

# CƠ HỌC LƯỢNG TỬ LÀ GÌ?

*Tác giả:* Nguyễn Xuân Hy

## *Lời nói đầu*

---

Ngày nay, một trong những đối tượng nghiên cứu quan trọng nhất của vật lý hiện đại là thế giới vi mô, đó là những vật thể vô cùng nhỏ bé như nguyên tử, hạt nhân và các hạt cơ bản. Cơ học lượng tử chính là lý thuyết cơ sở đầu tiên giúp con người tìm hiểu và chinh phục thế giới vi mô. Sau này cơ học lượng tử được mở rộng và phát triển thành một lý thuyết tổng quát hơn là thuyết trường lượng tử.

Trong cuốn sách nhỏ này, chúng tôi giới thiệu với bạn đọc về sự ra đời và phát triển của cơ học lượng tử, giới thiệu những khái niệm cơ bản và những thành tựu nổi bật nhất của nó trong việc nghiên cứu thế giới vi mô. Cơ học lượng tử vốn gắn liền với những công cụ toán học rất khó và trừu tượng, nhưng để phục vụ đông đảo bạn đọc, chúng tôi đã cố gắng trình bày nó dưới dạng phổ thông, không dùng đến những tính toán. Để biên soạn cuốn sách này, chúng tôi đã tham khảo nhiều sách báo, các giáo trình trong và ngoài nước. Đặc biệt là cuốn “ABC về cơ học lượng tử” của Rutnich xuất bản bằng tiếng Anh tại Matxcova năm 1968.

Cuốn sách này nhằm phục vụ những bạn đọc có trình độ phổ thông cấp 3, đang thiết tha muốn tìm hiểu vật lý hiện đại, nhưng không có điều kiện đọc các giáo trình đại học. Tuy nhiên những sinh viên mới bắt đầu học cơ học lượng tử cũng có thể tìm thấy trong cuốn sách này những gợi mở bổ ích để tìm hiểu ý nghĩa vật lý của các biểu thức toán học phức tạp thường gặp trong các giáo trình đại học.

Chắc chắn rằng cuốn sách nhỏ này sẽ còn nhiều thiếu sót. Chúng tôi rất mong và xin cảm ơn sự góp ý của các bạn. Cuối cùng, chúng tôi xin tỏ lòng biết ơn anh Phạm Công Dũng đã đọc bản thảo lần đầu và góp cho chúng tôi nhiều ý kiến quý báu.

*Ngày 1-1-1975*

*Người biên soạn*

Quyển sách này được hai bạn sinh viên bộ môn Vật liệu Nano & Màng mỏng, K13 đánh máy từ sách gốc với hi vọng mang lại cho các bạn đã-đang-sẽ học môn Vật lý lượng tử (Cơ lượng tử) sự hiểu biết rõ ràng và yêu thích môn học này hơn.

**Quyển sách này được đánh máy chỉ nhằm mục đích phục vụ học tập, không nhằm mục đích thương mại hóa dưới mọi hình thức.**

# PHẦN THỨ NHẤT

## TỪ THẾ GIỚI VĨ MÔ ĐẾN THẾ GIỚI VI MÔ

### *Cuộc tấn công vào thế giới vi mô*

Hiểu biết – không phải chỉ là nhu cầu thực tiễn mà còn là một niềm vui tinh thần của con người. Trước mắt con người là thế giới muôn hình ngàn vẻ. Con người tự hỏi thế giới xung quanh đã hình thành thế nào và hình thành từ cái gì?

Từ lâu, con người dự đoán rằng: thiên nhiên, như một người thợ kì tài, đã dùng những viên gạch vô cùng nhỏ bé để tạo nên muôn vật. Vậy những viên gạch vô cùng nhỏ bé đó là gì?

Ta hãy lấy một thí dụ: những quả núi hung vĩ vỡ thành những tảng đá, đá vỡ thành sỏi...thời gian trôi đi, đá sỏi lại phân thành cát bụi...Nhưng rồi cát bụi sẽ phân thành cái gì? Liệu có những vật nhỏ bé đến mức mà thiên nhiên không thể phân chia nữa được không?

Từ ngày xưa, các nhà bác học Êpiquya, Đêmôcrit đã trả lời rằng có những vật ở mức như vậy: tên của chúng là “nguyên tử”. Tên đó đã phản ánh cái đặc tính chủ yếu của chúng: sự không thể phân chia được nữa.

Trong thời kì khoa học hãy còn phôi thai, ý nghĩ về sự tồn tại của nguyên tử đương nhiên là một dự đoán thiên tài. Nhưng đó chỉ là dự đoán không được thực nghiệm nào xác nhận.

Xung quanh con người có biết bao nhiêu là vật thể. Trước hết cần phải biết các vật đó liên hệ với nhau thế nào rồi sau mới đi vào vấn đề: chúng cấu tạo ra sao? Do đó, người ta quên các nguyên tử trong một thời gian khá lâu.

Đầu thế kỉ 19, người ta mới lại nhớ đến chúng, nhưng không phải các nhà vật lý mà là các nhà hóa học. Năm 1815, nhà bác học người Anh là Prut đã tiên đoán sự tồn tại của các hạt rất nhỏ, chúng không thể bị phá vỡ cũng không được sinh ra hay bị mất đi khi tham gia các phản ứng hóa học khác nhau. Đó là giả thuyết về nguyên tử. Nhưng nói chung hầu như suốt thế kỉ 19, nguyên tử vẫn là một cái gì bất biến và không thể bị phân chia.

Cho đến năm 1897, nhà vật lý học Ronghen người Đức, phát minh ra nhưng tia mà sau này người ta gọi là tia Ronghen. Tia Ronghen chính là một dạng sóng điện từ, có bước sóng rất ngắn vào khoảng  $10^{-8}$  cm, tương ứng với tần số rất lớn, chừng  $10^{18}$  dao động trong 1 giây. Bắt đầu từ thời kì này, ngày càng có nhiều sự kiện thực nghiệm về những hạt vô cùng bé.

Ngay trước đó, năm 1896, nhà bác học Beccoren người Pháp, đã nhận thấy rằng các muối của nguyên tố uran phát ra một loại bức xạ (tia) có thể làm đen kính ảnh, xuyên qua giấy và làm ion hóa không khí. Năm 1898 Mari và Pie Curi đã phát minh ra hai nguyên tố hóa học mới là poloni và radi. Những hợp chất của hai nguyên tố này còn phát ra những tia “đâm sâu” mạnh hơn nhiều so với uran. Dần dần người ta hiểu rằng, hiện tượng phát ra những tia – mà Mari gọi là hiện tượng phóng xạ - là do sự biến đổi của một nguyên tố hóa học này thành một nguyên tố hóa học khác kèm theo sự phát ra năng lượng. Sự biến đổi này không phải do nguyên nhân bên ngoài mà do những nguyên nhân bên trong: do tính không bền của các nguyên tử nặng.

Hiện tượng phóng xạ có ý nghĩa gì? Hiện tượng đó chứng tỏ rằng các nguyên tử không thể là không phân chia được, mà nó đã “tự phân chia” thành các hạt nhỏ hơn nữa... Thế mà chúng ta biết rằng, chính nguyên tử đã nhỏ bé lắm rồi, đường kính chỉ vào khoảng  $10^{-8}$  cm, nghĩa là nếu có thể xâu thành chuỗi thì phải cần 100 triệu nguyên tử mới được chuỗi dài 1cm.

Ngay sau khi tìm ra hiện tượng phóng xạ, năm 1897 nhà vật lý người Anh là Tômsơn đã phát hiện ra điện tử lại vô cùng nhỏ bé, nó chỉ bằng  $9 \times 10^{-28}$  gam và điện tích là  $1,6 \times 10^{-19}$  culông. Lúc đó điện tử được xem là những “nguyên tử điện”, nghĩa là những điện tích nhỏ bé nhất không thể phân chia được nữa.

Sự kiện vẫn dòn dập xảy ra. Ngày 14 tháng chạp năm 1900, khi chỉ còn vài ngày nữa là bước sang thế kỉ 20, nhà vật lý học Plăng người Đức đã trình bày một bản báo cáo nhằm giải quyết cuộc khủng hoảng lý thuyết bức xạ nhiệt. Plăng đã đưa ra giả thuyết về sự tồn tại của những *lượng tử năng lượng*: năng lượng cũng có tính gián đoạn, cũng phân thành những lượng nhỏ xác định mà Plăng gọi là những lượng tử... Lúc đó, ngay chính các nhà bác học cũng chưa thấy rõ hết tầm quan trọng của giả thuyết Plăng. Năm 1905, dựa trên giả thuyết Plăng, nhà bác học Anhxtanh đã nêu ra thuyết lượng tử ánh sáng và giải thích hiện tượng quang điện một cách mỹ mãn. Bây giờ, ánh sáng cũng là một dòng những hạt vô cùng nhỏ bé.

Năm 1903, Tômsơn đã đưa ra mô hình nguyên tử đầu tiên: nguyên tử là một khối hình cầu mang điện âm rải rác. Vài năm sau, một học trò của Tômsơn là Rudopho đã chứng minh sự thiếu sót trong mô hình nguyên tử của thầy mình. Bằng thí nghiệm, Rudopho đã chứng minh rằng nguyên tử phải có một hạt nhân mang điện tích dương vô cùng bé (đường kính hạt nhân bé hơn nguyên tử đến 10 vạn lần). Hạt nhân nằm ở giữa và các điện tử quay xung quanh. Đó là mô hình “hành tinh nguyên tử”. Thế là, chúng ta lại biết một hạt nhân còn nhỏ bé hơn nữa.

Như vậy, chỉ trong một thời gian không dài, đã xuất hiện rất nhiều kết quả thực nghiệm mới chứng tỏ rằng: đúng là tồn tại những đối tượng vật chất với kích thước, khối lượng và điện tích hết sức nhỏ bé. Đó là đối tượng của thế giới vi mô, thế giới mà ta không nhìn thấy được. Thế giới này khác với thế giới của những vật thông thường mà ta có thể nhận biết trực tiếp bằng các giác quan – Thế giới vĩ mô.

Tuy không nhìn thấy thế giới vi mô, nhưng con người vẫn có thể phát hiện được nhiều hiện tượng kì lạ của thế giới này thông qua con đường thực nghiệm và suy luận. Có nhiều hiện tượng kì lạ mà những khái niệm cũ, lý thuyết cũ không thể nào giải thích được... Điện tử và những hạt vô cùng nhỏ bé khác, khi thì giống như một hạt, khi thì giống như một sóng, có khi lại ngằm chui qua một hàng rào kiên cố, có lúc lại như “phân chia” ra thành mấy phần, có khi chúng lại cùng nhau biến đi và để lại photon.

Rõ ràng là, đối với những hạt vô cùng nhỏ bé này phải có phương pháp nhìn nhận mới, phải có những quan niệm mới và lý thuyết mới.

Cơ học lượng tử chính là lý thuyết mới, với những quan niệm mới và phương pháp mới và phương pháp mới. Nhưng trước khi tìm hiểu về lý thuyết mới, chúng ta cần biết về lý thuyết cũ, mà người ta vẫn thường gọi là vật lý cổ điển.

### ***Thế giới vĩ mô và vật lý cổ điển***

Không có gì xuất hiện ra từ hư vô, cho nên có thể nói rằng cơ học lượng tử là con đẻ của vật lý học cổ điển. Nhưng “con đã hơn cha”, khoa học là một tòa nhà “có phúc”.

Vật lý học cổ điển bắt đầu từ cơ học cổ điển. Sẽ không công bằng nếu ta quy công lao động xây dựng cơ học cổ điển cho một mình Niuton. Nhiều bộ óc vĩ đại thời Phục hưng đã nghiên cứu những vấn đề làm cơ sở cho cơ học cổ điển. Lêônado Vinxi và Galilê Galilê người Ý, Ximông Stêvin người Anh, Blêz Pascan người Pháp... Nhưng chỉ đến Niuton, Niu ton mới xây dựng được một lý thuyết chặt chẽ cho những chuyển động cơ học. Dựa trên cơ sở những nghiên cứu tỉ mỉ về những chuyển động của mọi vật, sau nhiều năm nghiên cứu nghiêm túc, viết đi viết lại, năm 1678 Niuton cho ra đời cuốn sách mang tên

---

(1) Người ta thường quy ước kích thước vi mô là những kích thước nhỏ hơn  $10^{-8}$  cm, còn lớn hơn thì gọi là vĩ mô

“Những cơ sở toán học của triết học tự nhiên” (thời đó người ta gọi khoa học là triết học tự nhiên).

Trong cuốn sách này, lần đầu tiên Niuton đã phát biểu 3 nguyên lý cơ bản cơ học cổ điển, sau này được gọi là 3 định luật Niuton mà mỗi học sinh phổ thông đều biết. Để xây dựng nên 3 định luật đó, Niuton đã đưa ra những khái niệm cơ bản như “lực”, “khối lượng”...Niuton đã xây dựng được phương trình cơ bản của cơ học cổ điển, đó là phương trình:  $Lực = Khối\ lượng \times Gia\ tốc$ . Từ phương trình này, ta sẽ tính được gia tốc, vận tốc và nếu biết vị trí của vật ở thời điểm ban đầu, ta có thể tính được vị trí của vật ở bất kì thời điểm nào và vẽ được quỹ đạo mà vật đi theo trong quá trình chuyển động. Như vậy ta hoàn toàn mô tả được chuyển động của vật thể.

Tất nhiên, vật chỉ có thể chuyển động trong không gian, thời gian. Do đó mà cơ học Niuton phải đề cập đến những khái niệm cơ bản nhất của khoa học tự nhiên: không gian, thời gian, vật chất chuyển động, nguyên nhân của chuyển động.

Niuton quan niệm không gian như là một cái hộp trống rỗng khổng lồ, trong đó vật chất ở rải rác. Không gian là tuyệt đối không những theo ý nghĩa vật lý mà còn theo ý nghĩa triết học: không gian không thay đổi, không chuyển động, tính chất của không gian không phụ thuộc gì cả, có thể lấy các vật trong gian ra mà không gian vẫn còn nguyên và tính chất của nó vẫn như cũ. Thời gian cũng vậy, thời gian trôi đi với nhịp điệu đồng nhất trong toàn vũ trụ và sự trôi đó không phụ thuộc vào bất cứ cái gì. Có thể đo được khoảng thời gian và số đo đó là tuyệt đối.

Niuton cho rằng khối lượng là số đo lượng vật chất. Như vậy, phương trình Niuton có ý nghĩa cơ bản, vì về trái là lực, tức nguyên nhân gây ra vận động, về phải có khối lượng là một thuộc tính của vật chất, và gia tốc là một hệ thức giữa không gian và thời gian. Vậy đây là một phương trình nêu lên mối quan

hệ giữa vật chất, vận động, không gian, thời gian và nguyên nhân gây nên sự vận động đó. Còn nguồn gốc của chuyển động thì ta có thể hình dung quan điểm của Niuton như sau: lúc ban đầu, toàn vũ trụ từ những hành tinh không lồ đến những hạt bụi nhỏ bé, tất cả đều đứng yên. Vũ trụ ở trong một trạng thái yên tĩnh đến ghê người... Bỗng thượng đế tỉnh dậy, ngỡ ngàng trước những hình hài muôn hình muôn vẻ do mình sáng tạo ra, ngài bèn truyền cho một “ cái đẩy đầu tiên”, “lên dây cót cho đồng hồ vũ trụ”. Sau cái lần đầu tiên lên dây cót đó, nhiệm vụ của thượng đế xem như đã hoàn thành. Ngài không bao giờ can thiệp vào vũ trụ nữa, không bao giờ xuất hiện ở đâu nữa, Ngài để mặc cho các chuyển động và tương tác với nhau theo những quy luật xác định. Những quy luật đó có nhiều nhưng cuối cùng có thể quy về một số định luật cơ bản. Từ đó trở đi không có sự ngẫu nhiên nào nữa. Biết được quy luật chuyển động và biết được trạng thái hiện tại, dứt khoát người ta sẽ suy được trạng thái quá khứ và tương lai.

Niuton cho rằng tất cả các hiện tượng tự nhiên đều “do một số lực quyết định, khiến cho các vật hoặc là hút vào nhau thành những hình dạng xác định, hoặc là xô đẩy va xa lẫn nhau”. Từ đó, Niuton cho rằng nhiệm vụ chủ yếu của khoa học là dựa vào những lực được xác định chính xác, và dựa vào những chuyển động cơ học do các lực ấy gây nên để nhận thức tất cả các hiện tượng xảy ra trong tự nhiên. Quan niệm ấy về sau được gọi là thuyết quyết định luận cơ giới.

Cùng với 3 định luật cơ bản cơ bản của cơ học, Niuton còn phát minh ra định luật “Vận vật hấp dẫn” nổi tiếng, định luật mà từ những vật nhỏ bé đến những hành tinh, những thiên thể khổng lồ đều phải tuân theo. Người ta thường cho định luật này là sự “khái quát hóa vĩ đại nhất” và Niuton được xem là người đầu tiên tìm ra bí quyết của “Thiên cơ”.

Năm 1842, nhà thiên văn học Loveriê, dựa vào lý thuyết của Niuton đã tính toán được vị trí của một hành tinh mới là Hải Vương tinh. Loveriê đã chỉ ra



đúng ngày nào tháng nào thì hành tinh chưa ai biết này sẽ xuất hiện tại chỗ nào trên bầu trời... Con người càng kinh ngạc vì thiên tài của trí tuệ của chính mình.

Hơn một trăm năm sau Niuton, sự phù hợp đẹp đẽ của thế giới trong cơ học Niu ton vẫn làm cho các nhà vật lý thỏa mãn và yên lòng. Cho đến nay, dựa vào cơ học Niuton, người ta đã có thể tính toán được những công trình xây dựng trên quả đất, chuyển động của những máy móc, chuyển động của các thiên thể, tính toán đường bay của các vệ tinh nhân tạo và con tàu vũ trụ với độ chính xác rất cao!

Cơ học Niuton, kết hợp với thuyết động học phân tử và các thuyết phân bố thống kê của Mắcxoen-Bôndoman đã tạo nên Vật lý phân tử. Áp dụng vào một tập hợp gồm rất nhiều phân tử, vật lý phân tử, đã giải thích được nhiều hiện tượng, tính chất, trạng thái và đặc điểm của vật chất ở ba thể rắn, lỏng và khí. Vật lý phân tử đã có những thành công đáng kể trong việc nghiên cứu mối quan hệ giữa áp suất, thể tích và nhiệt độ của một khối khí với vận tốc trung bình của chuyển động phân tử, đã giải thích hiện tượng nội ma sát, hiện tượng mao dẫn, trạng thái mặt ngoài... của chất lỏng, đã giải thích nhiệt dung, sự nở vì nhiệt và các đặc tính khác của chất rắn.

Thực ra thì trong vật lý phân tử, người ta đã bắt đầu thấy nhiều điều không nằm trong khuôn khổ của cơ học Niuton (mà người ta thường gọi là cơ học cổ điển), nhưng lúc đó người ta vẫn xoa tay nghỉ ngơi, hay đúng hơn là chưa có điều kiện giải quyết.

Tòa lâu đài vật lý cổ điển còn bao gồm cả lĩnh vực những hiện tượng điện và từ. Lúc đầu người ta tưởng rằng những hiện tượng này không liên quan gì với cơ học Niuton. Các hiện tượng điện, từ được mô tả qua điện trường  $E$  và từ trường  $B$ . Các trường này liên hệ với mật độ điện tích và mật độ dòng điện nhờ các phương trình Moắcxoen tìm ra, gọi là những phương trình cơ bản của điện động lực học cổ điển. Chúng ta không nhắc lại phương trình đó ở đây. Chỉ biết

rằng các phương trình này dẫn đến kết luận là: các trường nói trên phải lan truyền trong không gian tự do như những sóng với tốc độ không đổi  $c$  bằng vận tốc ánh sáng. Đó là những sóng điện từ hay bức xạ điện từ.

Nhưng rồi cơ học Niuton đã kết hợp được với điện động lực học cổ điển nhờ định luật Lorenz nói rằng: một hạt tích điện  $q$  chuyển động với vận tốc  $v$  trong điện trường  $E$  và từ trường  $B$  thì sẽ chịu tác dụng của một lực:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q[ \vec{v} \times \vec{B} ]$$

Sự kết hợp này là đúng đắn. Tuy nhiên, dù chưa kết hợp với cơ học Niuton, thì điện động lực học cổ điển cũng thừa nhận quan niệm của Niuton về không gian, thời gian. Không ai ngờ rằng, chính sự thừa nhận này, về sau dẫn đến một cuộc khủng hoảng, và cuộc khủng hoảng này được giải quyết một cách xuất sắc bằng thuyết tương đối của Anhtan, một thuyết mà, cùng với cơ học lượng tử, được coi là một trong hai ngọn đèn pha của vật lý hiện đại.

Thế là, tòa lâu đài của vật lý cổ điển bao gồm cơ học Niuton kết hợp với các lý thuyết thống kê và điện động lực học đã cho ta một bức tranh chung về tự nhiên- bức tranh cổ điển-trong đó vật chất thì gồm những hạt và bức xạ thì gồm những sóng. Mỗi hạt có khối lượng và có điện tích. Các hạt tương tác với nhau qua những lực cơ bản là lực hấp dẫn và lực điện từ. Bức xạ thì mang năng lượng, truyền liên tục và choán khắp không gian.

### ***Vật lý cổ điển lâm vào bế tắc***

Hơn một trăm năm sau Niuton, người ta vẫn còn coi những quan niệm và định luật của ông là vạn năng, đúng đắn.

Tuy nhiên, cơ học cổ điển là hoàn toàn đầy đủ khi vật lý học mới chỉ là cơ học. Nhưng thế kỉ 19 là người chứng kiến sự thâm nhập như vũ bão của vật lý học vào các lĩnh vực mới của tự nhiên. Ngay trong những năm bảy mươi của

thế kỉ 19, khi thuyết động học các chất khí ra đời, người ta đã thấy sự hạn chế của cơ học cổ điển: không thể nào viết phương trình chuyển động và giải phương trình cho tất cả các phân tử trong một khối khí được. trong lĩnh vực điện và từ, người ta cố gắng quy những định luật của trường điện từ về những định luật cơ học, nhằm giải thích những hiện tượng điện và từ như là chuyển động cơ học của một môi trường vũ trụ đặc biệt là ête. Tuy nhiên những cố gắng đó đều thất bại. Đến khi điện động lực học của Faraday và Moaxoen được thừa nhận rộng rãi, thì cơ học Niuton không phải là vạn năng nữa, tuy nhiên những quan niệm của Niuton về không gian và thời gian vẫn còn bám chắc trong tư tưởng các nhà bác học.

Nhưng, mọi việc đều không đơn giản và luôn luôn biến đổi. Tò mò lâu đài vật lý cổ điển vẫn phải lung lay trước sự tấn công của các sự kiện mới.

Một trong những sự kiện đó là: sự bất biến hiển nhiên của vận tốc ánh sáng. Những thí nghiệm thận trọng, vô tư của Maikenson và nhiều người khác đã chứng tỏ rằng: vận tốc ánh sáng trong chân không, dù đo trong hệ quy chiếu nào, cũng có trị số không đổi. Vận tốc ánh sáng không tuân theo quy tắc cộng vận tốc thông thường. Ánh sáng có tính chất hoàn toàn khác với những điều đã biết được cho tới thời gian đó. Để ép những tính chất của ánh sáng vào trong khuôn khổ của vật lý cổ điển, người ta đã nghĩ ra một môi trường ête đặc biệt và gán cho ête những tính chất rất hoang đường đối với chính vật lý cổ điển! Nhưng ête vẫn không cứu được sự bế tắc của vật lý cổ điển.

Bức xạ nhiệt của các vật nóng cũng là một hòn đá tảng mà vật lý cổ điển vấp phải. Vật lý cổ điển cho rằng bức xạ nhiệt có thể phát ra một cách liên tục với năng lượng bất kì. Nhưng quan điểm đó dẫn đến những mâu thuẫn rõ ràng với thực nghiệm.

Rồi quang phổ, người ta biết rằng ở trạng thái khí, các chất bị kích thích sẽ phát sáng. Cho ánh sáng đó đi qua lăng kính và thu tia ló lên trên một ảnh,

ta sẽ được một hình ảnh gọi là quang phổ. Quang phổ của các nguyên tử ở trạng thái khí gồm một số vạch màu riêng biệt, có bước sóng hoàn toàn xác định, đặc trưng cho nguyên tố hóa học đã cho. Vật lý cổ điển không sao giải thích được hiện tượng này.

Tiếp đến là hiện tượng quang điện-tức là hiện tượng bật điện tử ra khỏi mặt ngoài kim loại khi kim loại bị chiếu sáng-cũng là hiện tượng mà vật lý cổ điển bế tắc. Vật lý cổ điển không hiểu tại sao một chùm sáng rất mạnh mà bước sóng không thích hợp thì cũng không gây được hiện tượng quang điện.

Cuối cùng việc tìm ra hiện tượng phóng xạ là một trong những vực thẳm đáng sợ nhất mà vật lý cổ điển sa vào trong những năm cuối cùng của sự thống trị độc quyền của nó. Do đâu mà hạt nhân nguyên tử bị phân rã để nguyên tố này biến thành nguyên tố khác? Vật chất biến đi đâu? Khối lượng biến đi đâu?... Đó là những câu hỏi bí ẩn đối với vật lý cổ điển. Các nhà vật lý bắt đầu hoang mang bối rối và vật lý lâm vào cuộc khủng hoảng sâu sắc ở cuối thế kỉ 19 đầu thế kỉ 20.

Thì ra cơ học Niuton chỉ là cơ học của những vật thể có kích thước thông thường mà ta có thể nhận biết bằng giác quan-cơ học của thế giới vĩ mô. Thế mà vật lý cổ điển dựa trên cơ học Niuton và những quan điểm của Niuton về không gian, thời gian và vật chất. Nhưng quan điểm này cũng xuất phát từ những quan sát bằng giác quan trong thế giới vĩ mô. Nhưng ngay thì giác-một giác quan tinh vi và quan trọng nhất cũng bị hạn chế rất nhiều, con mắt chỉ cảm giác được một phần rất hẹp của dãy sóng điện từ là vùng ánh sáng khả kiến; mắt không thể phân biệt được hai điểm nhìn dưới góc bé hơn 1 phút; không thể phân biệt 2 sự kiện xảy ra cách nhau  $1/24$  giây.

Do đó, bước vào thế giới vi mô-thế giới của những vật vô cùng nhỏ bé mà ta không nhìn thấy được-thì những quan niệm cũ-hình thành trong khi quan sát thế giới vĩ mô-không còn thích hợp nữa. Những bế tắc của vật lý cổ điển

vừa nêu trên chính là những hiện tượng có nguồn gốc từ trong phân tử, nguyên tử và hạt nhân nguyên tử-những hiện tượng vi mô. Thế giới vi mô tuân theo những quy luật riêng của nó, khác với những quy luật trong thế giới vĩ mô.

Do đó mà một lý thuyết mới đã ra đời để giải thích những hiện tượng trong thế giới vi mô. Con học lượng tử không những đã mang lại phương pháp mới để nhận thức thế giới mà nó còn tiên đoán nhiều hiện tượng trong thế giới vi mô theo một kiểu mới.

### ***Làm thế nào để hình dung được các vật thể vô cùng nhỏ bé?***

Giả sử rằng với cặp mắt bình thường, ta hãy nhìn một hạt bụi nhỏ nhất mà ta có thể thấy được. nhưng ta hãy nhớ rằng, trong hạt bụi nhỏ nhất đó còn chứa hàng triệu triệu nguyên tử nữa... Vậy thì nguyên tử nhỏ bé biết bao nhiêu! Chúng ta làm sao mà nhìn thấy được bên trong nguyên tử còn có những gì? Nguyên tử có cấu tạo thế nào?

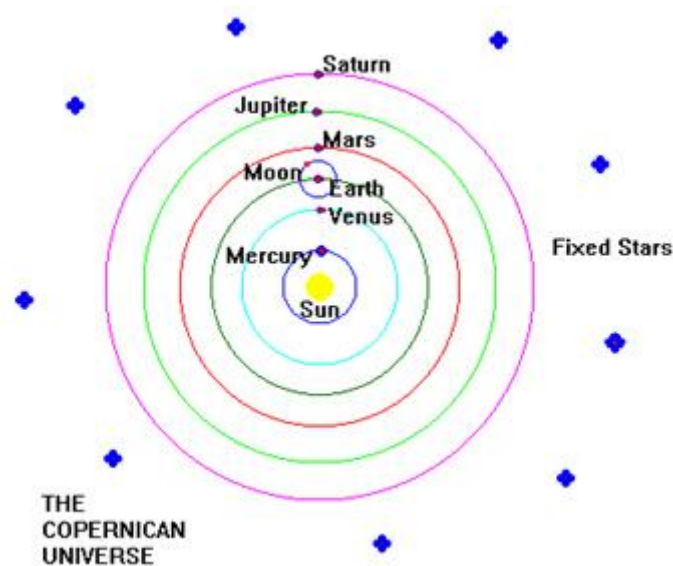
Để giải quyết vấn đề này, cơ học lượng tử phải dùng một phương pháp quen thuộc của vật lý học là phương pháp mô hình. Vậy mô hình là gì? Mô hình là một hình ảnh xác định mà con người tưởng tượng ra để mô tả một vật nào đó mà con người không trực tiếp nhìn thấy, và về mặt hình thức thì vật này được xem là giống với mô hình. Vậy phương pháp mô hình chẳng qua là cách so sánh ví von: ví sự vật và quá trình mà ta không nhìn thấy với sự vật và quá trình mà ta nhìn thấy, ví sự vật và quá trình mà ta không tưởng tượng được với sự vật và quá trình mà ta tưởng tượng được. Nhờ sự so sánh ví von như vậy, ta có cơ sở để tính toán, lập luận, suy diễn và nếu kết quả suy diễn mà phù hợp với thực nghiệm thì sự ví von của ta là hợp lý và mô hình mà ta đưa ra để mô tả sự vật là đúng hoặc gần đúng.

Như vậy, mô hình chẳng qua là một giả thuyết gồm một số đặc điểm mà ta gán cho sự vật. Một giả thuyết bao giờ cũng chịu sự phán xử của thực nghiệm. Nó có thể được thừa nhận hoặc bác bỏ.

Ngược trở lại lịch sử, các nhà vật lý đã nhiều lần đưa ra các mô hình.

Chất khí trong bình kia là cái gì? Không ai nhìn thấy, nhưng các nhà vật lý đã giả sử nó gồm những phần tử nhỏ bé gọi là phân tử. Các phân tử khí là những quả cầu đàn hồi chuyển động hỗn loạn, va chạm vào nhau và va chạm vào thành bình gây ra áp suất. Như vậy có thể nói: tập hợp các hạt nhỏ hình cầu chuyển động hỗn loạn là mô hình chất khí. Nhờ mô hình đó các nhà vật lý đã giải thích được hầu hết các đặc điểm và tính chất của chất khí.

Các bạn cũng thường nghe nói đến hệ đại tâm của Ptôlêmê. Đó chính là mô hình vũ trụ mà trong đó, Ptôlêmê giả thuyết rằng Trái Đất có dạng cầu nằm yên ở trung tâm vũ trụ. Giới hạn của vũ trụ là một vòm cầu thủy tinh có gắn các vì sao. Vòm cầu này quay đều quanh một trục xuyên qua tâm trái đất, còn Mặt Trời, Mặt Trăng thì chuyển động đều trên những vòng tròn có tâm là Trái Đất.

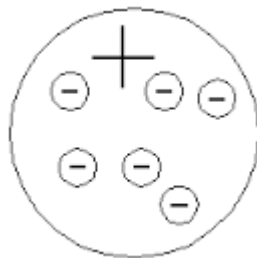


Hình 1. Mô hình Thái dương hệ Côpécnic

Về sau, thực nghiệm chứng tỏ mô hình Ptôlêmê là không đúng, và Côpécnic là người đầu tiên đã dũng cảm đưa ra một mô hình thái dương hệ, trong đó Mặt Trời là trung tâm và Trái Đất chúng ta chỉ là một trong 9 hành

tinh quay quanh Mặt Trời. Cho đến nay, về cơ bản, mô hình do Côpécnic đưa ra vẫn được thực nghiệm xác nhận.

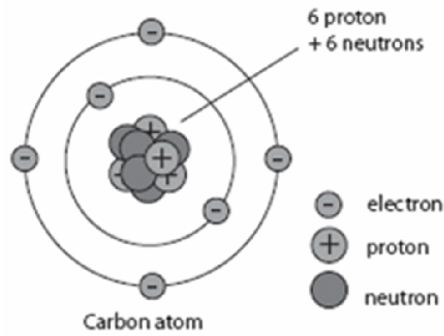
Trên đây là nói về những thiên thể, những vật rất to lớn mà ít hay nhiều chúng ta cũng được nhìn thấy một phần, dù là thấy một cách biểu kiến. Bây giờ đến những vật vô cùng nhỏ bé như nguyên tử, phân tử, hạt nhân nguyên tử thì sao? Trong lĩnh vực này, phương pháp mô hình lại càng quan trọng. Nhưng dựa vào đâu mà xây dựng được mô hình cho những hạt vi mô và những hiện tượng vi mô? Nói khác đi, dựa vào đâu mà cho hạt vi mô có đặc điểm này, tính chất nọ? Tất nhiên là phải dựa vào những sự kiện thực nghiệm đã biết.



Hình 2. Mô hình nguyên tử của Tômsơn: những điện tích âm phân bố rải rác trong hình cầu tích điện dương

Mô hình nguyên tử đầu tiên do Tômsơn, một nhà bác học Anh đưa ra. Theo Tômsơn, nguyên tử là một hình cầu, mang điện dương, trong đó các electron mang điện âm phân bố rải rác (hình 2). Mô hình Tômsơn đã giải thích được một số hiện tượng. Nhưng sau đó, Rudơfo, một học trò của Tômsơn, bằng thí nghiệm, đã chứng minh sự thiếu sót trong mô hình nguyên tử của thầy mình.

Theo mô hình Rudơpho, ở tâm nguyên tử có hạt nhân rất bé mang điện dương và tập trung gần như toàn bộ khối lượng nguyên tử. Các điện tử quay quanh xung quanh hạt nhân theo những quỹ đạo tròn giống như các hành tinh quay quanh mặt trời (hình 3). Số điện tử trong nguyên tử bằng số thứ tự của nguyên tử trong bảng Mendêlêep.



Hình 3. Mô hình nguyên tử cacbon theo Rudofơ: ở tâm là hạt nhân rất bé, các điện tử quay xung quanh hạt nhân

Theo mô hình này thì nguyên tử và hệ mặt trời chỉ khác nhau ở một điểm là lực tác dụng giữa hạt nhân và các điện tử là lực điện chứ không phải lực vạn vật hấp dẫn như giữa mặt trời và các hành tinh. Về sau người ta thường gọi mô hình Rudofơ là mô hình hành tinh nguyên tử.

Mô hình hành tinh nguyên tử là một bước tiến đáng kể so với mô hình Tômsơn nhưng vẫn còn có mâu thuẫn với thực nghiệm. Năm 1913, nhà vật lý học Đan Mạch Nin-Bo đã cải tiến mô hình Rudofơ. Mặc dù mô hình Bo chỉ cho khái niệm rất đại cương về cấu tạo nguyên tử, mô hình đó vẫn được tín nhiệm trong vật lý học. Nhưng, như chúng ta sẽ thấy sau này, mô hình Bo không còn dựa vào những khái niệm của cơ học cổ điển mà dựa vào những khái niệm mới, những khái niệm lượng tử, dù chỉ dựa vào một phần...

Như vậy, nhờ phương pháp mô hình ta có thể hình dung được những hiện tượng có kích thước vô cùng to lớn cũng như những hiện tượng có kích thước vô cùng nhỏ bé. Nhưng liệu có đúng không, nếu áp dụng cái quy tắc “tương tự hóa” bằng mô hình này ở mọi lúc, mọi nơi? Có người ngại rằng, thế giới vi mô và thế giới vĩ mô là hai thế giới có quy mô khác nhau, cho nên việc dùng những hình ảnh, khái niệm của thế giới vĩ mô để mô tả thế giới vi mô là một việc bấp



bên. Tuy nhiên không có cách nào khác, vật lý học vẫn phải dùng phương pháp mô hình, và mô hình đúng hay sai chỉ có thực nghiệm mới phán xét được.

Lúc đầu các nhà vật lý nghĩ rằng thế giới vi mô chỉ khác thế giới thông thường ở những nét chi tiết và không khác về đại thể cho nên họ đã dùng một mô hình đơn giản: coi điện tử như một quả cầu nhỏ bé mang điện âm. Điện tử quay quanh hạt nhân nguyên tử như những hành tinh quay quanh mặt trời. Điện tử giống như một hạt nhỏ. Nhưng rồi những thí nghiệm về nhiễu xạ của Đêvison và Giécơ lại xác nhận một mô hình khác do Đơ Broi đưa ra: điện tử, hạt nhân và các hạt vi mô khác còn có những tính chất giống như một sóng.

Thế là các hạt vi mô không còn tính chất rõ ràng của những hạt thông thường nữa! Hạt vi mô là hạt hay là sóng? Các nhà vật lý bối rối vì không có một mô hình nào phù hợp với các đối tượng vi mô! Làm thế nào mà tưởng tượng ra được những điều mà con người chưa hề thấy bao giờ? Một số điều “thấy” được qua suy luận từ các hiện tượng thì quá lạ lùng và bất thường.

Nhưng chẳng lẽ thế giới vi mô lại có cấu tạo khác thường đến nỗi không thể mô tả chúng bằng một mô hình nào ư? Không thể bó tay! Nếu không xây dựng được những mô hình rõ ràng thì phải xây dựng những mô hình kém rõ ràng vậy! Và chẳng, chuyển động của điện tử trong nguyên tử và ngay chính bản thân điện tử còn vô cùng phức tạp hơn những điều mà ngày nay chúng ta tưởng tượng ra và biết về chúng! Và không chỉ ngày nay mà cả về sau nữa! Do đó cơ học lượng tử vẫn sử dụng những mô hình, dù cho mô hình đó còn quá thô sơ và không hoàn toàn đủ chính xác. Cơ học lượng tử hiểu rằng, không thể vì vẻ ngoài của hiện tượng giống nhau, mà nhất thiết những cơ cấu bên trong cũng giống nhau... Có thể nói rằng nhiều khái niệm và đại lượng vật lý có ý nghĩa như những mô hình.

Thời gian trôi đi, mô hình nào không phù hợp với quan sát thực nghiệm sẽ bị bác bỏ, những mô hình hợp lý sẽ được thừa nhận và trở thành công cụ đặc

lực cho việc tìm hiểu thế giới vi mô. Chắc chắn rằng, trong tương lai, các nhà vật lý sẽ phải từ bỏ nhiều mô hình và còn phải xây dựng nhiều mô hình mới phức tạp hơn, bất thường hơn và khó hiểu hơn nữa! Chẳng thể nào khác được: quy luật phát triển của khoa học là như vậy!

Sự bất thường, sự kì lạ và khó hiểu của những khái niệm của cơ học lượng tử đã gây khó khăn cho nhận thức. Tuy nhiên, chúng ta phải thông cảm với các nhà vật lý ở chỗ là cơ học lượng tử là một lý thuyết về những đối tượng mà con người không thể nhận biết trực tiếp được mà phải dùng các mô hình. Nhưng mô hình nào cũng chỉ gần đúng, chỉ làm cho nhận thức bớt khó khăn chứ không thể có ý nghĩa sâu sắc. Đã thế, thế giới vi mô lại hiện ra với biết bao nhiêu điều lạ lùng, kì dị. Cái mà chúng ta tưởng là hạt thì nó lại biểu hiện như là sóng, cái mà ta cho là sóng thì nó lại biểu hiện như là hạt và khi ta tin rằng một hạt đã được giữ chặt ở một vùng nào đó thì nó lại “chui” ra không biết tự lối nào! Cơ học lượng tử thừa nhận những hiện tượng đó và từ đó xây dựng lý thuyết của mình. Do đó, cơ học lượng tử cũng phải dùng đến khái niệm mới, những mô hình mới, khiến cho lúc đầu nhiều người không hiểu nổi, và cho đến ngày nay, nhiều tư tưởng của cơ học lượng tử vẫn còn được tranh cãi. Tuy nhiên, ai cũng phải thừa nhận rằng, nhờ có cơ học lượng tử, con người đã đạt được những thành tựu to lớn: đã tìm ra bí quyết để giải phóng nguồn năng lượng tiềm tàng trong hạt nhân, đã tìm ra những đồng vị phóng xạ mới, đã hiểu sâu sắc lớp vỏ điện tử của nguyên tử để từ đó chế ra những hợp chất hóa học mới, những tinh thể kì lạ...

### ***Về cái tên “Cơ học lượng tử”***

Cơ học lượng tử là lý thuyết mới mà các nhà vật lý xây dựng nên để làm công cụ giải thích và tìm hiểu thế giới vi mô. Vậy cái tên “Cơ học lượng tử” xuất hiện từ đâu? Thực ra cái tên đó không phản ánh đầy đủ những vấn đề mà lý thuyết mới nghiên cứu.

Trước hết, tại sao gọi là Cơ học? Trong vật lý cổ điển, người ta hiểu cơ học là khoa học nghiên cứu về các chuyển động và các lực (gây ra chuyển động). Tuy nhiên, sự chuyển động trong vật lý cổ điển là sự rời chỗ rõ ràng trong không gian, thời gian và có thể mô tả bằng vận tốc gia tốc và quỹ đạo. Trong thế giới vi mô, người ta không trong thấy các hạt vi mô chuyển động thế nào, nhưng người ta tin chắc rằng chúng phải vận động (chuyển động). Và người ta vẫn dùng tiếng “cơ học” để chỉ môn học nghiên cứu về các quy luật vận động của các hạt vi mô. Tiếp sau, tại sao lại thêm tiếng “lượng tử”? Lý thuyết mới, như ta sẽ thấy sau này, ra đời từ giả thuyết về lượng tử của Plăng. Lượng tử có nghĩa là một phần nhỏ riêng biệt. Lý thuyết mới xác nhận rằng, năng lượng và nhiều đại lượng vật lý khác đặc trưng cho thế giới vi mô thường chia ra thành từng phần nhỏ gián đoạn: chia ra thành từng lượng tử. Năng lượng và những đại lượng vật lý đó cũng chỉ thay đổi một cách gián đoạn, mỗi lần thay đổi một lượng tử. Người ta nói là những đại lượng đó bị lượng tử hóa. Như vậy, tiếng lượng tử nói lên tính chất gián đoạn của thế giới, nói lên tính hạt của các đối tượng vi mô. Nhưng đối tượng vi mô vừa có tính hạt lại vừa có tính sóng. Thế là tiếng “lượng tử” mới nói lên được một mặt của vấn đề là tính hạt, vậy tính sóng kể vào đâu? Vì vậy thuở mới ra đời, người ta gọi lý thuyết mới về thế giới vi mô là “Cơ học sóng”. Tuy nhiên tên này cũng chỉ phản ánh được một mặt của vấn đề.

Như vậy, không một tên gọi nào thỏa mãn với nội dung của lý thuyết mới! Có lẽ các nhà bác học cho rằng cố tình nghĩ ra một tên gọi là điều không cần thiết. Và chẳng sau này “sóng” và “lượng tử” đã gặp nhau trong lý thuyết mới. Và tên “Cơ học lượng tử” đã dần dần trở thành tên gọi quan dùng của các nhà vật lý vì nó gắn liền với giả thuyết đầu tiên của Plăng-giả thuyết đã khai sinh ra cho lý thuyết mới. Các nhà vật lý hiểu rất rõ những gì bao hàm trong cái tên quen thuộc đó!

Cơ học lượng tử ra đời cùng với thế kỉ thứ hai mươi và trở thành vũ khí sắc bén cho con người tiến công vào thế giới vi mô. Cơ học lượng tử ra đời từ hạt giống đầu tiên mà Plăng đã gieo xuống cánh đồng màu mỡ của khoa học, và sau đó được cả một lớp các nhà bác học xuất sắc như Bo, Hâydenbe, Srôđingơ, Đơ Bơri, Phécmi, Đirắc, Paoli...chăm sóc, vun trồng...

## PHẦN THỨ HAI

### CƠ HỌC LƯỢNG TỬ PHẢI RA ĐỜI

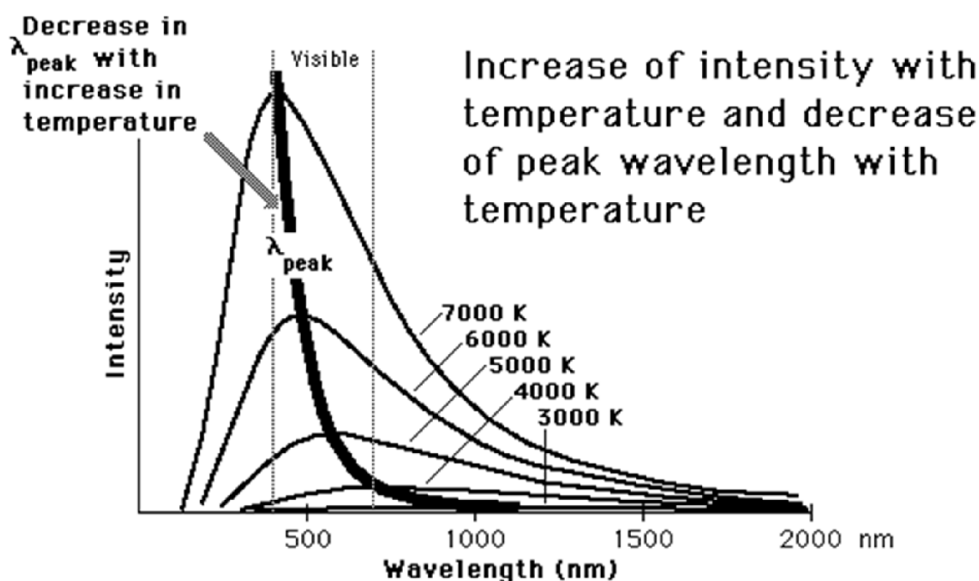
#### ***Bức xạ nhiệt là gì?***

Buổi tối mùa đông giá rét mà được ngồi bên đống lửa đang cháy thì thú vị biết bao! Củi nổ lách tách, ngọn lửa bập bùng và chúng ta cảm thấy ấm áp. Ai cũng biết rằng “nhiệt” truyền từ đống lửa đến chúng ta và có lẽ...không cần thắc mắc gì nữa. Nhưng nhà bác học thì lúc nào cũng thắc mắc. Tại sao nhiệt lại truyền được ra xung quanh? Nhiệt được phát ra và truyền đi như thế nào? Ở trường phổ thông, chúng ta đã biết có 3 kiểu truyền nhiệt: dẫn nhiệt, đối lưu và bức xạ. Dẫn nhiệt là sự truyền nhiệt từ chỗ nóng đến chỗ lạnh qua một vật thể trung gian gọi là vật dẫn nhiệt. Đối lưu là sự truyền nhiệt do chuyển động tập thể của cả khối chất lỏng hay chất khí từ vùng này đến vùng khác. Nhưng phải nói rằng kiểu truyền nhiệt phổ biến nhất là truyền nhiệt bằng bức xạ: từ nguồn nóng phát ra những tia mà mắt ta nhìn thấy hoặc không nhìn thấy, những tia này mang cái “nóng” từ nguồn truyền đến những vật thể mà nó gặp trên đường đi. Những tia đó gọi là tia nhiệt hay bức xạ nhiệt (đôi khi người ta cũng gọi chính hiện tượng phát ra tia nhiệt là hiện tượng bức xạ nhiệt). Rõ ràng rằng bức xạ nhiệt là một hiện tượng rất phổ biến trong thiên nhiên. Theo lý thuyết thì bất cứ vật nào có nhiệt độ cao hơn  $0^{\circ}\text{K}$  đều bức xạ nhiệt. Tuy nhiên, đồng thời với sự phát ra, còn có sự hấp thụ, nên thực tế có thể nói rằng, chỉ những vật nào bị đốt nóng mới phát ra bức xạ nhiệt. Nếu vật nóng đến phát sáng lên, thì có nghĩa là trong bức xạ nhiệt của vật cũng có những tia mà mắt ta nhìn thấy (tia sáng). Nhưng cũng có những loại mà mắt ta không nhìn thấy như tia hồng ngoại, tia tử ngoại. Như vậy có thể gọi bức xạ nhiệt là tất cả những tia mà các vật phát ra khi bị đốt nóng...Bức xạ nhiệt có thể truyền qua khoảng chân không mà nó không hề làm

nóng khoảng chân không ấy. Chính vì vậy mà mặc dù không gian vũ trụ chịu bức xạ nhiệt rất mạnh của hàng tỉ ngôi sao nóng bỏng như mặt trời mà nó vẫn lạnh lẽo.

### ***Cuộc khủng hoảng ở vùng tử ngoại***

Ngay từ thế kỉ trước, các nhà vật lý đã biết được nhiều tính chất và định luật về bức xạ nhiệt. Có 2 định luật mà chúng ta quan tâm. Định luật thứ nhất nói rằng: “Năng suất bức xạ toàn phần của một vật-tức là năng lượng mà một đơn vị diện tích bề mặt vật phát ra sau mỗi giây-thì tỉ lệ với lũy thừa bốn của nhiệt độ tuyệt đối của nó”. Định luật này do hai nhà bác học Đức là Stêfan và Bôndoman tìm ra... Bình thường ta cũng thấy là nhiệt độ của vật càng cao thì bức xạ nhiệt phát ra càng mạnh, nhưng định luật này chỉ rõ, giả sử nhiệt độ tuyệt đối của vật tăng 2 lần thì bức xạ phát ra sẽ mạnh gấp  $2^4$  lần, tức 16 lần. Và định luật thứ 2 cho biết: “Khi tăng nhiệt độ tuyệt đối của vật thì bước sóng ứng với cực đại của năng suất bức xạ giảm đi-và giảm theo tỷ lệ nghịch”. Định luật này do nhà bác học Vin, người Áo tìm ra. Định luật chỉ rõ rằng vật phát ra nhiều loại bức xạ với các bước sóng khác nhau và khi càng tăng nhiệt độ của vật thì bước sóng của bức xạ có năng suất cực đại sẽ ngắn dần về phía tím của quang phổ. Do đó định luật này gọi là định luật về sự dịch chuyển (hình 4).



