



100
năm

THUYẾT TƯƠNG ĐỐI HẸP VÀ RỘNG

Albert Einstein

(Viết cho đại chúng)

Với:
Einstein
Eddington
Planck
Poincaré
Newton
Mach

Nguyễn Xuân Xanh

Sưu tầm, chuyên ngữ và viết lời dẫn nhập

NHÀ XUẤT BẢN TỔNG HỢP THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH



**THUYẾT TƯƠNG ĐỐI HẸP VÀ RỘNG
CỦA ALBERT EINSTEIN**

Nguyễn Xuân Xanh

NXB Tổng hợp Thành phố Hồ Chí Minh

2014



Albert Einstein

(14-3-1879 – 18-4-1955)

Tìm đọc cùng tác giả:

EINSTEIN

**Nhân vật huyền thoại đã cách mạng ngành vật lý thế giới,
một Copernicus thế kỷ XX**

Quyển sách được GIẢI VÀNG SÁCH HAY 2008 Bestseller và
Longseller

tại:

Nhà xuất bản Tổng hợp Thành phố Hồ Chí Minh
62 Nguyễn Thị Minh Khai, Quận 1, Thành phố Hồ Chí Minh

Ebook miễn phí tại : www.Sachvui.Com

**Ebook được hoàn thành với sự tham gia của 1953snake và
4DHN**

Nếu một con bọ bò dọc trên một cành cây cong, nó không biết rằng cành cây bị cong. Bố có điểm phúc nhận ra điều mà con bọ đã không thấy.

ALBERT EINSTEIN

*Từ một cuộc trò chuyện
với cậu con trai chín tuổi
Eduard, năm 1919*

Đối với những con người hành động, nhận thức một lần về chân lý là không đủ; ngược lại, nhận thức này phải được luôn luôn làm mới lại một cách không mệt mỏi nếu không muốn nó bị mai một. Nhận thức giống một bức tượng cẩm thạch đứng giữa sa mạc và luôn có nguy cơ bị gió cát chôn vùi. Những bàn tay siêng năng phải luôn luôn hoạt động để cho cẩm thạch có thể tiếp tục lấp lánh dưới ánh mặt trời.

ALBERT EINSTEIN

Mục Lục

Lời Tựa Cho Lần In Thứ Hai: MỘT TRĂM NĂM

Dẫn Nhập: CUỘC LỆCH GIỜ TRĂM NĂM

LỜI NÓI ĐẦU

Phần I THUYẾT TƯƠNG ĐỐI HẸP (§ 1 - § 17)

§ 1 Ý Nghĩa Vật Lý của các Định Lý Hình Học

§ 2 Hệ Thống Tọa Độ

§ 3 Không Gian và Thời Gian trong Cơ Học Cổ Điển

§ 4 Hệ Tọa Độ Galilei

§ 5 Nguyên Lý Tương Đối (Theo Nghĩa Hẹp)

§ 6 Định Lý Cộng của Vận Tốc Theo Cơ Học Cổ Điển

§ 7 Về Mâu Thuẫn của Định Luật Truyền Ánh Sáng với Nguyên Lý Tương Đối

§ 8 Khái Niệm Thời Gian trong Vật Lý

§ 9 Tính Tương Đối của Tính Đồng Thời

§ 10 Tính Tương Đối của Khái Niệm Khoảng Cách Không Gian

§ 11 Phép Biến Đổi Lorentz

§ 12 Vận Hành của Thước Đo và Đồng Hồ trong Chuyển Động

§ 13 Định Lý Cộng Vận Tốc - Thí Nghiệm Fizeau

§ 14 Giá Trị Hỗ Trợ Phát Minh của Thuyết Tương Đối

§ 15 Những Kết Quả Tổng Quát của Lý Thuyết

§ 16 Thuyết Tương Đối Hẹp và Kinh Nghiệm

§ 17 Không Gian Minkowski Bốn Chiều

Phần II THUYẾT TƯƠNG ĐỐI RỘNG (§ 18 - § 29)

§ 18 Nguyên Lý Tương Đối Hẹp Và Rộng

§ 19 Trường Hấp Dẫn

§ 20 Đẳng Thức giữa Khối Lượng Quán Tính và Khối Lượng Hấp Dẫn như Một Lý Lẽ Cho Định Đề Tương Đối Rộng

§ 21 Trong Chừng Mực Nào các Cơ Sở của Cơ Học Cổ Điển và Thuyết Tương Đối Hẹp Là Không Thỏa Đáng?

§ 22 Vài Suy Diễn Từ Nguyên Lý Tương Đối Rộng

§ 23 Sự Vận Hành của Đồng Hồ và Thanh Đo Trên Một Vật Thở Quay Chiếu Quay

§ 24 Continuum Euclid và Phi-Euclid

§ 25 Tọa Độ Gauss

§ 26 Continuum Không-thời-gian của Thuyết Tương Đối Hẹp Là Euclid

§ 27 Continuum Không-thời-gian của Thuyết Tương Đối Rộng Là Phi-Euclid

§ 28 Sự Diễn Tả Chính Xác của Nguyên Lý Tương Đối Rộng

§ 29 Lời Giải của Bài Toán Lực Hấp Dẫn trên Cơ Sở Nguyên Lý Tương Đối Rộng

Phần III SUY NGHĨ VỀ VŨ TRỤ NHƯ MỘT TỔNG THỂ (§ 30 - § 32)

§ 30 Những Khó Khăn Vũ Trụ Học của Thuyết Newton

§ 31 Khả Năng của Một Vũ Trụ "Hữu Hạn" nhưng "Không Giới Hạn"

§ 32 Cấu Trúc của Không Gian Theo Thuyết Tương Đối Rộng

Phần IV PHỤ LỤC

Phụ Lục I

Phụ Lục II

Phụ Lục III

A. CHUYỂN ĐỘNG CỦA ĐIỂM CẬN NHẬT CỦA SAO THỦY

B. SỰ LỆCH CỦA ÁNH SÁNG TRONG TRƯỜNG HẤP DẪN

C. SỰ DỊCH CHUYỂN CỦA CÁC VẠCH QUANG PHỔ VỀ PHÍA ĐỎ[73]

Phụ Lục IV

Phụ Lục V

TRƯỜNG

Ý TƯỞNG KHÔNG GIAN TRONG THUYẾT TƯƠNG ĐỐI RỘNG

THUYẾT HẤP DẪN MỞ RỘNG

TƯ LIỆU LỊCH SỬ

1. Albert Einstein

Về Điện Động Học của các Vật Thể Chuyển Động (1905)

Phần Động Học

§ 1. Định nghĩa của tính đồng thời

Thuyết Tương đối Là Gì? (1919)

Về Thuyết Tương Đối (1921)

Hình Học và Kinh Nghiệm (1921)

Tôi Đã Tìm Thấy Thuyết Tương Đối Như Thế Nào (1922)

Đôi Điều về Sự Hình Thành của Thuyết Tương Đối Rộng (1930)

Về Phương Pháp của Vật Lý Lý Thuyết (1933)

Thuyết Tương Đối (1936)

2. Max Planck

và Thuyết Tương Đối

3. Arthur Stanley Eddington

Thuyết Tương Đối và Ảnh Hưởng của Nó Đối Với Tư Duy Khoa Học

4. Henri Poincaré

"Các Nguyên Lý của Vật Lý Toán" hay là Cuộc Khủng Hoảng của Ngành Vật Lý Toán

5. Isaac Newton

Các Nguyên Lý Toán Học của Triết Học Tự Nhiên

BÌNH LUẬN VÀ MINH HỌA

6. Ernst Mach

Lịch Sử Cơ Học - Được Trình Bày Dưới Dạng Phê Phán

TƯ LIỆU THAM KHẢO

CHÚ THÍCH

Lời Tựa Cho Lần In Thứ Hai: **MỘT TRĂM NĂM**

Tôi sẽ dẫn dắt người đọc lên một con đường mà chính tôi đã đi, một con đường khá gồ ghề và uốn khúc, vì nếu khác đi, tôi không thể hy vọng anh ta sẽ có hứng thú với các kết quả ở cuối cuộc hành trình.

Albert Einstein

2015 đánh dấu 100 năm Thuyết tương đối rộng của Einstein, nền tảng của một lý thuyết của vũ trụ học trong thế kỷ XX về nguồn gốc, cấu trúc và sự tiến hóa của vũ trụ. Cùng với nó, các ngành thiên văn học và vật lý thiên văn dựa trên quan sát cũng phát triển song song chưa từng thấy như những minh họa đẹp mắt. Có thể nói tương tự như nhà di truyền học Theodosius Dobzhansky đã nói về thuyết tiến hóa của Darwin: "Không có gì trong vũ trụ học có ý nghĩa trừ khi được đặt dưới ánh sáng của thuyết tương đối rộng." Thuyết tương đối rộng có những hệ lụy sâu rộng. Nó truyền cảm hứng cả cho các nhà khoa học giả tưởng, cũng như chạm đến những vấn đề triết học và tôn giáo ở chiều sâu.

Theo thuyết tương đối rộng, lực hấp dẫn ngày xưa, gravity, nay không còn là một "lực" nữa, mà là độ cong của không-thời-gian. Hay nói một cách khác: Độ cong của không-thời-gian chính là sự biểu thị của lực, đúng như ý tưởng ban đầu của Riemann. Một tờ giấy cong biểu thị một lực nhất định. Không gian và thời gian mà chúng ta sống và các vật thể chuyển động trong đó cũng không còn là cố định hay tuyệt đối, như Newton đã quan niệm. Chúng bị cong và co giãn bởi sự hiện diện của vật chất và năng lượng như một khu sân golf. Các vật thể khi được đặt trong đó sẽ chuyển động như các trái banh trên sân golf với những chỗ cao chỗ thấp. Không gian và thời gian không phải là cái sân khấu cố định và có sẵn cho vật chất, mà chúng cùng tồn tại hay cùng biến đi với vật chất. Chúng cũng không phải không gian Euclid và "tiên nghiệm" như Kant quan niệm, mà là phi-Euclid với các độ cong. Quan điểm của Kant dễ hiểu, bởi vì cho đến khi Kant mất, khái niệm không gian phi-Euclid của Gauss, Riemann vẫn chưa ra đời cho đến gần nửa thế kỷ sau.

Trong lịch sử phương Tây có hai khám phá thiên văn gây chấn động mạnh mẽ nhất: Quyển sách Sidereus Nuncius (Thông điệp sao) của Galilei năm 1610 báo cáo những kết quả quan sát trên bầu trời bằng viễn vọng kính tự tạo, chứ chưa phải là tác phẩm "Về các vòng quay" của Copernic 67 năm trước đó. Thông điệp sao đã hé lộ một thế giới hoàn toàn khác với những gì Aristote, Ptolemy và Giáo hội La Mã quan niệm, và làm hiện ra chứng cứ càng rõ của thuyết nhật tâm Copernic. Rồi "Gần cả trăm năm, vũ trụ hoạt động theo bộ máy đồng hồ của Galilei và Newton - dựa trên các quy luật tuyệt đối - đã tạo thành nền tảng tâm lý cho Khai sáng, với niềm tin vào quy luật nhân quả, trật tự, tính hữu lý và cả nhiệm vụ cần thiết" (W. Isaacson).

Sự kiện thứ hai ba trăm năm sau đó, càng gây chấn động cả thế giới hơn, là thuyết tương đối rộng của Einstein năm 1915, đã cách mạng đến nền tảng quan niệm về thế giới, thời gian, không gian, lực hấp dẫn và năng lượng. Nó giúp con người hiểu sự hình thành và tiến hóa của vũ trụ, sự "Tạo thiên lập địa" - Creation - Big Bang - và những hiện tượng huyền bí khác trên trời, như ánh sáng bị cong, không gian cong, sự chuyển dịch đỏ, đồng hồ chạy chậm hơn ở những nơi trường hấp dẫn mạnh hơn, thấu kính hấp dẫn, bức xạ nền của vũ trụ thời trẻ, tuổi của vũ trụ, sự giãn nở, giãn nở gia tốc, sóng hấp dẫn, các pulsar, quasar, lỗ đen. Sóng hấp dẫn ban sơ của vũ trụ vẫn còn là một bí ẩn lớn. Chúng là hệ quả của các chấn động của sự lạm phát, diễn ra vào thời điểm 10⁻³⁵ giây sau Big Bang, như tiên đoán của Einstein, và truyền đi dọc theo tấm thảm của không-thời-gian. Nhưng các nhà vật lý rất hy vọng tìm thấy các sóng này trong những năm tới, và cùng với bức xạ nền vào thời điểm 300.000 năm sau Big Bang, một khám phá có ý nghĩa rất to lớn, chúng sẽ hoàn thiện bức tranh tráng lệ và vĩ đại của thuyết Big Bang.



Chân dung Albert Einstein của Hermann Struck đăng trong bản dịch tiếng Anh 1920 theo đòi hỏi của Robert W. Lawson

Thuyết tương đối rộng được Einstein trình bày trước Hàn lâm viện khoa học Phổ cuối 1915, và được công bố trên tạp chí Annalen der Physik đầu năm sau. Cuối năm đó, Einstein cũng viết xong tác phẩm bất hủ cho đại chúng về các ý tưởng chính của thuyết này cũng như của thuyết tương đối hẹp có tên Thuyết tương đối hẹp và rộng mà quý độc giả đang có trong tay. Quyển sách được xuất bản vào đầu năm 1917 tại Nhà xuất bản Vieweg & Sohn, nước Đức.

Sau sự kiện độ lệch của ánh sáng mà Einstein tiên đoán trong trường hấp dẫn của mặt trời được hai đoàn thám hiểm Anh xác nhận đúng, gây tít lớn trên báo Times Luân Đôn: "Cách mạng trong Khoa học - Lý thuyết mới của Vũ trụ - Ý tưởng của Newton bị lật đổ" vào ngày 7, tháng 11, năm 1919, truyền đi những chấn động dữ dội, quyển sách của Einstein lọt vào tầm ngắm của thế giới. Nó được dịch ngay sang tiếng Anh (1920), tiếng Pháp (1921), tiếng Ý (1921), tiếng Nhật (1921), tiếng Nga (1921), tiếng Hoa (1922), tiếng Hebrew (1928), và nhiều thứ tiếng khác nữa. Việt Nam suýt cũng được đi vào lịch sử thế giới: năm 1929 một đoàn các nhà thiên

văn Pháp cũng đã từng đến Côn Đảo để đo đạc lại độ lệch ánh sáng và kiểm tra thuyết tương đối Einstein vào lúc nhật thực toàn phần diễn ra, nhưng không may thời tiết bị xấu nên không có được kết quả đo đạc như mong muốn.

Bản dịch tiếng Anh được Einstein ủy thác cho Robert W. Lawson, một giảng viên vật lý tại Đại học Sheffield, Anh quốc, là người đầu tiên đề nghị với Einstein dịch tác phẩm sang tiếng Anh vì tầm quan trọng của nó. Bản này ra mắt tháng 8, 1920, được phát hành đồng thời tại Hoa Kỳ.

Một trăm năm qua, thuyết tương đối rộng đã vượt qua mọi phép thử và đứng vững không lay chuyển. Nhưng đối với Einstein, bản giao hưởng tác phẩm của đời ông còn dang dở. Ông dành ra ba mươi năm cuối đời để tìm sự thống nhất thuyết tương đối rộng và thuyết điện từ trong một cuộc chiến đấu cô đơn và vô vọng. Rồi những thập kỷ cuối thế kỷ XX, tức không bao lâu sau khi ông mất, các nhà vật lý lý thuyết và toán học thế giới lại tiếp tục công việc dang dở của ông, đi tìm sự thống nhất của thuyết tương đối rộng và cơ học lượng tử là hai cột trụ của vật lý học thế giới nhưng lại đứng quá xa nhau, một thuyết trị vì thế giới vô cùng lớn, còn thuyết kia thế giới vô cùng nhỏ. Những nỗ lực thống nhất này đã dẫn đến sự ra đời của nhiều ý tưởng rất táo bạo và độc đáo với những cái tên như Hấp dẫn lượng tử, Thuyết siêu dây, hay Thuyết-M, Nguyên lý toàn ảnh, chỉ kể một số tên. Những đợt sóng mới dâng cao trong nghiên cứu, một "cosmic landscape" hiện ra những hứa hẹn về một chân trời mới. Nhưng sương mù vẫn còn nhiều phía trước.

Vượt lên khỏi Einstein, để nói rộng thêm, các nhà vật lý còn đặt ra những vấn đề như không gian và thời gian đến từ đâu, và những bí mật nào đang chứa trong lỗ đen? Người ta tin rằng không gian và thời gian ở cấp độ Planck cực nhỏ sẽ là một cái gì khác, và có điểm chung gì đó với cơ học lượng tử. Nhà vật lý học John Archibald Wheeler (1918 - 2008), một trong những người có công lớn làm sống lại thuyết tương đối rộng sau ba thập niên bị bỏ quên, cho rằng nếu vật chất và năng lượng được lượng tử hóa, thì không-thời-gian có lẽ cũng như thế, rằng với một chiếc kính hiển vi siêu mạnh, người ta có thể thấy "hình học sẽ giống như tấm bọt". Ông thích ví không gian lượng tử như một đại dương: Nhìn từ trên cao, mặt đại dương nhẵn (smooth), nhưng nếu chèo thuyền trên đó, "chúng ta sẽ thấy

sóng và bọt nhấp nhô. Đó chính là bức tranh cấu trúc của không gian ở cấp độ rất nhỏ." Chính Einstein ngay sau khi hoàn tất thuyết tương đối rộng cũng linh cảm rằng "Đường như thuyết mới về hấp dẫn cần phải được tu chỉnh".

Mặt khác, sau khi Mô hình chuẩn và hạt Higgs đã trả lời rất ráo sự cấu tạo vật chất thông thường, thì câu hỏi "Thế giới được cấu tạo bằng gì" vẫn còn nằm ở phía trước. Các nhà thiên văn học khám phá ra rằng vũ trụ thật sự còn chứa một loại "vật chất tối", mục đích để giữ cho các thiên hà, hay cụm thiên hà ở lại bên nhau, bởi lực hấp dẫn thôi không đủ, và một loại "năng lượng tối" để đẩy sự giãn nở vũ trụ lên gia tốc, hiện tượng đã quan sát được ở các siêu sao mới (supernova). Các vật chất và năng lượng tối này chiếm đến 96% toàn năng lượng của vũ trụ. Chúng là gì? Đó là những câu hỏi vô cùng quan trọng. Hằng số lambda, được Einstein đưa ra năm 1917 như một lực đẩy nhằm cân bằng lực hấp dẫn để giữ vũ trụ tĩnh, cái tưởng chừng như một "ngó ngẩn lớn nhất của tôi", sau gần 90 năm bị khuất trong bóng tối bỗng sống lại một cách đầy kịch tính như một dạng năng lượng tối, hay năng lượng chân không.

Bước vào thế kỷ XXI, với cả một thiên hà những khám phá kỳ thú vừa thực nghiệm vừa lý thuyết của thế kỷ qua, nhân loại như đặt chân lên bờ của một lục địa mới kỳ lạ. Một cuộc tìm kiếm các định luật cuối cùng của vũ trụ tuy là một sự thách thức lớn, nhưng đầy thú vị và hứa hẹn. Bức tranh của vũ trụ thế kỷ XXI chắc chắn sẽ còn khác nhiều so với bức tranh của vũ trụ cuối thế kỷ XX, giống như bức tranh ấy đã từng quá khác biệt giữa thời kỳ cuối thế kỷ XIX và cuối thế kỷ XX.

Chúng tôi mong rằng quyển sách này truyền cảm hứng đến bạn đọc, nhất là các bạn trẻ, như nó đã từng truyền cảm hứng cho hàng triệu người trên thế giới từ học sinh đến người lớn, từ Tây sang Đông. Một "Tân thế giới" đang nằm trong bàn tay các bạn để khám phá. Hiểu được vũ trụ, con người cũng sẽ hiểu được cái tôi trong cái tôi kỳ quan của mình mà sự tồn tại của trái đất và bản thân là một ân huệ kỳ diệu trong đó. Vũ trụ này có phải được tạo ra, với những hằng số vật lý tích hợp với nhau một cách tinh tế để tương thích với sự tồn tại của chúng ta không, để cho con người của nó có ý thức về nó? Dù có thể có nhiều vũ trụ, nhưng chưa chắc có một bộ hằng số đặc biệt "hòa điệu tinh tế" như vũ trụ chúng ta? (Nguyên lý vị nhân)

Trong lịch sử, sự hưng vong của các quốc gia phương Tây có lúc cũng gắn liền với sự hưng vong của thiên văn học, của tri thức về thế giới như một khoa học đích thực. Và như nhà khoa học và sử học đầy tính nhân văn Mỹ Jacob Bronowski viết "Tri thức là định mệnh của chúng ta". Tò mò, hay dùng từ của Augustin, "sự không yên" của trái tim, luôn luôn muốn đi xa hơn, khám phá và chấp nhận thách thức, đó là "nét cơ bản của con người". "Xã hội nào ngăn chặn, kềm hãm nó, sẽ suy thoái hay tiêu vong" (Edmund Phelps). Con người từng được tôn giáo nâng lên là "đồng tác giả" với Thượng đế để thực hiện "những tiềm năng mà Đấng sáng tạo đã giấu bên trong". Nói một cách nhân văn và hiện sinh như Michio Kaku: "Một số người đi tìm ý nghĩa của cuộc đời bằng lợi ích cá nhân, bằng các mối quan hệ cá nhân, hay bằng những trải nghiệm cá nhân. Tuy nhiên, đối với tôi dường như rằng được ban cho trí tuệ như một ân huệ để đoán ra được những bí mật chung cuộc của tự nhiên, điều đó sẽ đem lại ý nghĩa đủ cho cuộc sống". Hoặc như Steven Weinberg viết trong tác phẩm Ba phút ban đầu với một chút kịch tính: "Con người không chịu tự an ủi mình với những câu chuyện về thần linh..., cũng không chịu giới hạn suy nghĩ mình vào cuộc sống thường nhật. Không chịu hài lòng, nên con người mới xây dựng viễn vọng kính, vệ tinh và máy gia tốc, tiêu pha vô số thì giờ ở bàn làm việc để giải mã những dữ liệu thu thập được. Niềm mong ước của họ là hiểu được vũ trụ, nâng cuộc sống con người lên khỏi sân khấu hề của đời thường một ít, và đem lại cho nó một chút nhân phẩm có tính bi kịch."

Đối với người Việt Nam, để có một nền khoa học tự lực để phụng sự phồn vinh xã hội và những cái đích khoa học cao cả xem ra còn xa. Khoa học không phải là cái máy có thể nhập về rồi sử dụng để cho ra sản phẩm nhanh như ta mong muốn. Khoa học là "một cơ thể (organism), và, như những cơ thể khác, để phát triển tốt, nó cần một thời tiết đặc biệt, một không khí đặc biệt" như người bác sĩ Đức Erwin von Bälz (1849 - 1913) phát biểu năm 1900, người đã dạy Y khoa 25 năm tại trường Đại học Tokyo từ 1876. Có thể ví nó như "cây khoa học". Muốn cho cây phát triển và cho ra quả tốt, cần có một miếng đất tốt cho nó, một thể chế tốt, định chế tốt, và luôn luôn được chăm sóc, vun bồi. Bälz không muốn làm người "bán trái cây" để bán quả cho các samurai, mà làm một "người làm vườn" chăm sóc miếng đất để người phương Tây có thể nhận ra được giống mảnh đất của họ. Chừng đó, ông tin quả mới ngon.

Ông nói tiếp, ở phương Tây, để đạt được "không khí tinh thần " thuận lợi cho khoa học như hôm nay, các bộ óc vĩ đại đã phải lao động cật lực qua nhiều thời đại để giải mã các bí mật của vũ trụ", và "xa lộ tinh thần con người" của họ đã được tưới bằng mồ hôi và máu, và thắp sáng bằng lửa của sự hành hình. Cái tinh thần ấy không thể học một sớm một chiều trong các giảng đường, mà chỉ được truyền đạt qua lao động "vai sánh vai" với những nhà nghiên cứu khác. Hơn nữa, khoa học phương Tây không phải hoàn toàn "trung tính " như người ta tưởng để có thể dẫm xuống những miếng đất lạ mà thành công ngay. Khoa học ẩn chứa các mặt triết học, văn hóa, dĩ nhiên cả xã hội trong đó. Người Nhật lúc đầu đã nhập khẩu khoa học mà vứt bỏ các tính chất triết học và văn hóa đi nhiều thập kỷ liền, cho đến khi họ nhận ra và thay đổi.

Việt Nam chừng nào có một miếng đất và những điều kiện thời tiết, các định chế và những sự chăm bồi như thế? Chừng nào các nhà làm khoa học Việt Nam, từ sự đam mê và lý tưởng, tự nguyện góp phần dẫm bồi một nền văn hóa mới then chốt cho cuộc chấn hưng đất nước trên mảnh đất còn nghèo truyền thống khoa học này, biến khoa học Việt Nam thành một khu vườn màu mỡ giống nền khoa học thế giới?

Tháng 10 năm 2015

NGUYỄN XUÂN XANH

Dẫn Nhập: **CUỘC LỆCH GIỜ TRĂM NĂM**

Với thuyết tương đối Einstein, tư duy của nhân loại về vũ trụ đã bước lên tới một bậc thang mới. Tình huống này giống như một bức tường từng ngăn cách chúng ta với sự thật thình lình bị sụp đổ: bây giờ các tầm xa và chiều sâu trước mắt chúng ta như được mở khóa mà những khả năng của chúng chưa được chúng ta hình dung hết. Chúng ta đã tiến một bước vĩ đại đến gần sự thấu hiểu bản chất của lý tính vốn nằm trong các diễn biến của thế giới vật lý.

HERMANN WEYL

Tại sao chúng ta lại phát minh ra các lý thuyết vậy? Câu trả lời là đơn giản: rằng bởi vì chúng ta thích thú "sự hiểu biết"... Có một sự đam mê về hiểu biết, cũng như có một sự đam mê về âm nhạc.

ALBERT EINSTEIN

Bạn đọc quý mến,

Quyển sách "*Thuyết tương đối hẹp và rộng*" [1] được Einstein viết năm 1916, và xuất bản lần đầu năm 1917 ở Đức. Quyển sách trở thành bestseller và longseller. Quyển sách được xuất bản tại Anh năm 1922 cũng rất thành công. Lần xuất bản thứ 12 vào năm 1934, lần thứ 13 năm 1944 và lần thứ 14 năm 1946. Từ đó quyển sách này không bao giờ thiếu vắng trên thị trường sách phương Tây, ngay cả hôm nay, không chỉ để phục vụ cho giáo dục đại chúng và các thế hệ trẻ mới lớn lên là chính, mà còn vì một điều, như GS. Roger Penrose nói, vẫn còn có những người chống lại thuyết tương đối. Quyển sách này thực sự đã trở thành một *di sản văn hóa* thế giới.

Giờ đây, bạn đọc cầm trên tay tác phẩm lịch sử này bằng tiếng Việt^[2], sau một cuộc "lệch giờ" lịch sử ngọt 100 năm. Sau một trăm năm, quyển sách về thuyết tương đối mới có mặt tại Việt

Nam. Việt Nam đã "trăm năm cô đơn" đối với khoa học hiện đại, nếu không muốn nói là ba trăm năm, hay nhiều hơn nữa, và giờ đây cần phải nỗ lực phá vỡ "sự cô đơn truyền kiếp" ấy.

Thế kỷ XX đã bước vào giai đoạn phát triển cách mạng của khoa học với thuyết tương đối và lượng tử.

Đó là cuộc cách mạng khoa học thứ hai, sau cuộc cách mạng khoa học thứ nhất ba trăm năm trước với Galilei, Kepler và Newton. Thế kỷ XXI sẽ là thế kỷ của một cuộc cách mạng thứ ba. Cột trụ thuyết tương đối và lượng tử chưa tỏ ra suy giảm chút nào. Mô hình Chuẩn và cuộc tìm kiếm hạt Higgs của năm mươi năm qua luôn luôn sử dụng các lý thuyết đó như những công cụ nền tảng, được tinh luyện thêm theo nhu cầu. Thuyết tương đối hẹp được sử dụng như "cơm bữa" trong tất cả các máy gia tốc.

Quyển sách này đã từng là nguồn cảm hứng to lớn cho nhiều thế hệ sinh viên khoa học trẻ của thế giới phương Tây. Chúng ta hãy nghe lời tự thuật của Wemer Heisenberg, một trong những cha đẻ của thuyết lượng tử, khi tiếp xúc với quyển sách:

Lúc đó tôi 15 tuổi (tức khi Einstein viết thuyết tương đối cho đại chúng năm 1916), là một học sinh của trường trung học Max-Gymnasium tại Munich, tôi có mối quan tâm lớn đến những vấn đề toán học. Một ngày nọ, một quyển sách mỏng đến tay tôi, chứa đựng các bài viết khoa học mà Einstein đã sửa soạn cho quyển thuyết tương đối hẹp của ông dưới dạng đại chúng. Cái tên Einstein thỉnh thoảng tôi đã đọc trên báo chí, tôi cũng đã nghe về thuyết tương đối và biết rằng nó đặc biệt khó hiểu. Điều đó dĩ nhiên làm cho nó có sức hấp dẫn đặc biệt đối với tôi. Tôi thấy quyển sách có một sự hấp dẫn đặc biệt, và do đó tôi cố gắng thâm nhập rất sâu tác phẩm nhỏ này. Sau một thời gian, tôi tin mình đã hoàn toàn hiểu phần toán học – rằng sau cùng, đó là một trường hợp đặc biệt đơn giản của Phép biến đổi Lorentz - nhưng tôi nhận ra ngay rằng các khó khăn thật sự của thuyết này nằm ở đâu khác. Tôi cảm thấy khái niệm (tính) đồng thời (simultaneity) là rắc rối, và về bản chất, câu hỏi hai sự kiện diễn ra tại những chỗ khác nhau có là đồng thời hay không tùy thuộc vào trạng thái chuyển động của người quan sát. Tôi cảm thấy đặc biệt khó khăn để thâm nhập vào các vấn đề này, và ngay cả sự trợ lực của Einstein bằng những câu như "bạn đọc thân mến" để thêm gia vị cho quyển sách cũng không giúp tôi hiểu dễ hơn. Tuy

nhiên, quyển sách để lại cho tôi cảm giác rõ ràng về điều mà Einstein muốn nhắm tới, tôi nhận thức rằng những khẳng định của ông rõ ràng không mắc mứu vào những mâu thuẫn nội tại; và sau cùng, dĩ nhiên, tôi có niềm ham muốn cháy bỏng thâm nhập sâu hơn vào thuyết tương đối vào một thời điểm sau này. Vì thế tôi quyết định, trong thời gian học tiếp của tôi trên đại học, bằng mọi giá đi nghe các bài giảng về thuyết tương đối của Einstein.

Bằng trải nghiệm đó, nguyện vọng ban đầu là học Toán của tôi đã âm thầm được chuyển sang hướng Vật lý lý thuyết lúc nào không hay biết, ngành mà tôi lúc đó hầu như không ý thức nó là gì.

Đúng như Heisenberg nói, thuyết tương đối hẹp xét về mặt toán học không có gì phức tạp cả, các em học sinh trung học đều có thể thực hiện các phép toán đó. Cái khó chính là cái nhìn, là quan điểm có tính "triết học" về thế giới ở cấp vĩ mô, thoát khỏi cái nhìn bằng giác quan thường nghiệm của con người. Kích thước của con người, *human scales*, và không gian của nó, không thuận lợi cho những cảm nhận trung thực để hình dung được những hiện tượng và định luật ở cấp vĩ mô của vũ trụ, vì con người đã quen với không gian kích thước như thế, điều đã hằn sâu trong tâm trí. Con người chỉ có thể chuyển động vài chục cây số một giờ, hay một bội số của nó, trong khi vận tốc trong vũ trụ phải được đo bằng vận tốc ánh sáng $c = 300.000\text{km/giây}$ (trong chân không), một vận tốc không thể tưởng tượng nổi đối với con người. Vận tốc của trái đất 30km/giây cũng thuộc về vận tốc khủng đối với con người rồi, nhưng còn nhỏ 10 ngàn lần so với vận tốc ánh sáng. Cũng thế đối với cấp vi mô của nguyên tử. Ở kia, con người quá nhỏ. Ở đây, con người quá thô. Lý trí con người do đó thất bại ở những thế giới có kích thước vô cùng lớn hay vô cùng nhỏ, những nơi lại diễn ra những điều kỳ diệu có tính chất phản lại trực giác đời thường, về vận tốc ánh sáng, con người đã "khoán cho lý tính", như Newton và những nhà khoa học các thời đại trước đã làm mà không nghi ngại, là thừa nhận vận tốc đó là vô hạn. Điều này gây ra những ngộ nhận nghiêm trọng trong nhận thức về thực tại. Thuyết tương đối hẹp Einstein ra sức tu chỉnh những sai lệch đó.

Một trong những ngộ nhận hằn sâu là khái niệm *tính đồng thời*, như vừa nói ở trên trong tự sự của Heisenberg. Nếu một

người *đứng giữa* hai sự kiện, nghĩa là có cùng khoảng cách với hai nơi khác nhau diễn ra hai sự kiện, thí dụ như hai sự kiện hai tia sét đánh vào hai vị trí A và B, anh ta sẽ cảm nhận hai tia chớp *cùng một lúc*, vì hai tia sáng đến anh ta cùng một lúc, và, theo định nghĩa của Einstein, chúng đã xảy ra *đồng thời*. Nhưng sẽ là một sự sai lầm nếu người ta suy từ đó ra rằng mọi người khác đứng ở đâu cũng đều cảm nhận sự đồng thời như thế. Tia chớp được truyền đi với vận tốc ánh sáng, chứ *không* truyền đi tức thì, vì vận tốc nó tuy có lớn nhưng vẫn hữu hạn. Một người đứng ở vị trí khác, không ở giữa hai vị trí sét kia, sẽ cảm nhận hai tia sét đến vào hai thời điểm khác nhau, do đó hai hiện tượng đó *không* còn đồng thời nữa. Điều này có nghĩa rằng, tính đồng thời đã mất đi tính khách quan của nó, chỉ còn tính tương đối thôi. Đó là nhận thức chìa khóa để Einstein đi đến kết luận: không có thời gian tuyệt đối chung cho mọi người như làm tưởng mà chỉ có thời gian của tôi, của bạn. Không có đồng hồ toàn cầu hay vũ trụ đập tíc tắc một nhịp chung cho mọi người. Xưa đối với Newton, thời gian của hai người quan sát đối với một hiện tượng vật lý là như nhau, vì nó tuyệt đối, dựa trên giả định ánh sáng truyền với vận tốc vô cực, do đó hai người quan sát có thể thông tin nhau tức thì. Newton là người đầu tiên định nghĩa thời gian trong tác phẩm *Principia* năm 1687. Còn thánh Augustin thế kỷ thứ IV thì chỉ biết nói: "Thời gian như vậy là gì? Nếu không ai hỏi tôi, tôi biết nó là gì. Nếu tôi muốn cắt nghĩa khi ai đó hỏi tôi thời gian là gì thì tôi không biết." Đúng vậy, ai cũng tưởng mình hiểu thời gian, không gian từ lâu rồi. Chỉ có Einstein là "không biết", như Socrates từng tự nhận mình "không biết", nên mới hỏi và đi tìm ý nghĩa thật của chúng.

Mặt khác, theo vật lý Newton, vận tốc có thể cộng với nhau bất kỳ. Vận tốc ánh sáng phát ra từ một hệ chuyển động, thí dụ từ chiếc ô tô đang chạy và đèn ô tô bật lên, sẽ bằng vận tốc ánh sáng cộng lại vận tốc của ô tô. Nhưng thuyết điện từ Maxwell không cho phép vận tốc ánh sáng lớn hơn vận tốc c . Vật lý Newton mâu thuẫn với thuyết Maxwell và bị rúng động tận gốc rễ.

Einstein kết luận trong bài báo có tựa đề "*Về điện động học của các vật thể chuyển động*" (Zur Elektrodynamik bewegter Körper) năm 1905 đăng trên tạp chí *Annalen der Physik*, tập 17, là bài báo

về thuyết tương đối hẹp của ông:

Do đó chúng ta thấy, chúng ta không thể dành cho khái niệm đồng thời một ý nghĩa tuyệt đối được, hai sự kiện vốn được xem là đồng thời từ một hệ quy chiếu, nay không thể được xem là những sự kiện đồng thời nữa, nếu nhìn từ một hệ quy chiếu chuyển động đối với hệ quy chiếu thứ nhất.

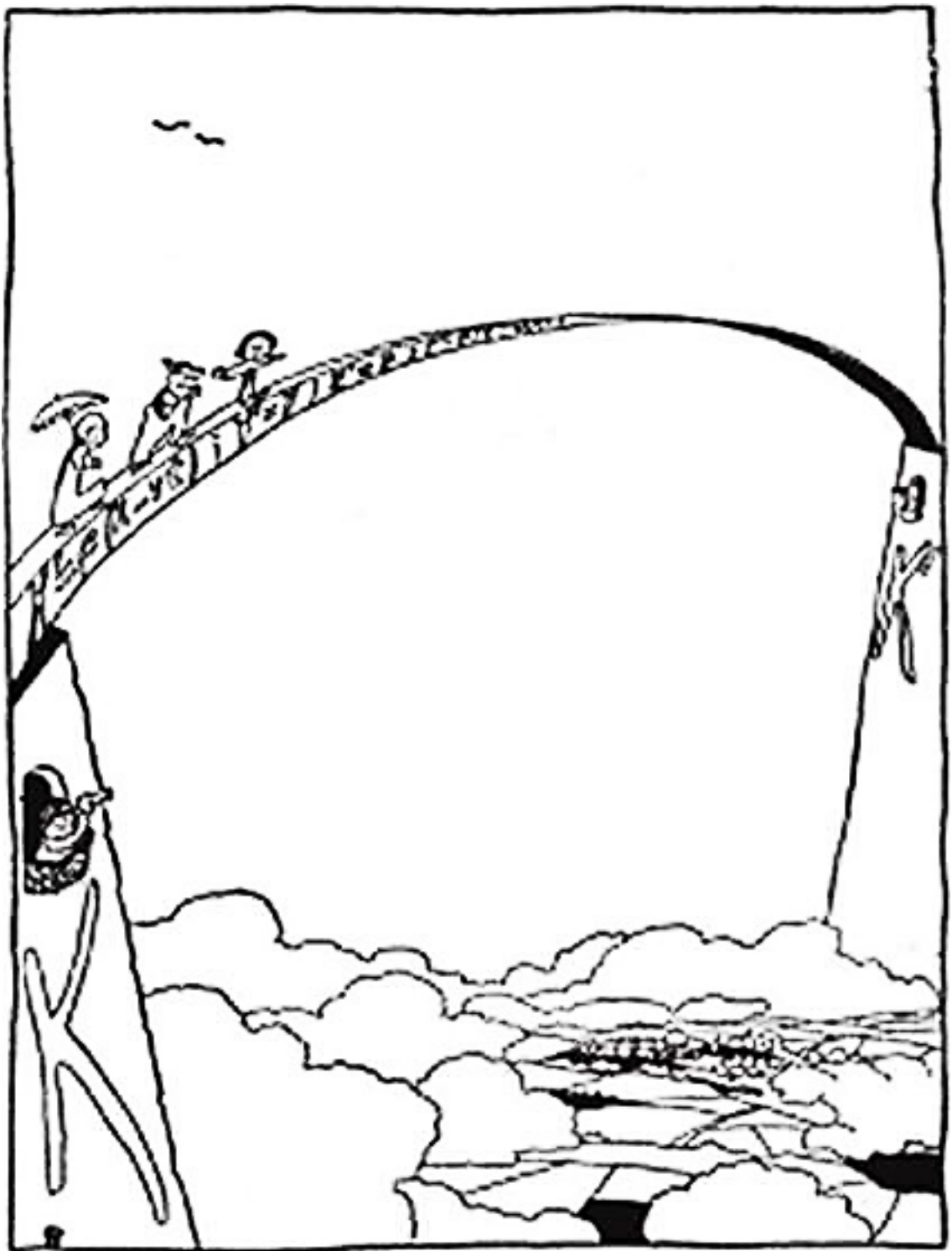
Thuyết tương đối hẹp phát triển từ hai tiên đề đơn giản, một tiên đề về vận tốc ánh sáng, và một về nguyên lý tương đối:

1. *Nguyên lý tương đối.* Tất cả các hiện tượng vật lý, về cơ học cũng như điện động học, vẫn không thay đổi trong tất cả mọi hệ quy chiếu chuyển động đều (gọi là *hệ quy chiếu quán tính*).

2. *Nguyên lý bất biến của vận tốc truyền ánh sáng trong chân không.* Vận tốc ánh sáng có cùng độ lớn c trong tất cả các hệ quy chiếu, miễn là các hệ thống này chuyển động tương đối đều với nhau.^[3]

Thời gian và tọa độ không gian của một hiện tượng trong một hệ quy chiếu K' có thể được diễn tả bằng một phép biến đổi có tên Lorentz từ thời gian và tọa độ không gian của cùng hiện tượng trong hệ thống quy chiếu K , khi K và K' chuyển động tương đối đều với nhau.

Khi Einstein công bố bài báo này, ông chỉ mới 26 tuổi, đang buộc phải ẩn dật làm việc kiếm sống qua ngày tại Sở công nhận quyền sở hữu sáng chế tại Bern, Thụy Sĩ, làm việc 6 ngày một tuần, với đồng lương \$600 một năm, trong khi phải nuôi vợ và một con. Vị trí khiêm tốn đó - chuyên gia bậc I, là bậc thấp nhất - là cái phao cứu nạn của người bạn giúp cho ông, Marcel Grossmann. Bài báo trên, cùng với 4 bài báo khác cùng một năm, tất cả công bố trong *Niên Giám Vật Lý Đức (Annalen der Physik)*, đã cách mạng diện mạo vật lý của thế giới. Năm 1905 được gọi là "Năm thần kỳ". Người ta so sánh tuổi "Phù Đổng" của Einstein lúc 26 so với tuổi "Phù Đổng" của Newton lúc 24 tuổi, xấp xỉ ngang nhau.



Minh họa vui về phép biến đổi Lorentz giữa hai hệ thống tọa độ K và K' chuyển động đều tương đối với nhau (hệ quy chiếu quán tính). Tọa độ không gian và thời gian của một sự kiện nhìn từ K' sẽ được diễn tả là những hàm số của các tọa độ của cùng hiện tượng nhìn từ hệ thống K . (Courtesy of William R. Lieber).

Dưới phép màu của ánh sáng, không gian và thời gian gặp nhau và có thể biến đổi lẫn nhau. Đó là cái mới lạ. "Phép màu" đó là tốc độ truyền ánh sáng trong tất cả các hệ quy chiếu đều

không thay đổi - nguyên lý thứ nhất của Einstein - và vận tốc đó là hữu hạn, nhưng vô cùng lớn, 300.000km/giây. Một nhà vật lý Trung Hoa đầu thế kỷ XX đã viết một vở kịch minh họa thuyết tương đối để bày tỏ sự ngưỡng mộ. Trong vở kịch, dưới quyền năng của một vị thần, là thần Ánh sáng, thì ông Thời gian, và bà Không gian, vốn bị chia cách từ nghìn xưa, nay có thể tái ngộ, bắt tay nhau, hòa quyện lẫn nhau! Họ đã trở thành một gia đình không chia cắt được nữa, trong ngôi nhà bốn chiều liên tục (continuum). Một kiểu Ngưu Lang - Chức Nữ mang tính chất thuyết tương đối thời hiện đại. Giờ họ đoàn tụ vĩnh viễn. Chiều thứ tư, thời gian, đã "châu về hợp phố". Einstein đã vén bức màn che khuất sự thật từ thời Hy Lạp.



H. Minkowski

Nhà toán học Hermann Minkowski, thầy của Einstein tại Đại học ETH Zurich, Thụy Sĩ, người có công diễn tả thuyết tương đối hẹp bằng khung hình học.

Thời gian không còn là "quan niệm tiên nghiệm thuần túy". Các nhà triết học đã "đưa khái niệm thời gian từ vùng kinh nghiệm chủ nghĩa lên đỉnh cao không với tới của sự 'tiên nghiệm' trên ngọn núi Olympus" và nay được Einstein kéo xuống mặt đất để truy nguyên nguồn gốc trần thế của nó, đem lại cho nó một bộ mặt hoàn toàn mới. (Xem Phụ lục V).

Để diễn tả sự hòa quyện này, nhà toán học Hermann Minkowski, thầy cũ của Einstein, viết những dòng bất hủ về thuyết tương đối hẹp trong một báo cáo trước "Hội nghị các nhà khoa học và bác sĩ Đức tại Koln" năm 1908 khi ông đưa thuyết này trải lên khung toán hình học của không gian bốn chiều, ba chiều của không gian và một chiều của thời gian, rất đẹp mắt:

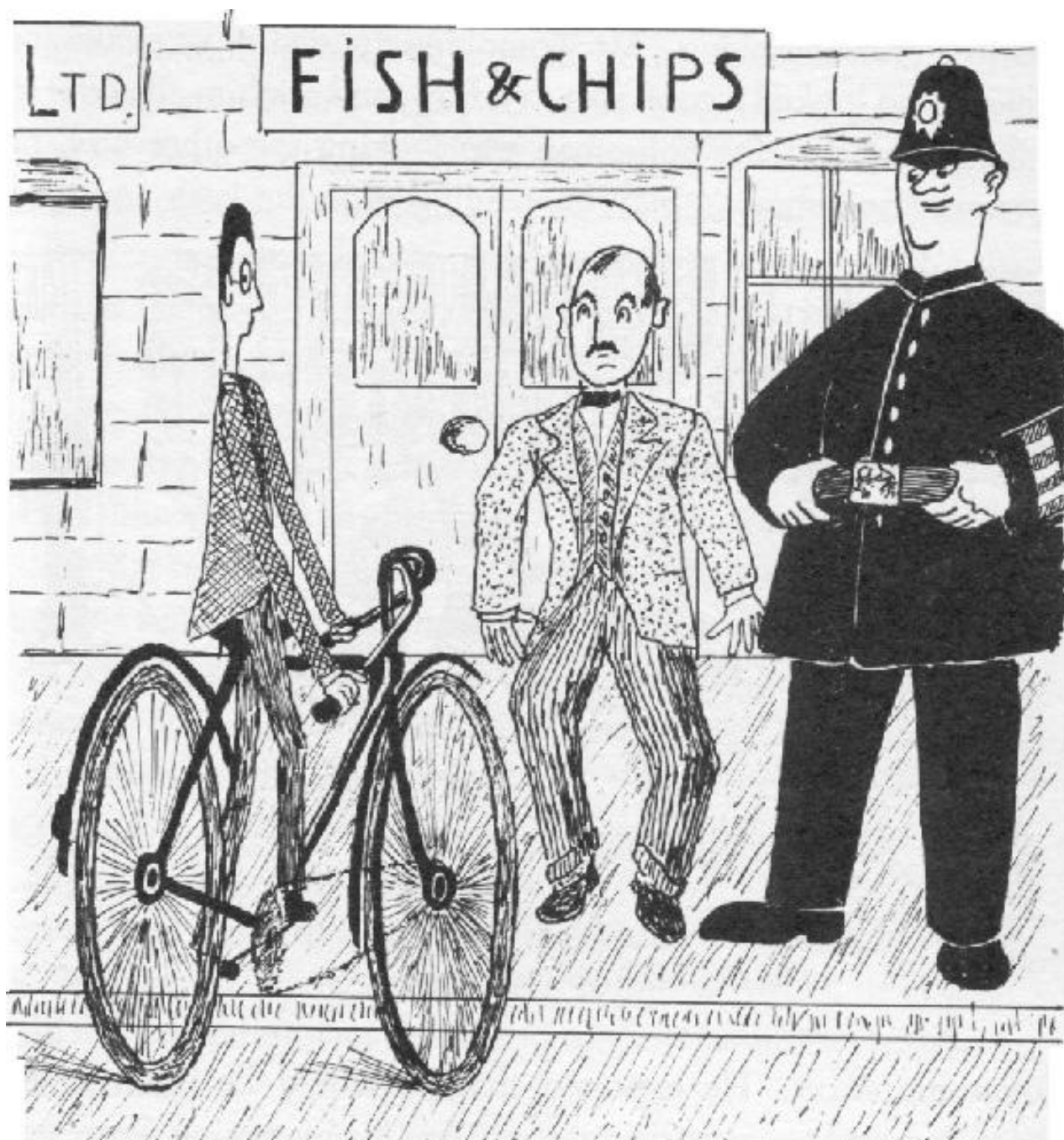
"Thưa Quý Ngài! Các quan niệm về không gian và thời gian mà tôi muốn trình bày với Quý Ngài là phát triển từ miếng đất vật lý thực nghiệm. Sức mạnh của chúng là ở chỗ đó. Khuynh hướng chung là triệt để. Từ giờ phút này trở đi, không gian xét riêng và thời gian xét riêng chỉ còn là cái bóng, và chỉ có một thể liên kết của cả hai mới giữ vững được tính độc lập."

Không gian hình học này được gọi là không-thời-gian Minkowski, hay còn được gọi là "Thế giới" (world), có một độ đo metric để đo những khoảng cách giữa các sự kiện (events). Metric này bất biến đối với các phép biến đổi Lorentz, các phép này là những "phép quay" trong "Thế giới", tương tự như phép quay trong không gian Euclid. Đó vẫn còn là một thế giới "phẳng", Euclid. Max Planck, một người luôn luôn đi tìm cái tuyệt đối, lấy làm thú vị khi biết rằng không-thời-gian Minkowski và độ đo metric này là "hậu phương tuyệt đối", độc lập với các hệ quy chiếu quán tính tương đối. (Không-thời-gian Minkowski sẽ trở thành phi-Euclid, trong sự hiện diện của vật chất, theo thuyết tương đối rộng.)

Sự diễn tả hình học của thuyết tương đối hẹp là sự dọn đường cho giai đoạn cách mạng thứ hai của thuyết tương đối sắp tới, mà nếu: "Không có ý tưởng quan trọng của Minkowski có lẽ lý thuyết tương đối rộng vẫn còn trong giai đoạn trẻ thơ" như Einstein nói.

Không gian và thời gian đã trở thành những đại lượng tương đối, chúng thay đổi theo vận tốc chuyển động của hệ quy chiếu. Thời gian giãn nở và không gian (chiều dài) co lại. Đồng hồ chuyển động sẽ chạy chậm hơn so với đồng hồ đứng yên, chuyển động càng nhanh thì thời gian càng chậm lại. Nếu người anh em của một cặp sinh đôi du hành trong vũ trụ với vận tốc gần bằng vận tốc ánh sáng, thì khi anh trở về, người anh em kia của anh đã già nua, hay có thể không còn sống trên đời nữa. Điều này nghe

có vẻ thần bí và hoang đường, nhưng lại là sự thật. Nếu một chiếc xe đua Formula One chạy vèo qua bạn, bạn sẽ thấy chiều dài của chiếc xe bị co lại. Dĩ nhiên tốc độ xe hãy còn nhỏ để bạn có thể cảm nhận sự co lại đó.



Minh họa của George Gamow về hiện tượng co lại của chiều dài. Người đi xe đạp chuyển động gần với vận tốc ánh sáng hiện ra bị ngắn lại đáng kể.

Einstein đã phá hủy chất ether mà giới vật lý cũ nghĩ là để truyền sóng điện từ. Đó là một "chất ảo" luôn luôn làm cho giới vật lý bù đầu và khiến họ sa lầy vào đấy, đặc biệt những cái đầu vĩ đại như Poincaré và Lorentz đã luôn luôn tin và kẹt ở đó về

quan điểm. Ether gắn liền với sự tồn tại của một hệ quy chiếu tuyệt đối của Newton. Nhưng không có một hệ quy chiếu tuyệt đối như thế trong trời đất, mà chỉ có những hệ chuyển động tương đối.

Hơn nữa, năng lượng của một vật thể cũng thay đổi theo vận tốc chuyển động của nó, càng lớn nếu vận tốc càng cao. Từ hệ quả của thuyết tương đối, Einstein rút ra kết luận, rằng năng lượng và khối lượng là một, được thể hiện ở hai dạng khác nhau và có thể biến đổi qua lại với nhau thông qua công thức đã trở thành nổi tiếng $E = mc^2$ (năng lượng bằng khối lượng nhân cho bình phương vận tốc ánh sáng). Những quan điểm triết học tự nhiên từ xa xưa cho rằng vật chất không bao giờ bị tiêu hủy, mặc dù các hạt cơ bản có thể bị tiêu hủy và biến thành bức xạ (ánh sáng). Nhưng nhìn kỹ, bức xạ chính là một dạng năng lượng. Cho nên vật chất không hề bị phá hủy hay biến mất. Nó biến thành năng lượng hoặc khối lượng. Định luật bảo toàn giờ đây đúng cho tổng hợp năng lượng và khối lượng. "Không có sự khác biệt cơ bản giữa khối lượng và năng lượng. Năng lượng có khối lượng và khối lượng đại diện cho năng lượng. Thay vì hai định luật bảo toàn, chúng ta chỉ có một, cho khối lượng-năng lượng" như Einstein viết.

Theo thuyết Newton, các vật chất có khối lượng hút nhau bằng lực hấp dẫn. Nhưng ánh sáng, theo Einstein, được cấu tạo bằng những hạt photon *không khối lượng*. Vậy tại sao, theo thuyết tương đối rộng dưới đây, ánh sáng lại bị mặt trời hút khi nó đi ngang qua? Đó chính vì năng lượng cũng là một dạng khác của khối lượng!

Sự tương đương giữa năng lượng và khối lượng vào lúc được phát hiện là một cuộc cách mạng. Nhưng lúc đó chưa có thiết bị để kiểm chứng. Ngày nay, việc năng lượng biến thành khối lượng và ngược lại, là chuyện hằng ngày trong các máy gia tốc. Robert Oppenheimer, "cha đẻ" của bom nguyên tử Mỹ, đã nói: "Chúng ta sử dụng nó (lý thuyết tương đối hẹp) hầu như trong mỗi ngành vật lý hạt nhân và trong nhiều lãnh vực của vật lý nguyên tử, và cũng như thế trong tất cả lãnh vực của vật lý liên quan đến các hạt cơ bản. Lý thuyết đó luôn luôn lại được kiểm nghiệm bằng mỗi cách mới và nó là một phần rất quý báu của tài

sản chúng ta."

Paul Dirac, phát biểu tại Tòa thánh Vatican năm 1979 trong buổi lễ kỷ niệm 100 năm ngày sinh Einstein: "Thuyết tương đối hẹp dẫn tới một sự phát triển lâu dài... Nó đưa đến căn bậc hai trong phương trình cho một vật thể chuyển động, cho nên năng lượng, xét thuần về mặt toán học, có thể có những trị số âm. Điều này đầu tiên tỏ ra vô nghĩa, vì người ta có thể nói rằng các trạng thái năng lượng âm đơn giản không xuất hiện được. Nhưng với sự ra đời của cơ học lượng tử, khả năng mở ra, rằng một hạt có thể chuyển từ một trạng thái năng lượng dương sang âm, và do đó người ta bắt buộc nghiên cứu ý nghĩa của năng lượng âm. Điều này đưa tới quan niệm phản-vật-chất, một hệ quả trực tiếp của thuyết tương đối Einstein."

Người ta hiểu "sức mạnh" của công thức $E = mc^2$ hơn khi hai trái bom nguyên tử đầu tiên nổ tại Hiroshima và Nagasaki vào tháng 8 năm 1945.

Ý tưởng về Thuyết tương đối hẹp vào cuối thế kỷ XIX đã có trong không khí và không phải mới lạ. Ngoài Poincaré, Lorentz, nhà toán học Minkowski ở Gottingen cũng đã nghiên cứu và chiến đấu. Họ đã cày xới hết vấn đề, nhưng không ai tạo được sự bứt phá để đạt đến một thuyết mới hài hòa, nhất quán và đẹp mắt như thế. Einstein xuất hiện vào lúc sự phát triển vật lý như đi vào ngõ cụt. Max Born, sau này là người bạn thân thiết của Einstein, đã nhớ lại: "Lâu lắm trước khi tôi đọc công trình nổi tiếng năm 1905 (của Einstein), tôi đã biết đến khía cạnh toán học của thuyết tương đối hẹp của thầy tôi là Hermann Minkowski. Nhưng công trình của Einstein đối với tôi là một sự giác ngộ, có ảnh hưởng đến tư duy tôi hơn tất cả một trải nghiệm khoa học nào khác."

Với ngân ấy thay đổi, thuyết tương đối hẹp đã lật đổ tất cả các nguyên lý của *lý trí lành mạnh* của con người. *Bức tường ngăn cách chúng ta với sự thật thành linh sụp đổ* như Hermann Weyl diễn tả sự bứt phá.

Không phải đường ngắn nhất luôn luôn là đường thẳng nhất.

(Nhà khai sáng Đức, thế kỷ XVIII)

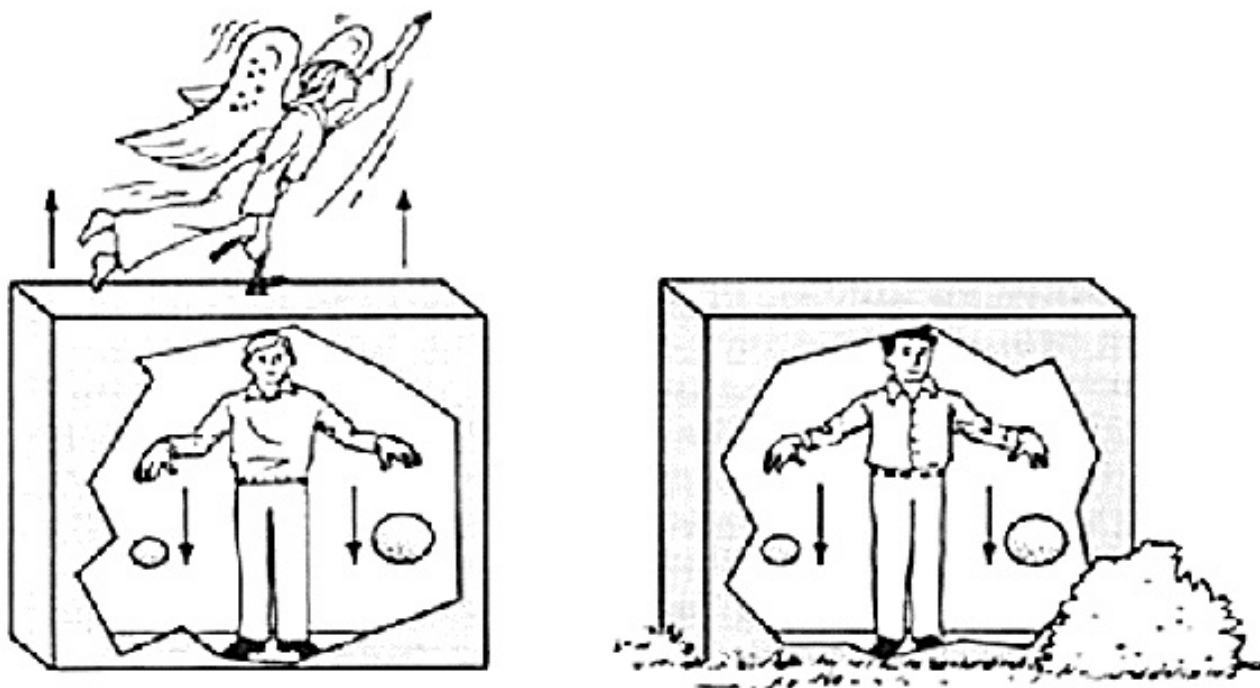
Thuyết tương đối hẹp xét các hệ quy chiếu (tọa độ) có chuyển động đều, nghĩa là không có gia tốc (vận tốc bằng hằng số). Thuyết tương đối rộng xét các hệ quy chiếu chuyển động có gia tốc. "Thuyết tương đối giống như một tòa nhà có hai tầng riêng biệt: thuyết tương đối hẹp và thuyết tương đối rộng. Thuyết tương đối hẹp, mà trên đó thuyết tương đối rộng tựa lên, áp dụng cho tất cả các hiện tượng vật lý trong sự vắng bóng của hấp dẫn; trong khi thuyết tương đối rộng bao hàm định luật của hấp dẫn và các quan hệ của nó với các lực tự nhiên khác", như Einstein ví.

Có nhiều nhận thức ban đầu khiến Einstein đi đến thuyết này. Một trong những nhận thức đó là quan sát của Einstein, khi ông ngồi trong văn phòng ở Bern thành lập một ý tưởng chợt đến, rằng "Nếu một người rơi tự do, anh ta sẽ không cảm nhận trọng lượng của anh ta nữa." Sở dĩ như thế là vì "trong hệ quy chiếu của anh ta có một trường hấp dẫn mới đã làm triệt tiêu trường hấp dẫn đã được sinh ra từ trái đất", như Einstein lý giải. Nghĩa là, có một sự tương đương giữa chuyển động gia tốc và lực hấp dẫn, được gọi là *nguyên lý tương đương*. Đó là năm 1907. Trong bài "*Các ý tưởng nền tảng và phương pháp của Thuyết tương đối được trình bày trong quá trình phát triển của nó*" năm 1920, Einstein cho đó là "*ý tưởng hạnh phúc nhất của đời tôi*".

Thực vậy, hãy tưởng tượng thí nghiệm tư tưởng này, nếu một người quan sát được đặt vào một cái hộp thang máy tại một nơi không có lực hấp dẫn nào cả, được một thiên thần bên ngoài kéo lên theo chiều từ chân lên đầu anh ta, với một chuyển động gia tốc có gia tốc bằng gia tốc của chuyển động rơi tự do trên mặt đất, thì anh ta sẽ cảm thấy đúng là mình đang ở trong một trường hấp dẫn như trên mặt đất. Nếu anh ta lấy một vật thể đưa lên và buông ra, vật thể ấy sẽ rơi xuống sàn anh ta đang đứng giống y như rơi xuống đất. Thí nghiệm tư tưởng này cũng có hệ luận thêm, tại sao ánh sáng bị lực hấp dẫn uốn cong! Đơn giản, hình dung một chiếc đèn trên đầu người quan sát chẳng hạn. Nếu hộp thang đứng yên và đèn được bật lên chiếu ngang qua đầu, thì vẫn chưa có gì xảy ra, ánh sáng sẽ đi ngang qua đầu anh

ta bình thường. Nhưng khi thiên thần kéo hộp thang theo chuyển động gia tốc, thì ta dễ thấy ngay các tia sáng của đèn bị lệch xuống phía sàn. Nghĩa là ánh sáng bị trường hấp dẫn uốn cong. Ở đây, vận tốc ánh sáng không còn là hằng số nữa. Ánh sáng chỉ truyền với vận tốc hằng số c trong vùng không có trường hấp dẫn.

Thêm nữa, từ *gedankenexperiment* (thí nghiệm ý tưởng) trên, ta dễ dàng thấy điều mà Galilei đã khám phá ba thế kỷ trước: Nếu người quan sát cầm một chiếc lông ngỗng một tay, và một cái búa tay kia, ở cùng độ cao với mặt sàn và buông ra, lúc đầu chúng đứng yên lơ lửng vì thang máy đang ở trong vùng không có lực hấp dẫn. Khi thiên thần kéo hộp thang máy lên với gia tốc, người quan sát sẽ thấy hai vật đó rơi xuống sàn với một vận tốc như nhau. Điều này, theo nguyên lý tương đương, có nghĩa rằng (trong chân không) hai vật ấy rơi xuống đất như nhau dưới sức hút của trái đất.



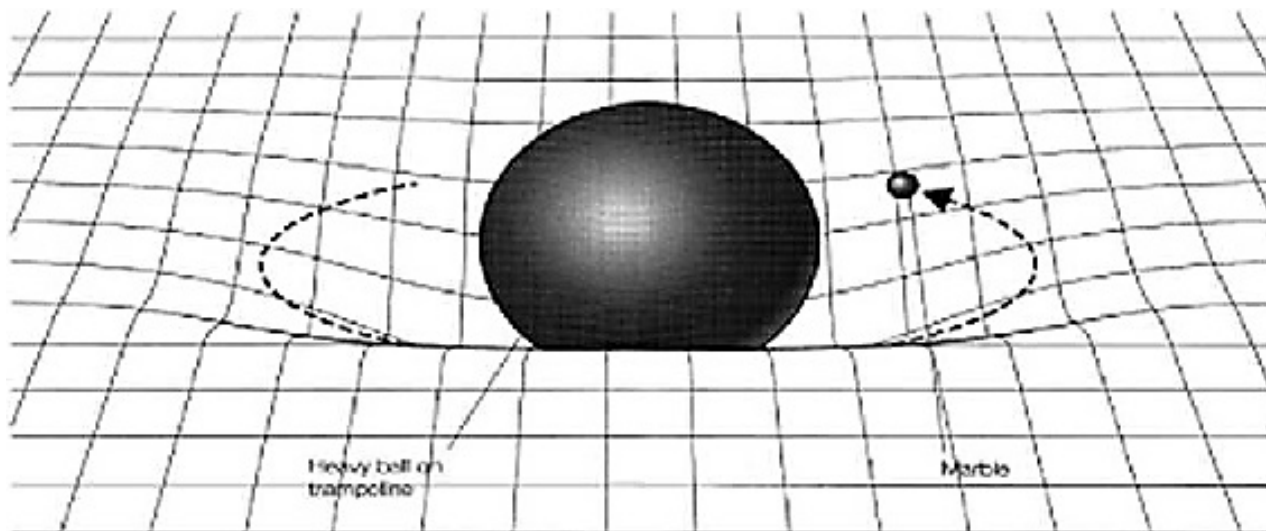
Thiên thần kéo hộp thang máy, minh họa hai hòn bi khối lượng khác nhau nhưng cũng rơi với tốc độ như nhau (trong chân không) (Courtesy of Benesh Hoffmann)

Nguyên lý tương đương nói trên còn được diễn tả bằng một sự tương đương khác: tương đương giữa khối lượng quán tính (trong chuyển động gia tốc) và khối lượng hấp dẫn (trong lực hấp dẫn Newton).

Từ những ý tưởng trên, Einstein diễn tả lực hấp dẫn trên không gian continuum bốn chiều không-thời-gian của Minkowski đã được xây dựng cho thuyết tương đối hẹp. Lực hấp dẫn được mô tả bằng độ cong của không-thời-gian continuum. Một vật thể, như mặt trời, với khối lượng của nó, gây ra một độ cong xung quanh nó trong không-thời-gian. Không gian cong này sẽ quy định các vật thể khác, như trái đất chúng ta, khi được đặt vào đó sẽ chuyển động như thế nào. Giống như một vật có trọng lượng nặng được đặt trên một tấm nệm mút, nó sẽ gây một độ cong xung quanh, và vật nào ở gần đó sẽ bị "hút" vào chỗ trũng. Không gian cong mới là không gian chúng ta sống. *Cong* mới là ngôn ngữ của lực hấp dẫn. Một vật được đặt vào vùng ảnh hưởng của một vật thể khác, như thí dụ tấm nệm mút, sẽ có một chuyển động theo đường *trắc địa* là đường *cong ngắn nhất* khả dĩ hướng về vật thể kia.

Một trong những hệ quả rất ngạc nhiên của phương trình trường Einstein là nếu vật chất biến mất hết, thì không-thời-gian cũng biến mất theo! Trong cơ học Newton, không gian là sân khấu, mà vật chất là các diễn viên. Các diễn viên có thể biến mất, nhưng sân khấu vẫn còn. Với thuyết tương đối rộng của Einstein, tình hình khác hẳn. Nếu không có diễn viên thì sân khấu cũng biến mất. Điều đó lại xác nhận quan điểm của Descartes là đúng, khi ông này cho rằng, không gian là sự nở rộng của vật chất, nghĩa là nếu không có vật chất thì cũng sẽ không có không gian. Sân khấu và diễn viên hòa quyện nhau, không tách rời. Một vật được đặt vào vùng ảnh hưởng của một vật thể khác, như thí dụ tấm nệm mút, sẽ có một chuyển động theo đường trắc địa là đường cong ngắn nhất khả dĩ hướng về vật thể kia.

Einstein hoàn thành thuyết tương đối rộng năm 1915 trong lúc chiến tranh diễn ra trên toàn châu Âu, và trình bày trước Hàn lâm viện khoa học Phổ tháng 11 năm 1916. Điều ngoạn mục ở thuyết Einstein là lực hấp dẫn Newton không còn được xem là lực được truyền lên các đối tượng xuyên qua không gian một cách khó hiểu. Lực không còn là điều thần bí nữa. Tác dụng từ xa huyền bí của Newton không còn nữa. Nó được Einstein giải mã.

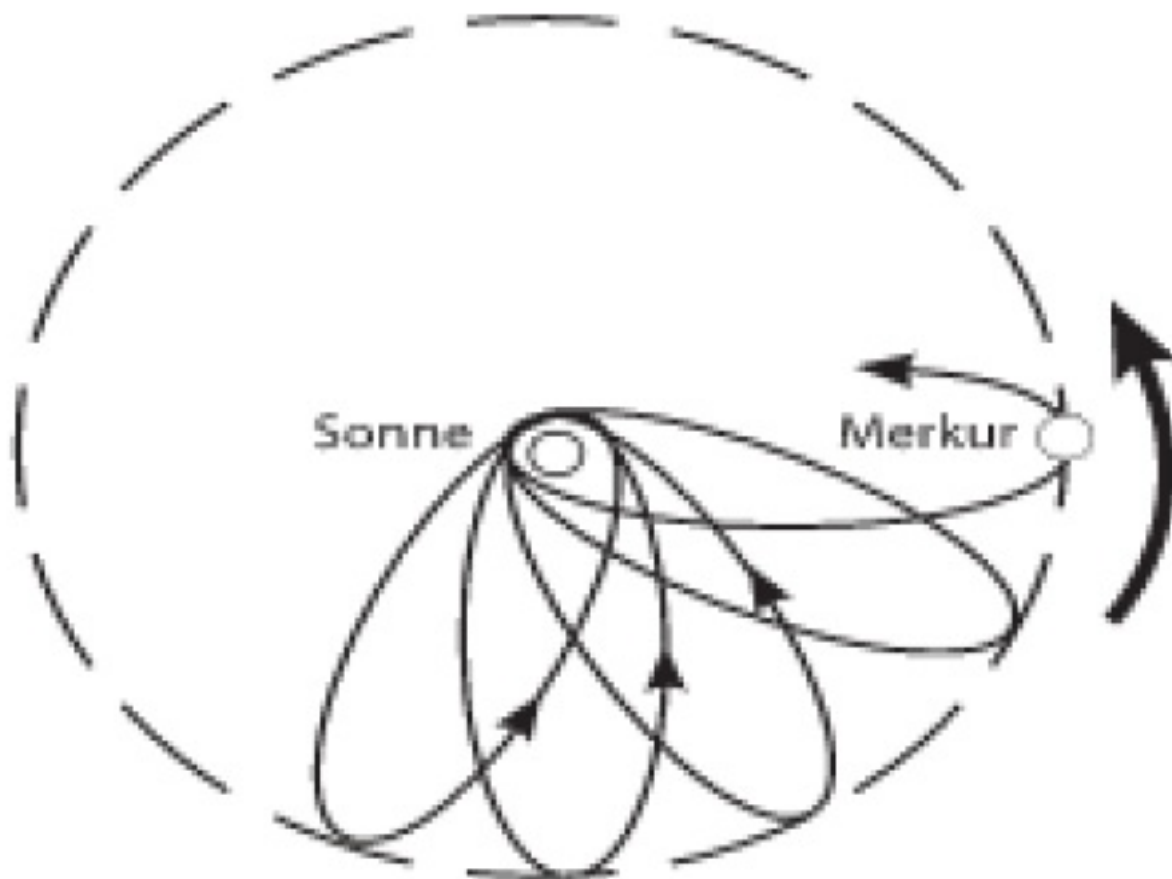


Minh họa thuyết tương đối rộng Einstein (Courtesy of Andrew Robinson)

Cách mô tả lực hấp dẫn bằng thuyết tương đối tỏ ra chính xác hơn thuyết hấp dẫn của Newton một cách chưa từng thấy. Độ cong được mô tả bằng một hệ thống phương trình vi phân, người ta gọi là các phương trình trường, diễn tả mối tương quan giữa vật chất, năng lượng, và độ cong của không gian.^[4] Lực hấp dẫn được hiểu như trường, giống như trường điện từ. Trái táo Newton rơi xuống đất là theo quy luật độ cong này của không-thời-gian.

Thuyết tương đối rộng không cho rằng thuyết hấp dẫn Newton sai. Thuyết sau vẫn đúng, một cách xấp xỉ. Thuyết Newton là xấp xỉ của thuyết Einstein. Richard Feynman diễn tả chính xác: "Ở đâu và lúc nào mà những tiên đoán của Einstein tỏ ra khác với tiên đoán với những ý tưởng cơ học Newton thì Tự nhiên chọn giải pháp của Einstein." Ở đâu thuyết Newton thất bại, không khớp với thực nghiệm, như trường hợp chuyển động của sao Thủy (Mercury) gần mặt trời mà nhà khoa học Pháp Jean Le Verrier đã quan sát nửa thế kỷ trước đó, thì ở đó thuyết Einstein tỏ ra rất chính xác. Sao này ở gần mặt trời nhất, có một chuyển động "kỳ dị" mà thuyết lực hấp dẫn Newton không giải thích được chính xác. Quỹ đạo ellip của nó không khép kín mà quay tròn, điểm gần mặt trời nhất (điểm cận nhật) của nó quay hằng năm, và lệch đi 43 độ cung trong 100 năm! Một độ lệch cực kỳ nhỏ bé, nhưng đủ để các nhà khoa học cảm thấy bất ổn và phải lo toan.

Khi Einstein tính toán thấy thuyết tương đối rộng của mình đã giải được độ lệch trên, thì ông hạnh phúc ngất ngây và tin tưởng mãnh liệt vào sức mạnh của thuyết này. Không còn nghi ngờ gì nữa. Einstein viết: "Ai thật sự hiểu thuyết tương đối rộng rồi thì không thể thoát khỏi sự mê hoặc của nó."



Quỹ đạo của sao Mercury (sao Thủy)

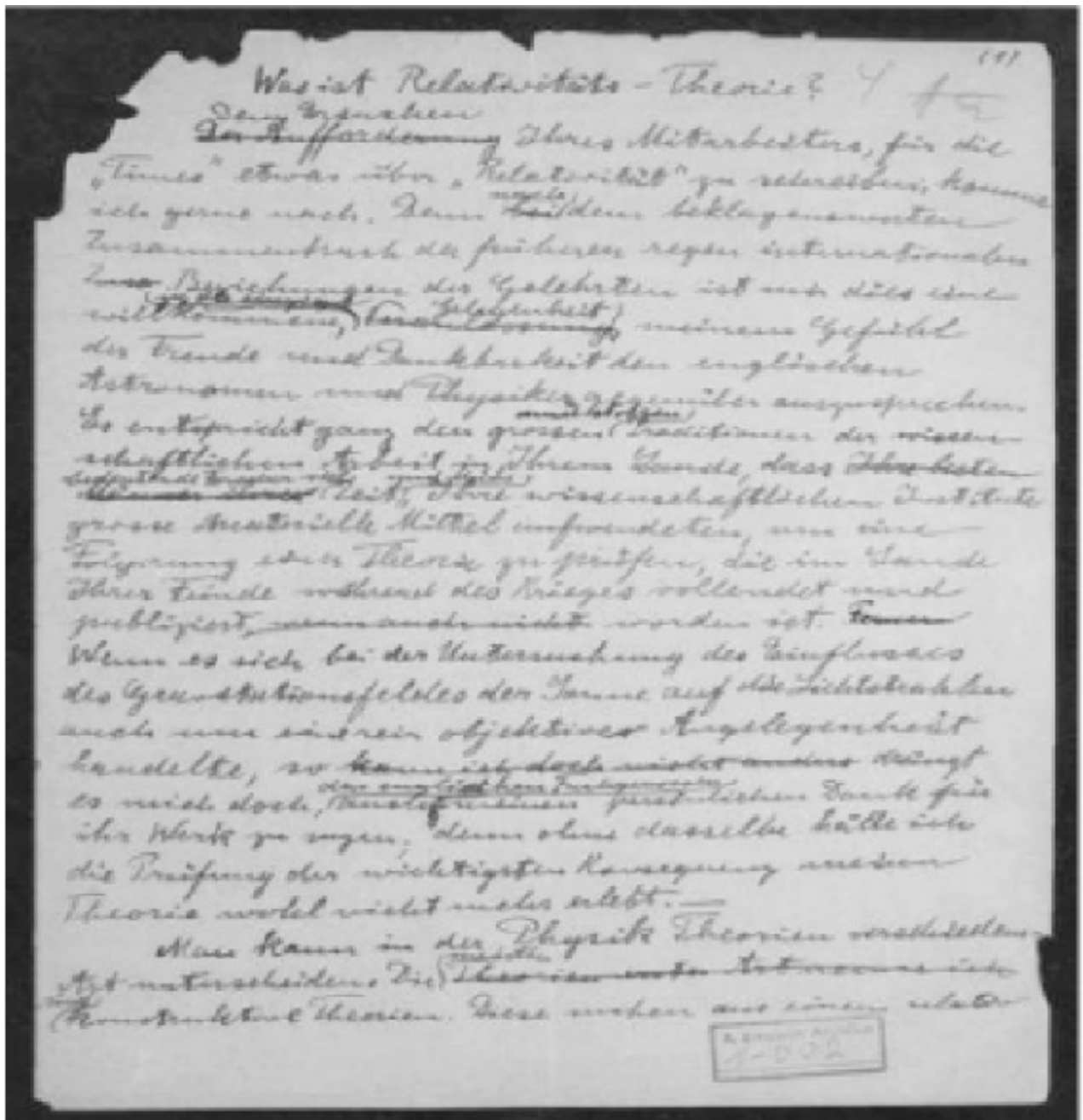
Trong một bức thư gửi cho Arnold Sommerfeld năm 1915, Einstein tóm tắt:

"Điều tuyệt diệu tôi trải nghiệm là giờ đây không phải chỉ Thuyết Newton là xấp xỉ bậc nhất, mà chuyển động điểm cận nhật của Sao Thủy (43° trong trăm năm) cũng là xấp xỉ bậc hai (của thuyết tương đối rộng). Đối với độ lệch ánh sáng ở mặt trời, nó có một trị số lớn gấp đôi hơn trước đây." Độ lệch này, 1,745 giây cung, còn phải được kiểm chứng, nhưng Einstein không nghi ngờ gì về tính đúng đắn của nó nữa. Đó là nhiệm vụ của các đoàn thám hiểm Anh vào mùa xuân năm 1919.

Một hiệu ứng nữa của thuyết tương đối trường hấp dẫn làm cho thời gian chậm lại. Đồng hồ ở gần trái đất chạy chậm hơn

đồng hồ ở xa trái đất. Hiệu ứng này được R.V. Pound và G.A. Rebka kiểm tra vào năm 1960.

Con đường đi đến các phương trình trường của thuyết tương đối rộng là rất gian nan, không giống như với thuyết tương đối hẹp. "Ông hoàn toàn không ngờ được tôi đã phải lâm than thế nào như một tên ngu dốt về toán học cho đến khi tôi cập được bến này", như ông viết cho một đồng nghiệp năm 1915. Khi thấy Einstein miệt mài theo đuổi thuyết tương đối rộng, người đỡ đầu cao tuổi Max Planck của ông khuyên: "Như một bạn già, tôi phải khuyên ông hãy từ bỏ, bởi vì ông sẽ không vượt qua được những khó khăn đâu; và nếu ông vượt qua được, cũng sẽ không ai tin ông đâu." Nhưng Einstein vẫn "cứng đầu". Nhịp sống ông bị đổi khác trong giai đoạn "ấp ủ" khó khăn: "Tôi hút thuốc như một ống khói, làm việc như một con lừa, ăn không cần nghĩ ngợi và chọn lựa, chỉ đi dạo với bầu bạn dễ thương, nên rất hiếm, ngủ thất thường, v.v."

