

Cơ học lượng tử

1

Cơ học lượng tử là một trong những lý thuyết cơ bản của vật lý học. Cơ học lượng tử là phần mở rộng và bổ sung của cơ học Newton (còn gọi là cơ học cổ điển). Nó là cơ sở của rất nhiều các chuyên ngành khác của vật lý và hóa học như vật lý chất rắn, hóa lượng tử, vật lý hạt. Khái niệm lượng tử để chỉ một số đại lượng vật lý như năng lượng (xem Hình 1) không liên tục mà rời rạc.

Cơ học lượng tử là một lý thuyết cơ học, nghiên cứu về chuyển động và các đại lượng vật lý liên quan đến chuyển động như năng lượng và xung lượng, của các vật thể nhỏ bé, ở đó lưỡng tính sóng hạt được thể hiện rõ. Lưỡng tính sóng hạt được giả định là tính chất cơ bản của vật chất, chính vì thế cơ học lượng tử được coi là cơ bản hơn cơ học Newton vì nó cho phép mô tả chính xác và đúng đắn rất nhiều các hiện tượng vật lý mà cơ học Newton không thể giải thích được. Các hiện tượng này bao gồm các hiện tượng ở quy mô nguyên tử hay nhỏ hơn (hạ nguyên tử). Cơ học Newton không thể lý giải tại sao các nguyên tử lại có thể bền vững đến thế, hoặc không thể giải thích được một số hiện tượng vĩ mô như siêu dẫn, siêu chảy. Các tiên đoán của cơ học lượng tử chưa bao giờ bị thực nghiệm chứng minh là sai sau một thế kỷ. Cơ học lượng tử là sự kết hợp chặt chẽ của ít nhất ba loại hiện tượng mà cơ học cổ điển không tính đến, đó là: (i) việc lượng tử hóa (rời rạc hóa) một số đại lượng vật lý, (ii) lưỡng tính sóng hạt, và (iii) vướng lượng tử.

Trong các trường hợp nhất định, các định luật của cơ học lượng tử chính là các định luật của cơ học cổ điển ở mức độ chính xác cao hơn. Việc cơ học lượng tử rút về cơ học cổ điển được biết với cái tên nguyên lý tương ứng.

Cơ học lượng tử được kết hợp với thuyết tương đối để tạo nên cơ học lượng tử tương đối tính, để đối lập với cơ học lượng tử phi tương đối tính khi không tính đến tính tương đối của các vật thể. Ta dùng khái niệm cơ học lượng tử để chỉ cả hai loại trên. Cơ học lượng tử đồng nghĩa với vật lý lượng tử. Tuy nhiên vẫn có nhiều nhà khoa học coi cơ học lượng tử có ý nghĩa như cơ học lượng tử phi tương đối tính, mà như thế thì nó hẹp hơn vật lý lượng tử.

Một số nhà vật lý tin rằng cơ học lượng tử cho ta một mô tả chính xác thế giới vật lý với hầu hết các điều kiện khác nhau. Dường như là cơ học lượng tử không còn đúng ở lân cận các hố đen hoặc khi xem xét vũ trụ như một toàn thể. Ở phạm vi này thì cơ học lượng tử lại mâu thuẫn với lý thuyết tương đối rộng, một lý thuyết về hấp dẫn. Câu hỏi về sự tương thích giữa cơ học lượng tử và thuyết tương đối rộng vẫn là một lĩnh vực nghiên cứu rất sôi nổi.

Cơ học lượng tử được hình thành vào nửa đầu thế kỷ 20 do Max Planck, Albert Einstein, Niels Bohr, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger, Max Born, John von Neumann, Paul Dirac, Wolfgang Pauli và một số người khác tạo nên. Một số vấn đề cơ bản của lý thuyết này vẫn được nghiên cứu cho đến ngày nay.

Mô tả lý thuyết

Có nhiều phương pháp toán học mô tả cơ học lượng tử, chúng tương đương với nhau. Một trong những phương pháp được dùng nhiều nhất đó là lý thuyết biến đổi, do Paul Dirac phát minh ra nhằm thống nhất và khái quát hóa hai phương pháp toán học trước đó là cơ học ma trận (của Werner Heisenberg) và cơ học sóng (của Erwin Schrödinger).

Theo các phương pháp toán học mô tả cơ học lượng tử này thì trạng thái lượng tử của một hệ lượng tử sẽ cho thông tin về xác suất của các tính chất, hay còn gọi là các đại lượng quan sát (đôi khi gọi tắt là quan sát), có thể đo được. Các quan sát có thể là năng lượng, vị trí, động lượng (xung lượng), và mô men động lượng. Các quan sát có thể là liên tục (ví dụ vị trí của các hạt) hoặc rời rạc (ví dụ năng lượng của điện tử trong nguyên tử hydrogen).

Nói chung, cơ học lượng tử không cho ra các quan sát có giá trị xác định. Thay vào đó, nó tiên đoán một phân bố xác suất, tức là, xác suất để thu được một kết quả khả dĩ từ một phép đo nhất định. Các xác suất này phụ thuộc vào trạng thái lượng tử ngay tại lúc tiến hành phép đo. Tuy nhiên vẫn có một số các trạng thái nhất định liên quan đến một giá trị xác định của một quan sát cụ thể. Các giá trị đó được biết với cái tên là hàm riêng, hay còn gọi là trạng thái riêng của quan sát đó.

