Introducció a la teoria especial de la relativitat

Dinàmica

Josep Llosa

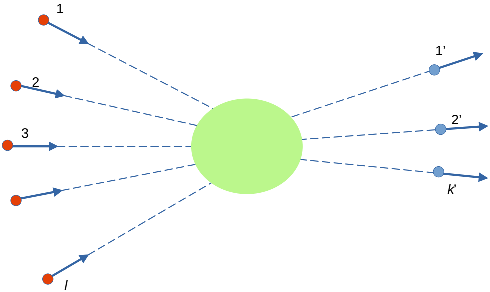
Dept FQA, UB

agost de 2023

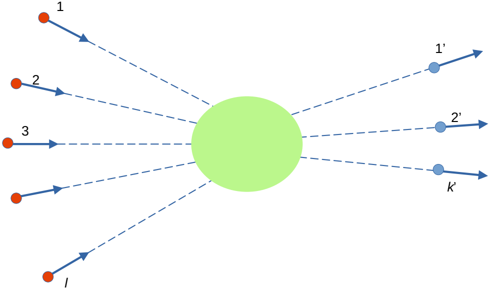
Menú

1. Xocs. Lleis de conservació
   - Moment lineal i energia
2. Aplicacions
   - Emissió i absorció de fotons
   - Fissió nuclear
   - Desintegració β
   - Fusió nuclear
3. Força i acceleració
   - Inèrcia i velocitat

Xocs (teoria newtoniana)



Xocs (teoria newtoniana)



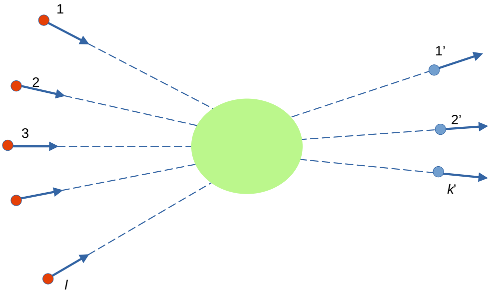
Moment lineal

$$\boxed{\mathbf{p} = m\,\mathbf{v}}$$

Energia cinètica

$$\boxed{K = \frac{1}{2}\,m\,\mathbf{v}^2}$$

Xocs (teoria newtoniana)



Moment lineal

$$\boxed{\mathbf{p} = m\,\mathbf{v}}$$

Energia cinètica

$$\boxed{K = \frac{1}{2}\,m\,\mathbf{v}^2}$$

Lleis de conservació

Moment lineal total: $\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 + \ldots \mathbf{p}_l = \mathbf{p}'_1 + \mathbf{p}'_2 + \ldots \mathbf{p}'_k$

Massa total: $m_1 + m_2 + \ldots m_l = m'_1 + m'_2 + \ldots m'_k$

Si també es conserva l'energia cinètica total, en diem *xoc elàstic*

Xocs (mecànica relativista)

La llei $\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 + \dots \mathbf{p}_l = \mathbf{p}'_1 + \mathbf{p}'_2 + \dots \mathbf{p}'_k$ no és *invariant Lorentz*.

Xocs (mecànica relativista)

La llei $\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 + \ldots \mathbf{p}_l = \mathbf{p}'_1 + \mathbf{p}'_2 + \ldots \mathbf{p}'_k$ no és *invariant Lorentz*.

Si modifiquem la definició $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$, podem aconseguir que la llei sigui invariant i l'única definició de moment lineal que ho aconsegueix és

$$\boxed{\mathbf{p} = \frac{m\mathbf{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}}$$

Xocs (mecànica relativista)

La llei $\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 + \ldots \mathbf{p}_l = \mathbf{p}'_1 + \mathbf{p}'_2 + \ldots \mathbf{p}'_k$ no és *invariant Lorentz*.

Si modifiquem la definició $\mathbf{p} = m\,\mathbf{v}$, podem aconseguir que la llei sigui invariant i l'única definició de moment lineal que ho aconsegueix és

$$\boxed{\mathbf{p} = \frac{m\,\mathbf{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}}$$

Conseqüència directa de la nova llei de conservació

També es conserva la suma $\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \ldots \mathcal{E}_l = \mathcal{E}'_1 + \mathcal{E}'_2 \ldots \mathcal{E}'_k$ amb

$$\mathcal{E} = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Xocs (mecànica relativista)

La llei $\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 + \dots \mathbf{p}_l = \mathbf{p}'_1 + \mathbf{p}'_2 + \dots \mathbf{p}'_k$ no és *invariant Lorentz*.

