

Des Atomes aux quarks

❖ 100 ans d'avancés scientifiques

Aperçu

- ❖ La genèse

 - les particules ordinaires

- ❖ L'âge d'or

 - une foison de nouvelles particules

- ❖ L'ère moderne

 - le Modèle Standard des particules et de leur interaction

La genèse

- ❖ État des lieux à la fin du XIX^e S
- ❖ Révolutions conceptuelles
- ❖ Les particules ordinaires

État des lieux à la fin du XIX^{ème} Siècle

Mécanique newtonienne [Newton (1643-1727)]

- principe d'inertie
- loi de la dynamique
- gravitation universelle

Mécanique analytique [Lagrange (1736-1813)]

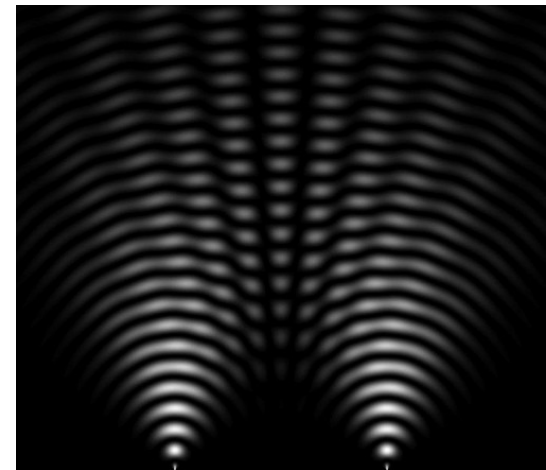
- principe de moindre action

Optique ondulatoire [Fresnel (1788-1827) – Young (1773-1829)]

- nature ondulatoire de la lumière

Électromagnétisme [Maxwell (1831-1879)]

- unification électricité - magnétisme



↘ Existence des atomes : pas prouvée – en débat

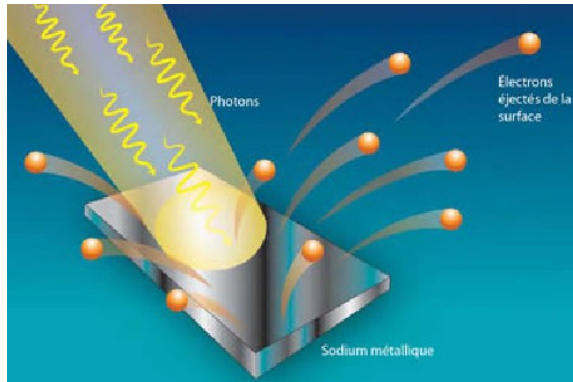
↘ Lumière : onde électromagnétique se propageant dans un *éther*

Révolutions conceptuelles

- ❖ 2 théories fondamentales voient le jour au début du XX^e Siècle
 - La relativité restreinte
 - La mécanique quantique

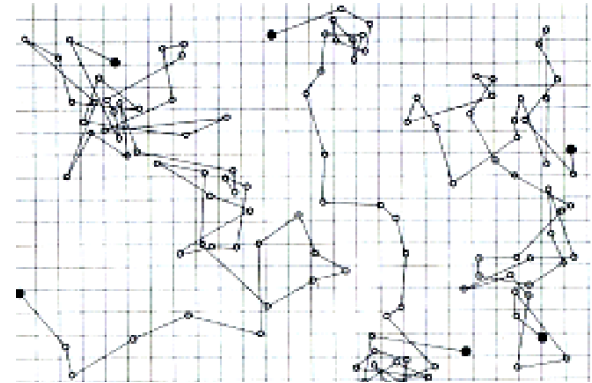
1905, Annus Mirabilis (articles clefs publiés par Einstein)

effet photo-électrique



nature corpusculaire de la lumière (photon)

mouvement brownien

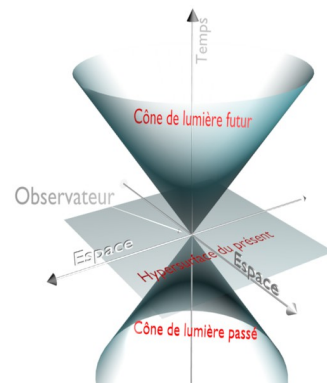


argument en faveur de la théorie atomiste de la matière

relativité restreinte

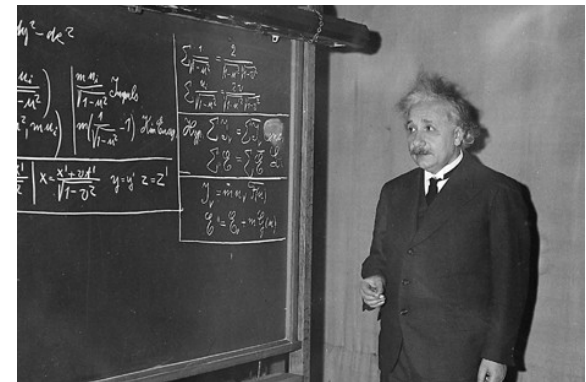
Postulats :

