

BÀI GIẢNG VẬT LÝ ĐẠI CƯỜNG

Tác giả: PGS. TS Đỗ Ngọc Uẩn

Viện Vật lý kỹ thuật

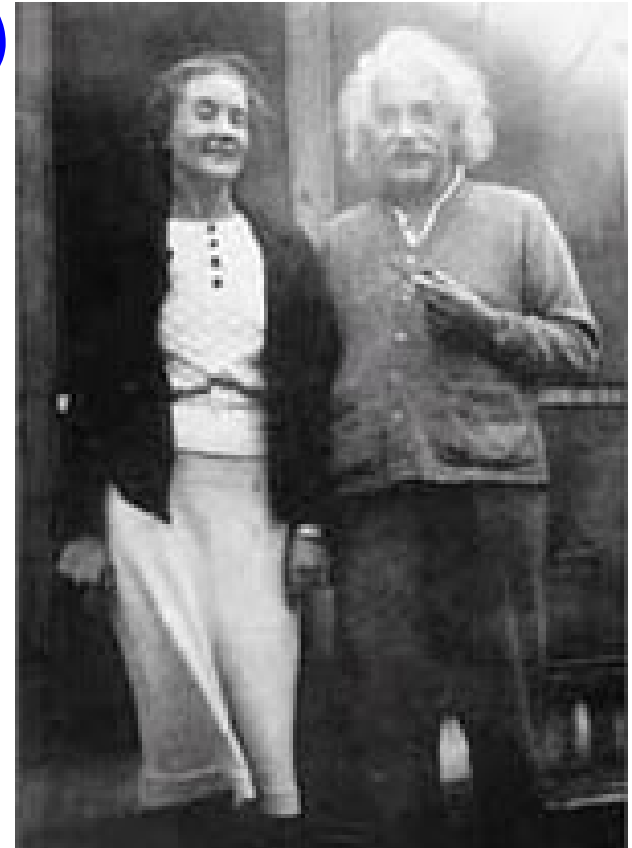
Trường ĐH Bách khoa Hà nội

CHƯƠNG 2

Thuyết tương đối hẹp Einstein (Anhxtanh)



Albert Einstein



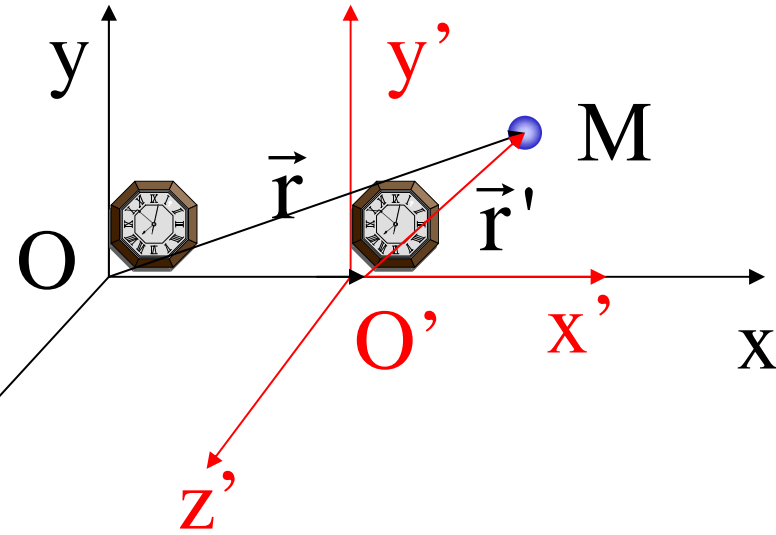
1. Tổng hợp vận tốc và gia tốc

$$\vec{r} = \vec{r}' + \vec{OO}'$$

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{d\vec{r}'}{dt} + \frac{d\vec{OO}'}{dt}$$

$$\Rightarrow \vec{v} = \vec{v}' + \vec{V}$$

$$\frac{d}{dt} = \frac{d}{dt'}$$



\vec{v}' Vtơ vtốc trong hqc O'

