

MỤC LỤC

LỜI NÓI ĐẦU CỦA BRIAN GREENE.....	2
CHƯƠNG I ĐƯỢC KẾT NỐI BỞI CÁC DÂY	6
CHƯƠNG 2 KHÔNG GIAN, THỜI GIAN VÀ NGƯỜI QUAN SÁT.....	28
CHƯƠNG 3 UỐN CONG VÀ LỢN SÓNG.....	63
CHƯƠNG 4 NHỮNG ĐIỀU KỲ LẠ TRONG THẾ GIỚI VI MÔ	99
CHƯƠNG 5 MÂU THUẤN GIỮA THUYẾT TƯƠNG ĐỐI RỘNG VÀ CƠ HỌC LƯỢNG TỬ: TIẾN TỚI MỘT LÝ THUYẾT MỚI	134

LỜI NÓI ĐẦU CỦA BRIAN GREENE

Tôi hy vọng rằng thông qua việc giải thích các thành tựu lớn của vật lý, bắt đầu từ Einstein và Heisenberg, cùng với những mô tả về sự phát triển vô cùng rực rỡ của các phát minh của họ thông qua những đột phá của thời đại chúng ta, cuốn sách này sẽ vừa làm giàu có thêm vừa thỏa mãn được nhu cầu bức xúc đó.

Trong ba mươi năm cuối cùng của cuộc đời mình, Albert Einstein đã không ngừng tìm kiếm cái được gọi là lý thuyết trường thống nhất, một lý thuyết có khả năng mô tả được tất cả các lực của tự nhiên trong một khuôn khổ duy nhất, nhất quán và bao quát được tất cả. Einstein không hề quan tâm tới sự giải thích một dữ liệu thực nghiệm cụ thể này hay khác. Thay vì thế, ông được thôi thúc bởi một niềm tin mê đắm rằng sự hiểu biết sâu sắc nhất về Vũ trụ sẽ hé lộ sự kỳ diệu đích thực nhất của nó: đó là tính đơn giản và sức mạnh của những nguyên lý nền tảng. Einstein muốn soi rọi cơ chế vận hành của Vũ trụ với một sự sáng tỏ chưa từng có, cho phép tất cả chúng ta phải sửng sốt trước vẻ đẹp và sự thanh nhã thuần khiết của Vũ trụ.

Nhưng Einstein đã không thực hiện được ước mơ của mình, phần lớn là bởi vì có rất nhiều điều liên minh chống lại ông. Vào thời đó, người ta còn chưa biết hoặc may lắm thì cũng mới chỉ biết một cách nghèo nàn về nhiều đặc điểm rất căn bản của vật chất và các lực của tự nhiên. Trong suốt nửa thế kỷ qua, mỗi thế hệ mới các nhà vật lý đã từng bước xây dựng trên những phát minh của những người đi trước một sự hiểu biết ngày càng đầy đủ hơn về sự hoạt động của Vũ trụ. Và giờ đây, rất lâu sau khi Einstein dấn thân vào cuộc tìm kiếm một lý thuyết thống nhất và đã kết thúc gần như tay trắng, các nhà vật lý đã tin rằng họ cuối cùng đã tìm ra một khuôn khổ hợp nhất được tất cả những đóng góp đó thành một lý thuyết duy nhất, về nguyên tắc, có khả năng mô tả được tất cả các hiện tượng vật lý. Đó là lý thuyết siêu dây, đối tượng của cuốn sách này.

Tôi viết cuốn Giai điệu dây và bản giao hưởng vũ trụ này với hy vọng để cho các độc giả bình thường không được đào tạo về vật lý và toán học có thể tiếp cận được những ý tưởng xuất hiện ở tuyến trước của các nghiên cứu vật lý. Thông qua những cuộc nói chuyện với công chúng về lý thuyết dây trong mấy năm qua, tôi đã nhận thấy rằng thực sự có một nhu cầu muốn tìm hiểu những nghiên cứu đang tiến hành về các định luật cơ bản, về những đòi hỏi phải cấu trúc lại một cách căn bản quan niệm của chúng ta về Vũ trụ của những định luật đó, cùng với những thách thức đang ở phía trước trên con đường tìm kiếm một lý thuyết tối hậu. Tôi hy vọng rằng thông qua việc giải thích các thành tựu lớn của vật lý, bắt đầu từ Einstein và Heisenberg cùng với những mô tả về sự phát triển vô cùng rực rỡ của các phát minh của họ thông qua những đột phá của thời đại chúng ta, cuốn sách này sẽ vừa làm giàu có thêm vừa thỏa mãn được nhu cầu bức xúc đó.

Tôi cũng hy vọng rằng cuốn Giai điệu dây và bản giao hưởng vũ trụ sẽ được tất cả những ai đã có một kiến thức nhất định về khoa học quan tâm. Đối với các sinh viên và giáo viên khoa học, tôi hy vọng rằng các bạn sẽ tìm thấy trong cuốn sách này một sự cô đúc những kiến thức cơ bản của vật lý hiện đại, như thuyết tương đối hẹp, thuyết tương đối rộng và cơ học lượng tử đồng thời cùng chia sẻ sự nhiệt thành có sức lôi cuốn lớn lao của các nhà nghiên cứu đang tiến gần tới một lý thuyết thống nhất đã được tìm kiếm từ lâu. Đối với các độc giả ham thích khoa học đại chúng, tôi đã cố gắng giải thích nhiều tiến bộ rất đáng khích lệ trong sự hiểu biết của chúng ta về Vũ trụ trong chục năm trở lại đây. Đối với các đồng nghiệp của tôi trong các lĩnh vực khác, tôi hy vọng cuốn sách này sẽ giúp họ hiểu được một cách đúng đắn và công bằng về việc tại sao các nhà lý thuyết dây lại quá nhiệt thành như vậy đối với những tiến bộ trong cuộc tìm kiếm một lý thuyết tối hậu của tự nhiên.

Lý thuyết siêu dây bao trùm một lĩnh vực rộng lớn. Đó là một đề tài vừa sâu vừa rộng, huy động nhiều phát minh cơ bản của vật lý. Vì nó thống nhất các định luật của thế giới vô cùng lớn và thế giới vô cùng bé – từ những quy luật chi phối vật lý ở những thang thiên văn cực lớn tới những quy luật chi phối hành trạng của những hạt nhỏ bé nhất của vật chất, nên lý thuyết dây có thể được đề cập theo nhiều cách khác nhau. Tôi đã chọn cách tập trung vào sự tiến hóa của quan niệm về không gian và thời gian

của chúng ta. Tôi cho rằng đó là một con đường phát triển cực kỳ hấp dẫn, cho phép ta tiếp cận được những phát minh cơ bản nhất trong những năm gần đây. Einstein đã chứng tỏ rằng không gian và thời gian có hành trạng rất lạ lùng. Giờ đây, những phát minh của ông đã được sáp nhập vào thế giới lượng tử với nhiều chiều ẩn giấu được cuộn lại trong cấu trúc của không – thời gian và hình học phức tạp của những chiều mới này có thể sẽ cho ta chìa khóa để trả lời một số câu hỏi cơ bản nhất đã từng được đặt ra. Mặc dù một số khái niệm đó rất tinh tế, nhưng chúng ta sẽ thấy rằng chúng vẫn có thể lĩnh hội được thông qua những sự tương tự trong đời thường. Và một khi những ý tưởng đó đã được nắm bắt, chúng sẽ cho ta một cái nhìn hoàn toàn bất ngờ về Vũ trụ của chúng ta.

Trong suốt cuốn sách này, tôi đã cố gắng bám thật sát thực tiễn khoa học, nhưng đồng thời cũng cho độc giả một cách hiểu trực giác – thông qua các hình ảnh tương tự và ẩn dụ – những cách thức mà các nhà nghiên cứu đã đi tới những quan niệm hiện nay của họ về Vũ trụ. Tôi cũng đã cố gắng tránh sử dụng các phương trình và một ngôn ngữ quá kỹ thuật. Tuy nhiên, do một số khái niệm còn quá mới mẻ, nên độc giả đôi khi nên tạm dừng để đọc lại một số chương mục này hay khác hoặc ngâm nghĩ về một giải thích nào đó, mới theo dõi được toàn vẹn sự tiến triển của các ý tưởng. Một số đoạn của phần thứ tư (mô tả những tiến bộ mới đây nhất) hơi khó đọc hơn các phần khác, tôi cũng đã thận trọng báo trước độc giả và cố gắng cấu trúc cuốn sách để có thể đọc lướt hoặc bỏ qua mà ít bị ảnh hưởng nhất đến dòng chảy logic của cuốn sách. Tôi cũng đưa vào cuối sách một danh mục các thuật ngữ khoa học để độc giả dễ dàng tra cứu và nhớ lại. Những độc giả muốn tìm hiểu sâu hơn một số vấn đề có thể xem phần chú thích.

Cuối cùng, từ tận đáy lòng, tôi xin cảm ơn những người đã giúp đỡ tôi thực hiện cuốn sách này mà chắc hẳn thiếu điều đó cuốn sách này không bao giờ có thể ra đời được.

Phần I
Ở biên giới của tri thức

CHƯƠNG I

ĐƯỢC KẾT NỐI BỞI CÁC DÂY

Nói rằng người ta cố tình im đi thì kể cũng hơi quá đáng. Nhưng từ hơn một nửa thế kỷ nay, thậm chí ngay cả khi dấn thân vào một trong số những cuộc phiêu lưu khoa học vĩ đại nhất của thời đại chúng ta, các nhà vật lý cũng cố lờ đi các đám mây đen mà họ đã nhìn thấy lấp ló ở phía chân trời. Nguyên do là thế này: vật lý hiện đại dựa trên hai trụ cột. Một là lý thuyết tương đối rộng của Albert Einstein mô tả tự nhiên ở thang lớn nhất, thang của các sao, các thiên hà và thậm chí của toàn Vũ trụ. Và hai là lý thuyết lượng tử mô tả tự nhiên ở thang nhỏ nhất, thang của các phân tử, nguyên tử và các thành phần sơ cấp của vật chất, chẳng hạn như các quark và các electron. Những tiên đoán của cả hai lý thuyết đều được khẳng định hùng hồn bởi rất nhiều thực nghiệm với một độ chính xác không thể tưởng tượng nổi. Tuy nhiên, chính hai công cụ lý thuyết này lại không tránh khỏi dẫn tới một kết luận đáng lo ngại: theo như cách chúng được trình bày hiện nay thì thuyết tương đối rộng và cơ học lượng tử không thể cả hai đều đúng được. Hai lý thuyết đặt cơ sở cho sự tiến bộ vĩ đại của vật lý trong suốt một trăm năm trở lại đây lại không tương thích với nhau.

Nếu trước đây bạn chưa bao giờ được nghe nói tới sự đối kháng gay gắt đó thì chắc chắn bạn sẽ thấy rất ngạc nhiên. Nhưng điều này cũng chẳng có gì là khó hiểu cả: thường thì trừ những tình huống cực đoan nhất, còn thì các nhà vật lý hoặc là chỉ nghiên cứu những hệ rất nhỏ và rất nhẹ (các nguyên tử hoặc các thành phần cấu tạo nên nó) hoặc là các hệ cực lớn và cực nặng (như các sao và các thiên hà), nhưng chưa bao giờ nghiên cứu đồng thời cả hai loại hệ đó. Điều này có nghĩa là, các nhà vật lý hoặc chỉ cần dùng cơ học lượng tử hoặc chỉ dùng thuyết tương đối rộng. Và như vậy, trong suốt năm mươi năm nay, họ cứ hài lòng như vậy trong cảnh bình an chẳng khác gì kẻ điếc không sợ súng.

Khốn nỗi, tự nhiên cũng rất có thể là “cực đoan”. Trong sâu thẳm ở trung tâm của một lỗ đen, có một khối lượng rất lớn được giam trong một thể tích cực nhỏ. Hoặc ở thời điểm Big Bang, toàn bộ Vũ trụ được phun ra từ một điểm nhỏ tới mức mà ở bên cạnh nó một hạt cát cũng trở nên khổng lồ. Những hiện tượng này vừa có khối lượng cực lớn vừa có kích thước cực nhỏ, nên cần phải có cả thuyết tương đối rộng lẫn cơ học lượng tử mới mô tả được. Vì những lý do mà rồi dần dần chúng ta sẽ biết: khi kết hợp các phương trình của thuyết tương đối rộng với các phương trình của cơ học lượng tử, lý thuyết sẽ bắt đầu lộn xộn và phun khói mù mịt như một cỗ xe đã hết hơi. Nói một cách khác, trong cuộc hôn phối bất hạnh của hai lý thuyết đó, những bài toán vật lý được đặt một cách nghiêm chỉnh lại cho những câu trả lời vô nghĩa. Thậm chí, ngay cả khi chúng ta sẵn sàng chấp nhận để mặc cho những chuyện bên trong lỗ đen và sự sáng tạo ra Vũ trụ vẫn nằm trong vòng bí mật đi nữa thì chúng ta không thể không cảm thấy rằng sự đối địch giữa thuyết tương đối rộng và cơ học lượng tử đang đòi hỏi khẩn thiết phải có một trình độ hiểu biết sâu sắc hơn. Liệu có đúng là Vũ trụ, ở mức cơ bản nhất của nó, đã được phân chia một cách rạch ròi: có một tập hợp những định luật dùng để mô tả những hiện tượng ở thang nhỏ và một tập hợp các định luật khác, không tương thích với tập thứ nhất, dùng để mô tả các hiện tượng ở thang rất lớn?

Lý thuyết siêu dây, một kẻ ngỗ ngáo trẻ tuổi so với các bậc lão làng là thuyết tương đối rộng và cơ học lượng tử, đã kiêu hãnh trả lời phủ định câu hỏi ở trên. Những nghiên cứu ráo riết hơn một chục năm qua của các nhà vật lý và toán học trên khắp thế giới đã cho thấy rằng lý thuyết mới này, lý thuyết mô tả vật chất ở mức cơ bản nhất của nó, đã giải tỏa được sự căng thẳng giữa lý thuyết lượng tử và lý thuyết tương đối rộng. Thực tế, lý thuyết siêu dây còn cho thấy hơn thế: trong khuôn khổ của lý thuyết mới, hai lý thuyết này còn trở nên cần thiết cho nhau để làm cho lý thuyết mới có nghĩa. Theo lý thuyết siêu dây thì cuộc hôn phối giữa hai lý thuyết đó không những chỉ là hạnh phúc mà còn không thể tránh được.

Đó mới chỉ là một phần của tin tức tốt lành. Lý thuyết siêu dây – mà sau này để ngắn gọn ta gọi là lý thuyết dây – còn xem sự kết hợp này là một bước tiến khổng lồ. Trong suốt ba chục năm ròn, Einstein đã tìm kiếm một lý thuyết thống nhất của vật lý,

một lý thuyết có khả năng đan bện tất cả các lực của tự nhiên và tất cả các thành phần tạo nên vật chất trong một tầm thẳm lý thuyết duy nhất. Nhưng ông đã thất bại. Giờ đây, vào buổi bình minh của thiên niên kỷ mới, những chuyên gia của lý thuyết siêu dây tuyên bố rằng những đầu mối của tầm thẳm thống nhất khó nắm bắt này cuối cùng đã được hé lộ. Lý thuyết dây có khả năng chứng tỏ rằng tất cả những điều kỳ diệu của Vũ trụ đều xuất phát từ một nguyên lý vật lý duy nhất, từ một phương trình cơ bản duy nhất, từ vũ điệu cuồng loạn của hạt quark trong nguyên tử tới điệu van nhịp nhàng của các hệ sao đôi, từ vụ nổ nguyên tử (Big Bang) tới vòng xoáy tuyệt đẹp của các thiên hà...

Nhưng tất cả những điều đó đòi hỏi chúng ta phải thay đổi một cách căn bản quan niệm của chúng ta về không gian, thời gian và vật chất, vì vậy phải có thời gian để quen dần, thấm dần tới mức ta cảm thấy thật thoải mái. Như chúng ta sẽ thấy, khi được nhìn nhận trong bối cảnh riêng của nó, lý thuyết dây xuất hiện như một hệ quả tự nhiên và đầy kịch tính của những phát minh có tính cách mạng của vật lý học trong suốt một trăm năm qua. Thực tế, sự xung đột giữa thuyết tương đối rộng và lý thuyết lượng tử không phải là cuộc xung đột đầu tiên mà là thứ ba trong dãy những xung đột có tính chất bước ngoặt trong một thế kỷ qua. Cứ mỗi lần một cuộc xung đột được giải quyết là một lần sự hiểu biết của chúng ta về tự nhiên lại có những biến đổi đáng ngạc nhiên.

Ba cuộc xung đột

Cuộc xung đột đầu tiên khởi nguồn từ cuối những năm 1800, liên quan tới một số tính chất lạ lùng của ánh sáng. Nói một cách vắn tắt, theo các định luật về chuyển động của Newton, nếu chạy thật nhanh thì ta nhất định sẽ đuổi kịp tia sáng. Tuy nhiên, theo những định luật điện từ của Maxwell, thì điều đó là không thể. Như chúng ta sẽ thấy ở Chương 2, Einstein đã giải quyết được xung đột đó thông qua thuyết tương đối hẹp của ông, một lý thuyết đã làm đảo lộn những quan niệm của chúng ta về không gian và thời gian. Theo thuyết tương đối hẹp, không gian và thời gian không phải là những khái niệm tuyệt đối như trước: chúng không được mọi người tiếp nhận theo cách như nhau mà tùy thuộc vào trạng thái chuyển động của mỗi người.

Sự phát triển của thuyết tương đối hẹp ngay lập tức đã gây ra cuộc xung đột thứ hai. Thực vậy, một trong số những kết luận trong công trình của Einstein nói rằng không có một vật nào, cũng như không có một thông tin hay một ảnh hưởng nào có thể truyền đi nhanh hơn ánh sáng. Nhưng ở Chương 3, lý thuyết hấp dẫn của Newton, một lý thuyết rất hợp với trực giác và đã được thực nghiệm kiểm chứng nhiều lần, lại xem rằng những ảnh hưởng của lực hấp dẫn đã được truyền đi một cách tức thời, ngay cả khi truyền trên những khoảng cách khổng lồ. Và lại một lần nữa, Einstein đã giải quyết được xung đột này bằng cách đưa ra một cách mô tả mới về hấp dẫn, đó là thuyết tương đối rộng được công bố năm 1915. Cũng như thuyết tương đối hẹp, lý thuyết mới này cũng làm đảo lộn những quan niệm của chúng ta về không gian và thời gian: chúng giờ đây bị cong và bị xoắn đi để đáp ứng lại sự hiện diện của vật chất hoặc năng lượng. Và chính những biến dạng này của cấu trúc không-thời gian đã truyền lực hấp dẫn từ nơi này đến nơi khác. Không gian và thời gian, do đó, không còn được xem như một màn ảnh đơn giản và trơ mà các hiện tượng tự nhiên được chiếu lên: giờ đây chúng còn là một phần không tách rời của chính các hiện tượng mà vật lý học tìm cách mô tả.

Lại một lần nữa, sự phát minh ra thuyết tương đối rộng, trong khi giải quyết được một xung đột, lại dẫn tới một xung đột khác. Từ đầu thế kỷ XX cho tới tận những năm 30, các nhà vật lý đã xây dựng lý thuyết lượng tử (xem Chương 4) để trả lời một loạt những vấn đề nóng bỏng được đặt ra ngay khi người ta định dùng vật lý của thế kỷ XIX để mô tả thế giới vi mô. Và chính ở đây, như đã nói ở trên, đã ra đời cuộc xung đột thứ ba, cũng là cuộc xung đột sâu sắc nhất, xuất hiện từ sự không tương thích giữa cơ học lượng tử và thuyết tương đối rộng. Như chúng ta sẽ thấy trong Chương 5, độ cong trơn tru của không-thời gian mà thuyết tương đối rộng ban cho lại hoàn toàn không phù hợp với sự sôi động điên cuồng mà lý thuyết lượng tử gán cho thế giới vi mô. Do mãi tới giữa những năm 1980, lượng tử dây mới đưa được ra một giải pháp, nên cuộc xung đột này được gọi rất đúng là bài toán trung tâm của vật lý hiện đại. Hơn thế nữa, là hậu duệ của thuyết tương đối hẹp và rộng, lý thuyết dây cũng đòi hỏi phải xem xét lại những quan niệm về không gian và thời gian theo cách riêng của nó. Chẳng hạn, phần lớn chúng ta đều tin rằng thế giới của chúng ta đang sống có ba chiều không gian. Tuy nhiên, điều này không đúng đối với lý thuyết dây bởi lẽ lý thuyết này tiên đoán rằng ngoài những chiều

mà chúng ta có thể nhìn thấy được còn có những chiều khác không nhìn thấy bị cuộn chặt lại trong những chi tiết nhỏ nhất của cấu trúc không gian. Những điều mới mẻ đây ấn tượng đó sẽ là sợi dây dẫn đường cho chúng ta trong các bước tiếp sau. Và thực tế, lý thuyết dây là phần tiếp nối của lịch sử về không-thời gian bắt đầu từ Einstein.

Để có một ý niệm chính xác về lý thuyết dây, chúng ta hãy tạm lùi lại một bước để mô tả vắn tắt những điều mà chúng ta đã biết được trong suốt thế kỷ trước về cấu trúc vi mô của Vũ trụ.

Vũ trụ dưới kính lúp: chúng ta biết gì về vật chất

Các nhà triết học cổ Hy Lạp cho rằng Vũ trụ được cấu thành từ những phần tử nhỏ bé không thể “cắt nhỏ” được nữa mà họ gọi là các nguyên tử. Họ đoán rằng các đối tượng vật chất đều được tạo thành từ tổ hợp của một số ít các viên gạch sơ cấp đó, cũng gần giống như các từ là tổ hợp chỉ của dăm ba chữ cái. Và họ đã đoán đúng. Hơn 2000 năm sau, chúng ta vẫn còn tin rằng điều đó là đúng, mặc dù bản chất của những viên gạch cơ bản nhất đó cũng đã tiến hóa rất nhiều. Ở thế kỷ XIX, nhiều nhà khoa học đã chứng tỏ được rằng nhiều chất quen thuộc như ôxy và cacbon đều có một thành phần nhỏ nhất có thể nhận dạng được và theo truyền thống Hy Lạp họ cũng gọi chúng là các nguyên tử. Cái tên thì vẫn thế, nhưng lịch sử đã chứng tỏ rằng nó là một cái tên không đạt, bởi lẽ các nguyên tử thực sự vẫn có thể cắt nhỏ được. Vào đầu những năm 1930, những công trình tập thể của Joseph John Thomson, Ernest Rutherford, Niels Bohr và James Chadwick đã cho ra đời một mô hình nguyên tử giống như hệ mặt trời (vì thế mô hình này còn được gọi là “mẫu hành tinh”) mà phần lớn chúng ta đều đã rất quen thuộc. Trong mô hình này, nguyên tử không phải là thành phần sơ cấp nhất của vật chất mà là được tạo thành từ một hạt nhân chứa proton và nơtron với đám mây các electron bao quanh.

Có một thời, nhiều nhà vật lý đã tưởng rằng proton, nơtron và các electron chính là các “nguyên tử” theo định nghĩa của người cổ Hy Lạp. Nhưng vào năm 1968, những thí nghiệm được tiến hành trên máy gia tốc tuyến tính ở Stanford, Hoa Kỳ, đã cho thấy rằng các proton và nơtron cũng không phải là các hạt cơ bản nhất, chúng lại được cấu tạo bởi ba hạt nhỏ hơn, đó là các hạt quark. Cái tên kỳ cục này đã được Murrey Gell-Mann – người đầu tiên tiên

đoán sự tồn tại của chúng – lấy từ cuốn tiểu thuyết Finnegans Wake của nhà văn nổi tiếng người Scotlen – James Joyce. Thực nghiệm cũng khẳng định sự tồn tại của hai loại quark: quark u (up) và quark d (down). Proton được tạo bởi hai quark u và một quark d, còn nơtron bởi hai quark d và một quark u.

Tất cả mọi vật mà bạn thấy trong thế giới ở mặt đất cũng như trên trời đều được tạo từ tổ hợp các electron, các quark u và các quark d. Không có một bằng chứng thực nghiệm nào chỉ ra rằng các hạt này không phải là sơ cấp nhất, tức là được cấu tạo nên từ các hạt khác nhỏ hơn. Nhưng cũng có rất nhiều bằng chứng cho thấy Vũ trụ còn có những hạt sơ cấp khác nữa. Vào giữa những năm 1950, Frederick Reines và Clyde Cowan đã tìm được một bằng chứng thực nghiệm xác thực cho loại hạt cơ bản thứ tư gọi là hạt nơtrinô và Wolfgang Pauli đã tiên đoán sự tồn tại của nó vào đầu những năm 1930. Nơtrinô là những hạt rất khó phát hiện vì chúng rất hiếm khi tương tác với các hạt vật chất khác: Một nơtrinô có năng lượng trung bình có thể đi qua một tấm chì dày hàng ngàn kilômét mà chuyển động của nó không mấy may chịu một ảnh hưởng nào. Điều này sẽ khiến bạn cảm thấy yên tâm hơn rất nhiều, bởi lẽ ngay khi bạn đang đọc những dòng này, thì hàng tỷ nơtrinô do Mặt Trời phóng vào không gian đang xuyên qua cơ thể bạn và qua cả Trái Đất nữa, như một phần trong hành trình đơn độc của chúng trong Vũ trụ. Một hạt cơ bản khác có tên là muon đã được phát hiện vào cuối những năm 30 bởi các nhà vật lý nghiên cứu tia Vũ trụ (đó là những trận mưa hạt tới từ không gian Vũ trụ thường xuyên tới bắn phá Trái Đất). Muon rất giống electron chỉ có điều khối lượng của nó lớn hơn cỡ 200 lần. Do không có gì trong trật tự của Vũ trụ, không có một vấn đề nào chưa được giải quyết cũng như chẳng có một vị trí thích hợp nào đòi hỏi phải có sự tồn tại của hạt muon, nên nhà vật lý hạt nào được giải thưởng Nobel Isaac Isidor Rabi đã đón tiếp sự phát minh ra nó với lời chúc mừng không mấy hào hứng: “Ai đã ra lệnh để có mây trên đời này?”. Tuy nhiên, muon vẫn hiện diện đó và chúng ta vẫn sẽ còn chưa hết ngạc nhiên.

Nhờ những công nghệ ngày càng tân tiến hơn, các nhà vật lý tiếp tục bắn phá các khối vật chất với năng lượng ngày càng cao hơn, và bằng cách đó, có lúc, họ đã tạo lại được những điều kiện chưa từng thấy kể từ Big Bang. Họ đào bới trong các mảnh vỡ nhằm tìm kiếm những hạt cơ bản mới để thêm vào danh sách ngày

càng dài của các hạt. Và họ đã phát hiện thêm 4 hạt quark mới, đó là quark c (charm), quark s (strange), quark b (bottom), quark t (top) và hạt họ hàng thứ hai của electron có tên là hạt tau còn nặng hơn cả muon cùng với hai hạt khác nữa tương tự như hạt nơtrino (mà người ta gọi là nơtrino-mu và nơtrino-tau để phân biệt với nơtrino đầu tiên có tên là nơtrino-e hay nơtrino-electron). Tất cả những hạt được tạo ra trong những va chạm ở năng lượng cao này đều rất phù du và không thuộc số những thành phần tạo nên vật chất của thế giới xung quanh chúng ta.

Tuy nhiên, chúng ta vẫn còn chưa hoàn toàn ở tận cùng của bản danh sách, bởi vì ứng với mỗi một hạt còn có một phản - hạt, có cùng khối lượng với hạt, nhưng một số đặc tính khác của nó thì ngược lại, chẳng hạn như điện tích hay một số tích khác tương ứng với các lực khác mà chúng ta sẽ giới thiệu ngay dưới đây. Ví dụ, phản-hạt của electron gọi là positron, nó có khối lượng đúng như electron, nhưng điện tích của nó là +1 thay vì là -1 như electron. Khi vật chất gặp phản vật chất, chúng sẽ huỷ nhau để chỉ tạo ra năng lượng thuần túy, chính vì lẽ đó mà chỉ có rất ít phản vật chất có trong tự nhiên của thế giới bao quanh chúng ta.

Các nhà vật lý cũng đã phát hiện được một loại sơ đồ sắp xếp các hạt: các thành phần cấu tạo nên vật chất được tổ chức thành ba nhóm hay thường được gọi là ba họ như được trình bày trong Bảng 1.1. Mỗi họ đều chứa hai quark, một electron hay một trong số hai hạt họ hàng của nó cùng với nơtrino gắn với chúng. Các loại hạt tương ứng trong cả ba họ đều có tính chất như nhau, chỉ có điều khối lượng của chúng lớn dần từ họ thứ nhất tới họ thứ ba. Kết quả là, hiện nay các nhà vật lý đã thăm dò được cấu trúc của vật chất tới các thang khoảng một phần tỷ mét và chúng tỏ được rằng mọi thứ mà ta gặp – dù là có trong tự nhiên hay được con người tạo ra từ những máy va chạm nguyên tử khổng lồ - đều được tạo thành chỉ từ một tổ hợp nào đó của các hạt trong ba họ đó và các phản-hạt của chúng.

Họ I		Họ II		Họ III	
Hạt	Khối lượng	Hạt	Khối lượng	Hạt	Khối lượng
electron	0,00054	muon	0,11	tau	1,9

neutrino-e	< 10 ⁻⁸	neutrino-mu	< 0,0003	neutrino-tau	< 0,033
quark u	0,0047	quark c	1,6	quark t	189
quark d	0,0074	quark s	0,16	quark b	5,2

Bảng 1.1. Ba họ các hạt sơ cấp. Khối lượng của chúng được tính theo khối lượng của proton lấy làm đơn vị. Giá trị khối lượng của neutrino luôn lảng tránh sự xác định bằng thực nghiệm.

Nhìn vào Bảng 1.1., ta hiểu rõ hơn sự lúng túng của Rabi khi đối mặt với sự phát hiện ra hạt muon: sự sắp xếp các họ hạt dường như khá có tổ chức nhưng cũng lại đặt ra nhiều câu hỏi. Tại sao lại có nhiều hạt cơ bản đến thế, nhất là khi hầu hết các vật trong thế giới xung quanh chúng ta lại chỉ được tạo bởi electron, quark u và quark d? Tại sao lại cần tới những ba họ chứ không phải là một? Và tại sao lại không phải là bốn họ hay bất cứ một số họ nào khác? Tại sao khối lượng của các hạt lại có vẻ như được gán cho một cách ngẫu nhiên như vậy? Chẳng hạn, tại sao hạt tau lại nặng hơn electron tới ba ngàn năm trăm hai mươi lần? Và tại sao quark t lại nặng hơn hạt đồng loại với nó là quark u tới bốn mươi ngàn hai trăm lần? Đó là những con số thật lạ lùng và dường như khá ngẫu nhiên. Liệu chúng có phải kết quả của sự ngẫu nhiên hay do một đấng thần thánh nào đó tạo ra, hoặc có một cách giải thích khoa học có thể hiểu được đối với tất cả những đặc điểm cơ bản đó của Vũ trụ chúng ta.

Các lực hay bản chất của photon

Mọi chuyện trở nên phức tạp hơn khi chúng ta xét tới các lực của tự nhiên. Thế giới xung quanh chúng ta đầy rẫy những phương tiện gây tác động: những chiếc vợt đập vào quả bóng, những vận động viên nhảy cầu có thể tung mình lao xuống từ những cầu nhảy cao, các nam châm lớn nâng những đoàn tàu cao tốc trên được ray riêng của chúng, các máy đếm Geiger phát tín hiệu khi có chất phóng xạ, những quả bom hạt nhân phát nổ... Và bản thân chúng ta cũng có thể tác động lên các vật bằng cách kéo, đẩy hoặc lắc chúng, bằng cách ném hoặc bắn các vật khác vào chúng, bằng cách kéo giãn, vặn xoắn hoặc nghiền nát chúng, hoặc bằng cách làm lạnh, đốt nóng, hoặc đốt cháy chúng... Trong suốt

thế kỷ XX, các nhà vật lý đã tích lũy được rất nhiều bằng chứng cho thấy tất cả những tương tác đó giữa các vật và các chất khác nhau, cũng như hàng triệu tương tác khác mà chúng ta gặp hàng ngày, đều có thể quy về những tổ hợp của bốn lực cơ bản. Một trong số bốn lực đó là lực hấp dẫn. Ba lực khác là lực điện từ và hai lực hạt nhân mạnh và yếu.

Trong số bốn lực trên, lực hấp dẫn là lực quen thuộc nhất. Chính lực này đã giữ cho Trái Đất của chúng ta quay quanh Mặt Trời và cũng nhờ nó mà bàn chân chúng ta bám chặt được vào mặt đất. Khối lượng của một vật là thước đo lực hấp dẫn mà nó có thể tác dụng cũng như lực hấp dẫn mà nó có thể bị tác dụng. Nó là nền tảng của những tiện nghi trong đời sống hiện đại (điện, TV, điện thoại, máy tính...), cũng như của sức mạnh đầy ấn tượng của sấm sét và ngay cả của cái vuốt ve dịu dàng của bàn tay. Ở thang vi mô, điện tích của hạt đóng vai trò đối với lực điện từ như là khối lượng đối với lực hấp dẫn: nó xác định cường độ của lực điện từ mà hạt đó có thể tác dụng cũng như cường độ phản ứng của nó đối với lực ấy.

Các lực hạt nhân mạnh và yếu ít quen thuộc hơn, đơn giản là vì cường độ của chúng giảm rất nhanh ở ngoài thang kích thước dưới nguyên tử. Chính vì thế mà rất gần đây, các nhà vật lý mới phát hiện ra chúng. Nhờ lực hạt nhân mạnh mà các quark vẫn còn “dính” với nhau ở bên trong các proton và neutron cũng như giữ chặt chính các hạt này bên trong hạt nhân nguyên tử. Còn lực yếu là lực gây ra sự phân rã phóng xạ của một số nguyên tố như urani, coban...

Trong suốt thế kỷ trước, các nhà vật lý cũng đã phát hiện ra hai điểm chung của tất cả các lực cơ bản. Thứ nhất, như chúng ta sẽ thấy trong Chương 5, ở mức vi mô, mỗi một lực đều tương ứng với một loại hạt mà ta có thể hiểu như là một “bó” nhỏ nhất của lực đó. Nếu bạn bắn một chùm laser – tức cũng là một chùm tia của bức xạ điện từ – thì có nghĩa là bạn đã bắn một chùm hạt photon – những bó nhỏ nhất của tương tác điện từ. Cũng tương tự, các lực yếu và mạnh có các bó sơ cấp tương ứng là các hạt boson yếu và các hạt gluon. (Cái tên gluon ở đây là rất gợi: chúng có thể được xem như là các thành phần vi mô của một “chất keo” (tiếng Anh là glue) đảm bảo sự gắn kết của các hạt nhân nguyên tử). Ngay từ năm 1984, các nhà thực nghiệm đã xác lập được sự tồn tại cũng như tính chất của ba loại “hạt tương tác” (xem Bảng 1.2).

Còn graviton – hạt tương tác gắn với lực hấp dẫn, mặc dù còn chưa có những khẳng định bằng thực nghiệm, nhưng các nhà vật lý hầu như đã tin vào sự tồn tại của chúng.

Lực	Hạt tương tác	Khối lượng
lực hạt nhân mạnh	gluon	0
lực điện từ	photon	0
lực hạt nhân yếu	các boson yếu	86-97
lực hấp dẫn	graviton	0

Bảng 1.2. Đối với mỗi lực cơ bản đều cho hạt tương tác tương ứng và khối lượng của nó (tính theo đơn vị là khối lượng của proton). Đối với lực hạt nhân yếu, có nhiều hạt tương tác với khối lượng nhận một trong hai giá trị cho trong bảng. Sự không có khối lượng của graviton vẫn chỉ là giả thuyết.

Điểm chung thứ hai của tất cả các lực cơ bản liên quan tới các “tích”: cũng hệt như khối lượng của các hạt do tác dụng của lực hấp dẫn lên nó, điện tích xác định cường độ của lực điện từ tác dụng lên hạt, các hạt mang “tích yếu” hoặc “tích mạnh” là những tính xác định cường độ của các lực yếu và lực mạnh tương ứng tác dụng lên hạt đó. (Chi tiết về tính chất của các hạt cơ bản được cho trong bảng ở phần Chú thích của bài này [1]). Điện tích và khối lượng đã được các nhà vật lý thực nghiệm đo đạc rất chính xác, nhưng thật không may, cho tới nay chưa có ai có thể giải thích được tại sao Vũ trụ của chúng ta lại tạo bởi những hạt mang đúng những giá trị khối lượng và điện tích đó?

Mặc dù có những điểm chung, nhưng việc xem xét bốn lực cơ bản lại đặt ra nhiều câu hỏi mới. Trước hết, tại sao lại là bốn lực? Tại sao không phải là năm, là ba hay thậm chí chỉ là một lực duy nhất? Tại sao các lực lại thể hiện những tính chất rất khác nhau như vậy? Tại sao các lực hạt nhân mạnh và yếu lại bị buộc chỉ đứng hoạt động ở mức vi mô, trong khi các lực hấp dẫn và điện từ lại có tầm tác dụng vô hạn? Và cũng tại sao, cường độ của bốn lực đó lại khác biệt nhiều như vậy?

Để bạn có được một ý niệm về sự khác biệt đó, hãy tưởng tượng mỗi tay bạn đều giữ một electron và cố đưa chúng lại gần

nhau. Hai hạt tích điện và giống hệt nhau này sẽ hút nhau bởi lực hấp dẫn và đẩy nhau bởi lực điện từ. Vậy lực nào sẽ thắng thế? Các electron sẽ hút lại gần nhau hay đẩy nhau ra xa? Tất nhiên là lực đẩy sẽ thắng thế vì lực điện từ mạnh hơn lực hấp dẫn tới một triệu tỷ tỷ tỷ tỷ (1042) lần. Và nếu như cơ bắp ở tay phải bạn tượng trưng cho lực hấp dẫn, thì khi đó để tượng trưng cho lực điện từ, cơ bắp tay trái bạn phải kéo dài tới tận bên ngoài biên giới tận cùng của Vũ trụ mà ta quan sát được! Lý do duy nhất để giải thích tại sao lực điện từ không lấn át lực hấp dẫn trong thế giới bao quanh chúng ta là bởi vì phần lớn các vật được tạo bởi lượng điện tích dương và âm ngang nhau, do đó lực điện từ triệt tiêu lẫn nhau. Trong khi đó, lực hấp dẫn chỉ là hút, nên không có sự triệt tiêu như thế: càng có nhiều vật chất thì lực hấp dẫn chỉ càng mạnh thêm. Hơn thế nữa, về bản chất lực hấp dẫn là một lực cực yếu. (Điều này giải thích tại sao khẳng định bằng thực nghiệm sự tồn tại của graviton là một việc rất khó. Do vậy, việc tìm kiếm cái bó nhỏ nhất đó của lực yếu nhất này quả là một thách thức). Thực nghiệm cũng đã chứng tỏ được rằng lực mạnh lớn gấp một trăm lần lực điện từ và lớn gấp một ngàn lần lực yếu. Và ở đây, một lần nữa, một câu hỏi được đặt ra là: do đâu mà Vũ trụ chúng ta lại có những đặc điểm đó?

Đây không phải là câu hỏi được sinh ra từ sự triết lý bàn trà kiểu như tại sao một số chi tiết lại xảy ra theo cách này mà không theo cách khác. Vấn đề là ở chỗ Vũ trụ sẽ khác đi rất nhiều nếu ta làm thay đổi, dù chỉ là tí chút, những tính chất của vật chất và các hạt tương tác. Ví dụ, sự tồn tại của các hạt nhân bền vững tạo nên hơn một trăm nguyên tố trong Bảng tuần hoàn phụ thuộc một cách sít sao vào tỷ số giữa cường độ của lực hạt nhân mạnh và cường độ của lực điện từ. Thực vậy, lực điện từ giữa các proton bị giam bên trong hạt nhân làm cho chúng đẩy nhau, trong khi đó, thật may mắn, lực hạt nhân mạnh tác dụng giữa các hạt quark tạo nên chúng lại thắng lực đẩy này và giữ chặt các proton lại với nhau. Nhưng chỉ cần một thay đổi nhỏ trong cường độ tương đối của hai lực đó là sự cân bằng giữa chúng sẽ bị phá vỡ và có thể sẽ làm cho phần lớn các hạt nhân nguyên tử bị phân rã. Một ví dụ khác: nếu khối lượng của electron lớn hơn một chút, các electron và proton sẽ có xu hướng kết hợp với nhau để tạo thành nơtron, khi đó thì nguyên tử hydro (nguyên tố đơn giản nhất trong Vũ trụ với hạt nhân chỉ gồm một proton duy nhất) sẽ biến mất và do đó làm cho quá trình sản xuất ra các nguyên tố phức tạp hơn bị

ngừng trệ. Các ngôi sao chỉ tồn tại được là nhờ vào sự tổng hợp các hạt nhân trong lòng của chúng, với sự thay đổi này, cũng sẽ không còn các ngôi sao nữa. Ở đây cường độ của lực hấp dẫn cũng đóng vai trò quan trọng. Mật độ lớn của vật chất trong lõi của các ngôi sao có tác dụng duy trì lò lửa hạt nhân trong đó và dẫn tới sự phát sáng của các ngôi sao. Nếu như lực hấp dẫn mạnh hơn một chút, lõi của các ngôi sao sẽ hút mạnh hơn và do đó sẽ làm tăng nhịp độ diễn ra các phản ứng tổng hợp hạt nhân. Cũng giống như các bó đuốc sáng sẽ tiêu thụ nhiên liệu nhanh hơn một ngọn nến cháy chậm rãi, nếu nhịp độ xảy ra các phản ứng tổng hợp hạt nhân gia tăng, thì các ngôi sao như Mặt Trời của chúng ta sẽ tắt nhanh hơn và do đó việc tạo thành sự sống như chúng ta đã biết sẽ hoàn toàn là chuyện đáng ngờ. Trái lại, nếu lực hấp dẫn yếu hơn một chút, vật chất sẽ phân tán và do đó sẽ không có các ngôi sao cũng như chẳng có các thiên hà.

Những ví dụ trên còn có rất nhiều, nhưng ý tưởng này đã là rõ ràng: Vũ trụ của chúng ta như nó hiện nay là bởi vì vật chất và các tương tác của chúng có những tính chất như chúng đang có. Nhưng liệu có một giải thích khoa học cho câu hỏi: Tại sao chúng lại có những tính chất đó?

[1] Bảng dưới đây khá chi tiết hơn so với Bảng 1.1., trong đó liệt kê khối lượng, tích lực của các hạt thuộc cả ba họ. Mỗi loại quark mang ba tích lực mạnh khả dĩ được gọi vắn vẽ là ba tích màu, tượng trưng cho giá trị bằng số của ba tích lực mạnh. Các tích yếu thực chất là “thành phần thứ ba” của isospin yếu.

Họ I				
Hạt	Khối lượng	Điện tích	Tích yếu	Tích mạnh
Êlectron	0,00054	-1	-1/2	0
Nơtrinô-electron	< 10-8	0	1/2	0
Quark u	0,0047	2/3	1/2	đỏ, lục, lam
Quark d	0,0074	-1/3	-1/2	đỏ, lục, lam

Họ II				
Hạt	Khối lượng	Điện tích	Tích yếu	Tích mạnh
Muon	0,11	-1	-1/2	0
Neutrino-muon	< 0,0003	0	1/2	0
Quark c	1,6	2/3	1/2	đỏ, lục, lam
Quark s	0,16	-1/3	-1/2	đỏ, lục, lam

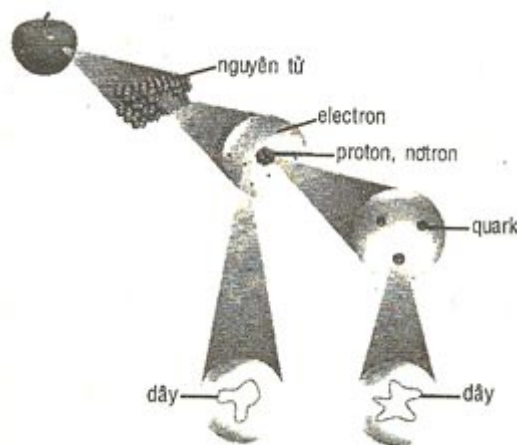
Họ III				
Hạt	Khối lượng	Điện tích	Tích yếu	Tích mạnh
Tau	1,9	-1	-1/2	0
Neutrino-tau	< 0,033	0	1/2	0
Quark t	189	2/3	1/2	đỏ, lục, lam
Quark b	5,2	-1/3	-1/2	đỏ, lục, lam

Lý thuyết dây: ý tưởng cơ bản

Lý thuyết dây lần đầu tiên đã cho một khuôn mẫu khái niệm mạnh mẽ cho phép trả lời được những câu hỏi mà chúng ta đã nêu ở trên. Trước hết chúng ta hãy làm quen với ý tưởng cơ bản của nó.

Các hạt được liệt kê trong Bảng 1.1 là “những chữ cái” của vật chất. Cũng giống như bảng các chữ cái, chúng không có cấu trúc nội tại. Nhưng lý thuyết dây lại tuyên bố khác. Theo lý thuyết này, nếu chúng ta có thể xem xét các hạt đó với độ chính xác cao hơn – cao hơn nhiều bậc so với độ chính xác của khả năng công nghệ hiện nay – thì chúng ta sẽ thấy rằng mỗi một hạt đó không có dạng điểm, mà thay vì thế chúng gồm một vòng dây nhỏ xíu

một chiều. Giống như một dải cao su cực mảnh, mỗi một hạt này chứa một sợi dây nhảy múa và dao động, mà các nhà vật lý do không có cái duyên văn học của Gell-Mann đã đặt tên cho nó là dây. Hình 1.1. minh họa ý tưởng căn bản này của lý thuyết dây: xuất phát từ một mẫu vật chất thông thường – một quả táo – và liên tiếp được phóng đại để nhìn rõ những thành phần ngày càng ở thang nhỏ hơn của nó. Lý thuyết dây đã thêm một cấp độ vi mô mới, nhỏ bé nhất – cấp độ của các vòng dây dao động – vào tiến trình mà ta đã biết trước, từ quả táo tới các nguyên tử qua proton, nơtron, rồi electron đến quark [1].



Hình 1.1. Vật chất được cấu tạo từ các nguyên tử, rồi các nguyên tử lại được tạo thành từ các quark và electron. Theo lý thuyết dây, tất cả các hạt đó lại được tạo thành từ các dây dao động.

Mặc dù điều này đã hoàn toàn rõ ràng, nhưng chúng ta sẽ thấy trong Chương 6 rằng việc thay thế các thành phần cơ bản nhất của vật chất có dạng điểm bằng các dây đã giải quyết được sự không tương thích giữa cơ học lượng tử và thuyết tương đối rộng. Và như vậy lý thuyết dây đã cho phép ta gỡ được cái nút nan giải nhất của vật lý hiện đại. Đây là một thành tựu to lớn, nhưng mới chỉ là một phần của cái lý do khiến cho lý thuyết dây đã tạo ra được một sự phấn khích đến như vậy.

Lý thuyết dây – lý thuyết của tất cả?

Vào thời Einstein, các lực hạt nhân yếu và mạnh còn chưa được phát hiện, nhưng ông đã thấy rằng sự tồn tại của hai lực khác biệt là lực hấp dẫn và lực điện từ đã gây ra những khó khăn rất sâu sắc. Einstein đã không chấp nhận chuyện tự nhiên lại được xây dựng trên một bản thiết kế phung phí như vậy. Ông đã lao vào một cuộc hành trình kéo dài 30 năm để tìm kiếm cái gọi là lý thuyết trường thống nhất mà ông hy vọng sẽ chứng tỏ được hai lực này thực sự chỉ là những biểu hiện khác nhau của một nguyên lý lớn. Cuộc tìm kiếm đầy ảo tưởng đó đã tách Einstein ra khỏi dòng chính của vật lý học thời đó. Những nhà vật lý cùng thời với ông đang mải mê lao vào những nghiên cứu sôi động hơn nhiều trong khuôn khổ của vật lý lượng tử vừa mới xuất hiện. Vào đầu những năm 1940, ông đã viết cho một người bạn: “Tôi đã trở thành một lão già đơn độc được biết tới chỉ vì không mang vợ và được trưng bày trong những dịp lễ lạt lớn như là một thứ của lạ” [2].

Chẳng qua đơn giản là vì Einstein đã đi trước thời đại mình. Hơn một nửa thế kỷ sau, giấc mơ về một lý thuyết thống nhất của ông đã trở thành mục tiêu của vật lý hiện đại. Hiện nay, một bộ phận đáng kể của cộng đồng các nhà vật lý và toán học đang ngày càng tin rằng lý thuyết dây đang đi theo con đường đúng. Lý thuyết này cho chúng ta một khuôn khổ giải thích duy nhất cho vật chất và tất cả các tương tác của nó mà chỉ dựa trên một nguyên lý duy nhất: ở cấp độ nhỏ nhất, tất cả chỉ là những tổ hợp của các dây dao động.

Chẳng hạn, lý thuyết dây khẳng định rằng các tính chất của những hạt đã biết (được liệt kê trong các Bảng 1.1. và 1.2.) chỉ là sự phản ánh những cách dao động khác nhau của các dây. Cũng giống như các dây đàn Piano hay Violon có thể dao động theo nhiều tần số cộng hưởng mà tai ta cảm nhận như những nốt nhạc khác nhau và các họa ba bậc cao của chúng, điều này cũng đúng đối với các vòng của lý thuyết dây. Nhưng như chúng ta sẽ thấy, những mode dao động của dây trong lý thuyết dây không tạo ra những nốt nhạc mà chúng là các hạt có khối lượng và điện tích được xác định bởi mode dao động đó. Electron là một kiểu dao động của dây, quark u là một kiểu dao động khác v.v. Những tính chất mà lý thuyết dây trao cho các hạt hoàn toàn không phải là một tập hợp hổ lốn các sự kiện thực nghiệm mà chúng là sự thể

hiện của cùng một đặc điểm vật lý, đó là các mode dao động cộng hưởng, hay có thể nói là giai điệu của những vòng dây sơ cấp đó. Chính ý tưởng này cũng được áp dụng cho các lực của tự nhiên. Chúng ta cũng sẽ thấy rằng các hạt lực cũng được gắn với những mode dao động cụ thể của dây, và từ đó mà toàn bộ vật chất và tất cả các lực sẽ được thống nhất trong cùng một khuôn khổ những dao động vi mô của các dây, như những nốt nhạc khác nhau mà các dây có thể tạo ra.

