

TS. PHẠM DUY LÁC

Lý thuyết
TRƯỜNG LƯỢNG TỬ

NHÀ XUẤT BẢN GIÁO DỤC

Chịu trách nhiệm xuất bản :
Giám đốc NGÔ TRẦN ÁI
Tổng biên tập VŨ DƯƠNG THỤY

Biên tập :
TRẦN NGỌC KHÁNH

Trình bày bìa :
TẠ TRỌNG TRÍ

Sửa bản in :
NGUYỄN THU HẰNG

Chế bản :
NGUYỄN MINH CHÂU

MỞ ĐẦU

Ngày nay với sự phát triển không ngừng của vật lý hạt cơ bản, nhiều hạt cơ bản mới được tìm ra nhờ những tiến bộ vượt bậc của kỹ thuật máy gia tốc các hạt. Vượt lên trên hết là khối lượng đồ sộ các số liệu thực nghiệm, lượng thông tin mới về là chỗ lý giải thế nào bản chất của hạt về cấu trúc, các tính chất, các tương tác và sự sinh hủy chuyển hóa lẫn nhau giữa chúng. Lý thuyết trường lượng tử ra đời cùng với các thành tựu của lý thuyết đối xứng trong của các hạt cơ bản và mô hình quark của cấu tạo hạt hadron, các quark duyên và gắn liền với nó một số lượng tử đặc biệt, kết hợp với nguyên lý động lực học của sự đối xứng chuẩn định xứ, lý thuyết thống nhất các tương tác điện từ yếu, cho phép giải thích một cách định lượng gần như tất cả các số liệu thực nghiệm về các quá trình xảy ra do tương tác này gây nên, tiên đoán được sự tồn tại của các hạt tải của tương tác yếu – các bozon véc tơ và các hạt cơ bản mới khác. Đó là mốc lịch sử mà lý thuyết trường lượng tử đã mở ra giúp chúng ta nhận biết các quá trình vật lý diễn ra trong thế giới vi mô đều do sự chuyển động và tương tác của các vi hạt tạo nên chúng tạo thành. Với vai trò như vậy vật lý trường lượng tử - vật lý hạt cơ bản chắc chắn sẽ có những đóng góp quan trọng trong sự phát triển vật lý hiện đại.

Lý thuyết trường lượng tử hình thành trên cơ sở kết hợp lý thuyết tương đối (giúp ta có những hiểu biết mới về các tính chất của không gian và thời gian, có hằng số c đặc trưng – vận tốc ánh sáng trong chân không) và cơ học lượng tử (chỉ ra những giới hạn ứng dụng các khái niệm cổ điển vào thế giới vi mô, có hằng số đặc trưng là hằng số Planck). Để đi đến lý thuyết trường lượng tử - lý thuyết tương đối của nhiều vật trong đó có thể phản ánh được sự sinh hủy của các hạt, trước hết chúng ta điếm lại một số nội dung cơ bản của cơ học lượng tử (lý thuyết tương đối của một vật). Qua đó chúng ta có nhận thức sâu sắc hơn về không gian, về thời gian, về các dạng vật chất và chuyển động của chúng.