\vec{V} Vtơ vtốc trong hqc O

\vec{V} Vtơ vtốc O' đối với O

Véc tơ vận tốc của chất điểm đối với hệ qchiếu O bằng tổng hợp véc tơ vtốc của chất điểm đó đối với hệ qc O' chđộng tịnh tiến đvới hệ qc O và vtơ vtốc tịnh tiến của hệ qc O' đối với hệ qc O

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d\vec{v}'}{dt} + \frac{d\vec{V}}{dt} \quad \Rightarrow \quad \vec{a} = \vec{a}' + \vec{A}$$

\vec{a} Vtơ gia tốc M trong hqc O

\vec{a}' Vtơ gia tốc M trong hqc O'

\vec{A} Vtơ gia tốc O' đối với hqc O

Véc tơ gia tốc của chất điểm đối với một hệ qchiếu O bằng tổng hợp véc tơ gia tốc của chất điểm đó đối với hệ qc O' chuyển động tịnh tiến đối với hệ qc O và vtơ gia tốc tịnh tiến của hệ qc O' đối với hệ qc O

2. Nguyên lý tương đối Galilê

Hệ qui chiếu quán tính: $\vec{m}\vec{a} = \vec{F}$

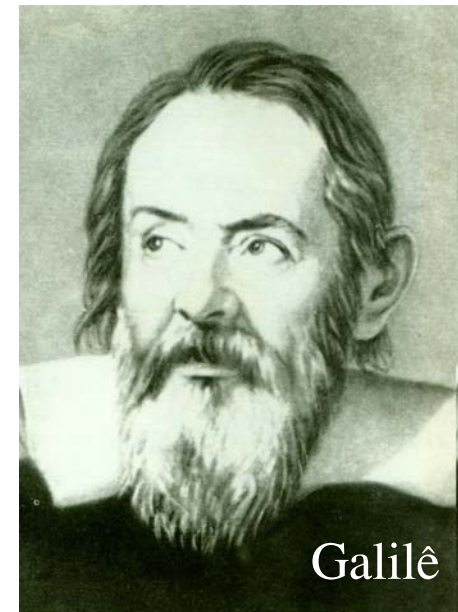
Nếu O' chuyển động thẳng đều
đối với O thì $A=0$ $\vec{m}\vec{a} = \vec{m}\vec{a}'$

$$\vec{m}\vec{a}' = \vec{m}\vec{a} = \vec{F}$$

O' cũng là hqc quán tính

Mọi hệ qui chiếu chuyển động thẳng đều với
hqc quán tính cũng là hqc quán tính.

Các định luật Niu tơn nghiệm đúng trong
mọi hệ qui chiếu chuyển động thẳng đều
đối với hqc quán tính



Các phương trình động lực học trong các hệ qui chiếu quán tính có dạng như nhau.

Các phương trình cơ học bất biến đối với phép biến đổi Galilê

3. Thuyết tương đối hẹp của Anhtanh

3.1. Khái niệm mở đầu:

Cơ học **Niuton** hình thành quan niệm về không gian, thời gian và vật chất không phụ thuộc vào chuyển động ($v \ll c$)

Cuối thế kỷ 19 phát hiện ra các hạt có vận tốc cỡ $c = 3 \cdot 10^8 \text{m/s} \Rightarrow$ Mâu thuẫn cơ học Niuton
 \Rightarrow Xây dựng môn cơ học tổng quát hơn: Cơ học tương đối tính

3.2. Các tiên đề Anhtanh:

○ Nguyên lý tương đối: Mọi định luật vật lý đều như nhau trong các hệ quy chiếu quán tính

Nguyên lý về sự bất biến của vận tốc ánh sáng: Vận tốc ánh sáng trong chân không đều bằng nhau đối với mọi hệ quán tính. Nó có giá trị bằng $c=3.10^8\text{m/s}$ và là giá trị cực đại trong tự nhiên. (khác CH Niuton)

