

Mở đầu: Mẫu nguyên tử Bo

Vào đầu thế kỷ 20, mẫu nguyên tử của Rutherford tuy thành công trong việc khám phá ra hạt nhân nhưng lại mâu thuẫn với các định luật vật lý cổ điển. Theo lý thuyết cổ điển, một electron chuyển động có gia tốc quanh hạt nhân sẽ phải liên tục bức xạ năng lượng dưới dạng sóng điện từ, khiến năng lượng của nó giảm dần và cuối cùng rơi vào hạt nhân. Tuy nhiên, thực tế các nguyên tử lại rất bền vững.

Năm 1913, nhà vật lý người Đan Mạch Niels Bohr đã đề xuất một mô hình nguyên tử mới, kết hợp giữa vật lý cổ điển và những ý tưởng lượng tử sơ khai của Planck và Einstein. Mẫu nguyên tử Bo đã giải quyết được mâu thuẫn trên và giải thích thành công sự tồn tại của quang phổ vạch của nguyên tử Hydro. Nội dung cốt lõi của mẫu nguyên tử Bo được thể hiện qua hai tiên đề sau đây.

I. Tiên đề về các trạng thái dừng

Tiên đề này mô tả trạng thái tồn tại đặc biệt của các nguyên tử, đi ngược lại hoàn toàn với quan điểm của vật lý cổ điển.

1. Nội dung tiên đề

- Nguyên tử chỉ tồn tại trong những trạng thái có năng lượng xác định, gọi là các **trạng thái dừng**. Khi ở trong các trạng thái dừng, nguyên tử không bức xạ năng lượng.

- Trong các trạng thái dừng của nguyên tử, electron chỉ chuyển động quanh hạt nhân trên những quỹ đạo có bán kính hoàn toàn xác định, gọi là các **quỹ đạo dừng**.

Điều này có nghĩa là cả năng lượng và bán kính quỹ đạo của electron trong nguyên tử đều bị "lượng tử hóa", tức là chỉ có thể nhận những giá trị gián đoạn, xác định.

2. Bán kính quỹ đạo dừng (Đối với nguyên tử Hydro)

Bohr đã thiết lập được công thức tính bán kính của các quỹ đạo dừng cho nguyên tử Hydro (nguyên tử chỉ có 1 electron).

- **Công thức:** $r_n = n^2 * r_0$
- **Giải thích:**
 - r_n là bán kính quỹ đạo dừng thứ n .
 - n là số nguyên dương ($n = 1, 2, 3, \dots$) được gọi là số lượng tử chính. Mỗi giá trị của n ứng với một quỹ đạo dừng.
 - r_0 là bán kính Bo, là bán kính của quỹ đạo dừng gần hạt nhân nhất (ứng với $n=1$). $r_0 \approx 5,3 \cdot 10^{-11} \text{ m}$.

Ví dụ minh họa:

1. **Ví dụ 1:** Tính bán kính quỹ đạo dừng L của nguyên tử Hydro.

Phân tích: Quỹ đạo L là quỹ đạo thứ hai, ứng với $n = 2$.

Giải: Áp dụng công thức, ta có $r_2 = 2^2 * r_0 = 4 * r_0 = 4 * 5,3 \cdot 10^{-11} = 21,2 \cdot 10^{-11} \text{ m}$.

2. **Ví dụ 2:** Một electron trong nguyên tử Hydro đang ở trên quỹ đạo dừng có bán kính $132,5 \cdot 10^{-11}$ m. Cho biết electron này đang ở quỹ đạo nào?

Phân tích: Ta có $r_n = 132,5 \cdot 10^{-11}$ m và $r_0 = 5,3 \cdot 10^{-11}$ m. Ta cần tìm n.

Giải: Từ công thức $r_n = n^2 \cdot r_0$, suy ra $n^2 = r_n / r_0 = (132,5 \cdot 10^{-11}) / (5,3 \cdot 10^{-11}) = 25$. Vậy $n = 5$. Electron đang ở quỹ đạo dừng O.

3. Năng lượng của nguyên tử ở trạng thái dừng

Mỗi trạng thái dừng ứng với một mức năng lượng hoàn toàn xác định.

- **Công thức:** $E_n = -E_0 / n^2$ (Với $E_0 = 13,6$ eV)

- **Giải thích:**

- E_n là năng lượng của nguyên tử ở trạng thái dừng thứ n.
- n là số lượng tử chính ($n = 1, 2, 3, \dots$).
- E_0 là năng lượng ion hóa của nguyên tử Hydro ở trạng thái cơ bản, có giá trị **13,6 eV** ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$).
- Dấu "-" cho biết đây là năng lượng của một trạng thái liên kết. Electron vẫn bị ràng buộc bởi hạt nhân. Năng lượng càng âm thì trạng thái càng bền vững.
- Trạng thái dừng có năng lượng thấp nhất ứng với $n=1$, gọi là **trạng thái cơ bản**.
- Các trạng thái dừng có năng lượng cao hơn ($n = 2, 3, 4, \dots$) gọi là các **trạng thái kích thích**.