- 1) les lois de la physique sont identiques dans tous les référentiels inertiels
- 2) vitesse limite et absolue de la lumière



Espace-temps

équivalence masse-énergie



$E=mc^2$!!

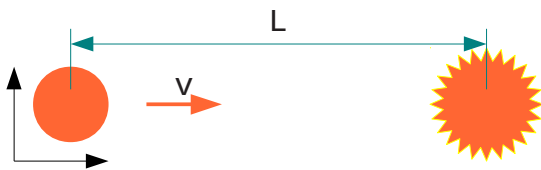
Relativité restreinte : espace-temps

Contraction des longueurs et dilatation du temps

- L'écoulement du temps dépend du référentiel
- temps propre (t_0): temps mesuré dans le référentiel lié à l'objet considéré
- temps mesuré par un observateur (fixe) pour qui l'objet se déplace à une vitesse v :

$$t = \gamma t_0 \text{ où } \gamma = 1./(1-v^2/c^2) > 1 \text{ (d'autant plus grand que } v \text{ est grand)}$$

- exemple : une bombe programmée pour exploser après 1 s



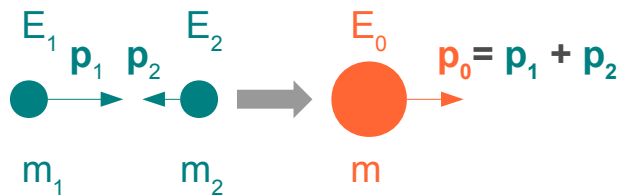
1) $v =$	300 km/s	(0,1 % c)	→ $L =$	300 km	($t = 1s$)
2) $v =$	29 979 km/s	(10 % c)	→ $L =$	30 130 km	($t = 1s$)
3) $v =$	269 813 km/s	(90 % c)	→ $L =$	618 994 km	($t = 2s$)
4) $v =$	296 794 km/s	(99 % c)	→ $L =$	2 103 921 km	($t = 7s$)
5) $v =$	299 493 km/s	(99,9 % c)	→ $L =$	6 698 534 km	($t = 22s$)

- relativité restreinte à prendre en compte quand les vitesses considérées s'approchent de la vitesse limite

Relativité restreinte : masse et énergie

Équivalence masse-énergie

- la masse est une forme d'énergie
- si un corps perd une quantité d'énergie E , sa masse diminue de E/c^2 : $E = \Delta mc^2$
- $E_0 = m c^2$: énergie au repos (dans le ref. où le corps est immobile)
- énergie totale d'un système : $E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2$ (p : quantité de mouvement)
- transformation de l'énergie cinétique en masse

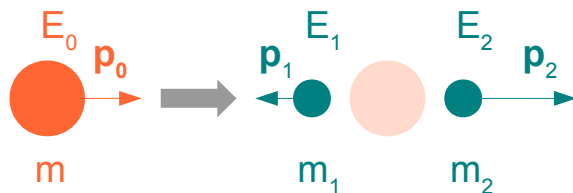


$$E_0 = E_1 + E_2 = \sqrt{(m_1^2 + p_1^2)} + \sqrt{(m_2^2 + p_2^2)}$$

exemple : collision de protons avec $E = 7\text{TeV}$
→ énergie disponible : $E_0 = 14\text{ TeV}$

Lors de collision, on peut créer des objets plus lourds que ceux initialement présents !

- transformation de la masse en énergie cinétique



$$m^2 = E_0^2 - p_0^2 = [\sqrt{(m_1^2 + p_1^2)} + \sqrt{(m_2^2 + p_2^2)}]^2 + [p_1 + p_2]^2$$

exemple : désintégration de particules instables

En identifiant la nature des produits de désintégration, on connaît leur masse.

