Relativité restreinte : dynamique

IPhO 2017

Expressions de l'énergie d'une particule et de sa quantité de mouvement

- Soit une particule de masse m

Expressions de l'énergie d'une particule et de sa quantité de mouvement

- Soit une particule de masse m
- Si elle est immobile dans un référentiel $\mathcal{R}$ sa quantité de mouvement est nulle $\overrightarrow{p} = \overrightarrow{0}$ mais son énergie est donnée par la célèbre relation d'Einstein

$$E_0 = mc^2$$

Expressions de l'énergie d'une particule et de sa quantité de mouvement

- Soit une particule de masse m
- Si elle est immobile dans un référentiel $\mathcal{R}$ sa quantité de mouvement est nulle $\overrightarrow{p} = \overrightarrow{0}$ mais son énergie est donnée par la célèbre relation d'EINSTEIN

$$E_0 = mc^2$$

- Cette énergie est l'énergie de repos

Expressions de l'énergie d'une particule et de sa quantité de mouvement

- Si la particule est animée d'une vitesse $\overrightarrow{v}$ dans le référentiel $\mathcal{R}$, on lui associe son coefficient relativiste

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

Expressions de l'énergie d'une particule et de sa quantité de mouvement

- Si la particule est animée d'une vitesse $\overrightarrow{v}$ dans le référentiel $\mathcal{R}$, on lui associe son coefficient relativiste

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

- À ne pas confondre avec celui vu précédemment lors des changements de référentiels

Expressions de l'énergie d'une particule et de sa quantité de mouvement

- Si la particule est animée d'une vitesse $\overrightarrow{v}$ dans le référentiel $\mathcal{R}$, on lui associe son coefficient relativiste

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

- À ne pas confondre avec celui vu précédemment lors des changements de référentiels
- Sa quantité de mouvement n'est plus $\overrightarrow{p} = m\overrightarrow{v}$ mais

$$\overrightarrow{p} = \gamma m \overrightarrow{v}.$$

Expressions de l'énergie d'une particule et de sa quantité de mouvement

- Si la particule est animée d'une vitesse $\overrightarrow{v}$ dans le référentiel $\mathcal{R}$, on lui associe son coefficient relativiste
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$
- À ne pas confondre avec celui vu précédemment lors des changements de référentiels
- Sa quantité de mouvement n'est plus $\overrightarrow{p} = m\overrightarrow{v}$ mais
$$\overrightarrow{p} = \gamma m \overrightarrow{v}.$$
- Si $v \ll c$ on retrouve l'expression classique.

Expressions de l'énergie d'une particule et de sa quantité de mouvement

- Si la particule est animée d'une vitesse $\overrightarrow{v}$ dans le référentiel $\mathcal{R}$, on lui associe son coefficient relativiste

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

- À ne pas confondre avec celui vu précédemment lors des changements de référentiels
- Sa quantité de mouvement n'est plus $\overrightarrow{p} = m\overrightarrow{v}$ mais

$$\overrightarrow{p} = \gamma m \overrightarrow{v}.$$

- Si $v \ll c$ on retrouve l'expression classique.
- Si v tend vers c, $\overrightarrow{p}$ n'est pas bornée alors que la vitesse l'est !

Expressions de l'énergie d'une particule et de sa quantité de mouvement

- Son énergie est alors
$$E = \gamma mc^2.$$

Expressions de l'énergie d'une particule et de sa quantité de mouvement

- Son énergie est alors
$$E = \gamma mc^2.$$
- Cette énergie est la somme de son énergie de repos mc^2 et de son énergie de mouvement : énergie cinétique E_c, d'où

Expressions de l'énergie d'une particule et de sa quantité de mouvement

- Son énergie est alors
$$E = \gamma mc^2.$$
- Cette énergie est la somme de son énergie de repos mc^2 et de son énergie de mouvement : énergie cinétique E_c, d'où
-
$$E_c = (\gamma - 1)\, mc^2$$

Expressions de l'énergie d'une particule et de sa quantité de mouvement

- Son énergie est alors
$$E = \gamma mc^2.$$
- Cette énergie est la somme de son énergie de repos mc^2 et de son énergie de mouvement : énergie cinétique E_c, d'où
- $$E_c = (\gamma - 1)\, mc^2$$
- Si $v \ll c$ on retrouve l'expression classique $\frac{1}{2}mv^2$.

Relation entre l'énergie d'une particule et sa quantité de mouvement

- On montre que l'énergie d'une particule et sa quantité de mouvement son liées par

Relation entre l'énergie d'une particule et sa quantité de mouvement

- On montre que l'énergie d'une particule et sa quantité de mouvement son liées par
- $$E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$$

Cas du photon

- Pour un photon $m = 0$, mais sa vitesse est $v = c$.