CH Niuton: Các định luật cơ học

Tương tác tức thời (vận tốc truyền tương tác là ∞)

3.3. Động học tương đối tính - Phép biến đổi Lorentz

3.3.1. Sự mâu thuẫn của phép biến đổi Galilê với thuyết tương đối Anhtanh

Phép biến đổi Galilê

$$t=t'; \quad v=v'+V$$

$$l=x_2-x_1=x_2'-x_1'=l'$$

Áp dụng cho hai hệ K và K' :
 O' chuyển động với V

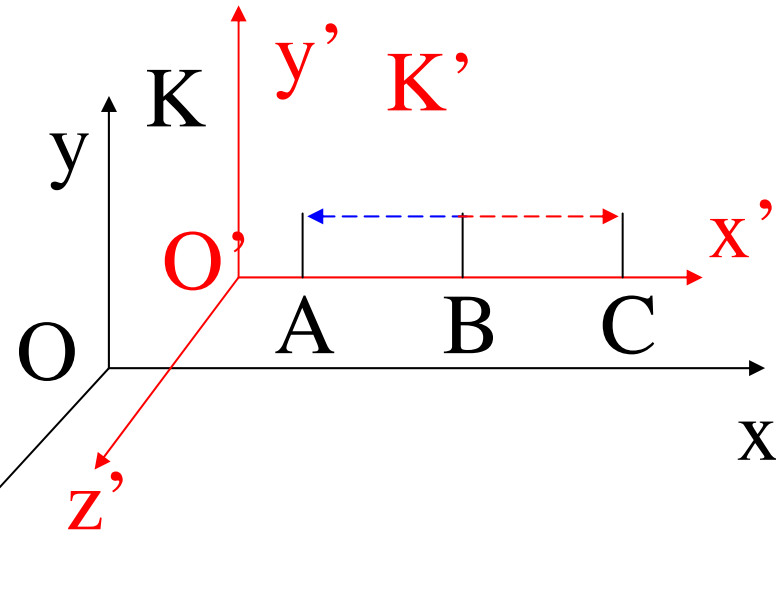
Trên O' Có A, B, C

Ánh sáng phát ra từ B: Tới A với $v=c+V$

Tới C với $v=c-V$

\Rightarrow Trái với tiên đề thứ 2 của Anhtanh

Phép biến đổi Galilê không phù hợp cho
chuyển động có vận tốc cỡ vận tốc ánh sáng



3.3. 2. Phép biến đổi Lorentz:

- Thời gian là tương đối $t \neq t'$

- Không gian trong hai hệ: $x' = f(x, t)$

Gốc O' chuyển động với vận tốc V đối với K

Có $x - Vt = 0$

Trong K' tọa độ của O' luôn có $x' = 0$

Đối với O' viết: $x' = \alpha(x - Vt)$

O $x = \beta(x' + Vt')$

Thay $x' \Leftrightarrow x$, $V \Leftrightarrow -V$ và $t' \Leftrightarrow t$ có $\alpha = \beta$

Theo tiên đề 2: $x = ct$ và $x' = ct'$ có:

$ct' = \alpha t(c - V)$ và $ct = \beta t'(c + V)$

Nhân 2 vế có:

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

Thay vào có

$$x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

$$x = \frac{x' + Vt'}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

Từ đây, rút t' :

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

Thay x'

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

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

Phép biến đổi Lorentz:

$$x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

$$y' = y, z' = z$$

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

$$x = \frac{x' + Vt'}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

$$y = y', z = z'$$

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

Nếu $V \ll c$ thì BĐ Lorentz \rightarrow BĐ Galilê

$$x' = x - Vt, y' = y, z' = z, t' = t$$

$$x = x' + Vt', y = y', z = z', t = t'$$

3.4. Các hệ quả của phép biến đổi Lorentz:

3.4.1. Khái niệm về tính đồng thời và quan hệ nhân quả

$$t_2' - t_1' = \frac{t_2 - t_1 - \frac{v}{c^2}(x_2 - x_1)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$\Delta t' = \Delta t = 0$ chỉ khi $x_1 = x_2$

Hai sự kiện rời rạc 1 và 2 xảy ra đồng thời ở hệ qui chiếu này, nhưng chưa chắc đã đồng thời xảy ra đối với hệ qui chiếu khác.