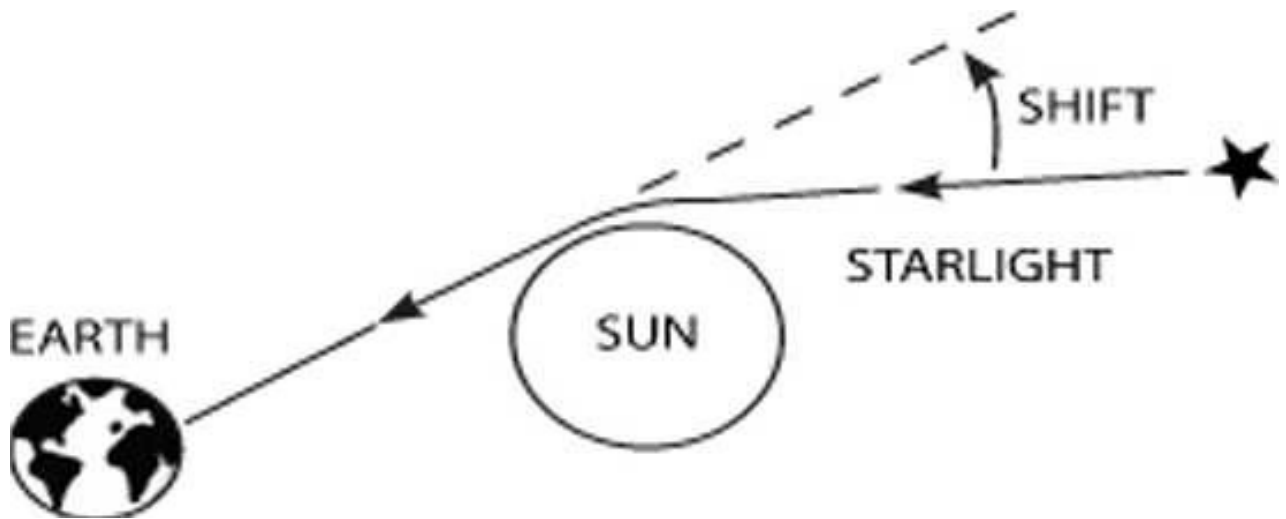


Bản thảo viết tay của bài *Thuyết tương đối là gì?* của Einstein

Người ta khó lý giải được sự bùng nổ của cuộc Thế chiến thứ nhất giữa lúc nền văn minh phương Tây được tin đã gần đến đích khả hoàn, "con người đã lên gần tới Trời" (Hermann Hesse), giấc mơ về một thiên đường có thật trên trái đất kết tinh từ thành quả lao động của lý trí khai sáng hai thế kỷ qua đang trở thành hiện thực, mãi mãi loại bỏ chiến tranh giữa con người như một khuyết tật, lâu đài thế giới quan cơ học Newton, nguồn gốc của khai sáng châu Âu, được tin rằng sắp hoàn tất ở những chi tiết cuối cùng. Thế chiến thứ nhất đã làm cho các niềm tin trên sụp đổ, để lại một di sản đắng cay và vô định. Định mệnh con người đã vượt khỏi tầm tay của nó. Từ đỉnh cao của văn minh

phát triển, phương Tây như bước vào giai đoạn suy tàn (Oswald Spengler). Sự suy tàn, đối với nhiều người, được đánh dấu bởi nguyên nhân của sự thống trị của một "chủ nghĩa cơ giới Newton" vô tri vô giác, chủ nghĩa vật chất vô hồn, tư duy tất định và "văn hóa đám đông". Đức tin của thế giới Kitô giáo bị thay thế bằng ý thức hệ thể tục và quyền lợi kinh tế thuần túy. Nhưng thâm tâm Einstein nghĩ rằng, con người về bản chất vẫn hành động theo thuyết tất định (determinism): "Chính thái độ hành xử đầy bản năng của con người hôm nay trong những việc chính trị là thích hợp để làm cho niềm tin vào chủ nghĩa tất định rất sống động", như Max Born thuật.

Trong sự hoang mang và bi quan tột độ đó, thuyết tương đối xuất hiện như một ánh sáng. Ngày 6 tháng 11 năm 1919, sau khi hai đoàn thám hiểm Anh đo đạc tiên đoán độ lệch của ánh sáng đi qua mặt trời từ tháng 5 vào lúc có nhật thực ở Brazil và Guinea, đã công bố kết quả đo đạc trước Hàn lâm viện khoa học Anh gây chấn động dữ dội: tiên đoán độ lệch của ánh sáng đi qua mặt trời của thuyết tương đối rộng của Einstein là chính xác! Newton sai! Một cuộc cách mạng mới được xác nhận trên trời. Sau hơn 200 năm, thế giới của Newton phải điều chỉnh. Từ giờ phút ấy, Einstein đã trở thành "*anh hùng toàn cầu*", "một vị cứu tinh". Cái tên "thuyết tương đối" và gương mặt Einstein trở thành một sự hấp dẫn kỳ lạ cho công chúng khắp thế giới. Hàng ngàn người chờ đợi để nhìn thấy ông, nghe ông diễn thuyết. Người ta muốn biết thuyết tương đối là gì. Tại sao lại không có chuyển động tuyệt đối, tại sao thời gian, không gian không tuyệt đối, tại sao không gian không còn Euclid nữa, v.v. "Thế giới đã bị lỏng ốc" (Hamlet). Bao nhiêu ảo giác hằn sâu trong nhận thức của quá khứ từ Cổ đại Hy Lạp đang được Einstein bày ra trước mắt mọi người. Tư duy tuyệt đối, cơ giới của vật lý Newton thành linh bị thuyết tương đối cắt đứt. Người ta ngược nhìn lên *bầu trời mới* để quên bớt những đau khổ con người tự gây cho nhau và lấy lại niềm tin, hy vọng. Thế giới đã trở thành "*tương đối tính*", thay thế cho thế giới của trật tự cũ cứng nhắc. Mọi người đều hướng chú ý mình về thuyết tương đối. Các văn hóa bị chia cắt của C.P. Snow được hội tụ lại qua con người của Einstein.



Ánh sáng đi gần mặt trời bị cong, khiến cho mắt thường nhìn từ trái đất tưởng vị trí vì sao nằm chỗ khác (*Courtesy of Cassidy*)

Thuyết tương đối rộng không dừng lại ở chỗ cắt nghĩa lực hấp dẫn của Newton, mà còn có những hệ quả sâu rộng cho vũ trụ học, làm cho ngành này phát triển chưa từng thấy. Những khái niệm như Big Bang, thuyết tiến hóa vũ trụ, hay hố đen sẽ không hình dung được nếu không có thuyết tương đối rộng. Nhà vật lý học Freeman Dyson diễn tả điều này khi nói rằng: "Đối với chúng tôi, các lỗ đen là sự xác nhận đẹp nhất và ấn tượng nhất của thuyết tương đối rộng của Einstein. Chúng là những nơi mà thuyết Einstein bộc lộ hết sức mạnh và sự vinh quang của nó."

Thuyết tương đối rộng đưa các nhà khoa học đến nhiều tư biện khoa học có tính giả tưởng thú vị. Một trong những tư biện đó là "du ngoạn thời gian". Không gian và thời gian có khả năng cong lại nhiều đến nỗi người ta có thể đi trên một con đường dẫn về chỗ cũ trước khi khởi hành. Bạn có thể đi du hành trong "lỗ sâu" sang phía bên kia rồi trở về đúng giờ cơm tối.

Paul Dirac viết về những ấn tượng của thuyết tương đối đối với ông khi còn là sinh viên:

Tôi không thể diễn tả bằng những từ khác hơn là nói nó (thuyết tương đối) đã vỡ tung đối với chúng tôi. Đó là một ý tưởng mới, một loại triết học mới, và nó dấy lên sự quan tâm và kích động trong mọi con người. [...] Mọi thứ cần được xem một cách tương đối đối với một cái khác. Chủ nghĩa tuyệt đối là một ý tưởng tồi người ta cần phải bỏ đi. [...] Tôi bị rơi vào sự kích động của thuyết tương đối cùng với các bạn bè sinh viên của tôi. Chúng tôi học ngành kỹ sư, và tất cả

những công việc của chúng tôi đều dựa vào Newton.

Dirac bình luận về thuyết tương đối rộng: "Khám phá có lẽ lớn nhất từ trước đến nay được thực hiện."

Còn nhà vật lý học Anh đương đại Roger Penrose viết năm 2006: "Thuyết này là một loại - gần như độc nhất trong sự phát triển khoa học - và không phải vô lý khi nghĩ rằng, nếu Einstein không có mặt, thì thuyết này có thể vẫn chưa được tìm thấy bởi bất cứ ai một thế kỷ sau, hay lâu hơn." Nó đòi hỏi một cấp bậc đặc biệt của tính độc đáo như ông nói.

Leopold Infeld, học trò và đồng nghiệp của Einstein, kể lại tình hình sau đây để thấy con người đón nhận thuyết tương đối nồng nhiệt thế nào: "Sau đó, thành linh, gần như qua đêm, Einstein trở nên nổi tiếng. Khi đó tôi là giáo viên ở một thành phố nhỏ của Ba Lan, và tôi làm điều mà hàng trăm người khác trên thế giới làm. Tôi làm một bài thuyết trình cho công chúng về thuyết tương đối, và đám đông đứng sấp hàng trong một đêm đông lạnh, không tìm được chỗ trong giảng đường lớn nhất. Ảnh của Einstein xuất hiện trên nhiều tờ báo và, điều làm tôi ngạc nhiên, gương mặt ông giống gương mặt của một nghệ nhân hay một nhà tiên tri hơn là khuôn mặt của một nhà khoa học."

Thưa Quý Bà, Quý Ông,

Lý do tôi nhận lời mời của trường Đại học Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) trình bày một bài diễn thuyết về Einstein là ngày nay, Toán học, Khoa học tự nhiên và Triết học đan kết chặt chẽ nhau đến độ những người không chuyên môn cũng phải nghiên cứu những thắt nút cực kỳ phức tạp này. Bởi vì nếu chúng ta để họ một mình, chúng ta cuối cùng sẽ đuổi họ trở về các Ghetto của các ngành chuyên môn của họ.

Nhà văn - Nhà soạn kịch F Durremmatt

Thế giới lên cơn sốt với thuyết tương đối.

"Thế giới này là một bệnh viện tâm thần kỳ lạ. Hiện tại mỗi chú lái xe ngựa và mỗi anh bồi bàn tranh luận xem thuyết tương đối có đúng không", Einstein viết. Người ta đồn, chỉ có vài người

mới hiểu thuyết tương đối thôi. Tuy không hiểu, nhưng sự ngưỡng mộ đối với Einstein là vô bờ bến. Câu nói của vua hề Chaplin với Einstein: "Dân chúng hoan hô tôi vì mọi người hiểu tôi, còn họ hoan hô ông bởi vì không ai hiểu ông" có lẽ diễn tả đúng sự thật.

Infeld kể lại giai thoại sau đây: Trong một cuộc trò chuyện với Eddington, giáo sư Ba Lan Ludwig Silberstein nói "Giáo sư Eddington, Ngài là một trong ba người hiểu thuyết tương đối." Khi thấy giáo sư Eddington có vẻ nghi ngờ, giáo sư Silberstein nói tiếp: "Xin Ngài đừng quá khiêm tốn". "Không", Eddington đáp lại, "đó không phải là sự khiêm tốn; tôi chỉ muốn biết ai là người thứ ba kia." Giai thoại này nói lên thuyết tương đối là lạ lùng và khó khăn thế nào đối với mọi người. Có lẽ tại vì, như người ta giải thích, cơ học Newton đã ăn quá sâu vào tiềm thức, với tư duy tất định, tuyệt đối, khiến con người khó chấp nhận [thuyết] tương đối. Lord Kelvin từng tuyên bố, ông chỉ hiểu một sự vật khi nào đã xây dựng cho nó một mô hình cơ học. (Tình hình ở Nhật Bản khác hơn, họ đón nhận thuyết tương đối một cách dễ dàng vì họ chưa có quá trình thâm nhập sâu xa của cơ học Newton).

Einstein tích cực truyền bá khoa học đại chúng. Ông đi diễn thuyết khắp nơi. Một lần Infeld chứng kiến một buổi giảng như thế tại giảng đường lớn nhất của Đại học Berlin. Đề tài: "Hình học và Kinh nghiệm" (bài này được đăng lại trong quyển này, xin xem phần Tư liệu lịch sử). Ông kể lại: giảng đường đầy ắp; Einstein là một diễn giả lôi cuốn, ngay đối với những cử tọa không hiểu gì về những điều ông nói. Sau khi Einstein kết thúc, phần thảo luận bắt đầu. Một sinh viên triết học trẻ nói, rằng quan điểm của Einstein đi ngược lại quan điểm của Kant về không gian. Einstein mỉm cười. Tình hình giống như, trong bầu không khí Phổ này, Einstein có can đảm đứng lên chống lại Kant. "Một sự cả gan làm sao!"

Einstein rất kính trọng Kant, dĩ nhiên, nhưng có đủ tỉnh táo và lập trường để không bị "thôn tính" trước sức mạnh áp đảo tỏa ra từ tác phẩm Kant. Max Born thuật lại về nội dung của một lá thư Einstein gửi ông năm 1918 từ nơi Einstein nghỉ mát, có đoạn sau đây: "Tôi đang đọc ở đây nhiều thứ, trong đó có *Prolegomena* [5] của Kant, và bắt đầu hiểu tác dụng gợi ý khổng lồ tỏa ra từ anh

chàng này^[6] và còn tỏa ra tiếp tục. Nếu ai chấp nhận sự tồn tại của phê phán tổng hợp của anh ta một cách tiên nghiệm, thì người ấy bị cầm tù. Tôi phải làm giảm nhẹ "a priori" (tiên nghiệm) thành "quy ước", để khỏi phải tranh cãi, nhưng điều này cũng không phù hợp với các chi tiết. Dù sao, đọc tác phẩm đó là thú vị, dù không đẹp bằng người đi trước anh ta là Hume, người có nhiều bản năng lành mạnh đáng kể hơn..." Born cảm thấy cách gọi một trong những người hùng vĩ đại của triết học Đức là "anh chàng" có tác dụng làm thức tỉnh đối với ông. "Bằng những cách xưng hô đó, tôi học được thái độ bất kính người ta phải có đối với những ý tưởng triết học, nếu người ta muốn tạo ra cái gì mới trong vật lý lý thuyết. Thái độ này tôi đã tìm cách truyền lại cho các học trò tôi, và, như tôi tin, không phải là vô ích", Born viết tiếp. Thái độ này, thực vậy, hoàn toàn phù hợp với thái độ Einstein từng diễn tả: "Sự sợ hãi trước quyền lực là kẻ thù lớn nhất của chân lý."

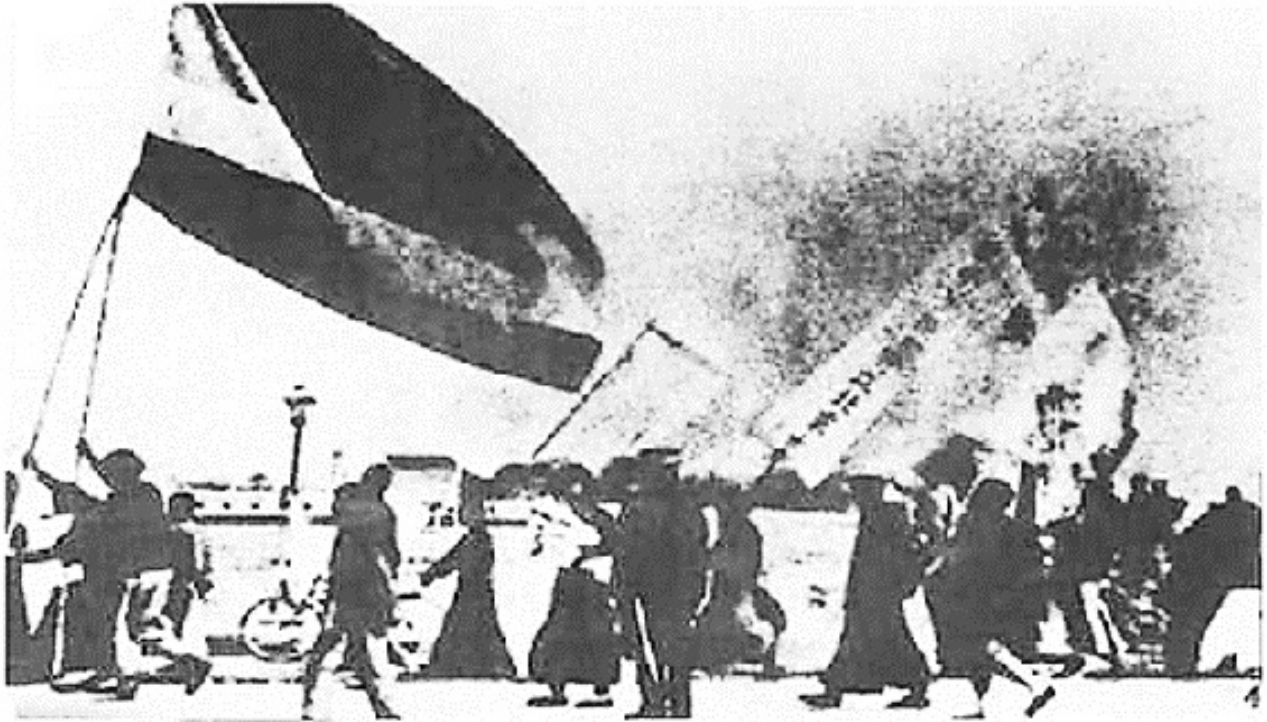
Giữa lúc hai thế giới văn hóa văn chương và khoa học ngày càng tách xa nhau, giữa nỗi lo "khoa học vật lý đã vượt khỏi tầm nắm bắt tri thức của hầu hết con người... và sự ngăn cách này được cảm nhận như một vết thương đối với lòng tự tin trí thức chúng ta" (Lionel Trilling) thì Einstein nhìn vấn đề một cách hòa hợp hơn: "Tất cả các tôn giáo, nghệ thuật và khoa học đều là các cành của cùng một cây. Tất cả những khát vọng này được hướng đến làm cao cả cuộc sống con người, nâng con người lên khỏi thế giới của sự tồn tại thuần vật chất, và dẫn dắt cá nhân đi đến sự giải phóng nội tâm."

Tại phương Đông, Nhật Bản là quốc gia quan tâm hàng đầu, đi đến thuyết tương đối sớm nhất, dĩ nhiên. Năm 1907, tức 2 năm sau thuyết tương đối hẹp ra đời, đã có bài viết giới thiệu thuyết này từ một sinh viên vật lý sau cử nhân (Ayao Kuwaki) đăng trên một tờ nhật báo. Năm 1909 nhà vật lý lý thuyết Ishiwara Jun (1881 - 1947) đã công bố bài đầu tiên về nguyên lý của thuyết tương đối, và tiếp tục hoàn thành tám bài nữa trong ba năm tới. Ishiwara là người thông dịch cho Einstein và ghi lại bài nói chuyện "Tôi đã tìm thấy thuyết tương đối thế nào" (1922) được đăng lại trong phần tư liệu lịch sử cuối quyển sách này.

Ishiwara học với Einstein tại Berlin năm 1912 - 1914 và sau đó với Arnold Sommerfeld tại Munich, và là giáo sư vật lý tại đại học mới Tohoku. Ông là một trong những nhà vật lý lý thuyết quan trọng đầu tiên của Nhật Bản và nghiên cứu các lãnh vực vật lý lượng tử, vật lý hạt nhân và thuyết tương đối. Năm 1922 Einstein được mời và thu xếp đi Nhật Bản trong một chuyến đi lịch sử, mở đường cho một sự mở cửa rộng lớn đón mời các thiên tài của phương Tây qua thuyết trình cho sinh viên, giáo sư và cả công chúng. Sau đó những tên tuổi như Werner Heisenberg và Paul Dirac, rồi Niels Bohr, lần lượt sang thuyết trình. Nhật Bản lúc đó, tuy đã công nghiệp hóa thành công đất nước, nhưng sau sáu mươi năm vẫn còn bị một "vòng kim cô" vô hình kềm hãm sự sáng tạo tri thức cần phải được phá bỏ, và họ làm điều đó trong thập niên 1920, đặt những viên gạch đầu tiên cho một tinh thần mới: sáng tạo thay vì sao chép. Kết quả của họ là năm 1949, nhà vật lý hạt Hideki Yukawa đem về giải Nobel đầu tiên cho đất nước, tạo lại niềm tin trong thời bại trận đau khổ, cũng giống như với sự xác nhận thuyết tương đối rộng trên trời năm 1919 Einstein từng đã tạo lại niềm tin cho nước Đức sau khi thất trận trong Thế chiến thứ nhất.

Tình hình Trung Hoa phức tạp hơn. Trung Hoa chịu ảnh hưởng của Nhật Bản, từ đây khoa học hiện đại được truyền bá vào, nhưng Trung Hoa cũng chịu ảnh hưởng chính trị và ý thức hệ của Liên Xô và cuộc "Cách mạng văn hóa" có tính tự sát. Các nhà vật lý của Trung Hoa đều học từ Nhật Bản, và họ đã đưa thuyết tương đối vào đất nước họ từ năm 1917. Các nhà vật lý Nhật Bản cũng tiếp sức, đặc biệt Ishiwara. Nhưng sự truyền bá thuyết tương đối mạnh mẽ nhất diễn ra vào lúc Trung Hoa trải qua *Phong trào Ngũ Tứ* năm 1919. Thời kỳ này rất sôi nổi đối với trí thức Trung Hoa, được gọi là "*Thời kỳ Văn hóa Mới*", và sẽ có ảnh hưởng lâu dài lên lịch sử hiện đại của Trung Hoa. Phong trào này kéo dài từ 1917 - 1921. Đó là phong trào khai sáng quan trọng nhất của Trung Hoa có những nét giống như cuộc cải cách của Nhật Bản Minh Trị xét về mặt nhận thức. Nó có tính chất "radical", "tả" hơn, bởi tình hình của Trung Hoa đã quá tồi tệ, đó là điều dễ hiểu. Trí thức Trung Hoa gần như cuồng nhiệt tin tưởng *khoa học* và *dân chủ* sẽ đổi đời đất nước. Họ đã mục kích

tận mắt tấm gương của Nhật Bản. Sinh viên và trí thức kỳ vọng thúc đẩy "một phong trào hiện đại hóa rộng lớn để xây dựng một Trung Hoa mới bằng những cải tổ xã hội và trí thức." Họ đả phá Khổng giáo. Sách vở được xuất bản mạnh mẽ, trong đó có sách và báo nói về Einstein và thuyết tương đối. Nhà văn Lỗ Tấn cũng tham gia phong trào này, và cũng là người muốn đả phá tất cả những cái cũ, vì cho rằng chính cái di sản cũ đã làm cho đất nước kiệt quệ và tan nát.



Sinh viên biểu tình ngày Ngũ Tứ (4 tháng 5) 1919 tại Bắc Kinh
(Nguồn: wiki)

Năm 1919, khi tiên đoán độ lệch của ánh sáng khi đi ngang mặt trời từ thuyết tương đối rộng của Einstein được kiểm chứng, Einstein trở thành anh hùng không những ở phương Tây mà ở Trung Hoa. Einstein được xem là nhà cách mạng khoa học. Tính chất cách mạng này phù hợp với những đòi hỏi có tính cách mạng đang dâng lên của Phong trào Ngũ Tứ. Bertrand Russell truyền bá thêm thuyết tương đối. Einstein dự định thăm Trung Hoa, nhưng không thành, trong sự luyến tiếc của trí thức nước này.

Thuyết tương đối phát triển mạnh mẽ và rộng rãi trong ba thập niên liên tiếp tại Trung Hoa, đi từ việc truyền bá đại chúng đến nghiên cứu chiều sâu. Không những tác phẩm khoa học của

Einstein mà cả những ý tưởng về hòa bình, công lý, thế giới quan, cũng được giới thiệu cho công chúng. Sau năm 1949, tình hình đổi khác. Trong giai đoạn Trung Hoa chịu ảnh hưởng của Liên Xô sau Thế chiến thứ hai để tồn tại trước sự cấm vận của phương Tây, Einstein trở thành mục tiêu đấu tranh chính trị, bị tấn công bằng các quan điểm triết học. Chiến dịch này chỉ là sự sao chép quan điểm của Liên Xô thời Stalin vốn không dung nạp thuyết tương đối và lượng tử. Họ lợi dụng chủ nghĩa Mác-Lênin để phê phán Einstein, cho rằng các kết luận về nhận thức luận của Einstein căn cứ trên các nghiên cứu khoa học "chứa đầy những dơ bẩn duy tâm", và nhiều tố cáo khác. Tất cả để phục vụ cho mục tiêu đấu tranh chính trị nội bộ nhiều hơn. Còn tại Liên Xô thời kỳ này, khoa học không được xem như nỗ lực của con người đi tìm chân lý khách quan, mà chỉ là sản phẩm của các quan hệ kinh tế của xã hội, nhằm phục vụ quyền lợi của giai cấp.

Trong thời "Cách mạng văn hóa", Einstein bị tấn công toàn diện, từ đủ mọi thành phần, thanh niên, công nhân, sinh viên đến trí thức. Cha đẻ chương trình hỏa tiễn không gian Tiên Học Sâm, người từng học và làm việc ở Hoa Kỳ, một trong những cha đẻ của chương trình hỏa tiễn không gian JPL (Jet Propulsion Laboratory của Celtech) của Mỹ, cũng tiếp tay chiến dịch tố cáo.

Mãi cho đến khi Đặng Tiểu Bình lên nắm quyền tuyên bố chương trình "Bốn hiện đại hóa", trong đó có hiện đại hóa khoa học và công nghệ, Einstein và thuyết tương đối, cũng như khoa học nói chung, mới được thật sự phục hồi và nâng cao. Năm 1979, giới khoa học Trung Quốc được sự ủng hộ của Đặng Tiểu Bình đã tổ chức một lễ kỷ niệm sinh nhật thứ 100 năm của Einstein rất lớn cùng lúc với thế giới. Với lễ kỷ niệm đó, giới khoa học Trung Quốc muốn nói với thế giới rằng, khoa học ở Trung Quốc đã trở lại "bình thường", giai đoạn đàn áp khoa học đã qua, và Einstein trở lại là thần tượng, kỳ vọng lấy khoa học phụng sự xã hội của Phong trào Ngũ Tứ được tiếp tục. Lấy hình ảnh Einstein để quảng bá trước thế giới cho gương mặt khoa học mới của Trung Hoa, và cho sự mở cửa của đất nước, điều đó không còn gì tốt bằng.

Tại Việt Nam, trong những thập kỷ mà thế giới phương Tây và

Nhật Bản, Trung Hoa ngưỡng mộ thuyết tương đối và Einstein cuồng nhiệt, thì Việt Nam không có được một phong trào hưởng ứng đáng kể đồng điệu với thế giới. Phong trào Duy Tân và Đông Du chưa đi sâu vào khoa học. Việt Nam bấy giờ chưa có các nhà khoa học được đào tạo tại Nhật như Trung Hoa (Pháp liên kết với Nhật khiến tất cả du học sinh Việt Nam của phong trào Đông Du bị Nhật trục xuất về nước). Đại học Đông Dương tuy được thành lập năm 1906, nhưng đó là đại học thuộc địa, nhằm đào tạo công chức của bộ máy cai trị là chính. Sau đó nhóm Tự lực văn đoàn tập trung vào cải cách và hiện đại hóa tiếng Việt. Khoa học chưa phải là niềm cảm hứng và kỳ vọng của giới tinh hoa trong công cuộc xây dựng đất nước. Phong trào khai sáng của Nhật Bản truyền sang Trung Hoa rồi lan đến Việt Nam, nhưng yếu đi nhiều về mặt khoa học, thay vào đó, mạnh về đấu tranh cho dân chủ, tự do. Rồi chiến tranh kéo dài, trí thức Việt Nam không có một giai đoạn độc lập để nhận thức và phụng sự. Cuộc đấu tranh giành độc lập diễn ra trên bình diện chính trị, quân sự và văn hóa, hơn là khoa học.

Ngày nay, sau một thế kỷ chậm chân, Việt Nam vẫn chưa có một ý thức thật sự sâu sắc và mạnh mẽ, chưa có đam mê về vai trò của khoa học như thời Nhật Bản Minh Trị, hay như Phong trào Ngũ Tứ của Trung Hoa, để truyền lại một dấu ấn sâu đậm như một di sản tinh thần. Việc giáo dục khoa học đại chúng chưa được coi trọng. Thực tế, khoa học chưa phải là quốc sách. Thực tế, văn hóa khoa học còn nghèo nàn, lung linh như "ngọn nến". Tình yêu nước thôi chưa đủ. Thủ tướng Bismarck của Đức từng khuyên các nhà lãnh đạo của Nhật Bản Minh Trị: Một dân tộc chỉ chăm sóc tình yêu quê hương thôi chưa đủ. Nếu không xây dựng được sức mạnh thì đất nước sẽ không giành được sự tôn trọng trên chính trường quốc tế, độc lập chỉ là niềm hy vọng hão thôi. Không có khoa học, công nghệ phát triển thì lấy đâu có sức mạnh đó? Việt Nam cần biết soi gương mình trong lịch sử để sự tỉnh và đưa khoa học vươn lên phát triển mạnh mẽ hơn trong tương lai.

Niềm tin khai sáng cuồng nhiệt của Minh Trị Duy Tân, hay của Phong trào Ngũ Tứ, đều là tiếng vọng của niềm tin vào khai sáng và lý tính một cách cuồng nhiệt của thế kỷ XVIII ở châu Âu. Lúc đó, ở châu Âu, chưa bao giờ như thế, cả thế giới có học được

thuyết phục rằng sức mạnh có ích lợi nhất và thánh thiện nhất trong đời sống con người, thành quả tối cao của con người và viên ngọc quý sáng giá nhất, đó là Khoa học. Lần đầu tiên trong lịch sử lâu dài của nhân loại, con người tin tưởng rộng rãi rằng hạnh phúc nhân loại và tri thức nhân loại đi đôi với nhau tay trong tay. Khoa học lần đầu tiên tiến vào mọi lãnh vực của mối quan tâm con người, và thu hút được trí tuệ của mọi người có học. Một cuộc cách mạng về niềm tin và thói quen tư duy diễn ra. Thế kỷ XVIII, vượt lên trên hết, là thời đại của lòng tin vào khoa học. (John H. Randall, Jr.).

"Ôi, Đấng tự nhiên, đấng tối cao của mọi sinh linh!

Và các ngài, Đức hạnh, Lý trí và Chân lý, những đứa con đáng tôn kính của Người! Hãy mãi mãi là những ân nhân che chở được sùng kính của chúng con! Những lời ngợi ca của toàn thể nhân loại thuộc về các ngài; sự tôn kính của trái đất này là dành cho các ngài. Hãy cho chúng con biết, ôi Đấng tự nhiên! Rằng những gì con người cần phải làm để đạt được hạnh phúc mà ngài đã khiến lòng chúng con khao khát. Đức hạnh! hãy truyền sức Sống cho con người bằng ngọn lửa ơn huệ của ngài. Lý trí! hãy dẫn dắt những bước chân vô định của y qua các nẻo đường đời. Chân lý! hãy để ngọn đuốc của ngài chiếu sáng trí tuệ y, xua tan bóng tối trên con đường của y. Ôi, các vị thần linh phò trợ! Xin hãy hợp lực quyền năng của các ngài lại, để làm cho trái tim nhân loại phục tùng sự thống lĩnh của các ngài. Xin hãy xua đuổi lỗi lầm khỏi trí tuệ chúng con; sự hiểm ác khỏi trái tim chúng con; sự nhầm lẫn khỏi bước chân chúng con; xin hãy làm cho tri thức mở rộng triều đại tốt đẹp của nó; xin hãy để cái thiện chiếm ngự linh hồn chúng con, cũng như niềm thanh thản chiếm ngự lòng chúng con". (D'Holbach)

Khoa học, Khai sáng và Lý tính đã chiếm ngự trái tim và khối óc con người một cách sâu thẳm như một "đức tin tôn giáo", một "ý thức hệ", và chỉ như thế mới tạo nên sức bật.

Vương quốc Trung Hoa là một xã hội với những định chế thương mại thành công và nội thương phát triển, nhưng thiếu một tinh thần giống như niềm tin vào cuộc Khai sáng khoa học, công nghiệp phương Tây. Vào những thời trước, Trung Hoa đã

chúng tỏ những năng lực khoa học và công nghệ to lớn của mình, nhưng vào thời kỳ Cách mạng công nghệ Anh, Trung Hoa đã trở nên trì trệ về công nghệ. Năm 1792 Anh quốc làm một cử chỉ thiện chí để "xuất khẩu" Khai sáng Công nghiệp sang Trung Hoa. Sứ thần Lord George Macartney được gửi đi để trưng bày những sản phẩm kỳ diệu của thời đại Khai sáng, trong đó có những thiết bị khoa học, và muốn Trung Hoa mở cửa thị trường cho Anh quốc. Nhưng lãnh đạo Trung Hoa không tỏ ra có một sự tò mò tích cực về những chuyển động đang diễn ra tại châu Âu. Không có sứ thần nào của Trung Hoa được gửi sang châu Âu để nghiên cứu những đổi mới sáng tạo đó cả. Ngay cả sang thế kỷ XIX, Trung Hoa tuy có mua sản phẩm và thiết bị khoa học của châu Âu, nhưng tuyệt nhiên không du nhập một ý thức hệ nào liên quan đến Khai sáng, như người Nhật sau này buộc phải làm, sau tiếng súng của Đô đốc Perry. Trung Hoa đã chết lâm sàng mà không biết.

Chúng tôi hy vọng quyển sách này, cũng như quyển sách *EINSTEIN* trước đây, sẽ nhóm lên những ngọn lửa hy vọng trong các bạn học sinh, sinh viên để góp phần thay đổi nhận thức xã hội. Chúng ta hãy đam mê, hãy nuôi dưỡng niềm tin và kỳ vọng vào khoa học và sự truyền bá của nó trong một môi trường có đủ dân chủ để đem lại một xã hội tốt đẹp và hạnh phúc. Không có xã hội nào tiến lên phú cường mà không có khoa học phát triển cả.

Con đường nắm bắt khoa học không đơn giản, vì nếu đơn giản thì không còn khoa học nữa. Khoa học là một chuỗi bút phá tư duy của con người để tiến lên nhận thức những cái còn ẩn chứa mà mắt thường không thể thấy. Nói theo Plato, khoa học giúp cho con người ra khỏi "hang động" của sự vô minh ngậm chứa trong sự hữu hạn của con người để nhìn thấy ánh sáng từ nhiều chân trời hơn. Khoa học là khai sáng, là đem lại sự phồn vinh cho xã hội. Phồn vinh và khoa học là một "cặp sinh đôi". Con đường khoa học của Việt Nam hãy còn xa. Vì thế con đường phồn vinh cũng còn xa. Một dân tộc cần phải có đam mê và niềm tin khai sáng mãnh liệt vào khoa học và công nghệ mới có phồn vinh. Nếu không, cuộc đời chỉ là sự đi lại mua bán buồn tẻ giữa "chợ cá" và "chợ mắm", nói như nhà thơ Đức Joseph Eichendorff. Sự hiểu

biết tuy trước nhất đem lại niềm vui một cách tự nhiên như từ bản tính con người, như Einstein diễn tả, đó là sự đam mê có tính hiện sinh hay nhân văn, nhưng lịch sử cho thấy, dân tộc nào nhiều đam mê hiểu biết, dân tộc đó sẽ được phần vinh. Vật lý thế kỷ XX đã thay đổi bộ mặt vật chất và kinh tế của thế giới. Vật lý đó bắt đầu từ sự tò mò hiện sinh, có tính triết học, không phải từ tính toán lợi ích trước mắt. Trong một lá thư gửi cho Max von Laue, Einstein viết: "Vật lý không chỉ là sự tìm chân lý, nó cũng là sức mạnh tiềm tàng đối với tự nhiên, hai mặt không thể tách ra được [...] Nó không chỉ tượng trưng cho triết học tự nhiên mà còn dính sâu vào hành động - vào cái sống (và cả cái chết)."

Quyển sách này của Einstein được viết xong cuối năm 1916, tức ngay sau khi ông hoàn tất thuyết tương đối rộng, và đưa ra những tiên đoán chờ được kiểm tra. Từ đó đến khi ông mất, tác phẩm ấy vẫn được giữ nguyên hiện trạng phần chính, chỉ thêm vài phụ lục. Sau năm 1919, Einstein diễn thuyết và viết báo về những vấn đề ý nghĩa triết học, nhận thức luận, phương pháp luận khoa học trước giới khoa học, có tính đại chúng. Những bài này nay được tập hợp trong phần *Tư liệu lịch sử* của lần xuất bản tiếng Việt. Ngoài ra quyển này cũng có thêm các bài viết của một số nhà khoa học khác như Max Planck và Arthur Eddington, của Isaac Newton, Henri Poincaré và Ernst Mach để bổ sung vào bối cảnh khoa học cho đầy đủ. Newton quan niệm thời gian và không gian cứng nhắc, trong khi Poincaré là người đã "ngửi" thấy mùi của thuyết tương đối trong không khí và thấy nhu cầu của một nền cơ học mới thay thế cho cơ học cũ, còn Mach là người "nã đạn" mạnh mẽ vào các thành trì cứng nhắc của các khái niệm không gian, thời gian của Newton, cổ vũ Einstein tin tưởng vào con đường cách mạng của mình. Các tư liệu lịch sử này sẽ giúp cho những độc giả quan tâm những vấn đề triết học có thể tham khảo nhiều hơn.

Einstein được đặc biệt vinh danh rất nồng nhiệt tại quê hương của Newton, cũng như tại Hoa Kỳ và Nhật Bản. Nhà văn Anh nhận giải Nobel Văn học Bernard Shaw có những lời tôn vinh trân trọng sau đây trong một buổi tiệc mừng Einstein:

Napoleon và những con người vĩ đại khác là thuộc típ này: họ là

những người tạo ra các đế chế. Nhưng có một cấp bậc khác của những người vĩ đại vượt xa hơn. Họ không phải là những người tạo ra đế chế, mà tạo ra các vũ trụ... Ptolemy đã làm một vũ trụ kéo dài 1.500 năm. Newton, cũng thế, làm một vũ trụ kéo dài 300 năm. Còn Einstein đã làm một vũ trụ mà tôi không thể kể cho quý vị biết nó sẽ kéo dài đến bao giờ.

Trí thức Anh, tuy cảm nhận thời kỳ Newton đã hết để nhường chỗ cho thời kỳ Einstein, tuy là thù địch với nước Đức trong chiến tranh, nhưng những điều đó không ngăn được sự ngưỡng mộ cao độ và chân thành của họ dành cho Einstein. Họ đã bỏ công kiểm tra độ lệch ánh sáng của thuyết Einstein. Họ là người đầu tiên mời Einstein viết một bài cho tờ *The London Times*, có tựa đề "*Thời gian, Không gian, và Lực hấp dẫn*" ngày 28 tháng 11 năm 1919.^[7] Họ mê say Einstein như mê say chính đứa con của dân tộc mình.

Năm 1922, sau khi nói Copernicus đã giải phóng con người khỏi tư duy lấy trái đất làm trung tâm vũ trụ, tuy thế trong tiềm thức sâu thẳm con người vẫn còn vương vấn với tư duy đó, Eddington đã diễn tả những cảm xúc mạnh mẽ của ông về cuộc giải phóng một lần nữa do Einstein thực hiện:

Giải phóng tư duy của chúng ta khỏi các trói buộc của không gian và thời gian là một nguồn cảm hứng của nhà thơ và nhà thần bí, được nhìn hơi tinh táo bởi nhà khoa học khi anh ta có lý do quá rõ ràng để sợ sự mơ hồ của những ý tưởng lỏng lẻo rất có thể phát sinh. Nếu những người khác có sự nghi ngờ về một kết cục mong muốn, thì Einstein được giao phó nhiệm vụ chỉ ra con đường để chúng ta vứt bỏ được "những bám víu trên mặt đất vào tư duy". Và bằng cách cởi bỏ các trói buộc của chúng ta, ông đã để lại cho chúng ta những suy nghĩ chung không phải mơ hồ (như có thể có ai đó quan ngại) cho sự trầm tư ngây ngất của nhà thần bí, mà là một sơ đồ chính xác của cấu trúc thế giới để cổ vũ nhà vật lý.

Gần nhất, năm 2006, Chen Ning Yang, người được trao giải Nobel ở tuổi 34, đã nhận xét về ảnh hưởng của Einstein: "Sự nhận thức của Einstein đã thâm nhập vào hồn nghiên cứu trong vật lý lý thuyết cơ bản trong 50 năm qua từ lúc ông mất, để lại một dấu ấn bền vững cho sự vĩ đại của lòng can đảm, tính độc lập, kiên gan và sự sâu sắc." Stephen Hawking viết: "Ngày nay

các ý tưởng của ông về không gian, thời gian hòa quyện nhau được ăn sâu vào văn hóa đại chúng, được mô tả bởi các tác giả nhiều thế hệ qua."

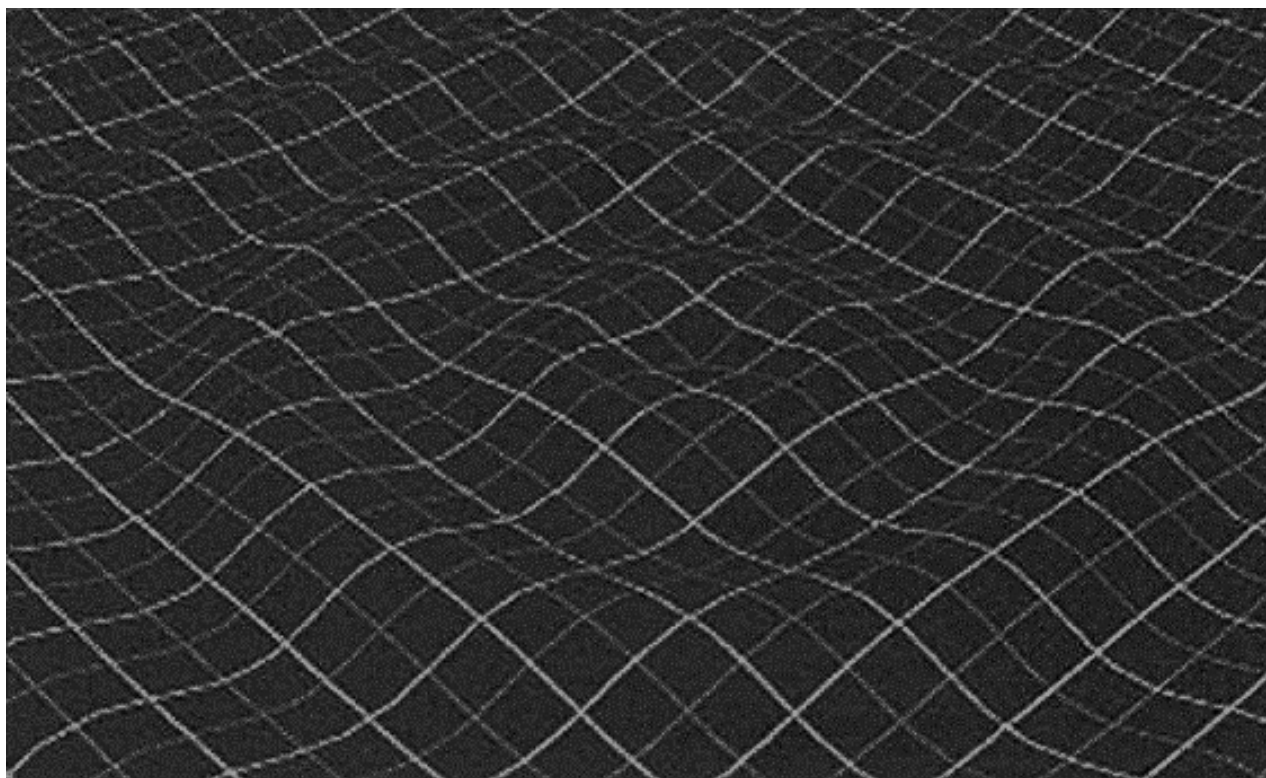
Với những lời này, chúng tôi xin khép lại phần dẫn nhập để nhường chỗ cho Einstein truyền đạt những ý tưởng thuyết tương đối đến các "bạn đọc Việt Nam thân mến". Với tác phẩm này, chúng ta có thêm một di sản khoa học của Einstein. "Sự giới hạn các nhận thức khoa học vào một nhóm nhỏ người làm suy yếu tinh thần triết học của một dân tộc và dẫn đến sự nghèo nàn tinh thần của nó" như Einstein viết. Tác phẩm này cũng có mục đích truyền bá tinh thần triết học của thuyết tương đối.

Việc tham khảo thêm quyển *EINSTEIN* [8] từng được đọc giả yêu thích sẽ giúp bạn đọc hiểu Einstein nhiều hơn về con người và về các lý thuyết khoa học. Việt Nam phải sớm là quê hương của Einstein. Khoa học sớm phải là dấu ấn phẩm chất của văn hóa công chúng.

Tác phẩm này không phải như một quyển tiểu thuyết để có thể đọc nhanh và dễ dàng, mà người đọc đôi khi phải dừng lại để suy nghĩ, trầm tư, chứng nghiệm; hoặc đôi khi phải tạm thời lướt qua để đọc tiếp những phần sau, rồi sau đó nếu có thì giờ sẽ trở lại, không sao cả. Khoa học nếu dễ dàng, sẽ không còn là khoa học nữa. Đọc đi đọc lại là việc thường. Chúng ta không kỳ vọng có thể hiểu ngay hết các chi tiết Einstein viết, mà trước hết cần hiểu những ý tưởng trong đó, cần thấy những mảnh rừng của cảnh quan trong đó. Điều này cũng đúng cho phần tư liệu lịch sử. Đôi khi chúng ta chỉ cần hiểu một hai ý quan trọng của một bài viết là cũng thấy mình giàu có thêm. Dĩ nhiên, càng hiểu thêm chi tiết, ta càng thâm nhập sâu hơn vào vẻ đẹp của khoa học và sự phong phú của nó. Điều chúng ta kỳ vọng là nhận được nguồn cảm hứng tỏa ra từ quyển sách, và từ Einstein. Đọc một tác phẩm là gặp gỡ tác giả trong từng câu chữ. "Cuốn sách tuy ngắn, nhưng đòi hỏi ở phía người đọc một trình độ học vấn phổ thông, khá nhiều kiên nhẫn và ý chí mạnh" như Einstein nhắn nhủ trong lời nói đầu của ông.

Chân thành cảm ơn hạn đọc.

TIN GIỜ CHÓT: Ngày 17 tháng 3 năm 2014 một đoàn thám hiểm Mỹ sau một nghiên cứu 3 năm thông báo long trọng tại buổi họp báo lịch sử ở Harvard, rằng họ đã thật sự quan sát được sóng hấp dẫn ban sơ (primordial gravitational waves) của giây phút ngay sau Big Bang. Các chứng cứ vừa tìm cho thấy vũ trụ ban đầu chịu một sự bùng nổ lạm phát mạnh mẽ, và sự bùng nổ này truyền đi nhanh hơn ánh sáng mặt trời trong chốc lát của sự tồn tại của nó, ném ra một cơn bão sóng hấp dẫn ban đầu vào không gian. Khám phá trên cũng hỗ trợ thêm thuyết lạm phát của vũ trụ, hiện tượng đã phóng đại các sóng hấp dẫn ban sơ để dễ quan sát hơn. Con người đã có thể nhìn thấy, bằng thí nghiệm và kính viễn vọng tinh vi BICEP2, những tín hiệu bí mật sâu thẳm nhất, những ánh sáng đầu tiên của thời tạo thiên lập địa 13,8 tỉ năm ánh sáng trước. Sóng hấp dẫn là khám phá lớn nhất sau khám phá sóng vi ba vũ trụ nền 50 năm trước của Amo Penzias và Robert Wilson tại Bell Lab, và sự kiện quan trọng nhất sau năng lượng tối.



Thí dụ sóng hấp dẫn như sóng gợn trong tấm vải không-thời-gian (Courtesy of Brian Greene)

Năm 1916 - 1918, Einstein là người đã dựa trên các phương trình trường hấp dẫn của thuyết tương đối rộng tiên đoán hiện tượng sóng hấp dẫn này. Theo thuyết tương đối rộng, khối lượng

và năng lượng sẽ gây ra một sự cong nhất định cho tấm vải vũ trụ không-thời-gian. Nếu khối lượng và năng lượng này đứng yên, thì tấm vải cong đó đứng yên, giống như một tấm trampolin (lưới, hay bạt nhúng) bị cong đứng yên. Nhưng nếu vật chất chuyển động tới lui, thì nó sẽ gây ra những đợt sóng lên xuống, tấm lưới nhúng sẽ chuyển động lên xuống, hoặc như sóng trên mặt nước. Đó là sóng của các độ cong xuyên qua không-thời-gian. Một supernova nổ cũng gây ra các sóng hấp dẫn. Chúng gây ra sự biến dạng của không gian và truyền đi.

Tháng 3 cũng là tháng sinh nhật của Einstein (ngày 14). Thật là một khám phá tuyệt vời, một trong những khám phá "có ý nghĩa nhất trong lịch sử khoa học" như một nhà thiên văn học của M.I.T. nói, có lẽ để mừng sinh nhật thứ 135 của Einstein. Sóng hấp dẫn là tiên đoán cuối cùng của thuyết tương đối rộng Einstein còn chưa được kiểm chứng tuy còn phải được đo đạc thêm một lần nữa, nhưng giờ đây có cơ sở trở thành sự thật như một ngọn hải đăng được thắp sáng lên trong cái biển tri thức mênh mông.

Tháng 3, Xuân Giáp Ngọ 2014 NGUYỄN XUÂN XANH

T.B. (2015) Kết quả về sóng hấp dẫn vũ trụ ban sơ chưa ngã ngũ hẳn, vì bụi vũ trụ đã gây cản trở trong đo đạc. Cho nên công việc này còn đang tiếp tục.

LỜI NÓI ĐẦU

Cuốn sách nhỏ này mong muốn truyền đạt một sự hiểu biết thấu đáo như có thể được về Lý thuyết tương đối đến những bạn đọc mà, từ một quan điểm triết học và khoa học tổng quát, có mối quan tâm đến lý thuyết, nhưng không nắm vững công cụ toán học của ngành vật lý lý thuyết. Cuốn sách tuy ngắn, nhưng đòi hỏi ở phía người đọc một trình độ học vấn phổ thông, khá nhiều kiên nhẫn và ý chí mạnh. Tác giả đã nỗ lực cao nhất để trình bày những ý tưởng cơ bản cho rõ ràng và dễ hiểu, và xét toàn bộ, đúng theo trình tự và mối quan hệ mà chúng đã thực sự hình thành. Lấy sự sáng tỏ làm trọng, tôi thấy không thể tránh khỏi việc lặp đi lặp lại mà không chú ý đến vẻ thanh nhã trong cách trình bày. Tôi tuân thủ nguyên tắc của nhà vật lý lý thuyết thiên tài L. Boltzmann: ta nên để vẻ thanh nhã cho người thợ may hay thợ giày chăm chút. Tôi tin mình không giấu giếm trước bạn đọc những rối rắm vốn nằm sẵn trong bản chất của sự vật. Ngược lại, tôi đã trình bày các cơ sở vật lý và thực nghiệm của lý thuyết một cách "ghẻ lạnh", để những bạn đọc nào ít quen thuộc hơn với vật lý sẽ không có cảm giác như một người đi dạo chỉ thấy cây mà chẳng thấy rừng. Hy vọng quyển sách mang lại cho ai đó những giờ hứng khởi của sự gợi mở.

ALBERT EINSTEIN

Tháng 12 năm 1916

Phần 1
THUYẾT TƯƠNG ĐỐI HẸP
(§ 1 - § 17)

§ 1

Ý Nghĩa Vật Lý của các Định Lý Hình Học

Chắc bạn cũng thế, bạn đọc thân mến, khi hãy còn là một cô hay cậu học trò, bạn đã làm quen với tòa nhà kiêu hãnh của hình học *Euclid*, và có lẽ nhớ lại, với sự kính trọng hơn là với lòng yêu mến, đã bị rượt đuổi loanh quanh trên những bậc thang cao của nó trong vô số giờ học bởi các thầy cô tận tâm. Với kinh nghiệm của quá khứ này, chắc bạn sẽ trừng phạt bằng sự khinh miệt, nếu có ai đó dám tuyên bố, một định lý nhỏ dù xa vời nhất nào của môn khoa học này là sai. Nhưng có lẽ cảm giác của sự đoan chắc hãnh diện này sẽ rời bỏ bạn ngay nếu ai đó hỏi bạn: "Vậy thì bạn nghĩ gì khi khẳng định các định lý này là chân lý?^[9]" Chúng ta hãy dừng lại ở câu hỏi này một chút.

Hình học phát xuất từ những khái niệm cơ bản nhất định, như "mặt phẳng", "điểm", "đường thẳng" mà chúng ta có khả năng hình dung ít nhiều rõ nét, và từ một số mệnh đề (định đề) đơn giản nhất định mà dựa trên cơ sở của những hình dung kia chúng ta có khuynh hướng cho là "chân lý". Tất cả những định lý còn lại sau đó đều được quy về các định đề trên, nghĩa là được chứng minh, trên cơ sở một phương pháp logic mà tính chính đáng của nó chúng ta thấy bị bắt buộc phải công nhận. Một định lý sau đó được xem là đúng, hay "chân lý", nếu nó được suy diễn từ các định đề bằng phương pháp đã được công nhận. Câu hỏi về "chân lý" của các định lý hình học riêng lẻ do đó được quy về câu hỏi về tính "chân lý" của các định đề. Nhưng từ lâu người ta được biết rằng, câu hỏi sau cùng không những không thể trả lời được bằng những phương pháp của hình học, mà bản thân nó tuyệt nhiên cũng không có ý nghĩa. Người ta không thể hỏi có đúng hay không đúng, rằng qua hai điểm chỉ có một đường thẳng đi qua. Người ta chỉ có thể nói rằng, hình học *Euclid* có đối tượng là

các hình dạng mà nó gọi là "đường thẳng", và quy cho nó (đường thẳng) tính chất được xác định một cách duy nhất bằng hai điểm trên đó. Khái niệm "chân lý" không thích hợp với các mệnh đề của hình học thuần túy, vì với khái niệm "chân lý", chúng ta chủ yếu luôn luôn quen hiểu sự trùng hợp của nó với một vật thể "thật"^[10]. Tuy nhiên, hình học không quan tâm đến mối quan hệ giữa các khái niệm của nó với các đối tượng của kinh nghiệm, mà chỉ quan tâm đến mối quan hệ logic của các khái niệm này với nhau mà thôi.

Lý do khiến chúng ta mặc dù thế vẫn bị cám dỗ gọi các định lý của hình học là "chân lý" có thể được giải thích dễ dàng. Các khái niệm hình học tương ứng với các đối tượng ít nhiều chính xác trong tự nhiên, và những điều này, không nghi ngờ, chính là nguồn gốc duy nhất của sự hình thành các khái niệm kia. Có thể để tạo sự thống nhất logic lớn nhất khả dĩ cho tòa nhà của nó, hình học đã tránh né quá trình hình thành đó. Lệ thường, thí dụ như nhìn thấy một khoảng cách qua hai vị trí được đánh dấu trên một vật thể gần như rắn^[11], đã hằn sâu trong các thói quen tư duy chúng ta. Hơn nữa chúng ta cũng có thói quen chấp nhận coi ba vị trí là cùng nằm trên một đường thẳng khi chúng ta làm cho các vị trí hiển nhiên của chúng trùng lên nhau khi ta nhìn chúng bằng một mắt, với một sự chọn lựa thích hợp vị trí quan sát của chúng ta.

Nếu bây giờ, tiếp tục thói quen suy nghĩ, chúng ta bổ sung vào các định lý của hình học Euclid một định lý duy nhất, nói rằng hai điểm của một vật thể thực tế rắn luôn luôn tương ứng với cùng một khoảng cách (đoạn đường^[12]), không phụ thuộc vào các thay đổi vị trí chúng ta muốn cho vật thể, thì những định lý hình học Euclid sẽ biến thành những định lý về vị trí tương đối có thể có của những vật thể thực tế rắn^[13]. Hình học được bổ sung bằng cách đó được xem như một ngành của vật lý. Bây giờ chúng ta có thể hỏi một cách chính đáng về "chân lý" của những định lý hình học được diễn giải bằng cách đó, bởi vì chúng ta có thể hỏi, những định lý kia có đúng cho những vật thể thực tiễn mà chúng ta đã liên kết với những khái niệm hình học hay không. Một cách ít chính xác hơn, chúng ta do đó có thể nói, dưới từ "chân lý" của một định lý hình học trong nghĩa này, chúng ta hiểu tính hiệu lực của nó cho một phép vẽ^[14] bằng thước và

compa.

Dĩ nhiên sự tin tưởng vào "chân lý" của các định lý hình học theo nghĩa này hoàn toàn dựa trên những kinh nghiệm khá không đầy đủ. Ở giai đoạn hiện tại, chúng ta trước hết sẽ giả định "chân lý" kia của các định lý hình học, để rồi sau đó trong phần cuối của sự khảo sát (phần thuyết tương đối rộng) của cuốn sách, chúng ta sẽ thấy rằng "chân lý" này sẽ có giới hạn, và giới hạn đến đâu.

§ 2

Hệ Thống Tọa Độ

Trên cơ sở diễn giải vật lý của khoảng cách như vừa được phác họa, chúng ta cũng có khả năng xác định khoảng cách hai điểm của một vật thể rắn bằng những sự đo đạc. Để làm việc đó, chúng ta cần một "khoảng cách" (thanh đo con S) dùng cho tất cả lần đo, được sử dụng như đơn vị đo lường. Nếu giờ A và B là hai điểm của một vật thể rắn, thì đường thẳng nối liền chúng có thể được xây dựng theo các định luật hình học; sau đó, người ta có thể đặt thanh đo con S nối đuôi nhau từ A cho đến khi đạt đến B . Số lần lặp lại của thanh đo chính là số đo của khoảng cách AB . Tất cả các phép đo chiều dài đều dựa trên phương pháp này^[15].

Mỗi sự mô tả về không gian của vị trí của một sự kiện^[16] hay đối tượng, được thực hiện khi người ta cho biết điểm của một vật thể rắn (vật thể quy chiếu) trùng với sự kiện kia. Điều này không những đúng cho sự mô tả khoa học mà còn cho cuộc sống hàng ngày. Nếu tôi phân tích sự chỉ báo vị trí^[17] "Quảng trường Mê Linh tại Thành phố Hồ Chí Minh"^[18] thì nó có nghĩa như sau: Mặt đất là một vật thể rắn trên đó thông tin về vị trí được cho biết (quy chiếu); ở đó "Quảng trường Mê Linh tại Thành phố Hồ Chí Minh" là một điểm được đánh dấu và được gán một cái tên, điểm mà sự kiện kia trùng khớp về không gian với nó^[19].

Cách xác định vị trí thô thiển này chỉ biết đến các vị trí ở bề mặt của các vật thể rắn và nó gắn liền với sự hiện hữu của nhiều điểm có thể phân biệt được của bề mặt này. Chúng ta hãy xem tinh thần con người tự giải phóng khỏi hai giới hạn này như thế nào mà không làm cho bản chất của cách xác định vị trí thay đổi! Nếu chẳng hạn trên Quảng trường Mê Linh có một đám mây lơ lửng, thì vị trí của đám mây này, quy về bề mặt quả đất, có thể được xác định bằng cách người ta thiết lập tại quảng trường một cái sào thẳng góc, và cao đến đám mây. Chiều dài của cây sào, được đo với một thanh đo đơn vị chuẩn, cùng với sự xác định vị trí của điểm chân của cây sào, làm thành sự xác định đầy đủ vị trí của đám mây. Qua thí dụ này, chúng ta thấy cách thức mà sự tinh tế hóa của khái niệm vị trí đã diễn ra.

a) Chúng ta mở rộng ra vật thể rắn, như là hệ quy chiếu cho sự

xác định vị trí, sao cho vật thể rắn được nói rộng kia bắt gặp đối tượng cần được định vị.

b) Để đặc trưng vị trí, người ta sử dụng *con số* (ở đây là chiều dài của cây sào được đo bằng thanh đo) thay vì các điểm được đánh dấu.

c) Chúng ta vẫn nói đến chiều cao của đám mây, ngay cả khi cây sào đo, đáng lẽ phải cao đến đám mây, không được dựng lên. Trong trường hợp của chúng ta, bằng những cách quan sát quang học đám mây từ nhiều vị trí khác nhau từ mặt đất, và để ý đến những tính chất truyền của ánh sáng, chúng ta xác định được cái sào kia cần phải dài bao nhiêu để đạt tới đám mây.

Từ suy nghĩ này chúng ta thấy rằng để mô tả vị trí, chúng ta có lợi hơn nếu có thể sử dụng các số đo, để làm cho mình độc lập với sự tồn tại của những điểm được đánh dấu trên vật thể rắn quy chiếu. Vật lý đo đạc thực hiện được điều này bằng việc áp dụng hệ thống tọa độ Descartes (Đề-Các).

Hệ thống tọa độ này bao gồm ba mặt phẳng thẳng góc nhau và gắn vào một vật thể rắn. Vị trí của một sự kiện bất kỳ đối với hệ tọa độ (về cơ bản) sẽ được mô tả bằng sự xác định chiều dài của ba đoạn, hay của tọa độ (x, y, z) , (so sánh ảnh 2, tr. 34), chạy thẳng góc từ sự kiện xuống các mặt phẳng. Chiều dài của ba đoạn thẳng góc này có thể được xác định bởi một loạt thao tác với các thanh đo rắn, được quy định bởi các định luật và phương pháp của hình học Euclid.

Trong thực tế, các mặt phẳng rắn kia làm nên hệ thống tọa độ thường không được thực hiện; các tọa độ cũng không được xác định thực sự bằng cách đo đạc với những thanh đo rắn, mà bằng những cách gián tiếp. Tuy nhiên ý nghĩa vật lý của các thông số về vị trí phải luôn luôn được bảo đảm cho phù hợp với những suy nghĩ trên, nếu các kết quả của vật lý và thiên văn học muốn duy trì sự sáng sủa của chúng^[20].

Do đó chúng ta có kết luận sau đây: Mỗi một sự mô tả về không gian của các sự kiện đều sử dụng một vật thể rắn, trên đó các sự kiện được quy chiếu. Mối liên hệ đó bảo đảm rằng các định luật hình học Euclid là đúng cho các "khoảng cách", và "khoảng cách" được biểu thị về mặt vật lý học bằng hai đầu mốc trên một

vật thể rắn.

§ 3

Không Gian và Thời Gian trong Cơ Học Cổ Điển

Nếu không có một sự suy tư nghiêm chỉnh và những lời giải thích chi tiết về nhiệm vụ của cơ học, "là biểu thị các vật thể thay đổi vị trí của chúng trong không gian theo thời gian như thế nào", thì lương tâm tôi sẽ cảm thấy tội lỗi trước tinh thần thiêng liêng của sự minh bạch. Những tội danh này trước hết phải được đưa ra ánh sáng.

Ở đây "vị trí" và "không gian" được hiểu là gì, điều đó chưa rõ ràng. Tôi đứng ở cửa sổ của một chiếc xe lửa chạy với một vận tốc đều, và buông một hòn đá rơi xuống nền đường ray mà không cho nó thêm một lực ban đầu nào. Bỏ đi ảnh hưởng sức cản của không khí, tôi sẽ thấy hòn đá rơi theo đường thẳng. Một người đi bộ, nhìn thấy hành động xấu này của tôi từ phía đường, ghi nhận rằng hòn đá rơi xuống đất theo đường parabol. Bây giờ tôi hỏi: Những "vị trí" mà hòn đá đã đi qua, "trong thực tế" nằm trên một đường thẳng hay trên một đường parabol? Tiếp đến, chuyển động "trong không gian" có nghĩa gì? Theo những suy nghĩ của § 2, câu trả lời là hiển nhiên. Trước hết chúng ta hãy gác từ ngữ tối nghĩa "không gian" sang một bên, từ ngữ mà thành thật thú nhận chúng ta không thể có một khái niệm tối thiểu nào về nó. Thay vào đó chúng ta xét "chuyển động tương đối với một vật thể quy chiếu thực tế rắn". Vị trí đối với vật thể quy chiếu (là xe lửa hay mặt đất) đã được định nghĩa chi tiết trong chương trước. Bằng cách đưa vào khái niệm "hệ tọa độ" hữu ích cho sự diễn tả toán học, thay cho "vật thể quy chiếu", chúng ta có thể nói: Hòn đá rơi theo một đường thẳng đối với một hệ tọa độ gắn chặt với xe lửa, và theo một đường parabol đối với một hệ tọa độ gắn chặt với mặt đất. Qua thí dụ này người ta thấy rõ không có một quỹ đạo^[21] nói chung, mà chỉ có quỹ đạo đối với một vật thể quy chiếu nào đó mà thôi.

Để có được một sự mô tả đầy đủ của chuyển động, chúng ta phải cho biết vật thể thay đổi vị trí của nó như thế nào theo thời gian, nghĩa là đối với mỗi điểm của quỹ đạo, người ta phải xác định được tại thời điểm nào vật thể ở đó. Những số liệu này phải được hoàn chỉnh bằng một định nghĩa của thời gian, sao cho

những trị số thời gian này, bằng định nghĩa đó, có thể được xem như các đại lượng có thể quan sát được về nguyên tắc (là kết quả của sự đo đạc). Nếu đứng trên miếng đất của cơ học cổ điển, chúng ta có thể thỏa mãn được yêu cầu này trong thí dụ của chúng ta bằng cách sau. Chúng ta tưởng tượng có hai đồng hồ được cấu tạo giống nhau; một cái ở trên tay của người đứng cạnh của số xe lửa, một cái ở trên tay của người đi bộ trên mặt đất. Mỗi người trong họ xác định hòn đá ở vị trí nào trên vật thể quy chiếu của anh ta khi đồng hồ trên tay anh ta vừa kêu tíc. Ở đây chúng ta không đi sâu vào sự thiếu chính xác gây ra bởi vận tốc truyền giới hạn của ánh sáng. Về điều này, và về một khó khăn thứ hai tiềm tàng ở đây, chúng ta sẽ nói một cách chi tiết sau.

§ 4

Hệ Tọa Độ Galilei

Định luật cơ bản của cơ học *Galilei - Newton* được biết dưới cái tên *Định luật quán tính* có nội dung như sau: Một vật thể, ở đủ xa các vật thể khác^[22], khẳng khẳng ở trong trạng thái đứng yên hay trạng thái của một chuyển động đều trên một đường thẳng. Định lý này phát biểu không chỉ một cái gì đó về sự chuyển động của các vật thể, mà còn về các vật thể quy chiếu được cho phép trong cơ học, hay các hệ tọa độ, có thể được phép sử dụng trong việc mô tả cơ học. Các vật thể (quy chiếu), mà định luật quán tính chắc chắn có thể áp dụng với độ xấp xỉ lớn, là những vì sao cố định có thể thấy được. Nếu bây giờ chúng ta sử dụng một hệ tọa độ gắn chặt với trái đất, thì đối với nó, mỗi vì sao cố định sẽ vẽ lên trong thời gian một ngày (thiên văn) một quỹ đạo là một vòng tròn với đường kính khổng lồ, điều mâu thuẫn với nội dung của định luật quán tính. Do đó, nếu theo sát định luật quán tính, thì chúng ta chỉ được phép quy chiếu các chuyển động lên các hệ tọa độ, mà đối với chúng, các vì sao cố định không vẽ lên các chuyển động tròn. Một hệ tọa độ, mà trạng thái chuyển động của nó có tính chất như thế, để cho đối với nó định luật quán tính có hiệu lực, chúng ta gọi là một "hệ tọa độ *Galilei*". Chỉ đối với một hệ tọa độ *Galilei* thì các định luật của cơ học *Galilei - Newton* mới được xem là có hiệu lực.

§ 5

Nguyên Lý Tương Đối (Theo Nghĩa Hẹp)

Chúng ta lại xuất phát từ thí dụ của chiếc xe lửa chạy với vận tốc đều, để có được sự rõ ràng lớn như có thể. Chúng ta gọi chuyển động của nó là chuyển động tịnh tiến đều ("đều" vì vận tốc và hướng của nó không thay đổi, "chuyển động tịnh tiến" vì xe tuy thay đổi vị trí đối với nền ray nhưng nó không thực hiện chuyển động quay). Chúng ta tưởng tượng một con quạ bay thẳng và đều trong không khí - nếu chúng ta quan sát từ nền ray. Quan sát từ chiếc xe chạy, chuyển động của con quạ là một chuyển động tuy với vận tốc và phương hướng khác, nhưng nó cũng là thẳng và đều. Diễn tả một cách trừu tượng: Một khối lượng m chuyển động thẳng và đều đối với một hệ tọa độ K , thì nó chuyển động cũng thẳng và đều đối với một hệ tọa độ thứ hai K' , nếu hệ này có một chuyển động tịnh tiến đều đối với K . Từ đây chúng ta có kết luận, phù hợp với trình bày của chương trước:

Nếu K là một hệ tọa độ *Galilei*, thì mỗi một hệ tọa độ khác K' cũng là *Galilei*, nếu hệ đó ở trong trạng thái một chuyển động tịnh tiến đều đối với K . Các định luật của cơ học *Galilei - Newton* có giá trị đối với K' , cũng như đối với K .

Chúng ta đi thêm một bước nữa trong việc tổng quát hóa bằng cách phát biểu nguyên lý: Nếu K' là một hệ tọa độ chuyển động đều và không quay đối với K thì các sự kiện tự nhiên đối với K' diễn biến theo cùng các định luật tổng quát như đối với K . Tính chất này chúng ta gọi là *Nguyên lý tương đối* (theo nghĩa hẹp).

Chừng nào người ta còn tin rằng tất cả các sự kiện thiên nhiên được mô tả bằng cơ học cổ điển, thì người ta không thể nghi ngờ hiệu lực của nguyên lý tương đối này. Tuy nhiên, với sự phát triển mới của điện động học và quang học thì rõ ràng cơ học cổ điển ngày càng không còn là nền tảng đầy đủ của mọi sự mô tả tự nhiên. Do đó câu hỏi về hiệu lực của nguyên lý tương đối trở thành vấn đề đáng thảo luận. Và người ta không loại trừ câu trả lời có thể là phủ định.

Tuy nhiên, có hai sự thật phổ quát hỗ trợ mạnh mẽ hiệu lực

của nguyên lý tương đối ngay từ đầu. Cho dù cơ học cổ điển không cung cấp được một cơ sở đủ rộng cho sự mô tả bằng lý thuyết cho *tất cả* các sự kiện vật lý, nó vẫn có một hàm lượng chân lý rất quan trọng; bởi vì nó cung cấp những chuyển động thực tế của các thiên thể với độ chính xác đáng ngưỡng mộ. Do đó, trong mọi trường hợp nguyên lý tương đối cũng phải có hiệu lực trong lĩnh vực *cơ học* với độ chính xác cao. Một nguyên lý với tính phổ quát cao, có hiệu lực trong một lĩnh vực của các hiện tượng tự nhiên với độ chính xác cao như thế, nhưng lại không có hiệu lực trong một lĩnh vực khác của các hiện tượng tự nhiên, điều đó, một cách tiên nghiệm, hiếm có thể xảy ra.

Lý do thứ hai mà chúng ta sẽ trở lại sau là thế này. Nếu nguyên lý tương đối (theo nghĩa hẹp) không có hiệu lực, thì các hệ tọa độ Galilei chuyển động đều đối với nhau K, K', K'', \dots sẽ không có giá trị *tương đương* nhau trong việc mô tả các hiện tượng tự nhiên. Lúc đó khó có thể nghĩ khác hơn rằng, các định luật tự nhiên chỉ được biểu thị một cách đặc biệt đơn giản và tự nhiên khi trong tất cả các hệ tọa độ Galilei có thể có, chúng ta chọn ra được một hệ (K^0) với một trạng thái chuyển động nhất định để làm vật thể quy chiếu. Chúng ta được phép gọi một cách chính đáng hệ tọa độ này là hệ "tuyệt đối đứng yên" (bởi những ưu điểm của nó trong việc mô tả các hiện tượng tự nhiên), trong khi những hệ *Galilei* còn lại K là hệ "chuyển động". Nếu chẳng hạn nền đường sắt chúng ta là hệ K_0 , thì xe lửa của chúng ta một hệ K , mà đối với nó, ta có các định luật được mô tả ít đơn giản hơn là đối với K_0 . Sự đơn giản bị giảm đi này bắt nguồn từ việc xe lửa K là chuyển động ("thực") đối với K_0 . Trong các định luật tự nhiên phổ quát được mô tả đối với K phải có vai trò của độ lớn và phương hướng vận tốc chuyển động của xe. Chẳng hạn người ta chờ đợi âm thanh phát ra từ một ống sáo của dàn đại phong cầm sẽ khác đi nếu ống đó được đặt song song với chiều xe chạy thay vì thẳng góc. Nhưng bây giờ trái đất chúng ta, do chuyển động của nó xung quanh mặt trời, có thể so sánh với chiếc xe lửa chạy với tốc độ khoảng 30km một giây. Vì thế, trong trường hợp thuyết tương đối mất hiệu lực, người ta chờ đợi hướng chuyển động tức thời của quả đất sẽ có ảnh hưởng vào các định luật tự nhiên, sự vận hành của các hệ thống vật lý do đó sẽ phải tùy thuộc vào định hướng không gian của chúng đối với trái đất. Bởi

vì do sự thay đổi hướng vận tốc của chuyển động quay của quả đất trong năm, nên quả đất không thể được xem là đứng yên cả năm đối với hệ giả định K_0 . Tuy nhiên, với tất cả sự thận trọng, người ta không hề quan sát được một sự bất đẳng hướng như thế của không gian vật lý trên trái đất, nghĩa là một tính chất bất tương đương vật lý của các hướng khác nhau. Đây là một lý lẽ nặng ký có lợi cho nguyên lý tương đối.

§ 6

Định Lý Cộng của Vận Tốc Theo Cơ Học Cổ Điển

Chiếc xe lửa thường được đưa ra làm thí dụ bây giờ được giả thiết chạy với vận tốc đều v trên đường ray. Trong xe lửa có một người đi bộ dọc theo chiều dài của nó, và đi theo chiều chạy của xe với vận tốc w . Câu hỏi đặt ra: Người kia đi nhanh chậm thế nào, hay nói cách khác, với vận tốc w nào về phía trước đối với nền ray trong quá trình đi của anh ta? Câu trả lời duy nhất có thể có dường như xuất phát từ suy nghĩ sau đây:

Nếu người đó đứng yên trong một giây, thì đối với nền ray anh ta sẽ đi về phía trước được một đoạn v bằng vận tốc chuyển động của xe. Nhưng trong thực tế anh ta còn đi đối với xe, do đó cũng đối với nền ray thêm một đoạn là w trong giây này, bằng vận tốc đi bộ của anh ta. Do đó đối với nền ray, trong một giây đang xét, anh ta đã đi tổng cộng một đoạn bằng:

$$W = v + w$$

Chúng ta sẽ thấy suy nghĩ này, suy nghĩ mà từ đó phát sinh ra định lý cộng vận tốc theo cơ học cổ điển, sẽ không thể đứng vững được; nói cách khác, định luật vừa được mô tả trong thực tế là không đúng. Tuy nhiên tạm thời chúng ta chấp nhận tính đúng đắn của nó.

§ 7

Về Mâu Thuẫn của Định Luật Truyền Ánh Sáng với Nguyên Lý Tương Đối

Hầu như không có một định luật nào trong vật lý đơn giản hơn định luật theo đó ánh sáng truyền đi trong chân không. Mọi em học sinh đều biết, hay tin mình biết, rằng sự truyền này diễn ra theo đường thẳng với một vận tốc $c = 300.000\text{km/giây}$. Trong mọi trường hợp chúng ta biết với độ chính xác cao, vận tốc này không thay đổi đối với mọi màu sắc; vì nếu điều đó không đúng, độ cực tiểu của phát xạ sẽ không được quan sát đồng thời cho nhiều màu khác nhau khi một ngôi sao cố định bị che khuất bởi một ngôi sao láng giềng tối. Bằng một quan điểm tương tự, dựa trên các quan sát của các sao kép, nhà thiên văn học Hà Lan De Sitter cũng có thể chứng minh rằng vận tốc truyền của ánh sáng không thể phụ thuộc vào vận tốc chuyển động của vật thể phát ra ánh sáng đó. Giả định nói rằng vận tốc truyền của ánh sáng lệ thuộc vào phương hướng "trong không gian", điều tự nó không thể được.

Nói tóm lại, chúng ta hãy giả thiết rằng các học sinh đã tin tưởng vào định luật đơn giản về vận tốc hằng số của ánh sáng c (trong chân không) một cách chính đáng! Nhưng ai lại dám nghĩ rằng chính định luật đơn giản này đã đẩy những nhà vật lý học sâu sắc và trung thực vào những khó khăn lớn nhất? Những khó khăn này hình thành như sau.

Dĩ nhiên chúng ta phải quy chiếu quá trình truyền ánh sáng cũng như mọi quá trình khác lên một vật thể quy chiếu rắn (hệ tọa độ). Chúng ta chọn nền ray làm một hệ như thế, và tưởng tượng đã bơm hết không khí ra khỏi bầu trời trên đó. Dọc theo nền ray một tia sáng được phóng đi, điểm đỉnh đầu của nó được truyền đi, theo định luật trên, với vận tốc c đối với nền ray. Trên đường ray, chiếc xe lửa chúng ta lại chạy với vận tốc v , cùng một chiều với chiều ánh sáng truyền đi, nhưng dĩ nhiên chậm hơn nhiều. Chúng ta hỏi vận tốc truyền của tia sáng đối với xe lửa. Dễ dàng nhìn thấy suy nghĩ của chương trước có thể được áp dụng ở đây, với người đi bộ trong xe đóng vai trò tia sáng. Thay vì vận tốc w của anh ta đối với nền ray thì ở đây chúng ta có vận tốc c của ánh sáng đối với nền ray; w là vận tốc muốn tìm của ánh

sáng đối với xe lửa. Do đó ta có:

$$w = c - v$$

Vận tốc truyền của tia sáng đối với xe lửa như thế nhỏ hơn c .

Kết quả này vi phạm nguyên lý tương đối đã được trình bày trong § 5. Bởi vì, theo nguyên lý đó, định luật truyền ánh sáng trong chân không, cũng như tất cả định luật tự nhiên phổ quát khác, phải giống nhau đối với xe lửa và nền ray, được xem như những vật thể quy chiếu. Nhưng theo suy nghĩ trên, điều này xem ra không thể được. Nếu mỗi tia sáng truyền đi với vận tốc c đối với nền ray, thì với lý do này định luật truyền ánh sáng đối với xe lửa phải khác đi - điều mâu thuẫn với nguyên lý tương đối.

