

Chương 4. Thuyết tương đối hẹp

- A. Các tiên đề của Einstein
- B. Phép biến đổi Lorentz
- C. Hệ quả của phép biến đổi Lorentz
- D. Phép biến đổi vận tốc
- E. Động lực học tương đối tính

A.1. Hạn chế của cơ học cổ điển

- Cuối thế kỷ XIX, đầu thế kỷ XX, người ta phát hiện ra rằng, trong những chuyển động có vận tốc $v \approx c$, cơ học Newton không còn đúng nữa.
- Năm 1905, Einstein xây dựng lý thuyết tương đối hẹp. Thuyết này xây dựng dựa trên 2 tiên đề chính.

A.2. Hai tiên đề

- *Tiên đề 1 (nguyên lý tương đối)*: “Mọi hiện tượng vật lý xảy ra như nhau trong mọi hệ quy chiếu quán tính”.



- *Tiên đề 1* được mở rộng so với nguyên lý tương đối của Galilé, ở đó chỉ nhắc đến các hiện tượng cơ học.

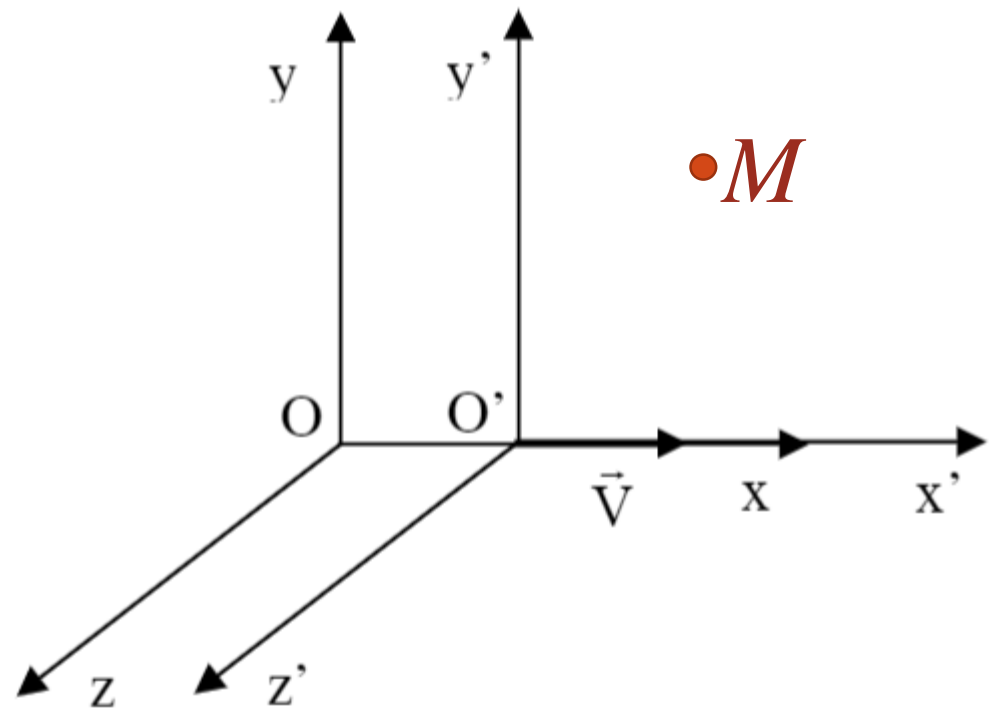
A.2. Tiên đề 1

- *Tiên đề 2 (nguyên lý về sự bất biến về vận tốc của ánh sáng):* “Vận tốc ánh sáng trong chân không đều bằng nhau theo mọi phương và đối với mọi hệ quy chiếu quán tính. Nó có giá trị $c=3.10^8 m/s$ và là giá trị vận tốc cực đại trong tự nhiên”.
- Tiên đề 2 được xác nhận bằng thí nghiệm về giao thoa của Michelson (1887)

B.1. Phép biến đổi Galile

- Hqc K – hqc đứng yên.
- Hqc K' – chuyển động đối với hqc K với vận tốc $\vec{v} // O\mathbf{x}$

$$\begin{cases} x' = x - vt \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = t \end{cases}$$



