

כוחות היחסות ביחסות

ניתן לחשב את מספר ההצברות שילושית של כוח מן המכניקה. למשל:

$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$ צירך תנגוד:

$W = \int_1^2 \vec{F} \cdot d\vec{x}$ צירך עבודה:

$\vec{F} \cdot \vec{v} = \frac{dE}{dt}$ או אם גזורים בזמן, צירך הספק:

נוגה שהצברות אלה אקויוולנטיות וקונסיסטנטיות עם ההצברות האנרגיה והמפגשים הקולנויים. לעומת זאת, ההצברות: $F = m \frac{d^2x}{dt^2}$ אינה טובה. הפיכה נעוצה ב"ציר שלילי היחסות" אינן קבוצה ויטלקית יתר שנויה במחלוקת.

* כאמור, למי שווה הכוח המועבר בעצרת התנגוד?

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d}{dt} \frac{m_0 \vec{v}}{(1 - v^2/c^2)^{1/2}} = \frac{m_0 \dot{\vec{v}}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} + \frac{m_0 \vec{v}(\vec{v} \cdot \dot{\vec{v}})/c^2}{(1 - v^2/c^2)^{3/2}}$$

מה העבודה לוח' זמן (= הספק) שלגיה ע"י כוח זה? למשל:

$$\frac{dE}{dt} = \underbrace{\vec{F} \cdot \vec{v}}_{\text{הספק}} = \frac{d\vec{p}}{dt} \cdot \vec{v} = \frac{m_0 \dot{\vec{v}} \cdot \vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} + \frac{m_0 (\vec{v} \cdot \dot{\vec{v}}) v^2/c^2}{(1 - v^2/c^2)^{3/2}} =$$

$$= \frac{m_0 (\vec{v} \cdot \dot{\vec{v}})}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \left[1 + \frac{v^2/c^2}{1 - v^2/c^2} \right] = \gamma^3 m_0 (\vec{v} \cdot \dot{\vec{v}})$$

נוצרו גורם משתף.

* מאידך גיסא, מה ההספק המפקח אם משתמשים בהצברות האנרגיה היחסית? ומה התנגוד היחסית?

$$\frac{dE}{dt} = \frac{d}{dt} (\gamma(v) m_0 c^2) = m_0 c^2 \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{(1 - v^2/c^2)^{1/2}} \right) = m_0 c^2 \frac{\vec{v} \cdot \dot{\vec{v}}/c^2}{(1 - v^2/c^2)^{3/2}} = \gamma^3 m_0 (\vec{v} \cdot \dot{\vec{v}})$$

פהיון ההצברות הכוח צירך האנרגיה (עבודה) או צירך התנגוד אקויוולנטיות.

16.1.05

* רצוננו גאון, הוצאת הכוח בדרך התאוצה (הנחה כי המסה קבועה)

והנחתנו שאם המאסה וההצורה בעצרת בינוני תנע או אנרגיה:

$$\vec{F}_{bad} = m \frac{d^2 \vec{x}}{dt^2} = m_0 \gamma \cdot \vec{v}$$

$$\vec{F}_{bad} \cdot \vec{v} = \gamma m_0 (\vec{v} \cdot \vec{v}) \neq \underbrace{\gamma^3 m_0 (\vec{v} \cdot \vec{v})}_{\text{מה שמתקבל קודם}} \quad \text{בקשה ספק שמתקבל:}$$

טקנסורומציה של כוח:

כדי שההתאמה (שהואצרה כנוצרת בזמן & המרחב-זמן) תהיה עקבית (אין עדיפת טיפוס' המערכת המערכת בעצרת העתים' הסטנדרטית של ענייני & 4-וקטורים, כך גם הכוח שאינו מוגדר כארבע וקטור (או כחלק ממנו!) אנו עוברים טיפוס' סטנדרטית.

נראה כיצד הכוח עובד מעניינת \vec{F} בה התאקוף נע באיחור \vec{v}

P מענינת \vec{P} באיחור (שנעה בזמן כוח x יחס \vec{v} - \vec{v} במרחב \vec{v}).

חישוב הטקנסורומציה בוצע מוגז הקיטוב הטקנסורומציה & מניחול:

* נתחיל מהטקנסורומציה לתנע (ולא וקטור) ששומים עבוי מניחול):

$$P'_x = \gamma (P_x - \frac{E}{c} v)$$

$$P'_y = P_y$$

$$P'_z = P_z$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{של} \\ \text{מערכת} \\ \text{(כוח)} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \\ \beta = v/c \end{array}$$

מחשבוניקטור

$$F'_y \equiv \frac{dp'_y}{dt'} = \frac{dp_y}{dt} \cdot \frac{dt}{dt'} = \underbrace{\frac{dp_y}{dt}}_{F_y} / \frac{dt}{dt'}$$

(כוחות)

