KHOA HỌC KHÁM PHÁ

THẾ GIỚI LƯỢNG TỬ KỲ BÍ

SKURRILE QUANTENWELT

NHỮNG BÍ ẨN VỀ SỰ HUYỀN HOẶC CỦA THẾ GIỚI VI MÔ

SILVIA ARROYO CAMEJO

NHÀ XUẤT BẢN TRẺ

THẾ GIỚI LƯỢNG TỬ KỲ BÍ

SKURRILE QUANTENWELT

NHỮNG BÍ ẨN

VỀ SỰ HUYỀN HOẶC CỦA THẾ GIỚI VI MÔ

SKURRILE QUANTENWELT by Silvia Arroyo Camejo
Copyright@ Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006
Springer is a part of Springer Science + Business Media
All Rights Reserved

BIỂU GHI BIÊN MỤC TRƯỚC XUẤT BẢN ĐƯỢC THỰC HIỆN BỞI THƯ VIỆN KHTH TP.HCM

Camejo, Silvia Arroyo

Thế giới lượng tử kỳ bí / Silvia Arroyo Camejo. - T.P. Hồ Chí Minh : Trẻ, 2008
278tr. ; 20 cm. - (Kiến thức bách khoa) (Khoa học và khám phá)
Nguyên bản : Skurrile Quantenwelt.
1. Vật lý lượng tử. I. Ts. II. Ts: Skurrile Quantenwelt.

539 -- dc 22
C181

THẾ GIỚI LƯỢNG TỬ KỲ BÍ

SKURRILE QUANTENWELT

NHỮNG BÍ ẨN VỀ SỰ HUYỀN HOẶC CỦA THẾ GIỚI VI MÔ

SILVIA ARROYO CAMEJO

PHẠM VĂN THIỀU - NGUYỄN VĂN LIỄN - VŨ CÔNG LẬP
dịch

NHÀ XUẤT BẢN TRẺ

Về sự ra đời của cuốn sách này

Tôi vẫn thường được hỏi, ma xui quỷ khiến thế nào, mà ở vào lứa tuổi 17, tôi lại viết một cuốn sách với chủ đề vật lý lượng tử.

Để trả lời câu hỏi đó, trước hết tôi muốn giải thích cho rõ những điều không thể xem là nguyên nhân thúc đẩy tôi viết cuốn sách vật lý lượng tử này. Chẳng hạn không bao giờ tôi có ý muốn viết một cuốn sách với số lượng phát hành cao để thu về khoản tiền lớn. Trong ý tưởng của tôi về cuốn sách không bao giờ có bóng dáng của đồng tiền. Nếu là tiền, không khi nào tôi viết một cuốn sách mà chủ đề của nó, đối với nhiều người, chỉ là một trong những môn học ít được ưa chuộng nhất còn lưu lại trong ký ức nhạt nhòa và đáng sợ. Tôi luôn luôn phải xác định rằng – lúc đầu với ít nhiều ngạc nhiên –, với hứng thú vô cùng và khát khao hiểu biết không ngưng nghỉ về những quá trình khác thường trong thế giới vi mô và vĩ mô, tôi thường lẻ loi đơn độc và rồi cuối cùng lại vấp phải sự bất lực hay những cái lắc đầu.

Sự khát khao được nổi tiếng cũng không phải là nguyên nhân thúc đẩy tôi viết cuốn sách này. Bởi lẽ, để người khác xem mình là điên cuồng và rồ dại cũng chẳng phải hay ho gì.

Tôi cũng không thể nói rằng, những điều tôi viết ra ở đây là kết quả của nỗi buồn chán hay sự rảnh rang ở trường học. Nói đúng ra, khi tôi

hoàn chỉnh cuốn sách này cũng là lúc tôi đang tối tăm mặt mày với việc học hành và thi cử, bởi vì tôi rất cố gắng để có điểm cao khi tốt nghiệp phổ thông. Trong hoàn cảnh đó, đối với tôi, những trang viết vật lý lượng tử giống như một sự thay đổi bổ sung đầy hứng khởi và thách thức.

Cha tôi có lần nói rằng, người ta chỉ có thể viết một cuốn sách như cuốn của tôi khi còn rất trẻ. Chỉ khi còn trẻ, người ta mới có đủ động lực và sức chịu đựng để làm được một điều gì đó, có vẻ như không có ý nghĩa và mục đích, không có áp lực từ bên ngoài, và cũng hoàn toàn chẳng có lợi lộc về tiền bạc. Giờ đây, tôi không hoàn toàn chắc chắn về những điều đó, nhưng tôi rất hy vọng, sau này vẫn còn tìm ra được sức mạnh và thời gian để thêm một lần nữa hưởng niềm vui sướng khi tạo ra một cái gì đó không có ý nghĩa và mục đích kiểu như vậy.

Vậy thì, điều gì đã thúc đẩy tôi viết cuốn sách này? Thật đơn giản: tình yêu của tôi dành cho vật lý, sự say mê của tôi đối với tính đa dạng của những quá trình phức tạp đầy mê hoặc, mà ở đó, trái với những kinh nghiệm quen thuộc thường ngày cũng như những hiểu biết phổ thông của chúng ta, không còn cả nguyên lý nhân quả lẫn khái niệm khách quan. Một thế giới mà ở đó cái ngẫu nhiên khách quan, tuyệt đối biểu thị một phần xác định những quy luật vật lý giống như điều khẳng định rằng, một đối tượng lượng tử đồng thời có thể tồn tại ở nhiều địa điểm khác nhau. Một thế giới dường như chứa đầy mâu thuẫn và nghịch lý tới mức đôi khi người ta có cảm giác không còn có thể đặt chân trên mặt đất. Chính trong khi hình dung các hiện tượng và tính quy luật của thế giới vi mô phức tạp và không minh bạch như vậy, những nhận thức về bản chất của thế giới vi mô có thể thu được khi nghiên cứu các phương thức hành xử vật lý của các đối tượng lượng tử càng trở nên thần kỳ và quyến rũ.

Tôi muốn nhận thức được cái cấu trúc hành xử của tự nhiên. Tôi muốn biết cái thế giới thần kỳ mà chúng ta sống trong đó hoạt động như thế nào. Từ mong muốn đó, và được thôi thúc bởi khát khao hiểu biết không ngừng, khoảng năm 15 tuổi, thông qua các bài giảng và tài liệu khoa học đại chúng, tôi đã có những hiểu biết đầu tiên về vật lý lượng tử. Mối quan tâm đến chủ đề vô cùng hấp dẫn và xâm chiếm tôi hoàn toàn này phát triển càng ngày càng mạnh mẽ. Những câu hỏi liên tiếp phát sinh đòi hỏi phải có những câu trả lời hối thúc tôi, nhưng không ai có thể trả lời cho tôi điều đó.

Sau đó ít lâu, tôi vấp phải một giới hạn không thể vượt qua nếu chỉ dừng lại trong việc đọc những sách vật lý lượng tử dưới dạng khoa học đại chúng. Tuy nhiên, những tài liệu học tập soạn cho sinh viên vật lý trong giai đoạn cơ bản và cơ sở luôn gắn với việc sử dụng toán học cao cấp, do đó tôi rất khó khăn và hầu như không thể tham khảo những tài liệu này (lúc đó tôi mới chỉ là cô bé học sinh lớp 10).

Lúc đầu, khoảng trống tư liệu giữa một bên là những tài liệu khoa học đại chúng, viết dễ hiểu cho tất cả mọi người, nơi người ta luôn tránh dùng công thức toán học, với một bên là tài liệu học tập chính thống, nơi mỗi trang chứa hàng loạt tích phân hay phương trình vi phân, quả là vấn đề lớn đối với tôi. Sau đó, tôi dần dần thành công. Thông qua nhiều thư viện, nhiều loại sách kinh điển hay mạng Internet, tôi tiếp tục phát triển quá trình tìm hiểu cơ học lượng tử và tiến tới tiếp cận trọn vẹn nội dung của vật lý lượng tử. Tôi nhận thức rõ ràng rằng, những phạm vi và các đặc trưng của vật lý lượng tử sẽ trở nên dễ hiểu hơn và rõ ràng hơn với sự giúp đỡ của hình thức luận toán học. Tôi cũng nhận ra rằng, ta chỉ có thể trình bày các hiệu ứng cơ học lượng tử một cách sâu sắc và thực sự có sức thuyết phục, nếu ta phối hợp việc thảo luận, giải thích với hệ thức toán học tương ứng.

Sau khi đã nhận thức điều đó một cách rõ ràng, và sau khi đã nghiên cứu vật lý lượng tử 2 năm, tôi cảm thấy một áp lực thôi thúc tôi sắp xếp lại những kiến thức mà mình đã thu thập được cho đến thời điểm này. Từ đó tôi có ý tưởng lưu lại bằng văn bản một số chủ đề trung tâm cũng như một số hiệu ứng xuất hiện trong vật lý lượng tử theo hiểu biết của riêng tôi. Tôi rất vui mừng khi thực hiện công việc này, khi bắt đầu có ý nghĩ về một cấu trúc hoàn toàn mới, có giá trị giáo khoa cho những chủ đề lượng tử dưới dạng một cuốn sách tự viết, để rồi cuối cùng cũng lấp đầy khoảng trống tư liệu giữa các tài liệu khoa học đại chúng và tài liệu học tập, nghiên cứu chính thống.

Độc giả quý mến, giờ đây bạn đang giữ trên tay những gì đã sinh ra từ hoàn cảnh đó. Nói một cách cô đọng, cuốn sách này là sự thể hiện tinh khiết niềm vui của tôi khi trình bày những chủ đề mê hoặc và thần kỳ của vật lý lượng tử, vừa có thể có giá trị giáo khoa, vừa dễ hiểu, nhưng cũng đủ sâu sắc và có tính tổng quát. Cuốn sách này cũng là sự thể hiện tinh khiết mong ước cá nhân của tôi, vào một ngày đẹp trời nào đó, lại có thể tự mình quay lại tất cả những điều đó một lần nữa. Và tất cả đơn giản chỉ là vì, điều đó đem lại cho tôi một niềm vui sướng biết bao.

Berlin, tháng Mười hai, 2005

Lời nói đầu

Vật lý lượng tử là gì?

Bạn đọc thân mến, chắc hẳn các bạn, ít nhất một lần, đã tự đặt cho mình một trong những câu hỏi sau:

Lượng tử là gì?

Có mối quan hệ nào giữa vật lý lượng tử và thế giới thực?

Vật chất được tạo nên như thế nào?

Thế nào là hệ thức bất định Heisenberg?

Điều gì xảy ra với con mèo Schrôdinger?

Các biến cố trên thế giới được xác định thông qua các tham số ẩn như thế nào?

Đâu là biên giới giữa thế giới vi mô và thế giới vĩ mô?

... cũng như nhiều câu hỏi khác nữa.

Đó là những câu hỏi có ý nghĩa hết sức cơ bản và nền tảng, không chỉ đơn thuần đối với vật lý hiện đại, mà còn hết sức quan trọng đối với bức tranh chung về thế giới và bản chất của tự nhiên, đối với niềm tin vững chắc của chúng ta vào sự hiểu biết lành mạnh của con người cũng như đối với chính khả năng nhận thức của con người. Khoa học về nhận thức, hay những luận điểm cơ bản và bức tranh về thế giới theo nhận thức luận, trước kia được đặc trưng và xác định bằng những cơ sở và tiền đề tư duy thuần túy triết học. Đây là một trong những phương pháp tiếp cận rất tự nhiên và dễ hiểu đối với những vấn đề cơ bản nhất của sự tồn tại và tính thực tiễn của thế giới. Tuy nhiên, trong quá khứ, cũng trong khuôn khổ như vậy, thông qua những giải thích hợp lý, khoa

học đã ngày càng đẩy lùi những giải thích mơ hồ mang tính tôn giáo hay thần bí, khiến cho ngay trong giai đoạn hiện nay những thay đổi của khoa học nhận thức cũng vẫn là cần thiết. Ngay cả khi không phải bao giờ cũng ý thức được một cách đầy đủ, lại do không chú ý đến tất cả những nguyên lý cơ bản và hiện đại thu được nhờ vật lý hiện đại, chúng ta vẫn thường nghiêng về bức tranh thế giới giống như thời Newton vào những năm 1700. Chúng ta vẫn chăm chút một thế giới quan cơ giới, quyết định luận, được xác lập và được khẳng định bằng những sự kiện bao quanh chúng ta trong đời sống hàng ngày.

Bàn chơi bi-da là một thí dụ thống nhất tất cả mọi định kiến của chúng ta về thế giới quan: Trong sự phối hợp tác dụng có thể nói là tầm thường của những lực đẩy, theo nguyên lý bảo toàn năng lượng và xung lượng, cộng thêm những chuyển động quay, việc tính toán lực tác dụng và chuyển động của viên bi-da không phức tạp lắm. Đó là thế giới cổ điển, cơ giới và quyết định luận như chúng ta vẫn nhận thấy. Nhưng, bức tranh cơ giới như vậy về tự nhiên có chính xác không? Tất cả các đối tượng khác trong tự nhiên đều hành xử một cách đơn giản và có thể tiên đoán được như những quả bi-da chăng?

Trong cuốn sách này, với câu hỏi cơ bản như thế trong đầu, tôi sẽ cố gắng có được một cái nhìn nhỏ nhoi vào thế giới lượng tử đầy bí hiểm, vô cùng thần kỳ và hết sức huyễn hoặc, để rồi trong cuộc kiếm tìm vô tận bản chất nội tại của mọi vật thể, sẽ đi gần hơn một chút đến nguyên lý cơ bản cuối cùng của tự nhiên.

Thế nào là một đối tượng lượng tử?

Bây giờ chúng ta hãy thực sự làm bước khởi đầu: Vậy thật ra *vật lý lượng tử* là gì? Vật lý lượng tử là một lĩnh vực của vật lý, liên quan tới

phương thức hành xử của các đối tượng lượng tử. Thế là được. Nhưng, suy cho cùng thì các đối tượng lượng tử là gì?

Dưới khái niệm *đối tượng lượng tử* thông thường chúng ta hiểu là những đối tượng có kích thước nguyên tử hoặc dưới nguyên tử, chẳng hạn những hạt cơ bản, giống như những viên gạch cấu tạo nên nguyên tử – electron, proton, nơtron. Trong một định nghĩa tổng quát hơn, tất cả các chất kể cả ánh sáng đều được xem là đối tượng lượng tử khi khảo sát ở những kích thước nhỏ. Thậm chí, một tập hợp lớn hơn đáng kể của nhiều nguyên tử cũng vẫn hành xử như một đối tượng lượng tử. Trong những chương sau, chúng ta sẽ nhận biết chính xác hơn về vấn đề này.

Con người tiến hành nghiên cứu trong thế giới vi mô để làm gì?

Sau khi đã giải thích sơ bộ vật lý lượng tử liên quan đến những vấn đề gì, cũng sẽ thật lý thú nếu ta tìm hiểu xem, thực ra vì sao người ta lại phải quan tâm đến những phương thức hành xử của đối tượng lượng tử và vì sao người ta lại phải đầu tư ghê gớm cho những nghiên cứu trong lĩnh vực các hạt nhỏ nhất. Cũng phải thừa nhận một thực tế là, một nhà nghiên cứu cơ bản trong lĩnh vực vật lý lượng tử, vật lý hạt hay vật lý năng lượng cao trước hết được lôi cuốn không phải bởi những ứng dụng thực tế các kết quả nghiên cứu của mình, mà nhiều hơn lại là bởi sự tò mò không cạn kiệt, sự đòi hỏi nội tâm phải tìm hiểu và nhận thức được cái thế giới say mê và cảm động bao quanh anh ta. Như vậy, một nhà vật lý nghiên cứu những cơ sở của vật lý lượng tử phải thường xuyên tự biết cách cân bằng trên mảnh đất nhỏ hẹp giữa những nghiên cứu không mục đích và đôi khi dường như vô nghĩa. Đối với các nhà khoa học tự nhiên chân chính và nhiều đam mê, điều đó cũng chẳng phải là một chướng ngại vật đáng kể cho công việc của họ. Thực ra, sự khao

khát kiến thức vốn là mục đích của nghiên cứu, thúc đẩy các nhà khoa học không kém gì bản chất thần kỳ của tự nhiên. Những sự kiện, chẳng hạn như một đối tượng lượng tử "có thể đồng thời nhẩy múa tại hai đám cưới", hay dường như không tồn tại tính khách quan trong thế giới vi mô, hoặc việc nhận ra rằng sự tồn tại của "tác dụng xa đầy tính ma quỷ" vốn bị Einstein chối bỏ một cách quyết liệt lại là một phần không thể tách rời của thực tại vật lý, làm cho những nghiên cứu vật lý lượng tử trở thành một bộ phim hình sự hồi hộp hơn, có tính viễn tưởng, phức tạp và tốt đẹp hơn. Tuy nhiên, chính sự huyền hoặc của vật lý lượng tử lại nằm ở chỗ, nó không phải là khoa học viễn tưởng, mà chính là hiện thực ở mức độ đặc thù cao nhất. Trong thế giới lượng tử cũng tồn tại không ít điều thuộc về "chuyện thường ngày lượng tử", cái mà theo cách nhìn thông thường của chúng ta là quá mù mờ, thậm chí vớ vẩn, ngay cả khi so sánh với những gì được miêu tả trong "cuộc chiến tranh giữa các vì sao". Có thể diễn đạt điều đó bằng những lời chính xác và rất đặc thù của nhà vật lý lượng tử Daniel Greenberger[1]:

> "Einstein đã nói rằng, thế giới không thể điên rồ đến như vậy. Nhưng hôm nay chúng ta đều biết, thế giới quả là điên rồ như thế".

Phải chăng vật lý là một ngôi nhà tri thức đóng kín?

Trong nhà trường, có thể như chính các bạn đã tự nhận ra, thường phổ biến ấn tượng rằng, vật lý là một ngôi nhà tri thức hoàn chỉnh và đóng kín, tạo nên từ vô số các phương trình, cho phép mô tả các thí nghiệm lý tưởng hóa bằng một cách nào đó. Từ đó có thể cho rằng, những thách thức đối với các nhà vật lý thường là, đối với một trường

1 A. Zeilinger: *Einsteins Schleier* (C.H. Beck) 2003, trang 7.

hợp cụ thể, rút ra những công thức thích hợp trong một mớ công thức có sẵn, chuyển cho máy tính những công thức đó kèm theo các dữ liệu nghiên cứu, để rồi cuối cùng máy tính trả ra những kết quả chuẩn xác. Thế nhưng – phải nhấn mạnh điều này thật rõ ràng – sự thật lại không phải như vậy.

Max Planck (1858-1947), người được coi là cha đẻ của lý thuyết lượng tử một cách hoàn toàn hợp lý, ngay từ khi còn trẻ đã nghi ngờ rằng, liệu học và nghiên cứu vật lý có nhiều hứa hẹn không, nếu không cảm thấy mối quan tâm mạnh mẽ đối với những vấn đề nền tảng nhất của tất cả các khoa học tự nhiên. Một giáo sư vật lý nổi tiếng lúc đó đã khuyên nhủ đầy thiện ý bằng cách nhấn mạnh với ông rằng, trong vật lý, tất cả những điều căn bản nhất đã được nghiên cứu và phát hiện cả rồi. Chỉ còn một số chi tiết không quan trọng lắm là cần được giải thích thêm mà thôi. Thật may là Planck đã bỏ qua lời khuyên nhủ chân thành này, bởi vì những công trình sau đó của ông đã mở ra một kỷ nguyên mới về căn bản trong những quy tắc vật lý và khởi phát một cuộc cách mạng vật lý thực sự. Và cuối cùng, vào năm 1900, Planck đã phát hiện ra một khía cạnh của tự nhiên mà trước đây chưa từng được nghĩ tới: đó là sự lượng tử hóa trong thế giới vi mô.

Điều gì xảy ra trong thế giới vi mô?

Đó chính là câu hỏi về cái cốt lõi nhất của sự vật, về những nguyên lý tự nhiên cơ bản, về ngay bản thân của cấu trúc vật lý và hành xử của vũ trụ. Chủ đề chính của cuộc thám hiểm vào thế giới vi mô xoay quanh câu hỏi đó. Và câu hỏi đó như một sợi chỉ đỏ xuyên suốt từng chương của cuốn sách này.

Bây giờ, để có thể tham dự trực tiếp vào chuyến du ngoạn trong vật lý lượng tử, vào thế giới vi mô đầy mê hoặc, chắc chắn chúng ta – như

tôi đã từng cảnh báo các bạn ở một chỗ nào đó trước đây – sẽ vấp phải những biên giới hiểu biết và biên giới nhận thức. Tuy nhiên, điều này không nằm ở bản thân các bạn, cũng không nằm ở các lý thuyết vật lý được sử dụng, mà cơ bản nằm ở chính bản chất của đối tượng khảo sát. Thế giới vi mô chơi một trò chơi tinh tế và rắc rối. Các đối tượng lượng tử, sau hàng chục năm được nghiên cứu nỗ lực và thành công, đang và sẽ vẫn còn là một câu đố vĩnh cửu, một tổng thể của mâu thuẫn, của sự không rõ ràng đầy bí hiểm. Vật lý lượng tử chứa đầy những nghịch lý và những bất ngờ không thể đoán định, đến mức đôi khi chúng ta phải nghi ngờ khả năng nhận thức của chính mình.

Thế nhưng, theo ý tôi, chính tính không thể đoán định và tính thách đố đến tận cùng của thế giới lượng tử làm nên sự kích thích đầy đắm đuối và sẽ cuốn tất cả theo quỹ đạo của nó.

1
Ánh sáng và vật chất

Thực ra ánh sáng là gì ?

Câu hỏi lý thú về bản chất của ánh sáng đã được nêu ra ngay từ thời cổ Hy Lạp. Thế nhưng, câu hỏi ngắn ngủi này thoạt đầu càng có vẻ đơn giản bao nhiêu, thì trái lại, việc có được một câu trả lời minh bạch càng khó khăn bấy nhiêu. Lịch sử phát triển hàng trăm năm của vật lý đã cho thấy, trả lời cho câu hỏi này thường dẫn tới những thay đổi lớn lao. Các bạn có thể sẽ hỏi tại sao. Vấn đề là ở chỗ, ánh sáng là một sự vật điên đảo đến mức khó chịu. Chúng ta sẽ biết chi tiết hơn về điều này trong những phần sau của cuốn sách. Trước hết, chúng ta hãy để tâm đến định nghĩa cổ điển, theo thói quen về ánh sáng.

Trước khi bắt đầu, chúng ta cần nhanh chóng làm rõ, trong vật lý, đằng sau tính từ "cổ điển" ẩn chứa những ý nghĩa gì. Chúng ta sẽ nhận thấy, trong những phần tiếp sau, các hiện tượng vật lý thường được khảo sát dưới *quan điểm cổ điển*, hay chúng ta sẽ phân tích những tiên đoán của *lý thuyết cổ điển*. Ở đó, từ "cổ điển" luôn luôn ngụ ý là, trong những trường hợp này, ta đang khảo sát các hiện tượng được đặt ra theo ý nghĩa của *vật lý cổ điển,* tức là tất cả những phần của vật lý (từ cơ học Newton, điện động lực học Maxwell,... cho tới lý thuyết tương đối Einstein), chỉ trừ vật lý lượng tử. Phải trừ ra vật lý lượng tử bởi vì chính phần này của vật lý mang theo những đặc tính hết sức khác biệt so với vật lý cổ điển. Chúng ta sẽ nói nhiều về điều này ở những phần sau. Ở đây điều cần nói rõ chỉ là, tất cả những lý thuyết không phải lượng tử sẽ nói đến trong cuốn sách này đều được gắn cho tính từ "cổ điển", và như vậy, ta có thể phân biệt rõ khái niệm "những lý thuyết phi lượng tử" (cổ điển) và "những lý thuyết lượng tử" (phi cổ điển).

Bây giờ, chúng ta hãy bắt đầu bằng lý thuyết cổ điển về ánh sáng. Nếu tra một cuốn bách khoa toàn thư về vật lý, có thể chúng ta sẽ nhận được một trong những định nghĩa giống như phát biểu sau:

> Ánh sáng là một phần của phổ bức xạ điện từ có bước sóng từ 360.10^{-9} m đến 780.10^{-9} m.

Chúng ta sẽ bắt đầu ra sao từ định nghĩa này? Tôi sẽ cố gắng trình bày vấn đề này cho dễ hình dung hơn. Không gian (tức là bất kỳ khoảng không nào, có thể chỉ là chân không hay chứa đầy đất hoặc không khí) bị phủ bởi trường điện từ. Một cách hình ảnh, có thể tưởng tượng trường này là vô số các sợi tơ chăng ngang dọc trong không gian theo mọi hướng. Nếu đập vào sợi tơ tại một điểm nào đó, nhiễu động sẽ được lan truyền dưới dạng sóng cầu ba chiều theo những sợi tơ trong không gian đó. Như vậy, những sợi tơ đóng vai trò là môi trường truyền sóng, cũng như không khí là môi trường truyền sóng âm.

Với ánh sáng cũng xảy ra điều tương tự: thông qua dao động tuần hoàn của một hạt mang điện, trường điện từ bao quanh hạt cũng chuyển sang trạng thái dao động. Chúng ta gọi dao động này của trường điện từ là sóng điện từ. Như vậy, sóng điện từ được hiểu một cách đơn giản là dao động của trường điện từ. Năng lượng dao động của sóng lan truyền như một nhiễu động của trường điện từ.

James Maxwell (1831-1879) là người đầu tiên khẳng định sự tồn tại của trường điện từ, là người đưa ra các phương trình cơ bản của điện động lực học cổ điển, những phương trình sau này được gọi là *hệ phương trình Maxwell*. Hệ phương trình này mô tả động học của trường điện từ trên bình diện toán học và lý thuyết. Khoảng hai mươi bảy năm sau phát hiện lý thuyết của Maxwell, sóng điện từ đã được chứng minh bằng thực nghiệm. Heinrich Hertz (1857-1894) là tác giả của công trình này

vào năm 1887, khi ông đã tạo ra sóng điện từ và chứng minh sự tồn tại của nó trong các thí nghiệm của mình.

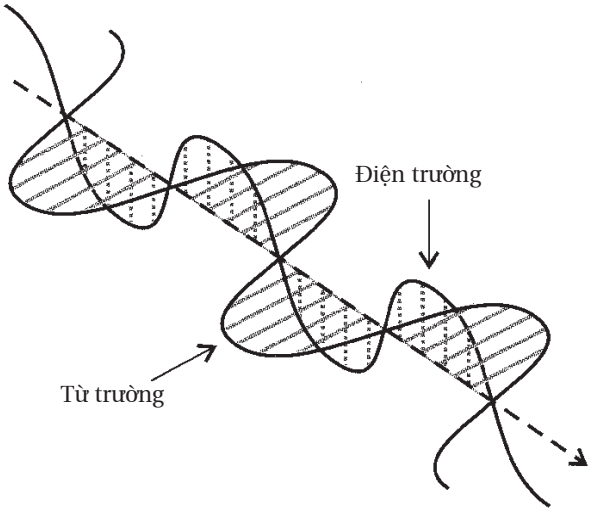
Cái gì dao động và dao động như thế nào?

Một câu hỏi tiếp theo là liệu ta có thể hình dung một cách chính xác trường điện từ dao động như thế nào hay không. Với mục đích đó, chúng ta sử dụng Hình 1.1, mô tả hình ảnh của sóng điện từ trong một sơ đồ tương đối rõ ràng.

Hình vẽ cho ta thấy rất rõ: sóng điện từ có hai hướng dao động. Các véctơ điện trường và từ trường của bức xạ điện từ luôn luôn nằm vuông góc với nhau. Hơn nữa, hai trường này luôn dao động với cùng một pha, nghĩa là chúng luôn luôn đạt giá trị cực đại ở cùng một thời điểm và đồng thời đi qua vị trí cân bằng. Như vậy, điện trường và từ trường của sóng dao động theo phương vuông góc với nhau và chúng đồng thời vuông góc với phương truyền sóng.

Vì thế, dao động điện từ thuộc dạng sóng ngang (giống như sóng nước hay sóng truyền trên một sợi dây căng), trong đó phương dao động nằm vuông góc với phương truyền sóng, khác với sóng dọc (chẳng hạn như sóng âm), trong đó phương dao động trùng với phương truyền sóng. Một đặc thù của sóng ngang là, chúng có một tính chất riêng gọi là *phân cực*. Nếu véctơ điện của sóng điện từ dao động trong một mặt phẳng, ta gọi đó là *sóng phân cực thẳng* (hay *phân cực tuyến tính)*. Ví dụ ánh sáng mặt trời thực ra là không phân cực, nhưng nếu ta gửi ánh sáng mặt trời qua một kính lọc phân cực ta sẽ nhận được ánh sáng phân cực với một hướng dao động xác định.

Đặc trưng cơ bản tiếp theo của sóng điện từ là *bước sóng* λ và *tần số* ν. Rất đơn giản, bước sóng là khoảng cách giữa hai điểm đồng nhất của

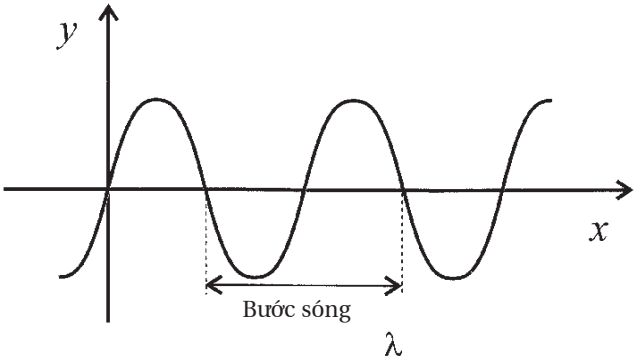


Hình 1.1. Các mặt phẳng dao động vuông góc với nhau của một sóng điện từ

sóng, chẳng hạn khoảng cách từ đỉnh sóng này tới đỉnh sóng tiếp theo (Hình 1.2). Còn tần số của bức xạ cho ta biết số dao động trong một giây. Bước sóng và tần số có mối liên hệ theo kiểu tỷ lệ nghịch. Điều rất thú vị là, nếu nhân bước sóng với tần số, thì ta sẽ nhận được *tốc độ truyền sóng c*:

$$c = \upsilon . \lambda$$

Với bức xạ điện từ, chúng ta đều biết c là tốc độ truyền ánh sáng. Dưới đây chỗ nào có chữ cái c ta hiểu đó là tốc độ ánh sáng truyền trong chân không với giá trị khoảng $c = 3{,}0.10^8$ m/s. Nếu có gì khác với quy ước này, sẽ được nói rõ.

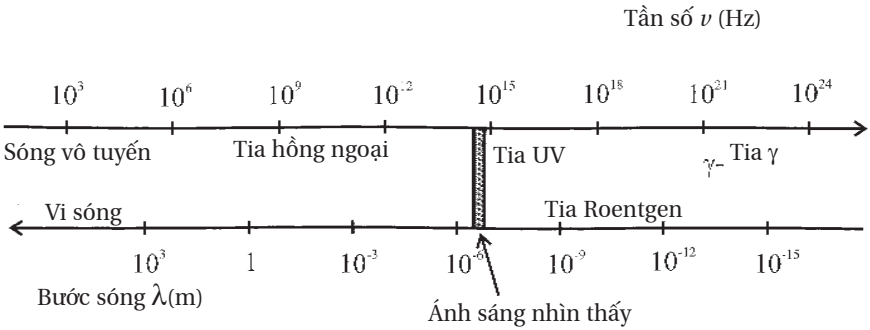


Hình 1.2. Định nghĩa bước sóng

Đâu là tần số và bước sóng của ánh sáng?

Về mặt lý thuyết, số tần số có thể, cũng như số bước sóng khả dĩ của bức xạ điện từ là vô hạn. *Phổ liên tục của bức xạ điện từ* chứa tất cả các giá trị của bước sóng cũng như tần số. Khi chuyển sang thang lô-ga-rit để biểu diễn bước sóng và tần số như trên Hình 1.3, chúng ta thấy chỉ đủ chỗ cho vùng phổ bức xạ từ bức xạ gamma cứng với bước sóng ngắn đến vùng sóng vô tuyến có bước sóng dài. Tại vùng trung gian giữa hai giới hạn này, tiếp sau tia gamma cứng ta lần lượt có: bức xạ Rơn-ghen mềm, bức xạ tử ngoại, rồi đến một vùng phổ nhỏ nhoi con người có thể nhìn thấy được là ánh sáng, sau đó là tia hồng ngoại, và cuối cùng là vi sóng. Thật là đáng ngạc nhiên, vì tất cả các loại bức xạ này thực ra có cùng bản chất như ánh sáng và chỉ khác nhau ở giá trị của tần số hay bước sóng mà thôi. Vấn đề là ở những đặc tính của mắt người, khiến chúng ta chỉ có thể cảm nhận được một vùng phổ xác định và do đó nhìn thấy chúng.

Bây giờ có thể đặt tiếp câu hỏi: do đâu lại có sự khác nhau về tần số giữa các sóng điện từ. Sự khác nhau nằm ở bản chất của quá trình sinh



Hình 1.3. Phổ bức xạ điện từ, xác định cho cả tần số *v* và bước sóng l.

ra bức xạ. Chẳng hạn, nguồn của bức xạ gamma cứng là ở hạt nhân nguyên tử phóng xạ được kích thích bức xạ ra một lượng tử gamma để trở về một trạng thái năng lượng thấp hơn và bền vững hơn. Ngược lại, sóng vô tuyến sinh ra từ một lưỡng cực điện dao động, đó là một vật dẫn hở hai đầu mà ở đó tồn tại một điện thế xoay chiều. Tất cả các loại bức xạ đó được phản ánh trên Hình 1.3, có bản chất vật lý như nhau, tức là tuân theo cùng những định luật quang học, giống như ánh sáng mà chúng ta nhìn thấy vậy.

Vật chất là gì?

Một cách trực giác, người ta có thể nghĩ như sau: *"Quá rõ ràng. Vật chất đơn giản là các vật hay một thực thể nào đó, mà người ta có thể sờ nắm được. Đối lập với nó, là vi sóng và bức xạ nhiệt, hay ánh sáng. Một viên đá chắc chắn là vật chất: nó có thể được ném lên cao hay rơi xuống mặt đất. Điều đó không thể xảy ra với ánh sáng..."*.

Nhưng, với electron chẳng hạn thì sao? Liệu có thể sờ vào nó không? Hay tia an-pha, tạo thành từ hạt nhân nguyên tử heli? Phải chăng chúng không phải là vật chất, chỉ vì không thể sờ nắm và không thể nhìn thấy được? Thực ra, vấn đề là phức tạp hơn ít nhiều và trung thực mà nói, thậm chí không có một định nghĩa vật lý chính xác nào cho khái niệm *vật chất*. Tất nhiên chúng ta có thể nói, vật chất là tất cả những gì có khối lượng. Nhưng chúng ta lại biết phát minh của Einstein về *sự tương đương giữa khối lượng và năng lượng:*

$$E = mc^2$$

nghĩa là, một khối lượng m tương đương với một năng lượng E nào đó, với tốc độ ánh sáng bình phương đóng vai trò là hệ số tỷ lệ. Mỗi khối lượng tương đương một năng lượng, cũng như mỗi năng lượng tương đương một khối lượng. Như vậy làm sao còn có thể phân biệt được giữa có khối lượng và không có khối lượng?

Mặc dù có những khó khăn lớn như vậy khi đi tìm một định nghĩa, chúng ta vẫn có khả năng minh xác khái niệm này: tất cả các hạt cơ bản có khối lượng nghỉ đều được xem là vật chất. Vậy khối lượng nghỉ là gì? *Khối lượng nghỉ là khối lượng của một vật khi nó không chuyển động,* và theo *lý thuyết tương đối hẹp*, mỗi hạt vận động đều nhận được một sự *gia tăng khối lượng*, do vậy *khối lượng động* của một vật luôn lớn hơn khối lượng nghỉ của nó. Ánh sáng, hay nói tổng quát hơn, bức xạ điện từ, không có khối lượng nghỉ mà chỉ có khối lượng động. Đến đây người ta có thể chia ra: vật chất có khối lượng nghỉ còn bức xạ không có khối lượng nghỉ.

Vật chất gắn với khối lượng nghỉ sinh ra từ đâu?

Từ đời sống hằng ngày chúng ta đều biết, mỗi dạng vật chất bao quanh chúng ta đều được cấu tạo từ những phần tử rất nhỏ: đó là các

nguyên tử. Ngay từ thời cổ Hy-Lạp, Leukipp và Democrit (cả hai đều sống vào khoảng 500 năm trước Công nguyên) đã trình bày giả thuyết về nguyên tử của họ, theo đó tận cùng vật chất là những hạt không còn có thể chia nhỏ được nữa.

Theo cách nhìn hiện nay, những đoán định triết học từ xa xưa ấy dường như là thiếu cơ sở, nhưng chúng vẫn được khẳng định nhờ những công trình khá muộn về sau, chẳng hạn như công trình của John Dalton (1766-1844).

Tiếp sau đó là hàng loạt những mô hình nguyên tử khác nhau, ngày một hoàn thiện. Trước hết là mô hình của nhà khoa học Anh Joseph Thomson (1856-1940) mang tên *mô hình bánh nho khô,* nói rằng, vật chất cấu tạo từ *bột vật chất* tích điện dương với các electron tích điện âm (cũng do chính ông phát hiện ra) rắc vào trong đó (như những hạt nho khô).

Nhưng rồi chẳng bao lâu sau đó, nhà vật lý người gốc New Zealand, Ernerst Rutherfort (1871-1937), bằng thí nghiệm tán xạ trên lá vàng mỏng, đã chỉ ra rằng, nguyên tử phần lớn là trống rỗng và chứa một hạt nhân tích điện dương kết cấu chặt chẽ với kích thước rất nhỏ. Các *electron*, trái lại, nằm trong các lớp vỏ nguyên tử và ở những khoảnh cách khác nhau so với hạt nhân, giống như một hệ mặt trời thu nhỏ, trong đó hạt nhân nguyên tử chính là mặt trời, còn các electron là những hành tinh. Như vậy, hiển nhiên là, các hạt được gọi một cách sai lầm là "atomos" – tức là nguyên tử – thật ra vẫn còn phân chia được. Từ đây nguyên tử không còn được xem là cơ bản, là không thể phân chia được nữa.

Đến đây lại buộc phải nêu ra một câu hỏi mới: liệu những mảnh "mới được đập vỡ ra" từ nguyên tử, đến lượt nó, có phải là cơ bản hay không? Như đã tìm ra sau này, chúng cũng chưa phải là cơ bản, bởi vì hạt nhân nguyên tử lại được tạo thành từ hai loại hạt, các *proton* tích điện dương

và các *nơtron* trung hòa hay không mang điện. Rồi ngay cả những hạt này nữa, cũng không hề cơ bản, vì chúng được tạo nên từ những hạt gọi là *quarks,* một cái tên được nhà vật lý hạt cơ bản người Mỹ Murray Gell-Mann (sinh năm 1926) nghĩ ra. Theo *mô hình chuẩn của vật lý hạt cơ bản* hiện nay, proton (uud) cấu tạo từ hai quark *up* (u) và một quark *down* (d), còn nơtron (udd) thì từ một quark *up* và hai quark *down* (d). Nói chính xác hơn, các nucleon nói trên được tạo ra từ các quark cùng với các hạt trao đổi (các boson) của lực hạt nhân mạnh.

Như những gì chúng ta biết cho đến nay, những hạt quark như vậy là cơ bản theo nghĩa chúng không thể được cấu tạo từ những hạt khác. Và có đủ lý do cần thiết cho điều khẳng định đó. Như vậy, với tư cách những viên gạch cấu tạo nên nguyên tử, chỉ có *quark up, quark down* và *electron* thực sự là những hạt cơ bản. Thế mà – thật nghịch lý – người ta vẫn gọi proton cùng nơtron là các hạt cơ bản, cho dù, như chúng ta đã biết, chúng thật ra không phải như vậy.

Tuy nhiên, lại cũng phải nhấn mạnh rằng, "từ những hạt khác cấu tạo thành" không nhất thiết phải là "có khả năng phân chia được". Ta phải hiểu điều đó như thế nào? Ví dụ như, ta nói proton không có khả năng tiếp tục phân chia nữa, mặc dù chúng được tạo nên từ những hạt quark rất nhỏ là dựa trên tính chất của lực giữ cho proton cũng như nơtron bền vững. Những lực có tác dụng giữ cho các hạt quark không khi nào có thể tồn tại cô lập được gọi là *tương tác mạnh* (một trong *bốn loại tương tác cơ bản* của tự nhiên). Theo đó, các quark chỉ có thể xuất hiện trong những lưỡng tuyến, *meson* hoặc các tam tuyến, *baryon.*

Hiện tượng mà theo đó ba hạt quark được giữ chặt với nhau trong một proton không thể phân tách được gọi là sự *cầm tù quark.* Nhân đây cũng xin nói rằng, tính chất lý thú và lạ lùng này của tương tác mạnh vẫn luôn luôn là những câu đố có tính thời sự của nghiên cứu cơ bản.

Những thí nghiệm mới mẻ hơn ở những máy gia tốc hạt lớn nhất thế giới từ vài năm qua đã được tích cực tiến hành để tìm kiếm một lớp hạt mới, gọi là *pentaquark*, đó là những hạt không bền ở bất cứ đâu. Những hạt này được cấu thành từ bốn quark và một phản quark. Một thí dụ cho nhóm hạt này là $\Theta^{+}(uudd\bar{s})$, $\Theta_c^0(uudd\bar{c})$ và $\Xi^{--}(ddss\bar{u})$. Như các thí nghiệm hiện nay chỉ ra, việc chứng minh chắc chắn sự tồn tại của chúng là hết sức khó khăn. Đến khi cuốn sách này ra đời, đã có chừng mười thí nghiệm chứng tỏ sự tồn tại của những hạt này, nhưng đáng tiếc lại cũng có chừng ấy thí nghiệm khẳng định điều ngược lại hay đơn thuần là không thể đưa ra kết quả. Từ thực trạng thí nghiệm bấp bênh ấy, người ta có cơ sở để nghi ngờ là liệu những thí nghiệm đã làm đến nay đã thực sự đáng tin cậy hay chưa. Khẳng định dứt khoát sự tồn tại vẫn còn đang nghi vấn của các hạt pentaquark sẽ được chỉ rõ trong những thí nghiệm tới đây[2]. Dù sao, những nghiên cứu về pentaquark sẽ giúp chúng ta thu được những nhận thức mới, sâu sắc hơn về bản chất của tương tác mạnh là điều không còn phải tranh cãi. Để giải thích hiện tượng cầm tù quark, các polyquark có vai trò đặc biệt lý thú.

Các hạt cơ bản có phải là hạt không?

Đến nay, chúng ta hiểu rằng các hạt cơ bản không nhất thiết phải là cơ bản, và để chuyển sang một phần khác của khái niệm này, chúng ta lại hỏi, chúng có phải là các hạt không?

Vâng, điều đó cũng chỉ có ý nghĩa tương đối! Trong vật lý các hạt cơ bản, dưới khái niệm "hạt" thông thường người ta hiểu là một cái gì đó với

---

[2] Một bài trình bày rất hay về tình trạng thực nghiệm bấp bênh hiện nay có thể tìm thấy trong: K. Hicks: Experimental Search for Pentaquarks, Prog. Part. Nucl. Phys. 55 (2005) http://arxiv.org./abc/hep-ex/0504027 (2005).

kích thước cỡ 10^{-1} m mà chúng ta vẫn hình dung trong điều kiện thông thường. Khi nói về một "hạt", chúng ta thường quen nghĩ tới một cái gì đó nhỏ bé, rắn chắc, có thể so sánh với một quả cầu cực nhỏ bằng kim loại. Bức tranh như vậy của một *hạt* cổ điển sẽ mất ý nghĩa khi chúng ta quay về một thang kích thước nào đó. Hãy tưởng tượng, một chút xíu thôi, chúng ta là những đối tượng của thế giới vi mô và đang ở trong ngôi nhà có kích cỡ 10^{-10} m. Khi đó chúng ta sẽ nhận ra rằng, cái cách mà chúng ta hình dung một hạt, như một quả cầu rắn chắc, nho nhỏ, sẽ đơn giản và chắc chắn không còn đứng vững nữa, chúng hoàn toàn vô nghĩa theo quan điểm cơ học lượng tử.

Trong thế giới vi mô, cái gọi là "hạt" đơn giản có một lối sống khác: nó có cuộc sống hai mặt. Vâng, thực ra chỉ có một nửa cuộc sống của nó thể hiện đúng như là một hạt, còn nửa kia, nó hành xử như là sóng. Một cách nào đó chúng ta buộc phải thừa nhận rằng, các đối tượng lượng tử vừa là hạt lại vừa đồng thời là sóng. Ta không thể khẳng định một cách chắc chắn chúng chỉ thuộc về dạng nào trong hai dạng đó, bởi vì chúng chẳng phải là các hạt cổ điển mà cũng chẳng phải là các sóng cổ điển. Chúng hành xử thế nào đó, nhưng hoàn toàn khác hẳn so với những gì hằng quen thuộc "trong thế giới cổ điển, thông thường" của chúng ta. Các quy tắc của chúng khác hẳn với các quy tắc của chúng ta, khác đến mức như chúng ta có những khó khăn mạn tính khi theo dõi những hoạt động trừu tượng của chúng. Chúng là một cái gì đó hoàn toàn khác hẳn so với những gì chúng ta có thể tưởng tượng ra trong chân trời cổ điển, giới hạn của mình. Chúng không phải là *các hạt vĩ mô*, chúng chẳng phải là *các sóng vĩ mô* – chúng là các *đối tượng lượng tử*. Với cuốn sách này, chúng tôi muốn tìm cách phát hiện ra dấu ấn hành xử hiếm hoi và nhận biết được phần nhỏ bé nào đó trong những đặc tính bí hiểm, thần kỳ và say đắm của chúng.

2
Nguồn gốc của lượng tử tác dụng Planck

Giả thuyết lượng tử đến từ đâu?

Trước 1900, ở lĩnh vực nhiệt động học, trong vật lý cổ điển có một vấn đề nhỏ, dường như không quan trọng nhưng không thể bỏ qua được. Ta tưởng tượng có một vật đen lý tưởng, không phản xạ sóng điện từ mà hấp thụ toàn bộ bức xạ truyền tới. Vật thể như thế sẽ bức xạ một phổ sóng điện từ chỉ phụ thuộc vào nhiệt độ của nó, chứ không hề phụ thuộc vào chất liệu mà nó được tạo ra hay các ảnh hưởng khác. Bức xạ này được gọi là *bức xạ vật đen*.

Một khả năng để có vật đen như thế là ta lấy một hốc (ví dụ một quả cầu kim loại rỗng) và truyền sóng điện từ vào nó qua một lỗ nhỏ. Bức xạ sẽ phản xạ qua lại trên thành bên trong của hốc cho tới khi chúng được hấp thụ hết và nhiệt độ của vật thể được nâng lên cho đến khi đạt được cân bằng. Bây giờ ta có thể xác định phân bố phổ của vật đen, tức là công suất của bức xạ điện từ ở một bước sóng xác định, tính trên một đơn vị diện tích, bằng phương pháp lý thuyết cũng như thực nghiệm (chẳng hạn đo trên vật thể được nói tới ở trên).

Đồ thị trên Hình 2.1 cho ta một ví dụ về những hàm phân bố phổ khác nhau của vật đen ở những nhiệt độ khác nhau. Trên trục tung là công suất bức xạ P tính trên một đơn vị diện tích (năng suất bức xạ) còn trục hoành là bước sóng λ của bức xạ điện từ. Những giá trị này có thể thu được bằng con đường thực nghiệm.

Tuy nhiên, khi so sánh lý thuyết và thực nghiệm của bức xạ vật đen, người ta nhận ra rằng chúng mâu thuẫn với nhau. Lý thuyết trước đây nói rằng, công suất P của bức xạ tỷ lệ nghịch với lũy thừa bậc bốn của bước sóng theo *công thức Rayleigh-Jeans:*

$$P(\lambda;T) = \frac{8\pi k_B T}{\lambda^4} \tag{2.1}$$

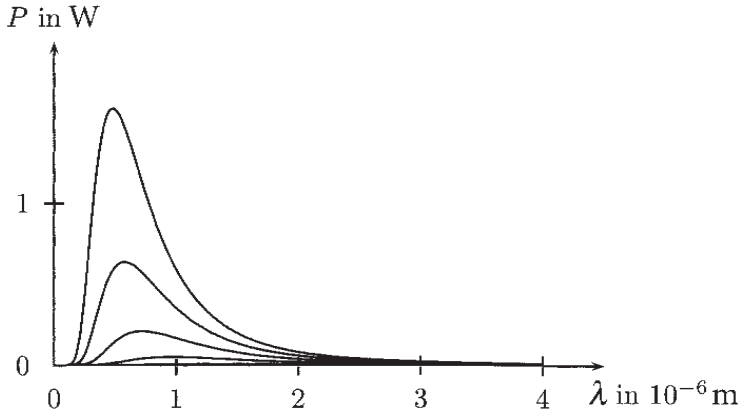
trong đó k_B là hằng số Bolzmann, có giá trị bằng 1,38.10 $^{-23}$ J/K và T là nhiệt độ vật đen đo bằng Kelvin (K).

Điều đó có nghĩa là phân bố phổ phải có dạng sao cho khi bước sóng càng nhỏ thì công suất càng tăng và khi $\lambda \to 0$ thì công suất bức xạ P phải tiến tới vô cùng.

Cụ thể hơn, tại nhiệt độ xấp xỉ ngay sát phía trên không độ tuyệt đối (gần bằng -273^{0}C) vật đen phải bức xạ năng lượng nhiều vô hạn dưới dạng sóng điện từ. Điều đó đương nhiên là mâu thuẫn với thực nghiệm, vì như ta thấy trên Hình 2.1, khi $\lambda \to 0$ thì công suất P cũng tiến tới không. Hiện tượng lý thuyết tiên đoán sai ở đây được gọi là *tai họa tử ngoại.*

Tai họa tử ngoại được giải quyết như thế nào?

Ngay trước thềm thế kỷ mới, tại hội nghị có thể nói là quan trọng nhất về lý thuyết lượng tử ngày 14 tháng Mười hai năm 1900, Max Planck đã



Hình 2.1. Hàm phân bố phổ của vật đen ở những nhiệt độ khác nhau.

làm nên giờ phút sinh thành của vật lý lượng tử và do đó tự mình trở thành cha đẻ của lý thuyết này. Ông đã giải bài toán tai họa tử ngoại của phân bố phổ bức xạ của vật đen bằng cách đưa ra một cách thiên tài công thức bức xạ hoàn toàn mới.

Cũng thật thú vị khi nhớ lại rằng, chính Planck đã mô tả công thức của mình như là một *"sự can thiệp nhân tạo"* khi biến đổi công thức bức xạ cổ điển để đưa hàm phân bố phổ lý thuyết về gần phù hợp với kết quả thực nghiệm. Ông thường nhấn mạnh, ông đã tìm ra công thức mới này khi buộc phải có *"một hành động đáng nghi ngờ"*. Điều tuyệt vời là, công thức bức xạ do Planck mới tìm ra nhờ giả thuyết lượng tử cho phép mô tả các kết quả thực nghiệm rất hoàn hảo trong phạm vi độ chính xác của phép đo (sai số chỉ vài phần lẻ).

Định luật mang tính cách mạng này, sau đó, để vinh danh tác giả, được gọi là định luật bức xạ Planck, có dạng:

$$P(\nu;T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \cdot \frac{h\nu}{e^{h\nu/k_BT} - 1} \tag{2.2}$$

Ta sẽ không đi vào các chi tiết dẫn giải dài dòng và phức tạp cũng như cách xây dựng chính xác của công thức bức xạ này. Cái chúng ta quan tâm là sự đổi mới cơ bản của Planck, là giả thuyết có tính cách mạng của ông.

Trong công thức (2.2), ý tưởng có tính đột phá, trái ngược với cách tiếp cận cổ điển, là một quan niệm có tính *lượng tử về bức xạ* cũng như *hấp thụ* bức xạ điện từ ở trong vật đen. Theo đó, vật đen hấp thụ nhiệt lượng qua những phần nhỏ nhất gọi là *lượng tử*, tức là những "bó năng lượng nhỏ", và khi bức xạ cũng phát ra từng lượng tử như vậy. Theo giả thuyết của Planck, năng lượng của mỗi lượng tử như vậy phụ thuộc vào tần số n và một hằng số sau này có tên *lượng tử tác dụng Planck,* ký

hiệu là h, $h = 6{,}626.\ 10^{-34}$ Js. Như thế, năng lượng của mỗi lượng tử bức xạ điện từ theo giả thuyết Planck sẽ là:

$$E = h.\ \upsilon \tag{2.3}$$

Ngay từ thời đó, thật đáng ngạc nhiên, Planck đã có thể đưa ra một giá trị bằng số khá chính xác của *h*. Để làm điều đó, ông đã lắp vào định luật bức xạ Planck (2.2) mà ông mới tìm ra một tập hợp lớn các giá trị của *h* để so với các giá trị đo được bằng thực nghiệm. Về sau, giá trị của lượng tử tác dụng Planck tìm được một cách chính xác hơn thông qua thí nghiệm về hiệu ứng quang điện với $h = E/\upsilon$. Đó là điều chúng ta sẽ thấy trong Chương 3.

Giá trị năng lượng của lượng tử ánh sáng phụ thuộc vào cái gì?

Từ nay về sau, khi nói về *lượng tử* hay *lượng tử ánh sáng,* chúng ta hiểu đó là nói về "bó năng lượng" có giá trị $h\upsilon$ trong phương trình (2.3), như chính công thức bức xạ của Planck đòi hỏi.

Để ý rằng, ngay từ Chương 1 ta đã biết công thức chung cho mọi sóng:

$$c = \upsilon\lambda \tag{2.4}$$

theo đó tốc độ truyền sóng bằng tích của bước sóng và tần số. Vì trong một môi trường xác định, tốc độ truyền sóng điện từ là hằng số, cụ thể trong chân không tốc độ đó là 300.000 km/s, nên từ (2.3) và (2.4) suy ra:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \tag{2.5}$$

với *c* là tốc độ ánh sáng trong chân không. Từ (2.3) và (2.5) ta rút ra nhận xét thú vị rằng, năng lượng của một lượng tử ánh sáng tỷ lệ thuận với tần số và tỷ lệ nghịch với bước sóng.

Tiếp theo, ta còn có thể thu được mối quan hệ thú vị nữa đối với năng lượng của lượng tử. Trong vật lý lượng tử, người ta đưa vào đại lượng rút

gọn $\eta = \frac{h}{2\pi}$ để mô tả đơn vị nhỏ nhất của *spin*, một dạng mômen xung lượng riêng của các đối tượng lượng tử:

$$\eta = \frac{h}{2\pi} \approx 1{,}055.10^{-34}\ \text{Js} \tag{2.6}$$

Thay vào phương trình của giả thuyết lượng tử, ta được hệ thức:

$$E = \eta.2\pi v \tag{2.7}$$

Từ việc phân tích chuyển động tròn đều (mà chúng ta sẽ không đề cập ở đây), ta có định nghĩa về tốc độ góc ω:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \tag{2.8}$$

Tốc độ góc ω là số vòng quay (trong hệ đo cung đó chính là bội số của 2π) trong đơn vị thời gian, còn *T* là thời gian cần thiết cho một vòng quay. Vì thời gian đủ để quay một vòng *T* là nghịch đảo của tần số chuyển động tròn:

$$\nu = \frac{1}{T} \tag{2.9}$$

từ (2.8) và (2.9) ta có:

$$\omega = 2\pi v \tag{2.10}$$

Và khi thay (2.10) vào (2.7) ta được:

$$E = \eta\omega \tag{2.11}$$

Như vậy năng lượng của một lượng tử, cho tới nay ta có các hệ thức sau:

$$\begin{aligned} E &= hv \\ &= \frac{hc}{\lambda} \\ &= \eta\omega \end{aligned} \tag{2.12}$$

Chúng ta cần nhớ kỹ những đẳng thức này, bởi vì trong vật lý lượng tử, hay chi tiết hơn là vật lý được lượng tử hóa, chúng có ý nghĩa hết

sức cơ bản và trong cuộc hành trình của chúng ta trong thế giới vi mô, chúng hiện ra ở mỗi góc đường.

Cuối cùng, có lẽ cũng nên nêu lại câu chuyện hơi có mầu sắc giai thoại. Khi thực hiện lượng tử hóa trong thế giới vi mô (bằng cách đưa vào thừa số *h)*, chính Planck chỉ xem đó như là một hỗ trợ về mặt toán học để kết quả tính toán lý thuyết phù hợp với phân bố phổ của bức xạ vật đen được tìm thấy bằng thực nghiệm.

Mãi đến năm 1905, khi nghiên cứu hiệu ứng quang điện, Albert Einstein mới nhận ra rằng, lượng tử hóa năng lượng không chỉ đóng vai trò là hỗ trợ toán học, mà còn diễn đạt một tính chất cơ bản của bức xạ điện từ.

3
Hiệu ứng quang điện

Hiệu ứng quang điện là gì?

Ngay trước Albert Einstein (1879-1955) người ta đã biết rằng, electron có thể bị "bứt ra" từ một tấm kim loại có ánh sáng chiếu vào. Hiệu ứng này do Heinrich Hertz phát hiện năm 1887 và sau đó được gọi là *hiệu ứng quang điện*. Năm 1905 Einstein bắt đầu quan tâm đến hiệu ứng này, rồi ít lâu sau ông công bố công trình *"Về một cách nhìn khoa học liên quan đến sự sinh ra và biến đổi của ánh sáng"*[3], trong đó ông giải thích một cách vật lý các quá trình cho đến lúc đó hãy còn mập mờ vì giữa các số liệu thực nghiệm và các tiên đoán của lý thuyết sóng cổ điển về bức xạ điện từ có một sự khác biệt quá lớn.

Sơ đồ thí nghiệm để đo hiệu ứng quang điện được trình bày trên Hình 3.1 và về mặt nguyên tắc là tương đối đơn giản:

Trước hết, ta cần có một vòng kim loại đóng vai trò *anốt* và một tấm kim loại được gọi là *catốt quang*, nơi các electron thoát ra trong hiệu ứng quang điện. Qua anốt vòng, bức xạ điện từ phóng tới catốt quang sao cho chính bức xạ này giải phóng các electron ra khỏi kim loại. Trong hiệu ứng này, năng lượng dùng để bứt electron thoát khỏi liên kết trong kim loại chính là năng lượng của bức xạ điện từ. Năng lượng này được gọi là *năng lượng giải phóng electron* $W_{g.p}$ và phụ thuộc vào vật liệu chế tạo catốt.

Một khi có các electron vừa được giải phóng, chúng sẽ bay hướng tới anốt vòng, nghĩa là sẽ có một dịch chuyển điện tích và do đó có một dòng điện. (Trong trường hợp lý tưởng, cả anốt lẫn catốt cùng đặt trong bình chân không. Trong thực tế, dụng cụ sử dụng là ống trụ bằng thủy

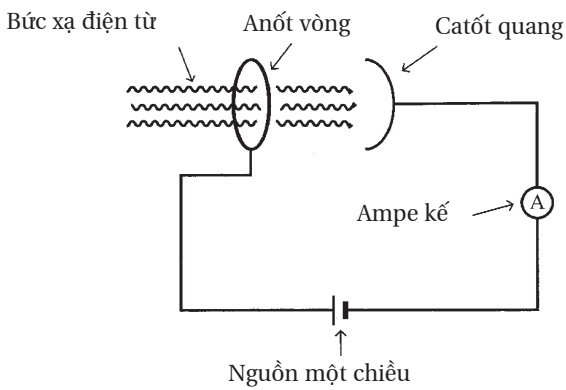
---

[3] Công bố trong *Annalen der Physik* 17 (1905), trang 132-148

tinh được hút hết khí hay chỉ còn rất ít khí. Đó là *tế bào quang điện*. Cả anốt vòng lẫn catốt quang đều làm việc trong môi trường này). Có thể ghi lại dòng điện mới phát sinh, bằng cách nối anốt và catốt qua một ampe kế (xem Hình 3.1). Cường độ dòng đo được trên ampe kế là số đo số các electron được giải phóng nhờ tác dụng của bức xạ. Nhớ lại rằng, *cường độ dòng I* được định nghĩa là điện lượng ΔQ chạy qua tiết diện trong khoảng thời gian Δt:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \tag{3.1}$$

Nguồn một chiều dùng trong sơ đồ 3.1 không phải dùng để đo hiệu ứng quang điện, nhưng khi có nó thì dòng điện tạo bởi các electron được giải phóng do ampe kế ghi nhận sẽ rất tập trung, còn nếu không thì các electron đó sẽ bay tản mác theo mọi hướng và khi đó giá trị đo được sẽ không đáng kể. Tuy nhiên, để đánh giá định tính hiệu ứng quang điện thì nguồn một chiều này không phải là yêu cầu bắt buộc.



Hình 3.1 Cấu trúc thí nghiệm thứ nhất để đo hiệu ứng quang điện.

Điều gì là không cổ điển trong hiệu ứng quang điện?

1. Thí nghiệm thứ nhất

Theo lý thuyết sóng cổ điển của bức xạ điện từ, năng lượng cần dùng để bứt electron ra khỏi kim loại phải tích tụ dần cho tới khi electron có năng lượng đủ lớn để thoát ra. Tùy theo cường độ bức xạ mạnh đến mức nào mà electron phải chờ đến khi có đủ năng lượng đó lâu hay chóng. Trong mọi trường hợp, electron luôn có thể giải phóng ra khỏi kim loại, miễn là thời gian chiếu bức xạ đủ lớn.

Thí nghiệm. Nguồn bức xạ điện từ dùng trong thí nghiệm này là ánh sáng đơn sắc, nghĩa là bức xạ chỉ có một tần số hay một bước sóng. (Vì sao yêu cầu này quan trọng, chúng ta sẽ nhận ra ở phần sau).

Bây giờ, trong thí nghiệm mô tả trên Hình 3.1 ta thay đổi *cường độ bức xạ điện từ* và quan sát sự thay đổi cường độ dòng điện trong quá trình đó. Quá trình này sẽ được tiến hành với nhiều tần số kế tiếp khác nhau của bức xạ điện từ.

Quan sát. Điều rất đáng ngạc nhiên, đó là chúng ta có thể xác định chắc chắn rằng, với tần số của bức xạ điện từ thấp hơn một *tần số giới hạn* xác định nào đó thì ampe kế không ghi được dòng điện nào. Điều đó có nghĩa là không có electron nào được giải phóng ra từ catốt. Chỉ khi tần số vượt qua giới hạn đó, mới xuất hiện dòng điện, nghĩa là các electron mới được giải phóng.

Cường độ bức xạ càng cao, thì cường độ dòng, và cũng chính là số electron được giải phóng sẽ càng lớn. Nếu cường độ bức xạ nhỏ, thì các electron vẫn được giải phóng ngay lập tức, chứ không phải chờ đợi bất cứ thời gian nào để tích lũy năng lượng.

Đánh giá. Thí nghiệm chỉ ra rằng, electron được giải phóng ra khỏi kim loại khi tần số của bức xạ vượt qua một giới hạn xác định, và

hiện tượng này xảy ra *độc lập* với cường độ bức xạ. Trong thực tế, không có sự tích lũy năng lượng liên tục nào cho các electron.

Ngoài ra, electrron bị bứt ra không có khoảng trễ nào về thời gian, và điều này cũng trái với lý thuyết cổ điển ("tích lũy năng lượng cần phải có thời gian").

2. Thí nghiệm thứ hai

Theo lý thuyết cổ điển, động năng của electron được xác định qua công thức:

$$E_đ = \frac{1}{2}mv^2 \qquad (3.2)$$

cũng sẽ phụ thuộc vào cường độ bức xạ điện từ: cường độ bức xạ càng lớn thì động năng của electron càng lớn.

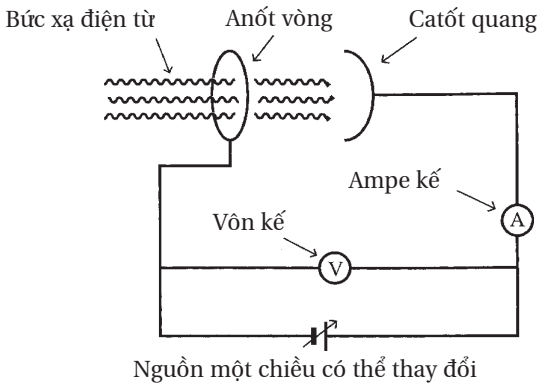
Thí nghiệm. Để kiểm tra điều tiên đoán này của lý thuyết sóng cổ điển về ánh sáng, ta biến đổi sơ đồ thí nghiệm ban đầu một chút (như Hình 3.2). Bây giờ ta thay nguồn một chiều không đổi trong thí nghiệm 1 bằng nguồn một chiều biến đổi, thậm chí còn có thể đảo cực. Đồng thời, ta lắp một von kế song song với nguồn này để xác định hiệu điện thế giữa anốt vòng và catốt quang.

Bởi vì bây giờ anốt vòng lại nối với cực âm của nguồn một chiều, chuyển động của các electron cũng mang điện âm, bị hãm lại. Như vậy, chuyển động của electron về phía anôt sẽ bị hãm bởi thế năng:

$$E_h = e\,.\,U \qquad (3.3)$$

với U là hiệu điện thế giữa hai cực trong mạch: điện thế dương ở catôt quang (!) và điện thế âm ở anôt vòng (!). Ta thấy lại công thức năng lượng hãm bằng tích của điện tích hạt và hiệu điện thế giữa các cực mà hạt chuyển động.

Để tìm động năng của electron khi thay đổi cường độ bức xạ, ta chọn một hiệu điện thế U^* sao cho các electron sau khi bứt ra khỏi



Hình 3.2. Cấu trúc thí nghiệm thứ hai đo hiệu ứng quang điện

---

kim loại bị hãm mạnh đến mức không đến được anốt vòng, nghĩa là ampe kế không ghi nhận dòng điện nào Khi đó, ta có:

$$O = E_d - E_h \qquad (3.4)$$

Như vậy, hiệu điện thế U^* là độ đo động năng của electron mới được giải phóng. Chúng ta tiến hành liên tục các thí nghiệm dạng này với các tần số thay đổi nối tiếp nhau.

Quan sát. Hiệu điện thế ngược chiều U^* cần thiết để hãm hoàn toàn các electron, trái với điều ta chờ đợi, lại không thay đổi khi thay đổi cường độ bức xạ: U^* độc lập với cường độ bức xạ. Trong khi đó, U^* lại tăng khi tần số bức xạ tăng.

Đánh giá. Thực nghiệm chỉ ra rằng, động năng của electron được giải phóng độc lập với cường độ bức xạ. Chúng chỉ phụ thuộc vào tần số bức xạ: tần số bức xạ càng lớn thì hiệu điện thế ngược U^* cần thiết càng lớn và do đó động năng của electron càng lớn.

Những kết quả thu được từ thí nghiệm 1 và thí nghiệm 2 không thể giải thích theo cách cổ điển, vì chúng mâu thuẫn với những tiên đoán của lý thuyết cổ điển.

Einstein đã giải quyết mâu thuẫn này như thế nào?