Do đó đây là lần đầu tiên trong lịch sử vật lý chúng ta có được một khuôn khổ có thể giải thích được từng đặc trưng cơ bản của tự nhiên. Vì lý do đó mà lý thuyết dây đôi khi được xem là “lý thuyết cuối cùng”. Với những lời lẽ to tát đó, thực ra người ta chỉ muốn nói rằng lý thuyết này sẽ là một lý thuyết sâu sắc nhất của tất cả những lý thuyết khác và không phải dựa trên một lý thuyết nào. Tuy nhiên, nhiều nhà lý thuyết dây có một cách tiếp cận thực tế hơn, họ xem lý thuyết về “tất cả” đơn giản chỉ là một lý thuyết có khả năng giải thích được những tính chất của các hạt cơ bản và các tương tác giữa chúng. Một nhà quy giản luận thuần túy và cứng rắn chắc sẽ nói với bạn rằng đó hoàn toàn không phải là sự hạn chế, rằng sự hiểu biết các quá trình vi mô sơ cấp, về nguyên tắc, là đủ để chúng ta giải thích được tất cả những thứ còn lại, từ Big Bang cho tới tận những giấc mơ của chúng ta.

Triết lý quy giản luận đã gây ra những cuộc tranh luận gay gắt. Nhiều người thấy rằng sẽ thật là ngớ ngẩn và dễ gây phẫn nộ nếu cho rằng những điều kỳ diệu của sự sống và của Vũ trụ chỉ đơn giản là kết quả của cái vũ điệu tẻ nhạt của các hạt cơ bản dưới sự chỉ huy của các định luật vật lý. Lẽ nào niềm vui hay nỗi buồn thực sự chỉ là kết quả của những phản ứng hóa học ở bên trong bộ não của chúng ta – những phản ứng giữa các phân tử và nguyên tử, những hạt mà ở thang nhỏ hơn lại là kết quả của những phản ứng giữa các hạt được liệt kê trong Bảng 1.1. và chính những hạt này lại chỉ đơn giản là các sợi dây nhỏ bé dao động? Đối mặt với kiểu phê phán đó, lời lẽ của nhà vật lý được giải Nobel Steven Weinberg trong cuốn *Giấc mơ về một lý thuyết cuối cùng* vẫn còn rất thận trọng:

“Ở đầu phổ bên kia là những người phản đối quy giản luận những người hoảng sợ trước cái mà họ cảm thấy sẽ là cảnh tiêu điều khô cằn của khoa học hiện đại. Trong bất kỳ phạm vi nào, họ và thế giới của họ đều có thể quy về khuôn khổ của các hạt hoặc

trường cùng với những tương tác của chúng và điều đó khiến cho họ cảm thấy giá trị của mình bị hạ thấp... Tôi không có ý định trả lời những ý kiến phê bình đó bằng một bản trình bày hùng hồn về những vẻ đẹp của khoa học hiện đại. Hẳn nhiên, quan điểm quy giản luận khiến chúng ta đều cảm thấy ớn lạnh sống lưng. Nhưng chúng ta đã chấp nhận nó như vốn có, không phải bởi vì nó khiến chúng ta thích thú mà bởi vì thế giới của chúng ta vận hành đúng như vậy” [3].

Một số người đồng ý với quan điểm khắc nghiệt nhưng thực tế đó, song không phải là tất cả.

Một số người đã viện đến, chẳng hạn như lý thuyết hỗn độn, để biện luận rằng mỗi khi độ phức tạp của một hệ thống tăng lên thì sẽ lại xuất hiện những dạng định luật mới. Việc hiểu được hành trạng của các electron hay các quark là một chuyện, còn áp dụng những tri thức này để mô tả một cơn lốc, chẳng hạn, lại là một chuyện khác. Gần như không có phản đối điều đó. Nhưng các ý kiến bắt đầu phân kỳ ngay khi nói về tính đa dạng và đặc tính đôi khi bất ngờ của các hiện tượng có thể xuất hiện từ những hệ thống phức tạp hơn những hạt đơn lẻ. Phải chăng chúng là hệ quả của những nguyên lý mới? Hay những hiện tượng đó có thể được suy ra một cách cực kỳ phức tạp từ những quy luật vật lý chi phối một số rất lớn các thành phần sơ cấp? Cảm giác riêng của tôi là chúng không phải là thể hiện của những định luật vật lý mới và độc lập. Tất nhiên, sẽ là rất khó khăn khi phải mô tả một cơn lốc bằng những định luật của vật lý hạt cơ bản, nhưng tôi thấy vấn đề ở đây chỉ là do thiếu các phương tiện tính toán chứ không phải là dấu hiệu của sự cần phải có những định luật mới. Nhưng lại một lần nữa không phải mọi người đều đồng ý với quan điểm đó.

Một điểm có tầm quan trọng hàng đầu đối với cuộc phiêu lưu được mô tả trong cuốn sách này và không ai có thể nghi ngờ, đó là: thậm chí ngay cả khi ta chấp nhận quan điểm quy giản luận thuần túy và cứng rắn nhất đi nữa thì lý thuyết và thực tiễn vẫn là hai chuyện khác nhau. Hầu hết mọi người đều thừa nhận rằng việc tìm ra “lý thuyết về tất cả” hoàn toàn không có nghĩa là tất cả những vấn đề của tâm lý học, sinh học, hóa học và thậm chí của vật lý học nữa sẽ được giải quyết hết. Vũ trụ cực kỳ đa dạng và phức tạp tới mức sự phát minh ra lý thuyết cuối cùng theo nghĩa chúng ta mô tả ở đây không hề là lời tuyên bố cáo chung của khoa học. Mà hoàn toàn ngược lại. Lý thuyết này, lý thuyết cho sự giải

thích tối hậu về Vũ trụ ở cấp độ vi mô nhất của nó và không dựa trên một cách giải thích nào khác ở cấp độ sâu hơn, sẽ cung cấp cho ta một nền tảng vững chắc nhất để xây dựng nên sự hiểu biết của chúng ta về thế giới. Sự phát minh ra lý thuyết đó đánh dấu một sự khởi đầu chứ không phải kết thúc. Lý thuyết tối hậu mang lại cho chúng ta một cơ sở vững chắc cho sự nhất quán và vĩnh viễn đảm bảo cho chúng ta rằng Vũ trụ là có thể hiểu được.

[1] Ngoài các vòng dây kín như minh hoạ trên Hình 1.1, các dây cũng có thể có hai đầu tự do (gọi là các dây hở). Để dễ trình bày, chúng tôi chủ yếu tập trung xét các dây kín, nhưng phần lớn những điều chúng tôi nói áp dụng được cả cho hai loại dây.

[2] Albert Einstein, trong bức thư gửi cho một người bạn năm 1942, được trích trong cuốn *Einstein's Mirror* của Tony Hey và Patrick (Cambridge University Press, 1997).

[3] Steven Weinberg, *Dreams of a Final Theory* (Pantheon, 1992), trang 52.

Hiện trạng của lý thuyết dây

Mục đích chủ yếu của cuốn sách này là giải thích sự hoạt động của Vũ trụ theo lý thuyết dây và đặc điểm nhấn mạnh tới những hệ quả của nó đối với sự nhận thức của chúng ta về không gian và thời gian. Không giống như nhiều tác phẩm khác viết về sự tiến bộ của khoa học, cuốn sách mà bạn đang cầm trong tay đây không mô tả một lý thuyết đã hoàn toàn sáng tỏ, đã được khẳng định bởi nhiều quan sát thực nghiệm và đã được toàn thể cộng đồng khoa học thế giới chấp nhận. Sở dĩ như vậy là do, lý thuyết dây là một cấu trúc lý thuyết rất sâu sắc và tinh xảo tới mức, mặc dù đã có những tiến bộ rất lớn trong hai chục năm trở lại đây, nhưng chúng ta còn xa mới có thể tuyên bố là đã làm chủ được hoàn toàn.

Do vậy, lý thuyết dây nên được xem như một công trình đang thi công, nhưng những bộ phận đã được hoàn tất của nó đã hé lộ những đặc trưng lạ lùng của vật chất, không gian và thời gian. Sự kết hợp hài hòa được thuyết tương đối rộng với cơ học lượng tử là một thành công chủ yếu. Hơn nữa, không giống như những lý thuyết trước đó, lý thuyết dây có khả năng trả lời được những câu hỏi căn bản nhất về những thành phần và các lực cơ bản của tự

nhiên, đó là sự thanh nhã của cả những câu trả lời lẫn khuôn khổ để trả lời mà lý thuyết dây đã đưa ra. Chẳng hạn, rất nhiều đặc điểm của tự nhiên tương như chỉ đơn giản là những chi tiết có tính kỹ thuật (như số lượng các hạt cơ bản và những tính chất tương ứng của chúng) thì hóa ra lại là hệ quả của một số đặc trưng căn bản và cụ thể là đặc trưng hình học của Vũ trụ. Nếu như lý thuyết dây là đúng, thì cấu trúc vi mô của Vũ trụ chúng ta sẽ là một mê lộ đa chiều đan xen nhau, trong đó các dây của Vũ trụ không ngừng dao động và vặn xoắn nhịp theo những định luật của Vũ trụ. Các tính chất của những viên gạch sơ cấp cấu tạo nên Vũ trụ hoàn toàn không phải là dãy những chi tiết ngẫu nhiên mà gắn bó một cách mật thiết với cấu trúc của không gian và thời gian.

Tuy nhiên, theo những phân tích mới nhất, lý thuyết này vẫn chưa có những tiên đoán có tính chất quyết định có thể kiểm chứng bằng thực nghiệm để xác định dứt khoát nó đã thực sự vén được bức màn bí mật che giấu những chân lý sâu xa nhất của Vũ trụ chúng ta hay chưa. Có lẽ phải cần một thời gian nữa, khi mà sự hiểu biết của chúng ta đạt tới đủ độ sâu cần thiết, chúng ta mới có thể đến được mục tiêu đó. Tuy nhiên, như chúng ta sẽ thấy trong Chương 9, những kiểm chứng thực nghiệm trong vòng chục năm tới vẫn có thể tạo ra được những bằng chứng gián tiếp nhưng vững chắc về sự đúng đắn của một số kết quả do lý thuyết dây tiên đoán. Hơn thế nữa, như chúng ta sẽ thấy trong Chương 13, lý thuyết dây vừa mới giải quyết được một bài toán trung tâm của vật lý các lỗ đen, liên quan tới cái gọi là entropy Bekenstein – Hawking, mà các phương pháp thông thường đã bất lực trong suốt 25 năm. Nhờ có thành công đó, nhiều người đã tin rằng lý thuyết dây sẽ cho chúng ta một sự hiểu biết sâu sắc nhất về sự hoạt động của Vũ trụ.

Edward Witten, một chuyên gia hàng đầu và là nhà vật lý tiên phong trong lĩnh vực này, đã tổng kết tình hình trên trong nhận xét rằng: “lý thuyết dây là một bộ phận của vật lý thế kỷ XXI đã tình cờ rơi xuống thế kỷ XX” [1] - (một đánh giá được nêu ra đầu tiên bởi nhà vật lý nổi tiếng người Italia – Daniele Amati). Về một phương diện nào đó, điều này cũng tương tự như chúng ta đặt các nhà bác học của thế kỷ XIX trước một siêu máy tính mà không có tài liệu hướng dẫn sử dụng. Dần dà, bằng những bước đi dò dẫm, rồi họ cũng sẽ hiểu được sức mạnh của chiếc máy đó, nhưng họ sẽ còn phải bỏ ra nhiều sức lực và thời gian mới có thể làm chủ

được nó. Những mách bảo về tiềm năng của chiếc máy đó (cũng như chúng ta cảm nhận được sức mạnh giải thích của lý thuyết dây) sẽ mang lại cho họ một động cơ cực kỳ mạnh mẽ để chinh phục hết những tính năng của nó. Ngày hôm nay, một động cơ tương tự cũng đang thôi thúc cả một thế hệ các nhà vật lý hăm hở tìm kiếm một sự hiểu biết đầy đủ và chính xác về lý thuyết dây.

Ý kiến của Witten và của nhiều chuyên gia khác trong lĩnh vực này chỉ ra rằng phải mất hàng chục thậm chí hàng trăm năm nữa chúng ta mới triển khai được đầy đủ và mới thực sự hiểu hết lý thuyết dây. Có lẽ đúng là như vậy. Thực tế, cơ sở toán học của lý thuyết dây phức tạp tới mức, cho tới nay chưa có ai biết được những phương trình chính xác chi phối lý thuyết này là như thế nào. Các nhà nghiên cứu chỉ mới biết một số dạng gần đúng của các phương trình đó, nhưng dù thế chúng cũng đã quá phức tạp và do đó mới chỉ giải được một phần. Tuy nhiên, vào cuối những năm 1900 người ta đã chứng kiến nhiều đột phá lý thuyết quan trọng cho phép trả lời được nhiều câu hỏi cực kỳ khó về mặt lý thuyết. Và điều này khiến người ta nghĩ rằng sự hiểu biết lý thuyết dây một cách đầy đủ về mặt định tính không phải quá xa vời như người ta tưởng. Các nhà vật lý trên khắp thế giới đang phát triển những kỹ thuật mới hòng vượt qua nhiều phương pháp gần đúng đã được dùng cho tới nay. Họ cùng nhau lắp ghép những mảnh rời rạc của câu đố ghép hình là lý thuyết dây của chúng ta với một tốc độ rất đáng khích lệ.

Một điều lạ lùng là, những tiến bộ mới đây đã làm xuất hiện nhiều quan niệm mới cho phép giải thích lại một số khía cạnh kiến trúc của lý thuyết mà người ta tưởng là đã được xác lập. Chẳng hạn, nhìn hình 1.1. bạn có thể nảy ra một câu hỏi rất tự nhiên là: tại sao lại là dây? Tại sao không phải là các đĩa? Hay không phải là những giọt cực nhỏ? Hay thậm chí không là tổ hợp của ba khả năng đó? Như chúng ta sẽ thấy trong Chương 12, những thành tựu mới nhất cho thấy rằng các phân tử khác nhau này thực tế đều đóng một vai trò quan trọng trong lý thuyết dây và đã phát hiện ra rằng lý thuyết dây thực sự chỉ là bộ phận của một sự tổng hợp rộng lớn hơn thường được gọi (một cách bí ẩn) là lý thuyết M. Những phát minh mới nhất đó sẽ là đề tài được đề cập tới trong những chương cuối cùng của cuốn sách này.

Sự tiến bộ của khoa học thường diễn ra theo từng đợt. Một số thời kỳ dồn dập những đột phá ngoạn mục, trong khi những thời

kỳ khác đối với các nhà nghiên cứu chỉ là những chặng đường dằng dặc qua sa mạc. Các nhà khoa học đưa ra những kết quả cả về lý thuyết lẫn thực nghiệm rồi sau đó được cả cộng đồng khoa học thảo luận. Những kết quả đó đôi khi có thể bị từ chối vứt bỏ hoặc được sửa đổi, nhưng đôi khi chúng cũng mang lại một chớp lửa cảm hứng cần thiết để tìm ra một con đường mới và chính xác hơn để hiểu cái vũ trụ vật lý của chúng ta. Nói một cách khác, khoa học luôn đi theo một con đường zig zac tới cái mà chúng ta hy vọng sẽ là chân lý cuối cùng. Con đường đó bắt đầu từ những toan tính thăm dò Vũ trụ đầu tiên của con người nhưng chưa ai đoán được điểm tận cùng của nó. Và cũng không ai có thể nói được, trên con đường dằng dặc đó, lý thuyết dây đơn giản chỉ là một điểm dừng, một điểm mốc quan trọng hay chính là đích cuối cùng. Dẫu sao, những nghiên cứu miệt mài của nhiều nhà vật lý và toán học thuộc nhiều quốc tịch khác nhau trong suốt hai chục năm qua đã cho chúng ta một cơ sở để hy vọng rằng chúng ta đang đi theo con đường đúng và có thể cũng là con đường cuối cùng.

Riêng chuyện ở trình độ chưa cao như chúng ta hiện nay mà đã có thể rút ra được những kết luận mới về sự hoạt động của Vũ trụ cũng đã chứng tỏ sự giàu có và tầm vóc của lý thuyết dây. Sợi chỉ trung tâm xuyên suốt trong những phần tiếp sau sẽ là những phát triển nhằm đẩy xa hơn nữa cuộc cách mạng trong quan niệm của chúng ta về không gian và thời gian, một cuộc cách mạng đã được khởi phát bởi các thuyết tương đối hẹp và rộng của Einstein. Chúng ta sẽ thấy rằng, nếu lý thuyết dây là đúng, thì cấu trúc của Vũ trụ chúng ta có những tính chất mà ngay cả Einstein cũng phải kinh ngạc.

[1] Phỏng vấn Edword Witten, 11 tháng 5 năm 1998.

Phần II
Không gian, thời gian và các lượng tử

CHƯƠNG 2

KHÔNG GIAN, THỜI GIAN VÀ NGƯỜI QUAN SÁT

Tháng 6 năm 1905: Albert Einstein, mới 26 tuổi, đã gửi đăng một bài báo trên tạp chí khoa học của Đức *Annalen der Physik*. Trong bài nghiên cứu mang tính rất chuyên môn đó, Einstein đã tấn công vào một nghịch lý có liên quan tới ánh sáng đã làm cho ông trăn trở khoảng chừng mười năm trước. Khi lật tới trang bản thảo cuối cùng của Einstein, vị chủ biên của tạp chí là Max Planck đã thấy rằng bài báo có chất lượng vượt quá mọi yêu cầu để được công bố. Thế là, không hề có trống đồng cờ mở, gã nhân viên cạo giấy ở Bernơ, Thụy Sĩ, đã làm đảo lộn hoàn toàn những khái niệm truyền thống về không gian – thời gian và thay chúng bằng một khái niệm mới với những tính chất hoàn toàn trái ngược những điều mà chúng ta đã quen thuộc theo kinh nghiệm hằng ngày.

Nghịch lý khiến Einstein phải trăn trở từ hơn mười năm trước là thế này. Vào giữa thế kỷ XIX, sau khi xem xét một cách tỉ mỉ những công trình thực nghiệm của nhà vật lý người Anh Michael Faraday, nhà vật lý người Scotlen Clerk Maxwell đã thành công trong việc thống nhất được điện và từ trong một khuôn khổ duy nhất là trường điện từ. Nếu như bạn có dịp đứng trên một đỉnh núi ngay trước khi có mưa dông lớn hay đứng cạnh một máy phát tĩnh điện Van de Graaf, bạn sẽ có được một cảm giác sâu xa về trường điện từ là gì, vì bạn đã cảm nhận được nó. Trong trường hợp bạn chưa có cơ may đó, thì hãy tưởng tượng nó giống như những làn sóng các đường sức điện và từ lan rộng trong vùng không gian mà nó đi qua. Chẳng hạn, khi bạn rắc magnet sắt gần một thanh nam châm, bạn sẽ thấy một bức tranh rất có trật tự, tạo bởi những magnet sắt này xếp theo một số những đường sức từ không nhìn thấy được. Vào một ngày đông đặc biệt khô ráo, khi cởi những chiếc áo len ra, chắc chắn là khi đó bạn đã chứng kiến sự tồn tại của các đường sức điện. Tiếng lép bép mà bạn nghe thấy hoặc thậm chí có cả sự phóng điện nhỏ mà bạn có thể cảm thấy đều là những biểu hiện của những đường sức mà các điện tích bị bứt khỏi những sợi dệt nên chiếc áo của bạn tạo ra. Ngoài chuyện

thống nhất các hiện tượng điện và từ trong một khuôn khổ toán học duy nhất, lý thuyết Maxwell còn bất ngờ chứng tỏ được rằng những nhiễu động điện từ luôn luôn được truyền với cùng một vận tốc không đổi và vận tốc đó lại chính là vận tốc ánh sáng. Điều này cho phép Maxwell hiểu ra rằng ánh sáng thấy được chẳng qua chỉ là một loại sóng điện từ có khả năng tương tác hóa học với võng mạc để tạo ra thị giác. Hơn nữa, điều quan trọng, theo lý thuyết Maxwell, các sóng điện từ, trong đó có ánh sáng thấy được đều là những kẻ du mục: chúng không bao giờ dừng lại cả. Chúng cũng không bao giờ chậm lại, mà luôn luôn chuyển động với vận tốc của ánh sáng.

Mọi chuyện đều tốt đẹp cho tới khi ta đặt ra câu hỏi, như chàng thanh niên Einstein 26 tuổi đã làm: Điều gì sẽ xảy ra nếu chúng ta đuổi theo một chùm tia sáng với vận tốc ánh sáng? Lý lẽ trực giác, bắt rễ từ những định luật chuyển động của Newton, mách bảo ta rằng chúng ta sẽ đuổi kịp các sóng ánh sáng và do đó sẽ thấy chúng là dừng, tức là ánh sáng khi đó sẽ đứng yên. Nhưng theo lý thuyết của Maxwell và những quan sát đáng tin cậy khác, thì không thể có chuyện ánh sáng là dừng được: không ai có thể giữ một nhúm ánh sáng trong bàn tay của mình. Và vấn đề được nảy sinh từ đó. May thay, Einstein lại không hề biết rằng đã có nhiều nhà vật lý hàng đầu thế giới đã từng vật lộn với vấn đề đó, nhưng đã thất bại và họ chỉ còn nghiền ngẫm về cái nghịch lý của Maxwell – Newton trong những suy tư thâm kín của họ.

Trong chương này chúng ta sẽ xem, thông qua thuyết tương đối hẹp của mình, Einstein đã giải quyết cuộc xung đột đó như thế nào và khi làm như vậy, ông đã làm thay đổi vĩnh viễn quan niệm của chúng ta về không gian và thời gian ra sao. Có lẽ người ta sẽ ngạc nhiên rằng mỗi quan tâm cơ bản của thuyết tương đối hẹp là hiểu một cách chính xác thế giới sẽ như thế nào dưới con mắt của những cá nhân, thường gọi là những “người quan sát”, chuyển động đối với nhau. Thoạt tiên, điều đó tưởng như chỉ là một bài tập luyện trí óc không mấy quan trọng. Nhưng thực tế hoàn toàn ngược lại: với hình ảnh thường trực về người quan sát đuổi theo chùm sáng, trong tay Einstein đã có những hệ quả sâu sắc, thâm tóm một cách đầy đủ cả những tình huống tẻ nhạt nhất được nhìn như thế nào dưới con mắt của những người quan sát chuyển động đối với nhau.

Trực giác và những sai lầm của nó

Kinh nghiệm hằng ngày đã cho phép chúng ta cảm nhận được một số khác biệt gắn liền với hai người quan sát chuyển động đối với nhau. Chẳng hạn, theo quan điểm của người lái xe chúng ta lại là đứng yên đối với người vẫy xe đi nhờ đang đứng ở bên đường. Cũng tương tự, bảng đồng hồ trên xe là đứng yên đối với người lái xe (thật may mắn thay!), nhưng giống như các bộ phận khác của chiếc xe, nó lại là chuyển động đối với người vẫy xe đi nhờ. Đó là những tính chất quá sơ đẳng và trực quan về thế giới xung quanh chúng ta tới mức chúng ta chẳng buồn chú ý tới nữa.

Tuy nhiên, thuyết tương đối hẹp lại cho thấy rằng những khác biệt đó trong sự quan sát của hai cá nhân nói ở trên là tinh tế và sâu sắc hơn nhiều. Điều lạ lùng là nó tiên đoán rằng hai người quan sát chuyển động đối với nhau lại cảm nhận về khoảng cách và thời gian một cách khác nhau. Điều này có nghĩa là, hai chiếc đồng hồ y hệt nhau mà hai người quan sát đó mang theo sẽ phát ra những tiếng tích tắc với nhịp độ khác nhau, do đó khoảng thời gian giữa hai sự kiện đã chọn sẽ được chỉ bởi hai đồng hồ đó một cách khác nhau. Thuyết tương đối hẹp hoàn toàn không đặt vấn đề nghi ngờ về độ chính xác của các đồng hồ, mà thực tế nó đã thiết lập được rằng đó chính là một tính chất của thời gian. Tương tự, hai người quan sát của chúng ta còn mang theo hai chiếc thước dây y hệt nhau, và họ đã đo được hai chiều dài khác nhau của cùng một vật. Vấn đề không phải là do sự không chính xác của các dụng cụ đo hay những sai số do cách sử dụng các dụng cụ đó. Những dụng cụ đo chính xác nhất thế giới đều khẳng định rằng không gian và thời gian - được đo như khoảng cách và độ kéo dài - không được cảm nhận như nhau bởi mọi người quan sát. Theo cách chính xác do Einstein vạch ra, thuyết tương đối hẹp đã giải quyết được sự xung đột giữa trực giác của chúng ta về chuyển động và những tính chất của ánh sáng, nhưng cái giá phải trả cho sự giải quyết đó là: những người quan sát chuyển động đối với nhau sẽ không nhất trí với nhau về những quan sát của họ về cả không gian lẫn thời gian.

Đã gần một thế kỷ kể từ khi Einstein công bố với thế giới phát minh gây chấn động của mình, thế nhưng đa số chúng ta vẫn quen dùng khái niệm không gian và thời gian tuyệt đối. Thuyết tương đối hẹp không có trong máu thịt chúng ta, do đó ta không

cảm nhận được nó. Những hệ quả của nó không nằm trong phần trung tâm của trực giác chúng ta. Nguyên do của điều đó cũng khá đơn giản: những hiệu ứng của thuyết tương đối hẹp phụ thuộc vào vận tốc mà ta chuyển động và đối với các vận tốc như của xe ô tô, máy bay, hoặc ngay cả của tàu con thoi đi nữa thì những hiệu ứng đó cũng rất bé nhỏ. Sự khác biệt trong cảm nhận về không gian và thời gian của một người ngồi trong xe hơi hoặc trên máy bay và người đứng trên mặt đất vẫn có, nhưng chúng quá nhỏ nên không nhận thấy được. Tuy nhiên, nếu như có một người du hành trên con tàu vũ trụ tương lai với vận tốc gần với vận tốc ánh sáng thì những hiệu ứng của tính tương đối sẽ trở nên rất rõ rệt. Tất nhiên, hiện nay điều đó vẫn nằm trong thế giới của khoa học viễn tưởng, nhưng như chúng ta sẽ thấy trong các mục sau, nhiều thí nghiệm thông minh đã cho phép chúng ta quan sát được, thậm chí đo đạc được cả những tính chất tương đối của không gian và thời gian mà lý thuyết của Einstein đã tiên đoán.

Để có một ý niệm về các thang có liên quan, ta hãy quay trở lại những năm 1970, khi các loại xe hơi lớn và chạy nhanh ra đời. Slim mua một chiếc Trans Am. Anh ta đưa người em tên là Jim đến đường đua xe để tiến hành thử vận tốc. Slim cho xe lao với tốc độ 200 km một giờ trên một đường đua dài 1500m, trong khi Jim đứng bên lề đường đo thời gian. Trong khi chờ đợi khẳng định của Jim, Slim cũng dùng một đồng hồ bấm giây để đo thời gian chiếc xe của anh ta chạy hết đoạn đường đua. Trước công trình của Einstein, chẳng có ai lại đi đặt câu hỏi rằng nếu cả hai đồng hồ của Slim và Jim đều hoạt động tốt thì chúng có đo được cùng một khoảng thời gian hay không? Nhưng theo thuyết tương đối hẹp, trong khi Jim đo được khoảng thời gian đó là 30 giây, thì đồng hồ của Slim đo được là 29,999999999952 giây – tức là nhỏ hơn một lượng cực bé. Tất nhiên, sự khác biệt này là nhỏ tới mức ta không thể đo được bằng đồng hồ bấm giây hoặc thậm chí bằng cả các đồng hồ nguyên tử chính xác nhất. Vì vậy không có gì lạ là tại sao những kinh nghiệm hằng ngày không hé lộ cho chúng ta biết sự trôi qua của thời gian phụ thuộc vào trạng thái chuyển động của chúng ta.

Cũng có một sự bất đồng tương tự về các phép đo chiều dài. Chẳng hạn, trong một lần chạy thử khác, Jim dùng một mẹo khá thông minh để đo chiều dài chiếc xe mới của Slim. Cậu ta bấm cho đồng hồ chạy ngay khi đầu trước của chiếc xe đi ngang qua chỗ

mình đứng rồi bấm cho nó dừng lại ngay khi đuôi chiếc xe đi ngang qua. Vì Jim biết Slim cho xe chạy với tốc độ 200km một giờ, nên cậu ta tính ngay ra chiều dài chiếc xe bằng cách nhân vận tốc đó với khoảng thời gian chỉ bởi chiếc đồng hồ bấm giây. Lại một lần nữa, trước Einstein, chẳng có ai lại đặt câu hỏi liệu chiều dài mà Jim đo được một cách gián tiếp như trên có trùng với chiều dài mà Slim đo được khi chiếc xe còn nằm ở phòng trưng bày của cửa hàng hay không. Trái lại, thuyết tương đối hẹp cho ta biết rằng nếu Jim và Slim đã tiến hành đo như trên một cách chính xác và giả thử Slim đo được chiều dài chiếc xe chính xác bằng 4m, thì kết quả phép đo của Jim sẽ là 3,99999999999314 mét, nghĩa là hơi nhỏ hơn chút xíu. Cũng như với phép đo thời gian, đây là sự sai khác rất bé, bé tới mức những dụng cụ đo thông thường không đủ độ chính xác để phát hiện được.

Mặc dù sự khác biệt là cực kỳ nhỏ, nhưng chúng đã cho ta thấy một sự sai lầm rất cơ bản của quan niệm thông thường cho rằng không gian và thời gian là tuyệt đối và không thể thay đổi. Khi vận tốc tương đối của hai người quan sát, như Jim và Slim chẳng hạn, lớn hơn, thì sai lầm đó sẽ được thể hiện càng rõ ràng hơn. Và khi vận tốc tương đối của họ gần với vận tốc ánh sáng, thì những khác biệt đó sẽ trở nên nhận biết được. Lý thuyết Maxwell và nhiều thực nghiệm đã xác lập được rằng vận tốc ánh sáng trong chân không – vận tốc lớn nhất khả dĩ mà không gì có thể vượt qua – có giá trị là ba trăm ngàn kilômét trong một giây, tức hơn một tỷ kilômét trong một giờ! Với vận tốc đó người ta có thể chạy vòng quanh Trái Đất hơn 7 vòng trong 1 giây. Nếu giả thử Slim cho xe chạy không phải với vận tốc 200km/h mà là 900 triệu km/h (tức khoảng 83% vận tốc của ánh sáng), thì những tính toán theo thuyết tương đối sẽ cho kết quả là chiều dài chiếc xe mà Jim đo được chỉ dài hơn 2m chút ít, nghĩa là khác rất xa với kết quả đo của Slim (cũng là khác xa với chiều dài ghi trong lý lịch của xe). Tương tự, thời gian chạy xe trên đường đua theo phép đo của Jim dài hơn gần hai lần so với phép đo của Slim.

Vì những vận tốc lớn như thế nằm ngoài khả năng đạt được của các phương tiện thông thường, nên các hiệu ứng “giãn nở thời gian” và “co Lorenzt” không gian (thuật ngữ chuyên môn của các nhà vật lý dùng để gọi các hiện tượng mô tả ở trên) là cực kỳ nhỏ bé trong đời sống thường nhật của chúng ta. Nếu chúng ta có dịp được sống trong một thế giới mà các vật thường chuyển động gần

với vận tốc ánh sáng, thì những tính chất nói trên của không gian và thời gian sẽ trở nên trực quan, (vì chúng ta cảm nhận được chúng hàng ngày) và đối với chúng ta, chúng cũng sẽ hiển nhiên như chuyển động biểu kiến của những hàng cây bên đường mà ta đã nói tới ở đầu chương. Nhưng vì chúng ta không sống trong một thế giới như thế, nên những đặc tính đó mới trở nên xa lạ như vậy. Và như chúng ta sẽ thấy, để hiểu và chấp nhận chúng, chúng ta phải vứt bỏ hoàn toàn quan niệm của chúng ta về thế giới.

Nguyên lý tương đối

Nền tảng của thuyết tương đối hẹp gồm hai cấu trúc rất đơn giản nhưng lại rất căn bản. Chúng ta đã biết rằng, một trong hai cấu trúc có liên quan tới những tính chất của ánh sáng và điều này sẽ được xem xét một cách đầy đủ hơn ở mục tiếp sau. Cấu trúc thứ hai có bản chất trừu tượng hơn. Nó không liên quan tới một định luật vật lý cụ thể, mà được áp dụng cho mọi định luật vật lý. Đó là nguyên lý tương đối. Nguyên lý này dựa trên một sự kiện đơn giản là: bất kỳ khi nào nói tới vận tốc (kể cả độ lớn và hướng của nó) thì nhất thiết ta phải chỉ rõ ai hoặc cái gì đã làm phép đo đó. Ta sẽ dễ dàng hiểu được ý nghĩa và tầm quan trọng của điều nói trên bằng cách xem xét tình huống sau:

Ta hãy hình dung một anh chàng George nào đó, mặc bộ quần áo du hành vũ trụ có gắn một chiếc đèn chớp phát ánh sáng đỏ, đang trôi nổi trong màn đêm dày đặc của khoảng không vũ trụ, cách xa hết thấy các hành tinh, các ngôi sao và các thiên hà. Theo quan điểm của George thì anh ta là hoàn toàn đứng yên trong bóng đêm mịn màng và tĩnh lặng của Vũ trụ. Rồi George chợt nhận thấy từ xa có một đốm sáng xanh đang tiến lại gần. Cuối cùng, khi nó tới gần hơn, George mới nhận ra rằng chiếc đèn được gắn vào bộ quần áo du hành vũ trụ của một nhà du hành khác – Gracie - đang chậm chạp trôi tới. Khi đi qua bên cạnh, cô gái và George vẫy tay chào nhau, rồi cô gái lại trôi tiếp ra xa. Câu chuyện này hoàn toàn có thể được kể lại hết như thế theo quan điểm của Gracie. Nghĩa là ban đầu Gracie cũng hoàn toàn đơn độc trong bóng đêm bao la và tĩnh lặng của khoảng không Vũ trụ. Rồi bất chợt Gracie cũng thấy từ xa có đốm sáng đỏ nhấp nháy đang tiến lại gần. Cuối cùng, khi đốm đỏ đến khá gần, cô mới nhận ra đó là một nhà du hành khác, tức là George, đang chậm chạp trôi qua

cạnh mình. Anh ta và Gracie vẫy chào nhau rồi anh ta tiếp tục trôi tiếp ra xa.

Hai câu chuyện đó mô tả chỉ một tình huống duy nhất theo hai quan điểm khác nhau nhưng đều có lý như nhau. Mỗi người quan sát đều cảm thấy mình đứng yên và người kia chuyển động. Quan điểm của mỗi người đều hợp lý và có thể thông cảm được. Do có sự đối xứng giữa hai nhà du hành đó, nên không có cách nào để nói được rằng ai là đúng, ai là sai. Cả hai quan điểm đều có một phần sự thật ngang nhau.

Ví dụ trên đã nắm bắt được ý nghĩa của nguyên lý tương đối: khái niệm chuyển động là có tính tương đối. Chúng ta có thể nói về chuyển động của một vật, nhưng chỉ là đối với hay so với một vật khác. Vì vậy nói rằng: “George chuyển động với vận tốc 15km/h” là hoàn toàn vô nghĩa, vì chúng ta không chỉ rõ anh ta chuyển động so với cái gì. Nhưng nói rằng: “George chuyển động ngang qua Gracie với vận tốc 15km/h” lại là có nghĩa vì chúng ta đã chỉ ra Gracie như một vật mốc. Như ví dụ trên của chúng ta cho thấy, câu nói thứ hai ở trên hoàn toàn tương đương với câu nói rằng: “Gracie chuyển động ngang qua George với vận tốc 15km/h (theo phương ngược lại)”. Nói một cách khác, không có chuyển động tuyệt đối. Chuyển động là tương đối.

Yếu tố then chốt của câu chuyện trên là ở chỗ: cả George lẫn Gracie đều không bị đẩy, hay bị kéo hay chịu một tác dụng nào đó làm nhiễu động trạng thái chuyển động thẳng đều êm đềm của họ. Vì vậy chính xác hơn, ta phải nói rằng chuyển động không chịu tác dụng của một lực nào chỉ có nghĩa khi so sánh với các vật khác. Sự chính xác này rất quan trọng, bởi lẽ nếu có các lực tham gia vào, thì chúng sẽ làm thay đổi vận tốc (cả về độ lớn lẫn về hướng) của hai nhà quan sát và những thay đổi đó có thể nhận thấy được. Chẳng hạn, nếu như George có đeo một động cơ phản lực nhỏ ở sau lưng, thì anh ta chắc sẽ cảm thấy mình đang chuyển động. Nhưng cảm giác đó chỉ là bản năng. Nếu động cơ bắt đầu thực sự đẩy về phía sau, thì George sẽ biết là mình đang chuyển động cho dù anh ta có nhắm mắt lại và do đó không thể so sánh với các vật khác. Ngay cả khi không có những vật mốc để so sánh, anh ta cũng không thể tuyên bố rằng mình là đứng yên “trong khi đó toàn bộ thế giới còn lại chuyển động qua bên cạnh anh ta”. Như vậy, chuyển động có vận tốc không đổi là tương đối; nhưng điều này không còn đúng nữa đối với các chuyển động có vận tốc thay đổi,

tức là những chuyển động có gia tốc. (Chúng ta sẽ còn trở lại phát biểu này trong chương sau, khi nói về chuyển động có gia tốc và thuyết tương đối rộng).

Để dễ hiểu, chúng ta đã bố trí cho câu chuyện trên xảy ra trong bóng đêm của khoảng không vũ trụ, nhằm gạt bỏ những vật thể quen thuộc như đường phố, nhà cửa mà chúng ta thường mặc nhiên xem là “đứng yên” (mặc dù là không đúng). Tuy nhiên, chính nguyên lý này cũng áp dụng được cho cả mặt đất trần thế của chúng ta và thực tế ta cũng thường cảm nhận được. Ví dụ, hãy tưởng tượng, sau khi ngủ một giấc say trên xe lửa, bạn thức dậy ngay khi con tàu của bạn đi qua bên cạnh một đường ray khác đặt song song. Khi đó tầm nhìn của bạn hoàn toàn bị chắn bởi một đoàn tàu khác, nên không nhìn thấy các vật khác, vì vậy trong khoảnh khắc bạn không biết chắc chắn con tàu của bạn hay con tàu kia hay cả hai đang chuyển động. Tất nhiên, con tàu của bạn có thể lắc hoặc giật, hoặc nếu nó đổi hướng theo một đường vòng, thì bạn sẽ cảm thấy là mình đang chuyển động. Nhưng nếu con tàu chạy thật êm, và nếu vận tốc của nó giữ nguyên không đổi thì bạn sẽ chỉ thấy chuyển động tương đối của hai con tàu chứ không thể nói chắc chắn là con tàu nào đang chuyển động.

Bây giờ chúng ta tiến thêm một bước nữa. Hãy tưởng tượng bạn đang ngồi trên xe lửa với các cửa sổ đều đóng kín mít. Do không có khả năng nhìn ra bên ngoài toa xe của mình và giả sử rằng con tàu chạy thật êm với vận tốc tuyệt đối là đều, khi đó bạn sẽ không có cách nào xác định được trạng thái chuyển động của bạn. Toa tàu của bạn nhìn hoàn toàn như nhau, bất kể là nó đứng yên trên đường ray hay đang chuyển động. Einstein đã hình thức hóa ý tưởng đó, một ý tưởng thực sự đã được biết tới từ thời Galileo, bằng cách tuyên bố rằng bạn hay bất kỳ một hành khách nào khác trong một toa xe kín mít dù có thực hiện bất cứ thí nghiệm nào cũng không thể phát hiện ra được con tàu đứng yên hay chuyển động. Điều này cũng thu tóm cả nguyên lý tương đối: vì chuyển động không có lực nào tác dụng là tương đối, nó chỉ có nghĩa khi so sánh với các vật khác hay người quan sát khác cũng đang chuyển động mà không có lực nào tác dụng. Đối với bạn không có cách nào có thể xác định được trạng thái chuyển động của mình mà không có sự so sánh trực tiếp hoặc gián tiếp với các vật “bên ngoài”. Đơn giản là không có khái niệm chuyển động

thẳng đều tuyệt đối, chỉ có những chuyển động tương đối là có ý nghĩa vật lý.

Thực tế, Einstein còn thấy rằng nguyên lý tương đối có một tuyên bố to lớn hơn: các định luật vật lý – bất kể là định luật nào – là hoàn toàn như nhau đối với tất cả những người quan sát chuyển động với vận tốc không đổi. Nếu George và Gracie ngoài chuyện trôi nổi đơn độc trong Vũ trụ còn tiến hành một số thí nghiệm giống hệt nhau trên trạm không gian cũng trôi nổi như họ, thì những kết quả mà họ tìm được là hoàn toàn như nhau. Lại một lần nữa hai người hoàn toàn có lý khi tin rằng trạm không gian của họ là đứng yên ngay cả khi chúng chuyển động đối với nhau. Nếu như tất cả những thiết bị thí nghiệm của họ là như nhau và không có gì khác biệt trong bố trí thí nghiệm, thì chúng là hoàn toàn đối xứng. Những định luật vật lý mà mỗi người rút ra từ những thí nghiệm của họ cũng sẽ hoàn toàn như nhau. Cả bản thân họ lẫn những thí nghiệm của họ đều không “cảm” thấy – tức là không phụ thuộc theo bất cứ cách nào – vào chuyển động có vận tốc không đổi. Chính quan niệm đơn giản này đã thiết lập sự đối xứng hoàn toàn giữa các người quan sát và cũng chính quan niệm này được hiện thân thành nguyên lý tương đối. Ngay dưới đây, chúng ta sẽ dùng nguyên lý này cho một hiệu ứng sâu xa hơn.

Vận tốc ánh sáng

Yếu tố then chốt thứ hai của thuyết tương đối hẹp gắn liền với ánh sáng và những tính chất chuyển động của nó. Trái với phát biểu của chúng ta nói rằng: “George chuyển động với vận tốc 15km/h” sẽ là vô nghĩa nếu không chỉ ra một vật mốc cụ thể nào để so sánh, những nỗ lực của nhiều thế hệ các nhà vật lý thực nghiệm trong gần một thế kỷ chứng tỏ rằng ánh sáng luôn chuyển động với vận tốc ba trăm ngàn kilômét một giây (tức 1080 triệu kilômét một giờ) đối với bất kể vật mốc so sánh nào.

Điều này đòi hỏi một cuộc cách mạng trong quan niệm của chúng ta về Vũ trụ. Trước hết chúng ta hãy tìm hiểu ý nghĩa của khẳng định trên bằng cách đối lập nó với những khẳng định tương tự áp dụng cho các đối tượng thông thường hơn. Hãy tưởng tượng vào một ngày đẹp trời, bạn đi chơi trong vườn với một người bạn. Trong khi cả hai đang lười nhác ném qua ném lại quả bóng với vận tốc, chẳng hạn 20km/h, thì một cơn giông thành linh ập tới khiến

cho hai người phải chạy vào chỗ trú mưa. Sau khi mưa tạnh, hai người lại tiếp tục chơi nhưng bạn nhận thấy người bạn gái của mình không còn như trước nữa. Mái tóc cô ta bù xù, đôi mắt trợn trừng điên dại. Và khi nhìn bàn tay cô ta, bạn sững sờ thấy rằng cô ta đang định ném cho bạn... một quả lựu đạn, chứ không phải là quả bóng. Hiển nhiên là bạn chẳng còn tâm trí đâu mà chơi bóng và bạn sẽ vẫn còn đang bay nhưng do bạn chạy, nên tốc độ của nó không còn là 20km/h, mà là nhỏ hơn. Thực tế, kinh nghiệm hàng ngày cho ta biết rằng nếu bạn chạy, ví dụ vận tốc là 12km/h, thì quả lựu đạn sẽ tiến về phía bạn với vận tốc 8km/h ($20-12=8$). Một ví dụ khác: khi bạn đang ở trong núi và xảy ra hiện tượng lở tuyết ập về phía bạn, thì phản ứng tự nhiên của bạn sẽ là quay lui và bỏ chạy, vì điều đó sẽ làm cho vận tốc của tuyết đuổi theo bạn sẽ giảm đi và nói chung đó là một điều tốt. Như vậy, lại một lần nữa ta thấy rằng một người quan sát đứng yên sẽ nhận thấy vận tốc lao đến gần của tuyết lở sẽ lớn hơn so với cảm nhận của người bỏ chạy.

Bây giờ chúng ta sẽ so sánh những quan sát cơ bản này về quả bóng, quả lựu đạn và tuyết lở với những quan sát về ánh sáng. Để cho sự so sánh được sát hơn, chúng ta sẽ xem ánh sáng như một chùm các hạt photon (đặc điểm này của ánh sáng sẽ được thảo luận đầy đủ hơn ở Chương 4). Khi chúng ta bật một đèn flash hoặc một chùm laser, thực tế là chúng ta đã bắn một dòng các hạt photon về hướng mà ta định trước. Như chúng ta đã làm trong trường hợp quả lựu đạn và trường hợp tuyết lở, ta hãy xem chuyển động của các photon sẽ như thế nào đối với một người quan sát chuyển động. Hãy tưởng tượng rằng cô bạn gái điên rồ của bạn đã thay quả lựu đạn bằng một laser cực mạnh. Nếu cô ta bắn chùm laser về phía bạn, và nếu bạn có một thiết bị đo thích hợp, bạn sẽ thấy rằng vận tốc của các photon tiến gần tới bạn với vận tốc 1080 triệu kilômét một giờ (tức 300.000km/s). Nhưng điều gì sẽ xảy ra nếu bạn bỏ chạy, như bạn đã làm trong trường hợp phải đối mặt với quả lựu đạn được ném tới? Bây giờ bạn sẽ đo được vận tốc của các photon đang tiến tới gần bằng bao nhiêu? Để cho hấp dẫn hơn hãy tưởng tượng rằng bạn nhảy lên một con tàu vũ trụ xuyên thiên hà chạy tròn với một vận tốc khiêm tốn là 180 triệu kilômét giờ (tức 50.000 km/s). Theo lý luận dựa trên thế giới quan truyền thống của Newton, thì vì giờ đây bạn đang chạy ra xa, nên bạn hy vọng rằng sẽ thấy các photon đuổi theo bạn với vận tốc chậm hơn.

Cụ thể, bạn chờ đợi sẽ thấy chúng tiến về phía bạn với vận tốc (1080 triệu kilômét/giờ) = 900 triệu km/h.

Những bằng chứng thực nghiệm ngày càng nhiều bắt đầu từ những năm 1880 cùng với những phân tích sâu sắc của lý thuyết điện từ Maxwell về ánh sáng dần dần đã thuyết phục được cộng đồng khoa học rằng kết quả tính toán ở trên không phải là điều mà bạn sẽ thấy. Ngay cả khi bạn bỏ chạy ra xa đi nữa, thì bạn cũng vẫn cứ đo được vận tốc của các photon đang tiến tới gần bằng 300.000km/s, không bớt một li. Mặc dù thoát đầu điều đó xem ra có vẻ hoàn toàn vô lý, không hề giống với những gì đã xảy ra trong trường hợp quả lựu đạn hay trường hợp tuyệt lộ, nhưng sự thực vận tốc của các photon tiến tới gần luôn luôn bằng 300.000km/s. Và điều này cũng đúng nếu bạn tiến tới gần các photon đang đi tới hay đuổi theo chúng, nghĩa là vận tốc của chúng vẫn hoàn toàn không thay đổi: chúng vẫn chuyển động với vận tốc 300.000km/s. Bất kể chuyển động tương đối giữa nguồn photon và người quan sát là như thế nào, vận tốc của ánh sáng luôn luôn có giá trị như nhau [1].

Những hạn chế về mặt công nghệ khiến cho những thí nghiệm với ánh sáng được mô tả ở trên là không thể thực hiện được. Nhưng tồn tại những phương tiện khác. Chẳng hạn, vào năm 1913, nhà vật lý người Hà Lan Willem de Sitter đã gợi ý rằng những hệ sao đôi chuyển động nhanh (tức là hệ gồm hai ngôi sao quay quanh nhau) có thể được dùng để đo tác dụng của nguồn chuyển động đến vận tốc của ánh sáng. Nhiều thí nghiệm khác nhau thuộc loại này được thực hiện trong suốt hơn tám chục năm qua đều xác nhận rằng vận tốc của ánh sáng nhận được từ những ngôi sao cố định hay chuyển động với vận tốc không đổi (tức chuyển động thẳng đều) là như nhau và đều bằng 300.000km/s. Giá trị này được đo với độ chính xác cao và không ngừng tăng lên nhờ những dụng cụ đo ngày càng tinh xảo hơn. Hơn nữa, cả một kho tàng những thí nghiệm chi tiết khác được thực hiện trong gần một thế kỷ qua – những thực nghiệm đo trực tiếp vận tốc ánh sáng trong những điều kiện khác nhau cũng như sự kiểm chứng nhiều hệ quả suy ra từ đặc tính đó của ánh sáng – tất cả đều khẳng định tính không đổi của vận tốc ánh sáng.