Quan hệ nhân quả: Hai sự kiện 1-nguyên nhân, 2-hệ quả

$x_1=vt_1$, $x_2=vt_2$ với $x_2 > x_1$

$$t_2' - t_1' = \frac{(t_2 - t_1) \left[1 - \frac{v}{c}\right]}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

vì $v < c$ nếu $t_2 > t_1$ thì $t_2' > t_1'$

=> Nguyên nhân luôn xảy ra trước hệ quả trong mọi hệ qui chiếu.

3.4.2. Sự co ngắn Lorentz

Không gian

$$x_1' = \frac{x_1 - Vt_1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$
$$x_2' = \frac{x_2 - Vt_2}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

Độ dài đo trên tàu: $l_0 = x_2' - x_1'$

Độ dài đo từ trái đất: $l = x_2 - x_1$

$$x_2' - x_1' = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \quad l = l_0 \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}$$

$V = 2,6 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
thì $l = 0,5 l_0$

Độ dài dọc theo phương chuyển động của thanh trong hệ quy chiếu mà thanh chuyển động ngắn hơn độ dài độ dài của thanh trong hệ mà thanh đứng yên. $V \ll c \Rightarrow l = l_0$

Thời gian là tương đối

Trong hệ chuyển động K': $\Delta t'$

Trong hệ đứng yên K: Δt

$$t_2 = \frac{t'_2 + \frac{V}{c^2} x'}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

$$t_2 - t_1 = \frac{t'_2 - t'_1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \quad \Delta t' = \Delta t \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}$$

$$t_1 = \frac{t'_1 + \frac{V}{c^2} x'}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

$$V = 2,9996 \cdot 10^8 \text{ m/s} \text{ thì } \Delta t' = 10^{-2} \Delta t$$

Khoảng thời gian diễn ra cùng một quá trình trong hệ chuyển động ngắn hơn trong hệ đứng yên; $V \ll c \Rightarrow \Delta t' = \Delta t$

Từ thức gặp tiên



Từ thức đi 3 ngày với tiên trở về, trên trái đất đã trôi đi 300 năm $V=?$

Nhà du hành vũ trụ bay với $V=2,9996.10^8\text{m/s}$ đi về mất 20 năm (Trên tàu anh ta già đi 20 tuổi) thì trên trái đất đã trải qua 2000 năm

3.4.3. Định lý về tổng hợp vận tốc

$$x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \quad dx' = \frac{dx - Vdt}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \quad \frac{dx'}{dt'} = \frac{dx - Vdt}{dt - \frac{V}{c^2} dx}$$

$$t' = \frac{t - \frac{V}{c^2} x}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \quad dt' = \frac{dt - \frac{V}{c^2} dx}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \quad u'_x = \frac{u_x - V}{1 - \frac{V}{c^2} u_x}$$

Nếu $u_x = c$ thì

$$u'_x = \frac{c - V}{1 - \frac{V}{c^2} c} = c$$

3.5. Động lực học tương đối tính

3.5.1. Phương trình cơ bản của chuyển động chất điểm

$$\vec{F} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} \quad m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

m_0 - khối lượng nghỉ ($v=0$)

3.5.2. Động lượng và năng lượng

$$\vec{F} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} \quad m\vec{v} = \frac{m_0\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$dW = dA = \vec{F}d\vec{s} = F.ds$$

$$dW = \frac{d}{dt} \left[\frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right] ds$$