Si modifiquem la definició $\mathbf{p} = m\,\mathbf{v}$, podem aconseguir que la llei sigui invariant i l'única definició de moment lineal que ho aconsegueix és

$$\boxed{\mathbf{p} = \frac{m\,\mathbf{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}}$$

Conseqüència directa de la nova llei de conservació

També es conserva la suma $\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \dots \mathcal{E}_l = \mathcal{E}'_1 + \mathcal{E}'_2 \dots \mathcal{E}'_k$ amb

$$\mathcal{E} = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$\mathcal{E}$ té dimensions d'energia i en diem *energia* però fins aquí encara no s'ha guanyat el dret a dir-se'n.

Moment lineal i energia

A baixes velocitats ($v \ll c$): $\qquad \mathbf{p} \approx m\,\mathbf{v} \qquad$ i $\qquad \mathcal{E} \approx m\,c^2$

Moment lineal i energia

A baixes velocitats ($v \ll c$): $\quad \mathbf{p} \approx m\,\mathbf{v} \quad$ i $\quad \mathcal{E} \approx m\,c^2$

i $\quad \dfrac{p - mv}{p} = O\left(\dfrac{v^2}{c^2}\right) \quad$ i $\quad \dfrac{\mathcal{E} - mc^2}{\mathcal{E}} = O\left(\dfrac{v^2}{c^2}\right)$

Moment lineal i energia

A baixes velocitats ($v \ll c$): $\mathbf{p} \approx m\,\mathbf{v}$ i $\mathcal{E} \approx m\,c^2$

i $$\frac{p - mv}{p} = O\left(\frac{v^2}{c^2}\right) \quad \text{i} \quad \frac{\mathcal{E} - mc^2}{\mathcal{E}} = O\left(\frac{v^2}{c^2}\right)$$

Si afinem més: $\mathcal{E} \approx m\,c^2 + \frac{1}{2}mv^2$

Moment lineal i energia

A baixes velocitats ($v \ll c$): $\mathbf{p} \approx m\,\mathbf{v}$ i $\mathcal{E} \approx m\,c^2$

i $$\frac{p - mv}{p} = O\left(\frac{v^2}{c^2}\right) \quad \text{i} \quad \frac{\mathcal{E} - mc^2}{\mathcal{E}} = O\left(\frac{v^2}{c^2}\right)$$

Si afinem més: $\mathcal{E} \approx m\,c^2 + \frac{1}{2}mv^2$

De la fórmula tenim que $\mathcal{E} \geq m\,c^2$, i distingim:

- l'*energia cinètica* $\mathcal{K} = \mathcal{E} - mc^2 \geq 0$,
- de l'*energia en repòs* mc^2 .

Conversió massa-energia

- Moment $\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 + \ldots = \mathbf{p}'_1 + \mathbf{p}'_2 + \ldots$
- Energia $\left(\mathcal{K}_1 + m_1 c^2\right) + \left(\mathcal{K}_2 + m_2 c^2\right) + \ldots = \left(\mathcal{K}'_1 + m'_1 c^2\right) + \left(\mathcal{K}'_2 + m'_2 c^2\right) \ldots$

Conversió massa-energia

- Moment $\quad \mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 + \ldots = \mathbf{p}'_1 + \mathbf{p}'_2 + \ldots$
- Energia $\quad \left(\mathcal{K}_1 + m_1 c^2\right) + \left(\mathcal{K}_2 + m_2 c^2\right) + \ldots = \left(\mathcal{K}'_1 + m'_1 c^2\right) + \left(\mathcal{K}'_2 + m'_2 c^2\right) \ldots$

No garanteixen que es conservi la massa i que sigui nul el *defecte de massa*,

$$\Delta m = m_1 + m_2 + \ldots - (m'_1 + m'_2 + \ldots)$$

Conversió massa-energia

- Moment $\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 + \ldots = \mathbf{p}'_1 + \mathbf{p}'_2 + \ldots$
- Energia $\left(\mathcal{K}_1 + m_1 c^2\right) + \left(\mathcal{K}_2 + m_2 c^2\right) + \ldots = \left(\mathcal{K}'_1 + m'_1 c^2\right) + \left(\mathcal{K}'_2 + m'_2 c^2\right) \ldots$