Hình 4. Mô tả định luật Vin: khi nhiệt độ tăng lên thì cực đại của đường cong chuyển dần về phía bước sóng ngắn

Muốn kiểm tra lại, ta hãy quan sát một thanh sắt được nung nóng: ban đầu nó phát ra ánh sáng đỏ sẫm và yếu ớt, tiếp tục nung, nó chuyển dần sang màu đỏ tươi, rồi màu da cam, màu vàng, màu lục, màu xanh, màu tím, nghĩa là ánh sáng của nó tím dần và cuối cùng tổng hợp các màu đó tạo thành ánh sáng trắng.

Như vậy là trong tay các nhà vật lý có hai định luật riêng biệt khá phù hợp với thực nghiệm. Nhưng đó là hai mặt khác nhau của cùng một hiện tượng. Vậy thì làm sao thống nhất được hai định luật trên vào một định luật chung?

Nói như các nhà vật lý là làm sao tìm được định luật cho thấy sự phân bố năng lượng của bức xạ nhiệt theo các bước sóng khác nhau và ở nhiệt độ khác nhau. Nếu ta gọi  $\xi_\lambda$  là năng suất bức xạ riêng, nghĩa là năng suất bức xạ có bước sóng  $\lambda$ , thì rõ ràng  $\xi_\lambda$  phải là một hàm số của cả bước sóng  $\lambda$  và nhiệt độ tuyệt đối  $T$ , nghĩa là  $\xi_\lambda = f(\lambda, T)$ .

Vấn đề là làm thế nào để tìm ra biểu thức của hàm  $f(\lambda, T)$  ? Dựa vào những lý thuyết cổ điển, hai nhà vật lý người Anh là Rây-lây và Zin đã đưa ra định luật

thống nhất như sau: “Năng suất bức xạ riêng của vật thì tỷ lệ thuận với nhiệt độ tuyệt đối của vật và tỷ lệ nghịch với lũy thừa bốn của bước sóng tương ứng”.

Lúc đầu, định luật đó có vẻ phù hợp với thực nghiệm. Nhưng rồi người ta thấy nó chỉ phù hợp với những bức xạ có bước sóng dài, nghĩa là những tia có màu vàng, màu da cam, màu đỏ và các tia hồng ngoại. Đối với các bức xạ có bước sóng càng ngắn thì nó càng sai lệch, đặc biệt là các bức xạ tím và bức xạ tử ngoại... Từ định luật Rây-lây-Zin ta suy ra rằng: bước sóng càng ngắn thì năng suất bức xạ phải càng mạnh. Nhưng thực nghiệm lại cho thấy hoàn toàn khác. Sự sai lệch định luật Rây-lây-Zin ở vùng bước sóng ngắn này được các nhà vật lý gọi là cuộc khủng hoảng ở vùng tử ngoại... Hơn nữa, điều nguy hiểm nhất là định luật Rây-lây-Zin dẫn đến hậu quả là năng suất bức xạ toàn phần của vật ở nhiệt độ  $T$  xác định lại bằng vô cùng. Điều đó không những trái với thực nghiệm mà còn phá sản cả về lý thuyết. Năng suất bức xạ của một vật phải là một số hữu hạn chứ không thể là vô cùng được!... Một đại lượng vật lý có thể rất, rất lớn... nhưng không thể bằng vô cùng được.

Thế là định luật Rây-lây-Zin, được suy từ lý thuyết cổ điển một cách chặt chẽ và chính xác, lại không phù hợp với thực nghiệm trong vùng tử ngoại! Không sao giải thích được mâu thuẫn này trong khuôn khổ các quan niệm cổ điển. Như vậy nghĩa là lý thuyết cổ điển đã bế tắc trước hiện tượng bức xạ nhiệt. Lý thuyết khi đã ở trong tình trạng bế tắc thì chẳng khác gì con mèo đang ở trong một ngôi nhà cháy mà chỉ có một cửa thoát ra sông. Con mèo cứ lẩn quẩn từ góc này sang góc kia chứ không nghĩ đến việc nhảy xuống nước, vì điều đó hoàn toàn trái với bản năng của con mèo.

Cuối thế kỉ 19, đối với một số nhà vật lý cũng có một cái gì tương tự xảy ra, khi tòa lâu đài vật lý mà nhiều thế hệ bác học xây dựng nên có nguy cơ bị sụp đổ. Tuy nhiên một số nhà bác học cũng đã nhìn thấy vật lý học cổ điển đã vào ngõ cụt, mà thuyết nhiệt không phải là ngõ cụt duy nhất. Những người cố gắng giải thích hiện tượng điện từ bằng cơ học của môi trường ête cũng thất



bại. Sự bối rối quần lầy các nhà vật lý...Nếu lý thuyết không giải thích nổi sự kiện thì phải cương quyết chấn chỉnh lại nó ngay từ gốc rễ. Lịch sử lại chứng minh rằng: những nhu cầu vĩ đại sản sinh ra những con người vĩ đại, và Anhtan, Plăng đã tìm ra lối thoát cho vật lý cổ điển khỏi ngõ cụt. Nhưng giải pháp của hai ông đã xuất hiện hoàn toàn bất ngờ từ những phía mà không ai chờ đợi cả. Anhtan đã đưa ra lý thuyết tương đối và Plăng đã đưa ra khái niệm “lượng tử”, tạo ra một cuộc cách mạng trong vật lý học và hướng vật lý học đi theo con đường khác.

### ***Ngày 14 tháng chạp năm 1900***

Phát minh của Plăng đã làm cho tên tuổi của ông được vĩnh viễn ghi vào lịch sử khoa học nhân loại. Plăng sinh năm 1858 tại thành phố Kilon nước Đức, trong một gia đình giáo sư luật học. Ngay từ nhỏ ông đã tỏ ra có năng khiếu đặc biệt về âm nhạc và khoa học chính xác... Nhưng khi ông định hiến mình cho vật lý thì có người khuyên ông rằng: tòa lâu đài vật lý học đã hoàn thiện rồi, không còn gì để ông sáng tạo thêm nữa, có chăng chỉ là việc tô vẽ trang điểm thêm thôi! Tuy nhiên Plăng vẫn say mê với lý thuyết nhiệt động học và ông đã trở thành giáo sư vật lý lý thuyết nổi tiếng, tác giả của nhiều công trình nghiên cứu quan trọng. Plăng hiểu rằng lý thuyết bức xạ nhiệt có liên quan trực tiếp đến nhiệt động lực học, do đó ông đã để gần 10 năm nghiên cứu vấn đề này và ngày 14 tháng 12 năm 1900 ông đã trình bày những quan điểm của mình về bức xạ nhiệt trong bản báo cáo tại Viện hàn lâm khoa học Đức. Ngày đó được xem là ngày ra đời của một trong những lý thuyết có tính chất cách mạng nhất của lịch sử vật lý học-lý thuyết lượng tử.

Khi đó Plăng đã hơn 40 tuổi. Trước mắt ông lý thuyết cổ điển về bức xạ nhiệt đang đi vào ngõ cụt, và ông cũng như các đồng nghiệp đã quyết chí tìm lối thoát. Nhiều năm sau, Plăng đã nhớ lại rằng, ông chưa bao giờ làm việc với lòng hào hứng say mê như những năm đó, những năm trước khi bước vào thế kỉ mới. Ban đầu, ý nghĩ của Plăng khá đơn giản. Râyly và Zin đã thống nhất

hai định luật bức xạ làm một và dẫn đến kết quả vô lý. Chẳng lẽ không tìm được một biểu thức nào cho năng suất bức xạ riêng vừa phù hợp với cả hai mà lại không mâu thuẫn với thực nghiệm hay sao? Sau nhiều ngày tháng tìm kiếm, Plăng đã tìm được một biểu thức như vậy. Biểu thức có dạng khá phức tạp, nhưng lại có mấy ưu điểm:

- Hoàn toàn phù hợp với các số liệu thực nghiệm;
- Từ biểu thức đó có thể suy ra hai định luật riêng rẽ của Stêfan- Bôndoman và Vin;
- Biểu thức này không dẫn đến một số vô cùng lớn nào! Có thể nói rằng biểu thức đó hoàn toàn đúng.

Nhưng là một nhà bác học chân chính, Plăng không vội vui mừng. chính ông đã nghi ngờ các biểu thức mà ông tìm ra. Ông hiểu rằng, trong khoa học không thể áp dụng quy tắc: “ Không xét xử kẻ chiến thắng!”. Phải xét xử, và xét xử một cách nghiêm khắc. Nhưng xét xử thì thấy rằng, từ những quan niệm của vật lý cổ điển không thể nào suy ra được biểu thức Plăng. Nhưng biểu thức Plăng lại phù hợp với các sự kiện thực nghiệm. Tình trạng thật là bi tráng! Plăng đứng về phía nào? Đứng về phía các quan niệm cổ điển để chống lại các sự kiện chẳng? Không! Plăng đã đứng về phía các sự kiện để chống lại các quan điểm già cỗi.

Vậy thì vật lý cổ điển đã xét các quá trình hấp thu và bức xạ thế nào? Vật lý cổ điển có một nguyên lý rất cơ bản: đó là nguyên lý khẳng định tính liên tục của năng lượng, nghĩa là nếu một vật phát ra bức xạ nhiệt thì năng lượng được phát ra thành một dòng liên tục tựa như nước trong vòi chảy ra vậy. Sự hấp thu năng lượng cũng diễn ra một cách liên tục như vậy-tính liên tục của năng lượng còn có nghĩa là một vật có thể hoặc nhận thêm hoặc phát ra năng lượng nhỏ bao nhiêu cũng được. Nguyên lý này “có vẻ” quá rõ ràng: ngọn nến đang cháy vẫn phát ra năng lượng sáng một cách liên tục đều đặn chứ không hề nhấp

nháy... Tuy nhiên khi nghiên cứu các quá trình bức xạ nhiệt, Plăng nhận ra thất bại của định luật Raylây- Zin chính là ở chỗ định luật đó xây dựng trên nguyên lý về tính liên tục của năng lượng. Plăng đề ra một quan niệm hoàn toàn mới là: năng lượng bức xạ cũng có tính nguyên tử, tính gián đoạn. Năng lượng được hấp thụ và phát ra một cách gián đoạn theo từng lượng nhỏ xác định, gọi là những lượng tử năng lượng.

Chính nhờ giả thiết về các lượng tử mà Plăng đã rút ra biểu thức năng suất bức xạ riêng một cách vô cùng chính xác. Nhưng vật lý cổ điển lại không có đất sống cho giả thiết này.

Lượng tử của bức xạ là một phần năng lượng vô cùng nhỏ. Nhận biết nó còn khó hơn là cân xem một nguyên tử nặng bao nhiêu. Plăng xác lập rằng các bức xạ khác nhau có các lượng tử với độ lớn khác nhau: độ lớn của lượng tử phụ thuộc vào tần số bức xạ. Bức xạ có tần số càng cao (nghĩa là ánh sáng càng tím hơn) thì năng lượng của mỗi lượng tử càng lớn. Nếu gọi  $\varepsilon$  là năng lượng của mỗi lượng tử và  $\nu$  (nuy) là tần số bức xạ, thì theo Plăng:  $\varepsilon = h\nu$ , với  $h$  là hệ số tỉ lệ gọi là hằng số Plăng. Hằng số Plăng là một hằng số cơ bản của vật lý hiện đại, nó phân ranh giữa vật lý cổ điển và hiện đại. Trong hệ đơn vị SI thì  $h = 6,62 \times 10^{-34}$  jun.giây. Giả thuyết Plăng có nghĩa là năng lượng bức xạ chỉ có thể là một số nguyên các lượng tử riêng biệt, số nguyên chứ không thể là số thập phân.

Chính vì giá trị quá nhỏ của lượng tử năng lượng và ngay ngay một nguồn sáng rất yếu cũng phóng ra hàng tỷ tỷ lượng tử trong một giây, nên ta có cảm giác rằng các nguồn sáng phát ra ánh sáng một cách liên tục. Hơn nữa, mắt người và bất cứ mọi dụng cụ nào cũng đều có quán tính nên nó không thể ghi nhận một cách rõ ràng những hiện tượng nối tiếp nhau rất nhanh. Chính vì vậy mà phản ứng của mắt đối với từng lượng tử sáng đều nằm trong một ấn tượng sáng liên tục.

Thế nhưng, nhà vật lý Xô viết Vavilốp đã bố trí những thí nghiệm rất tài tình cho phép mắt người có thể ghi nhận gần như từng lượng tử sáng một. Đó là vào những năm 30 của thế kỉ này, còn gần đây, vào những năm sáu mươi, nhờ hiệu ứng Môtsbaor, thực tế là người ta đã phát hiện được những lượng tử và cả sự thay đổi năng lượng của lượng tử khi nó chuyển động trong trường hấp dẫn của trái đất.

Có thể nói rằng, ngay nay không còn ai nghi ngờ về giả thuyết lượng tử của Plăng nữa, nhưng vào năm 1900, khi Plăng đưa ra giả thuyết này thì giới khoa học cảm thấy xôn xao, lo lắng, vì giả thuyết của Plăng tuy phù hợp với thực nghiệm nhưng lại xúc phạm một cách nghiêm trọng đến vật lý cổ điển. Chính các nhà bác học cũng cần thời gian để suy nghĩ về một cái gì đó đang vượt ra ngoài khuôn khổ. Những năm 1901, 1902, 1903, 1904 trôi đi, mà “lượng tử” vẫn chưa được ai chú ý, phải chờ đến năm 1905...

### ***Lại một khó khăn nữa của vật lý cổ điển***

Thực ra khó khăn này có từ trước khi xảy ra “Cuộc khủng hoảng ở vùng tử ngoại” của thuyết bức xạ nhiệt. Đó là khó khăn trong việc giải thích hiện tượng quang điện do Héc tìm ra năm 1887. Đó là hiện tượng làm bật điện tử ra khỏi mặt ngoài kim loại khi ta chiếu vào kim loại một luồng ánh sáng có tần số thích hợp. Trong hiện tượng này, người ta thấy nhiều điều rất lạ lùng mà vật lý cổ điển không sao hiểu nổi: để cho điện tử có thể bật ra khỏi một kim loại nào đó thì ánh sáng chiếu tới cần phải có tần số lớn hơn một giá trị xác định gọi là “tần số tới hạn”. Khi ánh sáng có tần số nhỏ hơn tần số tới hạn, thì dù có tăng cường độ chiếu sáng sáng đến đâu chẳng nữa, điện tử cũng không thể bật ra được. Nhưng theo quan niệm của vật lý cổ điển thì chuyện điện tử có bật ra hay không là do năng lượng mà kim loại nhận được của ánh sáng có đủ lớn hay không. Vậy nếu ta tăng mãi cường độ chiếu sáng lên thì thế nào điện tử cũng phải bật ra chứ! Tuy nhiên thực tế chứng tỏ rằng chính tần số ánh sáng-chứ không phải cường độ chiếu sáng-quyết định vấn đề.

Hơn nữa, nếu đo vận tốc của những điện tử bật ra, thì người ta cũng thấy rằng vận tốc đó không phụ thuộc vào cường độ chiếu sáng mà chỉ phụ thuộc vào tần số ánh sáng! Nhưng vật lý cổ điển cãi lại rằng: “Sao lại thế! Nếu cường độ chiếu sáng càng lớn thì thì điện tử thu được càng nhiều năng lượng và nó phải bật ra với vận tốc càng lớn chứ!” Nhưng thực tế vẫn là thực tế.

Rõ ràng là những quy luật của hiện tượng quang điện chẳng phù hợp chút nào với những quan niệm cổ điển! Biết làm sao bây giờ?

### ***Lượng tử ánh sáng***

Năm 1905, Anbe Anhxtanh đã công bố năm công trình khoa học quan trọng, khi đó ông mới 26 tuổi và chỉ là một viên chức vô danh trong sở cấp bằng phát minh Thụy Sĩ. Một trong năm công trình của ông là thuyết tương đối, đã làm đảo lộn toàn bộ nền tảng của vật lý học và của nhận thức nói chung. Công trình lớn thứ hai là lý thuyết về hiện tượng quang điện, lý thuyết này cũng đồng thời là lý thuyết mới về bản chất ánh sáng.

Rõ ràng là khi chiếu vào kim loại, chùm ánh sáng đã truyền cho điện tử một năng lượng để điện tử có thể bật ra. Theo điện động lực học cổ điển, ánh sáng là sóng điện từ, và năng lượng chuyển trong một chùm ánh sáng được phân bố đều trên mặt sóng. Trong những thí nghiệm quang điện, người ta đã đo kỹ càng cả cường độ lẫn tần số của ánh sáng chiếu tới, và tính toán theo lý thuyết cổ điển thì thấy rằng: cần phải chiếu sáng lâu hàng chục phút thì điện tử mới thu được đủ năng lượng để bật ra. Nhưng thực tế thì, sau khi chiếu sáng có tần số đủ lớn là điện tử bật ra ngay tức khắc. Muốn giải thích sự “bật ra ngay tức khắc” này, vật lý cổ điển phải nêu ra nhiều lý lẽ giả tạo. Chẳng hạn như phải cho rằng: cả mạng tinh thể kim loại nhận năng lượng của ánh sáng rồi bằng cách nào đó tức khắc dồn năng lượng cho một điện tử để điện tử này bật ra, hoặc cho rằng điện tử bật ra không lấy năng lượng của chùm sáng, mà lấy năng lượng ở một nguồn nào khác trong kim loại, và ánh sáng chỉ là điều kiện thích

hợp kích thích cho quá trình đó xảy ra mà thôi...Nhưng cả hai lý lẽ này đều mâu thuẫn với thực nghiệm, vì năng lượng của điện tử bật ra hoàn toàn không phụ thuộc vào bản chất của kim loại được chiếu sáng.

Anhxtanh đã suy nghĩ sâu sắc về điều này và thấy rằng chỉ còn một giả thuyết hợp lý là: năng lượng chuyển trong chùm sáng không phân bố đều trên mặt sóng mà tập trung vào một phần rất nhỏ của mặt sóng, tức là tập trung thành một hạt, gọi là photon. Rất nhạy cảm với giả thuyết về lượng tử năng lượng mà Plăng nêu ra, Anhxtanh cho rằng năng lượng của photon vừa bằng lượng tử năng lượng và hạt photon chính là lượng tử năng lượng ánh sáng. Nếu ánh sáng có tần số  $\nu$  thì năng lượng của một photon bằng  $\varepsilon = h\nu$  trong đó  $h$  là hằng số Plăng.

Tóm lại, theo Anhxtanh, *ánh sáng chính là một dòng những hạt photon, dòng những lượng tử.*

Ngay sau khi phát minh của Anhxtanh, tất cả những vấn đề khó hiểu trong hiện tượng quang điện đều được giải thích khá đơn giản và rõ ràng.

Khi chiếu sáng, mỗi photon va chạm với điện tử sẽ truyền năng lượng của nó cho điện tử.

Nếu điện tử bật ra thì rõ ràng ta có thể viết được:

$$h\nu = p + \frac{mv^2}{2}$$

trong đó  $h\nu$  là năng lượng của photon.

$p$  là năng lượng để giải phóng điện tử ra khỏi những liên kết trong kim loại (thường được gọi là công thoát điện tử) và  $mv^2/2$  là động năng để điện tử có khối lượng  $m$  bật ra với vận tốc  $v$ .

Nhìn vào phương trình trên, ta thấy ngay rằng, điện tử có thể bật ra hay không và bật ra với vận tốc bằng bao nhiêu, điều đó hoàn toàn do tần số  $\nu$  của ánh sáng quyết định.

Rõ ràng là muốn hiện tượng quang điện xảy ra thì  $h\nu$  không thể nhỏ hơn  $p$ , nghĩa là phải có  $\nu \geq \frac{p}{h}$ .

Khi  $\nu$  nhỏ hơn  $p/h$  thì cường độ chiếu sáng lại không quan trọng : hàng ngàn photon hay một photon bay tới kim loại cũng thế, vì điện tử bị “điếc” đối với tất cả các photon. Nhưng khi điều kiện  $\nu \geq \frac{p}{h}$  được thỏa mãn thì tình hình lại khác: cường độ chiếu sáng càng mạnh, nghĩa là số photon chiếu vào kim loại trong mỗi giây càng nhiều thì càng nhiều điện tử bị bật ra (và mỗi photon làm bật ra một điện tử).

Như vậy, với quan niệm ánh sáng là một dòng hạt photon, Anhtan đã giải thích được hiện tượng quang điện một cách mỹ mãn. Nhưng quan niệm này, cũng như giả thuyết Planck đã phá vỡ những nền tảng của vật lý cổ điển. Theo vật lý cổ điển, ánh sáng chỉ là sóng điện từ chứ không thể là những hạt.

Lý thuyết Anhtan lại làm bùng lên cuộc tranh luận kéo dài suốt hai thế kỷ trước về bản chất ánh sáng, và hơn thế nữa, còn gợi ra cho người ta nhiều tư tưởng mới lạ: ánh sáng là gì? Là sóng hay là hạt, hay đồng thời vừa là sóng vừa là hạt?

Chính vấn đề sóng – hạt này là một trong những nguyên nhân ra đời của cơ học lượng tử, và chúng ta sẽ trở lại vấn đề này khi nói về giả thuyết De Broie.

### ***Khó khăn trong việc giải thích quang phổ***

Con người không nhìn thấy nguyên tử, vậy làm thế nào mà hiểu được cấu trúc bên trong của nó? Chính là nhờ suy luận qua các sự kiện thực nghiệm và nhờ những “tin tức” từ nguyên tử phát ra: ánh sáng từ các nguyên tử bị kích

thích phát ra chính là những “tin tức” rất tốt và rất chính xác giúp ta hiểu được cấu tạo nguyên tử. Nhưng tiếc thay, chính những tin tức này lại đưa vật lý cổ điển vào con đường bế tắc.

Chúng ta hãy cùng các nhà vật lý suy luận qua các sự kiện thực nghiệm. Năm 1911, nhà vật lý người Anh Rudolfo đã dùng chùm tia anpha ( $\alpha$ )<sup>(1)</sup> để bắn phá các nguyên tử của một chất. Ông nhận thấy rằng, trong tuyệt đại đa số các trường hợp những hạt  $\alpha$  nặng, nhanh và mang điện dương này dễ dàng xuyên qua nguyên tử và hầu như nó mới bị lệch mà thôi.

Tại sao hạt  $\alpha$  xuyên qua được nguyên tử một cách dễ dàng? Vì phần lớn thể tích nguyên tử là rỗng. Và khi hạt  $\alpha$  bị lệch mạnh, thì cái gì làm cho nó lệch? Phải có một hạt nặng mang điện dương khá lớn đẩy nó (vì điện tích cùng dấu đẩy nhau). Tại sao hầu như hạt  $\alpha$  mới bị lệch?

-Vì hạt đẩy nó tuy là hạt nặng nhưng lại chiếm thể tích rất nhỏ bé, nên hầu như hạt  $\alpha$  mới đến gần hạt nặng này và mới bị đẩy.

Thế là, với những câu hỏi và trả lời như trên, Rudolfo đã đưa ra một mô hình nguyên tử: nguyên tử là một hệ thống bao gồm một hạt nhân nhỏ bé mang điện dương và rất nặng. Đường kính hạt nhân cỡ  $10^{-13}$  cm, nghĩa là 10 vạn lần nhỏ hơn đường kính nguyên tử. Ở cách nhân rất xa là những điện tử quay xung quanh như những hành tinh quay quanh mặt trời. Chính những hạt nhân này đã làm lệch hạt  $\alpha$  trong thí nghiệm của Rudolfo.

Theo mô hình này thì nguyên tử và hệ mặt trời chỉ khác nhau ở một điểm là lực tác dụng giữa hạt nhân và điện tử là lực điện chứ không phải lực hấp dẫn giữa mặt trời và các hành tinh.

---

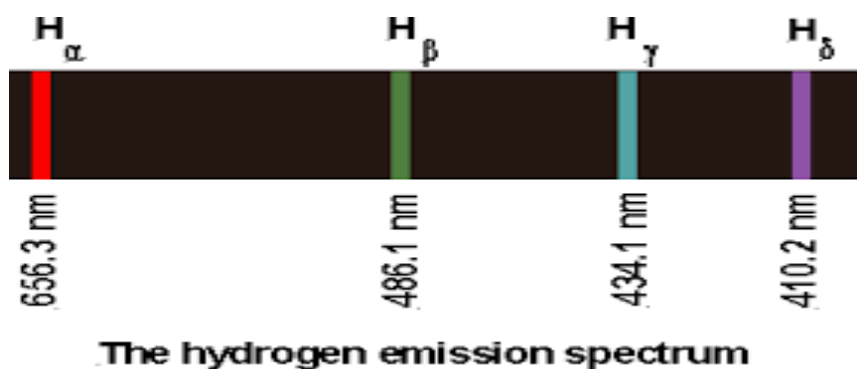
(1) Tia  $\alpha$  là tia phóng xạ từ hạt nhân nguyên tử phát ra. Hạt  $\alpha$  chính là hạt có điện tích bằng +2 và khối lượng bằng 4 (gồm có 2 proton và 2 neutron)



Bây giờ ta hãy xem nguyên tử của Rudofa phát ra ánh sáng như thế nào?

Chuyển động của điện tử quanh hạt nhân nguyên tử là chuyển động có gia tốc, vì vậy theo điện động lực học cổ điển, nó phải phát ra sóng điện từ, và sẽ mất dần năng lượng, nên điện tử sẽ quay chậm lại và không sao tránh khỏi lao vào hạt nhân rất nhanh, chẳng khác gì vệ tinh rơi xuống trái đất khi bị hãm dần trong khí quyển. Đầu tiên một điện tử rơi vào nhân, rồi một điện tử khác...thế là hạt nhân chẳng còn là hạt nhân và nguyên tử cũng chẳng còn là nguyên tử nữa...Nhưng thực tế thì nguyên tử vẫn còn, các vật và các chất vẫn tồn tại... Đó là một chỗ yếu của mô hình Rudofa và điện động lực cổ điển.

Nhưng, bề tắc quan trọng hơn của vật lý cổ điển là vấn đề quang phổ. Ngay từ những năm sáu mươi của thế kỉ 19, người ta đã biết rằng khi ở trạng thái khí, nếu được kích thích, nguyên tử một số chất sẽ phát ra ánh sáng. Dùng lăng kính để phân tích ánh sáng đó (làm tán sắc ánh sáng), ta sẽ thu được một hình ảnh gọi là quang phổ. Quang phổ do nguyên tử phát ra thường gồm một số vạch màu riêng biệt, cách quãng nhau một cách gián đoạn, mỗi vạch ứng với một tần số xác định. Hệ các vạch quang phổ này hoàn toàn đặc trưng cho nguyên tử của các chất đã cho như bản ghi nhận dạng của một người (hình 5).



Hình 5. Các vạch quang phổ của hydro

Vạch  $H_{\alpha}$ :  $\nu=4,6.10^{14}$  héc     $H_{\beta}$ :  $\nu=6,2.10^{14}$  héc

$H_{\gamma}$ :  $\nu=6,9.10^{14}$  héc         $H_{\delta}$ :  $\nu=7,3.10^{14}$  héc

Nhưng chính các vạch quang phổ này lại là một đòn giáng mạnh vào mô hình nguyên tử của Rudolfo và các quan điểm cổ điển, vì theo quan niệm cổ điển, các điện tử quay quanh hạt nhân phải phát ra ánh sáng có tần số thay đổi liên tục. Nhưng nếu tần số ánh sáng thay đổi liên tục thì quang phổ cũng phải là một dải màu liên tục từ màu nọ chuyển sang màu kia chứ không thể là những vạch màu cách quãng được.

Các vạch quang phổ đã đưa vật lý cổ điển vào một thế “bí”.

### ***Người gỡ thế bí: Nin Bo***

Trước tình hình bế tắc của vật lý cổ điển trong việc giải thích các vạch quang phổ, nhà vật lý trẻ tuổi người Đan Mạch Nin Bo lại lao vào nghiên cứu. Có lẽ mô hình nguyên tử của Rudolfo sai chăng? Không! Từ bỏ mô hình đó là điều chưa nên. Hãy thử thay đổi mô hình đó như thế nào để điện tử có thể quay xung quanh hạt nhân, phát ra ánh sáng mà lại không rơi vào hạt nhân!

Năm 1912 qua đi, nhưng trong kí ức của các nhà vật lý vẫn còn những ấn tượng mạnh mẽ do Anhtanh gây nên với thuyết tương đối và thuyết prôtôn. Những đòn nặng nề mà Anhtanh giáng vào vật lý cổ điển không thể không cổ vũ các nhà vật lý trẻ tuổi, không thể không tăng thêm lòng can đảm cho họ trong suy nghĩ. Và năm 1913 Bo đã nêu ra những giả thuyết sau:

*Giả thuyết thứ nhất:* “Trong nguyên tử, dù chuyển động có gia tốc, điện tử cũng có thể không bức xạ ánh sáng. Muốn khỏi rơi vào hạt nhân, điện tử phải chuyển động trên một đường đặc biệt gọi là quỹ đạo. Trên quỹ đạo này, điện tử không phát ra bức xạ và người ta gọi là điện tử ở trạng thái dừng”

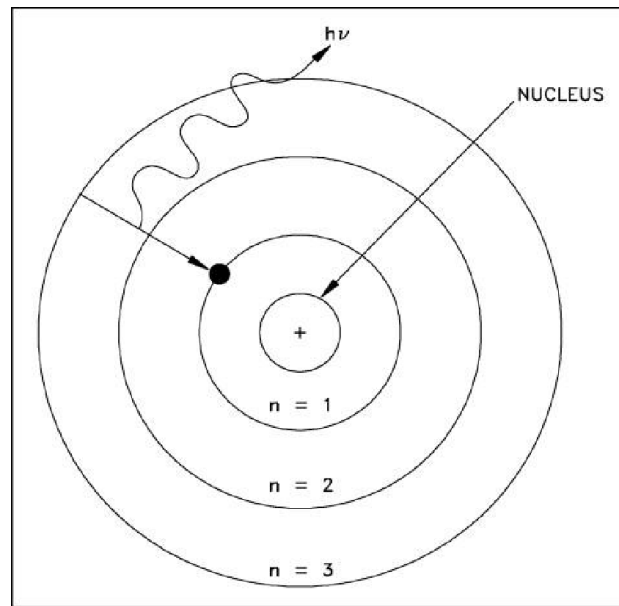
*Giả thuyết thứ hai:* “trong tất cả những quỹ đạo có thể, điện tử chỉ có thể ở trên quỹ đạo nào mà mômen động lượng của M bằng một số nguyên lần hằng số Plăng  $h = \frac{h}{2\pi}$ , nghĩa là  $M = nh$ ”.

Chúng ta thấy rằng giả thuyết thứ hai cũng chính là một sự ép buộc, nó ép buộc mômen động lượng (và do đó cả năng lượng) của điện tử chỉ có thể nhận những trị số gián đoạn, thay đổi theo từng lượng xác định. Rõ ràng rằng giả thuyết này thừa kế những tư tưởng của Plăng và được gọi là sự lượng tử hóa quỹ đạo.

Bây giờ, điện tử bỗng dừng chuyển từ quỹ đạo này sang quỹ đạo khác có năng lượng nhỏ hơn thì sao? Phần năng lượng dư thừa biến đi đâu? Năng lượng phải được bảo toàn và Bo đi đến giả thuyết tiếp sau.

*Giả thuyết thứ ba:* “Điện tử chỉ bức xạ khi nó chuyển từ quỹ đạo có năng lượng lớn  $E_1$  sang quỹ đạo có năng lượng nhỏ hơn  $E_2$  (hình 6). Phần năng lượng thừa thoát ra khỏi nguyên tử dưới dạng một lượng tử năng lượng mà Anhxtanh gọi là photon có tần số  $\nu$  và  $h\nu = E_1 - E_2$ ”.

Chính vì những hạt photon này đã bay đến mắt ta, gây cảm giác về màu sắc và độ chói của ánh sáng. Những hạt này cũng có thể đi qua lăng kính thủy tinh để rồi tạo ra quang phổ trên màn ghi hoặc trên kính ảnh. Mỗi loại photon có tần số xác định sẽ cho ta một vạch màu xác định với tần số đó. Số photon ứng với vạch màu nào càng nhiều thì vạch đó càng sáng chói. Trong mỗi nguyên tử có thể có những bước nhảy của điện tử giữa nhiều cặp quỹ đạo khác nhau, cho nên nguyên tử có thể phát ra nhiều loại photon khác nhau và ta cũng có nhiều vạch màu khác nhau trên quang phổ.



Hình 6. Điện tử chuyển từ quỹ đạo ngoài vào quỹ đạo trong và hạt ánh sáng (phôtôn) phóng ra

Áp dụng những giả thuyết Bo để giải thích quang phổ do hydro phát ra, người ta thấy sự phù hợp hoàn toàn giữa lý thuyết và thực nghiệm. Các tần số của vạch quang phổ tính theo thuyết Bo hoàn toàn trùng với tần số đo được theo vị trí của vạch quang phổ trên kính ảnh. Trước khi xuất hiện lý thuyết Bo, các nhà vật lý đã nghĩ đến nát óc về quy luật của những quang phổ phức tạp. Thậm chí Ritbe, Banme và nhiều người khác đã mài mò tìm ra những công thức rất chính xác để liên hệ các tần số của các vạch quang phổ của một chất, những công thức cũng không sao giải thích được tại sao lại có các công thức đó (các công thức vật lý thường thông minh hơn người tìm ra chúng!). Khi Bo đã chứng minh rằng quang phổ là hình ảnh của những bước nhảy điện tử trong nguyên tử thì các nhà bác học bắt đầu thấy dễ chịu hơn. Thuyết Bo đã cho ta một sự giải thích về quang phổ đơn giản và đẹp để làm sao! Các công thức mà trước đây phải mài mò tìm kiếm thì nay có thể suy ra được từ thuyết Bo. Dựa trên quang phổ quan sát được, ta lại có thể suy ra những điều kiện sinh sống của điện tử trong nguyên tử.

Nhưng cả ba giả thuyết của Bo đều không thể suy ra được từ vật lý cổ điển, dù bằng cách nào. Bo khiêm tốn gọi giả thuyết đó là tiên đề mà không chứng minh, thực ra không thể không chứng minh được trong khuôn khổ của vật lý cổ điển... Hơn mười năm sau, những tiên đề Bo đã được chứng minh một cách bất ngờ...trong...Cơ học lượng tử.

Thuyết Bo, sau này được Sômôfen hoàn thiện thêm, đã giải thích được nhiều đặc điểm của quang phổ hydro, đã dẫn tới việc mô tả điện tử trong nguyên tử bằng ba số lượng tử  $n, l, m$  và do đó dẫn tới việc sắp xếp các điện tử trong nguyên tử thành từng lớp, phân lớp và do đó còn giải thích được nhiều tính chất hóa học của các nguyên tố khác...Thuyết Bo thông trị trong vật lý học từ năm 1913 đến năm 1925, đã góp phần phát triển và thúc đẩy nhiều công trình lý thuyết và thực nghiệm khác, đã giải thích và tiên đoán được nhiều hiện tượng của nguyên tử.

### ***Thuyết Bo vẫn còn nhiều hạn chế***

Thuyết Bo đã có những đóng góp đáng kể vào sự phát triển của vật lý nguyên tử, nhưng chẳng bao lâu, người ta và ngay cả Bo nữa, đã thấy rằng thuyết Bo để lộ ra rất nhiều hạn chế.

Chúng ta biết rằng ánh sáng do nguyên tử phát ra không những được đặc trưng bằng tần số mà bằng cả độ chói. Thuyết Bo đã tính được tần số của các vạch quang phổ nhưng không sao tính được độ chói của vạch đó. Mặt khác theo thuyết Bo thì nguyên tử hydro phải có trục đối xứng giống như một cái đĩa, nhưng thực nghiệm lại cho thấy nguyên tử hydro có tính đối xứng cầu.

Thất bại rõ rệt nhất của thuyết Bo là nó không thể giải thích được quang phổ của heli, là nguyên tố đứng ngay sau hydro trong bảng Mendêlêep.

Người ta đã thấy những sự bất ổn nội tại trong thuyết Bo: tương tác giữa hai hạt nhân và điện tử được nghiên cứu hoàn toàn trong khuôn khổ cổ điển

(Bo vẫn giữ nguyên các quan niệm cổ điển về không gian, thời gian, vận tốc, quỹ đạo...), nhưng lý thuyết Bo lại bắt các điện tử phải chịu những hạn chế của các quy tắc lượng tử hoàn toàn trái với quan niệm cổ điển. Nhà bác học Bregơ người Anh đã nói đùa rằng, theo thuyết Bo thì chẳng khác gì ngày thứ hai, thứ tư, thứ sáu chúng ta phải dùng các quan niệm cổ điển, còn ngày thứ ba, thứ năm, thứ bảy lại theo quan niệm lượng tử.

Nhìn xa hơn chúng ta sẽ thấy rằng các tiên đề mà Bo đưa ra thật là thiếu tự nhiên, độc đoán và đột ngột:

-Dựa vào đâu mà lại bắt điện tử chỉ được quay theo những quỹ đạo dừng với năng lượng xác định?

-Dựa vào đâu mà lại cấm các điện tử không được bức xạ trên quỹ đạo?

Đặc biệt là , Bo đã nhận thấy rất sâu sắc tất cả những hạn chế trong lý thuyết của mình. Trong quá trình phát triển, thuyết Bo đã có những sự nhân nhượng đúng lúc nên nó đã tự giải nguy được cho chính mình trước nhiều sự kiện mới. Dù sao đó cũng là một bước tiến lớn trong việc nhận thức thế giới nguyên tử. Bo đã nhiều lần nhấn mạnh đến tính tạm thời của lý thuyết mà ông đưa ra và cần phải hoàn thiện nó bằng lý thuyết mới...Thuyết Bo chính là cái cầu giữa lý thuyết cổ điển và lý thuyết mới. Thời gian trôi đi, lý thuyết mới đã ra đời và Lui Đơ Broi là người đầu tiên mở đường.

### ***Cơ học lượng tử phải ra đời***

Chúng ta vừa đi qua những bế tắc của vật lý cổ điển trong việc giải thích các hiện tượng xảy ra trong phạm vi nguyên tử trong thế giới vi mô. Những bế tắc đó chứng tỏ rằng trong thế giới vi mô, vật lý cổ điển không thích hợp nữa, cần phải thay nó bằng một lý thuyết mới.

Thoạt nhìn, chúng ta thấy có ba chỗ bế tắc rõ nét: bế tắc trong cuộc khủng hoảng ở vùng tử ngoại, bế tắc trong việc giải thích hiện tượng quang điện và bế tắc trong việc giải thích quang phổ vạch (đó là chưa kể đến hiện tượng phóng xạ cũng là một bế tắc của vật lý cổ điển). Để thoát khỏi những bế tắc này, các nhà bác học phải đề ra những giả thuyết mới:

-Plăng nêu ra giả thuyết về lượng tử năng lượng.

-Anhxtanh nêu ra giả thuyết về những hạt lượng tử ánh sáng.

-Bo nêu ra giả thuyết về sự tồn tại những quỹ đạo dừng trong nguyên tử, mà khi điện tử chuyển động trên quỹ đạo đó sẽ có năng lượng hoàn toàn xác định và không bức xạ ánh sáng.

Xét cho cùng, thực chất của giả thuyết Bo là: ở trong nguyên tử, các đại lượng vật lý đặc trưng cho điện tử như năng lượng, mô men động lượng...chỉ có thể nhận những giá trị gián đoạn, nghĩa là các đại lượng đó bị lượng tử hóa.

Như vậy ba giả thuyết trên của ba nhà bác học, tuy dùng để giải thích những hiện tượng khác nhau nhưng rõ ràng là cùng bắt nguồn từ giả thuyết của Plăng và cùng dẫn đến, cùng hoàn thiện cho một luận điểm chung là: “Trong thế giới vi mô, một số đại lượng vật lý đặc trưng cho các hạt vi mô chỉ có thể nhận những giá trị gián đoạn-các đại lượng đó bị lượng tử hóa”.

Phải chăng sự lượng tử hóa của các đại lượng vật lý là một đặc điểm của thế giới vi mô sao? Dù sao thì sự lượng tử hóa đó cũng trái với tinh thần của lý thuyết cổ điển. Trước đây Plăng, Bo và Anhxtanh đã bắt buộc phải đưa ra khái niệm “lượng tử” một cách gượng ép. *Điều mà chúng ta đòi hỏi là phải có một lý thuyết mới, sao cho trong lý thuyết đó, những cái gì đúng của vật lý cổ điển vẫn giữ lại được và những cái gì trái với vật lý cổ điển như sự lượng tử hóa lại xuất hiện một cách tự nhiên.* Cơ học lượng tử chính là một lý thuyết đáp ứng đòi hỏi đó.

Có lẽ, khi nêu ra giả thuyết lượng tử, Plăng không ngờ rằng mình đã gieo một hạt giống cho cả một cánh đồng mênh mông của vật lý hiện đại. Trong cái công thức khiêm tốn  $\varepsilon=h\nu$ , nào ai ngờ lại có chứa cả sóng, cả hạt, cả trường và biết bao điều khác nữa! Nghĩ cho cùng thì chính cơ học lượng tử đã ra đời từ cái công thức khiêm tốn đó.



## PHẦN THỨ BA

### CƠ HỌC LƯỢNG TỬ LÀ GÌ

---

#### **CƠ HỌC LƯỢNG TỬ RA ĐỜI TỪ THUYẾT ĐƠ BROI**

##### **Sóng là gì?**

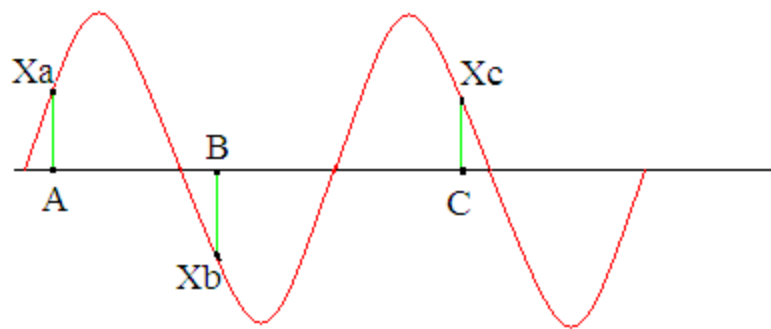
Nguồn gốc sâu xa của cơ học lượng tử là giả thuyết Plank. Nhưng cơ học lượng tử đã ra đời dưới 2 hình thức khác nhau: cơ học sóng và cơ học ma trận. Cơ học sóng bắt đầu từ giả thuyết Đơ-Broi. Muốn hiểu giả thuyết Đơ-Broi trước hết ta phải xem sóng là gì?

Ta ném hòn đá xuống nước, từ đó những vòng tròn truyền lan đi. Đó là sóng trên mặt nước. Ta hãy quan sát nút bậc bậc trên sóng: Chiếc nút chỉ nhấp nhô trên sóng, dao động theo nước chứ không bị cuốn theo sóng, chứng tỏ các hạt nước thì dao động tại chỗ còn sóng thì lan xa mãi ra xa. Như vậy trong sóng không phải là chính phần tử vật chất đã lan truyền, mà là những dao động đã được lan truyền từ phần tử này sang phần tử khác. Người ta định nghĩa: Sóng là sự lan truyền của dao động. Vì dao động có năng lượng, nên sóng cũng chính là sự lan truyền năng lượng (nhưng ko phải là lan truyền vật chất).

Cho đến cuối thế kỉ 19, người ta biết 2 loại sóng: sóng cơ và sóng điện từ. Sóng cơ là sự lan truyền dao động của các hạt vật chất trong môi trường truyền sóng, còn sóng điện từ là sóng lan truyền dao động của điện từ. Sóng cơ chỉ truyền được nhờ 1 môi trường vật chất nào đó (như không khí, nước...), còn sóng điện từ thì truyền được cả trong chân không, chính vì vậy trên trái đất chúng ta, tiếng ầm ầm khi phóng tàu vũ trụ là không chịu nổi đối với tai người, thì trên mặt trăng tiếng ầm ầm đó lại không có, vì mặt trăng không có lớp khí quyển xung quanh để truyền sóng âm.

Để mô tả sóng người ta thường dùng 1 hàm sóng. Hàm sóng cho biết li độ của sóng tại bất kì vị trí nào ở bất kì thời điểm nào.

Ly độ là gì? Chúng ta hãy nhìn hình 7, đó là ảnh chụp sóng nước ở 1 thời điểm  $t$  xác định. Đường thẳng là đường nằm ngang khi không có sóng. Đường cong hình sin là dạng sóng.



**Hình 7. Ảnh chụp sóng nước ở một thời điểm  $t$  xác định**

Tại các điểm A,B,C sóng nhất nhô một độ cao là  $x_A, x_B, x_C$ . Người ta gọi  $x_A, x_B, x_C$  là ly độ dao động của sóng của các điểm A,B,C tại thời điểm  $t$  mà ta chụp ảnh. Rõ ràng là, nếu ly độ càng lớn thì sóng càng mạnh. Có thể nói ly độ cho biết độ mạnh yếu của sóng. Hàm biểu diễn ly độ theo các biến số không gian  $x$  và thời điểm  $t$  chính là hàm sóng.

Trong đời sống hằng ngày, tiếng “sóng” được dùng khá nhiều, nhưng trong vật lý nói đến sóng là phải nói đến 2 đại lượng đặc trưng cho sóng đó là tần số  $\nu$  (nuy) và bước sóng  $\lambda$  (lamda).

Tần số  $\nu$  và bước sóng  $\lambda$  liên hệ với vận tốc truyền sóng  $c$  bằng biểu thức

$$c = \nu \cdot \lambda$$

Sóng đơn giản là sóng phẳng đơn sắc. Đó là sóng có bước  $\lambda$  hoàn toàn xác định và mặt mà sóng truyền đi là mặt phẳng.

## Sóng Đơ Bơ

“Những tư tưởng vĩ đại thường đơn giản”. Điều đó không biết có thật đúng hay không, nhưng những tư tưởng đã dẫn Đơ Bơ đến phát minh quả thật là đơn giản, nhưng sự đơn giản đến táo bạo.

Ngay sau khi Anh Xtanh đưa ra thuyết lượng tử ánh sáng, người ta đã thừa nhận tính hai mặt “Sóng – hạt” của ánh sáng. Không thể nào hiểu được hiện tượng giao thoa ánh sáng nếu không thừa nhận ánh sáng là sóng, nhưng cũng không thể hiểu được hiện tượng quang điện nếu ko thừa nhận ánh sáng là hạt. Cuối cùng không phải là “ba phải”, mà bằng suy nghĩ có logic các nhà bác học đã thừa nhận rằng ánh sáng vừa là sóng vừa là hạt. Đó là hai mặt “sóng-hạt” của ánh sáng.

Các đại lượng đặc trưng cho sóng là bước sóng  $\lambda$  và tần số  $\nu$  của sóng. Các đại lượng đặc trưng cho hạt là năng lượng  $\varepsilon$  và động lượng  $p$  của hạt.

Giữa các đặc trưng của hạt và đặc trưng của sóng có những biểu thức liên hệ với nhau thông qua hằng số Plank:

$$\varepsilon = h\nu$$

$$p = h / \lambda$$

Hằng số Plăng chính là yếu tố nối liền hai tính sóng và hạt với nhau.

Đơ Bơ tự hỏi rằng nếu những đối tượng mà ta tưởng thuần túy là sóng lại có tính chất hạt, thì liệu những đối tượng mà ta tưởng thuần túy là hạt có thể có tính chất sóng không?

Năm 1924, bằng trực giác minh mẫn của, Đơ Bơ trả lời là “có”. Những hạt mà ta tưởng chỉ thuần túy là tính hạt cũng có tính sóng. Nội dung của giả thuyết Đơ Bơ như sau:

“Mỗi hạt bất kì có năng lượng  $\varepsilon$  và động lượng là  $p$  đều gắn liền với một sóng có tần số  $\nu = \varepsilon / h$  và bước sóng  $\lambda = h / p$ ”.

Đơ Bơ gọi sóng mà ông tiên đoán là sóng vật chất, còn người đời gọi sóng đó là sóng Đơ Bơ.

Sóng Đơ Broi là gì? Đó là một loại sóng hoàn toàn mới, không có gì giống sóng âm, sóng ánh sáng hay bất kì loại sóng nào khác mà lâu nay các nhà vật lý vẫn gọi là sóng phát và thu được. Vì vậy, các nhà bác học già lắc đầu hoài nghi giả thuyết của Đơ Broi...thuyết “nhảm nhí”, một thứ sóng “ma”! Tuy nhiên trong bức thư gửi cho Mặc Born, Anhxtanh có khuyên Born đọc công trình của Đơ Broi và viết: “Anh hãy cứ đọc đi, hình như tác giả là một tay điên rồ, nhưng lập luận lại rất chặt chẽ và vững vàng”...Các nhà khoa học đã tốn biết bao nhiêu là giấy mực để tranh luận về giả thuyết sóng của Đơ Broi. Cho đến báo cáo gần nhất trong tạp chí “Báo cáo của viện hàn lâm khoa học Pháp” số 3-1973, chính Đơ Broi lại tranh luận một lần nữa về bản chất sóng mà ông đưa ra. Còn chúng ta, chúng ta sẽ hiểu ý nghĩa của sóng Đơ Broi qua những hiện tượng mà nó tự thể hiện.