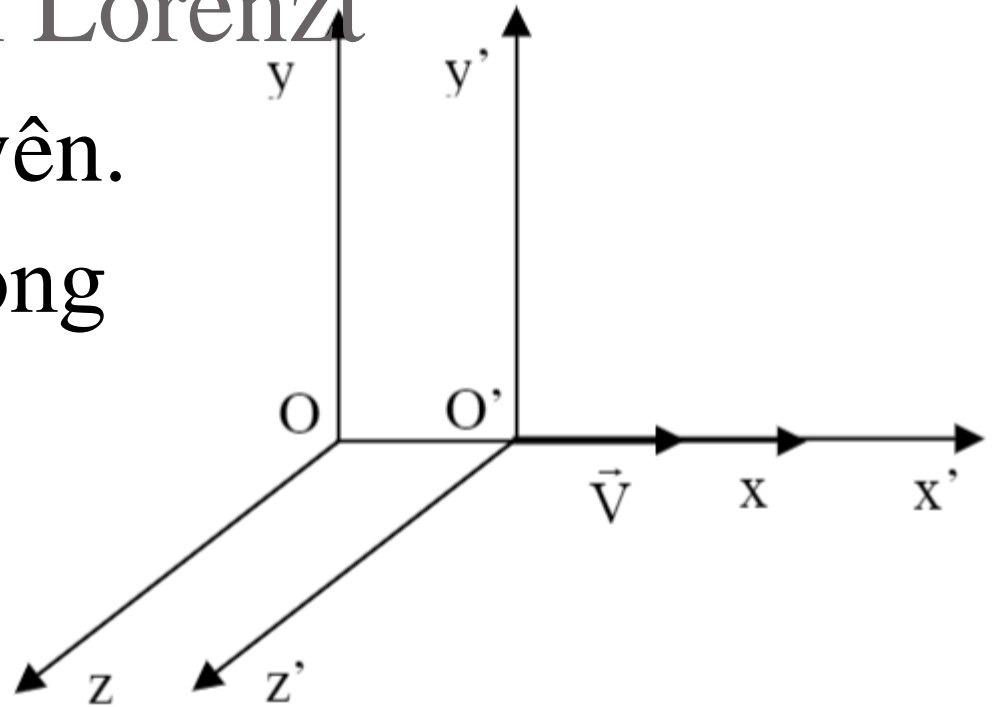
B.2. Phép biến đổi Lorentz

- Hqc K – hqc đứng yên.
- Hqc K' – chuyển động

$\vec{v} // O_x$

- Ban đầu, $O \equiv O'$.

Phát tín hiệu sáng đi.



- Ở thời điểm t , tín hiệu sáng đi được:

✓ Trong hqc K : $x=ct$

✓ Trong hqc K' : $x'=ct'$ $\rightarrow t \neq t' \rightarrow \neq Galile$

B.2. Phép biến đổi Lorentz

- Giả sử: $x' = \beta(x - vt)$
- Vì K và K' tương đương nên: $x = \beta(x' + vt')$
- Khi đó:

$$xx' = c^2 tt' = \beta^2 (x' + vt')(x - vt)$$

$$\rightarrow \beta = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\rightarrow x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

B.2. Phép biến đổi Lorentz

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

- Thế x' vào x ta có:

$$t = \frac{t' + \frac{v}{c^2} x'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2} x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

B.2. Phép biến đổi Lorentz

- Vậy ta có phép biến đổi Lorentz từ $K \rightarrow K'$:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

- Không gian mang tính **tương đối**: Không gian thay đổi dọc theo phương chuyển động.
- Thời gian mang tính tương đối.
- Không thời gian mang tính tương đối.

B.2. Phép biến đổi Lorentz

- Phép biến đổi Lorentz từ $K' \rightarrow K$:

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$y = y'$$

$$z = z'$$

$$t = \frac{t' + \frac{v}{c^2} x'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

→ Khi $v \ll c \rightarrow v/c \rightarrow 0$: phép biến đổi Lorentz trở thành phép biến đổi Galile.

B.2. Phép biến đổi Lorentz

- Ví dụ: Người quan sát trong hqc O phát hiện 2 sự kiện riêng rẽ xảy ra trên trục x ở điểm x_1 tại thời điểm t_1 và điểm x_2 tại thời điểm t_2 :

$$x_2 - x_1 = 600m; t_1 - t_2 = 0,8\mu s.$$

Tìm vận tốc v của hqc O' chuyển động dọc theo trục x của hqc O sao cho người quan sát thấy 2 sự kiện đó xảy ra đồng thời?

C.1. Đồng thời

- Trong K có 2 sự kiện xảy ra đồng thời ở thời điểm t , tại 2 vị trí x_1 và x_2 .

$$t_1' = \frac{t - \frac{v}{c^2} x_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$
$$t_2' = \frac{t - \frac{v}{c^2} x_2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$
$$\Delta t' = t_2' - t_1' = \frac{\frac{v}{c^2} (x_2 - x_1)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \neq 0$$

→ Khái niệm đồng thời mang tính tương đối.

