Bienvenue au cours de ...

Particules et interactions fondamentales

Prof. Olivier Schneider

Laboratoire de physique des hautes énergies

Site web du cours:

http://moodle.epfl.ch/course/view.php?id=5661


Pas d'excellence sans égalité des chances
RESPECT
@ EPFL


La diversité est notre force
RESPECT
@ EPFL


Écouter et oser prendre position
?!
@ :)
RESPECT
@ EPFL


Veillons les un·es sur les autres
RESPECT
@ EPFL


La bienveillance ça fait du bien
RESPECT
@ EPFL


Ensemble nous irons plus loin
RESPECT
@ EPFL

Organisation

- Toutes les infos toujours à jour sur le site Moodle
- Mercredi 19 mars 2025: visite au CERN
- Tous les autres mercredis, en salle INJ 218
  - **cours**: 13h15–15h00
  - **exercices**: 15h15–17h00
    - assistants:
      - **Eliot Bornand**
      - **Dimitris Kaminaris**
      - **Anni Kauniskangas**
      - **Tobias Monnard**
      - **Rita Silva**
- Forum de questions/réponses
  - pour toutes questions sur le cours et les exercices

Dimensions et énergies (échelles)

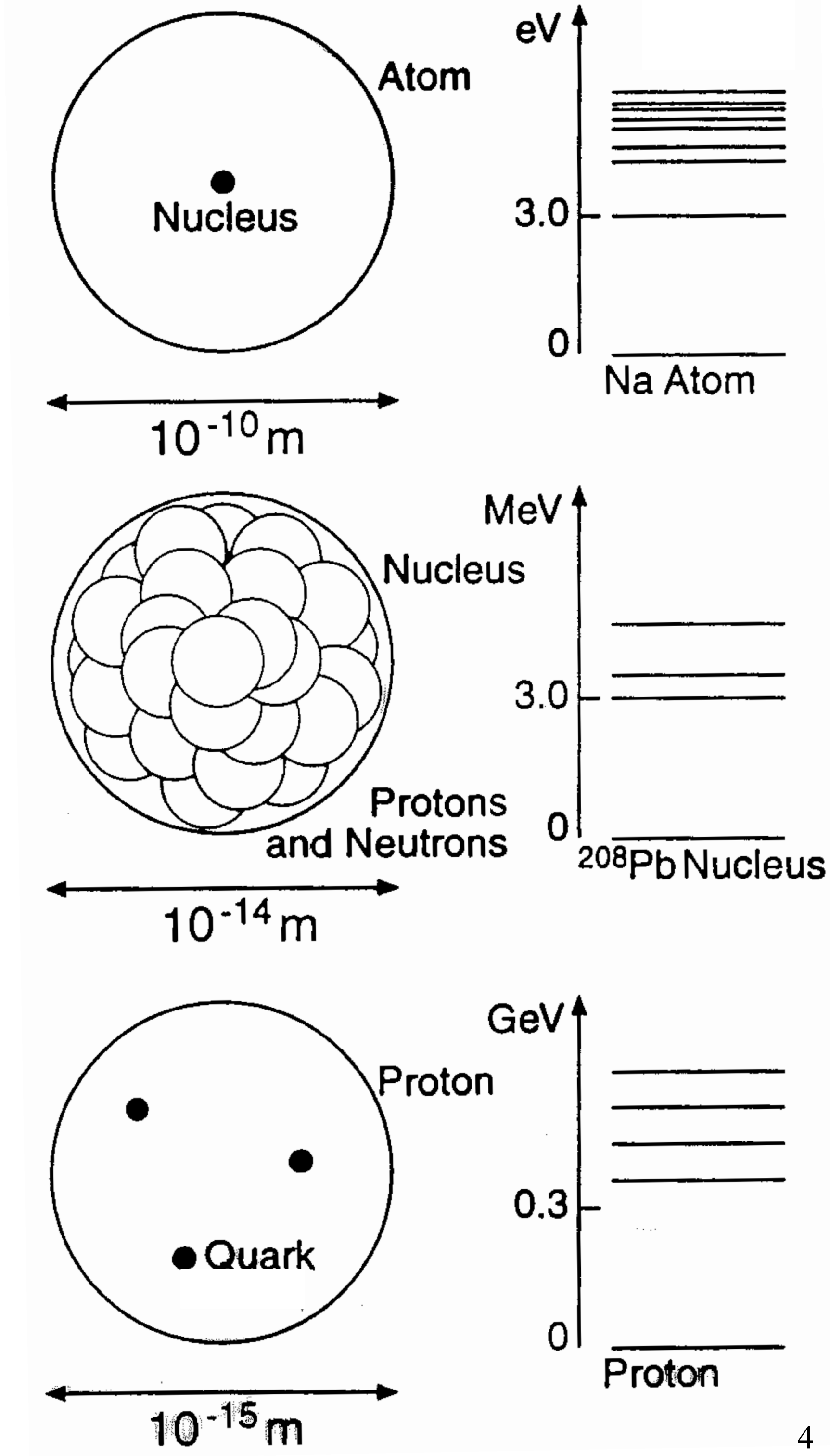
à savoir par coeur

Les électrons et les quarks ont une taille $< 10^{-19}$ m et sont considérés comme des constituants fondamentaux de la matière

Atome
(forces é.m.)
Å = 10^{-10} m
eV

Noyau
(forces nucléaires)
10^{-14} m
MeV

Nucléon
(forces de couleur)
fm = 10^{-15} m
GeV



Constantes et unités

à savoir par coeur

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 \hbar c} \cong \frac{1}{137}$$

constante de structure fine

$$\hbar c \cong 197 \text{ MeV fm}$$

constante de Plank réduite

$$m_p c^2 \cong 938 \text{ MeV}$$

masse du proton

$$m_e c^2 \cong 0.511 \text{ MeV}$$

masse de l'électron

$$1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$$

Fermi (= femtomètre)

$$1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

électron-volt

$$1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV}$$
$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$$
$$1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$$
$$1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$$