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right] = m_0 \frac{d}{dt} \left[v \cdot \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \right]$$

$$dW = \left[\frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \frac{dv}{dt} + \frac{m_0 v^2}{c^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{3/2}} \frac{dv}{dt} \right] ds$$

$$\frac{dv}{dt} ds = v dv$$

$$dW = \frac{m_0 v dv}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \left[1 + \frac{v^2}{c^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)} \right] = \frac{m_0 v dv}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{3/2}}$$

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

$$dm = \frac{m_0 v dv}{c^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{3/2}}$$

$$dW = c^2 dm$$

$$W = mc^2 + C$$

- Hệ thức Anhxtanh

$$W = 0; m = 0; C = 0$$

$$W = mc^2$$

0 Hệ quả

Ö Động năng:

$$W_d = mc^2 - m_0c^2 = m_0c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right)$$

Nếu $v \ll c$ thì

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \approx 1 - \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2}$$

$$W_d \approx m_0 c^2 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} - 1\right) \approx \frac{m_0 v^2}{2}$$

• Quan hệ giữa năng lượng và động lượng

$$W = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad m_0^2 c^4 = W^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) = W^2 - \frac{W^2 v^2}{c^2}$$

$$W = mc^2 \quad \text{và} \quad \vec{p} = m\vec{v}$$

$$W^2 = m_0^2 \cdot c^4 + p^2 c^2$$

Ê Độ hụt khối trong phân rã hạt nhân:

$$W = W_1 + W_2$$

$$mc^2 = \frac{m_1c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} + \frac{m_2c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\frac{m_1c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} > m_1c^2$$

$$m > m_1 + m_2$$

$$\frac{m_2c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} > m_2c^2$$

Khối lượng hạt nhân trước khi phân rã lớn hơn khối lượng của các hạt thành phần phân rã.

Năng lượng toả ra: $\Delta W = [m - (m_1 + m_2)]c^2 = \Delta mc^2$

/ Ý nghĩa triết học của hệ thức Anhxtanh:

- **Duy tâm:** Vật chất biến thành năng lượng -> tiêu huỷ
- **Duy vật:** Vật chất tồn tại khách quan, hệ thức Anhxtanh nối liền 2 tính chất của vật chất: Quán tính (m) và Mức độ vận động (W).

4. Thuyết tương đối rộng (tổng quát):

Thuyết tương đối hẹp chỉ nghiên cứu trong hệ qui chiếu quán tính.

Khi hệ qui chiếu chuyển động có gia tốc a so với hệ qui chiếu quán tính, hệ qui chiếu đó là hệ qui chiếu không quán tính.

Chất điểm chuyển động trong hệ qui chiếu không quán tính chịu tác dụng của lực quán tính
-> tương đương gia tốc hấp dẫn đều $g=-a$

Không phân biệt được chất điểm chuyển động trong hệ qui chiếu không quán tính hay trong hệ qui chiếu quán tính có gia tốc hấp dẫn đều.

Nguyên lý tương đương: Không thể có một thí nghiệm nào thực hiện được trong một không gian địa phương **có thể phân biệt được một hệ qui chiếu chuyển động có gia tốc và một hệ qui chiếu quán tính trong đó tồn tại một trường hấp dẫn đều.**