Trước tình hình khó xử này, chúng ta cảm thấy không thể không từ bỏ một trong hai cái, hoặc nguyên lý tương đối, hoặc định luật đơn giản của sự truyền ánh sáng trong chân không. Chắc hẳn bạn đọc nào đã chăm chú theo dõi các phần trình bày đến nay sẽ cho rằng nên giữ nguyên nguyên lý tương đối, vì nó tỏ ra hầu như không thể bác bỏ được đối với lý trí bởi tính đơn giản và tự nhiên của nó. Ngược lại, nên thay định luật truyền ánh sáng trong chân không bằng một định luật khác phức tạp hơn, và dung hợp được với nguyên lý tương đối. Tuy nhiên, sự phát triển của vật lý lý thuyết chứng minh rằng con đường này không thể đi được. Các công trình nghiên cứu lý thuyết mang tính thời đại của H.A. Lorentz về các hiện tượng điện động học và quang học trong các vật thể chuyển động thực tế đã chứng minh rằng những kinh nghiệm trong những lĩnh vực này tất yếu dẫn đến một lý thuyết về các hiện tượng điện từ, mà ở đó định luật hằng số của vận tốc ánh sáng trong chân không là một hệ luận không thể bác bỏ được. Cho nên các nhà vật lý học hàng đầu có khuynh hướng muốn bỏ rơi nguyên lý tương đối, mặc dù không có một chứng cứ thực nghiệm nào được tìm thấy có thể phản bác lại nó cả.

Nhưng chính ở ngã ba đường này thuyết tương đối đã bước vào đấu trường để can thiệp. Một sự phân tích các khái niệm thời gian và không gian chứng minh rằng sự thật không có mâu thuẫn giữa nguyên lý tương đối và định luật truyền ánh sáng, nói đúng hơn, bằng cách bám sát một cách có hệ thống vào hai định luật

này, người ta sẽ tiến đến một lý thuyết hoàn hảo về mặt logic. Lý thuyết này, chúng ta gọi là "thuyết tương đối hẹp" để phân biệt với sự mở rộng của nó được đề cập sau, sau đây sẽ được trình bày với những ý tưởng cơ bản của nó.

§ 8

Khái Niệm Thời Gian trong Vật Lý

Tại hai vị trí A và B cách xa nhau trên nền ray giả thiết có sét^[23] đánh. Tôi giả thiết thêm là hai tia chớp xảy ra *đồng thời*. Nếu giờ tôi hỏi, bạn đọc thân mến, rằng câu nói đó có ý nghĩa gì không, thì bạn sẽ trả lời "có" một cách vững tin. Nhưng nếu tôi tiến thêm một bước nữa, yêu cầu bạn giải thích ý nghĩa của câu nói một cách chính xác hơn, thì sau vài lúc suy nghĩ, bạn sẽ nhận thấy rằng, câu trả lời cho câu hỏi này không đơn giản như bạn đã tưởng ban đầu.

Sau một lát, có thể câu trả lời sau đây sẽ đến với bạn: "Ý nghĩa của câu nói thực ra tự nó đã rõ và không cần phải được giải thích thêm; tuy nhiên tôi cần suy nghĩ thêm một ít, nếu tôi được giao phó nhiệm vụ, bằng cách quan sát, xác định xem trong trường hợp thực tiễn hai sự kiện có xảy ra đồng thời hay không." Nhưng với câu trả lời này tôi không thể hài lòng, vì lý do sau đây. Giả thiết, một nhà khí tượng học lão luyện, bằng những suy nghĩ thông minh của ông, đã tìm thấy rằng tại hai nơi A và B sét phải luôn luôn đánh cùng một lúc, thì chúng ta đối mặt với nhiệm vụ là phải kiểm tra xem kết quả lý thuyết này có tương thích với thực tiễn hay không.

Tương tự như thế đối với tất cả những mệnh đề^[24] vật lý mà ở đó khái niệm "đồng thời" đóng một vai trò. Khái niệm chỉ tồn tại đối với nhà vật lý khi có điều kiện để kiểm chứng xem trong trường hợp thực tiễn khái niệm đó đúng hay không. Vậy thì cần có một định nghĩa như thế về tính đồng thời, để đưa ra một phương pháp, theo đó, trong trường hợp đang đề cập, có thể quyết định từ các thí nghiệm để xem các tia sét đánh đã xảy ra đồng thời hay không. Bao lâu đòi hỏi này không được thỏa mãn thì tôi, với tư cách là nhà vật lý (và cũng cho những người không phải nhà vật lý nữa) tự để mình rơi vào ảo tưởng khi tin rằng mình đã cho phát biểu về tính đồng thời một ý nghĩa (trước khi bạn thừa nhận với tôi điểm này một cách thấy thuyết phục, xin đừng đọc tiếp nữa.)

Sau một thời gian suy nghĩ, bạn sẽ làm đề nghị sau đây nhằm kiểm tra tính đồng thời. Đoạn đường nối AB sẽ được đo dọc theo

đường ray, và một người quan sát sẽ được đặt vào điểm giữa M của nó. Người quan sát được cung cấp một thiết bị (hai tấm gương đặt nghiêng nhau một góc 90° chẳng hạn) cho phép anh ta quan sát bằng mắt hai vị trí A và B cùng một lúc. Nếu người này nhận được hai tia chớp cùng một lúc, thì hai tia sét xảy ra là đồng thời.

Tôi rất hài lòng với đề xuất này, nhưng vẫn xem sự việc chưa hoàn toàn được giải tỏa, bởi tôi thấy còn cần phải nêu lên quan ngại sau đây: "Định nghĩa của bạn là hoàn toàn đúng, nếu tôi biết rằng ánh sáng, cái làm cho người quan sát tại M cảm nhận tia chớp của sét, truyền đi cùng một vận tốc dọc theo đoạn $A \rightarrow M$ cũng như dọc theo đoạn $B \rightarrow M$. Nhưng một sự kiểm tra giả thuyết này chỉ có thể, khi người ta đã có được phương tiện để đo thời gian. Như vậy người ta dường như chỉ chạy trong vòng luẩn quẩn lý luận."

Sau một thời gian suy nghĩ thêm, bạn sẽ nhìn tôi một cách miệt thị, nhưng chính đáng, và giải thích: "Mặc dù thế, tôi vẫn giữ vững định nghĩa của tôi trước đây, vì nó thực tế không giả định gì về ánh sáng. Chỉ có một đòi hỏi đặt ra cho định nghĩa tính đồng thời, là trong mỗi trường hợp thực tiễn nó cho ra được một quyết định thực nghiệm để xem khái niệm cần được định nghĩa có được thỏa mãn hay không. Không thể chối cãi, định nghĩa của tôi đã đạt được điều này. Việc ánh sáng cần cùng một thời gian để đi đoạn đường $A \rightarrow M$ và đi đoạn đường $B \rightarrow M$ trong thực tế không phải là *giả định* [25] hay *giả thuyết* [26] về bản chất vật lý của ánh sáng, mà là một *sự quy định* [27] tôi có thể đặt ra một cách tự ý, để đi đến một định nghĩa của tính đồng thời."

Rõ ràng định nghĩa này có thể được sử dụng để mang lại một nghĩa chính xác cho các phát biểu về tính đồng thời, không những của hai sự kiện mà của một số bất kỳ các sự kiện khác, dù các vị trí của các sự kiện nằm bất cứ nơi đâu đối với vật thể quy chiếu (ở đây là nền ray). Bằng cách đó người ta cùng đi đến một định nghĩa cho "thời gian" trong vật lý. Chúng ta hình dung tại các điểm A, B, C của đường ray (hệ tọa độ) [28] được đặt các đồng hồ có cùng một sự cấu tạo để các kim chỉ của chúng đồng thời giống nhau (theo nghĩa trên). Với những điều kiện này, người ta hiểu "thời gian" của một sự kiện là giờ đọc được (vị trí của kim

chỉ) của đồng hồ gần sự kiện nhất (xét về khoảng cách không gian). Bằng cách này đối với mỗi sự kiện người ta định được một trị số thời gian tương ứng, về nguyên tắc có thể quan sát được.

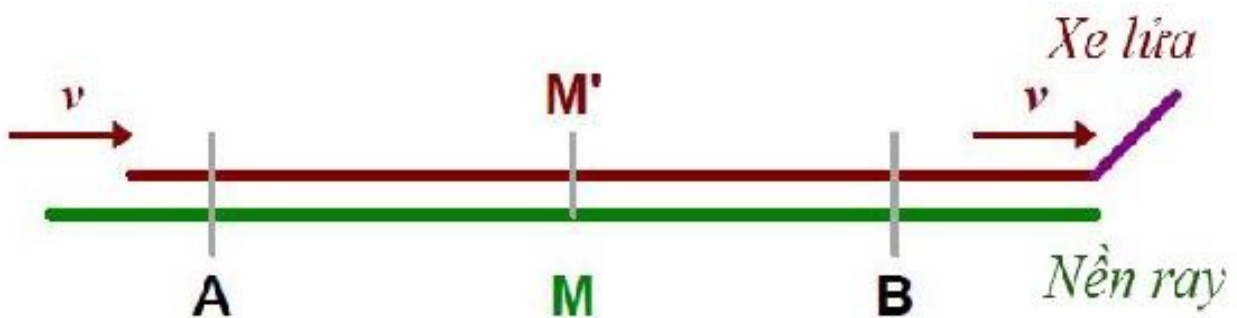
Sự quy định này chứa đựng một giả thuyết vật lý nữa mà người ta hầu như không nghi ngờ tính đúng đắn của nó, nếu không có chứng cứ thực nghiệm đi ngược lại. Nó giả định rằng tất cả đồng hồ này chạy "cùng nhanh" nếu chúng được cấu tạo giống nhau. Diễn tả một cách chính xác: Nếu hai đồng hồ, được đặt trong trạng thái đứng yên tại hai nơi khác nhau của vật thể quy chiếu, được chỉnh như thế nào để *một* vị trí kim của đồng hồ này xảy ra *đồng thời* (theo nghĩa trên) với cùng vị trí kim của đồng hồ kia, thì các vị trí kim giống nhau của chúng luôn luôn xảy ra đồng thời nhau (theo nghĩa của định nghĩa trên).

§ 9

Tính Tương Đối của Tính Đồng Thời

Cho đến giờ chúng ta đã gắn liền suy nghĩ với một vật thể quy chiếu nhất định mà chúng ta gọi là "nền ray". Giả thiết có một chiếc xe lửa rất dài chạy với vận tốc đều v theo chiều như trong Ảnh 1. Những người đi trên chiếc xe lửa này sẽ có lợi thế khi sử dụng chiếc xe lửa như một vật thể quy chiếu rắn: họ quy chiếu tất cả các sự kiện lên chiếc xe. Cũng như thế, tính đồng thời được định nghĩa đối với xe cũng giống như được định nghĩa đối với nền ray. Nhưng bây giờ câu hỏi sau đây sẽ xuất hiện một cách tự nhiên:

Nếu hai sự kiện xảy ra (thí dụ hai tiếng sét tại A và B) đối với nền ray là đồng thời, thì chúng cũng xảy ra đồng thời đối với xe lửa? Chúng ta sẽ chứng minh ngay câu trả lời phải là phủ định.



Ảnh 1

Khi chúng ta nói rằng hai tia sét A và B là đồng thời đối với nền ray, điều đó có nghĩa là: Các tia sáng xuất phát từ các vị trí tiếng sét ở A và B gặp nhau tại trung điểm M của đoạn A-B của nền ray. Các sự kiện A và B cùng tương ứng với các vị trí A và B trên xe lửa. Gọi M' là trung điểm của đoạn A-B của xe đang chạy. Điểm M' này, tuy trùng với điểm M vào lúc sét xảy ra, nhưng lại chuyển động với vận tốc v của xe về phía phải theo bản vẽ. Nếu một người ngồi tại điểm M' trong xe không có vận tốc này, thì anh ta sẽ luôn luôn ở tại điểm M, và các tia sáng của sét xuất phát từ A và B do đó sẽ gặp nhau tại điểm anh ta ngồi. Nhưng thực tế anh ta lại chạy (quan sát từ nền ray) về phía tia sáng được phát ra từ B. Do đó người quan sát sẽ thấy tia sáng phát ra từ B sớm hơn là tia sáng phát từ A. Người quan sát sử dụng xe lửa làm vật

quy chiếu do đó phải đi đến kết luận: tia sét B đã xảy ra sớm hơn tia sét A . Cho nên chúng ta đi đến kết luận quan trọng:

Các sự kiện, đối với nền ray là đồng thời, đối với xe lửa không đồng thời và ngược lại (tính tương đối của tính đồng thời). Mỗi vật thể quy chiếu (hệ tọa độ) có thời gian đặc biệt của nó; một thông tin về thời gian chỉ có ý nghĩa khi vật thể quy chiếu được cho biết, trên đó thông tin về thời gian được quy chiếu.

Trước khi thuyết tương đối ra đời, vật lý học đã luôn giả định âm thầm rằng các thông tin về thời gian có một ý nghĩa tuyệt đối, nghĩa là độc lập với trạng thái chuyển động của vật thể quy chiếu. Việc giả định này không dung hợp với định nghĩa rất hiển nhiên của tính đồng thời, đó là điều chúng ta vừa thấy. Nếu chúng ta từ bỏ nó, sự mâu thuẫn đã được đề cập trong § 7 giữa định luật truyền ánh sáng trong chân không với nguyên lý tương đối sẽ biến mất.

Trước đây nguồn gốc của mâu thuẫn kia là các suy nghĩ của § 6, bây giờ chúng không còn đứng vững được nữa. Ở đó chúng ta đã kết luận rằng, người đi dạo trong xe lửa, đi được khoảng cách w trong một giây đối với xe lửa, cũng đi được khoảng cách này đối với nền ray trong một giây. Nhưng theo các suy nghĩ vừa nói ở trên, thời gian đòi hỏi bởi một hiện tượng nhất định đối với xe lửa không thể bằng khoảng thời gian của cùng hiện tượng xét từ nền ray như vật thể quy chiếu. Cho nên chúng ta không thể cho rằng, người đi bộ trên xe lửa cũng đã đi được khoảng cách w trong một thời gian, nếu xét từ nền ray, cũng bằng một giây.

Ngoài ra, các suy nghĩ của § 6 còn dựa trên một giả định thứ hai, mà dưới ánh sáng của sự xem xét nghiêm ngặt, nó tỏ ra tùy tiện, mặc dù cũng luôn được ngầm hiểu trong thời gian trước thuyết tương đối.

§ 10

Tính Tương Đối của Khái Niệm Khoảng Cách Không Gian

Chúng ta xét hai vị trí nhất định của chiếc xe lửa^[29] chạy dọc theo nền ray với vận tốc v và hỏi về khoảng cách của chúng. Như đã biết, muốn đo khoảng cách, chúng ta cần một vật thể quy chiếu, và quy chiếu lên đó khoảng cách sẽ được đo. Đơn giản nhất là sử dụng chiếc xe làm vật thể quy chiếu (hệ tọa độ). Một quan sát viên đi lại trên xe đo khoảng cách, bằng cách anh ta đặt thước đo của mình theo đường thẳng, chẳng hạn dọc theo sàn toa xe và đánh dấu, rồi tiếp tục lặp đi lặp lại như thế, đến khi anh ta đi từ điểm đánh dấu này đến hết điểm đánh dấu kia. Số lần thước đo được đặt xuống chính là khoảng cách muốn tìm.

Tình hình sẽ khác đi khi khoảng cách ấy được đo từ đường ray. Phương pháp sau đây có thể giúp ích chúng ta. Nếu gọi A' và B' là hai điểm trên xe mà khoảng cách cần được đo, thì hai điểm này chuyển động với vận tốc v dọc theo nền ray. Trước hết chúng ta hỏi về các điểm A và B của nền ray, mà hai điểm A' và B' , nhìn từ nền ray, vừa trùng lên vào một thời điểm t nhất định. Hai điểm A và B này của nền ray có thể xác định được bằng định nghĩa thời gian được cho trong § 8. Từ đó khoảng cách hai điểm A và B này được đo bằng việc áp dụng lặp đi lặp lại của thước đo dọc theo nền ray.

Một cách tiên nghiệm, không có gì bảo đảm được rằng sự đo đạc thứ hai sẽ cho ra cùng kết quả với sự đo đạc thứ nhất. Được đo từ nền ray, chiều dài của xe đo đó có thể khác hơn là chiều dài nếu đo từ chính xe. Tình huống này đưa đến một phản biện thứ hai cần được nêu lên, đi ngược lại sự suy nghĩ xem ra hiển nhiên của § 6, đó là, nếu người đi bộ trong xe trong một đơn vị thời gian đi được đoạn w - *đo từ xe* - thì khoảng cách này - *nếu đo từ nền ray* - cũng không nhất thiết phải bằng w .

§ 11

Phép Biến Đổi Lorentz

Những suy nghĩ của ba chương trước cho chúng ta thấy, về mâu thuẫn của định luật truyền ánh sáng với nguyên lý tương đối trong § 7 đã được suy luận từ một cách nhìn vay mượn hai giả thuyết không gì biện minh được của cơ học cổ điển. Đó là:

Khoảng cách thời gian giữa hai sự kiện là độc lập với trạng thái chuyển động của vật thể quy chiếu.

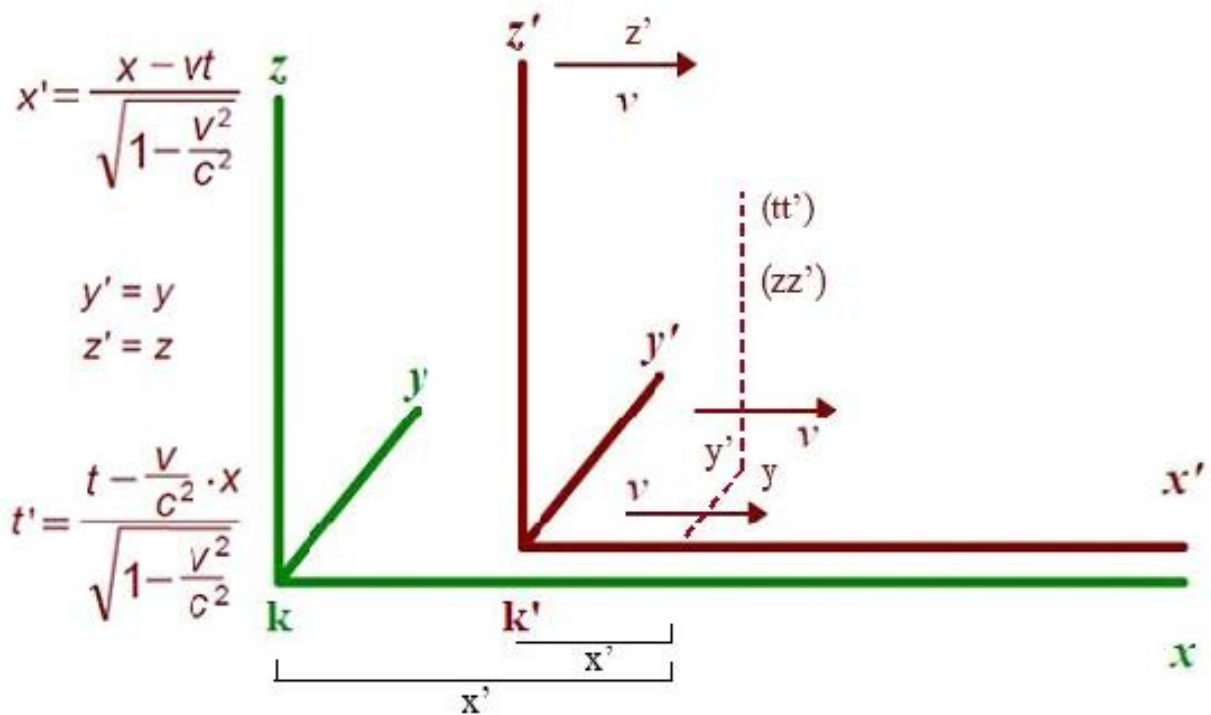
Khoảng cách không gian giữa hai điểm của một vật rắn là độc lập với trạng thái chuyển động của vật thể quy chiếu.

Nếu chúng ta rời bỏ các giả thuyết này, thì mâu thuẫn của § 7 sẽ biến mất, bởi định lý cộng của vận tốc được suy diễn trong § 6 sẽ không còn đúng nữa. Trước mặt chúng ta hiện ra khả năng định luật truyền ánh sáng trong chân không có thể dung hợp được với nguyên lý tương đối. Chúng ta đi đến câu hỏi: phải thay đổi thế nào những suy nghĩ trong § 6 để loại trừ về mâu thuẫn giữa hai kết quả cơ bản này của kinh nghiệm? Câu hỏi này đưa đến một câu hỏi tổng quát. Trong suy nghĩ của § 6 xuất hiện các vị trí và thời gian đối với xe và nền ray. Làm sao chúng ta tìm được vị trí và thời gian của một sự kiện đối với xe lửa, nếu chúng ta biết vị trí và thời gian của sự kiện đối với nền ray? Có chăng một câu trả lời có thể hình dung được cho câu hỏi này, sao cho theo đó, định luật truyền ánh sáng trong chân không không mâu thuẫn với nguyên lý tương đối? Nói một cách khác: Có thể hình dung được một quan hệ giữa vị trí và thời gian của các sự kiện cá nhân đối với hai vật thể quy chiếu, sao cho mỗi tia sáng đối với nền ray và đối với xe lửa có cùng vận tốc truyền là c ? Câu hỏi này dẫn đến câu trả lời khẳng định rất rõ ràng, đến một định luật biến đổi rất rõ ràng cho các đại lượng không gian-thời gian của một sự kiện khi có sự chuyển đổi từ một vật thể quy chiếu này sang vật thể quy chiếu khác.

Trước khi bắt tay vào công việc, chúng ta hãy làm một suy nghĩ chuyển tiếp như sau. Cho đến giờ chúng ta chỉ xét các sự kiện diễn ra dọc theo nền ray, và nền ray đã đóng vai trò như một đường thẳng về mặt toán học. Theo cách suy nghĩ được

trình bày trong § 2, chúng ta có thể tưởng tượng vật thể quy chiếu này được nới rộng ra hai bên và theo chiều thẳng góc lên trên bằng một dàn thước đo sao cho một sự kiện diễn ra bất kỳ ở đâu cũng có thể được định vị đối với bộ khung đo này. Một cách tương tự, chúng ta tưởng tượng chiếc xe lửa đang chạy với vận tốc v được nới rộng ra cả không gian, để cho mỗi sự kiện dù xa xôi cũng được định vị đối với bộ khung đo thứ hai. Chúng ta có thể bỏ qua sự việc sau đây mà không sợ phạm lỗi lớn, là trong thực tế các bộ khung này, do tính chất không xuyên qua được của các vật rắn, không ngừng phá hủy nhau^[30]. Trong mỗi bộ khung như thế chúng ta hình dung ba bức tường thẳng góc nhau được dựng lên và được gọi là "mặt phẳng tọa độ" ("hệ tọa độ"). Như vậy, nền ray tương ứng với một hệ tọa độ K , xe lửa một hệ tọa độ K' . Một sự kiện diễn ra đâu đó sẽ được định vị bằng những đường thẳng góc x, y, z xuống các mặt phẳng tọa độ, và được định vị về thời gian bằng một trị số thời gian t . Cùng sự kiện đó được định vị đối với K' bằng các đại lượng x', y', z', t' dĩ nhiên không nhất thiết phải trùng với x, y, z, t . Ý nghĩa của các đại lượng này, như là các kết quả đo đạc vật lý, đã được trình bày chi tiết trước đây.

Bài toán của chúng ta bây giờ rõ ràng được diễn tả dưới dạng chính xác như sau. Các đại lượng x', y', z', t' của một sự kiện đối với K' lớn bao nhiêu, khi cho biết các đại lượng x, y, z, t của cùng sự kiện đối với K ? Các quan hệ phải được chọn sao cho định luật truyền ánh sáng trong chân không cho một, và cùng một tia sáng (và dĩ nhiên cho mọi tia sáng), được thỏa mãn đối với K lẫn K' . Đối với sự định hướng không gian của các hệ tọa độ như được cho trong hình vẽ (Ảnh 2), bài toán được giải đáp bằng những phương trình:



Ảnh 2

Hệ thống phương trình này được gọi với cái tên "Phép biến đổi Lorentz"^[31].

Nếu thay vì định luật truyền ánh sáng, chúng ta đặt những giả định được hiểu ngầm của cơ học cũ về bản chất tuyệt đối của thời gian và chiều dài làm nền tảng, thì, thay vì những phương trình biến đổi trên, chúng ta sẽ đi đến các phương trình dạng:

$$x' = x - vt$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = t$$

Hệ thống phương trình thường được gọi là "Phép biến đổi Galilei". Phép biến đổi Galilei có thể được suy ra từ phép biến đổi Lorentz bằng cách ở đó người ta cho vận tốc ánh sáng c bằng vô cực.

Qua phép biến đổi Lorentz người ta có thể thấy dễ dàng rằng định luật truyền ánh sáng trong chân không được thỏa mãn cho vật thể quy chiếu K cũng như cho vật thể quy chiếu K' qua thí dụ sau đây. Một tín hiệu sáng được phát ra dọc theo phần trục x dương. Nó sẽ được truyền đi theo phương trình:

$$x = ct$$

nghĩa là với tốc độ c . Theo các phương trình của phép biến đổi Lorentz, quan hệ đơn giản này giữa x và t sẽ kéo theo một quan hệ giữa x' và t' . Thực vậy, nếu thay x bằng trị số ct trong phương trình thứ nhất và thứ tư của phép biến đổi Lorentz thì ta sẽ có:

$$x' = \frac{(c - v)t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$t' = \frac{\left(1 - \frac{v}{c}\right)t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Từ đó bằng một phép chia ta có ngay:

$$x' = ct'$$

Nghĩa là ánh sáng được truyền theo phương trình này trên hệ quy chiếu K' . Như vậy, chúng ta đã chứng minh vận tốc truyền của ánh sáng đối với vật thể quy chiếu K' cũng bằng c . Tương tự như thế đối với các tia sáng truyền theo bất kỳ chiều khác. Dĩ nhiên điều này không đáng ngạc nhiên, bởi vì các phương trình của phép biến đổi Lorentz được suy ra từ quan điểm này.

§ 12

Vận Hành của Thước Đo và Đồng Hồ trong Chuyển Động

Tôi đặt một thước đo mét^[32] vào trục- x' của K' sao cho một đầu (điểm đầu) của nó trùng vào điểm $x' = 0$ và đầu kia (điểm cuối) vào điểm $x' = 1$. Câu hỏi: Chiều dài của thước đo này đối với K là bao nhiêu? Để biết điều đó, chúng ta chỉ cần hỏi, điểm đầu và điểm cuối của thước đo nằm ở đâu đối với K tại một thời điểm nhất định t của hệ thống K . Bằng phương trình thứ nhất của phép biến đổi Lorentz người ta tìm thấy trị số của hai điểm này vào thời điểm $t = 0$

$$x(\text{điểm đầu}) = 0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$x(\text{điểm cuối}) = 1 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Khoảng cách của hai điểm do đó là $\sqrt{1 - v^2/c^2}$. Đối với K , thước đo đang chuyển động với vận tốc là v . Do đó, chiều dài của một thước đo mét rắn chuyển động với vận tốc v dọc theo chiều

dài của nó là bằng $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ của mét. Do đó, thước đo rắn khi ở trạng thái chuyển động ngắn hơn khi nó ở trạng thái đứng yên, và càng ngắn hơn, khi nó chuyển động càng nhanh hơn. Ở vận

tốc $v = c$ thì $\sqrt{1 - v^2/c^2} = 0$. Với vận tốc lớn hơn, căn số trở thành ảo. Từ đó chúng ta kết luận rằng, trong thuyết tương đối, vận tốc c đóng vai trò vận tốc giới hạn. Không vật thể nào đạt được, hay vượt qua nó cả.

Thực ra vai trò này của vận tốc c như vận tốc giới hạn đã là hệ luận rõ ràng của các phương trình phép biến đổi Lorentz. Bởi vì

những phương trình này sẽ trở thành vô nghĩa nếu v được chọn lớn hơn c .

Nếu ngược lại, chúng ta xét một thước đo mét nằm trên trục x và đứng yên đối với K , chúng ta sẽ tìm thấy kết quả rằng, xét từ

K' nó có chiều dài bằng $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ của mét. Điều này hoàn toàn phù hợp với tinh thần của nguyên lý tương đối^[33], cái đã làm nền tảng của suy nghĩ chúng ta.

Một cách tiên nghiệm, có thể thấy dễ dàng rằng, từ các phương trình của phép biến đổi chúng ta phải có khả năng biết được sự vận hành vật lý của các thước đo và đồng hồ. Vì các đại lượng x, y, z, t không gì khác hơn là những kết quả đo đạc được bằng thước đo và đồng hồ. Nếu lấy phép biến đổi Galilei làm nền tảng, chúng ta sẽ không nhận được một sự rút ngắn của thước đo chuyển động.

Bây giờ chúng ta xét một đồng hồ với đơn vị là giây, luôn nằm tại điểm gốc ($x' = 0$) của K' , $t' = 0$ và $t' = 1$ là hai tiếng tích liên tiếp của đồng hồ này. Phương trình thứ nhất và thứ hai của phép biến đổi Lorentz cho kết quả

$$t = 0$$

và

$$t = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Quan sát từ K , đồng hồ chuyển động với vận tốc v ; xét từ vật thể quy chiếu này, khoảng cách giữa hai tiếng tích không phải là 1 giây nữa, mà là

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \text{ giây,}$$

nghĩa là một thời gian lớn hơn. Như một hệ quả chuyển động của nó, đồng hồ chạy chậm hơn là khi nó đứng yên. Ở đây, vận

tốc c cũng đóng vai trò của một vận tốc giới hạn không thể đạt tới được.

§ 13

Định Lý Cộng Vận Tốc - Thí Nghiệm Fizeau

Vì trong thực tế chúng ta chỉ di chuyển được đồng hồ và thước đo với vận tốc nhỏ so với c , cho nên những kết quả của Chương trước hầu như không thể đem so sánh được trực tiếp với thực tế. Mặt khác, những kết quả đó tỏ ra lạ mắt đối với độ giả, nên vì lẽ đó bây giờ tôi sẽ rút ra một hệ luận khác từ lý thuyết, điều có thể được suy ra dễ dàng từ những gì đã được trình bày đến nay, nhưng nó sẽ được kiểm chứng một cách rục rờ từ thí nghiệm.

Trong § 6, chúng ta đã suy ra định lý cộng cho các vận tốc cùng chiều, như hệ luận từ các giả thuyết của cơ học cổ điển. Cùng kết quả đó có thể được suy ra dễ dàng từ phép biến đổi Galilei (§11). Thực vậy, thay vì một người đi trong xe, chúng ta xét một điểm, chuyển động đối với hệ tọa độ K' theo phương trình

$$x' = wt'$$

Từ phương trình thứ nhất và thứ tư của phép biến đổi Galilei người ta có thể diễn tả x' và t' theo x và t , từ đó chúng ta được kết quả

$$x = (v + w)t$$

Phương trình này diễn tả không gì khác hơn định luật chuyển động của điểm chúng ta xét đối với hệ thống K (người đi bộ đối với nền ray) mà vận tốc chúng ta gọi là W . Cho nên giống như trong § 6, chúng ta được

$$W = v + w \text{ (A)}$$

Nhưng chúng ta cũng hoàn toàn có khả năng thực hiện cách suy nghĩ này trên cơ sở của thuyết tương đối.

Trong phương trình

$$x' - wt'$$

người ta chỉ cần diễn tả x' và t' theo x và t bằng cách sử dụng phương trình thứ nhất và thứ tư của *phép biến đổi Lorentz*. Thay vì phương trình (A), người ta sẽ được phương trình (B):

$$W = \frac{v + w}{1 + \frac{vw}{c^2}}$$

tương ứng với định lý cộng cho các vận tốc cùng chiều trong trường hợp thuyết tương đối. Câu hỏi bây giờ là, cái nào trong hai định lý đó đúng vững trước kinh nghiệm thực tiễn. Về điều này, một thí nghiệm cực kỳ quan trọng sẽ chỉ cho chúng ta biết, thí nghiệm mà nhà vật lý thiên tài Fizeau đã thực hiện hơn nửa thế kỷ trước, và từ đó đến nay vài người trong số những nhà vật lý học thực nghiệm tài giỏi nhất lặp lại, cho nên kết quả của nó không thể nghi ngờ được. Thí nghiệm nhằm đến bài toán sau đây. Trong một chất lỏng đứng yên, ánh sáng truyền đi với một vận tốc nhất định là w . Câu hỏi đặt ra: Ánh sáng sẽ truyền với vận tốc nào trong ống nghiệm theo chiều mũi tên trong hình vẽ, nếu chất lỏng nói trên chảy trong ống nghiệm với vận tốc v .



Thế theo tinh thần của thuyết tương đối, chúng ta nhất thiết phải giả thiết rằng, đối với chất lỏng, ánh sáng luôn luôn truyền với cùng vận tốc w , dù chất lỏng có chuyển động hay đứng yên đối với các vật thể khác. Như vậy, vận tốc truyền của ánh sáng đối với chất lỏng, và vận tốc của chất lỏng đối với ống nghiệm, cả hai được biết trước; vấn đề là tìm vận tốc ánh sáng đối với ống nghiệm.

Rõ ràng ở đây chúng ta lại có bài toán của § 6. Ống nghiệm đóng vai trò của nền ray, hay của hệ tọa độ K , trong khi chất lỏng đóng vai trò của chiếc xe, hay của hệ tọa độ K' , sau cùng ánh sáng đóng vai trò của người đi bộ hay của điểm chuyển động trong Chương nói trên. Như vậy, nếu gọi w là vận tốc của ánh sáng đối với ống nghiệm, thì nó được xác định bởi phương trình (A) hay (B), tùy theo phép biến đổi Galilei, hay phép biến đổi Lorentz là phù hợp với thực tế.

Thí nghiệm thực tế quyết định thuận lợi cho phương trình (B), là phương trình được suy ra từ thuyết tương đối, một cách rất chính xác^[34]. Ảnh hưởng của vận tốc dòng chảy v lên sự truyền ánh sáng, theo những đo đạc xuất sắc gần đây nhất của *Zeeman* bằng phương trình (B), được trình bày chính xác với sai số nhỏ một phần trăm.

Tuy nhiên, bây giờ chúng ta cũng cần nêu lên rằng, một thời gian dài trước khi thuyết tương đối được thiết lập đã có một lý thuyết về hiện tượng này của *H.A. Lorentz*, bằng con đường thuần túy động điện học, và dưới sự sử dụng những giả thuyết nhất định về cấu trúc điện tử của vật chất. Tình huống này tuy nhiên không hề làm giảm đi sức thuyết phục của thí nghiệm như một phép thử quyết định có lợi cho thuyết tương đối. Bởi vì động điện học của *Maxwell-Lorentz* mà lý thuyết ban đầu dựa vào, không hề đối kháng với thuyết tương đối. Đúng hơn, thuyết sau đã được phát triển từ điện động học như sự tổng hợp đơn giản một cách ngạc nhiên và khái quát hóa của các giả thuyết trước đây độc lập nhau mà trên đó điện động học đã được xây dựng.

§ 14

Giá Trị Hỗ Trợ Phát Minh của Thuyết Tương Đối

Dòng ý tưởng đến nay có thể được tóm tắt lại như sau: Kinh nghiệm đã đưa đến niềm tin rằng một mặt nguyên lý tương đối (theo nghĩa hẹp) là đúng, và mặt khác vận tốc truyền của ánh sáng trong chân không được xem là một hằng số c . Bằng cách hợp nhất hai tiền đề này lại, chúng ta đạt được định luật biến đổi cho các tọa độ thẳng góc x, y, z và thời gian t của các sự kiện cấu thành các hiện tượng tự nhiên. Và trong khuôn khổ này, thực tế chúng ta đã đạt được không phải phép biến đổi Galilei, mà khác với cơ học cổ điển, phép biến đổi Lorentz.

Trong dòng ý tưởng này, định luật truyền ánh sáng đóng một vai trò quan trọng, mà sự chấp nhận nó được biện minh bằng kiến thức thực tiễn của chúng ta. Rồi sau khi đã có phép biến đổi Lorentz, chúng ta lại có thể thống nhất phép biến đổi này với nguyên lý tương đối và tóm tắt lý thuyết vào phát biểu sau đây:

Mỗi một định luật tự nhiên phổ quát^[35] phải được kiến tạo sao cho nó được biến đổi thành một định luật chính xác có cùng dạng, khi người ta đi từ các biến số không-thời-gian x, y, z, t của hệ tọa độ nguyên thủy K sang các biến số không-thời-gian mới x', y', z', t' của một hệ tọa độ K' , trong đó quan hệ toán học giữa các đại lượng thấy và không thấy được xác định bằng phép biến đổi Lorentz. Hay nói gọn lại, các định luật tự nhiên phổ quát là hiệp biến^[36] đối với các phép biến đổi Lorentz.

Đó là một điều kiện toán học rõ ràng mà thuyết tương đối đòi hỏi ở một định luật tự nhiên; bằng cách đó, lý thuyết trở thành một công cụ quý báu có tính chất hỗ trợ khám phá trong việc tìm kiếm các định luật tự nhiên phổ quát. Nếu có một định luật tự nhiên phổ quát được tìm thấy không thỏa mãn điều kiện trên, thì ít nhất một trong hai giả thuyết cơ bản của lý thuyết bị bác bỏ.

Bây giờ chúng ta hãy xem lý thuyết cho đến nay đã biểu lộ gì ở những kết quả tổng quát.

§ 15

Những Kết Quả Tổng Quát của Lý Thuyết

Từ những điều đã được trình bày đến nay chúng ta thấy rõ thuyết tương đối (hẹp^[37]) đã được thoát thai từ điện động học và quang học. Trong các lĩnh vực này, nó không thay đổi nhiều các kết quả^[38] của lý thuyết, nhưng nó đã đơn giản hóa một bước quan trọng tòa nhà lý thuyết, nghĩa là sự suy diễn các định luật, và điều còn quan trọng hơn nhiều, làm giảm thiểu một cách đáng kể con số các giả thuyết độc lập nhau làm thành cơ sở của lý thuyết. Nó đã làm cho thuyết *Maxwell-Lorentz* hiển nhiên đến độ các nhà vật lý vẫn tiếp tục tin tưởng nó, ngay cả khi kết quả của thí nghiệm tỏ ra ít thuyết phục như họ đã mong đợi.

Cơ học cổ điển cần một sự tu chỉnh để phù hợp với đòi hỏi của thuyết tương đối hẹp. Tuy nhiên phần chính của sự tu chỉnh này chỉ liên quan chủ yếu đến các định luật cho các chuyển động nhanh, ở đó vận tốc v của vật chất không quá nhỏ đối với vận tốc ánh sáng. Kinh nghiệm cho ta biết chuyển động nhanh như thế chỉ xảy ra ở electron và ion; ở những chuyển động khác, sự chênh lệch so với các định luật cơ học cổ điển là quá nhỏ để có thể thấy được trong thí nghiệm. Về chuyển động của sao, chúng ta sẽ nói đến khi bàn về thuyết tương đối rộng.

Theo thuyết tương đối, động năng của một điểm vật chất có khối lượng m không còn được xác định nữa bởi biểu thức quen thuộc

$$m \frac{v^2}{2}$$

mà bằng biểu thức

$$\frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Biểu thức này sẽ trở thành vô cực khi vận tốc v tiến gần đến vận tốc ánh sáng c . Vận tốc do đó phải luôn nhỏ hơn c , dù người ta có sử dụng bao nhiêu năng lượng đi nữa cho việc tăng tốc. Nếu triển khai biểu thức này của động năng thành chuỗi, chúng ta

có:

$$mc^2 + m\frac{v^2}{2} + \frac{3}{8}m\frac{v^4}{c^2} + \dots [39]$$

Số hạng thứ ba trong chuỗi này luôn luôn nhỏ đối với số hạng thứ hai, là số hạng duy nhất được để ý đến trong cơ học cổ điển, khi v^2/c^2 nhỏ đối với 1. Số hạng thứ nhất mc^2 không chứa vận tốc, do đó không cần thiết được để ý khi người ta chỉ quan tâm [đến] năng lượng của một điểm khối lượng^[40] lệ thuộc thế nào vào vận tốc. Về tầm quan trọng cơ bản của nó chúng ta sẽ nói đến sau.

Kết quả quan trọng nhất có tính chất khái quát mà thuyết tương đối đã đem lại là về khái niệm khối lượng. Vật lý tiên-tương-đối biết đến hai định lý bảo toàn có ý nghĩa cơ bản, đó là định luật bảo toàn năng lượng và định luật bảo toàn khối lượng; hai định luật cơ bản này được biết như hoàn toàn độc lập với nhau. Nhưng với thuyết tương đối, cả hai hòa nhập lại thành một định luật. Điều này hình thành ra sao, và sự hòa nhập lại được hiểu thế nào, chúng ta sẽ trình bày tóm tắt sau đây.

Nguyên lý tương đối đòi hỏi định luật bảo toàn năng lượng không những đúng đối với một hệ tọa độ K mà đối với cả mỗi hệ tọa độ K' ở trong trạng thái chuyển động tịnh tiến đều đối với K , tóm lại, đối với mỗi hệ tọa độ Galilei. Trong sự chuyển tiếp giữa hai hệ như thế thì khác với cơ học cổ điển, phép biến đổi *Lorentz* là yếu tố quyết định.

Từ những tiên đề này, cũng như các phương trình cơ bản của điện động học *Maxwell*, và bằng những suy nghĩ tương đối đơn giản, người ta có thể suy ra một cách thuyết phục: Một vật thể chuyển động với một vận tốc v , nếu hấp thu một năng lượng E_0 dưới dạng bức xạ mà không bị thay đổi về vận tốc trong quá trình chuyển động, thì hệ quả sẽ nhận được là một sự tăng trưởng năng lượng của nó bằng:

$$\frac{E_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Với biểu thức đã được biết ở trên của động năng một vật thể,

năng lượng tìm kiếm của vật thể có dạng:

$$\frac{(m + \frac{E_0}{c^2})c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Vật thể do đó có cùng năng lượng như một vật thể có khối lượng $(m + E_0/c^2)$ chuyển động với vận tốc v . Do đó chúng ta có thể nói: Một vật thể khi hấp thu một khối lượng^[41] năng lượng E_0 khối lượng quán tính của nó sẽ tăng lên một lượng bằng E_0/c^2 ; khối lượng quán tính của một vật thể không phải là hằng số, mà thay đổi theo mức độ thay đổi của năng lượng của nó. Khối lượng quán tính của một hệ thống vật thể do đó có thể được xem chính là độ đo của năng lượng của nó. Định lý bảo toàn khối lượng của một hệ thống trở thành trùng khớp với định lý bảo toàn năng lượng, và nó chỉ có giá trị, khi hệ thống không nhận thêm hoặc phát bớt đi năng lượng. Nếu viết lại biểu thức của năng lượng dưới dạng:

$$\frac{mc^2 + E_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

chúng ta sẽ thấy dạng thức mc^2 , gần đây đã thu hút sự chú ý chúng ta, không gì khác hơn là năng lượng mà vật thể^[42] đã có, trước khi nó hấp thu năng lượng E_0 .

Một sự so sánh trực tiếp định lý này với kinh nghiệm vào thời điểm hiện tại là không thể được. Lý do là các thay đổi năng lượng E_0 mà chúng ta có thể tạo cho một hệ thống là không đủ lớn để chúng có thể được cảm nhận như một sự thay đổi khối lượng quán tính của hệ thống. E_0/c^2 là quá nhỏ đối với m , khối lượng đã hiện hữu trước khi có sự thay đổi năng lượng. Chính do tình huống này mà cơ học cổ điển đã xây dựng được thành công một định luật bảo toàn khối lượng có hiệu lực độc lập cho nó.

Tôi muốn thêm một ghi chú cuối cùng có tính chất tự nhiên. Thành công của sự diễn giải *Faraday-Maxwell* về tác dụng điện từ ở khoảng cách xa, thông qua các diễn biến trung gian truyền

đi với vận tốc hữu hạn, đã có tác dụng làm cho các nhà vật lý bắt đầu tin rằng không hề có các tác dụng xa tức thời, không cần môi trường trung gian như loại định luật hấp dẫn *Newton*. Theo thuyết tương đối, tác dụng tức thời đến các khoảng cách xa, hay tác dụng xa với vận tốc truyền vô hạn, luôn được thế chỗ bằng tác dụng xa với vận tốc truyền của ánh sáng. Điều này liên quan đến vai trò rất cơ bản của vận tốc c trong lý thuyết này. Ở Phần II, chúng ta sẽ thấy kết quả này được tu chỉnh bằng cách nào trong thuyết tương đối rộng.

§ 16

Thuyết Tương Đối Hẹp và Kinh Nghiệm

Ở mức độ nào thuyết tương đối hẹp được hỗ trợ bởi kinh nghiệm, đó là câu hỏi không đơn giản để trả lời. Lý do đã được đề cập khi bàn về thí nghiệm cơ bản của *Fizeau*. Thuyết tương đối hẹp được kết tinh từ thuyết *Maxwell-Lorentz* về các hiện tượng điện từ. Cho nên tất cả dữ kiện thực nghiệm hỗ trợ thuyết điện từ cũng đều hỗ trợ thuyết tương đối. Tôi muốn nhắc ở đây một điều đặc biệt quan trọng là thuyết tương đối cho phép chúng ta suy diễn được những ảnh hưởng lên ánh sáng đi đến chúng ta từ các vì sao cố định gây ra do chuyển động tương đối của trái đất đối với các vì sao cố định kia. Các ảnh hưởng này được suy ra một cách vô cùng đơn giản, và phù hợp với kinh nghiệm thực tiễn. Đó là sự di chuyển hằng năm vị trí ảo của các vì sao cố định như hệ quả của sự chuyển động của quả đất xung quanh mặt trời (hiện tượng quang sai^[43]), và ảnh hưởng của các thành phần hướng tâm của các chuyển động tương đối của các vì sao cố định đối với trái đất lên màu sắc của ánh sáng phát ra từ chúng đi đến chúng ta. Ảnh hưởng sau được thể hiện bằng một sự dịch chuyển nhỏ của các vạch quang phổ của ánh sáng truyền đến chúng ta từ một vì sao cố định, khi so sánh với vị trí của cùng các vạch quang phổ được sinh ra bởi một nguồn ánh sáng trên mặt đất (định luật *Doppler*). Những lập luận thực nghiệm hỗ trợ cho thuyết *Maxwell-Lorentz* đồng thời cũng là những lập luận hỗ trợ thuyết tương đối, chúng có quá nhiều để có thể kể hết ở đây. Chúng thật sự đã thu nhỏ lại các cơ hội về lý thuyết đến độ không một thuyết nào khác hơn thuyết *Maxwell-Lorentz* có thể đứng vững được trước kinh nghiệm thực tiễn.

Tuy nhiên có hai nhóm dữ kiện thu thập được từ thí nghiệm mà thuyết *Maxwell-Lorentz* chỉ có thể cắt nghĩa bằng cách vay mượn thêm một giả thuyết hỗ trợ xa lạ nếu không sử dụng thuyết tương đối.

Người ta biết rằng, các tia ca-tốt, và các tia được gọi là tia β được cấu tạo bằng những hạt nhỏ có điện tích âm (electron) và được phát ra từ những chất phóng xạ, có quán tính rất nhỏ và vận tốc lớn. Bằng cách khảo sát độ lệch của những tia này dưới

ảnh hưởng của các trường điện và từ, người ta có thể nghiên cứu định luật chuyển động của các hạt nhỏ này một cách rất chính xác.

Khi nghiên cứu lý thuyết các electron này, người ta phải chiến đấu với khó khăn là thuyết điện từ tự nó không có khả năng đưa ra lời giải thích về bản chất của chúng. Bởi vì các khối lượng điện có cùng một dấu đẩy nhau, các khối lượng điện âm tạo thành electron phải bị phân tán ra dưới tác dụng đẩy nhau của chúng, nếu như không có những lực khác tác dụng giữa chúng với nhau, mà bản chất của các lực này đến nay vẫn còn khó hiểu đối với chúng ta^[44]. Nếu bây giờ chúng ta giả thiết rằng các khoảng cách tương đối giữa các khối lượng điện tạo thành electron vẫn không thay đổi trong quá trình chuyển động của electron (nghĩa là có một sự liên kết cứng theo nghĩa của cơ học cổ điển), chúng ta sẽ đi đến một định luật chuyển động của electron không phù hợp với thí nghiệm thực tiễn. Được dẫn dắt bởi quan điểm thuần túy hình thức, *H.A. Lorentz* là người đầu tiên đưa ra giả thuyết nói rằng vật thể của electron, như hệ quả của chuyển động, chịu một sự co lại^[45] theo chiều chuyển động, có cường độ co lại tỷ lệ với biểu thức

$$\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

Giả thuyết này không thể được biện minh bằng bất cứ điều gì trong điện từ học, nhưng sau đó cung cấp được định luật chuyển động đặc thù, và điều này đã được xác nhận bởi thí nghiệm với độ chính xác cao trong những năm gần đây.

Thuyết tương đối đưa chúng ta đến cùng một định luật chuyển động mà không cần đến một giả thuyết đặc thù nào về cấu trúc và sự vận hành của electron. Tương tự như thế là những kết luận mà chúng ta đã thấy ở § 13 trong thí nghiệm *Fizeau*. Thuyết tương đối đã cung cấp kết quả của *Fizeau*, mà không cần đến những giả thuyết về bản chất vật lý của chất lỏng.

Nhóm dữ kiện thứ hai tôi muốn đề cập ở đây liên quan đến câu hỏi, chuyển động của quả đất trong vũ trụ có gây ảnh hưởng cảm thụ được lên các thí nghiệm trên mặt đất hay không. Chúng ta đã nhận xét trong § 5 rằng tất cả những nỗ lực tìm kiếm như

thế đều dẫn đến kết quả phủ định. Trước khi thuyết tương đối ra đời, khoa học khó giải thích được kết quả phủ định này. Tình huống cụ thể là như sau. Những thành kiến lỗi thời về thời gian và không gian đã làm cho người ta không nghi ngờ được rằng phép biến đổi *Galilei* là yếu tố quyết định cho việc chuyển đổi từ một vật thể quy chiếu sang một cái khác. Giả thiết bây giờ, các phương trình *Maxwell-Lorentz* có hiệu lực cho một vật thể K , thì chúng ta sẽ thấy chúng không có hiệu lực đối với một hệ quy chiếu K' nếu người ta giả thiết quan hệ tồn tại giữa K và K' là phép biến đổi *Galilei*. Như thế có nghĩa rằng trong tất cả các hệ tọa độ *Galilei* có một hệ (K) với một trạng thái chuyển động nào đó có tính chất đặc biệt về mặt vật lý. Người ta diễn giải kết quả này theo hướng xem K như đứng yên đối với một bể ether được giả định tồn tại. Ngược lại, tất cả hệ tọa độ K' chuyển động đối với K được xem như chuyển động với ether. Người ta đã gán cho chuyển động này của K' đối với ether ("Gió ether"^[46] đối với K') những định luật phức tạp hơn cần phải có hiệu lực đối với K' . Do đó, đối với quả đất, một giả thuyết về sự tồn tại của gió ether như thế cũng phải được chấp nhận, và sự nỗ lực một thời gian dài của các nhà vật lý là nhằm để chứng minh điều đó.

Để chứng minh, *Michelson* đã tìm ra một phương pháp xem ra có tính chất quyết định. Hãy tưởng tượng hai tấm gương được gắn vào một vật thể rắn, quay bề mặt phản chiếu lại nhau. Một tia sáng cần một thời gian nhất định T để đi từ một gương này đến gương kia và trở lại, nếu cả hệ thống đứng yên đối với bể ether. Tuy nhiên, khi vật thể cùng với các gương chuyển động đối với ether, người ta sẽ tìm thấy qua tính toán một thời gian hơi khác đi là T' cho diễn biến trên. Chưa hết: tính toán cũng sẽ cho thấy, với vận tốc chuyển động v đối với bể ether, thời gian T' khi vật thể chuyển động thẳng góc với các mặt phẳng của gương sẽ khác hơn khi nó chuyển động song song với gương. Sự khác biệt được tính toán như thế giữa hai thời lượng, dù nhỏ đến đâu, cũng sẽ phải hiện ra nếu *Michelson* và *Morley* thực hiện thí nghiệm giao thoa. Tuy nhiên, thí nghiệm kết cục một cách phủ định, trước sự bối rối lớn của các nhà vật lý. *Lorentz* và *Fitzgerald* cứu vãn lý thuyết (ether) khỏi sự bối rối này bằng cách giả định chuyển động của vật thể đối với ether gây ra một sự co lại của nó theo chiều chuyển động, bằng một lượng vừa đủ để làm cho sự

khác biệt thời gian nói trên biến mất. Một sự so sánh với các điều trình bày trong § 12 cho thấy, lối thoát này cũng là đúng đắn đối với quan điểm của thuyết tương đối. Tuy nhiên phương pháp diễn đạt tình huống dựa trên thuyết tương đối là thỏa đáng hơn không gì sánh kịp. Theo đó, không có một hệ tọa độ ưu đãi, cái đã làm nên nguyên cơ cho việc hình thành ý tưởng ether, và vì thế cũng không có gió ether, và không có thí nghiệm nào để minh chứng được nó. Ở đây sự co lại của các vật thể chuyển động được suy ra từ hai nguyên lý cơ bản của lý thuyết mà không cần các giả thuyết phụ. Thực tế, yếu tố quyết định cho sự co lại này không phải là chuyển động tự nó, cái chúng ta không thể gán một ý nghĩa nào, mà chính là chuyển động đối với vật thể quy chiếu đã được chọn. Do đó, đối với một hệ quy chiếu chuyển động cùng với quả đất, hệ thống gương của *Michelson* và *Morley* không bị *thu ngắn* lại, nhưng nó sẽ bị thu ngắn lại đối với một hệ quy chiếu đứng yên đối với mặt trời.

§ 17

Không Gian Minkowski Bốn Chiều

Một người không am hiểu toán học sẽ bị một cảm giác sợ hãi xâm chiếm ngay nếu nghe đến các sự vật "bốn chiều", một cảm giác không phải không giống cái cảm giác sợ hãi được gây ra bởi những suy nghĩ siêu nhiên thần bí. Nhưng không có câu nói nào lại bình thường hơn là câu nói: thế giới chúng ta đang sống là một continuum^[47] không-thời-gian bốn chiều.

Không gian là một continuum ba chiều. Điều này muốn nói lên rằng người ta có thể mô tả vị trí của một điểm (đứng yên) bằng ba đại lượng (gọi là tọa độ) x, y, z , và mỗi điểm như thế có những điểm "láng giềng" ở gần bất kỳ, mà vị trí được mô tả bằng các trị số tọa độ x_1, y_1, z_1 , có thể tiến gần các tọa độ x, y, z của điểm trước một cách bất kỳ. Do tính chất sau, chúng ta nói đó là một "continuum", và do con số bộ ba của các tọa độ chúng ta nói "ba chiều".

Tương tự như thế là thế giới của những hiện tượng vật lý, được *Minkowski* gọi ngắn gọn là "thế giới"^[48], dĩ nhiên bốn chiều theo nghĩa không-thời-gian. Vì nó được tạo thành bằng các sự kiện cá nhân, mỗi cái trong đó được mô tả bằng bốn số, đó là ba tọa độ không gian x, y, z và một tọa độ thời gian, trị số t . "Thế giới" cũng là một continuum theo nghĩa trên; bởi vì đối với mỗi sự kiện đã cho, ta có những sự kiện "láng giềng" bất kỳ (được thực hiện hay có thể quan niệm được) mà tọa độ của chúng x_1, y_1, z_1, t_1 khác với tọa độ của sự kiện cho trước bởi một lượng nhỏ bất kỳ. Chúng ta đã không quen gọi thế giới trong nghĩa này bằng continuum bốn chiều. Lý do là thời gian trong vật lý tiền-tương-đối đóng một vai trò khác, độc lập hơn đối với tọa độ không gian. Cho nên chúng ta đã quen xem thời gian như một continuum độc lập. Trong thực tế, theo vật lý cổ điển, thời gian là tuyệt đối, nghĩa là độc lập với vị trí và *trạng thái chuyển động* của hệ quy chiếu. Điều này được biểu lộ trong phương trình cuối của phép biến đổi *Galilei* ($t' = t$).

Thuyết tương đối đã đem lại cách xem xét "thế giới" ở dạng bốn chiều một cách tự nhiên, bởi vì theo lý thuyết này thời gian

đã bị cướp mất tính độc lập của nó, như phương trình thứ tư của phép biến đổi Lorentz cho thấy:

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Hơn nữa, theo phương trình này, khoảng cách thời gian $\Delta t'$ của hai sự kiện đối với K' nói chung không triệt tiêu, ngay khi khoảng cách Δt của cùng những sự kiện đối với K triệt tiêu. "Khoảng cách không gian" thuần túy của hai hiện tượng đối với K đã sinh ra hệ quả là một "khoảng cách thời gian" của cùng các hiện tượng đối với K' . Nhưng ý nghĩa quan trọng của sự khám phá của *Minkowski* cho sự phát triển hình thức của thuyết tương đối cũng không phải nằm ở đây. Nó nằm nhiều hơn ở nhận thức rằng cái continuum bốn chiều của thuyết tương đối, xét về những tính chất hình thức cơ bản của nó^[49], có mang trong mình tính chất họ hàng rõ rệt nhất với continuum ba chiều của không gian hình học Euclid. Để làm cho sự giống nhau này hiện rõ ra, thay vì tọa độ thời gian thông thường t , chúng ta đưa vào đại lượng ảo ct tỉ lệ^[50] với nó. Bằng cách này, các định luật tự nhiên thỏa mãn thuyết tương đối hẹp sẽ có dạng toán học mà ở đó tọa độ thời gian đóng vai trò giống như vai trò của ba tọa độ không gian. Bốn tọa độ này tương ứng về hình thức chính xác ba tọa độ không gian của hình học Euclid. Một người không ở trong ngành toán cũng nhận thấy dễ dàng rằng, bằng nhận thức thuần túy hình thức này, thuyết tương đối đã đạt được sự sáng sủa đặc biệt.

Sự phức tạp ít ỏi trên đây chỉ đem đến cho người đọc một hình dung mơ hồ về ý tưởng quan trọng của *Minkowski*, ý tưởng mà nếu không có nó, thuyết tương đối rộng với những ý tưởng cơ bản của nó được phát triển sau đây, có lẽ vẫn còn nằm trong giai đoạn ấu trĩ. Vì một sự diễn đạt chuẩn xác hơn ý tưởng này, vốn đã rất khó hiểu đối với một người không kinh nghiệm với toán học, không ích lợi lắm cho việc hiểu biết những ý tưởng chính của thuyết tương đối hẹp hay rộng, nên tôi muốn tạm dừng ở đây, và sẽ trở lại trong phần trình bày ở cuối cuốn sách này.

Phần II
THUYẾT TƯƠNG ĐỐI RỘNG
(§ 18 - § 29)

§ 18

Nguyên Lý Tương Đối Hẹp Và Rộng

Luận đề cơ bản mà tất cả những ý tưởng được trình bày đến nay đều xoay quanh chính là nguyên lý tương đối *hẹp*, nghĩa là, nguyên lý của tính tương đối vật lý của mọi chuyển động *đều*. Chúng ta hãy phân tích lại một lần nữa nội dung của nó một cách chính xác.

Mọi chuyển động, theo khái niệm của nó, phải được quan niệm chỉ là chuyển động *tương đối*, điều đó thời nào ai cũng thấy được. Ở thí dụ nền ray và xe lửa được dùng rất nhiều lần, chúng ta có thể biểu thị sự chuyển động diễn ra ở đây dưới hai dạng sau một cách bình đẳng:

- (a) Xe lửa chuyển động tương đối đối với nền ray.
- (b) Nền ray chuyển động tương đối đối với xe lửa.

Trong trường hợp (a), nền ray được xem như vật thể quy chiếu; trong trường hợp (b) xe lửa là vật quy chiếu. Nếu chỉ để xác nhận hay mô tả một chuyển động thì quy chiếu chuyển động lên vật thể quy chiếu nào, điều đó về cơ bản không quan trọng. Điều này, như đã nói, là hiển nhiên, và không được lẫn lộn với tính chất rộng rãi hơn nhiều mà chúng ta đã gọi là "nguyên lý tương đối", và đã đặt nó làm nền tảng cho những nghiên cứu của chúng ta.

Nguyên lý đã được chúng ta sử dụng nói lên rằng chúng ta không những có thể chọn xe lửa mà còn [có thể] chọn nền ray như vật thể quy chiếu cho việc mô tả mọi diễn biến tự nhiên (bởi vì điều này là hiển nhiên). Nói đúng hơn, nguyên lý chúng ta khẳng định: Nếu chúng ta biểu thị các định luật tự nhiên phổ quát, như chúng thoát thai từ kinh nghiệm, bằng cách lấy

(c) Xe lửa làm vật quy chiếu,

(d) Nền ray làm vật quy chiếu,

thì các định luật tự nhiên phổ quát này (chẳng hạn các định luật của cơ học, hay định luật ánh sáng truyền trong chân không) chính xác giống nhau trong cả hai trường hợp. Chúng ta cũng có thể biểu thị điều này như sau: Đối với sự mô tả vật lý của các hiện tượng tự nhiên, không cái nào trong các vật thể quy chiếu K, K' nổi trội hơn cái kia. Phát biểu thứ hai này không nhất thiết phải đúng một cách tiên nghiệm như phát biểu thứ nhất; nó không được hàm chứa trong các khái niệm "chuyển động" và "vật thể quy chiếu" hoặc có thể được suy diễn từ chúng, mà chỉ có kinh nghiệm mới quyết định tính đúng đắn hay không đúng đắn của nó.

Tuy nhiên, cho đến nay chúng ta không hề khẳng định tính chất tương đương của *tất cả* các vật thể quy chiếu K liên quan đến việc biểu thị các định luật tự nhiên. Con đường chúng ta đi đúng hơn là như thế này. Đầu tiên chúng ta đã xuất phát từ giả thuyết, rằng có một vật thể quy chiếu K với một trạng thái chuyển động sao cho đối với nó định luật cơ bản *Galilei* có hiệu lực: Một điểm khối lượng, nếu để tự nó và đủ xa với mọi khối lượng còn lại, sẽ chuyển động đều và theo đường thẳng. Được quy chiếu lên K (một vật thể quy chiếu *Galilei*), các định luật tự nhiên sẽ có dạng đơn giản như có thể. Nhưng, ngoài K ra, tất cả những vật thể quy chiếu đều được ưu đãi theo nghĩa này, và đều tương đương với K trong việc biểu thị các định luật tự nhiên, miễn là chúng có một chuyển động *thẳng, đều, và không quay* đối với K' , tất cả những vật thể quy chiếu này đều được xem là vật thể quy chiếu *Galilei*. Chỉ đối với các vật thể quy chiếu này thì nguyên lý tương đối được giả định có giá trị, chứ không phải đối với các vật thể quy chiếu khác (chuyển động một cách khác). Trong nghĩa này, chúng ta nói đến nguyên lý tương đối *hẹp*, hay thuyết tương đối hẹp.

Ngược với những điều trên, dưới cái tên "nguyên lý tương đối rộng" chúng ta muốn hiểu phát biểu sau đây: Tất cả vật thể quy chiếu K, K' , v.v. là tương đương nhau cho việc mô tả các hiện tượng tự nhiên (cho sự biểu thị các định luật tự nhiên phổ quát), bất kể trạng thái chuyển động của chúng. Tuy nhiên, cần nói

ngay rằng, sự biểu thị này cần phải được thay bằng một sự biểu thị trừu tượng hơn, vì những lý do chỉ hiện rõ ra ở giai đoạn sau.

Sau khi nguyên lý tương đối hẹp được đưa vào thành công, những ai muốn vươn tới sự khái quát hóa đều cảm thấy bị cám dỗ muốn mạo hiểm đi thêm một bước về hướng nguyên lý tương đối rộng. Nhưng một sự suy nghĩ đơn giản, có vẻ rất đáng tin, dường như cho thấy một nỗ lực như thế trước tiên là vô vọng. Bạn đọc hãy hình dung đặt mình vào chiếc xe lửa chạy với vận tốc đều đã được nhiều lần xem xét. Bao lâu xe chạy đều, người hành khách sẽ không hề cảm nhận gì về sự di chuyển của xe. Cho nên hệ quả là anh ta cũng có thể diễn giải bản chất sự việc theo hướng sau đây mà không gặp phải sự kháng cự nội tâm, rằng chiếc xe đứng yên trong khi nền ray đang chạy. Cách diễn giải này thực ra, theo nguyên lý tương đối hẹp, cũng hoàn toàn chính đáng về mặt vật lý học.

Tuy nhiên nếu bây giờ chuyển động của xe lửa biến thành một chuyển động không đều, chẳng hạn như khi xe lửa thắng mạnh, lúc đó người hành khách bị một lực đẩy kéo mạnh về phía trước. Chuyển động bị hãm lại được thể hiện qua sự vận hành cơ học của các vật thể trong xe đối với anh ta; sự vận hành cơ học là khác hơn sự vận hành trong trường hợp đã xét trước đó, và có lẽ vì thế mà không thể nào các định luật cơ học đối với một chiếc xe chạy không đều như thế cũng đúng như chúng đã đúng đối với chiếc xe chạy đều, hay đứng yên. Trong mọi tình huống, rõ ràng định luật cơ bản *Galilei* không còn đúng đối với chiếc xe chuyển động không đều. Vì lý do này, chúng ta trước mắt cảm thấy bị bắt buộc phải công nhận một loại thực tại vật lý tuyệt đối cho chuyển động không đều, ngược với nguyên lý tương đối rộng. Tuy nhiên, dưới đây chúng ta sẽ nhanh chóng thấy rằng kết luận này không đứng vững.

§ 19

Trường Hấp Dẫn

"Nếu chúng ta lượm một cục đá lên rồi buông nó ra, tại sao nó rơi xuống đất?" Câu trả lời thường lệ là: "Vì nó bị trái đất hút". Vật lý hiện đại biểu thị câu trả lời một cách hơi khác đi bởi lý do sau. Qua những nghiên cứu chính xác hơn về các hiện tượng điện từ người ta đi đến quan niệm không có một tác dụng xa đột ngột mà không có sự trung gian. Nếu chẳng hạn một thanh nam châm hút một miếng sắt, thì chúng ta không nên thỏa mãn với quan niệm cho rằng thanh nam châm tác dụng trực tiếp lên miếng sắt xuyên qua khoảng không gian rỗng, mà nên hình dung theo cách *Faraday* đã làm, rằng thanh nam châm luôn luôn tạo ra một loại thực thể vật lý gì đó xung quanh nó, cái mà người ta gọi là "từ trường". Từ trường này tự nó tác dụng lên miếng sắt sao cho miếng sắt có khuynh hướng di chuyển đến thanh nam châm. Chúng ta không muốn bàn về tính chính đáng của khái niệm trung gian này vốn tự nó là tùy tiện. Chúng ta chỉ muốn ghi chú rằng với sự trợ giúp của nó, người ta có thể biểu thị các hiện tượng điện từ, đặc biệt sự truyền đi của các sóng điện từ, một cách thỏa đáng hơn nhiều về mặt lý thuyết, so với khi không có nó. Các tác dụng của lực hấp dẫn cũng được quan niệm một cách tương tự như thế.

Tác dụng của quả đất lên cục đá diễn ra một cách gián tiếp. Quả đất tạo ra trong môi trường xung quanh nó một trường hấp dẫn. Trường này tác dụng lên cục đá và khiến nó rơi. Như chúng ta biết từ kinh nghiệm, cường độ tác dụng lên vật thể giảm đi theo một định luật rất nhất định khi người ta đi xa dần khỏi quả đất. Theo quan niệm ấy của chúng ta điều đó có nghĩa: Định luật chi phối các tính chất của trường hấp dẫn trong không gian phải là một định luật rất nhất định, để biểu thị đúng đắn sự giảm đi của tác dụng hấp dẫn theo khoảng cách tính từ vật thể gây ra tác dụng. Chúng ta có thể hình dung một vật thể (chẳng hạn trái đất) trực tiếp sinh ra trường trong vùng lân cận gần nhất của nó; cường độ và phương hướng của trường ở khoảng cách lớn hơn được xác định từ đó bởi định luật chi phối các tính chất trong không gian của chính các trường hấp dẫn.

Khác với trường điện và từ, trường hấp dẫn có một tính chất đáng chú ý nhất, làm cho nó có ý nghĩa rất cơ bản cho điều dưới đây. Các vật thể chuyển động dưới tác dụng duy nhất của trường hấp dẫn phải chịu một sự gia tốc, và gia tốc này *không lệ thuộc chút nào vào chất liệu, hay vào trạng thái vật lý của vật thể*. Chẳng hạn, một miếng chì và một miếng gỗ rơi một cách chính xác giống nhau trong một trường hấp dẫn (trong chân không), nếu người ta buông chúng ra không có hay có cùng vận tốc ban đầu. Định luật này, đúng một cách cực kỳ chính xác, có thể được biểu thị bằng một dạng khác dưới ánh sáng của suy nghĩ sau đây.

Theo định luật chuyển động *Newton* chúng ta có:

$$(Lực) = (\text{Khối lượng quán tính}) \times (\text{Gia tốc})$$

trong đó "khối lượng quán tính" là một hằng số đặc trưng của vật thể chuyển động gia tốc. Nhưng vì hấp dẫn cũng chính là nguyên nhân của gia tốc, nên chúng ta cũng có:

$$[lực] = [\text{khối lượng hấp dẫn}] \times [\text{cường độ của trường hấp dẫn}]$$

trong đó khối lượng hấp dẫn tương tự cũng là một hằng số đặc trưng cho vật thể. Từ hai hệ thức này chúng ta suy ra:

$$\text{gia tốc} = \left[\frac{\text{khối lượng hấp dẫn}}{\text{khối lượng quán tính}} \right] \times [\text{cường độ của trường hấp dẫn}]$$

Nếu bây giờ, như kinh nghiệm cho thấy, gia tốc luôn luôn đồng nhất nhau, độc lập với bản chất và trạng thái của vật thể đối với một trường cho trước, thì tỷ lệ giữa khối lượng hấp dẫn và khối lượng quán tính cũng phải đồng nhất nhau cho tất cả các vật thể. Bằng cách chọn đơn vị đo lường thích hợp, người ta có thể làm cho tỷ lệ này bằng 1; lúc đó chúng ta có định lý: Khối lượng *hấp dẫn* và khối lượng *quán tính* của một vật thể là đồng nhất nhau.

Cơ học cho đến nay tuy có *ghi nhận* định lý quan trọng này, nhưng chưa *diễn giải* nó. Một sự diễn giải thỏa đáng chỉ có thể có khi chúng ta nhận thấy rằng: *Cùng phẩm chất của vật thể biểu hiện khi là "quán tính", khi là "trọng lượng", tùy theo tình huống*. Ở mức độ nào điều này là sự thật, cũng như câu hỏi này liên quan thế nào đến định đề của tương đối rộng, những điều đó sẽ

được trình bày trong chương tới.

§ 20

Đẳng Thức giữa Khối Lượng Quán Tính và Khối Lượng Hấp Dẫn như Một Lý Lẽ Cho Định Đề Tương Đối Rộng

Chúng ta hình dung một vùng rộng lớn của không gian rỗng, nằm xa các vì sao và các khối lượng đáng kể để ở đó, với độ chính xác thỏa đáng, định lý cơ bản *Galilei* có hiệu lực. Lúc đó, trong phần này của không gian thế giới, chúng ta có thể chọn một hệ tọa độ *Galilei*, để cho đối với nó các điểm đứng yên sẽ vẫn đứng yên, và những điểm chuyển động vẫn tiếp tục chuyển động thẳng đều. Để có vật quy chiếu, chúng ta hãy tưởng tượng một cái hộp rộng và có dạng của một căn phòng^[51], cùng với một quan sát viên trong đó được trang bị với các thiết bị. Hấp dẫn dĩ nhiên không tồn tại đối với người này. Do đó anh ta phải buộc mình bằng dây vào đáy sàn, nếu không, một sự chạm phải vào sàn của căn phòng dù nhẹ nhất sẽ làm cho anh ta từ từ bay lên trần.

Ở giữa trần, bên ngoài căn phòng, một cái móc cùng với một sợi dây được gắn chặt vào trần. Và bây giờ một "sinh vật"^[52], loại gì đối với chúng ta không quan trọng, bắt đầu kéo sợi dây với một lực hằng số. Lúc đó cái hộp cùng với người quan sát bên trong bắt đầu chuyển động lên "trên" với một chuyển động gia tốc đều. Với thời gian, vận tốc anh ta sẽ tăng cao ngất ngưỡng - nếu chúng ta quan sát tất cả sự kiện này từ một vật thể quy chiếu khác không được kéo đi bằng một sợi dây.

Nhưng người trong hộp nhìn hiện tượng kia thế nào? Sự gia tốc của hộp sẽ được truyền từ phía sàn hộp vào anh ta bằng một phản áp lực. Do đó, anh ta phải tiếp nhận áp lực này bằng đôi chân, nếu như không muốn bị "đo ván" với cả chiều dài thân thể anh ta. Lúc đó người anh đứng trong hộp giống như đứng trong căn phòng của một ngôi nhà trên mặt đất chúng ta. Nếu anh ta buông một vật thể mà anh ta có trong tay trước đó thì sự gia tốc của hộp sẽ không truyền vào nó nữa; vật thể do đó sẽ tiến dần về sàn hộp trong một chuyển động tương đối có gia tốc. Hơn nữa, quan sát viên sẽ tự thuyết phục mình rằng sự gia tốc của vật thể về hướng mặt sàn luôn luôn có cùng một độ lớn, cho dù anh ta làm thí nghiệm với vật thể nào đi nữa.

Dựa trên những kiến thức của trọng trường (hấp dẫn) như chúng ta đã đề cập trong chương rồi, người quan sát trong hộp như vậy sẽ đi đến kết luận, anh ta cùng với cái hộp đang ở trong một trọng trường bất biến với thời gian. Dĩ nhiên trong một lúc nào đó anh ta sẽ rất ngạc nhiên, rằng cái hộp lại không rơi trong trọng trường này. Nhưng rồi anh ta lại phát hiện ra cái móc ở giữa nắp của cái hộp và sợi dây được buộc vào nó đang căng ra, và anh ta do đó đi đến kết luận, rằng cái hộp được treo đứng yên trong trọng trường.

Chúng ta có được phép cười người kia và nói rằng anh ta có quan niệm sai không? Tôi tin, chúng ta không được phép, nếu chúng ta vẫn muốn nhất quán, mà ngược lại phải thú nhận rằng cách quan niệm của anh ta không hề vi phạm lý tính, cũng như các định luật cơ học quen thuộc. Chúng ta vẫn có thể xem cái hộp là đứng yên, tuy nó cũng được gia tốc đối với "không gian *Galilei*" được chọn ban đầu. Do đó chúng ta rất có lý do để nói rộng nguyên lý tương đối đến các vật thể quy chiếu chuyển động gia tốc đối với nhau, và như thế có được một lý lẽ mạnh mẽ cho một định đề được mở rộng của thuyết tương đối.

Chúng ta cần lưu ý rằng khả năng cho phép cách diễn giải này là dựa trên một tính chất cơ bản của trọng trường, là làm cho tất cả các vật thể có cùng một gia tốc, hay nói cách khác, dựa trên định lý về đẳng thức giữa khối lượng quán tính và hấp dẫn. Nếu định luật cơ bản này không tồn tại, thì người quan sát trong cái hộp được gia tốc kia sẽ không thể cắt nghĩa sự vận hành của các vật thể xung quanh anh ta bằng sự giả định một trường hấp dẫn, và anh ta sẽ không có lý do nào từ thực nghiệm để giả định một cách chính đáng rằng vật thể quy chiếu của anh ta là một vật thể "đứng yên".

Chúng ta giả thiết người quan sát buộc ở mặt trong của trần hộp một sợi dây, và ở đầu còn lại của dây anh ta buộc một vật thể. Qua vật này sợi dây bị tác dụng và buông xuống "thẳng đứng" trong trạng thái căng ra. Nếu chúng ta hỏi về nguyên nhân sự căng ra của dây thì người ở trong hộp sẽ bảo: "Vật thể được treo trong một trọng trường chịu một lực tác dụng đi xuống, và lực này được giữ cân bằng bởi sự căng ra của dây; yếu tố quyết định cho cường độ căng của dây là *khối lượng hấp dẫn*

của vật treo." Nhưng mặt khác, một quan sát viên lơ lửng tự do trong không gian lại nhận xét về trạng thái trên như sau: "Sợi dây bị bắt buộc cùng thực hiện chuyển động gia tốc của cái hộp, và truyền chuyển động này lên vật thể bị buộc ở dây. Sự căng của dây có cường độ thế nào để có thể gây ra vừa đúng chuyển động gia tốc của vật thể. Yếu tố quyết định cho cường độ căng trong sợi dây là *khối lượng quán tính* của vật thể." Thông qua thí dụ này chúng ta thấy sự mở rộng nguyên lý tương đối của chúng ta làm cho định lý về đẳng thức giữa khối lượng quán tính và hấp dẫn hiện ra như một sự *tất yếu*. Do đó, chúng ta đã có được một sự diễn giải vật lý của định lý này.

Từ việc xem xét cái hộp chuyển động gia tốc người ta thấy rằng một thuyết tương đối rộng phải cung cấp các kết quả quan trọng về định luật của hấp dẫn. Thật vậy, sự theo dõi nhất quán ý tưởng thuyết tương đối rộng đã cung cấp các định luật mà trường hấp dẫn thỏa mãn. Tuy nhiên ở đây tôi cần cảnh báo bạn đọc về một sự hiểu lầm được gợi ra từ những suy nghĩ này. Đối với người trong hộp có một trường hấp dẫn tồn tại, mặc dù đối với hệ tọa độ được chọn ban đầu thì không có một trường như thế. Người ta có thể dễ cho rằng sự tồn tại của một trường hấp dẫn luôn luôn chỉ là một sự tồn tại *ảo*. Người ta có thể nghĩ rằng, với bất cứ một trường hấp dẫn nào đang tồn tại, chúng ta cũng luôn luôn có thể chọn một vật thể quy chiếu sao cho đối với nó *không* có trường hấp dẫn tồn tại. Nhưng điều này hoàn toàn không đúng cho tất cả các trường hấp dẫn, mà chỉ đúng cho những trường có cấu trúc đặc biệt. Cho nên chẳng hạn, không thể nào chọn được một vật thể quy chiếu để sao cho xét từ đó trường hấp dẫn của quả đất biến mất (trong quy mô toàn thể của nó).

Bây giờ chúng ta hiểu được tại sao lý lẽ được đưa ra trong phần cuối của § 18 bất lợi cho nguyên lý tương đối rộng là không thuyết phục. Trong thực tế, quả thật người quan sát trên chiếc xe lửa bị thắng lại cảm nhận một cái giật mạnh về phía trước như hệ quả của sự thắng lại, và anh ta qua đó nhận biết tính không đều của chuyển động xe. Nhưng không ai bắt anh ta quy sự giật ấy về một sự gia tốc "thật sự" của xe. Anh ta cũng có thể diễn giải cảm nhận của mình như sau: "Vật thể quy chiếu của tôi (chiếc xe) vẫn là yên tĩnh. Nhưng trong quá trình thắng lại, đối với

cùng vật thể quy chiếu, có một trọng trường tồn tại được định hướng về phía trước và biến thiên theo thời gian. Dưới ảnh hưởng của trọng trường này, nền ray cùng với quả đất chuyển động không đều, sao cho vận tốc ban đầu của nền ray theo chiều về phía sau liên tục bị giảm đi. Trọng trường này cũng chính là cái đã gây ra cái giạt lên người quan sát."