Nếu như bạn thấy tính chất đó của ánh sáng là khó nuốt, thì bạn hoàn toàn không đơn độc. Vào đầu thế kỷ XX, các nhà vật lý đã tìm đủ mọi phương cách để chối bỏ nó. Nhưng họ đã không thể

làm được. Trái lại, Einstein đã chọn cách chấp nhận sự không đổi của vận tốc ánh sáng, vì đây chính là câu trả lời cho sự xung đột đã từng khiến cho ông trần trở từ tuổi thiếu niên: bất cứ vật gì cố sức đuổi theo chùm ánh sáng như thế nào đi nữa thì nó vẫn cứ chạy ra xa bạn với vận tốc ánh sáng. Bạn không bao giờ có thể làm cho vận tốc biểu kiến của ánh sáng nhỏ hơn 300.000km/s một li nào chứ đừng nói tới chuyện làm cho nó dừng lại. Vậy là vấn đề đã được khép lại. Nhưng thắng lợi đó không phải là nhỏ. Einstein đã nhận thấy rằng sự không đổi của vận tốc ánh sáng đã dẫn đến sự sụp đổ của vật lý Newton.

[1] Nói một cách chính xác hơn, vận tốc của ánh sáng trong chân không mới là 300.000km/s. Khi ánh sáng truyền qua một môi trường chất, như không khí hoặc thủy tinh, chẳng hạn, vận tốc của nó giảm na ná như một hòn đá rơi từ vách núi xuống biển, khi đi vào nước sẽ chuyển động chậm lại. Sự chậm lại của ánh sáng so với trong chân không không có ảnh hưởng gì đối với sự thảo luận của chúng ta về tính tương đối cả, vì vậy chúng tôi đã không đề cập tới.

Định nghĩa thời gian một cách trừu tượng là việc không dễ dàng. Những ý định làm điều đó thường rồi cuối cùng lại phải dùng chính từ “thời gian” hoặc những uôn éo ngôn ngữ để lảng tránh từ đó. Vì vậy, chúng ta sẽ không đi theo con đường đó, mà chọn một quan điểm thực dụng hơn và định nghĩa thời gian là cái được đo bởi các đồng hồ.

Chân lý và những hệ quả

Vận tốc là thước đo độ nhanh chậm chuyển động của một vật trong một khoảng thời gian đã cho. Nếu bạn cho xe chạy với vận tốc 100 km/h thì điều đó có nghĩa là bạn sẽ đi được quãng đường 100 km nếu bạn duy trì được trạng thái chuyển động đó trong một giờ. Với định nghĩa như trên xem ra vận tốc là một khái niệm quá ư bình thường, điều này khiến bạn có thể ngạc nhiên là tại sao chúng ta lại phải quá bận tâm về vận tốc của quả lựu đạn, của tuyết rơi và của các photon đến như vậy. Tuy nhiên, bạn cần lưu ý rằng khoảng cách (hay quãng đường) là một khái niệm về không gian và đặc biệt nó là thước đo khoảng không gian giữa hai điểm. Cũng lại phải lưu ý rằng khoảng thời gian là một khái niệm về thời gian - nó cho biết có bao nhiêu thời gian ngăn cách giữa hai sự

kiện. Do đó, vận tốc liên quan một cách mật thiết với những quan niệm của chúng ta về không gian và thời gian. Khi chúng ta diễn giải vận tốc theo cách vừa nêu ở trên, chúng ta thấy rằng bất cứ một sự kiện thực nghiệm nào thách thức quan niệm thông thường của chúng ta về vận tốc, ví dụ như sự không đổi của vận tốc ánh sáng chẳng hạn, thì nó cũng có khả năng thách thức những quan niệm thông thường của chúng ta về không gian và thời gian. Chính vì lý do đó, mà sự thực lạ lùng về vận tốc ánh sáng rất đáng để chúng ta phải xem xét một cách kỹ lưỡng. Đó là điều mà Einstein đã làm và đã đưa ông tới những kết luận đầy kinh ngạc.

Ảnh hưởng của chuyển động đến thời gian (I)

Dùng tính không đổi của vận tốc ánh sáng ta dễ dàng chứng minh được rằng quan niệm thông thường của chúng ta về thời gian là hoàn toàn sai lầm. Ta hãy hình dung lãnh tụ của hai nước đang có chiến tranh, ngồi ở hai đầu đối diện nhau bên bàn đàm phán, vừa mới thoả thuận xong hiệp ước ngừng bắn, nhưng không ai muốn đặt bút ký trước cả. Lúc này Tổng thư ký Liên hiệp quốc đã nảy ra một giải pháp tuyệt vời. Ông đề nghị đặt một bóng đèn được bật, ánh sáng từ bóng đèn sẽ đồng thời tới chỗ ngồi của hai vị tổng thống, vì họ ngồi cách bóng đèn những khoảng bằng nhau. Và mỗi vị tổng thống sẽ ký vào một bản hiệp ước khi nhìn thấy đèn sáng. Kế hoạch này đã được thực hiện và bản hiệp ước đã được ký kết với hài lòng của cả hai bên.

Hể hả với thành công đó, ông Tổng thư ký lại dùng chính biện pháp đó với hai quốc gia khác đang giao chiến khác cũng vừa mới đạt được thoả thuận hoà bình. Chỉ có điều khác là hai vị lãnh đạo tham gia trong cuộc đàm phán này lại ngồi đối diện nhau ở hai đầu bàn đặt trong một toa xe lửa chuyển động với vận tốc không đổi. Thật khéo bố trí là tổng thống nước Tiên Hành lại ngồi ở phía đầu bàn nhìn về phía đầu tàu. Vốn am hiểu nguyên lý nói rằng các định luật vật lý là hoàn toàn như nhau bất kể trạng thái chuyển động miễn sao chuyển động này là đều, ông Tổng thư ký đã không bận tâm tới vị trí ngồi khác nhau của hai vị lãnh đạo và cho tiến hành lễ ký kết được khởi phát bởi một bóng đèn như đã làm trong trường hợp trước. Cả hai tổng thống đã ký hiệp ước và cùng với đoàn cố vấn của cả hai bên ăn mừng về sự chấm dứt thù địch giữa hai nước.

Đúng lúc đó có tin trên sân ga đã xảy ra cuộc ẩu đả của dân hai nước đến quan sát lễ ký kết. Tất cả những người tham gia cuộc đàm phán trên tàu đều vô cùng bàng hoàng khi nghe nói rằng nguyên do của sự thù địch mới nổ ra là bởi dân nước Tiên Hành nói rằng họ đã bị lừa bịp vì tổng thống của họ đã đặt bút ký trước đức vua nước Hậu Hành. Vì mọi người trên tàu của cả hai bên đều nhất trí là hiệp ước đã được ký đồng thời, thế thì tại sao những người đứng quan sát bên ngoài trên sân ga lại có thể nghĩ khác?

Chúng ta xem xét kỹ lưỡng hơn quan điểm của người quan sát trên sân ga. Ban đầu, bóng đèn trên tàu chưa bật và sau đó ở một thời điểm đặc biệt nó được bật sáng và phóng chùm sáng về phía cả hai vị tổng thống. Theo quan điểm của người đứng trên sân ga, thì tổng thống của nước Tiên Hành tiến về phía chùm sáng trong khi đó đức vua nước Hậu Hành lùi ra chùm sáng tới. Như vậy, theo người quan sát trên sân ga thì điều này có nghĩa là, chùm sáng tới được tổng thống chỉ phải đi quãng đường ngắn hơn, do tổng thống tiến về phía nó, so với quãng đường đến được tới đức vua vì đức vua lùi ra xa nó. Điều này không đả động gì đến vận tốc ánh sáng vì như chúng ta đã nói bất chấp trạng thái chuyển động của nguồn sáng và người quan sát, vận tốc của ánh sáng đều như nhau. Thay vì thế chúng ta chỉ mô tả khoảng cách mà ánh sáng phải đi cho tới khi đến được tổng thống và đức vua theo quan điểm của người quan sát trên sân ga. Vì khoảng cách này đối với tổng thống là nhỏ hơn so với đức vua và vì vận tốc ánh sáng hướng tới mỗi người là như nhau, nên ánh sáng sẽ tới tổng thống của nước Tiên Hành sớm hơn. Và điều này giải thích tại sao dân nước này tuyên bố rằng họ đã bị lừa.

Khi đài CNN phát đi lý lẽ của những người chứng kiến, ông Tổng thư ký, tổng thống và đức vua hai nước cùng với các cố vấn của họ không thể tin vào tai mình nữa. Tất cả họ đều nhất trí rằng bóng đèn đã được lắp chặt ở chính giữa tổng thống và đức vua do đó dứt khoát là ánh sáng từ bóng đèn phát ra sẽ phải đi cùng một quãng đường đến đức vua và tổng thống. Vì vận tốc của ánh sáng đi sang phải sang trái đều như nhau, nên họ tin rằng ánh sáng đó sẽ đến hai vị lãnh đạo một cách đồng thời. Những quan sát của mỗi nhóm và lời giải thích biện hộ của họ đều không chệch vào đâu được. Và câu trả lời là cả hai đều có lý cả. Giống như hai nhà du hành Goerge và Gracie, quan điểm của mỗi người đều có một phần chân lý như nhau. Sự lắt léo duy nhất ở đây là: “chân lý” tương

ứng của hai bên dường như lại mâu thuẫn nhau. Về mặt chính trị, kết cục của cuộc tranh cãi này là rất quan trọng: Liệu tổng thống và đức vua có ký hiệp ước một cách đồng thời hay không? Những quan sát và suy luận nêu ở trên không khỏi dẫn chúng ta tới kết luận rằng theo những người ở trên tàu thì họ đã ký đồng thời còn theo những người ở sân ga thì không phải như vậy. Nói một cách khác, những sự kiện có thể đồng thời đối với người quan sát này sẽ không đồng thời đối với người quan sát khác, nếu như hai người là chuyển động đối với nhau.

Đây là một kết luận gây sửng sốt. Đó là một trong số những phát minh sâu sắc nhất về bản chất của thực tại. Tuy nhiên, nếu như rất lâu sau khi bạn gấp cuốn sách này lại mà bạn chẳng còn nhớ được chút gì trình bày trong chương này trừ sự ngộ nhận về tính đồng thời liên qua tới ví dụ ở trên thì nghĩa là bạn đã nắm được cái căn bản nhất trong phát minh của Einstein rồi. Câu chuyện của chúng ta chứng tỏ rằng không cần tới công cụ toán học hoặc những suy luận logic phức tạp, đặc điểm hoàn toàn bất ngờ nói trên của thời gian vẫn có thể suy ra trực tiếp từ tính không đối của vận tốc ánh sáng. Cần lưu ý rằng, nếu vận tốc ánh sáng không phải là không đổi mà xử sự theo đúng trực giác của chúng ta dựa trên những quả bóng hoặc khối tuyết chuyển động chậm chạp, thì những người quan sát trên sân ga sẽ nhất trí ngay với những người quan sát trên con tàu. Nhưng người trên sân ga cũng vẫn tuyên bố rằng quãng đường mà các photon phải đi tới tổng thống dài hơn quãng đường mà chúng đi tới đức vua. Tuy nhiên, trực giác thông thường lại cho biết rằng ánh sáng đi về phía đức vua chuyển động nhanh hơn do nhận được cú “hích” thêm của con tàu chuyển động về phía trước. Tương tự, những người quan sát này cũng thấy rằng ánh sáng đi về phía tổng thống sẽ chuyển động chậm hơn do bị chuyển động của con tàu “kéo lại”. Khi cả hai hiệu ứng (sai lầm) đó được xét tới, thì những người quan sát này cũng thấy rằng chùm sáng đến với tổng thống và đức vua đồng thời. Tuy nhiên, trong thế giới thực, ánh sáng không chuyển động nhanh lên hay chậm đi, nó không thể bị “hích” tới vận tốc cao hơn hay bị “kéo lại” để có vận tốc nhỏ đi. Do đó, những người quan sát trên sân ga kiện rằng ánh sáng tới tổng thống của họ sớm hơn là hoàn toàn có lý.

Sự không đối của vận tốc ánh sáng đòi hỏi chúng ta phải vứt bỏ quan niệm lỗi thời cho rằng tính đồng thời là một khái niệm

tuyệt đối, mà tất cả mọi người đều phải nhất trí bất kể trạng thái chuyển động của họ. Chiếc đồng hồ tuyệt đối theo những giây giống hệt nhau ở Trái Đất chúng ta cũng như trên sao Hỏa, sao Thổ, trong thiên hà Andromeda hay ở bất cứ xó xỉnh nào khác trong Vũ trụ là không tồn tại. Mà trái lại, những người quan sát chuyển động đối với nhau sẽ không nhất trí về tính đồng thời của sự kiện. Lại một lần nữa, nguyên nhân khiến cho kết luận đó – một đặc tính chân thực của thế giới mà chúng ta sống – trở nên xa lạ như vậy là do các hiệu ứng là cực kỳ nhỏ do những vận tốc có liên quan chỉ là những vận tốc bình thường mà ta gặp hàng ngày (nghĩa là rất nhỏ so với vận tốc ánh sáng – ND). Giả sử chiếc bàn đàm phán dài cỡ 30 m đặt trong toa xe lửa chuyển động với vận tốc 15 km/h, thì những người quan sát trên sân ga sẽ “thấy” chùm ánh sáng tới tổng thống sớm hơn tới đức vua chỉ khoảng một phần triệu tỷ giây. Sự khác biệt đó là có thật, nhưng vì nó quá nhỏ nên mắt người không thể phát hiện trực tiếp được. Nếu xe lửa chuyển động nhanh hơn nhiều, chẳng hạn với vận tốc 1 tỷ km/giờ, thì đối với người quan sát trên sân ga, ánh sáng tới đức vua sẽ mất một khoảng thời gian dài gấp 25 lần thời gian ánh sáng tới tổng thống. Ở những vận tốc cao, những hiệu ứng lạ lùng của thuyết tương đối hẹp sẽ càng thể hiện rõ rệt.

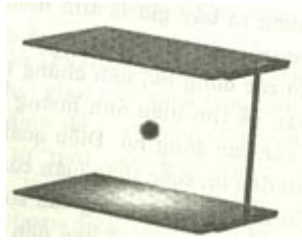
Ảnh hưởng của chuyển động đến thời gian (II)

Định nghĩa thời gian một cách trừu tượng là việc không dễ dàng. Những ý định làm điều đó thường rồi cuối cùng lại phải dùng chính từ “thời gian” hoặc những uôn éo ngôn ngữ để lảng tránh từ đó. Vì vậy, chúng ta sẽ không đi theo con đường đó, mà chọn một quan điểm thực dụng hơn và định nghĩa thời gian là cái được đo bởi các đồng hồ. Tất nhiên, làm như vậy là ta đã chuyển gánh nặng định nghĩa sang từ “đồng hồ”. Ở đây ta tạm coi đồng hồ là một dụng cụ thực hiện những chu trình chuyển động cực kỳ đều đặn và ta sẽ đo thời gian bằng cách đếm số chu trình mà đồng hồ đã thực hiện. Những đồng hồ quen thuộc như chiếc đồng hồ đeo tay của chúng ta đều phù hợp với định nghĩa đó, chúng đều có các kim chuyển động theo những chu trình đều đặn và thực tế chúng ta đo khoảng thời gian bằng cách đếm số các chu trình (hay các phần của chu trình) mà các kim đã quét được giữa hai sự kiện đã chọn.

Tất nhiên, ý nghĩa của cụm từ “những chu trình chuyển động cực kỳ đều đặn” đã ngầm liên quan đến khái niệm thời gian rời, tính từ “đều đặn” đã ám chỉ những khoảng thời gian bằng nhau đã trôi qua trong mỗi chu trình. Trên quan điểm thực tiễn, điều này được thể hiện ở chỗ chúng ta đã chế tạo đồng hồ bằng những linh kiện vật lý đơn giản mà không có gì thay đổi từ chu trình này sang chu trình khác. Những đồng hồ của cụ kỵ chúng ta với con lắc đu đưa qua lại và những đồng hồ nguyên tử dựa trên các quá trình tuần hoàn xảy ra trong nguyên tử là những ví dụ quen thuộc.

Mục đích của chúng ta bây giờ là tìm hiểu ảnh hưởng của chuyển động đến sự trôi của thời gian và vì chúng ta đã định nghĩa thời gian nhờ các đồng hồ, nên chúng ta có thể “phiên” vấn đề đó thành vấn đề tìm hiểu ảnh hưởng của chuyển động đến nhịp “tíc tắc” của các đồng hồ. Điều quan trọng cần phải nhấn mạnh ngay từ đầu là, cuộc thảo luận của chúng ta không có liên quan gì đến những ảnh hưởng của sự xô lệch do những chuyển động trên các con đường gồ ghề đến sự hoạt động của các cơ cấu bên trong một đồng hồ cụ thể nào đó. Thực tế, chúng ta chỉ xét một loại chuyển động đơn giản và êm đềm nhất, đó là chuyển động thẳng đều và do đó hoàn toàn không có sự xô lệch nào. Và chúng ta sẽ chỉ quan tâm tới câu hỏi có tính tổng quát: chuyển động có ảnh hưởng như thế nào đến sự trôi của thời gian và do đó nó ảnh hưởng một cách cơ bản như thế nào đến nhịp tíc tắc của mọi loại đồng hồ bất kể chúng được thiết kế và chế tạo cụ thể như thế nào?

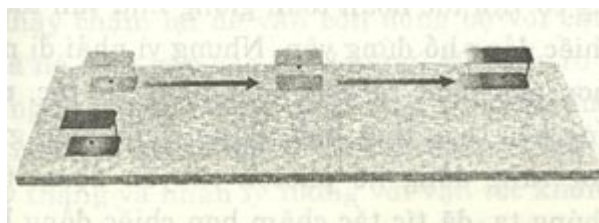
Để đạt mục đích đó, chúng ta đưa vào một loại đồng hồ đơn giản nhất (và cũng là phi thực tiễn nhất) thế giới, nó được gọi là “đồng hồ photon”. Đồng hồ này gồm hai gương nhỏ lắp trên giá, quay mặt phản xạ vào nhau và một photon duy nhất nảy qua nảy lại giữa hai gương đó (xem Hình 2.1). Với khoảng cách giữa hai gương bằng 15 cm, photon sẽ mất một phần tỷ giây để thực hiện được một chu trình trọn vẹn (từ một gương nảy tới gương kia rồi nảy về gương ban đầu). Có thể coi những tiếng “tíc tắc” trong đồng hồ photon sẽ được phát ra mỗi khi photon thực hiện được trọn một chu trình. Như vậy, đồng hồ nói trên trong khoảng thời gian một giây sẽ phát ra một tỷ tiếng “tíc tắc”.



Hình 2.1. Một đồng hồ photon gồm hai gương đặt song song với một photon nảy qua lại giữa hai gương. Đồng hồ sẽ phát ra tiếng “tíc tắc” mỗi khi photon thực hiện được một chu trình trọn vẹn.

Chúng ta có thể dùng đồng hồ photon để đo khoảng thời gian giữa hai sự kiện bằng cách chỉ cần đếm số tiếng tíc tắc mà đồng hồ phát ra giữa hai sự kiện đó rồi nhân nó với thời gian tương ứng với tiếng tíc tắc. Ví dụ, nếu chúng ta muốn xác định thời gian đua của một con ngựa và giữa thời điểm xuất phát với thời điểm tới đích ta đếm được 55 tỷ chu trình trọn vẹn của photon, thì ta có thể kết luận được rằng con ngựa chạy hết 55 giây.

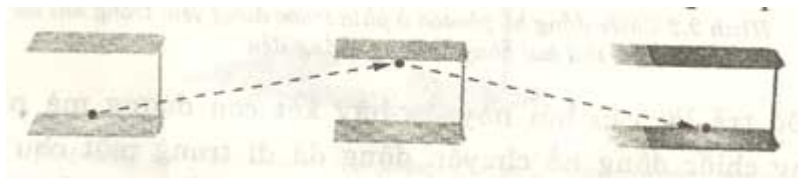
Sở dĩ ở đây chúng ta dùng đồng hồ photon là bởi vì đơn giản về mặt cơ cấu của nó sẽ tước bỏ đi được nhiều chi tiết không có liên can và do đó cho phép chúng ta thấy được rõ nhất ảnh hưởng của chuyển động đến sự trôi của thời gian. Để thấy điều đó, hãy tưởng tượng ta đang lơ đãng quan sát sự trôi của thời gian bằng cách nhìn chiếc đồng hồ photon đang tíc tắc ở chiếc bàn bên cạnh. Rồi bất chợt có một chiếc đồng hồ photon thứ hai trượt qua bên cạnh với vận tốc không đổi (xem Hình 2.2). Vấn đề đặt ra là chiếc đồng hồ photon chuyển động có tíc tắc cùng một nhịp với chiếc đồng hồ đứng yên hay không ?



Hình 2.2. Chiếc đồng hồ photon ở phía trước đứng yên, trong khi đó chiếc đồng hồ thứ hai chuyển động thẳng đều.

Để trả lời câu hỏi này, ta hãy xét con đường mà photon trong chiếc đồng hồ chuyển động đã đi trong một chu trình trọn vẹn theo

quan điểm của chúng ta. Photon xuất phát từ chiếc gương dưới trong chiếc đồng hồ chuyển động (xem Hình 2.3) và ban đầu đi tới gương trên. Vì theo quan điểm của chúng ta, đồng hồ là chuyển động, nên photon phải đi theo con đường xiên góc như ta thấy trên hình 2.3. Nếu photon không đi theo con đường đó thì nó không thể tới đập vào gương trên và sẽ bay mất tằm vào không gian. Vì đồng hồ chuyển động hoàn toàn có quyền tuyên bố rằng nó đứng yên và mọi thứ khác đều chuyển động, nên ta biết rằng photon nhất định sẽ đập vào gương trên và do đó con đường mà chúng ta vẽ là đúng. Sau khi đập vào gương trên, photon lại đi theo con đường chéo góc trở về đập vào gương dưới và đồng hồ chuyển động phát ra tiếng tíc tắc. Một điểm đơn giản nhưng rất quan trọng là quãng đường gồm hai đoạn chéo góc nói trên mà ta thấy photon này phải đi đoạn dài hơn quãng đường đi lên đi xuống của photon trong chiếc đồng hồ đứng yên, vì ngoài việc phải đi các đoạn lên và xuống, photon trong chiếc đồng hồ chuyển động còn cần phải chuyển động ngang sang bên phải nữa (tất nhiên là theo quan điểm của chúng ta). Hơn nữa, sự không đổi của vận tốc ánh sáng nói với chúng ta rằng photon trong chiếc đồng hồ chuyển động có vận tốc hoàn toàn giống như vận tốc của photon trong chiếc đồng hồ đứng yên. Nhưng vì phải đi một quãng đường xa hơn mới phát ra được một tiếng tíc tắc, nên nó sẽ phát ra tiếng kêu thưa thớt hơn. Bằng chứng đơn giản đó đã xác lập được rằng đồng hồ photon chuyển động, theo quan điểm của chúng ta, đã tíc tắc chậm hơn chiếc đồng hồ photon đứng yên. Và vì chúng ta đã nhất trí rằng số tiếng tíc tắc trực tiếp cho biết có bao nhiêu thời gian đã trôi qua, nên chúng ta thấy rằng, đối với đồng hồ chuyển động, thời gian trôi chậm chạp hơn.



Hình 2.3. Theo quan điểm của chúng ta, photon trong đồng hồ chuyển động đi theo đường chéo góc.

Có thể bạn còn băn khoăn tự hỏi, điều này biết đâu chỉ đơn giản phản ánh một đặc điểm đặc biệt nào đó của đồng hồ photon và liệu có thể áp dụng cho các đồng hồ quả lắc thời cụ kỳ của chúng ta hoặc những chiếc đồng hồ Rolex hay không? Nghĩa là liệu thời gian được đo bởi các đồng hồ quen thuộc hơn đối với chúng ta

có chậm lại như đồng hồ photon nói ở trên không? Câu trả lời là một tiếng có đồng dạng, như bạn có thể thấy bằng cách áp dụng nguyên lý tương đối. Giả sử bạn gắn một chiếc đồng hồ Rolex lên trên mỗi đồng hồ photon và lặp lại thí nghiệm ở trên. Như đã nói, đồng hồ photon đứng yên và chiếc đồng hồ Rolex chỉ cùng các khoảng thời gian, tức là khi đồng hồ Rolex chỉ 1 giây, thì đồng hồ photon phát ra 1 tỷ tiếng tíc tắc. Nhưng còn đồng hồ photon chuyển động và chiếc đồng hồ Rolex gắn với nó thì sao? Liệu chiếc đồng hồ Rolex chuyển động có chạy chậm lại để vẫn còn đồng bộ với chiếc đồng hồ photon mà nó được gắn vào hay không? Để thấy rõ hơn, ta hãy tưởng tượng tổ hợp hai đồng hồ photon và Rolex được gắn chặt vào trần một toa xe không có cửa sổ đang chuyển động trên đường ray thẳng và nhìn lý tưởng với vận tốc không đổi. Theo nguyên lý tương đối, thì người quan sát trên con tàu không có một cách thức nào để phát hiện được bất cứ một ảnh hưởng nào chuyển động của con tàu. Nhưng nếu chiếc đồng hồ photon và đồng hồ Rolex mất đồng bộ với nhau, thì đây chính là một ảnh hưởng có thể ghi nhận được, tức là trái với nguyên lý tương đối. Như vậy, chiếc đồng hồ photon và đồng hồ Rolex vẫn phải cùng đo được những khoảng thời gian như nhau và chiếc đồng hồ Rolex cũng phải chậm lại theo cách hết như chiếc đồng hồ photon. Bất chấp nhãn hiệu, kiểu loại và cấu tạo, các đồng hồ chuyển động đối với nhau sẽ ghi lại sự trôi của thời gian với tốc độ khác nhau.

Sự khảo sát ở trên đối với đồng hồ photon cũng cho ta thấy rõ rằng sự sai khác chính xác về thời gian của các đồng hồ đứng yên và chuyển động phụ thuộc vào chỗ: trong một chu trình trọn vẹn, photon trong đồng hồ chuyển động phải đi một quãng đường dài hơn là bao nhiêu. Mà điều này thì lại phụ thuộc vào tốc độ của đồng hồ chuyển động càng nhanh, photon sẽ phải chuyển động ngang về phía bên phải càng dài hơn. Như vậy, chúng ta có thể kết luận rằng, so với đồng hồ đứng yên, nhịp độ phát ra tiếng tíc tắc của đồng hồ chuyển động sẽ càng chậm nếu nó chuyển động càng nhanh [1].

Để có một ý niệm về thang các độ lớn, cần lưu ý rằng thời gian để photon đi hết một chu trình trọn vẹn là một phần tỷ giây. Muốn cho đồng hồ có thể đi được một khoảng cách đáng kể trong thời gian giữa một tiếng tíc tắc này đến một tiếng tíc tắc tiếp sau, thì nó phải chuyển động rất nhanh, tức là phải có vận tốc gần vận tốc ánh sáng. Nếu nó chuyển động với vận tốc thông thường cỡ 15

km/h thì giữa hai lần phát ra tiếng tíc tắc nó sẽ chỉ đi được theo phương ngang về bên phải chừng bốn phần tỷ mét. Khi đó phần quãng đường mà photon chuyển động phải đi thêm là rất nhỏ và vì vậy tác dụng tương ứng của nó đến nhịp độ phát ra tiếng tíc tắc của đồng hồ chuyển động cũng sẽ cực nhỏ. Và lại một lần nữa, do nguyên lý tương đối, điều này đối với mọi đồng hồ và do vậy đúng với chính thời gian. Điều này giải thích tại sao, những sinh vật như chúng ta vốn chỉ chuyển động đối với nhau với vận tốc nhỏ, nói chung, không ý thức được sự giãn nở của thời gian. Những hiệu ứng, mặc dù thực sự hiện hữu, nhưng lại cực kỳ nhỏ bé. Trái lại, nếu chúng ta bám được vào chiếc đồng hồ chuyển động và cùng chu du với nó với vận tốc chẳng hạn bằng $3/4$ vận tốc ánh sáng, thì những phương trình của thuyết tương đối hẹp cho thấy rằng những người quan sát đứng yên sẽ thấy chiếc đồng hồ chuyển động của chúng ta phát ra tiếng tíc tắc với nhịp độ chỉ gần bằng $2/3$ nhịp độ của chiếc đồng hồ riêng của họ. Quả là một hiệu ứng đáng kể.

[1] Đối với độc giả thiên về toán học, những nhận xét này có thể tính được một cách định lượng. Ví dụ, nếu đồng hồ ánh sáng chuyển động có vận tốc v và photon của nó phải mất một thời gian t mới thực hiện trọn vẹn một chu trình khứ hồi (đo theo đồng hồ ánh sáng đứng yên của chúng ta), thì đồng hồ chuyển động sẽ đi được quãng đường Vũ trụ khi photon của nó về tới gương dưới). Theo định lý Pythagore, thì các đoạn đường chéo góc trên hình 2.3 bằng $[\sqrt{(vt/2)^2 + h^2}]$ với h là khoảng cách giữa hai gương. Do đó, tổng hai đoạn đường chéo góc bằng $2[\sqrt{(vt/2)^2 + h^2}]$. Vì vận tốc của ánh sáng là không đổi và được ký hiệu là c , nên photon phải mất một thời gian $2[\sqrt{(vt/2)^2 + h^2}]/c$ giây để thực hiện một chu trình khứ hồi. Nghĩa là chúng ta có phương trình $t = 2[\sqrt{(vt/2)^2 + h^2}]/c + h/c$. Giải phương trình trên cho t , ta được $t = 2h/[\sqrt{c^2 - v^2}]$. Để tránh nhầm lẫn, ta viết $t_{cd} = 2h/[\sqrt{c^2 - v^2}]$ trong đó chỉ số dưới chỉ khoảng thời gian chúng ta đo được giữa hai đồng hồ đứng yên của chúng ta là $t_{dy} = 2h/c$ và sau vài ba phép biến đổi ta tìm được $t_{cd} = t_{dy}/[\sqrt{1 - v^2/c^2}]$. Hệ thức vừa tìm được trực tiếp chứng tỏ rằng thời gian giữa hai tiếng tíc tắc của đồng hồ chuyển động dài hơn thời gian giữa hai tiếng tíc tắc của đồng hồ đứng yên. Điều này có nghĩa là giữa hai sự kiện đã chọn, số tiếng tíc tắc phát ra trong đồng hồ chuyển động ít hơn so với đồng hồ đứng yên.

Cũng như đối với tất cả những chuyện tưởng như là nghịch lý trong thuyết tương đối hẹp, khi được xem xét một cách thấu đáo, thì những điều phi logic bề ngoài đó sẽ được giải quyết, đồng thời hé mở những đặc điểm mới trong sự vận hành của Vũ trụ.

Sống hết tốc lực

Chúng ta đã thấy rằng sự không đối của vận tốc ánh sáng dẫn tới việc phát ra những tiếng tíc tắc của đồng hồ photon chuyển động chậm hơn so với đồng hồ photon đứng yên. Và lại theo nguyên lý tương đối, điều này cần phải đúng không phải chỉ với đồng hồ photon mà còn đúng với một đồng hồ bất kỳ, nghĩa là nó cần phải đúng đối với chính bản thân thời gian. So với người đang đứng yên, thì thời gian đối với người đang chuyển động trôi chậm hơn. Nhưng nếu những suy luận khá đơn giản đã dẫn chúng ta tới kết luận đó là đúng, thì liệu người đang chuyển động có sống lâu hơn người đứng yên hay không? Xét cho cùng, nếu thời gian trôi đối với người chuyển động chậm hơn so với người đứng yên, thì sự khác nhau đó sẽ không chỉ áp dụng cho thời gian được đo bởi các đồng hồ mà còn cho cả thời gian được đo bởi nhịp đập của con tim cũng như nhịp độ thoái hóa của các bộ phận của cơ thể. Thực tế, nhiều thực nghiệm (không phải về tuổi thọ của con người mà về tuổi thọ của một số hạt vi mô, như các muon, chẳng hạn) đã trực tiếp khẳng định điều đó. Tuy nhiên, có một điểm thiết yếu cản trở chúng ta tuyên bố rằng chúng ta đã tìm được cách cải lão hoàn đồng.

Khi ngồi yên trong phòng thí nghiệm, các hạt muon phân rã theo một quá trình gần giống như sự phân rã phóng xạ sau một khoảng thời gian trung bình là hai phần triệu giây. Sự phân rã này là một sự kiện thực nghiệm đã được xác nhận nhiều lần. Điều đó tựa như là muon sống cả cuộc đời của mình với khẩu súng dí vào đầu; và khi đạt tới tuổi hai phần triệu giây nó bèn bóp cò và vỡ tan thành các hạt electron và neutrino. Nhưng nếu các hạt muon này không ngồi yên trong phòng thí nghiệm mà lại muôn chu du trong một thiết bị thí nghiệm tên là máy gia tốc hạt để đưa vận tốc của nó tới gần vận tốc ánh sáng, thì như các nhà khoa học trong phòng thí nghiệm đã đo được, tuổi thọ của nó tăng lên một cách ghê gớm. Và điều này xảy ra một cách thực sự. Với vận tốc 298.000k/s (xấp xỉ 99,5% vận tốc ánh sáng), thời gian sống của

muon được quan sát thấy tăng lên 10 lần. Theo thuyết tương đối hẹp, sở dĩ như vậy là do “đồng hồ” mà hạt muon mang theo chạy chậm hơn nhiều so với đồng hồ trong phòng thí nghiệm, vì thế mà sau khi đồng hồ ở phòng thí nghiệm báo rằng đã đến lúc muon phải bóp cò và nổ tung thì đồng hồ mà muon mang theo còn chưa tới thời điểm định mệnh đó. Đây là một chứng minh trực tiếp và ngoạn mục cho tác dụng của chuyển động đến sự trôi của thời gian. Nếu con người tắt bật hàng ngày nhanh như các muon này thì tuổi thọ của họ cũng sẽ tăng lên 10 lần. Nghĩa là tuổi thọ trung bình của chúng ta không phải là 70 nữa mà sẽ là 700 tuổi [1].

Bây giờ sẽ nói về cái điểm thiết yếu cản trở chúng ta. Mặc dù những người quan sát trong phòng thí nghiệm thấy các muon chuyển động nhanh sống lâu hơn nhiều so với bà con của chúng ở trạng thái đứng yên. Điều đó là do đối với các muon chuyển động thời gian trôi chậm hơn. Sự chậm lại này của thời gian không chỉ áp dụng cho các đồng hồ mà những hạt muon đó mang theo mà còn cho tất cả những hành động mà chúng thực hiện. Ví dụ, nếu một muon đứng yên có thể đọc được 100 cuốn sách trong cuộc đời ngắn ngủi của nó, thì người anh em chuyển động nhanh của nó cũng sẽ chỉ đọc được 100 cuốn sách mà thôi, bởi vì mặc dù nó có vẻ sống lâu hơn hạt muon đứng yên, nhưng tốc độ đọc của nó – cũng như mọi thứ khác trong cuộc sống của nó – cũng sẽ chậm lại. Theo quan điểm của người quan sát trong phòng thí nghiệm, thì điều đó tựa như muon chuyển động sống cuộc đời của nó theo một nhịp độ chậm, và cũng theo quan điểm này thì hạt muon chuyển động sẽ sống lâu hơn muon đứng yên, nhưng “tổng số những trải nghiệm cuộc sống” của hạt chuyển động này thì cũng chẳng hơn gì. Dĩ nhiên chính kết luận đó cũng áp dụng được cho những người chuyển động nhanh với tuổi thọ trung bình cỡ hàng thế kỷ. Theo quan điểm của họ, thì đời sống cũng như bình thường. Nhưng theo quan điểm của chúng ta thì họ đã sống một cuộc sống với nhịp độ siêu chậm và do đó một vòng sống bình thường của họ phải chiếm một lượng cực lớn thời gian của chúng ta.

Xét cho cùng thì ai là người chuyển động?

Tính tương đối của chuyển động vừa là chìa khoá để hiểu lý thuyết của Einstein và cũng vừa là nguồn gốc tiềm tàng của những sự hiểu lầm. Bạn chắc có lẽ cũng đã thấy rằng chỉ cần đảo

lại điểm nhìn là vai trò của muon chuyển động và muon đứng yên sẽ đổi vai trò cho nhau. Cũng như cả Goerge và Gracie đều có quyền ngang nhau khi tuyên bố rằng mình đứng yên còn người kia chuyển động, các muon mà chúng ta đã mô tả là chuyển động hoàn toàn có quyền tuyên bố như thế, nghĩa là theo quan điểm của chúng, chúng là đứng yên còn những muon “đứng yên” kia mới là chuyển động theo hướng ngược lại. Những lập luận được trình bày ở trên cũng sẽ được áp dụng cho quan điểm này và sẽ dẫn tới một kết luận ngược hẳn lại, nghĩa là đồng hồ gắn với các muon mà chúng ta xem là đứng yên chạy chậm hơn so với đồng hồ gắn với muon mà ta xem là chuyển động.

Ở trên chúng ta đã xét tình huống tương tự, đó là lễ ký kết với bóng đèn phát tín hiệu, trong đó những quan điểm khác nhau dẫn tới những kết quả dường như hoàn toàn khác nhau. Trong trường hợp đó, bằng những suy luận cơ bản dựa trên thuyết tương đối hẹp, chúng ta đã buộc phải vứt bỏ quan niệm cho rằng mọi người, bất chấp trạng thái chuyển động của mình, đều nhất trí về các sự kiện xảy ra đồng thời. Mặc dù trong tình huống mà ta đang xét ở đây sự bất đồng còn tồi tệ hơn nhiều. Làm sao cả hai người quan sát lại đều có thể tuyên bố rằng đồng hồ của người kia chạy chậm hơn? Bi đát hơn nữa, những quan điểm khác nhau nhưng đều có giá trị như nhau của các muon dường như lại dẫn chúng ta tới kết luận rằng mỗi một nhóm đều buồn bã tuyên bố chắc như đinh đóng cột rằng mình sẽ chết trước nhóm kia. Chúng ta biết rằng thế giới có thể có những đặc điểm kỳ lạ đến bất ngờ, nhưng chúng ta vẫn hy vọng rằng nó không thể vượt qua những giới hạn của sự phi lý. Vậy thì chuyện gì đã xảy ra?

Cũng như đối với tất cả những chuyện tưởng như là nghịch lý trong thuyết tương đối hẹp, khi được xem xét một cách thấu đáo, thì những điều phi logic bề ngoài đó sẽ được giải quyết đồng thời hé mở những đặc điểm mới trong sự vận hành của Vũ trụ. Để tránh sự nhân cách hóa quá khiên cưỡng, chúng ta tạm biệt các muon và trở về với Goerge và Gracie, những người mà ngoài chiếc đèn nhấp nháy bây giờ còn có thêm một chiếc đồng hồ số to tương phát quang. Theo quan điểm của Goerge, thì anh ta đứng yên, còn Gracie với chiếc đèn phát ánh sáng xanh và chiếc đồng hồ lớn xuất hiện từ xa rồi đi qua cạnh anh ta trong bóng đêm bao la của khoảng không vũ trụ. Anh ta nhìn thấy chiếc đồng hồ của Gracie chạy chậm so với đồng hồ của mình (với nhịp độ chậm lại tùy

thuộc vào vận tốc tương đối của họ). Nếu như anh ta tinh ý một chút chắc cũng sẽ thấy rằng ngoài sự trôi của thời gian theo đồng hồ của Gracie ra, mọi hoạt động của cô ta như vẫy tay khi đi qua cạnh Goerge hay tốc độ chớp mắt của cô ta chẳng hạn đều diễn ra chậm chạp. Trong khi đó, theo quan điểm của Gracie thì tất cả những quan sát đó đều áp dụng được cho Goerge.

Mặc dù điều đó xem ra có vẻ nghịch lý, nhưng chúng ta hãy thử xác định một thí nghiệm chính xác có thể vạch ra sự phi logic đó. Khả năng duy nhất là sắp đặt mọi chuyện sao cho khi Goerge và Gracie gặp nhau họ chỉnh lại đồng hồ về đúng 12 giờ. Rồi khi ở xa nhau cả hai đều tuyên bố rằng đồng hồ của người kia chạy chậm hơn. Để đối chứng sự bất đồng đó, thì Goerge và Gracie cần phải gặp nhau một lần nữa và trực tiếp so sánh khoảng thời gian đã trôi qua giữa hai lần gặp nhau theo đồng hồ của từng người. Nhưng họ có thể làm điều đó bằng cách nào? Theo Goerge thì anh ta có thể dùng chiếc đồng hồ đeo trên lưng để đuổi theo Gracie. Nhưng nếu anh ta làm như thế thì sự đối xứng giữa hai quan điểm (của anh ta và của Gracie) vốn là nguyên nhân gây ra nghịch lý này, sẽ bị phá vỡ bởi vì Goerge được gia tốc, tức là chuyển động của anh ta không còn là thẳng đều nữa. Khi họ gặp lại nhau theo cách đó, thì đồng hồ của Goerge thực sự chỉ khoảng thời gian nhỏ hơn vì bây giờ anh ta có thể nói một cách chắc chắn rằng mình chuyển động vì chính anh ta cảm thấy được điều đó. Và như vậy, quan điểm của Goerge và của Gracie không còn bình đẳng như nhau nữa. Vào lúc bật động cơ là Goerge đã ngay lập tức không dám tuyên bố mình đứng yên nữa rồi.

Nếu như Goerge đuổi theo Gracie theo cách đó, thì sự khác biệt về thời gian chỉ bởi đồng hồ của hai người sẽ phụ thuộc vào vận tốc tương đối của họ, cũng như vào các chi tiết của cách thức mà Goerge sử dụng chiếc đồng hồ đeo trên lưng. Như đã biết, nếu các vận tốc có liên quan là nhỏ thì sự khác biệt cũng rất nhỏ. Nhưng nếu các vận tốc đó gần với vận tốc ánh sáng thì sự khác biệt có thể cỡ hàng phút, hàng ngày, hàng năm thậm chí hàng thế kỷ hoặc dài hơn nữa. Để cho một ví dụ cụ thể, hãy tưởng tượng rằng vận tốc tương đối của Goerge và Gracie khi đi qua cạnh nhau bằng 99,5% vận tốc ánh sáng. Hơn nữa, ta cũng giả sử rằng Goerge đợi 3 năm sau (theo đồng hồ của anh ta) mới tức thì bật động cơ đưa anh ta đuổi theo Gracie với cùng vận tốc như lúc họ rời xa nhau, tức là bằng 99,5% vận tốc ánh sáng. Khi họ gặp nhau, thì đồng hồ

của Goerge 6 năm đã trôi qua do phải mất 3 năm để đuổi theo. Tuy nhiên, những tính toán theo thuyết tương đối hẹp thì đồng hồ của Gracie đã chỉ 60 năm đã trôi qua. Đó là khoảng thời gian không phải là nhỏ và Gracie phải lục tìm trong ký ức xa xôi, mới nhớ được ra rằng khoảng 60 năm trước Goerge đã từng đi qua cạnh mình trong không gian. Trái lại đối với Goerge, đó mới chỉ là 6 năm trước. Theo ý nghĩa thực thì chuyển động của Goerge đã làm cho anh ta trở thành một lữ hành theo thời gian hay nói theo nghĩa chính xác thì anh ta đã chu du vào tương lai của Gracie.

Việc đưa hai đồng hồ lại gặp nhau để trực tiếp so sánh tưởng như đơn giản chỉ là những rắc rối về mặt “hậu cần”, nhưng nó thực sự là điểm cốt lõi của vấn đề. Chúng ta có thể nghĩ ra đủ thứ mưu mẹo để lảng tránh cái khe hở trong cái áo giáp nghịch lý đó, nhưng tất cả đều không tránh khỏi thất bại. Chẳng hạn, thay vì đưa các đồng hồ trở lại gặp nhau, Goerge và Gracie có thể thông báo với nhau bằng điện thoại di động thì sao? Nếu như sự liên lạc như vậy là tức thời, thì chúng ta sẽ phải đối mặt với một sự thiếu nhất quán không thể vượt qua: thực vậy, nếu suy luận theo Gracie, đồng hồ của Goerge là chạy chậm hơn, do đó anh ta sẽ thông báo thời gian của mình nhỏ hơn; còn nếu suy luận theo quan điểm của Goerge thì đồng hồ của Gracie chạy chậm hơn và cô ta sẽ lại thông báo thời gian của mình nhỏ hơn. Do họ không thể đúng cả hai, nên chúng ta xem như thất bại. Tất nhiên, điểm then chốt ở đây là ở chỗ, điện thoại di động giống như tất cả các loại thông tin liên lạc khác, không thể truyền tín hiệu một cách tức thời. Điện thoại di động hoạt động bằng các sóng vô tuyến, một dạng của ánh sáng, vì thế tín hiệu mà nó truyền phải có vận tốc bằng vận tốc ánh sáng. Điều này có nghĩa là phải mất một thời gian tín hiệu mới nhận được – một khoảng thời gian vừa đủ để hai quan điểm trở lại phù hợp với nhau.

Bây giờ chúng ta hãy xét điều này, trước hết theo quan điểm của Goerge. Hãy tưởng tượng cứ mỗi một giờ Goerge lại nói qua điện thoại: “Bây giờ là 12 giờ, mọi chuyện đều tốt đẹp cả”, “Bây giờ là 1 giờ, mọi chuyện đều tốt đẹp cả” v.v... Vì theo quan điểm của anh ta, đồng hồ của Gracie là chậm hơn, nên anh ta từ đầu đã tự nhủ rằng Gracie sẽ nhận được tín hiệu này trước khi đồng hồ của cô ta chỉ giờ tương ứng. Theo cách đó, anh ta kết luận rằng Gracie sẽ đồng ý là đồng hồ của cô ta quả thật chạy chậm. Nhưng sau đó, anh ta nghĩ lại: “Vì Gracie chuyển động ra xa mình, nên tín hiệu

mà mình gửi theo điện thoại di động phải đi một khoảng cách xa hơn dự tính mới tới được chỗ cô ta. Có thể thời gian phụ trội thêm này bù trừ cho sự chạy chậm của đồng hồ cô ta cũng nên”. Nhận thấy có hiệu ứng bù trừ đó, Goerge nảy ra cảm hứng ngồi vào bàn thử tính toán một cách chính xác xem sao. Kết quả mà anh ta tìm thấy thật sự đáng ngạc nhiên: thời gian truyền còn vượt quá thời gian chạy chậm của đồng hồ Gracie. Điều này có nghĩa là sau khi đồng hồ của Gracie chỉ một giờ tương ứng, cô ta mới nhận được những tín hiệu của Goerge báo rằng một giờ đã trôi qua theo đồng hồ của anh ta. Thực tế, do biết sự tinh thông vật lý của Gracie, nên Goerge biết rằng cô ta sẽ tính tới thời gian truyền của tín hiệu khi rút ra kết luận về đồng hồ của Goerge dựa trên thông báo điện thoại của anh ta. Chỉ cần thêm một chút tính toán nữa sẽ cho thấy rằng cho dù có tính tới cả thời gian truyền của tín hiệu đi nữa thì sự phân tích của Gracie đối với các tín hiệu của Goerge cũng sẽ dẫn tới kết luận rằng đồng hồ của Goerge chạy chậm hơn đồng hồ của cô ta.

Chính những lý luận trên cũng áp dụng được khi đứng trên quan điểm của Gracie, khi mỗi giờ cô cũng gửi cho Goerge những tín hiệu qua điện thoại di động. Thoạt đầu, sự chạy chậm của đồng hồ của Goerge, theo quan điểm của Gracie, khiến cô nghĩ rằng anh ta sẽ nhận được tín hiệu của cô trước khi anh ta phát đi tín hiệu. Nhưng khi tính tới tín hiệu của mình phải đi quãng đường xa hơn do Goerge chuyển động ra xa, Gracie thấy rằng Goerge nhận được tín hiệu của cô sau khi anh ta phát tín hiệu. Và lại một lần nữa, cô ta thấy rằng nếu Goerge tính tới thời gian truyền tín hiệu thì anh ta cũng sẽ rút ra kết luận rằng đồng hồ của cô chạy chậm hơn.

Chừng nào mà Goerge hoặc Gracie còn chưa được gia tốc, thì chừng đó quan điểm của họ hoàn toàn bình đẳng với nhau. Thậm chí mặc dù điều đó dường như là nghịch lý đi nữa, thì theo cách ấy, cả hai người đều thấy rằng việc người này nghĩ rằng đồng hồ của người kia là chạy chậm hơn đều hoàn toàn nhất quán.

[1] Trong trường hợp bạn muốn khẳng định bằng một thực nghiệm dễ hiểu hơn là thực nghiệm trong máy gia tốc hạt, hãy xét thí nghiệm sau. Tháng 10 năm 1971, J.C. Hafele, hồi đó thuộc Đại học Washington và Richard Keating thuộc Hải quân Mỹ đã đặt các đồng hồ nguyên tử Cesi bay trên các máy bay hành khách trong khoảng 40 giờ. Sau khi tính tới tất cả những đặc điểm tinh tế có liên quan tới lực hấp dẫn, thuyết tương đối hẹp

khẳng định rằng khoảng thời gian đo bởi các đồng hồ chuyển động nhỏ hơn so với số đo tương ứng của đồng hồ gắn với mặt đất vài phần trăm tỷ giây. Và đó cũng chính là điều mà Hafele và Keating đã tìm ra: thời gian thực sự bị chậm lại khi chuyển động.

Trên quan điểm của những khái niệm mà chúng ta đã nhấn mạnh trong suốt chương này, phương trình Einstein cho chúng ta một cách giải thích cụ thể nhất cho vấn đề trung tâm của chúng ta, đó là không có vật nào có thể chuyển động nhanh hơn vận tốc ánh sáng.

Ảnh hưởng của chuyển động đến không gian

Sự thảo luận ở trên cho ta thấy rằng những người quan sát thấy các đồng hồ chuyển động chạy chậm hơn đồng hồ của mình, tức là chuyển động có ảnh hưởng tới thời gian. Từ đây, chỉ cần một bước nhỏ nữa là chúng ta thấy rằng chuyển động cũng ảnh hưởng mạnh đến không gian. Ta hãy trở lại cuộc chạy thử xe của hai anh em Slim và Jim. Như đã nói ở trên, khi chiếc xe còn đặt ở phòng trưng bày, Slim đã dùng thước dây đo rất cẩn thận chiều dài của chiếc xe mới. Khi Slim cho xe phóng trên đường đua, do không thể dùng cũng cách đó để đo chiều dài chiếc xe được, nên Jim buộc phải dùng một phương pháp gián tiếp. Một trong những cách đó chúng ta đã nói ở trên: Jim bấm đồng hồ khi đầu xe đi qua và dừng đồng hồ khi đuôi xe đi qua. Bằng cách nhân thời gian xác định theo đồng hồ với vận tốc của xe, Jim xác định được chiều dài của nó.