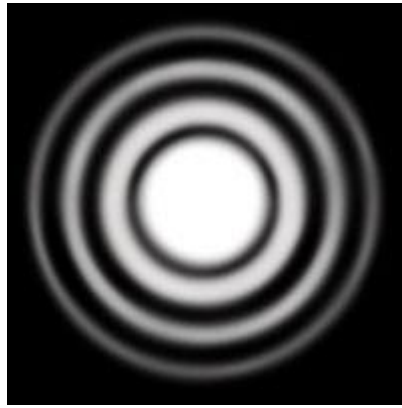
### **Sóng Đơ Broi là có thật.**

Làm thế nào để phát hiện được sóng Đơ Broi?

Sóng Đơ Broi luôn luôn gắn liền với các hạt vật chất chuyển động chứ không có nguồn nào phát ra được, cũng không có máy nào thu được. Nhưng nếu sóng đó có thật thì nhất định phải tìm được hiện tượng mà trong đó sóng thể hiện bản chất của mình. Các nhà bác học cố gắng tìm sóng Đơ Broi trong một hiện tượng điển hình thể hiện tính chất sóng là hiện tượng nhiễu xạ.

Hiện tượng đó là: Khi gặp một vật cản nhỏ trên đường truyền của nó, sóng sẽ đi vòng qua vật cản và do đó bị lệch khỏi phương truyền thẳng, hoặc sóng truyền qua một lỗ nhỏ đục trên màn chắn sóng, mép lỗ sẽ trở thành mặt cản sóng và sóng sẽ đi vòng qua mép lỗ mà lệch khỏi phương truyền thẳng. Cả hai trường hợp lệch phương đều gọi là hiện tượng nhiễu xạ.

Ta hãy cho một chùm sóng sáng chiếu qua một lỗ nhỏ khoét trên vật chắn rồi đập lên màn ảnh. Lỗ nhỏ này sẽ gây ra hiện tượng nhiễu xạ và trên màn ta sẽ thu được bức tranh nhiễu xạ (hình 8)



**Hình 8 bức tranh nhiễu xạ ánh sáng.**

Do là hệ thống những vành sáng và tối xen kẽ nhau (tựa như những vòng gợn lồi và lõm xen kẽ nhau như sóng nước). Nếu ánh sáng không phải là sóng thì trên màn thì ta chỉ thu được vòng tròn sáng đều chứ làm sao có những vành sáng và vành tối xen kẽ nhau được. Cho nên hiện tượng *nhiễu xạ* là một hiện tượng đặc trưng của sóng. Ở chỗ xảy ra nhiễu xạ thì chắc chắn ở đó có sóng. Chính việc phát minh ra hiện tượng nhiễu xạ ánh sáng vào đầu thế kỷ 19 đã chứng minh hùng hồn rằng ánh sáng là sóng.

Vậy liệu bước sóng Đơ Broi có gây ra hiện tượng nhiễu xạ không?

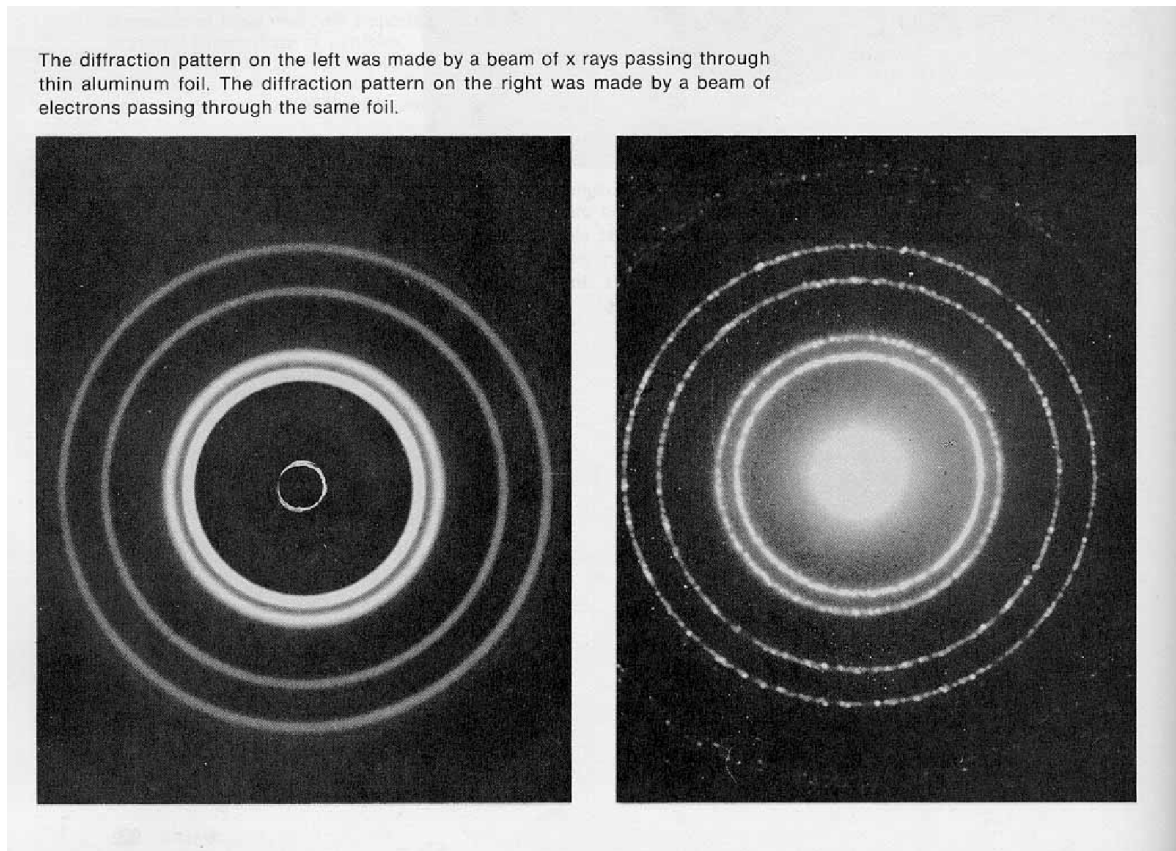
Các nhà bác học định thí nghiệm đối với sóng Đơ Broi của điện tử, xem sóng có gây ra hiện tượng nhiễu xạ không?

Điện tử có khối lượng  $m$  xấp xỉ  $10^{-31}$ kg, nếu vận tốc  $v$  bằng khoảng  $6.10^5 \frac{m}{gy}$ , thì động lượng  $p = m v$  và bước sóng Đơ Broi của điện tử:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{6,6.10^{-34}}{10^{-30}.6.10^5} \approx 10^{-9} m$$

Theo thuyết sóng, để có thể quan sát được hiện tượng nhiễu xạ, kích thước của vật cản phải xấp xỉ bằng bước sóng, nhưng sóng Đơ Broi của điện tử nhỏ hơn bước sóng của ánh sáng hàng trăm lần nên những thiết bị để tạo nên hiện tượng nhiễu xạ ánh sáng hoàn toàn không thích hợp với sóng Đơ Broi của điện tử. May mắn năm 1927, nhà bác học Laor người Đức đã phát hiện được hiện tượng

nhiều xạ của tia Ronghen bằng cách cho tia Ronghen đi qua một tinh thể rồi chiếu lên kính ảnh.



**Hình 9. Hình ảnh nhiễu xạ tia Ronghen**

Ít lâu sau, Đêbai và Sêrô cải tiến thí nghiệm của Laor và cũng thu được bức tranh nhiễu xạ tia Ronghen gồm những vòng sáng tối như hình 8. Thế mà, bước sóng Đơ Broi của điện tử cũng có giá trị xấp xỉ bằng bước sóng của tia Ronghen. Vậy cũng có thể dùng mạng tinh thể để quan sát sự nhiễu xạ của điện tử, nếu có. Nhưng giữa tia Ronghen và tia điện tử có sự khác nhau là: Tia Ronghen qua tinh thể mà không bị hấp thụ gì. Còn điện tử thì bị hấp thụ hoàn toàn trong lớp tinh thể chỉ dày độ vài phần milimet. Do đó, hoặc phải lấy những bản tinh thể rất mỏng hoặc phải cho chùm điện tử phản xạ ở mặt ngoài tinh thể. Khi phản xạ như vậy, điện tử sẽ bị nhiễu xạ trên những lớp nguyên tử ở ngoài cùng của tinh thể. Sau khi bị phản xạ, người ta cho chùm điện tử đập vào kính ảnh (vì chùm điện tử cũng có tác dụng lên kính ảnh như tia Ronghen). Đem

nhúng vào thuốc hiện, kính ảnh sẽ bị đen ở những chỗ bị điện tử đập vào, những chỗ điện tử ko đập vào thì chỗ đó sẽ sáng. Năm 1927, các nhà bác học người Mỹ là Đêvison và Giecme đã phát hiện được hiện tượng nhiễu xạ điện tử, nhưng phát hiện bằng ống đếm chứ không phải bằng kính ảnh. Sau đó các nhà bác học Tactacôpski và đồng thời nhà bác học Tômsơn đã thu được bức tranh nhiễu xạ điện tử trên kính ảnh cũng gồm những vành sáng tối như trên hình 10. (trang 72).

Họ đã gửi những hình ảnh đầu tiên đó đến các phòng thí nghiệm vật lý lớn nhất thế giới như những báu vật vô giá chứng tỏ tính sóng của chùm điện tử: nếu điện tử không có tính sóng thì làm sao có thể gây ra hiện tượng nhiễu xạ để tạo thành những vành sáng vành tối xen kẽ nhau trên kính ảnh?

Thế là ba năm sau khi Đơ Broi tiên đoán, giả thuyết táo bạo về tính sóng của các hạt đã được thực nghiệm xác nhận rạch ròi: có xảy ra hiện tượng nhiễu xạ của chùm điện tử. Vậy điện tử có tính chất sóng. Sóng gắn liền với chuyển động của điện tử gọi là sóng Đơ Broi của điện tử. Chúng ta nói sóng Đơ Broi của điện tử là có thật với ý nghĩa rằng tính sóng của điện tử là có thật. Người ta ước tính bước sóng theo lý thuyết Đơ Broi, và tính bước sóng theo kết quả thực nghiệm thì thấy rằng lý thuyết hoàn toàn phù hợp với thực nghiệm. Không còn ai nghi ngờ về tính chất sóng của điện tử nữa.

Ngoài điện tử người ta còn phát hiện được hiện tượng nhiễu xạ đối với nhiều hạt khác nữa, những hạt nặng hơn và phức tạp hơn điện tử. Như vậy tính sóng không phải đặc trưng của hạt này hay hạt khác mà là một tính chung của các hạt vi mô, biểu thị một định luật tổng quát của chuyển động của các hạt vi mô. Tính sóng của các hạt vi mô phải được thể hiện trong lý thuyết mới về các hạt vi mô là cơ học lượng tử.

### **Cơ học lượng tử ra đời từ giả thuyết Đơ Broi**

Giả thuyết Đơ Broi đã khẳng định rằng các hạt vi mô ngoài tính hạt còn có tính sóng. Nhưng mô tả hạt vi mô như một hạt thông thường chuyển động theo quỹ

đạo- tức là mô tả theo cơ học cổ điển-đã dẫn đến những khó khăn và bế tắc ( Mô hình nguyên tử của Bo và Rudopho). Vậy hãy thử **mô tả hạt vi mô một cách khác đi, xem hạt vi mô như là một sóng thì sao?** Có thể nói rằng cơ học lượng tử là lý thuyết về hạt vi mô dựa trên cơ sở xem hạt vi mô như là một sóng. Cơ học lượng tử mô tả trạng thái của hạt bằng một hàm sóng, gọi là hàm  $\psi(s)$  và đưa ra phương trình cơ bản mà hàm sóng phải có nghiệm đúng.

Một nguồn gốc nữa của cơ học lượng tử đó là xuất phát từ sự tương quang giữa cơ học và quang học. Chúng ta biết rằng quang học có 2 ngành là quang hình và quang sóng, quang hình xem ánh sáng như là một dòng hạt truyền thẳng theo các tia, và quang sóng xem ánh sáng như là một sóng lan truyền theo các mặt sóng. Người ta đã chứng minh được rằng, quang hình tương đương với cơ học cổ điển và người ta phải tự hỏi: Quang sóng sẽ tương đương với cơ học nào ? Đơ Broi cũng là người đầu tiên đã nêu lên sự tương tự bị lãng quên này và nhờ vậy đã gọi cho Srôđingơ xây dựng môn cơ học lượng tử tương đương với quang sóng. Srôđingơ đã xuất phát từ phương trình truyền sóng và phương trình cơ bản của quang sóng để xây dựng lên nên phương trình cơ bản của môn cơ học mới- Cơ học lượng tử.

Có một điều thú vị là khi bước sóng của ánh sáng càng nhỏ thì tính hạt của ánh sáng càng rõ, ta có thể xem sóng sáng là thực sự truyền thẳng và những qui luật của quang sóng qui về những quy luật của quang hình. Cũng tương tự như vậy, khi bước sóng Đơ Broi của hạt vi mô càng nhỏ thì tính hạt của hạt vi mô càng rõ và những qui luật của cơ học lượng tử cũng quy về những quy luật của cơ học cổ điển.

Như vậy dù xét dưới khía cạnh nào cũng phải nói rằng cơ học lượng tử ra đời trên cơ sở thừa nhận tính sóng của các hạt vi mô-sóng Đơ Broi. Chỉ có điều là sóng đó có bản chất hoàn toàn khác với những sóng thực mà người ta đã biết như sóng nước, sóng âm, sóng điện từ. Chúng ta sẽ còn dịp bàn xem sóng đó là sóng gì?



## HÀM SÓNG VÀ PHƯƠNG TRÌNH SƠ ĐỒ

### Hàm sóng để mô tả các hạt vi mô:

Theo thuyết sóng mỗi sóng được miêu tả bằng một hàm sóng, biểu diễn theo ly độ  $x$  theo các biến số không gian  $r$  và thời gian  $t$ .

Ta đã biết sóng đơn giản nhất là sóng phẳng đơn sắc và hàm sóng nó có dạng:

$$x = A \cos(\omega t - kr)$$

Trong đó  $x$  là ly độ dao động sóng tại thời điểm  $t$  ở vị trí cách nguồn phát sóng một khoảng là  $r$ ,  $A$  giá trị cực đại của ly độ,  $A$  thường được gọi là biên độ,  $\omega = 2\pi\nu$  với  $\nu$  là tần số của sóng và  $k = 2\pi/\lambda$  với  $\lambda$  là bước sóng.

Bây giờ xem rằng hạt vi mô cũng đồng thời có tính sóng, cơ học lượng tử cũng mô tả mỗi hạt vi mô (hay tập hợp các hạt vi mô giống nhau) bằng một hàm sóng. Vậy hàm sóng có dạng như thế nào?

Hạt chuyển động đơn giản nhất là hạt chuyển động tự do, tức là hạt không tương tác với bất kỳ hạt nào khác (không nằm trong trường lực nào). Hạt tự do có năng lượng  $\varepsilon$  và động lượng  $p$ . Theo công thức của Đơ Bơ-ri sóng ứng với hạt này sẽ có tần số  $\nu = \varepsilon/h$  và bước sóng  $\lambda = h/p$ .

Tự nhiên người ta nghĩ rằng hạt chuyển động đơn giản nhất sẽ tương ứng với sóng đơn giản nhất và cơ học lượng tử đã thừa nhận rằng: "Hàm sóng mô tả hạt chuyển động tự do chính là hàm sóng phẳng đơn sắc có tần số và bước sóng xác định theo công thức Đơ Bơ-ri"

Như vậy hàm sóng của hạt tự do được thừa nhận là:

$$x = A \cos(\omega t - kr)$$

Trong đó  $r$  được xem là tọa độ xác định vị trí của hạt và  $t$  là thời điểm mà ta đang xét.

Nhưng theo một công thức về hàm số phức thì:

$$A^{-i\varphi} = A \cos \varphi + iA \sin \varphi,$$

Thì  $A \cos \varphi$  chẳng qua chỉ là phần thực của số phức  $A e^{-i\varphi}$  vậy hàm  $x = A \cos(\omega t - kr)$  chẳng qua chỉ là một phần thực của một hàm phức  $\psi$  :

$$\psi = A e^{-i(\omega t - kr)}$$

Cơ học lượng tử đã làm một thay đổi là sau khi phức hóa hàm sóng như trên thì lấy *hàm phức  $\psi$  làm hàm sóng của hạt tự do* chứ không lấy hàm thực  $x$  như cũ.

Tại sao lại phải phức hóa hàm sóng như vậy? Các nhà bác học cho rằng số phức phải xuất hiện trong bước sóng De Broie như một cái gì vốn có do bản chất của sóng De Broie. Bởi vì nếu trong vật lý cổ điển sóng là những sao động có thực lan truyền trong một môi trường xác định thì trong vật lý lượng tử không thể xem sóng De Broie như là 1 sự lan truyền những dao động có thực được..Do đó mà số ảo được xuất hiện trong hàm sóng.

Như vậy hàm sóng của hạt tự do có dạng là  $\psi = A e^{-i(\omega t - kr)}$ . Còn nếu hạt không tự do mà có tương tác với các hạt khác(hạt nằm trong một trường lực khác) thì hàm sóng sẽ có dạng phức tạp hơn và *tùy trường hợp cụ thể mà hàm sóng sẽ có những dạng khác nhau*.

Do những điều kiện toán học và vật lý mà hàm sóng phải có những tính chất như liên tục,giới nội và chuẩn hóa. Tuy nhiên chúng ta không thể đi sâu vào lý luận toán học mà giải thích những tính chất ấy.

### **Phương trình Srôđingơ (Schrodinger)-Cơ học sóng**

Phương trình Srôđingơ chính là phương trình cho phép ta tìm được hàm sóng của hạt vi mô, cho nên nó giúp ta giải quyết được nhiệm vụ cơ bản của cơ học lượng tử và được gọi là phương trình cơ bản của cơ học lượng tử.

Trong cơ học cổ điển cũng có một phương trình như vậy đó là phương trình  $\vec{F} = m\vec{a}$ , biểu diễn định luật thứ 2 của Newton.Giải phương trình này chúng ta sẽ biết được tất cả những điều muốn biết về chuyển động của hạt.

Ngoài ra trong cơ học cổ điển còn một phương trình quan trọng nữa là phương trình truyền sóng do Đalămbe tìm ra. Phương trình này mô tả sự truyền sóng bất kì trong môi trường đàn hồi, nhưng xét cho cùng thì phương trình của Đalămbe cũng là kế thừa của phương trình Newton.

Như vậy trong cơ học cổ điển có hai phương trình riêng: một phương trình mô tả chuyển động của hạt, một phương trình mô tả chuyển động của sóng. Trong cơ học lượng tử đối tượng vi mô đồng thời có cả hai tính chất sóng và hạt, nên phương trình cơ học lượng tử phải thay thế được cho cả hai phương trình tiền bối của nó. Phương trình cơ bản phải vừa giải thích được tính hai mặt của sóng hạt của các hạt vi mô, vừa giải thích được tính gián đoạn về trị số của mỗi đại lượng vật lý, nghĩa là giải thích được sự lượng tử hóa các đại lượng vật lý.

Quả thật các nhà vật lý, lý thuyết đã có một niềm tin mạnh mẽ: dù trong tay chưa có gì ngoài giả thuyết Đơ Broi lúc đó còn chưa được thực nghiệm xác nhận, họ vẫn quyết tâm xây dựng phương trình cho lý thuyết mới. Bắt đầu từ cái gì? Thay đổi phương trình Newton để phương trình này có thể bao gồm cả tính sóng và hạt ư? Không được trong phương trình Newton không có chỗ nào có thể đưa những đặc trưng của sóng vào cả (phải chăng vì hạt là 1 cái gì “cơ bản” hơn?). Trên cơ sở thừa nhận hàm sóng của hạt tự do như ta đã biết Srôdinger đã cố gắng thay đổi phương trình sóng để nó có thể phản ánh tính hạt, tính lượng tử của sóng. Ông đã tìm ra phương trình biểu diễn sự thay đổi của hàm sóng theo thời gian như sau:

$$i \hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = - \frac{\hbar^2}{2m} \Delta \psi + U \psi$$

Trong đó  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ , m là khối lượng hạt, U là thế năng của hạt trong trường thế.

Kí hiệu  $\partial \psi / \partial t$  là đạo hàm riêng phần cấp 1 của hàm sóng theo thời gian t, còn ký hiệu  $\Delta$  được gọi là toán tử Laplace, là ký hiệu của 1 phép toán tác dụng lên

hàm sóng  $\psi$  thường được gọi là toán tử Laplace sao cho  $\Delta \psi = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2}$

và  $\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2}$  là đạo hàm riêng phần cấp 2 của  $\psi$  theo  $x$ . Phương trình trên được gọi là phương trình Schrödinger hay phương trình cơ bản của cơ học lượng tử. Các nhà bác học cho rằng không thể chứng minh được phương trình này mà phải thừa nhận nó như 1 tiên đề, một nguyên lý của lý thuyết mới. Chỗ dựa chủ yếu của phương trình Schrödinger đó là thực nghiệm chứ không phải là các phương trình tiên bối của nó, cũng không phải là những yêu cầu của lý thuyết. Phương trình viết ở trên là dạng đơn giản nhất. Ngoài ra phương trình Schrödinger còn viết dưới một số trường hợp khác nữa, mỗi dạng tiện dùng trong một số trường hợp.

Ý nghĩa to lớn của phương trình này là nó cho phép ta tìm được hàm sóng mô tả chuyển động của hạt vi mô và tính được trị số của các đại lượng vật lý đặc trưng cho hạt.

Về nguyên tắc cơ học lượng tử cho rằng có thể áp dụng phương trình Schrödinger để giải mọi bài toán các hạt vi mô. Những khó khăn về tính toán ngày nay sẽ được các máy tính điện tử khắc phục.

Như vậy phương trình Schrödinger là cơ sở để dựng lên một lý thuyết tương đối hoàn chỉnh để giải các bài toán vận động của các hạt vi mô. Lý thuyết đó được gọi là cơ học sóng. Vì nó giải quyết mọi vấn đề trên cơ sở thừa nhận một hàm sóng ứng với mỗi trạng thái của hạt.

### **Phương trình Dirac**

Khi xây dựng phương trình của mình, Schrödinger xuất phát từ vật lý cổ điển là lý thuyết chỉ đúng với những vận tốc nhỏ. Đối với những chuyển động có vận tốc gần bằng ánh sáng thì vật lý cổ điển không còn đúng nữa, do đó mà phương trình Schrödinger cũng không đúng nữa.

Vấn đề đặt ra là cần phải sửa đổi phương trình Schrödinger theo thuyết tương đối của Anhxtanh, là lý thuyết cho những chuyển động xấp xỉ vận tốc ánh sáng. Mãi đến năm 1928 nhà vật lý người Anh P.M. Dirac mới hoàn thành công việc

sửa đổi này và đưa ra phương trình mới gọi là phương trình Srôdinger tương đối tính hay phương trình Dirac. Lý thuyết Dirac có ý nghĩa vật lý quan trọng, nhưng về hình thức còn kỳ dị và trừu tượng hơn mọi giả thuyết trước nó. Một trong những thành tựu quan trọng nhất là thuyết Dirac là thuyết mà từ đó người ta rút ra khái niệm spin của điện tử (Uhlenbeck và Goudsmit đã đưa ra khái niệm spin năm 1925 làm mọi người xôn xao nhưng nhờ đó đã giải thích được cấu trúc tinh vi của quang phổ). Giả thuyết spin đã được thực nghiệm xác nhận và do đó được một người thừa nhận.

Một điều tuyệt diệu nữa là từ thuyết Dirac còn tiên đoán được sự tồn tại của một hạt mới là pôđitrôn, có khối lượng bằng điện tử nhưng mang điện trái dấu điện tử. Đó là phản hạt của điện tử, một phản hạt đầu tiên mà con người phát hiện được, và tài tình hơn là phát hiện nhờ tiên đoán trên lý thuyết. Bảy năm sau người ta mới tìm thấy được pôđitrôn trên thực nghiệm.

Như vậy, phương trình Dirac đã phối hợp một cách hài hòa lý thuyết lượng tử với lý thuyết tương đối, lý thuyết spin và lý thuyết đối xứng điện tích (hạt và phản hạt), là những lý thuyết mà người ta tưởng là không có liên quan với nhau.

## **CÁC ĐẠI LƯỢNG VẬT LÝ CÓ THỂ NHẬN NHỮNG GIÁ TRỊ GIÁN ĐOẠN VỚI MỘT XÁC SUẤT NÀO ĐÓ**

**Bài toán dừng trong cơ học lượng tử và tính gián đoạn của mỗi đại lượng vật lý:**

Đối với những trạng thái mà hạt có năng lượng xác định, được gọi là trạng thái dừng thì hàm sóng trạng thái của hạt không phụ thuộc vào thời gian. Với những trạng thái như vậy người ta áp dụng phương trình Srodinger không còn phụ thuộc vào thời gian hay phương trình dừng:

$$\Delta \psi = \frac{2m}{\hbar^2} (U - E) \psi$$

Trong đó  $E$  là năng lượng toàn phần của hạt vi mô, còn các ký hiệu khác vẫn như cũ.

Nghiệm của phương trình này liên quan đến các quá trình (vì trong quá trình phải có ít nhất 1 thứ biến đổi theo thời gian), mà liên quan tới vấn đề cấu tạo, cấu trúc của hệ. Biết được cấu trúc là điều rất quan trọng vì qua đó ta sẽ biết được hoàn cảnh để quá trình có thể xảy ra. Nguyên tử, phân tử, tinh thể chính là những cấu trúc mà trong đó các quá trình vi mô xảy ra. Việc giải phương trình Schrödinger cho các hạt đó được gọi là giải các bài toán dừng. Áp dụng phương trình Schrödinger cho nguyên tử Hidrô người ta thu được kết quả như Bo và Sommerfeld đã thu được: các điện tử chỉ tồn tại trong các mức năng lượng xác định gọi là những trạng thái dừng, nghĩa là *năng lượng của điện tử chỉ là những trị số xác định, cách quãng nhau chứ không thể có bất kỳ trị số nào*. Tình trạng đó gọi là sự gián đoạn các mức năng lượng hay *sự lượng tử hóa năng lượng*.

Cơ học lượng tử cũng chứng tỏ rằng mỗi trạng thái dừng của nguyên tử được xác định bởi 3 số lượng tử:  $n, l, m$ . Đặc biệt để xác định 3 số lượng tử ấy, *chúng ta không cần thừa nhận thêm một tiên đề nào khác nữa*. Như vậy cơ học lượng tử đã đặt nền móng cho lý thuyết Bo.

Trong các bài toán dừng, không những năng lượng mà một số đặc trưng khác của hạt vi mô cũng bị lượng tử hóa: chúng chỉ nhận các giá trị xác định. Thế là mơ ước của chúng ta đã đạt được vì trong phương trình sóng ta đã tìm được những giá trị gián đoạn, tìm thấy sự lượng tử hóa, tức tìm thấy hạt.

Từ nghiệm của phương trình Schrödinger, ta thấy điện tử chỉ được phép nằm ở những trạng thái có năng lượng xác định. Năng lượng của điện tử chỉ thay đổi khi điện tử chuyển từ trạng thái này sang trạng thái khác, do đó năng lượng của điện tử cũng thay đổi một cách hoàn toàn xác định.

Nếu điện tử chuyển từ trạng thái có mức năng lượng  $E_1$  sang mức năng lượng  $E_2$  nhỏ hơn, thì phần năng lượng thừa sẽ phát ra dưới dạng lượng tử Plăng:

$$E_1 - E_2 = h\nu$$

Ngược lại nếu đang ở mức năng lượng nhỏ  $E_2$  điện tử hấp thụ một lượng tử năng lượng  $h\nu$  sao cho  $E_2 + h\nu = E_1$  thì điện tử chuyển sang mức  $E_1$ .

Như vậy phương trình Schrödinger đã thống nhất hai giả thuyết xuất sắc: giả thuyết Planck về lượng tử năng lượng và giả thuyết DeBroie về tính sóng hạt. Có thể nói rằng sóng và hạt đã thống nhất với nhau trong phương trình Schrödinger, phương trình cơ bản của cơ học lượng tử.

### **Xác suất là gì?**

Để tiếp tục tìm hiểu về cơ học lượng tử cần làm sáng tỏ khái niệm xác suất. Chúng ta xét việc gieo một con xúc xắc trong trò chơi cá ngựa. Con xúc xắc ta không bao giờ biết trước nó sẽ ra mặt nào, vì sự lật đó bao giờ cũng phụ thuộc vào rất nhiều yếu tố mà ta không thể nào tính trước được. Vì thế ta nói, sự lật một mặt nào đó ví dụ mặt 2 chấm là một sự kiện hoàn toàn ngẫu nhiên. Sự kiện ngẫu nhiên không phải là một cái gì huyền bí mà chỉ vì chúng phụ thuộc vào quá nhiều nguyên nhân phức tạp khiến ta không thể tính toán trước được. Tuy nhiên từng sự kiện ngẫu nhiên thì ngẫu nhiên, nhưng có một số rất lớn những sự kiện ngẫu nhiên cùng loại, lại có thể có qui luật, Ta xét sự lật ngựa của đồng tiền. Nếu số lần thử không nhiều lắm, thì sự lật ngựa xảy ra không đều đặn. Nhưng nếu số lần thử đủ lớn thì số lần sấp ngựa xấp xỉ bằng 1 nửa số lần gieo. Nhà khoa học Bayes đã gieo đồng tiền 4040 lần trong đó có 2048 lần ngựa( sấp xấp xỉ  $\frac{1}{2}$  tổng số lần thử).

Gieo con xúc sắc cũng vậy nếu số lần thử đủ lớn, thì vì không có mặt nào đặc biệt hơn mặt nào nên số lần xuất hiện của các mặt xấp xỉ bằng nhau và xấp xỉ bằng  $\frac{1}{6}$  tổng số lần gieo. Nhưng ta không thể chỉ rõ được số lần gieo nào xuất hiện mặt nào.

Ta gọi tần suất của một sự kiện là 1 phân số mà mẫu số là tổng số lần thử, còn tử số là số lần xảy ra sự kiện mà ta mong đợi. Trong những điều kiện thử như nhau khi số lần thử rất lớn thì những sự kiện ngẫu nhiên có tần suất khá ổn định chẳng hạn tần suất lật mặt ngựa của đồng tiền là  $\frac{1}{2}$ , tần suất xuất hiện của 1 mặt con xúc xắc là  $\frac{1}{6}$ .

Những sự kiện ngẫu nhiên có tần suất ổn định giữ một vai trò to lớn trong khoa học kỹ thuật, cũng như trong đời sống. Để đánh giá khả năng xảy ra của sự kiện có tần suất ổn định người ta dùng khái niệm xác suất: *xác suất là một phân số cho biết giá trị gần đúng của tần suất xảy ra sự kiện ngẫu nhiên khi số lần thử là rất lớn*. Nói cách khác xác suất một sự kiện cho biết khả năng xảy ra sự kiện đó nhiều hay ít. Trong thí dụ ta vừa xét, xác suất của việc lật một mặt của con xúc xắc là  $\frac{1}{6}$  và xác suất của sự lật ngựa đồng tiền là  $\frac{1}{2}$ .

Xác suất bao giờ cũng nằm trong giới hạn từ 0 đến 1, nếu xác suất của một sự kiện là 0 thì sự kiện đó không bao giờ xảy ra. Nếu gieo con xúc xắc mà ta mong chờ mặt 7 chấm thì xác suất sự kiện này là 0. Nếu xác suất = 1 thì sự kiện ấy chắc chắn xảy ra ví dụ ta ghi 2 chấm lên cả 6 mặt của xúc xắc thì bất kì lần thử nào ta cũng được mặt 2 chấm. Chúng ta vừa tìm hiểu qua thế nào là xác suất. Ngày nay lý thuyết của xác suất trở thành một ngành toán học rất quan trọng có nhiều ứng dụng trong khoa học và thực tiễn. Lý thuyết xác suất là một công cụ của vật lý thống kê là môn vật lý nghiên cứu về hệ có rất nhiều hạt. Những định luật vật lý liên hệ đến xác suất của sự kiện vật lý này hay sự kiện vật lý khác gọi là những định luật có tính thống kê. Những định luật ấy không áp dụng cho từng cá thể đơn giản mà áp dụng cho một tập hợp số đông các cá thể.

Khái niệm xác suất đã thâm nhập vào vật lý học từ thế kỷ 19, gắn liền với tên tuổi các nhà vật lý tài năng Maxwell, Bôndoman, Ghipxơ. Vào thời kì đó vật lý học đang nghiên cứu chuyển động nội tại của chất khí. Chúng ta hãy xem ngay trong một khối khí rất nhỏ chứa hàng tỷ tỷ phân tử khí. Về nguyên tắc chúng ta có thể đánh số từng phân tử rồi lập phương trình để giải chính xác bài toán chuyển động của từng phân tử. Nhưng không ai điên rồ mà làm như vậy, vì



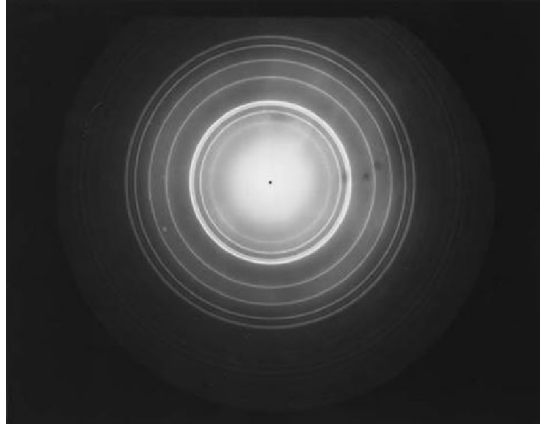
muốn lập và giải được cũng mất hàng nghìn năm. Hơn nữa, theo dõi chuyển động của một phân tử riêng lẻ cũng chẳng có ích lợi gì vì các phân tử khí luôn luôn chuyển động hỗn loạn, nên cả khối khí có những đặc trưng mới như nhiệt độ, áp suất, thể tích...mà từng phân tử riêng lẻ không có. Để xác định áp suất và nhiệt độ, người ta cũng không cần cũng như không thể xác định chính xác vận tốc và động lượng của từng phân tử riêng lẻ 1 cách chính xác, nhưng phải xác định được vận tốc trung bình và động lượng trung bình của các phân tử. Chính phương pháp lý thuyết xác suất cho phép ta tính được các đại lượng trung bình ấy.

Trong phương pháp thống kê xác suất người ta không quan tâm đến các cá thể mà chỉ tìm giá trị trung bình cho một tập hợp gồm một số lớn cá thể. Đối với từng cá thể chúng ta chỉ có thể tiên đoán theo xác suất. Chẳng hạn nếu định luật thống kê cho biết có  $\frac{1}{3}$  số phân tử có vận tốc trong khoảng từ 500m/gy đến 600m/gy thì điều đó có nghĩa là xác suất để tìm thấy một hạt có vận tốc trong khoảng đó là  $\frac{1}{3}$ .

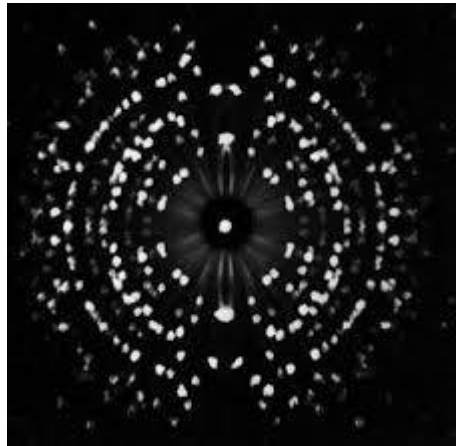
Trong cơ học lượng tử khái niệm xác suất được sử dụng một cách triệt để.

### **Phân tích lại thí nghiệm nhiễu xạ điện tử để tìm ý nghĩa của sóng De Broie**

Chúng ta trở lại thí nghiệm nhiễu xạ điện tử. Một sợi dây kim loại nóng đỏ phát ra một chùm điện tử, chùm điện tử này đi qua một lỗ nhỏ của một màn chắn rồi bị nhiễu xạ bởi một màng mỏng kim loại có cấu trúc đa tinh thể và đập vào kính ảnh. Sau khi hiện hình mỗi chỗ điện tử đập vào sẽ gây ra một chấm đen. Nếu ngay từ đầu khi chỉ có vài chục điện tử đập vào kính ảnh ta ngừng thí nghiệm thì sẽ nhận được gì.



**Hình 10. Hình ảnh nhiễu xạ điện tử khi có rất nhiều điện tử đập vào kính ảnh.**



**Hình 11. Khi mới có vài chục điện tử đập vào hình ảnh**

Nếu như điện tử chỉ có tính hạt mà không có tính sóng thì chúng sẽ chỉ đập vào kính ảnh trong phạm vi một vòng tròn tương ứng với lỗ của màn chắn. Nhưng trên hình 11 ta thấy những vệt đen rải rác hoàn toàn ngẫu nhiên. Điện tử đập vào chỗ nào thì đó là một sự kiện ngẫu nhiên mà không ai có thể tiên đoán trước được. Tại sao điện tử lại đập một cách ngẫu nhiên như vậy? Người ta giải thích là do tính “sóng” của điện tử, nếu điện tử thuần túy là hạt thì người ta sẽ tính được điện tử sẽ đập vào đâu. Kéo dài thời gian thí nghiệm các chấm đen có hệ thống rõ ràng. Khi có nhiều điện tử đập vào trên kính ảnh sẽ xuất hiện những vành đen trắng rõ rệt (hình 10) đó chính là những vành nhiễu xạ. Vành đen là những chỗ điện tử đập vào, vành trắng là những chỗ điện tử không đập vào. Có vành đen nhiều có vành đen ít và *sự nhiều ít đó hoàn toàn có qui luật*. Ta cũng

thấy một điều tương tự khi dẫn ra xác suất: vị trí mà các điện tử đập vào đâu đó là hoàn toàn ngẫu nhiên, nhưng lại một số lớn điện tử ta lại thấy có qui luật. Thuyết sóng có thể tính được vị trí những vành sáng vành tối và chỉ ra được bao nhiêu phần trăm số điện tử sẽ đập vào vành đó: vì qui luật của những vành đó phù hợp với lý thuyết sóng cho nên ta gọi là qui luật sóng. Tuy nhiên chúng ta đừng nghĩ rằng tính sóng là do một số lượng lớn điện tử gây ra. Không tính sóng được thể hiện ngay ở chuyển động của từng điện tử, bởi vì nếu điện tử không có tính sóng thì người ta phải tính trước được rằng điện tử sẽ đập vào đâu. Hơn nữa dùng một nguồn cấp điện tử rất yếu sao cho điện tử đập lên kính gần như từng hạt một thì cuối cùng sau một thời gian đủ lâu ta cũng thu được những vành nhiễu xạ như “hình 11”.

Rõ ràng rằng những chỗ đen nhiều là những chỗ có nhiều điện tử đập vào hơn, hay *xác suất để điện tử đập vào chỗ đó lớn hơn*. Xác suất đập vào một chỗ nào đó lớn hơn, nhưng chưa chắc điện tử này lại đập vào chỗ đó mà có thể đập vào chỗ khác. Người ta có thể đo độ đen để tìm ra xác suất. Như vậy thuyết *ĐơBroi* giải thích được hiện tượng nhiễu xạ điện tử và đã tính được xác suất để điện tử bay vào một vị trí nào đó là bao nhiêu (nhưng không thể khẳng định chắc chắn được điện tử nào sẽ đập vào chỗ nào).

Chúng ta trở về thuyết sóng-hạt ánh sáng, để trên cơ sở đó tìm hiểu ý nghĩa của sóng *ĐơBroi*. Theo ngôn ngữ của thuyết sóng, thì cường độ sóng ánh sáng tỷ lệ với bình phương biên độ sóng, theo ngôn ngữ của thuyết hạt thì cường độ ánh sáng tỷ lệ thuận với mật độ hạt ánh sáng. Vậy phối hợp 2 ngôn ngữ có thể nói: “Bình phương biên độ sóng thì tỷ lệ với mật độ hạt. Nhưng với thí nghiệm nhiễu xạ điện tử thì mật độ hạt ở một vùng tỷ lệ với xác suất để tìm thấy điện tử bay vào vùng đó (tức là điện tử tồn tại ở chỗ đó).

Qua hai lần tỷ lệ như vậy, chúng ta có thể kết luận một cách tổng quát là:

*Bình phương biên độ sóng tại một vị trí thì tỷ lệ với xác suất tìm thấy hạt ở vị trí đó.* Luận điểm trên chính là điều mà điều mà MácBorn dùng để giải thích bản chất của sóng *ĐơBroi*.

Giả thuyết về sóng DeBroi chỉ đứng vững vàng nhờ có thí nghiệm nhiễu xạ điện tử và trong thí nghiệm đó người ta chỉ tính được xác suất tìm thấy hạt bay vào chỗ nào nên MácBorn mới nói:

Sóng DeBroi là sóng mà bình phương biên độ của nó tại mỗi vị trí tỷ lệ với xác suất tìm thấy hạt ở vị trí đó. Suy cho cùng cách giải thích của MácBorn cũng suy ra từ hiện tượng và cũng không nói gì hơn về điều mà hiện tượng đã nói. Mọi người dễ dàng chấp nhận cách giải thích này vì cũng thật khó mà phủ nhận hiện tượng.

Như vậy sóng DeBroi là sóng cho biết xác suất để hạt thể này hoặc thể nọ nên người ta gọi sóng đó là *sóng xác suất*. Cách giải thích bình phương biên độ sóng tỷ lệ với xác suất tìm thấy hạt dẫn người ta đến ý nghĩa rằng: nếu hạt chắc chắn tồn tại trong một vùng nào đó (xác suất bằng 1) thì bình phương biên độ sóng tính cho vùng đó phải bằng 1, *đó là sự chuẩn hóa hàm sóng*. Sự chuẩn hóa này dẫn đến khả năng tiên đoán được nhiều đặc trưng vật lý khác của hạt theo xác suất.

### **Tính thống kê của cơ học lượng tử:**

Chúng ta đã thấy rằng những định luật vật lý có quan hệ đến khái niệm xác suất là những định luật có tính thống kê. Thế mà trong cơ học lượng tử ngay từ thí nghiệm đầu tiên- thí nghiệm dùng để làm chỗ dựa cho lý thuyết sóng DeBroi có thể đứng vững-người ta đã dùng đến khái niệm xác suất để mô tả. Với toàn bộ điện tử thì ta có thể nói rõ có bao nhiêu % đập vào vành nào, nhưng với mỗi điện tử thì chỉ có thể nói xác suất để đập vào 1 vành nào đó là bao nhiêu.

Vì chính sự tồn tại của điện tử (hay hạt vi mô) ở một vị trí (hay trạng thái) nào đó chỉ có thể tiên đoán bằng xác suất, nên trị số của các đại lượng vật lý đặc trưng cho điện tử cũng chỉ tiên đoán được một xác suất nào đó.

Một điện tử đang quay quanh hạt nhân của nguyên tử Hidrô, hỏi rằng nó sẽ ở cách nhân bao nhiêu và có năng lượng là bao nhiêu?

-“Ồ cách chừng này và có năng lượng chừng này”. Vật lý cổ điển tính toán cẩn thận những lực hướng tâm, lực tĩnh điện, động năng, thế năng và trả lời một cách chính xác và dứt khoát..

-“Tôi không biết chính xác. Tôi chỉ biết điện tử ở cách hạt nhân chừng này và năng lượng chừng này với xác suất là ...”. Cơ học lượng tử chỉ trả lời khiêm tốn như vậy.

Tóm lại trong cơ học lượng tử người ta chỉ có thể biết được xác suất để hạt vĩ mô ở trong một trạng thái nào đó và xác suất để một đại lượng vật lý nhận được một trị số nào đó. Vì lẽ đó người ta nói cơ học lượng tử là một thuyết thống kê. Là một lý thuyết thống kê, những định luật của cơ học lượng tử thiết lập cho một tập hợp nhiều cá thể và tìm giá trị trung bình của những đại lượng đặc trưng cho toàn tập hợp. Đối với từng cá thể riêng biệt cơ học lượng tử không có khả năng miêu tả chính xác mà chỉ cho những tiên đoán về xác suất. Nếu ta hỏi : “tại sao cho học lượng tử lại có tính thống kê?”. Hỏi như vậy thì quá khó! Hỏi rõ hơn nữa là tại sao ta không thể biết được chính xác điện tử bay vào chỗ nào? Cơ học lượng tử chỉ có một câu trả lời: “vì đó là một thuộc tính cơ bản của hạt vĩ mô”.

## **Sóng và hạt**

Hiện nay, cơ học lượng tử tạm dừng lại với quan điểm sóng ĐơBroi là sóng xác suất. Tuy nhiên chúng ta cần đi ngược với quá trình tìm hiểu về mối quan hệ giữa sóng và hạt. Trước ngày giả thuyết ĐơBroi ra đời, người ta nghĩ sóng và hạt là hai trạng thái loại trừ nhau, sóng là sự lan truyền năng lượng 1 cách liên tục, còn hạt là sự tập trung vật chất thành các khối từng lượng gián đoạn. Vậy thì một hạt vi mô vừa là hạt vừa là sóng thì thế nào? Sóng gắn liền với hạt ra sao? Nếu sóng ĐơBroi về bản chất có gì khác với các sóng thực khác, thì sóng ĐơBroi là gì?

Chính ĐơBroi thì cho rằng sóng mà ông đưa ra là sóng chuyên chở hạt. Hạt tựa như ngồi trên sóng trong một chiếc ghế bành thật nhẹ và sóng cuốn nó tới đâu

thì nó tới đó. Nhưng sóng tồn tại cùng với hạt ngay cả khi hạt chuyển động trong chân không hoàn toàn như vậy sóng chính là sản phẩm của hạt. Vậy hạt tạo ra sóng như thế nào? Sóng chia sẻ số phận cùng với hạt khi hạt tương tác với hạt khác và với môi trường như thế nào? Đó là những câu hỏi mà quan điểm “sóng chuyên chở” không trả lời được.

Lại có người cho rằng chính hạt tạo nên từ các sóng, nói rõ hơn hạt là 1 tổ chức đặc răn nào đó do các sóng gộp lại, hạt như là một bó sóng là nơi chồng chất các bước sóng ngắn. Tuy nhiên thực tế không thừa nhận cách giải thích này: hạt không thể là bó sóng được vì bó sóng tan rất nhanh vì một hiện tượng mà ta đã biết được đó là hiện tượng tán sắc của sóng. Nhưng thực tế các hạt không hề tan ra.

Như vậy, mọi ý đồ liên kết một cách cổ điển tính sóng với tính hạt đều không thành công. Nhiều người muốn từ bỏ cái mô hình quái dị “đầu hạt mình sóng” hoặc “đầu sóng mình hạt” nghĩa là không muốn ghép sóng và hạt một cách máy móc theo kiểu cổ điển.

Người ta tự hỏi rằng: phải chăng tính sóng là do một tập thể lớn các hạt tạo thành? Những thí nghiệm chùm điện tử bay đến kính ảnh gần như là từng hạt riêng biệt thì người ta vẫn thu được hình ảnh nhiễu xạ, nghĩa là vẫn phát hiện được tính sóng. Như vậy *riêng từng hạt cũng có tính sóng*.

Cuối cùng như ta đã thấy cơ học lượng tử hiện hành bằng lòng với quan niệm sóng xác suất. Trong mệnh đề “sóng gắn liền với hạt”, tiếng sóng được dùng với ý nghĩa tượng trưng, để chỉ rằng hạt có một đặc tính đặc biệt nào đó khiến cho có thể mô tả bằng một hàm tuần hoàn gọi là hàm sóng. Qua hàm sóng người ta hiểu biết về hạt với một xác suất nào đó.

Tuy nhiên việc mô tả hạt bằng một hàm sóng-sóng DeBroi vẫn có ý nghĩa tổng quát và dẫn đến những kết quả đúng đắn. Khi “hạt” có khối lượng càng “nhỏ” bước sóng DeBroi của “hạt” càng lớn thì “hạt” càng khác xa với hạt theo nghĩa cổ điển, khi đó người ta nói rằng hạt vi mô giống với một sóng hơn.

Như vậy trước DeBroi người ta đã biết rằng cái mà chúng ta vẫn tưởng đơn thuần là sóng (ánh sáng) thì một trong những điều kiện nào đó lại tác dụng như một dòng hạt. Nhờ DeBroi người ta biết thêm rằng cái mà chúng ta vẫn tưởng đơn thuần là hạt (điện tử) thì trong những điều kiện nào đó lại tác dụng như một sóng. Như vậy phát minh của DeBroi đã bắc một cái cầu giữa hai yếu tố tưởng như tách rời nhau và đem lại cho ta ý nghĩ về sự hài hòa của thế giới.

## TOÁN TỬ VÀ MA TRẬN-CƠ HỌC MA TRẬN

### Toán tử trong cơ học lượng tử

“ Một nội dung mới mẻ bao giờ cũng kèm theo một hình thức mới mẻ!”. Câu nói đó có lẽ rất đúng với trường hợp của cơ học lượng tử, cơ học lượng tử đã tìm ra cho mình một công cụ toán học mới phù hợp với nội dung của nó. Đó là các toán tử, vậy chúng là gì?

Giả sử một hàm  $U(x)$ . Bây giờ bằng một phép toán nào đó ta tác dụng vào hàm  $U(x)$  ta thu được một hàm mới  $V(x)$  và ký hiệu là  $V(x) = \widehat{F}U(x)$ .