No garanteixen que es conservi la massa i que sigui nul el *defecte de massa*,

$$\Delta m = m_1 + m_2 + \ldots - (m'_1 + m'_2 + \ldots)$$

Si $\Delta m = 0$, *xoc elàstic* i si $\Delta m \neq 0$, *xoc inelàstic*. En general,

$$\mathcal{K}'_1 + \mathcal{K}'_2 + \ldots - (\mathcal{K}_1 + \mathcal{K}_2 + \ldots) - \Delta m\, c^2 = 0$$

L'energia cinètica i l'energia en repós no es conserven per separat però la suma sí. Es poden transformar l'una en l'altra

Dues identitats. Massa pròpia

- $\mathbf{p}^2 c^2 - \mathcal{E}^2 = m^2 c^4 \,,$ és una identitat i val el mateix en tots els sistemes de referència inercials (invariant). m s'anomena **massa pròpia**

Dues identitats. Massa pròpia

- $\mathbf{p}^2 c^2 - \mathcal{E}^2 = m^2 c^4\,,$ és una identitat i val el mateix en tots els sistemes de referència inercials (invariant). m s'anomena **massa pròpia**

- $\dfrac{\mathbf{p}\,c}{\mathcal{E}} = \dfrac{\mathbf{v}}{c}$

Dues identitats. Massa pròpia

- $\mathbf{p}^2 c^2 - \mathcal{E}^2 = m^2 c^4$, és una identitat i val el mateix en tots els sistemes de referència inercials (invariant). m s'anomena **massa pròpia**

- $\dfrac{\mathbf{p}\, c}{\mathcal{E}} = \dfrac{\mathbf{v}}{c}$

- Si un cos va a la velocitat de la llum, $|\mathbf{v}| = c$ i així

$$c\,|\mathbf{p}| = \mathcal{E} \qquad \text{i} \qquad m^2 c^4 = 0$$

Dues identitats. Massa pròpia

- $\mathbf{p}^2 c^2 - \mathcal{E}^2 = m^2 c^4$, és una identitat i val el mateix en tots els sistemes de referència inercials (invariant). m s'anomena **massa pròpia**

- $\dfrac{\mathbf{p}\, c}{\mathcal{E}} = \dfrac{\mathbf{v}}{c}$

- Si un cos va a la velocitat de la llum, $|\mathbf{v}| = c$ i així

$$c\,|\mathbf{p}| = \mathcal{E} \qquad \text{i} \qquad m^2 c^4 = 0$$

El fotó té massa nul·la però té moment lineal i energia cinètica

Passa el mateix amb altres partícules de massa nul·la

Emissió d'un fotó

- Per un àtom: $A_1 \to A_2 + \gamma$

Emissió d'un fotó

- Per un àtom: $A_1 \to A_2 + \gamma$

  En el sistema estacionari de l'emissor, $\mathcal{E}_1 = m_1\,c^2$ i $\mathbf{p}_1 = 0\,.$

Emissió d'un fotó

- Per un àtom: $A_1 \rightarrow A_2 + \gamma$

  En el sistema estacionari de l'emissor, $\mathcal{E}_1 = m_1\, c^2$ i $\mathbf{p}_1 = 0$.

  L'energia cinètica dels productes és positiva i la seva energia total serà $> m_2 c^2$.

Emissió d'un fotó

- Per un àtom: $A_1 \to A_2 + \gamma$

  En el sistema estacionari de l'emissor, $\mathcal{E}_1 = m_1 c^2$ i $\mathbf{p}_1 = 0$.

  L'energia cinètica dels productes és positiva i la seva energia total serà $> m_2 c^2$.

  Per tant, $m_1 > m_2$ és condició necessària perquè hi hagi emissió: en aquest procés l'energia interna de l'àtom disminueix.

Emissió d'un fotó

- Per un àtom: $A_1 \to A_2 + \gamma$

  En el sistema estacionari de l'emissor, $\mathcal{E}_1 = m_1\,c^2$ i $\mathbf{p}_1 = 0$.

  L'energia cinètica dels productes és positiva i la seva energia total serà $> m_2 c^2$.

  Per tant, $m_1 > m_2$ és condició necessària perquè hi hagi emissió: en aquest procés l'energia interna de l'àtom disminueix.

  Un mateix àtom (o nucli) pot tenir diferent massa pròpia si canvia el seu estat intern.