Dùng những điều tinh tế mới phát hiện được về thời gian, chúng ta thấy rằng quan điểm của Slim thì anh ta là đứng yên còn Jim là chuyển động do đó đồng hồ của Jim chạy chậm hơn. Kết quả là Slim thấy rằng phép đo gián tiếp chiều dài chiếc xe mà Jim thực hiện cho kết quả ngắn hơn chiều dài chiếc xe mà Slim đã đo trong phòng trưng bày, vì trong tính toán của Jim (chiều dài bằng tích của vận tốc với thời gian) Jim đã đo thời gian bằng đồng hồ chạy chậm. Mà nếu đồng hồ đã chạy chậm thì khoảng thời gian mà Jim đo được là nhỏ hơn và do đó kết quả mà anh ta tính được sẽ cho chiều dài ngắn hơn.

Như vậy Jim sẽ nhận thấy chiều dài chiếc xe của Slim ngắn hơn chiều dài của nó được đo khi đứng yên. Đây là ví dụ về một hiện tượng chung mà những người quan sát cảm nhận thấy các

vật chuyển động bị co ngắn lại dọc theo phương chuyển động. Ví dụ, các phương trình của thuyết tương đối hẹp cho thấy rằng nếu một vật chuyển động với vận tốc bằng 98% vận tốc ánh sáng thì người quan sát đứng yên sẽ thấy nó ngắn hơn so với khi nó đứng yên 80%. Hiện tượng này được minh họa trên Hình 2.4 [1].



Hình 2.4 Một vật chuyển động bị co ngắn lại theo phương chuyển động.

Chuyển động qua không thời gian

Sự không đổi của vận tốc ánh sáng đã khiến chúng ta phải thay quan niệm truyền thống về không gian và thời gian như những cấu trúc phổ quát và bất đồng bằng một quan niệm mới trong đó không gian và thời gian phụ thuộc một cách mật thiết vào chuyển động tương đối của người quan sát và vật được quan sát. Chúng ta có thể kết thúc cuộc thảo luận ở đây bằng một nhận xét là các vật chuyển động nhanh sẽ lại tiến hóa với nhịp độ chậm và đồng thời bị co ngắn lại. Mặc dù vậy, thuyết tương đối hẹp đã cho chúng ta một khuôn khổ thống nhất sâu sắc hơn, bao quát được tất cả những hiện tượng đó.

Để hiểu được điều này, hãy hình dung một chiếc xe tương tượng trong chớp mắt đã đạt tới vận tốc đều 150km/h và duy trì vận tốc đó một cách chính xác cho tới khi tắt máy để xe tự lăn rồi từ từ dừng lại. Giả sử ta cũng tương tượng rằng, do vốn nổi tiếng là một lái xe điệu nghệ, Slim được mời lái thử xe trên một đường đua thẳng, rộng và dài nằm giữa một vùng bằng phẳng trong sa mạc. Vì khoảng cách giữa vạch xuất phát và đích dài 15km, nên chiếc xe với vận tốc nói trên sẽ đi hết quãng đường đó trong khoảng thời gian 1/10 giờ, tức là 6 phút. Jim vốn cũng là một kỹ sư ô tô xuất sắc, anh đã kiểm tra kỹ lưỡng các dữ liệu đã được ghi lại từ hàng chục cuộc lái thử và cảm thấy băn khoăn khi thấy rằng mặc dù đã số các cuộc thử đều ghi được thời gian là 6 phút, nhưng một số ít cuộc thử cuối cùng lại thấy ghi dài hơn nhiều: 6,5 rồi 7, thậm chí tới 7,5 phút. Thoạt đầu anh ngỡ rằng máy móc có trục trặc gì đó, nhưng số ghi thời gian này dường như báo rằng chiếc xe

đã chạy chậm hơn 150km/h trong ba lần thử cuối cùng. Tuy nhiên sau khi kiểm tra một cách kỹ lưỡng và toàn diện, anh khẳng định rằng mọi thứ trên chiếc xe đều rất hoàn hảo. Do không giải thích được tại sao thời gian chạy xe lại dài một cách bất thường như vậy, Jim bèn tới hỏi Slim về mấy lần chạy thử cuối cùng. Slim đưa ra một cách giải thích rất đơn giản. Anh ta nói với Jim rằng do đường đua nằm theo hướng đông – tây, những lần chạy thử lại diễn ra vào cuối ngày, nên mặt trời làm cho anh ta hơi loá mắt. Trong ba lần thử cuối cùng, tình trạng này tồi tệ tới mức anh không thể chạy được thẳng theo đường đua mà hơi chệch một góc nhỏ. Anh ta còn vẽ phác đường chạy mà anh đã lái trong ba cuộc thử cuối cùng và được minh họa trên Hình 2.5. Sự giải thích cho ba lần chạy cuối cùng bây giờ trở nên hoàn toàn rõ ràng: đường đi từ vạch xuất phát tới đích sẽ dài hơn nếu đi chệch một góc nào đó và do đó với vận tốc vẫn là 15km/h thì thời gian sẽ phải mất nhiều hơn. Nói một cách khác, khi đi chệch một góc nào đó, một phần của vận tốc 15km/h đã dùng để đi theo hướng nam – bắc khiến cho phần để đi theo hướng đông – tây trở nên nhỏ hơn so với khi chạy thẳng theo hướng này. Điều này có nghĩa là nó phải mất một thời gian dài hơn.



Hình 2.5. Do bị Mặt trời làm loá mắt, Slim lái chệch một góc tăng dần trong ba lần thử cuối cùng.

Mặc dù cách giải thích của Slim thật dễ hiểu, nhưng sẽ rất có lợi nếu chúng ta diễn đạt nó hơi khác một chút để chuẩn bị cho một bước nhảy về mặt khái niệm mà chúng ta sắp làm dưới đây. Các hướng bắc – nam và đông – tây là hai chiều không gian độc lập nhau theo đó chiếc xe có thể chuyển động. (Tất nhiên, nó có thể chuyển động theo cả phương thẳng đứng khi đi theo đường lên núi chẳng hạn, nhưng ở đây chúng ta không cần xét tới khả năng đó). Cách giải thích của Slim minh họa cho điều là: thậm chí mặc dù chiếc xe chạy với vận tốc 150km/h trong tất cả các lần thử, nhưng trong ba lần thử cuối cùng nó phải chia sẻ vận tốc này cho hai chiều và do đó gây cho ta cảm tưởng nó chạy chậm hơn 150km/h

theo hướng đông – tây. Trong những lần thử trước, vận tốc 150km/h được hoàn toàn dành cho chuyển động chỉ theo hướng đông – tây; còn trong ba lần thử cuối cùng, một phần vận tốc này đã được dùng cho chuyển động theo hướng bắc – nam.

Einstein đã phát hiện ra rằng, ý tưởng về sự chia sẻ chuyển động giữa các chiều khác nhau này lại chính là cơ sở cho toàn bộ cái vật lý lạ lùng của thuyết tương đối hẹp, với điều kiện ta phải chấp nhận rằng sự chia sẻ này không chỉ được thực hiện giữa các chiều không gian mà còn với cả chiều thời gian nữa. Thực ra, trong phần lớn các hoàn cảnh, chuyển động của các vật chủ yếu là qua thời gian chứ không phải qua không gian. Ta hãy thử xem điều này có ý nghĩa gì.

Chuyển động qua không gian là một khái niệm mà ta đã biết từ thuở ấu thơ. Mặc dù chúng ta không thường xuyên nghĩ về các vật theo cách như vậy, nhưng chúng ta đều biết rằng, chúng ta, bạn bè và những người thân thuộc của chúng ta... tất cả cũng đều chuyển động qua thời gian. Khi chúng ta xe đồng hồ, thậm chí chúng ta nhàn rỗi ngồi xem TV, các con số chỉ thời gian liên tục thay đổi, liên tục “chuyển động về phía trước theo thời gian”. Chúng ta và vạn vật xung quanh chúng ta đều già đi, đều không tránh khỏi phải chuyển từ thời điểm này tới thời điểm tiếp sau. Thực tế, nhà toán học Hermann Minkowski, và cuối cùng là cả Einstein nữa, đã cố vẽ cho ý tưởng xem thời gian như một chiều thứ tư của Vũ trụ tương tự như ba chiều không gian mà chúng ta đã quá quen thuộc và chính chúng ta bị chìm ngập trong đó. Mặc dù điều đó nghe có vẻ trừu tượng, nhưng khái niệm thời gian như một chiều là thực sự cụ thể. Khi chúng ta muốn gặp ai đó, chúng ta sẽ nói cho người đó biết ta sẽ chờ gặp anh ta ở đâu “trong không gian” – chẳng hạn ở tầng 9, tòa nhà nằm ở góc Phố 53 và Đại lộ 7. Như vậy là ở đây có ba thông tin (tầng 9, Phố 53 và Đại lộ 7) cho ta biết một vị trí cụ thể nào đó theo ba chiều của không gian. Tuy nhiên, điều quan trọng không kém còn phải cho biết, đó là ta sẽ đợi gặp người đó khi nào, chẳng hạn vào lúc 3 giờ chiều. Thông tin này cho biết cuộc gặp gỡ của hai người sẽ diễn ra ở đâu theo “thời gian”. Do đó, các sự kiện được xác định bởi bốn thông tin: ba về không gian và một về thời gian. Những dữ liệu này, như người ta thường nói, xác định vị trí của một sự kiện trong không gian và trong thời gian. Theo ý nghĩa đó thì thời gian đúng là một chiều khác.

Vì quan niệm này nói rằng không gian và thời gian đơn giản chỉ là những ví dụ khác nhau về các chiều, vậy liệu chúng ta có thể nói về vận tốc của một vật qua thời gian theo cách giống như khái niệm vận tốc trong không gian hay không? Có thể.

Một chỉ dẫn quan trọng cho biết làm điều đó như thế nào nằm ngay trong một thông tin rất căn bản mà ta đã từng gặp ở trên. Khi một vật chuyển động qua không gian đối với chúng ta, đồng hồ của nó sẽ chậm lại so với đồng hồ của chúng ta. Điều này có nghĩa là tốc độ chuyển động của nó qua thời gian chậm lại. Và đây là một bước nhảy vọt: Einstein đã tuyên bố rằng mọi vật trong Vũ trụ luôn luôn chuyển động trong không – thời gian với một vận tốc cố định - đó là vận tốc ánh sáng. Đây là một ý tưởng thật lạ lùng: chúng ta đã quá quen thuộc với quan niệm rằng các vật chuyển động với những vận tốc nhỏ đáng kể so với vận tốc ánh sáng. Chúng ta cũng đã nhắc đi nhắc lại điều đó như là một nguyên nhân giải thích tại sao những hiệu ứng tương đối tính lại quá xa lạ với thế giới hàng ngày của chúng ta. Tất cả những điều đó đúng cả. Nhưng ở đây chúng ta đang nói về một vận tốc tổ hợp của vật qua tất cả bốn chiều – ba chiều không gian và một chiều thời gian – và chính cái vận tốc của vật theo nghĩa tổng quát hoá đó mới có giá trị bằng vận tốc ánh sáng. Để hiểu điều này một cách đầy đủ hơn và để thấy rõ tầm quan trọng của nó, ta chú ý rằng, giống như chiếc xe tưởng tượng chỉ chạy với một vận tốc mà ta đã xét ở trên, cái vận tốc cố định này có thể được chia sẻ giữa các chiều khác nhau, tức là giữa ba chiều không gian và một chiều thời gian. Nếu một vật là đứng yên (đối với chúng ta) và do đó hoàn toàn không chuyển động qua không gian, thì khi đó, tương tự như trong những lần chạy thử đầu tiên của chiếc xe tưởng tượng nói trên, toàn bộ chuyển động của vật được dùng để đi theo một chiều, trong ví dụ chiếc xe, đó là chiều đông – tây, còn trong trường hợp của chúng ta đó là chiều thời gian. Hơn nữa, tất cả các vật đứng yên đối với chúng ta và đối với nhau đều chuyển động theo thời gian (thể hiện là chúng già đi) với một tốc độ như nhau. Tuy nhiên, nếu một vật chuyển động qua không gian thì điều đó có nghĩa là một phần của chuyển động trước đó theo thời gian cần phải bị “chệch” đi. Giống như chiếc xe chạy lệch đi một góc, sự chia sẻ chuyển động này khiến cho vật sẽ chuyển động chậm lại theo thời gian so với các vật đứng yên, vì một phần chuyển động của nó đã được dùng để đi qua không gian. Đây chính là điều mà chúng ta đã phát hiện ra ở trên. Bây giờ chúng ta thấy rằng thời gian

chậm lại khi vật chuyển động đối với chúng ta là bởi vì điều đó làm chia sẻ một phần chuyển động qua thời gian của nó thành chuyển động qua không gian. Vận tốc của vật qua không gian chẳng qua chỉ là phản ánh bao nhiêu phần chuyển động qua thời gian đã được chia sẻ bớt.

Từ những điều vừa nói chúng ta thấy ngay rằng có một giới hạn đối với vận tốc theo không gian của các vật: vận tốc cực đại qua không gian sẽ đạt được nếu như toàn bộ chuyển động của vật qua thời gian được chuyển hết thành chuyển động theo không gian. Điều này xảy ra khi toàn bộ chuyển động với vận tốc ánh sáng theo không gian. Nhưng do đã sử dụng hết chuyển động của mình qua thời gian, nên đó cũng chính là vận tốc lớn nhất qua không gian mà vật đó – hay một vật bất kỳ – có thể đạt được. Điều này tương tự với trường hợp chiếc xe ca chạy thử đi ngang theo bắc – nam. Cũng như chiếc xe không còn một chút vận tốc nào dành cho chuyển động theo chiều đông – tây nữa, một vật nào đó chuyển động với vận tốc ánh sáng qua không gian sẽ không còn để lại một chút vận tốc nào cho chuyển động theo thời gian. Như vậy ánh sáng không bao giờ già đi: một photon xuất hiện từ Big Bang ngày hôm nay cũng vẫn có tuổi như khi đó. Với vận tốc ánh sáng thời gian sẽ dừng lại.

Còn về $E = MC^2$ thì sao?

Mặc dù Einstein không tán thành lắm việc gọi lý thuyết của mình là “tương đối” (ông cũng đã đề nghị gọi nó là “bất biến” để phản ánh (ngoài những điều khác) tính không thay đổi của vận tốc ánh sáng), nhưng ý nghĩa của nó bây giờ đã hoàn toàn rõ ràng. Công trình của Einstein chứng tỏ rằng những khái niệm như không gian và thời gian mà trước kia được xem là tuyệt đối và tách biệt nhau, thì bây giờ có tính chất tương đối và liên hệ mật thiết với nhau. Tiếp đó, Einstein cũng chứng tỏ được rằng các tính chất vật lý khác của Vũ trụ cũng liên hệ mật thiết với nhau một cách bất ngờ. Một trong số những ví dụ quan trọng nhất là phương trình nổi tiếng nhất của ông. Trong đó, Einstein khẳng định rằng năng lượng (E) của một vật và khối lượng (m) của nó không phải là những khái niệm độc lập; chúng ta có thể xác định được khối lượng khi biết năng lượng (bằng cách chia năng lượng cho bình phương vận tốc ánh sáng). Nói một cách khác, năng lượng và khối lượng –

giống như đồng đôla và đồng frăng – có thể chuyển đổi lẫn nhau. Nhưng không giống như tiền tệ, tỷ lệ trao đổi ở đây là bình phương của vận tốc ánh sáng – một con số đã và sẽ mãi mãi cố định. Vì thừa số tỷ lệ trao đổi này là rất lớn (c² là một số rất lớn) nên một khối lượng nhỏ phải qua một con đường cực dài để tạo ra được năng lượng. Thế giới đã từng biết tới sức mạnh tàn phá ghê gớm từ việc biến 10 gam urani thành năng lượng ở Hiroshima; một ngày nào đó, từ những nguồn nước biển vô tận và các nhà máy điện tổng hợp hạt nhân, chúng ta có thể sẽ khai thác một cách thông minh công thức trên của Einstein để dung cấp đủ năng lượng cho toàn thế giới.

Trên quan điểm của những khái niệm mà chúng ta đã nhấn mạnh trong suốt chương này, phương trình Einstein cho chúng ta một cách giải thích cụ thể nhất cho vấn đề trung tâm của chúng ta, đó là không có vật nào có thể chuyển động nhanh hơn vận tốc ánh sáng. Ví dụ, bạn có thể băn khoăn tự hỏi: tại sao ta không lấy một vật nào đó, như hạt muon chẳng hạn, rồi dùng máy gia tốc đưa vận tốc của nó đạt tới 298.000km/s, tức gần 99,5% và sau đó đẩy thực mạnh để buộc nó phải vượt qua cái tường chắn là vận tốc ánh sáng. Công thức Einstein giải thích được tại sao điều đó không thể thực hiện được. Một vật chuyển động càng nhanh thì năng lượng mà nó càng lớn và theo công thức Einstein ta thấy rằng một vật có năng lượng càng lớn thì khối lượng của nó cũng sẽ càng lớn. Các hạt muon chuyển động với vận tốc bằng 99,9% vận tốc ánh sáng sẽ nặng hơn rất nhiều so với những hạt muon đứng yên. Thực tế, chúng nặng hơn tới 22 lần. (Các giá trị khối lượng cho trong Bảng 1.1 là đối với các hạt đứng yên). Nhưng một vật càng nặng, thì càng khó tăng tốc cho nó. Đẩy một đĩa bé ngồi trên xe đạp là một chuyện, còn đẩy một chiếc rơmooc lại là một chuyện hoàn toàn khác. Như vậy, khi các muon chuyển động càng nhanh chúng ta càng khó gia tốc chúng. Với vận tốc bằng 99,999% vận tốc ánh sáng, khối lượng của các muon tăng lên 224 lần, còn ở vận tốc 99,99999999% vận tốc ánh sáng thì khối lượng tăng tới 70.000 lần. Vì khối lượng của muon có thể tăng vô hạn khi vận tốc của nó tiến dần tới vận tốc ánh sáng, nên nó đòi hỏi phải có một năng lượng lớn vô hạn mới có thể đẩy được nó vượt qua bức tường chắn là vận tốc ánh sáng. Tất nhiên, điều này là không thể, nên tuyệt đối không có vật gì có thể chuyển động nhanh hơn vận tốc ánh sáng.

Như chúng ta sẽ thấy ở chương sau, kết luận này đã gieo mầm cho một cuộc xung đột lớn thứ hai mà vật lý học đã phải đối mặt trong suốt một thế kỷ qua và cuối cùng đã dẫn tới sự sụp đổ của một lý thuyết đã từng có uy tín nhất, đó là lý thuyết hấp dẫn của Newton.

[1] Mặc dù Hình 2.4. minh họa đúng sự co của một vật dọc theo phương chuyển động của nó, nhưng lại không minh họa được cái mà chúng ta sẽ thực sự nhìn thấy khi mà vật bằng một cách nào đó, có thể phóng với vận tốc ánh sáng (giả thiết rằng thị giác của chúng ta hoặc thiết bị chụp ảnh đủ tinh tường để còn thấy một cái gì đó!). Để nhìn thấy một vật nào đó, mắt – hoặc máy ảnh – của chúng ta phải nhận được ánh sáng phản xạ từ bề mặt của vật đó. Nhưng vì ánh sáng phản xạ tới chúng ta từ những vị trí khác nhau trên vật, nên ánh sáng mà chúng ta nhìn thấy ở một thời điểm nào đó đã đi tới chúng ta theo những con đường có chiều dài khác nhau. Và điều này dẫn tới một ảo giác tương đối tính trong đó vật dường như vừa bị co ngắn lại vừa bị quay lại.

Sự thừa nhận hấp dẫn và chuyển động gia tốc có liên quan mật thiết với nhau chính là ý tưởng hay nhất của Einstein đã nảy ra trong một ngày hạnh phúc của ông tại Văn phòng đăng ký sáng chế phát minh ở Bern.

CHƯƠNG 3

UỐN CONG VÀ LƯỢN SÓNG

Thông qua thuyết tương đối hẹp, Einstein đã giải quyết được sự xung đột giữa “trực giác già cỗi” về chuyển động và tính không đổi của vận tốc ánh sáng. Nói một cách ngắn gọn, giải pháp này cho rằng trực giác của chúng ta là sai, nó chỉ quen với những chuyển động thường là có vận tốc rất nhỏ so với vận tốc ánh sáng và những chuyển động rất chậm như vậy đã làm khuất lấp mất đặc tính thực sự của không gian và thời gian. Thuyết tương đối hẹp đã vạch ra bản chất của chúng và cho thấy chúng khác một cách căn bản so với những quan niệm trước đây. Nhưng tạo dựng lại hiểu biết của chúng ta về những nền của không gian và thời gian không phải chuyện dễ dàng. Chẳng bao lâu, Einstein đã nhận thấy rằng trong số rất nhiều những hệ quả suy ra từ thuyết tương đối hẹp, có một hệ quả có ý nghĩa đặc biệt sâu sắc, đó là khẳng định rằng không có vật gì có thể chuyển động vượt ánh sáng, mà điều này thì không tương thích với lý thuyết hấp dẫn đầy uy tín đã được Newton đưa ra vào cuối thế kỷ XVII. Và như vậy, trong khi giải quyết xong một cuộc xung đột thì thuyết tương đối hẹp lại làm nảy sinh một cuộc xung đột khác. Sau một chục năm nghiên cứu căng thẳng và đôi khi khổ sở nữa, Einstein đã giải quyết được mâu thuẫn này bằng thuyết tương đối rộng (còn gọi là thuyết tương đối tổng quát – ND). Trong lý thuyết đó, Einstein một lần nữa lại làm một cuộc cách mạng trong nhận thức của chúng ta về không gian và thời gian: ông đã chỉ ra rằng không gian và thời gian bị uốn cong và lượn sóng để truyền đi lực hấp dẫn.

Quan niệm của Newton về hấp dẫn

Isaac Newton sinh năm 1642 ở Lincolnshire, nước Anh. Ông là người đã làm thay đổi bộ mặt của thế giới khoa học bằng cách sử dụng toàn bộ sức mạnh của toán học để phục vụ những nghiên cứu vật lý. Trí tuệ của ông vĩ đại tới mức, chẳng hạn như khi thấy rằng những công cụ toán học cần thiết cho một số nghiên cứu vật

lý còn chưa có, ông đã tự phát minh. Phải gần ba thế kỷ trôi qua, thế giới mới lại biết tới một thiên tài khoa học có tầm cỡ như thế. Trong số rất nhiều đóng góp cơ bản của Newton cho sự tìm hiểu về hoạt động của Vũ trụ, ở đây chúng ta đặc biệt quan tâm tới lý thuyết hấp dẫn của ông.

Lực hấp dẫn hiện diện mọi lúc mọi nơi trong đời sống hàng ngày của chúng ta. Nó giữ cho chúng ta và mọi vật xung quanh chúng ta bám chặt được vào mặt đất; nó giữ cho không khí mà chúng ta hít thở hàng ngày không bay hết ra ngoài không gian vũ trụ; nó cũng giữ cho Mặt Trăng duy trì được quỹ đạo xung quanh Trái Đất, cũng như Trái Đất cũng quanh Mặt Trời. Hấp dẫn cũng là lực điều khiển nhị độ của vũ điệu Vũ trụ với sự tham gia tận tụy và không biết mệt mỏi của hàng tỷ những cư dân trong Vũ trụ từ những tiểu hành tinh tới các hành tinh, các ngôi sao và tới các thiên hà. Hơn ba thế kỷ ảnh hưởng của Newton đã khiến chúng ta tin chắc rằng hấp dẫn là lực duy nhất đã tạo ra sự phong phú đa dạng đó của những điều xảy ra trên Trái Đất cũng như ngoài Trái Đất. Tuy nhiên, trước Newton chưa có ai hiểu được rằng sự rơi của quả táo từ trên cây xuống đất và chuyển động quay của Trái Đất xung quanh Mặt Trời lại đều là thể hiện của cùng một nguyên lý vật lý. Với bước đi táo bạo phụng sự cho sự bá quyền của khoa học, Newton đã thống nhất vật lý trên mặt đất với vật lý thiên thể và tuyên bố rằng lực hấp dẫn là bàn tay vô hình chi phối cả hai thế giới đó.

Quan điểm của Newton về hấp dẫn có thể được gọi là “quan điểm bình quân vĩ đại”. Ông tuyên bố rằng tất cả mọi vật đều tác dụng lực hút hấp dẫn lên tất cả mọi vật khác. Bất kể thành phần vật lý là như thế nào, mọi vật đều tác dụng cũng như đều chịu tác dụng của lực hấp dẫn. Dựa trên sự nghiên cứu kỹ lưỡng những phân tích của Johannes Kepler về chuyển động của các hành tinh, Newton đã suy ra được cường độ lực hút hấp dẫn giữa hai vật phụ thuộc chỉ vào hai thứ: Lượng chất chứa trong mỗi vật và khoảng cách giữa chúng “Chất” ở đây có nghĩa là vật chất – nó bao gồm tổng số các photon, nơtron và electron – và tổng số này xác định khối lượng của vật. Định luật vạn vật hấp dẫn của Newton khẳng định rằng cường độ lực hút giữa hai vật càng lớn nếu khối lượng của chúng càng lớn và càng nhỏ nếu khối lượng của chúng càng nhỏ; nó cũng còn khẳng định rằng cường độ lực hút hấp dẫn càng

lớn nếu khoảng cách giữa hai vật càng nhỏ và càng nhỏ nếu khoảng cách đó càng lớn.

Newton còn đi xa hơn sự mô tả định tính đó và ông đã viết ra công thức mô tả định lượng cường độ của lực hấp dẫn giữa hai vật. Công thức này có thể phát biểu bằng lời như sau: lực hấp dẫn giữa hai vật tỷ lệ thuận với tích khối lượng của chúng và tỷ lệ nghịch với bình phương khoảng cách giữa chúng. Định luật hấp dẫn này có thể dùng để tiên đoán chuyển động của các hành tinh và các sao chổi quay xung quanh Mặt Trời, chuyển động của Mặt Trăng xung quanh Trái Đất hoặc thậm chí của các tên lửa được phóng lên để thám hiểm các hành tinh. Nó cũng được áp dụng cho những tiên đoán đời thường hơn như quỹ đạo của quả bóng được ném lên hay những cú nhảy nhào lộn của các vận động viên nhảy cầu. Sự phù hợp của những tiên đoán đó với chuyển động quan sát được trên thực tế hết sức ngoạn mục. Thành công này đã đem lại cho lý thuyết của Newton một sự ủng hộ mạnh mẽ cho tới tận đầu thế kỷ XX. Tuy nhiên, phát minh ra thuyết tương đối của Einstein đã dựng lên một trở ngại mà lý thuyết của Newton không thể vượt qua.

Sự không tương thích giữa lý thuyết hấp dẫn của Newton và thuyết tương đối hẹp

Một đặc điểm trung tâm của thuyết tương đối hẹp là bức tường chắn tuyệt đối về vận tốc được thiết đặt bởi ánh sáng. Điều quan trọng cần phải thấy là, giới hạn này không chỉ áp dụng cho các đối tượng vật chất mà còn cả cho những tín hiệu cũng như những tác dụng thuộc bất cứ loại nào. Không có bất cứ cách gì có thể truyền tin hoặc những nhiễu động từ nơi này đến nơi khác với vận tốc nhanh hơn ánh sáng. Tất nhiên, thế giới có vô vàn cách để truyền những nhiễu động với vận tốc chậm hơn ánh sáng. Chẳng hạn, tiếng nói của bạn và tất cả những âm thanh khác đều là những dao động được truyền đi với vận tốc 340km/s (tức 1.200km/h) qua không khí, một vận tốc quá nhỏ bé so với vận tốc 300.000km/s của ánh sáng. Sự khác biệt này về vận tốc thể hiện rõ khi bạn quan sát một trận chơi bóng chày từ hàng ghế ở xa chỗ phát bóng. Khi cầu thủ cầm chày vụt bóng, âm thanh phát ra đến tai bạn chậm hơn giây lát sau khi bạn thấy quả bóng đã được đánh. Một điều tương tự cũng xảy ra trong lúc mưa giông. Mặc dù

sấm và chớp được tạo ra đồng thời, nhưng bao giờ ta cũng thấy chớp trước khi nghe thấy tiếng sấm. Lại một lần nữa, điều này phản ánh sự khác biệt rất lớn về vận tốc giữa ánh sáng và âm thanh. Thành công của thuyết tương đối hẹp là cho chúng ta biết rằng không thể có tình huống ngược lại, tức là một tín hiệu nào đó đến chúng ta trước cả ánh sáng do nó phát ra. Không có gì chạy nhanh hơn các photon.

Nhưng đây mới là toàn bộ khó khăn. Trong lý thuyết hấp dẫn của Newton, một vật tác dụng một lực hút hấp dẫn lên vật khác với cường độ chỉ được xác định bởi khối lượng của hai vật và độ lớn của khoảng cách giữa chúng. Chứ nó không có liên quan gì tới chuyện hai vật đã có mặt trong sự hiện diện của nhau bao nhiêu lâu. Điều này có nghĩa là nếu như khối lượng hoặc khoảng cách giữa chúng thay đổi, thì theo Newton, các vật sẽ ngay tức thì cảm thấy sự thay đổi trong lực hút hấp dẫn của chúng. Ví dụ, lý thuyết hấp dẫn của Newton tuyên bố rằng nếu Mặt Trời đột nhiên bùng nổ thì Trái Đất ở cách xa 150 triệu kilômét sẽ ngay tức thì rời khỏi quỹ đạo elip vốn có của nó. Mặc dù ngay cả ánh sáng phát ra từ vụ nổ cũng phải mất tới 8 phút mới tới được Trái Đất, nhưng theo lý thuyết của Newton thì thông tin Mặt Trời bùng nổ sẽ được truyền đi tức thời tới Trái Đất thông qua sự thay đổi tức thì của lực hấp dẫn chi phối chuyển động của nó.

Kết luận này mâu thuẫn trực tiếp với thuyết tương đối hẹp, vì thuyết này đảm bảo rằng không có thông tin nào có thể được truyền đi nhanh hơn vận tốc ánh sáng – và sự truyền đi tức thời đã vi phạm quan niệm này một cách tồi tệ.

Như vậy, vào đầu thế kỷ XX, Einstein đã nhận thấy rằng lý thuyết hấp dẫn cực kỳ thành công của Newton đã xung đột với thuyết tương đối hẹp của ông. Tin tưởng vào sự đúng đắn của thuyết tương đối hẹp và bất chấp cả núi những bằng chứng thực nghiệm khẳng định lý thuyết hấp dẫn của Newton, Einstein đã lao vào tìm kiếm một lý thuyết mới tương thích được với thuyết tương đối hẹp. Cuối cùng, ông đã phát minh ra thuyết tương đối rộng, trong đó đặc tính của không gian và thời gian lại một lần nữa phải trải qua những biến đổi đáng kể.

Ý tưởng hay nhất của Einstein

Ngay cả trước khi phát minh ra thuyết tương đối hẹp, lý thuyết hấp dẫn của Newton đã thiếu một điều hết sức căn bản. Mặc dù nó đã được dùng để đưa ra những tiên đoán hết sức chính xác về chuyển động của các vật dưới tác dụng của lực hấp dẫn, nhưng nó không cho biết lực hấp dẫn là cái gì. Nghĩa là bằng cách nào mà hai vật ở cách xa nhau, thậm chí tới hàng triệu kilômét, nếu không nói là còn lớn hơn nữa, lại có thể tác động đến chuyển động của nhau? Bằng cách nào mà lực hấp dẫn đã thực hiện được sứ mệnh đó? Đây là vấn đề mà chính Newton cũng đã ý thức được. Mời bạn hãy đọc những dòng do chính ông viết:

Thật không thể chấp nhận được chuyện vật chất vô tri, không có sự trung gian của bất cứ cái gì khác phi vật chất, lại có thể tác động lên vật chất khác mà không có sự tiếp xúc với nhau. Việc lực hấp dẫn là vốn có và căn bản đối với vật chất tới mức một vật có thể tác dụng lên một vật khác ở cách xa trong chân không, không có sự trung gian của một vật nào, mà qua đó tác dụng của chúng và lực có thể truyền đi, từ vật này tới vật khác, đối với tôi là một điều cực kỳ vô lý và tôi tin rằng không có một người nào có khả năng tư duy triết học lại có thể chấp nhận được điều đó. Hấp dẫn cần phải được gây bởi một tác nhân thường xuyên tác động theo một quy luật nào đó, nhưng tác nhân này là vật chất hay phi vật chất thì tôi xin dành cho bạn đọc suy nghĩ.

Như vậy có nghĩa là, Newton đã chấp nhận trước sự tồn tại của hấp dẫn và dẫn ra những phương trình mô tả chính xác những hiệu ứng của nó, chứ ông chưa bao giờ khám phá đến tận cùng sự hoạt động của nó. Ông đã trao cho thế giới một cuốn sách “hướng dẫn sử dụng” lực hấp dẫn mà các nhà vật lý, các nhà thiên văn và các kỹ sư đã khai thác rất thành công để phóng các tên lửa tới Mặt Trăng, sao Hỏa và các hành tinh khác trong hệ Mặt Trời; để tiên đoán nhật thực và nguyệt thực, tiên đoán chuyển động của các sao chổi v.v... Nhưng hoạt động nội tại của nó, những thứ bên trong của cái “hộp đen” hấp dẫn thì ông vẫn bỏ lại với sự bí ẩn hoàn toàn. Khi bạn sử dụng một đầu CD hoặc chiếc máy tính cá nhân, bạn cũng cảm thấy mình rơi vào trạng thái mù tịt tương tự đối với sự hoạt động bên trong của nó. Một khi mà bạn đã biết sử dụng nó, thì bạn cũng như bất cứ ai khác đều chưa cần biết những nhiệm vụ mà bạn đã đặt ra cho nó được thực hiện như thế nào.

Nhưng nếu chiếc đầu CD hay chiếc máy tính cá nhân của bạn bị trục trặc, thì việc sửa chữa đòi hỏi phải biết về sự hoạt động bên trong của nó. Tương tự như vậy, Einstein cũng nhận thấy rằng bất chấp những khẳng định bằng thực nghiệm hàng trăm năm của lý thuyết Newton về hấp dẫn, lý thuyết tương đối hẹp của ông đã rút ra kết luận rằng lý thuyết đó bị “trục trặc”, tất nhiên theo một cách hết sức tinh vi, và việc sửa chữa nó đòi hỏi phải nắm được bản chất đúng đắn và đầy đủ của hấp dẫn.

Năm 1907, trong khi đang suy tư về những vấn đề này bên bàn làm việc tại Văn phòng đăng ký sáng chế phát minh tại Bern, Thụy Sĩ, Einstein đã nảy ra một phát hiện quan trọng và phát hiện này, từng bước một, cuối cùng đã đưa ông tới một lý thuyết hoàn toàn mới về hấp dẫn. Lý thuyết không chỉ đơn giản là sự bổ khuyết cho lý thuyết hấp dẫn của Newton, mà thực chất nó xây dựng lại mới hoàn toàn tư tưởng về hấp dẫn và điều quan trọng nhất là nó hoàn toàn phù hợp với thuyết tương đối hẹp.

Phát hiện của Einstein có liên quan tới câu hỏi mà có lẽ bạn đã từng băn khoăn ở Chương 2, ở đó chúng ta đã nhấn mạnh rằng chúng ta chỉ quan tâm tới vấn đề: Vũ trụ sẽ được nhìn thế nào dưới con mắt của những người quan sát chuyển động đối với nhau với vận tốc không đổi. Bằng cách so sánh kỹ lưỡng những quan sát của họ, chúng ta đã phát hiện ra nhiều hệ quả lạ lùng liên quan tới bản chất của không gian và thời gian. Nhưng nếu những người quan sát lại chuyển động có gia tốc thì sao? Những quan sát của họ sẽ phức tạp, khó phân tích hơn so với trường hợp những người quan sát chuyển động với vận tốc không đổi. Tuy nhiên, một câu hỏi tự nhiên đặt ra là liệu có cách nào chế ngự được sự phức tạp đó và làm cho chuyển động có gia tốc dung hòa được với quan niệm mới của chúng ta về không gian và thời gian hay không?

Phát hiện sáng giá nhất của Einstein cho chúng ta biết phải làm điều đó như thế nào. Để hiểu phát hiện này, hãy hình dung chúng ta đang ở năm 2050 và bạn là vua của các chuyên gia về chất nổ của FBI. Một hôm bạn nhận được một cú điện thoại hốt hoảng báo rằng có một quả bom rất tinh xảo được gài ở ngay trung tâm Washington D.C. Sau khi lao tới hiện trường và khảo sát quả bom, cơn ác mộng tồi tệ nhất của bạn đã hiện hình: đó là một quả bom hạt nhân với công suất lớn tới mức nếu nó được chôn sâu trong vỏ Trái Đất hay thả xuống đáy đại dương thì sức phá hoại của nó cũng còn rất ghê gớm. Sau khi xem xét kỹ lưỡng cơ cấu của

ngòi nổ, bạn thấy rằng không có hy vọng gì tháo được ngòi này ra và hơn thế nữa bạn còn phát hiện ra trong đó có một cái bẫy nữa. Quả bom được đặt trên một cái cân. Chỉ cần cân lệch khỏi giá trị hiện thời 50% quả bom lập tức sẽ phát nổ. Theo cơ chế hẹn giờ, bạn biết được rằng thời hạn dành cho bạn chỉ còn một tuần lễ nữa. Số phận hàng triệu người đang đặt trên đôi vai bạn, bạn sẽ phải làm gì đây?

Sau khi đã biết chắc rằng không có một nơi an toàn nào ở trên cũng như dưới đất để cho quả bom này phát nổ, bạn nhận thấy dường như chỉ có cách lựa chọn duy nhất, đó là đưa quả bom đi rất xa ra ngoài khoảng không Vũ trụ, nơi mà quả bom nổ sẽ không gây ra tai họa nào. Bạn đã trình bày ý tưởng đó tại một cuộc họp FBI và toàn bộ kế hoạch của bạn đã bị một trợ tá trẻ tuổi tên là Isaac bác bỏ hoàn toàn: “Có một vấn đề nghiêm trọng trong kế hoạch của ông” – Isaac nói – “Vì quả bom càng đưa ra xa Trái Đất trọng lượng của nó càng giảm vì lực hút của Trái Đất lên nó sẽ giảm. Điều này có nghĩa là số chỉ của chiếc cân cũng sẽ giảm, do đó quả bom sẽ phát nổ trước khi chúng ta kịp đưa nó tới nơi an toàn”. Trước khi bạn có đủ thời gian để suy ngẫm kỹ càng về lời phê phán đó, thì một trợ tá trẻ khác tên là Albert lại lên tiếng: “Thực tế, còn có một vấn đề nữa. Vấn đề này cũng quan trọng không kém vấn đề mà Isaac vừa nêu ra, nhưng tinh tế hơn. Tôi xin phép được giải thích”. Do muốn có thời gian để suy nghĩ về sự bác bỏ của Isaac, bạn định ngắt lời Albert, nhưng như thường lệ, một khi anh ta đã nói thì không ai bắt anh ta dừng lại được.

“Để phóng quả bom vào khoảng không Vũ trụ, ta cần phải lấp nó lên một tên lửa. Khi tên lửa gia tốc hướng lên trên để vượt ra khỏi bầu khí quyển đi vào không gian, số chỉ của cân sẽ tăng, do đó sẽ lại làm cho quả bom nổ trước khi tới nơi đã định. Như các vị thấy, đế của quả bom đứng yên trên bàn cân sẽ đè mạnh hơn lên cân so với khi tất cả đều đứng yên, giống như cơ thể bạn bị ép chặt vào lưng ghế trên chiếc xe đang tăng tốc. Quả bom cũng sẽ “ép” xuống bàn cân hết như lưng bạn ép vào lưng ghế ngồi trong xe. Khi cân bị ép như vậy, tất nhiên số chỉ của nó sẽ tăng và điều đó sẽ làm cho quả bom phát nổ nếu sự tăng đó vượt quá 50%.

Bạn cảm ơn Albert về sự giải thích của anh ta, nhưng do không tập trung nghe vì mãi suy nghĩ về ý kiến của Isaac, bạn buồn bã tuyên bố rằng: chỉ cần một đòn chí mạng là đã đủ đập tan một ý tưởng rồi và sự phản đối rõ ràng là đúng đắn của Isaac đã

làm được việc đó. Cảm thấy hơi tuyệt vọng bạn bèn đề nghị mọi người hãy đưa ra những sáng kiến mới. Đúng lúc đó Albert nảy ra một ý tưởng đáng kinh ngạc: “Nghĩ đi nghĩ lại, cuối cùng tôi thấy rằng ý tưởng của ông không hỏng hoàn toàn. Ý kiến của Isaac cho rằng lực hấp dẫn giảm khi quả bom được đưa vào không gian, điều này có nghĩa là số chỉ của cân giảm. Còn ý kiến của tôi lại cho rằng gia tốc hướng lên của tên lửa sẽ làm cho quả bom đè lên cân mạnh hơn, nghĩa là sẽ làm cho số chỉ của nó tăng lên. Như vậy, nếu chúng ta hiệu chỉnh một cách chính xác gia tốc của tên lửa từng thời điểm một khi nó bay lên, thì hai hiệu ứng đó có thể sẽ triệt tiêu nhau! Đặc biệt, trong những giai đoạn bắt đầu nâng lên, khi mà tên lửa còn cảm thấy đầy đủ sức mạnh của lực hấp dẫn, nó vẫn có thể gia tốc, miễn sao không quá lớn để vẫn còn nằm trong khoảng cho phép 50%. Khi tên lửa ngày càng xa Trái Đất hơn, do đó ngày càng cảm thấy lực hấp dẫn của Trái Đất nhỏ hơn, chúng ta phải tăng tốc mạnh hơn để bù trừ lại. Độ tăng số chỉ của cân do gia tốc hướng lên có thể điều chỉnh đúng bằng độ giảm của nó do lực hút hấp dẫn giảm. Và như vậy, chúng ta có thể giữ cho chỉ số của cân hoàn toàn không thay đổi”.

Đề xuất của Albert đã dần dần hiện hình trong đầu óc bạn. “Nói một cách khác,” – bạn nói – “gia tốc hướng lên có thể cho ta một thứ thay thế được cho lực hấp dẫn. Và như vậy, chúng ta có thể mô phỏng hấp dẫn thông qua một chuyển động được gia tốc thích hợp”.

“Đúng như thế” – Albert đáp.

“Như vậy,” – bạn tiếp tục – “chúng ta có thể phóng quả bom vào không gian và bằng cách hiệu chỉnh gia tốc của tên lửa một cách chính xác chúng ta có thể đảm bảo rằng số chỉ của cân không thay đổi, và như vậy tránh được sự phát nổ của quả bom trước khi nó được đưa đến nơi an toàn”. Thành thử, bằng cách cho lực hấp dẫn và chuyển động có gia tốc thi đấu giằng co – tất nhiên còn nhờ vào độ chính xác của khoa học tên lửa thế kỷ XXI nữa – bạn có thể thoát khỏi tai họa.

Sự thừa nhận hấp dẫn và chuyển động gia tốc có liên quan mật thiết với nhau chính là ý tưởng hay nhất của Einstein đã nảy ra trong một ngày hạnh phúc của ông tại Văn phòng đăng ký sáng chế phát minh ở Bern. Mặc dù, câu chuyện về quả bom đã làm nổi rõ thực chất của ý tưởng đó, nhưng cũng cần phải trình bày lại nó trong một khuôn khổ gắn với Chương 2 hơn. Hãy nhớ lại rằng

nếu bạn bị nhốt trong một toa xe bị kín không có cửa sổ và con tàu chuyển động không có gia tốc, thì bạn không có cách gì xác định được vận tốc của bạn. Khi đó, toa xe nhìn hoàn toàn như khi nó đứng yên và mọi thí nghiệm mà bạn tiến hành đều cho cùng một kết quả bất chấp con tàu chạy nhanh tới mức nào. Cơ bản hơn nữa, nếu không có các vật mốc bên ngoài thì bạn cũng không có cách nào gán được một vận tốc cho chuyển động của bạn. Trái lại, nếu bạn chuyển động có gia tốc, thì ngay cả khi bị giam trong một toa xe bị kín, bạn cũng vẫn sẽ cảm nhận được có một lực tác dụng lên bạn. Ví dụ, nếu chiếc ghế của bạn ngồi hướng về phía đầu tàu và được vít chặt vào sàn tàu, thì khi con tàu tăng tốc, bạn sẽ cảm thấy lưng ghế tác dụng một lực vào lưng bạn hết như trường hợp được mô tả bởi Albert. Tương tự, nếu như bạn ở trong thang máy đang gia tốc hướng lên thì bạn sẽ cảm thấy sàn cabin thang máy tác dụng một lực lên chân bạn. Phát hiện của Einstein nói rằng trong cabin kín mít của mình, bạn sẽ không thể nào phân biệt được những tình huống có gia tốc với những tình huống không có gia tốc nhưng có lực hấp dẫn: khi độ lớn của chúng được hiệu chỉnh một cách hợp lý, thì lực mà bạn cảm thấy từ trường hấp dẫn và từ chuyển động có gia tốc là không thể phân biệt được. Nếu như cabin của bạn đặt đứng yên trên mặt đất, bạn sẽ cảm thấy lực tác dụng quen thuộc của sàn cabin tác dụng lên chân bạn hết như trong kịch bản gia tốc hướng lên. Đó chính là sự tương đương mà Albert đã khai thác trong giải pháp mà anh ta đưa ra để phóng quả bom của bọn khủng bố lên không gian. Nếu lật cabin của bạn ra phía sau (tức là lưng ghế của bạn bây giờ nằm song song với mặt đất – ND) và vẫn nằm yên trên mặt đất thì bạn sẽ cảm thấy lực do lưng ghế tác dụng lên lưng bạn (để đỡ cho bạn khỏi ngã) hết như khi cabin của bạn được gia tốc theo phương nằm ngang. Einstein đã gọi sự không thể phân biệt giữa chuyển động có gia tốc và hấp dẫn là nguyên lý tương đương[1]. Nguyên lý này đóng vai trò trung tâm của thuyết tương đối rộng.

Những điều nói trên cho thấy rằng thuyết tương đối rộng đã hoàn tất một công việc đã được khởi đầu bởi thuyết tương đối hẹp. Thông qua nguyên lý tương đối, thuyết tương đối hẹp đã tuyên bố sự dân chủ giữa tất cả các điểm quan sát khác nhau: các định luật vật lý là như nhau đối với tất cả những người quan sát chuyển động thẳng đều đối với nhau. Nhưng thật ra đây vẫn là một nền dân chủ hạn chế, vì nó đã loại trừ rất nhiều quan điểm khác, đó là quan điểm của những người quan sát chuyển động có gia tốc. Phát

hiện năm 1907 của Einstein đã cho chúng ta biết cách bao quát tất cả mọi quan điểm trong một khuôn khổ bình đẳng. Vì không có sự khác nhau giữa người quan sát chuyển động có gia tốc khi không có hấp dẫn và người quan sát không có gia tốc nhưng lại trong trường hấp dẫn, nên ta có thể khẳng định rằng tất cả mọi người quan sát, bất kể trạng thái chuyển động của họ, đều có thể tuyên bố rằng họ là đứng yên và “phần còn lại của thế giới chuyển động qua bên cạnh họ” với điều kiện họ đưa vào một trường hấp dẫn thích hợp để mô tả những thứ xung quanh họ. Theo nghĩa đó, thông qua việc đưa trường hấp dẫn vào, thuyết tương đối rộng đã đảm bảo rằng mọi điểm quan sát khả dĩ đều hoàn toàn bình đẳng với nhau. (Như chúng ta sẽ thấy ở sau, điều này có nghĩa là sự phân biệt giữa những người quan sát ở Chương 2 chuyển động có gia tốc đối với nhau – như George đuổi theo Gracie nhờ bật động cơ phản lực đeo ở lưng và già chậm hơn cô ta – chấp nhận sự mô tả tương đương khi không có gia tốc nhưng có trường hấp dẫn).

Mối liên hệ sâu xa này giữa hấp dẫn và chuyển động có gia tốc là một phát hiện sáng giá, nhưng tại sao Einstein vẫn còn chưa thoả mãn? Nguyên nhân, nói một cách đơn giản, là bởi vì bản chất của hấp dẫn trong đời sống của Vũ trụ, nhưng lại là một lực siêu thoát và khó nắm bắt. Trái lại, chuyển động có gia tốc mặc dù hơi phức tạp hơn chuyển động có vận tốc không đổi, nhưng vẫn còn là cụ thể và có thể sờ mó được. Bằng cách tìm ra mối liên hệ thứ hai đó, Einstein nhận thấy rằng ông có thể dùng sự hiểu biết của mình về chuyển động như một công cụ mạnh để đạt được sự hiểu biết tương tự về hấp dẫn. Tuy nhiên, thực hiện chiến lược đó trên thực tế không phải là một nhiệm vụ dễ dàng, cho dù là bậc thiên tài như Einstein. Nhưng rồi cuối cùng, cách tiếp cận đó đã mang lại cho ông thành quả, đó là thuyết tương đối rộng. Và để đạt được tới đó, Einstein còn phải rèn đúc một mắt thứ hai trong dây xích kết nối hấp dẫn với chuyển động có gia tốc, đó là độ cong của không gian và thời gian mà chúng ta sẽ đề cập tới ở mục sau.