Ví dụ, chúng ta hãy xét một hạt tự do, trạng thái lượng tử của nó có thể biểu diễn bằng một sóng có hình dạng bất kỳ và có thể lan truyền theo toàn bộ không gian, được gọi là hàm sóng. Vị trí và xung lượng của hạt là hai đại lượng quan sát. Trạng thái riêng của vị trí là một hàm sóng có giá trị rất lớn tại vị trí x và bằng không tại tất cả các vị trí khác x . Chúng ta tiến hành đo vị trí của một hàm sóng như vậy, chúng ta sẽ thu được kết quả tìm thấy hạt tại x với xác suất 100%. Mặt khác, trạng thái riêng của xung lượng lại có dạng một sóng phẳng. Bước sóng của nó là h/p , trong đó h là hằng số Planck và p là xung lượng ở trạng thái riêng đó.

Thông thường, một hệ sẽ không ở trong trạng thái riêng của bất kỳ quan sát nào mà chúng ta đang quan tâm. Tuy nhiên, nếu chúng ta đo một quan sát, hàm sóng sẽ ngay lập tức trở thành một trạng thái riêng của quan sát đó. Việc này được gọi là sự suy sập hàm sóng. Nếu ta biết hàm sóng tại một thời điểm trước khi đo đạc thì chúng ta có thể tính được xác suất suy sập vào mỗi trạng thái riêng khả dĩ. Ví dụ, hạt tự do được đề cập ở trên thường có một hàm sóng ở dạng một bó sóng có tâm là một vị trí ở x_0 nào đó, chứ không phải là trạng thái riêng của vị trí hay xung lượng. Khi ta đo vị trí của hạt, chúng ta không thể tiên đoán độ xác định của kết quả mà chúng ta sẽ thu được. Kết quả thu được có thể, chứ không chắc chắn, nằm gần x_0 mà ở đó, biên độ hàm sóng là lớn. Sau khi thực hiện phép đo xong, kết quả thu được là x , hàm sóng suy sập vào trạng thái riêng của vị trí nằm tại x .

Các hàm sóng có thể thay đổi theo thời gian. Phương trình mô tả sự thay đổi của hàm sóng theo thời gian là phương trình Schrödinger, đóng vai trò giống như định luật thứ hai của Newton trong cơ học cổ điển. Phương trình Schrödinger áp dụng cho hạt tự do của chúng ta sẽ tiên đoán tâm của bó sóng chuyển động trong không gian với vận tốc không đổi, giống như một hạt cổ điển chuyển động khi không có lực nào tác dụng lên nó. Tuy nhiên, bó sóng sẽ trải rộng ra theo thời gian, điều này có nghĩa là vị trí của hạt sẽ trở nên bất định và ảnh hưởng đến trạng thái riêng của vị trí làm cho nó biến thành các bó sóng rộng hơn không phải là các trạng thái riêng của vị trí nữa.

Một số hàm sóng tạo ra các phân bố xác suất không đổi theo thời gian. Rất nhiều hệ mà khi xem xét bằng cơ học cổ điển thì được coi là "động" nhưng lại được mô tả bằng hàm sóng "tĩnh". Ví dụ một điện tử trong một nguyên tử không bị kích thích được coi một cách cổ điển là chuyển động trên một quỹ đạo hình tròn xung quanh hạt nhân nguyên tử, trong khi đó thì cơ học lượng tử lại mô tả điện tử này bằng một đám mây xác suất đối xứng cầu tĩnh xung quanh hạt nhân (Hình 1).

Sự thay đổi của hàm sóng theo thời gian có tính ngẫu nhiên, theo nghĩa, với một hàm sóng tại một thời điểm ban đầu có thể cho một tiên đoán xác định hàm sóng sẽ như thế nào tại bất kỳ thời điểm tiếp theo. Trong phép đo lượng tử, sự thay đổi của một hàm sóng thành một hàm sóng khác không xác định và không thể đoán trước được, điều đó có nghĩa sự thay đổi đó là ngẫu nhiên.

Bản chất xác suất của cơ học lượng tử nảy sinh từ việc thực hiện phép đo: vật thể tương tác với máy đo, và hàm sóng tương ứng sẽ bị vướng. Kết quả là vật thể cần đo không còn tồn tại như một thực thể độc lập nữa. Điều này sẽ làm cho kết quả thu được trong tương lai có một độ bất định nào đó. Đến đây, người ta có thể nghĩ rằng nếu chuẩn bị các máy đo thì những bất định đó có thể chỉ là những dữ liệu chưa biết. Nhưng vấn đề là ta không thể biết được các dữ liệu đó vì máy đo không thể vừa dùng để đo tính chất vật thể, vừa tự biết ảnh hưởng của nó đến vật thể đó cùng một lúc.

Do đó, có vấn đề về nguyên tắc, chứ không phải về thực tiễn, có một độ bất định có mặt trong các tiên đoán xác suất. Đây là một trong những ý tưởng khó hiểu nhất về bản chất của một hệ lượng tử. Đó từng là trung tâm của của tranh luận Bohr-Einstein, trong đó, họ nghĩ tìm cách làm sáng tỏ các nguyên lý cơ bản này bằng các thí nghiệm tư duy.

Có một vài cách giải thích cơ học lượng tử phủ nhận sự "suy sập hàm sóng" bằng cách thay đổi khái niệm về những thành phần thiết lập nên các "phép đo" trong cơ học lượng tử (xem thêm giải thích trạng thái tương đối).