Cas du photon

- Pour un photon $m = 0$, mais sa vitesse est $v = c$.
- Un photon n'a pas d'énergie de repos car il est nécessairement en mouvement dans tout référentiel, avec une vitesse c !

Cas du photon

- Pour un photon $m = 0$, mais sa vitesse est $v = c$.
- Un photon n'a pas d'énergie de repos car il est nécessairement en mouvement dans tout référentiel, avec une vitesse c !
- L'énergie d'un photon de fréquence ν est

$$E = h\nu,$$

Cas du photon

- Pour un photon $m = 0$, mais sa vitesse est $v = c$.
- Un photon n'a pas d'énergie de repos car il est nécessairement en mouvement dans tout référentiel, avec une vitesse c !
- L'énergie d'un photon de fréquence ν est

$$E = h\nu,$$

- où h est la constante de Planck ($6{,}63.10^{-34}$ J·s)

Cas du photon

- Pour un photon $m = 0$, mais sa vitesse est $v = c$.
- Un photon n'a pas d'énergie de repos car il est nécessairement en mouvement dans tout référentiel, avec une vitesse c !
- L'énergie d'un photon de fréquence ν est

$$E = h\nu,$$

- où h est la constante de Planck ($6{,}63.10^{-34}$ J·s)
- D'après la relation entre E et p, le photon, même sans masse a une quantité de mouvement :

Cas du photon

- Pour un photon $m = 0$, mais sa vitesse est $v = c$.
- Un photon n'a pas d'énergie de repos car il est nécessairement en mouvement dans tout référentiel, avec une vitesse c !
- L'énergie d'un photon de fréquence ν est

$$E = h\nu,$$

- où h est la constante de Planck ($6{,}63.10^{-34}$ J·s)
- D'après la relation entre E et p, le photon, même sans masse a une quantité de mouvement :
- $E^2 = p^2c^2$, soit $p = E/c = \frac{h\nu}{c} =$

Cas du photon

- Pour un photon $m = 0$, mais sa vitesse est $v = c$.
- Un photon n'a pas d'énergie de repos car il est nécessairement en mouvement dans tout référentiel, avec une vitesse c !
- L'énergie d'un photon de fréquence ν est

$$E = h\nu,$$

- où h est la constante de Planck ($6{,}63.10^{-34}$ J·s)
- D'après la relation entre E et p, le photon, même sans masse a une quantité de mouvement :
- $E^2 = p^2c^2$, soit $p = E/c = \frac{h\nu}{c} =$
-

$$p = \frac{h}{\lambda}.$$

Équation du mouvement relativiste

- La forme de l'équation du mouvement est la même qu'en physique classique

Équation du mouvement relativiste

- La forme de l'équation du mouvement est la même qu'en physique classique
- si on prend soin de travailler avec la quantité de mouvement

Équation du mouvement relativiste

- La forme de l'équation du mouvement est la même qu'en physique classique
- si on prend soin de travailler avec la quantité de mouvement
- $$\frac{\mathrm{d}\overrightarrow{p}}{\mathrm{d}t} = \sum \overrightarrow{F}$$

Équation du mouvement relativiste

- La forme de l'équation du mouvement est la même qu'en physique classique
- si on prend soin de travailler avec la quantité de mouvement
- $$\frac{\mathrm{d}\overrightarrow{p}}{\mathrm{d}t} = \sum \overrightarrow{F}$$
- avec $\overrightarrow{p} = \gamma m \overrightarrow{v} = \frac{m\overrightarrow{v}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$!

Équation du mouvement relativiste

- La forme de l'équation du mouvement est la même qu'en physique classique
- si on prend soin de travailler avec la quantité de mouvement
- $$\frac{\mathrm{d}\overrightarrow{p}}{\mathrm{d}t} = \sum \overrightarrow{F}$$
- avec $\overrightarrow{p} = \gamma m \overrightarrow{v} = \frac{m\overrightarrow{v}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$!
- Attention c'est beaucoup plus difficile à résoudre qu'en mécanique non relativiste car γ dépend aussi de v !

Un exemple simple : accélération d'une particule chargée dans un champ électrique uniforme

- Particule de masse m, de charge q, initialement au repos, placé dans un champ électrique $\overrightarrow{\mathcal{E}}$

Un exemple simple : accélération d'une particule chargée dans un champ électrique uniforme

- Très bon accord entre théorie et expérience : Bertozzi 1964

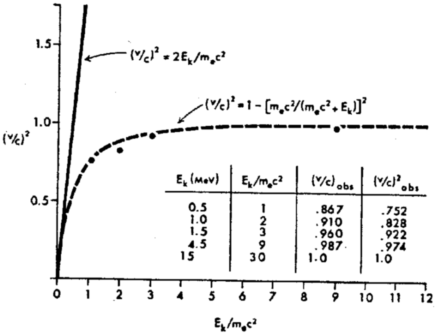

FIG. 3. The solid curve represents the prediction for $(v/c)^2$ according to Newtonian mechanics, $(v/c)^2 = 2E_k/m_ec^2$. The dashed curve represents the prediction of Special Relativity, $(v/c)^2 = 1 - [m_ec^2/(m_ec^2 + E_k)]^2$. m_e is the rest mass of an electron and c is the speed of light in a vacuum, 3×10^8 M/sec. The solid circles are the data of this experiment. The table presents the observed values of v/c.