[1] Nói một cách chính xác hơn, Einstein đã nhận thấy rằng nguyên lý tương đương đúng chừng nào mà những quan sát của bạn được giới hạn trong một vùng đủ nhỏ của không gian (tức cái cabin của bạn là đủ nhỏ). Lý do là như sau. Các trường hấp dẫn có thể thay đổi cường độ và về hướng từ nơi này sang nơi khác. Nhưng chúng ta hình dung rằng toàn bộ cabin của bạn được gia tốc như một khối duy nhất và do đó gia tốc của bạn mô phỏng một

trường hấp dẫn đều duy nhất. Khi cabin của bạn thu nhỏ dần, sẽ càng có ít chỗ cho trường hấp dẫn thay đổi, nên nguyên lý tương đương càng áp dụng tốt hơn. Về mặt kỹ thuật, sự sai khác giữa trường hấp dẫn “thực” có thể không đều được tạo bởi một tập hợp các vật có khối lượng nào đó được gọi là trường hấp dẫn “thuỷ triều” (vì nó giải thích được tác động hấp dẫn của Mặt Trăng lên thuỷ triều của Trái Đất). Nói tóm lại, lực hấp dẫn thuỷ triều sẽ trở nên ít đáng kể hơn nếu như cabin của bạn thu nhỏ lại, làm cho chuyển động có gia tốc và trường hấp dẫn thực sự trở nên không thể phân biệt được

Gia tốc và sự cong của không gian và thời gian

Einstein đã dồn hết sức lực, tâm trí, và nhiều lúc tựa như là bị ma ám, để nghiên cứu vấn đề đó. Khoảng 5 năm sau phát hiện sáng giá của mình tại Văn phòng đăng ký sáng chế ở Bern, ông đã viết cho nhà vật lý Arnold Sommerfeld: “Hiện giờ tôi chỉ làm việc về vấn đề hấp dẫn... [Một] điều chắc chắn - đó là chưa bao giờ trong đời tôi lại phải trăn trở khổ sở như vậy... So với bài toán này thì lý thuyết tương đối ban đầu [tức thuyết tương đối hẹp] chỉ là một trò chơi trẻ con”.

Vào năm 1912, ông tưởng như đã làm được một cú đột phá then chốt tiếp theo, đó là một hệ quả đơn giản nhưng tinh tế được rút ra khi áp dụng thuyết tương đối hẹp cho mối liên hệ giữa hấp dẫn và chuyển động có gia tốc. Để hiểu được bước này trong suy luận của Einstein, một cách dễ nhất là tập trung xem xét một ví dụ cụ thể về chuyển động có gia tốc, như chính ông cũng đã từng làm như vậy. Cần nhớ lại rằng, một vật chuyển động có gia tốc nếu độ lớn của vận tốc hoặc phương chuyển động của nó thay đổi. Để đơn giản, ta sẽ xét chuyển động có gia tốc trong đó chỉ có hướng của chuyển động thay đổi còn độ lớn của vận tốc thì cố định. Đặc biệt, ta sẽ xét chuyển động tròn mà ai cũng cảm thấy khi đứng yên trên một sàn quay có tên là Tornado thường thấy trong các công viên giải trí. Trong trường hợp bạn chưa quen đứng vững trên một sàn quay như vậy, bạn có thể đứng tựa lưng vào vách kính hình tròn làm bằng thủy tinh hữu cơ quay với tốc độ cao cùng với sàn. Giống như mọi chuyển động có gia tốc khác bạn có thể cảm nhận được chuyển động này: cụ thể, bạn cảm thấy một lực kéo bạn theo phương bán kính ra xa tâm quay đồng thời bạn cũng cảm thấy

vách kính ép lên lưng bạn, giữ cho bạn chuyển động tròn. (Mặc dù không có liên quan gì đến những điều thảo luận ở đây, nhưng cũng nói thêm rằng, thực tế chuyển động quay đã “găm” cơ thể bạn vào vách kính với một lực mạnh tới mức, dù cho sàn dưới chân bạn có biến mất bạn cũng không bị trượt xuống phía dưới). Nếu như sàn quay cực kỳ đều và bạn nhắm mắt lại, thì áp lực của sự quay lên lưng bạn có thể khiến cho bạn cảm thấy gần như là bạn đang nằm trên giường. Nói “gần như” là bởi vì bạn vẫn còn cảm thấy lực hấp dẫn bình thường theo phương “thẳng đứng”, khiến cho không thể lừa bộ não của bạn hoàn toàn được. Nhưng nếu bạn đứng trong Tornado đặt ở bên ngoài khoảng không vũ trụ chẳng hạn, và nếu như sàn quay với tốc độ thích hợp, thì bạn sẽ cảm thấy đúng là đang nằm trên chiếc giường đứng yên trên mặt đất. Hơn nữa, nếu như bạn “đứng dậy” và đi lại trên thành trong của vách kính quay, thì chân bạn ép lên nó hết như khi đi bình thường trên mặt đất. Thực tế, các trạm không gian đều được thiết kế quay theo cách đó để tạo ra cảm giác giả tạo về trọng lực trong không gian vũ trụ.

Bây giờ, khi đã quen với chuyển động có gia tốc của chiếc Tornado quay mô phỏng hấp dẫn (trọng lực), bạn có thể theo dõi sự suy luận của Einstein và xem không gian và thời gian nhìn như thế nào dưới con mắt của người quan sát cùng đứng trên sàn quay. Những suy luận của Einstein áp dụng cho trường hợp mô tả ở trên như sau: Chúng ta, những người quan sát đứng yên, có thể dễ dàng đo được chu vi và bán kính của sàn quay. Ví dụ đo chu vi ta thận trọng đặt thước kế tiếp nhau dọc theo vành đai của sàn; còn đối với bán kính, ta cũng làm theo phương pháp đó bằng cách đặt thước kế tiếp nhau từ tâm quay sàn đến mép ngoài của nó. Cuối cùng, ta thấy rằng tỷ số của hai kết quả đo được bằng hai lần của số pi, tức là xấp xỉ 6,28 đúng như đối với một hình tròn mà ta vẽ trên giấy trong hình học sơ cấp. Nhưng liệu điều đó có đúng đối với người quan sát đứng trên sàn quay không?

Để làm sáng tỏ vấn đề này, ta đề nghị Slim và Jim hiện đang chơi trên sàn quay, thực hiện một số phép đo. Ta ném cho Slim một chiếc thước và nhờ anh ta đo chu vi của sàn quay và một chiếc thước cho Jim để anh ta đo bán kính của nó. Để cho dễ quan sát, ta chọn một chỗ đứng trên cao nhìn xuống như được minh họa trên Hình 3.1.



Hình 3.1. Chiếc thước của Slim bị co lại, vì nó nằm dọc theo hướng chuyển động của sàn quay. Trong khi đó chiếc thước của Jim nằm dọc theo bán kính, tức là vuông góc với hướng chuyển động vì vậy chiều dài của nó không bị co lại.

Chúng ta cũng đã tô điểm cho bức hình chụp nhanh này một mũi tên chỉ hướng chuyển động tức thời của mỗi điểm trên sàn. Khi Slim bắt đầu đo chu vi, từ vị trí trên cao ta thấy ngay rằng anh ta sẽ nhận được một kết quả khác với kết quả của chúng ta. Đó là bởi vì, khi anh ta đặt thước đo chu vi, ta đã thấy rằng chiều dài chiếc thước của anh ta đã bị co ngắn lại. Đây chính là sự co Lorentz mà chúng ta đã thảo luận ở Chương 2, theo đó, chiều dài của một vật bị co ngắn lại dọc theo hướng chuyển động. Mà chiếc thước đã ngắn hơn có nghĩa là số lần đặt thước dọc theo chu vi của anh ta sẽ nhiều hơn. Vì Slim vẫn nghĩ rằng chiếc thước của anh ta dài 1m (do không có chuyển động tương đối giữa Slim và cái thước, nên anh ta cảm nhận thấy chiếc thước dài 1m như bình thường), điều này có nghĩa là Slim sẽ đo được chu vi của sàn dài hơn kết quả đo của chúng ta. (Nếu bạn thấy vô lý hãy xem chú thích 1, trang 9).

Còn bán kính thì sao? Jim cũng dùng phương pháp tương tự để đo bán kính và từ vị trí quan sát trên cao, chúng ta thấy rằng anh ta sẽ tìm thấy kết quả giống như chúng ta. Sở dĩ như vậy là vì, chiếc thước khi này không đặt dọc theo hướng tức thời của chuyển động (như Slim đo chu vi). Thay vì thế, nó lại đặt vuông góc với hướng chuyển động và do đó chiều dài của nó không bị co lại. Vì vậy, Jim sẽ đo được bán kính của sàn đúng như chúng ta đã đo được.

Nhưng bây giờ, khi mà Slim và Jim tính tỷ số của chu vi và bán kính của sàn quay, họ sẽ nhận được một con số lớn hai hai lần số pi mà chúng ta đã tính được, vì chu vi bây giờ là dài hơn còn bán kính thì vẫn như trước. Thật là một điều lạ lùng. Làm thế quái nào mà một vật hình tròn lại có thể vi phạm một phát minh

của người cổ Hy Lạp nói rằng đối với bất cứ một hình tròn nào, tỷ số của chu vi và bán kính của nó đều phải đúng bằng 2π ?

Đây là câu trả lời của Einstein: Phát minh của người cổ Hy Lạp là đúng đối với những vòng tròn được vẽ trên mặt phẳng. Nhưng cũng giống như những chiếc gương cong trong nhà cưỡi ở các công viên giải trí làm méo mó những quan hệ không gian trong ảnh của chúng ta qua những chiếc gương đó, nếu vòng tròn được vẽ trên một mặt cong, thì những quan hệ hình học bình thường của nó cũng sẽ bị méo mó: khi đó, tỷ số giữa chu vi và bán kính của nó, nói chung, sẽ không còn bằng hai lần số pi nữa.

Ví dụ, Hình 3.2 so sánh ba vòng tròn có bán kính như nhau. Tuy nhiên, cần thấy rằng chu vi của chúng lại không như nhau. Hình tròn (b) được vẽ trên mặt lồi của hình cầu, nó có chu vi nhỏ hơn chu vi của vòng tròn (a) vẽ trên mặt phẳng, ngay cả khi chúng có bán kính như nhau. Bản chất cong của mặt cầu khiến cho các đường bán kính hơi chụm vào nhau, do đó làm giảm chu vi của hình tròn. Mặt khác, chu vi của hình tròn (c), cũng được vẽ trên một mặt cong - có dạng hình yên ngựa - lại lớn hơn chu vi vòng tròn vẽ trên mặt phẳng. Bản chất cong của mặt hình yên ngựa khiến cho các đường bán kính hơi loe ra xa nhau, do đó làm cho chu vi của vòng tròn trở nên lớn hơn. Từ những nhận xét trên suy ra rằng tỷ số của chu vi và bán kính của vòng tròn (b) nhỏ hơn 2π , trong khi đó tỷ số ấy của vòng tròn (c) lại lớn hơn 2π . Nhưng độ sai lệch đó đối với 2π , mà đặc biệt là giá trị lớn hơn trong trường hợp (c) lại chính là điều chúng ta đã tìm thấy đối với trường hợp cái sàן quay Tornado. Điều này đã dẫn Einstein đưa ra ý tưởng cho rằng sự cong của không gian chính là nguyên nhân dẫn đến sự vi phạm hình học Euclide “thông thường”. Hình học phẳng của người Hy Lạp đã từng dạy cho trẻ em từ hàng ngàn năm nay hóa ra lại không dùng được cho người ở trên sàן quay. Như phân (c) của Hình 3.2 cho thấy, trong trường hợp này hình học Euclide phải được thay bằng hình học không gian cong - một sự tổng quát hóa của nó [1].



Hình 3.2 Vòng tròn được vẽ trên mặt cầu (b) có chu vi nhỏ hơn vòng tròn vẽ trên mặt phẳng (a), trong khi đó vòng tròn vẽ trên mặt hình yên ngựa (c) lại có chu vi lớn hơn ngay cả khi chúng có bán kính như nhau.

Và như vậy, Einstein đã nhận thấy rằng những quan hệ hình học quen thuộc được xây dựng bởi những người Hy Lạp, tức là những quan hệ thuộc về những hình không gian “phẳng” như vòng tròn trên một mặt bàn phẳng chẳng hạn, sẽ không còn đúng nữa đối với người quan sát chuyển động có gia tốc. Tất nhiên, chúng ta mới chỉ xem xét một loại chuyển động có gia tốc đặc biệt, nhưng Einstein đã chứng minh được rằng một kết quả tương tự, tức sự cong của không gian, cũng đúng đối với mọi trường hợp chuyển động có gia tốc.

Thực tế, chuyển động có gia tốc không chỉ tạo ra sự cong của không gian mà còn gây ra sự cong (hay biến dạng) của cả thời gian nữa. (Về mặt lịch sử thì Einstein ban đầu tập trung vào sự cong không gian). Trong một mức độ nào đó, không có gì phải quá ngạc nhiên về chuyện thời gian cũng bị ảnh hưởng, vì ở Chương 2 chúng ta đã thấy rằng thuyết tương đối hẹp đã tạo ra sự khớp nối giữa không gian và thời gian. Trong một bài giảng của mình về thuyết tương đối hẹp vào năm 1908, Minkowski đã nói về sự hòa nhập đó bằng những lời lẽ rất thơ như sau: “Từ nay, riêng không gian không thôi và riêng thời gian không thôi sẽ tàn tạ như những chiếc bóng, chỉ có sự thống nhất của cả hai mới giữ được tính độc lập của chúng”. Nói bằng một ngôn ngữ đời thường hơn, nhưng với độ chính xác cũng không kém, thì bằng cách đan kết không gian và thời gian thành một cấu trúc thống nhất là không-thời gian, thuyết tương đối hẹp đã trình trọng tuyên bố: “Cái gì đúng với không gian cũng sẽ đúng với thời gian”. Nhưng một câu hỏi lại được đặt ra: “Trong khi chúng ta có thể hình dung không gian cong bởi dạng cong của nó, thì thời gian cong có nghĩa là thế nào?”.

Để có một cảm giác về câu trả lời, ta lại đề nghị Slim và Jim hiện vẫn còn ở trên Tornado quay thực hiện thí nghiệm sau. Slim đứng ở đầu mút của một bán kính và áp lưng vào vách kính còn Jim thì bò dọc theo một bán kính nào đó xuất phát từ tâm quay.

Cứ vài mét Jim lại ngừng bò và hai anh em lại so đồng hồ với nhau. Họ sẽ thấy gì? Từ vị trí đứng yên trên cao, ta lại có thể tiên đoán được câu trả lời: đồng hồ của họ không chỉ giống nhau. Sở dĩ chúng ta đi tới kết luận đó là bởi vì chúng ta thấy rằng Slim và Jim chuyển động với vận tốc khác nhau. Ta biết rằng, trên sàn quay, nếu bạn ở càng xa tâm quay thì sau một vòng bạn sẽ đi được quãng đường dài hơn, do vậy mà bạn chuyển động nhanh hơn. Nhưng theo thuyết tương đối hẹp, bạn càng chuyển động nhanh thì đồng hồ của bạn càng chạy chậm và do đó chúng ta thấy rằng đồng hồ của Slim chạy chậm hơn đồng hồ của Jim. Hơn nữa, Slim và Jim còn thấy rằng khi Jim tới gần Slim, tốc độ phát tiếng tíc tắc của đồng hồ của Jim sẽ chậm lại và tiến gần tới tốc độ phát của đồng hồ Slim. Điều này phản ánh một thực tế là, khi Jim đi ra xa tâm quay, tốc độ chuyển động tròn của anh ta cũng tăng lên và tiến gần tới tốc độ của Slim.

Từ đó, ta có thể kết luận rằng, đối với những người quan sát trên sàn quay, như Slim và Jim chẳng hạn, thì tốc độ trôi của thời gian phụ thuộc vào vị trí chính xác của họ (trong trường hợp đang xét, đó là khoảng cách tới tâm quay). Đây chính là sự minh họa cho cái mà ta gọi là thời gian cong. Thời gian bị cong hay biến dạng, nếu như tốc độ trôi của nó từ nơi này đến nơi khác là khác nhau. Khi bò dọc theo một bán kính, Jim còn cảm thấy một điều khác nữa, đặc biệt quan trọng đối với sự thảo luận của chúng ta ở đây. Anh ta cảm thấy một lực (ly tâm) kéo mạnh ra phía ngoài và tăng dần, bởi vì khi bò ra càng xa tâm quay, không chỉ vận tốc mà gia tốc của anh ta cũng tăng. Cuối cùng chiếc sàn quay cho phép chúng ta thấy rằng gia tốc càng lớn thì kèm theo sự chậm của đồng hồ càng lớn, tức là gia tốc càng lớn thì thời gian càng cong mạnh.

Những nhận xét này đã đưa Einstein đến bước nhảy cuối cùng. Vì ông đã chứng tỏ được rằng hấp dẫn và chuyển động có gia tốc là thực sự không thể phân biệt được và vì giờ đây ông còn chứng tỏ được rằng chuyển động có gia tốc còn gắn liền với sự cong của không gian và thời gian nên ông đã đưa ra cách giải thích sau cho cái “hộp đen” hấp dẫn: hấp dẫn chính là sự cong của không gian và thời gian. Dưới đây chúng ta sẽ xét xem điều này có ý nghĩa gì.

[1] Sự phân tích vòng quay của Tornado hay “đĩa quay cứng” theo cách gọi chuyên môn hơn, sẽ dẫn đến hiểu lầm. Thực tế, cho

tới nay vẫn chưa có sự nhất trí hoàn toàn về nhiều khía cạnh tinh tế của ví dụ này. Trong phần trình bày ở Chương 3, chúng tôi theo đúng tinh thần phân tích của Einstein và trong chú thích này chúng tôi vẫn theo quan điểm đó và tìm cách làm sáng tỏ thêm một số đặc điểm mà bạn có thể còn mơ hồ. Thứ nhất, bạn có thể cảm thấy khó hiểu là tại sao chu vi của sàn quay lại không bị co Lorentz hết như cái thước và từ đó chiều dài của chu vi mà Slim đo được cũng đúng như chúng ta đã đo được ban đầu. Tuy nhiên, bạn cần nhớ kỹ rằng trong toàn bộ sự thảo luận của chúng ta, Tornado luôn luôn quay, và chúng ta không khi nào đo được chu vi của nó khi nó đứng yên cả. Và như vậy, theo quan điểm của chúng ta - những người quan sát đứng yên - thì sự khác nhau duy nhất giữa phép đo chu vi sàn quay của chúng ta và của Slim là chiếc thước của Slim bị co lại; sàn Tornado quay vẫn đã quay từ trước khi chúng ta đo và cũng vẫn đang quay khi chúng ta quan sát Slim tiến hành đo. Vì chúng ta thấy chiếc thước của Slim bị co lại, nên chúng ta phát hiện ra rằng anh ta phải đặt chiếc thước dọc theo chu vi sàn quay với số lần lớn hơn chúng ta. Sự co lại của chu vi sàn quay có thể sẽ có liên quan chỉ khi chúng ta so sánh các tính chất của sàn quay khi nó quay và khi nó đứng yên, nhưng chúng ta không cần tới sự so sánh đó. Thứ hai, mặc dù chúng ta không cần phải đo sàn quay khi nó đứng yên, nhưng có thể bạn vẫn còn băn khoăn về chuyện điều gì sẽ xảy ra khi sàn quay chậm dần rồi dừng lại. Bây giờ thì chúng ta lại cần phải tính tới sự thay đổi của chu vi khi sàn quay chậm dần bởi vì mức độ co Lorentz cũng thay đổi. Nhưng điều này làm thế nào có thể phù hợp với thực tế là bán kính của sàn không thay đổi? Đây là một vấn đề rất tế nhị và việc giải quyết nó dựa vào một thực tế là, trong thế giới thực không có những vật rắn tuyệt đối. Các vật có thể kéo giãn hoặc uốn cong và do đó thích nghi với sự kéo giãn hoặc co lại mà chúng ta đã gặp phải; nếu không thế, như Einstein đã chỉ ra, thì chiếc đĩa quay - ban đầu được chế tạo bằng cách để cho kim loại nóng chảy nguội đi ở trong khuôn đúc chuyển động quay - sẽ bay tung toé ra ngoài khi vận tốc quay sau đó bị thay đổi. Chi tiết hơn về lịch sử chiếc đĩa quay có thể xem “Einstein và chiếc đĩa quay rắn” Stachel trong cuốn *General Relativity and Gravitation* (New York: Viking, 1997).

ABC về thuyết tương đối rộng

Để có một cảm giác đối với quan niệm mới về hấp dẫn, ta hãy xét trường hợp một hành tinh (chẳng hạn như Trái Đất) quay quanh một ngôi sao (chẳng hạn như Mặt Trời). Theo lý thuyết hấp dẫn của Newton, Mặt Trời giữ được Trái Đất trên quỹ đạo của nó là nhờ một “sợi dây” hấp dẫn chưa biết rõ “nhân dạng” tức thời vươn xa trên một khoảng cách cực lớn để chộp giữ lấy Trái Đất (tương tự, sợi dây hấp dẫn của Trái Đất cũng vươn ra để chộp giữ lấy Mặt Trời). Einstein đã xây dựng hẳn một quan niệm mới để giải thích điều gì đã thực sự xảy ra. Sẽ rất hữu ích cho việc bàn về cách tiếp cận của Einstein, nếu chúng ta có được một mô hình trực quan cụ thể của không-thời gian mà chúng ta có thể dễ dàng vận dụng. Để làm điều đó, ta sẽ đơn giản hóa sự vật theo hai cách. Thứ nhất, ta tạm thời không đếm xỉa đến thời gian và chỉ tập trung vào mô hình trực quan của không gian. Sau đó, ta sẽ lại gộp thời gian vào trong thảo luận của chúng ta. Thứ hai, để chúng ta có thể vẽ và vận dụng những hình ảnh trực quan trên những trang sách này, chúng ta thường viện đến sự tương tự hai chiều của không gian ba chiều. Phần lớn những hiểu biết mà ta thu nhận được nhờ mô hình có số chiều thấp hơn đều có thể áp dụng trực tiếp cho những tình huống vật lý ba chiều, do đó mô hình này là một công cụ sơ phạm khá hiệu quả.

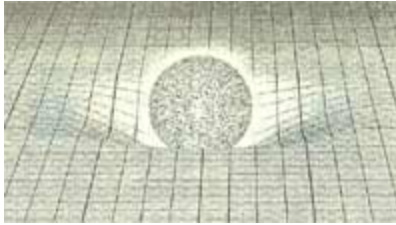
Trong Hình 3.3, chúng ta đã dùng những cách đơn giản hóa đó và vẽ một mô hình hai chiều của một vùng không gian trong Vũ trụ chúng ta. Cấu trúc giống như mạng lưới này cho ta một phương tiện để chỉ định vị trí hệt như mạng lưới các đường phố cho ta một phương tiện để xác định một địa điểm trong thành phố. Tất nhiên, trong thành phố, để cho địa chỉ, ngoài việc chỉ địa điểm trên mạng lưới đường phố hai chiều, còn phải cho vị trí theo hướng thẳng đứng, như số tầng chẳng hạn. Và cái thông tin cuối cùng này, tức là vị trí theo chiều thứ ba không gian, đã được bỏ đi trong mô hình hai chiều để dễ hình dung hơn.



Hình 3.3 Biểu diễn một không gian phẳng.

Khi không có vật chất và năng lượng, Einstein xem rằng không gian là “phẳng”. Trong mô hình hai chiều của chúng ta, điều này có nghĩa là “hình dạng” của không gian giống như bề mặt của một chiếc bàn nhẵn, như được minh họa trên Hình 3.3. Đây là hình ảnh không gian Vũ trụ của chúng ta đã được hình dung từ hàng ngàn năm nay. Nhưng điều gì sẽ xảy ra với không gian, nếu như có một vật nặng như Mặt Trời hiện diện? Trước Einstein, câu trả lời là không có gì; không gian (và thời gian) được xem đơn giản như một sân khấu lạnh lùng nơi diễn ra những sự kiện của Vũ trụ. Tuy nhiên, chuỗi những suy luận của Einstein mà chúng ta đang theo đuổi lại dẫn tới một kết luận khác.

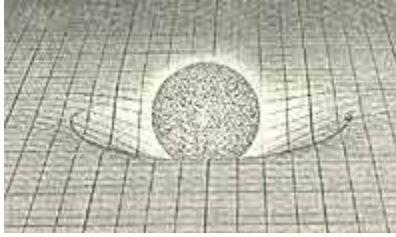
Một vật nặng như Mặt Trời và thực tế là một vật bất kỳ, đều tác dụng một lực hấp dẫn lên các vật khác. Trong ví dụ về quả bom của bốn khủng bố, chúng ta đã biết rằng lực hấp dẫn và chuyển động có gia tốc là không thể phân biệt được. Trong ví dụ về sàn quay Tornado, ta lại biết rằng mô tả toán học của chuyển động có gia tốc đòi hỏi những hệ thức của không gian cong. Những mối liên kết này giữa hấp dẫn, chuyển động có gia tốc và không gian cong đã dẫn Einstein tới một đề xướng quan trọng nói rằng sự hiện diện của một khối lượng, chẳng hạn như Mặt Trời, sẽ làm cho cấu trúc của không gian ở xung quanh nó bị cong đi, như được minh họa trên Hình 3.4. Một tương tự hữu ích và vẫn thường được trích dẫn, đó là một màng cao su trên đó có đặt một quả bowling. Hình ảnh này minh họa cho sự biến dạng của cấu trúc không gian do sự hiện diện của một vật nặng. Theo đề xuất có tính cách mạng đó, không gian không còn là một sân khấu thụ động nơi diễn ra những sự kiện của Vũ trụ nữa, mà bây giờ hình dạng của không gian phản ứng lại các vật ở trong môi trường.



Hình 3.4 Một vật nặng như Mặt Trời làm biến dạng cấu trúc của không gian tựa như tác dụng của quả bowling đặt trên một tấm vải đàn hồi.

Sự cong này, đến lượt mình, lại ảnh hưởng tới các vật khác chuyển động ở lân cận Mặt Trời, vì bây giờ chúng phải chuyển động qua một cấu trúc không gian đã bị biến dạng. Lại dùng hình ảnh tương tự của màng cao su với quả bowling, nếu ta đặt một viên bi nhỏ trên màng đó và cho nó một vận tốc ban đầu, thì quỹ đường mà nó sẽ đi phụ thuộc vào điều là quả bowling có được đặt ở tâm không. Nếu không có quả bowling ở đó, màng cao su sẽ phẳng và viên bi sẽ chuyển động theo một đường thẳng. Nếu có mặt quả bowling và do đó làm cong màng cao su, thì viên bi sẽ chuyển động với quỹ đạo cong. Thực tế, khi bỏ qua ma sát, nếu ta thả cho viên bi chuyển động với vận tốc và hướng thích hợp, nó sẽ tiếp tục chuyển động theo cùng một quỹ đạo cong, tuần hoàn xung quanh quả bowling, nghĩa là nó sẽ “quay quanh” quả bowling. Cách diễn đạt như thế là đã dự liệu trước để áp dụng sự tương tự đó cho hấp dẫn.

Giống như quả bowling, Mặt Trời làm cong cấu trúc của không gian bao quanh nó và chuyển động của Trái Đất, giống như chuyển động của viên bi, được xác định bởi hình dạng của sự cong đó. Trái Đất, giống như viên bi, sẽ chuyển động xung quanh Mặt Trời nếu như vận tốc và sự định hướng của nó có các giá trị thích hợp. Tác dụng này trên Trái Đất chính là cái mà chúng ta thường viện đến như là tác dụng hấp dẫn của Mặt Trời và được minh họa trên Hình 3.5. Nhưng bây giờ sự khác biệt là ở chỗ, không giống như Newton, Einstein đã chỉ ra được cơ chế truyền của hấp dẫn: đó là sự cong của không gian. Theo quan điểm của Einstein, sợi dây hấp dẫn giữ Trái Đất trên quỹ đạo của nó không phải là một tác dụng tức thời bí ẩn nào đó của Mặt Trời nữa, mà đó là sự cong của cấu trúc không gian gây bởi sự hiện diện của Mặt Trời.



Hình 3.5. Trái Đất được giữ trên quỹ đạo của nó xung quanh Mặt Trời là bởi vì nó lăn dọc theo một thung lũng trong cấu trúc không gian bị uốn cong. Nói một cách chính xác hơn, nó đi theo “con đường ít trở ngại nhất” trong vùng bị biến dạng xung quanh Mặt Trời.

Bức tranh này cho phép chúng ta hiểu được hai đặc điểm căn bản của hấp dẫn theo cách mới. Thứ nhất, quả bowling càng nặng thì sự biến dạng do nó gây ra cho màng cao su càng lớn. Tương tự như thế, trong sự mô tả của Einstein về hấp dẫn, một vật có khối lượng càng lớn, thì sự biến dạng mà nó gây ra cho không gian xung quanh cũng càng lớn. Điều này dẫn tới hệ quả là một vật càng nặng, thì tác dụng hấp dẫn của nó lên các vật khác càng lớn, điều này hoàn toàn phù hợp với kinh nghiệm của chúng ta. Thứ hai, cũng như sự biến dạng của màng cao su do quả bowling gây ra sẽ càng nhỏ khi ta càng ở xa nó, mức độ cong của không gian do một vật nặng như Mặt Trời gây ra sẽ giảm khi khoảng cách tới vật đó tăng. Điều này lại một lần nữa hoàn toàn phù hợp với sự hiểu biết của chúng ta về hấp dẫn: lực hấp dẫn càng yếu khi khoảng cách giữa các vật càng lớn.

Một điểm quan trọng cần phải lưu ý là, bản thân viên bi cũng làm biến dạng màng cao su, mặc dù chỉ ít thôi. Tương tự, Trái Đất cũng làm cong cấu trúc của không gian, mặc dù là nhỏ hơn rất nhiều so với Mặt Trời. Nói theo ngôn ngữ của thuyết tương đối rộng, thì điều này giải thích tại sao, Trái Đất lại giữ được Mặt Trăng trên quỹ đạo và Trái Đất giữ được chúng ta gắn chặt với bề mặt của nó. Hãy tưởng tượng một người nhảy dù: quá trình rơi xuống đất của anh ta thực chất là sự trượt xuống theo chỗ trũng của cấu trúc không gian mà khối lượng của Trái Đất đã tạo ra. Hơn thế nữa, mỗi chúng ta, cũng giống như bất cứ một vật có khối lượng nào khác, đều làm cong cấu trúc không gian ở lân cận cơ thể chúng ta, mặc dù khối lượng tương đối nhỏ bé của cơ thể con người chỉ gây ra được những biến dạng chút xíu thôi.

Nói tóm lại, Einstein hoàn toàn đồng ý với phát biểu của Newton nói rằng: “Hấp dẫn cần phải được gây bởi một tác nhân nào đó”, nhưng ông đã vượt qua sự thách thức của Newton nói

rằng bản chất của tác nhân nói trên xin nhường để “cho độc giả xem xét”. Tác nhân của hấp dẫn, theo Einstein, đó là cấu trúc không-thời gian của Vũ trụ.

Một vài cảnh báo

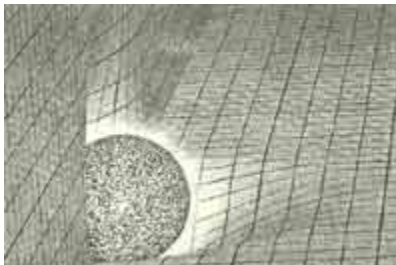
Mô hình màng cao su và quả bowling rất có giá trị, bởi vì nó cho chúng ta một hình ảnh trực quan có thể nắm bắt được một cách cụ thể thế nào là sự cong trong cấu trúc không gian của Vũ trụ. Các nhà vật lý thường dùng nó và những sự tương tự khác để dẫn dắt trực giác của mình về hấp dẫn và sự cong của không gian. Mặc dù rất hữu ích, tuy nhiên, mô hình màng cao su và quả bóng bowling không phải là hoàn hảo và để cho chính xác, chúng tôi xin lưu ý các bạn về một số nhược điểm của nó.

Trước hết, khi Mặt Trời làm cho cấu trúc không gian xung quanh nó bị cong đi, thì đó không phải là vì nó bị “kéo xuống phía dưới” bởi trọng lực như trong trường hợp quả bowling (quả này làm cong màng cao su do nó bị hút về phía Trái Đất bởi trọng lực). Trong trường hợp Mặt Trời, không có vật nào để “làm việc kéo” đó cả. Thay vì thế, Einstein đã dạy chúng ta rằng cong của không gian chính là hấp dẫn. Sự hiện diện của một vật có khối lượng làm cho không gian phản ứng lại bằng cách cong đi. Tương tự như vậy, Trái Đất không phải được giữ trên quỹ đạo của nó do lực hút hấp dẫn của một vật nào khác bên ngoài dẫn dắt nó dọc theo thung lũng của một môi trường không gian bị uốn cong như trong trường hợp viên bi trên màng cao su bị biến dạng. Thay vì thế, Einstein đã chỉ ra rằng các vật chuyển động qua không gian (chính xác hơn là không-thời gian) dọc theo những con đường khả dĩ ngắn nhất hay “những con đường ít bị cản trở nhất”. Nếu không gian bị cong, thì những con đường như thế cũng sẽ là cong.

Và như vậy, mặc dù mô hình màng cao su và quả bowling cho ta một sự tương tự trực quan tốt về sự cong của không gian xung quanh gây bởi một vật nặng như Mặt Trời và do đó về cả sự ảnh hưởng của nó đến chuyển động của các vật khác, nhưng cơ chế vật lý gây ra những biến dạng đó là hoàn toàn khác. Cơ chế trong các mô hình tương tự vẫn còn phải viện đến trực giác của chúng ta về hấp dẫn trong khuôn khổ truyền thống của Newton, trong khi đó cơ chế do Einstein đề xuất thể hiện sự giải thích lại trường hấp dẫn qua không gian cong.

Nhược điểm thứ hai của mô hình tương tự bắt nguồn từ tính hai chiều của màng cao su. Thực tế, mặc dù là khó hình dung, nhưng Mặt Trời (và tất cả các vật có khối lượng khác) đều thực sự làm cong không gian ba chiều ở xung quanh nó.

Hình 3.6 là một cố gắng minh họa điều đó một cách thô thiển. Toàn bộ không gian bao quanh Mặt Trời - “bên trên, “bên dưới” và “các bên” - đều chịu cùng một loại biến dạng mà Hình 3.6 chỉ cho thấy được phần nào. Một vật, tựa như Trái Đất chuyển động qua vùng không gian ba chiều bị uốn cong do sự hiện diện của Mặt Trời. Bạn có thể thấy hình này có gì đó hơi khó hiểu, chẳng hạn như tại sao Trái Đất lại không đâm sâu vào “bức tường thẳng đứng” của không gian cong được vẽ trên hình? Tuy nhiên, bạn cần luôn ghi nhớ trong đầu rằng, không gian không giống như màng cao su và cũng không phải là một bức tường chắn cứng rắn. Thay vì thế, những lưới kẻ ô bị uốn cong trên hình chỉ là những lát cắt mỏng qua toàn bộ không gian ba chiều bị uốn cong, mà bạn, Trái Đất và mọi thứ đều chìm ngập và cuộc sống hoàn toàn tự do trong đó. Cũng có thể bạn thấy rằng điều đó chỉ làm cho vấn đề trở nên tồi tệ hơn: nếu như chúng ta chìm ngập bên trong cấu trúc của không gian, thì tại sao chúng ta lại không cảm nhận được nó? Thực ra chúng ta đã cảm nhận được. Chúng ta đã cảm thấy lực hấp dẫn, mà không gian lại là môi trường qua đó lực hấp dẫn được truyền đi. Khi mô tả lực hấp dẫn, nhà vật lý xuất sắc John Wheeler thường nói: “Khối lượng áp đặt sự chi phối của nó lên không gian bằng cách nói cho không gian biết phải cong đi như thế nào, còn không gian áp đặt sự chi phối của nó lên khối lượng bằng cách nói cho khối lượng biết phải chuyển động như thế nào” [1].



Hình 3.6. Một mẫu về sự cong của không gian ba chiều xung quanh Mặt Trời.

Nhược điểm thứ ba của các mô hình tương tự này là trong đó chúng ta đã bỏ đi chiều thời gian. Chúng ta làm điều đó để cho dễ hình dung vấn đề, bởi vì mặc dù theo thuyết tương đối hẹp chúng ta cần phải xem chiều thời gian bình đẳng như ba chiều không

gian quen thuộc, nhưng để “nhìn thấy” thời gian không phải là việc dễ dàng. Song, như đã minh họa trong ví dụ về cái sàn quay Tornado, gia tốc - và do đó hấp dẫn - đều làm cong cả không gian và thời gian. (Thực tế, những tính toán từ thuyết tương đối rộng cho thấy rằng, trong trường hợp vật chuyển động tương đối chậm như Trái Đất quay quanh Mặt Trời chẳng hạn, thì sự uốn cong của thời gian thực sự có ảnh hưởng đến chuyển động của Trái Đất đáng kể hơn nhiều so với sự uốn cong của không gian). Chúng ta sẽ còn trở lại thảo luận về sự uốn cong của thời gian trong mục sau.

Do những điều cảnh báo nói trên khá quan trọng, nên chừng nào chúng còn lẫn quất đâu đó trong đầu óc bạn, thì việc viện đến hình ảnh không gian cong được cho bởi quả bowling đặt trên màng cao su như một sự tổng kết trực giác về quan điểm mới của Einstein về hấp dẫn, là hoàn toàn chấp nhận được.

[1] Phỏng vấn John Wheeler, ngày 27 tháng giêng năm 1998.

Giải quyết xung đột

Bằng cách làm cho không gian và thời gian trở thành những diễn viên hoạt động thực sự, Einstein đã cho chúng ta một hình ảnh có tính khái niệm về sự vận hành của hấp dẫn. Tuy nhiên, vấn đề trung tâm đặt ra là, liệu sự giải thích lại hấp dẫn đó có giải quyết được xung đột giữa thuyết tương đối hẹp và lý thuyết hấp dẫn của Newton hay không. Câu trả lời là có. Lại một lần nữa, mô hình màng cao su lại giúp chúng ta lĩnh hội được ý tưởng chính của câu trả lời này. Hãy hình dung ta có viên bi đang chuyển động thẳng dọc theo màng cao su phẳng, khi không có quả bowling. Khi đặt quả bowling lên màng cao su, chuyển động của viên bi sẽ bị ảnh hưởng, nhưng không phải ngay tức thì. Nếu chúng ta quay phim dãy những sự kiện đó, rồi cho quay chậm lại, ta sẽ thấy rằng, nhiều động do đưa quả bowling vào sẽ được truyền đi như những gợn sóng trên mặt hồ và cuối cùng mới tới vị trí của viên bi. Sau một thời gian ngắn, những dao động quá độ dọc theo màng cao su đó sẽ lắng xuống để lại cho chúng ta một màng cong tĩnh.

Điều nói trên cũng đúng với cấu trúc của không gian. Khi không có khối lượng hiện diện, không gian là phẳng và một vật nhỏ sẽ an bài ở trạng thái đứng yên hay chuyển động thẳng đều. Nếu một vật có khối lượng lớn xuất hiện, không gian sẽ biến dạng

- nhưng cũng tương tự như màng cao su - sự biến dạng này không diễn ra một cách tức thời, mà lan truyền từ vị trí của vật nặng ra phía ngoài và cuối cùng an bài dưới một dạng cong nhất định và bằng cách đó truyền lực hấp dẫn tới vật khác. Trong mô hình tương tự, những nhiễu động trên màng cao su lan truyền ra xung quanh với vận tốc được xác định bởi thành phần cụ thể của vật liệu chế tạo màng.

Trong khuôn khổ của thuyết tương đối rộng, Einstein đã tính được tốc độ truyền của các nhiễu động đối với cấu trúc không - thời gian của Vũ trụ và tìm thấy rằng nó đúng bằng vận tốc ánh sáng. Điều này, có nghĩa là trong tình huống giả tưởng được nói ở trên về cái chết của Mặt Trời ảnh hưởng tới Trái Đất do những thay đổi trong lực hút hấp dẫn giữa chúng, thì ảnh hưởng đó không được truyền đi một cách tức thời. Thực tế, khi một vật không thay đổi vị trí của nó hoặc thậm chí bị nổ tung, nó sẽ gây ra một sự thay đổi trong độ cong của cấu trúc không - thời gian. Sự thay đổi này được lan truyền ra xung quanh với vận tốc ánh sáng, hoàn toàn phù hợp với giới hạn về vận tốc của thuyết tương đối hẹp. Như vậy, ở mặt đất, chúng ta sẽ nhận biết được bằng mất sự bùng nổ của Mặt Trời ở đúng thời điểm mà chúng ta cảm thấy được những hệ quả về mặt hấp dẫn, tức là khoảng 8 phút sau khi bùng nổ. Như vậy, lý thuyết mới của Einstein đã giải quyết được sự xung đột; những nhiễu động hấp dẫn tuy không vượt được qua nhưng cũng theo kịp các photon.

Lại nói về sự cong của thời gian

Những minh họa như các hình 3.2; 3.4 và 3.6 đã nắm bắt được ý nghĩa căn bản của cái được gọi là không gian cong. Sự cong làm méo đi hình dạng của không gian. Các nhà vật lý đã phát minh ra nhiều hình ảnh tương tự nhằm chuyển tải được ý nghĩa của “thời gian cong”, nhưng hiểu được chúng cũng không dễ dàng gì, vì vậy, chúng tôi sẽ không đưa chúng vào đây. Thay vì, chúng ta sẽ tiếp tục theo dõi phần tiếp sau những cuộc phiêu lưu của Slim và Jim trên sàn quay Tornado và cố gắng thu được ý nghĩa của những hệ quả được suy ra từ sự cong của thời gian bị cong do hấp dẫn gây ra.

Để làm điều đó, chúng ta hãy gặp lại Goerge và Gracie không phải trong bóng đêm sâu thẳm của khoảng không Vũ trụ mà trôi

nổi đầu đó ở vùng ngoại vi của hệ Mặt Trời. Họ vẫn còn đeo một chiếc đồng hồ số to tướng trên người và ban đầu đã được chỉnh giờ như nhau. Để cho đơn giản, ta sẽ không xét đến ảnh hưởng của các hành tinh mà chỉ xét trường hấp dẫn của Mặt Trời. Hơn nữa, ta cũng tưởng tượng rằng có một con tàu vũ trụ cũng trôi nổi ở gần hai người và thả một sợi cáp dài xuống gần bề mặt của Mặt Trời. Và Goerge đã dùng sợi cáp này để tụt xuống phía Mặt Trời. Khi làm như vậy, định kỳ anh ta lại dừng lại để cùng với Gracie so sánh nhịp độ trôi của thời gian xét theo đồng hồ của họ. Sự cong của thời gian được tiên đoán bởi thuyết tương đối rộng dẫn tới hệ quả là đồng hồ của Goerge chạy ngày càng chậm so với đồng hồ của Gracie vì trường hấp dẫn tác dụng lên anh ta ngày càng mạnh hơn. Điều này có nghĩa là, càng tiến gần tới Mặt Trời thì đồng hồ của anh ta chạy càng chậm. Và nói rằng hấp dẫn làm cong thời gian cũng như không gian là hiểu theo nghĩa đó.

Bạn cũng nên lưu ý rằng, không giống như trường hợp nêu ở Chương 2, trong đó Goerge và Gracie ở trong khoảng không vũ trụ và chuyển động thẳng đều đối với nhau, trong trường hợp ta đang xét, không có sự đối xứng giữa họ. Khác với Gracie, Goerge cảm thấy lực hấp dẫn ngày càng mạnh, nên anh ta ngày càng phải giữ chặt dây cáp hơn để không bị kéo tụt xuống dưới. Cả hai người đều nhất trí rằng đồng hồ của Goerge chạy chậm hơn. Hoàn toàn không có “sự tương đương của hai quan điểm” để có thể trao đổi vai trò của họ và đảo ngược lại kết luận đó. Thực tế, đây chính là điều mà chúng ta đã tìm thấy trong Chương 2, khi Goerge cảm nhận thấy gia tốc bằng cách bật động cơ phản lực đeo ở sau lưng để đuổi theo Gracie. Gia tốc mà Goerge cảm nhận được làm cho đồng hồ của anh ta chắc chắn chậm so với đồng hồ của Gracie. Do bây giờ chúng ta đã biết cảm nhận chuyển động có gia tốc cũng hết như cảm nhận lực hấp dẫn, vì vậy mà tình huống Goerge đang bám vào sợi cáp mà ta đang xét có liên quan cùng một nguyên lý và lại một lần nữa, ta thấy đồng hồ của Goerge và mọi thứ trong anh ta đều diễn ra theo nhịp độ chậm hơn so với Gracie.

Trong trường hợp hấp dẫn, như ở bề mặt của Mặt Trời, sự chạy chậm của đồng hồ của Goerge là khá nhỏ. Nếu như Gracie ở cách Mặt Trời khoảng vài kilômét, nhịp độ phát ra tiếng tíc tắc của đồng hồ anh ta chỉ bằng 99,9998% đồng hồ của Gracie. Đúng là có chậm hơn, nhưng không nhiều [1]. Tuy nhiên, nếu Goerge theo dây cáp tụt xuống tới mức lơ lửng ngay ở sát bề mặt của một

sao neutron, một loại sao có khối lượng gần bằng Mặt Trời nhưng bị nén tới mức có khối lượng riêng lớn gấp cỡ một triệu tỷ lần của Mặt Trời, nên lực hấp dẫn mạnh hơn của nó làm cho đồng hồ của Goerge có nhịp độ phát tiếng tíc tắc chỉ còn bằng 78% đồng hồ của Gracie. Những trường hấp dẫn mạnh hơn, như trường ở bên ngoài các lỗ đen (như sẽ thảo luận dưới đây) sẽ làm cho sự trôi của thời gian còn chậm lại hơn nữa, tức là trường hấp dẫn càng mạnh càng làm cho thời gian bị cong nhiều hơn.

[1] Ngay cả như thế đi nữa, các đồng hồ nguyên tử hiện có cũng đủ chính xác để phát hiện được sự cong nhỏ như thế hoặc còn nhỏ hơn nữa của thời gian. Ví dụ, năm 1976 Robert Vessot và Martin Levine thuộc Đài Vật lý Thiên văn Smithsonian của Đại học Harvard cùng với một số cộng tác viên thuộc Cơ quan Nghiên cứu Vũ trụ quốc gia (NASA) đã phóng một tên lửa Scout D từ đảo Wallops, mang theo một đồng hồ nguyên tử với độ chính xác khoảng một phần ngàn tỷ giây trong một giờ. Họ hy vọng sẽ chứng tỏ được rằng khi tên lửa đạt được độ cao (do đó giảm tác dụng lực hút hấp dẫn của Trái Đất), thì đồng hồ nguyên tử giống hệt như thể gắn với mặt đất (tức vẫn còn chịu lực hút hấp dẫn của Trái Đất) sẽ chạy chậm hơn. Nhờ một dòng tín hiệu vi ba hai chiều, các nhà nghiên cứu đã so sánh được tốc độ của hai đồng hồ nguyên tử đó, và thực tế, ở độ cao cực đại của tên lửa (khoảng 10 ngàn kilômét) đồng hồ nguyên tử của nó chạy nhanh hơn khoảng 4 phần tỷ giây so với đồng hồ nguyên tử trên mặt đất, phù hợp với những tiên đoán của lý thuyết với độ chính xác nhỏ hơn một phần vạn.

Kiểm chứng thực nghiệm thuyết tương đối rộng

Phần lớn những ai nghiên cứu thuyết tương đối rộng đều bị hấp dẫn bởi vẻ đẹp thanh nhã của nó. Bằng cách thay thế quan niệm lạnh lùng và mang tính cơ học của Newton về không gian, thời gian và hấp dẫn bằng sự mô tả động và mang tính hình học, Einstein đã đan bện hấp dẫn vào cấu trúc cơ bản của Vũ trụ. Thay vì bị áp đặt như một cấu trúc được thêm vào, hấp dẫn đã trở thành một bộ phận hữu cơ của Vũ trụ ở mức cơ bản nhất của nó. Việc thổi sự sống vào không gian và thời gian bằng cách cho phép chúng uốn cong và lượn sóng đã tạo ra cái mà chúng ta thường gọi là hấp dẫn.

Tạm gác khía cạnh mỹ học sang một bên, sự kiểm chứng tối hậu của một lý thuyết vật lý là khả năng giải thích và tiên đoán chính xác những hiện tượng vật lý của lý thuyết đó. Từ khi khởi đầu vào cuối những năm 1600 cho tới tận đầu thế kỷ XX, lý thuyết của Newton về hấp dẫn đã vượt qua sự kiểm nghiệm này một cách vẻ vang. Dù là áp dụng cho quả bóng được ném lên, cho các vật rơi xuống từ tháp nghiêng, cho các sao chổi quay quanh Mặt Trời hay cho các hành tinh quay trên quỹ đạo xung quanh Mặt Trời, lý thuyết của Newton về hấp dẫn đều cho những giải thích cực kỳ chính xác đối với mọi quan sát cũng như những tiên đoán đã được kiểm chứng rất nhiều lần trong vô vàn tình huống khác nhau. Động cơ để đặt vấn đề xem xét lại một lý thuyết đã rất thành công về mặt thực nghiệm như thế, như chúng tôi đã từng nhấn mạnh, đó là tính chất truyền tức thời của lực hấp dẫn mâu thuẫn với thuyết tương đối hẹp.