Sondes

- Aujourd'hui comme au temps de Rutherford

étude expérimentale d'un petit objet
=
étude de collisions entre un projectile et cet objet

- Condition sur la longueur d'onde de De Broglie du projectile

$$\boldsymbol{\lambda = h/p \lesssim} \textbf{ dimension objet à étudier}$$

- Projectiles (sondes) les plus énergétiques:

Accélérateur	Projectiles	Energie de faisceau	λ
LEP 2 @ CERN	e^-, e^+	~100 GeV	$\sim 10^{-17}$ m
Tevatron @ Fermilab	p, $\bar{p}$	~900 GeV	$\sim 10^{-18}$ m
LHC @ CERN, 2024	p	6.8 TeV	$\sim 10^{-19}$ m

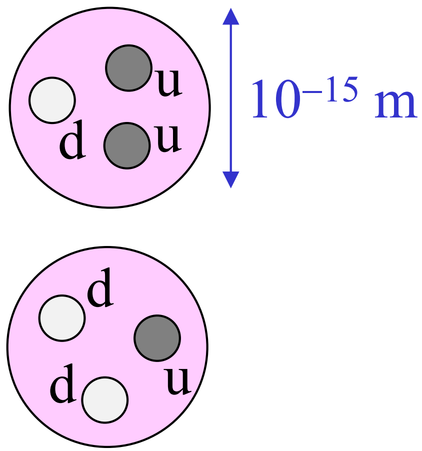
Large Hadron Collider (2009–2041 ?)

Constituants fondamentaux de la matière (fermions de spin ½)

- Toute la matière connue est formée de combinaisons de 6 leptons et 6 quarks
- Pour chacune de ces 12 particules, il existe une anti-particule de charge électrique opposée (anti-matière)
- Ces constituants élémentaires n'ont pas de structure connue

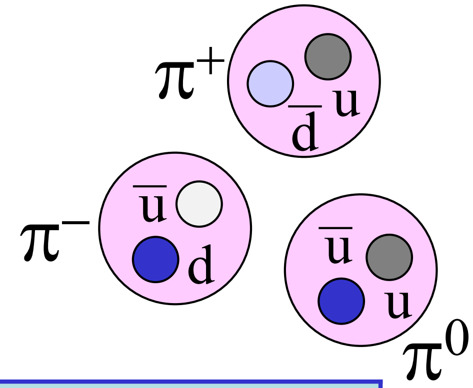
				Charge électrique [e]	**Charge de couleur**
Leptons	électron e	muon μ	tau τ	–1	non
	neutrino ν_e	neutrino ν_μ	neutrino ν_τ	0	
Quarks	up u	charm c	top t	+2/3	oui
	down d	strange s	bottom b	–1/3	

- La matière courante (stable) est formée seulement de trois types de particules élémentaires: e, u, d
  - Chaque atome contient des électrons et un noyau
  - Les noyau est fait de protons et de neutrons
  - Un proton est une combinaison de quarks u, u et d
  - Un neutron est une combinaison de quarks u, d et d



Particules-forces

- Les forces entre particules de matière et d'antimatière s'exercent par l'échange de particules-forces (bosons de spin entier)