Phần thứ nhất

NỘI DUNG CƠ BẢN CỦA CƠ HỌC LƯỢNG TỬ

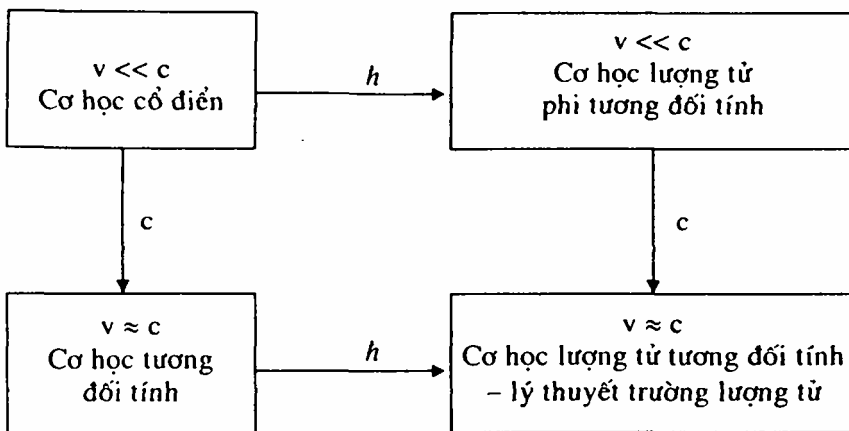
§1. CÁC KHÁI NIỆM VỀ CHUYỂN ĐỘNG, KHÔNG THỜI GIAN, TÍNH SÓNG HẠT

Chúng ta biết rằng lý thuyết hiện đại hình thành trên cơ sở hai lý thuyết chủ yếu: Lý thuyết tương đối của ANHSTANH (Albert Einstein) và lý thuyết lượng tử. Lý thuyết tương đối ANHSTANH được đặc trưng bởi vận tốc ánh sáng (hay còn gọi là vận tốc truyền tương tác $c \approx 3.10^8$ m/s).

Lý thuyết lượng tử được đặc trưng bởi hằng số Planck \hbar (\hbar còn gọi là lượng tử tác dụng). Hằng số này biểu thị các giá trị gián đoạn (phân lập) khả dĩ của các đại lượng vật lý và sự quan hệ giữa hai tính sóng - hạt của vật chất chuyển động.

$$h = 6,62517.10^{-34} \text{ j.s} ; \hbar = \frac{h}{2\pi}$$

Dựa vào hai hằng số này (c, \hbar) ta có thể rút ra sự liên hệ giữa lý thuyết lượng tử và lý thuyết tương đối tính theo phác đồ sau :



v là vận tốc của đối tượng chuyển động đang xét.

1. Các dạng chuyển động

Theo cơ học cổ điển vật chất có hai dạng chuyển động, đó là dạng chuyển động hạt và dạng chuyển động sóng. Dạng chuyển động hạt được đặc trưng bởi sự định xứ của vật trong không gian và sự tồn tại quỹ đạo, còn dạng chuyển động sóng được đặc trưng bởi sự không định xứ trong không gian. Sóng là quá trình truyền nhiễu loạn trong không gian với vận tốc không đổi và mang theo năng lượng. Chuyển động của sóng là chuyển động của trạng thái vật chất chứ không phải là sự truyền vật chất - là sự truyền pha từ phần tử vật chất này đến phần tử vật chất kia. Chuyển động sóng tuần hoàn trong không gian và thời gian. Sóng có khả năng nhiễu xạ và giao thoa. Sóng cơ và sóng điện từ có thể thu và phát được. Một loại sóng mà chúng ta cần đề cập quan tâm đến - đó là sóng gắn liền với chuyển động của vi hạt vật chất (sóng Debroi). Sóng Debroi khác với sóng cơ và sóng điện từ ở chỗ không có nguồn phát và không có nguồn thu, nhưng nhận biết được nó qua các hiện tượng vật lý tìm được thể hiện tính giao thoa và nhiễu xạ của sóng Debroi; mà hàm sóng phẳng tương ứng với nó có dạng :

$$\Psi(\vec{r}, t) = A \exp[-i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})] \quad (I-1)$$

Hàm sóng thỏa mãn phương trình sóng:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \Psi(\vec{r}, t) = 0 \quad (I-2)$$

(v - tần số)

2. Không thời gian và các biến động lực

Vật chất luôn luôn vận động và chỉ có thể vận động trong không gian và thời gian. Nói cách khác không gian và thời gian là hình thức phản ánh khách quan sự tồn tại cơ bản của vật chất đang vận động.

Không gian : Tất cả các vật thể vật chất tuy có hình thù bên ngoài khác nhau, nhưng đều có kích thước (dài - ngắn, rộng - hẹp, cao - thấp và chiếm một thể tích nhất định trong không gian. Từ lâu tất cả những tính chất chung nhất của các vật thể vật chất đã được phản ánh trong ý

thức của con người dưới dạng khái niệm không gian. Cũng từ đó hình thành các khái niệm hình học nghiên cứu các quan hệ không gian và hình dáng vật thể phản ánh các tính chất đó.

Thời gian: Là đặc tính biểu thị thời hạn nhất định của các quá trình vật chất diễn ra theo một trình tự nhất định và được tiến triển theo từng bước, từng giai đoạn phát triển.

Theo quan niệm cổ điển thì không gian = thời gian là tuyệt đối, không biến đổi, chúng độc lập với nhau và với vật chất.