Những hiệu ứng của thuyết tương đối hẹp, mặc dù rất quan trọng đối với sự hiểu biết cơ bản về không gian, thời gian và chuyển động, nhưng lại cực kỳ nhỏ trong thế giới của những vận tốc chậm như thế giới mà chúng ta đang sống. Cũng tương tự như vậy, những sai lệch giữa thuyết tương đối rộng của Einstein – lý thuyết tương thích được với thuyết tương đối hẹp – và lý thuyết của Newton về hấp dẫn cũng là cực kỳ nhỏ trong hầu hết các tình huống thông thường. Điều này vừa hay cũng vừa không hay. Hay là bởi vì bất kỳ một lý thuyết nào muốn thay thế cho lý thuyết của Newton về hấp dẫn đều phải phù hợp tốt nhất với nó trong những lĩnh vực mà lý thuyết Newton đã được kiểm chứng bằng thực nghiệm. Còn không hay là bởi vì nó sẽ làm cho ta khó phán xử hai lý thuyết bằng thực nghiệm. Vì vậy, để phân biệt giữa hai lý thuyết của Newton và Einstein đòi hỏi phải có những phép đo cực kỳ chính xác áp dụng cho những thí nghiệm rất nhạy cảm đối với những khác biệt của hai lý thuyết. Nếu bạn ném một quả bóng, thì lý thuyết về hấp dẫn của Newton và của Einstein đều có thể được sử dụng để tiên đoán nơi mà nó sẽ rơi xuống, và đáp số sẽ là khác nhau, nhưng sự khác nhau đó sẽ là nhỏ tới mức vượt ra ngoài khả năng phát hiện được bằng thực nghiệm. Nghĩa là cần phải có một thực nghiệm thông minh hơn và chính Einstein đã đề xuất một thực nghiệm như vậy [1].

Chúng ta chỉ nhìn thấy những ngôi sao vào ban đêm, nhưng tất nhiên là chúng vẫn hiện diện ở đó cả ban ngày. Sở dĩ chúng ta

thường không nhìn thấy chúng là bởi vì ánh sáng nhỏ xíu và xa xôi của chúng đã bị lấn át bởi ánh sáng của Mặt Trời. Tuy nhiên, trong nhật thực, Mặt Trăng tạm thời che khuất ánh sáng của Mặt Trời và những ngôi sao xa trở nên nhìn thấy được. Tuy nhiên, sự hiện diện của Mặt Trời vẫn còn có hiệu ứng: ánh sáng từ một số ngôi sao xa muốn tới Trái Đất phải đi qua gần Mặt Trời. Thuyết tương đối rộng của Einstein tiên đoán rằng Mặt Trời sẽ làm cho không gian xung quanh nó bị uốn cong và sự biến dạng đó của không gian sẽ có ảnh hưởng đến đường đi của ánh sáng sao. Sau hết, những photon có xuất xứ từ xa đi dọc theo cấu trúc của Vũ trụ và nếu cấu trúc này bị cong đi thì chuyển động của các photon cũng sẽ bị ảnh hưởng như đối với một vật thể vật chất bất kỳ nào. Sự uốn cong đường đi của tia sáng sẽ là lớn nhất đối với các tín hiệu sáng đi sát mép Mặt Trời trên đường đi của nó tới Trái Đất. Và nhật thực sẽ làm cho ta có thể nhìn thấy ánh sáng sao đi sát mép Mặt Trời mà không bị lấn át hoàn toàn bởi ánh sáng của chính Mặt Trời.

Góc lệch do đường đi của tia sáng bị uốn cong có thể đo được một cách khá đơn giản. Do tia sáng bị uốn cong nên vị trí biểu kiến của ngôi sao sẽ bị dịch đi. Độ dịch này có thể đo được chính xác bằng cách so sánh vị trí biểu kiến đó với vị trí thực của ngôi sao mà chúng ta đã biết từ những quan sát nó vào ban đêm (khi không có ảnh hưởng của độ cong do Mặt Trời gây ra) được thực hiện khi Trái Đất ở một vị trí thích hợp khoảng 6 tháng trước hoặc sau đó. Vào tháng 11 năm 1915, Einstein đã dùng những hiểu biết mới về hấp dẫn để tính góc mà tia sáng đi qua sát mép Mặt Trời bị uốn cong và kết quả tìm được là 0,00049 độ. Góc nhỏ xíu này đúng bằng góc nhìn một đồng xu đặt thẳng đứng ở cách xa 3km. Tuy nhiên, việc phát hiện được một góc nhỏ như thế hoàn toàn nằm trong khả năng của công nghệ vào thời đó. Dưới sự thúc ép của Sir Frank Dyson, giám đốc của Đài thiên văn Greenwich, Sir Arthur Eddington một nhà thiên văn học nổi tiếng đồng thời là thư ký của Hội Thiên văn Hoàng gia nước Anh, đã tổ chức một đoàn thám hiểm tới đảo Principe ở Tây Phi để kiểm chứng tiên đoán của Einstein trong kỳ nhật thực vào ngày 29 tháng 5 năm 1919.

Ngày 6 tháng 11 năm 1919, sau 5 tháng phân tích các bức ảnh chụp được trong thời gian nhật thực ở Principe (và những bức ảnh khác về kỳ nhật thực đó được một nhóm các nhà khoa học người Anh khác do Charles Davidson và Andrew Crommelin đứng

đầu chụp tại Sobral, Braxin), tại cuộc họp liên tịch của Hội Hoàng gia và Hội Thiên văn Hoàng gia, người ta thông báo rằng tiên đoán của Einstein dựa trên thuyết tương đối rộng đã được khẳng định. Ít lâu sau, tin đồn về thành công này – tức cũng là thành công của sự lật đổ những quan niệm cũ về không gian và thời gian - đã vượt ra ngoài phạm vi của cộng đồng các nhà vật lý và làm cho Einstein trở thành nhân vật nổi tiếng toàn thế giới. Ngày 7 tháng 11 năm 1919, trên trang nhất tờ Thời báo Luân Đôn xuất hiện hàng tit lớn: “một cuộc cách mạng trong khoa học – lý thuyết mới về Vũ trụ – những tư tưởng của Newton bị hạ bệ”. Đây đúng là thời điểm vinh quang nhất của Einstein.

Trong những năm tiếp sau thí nghiệm này, sự khẳng định của Eddington về tính đúng đắn của thuyết tương đối rộng đã bị đem ra mổ xẻ phê phán và được xem xét lại một cách kỹ lưỡng. Rất nhiều những khía cạnh khó khăn và tinh tế của phép đo đã làm cho nó khó lặp lại được và do đó làm dấy lên những nghi vấn về tính trung thực của thí nghiệm gốc. Tuy nhiên, vào cuối những năm 1940, rất nhiều thí nghiệm dùng những công nghệ tiên tiến đã kiểm chứng lại nhiều phương diện của thuyết tương đối rộng với độ chính xác cao. Những tiên đoán của lý thuyết này đều đã được nhất trí khẳng định. Không còn nghi ngờ gì nữa, mô tả của Einstein về hấp dẫn không chỉ tương thích được với thuyết tương đối hẹp mà còn cho những tiên đoán phù hợp với những kết quả thực nghiệm hơn những tiên đoán của lý thuyết hấp dẫn của Newton.

[1] Vào giữa những năm 1880, nhà khoa học người Pháp tên là Urbain Hean Joseph Le Verrier đã phát hiện ra rằng hành tinh Thuỷ hơi lệch ra khỏi quỹ đạo quay quanh Mặt Trời – quỹ đạo đã được tiên đoán dựa trên các định luật của Newton về lực hấp dẫn. Trong suốt hơn một nửa thế kỷ, những cố gắng giải thích hiện tượng tuế sai của điểm cận nhật (gần Mặt Trời nhất) (nói theo ngôn ngữ bình dân thì đây là hiện tượng: ở cuối mỗi một vòng quay quanh Mặt Trời, sao Thuỷ lại không trở về đúng điểm mà lý thuyết dự đoán) đã đưa ra đủ thứ nguyên nhân, như ảnh hưởng hấp dẫn của một hành tinh, hoặc một mặt trăng còn chưa phát hiện được, tác dụng của bụi giữa các hành tinh, hình dạng không hoàn toàn là cầu của Mặt Trời, nhưng không có giải thích nào được chấp nhận hoàn toàn. Năm 1915, Einstein đã tính toán lại hiện tượng này bằng cách dùng các phương trình mới trong thuyết

tương đối rộng của mình và đã tìm được đáp số mà theo như chính ông thú nhận, đã khiến tim ông phải đập loạn xạ vì vui sướng. Kết quả tính được từ thuyết tương đối rộng phù hợp một cách chính xác với những quan sát thiên văn. Thành công này chắc chắn là một nguyên nhân quan trọng để Einstein có đủ niềm tin vào lý thuyết của mình, nhưng phần lớn mọi người lại chờ sự khẳng định một tiên đoán chứ không phải sự giải thích một hiện tượng bất thường đã được biết tới từ trước. Chi tiết hơn có thể xem trong cuốn sách của Abraham Pais nhan đề *Subtle Is the Lord* (New York: Oxford University, 1982).

Các lỗ đen, Big Bang và sự giãn nở của không gian

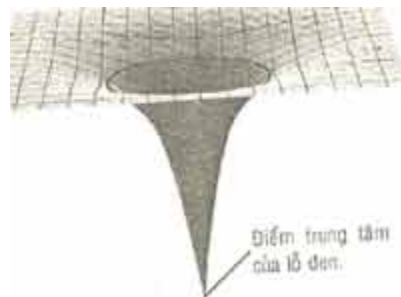
Trong khi những hiệu ứng của thuyết tương đối hẹp thể hiện rõ rệt nhất khi các vật chuyển động nhanh, thì thuyết tương đối rộng lại tỏ rõ uy quyền của nó khi các vật là rất nặng và sự cong của không gian và thời gian là đáng kể một cách tương ứng. Xin nêu ra hai ví dụ.

Ví dụ thứ nhất là phát minh được thực hiện bởi nhà thiên văn học người Đức tên là Karl Schwarzschild trong khi ông nghiên cứu những công trình của Einstein vào những lúc rảnh rỗi giữa hai đợt tính toán những phần tử pháo binh trên mặt trận Nga hồi Thế chiến thứ nhất, năm 1916. Điều đáng nói là, chỉ mấy tháng sau khi Einstein hoàn tất thuyết tương đối rộng của mình, Schwarzschild đã có thể dùng nó để nhận được sự hiểu biết đầy đủ và chính xác hơn về sự cong của không gian và thời gian ở lân cận một ngôi sao hình cầu lý tưởng. Từ mặt trận Nga, Schwarzschild đã gửi những kết quả của mình về cho Einstein và ông đã thay mặt Schwarzschild trình bày những kết quả đó trước Viện Hàn lâm Phổ.

Ngoài việc khẳng định và chính xác hóa thêm về mặt toán học sự cong của không - thời gian đã được minh họa một cách khái lược trên Hình 3.5, công trình của Schwarzschild - ngày nay thường được gọi là “nghiệm Schwarzschild” - còn phát lộ được một hệ quả lạ lùng của thuyết tương đối rộng. Ông đã chứng minh được rằng nếu khối lượng của một ngôi sao được tập trung trong một vùng hình cầu đủ nhỏ, sao cho tỷ số của khối lượng và bán kính của nó vượt quá một giá trị tới hạn cụ thể nào đó, thì sự cong của không - thời gian do nó gây ra sẽ mạnh tới mức bất cứ vật nào, kể cả ánh sáng,

khi tới gần ngôi sao đó, sẽ không thể thoát ra khỏi vòng xiết hấp dẫn của nó. Vì ngay cả ánh sáng cũng không thoát ra khỏi những “ngôi sao bị nén chặt” như vậy, nên ban đầu chúng được gọi là sao tối hay sao băng giá. Nhiều năm sau, John Wheeler đã đặt cho chúng cái tên quen rũ hơn là lỗ đen: đen vì chúng không phát ra ánh sáng, còn lỗ là bởi vì bất cứ vật gì tới quá gần nó đều bị rơi vào trong đó và không bao giờ đi ra được nữa. Quả là một cái tên rất đạt.

Nghiệm Schwarzschild được minh họa trên Hình 3.7. Mặc dù các lỗ đen nổi tiếng là háu ăn, nhưng các vật đi qua cạnh nó ở một khoảng cách “an toàn” cũng sẽ chỉ bị lệch theo cách hết như khi chúng đi cạnh một ngôi sao bình thường rồi lại tiếp tục hành trình vui vẻ của mình. Nhưng những vật, bất kể có thành phần như thế nào mà tới quá gần - gần hơn cái mà người ta gọi là “chân trời sự kiện” của lỗ đen - thì sẽ bị toi ngay: chúng chắc chắn sẽ bị kéo vào tâm lỗ đen và chịu một sức hấp dẫn tăng dần, rồi cuối cùng sẽ bị phá hủy hoàn toàn. Ví dụ, bạn bị rơi qua chân trời sự kiện, với hai chân vào trước. Khi càng tới gần tâm của lỗ đen sẽ tăng lên ghê gớm tới mức lực kéo chân bạn sẽ mạnh hơn nhiều so với lực kéo ở đầu bạn (vì chân rơi vào trước nên chân bạn luôn ở gần tâm lỗ đen hơn đầu bạn), và thực tế mạnh tới mức bạn sẽ bị kéo dài ra và nhanh chóng bị xé tan thành nhiều mảnh.



Hình 3.7. Lỗ đen làm cong cấu trúc không - thời xung quanh mạnh tới mức bất kỳ vật nào rơi vào bên trong “chân trời sự kiện” của nó - được minh họa bằng vòng tròn đen trên hình - đều không thoát khỏi móng vuốt hấp dẫn của nó. Chưa ai biết chính xác điều gì sẽ xảy ra ở điểm bên trong sâu nhất của lỗ đen.

Nếu, ngược lại, bạn thận trọng hơn khi lang thang gần lỗ đen và luôn luôn canh chừng để không vượt qua giới hạn của chân trời sự kiện, thì bạn có thể dùng lỗ đen cho những mục đích hết sức thú vị và đầy bất ngờ. Chẳng hạn, hãy tưởng tượng bạn cần phải khám phá một lỗ đen có khối lượng lớn gấp 1.000 lần Mặt Trời và

bạn phải bám theo một dây cáp để tụt xuống gần bề mặt của nó như Goerge đã làm ở trên đối với Mặt Trời, sao cho bạn ở bên trên chân trời sự kiện của lỗ đen chừng vài xentimét. Như chúng ta đã thảo luận ở trên, các trường hấp dẫn đều làm cong thời gian và điều này có nghĩa là sự trôi của bạn qua thời gian sẽ bị chậm lại. Thực tế, vì các lỗ đen có trường hấp dẫn mạnh tới mức sự trôi của bạn theo thời gian thực sự là rất rất chậm. Đồng hồ của bạn khi đó sẽ phát ra tiếng tíc tắc khoảng 10.000 lần chậm hơn đồng hồ của bạn bè ở trên Trái Đất. Nếu bạn cứ lơ lửng như vậy ở bên trên chân trời sự kiện của lỗ đen chừng một năm, rồi leo ngược trở lại theo dây cáp quay về con tàu không gian đang chờ bạn để trở về nghỉ ở quê nhà ít ngày, thì khi tới Trái Đất, bạn sẽ thấy hơn 10.000 năm đã trôi qua kể từ khi bạn cất bước ra đi. Vậy là bạn có thể sử dụng các lỗ đen như một loại máy thời gian, cho phép bạn chu du tới tương lai xa xôi của Trái Đất.

Điểm trung tâm của lỗ đen

Để có một ý niệm về những thang tỷ bậc có liên quan, lưu ý rằng một ngôi sao có khối lượng như Mặt Trời sẽ trở thành lỗ đen nếu bán kính của nó không có giá trị như bán kính Mặt Trời bằng 700.000 km mà rút lại chỉ còn khoảng 3km. Hãy tưởng tượng: toàn bộ Mặt Trời được ép lại như thế có thể đặt vừa khéo trong vùng Thượng Manhattan. Một thìa “đất” Mặt Trời khi đó nặng ngang cả ngọn núi Everest. Còn để biến Trái Đất thành một lỗ đen thì phải nén nó lại thành một quả cầu bán kính chưa đầy 1 centimét. Một thời gian khá dài, các nhà vật lý hoài nghi, không biết những cấu hình có tính cực đoan như vậy của vật chất liệu có thực sự tồn tại hay không và nhiều người đã nghĩ rằng lỗ đen chẳng qua chỉ phản ánh trí tưởng tượng đã quá mệt mỏi của các nhà lý thuyết.

Tuy nhiên, trong suốt chục năm trở lại đây, những bằng chứng thực nghiệm ngày càng có sức thuyết phục hơn về sự tồn tại của lỗ đen đã được tích tụ dần. Tất nhiên, vì chúng là đen nên không thể quan sát chúng bằng cách quét các kính thiên văn ngang qua bầu trời được. Thay vì thế, các nhà thiên văn tìm kiếm các lỗ đen bằng cách phát hiện những hành vi dị thường của các ngôi sao phát sáng bình thường hơn có thể ở ngay bên ngoài chân trời sự kiện của một lỗ đen nào đó. Ví dụ, khi bụi và khí ở những lớp ngoài của ngôi sao bình thường sức bị hút về phía chân trời sự

kiện của lỗ đen, chúng sẽ được gia tốc tới gần vận tốc ánh sáng. Với vận tốc lớn như thế, lực ma sát trong dòng vật chất cuộn xoáy đó sẽ phát sinh một lượng nhiệt rất lớn, làm cho hỗn hợp khí và bụi đó “nóng sáng” phát ra ánh sáng thấy được thông thường và các tia X. Vì bức xạ này được tạo ra ở ngay bên ngoài chân trời sự kiện của lỗ đen, nên có thể thoát ra ngoài và truyền qua không gian đến các đài quan sát trên Trái Đất và được nghiên cứu trực tiếp tại đó. Thuyết tương đối rộng cũng đã đưa những tiên đoán chi tiết về tính chất của bức xạ tia X đó và sự quan sát những tính chất này sẽ cho ta những bằng chứng mạnh mẽ, mặc dù là gián tiếp, về sự tồn tại của các lỗ đen. Ví dụ, ngày càng có nhiều bằng chứng chỉ ra rằng có một lỗ đen rất nặng, có khối lượng lớn gấp 2,5 triệu lần khối lượng Mặt Trời, nằm ngay ở tâm dải Ngân Hà của chúng ta. Tuy nhiên, lỗ đen khổng lồ này còn chưa là gì so với các lỗ đen mà các nhà thiên văn tin rằng chúng nằm ở lõi các quasar sáng khác thường ở rải rác trong khắp Vũ trụ: đó là những lỗ đen nặng gấp hàng tỷ lần Mặt Trời.

Chỉ ít tháng sau khi tìm ra lời giải của mình Schwarzschild đã qua đời do một căn bệnh về da mà ông mắc phải tại mặt trận Nga. Năm đó ông mới 42 tuổi. Cuộc gặp gỡ ngắn ngủi nhưng đầy bi kịch của ông với lý thuyết hấp dẫn của Einstein đã làm phát lộ một trong số những khía cạnh bí ẩn và lạ lùng nhất của thế giới tự nhiên.

Ví dụ thứ hai cho thấy sức mạnh của thuyết tương đối rộng lại với nhau, nhiệt độ tăng lên khủng khiếp, những ngôi sao sẽ tan rã và tạo thành một thứ plasma nóng gồm các hạt sơ cấp của vật chất. Khi cấu trúc tiếp tục co lại, mật độ cũng tăng lên một cách khủng khiếp, hoàn toàn giống như mật độ của plasma nguyên thủy. Khi chúng ta hình dung lần ngược trở lại theo thời gian từ tuổi hiện nay của Vũ trụ quan sát được (khoảng 15 tỷ năm), Vũ trụ như chúng ta biết sẽ co lại tới một kích thước cực nhỏ. Vật chất tạo ra vạn vật - tất cả xe hơi, nhà cửa, cao ốc, núi non trên mặt đất và cả bản thân Trái Đất, Mặt Trăng, sao Thổ, sao Mộc và tất cả các hành tinh khác; rồi Mặt Trời cùng với tất cả các ngôi sao khác trong Ngân Hà; tới thiên hà Andromeda với một trăm tỷ ngôi sao cùng với tất cả các ngôi sao của hơn 100 tỷ thiên hà khác - tất cả đều bị nén lại tới một mật độ lớn kinh khủng. Và khi lần ngược tới những thời điểm còn sớm hơn nữa, Vũ trụ sẽ được nén lại tới kích thước cỡ như hạt cát và còn nhỏ hơn nữa. Và khi ngoại suy tới

“điểm bắt đầu”, thì Vũ trụ dường như chỉ còn là một điểm - hình ảnh mà chúng ta sẽ xem xét lại một cách có phê phán ở chương sau - trong đó toàn bộ vật chất và năng lượng bị nén tới một mật độ và nhiệt độ lớn không thể tưởng tượng nổi. Người ta tin rằng, quả cầu lửa vũ trụ, tức Big Bang, sẽ bùng nổ từ cái hỗn hợp ấy và tung ra những hạt giống mà sau đó tiến hóa thành Vũ trụ như chúng ta biết ngày nay.

Hình ảnh Big Bang như một vụ nổ bắn ra toàn bộ vật chất của Vũ trụ giống như những mảnh của một quả bom nổ văng ra là một hình ảnh hữu ích cần ghi nhận, nhưng cũng dễ dẫn đến hiểu lầm. Khi một quả bom nổ, thì điều đó diễn ra tại một địa điểm cụ thể trong không gian và ở một thời điểm cụ thể trong thời gian. Đồng thời các mảnh của nó văng ra trong không gian xung quanh. Trong khi Big Bang, không có không gian xung quanh nào hết. Khi chúng ta lần ngược lại sự tiến hóa đến thời điểm bắt đầu, sự nén lại cùng nhau của toàn bộ vật chất xảy ra là do toàn bộ không gian cũng bị nén lại. Kích thước quả táo, kích thước hạt đậu và kích thước hạt cát khi lùi dần trở về thời điểm ban đầu là toàn bộ Vũ trụ, chứ không phải là một vật gì đó trong Vũ trụ. Ở thời điểm ban đầu, đơn giản là không có không gian bên ngoài quả bom nguyên thủy nhỏ xíu đó. Thay vì, Big Bang là sự phun ra không gian đã bị nén ép và sự bung ra của nó, giống như sóng thủy triều, đã mang đi theo vật chất và năng lượng cho tới tận hôm nay.

Thuyết tương đối rộng có đúng không ?

Cho tới nay, trong các thí nghiệm được thực hiện với trình độ công nghệ hiện đại, người ta chưa phát hiện thấy sự sai lệch nào đối với những tiên đoán của thuyết tương đối rộng. Tuy nhiên, chỉ có thời gian mới có thể nói được, với độ chính xác cao hơn của thực nghiệm, cuối cùng, người ta có phát hiện thấy sai lệch nào hay không. Điều đó cho thấy rằng lý thuyết tương đối rộng cũng chỉ là một sự mô tả gần đúng sự hoạt động của tự nhiên mà thôi. Sự kiểm nghiệm thường xuyên các lý thuyết với độ chính xác ngày càng cao hơn hiển nhiên là một trong số những con đường phát triển của khoa học, nhưng nó không phải là con đường duy nhất. Thực tế, điều này chúng ta cũng đã từng thấy: sự tìm kiếm một lý thuyết mới về hấp dẫn không phải khởi đầu từ sự bác bỏ của thực nghiệm, mà là do xung đột giữa lý thuyết hấp dẫn của Newton và

một lý thuyết khác, cụ thể là thuyết tương đối hẹp. Chỉ sau khi đã phát minh ra thuyết tương đối rộng như một lý thuyết cạnh tranh với lý thuyết hấp dẫn của Newton, những sai lệch thực nghiệm trong lý thuyết của Newton mới được nhận dạng nhằm tìm kiếm những hiệu ứng nhỏ nhưng có thể đo được, qua đó phân biệt được sức mạnh của hai lý thuyết. Chính vì vậy, sự không nhất quán trong nội bộ lý thuyết cũng đóng một vai trò quan trọng không kém những dữ liệu thực nghiệm trong việc thúc đẩy sự tiến bộ khoa học.

Trong nửa thế kỷ trở lại đây, vật lý học đã phải đối mặt với một cuộc xung đột lý thuyết mới, cũng nghiêm trọng không kém cuộc xung đột giữa thuyết tương đối hẹp với lý thuyết hấp dẫn của Newton. Người ta thấy rằng ở mức cơ bản, thuyết tương đối rộng hóa ra lại không tương thích với một lý thuyết cũng được kiểm chứng hết sức mỹ mãn bởi thực nghiệm, đó là cơ học lượng tử. Đối với những điều được trình bày trong chương này, thì cuộc xung đột mới đã cản trở các nhà vật lý tìm hiểu những gì xảy ra đối với không gian, thời gian và vật chất khi tất cả đều được nén lại ở thời điểm Big Bang hoặc ở điểm trung tâm của các lỗ đen. Trên quan điểm tổng quát hơn, thì cuộc xung đột này đã cảnh báo về một thiếu sót cơ bản nào đó trong quan niệm của chúng ta về tự nhiên. Việc giải quyết được cuộc xung đột mới này sẽ giải thoát cho một số nhà vật lý lý thuyết vĩ đại nhất khỏi ý định xem nó - mà cũng hoàn toàn xứng đáng - là bài toán trung tâm của vật lý lý thuyết hiện đại. Để hiểu cuộc xung đột mới này đòi hỏi phải làm quen với một số đặc điểm cơ bản của lý thuyết lượng tử mà chúng ta sẽ đề cập tới trong chương sau.

CHƯƠNG 4

NHỮNG ĐIỀU KỲ LẠ TRONG THẾ GIỚI VI MÔ

Hơi mệt mỏi vì cuộc thám hiểm ra ngoài hệ Mặt Trời, Goerge và Gracie vừa về tới Trái Đất đã đông ngay tới quán Lượng tử để tẩy trần sau những ngày vất vả trong khoảng không vũ trụ. Như thường lệ, Goerge gọi một ly nước đu đủ đá cho mình và một ly vodka cho Gracie, rồi ngả người trên ghế, quay lưng về phía quầy bar, hai tay đỡ sau gáy để thưởng thức điệu xì gà vừa mới châm. Nhưng, đang định hít một hơi cho đã thì Goerge chợt sững sờ nhận thấy rằng điệu xì gà đã biến mất. Nghĩ rằng điệu thuốc tuột khỏi miệng rơi xuống, Goerge vội ngả người về phía trước và định ninh rằng chắc nó đã đốt một lỗ thủng trên áo hoặc trên đầu mình. Nhưng anh tìm mãi không thấy. Và cả điệu xì gà cũng mất tăm luôn. Thấy Goerge tìm kiếm cuống cuồng, Gracie đứng dậy nhìn khắp lượt xung quanh và phát hiện ra rằng điệu xì gà nằm trên quầy ở ngay sau ghế của Goerge. “Lạ thật” - Goerge thốt lên - “Làm thế quái nào mà nó lại rơi lên đó được nhỉ?” Cứ như là nó đi xuyên qua đầu mình không bằng, nhưng lưới mình không bị bỏng và mình cũng chẳng thấy đầu có một lỗ mới nào”. Gracie xem đi xem lại đầu và miệng của Goerge, rồi cô cũng buộc phải khẳng định rằng lưới và đầu của anh hoàn toàn bình thường. Đúng lúc đó đồ uống được mang đến, Goerge và Gracie đành nhún vai ghi nhận chuyện điệu xì gà như là một trong số những bí ẩn nhỏ của cuộc đời. Nhưng sự kỳ lạ của quán Lượng tử không dừng lại ở đó.

Goerge nhìn vào ly nước đu đủ và thấy rằng những cục đá chuyển động lung tung, va chạm và nhau và va chạm vào thành cốc phát ra những tiếng lách cách không ngừng giống như những chiếc xe quá tải chen chúc trong một khu đất chật hẹp. Và lần này không chỉ có một mình Goerge gánh chịu. Gracie cầm lấy ly của mình - và cả hai người đều thấy rằng những cục đá trong ly của Gracie va đập còn dữ dội hơn, tới mức họ không sao phân biệt nổi từng cục đá nữa vì chúng tất cả đã nhào nhoẹt vào nhau thành một mảng. Nhưng điều này vẫn chưa là gì so với những thứ diễn ra sau đó. Khi cả hai trở mắt ngạc nhiên nhìn chiếc ly lách cách

loạn xạ của Gracie, họ bỗng thấy có một cục đá đi qua thành ly ra bên ngoài và rơi xuống bàn. Họ nhấc cục đá lên xem thì thấy nó vẫn nguyên vẹn, không biết nó đã xuyên qua thành thủy tinh rắn bằng cách nào mà không hề bị hư hại gì. “Chắc đây chỉ là hoang tưởng, hậu quả của chuyện đi dài ngày ra ngoài không khí của Vũ trụ đầy thôi” - Goerge nói. Cả hai người cố nén sự kích động do những cục đá chạy loạn xạ, họ uống cạn một hơi ly nước của mình vì ai nấy đều muốn về nhà càng nhanh càng tốt. Nhưng cả Goerge lẫn Gracie đều không nhận thấy rằng, do vội vã họ đã làm chiếc cửa giả là cửa ra vào, nhưng họ vẫn đi được ra ngoài như thường. Tuy nhiên, do ông chủ của quán Lượng tử đã quá quen với cảnh khách hàng đi qua tường nên cũng chẳng bận tâm đến chuyện đó.

Một thế kỷ trước, trong khi Conrad và Freud soi rọi những chỗ khuất trong trái tim và tâm hồn của con người, thì nhà vật lý người Đức tên là Max Planck đã rọi tia sáng đầu tiên vào cơ học lượng tử, một lý thuyết có thể giải thích được tại sao những trải nghiệm của Goerge và Gracie trong quán Lượng tử khi đưa nó về thang vi mô, không có gì là bí ẩn cả. Những điều xa lạ và bí hiểm như thế thực ra vẫn diễn ra “hàng ngày” trong Vũ trụ chúng ta ở những thang rất nhỏ.

Khuôn khổ lượng tử

Cơ học lượng tử là một khuôn khổ khái niệm dùng để tìm hiểu những tính chất vi mô của Vũ trụ. Cũng như thuyết tương đối hẹp và thuyết tương đối rộng đòi hỏi phải có những thay đổi triệt để trong thế giới quan của chúng ta khi các vật chuyển động nhanh hoặc khi chúng có khối lượng rất lớn, cơ học lượng tử cho thấy rằng Vũ trụ cũng có những tính chất như thế, nếu không muốn nói là hơn, khi ta xem xét nó ở các thang khoảng cách của nguyên tử và dưới nguyên tử. Năm 1965, Richard Feynman, một trong số những người tiên phong vĩ đại nhất của cơ học lượng tử đã viết:

Có một thời báo chí nói rằng chỉ có khoảng một chục người là hiểu được thuyết tương đối, riêng tôi, thì tôi không tin là đã có một thời như vậy. Có thể là có một thời mà chỉ có một người hiểu được nó, vì chính ông là người đã lĩnh hội được trước khi viết ra bài báo công bố nó. Nhưng sau đó, người ta đọc bài báo và nhiều người hiểu được lý thuyết tương đối theo cách này hoặc cách khác và

chắc chắn là nhiều hơn con số một chục. Trái lại, tôi nghĩ, tôi có thể nói một cách chắc chắn rằng không có một ai có thể hiểu được cơ học lượng tử [1]

Mặc dù Feynman phát biểu ý kiến này của mình hơn ba chục năm trước, nhưng nó vẫn còn đúng cho tới tận hôm nay. Điều mà ông muốn nói có nghĩa là, mặc dù thuyết tương đối hẹp và thuyết tương đối rộng đòi hỏi phải xem xét lại một cách căn bản những cách nhìn trước đây về thế giới, nhưng một khi người ta đã chấp nhận những nguyên lý cơ bản của hai lý thuyết đó, thì những hệ quả mới và trái với trực giác về không gian và thời gian được suy ra trực tiếp từ những lập luận lôgic. Nếu như bạn suy ngẫm một cách kỹ càng những điều đã được trình bày trong hai chương trước, bạn sẽ chấp nhận - dù chỉ trong giây lát - sự không tránh khỏi dẫn đến những kết luận như vậy. Nhưng với cơ học lượng tử thì lại khác. Vào khoảng năm 1928, rất nhiều những công thức và quy tắc của cơ học lượng tử đã được sắp xếp một cách hệ thống và từ đó chúng đã được sử dụng để đưa ra rất nhiều tiên đoán bằng số chính xác và thành công nhất trong lịch sử khoa học. Tuy nhiên, trên thực tế, những ai đã từng sử dụng cơ học lượng tử đều tự thấy rằng mình làm theo những quy tắc và những công thức do các “vị cha đẻ” ra cơ học lượng tử sáng lập ra, với những thủ tục tính toán không mấy khó thực hiện, nhưng thực sự không hiểu tại sao những thủ tục đó lại đưa đến những kết quả mỹ mãn như vậy và chúng có ý nghĩa gì. Không giống như thuyết tương đối, đối với cơ học lượng tử, chỉ một số rất ít người, nếu không muốn nói là không có ai, là nắm được “cái hồn” của nó.

Từ kết luận đó, chúng ta rút ra được điều gì? Phải chăng điều này có nghĩa là ở cấp độ vi mô, Vũ trụ vận hành một cách mù mờ và xa lạ tới mức trí tuệ con người, một trí tuệ đã được tiến hóa từ nhiều thế kỷ, đã chinh phục được nhiều hiện tượng diễn ra ở thang quen thuộc hàng ngày lại không thể lĩnh hội được đầy đủ “những cái thực sự đang diễn ra”? Hay liệu có thể là, do sự ngẫu nhiên của lịch sử, các nhà vật lý đã xây dựng được một hình thức luận còn cực kỳ vụng dại của cơ học lượng tử, khiến cho, mặc dù nó đã rất thành công về phương diện định lượng, nhưng lại làm lu mờ đi cái bản chất đích thực của thực tại? Điều này thì hiện chưa ai biết được. Có thể một ngày nào đó trong tương lai, một người thông minh nào đó sẽ nhìn ra một hình thức luận mới có khả năng làm phát lộ đầy đủ những “cái tại sao” và “cái gì” trong cơ học

lượng tử cũng nên. Có thể như vậy... và cũng có thể không. Điều duy nhất mà chúng ta biết chắc chắn, đó là cơ học lượng tử đã chứng tỏ một cách tương minh rằng nhiều khái niệm cơ bản có tầm quan trọng hàng đầu đối với việc tìm hiểu thế giới quen thuộc hằng ngày của chúng ta sẽ không còn ý nghĩa nữa khi bước vào địa hạt vi mô. Kết quả là, chúng ta phải thay đổi đáng kể cả ngôn ngữ cũng như lối suy luận của chúng ta khi định tìm hiểu và giải thích Vũ trụ ở các thang nguyên tử và dưới nguyên tử.

Trong các mục sau, chúng ta sẽ phát triển những cơ sở của ngôn ngữ này và mô tả một số hệ quả rất bất ngờ được suy ra từ đó. Nếu như dọc đường mà bạn cảm thấy cơ học lượng tử quá bí hiểm, thậm chí nực cười, thì bạn hãy ghi nhớ trong đầu hai điều sau. Thứ nhất, ngoài sự thực nó là một lý thuyết toán học hết sức nhất quán ra, lý do duy nhất khiến chúng ta tin tưởng vào cơ học lượng tử là bởi vì nó cho những tiên đoán đã được kiểm chứng tới độ chính xác đáng ngạc nhiên. Nếu có ai đó có thể nói chính xác với bạn rất nhiều chi tiết thầm kín về thuở ấu thơ của bạn, thì bạn khó có thể không tin khi người đó tuyên bố rằng ông (hoặc bà) ta là người họ hàng lưu lạc đã lâu của bạn. Thứ hai, bạn không hề đơn độc khi có những phản ứng như thế đối với cơ học lượng tử. Ngay cả những nhà vật lý vĩ đại nhất của mọi thời đại cũng có cảm nhận như vậy, chỉ có điều ở mức độ lớn hay nhỏ hơn mà thôi. Einstein đã hoàn toàn không chấp nhận cơ học lượng tử. Và thậm chí cả Niels Bohr, một trong những người tiên phong chủ chốt của lý thuyết lượng tử và là người bảo vệ nó một cách cuồng nhiệt nhất, cũng đã có lần thốt lên rằng, nếu đôi khi bạn không cảm thấy choáng váng khi nghĩ về cơ học lượng tử, thì có nghĩa là bạn chưa thực sự hiểu nó.

[1] Richard Feynman, *The Character of Physical Law* (Cambridge Mass: MIT Press, 1995)

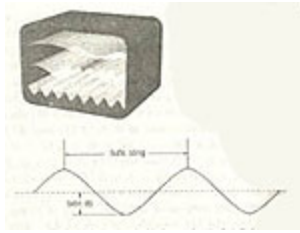
Trong bếp quá nóng

Con đường đi tới cơ học lượng tử bắt đầu từ một bài toán khá bí ẩn. Hãy hình dung cái bếp lò nhà bạn được cách nhiệt hoàn hảo; bạn điều chỉnh đặt nó ở một nhiệt độ nào đó, ví dụ như 2000C chẳng hạn, rồi bạn để tự cho nó nóng dần lên. Thậm chí, trước khi bật máy, bạn có hút hết không khí ra khỏi lò, thì do bị nung nóng, thành lò sẽ phát ra các sóng bức xạ bên trong lò. Bức xạ này cùng

loại với bức xạ được phát ra từ bề mặt Mặt Trời hay từ một thanh sắt nóng sáng, tức là nhiệt và ánh sáng dưới dạng sóng điện từ.

Vấn đề là thế này. Các sóng điện từ mang năng lượng, chẳng hạn, sự sống trên Trái Đất phụ thuộc sóng còn vào năng lượng được phát ra từ Mặt Trời và truyền tới Trái Đất bởi các sóng điện từ. Vào đầu thế kỷ XX, các nhà vật lý đã tính năng lượng toàn phần được mang theo bởi tất cả các sóng điện từ bên trong lò ở một nhiệt độ đã chọn. Dùng những thủ tục tính toán đã được xác lập là đúng đắn, họ tìm ra một đáp số thật nực cười: đối với nhiệt độ đã chọn, năng lượng toàn phần này có giá trị là vô hạn !.

Tất nhiên, ai cũng biết rằng điều đó là vô nghĩa: một bếp lò hoạt động có thể chứa một năng lượng đáng kể nhưng không thể là vô hạn được. Để hiểu được cách giải quyết của Planck, ta cần phải hiểu bài toán kỹ hơn một chút. Hóa ra, khi áp dụng lý thuyết điện từ của Maxwell cho các bức xạ trong lò, người ta thấy rằng các sóng do thành lò bị nung nóng phát ra chứa một số nguyên các đỉnh và hõm sóng và được đặt vừa khít giữa hai thành lò đối diện. Một số ví dụ về các sóng đó được minh họa trên Hình 4.1. Các nhà vật lý đã dùng ba thuật ngữ để mô tả các sóng ấy, đó là bước sóng, tần số và biên độ. Bước sóng là khoảng cách giữa hai đỉnh (hoặc hai hõm) sóng liên tiếp, như được minh họa trên Hình 4.2. Càng nhiều đỉnh hoặc hõm sóng thì bước sóng càng ngắn, bởi vì tất cả chúng đều phải được chèn cho hết trên khoảng cách cố định giữa hai thành lò. Còn tần số là số các chu trình cả lên lẫn xuống của dao động mà sóng thực hiện trong một giây. Như vậy, ta thấy tần số được xác định bởi bước sóng và ngược lại: bước sóng càng dài thì tần số càng thấp, bước sóng càng ngắn thì tần số càng cao. Để hiểu tại sao lại như vậy, bạn hãy thử nghĩ xem điều gì sẽ xảy ra khi bạn tạo một sóng bằng cách dùng một sợi dây thừng dài cố định một đầu và tay bạn cầm đầu tự do của nó lúc lắc lên xuống đều đặn. Muốn tạo ra bước sóng dài, tay bạn chỉ cần lúc lắc lên xuống một cách trể nải. Mà tần số của sóng lại đúng bằng số chu trình lúc lắc lên xuống của tay bạn trong một giây, vì vậy nó khá thấp. Nhưng để tạo ra những bước sóng ngắn, tay bạn phải lúc lắc một cách liên hồi, tức là thường xuyên hơn hay cũng có nghĩa là nó sinh ra sóng có tần số cao hơn. Cuối cùng, các nhà vật lý dùng thuật ngữ biên độ để chỉ độ cao hay độ sâu cực đại của sóng như được minh họa trên Hình 4.2.



Hình 4.1. Lý thuyết Maxwell nói với chúng ta rằng các sóng bức xạ trong lò có một số nguyên các đỉnh và hõm sóng - chúng tạo nên các chu trình sóng trọn vẹn.

Hình 4.2. Bước sóng là khoảng cách giữa hai đỉnh hoặc hai hõm sóng liên tiếp. Biên độ là độ cao hoặc độ sâu cực đại của sóng.

Trong trường hợp bạn thấy sóng điện từ có vẻ còn hơi trừu tượng, thì hãy nhớ tới một sự tương tự rất hay, đó là những sóng tạo ra khi gảy một sợi dây đàn violon. Biên độ của sóng trên sợi dây đàn này phụ thuộc vào bạn gảy nó mạnh tới mức nào. Gảy mạnh hơn nghĩa là bạn đã đặt nhiều năng lượng hơn vào sự nhiễu động sóng, do đó càng nhiều năng lượng tương ứng với biên độ càng lớn. Kết quả, bạn sẽ nghe thấy âm thanh do nó phát ra to hơn. Tương tự như vậy, năng lượng ít hơn sẽ tương ứng với biên độ nhỏ hơn và âm thanh nghe bé hơn.

Bằng cách sử dụng nhiệt động lực học của thế kỷ XIX, các nhà vật lý đã xác định được thành lò nóng đã bơm bao nhiêu năng lượng vào các sóng điện từ của từng bước sóng cho phép hay nói một cách hình ảnh, các bức tường đã “gảy” mỗi sóng đó mạnh tới mức nào. Kết quả là họ đã tìm ra một đáp số đơn giản: Mỗi một sóng cho phép, bất kể bước sóng của chúng, đều mang cùng một lượng năng lượng (với định lượng chính xác được xác định bởi nhiệt độ của lò). Nói một cách khác, tất cả các sóng khả dĩ có trong lò đều hoàn toàn bình đẳng với nhau trên phương diện liên quan tới lượng năng lượng mà chúng chứa.

Thoạt đầu, điều này tưởng như là một kết quả khá thú vị nhưng vô hại. Nhưng thực tế không phải như vậy. Nó đã dẫn tới sự sụp đổ của cái được gọi là vật lý cổ điển. Sở dĩ như vậy là vì: mặc dù việc đòi hỏi các sóng phải chứa một số nguyên các đỉnh và các hõm đã loại bớt đi một số rất lớn các sóng có thể có trong lò, nhưng vẫn còn một số vô hạn các sóng thỏa mãn đòi hỏi đó, mỗi một lần lại có nhiều đỉnh và hõm hơn. Vì mỗi sóng như vậy mang

cùng một lượng năng lượng, nên một số vô hạn các sóng đó sẽ mang một năng lượng toàn phần là vô hạn. Vậy là, vào lúc bước sang thế kỷ mới, thế kỷ XX, đã có một hạt sạn lớn kẹt giữa những bánh xe của bộ máy lý thuyết.

Tạo ra những “bó” nhỏ ở buổi bình minh của thế kỷ XX

Năm 1900, Planck đã đưa ra một ý tưởng thiên tài cho phép tìm ra con đường giải quyết bài toán bí ẩn nói trên và ông đã được trao giải thưởng Nobel về vật lý vào năm 1918. Để hiểu được ý tưởng đó, hãy hình dung bạn và một số đồng người - “vô hạn” về số lượng - chen chúc trong một nhà kho lớn và lạnh lẽo do một tay chủ rất keo kiệt quản lý. Trên tường nhà kho có một máy điều hòa nhiệt độ số hóa điều khiển nhiệt độ, nhưng bạn phải choáng váng nghe lão chủ thông báo về cách tính tiền sưởi. Nếu đặt điều hòa tăng 50 độ F [$10 \text{ độ C} = 5/9 (10F-32)$] thì mỗi người phải trả cho lão chủ 50 đôla, còn tăng 55 độ F thì phải trả 55 đôla, cứ như vậy mà tính tiếp. Bạn nhận thấy rằng, do bạn cùng chia sẻ nhà kho với một số vô hạn khách trọ khác, nên nếu bạn bật điều hòa thì lão chủ sẽ nhận được một số tiền là vô hạn.

Nhưng khi đọc kỹ quy tắc thanh toán của lão chủ, bạn chợt nhận ra trong đó có một khe hở. Vốn là một người rất bận rộn, lão không muốn phải thôi lại tiền thừa, nhất là lại đối với một số vô hạn người thuê như thế này. Vì vậy, lão quy định cách thanh toán như sau. Những người trả được chính xác số tiền phải trả thì không nói làm gì, còn nếu không, họ chỉ phải trả một số tiền tối đa có thể có, miễn là không phải thôi lại là được. Với ý định lôi kéo tất cả những người cùng trọ nhằm tránh phải trả một số tiền sưởi quá lớn, bạn thuyết phục mọi người phân chia giấy bạc họ có thành cách nhóm theo cách sau: một người giữ tất cả các đồng xu 1/100 đôla, một người giữ tất cả các đồng xu 1/20 đôla, một người giữ tất cả các đồng xu 1/4 đôla, và cứ như vậy mãi đối với các tờ 1 đôla, 5 đôla, 10 đôla, 20 đôla, 50 đôla, 100 đôla, 1.000 đôla, và những tờ giấy bạc có mệnh giá lớn hơn nữa (và cũng ít quen thuộc hơn). Thu xếp mọi chuyện xong xuôi, bạn ưng dung đặt điều hòa lên tới 80 độ (nghĩa là mỗi người sẽ phải trả 80 đôla tiền sưởi - ND), rồi ngồi đợi lão chủ tới. Khi lão chủ tới, người giữ những đồng 1/10 đôla đến trả đầu tiên và trao cho lão ta 8.000 đồng xu đó. Sau đó, đến lượt người giữ những đồng xu 1/20 đôla đưa cho lão chủ 1.600 đồng xu

này, rồi người giữ các đồng xu 1/10 đôla đưa những tờ 10 đôla đưa 8 tờ, người giữ những tờ 20 đôla đưa 4 tờ và người giữ những tờ 50 đôla chỉ phải đưa 1 tờ (vì nếu đưa 2 tờ thì lão chủ sẽ phải thôi lại, điều mà lão ta không muốn). Nhưng vì những người còn lại, mỗi người giữ chỉ một loại giấy bạc có cùng mệnh giá - mỗi tờ có thể được xem như là “gói” tối thiểu của loại giấy bạc tương ứng - đều vượt quá số tiền phải trả, nên họ không phải trả gì hết. Vì vậy, lẽ ra lão chủ được nhận một số tiền vô hạn như lão chờ đợi, thì bây giờ lão chỉ nhận được số tiền còn là 5.690 đôla.

Planck đã sử dụng chiến lược tương tự để đưa kết quả nực cười về lượng năng lượng vô hạn trong lò về một kết quả hữu hạn. Cụ thể là ông đã làm như sau. Ông đã táo bạo đưa ra giả thuyết cho rằng, cũng giống như tiền, năng lượng được mang bởi sóng điện từ trong lò theo từng “gói”. Năng lượng chỉ có thể bằng một lần, hai lần hoặc ba lần... một “mệnh giá năng lượng cơ bản” nhất định, và chỉ thế thôi. Và cũng như bạn không thể có các đồng xu 1/3 đôla hay 2/3 đôla, nên Planck tuyên bố rằng đối với năng lượng các phân số đều không được phép. Cũng như mệnh giá của các đồng xu hay các tờ giấy bạc đôla do Kho bạc của nước Mỹ quy định, Planck cho rằng mệnh giá năng lượng của một sóng, tức bó năng lượng tối thiểu của nó, do tần số của nó quyết định. Cụ thể, ông xem rằng năng lượng tối thiểu mà một sóng có thể có tỷ lệ thuận với tần số của nó: tần số càng lớn (tức bước sóng càng nhỏ) thì năng lượng tối thiểu càng lớn; tần số càng nhỏ (tức bước sóng càng lớn) thì năng lượng tối thiểu càng nhỏ. Nói một cách nôm na, cũng như các con sóng dịu êm trên đại dương thì dài, còn các con sóng lừng thì ngắn và mạnh, bức xạ có bước sóng dài vốn có năng lượng nhỏ hơn bức xạ có bước sóng ngắn.

Và đây mới là điểm thú vị nhất: những tính toán của Planck đã cho thấy rằng tính chất phân ra từng bó này của năng lượng được phép trong mỗi sóng đã sửa được cái kết quả nực cười về năng lượng toàn phần vô hạn mà ta nói tới ở trên. Để hiểu được tại sao lại như vậy, cũng không khó khăn lắm. Khi lò đã nóng tới một nhiệt độ chọn trước nào đó, những tính toán dựa trên nhiệt động lực học của thế kỷ XIX đã tiên đoán được lượng năng lượng chung mà mỗi một sóng được quy định là sẽ phải đóng góp cho năng lượng toàn phần. Nhưng cũng giống như những khách trọ không thể đóng góp số tiền chung mà mỗi người phải đóng cho lão chủ vì các tờ giấy bạc mà họ giữ có mệnh giá quá lớn, nếu năng lượng tối

thiếu của một sóng cụ thể nào đó vượt quá lượng năng lượng quy định mà nó phải đóng, thì nó không thể đóng được và đành phải ngủ yên không tham gia nữa. Theo Planck, vì năng lượng tối thiểu mà mỗi sóng có thể mang tỷ lệ thuận với tần số của sóng đó, nên khi chúng ta xét các sóng trong lò với tần số lớn dần (tức bước sóng nhỏ dần) thì rồi sớm hay muộn năng lượng tối thiểu mà chúng có thể mang sẽ lớn hơn năng lượng quy định mà chúng phải đóng góp. Tựa như những người khách trọ giữ những tờ giấy bạc lớn hơn 50 đôla, những sóng có tần số lớn này sẽ không thể đóng góp lượng năng lượng mà vật lý của thế kỷ XIX đòi hỏi. Và như vậy, cũng giống như chỉ có một số hữu hạn khách trọ là có thể đóng góp vào tổng số tiền trả tiền sưởi (dẫn tới tổng số tiền này là một số hữu hạn), chỉ có một số hữu hạn các sóng là có thể đóng góp vào năng lượng toàn phần của lò và do đó cũng dẫn tới lượng năng lượng toàn phần là hữu hạn. Dù là năng lượng hay là tiền, tính phân ra thành các gói đơn vị cơ bản với kích cỡ tăng dần của các gói đó, khi chúng ta đi tới các tần số cao hơn hay tới các mệnh giá lớn hơn, đã làm thay đổi đáp số vô hạn thành hữu hạn [1].