Emissió d'un fotó

- Per un àtom: $A_1 \to A_2 + \gamma$

  En el sistema estacionari de l'emissor, $\mathcal{E}_1 = m_1\, c^2$ i $\mathbf{p}_1 = 0$.

  L'energia cinètica dels productes és positiva i la seva energia total serà $> m_2 c^2$.

  Per tant, $m_1 > m_2$ és condició necessària perquè hi hagi emissió: en aquest procés l'energia interna de l'àtom disminueix.

  Un mateix àtom (o nucli) pot tenir diferent massa pròpia si canvia el seu estat intern.

- Per un electró lliure: $e \to e + \gamma$

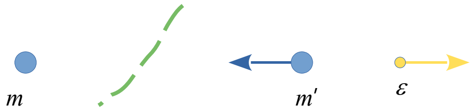
  És impossible perquè l'electró lliure no té estructura interna i la massa és la mateixa abans que després, $m_1 = m_2$.

Absorció ressonant

Pot un àtom absorbir un fotó emès per un altre àtom del mateix element?

Absorció ressonant

Pot un àtom absorbir un fotó emès per un altre àtom del mateix element?

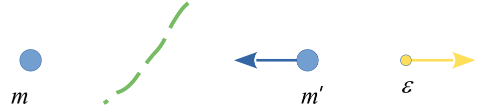


Emissió d'un fotó

$$\boxed{\varepsilon = \Delta m\, c^2\, \frac{m+m'}{2m}}$$

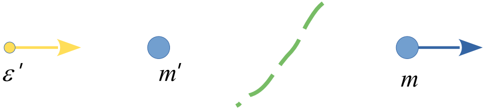
Absorció ressonant

Pot un àtom absorbir un fotó emès per un altre àtom del mateix element?



Emissió d'un fotó

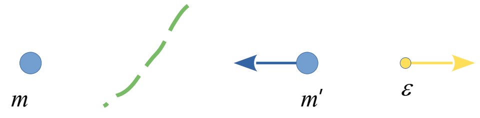
$$\boxed{\varepsilon = \Delta m\, c^2\, \frac{m+m'}{2m}}$$



Absorció d'un fotó

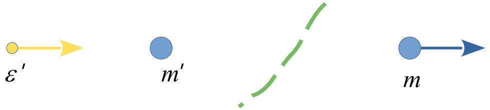
$$\boxed{\varepsilon' = \Delta m\, c^2\, \frac{m+m'}{2m'}}$$

Pot un àtom absorbir un fotó emès per un altre àtom del mateix element?



Emissió d'un fotó

$$\boxed{\varepsilon = \Delta m\, c^2\, \frac{m+m'}{2m}}$$



Absorció d'un fotó

$$\boxed{\varepsilon' = \Delta m\, c^2\, \frac{m+m'}{2m'}}$$

$$\frac{\varepsilon'}{\varepsilon} = \frac{m}{m'} > 1$$

El fotó emès no pot ser absorbit perquè té menys energia de la necessària.

Absorció ressonant (2)

$$\frac{\varepsilon' - \varepsilon}{\varepsilon'} = \frac{m - m'}{m}$$

Absorció ressonant (2)

$$\frac{\varepsilon' - \varepsilon}{\varepsilon'} = \frac{m - m'}{m}$$

$$\varepsilon = h\,f = \frac{h\,c}{\lambda}$$

L'amplada de la ratlla espectral vol dir incertesa en ε .

Absorció ressonant (2)

$$\frac{\varepsilon' - \varepsilon}{\varepsilon'} = \frac{m - m'}{m}$$

$$\varepsilon = h f = \frac{h c}{\lambda}$$

L'amplada de la ratlla espectral vol dir incertesa en ε .

Si m és gran, $\varepsilon' - \varepsilon$ és petit i, si és més petit que l'amplada de la ratlla espectral es pot produir l'*absorció ressonant*. Això és corrent en les emissions atòmiques.

Absorció ressonant (2)

$$\frac{\varepsilon' - \varepsilon}{\varepsilon'} = \frac{m - m'}{m}$$

$$\varepsilon = h\,f = \frac{h\,c}{\lambda}$$

L'amplada de la ratlla espectral vol dir incertesa en ε .

Si m és gran, $\varepsilon' - \varepsilon$ és petit i, si és més petit que l'amplada de la ratlla espectral es pot produir l'*absorció ressonant*. Això és corrent en les emissions atòmiques.