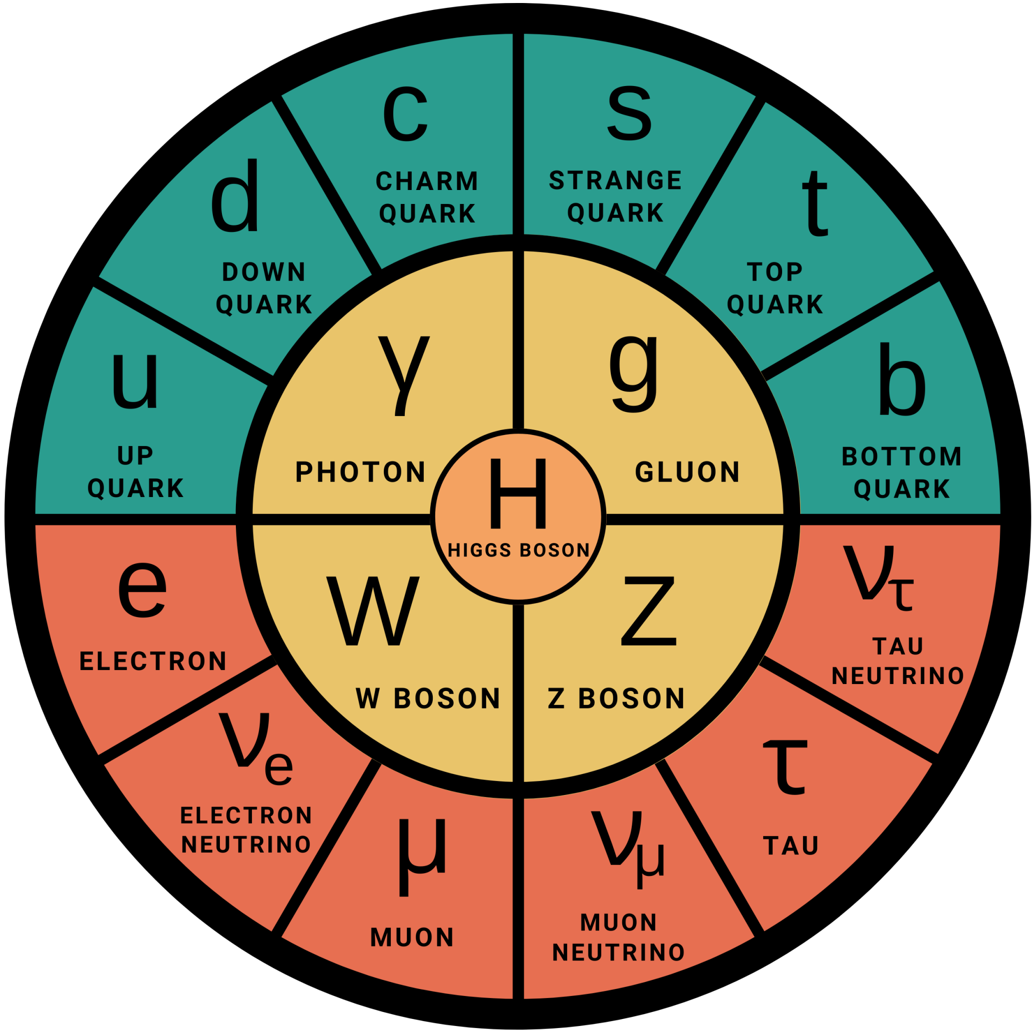


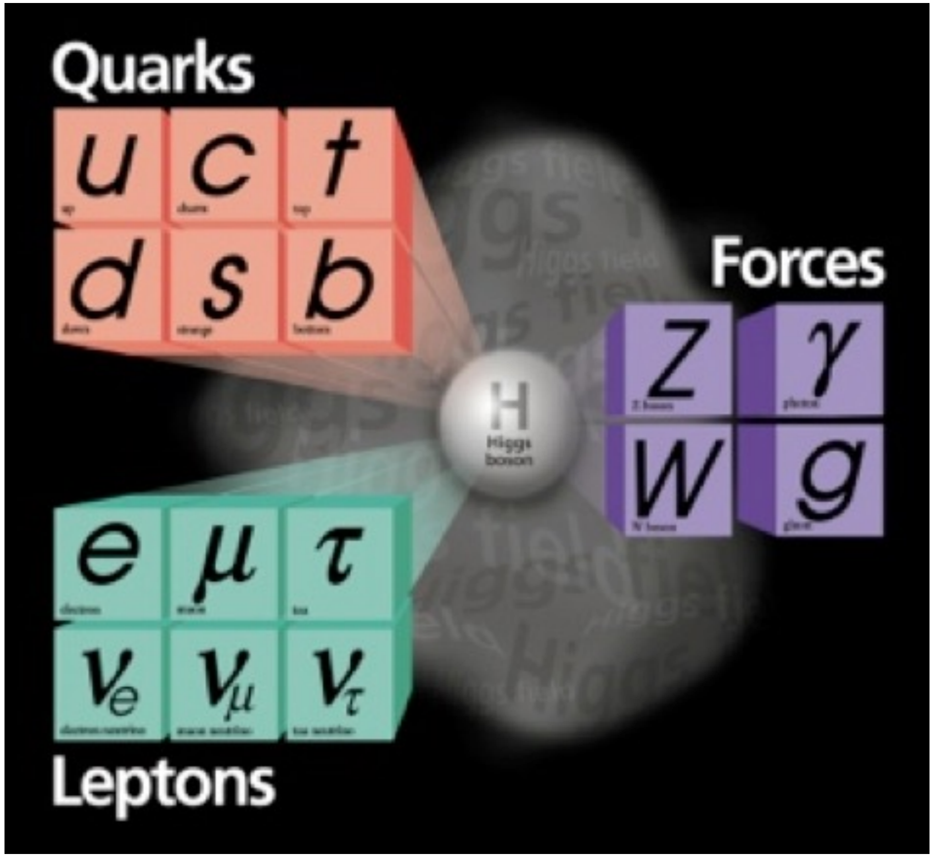
Modèle Standard de la physique des particules

Interaction	Bosons d'échange	Particules sensibles
Force de couleur [→ force forte]	8 gluons [mésons π]	seulement quarks & gluons [neutrons, protons, …]
Electromagnétisme	photon γ	particules chargées électriquement
Force faible	W^+, W^-, Z^0	toutes
Interaction de Higgs	H	particules massives
Gravitation	graviton	toutes

- Bosons W et Z découverts en 1983
- Boson de Higgs découvert en 2012
- Ondes gravitationnelles découvertes en 2016

Modèle Standard





Principes de relativité

relativité = invariance par changement de référentiel, donc d’observateur

- Relativité de Galilée

1. Les lois de la mécanique sont les mêmes dans tous les référentiels d’inertie
2. Le temps et l’espace sont des absolus

Les intervalles de temps et d’espace (=distance) séparant deux événements sont les mêmes pour tous les observateurs

- Relativité (restreinte) d’Einstein, 1905

1. Les lois de la physique sont les mêmes dans tous les référentiels d’inertie
2. La vitesse de la lumière dans le vide est une constante (c)

Et donc pas seulement celles de la mécanique (comme énoncé par Galilée), mais aussi celles de l’électromagnétisme, …

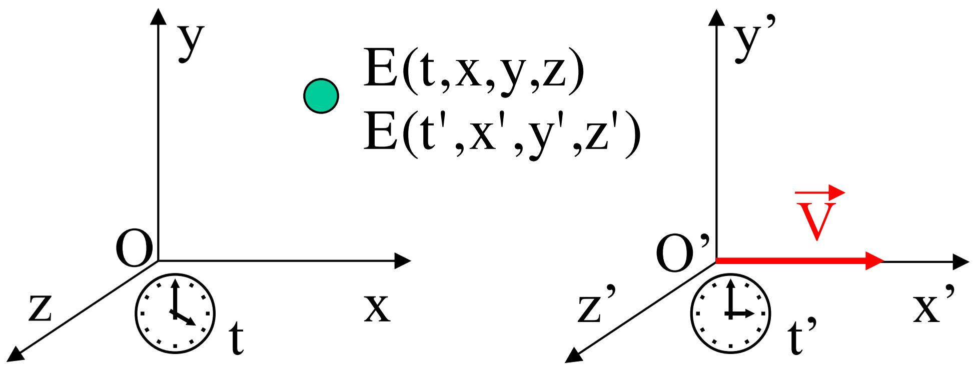
c = constante, indépendamment de l’observateur (référentiel) et du mouvement de la source