Bằng cách khử đi sự vô nghĩa hiển nhiên của kết quả vô hạn, Planck đã làm một bước quan trọng. Nhưng điều làm cho người ta thực sự tin rằng ý tưởng của ông là đúng đắn, đó là kết quả hữu hạn mà phương pháp mới của ông tính được cho năng lượng toàn phần trong lò phù hợp một cách hết sức mỹ mãn với các số liệu thực nghiệm. Cụ thể, Planck đã tìm thấy rằng, bằng cách điều chỉnh các tham số xuất hiện trong những tính toán mới của mình, ông có thể tiên đoán được chính xác năng lượng của lò ở một nhiệt độ bất kỳ cho trước. Tham số này chính là hệ số tỷ lệ giữa bó năng lượng cực tiểu (hay lượng tử) của sóng và tần số của nó. Planck cũng tìm thấy rằng hằng số tỷ lệ đó - mà hiện nay được gọi là hằng số Planck và ký hiệu là h - có giá trị khoảng một phần tỷ tỷ nếu tính theo các đơn vị đo thông thường 3. Giá trị cực nhỏ này của hằng số Planck có nghĩa là độ lớn của các bó năng lượng thường là rất nhỏ. Điều này giải thích tại sao, chẳng hạn, dường như chúng ta có thể làm cho năng lượng của sóng trên sợi dây đàn violon (và do đó cả âm lượng do nó phát ra) thay đổi một cách liên tục. Tuy nhiên, trên thực tế, năng lượng của sóng thay đổi theo các bậc thang gián đoạn, theo kiểu Planck, chỉ có điều kích thước của các bậc đó nhỏ tới mức những bước nhảy gián đoạn từ một âm lượng này tới một âm lượng khác có thể xem gần như là trơn tru, liên tục. Theo khẳng định của Planck, kích thước của những bước nhảy

đó tăng khi tần số của sóng càng cao (tức bước sóng càng giảm). Đây chính là yếu tố quyết định trong việc giải quyết nghịch lý năng lượng vô hạn nói ở trên.

Như chúng ta sẽ thấy, giả thuyết lượng tử của Planck không chỉ dừng lại ở chỗ cho phép chúng ta hiểu được lượng năng lượng chứa trong lò. Nó còn làm đảo lộn quan niệm về rất nhiều thứ trong thế giới mà chúng ta thường xem là hiển nhiên. Giá trị rất nhỏ của h đã giới hạn phần lớn những khác biệt căn bản với đời sống thường ngày đó chỉ trong thế giới vi mô, nhưng nếu như giá trị của h lớn hơn nhiều, thì những điều lạ lùng xảy ra trong quán Lượng tử sẽ thực sự trở thành những chuyện thường ngày. Và như chúng ta sẽ thấy, những chuyện tương tự trong thế giới vi mô đã xảy ra đúng như vậy.

[1] Nói chính xác hơn một chút, Planck đã chứng minh được rằng những sóng có năng lượng cực tiểu vượt quá đóng góp năng lượng trung bình được quy định (bởi nhiệt động học của thế kỷ XIX) đều bị khử mạnh. Sự khử này thể hiện càng rõ khi chúng ta xét.

Các “gói” năng lượng là gì ?

Planck không hề có một biện minh nào cho ý tưởng then chốt của ông là đã xem năng lượng được phân thành các gói. Ngoài chuyện ý tưởng này đã đưa lại những kết quả mỹ mãn ra, thì cả Planck cũng như bất cứ ai khác đều không thể cho một lý giải có sức thuyết phục là tại sao nó lại đúng như vậy. Như nhà vật lý Goerge Gamow có lần nói, dường như tự nhiên cho người ta uống cả một vại bia hoặc là không có tí bia nào, chứ không có kiểu chung chich ở giữa. Năm 1905, Einstein đã đưa ra cách giải thích và vì phát minh đó ông đã được trao giải thưởng Nobel về vật lý năm 1921.

Einstein đã tìm ra cách giải thích này trong quá trình giải quyết một vấn đề có tên là hiệu ứng quang điện. Nhà vật lý người Đức tên là Heinrich Hertz là người đầu tiên phát hiện ra rằng khi chiếu một bức xạ điện từ (chẳng hạn ánh sáng) lên bề mặt một số kim loại nào đó, thì chúng sẽ phát ra các electron. Bản thân chuyện này cũng chẳng có gì là đặc biệt lắm. Một trong những tính chất riêng của các kim loại là chúng có một số electron liên kết lỏng lẻo trong nguyên tử (điều này giải thích tại sao, chúng lại là

những vật dẫn điện tốt). Khi ánh sáng đập vào bề mặt kim loại nó sẽ nhường bớt một phần năng lượng, cũng hệt như khi nó chiếu vào bề mặt làn da của bạn và làm cho bạn cảm thấy ấm hơn. Năng lượng được nhường bớt này sẽ làm cho các electron liên kết lỏng lẻo có thể sẽ bị bắn ra ngoài.

Nhưng những đặc điểm lạ lùng của hiệu ứng quang điện trở nên rõ ràng hơn khi người ta nghiên cứu những tính chất tinh tế hơn của các electron được bắn ra. Thoạt tiên, người ta nghĩ rằng cường độ ánh sáng, tức độ chói của nó tăng thì vận tốc của các electron bắn ra cũng sẽ tăng, vì sóng điện từ tới có nhiều năng lượng hơn. Nhưng thực tế lại không phải như vậy. Khi đó, chỉ có số lượng các electron bắn ra là tăng thôi, còn vận tốc của chúng thì vẫn giữ cố định. Mặt khác, thực nghiệm còn cho thấy rằng vận tốc của các electron phát ra sẽ tăng nếu như tần số của ánh sáng chiếu tới tăng và tương tự, vận tốc của các electron sẽ giảm nếu như tần số của ánh sáng giảm. (Đối với sóng điện từ trong vùng phổ thấy được, sự tăng tần số tương ứng với sự thay đổi màu sắc từ đỏ, tới da cam, vàng, lục, lam, chàm và cuối cùng đến tím. Ánh sáng có tần số cao hơn tím là không nhìn thấy được và tương ứng là tia tử ngoại và sau đó là tia X; ánh sáng có tần số thấp hơn đỏ cũng không nhìn thấy được và tương ứng với tia hồng ngoại. Thực tế, khi giảm tần số của ánh sáng chiếu tới, thì đến một lúc nào đó, vận tốc của các electron phát ra sẽ giảm tới không và chúng sẽ không được bắn ra, bất chấp cường độ ánh sáng có mạnh đến đâu đi nữa. Do một nguyên nhân nào đó còn chưa biết, màu của chùm sáng tới, chứ không phải năng lượng toàn phần của nó, điều khiển việc có cho các electron bắn ra hay không và nếu chúng được bắn ra thì điều khiển cả năng lượng của chúng nữa.

Để hiểu Einstein đã giải thích những sự kiện bí ẩn nêu ở trên như thế nào, ta hãy quay trở lại cái nhà kho, mà bây giờ đã đang hoang được sưởi tới 80 độ F (tức gần 27 độ C). Hãy hình dung, lão chủ vốn là người ghét trẻ con, nên lão yêu cầu tất cả những ai dưới 15 tuổi đều phải ở tầng hầm của nhà kho, mà người lớn có thể quan sát được từ một ban công lớn bao quanh. Hơn thế nữa, cách duy nhất để bọn trẻ được ra khỏi tầng hầm của nhà kho là phải trả một lệ phí là 85 xu cho người gác cửa. (Lão chủ này đúng là một con quỷ tham lam). Còn người lớn, những người đã theo lời khuyên của ban tổ chức để mỗi người giữ tiền theo từng loại mệnh giá như đã mô tả ở trên, có thể cho tiền bọn trẻ con bằng

một cách duy nhất là ném xuống từ ban công. Giờ chúng ta hãy xem điều gì sẽ xảy ra.

Người giữ những đồng xu 1/100 đôla bắt đầu ném xuống một số đồng, nhưng tổng số tiền còn quá còn cỗi chưa đủ để nộp lệ phí cho một đứa trẻ ra ngoài. Vì có cả một biển gần như là “vô hạn” bọn trẻ tranh giành quyết liệt để nhặt những đồng xu ném xuống, nên cho dù người giữ những đồng xu này có ném xuống khá nhiều đi nữa thì cũng không có đứa nào hội đủ 85 xu cần thiết để trả cho người gác. Điều này cũng đúng đối với những người giữ các đồng xu 1/20 và 1/4 đôla. Mặc dù mỗi người lớn có thể ném xuống khá nhiều đồng xu mà mình giữ, nhưng một đứa trẻ nhặt được thậm chí một đồng thôi cũng là may mắn rồi (còn thì phần lớn chẳng nhặt được gì) và chắc chắn không có đứa trẻ nào nhặt được đủ 85 xu cần thiết để đi ra khỏi tầng hầm. Nhưng sau đó, khi người giữ những tờ giấy bạc mệnh giá từ 1 đôla ném xuống, thậm chí với tổng số tiền khá nhỏ, chẳng hạn như ném từng tờ một xuống, thì những đứa trẻ may mắn nhặt được một tờ thôi là đã có thể ngay lập tức được đi ra ngoài. Cũng cần lưu ý rằng, mặc dù ngay cả khi người lớn đó thả cả một bọc tiền gồm những tờ 1 đôla xuống ngay một lúc thì số đứa trẻ được rời tầng hầm tăng lên rất lớn, nhưng mỗi đứa cũng chỉ còn lại đúng 15 xu sau khi đã trả phí cho người gác cổng. Điều này là đúng bất chấp tổng số các tờ đôla ném xuống là bao nhiêu.

Bạn có thể hỏi những điều nói trên thì có liên quan gì tới hiệu ứng quang điện? Dựa trên những dữ liệu thực nghiệm đã nói tới ở trên, Einstein đã đề nghị sáp nhập quan niệm của Planck về các gói năng lượng của sóng vào sự mô tả mới về ánh sáng. Một chùm sáng, theo Einstein, cần thực sự được xem như là một dòng các gói nhỏ - những hạt nhỏ bé của ánh sáng - mà sau này được nhà hóa học Gilbert Lewis gọi là các photon (một khái niệm mà chúng ta đã sử dụng trong ví dụ về đồng hồ ánh sáng ở Chương 2). Để có một ý niệm thang về độ lớn, theo quan niệm hạt nói trên về ánh sáng, xin nêu một ví dụ: một bóng đèn 100W bình thường phát ra một trăm tỷ tỷ (10²⁰) photon trong 1 giây. Einstein đã dùng quan niệm này để đưa ra cơ chế vi mô của hiệu ứng quang điện. Theo ông, một electron được bắn ra khỏi bề mặt kim loại, nếu như nó va chạm với một photon có năng lượng đủ cao, nhưng cái gì xác định năng lượng của một photon riêng rẽ? Để giải thích các số liệu thực nghiệm, Einstein đi theo con đường mà Planck đã vạch

ra và ông cho rằng năng lượng của mỗi photon tỷ lệ với tần số của sóng ánh sáng (với hệ số tỷ lệ đúng bằng hằng số Planck).

Bây giờ, giống như phí tối thiểu để được đi ra khỏi cổng của bọn trẻ con trong khu nhà kho mà ta mô tả ở trên, để được bắn ra khỏi bề mặt, các electron trong kim loại cũng cần phải va chạm với một photon có một năng lượng tối thiểu nhất định. (Cũng như với bọn trẻ con tranh giành nhau quyết liệt để nhặt tiền, một electron cực kỳ ít có khả năng va chạm nào). Nhưng nếu tần số của chùm sáng chiếu tới là quá thấp, thì các photon riêng rẽ của nó không đủ năng lượng cần thiết để làm bắn electron ra ngoài. Cũng hệt như chẳng có đứa trẻ nào có thể được đi ra ngoài, bất chấp người lớn tung xuống một số lượng các đồng xu bằng bao nhiêu, ở đây cũng không có một electron nào được bắn ra ngoài, bất chấp năng lượng toàn phần chứa trong chùm sáng chiếu tới lớn đến mức nào, nếu như tần số (và do đó năng lượng của từng photon riêng rẽ) của nó là quá thấp.

Nhưng cũng giống như bọn trẻ có thể rời nhà kho ngay khi mệnh giá của tiền ném xuống là đủ lớn, các electron cũng được bắn ra khỏi bề mặt ngay khi năng lượng của ánh sáng chiếu tới, tức mệnh giá năng lượng của nó, là đủ cao. Hơn thế nữa, tương tự như người giữ những tờ 1 đôla tăng tổng lượng tiền cho bọn trẻ con bằng cách tăng số lượng những tờ 1 đôla được ném xuống, cường độ toàn phần của chùm sáng tới có tần số cho trước cũng được tăng bằng cách tăng số lượng các photon mà nó chứa. Và cũng như càng có nhiều tờ 1 đôla thả xuống thì càng có nhiều đứa trẻ được đi ra ngoài, ở đây càng có nhiều photon tới thì càng có nhiều electron bị va chạm và bị bắn ra ngoài bề mặt kim loại. Nhưng cũng cần lưu ý rằng, lượng năng lượng còn lại của mỗi electron đó sau khi ra ngoài kim loại chỉ phụ thuộc vào năng lượng photon mà nó va chạm, mà năng lượng này lại được xác định bởi tần số của chùm sáng tới, chứ không phải bởi cường độ của chùm sáng. Tương tự như bọn trẻ con rời tầng hầm với số tiền còn lại là 15 xu mỗi đứa, bất kể đã có bao nhiêu tờ 1 đôla được thả xuống, mỗi một electron ở đây rời bề mặt của kim loại với cùng một năng lượng, và do đó có cùng một vận tốc, bất kể cường độ toàn phần của chùm sáng chiếu tới bằng bao nhiêu. Lượng tiền thả xuống càng lớn, có nghĩa là có nhiều đứa trẻ được đi ra ngoài, tương tự như vậy, năng lượng toàn phần của chùm sáng tới càng lớn đơn giản có nghĩa là càng có nhiều electron bắn ra ngoài bề mặt kim loại. Nếu chúng ta muốn

bọn trẻ đi ra ngoài tầng hầm với số tiền còn lại lớn hơn, chúng ta cần phải tăng mệnh giá của các tờ giấy bạc được thả xuống, tương tự như vậy, nếu chúng ta muốn các electron rời bề mặt kim loại với vận tốc lớn hơn, chúng ta cần phải tăng tần số của chùm sáng chiếu tới, tức là tăng mệnh giá năng lượng của các photon chiếu tới bề mặt kim loại.

Điều này hoàn toàn phù hợp với những dữ liệu thực nghiệm. Tần số của ánh sáng (tức màu sắc của nó) quyết định vận tốc của các electron bị bắn ra; còn cường độ toàn phần của chùm sáng quyết định số lượng các electron đó. Và như vậy, Einstein đã chứng tỏ được rằng ý tưởng của Planck về năng lượng được phân thành các bó thực sự phản ánh một đặc điểm cơ bản của các sóng điện từ: chúng được tạo thành từ các hạt photon hay còn gọi là các lượng tử ánh sáng. Sở dĩ năng lượng chứa trong các sóng được phân thành các bó chẳng qua là vì các sóng đó được tạo thành từ các lượng tử.

Phát minh của Einstein thể hiện một sự tiến bộ rất to lớn. Nhưng, như chúng ta sẽ thấy dưới đây, mọi chuyện còn chưa hoàn toàn suôn sẻ như ta tưởng.

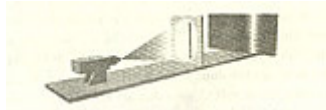
Vậy rốt cuộc ánh sáng là sóng hay là hạt ?

Ai cũng biết rằng nước - và từ đó cả những sóng nước - đều được tạo thành từ một số rất lớn các phân tử. Như vậy, liệu có đáng ngạc nhiên hay không nếu sóng ánh sáng cũng tạo bởi một số rất lớn hạt, cụ thể là các photon? Câu trả lời là có. Nhưng sự ngạc nhiên nằm trong các chi tiết. Bạn chắc đã biết, hơn ba trăm năm trước Newton đã khẳng định rằng ánh sáng gồm một dòng các hạt, vì vậy ý tưởng này không có gì là mới cả. Tuy nhiên, một số đồng nghiệp của Newton hồi đó, mà chủ yếu là nhà vật lý người Hà Lan Christian Huygens, đã không đồng ý với ông và cãi rằng ánh sáng là sóng. Cuộc tranh luận diễn ra gay gắt cho tới đầu thế kỷ XIX, khi mà những thí nghiệm của nhà vật lý người Anh Thomas Young được thực hiện vào những năm 1800 chứng minh được rằng Newton là sai.



Hình 4.3. Trong thí nghiệm Young, chùm sáng chiếu vào một màn chắn có hai khe, ánh sáng đi qua hai khe được ghi lại trên tấm kính ảnh khi một trong hai khe hoặc cả hai khe đều mở.

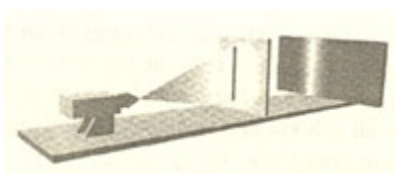
Sơ đồ thí nghiệm của Young, mà sau này người ta thường gọi là thí nghiệm hai khe, được minh họa trên Hình 4.3. Feynman rất thích nói rằng, có thể tóm tắt được toàn bộ cơ học lượng tử từ sự nghiên cứu thấu đáo những hệ quả rút ra chỉ từ thí nghiệm này, và vì vậy nó đáng để chúng ta thảo luận ở đây. Như ta thấy từ Hình 4.3, ánh sáng được chiếu tới một màn chắn trên đó có hai khe hẹp. Một tấm kính ảnh đặt ở phía sau có nhiệm vụ chụp lại ánh sáng tới nó sau khi đã đi qua hai khe: vùng sáng hơn trên bức ảnh cho biết có nhiều ánh sáng tới đó hơn. Thí nghiệm có mục đích so sánh các hình chụp được trên kính ảnh khi một trong hai khe hoặc cả hai khe đều mở và có ánh sáng chiếu vào.

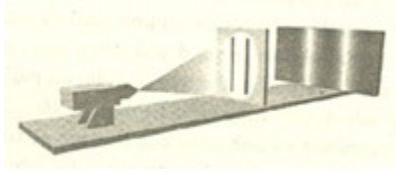


Hình 4.4. Trong thí nghiệm này khe bên phải mở còn khe bên trái bị chặn. Hình chụp được trên tấm kính như ta thấy trên hình vẽ.

Nếu che khe bên trái và mở khe bên phải, thì ảnh chụp được như ta thấy trên Hình 4.4. Điều này cũng thật dễ hiểu, bởi lẽ ánh sáng đập vào tấm kính ảnh phải đi qua chỉ một khe mở và do đó nó sẽ tập trung ở phần bên phải của tấm kính ảnh.

Tương tự, nếu ta che bên phải lại và mở khe bên trái, ảnh chụp được như ta thấy trên Hình 4.5. Nếu cả hai khe đều mở, quan niệm hạt về ánh sáng của Newton sẽ tiên đoán rằng bức ảnh chụp được như ta thấy trên Hình 4.6, tức là nó là gộp của hai Hình 4.4 và 4.5.



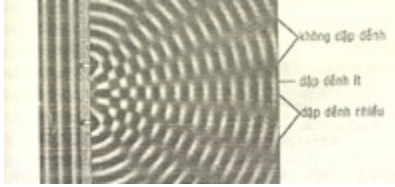


Hình 4.6. Quan điểm hạt về ánh sáng của Newton tiên đoán rằng khi cả hai khe đều mở, hình chụp được trên kính ảnh là gộp của hai ảnh trên các Hình 4.4 và 4.5.

Về căn bản, nếu bạn nghĩ về các hạt ánh sáng của Newton như là những viên đạn bi nhỏ mà bạn bắn lên tường, thì những viên đi qua sẽ tập trung vào hai vùng nằm song song với hai khe, tựa như hai vùng sáng trên Hình 4.6. Ngược lại, khi hai khe đều mở, thì quan niệm sóng về ánh sáng lại dẫn tới một tiên đoán hoàn toàn khác. Bây giờ chúng ta sẽ xem nó khác như thế nào.

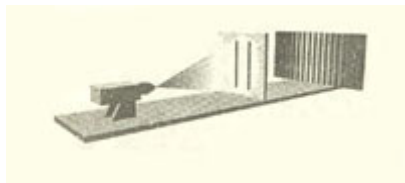
Bây giờ hãy tạm hình dung thay vì dùng các sóng ánh sáng ta sử dụng sóng nước. Kết quả mà chúng ta tìm thấy cũng sẽ hết như thế, chỉ có điều với sóng nước chúng ta dễ hình dung hơn mà thôi. Khi sóng nước đập vào một vách chắn, các sóng tròn đi ra từ mỗi khe trên vách rất giống như các sóng tạo thành khi ta ném một viên sỏi xuống hồ như được minh họa trên Hình 4.7.

(Thí nghiệm này bạn có thể tự làm không khó khăn gì bằng cách dùng một tấm bìa cátông rạch sẵn hai khe rồi nhúng trong một chậu nước). Do các sóng ló ra từ hai khe chồng chập lên nhau, bạn sẽ thấy xuất hiện một điều khá lý thú. Tại những chỗ có hai đỉnh sóng chồng lên nhau, thì độ cao của sóng nước tại đó tăng lên. Nó chính là tổng độ cao của hai đỉnh sóng nước thành phần. Tương tự, tại những chỗ có hai hõm sóng chồng lên nhau, thì độ sâu của hõm sóng cũng tăng. Và cuối cùng nếu đỉnh sóng ló ra từ một khe chồng lên một hõm sóng ló ra từ khe khác, thì chúng sẽ triệt tiêu nhau. (Thực tế, ý tưởng này chính là cơ sở để chế tạo các tai nghe tinh xảo có khử nhiễu: chúng đo hình dạng của sóng âm tới rồi tạo ra một dạng khác của nó nhưng “ngược” hoàn toàn, để cho chúng triệt tiêu lẫn nhau).



Hình 4.7 Các sóng nước tròn tỏa ra từ hai khe chồng lên nhau tạo ra sóng tổng hợp được tăng cường ở một số nơi và yếu đi ở một số nơi khác.

Ở giữa chừng xảy ra sự chồng lên nhau đặc biệt nói ở trên, cụ thể là đỉnh chồng lên đỉnh, hõm chồng lên hõm và đỉnh chồng lên hõm, là những chỗ xảy ra sự tăng độ cao hoặc triệt tiêu nhau một phần. Nếu bạn cùng với một nhóm bạn bè đặt một số chiếc thuyền giấy nằm thẳng hàng song song với vách chắn rồi mỗi người quan sát và nói một cách chính xác con thuyền của mình dập dềnh hay yếu thế nào khi sóng tổng hợp đi qua thì bạn sẽ nhận được kết quả giống như minh họa ở phần bên phải của Hình 4.7. Những nơi mà thuyền dập dềnh mạnh là ở đó đỉnh (hoặc hõm) của sóng từ hai khe chồng lên nhau; những nơi mà thuyền dập dềnh nhỏ nhất hoặc gần như đứng yên là ở đó đỉnh của sóng từ khe này chồng lên hõm sóng tới từ khe kia và chúng sẽ khử lẫn nhau.



Hình 4.8 Nếu ánh sáng là sóng, thì khi cả hai khe đều mở, sẽ có sự giao thoa giữa các sóng tới từ hai khe.

Vì tấm kính ảnh ghi lại nó bị ánh sáng tới làm cho “dập dềnh” mạnh tới mức nào, nên nếu áp dụng y xì những lập luận ở trên cho các sóng ánh sáng, thì ta sẽ thấy rằng, khi cả hai khe đều mở, bức ảnh mà ta chụp được sẽ nhìn giống như trên Hình 4.8. Những vùng sáng nhất trên Hình 4.8 là những nơi các đỉnh (hoặc hõm) sóng tới từ hai khe chồng lên nhau. Còn những vùng tối là những nơi mà đỉnh sóng tới từ khe này chồng lên hõm sóng tới từ khe kia và triệt tiêu lẫn nhau. Dãy những vạch sáng và tối xen kẽ nhau được gọi là bức tranh các vân giao thoa. Hiển nhiên, bức ảnh này khác hẳn với bức ảnh trên Hình 4.6 và như vậy là ta có một

thí nghiệm phân biệt được quan niệm hạt và quan niệm sóng về ánh sáng. Young đã thực hiện thí nghiệm trên và những kết quả của ông hoàn toàn phù hợp với Hình 4.8, do đó nó khẳng định tính đúng đắn của quan niệm sóng. Như vậy, quan niệm hạt về ánh sáng của Newton đã thất bại (mặc dù cũng phải mất một thời gian khá dài nữa các nhà vật lý mới chấp nhận điều đó). Và sau đó, Maxwell đã xây dựng một cơ sở toán học vững chắc cho quan điểm sóng vừa chiến thắng.

Nhưng Einstein, người đã từng lật đổ lý thuyết đầy uy tín về hấp dẫn của Newton, dường như giờ đây lại phục hồi mô hình hạt về ánh sáng của Newton bằng cách đưa vào các hạt photon. Tất nhiên, chúng ta vẫn phải đối mặt với chính câu hỏi trước đây: quan niệm hạt về ánh sáng làm thế nào có thể giải thích được bức tranh giao thoa trên Hình 4.8? Thoạt nhìn, bạn có thể đưa ra gợi ý sau: thì nước chẳng gồm các phân tử H₂O và các hạt này chẳng là “hạt” của nước là gì. Thế mà khi nhiều phân tử này chuyển động cùng với nhau, chúng vẫn có thể tạo nên sóng nước với những tính chất giao thoa như được minh họa trên Hình 4.7 đấy thôi. Và như vậy, vẫn sẽ là hợp lý nếu ta tiên đoán rằng những tính chất sóng, như bức tranh giao thoa chẳng hạn, vẫn có thể xuất hiện từ quan niệm hạt về ánh sáng, miễn là có sự tham gia của một số rất lớn các hạt photon, tức các hạt ánh sáng.

Tuy nhiên, trong thực tế, thế giới vi mô còn tinh quái hơn thế nhiều. Ngay cả khi cường độ của nguồn sáng trên Hình 4.8 giảm dần dần tới mức các photon riêng rẽ lần lượt từng hạt một được phóng tới màn chắn, chẳng hạn với tốc độ 1 hạt trong 10 giây, thì bức ảnh thu được vẫn còn giống như trên Hình 4.8. Nếu chúng ta đợi đủ lâu để cho một số lớn các bó ánh sáng rời biệt này (tức các photon - ND) có đủ thời gian đi qua hai khe và mỗi photon được ghi lại bằng một chấm duy nhất ở nơi chúng đập vào kính ảnh, thì những chấm này sẽ tích tụ và tạo nên hình ảnh của bức tranh giao thoa như trên Hình 4.8. Điều này thật đáng ngạc nhiên. Làm thế nào mà những hạt photon riêng rẽ lần lượt đi qua màn chắn và đập riêng rẽ lên kính ảnh lại có thể đồng mưu với nhau để tạo nên các vân sáng và tối của sóng giao thoa? Những suy luận thông thường nói với chúng ta rằng mỗi photon hoặc là đi qua khe bên trái hoặc là đi qua khe bên phải, do đó chúng ta chờ đợi sẽ nhận được bức tranh như trên Hình 4.6. Nhưng thực tế lại không phải như vậy.

Nếu như bạn không hề cảm thấy ngạc nhiên trước sự kiện này của tự nhiên, thì điều đó có nghĩa là, hoặc bạn đã từng biết nó từ trước và cảm thấy nhàm chán hoặc là sự trình bày của chúng tôi chưa đủ gây ấn tượng cho bạn. Nếu đó là trường hợp thứ hai, thì chúng tôi xin mô tả lại một lần nữa, nhưng theo một cách hơi khác. Bây giờ bạn hãy bịt khe bên trái lại, và bắn các photon từng hạt một tới màn chắn. Một số hạt sẽ đi qua được và một số hạt thì không. Những hạt đi qua khe sẽ tạo trên kính ảnh từng chấm một và cuối cùng ta sẽ nhận được hình như trên Hình 4.4. Sau đó, bạn thay tấm kính ảnh mới và làm lại thí nghiệm trên, nhưng lần này cả hai khe đều mở. Gần như là tự nhiên bạn sẽ nghĩ rằng, điều này chỉ làm tăng số photon đi qua các khe trên màn chắn và đập vào kính ảnh, do đó phim được phơi sáng nhiều hơn so với lần thí nghiệm đầu tiên. Nhưng khi xem xét bức ảnh nhận được sau đó, bạn mới thấy rằng không những chỉ có những chỗ mà trong lần thí nghiệm thứ nhất là tối thì bây giờ là sáng đúng như ta chờ đợi, mà còn có những chỗ trên kính ảnh là sáng trong lần thí nghiệm thứ nhất thì bây giờ lẽ ra phải là sáng hơn, nhưng thực tế lại là tối, như ta thấy trên Hình 4.8. Bằng cách tăng số photon riêng rẽ đập vào kính ảnh, bạn lại làm giảm độ sáng trong một số vùng nào đó. Hóa ra, bằng cách nào đó, các hạt photon tách biệt nhau về thời gian lại có thể triệt tiêu lẫn nhau. Bạn hãy thử nghĩ xem, lẽ nào điều này lại không điên rồ hay sao: các photon đi qua hai khe bên phải rồi đập vào kính ảnh và tạo một chấm sáng ở đúng chỗ một vân tối trên Hình 4.8 lại không làm được như vậy khi mở cả hai khe). Nhưng làm thế nào mà một photon đi qua khe bên phải lại chịu ảnh hưởng của việc khe bên trái có mở hay không. Như Feynman đã từng nhận xét, điều này cũng lạ lùng như khi bạn bắn súng máy lên màn chắn và khi cả hai khe đều mở, những viên đạn được bắn độc lập và tách rời nhau bằng cách nào đó lại có thể triệt tiêu nhau và để lại trên bia những vị trí còn nguyên vẹn, mặc dù khi mở chỉ một khe những vị trí đó đều bị đạn bắn vào.

Những thí nghiệm như vậy cho thấy các hạt của Einstein hoàn toàn khác các hạt của Newton. Không hiểu bằng cách nào mà các photon - mặc dù là các hạt - lại thể hiện cả những đặc điểm tựa như sóng của ánh sáng. Việc năng lượng của các hạt này được xác định bởi tần số - một đặc trưng của sóng - chính là manh mối đầu tiên cho sự kết hợp lạ lùng đó. Hiệu ứng quang điện chứng tỏ rằng ánh sáng có tính chất hạt. Thí nghiệm hai khe lại chứng

minh rằng ánh sáng thể hiện những tính chất giao thoa của các sóng. Gộp cả hai lại, chúng chứng tỏ rằng ánh sáng có cả tính chất sóng lẫn tính chất hạt. Thế giới vi mô yêu cầu phải vứt bỏ trực giác của chúng ta cho rằng một vật nào đó chỉ có thể sóng hoặc chỉ có thể là hạt và chấp nhận khả năng nó đồng thời là cả hai. Chính ở đây, tuyên bố của Feynman nói rằng “không ai có thể hiểu được cơ học lượng tử” mới thể hiện hết ý nghĩa của nó. Chúng ta có thể phát biểu những cụm từ như “lượng tính sóng hạt”. Chúng ta có thể phiên các từ này thành một hình thức luận toán học có khả năng mô tả được những thí nghiệm trong thế giới thực với một độ chính xác đáng kinh ngạc. Nhưng hiểu được ở mức trực giác và sâu xa đặc tính bí ẩn này của thế giới vi mô là một việc cực kỳ khó khăn.

Các hạt vật chất cũng là sóng

Trong vài ba thập kỷ đầu tiên của thế kỷ XX, nhiều nhà vật lý lý thuyết đã phải vật lộn không mệt mỏi để phát triển một sự hiểu biết vững chắc về mặt toán học và phù hợp về mặt vật lý đối với những đặc điểm tới lúc đó vẫn đang còn ẩn giấu của thực tại vi mô. Chẳng hạn, dưới sự lãnh đạo của Niels Bohr ở Copenhagen, người ta đã đạt được sự tiến bộ rất căn bản trong việc giải thích những tính chất của ánh sáng do các nguyên tử hiđrô bị đốt nóng phát ra. Nhưng công trình này và các công trình khác công bố khoảng giữa những năm 1920, chỉ là sự lấp ghép tạm thời các ý tưởng của thế kỷ XIX với khái niệm lượng tử mới được tìm ra chứ chưa phải là một khuôn khổ nhất quán cho phép mô tả được thế giới vật lý. So với khuôn khổ logic và rõ ràng của các định luật về chuyển động của Newton hay lý thuyết điện từ của Maxwell, thì lý thuyết lượng tử mới xây dựng được một phần vẫn còn đang ở trong tình trạng rối bời.

Năm 1923, một nhà quý tộc trẻ tuổi người Pháp, hoàng tử Louis de Broglie đã đưa một yếu tố mới vào mớ hỗn độn lượng tử, một yếu tố đã giúp đỡ rất nhiều cho việc nhanh chóng xây dựng được một khuôn khổ toán học cho cơ học lượng tử hiện đại và nhờ thế ông đã được trao giải thưởng Nobel về vật lý vào năm 1929. Dựa trên chuỗi những suy luận bắt nguồn từ thuyết tương đối hẹp của Einstein, Louis de Broglie đã đề xuất rằng lượng tính sóng hạt không chỉ áp dụng cho ánh sáng mà còn cho cả vật chất nữa. Nói

một cách nôm na, thì ông đã lập luận như sau: công thức $E = mc^2$ của Einstein liên hệ khối lượng với năng lượng, mặt khác Planck và Einstein lại liên hệ năng lượng với tần số của sóng, từ đó, bằng cách kết hợp hai mối liên hệ vừa nêu, suy ra khối lượng cũng có thể hóa thân dưới dạng sóng. Sau khi nghiên cứu một cách thận trọng theo đường lối suy nghĩ đó, ông đã đề xuất rằng, cũng như ánh sáng là một hiện tượng sóng được lý thuyết lượng tử chứng tỏ nó còn có cả cách mô tả hạt cũng có giá trị không kém, thì nay electron, vốn thường được xem là hạt - cũng còn một cách mô tả sóng và có giá trị không kém. Einstein ngay lập tức ủng hộ ý tưởng của de Broglie, vì nó chính là sự phát triển tự nhiên từ những công trình của ông về thuyết tương đối và photon. Tuy nhiên, thậm chí như vậy đi nữa, cũng không có gì có thể thay thế được sự chứng minh bằng thực nghiệm. Và chẳng bao lâu sau, Clinton Davisson và Lester Germer đã thực hiện được sự chứng minh đó.

Vào giữa những năm 1920, Davisson và Germer, hai nhà vật lý thực nghiệm làm việc tại công ty Bell Telephone, đã tiến hành nghiên cứu bắn một chùm electron lên một tấm niken. Chi tiết duy nhất quan trọng đối với chúng ta, đó là các tinh thể niken trong những thí nghiệm như thế có tác dụng rất giống với hai khe trong thí nghiệm của Young mà ta đã xét ở mục trước. Thực tế, bạn hoàn toàn có quyền xem thí nghiệm này y hệt như thí nghiệm của Young chỉ có khác là bây giờ chùm electron được sử dụng thay cho chùm sáng. Và chúng ta chấp nhận sẽ làm như vậy. Để quan sát và xem xét các electron sau khi cho chúng đi qua hai khe, Davisson và Germer cho chúng đập vào một màn huỳnh quang, màn này có tác dụng ghi lại vị trí mà mỗi electron đập vào bằng một chấm sáng (hệt như đã xảy ra trong máy thu hình). Và họ đã phát hiện được một điều hết sức lý thú, đó là bức tranh mà họ thu được rất giống với bức tranh trên Hình 4.8. Do vậy, thí nghiệm của họ đã chứng minh được rằng các electron cũng làm nảy sinh hiện tượng giao thoa, một dấu hiệu đặc trưng của các sóng. Tại những vết tối trên màn huỳnh quang, các electron bằng cách nào đó “triệt tiêu lẫn nhau” giống như sự chồng lên nhau của một đỉnh và một hõm sóng nước. Thậm chí ngay cả khi chùm electron được bắn ra “thưa thớt” tới mức, chẳng hạn chỉ 1 electron bắn ra trong 1 giây, thì các electron riêng rẽ, mặc dù mỗi lần chỉ tạo nên một vết, nhưng cũng vẫn sẽ tạo thành những vân tối và vân sáng. Cũng như với photon, các electron riêng rẽ bằng cách nào đó “giao thoa” với nhau, theo nghĩa là sau một khoảng thời gian, các electron

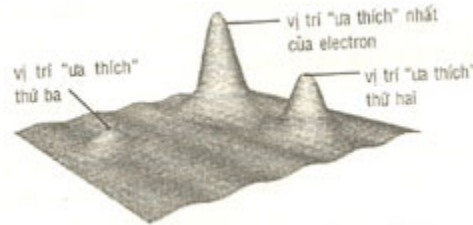
cũng sẽ tạo dựng thành một bức tranh giao thoa gắn liền với các sóng. Vì vậy, chúng ta buộc phải đi tới kết luận rằng mỗi một electron cũng thể hiện đặc tính sóng cùng với đặc tính hạt vốn quen thuộc hơn của nó.

Mặc dù chúng ta đã mô tả điều này chỉ đối với electron, nhưng những thí nghiệm tương tự đã dẫn chúng ta tới kết luận rằng toàn bộ vật chất đều có đặc tính sóng. Nhưng kết luận đó làm thế nào có thể phù hợp với kinh nghiệm hằng ngày của chúng ta về vật chất vốn được xem là rắn, bền vững và chẳng có một chút gì giống với sóng cả? Thật hay là de Broglie đã đưa ra một công thức tính bước sóng của vật chất và nó cho thấy rằng bước sóng này tỷ lệ với hằng số Planck h . (Nói một cách chính xác, bước sóng bằng hằng số Planck chia cho một động lượng của vật). Vì h có giá trị cực nhỏ, nên các bước sóng cũng cực kỳ nhỏ so với thang hằng ngày của chúng ta. Điều này giải thích tại sao đặc tính sóng của vật chất chỉ được thể hiện rõ rệt trong những nghiên cứu vi mô. Cũng giống như giá trị lớn của vận tốc ánh sáng c đã làm che lấp bản chất đích thực của không gian và thời gian, giá trị cực nhỏ của h cũng làm che lấp những khía cạnh sóng của vật chất trong thế giới hằng ngày của chúng ta.

Nhưng các sóng tạo bởi cái gì ?

Hiện tượng giao thoa được phát hiện trong thí nghiệm của Davisson và Germer đã làm cho bản chất sóng của các electron trở nên hiển nhiên. Nhưng các sóng đó tạo bởi cái gì ? Lúc đầu, nhà vật lý người Áo Erwin Schrodinger cho rằng các sóng đó là những electron bị “nhoè” ra. Điều này cũng cho được một ý niệm nào đó về các sóng electron, nhưng còn quá thô thiển. Khi bạn làm cho một vật nào đó nhoè ra, thì nó một phần phải ở đây một phần phải ở kia. Tuy nhiên, người ta chưa bao giờ gặp một phần hai, một phần ba hay một phần nào khác của electron cả. Điều đó khiến cho ta khó có thể hiểu nổi electron bị nhoè ra thực sự như thế nào. Năm 1926, nhà vật lý người Đức Max Born đã đưa ra một cách hiểu khác sau khi đã cải tiến triệt để cách giải thích của Schrodinger. Và cách giải thích đó của Born (sau đó đã được Bohr và các đồng nghiệp của ông khuếch trương) vẫn còn được dùng cho tới hiện nay. Đề xuất của Born là một trong số những đặc điểm lạ lùng nhất của lý thuyết lượng tử, nhưng nó đã được rất nhiều dữ

liệu thực nghiệm xác nhận. Born khẳng định rằng sóng electron cần phải được giải thích trên quan điểm xác suất. Những nơi mà độ lớn (chính xác hơn là bình phương độ lớn) của sóng lớn là những nơi thường tìm thấy electron ở đó hơn; còn những nơi mà độ lớn của sóng nhỏ là những nơi ít có khả năng tìm thấy electron ở đó. Một ví dụ được minh họa trên Hình 4.9.



Hình 4.9. Sóng gắn với electron là lớn nhất ở những nơi thường hay tìm thấy nó nhất và sóng dần dần nhỏ hơn ở những nơi ít tìm thấy nó hơn.

Đây đúng là một ý tưởng kỳ dị. Xác suất thì có liên quan gì tới một lý thuyết cơ bản của vật lý? Chúng ta vốn đã quen với xác suất của các cuộc đua ngựa, của việc tung đồng tiền sấp ngửa và của bàn cờ quay (rulet), nhưng trong những trường hợp đó, điều này chỉ phản ánh sự hiểu biết không đầy đủ của chúng ta mà thôi. Nếu chúng ta biết một cách chính xác tốc độ của vòng rulet, trọng lượng và độ cứng của viên bi đá, điểm rơi và vận tốc của viên bi đó khi thả xuống, những đặc tính chính xác của vật liệu tạo nên các ô ngăn v.v..., thì nhờ các máy tính đủ mạnh và dựa trên vật lý cổ điển, chúng ta có thể tính được chắc chắn viên bi sẽ dừng lại ở ô nào. Sự hoạt động của các sòng bạc là dựa vào chỗ bạn không có khả năng biết được tất cả các thông tin đó và không thực hiện được các tính toán cần thiết trước khi đặt tiền. Nhưng chúng ta thấy rằng xác suất, như ta gặp trong các sòng bạc, không phản ánh một điều gì đặc biệt cơ bản về sự hoạt động của Vũ trụ cả.

Trái lại, cơ học lượng tử đưa khái niệm xác suất vào Vũ trụ ở một mức độ sâu xa hơn nhiều. Theo Born và những thực nghiệm của hơn một nửa thế kỷ sau đó, bản chất sóng của vật chất dẫn tới hệ quả rằng chính bản thân vật chất cần phải được mô tả ở mức cơ bản theo xác suất. Đối với các vật vĩ mô, như cốc cà phê hay vòng rulet, quy tắc của de Broglie cho thấy rằng đặc tính sóng của

chúng thực sự là không thể nhận biết được và đối với phần lớn các mục đích thông thường, thì xác suất gắn liền với cơ học lượng tử có thể hoàn toàn không cần đếm xỉa đến. Nhưng ở cấp độ vi mô, chúng ta biết rằng điều tốt nhất mà chúng ta có thể làm được là nói rằng xác suất để tìm thấy các electron ở một vị trí cụ thể nào đó bằng bao nhiêu.

Cách giải thích xác suất có ưu điểm là nếu như sóng electron có những tính chất như các sóng khác có thể làm được, chẳng hạn như khi đập vào một vật chướng ngại nó tạo ra tất cả các loại gợn sóng khác nhau, thì điều đó không có nghĩa là bản thân electron bị vỡ thành các mảnh riêng rẽ. Mà đúng ra, điều đó nói lên rằng, bây giờ có nhiều vị trí mà xác suất tìm thấy electron ở đó là khác không. Thực tế, điều này có nghĩa là nếu một thí nghiệm cụ thể nào đó về electron được lặp đi lặp lại nhiều lần theo một cách hoàn toàn như nhau, thì mỗi một lần, phép đo vị trí của electron chẳng hạn, sẽ không cho cùng một kết quả. Thay vì thế, sự lặp đi lặp lại liên tiếp của thí nghiệm sẽ cho ta một tập hợp những giá trị khác nhau với tính chất là, số lần electron được tìm thấy tại một vị trí đã cho sẽ do dạng sóng xác suất của nó quyết định. Nếu như sóng xác suất (chính xác hơn là bình phương sóng xác suất) ở vị trí A lớn hơn ở vị trí B hai lần, thì lý thuyết tiên đoán rằng trong dãy lặp lại nhiều lần của thí nghiệm, electron sẽ có mặt tại A hai lần thường xuyên hơn ở B. Chúng ta không thể nào tiên đoán một cách chính xác kết cục của thí nghiệm, điều tốt nhất mà chúng ta có thể làm là tiên đoán được xác suất mà một kết cục nào đó có thể xảy ra.

Tuy vậy, chừng nào mà chúng ta xác định được bằng toán học dạng của các sóng xác suất, thì những tiên đoán có tính chất xác suất vẫn có thể kiểm chứng được bằng cách lặp lại thí nghiệm nhiều lần, từ đó đo được bằng thực nghiệm xác suất nhận được một kết quả này hay khác. Chỉ ít tháng sau đề xuất của de Broglie, Schrodinger đã đi một bước quyết định tiến tới mục đích đó bằng cách thiết lập phương trình chi phối dạng và sự tiến hóa của các sóng xác suất theo thời gian hay như người ta đặt tên cho nó là các hàm sóng. Điều này xảy ra không lâu trước khi phương trình Schrodinger và cách giải thích xác suất của Born được ứng dụng và dẫn tới những tiên đoán cực kỳ chính xác. Do đó mà từ năm 1927, sự vô tư trong trắng kinh điển đã không còn nữa. Đã qua rồi những ngày Vũ trụ hoạt động như một bộ máy đồng hồ,

mà mỗi phần tử cấu thành riêng biệt của nó được đưa vào vận hành tại một thời điểm nào đó trong quá khứ và mãi cán thực thi cái số phận đã được xác định một cách duy nhất và không tránh khỏi của mình. Theo cơ học lượng tử, Vũ trụ tiến hóa theo một hình thức luận toán học chính xác và chặt chẽ, nhưng lý thuyết đó chỉ xác định được xác suất để một tương lai cụ thể nào đó có thể sẽ xảy ra, chứ không chỉ ra được thực sự là tương lai nào.

Nhiều người cho rằng kết luận này là đáng lo ngại và thậm chí không thể chấp nhận được. Trong số đó có cả Einstein. Một trong những phát biểu được truyền tụng nhiều nhất của vật lý học là phát biểu trong đó Einstein cảnh báo lý thuyết lượng tử: “Chúa không chơi trò xúc xắc với Vũ trụ”. Ông cảm thấy rằng xác suất xuất hiện trong vật lý cơ bản, chẳng qua cũng bởi vì cái lý do mà nó đã xuất hiện bên vòng rulet chỉ có điều tinh tế hơn mà thôi: đó là có một sự thiếu sót căn bản trong sự hiểu biết của chúng ta. Vũ trụ, theo quan niệm của Einstein, không có chỗ cho một tương lai mà dạng chính xác của nó lại liên quan tới một yếu tố may rủi. Vật lý phải tiên đoán được Vũ trụ tiến hóa như thế nào chứ không đơn giản chỉ là xác suất để có một khả năng tiến hóa nào đó có thể xảy ra. Nhưng hết thí nghiệm này tới thí nghiệm khác, trong đó có những thí nghiệm có sức thuyết phục nhất được thực hiện sau khi ông qua đời, đã khẳng định một cách dứt khoát rằng Einstein đã sai lầm. Về điểm này, đúng là nhà vật lý người Anh Stephen Hawking đã nói: “Einstein đã nhầm lẫn chứ không phải là thuyết lượng tử” [1].

Tuy nhiên, cuộc tranh luận về ý nghĩa thực sự của cơ học lượng tử vẫn tiếp tục còn gay gắt không hề giảm bớt. Tất cả mọi người đều nhất trí về cách dùng các phương trình của cơ học lượng tử để đưa ra những tiên đoán chính xác. Nhưng lại không nhất trí về chuyện việc có hàm sóng xác suất là thực sự có ý nghĩa gì, hoặc làm thế nào mà một hạt lại có thể “chọn” đi theo một trong số rất nhiều tương lai khả dĩ hoặc về chuyện nó có thực sự chọn lựa hay chỉ là tách ra như một phụ lưu để sống tất cả những tương lai khả dĩ trong vô vàn những Vũ trụ song song. Chỉ riêng những vấn đề này đã xứng đáng là đề tài của cả một cuốn sách dày và thực tế đã có những cuốn sách rất tuyệt vời ủng hộ những cách suy nghĩ này hay khác về cơ học lượng tử. Nhưng có một điều chắc chắn, đó là bất kể bạn giải thích cơ học lượng tử như thế nào đi nữa, thì nó cũng luôn chứng tỏ một cách không thể phủ nhận được rằng, nếu

đứng trên quan điểm của kinh nghiệm hàng ngày của chúng ta, thì Vũ trụ được xây dựng trên những nguyên tắc hết sức bí ẩn.

“Siêu” bài học rút ra từ lý thuyết tương đối cũng như cơ học lượng tử, đó là khi thăm dò sâu vào hoạt động ở mức cơ bản của Vũ trụ, chúng ta sẽ vấp phải những khía cạnh hoàn toàn khác lạ với sự chờ đợi của chúng ta. Sự mạnh dạn đặt ra những câu hỏi sâu sắc như vậy đòi hỏi một sự mềm dẻo chưa thể tiên liệu được, nếu như chúng ta cần phải chấp nhận câu trả lời.

[1] Stephen Hawking, Bài giảng tại Hội nghị về Hấp dẫn, Lỗ đen và Lý thuyết dây, Amsterdam, tháng 7/1997

Quan điểm của Feynman

Richard Feynman là một trong số những nhà vật lý vĩ đại nhất sau Einstein. Ông đã hoàn toàn chấp nhận cái lỗi xác suất của cơ học lượng tử, nhưng trong những năm sau Đại chiến thế giới lần thứ 2, ông đã đưa ra một cách suy nghĩ mới rất có hiệu quả về lý thuyết này. Trên phương diện những tiên đoán bằng số, thì quan điểm của Feynman phù hợp một cách chính xác với tất cả những gì đã có trước đó. Nhưng cách trình bày của ông hoàn toàn khác. Ta sẽ mô tả cách trình bày này trong bối cảnh của thí nghiệm hai khe đối với electron.