Per a nuclis en estat sòlid a molt baixa temperatura, el nucli és solidari amb tota la xarxa i m és la massa d'aquesta (Efecte Mössbauer).

Fissió nuclear

Per què uns nuclis es desintegren i altres no?

Fissió nuclear

Per què uns nuclis es desintegren i altres no?

La massa del nucli és menor que la suma de les masses del protons i els neutrons que el componen.

Fissió nuclear

Per què uns nuclis es desintegren i altres no?

La massa del nucli és menor que la suma de les masses del protons i els neutrons que el componen.

L'energia d'enllaç és negativa ($-E$) i contribueix a la massa en $-E/c^2$.

Fissió nuclear

Per què uns nuclis es desintegren i altres no?

La massa del nucli és menor que la suma de les masses del protons i els neutrons que el componen.

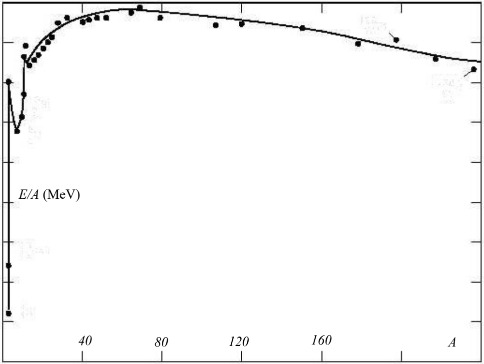
L'energia d'enllaç és negativa ($-E$) i contribueix a la massa en $-E/c^2$.

$^A_Z X$ $\left(^{235}_{92} U \right)$

A: nombre màssic

Z: nombre atòmic

$-E/A$: energia d'enllaç per nucleó



Fissió nuclear

És possible la desintegració $\quad {}^{A}_{Z}X \to {}^{A_1}_{Z_1}Y + {}^{A_2}_{Z_2}W \quad ?$

Fissió nuclear

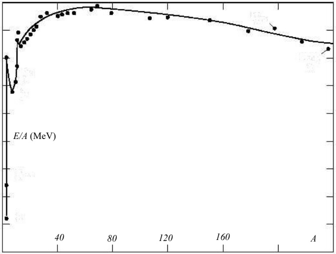
És possible la desintegració $\quad {}^{A}_{Z}X \to {}^{A_1}_{Z_1}Y + {}^{A_2}_{Z_2}W \quad ?$

Conservació de nombres màssic i atòmic: $\quad Z = Z_1 + Z_2\,, \quad A = A_1 + A_2$

Fissió nuclear

És possible la desintegració $\;{}^{A}_{Z}X \to {}^{A_1}_{Z_1}Y + {}^{A_2}_{Z_2}W\;$?

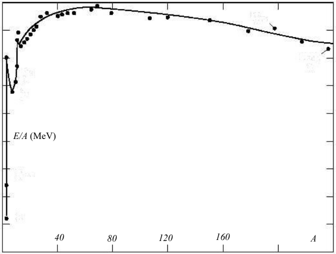
Conservació de nombres màssic i atòmic: $\quad Z = Z_1 + Z_2\,, \quad A = A_1 + A_2$



Fissió nuclear

És possible la desintegració $\,^{A}_{Z}X \to \,^{A_1}_{Z_1}Y + \,^{A_2}_{Z_2}W$?

Conservació de nombres màssic i atòmic: $Z = Z_1 + Z_2\,, \quad A = A_1 + A_2$



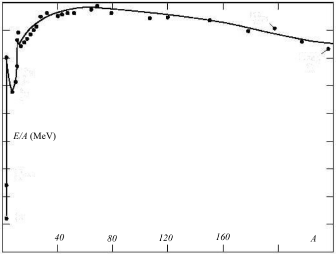
Massa de cada nucli:

$$m_j = Z_j m_\mathrm{p} + (A_j - Z_j) m_\mathrm{n} - A_j \frac{E(A_j)}{c^2}$$

Fissió nuclear

És possible la desintegració $\quad {}^{A}_{Z}X \to {}^{A_1}_{Z_1}Y + {}^{A_2}_{Z_2}W \quad$?