§ 21

Trong Chừng Mực Nào các Cơ Sở của Cơ Học Cổ Điển và Thuyết Tương Đối Hẹp Là Không Thỏa Đáng?

Như chúng ta đã nhắc đến nhiều lần, cơ học cổ điển xuất phát từ định luật sau đây: Ở đủ xa các điểm vật chất khác, các điểm vật chất tiếp tục chuyển động thẳng đều hay ì lại trong trạng thái yên tĩnh. Chúng ta cũng nhiều lần nhấn mạnh, định luật cơ bản này chỉ có thể đúng cho các vật thể quy chiếu K có những trạng thái chuyển động đặc trưng nhất định, và chúng có chuyển động tịnh tiến đều tương đối với nhau. Đối với các vật thể quy chiếu K' khác, định lý không đúng. Vì thế, cả trong cơ học cổ điển lẫn thuyết tương đối hẹp, người ta phân biệt giữa các vật thể quy chiếu K mà đối với chúng các định luật tự nhiên đúng, và các vật thể quy chiếu K' mà đối với chúng các định luật tự nhiên không đúng.

Nhưng không ai suy nghĩ nhất quán lại có thể thỏa mãn với tình huống này. Anh ta hỏi: "Vì sao lại có một số các vật thể quy chiếu nhất định (hay các trạng thái chuyển động của chúng) lại được ưu đãi hơn các vật thể quy chiếu khác (hay các trạng thái chuyển động của chúng)? *Đâu là lý do của sự ưu đãi này?*" Để làm rõ điều tôi muốn nói với câu hỏi này, xin đơn cử một sự so sánh.

Tôi đứng trước một bếp ga. Trên đó có hai cái nồi đặt cạnh nhau, chúng giống nhau đến độ dễ nhầm lẫn cái này với cái kia. Cả hai được đong nước đến nửa nồi. Tôi nhận thấy từ một nồi, hơi nước liên tục thoát ra, nhưng từ nồi kia thì không. Tôi ngạc nhiên về điều đó, mặc dù ngay khi tôi chưa bao giờ thấy một bếp ga và nồi nấu trước đó. Nếu giờ tôi thấy dưới đáy nồi thứ nhất một cái gì phát sáng có màu xanh, nhưng dưới nồi thứ hai thì không, thì tôi không còn ngạc nhiên nữa, cho dù tôi cũng chưa bao giờ biết lửa ga là gì. Bởi vì tôi chỉ có thể nói, rằng cái gì có ánh sáng màu xanh kia là lý do gây ra sự phát ra hơi nước, hay ít ra có thể gây ra. Nhưng nếu tôi không thấy cái gì màu xanh ở cả hai nồi, và nếu chỉ thấy một cái nồi vẫn tiếp tục bốc hơi, nồi kia thì không, tôi sẽ ngạc nhiên và không thỏa mãn, cho đến bao lâu tôi thấy được một tình huống nào đó để có thể lấy đó quy vào trách nhiệm của sự vận hành khác nhau của hai cái nồi.

Một cách tương tự, tôi đi tìm trong cơ học cổ điển (và trong thuyết tương đối hẹp), một cách hoài công, một cái gì hiện thực để có thể quy về đó sự vận hành khác biệt của các vật thể đối với các hệ quy chiếu K, K' . *Newton* đã thấy vấn đề này, và tìm cách làm cho nó mất hiệu lực, nhưng không thành công. Người nhận thức nó rõ nhất là *E. Mach*, và bản thân ông đã đòi hỏi cơ học phải được đặt trên nền tảng mới. Người ta chỉ có thể loại bỏ vấn đề này bằng một lý thuyết vật lý phù hợp với nguyên lý tương đối rộng. Bởi vì các phương trình của một lý thuyết như thế đều có hiệu lực cho mọi vật thể quy chiếu, dù ở trạng thái chuyển động nào đi nữa. ^[53]

§ 22

Vài Suy Diễn Từ Nguyên Lý Tương Đối Rộng

Các suy nghĩ ở § 20 cho thấy, nguyên lý tương đối rộng tạo cho chúng ta khả năng suy diễn các tính chất của trường hấp dẫn bằng con đường thuần túy lý thuyết. Thực vậy, chúng ta giả thiết một "diễn biến" không-thời-gian của một hiện tượng tự nhiên nào đó được biết, cũng như biết nó diễn ra thế nào trong miền *Galilei* đối với một vật thể quy chiếu *Galilei K*. Lúc đó, bằng những thao tác thuần túy lý thuyết, nghĩa là bằng tính toán đơn thuần, người ta có thể biết hiện tượng tự nhiên được biết trước này có dạng như thế nào nếu nhìn từ một vật thể quy chiếu K' chuyển động gia tốc đối với K . Nhưng vì đối với vật thể quy chiếu mới K' này có một trường hấp dẫn tồn tại, cho nên qua quan sát, chúng ta biết trường hấp dẫn ảnh hưởng thế nào lên hiện tượng đang được nghiên cứu.

Chẳng hạn chúng ta biết, một vật thể, được giả thiết có một chuyển động thẳng đều đối với K (phù hợp với định luật *Galilei*), thì sẽ thực hiện một chuyển động gia tốc và cong, nói chung, đối với vật thể chuyển động gia tốc K' (hộp). Sự gia tốc hay uốn cong này tương ứng với ảnh hưởng của trường hấp dẫn đang ngự trị đối với K' lên vật thể chuyển động. Trường hấp dẫn bằng cách này ảnh hưởng lên chuyển động của các vật thể, điều đó đã được biết đến, cho nên sự suy nghĩ của chúng ta không mang lại cái gì mới cơ bản cả.

Tuy nhiên, chúng ta được một kết quả mới có tầm quan trọng cơ bản khi áp dụng suy nghĩ tương tự lên một tia sáng. Đối với một vật thể quy chiếu *Galilei K*, tia sáng truyền đi theo đường thẳng với vận tốc c . Nhưng đối với cái hộp chuyển động gia tốc (vật thể quy chiếu K'), quỹ đạo của cùng tia sáng không còn là đường thẳng nữa, như có thể dễ dàng suy ra. Từ đó chúng ta kết luận rằng, nói chung, trong các trường hấp dẫn các tia sáng truyền đi theo đường cong. Kết quả này có tầm quan trọng theo hai phương diện.

Trước tiên, kết quả này có thể được so sánh với thực tiễn. Mặc dù một sự nghiên cứu chi tiết cho thấy độ cong của các tia sáng, như được cung cấp bởi thuyết tương đối rộng, chỉ là vô cùng nhỏ

đối với các trường hấp dẫn được chúng ta biết trong kinh nghiệm, thì nó lại có trị số 1,7 giây cung đối với các tia sáng đi qua gần mặt trời. Độ cong này phải được biểu lộ bằng cách sau đây. Nhìn từ mặt đất, các ngôi sao cố định xuất hiện gần mặt trời, và do đó có thể quan sát được khi có nhật thực toàn phần, phải hiện ra lệch khỏi mặt trời với độ lệch bằng độ lệch nói trên, so với vị trí chúng mà chúng ta đã thấy trên bầu trời khi mặt trời đứng ở một vị trí khác. Sự kiểm tra tính đúng đắn, hay không đúng đắn, của hệ luận này là một nhiệm vụ có tầm quan trọng bậc nhất mà lời giải đáp sắp tới của nó chúng ta được quyền chờ đợi từ các nhà thiên văn học.^[54]

Thứ hai, hệ quả này lại chứng minh rằng, theo thuyết tương đối rộng, định luật thường được nhắc đến về tính hằng số của vận tốc ánh sáng, một trong hai giả định cơ bản của thuyết tương đối hẹp, giờ không thể yêu sách có hiệu lực vô hạn được. Thực vậy, một sự uốn cong của các tia sáng chỉ có thể xảy ra được khi vận tốc ánh sáng thay đổi theo vị trí. Người ta có thể nghĩ qua hệ quả này, thuyết tương đối hẹp, và với nó thuyết tương đối nói chung, sẽ bị sụp đổ. Tuy nhiên điều này không đúng trên thực tế. Người ta chỉ có thể kết luận được rằng thuyết tương đối hẹp không thể yêu sách một miền hiệu lực không giới hạn; các kết quả của nó chỉ đúng trong chừng mực chúng ta có thể bỏ qua được ảnh hưởng của các trường hấp dẫn tác dụng lên các hiện tượng (thí dụ như lên ánh sáng).

Vì các đối thủ của thuyết tương đối thường cho rằng, thuyết tương đối hẹp sẽ bị thuyết tương đối rộng làm đổ nhào, tôi muốn làm rõ hơn tình huống thật của nó bằng một sự so sánh. Trước khi có sự xuất hiện của điện động lực học thì các định luật của tĩnh điện học được xem như những định luật của điện học nói chung. Ngày nay chúng ta biết rằng các điện trường được suy ra một cách chính xác từ tĩnh điện học chỉ trong trường hợp mà ở đó các khối lượng điện hoàn toàn đứng yên với nhau và với hệ tọa độ, điều chẳng bao giờ được thực hiện nghiêm ngặt cả. Có phải vì thế mà tĩnh điện học bị các phương trình trường *Maxwell* của điện động lực học làm đổ nhào không? Không chút nào! Tĩnh điện học được chứa đựng trong điện động lực học như một trường hợp tới hạn; các định luật của cái sau trực tiếp dẫn đến các định luật của cái trước trong trường hợp các trường không

biến thiên đối với thời gian. Không có số mệnh nào đẹp hơn cho một lý thuyết vật lý, khi chính nó chỉ ra con đường đi đến thiết lập một lý thuyết rộng lớn hơn, để rồi nó sống tiếp trong đó như một trường hợp tới hạn.

Trong thí dụ truyền ánh sáng vừa được đề cập, chúng ta đã thấy nguyên lý tương đối rộng làm cho chúng ta có khả năng suy diễn được bằng con đường lý thuyết ảnh hưởng của trường hấp dẫn lên diễn biến của các hiện tượng tự nhiên mà các định luật của chúng đã được biết trong trường hợp trường hấp dẫn vắng mặt. Nhưng bài toán hấp dẫn nhất, mà thuyết tương đối cung cấp chìa khóa cho lời giải của nó, liên quan đến việc tìm ra các định luật mà chính trường hấp dẫn thỏa mãn. Tình huống ở đây là như sau.

Chúng ta biết những miền không-thời-gian - mà với sự chọn lựa thích hợp của vật thể quy chiếu - chúng vận hành gần như "Galilei", nghĩa là các miền mà ở đó các trường hấp dẫn vắng mặt. Nếu giờ chúng ta quy chiếu một miền như thế lên một vật thể quy chiếu chuyển động bất kỳ K' , thì đối với K' chúng ta sẽ có một trường hấp dẫn biến thiên theo thời gian và không gian^[55]. Tính chất của trường này dĩ nhiên tùy thuộc vào chuyển động đã được chọn lựa cho K' . Theo thuyết tương đối rộng, định luật phổ quát của trường hấp dẫn phải được thỏa mãn cho tất cả trường hấp dẫn được tạo ra bằng cách đó. Tuy cũng không thể nào tạo ra được tất cả các trường bằng cách đó, nhưng người ta vẫn nuôi hy vọng rằng có thể từ những trường hấp dẫn có dạng đặc biệt này mà suy ra được định luật phổ quát của hấp dẫn. Và niềm hy vọng này đã trở thành sự thật một cách đẹp đẽ nhất! Nhưng từ chỗ thấy được rõ ràng mục tiêu này đến chỗ thực sự đạt được nó, còn cần phải vượt qua một khó khăn nghiêm trọng mà tôi không được phép giấu giếm bạn đọc, bởi vì nó nằm sâu trong bản chất của sự việc. Chúng ta trước nhất cần một sự đào sâu một lần nữa các khái niệm của continuum không-thời-gian.

§ 23

Sự Vận Hành của Đồng Hồ và Thanh Đo Trên Một Vật Thể Quy Chiếu Quay

Cho đến giờ tôi đã cố ý không nói về sự lý giải vật lý của các số đo không gian và thời gian trong trường hợp thuyết tương đối rộng. Qua đó tôi đã làm cho mình có phần mắc lỗi không cẩn thận trong trình bày, điều mà chúng ta đã biết trong phần thuyết tương đối hẹp, rằng nó không hề nhỏ hay có thể tha thứ được. Bây giờ đã đến lúc chúng ta phải lấp lại cái lỗ hổng này; nhưng tôi muốn nói trước công việc này đòi hỏi không ít kiên nhẫn và khả năng tư duy trừu tượng của bạn đọc.

Chúng ta lại xuất phát từ những trường hợp rất đặc thù đã thường được sử dụng. Giả thiết có một miền không-thời-gian sao cho trong đó chúng ta không có trường hấp dẫn đối với một vật thể quy chiếu K , với một trạng thái chuyển động được chọn thích hợp. Đối với miền xem xét, K là một vật thể quy chiếu *Galilei*, và đối với K các kết quả của thuyết tương đối hẹp có giá trị. Chúng ta quy chiếu miền này lên một vật thể quy chiếu thứ hai K' có chuyển động quay đều đối với K . Để cố định suy nghĩ, chúng ta hãy tưởng tượng K' dưới dạng của một đĩa tròn phẳng, quay đều quanh tâm điểm của nó trên mặt phẳng. Một người quan sát ngồi trên đĩa K' ngoài tâm điểm của nó, cảm nhận một lực tác dụng xuyên tâm hướng ra ngoài; lực này được một người quan sát đứng yên đối với vật thể quy chiếu ban đầu K diễn giải là một tác dụng quán tính (lực ly tâm). Nhưng người quan sát ngồi trên đĩa có thể cho rằng đĩa anh ta là vật thể "đứng yên"; theo nguyên lý tương đối rộng, quan niệm của anh ta là chính đáng. Anh ta diễn giải lực tác dụng lên anh ta, hay nói tổng quát, lên các vật thể đứng yên đối với đĩa, là tác dụng của một trường hấp dẫn. Tuy nhiên sự phân bố không gian của trọng trường này là một cái gì không giống như hấp dẫn của thuyết *Newton*.^[56] Nhưng người quan sát không cảm thấy bối rối, vì anh ta tin vào thuyết tương đối rộng; anh ta tin một cách chính đáng, rằng một định luật hấp dẫn phổ quát sẽ được tìm thấy, không những có khả năng giải thích chính xác sự vận hành của các tinh tú, mà còn giải thích được cả trường lực mà anh ta đã cảm nhận trên đĩa.

Người quan sát làm các thí nghiệm với đồng hồ và thanh đo trên đĩa quay của anh ta, với ý định, trên cơ sở các quan sát của mình, tìm thấy các định nghĩa chính xác cho ý nghĩa của các số đo thời gian và không gian đối với đĩa quay K' . Anh ta sẽ thu hoạch được những kinh nghiệm gì?

Để bắt đầu, anh ta lấy hai đồng hồ cấu tạo giống nhau, đặt một cái tại tâm điểm của đĩa, cái kia ở vùng biên, cả hai như vậy sẽ đứng yên đối với đĩa quay. Đầu tiên chúng ta hỏi, hai đồng hồ này có chạy nhanh như nhau hay không nhìn từ vật thể quy chiếu *Galilei* không quay K . Nhận xét từ đây, đồng hồ ở tâm điểm không có vận tốc, trong khi đồng hồ ở ngoại vi có chuyển động, hệ quả của chuyển động quay đối với K . Theo kết quả của § 12, đồng hồ thứ hai vì thế luôn luôn chạy chậm hơn đồng hồ ở tâm điểm của đĩa quay, nhìn từ K . Người quan sát trên đĩa quay mà chúng ta hình dung ngồi tại tâm điểm của đĩa quay, cạnh cái đồng hồ ở đó, rõ ràng cũng phải có cùng một nhận xét như thế. Do đó, trên đĩa quay, và tổng quát hơn trong mỗi trường hấp dẫn, đồng hồ sẽ chạy nhanh hơn hay chậm hơn tùy theo vị trí mà đồng hồ được đặt vào (yên tĩnh). Một định nghĩa hợp lý cho thời gian với sự giúp đỡ của các đồng hồ được đặt yên tĩnh đối với vật thể quy chiếu như vậy là không thể có. Một sự khó khăn tương tự xảy ra nếu chúng ta tìm cách áp dụng ở đây khái niệm trước đây của chúng ta về tính đồng thời. Nhưng tôi không muốn đi sâu hơn.

Hơn nữa, ở đây định nghĩa về tọa độ không gian trước tiên cũng gặp những khó khăn không vượt qua được. Thực vậy, nếu người quan sát đang chuyển động cùng với đĩa đặt một thanh đo đơn vị (một thanh đo nhỏ đối với đường kính đĩa) tại vòng ngoại vi của đĩa và tiếp tuyến với nó, thì thanh đo này, quan sát từ hệ tọa độ *Galilei*, ngắn hơn 1, bởi vì theo § 12 các vật thể chuyển động sẽ chịu một sự thu ngắn theo hướng chuyển động. Nếu ngược lại anh ta đặt thanh đo dọc theo đường bán kính của đĩa, thì thanh đo đó, quan sát từ K , không chịu sự thu ngắn. Do đó nếu người quan sát trước hết đo chu vi của đĩa, sau đó đường kính đĩa bằng thanh đo của anh ta, và sau đó chia hai kết quả cho nhau, anh ta sẽ tìm thấy tỉ lệ không phải là con số quen thuộc $\pi=3,14\dots$ nữa, mà là một số lớn hơn,^[57] trong khi trên một đĩa đứng yên đối với K các phép tính này dĩ nhiên phải cho ra chính

xác số π . Như vậy điều này đã chứng minh rằng các định lý của hình học Euclid trên một đĩa quay, và do đó nói chung trong một trường hấp dẫn, không thể đúng chính xác nữa, ít ra khi người ta cho thanh đo ở mọi vị trí và mỗi hướng độ dài là 1. Khái niệm đường thẳng cũng mất đi ý nghĩa của nó. Vì thế chúng ta không có khả năng định nghĩa một cách chính xác các tọa độ x, y, z đối với đĩa quay theo phương pháp đã được sử dụng trong thuyết tương đối hẹp. Và bao lâu tọa độ và thời gian của các sự kiện không được định nghĩa, các định luật tự nhiên trong đó các tọa độ này xuất hiện, cũng không có ý nghĩa chính xác.

Như vậy, tất cả những suy nghĩ mà chúng ta đã đưa ra đến nay về thuyết tương đối rộng dường như đã bị đặt dấu hỏi. Nhưng sự thật, chúng ta cần một con đường vòng tinh tế hơn để áp dụng được định đề của thuyết tương đối rộng một cách chính xác. Bạn đọc sẽ được chuẩn bị cho con đường này bằng những chương sau.

§ 24

Continuum Euclid và Phi-Euclid

Trước mặt tôi là bề mặt của một cái bàn đá cẩm thạch đang trải ra. Tôi có thể đi từ một điểm bất kỳ của bề mặt đến một điểm bất kỳ khác của nó, bằng cách đi liên tục từ một điểm đến điểm "láng giềng", và tiếp tục đi với một số (lớn) lần, hay nói một cách khác, bằng cách tôi đi từ điểm này đến điểm khác mà không phải làm những "bước nhảy". Tôi chắc đọc giả đủ hiểu các từ "láng giềng" hay "bước nhảy" (nếu anh ta không quá khó tính). Điều này được chúng ta biểu thị bằng cách nói rằng bề mặt là một continuum.

Chúng ta hãy tưởng tượng một số lượng lớn que con có độ dài bằng nhau được sản xuất, chiều dài của chúng rất nhỏ so với kích thước của mặt bàn. Nếu tôi bảo chiều dài của chúng bằng nhau, điều đó có nghĩa rằng các đầu của mỗi hai que chồng khít được lên nhau (khi chúng chập lên nhau). Bây giờ chúng ta đặt bốn trong các que con này lên mặt bàn cẩm thạch thế nào để chúng làm thành một hình tứ giác có các đường chéo dài bằng nhau (hình vuông). Để bảo đảm đẳng thức của đường chéo, chúng ta có thể sử dụng một que thử. Cạnh hình vuông này chúng ta đặt các hình vuông tương tự khác, mỗi cái của chúng có chung với nó một que con. Rồi làm như thế đối với các hình vuông mới, v.v. cho đến khi cuối cùng cả mặt bàn sẽ được phủ bởi các hình vuông. Với sự sắp xếp này, mỗi một cạnh hình vuông bên trong thuộc về hai hình vuông, và mỗi (điểm) góc của hình vuông bên trong thuộc về bốn hình vuông.

Thật là một điều ngạc nhiên đích thực khi người ta có thể thực hiện công việc này mà không gặp phải khó khăn lớn nhất nào! Người ta chỉ cần nghĩ đến điều sau đây. Nếu cứ ba hình vuông gặp nhau tại một góc, thì hai cạnh của hình vuông thứ tư đã được đặt xuống, và do đó hai cạnh còn lại đã được xác định hoàn toàn. Tôi không thể điều chỉnh hình tứ giác nữa để làm cho hai đường chéo bằng nhau. Chúng đã bằng nhau, bởi đó là một đặc ân của mặt bàn và của các que con mà tôi chỉ biết ngạc nhiên trong sự cảm ơn! Chúng ta sẽ ngạc nhiên nhiều lần như thế khi chúng kiến sự xây dựng đều kết thúc thành công tốt đẹp.

Nếu thực sự mọi việc diễn ra một cách trôi chảy, thì tôi nói rằng các điểm của mặt bàn hợp thành một continuum *Euclid* đối với các que con được sử dụng như "khoảng cách". Bằng cách chọn một góc của một hình vuông làm "điểm gốc", tôi có thể đặc trưng mỗi một góc hình vuông khác đối với điểm gốc bằng hai con số. Tôi chỉ cần cho biết, tôi phải đi từ điểm gốc qua bao nhiêu que con về phía "phải" và kể đó qua bao nhiêu que con lên phía "trên", để đi đến góc hình vuông đã nói. Hai số này chính là các "tọa độ Descartes" của góc đang nói đối với "hệ tọa độ Descartes" được xác định bằng sự sắp xếp của các que con đã được thực hiện.

Tuy nhiên cũng có những trường hợp thí nghiệm không thành công, như chúng ta nhận thấy ở sự biến thể như sau của thí nghiệm ý tưởng. Chúng ta giả thiết các que con "giãn nở" tỷ lệ theo độ tăng của nhiệt độ.

Mặt bàn được đun nóng lên ở giữa, nhưng ở vùng biên thì không, nơi đó hai trong bốn que con chúng ta vẫn còn có thể đặt trùng lên nhau tại mỗi điểm của bàn. Nhưng việc xây dựng các hình vuông của chúng ta ắt phải chịu sự xáo trộn trong quá trình đun nóng, bởi các que con của phần trong mặt bàn bị giãn nở, các que con của phần ngoài thì không.

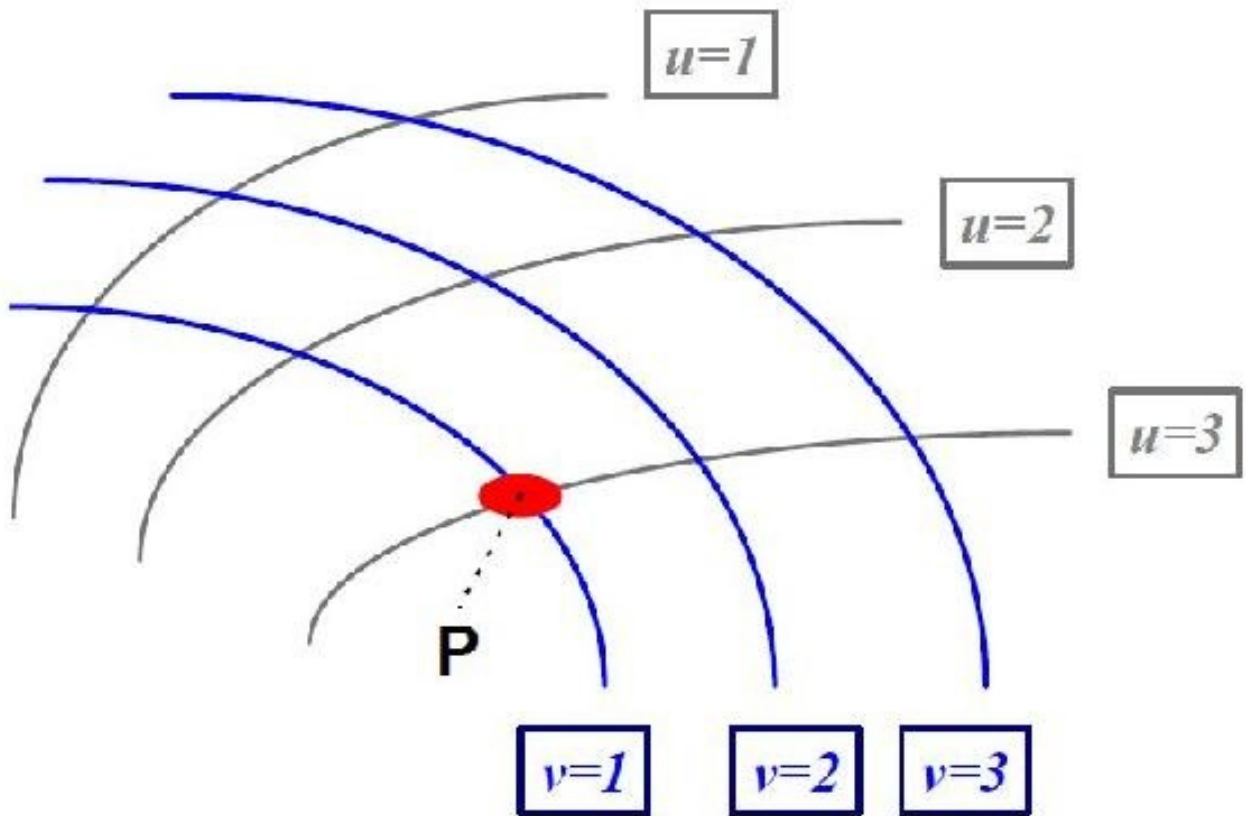
Đối với các que con của chúng ta - được định nghĩa như các khoảng cách đơn vị - thì mặt bàn bây giờ không còn là continuum *Euclid* nữa, và chúng ta cũng không còn khả năng định nghĩa tọa độ Descartes trực tiếp với sự giúp đỡ của chúng được, bởi sự xây dựng nói trên không thể thực hiện được nữa. Nhưng cũng có những vật khác không bị ảnh hưởng bởi nhiệt độ của bàn một cách tương tự như các que con (hoặc không hề bị ảnh hưởng chút nào), nên, một cách tự nhiên, ta có thể vẫn giữ quan điểm, rằng mặt bàn là một "continuum Euclid"; điều này có thể được thực hiện một cách thỏa đáng bằng một quy định tinh tế hơn về đo đạc hay so sánh các khoảng cách.

Nhưng nếu các que của tất cả mọi loại (nghĩa là mọi loại vật chất) vận hành *cùng một cách* nhạy cảm đối với nhiệt độ trên mặt bàn được điều chỉnh khác nhau, và nếu chúng ta không có phương tiện nào khác để phát hiện tác dụng của nhiệt độ hơn là sự vận hành hình học của các que con trong các thí nghiệm

tương tự với thí nghiệm đã được mô tả trên, thì có lẽ tốt hơn nếu chúng ta quy định khoảng cách của hai điểm trên bàn là 1, nếu hai đầu của một trong các que con chúng ta có thể được đặt trùng lên chúng; vì làm sao chúng ta định nghĩa được khoảng cách nếu không bằng một sự tùy tiện thô thiển như thế? Nhưng như vậy thì phương pháp tọa độ Descartes phải bị từ bỏ, và được thay thế bằng một phương pháp khác không giả thiết tính hiệu lực của hình học Euclid cho các vật thể rắn.^[58] Bạn đọc nhận ra rằng, tình huống được mô tả ở đây tương ứng với tình huống nảy sinh ra bởi định đề tương đối rộng (§ 23).

§ 25 Tọa Độ Gauss

Theo *Gauss*, cách xử lý kết hợp hình học và giải tích đối với bài toán đặt ra có thể đạt được bằng cách thức như sau. Chúng ta tưởng tượng có một hệ thống các đường cong bất kỳ (xem Ảnh 3) được vẽ lên mặt bàn mà chúng ta gọi là những đường cong u , và được tượng trưng bằng một con số cho mỗi cái.



Ảnh 3

Trong ảnh những đường cong $u = 1$, $u = 2$, $u = 3$ được vẽ lên. Mặt khác hãy tưởng tượng giữa hai đường $u = 1$ và $u = 2$ có vô số đường cong được vẽ lên, chúng tương ứng với tất cả các số thực nằm giữa 1 và 2. Như vậy chúng ta có một hệ thống các đường cong u vô cùng dày đặc bao phủ mặt bàn. Không đường u nào được phép cắt đường u khác, và qua mỗi điểm của mặt bàn chỉ có một đường u được phép đi qua thôi. Mỗi điểm của bề mặt của bàn do đó tương ứng với một trị số u hoàn toàn nhất định. Một cách tương tự, chúng ta tưởng tượng một hệ thống các đường cong v ; được vẽ lên bề mặt, thỏa mãn cùng những điều kiện như những đường cong u , được đánh dấu bằng các số một cách tương tự,

nhưng cũng có dạng bất kỳ. Mỗi điểm của mặt bàn như vậy sẽ tương ứng một trị số u và một trị số v , và chúng ta gọi hai số này là tọa độ của mặt bàn (tọa độ *Gauss*). Điểm P trong hình vẽ chẳng hạn có tọa độ $u = 3$ và $v = 1$. Hai điểm lân cận P và P' tương ứng với các tọa độ

$$P: u, v$$

$$P': u + du, v + dv$$

trong đó du và dv có nghĩa là những số rất nhỏ. Một cách tương tự, khoảng cách đo được với một que con của P và P' cũng là một số rất nhỏ ds . Lúc đó theo *Gauss* chúng ta có:

$$ds^2 = g_{11} du^2 + 2g_{12} dudv + g_{22} dv^2$$

trong đó g_{11} , g_{12} , g_{22} là những đại lượng tùy thuộc một cách nhất định vào u và v . Các đại lượng g_{11} , g_{12} và g_{22} xác định quan hệ của các que đo đối với các đường u và đường v , nghĩa là cũng đối với bề mặt của bàn. Trong trường hợp các điểm của bề mặt được xem xét tạo thành một continuum Euclid đối với các que đo con, và cũng chỉ khi đó, thì các đường u và đường v có thể được vẽ và được mang các số sao cho chúng ta có một cách đơn giản

$$ds^2 = du^2 + dv^2$$

Lúc đó các đường u và đường v là những đường thẳng theo nghĩa của hình học Euclid, và chúng thẳng góc nhau. Ở đây tọa độ *Gauss* đơn giản là tọa độ Descartes. Chúng ta thấy tọa độ *Gauss* không gì khác hơn là một phép tương ứng của cứ hai số thành một điểm của bề mặt đang xem xét, sao cho các điểm lân cận trong không gian tương ứng với những trị số khác nhau rất ít.

Những suy nghĩ này đến nay đúng cho một continuum hai chiều. Nhưng phương pháp *Gauss* cũng áp dụng được cho một continuum ba, bốn, hay nhiều chiều. Chẳng hạn với một continuum bốn chiều, thì chúng ta có thể biểu thị nó như sau. Với mỗi điểm của continuum chúng ta làm tương ứng một cách bất kỳ bốn số x_1, x_2, x_3 và x_4 mà chúng ta gọi là "tọa độ". Các điểm lân cận tương ứng với các trị số tọa độ lân cận. Nếu hai điểm lân cận P và P' tương ứng với một khoảng cách ds có thể đo đạc và được

định nghĩa rõ về quan điểm vật lý, thì công thức sau đây sẽ đúng

$$ds^2 = g_{11}dx^2 + 2g_{12}dx_1x^2 + \dots + g_{44}dx_4^2$$

trong đó các đại lượng g_{11} , v.v. có các trị số có thể biến thiên theo vị trí trong continuum. Chỉ trong trường hợp continuum là một continuum Euclid, chúng ta có thể chọn các tọa độ x_1, x_2, x_3, x_4 tương ứng với các điểm của continuum để có một cách đơn giản

$$ds^2 = dx^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + dx_4^2$$

Lúc đó các quan hệ trong continuum bốn chiều cũng đúng một cách tương tự như các quan hệ đúng trong các phép đo đạc ba chiều.

Phép biểu thị *Gauss* cho ds^2 chúng ta vừa thấy thực ra không phải luôn luôn có thể thực hiện được, mà chỉ có thể được trong trường hợp khi continuum xem xét có tính chất các miền đủ nhỏ của nó có thể được xem như những continuum Euclid. Điều đó rõ ràng đúng trong trường hợp của mặt bàn cẩm thạch và sự biến thiên cục bộ của nhiệt độ. Bởi vì đối với một phần nhỏ của bàn, nhiệt độ được xem như hằng số, sự vận hành hình học của các que nhỏ *hầu như* là sự vận hành theo các quy luật của hình học Euclid. Các sự bất nhất trong việc xây dựng hình vuông của chương trước chỉ hiện ra, khi việc xây dựng được nói rộng ra cho một phần đáng kể của mặt bàn.

Tóm tắt lại, chúng ta có thể nói rằng: *Gauss* đã phát minh ra một phương pháp cho việc xử lý toán học các continuum tổng quát, trong đó các "quan hệ độ lớn" ("khoảng cách" của các điểm lân cận) được định nghĩa. Mỗi điểm của continuum tương ứng với nhiều số (tọa độ *Gauss*) như số chiều của continuum. Phép tương ứng này được thực hiện sao cho tính duy nhất của nó được bảo đảm, và tương ứng với những điểm lân cận là những số khác nhau vô cùng nhỏ. Hệ tọa độ *Gauss* là một sự tổng quát hóa lôgic của hệ tọa độ Descartes. Nó cũng được áp dụng lên các continuum phi-Euclid, nhưng chỉ có thể được khi đối với độ đo đã được định nghĩa ("khoảng cách"), các phần nhỏ của continuum vận hành càng giống Euclid - với sự xấp xỉ càng lớn - nếu phần được xem xét của continuum càng nhỏ.

§ 26

Continuum Không-thời-gian của Thuyết Tương Đối Hẹp Là Euclid

Giờ đây chúng ta có đầy đủ điều kiện để biểu thị một cách chính xác hơn ý tưởng của *Minkowski* đã được phác họa trong § 17. Theo thuyết tương đối hẹp, để biểu thị continuum không-thời-gian bốn chiều, một số hệ tọa độ nhất định được ưu đãi mà chúng ta đã gọi là "hệ tọa độ *Galilei*". Đối với hệ này, chúng ta có bốn tọa độ x, y, z, t đã được xác định về vật lý một cách đơn giản; chúng xác định một sự kiện - hay nói một cách khác - một điểm của continuum bốn chiều, như đã trình bày chi tiết trong phần thứ nhất của quyển sách. Đối với sự chuyển đổi từ một hệ *Galilei* sang một hệ khác có chuyển động đều đối với hệ thứ nhất, các phương trình của phép biến đổi Lorentz có hiệu lực. Các phương trình này làm thành cơ sở diễn dịch các hệ quả của thuyết tương đối hẹp, và bản thân chúng không gì khác hơn là sự biểu hiện tính hiệu lực phổ quát của định luật truyền ánh sáng cho tất cả các hệ quy chiếu *Galilei*.

Minkowski đã tìm thấy các phép biến đổi Lorentz thỏa mãn các điều kiện đơn giản sau đây. Chúng ta xét hai sự kiện lân cận nhau mà vị trí tương đối trong continuum bốn chiều được cho bởi các hiệu số tọa độ không gian dx, dy, dz và hiệu số thời gian dt đối với một vật thể quy chiếu *Galilei* K . Đối với một hệ *Galilei* thứ hai, các hiệu số tương tự cho hai sự kiện này là dx', dy', dz', dt' . Lúc đó chúng ta luôn luôn có mối liên hệ giữa chúng:

$$dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2 = dx'^2 + dy'^2 + dz'^2 - c^2 dt'^2$$

Mối liên hệ này là hệ quả từ tính hiệu lực của phép biến đổi Lorentz. Chúng ta có thể phát biểu điều này như sau: Đại lượng

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2$$

thuộc về hai điểm lân cận của continuum không-thời-gian bốn chiều luôn luôn có cùng trị số đối với tất cả vật thể quy chiếu (*Galilei*) được ưu đãi. Nếu thay thế $x, y, z, \sqrt{-1}ct$ bằng x_1, x_2, x_3, x_4 chúng ta cũng được kết quả, rằng đại lượng

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + dx_4^2$$

là độc lập với sự chọn lựa của vật thể quy chiếu. Chúng ta gọi đại lượng ds là "khoảng cách" của hai sự kiện, hay hai điểm bốn chiều.

Như thế, nếu chọn biến số ảo ct thay vì biến số thực t , chúng ta có thể quan niệm continuum không-thời-gian, phù hợp với thuyết tương đối hẹp, như một continuum bốn chiều Euclid, theo như những trình bày của chương trước.

§ 27

Continuum Không-thời-gian của Thuyết Tương Đối Rộng Là Phi-Euclid

Trong phần thứ nhất của cuốn sách nhỏ này chúng ta đã có thể sử dụng các tọa độ không-thời-gian. Chúng cho phép một sự diễn giải vật lý học trực tiếp và đơn giản, và theo § 26, có thể được xem như tọa độ Descartes bốn chiều. Điều đó có thể được, trên cơ sở định luật về tính hằng số của vận tốc ánh sáng. Nhưng theo § 21, thuyết tương đối rộng lại không thể giữ vững được định luật này. Ngược lại, thực tế chúng ta đã đi đến kết quả, theo thuyết sau vận tốc ánh sáng phải luôn lệ thuộc vào các tọa độ, khi có một trường hấp dẫn tồn tại. Hơn nữa, ở một thí dụ đặc biệt trong § 23, chúng ta còn tìm thấy sự hiện diện của một trường hấp dẫn làm cho định nghĩa về tọa độ và thời gian vô nghĩa, điều mà với thuyết tương đối hẹp đã thành công.

Trước những kết quả của sự suy nghĩ này, chúng ta đi đến sự tin tưởng, theo nguyên lý tương đối rộng, continuum không-thời-gian không thể được quan niệm là một continuum Euclid, mà ở đây chúng ta có trường hợp tổng quát, tương ứng với mặt bàn cảm thạch với nhiệt độ biến thiên cục bộ mà chúng ta đã làm quen như một thí dụ của một continuum hai chiều. Nếu ở đó chúng ta không thể xây dựng một hệ tọa độ Descartes với những que nhỏ bằng nhau, thì ở đây chúng ta cũng không thể xây dựng một hệ thống (vật quy chiếu) từ những vật thể rắn và đồng hồ, sao cho các thanh đo và đồng hồ, được sắp xếp cố định với nhau, lại có thể chỉ báo vị trí và thời gian một cách trực tiếp. Đó là bản chất của sự khó khăn mà chúng ta đã gặp phải trong § 23.

Tuy nhiên các suy nghĩ của § 25 và § 26 chỉ cho chúng ta con đường khắc phục khó khăn này. Chúng ta quy chiếu continuum không-thời-gian bốn chiều một cách bất kỳ lên các tọa độ *Gauss*. Với mỗi điểm (sự kiện) của continuum chúng ta làm tương ứng bốn số x_1, x_2, x_3, x_4 (tọa độ), trước tiên không có ý nghĩa vật lý trực tiếp nào cả, mà chỉ để đánh số các điểm của continuum một cách nào đó, và tùy tiện. Chúng ta cũng không cần phải hiểu x_1, x_2, x_3 là các tọa độ "không gian", và x_4 là tọa độ "thời gian".

Bạn đọc có thể nghĩ rằng một sự mô tả như thế của thế giới là

hoàn toàn không thích hợp. Vì nó có nghĩa gì nếu từ một hiện tượng tôi làm tương ứng các tọa độ nhất định x_1, x_2, x_3, x_4 khi những tọa độ này tự nó không có ý nghĩa gì hết? Nhưng khi suy nghĩ kỹ chúng ta thấy lo lắng này là không có cơ sở. Chẳng hạn chúng ta xét một điểm vật chất với một chuyển động bất kỳ. Nếu điểm này chỉ tồn tại nhất thời mà không có độ dài thời gian, thì nó được mô tả bởi một hệ thống duy nhất, của các trị số x_1, x_2, x_3, x_4 . Sự tồn tại kéo dài do đó sẽ được đặc trưng bởi một số lớn vô hạn của những hệ thống trị số như thế, với các trị số tọa độ nối tiếp nhau liên tục; điểm khối lượng do đó tương ứng với một đường (một chiều) trong continuum bốn chiều. Nhiều điểm chuyển động do đó tương ứng với những đường như thế trong continuum chúng ta. Những mệnh đề duy nhất liên quan đến các điểm này, nếu có thể đòi hỏi một thực tại vật lý, thì thật sự chính là những mệnh đề về sự gặp gỡ của những điểm này. Trong sự biểu thị toán học, một sự gặp gỡ như thế được đặc trưng bởi sự kiện hai đường biểu diễn chuyển động của các điểm liên hệ có chung nhau một hệ thống nào đó x_1, x_2, x_3, x_4 của những trị số tọa độ. Sau khi suy nghĩ kỹ bạn đọc sẽ thừa nhận không nghi ngờ rằng những sự gặp gỡ như thế trong thực tế là những sự xác nhận duy nhất thật sự về tính chất không-thời-gian mà chúng ta gặp phải trong các mệnh đề vật lý.

Trước đây khi mô tả chuyển động của một điểm vật chất đối với một vật thể quy chiếu, chúng ta không xác nhận gì khác hơn là những sự gặp gỡ của điểm này với những điểm nhất định của vật thể quy chiếu. Các xác nhận thời gian liên quan cũng được quy về xác nhận các sự gặp gỡ của vật thể với các đồng hồ, kết hợp với xác nhận sự gặp gỡ của kim đồng hồ với các điểm nhất định của các mặt số đồng hồ. Nó không gì khác hơn đối với các đo đạc không gian bằng thanh đo, như một vài suy nghĩ cho thấy.

Một cách tổng quát chúng ta có: Mỗi sự mô tả vật lý được quy về một số các mệnh đề, mà mỗi mệnh đề trong đó quy về sự trùng hợp của hai sự kiện A và B . Mỗi mệnh đề như thế được biểu thị trong tọa độ *Gauss* bằng sự trùng nhau của bốn tọa độ x_1, x_2, x_3, x_4 . Sự mô tả continuum không-thời-gian bằng tọa độ *Gauss* do

đó thực sự thay thế hoàn toàn sự mô tả bằng một vật thể quy chiếu, mà không phải chịu thiệt thòi từ những khuyết điểm của phương pháp mô tả sau; nó không bị gắn liền với tính chất Euclid của continuum cần được biểu diễn.

§ 28

Sự Diễn Tả Chính Xác của Nguyên Lý Tương Đối Rộng

Bây giờ chúng ta có khả năng thay thế sự biểu thị tạm thời của nguyên lý tương đối rộng đã được trình bày trong § 18 bằng một sự biểu thị chính xác. Lỗi biểu thị trước đây: "Tất cả vật thể quy chiếu K, K' , v.v. là tương đương với nhau trong việc mô tả các hiện tượng tự nhiên (sự biểu thị các định luật tự nhiên phổ quát), bất kể trạng thái chuyển động của chúng" không thể đứng vững được, bởi vì việc sử dụng các vật thể rắn trong việc mô tả không-thời-gian, theo nghĩa của phương pháp đã được sử dụng trong thuyết tương đối hẹp, nói chung là không thể được. Hệ thống tọa độ *Gauss* đã thay thế vị trí của vật thể quy chiếu. Mệnh đề sau đây là tương ứng với ý tưởng nền tảng của nguyên lý tương đối rộng: "*Tất cả các hệ thống tọa độ Gauss là thiết yếu tương đương nhau trong việc hiểu thị các định luật phổ quát của tự nhiên.*"

Chúng ta cũng có thể phát biểu nguyên lý tương đối rộng này ở một dạng khác. Nó có thể làm cho người ta còn nhận dạng nguyên lý tương đối rộng rõ hơn với tính chất là một sự nở rộng tự nhiên của nguyên lý tương đối hẹp. Theo thuyết tương đối hẹp, các phương trình mô tả các định luật tự nhiên phổ quát được chuyển biến sang thành các phương trình có cùng dạng, nếu chúng ta thay thế các biến số không-thời-gian x, y, z, t của một vật thể quy chiếu K (*Galilei*), thông qua phép biến đổi Lorentz, bằng các biến số không-thời-gian x', y', z', t' của một vật thể quy chiếu mới K' . Mặt khác, theo thuyết tương đối rộng, thông qua sự thay thế bất kỳ các biến số *Gauss* x_1, x_2, x_3, x_4 , các phương trình phải được chuyển sang thành các phương trình có cùng dạng; bởi vì mỗi phép biến đổi (không chỉ phép biến đổi Lorentz) tương ứng với sự chuyển đổi từ một hệ tọa độ *Gauss* sang một hệ khác.

Nếu chúng ta muốn giữ cách nhìn ba chiều quen thuộc thì chúng ta có thể đặc trưng sự phát triển đã diễn ra bởi ý tưởng nền tảng của thuyết tương đối rộng như sau: Thuyết tương đối hẹp áp dụng cho các miền *Galilei*, nghĩa là các miền ở đó không có trường hấp dẫn. Vật thể quy chiếu được sử dụng ở đó là một vật thể *Galilei*, nghĩa là một vật thể rắn với trạng thái chuyển

động được chọn sao cho đối với nó, định lý *Galilei* về chuyển động thẳng đều của các điểm vật chất "cô lập" có hiệu lực.

Những suy nghĩ nhất định gợi ra rằng chúng ta cũng nên quy những miền *Galilei* này lên các vật thể quy chiếu *phi-Galilei*. Như vậy, đối với các vật quy chiếu này sẽ có một trường hấp dẫn dạng đặc biệt tồn tại (§ 20 và § 23).

Tuy nhiên, trong các trường hấp dẫn không có các vật thể rắn với các tính chất Euclid như thế; do đó sự tưởng tượng về một vật thể rắn chỉ là ảo tưởng trong thuyết tương đối rộng. Chuyển động của đồng hồ cũng bị ảnh hưởng bởi trường hấp dẫn, đến độ một định nghĩa vật lý về thời gian, trực tiếp với sự giúp đỡ của đồng hồ, hoàn toàn không có mức độ hợp lý như trong thuyết tương đối hẹp.

Do đó người ta sử dụng các vật quy chiếu không-rắn, chúng không những chuyển động bất kỳ như một khối toàn thể, mà ngay trong lúc chuyển động cũng còn chịu những biến dạng bất kỳ. Để định nghĩa thời gian, người ta sử dụng các đồng hồ với một quy luật vận hành bất kỳ, dù không đều thế nào đi nữa, và tưởng tượng gắn mỗi cái tại một điểm của vật thể quy chiếu không-rắn. Các đồng hồ này chỉ thỏa mãn một điều kiện, rằng các số đọc (thời gian) được quan sát cùng một lúc ở các đồng hồ lân cận nhau (về không gian) chỉ khác nhau vô cùng nhỏ. Vật thể quy chiếu không-rắn này, cái người ta có thể gọi là "nhuyễn thể" quy chiếu"^[59] không phải không chính đáng, về cơ bản tương đương với một hệ tọa độ *Gauss* bốn chiều được chọn bất kỳ. Điều đã tạo cho "nhuyễn thể" một tính trực quan nhất định, như khi so sánh với hệ tọa độ *Gauss*, đó là sự giữ được về mặt hình thức (thực ra không chính đáng) sự tồn tại riêng của các tọa độ không gian trước tọa độ thời gian. Mỗi điểm của nhuyễn thể được xem như một điểm không gian, mỗi điểm vật chất đứng yên đối với nó là đứng yên nói chung, bao lâu nhuyễn thể được xem như vật thể quy chiếu. Nguyên lý tương đối rộng yêu cầu tất cả mọi vật nhuyễn thể có thể được sử dụng cùng một cách công bằng, và với sự thành công như nhau, trong việc biểu thị các định luật phổ quát của tự nhiên với tư cách là vật thể quy chiếu; các định luật cần phải hoàn toàn độc lập với sự chọn lựa nhuyễn thể.

Nguồn sức mạnh vốn tiềm tàng trong nguyên lý tương đối

rộng chính nằm trong sự giới hạn bao quát được áp lên các định luật tự nhiên như hệ quả chúng ta đã thấy ở trên.

§ 29

Lời Giải của Bài Toán Lực Hấp Dẫn trên Cơ Sở Nguyên Lý Tương Đối Rộng

Nếu bạn đọc theo dõi tất cả những suy nghĩ đã được trình bày đến nay thì sẽ không còn khó khăn để hiểu các phương pháp dẫn đến lời giải bài toán của hấp dẫn.

Chúng ta bắt đầu bằng việc xem xét một miền *Galilei*, nghĩa là một miền mà trong đó, đối với vật thể quy chiếu *Galilei K*, không có trường hấp dẫn tồn tại. Sự vận hành của các thanh đo và đồng hồ đối với *K* đã được biết từ thuyết tương đối hẹp, cũng như sự vận hành của các điểm vật chất "cô lập"; các điểm này chuyển động đều và theo đường thẳng.

Bây giờ chúng ta quy chiếu miền này lên một hệ tọa độ *Gauss* bất kỳ, hay lên một "nhuyễn thể" như là vật quy chiếu *K'*. Đối với *K'* tồn tại một trường hấp dẫn *G* (của một dạng đặt biệt). Bằng phép biến đổi toán học thuần túy, chúng ta sẽ biết được sự vận hành của các thanh đo và đồng hồ, cũng như của các chất điểm chuyển động tự do đối với *K'*. Sự vận hành này người ta diễn giải như là sự vận hành của các thanh đo, đồng hồ và chất điểm dưới tác dụng của trường hấp dẫn *G*. Tiếp đến, người ta đưa vào giả thuyết, rằng tác dụng của trường hấp dẫn lên thanh đo, đồng hồ và các chất điểm chuyển động tự do cũng tiếp tục diễn ra theo cùng những định luật, ngay khi trường hấp dẫn tồn tại *không phải* được suy diễn từ trường hợp đặc biệt *Galilei* thông qua một phép biến đổi tọa độ thuần túy.

Tiếp theo, người ta nghiên cứu sự vận hành không-thời-gian của trường hấp dẫn *G* được suy ra từ trường hợp đặc biệt *Galilei* đơn giản thông qua phép biến đổi tọa độ. Sự vận hành này được biểu thị bằng một định luật, luôn luôn có giá trị cho dù vật thể quy chiếu (nhuyễn thể) được sử dụng cho sự biểu thị được lựa chọn thế nào.

Định luật này chưa phải là định luật *phổ quát* của trường hấp dẫn, bởi vì trường hấp dẫn *G* được nghiên cứu là trường có dạng đặc biệt. Để tìm ra định luật trường phổ quát của hấp dẫn người ta cần đến sự khái quát hóa của định luật vừa thu hoạch được. Sự khái quát hóa này tuy nhiên có thể được tìm thấy không phải

một cách tùy tiện, mà dưới sự chú ý đến các yêu cầu sau đây:

a) Sự khái quát hóa được tìm thấy cũng phải thỏa mãn định đề tương đối rộng.

b) Nếu có vật chất tồn tại trong miền nghiên cứu, thì chỉ có khối lượng quán tính của nó, và do đó theo § 15, chỉ năng lượng của nó là có tính chất quyết định cho tác dụng gây ra trường của nó.

c) Trường hấp dẫn cùng với vật chất phải thỏa mãn định luật về bảo toàn của năng lượng (và của xung lực).

Cuối cùng, nguyên lý tương đối rộng cho phép chúng ta xác định ảnh hưởng của trường hấp dẫn lên diễn biến của tất cả các hiện tượng đã diễn ra theo những định luật đã biết khi trường hấp dẫn vắng mặt, nghĩa là chúng đã khớp vào khuôn khổ của thuyết tương đối hẹp. Khi làm việc đó, người ta về nguyên tắc thực hiện theo đúng phương pháp đã được trình bày trước đây cho thanh đo, đồng hồ, và các điểm khối lượng chuyển động tự do.

Thuyết trường hấp dẫn được suy diễn như thế từ nguyên lý tương đối rộng có ưu điểm vượt trội không những ở vẻ đẹp của nó, mà nó còn loại bỏ không những khuyết điểm đã được giải thích ở § 21 vốn nằm trong bản chất của cơ học cổ điển; nó không những diễn giải được định luật của kinh nghiệm về đẳng thức giữa khối lượng quán tính và khối lượng hấp dẫn, mà còn đã giải thích được hai kết quả quan sát quan trọng với bản chất khác nhau của thiên văn học mà cơ học cổ điển đã bất lực. Kết quả thứ hai của hai kết quả này chính là sự uốn cong của các tia sáng dưới tác dụng trường hấp dẫn của mặt trời, điều đã được chúng ta nhắc tới. Kết quả thứ nhất liên quan đến quỹ đạo của hành tinh Sao Thủy^[60].

Nếu chúng ta ứng dụng các phương trình của thuyết tương đối rộng lên trường hợp đặc biệt khi các trường hấp dẫn có thể được xem là yếu, và khi tất cả các khối lượng chuyển động đối với hệ tọa độ với một vận tốc nhỏ so với vận tốc ánh sáng, chúng ta sẽ được thuyết *Newton* như một xấp xỉ bậc nhất. Do đó thuyết sau được suy ra ở đây mà không cần một giả thiết đặc biệt nào, trong khi *Newton* đã đưa ra giả thuyết rằng lực hút giữa các điểm

khối lượng tác dụng lên nhau tỉ lệ nghịch với bình phương khoảng cách chúng. Nếu chúng ta tăng độ chính xác của phép tính, những khác biệt với thuyết *Newton* sẽ xuất hiện, nhưng vì quá nhỏ nên hầu hết chúng vẫn còn vượt khỏi sự quan sát của chúng ta.

Chúng ta ở đây cần quan tâm đặc biệt đến một trong những khác biệt này. Theo thuyết *Newton*, một hành tinh chuyển động quanh mặt trời trên một quỹ đạo ellip, và ellip này sẽ giữ vững vị trí của nó mãi mãi đối với các vì sao cố định, nếu chúng ta bỏ qua tác dụng của những hành tinh khác lên hành tinh đang xét, và bỏ qua chuyển động tự thân của các vì sao cố định. Bỏ qua hai loại ảnh hưởng này, và nếu thuyết *Newton* là đúng một cách chính xác, thì quỹ đạo của hành tinh là một quỹ đạo cố định đối với các vì sao cố định. Sự suy diễn trên, vốn có thể được kiểm tra chính xác cao, có thể được xác nhận cho tất cả các hành tinh với độ chính xác đạt được bởi độ tinh vi cho phép hôm nay, trừ Sao Thủy là hành tinh gần mặt trời nhất. Tuy nhiên đối với hành tinh Sao Thủy chúng ta biết từ *Le Verrier*, hình ellip của quỹ đạo, sau khi đã được tu chỉnh theo nghĩa trên, không hề đứng yên đối với các vì sao cố định, mà chuyển động quay, mặc dù vô cùng chậm trong mặt phẳng của quỹ đạo, và theo nghĩa của chuyển động quỹ đạo. Trị số quan sát được của chuyển động quay vòng này của quỹ đạo ellip là 43 giây cung trong một trăm năm, một con số chính xác với sai số vài giây cung trở lại. Sự giải thích hiện tượng này theo cơ học cổ điển chỉ thành công bằng việc chấp nhận những giả thuyết tự nghĩ ra, rất ít khả năng có lý, chỉ dành riêng cho mục đích này mà thôi.

Trên cơ sở của thuyết tương đối rộng, người ta tìm thấy quỹ đạo ellip của mỗi hành tinh xung quanh mặt trời tất yếu phải quay theo cách trình bày trên; mỗi chuyển động quay này đối với tất cả các hành tinh, trừ Sao Thủy, là quá nhỏ để có thể quan sát được với độ chính xác của khả năng quan sát có thể đạt được hôm nay; nhưng chuyển động quay đó ở Sao Thủy phải có trị số 43 giây cung, chính xác như kết quả các quan sát đã cho thấy.

Ngoài ra, đến nay chỉ còn một hệ luận có thể được rút ra từ lý thuyết, và có thể được kiểm chứng bằng quan sát, đó là sự dịch chuyển của các vạch quang phổ của ánh sáng từ những vì sao

lớn đến chúng ta, so sánh với các vạch tương ứng của ánh sáng được tạo ra một cách tương tự trên mặt đất (nghĩa là bởi cùng loại phân tử). Tôi không nghi ngờ rằng hệ luận này của lý thuyết cũng sẽ nhanh chóng tìm được sự xác nhận.

Phần III
SUY NGHĨ VỀ VŨ TRỤ NHƯ MỘT TỔNG THỂ
(§ 30 - § 32)

§ 30

Những Khó Khăn Vũ Trụ Học của Thuyết Newton

Ngoài những khó khăn đã được trình bày trong § 21, còn có một khó khăn cơ bản thứ hai tiềm tàng trong cơ học thiên thể cổ điển, được thảo luận đầu tiên một cách chi tiết, theo tôi biết, bởi nhà thiên văn học *Seeliger*. Nếu người ta suy nghĩ về câu hỏi, vũ trụ được hiểu thế nào như một tổng thể, thì câu trả lời đầu tiên tự nó gợi ra cho chúng ta phải là như sau. Vũ trụ là vô hạn về không gian (và thời gian). Ở khắp nơi có sao, sao cho mật độ của vật chất, xét về chi tiết rất khác nhau, nhưng xét về bình quân trên diện rộng thì ở khắp nơi đều giống nhau. Nói một cách khác: dù đi xa thế nào vào vũ trụ, chúng ta vẫn tìm thấy khắp nơi một đám đông đúc, rời rạc các vì sao cố định có gần cùng tính chất và mật độ.

Quan niệm này không dung hợp được với thuyết *Newton*. Thuyết này đúng ra đòi hỏi vũ trụ phải có một loại trung tâm, ở đó mật độ các vì sao có trị số cực đại, và giảm dần khi chúng ta đi ra ngoài khỏi trung tâm, để cuối cùng ở những vùng xa xôi chỉ còn lại một không gian vô cùng rộng. Vũ trụ của những vì sao do đó phải làm thành một hòn đảo hữu hạn trong cái đại dương vô hạn của không gian^[61].

Quan niệm này tự nó là ít thỏa đáng. Lại càng ít thỏa đáng hơn vì nó đưa đến hệ luận rằng, ánh sáng phát ra từ các vì sao, cũng như các vì sao riêng lẻ của hệ thống tinh tú, liên tục đi về miền vô cực, không bao giờ trở lại và không một lần có tương tác với các vật thể tự nhiên khác. Vũ trụ với vật chất tập trung vào miền hữu hạn như thế phải dần dần nghèo đi một cách hệ thống.

Để thoát khỏi tình hình khó xử trên, *Seeliger* đã cải biên định luật *Newton* theo hướng để cho lực hấp dẫn của hai khối lượng ở

các khoảng cách lớn giảm đi nhanh hơn là theo định luật $1/r^2$ (r là khoảng cách). Bằng cách đó người ta có thể làm cho mật độ bình quân của vật chất là một hằng số ở khắp nơi, ngay tận các miền vô cực, mà không có các trường hấp dẫn vô cùng lớn nào hình thành. Như thế người ta vứt bỏ được quan niệm không được thiện cảm cho rằng vũ trụ vật chất phải có một loại trung tâm điểm. Dĩ nhiên người ta mua được sự giải phóng này khỏi sự bế tắc có tính cách nguyên lý đã được trình bày, để chuốc lấy một sự biến cải và phức tạp hóa định luật *Newton*, những thứ không hề lý giải được từ kinh nghiệm hay lý thuyết. Chúng ta có thể hình dung một số nhiều bất kỳ các định luật cùng cho ra một kết quả, nhưng chúng ta lại không thể đưa ra được một lý do để biện minh tại sao một trong các định luật đó lại được ưu đãi hơn những cái khác; bởi vì, cũng giống như định luật *Newton*, mỗi định luật kia cũng ít được xây dựng hợp lý trên những nguyên lý lý thuyết phổ quát hơn.

§ 31

Khả Năng của Một Vũ Trụ "Hữu Hạn" nhưng "Không Giới Hạn"

Tuy nhiên, những suy đoán về cấu trúc của vũ trụ cũng còn diễn biến theo một hướng hoàn toàn khác. Sự phát triển của hình học phi-Euclid thực tế đã đưa đến nhận thức, rằng người ta có thể nghi ngờ về *tính vô hạn* của không gian chúng ta, mà không rơi vào mâu thuẫn với các định luật của tư duy, hay với kinh nghiệm (*Riemann, Helmholtz*). Những điều này đã được trình bày chi tiết bởi *Helmholtz* và *Poincaré* với một sự sáng sủa không thể hơn được nữa; ở đây tôi chỉ có thể đề cập một cách ngắn gọn.

Trước tiên chúng ta tưởng tượng một sự tồn tại (đời sống) diễn ra trong không gian hai chiều. Các sinh vật phẳng đi lại tự do trong một *mặt phẳng* cùng với các dụng cụ lao động phẳng, đặc biệt với những thanh đo rắn, phẳng. Ngoài mặt phẳng này ra, không có gì tồn tại đối với họ cả, những gì họ quan sát thấy xảy đến cho họ và cho những vật phẳng của họ làm thành một thế giới hoàn toàn khép kín. Đặc biệt việc xây dựng hình học Euclid phẳng với các que con là khả thi, thí dụ như việc xây dựng mạng trên mặt bàn (bằng những ô vuông) đã được xem xét trong § 24. Vũ trụ của những sinh vật này, khác với vũ trụ của chúng ta, là hai chiều về không gian, nhưng cũng như vũ trụ chúng ta, được nới rộng ra vô hạn. Nó có chỗ cho vô số hình vuông của các que con, nghĩa là thể tích (điện tích) của nó là vô cực. Nếu các sinh vật này bảo, vũ trụ của họ là "phẳng", thì điều đó có ý nghĩa, bởi họ muốn nói họ có thể thực hiện được phép xây dựng hình học Euclid của mặt phẳng bằng các que con của họ, ở đó các que con luôn luôn tương trưng cùng khoảng cách, và độc lập với vị trí của chúng.

Bây giờ chúng ta lại tưởng tượng đến một sự tồn tại hai chiều thứ hai, nhưng lần này trên một bề mặt của hình cầu thay vì trên mặt phẳng. Các sinh vật dẹt (dẹp), với các thước đo và những dụng cụ khác của họ, nằm chính xác trên bề mặt này và không thể rời khỏi nó; nói đúng hơn cả vũ trụ tri giác của họ trải dài ra chỉ trên bề mặt hình cầu. Các sinh vật này có thể xem hình học của vũ trụ họ là hình học Euclid hai chiều, và đồng thời các

que con của họ như sự thể hiện của "khoảng cách" được không? Họ không thể làm điều đó. Bởi vì nếu họ tìm cách thực hiện một đường thẳng, họ sẽ nhận được một đường cong, cái mà chúng ta "những sinh vật ba chiều" gọi là một hình tròn lớn, nghĩa là một đường khép kín trong nó với một độ dài hữu hạn nhất định, và có thể đo được với một que con. Tương tự, vũ trụ này có một diện tích hữu hạn, có thể được so sánh với diện tích của một hình vuông được xây dựng bởi các que con. Điều thú vị lớn từ suy nghĩ này nằm ở nhận thức: *Vũ trụ của những sinh vật này là hữu hạn nhưng lại không có ranh giới* [62].

Nhưng các sinh vật trên bề mặt hình cầu này không cần làm một cuộc du lịch thế giới mới có thể nhận thức được rằng họ sống trong một vũ trụ không phải Euclid. Họ có thể tự thuyết phục về điều đó trên mỗi phần của vũ trụ họ, miễn là phần này không quá nhỏ. Xuất phát từ một điểm, họ kéo những "đường thẳng" (tức các cung tròn, xét từ không gian ba chiều) có chiều dài bằng nhau tỏa đi mọi hướng. Họ gọi đường nối các đầu cuối của các đoạn này là "hình tròn" (có bán kính là r). Đối với mặt phẳng, tỉ lệ giữa chu vi và đường kính của một vòng tròn, cả hai đều được đo bằng cùng một que con, là bằng π , theo hình học Euclid của một mặt phẳng, một con số độc lập với đường kính của hình tròn. Trên bề mặt của hình cầu, các sinh vật của chúng ta sẽ tìm thấy tỉ lệ này bằng trị số

$$\pi \frac{\sin\left(\frac{r}{R}\right)}{\left(\frac{r}{R}\right)}$$

nghĩa là nhỏ hơn π , và sự khác biệt này càng lớn, khi bán kính r của hình tròn càng lớn so với bán kính R của "vũ trụ hình cầu". Bằng hệ thức này, các sinh vật trên mặt cầu có thể xác định bán kính R của vũ trụ họ, cho dù họ chỉ có một phần tương đối nhỏ của vũ trụ cầu dành cho việc đo đạc của họ. Nhưng nếu phần này là quá nhỏ, thì họ sẽ không thể nhận ra họ đang ở trên một vũ trụ cầu, và không phải ở trên một mặt phẳng Euclid; bởi vì một mẫu nhỏ của bề mặt cầu chỉ khác biệt nhỏ so với một mẫu của một mặt phẳng có cùng kích thước.

Do đó, nếu các sinh vật sống trên một hành tinh mà hệ mặt trời của nó chỉ chiếm một phần nhỏ không đáng kể của vũ trụ

cầu, họ không có khả năng để quyết đoán xem họ sống trong một vũ trụ hữu hạn hay một vũ trụ vô hạn, bởi vì mảnh vũ trụ mà trong đó họ trải nghiệm được, trong cả hai trường hợp, là thực tế như phẳng hay Euclid. Những suy nghĩ này cho thấy trực tiếp rằng đối với các sinh vật cầu của chúng ta, chu vi của một hình tròn trước tiên tăng cùng với bán kính cho đến khi đạt được "chu vi vũ trụ", để sau đó, với bán kính tiếp tục tăng, lại giảm dần về số không. Trong quá trình đó, diện tích hình tròn luôn luôn tăng, cho đến sau cùng nó bằng tổng diện tích của cả vũ trụ cầu.

Bạn đọc có lẽ ngạc nhiên, tại sao chúng ta lại đặt các sinh vật của chúng ta lên một hình cầu mà không lên một bề mặt khép kín khác. Nhưng sự lựa chọn này có lý do của nó, bởi vì bề mặt cầu, so với tất cả các bề mặt khép kín khác, có đặc điểm duy nhất, là tất cả các điểm của nó tương đương nhau. Tỷ lệ giữa chu vi c của một hình tròn với bán kính r của nó, tuy tùy thuộc vào r , nhưng với một trị số r cho trước là bằng nhau cho tất cả các điểm của "vũ trụ cầu"; nói một cách khác, "vũ trụ cầu" là một "bề mặt có độ cong hằng số".

Vũ trụ cầu hai chiều này có một cái tương tự ba chiều, đó là không gian cầu ba chiều được *Riemann* khám phá. Tất cả các điểm của nó cũng tương đương nhau. Nó có một thể tích hữu hạn, được xác định bởi "bán kính" R ($2\pi^2R^3$). Người ta có thể tưởng tượng được một không gian cầu không? Tưởng tượng một không gian là không gì khác hơn tưởng tượng một hình tượng của các kinh nghiệm "không gian", nghĩa là của những kinh nghiệm mà người ta có thể có được qua sự di chuyển của các vật thể "rắn". Theo nghĩa này, chúng ta có thể tưởng tượng được một không gian cầu.

Giả thiết từ một điểm chúng ta kéo một đường thẳng (như căng một sợi dây) theo tất cả mọi hướng và đánh dấu trên mỗi đường đó một đoạn r bằng một cây thước. Tất cả những điểm cuối của các đoạn này nằm trên một bề mặt hình cầu. Đặc biệt chúng ta có thể đo diện tích (F) của bề mặt này với một hình vuông làm bằng các que đo. Nếu vũ trụ là Euclid, chúng ta có $F = 4\pi r^2$; nếu vũ trụ là hình cầu, thì F luôn luôn nhỏ hơn $4\pi r^2$. Với những trị số của r tăng, F tăng từ không đến một trị số cực đại, được xác định bởi "bán kính vũ trụ", nhưng nếu r vẫn tiếp tục

tăng, thì diện tích sẽ giảm dần về không. Đầu tiên các đường thẳng xuất phát từ tâm điểm tiếp tục xa rời nhau, sau đó tiến lại gần nhau, để cuối cùng chạy về "điểm đối" của điểm ban đầu; lúc đó chúng chiếm cả không gian cầu. Người ta có thể thấy dễ dàng không gian cầu ba chiều là hoàn toàn tương tự với không gian hai chiều (bề mặt cầu). Nó hữu hạn (nghĩa là có thể tích hữu hạn), nhưng không có ranh giới.

Chúng ta có thể lưu ý rằng còn có một loại biến tướng của không gian cầu, đó là "không gian ellip". Nó có thể được xem như một không gian cong mà ở đó "các điểm đối" đều đồng nhất (không thể phân biệt nhau). Một vũ trụ ellip như vậy trong chừng mực nào có thể được xem như một vũ trụ cong có sự đối xứng qua tâm.

Theo những điều nói trên, các không gian khép kín mà không có ranh giới là có thể quan niệm được. Trong những loại không gian này, không gian cầu (hay ellip) được đặc trưng bởi tính đơn giản của nó, rằng tất cả những điểm của nó là tương đương nhau. Như hệ quả của những điều vừa nói, một câu hỏi vô cùng lý thú đã được đặt ra cho các nhà thiên văn học và vật lý học, là vũ trụ chúng ta đang sống là vô cực, hay hữu hạn theo cách thức của vũ trụ hình cầu. Kinh nghiệm của chúng ta còn lâu mới đủ để đưa ra giải đáp cho câu hỏi này. Tuy nhiên thuyết tương đối rộng cho phép chúng ta trả lời nó với một độ tin cậy khá lớn; đồng thời qua đó cái khó khăn được trình bày trong § 30 cũng được giải tỏa luôn.

§ 32

Cấu Trúc của Không Gian Theo Thuyết Tương Đối Rộng

Theo thuyết tương đối rộng, các tính chất hình học của không gian là không độc lập, mà được quy định bởi vật chất. Do đó, người ta chỉ có thể có kết luận về cấu trúc hình học của vũ trụ khi người ta đặt việc nghiên cứu trên nền tảng của một trạng thái của vật chất được cho biết trước. Chúng ta biết từ kinh nghiệm, bằng cách chọn một hệ thống tọa độ thích hợp, vận tốc của các vì sao là rất nhỏ đối với vận tốc truyền của ánh sáng. Cho nên, một cách xấp xỉ thô thiển, chúng ta có thể biết được "thể chất" của vũ trụ một cách đại thể, nếu chúng ta xem vật chất là đứng yên.

Chúng ta đã biết từ những thảo luận trước đây, sự vận hành của các thanh đo và đồng hồ bị ảnh hưởng bởi các trường hấp dẫn, nghĩa là bởi sự phân bố vật chất. Từ đây chúng ta kết luận được rằng, hình học Euclid không thể đúng chính xác trong vũ trụ chúng ta. Nhưng chúng ta có thể hình dung được vũ trụ chúng ta chỉ khác vũ trụ Euclid ít thôi, và quan niệm này lại càng gần gũi với chúng ta hơn khi các phép tính cho thấy chính các khối lượng cỡ lớn như mặt trời cũng chỉ ảnh hưởng rất ít đến metric^[63] của không gian bao quanh. Chúng ta có thể hình dung, vũ trụ chúng ta có cấu trúc hình học tương tự như một bề mặt bị cong không đều ở từng nơi, nhưng nó không khác biệt đáng kể so với một mặt phẳng, giống như mặt hồ bị gợn sóng lăn tăn. Một vũ trụ như thế chúng ta có thể gọi một cách thích đáng là tựa-Euclid^[64]. Xét về không gian, nó là vô cực. Tuy nhiên phép tính cho thấy, trong một vũ trụ tựa-Euclid, mật độ trung bình của vật chất phải bằng không. Một vũ trụ như thế do đó có thể không chứa đựng vật chất ở khắp nơi; nó sẽ đưa ra hình ảnh không thỏa đáng mà chúng ta đã phác họa trong § 30.

Nhưng nếu giả thiết trong một vũ trụ có một mật độ trung bình khác không của vật chất, dù nhỏ thế nào, thì vũ trụ đó không thể tựa-Euclid được. Ngược lại, các kết quả của phép tính cho biết, nếu vật chất được phân bố đều thì vũ trụ tất yếu phải có dạng hình cầu (hay ellip). Nhưng vì trong thực tế vật chất được phân bố từng vùng một cách không đều, nên vũ trụ thật trong

từng vùng khác với vũ trụ cầu, nó sẽ là tựa-cầu. Nhưng nó tất yếu phải hữu hạn. Thực tế lý thuyết cung cấp chúng ta một mối liên hệ^[65] đơn giản giữa sự mở rộng không gian của vũ trụ và mật độ trung bình của vật chất chứa trong nó.

Phần IV

PHỤ LỤC

Phụ Lục I

Sự Suy Diễn Đơn Giản của Phép Biến Đổi Lorentz

[Bổ sung vào § 11]

Với sự định hướng tương đối với nhau của các hệ tọa độ như đã được vẽ ra trong ảnh số 2, các trục x của hai hệ thống luôn luôn trùng lên nhau. Chúng ta có thể chia bài toán ra thành từng phần và đầu tiên chỉ xem xét các sự kiện được định vị trên trục x . Mỗi sự kiện như thế được tượng trưng trong hệ tọa độ K bằng hoành độ x và thời gian t , và trong hệ tọa độ K' bằng hoành độ x' và thời gian t' . Chúng ta đi tìm x' và t' khi cho biết x và t .

Một tín hiệu ánh sáng truyền đi dọc theo phần trục x dương sẽ có phương trình truyền là

$$x = ct$$

hay

$$x - ct = 0 \quad (1)$$

Vì cùng một ánh sáng cũng truyền đi với vận tốc c đối trong hệ tọa độ K' nên sự truyền đi đối với K' cũng được diễn tả bởi công thức tương tự

$$x' - ct' = 0 \quad (2)$$

những điểm không-thời-gian (sự kiện) nào thỏa mãn (1) cũng phải thỏa mãn (2). Rõ ràng đó sẽ là trường hợp khi hệ thức

$$(x' - ct') = \lambda(x - ct) \quad (3)$$

được thỏa mãn một cách tổng quát, trong đó λ là một hằng số; bởi vì, theo (3), sự triệt tiêu của $x - ct$ sẽ kéo theo sự triệt tiêu của $x' - ct'$.

Áp dụng sự suy nghĩ tương tự cho ánh sáng truyền theo trục x âm sẽ cho chúng ta điều kiện

$$(x' + ct') = \mu(x + ct) \quad (4)$$

Bằng cách lần lượt cộng lại và trừ đi các phương trình (3) và (4) với nhau, cũng như đưa vào các hằng số a và b cho tiện lợi, với

$$a = \frac{\lambda + \mu}{2}$$

$$b = \frac{\lambda - \mu}{2}$$

chúng ta sẽ được các phương trình

$$\left. \begin{aligned} x' &= ax - bct \\ ct' &= act - bx \end{aligned} \right\} (5)$$

Bài toán của chúng ta do đó sẽ được giải, nếu các hằng số a và b được xác định. Và điều này là kết quả của những suy nghĩ sau.

Đối với điểm gốc của K' luôn luôn ta có $x' = 0$, do đó theo phương trình đầu của (5)

$$x = \frac{bc}{a} t$$

nếu gọi v là tốc độ của điểm gốc của K' trong chuyển động đối với K , thì chúng ta có (6)

$$v = \frac{bc}{a}$$

Người ta cũng được cùng một trị số v khi tính vận tốc của một điểm khác của K' đối với K , hay vận tốc (hướng theo trục x âm) của một điểm của K đối với K' . Cho nên người ta có thể gọi ngắn v là vận tốc tương đối của hai hệ tọa độ.

Tiếp đến, theo nguyên lý tương đối chúng ta thấy rõ, chiều dài của một thước đo đơn vị đứng yên đối với K' , nhìn từ K , cũng phải bằng chính xác chiều dài của một thước đo đơn vị đứng yên đối với K , nhìn từ K' .^[66] Để thấy các điểm của trục x' có dạng thế nào khi nhìn từ K , chúng ta chỉ cần chụp một "bức ảnh tức thì" của K' nhìn từ K . Điều này có nghĩa chúng ta đặt cho t một trị số nào đó, thí dụ $t = 0$. Với trị số này, chúng ta sẽ có từ phương trình thứ nhất của (5):

$$x' = ax$$

Hai điểm của trục x' , với khoảng cách $x' = 1$ được đo trong K' , do đó phải có trên bản chụp tức thì của chúng ta khoảng cách là (7):

$$\Delta x = \frac{1}{a}$$

Nếu chúng ta lại chụp ảnh tức thì của K' đại thời điểm $t' = 0$, thì từ (5), bằng cách khử t bằng (6), chúng ta sẽ được^[67]

$$x' = a \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) x$$

Từ đây chúng ta kết luận rằng hai điểm của trục x với khoảng cách 1 (đối với K) sẽ được biểu hiện ra trên bức ảnh tức thì với một khoảng cách (7a):

$$\Delta x' = a \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)$$

Vì như đã nói, hai tấm ảnh tức thì phải bằng nhau, nên trong (7) và trong (7a) phải bằng nhau, do đó chúng ta có (7b):

$$a^2 = \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Các phương trình (6) và (7b) xác định các hằng số a và b . Bằng cách đưa các trị số của hai hằng số này vào (5) chúng ta có phương trình thứ nhất và thứ tư của các phương trình đã cho trong § 11:

[Hệ phương trình (8):]

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$t' = \frac{1 - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Như thế, chúng ta đã chứng minh được phép biến đổi Lorentz

cho các sự kiện nằm trên trục x . Nó thỏa mãn điều kiện

$$x'^2 - c^2 t'^2 = x^2 - c^2 t^2 \quad (8a)$$

Chúng ta có thể mở rộng kết quả này đến các sự kiện diễn ra ở ngoài trục x , bằng cách giữ nguyên (8) và thêm vào đó các quan hệ

$$y' = y$$

$$z' = z \quad (9)$$

Bằng cách đó, người ta thỏa mãn định đề về hằng số của vận tốc truyền ánh sáng trong chân không cho tia sáng phát ra theo mọi hướng bất kỳ, cho hệ tọa độ K và cho cả K' . Điều này người ta có thể thấy như sau.

Giả thiết vào thời điểm $t = 0$ một tín hiệu ánh sáng được phát ra tại điểm gốc của K . Nó truyền đi theo phương trình

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = ct$$

hay là, bằng cách bình phương lên hai vế của phương trình,

$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 = 0 \quad (10)$$

Định luật truyền của ánh sáng cùng với định đề tương đối đòi hỏi rằng sự truyền của tín hiệu ánh sáng được xem xét phải diễn ra - nhìn từ K' - theo công thức tương ứng

$$r' = ct'$$

hay

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 t'^2 = 0 \quad (10a)$$

Để phương trình (10a) là hệ quả của phương trình (10), chúng ta phải có

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 t'^2 = \sigma(x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2) \quad (11)$$

Vì phương trình (8a) cũng phải đúng cho các điểm trên trục x nên chúng ta phải có $\sigma = 1$. Phép biến đổi Lorentz thỏa mãn phương trình (11) với $\sigma = 1$, điều đó chúng ta thấy dễ dàng; vì (11) chính là một hệ luận của (8a) và (9), cho nên cũng là hệ luận của (8) và (9). Do đó phép biến đổi Lorentz đã được chứng minh.