Các biến động lực: Để mô tả trạng thái vật thể và chuyển động của nó, trong vật lý cổ điển người ta dùng các biến động lực như năng lượng, động lượng (xung lượng) và mômen động lượng. Các đại lượng vật lý cơ bản này được đưa vào thông qua các định luật bảo toàn : năng lượng, động lượng và mômen động lượng. Các định luật này là hệ quả của các tính chất đồng nhất của không gian và thời gian.

Cho đến nay chưa có một thực nghiệm nào chỉ ra sự vi phạm các tính chất đối xứng của không thời gian trong các hiện tượng vi mô. Vì vậy các biến động lực nói ở trên vẫn được sử dụng để mô tả trạng thái chuyển động trong thế giới vi mô.

Trong cơ học cổ điển, phương trình Newton :

$$\text{Lực} = (\text{khối lượng}) \times (\text{gia tốc})$$

Có một ý nghĩa cơ bản quan trọng : Lực biểu thị nguyên nhân gây ra vận động, còn khối lượng là thuộc tính của vật chất và gia tốc biểu thị hệ thức giữa không gian và thời gian. Như vậy phương trình Newton thể hiện mối quan hệ giữa vật chất, vận động, không gian, thời gian và nguyên nhân gây ra sự vận động đó. Cơ học Newton cùng với lý thuyết điện từ của Maxwell đã mô tả được về cơ bản mọi hiện tượng vật lý của thế giới vĩ mô, nhưng lại nảy sinh những mâu thuẫn khi giải thích những hiện tượng kích thước nguyên tử (kích thước vi mô).

3. Tính chất sóng - hạt của vật chất và giả thuyết Đơbroi (Debroglie)

Bằng thực nghiệm Đavisson và Germer đã phát hiện ra hiện tượng

nhiều xạ electron (năm 1927). Điều đó chứng tỏ không chỉ ánh sáng mà ngay cả electron cũng có lưỡng tính sóng - hạt. Như vậy giả thuyết electron (như một điện tích nhỏ nhất) có tính chất sóng là có cơ sở thực nghiệm vững chắc (chẳng hạn hiện tượng nhiễu xạ qua khe hẹp, nhiễu xạ trên tinh thể,...). Bằng chứng thực nghiệm về tính sóng của electron ngày nay đã được ứng dụng trong kỹ thuật, trong máy nhiễu xạ electron, máy bán dẫn, v.v...

Từ những kết quả trên Đobroi đã mở rộng lưỡng tính sóng - hạt của ánh sáng cho mọi vi hạt khác bằng giả thuyết (ông tiên đoán từ năm 1924) rằng tất cả các hạt vi mô như electron vừa có tính chất hạt vừa có tính chất sóng giống như ánh sáng.

Mỗi vi hạt tự do có năng lượng W và động lượng \vec{P} xác định được mô tả bằng một sóng phẳng đơn sắc có tần số vòng ω và véc tơ sóng \vec{K} với :

$$W = \hbar\omega ; \vec{P} = \hbar\vec{K} \quad (I-3)$$

và sóng phẳng viết dưới dạng phức :

$$\Psi(\vec{r}, t) = \Psi_0 \exp\left[-\frac{i}{\hbar}(Wt - \vec{p} \cdot \vec{r})\right] = \Psi_0 \exp\left[-i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})\right] \quad (I-4)$$

§2. CƠ SỞ VẬT LÝ CỦA CƠ HỌC LƯỢNG TỬ

1. Hai ý tưởng của cơ học lượng tử

- Trước hết là ý tưởng lượng tử hóa (tính gián đoạn hay tính nguyên tử)
- Sau đó là ý tưởng lưỡng tính sóng - hạt.

a) Ý tưởng lượng tử hóa : ý tưởng này nảy sinh từ việc một vài đại

lượng vật lý mô tả các đối tượng vi mô trong những điều kiện nhất định chỉ có thể nhận các giá trị rời rạc xác định : ta nói chúng bị lượng tử hóa.