Công lao đáng kể của Einstein là ở chỗ, ông đã giải thích các kết quả thực nghiệm xung quanh hiệu ứng quang điện bằng cách sử dụng *giả thuyết lượng tử* của Planck. Nếu ta công nhận bức xạ điện từ là dòng của các lượng tử ánh sáng, tức là những phần năng lượng riêng lẻ, ta có thể giải thích các kết quả thực nghiệm trên như sau.

Với thí nghiệm thứ nhất

Trước hết, ta định nghĩa *cường độ I* của bức xạ điện từ là phần năng lượng ΔE tải qua tiết diện ΔA trong khoảng thời gian Δt. Ta có:

$$I = \frac{\Delta E}{\Delta A.\Delta t} \tag{3.5}$$

Trong điện động lực học cổ điển, với cùng một tần số bức xạ, các giá trị ΔE có thể thay đổi liên tục và nhỏ tùy ý.

Theo giả thuyết lượng tử Planck, bức xạ điện từ chỉ có thể hấp thụ và phát xạ từng lượng tử có giá trị:

$$\Delta E = h\upsilon \tag{3.6}$$

hay nếu ta biến đổi một chút theo $c = \upsilon\lambda$:

$$\Delta E = \frac{hc}{\lambda} \tag{3.7}$$

Bằng quan niệm rằng, bức xạ điện từ có bản chất lượng tử ở mọi nơi chứ không chỉ bó gọn trong các quá trình hấp thụ hay phát xạ, nghĩa là đâu đâu cũng tồn tại lượng tử ánh sáng ΔE, Einstein đã giải thích được những kết quả thực nghiệm hết sức khác thường. Theo giả thuyết của ông, năng lượng của bức xạ điện từ chỉ luôn tồn tại dưới dạng lượng tử hóa và bức xạ điện từ là dòng các lượng tử ánh sáng gọi là các *photon*.

Bởi vì mỗi một trong số các photon không thể phân chia này chỉ có thể trao năng lượng của nó cho một electron duy nhất tại catốt quang, nên khi tăng cường độ bức xạ, tức là tăng số photon đi qua một đơn vị diện tích trong một đơn vị thời gian (xem công thức 3.5), sẽ tăng thêm số electron được giải phóng khỏi catốt. Tuy nhiên, năng lượng của mỗi photon *riêng lẻ* lại hoàn toàn không phụ thuộc vào số photon đập vào một đơn vị diện tích trên bề mặt ca tôt trong một đơn vị thời gian, và do đó chẳng liên quan gì với cường độ bức xạ điện từ. Giá trị năng lượng mỗi photon chỉ phụ thuộc duy nhất vào tần số (công thức 3.6) hay bước sóng (công thức 3.7) chứ không chịu ảnh hưởng của bất cứ nhân tố nào khác.

Nếu năng lượng của các photon riêng lẻ tới catôt, do tần số quá thấp, còn nhỏ so với công thoát của electron, thì khi đó sẽ chẳng có electron nào được giải phóng, bất kể có bao nhiêu photon tới đập vào một đơn vị diện tích trên catôt trong một đơn vị thời gian – nghĩa là độc lập với cường độ bức xạ. Do đó, buộc phải có một *tần số giới hạn* ν_{min} sao cho:

$$\nu_{min} = \frac{W_{thoát}}{h} \tag{3.8}$$

Để electron có thể được giải phóng, năng lượng photon ít nhất phải bằng công thoát $W_{thoát}$ của electron, có nghĩa tần số bức xạ ít nhất phải bằng ν_{min}. Với tần số lớn hơn tần số giới hạn này, electron mới có thể được giải phóng và khi đó mới có thể thấy và đo được dòng qua amper kế.

Với thí nghiệm thứ hai

Chúng ta lại xuất phát từ những bước mở rộng của Einstein đối với thuyết lượng tử Planck: Nếu một photon có năng lượng E_{photon} đập vào một electron và nếu E_{photon} lớn hơn $W_{thoát}$ thì electron sẽ được giải phóng ra khỏi kim loại. Điều gì sẽ xảy ra với hiệu năng lượng E_{photon} - $W_{thoát}$? Thật đơn giản: phần năng lượng dư thừa của photon đến sẽ chuyển thành động năng của electron bay ra.

Einstein đã thể hiện điều đó trong một phương trình sau này được gọi là *phương trình Einstein:*

$$E_đ = h\nu - W_{thoát} \quad (3.9)$$

Từ phương trình này ta dễ dàng nhận thấy, động năng của electron chỉ phụ thuộc vào tần số chứ không chịu ảnh hưởng của cường độ bức xạ điện từ. Do đó, nếu tăng tần số trong thí nghiệm, thì động năng sẽ tăng theo. Trái lại, nếu tăng cường độ bức xạ thì chỉ dẫn tới sự tăng số electron được giải phóng (trong một đơn vị thời gian và trên một đơn vị tiết diện) chứ không làm thay đổi động năng của electron bay ra.

Như vậy, giải thích lý thuyết của hiệu ứng quang điện về mặt định lượng cũng đã phù hợp hoàn toàn với các quan sát thực nghiệm vừa trình bày ở trên.

Giá trị của *h* có thể xác định như thế nào?

Một tác dụng hữu ích khác trong thí nghiệm về hiệu ứng quang điện là ta có thể dùng thí nghiệm này để xác định lượng tử tác dụng Planck. Thử nhìn lại phương trình Einstein (3.9), ta phát hiện ra rằng đây chính là một phương trình bậc nhất biểu diễn đường thẳng:

$$E_đ = h\nu - W_{thoát} \quad (3.10)$$

$$y = mx + b \quad (3.11)$$

Nếu dùng hệ tọa độ trong đó trục *x* biểu diễn tần số bức xạ điện từ và trục *y* biểu diễn động năng electron bay ra, rồi đặt vào đây các giá trị thực nghiệm đo được, ta sẽ có một đường thẳng. Đường thẳng này, như ta có thể nhận thấy khi so với phương trình (3.11), có độ dốc là *h* và cắt trục *y* tại giá trị - $W_{thoát}$. Một giản đồ kiểu như vậy, nghĩa là dựng từ các giá trị đo được trong thí nghiệm, được biểu diễn trên Hình 3.3. Vì điểm cắt trên trục *y* là -3,36 . 10^{-19} J, tức công thoát của electron trong kim

loại làm ca tôt là 3,36 . 10^{-19} J. Nếu thay đổi vật liệu làm catôt trong thí nghiệm, thì công thoát điện tử $W_{thoát}$ sẽ thay đổi và điểm cắt trên trục $E_đ$ cũng sẽ thay đổi và ta sẽ có các đường thẳng song song biểu diễn (3.10).

Vì giả thuyết lượng tử Planck được Einstein sử dụng để giải thích hiện tượng quang điện liên quan tới năng lượng của các photon đập vào ca tốt, ta có thể biến đổi công thức ban đầu theo *h* và xác định hằng số Planck theo các dữ liệu thực nghiệm đã có:

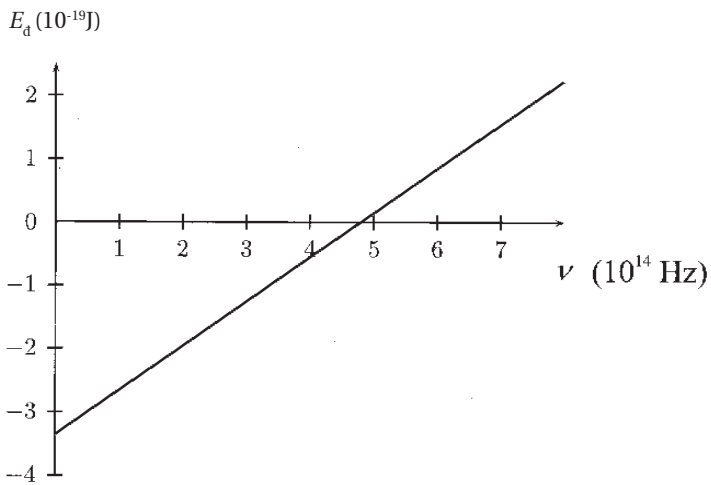
$$h = \frac{E_{ph}}{\nu_{ph}} \tag{3.12}$$

Để tính ra giá trị của *h*, chúng ta cần thông tin về năng lượng của photon. Năng lượng này theo logic chính bằng tổng động năng của electron bay ra và công thoát của electron đối với vật liệu làm điện cực:

$$E_{ph} = E_d + W_{thoát} \tag{3.13}$$

Và nếu phối hợp với (3.3) ta sẽ có:

$$E_{ph} = e\,.\,U^* + W_{thoát} \tag{3.14}$$



Hình 3.3. Giản đồ đánh giá cho thí nghiệm 2

Từ (3.12) và (3.14) ta có thể tính giá trị *h* từ những kết quả thực nghiệm:

$$h = \frac{e.U^* + W_{thoát}}{\nu_{ph}} \tag{3.15}$$

Giá trị của lượng tử tác dụng Planck tính theo cách này ở các phòng thí nghiệm lớn và với các kỹ thuật đắt tiền là 6,626 . 10^{-34} Js.

Qua cách giải thích của Einstein về hiệu ứng quang điện bằng việc mở rộng giả thuyết lượng tử của Planck, cuối cùng chúng ta đã nhận ra rõ ràng rằng, giả thuyết lượng tử mới của Planck với lượng tử tác dụng Planck h vốn chỉ được ông xem như là một *"sự can thiệp nhân tạo"*, có một ý nghĩa hết sức cơ bản và lớn hơn rất nhiều so với những gì người ta đánh giá trước đó.

4
Thí nghiệm hai khe

Thí nghiệm hai khe là gì?

Đã từ rất lâu, đối với các nhà triết học cổ xưa cũng như các nhà khoa học tự nhiên trước đây, câu hỏi hóc búa ánh sáng tạo nên từ sóng hay từ hạt là một câu đố chưa có lời giải. Thực ra, như chúng ta sẽ thấy một cách chi tiết sau này, cho đến tận hôm nay cũng vẫn chưa có được một giải đáp thật minh bạch. Câu hỏi này luôn là đối tượng thảo luận sôi nổi, là điểm khởi đầu của những cuộc chiến lý luận khốc liệt. Nhìn lại những quan điểm vật lý thống trị của các nhà khoa học tự nhiên trong từng giai đoạn lịch sử về vấn đề này, ta thấy nó cũng gần giống như trận đấu quần vợt gay cấn giữa các lý luận khác nhau.

"Thí nghiệm hai khe" được đề xuất bởi tài năng xuất chúng của nhà khoa học người Anh, Thomas Young (1773-1829) vào năm 1801 là sự khẳng định rõ ràng cho *lý thuyết sóng về ánh sáng*. Theo một câu chuyện mang màu sắc giai thoại, thì Young, khi quan sát các hiện tượng tự nhiên, đã hết sức tình cờ đi tới ý tưởng về khả năng giao thoa của ánh sáng. Khi quan sát đàn vịt bơi trên hồ nước, ông nhận thấy những làn sóng chồng lên nhau một cách bình yên, gây nên bởi những con vịt di động riêng lẻ. Chính do được khơi gợi bởi phát hiện này, Young đã thiết kế ra *thí nghiệm hai khe đối với ánh sáng*.

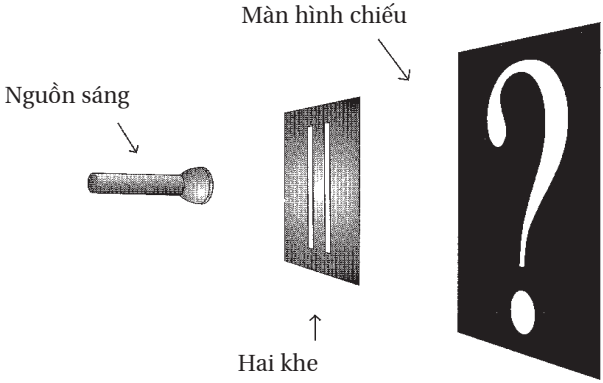
Trước thí nghiệm quan trọng này, bức tranh vật lý của thế giới chủ yếu được xác định bởi lý thuyết rất thành công của nhà khoa học người Anh Isaac Newton (1643-1727), theo đó, cơ học cổ điển là một trong những nền tảng của vật lý, nếu không muốn nói là nền tảng quan trọng nhất, và từ đó trở thành tiêu chuẩn của vật lý. Trong tác phẩm viết về quang học của mình, chính Newton đã trình bày lại *lý thuyết hạt về ánh sáng,* cơ sở giúp ông giải thích thành công các định luật về

khúc xạ và phản xạ. Theo lý thuyết của ông, ánh sáng trắng được tạo thành từ những hạt có mầu sắc khác nhau, gọi là các *vi thể*. Như vậy, tia sáng trắng là một dòng các vi thể sinh ra từ các hạt sáng có mầu sắc khác nhau.

Thực ra, trong thời gian này cũng đã tồn tại lý thuyết sóng về ánh sáng, như nhà vật lý Hà Lan, Christian Huygens (1629-1695) đã chỉ ra, cho phép giải thích sự khúc xạ và nhiễu xạ của ánh sáng. Tuy nhiên, do uy tín phi thường của Newton đặc biệt thành công (và cũng hay nổi giận), những lý thuyết khác với lý thuyết của chính ông đều không thể tìm được chỗ đứng trong giới chuyên môn, thậm chí trong những trường hợp cực đoan, còn bị chế nhạo nữa. Do những nguyên nhân đó, lý thuyết hạt của Newton được tận hưởng sự trường tồn trong cả trăm năm.

Bây giờ, thí nghiệm hai khe của Young dẫn tới một lý thuyết sóng mới về ánh sáng. Thí nghiệm vô cùng quan trọng này (xem Hình 4.1), được xây dựng như sau:

Một nguồn sáng phát ra ánh sáng đơn sắc về phía hai khe hẹp. Hai khe hẹp này được tạo ra trên một tấm chắn sáng. Đằng sau hai khe có



Hình 4.1. Thí nghiệm hai khe nhìn từ phía bên.

một màn ảnh, trên đó có thể quan sát hình ảnh của ánh sáng để phân tích xem điều gì đã xảy ra khi ánh sáng đi qua hai khe hẹp này.

Điều gì xảy ra với ánh sáng trong thí nghiệm hai khe?

Trước hết, chúng ta hãy tưởng tượng rằng, nguồn bây giờ không phải là thứ không trông thấy như ánh sáng, mà là một vật thể nào đó quen thuộc hơn và dễ nắm bắt hơn, chẳng hạn như một cầu thủ bóng đá hạng xoàng, sút những trái bóng một cách tùy ý và vô mục đích về phía hai khe trổ trên một bức tường.

Trong trường hợp này, ta có thể chỉ ra một cách khá đơn giản *phân bố xác suất đến* của các quả bóng sẽ có dạng như thế nào: đằng sau mỗi khe sẽ có mặt rất nhiều trái bóng, độc lập với việc có tồn lại khe kia hay không. Đối với trường hợp hai khe, công thức biểu thị điều đó có dạng:

$$P_{1+2} = P_1 + P_2 \tag{4.1}$$

Nghĩa là: phân bố xác suất tới P_{1+2} của những quả bóng khi mở đồng thời cả hai khe bằng tổng phân bố xác suất tới P_1 và P_2 khi lần lượt mở từng khe 1 và 2 riêng rẽ.

Tất nhiên, một cách trực giác và theo quy tắc tổng quát hóa thường thấy trong vật lý, ta chờ đợi công thức (4.1) là đúng đối với cả quả bóng quần vợt, quả bóng bàn hay những hòn bi..., bởi vì, xét cho cùng về mặt vật lý, các đối tượng cụ thể rất khác nhau này thực ra chỉ là một mà thôi.

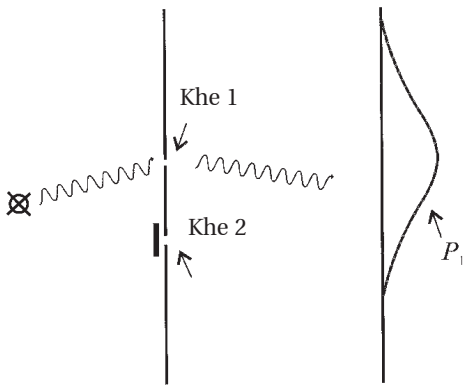
Trường hợp một khe

Bây giờ nguồn của chúng ta là ánh sáng, và chúng ta xuất phát từ quan niệm hạt của ánh sáng, như thế chúng ta chờ đợi trên màn hình phía sau khe sẽ có phân bố xác suất tới của photon giống như trường hợp quả bóng.

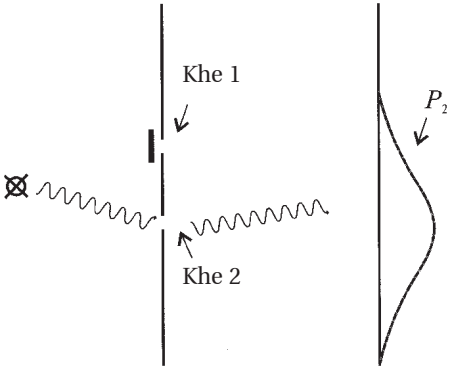
Chúng ta có sơ đồ mặt cắt của thí nghiệm hai khe với ánh sáng trong hai trường hợp khả dĩ riêng biệt. Đồ thị trên Hình 4.2 ứng với trường hợp mở khe 1, còn đồ thị trên Hình 4.3 là trường hợp mở khe 2. Trong cả hai trường hợp, bên trái là nguồn sáng, ở giữa là hai khe, còn bên phải là màn ảnh kèm theo đồ thị mô tả xác suất tới của các photon theo kiểu thông thường.

Tiến hành thí nghiệm trước hết với khe 1 mở, khe 2 đóng. Như ta thấy trên Hình 4.2, theo lý thuyết, trên màn ảnh sau khe 1, ta chờ đợi sẽ nhìn thấy một vạch sáng có kích thước giống như chính khe 1 trên màn chắn.

Trong thực tế, ngoài vạch sáng diễn tả *xác suất tới* P_1 của photon giống như mong đợi, nghĩa là sự phân bố cường độ sáng cổ điển theo khe photon đi qua, ta còn thấy vạch này mở rộng và mờ dần về hai phía, giống như lý thuyết sóng của huygens đã tiên lượng. *Sự nhiễu xạ qua khe* luôn xuất hiện rõ, nếu kích thước của khe cỡ bước sóng của bức xạ điện từ. Kết quả là ta thu được phân bố xác suất tới của photon có dạng phân bố Gauss hình chuông lý tưởng.



Hình 4.2. Phân bố xác suất tới của photon khi mở khe 1.



Hình 4.3. Phân bố xác suất tới của photon khi chỉ mở khe 2.

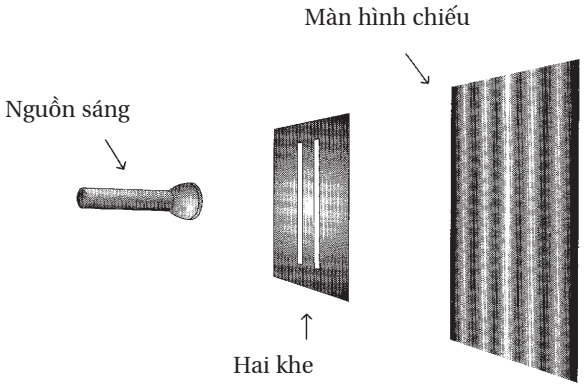
Đến đây ta có thể tự giải thích, khi thí nghiệm chỉ mở khe 2, ta sẽ có kết quả tương tự sau khe 2 và đó cũng là đường cong phân bố xác suất dạng Gauss hình chuông như trên Hình 4.3.

Trường hợp hai khe

Các kết quả của thí nghiệm hai khe với quả bóng hay các đối tượng "kiểu hạt" khác khiến chúng ta dự đoán rằng, phân bố xác suất tới của photon trong thí nghiệm hai khe đối với ánh sáng khi mở đồng thời cả hai khe 1 và 2 cũng đúng bằng tổng của hai phân bố xác suất tới khi chỉ mở từng khe riêng rẽ. Từ kinh nghiệm đời thường, ta đinh ninh rằng, điều dự đoán này sẽ phù hợp với thí nghiệm, như chúng ta đã từng biết với quả bóng hay hòn bi.

Nhưng kết quả thí nghiệm đã chứng tỏ rằng: *thực tế không phải như vậy!*

Trong thí nghiệm hai khe với ánh sáng, sự phân bố cường độ sáng hoàn toàn khác như thấy trên Hình 4.4. Phân bố cường độ thực nghiệm đo được trên màn ảnh thoạt nhìn là một loạt các vạch không thể nào



Hình 4.4. Vân giao thoa xuất hiện trong thí nghiệm

giải thích được: chúng là những dãy vạch sáng xen lẫn tối nối tiếp nhau. Trong thí nghiệm này, điều rõ ràng là:

$$P_{1+2} \neq P_1 + P_2 \tag{4.2}$$

Những photon đi qua khe 1 và những photon đi qua khe 2 không thể cộng lại với nhau một cách đơn giản như trong trường hợp các quả bóng trước đây. Cơ chế thực sự của hiện tượng này tinh tế hơn nhiều.

Giải thích các vân giao thoa như thế nào?

Xem xét thật chi tiết, hiện tượng này không phải là không giải thích được, nó có thể thuộc kiểu *"một chút + một chút = không là gì"*. Chẳng hạn, bây giờ chúng ta ném hai cục đá xuống hồ nước, quanh mỗi viên đá sẽ tạo ra một sóng bề mặt lan ra từ tâm và hai sóng đó có thể chồng lên nhau *(giao thoa)*. Tại những vị trí mà đỉnh hai sóng hay hõm hai sóng trùng nhau, độ lệch của dao động so với mức không – tức là mặt nước trong trạng thái nghỉ – sẽ được tăng cường (Hình 4.5 bên trái).

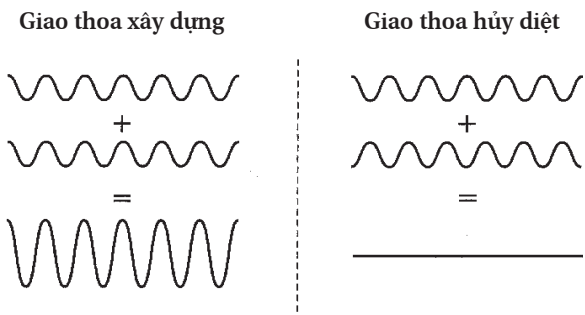
Lúc này ta có *giao thoa tăng cường nhau.* Ngược lại, nếu đỉnh sóng này gặp hõm sóng kia, biên độ dao động sẽ triệt tiêu lẫn nhau và ta không còn ghi nhận được sóng nữa (Hình 4.5 bên phải). Lúc này ta nói về *giao thoa hủy nhau.*

Trên thực tế, hiện tượng giao thoa của sóng nước rất dễ quan sát. Bằng những thí nghiệm khác có thể chứng minh rằng, mỗi loại sóng đều có tính chất này, tức là chúng có *khả năng giao thoa.* Các sóng âm, sóng trên dây, sóng trên lò xo... đều có thể giao thoa.

Trái lại, các đối tượng hạt như quả bóng đá, quả bóng bàn, viên bi và các vật tương tự không thể giao thoa như chúng ta đã xác định ở trên. Từ đó rút ra kết luận rằng, khả năng giao thoa là một tính chất chỉ có ở sóng.

Hãy hình dung ánh sáng như sóng, có thể giải thích được hiện tượng xảy ra trong thí nghiệm hai khe nhờ khả năng giao thoa xuất hiện khi chồng chất các sóng:

Tại những nơi mà đỉnh sóng hay hõm sóng trùng nhau, xuất hiện giao thoa tăng cường nhau và trên màn ảnh ta nhận được vân sáng. Tại những điểm mà hõm sóng này gặp đỉnh sóng kia, xuất hiện giao thoa hủy nhau và ta có vân tối.



Hình 4.5. Nguyên tắc giao thoa: cộng các ly độ để nhận được ly độ tổng hợp của sóng.

Nếu muốn tính *ly độ dao động tổng hợp* $y_{1+2}(t)$, tức là độ lệnh khỏi vị trí cân bằng tại thời điểm t, của sóng giao thoa tại một điểm x xác định nào đó, thì như đã nói ở trên, ta cộng các ly độ riêng lẻ $y_1(t)$ và $y_2(t)$ của từng sóng tại x, với chú ý đến dấu của chúng (xem Hình 4.5). Ly độ dao động tổng hợp tại tọa độ x ở thời điểm t sẽ là:

$$y_{1+2}(x; t) = y_1(x; t) + y_2(x; t) \tag{4.3}$$

Đối với *biên độ tổng hợp* (chính là ly độ cực đại) tại x ta sẽ có:

$$\overline{y}_{1+2}(x) = \overline{y}_1(x) + \overline{y}_2(x) \tag{4.4}$$

Vì *cường độ* sóng tại x được định nghĩa là bình phương biên độ, ta có

$$I_1(x) = \overline{y}_1^2(x)\ I_2(x) = \overline{y}_2^2(x) \tag{4.5}$$

Đối với cường độ sóng giao thoa tổng hợp, ta có:

$$I_{1+2}(x) = (\overline{y}_1(x) + \overline{y}_2(x))^2 \tag{4.6}$$

Chính ở đây ta thấy rõ sự khác biệt cơ bản giữa phân bố xác suất tới của các đối tượng hạt (4.1) và phân bố cường độ của sóng (4.6) trong thí nghiệm hai khe. Như chúng ta thấy ở (4.6), phân bố cường độ tổng hợp của sóng I_{1+2} không phải là tổng phân bố cường độ của những sóng riêng phần:

$$I_{1+2}(x) \neq I_1 + I_2 = \overline{y}_1^2(x) + \overline{y}_1^2(x) \tag{4.7}$$

Phân bố cường độ của bức xạ điện từ nhìn trên quan điểm lý thuyết lượng tử thì không gì khác chính là phân bố xác suất tới P của photon. Vì photon là các *hạt* - (sáng) chúng phải tuân theo phương trình (4.1). Bây giờ thí nghiệm lại chỉ ra cho chúng ta thấy rằng, khi giải thích các kết quả của thí nghiệm hai khe, chúng ta phải sử dụng mô hình sóng của ánh sáng để có thể tính ra phân bố cường độ phù hợp với thực nghiệm.

Ánh sáng chính là một sóng?

Khẳng định ngay như vậy là chưa ổn, bởi vì với một đối tượng vật lý không nhìn thấy được như bức xạ điện từ ta không thể quyết định một cách đơn giản như thế. Tuy nhiên, có thể khẳng định dứt khoát rằng, bức xạ điện từ là một cái gì đó không thể mô tả theo cách hiểu vĩ mô, cổ điển kiểu "mô hình-sóng-*hay là*-hạt" của chúng ta.

Bây giờ ta biết rằng, trong một số thí nghiệm nhất định (chẳng hạn thí nghiệm hai khe) bức xạ điện từ có đặc tính sóng, nhưng trong một số thí nghiệm khác (như ở hiệu ứng quang điện), chúng lại thể hiện đặc tính hạt. Tuy nhiên, bức tranh cổ điển của chúng ta về một sóng hay một hạt ở đây chỉ là *mô hình hình thức*, hay nói rõ hơn, *mô hình làm việc*, để mô tả một cái gì đó khác với kinh nghiệm và óc tưởng tượng thường ngày của chúng ta, giống như những đối tượng của thế giới vi mô. ánh sáng luôn luôn là sự huyền hoặc và sẽ vẫn là như thế, vì nó mang "lưỡng tính trong một bản thể" vốn đặc trưng cho cơ học lượng tử.

5
Thí nghiệm hai khe với electron

Có thể thực hiện thí nghiệm hai khe với electron được hay không?

Bây giờ, sau khi đã biết rằng, trong thí nghiệm hai khe bức xạ điện từ thể hiện rõ đặc tính sóng, chúng ta có thể nghiên cứu xem, điều gì sẽ xảy ra, nếu thay cho bức xạ điện từ ta dùng chùm tia electron, nghĩa là nguồn sẽ phát ra một dòng "hạt thực sự". Khi đó, về cơ bản, ta phải thay đổi cấu trúc thí nghiệm hai khe của Young sao cho chúng có thể dùng được với electron.

Nhưng thực tế chứng tỏ rằng, một thí nghiệm như thế thật ra rất khó thực hiện. Cho đến giữa thế kỷ trước, giới vật lý dường như đã thống nhất: không thể làm một thí nghiệm như vậy. Thật bất ngờ, năm 1957 nghiên cứu sinh Claus lại có bước đột phá thành công. Trong thí nghiệm của mình, ông đã chế tạo ra những màng mỏng kim loại có chứa khe với bề rộng cỡ 0,5 μm (= 0,5. 10^{-6} m). Tiếp nữa, ông đã giải quyết được vấn đề khuếch đại những dấu vết của electron trên màn hình khiến chúng đủ mạnh để có thể ghi nhận được.

Điều gì xảy ra trong thí nghiệm hai khe với electron?

Về cơ bản cấu tạo cũng như việc tiến hành thí nghiệm hai khe với electron, như ta có thể hình dung, giống như trong thí nghiệm với bức xạ điện từ. Điểm khác biệt đáng kể duy nhất trong thí nghiệm với electron là màn ảnh trong thí nghiệm ánh sáng được thay bằng một tấm kính ảnh để khi electron riêng lẻ tác dụng lên đó sẽ để lại những vết đen tương ứng.

Khe đơn

Nguồn electron truyền chùm tia electron tới khe. Những electron đi qua khe có thể ghi nhận trên tấm kính ảnh (Hình 5.1). Tiến hành thí nghiệm khi mở khe 1, đúng như chờ đợi, ta nhận thấy phân bố xác suất tới có giá trị rất cao tại những điểm nằm ngay trên đường thẳng từ nguồn đi qua khe và giảm dần khi ra xa miền này. Nếu bây giờ lại mở khe 2 và đóng khe 1, thì phân bố xác suất nhận được trên kính ảnh có cùng một dạng, nhưng nằm trên vị trí tới tương ứng với khe 2.

Cần nói ngay rằng, phân bố xác suất tới của electron trên tấm kính ảnh, về mặt định tính, giống hệt như phân bố mà ta đã gặp với bức xạ điện từ trước đây. Điều này cũng chẳng có gì đáng lo lắng, vì như sẽ thấy trong chương 7 khi thảo luận về hệ thức bất định Heisenberg, hiện tượng *nhiễu xạ qua khe hẹp* cũng có thể được giải thích kiểu cơ học lượng tử với mẫu hạt.

Hai khe

Bây giờ, ta đi tiếp một bước nữa: mở đồng thời cả hai khe. Ta chờ đợi rằng, phân bố xác suất tới của các electron trong trường hợp này sẽ bằng tổng của các xác suất tới riêng rẽ P_1 và P_2, tức là:

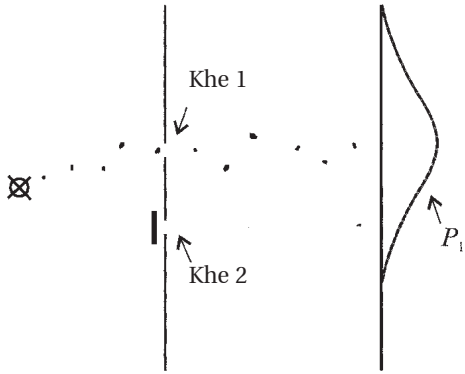
$$P_{1+2} = P_1 + P_2 \tag{5.1}$$

Bởi vì, như đã bàn luận trong chương 4, đối với các đối tượng hạt như electron, sau hai khe hẹp là một tập hợp các hạt được tạo thành từ tổng hai tập hợp ứng với hai khe riêng rẽ.

Thật đáng tiếc, thí nghiệm đã chứng tỏ rằng: *kết quả không phải như vậy!* Thay vì phân bố xác suất tới của electron giống như trên Hình 5.2, chúng ta lại nhận được một mẫu vân giao thoa giống như trường hợp thí nghiệm hai khe với bức xạ điện từ. Thành thử, trong thí nghiệm hai khe với electron ta cũng có:

$$P_{1+2} \neq P_1 + P_2 \tag{5.2}$$

Tiếp theo, chắc chắn là ta không thể giải thích các vân giao thoa trong thí nghiệm hai khe với electron bằng *mô hình hạt của electron,* vì mô hình hạt sẽ cho một tiên đoán về phân bố xác suất tới của electron trên tấm kính ảnh hoàn toàn khác so với kết quả thí nghiệm. Như vậy, dù muốn hay không, chúng ta cũng phải làm bạn với ý tưởng rằng, trong những điều kiện xác định, electron cũng có thể và cần phải được mô tả bằng *mô hình sóng,* bởi vì một khả năng giải thích khác dựa trên mô hình hạt của electron là không thể phù hợp. Cách giải thích kết quả thí nghiệm trong khuôn khổ mô hình sóng cho phép hiểu các vân giao thoa quan sát được như sau: các vân xuất hiện trên tấm kính ảnh là kết quả giao thoa tăng cường nhau hay giao thoa hủy nhau của sóng electron.



Hình 5.1. Xác suất tới của electron khi chỉ mở khe 1.

Có thể giải thích các vân giao thoa bằng cách khác không?

Tới nay, ta chỉ loay hoay quanh lý thuyết sóng electron cách này hay cách khác. Về nguyên tắc, ta có thể suy luận như sau: các electron (khảo sát từ mô hình hạt) có thể bằng một cách nào đó tương tác với nhau sau khi đã đi qua hai khe, để rồi xuất hiện trên một vị trí xác định nào đó, chẳng hạn vân sáng, trên tấm kính ảnh. Nghĩa là, khi một electron thoát ra khỏi khe 1 và nhận thấy một electron khác bay ra qua khe 2, chúng có thể có một cách thoả thuận nào đó (thí dụ tương tác qua cách trao đổi các hạt) để được phát hiện chỉ trên địa điểm đã thỏa thuận.

Thuần túy lý thuyết mà xét, vẫn có thể giải thích các vân giao thoa và đồng thời bảo tồn mô hình hạt của electron. Cho nên, phần tiếp sau ta sẽ thử xem, một giả thiết kiểu như vậy liệu có thể dẫn tới những kết quả phù hợp với dữ liệu thực nghiệm hay không. Về mặt thực nghiệm, có thể giảm cường độ nguồn elctrron đến mức tối thiểu, khiến cho tại mỗi thời điểm t tùy ý chỉ có một electron duy nhất trong thiết bị thí nghiệm. Điều này cũng có nghĩa là không có bất cứ tương tác nào giữa electron bay ra từ khe 1 và electron bay ra từ khe 2. Các electron bay ra từ khe 1 không thể biết khe 2 cũng đang mở (thậm chí là có tồn tại hay không) và do đó xuất hiện trên tấm kính ảnh với phân bố xác suất tới giống như trường hợp một khe.

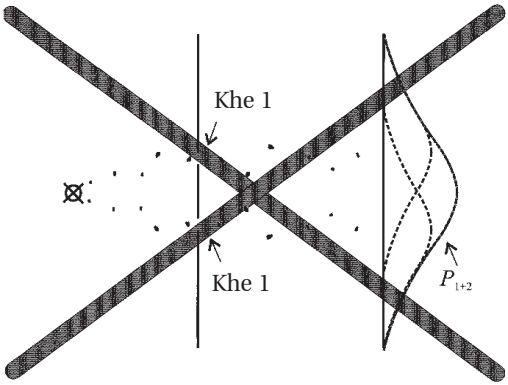
Nếu cứ cho thí nghiệm tiếp diễn liên tục như vậy và quan sát trên kính ảnh, chúng ta hẳn sẽ tìm thấy phân bố xác suất tới đúng bằng tổng phân bố xác suất tới của các hạt riêng lẻ, với khoảng 50% là electron bay qua khe 1 và 50% đến từ khe 2. Nghĩa là có thể viết:

$$P_{1+2} = P_1 + P_2 \tag{5.3}$$

Sở dĩ như vậy là vì mỗi hạt-electron riêng lẻ chỉ có thể đơn độc bay qua một khe và không "biết" gì về sự tồn tại của khe kia. Mỗi electron đều "nghĩ" như thế, nó bay đơn độc qua một khe, và để lại dấu vết trên kính ảnh giống *y* như phân bố xác suất tới trong trường hợp một khe. Từ (5.3) ta thấy hình ảnh thu được trên kính ảnh sẽ phải là hình ảnh đã bị gạch đi trên Hình 5.2.

Nhưng, hóa ra là, chúng ta đã hoàn toàn sai với giả thuyết của mình: việc tiến hành thí nghiệm hai khe thậm chí chỉ ra rằng vân giao thoa xuất hiện ngay cả khi chỉ có *electron riêng lẻ*[4]. *Ở* đây sẽ xuất hiện câu hỏi: Vì sao có thể xảy ra điều đó? Electron riêng lẻ chỉ có thể chọn và quyết định lấy một trong hai khe. Nhưng nếu chúng bay qua chỉ một khe thôi, thì làm sao lại có giao thoa? Muốn vậy, chúng phải tự phân thân, rồi đồng thời bay qua cả hai khe bằng một cách nào đó, vì chỉ có thế chúng mới có thể tự giao thoa với chính mình ở vùng sau khe.

Hình 5.2. Xác suất tới của các electron được chờ đợi trong thí nghiệm hai khe



[4] Nếu bạn đọc nào có một chút nghi ngờ gì đó ở đây, xin kiên nhẫn một chút, trong chương 7 vấn đề này sẽ được trình bày kỹ hơn.

Nhưng vấn đề là ở chỗ, electron lại không thể phân chia được. Với "giả thuyết phân chia electron" ở trên, nếu chúng ta tiếp tục làm thí nghiệm trong suy tưởng kiểu như vậy, với một số ngày càng nhiều hơn các hệ hai khe hẹp nối tiếp nhau, và với cách bố trí khéo léo, hợp lý các màn hình, ta sẽ có thể ghi nhận được "những hạt-một phần tư, - một phần tám, - một phân mười sáu electron". Nhưng cho đến nay vẫn chưa có nhà vật lý thực nghiệm nào quan sát được hiện tượng này. Đơn giản là electron là một lượng tử không thể phân chia được nữa.

Electron phải được nhìn nhận như sóng?

Trong giải thích thí nghiệm hai khe với electron, chúng ta không còn một cách lựa chọn nào khác là phải mô tả electron như một sóng. Trong chương 4 chúng ta đã lý giải cách tính toán phân bố cường độ trong thí nghiệm hai khe với bức xạ điện từ như thế nào? Chúng ta đã cho rằng, cường độ toàn phần tại một điểm *x* tùy ý bằng bình phương tổng biên độ các sóng riêng lẻ, nghĩa là:

$$I_{1+2}(x) = (\overline{y}_1(x) + \overline{y}_2(x))^2 \qquad (5.4)$$

Bây giờ, để mô tả toán học sự giao thoa của các electron trong thí nghiệm hai khe, chúng ta cũng phải làm tương tự. Điều khác nhau duy nhất xuất hiện ở đây là chúng ta không tính cường độ của chuyển động sóng thực (như sóng nước chẳng hạn) mà là tính xác suất tới của electron, một khái niệm thuần túy lý thuyết và toán học.

Biên độ sóng electron là gì? Trong cơ học lượng tử biên độ $\overline{y}_1(x)$ cũng như của sóng thực trong phương trình (5.4) được dùng để mô tả *biên độ xác* $\overline{y}_2(x)$ *suất*, một khái niệm dẫn ta trở về với nhà vật lý lượng tử Max Born (1882-1970). Chúng ta dùng ký hiệu *a* (ở chữ *amplitute*

- biên độ) cho khái niệm này. Như thế, đối với phân bố xác suất của electron trên màn hình, tương tự (5.4) ta sẽ có:

$$P_{1+2}(x) \neq (a_1(x) + a_2(x))^2 \tag{5.5}$$

Nhờ mô hình sóng như vậy của electron ta có thể khảo sát chi tiết các vân giao thoa, tức là tính bề rộng và vị trí của vân trên tấm kính ảnh.

Thật thú vị khi biết rằng, ngay từ năm 1923 nhà vật lý người Pháp louis de Broglie đã có phát hiện sau: các vân nhiễu xạ quan sát thấy trong thí nghiệm nhiễu xạ của electron trên mạng tinh thể có thể giải thích nhờ mô hình sóng của electron. Ông đã sử dụng công thức sau này gọi là *bước sóng de Broiglie*:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \tag{5.6}$$

theo đó bước sóng của một hạt bằng lượng tử tác dụng Planck chia cho xung lượng của hạt. Cũng chính từ đây, ông đã tính ra bước sóng của electron.

Không phải ngẫu nhiên mà bước sóng electrron được dùng trong lý thuyết sóng giải thích thí nghiệm hai khe với electron lại trùng với các giá trị trong tính toán của de Broglie.

Cũng cần lưu ý thêm, theo cách giải thích xác suất về cơ học lượng tử của Max Born, biên độ xác suất và bước sóng gán cho electron không được nhìn nhận như những đặc tính *thực* của electron như trong trường hợp mô tả các sóng cổ điển kiểu sóng nước. Chúng chỉ là một phần của những mô hình hình thức mà chúng ta cần phải sử dụng để tính toán lý thuyết các kết quả thực nghiệm.

Cần phải rút ra những kết luận gì từ kết quả thực nghiệm?

Trên cơ sở những sự kiện vừa trình bày, chúng ta cần phải mở rộng khái niệm trước đây về *lưỡng tính sóng-hạt* của bức xạ điện từ, ít nhất là đối với electron. Bởi vì, cũng giống như photon, các electron, như chúng ta đều biết, trong một số thí nghiệm (ví dụ thí nghiệm Joseph Thomson) phải được mô tả bằng mô hình hạt, và trong một số thí nghiệm khác (ví dụ thí nghiệm hai khe hay thí nghiệm nhiễu xạ) lại phải xem như là các sóng.

Nói cho thật chính xác, khái niệm lưỡng tính sóng-hạt vẫn còn phần nào chưa thật rõ ràng. Vấn đề ở đây thực ra là, trong thí nghiệm hai khe – ngay trong một thí nghiệm thôi, mà electron *vừa thể hiện* tính chất hạt *lại vừa thể hiện* tính chất sóng. Một mặt, khả năng giao thoa của electron trong thí nghiệm hai khe phải được mô tả bởi mô hình sóng, nhưng mặt khác, electron luôn luôn được ghi nhận một cách riêng lẻ và toàn vẹn, lại phản ánh đặc tính hạt. Về vấn đề này, vấn đề đã tạo ra chất liệu phong phú cho rất nhiều cuộc tranh luận giữa Bohr và Einstein, chúng ta sẽ thảo luận trong chương 8 và chương 9.

6
Hiệu ứng Compton

Hiệu ứng Compton là gì?

Sau khi Einstein đã làm sống lại *mô hình hạt của ánh sáng* vào năm 1905, *hiệu ứng Compton* lại một lần nữa khẳng định bằng thực nghiệm lý thuyết cho rằng bức xạ điện từ tạo nên bởi các photon.

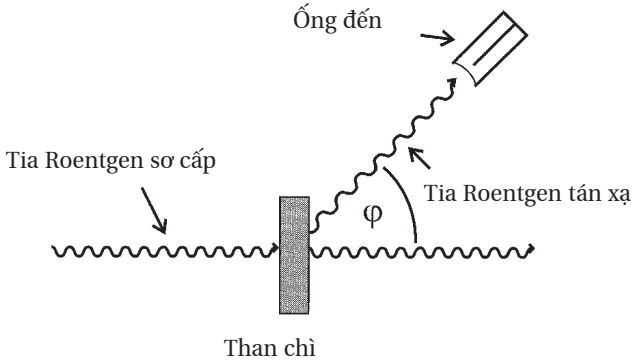
Năm 1923 nhà khoa học người Mỹ, Arthus Compton (1892-1962) đã tiến hành thí nghiệm về tán xạ của tia Rơnghen trên một khối than chì (xem hình 6.1). Trong thí nghiệm đó, ông chiếu tia Rơnghen đơn sắc vào một tấm than chì và khảo sát bước sóng của tia Rơnghen tán xạ. Từ những quan sát của mình, Compton đã khẳng định một cách bất ngờ rằng, bước sóng của tia Rơnghen tán xạ thay đổi tùy thuộc vào góc tán xạ φ:

Phần tia bức xạ không bị lệch sau khi tán xạ, nghĩa là vẫn truyền đúng theo phương của tia tới, sẽ không thay đổi bước sóng.

Còn ở những phần tia bức xạ bị tán xạ một góc đáng kể khi đi qua khối than chì thì bước sóng của nó thay đổi, cụ thể là bước sóng λ' của tia tán xạ *lớn hơn một cách đáng kể* so với bước sóng λ của sóng tới.

Hiển nhiên, khi này sẽ nẩy sinh câu hỏi: vì sao tần số của tia Rơnghen lại nhỏ đi như vậy?

Compton nhận ra rằng, hiện tượng này có thể dễ dàng giải thích bằng mô hình hạt của bức xạ điện từ khi cho rằng các photon của tia Rơnghen *va chạm đàn hồi* với các electron trong trạng thái liên kết của khối than chì. Theo quy luật của va chạm đàn hồi, các photon sẽ truyền một phần năng lượng cho electron và do đó sau khi va chạm sẽ có một năng lượng nhỏ hơn. Đến đây, theo giả thuyết lượng tử của Planck và lý thuyết photon của Einstein bức xạ sẽ có tần số nhỏ hơn và do đó có bước sóng lớn hơn.



Hình 6.1. Sơ đồ thí nghiệm tán xạ của Compton

Vì năng lượng liên kết của electron trong nguyên tử nói chung chỉ có giá trị cỡ vài eV, năng lượng cần để bứt electron ra khỏi nguyên tử có thể bỏ qua khi bắn khối than chì bằng chùm tia Rơnghen có năng lượng rất cao (với bước sóng $\lambda = 7{,}11 \,.\, 10^{-11}$ m thì năng lượng của photon tương ứng là $E = 17{,}4 \,.\, 10^{13}$ eV). Như vậy, có thể coi electron trong than chì gần như ở trạng thái tự do. Điều đó có nghĩa là, trong thực tế, toàn bộ năng lượng photon chuyển cho electron sẽ biến thành động năng của electron. Ta có thể áp dụng *định luật bảo toàn xung lượng và năng lượng*:

$$\vec{p}_{photon} + \vec{p}_{electron} = \vec{p}'_{photon} + \vec{p}'_{electron} \tag{6.1}$$

hay là:

$$E_{photon} + E_{electron} = E'_{photon} + E'_{electron} \tag{6.2}$$

Tốc độ của electron liên kết lỏng lẻo trước va chạm có thể bỏ qua so với tốc độ đặc biệt cao của photon. Bởi thế, trong khảo sát sau đây, có thể xem electron là ở trạng thái nghỉ trước khi va chạm.

Có thể tính sự thay đổi bước sóng như thế nào?

Thật lý thú khi tìm hiểu xem người ta tính sự thay đổi bước sóng của chùm tia Rơnghen tới tán xạ trên những electron gần như tự do của vật thể gây tán xạ phụ thuộc vào góc tán xạ j như thế nào?

Trước hết ta tìm xung lượng của một photon. Xuất phát từ *giả thuyết lượng tử* của Planck về sự phụ thuộc của năng lượng photon vào tần số của nó:

$$E = h\nu \tag{6.3}$$

Lại dùng hệ thức về *sự tương đương giữa khối lượng và năng lượng* của Einstein trong thuyết tương đối hẹp:

$$E = mc^2 \tag{6.4}$$

Ta có thể tìm được khối lượng động *m* của photon:

$$m_{photon} = \frac{h\nu}{c^2} \tag{6.5}$$

Để tìm xung lượng ($p = m$v) của một photon, ta chỉ cần nhân khối lượng photon với tốc độ chuyển động của nó:

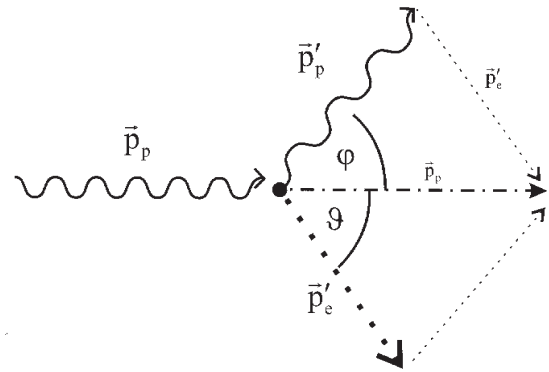
$$p_{photon} = m_{photon} . c = \frac{h\nu}{c} \tag{6.6}$$

Sử dụng hệ thức $c = \nu\lambda$ và (6.6), ta được:

$$p_{photon} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \tag{6.7}$$

Bây giờ ta xem thật kỹ hình 6.2.

Theo phép cộng vectơ, tổng xung lượng photon và xung lượng electron sau tán xạ bằng xung lượng của photon tới ban đầu. Đây chính là nội dung của định luật bảo toàn xung lượng. Để tính xung lượng của electron sau va chạm, ta lưu ý tam giác phía trên hình 6.2 đồng thời sử dụng định lý hàm số cosin ($a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos\alpha$):



Hình 6.2. Xung lượng trong tán xạ Compton của một photon rơnghen trên một electron tự do.

$$p'^2_{elektron} = p^2_{photon} + p'^2_{photon} - 2p_{photon}p'_{photon}.\cos\varphi \qquad (6.8)$$

Thay xung lượng photon theo (6.7) vào, ta được:

$$p'^2_{elektron} = \frac{h^2}{\lambda^2} + \frac{h^2}{\lambda'^2} - 2\frac{h}{\lambda}\frac{h}{\lambda'}.\cos\varphi \qquad (6.9)$$

Bây giờ, ta quay về định luật bảo toàn năng lượng (6.2). Giải (6.2) theo λ' ta sẽ có:

$$E'_e = E_p + E_e - E'_p \qquad (6.10)$$

Đã biết rằng, năng lượng photon được tính theo giả thiết lượng tử Planck, trong đó tần số sau va chạm là v'. Năng lượng của electron *nghỉ* được tính theo công thức biểu diễn sự tương đương khối lượng-năng lượng (6.4). Vậy năng lượng E'_e của electron sau va chạm là:

$$E'_e = hv + m_e c^2 - hv' \qquad (6.11)$$

Theo lý thuyết tương đối hẹp, quan hệ giữa xung lượng và năng lượng của một hạt tùy ý được biểu diễn qua công thức *quan hệ xung- năng lượng:*

$$E = \sqrt{p^2c^2 + m^2c^4} \qquad (6.12)$$

Giải (6.12) theo m^2c^4 cho electrron sau tán xạ, ta thu được:

$$E'^2_e - p'^2_e c^2 = m_e^2 c^4 \tag{6.13}$$

Trong (6.13) thay E'_e từ (6.10) và p'_e từ (6.8) ta sẽ có:

$$\left(E_p + E_e - E'_p\right)^2 - \left(p^2_{photon} + p'^2_{photon} - 2p_{photon}p'_{photon}.cos\varphi\right)c^2 = m_e^2 c^4 \tag{6.14}$$

Kết hợp phương trình trên với (6.11) và (6. 9) ta được:

$$\left(h\nu + m_e c^2 - h\nu'\right)^2 - \left(\frac{h^2}{\lambda^2} + \frac{h^2}{\lambda'^2} - 2\frac{h}{\lambda}\frac{h}{\lambda'}.cos\varphi\right)c^2 = m_e^2 c^4 \tag{6.15}$$

Chuyển vế đi, ta thu được:

$$m^2_e c^4 = h^2\nu^2 + 2h\nu m_e c^2 - 2h^2\nu\nu' + m^2_e c^4 - 2m_e c^2 h\nu' + h^2\nu'^2 - \left(\frac{h^2c^2}{\lambda^2} + \frac{h^2c^2}{\lambda'^2} - 2\frac{h^2c^2}{\lambda\lambda'}.cos\varphi\right) \tag{6.16}$$

Sau khi trừ $m_e^2c^4$ ở cả hai vế và thực hiện phép mở ngoặc, ta có:

$$0 = h^2\nu^2 + 2h\nu m_e c^2 - 2h^2\nu\nu' - 2m_e c^2 h\nu' + h^2\nu'^2 - \frac{h^2c^2}{\lambda^2} - \frac{h^2c^2}{\lambda'^2} + 2\frac{h^2c^2}{\lambda\lambda'}.cos\varphi \tag{6.17}$$

Sử dụng các công thức quen thuộc về tốc độ truyền sóng:

$$c = \lambda\nu \quad \Leftrightarrow \quad \nu = \frac{c}{\lambda} \tag{6.18}$$

Tính thêm:

Ở đây có thể đưa ra phép tính phụ cho số hạng bình phương trong (6.15):

$$(h\nu + m_e c^2 - h'\nu)^2$$
$$= h^2\nu^2 + h\nu m_e c^2 - h^2\nu\nu' + h\nu m_e c^2 + m^2_e c^4 - m_e c^2 h\nu' - h^2\nu\nu' - m_e c^2 h\nu' + h^2\nu'^2$$
$$= h^2\nu^2 + 2h\nu m_e c^2 - 2h^2\nu\nu' + m^2_e c^4 - 2m_e c^2 h\nu' - h^2\nu'^2$$

suy ra:

$$\frac{h^2c^2}{\lambda^2} = h^2\nu^2 \tag{6.19}$$

và:

$$\frac{h^2c^2}{\lambda\lambda'} = h^2\nu\nu' \tag{6.20}$$

Thay (6.19) và (6.20) vào (6.17), ta nhận được:

$$0 = h^2v^2 + 2hvm_ec^2 - 2h^2vv' - 2m_ec^2hv' + h^2v'^2 - h^2v^2 - h^2v'^2 + 2h^2vv'.\cos\varphi \tag{6.21}$$

Và cuối cùng, sau khi rút gọn, ta được:

$$0 = 2hvm_ec^2 - 2h^2vv' - 2m_ec^2hv' + 2h^2vv'.\cos\varphi \tag{6.22}$$

Chia (6.22) cho $2h$, sẽ có:

$$0 = vm_ec^2 - hvv' - m_ec^2v' + hvv'.\cos\varphi \tag{6.23}$$

Ghép theo thừa số chung m_ec^2 và $-hvv'$ ta nhận được:

$$0 = m_ec^2(v - v') - hvv'(1 - \cos\varphi) \tag{6.24}$$

hay:

$$m_ec^2(v - v') = hvv'(1 - \cos\varphi) \tag{6.25}$$

Chia hai vế của (6. 25) cho m_ec^2 và vv', ta được:

$$\frac{(v - v')}{vv'} = \frac{h(1 - \cos\varphi)}{m_ec^2} \tag{6.26}$$

Viết vế trái của phương trình trên thành hai phân số:

$$\frac{v}{vv'} - \frac{v'}{vv'} = \frac{h}{m_ec^2}(1 - \cos\varphi) \tag{6.27}$$

Tiếp tục rút gọn vế trái:

$$\frac{1}{v'} - \frac{1}{v} = \frac{h}{m_ec^2}(1 - \cos\varphi) \tag{6.28}$$

Nhân cả hai vế của (6.28) với c, ta được

$$\frac{c}{v'} - \frac{c}{v} = \frac{h}{m_ec}(1 - \cos\varphi) \tag{6.29}$$

Vì $\frac{c}{\nu} = \lambda$ (xem (6. 18)), ta có thể viết (6. 29) dưới dạng:

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c}(1 - \cos\varphi) \tag{6.30}$$

Hiệu số bước sóng $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$ trong phương trình (6. 30) không gì khác chính là sự thay đổi bước sóng gây ra bởi tán xạ của photon (của tia Rơnghen) trên các electron. Hiệu số này được gọi là *độ dịch chuyển Compton*. Như chúng ta dễ dàng nhận thấy, sự thay đổi bước sóng của bức xạ điện từ chỉ phụ thuộc vào góc tán xạ φ mà thôi, bởi vì tất cả phần còn lại trong (6.30) đều là hằng số.

Từ (6.30) cũng có thể thấy rằng, nếu góc tán xạ φ nhỏ, nghĩa là $1 - \cos\varphi \approx 0$, sự thay đổi bước sóng của photon cũng sẽ nhỏ. Còn nếu φ 0 lớn, tức $1 - \cos\varphi >> 0$, sự thay đổi bước sóng có giá trị lớn. $\Delta\lambda$ có giá trị cực đại khi góc tán xạ $\varphi = 180^0$:

$$\lambda' - \lambda = 2\frac{h}{m_e c} \tag{6.31}$$

Tất cả những tiên đoán lý thuyết này đều hoàn toàn trùng khớp với các quan sát thực nghiệm của Compton.

Sự thay đổi bước sóng trong tán xạ Compton khi $\varphi = 90^0$ được gọi là *bước sóng Compton* λ_C:

$$\lambda_C = \frac{h}{m_e c} = \frac{6{,}626.10^{-34} Js}{9{,}11.10^{-31} kg.3{,}0.10^8 m/s} = 2{,}424.10^{-12} m \tag{6.32}$$

Vì sao hiệu ứng Compton không xuất hiện ở ánh sáng nhìn thấy?

Đến đây, chúng ta có thể tự đặt câu hỏi: vì sao sự thay đổi tần số của bức xạ điện từ khi tán xạ trên những electron (gần như) tự do lại không quan sát thấy trên vùng phổ ánh sáng nhìn thấy. Chúng ta có thể hình

dung, chẳng hạn khi ánh sáng xanh chiếu tới một vật nào đó, sau tán xạ trở nên có mầu đỏ, tức là bức xạ nhìn thấy có bước sóng dài hơn. Tuy nhiên, trong thực tế điều đó đã không xảy ra. Thoạt nhìn, điều này quả là cũng đáng ngạc nhiên.

Với ánh sáng nhìn thấy, độ dịch chuyển Compton không quan sát thấy một cách rõ rệt bởi vì trong trường hợp này mối tương quan khối lượng giữa electron và photon là hết sức không thuận lợi. Khi quan sát va chạm đàn hồi lý tưởng, người ta nhận thấy, phần xung lượng được truyền sang đối tác va chạm là nhiều nhất nếu tỷ lệ khối lượng là 1:1.

Ta biết rằng, năng lượng của photon ánh sáng nhìn thấy khoảng 2,5 eV (ở vùng bước sóng cỡ $\lambda = 5.10^{-7}$). Trái lại, năng lượng của electron tính theo tương đương khối lượng-năng lượng (6.4) lại có giá trị cỡ 511.10^3 eV. Từ đó suy ra tỷ lệ khối lượng photon/electron là:

$$\frac{m_{photon}}{m_{elektron}} \approx \frac{1}{20000} \tag{6.33}$$

Để có thể so sánh trong khuôn khổ vĩ mô, ta hình dung một quả cầu nhỏ kim loại đập vào một bức tường thép vững chắc: quả cầu nhỏ sẽ bay ngược lại với xung lượng hầu như không đổi và phần xung lượng $(-2\vec{p}_{cầu})$ mà nó truyền cho bức tường thép với khối lượng cực lớn rõ ràng là nhỏ đến mức có thể bỏ qua. Năng lượng của quả cầu nhỏ có thể xem là không thay đổi.

Điều đó có nghĩa, để phần năng lượng chuyển giao đáng kể đến mức sự thay đổi bước sóng của photon tán xạ là quan sát được, thì tỷ lệ khối lượng photon/electron không được quá nhỏ. Đấy chính là lý do vì sao trong thí nghiệm của mình Compton đã sử dụng photon tới của bức xạ Rơnghen có năng lượng tương đương với năng lượng của electron nghỉ, điều kiện để có thể đo được phần năng lượng chuyển từ photon sang electron, và đó chính là điều không thể có với ánh sáng nhìn thấy.

Phải chăng hiệu ứng Compton chỉ có thể giải thích bằng mô hình hạt?

Chúng ta vừa chứng kiến, hiệu ứng Compton có thể được giải thích tuyệt vời bằng *mô hình hạt* của ánh sáng và bằng cách đó có thể tính được độ dịch chuyển bước sóng. Tuy nhiên, nói rằng mô hình hạt là khả năng *duy nhất* giải thích được hiệu ứng Compton lại là một sự nhầm lẫn thường thấy trong các tài liệu khoa học đại chúng cũng như trong các sách giáo khoa nơi học đường.

Chính bản thân Compton cũng đã nhận ra rằng, bên cạnh cách giải thích hiệu ứng bằng mẫu hạt của ánh sáng, cũng có thể chọn mô hình sóng để đưa ra sự dịch chuyển bước sóng trong hiệu ứng. Trong trường hợp này, có sự dịch chuyển bước sóng trong *hiệu ứng Doppler,* một hiệu ứng phản ánh tính chất sóng của ánh sáng, xảy ra khi có sự chuyển động tương đối giữa nguồn phát sóng và máy nhận sóng, khiến cho dù chỉ có một nguồn sóng mà tùy theo việc chọn hệ quy chiếu ta lại thu được những bước sóng khác nhau. Sự thay đổi bước sóng trong hiệu ứng Compton có thể giải thích theo quan niệm sóng như sau:

Electron ở trạng thái nghỉ được gia tốc đến tốc độ v nhờ sóng điện từ bước sóng λ đến đập vào nó. Vấn đề ở đây là đo bước sóng trong hệ qui chiếu nào: trong hệ (đứng yên) gắn với electron đứng yên hay trong hệ gắn với electron sau khi tán xạ với sóng điện từ. Hệ sau chuyển động với vận tốc $\vec{v}$ so với hệ trước. Do đó, giống như trong hiệu ứng Doppler, nếu λ là bước sóng đo được trong hệ gắn với electron chuyển động thì bước sóng đo được trong hệ gắn với electron đứng yên sẽ là λ' và $\lambda' > \lambda$. Nghĩa là bước sóng của sóng tán xạ sẽ lớn hơn bước sóng của ánh sáng tới một lượng $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$.

Bằng cách mô tả hiệu ứng này theo lý thuyết sóng, ta cũng sẽ có những tiên đoán lý thuyết định lượng về chuyển dịch bước sóng, và những tiên đoán này cũng trùng hợp với những tiên đoán nhận được từ lý thuyết hạt. Như vậy, mô tả lý thuyết sóng cũng có giá trị tương đồng bên cạnh mô tả bằng lý thuyết hạt mà ta đã khảo sát kỹ ở trên. Do đó, xin được nhấn mạnh một lần nữa, trái với sự trình bày sai lầm trong không ít cuốn sách vật lý, không chỉ mô hình hạt của ánh sáng mới cho phép ta hiểu và tính toán hiệu ứng Compton, mà mô hình sóng cũng có giá trị hoàn toàn tương đương.

7
Hệ thức bất định Heisenberg

Hệ thức bất định Heisenberg nói gì?

Hệ thức bất định Heisenberg là một trong những cơ sở căn bản nhất và trung tâm nhất của cơ học lượng tử. Đối với cơ học lượng tử, nguyên lý này có vai trò giống như những kiến thức về giải phẫu đối với các nhà *y* học. Thế nên, trong chương này chúng ta sẽ bàn đến bất đẳng thức rất quan trọng đó.

Để làm điều này, chúng ta hãy hình dung một đối tượng lượng tử, chẳng hạn như electron mà chúng ta đã từng khảo sát. Nếu chúng ta biết chính xác vị trí (tọa độ) x và xung lượng p (là tích của khối lượng m và tốc độ v) của hạt tại một thời điểm, thì từ những định luật cổ điển trong cơ học Newton chúng ta có thể xác chính xác trạng thái chuyển động của hạt đó tại bất cứ thời điểm nào khác.

Nền tảng của điều khẳng định này là những suy nghĩ của nhà vật lý và toán học người Pháp Pierre Simon de Laplace (1749-1827) với ý tưởng được biết tới dưới tên gọi *con quỷ Laplace* có thể phát biểu như sau: Nếu biết chính xác tọa độ và xung lượng của một hạt bất kỳ tại một thời điểm duy nhất bất kỳ, thì nhờ định luật Newton, một con quỷ thông tuệ có thể tính ra toàn bộ các sự kiện trong quá khứ, hiện tại và tương lai. Theo *thế giới quan quyết định luận này,* ngay từ thời điểm mới sinh ra, vũ trụ đã hoàn toàn xác định. Đương nhiên, đó là một cách diễn đạt đơn giản và dễ chấp nhận về mặt logic.

Thật thú vị khi để ý rằng, vào năm mới chỉ 26 tuổi (!), nhà vật lý lượng tử thiên tài Werner Heisenberg (1901-1976), bằng những tính toán của mình đã giáng cho quyết định luận cổ điển một đòn chí tử, khi trình bày *nguyên lý bất định Heisenberg* đầy tính cách mạng và tìm ra một hệ thức giới hạn giữa độ chính xác Δx về tọa độ và độ chính xác Δp về

xung lượng. Hệ thức có tính cách mạng và thoạt đầu có vẻ tà đạo này được phát biểu hết sức đơn giản như sau:

$$\Delta x \,.\, \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \tag{7.1}$$

Ký hiệu η ở đây không là gì khác so với những điều ta đã nói trong Chương 2, nó chính là hằng số hay xuất hiện nhất trong lý thuyết lượng tử $h/(2\pi)$ với trị giá:

$$\eta = \frac{h}{2\pi} \approx 1{,}055.10^{-34}\,\text{Js} \tag{7.2}$$

Chúng ta sẽ không dành nhiều thời gian cho hằng số này, mà tập trung vào lời tiên đoán cốt tử có giá trị vô cùng to lớn của bất đẳng thức: Phía bên phải của (7.1) là một hằng số, không thay đổi trong bất cứ trường hợp nào và *không khi nào bằng không*. Tiếp nữa, tích ở vế trái buộc phải hoặc là lớn hơn, hoặc cùng lắm là bằng giá trị của hằng số này. Trong đó, Δx là sai số (= độ bất định) khi xác định tọa độ một hạt, còn Δp là độ bất định về xung lượng của hạt đó, với ngụ ý rằng, hạt tồn tại ở đâu đó trong khoảng Δx và có xung lượng nằm trong vùng Δp.

Giả sử, theo ý nghĩa con quỷ Laplace, chúng ta muốn tính chính xác quỹ đạo của hạt, lẽ đương nhiên chúng ta sẽ tìm cách làm cho Δx và Δp càng nhỏ càng tốt hay tốt nhất là cho chúng tiến về không. Tuy nhiên, theo hệ thức bất định Heisenberg (7.1) thì điều này là không thể, vì một Δx nhỏ hơn tất yếu dẫn tới một Δp lớn hơn, bởi vì tích của hai giá trị này ít nhất phải bằng giá trị không đổi... Nếu giảm mạnh Δp sẽ xuất hiện ngay vấn đề về sự tăng Δx. Giữa Δx và Δp tồn tại *mối quan hệ bù trừ*. Như vậy, hệ thức Heisenberg giới hạn một cách cơ bản hiểu biết của chúng ta về quỹ đạo của các đối tượng lượng tử.

Ở đây có điều quan trọng mà chính Heisenberg và cộng sự đã nhấn mạnh, giới hạn hiểu biết này *không phải* sinh ra từ sự không chính xác

của các kỹ thuật được sử dụng hay của bản thân các dụng cụ đo, mà được xác định bởi một *tính chất xác định của các đối tượng vật chất trong thế giới vi mô*. Bản thân một đối tượng lượng tử có một tọa độ bất định hay một xung lượng bất định.