- Khi n tiến ra vô cùng ($n \rightarrow \infty$), $E_n \rightarrow 0$. Đây là trạng thái ion hóa, electron đã thoát ra khỏi nguyên tử.

Bảng tóm tắt các trạng thái dừng của nguyên tử Hydro:

Tên quỹ đạo	Giá trị n	Bán kính (r_n)	Năng lượng (E_n)	Tên trạng thái
K	1	r_0	-13,6 eV	Trạng thái cơ bản
L	2	$4r_0$	-3,4 eV	Trạng thái kích thích thứ nhất
M	3	$9r_0$	-1,51 eV	Trạng thái kích thích thứ hai
N	4	$16r_0$	-0,85 eV	Trạng thái kích thích thứ ba
O	5	$25r_0$	-0,54 eV	Trạng thái kích thích thứ tư
P	6	$36r_0$	-0,38 eV	Trạng thái kích thích thứ năm

Ví dụ minh họa:

- Ví dụ 1:** Tính năng lượng của nguyên tử Hydro ở trạng thái kích thích thứ hai.

Phân tích: Trạng thái kích thích thứ hai ứng với quỹ đạo M, có $n = 3$.

Giải: Áp dụng công thức, ta có $E_3 = -13,6 / 3^2 = -13,6 / 9 \approx -1,51 \text{ eV}$.

2. **Ví dụ 2:** Cần cung cấp một năng lượng tối thiểu bằng bao nhiêu để ion hóa một nguyên tử Hydro đang ở trạng thái cơ bản?

Phân tích: Ion hóa nguyên tử là quá trình đưa electron từ trạng thái đang xét ($n=1$) ra xa vô cùng ($n \rightarrow \infty$). Năng lượng cần cung cấp chính bằng độ chênh lệch năng lượng giữa hai trạng thái này.

Giải: Năng lượng ở trạng thái cơ bản là $E_1 = -13,6 \text{ eV}$. Năng lượng ở trạng thái ion hóa là $E_\infty = 0$. Năng lượng cần cung cấp là: $\Delta E = E_\infty - E_1 = 0 - (-13,6) = 13,6 \text{ eV}$.

II. Tiên đề về sự bức xạ và hấp thụ năng lượng

Tiên đề này giải thích cơ chế nguyên tử phát ra hoặc hấp thụ ánh sáng (photon).

1. Nội dung tiên đề

- Khi nguyên tử chuyển từ trạng thái dừng có năng lượng cao E_m sang trạng thái dừng có năng lượng thấp hơn E_n (với $m > n$), nó sẽ phát ra một photon có năng lượng đúng bằng hiệu hai mức năng lượng đó: $\epsilon = hf_{mn} = E_m - E_n$.
- Ngược lại, khi nguyên tử đang ở trạng thái dừng có năng lượng thấp E_n , nếu nó hấp thụ được một photon có năng lượng ϵ đúng bằng hiệu $E_m - E_n$ (với $m > n$), nó sẽ chuyển lên trạng thái dừng có năng lượng cao hơn E_m .

Quá trình này được gọi là sự chuyển mức năng lượng. Sự hấp thụ hay bức xạ photon là một quá trình "nhảy vọt", không có trạng thái trung gian.

2. Sự bức xạ photon (Phát xạ)

Đây là cơ chế tạo ra quang phổ vạch phát xạ của các nguyên tố.

- **Công thức:** $\epsilon_{\text{photon}} = hf = hc/\lambda = E_{\text{cao}} - E_{\text{thấp}}$
- **Giải thích:** Khi electron "nhảy" từ mức năng lượng cao xuống mức thấp, phần năng lượng chênh lệch sẽ được giải phóng dưới dạng một hạt ánh sáng (photon). Năng lượng của photon này quyết định tần số (f) và bước sóng (λ) của ánh sáng phát ra.

Ví dụ minh họa:

Ví dụ: Tính bước sóng của bức xạ do nguyên tử Hydro phát ra khi electron chuyển từ quỹ đạo M về quỹ đạo L.

Phân tích: Chuyển từ M (n=3) về L (n=2). Ta có $E_3 \approx -1,51 \text{ eV}$ và $E_2 = -3,4 \text{ eV}$.

Giải:

Năng lượng photon phát ra là: $\epsilon = E_3 - E_2 = (-1,51) - (-3,4) = 1,89 \text{ eV}$.

Đổi ra Joules: $\epsilon = 1,89 * 1,6.10^{-19} = 3,024.10^{-19} \text{ J}$.