Điều cần nhấn mạnh nữa là năng lượng của bất cứ vi hạt nào ở trạng thái liên kết (thí dụ như electron trong nguyên tử) cũng đều bị lượng tử hóa, trong khi đó năng lượng của electron chuyển động tự do không bị lượng tử hóa. Khi electron chuyển từ trạng thái đặc trưng bởi năng lượng W_1 sang trạng thái đặc trưng bởi năng lượng W_2 , sau khi nhận hoặc phát ra một lượng tử thì sự chuyển dời đó gọi là chuyển dời lượng tử. Người đầu tiên đưa ra ý tưởng lượng tử là Planck (1900) khi nghiên cứu bức xạ của vật đen tuyệt đối. Ý tưởng đó chứa đựng trong giả thuyết : "Năng lượng của bức xạ điện từ do vật phát ra không phải là liên tục mà là phát ra dưới dạng những lượng tử gián đoạn (gọi là các lượng tử năng lượng) ; và mỗi lượng tử mang năng lượng :

$$W = \hbar\omega$$

với ω là tần số bức xạ.

Tiếp đó Bohr (năm 1913) đã áp dụng thành công ý tưởng lượng tử hóa để xây dựng lý thuyết lượng tử bán cổ điển nhằm giải thích cấu tạo quang phổ vạch của nguyên tử hydro theo mẫu hành tinh nguyên tử của Rutherford.

b) Ý tưởng lưỡng tính sóng hạt

Theo quan niệm vật lý cổ điển hạt và sóng là hai mặt đối lập loại trừ nhau. Nếu là hạt thì phải có quỹ đạo xác định, có những hiện tượng đặc trưng như va chạm..., là sóng thì có những đặc trưng như nhiễu xạ, giao thoa... hạt không thể có đặc trưng của sóng và ngược lại. Nhưng chuyển động động của các hạt vi mô lại được đồng thời đặc trưng bằng cả tính sóng và cả tính hạt. Thực ra hai mặt đối lập này kết hợp với nhau một cách biện chứng thống nhất tạo nên lưỡng tính sóng - hạt của hạt vi mô.

Ý tưởng sóng - hạt đã được ANHSTANH áp dụng cho bức xạ điện từ để giải thích các hiện tượng quang điện. Sau đó Đơbroi đã mở rộng ý

tương đó cho tất cả các đối tượng vi mô nói chung. Ngày nay lưỡng tính sóng - hạt được hiểu như khả năng sẵn có của thế giới vi mô thể hiện những tính chất khác nhau của mình phụ thuộc vào các điều kiện cụ thể, chẳng hạn như điều kiện quan sát,...

Mỗi vi hạt có những đặc trưng hạt (năng lượng và động lượng) và cả những đặc trưng sóng (tần số, bước sóng):

$$W = \hbar\omega ; \vec{P} = \hbar\vec{K} \quad (I-5)$$

(Hệ thức Planck - Einstein)

$$(W, \vec{P}) \text{ tính hạt} \xleftrightarrow{h} \text{ tính sóng } (\omega, \vec{k})$$

$$\text{Với bước sóng } \lambda = \frac{h}{p}$$

2. Các hệ thức bất định

Heisenberg và Bohr là người đầu tiên sử dụng hệ thức Planck - Einstein áp dụng cho các đặc trưng hạt của vi hạt đã đưa ra hệ thức:

$$\Delta P_x \cdot \Delta x \geq \hbar \quad (I-6)$$

$$\Delta W \cdot \Delta t \geq \hbar \quad (I-7)$$

gọi là các hệ thức bất định.

Hệ thức (I-6) có ý nghĩa là : Nếu vi hạt được định xứ tại một điểm xác định ứng với tọa độ x (độ bất định về tọa độ $\Delta x = 0$) thì hình chiếu P_x của động lượng của nó phải có độ lớn tùy ý, có nghĩa là vi hạt phải lan ra theo cả trục x. Điều đó chứng tỏ trong cơ học lượng tử vi hạt không thể có đồng thời tọa độ xác định và giá trị hình chiếu động lượng xác định, tương ứng là không có khái niệm quỹ đạo. Do thời gian chỉ là một tham số chứ không phải là biến động lực nên Δt không phải là độ bất định của thời gian, vì thế hệ thức (I-7) có thể giải thích theo nhiều cách khác nhau:

Nếu hệ ở trạng thái kích thích trong khoảng thời gian Δt thì khi đó hệ không thể có năng lượng xác định và độ bất định năng lượng của hệ