Tôi tin chắc rằng, các bạn – nếu bạn vốn là người có óc phê phán, một phẩm chất rất đáng ca ngợi – có thể sẽ không tiếp nhận khẳng định này một cách đơn giản. Thế nhưng, thật đáng tiếc, đây là giờ phút tôi buộc phải thông báo cho các bạn về điều đó. Trước mắt, xin các bạn vui lòng hãy nuốt tạm điều này đã. Còn vì sao mà các nhà vật lý hiện đại lại tin chắc rằng, hệ thức bất định Heisenberg không phải bắt nguồn từ sự thiếu chính xác của các phép đo, mà đích thực là một tính chất của vật chất, rồi vì sao hệ thức này lại phản ánh đúng và phù hợp với thực nghiệm, thì, tôi xin hứa với các bạn, trong Chương 15 sau này, chúng ta sẽ lại đề cập tới một lần nữa, cặn kẽ hơn.

Chúng ta có thể tưởng tượng hệ thức bất định thực ra như thế nào?

Trong Chương 5, bằng tính chất sóng được mô tả qua bước sóng de Broglie, chúng ta đã giải thích được các vân giao thoa xuất hiện trong thí nghiệm hai khe với electron cũng như hiện tượng nhiễu xạ qua khe. Rồi chúng ta cũng đã nói, chẳng hạn đối với sự nhiễu xạ qua khe, việc sử dụng mô hình sóng để giải thích không nhất thiết phải là bắt buộc. Thực ra chúng ta sẽ thấy, hệ thức bất định Heisenberg có khả năng giải thích hiệu ứng nhiễu xạ qua khe mà không cần dùng đến mô hình sóng.

Chúng ta hãy tưởng tượng một electron đang tự do bay quanh quẩn đâu đó, và nó có một vectơ tốc độ trong khuôn khổ một xung lượng

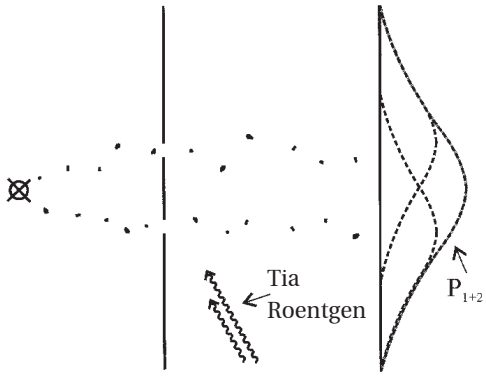
được xác định chính xác nhiều hay ít. Bây giờ chúng ta thu hẹp quỹ đạo của electron, chẳng hạn bằng cách cho nó đi qua một khe hẹp, khi đó tọa độ của nó có thể được xác định chính xác hơn, vì hạt chỉ còn có thể tồn tại ở khoảng không gian trong khe. Nhưng khi đó độ bất định về xung lượng sẽ tăng lên, và sau khe không còn có thể tiên đoán được chính xác hướng bay của hạt nữa. Chọn khe càng hẹp, tức là Δx càng nhỏ, thì sự bất định về hướng và tốc độ electron bay ra sau khe lại càng lớn, ứng với Δp càng lớn. Chúng ta thấy rằng, để mô tả đúng sư nhiễu xạ của hạt qua khe, không nhất thiết phải từ bỏ thuyết hạt, mà chỉ mở rộng nó thông qua hệ thức bất định.

Vân giao thoa cũng có thể được giải thích nhờ hệ thức bất định?

Như vừa mới chứng minh, có thể giải thích hiệu ứng nhiễu xạ của electron qua khe hẹp bằng cách sử dụng mô hình hạt có kể đến hệ thức bất định. Liệu với vân giao thoa trong thí nghiệm hai khe có xảy ra điều tương tự hay không? Để làm điều đó, trước hết ta cần phải xác định, giữa nguồn electron và màn ảnh, electron đã đi theo quỹ đạo nào, hay nói một cách khác, chúng đi qua khe nào?

Vấn đề là, nói chung, quỹ đạo của electron được xác định như thế nào? Thật đơn giản: ta nhìn theo hướng, hay phát biểu một cách chuyên nghiệp hơn, ta hướng chùm bức xạ điện từ tới một tọa độ (ở đây là hai khe) và đặt thiết bị ghi xem ở những góc nào thì chúng bị electron tác động, hay phản xạ lại khi đập trúng electron (Hình 7.1).

Cũng cần nói thêm rằng, để thu được những kết quả có nhiều thông tin hơn, cần sử dụng bức xạ điện từ có bước sóng nhỏ, bởi vì *độ phân giải của hình* – thu được khi hạt qua khe đập lên màn hình – càng cao



Hình 7.1. Thí nghiệm hai khe với electron. Bức xạ Rơnghen định vị electron có thể làm biến mất các vân giao thoa.

khi bước sóng càng nhỏ, nghĩa là khi tần số của bức xạ càng lớn. Lại vì hai khe trong thí nghiệm của chúng ta nằm rất gần nhau, chúng ta buộc phải sử dụng bức xạ Rơnghen có bước sóng ngắn để thu được các dữ liệu có tính thuyết phục cao.

Thí nghiệm thứ nhất

Chúng ta tiến hành thí nghiệm đã giới thiệu trong Chương 5, *thí nghiệm hai khe với electron*, trong đó cường độ nguồn electron thấp và ghi lại một danh sách quỹ đạo hay các khe mà mỗi electron đã đi qua. Ở đây ta nói tới *thông tin-con đường* mà chúng ta biết được về từng electron riêng biệt. Bởi vì so với những việc đã làm ở những chương trước, chúng ta không thay đổi bố trí thí nghiệm, chúng ta cũng xuất phát từ giả thuyết rằng, trên màn ảnh sẽ xuất hiện những vân giao thoa, như trước đây ta luôn có trong thí nghiệm hai khe với electron.

Tiếc thay, kết quả thí nghiệm cho chúng ta thấy: *không phải như vậy.* Trong thí nghiệm hai khe với electron khi có chiếu bức xạ Rơnghen để biết electron đi qua khe nào, ta không còn thấy các vân giao thoa trên

màn ảnh nữa, và phân bố xác suất tới toàn phần chỉ còn là tổng phân bố xác suất tới riêng rẽ ứng với mỗi khe, nghĩa là giống như trường hợp các đối tượng vĩ mô.

Vâng, quả thật là rắc rối! Lập tức xuất hiện câu hỏi: làm sao mà các vân giao thoa có thể biến mất, khi chỉ chiếu thêm ánh sáng vào đây? Chỉ nhìn vào thôi mà đã thay đổi nhiều như vậy được sao?

Để giải thích kết quả quan sát bất ngờ này, chúng ta phải nhớ lại hiệu ứng Compton ở Chương 6. Chúng ta biết rằng, các photon, do khối lượng động của chúng, có một xung lượng không thể bỏ qua khi tương tác với những đối tượng lượng tử có khối lượng nhỏ khác. Dễ dàng thấy rằng, các photon Rơnghen giầu năng lượng dùng để định vị electron trong thí nghiệm này, khi tương tác với electron theo kiểu "va chạm đàn hồi" được mô tả bởi Compton, đã làm thay đổi một cách đáng kể xung lượng của những electron đó.

Cái không ổn trong thí nghiệm của chúng ta là việc sử dụng bức xạ điện từ tần số cao như bức xạ Rơnghen để định vị electron, bởi vì khi tần số bức xạ điện từ cao, các photon sẽ có xung lượng đặc biệt lớn, như dễ thấy từ hệ thức

$$p_{photon} = \frac{h\nu}{c} \tag{7.3}$$

Điều đó cũng có nghĩa, xung lượng Δp chuyển cho electron là lớn và do đó nhiễu loạn cũng sẽ lớn. Khi đã nắm được điều này, chúng ta phải tìm cách giảm thiểu trong phạm vi có thể sự nhiễu loạn gây ra bởi photon, tức giảm thiểu xung lượng của chúng, bằng cách chọn tần số bức xạ điện từ càng nhỏ càng tốt.

Thí nghiệm thứ hai

Chúng ta tiến hành thí nghiệm lại một lần nữa, nhưng với tần số bức xạ thấp, và thử quan sát xem kết quả có gì thay đổi không.

Mặc dù lần này, may mắn thay, các vân giao thoa không biến mất nữa, chúng ta vẫn cảm thấy đáng tiếc khi thấy rằng, trật tự các electron không thể xác định được chi tiết như trước nữa. Nói một cách đơn giản, quỹ đạo của mỗi electron trong thí nghiệm này không còn có thể xác định được nữa. Tuy nhiên, trên màn ảnh chúng ta lại thấy các vân giao thoa. Hỏi có phát điên lên không?

Nhìn tổng thể lại một lần nữa, ta nhớ rằng thí nghiệm đã được tiến hành như sau: Trong thí nghiệm hai khe với electron có sử dụng bức xạ điện từ để định vị electron, nếu tần số bức xạ thấp thì vẫn duy trì được vân giao thoa, tuy nhiên, không thể xác định được khe mà electron đã đi qua.

Một cách giải thích có thể trong trường hợp này là, phần xung lượng do photon truyền làm nhiễu động electron đã nhỏ đến mức các electron này vẫn có thể tạo thành các vân giao thoa, tuy nhiên do bước sóng lớn mà khả năng phân giải của hình để xác định xem electron thuộc về khe 1 hay khe 2 lại giảm rất mạnh, khiến cho ta không thể thu được loại *thông tin-con đường* và cuối cùng là không thể xác định được quỹ đạo electron nữa.

Liên quan đến hệ thức bất định, điều này có nghĩa: nhờ có Δp nhỏ, chúng ta biết electron bay đến đâu trên màn ảnh, cụ thể là bay tới những vân sáng mà vị trí của chúng có thể tính trước được, nhưng ngược lại, chúng ta không thể biết được electron bay qua khe nào, do Δx quá lớn. *Tính bù trừ* giữa sự bất định về tọa độ và sự bất định về xung lượng lại thể hiện rất rõ ràng trong thí nghiệm này. Cho nên, có thể nói đây chính là một khẳng định thực nghiệm nữa cho nguyên lý bất định Heisenberg.

---

[5] Chi tiết hơn xin xem ở S. Duerr, T. Nonn, G. Rempe: Origin of quantum-mechanical complementary probed by a 'which-way' experiment in an atom interferometer. Nature 395 (1998), cũng như S. Duerr, G. Rempe: Can wave- particle duality be based on the uncertainity relation? Am. J. Phys. **68**, 11 (2000).

Từ kết quả thí nghiệm có thể rút ra những gì?

Điều rất quan trọng mà chúng ta đã nhận thấy là không thể giải thích sự xuất hiện của vân giao thoa mà chỉ dựa vào mô hình hạt. Trong bất cứ trường hợp nào, chúng ta đều cần mô hình sóng để mô tả hiện tượng giao thoa của các electron. Lại còn thú vị hơn nữa, các sóng-electron không thể được chứng minh một cách trực tiếp. Trong thí nghiệm hai, chúng ta chỉ chứng minh gián tiếp đặc trưng sóng của electron bởi nếu không thì không thể nào giải thích được các vân giao thoa. Giống như đã làm trong thí nghiệm 1, bây giờ chúng ta sử dụng bức xạ điện từ tần số cao để xác định khe đã được chọn bởi electron, rồi chúng ta đo không phải những sóng, mà là những hạt, qua phân bố xác suất của các electron tới trên màn ảnh mô tả ở hình 7.1, và sau quá trình đo chúng tiếp tục hành xử như những đối tượng hạt.

Về sự phức tạp này, ta có thể phát biểu một cách hình ảnh như sau: hình như electron xấu hổ về đặc tính sóng của mình. Nếu người ta không để ý tới, chúng hành xử như sóng, nhưng khi bị quan sát trực tiếp, chúng lại tự chứng tỏ mình là hạt. Tất nhiên kiểu phát biểu này hơi thái quá một chút, nhưng nó phản ảnh được các kết quả thực nghiệm một cách ngộ ngĩnh.

Trong một cách trình bày nghiêm túc hơn, chúng ta phải xác định: Nếu quỹ đạo của mỗi electron là không xác định, chúng ta sẽ thu được vân giao thoa, ngược lại, khi ta có *thông tin-con đường* thì các vân giao thoa sẽ biến mất. Giữa *thông tin-con đường* và sự xuất hiện các vân giao thoa có *một sự bù trừ* rất cơ bản.

Về sau, cũng có nhiều câu hỏi về đặc tính cơ bản của hệ thức bất định Heisenberg. Khi mới bước sang thế kỷ 21, người ta đã nghi ngờ khá nhiều khẳng định rằng, để thu được *thông tin-con đường* sẽ buộc phải mất đi vân giao thoa trong thí nghiệm hai khe.

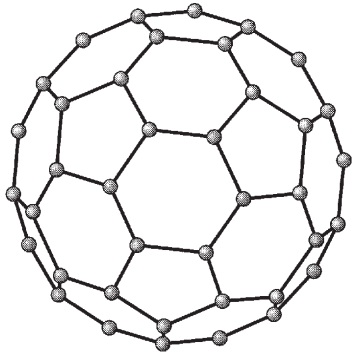
Những thí nghiệm có căn cứ vững vàng nhất, được tiến hành trước tiên bởi nhóm gerhard Rempe, đã chỉ ra rằng, việc mất đi khả năng giao thoa qua hai khe hẹp trước hết là do *quan hệ* lượng tử giữa máy phát hiện (detector) *con đường nào* và đối tượng lượng tử[5]. Từ đó, cuối cùng người ta rút ra kết luận rằng, lưỡng tính sóng-hạt cơ học lượng tử về thực chất là cơ bản hơn nguyên lý bất định Heisenberg vốn được đưa ra để giải thích hiện tượng. Đây là một phát hiện hoàn toàn mới mẻ và vô cùng quan trọng.

Có thể tiến hành thí nghiệm hai khe với các hạt khác không?

Người ta đã nghĩ đến khả năng tiến hành thí nghiệm hai khe với những hạt khác chứ không phải là chỉ với electron, mặc dù xây dựng thí nghiệm với những hạt có khối lượng càng lớn sẽ càng khó khăn hơn. Với những nỗ lực lớn hơn và tốn kém hơn, với những hạt cơ bản khác, chẳng hạn như nơtron, người ta cũng đã chứng tỏ được sự tồn tại của vân giao thoa. Điều đó nói với chúng ta rằng, ngay cả những hạt đó cũng tuân theo *lưỡng tính lưỡng sóng hạt* và do đó chúng cũng được gắn với một bước sóng de Broglie.

Từ những thí nghiệm mới nhất người ta biết rằng, vân giao thoa cũng xuất hiện ngay cả trong thí nghiệm hai khe với những phân tử lớn có tên gọi *fulleren* (còn gọi là phân tử bóng đá vì chúng có dạng hình cầu giống như quả bóng đá (xem hình 7.2)), tạo thành từ 60, 70 phân tử cacbon. Điều này là hết sức lý thú, vì ranh giới giữa vi mô và vĩ mô ngày càng dịch chuyển về phía có kích thước lớn hơn, nghĩa là chúng "khử định xứ" theo ý nghĩa chân thực nhất của từ này.

Tất nhiên, ở đây lại xuất hiện câu hỏi: nếu cứ tiếp trục dịch chuyển về phía kích thước lớn như vậy, thì khi nào khả năng giao thoa của hạt



Hình 7.2. Mô hình một phân tử fulleren, tạo thành từ 60 nguyên tử cacbon.

sẽ mất đi, và chính xác ranh giới thế giới vi mô/vĩ mô nằm ở đâu? Tạm thời ta sẽ chưa đề cập đến vấn đề này. Trong Chương 12, khi bàn về con mèo Schrôdinger chúng ta sẽ quay trở lại và xác định rằng, đến tận hôm nay đó vẫn là vấn đề trung tâm của vật lý lượng tử.

Bây giờ, thật ra electron là gì: sóng hay hạt?

Sau tất cả những rắc rối đã xảy ra, với những kết quả đầy mâu thuẫn xuất hiện nối tiếp nhau, theo quan điểm cổ điển quen thuộc, chúng ta phải đặt ra câu hỏi đơn giản nhưng quyết định tất cả: vậy thì, thực ra electron là gì: nó là sóng hay là hạt? hay là cả hai đồng thời? hay chẳng là gì cả?

Để trả lời cho câu hỏi đặc biệt khó khăn và phức tạp này, tôi xin trích dẫn lời của một nhà vật lý lượng tử nổi tiếng và thiên tài người Mỹ, Richard Feymann (1918-1988), người luôn luôn có thể tìm ra trên đôi môi mình một thành ngữ thích hợp để mô tả những đặc tính khác thường trong cơ học lượng tử. Về hành vi ngộ nghĩnh, tự mâu thuẫn của electron, trong cách phát biểu dứt khoát quen thuộc của ông, Feymann đã nói thật chính xác và thông minh như sau:

"Nó chẳng là gì trong cả hai"[6]

Không thể có cách diễn đạt nào đích đáng hơn. Bởi vì như chúng ta đã nhấn mạnh đi nhấn mạnh lại, mô hình sóng hay mô hình hạt mà chúng ta sử dụng để mô tả cách hành xử nào đó của các đối tượng lượng tử, luôn là những mô hình làm việc *cổ điển* lấy từ thế giới vĩ mô, là những phương pháp được vay mượn để giải quyết sự bất lực của *vật lý cổ điển* và do đó không khi nào có thể mô tả hoàn toàn thích hợp với các đối tượng lượng tử.

Bức xạ điện từ, electron, proton, hơn 200 hạt cơ bản khác, và ngay cả những phân tử lớn như fulleren, không thể xem một cách giản đơn là sóng hay là hạt. *Chúng chẳng là gì trong cả hai!* Chúng là một cái gì đó hiếm hoi nằm ở giữa, mà không thể có sự so sánh nào với thế giới vĩ mô, môi trường quen thuộc của chúng ta với kích cỡ chừng 10^{-1}m.

Nếu ngược lại, đối tượng của chúng ta là *thế giới vi mô*, với kích thước 10^{-10} m, cỡ đường kính của nguyên tử, chúng ta sẽ thấy những hiện tượng lượng tử lạ lùng, đầy ngạc nhiên và không chút hiếm hoi nếu không muốn nói là thường nhật. Sự ngộ nghĩnh, bí hiểm và những nghịch lý của các đối tượng lượng tử xuất hiện chỉ vì chúng ta không quen với chúng trong thế giới vĩ mô thông thường của chúng ta. (Chà, nếu con người ta là một proton thì ta sẽ dễ dàng hiểu được cơ học lượng tử. Nhưng khi đó ta sẽ lại phải mang điện dương và có thời gian sống gần như vô hạn).

Cuối cùng thì electron chẳng là sóng mà cũng chẳng là hạt, giản dị và rõ ràng: nó là một *đối tượng lượng tử*.

---

[6] R. Feynman, R. Leighton, M. Sands: Các bài giảng về vật lý của Feynman.

8
Sự suy sụp của hàm sóng

Thật ra, mâu thuẫn giữa mô hình sóng và mô hình hạt nằm ở đâu?

Như đã thảo luận ở các chương trước, cả trong vật lý cổ điển lẫn một số trường hợp riêng của vật lý lượng tử, có một số hiệu ứng và hiện tượng xác định chỉ có thể mô tả hay giải thích bằng hoặc *mô hình sóng* hoặc *mô hình hạt*. Với mỗi trường hợp cụ thể, việc mô hình nào có thể dùng để mô tả được xác định hoặc bởi đối tượng nghiên cứu (chẳng hạn, đó là bức xạ điện từ, electron, quả bóng đá hay các vật thể khác) hoặc bởi cấu trúc của thí nghiệm (tức là theo cách thức mà ta lấy thông tin từ đối tượng nghiên cứu).

Những đặc thù của vật lý lượng tử khiến cho – và điều này không phải là hiếm – cùng một đối tượng nghiên cứu xác định, tùy thuộc vào cấu trúc thí nghiệm, mà trong mô hình giải thích có thể coi nó *là hạt* hoặc *là sóng*. Trong vật lý cổ điển, khó có thể tưởng tượng một phương thức mô tả thiếu nhất quán như vậy, bởi vì trong vật lý cổ điển, sóng thì mãi mãi vẫn cứ là sóng, còn hạt thì luôn luôn là hạt, không có gì phải nghi ngờ và cũng chẳng có ngoại lệ nào.

Đến đây, ta có thể đặt câu hỏi: vậy thì cái gì làm nên sự khác biệt, sự không thống nhất giữa sóng cổ điển và hạt cổ điển? Vì sao mô hình sóng và mô hình hạt lại mâu thuẫn với nhau? Rồi liệu người ta có thể, chẳng hạn: 1) cho rằng electron là hạt, nhưng lại lan truyền theo những quy luật sóng? hay 2) sóng nước là những sóng nhưng được tạo nên từ các hạt (cụ thể là các phân tử nước)? Đấy là những đề nghị đơn giản nhất về sự thống nhất sóng-hạt mà ta có thể nghĩ tới.

Nghĩ kỹ hơn một chút, ta thấy sự việc thật ra không hoàn toàn đơn giản như hai đề xuất ở trên:

1) Nếu ta lấy xuất phát điểm là electron có thể lan truyền trên những quỹ đạo lượn sóng, thì sẽ xuất hiện ngay câu hỏi: làm sao trong khi thay đổi liên tục hướng chuyển động, chúng có thể thực hiện được sự đổi hướng xung lượng liên tục mà không vi phạm định luật bảo toàn xung lượng? Sẽ phải giải thích điều này như thế nào?

   Vấn đề tiếp theo: các hạt tích điện được gia tốc có tính chất là sẽ phát ra năng lượng dưới dạng bức xạ điện từ. Như vậy, khi chuyển động lượn sóng, electron (có điện tích bằng $-e = -1{,}602 \,.\, 10^{-19}$C) sẽ phải thường xuyên phát ra bức xạ điện từ, mà như chúng ta biết, thực tế các electron đã không làm như thế. Bởi vậy, một hình dung đơn giản về bức tranh thống nhất sóng-hạt thực ra là rất có vấn đề.

2. Việc khảo sát sóng nước (một thí dụ tiêu biểu của sóng) đã giúp chúng ta rất nhiều khi giải thích sự xuất hiện của các vân giao thoa trong thí nghiệm hai khe, nhưng ở đây có sự khác biệt nhất định giữa photon và electron.

   Trong sóng nước, các phân tử nước chỉ là *môi trường truyền* của sóng. Chúng không được vận chuyển theo sóng mà chỉ có năng lượng dao động của sóng được truyền qua môi trường đó mà thôi. Các phân tử nước chỉ là các *dao động tử,* tức là các vật thể có khả năng dao động, tạo ra khả năng lan truyền sóng, hay nói chính xác hơn là tạo khả năng lan truyền năng lượng dao động của sóng. Tuy nhiên, ở đây sóng mang biểu hiện một dòng chảy năng lượng *liên tục*. Do đó, sóng nước tự bản thân nó, cũng như cường độ của nó, không được lượng tử hóa.

Như thế, chúng ta thấy rằng, mô hình sóng và mô hình hạt thực ra không dễ giao hòa với nhau. Ở đây có sự khác biệt cơ bản giữa một sóng lan truyền liên tục trong không gian, không có vị trí chính xác và một hạt rắn chuyển động trên một quỹ đạo xác định.

Càng đặc biệt hơn, khi chúng ta mô tả một đối tượng lượng tử như photon, các hạt cơ bản... theo kiểu tuy cùng một đối tượng, nhưng tùy thuộc vào thí nghiệm nghiên cứu cụ thể, mà luôn phải sử dụng đồng thời mô hình sóng và mô hình hạt, cho dù trên quan điểm vĩ mô, chúng thực ra là đối kháng nhau. Liên quan đến hiện tượng này, ta thường nói đến tính chất lưỡng nguyên của bức tranh sóng và bức tranh hạt, cái mà ta vẫn gọi là *lưỡng tính sóng hạt*. Trên quan điểm vĩ mô, mô hình sóng và mô hình hạt mâu thuẫn với nhau, nhưng để mô tả một đối tượng lượng tử thì hai mô hình này lại bổ sung cho nhau. Chúng hành xử theo kiểu *bổ sung* cho nhau.

Thật ra, cách nhìn nhận như vậy chưa phải đã hoàn toàn thoả đáng, nhưng khi đối mặt với thực tế mâu thuẫn của các đối tượng lượng tử dường như ta không còn một lựa chọn nào khác. Bởi vì, như ở phần cuối của chương trước đã chỉ ra, các đối tượng lượng tử hành xử hoàn toàn khác với những gì chúng ta vốn quen thuộc trong thế giới hàng ngày của vật lý cổ điển vĩ mô. Chúng tuân theo những quy luật của *vật lý lượng tử*.

Ý nghĩa chính xác của Khái niệm lưỡng tính sóng-hạt là gì?

Nói chung, khái niệm *lưỡng tính sóng-hạt* dùng để chỉ một thực tế là, tùy theo loại thực nghiệm mà một đối tượng lượng tử chỉ có thể được mô tả hiệu quả và chính xác trong những thí nghiệm cụ thể này bằng mô hình hạt, còn trong những thí nghiệm cụ thể khác lại bằng mô hình sóng. Tuy nhiên, như tôi đã nêu ra ở phần trên, tình hình thực ra vẫn còn ít nhiều chưa rõ ràng.

Một lần nữa, chúng ta hãy quay trở lại thí nghiệm hai khe với electron (không sử dụng bức xạ Rơnghen để định vị electron) và quan sát kỹ hơn các vân giao thoa hiện trên màn hình.

Trong thí nghiệm của chúng ta, màn hình là các tấm kính ảnh, chúng sẽ bị hóa đen khi electron đập vào. Khi tiến hành thí nghiệm, nhìn màn hình từ phía trước, ta sẽ quan sát được các vân giao thoa điển hình, vùng có vân đen ứng với xác suất tới của electron là cao, còn vùng vân sáng ứng với xác suất tới của electron là thấp. Từ những suy luận ở chương trước, ta biết rằng các vân giao thoa trên tấm kính ảnh chỉ có thể giải thích được nhờ *mô hình sóng của electron* và không thể cắt nghĩa được bằng mô hình hạt. Tạm thời ta cứ biết như vậy.

Bây giờ, nếu nhìn kỹ hơn các tấm kính ảnh có electron bắn vào, chúng ta sẽ sửng sốt mà xác nhận rằng, các vân giao thoa trên tấm kính ảnh mà chúng ta quan sát được thực ra cũng không liên tục và đều đặn như ta hằng chờ đợi ở một sóng-electron liên tục, mà thể hiện một cấu trúc dạng hạt. Trên tấm kính ảnh thậm chí còn hiện rõ những điểm *riêng rẽ*, như dấu vết của các hạt electron đập vào một cách *riêng lẻ*. Như vậy, các electron không đập lên màn hình một cách liên tục như kiểu sóng vỗ bờ, mà luôn được ghi nhận như những hạt, *những hạt riêng rẽ, toàn vẹn*.

Điều đó có ý nghĩa rằng, định nghĩa về khái niệm *lưỡng tính sóng hạt* như chúng ta tạm nêu ra ở đầu chương này và như vẫn được sử dụng trong các tài liệu khoa học đại chúng, cần phải được mở rộng một cách thực sự. Không phải chúng ta dùng mô hình sóng để mô tả thí nghiệm này và dùng mô hình hạt để mô tả thí nghiệm khác, mà thực ra chúng ta cần phải đồng thời sử dụng cả hai mô hình trong *cùng một thí nghiệm*. Bởi vì, như chúng ta vừa thấy, chỉ có thể giải thích các vân giao thoa sau khi electron qua khe trong thí nghiệm hai khe bằng mô hình sóng. Nhưng thực tế cũng chỉ ra rằng, trên màn hình, electron được ghi nhận một cách toàn vẹn và riêng lẻ, và điều đó khiến ta phải sử dụng đặc tính hạt của electron.

Chúng ta thậm chí phải sử dụng song song cả mô hình sóng lẫn mô hình hạt trong khuôn khổ chỉ một thí nghiệm duy nhất mới có thể giải thích được các kết quả quan sát, mặc dù bản thân những mô hình này mâu thuẫn với nhau trong khuôn khổ vật lý vĩ mô cổ điển.

Từ sóng electron, một hạt sẽ hiện trên màn hình như thế nào?

Sau khi chúng ta nhận ra rằng, bản chất lưỡng tính sóng hạt của đối tượng lượng tử có thể xuất hiện ngay trong cùng một thí nghiệm duy nhất, tự nhiên sẽ xuất hiện câu hỏi: vì sao một đối tượng lượng tử (thí dụ electron) vừa được mô tả trong thí nghiệm hai khe như một sóng xác suất, nhưng ngay sau đó lại được ghi nhận trên màn hình như một chấm nhỏ? Nói khác đi: từ sóng xác suất của các đối tượng lượng tử mà sau khi qua khe không có một hướng truyền ưu tiên nào hết, làm sao ta lại ghi nhận được từng hạt một trên màn hình? Đây là vấn đề chuyển từ việc mô tả một đối tượng lượng tử trong mô hình sóng sang mô tả cùng đối tượng đó trong mô hình hạt.

Để tiếp tục thảo luận vấn đề này, chúng ta đơn giản hóa một chút bằng cách xem các khe riêng biệt là những lỗ tròn và đối tượng lượng tử là những electron đáng yêu quen thuộc.

Việc mô tả electron bằng mô hình sóng nói rằng, sau khi qua khe chúng tiếp tục lan truyền theo mọi hướng như nhau dưới dạng sóng cầu ba chiều. Bởi vì sóng cầu-electron không có một hướng truyền ưu tiên nào trong không gian, ta nói rằng chúng lan truyền *đẳng hướng*. Các vân giao thoa tuyệt vời xuất hiện trong thí nghiệm từ sự chồng chất của hai sóng cầu tiếp tục truyền đi sau hai khe. (Cũng xin nói thêm rằng, những vân giao thoa xuất hiện sau "khe" hình tròn khó hình dung hơn

những vân thông thường chúng ta vẫn biết, nhưng vẫn hoàn toàn có thể tính toán được. Đến lúc này, có vẻ như chỉ với mô hình sóng của electron mọi sự đều có thể giải thích và tính toán được).

Tình hình sẽ nóng bỏng hẳn lên, vì sóng electron như chúng ta vừa ghi nhận ở trên, lại không được ghi nhận như một sóng liên tục, mà thể hiện trên màn hình dưới dạng hạt gián đoạn, khiến cho chúng ta buộc phải chuyển qua mô hình hạt của electron.

Nhưng, làm sao từ một sóng cầu lại có thể suy ra hạt được? Vấn đề là ở chỗ, khi được mô tả như một sóng, electron không còn định xứ nữa. Nó tồn tại với một xác suất lớn hay nhỏ ở đây hay ở bất cứ nơi nào khác. Nhưng vào một thời điểm xác định nó nằm ở đâu, thì không thể có một tiên đoán chính xác nào. Định xứ là tính chất của hạt nhưng khi đó thì lại không thể giao thoa, nghĩa là không có vân giao thoa.

Chúng ta đã quan sát thấy vân giao thoa, và do đó electron không thể định xứ, chúng phải được mô tả bằng những hàm sóng bất định xứ.

Chúng ta hãy tưởng tượng hai sóng electron hình cầu giao thoa, xuất hiện đằng sau hai khe và chuyển động về phía màn hình, như vậy chúng ta cũng phải thừa nhận rằng, vào thời điểm ngay trước khi sóng đập lên màn hình, chúng vẫn còn là bất định xứ trong không gian. Tại thời điểm này, electron vẫn phân bố theo sóng xác suất choán toàn bộ không gian. Vậy điều gì xảy ra vào thời điểm mà electron được ghi nhận tại một tọa độ x trên màn hình, trong khi phần sóng còn lại đang chiếm toàn không gian?

Điều gì xảy ra với phần còn lại của sóng electron?

Nhớ lại rằng, chúng ta tiến hành thí nghiệm này với từng electron riêng lẻ, theo ý nghĩa tại mỗi thời điểm chỉ có một electron duy nhất

chuyển động trong toàn bộ dụng cụ thí nghiệm giữa nguồn electron và tấm kính ảnh. Theo logic, từ đó phải suy ra rằng, toàn bộ sóng electron quan sát được ở đây chỉ thể hiện một electron duy nhất, và vì ta biết rằng, trên màn hình chỉ ghi nhận được một electron trọn vẹn, nên ta lại suy ra rằng, khi ghi nhận được một electron tại tọa độ x, thì toàn bộ sóng electron choán không gian này sẽ phải biến mất. Sự biến mất đột ngột của sóng electron như vậy được gọi là *sự suy sụp của hàm sóng*. Sự suy sụp này của hàm sóng thể hiện sự chuyển tiếp từ mô tả các đối tượng lượng tử bằng bức tranh sóng, sang mô tả đối tượng đó bằng bức tranh hạt. Phần còn lại của sóng electron, chính là phần của sóng choán toàn không gian nhưng khi ghi nhận electron tại tọa độ x lại không có mặt ở đó, sẽ đơn giản biến mất tại chính thời điểm ghi nhận. Và ở cùng thời điểm sẽ xuất hiện một điểm ghi mầu đen trên màn hình, cái vết chỉ ra sự hiện diện của electron.

Cần hiểu thế nào về sự đồng thời và trao đổi thông tin tức thời?

Như thế, chúng ta có thể nghĩ rằng, ở điểm cuối của quá trình, sóng sẽ biến đi ngay khi electron xuất hiện ở tọa độ x. Nhưng thực ra phần sóng electron còn lại biến đi như thế nào? Và ở đây có liên quan gì đến vật chất hay không? Khi nhớ lại rằng, với sóng electron trong thí nghiệm hai khe, tương ứng với một hàm sóng toán học ta có vật chất thực sự lan truyền, khiến ta tự hỏi: làm sao cái sóng vật chất này lại có thể biến mất tại một điểm? Vì ngay khi ghi nhận được electron hàm sóng không còn tồn tại nữa, nên quá trình chuyển tiếp buộc phải xảy ra *tức thời*, tức là không có một sự trễ nào về thời gian. Đấy lại là một chuyển tiếp kiểu bước nhẩy lượng tử khiến ta bỗng có ý tưởng cần thiết phải có một kiểu "ảo thuật lượng tử tinh vi". Vậy thực chất là thế nào đây?

Bản thân Albert Einstein cũng đã nhận thấy những khó khăn của lý thuyết này. Những suy luận lý thuyết trước đó đã dẫn ông đến chỗ hình thành lý thuyết tương đối hẹp. Ông đã nhận thấy rằng, một quá trình truyền thông tin với tốc độ lớn hơn tốc độ ánh sáng trong chân không sẽ dẫn tới những nghịch lý và phá hủy nguyên lý nhân quả. Từ đó, ông rút ra kết luận: thông tin chỉ có thể truyền với tốc độ cao nhất là tốc độ ánh sáng.

Điều đó có liên quan đến vấn đề của chúng ta. Khi một sự kiện (ghi nhận hạt electron) xuất hiện tại x, thông tin về sự kiện này chỉ có thể truyền với tốc độ cao nhất là tốc độ ánh sáng đến một điểm khác bất kỳ nào đó (ở đây là những điểm khác x, nơi mà sóng electron đang hiện diện ở đúng thời điểm ghi nhận electron đã nói ở trên). Ta có thể nói một cách chắc chắn rằng, vì ngay khi ghi nhận electron hàm sóng lập tức biến mất tại tất cả các tọa độ khác x, nên thông tin "electron đã được ghi nhận tại x" sẽ phải được truyền đi tức thời, nhanh hơn ánh sáng, từ điểm ghi nhận electron tới tất cả các điểm khác có tồn tại sóng electron.

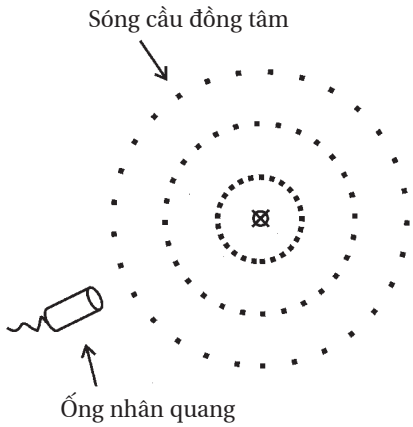
Truyền thông tin nhanh hơn ánh sáng mâu thuẫn với những nền tảng của thuyết tương đối và đó là lý do vì sao Einstein đã cảm thấy rất đau đầu khi hình dung về sự biến mất tức thời của sóng electron. Từ đó, ông mô tả đặc tính phi định xứ của các đối tượng lượng tử như một *"tác dụng từ xa ma quái"*. Mối ác cảm đối với những mô tả mà theo ông là sai lầm hiển nhiên này của cơ học lượng tử sau đó đã giúp ông hình thành một thí nghiệm tưởng tượng nổi tiếng, một sản phẩm của ông và hai đồng nghiệp (trong Chương 13 chúng ta sẽ khảo sát thí nghiệm tưởng tượng còn mang tên là nghịch lý EPR này).

Để có thể tóm lược vấn đề một cách chính xác, ta có thể khảo sát sự suy sụp của hàm sóng theo một cách khác, bằng một thí nghiệm đơn giản hơn:

Trước hết, chúng ta hãy tưởng tượng có một nguồn rất nhỏ, gọi là nguồn điểm, truyền ánh sáng đẳng hướng, nghĩa là như nhau về tất cả mọi hướng. Như thế, bức xạ điện từ sẽ rời nguồn sáng đều đặn theo hướng xuyên tâm – tất nhiên là với tốc độ ánh sáng. Bây giờ, giảm cường độ nguồn sáng đến mức, trong một khoảng thời gian khá dài chỉ phát ra từng photon riêng lẻ có trạng thái được mô tả bằng những sóng đồng tâm (xem các đường tròn đứt nét trên Hình 8.1), bởi vì photon không có hướng truyền ưu tiên nào. Các sóng cầu photon đồng tâm đó được truyền đi đẳng hướng trong không gian.

Bây giờ ta đặt một máy ghi (như ống nhân quang, chẳng hạn) cho phép ta ghi lại những photon tới. Như vậy ta gặp lại vấn đề đã được trình bày ở trên với thí nghiệm hai khe. Khi một photon được ghi nhận bởi ống nhân quang, xuất hiện trở lại vấn đề, sóng cầu mô tả photon sẽ biến mất như thế nào? Chừng nào ta chưa đo góc bức xạ của từng photon riêng lẻ đó, thì theo những nguyên lý của cơ học lượng tử, photon sẽ ở cùng một trạng thái tại tất cả các tọa độ nằm đối xứng xuyên tâm bao quanh nguồn sáng một khoảng cách là:

$$r = c \, . \, t \tag{8.1}$$



Hình 8.1 Một nguồn sáng bức xạ ra những photon riêng lẻ, truyền đi dưới dạng sóng cầu đồng tâm.

trong đó c tất nhiên là tốc độ ánh sáng và t là khoảng thời gian kể từ khi photon bức xạ từ nguồn. Trước khi đo photon tại thời điểm t, photon sẽ nằm đồng thời tại tất cả tọa độ r mà cũng đồng thời chẳng nằm cụ thể đâu cả. Thế thì, làm sao trong một chớp mắt đột nhiên photon lại có thể "hiện hữu", định xứ tại một điểm?

Thật đáng ngạc nhiên, lời giải chuẩn cho vấn đề còn khá mơ hồ này dường như lại rất đơn giản. Chúng ta hãy ngẫm lại một chút cách giải thích của Born về hàm sóng: theo ông, hàm sóng của một đối tượng lượng tử không có gì khác hơn là xác suất tồn tại của đối tượng được mô tả qua hàm sóng ấy tại một địa điểm xác định. Với cách lý giải của Max Born, hàm sóng không phải là một sóng thực lan truyền trong không gian và theo thời gian như sóng nước hay sóng âm, mà đơn giản chỉ thể hiện một cấu trúc toán học mà nhờ nó ta có thể tính được xác suất cư trú của một đối tượng lượng tử.

Khi quan sát các sóng photon và sóng electron, nếu chúng ta hiểu rõ đấy chỉ là những sóng xác suất chứ không phải là sóng *thực*, nghĩa là sóng vật chất lan truyền theo không-thời gian, thì bài toán tự nó đã được giải quyết. Nếu hàm sóng đơn giản chỉ cho biết xác suất tồn tại của đối tượng lượng tử tại một địa điểm xác định nào đó, mà nhờ máy ghi ta đã xác định được chính xác đối tượng đang nằm ở tọa độ x, thì đương nhiên vào lúc đó đối tượng không còn có thể tồn tại ở bất cứ chỗ nào khác. Về mặt toán học mà xét, vì tại x xác suất tồn tại đối tượng lượng tử bằng 1 (sự kiện đối tượng nằm tại x là chắc chắn 100%), hậu quả đương nhiên cần phải suy ra là xác suất tồn tại của đối tượng tại tất cả các tọa độ khác đều phải bằng 0.

Như vậy, quả thật không cần thiết phải nêu yêu cầu về sự truyền thông tin tức thời từ máy ghi đến tất cả các địa điểm khác. Hàm sóng, theo Born, Bohr, Heisenberg và những tác giả khác..., không phải là

những sóng thực truyền theo không-thời gian, mà chỉ là một *cấu trúc toán học*, một hàm sóng theo nghĩa trừu tượng toán học lan truyền trong không gian cấu hình. Nó có ý nghĩa thuần tuý toán học, chứ không có nền tảng vật lý sâu sắc như ta vẫn mô tả các quá trình vật lý trong cơ học Newton.

Nhờ đâu mà vấn đề suy sụp của hàm sóng được giải quyết?

Bây giờ chúng ta đã biết rằng, để giải thích sự xuất hiện electron một cách riêng lẻ, toàn vẹn, hàm sóng buộc phải biến mất. Nhưng điều gì dẫn tới sự suy sụp của hàm sóng, hay nói khác đi, nguyên nhân suy sụp của hàm sóng là gì, chúng ta vẫn chưa giải thích được một cách rõ ràng. Vậy sự rút gọn trạng thái của electron đã xảy ra như thế nào? Vì sao chúng ta không đo được sự chồng chất như vậy ở các trạng thái khác?

Đấy là một câu hỏi đặc biệt thú vị mà tiếc rằng cho đến nay vẫn chưa có câu trả lời duy nhất rõ ràng. Trong thế giới chuyên ngành vật lý, từ thời Bohr, Einstein cho đến thời đại của chúng ta hiện nay, giữa các nhà vật lý lượng tử vẫn chưa có sự thống nhất về vấn đề rắc rối này. Cùng với thời gian, đã kết tinh lại một số tiền đề khác nhau cho **một** giải pháp, rồi từ đó đã phát triển không ít những lý thuyết khả dĩ. Điều đáng ghi nhận là, ý kiến của các nhà vật lý lượng tử hiện đại luôn vẫn còn cách xa nhau một cách đáng ngạc nhiên, đặc biệt trong những khía cạnh cơ bản nhất và chính yếu nhất.

Vì có khá nhiều lý thuyết, và cũng chẳng mất đi nhiều tầm nhìn tổng quát, vào lúc này chúng ta chỉ trích dẫn lại lý thuyết đầu tiên và do đó cũng là xưa cũ nhất. (Trong lĩnh vực này, lý thuyết quan trọng nhất sẽ được thảo luận kỹ như một trọng tâm ở Chương 13, sau khi

đã xét một trong những thí nghiệm tưởng tượng phổ biến nhất - con mèo Schrôdinger).

Lý thuyết đầu tiên về vấn đề mà ta đang khảo sát dựa trên ý tưởng của nhà vật lý người Đan Mạch, Niels Bohr (1885-1962), người đã được tôn vinh như một trong những cha đẻ của cơ học lượng tử nhờ mẫu nguyên tử bán cổ điển mang tên ông – mẫu nguyên tử Bohr (xem Chương 10). Khoảng năm 1927, cùng với học trò của mình là Werner Heisenberg, Bohr đã đưa ra cách giải thích vật lý đầu tiên của hình thức luận toán học trừu tượng dành riêng cho cơ học lượng tử. Cách giải thích này mang tên địa điểm mà nó ra đời: *cách giải thích Copenhagen*.

Về mặt vật lý, sự biến mất của hàm sóng trong thí nghiệm hai khe là hệ quả của *quá trình đo*. Chính tương tác giữa đối tượng lượng tử (ví dụ một electron) và đối tượng vĩ mô (ví dụ màn hình) đã làm mất đi sự chồng chất của những trạng thái khác nhau của đối tượng lượng tử (trong ví dụ này là sự tồn tại của electron tại vô số các địa điểm thuộc sóng electron). Chính sự tương tác giữa đối tượng lượng tử và đối tượng vĩ mô đã làm hàm sóng suy sụp. Như vậy, sự suy sụp của hàm sóng chính là kết quả của quá trình đo.

Trong một cuốn sách của mình, Heisenberg đã giải thích mối quan hệ giữa sự biến mất của hàm xác suất toán học và quá trình vật lý như sau:

> *"Khác với sơ đồ toán học trong cơ học Newton, hàm xác suất mô tả không phải một quá trình xác định, mà là tổng thể những quá trình khả dĩ, chỉ ít là dựa vào quá trình quan sát. Bản thân sự quan sát làm thay đổi xác suất một cách không liên tục. Từ các quá trình khả dĩ, nó chọn ra quá trình thực tế xảy ra (...). Sự chuyển tiếp không gắn với sự ghi nhận kết quả quan sát theo*

tinh thần của người quan sát. Tuy nhiên, sự thay đổi không liên tục của xác suất xảy ra là do hành động ghi nhận; bởi vì ở đây đề cập tới sự thay đổi không liên tục nhận thức của chúng ta tại thời điểm ghi nhận, mà nó được phản ánh lại qua sự thay đổi không liên tục của hàm xác suất"[7].

Đặc biệt trong phần đầu và trong câu cuối của đoạn trích ở trên, chúng ta lại thấy rõ cách giải thích của Born về ý nghĩa xác suất của hàm sóng. Điều rất quan trọng, theo cách giải thích Copenhagen, là *quá trình đo* đã chọn từ trong "tổng thể các quá trình khả dĩ" – tức là trong chồng chất các trạng thái riêng lẻ của đối tượng lượng tử – lấy ra một trạng thái xác định – chính là kết quả quan sát. Như vậy, ngay từ lời giải thích này ta đã thấy, hàm xác suất *không* mô tả các trạng thái của đối tượng lượng tử như bản thân nó có, mà chỉ đưa ra một xác suất mà với xác suất đó, *trong trường hợp tiến hành phép đo*, đối tượng lượng tử được nói đến sẽ xuất hiện trong một trạng thái xác định.

Đến đây, quay lại một thí dụ quen thuộc, dễ quan sát, một lần nữa chúng ta nhớ tới những thảo luận về thí nghiệm hai khe với electron, bao gồm cả hệ xác định khe nhờ bức xạ Rơnghen. Ở trên, chúng ta đã nhận xét rằng, để xác định xem electron đã đi qua khe nào, cũng có nghĩa để thu được loại *thông tin- con đường nào*, electron buộc phải mất đi *khả năng giao thoa*. Trên tinh thần cách giải thích Copenhagen, việc electron mất khả năng giao thoa – tức cũng có nghĩa là mất đi tính chất sóng – chính là do *phép đo tọa độ* đã rút gọn các trạng thái của electron. Hành động đo xác định khe hay xác định tọa độ electron ở đây đã làm suy sụp sự chồng chất trạng thái

---

[7] W. Heisenberg: Physik and Philosophie. (Hirzel 2000), trang 80, 81.

của electron. Từ thời điểm đo, electron chỉ còn ở trong một trạng thái xác định, định xứ, mang đặc tính hạt, và nó giữ trạng thái đó cho đến khi tác động vào màn hình theo những đặc tính của hạt cổ điển. Hậu quả tiếp theo: không còn tạo ra vân giao thoa, một sản phẩm đặc trưng cho tính chất sóng.

Thống nhất hoàn toàn với cách giải thích Copenhagen, ta nói rằng, thông qua việc đo tọa độ, đã xảy ra việc rút gọn trạng thái của electron. Sự rút gọn tính sóng là hệ quả của quá trình đo.

9
Cuộc tranh luận Bohr-Einstein

Vì sao có cuộc tranh luận Bohr-Einstein?

Niels Bohr (1885-1962), người khởi xướng mẫu nguyên tử sau này mang tên ông, vào năm 1927, tại *Hội nghị Solvay* lần thứ 5 nổi tiếng, nơi trao đổi ý kiến của những nhà vật lý đương thời xuất chúng nhất, đã đọc một bản báo cáo với chủ đề của hội nghị lần này: "photon và electron". Nhân dịp này, ông đã giới thiệu *cơ học lượng tử* như một ngành khoa học mới, được phát triển chủ yếu nhờ ông và Werner Heisenberg, học trò của ông, như một lý thuyết tổng quát và hoàn chỉnh để mô tả các đối tượng của thế giới vi mô, đồng thời, vượt xa trước người khác, ông đã đưa ra cách giải thích vật lý cho hình thức luận toán học, cách giải thích sau này mang tên *Cách giải thích Copenhagen* để ghi nhớ địa điểm mà nó đã được đưa ra.

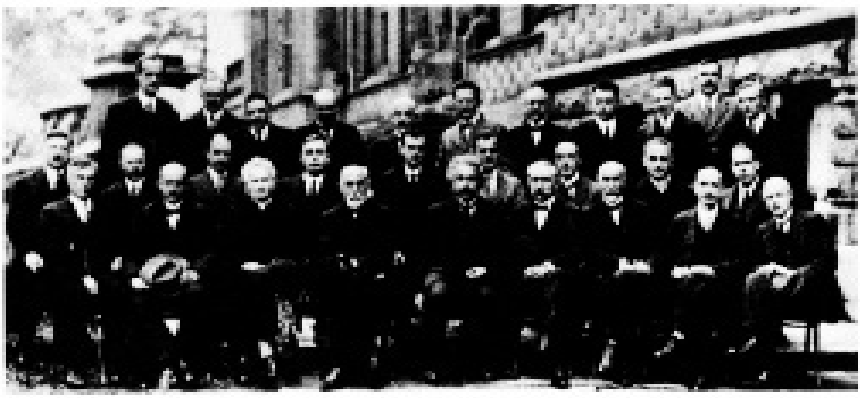
Tại hội nghị này, một người tham dự khác là Albert Einstein cũng nhìn thấy cơ hội thuận tiện để đưa ra công khai lời phê phán của mình đối với cơ học lượng tử mới được phát triển bởi Bohr và Heisenberg. Cuộc thảo luận quyết liệt bắt đầu từ đây giữa Bohr và Einstein kéo dài nhiều năm về sau và đã trở thành nổi tiếng dưới tên gọi *cuộc tranh luận Bohr-Einstein*.

Điều khẳng định tất yếu suy ra từ cơ học lượng tử là các đối tượng lượng tử, chẳng hạn electron, hoặc không có một tọa độ xác định, hoặc không có một xung lượng xác định, đã làm Einstein băn khoăn rất nhiều. Cái điều ngẫu nhiên không tránh khỏi ấy, vốn được suy từ hệ thức bất định Heisenberg và đóng vai trò trung tâm trong việc mô tả cách hành xử của các đối tượng lượng tử, tuyệt đối không thể dung hòa được với thế giới quan của Einstein vốn mang đặc tính quyết định luận.

Einstein đã thường xuyên nhấn mạnh sự từ chối dứt khoát của mình đối với cơ học lượng tử phi tất định trong một nhận xét không phải không có chút mỉa mai rằng, ông không thể tin, Chúa lại có thể chơi trò xúc xắc với toàn bộ vũ trụ này. (Lại thêm một giai thoại được đồn thổi khác: để đáp lại điều đó, Bohr đã ranh mãnh phản bác, Einstein không có nhiệm vụ phải viết ra trước những gì mà Chúa phải làm). Einstein luôn luôn nghi ngờ yêu cầu tổng quát của các nhà cơ học lượng tử về tính đầy đủ trong lý thuyết của họ. Nhân đây cũng xin nêu một cách ngắn gọn, người ta nói đến *tính đầy đủ* của một lý thuyết vật lý khi mỗi phần tử của thực tại vật lý đều có thể xếp một cách chính xác vào chỗ một đối tượng trong lý thuyết này.

Einstein tự cho mình có nhiệm vụ phải trình bày rõ ràng rằng, trái với ý kiến của Bohr, việc mô tả các quá trình trong thế giới vi mô nhờ cơ học lượng tử, chưa thể xem là đầy đủ. Ông tin tưởng rằng, "tính bất định" chỉ *dường như* tạo nên một rào chắn, mà với một cấu trúc thí nghiệm được lựa chọn một cách khôn ngoan người ta có thể vượt qua. Sau này, những đại lượng vật lý không thể lĩnh hội được bằng cơ học lượng tử được mô tả là những *biến ẩn* hay *tham số ẩn.*

Giả dụ những tham số ẩn như vậy thực sự tồn tại trong thực tế, thì những phản bác của Einstein có thể xem là có lý vì cơ học lượng tử không giới thiệu một cách mô tả đầy đủ mọi quá trình trong thế giới vi mô. Sức mạnh tiên đoán của nó giới hạn trong những tiên đoán thống kê, vì cơ học lượng tử không bao quát được những quá trình thực, có tính chất thứ yếu. Để bác bỏ việc thừa nhận tính đầy đủ một cách sai lầm của Bohr theo ý Einstein, trong suốt cuộc thảo luận lâu dài Bohr-Einstein, ông luôn nghĩ ra những thí nghiệm tưởng tượng mới mẻ, tinh tế mà nhờ nó có thể chỉ ra sự thiếu chặt chẽ của hệ thức bất định Heisenberg.



Hình 9.1. Những người tham gia Hội nghị Solvey tại Brúcxen năm 1927. *Hàng trên cùng:* Piccard, Henriot, Ehrenfest, Herzen, de Donder, Schrôdinger, Verschaffelt, Pauli, Heisenberg, Fowler, Brillouin. *Hàng giữa:* Debye, Knudsen, Bragg, Kramers, Dirac, Compton, De Broglie, Born, Bohr. *Hàng trước:* Langmuir, Planck, Curie, Lorentz, Einstein, Langevin, Guye, Wilson, Richardson.

Cái "ngẫu nhiên" được nhìn nhận một cách vật lý như thế nào?

Để có thể nắm được một cách đúng đắn những phản đối rất cơ bản và sắc sảo của Einstein, trước hết chúng ta phải giải thích xem trong vật lý khái niệm ngẫu nhiên có ý nghĩa gì. Theo định nghĩa của Heisenberg, người ta phân thành hai loại ngẫu nhiên: ngẫu nhiên *chủ quan* và ngẫu nhiên *khách quan*.

Ngẫu nhiên chủ quan là những ngẫu nhiên "dường như" xuất hiện do thiếu thông tin về những điều kiện ban đầu chính xác mà trên cơ sở đó quá trình vật lý diễn ra. Bởi vì kiến thức do những dữ liệu này đem lại là hết sức cần thiết cho việc tính toán chính xác kết quả của quá trình (chúng ta hãy nhớ lại *con quỷ Laplace* ở Chương 7). Những quá trình mà

trong đó mỗi thay đổi nhỏ trong điều kiện ban đầu có thể gây nên những khác nhau lớn trong trạng thái cuối cùng dường như đều là ngẫu nhiên.

Một thí dụ quen thuộc của ngẫu nhiên chủ quan cổ điển là trò chơi xổ số hay xúc xắc. Trong loại ngẫu nhiên chủ quan này, việc tính toán xác suất (chúng ta đều biết cơ hội xuất hiện mặt 6 là 1/6) là cần thiết, vì giá trị lối ra chính xác của một quá trình hoàn toàn tất định là không biết. Tuy nhiên, ở đây luôn có sự chi phối của một nguyên lý không bị giới hạn là *nguyên lý nhân quả* nói về mối quan hệ bắt buộc giữa kết quả và nguyên nhân.

Chẳng hạn, có thể thống kê về tần số xuất hiện của tai nạn máy bay tại một thời điểm xác định, ở một địa điểm xác định hay trong điều kiện thời tiết xác định..., nhưng với mỗi tọa độ, mỗi thời điểm không thể tính trước được sự biến tai nạn vì *thiếu dữ liệu*, chứ không phải vì không có nguyên nhân cơ bản cho sự biến đó. Theo đó, mỗi khi máy bay rơi (để cho tiện chúng ta tiếp tục sử dụng thí dụ này), ta có thể quay về nguyên lý nhân quả và tìm kiếm cho tới khi nào nguyên nhân máy bay rơi được phát hiện, cho từng trường hợp. Điều đó là làm được, vì bao giờ cũng chắc chắn có ít nhất một nguyên nhân (có thể là vấn đề kỹ thuật, sai lầm của con người như của phi công hay do chỉ dẫn bay hoặc bất cứ một cái gì khác) đã gây nên hệ quả đó (máy bay rơi).

Như vậy, ngẫu nhiên chủ quan là do sự thiếu hiểu biết về những điều kiện chính xác hơn mà trong đó toàn bộ quá trình diễn ra, dù rằng các quá trình vật lý *tự bản thân nó vẫn là xác định* và tuân theo nguyên lý nhân quả.

Ngẫu nhiên khách quan – trái ngược với tất cả những điều vừa trình bày – dùng để mô tả những sự kiện *ngẫu nhiên tuyệt đối*, không hề có bất cứ một nguyên do ẩn giấu nào liên quan với sự thiếu hiểu biết của chúng ta. Ngẫu nhiên này sinh ra, khác hẳn với ngẫu nhiên chủ quan,

không phải do thiếu thông tin về các điều kiện trong đó quá trình xảy ra, mà bởi vì nó thật sự là ngẫu nhiên và điều đó có nghĩa là ở đây không buộc phải có mối ràng buộc giữa nguyên nhân và kết quả nữa. Ngẫu nhiên khách quan, do đó, có mâu thuẫn trực tiếp với nguyên lý nhân quả, vì nguyên nhân và kết quả không còn phải gắn bó với nhau theo kiểu "nhân quả". Đây chính là điểm chỉ ra sự khác biệt về chất giữa ngẫu nhiên chủ quan và ngẫu nhiên khách quan.

Như chúng ta biết, trên lập trường vật lý cổ điển, không thể có ngẫu nhiên khách quan, bởi vì tất cả các sự kiện đều tuân theo các định luật của Newton, khiến cho về cơ bản cả vũ trụ tuân thủ những quy luật xác định như nhau, như những bánh xe chuyển động chính xác trong đồng hồ Thụy Sĩ.

Lời phê bình của Einstein là như thế nào?

Cũng dễ hiểu, khi Einstein cho rằng, với sự hiểu biết thông thường và lành mạnh của con người, nguyên lý nhân quả luôn có giá trị như một tiền đề, và do đó rõ ràng ông không thể hình dung được sự tồn tại của một ngẫu nhiên thực sự khách quan. Thêm nữa, cho đến nay, tính đúng đắn của nguyên lý nhân quả luôn là cơ sở cho mỗi ngành khoa học tự nhiên.

Tuy nhiên, trong thực tế chính ngẫu nhiên khách quan lại là thành phần cơ bản của lý thuyết lượng tử. Bởi vì nguyên lý bất định Heisenberg không chỉ hạn chế một cách cơ bản – như người ta khẳng định sai lầm ở giai đoạn đầu – khả năng hiểu biết của chúng ta về các tính chất của một đối tượng lượng tử (ví dụ tọa độ hay xung lượng của chúng), mà thậm chí còn nói rằng, đối tượng lượng tử *tự nó* đôi khi cũng chẳng có tính chất xác định nào. Nếu xung lượng của một đối tượng lượng tử

được xác định rất chính xác, thì tọa độ của nó không những không thể xác định được chính xác mà tự bản thân đối tượng đó cũng chẳng có một tọa độ chính xác nào. Với một chút khôi hài ta có thể nhấn mạnh điều này: nếu một electron bị buộc phải bay theo một hướng xác định, thì tự nó sẽ không còn biết rằng mình sẽ tồn tại ở đâu.

Một khía cạnh khác tạo nên sự nghi ngờ của Einstein về tính đầy đủ của cơ học lượng tử chính là ở chỗ, cách mô tả electron bằng cơ học lượng tử không thể cho biết thông tin về điểm tới của electron trên màn hình. Phương trình Schrôdinger chứa hàm sóng mô tả trạng thái của đối tượng lượng tử là một cách viết toán học tương đương cơ học ma trận của Heisenberg. Chúng không thể cho thông tin duy nhất, xác định về tọa độ của electron trên màn hình, mà chỉ đưa ra một tiên đoán về xác suất một electron có thể đến đập vào một điểm xác định trên màn mà thôi.

Theo cơ học lượng tử của Bohr và Heisenberg, điểm đập vào màn hình của electron là tuyệt đối ngẫu nhiên, bởi vì thông tin về điểm tới đó không nằm trong hàm sóng mô tả electron. Sự không rõ ràng khách quan này dẫn tới hệ quả là không thể xác định chính xác quỹ đạo của đối tượng lượng tử. Hình thức luận toán học của cơ học lượng tử cho phép chúng ta tiên đoán về *xác suất* để một đối tượng lượng tử đến một tọa độ xác định nào đó, khi thực hiện phép đo. Thế nhưng câu hỏi về tọa độ thực của đối tượng lượng tử, nếu chúng ta không quan sát – nghĩa là không đo, tự bản thân nó là vô nghĩa và phi lý, bởi vì đối tượng lượng tử tồn tại ở trong một *chồng chất* các cư trú tại vô hạn các tọa độ. Chừng nào chưa có sự ép buộc của phép đo, nó không có một tính chất (cổ điển) xác định nào cả.

Từ đó, buộc phải suy ra rằng, điểm ghi nhận cuối cùng cũng phải là *ngẫu nhiên khách quan*. Chúng ta hãy tưởng tượng ra một vùng không gian bất kỳ, trong đó mỗi đối tượng lượng tử có thể tồn tại ở bất kỳ điểm

nào với xác suất chính xác như nhau, lại vì đối tượng đó không có một tính chất xác định nào cả, sẽ không có bất cứ khả năng nào khác ngoài việc tọa độ cuối cùng ghi nhận được của đối tượng là ngẫu nhiên khách quan. Phương trình Schrôdinger không thể cho ta thông tin về hàm sóng sẽ biến mất ở đâu vào lúc thực hiện phép đo.

Nếu ta nhìn nhận việc mô tả nhờ hình thức luận cơ học lượng tử là đầy đủ, thì tọa độ biến mất của hàm sóng chỉ là được lựa chọn ngẫu nhiên. Với kết quả cuối cùng này, theo cơ học lượng tử, thực sự không có nguyên nhân nào cả.

Tính phi tất định là một đặc trưng đáng kể của cơ học lượng tử và đó chính là điều mà Einstein không dễ dàng chấp nhận. Ông tin tưởng một cách vững chắc rằng, với mỗi hậu quả, chắc chắn phải có một nguyên nhân, bất kể đây là những quá trình trong thế giới vĩ mô (chẳng hạn trong trò chơi bi-da hay trong chuyển động của các hành tinh...) hay các hiện tượng trong thế giới vi mô (ví dụ các quá trình trong lớp vỏ nguyên tử...). Ông cũng nói, ngay cả các sự kiện ở mức độ lượng tử, cũng phải có một nguyên nhân tiên quyết nào đó. Không phải vì Einstein gắn bó quá chặt chẽ với nguyên lý nhân quả vốn được xem là tuyệt đối đúng, cũng không phải vì vật lý lượng tử không cho phép diễn ra cái "bước nhảy lượng tử" này, mà đơn giản chỉ vì ông không thể hình dung nổi một thế giới bất định như thế. Việc thừa nhận một vũ trụ tiềm tàng sự bất định như vậy mâu thuẫn với những hiểu biết cơ bản của ông về tự nhiên.

Einstein cũng hết sức khó chịu khi tiếp nhận *tính không khách quan cố hữu* của cơ học lượng tử theo cách giải thích Copenhagen. Ông không thể hình dung, một electron không có một tọa độ xác định chừng nào phép đo chưa được tiến hành như lối giải thích Copenhagen khẳng định. Làm sao một nhà vật lý có thể hình dung rằng, đối tượng được mô tả lại

phụ thuộc vào quá trình hay hệ thống quan sát. Trong những năm sau này, có lần Einstein đã hỏi người bạn và người đồng nghiệp của ông – Abraham Pais – bằng giọng mai mỉa đặc trưng của ông:

> *"Cậu có tin thật không, nếu nói mặt trăng tồn tại chỉ vì chúng ta nhìn vào nó?"*[8]

Tại một trong những bút văn của Einstein trích từ thư gửi cho Max Born năm 1926, đã cho ta thấy rõ ông phê phán lý thuyết lượng tử lúc ấy còn rất non trẻ như thế nào:

> *"Lý thuyết đã làm được rất nhiều việc, nhưng nó không đem chúng ta lại gần hơn những bí mật vốn có. Trong bất cứ trường hợp nào tôi cũng tin rằng, không có trò chơi may rủi".*[9]

Trong lời nhấn mạnh này, ta thấy thái độ không mấy tin tưởng của Einstein đối với cách giải thích Copenhagen được đại diện bởi Bohr. Không còn nghi ngờ gì nữa, Einstein luôn luôn tin chắc rằng, cơ học lượng tử không có khả năng giải thích tự nhiên một cách đầy đủ. Thật ra, ông tôn vinh sức mạnh tiên đoán của cơ học lượng tử (với lối giải thích theo ông là thuần túy thống kê), nhưng ông cương quyết bác bỏ yêu cầu nói rằng, đấy là một lý thuyết đầy đủ trong việc mô tả các sự kiện trong thế giới vi mô.

Nếu chỉ nhìn một cách hời hợt thì dường như cái nhìn của Einstein vừa được trích ra ở trên có vẻ gì đó như là tùy tiện và chủ quan, thế nhưng nó không bác bỏ mà cũng chẳng bảo vệ những thành tựu khoa học của ông. Sự từ chối của ông đối với cơ học lượng tử là dễ chấp nhận

---

[8] Biographie: Einstein (Specktrum, 2002); trang. 91

[9] C. Held: Die Bohr-Einstein-Debatte (Schoeningh, 1998); trang. 73

theo logic thông thường của con người. Một thế giới phi nhân quả chắc chắn mâu thuẫn với phương pháp tư duy hợp lý của con người. Theo lẽ tự nhiên, chúng ta không thể làm điều gì khác là tìm kiếm theo nguyên lý nhân quả và hành động theo đó. Không làm như thế, thì có lẽ là không chín chắn và gàn dở.

Lại còn ấn tượng hơn, khi biết rằng, Einstein đã rất sớm, ngay từ giai đoạn phát triển đầu tiên của cơ học lượng tử, bằng những nhận xét sắc sảo của mình, đã đánh đúng vào những điểm mấu chốt nhất của ngành khoa học này.

Bohr và Einstein đã thảo luận những thì nghiệm nào?

Sau đây chúng ta sẽ cố gắng thảo luận một trong những thí nghiệm tưởng tượng nổi tiếng nhất mà Einstein đã nghĩ ra để giải thích rõ sự phê phán của ông. Cấu trúc của thí nghiệm này về cơ bản giống với thí nghiệm hai khe mà chúng ta đã rất quen thuộc. Sự khác nhau duy nhất, và cũng bản chất nhất, nằm ở chỗ trong thí nghiệm này hai khe *chuyển động*, và do đó ta đang nói về *thí nghiệm với hai khe chuyển động*.