Ta nói rằng  $V(x)$  là kết quả của việc tác dụng toán tử  $\widehat{F}$  lên  $U(x)$ . Như vậy toán tử là một phép toán khi tác động lên hàm số này sẽ cho ta hàm số khác. Toán tử thường được ký hiệu là một chữ đội một dấu mũ ở phía trên. Thí dụ:

Toán tử lấy đạo hàm:  $\widehat{F} = \frac{d}{dx}$

$$V(x) = \widehat{F} \cdot U(x) = \frac{dU}{dx}$$

Toán tử khai căn:  $\widehat{F} = \sqrt{\dots}$

$$V(x) = \widehat{F}U = \sqrt{U(x)}$$

Tích hai toán tử  $\widehat{A}$  và  $\widehat{B}$  nói chung là phụ thuộc vào thứ tự thừa số:  $\widehat{A}\widehat{B}\psi$  nghĩa là tác dụng của toán tử  $\widehat{B}$  lên hàm  $\psi$  trước, rồi sau đó mới tác dụng lên toán tử  $\widehat{A}$ , còn  $\widehat{B}\widehat{A}\psi$  nghĩa là tác dụng toán tử  $\widehat{A}$  xong rồi mới tác dụng lên toán tử  $\widehat{B}$

Nếu  $\widehat{A}\widehat{B}\psi \neq \widehat{B}\widehat{A}\psi$  thì  $\widehat{A}\widehat{B} \neq \widehat{B}\widehat{A}$  thì ta nói toán tử  $\widehat{A}$  và  $\widehat{B}$  không giao hoán với nhau.

Nếu  $\widehat{A}\widehat{B}\psi = \widehat{B}\widehat{A}\psi$  thì  $\widehat{A}\widehat{B} = \widehat{B}\widehat{A}$  thì ta nói toán tử  $\widehat{A}$  và  $\widehat{B}$  giao hoán với nhau.

Có những hàm số chịu tác dụng của toán tử  $\widehat{A}$  chỉ biến đổi đơn giản là hàm đó được nhân lên với một hằng số a, nghĩa là  $\widehat{A}U(x) = aU(x)$ , khi đó U(x) được gọi là hàm riêng và a được gọi là trị riêng của toán tử  $\widehat{A}$ . Mỗi toán tử có thể có nhiều hàm riêng. Trong cơ học lượng tử người ta chỉ dùng các *toán tử tuyến tính liên hợp*. Chúng ta có thể tìm hiểu khái niệm này trong các giáo trình chuyên môn.

Trong cơ học lượng tử, người ta thừa nhận như một tiên đề rằng, mỗi đại lượng vật lý F được đối ứng với một toán tử tuyến tính liên hợp  $\widehat{F}$ . Toán tử này tác dụng lên hàm sóng mô tả hạt. Chẳng hạn như:

-Tọa độ của hạt ứng với toán tử tọa độ  $\widehat{x}$ .

-Động lượng  $p_x$  ứng với động lượng  $\widehat{p}_x = -i\hbar \frac{\partial}{\partial x}$ , toán tử  $\widehat{p}_x$  tác dụng lên hàm

sóng bằng cách lấy đạo hàm theo x rồi nhân với  $(-i\hbar)$ , cụ thể là  $\widehat{p}_x\psi = -i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial x}$ .

Xuất phát từ những công thức liên hệ các đại lượng trong vật lý cổ điển, người ta có thể xây dựng được các toán tử tương ứng với mỗi đại lượng vật lý trong cơ học lượng tử.

Khi tác dụng toán tử lên hàm sóng, trị riêng thu được chính là trị số của đại lượng vật lý tương ứng. Như vậy toán tử không phải là điều quan trọng mà trị riêng của nó mới có ý nghĩa.

Bây giờ ta hãy xem việc sử dụng toán tử trong cơ học lượng tử có ý nghĩa gì? Thứ nhất, cơ học lượng tử là một lý thuyết thống kê, nó đoán nhận trị số của đại lượng vật lý với một xác suất nào đó và tìm được trị số trung bình của đại lượng này. Việc đối xứng mỗi đại lượng vật lý với một toán tử đã khiến là công thức tính trị số trung bình của đại lượng này. Việc đối ứng mỗi đại lượng vật lý với



1 toán tử đã khiến cho công thức tính trị số trung bình có một dạng tổng quát đẹp đẽ.

Thứ hai là cơ học lượng tử có những cặp đại lượng vật lý (thí dụ như tọa độ và động lượng) không thể đồng thời có giá trị xác định. Điều đó rất phù hợp với sự kiện là các toán tử tương ứng với các đại lượng đó không có cùng một hàm riêng.

Thứ 3 là cơ học lượng tử có một nguyên lý gọi là nguyên lý chồng chất trạng thái. Nguyên lý này gắn liền với tính chất tuyến tính của toán tử. Nguyên lý này cho phép ta khai triển một hàm sóng theo các hàm riêng của một toán tử bất kỳ. Khi đó các hệ số khai triển sẽ cho ta xác suất tìm thấy hạt ở trong trạng thái ứng với hàm riêng đó, xác suất này cũng là xác suất để đại lượng vật lý nhận trị số riêng tương ứng.

Thứ tư là trị riêng của các toán tử chính là trị số khả dĩ của đại lượng vật lý cần đo. Điều này gợi cho chúng ta một ý nghĩa rằng đo một đại lượng vật lý nào đó của hệ chính là tác dụng một toán tử lên hàm sóng của hệ.

Và cuối cùng, phương trình cơ bản của cơ học lượng tử- phương trình Schrödinger, chẳng qua cũng chỉ là kết quả tác dụng của một toán tử đặc biệt là toán tử Hamilton lên hàm sóng. Toán tử Hamilton là toán tử xác định sự thay đổi của trạng thái (hàm sóng) theo thời gian.

Có lẽ chúng ta vừa đọc qua những điều quá trừu tượng và khó hiểu, nhưng tóm lại chỉ cần biết rằng: Việc đối ứng một đại lượng vật lý với một toán tử đã đem lại sự gắn bó hài hòa cho các nguyên lý của cơ học lượng tử. Nhiều nội dung và chi tiết tưởng chừng như là xa lạ với nhau và khó hiểu thì nhờ vào việc thừa nhận rằng mỗi đại lượng vật lý ứng với một toán tử, các nội dung và chi tiết đó lại trở thành gắn bó với nhau và có thể hiểu được. Có thể nói rằng cơ học lượng tử đã tìm được một công cụ thích hợp cho nó, công cụ đó là toán tử tuyến tính tự liên hợp.

## Ma trận và cơ học ma trận

Ngay khi những nguyên lý cơ học sóng còn đang phôi thai, thì năm 1925 nhà vật lý Haidenbe người Đức đã tìm ra một phương pháp hoàn toàn mới nhằm đưa vật lý ra khỏi khó khăn. Theo Haidenbe khi xây dựng lý thuyết : Chỉ nên sử dụng những đại lượng nào mà chúng ta quan sát được và đo được. Thí dụ trong những lý thuyết trước đây người ta có nói đến quỹ đạo, vận tốc của điện tử nhưng nào có ai đã đo được những đại lượng ấy?

Vậy hãy chỉ nên sử dụng những đại lượng nào mà thực nghiệm có thể đo được (Đây là quan điểm riêng của Haidenbe, vì cũng còn phải bàn xem thế nào là “đo được”).

1925 trong số những đại lượng đặc trưng cho chuyển động bên trong của nguyên tử người ta mới đo được những đại lượng như tần số và cường độ bức xạ mà nguyên tử phát ra.

Phân tích những đại lượng đo được đó Haidenbe cũng nhận thấy rằng chúng có tính gián đoạn cần phải tìm một hình thức mới nào đó để biểu diễn chúng.

Vật lý cổ điển trước đây đã xếp những tần số bức xạ mà nguyên tử phát ra theo một hàng:

$$\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_n, \dots$$

Nhưng các nhà bác học Ritz đã nhận thấy rằng những tần số quan sát thấy trong thí nghiệm luôn luôn được xác định bằng hai chỉ số nguyên:

$\nu = \nu_{12}, \nu_{21}, \nu_{13}, \nu_{31}, \dots, \nu_{mn}, \dots$  Chẳng hạn tần số  $\nu_{mn}$  là do bước chuyển của nguyên tử từ trạng thái có năng lượng  $E_m$  về trạng thái  $E_n$  và phát ra một lượng tử:

$$h\nu = E_m - E_n, \rightarrow \nu_{mn} = \frac{E_m - E_n}{h}.$$

Như vậy tần số không thể xếp theo hàng mà phải xếp thành một bảng

$$v = \begin{pmatrix} 0 & v_{12} \dots & v_{1n} \\ v_{21} & 0 \dots & v_{n3} \\ v_{m1} & v_{m2} \dots & v_{mn} \end{pmatrix}$$

Bảng trên gọi là ma trận tần số, mỗi số hạng trong bảng có hai chỉ số, chỉ số thứ nhất chỉ hàng chỉ số thứ hai chỉ cột.

Theo Haidenbe, tất cả những đại lượng đặc trưng cho các chuyển động bên trong nguyên tử đều có thể được biểu diễn dưới dạng ma trận giống như ma trận tần số, chẳng hạn như tọa độ x biểu diễn bằng ma trận  $x_{mn}$  và động lượng

p biểu diễn bằng ma trận  $P_{mn}$ . Không những các đại lượng biến thiên liên tục cũng có thể biểu diễn dưới dạng ma trận. Trong phần trước chúng ta đã nói rằng mỗi đại lượng vật lý đã được biểu diễn bởi một toán tử. Điều đó không có gì mâu thuẫn bởi chính mỗi toán tử đều được biểu diễn dưới dạng ma trận.

Như vậy dù xuất phát từ kinh nghiệm của Ritz hay xuất phát từ các toán tử, chúng ta đều thấy rằng có thể *biểu diễn bất kỳ một đại lượng vật lý nào dưới dạng một ma trận*.

Sau khi có ý nghĩ như vậy Haidenbe phải tiếp tục suy nghĩ để tìm cách: dùng những ma trận loại nào để biểu diễn các đại lượng vật lý một cách thuận lợi nhất? Tính toán các ma trận đó theo nguyên tắc nào? Làm sao đưa được tư tưởng của Plank vào trong sơ đồ ma trận biểu diễn các đặc trưng của thế giới vi mô? Làm sao lập được các phương trình liên hệ ma trận tương tự như phương trình liên hệ đại lượng vật lý trong cơ học cổ điển.

Trong khi giải quyết các vấn đề trên, Haidenbe đã chứng minh được sự tồn tại của những trạng thái dừng cùng với những trị số năng lượng đã lượng tử hóa, đã tìm ra tất cả như phương trình Srôđingơ đã tìm ra, đã tìm ra công thức tính các giá trị trung bình cho các đại lượng vật lý theo ma trận, đã biểu diễn phương trình Srôđingơ dưới dạng ma trận. Đặc biệt là nhờ phương pháp ma trận Haidenbe đã tìm ra hệ thức bất định nổi tiếng, một công thức là nền tảng của

cơ học lượng tử mà ta sẽ nói đến sau đây. Lý thuyết của ông được gọi là “cơ học ma trận” mà DoBroi và Srodinơ đã xây dựng. Cơ học ma trận về sau được các nhà vật lý nổi tiếng như Born, Iorden và Dirac phát triển và hoàn thiện hơn. Cơ học ma trận có sự chính xác và cân đối về mặt toán học, nhưng sự trừu tượng cũng quá mức của nó, việc đặt cả ký hiệu toán học “chùm” lên các đại lượng vật lý khiến cho nhiều người lo lắng khó hiểu.

Srôdingơ đã chứng minh rằng dù rằng công cụ toán học của hai lý thuyết có khác nhau, cơ học sóng và cơ học ma trận chẳng qua chỉ là hai hình thức diễn đạt toán học khác nhau của một lý thuyết là cơ học lượng tử. cả hai đều lấy hằng số Plank và khái niệm “lượng tử hóa” làm cơ sở cho phương pháp của mình. Chính vì vậy kết quả của hai phương pháp này trùng nhau. Cơ học sóng gần gũi với trực quan hơn, công cụ toán học đơn giản hơn nên thông dụng hơn nhưng cơ học ma trận lại dẫn tới kết quả nhanh hơn.

## **HỆ THỨC BẤT ĐỊNH HAIĐENBE**

### **Hệ thức bất định là gì?**

Khi chúng ta ném một hòn đá hay một viên đạn đang bay thì không ai nghi ngờ gì về việc chúng ta xác định đồng thời tọa độ và vận tốc của hòn đá hay viên đạn. Biết được vận tốc và quỹ đạo ta có thể vẽ ra được quỹ đạo chuyển động. Nói một cách cơ học cổ điển cho rằng: vận tốc và tọa độ của một hạt bao giờ cũng có thể xác định được đồng thời. Nhưng với hạt vi mô thì điều đó không thể thực hiện được vì hệ thức bất định không cho phép. Vậy hệ thức bất định là gì?

Giả sử tọa độ  $x$  có thể nhận những trị số nằm trong khoảng từ  $x_1 \rightarrow x_2$  thì hiệu số  $\Delta x = x_2 - x_1$  được gọi là độ bất định về tọa độ. Tương tự nếu vận tốc  $v_x$  của hạt được nhận những giá trị trong khoảng từ  $v_{x1}$  đến  $v_{x2}$  thì  $\Delta v = v_{x2} - v_{x1}$  được gọi là độ bất định về vận tốc.

Hệ thức bất định khẳng định tọa độ và vị trí của hạt không thể đồng thời có trị số xác định. Nếu tọa độ hạt có độ bất định là  $\Delta x$  thì vận tốc hạt cũng có độ bất định là  $\Delta v_x$  sao cho:

$$\Delta x \cdot \Delta v \geq \frac{h}{m}.$$

Trong đó  $h$  là hằng số Plank và  $m$  là khối lượng của hạt. Hệ thức này do Haidenbe tìm ra lần đầu tiên và gọi là hệ thức bất định Haidenbe. Theo hệ thức này hai độ bất định về tọa độ và vận tốc là tỷ lệ nghịch với nhau. Nếu  $\Delta x$  càng nhỏ thì  $\Delta v$  càng lớn và ngược lại, nghĩa là đo tọa độ chính xác bao nhiêu, thì đo vận tốc kém chính xác bấy nhiêu.

Haidenbe đã tìm ra hệ thức bất định dựa trên cơ sở các ma trận tọa độ và ma trận vận tốc mà ông đưa ra. Nhưng cơ học sóng cũng dễ dàng dẫn tới hệ thức bất định. Xuất phát từ hệ thức ĐơBroi một hạt có khối lượng  $m$  và vận tốc  $v$  sẽ liên đới với 1 bước sóng  $\lambda = \frac{h}{mv}$ .

Nếu coi  $\lambda$  là bước sóng thì dù bản chất sóng là thế nào đi nữa thì bước sóng cũng thể là hàm số của tọa độ  $x$ . Câu nói “bước sóng tại 1 điểm  $x$  bằng  $\lambda$ ” không có ý nghĩa gì cả, bởi vì theo định nghĩa bước sóng là một đại lượng đặc trưng cho sóng lan truyền vô hạn trong không gian, cho nên bước sóng là hàm số của dạng sóng chứ không phải hàm số của một điểm nào đó. Cũng tương tự như vậy câu nói “tần số dao động của con lắc tại một thời điểm là  $\nu$ ” cũng không có ý nghĩa gì cả, bởi vì khi định nghĩa tần số ta phải dõi theo nhiều dao động của con lắc.

Vì bước sóng  $\lambda$  và vận tốc  $v$  liên hệ chặt chẽ với nhau qua hệ thức ĐơBroi, nên ta thừa nhận là  $\lambda$  không phải là 1 hàm số theo  $x$  thì ta phải thừa nhận rằng vận tốc  $v$  của một hạt không phải là một hàm số theo biến tọa độ  $x$ . Nói khác đi, vận tốc  $v$  và tọa độ  $x$  của hạt không thể đồng thời có giá trị xác định.

Vì vậy mới có hệ thức bất định. Có thể nói rằng: hệ thức bất định nói lên hạn chế lẫn nhau giữa hai mặt thống nhất là sóng và hạt.

### Vài thí dụ làm sáng tỏ hệ thức bất định

Ta hãy xét điện tử chuyển động trong nguyên tử. Vì kích thước nguyên tử có  $10^{-8} \text{cm}$ , nên nhiều nhất thì độ bất định của điện tử bằng  $\Delta x = 10^{-8} \text{cm}$ . Khối lượng điện tử cỡ  $10^{-37} \text{gam}$ . Nên từ hệ thức bất định ta suy ra:

$$\Delta v_x = \frac{h}{m \Delta x} \approx \frac{6,6.10^{-27}}{10^{-27}.10^{-8}} \approx 6,6.10^8 \text{ cm / gy}$$

Bởi vì vận tốc của điện tử trong nguyên tử vào cỡ  $10^8 \text{cm/gy}$  nên độ bất định về vận tốc mà tính được gấp mấy lần vận tốc thật, nói khác đi vận tốc điện tử hoàn toàn không xác định. Như vậy ta cũng có thể xem điện tử trong nguyên tử như một hạt thông thường, chúng ta có thể áp dụng cơ học cổ điển cho điện tử đó được.

Bây giờ ta hãy xét những điện tử từ một dây kim loại nóng đỏ phát xạ, bay qua một lỗ tròn đường kính  $d=0.01 \text{ cm}$ , rồi đập lên màn huỳnh quang là đèn lóe sáng: như vậy độ bất định của tọa độ cũng cỡ  $\Delta x \approx 0.01 \text{cm} \equiv 10^{-2} \text{cm}$ . Ta suy ra độ bất định về vận tốc

$$\Delta v_x = \frac{h}{\Delta x.m} \approx \frac{6,6.10^{-27}}{10^{-27}.10^{-2}} \approx 6,6.10^2 \text{ cm/gy}$$

Nhưng vận tốc chính của điện tử  $v \sim 10^8 \text{cm/gy}$  nên ta thấy rằng độ bất định về vận tốc chỉ bằng 0.001% trị số vận tốc, độ bất định như thế được chấp nhận. Nói khác đi trong điều kiện vừa xét vẫn có thể xem điện tử như một hạt thông thường vì vị trí và vận tốc của nó có thể đồng thời xác định được với độ chính xác cao. Trong trường hợp này có thể áp dụng cơ học cổ điển cho điện tử.

Tại lại xét hạt bụi có khối lượng  $10^{-12}$ gam, đó là một hạt khá lớn, không phải hạt vi mô. Giả sử ta xác định tọa độ của nó với  $\Delta x = 10^{-6}$ cm khi đó theo hệ thức bất định ta có:

$$\Delta v_x = \frac{h}{m \cdot \Delta x} = \frac{6,6 \cdot 10^{-27}}{10^{-12} \cdot 10^{-6}} = 10^{-8} \text{ cm / gy}$$

Nghĩa là độ bất định  $\Delta v_x$  của vận tốc cũng rất nhỏ. Nói khác đi đối với hạt bụi có thể đo được tọa độ và vận tốc với mức chính xác tùy ý. Hạt bụi là một hạt có tính chất cơ học cổ điển. Cũng vì vậy khi xác định tọa độ và vận tốc của hạt bụi (và nói chung là các vật lớn khác), ta không thể nào dự đoán sự tồn tại của hệ thức bất định.

### **Ý nghĩa của hệ thức bất định:**

Hệ thức bất định gây ra rất nhiều thắc mắc: tại sao với viên đạn ta có thể xác định đồng thời cả vận tốc và tọa độ còn đối với hạt vi mô thì không làm được?. Câu trả lời như sau: chúng ta không thể xác định đồng thời cả tọa độ và vận tốc của hạt vi mô không phải vì chúng ta kém tài, cũng không phải vì chúng ta không có dụng cụ đo lường chính xác mà bởi vì đây là bản chất của hạt vi mô. Tọa độ và vận tốc đó là những đặc trưng cổ điển của chuyển động cơ học cổ điển thường sử dụng. Còn trong cơ học lượng tử khi dùng đến khái niệm tọa độ và vận tốc thì cũng chỉ là cố gắng tận dụng các khái niệm cũ để mô tả các hạt vi mô. Các khái niệm này thật ra không dùng được trong thế giới vi mô hay nếu có dùng được thì cũng hạn chế rất nhiều, chính hệ thức bất định đã chỉ ra hạn chế đó, chỉ rõ giới hạn những khái niệm cổ điển vào thế giới vi mô. Nếu ta có tình dùng các khái niệm cổ điển chúng ta sẽ gặp những độ bất định không thể tránh khỏi do bản chất của các hạt vi mô gây ra. Mấy thí dụ ở mục trên đã chỉ rõ điều kiện để có thể dùng được đồng thời hai khái niệm tọa độ và vận tốc (nghĩa là khi nào xem hạt là hạt bình thường). Như vậy hệ thức bất định đã cho

thấy là trong thế giới vi mô những khái niệm cổ điển như tọa độ vận tốc không còn thích hợp nữa mà đã bị “sụt giá”.

Vì không thể xác định đồng thời tọa độ và vận tốc của hạt vi mô ở một thời điểm, nên ta cũng không thể định được tọa độ hạt ở thời điểm sau, do đó không cũng không thể xác định được quỹ đạo của hạt. Vì vậy trong thế giới vi mô khái niệm quỹ đạo cũng mất hết ý nghĩa. Tuy nhiên trước đây và sau này nếu mà chúng tôi có dùng chữ “quỹ đạo”, thì đó chỉ là cách trình bày “trực quan” để dễ hình dung mà thôi.

Các bạn có thể hỏi rằng sao không vứt bỏ những khái niệm “sụt giá” đó đi? Phải nói rằng quá trình “vứt bỏ” này vô cùng là phức tạp, lâu dài vì nó đụng chạm ngay đến bản chất nhận thức của chúng ta.

Có thể nói rằng hệ thức bất định là một trong những hệ thức cơ bản nhất của cơ học lượng tử, một trong những hệ quả quan trọng của lý thuyết ĐơBroi về tính sóng của hạt vi mô. Hệ thức này cho ta một tiêu chuẩn một cơ sở để đánh giá các đặc trưng của hạt vi mô. Biết được độ bất định về vận tốc  $\Delta v_x$  thì ta tính được độ bất định về tọa độ  $\Delta x$ , và như vậy người ta sẽ biết được vùng không gian mà hạt có thể có mặt. Ngược lại biết được độ bất định về tọa độ  $\Delta x$  ta có thể tính được độ bất định về vận tốc  $\Delta v_x$ , từ đó ta có thể đánh giá một cách gần đúng vận tốc, năng lượng, động lượng và khối lượng hạt vi mô.

Ngoài hệ thức bất định giữa vận tốc và tọa độ ta còn có hệ thức bất định giữa năng lượng  $E$  và thời gian  $t$ :

$$\Delta E . \Delta t \geq h.$$

Tuy nhiên về bản chất vật lý thì hệ thức này khác với hệ thức trên vì  $\Delta t$  không phải là độ bất định thời gian. Hệ thức này chỉ có ý nghĩa như sau:



Thứ nhất, nếu hệ đang ở trong trạng thái kích thích trong khoảng thời gian  $\Delta t$ , thì khi đó hệ không thể có năng lượng xác định và độ bất định về năng lượng:

$$\Delta E \geq \frac{h}{\Delta t}.$$

Thứ hai nếu chúng ta đo được năng lượng  $E$  của hệ, thời gian tiến hành đo là  $\Delta t$  thì chúng ta chỉ nhận được chỉ số năng lượng với sai số:  $\Delta E \geq \frac{h}{\Delta t}$ .

Tuy nhiên, độ bất định về năng lượng không có nghĩa là năng lượng không bảo toàn. Bởi vì nếu hệ ở trạng thái dừng, năng lượng của hệ sẽ không đổi theo thời gian, như vậy ta có thể đo năng lượng trong khoảng thời gian  $\Delta t$  tùy ý, nghĩa là  $\Delta t = \infty$ , như vậy  $\Delta E = 0$  và không có sự sai lệch nào về năng lượng.

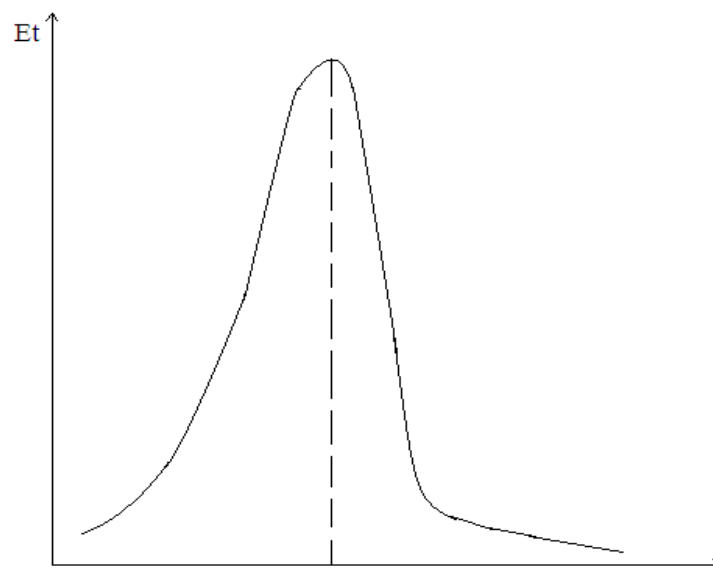
Trong thời đại chúng ta, kiến thức của con người phát triển nhanh chóng, nhiều khi có vẻ kì lạ bí ẩn và mâu thuẫn. Có lẽ hệ thức bất định là một thí dụ cho điều vừa nói.

### **Hiệu ứng đường ngầm**

Các bạn hãy tưởng tượng một vườn ra xanh tốt và một con gà rất muốn vào vườn nhưng người chủ đã làm một bức tường khá cao và kín đáo bao quanh. Chú gà đành bất lực và buồn cho giấc mơ của chính mình không thực hiện được vì bức tường quá cao. Nhưng nếu chú gà hiểu được tiếng người thì ta có thể bảo rằng: "Tiếc cho mày quá ở đây có thể khó cho mày quá, nhưng ở thế giới vi mô chẳng cần động đậy gì cũng tự nhiên vào được phía trong bức tường". "Chẳng cần động đậy gì cũng tự nhiên chuyển qua bức tường được". Đó quả là một chuyện hoang đường. Nhưng trong thế giới vi mô có những chuyện như vậy. Đó là các hạt "thấm" qua một "bức tường" dày đặc. Tất nhiên ở đây không phải là bức tường thật mà nó là một cái gì đó giống như bức tường-bức tường năng lượng. Chúng ta hãy xét câu chuyện này.

Muốn vào vườn ít ra phải chèo lên đỉnh tường. Nếu vậy phải tốn công hoặc thu năng lượng từ trường ngoài để tăng thế năng của ta lên. Độ tăng của thế năng ít ra cũng phải bằng trọng lượng  $P$  của cơ thể nhân với chiều cao  $h$  của bức tường (thế năng  $E_t = Ph = mgh$ ).. Từ trên đỉnh tường mà nhảy vào vườn không có khó khăn gì.

Nếu vẽ đồ thị thế năng của một người trong lúc người đó đang vượt lên đỉnh tường thế năng tăng: quá trình từ đỉnh tường nhảy vào vườn thì thế năng giảm. Đường biểu diễn thế năng có dạng như núi cao thon và nhọn (Hình 12).



**Hình 12 Bức tường thế năng**

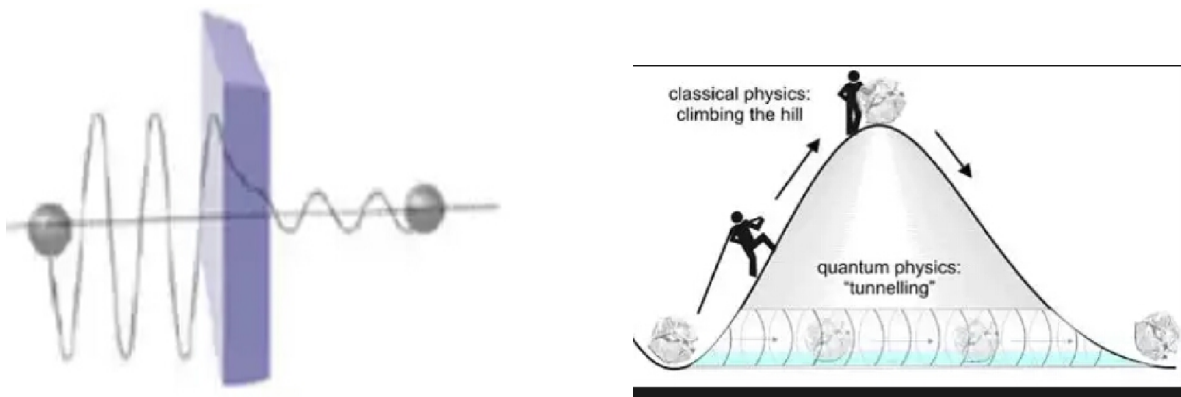
Theo cơ học cổ điển thì vật muốn vượt qua hàng rào thế năng này thì phải có năng lượng toàn phần (động năng + thế năng) lớn hơn thế năng tại điểm cao nhất của bức tường.

Trong thế giới vi mô cũng có những bức tường thế năng như vậy đối với hạt vi mô. Bức tường thế năng giam giữ các điện tử trong nguyên tử, bức tường thế năng giam các proton và neutron chặt trong hạt nhân. Bây giờ chúng ta xét bức tường thế năng giam giữ các điện tử tự do không cho ra khỏi mặt ngoài kim loại. Nói chung tinh thể kim loại có rất nhiều điện tử tự do là những điện tử không bị ràng buộc bởi các điện tử nào cả, nhưng chúng không thể thoát ra khỏi mặt ngoài kim loại vì chúng bị các ion dương của kim loại hút lại. Tác dụng

tổng hợp của các ion dương hút điện tử có thể coi là một rào thế năng khá cao, ngăn cho điện tử không bị bức ra ngoài.

Giả sử bức tường thế năng đối với điện tử có chiều cao bằng  $A$ . Cơ học cổ điển quả quyết là nếu không cung cấp một năng lượng tối thiểu bằng  $A$  thì điện tử không thể vượt ra ngoài kim loại, cũng như hòn bi trong chiếc hộp không thể tự nhảy ra ngoài được.

Tuy nhiên lập và giải phương trình Srôđingơ cho điện tử tự do nằm trong kim loại, giống như điện tử bị chặn bởi một hàng rào thế năng, thì vẫn có xác suất để điện tử ở phía ngoài bức tường, tuy không lớn. Thế có nghĩa là bằng cách nào đó điện tử đã “thấm” qua bức tường mà ra ngoài. Cơ học cổ điển ko hiểu nổi hiện tượng này và đã cho rằng dường như có một lực tàng hình nào đó đã đào thủng một đường hầm (Hình 13) xuyên qua chân tường, khiến cho điện tử dù có năng lượng không đủ chũng chui qua được hàng rào thế. Hiện tượng mà điện tử tự nhiên “chui” qua được hàng rào thế năng và qua đến bên kia tường được gọi là *hiệu ứng đường ngầm*, một hiện tượng đầy tính bí hiểm đối với vật lý cổ điển, nhưng lại hoàn toàn phù hợp với lý thuyết của cơ học lượng tử. Chúng ta lần nữa phân tích hiện tượng này.



**Hình 13. Đường ngầm**

Cơ học cổ điển xuất phát từ hệ thức  $E = E_D + E_t$  trong đó E là năng lượng toàn phần,  $E_d$  là động năng,  $E_t$  là thế năng, và lập luận rằng vì động năng luôn luôn dương cho nên năng lượng toàn phần bao giờ cũng lớn hơn thế năng.

Lúc qua điểm cao nhất của bức tường, năng lượng toàn phần lớn hơn thế năng cực đại:  $E > E_{t_{\max}}$ . Nhưng nếu  $E < E_{t_{\max}}$  mà vẫn qua được bức tường thì chẳng hóa ra  $E_d$  âm ư? (vì lúc qua tường, ta vẫn phải có  $E = E_{t_{\max}} + E_d$ ). Động năng  $E_d$  làm sao mà âm được. Vô lý. Cơ học cổ điển đã nói như thế.

Lúc đó cơ học lượng tử bước ra giải thích.

Trước tiên cơ học lượng tử phê phán ngay biểu thức  $E = E_d + E_t$ . Chúng ta biết rằng động năng  $E_d$  được xác định với vận tốc, thế năng  $E_t$  được xác định bởi tọa độ hạt. Nhưng hệ thức bất định đã chỉ ra rằng không thể xác định đồng thời tọa độ và vận tốc. Như vậy theo cơ học lượng tử việc phân chia năng lượng toàn phần thành động năng và thế năng là vô nghĩa. Do đó dù năng lượng E của hạt có trị số xác định thì cũng không thể xem nó là tổng của động năng và thế năng. Vậy không có lý do gì để nói rằng lúc qua “đường ngầm” động năng có trị số âm.

Vậy cơ học lượng tử giải thích ra sao? Có nhiều cách. Như ta đã nói, lập và giải phương trình Schrödinger cho hạt ta thấy xác suất hạt tồn tại bên kia bức tường tuy nhỏ nhưng vẫn có. Như vậy việc hạt “thấm” qua bức tường ngoài là hoàn toàn là một hệ quả tự nhiên của cơ học lượng tử.

Có một giải thích khác dựa vào hệ bất định. Bức tường thế năng nào cũng có một bề dày d. Nếu trong những điều kiện khiến cho độ bất định về tọa độ  $\Delta x$  lớn hơn bề dày d thì rõ ràng hạt cũng ở phía bên này cũng như phía bên kia bức tường. Cũng có thể nói rằng trong những điều kiện khiến cho độ bất định về vận tốc  $\Delta U$  đủ lớn gây độ bất định đủ lớn về năng lượng đến mức hạt có thừa năng lượng để vượt qua chiều cao bức tường thế năng mà ra ngoài.

Hiện tượng các hạt vi mô thấm qua một bức tường thế năng được gọi là hiệu ứng đường ngầm. Giả sử cứ 100 hạt thấm qua tường thì xác suất dẫn của hiệu

ứng đường ngầm là 1% còn xác suất để hiệu ứng không xảy ra là 99%. Các nhà vật lý gọi những xác suất đó là hệ số truyền qua và hệ số phản xạ của bức tường thế năng.

Sự truyền qua, sự phản xạ những tiếng quen thuộc. Trên bề mặt phân cách giữa 2 chất khác nhau, sóng điện từ (sóng ánh sáng chẳng hạn) thường truyền qua môi trường thứ hai một phần và phản xạ 1 phần. Bức tường thế năng đối với bước sóng DeBroi cũng có vai trò tương đương như mặt phân cách giữa hai môi trường đối với sóng điện từ. Sự tương đương ấy có một ý nghĩa sâu sắc.

Chúng ta có thể ít tin vào những điều vừa giải thích. Hình như đó chỉ là những lập luận lý thuyết trừu tượng? Nhưng hiệu ứng đường ngầm là một hiệu ứng rất điển hình và phổ biến trong thế giới vi mô: ngay ở nhiệt độ thường cũng có 1 số điện tử thoát ra khỏi bề mặt kim loại khi vào một điện trường cực mạnh thì các điện tử bay ra nhiều hơn nữa. Hiện tượng này gọi là phát xạ lạnh (tự động). Hiện tượng này không thể giải thích được theo quan điểm cơ học cổ điển nhưng lại phù hợp một cách tuyệt diệu với tính toán theo lý thuyết "hiệu ứng đường ngầm" của cơ học lượng tử.

### **Một nguyên lý nữa của cơ học lượng tử**

Chúng ta vừa đọc qua một số nguyên lý của cơ học lượng tử. Bây giờ còn một nguyên lý nữa nói rằng: *"không thể nào phân biệt được các hạt giống nhau"*.

Các bạn có thể hỏi nguyên lý gì mà lạ vậy? đã gọi là "giống nhau" thì hiển nhiên là "không thể phân biệt được" chứ còn nói gì!

Không đơn giản vậy đâu. Chính nguyên lý này thể hiện sự khác nhau giữa cơ học cổ điển và cơ học lượng tử. Cơ học cổ điển cho rằng dù các hạt có là đồng nhất người ta vẫn có thể đánh số được chúng và phân biệt được hạt nọ với hạt kia: đánh số cho mỗi hạt theo dõi chuyển động của nó trên quỹ đạo và vẫn biết được tại bất kỳ thời điểm nào hạt nào đang ở đâu, do đó vẫn có thể phân biệt được từng hạt.

Nhưng cơ học lượng tử cho rằng không thể phân biệt được các hạt vì theo hệ thức bất định, không thể xác định chính xác tọa độ của hạt. Hơn nữa vì *khái niệm quỹ đạo đã mất ý nghĩa*, do đó dù lúc đầu có đánh số và biết được vị trí của các hạt cũng vẫn không theo dõi được hạt vì hạt không có quỹ đạo, và sau một thời gian không còn biết hạt nào ở đâu, nghĩa là không *phân biệt được các hạt*.

Như vậy, nguyên lý không thể phân biệt được các hạt giống nhau là hệ quả của nguyên lý bất định và sẽ chi phối các tập hợp các hạt vi mô.

## VÀI LỜI TÓM TẮT

### **Những nhiệm vụ và nguyên lý của cơ học lượng tử:**

Chúng ta vừa trình bày quá trình hình thành và những nội dung chủ yếu của cơ học lượng tử. Rõ ràng đây không phải là sự trình bày theo một trình tự lý luận chặt chẽ, vì chúng tôi không thể sử dụng toán học trong lúc trình bày. Do đó phải có vài lời tóm tắt để giải thích cơ học lượng tử là gì?

Có thể nói rằng cơ học lượng tử là lý thuyết về những hiện tượng trong phạm vi rất nhỏ bé của phân tử, nguyên tử và hạt nhân nguyên tử. Phạm vi nhỏ bé đó được gọi là thế giới vi mô.

Khi nghiên cứu về thế giới vi mô, cơ học lượng tử phải giải quyết 3 nhiệm vụ cơ bản sau đây:

- Một là tìm các đại lượng vật lý có thể có của vật lý.
- Hai là tính xác suất để cho một đại lượng vật lý nhận được một giá trị nào đó.
- Ba là nghiên cứu sự thay đổi của các đối tượng vi mô theo thời gian.

Việc giải quyết ba vấn đề trên đều liên quan đến việc tìm hàm sóng của đối tượng vi mô. Nhưng việc nghiên cứu thế giới vi mô cũng như việc tìm hàm sóng để miêu tả đối tượng vi mô có hai khó khăn:

Thứ nhất là các giác quan chúng ta hầu như không nhận biết được gì về đối tượng vi mô này, chúng ta nghiên cứu chúng thông qua các công cụ.

Công cụ có nhiệm vụ “dịch” các hiện tượng vi mô thành ra thứ “ngôn ngữ vĩ mô” mà ta có thể hiểu được.

Thứ hai là khi đã dùng công cụ để nghiên cứu đối tượng vi mô, thì chính các công cụ cũng tác động lên các đối tượng vi mô đó, làm sai lệch đối tượng và những sai lệch này dường như chúng ta không thể lường trước được. Do những khó khăn trên khi xây dựng lý thuyết của mình cơ học lượng tử phải thừa nhận năm nguyên lý sau:

1. Trạng thái của mỗi đối tượng vi mô được miêu tả bằng hàm sóng.
2. Bình phương biên độ của hàm sóng tại một điểm tỷ lệ với xác suất tìm thấy hạt tại điểm đó.
3. Mỗi đại lượng vật lý tương ứng với 1 toán tử tuyến tính tự liên hợp.
4. Các đại lượng vật lý chia thành các nhóm loại trừ nhau: xác định đại lượng chính xác của nhóm này thì trong khi đó không thể xác định được đại lượng của nhóm kia. Nói khác đi giữa các đại lượng có hệ thức bất định.
5. Để tìm được hàm sóng thì ta phải giải phương trình Schrödinger.

Năm nguyên lý này hoàn toàn đủ chính xác để có thể cho ta một vài kiến thức về các hạt vi mô. Nhưng người ta cũng thường nói nó có đủ “mơ hồ”, vì nó chỉ cho người ta biết về hạt vi mô theo quan điểm thống kê, chẳng hạn như nó cho biết: hạt ở vị trí này có xác suất nào đó.. Tuy nhiên 5 nguyên lý này bổ sung cho nhau và hợp thành một hệ đầy đủ chặt chẽ giúp các nhà vật lý giải quyết 3 nhiệm vụ trên.

Ngoài hệ thống 5 nguyên lý này trong cơ học lượng tử cũng còn những luận điểm khác nữa mà đôi khi người ta cũng quen gọi là nguyên lý chẳng hạn như nguyên lý chồng chất trạng thái, nguyên lý không phân được các hạt đồng nhất.. Tuy nhiên suy cho cùng các luận điểm này chỉ là hệ quả của hệ thống 5 nguyên lý trên.

### **Đặc điểm của cơ học lượng tử.**

Trong quá trình làm việc của nó, cơ học lượng tử phải từ bỏ nhiều quan niệm khái niệm vẫn thường dùng trong cơ học cổ điển. Chẳng hạn phải từ bỏ quan niệm liên tục của năng lượng, từ bỏ khả năng có thể phân biệt được các hạt giống nhau, từ bỏ khả năng có thể tiên đoán chính xác trị số của một đại lượng. Có những khái niệm phải bỏ qua như là khái niệm quỹ đạo, có những khái niệm chỉ dùng một cách hạn chế trong một phép đo gần đúng nào đó như khái niệm vị trí, năng lượng, động năng, chu kì, tần số... cơ học lượng tử lại phải đưa ra nhiều khái niệm mới của hàm sóng, sóng xác suất, độ bất định, hiệu ứng đường ngầm, các số lượng tử, spin... và rất nhiều khái niệm mới nữa. Không thể một sớm một chiều mà có thể hiểu hết các khái niệm này. Cần phải nghiên cứu ngầm chúng trong quá trình sử dụng chúng thì mới có thể phần nào hiểu được, vì những khái niệm này thường không cụ thể và không tương đương với 1 khái niệm nào mà ta đã quen thuộc.

Trong quá trình “làm việc” với những nguyên lý và khái niệm trên cơ học lượng tử đã để lộ ra nhiều đặc điểm. Đặc điểm đầu tiên của cơ học lượng tử là tính thống kê của nó: nó chỉ cho phép ta tính được xác suất để một đại lượng vật lý nhận được 1 trị số nào đó.

Đặc điểm thứ hai là trong cơ học lượng tử hệ thức bất định có vai trò quan trọng và hằng số Plank có một ý nghĩa cơ bản. Những hiện tượng mà trong đó không thể bỏ qua được hằng số Plank thì cũng không tuân theo qui luật của cơ học cổ điển. Hằng số Plank là hằng số cơ bản ranh giới giữa thế giới vi mô và thế giới vĩ mô, phân ranh giới giữa vật lý cổ điển và vật lý lượng tử.

Cuối cùng đặc điểm thứ ba là khi xây dựng cơ học lượng tử bao giờ người ta cũng xuất phát từ cơ học cổ điển. Khi nào có thể xem hằng số Plank  $h=0$  đó là các qui luật của cơ học lượng tử trùng với cơ học cổ điển.

Ngày nay người ta xem cơ học cổ điển là trường hợp giới hạn của cơ học lượng tử vì mỗi lý thuyết có một phạm vi ứng dụng riêng. Nhưng phải thừa nhận rằng cơ học lượng tử bắt nguồn từ cơ học cổ điển.



Cơ học lượng tử ra đời với bộ mặt thật mới mẻ với những quan điểm và khái niệm lạ lùng, những công cụ toán đặc sắc và phức tạp. Nhiều lúc người ta tưởng các ký hiệu toán học đã che mất các đặc trưng của vật lý, các hàm sóng che mất các trạng thái, cách biểu diễn nhóm che mất các định luật vật lý, các phương pháp gần đúng che mất các điều kiện vật lý..

Tuy nhiên, chính vì vậy mà cơ học lượng tử đã thành công rực rỡ trong việc nghiên cứu nguyên tử, phân tử từ cấu tạo và tính chất của chất rắn chất lỏng đến tác dụng của các trường bên ngoài lên các hệ nguyên tử...

Đặc biệt cơ học lượng tử kết hợp với thuyết nhóm đã cho ta nhiều kiến thức về sự biến đổi của hàm sóng và giúp ta có được sự phân loại nào đó đối với các hạt con bản.

Với tất cả vẻ kỳ lạ và thành công của nó, cơ học lượng tử được xem là một cuộc cách mạng trong khoa học hiện đại. Gắn liền với các tên tuổi các nhà bác học tài năng: ĐơBroi, Haidenbe, Born, Đirắc, Paoli và phải kể đến Plank người gieo hạt giống đầu tiên.

## PHẦN THỨ TƯ

# CUỘC HÀNH TRÌNH VÀO THẾ GIỚI VI MÔ

---

Có lẽ cho đến năm 1925 không một ngành vật lý nào có nhịp độ phát triển nhanh như cơ học cơ học lượng tử. Kể từ ngày tư tưởng ĐơBroi ra đời, chỉ sau 5 năm mà những cơ sở lý luận những phương pháp và công cụ toán học của cơ học lượng tử đã hoàn thành những nét cơ bản nhiều thành quả khoa học đã ra đời. Tới năm 1928, trước con mắt kinh ngạc của những người đương thời, cơ học lượng tử là một khoa học đã trưởng thành hoàn toàn và có cơ sở lý luận vững chắc không kém gì cơ học cổ điển. Nhưng sự phát triển của cơ học cổ điển cần thời gian phát triển đến 200 năm. Còn cơ học lượng tử thì xây dựng trong 5 năm. Nhịp độ thế kỉ 20 là thế. Sau 5 năm phát triển như vũ bão và quyết liệt, cơ học lượng tử bắt đầu phát triển bình lặng hơn đi vào khai phá và giải thích những hiện tượng mới nhất ở thế giới vi mô.

Trên con đường đã đi, cơ học lượng tử trải qua ba giai đoạn. Giai đoạn thứ nhất là thời gian tìm hiểu về các vỏ điện tử, giai đoạn thứ hai thời kỳ tìm hiểu cấu trúc hạt nhân, cuối cùng là thời kỳ tìm hiểu cấu trúc của các hạt cơ bản. Ba lĩnh vực nghiên cứu này có những nét tương tự, nhưng đồng thời cũng có những sự khác nhau đặc biệt, khiến cho vai trò và phương pháp của cơ học lượng tử trong ba lĩnh vực đó khác nhau.

## **LỚP VỎ ĐIỆN TỬ CỦA NGUYÊN TỬ**

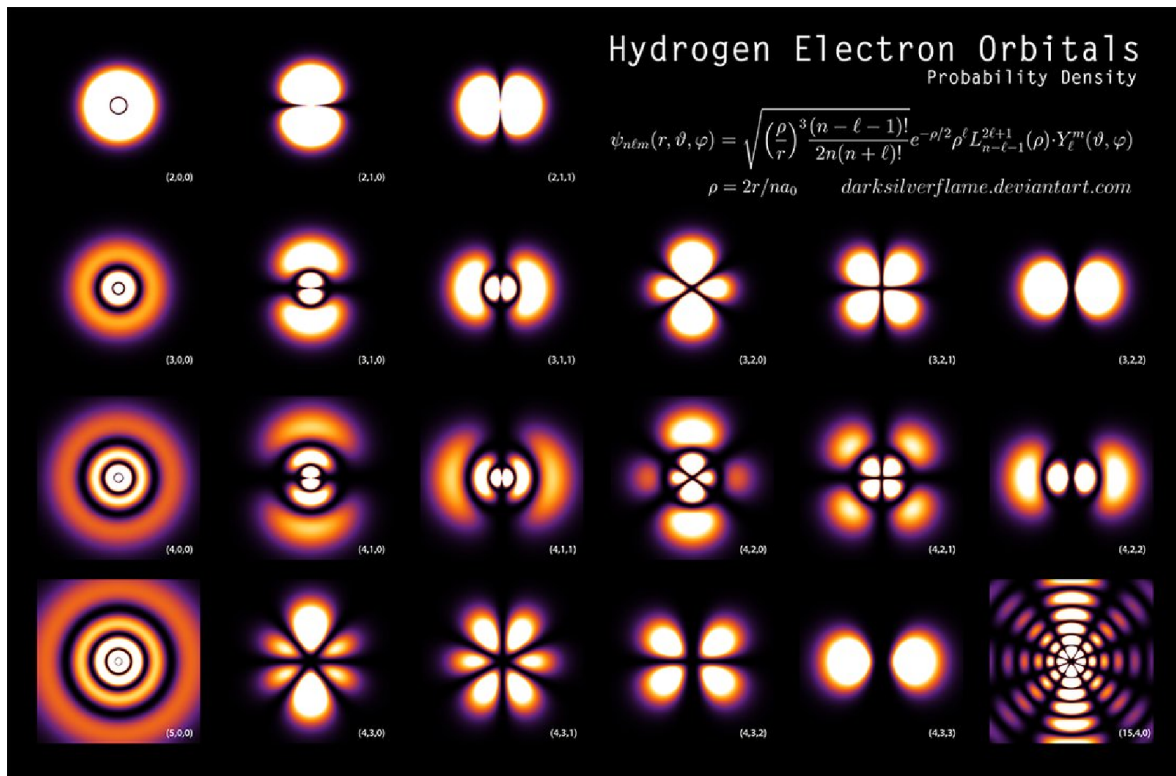
Đương nhiên, mảnh đất đầu tiên mà cơ học lượng tử khai phá là nguyên tử. Bây giờ chúng ta đều biết nguyên tử gồm có 1 hạt nhân rất nhỏ với các điện tử quay xung quanh, các điện tử tạo thành lớp vỏ điện tử của nguyên tử. Lớp vỏ điện tử có những cấu hình xác định và chính những cấu hình bền vững ấy làm cho nguyên tử có những tính chất riêng của nó. Trên thực tế cơ học lượng tử đã nêu lên và giải thích được tất cả tính chất của vỏ điện tử. Một nhà bác học đã nói rằng: *chính cơ học lượng tử đã cho ta chìa khóa để hiểu được phần lớn các điện tử quanh ta trên trái đất mà nhờ đó ta có thể đề ra những phương pháp chi phối chúng*. Thực vậy sự hiểu biết về quá trình hoạt động của lớp vỏ điện tử của nguyên tử cho ta hiểu được hóa học, nghĩa là *hiểu được cấu tạo của các chất quanh ta*: kim loại, chất rắn, chất khí, chất lỏng. Cơ học lượng tử cho phép ta hiểu được các hiện tượng, các mối quan hệ giữa chất và ánh sáng, nguyên nhân có màu sắc của các vật thể, bản chất liên kết hóa học. Cơ học lượng tử cho ta hiểu được quá trình tỏa năng lượng trong các hiện tượng điện và hóa học. Sự hiểu biết về cấu tạo lớp vỏ điện tử cũng cho ta chìa khóa để nghiên cứu cấu trúc của các phân tử sống, nghiên cứu bản chất của quá trình sống.