Conservació de nombres màssic i atòmic: $\quad Z = Z_1 + Z_2\,, \quad A = A_1 + A_2$



Massa de cada nucli:

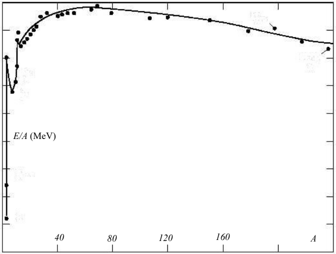
$$m_j = Z_j m_{\rm p} + (A_j - Z_j) m_{\rm n} - A_j \frac{E(A_j)}{c^2}$$

$$\Delta m\, c^2 = (m_X - m_1 - m_2)\; c^2 > 0 \qquad (?)$$

Fissió nuclear

És possible la desintegració $\ {}^{A}_{Z}X \to {}^{A_1}_{Z_1}Y + {}^{A_2}_{Z_2}W$?

Conservació de nombres màssic i atòmic: $Z = Z_1 + Z_2\,, \quad A = A_1 + A_2$



Massa de cada nucli:

$$m_j = Z_j m_{\rm p} + (A_j - Z_j) m_{\rm n} - A_j \frac{E(A_j)}{c^2}$$

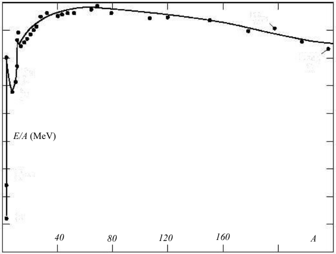
$$\Delta m\, c^2 = (m_X - m_1 - m_2)\; c^2 > 0 \qquad (?)$$

$$-AE(A) + A_1 E(A_1) + A_2 E(A_2) > 0 \qquad (?)$$

Fissió nuclear

És possible la desintegració $\;{}^{A}_{Z}X \to {}^{A_1}_{Z_1}Y + {}^{A_2}_{Z_2}W\;$?

Conservació de nombres màssic i atòmic: $\quad Z = Z_1 + Z_2\,, \quad A = A_1 + A_2$



Massa de cada nucli:

$$m_j = Z_j m_{\rm p} + (A_j - Z_j) m_{\rm n} - A_j \frac{E(A_j)}{c^2}$$

$$\Delta m\, c^2 = (m_X - m_1 - m_2)\; c^2 > 0 \qquad (?)$$

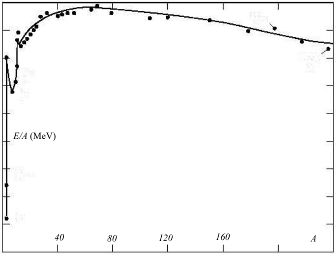
$$-AE(A) + A_1 E(A_1) + A_2 E(A_2) > 0 \qquad (?)$$

$$A_1\,[E(A) - E(A_1)] + A_2\,[E(A) - E(A_2)] < 0$$

Fissió nuclear

És possible la desintegració $\;{}^{A}_{Z}X \to {}^{A_1}_{Z_1}Y + {}^{A_2}_{Z_2}W\;$?

Conservació de nombres màssic i atòmic: $\quad Z = Z_1 + Z_2\,, \quad A = A_1 + A_2$



Massa de cada nucli:

$$m_j = Z_j m_{\rm p} + (A_j - Z_j) m_{\rm n} - A_j \frac{E(A_j)}{c^2}$$

$$\Delta m\, c^2 = (m_X - m_1 - m_2)\; c^2 > 0 \qquad (?)$$

$$-AE(A) + A_1 E(A_1) + A_2 E(A_2) > 0 \qquad (?)$$

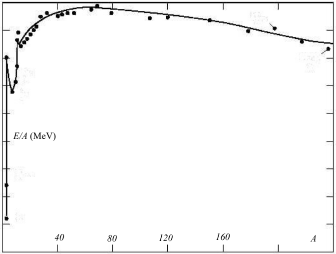
$$A_1\,[E(A) - E(A_1)] + A_2\,[E(A) - E(A_2)] < 0$$

Si A és prop del màxim (^{56}Fe , ^{63}Cu) el nucli és estable

Fissió nuclear

És possible la desintegració $\; {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A_1}_{Z_1}Y + {}^{A_2}_{Z_2}W \quad ?$

Conservació de nombres màssic i atòmic: $\quad Z = Z_1 + Z_2\,, \quad A = A_1 + A_2$



Massa de cada nucli:

$$m_j = Z_j m_{\rm p} + (A_j - Z_j) m_{\rm n} - A_j \frac{E(A_j)}{c^2}$$

$$\Delta m\, c^2 = (m_X - m_1 - m_2)\; c^2 > 0 \qquad (?)$$

$$-AE(A) + A_1 E(A_1) + A_2 E(A_2) > 0 \qquad (?)$$

$$A_1\,[E(A) - E(A_1)] + A_2\,[E(A) - E(A_2)] < 0$$

Si A és prop del màxim (^{56}Fe , ^{63}Cu) el nucli és estable

Si $E(A)$ és més gran que per als A's anteriors (p. ex. ^{4}He), també és estable.