Từ những khảo sát trước đây trong thí nghiệm hai khe, ta biết rằng phần lớn electron nhiễu xạ khi qua khe, nghĩa là thay đổi hướng chuyển động trước đây của chúng, khiến cho chúng được ghi nhận không chỉ ở những chỗ trực tiếp sau khe, mà ở trên một miền rộng của màn chắn. Điều mà đến nay chúng ta vẫn chưa chú ý là, theo định luật bảo toàn xung lượng, sự thay đổi xung lượng của electron bên khe luôn kèm theo sự thay đổi xung lượng của chính khe nhúng theo chiều ngược lại. Khe đã nhận từ va chạm với electron một loại tác dụng giật lùi. Khi electron qua khe và bị đổi hướng, nó truyền lại cho khe một xung có giá trị chính bằng sự thay đổi xung lượng của electron và có hướng ngược lại. Cho tới nay, do khối lượng rất lớn của bản thân khe so với

khối lượng quá nhẹ của electron, chúng ta đã bỏ qua sự thay đổi xung lượng này của khe.

Theo lý thuyết cơ học lượng tử, nếu trên màn hình thu được các vân giao thoa, thì sau khi qua khe electron sẽ không có bất cứ một phương truyền ưu tiên nào, vì để có khả năng giao thoa electron phải được mô tả bằng một sóng cầu ba chiều đẳng hướng.

Hay là, nói theo ngôn ngữ của *nguyên lý bổ sung* giữa độ chính xác của tọa độ và xung lượng: Nếu chúng ta muốn điểm xuất hiện cuối cùng của electron trên màn hình có thể được xác định rất chính xác bằng cách tính những vân tối của vân giao thoa thì thật đáng tiếc chúng ta phải chấp nhận rằng, theo nguyên lý bất định, các thành phần của xung lượng electron, cũng có nghĩa là hướng bay sau khi nhiễu xạ qua khe, hoàn toàn không thể xác định chính xác được nữa.

Như vậy, cơ học lượng tử khẳng định rằng, không thể đồng thời đo thay đổi xung lượng của electron khi đi qua khe (cũng là thay đổi xung lượng của bản thân khe) và nhận được vân giao thoa, bởi vì theo cách nhìn cơ học lượng tử, sự xuất hiện của vân giao thoa và sự xác định phần thay đổi xung lượng là những sự kiện bổ sung cho nhau. Nếu bây giờ chúng ta nhớ lại phần thí nghiệm đã trình bày ở Chương 5 trong đó chúng ta dùng một chùm bức xạ Rơngen để xác định con đường electron qua khe, thì chúng ta biết: nếu xác định chính xác con đường electron qua khe chúng ta sẽ mất vân giao thoa trên màn hình, nghĩa là mất khả năng giao thoa của electron.

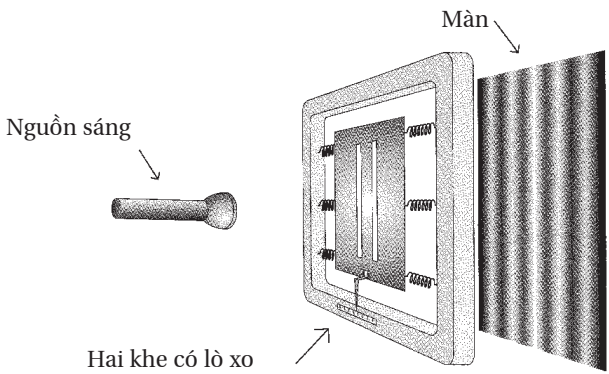
Cho nên, cơ học lượng tử khẳng định rằng, trong trường hợp xác định chính xác sự thay đổi xung lượng của electron thì vân giao thoa sẽ biến mất, điểm xuất hiện của electron trên màn sẽ hoàn toàn không xác định. Chúng ta phải khẳng định rằng, cơ học lượng tử không cho phép *đồng thời* có thông tin khác nhau về hướng nhiễu xạ của electron và sự xuất hiện các vân giao thoa.

Từ nguyên lý bất định suy ra *ngẫu nhiên khách quan* có bản chất cơ học lượng tử – điều mà Einstein rất căm ghét – là liên quan với sự bất định trong xác định tọa độ điểm đến của electron trên màn hình, bởi vì về nguyên tắc cơ học lượng tử không cho thông tin về quỹ đạo electron, mà chỉ cho một *xác suất* để electron đến tọa độ x nào đó trên màn hình mà thôi.

Từ đó, Einstein tự đặt cho mình nhiệm vụ tìm ra cái ẩn ở đằng sau quá trình lượng tử. Ông đã đưa ra những ý tưởng trái ngược với những luận lý cơ học lượng tử vừa trình bày ở trên theo kiểu như sau:

Einstein lý luận: ta có thể tưởng tượng rằng, bằng một thiết kế thí nghiệm nhậy cảm trên một hệ hai khe linh động, ta có thể đo được sự thay đổi xung lượng khi electron đi qua khe ấy và bị đổi hướng chuyển động. Chẳng hạn ông đã hình dung ra một cấu trúc lý tưởng trong đó hai khe chuyển động (ví dụ nhờ những lò xo kim loại hết sức tinh tế) trong một giá đỡ bên ngoài có thể cho ta biết sự chuyển động này (Hình 9.2, kim chỉ ở phía dưới).

Đến đây vẫn chưa nói gì đến sự thay đổi giá trị của xung lượng. Chỉ riêng điều electron bị lệch trái hay lệch phải đã cho ta nhiều thông tin



Hình 9.2. Sơ đồ cấu trúc thí nghiệm tưởng tượng của Einstein.

hơn về trạng thái của electron, so với những gì cơ học lượng tử có thể cung cấp.

Trong một thí nghiệm thiết kế như thế, nếu có thể thực sự xác định được hướng lệch của electron một cách chính xác mà không làm nhiễu loạn các vân giao thoa, thì ta đã tìm ra một minh chứng đủ để nói rằng cơ học lượng tử không thể mô tả đầy đủ thế giới vi mô. Bằng cách như thế, Einstein dường như đã tìm ra một cơ sở thí nghiệm vững chắc để bác lại hệ thức bất định Heisenberg. Tuy nhiên, trước khi chúng ta tìm hiểu sự đáp trả của Bohr cho thách thức này, tôi muốn nói đôi lời ngắn ngủi về những thí nghiệm vật lý tưởng tượng và ý nghĩa tự thân của nó.

Những sự kiện thực nghiệm nào làm cơ sở cho thảo luận?

Không thể không nói rằng, những thí nghiệm về giao thoa của electron, photon... trong thời Bohr và Einstein, nghĩa là khoảng nửa đầu thế kỷ 20, về cơ bản chỉ là những *thí nghiệm tưởng tượng thuần túy*, đó là những thí nghiệm không được tiến hành thực. Cũng có nhiều nghi ngờ rằng những dạng thí nghiệm như thí nghiệm hai khe với electron thời tranh luận Bohr-Einstein đã được tiến hành thực hay chưa. Tuy vậy, điều chúng ta cần ý thức một cách sâu sắc lại chính là: Bohr và Einstein là những người tiên phong nghiên cứu thế giới vi mô không phải bằng những thí nghiệm thực, mà bằng những thí nghiệm giả tưởng, bằng tư duy thuần túy.

Tôi muốn tô điểm thêm cho điều vừa nhắc tới bằng một giai thoại: Khi Einstein đã nổi tiếng rồi, có lần một phóng viên hỏi ông về địa điểm phòng thí nghiệm nơi ông đã tìm ra những kiến thức đủ để tạo nên cả một lý thuyết đầy tính cách mạng. Einstein đã lục tìm trong túi áo vét, lấy ra cái bút máy và nói rằng đấy chính là phòng thí nghiệm của ông.

Vâng, điều ấy chỉ ra rất rõ lập trường và thái độ của Einstein: ông đích thực là một nhà vật lý lý thuyết. Ông rất muốn trao nhiệm vụ thí nghiệm cho những người khác. Lĩnh vực của riêng ông là vật lý lý thuyết, là "suy nghĩ và tính toán". Chỉ với tờ giấy và cái bút, ông đã phát triển lý thuyết tương đối hẹp và lý thuyết tương đối rộng dùng để mô tả thế giới vĩ mô, và cũng chỉ với tờ giấy và cái bút ông đã tìm cách bác bỏ lý thuyết của Bohr và Heisenberg dùng để mô tả thế giới vi mô. Nhưng thiên tài toàn năng này đã không thành công ở nhiệm vụ thứ hai.

Bohr đã phản bác lại như thế nào?

Theo những điều vừa trình bày ở trên, những ý tưởng của Einstein không thể trực tiếp kiểm tra bằng một cấu trúc thí nghiệm thực được. Do vậy, sau khi đã được thông báo những phê phán của Einstein, Bohr tìm cách phát hiện những sơ suất về *lý thuyết* và *tư duy* của Einstein để bảo vệ những quan điểm về tính đầy đủ của cơ học lượng tử. Bởi vì chỉ khi chỉ ra được *sự không chắc chắn* trong việc mô tả hay "tiến hành" thí nghiệm tưởng tượng mới có thể bác bỏ nó mà không cần tiến hành thí nghiệm thực.

Thật may mắn (hay thật đáng tiếc, tùy theo người ta nghĩ), sau khi phân tích kỹ càng thí nghiệm tưởng tượng của Einstein, Bohr đã tìm ra điểm yếu của nó: sai lầm logic nằm ở sự đánh giá sai lầm về *tác dụng của lò xo* trên khe.

Bây giờ chúng ta sẽ hỏi: vì sao kẻ làm hỏng việc lại là các khe linh động. Lập luận ở đây hơi rối rắm, cho dù sự việc thực ra không mấy phức tạp. Bây giờ chúng ta hãy tập trung vào cơ chế để đo sự thay đổi xung lượng của electron. Trước hết phải thấy rõ rằng, chúng ta cần hai khe nhỏ nhẹ, được sắp đặt di động, cho phép ở trạng thái nghỉ làm lệch

hướng từng electron riêng biệt. Trong thực tế rất khó có thể tạo ra hai khe với yêu cầu như vậy, nhưng chúng ta không cần lo lắng, vì ở đây ta đang bàn đến thí nghiệm *tưởng tượng*. Trong trường hợp này, có thể bỏ qua những khó khăn có bản chất kỹ thuật mà chỉ bàn đến khía cạnh thuần túy nguyên lý thôi.

Trong phân tích các thí nghiệm tưởng tượng, ta luôn luôn phải chú ý hết sức cẩn thận để không bỏ qua hay hiểu sai bất kỳ một quy luật vật lý nào. Như thế, chỉ trừ khó khăn kỹ thuật khi nói về hai khe di động, ta phải đối đầu với sự thật cơ bản sau: Nếu ta muốn thiết kế một cấu trúc hai khe có khối lượng nhỏ đến cùng cực mà vẫn có thể ảnh hưởng đến xung lượng của mỗi electron, thì *chính bản thân* cái đối tượng mong manh này không còn có thể xem là vĩ mô được nữa. Chính cấu trúc đặc biệt này cũng phải được khảo sát như một đối tượng lượng tử, và do đó nó cũng phải tuân theo những quy tắc cơ học lượng tử giống hệt như electron. Và cũng giống như các đối tượng lượng tử khác, nó không thể chống lại nguyên lý bất định Heisenberg: chỉ hoặc tọa độ, hoặc xung lượng được xác định chính xác, không khi nào cả hai đồng thời.

Nếu bây giờ chúng ta muốn thực hiện thí nghiệm tưởng tượng của Einstein, trước hết chúng ta phải đưa hai khe di động về trạng thái nghỉ để có thể đo được độ lệch của nó khỏi vị trí cân bằng do electron tán xạ khi đi qua gây ra. Nhưng tiếc thay, như chúng ta đã biết, đó là nhiệm vụ bất khả thi, vì khi tọa độ của khe xác định chính xác, thì các thành phần xung lượng của nó lại hoàn toàn bất định. Chúng ta càng cố gắng đưa khe về trạng thái nghỉ để có thể bắt đầu thí nghiệm của mình, thì nó càng quẫy đạp một cách điên cuồng, vì các thành phần xung lượng của nó không còn có thể khống chế được nữa.

Như thế, dù ít hay nhiều thì chúng ta cũng phải chấp nhận rằng, thí nghiệm tưởng tượng được Einstein nghĩ ra hết sức thông minh đã không

hoàn thành được mục đích riêng của nó là bỏ qua nguyên lý bất định Heisenberg. Thí nghiệm của Einstein đã thất bại chính ở nguyên lý bất định này. Và như vậy, trong những cố gắng đầy nghi hoặc của mình, chúng ta đã hai lần quay trọn một góc 360^0 và bây giờ lại quay trở về vạch xuất phát đầu tiên.

Chúng ta có thể rút ra kết luận gì từ cuộc tranh luận Bohr-Einstein?

Chí ít, chúng ta biết rằng nguyên lý bất định thường được trích dẫn không dễ gì bác bỏ. Nhưng vẫn luôn luôn có những cuộc tranh luận nhằm bước qua nguyên lý này. Cũng cần phải nói rằng, Einstein, với vô vàn ý tưởng độc đáo và những thí nghiệm tưởng tượng của ông, là người đã đem lại cho Bohr nhiều chướng ngại vật nhất. Tuy nhiên, cuối cùng thì Einstein cũng không giáng được đòn chí tử nào đối với lý thuyết Bohr.

Hay, nói một cách khác: cho dù với không ít người, cơ học lượng tử thật chẳng ngon lành gì, nhưng cũng không thể tìm được một cái đòn bẩy hất nó ra khỏi con đường của chúng ta. Vậy ta sẽ phải làm gì đây?

Để kết thúc phần trình bày về cuộc tranh luận Bohr-Einstein, xin có một nhận xét hàm ý phê phán rằng, cho dù cuộc tranh luận có ý nghĩa khá sâu sắc với sự phát triển tiếp theo của cơ học lượng tử, với cách nhìn khách quan ngày hôm nay, chúng ta (dường như phải) thấy rằng, trong cuộc tranh luận của mình, Bohr và Einstein đã không gặp nhau ở những chỗ chẳng phải là không quan trọng:

Trong tất cả những lập luận của mình, Einstein luôn luôn có một thế giới quan phụ thuộc vào người quan sát, trong khi trái lại, Bohr luôn tin tưởng rằng, thật ra ta không thể thâm nhập vào thế giới vi mô. Theo

Bohr, trên cơ sở tính bổ sung của các tính chất vật lý của đối tượng lượng tử, trong đó có nguyên lý bất định, bản thân các thiết bị đo cũng phải đưa vào trong quan sát vật lý. Khi ta đo một tính chất, chẳng hạn tọa độ của các đối tượng lượng tử, thì mỗi phép đo đều dẫn tới việc làm rối loạn chồng chất trạng thái (cư trú), khiến đối tượng chuyển từ chỗ có thể cư trú tại vô số các điểm khác nhau đến chỗ phải định xứ tại một điểm xác định và từ đó dẫn tới *sự biến mất của hàm sóng*. Điều đó đương nhiên dẫn tới sự loại bỏ khả năng khách thể hóa. Mà Einstein lại luôn hăng hái mô tả thế giới vật lý một cách khách quan, đòi hỏi vật lý phải khách quan và không phụ thuộc vào phép đo (cũng như vào con người). Nhưng đó chính là điều mà quan điểm cơ học lượng tử của Bohr cho rằng là không thể được. Đây chính là chỗ mà hai thiên tài đã chẳng bao giờ gặp nhau, thậm chí có thể họ cũng chưa ý thức đầy đủ về thế giới quan khác biệt này của mình.

Hình 9.3. Hai đồng nghiệp tranh luận gắt gao và cũng là hai người bạn tốt: Bohr và Einstein.

Đương nhiên, Einstein không hoang mang vì sự bất lợi nho nhỏ này của mình, nói gì đến chuyện hạ vũ khí. Ông vẫn luôn tiếp tục, thậm chí đến phút cuối đời mình, tin rằng cần phải có một cái gì đó như *các biến ẩn* chẳng hạn, cho ta một mặt bằng quyết định luận ở phía dưới mặt bằng lượng tử, khiến cho sự ngẫu nhiên khách quan của Heinsenberg chỉ còn là "dường như", vì nó được suy ra dựa trên một lý thuyết không đầy đủ. Cuối cùng, sau khi di cư sang Mỹ năm 1933, Einstein vẫn còn có một đòn đánh nữa rất quan trọng mang lại sự hiểu biết sâu sắc hơn về vật lý lượng tử. Đó là một thí nghiệm tưởng tượng ở dạng hoàn toàn khác mà cho đến hôm nay vẫn còn tranh luận cả về cách giải thích vật lý lẫn phương diện ứng dụng với một ý nghĩa rộng lớn: đó là *thí nghiệm EPR* mà nội dung của nó chúng ta sẽ thảo luận ở Chương 13.

10
Mẫu nguyên tử Bohr

Đã có những mẫu nguyên tử nào?

Ngay từ đầu cuốn sách này đã đặt ra câu hỏi rất cơ bản về cấu trúc của vật chất. Chúng ta sẽ khảo sát kỹ hơn những mẫu nguyên tử đã được giới thiệu ngắn gọn trong Chương 1 để thấy rõ vì sao việc hình thành một mẫu nguyên tử mới gần với thực tế hơn lại vô cùng cần thiết.

Từ rất xa xưa người ta đã biết rằng vật chất được cấu tạo từ những hạt nhỏ nhất không thể phân chia được nữa, như một giả thuyết thời cổ Hy Lạp, dựa trên phương thức tư duy triết học nhiều hơn là tư duy vật lý chặt chẽ của Galile và Newton. Ngay từ thế kỷ thứ 5 trước công nguyên, các nhà triết học như Leukipp, Democrit đã đề xuất quan điểm cho rằng có tồn tại những hạt nhỏ nhất gọi là *nguyên tử* (theo tiếng Hy Lạp thì *atomos* (nguyên tử) = không phân chia được).

Mãi về sau, dựa trên những quy luật xác định mà người ta quan sát thấy trong những nghiên cứu hóa học, nhà hóa học người Anh John Dalton (1766-1844) mới xem xét lại và bổ sung thêm cho giả thuyết nguyên tử cổ xưa này. Dalton nhận thấy rằng quy luật ***tỷ lệ bội*** cho phép ta có cơ sở để thừa nhận sự tồn tại của nguyên tử (theo quy luật này thì các nguyên tố tham gia liên kết hóa học chỉ theo một tỷ lệ khối lượng xác định hay một số nguyên lần của khối lượng đó). ít nhất là về mặt hóa học, với mỗi nguyên tố hóa học xác định, phần khối lượng này là không thể phân chia được nữa và người ta coi nguyên tử của nguyên tố luôn có khối lượng đó. Lẽ đương nhiên mô hình nguyên tử ra đời sớm sủa này không thể giải thích được tất cả những hiện tượng đã quan sát thấy.

Sau đó nhà khoa học người Anh, Joseph Thomson (1856-1940) đã phát hiện ra electron trong khi làm thí nghiệm với các ống tia âm cực.

Ông khẳng định rằng nhất định phải tồn tại các hạt tích điện âm. Thậm chí trong thí nghiệm của mình ông còn xác định được tỷ số *q/m*, tức là tỷ số giữa điện tích và khối lượng của các hạt này. Sau đó, để giải thích cho thí nghiệm của mình, ông cho rằng có tồn tại cả những hạt tích điện dương (những ion mang điện dương). Mẫu nguyên tử hình thành từ những nhận thức mới mẻ này của Thomson được gọi là *mẫu bánh nho khô*. Trong mẫu này, nguyên tử được hình dung như một cục bột đặc nhỏ *(compact)* và trong quả cầu vật chất mang điện dương đó có phân bố đều đặn các electron mang điện âm, giống như những hạt nho khô rắc trong một chiếc bánh ngọt vậy.

Như vậy, đến giữa thế kỷ 19 người ta đã nhận ra rằng, cái được gọi là nguyên tử thật ra chẳng phải là không thể phân chia được nữa như thoạt đầu người ta tưởng, còn cái nguyên tử thực sự kia – cái mà không thể phân chia được ấy, nếu nó tồn tại, thì lại vẫn chưa được tìm thấy.

Đến năm 1903, khi Philipp Lennard (1862-1947) bắt đầu tiến tới những kết luận chính xác hơn về cấu trúc của nguyên tử với thí nghiệm bắn phá những lá nhôm mỏng bằng chùm hạt electron được gia tốc, thì mẫu nguyên tử của Thomson không còn đứng vững nữa trước các kết quả thực nghiệm. Lennard nhận ra rằng, nguyên tử thật ra chủ yếu là trống rỗng chứ không thể là một cấu trúc đặc như Thomson hình dung.

Những kết quả chính xác hơn lại do Ernest Rutheford (1871-1937) phát hiện. Bằng một thí nghiệm hết sức tinh tế ông đã tiến tới một mẫu nguyên tử mới, hoàn thiện hơn. Rutherford bắn phá lá vàng mỏng bằng một chùm tia alpha – hạt nhân của nguyên tử hêli, thu được từ các hạt nhân phóng xạ. Trong thí nghiệm này, Rutherford đo góc lệch ϑ của hạt alpha khi tán xạ trên một lá vàng có bề dày khoảng 100 lớp nguyên tử và nhận thấy rằng, các hạt alpha chủ yếu chỉ bị lệch một

góc rất nhỏ. Tuy nhiên, có một số hạt bị hất ngược trở lại với góc gần như bằng 180^0. Từ đó, Rutherford đã khẳng định rằng, hiện tượng tán xạ quan sát được của chùm tia alpha là không thể giải thích được bằng mẫu nguyên tử của Thomson, vì trong mẫu này các điện tích dương của nguyên tử phân bố đều đặn trong toàn nguyên tử.

Từ thí nghiệm giàu hệ quả này, Rutherford suy ra những kết luận dẫn ông tới mẫu nguyên tử mới như sau:

- Phần lớn nguyên tử là trống rỗng

- Nguyên tử có một nhân tích điện dương, cấu trúc đặc biệt chặt, kích thước nhỏ cỡ 10^{-15} m

- Các electron quay trong các lớp vỏ nguyên tử và có khoảng cách tới nhân tùy ý. Lực ly tâm sinh ra do chuyển động theo quỹ đạo của electron phải cân bằng với lực hút giữa các điện tích trái dấu.

Dễ thấy rằng mẫu này rất gần với cấu trúc hệ mặt trời của chúng ta. Do đó, *mẫu nguyên tử Rutherford* cũng còn được gọi là *mẫu hành tinh nguyên tử*. Như chúng ta đã biết từ cơ học Newton, điều kiện cân bằng giữa lực hút điện và lực ly tâm ngược chiều nhau là:

$$F_C = F_{lt} \tag{10.1}$$

Lực điện ở đây chính là *lực Coulomb* trong chân không được tính theo công thức:

$$F_C = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \tag{10.2}$$

trong đó Q_1 và Q_2 là độ lớn của hai điện tích trái dấu hút nhau và đặt cách nhau một khoảng r. Hằng số ε_0 gọi là *hằng số điện môi* và có giá trị $\varepsilon_0 = 8{,}854 \,.\, 10^{-12}$ As/Vm.

Lực ly tâm được xác định nhờ hệ thức:

$$F_{lt} = \frac{mv^2}{r} \tag{10.3}$$

Cuối cùng, đặt hai biểu thức (10.2) và (10.3) vào điều kiện cân bằng (10.1) trong mẫu nguyên tử của Rutherford, ta được

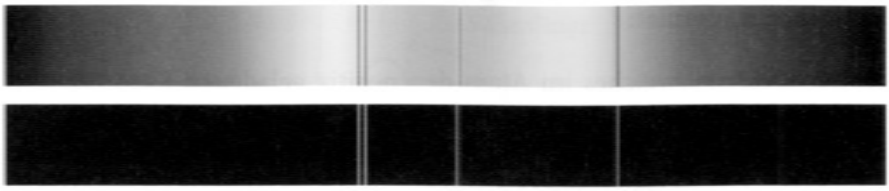
$$\frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Q_1 Q_2}{r^2} = \frac{mv^2}{r} \tag{10.4}$$

Mẫu hành tinh nguyên tử của Rutherford còn những thiếu sót gì?

Lẽ đương nhiên, mẫu nguyên tử có những tiến bộ rất cơ bản này vẫn còn một số thiếu sót. Có hai sự kiện rất cơ bản chưa được chú ý trong mẫu này:

a) *Tính gián đoạn của phổ hấp thụ và phổ phát xạ:*

Có một sự thật đã được thực nghiệm kiểm chứng, đó là các nguyên tử chỉ có thể hấp thụ hay phát xạ bức xạ điện từ ở những tần số hoàn toàn xác định đặc trưng cho mỗi nguyên tố. Chẳng hạn khi nghiên cứu quang phổ do nguyên tử Hg bị kích thích phát ra (hơi thủy ngân), ta thấy rằng, không có sự liên tục trong phổ phát xạ điện từ, mà chỉ ghi nhận được những tần số xác định gọi là các vạch phổ (Hình 10.1). Vậy thì, vì sao lại chỉ có những tần số xác định được hấp thụ hay phát xạ?



Hình 10.1. Tính gián đoạn của vạch quang phổ trong phổ kế
Trên: Các vạch phổ hấp thụ của nguyên tử Hg. *Dưới:* Các vạch phổ bức xạ của nguyên tử Hg

b) *Tính bền vững của nguyên tử:*

Theo điện động lực học cổ điển, những hạt mang điện được gia tốc sẽ phát ra năng lượng dưới dạng bức xạ điện từ. Trong mẫu nguyên tử của Rutherford, electron quay quanh hạt nhân trong lớp vỏ nguyên tử, do đó chúng có gia tốc hướng tâm. Điều đó phải dẫn tới hệ quả là electron, do thường xuyên bị gia tốc, sẽ phát ra năng lượng, nó mất dần động năng và cuối cùng sẽ nhập vào nhân. Kết quả là nguyên tử không bền vững, nó sẽ nhanh chóng bị sụp đổ. Nhưng thực tế chứng tỏ điều ngược lại: Nguyên tử đặc biệt bền vững[10]. Vậy làm thế nào giải thích được sự bền vững này của nguyên tử?

Mặc dù đã có rất nhiều cố gắng, nhưng những câu hỏi đó vẫn còn để ngỏ và buộc chúng ta phải thừa nhận rằng, mẫu nguyên tử của Rutherford chí ít vẫn là chưa đầy đủ. Cuộc tìm kiếm một lý thuyết mới tốt hơn, sát thực tế hơn lại bắt đầu.

Mẫu nguyên tử của Bohr đã giải quyết mâu thuẫn này như thế nào?

Nhà vật lý người Đan Mạch lúc đó đã rất nổi tiếng là Niels Bohr (1885-1962) cố gắng giải quyết mối mâu thuẫn trên giữa lý thuyết nguyên tử của Rutherford và thực tế bền vững của nguyên tử và tính gián đoạn của phổ hấp thụ cũng như phổ bức xạ. Phương pháp của ông là mở rộng mẫu nguyên tử Rutherford bằng cách sử dụng giả thuyết lượng tử của Planck. Dựa trên *mẫu nguyên tử lượng tử hóa* của mình, năm 1913 Bohr đã giải thích thành công quang phổ vạch của nguyên tử hyđrô.

---

[10] Một ngoại lệ ở đây là các hạt nhân phóng xạ, tuy nhiên hiện tượng phóng xạ dựa trên những nguyên nhân hoàn toàn khác và sự giải thích hiện tượng đó không liên quan gì đến "sự biến mất của hàm sóng".

Mẫu nguyên tử mới bán cổ điển của Bohr dựa trên ba tiên đề cơ bản, sau này được gọi là các *giả thuyết Bohr* để tôn vinh ông.

1. Tiên đề thứ nhất của Bohr

Trong nguyên tử, các electron quay quanh một hạt nhân tích điện dương và chỉ có thể tồn tại trên những quỹ đạo tròn xác định với những mức năng lượng gián đoạn E_n (với n = 1, 2, 3 v.v...). Những quỹ đạo này được gọi là *các trạng thái (quỹ đạo) dừng.*

2. Tiên đề thứ hai của Bohr

Trong lớp vỏ nguyên tử, khi chuyển động trên một quỹ đạo xác định, electron ở trong trạng thái dừng và không phát bức xạ điện từ.

Khi electron chuyển từ mức năng lượng n sang mức năng lượng m thấp hơn, nó sẽ phát ra một photon với năng lượng bằng:

$$\Delta E = Em - En = h \,.\, \Delta v \qquad (10.5)$$

Để electron chuyển từ mức năng lượng thấp lên mức năng lượng cao hơn, nó cần hấp thụ một photon có năng lượng ΔE cũng được tính từ công thức (10.5) *(sự hấp thụ)*. Mặc dù electron luôn có gia tốc hướng tâm, nhưng nó không buộc phải liên tục phát năng lượng. Năng lượng chỉ phát ra khi electron chuyển từ mức năng lượng cao xuống mức năng lượng thấp.

3. Tiên đề thứ ba của Bohr

Mô men xung lượng của electron, $L = mv \,.\, r$, không gì khác hơn chính là tích của xung lượng mv và bán kính r, chỉ có thể nhận những giá trị gián đoạn trong lớp vỏ nguyên tử. Nó đã được *lượng tử hóa.* Cụ thể, mô men xung lượng của electron chỉ có thể nhận các giá trị là những số nguyên lần của η:

$$L = mv \,.\, r = n\eta \qquad (10.6)$$

trong đó n = 1, 2, 3 v.v...

Nhân đây tôi giới thiệu thêm một giải thích bổ sung, vốn không phải của Bohr, mà là của Luis de Broglie, nhưng theo tôi thì lại có ý nghĩa hết sức lớn để ta dễ hình dung vấn đề. Sự giải thích này dựa trên nguyên lý về *sóng vật chất* của de Broglie, nguyên lý nói rằng, ứng với mỗi hạt vật chất chuyển động đều có một sóng – về mặt toán học thể hiện qua bước sóng de Broglie.

Ta hình dung một electron quay quanh hạt nhân nguyên tử trên một mức năng lượng (xem hình 10.2). Chu vi một vòng quay của quỹ đạo electron là:

$$U = 2\pi r. \tag{10.7}$$

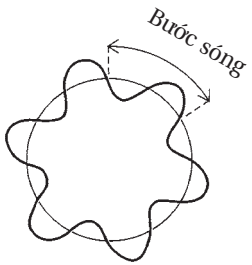
Vì sóng có khả năng giao thoa, ta cần phải thừa nhận rằng, sóng electron khi lan truyền trên quỹ đạo tròn cũng giao thoa tăng cường nhau với chính nó, nếu chu vi quỹ đạo là một số nguyên lần bước sóng của electron:

$$2\pi r = n\lambda \tag{10.8}$$

Thay *bước sóng de Broglie* ($\lambda = h/p$) vào (10.8) ta nhận được điều kiện:

$$2\pi r = n\frac{h}{p} \tag{10.9}$$

Đây chính là điều kiện cần phải thực hiện để khi quay quanh nhân trên quỹ đạo của mình, electron giao thoa tăng cường nhau với chính nó, chứ không mất đi do sự giao thoa hủy nhau.



Hình 10.2. Sóng electron, có thể tự giao thoa tăng cường với chính nó.

Nếu bây giờ chúng ta xem xét (10.9) chi tiết hơn và biến đổi một chút (đổi chỗ 2π và *p* cho nhau), ta sẽ có:

$$pr = n\frac{h}{2\pi} \tag{10.10}$$

Lại vì h/2π chính là = η, còn $p = mv$, nên ta lại trở về "phương án" ban đầu.

$$mv\,.\,r = n\eta \tag{10.11}$$

Việc "suy ra" tiên đề thứ ba của Bohr có thể xem như một dạng lập luận cơ bản ủng hộ sự hình thành tiên đề này, vì như chúng ta đều biết, khi nói về các tiên đề, vấn đề cơ bản là thừa nhận những điều rõ ràng và có sức thuyết phục. Cho nên, sự giải thích nhỏ nhoi này nhờ sóng vật chất de Broglie là cần thiết.

Bán kính Bohr là gì?

Bây giờ chúng ta sẽ khảo sát kỹ hơn ba tiên đề trung tâm làm điểm tựa cho mẫu nguyên tử Bohr. Nói ngắn gọn, bây giờ chúng ta biết rằng electron chỉ có thể quay quanh hạt nhân nguyên tử trên những quỹ đạo xác định ứng với mômen xung lượng xác định. Như vậy, cả bán kính quỹ đạo lẫn mô men xung lượng của electron đều bị lượng tử hóa.

Bây giờ ta tìm cách ứng dụng mẫu nguyên tử Bohr cho nguyên tử đơn giản nhất trong số tất cả các nguyên tố: nguyên tử hyđrô. Nguyên tử hyđrô chỉ gồm 1 proton và 1 electron, trong đó electron quay quanh proton – hạt nhân nguyên tử. Cả hai hạt cơ bản này đều có điện tích nguyên tố e (nhưng trái dấu), với giá trị:

$$e = 1{,}602.\ 10^{-19}\ C \tag{10.12}$$

trong đó, điện tích proton là + *e*, còn điện tích electron là - e.

Trước hết, electron này phải thoả mãn điều kiện cân bằng trong mẫu nguyên tử Rutherford thể hiện qua phương trình (10.4), nghĩa là phải thoả mãn:

$$\frac{Q_1Q_2}{4\pi\varepsilon_0 r^2} = -\frac{mv^2}{r} \tag{10.13}$$

với $Q_1 = e$, $Q_2 = -e$ (lưu ý rằng như ở trên, ở đây ta ký hiệu Q_1, Q_2 là độ lớn điện tích của electrron và proton). Khối lượng m ở đây đương nhiên là khối lượng electron, có trị giá:

$$m_e = 9{,}109 \,.\, 10^{-31} \text{ kg} \tag{10.14}$$

Nhân cả hai vế của (10.13) với r^2 ta có:

$$\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0} = m_e v^2 r \tag{10.15}$$

Vế phải của đẳng thức trên chính là tích của mômen xung lượng $L = mv \,.\, r$ và vận tốc quỹ đạo v. Lại thay L bằng tiên đề thứ ba của Bohr, ta được:

$$\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0} = Lv = n\hbar v \tag{10.16}$$

Giải (10.16) theo vận tốc quỹ đạo v, ta được:

$$v = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 n\hbar} \tag{10.17}$$

hay thay $\eta = \frac{h}{2\pi}$, ta được

$$v = \frac{e^2}{2\varepsilon_0 nh} \tag{10.18}$$

Cuối cùng, thay giá trị v trong (10.18) vào (10.15), ta được hệ thức:

$$\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0} = m_e\left(\frac{e^2}{2\varepsilon_0 nh}\right)^2 r \quad = r\frac{m_e e^4}{4\varepsilon_0^2 n^2 h^2} \tag{10.19}$$

Đẳng thức thì dài, rất nhiều ký hiệu, nhưng ngoài các hằng số thì thực ra chỉ có một biến số là bán kính r. Rút gọn $\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0}$ ở hai vế, ta được công thức đơn giản:

$$1 = r\frac{m_e e^2 \pi}{\varepsilon_0 n^2 h^2} \tag{10.20}$$

hay:

$$r = \frac{\varepsilon_0 n^2 h^2}{m_e e^2 \pi} \tag{10.21}$$

Trong công thức này ta nhận thấy rằng, bán kính quỹ đạo *r*, tưc là khoảng cách từ electron tới hạt nhân, chỉ phụ thuộc vào biến số nguyên $n = 1, 2, 3,$ v.v..., nghĩa là nó đã bị lượng tử hóa, vì tất cả các đại lượng vật lý còn lại trong (10.21) đều là các hằng số. Do đó, để cho dễ nhận biết, ta có thể viết lại biểu thức trên dưới dạng *r(n)*:

$$r(n) = n^2 \frac{\varepsilon_0 h^2}{m_e e^2 \pi} \tag{10.22}$$

Bây giờ, thay $n_1 = 1$ vào (10.22) ta sẽ tìm được khoảng cách nhỏ nhất từ electron tới hạt nhân:

$$r_1 = \frac{8{,}854.10^{-12}\,As/Vm.(6{,}626.10^{-34}\,J.s)^2}{9{,}109.10^{-31}\,kg.(1{,}602.10^{-19}\,C)^2\pi} \approx 5{,}29.10^{-11}m \tag{10.23}$$

Khoảng cách nhỏ nhất có thể từ electron tới hạt nhân của nguyên tử hyđrô được gọi là *bán kính Bohr*. Đem so bậc của bán kính Bohr với kết quả thí nghiệm của Rutherford, theo đó đường kính nguyên tử có bậc cỡ 10^{-10} m, ta thấy giá trị tính từ lý thuyết của bán kính Bohr khá phù hợp với số liệu thực nghiệm.

Mức năng lượng trong vỏ nguyên tử có thể nhận những giá trị nào?

Trước đây ta đã sử dụng các khái niệm quỹ đạo electron, quỹ đạo chuyển động và mức năng lượng theo những ý nghĩa tương đương với nhau. Trong mẫu nguyên tử của Bohr, đó là những trạng thái dừng,

cũng có nghĩa là những quỹ đạo mà khi electron chuyển động trên đó không có hiện tượng phát xạ (xem lại tiên đề thứ 2 của Bohr). Ngay những giá trị của mức năng lượng cũng đã bị lượng tử hóa, phụ thuộc vào giá trị của n = 1, 2, 3 v.v... Sau đây chúng ta sẽ tính giá trị của các mức năng lượng này.

Hiển nhiên, năng lượng toàn phần của electron trên một mức năng lượng đúng bằng tổng động năng và thế năng của nó:

$$E_{\text{toàn phần}} = E_{\text{động năng}} + E_{\text{thế năng}} \tag{10.24}$$

Thế năng của electron trong nguyên tử hyđrô là

$$E_{\text{thế năng}} = -\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r} \tag{10.25}$$

Thay biểu thức (10.21) của r vào, ta được:

$$E_{\text{thế năng}} = -\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 \dfrac{\varepsilon_0 n^2 h^2}{m_e e^2 \pi}} \tag{10.26}$$

Sau khi rút gọn, ta có:

$$E_{\text{thế năng}} = -\frac{m_e e^4}{4\varepsilon_0{}^2 n^2 h^2} \tag{10.27}$$

Như đã biết động năng của electron là:

$$E_{\text{động năng}} = \frac{1}{2} m_e v^2 \tag{10.28}$$

Thay biểu thức của v từ (10.18) vào ta sẽ nhận được:

$$E_{\text{động năng}} = \frac{1}{2} m_e \frac{e^4}{4\varepsilon_0^2 n^2 h^2} = \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 n^2 h^2} \tag{10.29}$$

Thay (10.27) và (10.29) vào (10.24), ta được:

$$E_{\text{toàn phần}} = -\frac{m_e e^4}{4\varepsilon_0{}^2 n^2 h^2} + \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 n^2 h^2} - \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 n^2 h^2} \tag{10.30}$$

Hay viết cho dễ nhìn hơn:

$$E_{\text{toàn phần}} = -\frac{1}{n^2}\frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2} \tag{10.31}$$

Thật tuyệt vời, ta nhận thấy rằng, ngay giá trị của các mức năng lượng cũng phụ thuộc vào biến số gián đoạn n = 1, 2, 3, v. v... Thông qua (10.31) có thể tính được mọi mức năng lượng khả dĩ của electron trong mẫu nguyên tử Bohr.

Việc hấp thụ hay phát xạ photon xảy ra như thế nào?

Bây giờ chúng ta tập trung vào tiên đề thứ hai của Bohr, theo đó electron chỉ thu vào hay phát ra một lượng tử năng lượng khi có thể "nhẩy" từ mức năng lượng này sang mức năng lượng khác. Chữ "nhẩy" ở đây ta hiểu theo ý nghĩa phong phú của nó, bởi vì theo Bohr, electron không thể tồn tại ở bất cứ chỗ nào ở *giữa* hai mức năng lượng. Electron không thể di chuyển giữa hai mức năng lượng, mà tại cùng một thời điểm, nó biến mất ở mức năng lượng này và xuất hiện ở mức năng lượng kia. Điều này xảy ra sao cho không bao giờ xuất hiện electron ở bất cứ chỗ nào giữa hai mức ấy.

Nếu bạn cảm thấy điều này tức cười, thì xin bạn hãy tin tôi, bạn không phải là kẻ duy nhất trên thế giới ở vào hoàn cảnh ấy. Vấn đề là, tôi muốn mô tả thật thoải mái, "bước nhẩy electron ma quái" ấy đã tạo ra khả năng duy nhất thống nhất toàn bộ các dữ liệu thực nghiệm đã thu thập được trong một lý thuyết vững chắc và cho phép ta đưa ra những lời tiên đoán xác đáng. Trong thế giới vi mô, chúng ta thường gặp phải những vấn đề vượt qua mọi khả năng tưởng tượng như vậy.

Theo lẽ đó, chừng nào ta chưa tìm ra một cách giải thích tốt hơn hay chưa phát hiện được một lỗi lầm nào đó của lý thuyết, thì ta hãy thừa

nhận việc electron "nhẩy" từ mức năng lượng này sang mức năng lượng khác như một sự ghi nhận chuyển từ trạng thái đầu sang trạng thái cuối. Và bởi vì ở đây ta chỉ khảo sát sự khác biệt về năng lượng, nên ta sẽ không gặp khó khăn gì lớn trong cách hình dung như vậy.

Quá trình hấp thụ hay phát xạ một lượng tử sáng dựa trên bước nhẩy của electron trong vỏ nguyên tử, và hiệu năng lượng giữa mức năng lượng đầu tiên và mức năng lượng cuối cùng sẽ được hấp thụ hay phát ra dưới dạng một lượng tử năng lượng. Ví dụ, nếu một electron nhẩy từ mức năng lượng 4 với $n = 4$ sang mức năng lượng 2 với $n = 2$, thì hiệu năng lượng

$$E_{photon} = E_4 - E_2 = -\frac{1}{4^2}\frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2} - \left(-\frac{1}{2^2}\frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2}\right) \tag{10.32}$$

sẽ được giải phóng ra dưới dạng một photon bức xạ. Ngược lại, nếu một electron đang nằm ở mức năng lượng 2 với $n = 2$ mà hấp thụ một photon có năng lượng (10.32) thì nó sẽ nhảy từ mức này lên mức năng lượng $n = 4$.

Để diễn tả trong một công thức tổng quát, hiệu năng lượng giữa hai mức m và n tùy ý được tính bằng:

$$\Delta E = E_m - E_n = -\frac{1}{m^2}\frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2} - \left(-\frac{1}{n^2}\frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2}\right) \tag{10.33}$$

$$\frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2}\left(-\frac{1}{m^2} + \frac{1}{n^2}\right)$$

Điểm mới cơ bản nhất trong mẫu nguyên tử Bohr chính là *sự lượng tử hóa* đã diễn ra trong nguyên tử: khoảng cách từ electron đến hạt nhân, mômen xung lượng của chúng, mức năng lượng mà trên đó chúng chuyển động, tất cả đều là những đại lượng đã bị lượng tử hóa, nghĩa là những đại lượng đó nhận các giá trị gián đoạn, luôn luôn là

một số nguyên lần một đơn vị nhỏ nhất gọi là *lượng tử (-nguyên tố)* của đại lượng vật lý đó.

Đã có thể xem mẫu nguyên tử Bohr là "đúng đắn" hay chưa?

Bên cạnh những thành tựu lớn lao do mẫu nguyên tử Bohr đem lại, tất nhiên không thể không nói rằng, mẫu nguyên tử này còn lâu mới là tiếng nói cuối cùng. Mặc dù đây là mẫu nguyên tử đầu tiên không chỉ giải thích được sự bền vững của nguyên tử cũng như tính gián đoạn trong phổ hấp thụ và phát xạ, mà còn tiên đoán được đường kính của nguyên tử cũng như đưa ra những số liệu chính xác về năng lượng ion hóa của nguyên tử hyđrô, nhưng vẫn còn đó những câu hỏi để ngỏ.

Xin nêu một ví dụ, ta thấy rằng mẫu nguyên tử Bohr chỉ có thể mô tả được nguyên tử hyđrô và một số ít nguyên tử giống nó mà thôi. Đó rõ ràng là một khiếm khuyết của mẫu này, sự khiếm khuyết mà ta không thể không thừ nhận.

Mặt khác, với quan niệm ngày hôm nay, một quỹ đạo gián đoạn, bán cổ điển như Bohr đã giả thiết, thực ra là không thể chấp nhận được nếu xét một cách thực sự theo cơ học lượng tử, bởi vì với một đối tượng lượng tử như electron không thể gán cho nó một quỹ đạo xác định được. Hệ thức bất định Heisenberg cấm ta nói đồng thời về một bán kính quỹ đạo chính xác r và một vận tốc quỹ đạo cụ thể v, nhưng đó lại chính là điều mà Bohr đã xem như một tiền đề trong mẫu của mình như chúng ta đã thấy.

Cuối cùng, chúng ta cũng phải thừa nhận rằng, mặc dù mẫu nguyên tử Bohr và những tiên đoán cho nguyên tử hyđrô là rất chính xác, nhưng những giả thiết của Bohr ví như cho rằng có những quỹ đạo dừng mà

trên đó electron chuyển động không kèm theo bức xạ là vô căn cứ. Nó là và mãi mãi chỉ là *những giả thiết* được đưa ra theo kiểu những tiên đề ít nhiều tùy tiện.

Ngày nay chúng ta biết rằng, mẫu nguyên tử Bohr là mẫu bán cổ điển, chẳng có gì khác hơn là một bước tiến gần hơn đến thực tại vật lý. Khảo sát theo nhãn quan hiện tại, nó là một đại diện ưu tú cho vô số những mẫu nguyên tử, ghi một dấu ấn trên con đường dài khúc khuỷu đến trình độ hiểu biết hôm nay của chúng ta.

Đặc tính nổi bật nhất, đáng ghi nhận nhất trong mẫu nguyên tử Bohr chính là, đó là mẫu đầu tiên đưa ra những giả thiết về "trạng thái lượng tử hóa" của electron.

11
Phương trình Schrôdinger

Đâu là sự khác nhau giữa cơ học ma trận và cơ học sóng?

Cơ học ma trận do Werner Heisenberg phát triển vào năm 1925 là một lý thuyết toán học lần đầu tiên mô tả hành vi của các đối tượng lượng tử, và nếu nhìn nhận về mặt toán học, như không khó nhận ra qua tên gọi của nó, thì nó dựa trên *phép tính ma trận*. Nhờ đó, lần đầu tiên đã có thể tiến hành những tính toán cụ thể liên quan đến các quá trình vật lý lượng tử. Heisenberrg luôn lưu ý đến nét đặc thù trong lý thuyết của ông bằng cách thường xuyên nhấn mạnh rằng, trong lý thuyết đó chỉ chứa những đại lượng quan sát được và trước hết là đo được, gọi là những đại lượng quan sát được (hay đo được). Điều này đặc biệt quan trọng đối với ông, bởi vì theo cách giải thích cơ học lượng tử của Bohr và Heinsenberg, chỉ có thể gán một giá trị thực cho những đại lượng đo được.

Gần như đồng thời và độc lập với Heisenberg, vào năm 1926, nhà vật lý người áo Erwin Schrôdinger (1887-1796) phát biểu một cách mô tả toán học riêng dành cho các quá trình trong thế giới vi mô, không dựa trên các ma trận, mà dựa vào sự tương đương của cơ học lượng tử với phương trình sóng trong lý thuyết dao động, gọi là *cơ học sóng*. Trong lý thuyết đó, Schrôdinger vẫn còn phần nào gắn bó với mô hình nguyên tử bán cổ điển của Bohr, khi ông nghĩ các electron trong lớp vỏ nguyên tử chuyển động trên những quỹ đạo dừng. Những trạng thái dừng này xuất hiện vì các electron được nhìn nhận như những sóng de Broglie tồn tại trong những trạng thái dao động xác định. Phương pháp khảo sát này của Schrôdinger cũng tỏ ra hữu ích và đầy hứa hẹn.

Đầu tiên, cả hai lý thuyết xuất hiện gần như đồng thời này tồn tại hoàn toàn độc lập với nhau và đều cung cấp những tiên đoán hết sức xuất sắc. Tuy nhiên, ngay trong năm 1926 Schrôdinger đã chứng minh rằng, hai

lý thuyết cạnh tranh với nhau này – cơ học ma trận của Heisenberg và cơ học sóng của Schrôdinger – là hoàn toàn tương đương về mặt toán học, mặc dù chúng xuất phát từ những tiền đề hoàn toàn khác nhau về thế giới quan.

Về cơ bản, Heisenberg coi cơ học ma trận của mình là toán học thuần túy dùng để tính các giá trị xác suất. Ông đứng trên lập trường *thực chứng,* và không ướm thử bất cứ giá trị thực nào cho những đại lượng cơ học lượng tử không đo được (và trước hết là những đại lượng không thể đo được).

Trái lại, quan điểm của Schrôdinger có bản chất *thực tế*. Ông xuất phát từ thực tế hiển nhiên của các sóng toán học và của các dao động electron trong nguyên tử. Các luận đề toán học của ông phản ánh thực tại khách quan của thế giới vi mô chứ không phải là hình thức luận thuần túy toán học như Heisenberg đã nhìn nhận. (Một cách nhìn dễ được thừa nhận như vậy có thể dễ dàng dẫn đến những nghịch lý và điều này chúng ta sẽ biết trong những chương sau).

Lại càng đáng ngạc nhiên hơn khi hai phương thức toán học khác nhau một cách cơ bản đến như vậy, nhưng cuối cùng lại được chứng minh là hoàn toàn tương đương. Cả hai đều mô tả sự tiến triển theo thời gian của các trạng thái của một hệ lượng tử không được quan sát[11]. Chúng chỉ khác nhau đáng kể về hình thức. Và thật là kỳ quặc, khi gần như là một quy tắc, trong các tính toán cơ học lượng tử, cơ học sóng thường được sử dụng nhiều hơn so với cơ học ma trận. Nguyên nhân của điều này trước hết nằm ở sự đơn giản của lý thuyết Schrôdinger so với ma trận Heisenberg. Đó cũng là lý do vì sao bây giờ chúng ta sẽ chỉ

[11] Không quan sát được là bởi vì, như chúng ta biết, theo cách giải thích Copenhagen thì hàm sóng bị thay đổi một cách gián đoạn bởi quá trình đo: điều này dẫn tới sự biến mất của hàm sóng (xem Chương 8).

khảo sát *phương trình Schrôdinger* mà không đề cập tới phương pháp tính của Heisenberg.

Sau khi đã có một cái nhìn định tính vào thế giới độc đáo của các đối tượng lượng tử, bây giờ là lúc chúng ta quan tâm một cách định lượng hơn việc mô tả các hạt có khối lượng. Đối tượng của chúng ta trong quá trình mô tả này chính là hàm sóng *y* vẫn thường xuất hiện trên con đường của chúng ta cũng như *phương trình Schrôdinger* vừa được nhắc tới ở trên.

Không nghi ngờ gì nữa, chương này sẽ là một trong những chương vất vả nhất mà chúng ta gặp phải trong cuốn sách này, bởi vì nó liên quan tới chính phương trình Schrôdinger nổi tiếng. Mặc dù phương trình này là phương trình đạo hàm riêng và do đó cần những kiến thức liên quan đến phép tính đạo hàm riêng, nhưng tôi vẫn không bận tâm về điều đó và muốn dành cho phương trình quan trọng này ít nhất là nguyên một chương[12].

Hàm sóng có ý nghĩa gì?

Trước khi động đến toán học, chúng ta hãy nói đôi lời về những phần cấu thành của phương trình trung tâm và quan trọng này.

Như đã nói, phương trình Schrôdinger là một phương trình vi phân và chứa *hàm sóng* như một ẩn hàm. Thoạt khởi đầu, những hàm sóng này quy về lý thuyết de Broglie, theo đó có thể gắn cho các hạt vật chất chuyển động một bước sóng gọi là bước sóng de Broglie. Có thể xem hàm sóng giả thiết bởi de Broglie để mô tả sóng vật chất là nghiệm của phương trình Schrôdinger.

---

[12] Bạn đọc thân mến, nếu bạn gặp khó khăn về đạo hàm riêng, bạn có thể bỏ qua những phần liên quan tới tính toán ở chương này mà vẫn không có vấn đề gì xảy ra cả.

Ngay cả vào lúc này, mặc dù vẫn chưa ý thức được đầy đủ, nhưng chúng ta thực ra đã làm việc với hàm sóng, bởi vì trong cơ học lượng tử, hàm sóng chính là đồng nghĩa với khái niệm *biên độ xác suất*.

Chắc chắn bạn còn nhớ thí nghiệm hai khe với electron ở Chương 5 và nhớ những tính toán của chúng ta ở đó đối với phân bố xác suất tới của electron trên tấm kính ảnh, trong đó chúng ta đã định nghĩa biên độ xác suất *a* để giải thích các vân giao thoa thu được trong thí nghiệm. Thông thường, biên độ xác suất này không ký hiệu là *a*, mà được ký hiệu bằng chữ cái Hy Lạp Ψ – chính là hàm sóng mà chúng ta vẫn luôn nói tới. Các khái niệm biên độ lượng tử cũng như biên độ xác suất thực ra đều tương đương với hàm sóng. Người ta cũng dùng hàm sóng Ψ để nói tới *hàm trạng thái* của đối tượng lượng tử mà nó mô tả.

Tiếp theo, chúng ta nhớ lại rằng, theo cách giải thích xác suất của Max Born thì bình phương giá trị tuyệt đối hàm sóng của một hạt $|\Psi(x; t)|^2$ cho ta biết xác suất tồn tại của hạt tại tọa độ *x* và ở thời điểm *t* (xem lại công thức (5.5)). Nhưng để tính được xác suất này, trước hết ta cần phải biết hàm sóng $\Psi(x; t)$ và do đó ta phải giải phương trình Schrôdinger bởi vì nghiệm của nó chính là hàm $\Psi(x; t)$ cần tìm. Tạm thời chúng ta chưa đề cập đến việc giải phương trình này ở đây, mà chỉ khảo sát việc xây dựng nó để làm quen phần nào với phương trình đặc biệt quan trọng đó.

Cũng cần nhấn mạnh một lần nữa rằng, mặc dù mang tên là sóng, nhưng theo lý thuyết của Born, hàm sóng cơ học lượng tử $\Psi(x; t)$ không phải là hàm sóng *thực, sóng cơ học* như ta đã biết trong lý thuyết dao động. Khái niệm hàm sóng được dùng ở đây chỉ để nêu ra *sự giống nhau về hình thức* đối với hàm sóng cơ học mà thôi. Như vậy phương trình Schrôdinger thực ra không phải là một phương trình sóng theo nghĩa của lý thuyết dao động mà chỉ được nhìn nhận như một dạng

tương đương của cơ học lượng tử với một phương trình sóng cơ học cổ điển đã biết.

Mặt khác, cũng không nên quên rằng, cách giải thích như vậy về hàm sóng cơ học lượng tử chưa làm hài lòng một số nhà vật lý lượng tử có tên tuổi của ngày hôm nay. Trong thực tế, một vấn đề đã được nhiều lần đề cập tới, đó là liệu hàm Ψ, về mặt nhận thức luận, chỉ cho biết trạng thái của một đối tượng lượng tử, hay còn được gán cho một ý nghĩa thực tế khác mà vẫn không tạo nên mâu thuẫn nào.

Liên quan tới điểm tranh cãi còn chưa rõ ràng này, trong cách giải thích hàm sóng, tôi muốn đưa ra một trích dẫn hết sức lý thú của nhà vật lý lượng tử erich joos và nhà vật lý hấp dẫn lượng tử Claus Kiefer:

> *"Liệu có sự "suy sụp" thực sự của toàn bộ trạng thái về một thành phần xác định hay không (...), hiện nay vẫn là một câu hỏi còn bỏ ngỏ. Do trong tương lai gần vẫn chưa thể có một xác quyết thực nghiệm, nên có thể xem đây chỉ là 'vấn đề khẩu vị'"*[13]

Trong thời gian trước mắt, vẫn chưa thể đưa ra một bằng chứng thực nghiệm về việc hàm sóng có bản chất *"thực"* hay *"thuần túy toán học"*. Như vậy, quan điểm thực chứng luận về hàm sóng của Heisenberg và Bohr vẫn chưa thể được chứng thực hay bị bác bỏ.

Mặc dù cách giải thích Copenhagen còn chưa thực sự vững chắc, nhưng sự níu kéo vào các quan điểm cũ kỹ khác còn thiếu cơ sở hơn nhiều[14].

---

[13] C. Kiefer, E. Joos: Decoherence: Concepts an Examples, In: *P*. Blanchard, Arkadiusz Jadczyk *Quantum Future: From Como to the Present and Beyond* (Springer Berlin Heidenberg New York 1999).

[14] Cụ thể hơn xin xem trong L. Marchildon: Why should we interpret Quantum Mechanics? Found. Phys. 34, 11 (2004), cũng như trong H.D. Zeh: The Wave Function: It or Bit? trong: J. Barow, *P*. Davies et al. (Hrsg) Science and Ultimate Reality (Cambridge University Press, 2002); arXiv: quant-ph/0204088 v2 (2002)

Phương trình Schrôdinger được suy ra như thế nào?

Trước hết, có lẽ tôi sẽ làm các bạn thất vọng, vì thật ra phương trình Schrôdinger tuyệt vời như vậy lại không được suy ra theo tinh thần vật lý. Nhà vật lý lượng tử Richard Feynman (1918-1988), một bậc thầy về ngôn từ, đã có lần nói:

> *"Từ đâu chúng ta có phương trình này? Chẳng từ đâu cả. Không thể suy ra nó từ một cái gì đó vốn đã biết. Nó nhẩy ra từ cái đầu của Schrôdinger"*[15]

Cũng tốt thôi. Bây giờ chúng ta sẽ thử dẫn ra phương trình này, cho dù chỉ là thuần túy toán học. Tuy nhiên cần phải nhấn mạnh một cách rõ ràng rằng, "suy ra" không phải là một quy trình chuẩn để nhận được phương trình Schrôdinger như sản phẩm cuối cùng. Nhưng đó cũng chẳng phải là một sự kiện gì kinh hoàng, nếu phương trình Schrôdinger – cũng giống như phương trình cơ bản của cơ học cổ điển Newton – không được dẫn ra từ một nền tảng vật lý, bởi vì phương trình này *tự bản thân nó* đã chính là phương trình cơ bản của cơ học lượng tử.

Phần dẫn dắt sau đây cần được nhìn nhận một cách rõ ràng, và vì tại một số điểm, những phân tích đầu tiên về phương trình Schrôdinger là hơi rối rắm, nên chúng ta trước hết phải nắm được những mối quan hệ tổng quát đã. Tiếp theo, chúng ta sẽ suy ra phương trình Schrôdinger phi tương đối tính, vì phương trình này khá đơn giản, khi nó chỉ dùng được cho những trường hợp vận tốc v của hạt là khá nhỏ.

Chúng ta xét một hạt có khối lượng m và vận tốc v. Trước hết, ta cho rằng hạt chuyển động tự do, tức là không chịu tác dụng của trường lực

---

[15] T. Hey, *P*. Walter: *Das Quanten Universum* (Apektrrum, 1998), Trang 51

ngoài. Năng lượng toàn phần E_{tp} của hạt (khi bỏ qua năng lượng nghỉ bằng mc^2) chính là động năng

$$E_{dn} = \frac{1}{2}mv^2 \tag{11.1}$$

Có thể thay $p^2 = m^2v^2$, ta được:

$$E_{dn} = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\frac{p^2}{m} \tag{11.2}$$

Chúng ta đã quen thuộc với hệ thức $p = h/\lambda$ cho xung lượng của một đối tượng lượng tử, hệ thức có trong phương trình bước sóng de Broglie. Với chúng ta công thức mới là công thức tính xung lượng qua *số sóng*, với định nghĩa:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \tag{11.3}$$

và khi đó xung lượng có thể viết dưới dạng:

$$p = \frac{kh}{2\pi} = k\hbar \tag{11.4}$$

Tiếp theo, với năng lượng của hạt thường được tính theo $\eta\omega$ (xem lại Chương 2), ta có:

$$E_{tp} = \frac{k^2\hbar^2}{2m} = \hbar\omega \tag{11.5}$$

Bây giờ ta sẽ chuyển sang phần khó khăn hơn của quá trình suy diễn, nó dễ tiếp nhận về mặt toán học nhưng lại hơi "quá sáng tạo" hay tùy tiện về mặt vật lý.

Ta đưa vào một *hàm sóng* $\Psi(x; t)$ ví như *sóng de Broglie*. Với giả thiết rằng không có một trường thế bên ngoài $(V(x; t) = 0)$, hàm sóng này có dạng:

$$\Psi(x; t) = e^{i(kx - \omega t)} \tag{11.6}$$

trong đó $i = \sqrt{-1}$ là số ảo. Lấy đạo hàm riêng theo *t* ta có:

$$\frac{\partial\psi(x;t)}{\partial t} = -i\omega e^{i(kx-\omega t)} \tag{11.7}$$

Lấy đạo hàm riêng (11.6) hai lần theo *x* ta được:

$$\frac{\partial^2\psi(x;t)}{\partial x^2} = i^2k^2\omega e^{i(kx-\omega t)} \tag{11.8}$$

Chúng ta sẽ còn quay lại hai biểu thức đạo hàm riêng này.

Vì những lý do sau này sẽ rõ, ta nhân hai vế của (11.5) với $-i^2\, e^{i(kx\,-\,\omega t)}$ và thu được:

$$-i^2.\hbar\omega.e^{i(kx-\omega t)} = -i^2\frac{k^2\hbar^2}{2m}e^{1(kx-\omega t)} \tag{11.9}$$

Đáng ngạc nhiên là ở đây xuất hiện trở lại những những biểu thức đạo hàm riêng ta đã thấy ở (11.7) và (11.8):

$$-\frac{\eta^2}{2m}\underbrace{i^2k^2\ e^{i(kx-\omega t)}}_{\frac{\partial^2\Psi(x;t)}{\partial x^2}} = i\eta\underbrace{(-i)\omega\, e^{i(kx-\omega t)}}_{\frac{\partial\Psi(x;t)}{\partial t}} \tag{11.10}$$

Hay ta có thể viết lại (11.9) dưới dạng:

$$-\frac{\eta^2}{2m}\frac{\partial^2\psi(x;t)}{\partial x^2} = i\eta\frac{\partial\psi}{\partial t} \tag{11.11}$$

Đây chính là phương trình Schrôdinger của hạt đang xét trong trường hợp không có trường ngoài *(V (x; t) = 0)*.

Để có được phương trình Schrôdinger trong trường hợp tổng quát (nghĩa là *(V (x; t) ≠ 0)* ta phải cộng thêm phần thế năng của hạt (là phần năng lượng hạt có được khi đặt trong trường ngoài) vào biểu thức năng lượng toàn phần và khi đó (11.2) được mở rộng thành:

$$E_{tp} = \frac{1}{2}\frac{p^2}{m} + V(x;t) \tag{11.12}$$

Từ đó, Schrôdinger đề nghị dạng tổng quát của (11.11) là

$$-\frac{\eta^2}{2m}\frac{\partial^2\psi(x;t)}{\partial x^2} + V(x;t)\,\psi(x;t) = i\eta\frac{\partial\psi}{\partial t} \tag{11.13}$$

trong đó Ψ *(x; t)* là *hàm sóng tổng quát* chứ không chỉ là hàm sóng phẳng de Broglie đặc biệt (11.6) nữa. Phương trình Schrôdinger này đúng trong trường hợp tổng quát khi có trường ngoài tùy ý *V (x; t)*. Vì hàm sóng Ψ ở đây phụ thuộc vào thời gian, nên ta còn gọi (11.13) là *phương trình Schrôdinger phụ thuộc thời gian*.

Thật thú vị khi ghi nhận rằng, phương trình được đề xuất bởi Schrôdinger đã luôn tỏ ra vô cùng hữu ích trong những tháng năm sau đó và mãi cho tới tận ngày hôm nay, thực ra chỉ là sản phẩm của một quá trình ước đoán thiên tài chứ không phải là một suy diễn vật lý rành mạch.

Chúng ta đã đơn giản hóa tính toán khi sử dụng hệ một chiều (chỉ có tọa độ *x*) và khi đó đạo hàm riêng theo tọa độ của Ψ chỉ có thành phần tính theo trục *x*. Thực ra, hàm sóng phụ thuộc cả vào các tọa độ *y* và *z*, do đó ta phải lấy đạo hàm riêng theo cả *x*, *y* và *z* và đấy chính là *toán tử Laplace*

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \tag{11.14}$$

Nếu bây giờ ta viết gọn lại Ψ *(x; y; z; t)* = Ψ *(r; t)*, và tương tự *V (r; t)* thì *phương trình Schrôdinger ba chiều phụ thuộc thời gian sẽ là*

$$-\frac{\eta^2}{2m}\nabla^2\psi(r;t) + V(r;t)\,\psi(r;t) = i\eta\frac{\partial\psi(r;t)}{\partial t} \tag{11.15}$$

Để tránh mọi sự hiểu nhầm, ta nhấn mạnh rằng, chỉ trong một số trường hợp ngoại lệ hiếm hoi hàm sóng Ψ mới thực sự dao động trong

không gian ba chiều quen thuộc. Nhìn chung, nó được định nghĩa trong một *không gian cấu hình* toán học, một không gian toán học trừu tượng, nhiều chiều, có khả năng mô tả tất cả các trạng thái cổ điển khả dĩ của đối tượng lượng tử.

Biểu thức xác định sự tiến triển hàm sóng của hạt $i\eta\partial/\partial t$ từ đây được gọi là *toán tử Hamilton* $\hat{H}$ trong cơ học lượng tử. Về mặt toán học mà nói, nó chỉ mô tả một quy tắc tính toán, nhưng đồng thời nó lại đảm nhiệm vị trí trung tâm trong cơ học lượng tử. Như vậy, phương trình Schrôdinger ba chiều không phụ thuộc thời gian có dạng viết rút gọn là:

$$E\psi = \hat{H}\psi \qquad (11.16)$$

Đây là một biểu thức thật gọn gàng và dễ thương.

Người ta tính toán những gì với phương trình Schrôdinger

Sau khi đã thành công với việc thiết lập phương trình Schrôdinger, câu hỏi đặt ra là: chúng ta sẽ làm gì với phương trình này? Mục đích các tính toán cơ học lượng tử nhờ phương trình Schrôdinger là nhận được trạng thái cơ học lượng tử của các đối tượng lượng tử, nghĩa là tìm ra hàm sóng mô tả các hệ lượng tử. Một trong những kết quả rực rỡ nhất mà phương trình Schrôdinger có thể làm được là thiết lập cái gọi là *mẫu nguyên tử cơ học sóng,* mà chúng ta sẽ khảo sát trong phần tiếp theo. Mẫu này sinh ra từ việc khảo sát các trạng thái electron chuyển động quanh hạt nhân nguyên tử, có thể tính được từ phương trình Schrôdinger.