Về mặt kỹ thuật, rõ ràng là bất kỳ ngành công nghiệp hiện đại nào, dù nhiều hay ít đều chịu ảnh hưởng của khoa học về nguyên tử: ngành sản xuất năng lượng hiện đại dựa trên sự phân tích tỷ mỉ các quá trình biến đổi năng lượng xảy ra bên trong vật chất. Điện tử học, cơ sở các thông tin liên lạc hiện đại, không thể phát triển được nếu không có quan niệm về đặc trưng của lượng tử của chuyển động điện tử. Luyện kim học nghiên cứu cấu trúc của lượng tử các kim loại, còn ngành sản xuất các chất polyme cũng không thể ra đời nếu không có hóa học lượng tử hiện đại. Rõ ràng sự hiểu biết về lớp vỏ điện tử của nguyên tử cho ta chi phối những thứ ở quanh ta trên trái đất. Với con mắt của cơ học lượng tử, chúng ta hãy nhìn kỹ hơn nữa vào lớp vỏ này.

## **Đám mây thay cho quỹ đạo**

NinBorn với trực giác vật lý tuyệt diệu của mình, đã đưa ra khái niệm quỹ đạo điện tử: điện tử chỉ được quay quanh hạt nhân ở những quỹ đạo hoàn toàn xác định, có năng lượng xác định. Khi điện tử chuyển từ mức năng lượng đến mức có năng lượng thấp, thì nguyên tử sẽ phát ra một photon, ngược lại khi hấp thụ mức năng lượng thích hợp điện tử nhảy từ mức năng lượng thấp lên mức năng lượng cao. Khái niệm quỹ đạo hoàn toàn phù hợp với cơ học cổ điển. Tuy nhiên đối với cơ học lượng tử khái niệm quỹ đạo hoàn toàn không dùng được.

Quỹ đạo là đường chuyển động của điện tử trong nguyên tử, muốn xác định được chúng thì tại mỗi thời điểm ta phải xác định đồng thời cả tọa độ và vận tốc của điện tử. Nhưng ta đã biết hệ thức bất định không cho phép ta thực hiện điều đó. Vậy thì thứ gì thay thế cho quỹ đạo? Theo cơ học lượng tử nhờ hàm sóng mà ta có thể biết được điện tử nằm ở vị trí nào đó với một xác suất nào đó của vùng không gian mà trong đó xác suất tồn tại điện tử khác không được gọi là đám mây xác suất. Gọi là đám mây là vì điện tử có tính sóng, điện tử loang ra trên sóng của nó... như mây. Chính đám mây xác suất này đã thay thế cho khái niệm quỹ đạo, vì đám mây điện tử là vùng mà trong đó *có thể có điện tử*. Chỗ nào có xác suất điện tử càng lớn nơi đó đám mây càng dày đặc và ngược lại.



**Hình 14. Những đám mây xác suất của điện tử có thể có trong hydro.**

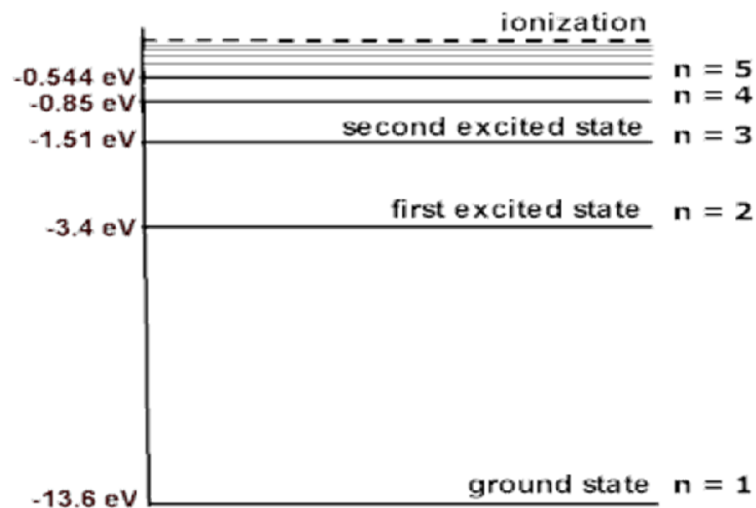
Bạn hãy nhìn xem những đám mây đó trên bức ảnh (hình 14). Ảnh ư? Có nghĩa là ta đã chụp được những điện tử ư? Không phải hệ thức bất định không cho phép ta chụp được như vậy. Những hình trên chỉ là những mô hình đặc biệt bằng khối, bề ngoài giống như các đám mây xác suất của điện tử trong nguyên tử: đám thì có dạng hình cầu, đám thì dài như điều thuốc lá, đám thì như quả tạ đôi.

Như vậy cơ học lượng tử đã thay khái niệm quỹ đạo bằng khái niệm đám mây xác suất. Nhưng đối với ai còn luyến tiếc khái niệm quỹ đạo thì cơ học lượng tử cũng rất rộng lượng: “Anh hãy vẽ đường cong qua những điểm mà xác suất tồn tại của điện tử là lớn nhất ứng với năng lượng được phép. Thì đường cong ấy sẽ trùng với quỹ đạo của anh. Nhưng anh nhớ rằng không phải dứt khoát điện tử nằm trên đường cong đó đâu, mà điện tử có thể nằm lân cận xung quanh đường cong đó nghĩa là bất kỳ chỗ nào trong đám mây”.. Do đó có thể nói rằng khái niệm quỹ đạo của Born vẫn tìm thấy một ý nghĩa trong cơ học lượng tử

chúng ta. Nhưng dù sao quỹ đạo cũng là một khái niệm qui ước. Một điều thú vị là, chu vi của “quỹ đạo” đó vừa bằng một số nguyên lần bước sóng DeBroi của điện tử, ở quỹ đạo thứ nhất gần hạt nhân nhất có một sóng, quỹ đạo thứ 2 có hai sóng,...v.v. Điều này làm cho chúng ta nghĩ rằng sóng DeBroi có một ý nghĩa tổng quát nào đó.

### **Sự lượng tử hóa năng lượng:**

Chúng ta đã biết rằng để giải thích sự xuất hiện các vạch quang phổ, thuyết Bo đã đưa ra nhiều định đề một cách gò bó độc đoán. Thuyết Bo đã chông chát một cách tùy tiện các định đề có tính kinh nghiệm của cơ học cổ điển trong khi chính định đề này lại trái với cơ học cổ điển. Nhưng định đề Bo lại xuất hiện một cách tự nhiên trong định đề lượng tử. Thật vậy, lập và giải phương trình Schrödinger đối với điện tử trong nguyên tử, ta thấy rằng điện tử chỉ nhận được những trị số năng lượng xác định, trị số nó cách quãng trị số kia, mỗi trị số được gọi là một mức năng lượng. Ta dùng mức để nhấn mạnh rằng năng lượng thay đổi theo từng nấc gián đoạn. Hình 15 vẽ sơ đồ các mức năng lượng của điện tử trong nguyên tử Hydro. Mỗi vạch ngang là một mức. Chúng ta đừng nhầm các vạch ngang trên hình vẽ là quỹ đạo điện tử, cũng đừng nhầm khoảng cách giữa các vạch là khoảng cách giữa các điện tử. Hình 15 chỉ mô tả tính gián đoạn về năng lượng của điện tử, Hiện tượng đó được gọi là sự lượng tử hóa năng lượng.



**Hình 15. Các mức năng lượng trong nguyên tử Hidro**

### Ba số lượng tử

Một trong những đặc điểm của cơ học lượng tử là ở chỗ nó khẳng định rằng trong phạm vi nguyên tử, điện tử trong lớp vỏ chỉ tồn tại trong những trạng thái hoàn toàn xác định. Mỗi trạng thái được miêu tả bằng một hàm sóng. Những yêu cầu về mặt vật lý đối hàm sóng bắt buộc hàm sóng phải thỏa mãn một số điều kiện toán học: như hàm sóng phải đơn trị, phải liên tục và hữu hạn không được tiến tới  $\infty$ . Những điều kiện toán học này khiến cho hàm sóng được xác định với 3 loại chỉ số (ứng với 3 tọa độ trong không gian). Ba loại chỉ số bao giờ cũng nhận được những giá trị số nguyên nên được gọi là 3 số lượng tử.

Số lượng tử thứ nhất là số lượng tử chính  $n$  có thể nhận giá trị 1,2,3... nói chung là những số nguyên dương. Trong nguyên tử Hidrô số lượng tử  $n$  xác định mức năng lượng của điện tử.

Số lượng tử thứ hai là số lượng tử phụ  $l$ ,  $l$  bị ràng buộc bởi  $n$  và chỉ có thể nhận những giá trị từ 0,1,2... ( $n-1$ ). Như vậy mỗi giá trị của  $n$  có thể có  $n$  giá trị khác nhau của  $l$  từ  $0 \rightarrow n-1$ . Số lượng tử phụ  $l$  xác định momen động lượng  $M$  của điện tử.

$M = \hbar\sqrt{l(l+1)}$  với  $\hbar$  là hằng số Plank, số lượng tử  $l$  còn được gọi là số lượng tử quỹ đạo.

Số lượng tử thứ 3 được gọi là số lượng tử từ  $m$ ,  $m$  bị ràng buộc bởi  $l$  và có thể nhận giá trị  $0, 0; \pm 1; \pm 2 \dots \pm l$ , nghĩa là với mỗi giá trị của  $l$  có thể có  $(2l+1)$  giá trị khác nhau của  $m$ . Số lượng tử  $m$  xác định hình chiếu momen động lượng  $M$  trên một phương xác định trong không gian. Phương này thường được gọi là phương của trường lực ngoài. Giả sử phương này nằm trên trục  $z$  ta có:

$$M_z = m \hbar$$

Như vậy mỗi trạng thái dừng( ứng với một hàm sóng xác định) điện tử có một năng lượng xác định, một momen động lượng xác định và một hình chiếu xác định momen động lượng. Các đại lượng này đều là các đại lượng bị lượng tử hóa( chỉ có thay đổi 1 cách gián đoạn).

Mỗi trạng thái( mỗi hàm sóng) xác định bởi một bộ ba số lượng tử  $n, l, m$  nhưng  $n$  quy định  $l$ ,  $l$  lại quy định  $m$ , vậy với một chỉ số  $n$  cho trước thì  $m$  có thể nhận được bao nhiêu chỉ số khác nhau. Với  $n$  cho trước, có  $n$  trị số khác nhau của  $l$ . Mỗi trị số của  $l$  lại có thể có  $(2l+1)$  trị số khác nhau của  $m$ . Vậy với  $n$  cho trước

có cả thảy:  $\sum_{l=0}^{l=n-1} (2l+1) = n^2$  trị số khác nhau của  $m$ .

Như vậy ứng với mỗi trị số của  $n$  có thể có  $n^2$  trạng thái khác nhau, mỗi trạng thái xác định bởi hàm sóng với 3 chỉ số  $n, l, m$  gọi là trạng thái  $\psi_{n,l,m}$ .



### Và số lượng tử thứ 4: spin.

Ngoài ba số lượng tử trên còn một số lượng tử nữa, gọi là số lượng tử spin. Vậy spin là gì?

Spin, tiếng anh có nghĩa là quay. Lúc đầu người ta tưởng rằng, điện tử ngoài chuyển động quay quanh hạt nhân, còn chuyển động tự quay quanh trục riêng của nó. Chuyển động quay quanh trục gây ra momen động lượng riêng. Nhưng đó là sự tưởng lầm, chúng ta đừng gán spin với một chuyển động nào của điện tử. Spin là một đại lượng thuần túy lượng tử đặc trưng cho riêng hạt vi mô mới có. Spin là một đại lượng về hình thức nó giống như momen động lượng nên còn gọi là moment spin để chỉ sự giống nhau đó.

Dù momen là một đại lượng cho chuyển động quay, nhưng cơ học lượng tử không quan niệm điện tử là một quả cầu quay quanh hạt nhân, càng không thể coi điện tử là quả cầu quay quanh chính trục của nó. Bản chất của điện tử và chuyển động còn phức tạp hơn rất nhiều.

Spin là một đại lượng chỉ đặc trưng cho hạt vi mô, trong vật lý cổ điển không có khái niệm nào tương đương với Spin cả. Sự tồn tại của Spin đối với điện tử trong nguyên tử thể hiện ở chỗ là, thêm vào momen động lượng mà điện tử có khi chuyển động gần hạt nhân còn có một momen động lượng khác nữa mà điện tử vốn có, do chuyển động bên trong nó tạo ra. Momen động lượng mà điện tử vốn có này spin, giá trị của spin không phụ thuộc vào việc điện tử ở đâu, chuyển động ở gần hạt nhân hay chuyển động bán tự do trong mẫu kim loại hoặc chuyển động hoàn toàn tự do trong không gian vũ trụ. Spin của điện tử luôn luôn có cùng một trị số và luôn luôn tồn tại cùng với điện tử nhưng hình chiếu  $S_z$  của spin s lên trục z tùy ý cũng là một đại lượng bị lượng tử hóa và chỉ có thể nhận những trị số:

$$S_l = m_s \hbar$$

Trong đó  $m_s$  được gọi là số lượng tử hình chiếu spin,  $m_s$  chỉ nhận được hai giá trị  $\pm \frac{1}{2}$  vì thế người ta gọi tắt là hạt có spin  $\pm \frac{1}{2}$ .

Những điện tử có spin song song là những điện tử có cùng trị số  $m_s$  và những điện tử có spin đối song là những điện tử có  $m_s$  ngược dấu nhau.

Khái niệm spin của điện tử đã được Ulenbêc và Gaodsmít đưa ra từ năm 1925 để giải thích hiện tượng tách các vạch quang phổ. Spin là một đại lượng đặc trưng thuần túy của cơ học lượng tử, nhưng khi giải phương trình Srôđingơ ta không thấy hiện đặc trưng này. Đó là vì phương trình Srôđingơ tuy đã phản ánh được tính chất lượng tử của điện tử (tính sóng hạt, tính thống kê...), nhưng phương trình Srôđingơ chưa kết hợp được với thuyết tương đối của Anhtanh. Dirắc đã xây dựng lên một phương trình mới kết hợp những tính chất lượng tử của điện tử với những tính chất do thuyết tương đối quy định. Phương trình Dirắc tổng quát hơn phương trình Srôđingơ.

Giải phương trình Dirắc, thu được kết quả rất đặc sắc đó là việc tìm ra được một phản hạt của điện tử là pôđitorôn. Nhưng ngoài ra, nhờ phương trình Dirắc người ta thấy xuất hiện một đặc trưng mới của điện tử đó là spin. Như vậy cùng với 3 số lượng tử  $n, l, m$  số lượng tử spin  $m_s$  cũng xuất hiện trong cơ học lượng tử một cách tự nhiên.

Tóm lại, trạng thái của điện tử trong nguyên tử được đặc trưng bằng bốn số lượng tử:  $n, l, m, m_s$ , trong đó ba số lượng tử đầu tiên phụ thuộc vào tọa độ trong không gian, vào điều kiện bên ngoài, còn số lượng tử thứ tư là do bản chất bên trong của điện tử. Phần trên ta đã biết rằng nếu chỉ dùng 3 số lượng tử  $n, l, m$  thì ứng với trị số  $n$  có thể có  $n^2$  trạng thái khác nhau, bây giờ do số lượng tử  $m_s$  có hai trường hợp, nên nếu mỗi trạng thái lượng tử được đặc trưng bởi 4 số lượng tử thì ứng với trị số của  $n$ , có thể có  $2n^2$  trạng thái khác nhau.

## Nguyên lý Paoli.

Thiên nhiên, nhà kiến trúc vĩ đại đã xây dựng lên nguyên tử của các nguyên tố hóa học. Cho đến nay con người đã biết được 106 loại nguyên tố khác nhau với 106 hạt nhân và 106 lớp vỏ điện tử khác nhau. Vấn đề được đặt ra là các điện tử được sắp xếp trong các lớp vỏ thế nào?

Phải nói rằng khi cơ học lượng tử chưa ra đời, bằng thực nghiệm hóa học và quang phổ học các nhà bác học cũng đề ra nhiều tiên đề về qui tắc giải thích cấu tạo lớp vỏ điện tử, nhưng những tiên đề và qui tắc đó chỉ là kinh nghiệm, thiếu cơ sở lý luận và không thể giải thích đầy đủ các vấn đề. Công lao của cơ học lượng tử là đã đưa ra được cơ sở lý luận cho một cách giải thích nhất quán và tương đối trọn vẹn.

Dựa vào nguyên lý “Không thể phân biệt được các hạt giống nhau” và thống kê lượng tử. Paoli đã chứng minh được định luật sau: “Trong nguyên tử không thể có đến 2 điện tử cùng được đặc trưng bằng một bộ bốn số lượng tử giống nhau”. Định luật này thường được gọi là nguyên lý Paoli một trong hai nguyên lý cơ bản mà thiên nhiên dựa vào để xây dựng tòa nhà điện tử.

Nếu 2 điện tử trong nguyên tử có 3 số lượng tử giống nhau thì một số lượng tử thứ tư chắc chắn phải khác nhau. Cho nên nếu mỗi trạng thái ứng với 1 bộ bốn số lượng tử thì ta có phát biểu lại nguyên lý Paoli như sau: “trong nguyên tử không hề có đến 2 điện tử có cùng 4 số lượng tử với nhau”.

Trở lại lớp vỏ điện tử ta biết rằng:

Vì số lượng tử  $n$  quy định số lượng tử  $l$ , số lượng tử  $l$  lại quy định số lượng tử  $m$  cho nên những nguyên tử có cùng trạng thái  $n$  sẽ tạo thành một lớp. Trong mỗi lớp điện tử có cùng số lượng tử  $l$  lại hợp thành một phân lớp.

Bây giờ ta hãy áp dụng nguyên lý loại trừ Paoli để xem trong mỗi lớp có thể có tối đa bao nhiêu điện tử. Mục trước ta đã biết rằng ứng với mỗi số lượng tử  $n$

có thể có  $2n^2$  trạng thái khác nhau vì mỗi trạng thái chỉ có một điện tử nên mỗi số điện tử trong mỗi lớp tối đa là  $2n^2$ .

Lớp  $n=1$  có  $2 \times 1^2 = 2$  điện tử

Lớp  $n=2$  có  $2 \times 2^2 = 8$  điện tử

Lớp  $n=3$  có  $2 \times 3^2 = 18$  điện tử

Bây giờ tính số điện tử có thể có trong mỗi phân lớp có  $2(2l + 1)$  điện tử (có thừa số 2 là vì mỗi cặp  $(l, m)$  có thể ứng với hai trị số khác nhau của  $m_s$ )

Phân lớp  $l = 0$  gọi là phân lớp s có  $2(2 \times 0 + 1) = 2$  điện tử

Phân lớp  $l = 1$  gọi là phân lớp p có  $2(2 \times 1 + 1) = 6$  điện tử

Phân lớp  $l = 2$  gọi là phân lớp d có  $2(2 \times 2 + 1) = 10$  điện tử

Để ký hiệu một phân lớp cụ thể, chỉ rõ phân lớp nào nằm trong lớp nào ta dùng 1 số và 1 chữ. Số viết trước chỉ lớp, chữ viết sau chỉ phân lớp. VD phân lớp 1s là phân lớp ứng với  $l = 0$  nằm trong lớp tương ứng  $n=1$ .

Số điện tử trong mỗi lớp và phân lớp được ghi trong bảng sau:

ố lớp	$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=4$
ố điện tử trong lớp		8	10	24

hân lớp		s	p	s	p	d	s	p	d	f
ố điện tử trong phân lớp						0			0	4

Bảng trên đây là số điện tử tối đa mà có thể có trong mỗi lớp và phân lớp nhưng thực tế các điện tử sắp xếp trong mỗi lớp và phân lớp như thế nào, chúng ra hãy xem bảng Mendelêép.

### **Bảng tuần hoàn Mendelêép**

Sau một thời gian nghiên cứu lâu dài và sâu sắc những tính chất vật lý và hóa học của các nguyên tố. Năm 1869, Mendelêép đã xây dựng lên một hệ thống tuần hoàn các nguyên tố. Ông đã chứng minh rằng các sắp xếp các nguyên tố theo thứ tự tăng dần trọng lượng nguyên tử (trừ một số ít trường hợp) những tính chất hóa học của chúng được lặp lại một cách tuần hoàn. Vì vậy có thể sắp xếp các nguyên tố thành các chu kỳ. Hệ thống của Mendelêép có tất cả 7 chu kỳ. Trong mỗi chu kỳ tính chất hóa học thay đổi đều đặn từ nguyên tố này sang nguyên tố kia. Hết mỗi chu kỳ lại đến 1 nguyên tố tiếp sau có tính chất hóa học giống hệt nguyên tố đầu chu kỳ trước. Do đó mà trong hệ thống Mendelêép còn có những nhóm nguyên tố mà tính hóa học giống nhau. Mỗi nguyên tố được

sắp xếp vào 1 ô trong bảng . Hàng ngang là các chu kì , mỗi cột là 1 nhóm gồm có các nguyên tố có tính chất hóa học giống hệt nhau.

Ta hãy xét hai vấn đề là: tại sao trong mỗi chu kỳ tính chất hóa học lại thay đổi liên tục từ nguyên tử đứng trước sang nguyên tử đứng sau? Và tại sao nguyên tố trong cùng một cột lại tính chất giống nhau?

Ngày nay ta biết rằng trong bảng Mendelêép các nguyên tố được sắp xếp không phải theo trọng lượng nguyên tử mà theo số điện tích  $z$  của hạt nhân nguyên tử . Tuy nhiên thứ tự này đều hoàn toàn giống nhau. Vấn đề là  $z$  điện tử ở vỏ sắp xếp như thế nào? Vì chính sự quyết định hóa tính của nguyên tố và quyết định sự sắp xếp các nguyên tố vào các ô trống trong bảng Mendelêép.

Sự sắp xếp các điện tử ở vỏ tuân theo 2 nguyên lý. Thứ nhất là nguyên lý Paoli “ không thể có 2 điện tử cùng chiếm một trạng thái”. Từ nguyên lý này ta mới chỉ tính được số điện tử tối đa trong mỗi lớp và phân lớp chứ chưa biết điện tử sắp xếp trong mỗi lớp như thế nào, cho nên còn cần một nguyên lý thứ 2 nữa “điện tử bao giờ cũng chiếm được các mức năng lượng thấp nhất”.

Vậy những mức năng lượng nào là thấp nhất? Năng lượng của điện tử trong mỗi trạng thái phụ thuộc vào hai số lượng tử  $n$  và  $l$ , như vậy tên mỗi mức năng lượng cũng trùng với tên của các phân lớp. Thí dụ mức  $1s$  là mức có  $n=1$  và  $l=0$ . Lúc đầu nhờ thực nghiệm nhưng về sau các nhà vật lý nổi tiếng Phécmi đã tính toán được thứ tự cao dần của các mức năng lượng như sau:

$$1s < 2s < 3s < 3p < 4s < 3d < 4p < 5s < 4d < 5p < 6s < 5d < 4f..$$

Bắt đầu từ mức  $1s$ , thì điện tử có lần lượt theo chu trình trên mà chiếm dần các mức. Nhưng chú ý rằng mức  $s$  chỉ có thể có tối đa 2 điện tử , mức  $p$  tối đa 6 điện tử , lớp  $d$  có tối đa 10 điện tử.

Như vậy:

Hidro có 1 điện tử, điện tử phải mức năng lượng thấp nhất là mức 1s. ta ký hiệu là  $(1s)^1$ . Chữ số góc bên trên phải cho biết số điện tử ở trong phân lớp.

Heli có 2 điện tử, hai điện tử đó vừa chiếm đầy mức năng lượng 1s. Ta ký hiệu là  $(1s)^2$

Chu kì	Số Thứ Tự	Tên Nguyên tố	Lớp n=1	Lớp n=2		Lớp n=3	
			1s	2s	2p	3s	3p
I	1	Hidro	1				
	2	Heli	2				
II	3	Liti	2	1			
	4	Beri	2	2			
	5	Bo	2	2	1		
	6	Cacbon	2	2	2		
	7	Nitơ	2	2	3		
	8	Oxy	2	2	4		
	9	Flo	2	2	5		
	10	Neon	2	2	6		

III	11	Natri	2	2	2	1	
	12	Manhe	2	2	2	2	
	13	Nhôm	2	2	2	2	1
	14	Silic	2	2	2	2	2
	15	Photpho	2	2	2	2	3
	16	Lưu huỳnh	2	2	2	2	4
	17	Clo	2	2	2	2	5
	18	Acgôn	2	2	2	2	6

Liti có 3 điện tử, hai điện tử đầu chiếm đầy mức 1s còn điện tử thứ 3 buộc phải chiếm mức 2s. Ta ký hiệu  $1s^2 2s^1$ .

Ta cứ theo cách này mà xếp mãi: đầy mức (phân lớp) 2s rồi sang 2p...

Bảng sau đây cho thấy sự sắp xếp lớp vỏ điện tử của 18 nguyên tố đầu tiên của bảng Mendelêép.

Nhìn bảng trên ta thấy gì?

\*Thứ nhất trong chu kì I các điện tử chỉ chiếm lớp  $n=1$

Trong chu kỳ II điện tử bắt đầu chiếm sang lớp  $n=2$  (Liti) và làm đầy lớp này. Hết chu kỳ 2 thì lớp  $n=2$  cũng hoàn toàn đầy (neon).

Trong chu kỳ III điện tử bắt đầu chiếm sang lớp  $n=3$  nhưng chưa làm đầy lớp vỏ này. Chu kỳ III kết thúc ở nguyên tố acgon và mới đầy ở phân lớp 3p.

Như vậy mỗi chu kỳ hóa tính của các nguyên tử thay đổi dần là vì lớp còn trống trong chu kỳ đó được các điện tử lấp đầy.



\*Thứ hai là các nguyên tử có số điện tử lớp ngoài cùng( chứ không phải phân lớp ngoài cùng) giống nhau thì có hóa tính giống nhau và được xếp vào một nhóm. Chẳng hạn liti cùng nhóm với Natri,Bo cùng nhóm với Al, beri cùng nhóm với manhe..v.v.Trong bảng Mendêlêép mỗi nhóm xếp thành một hàng dọc (được gọi là cột).

Tất nhiên là trong bảng Mendêlêép còn nhiều điều cần phải giải thích và cơ học lượng tử đã giải thích được. Nhưng qua hai vấn đề trên ta nhận thấy rằng: *sự sắp xếp các nguyên tố trong bảng tuần hoàn là sự sắp xếp các điện tử trong nguyên tử của nguyên tố đó*, mà sự sắp xếp các điện tử này lại được giải thích nhờ các nguyên lý và quy tắc của cơ học lượng tử.

1869 khi xây dựng bảng tuần hoàn, Mendêlêép còn phải để trống nhiều ô và còn một vài chỗ chưa hợp lý. Ngày nay bảng tuần hoàn Mendêlêép có 106 nguyên tố giữa chúng không có chỗ trống nào.

Sự phong phú kỳ lạ của thế giới quanh ta có hàng triệu hợp chất hóa học đã được tạo nên nhờ hơn 100 nguyên tố đó. Dưới ánh sáng cơ học lượng tử hiện đại, ta càng thấy giá trị to lớn của phát minh Mendêlêép, người ta đã tìm ra một trong những luật quan trọng nhất của tự nhiên mà hơn 50 năm sau hậu thế mới biết cách giải thích.

### **Liên kết hóa học**

Liên kết hóa học là một trong những bí ẩn mà vật lý và hóa học cổ điển không khám phá ra được. Không nắm được liên kết hóa học-tức là không nắm được bản chất của mỗi tương tác giữa các nguyên tử trong phân tử- thì không thể hiểu được sự đa dạng của các hợp chất hóa học, nguyên nhân hình thành các hợp chất đó và khả năng của các phản ứng. Do đó học thuyết về bản chất liên kết hóa học là vấn đề trung tâm của toàn bộ khoa học hóa lý thuyết.

Biết được bản chất liên kết hóa học thì người ta có thể trả lời được câu hỏi:

Lực hóa học là gì? Tại sao các nguyên tử lại kết hợp với nhau thành những phân tử có thành phần xác định? Tại sao hợp chất hóa học lại có tính chất bền tương đối? Hóa trị là gì? Hóa trị của mỗi nguyên tố là cố định hay thay đổi? (quan niệm về hóa trị không đổi của các nguyên tố đã có vai trò quan trọng trong hóa hữu cơ, nhưng quan niệm về hóa trị thay đổi quyết định thành công của hóa vô cơ).

Tuy nhiên hóa học cổ điển- hóa học thế kỉ 19 không giải đáp được những câu hỏi đó, không hiểu vấn đề liên kết hóa học một cách khoa học. Chỉ từ khi cơ học lượng tử ra đời, khi người ta tìm được các qui luật chi phối thế giới vi mô thì lời giải cho các câu hỏi trên mới dần được xác định rõ ràng, người ta mới xây dựng được một lý thuyết hóa học hoàn toàn mới làm nền tảng cho toàn bộ lâu đài hóa học.

Theo quan điểm của cơ học lượng tử, liên kết hóa học được hình thành là do chuyển động của các điện tử thuộc lớp ngoài cùng của nguyên tử trong phần không gian giữa các hạt nhân. Việc xuất hiện liên kết hóa học là do các điện tử trước kia thuộc hai nguyên tử phân biệt, nay trở thành điện tử chung cho hai nguyên tử. Những lực cơ bản tác dụng trong phân tử có nguồn gốc là lực tĩnh điện (lực Coulomb). Tuy nhiên do tính chất sóng của điện tử tương tác giữa chúng không phải là tương tác của những điện tích điểm mà là tương tác của những điện tích điểm mà là tương tác của các điện tích phân bố dưới dạng đám mây nào đó.

Các nguyên tử sẽ kết hợp với nhau tạo thành phân tử, nếu sự kết hợp đó làm cho năng lượng toàn phần của hệ giảm đi. Cơ học lượng tử đã chứng minh được rằng sự giảm năng lượng này xảy ra khi có sự tăng mật độ điện tử trong khoảng không gian giữa các hạt nhân, sự tăng mật độ này lại xảy ra do một hiện tượng gọi là *trương tác trao đổi* của các điện tử.

Vậy tương tác trao đổi là gì? Trong khuôn khổ của vật lý cổ điển ta không thể hiểu được tương tác trao đổi vì vật lý cổ điển coi các điện tử là những quả cầu rắn chắc không thể xâm nhập vào nhau. Nhưng cơ học lượng tử hình dung điện tử như 1 đám mây mà điện tích phân bố theo xác suất tỷ lệ với bình phương biên độ hàm sóng  $[\psi]^2$ , do đó ở giữa hai hạt nhân có thể có sự phủ nhau của 2 đám mây đó. Ở đây một nguyên lý đặc thù của cơ học lượng tử xuất hiện đó là sự không thể theo dõi và phân biệt được các hạt vi mô giống nhau, không thể phân biệt được điện tử là của hạt nhân nào: điện tử thuộc về hai hạt nhân. Khi có sự trao đổi điện tử xảy ra, nếu sự trao đổi này làm tăng mật độ điện tử ở khoảng giữa nguyên tử thì năng lượng toàn phần của hệ giảm và liên kết hóa học sẽ được hình thành, cũng có thể là sự trao đổi dẫn đến sự giảm mật độ điện tử ở giữa hai nguyên tử, năng lượng toàn phần của hệ tăng và các nguyên tử đẩy nhau không tạo thành liên kết.

Như vậy bài toán liên kết hóa học đặt ta cho cơ học lượng tử là: Xác định sự phân bố mật độ điện tử giữa nguyên tử trong phân tử, hay nói theo ngôn ngữ cơ học lượng tử là: xác định sự phân bố xác suất tồn tại của điện tử lớp ngoài cùng trong khoảng giữa 2 nguyên tử của phân tử. Chính sự phân bố xác suất này sẽ quyết định khoảng cách giữa các nguyên tử và hình học không gian của các phân tử, xác định những đặc tính quang, điện, từ và nhiều đặc tính khác, kể cả khả năng phản ứng của phân tử. Để làm sáng tỏ sự phân bố mật độ điện tử ta cần phải giải phương trình Schrödinger cho hệ các nguyên tử tạo thành phân tử. Tuy nhiên những khó khăn toán học làm cho việc giải phức tạp. Hơn nữa, không phải chỉ có các điện tử lớp ngoài cùng tham gia hình thành liên kết, mà dù là ít cũng có ảnh hưởng của các điện tử lớp trong, do đó việc tính toán ngày càng khó khăn. Cho đến ngày nay người ta vẫn chưa giải được hoàn toàn chính xác phương trình Schrödinger đối với hệ chứa từ hai điện tử trở lên mà chỉ giải gần đúng.

Như vậy có thể nói rằng bài toán về liên kết hóa học vẫn chưa thể giải được thật chính xác trong mọi trường hợp.

Trước tình hình như vậy có hai phương hướng giải quyết. hướng thứ nhất là người ta dùng những hàm sóng phức tạp của nhiều tham số, và quyết tâm tính toán: năm 1933, A.Giêmxơ và G.Culitxơ, trong khi giải bài tính về phân tử  $H_2$  đã dùng hàm sóng chứa 13 tham số và tính được năng lượng phân ly bằng 4.7198 eV trong khi thực nghiệm đo được 4.7451 eV. Ngày nay, những bài toán phức tạp thường giải bằng máy tính điện tử chẳng hạn để tính phân tử  $H_2$  người ta dùng hàm sóng chứa đến 50 tham số và để tính toán cho nguyên tử He người ta dùng hàm sóng chứa 1078 tham số, và thu được kết quả vượt qua sự chính xác của thực nghiệm. Tuy nhiên hướng này đã đưa hóa học đi xa con đường truyền thống của nó. Hướng thứ hai mà nhiều nhà hóa học đi theo là dùng hàm sóng đơn giản, kết hợp với thực nghiệm và dùng phương pháp gần đúng để đưa ra những tiên đoán về định tính và bán định lượng. Hướng thứ hai này tỏ ra có nhiều hiệu quả nó dẫn đến việc tổng hợp những hợp chất mới với những kiểu liên kết kỳ lạ.

Dù hướng nào đi nữa chúng ta cũng phải thừa nhận rằng cơ học lượng tử đã áp dụng được hóa học, đã tạo ra bộ mặt mới cho hóa học: hóa học lượng tử.

Dù rằng cơ học lượng tử chưa đem lại cho khái niệm liên kết hóa học một định nghĩa toán học chặt chẽ, nhưng liên kết hóa học vẫn là một khái niệm trung tâm, cơ bản và có kết quả nhất của hóa học, từ đó giúp người ta hiểu được nhiều khái niệm khác như độ âm điện, sự liên hợp, tính thơm, sự tạo phức...

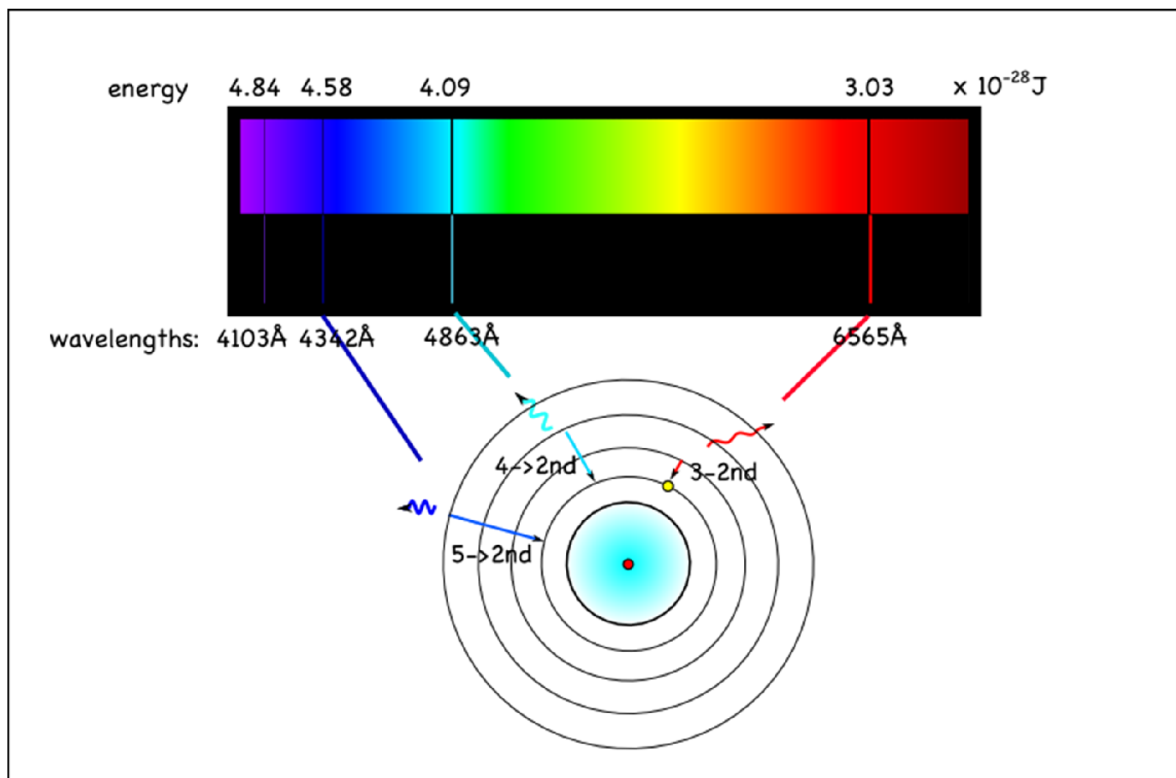
Chúng ta đã trình bày qua về liên kết hóa học, giờ xin mời các bạn nếu có điều kiện, hãy đi vào những vấn đề cụ thể, chẳng hạn:

- Tại sao hai nguyên tử Hidro lại liên kết với nhau thành phân tử hydro?
- Tại sao đã liên kết tạo thành metan  $CH_4$  lại có liên kết tạo thành cacbon tetra clorua  $CCl_4$  và khi nguyên tử (hoặc phân tử) chuyển từ một trạng thái có

năng lượng cao về trạng thái có năng lượng thấp sẽ phát ra một photon có tần số (bước sóng) xác định. Các photon cùng loại (cùng tần số) khi tác dụng lên kính ảnh sẽ cho ta một vạch quang phổ với tần số tương ứng. Vạch quang phổ càng đậm sẽ phát ra photon càng nhiều.

Như vậy quang phổ là một nguồn tin tức giúp con người hiểu về trạng thái, các mức năng lượng có thể có trong nguyên tử, phân tử và khả năng chuyển giữa các mức đó.

Quang phổ và những phương pháp phân tích quang phổ đã có từ lâu, trước khi cơ học lượng tử ra đời. Người ta đã tích lũy được khá nhiều số liệu, đã mò mẫm và tìm ra nhiều công thức phù hợp với thực nghiệm. Chẳng hạn Hydro phát sáng cho 4 vạch quang phổ có tần số:



**Hình 16: Bốn vạch quang phổ của Hydro**

$$\nu_{\alpha} = 4,6.10^{14} \text{ Hz}$$

$$\nu_{\beta} = 6,2.10^{14} \text{ Hz}$$

$$\nu_{\gamma} = 6,9.10^{14} \text{ Hz}$$

$$\nu_{\delta} = 7,3.10^{14} \text{ Hz}$$

Bốn vạch quang phổ được sắp xếp như hình 16

Và lần mò thê nào đó các nhà vật lý Balme và Ritbe đã tìm ra được công thức liên hệ giữa 4 tần số trên:

$$\nu = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right); \quad n = 3, 4, 5, 6 \quad \text{với} \quad R = 3,28985.10^{15} \text{ gy}^{-1}$$

Công thức Balme-Rilbe là một trong những công thức chính xác nhất của vật lý học, nhưng ta không sao giải thích được công thức này, vì không tìm ra cơ sở lý thuyết của các công thức. Và có rất nhiều thực nghiệm và công thức mò mẫm nữa. Tóm lại trước khi cơ học lượng tử ra đời, quang phổ không thực sự là môn học vì nó không có lý thuyết.

Thuyết Born ra đời đã đem lại cho quang phổ học một bộ mặt mới, một cơ sở mới, nhưng như đã nói bản thân thuyết Bo lại có những bất ổn nội tại: thuyết Bo kết hợp nhiều nguyên lý vật lý cổ điển với những tiên đề hoàn toàn trái với tinh thần của vật lý cổ điển. Hơn nữa thuyết Bo vẫn bế tắc vì nó không giải thích được quang phổ của những nguyên tử phức tạp và không tính được cường độ giữ các vạch quang phổ (cường độ càng lớn kính ảnh càng đen). Chỉ có cơ học lượng tử mới giải quyết trọn vẹn vấn đề quang phổ.

Trong việc giải thích nguồn gốc quang phổ, thì quan điểm của cơ học lượng tử phù hợp với thuyết Bo. Khi điện tử nhảy từ trạng thái này sang trạng thái khác thì hiệu số giữa hai trạng thái năng lượng đó được phát ra dưới dạng photon. Nhưng điện tử nhảy từ đâu đến đâu? Khi lý thuyết còn thừa nhận khái niệm quỹ

đạo thì việc nhảy này có thể hình dung được dễ dàng:nhảy từ quỹ đạo này sang quỹ đạo khác.

Nhưng cơ học lượng tử đã từ bỏ khái niệm quỹ đạo và thay bằng đám mây điện tử! Thật khó nói đến chuyện nhảy mức. Phải hiểu quá trình bức xạ và hấp thụ như là sự thay đổi tức thời hình dạng đám mây điện tử trong nguyên tử, một quá trình làm rung động điện tử trong nguyên tử, một quá trình làm rung động “lớp băng giá” vỏ nguyên tử làm cho nó có một dạng khác tức là chuyển từ một trạng thái này sang trạng thái khác.

Trong thuyết Bo sự nhảy mức của điện tử từ quỹ đạo này sang quỹ đạo khác là luôn luôn có thể và khả năng đó không phụ thuộc và đặc điểm của các quỹ đạo đó. Chính nguồn gốc thất bại thuyết Bo là ở đó.

Theo thuyết cơ học lượng tử sự nhảy mức của điện tử phải có một xác suất nhất định. Xác suất đó phụ thuộc rất nhiều vào hình dạng, và mức độ xâm nhập vào nhau giữa các đám mây tương ứng với điện tử trước và sau khi nhảy.

Nói một cách hình ảnh thì điện tử có thể nhảy sang trạng thái mới như 1 khách hàng nhảy từ đoàn tàu này sang đoàn tàu khác. Rõ ràng là hai đoàn tàu càng dài “phạm vi không gian” mà chúng đi gần nhau càng lớn thì hành khách càng dễ nhảy từ đoàn tàu này sang đoàn tàu khác.

Đám mây điện tử là vùng không gian mà điện tử có thể có mặt với xác suất nào đó. Hai đám mây hình cầu, có tâm chung thực tế là không xâm nhập vào nhau, như vậy không thể thực hiện được sự nhảy mức điện tử giữa những trạng thái tương ứng với hai đám mây hình cầu. Nhưng một đám hình quả bí đao sẽ xâm nhập nhiều vào đám mây hình cầu.

Qua sự xâm nhập vào nhau nhiều hay ít của đám mây mà người ta tính ra xác suất lớn hay nhỏ của sự nhảy mức điện tử giữa các đám mây đó. Trong cơ học lượng tử người ta gọi những quy luật làm cho sự nhảy mức có xác suất lớn hoặc

nhỏ là quy tắc chọn lọc. Muốn tìm ra quy tắc chọn lọc phải tìm được hình dạng và mật độ của đám mây điện tử tức là vùng không gian mà trong đó hàm sóng khác với số không (điện tử sẽ có mặt trong vùng đó với xác suất nào đó).

Cơ học lượng tử đã tìm ra những quy tắc chọn lọc, cho phép những sự nhảy từ mức này, cấm những sự nhảy của mức kia, tuy nhiên quy tắc chọn lọc chỉ phù hợp khá tốt với những nguyên tử nhẹ có ít điện tử. Trong những nguyên tử nặng có nhiều điện tử, có sự trộn vào nhau giữa các đám mây, thì sự cấm đoán của cơ học lượng tử nhiều khi mất hiệu lực.

Như vậy là trong sự nhảy mức của các điện tử các photon đã sinh ra trong cái “rừng mình” rất lạ lùng và nhanh chóng của đám mây điện tử. Bay tới máy quang phổ và bị phân loại trong máy đó, các photon tạo lên những vạch quang phổ với tất cả những màu sắc cầu vồng, mỗi vạch một màu xác định (nếu các photon đập vào kính ảnh thì ta chỉ được vạch đen)

Nếu xác suất nhảy từ mức càng lớn thì số photon phát ra càng nhiều, vạch quang phổ ngày càng sáng chói (làm kính ảnh bị đen)

Càng tính toán kỹ mức năng lượng của các đám mây và sự xâm nhập vào nhau của chúng ta càng hiểu rõ được tần số và độ chói của vạch quang phổ. Cơ học lượng tử đã thực hiện được nhiệm vụ một cách rạch ròi và đạt được sự phù hợp tuyệt diệu với thực nghiệm; tòa nhà quang phổ học đã được xây dựng vững chắc trên nền tảng cơ học lượng tử.

### **Lade (laser)**

Lade, còn gọi là máy phát quang lượng tử, là một trong những phát minh đặc sắc của thế kỷ 20. Ra đời vào mùa hè năm 1960, lade đã phát triển rất nhanh chóng và đã tìm thấy những ứng dụng cực kỳ quan trọng trong nhiều lĩnh vực như quốc phòng, công nghiệp, nghiên cứu khoa học, y học, thông tin, đo lường...v.v. Lade trở thành niềm kiêu hãnh của vật lý hiện đại.



Laser là từ ghép của 5 chữ cái đầu tiên của nhóm từ tiếng anh “Light Amplification by stimulated emission of radiation”. Có nghĩa là sự khuếch đại ánh sáng bằng bức xạ cảm ứng.

Ánh sáng do laser phát ra khác tất cả những thứ ánh sáng khác mà ta đã biết cho đến năm 1960. Tia laser có định hướng cao và do đó có thể tập trung một công suất rất lớn vào 1 chỗ( bức xạ laser có thể mạnh hơn bức xạ nhiệt mặt trời hàng tỷ lần). Nhưng điều quan trọng nhất là bức xạ có sai số tương đối về tần số  $\frac{\Delta\nu}{\nu} \approx 10^{-5}$ , trong khi đó bức xạ laser có  $\frac{\Delta\nu}{\nu} \approx 10^{-13}$  nghĩa là sai số về tần số nhỏ hơn các bức xạ khác hàng trăm triệu lần. Tính ổn định về tần số là một tính chất vô cùng quý báu trong nghiên cứu khoa học và kỹ thuật.

Laser là con đẻ của một ngành khoa học trẻ tuổi, ngành điện tử học lượng tử. Ngành này là nơi gặp gỡ giữa điện tử học và cơ học lượng tử.

Tia laser chẳng qua cũng chỉ là tia photon do các nguyên tử phát ra khi điện tử nhảy từ mức năng lượng cao về mức năng lượng thấp, những photon sinh ra trong cái “rùng mình” kỳ lạ và nhanh chóng của các đám mây điện tử. Vậy thì sao bức xạ laser lại khác với bức xạ thường? Thực ra có hai hiện tượng bức xạ khác nhau: bức xạ tự phát và bức xạ cảm ứng.

Bức xạ tự phát là bức xạ thông thường, xảy ra khi điện tử tự động chuyển từ mức năng lượng cao về mức năng lượng thấp mà không cần bất kì tác động nào từ bên ngoài. Nhưng vì sự tự phát nên nó phát ra một cách hỗn loạn, các photon phát ra không đồng bộ với nhau và bay về mọi phương.

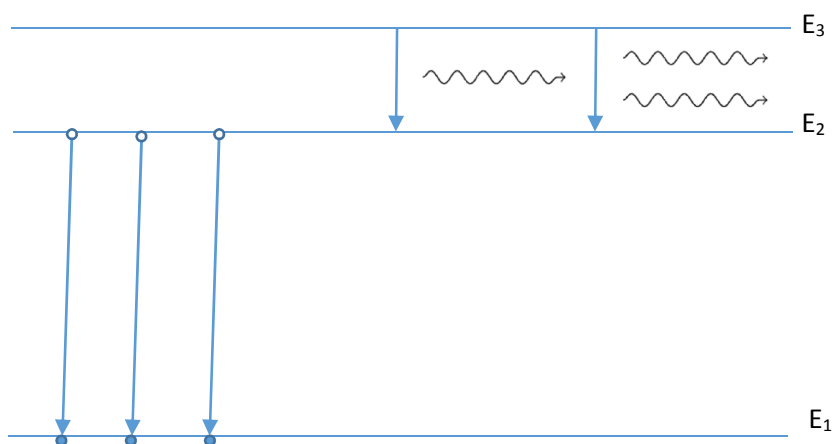
Tuy nhiên vào năm 1917 tác giả vĩ đại của thuyết tương đối Anhtan, với trực giác minh mẫn và sâu sắc của mình đã đi tới một kết luận bất ngờ là: nguyên tử không những có thể phát xạ tự phát một cách hỗn loạn mà còn có thể bức xạ nhờ ảnh hưởng của một bức xạ thích hợp khác từ ngoài kích động vào. Bức xạ

từ bên ngoài kích động vào đó là bức xạ cảm ứng hay còn gọi là bức xạ cưỡng bức.