Phép biến đổi Lorentz được diễn tả bởi (8) và (9) còn cần một

sự khái quát hóa. Rõ ràng không phải là điều quan trọng khi người ta chọn các trục của K' về không gian song song với các trục của K . Cũng không phải là điều quan trọng khi chúng ta chọn vận tốc của phép tịnh tiến của K' có hướng của trục x . Một suy nghĩ đơn giản cho thấy chúng ta có thể tạo phép biến đổi Lorentz tổng quát bằng hai phép biến đổi, đó là phép biến đổi Lorentz trong trường hợp đặc biệt (như trên) và các phép biến đổi thuần túy về không gian. Phép biến đổi sau nhằm thay thế hệ tọa độ vuông góc bằng một hệ mới với các trục định hướng khác.

Bằng toán học, chúng ta có thể đặc trưng phép biến đổi Lorentz được khái quát hóa như sau: Nó diễn tả x', y', z', t' bằng những hàm số tuyến tính và thuần nhất của x, y, z, t sao cho hệ thức

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 t'^2 = x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 \quad (11a)$$

được thỏa mãn một cách đồng nhất. Điều này muốn nói: Nếu trong vế trái ta thay thế x', y', z', t' bằng các biểu thức của chúng theo x, y, z, t , thì vế trái của (11a) trùng với vế phải.

Phụ Lục II

Không Gian Minkowski Bốn Chiều ("Thế Giới")

(Bổ sung vào § 17)

Phép biến đổi Lorentz được tổng quát hóa có thể còn được đặc trưng một cách đơn giản hơn nếu chúng ta lấy số ảo $\sqrt{-1}ct$, thay vì t , làm biến số. Theo đó, nếu chúng ta đặt

$$x_1 = x$$

$$x_2 = y$$

$$x_3 = z$$

$$x_4 = \sqrt{-1}ct$$

và làm một cách tương tự với hệ tọa độ K' , thì điều kiện mà phép biến đổi (Lorentz) thỏa mãn một cách đồng nhất có thể được diễn tả ở dạng

$$x'_1{}^2 + x'_2{}^2 + x'_3{}^2 + x'_4{}^2 = x_1{}^2 + x_2{}^2 + x_3{}^2 + x_4{}^2 \quad (12)$$

Phương trình này chính là dạng mới của phương trình (11a) với các tọa độ vừa được chọn.

Chúng ta thấy từ (12) rằng tọa độ thời gian ảo x_4 đi vào điều kiện của phép biến đổi một cách chính xác với cùng một cung cách như các tọa độ không gian x_1, x_2, x_3 .

Minkowski gọi một continuum bốn chiều được diễn tả bởi các "tọa độ" x_1, x_2, x_3, x_4 là "thế giới", điểm-sự-kiện là "điểm thế giới". Vật lý, từ một "sự kiện" (Geschehen) trong không gian ba chiều, ở mức độ nào đó, đã trở thành một *tồn tại* (Sein) trong "thế giới" bốn chiều.

"Thế giới" bốn chiều này mang một sự tương đồng sâu sắc với "không gian" ba chiều của hình học giải tích (Euclid), ở hình học này, nếu chúng ta đưa vào một hệ tọa độ Descartes mới x'_1, x'_2, x'_3 cùng có một điểm gốc với hệ tọa độ cũ, thì x'_1, x'_2, x'_3 là những hàm số tuyến tính thuần nhất của các tọa độ x_1, x_2, x_3 và thỏa mãn phương trình một cách đồng nhất

$$x_1'^2 + x_2'^2 + x_3'^2 = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 \quad (12a)$$

Sự tương tự với (12) là hoàn hảo. Chúng ta có thể gọi thế giới *Minkowski* về hình thức là một không gian Euclid bốn chiều (với tọa độ thời gian ảo). Phép biến đổi Lorentz tương ứng với một "phép quay" của hệ tọa độ trong "thế giới" bốn chiều^[68].

Phụ Lục III

VỀ SỰ XÁC NHẬN THỰC NGHIỆM CỦA THUYẾT TƯƠNG ĐỐI RỘNG

Từ quan điểm nhận thức luận một cách hệ thống, người ta có thể nghĩ quá trình tiến hóa của một ngành khoa học thực nghiệm là một quá trình quy nạp liên tục. Các lý thuyết xuất hiện như những sự tổng kết của một khối lượng lớn những quan sát riêng lẻ thành những định luật thực nghiệm, mà từ đó các định luật phổ quát được phát hiện bằng phương pháp so sánh. Sự phát triển của khoa học, theo cách suy nghĩ này, mang tính chất giống như công việc xếp loại danh mục, như một tác phẩm chỉ thuần thực nghiệm.

Tuy nhiên quan điểm này không hề phản ảnh hết toàn bộ quá trình thật sự đã diễn ra. Thực vậy, nó bỏ qua vai trò quan trọng của trực giác và phương pháp tư duy suy diễn trong sự phát triển của khoa học chính xác. Khi một khoa học vừa ra khỏi giai đoạn sơ khai của nó thì các tiến bộ lý thuyết không còn diễn ra chỉ bằng hoạt động phân loại, sắp xếp và tổng kết đơn thuần nữa. Đúng hơn, được gợi hứng từ những dữ kiện thực nghiệm, nhà nghiên cứu phát triển một hệ thống ý tưởng, thường được xây dựng một cách lôgic trên một số ít giả thuyết nền tảng, được gọi là tiên đề. Một hệ thống ý tưởng như thế chúng ta gọi là một lý thuyết.

Lý thuyết tìm cho mình quyền tồn tại bằng cách thiết lập mối quan hệ lôgic với một số lớn các dữ kiện thực nghiệm riêng lẻ. Và chính ở đây mới là "chân lý" của nó.

Nhưng có thể có nhiều lý thuyết tuy khác nhau ở mức độ đáng kể nhưng lại cùng tương ứng với một phức hợp các dữ kiện thực nghiệm. Sự trùng hợp giữa hai lý thuyết, xét trên những hệ quả kiểm tra được bằng thực nghiệm của chúng, có thể đạt đến mức toàn diện khiến khó có thể tìm được những hệ quả có thể kiểm tra được bằng kinh nghiệm để thấy qua đó hai lý thuyết khác nhau. Chẳng hạn một trường hợp như thế vốn được quan tâm rộng rãi trong lĩnh vực sinh học là thuyết Darwin về sự tiến hóa của các loài bằng sự sàng lọc qua chiến đấu để tồn tại, và lý thuyết tiến hóa dựa trên giả thuyết di truyền của các phẩm chất

đã tiếp thu được.

Một trường hợp khác của sự trùng hợp sâu rộng của các hệ quả là cơ học *Newton* một mặt, và thuyết tương đối rộng mặt khác. Sự trùng hợp này đạt tới mức độ rộng cho đến nay người ta chỉ có thể tìm thấy một số ít hệ luận có thể được kiểm chứng được bằng thực nghiệm của thuyết tương đối rộng mà vật lý tiền-tương-đối không thể với tới được; điều này, mặc dù tính dị biệt sâu sắc của các tiên đề của hai lý thuyết. Sau đây chúng ta muốn xem xét các hệ luận quan trọng này một lần nữa, và thảo luận các kinh nghiệm liên quan đã thu thập được đến nay.

A. CHUYỂN ĐỘNG CỦA ĐIỂM CẬN NHẬT CỦA SAO THỦY

Theo cơ học *Newton* và định luật hấp dẫn *Newton*, một hành tinh quay quanh mặt trời sẽ vẽ lên một quỹ đạo ellip quanh mặt trời, hay chính xác hơn, quanh trọng tâm chung của mặt trời và hành tinh. Trong một hệ thống như thế, mặt trời hay trọng tâm chung nằm tại một tiêu điểm của quỹ đạo ellip, sao cho trong một năm-hành-tinh khoảng cách nối liền mặt trời và hành tinh tăng từ một trị số cực tiểu đến trị số cực đại rồi sau đó trở về cực tiểu lại. Nếu thay định luật hấp dẫn *Newton* bằng một định luật hấp dẫn có phần khác đi, người ta sẽ tìm thấy, theo định luật mới này, chuyển động vẫn diễn ra với tính chất khoảng cách mặt trời - hành tinh biến thiên tăng giảm; nhưng sau một chu kỳ [từ điểm cận nhật (điểm gần mặt trời nhất) đến điểm cận nhật] thì góc quét bởi đường thẳng nối mặt trời và hành tinh sẽ khác với 360° . Quỹ đạo cũng không phải là một đường khép kín, mà theo thời gian nó sẽ lấp đầy phần vành của mặt phẳng quỹ đạo (nằm giữa hình tròn của khoảng cách nhỏ nhất, và hình tròn của khoảng cách lớn nhất của hành tinh đến mặt trời).

Theo thuyết tương đối rộng, dĩ nhiên khác với thuyết *Newton*, một sự lệch nhỏ như thế đối với chuyển động quỹ đạo *Kepler-Newton* cũng sẽ xảy ra, với tính chất góc quét bởi bán kính mặt trời-hành tinh giữa hai lần điểm cận nhật liên tiếp vượt quá góc của một vòng quay hoàn chỉnh (nghĩa là 2π trong đơn vị đo góc tuyệt đối trong vật lý) bởi một trị số là

$$\frac{24\pi^3 a^2}{r^2 c^2 (1 - e^2)}$$

(Trong này, a là bán trục lớn của ellip, e là tâm sai của nó, c là vận tốc ánh sáng và T là thời gian quay vòng của hành tinh). Người ta cũng có thể diễn giải điều này như sau: Theo thuyết tương đối rộng, trục lớn của ellip quay xung quanh mặt trời như chuyển động quỹ đạo quanh mặt trời của hành tinh. Độ quay này, như một kết quả của lý thuyết, có trị số bằng 43 giây cung trong một trăm năm đối với Sao Thủy, nhưng lại quá nhỏ đối với các hành tinh khác của hệ mặt trời của chúng ta khiến nó vượt khỏi sự quan sát.^[69]

Như một sự thật, các nhà thiên văn học đã tìm thấy thuyết *Newton* không đủ sức tính toán chuyển động đã được quan sát của Sao Thủy với độ chính xác mà khả năng quan sát của khoa học hôm nay cho phép. Sau khi đã để ý đến các ảnh hưởng gây rối lên Sao Thủy từ các hành tinh còn lại, người ta tìm thấy (*Le Verrier*, 1859 và *Newcomb*, 1895) vẫn còn tồn tại một chuyển động không giải thích được của điểm cận nhật của quỹ đạo Sao Thủy với một trị số không khác bao nhiêu so với +43 giây cung cho một thế kỷ đã nói. Độ cách biệt của kết quả thực nghiệm này (kết quả trùng khớp với lý thuyết tương đối rộng) chỉ là vài giây.

B. SỰ LỆCH CỦA ÁNH SÁNG TRONG TRƯỜNG HẤP DẪN

Trong § 22 chúng ta đã trình bày rằng theo thuyết tương đối rộng, tia sáng phải chịu một sự uốn cong khi đi qua một trường hấp dẫn, giống như sự uốn cong mà quỹ đạo của một vật thể chuyển động xuyên qua trường hấp dẫn phải chịu. Như một hệ quả thuyết này, một tia sáng đi ngang qua một thiên thể sẽ bị uốn cong về phía thiên thể. Một tia sáng đi qua mặt trời, với một khoảng cách Δ (lần) bán kính mặt trời^[70], sẽ có góc lệch có trị số bằng

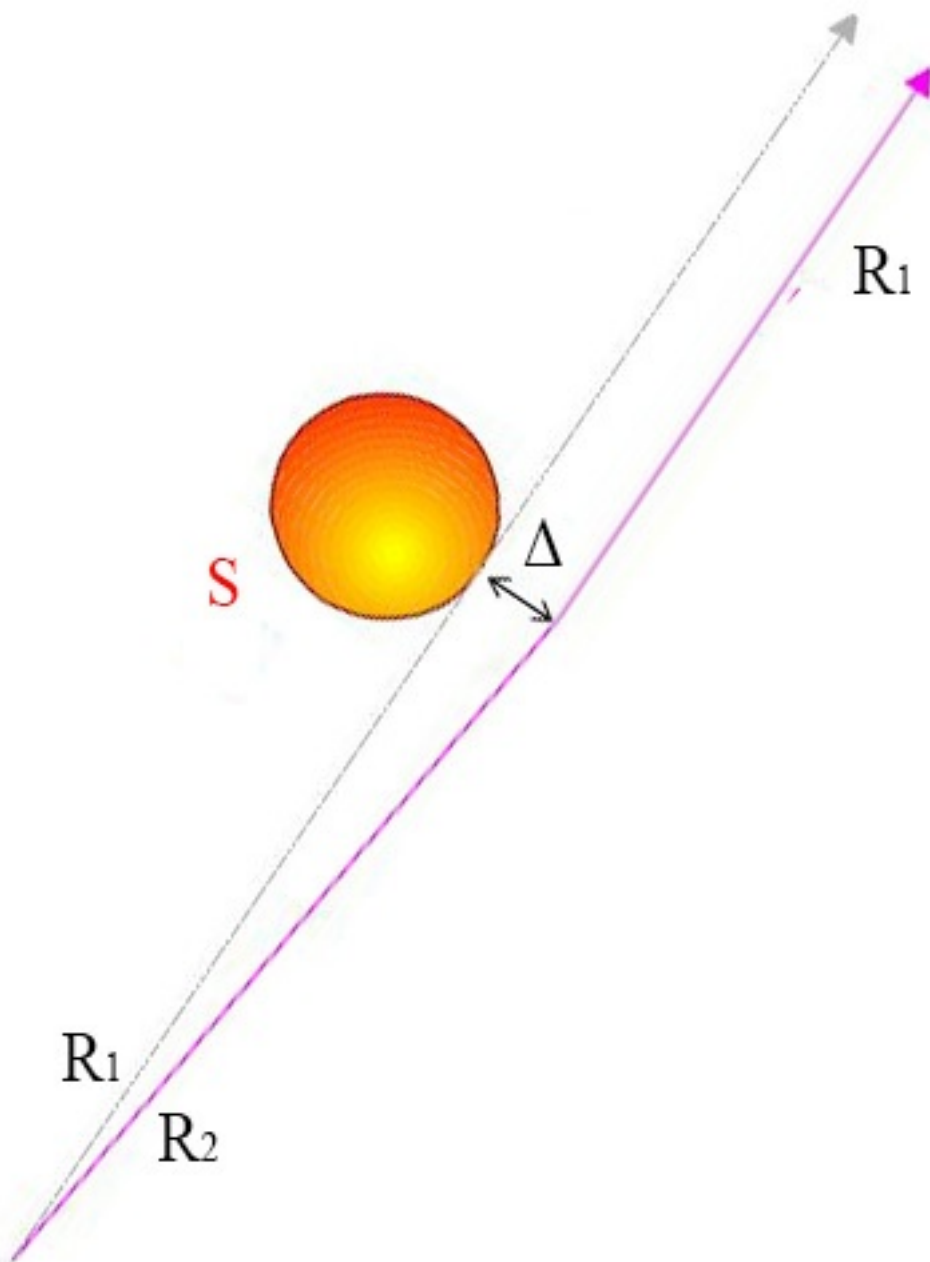
$$\alpha = \frac{1,7 \text{ giây cung}}{\Delta}$$

Cần nói thêm rằng theo lý thuyết, một nửa độ lệch này là do tác dụng của trường hấp dẫn *Newton* của mặt trời, một nửa do sự biến dạng hình học ("sự uốn cong") của không gian gây ra bởi mặt trời.

Kết quả này cho phép một sự thẩm tra thực nghiệm bằng

phương pháp chụp ảnh các vì sao vào lúc nhật thực toàn phần. Sở dĩ chúng ta phải chờ đến hiện tượng này là vì vào những thời điểm khác, bầu khí quyển bị mặt trời chiếu sáng mạnh làm chói mắt khiến không thể thấy được các vì sao gần mặt trời.

Hiệu ứng chúng ta chờ đợi có thể được thấy rõ trong ảnh 4 dưới đây. Nếu không có mặt trời S , một vì sao xa vô cực sẽ được nhìn thấy theo hướng R_1 . Nhưng do hệ quả uốn cong của tia sáng bởi mặt trời, người ta thấy nó xuất hiện theo hướng R_2 , nghĩa là ở một khoảng cách từ tâm điểm mặt trời lớn hơn là sự thật.



Ảnh 4

Trong thực tế, việc kiểm tra diễn ra như sau. Các vì sao trong vùng cận của mặt trời được chụp ảnh vào lúc nhật thực toàn phần. Tiếp đến, một tấm ảnh thứ hai (để đối chiếu) của chính các vì sao đó được chụp khi mặt trời ở một vị trí khác trên bầu trời (nghĩa là vài tháng trước hay sau). Ảnh của các vì sao được chụp vào lúc nhật thực, khi đem so sánh với tấm ảnh thứ hai, phải bị đẩy xa ra khỏi mặt trời (từ tâm mặt trời đi) một khoảng cách. Khoảng cách này là tương ứng với góc α .

Chúng ta cảm ơn Viện hàn lâm Anh và Viện hàn lâm thiên văn Anh về sự kiểm tra sự kiện quan trọng này. Không dễ nản lòng vì chiến tranh (thế giới lần thứ nhất) và những khó khăn về mặt tâm lý do nó gây ra, các viện này đã gửi nhiều nhà thiên văn học tầm cỡ nhất (*Eddington, Cottingham, Crommelin, Davidson*) và trang bị hai đoàn thám hiểm để có được những tấm ảnh của nhật thực vào ngày 19 tháng 5 năm 1919 ở Sobral (Brazil) và trên đảo Principe (Tây Phi). Độ lệch tương đối người ta chờ đợi giữa các ảnh nhật thực và ảnh đối chiếu chỉ bằng vài phần trăm của milimét. Cho nên những đòi hỏi về độ chính xác được đặt ra cho việc chụp ảnh và đo đạc sau đó là không nhỏ.

Kết quả đo đạc đã xác nhận lý thuyết một cách hoàn toàn thỏa đáng. Các thành phần góc của các độ lệch, theo quan sát và theo tính toán từ lý thuyết của các sao (tính bằng giây cung) được trình bày trong bảng dưới đây^[71]:

Số lượng sao ^[72]	Tọa độ thứ nhất		Tọa độ thứ hai	
	theo quan sát	theo tính toán	theo quan sát	theo tính toán
11	- 0,19	- 0,22	+ 0,16	+ 0,02
5	- 0,29	- 0,31	- 0,46	- 0,43
4	- 0,11	- 0,10	+ 0,83	+ 0,74
3	- 0,20	- 0,12	+ 1,00	+ 0,87
6	- 0,10	- 0,04	+ 0,57	+ 0,40

10	- 0,08	+ 0,09	+ 0,35	+ 0,32
2	+ 0,95	+ 0,85	- 0,27	- 0,09

C. SỰ DỊCH CHUYỂN CỦA CÁC VẠCH QUANG PHỔ VỀ PHÍA ĐỎ^[73]

Trong § 23 chúng ta đã chứng minh, trong một hệ thống K' chuyển động quay đối với một hệ Galilei K , các đồng hồ được cấu tạo giống nhau và được xem đứng yên đối với hệ quy chiếu quay K' sẽ chạy với các vận tốc lệ thuộc vào vị trí của chúng. Chúng ta muốn nghiên cứu sự lệ thuộc này một cách định lượng. Một đồng hồ, giả thiết được đặt ở một khoảng cách r từ trung tâm đĩa quay sẽ có một vận tốc đối với K được cho bởi công thức

$$v = \omega r$$

trong đó ω là vận tốc quay của đĩa (K') đối với K . Nếu gọi v_0 là số lần tíc tắc của đồng hồ trong đơn vị giây (vận tốc của đồng hồ) đối với K , khi đồng hồ đứng yên, thì vận tốc v của đồng hồ chuyển động với vận tốc v đối với K , đứng yên đối với đĩa, theo § 12 là

$$v = v_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

hay với độ chính xác thỏa đáng

$$v = v_0 \left(1 - \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2}\right)$$

hoặc cũng có thể được viết lại dưới dạng

$$v = v_0 \left(1 - \frac{\omega^2 r^2}{2c^2}\right)$$

Nếu chúng ta gọi là Φ hiệu số của thế^[74] của lực ly tâm giữa điểm vị trí của đồng hồ và tâm điểm của đĩa, nghĩa là công^[75] (được xem âm) mà người ta cần thực hiện trên một đơn vị khối lượng ngược với lực ly tâm, để có thể di chuyển nó từ vị trí của

đồng hồ trên đĩa đang chuyển động đến tâm điểm của đĩa, thì chúng ta có

$$\Phi = -\frac{\omega^2 r^2}{2}$$

Do đó

$$v = v_0 \left(1 + \frac{\Phi}{c^2}\right)$$

Trước nhất, chúng ta thấy từ biểu thức này, hai đồng hồ được cấu tạo giống nhau sẽ chạy với hai vận tốc khác nhau nếu chúng được đặt tại hai khoảng cách khác nhau từ tâm đĩa. Kết quả này cũng đúng từ quan điểm của một người quan sát quay theo đĩa.

Nhưng bây giờ, nếu xét đoán từ đĩa, có một trường hấp dẫn tồn tại với thế là Φ , cho nên kết quả vừa tìm thấy nói chung cũng có giá trị cho các trường hấp dẫn.

Hơn nữa, vì chúng ta được phép xem một nguyên tử phát ra các vạch quang phổ như một đồng hồ, cho nên chúng ta có định lý:

Một nguyên tử hấp thu hay phát ra ánh sáng với một tần số lệ thuộc vào thế của trường hấp dẫn mà nó nằm trong đó.

Tần số của một nguyên tử ở bề mặt của một thiên thể do đó sẽ có phần nhỏ hơn tần số của một nguyên tử cùng nguyên tố được đặt trong không gian tự do (hay trên bề mặt của một thiên thể nhỏ hơn).

Bây giờ, vì $\Phi = -KM/r$, trong đó K là hằng số hấp dẫn Newton, M khối lượng của thiên thể, r bán kính của thiên thể, cho nên một sự dịch chuyển về vùng đỏ của các vạch quang phổ được tạo ra trên bề mặt của các thiên thể, so với các vạch quang phổ được tạo ra ở bề mặt của trái đất, phải diễn ra với một độ lệch là

$$\frac{v - v_0}{v_0} = -\frac{K M}{c^2 r}$$

Trong trường hợp của mặt trời, độ dịch chuyển về phía đỏ được tiên đoán bởi lý thuyết có trị số khoảng hai phần triệu của độ dài sóng. Đối với các vì sao cố định, một sự tính toán tin cậy

không thể có được, bởi cả khối lượng M lẫn bán kính r thông thường không được biết.

Nhưng hiệu ứng này thật sự có tồn tại hay không, đó là một câu hỏi chưa được giải đáp mà hiện tại (1920) các nhà thiên văn học đang làm việc hết sức khẩn trương để tìm lời giải cho nó. Trong trường hợp mặt trời, bởi sự nhỏ bé của hiệu ứng nên hãy còn khó khăn trong việc quyết định về sự tồn tại của nó. Trong khi *Grebe* và *Bachem* (Bonn), dựa trên cơ sở của những đo đạc riêng cũng như những đo đạc của *Evershed* và *Schwarzschild* trên các dãy cyanogen, đã khẳng định sự tồn tại của hiệu ứng là chắc chắn, thì các nhà khoa học khác, đặc biệt *W.H. Julius* và *S. John*, trên cơ sở những đo đạc của họ đã đi đến ý kiến ngược lại.

Các độ dịch chuyển trung bình của các vạch về phía quang phổ ít khúc xạ hơn của những sóng dài chắc chắn phải được bộc lộ ra qua các nghiên cứu thống kê ở các vì sao cố định. Nhưng cho đến nay việc nghiên cứu các số liệu có được vẫn chưa cho phép đi đến một quyết định chắc chắn, rằng có phải các sự dịch chuyển kia thực sự do lực hấp dẫn gây nên hay không. Các kết quả của quan sát được thu thập và thảo luận chi tiết từ quan điểm của câu hỏi làm chúng ta quan tâm trong một công trình của *E. Freundlich* có tiêu đề "Kiểm tra thuyết tương đối rộng" "Priifung der allgemeinen Relativitätstheorie" (trong tạp chí *Die Naturwissenschaften* 1919, Số 35, tr. 530, Nxb. Julius Springer, Berlin).

Những năm tới nhất định sẽ đem lại câu trả lời chắc chắn. Nếu sự dịch chuyển đỏ của các vạch quang phổ do thế hấp dẫn không tồn tại, thuyết tương đối rộng sẽ không đứng vững. Mặt khác, nếu nguồn gốc của sự chuyển dịch được xác định chắc chắn từ thế hấp dẫn^[76] thì sự nghiên cứu của sự dịch chuyển các vạch sẽ mang lại những thông tin quan trọng về khối lượng của các thiên thể.

Phụ Lục IV

Cấu Trúc của Không Gian trong Mối Liên Hệ với Thuyết Tương Đối Rộng (Bổ sung § 32)

Từ lần xuất bản thứ nhất của cuốn sách nhỏ này nhận thức của chúng ta về cấu trúc của không gian ở mức độ lớn ("bài toán vũ trụ học") đã có bước phát triển quan trọng mà một sự trình bày đại chúng về đề tài là cần thiết.

Các suy nghĩ ban đầu của tôi về đề tài đã được dựa trên hai giả thuyết sau đây:

1. Có một mật độ trung bình khác không (0) của vật chất tồn tại trong cả không gian, và bằng nhau ở khắp) nơi.
2. Độ lớn (hay "bán kính") của không gian là độc lập với thời gian.

Hai giả thuyết này đã chứng tỏ, theo thuyết tương đối rộng, là nhất quán nhau, nhưng chỉ sau khi người ta thêm vào các phương trình trường một số hạng có tính cách giả định, không phải do lý thuyết đòi hỏi, nó cũng không phải là tự nhiên nếu nhìn từ quan điểm lý thuyết (đó là "số hạng vũ trụ học trong các phương trình trường").

Giả thuyết (2) đối với tôi trước đây là không tránh khỏi, vì tôi nghĩ, rời khỏi nó người ta sẽ rơi vào những suy đoán vô bờ bến.

Tuy nhiên trong những năm 1920, nhà toán học Nga *Friedman* khám phá rằng một giả thuyết khác mới là tự nhiên hơn, nếu đứng trên quan điểm thuần túy lý thuyết. Một cách cụ thể, ông nhận thấy rằng có thể giữ lại giả thuyết (1) mà không cần phải đưa vào số hạng vũ trụ học vốn ít tự nhiên hơn vào phương trình trường của lực hấp dẫn, nếu chúng ta quyết định bỏ giả thuyết số (2). Thực vậy, các phương trình trường nguyên thủy cho phép có một nghiệm số, trong đó "bán kính vũ trụ" lệ thuộc vào thời gian (không gian bành trướng). Trong nghĩa này, người ta có thể nói cùng với *Friedman* rằng lý thuyết đòi hỏi một sự bành trướng của không gian.

Ít năm sau đó, *Hubble* đã chứng minh bằng một nghiên cứu

đặc biệt ở quang phổ của những "tinh vân ngoài thiên hà"^[77] (các "ngân hà"), rằng các vạch phát ra từ các tinh vân này chịu một sự dịch chuyển đỏ có tính chất tăng đều đặn với khoảng cách của các tinh vân. Theo sự hiểu biết hiện tại của chúng ta, điều này có thể được diễn giải theo nguyên lý *Doppler* là không gì khác hơn một chuyển động bành trướng của hệ tinh tú trên diện rộng, như theo yêu cầu của các phương trình trường của lực hấp dẫn qua nghiên cứu của *Friedman*. Phát hiện của *Hubble* do đó trong chừng mực nào có thể được xem như một sự xác nhận của lý thuyết.

Nhưng rồi một khó khăn lạ thường xảy đến. Sự diễn giải các sự dịch chuyển vạch của thiên hà được khám phá bởi *Hubble* như một sự bành trướng (về lý thuyết hầu như không nghi ngờ nữa) đưa đến một sự khởi đầu của sự bành trướng này, xảy ra "chỉ" cách đây khoảng 109 năm, trong khi thiên văn học vật lý cho thấy có khả năng, rằng sự phát triển các vì sao cá nhân và các hệ thống tinh tú cần những thời gian đáng kể lâu hơn. Hiện tại vẫn chưa biết chắc sự không nhất quán này có thể được vượt qua bằng cách nào.

Tôi cũng xin chú thích rằng lý thuyết không gian bành trướng cùng với những dữ liệu thực nghiệm chưa cho phép kết luận về tính hữu hạn hay vô hạn của không gian (ba chiều), trong khi giả thuyết "tĩnh" ban đầu về không gian cho phép kết luận sự khép kín (tính hữu hạn) của không gian.

Phụ Lục V

Thuyết Tương Đối và Vấn Đề Không Gian

Trong lần tái bản này (thứ mười lăm, bằng tiếng Anh), tôi đã thêm, như một phụ lục thứ năm, phần trình bày các quan điểm của tôi về vấn đề của không gian nói chung, và về những thay đổi từng bước của các ý tưởng của chúng tôi về không gian rút ra từ ảnh hưởng của quan điểm thuyết tương đối. Tôi muốn chứng minh rằng không-thời-gian không nhất thiết là cái gì người ta có thể gán cho nó một sự tồn tại tách biệt, độc lập với các vật thể thực của thực tại vật lý. Các vật thể vật lý không phải ở trong không gian, mà những vật thể này là sự nở rộng của không gian. Theo cách này, khái niệm "không gian rỗng" mất đi ý nghĩa của nó.

EINSTEIN

Ngày 9 tháng 6 năm 1952

Đặc trưng của vật lý Newton là nó phải công nhận một sự tồn tại thực và độc lập cho không gian và thời gian, bên cạnh vật chất. Bởi vì trong định luật chuyển động Newton khái niệm gia tốc xuất hiện. Nhưng trong thuyết này, gia tốc chỉ có thể có nghĩa là "gia tốc đối với không gian". Không gian của Newton do đó phải được quan niệm như "yên tĩnh", hay ít nhất "không gia tốc", để người ta có thể xem gia tốc xuất hiện trong định luật chuyển động là một đại lượng có ý nghĩa. Cũng tương tự như thế đối với thời gian, đại lượng cũng đi vào khái niệm gia tốc. Bản thân Newton và những người đương thời có óc phê phán ông cũng đã cảm thấy sự khó chịu khi người ta phải thừa nhận cho không gian lẫn trạng thái chuyển động của nó một thực tại vật lý; nhưng lúc bấy giờ không có lối thoát nào khác khi người ta muốn cho cơ học một ý nghĩa sáng sủa.

Thật là một yêu sách khó khăn khi người ta nói chung phải thừa nhận cho không gian một thực tại vật lý, đặc biệt không gian rỗng. Các nhà triết học từ những thời xa xưa nhất đã luôn lặp lại sự chống đối một yêu sách như thế. Chẳng hạn Descartes lý luận như sau: Không gian về bản chất đồng nhất với sự nở

rộng^[78]. Nhưng sự nối rộng lại dính liền với vật thể. Như vậy không thể có không gian mà không có vật thể, nghĩa là không có không gian rỗng. Điểm yếu của cách lý luận này chủ yếu nằm ở chỗ: tuy khái niệm nối rộng đúng là có nguồn gốc từ kinh nghiệm chúng ta khi sắp xếp các vật thể rắn (tiếp xúc chúng). Nhưng từ đó chúng ta không thể kết luận rằng khái niệm nối rộng là không chính đáng trong những trường hợp không phải là nguyên nhân cho sự tạo thành khái niệm này. Một sự nối rộng như thế của các khái niệm có thể cũng được biện minh một cách gián tiếp bởi giá trị của chúng cho việc hiểu biết các kết quả thực nghiệm. Cho nên bảo rằng sự nối rộng là gắn liền với vật thể tự nó thật sự không có cơ sở.

Tuy nhiên, chúng ta sẽ thấy sau này thuyết tương đối rộng xác nhận quan điểm của *Descartes* qua một đường vòng. Cái gì đã đưa *Descartes* đến quan niệm lạ lùng của ông, đó có lẽ là cái cảm giác, rằng nếu không có một sự cần thiết cấp bách, người ta không được phép gán một thực tại vật lý cho một "vật thể không thể trực tiếp trải nghiệm được" như không gian.^[79]

Nguồn gốc tâm lý của khái niệm không gian, hay của sự cần thiết của nó, chẳng phải là hiển nhiên như chúng ta đã quan niệm khi dựa trên cơ sở của các thói quen tư duy. Các nhà hình học cổ xưa nghiên cứu những vật thể có tính chất khái niệm (đường thẳng, điểm, bề mặt) nhưng không nghiên cứu không gian như chính nó, như sau này hình học giải tích làm. Tuy nhiên khái niệm không gian được gợi ra bởi một số kinh nghiệm sơ khai nhất định. Giả thiết chúng ta làm một cái hộp. Các đồ vật có thể được sắp xếp vào theo một cách nào đấy sao cho nó đầy. Khả năng của những sự sắp xếp như thế, đó là tính chất của đối tượng vật chất "hộp", tức một cái gì được cho cùng với cái hộp: cái "không gian được bao quanh bởi cái hộp". Đó là một cái gì, có tính chất khác nhau với những cái hộp khác nhau, một cái gì được nghĩ như hoàn toàn tự nhiên và độc lập với việc, có hay không đối tượng nào trong hộp nói chung. Nếu không có đối tượng nào nằm trong hộp, không gian của nó trông như "rỗng".

Cho đến nay, khái niệm không gian của chúng ta gắn liền với cái hộp. Nhưng thật ra những khả năng chứa đựng làm thành không-gian-hộp là độc lập với độ dày của các bức tường của hộp.

Có thể nào người ta cho độ dày này tiến dần về số không, mà không làm cho "không gian" bị mất đi từ đó hay không? Tính chất tự nhiên của một quá trình tới hạn như thế là hiển nhiên, và giờ vẫn còn tồn tại trong tư duy chúng ta không gian không có cái hộp, một vật tự thân của nó, nhưng lại là một thứ thực ra không thật, nếu chúng ta quên đi nguồn gốc của khái niệm này. Người ta hiểu tại sao *Descartes* lại phản kháng việc xem không gian như một vật độc lập với các đối tượng vật thể, một vật có thể tồn tại mà không cần đến vật chất^[80] (tuy nhiên điều này không ngăn ông xem không gian như một khái niệm cơ bản trong hình học giải tích của ông ta). Một sự lưu ý đến khoảng chân không trong hàn thủ biểu thủy ngân chắc chắn đã tước vũ khí của những người cuối cùng theo chủ nghĩa *Descartes*. Nhưng người ta không thể chối cãi được rằng ngay trong giai đoạn sơ khai này, khái niệm không gian, hay chính không gian, được quan niệm như một vật thực, độc lập, đã mang trong mình một cái gì không thỏa đáng.

Những cách gói ghém các vật thể vào không gian (chẳng hạn cái hộp) là đề tài của hình học *Euclid* ba chiều mà cấu trúc tiên đề của nó dễ dàng lừa chúng ta để quên đi rằng nó dựa trên các hoàn cảnh có thể trải nghiệm được.

Nếu giờ khái niệm không gian được hình thành như cách thức đã phác thảo ở trên và được gắn liền với kinh nghiệm về "lấp đầy" cái hộp, thì trước tiên đây là một không gian *giới hạn*. *Tuy nhiên tính giới hạn tỏ ra không quan trọng*, bởi vì rõ ràng một hộp lớn hơn luôn luôn có thể chứa đựng một cái hộp nhỏ hơn. Không gian do đó tỏ ra là một cái gì không có giới hạn.

Nhưng ở đây tôi không muốn bàn các quan niệm về tính ba chiều và "tính *Euclid*" của không gian có thể được truy nguyên từ những kinh nghiệm tương đối sơ khai như thế nào. Mà đúng hơn, trước tiên tôi muốn xem xét, nhìn từ những quan điểm khác, vai trò của khái niệm không gian trong sự phát triển của tư duy vật lý.

Nếu một hộp nhỏ hơn s nằm bên trong không gian rỗng của một hộp lớn hơn S , và đúng yện đối với s , thì không gian rỗng của s là một phần của không gian rỗng của S , và chính cái "không gian" chứa hai hộp kia cũng thuộc về mỗi cái hộp. Tuy nhiên,

nếu s chuyển động đối với S , thì quan niệm sẽ ít đơn giản hơn. Người ta có khuynh hướng nghĩ rằng s luôn luôn bao gồm cùng một không gian, nhưng là một phần biến thiên của không gian S . Như vậy người ta thấy cần thiết gán cho mỗi hộp không gian đặc biệt của nó (không được nghĩ là giới hạn) và giả thiết rằng hai không gian này chuyển động tương đối nhau.

Trước khi người ta ý thức về sự phức tạp này, không gian xem ra như một môi trường giới hạn (thùng chứa), trong đó các đối tượng vật thể bởi quanh. Nhưng giờ người ta phải nghĩ rằng có vô số không gian chuyển động tương đối nhau. Khái niệm không gian như một cái gì tồn tại khách quan độc lập với các vật thể là thuộc về loại tư duy tiền-khoa-học, nhưng ý tưởng về sự tồn tại của vô số các không gian chuyển động tương đối nhau thì không. Ý tưởng sau tuy về mặt lôgic là không tránh khỏi, nhưng không đóng vai trò quan trọng ngay cả trong tư duy khoa học một thời gian dài.

Còn về nguồn gốc tâm lý của khái niệm thời gian thì sao? Khái niệm này không nghi ngờ có liên quan với dữ kiện "hồi tưởng", cùng như với sự phân biệt giữa các trải nghiệm bằng giác quan và sự hồi tưởng về chúng. Thực ra người ta có thể đặt nghi vấn, không biết sự phân biệt giữa trải nghiệm giác quan và hồi tưởng (hay là sự hình dung đơn thuần) có phải là một cái gì về tâm lý cho sẵn trực tiếp chúng ta hay không. Mỗi người đã có lúc trải nghiệm rằng anh ta đâm ra hoang mang không biết có phải anh ta thực sự trải nghiệm điều gì đó với các giác quan của mình, hay chỉ mơ tưởng nó thôi. Có lẽ khả năng phân biệt này chỉ hình thành như một kết quả của hoạt động lý trí nhằm sắp xếp thứ tự.

Mỗi sự "hồi tưởng" tương ứng một sự trải nghiệm được xem đã xảy ra như "trước đây" để so sánh với các "trải nghiệm hiện tại". Đây là một nguyên lý sắp xếp thứ tự về mặt khái niệm cho các trải nghiệm (được hồi tưởng), và khả năng thực hiện nó là nguyên cơ cho khái niệm thời gian có tính cách chủ quan, nghĩa là cho cái khái niệm thời gian được dựa trên sự sắp xếp các trải nghiệm của cá nhân.

Chúng ta hiểu thế nào về sự "khách quan hóa" khái niệm thời gian? Chúng ta hãy xét một thí dụ. Cá nhân A ("tôi") có một trải nghiệm "trời chớp". Cùng lúc cá nhân A cũng trải nghiệm một

hành vi của cá nhân B , cùng lúc có mối quan hệ gắn liền với sự trải nghiệm riêng "trời chớp" của A . Như vậy cá nhân A liên kết B với trải nghiệm "trời chớp". Đối với A , một ý tưởng được nảy sinh cho rằng cũng có những cá nhân khác tham gia vào sự trải nghiệm "trời chớp". Trải nghiệm "trời chớp" do đó bây giờ không còn được quan niệm là một trải nghiệm cá nhân riêng biệt nữa, mà là trải nghiệm của những cá nhân khác (hay sau cùng chỉ là một "trải nghiệm tiềm năng"). Bằng cách này, một quan niệm được hình thành cho rằng hiện tượng "trời chớp", ban đầu đã đi vào ý thức với tư cách của một "trải nghiệm", bây giờ cũng được quan niệm như một "sự kiện" (khách quan). Toàn bộ các sự kiện, đó chính là cái chúng ta nghĩ khi chúng ta nói về "thế giới thực bên ngoài".

Chúng ta đã thấy, chúng ta bị bắt buộc phải cho thêm một sự sắp xếp thời gian vào những trải nghiệm theo cách sau: Nếu β xảy ra sau α , và γ sau β thì γ cùng xảy ra sau α (chuỗi của "trải nghiệm"). Nhưng trong phương diện này, đối với các sự kiện mà chúng ta đã liên kết với các trải nghiệm thì sao? Mới nhìn, người ta dường như có thể giả định một cách hiển nhiên rằng có tồn tại một sự sắp xếp thời gian của các sự kiện một cách trùng khớp với sự sắp xếp thời gian của các trải nghiệm.

Người ta làm điều này cũng một cách chung chung và không ý thức, cho đến khi hoài nghi xuất hiện trong tư duy.^[81] Để đạt đến thế giới khách quan, chúng ta còn cần một ý tưởng bổ sung xây dựng: Sự kiện được định vị cả trong không gian, không chỉ trong thời gian.

Trong những phần trước, chúng ta cố gắng mô tả các khái niệm không gian, thời gian và sự kiện có mối quan hệ tâm lý thế nào với các trải nghiệm. Xem xét một cách lôgic, đó là những trước tác tự do của trí thông minh con người, của công cụ của tư duy, nhằm làm cho các trải nghiệm có mối liên hệ với nhau, và bằng cách đó, người ta có được cái nhìn tổng thể tốt hơn. Nỗ lực để ý thức về các nguồn thực nghiệm của các khái niệm cơ bản này là nhằm chứng minh rằng chúng ta trong chừng mực nào thực sự bị ràng buộc với những khái niệm này. Bằng cách đó, chúng ta sẽ ý thức được tự do của chúng ta, để khi cần, sử dụng nó một cách hợp lý, điều luôn luôn là một việc không dễ làm.

Chúng ta còn phải thêm một điều cơ bản vào cái phác họa liên quan đến nguồn gốc tâm lý của các khái niệm không gian-thời gian-sự kiện (chúng ta muốn gọi chúng ngắn hơn là các khái niệm "(thuộc) loại-không gian"^[82], ngược lại với các khái niệm từ phạm vi tâm lý học). Chúng ta đã liên hệ khái niệm không gian với trải nghiệm ở các hộp và sự sắp xếp các đối tượng vật thể trong đó. Sự tạo thành khái niệm do đó đã giả định trước khái niệm của đối tượng vật thể (chẳng hạn "hộp"). Cũng như thế, những cá nhân, những người phải được đưa vào việc hình thành một khái niệm thời gian khách quan, cũng đóng vai trò của các đối tượng vật thể trong khuôn khổ này. Cho nên đối với tôi, dường như sự tạo thành khái niệm của đối tượng vật thể phải đi trước các khái niệm của chúng ta về thời gian và không gian.

Tất cả các khái niệm loại-không gian này đã thuộc về giai đoạn tư duy tiền-khoa-học, bên cạnh các khái niệm từ lãnh vực tâm lý học, như đau đớn, cứu cánh, mục tiêu, v.v. Bây giờ đặc trưng cho tư duy trong vật lý học cũng như trong khoa học nói chung là người ta cơ bản ham muốn *chỉ* hoạt động với các khái niệm "loại-không gian" là đủ, và nỗ lực diễn tả nhờ đó tất cả các quan hệ có tính quy luật. Nhà vật lý học tìm cách quy màu sắc và âm thanh về tần số, nhà sinh lý học quy tư duy và đau đớn về các quá trình thần kinh, sao cho phần tâm lý tự nó bị loại bỏ khỏi mỗi quan hệ nhân quả của sự tồn tại, do đó không còn xuất hiện bất cứ nơi đâu với tư cách là một gạch nối độc lập trong các các quan hệ nhân quả. Quan điểm này, cho rằng về nguyên tắc có thể nắm bắt được tất cả mối quan hệ bằng việc sử dụng duy nhất các khái niệm "loại-không gian", chính là cái mà hiện tại người ta hiểu dưới cái tên "chủ nghĩa duy vật" (sau khi "vật chất" đã mất đi vai trò của nó với tư cách là một khái niệm cơ bản).

Tại sao lại cần thiết phải kéo các khái niệm cơ bản của tư duy khoa học tự nhiên xuống khỏi các cánh đồng Olympus của Platon, và tìm cách phát hiện ra nguồn gốc trần thế của chúng? Câu trả lời là: Để giải phóng các khái niệm này khỏi sự cấm kỵ còn bám víu chúng, để đạt đến một sự tự do lớn hơn trong việc hình thành khái niệm. Gióng lên tiếng chuông cảnh tỉnh này, trước nhất là công lao bất tử của *D. Hume* và *E. Mach*.

Khoa học đã tiếp nhận các khái niệm không gian, thời gian,

đối tượng vật thể (với trường hợp đặc biệt quan trọng là "vật thể rắn") từ tư duy tiền-khoa-học, cải biên và làm cho chúng chính xác hơn. Đóng góp quan trọng đầu tiên của nó là sự phát triển hình học Euclid. Cách diễn đạt bằng tiên đề của nó không được phép gây ảo giác làm chúng ta quên đi nguồn gốc thực nghiệm của nó (các khả năng chứa đựng, hay đặt các vật rắn cạnh nhau). Đặc biệt, tính chất ba chiều của không gian, cũng như đặc tính Euclid của nó là có nguồn gốc thực nghiệm (nó có thể được lấp đầy toàn bộ bởi những "hình lập phương" được cấu tạo giống nhau).

Tính tinh tế của khái niệm không gian được nâng cao lên bởi sự khám phá rằng không có vật thể hoàn toàn rắn. Tất cả mọi vật thể đều có thể biến dạng được một cách đàn hồi và thay đổi thể tích của chúng khi nhiệt độ thay đổi. Cho nên các hình thể, mà khả năng chứa đựng khả dĩ của chúng được mô tả bằng hình học Euclid, do đó không thể được quy định thoát ly khỏi nội dung của vật lý. Nhưng vì vật lý học, để thiết lập các khái niệm của nó, đã phải sử dụng hình học, nên hàm lượng thực nghiệm của hình học chỉ có thể được xác nhận và kiểm tra trong khuôn khổ của toàn ngành vật lý học thôi.

Trong mối liên hệ này, người ta phải nghĩ đến thuyết nguyên tử, và quan điểm của nó về tính khả phân hữu hạn (chia nhỏ được); vì không gian của sự nở rộ đến phần dưới-nguyên tử là không thể đo lường được. Thuyết nguyên tử cũng buộc chúng ta từ bỏ, trên nguyên tắc, ý tưởng cho rằng bề mặt giới hạn của các vật thể rắn có thể được xác định một cách tinh và sắc nét. Nói đúng ra, không có định luật riêng biệt nào cho các cấu hình khả dĩ của các vật thể rắn tiếp xúc nhau, ngay trong vùng vĩ mô.

Mặc dù thế, không ai nghĩ cần phải từ bỏ khái niệm không gian, bởi vì nó tỏ ra không thể thiếu trong toàn hệ thống đã được thử thách và thành công xuất sắc của khoa học tự nhiên. *Mach* là người duy nhất trong thế kỷ XIX nghiêm túc nghĩ đến việc loại bỏ khái niệm không gian, bằng việc ông tìm cách thay thế nó bằng khái niệm toàn thể các khoảng cách có mặt của tất cả điểm vật chất (Ông đã nỗ lực làm việc này để đi đến một sự hiểu biết thỏa đáng về quán tính).

TRƯỜNG

Trong cơ học *Newton*, không gian và thời gian đóng một vai trò đôi. Thứ nhất là vai trò giá đỡ, hay khung, của các diễn biến vật lý, mà trên đó các sự kiện được mô tả bằng các tọa độ không gian và thời gian. Trên nguyên tắc, vật chất được xem như cấu thành bởi những "điểm vật chất" mà các chuyển động của chúng làm nên diễn biến vật lý. Nếu vật chất được xem là liên tục, thì có thể nói, điều này xảy ra có thể nói như nhất thời trong những trường hợp mà ở đó người ta không muốn, hay không thể mô tả được cấu trúc rời rạc. Trong trường hợp này, các phần nhỏ (phần tử của thể tích) của vật chất được xem tương tự như các điểm vật chất, ít ra trong chừng mực chúng ta chỉ quan tâm đến các chuyển động, và không quan tâm đến các diễn biến mà hiện thời chúng ta không thể quy chúng về các chuyển động được, hoặc không hữu ích khi làm thế (thí dụ các thay đổi nhiệt độ, các quá trình hóa học). Vai trò thứ hai của không gian và thời gian là vai trò của "hệ quán tính"^[83]. Trong tất cả các hệ quy chiếu khả dĩ thì các hệ quán tính được xem là ưu đãi vì lý do, đối với chúng, định luật quán tính có hiệu lực.

Điều cốt lõi ở đây là, cái "thực tại vật lý", được xem như độc lập với các chủ thể trải nghiệm, được quan niệm, ít ra về nguyên tắc, gồm có không gian và thời gian một bên, và các điểm vật chất thường xuyên chuyển động đối với chúng bên kia. Ý tưởng của sự tồn tại độc lập của không gian và thời gian có thể được diễn tả một cách tiêu biểu như sau: Nếu vật chất biến mất, thì không gian và thời gian vẫn còn lại một mình (như một loại sân khấu cho các diễn biến vật lý).

Sự khắc phục quan điểm này đã thoát thai từ một sự phát triển thoát đầu có vẻ không liên quan gì đến bài toán không-thời-gian - đó là sự xuất hiện của *khái niệm trường* và yêu sách tối hậu của nó là phải thay đổi, về nguyên tắc, khái niệm hạt (điểm vật chất). Trong khuôn khổ vật lý cổ điển, khái niệm trường xuất hiện như khái niệm phụ trợ, trong những trường hợp mà ở đó người ta xem vật chất như một continuum (môi trường liên tục). Thí dụ khi người ta xét sự dẫn nhiệt trong một vật thể rắn, trạng thái của vật thể được mô tả bằng cách cho biết nhiệt độ ở mỗi điểm của vật thể tại mỗi thời gian nhất định. Bằng toán học, điều này có nghĩa: Nhiệt độ T được biểu diễn bằng một biểu thức toán

học (hàm số) theo các tọa độ không gian và thời gian t (trường nhiệt độ). Định luật của sự dẫn nhiệt sẽ được biểu diễn bằng một quan hệ cục bộ (phương trình vi phân), chứa đựng tất cả các trường hợp đặc biệt của sự dẫn nhiệt. Nhiệt độ ở đây là một thí dụ đơn giản cho khái niệm trường. Đại lượng này (hay một tổng thể của các đại lượng) là một hàm số của các tọa độ và thời gian. Một thí dụ khác là sự mô tả chuyển động của một chất lỏng. Tại mỗi điểm, có một vận tốc ở mỗi lúc, được diễn tả định lượng bằng ba "thành phần" của nó đối với các trục của một hệ tọa độ (vectơ). Các thành phần của vận tốc tại một điểm (các thành phần trường), ở đây cũng thế, là những hàm số của tọa độ (x, y, z) và thời gian (t).

Đặc trưng cho những trường được nói trên là chúng chỉ diễn ra bên trong một khối lượng có trọng lượng; chúng chỉ để mô tả trạng thái của khối vật chất này.

Ở đâu không có vật chất, theo lịch sử hình thành của khái niệm trường, ở đó cũng không thể có trường tồn tại. Nhưng trong phần tư đầu thế kỷ XIX người ta đã thấy các hiện tượng giao thoa và chuyển động của ánh sáng được cắt nghĩa với độ chính xác đáng ngạc nhiên nếu người ta quan niệm ánh sáng như một trường sóng, hoàn toàn tương tự với trường rung động cơ học trong một vật thể rắn đàn hồi. Do đó người ta thấy cần thiết phải tạo ra khái niệm trường, cũng có thể tồn tại trong "không gian rỗng" không chứa vật chất có trọng lượng.

Hoàn cảnh này tạo ra một tình huống mâu thuẫn, vì khái niệm trường ban đầu xuất hiện chỉ để mô tả các trạng thái ở bên trong của một vật thể có trọng lượng. Điều này lại càng hiện ra chắc chắn hơn khi người ta tin rằng mỗi trường có thể được xem là một trạng thái có thể diễn giải được một cách cơ học, điều giả định sự hiện diện của vật chất. Vì thế người ta cảm thấy bắt buộc gia thiết sự tồn tại ở khắp nơi của một loại vật chất mà người ta gọi là "ether", ngay cả trong không gian cho đến nay được quan niệm rỗng.

Sự giải phóng khái niệm trường ra khỏi giả thuyết về sự tồn tại của một môi trường nền bằng vật chất là một trong những sự kiện về mặt tâm lý thú vị nhất của sự phát triển tư duy vật lý. Trong nửa phần sau của thế kỷ XIX, dựa vào các nghiên cứu của

Faraday và *Maxwell*, người ta thấy càng ngày càng rõ hơn, rằng sự mô tả bằng trường các quá trình điện từ có tính ưu việt hẳn so với sự mô tả dựa trên cơ sở các khái niệm cơ học của điểm vật chất. Bằng việc đưa khái niệm trường vào động điện học, *Maxwell* đã thành công trong việc tiên đoán sự tồn tại của sóng điện từ mà sự tương đồng cốt lõi của nó với sóng ánh sáng không còn nghi ngờ gì nữa bởi vận tốc truyền của chúng bằng nhau. Bằng cách đó quang học về cơ bản bị hấp thụ vào điện động học. Một hiệu ứng tâm lý của thành công vĩ đại này là khái niệm trường dần dần giành được sự độc lập lớn hơn trước khuôn khổ cơ giới của vật lý học cổ điển.

Nhưng rồi lúc đầu người ta vẫn tiếp tục giả thiết như một lẽ đương nhiên, rằng các trường điện từ phải được lý giải như các trạng thái của ether, và người ta đi tìm các trạng thái này một cách hăng say như là những trạng thái cơ học. Chỉ khi những nỗ lực này liên tiếp thất bại, các nhà khoa học mới dần dần làm quen với quan điểm từ chối một sự lý giải cơ học như thế. Nhưng niềm tin vẫn còn luôn vương vấn, rằng các trường điện từ phải là những trạng thái của ether; và đó là tình hình vào giai đoạn giao thời của thế kỷ.

Thuyết ether đã mang theo mình câu hỏi: Ether vận hành như thế nào từ quan điểm cơ học đối với các vật thể có trọng lượng? Nó tham gia vào các chuyển động của vật thể, hay là các bộ phận của nó đứng yên với nhau? Nhiều thí nghiệm tinh vi được tiến hành để quyết định câu trả lời. Những sự kiện quan trọng đáng được nhắc đến trong khung cảnh này, đó là "quang sai" của các sao cố định như hệ quả của sự chuyển động thường niên của trái đất, cũng như "hiệu ứng Doppler", nghĩa là ảnh hưởng của chuyển động tương đối của các sao cố định lên tần số của ánh sáng đến mắt chúng ta có các tần số phát ra đã được biết trước. Kết quả của những sự kiện và thí nghiệm này (trừ kết quả của một thí nghiệm, thí nghiệm *Michelson-Morley*) được *H.A. Lorentz* giải thích dưới sự giả định, rằng ether không tham gia vào chuyển động của các vật thể có trọng lượng, và các bộ phận của ether hoàn toàn không có chuyển động tương đối với nhau. Do đó ether có thể nói xuất hiện như biểu tượng của một không gian tuyệt đối yên tĩnh. Nhưng nghiên cứu của Lorentz còn đem lại nhiều hơn. Nó giải thích được các hiện tượng điện từ hay quang

học được biết trước cho đến nay diễn ra bên trong các vật thể có trọng lượng, dưới sự giả định rằng ảnh hưởng của vật chất có trọng lượng lên trường điện - và ngược lại - là chỉ do các hạt của vật chất mang các điện tích, và các điện tích này tham gia vào chuyển động của các hạt. Về thí nghiệm của *Michelson-Morley*, H.A. Lorentz đã chứng minh rằng kết quả thu lượm được của ông ít ra không mâu thuẫn với thuyết ether đứng yên.

Mặc dù có tất cả những thành công tốt đẹp này, nhưng hiện trạng của lý thuyết chưa làm người ta hài lòng hoàn toàn, bởi lý do sau. Cơ học cổ điển, thuyết mà chúng ta không nghi ngờ gì nữa rằng nó đúng với độ chính xác lớn, dạy chúng ta sự tương đương của tất cả các hệ quán tính, hay các không gian quán tính, trong việc diễn tả các định luật tự nhiên, nghĩa là tính bất biến của các định luật tự nhiên đối với sự chuyển đổi từ một hệ quán tính này sang hệ khác. Các *thí nghiệm* điện từ học và quang học dạy chúng ta cùng một điều với độ chính xác đáng kể. Nhưng cơ sở của *thuyết* điện từ lại dạy ta rằng có một hệ quán tính đặc biệt tồn tại được ưu đãi, đó là hệ của ether ánh sáng^[84] đứng yên. Quan niệm này của cơ sở lý thuyết là rất không thỏa đáng. Không có một sự cải biên của cơ sở lý thuyết để - như cơ học cổ điển - đảm bảo được sự tương đương của các hệ quán tính (nguyên lý tương đối hẹp) hay sao?

Câu trả lời cho câu hỏi này chính là thuyết tương đối hẹp. Thuyết này tiếp nhận từ thuyết *Maxwell-Lorentz* giả thuyết về tính hằng số của vận tốc ánh sáng trong không gian rỗng. Để làm tính chất này hòa hợp với tính tương đương của các hệ quán tính (nguyên lý tương đối hẹp) chúng ta phải từ bỏ ý tưởng về tính tuyệt đối của tính đồng thời; thêm vào đó, các phép biến đổi Lorentz của thời gian và tọa độ không gian là hệ luận cho sự chuyển đổi từ một hệ quán tính sang hệ quán tính khác. Cả nội dung của thuyết tương đối hẹp được chứa đựng trong định đề này: Các định luật tự nhiên là bất biến đối với phép biến đổi Lorentz. Điều quan trọng nhất của yêu cầu này nằm ở chỗ nó giới hạn lại, một cách nhất định, các định luật tự nhiên có thể tồn tại.

Đâu là vị trí của thuyết tương đối hẹp đối với bài toán về không gian? Trước hết chúng ta phải cẩn thận trước ý kiến cho rằng tính chất bốn chiều của (thế giới) thực tại là chỉ mới được đề

cập gần đây bởi lý thuyết này. Ngay trong cơ học cổ điển, sự kiện cũng được định vị bằng bốn số, cụ thể là ba tọa độ không gian và một tọa độ thời gian; toàn thể các "sự kiện" vật lý do đó được đặt vào một đa tạp liên tục bốn chiều. Nhưng trên cơ sở của cơ học cổ điển, continuum bốn chiều này được phân giải^[85] một cách khách quan thành thời gian một chiều và các lát cắt không gian ba chiều, những cái sau chỉ chứa đựng những sự kiện đồng thời thôi. Sự phân giải này là giống nhau cho tất cả các hệ quán tính. Tính đồng thời của hai sự kiện nhất định đối với một hệ quán tính kéo theo tính đồng thời của các sự kiện này đối với tất cả các hệ quán tính. Đó là điều được hiểu khi người ta nói, thời gian của cơ học cổ điển là tuyệt đối. Nhưng theo thuyết tương đối hẹp thì tình hình khác đi. Toàn bộ các sự kiện đồng thời với một sự kiện được cho trước tuy đúng đối với một hệ quán tính nhất định, nhưng không còn độc lập nữa đối với sự lựa chọn hệ quán tính. Continuum bốn chiều không thể phân giải được một cách khách quan thành các lát cắt chứa đựng tất cả các sự kiện đồng thời nữa; khái niệm "bây giờ" mất đi ý nghĩa khách quan đối với thế giới được mở rộng về không gian. Điều đó là vì người ta phải quan niệm không gian và thời gian là một continuum không thể phân giải ra được một cách khách quan, nếu người ta muốn diễn tả nội dung của các quan hệ khách quan mà không có sự tùy tiện ước lệ không cần thiết.

Bằng cách thuyết tương đối hẹp bộc lộ tính tương đương vật lý của tất cả các hệ quán tính, nó chứng minh không thể bảo vệ được giả thuyết về ether yên tĩnh. Do đó người ta phải từ bỏ ý tưởng rằng trường điện từ phải được quan niệm như trạng thái của một môi trường nền vật chất. Trường, do đó, trở thành một nhân tố không rút gọn được của sự mô tả vật lý, không rút gọn được theo cùng nghĩa như khái niệm của vật chất trong thuyết Newton.

Cho đến giờ, chúng ta đã hướng sự chú ý đến việc tìm hiểu các khái niệm không gian và thời gian đã được *cải biên* thế nào bởi thuyết tương đối hẹp. Bây giờ chúng ta hãy chú ý đến các nhân tố mà thuyết này đã tiếp thu từ cơ học cổ điển. Ở đây cũng thế, các định luật tự nhiên chỉ đòi hỏi tính hiệu lực khi một hệ quán tính được chọn làm cơ sở cho sự mô tả không-thời-gian. Nguyên lý quán tính và nguyên lý hằng số vận tốc truyền của ánh sáng

chỉ đúng đối với một *hệ quán tính*. Cũng thế, các định luật về trường chỉ có ý nghĩa và hiệu lực đối với các hệ quán tính. Do đó, cũng như trong cơ học cổ điển, không gian ở đây cũng là một bộ phận độc lập trong sự mô tả thực tại vật lý. Không gian (quán tính) - hay rõ hơn - hay đúng hơn, không gian này cùng với thời gian liên kết của nó - vẫn còn tồn tại khi người ta tưởng tượng vật chất và trường đã được lấy đi. Cấu trúc bốn chiều này (không gian Minkowski) được quan niệm là cái giá tải của vật chất và trường. Các không gian quán tính, với các thời gian liên kết của chúng, chỉ là những hệ tọa độ bốn chiều ưu đãi, chúng được nối kết với nhau bằng các phép biến đổi tuyến tính Lorentz. Bởi vì trong cấu trúc bốn chiều này không có nữa những lát cắt tương trưng khách quan cho "bây giờ", nên các khái niệm về sự kiện (xảy ra) hay diễn biến (tiến hóa) tuy không hoàn toàn bị xóa bỏ, nhưng lại phức tạp. Cho nên sẽ là tự nhiên hơn, nếu chúng ta nghĩ cái thực tại vật lý như một sự tồn tại bốn chiều, thay vì cho đến nay như là một sự *tiến hóa* trong không gian ba chiều.

Không gian bốn chiều rắn này của thuyết tương đối hẹp, ở mức độ nào đó, là một cái tương tự bốn chiều của môi trường ether ba chiều rắn của *H.A. Lorentz*. Đối với thuyết này, sự phát biểu sau đây cũng có hiệu lực: Sự mô tả các trạng thái vật lý giả định rằng không gian được cho trước từ đầu, cũng như giả định nó tồn tại một cách độc lập. Cho nên lý thuyết này cũng không loại bỏ được sự khó chịu của *Descartes* liên quan đến sự tồn tại độc lập, và cả tiên nghiệm, của "không gian rỗng". Ở mức độ nào sự quan ngại này được giải tỏa bằng thuyết tương đối rộng, đó là mục đích chính của những suy nghĩ cơ bản được trình bày ở đây.

Ý TƯỞNG KHÔNG GIAN TRONG THUYẾT TƯƠNG ĐỐI RỘNG

Thuyết này trước tiên bắt nguồn từ nỗ lực muốn hiểu được sự tương đương của khối lượng quán tính và khối lượng hấp dẫn. Chúng ta xuất phát từ một hệ thống quán tính *S1*, mà không gian của nó là rỗng về mặt vật lý, nghĩa là trong phần không gian mà chúng ta quan tâm, không tồn tại vật chất, theo nghĩa thường, hay một trường, theo nghĩa thuyết tương đối hẹp. Đối với *S1* chúng ta tưởng tượng một hệ quy chiếu thứ hai *S2* chuyển động gia tốc đều.

S2 như vậy không phải là hệ quán tính. Đối với S2 mỗi khối lượng thử^[86] chuyển động gia tốc, một cách độc lập với tính chất vật lý hay hóa học của nó. Đối với S2, do đó, có một trạng thái tồn tại mà người ta - ít ra gần đúng bậc nhất - không phân biệt được với một trường hấp dẫn. Quan niệm sau đây do đó phù hợp với những dữ kiện có thể quan sát được: S2 cũng là tương đương với một "hệ quán tính"; nhưng đối với S2 có một trường hấp dẫn (thuần nhất) tồn tại (trong khuôn khổ này chúng ta không cần quan tâm đến nguồn gốc của nó). Do đó nếu trường hấp dẫn được đưa vào khuôn khổ nghiên cứu, thì hệ quán tính mất đi ý nghĩa khách quan của nó, miễn là "nguyên lý tương đương" này có thể được nối rộng đến các chuyển động tương đối bất kỳ của các hệ quy chiếu. Nếu có thể xây dựng được một lý thuyết nhất quán dựa trên những ý tưởng nền tảng này, thì tự nó lý thuyết sẽ thỏa mãn đẳng thức của khối lượng quán tính và khối lượng hấp dẫn (trọng lực), một dữ kiện đã được thực nghiệm hỗ trợ mạnh mẽ.

Xét một cách bốn chiều, tương ứng với sự biến đổi từ S1 sang S2 sẽ là một phép biến đổi phi tuyến của bốn tọa độ. Một câu hỏi đặt ra: Những phép biến đổi phi tuyến nào nên được cho phép, hay: Phép biến đổi Lorentz được nối rộng ra như thế nào? Để trả lời câu hỏi này, suy nghĩ sau đây là quyết định.

Chúng ta đã quy cho hệ quán tính của lý thuyết trước đây tính chất: Các hiệu số tọa độ được đo bằng những thước đo "rắn" đứng yên, các hiệu số thời gian bằng những đồng hồ đứng yên. Giả thiết thứ nhất được bổ sung bằng một cái khác, rằng các định lý về "khoảng cách" của hình học Euclid có hiệu lực cho các khả năng sắp xếp tương đối của các thước đo yên tĩnh. Bằng những suy nghĩ sơ đẳng, người ta suy ra từ những kết quả của thuyết tương đối hẹp, rằng sự diễn giải vật lý trực tiếp của các tọa độ đã mất đi ý nghĩa đối với các hệ quy chiếu (S2) được gia tốc đối với các hệ quán tính (S1). Nhưng nếu đó là đúng, thì các tọa độ chỉ diễn tả nhiều hơn sự sắp xếp (trật tự) của "sự tồn tại bên cạnh nhau" (và do đó cũng là độ thứ nguyên của không gian), nhưng không phải những tính chất metric của không gian. Do đó người ta đi đến việc nối rộng các phép biến đổi đến các phép biến đổi liên tục và bất kỳ.^[87] Điều này đưa đến nguyên lý tương đối rộng: Các định luật tự nhiên phải hiệp biến đối với các phép biến đổi

liên tục bất kỳ của tọa độ. Yêu cầu này (kết hợp với yêu cầu của tính đơn giản logic tối đa khả dĩ của các định luật) giới hạn các định luật tự nhiên được quan tâm, một cách mạnh mẽ không gì sánh kịp so với nguyên lý tương đối hẹp.

Dòng ý tưởng này cơ bản được xây dựng trên khái niệm trường như một khái niệm độc lập. Bởi vì các quan hệ tồn tại đối với S_2 được lý giải như một trường hấp dẫn, mà không cần đặt ra vấn đề tồn tại của các khối lượng, những thứ vốn sinh ra trường này. Dòng ý tưởng này cũng làm cho người ta hiểu tại sao các định luật của trường hấp dẫn thuần túy lại được liên hệ trực tiếp với ý tưởng của nguyên lý tương đối rộng trực tiếp hơn là các định luật của các trường có dạng phổ quát (khi chẳng hạn có một trường điện từ tồn tại). Thật vậy, chúng ta có cơ sở chính đáng để giả thiết rằng không gian *Minkowski* "vô trường" (không có trường) biểu thị một trường hợp đặc biệt khả dĩ trong định luật tự nhiên, và là trường hợp đặc biệt đơn giản nhất có thể quan niệm được. Xét về tính chất metric của nó, một không gian như thế được đặc trưng bởi tính chất rằng biểu thức $dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2$, được đo bằng một đơn vị đo lường, là bình phương của khoảng cách không gian của hai điểm lân cận vi phân của một lát cắt loại-không gian ba chiều (định lý *Pythagore*), trong khi dx_4 là khoảng cách thời gian, được đo bằng một đơn vị thời gian thích hợp, của hai sự kiện với những tọa độ chung (x_1, x_2, x_3) . Tất cả những điều này chung quy dẫn tới kết quả, điều có thể dễ dàng được chứng minh với sự giúp đỡ của các phép biến đổi Lorentz, rằng đại lượng

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 - dx_4^2 \quad (1)$$

mang một ý nghĩa metric khách quan, về mặt toán học, điều này tương ứng với việc ds^2 là một đại lượng bất biến đối với các phép biến đổi Lorentz.

Nếu giờ, theo nghĩa của nguyên lý tương đối rộng, chúng ta áp lên không gian này một phép biến đổi liên tục bất kỳ của các tọa độ, thì độ lớn hợp lý khách quan ds sẽ được diễn tả trong hệ tọa độ mới bằng hệ thức

$$ds^2 = g^{ik} dx^i dx^k \quad (1a)$$

trong đó về phải là một tổng số^[88] khi các chỉ số i và k biến thiên trên các tổ hợp $11, 12, \dots$ cho đến 44 . Các số hạng g_{ik} bây giờ không phải là hằng số mà là hàm số của các tọa độ và được xác định bởi phép biến đổi được chọn bất kỳ (vừa nói). Tuy nhiên các g_{ik} không phải là những hàm số tùy tiện của các tọa độ mới, mà phải là các hàm số sao cho hệ thức (1a) có thể được biến đổi ngược lại thành (1) bằng một phép biến đổi liên tục của bốn tọa độ. Để điều đó có thể được thực hiện, các hàm số g_{ik} phải thỏa mãn các "phương trình của điều kiện" nhất định có tính chất hiệp biến mà *B. Riemann* đã rút ra hơn một nửa thế kỷ trước khi thuyết tương đối rộng được thiết lập ("Điều kiện *Riemann*"). Theo nguyên lý tương đương, (1a) mô tả dưới dạng hiệp biến tổng quát một trường hấp dẫn loại đặc biệt, nếu các g_{ik} thỏa mãn điều kiện *Riemann*.

Định luật cho trường hấp dẫn thuần túy của dạng tổng quát do đó phải được thỏa mãn khi điều kiện *Riemann* được thỏa mãn; nhưng nó (định luật) phải yếu hơn, nghĩa là ít giới hạn hơn điều kiện *Riemann*. Bằng cách đó, định luật trường của lực hấp dẫn thuần túy thực tế đã được hoàn toàn xác định, một kết quả sẽ không được diễn giải chi tiết ở đây.

Bây giờ chúng ta đã được chuẩn bị để thấy được sự chuyển tiếp sang thuyết tương đối rộng sửa đổi khái niệm không gian ở mức độ nào. Theo cơ học cổ điển và thuyết tương đối hẹp, không gian (không-thời-gian) có một sự tồn tại độc lập đối với vật chất hay với trường. Nói chung để có thể mô tả "cái lấp đầy không gian" và lệ thuộc vào tọa độ, thì không-thời-gian hay hệ quán tính phải được quan niệm là tồn tại ngay từ đầu cùng với những tính chất metric của nó, bởi vì nếu không, sự mô tả của cái "lấp đầy không gian" sẽ không có ý nghĩa.^[89] Nhưng theo thuyết tương đối rộng, không gian ngược lại không có sự tồn tại đặc biệt nào đối với "cái lấp đầy không gian", lệ thuộc vào các tọa độ. Chẳng hạn giả thiết người ta mô tả một trường hấp dẫn thuần túy bằng các g_{ik} (như hàm số của các tọa độ) như nghiệm số của các phương trình hấp dẫn. Khi người ta nghĩ lấy đi trường hấp dẫn, nghĩa là lấy đi các hàm số g_{ik} , thì không còn một không gian của dạng (1), mà nói chung, *chẳng còn lại gì cả*, kể cả "không gian tôpô". Bởi vì các hàm số g_{ik} mô tả không những trường, mà đồng thời còn mô tả cấu trúc tôpô và metric - các tính chất của

đa tạp. Một không gian kiểu (1), theo nghĩa của thuyết tương đối rộng, không phải là một không gian không trường, mà là một trường hợp đặc biệt của trường (g_{ik}), ở đó các g_{ik} (đối với hệ tọa độ được sử dụng, cái thực ra không có ý nghĩa khách quan) có những trị số không tùy thuộc vào các tọa độ; một không gian rỗng, nghĩa là một không gian không có trường, cái đó không thể có. Không-thời-gian tự nó không đòi hỏi sự tồn tại riêng của nó, nhưng chỉ là một đặc tính về cấu trúc của trường mà thôi.^[90]

Do đó *Descartes* không phải không có lý lắm khi ông tin cần phải loại bỏ sự tồn tại của không gian rỗng. Ý tưởng xem ra tuy vô lý, nhưng bao lâu người ta chỉ nhìn cái thực tại vật lý qua các vật thể có trọng lượng. Chỉ có ý tưởng trường với tư cách là người thủ vai của thực tại, và trong sự kết hợp với nguyên lý tương đối rộng, mới chỉ ra được cái lỗi thực của ý tưởng *Descartes*: không có không gian "vô trường".

THUYẾT HẤP DẪN MỞ RỘNG

Thuyết trường hấp dẫn thuần túy trên miếng đất của thuyết tương đối rộng vì thế dễ tiếp cận, vì chúng ta được phép tin tưởng rằng không gian Minkowski "vô trường" với metric phù hợp với (1) phải thỏa mãn các định luật trường tổng quát. Từ trường hợp đặc biệt này chúng ta suy ra định luật hấp dẫn bằng một sự khái quát hóa hầu như không có một sự tùy tiện nào. Con đường phát triển tiếp của lý thuyết không được xác định rõ hướng lắm từ thuyết tương đối rộng; trong mấy thập kỷ qua có nhiều cuộc thử nghiệm theo nhiều hướng khác nhau. Điểm chung tất cả các thử nghiệm này là quan niệm cái thực tại vật lý như một trường, ở đó trường này là sự khái quát hóa của trường hấp dẫn, và định luật trường là sự khái quát hóa của định luật về trường hấp dẫn thuần túy. Tôi tin lúc này, rằng sau một sự mò mẫm kéo dài, tôi đã tìm thấy^[91] hình dạng tự nhiên nhất của sự khái quát hóa này, nhưng đến nay tôi vẫn chưa thể biết chắc được định luật mở rộng này có đứng vững trước những dữ kiện của thực nghiệm hay không.

Đối với những suy nghĩ trên, vấn đề của định luật trường đặc biệt là thứ yếu. Câu hỏi chính yếu hiện nay là, một lý thuyết trường của một loại đang được quan tâm tới nói chung có thể

dẫn đến thành công hay không. Ý nói, đó là một lý thuyết có khả năng mô tả một cách trọn vẹn cái thực tại vật lý, bao gồm cả không gian bốn chiều, bằng một trường. Thế hệ hiện tại của các nhà vật lý nghiêng về câu trả lời phủ định; dựa trên tình hình phát triển hiện tại của thuyết lượng tử, họ tin rằng trạng thái của một hệ thống có thể được đặc trưng không phải trực tiếp, mà chỉ bằng con đường gián tiếp qua một sự xác nhận thống kê của các kết quả đo đạc được ở hệ thống. Một sự đoan chắc đang thịnh hành, rằng bản chất đôi (cấu trúc hạt và sóng) đã được bảo đảm bởi thực nghiệm chỉ có thể đạt được bằng sự giảm nhẹ đi khái niệm thực tại. Tôi nghĩ, một sự từ chối rộng rãi như thế về mặt lý thuyết dựa trên kiến thức hiện hành là không thể biện giải được trước mắt, và người ta không nên để mình bị cản trở trong việc suy nghĩ đến cùng về con đường của thuyết trường tương đối.

TỰ LIỆU LỊCH SỬ

Phần này không nằm trong quyển sách của Einstein, mà do dịch giả sưu tầm và thêm vào cho phong phú. Nó bao gồm các bài phát biểu hay viết của Einstein về thuyết tương đối cùng như của các tác giả khác xung quanh chủ đề này, có giá trị lịch sử cũng như nhận thức luận.

1. Albert Einstein

Về Điện Động Học của các Vật Thể Chuyển Động (1905)

Đây là phần đầu của bài báo nổi tiếng về thuyết tương đối hẹp với tựa đề như trên, tiếng Đức: "Zur Elektrodynamik bewegter Körper", một trong năm bài của "năm thần kỳ" 1905, được đăng trong tạp chí Annalen der Physik, tập 17. Chúng ta hãy "gặp" trực tiếp thanh niên Einstein 26 tuổi ít phút qua phần đầu của bài báo huyền thoại này.

Người ta biết rằng điện động học của Maxwell - như hiện tại nó thường được hiểu - khi được áp dụng vào các vật thể chuyển động, dẫn tới các bất đối xứng, điều dường như không nằm trong bản chất của các hiện tượng. Thí dụ, hãy nghĩ đến tác dụng qua lại điện động học giữa một thanh nam châm và một dây dẫn điện. Hiện tượng quan sát được ở đây chỉ lệ thuộc vào chuyển động tương đối của dây điện và thanh nam châm, trong khi theo cách hiểu thông thường người ta lại phân biệt nghiêm ngặt hai trường hợp, một vật thể này hay vật thể kia chuyển động. Thật vậy, nếu thanh nam châm chuyển động, và dây điện đứng yên, thì trong vùng lân cận của thanh nam châm sẽ hình thành một điện trường với một trị số năng lượng nhất định, gây ra một dòng điện tại những nơi có các phần của dây điện đang ở. Nhưng nếu thanh nam châm đứng yên và dây điện chuyển động, thì sẽ không có điện trường phát sinh trong vùng lân cận của nam châm. Tuy nhiên trong dây điện có phát sinh một lực động cơ điện, tuy không tương ứng với một năng lượng, nhưng nó làm phát sinh một dòng điện có cùng cường độ, và theo đúng quá trình như các dòng điện được sinh ra bởi các lực điện trong

trường hợp thứ nhất - nếu chúng ta giả thiết sự tương đương của chuyển động tương đối ở hai trường hợp đang xét.

Các thí nghiệm loại tương tự, cũng như các nỗ lực không thành nhằm phát hiện một sự chuyển động của quả đất đối với "môi trường của ánh sáng", gợi ra rằng các hiện tượng trong điện động học cũng như cơ học không hề có những tính chất tương ứng với ý tưởng về sự yên tĩnh tuyệt đối, mà đúng hơn chúng gợi ra rằng, đối với tất cả các hệ tọa độ mà ở đó các phương trình cơ học đã có hiệu lực thì cùng những định luật điện động học và quang học cũng đều có hiệu lực, như đã được chứng minh cho các đại lượng bậc nhất. Chúng ta muốn nâng giả thuyết này (mà nội dung sẽ được gọi là "Nguyên lý tương đối" sau đây) lên thành một định đề, và ngoài ra đưa vào một định đề khác có vẻ như không dung hợp với nó, đó là ánh sáng được truyền trong không gian rỗng luôn luôn với một vận tốc nhất định c [92], độc lập với trạng thái chuyển động của vật thể phát ra nó.