Nhưng, làm thế nào để từ phương trình Schrôdinger suy ra trạng thái của các đối tượng lượng tử? Trước hết, cần phải tính *hàm sóng* $\Psi(r; t)$ phụ thuộc tọa độ và thời gian của đối tượng lượng tử – kết quả của việc giải phương trình Schrôdinger – điều mà nói thì dễ hơn làm rất nhiều. Theo *cách giải thích xác suất của Born*, bình phương trị tuyệt đối của

hàm sóng này sẽ cho ta xác suất *P (r; t)* để hạt có mặt tại tọa độ *x* vào thời điểm *t*, hay viết dưới dạng toán học:

$$P(r; t) = |\Psi(r; t)|^2 \tag{11.17}$$

Trong trường hợp *dừng*, tức những trường hợp không có sự thay đổi theo thời gian, ta có thể xuất phát từ một hàm sóng chỉ phụ thuộc tọa độ $\Psi(r)$ và điều này làm cho các phép tính đơn giản đi rất nhiều. Theo đó, phân bố xác suất có dạng:

$$P(r) = |\Psi(r)|^2 \tag{11.18}$$

Đến đây bạn có thể tự hỏi, vì sao lại phải bình phương *modun* của hàm sóng, một phép tính luôn để loại bỏ mọi giá trị âm. Vấn đề nằm ở phần đặc biệt của hàm sóng, có chứa số ảo . Do đặc điểm đó, hàm sóng có thể nhận những giá trị phức. Khi đó, có $i = \sqrt{-1}$ cách viết khác cho bình phương modun của hàm sóng:

$$|\Psi| = \Psi \cdot \Psi^* \tag{11.19}$$

Điều đó có nghĩa: bình phương modun hàm sóng $|\Psi|^2$ là tích giữa chính hàm sóng và liên hợp phức Ψ^* của nó, thu được bằng cách thay *i* bằng *-i* trong biểu thức. Làm như vậy sẽ đảm bảo rằng cuối cùng xác suất luôn có giá trị thực.

Vì chưa có bất cứ giới hạn nào cho hàm Ψ, nên về nguyên tắc $|\Psi|^2$ có thể nhận giá trị bất kỳ chứ không nhất thiết phải nằm trong khoảng $0 \leq |\Psi(r)^2| \leq 1$ theo đúng ý nghĩa xác suất chỉ nhận giá trị nằm giữa 0 và 1. Cho đến nay chúng ta vẫn chưa nói tới *hệ số chuẩn hóa N* (không nhất thiết phải đưa vào khi tìm hàm sóng), nó được dùng trong trường hợp giá trị cực đại của $|\Psi^2|$ chưa bằng 1. Hệ số chuẩn hóa *N* được xác định từ điều kiện chuẩn hóa:

$$N^2 \int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(r)|^2 dr = 1 \tag{11.20}$$

nghĩa là

$$N = \frac{1}{\sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(r)|^2 dr}} \quad (11.21)$$

Đến đây, với hàm sóng chuẩn hóa $\Psi(r)_N$ được xác định bởi $\Psi(r)_N^2 = N^2 |\Psi(r)^2|$, ta có phân bố xác suất chính xác là

$$P(r) = |\Psi(r)_N^2| \quad (11.22)$$

Phương trình Schrôdinger có ảnh hưởng gì đến mẫu nguyên tử?

Một trong những thành tích tuyệt vời của phương trình Schrôdinger là những tiên đoán về mẫu nguyên tử. Nhờ có phương trình này, một mẫu nguyên tử mới, hoàn chỉnh hơn nhiều đã được xây dựng với tên gọi là *mẫu nguyên tử của cơ học sóng*. Phần sau đây sẽ bàn tới mẫu này.

Nghiệm của phương trình Schrôdinger cho các electron trong vỏ nguyên tử thể hiện dưới dạng những sóng đứng. Mỗi nghiệm Ψ của phương trình, trong trạng thái dừng không phụ thuộc thời gian, thể hiện một trạng thái năng lượng gián đoạn của electron. Giải thích vật lý của hàm sóng này vượt qua khái niệm thông thường về *không gian tồn tại* của electron.

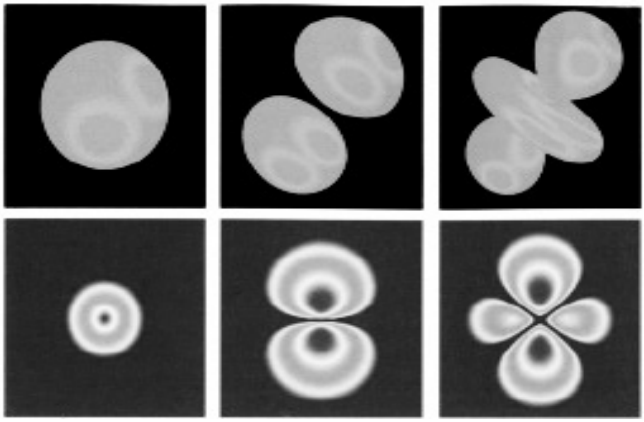
Theo cách giải thích xác suất trong mẫu nguyên tử của cơ học sóng, ta nói tới *không gian xác suất tồn tại*, đó là những miền mà ở đó đối tượng lượng tử (ở đây cụ thể là electron) có thể bị bắt gặp với một xác suất nào đó, chẳng hạn là 90%, và nói chung có hình ảnh khác hẳn so với quỹ đạo Bohr.

Một số hình ảnh của không gian xác suất tồn tại như vậy của electron trong trường hợp đơn giản nhất – nguyên tử hyđrô – được thể hiện trên hình 11.1. Hai phương pháp trình bày khác nhau trên hình đã cho mô phỏng "đám mây điện tích", trong đó electron của nguyên tử hyđrô có

thể tồn tại với xác suất 90%. Dạng và cấu trúc của không gian tồn tại này được trình bày ở hàng trên qua một cái vỏ bên ngoài được tưởng tượng ra (trong vỏ đó electron tồn tại với xác suất 90%), trái lại, ở hàng dưới, ta có *mật độ xác suất tồn tại* của electron trong chính không gian tồn tại này dưới dạng "lát cắt" và thể hiện qua độ đậm riêng (sẫm ứng mật độ xác suất tồn tại cao, nhạt ứng mật độ xác suất tồn tại thấp).

Mỗi không gian xác suất tồn tại đều xuất hiện từ sự giải thích vật lý cho một nghiệm toán học của phương trình Schrôdinger. Bằng phương pháp đó, phương trình Schrôdinger có thể cung cấp cho chúng ta bức tranh nguyên tử xác thực hơn, tinh tế hơn so với mẫu nguyên tử của Bohr đã tỏ ra không còn đầy đủ.

Mặc dù thoạt đầu phương trình Schrôdinger chỉ được sử dụng trong những trường hợp phi tương đối tính, nghĩa là khi tốc độ của đối tượng lượng tử là nhỏ so với tốc độ ánh sáng, và phương trình này vốn được tìm ra cho những hạt không có spin, nghĩa là những hạt không có momen xung lượng riêng, nhưng phương trình Schrôdinger vẫn là phương trình quan trọng nhất của toàn bộ vật lý lượng tử.



Hình 11.1. Biểu diễn một số không gian tồn tại có tính chất thí dụ của electron trong nguyên tử hyđrô (hàng trên là hình ảnh ba chiều, hàng dưới là "lát cắt ").

12
Con mèo của Schrôdinger

Con mèo Schrôdinger đề cập đến vấn đề gì?

Trong khi thảo luận về phương trình Schrôdinger chúng ta đã biết rằng công cụ toán học của cơ học lượng tử vừa hết sức chính xác lại vừa có khả năng mô tả thế giới vi mô, một sự mô tả đã được kiểm chứng bởi thực nghiệm. Tất cả các thí nghiệm mà đến nay chúng ta đã khảo sát, tất cả những hiện tượng mà đến nay chúng ta phải đối đầu, đều được giải thích thoả đáng nhờ cơ học lượng tử. Không còn nghi ngờ gì nữa, cho dù có không ít phản bác, nhưng đó vẫn là một lý thuyết thành công nhất mà chúng ta có thể dùng để mô tả thế giới vi mô, cho đến thời điểm hiện nay.

Tuy nhiên, chúng ta lại cũng biết rằng, trong *thế giới vĩ mô* thông thường của chúng ta, trong đời sống hàng ngày với kích thước cỡ 10^{-1} m thì lại khác. Cho dù chúng ta đã thành công khi ngày càng hiểu biết chính xác hơn về những cơ chế quy định cách hành xử của các đối tượng vi mô, nhưng chúng ta vẫn chưa thể chuyển cách hành xử của các đối tượng này sang thế giới vĩ mô, sang cách hành xử của các đối tượng vĩ mô. Với tất cả những gì được biết cho đến hôm nay, chúng ta có thể khẳng định chắc chắn rằng, cơ học của một electron khác với cơ học của một quả bóng đá.

Với phương pháp khảo sát của cơ học lượng tử, sẽ là hoàn toàn bình thường, thậm chí, là rất cần thiết, phải luôn nghĩ rằng, trong những hoàn cảnh xác định, một electron đồng thời có thể xuất hiện tại nhiều tọa độ khác nhau. Nhưng bạn hãy hỏi một cầu thủ bóng đá mà xem, đã khi nào anh ta thấy quả bóng đá đồng thời tồn tại ở nhiều chỗ khác nhau hay chưa! Hay bạn hãy tự hỏi chính mình xem, đã có lúc nào trong đời

mình, bạn đồng thời khiêu vũ ở hai đám cưới khác nhau không? Tất nhiên, chuyện đó là không thể!

Đó là bởi vì, bạn không phải là một đối tượng lượng tử, chắc chắn là không. Nhưng khi nào thì một đối tượng nào đó trở thành *đối tượng lượng tử?* Từ lúc nào, một đối tượng, vốn được nhìn nhận là cổ điển, nghĩa là không chứa đựng những chồng chất trạng thái khác nhau, nay lại trở thành một đối tượng lượng tử? Đâu là biên giới giữa thế giới vi mô và thế giới vĩ mô?

Có thể bạn nhớ rằng, đâu đó trước đây mình cũng đã gặp phải những câu hỏi tương tự mà chưa thể trả lời. Chúng ta cũng chẳng phải là những người đầu tiên đối đầu với vấn đề chuyển tiếp mô tả vật lý các quá trình từ thế giới vi mô sang thế giới vĩ mô. Erwin Schrôdinger là một trong những nhà vật lý đứng ở trung tâm để giải quyết vấn đề cơ bản này, như ông đã thảo luận trong nhiều công trình mà trước hết là tác phẩm *Tình hình cơ học lượng tử hiện nay*[16] xuất bản năm 1935. Thí nghiệm tưởng tượng do ông nghĩ ra về nghịch lý con mèo, sau này nối tiếng dưới cái tên *"con mèo của Schrôdinger"* đã chỉ ra một điểm yếu có liên quan đến thực tại vật lý trong cách giải thích Copenhagen về cơ học lượng tử. Mặc dù có những công lao rực rỡ về cơ học lượng tử, đặc biệt nhờ việc thiết lập phương trình mang tên ông, nhưng dường như Schrôdinger không tin tưởng nhiều lắm vào cách giải thích cơ học lượng tử của Bohr, điều này đặc biệt thể hiện rõ trong phát biểu sau đây của ông về cơ học lượng tử[17]:

---

[16] Công bố lần đầu trong Die Naturwissenschaften 23, 48 (1935), Sau đó in lại trong E. Schrôdinger: Beitraege zur Quantentheorie, trong Gesammelte Abhendlungen, Bd. 3, trang. 484 ff.

[17] J. Gribbin: Auf der Suche nach Schrôdinger Katze (Piper, 2001), trang 5. Hình 12.1. Bố trí thí nghiệm tưởng tượng với nghịch lý con mèo Schrôdinger.

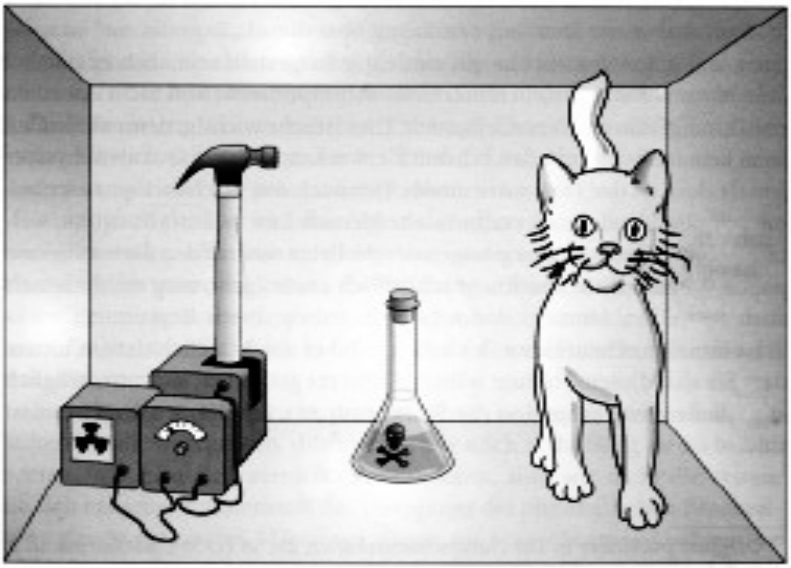
"Tôi không thích chuyện này, và tôi rất lấy làm tiếc là tôi đã có chuyện phải làm với nó"

Hãy tưởng tượng rằng, những đối tượng vĩ mô như quả bóng đá có khả năng chồng chất trạng thái, hay chính bạn có thể giao thoa qua "hai khe hở trên tường", bản thân Schrôdinger cũng xem đó là chuyện vô lý. Nhưng để cho chính xác, Schrôdinger đã không suy nghĩ trên một quả bóng đá, mà trên một đối tượng vĩ mô khác, một con vật rất được yêu mến: con mèo.

Trước khi chuyển sang nói về "thí nghiệm", cần khẳng định ngay rằng, với *con mèo Schrôdinger* ta chỉ có *một thí nghiệm thuần túy tưởng tượng*, loại thí nghiệm không thể tiến hành trong thực tế. Điều này đặc biệt quan trọng, vì chúng ta không được, dù chỉ trong một khoảnh khắc, tạo nên một ấn tượng rằng nhà vật lý lượng tử lại có khả năng bẻ cong sợi lông của một con mèo. Đặc biệt đó lại là một con người gắn bó với tự nhiên như Erwin Schrôdinger, một người thích đi dạo trong rừng và thích leo núi. Xin nhắc lại: đừng một phút nào nghĩ rằng thí nghiệm này được tiến hành thực. Tôi xin nhấn mạnh lần nữa rằng, trong khi đọc phần viết về thí nghiệm Schrôdinger, bạn cần luôn ghi nhớ điều đó.

Thí nghiệm tưởng tượng về con mèo Schrôdinger được xây dựng như thế nào?

Đây là một bố trí thí nghiệm thuần túy giả định và có vẻ rùng rợn (xem hình 12.1): trong một hộp đóng kín, đậm đặc không khí và cô lập với môi trường bên ngoài người ta nhốt một con mèo cùng với một chế phẩm phóng xạ, một ống đếm Geiger-Mueller, một cái búa và một lọ chất độc xyanua kali.



Hình 12.1. Cấu trúc thí nghiệm suy tưởng về nghịch lý con mèo Schrôdinger.

Tất cả các đối tượng riêng lẻ này được kết nối với nhau theo quan hệ nhân quả bằng một cơ cấu đặc biệt. Nguyên lý hoạt động của thí nghiệm đáng sợ này được tưởng tượng như sau: khi chế phẩm phóng xạ, để đơn giản xem là một nguyên tử phóng xạ duy nhất, phân rã, phóng xạ phát ra sẽ được ghi nhận bởi ống đếm Geiger-Mueller và qua đó khởi phát một cơ cấu khiến cái búa đập vỡ chai xyanua kali, chất độc thoát ra sẽ giết chết con mèo. Trong trường hợp nguyên tử phóng xạ không phân rã, toàn bộ cơ cấu không được phát động, chai thuốc độc còn nguyên và đương nhiên mèo vẫn sống.

Tổng quát lại, có thể nói một cách tóm tắt như sau: nếu nguyên tử phóng xạ phân rã, mèo sẽ chết, nếu không phân rã, mèo sống. Như thế thí nghiệm thật ra là khá đơn giản.

Nghịch lý trong thí nghiệm tưởng tượng về con mèo Schrôdinger nằm ở đâu?

Thoạt nhìn, khó nhận ra điểm mấu chốt trong nghịch lý con mèo Schrôdinger. Giống như những chuyện ma quái khác, điểm chốt đó nằm trong chi tiết. Chúng ta hãy bắt đầu lại từ đầu, một cách nhẹ nhàng thôi:

Nguyên tử phóng xạ, và điều này thì hoàn toàn chắc chắn, là một đối tượng lượng tử, và do đó nó có cách cư xử riêng. Phương trình cơ học lượng tử nói với ta rằng, chừng nào còn ở trạng thái nghỉ, mỗi nguyên tử phóng xạ nằm trong trạng thái Ψ *(r; t)* xác định nào đó. Cụm từ "trạng thái xác định nào đó" có thể gây nên một chút hiểu nhầm, vì định ngữ "xác định nào đó" ở đây không theo ý nghĩa cổ điển là một trạng thái xác định cụ thể. Nguyên tử thực ra nằm trong một trạng thái là chồng chất của nhiều trạng thái khác nhau. Người ta nói tới *sự chồng chất những trạng thái riêng lẻ khác nhau* của các đối tượng lượng tử, trong đó những trạng thái riêng lẻ được xác định một cách gián đoạn (chẳng hạn như "chết" và "sống") và có thể giải thích theo nghĩa cổ điển. Mỗi trạng thái cơ học lượng tử trong đó đối tượng lượng tử tồn tại thường là chồng chất của rất nhiều và thường là vô hạn những trạng thái riêng lẻ và đó chính là điều chúng ta không gặp phải trong đời sống hàng ngày thuộc về thế giới cổ điển.

Ở đây, chúng ta có thể nêu lại những hiểu biết trong Chương 4 và Chương 5 đối với thí nghiệm hai khe, trong đó ta giải thích các vân giao thoa như chồng chất của những vân riêng lẻ tương ứng khi mở từng khe một. Những photon hay electron riêng lẻ, nghĩa là những đối tượng lượng tử giao thoa, khi đi qua khe cũng không ở trong một trạng thái riêng lẻ xác định (cụ thể là trên đường đi qua khe 1 hay khe 2), mà ở trong một trạng thái chồng chất, trong đó chứa cả hai trạng thái riêng khả dĩ. Một hạt, khi đi qua hai khe, nằm trong trạng thái chồng chất của

"*ngần ấy phần trăm đi qua khe 1*" và "*ngần ấy phần trăm đi qua khe 2*". Đó là chồng chất của hai trạng thái riêng lẻ khác nhau.

Hoàn toàn tương tự, chúng ta phải tưởng tượng ra trạng thái của một nguyên tử phóng xạ. Nó không đơn giản là trạng thái cụ thể phân rã hay không phân rã. Nguyên tử nằm ở trong trạng thái vừa phân rã lại *đồng thời* vừa không phân rã. Hơn nữa, "trạng thái hỗn hợp" này lại là xác định, tỷ lệ phần trăm của phần trạng thái phân rã và không phân rã thay đổi theo thời gian và tuân theo một tiên đoán chính xác qua hàm sóng trạng thái Ψ *(r; t)* được gán cho nguyên tử. Trạng thái lượng tử của hạt tạo nên từ chồng chất các trạng thái riêng lẻ, theo phương trình Schrôdinger là hoàn toàn xác định và tính được.

Người ta thể hiện trạng thái chồng chất của hạt theo nghĩa lượng tử như thế nào?

Nếu quay lại nền tảng toán học của con mèo Schrôdinger, chúng ta có thể sử dụng một cách viết mới, rất được ưa chuộng trong cơ học lượng tử. Đó là *cách viết theo ngoặc Dirac*[18]. Paul Dirac (1902-1984), bên cạnh Schrôdinger và Heisenberg, là một trong những nhà cơ học lượng tử lão luyện nhất trong thời gian ấy. Cách viết theo ngoặc do ông phát triển có ý nghĩa giống như dùng mũi tên để mô tả vectơ, với chiều mũi tên là hướng của đại lượng và độ dài vectơ tương ứng với trị giá của đại lượng ấy. Vectơ trạng thái của đối tượng lượng tử là một đại lượng cơ học lượng tử và có thể xem như sự tương đồng với các đại lượng vectơ cổ điển mà chúng ta vốn quen thuộc.

---

[18] Ban đầu lối viết này đòi hỏi một thời gian làm quen, xin bạn đừng lùi bước trước khó khăn. Thoạt nhìn thì có vẻ xa lạ đấy, nhưng thật ra nó chẳng đòi hỏi gì nhiều hơn là trình độ toán học bậc phổ thông.

Như chúng ta biết, trạng thái của đối tượng lượng tử được mô tả qua hàm sóng Ψ. *Trạng thái cơ học lượng tử* của một đối tượng lượng tử, theo cách viết Dirac, được ghi là

$$|\Psi\rangle \tag{12.1}$$

trong đó $|\ \rangle$ được gọi là *ket*. Phần ngược lại của nó là $\langle\ |$ được gọi là *bra*. Chúng ta sẽ không nói quá nhiều về điều này, chỉ cần biết rằng tổ hợp của hai phần đó cho ta một tích vô hướng gọi là *bra-ket* $\langle\ |\ \rangle$ (trong tiếng Anh, bracket có nghĩa là dấu ngoặc). Bây giờ ta quy định rằng, trạng thái cơ học lượng tử của một đối tượng lượng tử được viết dưới dạng $|\Psi\rangle$.

Nếu muốn dùng cách viết theo ngoặc Dirac để mô tả trạng thái chồng chất của nguyên tử phóng xạ, ta sẽ dùng một tổ hợp tuyến tích của các trạng thái riêng lẻ $|$ *phân rã* $\rangle$ và $|$*không phân rã* $\rangle$, đó là trạng thái:

$$|\Psi\rangle = a\,|\,\textit{phân rã}\,\rangle + b\,|\textit{chưa phân rã}\,\rangle \tag{12.2}$$

trong đó a và b là các thừa số như chúng ta đã biết, có ý nghĩa là *biên độ xác suất của các trạng thái riêng lẻ* $|$ *phân rã* $\rangle$ cũng như $|$*không phân rã* $\rangle$. Theo cách *giải thích xác suất của Born*, về mặt cơ học lượng tử có thể tính được xác suất nguyên tử nằm trong trạng thái nào, nếu như ta thực hiện các phép đo. Biên độ xác suất a và b cần phải thoả mãn điều kiện:

$$|a|^2 + |b|^2 = 1 \tag{12.3}$$

Đây chính là điều kiện chuẩn hóa, để xác suất toàn phần phải bằng 1, nghĩa là 100%.

Trong trường hợp các trạng thái riêng trong trạng thái chồng chất, ở đây là $|$ *phân rã* $\rangle$ và $|$*không phân rã* $\rangle$, có xác suất như nhau, nghĩa là $a = b$, thì từ (12.3) ta suy ra:

$$a = b = \frac{1}{\sqrt{2}} \tag{12.4}$$

Như vậy, khi chồng chất hai trạng thái riêng đồng xác suất, giống như trong thí nghiệm với con mèo, sau chu kỳ bán rã bằng đúng một giờ, ta nhận được trạng thái chồng chất toàn phần như sau:

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|\textit{phân rã}\rangle + |\textit{chưa phân rã}\rangle\right) \qquad (12.5)$$

Trong thực tế, xác suất để nguyên tử ở một trong hai trạng thái riêng sẽ thay đổi theo thời gian, vì *chu kỳ bán rã* của một nguyên tố phóng xạ là độ đo xác suất để nguyên tử phân rã sau khoảng thời gian xác định. Do đó, nếu thời gian trôi đi càng lâu thì xác suất của trạng thái |*không phân rã* ⟩ sẽ càng nhỏ. Tuy nhiên, chừng nào chưa tiến hành phép đo thì nguyên tử sẽ ở trong trạng thái |*phân rã* ⟩ hoặc |*không phân rã* ⟩ với xác suất có thể tiên đoán chính xác nằm giữa 0 và 1.

Nếu bây giờ bạn muốn nêu câu hỏi theo kiểu, một nguyên tử với xác suất 40% phân rã và 60% không phân rã sẽ như thế nào, tôi xin nói ngay với bạn: Hãy ngừng ngay những suy luận theo hướng đó. Không ai có thể tưởng tượng kiểu như vậy. Đây là câu chuyện liên quan đến những trạng thái lượng tử mà người ta không dễ hình dung. Chúng ta có thể nói về những nguyên lý cơ học lượng tử vì chúng ta đã biết rằng hình thức luận toán học của cơ học lượng tử có thể tiên đoán những kết quả thực nghiệm chính xác. Nhưng thực tế ta có thể hình dung ra sự chồng chất trạng thái này như thế nào thì không thể nói gì trước được.

Chẳng hạn, nếu khởi đầu chúng ta có 1.000.000 nguyên tử của một đồng vị phóng xạ xác định nào đó có chu kỳ bán rã là 60 phút, thì sau một giờ, nếu kiểm tra lại chúng ta sẽ phát hiện ra rằng, khoảng 500.000 nguyên tử (nghĩa là một nửa tổng số ban đầu) đã bị phân rã, còn một nửa còn lại vẫn chưa phân rã. Chính đây cũng là nguyên tắc để định nghĩa chu kỳ bán rã của các đồng vị phóng xạ khác nhau.

Giá trị chu kỳ bán rã của các đồng vị phóng xạ là những con số cụ thể, tuy nhiên nó chỉ có đặc tính đại diện cho một tập hợp lớn các nguyên tử đồng vị đó, vì chu kỳ bán rã chỉ là một tiên đoán thuần túy có tính chất thống kê.

Với một nguyên tử đồng vị riêng lẻ, chu kỳ bán rã chỉ cho ta biết xác suất phân rã theo thời gian. Tuy nhiên, về trạng thái mà một nguyên tử đồng vị *thực sự* đang tồn tại trong đó, chừng nào ta chưa quan sát thì ta vẫn chưa thể đưa ra một tiên đoán nào, theo cách giải thích Copenhagen. Ngay cả cách đặt vấn đề "thực tế" đang tồn tại trong trạng thái nào cũng không có ý nghĩa nếu xét trên bình diện cơ học lượng tử. Cơ học lượng tử, theo lý thuyết Born, cho chúng ta một phương pháp để tính xác suất nguyên tử ở trong một trạng thái nào đó khi phép đo được tiến hành, cho ta biết khi đo thì trạng thái nào, phân rã hay không phân rã, sẽ có xác suất cao hơn.

Trái lại, *trạng thái không đo* của nguyên tử được nhìn nhận thuần túy toán học là chồng chất của hai trạng thái $|$ *phân rã* $\rangle$ và $|$*không phân rã* $\rangle$ như ta thấy trong phương trình (12.2). Sau này chúng ta phải luôn luôn ý thức được rằng, hàm trạng thái Ψ *(r; t)* chỉ cho chúng ta biết xác suất mà một nguyên tử phóng xạ phân rã sau một khoảng thời gian xác định tùy ý. Còn mỗi nguyên tử phóng xạ riêng lẻ đang ở trong trạng thái lượng tử nào sau một khoảng thời gian nào đó thì chỉ có Chúa mới biết mà thôi (mà rất có thể cả Chúa cũng không biết).

Nhờ hàm sóng, chúng ta chỉ có thể tiên đoán, khi tiến hành phép đo, nguyên tử sẽ phân rã hay không phân rã với xác suất nào, nhưng chừng nào chúng ta chưa tiến hành phép đo thì hàm sóng chỉ là toán học thuần túy để tính xác suất (xem lại trích dẫn của Heisenberg ở Chương 8). Nếu không như vậy, ta sẽ bị cuốn vào mâu thuẫn trong mối quan hệ với sự biến mất của hàm sóng.

Cuối cùng, chúng ta phải xác định rằng, bản thân câu hỏi về "diện mạo" của một nguyên tử trong trạng thái chồng chất là không thích hợp, vì trạng thái của một nguyên tử trước khi đo là bất định. Bohr thường nhấn mạnh đôi khi hơi quá mức, nhưng rất nghiêm túc rằng,

với một hạt cơ học lượng tử, ta chưa được phép cho rằng hạt đó tồn tại nếu chưa đích thực nhìn thấy nó. Trong cơ học lượng tử, tuyên bố của Ludwig Wittgenstein, có thể hơi quá lời một chút, nhưng có lẽ đã trở thành nguyên tắc: chưa *được phép* và chưa *có thể* nói về một cái gì chưa được đo.

Đó là những điều nói về trạng thái chồng chất của nguyên tử phóng xạ.

Con mèo đang ở trong trạng thái nào?

Bây giờ chúng ta quay trở lại với thí nghiệm con mèo, vì nguyên tử phóng xạ mới chỉ là điểm khởi đầu cho toàn bộ hoạt động của thí nghiệm với con mèo Schrôdinger. ống đếm Geiger-Mueller liên kết với nguyên tử phóng xạ theo nguyên lý nhân quả: nếu nguyên tử phân rã, ống đếm Geiger-Mueller phát tín hiệu báo động để khởi phát cái búa đập vỡ chai xyanua kali và cuối cùng thì con mèo sẽ chết. Còn nếu nguyên tử không phân rã tất cả vẫn như cũ và con mèo tiếp tục sống. Tuy nhiên, bây giờ ta biết rằng, nguyên tử phóng xạ ở trong một chồng chất các trạng thái lượng tử, bởi vì nguyên tử là một đối tượng lượng tử.

Tiếp theo, ống đếm Geiger-Mueller cũng chẳng phải gì khác hơn là được tạo thành từ những nguyên tử nhỏ bé – các đối tượng lượng tử. Mỗi nguyên tử riêng biệt của ống đếm Geiger-Mueller, do vậy, cũng ở trong một chồng chất trạng thái phụ thuộc vào trạng thái của nguyên tử phóng xạ, một chồng chất tạo nên từ các trạng thái riêng lẻ "ghi nhận phân rã" hay "không ghi nhận phân rã". Suy nghĩ tiếp tục, chúng ta tiến tới các nguyên tử của cái búa ở trong chồng chất trạng thái tạo bởi các trạng thái riêng "khởi phát" hay "không khởi phát". Với chai xyanua kali thì đó lại là chồng chất "bị đập vỡ" hay "không bị đập vỡ". Từ đó suy ra, con mèo trong thí nghiệm nằm trong chồng chất trạng

thái "chết" và "sống". Cuối cùng, sau một giờ là khoảng thời gian bằng chu kỳ bán rã của nguyên tử phóng xạ, theo cách viết của Dirac, con mèo ở trong trạng thái:

$$|\Psi_{con\ mèo}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\ (|\,chết\,\rangle + |\,sống\,\rangle) \tag{12.6}$$

Điều đó là không thể được! Không khi nào một con mèo lại vừa chết vừa sống. Đơn giản là không thể được. Đấy chính là nghịch lý trong thí nghiệm tưởng tượng về con mèo Schrôdinger.

Đấy cũng là bằng cớ của sự thật hiển nhiên không cần tranh cãi rằng, các đối tượng vĩ mô không chấp nhận những chồng chất trạng thái kiểu cơ học lượng tử, trái lại chúng luôn luôn có những giá trị cổ điển, cụ thể, độc lập với các phép đo tiến hành. Nhưng, trong chuỗi các mắt xích thí nghiệm với con mèo Schrôdinger, đâu là biên giới chuyển tiếp từ vi mô sang vĩ mô, đâu là nơi chấm dứt sự chồng chất trạng thái khiến cho con mèo chỉ còn có thể *hoặc* chết *hoặc sống?* Đâu là nơi chấm dứt sự chồng chất trạng thái của nguyên tử phóng xạ? Đấy chính là vấn đề!

13
Giải thích hình thức luận của cơ học lượng tử

Nghịch lý con mèo Schrôdinger được giải quyết như thế nào?

Chúng ta đã xem xét về sự chuyển một hệ từ một trạng thái là chồng chất các trạng thái sang một trạng thái riêng lẻ xác định trong những phần trước khi thảo luận về lưỡng tính sóng-hạt trong thí nghiệm hai khe. Chúng ta cũng đã làm quen với cách giải thích Copenhagen, do Bohr và cộng sự đề xuất. Bên cạnh cách giải thích chuẩn này, từ một phổ khá rộng các công trình nghiên cứu, một số cách giải thích khác cũng thu được thành công nhất định. Tuy nhiên, cách giải thích nào trong số đó là thích hợp nhất để mô tả tự nhiên thì vẫn luôn là cuộc tranh luận cam go không ngưng nghỉ. Ngay cả cho đến hôm nay, sau hơn nửa thế kỷ, sự không thống nhất này vẫn đang còn hiện hữu.

Chúng ta hãy lọc ra một số hướng cơ bản trong *cách giải thích vật lý* hình thức luận của cơ học lượng tử và sẽ thấy rằng phổ rất rộng của các cách giải thích khác nhau ấy có thể chia thành một số nhóm sau:

- **Cách giải thích Copenhagen:** cách giải thích này được xem như cách giải thích chính thống tiêu chuẩn của cơ học lượng tử (Bohr, Heisenberg và cộng sự...)
- **Lý thuyết các biến ẩn:** theo đó cơ học lượng tử thông thường được quy về những biến ẩn, định xứ thực.
- **Cơ học Bohm:** bằng việc mở rộng cơ học lượng tử truyền thống nhờ các sóng dẫn bổ sung, đi tới động lực học quyết định luận, không định xứ, trong đó hàm sóng nhận được ý nghĩa thực (de Broglie, Bohm và cộng sự...)
- **Lý thuyết định xứ tự phát:** hay còn gọi là *lý thuyết - suy sụp vật lý (physical collaps- theory)* minh bạch, trong đó người ta đưa

vào một cơ chế suy sụp *vật lý thực*, bằng cách sửa đổi phương trình Schrôdinger (Pearle, Ghirardi, Rimini, Weber và những người khác...)

- **Cách giải thích- trạng thái - tương đối hay cách giải thích đa vũ trụ:** đây là lý thuyết trình bày một cách cắt nghĩa khác cho hình thức luận toán học (Everett, Dewitt và những người khác...)
- **Thuyết lịch sử nhất quán:** thuyết này (giống như cách giải thích trạng thái tương đối), tước bỏ vai trò trung tâm thường thấy trong các lý thuyết khác của quá trình đo như một tác động của người quan sát bên ngoài.

Để không phá vỡ khuôn khổ cuốn sách, ở đây chúng ta sẽ chỉ điểm qua một số cách giải thích quan trọng nhất về hình thức luận toán học của cơ học lượng tử: Trước hết là *cách giải thích Copenhagen* đã được nói tới rất nhiều và về cơ bản được hình thành nhờ công của Bohr và Heisenberg, thứ đến là cách *giải thích đa vũ trụ* khởi đầu bằng tư tưởng của nhà vật lý lượng tử Hugh Everett, thứ ba là cách giải thích có thể coi như sự chính xác hóa những tư tưởng của Everett và phần chủ yếu xây dựng trên lý thuyết *mất kết hợp* phát triển bởi Zeh và Zurek, một lý thuyết đã thu được sự thừa nhận chung khi mô tả các hiện tượng cơ bản. Bây giờ chúng ta sẽ khảo sát kỹ hơn ba cách giải thích này với những điểm mạnh và yếu của chúng.

Cách giải thích Copenhagen nói lên điều gì?

Có thể xem cách giải thích Copenhagen là cách giải thích tiêu chuẩn đối với vấn đề chúng ta đang xem xét. Chúng ta đã làm quen với cách giải thích đầu tiên về hình thức luận của cơ học lượng tử do Bohr và Heisenberg đề xuất, và cho đến nay, dù là có ý thức hay

không, ta vẫn dùng quan điểm Copenhagen trong tất cả các khảo sát của mình.

Nguyên lý trung tâm tạo nên cơ sở cho cách giải thích này là lưỡng tính sóng-hạt. Bohr đã đưa ra khái niệm *tính bổ sung* của bức tranh sóng và bức tranh hạt để mô tả các quá trình trong thế giới vi mô và khái niệm này đóng vai trò hết sức quan trọng trong toàn bộ cách giải thích Copenhagen. Theo Bohr, đấy chính là sứ mạng lớn lao của cơ học lượng tử khiến cho phạm vi ảnh hưởng của nó vượt ra khỏi kinh nghiệm trực tiếp của chúng ta và sức tưởng tượng thông thường của con người. Chúng ta luôn chỉ có thể phản ứng với các quá trình trong thế giới vi mô trong khuôn khổ của trực giác cùng những khái niệm và cơ chế cổ điển mà thôi. Các cấu trúc thí nghiệm của chúng ta, các máy đo của chúng ta, các mô hình làm việc của chúng ta, và, vâng, toàn bộ tư duy vật lý, phân tích của chúng ta theo lẽ tự nhiên đều dựa trên những khái niệm, những quy trình cổ điển.

Nhưng, trong khi thế giới vi mô lại hành xử hoàn toàn khác hẳn, nghĩa là không cổ điển một chút nào, mà chúng ta lại chỉ có thể dùng thứ ngôn ngữ nghèo nào của vật lý cổ điển để mô tả các cơ chế cơ học lượng tử – mà thật ra, chúng ta cũng chẳng có thứ ngôn ngữ nào khác –, thì tất yếu ta sẽ gặp một chướng ngại mà trực giác không thể nào vượt qua được. Điều này thể hiện rất rõ ràng trong câu trích dưới đây của Bohr:

> *"Không có thế giới lượng tử. Chỉ có sự mô tả vật lý lượng tử một cách trừu tượng. Thật là sai lầm khi nghĩ rằng, nhiệm vụ của vật lý là tìm ra bản chất của tự nhiên. Vật lý chỉ quan tâm đến những cái mà chúng ta có thể nói về tự nhiên"*[19]

[19] J. Baggot: *Beyon Measure* (Oxford University Press, 2004); trang 109

"Thế giới lượng tử" như Bohr nhắc tới ở đây, tự bản thân chúng ta không thể lĩnh hội được. Lý do đơn giản chỉ là vì chúng ta tồn tại ở một thang kích thước "sai lầm". Heisenberg luôn nhấn mạnh rằng, chúng ta thường xuyên bị gắn chặt vào ngôn ngữ vốn không chính xác của vật lý cổ điển. Với bức tranh sóng và bức tranh hạt cổ điển như vậy mà ta lại tìm cách tiếp cận các sự kiện cơ học lượng tử, trong khi lượng tử thực ra không là sóng mà cũng chẳng là hạt. Thành thử đối với mọi phương thức quan sát trong cơ học lượng tử ta buộc phải xem rằng, chúng chỉ có đặc tính mô hình mà thôi.

Tiếp theo, trong cách giải thích Copenhagen, sự biến mất (hay suy sụp) của hàm sóng cũng chiếm vị trí trung tâm. Như ta còn nhớ, cách giải thích Copenhagen nói rằng, sự biến mất của hàm sóng là hệ quả của quá trình đo. Vì thế, dụng cụ đo hay quá trình đo có ý nghĩa đáng kể không thể bỏ qua được. Ta không thể đo các đối tượng vi mô mà không kèm theo sự nhiễu động và do đó cũng buộc phải công nhận rằng, sự quan sát các quá trình trong thế giới vi mô là không thể khách quan.

Trong mối tương quan như vậy, ta phải hiểu phạm trù *không thể khách quan* trong cách giải thích Copenhagen như sau: Tự nhiên ở bình diện vi mô không cho phép ta khảo sát nó một cách khách quan, nghĩa là độc lập vơi người quan sát. Trên cơ sở đó, Bohr và Heisenberg buộc phải chấp nhận *một cách nhìn thực chứng luận*. Vai trò và nguyên tắc của tính không thể khách quan đã được thể hiện một cách xuất sắc trong câu trích dẫn sau đây của Heisenberg:

> *"Tình huống mới mẻ này trong khoa học tự nhiên hiện đại hiển nhiên đã tác động đến chúng ta hết sức mạnh mẽ, trong đó* [...] *đã thấy rõ rằng, chúng ta không thể quan sát được những viên gạch cấu tạo nên vật chất, vốn khởi thủy được xem là thực tế khách quan*

cuối cùng, như 'tự nó vốn thế', và rằng, về cơ bản chúng ta luôn chỉ có thể biến những hiểu biết của chúng ta về những hạt này thành đối tượng của khoa học mà thôi"[20]

Về tính chất của những đối tượng lượng tử không được đo hay về nguyên tắc là không thể đo được, cách giải thích Copenhagen không đưa ra một lời tiên đoán nào. Heisenberg xây dựng cơ học ma trận chỉ để dùng cho những đại lượng *có thể quan sát (observable)*, tức là có thể đo được. Trong cách giải thích của Bohr, những gì không thể quan sát thì không nhận một giá trị thực nào.

Trong mệnh đề cuối của câu trích dẫn ở trên của Heisenberg nổi bật đặc trưng thực chứng luận trong cách giải thích của ông mà theo đó, chỉ phần hiểu biết về các đối tượng vật lý là đối tượng của khoa học. Và như thế, *cách giải thích xác suất của Born* trở thành yếu tố hạt nhân trong cách giải thích Copenhagen. Theo cách giải thích này, khi đo các đối tượng lượng tử, hàm sóng Ψ được nhìn nhận như độ đo xác suất ở một trạng thái xác định nào đó. Sự biến mất của hàm sóng thể hiện không gì khác hơn là sự thay đổi hiểu biết tức thời về trạng thái của đối tượng quan sát gây bởi quá trình quan sát, tức là quá trình đo. Chỉ sau khi có hành động đo đạc này, đối tượng lượng tử mới nhận một trạng thái cụ thể và một trong những trạng thái riêng của đối tượng lượng tử được thể hiện ra như là một yếu tố của thực tại.

Nếu bây giờ chúng ta khảo sát vấn đề con mèo Schrôdinger theo cách giải thích Copenhagen thì chồng chất trạng thái của nguyên tử phóng xạ được truyền suốt dọc theo tất cả các mắt xích thí nghiệm cho tới con mèo. Chừng nào con mèo cùng với toàn bộ cấu trúc thí nghiệm vẫn còn ẩn mình trong hệ cô lập và khép kín của buồng thí nghiệm,

---

[20] W. Heisenberg: *Das Naturbild der heutigen Physik* (Rowohlt, 1955); trang 18

thì theo cách giải thích của Bohr, ngay cả con mèo – "đối tượng vĩ mô" cũng ở trong trạng thái chồng chất tạo nên từ $|$ *chết* $\rangle$ và $|$ *sống* $\rangle$ (xem phương trình (12.2)).

Tuy vậy, cần phải nói rõ rằng, cả chồng chất trạng thái của nguyên tử lẫn chồng chất trạng thái của con mèo đều không phải là những phần của *thực tại vật lý*. Chỉ đến khi tiến hành đo trạng thái của các đối tượng, một trong những trạng thái riêng lẻ vốn nằm sẵn trong chồng chất đó mới được "lựa chọn" (theo đúng cách nói của Heisenberg) một cách ngẫu nhiên do sự suy sụp của hàm sóng và trở thành một thực tại vật lý. Hàm sóng, biên độ xác suất, trạng thái chồng chất v.v... cuối cùng chỉ có ý nghĩa hình thức toán học để tính toán xác suất xuất hiện của một trạng thái cổ điển xác định chứ những chồng chất trạng thái đó không hề là thực tại vật lý.

Phê phán: Với cách lý giải như vậy cho hình thức luận của cơ học lượng tử, cách giải thích Copenhagen là chặt chẽ trong nội tại của nó, nhưng vẫn để lại nhiều câu hỏi không thể trả lời. Thực ra một hệ như thế nào được gọi là kín: đấy là một mình nguyên tử phóng xạ, đấy là phần nội dung bên trong của buồng thí nghiệm, đấy là toàn bộ phòng thí nghiệm hay là thậm chí toàn bộ vũ trụ? Biên giới nằm ở đâu? Ai có thể được xem như người quan sát hay người đo đạc: nhà khoa học trong phòng thí nghiệm chính là người quan sát chăng? Tại sao không thể xem chính con mèo là nhà quan sát? v.v...?

Những câu hỏi như vậy và nhiều câu khác nữa cuối cùng vẫn không thể trả lời. Việc định nghĩa các cấp độ riêng lẻ giữ vị trí trung tâm không thể chối cãi trong cách giải thích Copenhagen, nhưng nó có vẻ hơi tùy tiện và thiếu tiêu chí.

Cách giải thích nhiều thế giới nói lên điều gì?

Một cách giải thích khác với trường phái Copenhagen truyền thống là việc đưa vào *"trạng thái tương đối" (relative state)* của cơ học lượng tử, dựa trên ý tưởng hết sức độc đáo của nhà vật lý lượng tử Hugh Everett (1930-1982) thể hiện trong luận án tiến sĩ của ông[21]. Chỉ ít lâu sau đó, cách giải thích này trở nên rất nổi tiếng dưới cái tên *cách giải thích đa vũ trụ* nhờ những nỗ lực đóng góp của bryce de Witt (1923 -2004).

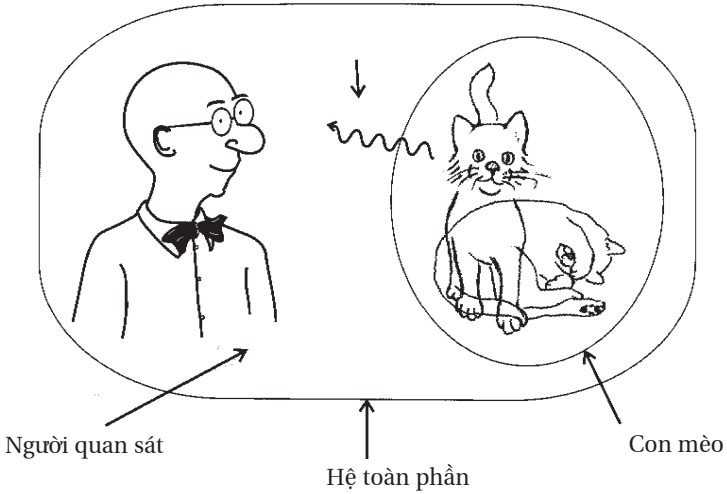
Điều mới mẻ trong cách giải thích hình thức luận của cơ học lượng tử ở đây trước hết là, như Everett đã nhấn mạnh trong bài báo của ông xuất bản năm 1957, công nhận rằng, phương trình Schrôdinger mô tả không chỉ *hiểu biết* của chúng ta về các đối tượng lượng tử như cách giải thích Copenhagen vẫn khẳng định, mà trong mọi trường hợp, còn cung cấp cho chúng ta sự mô tả *đầy đủ* đối với các hệ lượng tử cô lập.

Tiếp theo, ông thừa nhận rằng, mỗi hệ vật lý quan sát được đều là bộ phận của một hệ cô lập lớn hơn mà ta có thể tưởng tượng ra (xem hình 13.1). Tương tác giữa hai phần của hệ lớn này (phần ta đang quan sát và phần còn lại) làm cho mỗi phần không còn được mô tả bằng một hàm trạng thái duy nhất, độc lập với phần kia. Một điểm rất quan trọng là, mỗi hàm trạng thái của hệ thành phần chỉ có ý nghĩa *tương đối* đối với hàm trạng thái của hệ còn lại.

Với những gì mô tả trên hình 13.1, trong đó một hệ thành phần là con mèo (ở trong chồng chất trạng thái "sống-chết") và hệ còn lại được thể hiện qua nhà khoa học đang quan sát trong phòng thí nghiệm, Everett đã thể hiện tư tưởng xuất chúng của mình như sau:

---

[21] H. Everett: "Relative state" formulation of quantum mechanics. *Rev. Mod. Phys.* **29,** 454-62; in lại trong J. Wheeler, W. Zurek: *Quantum theory and Measurement* (Princeton University Press, 1983), trang 315.



Hình 13.1 Hệ cô lập lớn tạo nên từ hai hệ thành phần (con mèo "sống-chết" và phần còn lại = người quan sát).

Mối quan hệ giữa con mèo và người quan sát không cho phép *sự quan sát từ bên ngoài* đối với hệ thành phần con mèo, như đã chỉ rõ trong cách giải thích Copenhagen. Do vậy, trong trường hợp này, phải nói tới *sự quan sát tương đối.* Nhà khoa học quan sát con mèo không phải khách quan từ bên ngoài, mà luôn luôn trong mối quan hệ khăng khít với chính con mèo khiến cho "kết quả đo" của ông về tình trạng của con mèo, về toàn cục, không thể được xem là đúng đắn tuyệt đối. Kết quả ấy chỉ có giá trị tương đối và phụ thuộc vào chính trạng thái mà con mèo đang tồn tại.

Hai trạng thái xen kẽ và tương quan của một hệ cô lập tưởng tượng (tạo nên từ con mèo M và người quan sát N) trong trường hợp đơn giản này ta có thể hình dung như sau:

1) Nếu hệ con mèo ở trạng thái $|\textit{sống}\rangle_M$ thì hệ còn lại nằm ở trạng thái $|\textit{vui}\rangle_N$.
2) Nếu hệ con mèo ở trạng thái $|\textit{chết}\rangle_M$ thì hệ còn lại ở trạng thái $|\textit{buồn}\rangle_N$.

Everett giải thích một cách tổng quát rằng, ngay cả khi hệ còn lại (= người quan sát N) không thể được mô tả bởi một hàm trạng thái đơn giá thì nó cũng nằm trong chồng chất của những trạng thái riêng khác nhau (ở đây: $|\textit{vui}\rangle_N$ và $|\textit{buồn}\rangle_N$). Theo đó, cuối cùng ông đi đến một kết luận, thoạt nghe thì ta có thể sửng sốt, nhưng thật ra lại hợp lý:

> *"Như vậy, với mỗi một lần quan sát (hay đo đạc) liên tiếp, trạng thái của người quan sát lại 'phân nhánh' thành một số các trạng thái khác nhau. Mỗi nhánh thể hiện một kết cục khác nhau của phép đo và trạng thái riêng tương ứng của hệ- đối tượng. Tất cả các nhánh tồn tại đồng thời trong một chồng chất sau một chuỗi các quan sát đã cho"*[22]

Như vậy, ông đi tới kết luận rằng, với mỗi quan sát/tương tác của hệ thành phần (con mèo) qua/hoặc với hệ còn lại, trạng thái của hệ còn lại chia ra những nhánh khác nhau mà mỗi nhánh đều thực sự tồn tại. Mỗi trạng thái riêng của hệ còn lại có thể chứa trong chồng chất ban đầu sẽ được thực hiện sao cho không cần thiết phải diễn ra sự suy sụp (hay biến mất) đột ngột và khó hiểu của hàm sóng.

Với phương thức như vậy, sự phát biểu của Everett về cơ học lượng tử nhờ trạng thái tương đối có thể bỏ qua sự cần thiết phải công nhận giả thiết về sự biến mất của hàm sóng, một giả thiết không thật đẹp

---

[22] J. Wheerek, W. Zurek: *Quantum Theory and Measurement*, đã dẫn, trang 320.

lắm và tiềm ẩn nghịch lý vốn giữ vai trò trung tâm trong cách giải thích Copenhagen.

Everett cũng chỉ dẫn khá kỹ càng rằng, bản thân hình thức luận toán học của cơ học lượng tử vốn rất thành công (mà ngày nay chúng ta còn biết rõ hơn bất cứ thời kỳ nào trước kia) cũng sẽ tự dẫn đến khái niệm trạng thái tương đối. Một căn cứ không dễ bác bỏ đối với cách giải thích của ông chính là sự nhất quán thực sự của nó. Khó khăn về định nghĩa vốn khá điển hình cho cách giải thích Copenhagen như chúng ta đã nêu thành một điểm phê phán ở trên không hề gặp phải trong cách giải thích Everett.

Theo cách trình bày sau này của de Witt về ý tưởng của Everett, những trạng thái riêng tồn tại cách biệt về mặt vật lý của một hệ (lượng tử) nằm trong chồng chất trạng thái được thực hiện trong tưởng tượng ở những vũ trụ khác nhau. Chồng chất trạng thái cơ học lượng tử của một đối tượng lượng tử theo đó không chỉ định xứ trong vũ trụ đang khảo sát, mà được coi là đồng thời tồn tại trong vô số các *vũ trụ song song* khác.

Theo quan điểm này, các trạng thái riêng hình thức của một đối tượng lượng tử vốn chồng chất thành những trạng thái tổng hợp của đối tượng lượng tử đó theo hình thức luận toán học của cơ học lượng tử sẽ tồn tại định xứ một cách riêng biệt và đồng thời, mỗi trạng thái riêng trong một vũ trụ riêng, những vũ trụ này không có sự khác biệt nào với vũ trụ mẹ và các vũ trụ song song khác, ngoài điểm duy nhất là trạng thái lượng tử đã biết. Cứ mỗi lần, khi trong một vũ trụ xuất hiện khả năng xác định những trạng thái riêng luân phiên, khác nhau của đối tượng lượng tử, thì vũ trụ sẽ phân thành những vũ trụ được gọi là vũ trụ de Witt và tất cả các trạng thái riêng khả dĩ sẽ được thực hiện trong vũ trụ riêng của chúng, "suy ra" từ vũ trụ gốc ban đầu.

Nhưng, ngay cả ở đây cũng vậy, xin bạn chớ mất tinh thần, nếu bạn không hình dung ra nổi một số vô hạn những vũ trụ song song, vì có lẽ con người không có khả năng, về mặt nguyên tắc, để làm những việc như thế. Nhưng đấy cũng chưa phải là tất cả. Những người đa nghi khi nghe nói về các cách giải thích khác nhau của cơ học lượng tử, ít nhất là lúc ban đầu, thường cảm thấy rối rắm khó tin, và ngay lập tức nghĩ tới những tác phẩm khoa học viễn tưởng kiểu như *Chiến tranh giữa các vì sao*. Nhưng cái ta bàn tới ở đây là khả năng có thể chấp nhận thực tại vật lý một cách nghiêm chỉnh.

Sự khác nhau cơ bản nhất so với cách giải thích Copenhagen nằm ở chỗ, trong cách giải thích đa vũ trụ tất cả các trạng thái khả dĩ trong thực tại vật lý đều được thực hiện, cho dù là ở trong những vũ trụ riêng khác nhau. Cách giải thích cũ bao gồm sự suy sụp có lựa chọn của hàm sóng và qua đó những trạng thái khả dĩ khác có thể đơn giản biến mất không dấu vết (một cách bí hiểm).

Nếu bây giờ ứng dụng cho trường hợp con mèo Schrôdinger, con mèo cũng như nguyên tử phóng xạ ở bất cứ thời điểm nào cũng ở trong một trạng thái cụ thể. Trong một vũ trụ, nguyên tử không phân rã và con mèo sống, trong vũ trụ khác, nguyên tử phân rã và con mèo chết. Sẽ không xuất hiện câu hỏi, sự biến mất của hàm sóng được sinh ra hay xảy ra như thế nào, bởi vì đơn giản là không có chuyện này. Trạng thái nào trong số các trạng thái riêng xuất hiện ở trong một vũ trụ đơn giản phụ thuộc vào chuyện, người quan sát đo trạng thái con mèo đang ở trong vũ trụ nào trong số các vũ trụ song song cùng tồn tại.

Các trạng thái được chồng chất chỉ có nghĩa toàn cục đối với các hệ cô lập tuyệt đối, những hệ không quan sát được theo bản chất tự nhiên, bởi lẽ đơn giản rằng chúng không thể được quan sát mà vẫn còn độc lập. Đối với tất cả các trường hợp thực tế, nghĩa là với các hệ có tồn tại

một phép đo hay một tương tác (ngay cả khi không kiểm soát được), mỗi chồng chất các trạng thái lượng tử đều kết thúc trong sự phân chia ra nhiều vũ trụ song song tương ứng.

Phê phán: Điểm bị phê phán nhiều nhất trong cách giải thích đa vũ trụ cũng là một điều dễ hiểu: thật khó hình dung ra một số vô hạn các thế giới song song cùng tồn tại. Đấy cũng chính là trở ngại lớn nhất khiến cho lý thuyết này khó có được sự chấp nhận trong giới vật lý, ngay cả khi tính vững chắc về mặt vật lý của những lời phê phán cũng thật đáng nghi ngờ. Dù sao, cách giải thích đa vũ trụ vẫn sống được qua năm tháng nhờ sự vững chắc cũng như những thành tựu khoa học không thể xem thường của nó.

Một sự chính xác hóa về mặt vật lý những ý tưởng khởi đầu của Everett về cơ chế mất kết hợp có thể dẫn tới cách giải thích mới như chúng ta sẽ thấy dưới đây.

Lý thuyết mất kết hợp nói lên điều gì?

Trong giới chuyên môn hiện nay, đối với phần lớn các nhà vật lý lượng tử, lý thuyết mất kết hợp là một cách mô tả hiện tượng đã được công nhận. Không phải chỉ bởi vì mất kết hợp là một chướng ngại vật khó bẻ gẫy hay một yếu tố gây nhiễu khó vượt qua đối với nhiều thí nghiệm. Thật thú vị khi lý thuyết mất kết hợp tạo ra điểm tựa cho một cách giải thích mới thoạt nhìn có vẻ như thiếu độ tin cậy. Trong lý thuyết này, trái với cách giải thích chính thống Copenhagen, người ta đề cập nhiều tới kiểu giải thích *vững chắc và có thể nắm bắt được* hơn là cách giải thích *thực dụng* được công nhận về mặt nhận thức.

Trong cách giải thích dựa trên cơ chế mất kết hợp này, sự biến mất của chồng chất các trạng thái khác nhau xảy ra theo hướng tiến tới những thang bậc cao hơn thông qua mối tương tác không tránh khỏi,

tăng dần của bản thân đối tượng với môi trường bao quanh. Trong tác phẩm *Điều gì sẽ xảy ra khi mất kết hợp* của H. Dieter Zeh, người đã có đóng góp đáng kể vào lý thuyết mất kết hợp, khái niệm *mất kết hợp* đã được định nghĩa như sau:

> *"... theo tôi mất kết hợp là sự biến mất một cách bất thuận nghịch và không thể tránh khỏi của các mối quan hệ về pha của các trạng thái của các hệ cục bộ do tương tác với môi trường bao quanh theo phương trình Schrôdinger."*[23]

Trong quá trình mất kết hợp bất thuận nghịch, sự chồng chất các trạng thái kết hợp của một đối tượng vật lý bị phá hủy bởi ảnh hưởng không thể tránh khỏi của môi trường bao quanh. Quan hệ pha kết hợp xác định của các thành phần chồng chất sẽ mất đi trong quá trình mất kết hợp. Trong quá trình đó, nếu đối tượng càng lớn thì tương tác của nó với môi trường xảy ra càng sớm và đối tượng càng ít có khả năng xuất hiện trong một trạng thái chồng chất.

Một vài thí dụ dưới đây có thể giúp ta hiểu rõ hơn bước chuyển quá độ từ cơ học lượng tử về cơ học cổ điển.

Một nơtrino -electrron (ký hiệu n_e) sẽ thực hiện *tương tác yếu*[24], loại tương tác yếu thứ hai trong số 4 loại tương tác cơ bản của vũ trụ.

Một phân tử fulleren (xem lại mục 7.2) tạo thành từ một số rất lớn các nguyên tử cacbon (có thể là 60, 70, 80 hay nhiều hơn nữa), trái lại,

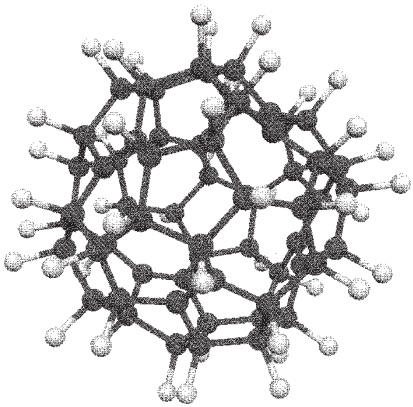
---

[23] *arX iv:* http://arxiv.org/abs/quant-ph/9610014 (1996

[24] Theo mô hình chuẩn của vật lý các hạt cơ bản, nơtrino không có khối lượng nghỉ. Nhưng hiện nay người ta coi như đã chứng minh được rằng, có thể gán cho hạt này một khối lượng dù rằng cực nhỏ để chúng có một tương tác hấp dẫn cực yếu. Tuy nhiên, điều đó không quan trọng lắm đối với những vấn đề được trình bày ở đây.

sẽ tương tác mạnh hơn nhiều với môi trường quanh nó. Không phải chỉ vì – trái với nơtrino không có cấu trúc và có vẻ vô thưởng vô phạt – phân tử này có thể tương tác với môi trường theo cả 4 loại tương tác, fulleren còn thực sự là một *đại* phân tử theo nghĩa chân thực nhất của từ này. Cấu trúc giống như quả bóng đá và có kích thước cỡ một nửa nanomet này cần được khảo sát như một hạt "thực sự", bán cổ điển, giống như những hạt bụi than hết sức mịn (ngay cả khi đó là một sự biến tướng ở dạng hoàn toàn khác).

Thú vị hơn nữa, khi trong một cấu trúc tương tự nhưng có kích thước lớn hơn với sự có mặt của nguyên tố Flo – mà cụ thể là Fluorofulleren $C_{60}F_{48}$ (xem H.13.2), người ta vẫn chứng minh được tính chất sóng rõ rệt của nó như đã chỉ ra trong thí nghiệm giao thoa của Markus Arndt năm 2003[25]. Trong thí nghiệm khá mới mẻ này, phân tử fluorofulleren khá lớn vẫn có thể đủ cô lập để chống lại quá trình mất kết hợp tự nhiên. Ở ngay phía trên kích thước này, chẳng hạn những đối tượng lớn hơn như các cơ thể cực nhỏ, sẽ xuất hiện biên giới cho sự thành công của những thí nghiệm hai khe.



Hình 13.2- Biểu diễn sơ đồ một phân tử fluorofulleren ($C_{60}F_{48}$)

[25] M. Arndt, B. Brezger, L. Hackermueller, K. Hornberger, E. Reiger, A. Zeilinger: *The wave nature of biomolecules and fluorofullerenes*. Phys. Rev. Lett. **91** (2003); *arXiv:* quant-ph/0309016 v1 (2003).

Một con mèo, một con người hay các hệ vĩ mô khác không còn có thể hình dung như những thực thể cô lập. Chúng không thể chấp nhận trạng thái chồng chất của | *chết* ⟩ và | *sống* ⟩ như kinh nghiệm cuộc sống hàng ngày của chúng ta đã chứng tỏ. Theo cách giải thích mất kết hợp, điều này dựa trên cơ sở đơn giản cho rằng, thông qua sự trao đổi chất và trao đổi nhiệt với môi trường bên ngoài, tính kết hợp của hệ đã bị mất đi.

Trong bài báo của ông với nhan đề *Decoherence and the Transition from Quantum to Classical* (Mất kết hợp và sự chuyển từ lượng tử về cổ điển) Wojciech Zurek đã giải thích vấn đề cốt lõi trong cố gắng mô tả các đối tượng vĩ mô bằng cơ học lượng tử bằng những lời như sau:

> *"Các hệ vĩ mô không bao giờ có thể cô lập với môi trường xung quanh. Do vậy* [...] *không thể chờ đợi chúng sẽ tuân theo phương trình Schrôdinger vốn chỉ dùng cho các hệ kín"*[26]

Vì những lý do hiển nhiên, các đối tượng vĩ mô không thể khảo sát như những hệ cô lập. Một cách tiên quyết, chúng không thể được nhìn nhận hay mô tả như những hệ kín. Sự tương tác không tránh khỏi với môi trường xung quanh đã phá hủy chồng chất trạng thái cơ học lượng tử và dẫn đến các trạng thái riêng, không chồng chất của đối tượng như kết quả cuối cùng.

Trong nghịch lý liên quan đến con mèo Schrôdinger, theo các giải thích mất kết hợp, có thể nói rằng, tương tác của con mèo với môi trường xung quanh, chẳng hạn như với không khí mà nó cần có để sống, hay bức xạ nhiệt mà bản thân con mèo luôn phát ra, đã phá vỡ trạng thái chồng chất cho rằng con mèo đồng thời vừa chết lại vừa sống.

---

[26] Công bố trong Los Alamos Science **27** (2002)

Nhưng bây giờ người ta có thể cãi lại rằng, xét đến cùng thì toàn bộ nội dung của cái buồng, bao gồm cả con mèo lẫn nguyên tử phóng xạ, ống đếm, cái búa, cái chai, và cả không khí lẫn bức xạ nhiệt có thể tồn tại trong một trạng thái chồng chất. Bởi vì cả cái buồng như vậy có thể xem là cô lập và miễn dịch đối với quá trình mất kết hợp. Nhưng để đi đến giả thiết hệ kín đó, phải làm vô số các bước lý tưởng hóa, vì một đối tượng vĩ mô như cả cái buồng không khi nào có thể xem là cô lập.

Sự khác biệt lớn nhất giữa lý thuyết mất kết hợp và cách giải thích nguyên thủy Copenhagen là không cần viện đến một giả thiết khá trừu tượng và đôi khi chẳng mấy dễ chịu về sự suy sụp tức thời của hàm sóng. Thay thế vào đó là *quá trình mất kết hợp*, một quá trình vật lý thực, xuất hiện trong một thời gian xác định và do đó – chỗ này xin nhấn mạnh – không phải là *tức thời*. Nó thể hiện sự phát triển trong thời gian thống nhất, trong đó sự mất kết hợp (tức là sự biến mất của giao thoa) là hệ quả của sự phát triển theo thời gian thống nhất của mỗi hệ và môi trường bao quanh nó.

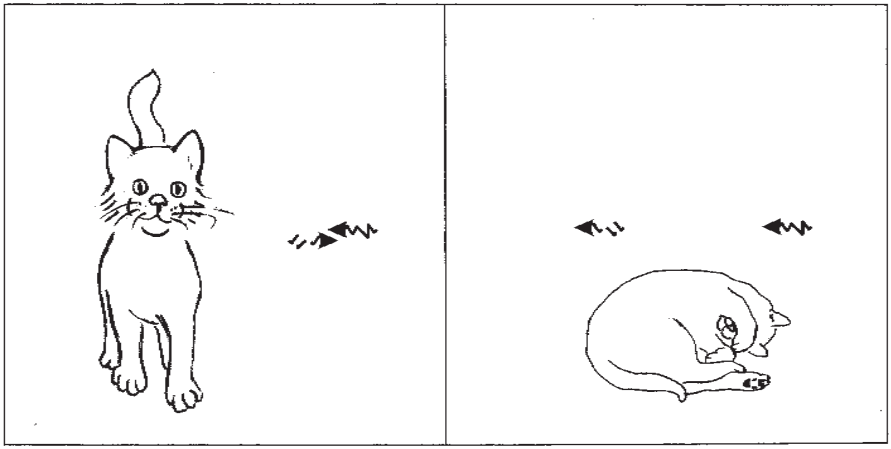
Như trong những thí nghiệm mới đây của Serge Haroche tại Paris đã chỉ ra, hiện nay đã có thể kiểm chứng *thời gian mất kết hợp* được lý thuyết tiên đoán trong một số thí nghiệm. Như thế, lý thuyết mất kết hợp có thể sẽ thay thế cho cách giải thích Copenhagen đã trở nên già cỗi, bởi vì lý thuyết Copenhagen cần có sự suy sụp tức thời của hàm sóng, điều không quan sát được trong thực nghiệm. Không chỉ có sự khác biệt riêng lẻ, đáng kể giữa hai cách giải thích về mặt lý thuyết, mà trong thực nghiệm còn quan sát được những sự khác biệt như những bằng chứng quyết định về sự hữu dụng của chúng. Theo cách giải thích mới này, những khái niệm rất điển hình kiểu Copenhagen như tính bổ sung của Bohr hay lưỡng tính sóng hạt dường như đã trở nên thừa thãi, nếu không muốn nói rằng có thể dễ gây nên nhầm lẫn.

