نسبیت خاص:

مفهوم ۴ بردار

$$u^\mu \equiv \frac{dx^\mu}{d\tau} = \frac{dx^\mu}{dt}\cdot\frac{dt}{d\tau} = \gamma(c,\vec{v})$$

$$\vec{v} \equiv \frac{d\vec{x}}{dt}$$ از ناظر همراه $v=0,\ \gamma(v)=1 \rightarrow u^\mu = (c,\vec{0})$

$u^\mu u_\mu = c^2$ ✓ invariant - time-like vector!

حد غیرنسبیتی $v \ll c \rightarrow m_0\vec{v} \sim \vec{p}$

$$p^\mu = m_0 u^\mu = m_0\gamma(c,\vec{v})$$

$$p^0 = m_0\gamma c = m_0 c\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}} \simeq m_0 c\left(1+\frac{1}{2}\left(\frac{v}{c}\right)^2 + O\left(\frac{v}{c}\right)^4\right)$$

$\dots \left(\frac{v}{c}\right)$ ها

$$p^0 \simeq m_0 c + \frac{1}{2} m_0 \frac{1}{c} v^2 + \dots$$

$$cp^0 \simeq m_0 c^2 + \frac{1}{2} m_0 v^2 + \dots$$

ثابت $E_0 = m_0 c^2$

$v=0$ همراه انرژی سکون

$E = cp^0 \equiv m_0 c^2$

۱) انرژی ↑ انرژی جنبشی در حالت کلاسیک تصحیحات انرژی جنبشی

$$p^\mu \equiv m_0 u^\mu \rightarrow p^\mu = \left(\frac{E}{c}, \vec{p}\right)$$ $\vec{p} = m_0\gamma\vec{v}$

(انرژی ، تکانه)

ناوردا است

$p^\mu = m_0\gamma(c,\vec{v})$ $v=0$ $p^\mu\big|_{\text{همراه}} = m_0(c,\vec{0})$

$v=$ $v=$ $v=$

نورگونه $\vec{v} = c$

$$\rightarrow p^\mu p_\mu = m_0^2 c^2 \underset{\text{فوتون}}{=} 0$$

$p^\mu = m_0\gamma(c,c)$

$0\times\infty$

$$p^\mu = \left(\frac{E}{c}, \vec{p}\right)$$

انرژی فوتون صفر نیست ↑

$p^\mu = \left(\frac{h\nu}{\dots}, \vec{p}\right)$ $p^\mu p_\mu = 0$

۳ انرژی تکانه فوتون

$$E_\gamma = h\nu \qquad p^\mu = \left(\frac{h\nu}{c}, \vec{p}\right) \qquad p^\mu p_\mu = 0$$

$$\rightarrow p^\mu = h\left(\frac{\nu}{c}, \frac{1}{\lambda}\hat{n}\right) \qquad \vec{p} = \frac{h\nu}{c}\hat{n} = \frac{h}{\lambda}\hat{n}$$

پایستگی انرژی - جرم ← p^0 ($\mu = 0$)

پایستگی تکانه ← p^i ($\mu = i$)

$$\rightarrow \sum_{i=1}^{N} p_i^\mu = 0 \qquad \text{in} \rightarrow \text{out}$$

$$\sum_{i=1}^{N} P^\mu_{i,\,in} = \sum_{i=1}^{N} P^\mu_{i,\,out} \qquad \text{۴ معادله}$$

$$cp^0 = m_0c^2 + \cdots$$ سرعت

حرکت نداشته باشد $p^0 \rightarrow$ پایستگی جرم

$$p^\mu = \left(\frac{E}{c}, \vec{p}\right) = \left(\frac{h\nu}{c}, \frac{h}{\lambda}\underset{\text{جهت انتشار}}{\hat{n}}\right)$$

$$x^\mu = (ct, \vec{x})$$

$$p^\mu x_\mu = \frac{h\nu}{c}\cdot ct - \frac{h}{\lambda}\hat{n}\cdot\vec{x} \quad (+---) \rightarrow 2\pi p^\mu x_\mu = h\left(2\pi\nu t - \frac{2\pi}{\lambda}\hat{n}\cdot\vec{x}\right)$$

$$= h(\underbrace{\omega t - \vec{k}\cdot\vec{x}}_{\text{phase}}) = \text{invariant} \qquad \vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda}\hat{n}$$

$$\vec{p} \equiv m_0\gamma\vec{v}$$

$$p^\mu = \left(\frac{E}{c}, \vec{p}\right) \rightarrow p_\mu = \left(\frac{E}{c}, -\vec{p}\right) \quad (+---) \qquad \vec{p}\cdot\vec{p} \equiv p^2$$

$$p^\mu p_\mu = m_0^2c^2 = \frac{E^2}{c^2} - p^2 \rightarrow \boxed{E^2 = m_0^2c^4 + p^2c^2}$$

ناوردای انرژی ← ناظر همراه

$$E = m_0c^2 \leftarrow p = 0 \leftarrow v = 0$$ اگر ناظر همراه

$$h\nu = \frac{h}{\lambda}c \longleftrightarrow E = pc \leftarrow m_0 = 0$$ اگر جرم سکون ذره صفر باشد

توضیح: انرژی جنبشی ذره نسبیتی را به دست آورید. $T \simeq \frac{1}{2}m_0v^2$ تقریب است. کل انرژی حرکتی بدین وار است

$$\rightarrow T = E - m_0c^2 = \left(m_0^2c^4 + p^2c^2\right)^{\frac{1}{2}} - m_0c^2$$

$$T = E - m_0 c = (m_0 c + p c) - m_0 c$$

1

$$p^\mu = \gamma m_0 (c, \vec{v}) \qquad m \equiv \gamma m_0$$

$$p^\mu = (mc, m\vec{v}) = \left(\frac{E}{c}, \vec{p}\right)$$

$$p^0 = \frac{E}{c} = mc \rightarrow 2. \quad E = mc^2$$

1,2

$$T = mc^2 - m_0 c^2 = \gamma m_0 c^2 - m_0 c^2 = (\gamma - 1) m_0 c^2$$

$$\rightarrow \frac{T}{m_0 c^2} = \gamma - 1$$

$$\boxed{\frac{c\vec{p}}{E} = \frac{c m \vec{v}}{m c^2} \equiv \beta}$$

E: الطاقة

$$p^\mu p_\mu \rightarrow m_0^2 c^2 \qquad m = \gamma m_0$$

$$p^\mu x_\mu \rightarrow$$

$$u^\mu a_\mu \rightarrow$$

$$p'^\mu = \Lambda^\mu{}_\nu p^\nu \qquad \left(\frac{E}{c}, \vec{p}\right)$$

$$p^\mu \quad S \rightarrow S' \quad x \rightarrow v$$

$$p'^\mu = \Lambda^\mu{}_\nu p^\nu$$

$$\begin{pmatrix} E'/c \\ \vec{p}' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & -\gamma\beta & 0 & 0 \\ -\gamma\beta & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E/c \\ \vec{p} \end{pmatrix}$$