Trong bức xạ cưỡng cảm ứng, nguyên tử đang ở trạng thái kích thích sẽ phát ra một photon giống hệt như photon bay tới tác động vào nó: hạt photon mới có cùng hướng truyền, một tần số, một pha, một phương phân cực với photon bay tới. Như vậy, lúc đầu ta có một photon sau thành 2 photon giống hệt nhau. Bây giờ làm sao để hai photon này tạo thành hai photon mới khác nữa? Muốn vậy phải có các nguyên tử đang ở trạng thái kích thích để khi hai hạt photon này tới kích thích vào, hai nguyên tử sẽ phát ra hai photon mới nữa, thế là ta được 4 photon, 4 photon cho ta 8 photon. Nghĩa là số photon giống nhau về mọi mặt được tăng nên bội và cường độ ánh sáng được khuếch đại. Tia laser chính là bức xạ cảm ứng được khuếch đại lên. Như ta vừa thấy muốn khuếch đại được phải có nhiều nguyên tử đang ở trạng thái kích thích. Do vấn đề cơ bản của máy phát lượng tử làm sao chế tạo được môi trường đa số nguyên tử ở trạng thái kích thích. Môi trường như thế được gọi là môi trường hoạt tính hay môi trường đảo lộn mật độ.

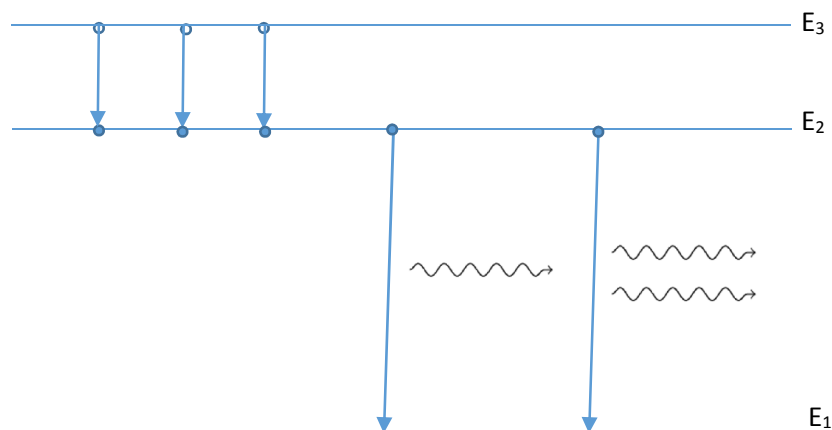
Ngày nay người ta đã biết tạo ra môi trường như vậy, nhưng bằng phương pháp lập luận đơn giản ta thấy rằng: nếu nguyên tử chỉ có khả năng chuyển 2 mức năng lượng cơ bản  $E_1$  và mức kích thích  $E_2$  thì không thể tạo thành môi trường hoạt tính được vì nếu điện tử nhảy từ mức  $E_1$  sang  $E_2$  thì nó sẽ tự phát nhảy ngay từ  $E_2$  về  $E_1$ , do đó không thể có đa số nguyên tử ở trạng thái kích thích  $E_2$  được. Vì vậy phải có 3 mức năng lượng thích hợp  $E_1 < E_2 < E_3$  và làm sao có thể kích thích nguyên tử lên trạng thái  $E_3$ . Gọi xác suất chuyển từ mức 3 xuống mức 2 là  $X_{32}$ , chuyển từ mức 2 xuống mức 1 là  $X_{21}$ . Khi đó hai trường hợp xảy ra:

a) Nếu  $X_{21} > X_{32}$  thì số nguyên tử tồn tại ở mức 2 ít hơn mức 3. Do đó mà bức xạ chuyển từ mức 3 về mức 2 sẽ được khuếch đại nhờ cảm ứng (Hình 17)



**Hình số 17. Số nguyên tử ở mức 3 nhiều hơn số nguyên tử ở mức 2**

b) Nếu  $X_{21} < X_{32}$  thì sẽ có rất nhiều nguyên tử ở mức 2 chưa chuyển kịp xuống mức 1, khi đó bức xạ do sự chuyển động từ 2 về mức 1 sẽ được khuếch đại (Hình 18).



**Hình 18. Đa số nguyên tử ở mức kích thích  $E_2$**

Như vậy muốn tạo ra được môi trường đảo lộn mật độ thì phải nghiên cứu cho được xác suất sự chuyển động của các mức. Xác suất này liên quan đến hình dạng và sự thâm nhập vào nhau giữa các đám mây điện tử: muốn có kiến thức

về đám mây điện tử ta phải giải phương trình Srôđingơ cho các điện tử trong nguyên tử.

Tất nhiên kỹ thuật lade là kỹ thuật của nhiều ngành khoa học khác nữa, nhưng cơ học lượng tử chính là lý thuyết cơ bản.

Ngày nay khó lòng mà nói hết được những ứng dụng của lade trong đời sống. Mời các bạn hãy tìm đọc các sách báo chí viết về lade. Ngoài tác dụng nhiệt của tia lade thì mức độ ổn định cao tia lade đã nâng mức chính xác đo lường và thực nghiệm khoa học lên 1 mức nhảy vọt. Tia lade gây ra một sự biến đổi về chất trong mọi lĩnh vực có liên quan đến bức xạ vì lade là một loại bức xạ thuần khiết, định hướng nhất, có công suất mạnh nhất.

### **Cơ học lượng tử và chất rắn**

Một trong những lĩnh vực mà cơ học lượng tử áp dụng hiệu quả nhất là chất rắn. Đầu thế kỉ 20, khoa học đã tích lũy nhiều kiến thức về chất rắn. Chúng có thể là những chất kết tinh hoặc vô định hình có thể dẫn điện dẫn nhiệt, truyền ánh sáng, truyền âm với những mức độ khác nhau, chúng có độ bền cứng, sức chịu nóng nào đó.. Tuy nhiên vật lý cổ điển không thể giải thích được căn cớ được bất kì tính chất nào trong những tính chất kể trên vì tất cả những tính chất đó đều liên quan tới cấu trúc vi mô của chất rắn.

Gần đây, sự phát triển mạnh mẽ của khoa học và kỹ thuật đòi hỏi con người phải hiểu biết cặn kẽ mọi tính chất của vật rắn để chế ngự chúng, nhằm tạo ra những vật liệu mới có tính năng mới. Cơ học lượng tử đã làm thỏa mãn việc đó và đã đạt được những thành tựu quan trọng. Như chúng ta đã biết, vật rắn là những vật có thể giữ nguyên hình dạng của nó trong những điều kiện bình thường, vì có lực liên kết mạnh giữa các nguyên tử hợp thành. Nói đến liên kết giữa các nguyên tử phải nói đến tính chất của các lớp vỏ điện tử, nói đến đám

mây điện tử...đó chính là ứng dụng mà cơ học lượng tử thành công. Ngoài bài toán về chuyển động và tương tác của lớp vỏ điện tử, trong chất rắn còn có các dao động Ion nằm ở nút mạng tinh thể, kéo theo toàn bộ mạng tinh thể dao động. Dao động mạng tinh thể không định xứ tại một chỗ và truyền đi trong mạng tinh thể như sóng cơ học... Những sóng đó lại có những lượng tử của nó( hạt gắn liền với sóng) mà người ta gọi là phonon. Dao động của mạng tinh thể cùng với các phonon ảnh hưởng quan trọng nhiều đến tính chất của vật rắn. Bài toán về dao động, bài toán về phonon cũng chỉ giải được trên cơ sở của cơ học lượng tử áp dụng cho hệ nhiều hạt.

Trước đây con người mới sử dụng chất rắn như là những *vật liệu* dùng để chế tạo máy móc công cụ: người ta sử dụng độ bền, độ cứng, sức chịu nhiệt, độ dẫn điện, độ nhiễm từ của nó. Nhưng từ sau đại chiến thứ hai, đã xuất hiện một phương hướng cực kì quan trọng và mới mẻ trong việc sử dụng chất rắn: *máy chất rắn*. Máy chất rắn chính là những vật liệu rắn được pha chế một cách đặc biệt để có những bản chất nội tại đặc biệt nhằm thực hiện một chức năng, một quá trình đặc biệt. Nói khác đi máy chất rắn là máy mà nguyên lý hoạt động của nó là do bản chất nội tại của vật liệu quyết định. *Điốt, Triốt* là những máy chất rắn đơn giản nhất và những tên đó thành phổ biến, ngày nay *vi điện tử* đã đi vào đời sống chúng ta một cách gì đó kỳ diệu. Máy chất rắn cũng phải yêu cầu con người hiểu biết sâu sắc, chính xác và thiết thực về cấu trúc vi mô của chất rắn. Máy chất rắn ra đời do sự ứng dụng thông minh và tài tình của cơ học lượng tử và hóa học vào những hệ vật chất kết tinh và ngưng tụ.

### **Các chất dẫn điện như thế nào ?**

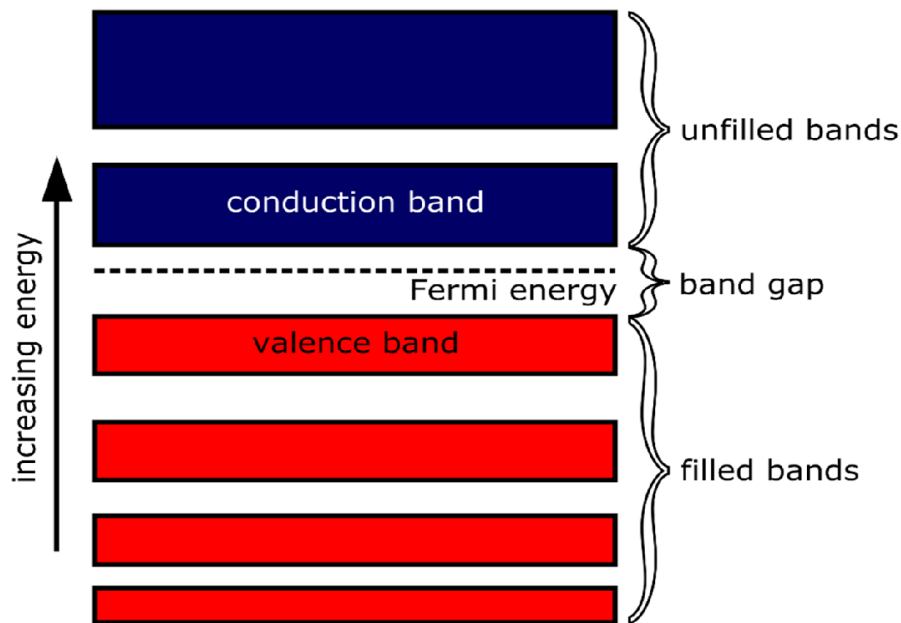
Về phương diện dẫn điện các chất được chia thành 3 loại: dẫn điện, bán dẫn, cách điện. Nếu chỉ dựa trên lý thuyết vật lý cổ điển người ta không hiểu tại sao lại có sự phân loại như vậy. Hãy xem cơ học lượng tử giải thích như thế nào?

Trước hết khả năng dẫn điện là gì? Là khả năng mà những điện tử tự do của một chất có thể tiếp nhận năng lượng của điện trường ngoài để chuyển động và truyền năng lượng đó ra toàn bộ thể tích của chất đó.

Muốn biết điện tử có khả năng nhận năng lượng của điện trường ngoài hay không, phải giải phương trình Srôđingơ cho điện tử đó để tìm được hàm sóng và các mức năng lượng của chúng. Bài toán này vô cùng phức tạp nếu ta tính đến dao động của mạng tinh thể lẫn tương tác chính của các điện tử. Người ta đơn giản bài toán bằng những giải thuyết phụ và thu lấy những kết quả gần đúng định tính.

Kết quả của việc giải phương trình Srôđingơ cho thấy là, trong vật rắn các mức năng lượng của điện tử chỉ có thể nằm trong những vùng xác định gọi là vùng được phép. Chẳng hạn như vùng được phép I,II,III trên hình 19.

Điện tử có thể nhận bất kỳ mức năng lượng nào trong các vùng được phép. Giữa hai vùng được phép là vùng cấm. Điện tử không được phép ở trong vùng cấm. Tuy nhiên ta không nên hiểu đây là một vùng không gian mà “vùng” chỉ trên giản đồ biểu diễn các mức năng lượng. Lý thuyết vừa kể được gọi là *thuyết vùng năng lượng*. Trong những vùng được phép thiết ra vẫn có các mức nhưng chụp xếp khít lại với nhau, có thể xem các mức đó liền nhau hợp thành 1 vùng liên tục.



**Hình 19. Các vùng năng lượng**

Trong các vùng được phép có một vùng quan trọng là vùng hóa trị. Đó là năng lượng được phép thấp nhất của điện tử lớp ngoài( điện tử hóa trị).

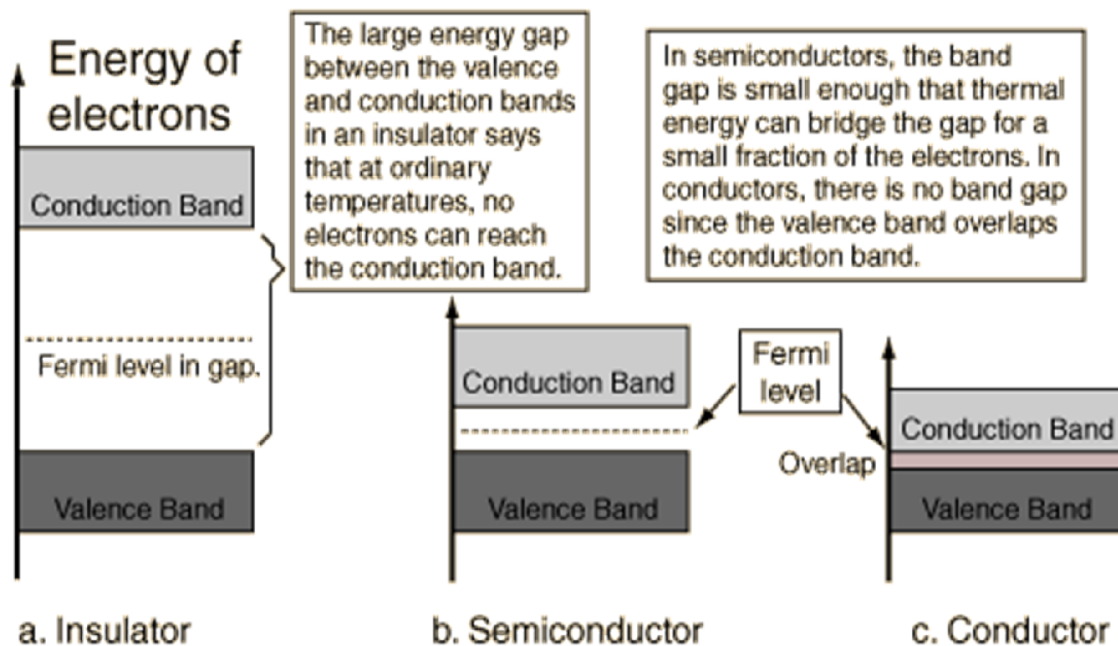
Nếu một vùng mà trong đó tất cả các mức năng lượng đều đã bị chiếm thì theo nguyên lý Paoli, các điện tử vùng ấy không thể thay đổi mức năng lượng mà nó đang chiếm một mức năng lượng khác trong vùng, do đó nó không thể nhận thêm năng lượng từ điện trường ngoài, tức là không thể tham gia dẫn điện. Vậy muốn cho *điện tử tham gia dẫn điện được thì trong vùng đó phải có các mức năng lượng trống*. Với điều kiện đó, thì có thể có ba trường hợp sau:

a) Chất dẫn điện là những chất mà vùng hóa trị có một số mức năng lượng trống. Như vậy khi có điện trường ngoài vào tác dụng, điện tử có thể nhận năng lượng của điện trường ngoài để chuyển sang một mức năng lượng cao hơn, như vậy điện tử có thể tham gia dẫn điện (hình 20a). Những điện tử lớp ngoài đó gọi là những điện tử tự do, nghĩa là không bị trói buộc vào nguyên tử nào.

b) Chất bán dẫn là những chất mà vùng hóa trị lấp đầy hoàn toàn, nhưng vùng trống phía trên nằm cách vùng hóa trị một khoảng rất nhỏ (hình 20b). Như vậy

bình thường chất bán dẫn không dẫn điện được vì điện tử vùng hóa trị không thể nhận thêm năng lượng từ điện trường ngoài (không có mức trống nào để chuyển đến). Nhưng vì khoảng cấm tương đối nhỏ nên do hiệu ứng đường ngầm, có một số ít điện tử truyền từ vùng hóa trị lên vùng trống phía trên. Ngoài ra việc kích thích chất bán dẫn có thể làm cho một số điện tử thu được đủ năng lượng vượt nên khoảng cấm mà lên vùng trống phía trên. Khi đó vùng trống phía trên trở thành vùng chưa đầy, điện tử còn nhiều mức trống để có khả năng nhận năng lượng của điện trường ngoài nghĩa là có khả năng dẫn điện. Như vậy khi được kích thích thì chất bán dẫn có khả năng dẫn điện.

c) Chất cách điện là những chất vùng hóa trị đã đầy điện tử nhưng vùng trống gần nhất nằm cách vùng hóa trị một khoảng cách rất lớn (hình 20c) Dù ta có kích thích nhưng điện tử không thể vượt qua khoảng cấm đó: điện tử không có khả năng tiếp nhận năng lượng từ điện trường ngoài, nghĩa là không có khả năng dẫn điện.



**Hình 20. Các chất dẫn điện như thế nào**



## Điện trở và siêu dẫn

Dòng điện chạy trong kim loại như thế nào? Có lẽ đó là một câu hỏi mà còn lâu chúng ta mới có thể trả lời thỏa mãn. Phải chăng, khi đóng mạch điện thì từ một cực của nguồn điện, các điện tử sẽ đi vào một đầu của dây dẫn và điện trường sẽ bắt chúng chạy trong dây về cực kia của nguồn? Không đơn giản vậy đâu. Tính toán cho rằng điện trường chỉ có thể truyền cho điện tử một vận tốc có hướng khoảng 0.1 cm/s thế thì tại sao dòng điện lại truyền rất nhanh với vận tốc gần 30 vạn km/s trong dây dẫn? Ta sẽ trả lời rằng điện tử chuyển động tạo thành sóng điện từ, sóng lan truyền trong dây tạo thành dòng điện. Nhưng nếu dây dẫn là yếu tố dẫn dòng điện thì sao nó lại gây ra sự cản trở dòng điện (điện trở)? Nói theo triết học, có lẽ đó là sự tồn tại song song tồn tại giữa các mặt đối lập. Nhưng chúng ta hãy trở về hiện tượng vật lý.

Điện trở là gì? Tại sao có điện trở? Cũng chỉ có cơ học lượng tử mới cho một lời giải đáp thỏa đáng.

Vật lý cổ điển giải thích rằng, các điện tử chuyển động tự do trong tinh thể luôn bị va chạm với các nút Ion của mạng, cho nên bị mất năng lượng( thành nhiệt làm cho vật dẫn nóng).Như vậy chính sự va chạm giữa các nút Ion gây ra điện trở. Cách giải thích này về định tính có vẻ hợp lý, nhưng về tính toán người ta thấy điện trở tính theo quan điểm cổ điển lớn hơn thực tế hàng trăm lần và còn 1 điều nữa là : Tại sao khi có tạp chất vào thì điện trở kim loại tăng lên?

Cơ học lượng tử chứng minh rằng sở dĩ kim loại có điện trở là vì mạng tinh thể của nó có nhiều *bất hoàn chỉnh*: sự sắp xếp các ion không đều đặn, tuần hoàn, lẫn các nguyên tử tạp chất, khuyết tật, lệch mạng, dao động mạng... Chính những va chạm với các bất hoàn chỉnh và va chạm với các điện tử với nhau luôn làm mất năng lượng trong chuyển động có hướng, nghĩa là làm cản trở chuyển động của điện tử, gây ra điện trở và gây ra tỏa nhiệt. Phần mất mát năng

lượng ấy được điện trường bù vào. Khi không có điện trường ngoài, những va chạm với các bất hoàn chỉnh làm tắt ngay chuyển động có hướng của điện tử.

Chính vì vậy mà khi nhiệt độ tăng, dao động nhiệt của mạng cũng tăng, những bất hoàn chỉnh làm cho điện trở kim loại tăng. Ngay dù ở 0 độ tuyệt đối nếu vẫn có những bất hoàn chỉnh thì điện trở vẫn còn. Vì tạp chất lẫn vào cũng gây ra những bất hoàn chỉnh nên điện trở của mạng cũng tăng lên.

Nhưng không phải tất cả và luôn như vậy. thiên nhiên dường như không bao giờ thỏa mãn với sự sáng tạo của mình, đã tỏ ra nhiều tài năng hơn nữa-thiên nhiên tạo ra những chất siêu dẫn: một số kim loại và hợp kim ở nhiệt độ rất thấp sẽ bắt đầu có những tính chất rất lạ lùng, điện trở của chúng bỗng nhiên tụt xuống không. Hiện tượng này do nhà vật lý Hà Lan Camerling Onnet khám phá năm 1911 và gọi là hiện tượng siêu dẫn ( dẫn điện tốt).

Dòng điện chạy qua dây siêu dẫn không bị tổn hao năng lượng, dòng điện có cường độ rất lớn nhưng không tỏa nhiệt nên không làm cho dây nóng lên và khi bỏ nguồn điện đi thì dòng điện vẫn còn chạy mãi trong dây.

Trong một buồng làm lạnh bằng Heli lỏng, Camerling Onnet đã dùng hiện tượng cảm ứng điện từ để tạo ra dòng điện mạnh đến 320A trong 1 vòng dây chì. Sau khi từ thông ngưng biến thiên mà dòng điện vẫn chạy trong hàng giờ, còn nếu dùng đến thủy ngân có thể hàng năm.

Vật lý cổ điển tất nhiên không giải thích được hiện tượng siêu dẫn,nhưng cơ học lượng tử làm được. Công lao giải thích thuộc về 3 nhà vật lý Bacden-Cupơ-Srifo ( thường gọi là thuyết BCS chữ đầu của ba người) và 3 ông nhận được giải Noben năm 1972. Riêng Bacdin năm 1956 đã nhận giải Nôben vì khám phá ra hiệu ứng tranzito.

Không thể kể tỉ mỉ cách giải thích hiện tượng trên bằng những trang sách của chúng ta, chỉ biết rằng nhiệt độ mà các chất chuyển trạng thái bình thường sang

trạng thái siêu dẫn được gọi là nhiệt độ tới hạn, và năm 1950 người ta phát hiện ra một hiện tượng là: khi thay hạt nhân ở các nút mạng siêu dẫn bằng một đồng vị của nó thì nhiệt độ tới hạn cũng thay đổi thì nhiệt độ tới hạn cũng thay đổi theo. Hiện tượng này chỉ ra rằng không chỉ có điện tử mới tham gia vào quá trình dẫn điện của chất siêu dẫn mà các ion nằm ở các nút mạng cũng đóng vai trò quan trọng. Như vậy tương tác giữa điện tử và nút mạng là yếu tố then chốt tìm hiểu tính siêu dẫn. Vậy phải tìm hiểu cơ chế tương tác đó.

1956, nhà nghiên cứu trẻ tuổi Cupơ-học trò của Bécđեն- đã trình bày với Bécđեն một ý tưởng nhỏ rằng: do những điều kiện đặc biệt ở trạng thái siêu dẫn, tương tác giữa điện tử và ion nút mạng có thể làm cho điện tử liên kết với nhau thành từng cặp (mặc dù chúng mang điện cùng dấu). Đặc biệt nhạy cảm Bécđեն thấy ngay những cặp điện tử liên kết này chính là chìa khóa giải thích hiện tượng siêu dẫn. Ông cùng với Cupơ và Srifơ nghiên cứu vấn đề đó một cách tổng quát năm 1957 đã giải quyết thành công vấn đề. Lý thuyết BCS ra đời. Lý thuyết đó chứng tỏ rằng trong điều kiện xác định có thể xảy ra sự tạo thành các cặp điện tử liên kết, các cặp này không bị va chạm với các bất hoàn chỉnh trong mạng tinh thể nữa và do đó không có điện trở. Dòng siêu dẫn chính là dòng các cặp điện tử kết hợp( gọi là cặp Cupơ).

Lý thuyết BCS trong khi giải quyết bài toán siêu dẫn đã giải quyết được bài toán tổng quát hơn, phức tạp hơn: lý thuyết lượng tử của hệ nhiều hạt.

Các chất siêu dẫn đang mở ra một triển vọng mới cho kỹ thuật, người ta đang cố tạo ra các chất siêu dẫn ở nhiệt độ thường.

### **Vi điện tử**

Có lẽ, một trong những thành tựu đặc sắc nhất và quan trọng nhất của kỹ thuật hiện đại là vi điện tử. Với vi điện tử người ta chế tạo được những máy mà nguyên lý hoạt động được quyết định bởi bản chất và cấu trúc nội tại của tinh

thể. Đứng về mặt công cụ, mạch vi điện tử là một máy móc khác về chất, là một bước nhảy vọt so với tất cả máy móc biết trước đó. Vậy vi điện tử là gì?

Chúng ta đã biết một mạch điện tử thường gồm rất nhiều linh kiện như diode, triot, tụ điện, cuộn cảm, điện trở.. một máy thu thanh bán dẫn có khoảng vài trăm linh kiện như vậy. Trước đây những linh kiện đó thường được chế tạo một cách riêng lẻ rồi hàn nối với nhau. Còn vi điện tử là một ngành kỹ thuật tổng hợp nhằm chế tạo những linh kiện không phải những linh kiện riêng rẽ mà chế tạo đồng thời thành một mạch điện tử phức tạp trên một tấm hay một khối nào đó. Bạn hãy nhìn một máy thu bán dẫn có 10 tranzito, có khoảng 200 linh kiện lắp trong một thể tích khoảng  $1000\text{cm}^3$ . Bây giờ với kỹ thuật vi điện tử ta không cần một mối hàn nào mà có thể tạo ra hàng ngàn linh kiện trong 1 thể tích là  $1\text{cm}^3$ , nghĩa là kích thước mạch điện tử thu nhỏ hơn trước hàng ngàn vạn lần.

Tuy nhiên điều quan trọng nhất là mạch vi điện tử có độ tin cậy đặc biệt cao và có thể chế tạo hàng loạt( đơn giản thì độ tin cậy là khả năng giữ cho mạch điện tử làm việc đúng và tốt trong một thời gian lâu không bị sai hỏng). Vì không phải hàn nối nên không phải lo đứt, hỏng.

Muốn chế tạo mạch vi điện tử người ta phải dùng những quá trình vật lý và hóa học để tạo ra những khu vực có tính năng khác hẳn nhau cùng nằm trong một khối tinh thể. Khu vực này có tính năng như một diode, khu vực kia có tính năng là 1 triot, tranzito v.v..Điều khó khăn là những khu vực này có kích thước rất nhỏ( vài phần vạn cm) lại nằm rất gần nhau. Rõ ràng làm được như vậy phải có kiến thức sâu sắc và chính xác về cấu trúc vi mô của tinh thể, đặc điểm của các chất pha chế phụ thêm, các cơ chế vi mô trong mạng tinh thể, lại phải biết cách khống chế và khai thác các cấu trúc, đặc điểm và cơ chế đó. Lý thuyết để làm tất cả những điều đó vẫn là cơ học lượng tử.

Chuyển động có vẻ bí ẩn của các điện tử và lỗ trống, những khái niệm có vẻ xa lạ như phonon, manhôn, mức Phecmi, mức cho, mức nhận...những thứ mà

chúng ta không thể nhìn thấy được, thậm chí cũng không thể tưởng tượng ra được lại chính là những cơ sở để giải thích những cơ chế kỳ diệu của các chất bán dẫn như hiệu ứng tiếp xúc, khuếch đại, hiệu ứng trường, hiệu ứng đường ngầm...

Để có thể nghĩ ra những khái niệm và mô hình đó và giải thích những hiệu ứng quan trọng đó, người ta phải dùng có phương pháp và nguyên lý của cơ học lượng tử. Dùng phương trình Schrödinger để tính các vùng năng lượng của điện tử, dùng thống kê học lượng tử để tính số điện tử và lỗ trống có trong một trạng thái nào đó, dùng hệ thức bất định để tính thời gian sống của các “hạt”, dùng lý thuyết đường ngầm để tính xác suất vượt qua một hàng rào v.v.. Trong lúc giải những bài toán đặc biệt này các nhà vật lý đã sáng tạo ra nhiều phương pháp và thủ thuật toán học kết hợp với những số liệu thực nghiệm, những mô hình độc đáo. Tất cả đều chứng tỏ bước phát triển, sức sống mới của cơ học lượng tử.

Có thể nói rằng vi điện tử đã làm thay đổi bộ mặt của kỹ thuật điện tử hiện đại và do đó tác động mạnh mẽ đến toàn bộ nền khoa học kỹ thuật nói chung.

## **HẠT NHÂN NGUYÊN TỬ VÀ CÁC HẠT CƠ BẢN**

### **Vật lý nguyên tử và vật lý hạt nhân**

Chúng ta đã dùng cơ học lượng tử để tìm hiểu lớp vỏ điện tử của nguyên tử. Hầu hết tính chất vật lý và hóa học quyết định bởi lớp vỏ này. Những nguyên tố không phải là nguyên tố phóng xạ thường có độ bền vững rất cao và những tác động vật lý và hóa học thông thường chỉ làm thay đổi liên kết của các điện tử ở lớp vỏ điện tử chứ thực tế không ảnh hưởng gì đến hạt nhân. Do đó vật lý nguyên tử chỉ nghiên cứu tính chất, cấu trúc và các diễn biến của lớp vỏ điện tử và xem hạt nhân như một hạt tròn vẹn không chia được- một chất điểm có khối lượng và điện tích dương. Tóm lại, vật lý nguyên tử không nghiên cứu cấu trúc hạt nhân.

Từ lớp vỏ điện tử tiến vào hạt nhân là một bước tiến khổng lồ. Khoảng cách thông thường trong những hiện tượng nguyên tử cỡ vào  $10^{-8}$  cm còn khoảng các trong hiện tượng hạt nhân khoảng  $10^{-13}$  cm, nghĩa là nhỏ hơn 10 vạn lần. Về năng lượng cũng vậy, năng lượng thường gặp ở lớp vỏ điện tử cỡ vài eV, còn năng lượng thường gặp trong hạt nhân là MeV. Rõ ràng là về mặt số lượng thì khi đi vào hạt nhân tức là đi vào một lĩnh vực hoàn toàn khác. Trên đường đi từ thế với vĩ mô đến kích thước lớp vỏ điện tử ta thấy rằng cần từ bỏ cơ học cổ điển để theo cơ học lượng tử. Từ lớp vỏ điện tử đi vào hạt nhân liệu chúng ta có phải từ bỏ cơ học lượng tử để đi theo một “cơ học mới” nào nữa không? Chính vì băn khoăn như vậy mà các nhà vật lý chân chừ chưa dám đẩy chiếc xe cơ học lượng tử vào khu rừng hiểm trở của hạt nhân. Họ chờ các nhà thực nghiệm mở một con đường. Nhưng họ còn phải chờ lâu. Dần dần đã có những con đường nhỏ cho chiếc xe cơ học lượng tử đi vào, người ta càng thấy rằng: đúng là cần phải mở rộng và cải thiện thuyết cơ học lượng tử theo nhiều phương hướng,

nhưng những tư tưởng cơ bản của cơ học lượng tử đã được chuyển từ lớp vỏ điện tử vào hạt nhân một cách có kết quả.

Chẳng hạn như, vẫn dùng phương trình Srôđingơ để tìm hàm sóng của các hạt trong hạt nhân, từ đó mà suy ra các đặc trưng khác, vẫn dùng hệ thức bất định để xác định các trị số của động lượng, năng lượng, thời gian sống của hạt.. Năng lượng, spin của hạt cũng bị lượng tử hóa: các hạt trong nhân tuân theo nguyên lý Paoly, trong hạt nhân cũng có hiệu ứng đường ngầm v.v..

Chúng ta hãy cùng nhau xem một vài nơi trong “khu rùng” hạt nhân.

### **Cấu tạo hạt nhân**

Trước khi cơ học lượng tử ra đời con người đã biết gì về hạt nhân nguyên tử?

Vào cuối thế kỉ 19, nhà bác học Becquerel người Pháp đã phát hiện ra rằng: uran và những muối của nó có thể phát ra tia làm đen kính ảnh. Hiện tượng đó mai này được Mari Curi và Pie Curi tiếp tục nghiên cứu gọi là hiện tượng phóng xạ. Tia phóng xạ gồm 3 thành phần:

- Tia  $\alpha$  gồm những hạt mang điện dương  $2e$ , khối lượng mỗi hạt bằng khối lượng nguyên tử Heli, có khả năng kích thích mạnh phản ứng hóa học và ion hóa chất khí rất mạnh, có khả năng đâm xuyên nhưng rất kém.
- Tia  $\beta$  là chùm hạt điện tử, có khả năng ion hóa kém hơn nhưng lại đâm xuyên mạnh hơn tia  $\alpha$ .
- Tia gamma  $\gamma$  một bức xạ điện từ có bước sóng rất ngắn, khả năng đâm xuyên rất mạnh.

Sau khi mô hình hành tinh nguyên tử của Rutherford và Bohr, người ta chứng minh được tia phóng xạ là từ hạt nhân phóng xạ ra, hiện tượng phóng xạ có liên quan đến sự thay đổi hạt nhân chứ không liên quan gì đến lớp vỏ điện tử của nguyên tử. Thực vậy, những đặc tính của phóng xạ không bị ảnh hưởng bởi yếu tố bên

ngoài như nhiệt độ, áp suất, chiếu sáng, điện trường từ trường. tính phóng xạ không làm thay đổi nguyên tố tham gia vào liên kết hóa học.

Năm 1919 Rutherford đã thực hiện phản ứng hạt nhân đầu tiên trong nhân loại: chiếu tia anpha do radi phát ra vào 1 bình đựng khí Nitơ nguyên chất. Thế là từ nguyên tố này biến sang nguyên tố khác, nhưng không phải bằng phương pháp hóa học mà bằng phương pháp vật lý. Mơ ước của các nhà luyện đan đã được kết nhà vật lý thực hiện.

Cũng năm đó, người ta thấy hạt nhân của một nguyên tử cùng một nguyên tố hóa học có thể có các khối lượng khác nhau và khác nhau một lượng sấp xỉ bằng khối lượng nguyên tử Hidro. Những hạt nhân của cùng 1 nguyên tố nhưng có khối lượng khác nhau thì gọi là *đồng vị*.

Nhưng hạt nhân có cấu tạo như thế nào? Trong vấn đề nay cơ học lượng tử tỏ rõ sức sống của nó.

Lúc đầu vì hạt nhân phóng xạ ra hạt  $\alpha$  và điện tử nên người ta nghĩ hạt nhân tạo thành từ hai hạt đó. Nhưng hạt  $\alpha$  nặng gấp 4 lần hạt nhân hydro đó là prôtôn. Trong vật lý hạt nhân người ta thừa nhận khối lượng của  $1/16$  nguyên tử  $O^{16}$  làm 1 đơn vị khối lượng nguyên tử. Như vậy hạt nhân có điện tích là  $z$  và khối lượng là  $A$  thì sẽ gồm có  $A$  proton và  $(A-z)$  điện tử.

Nhưng cơ học lượng tử đã phủ nhận, không cho phép điện tử tồn tại trong hạt nhân: nếu điện tử trong hạt nhân thì độ bất định về vị trí  $\Delta x$  của nó cỡ vài  $10^{-13} \text{cm}$ . Khi đó hệ thức bất định về vận tốc là:

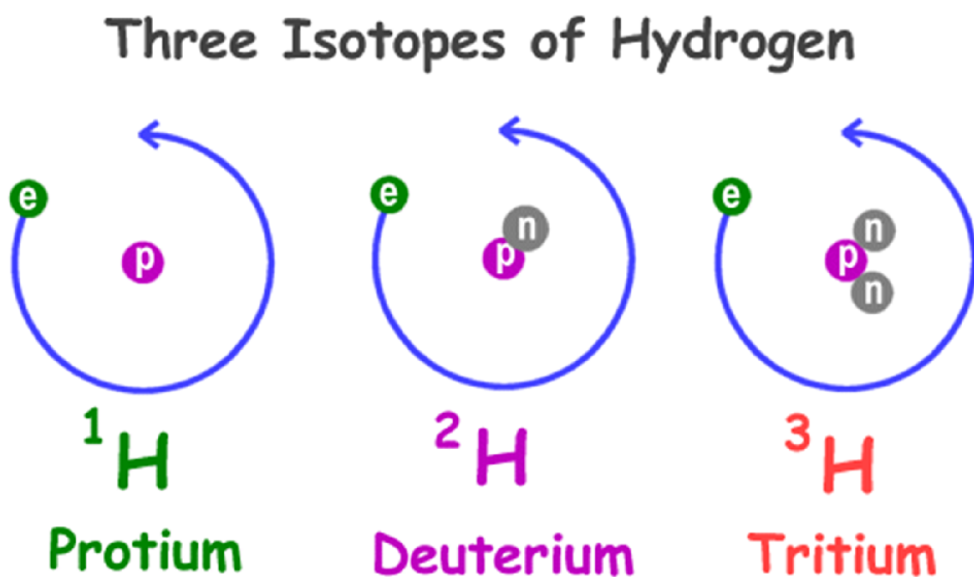
$$\Delta v \geq \frac{h}{m \cdot \Delta x} \approx \frac{6,6 \cdot 10^{-27}}{9,1 \cdot 10^{-28} \cdot 10^{-13}} \approx 7 \cdot 10^{13} \frac{\text{cm}}{\text{gy}}$$

Vận tốc của điện tử tối thiểu cũng bằng độ bất định, con số này lớn hơn rất nhiều vận tốc ánh sáng điều mà thuyết tương đối không cho phép. Tuy nhiên nếu không kể đến thuyết tương đối thì với vận tốc trên điện tử có động năng rất



lớn, lớn hơn rất nhiều lần năng lượng liên kết trong hạt nhân, và với động năng như thế điện tử không bao giờ nằm trong hạt nhân.

Như vậy hệ thức bất định phủ nhận sự tồn tại điện tử trong hạt nhân. Các nhà vật lý chưa biết xử lý thế nào 1932 nhà vật lý người Anh Chatvich đã tìm ra một hạt cơ bản mới là notron, có khối lượng sấp xỉ proton nhưng không mang điện. Việc phát hiện ra notron đưa đến 1 giả thuyết rằng: hạt nhân nguyên tử gồm hai loại hạt là proton và notron mang tên chung là nuclôn, giả thuyết này phù hợp với thực nghiệm, phù hợp với hệ thức bất định mang lại bức trang giản di cho cấu trúc hạt nhân và giải thích nhiều mắc mớ của một số nhà vật lý trước đó đã có lần “gặp phải” notron mà không biết nó là hạt gì?. Và nhanh chóng thừa nhận rằng: hạt nhân tạo nên từ các hạt proton và notron. Nếu hạt có điện tích  $z$  và khối lượng  $A$  thì nó sẽ gồm  $A$  các nuclôn, trong đó  $z$  proton và  $N=A-z$  notron. Các đồng vị là hạt nhân có proton bằng nhau nhưng khác nhau về notron. Người ta qui ước ký hiệu của hạt nhân nguyên tử là  ${}_Z^AX$  trong đó  $X$  là ký hiệu nguyên tử,  $z$  là số điện tích (proton),  $A$  là khối lượng (số nuclôn). Chẳng hạn như hạt nhân Hydro:  ${}_1^1H$  có  $z=1$  và  $A=1$ , ngoài ra còn hai đồng vị đơteri  ${}_1^2D$   $z=1$  và  $A=2$  và triti  ${}_1^3T$  có  $z=1$  và  $A=3$ . (hình 21)



**Hình 21. Ba đồng vị hydro**

Khi tạo nên hạt nhân nguyên tử, thiên nhiên cũng tiết kiệm như khi cấu tạo lớp vỏ điện tử. Nhưng giờ thiên nhiên có hai loại gạch proton và neutron. Mỗi lần cho một proton vào hạt nhân cho ra nguyên tố mới thì thiên nhiên phải chú ý theo dõi để sao cho hạt nhân không vỡ ra dưới tác dụng của lực đẩy tĩnh điện giữa các proton: đến hạt nhân uran thì  $A=238$  gồm 98 proton và 146 neutron.

Tin chắc rằng lõi kiến trúc proton-neutron làm cho tòa nhà hạt nhân sẽ vững vàng, đôi chỗ thiên nhiên còn sửa đổi lõi kiến trúc của mình cho khỏi đơn điệu: chỗ thì thiên nhiên thêm vào, chỗ thì bớt đi vài neutron. Vì vậy mà có những hạt nhân có đến ba đồng vị.

Cơ học lượng tử áp dụng cho hạt nhân xem hạt nhân như hệ có các proton và neutron, trước tiên người ta giải bài toán cơ học lượng tử cho 1 hệ đơn giản nhất là hạt nhân deuteri gồm 1 proton và 1 neutron. Dùng làm cơ sở giải nhiều bài toán phức tạp hơn.

### **Sự hụt khối và năng lượng liên kết**

Ta biết rằng hạt nhân  ${}_Z^AX$ , sẽ gồm  $z$  proton và  $A-z$  neutron. gọi  $m_p$  là khối lượng của proton và  $m_n$  là khối lượng neutron. Tổng khối lượng hạt nhân  $M'$  sẽ bằng tổng khối lượng các nuclôn:

$$M' = z.m_p + (A - z)m_n$$

Nhưng thực sự không như chúng ta nghĩ. Khối lượng thực hạt nhân không bằng  $M'$ , mà lúc nào cũng nhỏ hơn  $M'$  một lượng  $\Delta M$  nào đó được gọi là độ hụt khối.

$$\Delta M = M' - M$$

Như vậy, khi kết hợp các nuclôn riêng lẻ thành hạt nhân đã xảy ra một sự hụt khối, vì khối lượng thực của hạt nhân nhỏ hơn tổng khối lượng của các hạt tạo thành.

Chuyện gì mà kỳ lạ vậy! chẳng khác gì hai chú bé, mỗi chú góp vào ống tiền 10 đồng, nhưng khi mở ống thay vì 20 đồng giờ chỉ có 18 đồng. Hụt đi đâu hết 2 đồng? Tất nhiên mọi sự so sánh ở đây đều khập khiễng nhưng ở đây sự hụt khối nhìn bề ngoài có vẻ như vậy. Tuy nhiên khác nhau ở chỗ sự hụt khối là có thật.

Thuyết tương đối của Anhtanh sẽ giúp chúng ta. Một trong những kết luận của thuyết tương đối nói rằng, giữa khối lượng  $m$  và năng lượng toàn phần  $E$  của vật đó có mối liên hệ  $E=mc^2$ . Nếu  $m$  tính bằng gam,  $c$  tính ra cm/s, thì  $E$  tính ra là “éc”

Tính ra một gam khối lượng tàng trữ một năng lượng toàn phần bằng bằng  $9 \times 10^{20}$  éc, đó là năng lượng khá lớn tương đương năng lượng đốt 3000 tấn than. Tuy nhiên trong vật lý hạt nhân người ta quen dùng đơn vị năng lượng mega electronvon (MeV) và

$$1\text{Mev}=1,6.10^{-6} \text{ éc}$$

Khi đó một đơn vị khối lượng nguyên tử tàng trữ 1 năng lượng là 932 MeV. Như vậy phương trình Anhtanh giúp chúng ta giải thích: phần hụt khối lượng đi đâu khi tạo thành hạt nhân? Phần khối lượng đó tỏa ra môi trường và năng lượng tỏa ra là:  $\Delta E = \Delta m.c^2$ . Như vậy năng lượng toàn phần của hệ các hạt nuclôn tạo thành nhân giảm đi một lượng  $\Delta E$ , do đó các nuclôn này liên kết với nhau tạo thành hạt nhân bền vững và  $\Delta E$  được gọi là năng lượng liên kết. Ngược lại muốn phá vỡ 1 hạt nhân thành các nuclôn riêng ta cũng phải tiêu tốn một năng lượng bằng năng lượng liên kết. Thí dụ hãy xét năng lượng liên kết 2 proton liên kết 2 notron tạo thành hạt nhân Heli, đơn vị khối lượng dùng ở đây là đơn vị khối lượng nguyên tử viết tắt đ.v.k.l.n.t.

Tổng khối lượng 2 ptoton và 2 notron riêng lẻ là:

$$M'=2.1,0081+2.1,0090=4.034$$

Khối lượng của nhân heli là  $M=4.004$

$$\text{Vật độ hụt khối } \Delta M = M' - M = 0.03 \text{ đ.v.k.l.n.t}$$

Độ hụt khối này tương đương với năng lượng liên kết

$$\Delta E = 932.0,03 = 28MeV$$

Vậy năng lượng liên kết của 1 hạt nhân Heli bằng 28MeV. Và năng lượng liên kết của hàng kilogam thì sẽ lớn như thế nào.

Chính năng lượng tỏa ra trong lò phản ứng hạt nhân là một phần nhỏ của liên kết này.

### **Lực hạt nhân**

Chúng ta biết rằng hạt nhân nguyên tử rất bền, vì các hạt trong liên kết với nhau rất vững chắc: dù bằng những tác động hóa học, bằng nhiệt độ cực cao hay điện trường cực mạnh, nói chung cả kho vũ khí ta dùng tác động lên lớp vỏ điện tử đều vô ích với hạt nhân.

Vậy trong hạt nhân (các nuclôn) liên kết với nhau bằng những lực gì? Trước khi khám phá neutron người ta chỉ biết hai lực: lực hấp dẫn và lực điện. Nhưng lực hấp dẫn 2 nuclôn là vô cùng nhỏ và hoàn toàn không đáng kể, khi mà lực đẩy giữa hai proton là rất lớn vì 2 proton mang điện cùng dấu lại ở rất gần nhau. Lực đẩy này có khuynh hướng phá vỡ hạt nhân... Nhưng hạt nhân vô cùng bền vững. Điều này chứng tỏ lực mà các nuclôn hút nhau rất là mạnh. Vì ta chưa biết rõ bản chất lực này là gì nên ta tạm gọi là lực hạt nhân. Tuy nhiên, qua thực nghiệm, người ta vẫn có thể hiểu được một số đặc tính của lực hạt nhân. Ngoài đặc điểm là lực hạt nhân phải rất mạnh ra thì lực hạt nhân chỉ tác dụng trên một khoảng cách rất ngắn vào cỡ  $10^{-13}$  cm, khoảng cách đó gọi là bán kính tác dụng của hạt nhân (điều này cũng hiển nhiên, là vì nếu lực hạt nhân tác dụng trên những khoảng cách lớn, chẳng hạn giữa hai hạt nhân của hai nguyên tử, thì các nguyên tử sẽ hút nhau rất mạnh và tất cả các chất sẽ là những chất cực rắn).

Ngoài ra, lực hạt nhân là lực bão hòa, nghĩa là mỗi nuclôn chỉ tương tác với một số nuclôn nào đó lân cận quanh nó chứ không tương tác với mọi nuclôn

ở trong hạt nhân. Chúng ta cũng cần chú ý rằng lực hạt nhân không phụ thuộc vào điện tích của các nuclôn, nghĩa là lực hạt nhân tác dụng giữa các cặp prôtôn-prôtôn, prôtôn-notrôn và notrôn-prôtôn cũng đều giống nhau.

Tuy nhiên, điều cơ bản nhất là, lực hạt nhân do những yếu tố nào gây ra? Lực hạt nhân được tính bằng công thức nào thì chưa ai biết. Đó là một khó khăn rất lớn cho lý thuyết.

### ***Tương tác là gì? Phôtôn ảo***

Khi các nhà lý thuyết thấy cần phải giải thích lực hạt nhân, họ liên tưởng đến lực điện Coulomb. Hai điện tích  $q_1$  và  $q_2$  đặt cách nhau một khoảng  $r$  sẽ tương tác với nhau một lực  $f = \frac{q_1 q_2}{r^2}$ . Tương tác này được thực hiện qua trường: Điện tích thứ nhất gây ra một điện trường, trường này tác dụng một lực  $f$  lên điện tích thứ hai. Ngược lại, điện tích thứ hai cũng gây ra một điện trường tác dụng lên điện tích thứ nhất. Như vậy tương tác giữa các điện tử là hệ quả của hai tương tác giữa điện tích với điện trường: đầu tiên điện tích thứ nhất tương tác với trường (tạo với trường) sau đó trường này tương tác với điện tích thứ hai.

Bây giờ, thử xem khi chuyển từ thế giới vĩ mô đến thế giới vi mô thì quan niệm về trường và tương tác giữa các hạt thay đổi thế nào? Trong thế giới vi mô, khái niệm trường đã bị thay đổi: trường cũng có cấu tạo gián đoạn, cũng bị lượng tử hóa. Các lượng tử của trường điện từ gọi là các phôtôn. Điện tích tạo ra trường nghĩa là điện tích phát ra xung quanh nó những phôtôn. Tương tác giữa các điện tích xảy ra khi phôtôn do điện tích này phát ra bị điện tích kia hấp thụ, nghĩa là tương tác được thực hiện nhờ có việc trao đổi phôtôn, điện tích này bắt lấy tựa như hai người chơi bóng chuyền bóng cho nhau.

Mô hình tương tác như vậy có vẻ dễ hiểu, nhưng tiếc thay, các phôtôn trao đổi ở đây chỉ là *phôtôn ảo*. Tại sao lại ảo? Chỉ có trong cơ học lượng tử mới phân tích được cặn kẽ quá trình này.

Giả sử có hai điện tử tương tác với nhau thông qua việc trao đổi photon. Muốn vậy phải có hai quá trình cơ sở là:

Điện tử phát ra photon:  $e \rightarrow e + \gamma$ ,

và điện tử hấp thụ photon:  $e + \gamma \rightarrow e$

( $e$  là kí hiệu điện tử,  $\gamma$  là kí hiệu photon).