c = 299’792’458 m/s (exactement) ~3 × 10^8 m/s

Transformation de Lorentz

se démontre à partir des postulats de la relativité d'Einstein

- Référentiel d'inertie $\mathcal{R}$
- Référentiel d'inertie $\mathcal{R}$' en « saut de vitesse standard V » selon x par rapport au référentiel d'inertie $\mathcal{R}$:
  - Oxyz et O′x′y′z′ coincident à t = t′ = 0
- Même événement E vu dans les deux référentiels:
  - position x, y, z et temps t mesurés dans $\mathcal{R}$
  - position x', y', z' et temps t' mesurés dans $\mathcal{R}$'



$$\vec{V} = \begin{pmatrix} V \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} ct' \\ x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & -\beta\gamma & 0 & 0 \\ -\beta\gamma & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} ct \\ x \\ y \\ z \end{pmatrix} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} ct \\ x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & +\beta\gamma & 0 & 0 \\ +\beta\gamma & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} ct' \\ x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix}$$

Transformation de Lorentz   Transformation de Lorentz inverse

$$\boxed{\beta = \frac{V}{c}} \in [-1, +1], \qquad \boxed{\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}} \geq 1$$

Invariant relativiste

à démontrer
en exercice

- Deux événements séparés par $(c\Delta t, \Delta x, \Delta y, \Delta z) = (c\Delta t, \overrightarrow{\Delta x})$
  - par linéarité de la transformation de Lorentz

$$\begin{pmatrix} c\Delta t' \\ \Delta x' \\ \Delta y' \\ \Delta z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & -\beta\gamma & 0 & 0 \\ -\beta\gamma & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c\Delta t \\ \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix}$$

avec:

$$\boxed{\beta = \frac{u}{c}\,, \quad |\beta| \le 1 \qquad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}\,, \quad \gamma \ge 1}$$

  - **intervalle d'espace-temps** (définition)

$$\boxed{(\Delta s)^2 = (c\Delta t)^2 - (\overrightarrow{\Delta x})^2}$$

>0, <0, ou $=0$

    - $(\Delta s)^2$ prend la même valeur dans tous les référentiels d'inertie, c'est un **invariant relativiste**

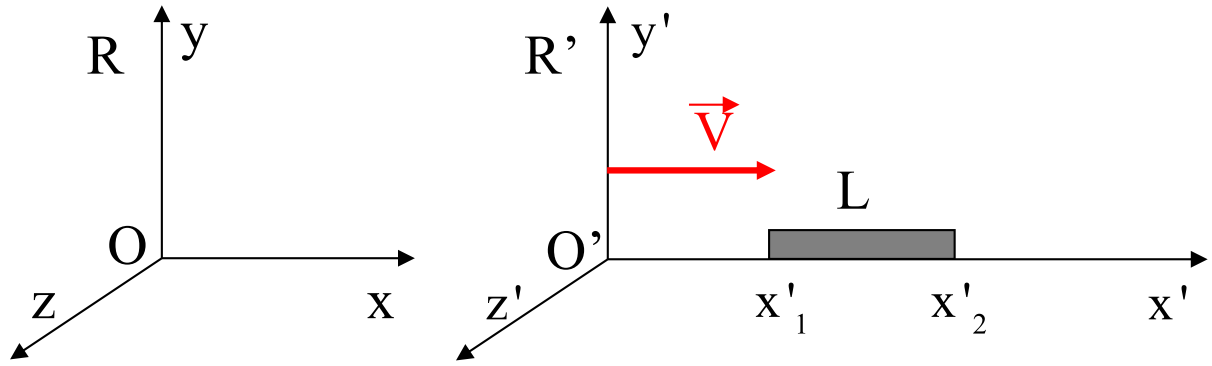
$$\boxed{(\Delta s')^2 = (\Delta s)^2}$$

relativité de Galilée ⇔	Δt et $\lvert\overrightarrow{\Delta x}\rvert$ invariants	⇔ temps et espace absolus
relativité d'Einstein ⇔	$(\Delta s)^2 = c^2(\Delta t)^2 - \lvert\overrightarrow{\Delta x}\rvert^2$ invariant	⇔ c = constante

- Conséquence de c = constante
  - deux événements simultanés dans une référentiel ($\Delta t = 0$) ne sont pas nécessairement simultanés dans un autre référentiel ($\Delta t' \neq 0$)

Contraction des longueurs et dilatation du temps

- Règle de longueur L en mouvement longitudinal de vitesse V

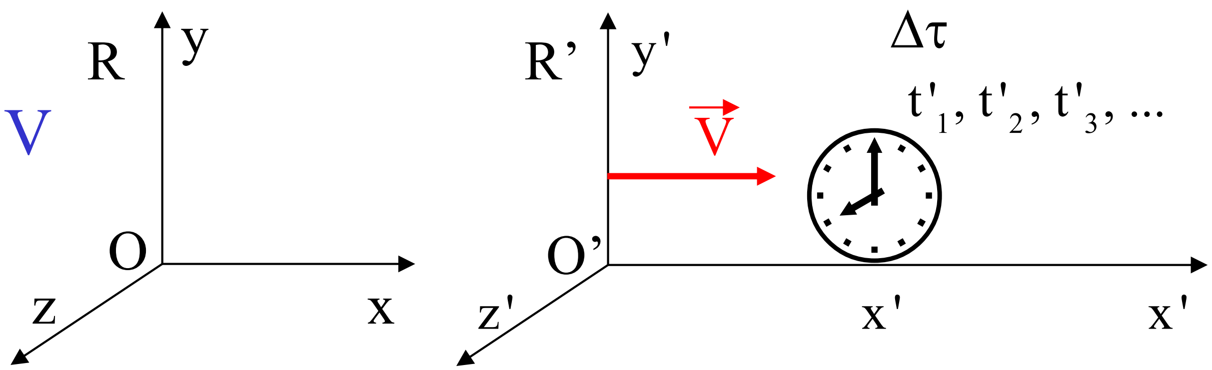


$$\left.\begin{aligned} x'_1 &= \gamma\left(x_1 - \beta ct\right) \\ x'_2 &= \gamma\left(x_2 - \beta ct\right) \end{aligned}\right\}$$ où les positions x_1 et x_2 sont définies au même temps t dans R