La desintegració β i el neutrino

En l'emissió β: $\quad {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + e^{-}$

s'observa que l'energia cinètica de l'electró $\mathcal{K}_e$ pren valors en un espectre continu entre 0 i un valor màxim.

La desintegració β i el neutrino

En l'emissió β: $${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + e^{-}$$

s'observa que l'energia cinètica de l'electró $\mathcal{K}_e$ pren valors en un espectre continu entre 0 i un valor màxim.

Contra el que prediu la llei de conservació: $$\mathcal{K}_e = \frac{(m_X - m_e)^2 - m_Y^2}{2M_X}\,c^2$$

La desintegració β i el neutrino

En l'emissió β: $${}^{A}_{Z}X \to {}^{A}_{Z+1}Y + e^-$$

s'observa que l'energia cinètica de l'electró $\mathcal{K}_e$ pren valors en un espectre continu entre 0 i un valor màxim.

Contra el que prediu la llei de conservació: $$\mathcal{K}_e = \frac{(m_X - m_e)^2 - m_Y^2}{2M_X}\, c^2$$

Pauli (1930) proposa com a explicació que hi ha una tercera partícula, el *neutrino*, que ha de ser neutra i per això és difícil de detectar.

La desintegració β i el neutrino

En l'emissió β: $\quad {}^A_Z X \to {}^{A}_{Z+1} Y + e^-$

s'observa que l'energia cinètica de l'electró $\mathcal{K}_e$ pren valors en un espectre continu entre 0 i un valor màxim.

Contra el que prediu la llei de conservació: $\quad \mathcal{K}_e = \dfrac{(m_X - m_e)^2 - m_Y^2}{2M_X}\, c^2$

Pauli (1930) proposa com a explicació que hi ha una tercera partícula, el *neutrino*, que ha de ser neutra i per això és difícil de detectar.

$$n \to p + e^- + \bar{\nu}\,, \qquad \mathcal{K}_e \leq \frac{(m_X - m_e)^2 - (m_Y + m_\nu)^2}{2M_X}\, c^2$$

La desintegració β i el neutrino

En l'emissió β: $${}^A_Z X \to {}^{\;\,A}_{Z+1} Y + e^-$$

s'observa que l'energia cinètica de l'electró $\mathcal{K}_e$ pren valors en un espectre continu entre 0 i un valor màxim.

Contra el que prediu la llei de conservació: $$\mathcal{K}_e = \frac{(m_X - m_e)^2 - m_Y^2}{2M_X}\, c^2$$

Pauli (1930) proposa com a explicació que hi ha una tercera partícula, el *neutrino*, que ha de ser neutra i per això és difícil de detectar.

$$n \to p + e^- + \bar{\nu}\,, \qquad \mathcal{K}_e \leq \frac{(m_X - m_e)^2 - (m_Y + m_\nu)^2}{2M_X}\, c^2$$

Cowan i Reines (1956) van detectar els antineutrinos prop d'un reactor nuclear perquè exciten la reacció inversa (β^+)

$$\bar{\nu} + p \to n + e^+$$

Fusió nuclear

$$^{1}\mathrm{H} + {}^{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{2}\mathrm{H} + \mathrm{e}^{+} + \nu + 0,42\,\mathrm{MeV}\,, \qquad \mathrm{e}^{+} + \mathrm{e}^{-} \rightarrow 2\,\gamma + 1,2\,\mathrm{MeV}$$

$$^{2}\mathrm{H} + {}^{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{3}\mathrm{He} + \gamma + 5,49\,\mathrm{MeV}$$

$$^{3}\mathrm{He} + {}^{3}\mathrm{He} \rightarrow {}^{4}\mathrm{He} + {}^{1}\mathrm{H} + {}^{1}\mathrm{H} + 12,86\,\mathrm{MeV}$$