Hai định đề này đủ sức để thiết lập nên một lý thuyết đơn giản và nhất quán của điện động học của các vật thể chuyển động dựa trên nền tảng của thuyết Maxwell cho các vật thể đứng yên. Sự đưa vào giả thuyết "ether của ánh sáng" tỏ ra là thừa, bởi các suy nghĩ sẽ được phát triển ở đây không đòi hỏi một "không gian yên tĩnh tuyệt đối" với những tính chất đặc biệt nào, chúng cũng không gán một véctơ vận tốc cho một điểm nào của không gian rỗng mà ở đó các quá trình điện từ diễn ra.

Cùng như tất cả các thuyết điện động học khác, lý thuyết được phát triển ở đây được dựa trên động học của vật thể rắn, bởi vì các mệnh đề (định lý) của bất cứ một lý thuyết nào như thế đều liên can đến các mối quan hệ giữa các vật thể rắn (hệ tọa độ), đồng hồ và các quá trình điện từ học. Sự quan tâm không đầy đủ đến tình huống này chính là nguồn gốc của những khó khăn mà điện động học của các vật thể chuyển động hiện nay phải chiến đấu.

Phần Động Học

§ 1. Định nghĩa của tính đồng thời

Chúng ta hãy lấy một hệ tọa độ mà ở đó các phương trình của

cơ học Newton có hiệu lực. Để có sự phân biệt về mặt ngôn ngữ đối với các hệ tọa độ sẽ được đề cập đến sau này, và để cho sự trình bày được chính xác hơn, chúng ta gọi hệ tọa độ này là "hệ tọa độ đứng yên".

Nếu một điểm vật chất đứng yên đối với hệ tọa độ này thì vị trí của nó trong đó có thể được xác định bằng cách sử dụng các thước đo rắn, các phương pháp của hình học Euclid, và được diễn tả bằng các tọa độ Descartes.

Nếu muốn mô tả *chuyển động* của một điểm vật chất, chúng ta cho những trị số tọa độ của nó như là hàm số của thời gian. Nhưng chúng phải cẩn thận để ý rằng một sự mô tả toán học như thế chỉ có ý nghĩa khi chúng ta đã hình dung rõ "thời gian" ở đây là gì. Cần đề ý rằng tất cả những phán đoán của chúng ta mà trong đó thời gian có một vai trò đều là những phán đoán về *những sự kiện đồng thời*. Chẳng hạn, khi tôi nói rằng "chiếc xe lửa kia đến đây vào lúc 7 giờ", thì điều này có nghĩa như sau: "Cây kim chỉ giờ của chiếc đồng hồ tôi chỉ số 7, và sự xuất hiện của xe lửa ở đây, đó là những sự kiện đồng thời".

Có thể người ta nghĩ rằng tất cả những khó khăn liên quan đến định nghĩa "thời gian" có thể được khắc phục, nếu chúng ta thay thế "thời gian" bằng "vị trí cây kim chỉ giờ của đồng hồ tôi". Một định nghĩa như thế thực tế là thỏa đáng, nếu chúng ta muốn định nghĩa thời gian chỉ cho tại nơi đồng hồ đang được đặt thôi; nhưng định nghĩa đó sẽ không thỏa đáng nếu phải liên kết với nhau về mặt thời gian các chuỗi sự kiện xảy ra tại nhiều vị trí khác nhau - hay một cách tương đương - nếu chúng ta phải đo thời gian của các sự kiện xảy ra tại những nơi xa đồng hồ.

Chúng ta dĩ nhiên có thể bằng lòng với các trị số thời gian được xác định bởi một quan sát viên được đặt cùng với đồng hồ tại điểm gốc của hệ tọa độ, ghi nhận các vị trí của kim chỉ giờ tương ứng với tín hiệu ánh sáng được phát ra từ mỗi sự kiện cần được đo thời gian, và đến với anh ta, sau khi đi xuyên qua không gian rỗng. Nhưng phép tương ứng ấy (vị trí kim chỉ giờ và tín hiệu ánh sáng đến) mang theo một bất lợi, rằng nó không độc lập với quan điểm của người quan sát được trang bị với cái đồng hồ, như chúng ta biết qua kinh nghiệm. Chúng ta đạt đến một quy định thực tế hơn rất nhiều qua cách suy nghĩ sau đây.

Nếu tại điểm A của không gian có đặt một cái đồng hồ, thì một người quan sát tại A có thể xác định thời gian của những hiện tượng xảy ra trong vùng lân cận trực tiếp, bằng cách xác định các vị trí của kim chỉ giờ diễn ra đồng thời với các sự kiện. Nếu tại điểm B trong không gian cũng có một chiếc đồng hồ, giả thiết có cấu tạo hoàn toàn giống đồng hồ ở A, thì một sự xác định thời gian của những sự kiện xảy ra trong vùng lân cận trực tiếp của B là có thể qua một người quan sát đặt ở B. Tuy nhiên, nếu không có giả thiết gì khác nữa, người ta vẫn chưa thể so sánh về mặt thời gian một sự kiện tại A với một sự kiện tại B. Chúng ta đến giờ chỉ mới định nghĩa một "thời gian-A" và một "thời gian-B", nhưng chưa có "thời gian" chung cho A và B. Thời gian sau có thể được định nghĩa bằng cách người ta quy định bằng *định nghĩa*, rằng "thời gian" cần thiết để ánh sáng đi từ A đến B là bằng "thời gian" cần thiết để nó đi từ B sang A. Hãy để một tia sáng xuất phát từ A vào "thời gian-A" là t_A để đi sang B, và để cho nó được phản chiếu tại B vào "thời gian-B" là t_B đi sang A, và về lại A lúc "thời gian-A" t' . Theo định nghĩa, hai đồng hồ được gọi là chạy đồng bộ với nhau, khi

$$t_B - t_A = t'_A - t'_B$$

Chúng ta giả thiết rằng định nghĩa này của tính đồng bộ là không mâu thuẫn, và có hiệu lực cho bất kỳ số điểm, và qua đó các tính chất sau đây đúng một cách phổ quát:

1. Nếu đồng hồ ở B chạy đồng bộ với đồng hồ ở A, thì đồng hồ ở A chạy đồng bộ với đồng hồ ở B.

2. Nếu đồng hồ ở A chạy đồng bộ vừa với đồng hồ ở B và đồng hồ ở C, thì đồng hồ ở B và C cũng chạy đồng bộ nhau.

Với sự hỗ trợ của các thí nghiệm vật lý trong tưởng tượng nhất định, chúng ta đã xác định được thế nào là các đồng hồ đứng yên, được đặt tại nhiều vị trí khác nhau chạy đồng bộ, và rõ ràng qua đó chúng ta có được một định nghĩa của "đồng thời" hay "đồng bộ" và của "thời gian". "Thời gian" của một sự kiện là thời gian đồng thời với sự kiện của một đồng hồ đứng yên được đặt tại chỗ của sự kiện, chạy đồng bộ với một đồng hồ đứng yên nhất định, và thực tế chạy đồng bộ ở mọi sự xác định thời gian với đồng hồ đã nói.

Thêm nữa, phù hợp với kinh nghiệm, chúng ta giả thiết rằng đại lượng

$$\frac{2\overline{AB}}{t'_A - t_A} = c$$

(\overline{AB} là khoảng cách giữa A và B)

là một hằng số phổ quát - vận tốc truyền của ánh sáng trong không gian rỗng.

Điều cơ bản là chúng ta đã định nghĩa thời gian bằng các đồng hồ đứng yên trong một hệ thống đứng yên, và chúng ta gọi thời gian vừa được định nghĩa là "thời gian của hệ quy chiếu đứng yên", bởi nó thuộc về hệ thống đứng yên.

§ 2. Về tính tương đối của chiều dài và thời gian

Những suy nghĩ tiếp theo đây được dựa trên nguyên lý tương đối và nguyên lý hằng số của vận tốc truyền ánh sáng, cả hai được chúng ta định nghĩa như sau:

1. Các định luật, theo đó các thay đổi trạng thái của hệ thống vật lý bị chi phối, là không hề bị ảnh hưởng, cho dù các thay đổi trạng thái này được quy chiếu lên một trong hai hệ tọa độ có chuyển động tịnh tiến đều tương đối với nhau.

2. Mỗi tia sáng chuyển động trong một hệ tọa độ "yên tĩnh" với vận tốc nhất định c , độc lập với việc tia sáng được phát ra bởi một vật thể đứng yên hay chuyển động. Ở đây

$$\text{Vận tốc} = \frac{\text{Cường độ của ánh sáng}}{\text{Thời gian}}$$

trong đó "thời gian đi" được hiểu như trong § 1.

Chúng ta hãy xét một thanh rắn đứng yên; thanh này có một chiều dài là l nếu được đo bằng một thước đo đơn vị cũng đứng yên. Chúng ta tưởng tượng đặt trục của thanh vào trục x của một hệ tọa độ đứng yên, và sau đó tạo cho thanh một chuyển động tịnh tiến song song đều với vận tốc là v dọc theo trục x theo hướng tăng của x . Giờ chúng ta hỏi chiều dài của thanh *chuyển động* mà chúng ta nghĩ sẽ được xác định bằng hai thao tác sau:

(a) Người quan sát chuyển động cùng với một thước đo nói

trên và với thanh cần đo, anh ta đo chiều dài của thanh trực tiếp bằng cách chập thước đo lên, theo đúng cách thức như khi cả ba, thanh cần được đo, người quan sát và thước đo, ở trong trạng thái đứng yên.

(b) Người quan sát - với sự hỗ trợ của các đồng hồ đứng yên, được đồng bộ hóa theo § 1 và được đặt trong hệ thống đứng yên - xác định tại những điểm nào của hệ thống đứng yên mà điểm đầu và điểm cuối của thanh cần đo được định vị vào một thời điểm nhất định t . Khoảng cách của hai điểm này, được đo với cây thước đã được sử dụng, trong trường hợp này là một thước đo tiêu chuẩn đứng yên, chính là chiều dài mà người ta có thể gọi là "chiều dài của thanh".

Theo nguyên lý tương đối, chiều dài cần phải được tìm ra trong thao tác (a) - chúng ta muốn gọi nó là "chiều dài của thanh trong hệ thống chuyển động" - là phải bằng chiều dài l của thanh trong trạng thái đứng yên.

Chiều dài cần phải được tìm ra trong phép toán (b) - chúng ta muốn gọi nó là "chiều dài của thanh chuyển động trong hệ thống đứng yên" - sẽ được xác định trên cơ sở của hai nguyên lý của chúng ta, và chúng ta sẽ thấy rằng nó khác với l .

Động học được sử dụng phổ biến hiện tại mặc nhiên giả định rằng các chiều dài được xác định từ hai phép toán trên là hoàn toàn bằng nhau, hay nói cách khác, một vật thể rắn chuyển động, tại một thời điểm t , là hoàn toàn có thể được thay thế, về mặt hình học, bởi cùng vật thể đó khi nó đứng yên trong một vị trí nhất định.

Chúng ta hãy tưởng tượng tiếp rằng đồng hồ được đặt vào hai điểm đầu và cuối của thanh (A và B), được làm đồng bộ với các đồng hồ của hệ thống đứng yên, nghĩa là các sự chỉ báo của chúng tương ứng với "thời gian của hệ thống đứng yên" tại những vị trí mà chúng được định vị; các đồng hồ này do đó là "đồng bộ trong hệ thống đứng yên".

Chúng ta tưởng tượng tiếp rằng tại mỗi đồng hồ có một người quan sát chuyển động cùng với nó, và những người này áp dụng lên hai đồng hồ tiêu chuẩn được thiết lập trong § 1 cho việc đồng bộ hóa của hai đồng hồ. Vào thời điểm^[93] t A một tia sáng đi từ A,

nó sẽ phản chiếu tại B vào thời điểm t_B , và trở về tại A lúc t'_A . Phù hợp với nguyên lý hằng số vận tốc ánh sáng chúng ta có:

$$t_B - t_A = \frac{r_{AB}}{c-v}$$

$$t'_A - t_B = \frac{r_{AB}}{c+v}$$

trong đó r^{AB} là chiều dài của thanh chuyển động - được đo trong hệ quy chiếu đứng yên. Các quan sát viên cùng chuyển động với thanh chuyển động, do đó sẽ thấy các đồng hồ không đồng bộ nhau nữa, trong khi các quan sát viên trong hệ quy chiếu đứng yên sẽ cho rằng các đồng hồ là đồng bộ.

Do đó chúng ta thấy, chúng ta không thể dành cho khái niệm đồng thời một ý nghĩa *tuyệt đối* được, hai sự kiện vốn được xem là đồng thời từ một hệ quy chiếu nay không thể được xem là những sự kiện đồng thời nữa, nếu nhìn từ một hệ quy chiếu chuyển động đối với hệ quy chiếu thứ nhất.

Thuyết Tương đối Là Gì? (1919)

Bài này được Einstein viết theo yêu cầu của báo The London Times và được đăng ngày 28 tháng 11 năm 1919 với nhan đề "My theory" (Lý thuyết của tôi), sau khi thuyết tương đối rộng của Einstein được các đoàn thám hiểm Anh xác nhận và long trọng công bố vào ngày 6 tháng 11 năm 1919: Ánh sáng của các vì sao trên trời bị cong khi đi qua vùng gần mặt trời trước khi đến mắt chúng ta, và độ cong của nó theo thuyết Einstein là chính xác, hơn sự tiên đoán của thuyết hấp dẫn Newton. Bài được đăng lại trong Mein Weltbild (thế giới quan của tôi), Amsterdam, Nxb. Querido, 1934.

Tôi sẵn sàng đáp ứng lời yêu cầu của cộng tác viên của Quý Ngài để viết cho tờ *Times* một cái gì về "Thuyết tương đối". Sau sự sụp đổ đáng tiếc của các quan hệ quốc tế sôi động trước đây giữa các học giả thì đây là một cơ hội đáng hoan nghênh cho tôi để bày tỏ những tình cảm vui sướng và biết ơn của tôi đối với các nhà thiên văn học và vật lý học Anh. Đó là một điều hoàn toàn phù hợp với truyền thống vĩ đại và đáng hãnh diện của việc nghiên cứu khoa học trong nước của Quý Ngài, các nhà nghiên

cứu tên tuổi dành nhiều thì giờ và công sức, các tổ chức khoa học của Quý Ngài dành nhiều phương tiện vật chất để kiểm tra hệ luận của một lý thuyết đã được hoàn tất và công bố tại đất nước thù địch của Quý Ngài trong thời gian chiến tranh. Dù việc nghiên cứu về ảnh hưởng của trường hấp dẫn của mặt trời lên các tia sáng chỉ là công việc thuần túy khách quan, tôi cảm thấy không thể không nói lời cảm ơn cá nhân của tôi đến các đồng nghiệp Anh về công trình của họ, bởi vì nếu không có nó, chắc tôi không thể nào chứng kiến được nữa sự kiểm tra hệ quả quan trọng nhất của lý thuyết của tôi.

Người ta có thể phân biệt nhiều loại lý thuyết khác nhau trong vật lý. Phần lớn các lý thuyết có tính chất kiến tạo^[94]. Chúng tìm cách xây dựng một bức tranh của những hiện tượng phức tạp hơn đi từ những vật liệu của một sơ đồ hình thức tương đối đơn giản được đặt làm nền tảng. Và như thế, lý thuyết khí động học tìm cách quy các hiện tượng cơ học, nhiệt học và khuếch tán về chuyển động của các phân tử, nghĩa là xây dựng chúng trên giả thuyết về chuyển động nguyên tử. Nếu chúng ta nói, chúng ta đã thành công trong việc hiểu một nhóm các hiện tượng tự nhiên, điều đó hàm ý chúng ta đã tìm thấy một lý thuyết kiến tạo có thể giải thích được chúng.

Nhưng bên cạnh nhóm quan trọng nhất này của các lý thuyết còn có một nhóm thứ hai mà tôi muốn gọi nó là các "lý thuyết nguyên lý"^[95]. Chúng sử dụng phương pháp phân tích chứ không phải tổng hợp. Cơ sở và xuất phát điểm của các lý thuyết này không phải các phân tử kiến tạo có tính cách giả thuyết, mà là các đặc tính chung đã được khám phá trong thực nghiệm của các quá trình tự nhiên, các nguyên lý mà từ đó các tiêu chuẩn toán học được suy ra, và các hiện tượng riêng lẻ hay các sự biểu thị lý thuyết của chúng phải tuân thủ. Do đó, từ dữ kiện thực nghiệm phổ quát nói rằng động cơ vĩnh cửu^[96] là bất khả thi, nhiệt động học bằng con đường phân tích tìm cách suy diễn các điều kiện cần mà các hiện tượng riêng lẻ phải thỏa mãn.

Lợi điểm của các lý thuyết kiến tạo là tính đầy đủ, khả năng thích ứng và tính trực quan, trong khi lợi điểm của lý thuyết nguyên lý là tính hoàn hảo lôgic và sự an toàn của nền tảng.

Thuyết tương đối thuộc về nhóm lý thuyết nguyên lý. Để hiểu

được bản chất của nó, trước nhất chúng ta cơ bản phải làm quen với những nguyên lý mà trên đó thuyết tương đối được xây dựng. Tuy nhiên trước khi đi vào chi tiết, tôi muốn nhận xét ngay, thuyết tương đối giống như một tòa nhà có hai tầng riêng biệt: thuyết tương đối hẹp, và thuyết tương đối rộng. Thuyết tương đối hẹp, mà trên đó thuyết tương đối rộng tựa lên, áp dụng cho tất cả các hiện tượng vật lý trong sự vắng bóng của hấp dẫn; trong khi thuyết tương đối rộng cung cấp định luật của hấp dẫn và các quan hệ của nó với các lực tự nhiên khác.

Từ thời cổ đại Hy Lạp người ta biết rằng, để mô tả chuyển động của một vật thể người ta cần đến một vật thể thứ hai để quy chiếu chuyển động của vật thể thứ nhất lên đó. Chuyển động của chiếc xe lửa được quy chiếu lên mặt đất, hay chuyển động của một hành tinh được quy chiếu lên toàn thể các sao cố định thấy được. Trong vật lý, một vật thể dùng để quy chiếu các hiện tượng lên đó bằng các thông số không gian được gọi là hệ tọa độ. Các định luật của cơ học Galilei và Newton chẳng hạn chỉ được diễn tả bằng việc sử dụng một hệ tọa độ.

Tuy nhiên, trạng thái chuyển động của hệ tọa độ không được phép lựa chọn tùy tiện, nếu các định luật của cơ học muốn có hiệu lực (nó phải "không quay" và "không gia tốc"). Người ta gọi một hệ tọa độ được cho phép trong cơ học là "hệ quán tính". Tuy nhiên theo cơ học, trạng thái chuyển động của một hệ quy chiếu không phải được tự nhiên xác định duy nhất. Ngược lại, chúng ta có định lý sau đây: Một hệ tọa độ chuyển động thẳng đều đối với một hệ tọa độ quán tính cũng là một hệ quán tính. Dưới cái tên "nguyên lý tương đối hẹp" người ta hiểu sự khái quát hóa định lý này áp dụng lên các hiện tượng tự nhiên bất kỳ; nghĩa là, mỗi hiện tượng tự nhiên khái quát, nếu đúng đối với một hệ tọa độ K , thì cũng đúng đối với một hệ tọa độ K' với một chuyển động tịnh tiến đều đối với K .

Nguyên lý thứ hai mà thuyết tương đối hẹp dựa vào, đó là "nguyên lý hằng số vận tốc ánh sáng trong chân không". Nguyên lý này nói: Ánh sáng luôn luôn có một vận tốc truyền nhất định, độc lập với trạng thái chuyển động của nguồn phát ra nó. Niềm tin mà các nhà vật lý đặt vào định lý này có nguồn gốc từ những thành công của thuyết điện động học Maxwell-Lorentz.

Cả hai nguyên lý vừa nói được hỗ trợ mạnh mẽ bởi kinh nghiệm, nhưng xem ra lại không dung hợp với nhau một cách logic. Một sự cải biên động học, nghĩa là thuyết về các định luật liên quan đến không gian và thời gian từ quan điểm vật lý học, cuối cùng đã cho phép một sự kết hợp chúng lại một cách logic để đưa đến thuyết tương đối hẹp. Nó đã chứng minh rằng, nói đến tính đồng thời của hai sự kiện chỉ có ý nghĩa đối với một hệ tọa độ, và hình dạng của các vật thể đo lường (thước đo chẳng hạn) cũng như tốc độ của đồng hồ phải tùy thuộc vào trạng thái chuyển động của chúng đối với hệ tọa độ.

Tuy nhiên, vật lý học cũ bao gồm cả các định luật chuyển động Galilei-Newton không còn phù hợp với động học của thuyết tương đối vừa được đề cập. Từ cái sau, các điều kiện toán học phổ quát được suy ra mà các định luật tự nhiên phải tuân thủ, nếu muốn hai nguyên lý phổ quát nói trên thực sự có hiệu lực. Vật lý học phải thích ứng với các nguyên lý đó. Đặc biệt người ta đạt đến một định luật chuyển động mới cho các điểm khối lượng chuyển động nhanh, điều đã được xác nhận xuất sắc ở các hạt có mang điện tích. Kết quả quan trọng nhất của thuyết tương đối là liên quan đến khối lượng quán tính của các hệ thống vật thể. Người ta chứng minh được rằng quán tính của một hệ thống tất yếu phải tùy thuộc vào hàm lượng của năng lượng, và điều này dẫn tới quan điểm rằng khối lượng quán tính không gì khác hơn là năng lượng tiềm ẩn. Định lý bảo toàn khối lượng mất đi tính độc lập của nó và hòa nhập vào định lý bảo toàn năng lượng.

Thuyết tương đối hẹp là không gì khác hơn một sự phát triển tiếp tục có hệ thống của điện động học Maxwell-Lorentz, nhưng đã vượt qua nó. Sự độc lập^[97] của các định luật vật lý đối với trạng thái chuyển động của hệ tọa độ có phải bị giới hạn vào các loại chuyển động tịnh tiến của các hệ tọa độ với nhau hay không? Tự nhiên làm gì với các hệ tọa độ của chúng ta đã đưa vào, và với các trạng thái chuyển động của chúng? Nếu vì mục đích mô tả tự nhiên chúng ta cần thiết phải sử dụng một hệ tọa độ được chọn lựa tùy ý, thì sự chọn lựa trạng thái chuyển động của nó không được phép chịu sự giới hạn nào; các định luật phải hoàn toàn độc lập với sự lựa chọn này (nguyên lý tương đối rộng).

Sự thiết lập nguyên lý tương đối rộng này được gợi ra bởi một kinh nghiệm đã được biết từ lâu, theo đó trọng lượng và quán tính của một vật thể được chi phối bởi cùng một hằng số (đẳng thức của khối lượng quán tính và hấp dẫn). Chẳng hạn hãy nghĩ đến một hệ tọa độ có chuyển động quay đều đối với một hệ quán tính theo nghĩa của Newton. Các lực ly tâm xuất hiện đối với hệ tọa độ này phải được diễn giải theo nghĩa của Newton như là những tác dụng của quán tính. Nhưng các lực ly tâm này, y như các lực hấp dẫn, là tỷ lệ với khối lượng của vật thể. Chúng ta không được phép xem hệ tọa độ là đứng yên và các lực ly tâm là lực của hấp dẫn hay sao? Quan niệm đã khá hiển nhiên, nhưng cơ học cổ điển cấm nó.

Sự suy nghĩ thoáng qua này làm chúng ta mừng rỡ tưởng rằng một lý thuyết tương đối rộng phải cung cấp được các định luật hấp dẫn, và sự theo dõi tới cùng ý tưởng này đã biện minh cho hy vọng chúng ta.

Nhưng con đường là chông gai hơn chúng ta tưởng, bởi vì nó đòi hỏi sự từ bỏ hình học Euclid. Điều này có nghĩa: Các định luật, theo đó các vật thể rắn có thể được sắp xếp trong không gian, không hoàn toàn trùng khớp với các định luật về sắp xếp mà hình học Euclid đã quy định cho các vật thể. Đó là điều ta nghĩ khi ta nói "độ cong của không gian". Các khái niệm nền tảng như "đường thẳng", "mặt phẳng", v.v. qua đó mất đi ý nghĩa chính xác của nó trong vật lý.

Trong thuyết tương đối rộng, học thuyết về không gian và thời gian, hay động học, không còn đóng vai trò của một nền tảng độc lập nữa đối với phần vật lý còn lại. Sự vận hành hình học của các vật thể, và tốc độ của các đồng hồ đúng hơn lệ thuộc vào các trường hấp dẫn, những cái được sinh ra bởi chính vật chất.

Lý thuyết mới của hấp dẫn, xét về mặt nguyên lý, khác biệt đáng kể với lý thuyết Newton. Nhưng các kết quả thực nghiệm của nó trùng hợp rất gần với các kết quả thực nghiệm của Newton đến nỗi khó tìm ra được những tiêu chuẩn phân biệt có thể kiểm chứng bằng thực nghiệm. Những tiêu chuẩn phân biệt như thế được tìm thấy đến nay là:

1. Trong chuyển động quay của các ellip của quỹ đạo các hành tinh quanh mặt trời (*được xác nhận ở Sao Thủy*)

2. Trong sự uốn cong của các tia sáng đi ngang qua các trường hấp dẫn (*được xác nhận bởi các ảnh chụp của các nhà thám hiểm Anh trong dịp nhật thực toàn phần*)

3. Trong một sự chuyển dịch của các vạch quang phổ về phía đỏ của ánh sáng đến chúng ta được phát ra từ các sao có khối lượng đáng kể (*sau này cũng được xác nhận luôn*).

Sự hấp dẫn chính của lý thuyết nằm ở tính khép kín logic của nó. Nếu một hệ quả duy nhất suy ra từ nó bị xác nhận là không đúng, thì lý thuyết phải bị từ bỏ; một sự cải biên có lẽ không thể thực hiện được mà không phải phá hủy cả tòa nhà.

Tuy nhiên không nên nghĩ rằng, bằng lý thuyết này hay một lý thuyết bất kỳ nào khác mà công trình vĩ đại của Newton có thể bị thay thế theo đúng nghĩa của nó. Các ý tưởng sáng sủa và vĩ đại của ông sẽ vẫn giữ nguyên ý nghĩa tuyệt diệu của chúng trong mọi thời đại tương lai là như nền tảng của sự hình thành khái niệm hiện đại của chúng ta trong lãnh vực triết học tự nhiên.

[*Phụ chú: Một số điều của Quý Báo liên quan đến cá nhân và cuộc đời tôi có nguồn gốc từ óc tưởng tượng sôi nổi của tác giả. Đây, còn một loại ứng dụng khác của nguyên lý tương đối để giúp vui cho bạn đọc: Hôm nay ở Đức tôi được gọi là một "nhà thông thái Đức" và ở Anh là một "người Do Thái Thụy Sĩ". Nếu lúc nào đó định mệnh bắt tôi bị xem như "con vật ghê tởm", thì ngược lại tôi đối với người Đức là một "người Do Thái Thụy Sĩ" và đối với người Anh là một "nhà thông thái Đức".]*

Về Thuyết Tương Đối (1921)

Bài diễn văn tại King's College, London, năm 1921, còn được gọi là "Bài diễn văn Luân Đôn", được đăng lại trong Mein Weltbild, Amsterdam, Nxb. Querido, 1934.

Thật là một niềm vui đặc biệt cho tôi vào hôm nay được nói chuyện tại thủ đô của đất nước mà từ đây những ý tưởng nền tảng quan trọng nhất của ngành vật lý lý thuyết đã đi vào thế

giới. Tôi nghĩ đến lý thuyết về chuyển động của các khối lượng và đến hấp dẫn mà Newton đã tặng chúng ta, và đến khái niệm trường điện từ, qua đó Faraday và Maxwell đã đem lại cho ngành vật lý một cơ sở mới. Người ta có thể nói, thuyết tương đối đã mang lại một cách kết thúc cho tòa nhà ý tưởng tuyệt vời của Maxwell và Lorentz, bằng cách nó nỗ lực mở rộng vật lý trường đến tất cả các hiện tượng, kể cả hiện tượng hấp dẫn.

Trở lại đề tài chính là thuyết tương đối, tôi muốn nêu bật lên rằng, lý thuyết này không có nguồn gốc tư biện; sự khám phá nó hoàn toàn dựa vào nỗ lực thích nghi lý thuyết vật lý vào các dữ kiện quan sát được, càng nhiều như có thể. Ở đây không hề có một hành động cách mạng, mà là một sự phát triển tiếp tục tự nhiên của một con đường đã được theo đuổi từ nhiều thế kỷ. Sự từ bỏ một số khái niệm nhất định được xem là căn bản đến nay về không gian, thời gian và chuyển động, không nên được quan niệm như một việc làm tùy tiện, mà chỉ vì bị chi phối bởi các dữ kiện được quan sát.

Định luật hằng số của vận tốc truyền của ánh sáng trong chân không, điều được củng cố bởi sự phát triển của điện động học và quang học; sự bình đẳng chính đáng của tất cả các hệ quán tính (nguyên lý tương đối hẹp), điều được diễn tả sắc nét đặc biệt trong thí nghiệm nổi tiếng của Michelson; cả hai trước tiên đưa đến kết quả rằng khái niệm thời gian cần phải được tương đối hóa, bằng cách phải cho mỗi hệ quán tính thời gian đặc biệt của nó. Trong khi phát triển ý tưởng này, người ta thấy rằng trước đây mối tương quan giữa các trải nghiệm trực tiếp một mặt, các tọa độ và thời gian mặt kia, chưa được suy nghĩ sâu sắc đầy đủ.

Nói chung, một trong những nét chính của thuyết tương đối là nó nỗ lực làm rõ ra các mối quan hệ của các khái niệm khái quát với những dữ kiện được trải nghiệm một cách chính xác hơn. Nguyên tắc cơ bản ở đây luôn luôn là, sự chính đáng của một khái niệm vật lý nằm hoàn toàn trong mối quan hệ sáng sủa và minh bạch của nó với các dữ kiện trải nghiệm được. Theo thuyết tương đối hẹp, các tọa độ không gian và thời gian vẫn còn giữ tính chất tuyệt đối trong chừng mực chúng được đo trực tiếp bởi các đồng hồ và vật thể rắn. Nhưng chúng có tính chất tương đối trong chừng mực chúng lệ thuộc vào trạng thái chuyển động

của hệ quán tính được chọn. Continuum bốn chiều, được tạo nên bởi sự hợp nhất của không gian và thời gian, vẫn giữ tính chất tuyệt đối theo thuyết tương đối hẹp, cũng là tính chất mà theo thuyết của không gian lẫn thời gian sở hữu riêng biệt nhau. Từ sự diễn giải tọa độ và thời gian như là những kết quả của sự đo đạc, người ta suy ra ảnh hưởng của chuyển động tương đối đối với hệ tọa độ lên hình dạng của các vật thể và lên vận tốc của đồng hồ, cũng như suy ra sự tương đương của năng lượng và khối lượng quán tính.

Nguồn gốc của sự hình thành của thuyết tương đối rộng trước hết bắt nguồn từ dữ kiện thực nghiệm của đẳng thức hằng số của khối lượng quán tính và khối lượng hấp dẫn của các vật thể, mà vật lý cổ điển đã không cung cấp được sự lý giải nào cho sự thật căn bản đó. Người ta đạt đến một sự lý giải như thế bằng sự mở rộng nguyên lý tương đối đến các hệ tọa độ chuyển động gia tốc tương đối với nhau. Việc đưa vào các hệ tọa độ có chuyển động gia tốc đối với các hệ tọa độ quán tính đã làm xuất hiện các trường hấp dẫn đối với các hệ quán tính. Như một hệ luận của điều này, thuyết tương đối rộng, vốn được xây dựng trên đẳng thức của quán tính và trọng lực, cung cấp một lý thuyết của trường hấp dẫn.

Việc đưa vào các hệ tọa độ chuyển động gia tốc tương đối nhau như những hệ tọa độ bình đẳng, như chúng đã hình thành dưới sự chi phối của đẳng thức giữa quán tính và trọng lực, cùng với những kết quả của thuyết tương đối hẹp đã dẫn đến hệ luận rằng, định luật chi phối sự sắp xếp các vật thể rắn không tuân theo các định luật của hình học Euclid khi có sự hiện diện của trường hấp dẫn. Chúng ta có một kết quả tương tự cho vận tốc của đồng hồ. Điều này đưa đến sự cần thiết khái quát hóa một lần nữa lý thuyết về không gian và thời gian, bởi vì giờ đây sự diễn giải trực tiếp của các tọa độ không gian và thời gian bằng các đo đạc thu hoạch được với thước đo và đồng hồ không còn đúng nữa. Cái khái quát hóa của metric, vốn đã tồn tại trên lãnh vực toán học thuần túy bằng những nghiên cứu của Gauss và Riemann, cơ bản dựa trên sự thật metric của thuyết tương đối hẹp cũng còn có thể yêu sách hiệu lực cho các miền nhỏ trong trường hợp tổng quát.

Quá trình phát triển được mô tả ở đây lấy mất đi mọi thực tại độc lập của các tọa độ không-thời-gian. Cái thực tại có tính chất metric chỉ bây giờ mới được xác định bởi sự kết hợp của các tọa độ không-thời-gian với các đại lượng toán học mô tả trường hấp dẫn.

Có một gốc rễ thứ hai của dòng ý tưởng của thuyết tương đối rộng. Như Mach đã khẳng định nêu lên, điểm sau đây trong thuyết Newton là không thỏa đáng: Nếu ta xem chuyển động từ quan điểm thuần mô tả, chứ không phải nhân quả, thì chỉ có chuyển động như là chuyển động tương đối của các vật thể với nhau. Nhưng nếu xét từ quan niệm của chuyển động tương đối thì gia tốc xuất hiện trong các phương trình chuyển động Newton là không thể hiểu được. Nó buộc Newton phải nghĩ ra một không gian vật lý, để đối với nó gia tốc tồn tại có ý nghĩa. Không gian được nghĩ ra một cách *ad hoc* (chỉ cho mục đích đây thôi) tuy xét về mặt lôgic là đúng đắn, nhưng xem ra không thỏa đáng. Cho nên Mach đi tìm một sự cải biên các phương trình cơ học sao cho quán tính của các vật thể được quy về chuyển động tương đối của cùng các vật thể không phải đối với không gian tuyệt đối, mà đối với toàn thể các vật thể còn lại có trọng lượng. nỗ lực của Mach phải thất bại trong tình trạng hiểu biết lúc bấy giờ.

Tuy nhiên cách đặt vấn đề xem ra là hoàn toàn hợp lý. Dòng ý tưởng này lại càng thúc bách mạnh mẽ hơn một cách đáng kể khi đứng trước thuyết tương đối rộng, bởi theo lý thuyết này các tính chất vật lý của không gian bị ảnh hưởng bởi vật chất có trọng lượng. Người thuyết trình tin tưởng rằng thuyết tương đối rộng chỉ có thể giải bài toán này một cách thỏa đáng bằng cách xem thế giới là khép kín về mặt không gian. Những kết quả toán học của lý thuyết buộc ta đi đến quan điểm này, nếu chúng ta tin rằng mật độ trung bình của vật chất có trọng lượng trong thế giới có một trị số hữu hạn tuy có thể rất nhỏ.

Hình Học và Kinh Nghiệm (1921)

Đây là bài báo cáo của Einstein trước Hàn lâm viện khoa học Phổ, ngày 27 tháng 1 năm 1921.

Toán học so với các khoa học khác hưởng được một uy tín đặc biệt bởi một lý do: các định luật của nó là chắc chắn tuyệt đối và không thể tranh cãi, trong khi các định luật của tất cả các khoa học khác trong một chừng mực nào là có thể tranh cãi và luôn luôn đối mặt với nguy cơ bị lật đổ bởi các dữ kiện được phát hiện mới. Mặc dù thế, một người nghiên cứu trên một lãnh vực khác của khoa học không cần phải ghen tị với nhà toán học, khi các định lý của anh ta không liên quan đến các đối tượng của thực tại, mà chỉ liên quan đến các đối tượng của sự tưởng tượng đơn thuần của chúng ta. Bởi vì điều không thể gây ngạc nhiên, là người ta đạt đến các hệ luận lôgic phù hợp nhau, khi người ta đã thỏa thuận nhau về các định lý cơ bản (tiên đề) cùng như về những phương pháp, mà nhờ chúng các định lý khác có thể được suy ra từ các định lý cơ bản này. Nhưng mặt khác, uy tín lớn kia của toán học còn dựa trên sự thật là chính toán học đã đem lại cho các ngành khoa học tự nhiên chắc chắn một mức độ an toàn mà nếu không có toán học các khoa học kia không thể nào đạt tới được.

Đến đây một điều bí ẩn xuất hiện, đã gây bất ổn nhiều cho những người làm nghiên cứu của mọi thời đại. Làm sao toán học, vốn là một sản phẩm của tư duy con người và độc lập với mọi kinh nghiệm, lại có thể phù hợp với các đối tượng của thực tại một cách tuyệt hảo như thế. Có thật lý trí con người có thể lý giải hết các tính chất của sự vật hiện thực chỉ bằng tư duy thuần túy thôi mà không cần đến kinh nghiệm hay sao?

Theo quan điểm tôi, câu trả lời ngắn gọn là như sau: *Bao lâu các định lý của toán học nói về thực tại, thì chúng không chắc chắn, và bao lâu chúng chắc chắn, thì chúng không nói về thực tại.* [98] Theo tôi, ý thức rõ ràng về tình hình này chỉ trở thành phổ biến qua khuynh hướng phát triển của toán học được biết dưới cái tên "tiên đề học" (xây dựng trên các tiên đề). Thực thế, sự tiến bộ đạt được với tiên đề học nằm ở chỗ nó đã tách biệt gọn ghẽ cái hình thức-lôgic ra khỏi nội dung sự vật hay nội dung trực giác; chỉ có cái hình thức-lôgic làm thành đối tượng của toán học, theo tiên đề học, chứ không phải nội dung trực giác hay gì khác hơn được liên kết với cái hình thức-lôgic.

Chúng ta hãy xem một lần từ quan điểm này một tiên đề bất

kỳ nào của hình học, chẳng hạn như tiên đề sau đây: Qua hai điểm của không gian ta chỉ có thể vẽ được một đường thẳng mà thôi. Diễn giải làm sao tiên đề này trong nghĩa cũ và mới?

Cách diễn giải cũ: Mỗi người đều biết một đường thẳng và một điểm là gì. Sự hiểu biết này có phải xuất phát từ năng lực của trí tuệ con người, hay từ kinh nghiệm, hoặc từ một sự phối hợp của cả hai, hay từ đâu khác, điều đó nhà toán học không cần phải quyết định; anh ta nhường quyết định này lại cho nhà triết học. Dựa trên kiến thức này cho sẵn trước mọi thứ toán học, thì tiên đề vừa nói, và tất cả những tiên đề khác, đều hiển nhiên, nghĩa là sự thể hiện của một phần của kiến thức tiên nghiệm này.

Cách diễn giải mới hơn: Hình học nghiên cứu các đối tượng được gọi bằng các từ như đường thẳng, điểm, v.v. Bất cứ một kiến thức hay trực quan nào về những đối tượng này đều không được giả thiết, mà người ta chỉ giả thiết tính hiệu lực của các tiên đề kia, được quan niệm một cách thuần túy hình thức, nghĩa là tách rời khỏi mọi nội dung của trải nghiệm hay trực giác, mà tiên đề nói trên là một thí dụ. Các tiên đề này là những trước tác tự do của trí tuệ con người. Tất cả những định lý hình học khác đều là những hệ luận lôgic của các tiên đề chỉ được quan niệm duy hình thức. Chỉ các tiên đề mới *định nghĩa* các đối tượng mà hình học lấy làm đề tài nghiên cứu. Cho nên Schlick trong quyển sách của ông về nhận thức luận đã gọi các tiên đề một cách rất đúng là "các định nghĩa ngầm".

Quan niệm này của các tiên đề được đại diện bởi tiên đề học hiện đại đã tẩy sạch toán học khỏi tất cả những phần tử nào không thuộc về nó, và như thế thanh toán cái tối tăm huyền bí vốn có sẵn trước đó trong cơ sở của toán học. Một cách trình bày được tẩy sạch như thế cũng làm cho hiển nhiên rằng toán học như tự nó không đủ khả năng khẳng định một cái gì về các đối tượng của trực giác hay các đối tượng của^[99] thực tại. Những từ ngữ như "điểm", "đường thẳng", v.v. trong hình học tiên đề tượng trưng cho những sơ đồ khái niệm rỗng về nội dung. Cái cho chúng nội dung không phải thuộc về toán học.

Nhưng mặt khác, một điều chắc chắn là toán học nói chung, và cũng là hình học nói riêng, có nguồn gốc hình thành của nó trong nhu cầu hiểu biết bằng kinh nghiệm một cái gì đó về sự

vận hành của các vật hiện thực. Từ "hình học", có nghĩa là "đo đạc đất", đã chứng minh điều này. Bởi vì đo đạc đất có đối tượng nghiên cứu là những khả năng đặt các vật thể tự nhiên với nhau, như các phần của vật thể đất, dây đo, thước đo, v.v. Rõ ràng hệ thống các khái niệm của hình học tiên đề một mình không thể cung cấp các định lý về sự vận hành của các vật thể mà chúng ta gọi là vật thể thực tế rắn. Để có thể cung cấp những định lý như thế, hình học phải được bóc trần ra khỏi tính chất hình thức-lôgic của nó, và những đối tượng trải nghiệm được của thực tại phải được thêm vào các sơ đồ khái niệm rỗng của hình học tiên đề. Để thực hiện điều này, chúng ta chỉ cần thêm vào đó mệnh đề sau đây:

Các vật thể rắn vận hành với nhau, liên quan đến các khả năng sắp xếp của chúng, như là những vật thể của hình học Euclid ba chiều; lúc đó, các định lý của hình học Euclid sẽ chứa đựng các phát biểu về sự vận hành của các vật thể thực tế rắn.

Hình học được bổ sung như thế rõ ràng là một khoa học tự nhiên; chúng ta có thể xem nó như nhánh xưa nhất của vật lý. Các phát biểu của nó cơ bản dựa trên phép quy nạp từ kinh nghiệm, chứ không phải chỉ dựa trên các suy luận lôgic. Chúng ta muốn gọi hình học được bổ sung như thế là "hình học thực tiễn" và sau đây phân biệt nó với "hình học thuần tiên đề". Câu hỏi, hình học thực tiễn của thế giới có phải là hình học Euclid hay không, có một ý nghĩa rõ, và câu trả lời chỉ có thể được cung cấp bằng kinh nghiệm mà thôi. Tất cả đo đạc chiều dài trong vật lý đều là hình học thực tiễn trong nghĩa này; đo đạc chiều dài trắc địa và thiên văn cũng như thế, nếu chúng ta đưa vào sử dụng định luật thực nghiệm, rằng ánh sáng truyền đi trong chân không theo đường thẳng, và thực tế theo đường thẳng theo nghĩa của hình học thực tiễn.

Tôi dành cho quan niệm này của hình học ý nghĩa đặc biệt bởi vì nếu không có nó, tôi sẽ không thể xây dựng được thuyết tương đối. Thực vậy, nếu không có nó, thì suy nghĩ sau đây sẽ không có thể: Trong một hệ quy chiếu chuyển động quay đối với một hệ quán tính, các định luật về sự sắp xếp của các vật thể rắn là không tương thích, do phép co của Lorentz, với các quy luật của hình học Euclid; cho nên, khi cho phép các hệ quy chiếu không-

quán tính như là những hệ quy chiếu tương đương, chúng ta phải rời bỏ hình học Euclid. Bước quyết định của sự chuyển tiếp sang các phương trình nói chung hiệp biến, chắc chắn sẽ không thực hiện được nếu không có cách diễn giải trên làm nền tảng. Nếu từ chối mối quan hệ giữa vật thể của hình học Euclid tiên đề và vật thể thực tế rắn của thực tại, thì người ta sẽ đi đến quan điểm sau đây mà con người tư duy sâu sắc Henri Poincaré đặc biệt đã đề cao: Trong tất cả những hình học tiên đề khả dĩ quan niệm được thì hình học Euclid nổi bật lên bởi tính đơn giản của nó. Nhưng vì hình học tiên đề một mình không thể chứa đựng hết các phát biểu về thực tại trải nghiệm được, mà chỉ một sự liên kết của nó với các định luật vật lý mới có thể làm được điều đó, cho nên, dù bản chất của thực tại thế nào đi nữa, có lẽ hợp lý và khả thi hơn nếu người ta vẫn bám vào hình học Euclid. Bởi vì khi có những mâu thuẫn giữa lý thuyết và kinh nghiệm bộc lộ ra, người ta sẽ thích quyết định thay đổi các định luật vật lý hơn là thay đổi hình học tiên đề Euclid^[100]. Nếu từ chối quan hệ giữa các vật thể thực tế rắn và hình học, thật sự người ta sẽ không dễ giải phóng mình ra khỏi quy ước, rằng hình học Euclid nên được bám giữ như là hình học đơn giản nhất.

Tại sao sự tương đương được gọt ra tự nhiên của vật thể thực tế rắn của kinh nghiệm và vật thể của hình học bị Poincaré và các nhà nghiên cứu khác từ chối? Đơn giản bởi vì những vật thể rắn thực sự của tự nhiên, nếu nhìn kỹ, không phải là rắn, vì sự vận hành của chúng, nghĩa là những khả năng sắp xếp tương đối của chúng, lệ thuộc vào nhiệt độ, các lực từ bên ngoài, v.v. Do đó quan hệ nguyên thủy, trực tiếp giữa hình học và thực tại vật lý dường như bị phá hủy, và người ta càng thấy bị thu hút về quan điểm tổng quát hơn sau đây, đặc trưng cho quan điểm của Poincaré: Hình học (G) không nói được gì về sự vận hành của các vật thực, mà chỉ có hình học (P) cùng với toàn thể các định luật vật lý. Một cách tượng trưng, chúng ta có thể nói, chỉ có tổng số (G) + (P) mới tuân thủ sự kiểm tra của thực nghiệm. Do đó (G) có thể được lựa chọn tùy tiện, cũng như các phần của (P); tất cả những định luật này là những quy ước. Để tránh khỏi mâu thuẫn, người ta cần thiết phải chọn phần còn lại của (P) sao cho (G) và toàn thể (P) cộng lại phải đáp ứng đòi hỏi của kinh nghiệm.

Với quan niệm này, hình học tiên đề và phần của các định luật tự nhiên đã được nâng lên thành quy ước trở thành tương đương nhau về mặt nhận thức luận.

Sub specie aeterni ^[101], theo tôi Poincaré có lý với quan điểm này. Khái niệm vật thể đo, cũng như khái niệm của đồng hồ được phối hợp với nó trong thuyết tương đối, không tìm thấy một đối tượng tương ứng chính xác nào trong thế giới hiện thực. Cũng rõ ràng rằng, vật thể rắn và đồng hồ không đóng vai trò của những phần tử không rút gọn được trong tòa nhà khái niệm của vật lý, mà đóng vai trò của những hình thể hỗn hợp, những cái không được phép đóng vai trò độc lập nào trong việc xây dựng ngành vật lý lý thuyết. Nhưng tôi tin tưởng rằng các khái niệm này, trong giai đoạn phát triển hiện tại của ngành vật lý lý thuyết, vẫn phải được mang ra sử dụng như những khái niệm còn độc lập; bởi vì chúng ta còn xa mới có một kiến thức đủ vững chắc về các cơ sở lý thuyết của cấu trúc nguyên tử để chúng ta có thể xây dựng về mặt lý thuyết các cấu trúc kia, vật thể rắn và đồng hồ, từ những khái niệm nền tảng.

Hơn nữa, sự phản biện cho rằng không có các vật thể thực sự rắn trong tự nhiên, và vì thế những vật thể với những tính chất được đề cập không liên quan gì đến thực tại vật lý, thực ra không sâu sắc như người ta nghĩ khi mới nhìn qua. Bởi vì không khó lắm để chúng ta xác định được trạng thái vật lý của một vật thể đo lường đủ chính xác để sự vận hành của nó đối với các vật thể đo lường khác là không thể lẫn lộn, để cho phép người ta sử dụng nó thay cho vật thể "rắn". Các phát biểu về các vật thể rắn cần phải được quy chiếu lên những vật thể đo lường loại như thế.

Tất cả các hình học thực tiễn đều dựa trên một nguyên lý có thể kiểm tra được bằng thực nghiệm mà bây giờ chúng ta muốn nhắc lại. Giả thiết có hai điểm mốc được ghi lên một vật thể rắn. Chúng ta gọi một cặp hai điểm mốc như thế là một đoạn đường. Chúng ta tưởng tượng có hai vật thể thực tế rắn, và trên mỗi vật thể có một đoạn đường được đánh dấu mốc như vừa nói. Hai đoạn này được gọi là "bằng nhau", nếu các điểm mốc của một đoạn luôn luôn có thể được làm trùng lên các điểm mốc của đoạn kia. Giờ chúng ta có thể giả thiết:

Nếu hai đoạn đường được tìm thấy bằng nhau tại một lần và ở

đâu đó, thì chúng bằng nhau luôn luôn và khắp mọi nơi.

Không chỉ hình học thực tiễn của Euclid, mà cả sự khái quát gần nhất của nó là hình học thực tiễn của Riemann, và cùng với nó là thuyết tương đối rộng, đều dựa trên giả thuyết này. Trong số những lý do của kinh nghiệm biện minh cho sự đúng đắn của giả thiết này, tôi chỉ muốn nói đến một lý do thôi. Hiện tượng truyền ánh sáng trong không gian rộng quy cho mỗi khoảng thời gian cục bộ một khoảng đường, đó là đường đi của ánh sáng tương ứng, và ngược lại. Từ đó chúng ta suy ra, giả thiết nói trên về các đoạn đường cũng đúng cho các khoảng thời gian của đồng hồ trong thuyết tương đối. Cho nên nó có thể được diễn đạt như sau: Nếu hai đồng hồ lý tưởng chạy nhanh bằng nhau ở một thời điểm và ở đâu đó (ở gần trực tiếp nhau), thì chúng sẽ luôn luôn chạy nhanh như nhau, bất cứ ở đâu và vào lúc nào chúng lại được so sánh với nhau tại cùng một chỗ. Nếu định lý này không đúng cho các đồng hồ tự nhiên, thì các tần số riêng của các nguyên tử riêng lẻ của cùng một nguyên tố hóa học sẽ không phù hợp nhau một cách chính xác như kinh nghiệm chứng minh. Sự hiện hữu của các vạch quang phổ sắc nét cung cấp một chứng minh thực nghiệm một cách thuyết phục cho nguyên lý đã nói trên của hình học thực tiễn. Chính dựa trên cơ sở này mà chúng ta có thể nói đến một metric Riemann của continuum không-thời-gian bốn chiều một cách có ý nghĩa.

Câu hỏi, continuum này là Euclid hay được cấu trúc theo sơ đồ tổng quát Riemann, hay theo cái gì khác, căn cứ vào quan điểm được đại diện ở đây, là một câu hỏi thực sự có tính chất vật lý cần phải được trả lời bằng kinh nghiệm, chứ không phải một câu hỏi của quy ước được chọn thuần túy theo những lý do thực dụng. Hình học Kiemann sẽ có hiệu lực nếu các định luật về sự sắp xếp các vật thể thực tế rắn được chuyển sang càng chính xác hơn thành các định luật về sự sắp xếp các vật thể của hình học Euclid, khi kích thước của miền không-thời-gian được xét càng nhỏ đi.

Cách diễn giải vật lý được đại diện ở đây của hình học tuy không còn đúng cho sự áp dụng trực tiếp của nó lên các không gian có kích thước dưới phân tử. Tuy nhiên nó vẫn giữ một phần ý nghĩa trong các vấn đề cấu tạo của hạt cơ bản. Bởi vì ngay khi

người ta muốn tìm một sự mô tả các hạt cơ bản điện tạo thành vật chất, có lẽ người ta cũng cần tìm cách tạo ra một ý nghĩa vật lý cho các khái niệm trường đã được định nghĩa về mặt vật lý cho mục tiêu mô tả sự vận hành hình học của các vật thể có kích thước lớn đối với nguyên tử. Chỉ có sự thành công mới quyết định về tính chính đáng của một sự thử nghiệm như thế nhằm công nhận một thực tại vật lý cho các khái niệm nền tảng của hình học Riemann vượt ra ngoài phạm vi định nghĩa vật lý của chúng. Có thể phép ngoại suy này không có một bảo đảm tốt hơn phép ngoại suy của khái niệm nhiệt độ áp dụng lên các phần của một vật thể có kích cỡ phân tử.

Sự nới rộng các khái niệm của hình học thực tiễn đến các không gian có kích cỡ vũ trụ xem ra có ít vấn đề hơn. Dĩ nhiên người ta có thể phản biện rằng một sự xây dựng bằng các thanh đo rắn lại càng xa rời tính chất cứng lý tưởng, khi sự mở rộng về không gian của nó càng lớn hơn. Nhưng người ta sẽ khó có thể cho sự phản biện này là một ý nghĩa quan trọng. Cho nên đối với tôi, câu hỏi thế giới là hữu hạn hay không về mặt không gian, cũng là một câu hỏi rất có ý nghĩa theo nghĩa của hình học thực tiễn. Tôi cũng không loại trừ khả năng rằng câu hỏi này sẽ được các nhà thiên văn học trả lời trong thời gian tới. Chúng ta hãy nhớ lại thuyết tương đối rộng nói điều gì trong vấn đề này. Theo nó, có hai khả năng:

1. Vũ trụ là vô hạn về không gian. Điều này chỉ có thể khi mật độ không gian trung bình của vật chất tập trung trong các vì sao triệt tiêu trong vũ trụ, nghĩa là khi tỷ lệ của toàn khối lượng của các vì sao với độ lớn của không gian, trong đó các vì sao được phân bố, tiến gần bất kỳ đến số không, khi người ta cho không gian được xét ngày càng lớn ra.

- 2/ Vũ trụ là hữu hạn về không gian. Đây phải là trường hợp khi có một mật độ trung bình khác không ($\neq 0$) của vật chất có trọng lượng trong vũ trụ. Mật độ trung bình càng nhỏ đi khi thể tích của không gian càng lớn lên.

Tôi không muốn bỏ qua mà không nhắc đến một sự lý giải lý thuyết có thể được viện dẫn để làm bằng chứng cho giả thuyết của một vũ trụ hữu hạn. Thuyết tương đối rộng nói rằng quán tính của một vật thể được cho lại càng lớn hơn, khi càng có nhiều

khối lượng có trọng lượng ở gần nó; cho nên một cách rất tự nhiên nếu ta quy toàn bộ tác dụng quán tính của một vật thể vào tương tác giữa nó và các vật thể còn lại của vũ trụ, cũng như từ thời Newton trọng lực cũng được hoàn toàn quy vào tương tác giữa các vật thể. Người ta có thể đọc từ các phương trình của thuyết tương đối rộng, rằng sự quy toàn bộ quán tính về tương tác giữa các khối lượng - như chẳng hạn được Ernst Mach yêu cầu - là chỉ có thể được khi vũ trụ hữu hạn về không gian.

Lập luận này không gây ấn tượng đối với nhiều nhà vật lý và thiên văn học. Cuối cùng, chỉ có kinh nghiệm mới thực sự quyết định cái nào trong hai khả năng được thực hiện trong tự nhiên. Kinh nghiệm có thể cung cấp câu trả lời như thế nào? Thoạt đầu người ta có thể nghĩ, mật độ trung bình của vật chất có thể được xác định bởi sự quan sát của phần vũ trụ trong tầm quan sát chúng ta. Hy vọng này là ảo giác. Sự phân bố của các vì sao thấy được là một sự phân bố vô cùng không đều đặn, đến nỗi chúng ta không được phép đặt mật độ trung bình vật chất của sao trong vũ trụ chẳng hạn bằng mật độ trung bình trong ngân hà. Trong mọi trường hợp - dù không gian được nghiên cứu có thể lớn đến đâu đi nữa - người ta có thể luôn thấy không thuyết phục rằng bên ngoài không gian này không còn sao nữa. Cho nên một sự ước tính mật độ trung bình xem như bị loại.

Tuy nhiên, còn một con đường thứ hai đối với tôi là có thể dễ đi hơn, tuy nó cũng đặt ra nhiều khó khăn lớn.

Thực vậy, nếu chúng ta hỏi về những sự khác biệt của thuyết tương đối rộng rút ra từ những hệ quả quan sát được trong thiên văn học so với các hệ quả của thuyết Newton, thì trước nhất chúng ta sẽ có một sự khác biệt rõ nét hiện ra trong vùng cận của khối lượng lớn hấp dẫn, một sự khác biệt đã được xác nhận ở Sao Thủy. Trong trường hợp vũ trụ hữu hạn về không gian, còn một khác biệt thứ hai so với thuyết Newton, được diễn tả trong ngôn ngữ của thuyết Newton như sau: Trường hấp dẫn được tạo ra như thể nó không phải là kết quả chỉ của các khối lượng có trọng lượng, mà còn của một mật độ khối lượng mang dấu âm, được phân phối đều trong không gian. Vì mật độ khối lượng giả định này phải là cực nhỏ, nên nó chỉ có thể đáng kể trong những hệ thống hấp dẫn có quy mô rất rộng.

Giả thiết chúng ta có thể biết được sự phân bố thống kê của sao trong dải ngân hà cùng như khối lượng của chúng. Lúc đó chúng ta có thể tính các trường hấp dẫn theo định luật Newton, cũng như các vận tốc trung bình mà các sao phải có, để cho ngân hà không sụp đổ vào trong do tác dụng hỗ tương của các sao của nó, mà vẫn giữ vững được sự bành trướng của nó. Nếu giờ các vận tốc trung bình thực sự của các sao - chúng có thể đo được - nhỏ hơn vận tốc được tính toán, thì chúng ta đã có bằng chứng để chứng minh rằng các lực hấp dẫn thực sự là nhỏ hơn kết quả theo định luật Newton ở những khoảng cách lớn. Từ một sự khác biệt như thế người ta có thể chứng minh một cách gián tiếp tính hữu hạn của vũ trụ, và ngay cả ước tính độ lớn không gian của nó.

Tôi Đã Tìm Thấy Thuyết Tương Đối Như Thế Nào (1922)

Đây là bài nói chuyện của Einstein ngày 14.12.1922 tại đại học Kyoto trước sinh viên và các thành viên đại học, vào cuối chuyến thăm 6 tuần của ông tại Nhật Bản, đáp lại lời yêu cầu của giáo sư K. Nishida khoa triết học, để nói về lịch sử khám phá thuyết tương đối của ông. Nó soi sáng con đường của Einstein đi đến thuyết tương đối và đem lại sự hiểu biết về nhiều mặt khác của công trình của ông. Ông thuyết trình ngẫu hứng bằng tiếng Đức, và được dịch đuổi tại chỗ bởi J.Ishiwara, người đã từng học với A. Sommerfeld và Einstein từ 1912 đến 1914, và là giáo sư vật lý tại đại học Tohoku. Ishiwara cất giữ tư liệu này cẩn thận và công bố nó lần đầu tiên năm 1923 trên tạp chí Kaizo bằng tiếng Nhật. Mãi đến năm 1982, nghĩa là sau ngót 60 năm, toàn bộ các ghi chép của Ishiwara mới được dịch sang tiếng Anh bởi Yoshimasa A.Ono và được đăng trên tạp chí Physics Today, số tháng tám.



Cái mũi dự trữ ý tưởng của Einstein. Tranh biếm họa của Ipei Okamoto - AIP

Là một điều không dễ dàng khi phải kể lại câu chuyện tôi đã tìm đến ý tưởng của thuyết tương đối như thế nào; có rất nhiều nguồn suy nghĩ phức tạp tiềm ẩn đã ảnh hưởng lên suy nghĩ của tôi, và ảnh hưởng của mỗi suy nghĩ là khác nhau tại những giai

đoạn khác nhau trong quá trình phát triển ý tưởng. Tôi sẽ không muốn nhắc hết ở đây. Tôi cũng không muốn kể hết những bài mà tôi đã viết về chủ đề này. Thay vào đó, tôi sẽ mô tả ngắn gọn sự phát triển ý tưởng của tôi có quan hệ trực tiếp với vấn đề này.

Hơn mười bảy năm về trước tôi đã có ý tưởng phát triển thuyết tương đối lần đầu tiên. Tôi không thể nói chính xác ý tưởng này đến từ đâu, nhưng tôi chắc chắn nó chứa đựng trong bài toán về các tính chất quang học của các vật thể chuyển động. Ánh sáng truyền đi qua biển ether mà Trái đất chuyển động trong đó. Nói cách khác, ether là chuyển động đối với Trái đất. Tôi cố gắng tìm chứng cứ thực nghiệm của dòng chảy của ether trong các tài liệu vật lý, nhưng hoài công.

Sau đó, tôi muốn kiểm chứng dòng chảy của ether đối với Trái đất, nói cách khác, chuyển động của Trái đất. Khi tôi nghĩ về vấn đề này lần đầu tiên, tôi không hoài nghi về sự tồn tại của ether, hay chuyển động của Trái đất xuyên qua nó. Tôi nghĩ đến thí nghiệm sau đây, sử dụng hai cặp nhiệt độ: đặt các kính thủy tinh sao cho ánh sáng từ một nguồn duy nhất phát ra sẽ bị phản chiếu theo hai hướng khác nhau, một song song với chuyển động của Trái đất và cái kia nghịch với song song. Nếu chúng ta nghĩ có sự khác biệt về năng lượng giữa hai tia sáng được phản chiếu, chúng ta có thể đo sự khác biệt trong nhiệt phát sinh bằng cách sử dụng hai cặp nhiệt độ. Mặc dù ý tưởng này rất giống với ý tưởng của Michelson, nhưng tôi không đưa thí nghiệm này vào thực tế để thử nghiệm.

Trong khi tôi nghĩ về bài toán này trong những năm sinh viên của mình, tôi nhận được tin về kết quả lạ lùng của thí nghiệm Michelson. Chẳng bao lâu tôi đi đến kết luận rằng ý tưởng của tôi về chuyển động của Trái đất đối với ether là không đúng, nếu chúng ta chấp nhận kết quả "số không"^[102] của Michelson như một thực tế. Đây là ngõ đường đầu tiên dẫn tôi đến thuyết tương đối hẹp. Từ đó tôi đi đến sự tin tưởng rằng chuyển động của Trái đất không thể phát hiện được bởi bất cứ thí nghiệm quang học nào, mặc dù Trái đất chuyển động quay xung quanh Mặt trời.

Tôi có cơ hội đọc công trình chuyên khảo năm 1895 của Lorentz. Ông bàn và giải quyết hoàn toàn bài toán của điện động học trong phạm vi xấp xỉ bậc nhất, nghĩa là xem những số hạng

bậc cao hơn của v/c là không đáng kể, trong đó v là vận tốc của vật thể và c là vận tốc của ánh sáng. Sau đó tôi thử thảo luận thí nghiệm Fizeau trên cơ sở giả thiết rằng các phương trình Lorentz cho electron sẽ có hiệu lực trong hệ quy chiếu của vật thể chuyển động cũng như trong hệ quy chiếu của chân không như được bàn bởi Lorentz. Vào lúc này tôi tin tưởng vững chắc rằng các phương trình của Maxwell và Lorentz là đúng đắn. Hơn nữa, giả thuyết rằng các phương trình này đúng trong hệ quy chiếu của vật thể chuyển động sẽ đưa tới khái niệm bất biến của vận tốc ánh sáng, điều lại mâu thuẫn với định luật cộng của vận tốc đã được sử dụng trong cơ học.

Tại sao hai quan niệm này lại mâu thuẫn nhau? Tôi nhận ra rằng khó khăn nảy quả là thật gay go để giải quyết. Tôi dành gần một năm trời để thử tu chỉnh ý tưởng của Lorentz với hy vọng giải được bài toán này, nhưng hoài công.

Tình cờ một người bạn tôi ở Bern (Michele Besso) đã giúp tôi. Đó là vào một ngày đẹp trời khi tôi đến thăm anh ta với bài toán này. Tôi bắt đầu cuộc trao đổi với anh ta bằng cách nói như sau: "Gần đây tôi đã làm việc về một bài toán khó. Hôm nay tôi đến đây để tranh luận với anh về bài toán này". Chúng tôi thảo luận mọi mặt của bài toán. Rồi tình hình tôi hiểu ra chìa khóa của bài toán nằm ở đâu. Ngày hôm sau tôi trở lại thăm anh ta và nói ngay mà không cần chào hỏi: "Cám ơn bạn. Tôi đã hoàn toàn giải được bài toán rồi." Một sự phân tích khái niệm thời gian là lời giải của tôi. Thời gian không thể được định nghĩa một cách tuyệt đối, và có một mối quan hệ không tách rời được giữa thời gian và vận tốc ánh sáng. Với quan niệm mới này, tôi có thể giải quyết những khó khăn lần đầu tiên một cách trọn vẹn.

Trong vòng năm tuần, thuyết tương đối hẹp được hoàn tất. Tôi không nghi ngờ tính hợp lý của lý thuyết mới, nhìn từ một quan điểm triết học. Tôi cũng thấy rằng lý thuyết mới là phù hợp với phản biện của Mach. Khác với trường hợp thuyết tương đối rộng mà quan điểm của Mach đã được thể hiện trong đó, sự phân tích của Mach (chỉ) có hệ quả gián tiếp trong thuyết tương đối hẹp mà thôi.

Đó là con đường thuyết tương đối hẹp đã hình thành.

Ý tưởng đầu tiên của tôi về thuyết tương đối rộng được hình thành hai năm sau đó, 1907. Ý tưởng đến một cách tình cờ. Tôi không thỏa mãn với thuyết tương đối hẹp vì nó bị giới hạn vào các hệ quy chiếu chuyển động với vận tốc hằng số tương đối với nhau và không thể áp dụng được vào chuyển động tổng quát của một hệ quy chiếu. Tôi chiến đấu để dỡ bỏ sự giới hạn này và muốn định hình bài toán trong trường hợp tổng quát.

Năm 1907 Johannes Stark yêu cầu tôi viết một chuyên khảo về thuyết tương đối hẹp trong tạp chí "Niên giám phóng xạ" (Jahrbuch der Radioaktivität). Trong khi viết nó, tôi nhận ra rằng tất cả các định luật tự nhiên đều có thể được thảo luận trong khuôn khổ của thuyết tương đối hẹp, trừ mỗi định luật hấp dẫn. Tôi muốn tìm ra lý do của điều này, nhưng không thể đạt đến mục tiêu dễ dàng.

Điều không thỏa mãn nhất là điểm sau đây: Mặc dù mối quan hệ giữa quán tính và năng lượng đã được xác định một cách rõ ràng bởi thuyết tương đối hẹp, mối quan hệ giữa quán tính và trọng lượng, hay năng lượng của trường hấp dẫn, chưa được làm sáng tỏ. Tôi cảm thấy bài toán này không thể giải quyết được trong khuôn khổ của thuyết tương đối hẹp.

Sự bất phá đến tình cờ vào một ngày nọ. Tôi đang ngồi trên ghế trong văn phòng đăng ký sáng chế của tôi ở Bern thì bỗng nhiên một ý nghĩ đã ập vào tôi: Nếu một người rơi tự do, anh ta sẽ không cảm nhận trọng lượng anh ta nữa. Tôi bị ngã người về phía sau. Thí nghiệm ý tưởng đơn giản này gây một ấn tượng sâu đậm đối với tôi. Điều đó đã đưa tôi đến thuyết hấp dẫn. Tôi tiếp tục ý tưởng đó: Một người rơi là chuyển động gia tốc. Do đó những gì anh ta cảm xúc và phán đoán được diễn ra trong hệ quy chiếu chuyển động gia tốc. Tôi quyết định mở rộng thuyết tương đối đến các hệ quy chiếu với gia tốc. Tôi có cảm giác, bằng cách đó, tôi có thể giải bài toán của lực hấp dẫn luôn. Một người rơi không cảm thấy sức nặng anh ta, bởi vì trong hệ quy chiếu của anh có một trường hấp dẫn mới đã làm triệt tiêu trường hấp dẫn đã sinh ra từ Trái đất. Trong hệ quy chiếu chuyển động gia tốc, chúng ta cần một trường hấp dẫn mới.

Tôi không thể giải bài toán này một cách hoàn toàn vào lúc đó. Tôi phải tốn tám năm nữa cho đến khi cuối cùng tôi tìm được

lời giải hoàn toàn. Trong những năm này tôi chỉ tìm được lời giải từng phần cho bài toán.

Ernst Mach là người đã khẳng định ý tưởng rằng các hệ quy chiếu có chuyển động tương đối gia tốc với nhau là tương đương. Ý tưởng này mâu thuẫn với hình học Euclid, bởi vì trong hệ quy chiếu với gia tốc, hình học Euclid không thể áp dụng được. Mô tả các định luật vật lý mà không có sự quy chiếu về hình học cũng giống như mô tả suy nghĩ chúng ta mà không có ngôn ngữ vậy. Chúng ta cần ngôn ngữ để diễn tả chúng ta. Vậy thì chúng ta cần gì để mô tả bài toán này? Bài toán này không được giải đáp cho đến năm 1912 khi một ý tưởng vụt đến, rằng lý thuyết bề mặt của Carl Friedrich Gauss có lẽ là chiếc chìa khóa của điều bí ẩn này. Tôi cảm thấy các tọa độ bề mặt của Gauss là rất có ý nghĩa để hiểu được bài toán. Cho tới lúc đó, tôi vẫn chưa biết rằng Bemard Riemann, là một học trò của Gauss, đã nghiên cứu cơ sở của hình học một cách sâu sắc. Tôi chợt nhớ lại bài giảng về hình học của Carl Friedrich Geiser trong những năm sinh viên của tôi ở Zurich, khi ông giảng về thuyết của Gauss. Tôi nhận thấy rằng các cơ sở của hình học có ý nghĩa vật lý sâu sắc trong bài toán này.

Khi tôi từ Prage trở lại Zürich, người bạn tôi, nhà toán học Marcel Grossmann đang chờ tôi. Anh ta đã giúp tôi trước đây trong việc cung cấp tài liệu toán học khi tôi còn làm việc ở sở đăng ký sáng chế ở Bern, và có một số khó khăn trong việc tìm kiếm các bài báo toán học. Đầu tiên anh ta dạy tôi về công trình của Curbastro Gregorio Ricci và sau đó của Riemann. Tôi thảo luận với anh ta xem bài toán có thể được giải đáp bằng cách sử dụng thuyết của Riemann hay không, nói cách khác, bằng cách sử dụng khái niệm bất biến của các phần tử tuyến tính^[103]. Chúng tôi viết chung một công trình về chủ đề này trong năm 1913, mặc dù chúng tôi không tìm được các phương trình chính xác cho lực hấp dẫn. Tôi tiếp tục nghiên cứu các phương trình của Riemann, chỉ để tìm thấy nhiều lý do tại sao không thể đạt tới được các kết quả mong muốn bằng cách này.

Sau hai năm chiến đấu, tôi đã tìm ra tôi đã làm lỗi trong các phép tính của tôi. Tôi đi ngược về phương trình nguyên thủy sử dụng thuyết tính bất biến, và nỗ lực xây dựng các phương trình

đúng đắn. Trong hai tuần, các phương trình chính xác đã xuất hiện trước mặt tôi!

Về công việc của tôi sau 1915, tôi chỉ muốn nhắc đến bài toán của vũ trụ học. Bài toán này liên quan đến^[104] hình học của vũ trụ và thời gian. Cơ sở của bài toán này bắt nguồn từ những điều kiện biên của thuyết tương đối rộng và những ý tưởng về bài toán quán tính của Mach. Mặc dù tôi không hiểu chính xác ý tưởng của Mach về quán tính, nhưng ảnh hưởng của ý tưởng ông lên suy nghĩ của tôi là lớn lao.

Tôi giải được bài toán vũ trụ học bằng cách đặt tính bất biến lên điều kiện biên cho các phương trình hấp dẫn. Rồi sau cùng tôi đã loại bỏ được biên bằng cách xem vũ trụ như một hệ thống khép kín. Như một hệ quả, quán tính hiện ra như một tính chất của vật chất tương tác và nó sẽ biến mất nếu không có các vật chất khác để tương tác nữa. Tôi tin rằng với kết quả này, thuyết tương đối rộng có thể được hiểu một cách thỏa đáng về mặt nhận thức luận.

Đây là một bài tổng quan lịch sử ngắn các ý tưởng tôi trong việc tìm ra thuyết tương đối.

Đôi Điều về Sự Hình Thành của Thuyết Tương Đối Rộng (1930)

Bản thảo đầu tiên của bài này được đăng năm 1930 trong tạp chí Forum Philosophicum và sau đó được tu chỉnh và đăng lại trong Mein Wellbild. 1934.

Tôi sẵn sàng đáp ứng yêu cầu phát biểu một cái gì đó về lịch sử của công việc nghiên cứu khoa học riêng của tôi. Không phải tôi muốn đánh giá cao ý nghĩa của các nỗ lực ấy một cách không chính đáng! Nhưng viết về công việc của những người khác đòi hỏi phải có một sự hiểu biết sâu sắc về tư duy của họ, điều thích hợp hơn đối với những cá nhân đã quen các công việc lịch sử, trong khi việc soi sáng tư duy trước đây của chính mình xem ra là một việc dễ hơn không thể so sánh kịp. Ở đây trong một tình huống thuận lợi hơn tất cả những người khác, người ta không nên bỏ qua cơ hội này chỉ vì sự khiêm tốn.

Khi tôi đạt đến sự tương đương của tất cả các hệ gọi là quán tính cho việc mô tả các định luật tự nhiên với thuyết tương đối hẹp vào năm 1905, thì câu hỏi sau đây là rất tự nhiên, rằng có hay không một sự tương đương sâu rộng của các hệ tọa độ? Nói một cách khác: Nếu khái niệm vận tốc chỉ có thể được xem có một ý nghĩa tương đối, thì người ta vẫn nên bám víu xem gia tốc như một khái niệm tuyệt đối?

Nhìn từ quan điểm thuần túy động học, thì tính tương đối của các chuyển động bất kỳ là không thể nghi ngờ được; nhưng về mặt vật lý thì hệ quán tính xem ra có một ý nghĩa ưu đãi, làm cho ý nghĩa của các hệ tọa độ có chuyển động khác là giả tạo.

Dĩ nhiên, tôi đã quen thuộc quan điểm của Mach trước đây, theo đó có thể quan niệm được rằng sức ỳ của quán tính thật ra không cản lại gia tốc, mà cản lại gia tốc đối với khối lượng của các vật thể khác còn lại tồn tại trong thế giới. Ý tưởng này là một sự "mê hoặc" đối với tôi, nhưng nó không cung cấp cho tôi một cơ sở hoạt động khả thi cho một lý thuyết mới.

Lần đầu tiên tôi tiến một bước gần hơn tới lời giải của bài toán khi tôi tìm cách xử lý định luật hấp dẫn trong khuôn khổ của thuyết tương đối hẹp. Như phần lớn các tác giả lúc bấy giờ, tôi tìm cách thiết lập một định luật trường cho lực hấp dẫn, bởi vì rõ ràng việc đưa vào tác dụng xa trực tiếp, do sự xóa bỏ khái niệm về tính đồng thời tuyệt đối, là không được nữa, hay ít ra không thể được nữa bằng một con đường tự nhiên nào đó.

Điều đơn giản nhất dĩ nhiên là giữ lại thế vô hướng Laplace của lực hấp dẫn^[105], và bổ sung phương trình Poisson một cách tự nhiên bằng một số hạng được lấy đạo hàm theo thời gian bằng một cách dễ thấy, sao cho thuyết tương đối hẹp được thỏa mãn. Định luật chuyển động của điểm khối lượng trong trường hấp dẫn cũng phải được làm thích ứng với thuyết tương đối hẹp. Con đường cho việc đó diễn ra ít rõ ràng, vì khối lượng quán tính của một vật thể có thể lệ thuộc vào thế hấp dẫn. Điều này thực ra cũng lại được chờ đợi do định lý về quán tính của năng lượng.

Tuy nhiên những sự nghiên cứu như thế đưa đến một kết quả làm cho tôi nghi ngờ cao độ. Thật vậy, theo cơ học cổ điển, gia tốc thẳng đứng của một vật thể trong một trường hấp dẫn thẳng

đứng không tùy thuộc vào thành phần ngang của vận tốc. Do đó trong một trường hấp dẫn như thế, gia tốc thẳng đứng của một hệ thống cơ học hay của trọng tâm của nó hoạt động độc lập với nội động năng của nó. Nhưng theo lý thuyết tôi đã thử nghiệm, không có sự độc lập gia tốc của vật thể rơi tự do đối với thành phần ngang của vận tốc, hay với nội năng của một hệ thống.

Điều này không phù hợp với kinh nghiệm xưa nói rằng trong một trường hấp dẫn tất cả các vật thể đều chịu cùng một gia tốc như nhau. Định luật này, cũng còn được mô tả là định luật đẳng thức của khối lượng quán tính và hấp dẫn, giờ lóe sáng lên trong tôi với tất cả ý nghĩa sâu xa của nó. Tôi ngạc nhiên cao độ về sự tồn tại của nó và linh cảm rằng chìa khóa để hiểu sâu xa hơn về quán tính và lực hấp dẫn phải nằm trong đó. Tôi cũng không có nghi ngờ đáng kể nào về tính chính xác nghiêm ngặt của nó mặc dù không hề biết kết quả của những thí nghiệm đáng ngưỡng mộ của Eötvös, những cái đến với tôi sau, nếu tôi nhớ không lầm. Bây giờ tôi từ bỏ cách tiếp cận được thử nghiệm nói trên như cách tiếp cận không phù hợp đối với bài toán lực hấp dẫn trong khuôn khổ thuyết tương đối hẹp. Cách tiếp cận đó rõ ràng không thích hợp với tính chất căn bản của lực hấp dẫn. Định luật về đẳng thức của khối lượng quán tính và hấp dẫn bây giờ có thể được diễn tả một cách sáng sủa như sau: Trong một trường hấp dẫn đồng nhất, tất cả chuyển động diễn ra cùng một cách như đối với một hệ tọa độ chuyển động gia tốc đều mà không có trường hấp dẫn. Nếu định lý này đúng cho các sự kiện bất kỳ ("nguyên lý tương đương") thì đó là dấu hiệu cho thấy nguyên lý tương đối cần phải được mở rộng đến các hệ tọa độ chuyển động không đều đối với nhau, nếu người ta muốn đạt tới một lý thuyết tự nhiên về các trường hấp dẫn. Những suy nghĩ như thế đã theo đuổi tôi từ 1908 đến 1911, và tôi tìm cách rút ra những hệ luận đặc biệt từ đó, những điều tôi không muốn đề cập ở đây. Trước mắt điều quan trọng chính là sự nhận thức rằng một lý thuyết hợp lý về lực hấp dẫn chỉ có thể được hy vọng từ một sự mở rộng nguyên lý tương đối.

Do đó điều cần phải làm là sự thiết lập một lý thuyết mà các phương trình của nó giữ nguyên được hình dạng của chúng đối với các phép biến đổi tọa độ không tuyến tính. Điều này sẽ đúng cho các phép biến đổi hoàn toàn bất kỳ (liên tục), hay chỉ đúng

cho một số loại nào thôi, điều đó lúc đầu tôi không rõ.