$$\Rightarrow L = x'_2 - x'_1 = \gamma\left(x_2 - x_1\right) \Rightarrow \boxed{\Delta x = \frac{L}{\gamma} < L}$$

La dimension d'un corps dans la direction de sa vitesse est contractée

- Horloge de période $\Delta\tau$ en mouvement de vitesse V



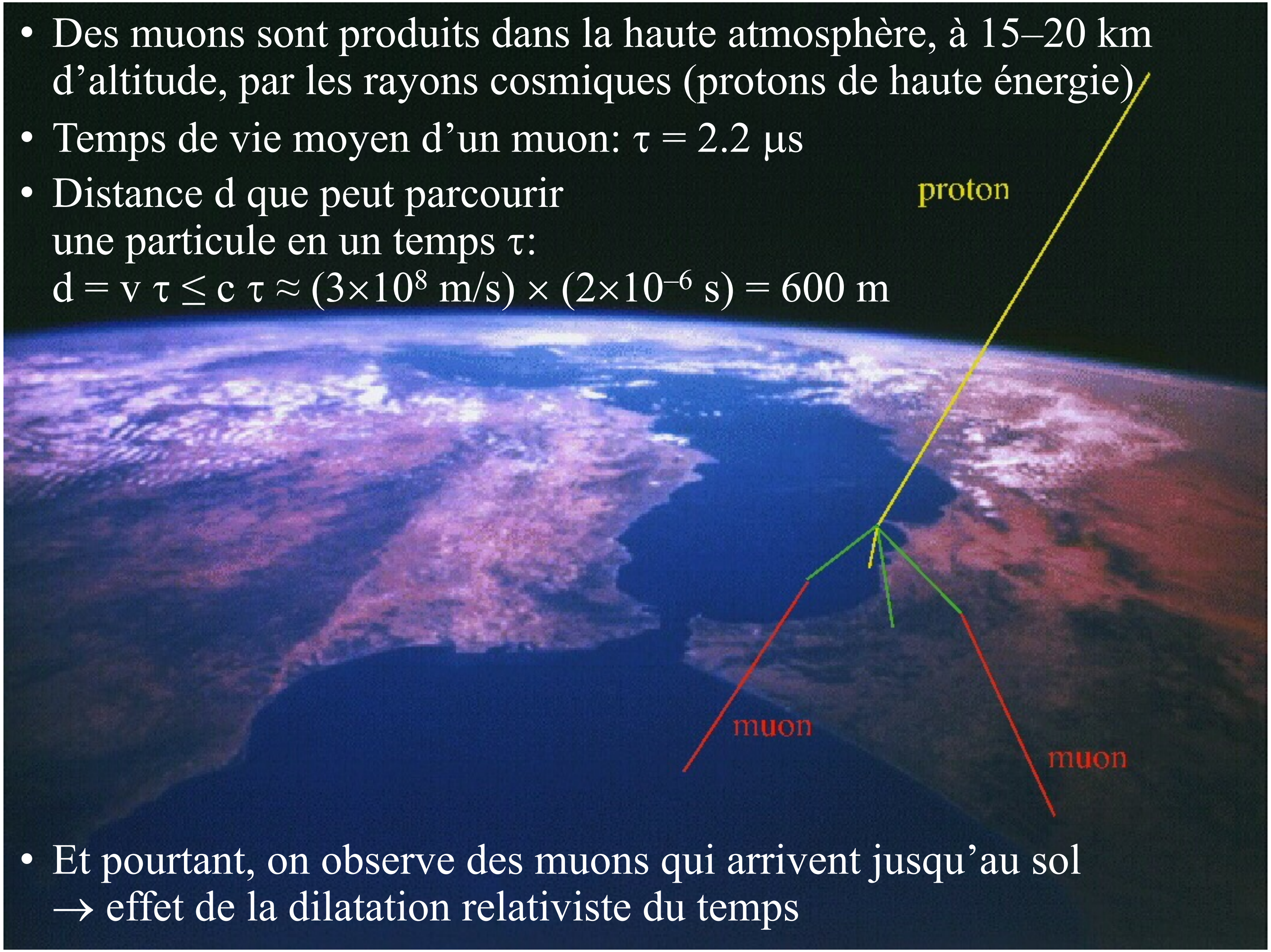
$$\left.\begin{aligned} ct_1 &= \gamma\left(ct'_1 + \beta x'\right) \\ ct_2 &= \gamma\left(ct'_2 + \beta x'\right) \end{aligned}\right\} \Rightarrow t_2 - t_1 = \gamma\left(t'_2 - t'_1\right) = \gamma\Delta\tau \Rightarrow \boxed{\Delta t = \gamma\Delta\tau > \Delta\tau}$$

Une horloge en mouvement retarde

Muons cosmiques

exemple concret et réel
de la dilatation du temps

- Des muons sont produits dans la haute atmosphère, à 15–20 km d'altitude, par les rayons cosmiques (protons de haute énergie)
- Temps de vie moyen d'un muon: $\tau = 2.2\ \mu s$
- Distance d que peut parcourir une particule en un temps τ:
  $d = v\ \tau \leq c\ \tau \approx (3\times10^{8}\ m/s) \times (2\times10^{-6}\ s) = 600\ m$