Fusió nuclear

$$^1\mathrm{H} + ^1\mathrm{H} \to ^2\mathrm{H} + \mathrm{e}^+ + \nu + 0,42\,\mathrm{MeV}\,, \qquad \mathrm{e}^+ + \mathrm{e}^- \to 2\,\gamma + 1,2\,\mathrm{MeV}$$

$$^2\mathrm{H} + ^1\mathrm{H} \to ^3\mathrm{He} + \gamma + 5,49\,\mathrm{MeV}$$

$$^3\mathrm{He} + ^3\mathrm{He} \to ^4\mathrm{He} + ^1\mathrm{H} + ^1\mathrm{H} + 12,86\,\mathrm{MeV}$$

$$^4\mathrm{He} + ^4\mathrm{He} \leftrightarrow ^8\mathrm{Be}\,, \qquad ^8\mathrm{Be} + ^4\mathrm{He} \to ^{12}\mathrm{C} + \gamma + 7,367\,\mathrm{MeV}$$

Forces

La mateixa relació que en la mecànica newtoniana, però

$$\boxed{\mathbf{F} = \frac{\mathrm{d}\mathbf{p}}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{m\,\mathbf{v}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\right)}$$

Forces

La mateixa relació que en la mecànica newtoniana, però

$$\boxed{\mathbf{F} = \frac{\mathrm{d}\mathbf{p}}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{m\,\mathbf{v}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\right)}$$

Aplicant una força, per gran que sigui, mai podrem accelerar un objecte a una velocitat igual o superior a c

Forces

La mateixa relació que en la mecànica newtoniana, però

$$\boxed{\mathbf{F} = \frac{\mathrm{d}\mathbf{p}}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{m\,\mathbf{v}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\right)}$$

Aplicant una força, per gran que sigui, mai podrem accelerar un objecte a una velocitat igual o superior a c

Massa longitudinal i massa transversal

$$\mathbf{F}_{\|} = m\gamma^3\,\mathbf{a}_{\|}\,, \qquad \mathbf{F}_{\perp} = m\gamma\,\mathbf{a}_{\perp}$$

La inèrcia del cos a ser accelerat augmenta més amb la velocitat que la inèrcia a canviar la direcció del moviment.

Forces

La mateixa relació que en la mecànica newtoniana, però

$$\boxed{\mathbf{F} = \frac{\mathrm{d}\mathbf{p}}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{m\,\mathbf{v}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\right)}$$

Aplicant una força, per gran que sigui, mai podrem accelerar un objecte a una velocitat igual o superior a c

Massa longitudinal i massa transversal

$$\mathbf{F}_{\|} = m\gamma^3\,\mathbf{a}_{\|}\,, \qquad\qquad \mathbf{F}_{\perp} = m\gamma\,\mathbf{a}_{\perp}$$

La inèrcia del cos a ser accelerat augmenta més amb la velocitat que la inèrcia a canviar la direcció del moviment.

Potència i energia

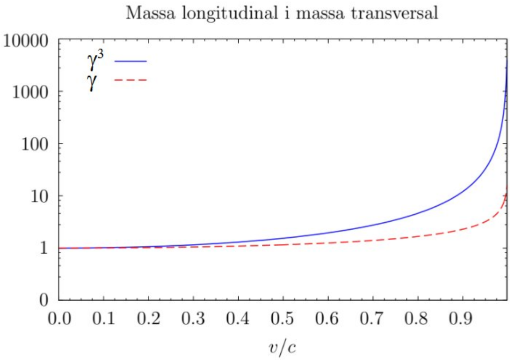
$$\mathbf{F}\cdot\mathbf{v} = m\gamma^3\,\mathbf{a}\cdot\mathbf{v} = \frac{\mathrm{d}\mathcal{E}}{\mathrm{d}t}$$

La inèrcia i la velocitat

$$M_\perp = m\gamma\,, \qquad \text{i} \qquad M_\| = m\gamma^3\,, \qquad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$$

La inèrcia i la velocitat

$$M_\perp = m\gamma\,, \qquad \text{i} \qquad M_\parallel = m\gamma^3\,, \qquad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$$



v/c	γ	γ^3
0,40	1,09	1,30
0,80	1,67	4,63
0,90	2,3	12,1
0,95	3,2	32,1
0,99	7,1	356,2
0,998	15,8	3958,8

Gràcies per la vostra atenció
i fins demà