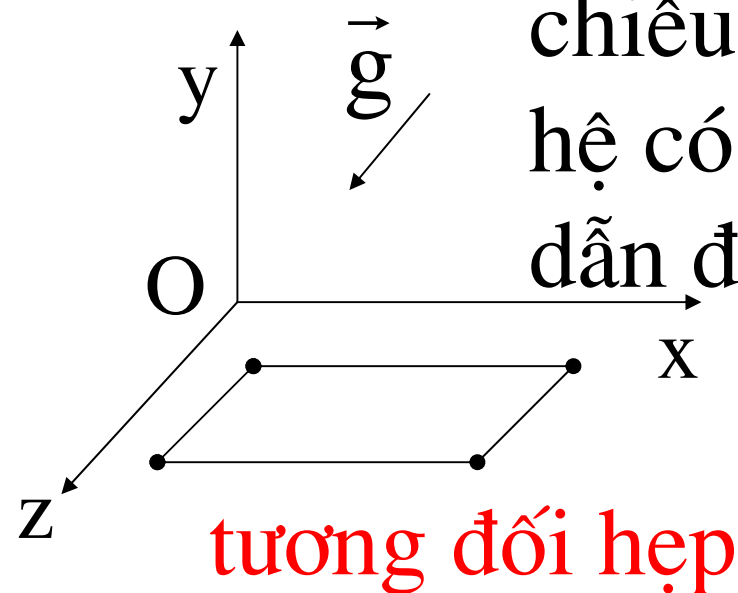
Thuyết tương đối rộng nghiên cứu liên hệ giữa không gian, thời gian và vật chất trong hệ qui chiếu không quán tính bằng cách hình học hoá:

Thuyết tương đối hẹp: Không gian bốn chiều x , y , z và t của hệ qui chiếu quán tính trong trường hấp dẫn là các trục thẳng + hấp dẫn.

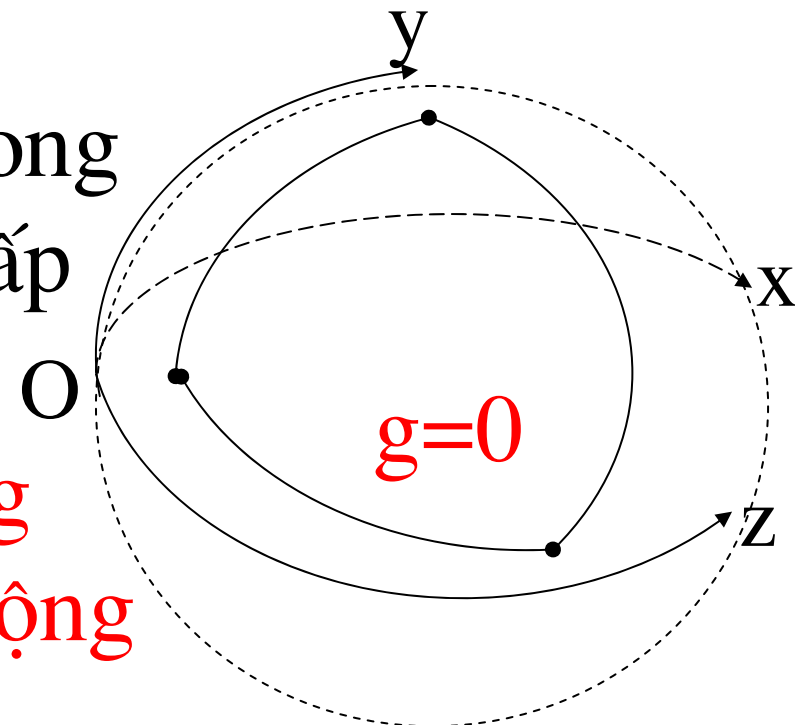
Đường ngắn nhất giữa 2 điểm là đường thẳng trên mặt phẳng -> Không - thời gian phẳng + g.

Thuyết tương đối rộng: Không gian bốn chiều x, y, z và t của hệ qui chiếu không quán tính là các trục cong -> Đường ngắn nhất giữa 2 điểm là đường cong trên mặt cầu -> không - thời gian cong và $g=0$

Không gian ba chiều x, y, z trong hệ có trường hấp dẫn đều



tương đối rộng



Hiệu ứng **cong không - thời gian** thấy rất rõ tại những vật có khối lượng lớn: gần các lỗ đen trong vũ trụ, tại đây mật độ vật chất rất lớn lên đến cỡ 10^{15} lần mật độ vật chất của mặt trời.

-> không - thời gian bị uốn cong mạnh.

-> Ánh sáng bị uốn cong và không thoát khỏi các lỗ đen.