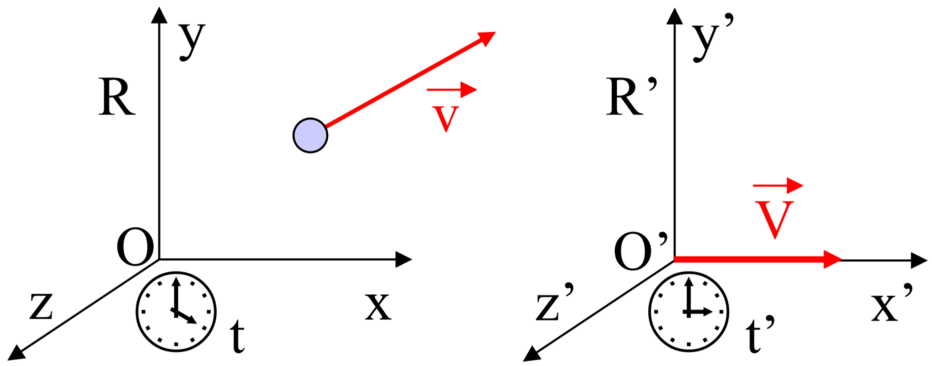


- Et pourtant, on observe des muons qui arrivent jusqu'au sol
  $\rightarrow$ effet de la dilatation relativiste du temps

Transformation des vitesses

à démontrer en exercice

- Particule de vitesse $\vec{v}$ dans R; quelle est sa vitesse $\vec{v}'$ dans R' ?

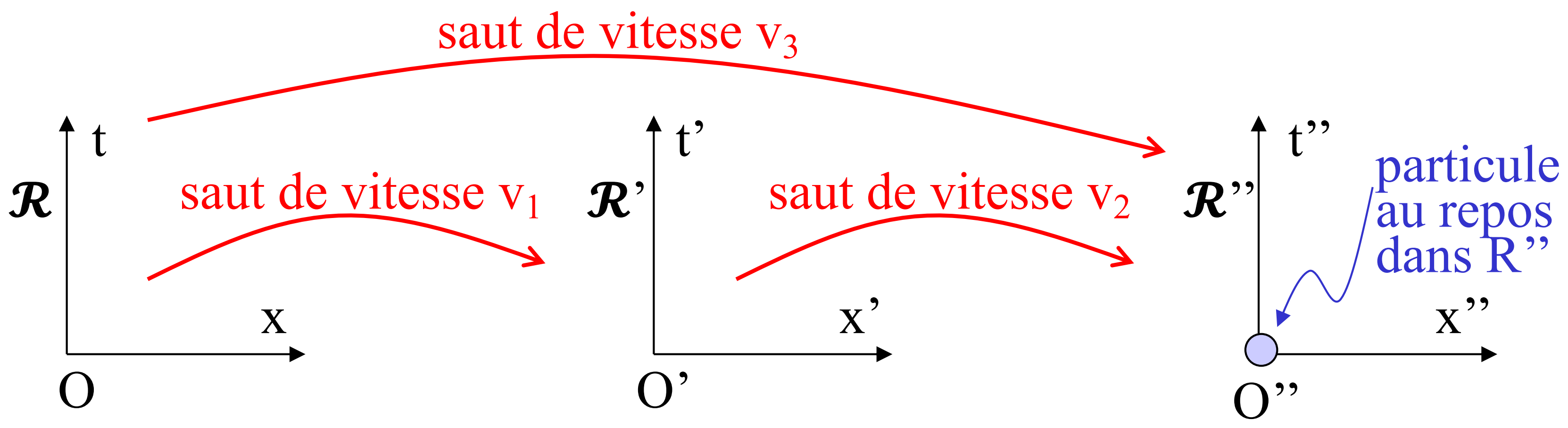


$$\boxed{\begin{aligned} v'_x &= \frac{v_x - V}{1 - \dfrac{Vv_x}{c^2}} \\ v'_y &= \frac{v_y}{\gamma\left(1 - \dfrac{Vv_x}{c^2}\right)} \\ v'_z &= \frac{v_z}{\gamma\left(1 - \dfrac{Vv_x}{c^2}\right)} \end{aligned}}$$

– Si V<c: $\boxed{\begin{aligned} |\vec{v}| < c \quad &\Leftrightarrow \quad |\vec{v}'| < c \\ |\vec{v}| = c \quad &\Leftrightarrow \quad |\vec{v}'| = c \end{aligned}}$

Composition des vitesses

- Deux sauts de vitesse standards consécutifs, de vitesses v_1 et v_2, sont équivalents à un saut de vitesse standard v_3
  - les sauts de vitesse standards forment un groupe



On applique la transformation des vitesses avec $V = v_1 ,\ \ v_x = v_3 ,\ \ v'_x = v_2$

$$v'_x = \frac{v_x - V}{1 - \frac{V v_x}{c^2}} \quad \Rightarrow \quad v_2 = \frac{v_3 - v_1}{1 - \frac{v_1 v_3}{c^2}} \quad \Rightarrow \quad \boxed{v_3 = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}}} \quad \text{ou} \quad \boxed{\beta_3 = \frac{\beta_1 + \beta_2}{1 + \beta_1 \beta_2}}$$

ou bien $\underline{\xi_3 = \xi_1 + \xi_2}$ avec $\xi_i = \operatorname{arctanh} \beta_i = \ln \sqrt{\frac{1+\beta_i}{1-\beta_i}}$