Từ công thức $\epsilon = hc/\lambda$, suy ra $\lambda = hc/\epsilon = (6,625.10^{-34} * 3.10^8) / (3,024.10^{-19}) \approx 0,657.10^{-6} \text{ m} = 0,657 \mu\text{m}$. Đây là bức xạ màu đỏ trong vùng ánh sáng nhìn thấy (vạch H_α trong dãy Balmer).

3. Sự hấp thụ photon

Đây là quá trình ngược lại với bức xạ và là chìa khóa để hiểu về quang phổ vạch hấp thụ.

- **Điều kiện hấp thụ:** Nguyên tử ở trạng thái năng lượng E_n chỉ có thể hấp thụ một photon có năng lượng ϵ nếu năng lượng này **chính xác bằng** hiệu năng

lượng $E_m - E_n$ để chuyển lên một trạng thái kích thích cao hơn E_m ($m > n$).

- **Công thức:** $\epsilon_{\text{hấp thụ}} = hf = E_m - E_n$ (với $m > n$)

- **Giải thích:** Nếu năng lượng photon không thỏa mãn điều kiện trên (tức là không đủ để nhảy lên mức E_m , hoặc thừa một chút), nguyên tử sẽ **không hấp thụ** photon đó. Photon sẽ đi xuyên qua nguyên tử mà không có tương tác. Đây là tính chất "tất cả hoặc không có gì" của quá trình hấp thụ lượng tử.

Ví dụ minh họa:

1. **Ví dụ 1:** Một nguyên tử Hydro đang ở trạng thái cơ bản ($n=1$). Chiếu vào nó một photon có năng lượng 10,2 eV. Nguyên tử có hấp thụ photon này không? Nếu có, nó chuyển lên trạng thái nào?

Phân tích: Năng lượng ở trạng thái cơ bản $E_1 = -13,6$ eV. Ta cần kiểm tra xem có mức năng lượng E_m nào thỏa mãn $E_m - E_1 = 10,2$ eV hay không.

Giải:

Thử với $n=2$: $E_2 = -3,4$ eV. Hiệu năng lượng: $E_2 - E_1 = (-3,4) - (-13,6) = 10,2$ eV.

Vì năng lượng photon đúng bằng hiệu $E_2 - E_1$, nên nguyên tử **có hấp thụ** photon này và chuyển lên trạng thái kích thích thứ nhất (quỹ đạo L, $n=2$).

2. **Ví dụ 2:** Chiếu một chùm photon có năng lượng 11 eV vào một đám khí Hydro ở trạng thái cơ bản. Hiện tượng gì sẽ xảy ra?

Phân tích: Ta cần kiểm tra xem 11 eV có tương ứng với bất kỳ hiệu $E_m - E_1$ nào không.

Giải:

$$E_2 - E_1 = 10,2 \text{ eV.}$$

$$E_3 - E_1 = (-1,51) - (-13,6) = 12,09 \text{ eV.}$$

Năng lượng photon 11 eV lớn hơn năng lượng cần để lên mức 2 nhưng lại nhỏ hơn năng lượng cần để lên mức 3. Vì không có mức năng lượng nào ở giữa, nên nguyên tử **không hấp thụ** các photon này. Chùm photon sẽ đi xuyên qua đám khí Hydro.

3. **Ví dụ 3:** Một nguyên tử Hydro đang ở trạng thái kích thích thứ nhất ($n=2$).

Nó có thể hấp thụ photon có năng lượng 2,55 eV không?

Phân tích: Nguyên tử đang ở $E_2 = -3,4 \text{ eV}$. Ta cần kiểm tra xem có mức E_m (với $m > 2$) nào thỏa mãn $E_m - E_2 = 2,55 \text{ eV}$ không.

Giải:

Thử với $n=3$: $E_3 - E_2 = (-1,51) - (-3,4) = 1,89 \text{ eV.}$

Thử với $n=4$: $E_4 = -0,85 \text{ eV}$. Hiệu năng lượng: $E_4 - E_2 = (-0,85) - (-3,4) = 2,55 \text{ eV.}$

Năng lượng photon đúng bằng hiệu $E_4 - E_2$. Vậy nguyên tử **có hấp thụ** photon và chuyển lên trạng thái kích thích thứ ba (quỹ đạo N, $n=4$).

Kết luận

Mẫu nguyên tử Bo, thông qua hai tiên đề của mình, đã đặt nền móng cho sự hiểu biết về thế giới vi mô. Nó giải thích thành công sự bền vững của nguyên tử, sự tồn tại của các vạch quang phổ và cơ chế tương tác giữa ánh sáng và vật chất. Đặc biệt, khái niệm về các trạng thái dừng và điều kiện hấp thụ/bức xạ photon là những kiến thức cốt lõi, giúp giải quyết rất nhiều dạng bài tập quan trọng trong chương trình Vật Lý 12 và các kỳ thi THPT Quốc Gia.