Để có thể lĩnh hội lý thuyết rất thành công về mất kết hợp theo một cách khác, chúng ta sẽ khảo sát chi tiết hơn quá trình mất kết hợp qua một thí dụ đơn giản dưới đây:

Xin các bạn hãy gọi trở lại con mèo Schrôdinger trong trí nhớ của mình và cho rằng chu kỳ bán rã của nguyên tử phóng xạ là một giờ. Như vậy, sau một giờ, con mèo còn sống với xác suất 50% và nó sẽ chết với cùng giá trị xác suất đó. Theo đó, bạn hãy tưởng tượng ra (xem H. 13.3) hai trường hợp: trong trường hợp 1, con mèo nổi tiếng của chúng ta (chính là hệ, ký hiệu là S) ở trong trạng thái "sống" và có một photon đến đập vào lưng mèo (đây là môi trường, ký hiệu là U), photon này đập thẳng vào lưng mèo và sau đó phản xạ trở lại "về phía bên phải". Trường hợp 2, con mèo chuyển sang trạng thái "chết", nằm bất động trên sàn khiến cho photon đến từ bên phải không thể đập vào lưng mèo và cứ thế tiếp tục bay "hướng về bên trái".

Để hệ thống lại theo kiểu sơ đồ, ta có hai trường hợp sau:

1) Nếu S ở trạng thái $|$ *sống* $\rangle$ thì U buộc phải có trạng thái $|$ *hướng phải* $\rangle$



Hình 13.3. Hai trạng thái khả dĩ thay thế nhau: bên trái là trạng thái 1, bên phải là trạng thái 2.

2) Nếu S chuyển sang trạng thái $|\,\textit{chết}\,\rangle$ thì, theo logic, U ở trạng thái $|\,\textit{hướng trái}\,\rangle$

Bây giờ chúng ta hãy khảo sát kỹ quá trình mất kết hợp: Trước khi có tương tác giữa hệ S và hệ U, hệ con mèo nằm trong chồng chất trạng thái giữa "sống" và "chết". Còn hệ U thì khác: nó chỉ nằm trong trạng thái "hướng trái". Đối với toàn hệ S + U, theo cách viết của Dirac, ta có chồng chất trạng thái trước khi tương tác:

$$|\,\Psi\,\rangle_{\text{trước}} = \frac{1}{\sqrt{2}}\,(|\,\textit{sống}\,\rangle_S\,|\,\textit{hướng trái}\,\rangle_U + |\,\textit{chết}\,\rangle_S\,|\,\textit{hướng trái}\,\rangle_U) \quad (13.1)$$

Trạng thái chồng chất này có thể phân tích ra thừa số, cái mà ta gọi là *phân tích Einstein,* và ta có thể viết nó dưới dạng một tích:

$$|\,\Psi\,\rangle_{\text{trước}} = \frac{1}{\sqrt{2}}\,(|\,\textit{sống}\,\rangle_S + |\,\textit{chết}\,\rangle_S)\,|\,\textit{hướng trái}\,\rangle_U \quad (13.2)$$

Việc phân tích ra thừa số như vậy đồng nghĩa với việc cho rằng hệ S nằm trong chồng chất trạng thái. Hệ cục bộ S đang nằm trong một chồng chất trạng thái. Đó là một điểm quan trọng, như chúng ta sẽ còn nhận biết dưới đây.

Nếu có tương tác giữa hệ S và hệ U, để – tùy theo trạng thái của hệ S mà photon sẽ phản xạ trở lại hay tiếp tục đi mà không bị nhiễu loạn, hệ toàn phần S + U sẽ có thay đổi căn bản, và khi đó trạng thái có dạng:

$$|\,\Psi\,\rangle_{\text{sau}} = \frac{1}{\sqrt{2}}\,(|\,\textit{sống}\,\rangle_S\,|\,\textit{hướng phải}\,\rangle_U + |\,\textit{chết}\,\rangle_S\,|\,\textit{hướng trái}\,\rangle_U) \quad (13.3)$$

Sự chồng chất trạng thái cục bộ của hệ S đã chuyển thành chồng chất *toàn cục* của con mèo và môi trường do quá trình *mất kết hợp*. Mỗi trạng thái tổng quát kiểu (13.3) là không thể phân tích ra thừa số

được nữa. Đấy chính là sự khác nhau có tính nguyên tắc giữa $|\Psi\rangle_{\text{trước}}$ và $|\Psi\rangle_{\text{sau}}$ sự khác nhau đó đã khiến cho chồng chất trạng thái của riêng hệ S biến mất.

Trong (13.3), vấn đề không còn là chồng chất trạng thái của một con mèo riêng lẻ nữa, mà là *trạng thái* vướng víu xác định được chúng ta gọi là "sống và hướng phải" cũng như "chết và hướng trái". Và trong thực tế đấy chính là những trạng thái mà chúng ta vốn quen thuộc trong thang kích thước của đời sống hàng ngày. Quá trình mất kết hợp bất thuận nghịch xảy ra nhờ tương tác giữa hệ S và môi trường U.

Đấy chính là nhận thức đơn giản một cách đáng ngạc nhiên, một lời giải lịch lãm về nghịch lý con mèo chúng ta đã đạt được hoàn toàn phù hợp với hình thức luận toán học của cơ học lượng tử mà không cần gì đến sự biến mất của hàm sóng. Không cần đưa thêm vào giả thiết về sự sụp đổ tức thời của hàm sóng. Quá trình mất kết hợp cần một khoảng thời gian thực có thể tính toán được – và từ đó cơ học lượng tử tự nó đã làm thành một lý thuyết vật lý bền vững, có ý nghĩa bao trùm, đặc biệt trong vùng chuyển tiếp vi mô-vĩ mô.

Một điểm khác, chắc chắn là rất dễ chịu đối với những nhà khoa học tự nhiên gần thực tiễn, là các trạng thái chồng chất không bắt buộc phải được nhìn nhận như một cấu trúc thuần túy toán học. Chủ nghĩa lạc quan kiểu Bohr chắc phải lùi bước trước hiện thực khoa học mà qua đó một phần tính khách quan hay khả năng khách thể hóa đã phục hồi trở lại.

Phê phán: Ngay cả khi lý thuyết mất kết hợp đã đáp ứng được yêu cầu chính đáng để trở thành một lý thuyết vật lý bền vững và tổng quát có khả năng mô tả được cả sự chuyển tiếp giữa vi mô và vĩ mô một cách đầy đủ mà không cần thiết phải đưa vào sự biến mất tức thời, và rất

đáng nghi ngờ, của hàm sóng, vẫn còn lại một số câu hỏi về cách giải thích mất kết hợp.

Rất đáng trích dẫn như một ví dụ câu phát biểu sau đây của các nhà vật lý lượng tử Markus Arndt, Klaus Hornberger và Anton Zeilinger trong công trình *Probing the limits of quantum world (Thử đi tìm giới hạn của thế giới lượng tử):*

> *"Mất kết hợp không thể giải quyết được những vấn đề triết học liên quan đến sự tìm hiểu nhận thức của con người đối với một thực tại cụ thể. Tuy nhiên, nó có thể giải thích được sự đột sinh của tính cổ điển, chẳng hạn khi nào và như thế nào một đối tượng mất đi những đặc trưng lượng tử của nó và trở nên không còn khác biệt với cách mô tả cổ điển nữa"*[27].

Tiện đây cũng xin nêu ra một sự kiện, rằng lý thuyết mất kết hợp nhờ cơ học lượng tử có thể mô tả sự không-thể-phân-tách-được, nhưng còn câu hỏi vì sao lại dẫn tới việc mất đi khả năng chồng chất của hệ thì vẫn còn là một vấn đề triết học chưa giải quyết được.

(Những luận đề khả dĩ giải quyết vấn đề này sẽ được tiếp tục nêu ra dưới đây).

Cuối cùng, xin nhấn mạnh một lần nữa rằng, ba cách giải thích trình bày ở đây chỉ là một lựa chọn nhỏ trong tất cả những khả năng giải thích có ý nghĩa hiện đang tồn tại.

Cách giải thích nào phù hợp với "thực tế"?

Chúng ta lưu ý rằng, vào một thời điểm thích hợp sau đây chúng ta sẽ làm quen với một cách bình luận khác về cơ học lượng tử mà chúng

---

[27] Công bố trong *Physics World* **18**, 3 (2005).

ta đã nêu ra ở đầu chương này, cách bình luận đưa chúng ta trở về với nhà vật lý, nhà tư tưởng luôn có lối tư duy độc đáo tên là David Bohm (1917-1992) và lý thuyết của ông mang tên *Cơ học Bohm*. Thảo luận về cơ học Bohm vào ngay lúc này hãy còn quá sớm và không mang lại nhiều hy vọng.

Bên cạnh những cách giải thích cơ bản nêu ra ở đây còn có vô số lý thuyết giải thích khác như những biến thể cải tiến và mở rộng. Tuy nhiên, không lý thuyết nào trong số đó có thể được xem là "đúng", "chân thực" hay "phù hợp với thực tiễn". Nó có thể là một cách giải thích, nhưng cũng chỉ tồn tại như một cách giải thích mà thôi, chứ chưa đạt đến tầm một lý thuyết. Rất khó nói về sự đúng đắn cũng như sự không đúng đắn của chúng. Chỉ có sự kiểm chứng xác đáng bằng thực nghiệm như những nỗ lực đã tiến hành liên quan đến quá trình mất kết hợp mới có thể đưa ra những cơ sở thoả đáng để khẳng định một lý thuyết này hay bác bỏ một lý thuyết kia.

Như chúng ta đã biết, lý thuyết mất kết hợp hiện nay đã được thừa nhận tương đối rộng rãi nhờ những kiểm chứng thực nghiệm phong phú và giầu ấn tượng. Quan điểm nguyên thủy của cách giải thích Copenhagen, khi lưu ý đến những kiến thức mới mẻ này, tỏ ra không chỉ là một cách giải thích *lâu đời*, mà còn có thể xem là *cũ kỹ đến mức cổ lỗ* nữa.

Tuy vậy, hiện nay những "lỗ hổng" nhất định trong lý thuyết mất kết hợp vẫn tạo ra mầm mống phân liệt trong giới chuyên môn vật lý lượng tử. Vấn đề nằm ở chỗ, bằng những phương thức rất có giá trị, thuyết mất kết hợp đã giải thích được sự biến mất của khả năng giao thoa, nhưng câu hỏi vì sao và như thế nào lại chọn ra một khả năng duy nhất trong vô số các trạng thái riêng của đối tượng lượng tử thì vẫn chưa được đề cập tới đầy đủ. Như vậy, chúng ta vẫn phải nhấn mạnh rằng lý thuyết mất kết hợp vẫn chưa thoát khỏi chữ "hay là":

a) Một giả thiết lựa chọn giống như sự biến mất của hàm sóng để rút về một trạng thái riêng duy nhất của đối tượng lượng tử, hay là

b) Một cách giải thích theo kiểu giải thích của Everett, thông qua một cách thực hiện đơn giản khiến cho tất cả những trạng thái riêng khả dĩ có thể thực hiện được trong những vũ trụ song song.

Lý do: công cụ sử dụng để mô tả quá trình mất kết hợp – *ma trận mật độ* – dù không còn chứa thành phần giao thoa nữa, nhưng vẫn cho phép những trạng thái riêng khác nhau xuất hiện. Trả lời cho câu hỏi, khả năng nào giữa a) và b) phù hợp với thực tế, có lẽ nên một lần nữa trích ra đây ý kiến đã nêu của erich joos và Claus Kiefer ở mục 11.2, theo đó, do còn nhiều khó khăn trong việc dùng thực nghiệm để khẳng định hay bác bỏ một thuyết nào đó, câu trả lời vẫn là chuyện "khẩu vị" của nhà nghiên cứu.

Cho dù hơi có vẻ khiêu khích, câu hỏi hiện thời có thể nêu ra như sau: một lý thuyết tiên đoán có vô số các vũ trụ song song hay một lý thuyết cần có một giả thiết thiếu biện giải và kém bền vững liệu có thoả đáng hay không?

Tôi hoàn toàn trung thực thú nhận rằng, tôi tự cảm thấy chưa đủ khả năng đưa ra một đánh giá về câu hỏi rắc rối này, bởi vì nếu ta nhìn nhận thấu đáo, chính ở đây đang đề cập tới những cấu trúc lý thuyết ở mức độ phong phú và phức tạp cao nhất. Theo quan điểm riêng tôi, đó là việc hết sức mạo hiểm.

Khách quan mà xét, thật thú vị khi thấy rằng, những người đại diện cho một lý thuyết nào đó, trong các ấn phẩm hay trong những trả lời phỏng vấn của mình, thường luôn cố gắng hạ thấp những lý thuyết cạnh tranh. Như vậy, sẽ tự nhiên xuất hiện ấn tượng rằng, một phần nào đó (dù rằng rất nhỏ) tính chủ quan, tính trực giác và yếu tố niềm tin đã bị cuốn vào khả năng nhận thức trong cuộc tranh luận về các lý thuyết giải thích cơ học lượng tử.

Chỉ còn lại niềm hy vọng là, những thực nghiệm trong tương lai có thể cung cấp những dữ liệu đủ mạnh để đánh giá những cách giải thích khác nhau một cách xác đáng.

14
Nghịch lý EPR

Nghịch lý EPR là gì và từ đâu sinh ra?

Chúng ta đã biết rõ sự từ chối dứt khoát của Einstein đối với hệ thức bất định. Và như đã thấy ở chương 9, ngay cả khi Bohr tỏ ra luôn luôn có khả năng bảo vệ lý thuyết của ông trước mọi phê phán của Einstein bằng những lý lẽ hết sức khôn khéo, Einstein vẫn cương quyết chống lại lời khẳng định rằng, cơ học lượng tử tạo ra một sự mô tả đầy đủ các quá trình vật lý trong thế giới vi mô.

Năm 1935, Einstein cùng hai cộng sự trẻ tuổi là Boris Podolski và Nathan Rosen, trong bài báo viết chung rất nổi tiếng *Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? (Có thể xem sự mô tả thực tại vật lý theo cơ học lượng tử là đầy đủ hay không?)*[28] đã trình bày một thí nghiệm tưởng tượng rất lý thú và quan trọng, lúc đầu mang tên *nghịch lý Einstein-Podolski-Rosen,* sau viết gọn thành *nghịch lý EPR*. Công trình này đề cập tới ý tưởng của Einstein cho rằng tính bất định không tránh khỏi của các đối tượng lượng tử được khẳng định trong hệ thức bất định Heisenberg chỉ có vẻ *dường như* mà thôi, và người ta có thể bỏ qua nguyên lý đó bằng một cấu trúc thí nghiệm được lựa chọn hết sức khôn ngoan. Để thực hiện mục tiêu đó, ba tác giả đã trình bày những suy luận mà nhờ đó có thể tránh được tính bất định của tọa độ và xung lượng một cách lịch lãm, khiến cho – theo ý họ – sự không đầy đủ của phương pháp khảo sát cơ học lượng tử sẽ trở nên rõ ràng, không kèm theo bất cứ nghi ngờ nào. Do tính chất quan trọng của công trình này, ta sẽ đề cập tới nó tương đối chi tiết.

---

[28] Ban đầu được công bố trên Phy. Rev. 47, 777 -80 (1935); sau này được in lại trong J. Wheeler, W. Zurek: Quantum Theory anh measurement (Princeton Univerrsity Press, 1983); trang 137

Trước hết, Einstein, Podolski và Rosen đã đưa ra hai định nghĩa trung tâm, những định nghĩa mà chúng ta đã biết khi theo dõi cuộc tranh luận Bohr-Einstein trước đây. Vì trọng lượng đáng kể của chúng trong toàn bộ lập luận, chúng ta tóm tắt lại những định nghĩa đó một lần nữa:

Tính đầy đủ: Một lý thuyết được xem là đầy đủ nếu mỗi yếu tố của thực tại đều tương ứng chính xác với một phần của lý thuyết vật lý đó.

Tiêu chuẩn thực tại: Một đại lượng vật lý là một yếu tố của thực tại, nếu nó được tiên đoán một cách chắc chắn mà không gây nhiễu loạn lên hệ thống.

Đây là những định nghĩa có tầm quan trọng nền tảng vì nó giúp ta thấu hiểu những cơ sở trong cách nhìn của Einstein.

Ông, hai trợ lý của ông và tất cả chúng ta đều hiểu là, theo cơ học lượng tử, trạng thái của một hạt, chẳng hạn của electron, được mô tả qua hàm sóng *y* mà sự tiến triển theo thời gian của nó có thể xác định nhờ phương trình Schrôdinger. Tiếp đó, chúng ta cũng tin tưởng rằng, theo nguyên lý bất định Heisenberg, tọa độ và xung lượng của hạt không thể đồng thời được xác định chính xác một cách tùy ý. Nghĩa là, với cách nhìn cơ học lượng tử, nếu ta đo xung lượng của một electron thì tọa độ của nó không thể được xác định chính xác đồng thời. Thông qua quá trình đo xung lượng của electron, trạng thái lượng tử chồng chất của electron đã bị nhiễu loạn, lúc đó xuất hiện sự suy sụp của bó sóng – ta có sự biến mất của hàm sóng *y*.

Tuy nhiên, khi nhận thức rằng, chỉ hoặc tọa độ – hoặc xung lượng có thể được xác định chính xác, đã dẫn ba nhà vật lý, những người tự tuyên bố mình là "phi cơ học lượng tử", tới điều khẳng định là, chỉ có thể có hai khả năng khi ta khảo sát thực tại vật lý:

a) Sự mô tả nhờ cơ học lượng tử là không đầy đủ, và

b) Hai đại lượng vật lý (ở đây là x và p) không chứa đựng đồng thời tính thực tại.

Rõ ràng, ít nhất thì một trong khai khả năng này phải là đúng.

Trong trường hợp electron đang được nói tới, nếu ta cố gắng đo vị trí chính xác để có thông tin về tọa độ của electron, thì bắt buộc chúng ta phải làm nhiễu động xung lượng của hạt một cách đáng kể. Theo lý luận của Einstein về tiêu chuẩn thực tại, nếu theo a) cơ học lượng tử là một lý thuyết đầy đủ thì từ đó suy ra theo b) xung lượng và tọa độ của đối tượng lượng tử không thể đồng thời là thực tại. Không khi nào hai đại lượng này có thể đo chính xác đồng thời, vì khi đo đại lượng này sẽ gây nhiễu động đáng kể lên đại lượng kia. Tại mỗi thời điểm, chỉ có thể một trong hai đại lượng tọa độ - xung lượng là thực tại. Không khi nào cả hai đồng thời.

Mặc dù việc giải quyết vấn đề tương đối đơn giản này của khái niệm thực tại cổ điển (tọa độ và xung lượng) thoạt đầu xem ra khá hợp lý, nhưng chính Einstein đã phạm sai lầm với kết luận của mình vì không chú ý đến một số sự kiện.

Bây giờ Einstein muốn ra một đòn lợi hại để làm rõ sự không đầy đủ của cơ học lượng tử, bằng cách cho rằng mệnh đề b) là không đúng. Để làm điều đó, ông đã cùng với Podolski và Rosen xây dựng nên một thí nghiệm tưởng tượng mà sau này mang tên là *nghịch lý EPR*.

Thí nghiệm EPR tưởng tượng được xây dựng như thế nào?

Ta hãy hình dung có một nguồn hạt đặc biệt, như trên hình 14., luôn phát ra hai hạt về hai hướng ngược nhau mà ta tạm gọi là hạt A và hạt B. Trong thời gian tiến hành thí nghiệm Δt hai hạt A và B không có khả

năng tương tác với nhau. Điều đó có thể làm được, vì theo thuyết tương đối hẹp, tương tác xảy ra không thể nhanh hơn tốc độ ánh sáng, tốc độ cao nhất có thể để truyền tất cả các loại thông tin. Nếu bây giờ ta chọn khoảng cách Δs giữa A và B sao cho nó luôn luôn lớn hơn quãng đường ánh sáng đi được sau khoảng thời gian Δt thì ta luôn chắc chắn rằng trong khoảng thời gian Δt đó không thể có tương tác giữa A và B. Giá trị nhỏ nhất cần có của khoảng cách giữa hai hạt đối với thời gian thí nghiệm Δt tuân theo phương trình:

$$\Delta s = c.\ \Delta t \tag{14.1}$$

trong đó c là tốc độ ánh sáng.

Với điều kiện (14.1), tốc độ nhanh nhất là là tốc độ ánh sáng cũng trở nên quá chậm so với việc truyền một thông tin nào đó từ A tới B, và ta nói về *tính định xứ* của hai hạt A và B. Chúng tách rời nhau một cách định xứ, nghĩa là một sự kiện nào đó xảy ra ở hạt A thì không thể ảnh hưởng tới hạt B. Đó là một kết luận bắt buộc, nếu ta có lòng tin tuyệt đối vào thuyết tương đối hẹp của Einstein, điều mà chúng ta chưa nói đến ở trên.

Tiếp đó, trạng thái Ψ_{AB} của hệ toàn phần (gồm hai hạt A và B) là đã biết, nghĩa là sự tiến triển theo thời gian của nó được xác định qua phương trình Schrôdinger là đã biết. Nhưng những trạng thái riêng của mỗi hạt thì lại hoàn toàn bất định. Chỉ có hệ toàn phần là có thể tính được theo kiểu cơ học lượng tử, chứ những trạng thái riêng của hai hệ cô lập thì không.

Nếu chúng ta tìm cách nhận được những trạng thái riêng của A và B, chúng ta sẽ buộc phải làm nhiễu loạn trạng thái cơ học lượng tử chung Ψ_{AB} của hệ và hàm sóng sẽ nhận được sự thay đổi không liên tục. Rồi cuối cùng sẽ dẫn tới sự suy sụp vốn rất đáng sợ của hàm sóng. Hàm sóng Ψ_{AB} cung cấp cho ta những thông tin mà chúng ta có thể có được về hệ

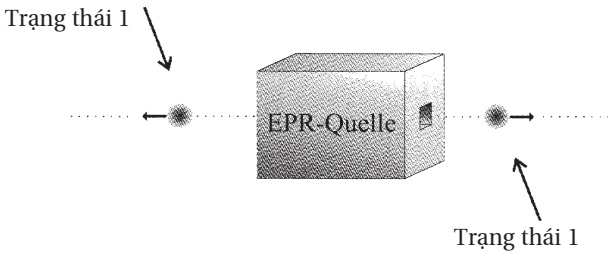
A + B theo quan điểm cơ học lượng tử, đó cũng chính là những thông tin có ở hệ này. Chúng tạo nên sự mô tả đầy đủ của hệ lượng tử A + B.

Trên cơ sở như vậy của cơ học lượng tử, Einstein và hai cộng sự đã suy luận như sau: Giả sử bây giờ chúng ta đo tọa độ của A, và như đã biết từ cơ học lượng tử, lúc này không thể xác định xung lượng của A với độ chính xác tùy ý được. Tuy nhiên, – và đây chính là luận điểm trung tâm – quá trình đo được tiến hành trên hạt A, ít nhất là trong khoảng thời gian Δt đã nói ở trên, không thể có ảnh hưởng gì lên hạt B, vì tương tác giữa A và B hoàn toàn bị loại trừ do điều kiện (14.1) được thoả mãn, nghĩa là *điều kiện định xứ* được đảm bảo. Tính định xứ của hai hạt cấm mọi mối quan hệ nhân quả giữa A và B. Cho tới khi hết khoảng thời gian Δt kể từ khi tiến hành phép đo ở A, hạt B không hề "biết" gì về phép đo có thể xem là được tiến hành *bí mật* ở A, bởi vì mọi thông tin chỉ có thể truyền từ A tới B sau Δt.

Hoàn toàn tương tự, ta có thể thấy rằng, trong khoảng thời gian Δt hạt B sẽ không nhận thấy phép đo xung lượng tiến hành tại A với độ chính xác tùy ý và như thế phép đo này cũng không có ảnh hưởng đến B.

Điều quan trọng ở đây là, ngay từ đầu B hoàn toàn không thể biết, khi nào chúng ta quyết định kết thúc phép đo, cũng không biết chúng ta sẽ đo xung lượng hay tọa độ của A (và do đó cũng gián tiếp với B), bởi vì chúng ta quyết định tất cả những điều đó hoàn toàn tự phát và tùy ý ở thời điểm cuối cùng, một thời điểm mà thông tin không thể kịp truyền về B (xem điều kiện định xứ (14.1)). Tuy nhiên, điều rõ ràng là, do *sự tương quan* giữa A và B, thông qua kết quả đo xung lượng hay tọa độ ở A, chúng ta cũng sẽ biết các giá trị tương ứng ở B mà không gây nhiễu loạn cho B dưới bất cứ hình thức nào.

Theo tiêu chuẩn thực tại, điều đó có nghĩa cả xung lượng lẫn tọa độ của B đều là những yếu tố của thực tại, và điều đó là *đồng thời* xảy ra,



Hình 14.1. Nguồn EPR luôn gửi hai hạt A và B về hai hướng ngược chiều nhau.

vì xung lượng và tọa độ bằng cách nào đó phải có sẵn những tính chất cụ thể này ở B trước các phép đo, do cả hai đều có thể được "gọi ra" một cách tự phát. Điều đó xảy ra mà không cần một tương tác nào với A, hay thậm chí chỉ là một khả năng tương tác với A.

Einstein đặt ra vấn đề để thảo luận: khi chúng ta thừa nhận tính đầy đủ của lý thuyết cơ học lượng tử, nhờ đâu mà hạt B có thể biết, liệu xung lượng của hạt A đã được đo, liệu tọa độ của hạt A đã được xác định, hay một phép đo ở A đã được tiến hành, nếu tương tác giữa hai hạt với nhau là không thể xảy ra, do sự tách biệt có tính nhân quả tương đối tính.

Tuy nhiên, nếu chúng ta cứ kiên trì điều khẳng định rằng cơ học lượng tử có thể mô tả đầy đủ các quá trình trong thế giới vi mô, thì chúng ta phải bắt đầu từ sự tồn tại của một cơ chế tác dụng xa rất đặc biệt mà Einstein vẫn thường gọi là "tác dụng xa ma quỷ". Tương tác này cần phải có khả năng truyền thông tin từ A về B một cách tức thời và trên khoảng cách xa tùy ý, sao cho A và B hòa hợp với nhau một cách tự phát theo những nguyên lý của cơ học lượng tử, sao cho vào thời điểm đo ở A, xung lượng hay tọa độ của hai hạt có thể nhận được những giá trị thích hợp, ngẫu nhiên khách quan. Một *cơ chế tương tác xa* như vậy nếu có sẽ không chỉ là một hiện tượng hoàn toàn mới mẻ và khó chấp nhận trong nền vật lý cho tới hiện nay, mà còn mâu thuẫn với những

kinh nghiệm tự nhiên ta vốn thấy rõ trong thế giới hàng ngày, cũng như trái ngược với toàn bộ trực giác của con người trong các mối quan hệ cơ bản với tự nhiên.

Và như vậy, Einstein kết luận: Nếu tại hệ B hoặc là xung lượng, hoặc là tọa độ có thể được xác định chính xác tùy ý mà không kèm theo bất cứ nhiễu loạn nào, thì theo tiêu chuẩn thực tại, có thể đồng thời gán cho mỗi một trong hai đại lượng vật lý này một thực tại tương ứng, khiến cho mệnh đề b) cần phải bị phủ định và mệnh đề a) được xem như là chuẩn xác.

Phương pháp khảo sát cơ học lượng tử phải được nhìn nhận là không đầy đủ. Phương pháp khảo sát này không có khả năng bao quát được về mặt lý thuyết tất cả các đại lượng vật lý xuất hiện trong thực tại.

Phải chăng không hình mẫu nào phải thay đổi do cơ học lượng tử?

Người ta có thể nghĩ rằng, vấn đề thế là đã rõ, cho dù điều này có làm Heisenberg, Bohr và một số người khác đau lòng, nhưng cơ học lượng tử là không đầy đủ và cần tìm một lý thuyết đầy đủ tốt đẹp hơn, một lý thuyết chứa đựng những đại lượng vật lý cho đến nay vẫn còn ẩn mình hay chưa được chú ý tới nhưng thực tế lại tồn tại. Bức tranh cổ điển về thế giới lại có thể giành được chiến thắng trước cái bản chất phụ thuộc vào xác suất và biến đổi theo kiểu nhẩy bậc của cơ học lượng tử vốn rất khó hình dung. Và chúng ta lại phải đi tìm *lý thuyết về những biến số ẩn* tổng quát hơn và chính xác hơn. Theo cách giải thích cơ học lượng tử của trường phái Copenhagen, nảy sinh một nhu cầu phải *thay đổi hình mẫu (paradigmen)*, phải từ bỏ tính khách quan, từ bỏ tính định xứ, từ

bỏ sự tồn tại đồng thời của những đại lượng bổ sung trên cùng một đối tượng vi mô, vâng – từ bỏ những niềm tin cơ bản trong nhận thức của một người bình thường. Bây giờ thì không cần sự thay đổi và sự từ bỏ ấy nữa: trái với cơ học lượng tử, một lý thuyết cổ điển với sự bổ sung những biến số ẩn có thể mô tả thực tại một cách đầy đủ. Chúng ta phải giữ vững lòng tin vào *bức tranh cổ điển của thế giới* vốn rất dễ chịu và đi tìm những tham số ẩn vừa nói tới ở trên.

Ngay cả khi những ý tưởng chống lại cơ học lượng tử như vậy thoạt đầu tỏ ra có sức thuyết phục, vẫn cần một lời cảnh báo về sự thận trọng, bởi vì vấn đề trình bày ở đây đáng tiếc lại không đơn giản như ấn tượng ban đầu và đó là điều sẽ được làm rõ sau đây. Cho nên, xin đề nghị hết sức thận trọng, đừng rút ra những kết luận vội vàng, khi một lý thuyết này hay lý thuyết khác tỏ ra dễ chịu hơn và do đó có vẻ như "thật" hơn, một sự dễ chịu tức thời thường qui định bởi bức tranh cổ điển quen thuộc. Lẽ tự nhiên, thật khó khăn khi phải vứt bỏ một bức tranh quen thuộc về thế giới vốn được chấp nhận trong một thời gian dài theo ý nghĩa là hình mẫu nhận thức luận để thừa nhận một bức tranh khác. Nhưng đây cũng chẳng phải là lần đầu, xảy ra sự thay đổi hình mẫu, xảy ra một cuộc cách mạng khoa học.

Nhà vật lý người Italia Galileo Galile (1564-1642), với tư cách là người sáng lập chính của khoa học tự nhiên hiện đại, nhờ những nhận thức và phương pháp mới mẻ mang tính đột phá mở đường, đã tạo ra một cuộc thay đổi hình mẫu như vậy bằng cách sử dụng lý thuyết nhận thức mới mẻ của ông về sự mô tả tự nhiên khi dùng ngôn ngữ toán học và bác bỏ bản thể học của Aristot.

Một bức tranh hoàn toàn mới và một hình mẫu hoàn toàn mới cũng đã được tạo ra bởi nhà vật lý người Anh Isaac Newton (1643-1727), người hoàn toàn xứng đáng được vinh danh là đã sáng lập ra vật lý cổ

điển, khi ông tạo ra bức tranh cơ học mới về thế giới, không chỉ nhờ phát biểu định luật vạn vật hấp dẫn có giá trị tổng quát cả trên mặt đất lẫn trên bầu trời.

Và có lẽ cũng có chút mỉa mai khi người tích cực chống lại bức tranh thế giới kiểu cơ học lượng tử lại chính là Albert Einstein, nhà vật lý thông qua *thuyết tương đối hẹp và thuyết tương đối tổng quát* đã làm cuộc cách mạng thay đổi nhận thức của chúng ta về không gian, thời gian và hệ quy chiếu tuyệt đối và qua đó bác bỏ thời đại cơ học vốn được thừa nhận. Có chút mai mỉa, vì ông chính là một nhà cách mạng trong lý thuyết của riêng mình về bức tranh thế giới lại không thể chấp nhận cơ học lượng tử.

Phải chăng cơ học lượng tử thực sự không đầy đủ?

Trước hết, cần phải đặt ra **câu hỏi trong một toàn bộ**: phải chăng bất đẳng thức Heisenberg thực ra chỉ là một khó khăn kỹ thuật thuộc về lịch sử? Phải chăng bất cứ một sự bất định lượng tử nào cũng chỉ là kết quả của sự không hiểu biết đầy đủ của chúng ta về tính chất thực của thế giới lượng tử do những khó khăn về kỹ thuật? Phải chăng vẫn còn đâu đó những tham số ẩn?

Rất có thể đó là những câu hỏi quan trọng nhất và cơ bản nhất xuất hiện trong cơ học lượng tử, những vấn đề khiến chúng ta khó tiêu hóa nổi những đặc trưng lượng tử do kinh nghiệm thường ngày và hiểu biết thông thường của mỗi người. Để có thể sắp xếp câu trả lời ngắn gọn và không đau đớn: tôi rất lấy làm tiếc phải thông báo với các bạn rằng, cái thế giới mà trong đó chúng ta đang sống thực ra lại rất điên rồ, hạt B sẽ biết tất cả, khi ta tiến hành một phép đo ở A. Trong thế giới lượng tử thực ra có một sự bất định khách quan như vậy, cái sự bất định mà

chúng ta không thể bỏ qua, ngay cả trong những thí nghiệm tưởng tượng tinh khôn nhất.

"Khoan đã!" – có thể bây giờ bạn sẽ nói – *"vì sao tôi lại phải tin chắc rằng, các đối tượng lượng tử thực ra có tính bất định, mặc cho tất cả những gì nói lên điều ngược lại"*. Đấy là một băn khoăn rất có lý, và là lý do vì sao chúng ta phải nghiên cứu câu hỏi khó khăn về khả năng tồn tại của các tham số ẩn một cách thấu đáo hơn.

Cơ học lượng tử hay lý thuyết về các biến số ẩn?

Nếu chúng ta phải lựa chọn giữa sự đúng đắn của lý thuyết các biến số ẩn và sự đúng đắn của cơ học lượng tử, thì chúng ta cần có một cấu trúc thí nghiệm đặc biệt, trong đó có các tiên đoán khác nhau suy ra từ từng lý thuyết, rồi trên cơ sở những quan sát thực nghiệm có thể khẳng định xem những tiên đoán từ lý thuyết nào là đúng. Theo tinh thần đó, sau đây chúng ta sẽ tìm cách so sánh những tiên đoán có thể của một lý thuyết dùng cho các hệ vi mô, một tiên đoán dựa trên phương pháp mô tả của các biến số ẩn, một tiên đoán xuất phát từ cơ học lượng tử không cần biến số ẩn. Rõ ràng là, nếu như ta có thể đo trực tiếp các biến số ẩn như vậy thì chẳng khó gì để đưa ra lời khẳng định hoặc bác bỏ cho thuyết này hoặc thuyết kia.

Nhưng đấy lại chính là vấn đề, vì tính từ *"ẩn"* trong thuật ngữ biến số ẩn lại dùng để chỉ những đại lượng vật lý có thật nhưng không thể đo trực tiếp được. Chúng ta cần phải quen với điều này: nhận biết trực tiếp hay đo đạc trực tiếp các biến số ẩn là không thể. Cho nên, chúng ta phải tự hạn chế trong việc tìm ra một bối cảnh vật lý, trong đó có sự khác nhau đo được bằng thực nghiệm giữa những tiên đoán từ một lý thuyết có biến số ẩn và một lý thuyết không có biến số ẩn.

Một cách hợp lẽ thôi, chúng ta có thể tin rằng, hầu như không thể có một trường hợp nào trong đó có một sự khác biệt thực nghiệm giữa một lý thuyết chấp nhận sự tồn tại biến số ẩn không thể đo được và một lý thuyết khác, như cơ học lượng tử, loại trừ sự tồn tại về mặt nguyên tắc của những biến số ẩn. Bởi vì làm sao chúng ta có thể quyết định về tính hữu dụng của hai lý thuyết, một xuất phát từ sự tồn tại những biến số ẩn không đo được, còn một với tên gọi cơ học lượng tử thì lại loại trừ về mặt nguyên tắc những biến số ẩn kiểu như thế?[29]. Làm sao có thể chứng minh được, hoặc chúng thực sự không tồn tại, hoặc ta chỉ không đo đạc được mà thôi, cho dù chúng vẫn thực sự tồn tại?

Điều này có thể dễ thấy hơn nếu ta so sánh với thí dụ sau. Ta có một cái hòm khóa chặt ở trước mặt, và phải chọn giữa hai khả năng sau:

a) Cái hòm không mở được, vì không có chìa khóa, hay là

b) Cái hòm vẫn không mở được, nhưng không chỉ vì ổ khóa không có chìa, mà còn vì nói chung là cái hòm ấy không thể mở được.

Bây giờ xin mời bạn chọn giữa a) và b)! Điều duy nhất bạn có thể biết là bạn không thể có một cái hòm mở ở trước mặt. Chấm hết! Còn chuyện có thể mở hòm ấy nếu có một chìa khóa thích hợp, thì đó là vấn đề còn tuyệt đối bỏ ngỏ. (Xin bạn hiểu cho rằng thí dụ này chỉ có một phần tương đồng với những vấn đề của cơ học lượng tử. Nó chỉ giúp hiểu vấn đề một cách dễ dàng hơn mà thôi).

Tương tự như vậy, trong vấn đề của chúng ta về sự tồn tại của các biến số ẩn, chúng ta chỉ biết là chúng ta không thể đo trực tiếp những biến số ấy, còn việc chúng có thể vẫn tồn tại hay không thì ta chưa thảo luận tới.

Cái câu hỏi cứ hành hạ chúng ta bây giờ sẽ là: làm sao ta có thể chứng minh được sự tồn tại hay không của một yếu tố thuộc thực tại vật lý –

---

[29] Chữ "nguyên tắc" ở đây sẽ trở nên tương đối trong những đoạn tiếp theo.

như những tham số ẩn, nếu như ngay từ đầu, về nguyên tắc, chúng là không thể đo được?

Về mặt nguyên tắc, cơ học lượng tử có loại trừ các biến số ẩn?

Trong những thảo luận ở trên, chúng ta đã cố gắng, và sẽ cố gắng trong những chương sau để tìm ra một sự khác nhau (có thể kiểm tra bằng thực nghiệm) giữa cơ học lượng tử và lý thuyết các biến số ẩn. Tôi có thể và muốn nói ra ở đây một sự kiện không thể không nói tới:

> *Về mặt nguyên tắc, cơ học lượng tử không loại trừ sự tồn tại của những biến số ẩn!*

Nhưng làm sao chúng ta lại có thể hiểu được điều này, khi suốt trong khoảng thời gian dài ta vẫn xem cơ học lượng tử và lý thuyết các biến số ẩn luôn cạnh tranh và loại trừ lẫn nhau? Thế mới biết, như bây giờ chúng ta thấy, cơ học lượng tử không phải là chuyện dễ dàng như thoạt đầu chúng ta nghĩ. Tốt nhất chúng ta hãy bắt đầu từ điểm khởi thủy.

Ngay từ buổi sinh thành cách giải thích Copenhagen tại hội nghị Solvay nổi tiếng vào năm 1927, louis de Broglie đã bày tỏ rõ ràng sự không thống nhất với quan điểm của Bohr và Heisenberg về cơ học lượng tử. Cơ học lượng tử không định xứ và không thực đã khiến cho de Broglie rất lúng túng, và ông phải đưa ra một cơ học lượng tử biến tướng của riêng mình, vẫn không định xứ, nhưng thực với tên gọi *"theorie de l'onde pilote"* (lý thuyết sóng dẫn), một lý thuyết có tính quyết định luận do chính ông nghĩ ra. Nhưng vào lúc đó, lý thuyết này đã không tìm được sự hưởng ứng của giới chuyên môn, và ông đã vứt bỏ nó tương đối nhanh chóng ngay khi nó chưa hoàn chỉnh.

Năm 1932 đã xuất hiện một sự kiện rất có ý nghĩa, khi nhà toán học John von Neumann (1903-1957) công bố một chứng minh phức tạp cho biết sự không thể thống nhất về mặt nguyên tắc giữa cơ học lượng tử và các biến số ẩn. Công trình tuyệt vời với một đòn phủ định rất nặng của von Neumann đã làm tan nát mà không hề dự đoán trước niềm hy vọng của nhiều nhà vật lý vốn chưa hài lòng với cơ học lượng tử đương đại nhưng cho rằng có thể hoàn thiện nó nhờ đưa vào những tham số ẩn. Sau đó, người ta không còn hứng khởi theo dõi lý thuyết các biến số ẩn như xưa nữa và phần lớn các nhà vật lý lượng tử đã thực sự từ bỏ nó với tư cách là một khả năng thay thế.

Khoảng 25 năm sau công trình của de Broglie, hoàn toàn không chịu ảnh hưởng gì từ công trình của von Neumann, một tác giả độc hành đã tìm cách xây dựng lại cơ học lượng tử thực, không định xứ với các biến số ẩn. Đó là David Bohm (1917-1992). Ông đã xây dựng được một lý thuyết chính xác và vững chắc, có khả năng cung cấp những tiên đoán chính xác như cơ học lượng tử, duy chỉ có điều *Cơ học Bohm* bây giờ thể hiện một động lực học thực và tất định.

Thoạt đầu, những nhà vật lý tên tuổi đã cười nhạo cơ học Bohm và xem đó chẳng qua chỉ là sự hâm nóng trở lại *"theorie de l'onde pilote"* của de Broglie và không thừa nhận nó như một lý thuyết độc lập nghiêm túc. Trước hết là Einstein, Heisenberg và các nhà vật lý giữ vai trò trung tâm khác vào thời đó, do nhiều lý do khác nhau, đã tới tấp tung ra những lời phê bình ầm ĩ. Nhưng, như một sự an ủi, từ ý tưởng của Bohm về một dạng cơ học lượng tử với các biến số ẩn đã phát triển thành cả một lý thuyết vật lý bền vững và được nhìn nhận nghiêm túc.

Khi nhìn nhận khả năng về mặt nguyên tắc của việc mở rộng cơ học lượng tử thông qua những biến số ẩn trong khuôn khổ của một lý thuyết không định xứ nhưng thực, để tránh những xung đột về định nghĩa, ở

đây cần nhấn mạnh rằng, trong những chương sau của cuốn sách này, khi nói đến lý thuyết biến số ẩn là ta luôn luôn ngụ ý về *lý thuyết thực, định xứ của những biến số ẩn*, một lý thuyết hoàn toàn trái ngược với cơ học lượng tử không định xứ, không thực. Nó cũng khác với cơ học lượng tử sửa đổi đầu tiên của Bohm – *lý thuyết các biến số ẩn, thực nhưng không định xứ* – cái mà chúng ta sẽ định nghĩa sau này qua khái niệm *cơ học Bohm*.

Cơ học Bohm được thiết kế như thế nào?

Điểm căn bản là cơ học Bohm đã mở rộng phương trình Schrôdinger vốn đã được thừa nhận của cơ học lượng tử để có *phương trình chuyển động* liên quan đến tọa độ của một đối tượng lượng tử bất kỳ. Phương trình chuyển động này được hiểu như phương trình chuyển động cổ điển, nó cho phép gán cho đối tượng một giá trị tọa độ cụ thể vào một thời điểm bất kỳ. Như vậy, lý thuyết Bohm đề cập tới một phương pháp mô tả quyết định luận đối với thế giới vi mô, còn hệ thức bất định Heisenberg sẽ được đưa vào một cách khôn ngoan qua các biến số ẩn và nhờ phương trình chuyển động. Để không mất cái nhìn tổng quát, chúng ta sẽ không bàn kỹ về các chi tiết toán học. Chỉ cần nêu lên rằng, phương trình chuyển động đã nói tới ở trên còn được gọi là *guiding equation*, hay dịch ra là *sóng pilot* hay *sóng dẫn*.

Một hệ quả của kiểu quyết định luận như vậy, là trong cơ học Bohm quá trình đo mất đi ý nghĩa của nó (còn trong cách giải thích Copenhagen quá trình đo giữ vị trí trung tâm). Nó không còn thể hiện sự rút gọn trạng thái, và trở nên giống như các phép đo cổ điển khách quan thông thường, không dẫn đến sự suy sụp của hàm sóng. Người ta có thể khảo sát cơ học Bohm như một dạng của cơ học lượng tử được hoàn thiện, không cần biết đến những tính chất cơ học lượng tử điển

hình mà trên lập trường cổ điển người ta xem là "những gói kèm theo ngẫu nhiên-không rõ ràng-không lành mạnh" của sự ngẫu nhiên khách quan, như hệ thức bất định Heisenberg, sự suy sụp của hàm sóng, nguyên lý bổ sung...

Nhưng ngay cả khi được giải phóng khỏi gánh nặng của cơ học lượng tử chính thống có thể mang lại hy vọng cho những người vốn phi lượng tử như Einstein và các cộng sự, sự ủng hộ của giới vật lý đối với lý thuyết Bohm cũng hết sức hạn chế như đã nói ở trên.

Và đến tận hôm nay tình yêu mà giới vật lý dành cho cơ học Bohm cũng không phải là lớn lao gì. Trong kho tàng kiến thức thuộc chương trình đào tạo ở các trường Tổng hợp, cơ học Bohm cũng chưa có được một vị trí xác định chắc chắn. John Bell đã phê phán hiện tượng này bằng những lời lẽ xác đáng như sau:

> *"Lý thuyết này tương đương với cơ học lượng tử phi tương đối tính thông thường. Nó hợp lý, rõ ràng, chính xác, và phù hợp với thực nghiệm. Tôi nghĩ rằng thật là một thảm họa khi sinh viên không biết gì về nó. Vì sao người ta không nói gì về nó? Tôi cho rằng ở đây có những nguyên nhân chính thuộc về lịch sử, nhưng một trong những nguyên nhân chắc chắn là lý thuyết này đã lấy đi hầu hết vẻ lãng mạn của cơ học lượng tử"*[30]

Lời biện giải này cũng không đến nỗi bay lửng lơ trong không khí, ngay cả khi ta tin rằng vật lý thật ra là một ngành khoa học duy lý và lãng mạn không phải là một tiêu chí căn bản để đánh giá một lý thuyết vật lý. Trong trường hợp cơ học Bohm không thể phủ nhận rằng một

---

[30] O. Passon: *Bohmsche Mechanik* (Harri Deutsch, 2004), Trang 14. Xuất bản lần đầu trong: A. Petersen: *Niels Bohr a centenary volume* (Havard University Press, 1985), trang 305.

phần bí ẩn của lượng tử đã bị lọai bỏ nhờ sự tồn tại của những biến số ẩn. Nếu thế giới vi mô là bí mật, có tính ẩn dấu, nhưng lại thuần túy xác định, thì theo đó sẽ không có ngẫu nhiên tuyệt đối và những đặc điểm tuyệt vời, kỳ bí và rối rắm của thế giới lượng tử sẽ lần lượt được bóc trần qua sự không đầy đủ của nó.

Khả năng thay thế của lý thuyết mới có lẽ đã làm các nhà vật lý lượng tử hoảng sợ, đến mức cơ học Bohm – cho dù sự bền vững đáng kể và khả năng xuất chúng của nó – không được tiếp tục nghiên cứu một cách xứng đáng và đành chịu số phận của một loại công trình "không được tin cậy lắm và không quan trọng lắm"[31].

[31] Tuy nhiên, ta cũng cần công nhận những lời phê bình khách quan, hợp lý đối với cơ học Bohm, khi chỉ ra rằng việc tổng quát hóa cơ học Bohm theo hướng vượt qua cơ học lượng tử thuần túy để phát triển tới lý thuyết trường lượng tử (xem chương 17) sẽ đặc biệt khó khăn.

15
Bất đẳng thức Bell

Có thể có một quyết định thực nghiệm về các biến số ẩn?

Có lẽ chúng ta sẽ cảm thấy có một vinh dự không nhỏ khi được tham dự vào những cuộc thảo luận tinh tế, xuất chúng giữa Bohr và Einstein nếu biết về những thành tựu tuyệt với của những nhà vật lý này. Tuy nhiên, đặc biệt đối với những nhà khoa học giàu tính phê phán, điều không thoả đáng là những cuộc thảo luận quan trọng và cơ bản như vậy cuối cùng chỉ dừng lại ở những khía cạnh triết học hay khía cạnh thuần túy lý thuyết. Bohr và Einstein liên tục thảo luận về các thí nghiệm tưởng tượng, từ một phương án mới của Einstein về thí nghiệm hai khe cho tới thí nghiệm EPR. Các bạn hẳn vẫn còn nhớ, đó là những cấu trúc thuần túy tưởng tượng.

Nhưng, như chính Einstein vẫn thường nhấn mạnh, ngọn lửa thử vàng đối với bất cứ lý thuyết nào lại chính là *những thí nghiệm* được tiến hành thực sự. Bởi vì khi bàn đến hai lý thuyết cùng bền vững và ở dạng thay thế nhau như trường hợp Bohr và Einstein, ta chỉ có thể thông qua những thí nghiệm được tiến hành thực để đưa ra lời phán quyết về tính đúng đắn của một trong hai lý thuyết đó. Thế mà việc thoả mãn yêu cầu đó trong trường hợp câu hỏi về sự tồn tại hay không tồn tại các biến số ẩn, như chúng ta đã nhận thấy, là hết sức khó khăn, nếu không muốn nói là không thể.

Khi nhìn nhận vấn đề như vậy, ta sẽ không khỏi ngạc nhiên, đến mức sửng sốt, khi biết nhà vật lý lượng tử giàu ý tưởng và rất khôn ngoan người Irland là John Bell (1928-1990) đã đem lại cho sự tưởng như không thể đó một giải pháp: Ông chọn ra một trường hợp đặc biệt, trong đó những tiên đoán của lý thuyết các biến số ẩn và cơ học lượng tử cho ta một sự khác biệt định lượng. Hệ thức toán học mà ông đưa ra trong

trường hợp này được gọi là *bất đẳng thức Bell*. Trong phần tiếp theo, mục đích của chúng ta sẽ là, nhận biết sự khác nhau có thể kiểm chứng bằng thực nghiệm của hai lý thuyết cạnh tranh với nhau này. Khi đó chúng ta sẽ xác nhận rằng, để trở thành người đầu tiên có được một công thức như vậy cũng không phải là khó lắm nhưng đòi hỏi sự dũng cảm vượt qua giới hạn của những thiên tài.

Thí nghiệm EPR mà Bell dùng để nghiên cứu cơ bản được xây dựng theo đề nghị của David Bohm và về nguyên tắc cũng tương tự như thí nghiệm tưởng tượng khởi thủy của Einstein. Nếu nói thật chính xác ra, thì nó là một biến thể của thí nghiệm EPR theo nguyên mẫu của Einstein. Tuy nhiên, nó không tập trung vào sự xác định hay tồn tại đồng thời của xung lượng và tọa độ của một đối tượng lượng tử như Einstein, Podolski và Rosen đã làm, mà chú ý đến một tính chất lượng tử khác được gọi là *spin*.

Spin của một hạt là gì?

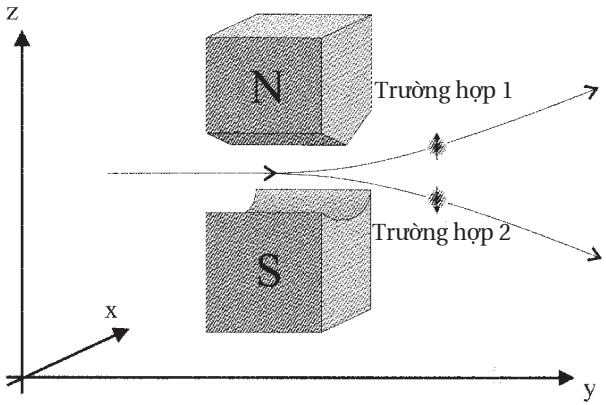
Để có sự tương tự dễ nhìn, người ta thường so sánh spin với một mômen xung lượng riêng vĩ mô, như mômen xung lượng của trái đất quay quanh trục của nó. Các hạt có kích thước nguyên tử và dưới nguyên tử cũng có tính chất lượng tử tương tự như vậy. Nhưng so sánh tính chất của các hạt vi mô với các hiện tượng trong kích cỡ thông thường của thế giới chúng ta chỉ là một cố gắng giúp ta dễ hình dung chứ không thật sự chính xác.

Ta còn nhớ η, bằng số lượng tử Planck h chia cho 2π. Spin của một hạt luôn bằng một (1) hay một nửa (1/2) lần của η và do đó (như nhiều đại lượng khác trong vật lý lượng tử) nó bị lượng tử hóa, nghĩa là ngay lập tức sự tương đương với momen xung lượng cổ điển rõ ràng là đã bị vi phạm.

Một electron nói chung có spin bằng $s = +\frac{1}{2}$ hay $s = -\frac{1}{2}$. Dấu +/- đứng trước giá trị của *s* chỉ ra spin của hạt đang nằm theo hướng nào, bởi vì cũng giống như momen xung lượng thông thường, nó là một vectơ có độ lớn và hướng. Chẳng hạn bây giờ ta đo thành phần spin hướng theo trục *x*, thì kết quả đo $s_x = -\frac{1}{2}$ nói rằng spin của electron nằm dọc theo chiều dương của trục *x*, còn kết quả ngược lại $s_x = +\frac{1}{2}$ ngụ ý rằng spin của hạt hướng theo chiều âm trục *x*. Thường thì người ta được phép chọn 1 trong ba trục không gian (hay bất cứ một trục nào khác) để xác định dấu các thành phần spin của một hạt bất kỳ.

Để tiến hành đo spin của một hạt người ta thường sử dụng *thí nghiệm Stern-Gerlach*. Nói ngắn gọn, thí nghiệm này có thể cho ta thông tin về hướng của spin theo một trục không gian thông qua hiện tượng lệch hướng chuyển động của hạt có spin khi đi qua một từ trường không đều. Chẳng hạn, chúng ta xét thí nghiệm mô tả trên hình 15.1. Nếu khi đi qua từ trường hạt lệch lên phía trên, ta biết rằng thành phần spin của nó hướng theo chiều dương của trục *z* (trường hợp 1: spin hướng lên trên). Trong trường hợp ngược lại, hạt lệch xuống dưới, spin của hạt sẽ hướng theo chiều âm của trục *z* (trường hợp 2: spin hướng xuống dưới).

Lẽ đương nhiên, chỉ với một lượng kiến thức không nhiều về từ trường ta cũng nhận ra rằng, không khi nào có thể đo được đồng thời các thành phần spin của một hạt theo nhiều hơn một trục. Chẳng hạn ta không thể đo đồng thời thành phần theo trục *z* và thành phần theo trục *y* của spin, bởi vì cấu trúc thí nghiệm trong hai trường hợp này loại trừ lẫn nhau. Từ trường cần thiết cho hai phép đo đó sẽ chồng chất lên nhau theo kiểu véctơ để rồi cuối cùng xuất hiện một từ trường tổng hợp và ta chỉ còn có thể (trong trường hợp khả quan nhất) đo



Hình 15.1. Thí nghiệm Stern-Gerlach để đo hướng spin

được thành phần spin dọc theo từ trường tổng hợp này. Như thế, chỉ thuần túy xuất phát từ cơ sở thực nghiệm, ta biết chắc chắn rằng tại một thời điểm bất kỳ, không bao giờ có thể đo được nhiều hơn thành phần spin theo một trục.

Chúng ta cần phải làm quen với điều này, vì không thể không nhận ra sự tương đương với nguyên lý bất định Heisenberg. Trong cả hai trường hợp, về mặt thực nghiệm đều không thể đồng thời đo được, một đằng là tọa độ và xung lượng, đằng kia là định hướng spin theo nhiều hơn một trục, do các cấu trúc thí nghiệm tương ứng loại trừ lẫn nhau. Trong vấn đề nêu ra ở đây, về sự tồn tại đồng thời các thành phần spin theo nhiều hơn một trục hay sự tồn tại đồng thời xung lượng và tọa độ, về mặt nguyên tắc, cả hai đều liên quan đến cùng một cách hành xử.

Đến đây có thể kết luận rằng, cuộc thảo luận EPR liên quan đến xung lượng và tọa độ có thể thay bằng cuộc thảo luận về đo các thành phần spin theo những trục khác nhau và cuối cùng vấn đề được nêu ra trong

nghịch lý EPR được thay thế bằng vấn đề đo spin. Vấn đề tương đương EPR bây giờ có thể phát biểu như sau: *Các thành phần spin theo những trục khác nhau có thể đồng thời là các yếu tố của thực tại?*

Đo spin theo lý thuyết các biến số ẩn hay theo cơ học lượng tử?

Vì bây giờ chúng ta đã biết rằng toàn bộ vấn đề EPR có thể thảo luận không chỉ trong khuôn khổ đo tọa độ và xung lượng mà đã chuyển qua đo spin theo nhiều trục, chúng ta phải khảo sát tương đối chính xác hơn quá trình đo spin. Để tìm ra một sự khác biệt có thể kiểm chứng bằng thực nghiệm giữa lý thuyết các biến số ẩn và cơ học lượng tử, trước hết chúng ta cần phải hiểu sự khác biệt căn bản của hai lý thuyết này liên quan đến quá trình đo spin của một đối tượng lượng tử.

Từ những chương trước liên quan tới cuộc thảo luận Bohr-Einstein và về nghịch lý EPR chúng ta đã biết được đại thể sự khác nhau đáng kể giữa lý thuyết các biến số ẩn và cơ học lượng tử: Trong lý thuyết các biến số ẩn chỉ tồn tại *sự ngẫu nhiên chủ quan* sinh ra do sự thiếu hiểu biết về những đại lượng vật lý tồn tại thực nhưng ta lại không biết, trái lại, thông qua sự suy sụp của hàm sóng và sự không tồn tại các biến số ẩn, cơ học lượng tử lại giả thiết về sự ngẫu nhiên khách quan và qua đó cho rằng nguyên lý nhân quả không còn hiệu lực.

Tạm thời, hãy coi như thế đã. Bây giờ trở về trường hợp đo một thành phần spin tùy ý, lý thuyết các biến số ẩn và cơ học lượng tử đưa ra những tiên đoán khác nhau như thế nào? Để trả lời câu hỏi này, ta hãy đơn giản hình dung ra một đối tượng lượng tử bay vuông góc với đường sức từ của một từ trường không đều như thể hiện trong hình 15.1. Nghĩa là chúng ta tiến hành thí nghiệm Stern-Gerlach. Bây giờ sự khác nhau trong tiên đoán từ hai lý thuyết thay thế sẽ ra sao?

Tiên đoán của cơ học lượng tử

Theo lý thuyết cơ học lượng tử, chừng nào còn chưa đo thì hạt không có một hướng spin nào cả. Thoạt đầu (tùy theo sự chuẩn bị), hạt ở trong một chồng chất rất nhiều định hướng spin khả dĩ, nếu không muốn nói là chồng chất của vô số các trạng thái như vậy. Theo cách viết Dirac, trạng thái cơ học lượng tử là một *trạng thái chồng chất* có dạng:

$$|\Psi\rangle = a|\uparrow\rangle + b|\downarrow\rangle \tag{15.1}$$

trong đó mũi tên lên trên hay xuống dưới tương ứng với trạng thái riêng của spin định hướng lên trên hay xuống dưới, còn các thừa số a và b về nguyên tắc là những số phức (nhưng tạm thời ta chưa để ý đến chuyện đó). Trạng thái chồng chất tổng quát của hạt xuất hiện như tổng của những trạng thái riêng (xem lại Chương 12).

Mãi đến khi tiến hành phép đo, spin của hạt mới nhận một giá trị xác định, cụ thể là hoặc hướng lên trên, hoặc hướng xuống dưới. Còn việc hạt định hướng như thế nào trong quá trình đo, thì theo cơ học lượng tử, đấy là sự ngẫu nhiên khách quan, bởi vì không còn một đại lượng hay tính chất vật lý nào của hạt, ở mức thấp hay cao, quyết định điều đó. Thông tin về một thành phần spin xác định đơn giản là không có ở hạt trong trạng thái chồng chất ban đầu của nó. Định hướng spin được xác định khi đo chỉ có thể được tiên đoán qua xác suất được tính từ hàm sóng $|\Psi^2$ của hạt (ở đây là $|a|^2$ và $|b|^2$). Giá trị cụ thể của nó là không xác định một cách khách quan.

Tiên đoán từ lý thuyết các biến số ẩn

Trái với cơ học lượng tử, lý thuyết các biến số ẩn cho rằng, sự định hướng spin khi đo vốn đã được xác định trước ở đối tượng đo, như một thực tế khách quan. Trước khi được đo, mỗi hạt chứa đựng thông tin là spin của nó có định hướng thế nào nếu được đo. Spin được xác định

qua những biến số ẩn không được đo trực tiếp, nhưng lại xác định định hướng của spin.

Do vậy, theo quan điểm của lý thuyết các biến số ẩn, sự suy sụp của hàm sóng kiểu cơ học lượng tử chỉ là một hiện tượng "kiểu dường như" mà thôi và điều này nảy sinh do sự không hiểu biết về giá trị tiềm ẩn của biến số ẩn. Theo đó xác suất $|\Psi|^2$ của cơ học lượng tử chỉ mang ý nghĩa một giá trị thống kê thuần túy, vì thành phần spin của hạt không phải được xác định một cách ngẫu nhiên khách quan khi đo, mà vốn đã có giá trị xác định ngay từ trước khi đo.

Đấy là điểm khác nhau trong tiên đoán suy từ hai lý thuyết. Nhưng khi quay về câu hỏi trước đây, rằng đâu là sự khác nhau của hai lý thuyết liên quan đến thí nghiệm mô tả trên hình 15.1, chúng ta lại phải thú nhận rằng, ở đây chưa xuất hiện sự khác biệt nào cả. Cả hai lý thuyết đều tiên đoán sự định hướng lên trên hay xuống dưới với cùng xác suất:

$$P_{\text{hướng lên trên}} = \frac{1}{2} \text{ và } P_{\text{hướng xuống dưới}} = \frac{1}{2}$$

Trong thí dụ quá đơn giản này, không cần giải phương trình Schrôdinger để đưa ra tiên đoán, bởi vì ta chỉ có hai khả năng đồng xác suất là "spin hướng lên trên" và "spin hướng xuống dưới". Cơ sở toán học của cả hai trường hợp cũng chỉ là một: đó là hàm sóng nhận được từ phương trình Schrôdinger mà bình phương môđun của nó cho biết xác suất hướng lên trên hay hướng xuống dưới.

Cuối cùng thì, khi đo đơn độc một thành phần spin, cũng giống như khi đo đơn độc xung lượng hoặc tọa độ của một hạt, không có sự khác biệt thực nghiệm giữa lý thuyết các biến số ẩn và cơ học lượng tử.

Như vậy, xuất hiện sự nghi ngờ, có chăng sự khác biệt trong tiên đoán của hai lý thuyết, bởi vì cho tới nay vẫn chưa tìm thấy một khác biệt nào có thể kiểm tra được bằng thực nghiệm. Phải chăng sự khác biệt

chỉ có một ý nghĩa nào đó về mặt triết học? Thế mới biết thiên tài của Bell khi ông đã tìm ra một sự khác biệt, điều mà không ai khác có thể nhìn thấy. Và bây giờ chúng ta sẽ quay về thí nghiệm EPR của Bohm, theo dấu chân của Bell để dẫn ra phương trình mang tên ông.

Cấu trúc thí nghiệm Bohm được tao ra như thế nào?

Nguyên tắc cơ bản của thí nghiệm EPR biến thể do Bohm đề xuất là tương đương, về mặt nguyên tắc, với thí nghiệm gốc của Einstein.

Trung tâm của thí nghiệm vẫn là nguồn EPR, nhưng bây giờ là hạt có spin $s = 0$. Hạt này có thể phân rã thành hai hạt A và B có spin $s = \frac{1}{2}$. Spin toàn phần của hai hạt A và B lẽ đương nhiên phải phù hợp với hạt ban đầu, trong trường hợp này là bằng không (0).

Về mặt cơ học lượng tử, trạng thái của cặp hạt A và B có thể khảo sát như sau: Trạng thái của một hệ hợp thành bất kỳ từ các hệ 1 và 2 với các trạng thái $|\Psi_1\rangle$ và $|\Psi_2\rangle$ chính là tích của các trạng thái riêng, trong cách viết của Dirac có dạng:

$$|\Psi\rangle = |\Psi_1\rangle . |\Psi_2\rangle \tag{15.2}$$

Trường hợp chúng ta đang xét với cặp hạt EPR A và B có đặc biệt hơn, bởi vì cả hai hạt, xét về mặt cơ học lượng tử, không thể xem là những hệ riêng, do trạng thái của chúng có liên hệ với nhau theo kiểu cơ học lượng tử. Một phép đo định hướng spin của hạt A ngay lập tức ảnh hưởng lên trạng thái spin của hạt B vì spin toàn phần buộc phải bằng không. Nếu chúng ta đo và nhận thấy spin của A hướng lên trên thì chúng ta biết ngay spin của B hướng xuống dưới.

Theo đó, hệ toàn phần tạo bởi hai hạt A và B ở trong chồng chất các trạng thái riêng "hạt A có spin hướng lên trên và hạt B có spin hướng xuống dưới" và "hạt A có spin hướng xuống dưới và hạt B có

spin hướng lên trên". Dưới dạng ngắn gọn, theo (15.2), hai trạng thái riêng khả dĩ của hệ toàn phần là $|\uparrow\rangle_A |\downarrow\rangle_B$ và $|\downarrow\rangle_A |\uparrow\rangle_B$ (bạn thấy không, cách viết của Dirac đẹp đẽ và tiện lợi biết nhường nào!). Các trạng thái của A và B liên hệ với nhau sao cho trạng thái của chúng không thể tách rời nhau và xuất hiện một trạng thái gọi là vướng víu có dạng:

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle_A |\downarrow\rangle_B - |\downarrow\rangle_A |\uparrow\rangle_B) \tag{15.3}$$

trong đó $\frac{1}{\sqrt{2}}$ là thừa số chúng ta đã làm quen trong nghịch lý con mèo Schrôdinger trong trường hợp đặc biệt hai biên độ xác suất $a = b$. Để đơn giản, ta bỏ bớt đi các chỉ số A và B ở sau ký hiện trạng thái và (15.3) khi đó có dạng:

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle|\downarrow\rangle - |\downarrow\rangle|\uparrow\rangle) \tag{15.4}$$

Khái niệm vướng víu xuất hiện lần đầu tiên trong công trình quan trọng của Schrôdinger *"Hiện trạng của cơ học lượng tử"*[32] (trong đó cũng đăng cuộc tranh luận nổi tiếng về nghịch lý con mèo). Nói một cách chính xác, trạng thái cơ học lượng tử đặc biệt này ngụ ý rằng, tại thời điểm ta tiến hành phép đo spin của A, hạt B đồng thời và tức khắc nhận giá trị spin tương ứng theo hướng ngược lại, mà không cần thông tin chuyển từ A đến B hay từ B đến A (điều kiện định xứ (14.1)), và không cần yêu cầu hạt đã có một giá trị spin xác định trước khi đo.