מניחול

$$\frac{dt}{dt'} = \gamma - \frac{\gamma v}{c} \frac{dx}{dt}$$

$$\left(\Leftarrow t' = \gamma \left(t - \frac{vx}{c} \right) \right)$$

אנרגיה

16.1.05

$$F'_y = \frac{F_y / \frac{dt'}{dt}}{\gamma(1 - \frac{v u_x}{c^2})}$$

אין:

$$F'_x = \frac{\frac{dP'_x}{dt'}}{\frac{dt}{dt'}} = \frac{\gamma \left(\frac{dP_x}{dt} - \frac{v}{c^2} \frac{dE}{dt} \right)}{\gamma \left(1 - \frac{v u_x}{c^2} \right)}$$

$\vec{F} \cdot \vec{v}$ - אולי $\frac{dE}{dt}$ כאן כפי שראינו קראנו #1, נחזיר ב ההסבר

$$F'_x = \frac{F_x - \frac{v}{c^2} (F_x u_x + F_y u_y + F_z u_z)}{\left(1 - \frac{v u_x}{c^2} \right)} = F_x - \frac{\frac{v}{c^2} (u_y F_y + u_z F_z)}{\left(1 - \frac{v u_x}{c^2} \right)}$$

$$F'_x = F_x - \frac{v/c^2 (u_y F_y + u_z F_z)}{\left(1 - v u_x / c^2 \right)}$$

$$F'_y = \frac{F_y}{\gamma \left(1 - \frac{v u_x}{c^2} \right)} \quad F'_z = \frac{F_z}{\gamma \left(1 - \frac{v u_x}{c^2} \right)}$$

כאן:

אם הנושא ננוח, אזי התאוצה במערכת S' היא אפס (כלומר, $\vec{a}' = 0$) העוצמה והתאוצה (כאן) הם זהים

$$F'_x = F_x \quad F'_y = F_y / \gamma \quad F'_z = F_z / \gamma$$

↑
 התאוצה
 ↑
 התאוצה במערכת S'

פאראדאקס און יחסות

1. האצה של חלקיק אטום חשמל קרוי.

(נתון שהכוח החשמלי הוא: $\vec{F}_E = \vec{E} q$ כאלו \vec{E} הוא השדה

החשמלי. ו- q המטען. אם נתון שהחלקיק מתחיל ממנוחה, מהי מהירותו כחלקיק בזמן, במערכת הייחוס? (בה \vec{E} נתון).

$\frac{dP_x}{dt} = F_x = E_x q$ * הגדרת הכוח במערכת הייחוס:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{m_0 v_x}{\sqrt{1 - v_x^2/c^2}} \right) = E_x q$$

(בזמן אקטיוויטי)

$$\frac{m_0 v_x}{\sqrt{1 - v_x^2/c^2}} = E_x q t$$

(אין קבועי אינטגרציה, ציינו הלאו למעלה כי נתון $v(t=0) = 0$)

מה הפונקציה $v_x(t)$ המשוואה היא? כ- v לפחות אולי אולי ציבורים אחרים
אם $v \ll c$ (מה ש v מהצורה:

$$v_x = c \sin \xi$$

אנחנו נחליף: ξ

$$\frac{m_0 c \sin \xi}{\sqrt{1 - \sin^2 \xi}} = \frac{m_0 c \sin \xi}{\cos \xi} = m_0 c \tan \xi \stackrel{\downarrow}{=} E_x q t$$

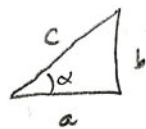
$$\tan \xi = \frac{E_x q t}{c m_0}$$

$$\xi = \tan^{-1} \left(\frac{E_x q t}{c m_0} \right)$$

$$v_x = c \sin \left(\tan^{-1} \left(\frac{E_x q t}{c m_0} \right) \right)$$

אם $\sin(\tan^{-1} b)$?

16.1.05



: עדינות ה' סתו' (Note: This text is written vertically and is difficult to decipher, possibly meaning 'ה' is the hypotenuse')

$$\alpha = \text{tg}^{-1} \frac{b}{a}$$

$$\leftarrow \text{tg} \alpha = \frac{b}{a} \quad : \text{ה' סתו'}$$

$$\sin \alpha = \frac{b}{c}$$

: ה' ע' (Note: This text is written vertically and is difficult to decipher, possibly meaning 'ה' is the hypotenuse')

$$\sin(\text{tg}^{-1} \alpha) = \sin(\text{tg}^{-1} \frac{b}{a}) = \frac{b}{c} = \frac{b}{\sqrt{a^2+b^2}}$$

: ה' ע' (Note: This text is written vertically and is difficult to decipher, possibly meaning 'ה' is the hypotenuse')

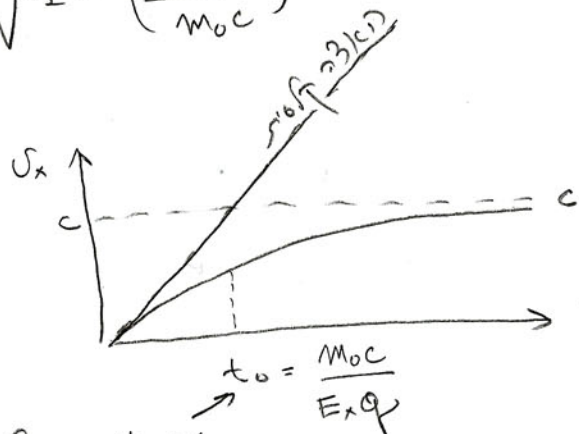
ה' ע' (Note: This text is written vertically and is difficult to decipher, possibly meaning 'ה' is the hypotenuse')

$$\sin(\text{tg}^{-1} b) = \frac{b}{\sqrt{1+b^2}}$$

: ה' ע' $a=1$ (Note: This text is written vertically and is difficult to decipher, possibly meaning 'ה' is the hypotenuse')