C.2. Quan hệ nhân quả

- Trong K có sự kiện $A(x_1, t_1)$ – nguyên nhân; $A(x_2, t_2)$ – kết quả.
- Gọi u – vận tốc truyền tác dụng từ nguyên nhân đến kết quả

$$t'_2 - t'_1 = \frac{t_2 - t_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \left(1 - \frac{v}{c^2} u \right)$$

- Vì $u < c$ và $t_2 > t_1 \rightarrow t'_2 > t'_1$.

→ Quan hệ nhân quả mang tính tuyệt đối.

C.3. Khoảng không gian

- Thanh đứng yên trong K' , có chiều dài l_0 :

$$l_0 = x'_2 - x'_1$$

- Cho thanh chuyển động dọc theo chiều dài thanh với vận tốc v . Chiều dài thanh trong hq đứng yên:

$$l = x_2 - x_1 = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} < l_0$$

→ Chiều dài bị co ngắn lại dọc theo phương chuyển động.

C.3. Khoảng không gian

- Ví dụ: Một thanh có chiều dài riêng 1,2 m chuyển động với vận tốc $v = 0,8c$ so với hqc đứng yên K, theo phương hợp với cây thước góc 60° . Tìm chiều dài của thanh trong hqc đứng yên?

C.4. Khoảng thời gian

- Xét 1 biến cố trong hqc K' xảy ra tại vị trí A trong khoảng thời gian từ t'_1 đến t'_2 .

$$\Delta t' = t'_2 - t'_1$$

- Khi đó, trong hqc K, khoảng thời gian xảy ra biến cố:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \Delta t' / \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} > \Delta t'$$

→ Đồng hồ chuyển động chạy chậm hơn đồng hồ đứng yên.

C.4. Khoảng thời gian

- Ví dụ: Hạt Mezon dịch chuyển trong hệ quy chiếu K với vận tốc $v=0,999c$. Từ khi sinh ra đến khi bị phân hủy nó đi được quãng đường 3km. Tìm thời gian sống riêng của hạt Mezon?

C.5. Khoảng không thời gian

- Khoảng không thời gian giữa 2 biến cố được định nghĩa:

$$\Delta s^2 = c\Delta t^2 - (\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2)$$

$$\Delta s'^2 = \Delta s^2$$

→ Khoảng không thời gian mang tính tuyệt đối.

D. Phép biến đổi vận tốc

- Gọi $\vec{v}(v_x, v_y, v_z)$; $\vec{v}'(v'_x, v'_y, v'_z)$ – vận tốc chất điểm trong K, K' :

$$v'_x = \frac{dx'}{dt'} = \frac{dx - v dt}{dt - \frac{v}{c^2} dx} = \frac{v_x - v}{1 - \frac{v}{c^2} v_x}$$

- Tương tự:

$$v'_y = \frac{v_y \sqrt{1 - v^2 / c^2}}{1 - \frac{v}{c^2} v_x}$$

$$v'_z = \frac{v_z \sqrt{1 - v^2 / c^2}}{1 - \frac{v}{c^2} v_x}$$

D. Phép biến đổi vận tốc

- Ví dụ: Giả sử trong trò chơi Pokenon Go, khi diễn ra trận đấu, 2 pokemon Pikachu và Mew chuyển động trên 2 đường thẳng vuông góc với các tốc độ $0,3c$ và $0,4c$ đối với phòng Gym. Xác định tốc độ của Mew trong hệ quy chiếu gắn với Pikachu?

E.1. Phương trình chuyển động

- Khối lượng có tính tương đối: khối lượng tăng khi chuyển động:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}} > m_0$$

- Khi $v \ll c$: $m = m_0$.
- Phương trình chuyển động:

$$\vec{F} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} = m \frac{d\vec{v}}{dt} + \vec{v} \frac{dm}{dt}$$

E.2. Năng lượng tương đối

- Năng lượng toàn phần: $E = mc^2$
- Năng lượng nghỉ: $E_0 = m_0c^2$
- Động năng – năng lượng của chuyển động.

$$K = E - E_0 = m_0c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}} - 1 \right)$$

E.3. Mối liên hệ giữa động lượng và năng lượng tương đối

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}} \rightarrow E^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) = m_0^2 c^4$$

$$\rightarrow E^2 - \frac{(m^2 c^4) v^2}{c^2} = m_0^2 c^4$$

$$E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4$$

E. Động lực học tương đối tính

- Ví dụ: Trong hệ quy chiếu quán tính O, một hạt khối lượng m_0 chuyển động dọc theo trục Ox dưới tác dụng của lực F. Tọa độ x của hạt phụ thuộc theo thời gian theo quy luật:

$$x = \sqrt{a^2 + c^2 t^2}$$

(a là hằng số dương)

Tìm lực F?