Giả sử điện tử  $e$  đứng yên, động năng của nó bằng không, vậy nó lấy năng lượng ở đâu để sinh ra photon được, và việc phát photon không thể xảy ra vì điều đó mâu thuẫn với định luật bảo toàn năng lượng. Người ta cũng chứng minh được rằng điện tử không thể hấp thụ photon được vì điều đó cũng mâu thuẫn với định luật bảo toàn năng lượng.

Như vậy hai quá trình này không thể xảy ra được mà là các quá trình do ta tưởng tượng ra. Các quá trình đó gọi là các *quá trình ảo*, khác với quá trình thực là quá trình có thật trong thực nghiệm và phù hợp với định luật bảo toàn năng lượng. Các quá trình ảo, trong đó định luật bảo toàn hình như bị vi phạm chỉ riêng có trong thuyết lượng tử. Thật ra thì định luật bảo toàn không bị vi phạm vì các quá trình ảo không xảy ra trong thực tế. Các quá trình ảo chỉ là một phương pháp đơn giản và tiện lợi để mô tả các hiện tượng. Còn photon ảo là photon được phát ra và hấp thụ trong quá trình ảo. Sự khác nhau giữa photon ảo và photon thực có liên quan đến năng lượng: khi phát ra photon ảo, định luật bảo toàn năng lượng không được thực hiện, còn các photon thực thì được phát ra phù hợp với định luật bảo toàn năng lượng.

Như vậy, nếu ta truyền cho điện tử một động năng phụ thì đáng lẽ phát ra photon ảo, điện tử có thể phát ra photon thật.

Bây giờ ta hãy xem xét tại sao cơ học lượng tử lại chấp nhận việc mô tả các hiện tượng dựa vào các quá trình ảo? Ta hãy xét hệ thức bất định đối với năng lượng và thời gian:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$$

Hệ thức này có nghĩa là trong thời gian  $\Delta t$  của quá trình chuyển dời hay biến đổi, năng lượng của hệ có thể bất định một lượng  $\Delta E \geq \hbar/\Delta t$ .

Điện tử có thể mất đi phần năng lượng  $\Delta E$  đó mà phát ra photon  $h\nu = \Delta E$  sao cho trong khoảng thời gian ngắn  $\Delta t = \hbar/\Delta E$  thì photon ảo vừa phát ra lại bị chính điện tử đó hay điện tử khác hấp thụ; hoặc điện tử cũng có thể như hấp thụ thêm phần năng lượng  $\Delta E$  khi hấp thụ photon ảo.

Như vậy, nhờ có hệ thức bất định, chúng ta có thể chấp nhận việc dùng các quá trình ảo làm một cách mô tả.

### ***Các hạt mêzôn***

Trở lại vấn đề tương tác giữa các nuclôn trong hạt nhân, xuất phát từ tính bão hòa của lực hạt nhân, nhà vật lý Xô viết I.E Tam đã đưa ra giả thuyết rằng: lực hạt nhân cũng là lực trao đổi Lực điện được thực hiện bằng việc trao đổi các photon ảo. Vậy lực hạt nhân được thực hiện bằng việc trao đổi những hạt ảo nào? Năm 1935, nhà bác học người Nhật Iukawa đưa ra giả thuyết rằng các nuclôn tương tác với nhau bằng cách trao đổi cho nhau những hạt mêzôn. Giả sử chúng ta có 2 nuclôn đứng gần yên tương tác với nhau. Theo công thức Anhxtanh, để tạo ra một hạt có khối lượng  $m$ , ít nhất phải cần một năng lượng bằng  $mc^2$ . Vậy độ bất định về năng lượng  $\Delta E$  không thể nhỏ hơn  $mc^2$  và tình trạng này không thể kéo dài quá thời gian  $\Delta t \sim \hbar/mc^2$ .

Coi vận tốc tối đa của mêzôn bằng vận tốc ánh sáng  $c$  thì khoảng cách  $R$  mà hạt mêzôn có thể đi được sau khoảng thời gian  $\Delta t$  là  $R = c \cdot \Delta t \sim \hbar/mc$  và khoảng cách  $R$  này phải bằng bán kính tác dụng của hạt nhân, nghĩa là  $R$  cỡ  $10^{-13}$  cm. Ta có  $m \approx \hbar/Rc$ .

Thay các trị số bằng số vào, ta được:

$$m = \frac{10^{-27}}{10^{-13} \cdot 3 \cdot 10^{10}} \approx 3 \cdot 10^{-25} \text{ gam} \approx 300 m_e \text{ (vì } m_e = \text{khối lượng điện tử} \approx 10^{-27} \text{ gam)}.$$

Như vậy dựa vào hệ thức bất định và bán kính tác dụng của lực hạt nhân, Iukawa đã tính được rằng khối lượng mêzôn phải xấp xỉ bằng 300 lần khối lượng điện tử.

Như chúng ta đã nói, sự khác nhau giữa các mêzôn thực và ảo có liên quan đến năng lượng. Khi phát ra mêzôn ảo năng lượng không còn bảo toàn còn khi phát ra mêzôn thực thì năng lượng luôn luôn được bảo toàn. Do đó chúng ta có thể có mêzôn thực nếu truyền cho prôtôn (hay notrôn) một năng lượng cần thiết.

Như vậy mêzôn chính là “quả bóng” mà nuclôn truyền cho nhau khi tương tác. Mêzôn là lượng tử của trường lực hạt nhân. Có thể nói mêzôn là thứ xi măng gắn các nuclôn lại thành khối duy nhất là hạt nhân. Nhưng vấn đề quan trọng là làm sao phát hiện được mêzôn trong thực nghiệm? Quá trình tìm kiếm này kéo dài trong 12 năm trời, qua nhiều lần làm đi làm lại, cuối cùng năm 1947, hai nhà vật lý Okialini và Paoon mới tìm thấy hạt mêzôn mà Iukawa tiên đoán trong các bức xạ vũ trụ và các ông gọi đó là mêzôn pi ( $\pi$ ), nhưng không phải có một mà có đến 3 loại mêzôn pi: mêzôn pi dương, âm và trung hòa.

Thế là, giả thuyết Iukawa, một giả thuyết xuất phát từ cơ học lượng tử, đã dành được thắng lợi và năm 1949, tức là hai năm sau, Iukawa đã vinh dự nhận giải thưởng Nôben. Tuy nhiên, vì chưa tìm được biểu thức của lực hạt nhân, chưa tìm được yếu tố gây nên lực hạt nhân, nên người ta vẫn chưa tìm được một lý thuyết thỏa đáng về lực hạt nhân và cũng vì vậy mà chưa giải thích được khá nhiều tính chất khác của lực hạt nhân.



### ***Sự phát minh ra pôditrôn***

Sau khi phát hiện ra notrôn, người ta biết được 3 hạt tạo thành nguyên tử: prôtôn, notrôn và điện tử. Nhiều người tưởng rằng vấn đề cấu tạo nguyên tử thế là được giải quyết. Nhưng đâu phải vậy! Không đầy một năm sau khi phát hiện ra notrôn, người ta tìm ra hạt cơ bản thứ tư là pôditrôn.

Việc nghiên cứu phát hiện ra pôditrôn là nhờ nghiên cứu tia vũ trụ. Ngay từ đầu thế kỉ 20, người ta đã biết rằng có những tia đi từ khoảng không vũ trụ đến trái đất. Đó là tia vũ trụ, gồm có những hạt mang điện hoặc không mang điện, nhưng đều mang một năng lượng rất lớn. Một trong những công cụ có công dụng nhất để quan sát các tia đó là buồng Uynson. Năm 1933, nhà vật lý người Mỹ Andécxơn ở học viện Caliphorni, trong lúc nghiên cứu tia vũ trụ, đã quan sát quỹ đạo các hạt trong buồng Uynson đặt trong từ trường. Từ trường làm cong (làm lệch) quỹ đạo của hạt mang điện. Nếu vận tốc của hạt càng lớn thì độ cong càng nhỏ. Ngoài ra từ trường còn cho phép biết được là hạt mang điện dương hay âm, vì tùy theo dấu của điện tích mà quỹ đạo bị uốn cong theo chiều này hoặc chiều khác. Andécxơn nhận thấy ngoài vết của hạt những hạt nhân mang điện âm (như điện tử) còn có những vết uốn theo phía ngược lại của những hạt mang điện dương đó là prôtôn, nhưng tiếp tục làm thí nghiệm ông đã thấy rằng hạt mang điện dương đó chỉ có khối lượng bằng khối lượng của điện tử. Ông gọi hạt mới này là pôditrôn. Hầu như đồng thời với Andécxơn, nhà vật lý Anh Blêket và nhà vật lý Ý Okialini cũng chụp được những vết của pôditrôn.

Thực ra thì pôditrôn đã được Dirắc tuyên đoán bằng lý thuyết trước khi Andécxơn tìm thấy bằng thực nghiệm. Dựa trên những phương pháp và nguyên lý của cơ học lượng tử kết hợp với thuyết tương đối của Anhtanh, Dirắc đã xây dựng lại phương trình Srôđingơ cho điện tử. Phương trình Dirắc cho 2 nghiệm, một nghiệm ứng với năng lượng toàn phần dương và một nghiệm ứng với năng lượng toàn phần âm của điện tử. Có gì đáng ngạc nhiên? Nếu điện tử

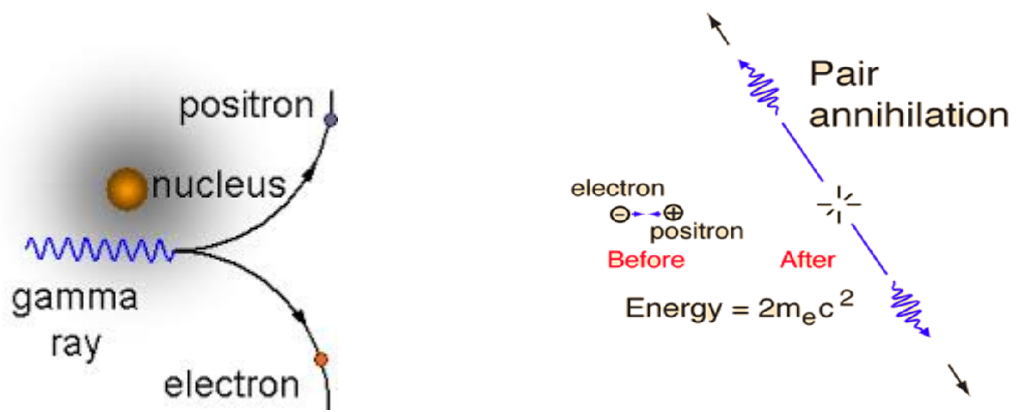
tự do thì năng lượng toàn phần dương, còn nếu điện tử liên kết thì năng lượng toàn phần âm. Nhưng phương trình Srôđingơ lại chỉ viết cho điện tử tự do. Thế thì vô lý quá!

Khi mà phép tính cho ta nghiệm số: diện tích ngôi nhà là âm  $20\text{m}^2$  thì đơn giản hơn cả là vứt cái nghiệm âm đó đi như vứt cái gì mâu thuẫn với “tư tưởng lành mạnh”, vứt đi một cái gì vô lý. Nhưng Dirac đã không vội vã làm thế. Là một nhà bác học chân chính và có suy nghĩ sâu sắc, ông cố tìm ra nguyên nhân của sự vô lý. Sau khi cân nhắc khá lâu, ông cho rằng nghiệm vô lý đó không thuộc về điện tử mà thuộc về một hạt nào đó mang điện tích trái dấu với điện tử, có khối lượng bằng điện tử. Hạt đó chính là pôđitrôn.

Lý thuyết Dirac còn tiên đoán được cả trong tương tác kì lạ giữa điện tử và pôđitrôn là hạt cơ bản đầu tiên được suy ra từ lý thuyết chứng tỏ sức mạnh của hai lý thuyết hiện đại là cơ học lượng tử và thuyết tương đối. Dù chỉ tiên đoán ra pôđitrôn, lý thuyết đã là quý rồi, nhưng không chỉ có thế, lý thuyết Dirac đã mở ra một lĩnh vực hoàn toàn mới: hạt và phản hạt, sự sinh và hủy cặp...

### ***Sự sinh và hủy cặp điện tử-pôđitrôn***

Sau khi Dirac tiên đoán quá trình phát sinh pôđitrôn, các nhà vật lý bèn lao vào tìm kiếm pôđitrôn ở khắp nơi, trong tia vũ trụ cũng như trong các thí nghiệm. Pôđitrôn có thể được sinh ra cũng có thể chết đi. Có một điều đáng chú ý là pôđitrôn lúc nào cũng được sinh cùng với điện tử. Cặp điện tử-pôđitrôn (kí hiệu là cặp  $e^- e^+$ ) sinh ra khi ta chiếu chùm tia gamma có năng lượng đủ lớn vào một chất xác định. Lượng tử của tia gamma là hạt phôtôn. Phôtôn bay tới biến đi đồng thời một cặp hạt  $e^- e^+$  sinh ra (hình 22a). Định luật bảo toàn năng lượng sẽ cho ta biết năng lượng cần thiết để sinh ra một cặp hạt. Trong trường hợp tạo thành các cặp hạt đứng yên thì năng lượng tiêu tốn sẽ nhỏ nhất.



a) Sự tạo thành cặp

b) Sự hủy cặp

Hình 22. Sự sinh và hủy cặp

Gọi  $m_0$  là khối lượng nghỉ của điện tử và pôđitrôn, tức là khối lượng khi hạt đứng yên. Tổng năng lượng nghỉ của cả hai hạt này bằng  $2m_0c^2 \approx 1\text{MeV}$ . Đó là lý do tại sao những photon có năng lượng lớn hơn 1MeV mới có khả năng tạo cặp  $e^-e^+$ .

Để tạo cặp, chùm tia gamma phải đi qua một chất nhất định trong những điều kiện nhất định nào đó. Quá trình tạo cặp có thể xảy ra muôn hình ngàn vẻ khác nhau. Thông thường hai photon va chạm vào nhau tạo thành một cặp  $e^-e^+$ . Quá trình này có thể viết:  $2\gamma \rightarrow e^- + e^+$ . Nếu quan niệm những tia gamma là bức xạ, còn điện tử và pôđitrôn là những hạt chất thì hiện tượng tạo cặp đã cho ta thấy khả năng có thể biến đổi bức xạ thành chất.

Trong vật lý lượng tử có một nguyên lý quan trọng, đó là nguyên lý thuận nghịch của các quá trình trong thế giới vi mô. Nếu có một quá trình thuận nghịch nào đấy thì nhất thiết phải có quá trình ngược lại. Nếu có quá trình hai photon tạo thành cặp  $e^-e^+$  thì cũng phải có quá trình biến đổi cặp  $e^-e^+$  thành hai photon:  $e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma$  (hình 22b). Sự biến đổi cặp hạt thành những lượng tử của trường (thành bức xạ) chỉ xảy ra khi động năng của hạt xấp xỉ bằng năng lượng riêng  $E_0$  của nó do khối lượng nghỉ xác định.:  $E_0 = m_0c^2$ .

Sự biến đổi cặp thành photon gọi là sự hủy cặp. Cách gọi này có thể gây cho người ta hiểu lầm là sự thủ tiêu cặp, biến cặp hạt thành hư vô. Thực ra đây vẫn là một quá trình bảo tồn vật chất và năng lượng. Hiện tượng hủy cặp đã được thấy trong thực nghiệm.

Trước khi biết hiện tượng sinh và hủy cặp, người ta phân biệt rạch ròi hai dạng vật chất và bức xạ. Chất là những hạt có khối lượng nghỉ và không thể chuyển động với vận tốc ánh sáng. Những hạt như điện tử, pôđitrôn, prôtôn, nơtrôn v.v... là những hạt chất. Còn bức xạ gồm những hạt không có khối lượng nghỉ, những lượng tử của trường, luôn luôn chuyển động với vận tốc ánh sáng. Qua sự sinh và hủy cặp, người ta thấy: chất và bức xạ có thể chuyển hóa lẫn nhau và sự khác nhau giữa chúng là khác về lượng nhiều hơn là về đặc tính.

Sự phát minh ra quá trình sinh và hủy cặp chứng tỏ rằng, các hạt mà ta tưởng là bất biến và bền vững vĩnh viễn, lại có khả năng biến hóa tương hỗ.

### ***Các hạt và phản hạt***

Ngay từ trước khi sự khám phá ra pôđitrôn, người ta đã ngạc nhiên về sự bất đối xứng của các điện tích âm và dương trong tự nhiên. Tại sao lại có các hạt nặng như prôtôn mang điện dương mà không có các hạt nặng như thế mang điện âm? Tại sao có các hạt nhẹ như điện tử mang điện âm mà lại không có các hạt nhẹ như thế mang điện dương?

Việc khám phá ra pôđitrôn làm giảm tính bất đối xứng và cho ta hy vọng rằng, phải chăng các định luật của tự nhiên là đối xứng với dấu của điện tích? (nghĩa là nếu đổi dấu các điện tích thì các định luật vật lý sẽ không đổi dạng).

Đi xa hơn nữa, các nhà vật lý lý thuyết còn phát biểu một nguyên lý là: Tất cả các định luật tự nhiên đều bất biến đối với phép liên hợp điện tích.

Theo nguyên lý này, mỗi hạt phải có một phản hạt tương ứng với nó.

-Khối lượng của phản hạt bằng khối lượng của hạt;

- Điện tích của phản hạt bằng và ngược dấu với điện tích của hạt;
- Spin của phản hạt bằng spin của hạt;
- Mômen từ spin của phản hạt bằng và ngược dấu với mômen từ spin của hạt.

Điều quan trọng nhất của nguyên lý liên hợp điện tích là: các định luật tự nhiên sẽ không đổi dạng nếu ta thay các hạt bằng các phản hạt.

Điện tử, prôtôn, nơtrôn, phôtôn v.v... có các phản hạt tương ứng là các phản điện tử, phản prôtôn, phản nơtrôn và phản phôtôn.

Phản điện tử chính là pôđitrôn.

Phản prôtôn mãi đến năm 1955 mới tìm ra.

Nơtrôn không có điện tích nên lúc đầu người ta tưởng rằng nơtrôn trùng với prôtôn, nhưng sau đó người ta mới biết rằng nơtrôn có mômen từ spin ngược dấu với phản hạt của nó. Nơtron có khối lượng lớn gấp 2000 lần khối lượng điện tử, nên để tạo thành một cặp nơtrôn-phản hạt nơtrôn phải có năng lượng lớn gấp 2000 lần năng lượng để tạo thành cặp  $e^- e^+$ , nghĩa là phải có năng lượng vài tỉ eV (để sinh ra một cặp hạt mà khối lượng mỗi hạt là  $m$ , ít nhất phải có năng lượng  $2mc^2$ ). Mãi đến năm 1953, người ta mới chế được những máy gia tốc những hạt có năng lượng như vậy và người ta đã tìm được phản hạt nơtrôn.

Còn phản phôtôn thì trùng với phôtôn.

Hạt và phản hạt khi gặp nhau cũng hủy lẫn nhau và biến thành bức xạ.

Các phản hạt gợi cho người ta nghĩ rằng có thể tồn tại các phản nguyên tử cấu tạo bởi các phản prôtôn, phản nơtrôn và phản điện tử. Các phản nguyên tử lại tạo thành các phản vật thể, phản thế giới.

Theo nguyên lý liên hợp điện tích, những quy luật của phản thể giới không khác gì với những quy luật của thể giới chúng ta, nếu hai thể giới tồn tại trong cùng một điều kiện. Do đó nếu phản thể giới có ở ngay dưới chân ta, ta cũng không nhận biết được. Điều duy nhất có thể nhận được là đường giới hạn giữa thể giới thể thông thường và phản thể giới. Trên giới hạn đó, những cư dân của hai thể giới có thể gặp nhau, nhưng đó là một cuộc gặp gỡ “nảy lửa” và khủng khiếp: Cả hai cùng biến mất đi và biến thành những lượng tử bức xạ cực mạnh về mọi phương... Tuy nhiên, cho đến nay các nhà bác học chưa phát hiện được các giới hạn ghê rợn đó.

Công cuộc nghiên cứu về phản hạt, phản nguyên tử và phản vật thể vẫn đang tiếp tục, kỳ thú nhưng cũng đầy khó khăn mà phạm vi cuốn sách này không cho phép chúng ta đi sâu hơn nữa. Nhưng rõ ràng là công cuộc nghiên cứu này bắt nguồn từ việc khám phá ra pôđitrôn trên lý thuyết rồi trên thực nghiệm.

### ***Phóng xạ anpha***

Các chất phóng xạ có thể phóng ra tia anpha, cũng có chất phóng ra tia bêta: Thường thường sau khi phóng ra các hạt anpha, bêta, hạt nhân vẫn còn ở trong trạng thái kích thích, hạt nhân sẽ phóng ra tia gamma là một loại bức xạ điện từ.

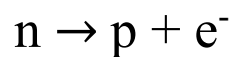
Tuy nhiên, hiện tượng hạt nhân tự động phát ra hạt anpha là một hiện tượng mà vật lý cổ điển không hiểu được. Hạt anpha vốn có ở trong nhân, có khối lượng 4 và điện tích 2, kí hiệu là  $2\alpha^4$ , chính là hạt nhân hêli gồm 2 prôtôn và 2 notrôn. Các hạt  $\alpha$  bị giữ trong nhân bằng một lực rất mạnh. Theo vật lý cổ điển thì hạt anpha không thể ra khỏi nhân được vì có một bức tường thế năng rất cao ngăn giữ. Trong nhân urani bức tường thế năng cao đến 9MeV. Nhưng nhân urani trong khi phân hủy vẫn phóng ra hạt anpha với năng lượng chỉ có 4MeV.

Tuy nhiên theo quan điểm của cơ học lượng tử thì dù có năng lượng nhỏ hơn chiều cao bức tường thế năng, hạt  $\alpha$  vẫn có thể rời bỏ hạt nhân theo hiệu ứng đường hầm. Theo quan điểm đó, năm 1928, Gamóp đã giải quyết được bài toán phóng xạ anpha. Xác xuất để hiệu ứng đường hầm xảy ra phụ thuộc vào năng lượng của hạt  $\alpha$ , chiều cao và bề dày của bức tường thế năng. Cơ học lượng tử còn giải quyết thỏa đáng các hiện tượng liên quan đến phóng xạ  $\alpha$ , đã tính được đúng chu kì bán hủy là khoảng thời gian để một nửa lượng chất phóng xạ hiện có bị phân rã.

### ***Phân rã beta và hạt notrôn***

Phân rã beta ( $\beta$ ) là hiện tượng từ hạt nhân phóng ra những điện tử. Nhưng hạt nhân tạo thành từ prôtôn và notrôn, vậy thì làm gì có điện tử trong nhân mà phóng ra?

Sau này, người ta giả thiết rằng, phân rã là do sự biến đổi của hạt notrôn thành prôtôn và điện tử:



Điện tử tạo thành được phóng xạ. Tuy nhiên, vấn đề phóng xạ  $\beta$  vẫn còn nhiều bí ẩn là, hình như trong hiện tượng này, định luật bảo toàn năng lượng bị vi phạm. Chẳng hạn, hạt nhân phóng xạ  ${}_{90}\text{Th}^{234}$  sau khi phóng xạ hạt  $\beta$  biến thành  ${}_{91}\text{Pa}^{234}$  (protactini). Theo lý luận, năng lượng của hạt  $\beta$  bằng hiệu số các mức năng lượng của hạt nhân trước và sau khi phóng ra hạt  $\beta$ , cụ thể là bằng 0,78MeV. Nhưng thực tế, hạt phóng ra có đủ mọi trị số năng lượng trong khoảng từ 0 đến 0,78MeV, có nghĩa là năng lượng của hạt  $\beta$  bao giờ cũng nhỏ hơn năng lượng mà hạt nhân đã giải phóng. Vậy phần năng lượng thừa biến đi đâu? Chính các nhà bác học Chatvich-người phát minh ra notrôn-đã đặt ra câu hỏi này từ năm 1914 nhưng chưa tìm ra được lời giải đáp.

Cho đến năm 1937, nhà vật lý Thụy Sĩ Paoli mới tìm được câu trả lời. Ông giả thiết rằng trong quá trình phân rã  $\beta$ , ngoài điện tử còn có một hạt nữa được tạo phóng ra. Hạt này không mang điện nên cũng được Paoli gọi là notrôn. Nhưng notrôn đã được đặt tên cho một hạt khác (mà Chatvich tìm ra) rồi. Có lần tại trường đại học tổng hợp Rôma ở Ý, nhà vật lý Phecmi đang kể cho các sinh viên nghe về phát minh của Paoli, một sinh viên hỏi: “Notrôn của Paoli có giống của Chatvich không?”. Phecmi trả lời : “Không! Notrôn của Paoli nhỏ hơn nhiều, đó là notrôn tí hon, notrinô” (trong tiếng Ý, tiếp vị ngữ “inô” nghĩa là nhỏ bé, đáng yêu).

Tên gọi đùa đó được giữ nguyên và ngày nay được thừa nhận là tên gọi của hạt mà Paoli tiên đoán. Notrinô không mang điện, khối lượng xấp xỉ bằng 0, spin bằng  $\frac{1}{2}$ .

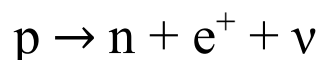
Chính hạt notrinô này đã mang theo phần năng lượng thừa trong phân rã  $\beta$  mà trước đây ta không biết nó biến đi đâu. Vậy ta có thể viết: “hiệu hai mức năng lượng của hạt nhân trước và sau khi phóng xạ bằng năng lượng của điện tử bay ra cộng với năng lượng của notrinô bay ra”. Nếu ta ký hiệu notrinô là  $\nu$  thì có thể viết:  $n \rightarrow p + e^- + \nu$ .

Các tính chất của notrinô làm cho nó trở thành một hạt vô hình vì rất khó quan sát: nó không mang điện nên không chịu ảnh hưởng của điện trường và không gây ion hóa. Notrinô tương tác rất yếu với các chất, nó rất nhẹ, lại có năng lượng khá lớn hơn hạt ánh sáng nên nó xuyên qua các chất khá dễ dàng, có thể đi xuyên qua bề dày trái đất. Vậy làm sao mà quan sát được notrinô bằng thực nghiệm?

Hai mươi năm sau khi Paoli tiên đoán, đến tháng 6 năm 1956 các nhà vật lý Mỹ Côoen và Rainet mới bố trí được thí nghiệm rất tài tình để quan sát được notrinô nhờ một lò phản ứng hạt nhân rất mạnh ở Xavana Rive. Một năm sau, năm 1957, người ta đã phát hiện được phản ứng notrinô. Phản notrinô phát ra



trong hiện tượng phân rã  $\beta$  dương, tức là hạt nhân phóng ra pôđitrôn là phản hạt của điện tử-trong quá trình này, prôtôn chuyển thành notrôn:



Thế là lại nảy ra vấn đề: prôtôn và notrôn có thể biến hóa lẫn nhau.

### ***Số chẵn lẻ và định luật không bảo toàn số chẵn lẻ***

Trước đây chúng ta đã nói đến tính đối xứng: đối xứng đối với phép liên hợp điện tích. Thực ra, vấn đề đối xứng còn có ý nghĩa sâu sắc và tổng quát hơn nhiều. Tính đối xứng có liên quan mật thiết với các định luật bảo toàn trong vật lý học. Ở đây chúng ta sẽ nói đến tính đối xứng gương đã dẫn đến định luật bảo toàn số chẵn lẻ.

Thế nào là tính đối xứng gương? Tính đối xứng gương có nghĩa là: giữa vật (hiện tượng) thực và ảnh phản chiếu của nó trong gương không hề có một sự khác nhau tuyệt đối nào, chẳng hạn một người đang đứng cạnh bảng, mặt quay về phía chúng ta, cầm phấn ở tay trái, chữ viết trên bảng lộn ngược thì chúng ta hiểu ngay rằng, đó chỉ là ảnh gương. Vậy hiện tượng mà ta vừa thấy có thể xảy ra trong thực tế không hay chỉ là ảnh trong gương?

Tuy nhiên không có một đặc điểm nội tại nào để khẳng định rằng hiện tượng trên không thể xảy ra trong thực tế. Từ đó người ta nói rằng: không thể nào tìm được khác nhau về bản chất nào có thể giúp ta phân biệt những hiện tượng vật lý xảy ra trong thực tế với ảnh của nó trong gương. Do đó nếu có một hiện tượng nào xảy ra thì, về nguyên tắc, ảnh của hiện tượng đó trong gương cũng xảy ra trong thực tế. Tính đối xứng gương là như vậy.

Khi giả thiết rằng các định luật của tự nhiên đối xứng gương, có nghĩa là các định luật đó không thay đổi nếu ta thay tất cả các hiện tượng bằng ảnh gương của chúng. Điều đó có nghĩa là bên phải và bên trái là tương đương với

nhau. Chúng ta là những người thuận tay phải và có trái tim ở bên lồng ngực trái. Về nguyên tắc, có thể có ở một hành tinh xa xăm nào đó những người thuận tay trái và có trái tim nằm bên phải.

Bây giờ hãy xem thế nào là số chẵn lẻ.

Số chẵn lẻ là một khái niệm thuần túy trong cơ học lượng tử. Theo cơ học lượng tử, mỗi hạ vi mô còn có một đặc trưng là số chẵn lẻ. Sở dĩ như vậy vì trạng thái của hạt vi mô được mô tả bằng một hàm sóng. Giả sử  $\psi(x,y,z)$  là hàm sóng của hạt phụ thuộc vào các tọa độ  $x,y,z$ . Nếu làm một phép phản chiếu tọa độ, nghĩa là đổi dấu  $x,y,z$  thành  $-x,-y,-z$  thì có hai trường hợp xảy ra:

Nếu hàm sóng của hạt không đổi dấu, nghĩa là:

1)  $\Psi(x,y,z)=\psi(-x,-y,-z)$  thì hàm đó là hàm chẵn và số chẵn lẻ của hạt quy ước bằng 1.

2) Nếu hàm sóng đổi dấu, nghĩa là:

$\Psi(x,y,z)= -\psi(-x,-y,-z)$ , thì hàm đó là hàm lẻ, và số chẵn lẻ của hạt quy ước bằng 1.

Số chẵn lẻ của một hệ phức tạp bằng tích các số chẵn lẻ của những hạt con của nó. Nhờ quan niệm về số chẵn lẻ, tính đối xứng gương được biểu diễn dưới dạng toán học. Nếu các định luật tự nhiên đối xứng gương thì số chẵn lẻ toàn phần của hệ hạt được bảo toàn trong quá trình biến đổi. Còn nếu tính đối xứng gương là không đúng, nghĩa là có thể phân biệt được bên trên, bên dưới, bên phải, bên trái thì số chẵn lẻ không được bảo toàn. Sở dĩ người ta liên hệ sự bảo toàn số chẵn lẻ với tính đối xứng gương là vì phép đổi dấu tọa độ là một phép phản chiếu qua gương và theo lý thuyết cơ học lượng tử thì  $\psi(x,y,z)$  và  $-\psi(-x,-y,-z)$  cùng mô tả một trạng thái cho nên trạng thái trong gương là trạng thái có thể xảy ra trong thực tế. Trước năm 1956, qua nhiều hiện tượng thực nghiệm, người ta tin rằng nguyên lý đối xứng gương là đúng và định luật bảo toàn số chẵn lẻ là đúng.

Mùa hè năm 1956, tại trường đại học Côlumbia, hai nhà vật lý Trung Quốc trẻ tuổi, Lý Chính Đạo và Dương Chân Ninh, trong khi cố gắng giải quyết những khó khăn nảy ra trong khi nghiên cứu sự phân rã của các hạt mêzôn K, đã dũng cảm giả thuyết rằng: trong những lĩnh vực nào đó, định luật bảo toàn số chẵn lẻ có thể không đúng, nghĩa là nguyên lý đối xứng gương có thể không đúng. Nói cho dễ hiểu hơn thì hai nhà bác học đó cho rằng, có thể phân biệt được bên phải khác bên trái, bên trên khác với bên dưới và hai ông đề nghị làm thí nghiệm để chứng tỏ sự khác nhau này. Lập luận của thí nghiệm như sau: trong phân rã phóng xạ, hạt mẹ sẽ sinh ra những hạt con. Hạt con bay ra theo phương spin của hạt mẹ. Ta không thể phân biệt hạt mẹ với ảnh hưởng của nó trong gương chỉ khi hạt mẹ phóng ra hạt con theo cả hai chiều với xác suất như nhau. Ngược lại, nếu những hạt con *chỉ được phóng ra ưu tiên theo một chiều* thì ta có thể phân biệt được hiện tượng phóng xạ với ảnh của nó qua gương và như vậy thì *nguyên lý đối xứng gương không đúng nữa*. Hai ông đã đề nghị quan sát các chi tiết tinh vi của phân rã  $\beta$ . Các nhà thực nghiệm hưởng ứng lời đề nghị của hai ông. Thí nghiệm đầu tiên có ý nghĩa quyết định là do bà Vũ Kiên Tân tiến hành. Đó là thí nghiệm về phóng xạ  $\beta$  của coban 60, trong đó coban phóng ra điện tử và neutrino để biến thành niken 60:



Điện tử được phóng ra theo phương của spin hạt nhân nhưng bình thường, mỗi hạt nhân định phương spin của nó một cách tùy ý, nên điện tử cũng bay ra theo mọi phương. Người ta bố trí lại bằng cách đặt chất phóng xạ trong một từ trường mạnh để định hướng spin hạt nhân theo một phương duy nhất! Các nhà bác học đã nói đùa rằng từ trường mạnh đã bắt các hạt nhân “giống cây chuối” trong suốt thời gian làm thí nghiệm. Để chuyển động nhiệt của hạt nhân không làm rối loạn sự sắp xếp của chúng, người ta giữ chất phóng xạ trong nhiệt độ âm đến  $268^{\circ}\text{C}$ . Sau đó người ta bố trí những máy đếm điện tử quanh

chất phóng xạ và thấy rằng: quả thật là điện tử chỉ được phóng ra theo một chiều ưu tiên còn chiều kia (cũng của phương đó) thấy rất ít điện tử phóng ra. Trên hình 23, hạt nhân coban được vẽ bằng một hình cầu có mũi tên chỉ chiều quay spin của hạt nhân (chiều quay của spin khác với vector spin). Hướng bay ra của điện tử được vẽ bằng hai mũi tên.

Chính hướng bay đó của điện tử mâu thuẫn với nguyên lý đối xứng gương. Thực vậy, nếu nguyên lý đối xứng gương đúng thì ảnh gương của bức tranh phân rã không bị thay đổi khi phản chiếu trên gương A hoặc gương B. Tuy nhiên vì điện tử chỉ bay theo một chiều nên sự phản chiếu trên các gương cho ta các bức tranh khác nhau. Khi phản chiếu trên gương A, chiều bay của điện tử không thay đổi nhưng chiều quay của spin hạt nhân lại thay đổi. Khi phản chiếu trên gương B, chiều bay của điện tử lại thay đổi.

Như vậy bức tranh phân rã không có sự phân rã không có sự đối xứng gương và do đó định luật bảo toàn số chẵn lẻ bị phá vỡ. Về sau, sự không bảo toàn số chẵn lẻ còn xuất hiện trong nhiều thí nghiệm khác. Giả thuyết của Lý và Dương được xác nhận, gây chấn động dư luận thế giới và ngay năm 1957 (sau khi có thí nghiệm của bà Vũ), hai ông đã được giải thưởng Nôben.

Một chuyện thú vị là chỉ hai ngày trước khi bà Vũ làm thí nghiệm, một nhà bác học nổi tiếng như Paoli vẫn còn nghi ngờ giả thuyết của Lý và Dương. Paoli viết thư cho bạn: “Tôi không tin rằng thượng đế lại là người yêu tay trái.” Và Paoli đánh cược rằng thí nghiệm của bà Vũ sẽ phủ nhận giả thuyết của Lý và Dương. Nhưng chỉ hai ngày sau, thí nghiệm của bà Vũ đã làm Paoli thua cuộc, Paoli lại viết thư cho bạn: “Tôi đã bắt đầu tỉnh ra sau cơn choáng váng đầu tiên. Choáng váng không phải vì thượng đế thích dùng tay trái, mà choáng váng vì tại sao tôi lại cứ ép thượng đế phải thuận cả hai tay”.

Ở đây lại nảy ra một vấn đề mới. Phải chăng không gian là không đối xứng? Không! Không gian có tính đối xứng gương, nhưng các hạt cơ bản không

có tính đối xứng gương. Các hạt cơ bản có tính đối xứng khác: ứng với mỗi hạt có một phản hạt. Phản hạt chính là ảnh gương của hạt. Trước đây, khi tin vào định luật bảo toàn số chẵn lẻ, người ta cho rằng ảnh của photon vẫn là photon, chỉ là đổi bên phải thành bên trái và ngược lại. Theo các nhà bác học Lý, Dương và Landau thì ảnh gương của hạt phải là phản hạt. Phép biến đổi trong đó vừa có sự phản chiếu gương vừa có sự chuyển từ hạt sang phản hạt được gọi là phép nghịch đảo kết hợp. Khi chưa phát hiện ra định luật không bảo toàn số chẵn lẻ, người ta cho rằng có hai tính đối xứng riêng biệt: đối xứng gương và đối xứng điện tích. Thực ra trong tự nhiên tồn tại một dạng đối xứng phức tạp hơn: các định luật sẽ không thay đổi nếu như đáng lẽ xét chính hiện tượng, chúng ta lại xét ảnh gương của nó, đồng thời các hạt được chuyển thành phản hạt. Như vậy sự phản chiếu gương chuyển coban thành phản coban. Phản coban không phát ra điện tử và neutrino mà phát ra phản điện tử và phản neutrino. Như vậy sở dĩ không có sự bảo toàn số chẵn lẻ trong các quá trình phân rã có neutrino tham gia là vì neutrino khác với phản neutrino.

### ***Hạt cơ bản là gì?***

Khi đặt câu hỏi: “các chất tạo nên từ những cái gì?” . Tự nhiên người ta đi đến ý nghĩ về những hạt nhỏ bé nhất-nhỏ bé đến không thể phân chia được nữa-mà thiên nhiên đã dùng để xây dựng nên thế giới vật chất của chúng ta. Những hạt nhỏ bé nhất đó được gọi là những hạt cơ bản. Nhưng thế giới nào “nhỏ bé nhất”? Ban đầu khi nghiên cứu các chất, người ta thấy phân tử là phân tử nhỏ bé nhất của một chất còn giữ được những đặc tính của chất đó. Nhưng rồi các nhà hóa học của thế kỉ 19 lại thấy rằng phân tử còn có thể phân chia thành các nguyên tử và người ta xem nguyên tử là hạt cuối cùng không thể phân chia được nữa. Đến đầu thế kỉ 20, thì nguyên tử vẫn còn là một thế giới phức tạp gồm nhiều hạt nhỏ bé hơn nữa như điện tử, proton, neutron và người ta đang gọi những hạt này là những hạt cơ bản.

Danh từ hạt cơ bản có thể gợi cho chúng ta quan niệm rằng đó là những phần tử đơn giản cuối cùng, nhỏ bé nhất của vật chất, những phần tử không có cấu trúc và không thể phân chia được nữa, những phần tử diễn biến như một thể đơn nhất ở mọi nơi. Thực ra thì không phải như vậy: như ta đã biết, trong mỗi thời kì nhất định, có những hạt ta đã xem là không thể phân chia được, và quan niệm hạt cơ bản, nhưng đến thời kì sau, khi khoa học đã phát triển hơn, những hạt đó lại bị phân chia, không còn là hạt cơ bản nữa. Vì vậy, khái niệm hạt cơ bản gắn liền với khả năng nhận thức của chúng ta, ngăn cách cái mà chúng ta đã biết với cái mà chúng ta chưa biết. Không nên xem hạt cơ bản như một cái đơn nhất không còn phân chia được nữa. Chỉ nên xem rằng, hạt cơ bản là hạt mà ngày nay với trình độ chúng ta, ta thấy nó diễn biến như một cái đơn nhất, không có cấu trúc, ta xem nó là con bản.

Hiện nay, khoa học đã tìm ra gần 200 hạt cơ bản (kể cả các cộng hưởng của chúng). Nhưng vào năm 1932, người ta biết được 4 hạt là prôtôn, notrôn, điện tử và phôtôn. Năm 1932, năm tìm ra notrôn trở thành một cái mốc quan trọng trong vật lý các hạt và chỉ sau đó người ta mới phát hiện ra những sự kiện làm thay đổi quan niệm về các hạt cơ bản. Năm 1933, người ta tìm ra pôditrôn và khám phá được những biến đổi kì lạ giữa điện tử và pôditrôn. Để cứu vãn định luật bảo toàn năng lượng trong phân rã, người ta đã tiên đoán được sự tồn tại của notrinô. Sau đó bằng một lý thuyết, người ta tiên đoán sự tồn tại của các hạt mới để giải thích lực hạt nhân (như hạt mêzôn), mặt khác trong vũ trụ cũng khám phá thêm một số hạt mới. Có đến 5 loại hạt mêzôn như mêzôn  $\mu$ , mêzôn  $\pi$ , mêzôn  $k$ , mêzôn  $\eta$  và các mêzôn cộng hưởng. Về sau người ta xếp mêzôn  $\mu$  vào một nhóm hạt khác, gọi là nhóm leptôn. Sau đó người ta lại tìm ra các hạt cơ bản rất nặng là các hyperôn.

Hiện nay, người ta xếp các hạt cơ bản đã biết thành 3 nhóm:

Nhóm các hạt nhẹ gọi là nhóm leptôn.

Nhóm các hạt trung bình gọi là nhóm mêzôn.

Người ta biết rằng các hạt cơ bản không phải như một cái gì không thể phân chia và phá hủy được. Sự thật thì trong khi va chạm với nhau, chúng có thể được sinh ra hay hủy đi, đồng thời biến thành các hạt cơ bản khác. Các hạt có thể biến thành bức xạ, tức là các lượng tử của trường và ngược lại, các lượng tử của trường có thể sinh ra các hạt. Các nhà vật lý tin rằng các hạt cơ bản vốn có sẵn khả năng biến đổi tương hỗ.

Các hạt cơ bản có nhiều đặc trưng riêng biệt. Càng đi sâu vào thế giới các hạt cơ bản thì càng thấy nhiều đặc trưng mới. Ngoài những đặc trưng thông thường như khối lượng, điện tích, còn có những đặc trưng mới như thời gian sống, spin, spin đồng vị, tích bariôn, tích leptôn, số chẵn lẻ, số lạ v.v... Những đặc trưng trên đây nghe có vẻ lạ tai nhưng nhờ chúng mới phản ánh được tính muôn màu muôn vẻ của các hạt cơ bản. Những danh từ mới đó cũng chứng tỏ rằng thế giới các hạt cơ bản có những đặc tính riêng và tuân theo một loạt những định luật đặc thù khác với các định luật thông thường của thế giới vĩ mô, trong quá trình nghiên cứu các hạt cơ bản, người ta đã phát hiện ra các phản hạt và người ta nghĩ tới cả phản vật chất.

Bây giờ, người ta đã biết gần 200 hạt cơ bản, nhưng liệu còn có thể khám phá được thêm bao nhiêu hạt nữa? Tại sao số các hạt cơ bản lại nhiều đến thế? Tính muôn hình muôn vẻ của các hạt cơ bản gợi cho người ta ý nghĩ rằng không phải tất cả các hạt đó là cơ bản, vậy thì hạt nào là cơ bản nhất?

Sau khi khám phá được khả năng có thể biến đổi tương hỗ giữa các hạt cơ bản, thực ra, chúng ta cũng chưa có cơ sở để khẳng định hay phủ nhận rằng liệu các hạt cơ bản hiện nay có được cấu tạo bởi các hạt khác nhỏ hơn hay

không? Bởi vì trước đây chúng ta dễ dàng thấy rằng nguyên tử không phải là một hạt cơ bản khi chúng ta bắn phá nguyên tử bằng những điện tử đủ nhanh: Nếu năng lượng của “viên đạn-điện tử” đủ mạnh thì một điện tử ở lớp vỏ nguyên tử có thể bị đánh bật ra. Người ra cũng dễ dàng thấy hạt nhân nguyên tử cũng không phải là hạt cơ bản khi người ta dùng những viên đạn đủ mạnh để bắn phá hạt nhân. Nhưng hiện nay, khi cố dùng những viên đạn thật mạnh hơn nữa để bắn phá hòng phá vỡ các hạt cơ bản thì chúng ta lại thất bại: sự va chạm vào các hạt cơ bản không phá vỡ chúng mà dẫn đến sự tạo thành các hạt mới. Do đó tình trạng hiện nay ở trong ngành vật lý các hạt cơ bản cũng giống như tình trạng hóa học trước khi có bảng Mendêlêep. Lúc đó người ta đã biết được một số lớn các nguyên tử khác nhau, và các nguyên tử được xem là các hạt cơ bản vì người ta chưa phá vỡ được chúng. Bảng Mendêlêep đã phát hiện được quy luật nội tại ở trong các tính chất của nguyên tử. Điều đó gián tiếp phản ánh cấu trúc phức tạp của chúng. Nhưng mãi sau này khi biết rõ cấu trúc của nguyên tử rồi thì ta mới hiểu rõ hơn cách sắp xếp các nguyên tố trong bảng Mendêlêep và người ta mới trả lời được câu hỏi: “có thể có bao nhiêu nguyên tử khác nhau?”

Nhiều người nghĩ rằng hạt cơ bản phải có cấu trúc và cấu trúc đó thể hiện ở tương tác của hạt với các hạt khác xung quanh. Cũng vì vậy, các nhà vật lý cần phát hiện cho được tính quy luật trong cấu trúc các hạt cơ bản để rồi tìm ra cơ sở lý luận cho sự phân loại các hạt cơ bản và xây dựng lý thuyết thống nhất về các hạt cơ bản. Người ta tin rằng lý thuyết mới phải dựa trên những quan niệm mới khác hẳn lý thuyết hiện tại, cũng khó hiểu và xa lạ với hiện tại như trước đây Cơ học lượng tử khó hiểu và xa lạ đối với các quan niệm cổ điển.

### ***Các hạt khác***

Ngày nay, con người đã biết gần 200 hạt cơ bản, từ những hạt rất nặng đến những hạt vô cùng nhẹ, từ những hạt tồn tại lâu bền đến những hạt tồn tại trong khoảng  $10^{-23}$  giây. Các nhà bác học đang mơ ước có một bảng phân loại



hệ thống các hạt giống như bảng tuần hoàn Mendêlêep phân loại các nguyên tố ngày xưa.

Trong thế giới các hạt cơ bản, cơ học lượng tử gặp khó khăn rất nhiều. Ở đây các định luật khác với các định luật trong thế giới nguyên tử, vì vậy mà cơ học lượng tử không giải quyết vấn đề bằng cuộc tấn công trực diện mà theo những con đường vòng quanh tế nhị, tựa như là không biết gì đến các định luật cơ bản. Một trong những con đường đó là sử dụng lý thuyết nhóm và lý thuyết biểu diễn nhóm.

Người ta tự hỏi: “trong số 200 hạt cơ bản đã biết thì những hạt cơ bản nào là cơ bản nhất?”.

Trước đây, nhà vật lý Sakata người Nhật đã cho rằng có 3 hạt cơ bản nhất là prôtôn, notrôn và hyperôn lamđa. Tất nhiên Sakara có lý luận của mình và ông giả định rằng 3 hạt này sẽ sinh ra những nhóm gồm 6 và 15 hạt. Tiếc thay, người ta chưa tìm thấy một nhóm nào thì sau đó nhà vật lý Mỹ Genman lại đưa ra lý thuyết về các nhóm bộ tám, bộ mười. Trong nhóm bộ mười, người ta đã quan sát được 9 hạt. Genman tin rằng nhất định phải có hạt thứ 10 và ông đặt tên là hạt ômêga, có khối lượng bằng 3300 lần khối lượng điện tử và thời gian sống là  $10^{-10}$  giây. Công cuộc thực nghiệm để săn tìm ômêga âm kéo dài khoảng 1 năm và vào mùa xuân năm 1964, người ta đã tìm ra hạt này sau khảo sát khoảng 10 vạn bức ảnh chụp trong buồng bọt của máy gia tốc tại phòng thí nghiệm quốc gia Bruchêvan nước Mỹ. Vì thắng lợi của lý thuyết bộ tám, bộ mười mà người ta quên mất lý thuyết Sakata. Nhưng chính Genmen lại đưa ra một lý thuyết mới về 3 hạt cơ bản nhất mà ông gọi là ba hạt quác.

Đặc điểm của ba hạt này là: Điện tích của chúng là phân số, bằng  $2/3$  hoặc  $1/3$  điện tích của điện tử (thế mà trước đây, người ta giả thiết rằng điện tích của điện tử là điện tích nhỏ nhất, không thể phân chia ra được nữa!). Ngoài ra khối lượng của hạt quác cũng phải lớn hơn khối lượng điện tử đến 6000 lần.

Ngày nay, cuộc săn tìm những hạt quác vẫn đang tiếp tục nhưng chưa ai thành công. Không biết quác có tồn tại hay không?

### ***Các hạt tương tác***

Chúng ta biết rằng, các hạt cơ bản có khả năng biến hóa lẫn nhau và biến thành các lượng tử của trường. Những sự biến hóa và biến đổi đó là kết quả của tương tác giữa chúng với nhau. Có thể nói rằng tương tác là hình thức tồn tại của hạt cơ bản. Các hạt cơ bản liên hệ với nhau nhờ tương tác. Khả năng tương tác đó không phải từ ngoài đem đến cho hạt mà do chính bản chất cấu trúc của hạt tạo nên. Hiện nay, người ta biết được tất cả 4 loại tương tác: tương tác mạnh, tương tác điện từ, tương tác yếu và tương tác hấp dẫn. Bốn loại tương tác này không những khác nhau về cường độ mà còn khác nhau về bản chất. Cường độ tương tác càng mạnh thì thời gian xảy ra tương tác càng ngắn. Mỗi loại tương tác ứng với một lực. Người ta quy ước đặc trưng cho cường độ tương tác bằng hằng số tương tác  $G^2$ , hằng số này không có thứ nguyên. Chúng ta hãy lần lượt xét các loại tương tác.