Nhanh chóng, tôi thấy rằng, với sự bao gồm cả các phép biến đổi phi tuyến như nguyên lý tương đương đòi hỏi, sự lý giải vật lý đơn giản của các tọa độ phải mất đi, nghĩa là chúng ta không thể đòi hỏi nữa, rằng các hiệu số tọa độ có ý nghĩa là các kết quả trực tiếp của sự đo đạc với các thước đo và đồng hồ lý tưởng. Nhận thức này làm tôi rất khổ sở, bởi vì trong một thời gian dài tôi không đủ sức để hiểu các tọa độ trong vật lý nói chung có ý nghĩa gì? Mãi đến khoảng 1912 sự giải phóng khỏi bế tắc này mới đến, bằng suy nghĩ sau đây:

Chắc chắn phải còn một cách diễn tả mới của định luật quán tính sẽ được tìm thấy, sao cho trong trường hợp vắng mặt của một "trường hấp dẫn thật", cách diễn tả đó sẽ chuyển thành cách diễn tả của Galilei cho nguyên lý quán tính, nếu một hệ quán tính được sử dụng làm hệ tọa độ. Cách diễn tả Galilei nói rằng: Một điểm vật chất, nếu không có lực tác dụng lên, được diễn tả bằng một đường thẳng trong không gian bốn chiều, nghĩa là bằng một con đường ngắn nhất, hay đúng hơn, một đường cực trị^[106]. Khái niệm này giả thiết khái niệm chiều dài của một phần tử tuyến tính^[107], nghĩa là của một metric. Trong thuyết tương đối hẹp, metric này - như Minkowski đã chứng minh - là tựa-Euclid, nghĩa là bình phương của "chiều dài" ds của một phần tử tuyến tính là một hàm số bậc hai nhất định của các vi phân của tọa độ.

Nếu bây giờ các tọa độ khác được đưa vào bằng một phép biến đổi phi-tuyến, thì ds^2 vẫn là một hàm số thuần nhất của các vi phân tọa độ, nhưng các hệ số của hàm số này ($g^{\mu\nu}$) sẽ không còn là hằng số nữa, mà là những hàm số nhất định của các tọa độ. về phương diện toán học, điều này có nghĩa: Không gian vật lý (bốn chiều) có một metric Riemann. Các đường cực trị loại-thời gian^[108] của metric này cung cấp định luật chuyển động của một điểm vật chất không bị tác dụng bởi lực nào lên đó ngoài lực hấp dẫn. Các hệ số ($g^{\mu\nu}$) của metric này đồng thời mô tả trường hấp dẫn đối với hệ tọa độ đã được chọn. Do đó, một sự diễn tả tự nhiên của nguyên lý tương đương đã được tìm thấy, mà sự mở rộng của nó đến các trường hấp dẫn bất kỳ làm thành một giả thuyết hoàn toàn tự nhiên.

Lời giải của tình thế khó xử nói trên do đó là: Một ý nghĩa vật lý không phải được dành cho các vi phân tọa độ mà chỉ dành cho metric Riemann tương ứng với chúng. Từ đó một cơ sở cho thuyết tương đối rộng được tìm thấy. Nhưng còn hai vấn đề phải được giải quyết:

1. Nếu một định luật trường được diễn tả bằng thuyết tương đối hẹp, thì làm sao cùng điều đó được chuyển sang trường hợp của một metric Riemann?

2. Các định luật vi phân để xác định chính metric Riemann (nghĩa là các $g_{\mu\nu}$) có dạng nào?

Tôi đã làm việc với hai câu hỏi này từ 1912 đến 1914 cùng với người bạn tôi Marcel Grossmann. Chúng tôi tìm thấy, các phương pháp toán học để giải bài toán 1 đã nằm sẵn trong phép tính vi phân vô cùng bé của Ricci và Levi-Civita.

Đối với bài toán 2, lời giải của nó hiển nhiên cần đến sự xây dựng các vi phân bất biến bậc hai từ các $g_{\mu\nu}$. Chúng tôi nhanh chóng thấy rằng những cái này đã được xây dựng bởi Riemann (tenzor của độ cong). Hai năm trước khi công bố thuyết tương đối rộng chúng tôi đã xem xét các phương trình trường đã đúng rồi, nhưng không đủ sức để thấy chúng có thể được sử dụng trong vật lý thế nào. Ngược lại, tôi tin rằng chúng không thể nào phù hợp với kinh nghiệm. Thêm vào đó, dựa trên một suy nghĩ tổng quát, tôi còn tin có thể chứng minh được rằng một định luật hấp dẫn bất biến đối với các phép biến đổi tọa độ bất kỳ là không dung hợp với nguyên lý nhân quả. Đó là sự sai lầm của tư duy đã làm hao tổn hai năm trời lao động vô cùng cực nhọc, cho đến cuối cùng vào cuối năm 1915 tôi đã nhận ra được những sai lầm đó, và tìm lại được mối dây liên lạc của lý thuyết với những dữ kiện của kinh nghiệm thiên văn học sau khi tôi trở lại độ cong của Riemann - trong sự hối hận.

Dưới ánh sáng của nhận thức đã đạt đến thì cái đã may mắn thu hoạch được hiện ra gần như tất nhiên, và mỗi sinh viên thông minh đều hiểu nó không khó nhọc lắm. Nhưng sự tìm kiếm đầy linh cảm, kéo dài nhiều năm trong bóng tối, với ước vọng căng tràn của nó, luân phiên giữa sự tin chắc và nỗi tuyệt vọng, rồi với sự bút phá cuối cùng đạt đến chân lý, những điều

đó chỉ có ai đã tự trải nghiệm mới hiểu được.

Về Phương Pháp của Vật Lý Lý Thuyết (1933)

Bài này còn được gọi là bài giảng Herbert Spencer, và được, đọc tại Oxford ngày 10.6.1933, sau đó được đăng lại trong Mein Weltbild năm 1934, nhưng có nguồn gốc từ 1930. Người được đề cập trong bài không còn biết được là ai. Người trợ lý của Einstein, nhà toán học Walter Mayer, cùng làm việc tại Princeton Institute for Advanced study, mất năm 1948, trước ông bảy năm.

Nếu các bạn muốn học cái gì từ các nhà vật lý lý thuyết về các phương pháp được họ sử dụng, tôi đề nghị các bạn hãy nắm vững nguyên tắc: Đừng nghe những gì họ nói, mà hãy bám sát những điều họ làm! Thực vậy, khi ai kia làm một cuộc khám phá, thì đối với người đó, những sản phẩm của óc tưởng tượng của anh ta hiện ra một cách tất yếu và tự nhiên đến nỗi anh ta xem chúng không phải là những sáng tạo của tư duy, mà là những thực tại đã có sẵn, và muốn chúng được xem như thế.

Những lời này dường như được nói ra để xua đuổi các bạn khỏi bài nói chuyện này. Vì các bạn sẽ thầm nói: Cái ông kia cũng là một nhà hoạt động vật lý, và vì thế ông nên nhường sự tư duy về cấu trúc của khoa học lý thuyết lại cho các nhà nhận thức luận.

Tôi có thể bảo vệ mình trước lời phản biện ấy từ quan điểm cá nhân bằng cách cam kết rằng, tôi đã bước lên diễn đàn này không phải do tự ý, mà từ lời mời hữu nghị để mừng một con người cả đời đã đấu tranh cho sự thống nhất của nhận thức. Tuy nhiên sự thật, nỗ lực của tôi được biện minh bởi điều, là ít ra có được một sự lý thú khi biết một người suy nghĩ gì về lãnh vực khoa học của anh ta, khi anh ta đã một đời vươn tới sự khai hoang và cải thiện những cơ sở của nó với tất cả sức lực. Cách anh ta nhìn thế nào quá khứ và hiện tại của lãnh vực mình, điều đó có thể lệ thuộc chặt chẽ vào việc anh ta chờ đợi gì ở tương lai, và anh ta phấn đấu để đạt được cái gì ở hiện tại. Nhưng đó sẽ là định mệnh không thể tránh khỏi của mỗi con người khi anh ta đã trót quen thích sống trong một thế giới ý tưởng. Anh ta cảm

thấy giống như nhà sử học khi ông này - tuy có thể không ý thức - cũng phân nhóm các sự kiện thực tế theo các hình ảnh lý tưởng mà ông đã xây dựng cho mình liên quan đến xã hội con người.

Chúng ta muốn có một cái nhìn lướt qua về sự phát triển của hệ thống lý thuyết, với một sự chú ý đặc biệt về mối quan hệ của nội dung lý thuyết với toàn bộ các dữ kiện thực nghiệm. Đó là một sự đối lập vĩnh cửu giữa hai thành phần không tách rời nhau được của tri thức trong lãnh vực hoạt động của chúng ta: thực nghiệm và lý trí.

Chúng ta ngưỡng mộ Hy Lạp cổ đại như một cái nôi của nền khoa học phương Tây. Ở đây, lần đầu tiên một kỳ quan ý tưởng của một hệ thống lôgic được khai sinh, mà những phát biểu của nó đã hình thành từng bước với độ chính xác cao đến nỗi mỗi một định lý khi được chứng minh đều vượt qua mọi sự nghi ngờ - ý tôi muốn nói hình học Euclid. Tác phẩm đáng ngưỡng mộ này của lý trí đã đem lại cho trí tuệ con người niềm tự tin cần thiết cho những hoạt động tiếp theo của nó. Ai trong thời niên thiếu không thấy lời cuốn trước tác phẩm này, người ấy không phải sinh ra để làm nhà nghiên cứu lý thuyết.

Nhưng để chín mùi cho một khoa học bao trùm được thực tại, con người cần đến một nhận thức cơ bản thứ hai, nhận thức mà cho đến thời của Galilei và Kepler mới trở thành tài sản tinh thần chung của giới triết học. Chỉ bằng tư duy thuần túy và lôgic chúng ta không có khả năng đạt tới tri thức nào về thế giới kinh nghiệm; tất cả tri thức về thực tại xuất phát từ kinh nghiệm và kết thúc ở đó. Các định lý thu hoạch được thuần túy bằng lôgic trở nên hoàn toàn sáo rỗng trước thực tại. Bằng nhận thức này, và bằng việc rao truyền nó vào thế giới khoa học, Galilei đã trở thành người cha đẻ của ngành vật lý lý thuyết, vâng, của cả nền khoa học hiện đại nói chung.

Nhưng giờ, nếu kinh nghiệm là khởi đầu và kết thúc của mọi tri thức của chúng ta về thực tại, thì đâu là vai trò của ratio (lý trí) trong khoa học?

Một hệ thống hoàn chỉnh của ngành vật lý lý thuyết được cấu thành bởi các khái niệm, các định luật cơ bản - được xem như có hiệu lực đối với các khái niệm kia - và các định lý được suy ra

bằng diễn dịch logic. Các định lý hệ luận này chính là những cái phải tương thích với những kinh nghiệm riêng lẻ của chúng ta; sự suy diễn logic của chúng chiếm hầu như tất cả các trang giấy trong một quyển sách lý thuyết.

Nhưng thực ra điều đó giống như trong hình học Euclid, chỉ khác là ở đó các định luật cơ bản được gọi là tiên đề, và người ta không nói rằng các định lý hệ luận phải tương thích với những kinh nghiệm nào. Nhưng nếu chúng ta quan niệm hình học Euclid như một lý thuyết của các mối quan hệ hỗ tương khả dĩ của các vật thể hầu như rắn trong không gian, nghĩa là diễn giải nó như một khoa học vật lý mà không trừu tượng hóa khỏi nội dung thực nghiệm nguyên thủy của nó, thì tính đồng nhất logic giữa hình học và vật lý lý thuyết là hoàn chỉnh.

Chúng ta bây giờ đã đặt lý trí và kinh nghiệm vào đúng vị trí của chúng trong hệ thống của một ngành vật lý lý thuyết. Lý trí đem lại sự xây dựng của hệ thống; các nội dung kinh nghiệm và quan hệ qua lại của chúng phải tìm thấy sự biểu thị ở các định lý hệ luận của lý thuyết. Chính trong khả năng của một sự biểu thị như thế mà cả hệ thống, và nhất là các khái niệm và định luật nền tảng làm cơ sở cho nó, đã tìm thấy giá trị và sự chính đáng của mình. Ngoài ra, các định luật nền tảng là những trước tác tự do của trí tuệ con người mà người ta không thể biện minh một cách *tiên nghiệm* bằng bản chất của trí tuệ con người hay bằng một cách nào khác.

Các khái niệm và định luật nền tảng, những thứ không thể rút gọn tiếp được một cách logic, làm thành phần cơ bản của lý thuyết mà lý trí không thể hiểu được. Mục đích quan trọng nhất của mọi lý thuyết là làm cho số phần tử nền tảng không thể rút gọn này đơn giản và ít như có thể, mà không phải bỏ bớt đi sự biểu thị thích đáng của một nội dung thực nghiệm nào.

Quan điểm mà tôi trình bày ở đây về tính chất thuần túy giả định của các cơ sở của lý thuyết là hoàn toàn không phải quan điểm thịnh hành ở thế kỷ XVIII và XIX. Nhưng nó ngày càng thịnh hành hơn bởi sự thật rằng khoảng cách ý tưởng giữa các khái niệm và các định luật nền tảng một bên, và bên kia các hệ luận cần phải được đặt vào mối quan hệ với các kinh nghiệm, ngày càng lớn hơn, khi cấu trúc logic ngày càng thống nhất hơn,

nghĩa là khi người ta có khả năng đặt toàn bộ cấu trúc lên ngày càng ít hơn các phần tử khái niệm độc lập nhau về mặt logic.

Newton, người khai sáng đầu tiên của một hệ thống bao quát và hữu hiệu của vật lý lý thuyết, vẫn còn tin rằng các khái niệm và định luật nền tảng của hệ thống ông là được suy diễn từ kinh nghiệm. Câu nói của ông *hypotheses non fingo* (tôi không bịa ra giả thuyết) có thể được hiểu trong nghĩa này.

Thực tế trước đây dường như không có vấn đề gì tồn tại trong các khái niệm không gian và thời gian. Các khái niệm khối lượng, quán tính và lực, cũng như mối quan hệ quy luật giữa chúng, dường như đã được vay mượn trực tiếp từ kinh nghiệm. Tuy nhiên một khi nền tảng này được chấp nhận, thì biểu thức cho lực hấp dẫn xem ra như có thể được suy diễn từ kinh nghiệm, và điều tương tự cũng được chờ đợi cho các lực khác.

Tuy nhiên, chúng ta thấy từ cách diễn đạt của Newton, rằng khái niệm không gian tuyệt đối, hàm chứa khái niệm của sự yên tĩnh tuyệt đối bên trong nó, đã làm cho ông khó chịu. Ông đã ý thức tình huống, rằng không có cái gì từ kinh nghiệm tương ứng với khái niệm sau cả. Ông cũng cảm thấy một sự khó chịu trong việc đưa ra khái niệm lực tác dụng xa. Nhưng sự thành công thực tiễn to lớn của thuyết ông có lẽ đã ngăn cản ông cũng như các nhà vật lý thế kỷ XVIII và XIX nhận thức được tính chất giả định của các cơ sở của hệ thống ông.

Các nhà nghiên cứu tự nhiên của những ngày đó phần lớn thực sự đã thấm nhuần ý tưởng, rằng các khái niệm và định luật nền tảng không phải là trước tác tự do của trí tuệ con người, theo nghĩa logic, mà những cái đó được suy diễn từ thực nghiệm bằng sự "trừu tượng hóa" - nghĩa là bằng con đường logic. Sự nhận thức rõ về sự sai lầm của quan điểm này thực sự chỉ diễn ra khi thuyết tương đối ra đời; bởi vì thuyết này chứng minh rằng, bằng một nền tảng khác rất xa với nền tảng của Newton, người ta có thể đáp ứng được một mảng rộng các dữ kiện thực nghiệm một cách còn thỏa đáng và hoàn hảo hơn là nền tảng của Newton cho phép. Nhưng bỏ qua vấn đề tính hơn hẳn của nền tảng này hay nền tảng kia, tính chất giả định của các cơ sở lộ ra hoàn toàn hiển nhiên qua sự việc, rằng người ta có thể tìm ra hai cơ sở khác nhau về cơ bản nhưng lại có thể cùng phù hợp với

kinh nghiệm trên một quy mô rộng. Điều này đồng thời cũng chứng minh rằng, mỗi nỗ lực của một sự suy diễn logic các khái niệm và định luật cơ bản của cơ học từ các kinh nghiệm cơ bản là tất yếu thất bại.

Nếu bây giờ sự thật là, cơ sở tiên đề của vật lý lý thuyết không thể được suy diễn từ kinh nghiệm, mà phải được trước tác tự do, thì chúng ta được phép hy vọng tìm ra được con đường đúng đắn hay không? Chưa hết: Con đường đúng đắn này tồn tại không phải chỉ trong ảo tưởng của chúng ta thôi? Chúng ta có được phép hy vọng được hướng dẫn bởi thực nghiệm một cách chắc chắn hay không, nếu có những lý thuyết như cơ học cổ điển, thỏa mãn kinh nghiệm rộng rãi, mà không hiểu biết sự việc ở chiều sâu? Tôi trả lời câu hỏi với sự tin chắc rằng theo tôi có một con đường đúng đắn, và chúng ta có khả năng tìm thấy nó. Thực vậy, theo kinh nghiệm đến nay, chúng ta được phép có lý do chính đáng để tin rằng, tự nhiên là sự thể hiện của những ý tưởng toán học đơn giản nhất có thể quan niệm được. Tôi tin rằng, với những công cụ toán học thuần túy, chúng ta có khả năng tìm được những khái niệm và định luật nối kết chúng, cần thiết để cung cấp chìa khóa cho sự hiểu biết các hiện tượng tự nhiên. Các khái niệm toán học hữu dụng có thể được gợi ra bởi kinh nghiệm, nhưng không thể nào được suy diễn từ đó. Kinh nghiệm dĩ nhiên vẫn là tiêu chuẩn duy nhất của tính hữu dụng của một sự kiến tạo toán học cho vật lý. Nhưng nguyên lý thực sự sáng tạo nằm trong toán học. Cho nên, trong một nghĩa nào đó, tôi cho rằng tư duy thuần túy có thể nắm bắt được thực tại, như những người cổ đại đã mơ ước.

Để biện minh cho niềm tin này, tôi tất yếu phải sử dụng các khái niệm toán học. Thế giới vật lý được biểu thị bởi một continuum bốn chiều. Nếu tôi cho không gian này một metric Riemann, và hỏi về những định luật đơn giản nhất mà một metric như thế thỏa mãn, thì tôi sẽ đi đến thuyết tương đối của hấp dẫn trong không gian rộng. Nếu tôi lấy trong không gian này một trường vectơ, hay trường-tensor-phản-đối-xúng được suy ra từ đây, và hỏi về những định luật đơn giản nhất mà một trường như thế có thể thỏa mãn, thì tôi sẽ đi đến các phương trình Maxwell của không gian rộng.

Đến đây, chúng ta vẫn còn thiếu một lý thuyết cho các phần của không gian mà ở đó mật độ điện tích không biến mất. Louis de Broglie tiên đoán được sự tồn tại của một trường sóng, có thể sử dụng để diễn giải những tính chất nhất định của vật chất. Dirac tìm thấy trong các spinor các đại lượng trường loại mới mà các phương trình đơn giản nhất của chúng cho phép suy ra các tính chất của electron một cách rộng rãi. Sau đó, tôi và đồng nghiệp, tiến sĩ Walter Mayer, tìm thấy các spinor này tạo thành một trường hợp đặc biệt của một loại trường mới, mà chúng ta gọi là "nửa-vectơ", được kết nối về mặt toán học với một hệ thống bốn chiều. Các phương trình đơn giản nhất mà các nửa-vectơ có thể tuân thủ, cung cấp một chìa khóa để hiểu sự tồn tại của hai loại hạt cơ bản với khối lượng có trọng lượng khác nhau, và có điện tích bằng nhau nhưng khác dấu. Các nửa-vectơ này, sau các vectơ thông thường, là những hình thái trường đơn giản nhất khả dĩ có trong một continuum metric bốn chiều, và dường như chúng mô tả các tính chất cơ bản của các hạt cơ bản mang điện tích một cách tự nhiên.

Điểm quan trọng chúng ta cần chú ý là tất cả những sự cấu tạo này, và những định luật nối liền chúng, có thể được tìm thấy bởi nguyên lý đi tìm các khái niệm đơn giản nhất về mặt toán học và các kết nối của chúng. Chính trong bản chất giới hạn của các loại trường đơn giản tồn tại về mặt toán học, và các phương trình đơn giản khả dĩ giữa chúng, mà nhà vật lý lý thuyết đặt hy vọng có thể nắm bắt được cái thật^[109] trong chiều sâu của nó.

Trong khi đó, cái khó khăn của một thuyết trường loại đó nằm ở việc hiểu được cấu trúc nguyên tử của vật chất và của năng lượng. Lý thuyết về cơ bản là không nguyên tử (non-atomistic), trong chừng mực nó chỉ hoạt động với các hàm liên tục của không gian, ngược với cơ học cổ điển ở đó phần tử quan trọng nhất, điểm vật chất, đã đáp ứng được cấu trúc nguyên tử của vật chất.

Thuyết lượng tử hiện đại trong dạng đặc trưng của các tên tuổi de Broglie, Schrödinger, Dirac, vốn hoạt động với các hàm liên tục, đã khắc phục được khó khăn này bằng một sự diễn giải táo bạo, đầu tiên được Max Born đưa ra ở dạng sáng sủa: các hàm số không gian xuất hiện trong các phương trình không yêu sách

là một mô hình toán học của các cấu trúc nguyên tử. Các hàm số kia chỉ xác định, bằng tính toán, các xác suất để tìm thấy các cấu trúc đó tại một vị trí nhất định, hay trong một trạng thái chuyển động nhất định khi một phép đo được thực hiện. Cách diễn giải này xét về mặt logic là hoàn hảo, và đã có những thành quả quan trọng. Tuy nhiên, nó buộc người ta phải sử dụng một continuum mà số chiều của nó không phải là số chiều của không gian vật lý như đến nay (tức là bốn), mà lại tăng lên vô hạn theo số hạt làm thành hệ thống được xem xét. Tôi không thể không thú nhận, rằng tôi chỉ công nhận một ý nghĩa nhất thời cho cách diễn giải này. Tôi vẫn tin vào khả năng có thể của một mô hình của thực tại, nghĩa là của một lý thuyết biểu thị chính các sự vật chứ không chỉ xác suất của sự xuất hiện của chúng.

Mặt khác, theo tôi chúng ta phải từ bỏ ý tưởng một sự định vị toàn diện của các hạt trong mô hình lý thuyết, điều đó dường như là chắc chắn. Theo tôi đó dường như là kết quả bền vững của nguyên lý bất định của Heisenberg. Nhưng một lý thuyết nguyên tử theo đúng nghĩa của nó (không phải chỉ trên cơ sở của một cách diễn giải) mà không có sự định vị của các hạt trong mô hình toán học là hoàn toàn có thể nghĩ đến được. Chẳng hạn, để phù hợp với tính chất nguyên tử của điện học, các phương trình trường chỉ cần đưa đến kết luận sau: Một phần không gian ba chiều mà vùng biên của nó có mật độ điện triệt tiêu khắp nơi, luôn luôn chứa đựng một tổng điện tích là một số nguyên. Trong một lý thuyết continuum, tính chất nguyên tử của các định luật tích phân do đó có thể được biểu hiện một cách thỏa đáng, không cần một sự định vị của các đơn vị làm thành cấu trúc nguyên tử.

Chỉ khi một sự biểu thị như thế của cấu trúc nguyên tử thành công, tôi mới cho rằng sự huyền bí của lượng tử được giải quyết.

Thuyết Tương Đối (1936)

Dưới đây là một chương của bài viết "Vật lý và thực tại" (Physics and Reality), đăng lần đầu tiên trong The Journal of the Franklin Institute, Vol. 221, No. 3, tháng 3 năm 1936, được đăng lại trong tuyển tập "Từ những năm sau của đời tôi".

Không có phương pháp quy nạp nào có thể dẫn đến các khái

niệm nền tảng của vật lý. Việc xem thường sự thật này là sai lầm cơ bản về triết học của nhiều nhà nghiên cứu của thế kỷ XIX; nó có thể là lý do khiến cho thuyết phân tử và thuyết Maxwell chỉ được công nhận tương đối muộn màng. Tư duy lôgic là tất yếu diễn dịch, được xây dựng trên các khái niệm có tính chất giả thuyết và các tiên đề. Làm sao chúng ta có thể chờ đợi có thể chọn lựa được những cái sau, sao cho chúng ta được phép hy vọng vào sự đứng vững của các hệ luận của chúng?

Trường hợp thuận lợi nhất rõ ràng là khi các giả thuyết nền tảng mới được gợi ra từ chính thế giới của trải nghiệm. Giả thuyết về sự không tồn tại của một động cơ vĩnh cửu như nền tảng của nhiệt động học là một thí dụ như thế của một giả thuyết cơ bản được gợi ra từ kinh nghiệm; giống như thế là nguyên lý quán tính của Galilei. Cùng trong cùng một phạm trù là các giả thuyết nền tảng của thuyết tương đối, thuyết đã dẫn đến một sự mở rộng và đào sâu bất ngờ của lý thuyết trường và đưa đến một sự khắc phục các cơ sở của cơ học cổ điển.

Các thành công của thuyết Maxwell-Lorentz đã đẩy lên niềm tin lớn vào hiệu lực của các phương trình điện từ cho chân không, đặc biệt vào phát biểu, rằng ánh sáng truyền đi "trong không gian" với một vận tốc nhất định c . Phát biểu này về tính chất hằng số của vận tốc truyền ánh sáng có đúng đối với các hệ quán tính bất kỳ? Nếu nó không đúng, thì một hệ quán tính nhất định, hay chính xác hơn một trạng thái chuyển động nhất định (của một vật thể quy chiếu) được ưu đãi đối với tất cả những hệ còn lại. Nhưng điều này mâu thuẫn với tất cả những dữ kiện kinh nghiệm cơ học và điện từ-quang học.

Từ những lý do này, chúng ta cần thiết phải nâng hiệu lực của định luật về hằng số của vận tốc truyền ánh sáng cho tất cả mọi hệ quán tính lên thành nguyên lý. Từ đó chúng ta có hệ quả rằng khi có sự chuyển đổi từ một hệ quán tính này sang một hệ khác, các tọa độ không gian x_1, x_2, x_3 , và thời gian x_4 được biến đổi theo "phép biến đổi Lorentz", và phép biến đổi này được đặc trưng bởi tính bất biến của biểu thức

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 - dx_4^2$$

(nếu chúng ta chọn đơn vị thời gian sao cho $c = 1$ đối với vận

tốc ánh sáng).

Do đó, thời gian mất đi tính độc lập của nó, và được đưa vào các tọa độ "không gian" như một đại lượng xét về mặt đại số gần như cùng chủng loại; tính chất tuyệt đối của thời gian và đặc biệt của tính đồng thời đã bị phá hủy, và sự mô tả bằng bốn chiều được đưa vào như là sự mô tả thích hợp duy nhất.

Hơn nữa, để có thể đáp ứng thỏa đáng sự tương đương của tất cả các hệ quán tính đối với tất cả các hiện tượng tự nhiên, người ta cần phải đòi hỏi tính bất biến đối với các phép biến đổi Lorentz của tất cả các hệ thống phương trình vật lý mô tả các định luật phổ quát. Thực hiện sự đòi hỏi này chính là nội dung của thuyết tương đối hẹp.

Lý thuyết này tuy phù hợp với các phương trình Maxwell, nhưng không dung hợp với nền tảng của cơ học cổ điển. Tuy các phương trình chuyển động của điểm vật chất có thể được cải biến (và cùng với chúng là các biểu thức của xung lượng, và động năng của điểm khối lượng) sao cho lý thuyết được thỏa mãn. Nhưng khái niệm của lực tương tác (và với nó, khái niệm của thế năng của một hệ thống) mất đi cơ sở của nó, vì nó dựa lên ý tưởng của tính đồng thời tuyệt đối. Lực đã nhường chỗ cho trường, như được quy định bởi các phương trình vi phân.

Bởi vì thuyết này chỉ cho phép các tương tác thông qua trường nên nó đòi hỏi một thuyết trường cho hấp dẫn. Thực sự cũng không phải khó khăn để thiết lập một lý thuyết như thế, mà ở đó, cũng giống như trong thuyết Newton, trường hấp dẫn được quy về một vô hướng thỏa mãn một phương trình vi phân riêng phần. Nhưng những dữ kiện kinh nghiệm được diễn đạt trong thuyết hấp dẫn của Newton lại dẫn sang con đường khác, con đường của thuyết tương đối rộng.

Một điểm không thỏa mãn trong cơ học cổ điển là trong các định luật cơ bản của nó *cùng một* hằng số khối lượng lại xuất hiện trong hai vai trò khác nhau; là "khối lượng quán tính" trong định luật chuyển động, đồng thời là "khối lượng hấp dẫn" trong định luật hấp dẫn. Như một hệ quả, sự gia tốc của một vật thể trong trường hấp dẫn thuần túy là độc lập với vật chất, hay là: trong hệ tọa độ *chuyển động gia tốc đều* (gia tốc đối với một "hệ

quán tính") các chuyển động diễn ra như trong một trường hấp dẫn thuần nhất (đối với một hệ tọa độ "đứng yên"). Nếu giả thiết rằng sự tương đương của hai trường hợp này là một sự tương đương hoàn hảo, thì người ta sẽ đạt đến một sự thích nghi của tư duy lý thuyết với sự thật rằng khối lượng quán tính và khối lượng hấp dẫn là đồng nhất với nhau.

Từ đó ta suy ra như một nguyên lý, rằng sự ưu đãi của các "hệ quán tính" không còn nữa, và các phép biến đổi *phi tuyến* của tọa độ (x_1, x_2, x_3, x_4) cũng được chấp nhận một cách bình đẳng. Nếu chúng ta làm một phép biến đổi như thế từ một hệ tọa độ của thuyết tương đối hẹp, thì metric của nó

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 - dx_4^2$$

sẽ được chuyển qua thành một metric (Riemann) tổng quát có dạng

$$ds^2 = g^{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu \text{ (tổng lấy trên các } \mu \text{ và } \nu \text{)}$$

trong đó các $g_{\mu\nu}$ đối xứng trong μ và ν , là những hàm số nhất định của x_1, x_2, x_3, x_4 mô tả các tính chất metric cũng như mô tả trường hấp dẫn của không gian đối với hệ tọa độ mới.

Tuy nhiên, sự tiến bộ nói trên trong việc diễn giải nền tảng cơ học đã phải được đánh đổi với sự việc - nếu chúng ta nhìn kỹ hơn - rằng các tọa độ mới không còn được diễn giải trực tiếp như là những kết quả của đo đạc ở các vật thể rắn và đồng hồ nữa, như trong hệ thống ban đầu (một hệ thống quán tính với trường hấp dẫn triệt tiêu).

Sự chuyển sang thuyết tương đối rộng được thực hiện bởi giả thiết nói rằng, một sự biểu thị như thế của các tính chất trường của không gian như đã được nói đến bằng các hàm số g (hay bởi metric Riemann) cũng là chính đáng trong trường hợp *tổng quát*, trong đó không có hệ tọa độ nào để đối với nó, độ đo metric có dạng tựa-Euclid đơn giản của thuyết tương đối hẹp.

Bây giờ các tọa độ tự nó không diễn tả các mối quan hệ metric, mà chỉ còn là sự "gắn nhau" thôi của các vật thể có tọa độ không cách biệt nhau lắm. Tất cả những phép biến đổi tọa độ không kỳ dị đều được chấp nhận. Chỉ những phương trình như thế mới có

ý nghĩa như những sự diễn đạt của các định luật tự nhiên phổ quát, có tính chất hiệp biến đối với các phép biến đổi bất kỳ trong nghĩa này (định đề của tính hiệp biến tổng quát).

Mục tiêu thứ nhất của thuyết tương đối rộng là một phiên bản tạm thời được kết nối với những "cái được trải nghiệm trực tiếp" một cách càng đơn giản càng tốt, mà không cần đáp ứng đòi hỏi phải tạo thành một hệ thống kín. Nếu lý thuyết được giới hạn vào cơ học hấp dẫn thuần túy, thì thuyết hấp dẫn Newton có thể được xem là một mô hình kiểu mẫu. Phiên bản tạm thời này có thể được đặc trưng như sau:

1. Khái niệm của điểm vật chất và khối lượng của nó được giữ nguyên. Một định luật chuyển động được tạo ra cho nó, định luật này là một sự thông dịch của định luật quán tính vào ngôn ngữ của thuyết tương đối rộng. Định luật này là một hệ thống các phương trình vi phân toàn phần, hệ thống đặc trưng của đường trắc địa.

2. Định luật tương tác bằng lực hấp dẫn của Newton được thay thế bằng hệ thống các phương trình vi phân nói chung hiệp biến và đơn giản nhất có thể được thiết lập cho tenzor $g_{\mu\nu}$. Nó được định dạng bằng cách đặt tenzor độ cong Riemann khi đã được rút gọn bằng không ($R_{\mu\nu} = 0$).

Cách diễn đạt này cho phép chúng ta xử lý bài toán của các hành tinh, hay một cách chính xác hơn, xử lý bài toán chuyển động của các điểm vật chất, có khối lượng hữu hạn như triết tiêu trong một trường hấp dẫn (đối xứng qua tâm) được sinh ra bởi một điểm khối lượng được xem như "đứng yên". Nó không quan tâm đến phản ứng của các điểm khối lượng "chuyển động" lên trường hấp dẫn, cũng không biểu thị^[110] khối lượng trung tâm tạo ra trường hấp dẫn như thế nào.

Sự tương đồng với cơ học cổ điển chỉ ra con đường sau đây để hoàn chỉnh lý thuyết. Để thiết lập các phương trình trường, người ta đặt

$$R_{ik} - 1/2 g_{ik} R = - T_{ik}.$$

trong đó R là vô hướng của độ cong Riemann, T_{ik} là tenzor năng lượng của vật chất trong một sự biểu thị hiện tượng học. Về trái của phương trình được chọn sao cho tính phân kỳ của nó

đồng nhất biến mất. Sự biến mất của tính phân kỳ của vế phải, như một hệ quả, đem lại "các phương trình chuyển động" của vật chất ở dạng các phương trình vi phân riêng phần cho trường hợp khi Tik , để mô tả vật chất, đưa vào chỉ *bốn* hàm số tiếp theo độc lập với nhau (chẳng hạn tỷ trọng, áp suất và các thành phần vận tốc, trong đó giữa những cái sau có một đồng nhất thức, trong khi giữa áp suất và tỷ trọng một phương trình điều kiện).

Với cách diễn đạt này, cả bài toán cơ học của hấp dẫn được quy về nghiệm số của một hệ thống duy nhất các phương trình vi phân riêng phần hiệp biến. Lý thuyết này tránh được tất cả những khuyết tật nội tại mà chúng ta đã buộc tội cho nền tảng cơ học cổ điển. Nó thỏa mãn được - trong chừng mực chúng ta biết - việc biểu thị các dữ kiện được quan sát của cơ học thiên thể. Nhưng nó giống như một tòa nhà có hai cánh, mà một cánh được làm bằng đá cẩm thạch quý (vế trái của phương trình) và cánh kia bằng gỗ kém chất lượng (vế phải của phương trình). Cách biểu thị hiện tượng học của vật chất thực thể chỉ là một sự thay thế thô thiển cho một cách biểu thị có thể đáp ứng tất cả những tính chất quen thuộc của vật chất.

Không có khó khăn trong việc kết nối thuyết Maxwell về trường điện từ với thuyết trường hấp dẫn cho đến khi người ta tự giới hạn mình vào không gian không có vật chất có trọng lượng và không có mật độ điện. Điều cần làm là bên vế phải của phương trình trên ta thay Tik bằng tenzor năng lượng của trường điện từ trong không gian rỗng (chân không), và đưa các phương trình trường Maxwell của chân không được viết dưới dạng hiệp biến tổng quát vào hệ thống phương trình vừa được cải biên. Dưới những điều kiện này sẽ tồn tại, giữa tất cả các phương trình này, một số các đẳng thức vi phân đủ để bảo đảm tính tương thích của chúng. Chúng ta có thể nói thêm rằng, tính chất hình thức cần thiết này của toàn bộ hệ thống phương trình để mở ngõ cho sự chọn lựa dấu của số hạng Tik - một điều sau này tỏ ra quan trọng.

Sự mong muốn đạt tới tính thống nhất lớn nhất khả dĩ của các cơ sở lý thuyết đã dẫn đến những nỗ lực nhằm đưa trường hấp dẫn và trường điện từ vào một quan điểm hình thức thống nhất. Đặc biệt ở đây chúng ta cần phải kể đến lý thuyết năm chiều của

Kaluza và Klein. Sau khi xem xét khả năng này rất cẩn thận, tôi cảm thấy vẫn hơn nếu chấp nhận khiếm khuyết nội tại đã nói về tính thống nhất của lý thuyết ban đầu, bởi tôi không thể nghĩ rằng toàn bộ các giả thuyết làm nền tảng cho thuyết năm chiều chứa đựng ít sự tùy tiện hơn là thuyết ban đầu. Điều vừa nói cũng đúng cho phiên bản biến tướng xạ ảnh của lý thuyết, được phát triển đặc biệt cẩn thận bởi von Dantzig và Pauli.

Những sự trình bày vừa qua là chỉ liên quan đến lý thuyết của trường phi vật chất. Làm sao để từ đó người ta đạt đến một lý thuyết hoàn chỉnh của vật chất được cấu tạo bởi các nguyên tử? Trong một lý thuyết như thế, các điểm kỳ dị chắc chắn phải bị loại bỏ, bởi vì nếu không, các phương trình vi phân xác định toàn bộ trường một cách không đầy đủ. Ở đây, trong lý thuyết trường của thuyết tương đối rộng, chúng ta gặp cùng một vấn đề của một sự biểu thị vật chất bằng lý thuyết trường như ban đầu đã gặp trong khuôn khổ thuyết Maxwell thuần túy.

Cũng lại ở đây, nỗ lực của một sự xây dựng thuyết trường cho các hạt dương như dẫn đến các kỳ dị. Cũng ở đây, người ta tìm cách tránh khỏi khó khăn này bằng cách đưa thêm vào các biến số trường và bằng sự phức tạp hóa và mở rộng ra hệ thống các phương trình trường. Tuy nhiên gần đây tôi cùng với TS. Nathan Rosen khám phá ra rằng sự kết hợp đơn giản nhất được gợi ra ở trên của các phương trình trường của hấp dẫn và điện đã mang lại các nghiệm số đối xứng tâm có thể được biểu thị không có kỳ dị (các nghiệm số đối xứng tâm quen thuộc của Schwarzschild cho trường hấp dẫn thuần túy, và các nghiệm số của Reissner cho trường điện có sự chú ý đến tác dụng hấp dẫn của nó). Việc này sẽ được báo cáo ngắn trong chương tới. Bằng cách này, dường như có thể đạt đến một lý thuyết trường thuần túy, cho vật chất và tương tác của nó, mà không cần đến các giả thuyết phụ, một lý thuyết mà sự kiểm tra của nó theo kinh nghiệm không gặp những khó khăn nào khác hơn là những khó khăn toán học, nhưng lại là những khó khăn nghiêm trọng.

2. Max Planck

(1858 – 1947)

và Thuyết Tương Đối

(1909)

Có thể nói Planck là người cha đỡ đầu của thuyết tương đối, là người đã nhận ra tầm quan trọng của nó sớm nhất, và hết mình cố gắng. Những gì viết ra đây không thể nào so sánh được với những nỗ lực to lớn của Planck nhằm đưa cho được Einstein về Berlin năm 1914 với những điều kiện ưu đãi chưa từng có để Einstein có thể hoạt động khoa học tốt nhất trong 20 năm ở đây. Số đề tài nghiên cứu cho nghiên cứu sinh của Ông về thuyết tương đối lớn hơn số đề tài về thuyết lượng tử mà ông là cha đẻ.

Trong một bài giảng năm 1909 tại Đại học Columbia ở Hoa Kỳ, Planck đã có những đánh giá đầu tiên về thuyết tương đối:

"Không cần phải nhấn mạnh rằng quan niệm mới này về khái niệm thời gian đã đặt những đòi hỏi cao nhất đối với khả năng tư duy trừu tượng và khả năng tưởng tượng của nhà vật lý học. Về mức độ táo bạo, nó vượt qua tất cả những gì đã biết trong nghiên cứu tự nhiên một cách tư biện, vâng, trong cả triết học nhận thức luận; đối với nó hình học phi-Euclid chỉ là trò chơi trẻ con. Ngược lại nguyên lý tương đối đòi hỏi một cách đúng đắn ý nghĩa vật lý thực tiễn, trong khi hình học phi-Euclid chỉ có ý nghĩa trong toán học thuần túy mà thôi. Người ta chỉ có thể so sánh cuộc cách mạng gây ra bởi nguyên lý này trong lãnh vực thế giới quan vật lý, về chiều sâu và chiều rộng, với cuộc cách mạng do hệ thống thế giới của Copernicus gây ra."

Planck nói về hình học phi-Euclid lúc này khi Einstein còn đang thai nghén thuyết tương đối rộng để chứng minh không-thời-gian của thực thể vũ trụ lại là phi-Euclid. Năm 1910, trước khi Einstein được mời nhậm chức giáo sư ở Prague, Planck đã viết một thư đánh giá đến phân khoa vật lý ở đó với lời lẽ như sau:

"Nếu lý thuyết Einstein được kiểm chứng là đúng, như tôi chờ đợi, Einstein sẽ là Copernicus của thế kỷ XX."

Một số các phát biểu khác của Planck về thuyết tương đối sau đó:

"Nhận thức mà Albert Einstein đã giành được nói rằng các khái niệm của chúng ta về không gian và thời gian, như Newton

và cũng như Kant đã đặt làm nền tảng cho những tư duy của họ như là những dạng cho trước tuyệt đối của trực quan chúng ta, do tính chất tùy tiện trong sự lựa chọn của hệ quy chiếu và của phương thức đo đạc, nên chỉ có tầm quan trọng tương đối trong nghĩa nào đó; nhận thức đó có lẽ làm thay đổi triệt để nhất đến gốc rễ hệ thống tư duy vật lý của chúng ta. Nhưng khi không gian và thời gian đã mất đi tính chất tuyệt đối, thì cái tuyệt đối không phải đã bị loại ra khỏi thế giới, mà nó chỉ được dời lui về phía sau, đó là vào metric của đa tạp bốn chiều được hình thành từ việc không gian và thời gian, thông qua vận tốc ánh sáng, đã được "đúc lại" thành một continuum thống nhất. Metric này biểu thị một cái gì độc lập thoát khỏi mọi sự tùy tiện, và do đó là cái tuyệt đối." (1924)

Từ bài "Từ tương đối đến tuyệt đối",

Trong "*Vorträge, Reden und Erinnerungen*"

"Năm 1905 một bài báo của A. Einstein xuất hiện trong *Niên giám Vật lý* (Annalen der Physik) chứa đựng những ý tưởng chính của thuyết tương đối, và sự triển khai chi tiết của nó đã thu hút ngay sự chú ý mạnh mẽ của tôi. Để tránh một sự hiểu lầm dễ đi đến, tôi phải có lời lưu ý có tính chất chung. Ngay từ phần đầu trong bài mô tả đời tôi, tôi đã nhấn mạnh, rằng sự tìm kiếm cái tuyệt đối là nhiệm vụ khoa học đẹp nhất của tôi. Người ta vì thế có thể tìm thấy một sự mâu thuẫn trong sự quan tâm của tôi đối với thuyết tương đối. Sự ngờ vực này dựa trên một sai lầm cơ bản. Bởi vì tất cả tương đối thì phải giả thiết có cái gì tuyệt đối, cái tương đối chỉ có ý nghĩa khi có cái tuyệt đối đối diện với nó. Câu nói thường nghe "Tất cả là tương đối" cũng dễ đánh lạc hướng, cũng như thiếu suy nghĩ. Cho nên đối với cái gọi là thuyết tương đối cũng có cái gì tuyệt đối làm nền tảng, đó chính là độ đo của continuum không-thời-gian, và chính đó là nhiệm vụ hấp dẫn đặc biệt để tìm ra cái tuyệt đối, cái đã làm cho cái tương đối hiện hữu ý nghĩa.

Chúng ta luôn luôn chỉ có thể xuất phát từ những cái tương đối. Tất cả những phép đo đạc của chúng ta đều có tính chất tương đối. Vật liệu của các thiết bị mà chúng ta sử dụng là lệ thuộc vào nguồn gốc của nó, sự xây dựng nên của chúng lệ thuộc

vào tính khéo léo của người thợ kỹ thuật đã nghĩ ra nó, việc sử dụng chúng lệ thuộc vào những mục tiêu đặc thù mà người thí nghiệm muốn đạt tới với chúng. Từ tất cả những dữ liệu này, chúng ta có nhiệm vụ đi tìm cái tuyệt đối, cái phổ quát, bất biến chứa đựng trong đó.

Thuyết tương đối đối với tôi cũng thế. Sức hấp dẫn của nó đối với tôi nằm ở chỗ, tôi nỗ lực suy ra từ tất cả định lý của nó cái tuyệt đối, cái bất biến làm nền tảng trong đó. Điều đó thành công một cách tương đối đơn giản. Trước tiên, thuyết tương đối đã mang lại một đại lượng, vốn có một ý nghĩa tương đối trong cơ học cổ điển, một ý nghĩa tuyệt đối: vận tốc truyền ánh sáng. Cũng giống như lượng tử tác dụng trong thuyết lượng tử, vận tốc ánh sáng đã làm thành điểm cốt lõi tuyệt đối trong thuyết tương đối. Liên quan đến nó, một nguyên lý tổng quát của cơ học cổ điển, là nguyên lý tác dụng tối thiểu, cũng là bất biến đối với thuyết tương đối, và do đó đại lượng tác dụng vẫn giữ được ý nghĩa của nó trong thuyết tương đối. Tôi tìm cách thực hiện điều đó một cách chi tiết, trước nhất đối với điểm khối lượng, sau đó đối với một bức xạ của một thùng rỗng. Một trong những kết quả là tính chất quán tính của bức xạ và tính bất biến của entropi đối với vận tốc của hệ thống quy chiếu."

Từ bài "Từ tương đối đến tuyệt đối",

Trong " *Vorträge, Reden und Erinnerungen* "

3. Arthur Stanley Eddington

(1882 - 1944)

Thuyết Tương Đối và Ảnh Hưởng của Nó Đối Với Tư Duy Khoa Học

(1922)

Arthur Stanley Eddington là người có thẩm quyền đặc biệt để nói về thuyết tương đối của Einstein. Chính ông là một trong những người đã dẫn đoàn thám hiểm của nước Anh để đo đạc góc lệch của tia sáng của một vì sao khi đi qua vùng mặt trời vào lúc nhật thực toàn phần năm 1919, và đã xác nhận độ lệch được thuyết tương đối của Einstein tiên đoán là chính xác, rằng

ánh sáng bị uốn cong bởi trường hấp dẫn của vật chất. Từ đó ông là "môn đệ" trung thành của thuyết tương đối và là người đầu tiên truyền bá thuyết này ra thế giới nói tiếng Anh.

Trong những ngày trước Copernicus, dường như thế, trái đất là một nền tảng bất động mà cấu trúc của đất trời được dựng trên đó. Con người, được sống một cách ưu đãi tại trung tâm của vũ trụ, có thể chờ đợi rằng đối với anh ta cả cái cấu trúc vũ trụ sẽ trải rộng ra dưới dạng đơn giản nhất của nó. Tuy nhiên, sự vận hành của các thiên thể không đơn giản chút nào; các hành tinh thực sự quay vòng thành những đường cong tuyệt hảo được gọi là epicycle. Nhà vũ trụ học có nhiệm vụ lắp đầy bầu trời bằng những hình cầu quay xung quanh hình cầu để giữ các hành tinh trong các quỹ đạo được cho phép; và những bánh xe được thêm vào những bánh xe, cho đến khi âm nhạc của các hình cầu hầu như bị nhận chìm trong một sự chói tai của guồng máy quay tít. Rồi một trong những cuộc cách mạng vĩ đại của tư duy khoa học đã đến, nó quét đi hệ thống Ptolemy của các hình cầu và epicycle, để lộ ra một cấu trúc đơn giản của hệ mặt trời kéo dài đến hôm nay.

Cuộc cách mạng bao gồm sự thay đổi quan điểm mà từ đó chúng ta đã nhìn các hiện tượng. Như được bày ra trước mặt đất, vết của một hành tinh là một đường epicycle. Nhưng Copernicus mời chúng ta hãy chuyển chỗ ở lên mặt trời và nhìn lại. Thay vì một đường cong với các đường vòng và thắt nút, quỹ đạo bây giờ thấy được là một trong những đường cong cơ bản nhất - một hình ellip. Chúng ta phải nhìn nhận cái hành tinh nhỏ bé mà chúng ta đứng trên đó là không có ý nghĩa gì lớn trong cái sơ đồ tổng thể của tự nhiên; để tháo gỡ bí mật của sơ đồ này, trước nhất chúng ta phải giải tỏa sự quấy rầy tự nhiên khỏi các biến dạng được hình thành từ quan điểm cục bộ mà từ đó chúng ta quan sát nó. Mặt trời, chứ không phải quả đất, là trung tâm thật sự của sơ đồ sự vật - ít nhất những sự vật mà các nhà thiên văn vào thời gian đó đã quan tâm - và bằng cách chuyển cách nhìn của chúng ta lên mặt trời, tính đơn giản của hệ hành tinh trở nên sáng sủa. Sự cần thiết một bộ máy phiền toái các hình cầu và bánh xe đã biến mất.

Tất cả mọi người bây giờ đều nhìn nhận rằng hệ thống

Ptolemy, vốn xem quả đất là trung tâm của vạn vật, là thuộc về những thời kỳ tối tăm. Nhưng rồi với sự kinh ngạc, chúng ta lại khám phá rằng, cũng cùng cách nhìn *lấy địa cầu làm trung tâm* vẫn còn thấm sâu xuyên suốt ngành vật lý học một cách không nghi ngờ cho đến gần đây. Công việc đã được giao phó cho Einstein để dẫn dắt tiếp cuộc cách mạng đã được bắt đầu bởi Copernicus - để giải phóng quan niệm chúng ta về tự nhiên khỏi các thiên lệch đã được du nhập vào nó bởi những giới hạn của các kinh nghiệm gắn liền với mặt đất của chúng ta. Để đạt tới một quan điểm khách quan hơn, chúng ta cần phải tưởng tượng một chuyến viếng thăm một thiên thể khác. Đó là đề tài đã thu hút các tiểu thuyết gia của đại chúng, và chúng ta thường mỉm cười về những lỗi lầm của họ khi không sớm thì muộn họ quên đi nguồn gốc của mình và trang bị cho những phi hành gia của họ bằng một loại hành trang nào đó thuần túy thuộc về mặt đất, không thích hợp cho vì sao họ đang thăm viếng kia. Nhưng các nhà khoa học - những người không có bản quyền của tiểu thuyết gia - cũng làm những lỗi ngốc nghếch như thế. Theo chân Copernicus, khi đồn trú trên mặt trời thì họ không nhận ra rằng họ cần thiết phải bỏ lại phía sau một phần hành trang nào đó thuần túy thuộc về mặt đất, đó chính là *hệ quy chiếu không gian và thời gian*, trong đó con người trên quả đất có thói quen định vị các sự kiện đã xảy ra. Sự thật là người quan sát trên mặt trời sẽ vẫn định vị các thí nghiệm của anh ta trong một hệ quy chiếu không gian và thời gian, nếu anh ta sử dụng cùng những khả năng của nhận thức và cùng những phương pháp của phép đo đạc khoa học như trên trái đất; nhưng hệ quy chiếu không gian và thời gian trên mặt trời không giống như hệ quy chiếu trên trái đất, như chúng ta hiện tại chứng kiến....

Càng xem xét kỹ các quá trình mà qua đó các sự kiện được quy về các vị trí của chúng trong không gian và thời gian, chúng ta sẽ càng thấy rõ rằng các tình huống cục bộ của chúng ta tham gia một phần đáng kể trong đó. Chúng ta không có quyền chờ đợi, rằng hệ quy chiếu không gian và thời gian trên mặt trời sẽ đồng nhất với hệ chúng ta trên mặt đất, hơn là quyền chờ đợi lực hấp dẫn sẽ đồng nhất ở đó và đây. Nếu không có chứng cứ thực nghiệm nào để hỗ trợ thuyết của Einstein, thì cũng đã tiến bộ lắm rồi nếu chúng ta vạch được ảo tưởng tiềm tàng ở lối tư duy

cũ - ảo tưởng gán tầm quan trọng của chúng ta với nhiều tính chất địa phương hơn của nó vào cách nhìn trên quả đất chúng ta đối với không gian và thời gian mà không cần nghi vấn. Nhưng có dư thừa các chứng cứ thực nghiệm để phát hiện và tính toán sự khác biệt giữa các hệ quy chiếu của các nhà quan sát ở những hoàn cảnh khác nhau. Nhiều chứng cứ có tính chất quá ư kỹ thuật để có thể trình bày ở đây, và tôi chỉ kể đến thí nghiệm Michelson-Morley. Tôi sợ rằng vài người trong quý vị thực ra cũng sẽ phải buồn tẻ với thí nghiệm này; nhưng những ai đi xem buổi diễn vở Hamlet sẽ phải chịu đựng hoàng tử của Đan Mạch [...]

Người ta đôi khi than phiền, kết luận của Einstein cho rằng các hệ quy chiếu không gian và thời gian khác nhau đối với các quan sát viên với những chuyển động khác nhau là có khuynh hướng tạo ra một sự huyền hoặc cho một hiện tượng cuối cùng không phải là lạ lùng xét từ nội tại. Chúng ta đã thấy rằng nó lệ thuộc vào sự co lại của các vật thể chuyển động, điều tỏ ra rất phù hợp với lý thuyết cổ điển của Maxwell. Nhưng ngay cả khi chúng ta thành công trong việc giải thích cho chính chúng ta một cách dễ hiểu, điều đó không hề làm giảm đi tính đúng thực của phát biểu! Một kết quả mới có thể thường được diễn tả theo nhiều cách; một cách diễn tả có thể nghe ít huyền bí hơn; nhưng một cách khác có thể vạch rõ ra đâu là những hệ quả trong việc tu chỉnh và mở rộng tri thức của chúng ta. Chính vì lý do sau mà chúng ta nhấn mạnh tính tương đối của không gian - rằng chiều dài và khoảng cách khác nhau tùy thuộc vào người quan sát trong cuộc. Khoảng cách, khoảng thời gian là những số hạng căn bản nhất trong vật lý; vận tốc, gia tốc, lực, năng lượng, v.v. tất cả đều tùy thuộc vào chúng; và chúng ta hầu như khó làm một phát biểu trong vật lý mà không liên quan gián tiếp hay trực tiếp với chúng. Chắc chắn chúng ta tốt nhất có thể chỉ ra những hệ quả cách mạng của điều mà chúng ta đã học được từ phát biểu, rằng khoảng cách và khoảng thời gian, và tất cả những đại lượng vật lý tùy thuộc vào chúng, là không liên quan, như đã được giả thiết đến nay, đến một cái gì tuyệt đối của thế giới bên ngoài, mà là những đại lượng tương đối thay đổi nếu chúng ta đi từ quan sát viên này sang một quan sát viên kia có một chuyển động khác. Hệ quả trong vật lý của sự khám phá rằng một mét không phải là

một mảnh tuyệt đối của không gian, rằng một đoạn có thể là một mét đối với một quan sát viên, nhưng có thể là mười centimet đối với một quan sát viên khác, hệ quả đó có thể được so sánh với hệ quả trong kinh tế của việc khám phá rằng một Bảng Anh không phải là một đại lượng tuyệt đối của sự phồn vinh, mà trong những tình huống nhất định có thể "thực tế" chỉ là bảy hay sáu xu thôi...

Ptolemy trên trái đất, và Copernicus trên mặt trời, cả hai tư duy về cùng một vũ trụ bên ngoài. Nhưng những kinh nghiệm họ khác nhau, và chính trong quá trình trải nghiệm các sự kiện mà họ trở nên gắn chặt vào hệ quy chiếu không gian và thời gian - các hệ khác nhau tùy theo các hoàn cảnh cục bộ của người quan sát đã trải nghiệm sự kiện. Đó là, tôi xin trích học thuyết của Kant, "Không gian và thời gian là những dạng của kinh nghiệm" [111]. Hệ quy chiếu không có sẵn trong trời đất. Nó chỉ được đặt ra bởi người quan sát, và lệ thuộc vào anh ta. Và các mối quan hệ kia của tính đơn giản mà chúng ta đã đi tìm khi nỗ lực để đạt đến sự hiểu biết vũ trụ vận hành thế nào, phải nằm trong bản thân các sự kiện trước khi chúng được gắn tùy tiện vào hệ quy chiếu. Điều nhiều nhất mà chúng ta có thể hy vọng từ mỗi hệ quy chiếu là nó sẽ không làm biến dạng đi tính đơn giản vốn nguyên thủy đã có, trong khi một hệ được chọn thiếu cân nhắc có thể phá hỏng tính đơn giản của sự vật...

Nếu tôi đã thành công trong mục tiêu của tôi, bạn đã nhận ra rằng cuộc cách mạng hiện tại của tư duy khoa học là một sự tiếp nối một cách tự nhiên trong chuỗi các cuộc cách mạng vĩ đại ở các thời đại trước trong lịch sử khoa học. Thuyết tương đối hẹp của Einstein, giải thích tính vô chùng của hệ quy chiếu không gian và thời gian, đã kết thúc vẻ vang công trình của Copernicus, người đầu tiên đã đưa chúng ta đến chỗ từ bỏ sự bám víu khăng khăng của chúng ta vào quan điểm lấy quả đất làm trung tâm để nhìn vũ trụ. Thuyết tương đối rộng của Einstein, để lộ ra tính chất cong của hình học phi-Euclid của hệ quy chiếu không gian và thời gian, là sự phát triển tiếp nối các ý nghĩ phôi thai của một số nhà thiên văn học trước đây, khi họ đầu tiên nghiên ngẫm về khả năng rằng sự tồn tại của họ nằm trên cái gì đó không phẳng. Những cuộc cách mạng sơ khởi này vẫn là nguồn gốc sự bối rối của tuổi thơ, mà chúng ta đã nhanh chóng vượt qua; và một thời

đại sẽ đến khi những khám phá gây sững sờ của Einstein trở thành những điều thông thường của tư duy đã được đem vào giáo dục.

Giải phóng tư duy của chúng ta khỏi các trói buộc của không gian và thời gian là một nguồn cảm hứng của nhà thơ và nhà thần bí, được nhìn hơi tỉnh táo bởi nhà khoa học khi anh ta có lý do quá rõ ràng để sợ sự mơ hồ của những ý tưởng lỏng lẻo rất có thể phát sinh. Nếu những người khác có sự nghi ngờ về một kết cục mong muốn, thì Einstein được giao phó nhiệm vụ chỉ ra con đường để chúng ta vứt bỏ được "những bám víu trên mặt đất vào tư duy". Và bằng cách cởi bỏ các trói buộc của chúng ta, ông đã để lại cho chúng ta những suy nghĩ chung không phải mơ hồ (như có thể có ai đó quan ngại) cho sự trầm tư ngây ngất của nhà thần bí, mà là một sơ đồ chính xác của cấu trúc thế giới để cổ vũ nhà vật lý.

4. Henri Poincaré

"Các Nguyên Lý của Vật Lý Toán" hay là Cuộc Khủng Hoảng của Ngành Vật Lý Toán

(1904)

Dưới đây là bài thuyết trình của Henri Poincaré tại Hội nghị về Nghệ thuật và Khoa học tại St. Louis, Missouri, Hoa Kỳ, năm 1904, một năm trước khi Einstein công bố thuyết tương đối hẹp. Bài này được đăng lại trong quyển La Valeur de la Science (Giá trị của khoa học) của Poincaré năm 1905. Ông đề cập đến cuộc khủng hoảng của ngành Vật lý thế giới, và có những nhận xét rất tiên tri liên quan đến những vấn đề của thuyết tương đối hẹp, nhưng đồng thời bài thuyết trình cũng cho thấy ông dính líu quá sâu vào thuyết ether, một sự cản trở khiến ông khó có thể đi đến hay tin vào thuyết tương đối như đã được Einstein trình bày. Dưới đây chúng tôi xin trích dịch những phần liên quan đến những vấn đề của thuyết tương đối. Giáo sư vật lý hạt Phạm Xuân Yêm ở Paris đã có nhã ý làm công việc dịch thuật quý báu này cho quyển sách.

Đâu là tình hình hiện nay của ngành vật lý toán? Đâu là

những vấn đề đang đặt ra của nó? Tương lai của nó sẽ ra sao? Nó đang trên đường thay đổi chẳng?

Mười năm nữa, mục tiêu và phương pháp của ngành này hiện ra đối với những người thừa kế trực tiếp của chúng ta sẽ y hệt như đối với chúng ta ngày hôm nay, hay ngược lại, mọi người sẽ chứng kiến một sự biến đổi tận gốc rễ? Đó là những câu hỏi mà chúng ta phải nêu lên khi chúng ta làm một cuộc khảo sát.

Đặt những câu hỏi thì dễ, nhưng giải đáp được thì khó...

Ngành vật lý toán của cha ông chúng ta đã làm chúng ta dần quen với những nguyên lý khác nhau, nhận diện được chúng dưới những cái vỏ bọc khác nhau mà chúng đã giấu mình dưới đó. Người ta đã so sánh chúng với những số liệu của thực nghiệm; người ta đã thấy lời lẽ diễn đạt phải được thay đổi thế nào để chúng phù hợp với số liệu; từ đây người ta đã mở rộng và củng cố chúng.

Như thế người ta phải đi đến việc xem chúng như là những dữ kiện của kinh nghiệm; khái niệm về lực xuyên tâm đã trở thành một giá đỡ vô ích, hay đúng hơn một sự cản trở, bởi vì cái khái niệm này đã làm cho các nguyên lý dự phần vào cái tính chất giả thiết của nó.

Các khuôn khổ do đó không bị vỡ, bởi vì chúng linh động, và đã được mở rộng ra; cha ông ta, những người đã lập nên chúng, đã không bỏ công vô ích, và chúng ta nhận ra trong khoa học ngày nay những nét tổng quát của bản phác họa mà cha ông ta đã vẽ nên.

Phải chẳng chúng ta đang bước vào đêm trước của một cuộc khủng hoảng thứ hai? Những nguyên lý mà chúng ta xây đắp sắp đến lượt bị đổ vỡ?...

Bây giờ chúng ta tới phần Nguyên lý Tương đối; nó không những được xác nhận bởi kinh nghiệm hàng ngày; không những nó là một hệ quả tất yếu của giả thiết về lực xuyên tâm, nó còn áp đặt lên lý trí lành mạnh của chúng ta một cách không sao cưỡng được, ấy vậy mà nó cũng bị đập phá.

Giá sử có hai vật thể mang điện tích; mặc dù đối với chúng ta chúng có vẻ như đứng yên nhưng thực ra cả hai chúng đều bị

chuyển động của trái đất kéo đi; mà một điện tích chuyển động, như Rowland đã chỉ cho chúng ta, thì tương đương với một dòng điện; như vậy hai vật thể mang điện tích sẽ tương đương với hai dòng điện song song cùng chiều và như vậy chúng phải hút nhau. Đo lường sức hút này, ta đo lường vận tốc của trái đất, không phải vận tốc đối với mặt trời hay những tinh tú cố định mà là vận tốc tuyệt đối.

Tôi biết rằng người ta sẽ nói không phải là vận tốc tuyệt đối đâu mà chỉ là vận tốc đối với ether thôi. Điều này thật không làm hài lòng ai cả! Chẳng phải đã rõ ràng từ một nguyên lý được hiểu như thế người ta sẽ không thể rút ra kết luận gì nữa hay sao? Nó không dạy ta thêm điều gì nữa, bởi vì nó không sợ bị phủ định gì nữa.

Nếu thành công trong việc đo đạc một cái gì, chúng ta sẽ có quyền tự do nói rằng đó không phải là vận tốc tuyệt đối; và nếu không phải là vận tốc đối với ether thì cũng là vận tốc đối với một chất lỏng mới lạ tràn đầy trong không gian.

Thực nghiệm cũng tìm cách phá hủy cách lý giải nguyên lý tương đối; tất cả các nỗ lực nhằm đo lường vận tốc của trái đất đối với ether đều đưa đến những kết quả phủ định. Lần này, ngành vật lý thực nghiệm đã trung thành với các nguyên lý hơn là ngành vật lý toán; các lý thuyết gia có thể vứt bỏ nó để có thể làm cho các quan điểm tổng quát khác của họ dung hợp nhau; nhưng thực nghiệm vẫn khẳng khẳng xác nhận kết quả phủ định trên.

Người ta thay đổi những phương cách đo lường, và rốt cuộc Michelson đã đạt tới độ chính xác ở mức độ tận cùng của nó, nhưng chẳng có gì mới cả. Chính vì để giải thích cái kết quả thực nghiệm bướng bỉnh ấy mà ngày nay những nhà toán học đã bị buộc phải huy động tất cả tài năng và sự khéo léo của họ.

Nhiệm vụ không dễ dàng, và nếu Lorentz đã giải quyết được nó, thì chỉ vì ông đã sử dụng đến nhiều giả thuyết.

Ý tưởng tài tình nhất là khái niệm thời gian cục bộ.

Tưởng tượng hai quan sát viên muốn điều chỉnh đồng hồ của họ bởi những tín hiệu quang học. Họ trao đổi tín hiệu với nhau; vì biết rằng ánh sáng truyền đi không tức thì nên họ bắt chúng

truyền chéo nhau. Khi trạm B nhận được tín hiệu của A, đồng hồ B không được phép chỉ cùng thời gian mà trạm A đã phát ra ánh sáng, mà là thời gian phải được cộng thêm khoảng thời gian tín hiệu truyền đi. Thí dụ khi trạm A gửi tín hiệu, đồng hồ của nó chỉ 0 giờ và B nhận được vào lúc t giờ. Hai bên điều chỉnh đồng hồ nếu sự chậm t giờ đó của B chính là thời gian truyền tín hiệu, và để kiểm chứng điều đó, trạm B gửi một tín hiệu khác khi đồng hồ của nó chỉ 0 giờ, và A sẽ nhận được tín hiệu khi đồng hồ của nó chỉ t giờ. Như vậy là hai đồng hồ được điều chỉnh.

Và quả thế, hai đồng hồ cùng chỉ một giờ ở cùng một thời điểm vật lý, nhưng với điều kiện là cả hai trạm A, B phải đứng yên. Trong trường hợp ngược lại, thời gian để truyền tín hiệu sẽ không còn bằng nhau cho cả hai phía nữa, bởi vì thí dụ trạm A chạy về phía ánh sáng phát ra từ B, trong khi đó B lại chạy xa khỏi cái tín hiệu phát ra từ A. Những đồng hồ điều chỉnh theo cách như trước sẽ không cho thời gian thực nữa; cái mà chúng chỉ báo, người ta có thể gọi là thời gian cục bộ; cái này sẽ chạy chậm hơn cái kia. Điều đó cũng không quan trọng gì, vì chúng ta không có cách nào để nhận ra cả. Tất cả các hiện tượng xảy ra ở A, thí dụ như thế, sẽ bị chậm đi, nhưng chúng đều chậm hết như nhau, và nhà quan sát không nhận ra vì đồng hồ của anh ta cũng chạy chậm; vậy đúng như nguyên lý tương đối bảo, người quan sát không có cách nào để biết anh ta đang yên tĩnh tuyệt đối hay chuyển động.

Nhưng cũng chưa đủ, người ta cần thêm những giả thiết bổ sung; người ta phải chấp nhận là những vật thể khi chuyển động bị ép lại đều theo chiều chuyển động của chúng. Một trong những đường kính của trái đất bị ngắn đi chừng $1/200.000.000$ do sự chuyển động của hành tinh chúng ta, trong khi đường kính khác vẫn giữ nguyên chiều dài bình thường. Vậy những khác biệt nhỏ như vậy bù trừ nhau. Còn giả thiết về các lực. Những lực này, trọng lực hay lực đàn hồi, sẽ bị giảm đi theo một tỷ lệ nào đó trong một thế giới chuyển động tịnh tiến đều, hay đúng hơn chỉ có thành phần của lực thẳng góc với đường tịnh tiến bị giảm, còn thành phần song song với nó thì không. Hãy lấy lại thí dụ của hai vật mang điện tích, chúng đẩy nhau nhưng đồng thời nếu cả hai bị kéo đi bởi một chuyển động tịnh tiến đều thì chúng có thể coi như tương đương với hai dòng điện chạy

song song cùng chiều, và như vậy chúng hút nhau. Sức hút bởi điện động học này sẽ khấu trừ chút ít cái sức đẩy ra của điện tĩnh học, và cái đẩy toàn phần yếu đi hơn trường hợp khi hai vật này ở trong trạng thái đứng yên. Nhưng vì để đo lường lực đẩy ra này, ta phải cân bằng nó bởi một lực khác, và tất cả những lực khác đều bị giảm thiểu đi theo cùng một tỷ lệ, cho nên chúng ta chẳng nhận thấy gì cả.

Hầu như mọi việc đều được dàn xếp, nhưng có phải tất cả những mối ngờ vực đều được giải tỏa chăng?

Cái gì sẽ xảy ra nếu ta có thể liên lạc không phải bằng tín hiệu quang học, mà hàng tín hiệu truyền đi với vận tốc khác với vận tốc ánh sáng? Nếu sau khi điều chỉnh hai đồng hồ bằng quang học, ta muốn kiểm tra chúng với tín hiệu mới mẻ này, ta sẽ nhận ra là có sự khác biệt, chúng tỏ có một chuyển động chung giữa hai trạm. Và những tín hiệu mới như thế là không khả dĩ chăng nếu ta thừa nhận với Laplace rằng trọng lực truyền đi với vận tốc nhanh gấp hàng triệu lần ánh sáng?

Vậy thì nguyên lý tương đối đã được bảo vệ kiên cường hơn trong suốt thời gian qua, nhưng chính sự mãnh liệt bỏ ra để bảo vệ nó chứng tỏ cuộc tấn công nghiêm trọng biết chừng nào.

Bây giờ chúng ta đề cập đến *nguyên lý Newton* về sự bình đẳng giữa tác dụng và phản tác dụng. Nguyên lý này liên hệ mật thiết đến nguyên lý trên, và hầu như sự sụp đổ của cái này cũng sẽ kéo theo sự sụp đổ của cái kia. Cho nên ta không ngạc nhiên là sẽ lại chứng kiến cũng bấy nhiêu khó khăn như thế.

Những hiện tượng điện từ, theo thuyết Lorentz, hình thành là do sự dịch chỗ của các hạt nhỏ mang điện tích, hay electron, chìm ngập trong một môi trường mà ta gọi là ether. Chuyển động của các electron này tạo nên những nhiễu loạn trong vùng ether gần nó; nhiễu loạn này truyền đi theo khắp hướng với vận tốc ánh sáng, và đến lượt những electron khác, lúc đầu bất động, cũng bị lay chuyển khi những nhiễu loạn truyền đến phần ether nằm bên cạnh chúng.

Những electron do đó tương tác với nhau, nhưng tác động đó không trực tiếp mà thông qua ether làm trung gian. Trong

những điều kiện đó, có thể có sự bù trừ giữa tác dụng và phản tác dụng không, ít ra đối với một quan sát viên chỉ quan tâm đến những chuyển động của vật chất, nghĩa là của electron, nhưng có thể nào bỏ qua các chuyển động của ether bởi anh ta không nhìn thấy nó? Rõ ràng là không thể được. Mà dẫu có sự bù trừ chính xác thì nó cũng không xảy ra đồng thời ngay lập tức được. Sự nhiễu loạn được truyền đi với một vận tốc hữu hạn, nó tác động lên electron thứ nhì khi electron đầu đã từ lâu yên tĩnh rồi. Electron thứ nhì chịu tác động chậm trễ của electron đầu, nhưng chắc chắn là vào thời điểm ấy electron thứ nhì không tác động lên electron đầu nữa vì chung quanh nó mọi cái đều yên tĩnh rồi.

Phân tích những sự kiện trên cho phép chúng ta nói chính xác hơn. Hãy tưởng tượng chẳng hạn một máy kích điện từ của Hertz giống những cái mà ta dùng trong máy điện báo vô tuyến. Máy kích này phát ra năng lượng theo khắp chiều hướng, nhưng chúng ta có thể ghép nó với một gương parabol như Hertz đã làm với nhiều máy kích điện nhỏ, mục đích để có thể phát năng lượng theo một hướng duy nhất.

Theo lý thuyết thì cái gì sẽ xảy ra? Máy kích này sẽ bị giạt lùi đi, vì nó có thể coi như một khẩu đại bác và năng lượng phát ra tựa như một viên đạn, nhưng cái này lại đối lập với nguyên lý Newton vì viên đạn bắn ra không có khối lượng, nó không phải là vật chất mà chỉ là năng lượng.

Sự kiện này cũng giống như một ngọn hải đăng mang gương phản chiếu bởi vì ánh sáng cũng chỉ là một nhiễu loạn của điện-từ trường. Ngọn hải đăng này phải giạt lùi vì ánh sáng nó chiếu ra giống như một viên đạn. Lực để làm cho ngọn hải đăng phải lùi lại là gì? Đó là cái người ta gọi là áp suất Maxwell-Bartholdi. Nó rất nhỏ và người ta khó nhọc lắm mới phát hiện được với những bức xạ kế rất nhạy, nhưng điều đó cũng đủ để chứng tỏ là áp lực đó có thực.

Nếu tất cả năng lượng phát ra từ máy kích điện rơi vào một máy thu, máy này xử sự như nó nhận được một sự va đập cơ khí đại diện cho sự bù trừ của máy kích bị giạt lùi; vậy phản lực sẽ bằng lực tác dụng, nhưng phản lực này lại xảy ra không đồng thời, máy thu sẽ chuyển động tiến lên, nhưng không cùng một lúc khi máy kích điện giạt lùi. Nếu năng lượng truyền đi mãi mà

không gặp máy thu nào, sự bù trừ sẽ không bao giờ xảy ra cả.

Có lẽ người ta cho rằng, khoảng không gian ngăn cách máy kích điện và máy thu mà nhiễu loạn phải chạy xuyên qua từ máy này đến máy kia, khoảng không gian đó chẳng rỗng, mà tràn đầy ether và cả không khí nữa, hay cả trong một không gian giữa các hành tinh có chứa một chất lỏng tinh rỗng nào đó; rằng vật chất này, cũng giống như một máy thu, sẽ nhận được một sự va đập vào thời điểm năng lượng ập lên, và nó cũng giạt lùi về khi sự nhiễu loạn rời bỏ nó. Điều này có thể cứu vãn nguyên lý Newton, nhưng lại không đúng.

Nếu năng lượng trong khi chuyển động lúc nào cũng gắn bó với một vật liệu, thì vật chất khi chuyển động mang theo ánh sáng với nó, và Fizeau đã chứng minh là không phải thế, ít nhất là đối với không khí. Đó chính là điều mà thực nghiệm của Michelson và Morley đã khẳng định từ độ ấy.

Người ta cũng có thể giả định rằng những chuyển động của vật chất thực sự được bù trừ chính xác bởi ether, nhưng điều đó cũng lại đưa đến cùng một nhận xét như trên. Nguyên lý được hiểu như thế có thể giải thích tất cả, bởi vì với bất kỳ những chuyển động nào quan sát được, lúc nào chúng ta cũng có khả năng tưởng tượng ra những chuyển động giả tưởng để bù trừ.

Nhưng nếu có thể giải thích được mọi điều thì nó lại không giúp ích ta tiên đoán cái gì hết; nó không cho phép ta chọn lựa giữa những giả thuyết khác nhau, vì nó đã giải thích ngay từ trước rồi. Vậy thì nó trở nên vô ích.

Và lại những giả thuyết cần thiết được đưa ra về những chuyển động của ether là không thỏa đáng lắm.

Nếu như những điện tích tăng lên gấp đôi, có lẽ đương nhiên ta sẽ mừng tượng vận tốc của nguyên tử ether cũng tăng lên như thế, và để có bù trừ, vận tốc trung bình của ether lại tăng gấp bốn lần.

Chính vì thế mà từ lâu tôi đã nghĩ rằng những hệ quả này của lý thuyết, vốn trái ngược với nguyên lý Newton, sẽ một ngày nào đó bị bỏ đi, vậy mà những thí nghiệm mới đây về chuyển động của electron phát ra bởi nguyên tố radium gần như lại muốn khẳng định chúng.

Tôi bàn đến *nguyên lý Lavoisier* về sự bảo toàn khối lượng. Thực tế đây là nguyên lý mà nếu đung đến nó thì chúng ta không khỏi làm lung lay ngành cơ học.

Mà rồi ngày nay một số người tin rằng, nguyên lý này đúng chỉ vì chúng ta quan tâm đến cơ học của vật chất chuyển động với vận tốc nhỏ thôi, nhưng nó không còn đúng nữa với những vật có vận tốc gần bằng ánh sáng. Và những vận tốc cao này, người ta tin, có thể thực hiện được; những tia âm cực và tia phóng xạ của radium đều được tạo nên bởi những hạt rất nhỏ, hay electron, di chuyển với vận tốc chắc chắn nhỏ hơn so với ánh sáng nhưng cũng đến một phần mười hay một phần ba của nó.

Những tia electron này đều bị lệch cong đi trong một điện hay từ trường, và khi so sánh những độ lệch đó ta có thể cùng lúc đo được cả vận tốc cùng khối lượng của electron (hay rõ hơn tỷ số của khối lượng trên điện tích). Nhưng khi thấy rằng những vận tốc đó đạt tới gần vận tốc ánh sáng, người ta nhìn nhận một hiệu chỉnh là cần thiết.

Những phân tử mang điện tích này không thể di chuyển mà không làm lay động môi trường ether; để chuyển động, chúng cần phải chiến thắng cả hai lực quán tính, lực của chính phân tử, và còn của ether nữa. Khối lượng tổng quát hay khối lượng biểu kiến mà ta đo lường do đó gồm có hai phần, khối lượng thực hay khối lượng cơ học của phân tử và khối lượng điện động học, đại diện cho quán tính của ether.

Những tính toán của Abraham và thực nghiệm của Kauffmann chứng minh cho thấy khối lượng cơ học thực sự không có, còn khối lượng của electron, hay ít nhất là các electron điện tích âm chỉ có nguồn gốc duy nhất là điện động học; điều đó buộc ta phải thay đổi định nghĩa của khối lượng; ta không thể phân biệt khối lượng cơ và khối lượng điện động học nữa, bởi vì cái thứ nhất biến mất, không có khối lượng nào khác ngoài quán tính điện động. Nhưng trong trường hợp này khối lượng không còn cố định nữa mà tăng theo vận tốc; hơn nữa, nó còn tùy thuộc vào hướng của chuyển động. Một vật thể chuyển động có vận tốc đáng kể sẽ không chống lại các lực áp lên nó nhằm kéo nó ra khỏi

quỹ đạo của nó với cùng một quán tính như chống lại các lực có khuynh hướng làm tăng hay giảm chuyển động nó trên quỹ đạo của nó.

Còn một phương sách nữa: những thành phần cuối cùng của vật thể là những electron, cái thì mang điện tích âm, cái thì mang điện tích dương. Electron âm không có khối lượng, điều đó đã được hiểu; nhưng electron dương, theo hiểu biết ít ỏi ngày nay của chúng ta, thì dường như lớn hơn nhiều. Có lẽ những electron dương ngoài khối lượng điện động học, chúng còn có khối lượng cơ học thật nữa. Khối lượng thật của một vật lúc đó sẽ là tổng cộng khối lượng cơ học của các electron dương này; các electron âm không được đếm; khối lượng được định nghĩa như vậy có thể là một hằng số.