Cas des collisions

- Lors d'une collision il y a conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie des particules avant et après le choc.

Cas des collisions

- Lors d'une collision il y a conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie des particules avant et après le choc.
- $$\sum_{i,\ \text{avant le choc}} \overrightarrow{p}_i = \sum_{j,\ \text{après le choc}} \overrightarrow{p'}_j$$

Cas des collisions

- Lors d'une collision il y a conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie des particules avant et après le choc.
- $$\sum_{i,\ \text{avant le choc}} \vec{p}_i = \sum_{j,\ \text{après le choc}} \vec{p'}_j$$
- $$\sum_{i,\ \text{avant le choc}} E_i = \sum_{j,\ \text{après le choc}} E'_j$$

Cas des collisions

- Lors d'une collision il y a conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie des particules avant et après le choc.
- $$\sum_{i,\text{ avant le choc}} \overrightarrow{p}_i = \sum_{j,\text{ après le choc}} \overrightarrow{p'}_j$$
- $$\sum_{i,\text{ avant le choc}} E_i = \sum_{j,\text{ après le choc}} E'_j$$
- Dans ces expressions les énergies sont les énergies totales, y compris les énergies de repos des particules.

Cas des collisions élastiques

- Dans une collision élastique les particules sont exactement les mêmes avant et après le choc,

Cas des collisions élastiques

- Dans une collision élastique les particules sont exactement les mêmes avant et après le choc,
- pas de création de particule, pas de disparition de particule,

Cas des collisions élastiques

- Dans une collision élastique les particules sont exactement les mêmes avant et après le choc,
- pas de création de particule, pas de disparition de particule,
- les particules restent dans le même état (pas d'excitation par exemple)

Cas des collisions élastiques

- Dans une collision élastique les particules sont exactement les mêmes avant et après le choc,
- pas de création de particule, pas de disparition de particule,
- les particules restent dans le même état (pas d'excitation par exemple)
- Les sommations portent alors sur les mêmes particules :

Cas des collisions élastiques

- Dans une collision élastique les particules sont exactement les mêmes avant et après le choc,
- pas de création de particule, pas de disparition de particule,
- les particules restent dans le même état (pas d'excitation par exemple)
- Les sommations portent alors sur les mêmes particules :
- $$\sum_{i,\ \text{avant le choc}} \overrightarrow{p}_i = \sum_{i,\ \text{après le choc}} \overrightarrow{p'}_i$$

Cas des collisions élastiques

- Dans une collision élastique les particules sont exactement les mêmes avant et après le choc,
- pas de création de particule, pas de disparition de particule,
- les particules restent dans le même état (pas d'excitation par exemple)
- Les sommations portent alors sur les mêmes particules :
- $$\sum_{i,\ \text{avant le choc}} \overrightarrow{p}_i = \sum_{i,\ \text{après le choc}} \overrightarrow{p'}_i$$
- $$\sum_{i,\ \text{avant le choc}} E_i = \sum_{j,\ \text{après le choc}} E'_i$$

Cas des collisions élastiques

- Dans une collision élastique les particules sont exactement les mêmes avant et après le choc,
- pas de création de particule, pas de disparition de particule,
- les particules restent dans le même état (pas d'excitation par exemple)
- Les sommations portent alors sur les mêmes particules :
- $$\sum_{i,\text{ avant le choc}} \overrightarrow{p}_i = \sum_{i,\text{ après le choc}} \overrightarrow{p'}_i$$
- $$\sum_{i,\text{ avant le choc}} E_i = \sum_{j,\text{ après le choc}} E'_i$$
- On pourrait simplifier les énergies de repos dans la ligne ci-dessus mais il est plus prudent de travailler quand même avec les expressions complètes.

Cas des collisions inélastiques

- Dans une collision inélastique les particules ne sont pas nécessairement exactement les mêmes avant et après le choc,

Cas des collisions inélastiques

- Dans une collision inélastique les particules ne sont pas nécessairement exactement les mêmes avant et après le choc,
- Il peut y avoir création ou anihilation de particules.

Cas des collisions inélastiques

- Dans une collision inélastique les particules ne sont pas nécessairement exactement les mêmes avant et après le choc,
- Il peut y avoir création ou anihilation de particules.
- C'est l'équivalence masse-énergie qui permet une éventuelle création de particule.