Cũng dễ thấy rằng nguyên tắc ấy không dễ hiểu và cũng không dễ chấp nhận. Thật là rối rắm, khi B đột nhiên nhận một tính chất lượng

---

[32] Nguyên bản công bố ở *Die Naturwissenschaften* **23**, 48 (1935); In lại ở nhiều tài liệu, trong đó có E. Schrôdinger: *Beitraege zur Quantentheorie*, trong Gesammelte Abhandlungen, Bd. 3; S. 484 ff

tử cụ thể nào đó, trong trường hợp này là định hướng spin (mà hơn nữa là nhận một giá trị chính xác ngược với A), trước hết là ngay lập tức, đồng thời với phép đo tại A, và sau nữa là lại có thể xảy ra trên khoảng cách bất kỳ giữa A và B. Đối với hiện tượng vướng víu cơ học lượng tử hầu như không thể hình dung nổi này không hề có bất cứ một sự tương đương nào trong thế giới vĩ mô của chúng ta. Đơn giản, đó là một hiệu ứng thuần túy lượng tử, không có cách nào trực tiếp hiểu nổi ở thang kích cỡ lớn.

Thế cho nên, chẳng có gì đáng ngạc nhiên, khi những nhà vật lý thiên tài bậc nhất, toàn năng bậc nhất như Einstein, những người luôn tự thấy "tin vào trực giác của chính mình", không thể thân thiện được với những nguyên lý của cơ học lượng tử. Phải chăng ta cần phải đơn giản chấp nhận những nghịch lý như vậy, những mâu thuẫn như vậy giữa lý thuyết cơ học lượng tử và và sự hiểu biết thông thường của con người? Liên quan đến câu hỏi ấy, ta hãy phát biểu tiên đoán cụ thể của lý thuyết các biến số ẩn trong thí nghiệm Epr của Bohm, sao cho có thể kiểm tra được tiên đoán ấy bằng thực nghiệm.

Tiên đoán của lý thuyết các biến số ẩn là như thế nào?

Theo lý thuyết các biến số ẩn, thì lý thuyết cơ học lượng tử trừu tượng về sự **vướng víu** chỉ "có vẻ như là có vấn đề". A và B nhận những giá trị của chúng không tự phát và ngẫu nhiên trong thời điểm đo, mà ngay từ khi tách rời nhau trong nguồn EPR chúng đã có giá trị spin của mình, cũng tức là có định hướng spin ngược chiều nhau. Do vậy hoàn toàn không xuất hiện câu hỏi, bằng con đường lượng tử bí mật nào mà B nhận được thông tin về sự định hướng spin hoàn toàn ngẫu nhiên vừa xảy ra tại A khi tiến hành phép đo, không có hiệu ứng trễ thời gian và độc lập với khoảng cách giữa A và B. Theo lý thuyết cổ điển về các

biến số ẩn, trái ngược với lý thuyết cơ học lượng tử, thành phần spin của một hạt dọc theo mỗi trục không gian ở thời điểm bất kỳ là đã xác định đơn giá.

Cho nên sau này trong giới chuyên môn, lý thuyết các biến số ẩn còn được gọi là *lý thuyết thực-định xứ*, bởi vì một mặt lý thuyết xuất phát từ sự thừa nhận tính đúng đắn của *sự định xứ*, nghĩa là xuất phát từ điều cho rằng, một nhiễu động tại A không thể gây ra tác động lên trạng thái của B định xứ tách rời với A, và mặt khác lý thuyết đó cũng thừa nhận sự đúng đắn của *tiêu chí thực tại* mà theo đó, mỗi đại lượng vật lý đều tương ứng chính xác với một yếu tố của thực tại vật lý, chúng tồn tại khách quan đối với một quan sát vật lý và có thể đo được bởi quan sát đó mà không có nhiễu loạn. Như chúng ta đều đã biết, hai nguyên tắc này không đúng với lý thuyết cơ học lượng tử và do đó cơ học lượng tử mang danh là *lý thuyết không định xứ-thực*. Hiện tượng vướng víu thực không dễ chịu đối với nhận thức thông thường của con người chúng ta, và có thể xem là lầm lẫn nếu xét từ khía cạnh định xứ-thực.

Nhân đây cũng xin nhắc lại một lần nữa cơ học Bohm, khác cả hai lý thuyết tiêu chuẩn kể trên, bởi vì nó là một *lý thuyết không định xứ, nhưng lại thực*. Cơ học Bohm, cho dù công nhận các biến số ẩn về một phía và thực tại vật lý về phía khác, lại luôn luôn cung cấp cho ta những tiên đoán giống hệt như cơ học lượng tử không định xứ-thực và không dây dưa nhiều với những cuộc bàn cãi triền miên về sự so sánh lý thuyết định xứ-thực với cơ học lượng tử. Do vậy, chúng ta sẽ tạm bỏ cơ học Bohm ra ngoài những thảo luận sắp tới và chỉ quay lại một chút ở chốt cuối cùng.

Để cho dễ hình dung về những vấn đề này, BELL đã phát biểu nghịch lý về *đôi tất Bertlmann* như sau: ta hãy tưởng tượng một giáo sư có tên

là Tiến sĩ Bertlmann[33] và ông mang hai chiếc tất khác màu. Không bao giờ ông mang hai chiếc tất cùng màu. Trong điều kiện này, *một tương quan thuần túy cổ điển*, chẳng có gì khó hiểu khi phán xét: nếu thấy Bertlmann đi ra từ góc phòng mà mang chiếc tất hồng ở chân phải, thì chắc chắn ở chân trái ông ta phải có một chiếc tất khác, không có màu hồng (xem H. 15.2).

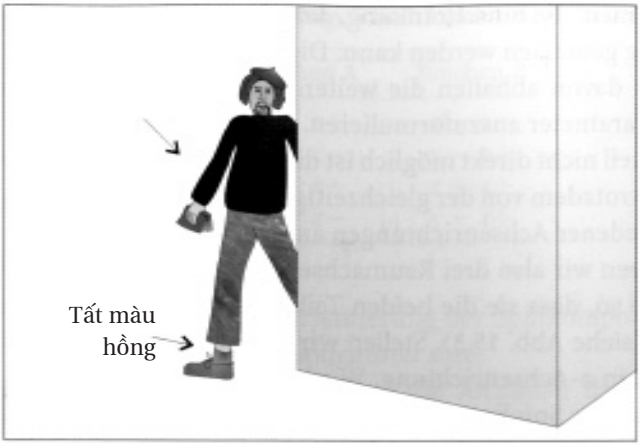
Điều này chẳng gây ra chuyện gì cả, vì tương quan cổ điển này xảy ra mà không cần có quá trình truyền thông tin từ chân nọ sang chân kia, do màu trên tất đã xác định từ trước. Nó đã được chính Bertlmann xác định từ buổi sáng, khi ông đi tất (tương đương nguồn EPR) và do đó không còn cần phải xác định tự phát bằng cách liếc nhìn (tương đương tiến hành phép đo).

Hoàn toàn tương tự có thể nói về thí nghiệm EPR liên quan đến spin theo quan điểm thực-định xứ: hướng spin của hai hạt đã được xác định ngay từ khi ra khỏi nguồn EPR thông qua những biến số ẩn. Chúng ta có thể xuất phát từ quan điểm cho rằng, khi ta tiến hành phép đo spin tại A, ta luôn nhận được một kết quả đã xác định sẵn từ trước.

Chúng ta lại đã biết, spin của một hạt không khi nào có thể đo được theo nhiều hơn một trục. Bởi vì cấu trúc thí nghiệm sẽ tự loại trừ lẫn nhau, nên sẽ có một giới hạn thực nghiệm là spin luôn chỉ có thể đo theo hướng một trục. Tuy nhiên, sự việc này cũng không hạn chế chúng ta khi phát biểu những tiên đoán tiếp theo của của lý thuyết các biến số ẩn. Cho nên, mặc dù không thể kiểm tra trực tiếp bằng thực nghiệm, ta vẫn có thể xuất phát từ sự tồn tại đồng thời của các

---

[33] Cũng xin nói thêm rằng REINHOLD BERTLMANN là nhân vật thực sự tồn tại, ông là giáo sư về vật lý lượng tử và là bạn gần gũi của BELL.
14 *Bách khoa toàn thư Brockhaus (24 tập)*. Tập 10, trang 524 (F.H. Brockhaus, 1997)

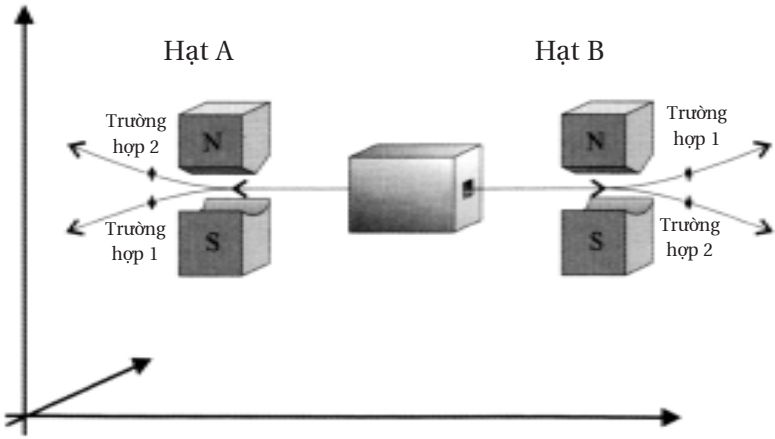


Hình 15.2. Giáo sư Bertlmann đi ra từ góc phòng với hai chiếc tất khác màu.

thành phần spin trên các hướng khác nhau để khảo sát một cách nhất quán vấn đề định xứ thực.

Chúng ta định nghĩa ba trục không gian là *x*, *y* và *z* và đặt nguồn EPR sao cho chúng phát ra hạt A và hạt B bay theo phương *y* (xem H.15.3). Trước hết, hãy hình dung, chúng ta đo spin của A theo hướng trục *z*. Nếu hạt lệch lên phía trên, ta có thành phần spin của A hướng theo chiều dương của trục *z*, còn thành phần spin của B hướng theo chiều âm của trục *z*. Ta ký hiệu kết quả này là *(z +, z −)*. Trong trường hợp ngược lại, ta có *(z −, z +)*. Như đã nhận xét nhiều lần trước đây, khi đo spin theo một hướng, ta chỉ có hai định hướng khả dĩ.

Ta đi thêm một bước nữa, và tưởng tượng rằng – mặc cho những khó khăn kỹ thuật mà ta có thể gặp phải – trong trường hợp hai trục đo, chẳng hạn như trục *z* và trục *x*, sẽ có bao nhiêu khả năng định hướng của các thành phần spin? Trong lý thuyết các biến số ẩn, sự tưởng tượng



Hình 15.3. Thí nghiệm EPR của Bell theo lý thuyết các biến số ẩn

như vậy không gây ra vấn đề gì, vì hạt đã vốn có những tính chất của nó, chẳng hạn như spin, một cách *khách quan* và độc lập với phép đo. Trong trường hợp đo theo hai trục sẽ có $2^2 = 4$ khả năng định hướng các thành phần spin của hạt, như ta thấy trong Bảng 15.1.

Bảng 15.1- Định hướng spin khả dĩ theo lý thuyết định xứ-thực

Số lượng	Hạt A	Hạt B
N_1	$x+z+$	$x-z-$
N_2	$x+z-$	$x-z+$
N_3	$x-z+$	$x+z-$
N_4	$x-z-$	$x+z+$

Các số từ N_1 đến N_4 ở đây là số trường hợp thực tế xa3y ra khi đo rất nhiều lần (với tổng số lần đo là $N_{\text{tổng}} = N_1 + N_2 + N_3 + N_4$), ứng

với các điều kiện ở cột bên phải. Chẳng hạn, N_3 là số lần đo trong tổng số $N_{\text{tổng}}$ lần mà hạt A có thành phần spin trên trục x là âm và trên trục z là dương, còn hạt B có thành phần spin trục x là dương và trục z là âm.

Bước tưởng tượng tiếp theo là ta lập một bảng tương tự về định hướng spin cho trường hợp ba trục. Ta có thể lấy các trục tùy ý với các góc α, β, γ so với trục z là hướng trục xác định sự định hướng của spin. Ta thấy rằng, ở đây sẽ có $2^3 = 8$ khả năng, như chỉ rõ trong Bảng 15.2.

Bảng 15.2. Các định hướng spin khả dĩ theo lý thuyết định xứ-thực.

Số lượng	Hạt A	Hạt B
N_1	$\alpha + \beta + \gamma +$	$\alpha - \beta - \gamma -$
N_2	$\alpha + \beta + \gamma -$	$\alpha - \beta - \gamma +$
N_3	$\alpha + \beta - \gamma +$	$\alpha - \beta + \gamma -$
N_4	$\alpha - \beta + \gamma +$	$\alpha + \beta - \gamma -$
N_5	$\alpha + \beta - \gamma -$	$\alpha - \beta + \gamma +$
N_6	$\alpha - \beta + \gamma -$	$\alpha + \beta - \gamma +$
N_7	$\alpha - \beta - \gamma +$	$\alpha + \beta + \gamma -$
N_8	$\alpha - \beta - \gamma -$	$\alpha + \beta + \gamma +$

Việc kiểm tra những tiên đoán bằng thực nghiệm sẽ được thực hiện như thế nào?

Ngay cả khi hai bảng này tỏ ra rất thú vị, câu hỏi vẫn là: ta có thể kiểm tra tính đúng đắn của của lý thuyết các biến số ẩn như thế nào, nếu trong thực tế ta không thể đo nhiều hơn một thành phần spin trong một lần đo. Chỉ là những suy tưởng thuần túy từ lý thuyết những biến

số ẩn dẫn ta tới những kết quả này, và ta chưa chú ý xem, nhưng kết quả ấy sẽ được kiểm tra trực tiếp ra sao. Vì lý do thuần túy kỹ thuật ta không làm được.

Nhưng bây giờ ta có *hai* hạt, và trên mỗi hạt ta có thể đo được một thành phần spin. Lại do thành phần spin của A và B có mối tương quan lẫn nhau, nếu sau phép đo ta biết thành phần spin của một hạt theo hướng một trục, thì ta có thể cũng biết thành phần spin của hạt kia mà không cần trực tiếp đo trên hạt thứ hai.

Về mặt nguyên tắc, trong khuôn khổ lý thuyết các biến số ẩn, ta có thể thiết kế một thí nghiệm EPR, trong đó tiến hành đo spin hạt A theo hướng trục α, còn đo spin hạt B theo hướng trục β, sao cho ta vẫn biết đồng thời định hướng spin của hạt kia theo hướng của trục tương ứng mà không cần phải đo trực tiếp. Trên hình 15.4 là một thí nghiệm cho mục đích này, với các góc xác định tùy ý: chẳng hạn, $\alpha = 0^0$, $\beta = 15^0$ và $\gamma = 35^0$.

Theo đó, hãy hình dung như sau: chúng ta đo spin của A theo hướng trục α và spin của B theo hướng trục β và nhận được kết quả (α + ; β +). Nếu đo một số lần $N_{tổng}$ rất lớn, thì số lần đo có đồng thời α + (tại A) và β + (tại B) như các trường hợp riêng sẽ là N_3 và N_5 (xem bảng 15.2). Như vậy:

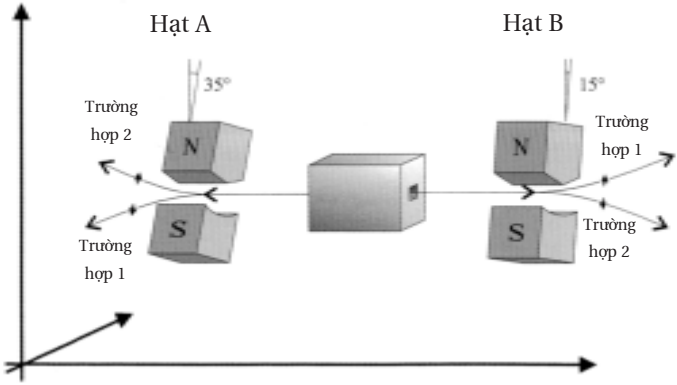
$$N(\alpha +; \beta +) = N_3 + N_5 \tag{15.5}$$

Và, ta có điều kiện:

$$N_3 + N_5 \leq N_2 + N_5 + N_3 + N_7 \tag{15.6}$$

Lẽ đương nhiên, xác suất để xuất hiện sự cố (α + ; β +) phụ thuộc vào xác suất xuất hiện các trường hợp số 3 và số 5. Tần suất tương đối của sự cố *i* là:

$$\frac{N_i}{N_{tổng}} \tag{15.7}$$



Hình 15.4. Thí nghiệm EPR của Bell theo lý thuyết các biến số ẩn (ví dụ ở đây: đo góc α ở A và góc β ở B).

Khi đó xác suất của sự cố *i* chính là giá trị của tần suất trên khi ta cho $N_{tổng}$ tiến tới vô cùng, nghĩa là thực hiện một số cực lớn các phép đo.

Theo đó, xác suất của trường hợp (α + ; β +) được tính bằng

$$P(\alpha+;\beta+) = \frac{N_3 + N_5}{N_{tổng}} \tag{15.8}$$

Nếu chúng ta đưa thêm vào góc thứ ba γ thì tương tự, từ Bảng 15.2, ta có: *P (α + ; β +)*

$$P(\alpha+;\gamma+) = \frac{N_2 + N_5}{N_{tổng}} \tag{15.9}$$

và:

$$P(\gamma+;\beta+) = \frac{N_3 + N_7}{N_{tổng}} \tag{15.10}$$

Cuối cùng, chúng ta nhận được một kết luận logic là bất đẳng thức:

$$P(\alpha+;\beta+) \leq P(\alpha+;\gamma+) + P(\gamma+;\beta+) \tag{15.11}$$

Bất đẳng thức (15.11) gọi là *bất đẳng thức Bell*. Bất đẳng thức này thu được dựa trên sự thừa nhận lý thuyết định xứ-thực và do đó là một tiên đoán của lý thuyết các biến số ẩn. Vì ở đây đề cập đến một tiên đoán định lượng, ta có thể kiểm tra thực nghiệm nó bằng cách đo xác suất tương đối của những trường hợp riêng rồi kiểm tra xem xác suất tương đối của trường hợp riêng $(\alpha +; \beta +)$ có thực sự nhỏ hơn hay bằng tổng xác suất tương đối của những trường hợp riêng $(\alpha +; \gamma +)$ và $(\gamma +; \beta +)$ hay không.

Nhà vật lý lượng tử thực nghiệm có nhiều thành công alain aspect (sinh năm 1952) đã tự đặt cho mình nhiệm vụ kiểm chứng điều này. Thông qua những thí nghiệm thành công của ông và bằng cách so sánh với những tiên đoán của lý thuyết các biến số ẩn thông qua bất đẳng thức Bell, ông đã thu được kết quả nói lên rằng – trái với tất cả nỗ lực của Einstein –, tự nhiên không chứa những tham số ẩn định xứ thực, bởi vì các kết quả thực nghiệm đã vi phạm bất đẳng thức Bell. Sự *vi phạm bất đẳng thức Bell* thông qua các kết quả có từ thực nghiệm được gọi là *định lý BELL*. Và như vậy, kết quả thực nghiệm của Aspect hoàn toàn phù hợp với những tiên đoán của cơ học lượng tử mà tính đúng đắn của nó lại một lần nữa được khẳng định khi mà sự phản đối nó lại bị bác bỏ.

Trái lại, lý thuyết chưa bác bỏ được chính là cơ học Bohm, thực nhưng không định xứ, cũng giống như cơ học lượng tử, nó hoàn toàn phù hợp với các kết quả thực nghiệm. Vì những lý do thật đáng tiếc mà chúng ta không thể khảo sát một cách đầy đủ lý thuyết thực – không định xứ, như đã nói ở Chương 14. Lý thuyết này thường bị đa số các nhà vật lý lượng tử bỏ qua.

Sau những kết quả thực nghiệm như vậy và sau khi lý thuyết thực-định xứ nói chung đã bị chứng minh là sai lầm, cuối cùng thì cũng khó mà nói dược có tồn tại những những biến số ẩn định xứ-thực, cũng

như ngẫu nhiên khách quan có phải là một phần không thể tránh khỏi, không thể bác bỏ được của thế giới chúng ta hay không. Dù sao đi nữa, sau khi cả hai đều đã mất, Bohr có lý hơn là Einstein.

16
Những ứng dụng hiện đại của vật lý lượng tử

Vật lý lượng tử được ứng dụng thực tế như thế nào?

Trong chương cuối cùng dành cho vật lý lượng tử "thuần túy" này, sau những phát minh lịch sử rực rỡ và chói lọi đã được đề cập tới, chúng ta muốn nói đến những phát minh của thời đại ngày nay. Nhiều thế hệ các nhà vật lý đã dành ra cả hai phần ba thế kỷ 20 để khảo sát tính độc đáo và sự khó hình dung của cơ học lượng tử, và tìm cách vượt qua những rối rắm logic của ngành khoa học mới mẻ này. Ngày nay, khi cánh cửa thế kỷ 21 đã rộng mở, mọi nghịch lý, mọi điều bất bình thường của lượng tử đều được chấp nhận như một thực tại hiện hữu mà không phải mất nhiều thời giờ bình luận, để từ đó tìm cách rút ra những điều tốt đẹp nhất theo quan điểm thực tiễn. Trong thực tế, chính sự bất bình thường của những cơ chế lượng tử đặc biệt đã tạo ra cho chúng ta những khả năng ứng dụng kỹ thuật theo những nguyên lý hoàn toàn mới mẻ mà với vật lý cổ điển chúng ta còn xa lắm mới dám mơ tưởng tới. Một kỷ nguyên mới, lạc quan hơn, và trước hết là định hướng thực tế mãnh liệt hơn đã xuất hiện. Đã đến lúc sử dụng những điều kỳ diệu của lượng tử.

Bạn hãy một lần nhìn quanh những gì có trong ngôi nhà của bạn! Các dụng cụ điện tử gia đình, radio của bạn, máy nghe CD hay máy nghe nhạc MP3 của bạn, vâng – toàn bộ thiết bị điện tử bạn dùng để giải trí, rồi cả máy tính của bạn nữa, rồi Laser hiện đã tìm ra ứng dụng trong đủ mọi lĩnh vực, các thiết bị *y* tế hiện đại, hệ thống điện tử bán dẫn, công nghệ nano của tương lai, vi điện tử... tất cả đều là sản phẩm của một giai đoạn đã bắt đầu từ rất lâu: giai đoạn ứng dụng những nguyên tắc vật lý của thế giới lượng tử. Không có những kiến thức hiện đại của chúng ta về những cơ chế khác thường của các đối tượng lượng tử thì

thế giới hôm nay của chúng ta hẳn đã khác rất nhiều so với những gì chúng ta hằng quen thuộc, ngay cả khi chính vật lý lượng tử tự bản thân nó vẫn luôn luôn là khác thường, thậm chí là xa lạ.

Tuy nhiên, những ứng dụng đã được đưa vào thực tiễn của các cơ chế vật lý lượng tử vẫn chưa phải là tất cả những khả năng kỳ diệu mà thế giới vi mô đã dành sẵn cho chúng ta. Đặc biệt trong những năm gần đây, trong những lĩnh vực hết sức đặc biệt, những nguyên lý mới và những phát triển mới đã tự khẳng định mình.

Thông tin lượng tử là gì?

Cơ sở cho tất cả những kỹ thuật tuyệt vời và những ứng dụng mới của cơ học lượng tử trong tương lai là thông tin mang trong một đối tượng lượng tử. Điều lý thú trong khái niệm "thông tin của một đối tượng lượng tử" này là chúng khác hẳn với thông tin mà chúng ta vốn quen thuộc trong đời sống hàng ngày.

Trước hết, điều quan trọng là chúng ta thử giải thích xem, thực ra, nói cho chính xác, "thông tin" là gì? Trong cuốn *Bách Khoa toàn thư* của Brochhaus, dưới khái niệm chung "thông tin", ở mục 2) có định nghĩa:

> *"Thông báo, tin tức, chỉ dẫn về một việc gì đó hay về một người nào đó."*[34]

Tất nhiên, chúng ta biết *"việc gì đó hay người nào đó"* có thể là một nhà chính trị "rất quan trọng" mà thông tin về ông ta đăng trên các phương tiện truyền thông, hay một cơn bão được cảnh báo trước, hay một electron mà spin của nó có thể đo trong thí nghiệm Stern-Gerlach. Tất cả những cái đó là thông tin (vật lý), nằm ngay trong bản thân đối tượng.

---

[34] *Bách khoa toàn thư Brockhaus* (24 tập), Tập 10, trang 524 (F.H. Brockhaus, 1997)

Người ta nghĩ rằng, tất cả những điều đó chẳng có gì đặc biệt, nhưng thực tế chỉ ra rằng thông tin mà các đối tượng của thế giới vi mô mang theo trên nhiều khía cạnh thú vị và hữu ích hơn nhiều, vì chúng khác hẳn thông tin cổ điển quen thuộc như vẫn hiện ra qua những *bit* số hóa ở máy tính của chúng ta.

Đối với thông tin đặc biệt của đối tượng lượng tử, người ta đưa vào một tên gọi đặc biệt theo đề nghị của nhà vật lý người Mỹ Benjamin Schumacher: *Qubit*.

Sự việc các đối tượng lượng tử mang thông tin theo cách khác hẳn với các hệ vĩ mô đã mở ra những khả năng hoàn toàn mới mẻ đối với khoa học thông tin. Vì vậy, dường như ta nói đến một lĩnh vực mới mẻ hoàn toàn, được sinh ra từ những hiểu biết hiện đại của chúng ta về vật lý lượng tử: *khoa học thông tin lượng tử* hay gọi tắt là *thông tin lượng tử*. Những ngành công nghệ mới đã định hình từ đây mà trước hết là *Viễn tải lượng tử* (*Quantum Teleportation), Máy tính lượng tử (Quantum Computer) và Mật mã lượng tử (Quantum Cryptography)*. Bây giờ chúng ta sẽ đề cập tới một số nét để hiểu về những đổi mới quan trọng, phi thường dựa trên những nguyên lý của vật lý lượng tử này.

Viễn tải lượng tử là gì?

Ta hiểu khái niệm viễn tải như một cảnh phi thường vẫn thấy trong phim khoa học viễn tưởng, trong đó con người có thể bị "phóng" từ A đến B trong chớp mắt nhờ chỉ một cái bấm nút. Một sự phi lý điển hình, một sự kiện không thể chấp nhận về mặt vật lý? Rất có thể không hoàn toàn như vậy, như một số thí nghiệm trong thời gian gần đây đã khiến chúng ta tin tưởng. Dù khi nghe tin ta cảm thấy rất ngạc nhiên, nhưng năm 1997 nhóm thí nghiệm của Harald Weinfurter và Anton Zeilinger

thuộc Trường Đại học Innsbruck đã thông báo rằng, lần đầu tiên họ đã thực hiện thành công sự *viễn tải lượng tử*[35].

Về mặt vật lý, viễn tải lượng tử là "việc chuyển tức thời những thông tin chứa trong một trạng thái lượng tử chưa biết tới một máy thu xa tùy ý nhờ sử dụng sự vướng víu"[36]. Bây giờ chúng ta sẽ bàn một cách chặt chẽ xem có thể hiểu hiện tượng viễn tải lượng tử ma quái này như thế nào. Lúc đầu, ta sẽ không chọn cả một con người làm đối tượng để viễn tải (như thế thì quá là viễn tưởng và gần như chắc chắn là không thể thực hiện được trong thực tế), mà ta sẽ thử với một đối tượng lượng tử.

Tình huống xuất phát là như sau: Cần phải viễn tải một photon T (chữ cái đầu của từ tiếng Anh *Teleportation)* từ điểm A đến một điểm B xa tùy ý – hay là như người ta vẫn quen dùng trong các cuộc đàm thoại mật mã: từ *Alice* đến *Bob*, nghĩa là: ở Alice biến mất và ở Bob tức thời xuất hiện một photon. Khi đó, tất nhiên photon sẽ không được thay đổi trạng thái ban đầu của nó, bởi vì nếu không thì không thể biết photon xuất hiện ở Bob có đúng là photon từng có mặt ở Alice hay không, nghĩa là có thực vừa xảy ra sự viễn tải hay không? Photon T ở Alice thế nào thì ở Bob nó cũng sẽ phải *y* như vậy, không hề "thương tổn". Hay là, để diễn đạt theo đúng ngôn ngữ thông tin, Qubit của photon được viễn tải từ Alice tới Bob phải đúng như bản gốc, không có bất cứ nhiễu loạn hay thay đổi nào.

Vấn đề đặt ra khi chúng ta giải quyết nhiệm vụ này nằm ở một sự thật không thể bỏ qua được rằng, trạng thái của một đối tượng lượng tử hay toàn bộ thông tin nằm trong đối tượng đó, thuần túy xét về

---

[35] D. Bouwmeester, J.W. Pan, K. Mattle, M. Eibl, H. Weinfurter, A. Zeilinger: *Experimental quantum teleportation*, Nature **390** (1997).

[36] D. Bruss: *Quanteninformation* (Fischer, 2003); trang 123

nguyên tắc, không thể được đọc một cách trọn vẹn bởi vì mỗi phép đo đều tất yếu dẫn đến sự suy sụp của hàm sóng. Theo đó, thật ra là không thể viễn tải một trạng thái không xác định và không có khả năng xác định, bởi vì làm sao ta có thể chuyển một cái gì đó mà vẫn chưa thể đọc một cách đầy đủ, ấy là còn chưa nói cái đó liệu đã xác định cụ thể hay chưa?

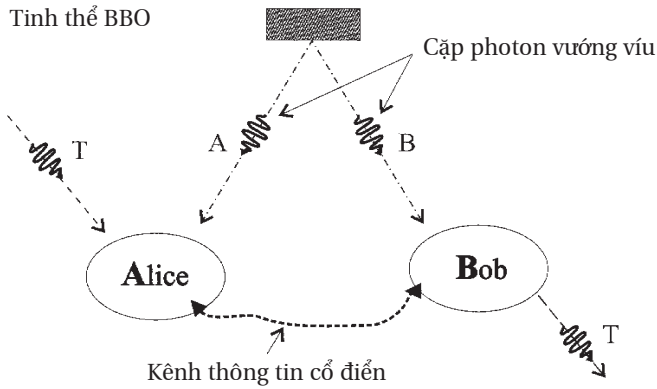
Những điều nghe mà không tin được, nhưng cũng chính trong cùng một khuôn khổ ấy, nếu những nguyên lý khôi hài của cơ lượng tử cấm thâu tóm toàn bộ trạng thái của một đối tượng lượng tử thì cũng chính tính quy luật của vật lý lượng tử lại tạo ra cho hiện tượng viễn tải một con đường kỳ bí để thực hiện những điều tưởng như không thể. Cái cửa sau ấy về thực chất suy từ một nguyên lý mà chúng ta đã biết trong những cuộc thảo luận trước đây: *nguyên lý vướng víu*.

Trong bài báo quan trọng của mình nhan đề *Viễn tải trạng thái lượng tử chưa biết thông qua hai kênh cổ điển và EPR song hành*[37] đăng năm 1939, các nhà vật lý lượng tử Charles Bennett, William Wooters và cộng sự đã trình bày những nguyên lý lý thuyết mới mẻ của viễn tải lượng tử mà theo đó một đối tượng lượng tử có thể được viễn tải nhờ kiểu con đường có hai đường ray: để viễn tải đối tượng lượng tử từ A đến B, nghĩa là từ Alice đến Bob, thứ nhất cần một kênh vật lý lượng tử dưới dạng một cặp hạt vướng víu, và thứ hai cần một kênh thông tin cổ điển.

Để dễ hình dung toàn bộ vấn đề, chúng tôi muốn ngay ở đây đưa ra một thí nghiệm thực hành liên quan đến viễn tải lượng tử vừa nêu ở trên. Thí nghiệm được thực hiện lần đầu tiên vào năm 1997 bởi nhóm Anton Zellinger, như theo chính lời của người trong cuộc.

---

[37] Công bố trong *Phys. Rev. Lett.* **70**, 13 (1993)



Hình 16.1. Sơ đồ thiết kế thí nghiệm viễn tải lượng tử.

Để viễn tải một photon chứa thông tin lượng tử dưới dạng *hướng phân cực* của hạt (xem lại Chương 1), ta sẽ sử dụng một cặp bổ sung của những photon vướng víu có vai trò giống như một dạng kênh chuyển tải. Để có thể nhận được một cặp photon vướng víu như vậy, rõ ràng cần một dạng đặc biệt của nguồn EPR. Trong mối quan hệ này, cũng cần nhấn mạnh rằng, mối tương quan sinh ra do sự vướng víu mà chúng ta đã làm quen trong thí nghiệm EPR của Bohm với spin của electrron như đã được thảo luận trong bài báo EPR năm 1935, cũng sẽ có sự tương đương nếu thay spin của hạt bằng hướng phân cực của photon. Sự vướng víu của hạt trong trường hợp này (liên quan đến phân cực của hai photon thay cho spin của hạt) không gây ra khác biệt về mặt nguyên tắc, và về bản chất cũng chỉ là một.

Trước hết, cần phải sinh ra một cặp photon vướng víu. Điều đó có thể thực hiện được nhờ một quá trình mang tên *parametric down conversion*. Trong quá trình này, một tia photon được dẫn qua một tinh thể phi tuyến đặc biệt, chẳng hạn được tạo thành từ β-bariborat

(BBO), trong đó photon tử ngoại tới có thể chia thành hai nhánh, sao cho xuất hiện hai photon với bước sóng gấp đôi nhau. Điều đặc biệt trong cỗ máy photon này chính là, với một xác suất dù rất nhỏ nhưng xác định, ở một góc bay ra nhất định, A và B sẽ vướng víu nhau về hướng phân cực của chúng. Nếu bây giờ ta dùng một tấm chắn lọc ra cặp photon bắt chéo này và nếu đo bằng kính phân cực ta sẽ luôn xác định được rằng, các photon sinh đôi A và B luôn luôn phân cực vuông góc với nhau và không khi nào song song với nhau. Trong Chương 15 chúng ta cũng đã biết đến lời giải bất ngờ của vấn đề EPR: do không có các tham số ẩn, định xứ-thực, nên trước khi tiến hành phép đo trên photon, cả hai photon đều không có một hướng phân cực xác định. Chỉ đến lúc phép đo được tiến hành, hướng phân cực mới được xác định một cách tự phát và khách quan. Đó là một sự thực khôi hài, nhưng quan trọng!

Trạng thái vướng víu của cặp photon A và B sinh ra như vậy sẽ có dạng:

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|\leftrightarrow\rangle_A|\updownarrow\rangle_B - |\updownarrow\rangle_A|\leftrightarrow\rangle_B\right) \qquad (16.1)$$

Trong đó $|\leftrightarrow\rangle$ là vectơ trạng thái riêng ứng phân cực ngang, còn $|\updownarrow\rangle$ là vectơ trạng thái riêng ứng với phân cực dọc của photon. Một cặp photon vướng víu về hướng phân cực như vậy sẽ được dùng với mục đích viễn tải, sao cho photon A được dẫn tới Alice và photon B được dẫn tới Bob. Điều này có thể được thực hiện trên đường hàng không hay qua cáp quang.

Bây giờ, để viễn tải photon T đến Bob, Alice phải chuyển photon này vào một mối quan hệ đặc biệt với photon A, hay diễn đạt một cách chính xác hơn: Alice phải làm cho T vướng víu với A. Điều đó có thể thực hiện nếu Alice tiến hành phép đo chung tại T và A, gọi là *phép đo-Bell*. Cho dù về mặt lý thuyết, một bước đi quan trọng như

vậy của viễn tải là hoàn toàn không còn gì để nghi ngờ và dường như khá đơn giản, nhưng để tiến hành thực nghiệm, trong thời gian dài đó chính lại là vật cản lớn. Với những khoản đầu tư đáng kể, với kỹ thuật tinh tế và khôn khéo, mới có thể thực hiện được phép đo Bell nhờ một gương bán mạ.

Nhờ phép đo- Bell có tác dụng tạo tương quan như vậy, Alice có thể nhận được một trong 4 *trạng thái Bell* khả dĩ sau đây:

$$|\Psi^{+}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|\leftrightarrow\rangle_T|\updownarrow\rangle_A + |\updownarrow\rangle_T|\leftrightarrow\rangle_A\right) \tag{16.2}$$

$$|\Psi^{-}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|\leftrightarrow\rangle_T|\updownarrow\rangle_A - |\updownarrow\rangle_T|\leftrightarrow\rangle_A\right) \tag{16.3}$$

$$|\Phi^{+}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|\leftrightarrow\rangle_T|\leftrightarrow\rangle_A + |\updownarrow\rangle_T|\updownarrow\rangle_A\right) \tag{16.4}$$

$$|\Phi^{-}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|\leftrightarrow\rangle_T|\leftrightarrow\rangle_A - |\updownarrow\rangle_T|\updownarrow\rangle_A\right) \tag{16.5}$$

Những trạng thái Bell sinh ra trong phép đo này, như ta nhận thấy rõ ràng, đều là trạng thái vướng víu giữa các photon T và A. Lẽ tự nhiên, cùng với phép đo Bell của Alice hạt B của Bob tức thời mất đi tính chất ban đầu của nó, bởi vì, phụ thuộc vào trạng thái ban đầu của photon T và kết quả của phép đo- Bell, nó sẽ được tìm thấy ở một trạng thái khác, không xác định.

Kết quả đo của Alice cho biết trạng thái nào trong số bốn trạng thái (16. 2) – (16.4) được xác định qua phép đo Bell. Kết quả này được gửi về Bob qua *kênh thông tin cổ điển* (chẳng hạn đường điện thoại, Fax hay Internet). Bây giờ sử dụng kết quả đo Bell mà Alice giữ cho, Bob tiến hành một phép biến đổi unita, thích hợp đối với photon B để nhận được trạng thái ban đầu của photon T. Qua phép biến đổi Bob thực

hiện trên photon B như vậy, photon B sẽ nhận được trạng thái lượng tử của T, tức là trạng thái ban đầu phân cực của nó. Đồng thời, T khởi thủy buộc phải mất đi trạng thái phân cực của mình, vì nó vướng víu với A. Tổng quát lại, thông qua những việc làm tại Bob và Alice, trạng thái vật lý lượng tử ban đầu đã được chuyển từ T sang B, hay nói khác đi: B đã trở thành T![38] Như vậy, một quá trình viễn tải đã được hoàn tất theo đúng nghĩa.

Chắc bạn cũng nhận ngay ra rằng, trong quá trình viễn tải photon T vừa nói tới ở trên thật ra không hề có sự vận chuyển vật chất theo đúng nghĩa riêng của nó. Về cơ bản, đó là toàn bộ thông tin của photon T được viễn tải về photon B mà không có gì được chuyển đi thật sự trên "con đường ma quái" như ta vẫn nghĩ. Và thật đáng ngạc nhiên là kết quả cuối cùng lại chính là sự vận chuyển có vẻ như "ma quái" đó.

Đồng thời, cũng nên nói rằng trong sự viễn tải lượng tử thực ra không có sự truyền thông tin tức thời nào cả, bởi vì trạng thái ban đầu của photon T ở Alice chỉ chuyển được sang Bob sau khi đã "công bố" kết quả đo của Alice nhờ phép đo Bell. Do thông tin về kết quả đo tại Alice được truyền đi qua kênh thông tin cổ điển và do đó tốc độ của nó không thể lớn hơn tốc độ ánh sáng, nên sự tái tạo trạng thái photon T tại Bob chỉ có thể diễn ra sớm nhất là sau khoảng thời gian:

$$t_{min} = \frac{s}{c} \tag{16.6}$$

trong đó s là khoảng cách giữa Alice và Bob. Ở đây không có mâu thuẫn nào với các nguyên lý của lý thuyết tương đối hẹp, bởi vì trong viễn tải lượng tử không hề có truyền thông tin tức thời.

---

[38] Điều này đúng trong trường hợp tại thời điểm ban đầu bước sóng của T bằng bước sóng của A và B.

Đến đây ta có thể nghĩ rằng, viễn tải lượng tử thực ra chẳng là gì quá đặc biệt, nó giống như một thủ thuật rất khôn ngoan mà thôi. Nó chẳng phải là sự biến mất của photon T tại Alice rồi xuất hiện đột ngột tại Bob, mà thực ra chỉ là một bản copy "rẻ tiền" được hoàn thiện tại Bob mà thôi. Nhưng, các nhà thực nghiệm nhấn mạnh rằng, không phải chỉ có như thế!

Thật ra có một hệ quả lý thú là, thông qua phép đo Bell tại T photon này sẽ mất đi tính chất ban đầu của nó và do đó không thể nhìn nhận như T được nữa, vì bây giờ nó có trạng thái hoàn toàn khác. Tuy nhiên, thông qua biến đổi unitar của Bob T lại quay trở về trạng thái ban đầu của nó, giống *y* như một bản sao hoàn chỉnh, một sự tái tạo tuyệt vời. Trích dẫn sau đây của Zeilinger cho ta thấy rõ hơn ý nghĩa này của thí nghiệm:

> *"Một người bi quan có thể nói rằng, đây chẳng qua chỉ là sự chuyển dời trạng thái phân cực của photon, hay nói khác đi, trạng thái lượng tử của nó, chứ không phải là "chính bản thân" photon. Nhưng, bởi vì mỗi photon lại được hoàn toàn xác định bởi trạng thái lượng tử của nó, nên viễn tải trạng thái hoàn toàn tương đương với viễn tải hạt"*[39]

Theo ý nghĩa đó, hạt T, photon mà Bob nhận được không đơn thuần chỉ là một bản sao thông thường theo nghĩa vĩ mô cổ điển, mà là một sự tái sinh trăm-phần-trăm của hạt T ban đầu, giống như khi người ta in ra một bản Fax – nếu ta muốn có một so sánh theo kiểu kinh điển. Photon T do Bob tìm thấy cũng chính là một bản gốc.

Điều tiếp theo cần phải chú ý, là sau khi thực hiện phép đo Bell ở Alice thì không còn "bản gốc" nào nữa, vì đã có sự nhiễu loạn không

---

[39] A. Zeilinger, Quanten Telepoctatin, Spektrum der Wissenschaft, **6** (2000) trang 25

thể nào tránh nổi. Sự kiện nói rằng các trạng thái vật lý lượng tử chưa xác định không thể nhân bản một cách hoàn chỉnh được gọi là *Định lý không thể nhân bản (No-Cloning-Theorem)*. Viễn tải lượng tử ở đây cho ta một thí dụ rõ rệt về vấn đề này.

Mặc cho tất cả những điều như vậy, việc cắt nghĩa viễn tải lượng tử như là việc truyền trạng thái hay truyền thông tin vẫn bị nghi ngờ rất nhiều. Bởi vì, nếu xem xét một cách thật chính xác, thì đối tượng sau này được nhìn nhận như là hạt được viễn tải, thực ra đã tồn tại ở B ngay từ trước khi có hành động viễn tải. Ngoài ra, trạng thái cơ học lượng tử vốn đã *tiềm tàng* ở B từ trước. Trạng thái cơ học lượng tử rất đặc biệt này cần phải được chuẩn bị rất chính xác ngay trước khi thí nghiệm như một phần của trạng thái vướng víu có tính toàn cục. Từ đó, nhiều nhà vật lý lượng tử rất có tên tuổi đã phê phán rằng, trong trường hợp viễn tải lượng tử, thật ra chẳng có gì được "tải đi" theo nghĩa đen của từ này, kể cả thông tin hay trạng thái, đó chẳng qua chỉ là sự đánh lừa mà thôi.

Cũng như trong rất nhiều trường hợp bất đồng chính kiến khác, chúng ta có thể cho rằng những nghiên cứu tiếp theo về những bất đồng này sẽ giúp chúng ta nhận thức rõ hơn sự vật. Một sự tức giận thái quá sẽ chỉ làm cho quá trình vốn đã trừu tượng dễ trở nên lầm lạc hơn.

Máy tính lượng tử là gì?

Dựa trên công nghệ mới vừa được trình bày – hiện tượng viễn tải lượng tử – có thể thiết kế loại máy tính hoàn toàn mới bên cạnh nhiều xu hướng phát minh khác. Khái niệm "loại mới" ở đây không chỉ ngụ ý tần số làm việc cao hơn một cách đáng kể hay bộ nhớ có dung lượng khổng lồ, như vẫn thường được nói tới một cách hết sức đặc trưng trong

công nghiệp máy tính. Không, ở đây chúng ta đề cập tới những đổi mới thực sự về mặt nguyên tắc, nói tới một thế hệ máy tính mới hoàn toàn về nguyên lý cơ bản, vì nó dựa trên những định luật vật lý một thời gian dài chưa được nghĩ tới và cho đến nay chưa hề được khai thác: khả năng tồn tại thông tin dưới dạng chồng chất trạng thái và khả năng tính song song thông qua rất nhiều vướng víu liên kết cũng như thông qua trao đổi các hạt EPR vướng víu trong một loại mạng lưới gọi là *trao đổi vướng víu* (*entanglement swapping*).

Cũng giống như electron trong các lớp vỏ của nguyên tử có thể đồng thời tồn tại ở nhiều vị trí khác nhau nhờ khả năng chồng chất trạng thái lượng tử, trong vật lý lượng tử ứng dụng, các quá trình tính toán cũng có thể thực hiện theo kiểu chồng chất ở nhiều lớp khác nhau.

Khác với các máy tính số cổ điển, một qubit vật lý lượng tử có thể không chỉ nằm trong trạng thái "đóng"-"mở" tức là 0-1, mà còn có thể tồn tại trong một chồng chất trạng thái tùy ý tạo ra từ hai trạng thái riêng này. Một qubit có thể đồng thời nhận các giá trị 0 và 1, cũng như tồn tại trong vô số những trạng thái với tỷ lệ đóng góp khác nhau của các trạng thái riêng $|0\rangle$ và $|1\rangle$ theo hệ thức chồng chất thông thường

$$|\Psi| = a|0\rangle + b|1\rangle \tag{16.7}$$

với điều kiện chuẩn hóa $|a|^2 + |b|^2 = 1$. Qua đó có thể thấy rằng, một máy tính lượng tử tạo nên từ qubit có thể tính nhanh gấp đôi một máy tính cổ điển thông thường bởi vì nó có thể tính song song với các giá trị 0 và 1. Thuật toán làm việc song song từ khả năng này cũng được gọi là *sự song hành lượng tử*. So với máy tính cổ điển, nó có những ưu thế rõ ràng.

Nhưng không chỉ có vậy mà thôi. Nếu ta kết nối càng nhiều qubit như vậy và cho chúng tính toán cùng nhau, thì càng có thể nhận nhiều giá trị

đồng thời và càng tạo ra nhiều con đường tính toán song song. Nói một cách chính xác, số những con đường tính toán song song khả dĩ W thậm chí còn tăng theo kiểu lũy thừa với số qubit được sử dụng n, cụ thể là:

$$W = 2^n \tag{16.8}$$

Với hai bit cổ điển thông thường, cần phải tiến hành bốn phép tính nối tiếp nhau, trong khi với hai qubit lượng tử ta chỉ cần một phép tính mà thôi. Trên cơ sở đó, nếu dùng ba qubit lượng tử ta có thể ghi nhận đồng thời 8 số. Theo một khẳng định ngày càng xuất hiện nhiều trong tư liệu được công bố, với khoảng 270 qubit người ta có thể đạt đến con số W trong (16-8) lớn hơn cả tổng số hạt có trong vũ trụ (Số hạt có trong vũ trụ được ước lượng là 10^{80} rõ ràng nhỏ hơn $2^{270} \approx 1{,}9.\ 10^{81}$).

Đặc biệt trong những quá trình tính toán khổng lồ và đòi hỏi tốc độ cực cao, chẳng hạn như việc phân tích các số ra *thừa số nguyên tố*, các máy tính lượng tử trong tương lai dựa trên qubit sẽ có ưu thế quyết định so với máy tính cổ điển hiện nay. Trong các máy tính thông thường, thời gian cần thiết để *phân tích ra thừa số nguyên tố*, tăng theo kiểu hàm mũ theo độ dài của số cần phân tích. Trái lại, nhờ thuật toán làm việc song song, máy tính lượng tử có thể rút ngắn khoảng thời gian ấy đến mức không lường được. Theo *thuật toán Shor*, thuật toán do nhà toán học Peter Shor phát triển năm 1994 riêng cho bài toán phân tích ra thừa số nguyên tố, với máy tính lượng tử, thời gian tiêu tốn sẽ không còn tăng theo kiểu hàm mũ nữa mà chỉ còn tăng theo kiểu lũy thừa bậc ba của độ dài số cần phân tích. Đấy quả thật là một sự khác biệt quá rõ ràng, đủ để làm cho việc phân tích một số ra thừa số nguyên tố không còn là một nỗi ám ảnh ghê gớm nữa, mà đã chuyển sang lĩnh vực có thể thực hiện được.

Tuy nhiên, chúng ta không được quên rằng còn có rất nhiều vấn đề phải giải quyết để có thể thực hiện được thế hệ máy tính dựa trên

cơ sở qubit. Một trong những vấn đề cơ bản, đượm mầu lý thuyết là việc đọc các kết quả tính toán cuối cùng. Vấn đề này chúng ta đã khá quen thuộc: đó là vấn đề đo trong vật lý lượng tử, vì qua hành động đo, chúng ta tất yếu sẽ làm *suy sụp trạng thái* và đó là điều ta không thể tránh khỏi. Cho nên, dù có nhiều con đường tính toán, dù có thể tính kiểu song song, vẫn chỉ có một kết quả duy nhất được đọc và kết quả đó tuân theo sự ngẫu nhiên khách quan. Các giá trị chồng chất, về tiên nghiệm mà nói, là không thể đọc được. Kết quả phụ thuộc nhiều hay ít vào khả năng mài dũa các thuật toán được sử dụng, hay nói rõ hơn là tùy thuộc vào thiên tài của các nhà tin học lượng tử, những người có khả năng biến những ưu việt của máy tính lượng tử thành có thể sử dụng được. Phần nào đó, đã có những kết quả nhiều hứa hẹn theo hướng này và vấn đề đọc kết quả cũng đã trở nên cũ kỹ.

Một vấn đề khác còn đáng kể hơn khiến cho việc chế tạo máy tính lượng tử gặp khó khăn chính là *hiện tượng mất kết hợp*, là tương tác của qubit với môi trường bao quanh nó, điều mà chúng ta đã thảo luận trong Chương 13. Vâng, không chỉ con mèo tuân theo sự mất kết hợp, ngay cả qubit cũng tuân theo những quá trình tổng quát làm mất đi tính kết hợp của nó. Các trạng thái thuần túy, kết hợp của qubit sẽ bị nhiễu loạn do từ trường, do tia laser vốn được thiết kế ở bên cạnh với mục đích để xử lý qubit... Điều đáng nói là những ảnh hưởng này hoặc rất khó, hoặc không thể loại trừ. Càng khó hơn là, không chỉ trạng thái của qubit riêng biệt bị mất kết hợp theo thời gian do những nhân tố môi trường, mà ngay cả khả năng vướng víu của qubit với nhau vốn có tầm quan trọng quyết định với máy tính lượng tử cũng bị giảm đi, thậm chí mất hẳn. Từ đó xuất hiện nhiệm vụ, chính xác hóa việc xử lý từng qubit riêng với yếu tố bên ngoài sao cho có thể duy trì thời gian kết hợp đặc trưng càng lớn càng tốt. Hoàn toàn độc lập với kiểu nhiễu loạn "tự gây

nên" này, ta còn buộc phải tính đến ảnh hưởng nhiệt của môi trường. Người ta cho rằng, các máy tính lượng tử trong tương lai chỉ có thể hoạt động ở nhiệt độ rất thấp.

Ngoài những lý do đã kể ra ở trên, còn có những lý do khác, khiến cho trong khoảng thời ngắn trước mắt chưa thể thấy được máy tính với *"công nghệ qubit"* được bán ở thị trường hay được cung cấp cho từng gia đình, nhưng xa hơn một chút thì máy tính lượng tử sẽ chiếm giữ vị trí then chốt trong mọi nhánh của công nghệ thông tin. Đó không chỉ là cuộc cách mạng mang lại may mắn cho khoa học máy tính, mà thông qua khả năng đặc biệt trong phân tích các số lớn ra các thừa số nguyên tố trong khoảng thời gian chấp nhận được, nó còn giải quyết được một vấn đề rất cơ bản về mặt bảo mật, vì việc mã hóa các dữ liệu, các tin tức quan trọng và bí mật hiện nay hầu như đều được thực hiện dựa vào sự khó khăn hay sự không thể phân tích các số lớn ra các thừa số nguyên tố bằng các máy tính hiện có, kể cả các siêu máy tính.

Tuy nhiên, các máy tính tương lai, khi có thể ứng dụng các quy luật của vật lý lượng tử để bẻ khóa các tin tức đã được mã hóa, sẽ thực sự trở thành mối đe doạ đối với ngành mật mã.

Có lẽ cũng là một chút trớ trêu của số phận, khi nhận xét rằng, cũng chính là những quy luật khác thường của thế giới lượng tử, một mặt có khả năng chôn vùi ngành mật mã cổ điển, nhưng mặt khác lại tìm ra một giải pháp lịch lãm, an toàn hơn nhiều lần cho việc mã hóa thông tin: đó là mật mã lượng tử.

Mật mã lượng tử là gì?

Nói đơn giản, *mật mã* là việc *mã hóa* những thông tin, những dữ liệu quan trọng để đảm bảo bí mật khi truyền đi. Nghệ thuật truyền dữ liệu

một cách bí mật chắc chắn đã có lịch sử cả ngàn năm, từ thời cổ Hy Lạp và La Mã. Ngay từ thuở xa xưa ấy đã có nhu cầu mã hóa một số tin tức sao cho chỉ có một số nhân vật xác định đọc được mà thôi.

Cũng xin nhận xét thêm rằng, trong quá trình mã hóa tin tức, thì sự cố gắng của một người thứ ba với ý định đọc/nghe trộm tin tức và giải mã tin tức lại còn lớn hơn. Điều này đặc biệt phát triển mạnh trong những năm gần đây, nhất là liên quan đến các dữ liệu kỹ thuật, tài chính hay các thông tin quân sự, và điều đó cũng là dễ hiểu. Nhiệm vụ của người tạo mã là phải chọn mật mã một cách khéo léo như thế nào, để việc giải mã bởi người thứ ba hoặc là không có thể về mặt nguyên tắc, hoặc là ít nhất phải cần một khoảng thời gian lớn đến mức thực tế là không thực hiện được. Lẽ đương nhiên, khả năng thứ hai này dù không đảm bảo an ninh lâu dài, nhưng cũng đủ (ngay cả trong thời gian hiện nay) cho đa số các ứng dụng thực tế.

Bây giờ, trong quá trình viễn tải lượng tử đã biết giữa Alice và Bob, để khảo sát sự mã hóa còn có thêm cô nàng Eve, trong vai trò một người đọc hay nghe trộm. Trong mật mã, tin tức trong *nguyên bản* được giữ bí mật gửi đi từ Alice đến Bob với một mã khóa khéo chọn sao cho Eve, khi không có chìa khóa mã, mà chỉ Alice và Bob biết, sẽ không thể giải mã được khi đọc *bản mã hóa.*

Chất lượng của bất cứ quy trình mã hóa nào cũng nằm ở cách thức và phương pháp chuyển nguyên bản thành bản mã hóa và ngược lại. Ở điểm này, xét một cách đơn giản, các quy trình mã hóa nhiều lớp được phân thành *quy trình mã hóa đối xứng và bất đối xứng.* Để tránh dài dòng, chúng ta sẽ không dừng lại lâu ở toàn bộ lịch sử phát triển của ngành mật mã mà chỉ giới hạn xem xét những điểm quan trọng nhất trong khuôn khổ nguyên tắc và ý nghĩa của mật mã lượng tử.

Một trong những quy trình mã hóa nổi tiếng là *mật mã Caesar* – gọi theo tên vị Hoàng đế có sáng kiến tạo ra nó –, thực hiện theo *quy trình thay thế* rất đơn giản. Theo mật mã này, mỗi chữ cái trong nguyên bản được thay bằng một chữ cái khác, đứng cách nó *n* vị trí trong bảng chữ cái.

Như vậy, quy trình mã hóa theo mật mã này là dịch chuyển chữ cái đi *n* vị trí theo bảng chữ cái. Với $n = 2$, từ thông báo gốc

`"sancta simplicitas"`

ta có bản mã hóa:

`"ucpevc ukornkekvcu"`

Như chúng ta dễ thấy, kiểu mã hóa như thế này thật dễ làm, và đồng thời cũng tạo ra khả năng cho người thứ ba (như Eve) giải mã không khó khăn lắm. Tệ nhất là sau 25 phép thử ta sẽ tìm ra ngay mật mã, nghĩa là xác định được *n*, và như thế tức là đọc được bản mã hóa. Cho nên những quy trình mã hóa trước đây rất không đủ độ an toàn với nhu cầu hiện nay và nếu so sánh với các quy trình mã hóa hiện đại thì đôi khi còn ngây ngô nữa.

Qua những biến đổi và mở rộng liên tục của quy trình thay thế, khả năng giải mã của Eve đáng giận càng ngày càng khó khăn hơn, khiến cho người ta dần dần cảm thấy có thể yên tâm với việc tạo ra mật mã, tuy nhiên thách thức chiến lược đối với Eve cuối cùng vẫn chỉ là thời gian. Thông qua việc *phân tích tần số* xuất hiện của những ký hiệu hay những tổ hợp ký hiệu xác định trong bản mã hóa, ví dụ trong tiếng Đức hay xuất hiện chữ cái "e" hay tiếp đuôi "-en", người ta có thể quay lại tìm ra quy tắc thay thế không khó khăn lắm và qua đó tái tạo lại bản gốc.

Năm 1918, trong ngành mật mã xảy ra một cuộc cách mạng: Gilbert Vernam nghĩ ra một quy trình mã hóa hoàn hảo, 100% không bị mở trộm, gọi là *mật mã Vernam*. Ngay cả với những máy tính nhanh nhất của tương lai và với kỹ thuật phân tích mã hoàn thiện nhất, từ vị trí của

Eve mà nhìn thì *hoàn toàn không thể* tìm ra mật mã để đọc được bản gốc khi nghe lén bản mã hóa. Mật mã Vernam chắc chắn tuyệt đối ấy chỉ đòi hỏi duy nhất một chìa khóa tạo ra từ ký hiệu ngẫu nhiên phù hợp với độ dài bản gốc. Nguyên lý mã hóa thực hiện như sau:

1. Tạo ra một mã khóa ngẫu nhiên nhị phân (từ các số 0 và số 1) chỉ có Alice và Bob biết.
2. Nguyên bản được Alice chuyển thành bản số hóa nhị phân (tức là chỉ gồm các số 0 và số 1).
3. Alice cộng nguyên bản và mã khóa đã được nhị phân theo mođun 2: theo quy tắc chung là 0 + 0 = 0, 0 + 1 = 1, 1 + 0 = 1 và 1 + 1 = 0, trong đó phần dư bỏ đi. Kết quả phép cộng chính là bản mã hóa.
4. Bản mã hóa được Alice chuyển đến cho Bob. Kênh truyền thông tin không cần tiêu chuẩn an toàn, có thể là một đường truyền tin công cộng (điện thoại, Internet, fax...), bởi vì nếu không có mã khóa nhị phân thì bản mã hóa đối với người thứ ba chỉ thuần túy là một dãy số ngẫu nhiên không chứa đựng bất cứ một mảy may thông tin nào.
5. Bob lại cộng mã khóa ngẫu nhiên lần thứ hai với bản mã hóa theo mođun 2, qua đó biến đổi dãy số đã nhận được thành các chữ cái và nhận đủ bản gốc ban đầu của Alice.

Nếu toàn bộ quy trình Vernam được thực hiện chính xác, thì đối với Eve sẽ không có bất cứ một cơ hội nào từ bản mã hóa truy ra bản gốc, cho dù cô ta có thông minh đến mấy và sở hữu một máy tính lượng tử có tốc độ tính nhanh nhất đi nữa. Lý do cũng đơn giản: thông qua một mã khóa ngẫu nhiên trong đó bản mã hóa được hình thành trên cơ sở một dãy số ngẫu nhiên khác gồm 0 và 1, không thể suy ra bất cứ quy luật nào, dù phức tạp đến mấy đi chăng nữa. Từ vị thế của Eve, việc bẻ khóa mật mã này là vô vọng, điều này được chứng minh tuyệt đối về mặt toán học.

Quy trình mật mã này rất hoàn thiện khi xét về mặt lý thuyết, nhưng thật đáng tiếc, lại có vấn đề khi vận dụng trong thực tế. Vấn đề cốt lõi hiện ra ngay ở bước 1, bởi vì điều kiện mã khóa bí mật cần phải có chiều dài đúng bằng chiều dài của bản thân thông báo gây nên những khó khăn khủng khiếp. Vấn đề thứ hai là mỗi mã khóa chỉ được sử dụng một lần, vì nếu không thì không còn là *dẫy ngẫu nhiên thực sự* nữa. Vì lý do mã khóa chỉ được dùng một lần rồi sau đó sẽ tiêu hủy, mật mã kiểu Vernam còn được gọi là one-time-pad *(chắn một lần)*. Chính *vấn đề phân phối mã khóa* xuất hiện ở những thông tin dài khi ứng dụng đã dẫn đến kết quả là, trong thực tế lại hay dùng những quy trình mật mã không an toàn lắm nhưng với độ dài mã khóa ngắn hơn một cách đáng kể.

Một nhược điểm chung của các quy trình mật mã đối xứng là lập mã và giải mã đều có cùng độ phức tạp như nhau và đó là lý do để sinh ra phương pháp mật mã bất đối xứng gọi là mật mã với chìa khóa mã công khai vào những năm 70, được xem là một bước đột phá trong ngành mật mã. Trong trường hợp này, khi sử dụng mã khóa công khai, vấn đề phân phối mã khóa vốn khó chịu sẽ không còn nữa, và ngay cả những đối tác liên lạc vốn chưa gặp nhau bao giờ để thoả thuận về mật mã cũng vẫn có thể trao đổi với nhau những thông báo đã được mã hóa.

Tính bất đối xứng của quy trình mã hóa này dựa trên sự bất đối xứng do tính phức tạp của những phép toán xác định. Như ở trên đã nói, phép nhân các số nguyên tố thì chẳng có gì phức tạp, nhưng việc phân tích các số lớn ra thừa số nguyên tố lại là một bài toán tốn rất nhiều công sức và thời gian. Trong trường hợp *phân tích ra thừa số nguyên tố*, độ phức tạp của bài toán tăng với độ dài của số cần phân tích theo kiểu hàm mũ.

Nhờ đó mật mã chìa khóa công khai khi sử dụng các phép toán mã hóa bất đối xứng đủ phức tạp là cũng khá an toàn. Tuy nhiên sự an toàn

luôn bị đe doạ bởi quá trình phát triển của công nghiệp máy tính, nhất là khi nghe nói tới khả năng, dù còn tương đối xa, ra đời máy tính lượng tử.

Thật may mắn, chính ở chỗ này ta lại có một giải pháp thần kỳ: *Mật mã lượng tử,* tạo khả năng giải thoát một cách lịch lãm khỏi vấn đề phân phối mã khóa trong quy trình Vernam. Để tránh nhầm lẫn đáng tiếc, xin nhấn mạnh ngay rằng, mật mã lượng tử không phải là một quy trình mật mã mới thực sự mà chủ yếu chỉ giới hạn tạo khả năng thực hiện quy trình Vernam vốn đã hoàn thiện. Mật mã lượng tử giúp cho việc phân phối mã khóa bí mật cần thiết cho mật mã Vernam một cách hoàn toàn chắc chắn.

Quy trình mật mã lượng tử để phân phối mã khóa về đại thể có thể chia thành hai loại. Lọai thứ nhất sử dụng hệ thống một hạt tựa như những photon riêng lẻ, còn loại thứ hai mới mẻ hơn dùng các hệ hai hạt tồn tại trong mối tương quan EPR phi định xứ, chẳng hạn như ở cặp photon vướng víu về phân cực. Để cho đơn giản, sau đây ta sẽ chỉ khảo sát kỹ phương án thứ nhất.

Năm 1984, trong một văn bản sau này gọi tên theo danh tính viết tắt của hai ông là *giao thức BB84,* Charles Bennet và Gilles Brassad đã công bố một quy tắc đổi mới mà theo đó những nguyên lý khác thường của vật lý lượng tử đã được ứng dụng một cách thiên tài dưới dạng một kỹ thuật phân phối mã khóa tuyệt đối an toàn. Cũng hơi có phần trớ trêu, hiện tượng được sử dụng ở đây lại chính là hiện tượng rất điển hình của cơ học lượng tử, hiện tượng đã khiến cơ học lượng tử từng chịu lao đao với tên gọi *vấn đề phép đo:* việc suy sụp trạng thái xảy ra hoàn toàn ngẫu nhiên gây ra bởi quá trình đo. Trong trường hợp này, trạng thái lượng tử được hiểu là hướng phân cực của các photon riêng lẻ, cũng giống như các trạng thái lượng tử khác là tọa độ, xung lượng hay các thành phần spin. Tuy nhiên, dùng khái niệm phân cực bởi vì nó có ưu

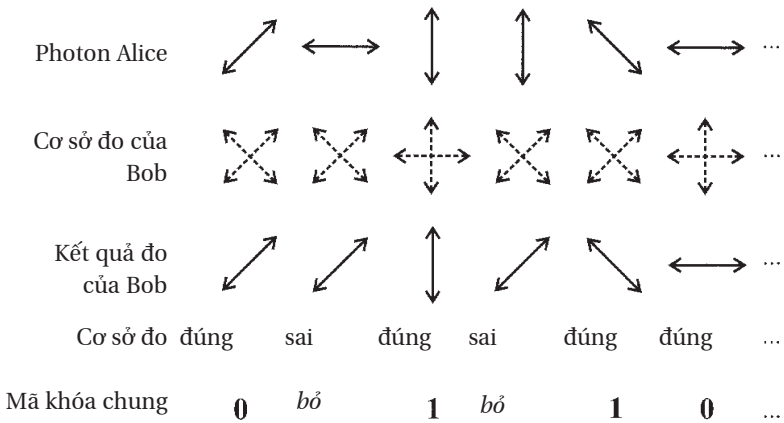
thế về mặt thực nghiệm: trong thông tin lượng tử hiện đại, thường tiến hành đo hướng phân cực của photon.

Để dùng mã khóa mật mã lượng tử, lẽ đương nhiên ta cần phân phối các giá trị bit cho các hướng phân cực đã được xác định. Trong khảo sát của chúng ta, Alice và Bob thoả thuận rằng, những photon phân cực theo hướng 0^0 và 45^0 được định nghĩa là nhận giá trị 0, nghĩa là các photon phân cực theo góc còn lại 90^0 và 135^0 sẽ nhận giá trị 1.

Quy trình mang tính cách mạng để *phân phối mã khóa* một cách hoàn hảo nhờ sự hỗ trợ lượng tử diễn ra như sau. Một ví dụ của giao thức BB84 trình bày ở hình 16.2 cho ta thấy điều này một cách rõ hơn.