Nhưng than ôi, phương sách này cũng vượt khỏi tầm tay của chúng ta. Hãy nhớ lại điều mà chúng ta nhận xét về nguyên lý tương đối và những cố gắng để bảo vệ nó. Không phải chỉ có nguyên lý là cần được cứu vãn mà những kết quả không thể nghi ngờ được từ các thí nghiệm của Michelson.

Để có thể giải thích được những kết quả đó, như chúng ta đã thấy ở trên, Lorentz buộc phải giả thiết là tất cả các lực bất kỳ nguồn gốc từ đâu phải bị giảm đi với cùng một hệ số khi ở trong một môi trường chuyển động thẳng đều. Nhưng điều đó cũng chưa đủ. Chưa đủ nếu điều đó chỉ đúng cho các lực thật, mà còn phải đúng thêm cho các lực của quán tính. Ông nói *khối lượng của tất cả các hạt đều bị ảnh hưởng ở cùng mức độ bởi sự chuyển động đều như những khối lượng điện động học của electron*.

Như vậy những khối lượng cơ học cũng phải biến thiên theo cùng các định luật như những khối lượng điện động học; chúng không thể nào là hằng số.

Tôi có cần nói thêm rằng sự sụp đổ của nguyên lý Lavoisier lồi theo nó sự sụp đổ của nguyên lý Newton? Điều này có nghĩa là trọng tâm của một vật cô lập chuyển động theo một đường thẳng; nhưng nếu không có khối lượng hằng số thì cũng chẳng có trọng tâm nữa, và chẳng ai biết vật đó thực sự là gì. Vì thế, như tôi đã nói ở trên, những thí nghiệm của những tia âm cực hầu như biện minh cho những ngờ vực của Lorentz về nguyên lý

Newton.

Từ những kết quả trên, nếu chúng được xác nhận, sẽ xuất hiện một ngành cơ học hoàn toàn mới được đặc trưng trên hết bởi điều này, rằng không thể có một vận tốc nào vượt qua được vận tốc của ánh sáng, cũng như không có nhiệt độ nào hạ xuống thấp hơn nhiệt độ 0° tuyệt đối, bởi vì các vật thể sẽ có một quán tính tăng dần lên để chống đối lại các nguyên nhân làm tăng tốc sự chuyển động của chúng, quán tính này trở thành vô hạn khi ta tiến đến gần vận tốc ánh sáng.

Đối với nhà quan sát, bị cuốn theo bởi một chuyển động đều mà anh ta không hay biết, không có một vận tốc biểu kiến nào vượt nổi ánh sáng; như vậy là một mâu thuẫn, nếu chúng ta nhớ lại rằng nhà quan sát ấy không sử dụng cùng một đồng hồ như người đứng yên mà một cái đồng hồ khác chỉ báo "thời gian cục bộ".

Chúng ta nay đối diện với một câu hỏi mà tôi chỉ đặt ra thôi. Nếu không có khối lượng nữa thì định luật Newton ra sao?

Khối lượng có hai mặt, nó vừa là một hệ số của quán tính, vừa là khối lượng hấp dẫn như một thừa số của lực hấp dẫn Newton. Nếu hệ số quán tính thay đổi, khối lượng hấp dẫn có thể cũng như thế không? Đó là câu hỏi...

Đứng trước sự sụp đổ của những nguyên lý, ngành vật lý toán sẽ có thái độ gì?

Trên hết, vấn đề là tìm ra được một lý thuyết thỏa mãn hơn về điện động học của những vật thể chuyển động. Đó chính là đề tài mà những khó khăn hội tụ lại, như tôi đã chứng tỏ khá đầy đủ ở trên; rõ ràng dù chúng ta có phải "chất đóng" các giả thuyết, nhưng chúng ta không thể thỏa mãn được tất cả những nguyên lý một lúc; cho đến nay, chúng ta đã cứu được cái này với điều kiện là phải hy sinh những cái kia; nhưng không phải mọi hy vọng đều tiêu tan. Chúng ta hãy lấy lý thuyết của Lorentz, xoay đổi nó theo đủ chiều, thay đổi nó dần dần và không chừng mọi việc sắp xếp đâu vào đấy.

Do đó, thay vì giả thiết rằng các vật thể khi chuyển động sẽ chịu một sự co lại theo chiều chuyển động, và cái co rút đó là cùng giống nhau cho tất cả mọi vật, bất kỳ bản chất của các vật

thể này và những lực tác dụng lên nó như thế nào, thì tại sao ta không đưa ra một giả thiết đơn giản và tự nhiên hơn?

Thí dụ chẳng hạn ta có thể tưởng tượng chính ether sẽ bị biến đổi khi nó ở trong chuyển động tương đối đối với môi trường vật chất mà nó xuyên qua, và ether khi biến đổi nó sẽ không truyền đi những nhiễu loạn với cùng một vận tốc theo khắp các hướng. Nó có thể truyền nhanh hơn những nhiễu loạn chuyển động song song cùng hay ngược chiều chuyển động, và chậm hơn những nhiễu loạn chuyển động theo hướng thẳng góc. Những bề mặt sóng sẽ không còn là hình cầu nữa mà là hình ellipsoid và chúng ta chẳng cần cái giả thiết co rút kỳ lạ của tất cả các vật nữa. Tôi chỉ kể điều này như một thí dụ thôi, bởi vì ta có thể thử vô hạn cách thay đổi.

Ta sẽ mở rộng ra theo hướng nào, điều đó chúng ta không thể dự kiến được; có thể lý thuyết động học chất khí sẽ được triển khai và dọn đường như mô hình cho những ngành khác. Khi đó, những sự kiện ban đầu thoáng trông như giản dị với chúng ta sẽ chỉ còn là tổng hợp của một số rất lớn những sự kiện sơ cấp chi phối bởi những định luật ngẫu nhiên để cho chúng quy về cùng một đích. Định luật vật lý như vậy sẽ mang một bộ mặt hoàn toàn mới lạ; nó sẽ không chỉ là một phương trình vi phân mà còn mang đặc tính của một định luật thống kê.

Có lẽ chúng ta phải xây dựng một nền cơ học mới chỉ vừa được hình dung chưa rõ nét trước mắt chúng ta, trong đó quán tính tăng lên với vận tốc, ánh sáng là giới hạn mà không vận tốc nào vượt qua được. Ngành cơ học thông thường sẽ rất đơn giản vẫn còn được bảo tồn như một xấp xỉ bậc nhất, bởi vì nó sẽ đúng đối với những vận tốc không lớn lắm, sao cho chúng ta vẫn còn tìm lại được động lực học cũ trong nền động lực học mới.

Chúng ta do đó không phải hối hận vì đã tin vào các nguyên lý, và, vì những vận tốc quá lớn đối với các công thức cũ luôn luôn chỉ là ngoại lệ, nên trong ứng dụng, một cách chắc chắn nhất, chúng ta làm như thể vẫn còn tiếp tục tin tưởng vào chúng. Chúng hãy còn rất hữu ích đến nỗi chúng ta phải cất giữ cho chúng một chỗ đứng. Hoàn toàn loại bỏ chúng, điều đó có

nghĩa là ta sẽ tự tước bỏ đi một trong những vũ khí quý báu. Để kết thúc, tôi muốn nói và nhấn mạnh rằng chúng ta chưa đến nỗi ấy, và chưa có gì chứng minh rằng chúng sẽ không bước ra khỏi trận chiến một cách thắng lợi và toàn vẹn.

S. Isaac Newton

(1642 - 1727)

Các Nguyên Lý Toán Học của Triết Học Tự Nhiên

(1687)

Năm 1687 cuốn sách có lẽ quan trọng nhất ra đời đánh dấu thời kỳ khoa học hiện đại của nhân loại, mang tên Các nguyên lý toán học của triết học tự nhiên (Philosophiae naturalis principia mathematica Tác giả của nó là Isaac Newton, giáo sư Lucas (thường được gọi theo tên của người sáng lập và đỡ đầu chiếc ghế giáo sư này) của khoa toán tại Đại học Cambridge. Cuốn sách thường được gọi tắt là Principia, Các nguyên lý.

Mục đích của Principia, như tên gọi của nó, là phát triển các cơ sở toán học để ứng dụng vào các vấn đề của triết học tự nhiên (khoa học tự nhiên), đặc biệt vào định luật hấp dẫn vạn vật, để làm sáng tỏ chúng một cách chính xác. Thời đại khoa học chính xác bắt đầu từ Galilei và đến Newton thì lên tới đỉnh cao. Để làm điều đó, Newton trước tiên dựng lên "sân khấu" không gian và thời gian mà ở đó các hiện tượng vật lý diễn ra. Ngay trong phần đầu của Principia, sau khi đưa ra các định nghĩa cần thiết, ông đã giải thích bản chất của thời gian và không gian trong mục Bình luận và Minh họa (Scholium) như được trích lại dưới đây. Ý tưởng đi tìm một không gian cố định tuyệt đối làm hệ quy chiếu, hay giả thiết có một cái như thế, là trung tâm suy nghĩ của ông. Cái thùng nước quay nổi tiếng của ông là một sự minh họa.

BÌNH LUẬN VÀ MINH HỌA

Cho đến bây giờ tôi đã trình bày các định nghĩa của các tên gọi ít được biết đến, và giải thích ý nghĩa mà tôi muốn chúng được hiểu trong phần trình bày sau đây. Tôi không định nghĩa *thời gian*, *không gian*, và *chuyển động*, như những cái đã được biết đến đối với mọi người. Tôi chỉ muốn lưu ý rằng, thông thường người ta quan niệm các đại lượng này không theo cách gì khác hơn là trong mối tương quan họ có đối với các giác quan. Và vì thế một số thành kiến nhất định hình thành, mà nếu muốn loại bỏ chúng, người ta cần phải phân biệt chúng thành các đại lượng tuyệt đối và tương đối, đúng thật^[112] và biểu kiến^[113], toán học và phổ thông^[114].

I. Thời gian tuyệt đối, đúng thực và toán học, tự nó và từ bản chất nó, chảy đều đặn mà không có quan hệ với một đối tượng ngoài, và dưới một tên khác, cũng còn được gọi là thời lượng^[115].

Thời gian tương đối, biểu kiến và phổ thông là một độ đo ngoài^[116], có thể cảm nhận được, hoặc chính xác, hay không đều nhau, của thời lượng thông qua chuyển động, đó là cái người ta thông thường quen sử dụng thay cho thời gian thực, như một giờ, một ngày, một tháng, một năm.

II. Không gian tuyệt đối, theo bản chất của nó, và không có mối liên hệ liên đới với mọi đối tượng ngoài, tồn tại luôn luôn giống nhau, và bất động.

Không gian tương đối là một độ đo hay một phần di động của không gian tuyệt đối, được giác quan chúng ta xác định bởi vị trí của nó đối với các vật thể khác, và thường được hiểu như không gian bất động, thí dụ như một phần không gian trong bề mặt quả đất, một phần của bầu khí quyển, hay của bầu trời, được xác định bởi vị trí của nó đối với quả đất. Không gian tuyệt đối và tương đối là như nhau về hình dạng và độ lớn, nhưng chúng không luôn luôn như nhau về số lượng. Nếu chẳng hạn quả đất chuyển động, thì không gian của bầu khí quyển chúng ta, cái vẫn giống nhau đối với quả đất, khi là phần này, khi là phần kia của không gian tuyệt đối mà bầu khí quyển đã được lồng vào, và cho nên, hiểu một cách tuyệt đối, nó luôn luôn thay đổi.

III. *Chỗ* ^[117] là một phần của không gian mà một vật thể chiếm lấy, và, tùy theo (tính chất của) không gian, là *tuyệt đối* hay *tương đối*.

Tôi nói, nó là một phần của không gian, nhưng không phải là địa điểm^[118], vị trí^[119] hay bề mặt bao quanh vật thể. Vì chỗ của các vật thể rắn bằng nhau^[120] luôn luôn bằng nhau, trong khi các bề mặt của chúng, do tính chất không giống nhau^[121] về hình thù, là thường không bằng nhau. *Vị trí* của một vật thể thực ra không có đại lượng, cũng không phải là chỗ như theo các đặc tính của chỗ. Sự chuyển động của cả cái toàn thể là đồng nhất với tổng số của các chuyển động của các phần riêng lẻ; cho nên sự thay đổi chỗ của cái toàn thể là đồng nhất với tổng số các thay đổi của các chỗ của các phần của nó, và vì lý do đó, nó là nội tại, và nằm trong cả vật thể.

IV. *Chuyển động tuyệt đối* là sự di chuyển của một vật thể từ một nơi tuyệt đối này đến một nơi tuyệt đối khác; *chuyển động tương đối* là sự thay đổi từ một nơi tương đối này đến một nơi tương đối khác.

Do đó, trong một chiếc tàu đang chạy, *chỗ tương đối* của một vật thể là phần của tàu mà vật thể đang chiếm, hay là phần của khoảng không mà vật thể chiếm lấy, và vì thế phần đó cùng lúc chạy theo chiếc tàu. *Sự yên tĩnh tương đối* là sự yên của vật thể trong cùng phần của tàu, hay trong cùng phần của không gian bên trong. Nhưng *sự yên tĩnh đúng thật, tuyệt đối*, ngược lại là sự yên của vật thể trong cùng phần của không gian bất động kia, trong đó chiếc tàu chính nó chuyển động cùng với không gian rộng của nó và với tất cả nội dung chứa đựng trong đó. Cho nên khi quả đất thực sự đứng yên, thì vật thể, cái đứng yên *tương đối* trong tàu, sẽ chuyển động *thực* và *tuyệt đối* với cùng vận tốc mà chiếc tàu đang chuyển động. Nhưng nếu quả đất cũng chuyển động, thì sự chuyển động *thực* và *tuyệt đối* của vật thể phát sinh một phần do chuyển động tương đối của chiếc tàu trên quả đất, một phần do chuyển động thực của quả đất trong không gian đứng yên; và nếu vật thể chuyển động tương đối trong tàu, thì chuyển động thực của nó phát sinh một phần do chuyển động thực của quả đất trong không gian yên tĩnh, và một phần do các chuyển động tương đối của chiếc tàu trên mặt đất, cũng như của

vật thể trong chiếc tàu; và từ hai chuyển động tương đối sau này mà hình thành chuyển động tương đối của vật thể trên quả đất.

Nếu chẳng hạn phần của quả đất, trong đó tàu đang ở, chuyển động về hướng Đông với một vận tốc là 10010 phần, trong khi chính chiếc tàu chuyển động bằng gió và buồm về phía Tây với một vận tốc là 10 phần, và nếu người thủy thủ di chuyển trong tàu về hướng Đông với vận tốc là 1 phần, thì anh ta chuyển động *thực* và *tuyệt đối* trong không gian bất động về hướng Đông với vận tốc là 10001 phần, và tương đối trên mặt đất về hướng Tây, với một vận tốc là 9 phần. [...]

Giống như thứ tự của các phần thời gian, thứ tự của các phần không gian cũng là bất biến. Nếu người ta làm chuyển động các phần kia ra khỏi chỗ của chúng, thì chúng (có thể nói như thế) sẽ xa rời khỏi chính chúng. Thời gian và không gian chính là các chỗ của chúng và cũng của mọi vật. Tất cả mọi vật được đặt vào thời gian theo thứ tự của sự nối tiếp nhau, và vào không gian theo thứ tự của địa điểm. Theo bản chất của chúng thì chúng là các chỗ; cho rằng các chỗ ban đầu của sự vật được chuyển động, đó là điều vô nghĩa. Cho nên đó là những chỗ tuyệt đối, và sự di chuyển từ một chỗ này đến một chỗ khác, đó chính là sự chuyển động tuyệt đối.

Tuy nhiên, vì những phần của không gian không được nhìn thấy, cũng không phân biệt được lẫn nhau bởi giác quan của chúng ta, nên chúng ta chỉ tiếp nhận các kích thước có thể tri giác được của chúng thay vì bản thân chúng. Từ vị trí và khoảng cách của các sự vật đến một vật thể được xem là bất động, chúng ta định nghĩa tất cả chỗ; và tiếp đến, chúng ta ước tính tất cả các chuyển động đối với các chỗ nhất định, trong chừng mực các vật thể di chuyển khỏi các chỗ đó. Và như thế, thay vì các chỗ và chuyển động *tuyệt đối*, chúng ta sử dụng chỉ những thứ *tương đối*, không phải không chính đáng trong công việc bình thường của con người; nhưng trong triết học tự nhiên chúng ta phải trừu tượng hóa lên từ các giác quan, và xem chính bản thân của sự vật, khác hơn những gì chúng ta đo đạc được từ chúng. Có thể xảy ra lắm trường hợp không có một vật thể đứng yên thực sự nào để chúng ta quy chiếu lên đó chỗ và chuyển động của những cái khác.

Nhưng chúng ta có thể phân biệt giữa yên tĩnh và chuyển động, tuyệt đối và tương đối, bằng những tính chất, nguyên nhân và hệ quả của chúng. Một tính chất của sự yên tĩnh tuyệt đối là các vật thể thực sự yên tĩnh sẽ yên tĩnh với nhau. Cho nên, vì có khả năng trong những vùng xa xôi của các vì sao cố định hay xa hơn nữa có thể có một vật thể yên tĩnh tuyệt đối; nhưng chúng ta không thể biết, xét từ vị trí của các vật thể này đến các vật thể khác trong các vùng của chúng ta, và có vật thể nào trong những vật thể đó vẫn giữ nguyên vị trí đối với vật thể ở xa, do đó sự yên tĩnh tuyệt đối không thể được xác định từ vị trí của những vật thể trong các vùng của chúng ta.

Một *tính chất* của chuyển động là, các phần, nếu chúng giữ nguyên các vị trí đã cho trước đối với cái toàn thể, sẽ tham gia vào chuyển động của cái sau. Bởi vì tất cả những phần của các vật thể chuyển động quay đều có khuynh hướng chuyển động xa khỏi trục chuyển động; và một cái đẩy của các vật thể chuyển động bắt nguồn từ những cái đẩy kết hợp lại của các phần riêng lẻ của chúng. Cho nên, nếu các vật thể (bao quanh)^[122] chuyển động, thì các phần yên tĩnh tương đối bên trong chúng cũng sẽ chuyển động theo. Vì thế, chuyển động thực và tuyệt đối của một vật thể không thể được xác định bởi sự di chuyển^[123] của nó từ các vật thể được xem như yên tĩnh. Chúng ta xem các vật thể ngoài^[124] không chỉ là yên tĩnh, mà chúng phải thật sự yên tĩnh; nếu không, tất cả những phần nằm trong đó, ngoài sự di chuyển của chúng ra khỏi vùng cận của các vật thể quay, cùng tham gia vào những chuyển động đúng thật của những vật thể sau (các vật thể quay). Nếu sự di chuyển này không xảy ra, thì chúng không đúng thật yên tĩnh, mà chỉ được xem là yên tĩnh. Những vật thể bao quanh có quan hệ với các phần nằm bên trong giống như phần ngoài của một cái toàn thể với phần bên trong, như lớp vỏ đối với cái lõi; nhưng nếu lớp vỏ chuyển động, cái lõi cũng sẽ chuyển động như một phần của cái toàn thể mà không tách rời xa khỏi vùng gần lớp vỏ.

Một tính chất gắn gũi với tính chất nói ở trên là khi một chỗ chuyển động thì vật thể nào được đặt ở đó cũng sẽ chuyển động với nó; và do đó một vật thể di chuyển từ một chỗ đang chuyển động, thì nó cũng chia sẻ chuyển động của chỗ của nó. Cho nên, tất cả những chuyển động diễn ra từ các chỗ đang chuyển động

không gì khác hơn là những phần của những chuyển động toàn thể và tương đối. Mỗi một chuyển động toàn thể sẽ được cấu thành bởi chuyển động của vật thể từ chỗ ban đầu của nó, và chuyển động của chỗ này ra khỏi chỗ của nó, v.v. cho đến khi chúng ta đi đến một chỗ không chuyển động, như trong thí dụ được đề cập ở trên của thủy thủ. Vì thế, các chuyển động toàn thể và tuyệt đối chỉ có thể được xác định bằng các chỗ đứng yên, và vì lý do này tôi đã quy chiếu các chuyển động tuyệt đối vào các chỗ đứng yên, và các chuyển động tương đối lên các chỗ chuyển động. Cho nên *các chỗ đứng yên* chỉ là những chỗ giữ nguyên cùng vị trí tương đối với nhau một cách vĩnh cửu, vì thế vẫn luôn không chuyển động, và chúng làm thành không gian mà tôi gọi là đứng yên.

Những *nguyên nhân*, mà qua đó các chuyển động thực và tương đối được phân biệt nhau, là các lực đã tác động lên các vật thể để gây ra chuyển động. Một chuyển động thực chỉ được gây ra hay được biến đổi bởi những lực tác động lên chính vật thể chuyển động, trong khi ngược lại các chuyển động tương đối có thể được gây ra hay biến đổi mà không cần các lực tác dụng lên vật thể này. Chỉ cần một lực nào đó tác động lên những vật thể khác mà vật thể trước có mối quan hệ quy chiếu; nếu các vật thể kia rút đi, thì mối quan hệ có thể cùng bị thay đổi theo, mối quan hệ đã tạo thành sự yên tĩnh và chuyển động *tương đối* của vật thể trước. Ngược lại, chuyển động *thực* của vật thể luôn luôn bị biến đổi bởi những lực tác động lên nó, trong khi chuyển động *tương đối* thì không nhất thiết phải bị biến đổi bởi những lực đó. Thực vậy, nếu cùng các lực ấy cùng tác động lên các vật thể khác, mà trên đó người ta quy chiếu vật thể kia, sao cho vị trí tương đối (giữa chúng) được giữ nguyên, thì điều kiện mà từ đó chuyển động tương đối được tạo thành sẽ được giữ nguyên. Cho nên, mỗi chuyển động tương đối có thể bị biến đổi khi chuyển động thực không thay đổi, và nó vẫn không bị biến đổi khi chuyển động thực thay đổi. Do đó, chuyển động thực không thể nào được tạo thành bởi những loại quan hệ như thế.

Các lực tác dụng mà qua đó chuyển động tương đối và tuyệt đối được phân biệt nhau, là các lực ly tâm từ trục của chuyển động tròn. Trong một chuyển động tròn chỉ thuần túy tương đối thì không có những lực này, nhưng trong một chuyển động tròn

thực và tuyệt đối, chúng sẽ lớn hơn hay nhỏ hơn tùy theo cường độ của chuyển động.

Tưởng tượng người ta treo một cái thùng vào một sợi dây rất dài, quay nó liên tục theo vòng tròn, cho đến khi sợi dây săn cứng lại; tiếp đến người ta đổ đầy nước vào nó, giữ nó và nước đứng yên. Nếu cái thùng, bằng một lực tác động thành linh, bị chuyển động tròn theo chiều ngược lại, và chuyển động này kéo dài, trong khi sợi dây được xoắn ra, thì bề mặt của nước lúc đầu phẳng như trước lúc chuyển động của thùng, nhưng sau đó, khi lực dần dần truyền chuyển động của nó vào nước, cái thùng sẽ làm cho nó (nước) bắt đầu chuyển động quay thấy rõ. Nước sẽ dần dần rời khỏi vùng tâm điểm, và dâng lên cao hơn ở vách thùng, làm thành một hình lõm (như tôi đã làm thí nghiệm). Khi chuyển động càng nhanh, nước càng dâng cao, cho đến lúc nó chuyển động quay nhanh như chính cái thùng, và trở thành đứng yên tương đối với thùng. Sự dâng lên của nước chứng tỏ khuynh hướng nó muốn xa dần trục chuyển động, và bằng một thí nghiệm như thế, chuyển động tròn thực và tuyệt đối của nước, trong trường hợp này hoàn toàn ngược chiều với chuyển động *tương đối*, có thể được nhận ra và đo đạc. Lúc đầu, khi chuyển động *tương đối* của nước trong thùng có cường độ lớn nhất, nó chưa gây ra khuynh hướng rời xa khỏi trục của nước; nước không tỏ ra có khuynh hướng tiến về vùng ngoại vi bằng cách dâng lên cao về phía thành thùng mà vẫn còn là mặt phẳng, và do đó chuyển động vòng tròn *thực* của nó chưa bắt đầu. Nhưng sau đó, khi chuyển động tương đối của nước giảm, sự dâng lên ở vùng vách thùng cho thấy khuynh hướng của nước rút đi khỏi trục; và khuynh hướng này chứng minh chuyển động vòng tròn *thực* của nước liên tục tăng lên, cho đến khi khuynh hướng này đạt tới trị số cao nhất khi nước tự nó đứng yên *tương đối* trong thùng. [...]



Thùng nước chuyển động quay của Newton

(Nguồn: Banesh Hoffmann, *Einsteins Ideen*, tr.52)

Những đại lượng *tương đối* do đó không phải là những đại lượng tự nó như chúng đã mang tên, nhưng là những độ đo có thể tri giác được (đúng thực hay nhầm lẫn), mà người ta sử dụng thay vì những đại lượng đo được. Nhưng nếu từ sự sử dụng này mà ý nghĩa của các từ được định nghĩa, thì thực ra dưới những cái tên *thời gian*, *không gian*, *chỗ* hay *chuyển động* người ta hiểu những độ đo có thể tri giác được; và nếu những đại lượng đo được hiểu dưới dạng đó, thì cách diễn đạt sẽ tỏ ra khác thường và

thuần túy có tính chất toán học.

Hơn nữa, ai diễn giải các từ ngữ này thành các đại lượng đo được người đó vi phạm tính chính xác của ngôn ngữ, cái đáng lẽ cần phải được gìn giữ chính xác. Và ai lẫn lộn các đại lượng *đúng thật* với các độ đo *tương đối* và phổ thông của cùng những đại lượng, người đó đã không ít làm ô uế các chân lý toán học và triết học tự nhiên.

Nhận diện được các chuyển động *thực* của các vật thể, và phân biệt được rõ với các chuyển động *không thực*, đó là một việc thực ra rất khó; bởi vì các phần của không gian bất động, mà trong đó các vật thể đang chuyển động, là khó có thể được nhận diện bằng giác quan. Nhưng công việc không phải hoàn toàn tuyệt vọng. Bởi vì chúng ta có một số lý lẽ để dẫn dắt, một phần từ các chuyển động biểu kiến làm thành những sự khác biệt với các chuyển động thực; một phần từ các lực, nguyên nhân và hệ quả của các chuyển động thực. Chẳng hạn nếu hai quả cầu, được giữ ở một khoảng cách cho trước bằng một sợi dây nối liền chúng, được chuyển động quay xung quanh trọng tâm của chúng, chúng ta có thể từ sức căng của dây nhận ra khuynh hướng của hai quả cầu rời bỏ trục chuyển động của chúng, và từ đó có thể tính toán cường độ của chuyển động vòng tròn của chúng. Nếu giờ người ta đem các lực bằng nhau bất kỳ cùng một lúc áp lên hai mặt của các quả cầu để làm tăng hay chậm lại chuyển động vòng tròn của chúng, thì căn cứ vào sự tăng lên hay giảm xuống của độ căng của sợi dây người ta có thể suy ra sự tăng lên hay giảm xuống của chuyển động chúng; và từ đấy có thể nhận diện ra các mặt nào của các quả cầu mà các lực phải tác dụng lên để có chuyển động mạnh nhất; nghĩa là, tìm ra được các mặt sau, hay các mặt sẽ tiếp theo sau chúng trong chuyển động vòng tròn. Khi đã nhận ra được các mặt tiếp theo, và do vậy các mặt trước đó, thì chúng ta sẽ có thể nhận ra chiều chuyển động. Bằng cách này, chúng ta có thể tìm thấy không những đại lượng mà cả chiều của chuyển động vòng tròn, mặc dù trong một không gian rộng vô cùng lớn, ngay khi không có cái gì ở bên ngoài hay khả dĩ tri giác được để có thể so sánh chúng với các quả cầu. Nhưng bây giờ, nếu người ta đặt vào một không gian vài vật thể ở xa, và để cho chúng luôn luôn giữ nguyên vị trí cho trước với nhau, như các ngôi sao cố định trong vùng trời chúng ta chẳng hạn, thì từ

sự di chuyển tương đối của các quả cầu giữa các vật thể kia, chúng ta sẽ không xác định được chuyển động thuộc về các quả cầu hay các vật thể. Nhưng nếu chúng ta quan sát sợi dây, và thấy độ căng của nó đúng như chuyển động của các quả cầu đòi hỏi, thì từ đó chúng ta có thể kết luận rằng các quả cầu chuyển động và các vật thể đứng yên; và sau cùng, từ sự di chuyển của các quả cầu giữa các vật thể chúng ta suy ra được chiều hướng của chuyển động. Nhưng làm sao tìm ra được các chuyển động đúng thật từ các nguyên nhân và hệ quả, cũng như từ các sự khác biệt có tính cách biểu kiến của chúng và ngược lại, làm sao tìm ra được các nguyên nhân và hệ quả từ những chuyển động đúng thật hay biểu kiến, những điều đó sẽ được cắt nghĩa chi tiết hơn trong khảo luận này. Chính vì mục đích này mà tôi đã viết ra nó.

6. Ernst Mach

(1838 - 1916)

Lịch Sử Cơ Học – Được Trình Bày Dưới Dạng Phê Phán

(1883)

Cuối thế kỷ XIX giới khoa học đã tin tưởng mãnh liệt rằng khoa học đã đạt đến sự hiểu biết cuối cùng của sự vật, tòa nhà vật lý đã hoàn thiện với thuyết cơ học của Newton và thuyết điện từ của Maxwell, không còn vấn đề gì lớn để nghiên cứu nữa, ai cũng nghĩ rằng khoa học đã đi đúng đường của nó, Chỉ có một số ít người mới cảm thấy nền tảng của vật lý là không ổn, và cần phải có một sự thay đổi cơ bản nhanh chóng.

Một trong những người đó là nhà vật lý kiêm triết học Ernst Mach của Áo. Trong quyển sách nổi tiếng của ông mang tên "Lịch sử Cơ học – Được trình bày dưới dạng phê phán" (Die Mechanik in ihrer Entwicklung: Historisch-kritisch dargestellt) được xuất bản năm 1883, Mach đã "thách thức" quan điểm của Newton về những khái niệm như thời gian và không gian tuyệt đối, và khẳng định tính chất tương đối của chúng. Ảnh hưởng của Mach lên Einstein trong thuyết tương đối của ông được ông xác nhận nhiều lần. "Cuốn sách này", Einstein viết trong một bài tự thuật năm

1946, "đã có một ảnh hưởng sâu đậm lên tôi". Dưới đây là một số đoạn trích từ quyển sách.

1. Trong phần bình luận và minh họa (scholium của Newton nói trên) mà ông đã đặt liền vào sau các định nghĩa, Newton đã phát biểu những quan điểm của ông về thời gian và không gian mà chúng ta cần phải xem xét chi tiết hơn. Để làm việc này, chúng ta sẽ trích dẫn nguyên văn, chỉ những đoạn tuyệt đối cần thiết đã đặc trưng các quan điểm của Newton... [xem những đoạn trên của Newton]

2. Người ta có cảm tưởng rằng Newton trong những đoạn bình luận được trích trên, dường như vẫn còn chịu ảnh hưởng của triết học trung cổ, như thể ông *không trung thành* với chủ đích của ông, là chỉ xem xét những *cái thực tồn* ^[125]. Nếu chúng ta nói một vật A thay đổi theo thời gian, chúng ta đơn giản nghĩ rằng các điều kiện xác định một vật A tùy thuộc vào các điều kiện xác định một vật B khác. Các dao động của con lắc diễn ra *theo thời gian*, khi sự dịch chuyển của nó *lệ thuộc* vào vị trí của quả đất. Bởi vì khi quan sát con lắc, chúng ta không cần để ý đến sự lệ thuộc vào vị trí của quả đất, nhưng có thể so sánh nó với bất cứ một vật nào khác xung quanh (mà các trạng thái của nó dĩ nhiên cũng lại lệ thuộc vào vị trí của quả đất), cho nên dễ hình thành ảo tưởng rằng tất cả những vật mà chúng ta dùng để so sánh là không thiết yếu. Đúng vậy, chúng ta có thể, khi quan sát chuyển động con lắc, hoàn toàn bỏ quên những vật còn lại của ngoại cảnh và thấy ở mỗi vị trí của con lắc những suy nghĩ và cảm xúc của chúng ta lại khác đi. Cho nên, thời gian dường như là một cái gì đặc biệt và độc lập mà vị trí của con lắc tùy thuộc vào sự diễn biến của nó, trong khi các vật khác mà chúng ta chọn tùy ý để làm sự so sánh dường như chỉ đóng vai trò tình cờ, hoàn toàn thứ yếu. Nhưng chúng ta không được phép quên rằng tất cả mọi vật trên thế giới đều có mối liên hệ với nhau, tùy thuộc lẫn nhau, cho nên ngay chúng ta, cùng với những suy nghĩ của chúng ta, cũng là một phần của tự nhiên. Việc *đo lường* những sự thay đổi của sự vật *theo thời gian* là hoàn toàn vượt quá giới hạn và khả năng của chúng ta. Đúng hơn, thời gian là một sự trừu tượng hóa mà chúng ta đã đạt tới thông qua những biến đổi của sự vật, bởi vì chúng ta không bị ràng buộc vào một thước đo *nhất định* nào cả, bởi vì tất cả mọi vật đều nối kết lẫn nhau.

Chúng ta gọi một chuyển động là đều nếu ở đó các gia lượng^[126] bằng nhau của đoạn đường vạch ra tương ứng với những gia lượng bằng nhau của đoạn đường vạch ra của một chuyển động chúng ta lấy làm so sánh, chẳng hạn chuyển động quay của quả đất. Một chuyển động, nếu đem so sánh với một chuyển động khác, có thể đều. Nhưng câu hỏi, một chuyển động tự nó có đều hay không, là vô nghĩa. Cũng vô nghĩa như thế, khi ta nói đến một "thời gian tuyệt đối" - *một thời gian độc lập* với mọi thay đổi. Thời gian tuyệt đối này không thể được đo bằng sự so sánh với bất cứ chuyển động nào; do đó nó không có bất cứ giá trị thực tiễn hay khoa học nào, không ai có thẩm quyền nói rằng anh ta biết về nó. Thời gian là một khái niệm "siêu hình" vô bổ. [...]

Chúng ta đã đi đến được ý tưởng thời gian – để diễn tả ngắn gọn và dễ hiểu – bằng mối liên hệ của nội dung chứa đựng trong vùng của bộ nhớ với nội dung chứa đựng trong vùng của tri giác chúng ta. Khi chúng ta nói thời gian trôi đi theo một nghĩa nào đó, chúng ta nghĩ rằng các sự kiện vật lý (và do đó các sự kiện sinh lý học) chỉ diễn ra theo một nghĩa nào đấy nhất định. Các sự khác biệt về nhiệt độ, về điện, về mức^[127] nói chung, nếu để cho chúng tự nhiên, sẽ không phát triển lớn ra, mà nhỏ lại. Nếu chúng ta nghĩ đến hai vật thể ở nhiệt độ khác nhau được đặt tiếp xúc nhau và để tự chúng hoạt động, chúng ta sẽ thấy sự khác biệt của nhiệt độ lớn hơn trong vùng hồi ức^[128] sẽ trùng khớp với các sự khác biệt nhỏ hơn của nhiệt độ trong vùng tri giác^[129], không phải ngược lại. Trong tất cả những cái này hiển hiện lên một mối liên hệ sâu xa và đặc thù giữa các sự vật. Đòi hỏi vào thời điểm hiện tại một sự làm sáng tỏ hoàn toàn, theo cách thức của triết học tư biện, có nghĩa là muốn dự đoán được những kết quả của một ngành nghiên cứu đặc biệt trong tương lai, nghĩa là một ngành khoa học tự nhiên được hoàn thiện hóa. [...]

3. Các quan điểm tương tự liên quan đến thời gian được phát triển bởi Newton đối với không gian và chuyển động^[130]...

Nếu trong một hệ thống không gian vật chất có nhiều khối lượng với những vận tốc khác nhau, và chúng có thể tác dụng hỗ tương với nhau, thì đối với chúng ta các khối lượng này tượng trưng cho các lực. Chúng ta chỉ có thể biết được các lực này lớn

như thế nào khi chúng ta biết được các vận tốc mà các khối lượng cần phải được đưa lên tới đó. Các khối lượng *đứng yên* cũng là các lực, nếu không phải *tất cả* các khối lượng đứng yên. Chúng ta chẳng hạn nghĩ đến cái thùng nước chuyển động quay của Newton lúc nước trong đó chưa quay. Nếu khối lượng m có vận tốc v_1 muốn được đưa lên vận tốc v_2 thì nó cần đến một lực bằng $p = m(v_1 - v_2)/t$, hay là một công lao động $ps = m(v_1^2 - v_2^2)$. *Tất cả* các khối lượng, *tất cả* các vận tốc, và do đó *tất cả* các lực đều là tương đối. Chúng ta không thể có một quyết định nào về cái tương đối hay cái tuyệt đối, dù có bị bắt buộc làm điều này, để từ đó có thể rút ra được một lợi ích tri thức hay một lợi ích nào khác. Nếu vẫn còn có các tác giả hiện đại tự để cho mình bị cảm dỗ bởi các lý lẽ của Newton lấy từ thùng nước để phân biệt chuyển động tương đối và tuyệt đối, đó là vì họ không nghĩ rằng hệ thống thế giới được cho chúng ta *một lần*, trong khi quan điểm của Ptolemy hay Copernicus lại là những cách lý giải *của chúng ta*, và cả hai đều là thực tồn như nhau cả. Hãy cố gắng giữ yên thùng nước Newton, và cho quay bầu trời các sao cố định, rồi chứng minh sự vắng mặt của các lực ly tâm.

4. Việc Newton đã hành động, trong các suy nghĩ vừa được trình bày, đi ngược lại với chủ đích của ông, rằng chỉ nghiên cứu *những cái thực tồn* thôi, điều đó hầu như không cần phải nói ra. Về không gian tuyệt đối và chuyển động tuyệt đối, không ai có thẩm quyền để phát biểu điều gì cả. Chúng là những sản phẩm của tư duy thuần túy chứ không phải sản phẩm của thực nghiệm. Tất cả những nguyên lý của chúng ta trong cơ học, như đã được chứng minh chi tiết, là những tri thức thực nghiệm về các vị trí và chuyển động *tương đối* của các vật thể. Ngay trong những vùng mà ở đó người ta xem chúng là có hiệu lực, chúng cũng không thể và không được phép chấp nhận mà không có sự kiểm chứng thực nghiệm trước đó. Không ai có thẩm quyền nói rộng những nguyên lý này vượt qua khỏi giới hạn của kinh nghiệm. Thực tế, một sự nói rộng như thế cũng là vô nghĩa, bởi vì không ai biết áp dụng nó thế nào.

Chúng ta tất yếu phải giả thiết rằng khúc quanh mới của Copernicus trong cách nhìn hệ thống thế giới đã để lại những dấu ấn sâu đậm trong tư duy của *Galilei* và *Newton*. Nhưng trong khi *Galilei* chọn không gian của các vì sao cố định như một hệ tọa

độ mới một cách hồn nhiên trong lý thuyết thủy triều của ông, thì chúng ta thấy *Newton* lại nghi ngờ, không biết một vì sao cố định cho trước có phải đứng yên thực hay là biểu kiến^[131]. Điều này dường như gây ra cho ông sự khó khăn để phân biệt giữa chuyển động thực (tuyệt đối) và chuyển động biểu kiến (tương đối). Từ đó ông thấy bị bắt buộc phải dựng lên khái niệm *không gian tuyệt đối*. Bằng những khảo sát tiếp tục theo hướng này - thảo luận thí nghiệm của các quả cầu quay được nối liền nhau bằng một sợi dây, và thí nghiệm của cái thùng nước quay^[132] - ông ấy tuy không tin tưởng một sự chuyển động tuyệt đối nào, nhưng có thể phát hiện ra một chuyển động quay tuyệt đối. Dưới cái tên chuyển động quay tuyệt đối ông ta hiểu một chuyển động quay đối với các vì sao cố định, ở đó lực ly tâm luôn luôn có thể được chứng minh hiện hữu. "Làm sao chúng ta kết luận được về chuyển động thực từ các nguyên nhân, hệ quả, và những sự khác biệt biểu kiến; và *ngược lại*, làm sao từ các chuyển động, thực hay biểu kiến, chúng ta kết luận được về nguyên nhân và tác dụng: những điều đó sẽ được giải thích chi tiết hơn trong phần khảo luận sau đây", *Newton* nói trong phần bình luận và minh họa ở phần cuối của các định nghĩa. Không gian đứng yên của các vì sao cố định dường như cũng đã gây một ấn tượng nhất định lên *Newton*. Hệ thống quy chiếu tự nhiên đối với ông là hệ thống có bất kỳ chuyển động tịnh tiến đều không quay (đối với không gian của các sao cố định). Phải chăng những lời trích dẫn trong dấu ngoặc vừa rồi chưa gây được ấn tượng, rằng *Newton* đã vui mừng đi đến được những câu hỏi ít nan giải hơn và có thể được kinh nghiệm kiểm chứng?

Chúng ta hãy đi vào chi tiết. Nếu chúng ta nói một vật thể K thay đổi hướng và vận tốc của nó chỉ do ảnh hưởng của một vật thể khác K' , thì chúng ta không thể có được nhận thức này nếu không có sự mặt của những vật thể khác A, B, C, \dots để cho chuyển động của vật thể K được đánh giá dựa trên chúng. Do đó thực tế chúng đã nhận thức một mối quan hệ của vật thể K với A, B, C, \dots . Nếu bây giờ tình hình chúng ta quên đi A, B, C, \dots và muốn nói về sự vận hành của K trong không gian tuyệt đối, thì chúng ta sẽ làm hai lần sai phạm. Lần thứ nhất, chúng ta sẽ không thể biết K vận hành thế nào trong sự vắng mặt của A, B, C, \dots ; lần thứ hai, chúng ta sẽ thiếu phương tiện để đánh giá sự vận hành của vật

thể K , và kiểm tra phán đoán của chúng ta, điều sau đó sẽ mất đi mọi ý nghĩa khoa học. [...]

Chuyển động của một vật thể K chỉ có thể được đánh giá đối với các vật thể khác A, B, C, \dots . Nhưng vì chúng ta luôn luôn có đủ một số các vật thể để tùy ý sử dụng, và chúng đứng yên tương đối nhau, hoặc chỉ thay đổi vị trí rất chậm, do đó chúng ta không lệ thuộc vào một vật thể *nhất định*, cho nên chúng ta khi thì bỏ qua được vật thể này, khi thì bỏ qua được vật thể kia. Bằng cách này người ta dần dần vững tin cho rằng các vật thể sau nói chung là không quan trọng.

Rất có thể các vật thể cô lập A, B, C, \dots chỉ đóng vai trò phụ trong việc xác định chuyển động của vật thể K , và chuyển động được xác định thông qua môi trường mà K đang ở trong đó. Trong trường hợp đó, người ta phải thay thế không gian tuyệt đối của Newton bằng môi trường kia. Không nghi ngờ Newton đã không nghĩ đến quan niệm này. Hơn nữa, có thể dễ dàng chứng minh rằng bầu không khí không phải là môi trường xác định được chuyển động kia. Chúng ta do đó phải tưởng tượng đến một môi trường khác, chẳng hạn đến môi trường lấp đầy không gian mà hiện tại chúng ta chưa có hiểu biết thích đáng về sự cấu tạo và các quan hệ vận hành của nó đối với các vật thể chứa trong đó. Thực ra một trạng thái sự vật như thế tự nó không phải là không có thể. Những nghiên cứu thủy động lực học mới nhất cho thấy, một vật thể rắn trong một chất lỏng không ma sát chỉ chịu một sức cản khi vận tốc của nó *thay đổi* thôi. Tuy kết quả này được suy ra một cách lý thuyết từ khái niệm về quán tính; nhưng nó có thể được xem như dữ kiện sơ khởi từ đó chúng ta có thể khởi đầu. Mặc dù với khái niệm này chúng ta trước tiên chưa thể làm gì được trong thực tế, nhưng người ta có thể hy vọng sẽ hiểu biết nhiều hơn về môi trường giả định này trong tương lai; và xét về mặt khoa học, nó vẫn còn quý hơn nhiều so với ý tưởng tuyệt vọng về không gian tuyệt đối. Nếu chúng ta nghĩ, chúng ta không thể bỏ đi các vật thể cô lập A, B, C, \dots , nghĩa là chúng ta không thể xác định bằng thí nghiệm để biết xem vai trò của chúng là chính yếu hay thứ yếu, rằng đến nay chúng vẫn là phương tiện duy nhất và cùng đầy đủ cho sự định hướng về các chuyển động và cho sự mô tả những dữ kiện cơ học, thì có lẽ chúng ta hãy nên xem tất cả các chuyển động

như được xác định bởi những vật thể này.

5. Bây giờ chúng ta hãy xem một điểm mà Newton dường như rất có lý trong việc phân biệt giữa chuyển động tương đối và tuyệt đối. Nếu quả đất có một chuyển động *tuyệt đối* xung quanh trục của nó, thì sẽ có các lực ly tâm phát sinh trên quả đất; nó sẽ bị dẹt đi, gia tốc của lực hấp dẫn bị giảm đi ở xích đạo, mặt phẳng của con lắc Foucault sẽ bị quay, v.v. Tất cả những hiện tượng này sẽ biến mất khi quả đất đứng yên và các thiên thể còn lại quay tuyệt đối xung quanh nó, để sao cho cùng một chuyển động quay *tương đối* hình thành. Đó thực ra chính là trường hợp, nếu chúng ta *ngay từ đầu* xuất phát từ quan niệm của một không gian tuyệt đối. Nhưng nếu chúng ta vẫn đứng trên miếng đất của các dữ kiện, thì chúng ta chỉ biết các không gian và chuyển động *tương đối* thôi. Một cách tương đối, nếu không kể đến môi trường chưa được biết và được chú ý của vũ trụ, các chuyển động trong hệ thống thế giới là giống nhau theo quan điểm của Ptolemy hay của Copernicus. Hai cách nhìn cũng cùng *đúng* như nhau, chỉ có điều cách nhìn sau là đơn giản và *thiết thực hơn*. Hệ thống thế giới không phải được cho ta *hai lần*, với quả đất đứng yên và quả đất chuyển động quay; nhưng chỉ được cho *một lần*, với những chuyển động tương đối duy nhất của nó có thể xác định được. Do đó chúng ta không thể nói, sự vật sẽ ra sao nếu như quả đất không quay. Chúng ta có thể lý giải một trường hợp đã được cho ta, nhưng theo nhiều cách khác nhau. Tuy nhiên, nếu chúng ta lý giải thế nào mà lại rơi vào mâu thuẫn với kinh nghiệm, thì đó là vì chúng ta lý giải sai. Các định luật cơ bản của cơ học do đó có thể được quan niệm thế nào để cho các lực ly tâm cũng hình thành ngay đối với các chuyển động quay tương đối.

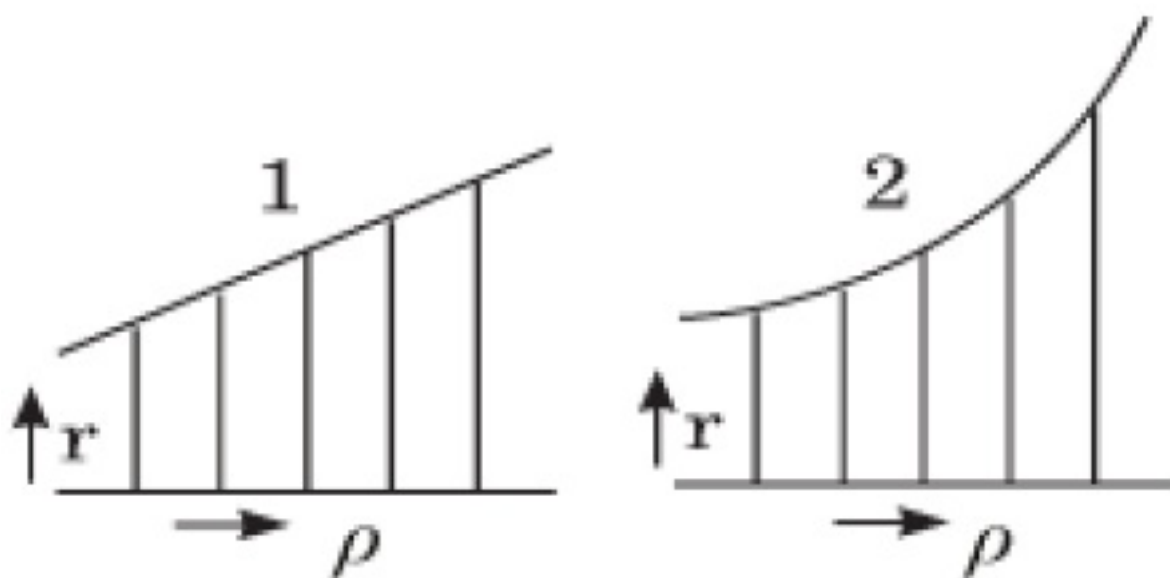
Thí nghiệm thùng nước quay của Newton đơn giản chỉ ra cho chúng ta biết chuyển động quay tương đối của nước đối với *thành thùng* không gây nên các lực ly tâm đáng kể, nhưng những lực này *được* gây nên bởi chuyển động quay tương đối của nó đối với khối lượng của quả đất và đối với các thiên thể còn lại. Không ai có đủ thẩm quyền để nói rằng, xét về chất lượng và số lượng, thí nghiệm sẽ diễn ra sao, nếu thành thùng ngày càng tăng lên về độ dày và khối lượng, và cuối cùng dày đến nhiều dặm. Chỉ có một thí nghiệm trước mắt, và nhiệm vụ của chúng ta phải làm cho nó phù hợp với những dữ kiện còn lại quen thuộc với chúng

ta, chứ không phải phù hợp với những sự thù ghét tùy tiện của óc tưởng tượng.

6. [...] Sự vận hành của các vật thể trên mặt đất đối với quả đất được quy về sự vận hành của quả đất đối với các thiên thể ở xa. Nếu chúng ta muốn khẳng định rằng chúng ta hiểu biết về các vật thể chuyển động nhiều hơn là hiểu biết về sự vận hành giả định được gợi ra bởi kinh nghiệm đối với các thiên thể, thì chúng ta sẽ tự chuốc lấy tội không thành thật. Do đó, nếu chúng ta nói một vật thể giữ nguyên chiều và vận tốc của nó *trong không gian*, thì sự khẳng định đó chỉ là một sự quy chiếu viết tắt về *cả vũ trụ*. Người phát minh của nguyên lý được phép sử dụng cách diễn tả viết tắt này, vì anh ta biết, rằng việc thực hiện sự quy chiếu chi tiết thường không gặp sự cản trở nào. Nhưng anh ta sẽ bó tay, nếu những khó khăn kia xuất hiện, chẳng hạn nếu thiếu đi các vật thể cần thiết đứng yên với nhau. [...]

7. Các suy nghĩ vừa được trình bày chứng minh rằng, chúng ta không cần thiết phải quy chiếu định luật quán tính lên một không gian đặc biệt tuyệt đối nào. Đúng hơn chúng ta nhận thức rằng, theo cách diễn tả thông thường, những khối lượng có tác dụng lực lên nhau, cũng như những khối lượng không có tác dụng lực lên nhau, tất cả những lực đó, xét về mặt gia tốc, có những mối quan hệ rất giống nhau; và thật ra, chúng ta có thể xem *tất cả* các khối lượng đều có liên hệ với nhau. *Các gia tốc* đóng vai trò nổi bật trong quan hệ của các khối lượng, điều đó phải được chấp nhận như dữ kiện thực nghiệm; nhưng điều đó không loại trừ các nỗ lực nhằm *soi sáng* dữ kiện này bằng cách so sánh nó với các dữ kiện khác, để qua đó các quan điểm mới có thể phát sinh. Trong tất cả các diễn biến của tự nhiên, sự *khác biệt* [133] của các đại lượng nhất định u đóng một vai trò quyết định. Sự khác biệt về nhiệt độ, hay của hàm số thế, v.v. gây ra một quá trình tự nhiên nhằm san bằng các sự khác biệt. Các biểu thức quen thuộc $d^2 u/dx^2$, $d^2 u/dy^2$, $d^2 u/dz^2$, có tính chất quyết định cho tính cách của sự san bằng, có thể được xem như độ đo của sự lệch đi của trạng thái [134] của một điểm ra khỏi trị số trung bình của các trạng thái của môi trường xung quanh, trị số trung bình mà điểm kia có khuynh hướng tiến đến. Gia tốc của các khối lượng cũng có thể được quan niệm theo một cách tương tự. Những khoảng cách lớn của các khối lượng, những thứ không

hệ có một quan hệ lực^[135] đặc biệt nào cả, thay đổi *tỷ lệ với nhau*. Do đó nếu chúng ta điền một khoảng cách nhất định ρ lên trục hoành độ, một khoảng cách r khác làm tung độ, chúng ta sẽ có một đường thẳng (xem Ảnh). Vậy thì mỗi một tung độ r , tương ứng với một trị số ρ , sẽ biểu thị trị số trung bình của các tung độ lân cận. Nếu các vật thể có một quan hệ lực với nhau, thì qua đó một trị số $d^2 r/dt^2$ sẽ được xác định, mà chúng ta, phù hợp với những điều ghi chú nói trên, có thể thay thế bằng biểu thức dạng $d^2 r/d\rho^2$.



Do đó, qua quan hệ lực, một *sự lệch đi* của tung độ r khỏi trị số *trung bình của các tung độ láng giềng* phát sinh, điều sẽ không tồn tại nếu không có quan hệ lực này. Sự gợi ý này hy vọng tạm đủ ở đây.

9. Ở trên chúng ta đã tìm cách cho định luật quán tính một biểu thức khác hơn biểu thức thông thường.

Biểu thức này, bao lâu có đủ các vật thể xem ra cố định trong không gian, sẽ hoàn tất những nhiệm vụ như biểu thức thông thường. Nó cũng dễ sử dụng, và cũng gặp phải những khó khăn như nhau. Trong trường hợp này, chúng ta không thể tìm thấy không gian tuyệt đối, trong trường hợp kia, chỉ có một số giới hạn khối lượng nằm trong tầm hiểu biết chúng ta, và do đó phép cộng được gợi ý không thể thực hiện được đầy đủ. Thật không thể nói được rằng biểu thức mới vẫn còn biểu thị tình huống đúng thật của các sự vật hay không, nếu các sao chuyển động hỗn độn. Các kinh nghiệm có tính *tổng quát hơn* không thể được

kiến tạo từ kinh nghiệm *đặc biệt hơn* mà chúng ta đang có. Ngược lại chúng ta phải *chờ đợi* một kinh nghiệm như thế xuất hiện. Kinh nghiệm này có thể được chờ đợi có lẽ từ một sự nói rộng các kiến thức thiên văn-vật lý của chúng ta ở đâu đó trong không gian của vũ trụ, nơi diễn ra các chuyển động dữ dội hơn và phức tạp hơn so với vùng lân cận của chúng ta. Tuy nhiên kết quả quan trọng nhất của các khảo sát của chúng ta là, *chính các định luật cơ học xem ra đơn giản nhất lại có bản chất rất phức tạp, rằng chúng dựa trên những kinh nghiệm chưa kết thúc, vâng ngay cả không bao giờ có thể kết thúc trọn vẹn được, rằng chúng tuy được bảo đảm chắc chắn trong thực tiễn, đủ để làm cơ sở của diễn dịch toán học nếu xét tính ổn định thỏa đáng của môi trường chúng ta, rằng tuy nhiên chúng không thể được phép xem là những chân lý được thiết lập bằng toán học, mà đúng hơn chỉ là những định lý, không phải chỉ có khả năng chịu một sự kiểm tra liên tục của kinh nghiệm, mà thực sự còn cần phải được như thế.*

TU LIỆU THAM KHẢO

1. Aichelburg & Sexl, Einstein. *Sein Einfluss auf Physik. Philosophic und Politik*. Vieweg, 1979.
2. Cassidy, David c., *Einstein and Our World*. Humanity Books, 2nd edition, 2004.
3. Einstein, Albert, *Über die spezielle and die allgemeine Relativitätstheorie* (allgemeinverständlich), in lần thứ hai mươi hai. Vieweg, 1972. Thêm bản dịch tiếng Anh: *Relativity - The Special and the General Theory: A Popular Exposition by A. Einstein*. Authorized translation by Robert W. Lawson. Crown Publishers, Inc., NY, USA, 1961.
4. Einstein, Albert, *Ideas and Opinions*. Wings Books, New York.
5. Einstein, Albert, *Mein Welthild*. Ullstein Materialien, 1981.
6. Einstein, Albert, *Aus Meinen Späten Jahren*. DVA, 1979.
7. Einstein, Albert, *Special and General Theory*. Introduction by Roger Penrose. Commentary by Robert Geroch. A Plume Book, 2005.
8. Friedman, Jerome I., *Con đường dẫn đến giải Nobel*, trong "Max Planck - Người khai sáng thuyết lượng tử. Kỷ yếu mừng sinh nhật thứ 150". Nxb. Tri Thức, 2008.
9. Goenner, Hubert, *Einsteins Relativitätstheorien. Raum, Zeit, Masse, Gravitation*. Beck'sche Reihe, 1997.
10. Hawking, Stephen (Ed. with commentary), *A Stubornly Persistent Illusion*. Running Press Book Publishers, 2007.
11. Heisenberg, Werner, *Tradition in der Wissenschaft*. Piper, 1977.
12. Hoffmann, Banesh, *Einsteins Ideen. Das Relativitätsprinzip und seine historischen Wurzeln* (Relativity and Its Roots). Spektrum Akademischer Verlag, 1983.
13. Holton, Gerald, *Thematic Origins of Scientific Thought:*

Kepler to Einstein. Harvard University Press 1973.

14. Johnson, Paul, *Modern Times. The World from the Twenties to the Nineties*. Harperperennial, 1992.

15. Kant, Immanuel, *Prolegomena zu einer jeden künftigen Metaphysik, die als Wissenschaft wird auftreten können*. Philosophische Bibliothek, Band 40, 1920.

16. Kant, Immanuel: *Kritik der Reinen Vernunft*. Hrsg Theodor Valentiner, Quyển 2, in lần thứ mười hai; [373], 40. Felix Meiner 1922.

17. Licbcr, Lillian R., *The Einstein Theory of Relativity: A Trip to the Fourth Dimension*. Paul Dry Books, 2008.

18. Mach. Ernst, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung: Historisch-kritisch dargestellt*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt, 1982.

19. Newton, Isaac, *Mathematische Prinzipien der Naturlehre*, viết tắt là *Principia* (bản tiếng Đức). Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt, 1963.

20. Nguyễn Xuân Xanh, *EINSTEIN*, in lần thứ 9. Nxb. Thành phố Hồ Chí Minh, 2011.

21. Poincaré, Henri, *La Valeur de la Science*. Bản tiếng Đức " *Der Wert der Wissenschaft* ". Teubner, 1910.

22. Randall, John H. Jr, *The Making of the Modern Mind*. With a Foreword by Jacques Barzun. Columbia University Press, 1976.

23. Robinson, Andrew, *Einstein. A Hundred Years of Relativity*. Harry N. Abrams, Inc., Publishers, 2005.

24. Roos, Hans; Hermann, Armin (ed.), *Max Planck. Vorträge. Reden. Erinnerungen*. Springer 2001.

25. Schilpp, Paul A. (cd.), *Albert Einstein als Philosoph and Naturforscher*. Vieweg, 1979.

26. Schwinger, Julian, *Einsteins Erbe. Die Einheit von Raum and Zeit*. Spektrum der Wissenschaft, 2000.

27. Steiner, Frank (ed.), *Albert Einstein. Genie, Visionär and Legende*. Spriner, 2005.

28. Weyl, Hermann, *Raum-Zeit-Materie. Vorlesungen über Allgemeine Relativitätstheorie.* Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt, 1961.

29. Williams, Pearce, *Relativity Theory: Its Origins & Impact On Modern Thought.* John Wiley & Sons, 1968.

oOo

CHÚ THÍCH

[1] Chữ "hẹp" hay "rộng" ở đây có nghĩa là "đặc biệt" (special), hay "tổng quát" (general). Thuyết tương đối hẹp là trường hợp không có lực dẫn (gravitation), trong khi thuyết tương đối rộng là có.

[2] Bản tiếng Việt được dựa trên bản gốc tiếng Đức của Einstein và bản dịch tiếng Anh của Robert W. Lawson được Einstein ủy quyền. Bản tiếng Anh hữu ích nhưng có một số lỗi, và những lỗi này cứ tiếp tục lặp lại nguyên văn ở tất cả những lần xuất bản dựa trên bản dịch của Lawson mà không hề có sự kiểm tra.

[3] Einstein diễn tả trong bản gốc: (2'). "Mỗi tia sáng chuyển động trong một hệ tọa độ "yên tĩnh" với vận tốc nhất định c , độc lập với việc tia sáng được phát ra bởi một vật thể đứng yên hay chuyển động. Stephen Hawking diễn tả gộp lại trong *Lược sử thời gian* theo cách này: "Einstein bắt đầu từ định đề rằng các định luật của khoa học hiện ra giống nhau đối với các quan sát viên chuyển động tự do. Đặc biệt, họ đo cùng một vận tốc ánh sáng, dù họ chuyển động nhanh thế nào."

[4] Nếu người ta muốn tính cụ thể, như chẳng hạn để biết một hành tinh chuyển động xung quanh mặt trời thế nào, hay một quả táo rơi thế nào, người ta phải giải các phương trình trường dưới những điều kiện biên vật lý được biết. Điều này đôi khi sẽ cực kỳ khó khăn.

[5] *Prolegomena* là một tác phẩm của Immanuel Kant có nghĩa như một *Sơ luận* dành cho mỗi một môn *Siêu hình học* tương lai, trong đó, Kant có luận bàn về thời gian và không gian.

[6] Einstein gọi Kant ở đây là "Kerl", tiếng Anh là "guy", một cách thân mật. Tuy nhiên, Kerl hay Guy tự nó còn có nghĩa không được kính trọng lắm. Guy được dùng phổ biến trong văn hóa Mỹ hơn Kerl trong văn hóa Đức.

[7] Bài này được dịch và đăng lại trong phần *Tư liệu lịch sử* dưới tiêu đề *Thuyết tương đối là gì?* (ND).

[8] Nguyễn Xuân Xanh, Nxb. Tổng hợp Thành phố Hồ Chí Minh, năm 2007, tái bản năm 2011.

[9] true; wahr (ND).

[10] real (ND).

[11] practically rigid; praktisch Starr (ND).

[12] distance (line-interval); Strecke (ND).

[13] Bằng cách đó, một vật thể tự nhiên được liên kết với một đường thẳng. Ba điểm A, B, C của một vật thể rắn được xem là nằm trên một đường thẳng khi, với các điểm A và C cho trước, điểm B được chọn sao cho tổng số các khoảng cách AB và BC nhỏ nhất như có thể. Sự gợi ý không đầy đủ này tuy nhiên có thể đủ cho mục đích của chúng ta hiện tại.

[14] 14 construction (ND).

[15] Ở đây người ta đã giả thiết rằng không có gì còn thừa lại, nghĩa là phép đó cho ra một kết quả số nguyên. Người ta thoát khỏi khó khăn này bằng cách sử dụng các thanh đo được chia nhỏ ra mà việc đưa vào sử dụng về căn bản không đòi hỏi một phương pháp mới nào có.

[16] event; Ereignis (ND).

[17] place specification; Ortsangabe. Cùng có nghĩa là xác định vị trí, hay thông tin (ND).

[18] Nguyên bản: "Quảng trường Potsdam tại Berlin" (ND).

[19] Một sự xem xét tiếp về ý nghĩa của "sự trùng khớp về không gian" là không cần thiết ở đây. Bởi vì khái niệm này đủ rõ, để bảo đảm sự khác biệt ý kiến, rằng nó có đúng hay không, hầu như không xảy ra trong trường hợp ứng dụng cụ thể.

[20] Một sự đào sâu và tu chỉnh các quan niệm này là cần thiết trong phần thứ hai của quyển sách khi bàn về thuyết tương đối rộng.

[21] Đó là một đường cong (curve) mà vật thể chuyển động trên đó.

[22] Để khỏi chịu ảnh hưởng hấp dẫn của chúng (ND).

[23] Chúng ta hiểu sét với chớp là một (ND).

[24] statement; Aussage. Còn có nghĩa là phát biểu (ND).

[25] supposition; Voraussetzung (ND).

[26] hypothesis; Hypothose (ND).

[27] stipulation; Festsatzung (ND).

[28] Chúng ta giả thiết tiếp, nếu ba sự kiện A, B, C xảy ra tại những vị trí khác nhau sao cho nếu A đồng thời với B và B đồng thời với C (đồng thời theo nghĩa của định nghĩa trên) thì tiêu chuẩn của tính đồng thời cũng được thỏa mãn cho cặp hiện tượng A-C. Sự giả định này là một giả thuyết vật lý về định luật truyền ánh sáng; nó nhất định phải được thỏa mãn, nếu chúng ta muốn giữ vững định luật hằng số của vận tốc truyền của ánh sáng trong chân không.

[29] Chẳng hạn trung điểm của toa thứ nhất và trung điểm của toa thứ 100.

[30] Ý nói chúng ta nên xem các bộ khung này là hai hệ tọa độ trừu tượng tồn tại song song nhau (ND).

[31] Một sự suy đơn giản của phép biến đổi Lorentz được trình bày trong phần phụ lục (ND).

[32] metre-rod; Meterstab, có chiều dài là 1 mét (ND).

[33] Tức nó có tính chất đối xứng giữa hai hệ K và K' (ND).

[34] *Fizeau* tìm thấy kết quả $W = w + u(1 - 1/n^2)$, trong đó $n = c/w$ là chiết xuất của chất lỏng. Mặt khác, vì vw/c^2 nhỏ đối với 1, chúng ta trước nhất có thể thay (B) bằng dạng $W = (w + v)(1 - vw/c^2)$, hay cùng với một độ xấp xỉ, $W = w + v(1 - 1/n^2)$, điều trùng khớp với kết quả của *Fizeau*.

[35] general; allgemein (ND).

[36] covariant (ND).

[37] special; speziell. Có nơi còn gọi là "đặc biệt" (ND).

[38] Tiếng Đức: Aussagen, hàm ý các định lý, tính chất... của lý thuyết. Bản tiếng Anh dịch là "predictions", các tiên đoán, tức các hệ luận, cũng cùng nghĩa (ND).

[39] Theo công thức triển khai của chuỗi nhị thức $(1+x)^n = 1 + nx + \frac{1}{2}n(n-1)x^2 + \dots$ với $n = -1/2$ và $x = -2/c^2$ (ND)

[40] Point-mass: Massenpunkt (ND)

[41] E^0 là năng lượng được hấp thu, xét từ một hệ tọa độ cùng chuyển động với vật thể.

[42] Phán đoán từ một hệ tọa độ cùng chuyển động với vật thể.

[43] aberration (ND).

[44] Thuyết tương đối gợi ra rằng các khối lượng điện của một electron được gắn bó với nhau được bằng các lực hấp dẫn.

[45] contraction; Kontraktion (ND).

[46] Tiếng Anh gọi là ether-drift, sự "trôi dạt ether" (ND).

[47] continuum, môi trường, thể liên tục (ND).

[48] world; Welt (ND).

[49] So sánh với phần trình bày tương đối chi tiết hơn trong phần Phụ lục (ND)

[50] là số ảo i , có tính chất $i^2 = -1$ (ND).

[51] Hay một cái phòng thang máy (ND).

[52] Hãy tưởng tượng một *thiên thần* chẳng hạn (ND).

[53] Vấn đề đặc biệt có tầm quan trọng khi trạng thái chuyển động của vật thể quy chiếu là một trạng thái không cần đến tác dụng từ ngoài để duy trì nó, chẳng hạn như trong trường hợp của một vật thể quy chiếu quay đều.

[54] Sự thật về độ lệch của ánh sáng như được tiên đoán bởi lý thuyết đã được xác nhận trong thời gian của hiện tượng nhật thực toàn phần ngày 30-5-1919 bằng phương pháp chụp ảnh các vì sao của hai đoàn thám hiểm được trang bị bởi một Liên ủy ban của Royal Society và Royal Astronomical Society dưới sự hướng dẫn của các nhà thiên văn học Eddington và Crommelin. (Xem Phụ lục III)

[55] Điều này được suy ra từ sự khái quát hóa các suy nghĩ của § 20.

[56] Trường này triệt tiêu ở tâm điểm của đĩa, và tăng lên tỷ lệ với khoảng cách từ tâm điểm trở ra.

[57] Trong suốt sự suy nghĩ, chúng ta phải sử dụng hệ *Galilei* K (không quay) như hệ tọa độ, bởi vì các kết quả của thuyết tương đối hẹp chỉ có hiệu lực đối với K (đối với K' có một trường hấp dẫn tồn tại).

[58] Các nhà toán học đã đối mặt với bài toán của chúng ta dưới dạng sau đây. Nếu cho một bề mặt (thí dụ bề mặt của một ellipsoid) trong không gian Euclid ba chiều, thì trên bề mặt này có một loại hình học hai chiều, giống như trên một mặt phẳng. *Gauss* đã tự đặt cho ông bài toán là xử lý hình học hai chiều này theo nguyên tắc không sử dụng dữ kiện bề mặt thuộc về một continuum ba chiều. Nếu chúng ta tưởng tượng thực hiện một phép xây dựng với các que con rắn, *trên bề mặt* (tương tự như trên mặt bàn trước đây), thì chúng ta sẽ thấy đối với bề mặt này, các định luật khác có hiệu lực hơn là các định luật của hình học Euclid trên mặt phẳng. Bề mặt đối với các que con không phải là một continuum Euclid, và người ta không thể định nghĩa các tọa độ Descartes *trên bề mặt*. *Gauss* đã chỉ ra theo những nguyên lý nào chúng ta có thể xử lý các mối quan hệ hình học trên bề mặt, và bằng cách đó chỉ ra con đường đưa đến cách xử lý của *Kiemann* cho các continuum nhiều chiều và phi-Euclid. Cho nên chính các nhà toán học đã giải những bài toán về mặt hình thức từ lâu trước khi định đề tương đối rộng dẫn chúng ta tới đó.

[59] reference-mollusk; Bezugsmolluske (ND).

[60] Mercury (ND).

[61] *Lý giải:* Theo thuyết *Newton*, số các "tuyến lực" (line of force) đến từ vô cực và hội tụ vào một khối lượng m là tỉ lệ với khối lượng m . Nếu tính bình quân, tỉ trọng ρ_0 của khối lượng là hằng số xuyên qua vũ trụ, thì một quả cầu có thể tích V sẽ chứa trung bình một khối lượng là $\rho_0 V$. Số các tuyến lực đi ngang qua bề mặt F của hình cầu xuyên vào bên trong hình cầu do đó tỉ lệ với $\rho_0 V$. Như vậy đối với một đơn vị diện tích của bề mặt hình cầu, số các tuyến lực đi xuyên qua nó là tỉ lệ với $\rho_0 (V/F)$, hay là $\rho_0 R$. Cường độ của trường ở bề mặt do đó, với bán kính R tăng, sẽ tăng lên vô cực, điều không có thể.

[62] limit, Grenze (ND).

[63] metric là độ đo khoảng cách (ND).

[64] quasi-Euclidean (ND).

$$R^2 = \frac{2}{k\rho}$$

[65] Thực vậy đối với "bán kính" R của vũ trụ. ta có phương trình

Bằng cách sử dụng hệ thống C.G.S ta có $\frac{2}{k} = 1,08 \cdot 10^{27}$; là mật độ trung bình của vật chất.

[66] Tính chất đối xứng của nguyên lý tương đối (ND)

[67] Có thể thấy như sau: với $t' = 0$, phương trình hai của (5) cho $act = bx$, hay $t = \frac{bx}{ac}$. Thay trị số t vào phương trình một của (5), và sử dụng (6) ta có $x' = a\left(1 - \frac{bcx}{a^2c}\right)x = a\left(1 - \frac{vb}{ac}\right) = a\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)x$; ta đã sử dụng (6) một lần nữa cho đẳng thức cuối cùng qua hệ thức $\frac{b}{ac} = \frac{bc}{ac^2} = \frac{v}{c^2}$.

[68] Phương trình (12a) là tương ứng với một phép quay của hệ tọa độ trong không gian Euclid ba chiều (ND).

[69] Đặc biệt. do hành tinh kế tiếp là Sao Kim (Venus) có một quỹ đạo gần như một hình tròn chính xác, nên việc xác định điểm cận nhật với sự chính xác càng khó khăn hơn.

[70] Nghĩa là A được đo bằng bán kính mặt trời (như đơn vị đo lường), hay nói một cách khác, đó là tỉ số của khoảng cách từ tia sáng đến tâm mặt trời với bán kính của mặt trời.

[71] 1953snake: Các dấu (+) và (-) trong bảng dưới đây không giống với bảng trong bản tiếng Anh. Xin tham khảo thêm tại <http://www.bartleby.com/173/a3.html>.

[72] 1953snake: Đối chiếu với bản tiếng Anh thì chỗ này là "Number of the Star" (Số của Vì sao), chứ không phải "number of stars" (số lượng sao).

[73] Hay là sự "dịch chuyển đỏ" của các vạch quang phổ (ND).

[74] potential (ND).

[75] work (ND).

[76] Sự dịch chuyển của các vạch quang phổ về phía đỏ của quang phổ cuối cùng được thiết lập một cách chắc chắn vào năm 1924 bởi Adams, bằng những quan sát trên sao đồng hành có mật độ cao của Sao Thiên Lang (Sirius), ở đó hiệu ứng dịch đỏ khoảng ba mươi lần lớn hơn hiệu ứng của mặt trời (ND).

[77] extra-galactic nebulae (ND).

[78] extension; Ausdehnung (ND).

[79] Câu nói này nên được hiểu một cách *cum grano salis* (với một hạt muối, nghĩa là với một sự giới hạn tương ứng, hay không nên hoàn toàn hiểu theo nguyên văn.)

[80] Nỗ lực của Kant loại bỏ sự khó chịu bằng cách chối bỏ tính khách quan của không gian, tuy nhiên, khó có thể được xem là nghiêm túc. Các khả năng sắp xếp vào hộp. được tượng trưng bởi không gian bên trong của nó. là khách quan trong cùng nghĩa như chính cái hộp, cũng như những đối tượng có thể được xếp vào trong đó.

[81] Thí dụ, thứ tự của các trải nghiệm theo thời gian đạt được qua con đường âm thanh học có thể khác với thứ tự thời gian đạt được bằng thị giác, do đó người ta không thể đơn giản đồng hóa thứ tự thời gian của các sự kiện với thứ tự thời gian của các trải nghiệm.

[82] space-like; raumartig (ND).

[83] inertial system (ND).

[84] Tức ether để truyền ánh sáng, và đó cũng là cứu cánh của sự tồn tại của ether (ND).

[85] break up, hay phân chia và tách ra; tiếng Đức: zerfallen hay zerlegen.

[86] testmass (ND).

[87] Cách diễn tả không chính xác này có lẽ đủ ở đây.

[88] Đáng lẽ phải viết $ds^2 = \sum g_{ik} dx_i dx_k$, nhưng Einstein đã bỏ ký hiệu tổng số để đơn giản hóa (ND).

[89] Nếu người ta nghĩ cái lấp đầy không gian (thí dụ như trường) bị lấy đi, thì vẫn còn lại không gian metric phù hợp với (1) và không gian sẽ quyết định về sự vận hành quán tính của một vật thể được đặt vào đó.

[90] Câu cuối cùng chỉ có trong bản tiếng Anh năm 1952 mà không có trong bản tiếng Đức (ND).

[91] Sự mở rộng có thể được đặc trưng như sau: Phù hợp với cách suy diễn từ "không gian Minkowski rộng", trường hấp dẫn thuần túy của các hàm số g_{ik} có tính chất đối xứng: $g^{ik} = g^{ki}$ ($g^{12} = g^{21}$, v.v.). Trường mở rộng là cùng loại, nhưng không có tính chất đối xứng này. Sự suy diễn định luật trường là hoàn toàn tương tự như sự suy diễn của trường hợp đặc biệt của hấp dẫn thuần túy.

[92] Trong bản gốc của bài báo, Einstein sử dụng ký hiệu V thay vì c ; nay ký hiệu c đã trở thành phổ biến trên thế giới (ND).

[93] "Thời gian" ở đây có nghĩa là "thời gian của hệ quy chiếu đứng yên" và cũng là "vị trí kim chỉ của đồng hồ chuyển động đang ở tại chỗ được xem xét" (ND).

[94] constructive theory (ND).

[95] principle-theories (ND).

[96] perpetuum mobile, perpetual motion (ND).

[97] Nghĩa là tính bất biến của chúng (ND).

[98] Đoạn viết nghiêng là của người dịch để nhấn mạnh.

[99] Moritz Schlick, học trò của Planck, sau chuyển hướng sang triết học.

[100] Bản dịch của câu này khác hơn bản dịch tiếng Anh trong *Einstein, Ideas and Opinions*, nhưng nó phù hợp hơn câu trước đó hơn (ND).

[101] Nhìn lâu dài (trước sự vĩnh hằng) (Spinoza).

[102] Nghĩa là không phát hiện được chuyển động của Trái đất trong biển ether như mong đợi.

[103] Line elements (ND).

[104] Line elements (ND).

[105] Laplacian scalar potential of gravity (ND).

[106] extremal line (ND).

[107] line element (ND).

[108] time-like (NO).

[109] the real, das Wirkliche (ND).

[110] Tiếng Đức: darstellen (represent); bản dịch tiếng Anh viết: consider (ND).

[111] Câu trích này của Kant, theo hiểu ý chúng tôi, là không đúng, đáng lẽ phải là ý của Einstein. Kant ngược lại cho rằng các khái niệm không gian và thời gian là *tiên nghiệm*, a priori, có trước kinh nghiệm, vì thế con người mới lĩnh hội được chúng. Trong "Phê phán lý tính thuần túy", Kant viết: *Thời gian và không gian là những sự hình dung tiên nghiệm, đã nằm trong trực quan cảm tính của chúng ta như những mô thức, cả trước khi một đối tượng thực tại đã tác động giác quan chúng ta bằng cảm giác.* (Raum und Zeit sind Vorstcllungen a priori, welche uns als Formen unserer sinnlichen Anschauung beiwohnen, ehe noch ein wirklicher Gegenstand unseren Sinn durch Empfindung bestimmt hat. Kant, KRV, 1373J, 40 (ND).

[112] true; wahr (ND).

[113] apparent; schcinbar (ND).

[114] common; gewöhnlich (ND).

[115] duration; Dauer, khoảng thời gian (ND).

[116] external; Susserlich (ND).

[117] external; Susserlich (ND).

[118] situation; Platz (ND).

[119] position; Lage (ND).

[120] equal; gleich (ND).

[121] dissimilar; unähnlich (ND).

[122] surrounding bodies (ND).

[123] translation (ND).

[124] external bodies (ND).

[125] actual; tatsächlich (KD).

[126] increment (ND).

[127] level/ Niveau (ND).

[128] field of memory/ Erinnerungsfeld (ND).

[129] field of sense-perception/ Wahrnehmungsfeld (ND).

[130] Mach lặp lại các phần II và IV ở trên của Newton (ND).

[131] *Principia*, 1687, tr. 11 (Ghi chú của E. Mach).

[132] *Principia*, tr. 9, 11 (như trên).

[133] difference; Differenz; còn có nghĩa: hiệu số, sự chênh lệch.

[134] Zustand (state); bán tiếng Anh dịch là condition.

[135] force-relation / Kraftbeziehung (ND).