Điều gây phiền phức trên Hình 4.8, đó là chúng ta hình dung rằng mỗi electron đi qua hoặc là khe bên trái hoặc là khe bên phải và do đó chúng ta chờ đợi kết quả thu được sẽ là gộp của hai Hình 4.4 và 4.5 như minh họa trên Hình 4.6. Một electron khi đi qua khe bên phải sẽ không cần phải quan tâm có tồn tại khe bên trái hay không và ngược lại. Nhưng thực tế lại không phải như vậy. Bức tranh giao thoa tạo thành đòi hỏi phải có sự hoà trộn và chồng lên nhau của một cái gì đó nhạy cảm với sự tồn tại của hai khe, ngay cả khi chúng ta bắn ra từng electron một. Schrodinger, de Broglie và Born đã giải thích hiện tượng này bằng cách gán một sóng xác suất cho mỗi electron. Giống như các sóng nước trên Hình 4.7, các sóng xác suất của electron “thấy” cả hai khe và chúng là đối tượng của cùng một loại giao thoa, hậu quả hòa trộn giữa chúng với nhau. Những chỗ mà sóng xác suất tăng khi hòa trộn với nhau giống như những chỗ dập dềnh mạnh trên Hình 4.7, đó là những nơi electron thường có mặt hơn; còn những chỗ mà sóng xác suất giảm, thì giống như những chỗ dập dềnh ít nhất hoặc không

dập dềnh trên Hình 4.7, tại đó ít có khả năng tìm thấy electron hoặc không bao giờ tìm thấy nó. Các electron này đập vào màn huỳnh quang từng hạt một, được phân bố theo biên dạng xác suất đó và bằng cách đó tạo dựng nên bức tranh giao thoa giống như trên Hình 4.8.

Feynman đã chọn một chiến thuật khác. Ông đã đặt lại vấn đề về giả thuyết cổ điển cho rằng mỗi electron chỉ có thể hoặc đi qua khe bên trái hoặc đi qua khe bên phải. Bạn có thể nghĩ rằng từ bỏ một tính chất cơ bản và hiển nhiên như thế của sự vật thì thật là nực cười. Xét cho cùng, thì lẽ nào ta không thể quan sát trong khoảng giữa các khe và màn huỳnh quang để xác định electron đã đi qua khe nào hay sao? Bạn hoàn toàn có thể. Nhưng bây giờ bạn lại làm thay đổi điều kiện của thí nghiệm mất rồi. Để quan sát electron, bạn phải làm một điều gì đó đối với nó, ví dụ như chiếu sáng nó chẳng hạn, nói cách khác là cho các photon đập vào nó. Trong cuộc sống hàng ngày, photon là những hạt tử nhỏ bé, nên khi đập vào cây cối, những bức tranh hay con người thì chúng không gây ra tác dụng căn bản nào đối với trạng thái chuyển động của những vật thể vật chất to lớn đó. Nhưng các electron lại là những mẫu vật chất cực nhỏ. Khi bạn tiến hành xác định khe mà electron đi qua, thì dù bạn có thận trọng tới mức nào đi nữa, thì các photon đập vào electron nhất thiết sẽ làm cho chuyển động sau đó của nó thay đổi. Nhưng sự thay đổi đó của chuyển động lại sẽ làm cho kết quả của thí nghiệm thay đổi. Nếu bạn làm nhiều động thí nghiệm tới mức đủ để xác định được electron đi qua khe nào, thì các thí nghiệm sẽ cho thấy rằng kết quả sẽ thay đổi từ Hình 4.8 thành Hình 4.6! Thế giới lượng tử đảm bảo rằng một khi ta đã xác lập được mỗi electron đi qua khe bên trái hay khe bên phải, thì sự giao thoa giữa hai khe cũng sẽ biến mất.

Và như vậy, Feynman hoàn toàn có cơ sở để gạt bỏ sự thách thức đó, bởi vì, mặc dù kinh nghiệm hàng ngày của chúng ta đòi hỏi mỗi electron chỉ đi qua khe này hoặc khe kia, nhưng đến cuối những năm 1920, các nhà vật lý đã thấy rằng mọi ý định kiểm chứng tính chất dường như cơ bản đó của thực tại đều làm hỏng thí nghiệm.

Feynman tuyên bố rằng mỗi electron tới được màn huỳnh quang thực sự đã đi qua cả hai khe. Điều này nghe có vẻ điên rồ, nhưng bạn hãy kiên nhẫn một chút: có những điều còn điên rồ hơn

thể nữa kia. Feynman lập rằng khi đi từ nguồn tới một điểm đã cho trên màn huỳnh quang, mỗi electron riêng rẽ thực sự đã đồng thời đi theo mọi quỹ đạo khả dĩ; một quỹ đạo này được minh họa trên Hình 4.10. Nó đi một cách khá “nghiêm chỉnh” qua khe bên trái. Nhưng đồng thời nó cũng đi một cách khá nghiêm chỉnh qua khe bên phải. Có thể nó tiến tới khe bên trái, rồi đột ngột thay đổi hướng đi qua khe bên phải. Nó cũng có thể đi lui nhiều lần rồi cuối cùng mới đi qua khe bên trái. Có thể nó đi theo một hành trình dài tới tận thiên hà Andromeda trước khi trở về đi qua khe bên trái để tới màn huỳnh quang. Và còn nhiều quỹ đạo khác nữa. Theo Feynman, electron “nêm trái” hết mọi quỹ đạo khả dĩ nối điểm xuất phát với đích cuối cùng của nó.

Feynman đã chứng tỏ được rằng ông có thể gán cho mỗi quỹ đạo đó một con số, sao cho khi lấy trung bình tổ hợp tất cả lại sẽ cho chính xác kết quả đối với xác suất mà người ta tính được khi dùng các hàm sóng. Và như vậy, từ quan điểm của Feynman, không còn cần phải gán cho mỗi electron một sóng xác suất nữa. Thay vì thế, chúng ta lại phải tưởng tượng ra một cái gì đó cũng bí ẩn không kém, nếu không muốn nói là hơn. Xác suất để electron – bây giờ được xem thuần túy là hạt – tới một điểm đã chọn trên màn là kết quả của hiệu ứng tổ hợp của tất cả các cách để nó tới được điểm đó. Phương pháp này của Feynman được gọi là phương pháp “lấy tổng theo mọi quỹ đạo khả dĩ” trong cơ học lượng tử” [1].

Đến đây, chắc bạn sẽ lại lên tiếng phản đối: làm sao một electron lại có thể đồng thời đi theo các con đường khác nhau? Phản đối như vậy kể ra cũng là tự nhiên thôi, nhưng cơ học lượng tử – vật lý của thế giới chúng ta - đòi hỏi rằng chúng ta hãy vứt bỏ những lời phản đối tế nhị như vậy. Những kết quả tính toán bằng cách dùng phương pháp của Feynman đều phù hợp với những kết quả của phương pháp hàm sóng vốn đã được xác nhận là phù hợp rất tốt với thực nghiệm. Bạn hãy để cho tự nhiên quyết định cái gì là có và cái gì là không có ý nghĩa. Như Feynman đã có lần viết: “[Cơ học lượng tử] mô tả tự nhiên một cách vô lý, nếu đứng trên quan điểm của lẽ phải thông thường. Nhưng nó lại hoàn toàn phù hợp với thực nghiệm. Vì vậy, tôi hy vọng rằng các bạn hãy chấp nhận tự nhiên như nó vốn vô lý như thế” [2].

Nhưng bất kể tự nhiên vô lý đến mức nào đi nữa khi xem xét ở thang vi mô, mọi thứ vẫn phải được xếp đặt sao cho chúng ta sẽ tìm lại được những thứ tế nhị quen thuộc trong thế giới hàng

ngày của chúng ta. Để đạt mục đích đó, Feynman đã chứng tỏ được rằng nếu bạn xem xét chuyển động của các vật lớn, như quả bóng, chiếc máy bay hay một hành tinh chẳng hạn, tức là lớn so với những hạt nội nguyên tử, thì quy tắc gán một con số cho mỗi quỹ đạo của ông sẽ đảm bảo rằng, ngoại trừ một quỹ đạo, còn thì tất cả các quỹ đạo khác sẽ triệt tiêu lẫn nhau khi tính đến những đóng góp tổ hợp của chúng. Thực tế, trong số vô hạn những quỹ đạo khả dĩ, chỉ có duy nhất một quỹ đạo là quan trọng, chừng nào có liên quan tới chuyển động của vật. Và nó chính là quỹ đạo mà ta tìm được theo những định luật về chuyển động của Newton. Điều này giải thích tại sao, trong thế giới hàng ngày, dường như đối với chúng ta, những vật này – chẳng hạn như quả bóng được ném lên – lại đi theo một quỹ đạo duy nhất có thể tiên đoán được từ lúc bắt đầu cho tới khi đến đích. Nhưng đối với những vật vi mô, quy tắc gán một số cho mỗi quỹ đạo của Feynman chứng tỏ rằng nhiều quỹ đạo khác nhau đều có thể và thường có đóng góp vào một chuyển động của vật. Chẳng hạn, trong thí nghiệm hai khe, một số các quỹ đạo này đi qua các khe khác nhau làm cho xuất hiện bức tranh giao thoa mà chúng ta đã quan sát được. Do đó, trong thế giới vi mô, chúng ta không thể khẳng định rằng một electron chỉ đi qua một khe này hoặc một khe khác. Bức tranh giao thoa và hình thức luận cơ học lượng tử của Feynman đều chứng tỏ ngược lại.

Những cách giải thích khác nhau về một cuốn sách hay một bộ phim có thể khá bổ ích trong việc giúp chúng ta hiểu được những khía cạnh khác nhau của tác phẩm, điều này cũng đúng đối với những cách tiếp cận khác nhau của cơ học lượng tử. Mặc dù những tiên đoán của các cách tiếp cận này hoàn toàn phù hợp với nhau, nhưng phương pháp hàm sóng và phương pháp lấy tổng theo các quỹ đạo khả dĩ của Feynman sẽ cho chúng ta những cách hiểu khác nhau về những gì diễn ra. Như chúng ta sẽ thấy dưới đây, đối với một số ứng dụng, phương pháp này hay phương pháp kia đều cho chúng ta một khuôn khổ giải thích vô giá.

[1] Điều đáng lưu ý là, cách tiếp cận cơ học lượng tử của Feynman có thể được dùng để suy ra cách tiếp cận dựa trên các hàm sóng và ngược lại; do đó hai cách tiếp cận là hoàn toàn tương đương. Tuy nhiên, các khái niệm, ngôn ngữ và các giải thích của hai cách tiếp cận đó lại khá khác nhau, mặc dù các kết quả của chúng là hoàn toàn như nhau.

[2] Richard Feynman, QED: The Strange Theory of Light and Matter (Princeton: Princeton University Press, 1988).

Tính kỳ lạ lượng tử

Bây giờ chắc bạn đã có một ý niệm về cách vận hành cực kỳ mới lạ của Vũ trụ theo những quy luật của cơ học lượng tử. Nếu bạn vẫn còn chưa cảm thấy choáng váng như Bohr đã nói, thì tính kỳ lạ lượng tử mà chúng ta sắp thảo luận ngay dưới đây chắc chắn sẽ làm cho bạn cảm thấy chóng mặt.

Hiểu được bằng trực giác cơ học lượng tử thậm chí còn khó hơn thuyết tương đối, bởi vì rất khó có thể tư duy như một người tí hon sinh ra và lớn lên trong thế giới vi mô. Tuy nhiên, có một khía cạnh của lý thuyết lượng tử đóng vai trò như một cột chỉ đường cho trực giác chúng ta, vì nó là dấu hiệu phân biệt một cách cơ bản tư duy lượng tử với tư duy cổ điển. Đó là nguyên lý bất định được nhà vật lý người Đức Werner Heisenberg phát minh và năm 1927.

Nguyên lý này bắt nguồn từ sự phản đối, có thể đã từng nảy ra trong đầu óc bạn. Ở trên, chúng ta đã thấy rằng, hành động nhằm xác định khe mà electron đi qua (tức vị trí của nó) nhất thiết sẽ làm nhiễu loạn chuyển động sau đó (tức vận tốc) của nó. Nhưng, cũng như chúng ta có thể đảm bảo chắc chắn sự hiện diện của ai đó bằng cách chạm nhẹ hoặc vỗ nhẹ vào lưng người đó, vậy thì tại sao chúng ta lại không thể xác định vị trí của electron bằng một nguồn sáng “thật dịu nhẹ” để làm giảm ảnh hưởng đến chuyển động của nó? Trên quan điểm của vật lý học thế kỷ XIX, thì điều đó hoàn toàn có thể. Bằng cách dùng một đèn mờ (và một detector nhạy sáng hơn) ta có thể làm cho sự ảnh hưởng tới chuyển động của electron trở nên nhỏ không đáng kể. Nhưng chính cơ học lượng tử đã soi ra sai lầm trong lập luận đó. Như chúng ta đã biết từ phần đầu của chương này, khi chúng ta giảm dần cường độ của nguồn sáng, tức là chúng ta giảm dần số photon do nó phát ra. Một khi chúng ta giảm cường độ xuống tới mức nguồn phát ra từng photon một, thì chúng ta không thể làm mờ ánh sáng hơn được nữa, ngoại trừ tắt nó đi. Như vậy, có một giới hạn lượng tử đối với “độ dịu nhẹ” của sự thăm dò của chúng ta. Và do đó, luôn có một ảnh hưởng cực tiểu mà chúng ta đã gây ra cho vận tốc của electron thông qua phép đo vị trí của nó.

Thật hay điều đó hầu như là đúng đắn! Định luật Planck nói với chúng ta rằng, năng lượng của một photon tỷ lệ với tần số của nó (tức là tỷ lệ nghịch với bước sóng). Do đó, bằng cách dùng ánh sáng có tần số càng thấp (tức bước sóng càng dài), chúng ta có thể

tạo ra các photon riêng rẽ càng dịu nhẹ hơn. Nhưng đây mới là điểm mấu chốt. Khi chúng ta cho một sóng tới đập vào và phản xạ trên một vật, thì thông tin mà chúng ta nhận được chỉ đủ để xác định được vị trí của nó trong phạm vi sai số đúng bằng bước sóng của sóng đó. Để có được một ý niệm trực giác về thực tế quan trọng đó, ta hãy dung mình đang thử xác định vị trí của một khối đá ngầm dựa theo ảnh hưởng của nó đối với các sóng biển đi qua. Khi các sóng tiến tới gần khối đá, chúng tạo thành một đoàn gồm các chu kỳ sóng lên xuống khá trật tự, nối tiếp nhau. Sau khi đi qua khối đá, các chu kỳ sóng riêng rẽ bị biến dạng và đây là dấu hiệu phát lộ sự hiện diện của khối đá ngầm. Cũng giống như những vạch chia nhỏ nhất trên một cái thước, những chu kỳ lên xuống riêng rẽ của sóng cũng là những đơn vị nhỏ nhất tạo nên đoàn sóng và do đó chỉ cần xem xét chúng bị phá vỡ như thế nào là chúng ta có thể xác định được vị trí của khối đá trong phạm vi sai số đúng bằng chiều dài của các chu trình sóng, tức bước sóng của sóng. Trong trường hợp ánh sáng, các photon, nói một cách nôm na, là những chu trình sóng riêng rẽ (với độ cao của chu trình sóng được xác định bằng số photon), do đó, một photon được dùng để xác định vị trí của một vật chỉ với độ chính xác bằng một bước sóng.

Và như vậy, chúng ta phải đối mặt với trò giữ thăng bằng lượng tử. Nếu dùng ánh sáng có tần số cao (bước sóng ngắn), chúng ta sẽ xác định được vị trí của electron với độ chính xác cao. Nhưng các photon có tần số cao lại có năng lượng lớn và do đó, nó làm cho vận tốc của electron thay đổi mạnh. Còn nếu dùng ánh sáng có tần số thấp (bước sóng dài) chúng ta sẽ làm giảm thiểu ảnh hưởng của photon đến chuyển động của electron vì các photon lúc này có năng lượng nhỏ, nhưng chúng ta lại phải trả giá bằng độ chính xác thấp trong việc xác định vị trí của electron. Heisenberg đã định lượng hóa sự cạnh tranh đó và tìm được một hệ thức toán học giữa độ chính xác đạt được khi đo vị trí của electron và độ chính xác đạt được khi đo đồng thời vận tốc của nó. Hoàn toàn phù hợp với sự thảo luận ở trên của chúng ta, Heisenberg đã tìm thấy rằng, hai độ chính xác đó tỷ lệ nghịch với nhau. Độ chính xác trong phép đo vị trí càng lớn thì nhất thiết phải kéo theo độ mất chính xác trong phép đo vận tốc cũng càng lớn và ngược lại. Và điều quan trọng nhất, đó là mặc dù chúng ta đã gán việc đo vị trí của electron với một thí nghiệm cụ thể, nhưng Heisenberg đã chứng minh được rằng, sự dung hòa giữa độ chính

xác của các phép đo vị trí và vận tốc là một sự kiện có tính chất cơ bản, nó đúng bất kể ta dùng thiết bị hay thủ tục đo nào. Không giống như lý thuyết của Newton hay Einstein, trong đó chuyển động của hạt được mô tả bằng cách cho vị trí và vận tốc của nó, cơ học lượng tử cho thấy rằng, ở cấp độ vi mô, bạn không thể biết đồng thời vị trí và vận tốc của hạt một cách hoàn toàn chính xác. Hơn thế nữa, khi bạn biết đại lượng này càng chính xác thì lại biết đại lượng kia càng kém chính xác. Và mặc dù chúng ta đã mô tả điều này chỉ cho electron, nhưng những ý tưởng đó cũng áp dụng được trực tiếp cho tất cả các hạt đã tạo nên Vũ trụ chúng ta.

Einstein đã cố gắng giảm thiểu tối đa sự xa rời vật lý cổ điển mà ta vừa nói ở trên, bằng cách lập luận rằng mặc dù cơ học lượng tử đã làm xuất hiện một giới hạn đối với sự hiểu biết của chúng ta về vị trí và vận tốc, nhưng electron bản thân nó vẫn có một vị trí và vận tốc xác định đúng như chúng ta đã nghĩ. Tuy nhiên, trong suốt vài ba chục năm trở lại đây, sự tiến bộ về mặt lý thuyết do nhà vật lý người Ailen đã quá cố là John Bell làm tiên phong và những kết quả thực nghiệm của Alain Aspect và các cộng sự của ông đã chứng tỏ một cách thuyết phục rằng Einstein sai lầm. Các electron - cũng như tất cả các hạt khác của vật chất - không thể được mô tả đồng thời bởi vị trí và vận tốc của nó. Cơ học lượng tử chứng tỏ rằng không chỉ phát biểu đó đã được kiểm chứng bằng thực nghiệm mà nó còn mâu thuẫn với những kết quả thực nghiệm khác mới được xác lập gần đây.

Thực tế, nếu chúng ta nhốt một electron duy nhất vào trong một hộp cứng và cho các thành hộp từ từ áp lại gần nhau để xác định vị trí của nó, thì ta sẽ thấy rằng electron chuyển động ngày càng điên cuồng hơn. Cứ như là mắc chứng sợ hãi những nơi bị che kín, electron sẽ vùng vẫy ngày càng quyết liệt và va chạm vào thành hộp với vận tốc ngày càng lớn và hỗn loạn không thể tiên đoán được. Tự nhiên không cho phép những hạt cấu tạo nên nó bị dồn vào một góc. Trong quán Lượng tử, nơi mà chúng ta đã tưởng tượng hằng số Planck h lớn hơn nhiều so với trong thế giới thực, bằng cách đó ta đã làm cho các vật trong đời sống hàng ngày trở thành đối tượng trực tiếp của hiệu ứng lượng tử, những cục đá trong ly rượu của Goerge và Gracie va chạm điên cuồng vào nhau vì chúng cũng mắc chứng sợ chỗ kín “lượng tử”. Mặc dù quán Lượng tử chỉ là tưởng tượng - vì thực tế cục kỳ nhỏ - nhưng chính chứng sợ chỗ kín lượng tử này lại là một đặc tính hiện diện khắp

nơi trong thế giới vi mô. Chuyển động của các hạt vi mô trở nên điên cuồng hơn khi chúng được xem xét và bị nhốt trong một vùng không gian nhỏ bé hơn.

Nguyên lý bất định cũng làm xuất hiện một hiệu ứng kỳ lạ gọi là hiệu ứng đường hầm. Nếu như bạn bắn một viên đạn nhựa vào một bức tường bê tông dày 10m, thì vật lý cổ điển cũng như trực giác của bạn đều cho một kết quả: đó là viên đạn sẽ bật ngược trở lại. Lý do là ở chỗ viên đạn không có đủ năng lượng để xuyên qua một vật cản đồ sộ như vậy. Nhưng ở cấp độ các hạt cơ bản, cơ học lượng tử đã chứng tỏ một cách hoàn toàn rõ ràng rằng các hàm sóng, tức là các sóng xác suất, của các hạt tạo nên viên đạn có một phần rất nhỏ ló ra được ở phía bên kia bức tường. Điều này có nghĩa là, có một cơ may rất nhỏ, nhưng khác không, để viên đạn có thể thực sự xuyên qua bức tường và ló ra ở phía bên kia. Làm sao có thể thực hiện được điều đó? Và một lần nữa, lại là nguyên lý bất định Heisenberg.

Để hiểu phần này, hãy tưởng tượng bạn đang ở trong tình trạng cực kỳ túng quẫn và đột nhiên được biết rằng một người họ hàng xa sống ở nước ngoài để lại cho bạn một gia tài kék xù. Vấn đề là ở chỗ bạn không có tiền để mua vé máy bay tới đó. Bạn xin ý kiến bạn bè: chỉ cần họ giúp bạn vượt qua được bức rào chắn giữa bạn và cái gia tài kék xù kia bằng cách cho bạn vay tạm một ít tiền để mua vé, thì bạn có thể trả “đẹp” cho họ khi trở về. Nhưng tiếc thay không ai trong số họ có tiền cho vay cả. Chợt nhớ ra một người bạn cũ làm việc tại một hãng hàng không, bạn liền tới cầu khẩn anh ta. Anh này cũng lại không có tiền cho vay, nhưng đưa ra một giải pháp. Hệ thống kế toán của hãng hàng không này cho phép bạn trả tiền trong vòng 24 giờ sau khi bạn tới nơi, không ai biết bạn chưa trả tiền vé trước khi bay cả. Nhờ mưu mẹo đó bạn có thể nhận được tài sản thừa kế của mình.

Thủ tục kế toán của cơ học lượng tử hoàn toàn tương tự. Ngoài việc chứng tỏ được rằng sự dung hòa giữa độ chính xác của các phép đo vị trí và vận tốc, Heisenberg cũng đã chứng minh được có một sự dung hòa tương tự giữa độ chính xác của phép đo năng lượng và khoảng thời gian tiên hành phép đo. Cơ học lượng tử khẳng định rằng bạn không thể nói chính xác một hạt có năng lượng bằng bao nhiêu ở thời điểm nào. Nếu bạn càng tăng độ chính xác của phép đo năng lượng, thì thời gian đòi hỏi để thực hiện phép đo đó sẽ càng dài. Nói một cách thô thiển, điều này có nghĩa

là năng lượng của hạt sẽ thắng giáng ghê gớm chừng nào mà sự thắng giáng đó diễn ra trong thời gian đủ ngắn. Như vậy, giống như hệ thống kế toán của hãng hàng không “cho phép” bạn “vay” tiền để mua vé máy bay, miễn là bạn trả lại đủ nhanh, cơ học lượng tử cũng cho phép hạt vay năng lượng, miễn là nó phải hoàn trả trong khoảng thời gian được xác định bởi nguyên lý bất định Heisenberg.

Những tính toán của cơ học lượng tử chứng tỏ rằng rào chắn năng lượng càng cao, thì xác suất để sự hạch toán vi mô sáng tạo đó thực sự xảy ra càng thấp. Nhưng đối với hạt vi mô đứng trước một tấm bê tông dày, chúng có thể và đôi khi đã vay được đủ năng lượng để làm cái mà theo vật lý cổ điển không thể làm được, cụ thể là tức thời đâm xuyên và chui hầm qua một vùng mà ban đầu chúng không có đủ năng lượng để đi vào. Khi những đối tượng mà chúng ta nghiên cứu ngày càng phức tạp hơn, chứa nhiều hạt thành phần hơn, sự chui hầm lượng tử vẫn có thể xảy ra, nhưng càng ít cơ may hơn vì tất cả các hạt riêng rẽ phải cùng cơ may chui hầm cùng với nhau. Nhưng những cảnh kỳ lạ như điều xì gà biến mất, cục đá chui qua thành cốc và Goerge cùng với Gracie đi xuyên qua bức tường của quán Lượng tử, vẫn có thể xảy ra.

Trong một xứ sở viễn tưởng như quán Lượng tử, trong đó ta tưởng tượng hằng số Planck h có giá trị lớn, việc xuyên hầm lượng tử như thế là chuyện bình thường. Nhưng những quy tắc tính xác suất của cơ học lượng tử và đặc biệt là sự cực kỳ nhỏ thực sự của hằng số h trong thế giới thực, cho thấy rằng nếu bạn đi được trong bức tường 1 giây, thì bạn phải đợi lâu hơn cả tuổi hiện nay của Vũ trụ để mới có cơ may đi qua được nó. Tuy nhiên, với sự kiên nhẫn (và cả tuổi thọ) thiên thu như vậy, sớm hay muộn, bạn có thể xuất hiện ở phía bên kia bức tường.

Nguyên lý bất định thu tóm được cái cốt lõi của cơ học lượng tử. Những tính chất mà chúng ta thường cho là cơ bản và nằm ngoài mọi sự nghi vấn, chẳng hạn như các vật đều có vị trí và vận tốc đồng thời xác định, có năng lượng xác định ở những thời điểm xác định, thì bây giờ được xem chẳng qua chỉ là những “thứ đồ” giả do hằng số Planck quá nhỏ bé ở những thang thuộc thế giới hàng ngày. Một điểm cuối cùng và cũng là điểm có tầm quan trọng hàng đầu, đó là khi những đặc tính lượng tử này được áp dụng cho cấu trúc của không-thời gian, thì nó cho thấy những khiếm khuyết tai hại trong “các mắt xích hấp dẫn” và dẫn chúng ta tới cuộc xung đột

thứ ba và cũng là chủ yếu mà vật lý học phải đối mặt trong thế kỷ qua.

CHƯƠNG 5

MÂU THUẬN GIỮA THUYẾT TƯƠNG ĐỐI RỘNG VÀ CƠ HỌC LƯỢNG TỬ: TIẾN TỚI MỘT LÝ THUYẾT MỚI

Sự hiểu biết của chúng ta về thế giới vật lý đã được đào sâu hơn một cách đáng kể trong suốt thế kỷ XX. Nhờ những công cụ lý thuyết của cơ học lượng tử và thuyết tương đối rộng, chúng ta đã hiểu và tiên đoán được nhiều hiệu ứng vật lý có thể đo lường được từ thế giới nội nguyên tử cho đến thế giới các thiên hà, các cụm thiên hà và thậm chí tới cả Vũ trụ trong tổng thể của nó. Đó là cả một thành tựu đồ sộ. Lẽ nào không đáng phấn khởi khi mà con người bị giam trên một hành tinh quay quanh một ngôi sao cũng tẻ nhạt như hàng triệu ngôi sao khác, lại nằm ở gần mép một thiên hà cũng bình thường thôi, thế mà bằng tư duy và thực nghiệm của mình, lại có thể làm sáng tỏ và hiểu được những đặc tính bí ẩn nhất của thế giới vật lý. Tuy nhiên, do bản chất của mình, các nhà vật lý sẽ không thỏa mãn chừng nào mà sự hiểu biết cơ bản nhất và sâu sắc nhất về Vũ trụ còn chưa đạt được. Đó là cái mà Stephen Hawking xem là bước đầu tiên tiến tới hiểu được “tinh thần của Chúa” [1].

Có rất nhiều những bằng chứng cho thấy cơ học lượng tử và thuyết tương đối rộng còn chưa cung cấp cho chúng ta sự hiểu biết đạt tới trình độ sâu sắc nhất đó. Vì những lĩnh vực ứng dụng thông thường của chúng rất khác nhau, khiến cho đa số những tình huống đòi hỏi sử dụng cơ học lượng tử hoặc chỉ thuyết tương đối rộng, chứ không yêu cầu phải dùng cả hai. Tuy nhiên, trong những điều kiện cực đoan, khi mà các vật có khối lượng cực lớn nhưng lại có kích thước cực nhỏ, chẳng hạn như ở gần tâm của các lỗ đen hay toàn bộ Vũ trụ ở thời điểm Big Bang, thì để hiểu được, chúng ta cần phải dùng cả thuyết tương đối rộng lẫn cơ học lượng tử. Nhưng cũng giống như khi trộn thuốc súng với lửa, khi chúng ta thử tổ hợp cơ học lượng tử với thuyết tương đối rộng, thì sự kết hợp đó mang lại những tai biến ghê gớm. Khi những phương trình

của hai lý thuyết đó được kết hợp với nhau, thì nhiều bài toán vật lý được đặt rất nghiêm chỉnh lại cho những đáp số vô nghĩa. Sự vô nghĩa này thường có dạng là một tiên đoán nói rằng xác suất (tính theo cơ học lượng tử) của một quá trình nào đó không phải là 20% hay 73% hay 91% mà lại là vô hạn. Làm thế nào mà xác suất lại có thể lớn hơn 1, chứ chưa nói tới chuyện bằng vô cùng? Chúng ta buộc phải đi tới kết luận rằng có một điều gì đó đã sai một cách nghiêm trọng. Bằng cách xem xét một cách kỹ lưỡng những tính chất cơ bản của thuyết tương đối rộng và cơ học lượng tử, chúng ta có thể nhận dạng ra đó là cái gì.

[1] Stephen Hawking, *Lược sử thời gian* (Bản dịch của Cao Chi và Phạm Văn Thiều, NXB Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội, 1995, 1998).

Trái tim của cơ học lượng tử

Khi Heisenberg phát minh ra nguyên lý bất định, vật lý học đã ngoặt hẳn sang một lối khác và không bao giờ trở lại con đường xưa cũ nữa. Xác suất, hàm sóng, giao thoa và lượng tử, tất cả đều liên quan với những cách nhìn nhận thực tại một cách hoàn toàn mới. Tuy nhiên, một nhà vật lý “cổ điển” ngoan cố chắc vẫn còn bám lấy hy vọng mong manh rằng những chuyện viển vông đó rồi cuối cùng cũng sẽ lại trở về gần gũi với khuôn khổ tư duy cũ mà thôi. Nhưng nguyên lý bất định đã làm tan vỡ hẳn mọi ý định trở về với quá khứ.

Nguyên lý bất định cho chúng ta biết rằng Vũ trụ là một nơi rất náo nhiệt khi được xem xét ở những khoảng cách ngày càng nhỏ hơn và ở những thời gian ngày càng ngắn hơn. Chúng ta đã thấy một số bằng chứng về điều đó ở chương trước, trong ý đồ của chúng ta muốn xác định vị trí của các hạt sơ cấp, như các hạt electron chẳng hạn: bằng cách chiếu ánh sáng với tần số cao hơn lên các electron, chúng ta sẽ đo được vị trí của nó với độ chính xác cao hơn, nhưng lại phải trả giá, bởi vì những quan sát của chúng ta sẽ gây ra những nhiễu động mạnh hơn. Photon tần số cao có năng lượng lớn và do đó nó cho các electron những “cú hích” mạnh hơn và làm cho vận tốc của chúng thay đổi nhiều hơn. Giống như sự nhốn nháo trong một căn phòng đầy trẻ con, tất cả những vị trí tức thời của chúng, bạn đều biết với độ chính xác cao, nhưng vận tốc của chúng - cả hướng và độ lớn - thì bạn hầu như không sao kiểm soát nổi, sự không có khả năng biết đồng thời cả vị trí và vận

tốc của các hạt sơ cấp cũng chỉ ra rằng thế giới vi mô về bản chất vốn đã là rất náo động.

Mặc dù ví dụ đó đã chuyển tải được mối quan hệ cơ bản giữa tính bất định và sự náo động, nhưng thực sự nó mới hé lộ chỉ một phần của câu chuyện mà thôi. Chẳng hạn, nó có thể dẫn bạn đến ý nghĩ rằng sự bất định xuất hiện chỉ là do sự quan sát vụng về của chúng ta. Nhưng điều đó không đúng. Ví dụ về một electron phản ứng dữ dội khi bị giam trong một hộp nhỏ bằng cách chuyển động hỗn loạn với vận tốc lớn, có lẽ, gần với sự thực hơn. Ngay cả khi không có những “cú hích trực tiếp” của các photon gây nhiễu động của nhà thực nghiệm, vận tốc của các electron từ thời điểm này tới thời điểm tiếp sau vẫn thay đổi một cách đáng kể và không thể tiên đoán được. Nhưng ví dụ này cũng không phản ánh hết những đặc tính lạ lùng mà nguyên lý bất định Heisenberg ban cho thế giới vi mô. Thậm chí trong những tình huống yên tĩnh nhất mà ta có thể tưởng tượng được ra, như khoảng không gian trống rỗng chẳng hạn, nguyên lý bất định cũng nói với chúng ta rằng, trên quan điểm vi mô, ở đây cũng có sự hoạt động rất náo nhiệt. Và sự hoạt động này sẽ càng náo nhiệt ở những thang khoảng cách và thời gian còn nhỏ hơn nữa.

“Hệ thống kế toán” lượng tử có vai trò rất căn bản giúp ta hiểu được điều đó. Trong chương trước chúng ta đã thấy rằng, hạt (như electron chẳng hạn) có thể tạm thời vay năng lượng để vượt qua một rào chắn thực sự nào đó, cũng như bạn tạm thời vay tiền để vượt qua một trở ngại tài chính lớn. Điều này là đúng. Nhưng cơ học lượng tử buộc chúng ta phải đưa sự tương tự đó đi thêm một bước quan trọng nữa. Hãy hình dung một con nợ kinh niên, chạy vay hết người bạn này đến người bạn khác để hỏi vay tiền. Giả sử rằng thời gian mà người bạn cho vay càng ngắn, thì khoản tiền được vay càng lớn. Bằng cách vay rồi trả, vay rồi trả, cứ liên tục như vậy không mệt mỏi, anh ta nhận tiền chỉ để trả lại sao cho nhanh hơn. Giống như giá cả chứng khoán trong ngày lên xuống như điên, số tiền mà con nợ kinh niên của chúng ta có được thường xuyên chịu những thăng giáng rất lớn, nhưng xét cho tới cùng thì tình trạng tài chính của anh ta cũng không gì hơn lúc ban đầu.

Nguyên lý bất định Heisenberg khẳng định rằng, sự xê dịch tới lui như điên của năng lượng và động lượng (hay vận tốc) cũng xảy ra thường xuyên trong Vũ trụ ở những khoảng cách và những khoảng thời gian vi mô. Thậm chí trong vùng không gian trống

rỗng chẳng hạn, nguyên lý bất định cũng nói rằng năng lượng và động lượng đều bất định: chúng thăng giáng giữa các giá trị biên càng xa nhau khi kích thước của hộp càng nhỏ dần. Điều đó tựa như vùng không gian trống rỗng bên trong hộp là một “con nợ kinh niên”, nó thường xuyên “vay” từ Vũ trụ rồi sau đó lại “trả lại”. Nhưng trong một vùng trống của không gian thì cái gì tham gia vào những cuộc trao đổi đó? Tất cả. Thực sự là tất cả. Nhưng năng lượng (và cả động lượng nữa) là đồng tiền trao đổi cuối cùng. Công thức $E = mc^2$ nói với chúng ta rằng năng lượng có thể biến thành vật chất và ngược lại. Như vậy, nếu những thăng giáng năng lượng là đủ lớn, thì nó tức thời có thể sinh ra, chẳng hạn, một electron cùng với người bạn phản vật chất của nó là hạt positron, thậm chí nếu vùng không gian đó ban đầu là trống rỗng! Vì năng lượng này cần phải trả lại nhanh, nên sau khoảng khắc hai hạt này sẽ hủy nhau để hoàn trả năng lượng mà chúng vay để sinh thành. Và điều này cũng đúng đối với tất cả các dạng khác mà năng lượng và động lượng có thể có, chẳng hạn như các cặp hạt khác được sinh ra rồi hủy nhau, những dao động điên cuồng của các trường sóng điện từ, những thăng giáng của trường lực mạnh và yếu... Như vậy, sự bất định lượng tử cho chúng ta biết rằng, ở thang vi mô Vũ trụ là một vũ đài lúc nhúc, náo nhiệt và hỗn loạn. Như Feynman đã có lần nói đùa: “Sinh và hủy, sinh và hủy... phí biết bao là thời gian!”. Vì vay và trả lấy trung bình sẽ triệt tiêu lẫn nhau, nên vùng không gian trống rỗng nhìn bề ngoài vẫn yên tĩnh và phẳng lặng khi người ta không quan sát với độ chính xác vi mô. Tuy nhiên, nguyên lý bất định phát lộ cho thấy rằng sự trung bình hóa vĩ mô đã làm che lấp đi những hoạt động vi mô rất phong phú và náo nhiệt [1]. Và như chúng ta sẽ thấy ngay dưới đây, chính sự náo nhiệt này đã là trở ngại cho sự sáp nhập thuyết tương đối rộng với cơ học lượng tử.

[1] Trong trường hợp bạn vẫn còn băn khoăn về chuyện làm sao mà lại có thể xảy ra một điều gì đó ở trong một vùng không gian trống rỗng, thì điều quan trọng cần phải nhận thấy là nguyên lý bất định đã đặt một giới hạn cho biết một vùng không gian có thể thực sự là “trống rỗng” như thế nào; nguyên lý này cũng làm thay đổi cái mà chúng ta muốn nói là trống rỗng. Ví dụ, khi được áp dụng cho những nhiễu động sóng trong một trường (như các sóng điện từ truyền trong trường điện từ) thì nguyên lý bất định chứng tỏ rằng biên độ của sóng và tốc độ thay đổi của biên độ đó phải thỏa mãn cùng một hệ thức tỷ lệ nghịch như vị trí và vận tốc

của một hạt: biên độ của sóng càng được xác định chính xác thì tốc độ biến thiên của biên độ đó càng kém xác định. Bây giờ, khi chúng ta nói một vùng không gian là trống rỗng, thì thường chúng ta muốn nói rằng, ngoài những điều khác ra, không có một sóng nào truyền qua nó và tất cả các trường đều có giá trị bằng không. Điều này cũng có nghĩa là biên độ của tất cả các sóng cũng có giá trị chính xác bằng không. Nhưng nếu như chúng ta biết biên độ một cách chính xác, thì theo nguyên lý bất định, tốc độ biến thiên của các biên độ đó là hoàn toàn bất định và có thể nhận bất kỳ giá trị nào. Nhưng nếu các biên độ thay đổi, thì điều này có nghĩa là ở thời điểm tiếp sau các biên độ không còn bằng không nữa, thậm chí mặc dù vùng không gian vẫn còn “trống rỗng”. Lại một lần nữa, về trung bình, trường đúng là bằng không vì ở một số chỗ giá trị của nó là dương và ở một số chỗ khác giá trị của nó là âm; về trung bình, năng lượng tổng cộng trong vùng đó cũng không thay đổi. Nhưng điều đó chỉ là về trung bình mà thôi. Tính bất định lượng tử ngụ ý rằng năng lượng trong trường - ngay cả ở trong vùng trống rỗng của không gian - thăng giáng lên xuống, với mức độ thăng giáng càng lớn khi các thang khoảng cách và thời gian càng nhỏ. Năng lượng được thể hiện trong những thăng giáng tức thời như vậy, nhờ công thức $E=mc^2$, có thể được chuyển hóa để sinh ra tức thời cặp hạt - phản hạt, rồi sau đó chúng vội vã hủy nhau để giữ cho năng lượng về trung bình không thay đổi.

Lý thuyết trường lượng tử

Trong suốt những năm 30 và 40 của thế kỷ XX, các nhà vật lý lý thuyết dưới sự dẫn dắt của Paul Dirac, Wolfgang Pauli, Julian Schwinger, Freeman Dyson, Sin-Intiro Tomonaga, Feynman và nhiều người khác, đã nỗ lực không mệt mỏi để tìm ra một hình thức luận có khả năng mô tả được sự náo động của thế giới vi mô mà ta đã đề cập ở trên. Họ đã nhận thấy rằng phương trình sóng của Schrodinger (xem Chương 4) thực ra chỉ là sự mô tả gần đúng của vật lý vi mô - một sự gần đúng đã cho kết quả rất tốt khi người ta chưa thăm dò sâu hơn vào sự náo động vi mô đó (cả về lý thuyết lẫn thực nghiệm), nhưng chắc chắn sẽ thất bại nếu người ta đi sâu hơn.

Một yếu tố căn bản của vật lý học mà Schrodinger đã bỏ qua trong hình thức luận cơ học lượng tử của ông là thuyết tương đối

hẹp. Thực ra, ban đầu Schrodinger đã thử gộp cả thuyết tương đối hẹp vào, nhưng phương trình lượng tử mà ông nhận được khi đó lại cho những tiên đoán không phù hợp với những phép đo thực nghiệm đối với nguyên tử hiđrô. Điều đó khiến cho Schrodinger chấp nhận truyền thống lâu đời trong vật lý, đó là truyền thống chia để trị: thường là sẽ rất có kết quả nếu ta đi từng bước nhỏ rồi lần lượt tính tới những phát minh mới nhất, hơn là nhảy một bước lớn bằng cách gộp tất cả những gì chúng ta đã biết về thế giới vật lý để xây dựng một lý thuyết mới. Schrodinger đã tìm kiếm và cuối cùng đã tìm ra một khuôn khổ toán học mô tả được lưỡng tính sóng hạt (đã được xác minh bằng thực nghiệm), nhưng ở giai đoạn còn sơ khai đó, ông đã không gộp được cả thuyết tương đối hẹp vào hình thức luận của mình[1].

Nhưng chẳng bao lâu các nhà vật lý đã nhận thấy rằng thuyết tương đối hẹp phải đóng vai trò trung tâm trong một lý thuyết lượng tử đích thực. Sở dĩ như vậy là bởi vì sự náo nhiệt cuồn loạn trong thế giới vi mô đòi hỏi chúng ta phải thừa nhận rằng bản thân năng lượng có thể có nhiều cách thể hiện do hệ thức nổi tiếng $E = mc^2$, một kết quả thuyết tương đối hẹp. Bỏ qua thuyết tương đối hẹp là Schrodinger đã bỏ qua khả năng biến đổi lẫn nhau giữa năng lượng, vật chất và chuyển động.

Ban đầu, để sáp nhập thuyết tương đối hẹp với cơ lượng tử, các nhà vật lý tập trung nỗ lực đột phá nhằm vào lực điện từ và sự tương tác của nó với vật chất. Nhờ một loạt những phát triển đầy cảm hứng, họ đã cho ra đời điện động lực học lượng tử, lý thuyết đơn giản nhất trong số các lý thuyết trường lượng tử. Lý thuyết này là lượng tử, bởi vì tất cả những khía cạnh xác suất và bất định đã được bao hàm ngay trong nền tảng của nó. Nó cũng là lý thuyết trường, bởi vì nó sáp nhập những nguyên lý lượng tử với một khái niệm cổ điển đã có từ trước, đó là trường lực - trong trường hợp của ta, đó là trường điện từ của Maxwell. Và cuối cùng, nó là tương đối tính, bởi vì thuyết tương đối hẹp đã được bao hàm ngay trong nền tảng của nó. (Để hình dung một trường lượng tử xuất phát từ một trường cổ điển - một đại dương các đường sức không nhìn thấy được thấm đẫm toàn bộ không gian, chúng ta cần phải hoàn tất hình ảnh này trên hai phương diện. Thứ nhất, cần phải hình dung rằng một trường lượng tử gồm các phần tử hạt, như photon đối với trường điện từ, chẳng hạn. Thứ hai, năng lượng được thể hiện dưới dạng chuyển động và khối lượng của các hạt đó. Năng lượng không

ngừng chuyển từ trường lượng tử này sang trường lượng tử khác trong khi đó các trường dao động trong không gian và thời gian).

Điện động lực học lượng tử có lẽ là lý thuyết chính xác nhất trong số các lý thuyết mô tả các hiện tượng tự nhiên đã từng được đưa ra. Một minh họa cho tính chính xác đáng ngạc nhiên đó là công trình của Toichiro Kinoshita, một nhà vật lý hạt ở đại học Cornell. Ba mươi năm trước, ông đã cần mẫn dùng điện động lực học lượng tử tính toán một số tính chất chi tiết của electron. Những tính toán của Kinoshita kín đặc hàng ngàn trang giấy và cuối cùng phải dùng tới những máy tính mạnh nhất trên thế giới mới thực hiện được. Nhưng những nỗ lực của ông đã được đền bù: những tính toán này đưa ra các tiên đoán và đã được thực nghiệm xác nhận với độ chính xác cao hơn 1 phần tỷ. Đây là sự phù hợp hết sức đáng kinh ngạc giữa những tính toán lý thuyết trừu tượng và thế giới thực tại. Thông qua điện động lực học lượng tử, các nhà vật lý đã củng cố vững chắc vai trò của các photon như là “những gói ánh sáng nhỏ nhất khả dĩ” và làm sáng tỏ tương tác của chúng với các hạt tích điện (như các electron, chẳng hạn) trong một khuôn khổ hoàn chỉnh về mặt toán học, có khả năng tiên đoán và giàu sức thuyết phục.

Thành công của điện lực học lượng tử đã cổ vũ các nhà vật lý khác trong những năm 60 và 70 của thế kỷ XX dùng một cách tiếp cận tương tự để phát triển sự hiểu biết lượng tử về các lực yếu, mạnh và hấp dẫn. Đối với các lực yếu và mạnh con đường chinh phục này tỏ ra rất có kết quả. Tương tự với điện động lực học lượng tử, các nhà vật lý đã xây dựng thành công các lý thuyết trường lượng tử cho các lực yếu và mạnh với tên gọi tương ứng là sắc động lực học lượng tử và lý thuyết điện - yếu lượng tử. Cái tên “sắc động lực học lượng tử” nghe có vẻ màu mè hơn cái tên lẽ ra phải gọi theo logic tự nhiên là “động lực học lượng tử của tương tác mạnh”, nhưng chẳng qua đây cũng chỉ là tên gọi mà thôi, chẳng có ý nghĩa sâu xa gì. Trái lại, cái tên “điện - yếu” đã đại diện được bước ngoặt quan trọng trong sự hiểu biết của chúng ta về các lực của tự nhiên.

Sheldon Glashow, Abdus Salam và Steven Weinberg đã được trao giải Nobel vì họ đã thống nhất được tương tác yếu với tương tác điện từ. Những công trình của họ đã chứng tỏ được rằng lý thuyết lượng tử của các trường này có thể được thống nhất một cách tự nhiên, mặc dù những thể hiện của chúng trong thế giới xung quanh chúng ta là rất khác nhau. Xét cho cùng thì các

trường lực yếu giảm rất nhanh tới không ở ngoài thang dưới nguyên tử, trong khi đó thì các trường điện từ - như ánh sáng nhìn thấy, tia X, các tín hiệu phát thanh và truyền hình - đều hiện diện ở mọi thang khoảng cách. Tuy nhiên, Glashow, Salam và Weinberg đã chứng tỏ được rằng, ở những năng lượng và nhiệt độ đủ cao - như ở những phần giây đầu tiên sau Big Bang - lực điện từ và lực yếu lại hòa vào nhau, có những đặc tính không thể phân biệt được và do đó được gọi chính xác hơn là các trường điện - yếu. Khi nhiệt độ giảm xuống, như đã xảy ra sau Big Bang, lực điện từ và lực yếu kết tinh rời ra thông qua một quá trình có tên là phá vỡ đối xứng mà chúng ta sẽ nói tới dưới đây và do đó chúng trở nên khác nhau trong thế giới lạnh mà chúng ta hiện đang sống.

Tóm lại, vào những năm 70, các nhà vật lý đã đưa ra được sự mô tả lượng tử thỏa đáng ba trong số bốn lực (mạnh, yếu và điện từ) và đã chứng tỏ được rằng hai trong số ba lực đó (yếu và điện từ) có cùng một nguồn gốc (là lực điện - yếu). Trong suốt hai thập kỷ qua, rất nhiều thực nghiệm đã được tiến hành để kiểm chứng những lý thuyết lượng tử của ba lực “phi hấp dẫn” đó - khi chúng tương tác với nhau và với các hạt vật chất được nêu trong Chương 1. Lý thuyết này đã vượt qua tất cả các thử thách đó một cách vẻ vang. Sau khi các nhà thực nghiệm đã tiến hành đo được khoảng 19 tham số [gồm khối lượng và các tích lực (tương tự như điện tích) của các hạt liệt kê trong Bảng 1.1 cùng với các cường độ của ba lực phi hấp dẫn cho trong Bảng 1.2 ở Chương 1, và một số ít các con số khác mà chúng ta không cần xét tới ở đây], các nhà vật lý đã đặt những con số đó vào lý thuyết trường lượng tử của các hạt vật chất và các trường lực mạnh, yếu và điện từ, thì những tiên đoán được suy ra từ đó đã phù hợp một cách ngoạn mục với các kết quả thực nghiệm. Điều này là đúng cho tới tận những năng lượng có khả năng đập vụn vật chất thành những mảnh cực nhỏ có kích thước chỉ bằng một phần tỷ tỷ mét - giới hạn của công nghệ hiện nay. Vì lý do đó, các nhà vật lý đã gọi lý thuyết của ba lực phi hấp dẫn và ba họ các hạt vật chất là lý thuyết chuẩn hay thường gọi hơn là mô hình chuẩn của vật lý hạt.

[1] Thậm chí mặc dù phương trình đầu tiên mà Schrodinger viết nó ra (có bao hàm cả thuyết tương đối hẹp) không mô tả chính xác các tính chất lượng tử của electron trong nguyên tử hiđrô, nhưng chẳng bao lâu sau người ta thấy rằng phương trình đó vẫn đúng nếu dùng nó trong một bối cảnh thích hợp và thực tế nó vẫn

được dùng cho tới tận hôm nay. Tuy nhiên, vào thời Schrodinger công bố phương trình tương đối tính của mình, thì Oskar Klein và Walter Gordon đã đi trước ông và do đó phương trình tương đối tính của ông lại được gọi là “phương trình Klein - - Gordon”.