Quantité de mouvement

à démontrer en exercice

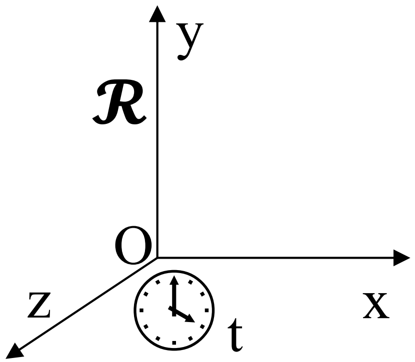
- Quelle est la quantité de mouvement $\vec{p}$ d'une particule de vitesse $\vec{v}$ et de masse m ?
- Hypothèses:
  - $\vec{p}$ est colinéaire à $\vec{v}$
  - si $v \ll c$, alors $\vec{p} = m\vec{v}$ (limite non-relativiste)
  - p est une fonction monotone croissante de v
  - $\vec{F} = d\vec{p}/dt$, et on particulier la conservation de la quantité de mouvement totale d'un système isolé est une loi physique (donc vraie dans tous les référentiels d'inertie)
- Conclusion:

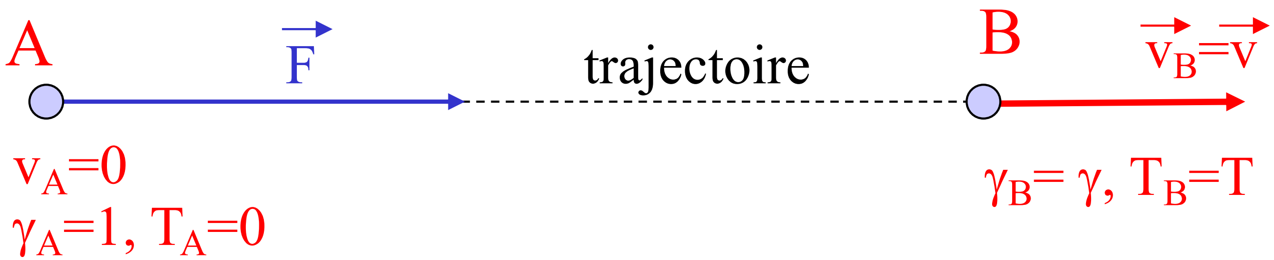
$$\boxed{\vec{p} = m\gamma\vec{v} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}}$$

  - si $v \ll c$: $$p = m\gamma\beta c = \frac{mc\beta}{\sqrt{1-\beta^2}} = mc\beta\left(1+\frac{1}{2}\beta^2+\ldots\right) = mc\beta + O(\beta^3)$$

Energie cinétique

- Une particule au repos dans $\mathcal{R}$ se déplace sur l'axe x de A à B sous l'effet d'une force F, en acquérant une énergie cinétique T:





- Théorème de l'énergie cinétique entre A et B:

$$T = T_B - T_A = \int_A^B \vec{F}\cdot d\vec{x} = \int_A^B \frac{d\vec{p}}{dt}\cdot\vec{v}\,dt = \int_A^B v\,dp = \int_A^B \beta c\frac{dp}{d\beta}d\beta$$

$$\frac{dp}{d\beta} = \frac{d}{d\beta}(m\gamma\beta c) = m\gamma c + m\beta c\frac{d\gamma}{d\beta} = mc\gamma + m\beta c\,\beta\gamma^3 = mc\gamma\left(1+\beta^2\gamma^2\right) = mc\gamma^3$$

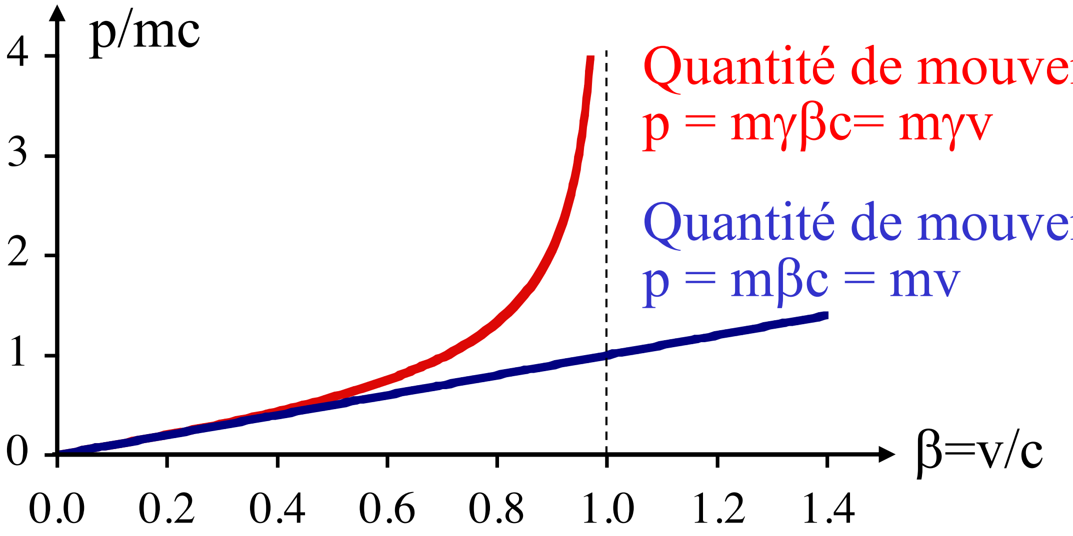
$$T = T_B - T_A = mc^2\int_A^B \beta\gamma^3 d\beta = mc^2\left[\gamma\right]_A^B = mc^2(\gamma-1)$$