: ה' ע' (Note: This text is written vertically and is difficult to decipher, possibly meaning 'ה' is the hypotenuse')

$$v_x = \frac{E_x q t}{m_0} \sqrt{1 + \left(\frac{E_x q t}{m_0 c}\right)^2}$$



: ה' ע' (Note: This text is written vertically and is difficult to decipher, possibly meaning 'ה' is the hypotenuse')

(Note: This text is written vertically and is difficult to decipher, possibly meaning 'ה' is the hypotenuse')

(תורה היא קריאה בה פוטון פוגע בהפרטון במנוחה ויוצרי פרוטון + פיון.

$$\underbrace{p}_{\text{פיון}} + \underbrace{\alpha}_{\text{פוטון}} \rightarrow \underbrace{p + \pi^0}_{\text{פיון}}$$

אנרגיית המנוחה של π^0 היא 135 MeV . (שאלת השאלה, מה האנרגיית פוטון המינימלית הדרושה אז למת שפיון יוכל להיווצר?)

פתרון:

דינמיקת המערכת הפוטון מתחיל עם 4-תנע: $p_p = (0, 0, 0, m_p c)$

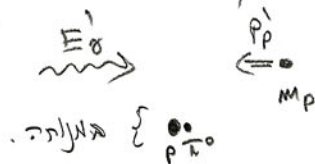
ואילו הפוטון דף 4-תנע: $p_\alpha = (\frac{E_\alpha}{c}, 0, 0, \frac{E_\alpha}{c})$

סה"כ: $p_{p+\alpha} = (\frac{E_\alpha}{c}, 0, 0, \frac{E_\alpha}{c} + m_p c)$

קרא של האנרגיה היא יכולה להיות אמת המנוחה של הפוטון והפיון אחי ההתנגשות הילך ומתערכת יש נטו תנע שהיה להשאר אחי ההתנגשות. זילול לעניין אחרני לעדוץ במערכת מרכז המסה (דה נטו תנע מתאפס) כך ש-

S' : $p'_p + p'_\alpha = (0, 0, 0, E_0)$

וזאת מפני שבמערכת זו אנו כן יכולים לקבוע מצב בו של האנרגיה אחי ההתנגשות היא אמת המנוחה של הפוטון והפיון.



במערכת מרכז המסה:

זילול. אנו חוצים שיקום: $E_0 \geq m_p c^2 + m_\pi c^2$

(שאלת אם כן השאלה, למה שווה E_0 כתלות ב- E_α ו- m_p ?)

כפי לענות עליה, נשתמש בעובדה שב 4-תנע היא אנזוקטל שתיית סתם' קליני

מק"מ: $E^2 - p^2 c^2 = \text{const}$

נדחג את הבטא בשת המערכת.

-7-
16.1.05

$$-E_0^2 = \text{const}$$

במערכת הננו: $p=0$ ולפי:

$$p^2 c^2 - E^2 = \text{const} = -E_0^2$$

ולפי המערכת המצומדת:

$$E = E_\gamma + m_p c^2 \quad - \quad p = \frac{E_\gamma}{c} \quad \text{אולם:}$$

$$E_\gamma^2 - (E_\gamma + m_p c^2)^2 = -E_0^2$$

$$m_p^2 c^4 + 2m_p c^2 E_\gamma = E_0^2$$

$$E_0 = \sqrt{m_p^2 c^4 + 2m_p c^2 E_\gamma} \quad \text{לפיכך:}$$

וכעת נבדוק את האנרגיה הנדרשת לפי המשוואה כדי לייצר פוליון (ולפיכך את הפוליון).

$$E_0 > m_p c^2 + m_\pi c^2$$

$$\cancel{m_p^2 c^4} + 2m_p c^2 E_\gamma > \cancel{m_p^2 c^4} + 2m_p m_\pi c^4 + m_\pi^2 c^2 \quad \text{לפיכך:}$$

$$E_\gamma > \left(1 + \frac{m_\pi}{2m_p}\right) m_\pi c^2$$

אם הפוליון היה גל מסתו און-ספר (בעצם הוא מסתו הפוליון או אנטי-הפוליון) התייחסו לפי המשוואה הנ"ל ונראה כי יש צורך פוליון גמוליה (אנטי-הפוליון) כך שהאנרגיה המינימלית היא $m_\pi c^2$ אולם למטה הפוליון הוא ספר ולכן חייב להיות גם פוליון אנטי-הפוליון (אנטי-הפוליון) והפוליון שנוצר.