1. Tương tác mạnh. Là tương tác giữa các nuclôn với nhau, tức là giữa prôtôn với prôtôn, prôtôn với notrôn và notrôn với notrôn. Tương tác này gắn bó các nuclôn lại thành hạt nhân nguyên tử bền vững. Năng lượng tỏa ra khi phân chia nhân uran cũng do tương tác này quyết định.

Quá trình tương tác mạnh còn xảy ra khi các hạ nặng như các nuclôn, hyperôn và chạm với các mêzôn  $k$  và mêzôn  $\pi$ . Các hạt tham gia vào tương tác mạnh gọi là các hadrôn nghĩa là các hạt nặng. Tương tác mạnh chỉ xảy ra trong khoảng cách rất ngắn  $r \sim 10^{-13}$  cm.

Thời gian xảy ra tương tác  $\tau_m \approx 10^{-23}$  giây

Hằng số tương tác  $G_m^2 \approx 1$

2. Tương tác điện từ. Là tương tác giữa các hạt mang điện với nhau, đúng hơn là tương tác giữa trường điện từ và các hạt mang điện. Tương tác này khiến cho các điện tử quay xung quanh hạt nhân tạo thành lớp vỏ điện tử, nhưng ở trong hạt nhân thì tương tác điện từ yếu hơn tương tác mạnh khoảng 140 lần.

Thời gian xảy ra tương tác  $\tau_{dt} \approx 10^{-21}$  giây.

Hằng số tương tác  $G_{dt}^2 \approx 1/140$

Chính tương tác điện từ dẫn đến hiện tượng sinh và hủy cặp điện tử-pôđitrôn và các hiện tượng điện từ khác. Về nguyên tắc, tương tác điện từ có thể xảy ra trên khoảng cách bất kì.

3. Tương tác yếu. Là tương tác gây ra hiện tượng phân rã beta ( $\beta$ ) và nhiều hiện tượng phân rã phóng xạ khác. Nói chung đa số các hạt cơ bản tạo thành do tương tác mạnh đều phân rã do tương tác yếu. Tương tác giữa notrinô với các hạt chất cũng là tương tác yếu hơn một nghìn tỉ lần so với tương tác điện từ:

$$G_y^2 = 10^{-14}$$

Và vì vậy mà thời gian tương tác cũng dài hơn khoảng một nghìn tỉ lần:

$$\tau_y = 10^{-9} \text{ giây}$$

Một số định luật như định luật bảo toàn số chẵn lẻ, bảo toàn số lạ, đúng với tương tác mạnh thì không đúng với tương tác yếu. Cho đến ngày nay người ta vẫn chưa nghiên cứu được đầy đủ về tương tác yếu, tuy rằng tương tác này rất phổ biến trong vật lý hạt nhân. Người ta cho rằng tương tác yếu được thực hiện qua một trường đặc biệt nào đó. Trường này cũng bị lượng tử hóa. Những lượng tử của trường này là những hạt W (do chữ weak trong tiếng Anh, nghĩa là yếu). Tương tác yếu chỉ tác dụng trong khoảng cách nhỏ  $r \sim 10^{-13}$  cm và gây

ra lực gọi là lực phân rã (gây ra hiện tượng phóng xạ). Tương tác yếu đang là vấn đề của vật lý hiện đại.

4. Tương tác hấp dẫn. Là tương tác gây ra lực hấp dẫn mà ta đã biết trong chương trình phổ thông. Là một loại tương tác vô cùng yếu so với 3 loại trên:

$$G_{hd}^2 \approx 10^{-39}$$

Vì nó quá yếu như vậy nên khi khảo sát các hiện tượng vi mô chúng ta bỏ qua tương tác này.

Nói chung trong 4 loại tương tác trên, chúng ta mới chỉ biết được quy luật của 2 loại tương tác là tương tác điện từ và tương tác hấp dẫn. Chúng ta còn chưa biết bản chất và biểu thức của lực hạt nhân do tương tác mạnh gây ra cũng như lực phân rã do tương tác yếu gây ra, Tuy nhiên chúng ta rất muốn biết và cần phải biết, vì tất cả những gì xảy ra trong vũ trụ này, có lẽ đều là kết quả của 4 loại tương tác kể trên. Nhưng biết đâu, cũng còn nhiều loại tương tác nữa mà con người chưa hề biết!

### ***Chất và trường***

Trong cuộc hành trình vào thế giới vi mô, chúng ta đã tìm hiểu các hạt cơ bản và đã biết một hiện tượng đặc sắc: hiện tượng sinh cặp và hủy cặp. Hai photon có năng lượng đủ lớn gặp nhau sẽ biến thành một cặp hạt điện tử-pôđitrôn. Đó là hiện tượng sinh cặp. Ngược lại một cặp điện tử-pôđitrôn gặp nhau sẽ biến thành 2 photon. Đó là hiện tượng hủy cặp. Tuy điện tử, pôđitrôn và photon cũng là những hạt, nhưng các nhà vật lý vẫn phân biệt hai loại hạt: điện tử, pôđitrôn và nói chung những hạt có khối lượng nghỉ khác được xem là những hạt chất, còn photon không có khối lượng nghỉ được xem là những lượng tử của trường. Nhưng hiện tượng sinh và hủy cặp đã cho thấy rằng các hạt chất và các lượng tử của trường có thể biến hóa lẫn nhau và hơn thế nữa, các hạt chất cũng có thể được sinh ra và bị hấp thụ như các lượng tử của trường. Người

ta thấy rằng trong những hệ hạt vi mô mà có hiện tượng các hạt sinh ra, biến đi và biến hóa lẫn nhau thì hệ đó giống với một trường hơn là một hệ hạt: trường điện từ-pôditrôn, trường mêzôn, trường prôtôn, trường notrôn... Vậy mối quan hệ giữa chất và trường là như thế nào?

Các nhà vật lý quan niệm rằng, vật chất gồm có hai dạng khác nhau là Chất và Trường? Tuy nhiên thật khó mà định nghĩa cho được chất là gì? Trường là gì?

Chất là “nguyên liệu” để tạo nên các vật thể, chất bao gồm những hạt có khối lượng nghỉ (nhưng đã ai định nghĩa được “khối lượng” là gì?).

Còn khái niệm về “Trường” xuất hiện khi các vật nằm cách nhau một khoảng nào đó mà vẫn tương tác được với nhau: quả táo khi rụng bị rơi xuống đất vì quả đất hút, thanh nam châm hút những vụn sắt, hai quả cầu nhẹ tích điện cùng dấu đẩy nhau... Trường được xem là một dạng đặc biệt của vật chất có nhiệm vụ thực hiện tương tác (hút, đẩy) giữa các vật ở cách xa nhau.

Vật lý cổ điển phân biệt chất và trường một cách rạch ròi: chất có khối lượng, tập trung trong một thể tích xác định, nếu thể tích đó lớn thì có thể nhìn thấy bằng mắt và cân được bằng cân, còn trường là do các hạt chất tạo ra ở không gian xung quanh hạt, trường tồn tại liên tục ở khắp nơi. Trường không có khối lượng nhưng có mang năng lượng. Đôi khi ta cũng nhận biết được một bộ phận đặc biệt của trường điện từ là ánh sáng, da thịt ta nhận biết một bộ phận khác của trường điện từ là bức xạ nhiệt.

Nhưng rồi hiện tượng bức xạ nhiệt đã bắt Plăng đưa ra quan niệm rằng bức xạ nhiệt được phát ra và hấp thụ một cách gián đoạn theo từng lượng riêng biệt gọi là những lượng tử năng lượng. Trường bức xạ nhiệt đã lượng tử hóa: nó tồn tại dưới dạng những hạt (những lượng tử) riêng biệt. Rồi hiện tượng quang điện lại bắt Anhxtanh phải lượng tử hóa trường ánh sáng: ánh sáng gồm những hạt gọi là phôtôn. Thế là người ta phải thừa nhận trường cũng có tính gián đoạn, có

cấu tạo “hạt” và những hạt của trường có thể có những đặc tính của hạt chất. Đó là nhịp cầu đầu tiên bắc giữa vực thăm ngấn cách giữa chất và trường.

Sau các quan niệm của Plăng và Anhtanh là đến một công thức nổi tiếng của thuyết tương đối cũng do Anhtanh tìm ra. Đó là công thức liên hệ giữa khối lượng và năng lượng  $E = mc^2$ .

Công thức đó chứng tỏ rằng giữa khối lượng và năng lượng có mối liên quan mật thiết với nhau: Chỗ nào có năng lượng thì chỗ đó có khối lượng và ngược lại. Như vậy chất có khối lượng cũng tàng trữ một năng lượng rất lớn và trường vì mang năng lượng lớn nên cũng có chứa một khối lượng nào đó: sự ngăn cách giữa chất và trường theo tiêu chuẩn khối lượng cũng không còn nữa. Đó là nhịp cầu thứ hai bắc giữa chất và trường.

Giả thuyết Đơ Broi lại bắc một nhịp nữa: các hạt chất cũng có tính sóng, tựa như nó loang ra trong không gian giống như trường. Như vậy các hạt cũng có đặc tính của trường.

Cuối cùng, nhịp cầu quan trọng nhất là hiện tượng sinh và hủy cặp: những hạt chất và những lượng tử của trường có thể chuyển hóa lẫn nhau.

Thế là: chất - trường là tập trung trong một kích thước giới hạn và có khối lượng, lại có thể mất kích thước và loang ra như trường, cũng có thể biến thành những lượng tử của trường, và trường - trường là loang ra vô hạn và không có khối lượng lại cũng tập trung thành từng hạt, cũng có khối lượng và cũng có biến đổi thành những hạt chất.

Các chất có những đặc tính của trường, những lượng tử của trường có đặc tính của hạt chất. Tuy nhiên, phải nói rằng những biểu hiện “giống như chất” chỉ rõ nét khi năng lượng của các lượng tử khá lớn và những biểu hiện “giống như trường” của chất của chất cũng khá rõ nét khi năng lượng của các

hạt chất khá lớn. Còn khi năng lượng nhỏ, thì về căn bản, trường vẫn có vẻ như trường, chất vẫn có vẻ như chất.

Tuy nhiên, người ta vẫn tự hỏi: chất và trường, trong hai cái đó, cái nào cơ bản hơn? Cái nào có trước?

Một thế kỉ trước, khi khái niệm trường mới ra đời, mọi người đều cho rằng: đương nhiên là chất có trước, các hạt chất tạo nên một trường xung quanh nó. Không có chất thì chẳng có trường. Trường không khác gì hơn là một công cụ phụ để tính toán tương tác giữa các hạt.

Nhưng thời gian trôi đi, người ta lại biết rằng trường có thể sinh ra hạt và hạt có thể biến thành trường. Ai dám bảo trường là “công phụ phụ”? Thế là một số nhà vật lý lại nhảy vào trạng thái cực đoan khác: họ theo vết Anhxtanh mà tin rằng: trường là cái đầu tiên. Thế giới là một trường duy nhất với tất cả những biểu hiện phong phú của nó. Các hạt chất không có gì khác hơn là một “cục đông lại” của trường. Không có trường thì không có chất.

Tuy nhiều năm, Anhxtanh đã gắng công xây dựng một lý thuyết trường thống nhất, nhưng Anhxtanh đã không thành công. Một số nhà vật lý cho rằng, địa vị hàng không thể là chất mà cũng không thể là trường. Cả hai đều là những mặt cơ bản của vật chất với mức độ ngang nhau. Trường và chất là hai hình thức tồn tại thống nhất và đối lập nhau của vật chất. Không có cái này thì không thể có cái kia. Mối quan hệ chặt chẽ ở mọi lúc mọi nơi giữa chất và trường, tính quy định lẫn nhau giữa chất và trường sẽ còn là vấn đề khiến vật lý học mất nhiều công giải quyết.

## PHẦN THỨ NĂM

### TỪ CƠ HỌC LƯỢNG TỬ...ĐẾN ĐÂU?

#### ***Sự lượng tử hóa lần thứ hai***

Xét về nguồn gốc sâu xa thì bước chuyển từ cơ học cổ điển sang cơ học lượng tử bắt đầu từ giả thuyết Plăng. Nhưng nguyên nhân trực tiếp dẫn đến cơ học lượng tử là giả thuyết Đơ Broi khẳng định tính sóng của các hạt vi mô, cho rằng chuyển động của các hạt vi mô tuân theo các định luật sóng. Và cơ học lượng tử đã ra đời với nhiệm vụ nghiên cứu các quy luật chuyển động của các hạt vi mô.

Khi chuyển từ cơ học cổ điển sang cơ học lượng tử, chúng ta đã bỏ qua tính gián đoạn của hạt, bỏ qua tính “hạt của hạt, mà chỉ nhấn mạnh tính sóng là mặt đối lập của tính hạt. Bước chuyển từ cơ học cổ điển sang cơ học lượng tử là bước chuyển từ hạt sang sóng với phương trình Srôđingơ nổi tiếng cho phép ta tìm được hàm sóng mô tả hạt. Bước chuyển đó được gọi là *Sự lượng tử hóa lần thứ nhất*.

Vậy sự lượng tử hóa lần thứ nhất có những đặc điểm gì?

Đặc điểm thứ nhất là: trạng thái của mỗi hạt được mô tả đầy đủ bằng một hàm sóng  $\psi$  là nghiệm của phương trình Srôđingơ.

Thứ hai là: mỗi đại lượng vật lý  $I$  được đối ứng với một toán tử tuyến tính tự liên hợp  $\hat{I}$ .

Thứ ba là: đại lượng  $I$  có thể nhận những trị số xác định, đó là những trị số riêng của toán tử  $\hat{I}$ .

Thứ tư là: xác suất để đại lượng  $I$  nhận một trị số nào đó cũng là một số hoàn toàn xác định và dựa vào xác suất này người ta tính được trị số trung bình  $\bar{I}$  của đại lượng  $I$ .

Lý thuyết lượng tử hóa lần thứ nhất đã giúp chúng ta giải được chính xác gần đúng khá nhiều bài toán của vật lý nguyên tử và vật lý hạt nhân. Nhưng lý thuyết lượng tử hóa lần thứ nhất còn khá nhiều nhược điểm. Chẳng hạn như:

-Các hạt đồng thời có cả tính hạt lẫn tính sóng nhưng trong sự lượng tử hóa lần thứ nhất chúng ta chỉ chú ý tính sóng mà bỏ qua tính hạt.



-Hơn nữa, không những hạt có tính sóng mà sóng cũng có tính hạt: sóng ánh sáng chính là gồm những hạt photon, nhưng sự lượng tử hóa lần thứ nhất chưa giải quyết vấn đề tính hạt của sóng, tức là chưa giải quyết vấn đề lượng tử hóa của trường.

-Đặc biệt là sự lượng tử hóa lần thứ nhất chưa bao hàm được hiện tượng sinh và hủy hạt. Khi có hiện tượng này thì hệ mà ta nghiên cứu sẽ có số hạt thay đổi. Hiện tượng này vượt ra ngoài phạm vi của lý thuyết lượng tử hóa lần thứ nhất, vì lý thuyết đó chỉ nghiên cứu chuyển động của những hạt có sẵn và tồn tại mãi mãi trong quá trình nghiên cứu chứ không bị biến hóa gì.

Đương nhiên, sự lượng tử hóa lần thứ nhất còn có những hạn chế khác, những hạn chế vừa nêu chỉ là những hạn chế khiến người ta phải thực hiện sự lượng tử hóa lần thứ hai. Vậy *sự lượng tử hóa lần thứ hai* phải giải quyết nhiệm vụ gì? Sự lượng tử hóa lần thứ hai phải làm sao cho lý thuyết có thể mô tả được những hệ có số hạt thay đổi, mô tả được sự biến hóa của hạt, sự sinh và hủy hạt, thể hiện được cả tính hạt của sóng và tính sóng của hạt.

Như vậy có thể nói rằng sự lượng tử hóa lần thứ nhất là sự chuyển từ hạt sang sóng thì sự lượng tử hóa lần thứ hai là sự chuyển hóa từ sóng về hạt. Tất nhiên hạt bây giờ không phải là hạt cổ điển mà là hạt phức tạp hơn, tuân theo các quy luật đặc biệt hơn. Sở dĩ có tên “lượng tử hóa lần thứ hai” là vì phương trình hàm sóng mà ta thu được trước đây do sự lượng tử hóa lần thứ nhất bây giờ lại bị lượng tử hóa lần nữa.

-Nếu trong sự lượng tử hóa lần thứ nhất người ta dùng các đại lượng vật lý làm biến đổi số để mô tả và đối ứng mỗi đại lượng với một toán tử tuyến tính tự liên hợp, thì trong sự lượng tử hóa lần thứ hai, người ta không dùng các đại lượng vật lý làm biến đổi số mà ta dùng ngay số hạt có trong các trạng thái đó làm biến đổi số để mô tả trạng thái (bởi vì chính số hạt và bản chất của hạt có thể thay đổi).

-Khi đó, giá trị trung bình của đại lượng vật lý-mà trong sự lượng tử hóa lần thứ nhất chỉ là một số thông thường-thì bây giờ được chuyển thành toán tử. Do đó mà các xác suất, tức là các hệ số khai triển của hàm sóng cũng chuyển thành toán tử và cuối cùng, các hàm sóng cũng chuyển thành toán tử, các toán tử tác dụng lên số hạt trong các trạng thái.

Như vậy, có thể nói rằng, trong sự lượng tử hóa lần thứ nhất, nhờ việc chuyển các đại lượng vật lý thành toán tử, người ta thu được các hàm sóng. Bây giờ

trong sự lượng tử hóa lần thứ hai, người ta chuyển luôn các hàm sóng thành toán tử. Do việc chuyển này mà sóng (tức là trường) bị lượng tử hóa: trong sóng xuất hiện tính hạt, tính gián đoạn, xuất hiện các hiện tượng sinh và hủy hạt.

Như vậy có thể nói rằng lý thuyết lượng tử hóa lần thứ hai chỉ có giá trị như một phương pháp, phương pháp mô tả những hệ số có hạt biến thiên.

Tuy nhiên phải nói rằng, sự lượng tử hóa lần thứ hai vẫn không giúp cho cơ học lượng tử giải quyết được những khó khăn trong việc nghiên cứu các hạt cơ bản.

Một trong những đặc điểm đặc trưng nhất của các hạt cơ bản là: do kết quả của những tương tác, chúng có khả năng sinh, hủy diệt, và biến đổi lẫn nhau. Chẳng hạn photon được sinh ra khi các điện tử trong nguyên tử chuyển trạng thái-hai photon gặp nhau trong trường hạt nhân có thể tạo thành cặp điện tử-pôditron. Notron sau khi phát ra điện tử và phản notrinô, biến thành prôtôn v.v...

Những hiện tượng đó làm cho các nhà vật lý phân vân, không rõ thế nào là “tính cơ bản” của hạt và liệu các hạt có thể độc lập với nhau hay không? Có thể có một hạt “cô lập” hay không?

Hơn nữa, những hiện tượng mà ở đó số hạt thay đổi phải là những hiện tượng xảy ra với năng lượng lớn! Với năng lượng lớn như vậy thì hạt sẽ định xứ trong không gian và thời gian như thế nào? Bởi vì nếu có sự biến hóa đó phải xảy ra tại một “điểm” của không gian và một “điểm” của thời gian! Vậy thì, chính không gian thời gian là cái gì?

Do đó mà khi đi vào thế giới các hạt cơ bản, cơ học lượng tử ngày càng gặp nhiều khó khăn. Suy cho cùng, câu hỏi hắc búa nhất là: các hạt cơ bản có cấu tạo thế nào? Chúng tương tác và biến hóa lẫn nhau ra sao?

Ngày nay trong lĩnh vực các hạt cơ bản, thực nghiệm đã đi trước so với lý thuyết! Nhiều hiện tượng đang chờ lý thuyết giải thích mà cơ học lượng tử chưa giải thích được.

Phải chăng, muốn giải quyết được cần phải thay đổi tận gốc những phương pháp mô tả quá trình và cả những quan niệm về không gian, thời gian?

### ***Không gian, thời gian và mặt trái của sự rõ ràng***

Nhưng quan niệm về thế giới vi mô, dù cho có rất khác thường đi nữa cũng vẫn chỉ dựa trên những khái niệm thông thường về không gian, thời gian. Người ta

vẫn nghĩ rằng, cách mô tả rõ ràng nhất, cụ thể nhất là cách mô tả sự vật và hiện tượng trong không gian và thời gian. Từ bỏ những khái niệm quen thuộc ngay từ lúc mới sinh ra, thật là việc khó khăn, ngay cả đối với những trí tuệ tự do nhất.

Có một con đường khác thực tế hơn: xét lại những quan niệm của chúng ta về không gian và thời gian. Bảy mươi năm trước đây, Anhtanh đã làm việc này khi đưa ra thuyết tương đối.

Ngày nay có lẽ cần phải xét lại lần nữa những khái niệm không gian, thời gian để có thể dùng những khái niệm đó cho những thế giới siêu nhỏ!

Bản chất thực sự của không gian, thời gian ở đâu? Chúng ta đã quen với những khái niệm đó đến mức là chẳng bao giờ chúng ta đặt câu hỏi này. Quan niệm thông thường bảo chúng ta rằng không gian là căn nhà chứa các vật! Nhưng hãy xem từ đâu mà quan niệm về không gian phát sinh trong chúng ta? Từ lúc ra đời, con người đã bắt đầu định hướng, nhưng không phải định hướng trong không gian “sạch sẽ thuần túy” mà định hướng giữa các vật trong không gian. Ta nhận biết các vật bằng thị giác. Hình như càng ở gần chúng ta các vật càng lớn. Nếu ta tưởng tượng rằng từ lúc sinh ra ta chỉ nhận thức thế giới bằng mắt, thì chúng ta sẽ không bao giờ có thể phân biệt sự khác nhau giữa những vật gần và nhỏ với những vật ở xa nhưng lớn. Không có những đo đạc và nhận xét bổ sung thì chúng ta sẽ không thể xác định được các vật ở gần chúng ta thế nào và kích thước bao nhiêu.

Thế nhưng, nếu không có các vật thể thì cũng không có bất kì quan niệm nào về không gian: ban đêm, khi không thấy rõ các vật thì ấn tượng về không gian cũng mất, ấn tượng về phương hướng cũng không còn (chắc bạn đã có lúc chột thức giấc ban đêm và thấy mình mất phương hướng!).

Giác quan của ta chính là những dụng cụ mà nhờ đó ta hình thành những quan niệm về thế giới các vật thể xung quanh. Nhưng những cảm giác của chúng ta (và cả quan niệm) là những cảm giác vĩ mô, cảm giác cổ điển vì những cảm giác đó được thu nhận qua các hiện tượng vĩ mô.

Như vậy có thể nói rằng khái niệm về không gian có nguồn gốc vật chất, và khái niệm cổ điển về không gian có nguồn gốc từ các vật thể vĩ mô.

Còn khái niệm thời gian? Nếu chúng ta sống giữa các vật mà trong đó không có một cái gì thay đổi thì chúng ta cũng không còn bất kì quan niệm nào về thời

gian nữa (chẳng hạn sống trong một căn nhà hầm kín dưới lòng sâu quả đất hoặc bay ra khỏi con tàu vũ trụ ở một vùng không gian rất xa các thiên thể).

Sự trôi của thời gian do những biến cố và những mối liên hệ chặt chẽ giữa nguyên nhân và kết quả xác định.

Tóm lại là , không thể có thời gian tuyệt đối tách rời các biến cố.

### ***Lượng tử không gian và lượng tử thời gian***

Nếu chúng ta thừa nhận không gian và thời gian gắn liền với sự tồn tại của vật thể và các biến cố của chúng thì trong thế giới vi mô, không gian sẽ như thế nào?

Một số nhà vật lý nảy ra ý nghĩ rằng, vì các đối tượng vi mô có tính chất lượng tử nên không gian và thời gian cũng có tính chất lượng tử, nghĩa là không gian, thời gian cũng bị lượng tử hóa. Nói khác đi, không gian, thời gian mất tính chất liên tục, cũng bị phân ra thành từng “phần nhỏ” riêng biệt, những lượng tử không gian và lượng tử thời gian.

Ôi! Có lẽ hình như sự việc rối tinh lên! Nào ai đã hiểu rõ không gian là gì, và thời gian là gì thế mà bây giờ lại còn lượng tử không gian và thời gian! Không, vấn đề chỉ là như sau: chúng ta đang tiến vào nghiên cứu những đối tượng ngày càng nhỏ, các khoảng cách không gian thời gian ngày càng ngắn, nhưng có thể nhỏ đến đâu?

Người ta cho rằng, có một độ dài ngắn nhất, gọi là “độ dài nguyên tố”  $l_0$  hay là lượng tử không gian, sao cho không thể có độ dài nào ngắn hơn độ dài đó. Các độ dài nhỏ hơn  $l_0$  sẽ không có ý nghĩa. Có lẽ  $l_0$  sẽ rất nhỏ hơn so với  $10^{-13}$  cm. Tất cả các độ dài chỉ có thể là một số nguyên lần  $l_0$ . Cũng như vậy, có một khoảng thời gian ngắn nhất gọi là “khoảng thời gian nguyên tố”  $\Delta_0 t$  hay là lượng tử thời gian, sao cho khoảng thời gian nhỏ hơn là vô nghĩa. Tất cả các khoảng thời gian chỉ có thể là một số nguyên lần  $\Delta_0 t$ . Có lẽ,  $\Delta_0 t$  phải nhỏ hơn nhiều so với  $10^{-23}$  giây.

Thật là những quan niệm thú vị! Chắc chắn rằng không bao giờ và không ở đâu có thể đo được những lượng tử không gian và những lượng tử thời gian vì chúng quá nhỏ. Không một thời gian kể nào có thể đo được khoảng thời gian bằng một phần tỷ tỷ tỷ giây, cũng không một cái thước vi mô nào có thể đo được một phần tỷ tỷ centimet.

Nhưng lượng tử không gian và lượng tử thời gian nếu có tồn tại thì sẽ liên quan tới khối lượng, năng lượng, cấu trúc và các đặc trưng khác của các hạt cơ bản và người ta có thể đoán nhận nó bằng lý thuyết về mối quan hệ giữa chất và trường

Chúng ta có thể hỏi rằng, có phải chẳng những tàn dư của các quan niệm cũ về không gian và thời gian vẫn sống dai dẳng trong các khái niệm lượng tử không gian và lượng tử thời gian?

Sự thật là như vậy, nhưng chúng ta đã nhiều lần nhấn mạnh rằng, mỗi một tầng kiến thức đều xây dựng trên nền tảng của những tầng kiến thức tiền thân của nó chứ không phải trên chân không. Quá trình hình thành những khái niệm mới không phải là tức thời mà thường xảy ra rất chậm, và những khái niệm mới bao giờ cũng mang dấu vết của những khái niệm cũ cùng loại, và bao giờ cũng ra đời trong cơn đau đẻ khó khăn, vất vả.

Ngay trong những năm đầu mới ra đời, những khó khăn của cơ học lượng tử đã nảy sinh. Giờ đây những khó khăn đó ngày càng rõ ràng hơn khi cơ học lượng tử cần phải chiếm những đỉnh cao mới trên con đường phát triển của nó. Nếu không vượt qua được, nó sẽ nhường chỗ cho một lý thuyết mới mạnh mẽ hơn.

### ***Đâu là giới hạn của kiến thức?***

Khối lượng, điện tích, spin, số lạ, số chẵn lẻ...Bạn hãy thử định nghĩa mỗi khái niệm đó của hạt một cách chính xác sao cho mỗi định nghĩa là độc lập với nhau, không dùng khái niệm này để định nghĩa khái niệm khác, thí dụ như không định nghĩa khối lượng qua trọng lượng, không định nghĩa điện tích qua lực đẩy và lực hút!

Chắc chắn rằng khi đó bạn sẽ không định nghĩa được cái gì cả. Chúng ta thường hay sử dụng những khái niệm đó, nhưng cho đến nay, chưa một nhà vật lý nào hiểu thật sâu sắc ý nghĩa của những khái niệm này.

Cơ học lượng tử mượn của vật lý cổ điển những khái niệm như khối lượng, điện tích và bản thân nó đưa ra những khái niệm mới như số chẵn lẻ, spin, số lạ v.v...Nhưng cơ học lượng tử không nói được gì nhiều hơn về ý nghĩa của những khái niệm đó.

Chẳng hạn như khối lượng là gì? Có nhiều quan niệm khác nhau. Có người cho rằng, khối lượng là số đo lượng chất chứa trong một vật nào đó. Có thể hiểu đó là khối lượng của các hạt nhân nguyên tử của vật (vì hầu như toàn bộ khối lượng nguyên tử tập trung ở nhân). Khối lượng hạt nhân lại xem như tổng khối lượng của prôtôn và notrôn cấu tạo nên hạt nhân.

Nhưng khối lượng của chính prôtôn là gì? Là số đo lượng chất chứa trong nó ư? Nhưng số đo nào? Chính khái niệm “số đo” có nghĩa là: có thể chia một cái gì đó ra những phần nhỏ và trong trường hợp này thì lấy nhiều phần hơn, trong trường hợp khác thì lấy ít phần hơn; nhưng chia nhỏ prôtôn thành cái gì? Không những thế, trong prôtôn chứa những “chất” gì? Ai biết? Khi chúng ta nói rằng prôtôn có khối lượng khoảng  $10^{-24}$  gam chỉ có ý nghĩa là trong 1 gam chất đó có khoảng  $10^{24}$  prôtôn chứ không có ý nghĩa gì hơn nữa. Như vậy quan niệm khối lượng là số đo lượng chất là không có giá trị lắm với những hạt vi mô. Quan niệm thứ hai cho rằng khối lượng là số đo quán tính của vật, nói khác đi là số đo mức cản trở của vật đối với sự thay đổi trạng thái. Trong trường hợp đơn giản nhất, khối lượng xác định mức cản trở của vật đối với sự thay đổi vị trí của nó trong không gian. Như vậy, khối lượng prôtôn là số đo “độ miễn cưỡng” mà prôtôn có khi chuyển động dưới tác dụng của lực do những hạt khác gây nên. Nhưng lực là biểu hiện của trường.

Nếu chuyển động nhanh hơn, prôtôn thu được khối lượng bổ sung của trường và nếu chậm đi, nó nhường khối lượng đó cho trường. Kết quả là khối lượng thay đổi. Sự thay đổi này xác định theo công thức của thuyết tương đối:

$$m = m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

Trong đó:  $m$  là khối lượng mà vật đang có,  $v$  là vận tốc của vật,  $c$  là vận tốc ánh sáng trong chân không, và  $m_0$  là khối lượng nghỉ của vật (tức là khối lượng của vật khi đứng yên).

Chúng ta thấy một tia hy vọng: khối lượng nghỉ thực sự là một đại lượng không đổi đối với một loại hạt xác định. Chỉ thay đổi chính bản thân hạt mới có thể thay đổi khối lượng nghỉ.

Khối lượng nghỉ cũng là số đo quán tính, nhưng không phải là chuyển động quán tính của cơ học thông thường (sự dời chỗ trong không gian) mà là chuyển động với nghĩa tổng quát nhất, tức là sự biến hóa các hạt. Nếu chúng ta nhớ lại rằng khi động năng của hạt so sánh được với năng lượng riêng của nó do khối lượng nghỉ xác định thì hạt có khả năng biến hóa thực sự thành những lượng tử của từ trường. Như vậy thì khối lượng nghỉ tựa như số đo độ bền vững của hạt.

Khối lượng nghỉ của hạt càng lớn thì hạt càng bền vững, hạt càng khó biến thành những lượng tử của trường. Theo những quan điểm hiện đại về hạt, ngoài những quá trình thực, còn có quá trình ảo là quá trình hạt phóng ra những lượng tử “ảo” của trường trong tương tác của nó với những hạt khác. Haidenbe thì lại cho rằng khối lượng là do tương tác mà có! Như vậy chúng ta thấy bản chất khối lượng rất là phức tạp. Một mặt khối lượng tự nó là một đặc trưng nào đó của hạt, mặt khác khối lượng là một nhân tố xác định tương tác của hạt với các hạt khác.

Đây chỉ mới chỉ xét khái niệm khối lượng! Các đặc trưng khác của hạt còn có bản chất phức tạp đến không ngờ được. Ngày nay tất cả các vấn đề về hạt vi mô đều liên quan đến một ngọn núi rất cao mà vật lý học chưa chinh phục được. Ngọn núi đó là mối quan hệ giữa 2 dạng vật chất cơ bản là chất và trường.

Trước sự phức tạp của các khái niệm, các vấn đề, các nhà vật lý bỗng tự hỏi: Họ nhận thức thế giới vi mô đúng đắn đến mức nào? Những khái niệm mà họ đưa ra có phù hợp với bản chất thực sự của thế giới đó không? Nói chung con người, đại biểu của thế giới vĩ mô, có thể nhận thức được những sự vật và biến cố trong thế giới vi mô hay không?

Chúng ta tin rằng con người có thể ngày càng nhận thức đúng đắn được những định luật của tự nhiên, ngày càng tiến gần tới chân lý. Nhưng nhận thức không bao giờ cùng tận, không bao giờ kiến thức về thế giới có thể tuyệt đối chính xác.

Chính nhờ nhận thức được nên con người mới tiên đoán được nhiều hiện tượng tự nhiên và lợi dụng, điều khiển chúng, điển hình là con người đã chế ngự được năng lượng của hạt nhân. Chỉ có điều là những tính chất của thế giới vi mô khác biệt một cách sâu sắc với những tính chất của thế giới thông thường, do đó những quan niệm thông thường của chúng ta không thể phản ánh được bản chất thực sự của thế giới vi mô. Nhưng, từ bỏ những quan niệm thông thường quen thuộc để đi đến những quan niệm mới là một việc rất khó khăn và chậm chạp.

Ngày nay, nghĩ và nói đến hạt vi mô, cần biết rằng đó không phải chỉ là hạt. Nói đến trường, cần biết rằng đó không chỉ là trường. Chúng ta có thể thắc mắc, vậy thì giữa cái vỏ ngôn ngữ và thực chất của sự vật có sự khác biệt nào không?

Tuy nhiên, khó khăn không chỉ ở ngôn ngữ mà cả trong cách hình tượng, cách nhận thức sự vật, khó khăn trong cách tìm ra những mô hình phù hợp với sự vật. Chắc chắn rằng thời gian càng trôi đi thì con người càng nhận thức được

sự vật một cách chính xác hơn. Chắc chắn rằng nhận thức và quan niệm của chúng ta ngày nay sẽ ngày thơ biết bao so với con cháu chúng ta ở các thế hệ xa xôi sau này-những người sẽ ra đời trong vài trăm năm sau.

### ***Công lao của cơ học lượng tử***

Chúng ta đã đi qua sự hình thành, nội dung và những áp dụng của cơ học lượng tử. Phải nhắc lại rằng cơ học lượng tử đã đem lại cho chúng ta một sự giải thích thỏa đáng về cấu trúc và tính chất của lớp vỏ điện tử của nguyên tử. Lớp vỏ này quyết định hoàn toàn tính chất hóa học và một phần tính chất lý học của các nguyên tử. Cơ học lượng tử còn áp dụng thành công trong việc nghiên cứu cấu trúc tinh vi của các chất rắn. Chính vì vậy mà cơ học lượng tử đem lại cho chúng ta chìa khóa để hiểu phần lớn các hiện tượng xảy ra quanh ta trên trái đất và các phương pháp chi phối các hiện tượng đó. Cơ học lượng tử cũng giúp chúng ta xây dựng được lý thuyết về cấu tạo và tính chất của hạt nhân nguyên tử, tiên đoán được nhiều hiện tượng trong hạt nhân nguyên tử. Nhưng công lao của một lý thuyết không chỉ là những điều nó đã giải thích hoặc tiên đoán được. Còn phải kể đến những tư tưởng mới đầy tính cách mạng mà nó đưa vào, còn phải kể đến phương pháp nghiên cứu và cách nhìn nhận vấn đề mà nó đã đem vào khoa học. Cơ học lượng tử đã trả lại tính gián đoạn cho những cái mà ta vẫn tưởng là liên tục: Cơ học lượng tử đã khẳng định rằng chỉ có thể nói: “Xác suất là bao nhiêu phần trăm” đối với những điều mà ta tưởng là “chắc chắn 100%”; Cơ học lượng tử đã chỉ cho chúng ta giới hạn áp dụng của những khái niệm mà ta tưởng áp dụng vào đâu cũng được; Cơ học lượng tử dám cả gan gán cho mỗi hạt một sóng và gán cho mỗi đại lượng vật lý một toán tử rồi lặng lẽ làm “thí nghiệm” với những toán tử đó bằng những phép tính trên mặt giấy! Cơ học lượng tử đã dám cả gan dùng những công cụ toán học trừu tượng, tưởng như rất xa lạ với vật lý và hình như nhiều khi nó chỉ làm việc với những ký hiệu và biểu diễn toán học... Cơ học lượng tử cũng dạy ta cách sáng tạo ra những khái niệm vật lý mới “không thể tưởng tượng” nổi, nhưng cũng dạy chúng ta tin vào một điều không bao giờ nên nghi ngờ là định luật bảo toàn vật chất và năng lượng và như vậy cơ học lượng tử dạy ta tin vào chủ nghĩa duy vật.

Tuy nhiên, lý thuyết nào cũng có 2 cuộc sống: cuộc sống của những tư tưởng, những khái niệm, những nguyên lý, định luật và cuộc sống thứ hai là cuộc sống của những áp dụng thực tế, những công cụ, máy móc do lý thuyết sinh ra.



Mác nói một câu nổi tiếng: “Các nhà triết học chỉ giải thích thế giới bằng nhiều cách khác nhau, nhưng vấn đề cơ bản là phải cải tạo thế giới”. Câu nói đó là lời khuyên đúng cho bất kì khoa học nào chứ không riêng gì triết học.

Khoa học-đó là “tiền tuyến” của trí tuệ con người trong cuộc tấn công vào những bí ẩn của thế giới và chiếm lĩnh những đỉnh cao của văn minh. Cơ học lượng tử chính là một khoa học như vậy. Chúng ta sẽ nói đôi chút về cuộc sống thứ hai của cơ học lượng tử.

Quan niệm về sự tồn tại của hạt nhân nguyên tử ra đời khoảng năm 1912. Nhưng 32 năm sau, bình minh của kỉ nguyên nguyên tử đã mở ra, và tiếc thay đó là những ánh hồng đầm máu của những vụ nổ nguyên tử do đế quốc Mỹ gây ra ở Hirôsimi và Nagasaki. Phải đợi thêm 9 năm nữa, đến năm 1954, bình minh thực sự của kỉ nguyên nguyên tử mới mở ra ở Liên Xô với việc xây dựng nhà máy điện nguyên tử đầu tiên trên trái đất.

Cơ học lượng tử đã có những ứng dụng kĩ thuật đầu tiên trong các lò phản ứng nguyên tử, nơi có những dòng hạt notrôn bắn vào hạt nhân của các nguyên tử nặng vỡ ra, tỏa nhiệt và biến thành dòng điện, đẩy lùi nguy cơ thiếu hụt năng lượng trên trái đất, đảm bảo sự phát triển của xã hội loài người...

Nếu không có cơ học lượng tử thì có lẽ người ta đã xem chất bán dẫn là chất bỏ đi, cơ học lượng tử không phải chỉ giải thích những tính chất tuyệt diệu của chất bán dẫn mà còn chỉ ra phương hướng để cải tiến triệt để những chất đó. Thuyết vùng năng lượng của chất rắn, một bộ phận của cơ học lượng tử đã ra đời, trở thành những ngôi sao chỉ đường đối với những người công tác trong ngành điện tử học. Và ngành vi điện tử-việc chế tạo những mạch điện tử phức tạp có độ tin cậy cao mà kích thước cực nhỏ-ngành này không thể ra đời được nếu không có lý thuyết cơ học lượng tử chỉ rõ cấu trúc tinh thể của các chất rắn. Vi điện tử-là sự ứng dụng sâu sắc vài tài tình của cơ học lượng tử vào các hệ vật chất ngưng tụ-đã tạo ra sự thay đổi căn bản trong công nghiệp kĩ thuật, đặc biệt là trong tự động hóa và điều khiển học.

Trong lĩnh vực du hành vũ trụ, những thiết bị vi điện tử đã làm gọn nhẹ rất nhiều cho con tàu, và đặc biệt là đảm bảo việc điều khiển cho chuyến bay chính xác an toàn.

Chúng ta biết rằng những định luật về bức xạ điện từ của nguyên tử đã được cơ học lượng tử xây dựng thành công từ lâu, và thành công đến mức không ai để ý đến nó nữa. Nhưng rồi một nghiên cứu tò mò và thận trọng đã nhìn vào những

định luật đó với quan điểm mới, và những định luật đó lại “lóa bùng lên” với những sự lộng lẫy hoàn toàn mới, lại tái sinh trong những dụng cụ có sức mạnh lạ kì :Lade và Made...Không thể nào kể hết những ứng dụng của lade, made trong khoa học và đời sống. Có thể nói rằng nhờ lade, made những chuyện tưởng như hoang đường đã trở thành sự thật...

Chúng ta chỉ có thể kể ở đây một vài những biểu hiện sáng chói nhất của những tư tưởng và phương pháp của cơ học lượng tử áp dụng vào thế giới vi mô. Những biểu hiện đó còn rất nhiều. Mỗi năm, cơ học lượng tử lại được áp dụng rộng rãi hơn vào kĩ thuật, công nghiệp và các ngành liên quan khác. Cuộc sống thứ hai của cơ học lượng tử đẹp đẽ và phong phú lạ thường. Chúng ta chỉ mới là những người chứng kiến thời hiện tại của cơ học lượng tử. Con cháu chúng ta sẽ là người chứng kiến những thành tựu về sau. Những thành tựu đó chắc chắn sẽ làm lu mờ những dự đoán của bất kì một nhà viễn tưởng táo bạo nào.

## KẾT LUẬN

Trong quyển sách nhỏ này, chúng ta đã tìm hiểu cơ học lượng tử ra đời trong điều kiện nào, phát triển ra sao và nội dung cơ bản của nó là gì. Chúng ta đã biết những nét chủ yếu về cuộc tấn công của cơ học lượng tử vào lớp vỏ điện tử của nguyên tử, vào hạt nhân nguyên tử và vào các hạt cơ bản như thế nào.

Hơn 70 năm, cơ học lượng tử đã trải qua 3 giai đoạn phát triển. Giai đoạn đầu là từ Plăng đến Đơ Bơri, kéo dài trong 25 năm. Giai đoạn này bắt đầu từ khi tìm ra tính sóng hạt của sóng sáng và kết thúc với việc tìm ra tính sóng của các hạt vi mô. Trong những năm đó, Anhxtanh đã xây dựng lý thuyết về các hạt ánh sáng và Bo đã xây dựng lý thuyết đầu tiên-tuy chưa hoàn chỉnh-về cấu tạo nguyên tử.

Từ phát minh của Đơ Bơri năm 1924, bắt đầu giai đoạn phát triển thứ hai của cơ học lượng tử, chỉ sau một khoảng thời gian rất ngắn-khoảng 5 năm người ta đã xây dựng nên “công cụ làm việc” của lý thuyết mới. Srôđingơ xây dựng phương trình cơ bản của cơ học lượng tử. Haiđենbe xây dựng nên cơ học ma trận và Đirắc đã tổng hợp cơ học lượng tử với thuyết tương đối của Anhxtanh...Cơ học lượng tử được áp dụng để giải quyết mọi vấn đề liên quan đến lớp vỏ điện tử của nguyên tử và được áp dụng để xây dựng lý thuyết về hạt nhân nguyên tử. Trong giai đoạn này cơ học lượng tử tỏ ra là một lý thuyết mạnh mẽ.

Giai đoạn thứ ba bắt đầu từ những năm sau đại chiến thứ hai với việc áp dụng cơ học lượng tử vào các hạt cơ bản của chất và vào vào một dạng khác của chất là trường. Trong giai đoạn này, những khó khăn mà cơ học lượng tử gặp phải tăng lên rất nhiều. Sau những thắng lợi của giai đoạn trước, lần đầu tiên cơ học lượng tử nếm mùi “khó khăn”. Cơ học lượng tử bó tay trước những câu hỏi hắc búa: các hạt cơ bản có cấu tạo thế nào? Và chúng tương tác với nhau ra sao?

Ngày nay, trong lĩnh vực các hạt cơ bản, thực nghiệm đã đi trước so với lý thuyết. Nhiều hiện tượng đang chờ lý thuyết giải thích mà cơ học lượng tử còn chưa thể giải quyết. Mặt hạn chế, điểm yếu của lý thuyết ngày càng rõ! Phải chăng đã đến lúc “sửa lại” cơ học lượng tử? Hoàn cảnh bây giờ có giống hoàn cảnh của cơ học cổ điển cuối thế kỉ 19 không?

Tuy nhiên, hình như chưa thấy những sự kiện mâu thuẫn với những nguyên lý cơ bản của cơ học lượng tử. Vấn đề chỉ là sự bất lực của nó trong việc giải thích một số hiện tượng, bất lực do chính lý thuyết chứ không phải các nhà bác học.

Một số người có ý định tăng sức mạnh cho cơ học lượng tử để mở rộng khuôn khổ của nó bằng cách đưa vào những nguyên lý quan trọng mới không mâu thuẫn với tinh thần cơ bản của nó. Một số người có ý định tìm hẩn một lý thuyết khác thật sự mới mẻ và cách mạng hơn. Nhưng chưa ai có thể kiêu hãnh vì thực sự thành công.

Thực ra, trong khoa học không và sẽ không thể có một lý thuyết mạnh vô hạn. Mỗi lý thuyết có một phạm vi ứng dụng của nó. Chúng ta không thể nói rằng cơ học lượng tử đúng hơn cơ học cổ điển. Cơ học cổ điển áp dụng cho các vật thể vĩ mô, cho các thiên thể nhưng thể áp dụng được cho các đối tượng vi mô. Cơ học lượng tử dùng để giải thích lớp vỏ điện tử của nguyên tử, những hiện tượng liên quan đến lớp vỏ đó. Cơ học lượng tử còn dùng để cấu tạo hạt nhân, nhưng dùng để giải thích cấu tạo và bản chất của các hạt nhỏ bé hơn nữa là các hạt cơ bản thì lại bế tắc.

Chưa có một lý thuyết mới cho các hạt cơ bản nhưng nhu cầu thì rất cấp bách. Ngày càng có nhiều nhà vật lý cho rằng, lý thuyết mới sẽ khó tưởng tượng hơn nữa, “kỳ lạ” hơn nữa và có vẻ “điên rồ” nhiều hơn nữa! Nhưng chúng ta không sợ điều đó. Bất kì một lý thuyết mới và quan trọng nào mới ra đời cũng gặp phản ứng của cái cũ. Luôn luôn có những người khuyên tác giả của lý thuyết đó kiểm tra tâm trạng. Chính cơ học lượng tử khi mới ra đời cũng là “kỳ quái” và “không thể hiểu nổi”. đối với nhiều nhà vật lý. Nhưng điều cơ bản là, lý thuyết có giải thích và tiên đoán được các sự kiện hay không? Ngày nay không còn ai phủ nhận những thành công rực rỡ mà cơ học lượng tử đã đạt được.

Nhưng bây giờ rõ ràng là cơ học lượng tử đang đứng trước những khó khăn không vượt qua được, nghĩa là vật lý học đang tới ngưỡng cửa của một bước nhảy vọt mới. Bước nhảy vọt đó hiện tại vẫn chưa xảy ra nhưng các nhà bác học biết họ phải làm gì. Và đây là một số trong những công việc đó:

Sắp xếp tất cả các hạt cơ bản đã và sẽ tìm được thành một hệ thống chặt chẽ, tổng quát và duy nhất; tìm hiểu cấu trúc và bản chất của các hạt cơ bản, bản chất của lực hạt nhân; tìm hiểu những định luật chính xác về mối quan hệ giữa hai hình thức cơ bản của vật chất là chất và trường; tìm hiểu ý nghĩa sâu xa và quan hệ tương hỗ của những đặc trưng của vật chất vận động: Năng lượng và thời gian, khối lượng và không gian, bản chất của thế giới vi mô xác định bởi mối quan hệ đó như thế nào?

Tình hình có vẻ như là trí tuệ. Nhưng không phải như vậy. Trong các phòng làm việc và phòng thí nghiệm, các nhà bác học vẫn đang miệt mài, đang thai

nghe cho những tư tưởng mới. Có lẽ vào một ngày tuyệt đẹp nào đó, những tư tưởng mới sẽ “nổ tung” ra và vật lý học lại tiến vọt lên phía trước.

Chúng ta lại nhìn vào cái chấm nhỏ nhất trên trang giấy này. Nó nhỏ bé biết chừng nào! Nhưng hãy tưởng tượng rằng trong cái chấm nhỏ đó còn chứa hàng tỉ nguyên tử, vậy thì nguyên tử nhỏ bé đến thế nào? Thế nhưng, trong đó, trong nguyên tử, là cả một thế giới đang vận động!

Ta không làm sao nhìn thấy được, cảm thấy được cái thế giới nhỏ bé đó mà chỉ phỏng đoán về nó mà thôi! Chúng ta sẽ thấy rằng việc nghiên cứu về thế giới đó là khó khăn đến chừng nào? Nhưng các nhà vật lý và cơ học lượng tử của chúng ta đã nghiên cứu thành công về nó đấy!

Quyển sách nhỏ của chúng tôi chấm dứt ở đây, nhưng vật lý học là một cuốn sách không bao giờ có trang cuối cùng.