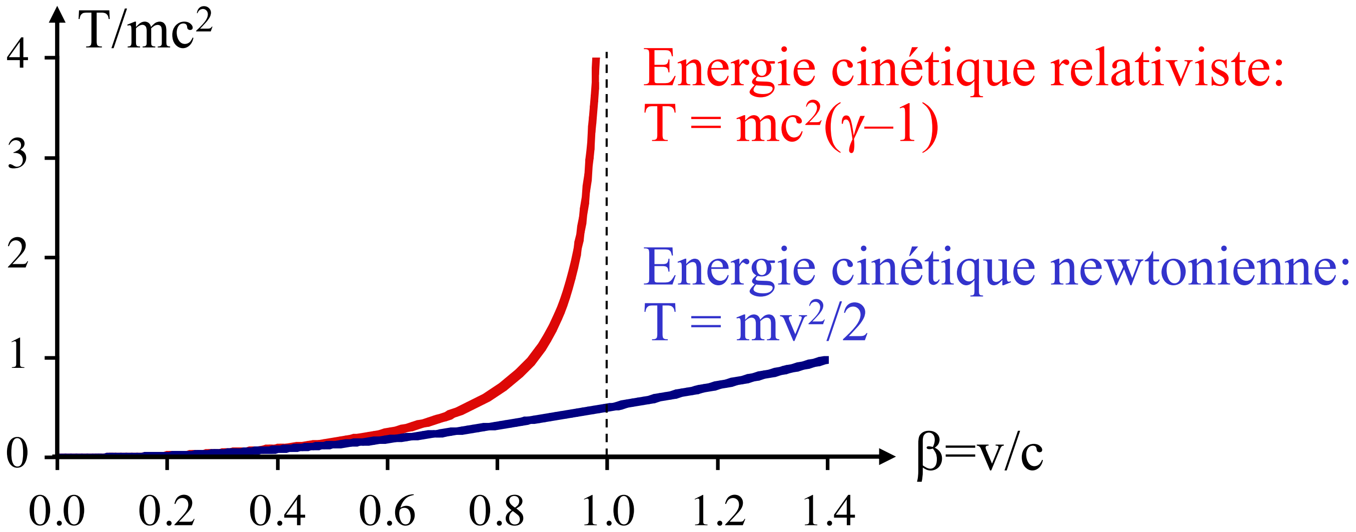
$$\boxed{T = mc^2(\gamma-1)}$$

- Limite non-relativiste ($\beta = v/c \ll 1$):

$$T = mc^2\left[\left(1-\vec{\beta}^2\right)^{-1/2} - 1\right] = mc^2\left[1+\tfrac{1}{2}\vec{\beta}^2 + O\left(\vec{\beta}^4\right) - 1\right] = \underbrace{\tfrac{1}{2}mc^2\vec{\beta}^2}_{\tfrac{1}{2}m\vec{v}^2} + O\left(\vec{\beta}^4\right)$$

Quantité de mouvement et énergie cinétique en fonction de la vitesse





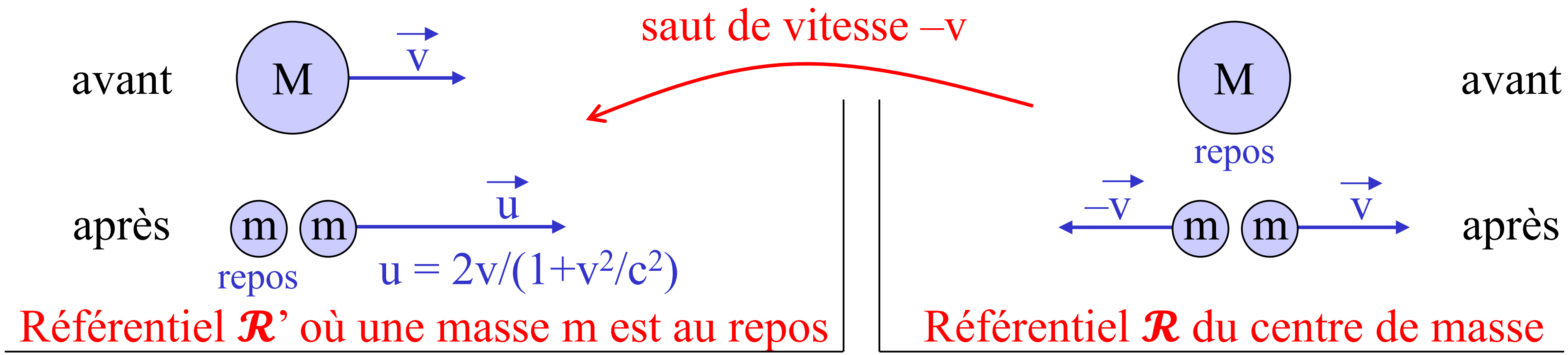
Remarques:

- on retrouve la mécanique newtonienne si $v \ll c$ ($\beta \ll 1$)
- en relativité, v est bornée (par c) mais p et T ne sont par bornées

Energie potentielle de masse

- Soit α la constante de proportionnalité entre masse et énergie interne de masse.
- Désintégration d'une particule de masse M en deux particules identiques de masses m:

$$\boxed{E^{pot}_{masse}(m) = \alpha\, m}$$



Conservation de E dans R': $T(M,v) + E^{pot}_{masse}(M) = T(m,u) + 2E^{pot}_{masse}(m)$

$$Mc^2\big(\gamma(v)-1\big) + \alpha M = mc^2\big(\gamma(u)-1\big) + 2\alpha m \qquad (1)$$

Conservation de $\vec{p}$ dans R': $M\gamma(v)v = m\gamma(u)u \qquad (2)$

$$\frac{(1)}{(2)} \Rightarrow \frac{c^2\big(\gamma(v)-1\big)+\alpha}{\gamma(v)v} = \frac{c^2\big(\gamma(u)-1\big)+2\alpha}{\gamma(u)u} \quad \text{où} \quad u = \frac{2v}{1+v^2/c^2}$$

à résoudre pour avoir α en fonction de v

Solution: $\boxed{\alpha = c^2}$ indépendamment de v !