1. Trước hết Alice gửi các photon riêng lẻ đến Bob, hướng phân cực của các photon này hoàn toàn ngẫu nhiên và nhận các giá trị theo một dãy số phi trật tự từ 0^0, 45^0, 90^0 hay 135^0 tính theo hướng chuẩn đã quy ước trước (trong hình 16.2 hướng chuẩn là hướng thẳng đứng).
2. Trong một định hướng độc lập với Alice và cũng hoàn toàn ngẫu nhiên, có nghĩa trên cơ sở hoặc là $0^0/90^0$, hoặc là $45^0/135^0$, Bob đo xem liệu các photon đến có đi qua các bộ lọc này hay không.
3. Tiếp theo phép đo, Bob thông báo cho Alice thông qua các kênh công khai là mình đã sử dụng hướng đo nào ($0^0/90^0$ hay $45^0/135^0$) đối với mỗi photon, nhưng không báo cho Alice kết quả đo ("có đi qua lọc phân cực hay không"). Đến lượt mình, Alice lại thông báo cho Bob biết, trong những trường hợp nào photon Alice gửi đi phân cực đúng theo cơ sở bộ lọc phân cực mà Bob đã dùng để đo. Tất cả các trường hợp khác, nghĩa là khi Bob đo trên một cơ sở khác với hướng phân cực của photon mà Alice đã gửi đi (chiếm khoảng 50%), sẽ lập tức bị loại bỏ.

Sau khi đã kết thúc toàn bộ quy trình này, cả Alice và Bob cùng sở hữu một mã khóa nhị phân ngẫu nhiên và đồng nhất, tạo thành từ dãy



Hình 16.2. Một trích đoạn ví dụ về quy trình phân phối mã khóa mật mã lượng tử.

các số 0 và 1 được sắp xếp hoàn toàn ngẫu nhiên. Nhưng do đâu mà họ hoàn toàn có thể chắc chắn rằng họ là những người duy nhất biết đến mã khóa tuyệt diệu này? Có khả năng để khẳng định hay loại trừ sự hiện diện của nhân vật nghe trộm Eve hay không? Vật lý lượng tử nói rằng: Có!

Để kiểm tra xem kênh lượng tử của mình có bị một Eve nào đó đột nhập để tìm cách đánh cắp mật mã hay một đọan thông tin nào đó hay không, có thể tiến hành so sánh mã khóa vừa mới tạo thành sau một đoạn nào đó trong toàn bộ quy trình kể trên. Bởi vì nếu Eve đột nhập vào kênh lượng tử và đo độ phân cực của photon do Alice gửi đi thì sẽ buộc phải làm nhiễu loạn mà không thể phục hồi trạng thái phân cực ban đầu của photon bị tấn công, do mỗi phép đo đều gây nên sự suy sụp trạng thái. Chỉ còn xác suất 50% để gửi tiếp đến Bob một photon đồng nhất với photon vừa bị suy sụp trạng thái. Trong một nửa số trường hợp còn lại, một hướng phân cực sai lầm sẽ được chọn rồi gửi tiếp đến Bob.

Do bản chất các quy luật vật lý của thế giới lượng tử, Eve hoàn toàn không còn khả năng sao chép lại trạng thái lượng tử của những photon do Alice gửi đi. Tại đây xuất hiện trở lại sự đúng đắn của định lý trung tâm – *Định lý không thể nhân bản*. Hậu quả là một phần tư photon do Eve gửi đi buộc phải có hướng phân cực sai. Tai họa cho Eve, và tuyệt vời cho Alice và Bob, bởi khi họ so sánh sau từng đoạn mã khóa ngẫu nhiên mới được tạo thành thì những phần ứng với photon do Eve chọn phân cực sai gửi đi sẽ bị nhận diện là có lỗi. Như vậy, Eve đã bị lộ diện. Alice và Bob biết rằng, thông tin họ chuyển và nhận không còn tuyệt đối an toàn nữa.

Trong các trường hợp khác, khi không có hoặc có rất, rất ít các yếu tố trong chuỗi được nhận diện là sai lầm thì Alice và Bob rất an tâm tin rằng họ đã tạo ra mã khóa ngẫu nhiên hoàn toàn bí mật. Cũng tự nhiên thôi: điều gì gắn với lỗi lầm sẽ bị loại bỏ và chỉ phần còn lại bí mật của mã khóa mới được sử dụng.

Với phương thức như vậy, mật mã lượng tử đã đạt được cái tối đa mà một mật mã viên có thể chờ đợi: thực hiện trong thực tế một quá trình mã hóa hoàn chỉnh không thể xâm phạm, nhờ mật mã Vernam và sự kiểm tra chắc chắn, không thoả hiệp với mọi hoạt động gián điệp.

Thật đáng lưu ý rằng, mật mã lượng tử trong thực tế là ngành công nghệ tiến xa nhất trong thông tin lượng tử. Năm 2002 công ty mới thành lập của Thụy Sĩ mang tên *id Quantique* đã giới thiệu thiết bị thương mại đầu tiên về mật mã lượng tử ứng dụng. Một công ty Mỹ khác, công ty *MagiQ* đã phát triển thành công một hệ máy "đủ chín muồi cho thị trường" dành cho việc phân phối mã khóa của mật mã lượng tử. Thời đại sử dụng có hiệu quả các đối tượng vật lý lượng tử ngộ nghĩnh và kỳ diệu đã bắt đầu từ lâu rồi, ngay khi chúng ta chưa kịp để ý.

17
Hấp dẫn lượng tử

Chúng ta cần hấp dẫn lượng tử để làm gì?

Trên cơ sở những ấn tượng hết sức tốt đẹp cả về những thành công đặc biệt về mặt lý thuyết lẫn những ứng dụng thực tế hiệu quả của vật lý lượng tử xét ở tương lai, chúng ta có quyền tin tưởng rằng, thông qua những hiểu biết về lượng tử, con người đã tiến đến rất gần những bí mật cuối cùng của tự nhiên. Rất nhiều thí nghiệm cực kỳ tinh vi và được suy diễn hết sức thông minh cho đến nay chỉ góp phần khẳng định vật lý lượng tử, và không khi nào, dù chỉ một phần, những thí nghiệm đó gây sự nghi ngờ hay bác bỏ lý thuyết ấy. Và ai mà biết được, sau viễn tải lượng tử, máy tính lượng tử và mật mã lượng tử, ta còn có thể chờ đợi những phát minh nào nữa. Tương lai còn hứa hẹn rất nhiều.

Ngay cả khi điều này có thể làm đau lòng những nhà vật lý lượng tử, ta vẫn phải nói rằng vật lý lượng tử không thể là bí mật cuối cùng của tự nhiên! Bạn sẽ tự hỏi: vì sao? Với tất cả những kiến thức tuyệt vời và lý thú mà cơ học lượng tử đã có thể đem lại cho chúng ta hoặc sẽ còn có thể đem đến cho chúng ta trong tương lai gần hay xa, mặc dù đã có những khẳng định đa dạng bằng những kiểm chứng thực nghiệm thông minh, vẫn không thể không nói rằng, ngay từ bây giờ, vật lý lượng tử đã thể hiện những giới hạn của mình. Dù được phát biểu tuyệt vời và có tác dụng hoàn hảo trong *thế giới vi mô,* nhưng vật lý lượng tử đã tỏ ra bất lực trong lĩnh vực "thế giới vĩ mô thực tiễn". Nhân đây cũng nói thêm rằng, việc đưa vào một cách nhân tạo khái niệm "thế giới vĩ mô thực tiễn" là điều đáng tiếc, bởi vì thực ra người ta chia thành thế giới vi mô, trung mô và vĩ mô *(micro*, *meso* và *macro*), nhưng trong ngôn ngữ

của cơ học lượng tử thường là nói về thế giới vi mô và vĩ mô, khiến cho thế giới trung mô *(mesocosmos)* – kích cỡ mà chúng ta quen sống – ít thấy nói đến. Nhưng thực ra, cái mà vật lý lượng tử vẫn mô tả là vĩ mô lại chính là thế giới quen thuộc này.

Trong *thế giới vĩ mô*, ở kích cỡ của các ngôi sao, các hệ hành tinh và các thiên hà, có sự thống trị của những quy luật thuộc lý thuyết tương đối rộng. Nói chung, các hiệu ứng lượng tử không đóng vai trò gì ở đây, bởi vì với các kích cỡ lớn như vậy, hấp dẫn mới là lực thống trị và do đó chỉ có lý thuyết tương đối rộng mới có thể mô tả thành công và chính xác. Hành vi của các thiên thể, những biến đổi quang học gây bởi các hiệu ứng thấu kính hẫp dẫn, sự phụ thuộc của thời gian và không gian vào các hệ quán tính cũng như các hiệu ứng tương đối tính khác đều được lý thuyết tương đối tiên đoán một cách xuất sắc. Các quan sát thiên văn cùng các thí nghiệm trên mặt đất hay gần trái đất cho đến nay đều phù hợp với những tiên đoán của lý thuyết tương đối rộng, không có một ngoại lệ nào và với một độ chính xác đầy ấn tượng. Chỉ cần kể ra một trong rất nhiều ứng dụng của lý thuyết này – *Hệ định vị toàn cầu (GPS -Global Positioning System)* là đủ để thấy độ chính xác do kiến thức về lý thuyết tương đối rộng đem lại lớn đến chừng nào.

Chừng nào mà chúng ta còn có thể chia thế giới thành thế giới vi mô và thế giới vĩ mô, như trường hợp tính toán quỹ đạo của các electron nguyên tử và xác định quỹ đạo của các thiên thể, rồi trong mỗi thế giới lại có những quy luật tự nhiên riêng chi phối, thì chừng đó chúng ta sẽ không gặp phải những xung đột lớn trong mô tả với một nền vật lý phân nhánh như thế.

Tuy nhiên, tại một số điểm xác định, hay nói chính xác hơn là trong một số phạm vi xác định của tự nhiên, chúng ta buộc phải thừa nhận

rằng, không thể đơn giản chia thành các phạm vi do vật lý lượng tử thống trị và các phạm vi do thuyết tương đối rộng thống trị được nữa. Một thí dụ nổi tiếng nhất của các đối tượng gây ra nhiều vấn đề như vậy là những cấu trúc mà do tác dụng hấp dẫn lớn khủng khiếp của nó, đến ánh sáng cũng không thể thoát ra được, đó là các *lỗ đen*. Một thí dụ khác nữa có vẻ còn hóc búa hơn là *Vụ nổ lớn nguyên thủy (Big Bang)* đầy bí hiểm. Trong những đối tượng này, quyết định đơn giản *hoặc dùng* lý thuyết tương đối rộng *hoặc dùng* cơ học lượng tử để mô tả vật lý các quá trình diễn ra ở đó là không còn thích hợp nữa, bởi vì sự tồn tại khối lượng cực lớn buộc ta phải sử dụng phương pháp khảo sát tương đối tính tổng quát, nhưng sự tập trung toàn bộ vào một không gian cực nhỏ lại liên quan đến những hiệu ứng vật lý lượng tử, nghĩa là phải sử dụng phương pháp mô tả của vật lý lượng tử. Chẳng hạn, trong trường hợp lỗ đen, với lý thuyết tương đối rộng phải tiên đoán sự tồn tại của những điểm có độ cong không-thời gian lớn vô hạn, gọi là các kỳ dị, điều mà trong quan niệm vật lý lượng tử hoàn toàn không thể chấp nhận được.

Trong những trường hợp cực hạn về mặt vật lý, như lỗ đen hay Big Bang, trong đó một khối lượng khổng lồ lại tập trung vào một kích cỡ vi mô, cần phải thống nhất các hiệu ứng của vật lý lượng tử và thuyết tương đối rộng. Nhưng tại thời điểm thống nhất hai cách mô tả hết sức khác nhau này của tự nhiên về một cách mô tả chung duy nhất, thì cả hai công trình lý thuyết phải sụp đổ vào trong nhau. Việc thống nhất một cách đơn giản hai lý thuyết, đương nhiên sẽ xuất hiện một lý thuyết chứa nhiều mâu thuẫn, mà thông qua những tiên đoán sai lầm và phi lý có thể chôn vùi ngay cả sự hữu dụng của chính mình. Như thế, sẽ xuất hiện một câu hỏi không tránh khỏi, liệu có tồn tại hay có thể tồn tại một lý thuyết vạn năng?

Liệu có một giải pháp cho xung đột lý thuyết này?

Đi tìm lời giải cho vấn đề vật lý đặc biệt hấp dẫn này – vấn đề về sự thiếu vắng một lý thuyết tối hậu về vũ trụ – đã trở thành đối tượng nghiên cứu của những nhà vật lý và những nhà toán học tài năng nhất, nổi tiếng nhất từ hơn một trăm năm nay. Thế nhưng cho đến hôm nay chúng ta vẫn chưa thể tìm hiểu hết cội nguồn của mọi vấn đề, dù đã có *Lý thuyết của tất cả (hay lý thuyết của vạn vật - Theory of every thing, viết tắt là TOE)*, như người ta vẫn thường gọi.

Tuy vậy, các nhà khoa học cũng đã nghĩ ra những tiền đề và một số trong đó tỏ ra rất hứa hẹn. Lý thuyết mang tên gọi *hấp dẫn lượng tử* đã coi sự thống nhất của *lý thuyết trường lượng tử* và *lý thuyết tương đối rộng* là mục tiêu của mình. Ở đây người ta hiểu lý thuyết trường lượng tử là một dạng vật lý lượng tử hiện đại tương đối tính, được mở rộng từ lý thuyết trường cổ điển theo hướng lượng tử hóa các trường.

Lý thuyết trường lượng tử bao hàm trong nó ba lý thuyết trường lượng tử khác nhau, mỗi lý thuyết mô tả một tương tác cơ bản: *Sắc động học lượng tử (QCD)* là lý thuyết của tương tác mạnh, tương tác thống trị giữa các quark (xem Chương 1), *Điện động lực học lượng tử (QED)* mô tả tương tác điện từ tác dụng ở khoảng cách xa hơn, và cuối cùng là tương tác thứ ba, tương tác yếu hơn được mô tả trong *Hương động lực học lượng tử* (QFD*)* ứng với tương tác điện yếu. Như vậy, trong lý thuyết trường lượng tử có sự gặp gỡ của sắc động lực học lượng tử và hương động lực học lượng tử.

Trái lại, tương tác cơ bản thứ tư – *hấp dẫn* – như chúng ta đều biết, được mô tả nhờ *lý thuyết tương đối rộng* cổ điển (theo nghĩa phi lượng tử - ND), một lý thuyết mà cho tới nay vẫn chưa thể lượng tử hóa thành công.

Như vậy, nhiệm vụ đặt ra cho những nhà vật lý hấp dẫn lượng tử là đem lại một lý thuyết trường hấp dẫn lượng tử hóa hòa hợp với lý thuyết trường lượng tử. Cho dù người ta thường nhắc nhở rằng, không ít lần khát vọng ấy đã kết thúc trong ngõ cụt, nhưng chúng ta vẫn sẽ khảo sát một số tiền đề đang tồn tại và nhiều triển vọng trong các lý thuyết hấp dẫn lượng tử khác nhau.

Hai nhóm vật lý bị nghi ngờ nhiều nhất và cũng có nhiều người ủng hộ nhất trong thuyết hấp dẫn lượng tử hứa hẹn nhiều thành công chính là *Lý thuyết dây* và *Hấp dẫn lượng tử vòng*. Bên cạnh hai nhóm lý thuyết này, còn nhiều lý thuyết khác xa vời và mờ mịt, chủ yếu là của các nhà khoa học riêng lẻ.

Sự phân biệt hai lý thuyết chủ yếu này của hấp dẫn lượng tử trước hết dựa trên điểm xuất phát khác nhau của chúng:

Lý thuyết dây khởi đầu trên cơ sở của lý thuyết trường lượng tử với ý định đưa thêm vào những nguyên lý cơ bản của thuyết tương đối rộng, tức là tích hợp tương tác hấp dẫn vào trong lý thuyết trường lượng tử. Như vậy, trong lý thuyết dây, ta bắt đầu trong kích cỡ nhỏ và làm việc một cách nhất quán từ kích cỡ nhỏ đến kích cỡ lớn.

Trái lại, điểm xuất phát của hấp dẫn lượng tử vòng là ở phía ngược lại, nghĩa là không phải xuất phát từ thế giới vi mô mà là từ thế giới vĩ mô. Lý thuyết tương đối rộng, vốn thống trị trong những kích cỡ lớn, sẽ được lượng tử hóa để trở thành một lý thuyết trường lượng tử của hấp dẫn, rồi cùng với sắc động lực học lượng tử và hương động lực học lượng tử tạo nên một lý thuyết của tất cả.

Ngay cả khi có sự phân chia như thế hay phân biệt như thế – dựa vào sự khác nhau ở điểm xuất phát và điểm kết thúc – cả hai lý thuyết đều quy về một và chỉ một lý thuyết hấp dẫn lượng tử mà thôi. Nhưng tất nhiên điều đó không đơn giản. Giữa hai lý thuyết này, xét về mặt vật lý và nguyên lý, có sự khác nhau cơ bản.

Lý thuyết dây nói lên điều gì?

Cơ sở của lý thuyết dây bắt đầu từ sự thừa nhận rằng, vật chất được tạo thành từ những sợi dây có năng lượng lớn, một chiều được xem là cơ bản và được gọi là *dây* (tiếng Anh là *string)*. Những dây này tồn tại hoặc ở dạng hở, hoặc đóng và theo lý thuyết chỉ chiếm một kích thước cực kỳ nhỏ, chúng có thể dao động theo những mode khác nhau như dây đàn vĩ cầm. Mỗi một hạt cơ bản tồn tại riêng lẻ (ví như quark-up, quark-down, electron...) được thể hiện qua một sợi dây đang dao động theo một mode xác định.

Điều đặc biệt đem lại hy vọng cho lý thuyết này là đã thay *những hạt điểm* không kích thước trong mô hình chuẩn của vật lý hạt cơ bản bằng một dây một chiều, chiếm một thể tích vô cùng nhỏ nhưng hữu hạn. Một tiền đề thoạt đầu nghe rất trừu tượng nhưng trong khuôn khổ chung là cần thiết của lý thuyết dây là, không gian không còn là ba chiều như chúng ta vốn quen thuộc nữa, mà được mở rộng đến 26 chiều. Dây dao động trong không gian đó. Cho dù điều này nghe có vẻ khác thường và chưa sáng tỏ lắm, nhưng quả thật là ấn tượng khi việc thừa nhận các giả thiết như thế bỗng nhiên làm cho sự thống nhất của lý thuyết trường lượng tử và lý thuyết tương đối rộng trở nên có thể.

Cho dù đạt được những thành công vang dội ban đầu, lý thuyết dây vẫn chứa đựng một số tiên đoán tiếc rằng không đứng vững, được xem như những khiếm khuyết và do đó sau đây ta sẽ tìm cách loại trừ. Trong dạng mở rộng liên quan đến nguyên lý *siêu đối xứng* (SUSY) có thể loại trừ một sự phi lý như vậy, như đã được nêu ra từ những năm 80. Điều này xảy ra khi khảo sát sự đối xứng giữa các hạt cơ bản *fermion* (các hạt có spin bán nguyên) và các *boson* (hạt có spin nguyên), khi đó lý thuyết siêu đối xứng đã tiên đoán rằng, bên cạnh các hạt đã biết còn có các hạt mới siêu đối xứng gọi là *hạt bạn*- SUSY (SUSY-*Partner*) (ví dụ

bên cạnh quark có các *s*quark, bên cạnh electron có *s*electron...). Tổng hợp những nghiên cứu đó gọi là *lý thuyết siêu dây,* với tiền đề chỉ còn 9 chiều thay vì 26 chiều như ban đầu ở lý thuyết này và tạo nên một lý thuyết vật lý đầu tiên có thể ứng dụng vào thực tế.

Sau đó, người ta lại chỉ ra rằng, có ít nhất năm loại lý thuyết siêu dây khác nhau và sau khi phân tích những mối quan hệ phức tạp hơn, người ta cho rằng đó chỉ là những mặt riêng rẽ của một lý thuyết bao quát hơn: *Lý thuyết M*. Tuy nhiên, sự trình bày lý thuyết M như vậy cho đến hôm nay vẫn còn là một câu đố lớn và đặt ra những thách thức khắc nghiệt nhất cho những nhà lý thuyết siêu dây hiện nay.

Tùy theo "mức độ lạc quan" riêng của từng nhà lý thuyết siêu dây mà xác suất phát hiện thành công lý thuyết M trong khoảng thời gian trước mắt được xem là rất cao hay rất thấp. Vấn đề lớn nhất cho tới nay của lý thuyết siêu dây, vốn được xem là thành công, dường như là tính chất phụ thuộc vào nền tảng của nó, tức là phụ thuộc vào không thời gian. Chính điểm yếu này của lý thuyết dây đã được lý thuyết cạnh tranh với nó là lý thuyết hấp dẫn lượng tử vòng, khắc phục rất ngoạn mục.

Hấp dẫn lượng tử vòng nói lên điều gì?

Hấp dẫn lượng tử vòng là lý thuyết trẻ trung hơn trong hai lý thuyết hấp dẫn lượng tử được khảo sát ở đây và dựa trên cơ sở là hai nguyên lý chính của lý thuyết tương đối rộng, đó là nguyên lý không phụ thuộc nền và nguyên lý bất biến đồng phôi.

Nguyên lý *không phụ thuộc nền* của một lý thuyết vật lý được hiểu là hình học của không-thời gian không cố định mà tiến triển theo thời gian, thay vì xem nó là một cái nền tĩnh, trên đó diễn ra các quá trình vật lý một cách "nhân tạo". Nghĩa là, hình học của không-thời gian ở

thang vi mô không tĩnh, mà luôn luôn động. Đấy chính là điều mà lý thuyết siêu dây, một lý thuyết phụ thuộc nền, đã không đề cập đến.

Còn nguyên lý *bất biến đồng phôi* thì nói rằng, có thể lựa chọn một tập hợp bất kỳ các tọa độ để mô tả không-thời gian và viết các phương trình. Không hề có những hệ tọa độ được ưu tiên nào để mô tả không thời gian.

Từ hai nguyên lý cơ bản này, thông qua những tính toán hết sức phức tạp, người ta đã suy ra cấu trúc của không-thời gian, cấu trúc được lượng tử hóa và xuất hiện những đơn vị gián đoạn. Tên của lý thuyết này – hấp dẫn lượng tử vòng, – liên quan tới sự thừa nhận có tồn tại những cái vòng nhỏ nhất của không-thời gian.

Trong hấp dẫn lượng tử vòng, *trạng thái lượng tử của không gian* được mô tả qua một cấu trúc được gọi là *mạng spin*, hình thành bởi các nút và các đường. Thể tích cơ bản tạo nên mạng spin là luôn luôn xác định qua một giá trị độ dài xác định được gọi là *chiều dài Planck* (xem 17.8). Số các thể tích cơ bản khả dĩ được xác định qua độ lớn của chiều dài Planck và do đó bị giới hạn, trong đó thể tích nhỏ nhất được quy định bởi *lập phương chiều dài Planck*.

Tuy vậy, trong hấp dẫn lượng tử vòng không chỉ không gian đóng vai trò hạt nhân, mà cả thời gian cũng có cấu trúc gián đoạn, đoạn nhỏ nhất (tức lượng tử thời gian) gọi là *thời gian Planck* (xem 17.9) tương tự như chiều dài Planck nói ở trên. Như vậy, một thời gian Planck thể hiện khoảng thời gian có ý nghĩa vật lý nhỏ nhất.

Sự phát triển theo thời gian của hình học không gian bây giờ được xác định qua *trạng thái lượng tử của không-thời gian*. Bằng cách mở rộng trạng thái lượng tử của không gian qua chiều của thời gian, từ mạng spin sẽ xuất hiện cái gọi là *bọt spin*. Khi đó, đường của mạng spin sẽ phát triển thành các mặt hai chiều (có diện tích - ND) và các nút thì trở thành các đường của bọt spin.

Bên cạnh sự thống nhất lý thuyết tương đối rộng với lý thuyết trường lượng tử như một bắt buộc, thành tích lớn lao của lý thuyết hấp dẫn lượng tử này trước hết nằm ở chỗ nó độc lập với nền và ở chỗ, khác với lý thuyết siêu dây, nó hoàn toàn không cần phải thừa nhận phải bổ sung thêm các chiều không gian.

Một tiên đoán phụ, nhỏ thôi, nhưng rõ ràng là có ý nghĩa của lý thuyết hấp dẫn lượng tử vòng là nó cho phép thay đổi tiên đề cốt lõi của thuyết tương đối hẹp cho rằng tốc độ ánh sáng là hằng số tuyệt đối trong chân không bằng giả thiết tốc độ ánh sáng có thể lớn hơn một chút đối với những photon có năng lượng cực cao. Người ta cho rằng đó là một giả thiết khá táo bạo.

Giữa các lý thuyết hấp dẫn lượng tử có những điểm chung không?

Mặc dù hai lý thuyết vừa khảo sát ở trên khác nhau rất lớn, nhưng thật may mắn là chúng lại phù hợp với nhau ở một số điểm cốt lõi. Điều đáng lưu ý trước hết, cho dù chúng có điểm xuất phát khác nhau và cách mô tả vật lý khác nhau, nhưng trong đa số các trường hợp chúng lại cho chúng ta cùng một lời giải.

Cả hai lý thuyết đều sử dụng vòng, mặc dù khi khảo sát chi tiết thì chúng lại sử dụng những phương pháp hết sức khác nhau, trong một trường hợp thì đấy là những "dây năng lượng" dao động, còn trong trường hợp khác đó lại là vòng không gian rất phức tạp về mặt toán học và khó hình dung.

Thứ nữa, cả lý thuyết siêu dây và hấp dẫn lượng tử vòng đều dự báo về cùng một kích cỡ xác định mà ở đó các hiệu ứng hấp dẫn lượng tử giữ vai trò thống trị. Điều đáng ngạc nhiên là ý tưởng về một kích thước

xác định với ý nghĩa như vậy đã được chính Max Planck nói tới từ năm 1899 và đó chính là lý do vì sao ta gọi kích cỡ này là *thang Planck*. Như chúng ta rồi sẽ thấy, thành tựu này quả thật là thần kỳ, bởi vì lượng tử tác dụng Planck, vốn tương đối dễ suy ra, vào lúc đó vừa chưa được chính thức đưa vào hệ thống kiến thức vật lý lại vừa chưa được xác định chính xác về giá trị. Lại càng gây ấn tượng mạnh hơn nữa là độ chính xác cao mà Planck đã tiên đoán kích cỡ của thang này ngay từ trước giờ khai sinh của lý thuyết lượng tử.

Những *đơn vị Planck* cơ bản xuất hiện ở đây phản ánh kết quả phối hợp giữa các hiệu ứng lượng tử và hiệu ứng tương đối tính. Đơn vị của chiều dài Planck nêu ở trên biểu diễn độ dài nhỏ nhất mà ở đó có thể xuất hiện các vấn đề vật lý. Từ những suy nghĩ cơ bản, nó cho biết một lỗ đen có thể nhỏ như thế nào để tính xác định về tọa độ của nó không mâu thuẫn với hệ thức bất định Heisenberg (theo quan điểm tương đối tính nghiêm ngặt một kỳ dị có kích thước bằng không). Bán kính giới hạn mà một đối tượng có khối lượng *m* cần phải đạt tới để trên bề mặt của nó tốc độ cần thiết để thoát ra được bằng chính tốc độ ánh sáng – điều kiện để vật trở thành lỗ đen, đã được Karl Schwarzschild (1873-1916) xác định là:

$$r = \frac{2\gamma m}{c^2} \tag{17.1}$$

trong đó g là hằng số hấp dẫn: $\gamma = 6{,}673 \,.\, 10^{-11}\ m^3/(kg\ s^2)$. Bán kính này được gọi là *bán kính Schwarzschild* để tôn vinh nhà khoa học đã tìm ra nó.

Câu hỏi dẫn đến chiều dài Planck bây giờ sẽ có dạng: một đối tượng khối lượng *m* có thể lấy một kích thước tối thiểu bằng bao nhiêu để cho bán kính Schwarzschild của nó không lớn hơn độ bất định về tọa độ của nó, bởi vì nếu không thì sẽ mâu thuẫn với hệ thức bất định Heisenberg.

Chúng ta hãy hình dung hệ thức bất định ở trường hợp giới hạn: Giả sử ta có một đối tượng vật lý vô cùng nhỏ, có tốc độ v nhỏ đến mức có thể bỏ qua và xem vật gần như ở trạng thái nghỉ, đồng thời vật định xứ như có thể, khi đó giữa xung lượng p của nó và độ bất định về tọa độ x_{min} có hệ thức:

$$p_{min} = \frac{\eta}{x_{min}} \tag{17.2}$$

Theo *sự tương đương giữa năng lượng và khối lượng*, ta có:

$$E = mc^2 = p \,.\, c \tag{17.3}$$

Thay (17.2) vào (17.3) ta được:

$$mc^2 = \frac{\eta}{2x_{min}} c \tag{17.4}$$

Sau khi giải theo m ta có:

$$m = \frac{\eta}{2x_{min}c} \tag{17.5}$$

Thay m từ (17.5) vào công thức của *bán kính Schwarzschild* ta sẽ được:

$$r = \frac{2\gamma}{c^2}\frac{\eta}{2x_{min}c} = \frac{\eta\gamma}{x_{min}c^3} \tag{17.6}$$

Rồi đặt $r = x_{min}$ cuối cùng ta sẽ nhận được

$$x_{min}^2 = \frac{\gamma\hbar}{c^3} \tag{17.7}$$

Hệ thức này xác định kích thước nhỏ nhất có thể của một đối tượng vật lý.

Đối với *chiều dài Planck* ta có

$$l_{Planck} = \sqrt{\frac{\gamma.\eta}{c^3}} \approx 1{,}16.10^{-35}\,m \tag{17.8}$$

Đó là một kích thước nhỏ đến mức khó hình dung nổi đối với sức tưởng tượng của con người. Nhưng theo thuyết hấp dẫn lượng tử, không phải sức tưởng tượng của con người bất lực, mà chính tự nhiên bất lực, vì nó không cho phép tồn tại một cấu trúc vật lý nào nhỏ hơn độ dài Planck vừa nói tới.

Tuy nhiên, như đã nhắc tới từ trước, trong hấp dẫn lượng tử không chỉ không gian là cốt lõi: mà cả thời gian nữa. Từ khoảng thời gian mà ánh sáng phải mất để đi được quãng đường bằng chiều dài Planck, ta có thể tính ra thời gian nhỏ nhất có thể, gọi là *thời gian Planck*:

$$t_{Planck} = \sqrt{\frac{\gamma . \eta}{c^5}} \approx 5{,}392.10^{-44}\, s \qquad (17.9)$$

Hấp dẫn lượng tử vẫn còn là vật lý hay đã thành triết học?

Cần phải thừa nhận rằng, những giả thiết rất sáng tạo trong lý thuyết siêu dây hay trong hấp dẫn lượng tử vòng và những điều tương tự nghe không gần gụi cho lắm với thực tế, không phù hợp với trực giác con người và thậm chí nói xa xôi thì cũng khó chấp nhận theo sự hiểu biết thông thường. Có thật không, nếu nói rằng vật chất được tạo thành từ những "sợi năng lượng", những sợi dao động trong một không thời gian 10 chiều? Hay là vũ trụ được xây nên từ những bọt spin, cấu trúc có từ những vòng không gian nhỏ xíu? Ngay cả khi xem đó là chất liệu cho khoa học viễn tưởng thì vẫn có thể nói rằng những lý thuyết này có tác dụng hơi khuếch đại. Các bạn sẽ nghĩ rằng đấy là những giả thiết táo bạo, ngây thơ và thiếu chín chắn, phải không?

Vấn đề khiến cho những lý thuyết này rơi vào tình trạng nghi hoặc hay mâu thuẫn cũng thật hoàn toàn đơn giản: ta đang bàn đến những lý thuyết với những giả thiết và những dự báo mà ít nhất là cho đến

thời điểm này vẫn chưa thể kiểm chứng trực tiếp được. Tiên đoán về dạng hạt của không thời gian ở kích cỡ 10^{-35} m không đem lại gì nhiều cho một nhà vật lý thực nghiệm nhiều tinh thần phê phán, bởi vì làm sao nhà vật lý đó có thể kiểm tra lại bất cứ điều gì ở cái kích thước quá nhỏ nhoi ấy, bởi vì ngay cả kích thước nhỏ bé cỡ nguyên tử cũng vẫn lớn hơn độ dài Planck "bí hiểm" kia tới 10^{20} (!) lần. Theo một số đánh giá, người ta chỉ có thể kiểm tra lại những tiên đoán của lý thuyết siêu dây bằng những máy gia tốc hạt có kích thước lớn đúng như hệ mặt trời của chúng ta hay còn lớn hơn nữa. Khả năng để kiểm tra lý thuyết như thế hầu như là không hiện thực trong thời gian trước mắt.

Cho nên, cũng không ngạc nhiên gì, nếu một số đông giới chuyên môn vật lý, vì những lý do tương tự như những điều vừa trình bày ở trên, quay lưng lại với lý thuyết hấp dẫn lượng tử và xem nó chỉ như một sự tưởng tượng tầm phào, phần nhiều là siêu hình hay triết học, chứ không phải là khoa học tự nhiên đích thực.

Tất nhiên, những phê phán khắc nghiệt như vậy, do những nguyên nhân dễ thấy, không phải là hoàn toàn bất công, nhưng tôi muốn ngay ở chỗ này chỉ ra một sự tương tự liên quan tới câu hỏi trước đây về sự tồn tại hay không tồn tại của những biến số ẩn cũng không thể đo trực tiếp được. Nếu câu chuyện đáng ngạc nhiên về sự chứng minh rõ ràng cho khả năng không thể tồn tại của những biến số ẩn định xứ thực đã dạy ta một điều gì đó, thì đó chính là, ngay từ đầu ta không thể đơn giản nói trước, cái gì đối với *thực nghiệm* là có thể và cái gì là không. Biến số ẩn định xứ thực ngay về mặt thuần túy nguyên tắc đã lẩn tránh bất cứ bằng chứng trực tiếp nào và đó là sự kiện không có gì phải nghi ngờ, nhưng ngay cả điều đó cũng không có nghĩa rằng, chúng là không thể về mặt khoa học thực nghiệm, tức là sự tồn tại của chúng không được khẳng định hay bác bỏ bằng thực nghiệm.

Tương tự, tôi nghĩ rằng, những tiên đoán của lý thuyết hấp dẫn lượng tử cũng phải được xem xét như vậy, bởi vì ta không thể nói trước xem thực nghiệm có thể bao quát những gì chừng nào ta chưa đo được cụ thể. Ngay cả đối với những sự vật mà thực nghiệm vẫn chưa bao quát được, ta cũng không bao giờ *có thể* nói rõ giới hạn của thực nghiệm là ở đâu.

Cho nên, càng đáng vui mừng hơn khi hấp dẫn lượng tử vòng đưa ra một số tiên đoán có thể kiểm tra được trong tương lai gần. Chẳng hạn, như tiên đoán mà theo đó, do tính gián đoạn của không-thời gian, những lượng tử gamma năng lượng rất cao lan truyền nhanh hơn những lượng tử năng lượng thấp trong mạng lưới spin, sắp tới có thể sẽ kiểm tra được bằng những phép đo từ vệ tinh của trái đất với độ chính xác cần thiết. Thiết bị GLAST *(Gamma-ray Large Area Space Telescope)* từ năm 2006 sẽ thực hiện những phép đo như vậy và có thể cung cấp bằng chứng khẳng định hay bác bỏ hấp dẫn lượng tử vòng. Việc đánh giá một lý thuyết vật lý tao nhã như vậy và nhiều hứa hẹn như vậy liệu có thể mô tả chính xác tự nhiên hay chỉ là sự tưởng tượng của những người tìm ra nó, đó là khả năng, là nhiệm vụ của và chỉ của thực nghiệm mà thôi. Thực nghiệm chính là ngọn lửa thử vàng.

Mục tiêu vĩ đại của vật lý, hay nói một cách khác – "cái ly thánh của vật lý", đó chính là tìm ra một lý thuyết cho tất cả, và khi theo đuổi mục tiêu này ta thường đi vào các ngõ cụt. Về khía cạnh đó, tôi muốn nhắc lại lời của anbert Einstein trong lá thư ông gửi cho David Bohm:

> *"Nếu thượng đế đã sáng tạo ra thế giới này thì mối bận tâm chủ yếu của Ngài chắc không phải là sẽ tạo ra như thế nào để chúng ta có thể hiểu được thế giới đó"*[40]

---

[40] A. Calaprice: Einstein sagt - Zitate, Einfälle, Gedanken (Piper, 2004), trang 184.

Đối với tôi, đó dường như là một điều khẳng định. Điều khẳng định mà mỗi nhà vật lý đều muốn cảm thấy. Kiến thức hiện đại của chúng ta về bản chất của vũ trụ cho đến hôm nay càng kỳ diệu và phong phú, thì chúng ta càng ý thức sâu sắc hơn bao giờ hết, rằng còn lâu lắm chúng ta mới đạt đến cái đích cuối cùng. Câu đố vĩ đại nhất vẫn còn chưa được phát hiện và đang đứng trước chúng ta, chờ đợi được nghiên cứu. Lý thuyết cho tất cả đang giấu mình nằm sâu, đang ẩn tàng trong chính bản chất mê đắm, tinh xảo và cao cả của tự nhiên.

Có lẽ chỉ có một điều, một mà ta chắc chắn có thể nói là: tương lai của hấp dẫn lượng tử là **tương đối bất định.**

Lời cuối sách

Sau khi đã cùng các bạn thâm nhập ít nhiều vào thế giới lượng tử trong một chuyến đi ngắn qua thế giới vi mô và thế giới vĩ mô, ở những dòng cuối cùng này tôi muốn nêu lên hai điểm.

Trước hết, về hình thức và phương pháp trình bày của cuốn sách. Như các bạn thấy, mỗi đoạn trong từng chương của cuốn sách này đều bắt đầu bằng một câu hỏi riêng biệt.

Cách viết này không tránh khỏi một nguy cơ liên quan đến thói quen hiểu biết trong nhà trường, khi khơi dậy ấn tượng rằng, "trên thế giới này chỉ có một số hữu hạn những câu hỏi, với mỗi câu hỏi lại có sẵn một câu trả lời đúng và tất cả những điều đó chúng ta đều có thể học được".

Bất chấp nguy cơ này, tôi vẫn luôn hy vọng rằng, ai cũng có thể nhận thấy điều đó là không đúng, đặc biệt là trong vật lý lượng tử! Có một thực tiễn không cần tranh cãi là, cho đến nay, thời đại mà phần lớn sản phẩm xã hội của những nước công nghiệp hiện đại đều dựa trên những hiểu biết phát triển rất xa trong lĩnh vực thế giới vi mô (kỹ thuật bán dẫn, microprocessor, laser, công nghệ nano…), chúng ta đã thu được một lượng rất lớn các kiến thức chắc chắn liên quan đến các cơ chế lượng tử.

Tuy nhiên, giữa các nhà vật lý lượng tử hiện đại vẫn tồn tại một sự khác biệt lớn khi giải thích ý nghĩa vật lý của các hệ hình thức luận toán

học vốn không còn nhiều tranh cãi của vật lý lượng tử. Sự không thống nhất và sự đa dạng trong cách nhìn của những nhà chuyên môn, sự vắng thiếu lời giải thích nhất quán cho hệ hình thức luận cơ bản (ngay cả khi việc ứng dụng những hiện tượng lượng tử trừu tượng đang ngày càng trở nên mạnh mẽ) là những nguyên nhân cốt lõi sinh ra nhiều nghịch lý cơ học lượng tử, những nghịch lý đầy kỳ bí và gần như kéo dài vô tận.

Điều thứ hai tôi muốn nói, là bản thân tôi khó có thể được xem là nhân vật thích hợp để giải những câu đố có tính thời sự của vật lý lượng tử. Với vị trí khiêm tốn của mình, ở lứa tuổi 17-19, ngay trước khi tốt nghiệp phổ thông và chưa hề học qua vật lý ở bậc đại học, việc viết cuốn sách như thế này đối với tôi là một thách thức rất lớn. Tất cả những kiến thức mà tôi có về thế giới lượng tử đều được thu thập theo con đường tự học.

Vì vậy, tôi muốn bày tỏ lòng cảm ơn đối với tác giả của những cuốn sách, những bài báo đã giúp tôi thâm nhập vào thế giới thần thoại của vật lý lượng tử, một thế giới mà nếu không có những tác giả đó đối với tôi là hoàn toàn đóng kín. Cách dẫn dắt, cách giải thích thường bắt nguồn từ những ý tưởng của riêng tôi, cho dù đôi khi cũng có ý tưởng lâm vào ngõ cụt. Dù sao tôi luôn cảm thấy thách thức này như một công việc hấp dẫn và quyến rũ cần trân trọng, và tôi hy vọng phần nào sự quyến rũ đó đã được đưa lên mặt giấy. Tôi cũng cầu mong một thái độ khoan dung của độc giả nếu ở chỗ này hay chỗ khác vẫn còn những nhầm lẫn.

Ở đây, tôi cũng muốn bầy tỏ lòng biết ơn chân thành đối với tất cả những ai đã ủng hộ tôi bằng khả năng và mong muốn của mình, đã đứng bên tôi ở giai đoạn cuối cùng sau hai năm vất vả viết lách và ngay cả khi bản thảo đã hoàn thành. Về phía chuyên ngành vật lý, đó là Giáo sư Aris Chatzidimitriou-Dreismann (Đại học Tổng hợp Kỹ thuật

Berlin), một nhà vật lý lượng tử giàu kinh nghiệm và có kiến thức uyên bác, cũng như Tiến sĩ Erich Joos, một chuyên gia lượng tử xuất sắc và có hiểu biết rộng rãi, người bằng những bình luận rất giá trị đã mài dũa những đường nét cuối cùng của bản thảo.

Tôi cũng xin cảm ơn thầy giáo của tôi, Tiến sĩ Herbert Voss, người thầy luôn sẵn sàng giúp tôi trong thời gian ở trường Colleg Canisius, đặc biệt vì sự giúp đỡ của thầy liên quan đến chương trình LATEX 2, rất có ích cho tôi trong giai đoạn mở đầu.

Nhưng trước hết tôi muốn cảm ơn gia đình yêu quý của tôi, những người luôn ủng hộ tôi trên mọi phương diện. Đó là mẹ tôi, cha tôi, chị tôi và chú chó yêu quý của tôi, những người luôn ủng hộ tôi bằng tình yêu của mình (cho dù đôi khi cũng kèm theo cái lắc đầu lúng túng) và luôn đảm bảo cho tôi khả năng tài chính cần thiết để có được cả núi sách mà nội dung của chúng bao giờ cũng làm tôi thèm muốn.

Và tôi cũng rất muốn cảm ơn các bạn độc giả yêu quý, vì các bạn đã đọc cuốn sách này đến trang cuối cùng. Tôi hy vọng, về một mặt nào đó, đây là bài học thành công để nhập môn vào chủ đề hấp dẫn của vật lý lượng tử. Tôi cũng hy vọng cuốn sách không nằm quá xa mục tiêu này, vừa một chút giải trí, vừa một chút thách thức, lại vừa bổ ích đối với việc học tập.

Ngoài ra, tôi mong rằng, cuốn sách này sẽ để lại trong lòng bạn đọc sự say đắm và niềm hứng khởi mà tôi đã luôn cảm thấy kể từ lần tiếp xúc đầu tiên với sự kỳ bí không thể nào mô tả nổi bên bờ vực sâu của vật lý lượng tử.

Các khái niệm

Mất kết hợp: Sự biến đổi không thể đảo ngược của chồng chất các trạng thái vật lý lượng tử thông qua tương tác không tránh khỏi với môi trường xung quanh.

Quyết định luận: Bức tranh thế giới cổ điển, theo đó quá khứ cũng như sự phát triển trong tương lai của một hệ vật lý kín, thậm chí của cả vũ trụ là được xác định hoàn toàn *(Con quỷ Laplace)*.

Hiệu ứng Doppler: Từ lý thuyết về dao động và sóng, ta biết hiện tượng này. Khi nguồn sóng và vật thu sóng tiến lại gần nhau, tần số sóng sẽ lớn lên. Tần số nhỏ đi khi vật phát và thu sóng chuyển động ra xa nhau.

Hệ quán tính: Là một hệ quy chiếu trong đó mỗi vật thể giữ nguyên trạng thái chuyển động thẳng đều của mình nếu không có lực nào tác dụng lên nó (khác với các hệ quy chiếu gia tốc)

Không nhất quán (inconsistent): Một lý thuyết là không nhất quán nếu nó tự mâu thuẫn với mình.

Tức thời (instantan): Ngay lập tức, không có thời gian trễ.

Đẳng hướng: Tất cả các hướng là bình đẳng với nhau

Nhân quả: Theo nguyên lý nhân quả có mối quan hệ bắt buộc giữa nguyên nhân và kết quả.

Vật lý cổ điển: Vật lý dựa trên các quy luật của cơ học cổ điển, điện từ học, nhiệt động học, quang học… Vật lý cổ điển đứng vững đến đầu thuế kỷ 19 (khác với vật lý hiện đại)

Sóng kết hợp: Sóng với quan hệ pha xác định.

Không gian cấu hình: Không gian của tất cả các trạng thái riêng của một đối tượng lượng tử (có thể giải thích theo kiểu cổ điển), trong đó chiều không gian được xác định qua số bậc tự do. Hàm sóng cơ học lượng tử được xác định trên không gian cấu hình, chỉ trong một số trường hợp riêng, không gian cấu hình mới đồng nhất với không gian ba chiều thông thường.

Nhất quán: Một lý thuyết vật lý là nhất quán nếu nó không tự mâu thuẫn nội tại với chính nó.

Lượng tử ánh sáng (photon): Đơn vị nhỏ nhất của ánh sáng được hiểu như phần nhìn thấy của bức xạ điện từ (cũng thường được sử dụng rộng rãi cho tất cả các tần số).

Tính định xứ: Người ta nói đến tính định xứ của hai hạt A và B nếu một sự kiện bất kỳ ở A không có khả năng ảnh hưởng tới B. Khi đó A và B định xứ tách biệt với nhau.

Vĩ mô: Trong ngôn ngữ thông thường của cơ học lượng tử thì vĩ mô và mặt đối lập của vi mô. Trong kích cỡ vĩ mô, các hiệu ứng lượng tử có thể bỏ qua. Cũng theo cách hiểu thông dụng, vĩ mô là kích cỡ mà ở đó các hiệu ứng tương đối tính là quan trọng.

Vi mô: Liên quan đến những kích cỡ mà ở đó các hiệu ứng lượng tử trở nên đáng kể.

Vật lý hiện đại: Phát triển đầu thế kỷ 20, mở rộng đến các kiến thức mới về lý thuyết lượng tử và lý thuyết tương đối.

Bức xạ đơn sắc: "Ánh sáng một mầu", là bức xạ chỉ có một tần số duy nhất, cũng có nghĩa là chỉ có một bước sóng duy nhất.

Định lý không nhân bản (No-Cloning-Theorem): Một trạng thái lượng tử chưa biết không thể được nhân lên một cách hoàn hảo, tức là không có lỗi.

Lượng tử tác dụng Planck: Hằng số cơ bản của cơ học lượng tử mà giá trị số của nó là h = 6,626. 10-34 Js. Hằng số η = h/ (2ϖ) =1,055. 10-34 Js, cũng được gọi là lượng tử tác dụng Planck.

Ống nhân quang: Một bộ khuếch đại để ghi nhận chính xác bức xạ điện từ (đặc biệt ở cường độ rất nhỏ).

Lượng tử: Một lượng tử là đơn vị nhỏ nhất của một đại lượng vật lý. Chẳng hạn đơn vị nhỏ nhất của bức xạ điện từ là một photon hay một lượng tử ánh sáng.

Lý thuyết trường lượng tử: Dạng lượng tử hóa của lý thuyết trường, tạo nên từ sắc động lực học lượng tử (QCD), điện động lực học lượng tử (QED) và lý thuyết tương tác yếu.

Hấp dẫn lượng tử: Thống nhất lý thuyết trường lượng tử và lý thuyết tương đối tổng quát. Lý thuyết siêu dây và lý thuyết lượng tử vòng là hai tiền đề quan trọng nhất cho lý thuyết này.

Đối tượng lượng tử: tất cả các đối tượng được mô tả nhờ vật lý lượng tử, nghĩa là không thể chỉ mô tả như sóng cũng không thể chỉ mô tả như hạt, đều được xem là đối tượng lượng tử.

Qubit: Một hệ lượng tử bất kỳ có ít nhất hai trạng thái (ví dụ spin của một hạt hay độ phân cực của một photon).

Tiêu chuẩn thực tại: Mỗi đại lượng vật lý đều là yếu tố của thực tại vật lý nếu nó tồn tại khách quan với người quan sát và có thể đo được mà không gây nhiễu cho hệ (Định nghĩa của Einstein).

Lý thuyết tương đối tổng quát: Dạng mở rộng của lý thuyết tương đối hẹp liên quan đến hấp dẫn và các chuyển động có gia tốc, trong đó lực hấp dẫn làm cong không-thời gian bốn chiều.

Lý thuyết tương đối hẹp: Lý thuyết về không thời gian dựa trên sự hằng định của tốc độ ánh sáng cho phép loại trừ mâu thuẫn giữa cơ học cổ điển là lý thuyết điện từ.

Vật đen: Một đối tượng lý tưởng hóa, hấp phụ bất cứ sóng điện từ nào đập vào nó. Trong thực tế, một vật rỗng với một lỗ nhỏ có thể xem gần đúng như một vật đen, sao cho tia phản xạ không thể thoát ra được và bị "hấp thụ" vào miền rỗng bên trong.

Phương trình Schrôdinger: Phương trình cơ bản của cơ học lượng tử phi tương đối, mô tả tiến hóa theo thời gian của trạng thái của một hệ lượng tử thể hiện qua hàm súng y.

Spin: Một đại lượng của cơ học lượng tử tương tự như momen xung lượng vĩ mô cổ điển, có giá trị bằng bội số của H. Các hạt có spin bán nguyên được gọi là fermion. Chúng hành xử theo những quy luật đặc trưng không giống với các boson là những hạt có spin nguyên.

Mô hình tiêu chuẩn của vật lý các hạt cơ bản: Lý thuyết đã được xác lập về vật lý các hạt cơ bản, trong đó thống nhất ba tương tác hay là ba lực cơ bản (chỉ trừ hấp dẫn) và như vậy thể hiện sự thống nhất sắc động học lượng tử và lý thuyết điện yếu.

Nguyên lý chồng chất: Trong vật lý lượng tử đó là nguyên tắc theo đó mỗi tổ hợp tuyến tính tùy ý của hai trạng thái khả dĩ $\psi 1$ và $\psi 2$ cũng là một trạng thái khả dĩ $\psi = a\,\psi 1 + b\,\psi 2$. (Cơ sở: Tính tuyến tính của phương trình Schrôdinger).

Lý thuyết của mọi vật (TOE: theory of everything): Lý thuyết bao gồm cả bốn tương tác cơ bản và do đó thống nhất lý thuyết trường lượng tử và lý thuyết tương đối tổng quát vào một lý thuyết duy nhất.

Hệ thức bất định: Một nguyên lý cơ bản của vật lý lượng tử theo đó không bao giờ cả tọa độ và xung lượng của một đối tượng lượng tử đồng thời được xác định với độ chính xác tùy ý.

Biến số ẩn: Những biến số vật lý giả thiết, được gắn với một thực tại vật lý nhưng về nguyên tắc lại không thể đo được. Lý thuyết quyết định luận dựa trên sự thừa nhận về khả năng tồn tại của chúng. Sự tồn tại của những biến số ẩn thực - định xứ đã bị thực nghiệm bác bỏ.

Vướng víu: Một trạng thái thuần túy lượng tử, trong đó hai hay nhiều đối tượng lượng tử tồn tại trong những tương quan với nhau. Ví dụ, với những nguồn EPR, các hệ lượng tử vướng víu có thể được sinh ra.

Tính đầy đủ: Một lý thuyết vật lý được xem là đầy đủ khi mỗi yếu tố trong lý thuyết đều tương ứng chính xác với một phần tử trong thực tại vật lý.

Tương tác cơ bản: Bốn tương tác hay bốn lực cơ bản là mạnh, yếu, điện từ và hấp dẫn. Ba tương tác đầu đã được bao quát trong mô hình tiêu chuẩn của vật lý hạt cơ bản. Vẫn chưa thể đưa thêm vào tương tác thứ tư.

Hàm sóng: Hàm sóng cơ học lượng tử có dạng của một hàm sóng (như đã biết trong lý thuyết dao động cổ điển), là nghiệm số của phương trình Schrôdinger và cho biết trạng thái ψ của một sóng vật chất phụ thuộc như thế nào vào tọa độ và thời gian. Hàm sóng được định nghĩa trong không gian cấu hình.

Lưỡng nguyên sóng hạt: Một nguyên lý cơ bản của vật lý lượng tử, theo đó các đối tượng lượng tử sẽ thể hiện ra như sóng hay như hạt tùy thuộc vào cách bố trí thí nghiệm.

Công thức thế giới: Xem lý thuyết TOE

Ngẫu nhiên khách quan: Ngẫu nhiên cơ học lượng tử, xuất hiện do sự không tồn tại các biến số ẩn.

Ngẫu nhiên chủ quan: Ngẫu nhiên chỉ do sự tác động ngẫu nhiên của thiếu thông tin (ví dụ gieo xúc sắc, chơi sổ số…).

Đôi lời về tác giả

Tìm gặp Silvia Arroyo Camejo thật không dễ dàng chút nào. Chị Antonia Rollwage ở Tổng lãnh sự quán CHLB Đức tại Thành phồ Hồ chí Minh rất nhiệt tình giúp chúng tôi làm điều đó. Nhưng chính chị cũng thất vọng: "Đã gửi thư cho nhà xuất bản Springer nhưng không nhận được trả lời. Tìm thông tin trên mạng và qua các con đường khác cũng thế".

Trong một bài viết đăng trên tờ *Spiegel*, nhà báo Schmiederkamp chỉ nói ngắn gọn: Camejo đang học vật lý tại trường Tổng hợp Humboldt. Tôi đành sang Berlin. Đến trường Humboldt, tìm vào Trung tâm thông tin. Do nguyên tắc bí mật các dữ liệu cá nhân, cô thư ký cũng chỉ có thể vẽ đường cho tôi đến khoa Vật lý, nơi Camejo đang theo học.

Rất may mắn, chúng tôi gặp Giáo sư Michael Mueller- Preussker - Viện trưởng Viện Vật lý ngay tại văn phòng Viện, trong một ngôi nhà có kiến trúc mới lạ ở số 15 phố Newton, thuộc Adlershof - "Thành phố của khoa học, kinh tế và truyền thông". Ông là chuyên gia về các hạt cơ bản và hiện tượng học (phenomenology). Khi biết mục đích của chúng tôi, ông gõ máy tính tìm kiếm một lúc rồi nói: "Khoảng nửa giờ nữa Silvia sẽ có giờ nghỉ".

GS Preussker đánh giá: "Cô bé viết được như thế là rất giỏi. Chúng tôi giới thiệu cuốn sách này cho tất cả sinh viên. Nhưng dù sao Silvia cũng

còn thiếu cơ sở toán học, do vậy cô phải học nhiều, một cách cơ bản. Hiện Silvia đang theo chuyên ngành quang học và đang viết luận án tốt nghiệp". Như các nhà khoa học và các nhà sư phạm, đánh giá của ông thật nghiêm khắc và chặt chẽ. Và chúng tôi hiểu, đấy đã là lời khen rất lớn dành cho tác giả trẻ tuổi này.

Đúng giờ, giáo sư dẫn chúng tôi xuống giảng đường. Gặp Camejo ngay tại hành lang. Nhỏ bé và trắng trẻo hơn rất nhiều như vẫn từng thấy cô trong ảnh, và rất xinh xắn. Giới thiệu ngắn gọn về việc dịch thuật và xuất bản sách ở Việt Nam, về Nhà Xuất bản Trẻ, về việc dạy và học vật lý. Camejo tỏ vẻ rất đỗi vui mừng khi cuốn sách sắp được xuất bản ở một nước xa xôi đến thế, biết Việt Nam đẹp và có những món ăn ngon. Chúng tôi bổ sung: "Các bạn trẻ Việt Nam rất vui nhộn, hiếu khách và thường đạt thành tích cao trong các kỳ thi Olimpic quốc tế". Camejo cười lớn: "Không hiểu nếu đi thi như vậy thì tôi có được giải hay không". Chúng tôi ngỏ lời mời tác giả sang thăm Việt Nam, mọi chi phí do Tổng lãnh sự quán Đức chi trả, cô nói: "Tôi rất hạnh phúc được sang thăm Việt Nam. Nhưng mọi việc phụ thuộc vào lịch học tập và do các giáo sư quyết định".

Camejo bắt đầu viết cuốn THẾ GIỚI LƯỢNG TỬ KỲ BÍ (trong nguyên tác, cô dùng từ *ngộ nghĩnh* chứ không phải *kỳ bí)* từ năm 17 tuổi và hoàn thành bản thảo hai năm sau đó, ở tuổi 19, ngay trước khi thi tốt nghiệp trung học phổ thông. Ngay từ tuổi 11, cô bé đã muốn biết: Lỗ đen là gì?, Trái đất hình thành từ đâu?, Thế nào là thuyết tương đối?... Khi không ai có thể trả lời những câu hỏi của cô mà khiến cô thỏa mãn, cô tự tìm kiếm lời giải thích trong đủ loại sách báo tạp chí mà cô kiếm được. Mặc dù nhiều khi phải lắc đầu nghi hoặc, bố mẹ Camejo bao giờ cũng thỏa mãn mọi nhu cầu sách vở của con gái, mặc dù số tiền bỏ ra không phải là nhỏ.

Đọc xong rất nhiều sách, Camejo chợt thấy hoang mang: không biết mình có hiểu đúng những gì đã đọc hay không. Rồi cô quyết định viết

một cuốn sách, chỉ với mục đích tự kiểm tra mình. Bài kiểm tra ấy phải có người chấm chứ! Thế là cô gửi sách cho Hans Dieter Zeh, một nhà vật lý lượng tử nổi tiếng của CHLB Đức đang công tác tại trường Tổng hợp Heidelberg. Sau này Zeh nhớ lại: "Tôi vô cùng phấn khích vì một cô học sinh đã viết được những điều như thế". Ông muốn sách được xuất bản, ở một nhà xuất bản hàng đầu về các tác phẩm khoa học. Và Springer ngay lập tức đồng ý. Về bản thảo, Zeh nhấn mạnh: "Tôi chẳng phải thay đổi gì nhiều trong cuốn sách này".

Đó chính là cuốn sách ngày hôm nay đến tay bạn đọc.

Xin nói thêm một chút: Camejo không phải là con người khô cứng vì sách vở. Cô học múa ballet, vẽ tranh dầu, hay dạo chơi trong rừng cùng con chó Lissy Gassi thân thuộc, nhiều khi đạp xe hàng giờ đồng hồ để chăm sóc sức khỏe… Đặc biệt, Camejo là một tay vĩ cầm tài năng, đã hai lần đoạt giải nhất trong các cuộc thi "Thanh niên và âm nhạc"… Cộng thêm vào đó là nhịp điệu học tập, làm việc không ngưng nghỉ, cô bé có một cuộc sống phong phú, thú vị.

Hình như Camejo không quan tâm lắm đến số phận cuốn sách sau khi đã xuất bản. Nghe nói cuốn sách thuộc hàng *bestseller* cô chỉ cười. Lúc đầu, Camejo định viết "bài tự kiểm tra" trong một bộ sách gồm ba cuốn, sau cuốn lượng tử là cuốn về các hạt cơ bản và cuối cùng là cuốn về vũ trụ. "Bao giờ bạn sẽ cho xuất bản nốt hai cuốn kia?", Camejo lại cười và lắc đầu: "Chưa biết được, dù ý tưởng đã đầy đủ"."

Nghĩa là chúng ta lại tiếp tục đợi chờ.

Khi giới thiệu cuốn sách trong lần xuất bản đầu tiên đăng trên *Spiegel* số 8 năm 2006, nhà báo Dworschak có nhận xét vài dòng ở cuối bài báo của mình: *"… Tác giả đôi khi quá say sưa dấn thân vào những chỗ cầu kỳ, một số ý đôi khi được nói, khẳng định, rồi nhắc lại đôi ba lần liên tiếp nhau, có khi còn giống nhau đến cả từ ngữ… Tránh được điều đó,*

chúng ta sẽ có một cuốn sách hoàn hảo". Ngay trong Lời cuối sách của mình, chính Camejo cũng viết: "Cách dẫn dắt, cách giải thích bắt nguồn từ những ý tưởng của riêng tôi, cho dù đôi khi cũng có ý tưởng đâm vào ngõ cụt. Tôi cũng cầu mong một thái độ khoan dung của độc giả nếu ở chỗ này hay chỗ khác vẫn còn nhầm lẫn".

Dù rất cố gắng, cũng khó tránh khỏi nhầm lẫn ở chỗ này hay chỗ khác trong bản dịch và trong công tác biên tập. Chúng tôi mong nhận được sự góp ý của độc giả, của các nhà chuyên môn và xin cám ơn vì sự giúp đỡ đó.

Niềm hy vọng lớn lao nhất của chúng tôi là, học sinh sẽ học môn vật lý say mê hơn, chăm chú hơn, cảm thấy hấp dẫn hơn. Để rồi môn vật lý có vị trí xứng đáng hơn trong toàn bộ hệ thống đào tạo của chúng ta. Hay rồi chúng ta cũng sẽ có một Camejo của chính chúng ta?

Nhóm dịch giả

Mục lục

VỀ SỰ RA ĐỜI CỦA CUỐN SÁCH NÀY 5

LỜI NÓI ĐẦU 9

1. ÁNH SÁNG VÀ VẬT CHẤT 17

2. NGUỒN GỐC CỦA LƯỢNG TỬ TÁC DỤNG PLANCK 29

3. HIỆU ỨNG QUANG ĐIỆN 36

4. THÍ NGHIỆM HAI KHE 47

5. THÍ NGHIỆM HAI KHE VỚI ELECTRON 57

6. HIỆU ỨNG COMPTON 66

7. HỆ THỨC BẤT ĐỊNH HEISENBERG 77

8. SỰ SUY SỤP CỦA HÀM SÓNG 89

9. CUỘC TRANH LUẬN BOHR-EINSTEIN 104

10. MẪU NGUYÊN TỬ BOHR 122

11. PHƯƠNG TRÌNH SCHRÔDINGER 138

12. CON MÈO CỦA SCHRÔDINGER 152

13. GIẢI THÍCH HÌNH THỨC LUẬN CỦA CƠ HỌC LƯỢNG TỬ 164

14. NGHỊCH LÝ EPR 188

15. BẤT ĐẲNG THỨC BELL 205

16. NHỮNG ỨNG DỤNG HIỆN ĐẠI CỦA VẬT LÝ LƯỢNG TỬ 225

17. HẤP DẪN LƯỢNG TỬ 249

LỜI CUỐI SÁCH 265

CÁC KHÁI NIỆM 268

ĐÔI LỜI VỀ TÁC GIẢ 273

THẾ GIỚI LƯỢNG TỬ KỲ BÍ

SILVIA ARROYO CAMEJO

PHẠM VĂN THIỀU - NGUYỄN VĂN LIỄN - VŨ CÔNG LẬP dịch

Chịu trách nhiệm xuất bản:
Ts. Quách Thu Nguyệt

Biên tập:
Hải Vân

Bìa:
Bùi Nam

Sửa bản in:
Thanh Việt

Kỹ thuật vi tính:
Thanh Hà

NHÀ XUẤT BẢN TRẺ
161B Lý Chính Thắng - Quận 3 - Thành phố Hồ Chí Minh
ĐT: 9316289 - 9316211 - 8465595 - 8465596 - 9350973
Fax: 84.8.8437450 - E-mail: nxbtre@ hcm.vnn.vn
Website: http://www.nxbtre.com.vn

CHI NHÁNH NHÀ XUẤT BẢN TRẺ TẠI HÀ NỘI
20 ngõ 91, Nguyễn Chí Thanh, Quận Đống Đa - Hà Nội
ĐT & Fax: (04) 7734544
E-mail: vanphongnxbtre@ hn.vnn.vn

CÔNG TY TNHH SÁCH ĐIỆN TỬ TRẺ (YBOOK)
161B Lý Chính Thắng, P.7, Q.3, Thành phố Hồ Chí Minh
Điện thoại: (08) 35261001 - Fax: (08) 38437450
Email: info@ybook.vn
Website: www.ybook.vn

SILVIA ARROYO CAMEJO

Silvia Arroyo Camejo: Sinh năm 1986 ở Berlin. Từ ngày còn bé đã say mê những câu hỏi về sự ra đời của vũ trụ và cấu trúc của vật chất. Năm 2005, cô tốt nghiệp Trung học Phổ thông tại trường Colleg Canisius và từ tháng mười năm đó theo học Vật lý tại trường Tổng hợp Humboldt- Berlin, nơi cô chuẩn bị nhận bằng Bachelor.

Trước hết, Silvia quan tâm đến những lĩnh vực của Vật lý hiện đại, đặc biệt Lý thuyết Trường Lượng tử và Lý thuyết Tương đối Tổng quát cũng như sự thống nhất đầy khó khăn của chúng.

THẾ GIỚI LƯỢNG TỬ KỲ BÍ

Được viết bởi một tài năng trẻ đặc biệt ngay trước kỳ thi tốt nghiệp phổ thông trung học. Cuối cùng cuốn sách này đã lấp đầy khoảng trống giữa một bên là các ấn phẩm khoa học đại chúng không hề có công thức và bên kia là tài liệu học tập, nghiên cứu chứa đầy toán học cao cấp.

Tác giả chỉ mới 19 tuổi, với công cụ toán học trong trường phổ thông, đã dẫn dắt độc giả đi vào những nguyên lý của Vật lý Lượng tử. Cô đã giúp chúng ta có một cái nhìn sâu sắc về thế giới vi mô, lĩnh vực hết sức quyến rũ của những hạt nhỏ nhất mà phương thức hành xử của chúng về nguyên tắc khác với những gì mà ta vẫn chờ đợi trong thế giới thông thường.

"Một cuốn sách... như tôi tự mong ước cho mình vào năm tôi 17 tuổi."

— Silvia Arroyo Camejo

"Với niềm vui sướng và sự say mê lớn lao, tác giả đã giải thích những cơ sở của vật lý lượng tử hiện đại một cách đặc biệt chính xác về mặt vật lý."

— Giáo sư Reinhold A. Bertlmann

"Một cuốn sách gây ngạc nhiên của một tác giả đặc biệt khác thường! Trong mỗi trang sách, chúng ta có thể nhận thấy niềm hứng khởi tác giả dành cho những câu hỏi bí ẩn về sự huyền hoặc của thế giới vi mô."

— Giáo sư H. Dieter Zeh

SKURRILE QUANTENWELT by Silvia Arroyo Camejo
Copyright@ Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006
Springer is a part of Springer Science + Business Media
All Rights Reserved