En mesurant en plus leur impulsion, on peut remonter à la masse et donc à la nature de la particule initiale

Mécanique quantique : dualité onde-corpuscule

Constante de Planck : $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$

Aux échelles microscopiques, les objets ont une nature à la fois corpusculaire et ondulatoire

$$E = \hbar \omega \quad (\omega: \text{ pulsation} = 2\pi\nu)$$

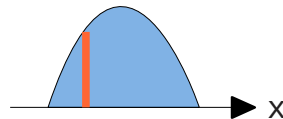
$$p = \hbar k \quad (k: \text{ vecteur d'onde } |k|=2\pi/\lambda)$$

→ pas d'équivalent dans le monde macroscopique → non intuitif !

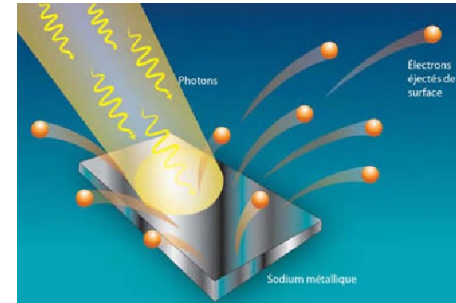
2 descriptions antagonistes !

- corpuscule : objet ponctuel avec une position et une impulsion bien définies
- onde : objet étendue pouvant interférer
- objet quantique : caractéristiques corpusculaires suivent les lois de probabilité dictées par les caractéristiques de l'onde associée.

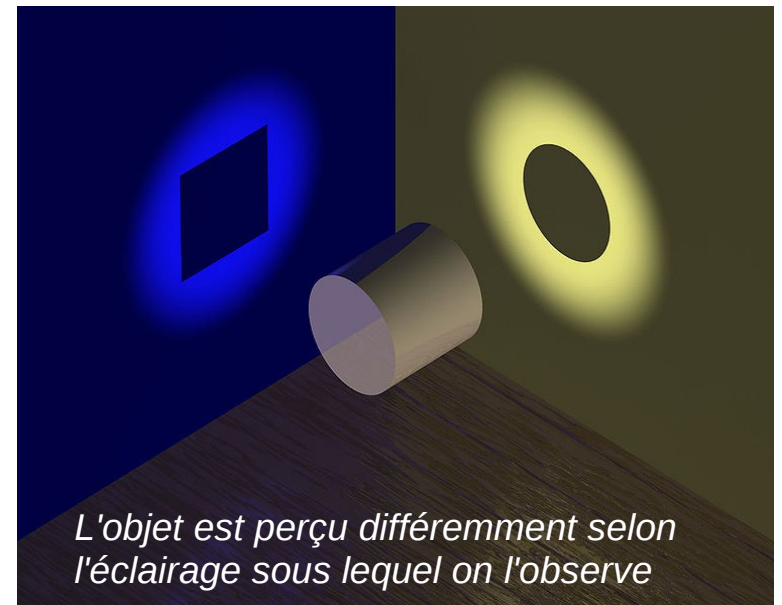
ex : la position d'une particule



Effet photo-électrique, Einstein, 1905



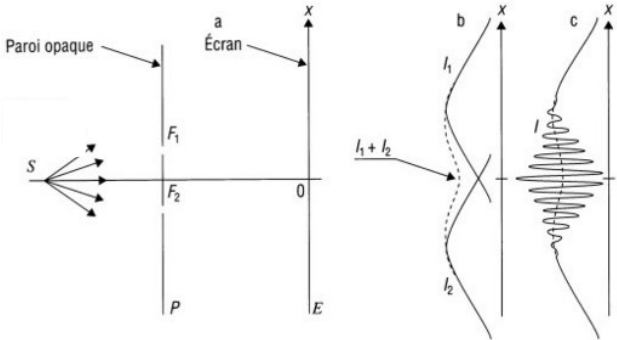
L'énergie de l'onde électromagnétique est portée par le photon



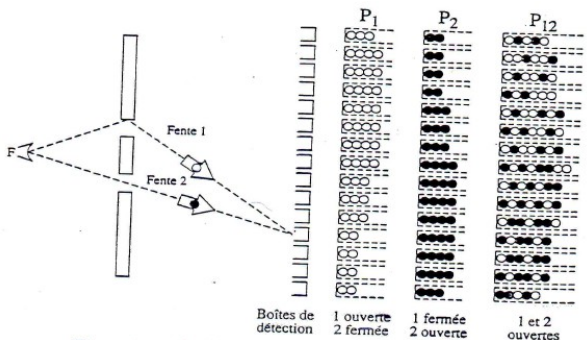
Mécanique quantique : illustration

L'EXPERIENCE DES FENTES D'YOUNG

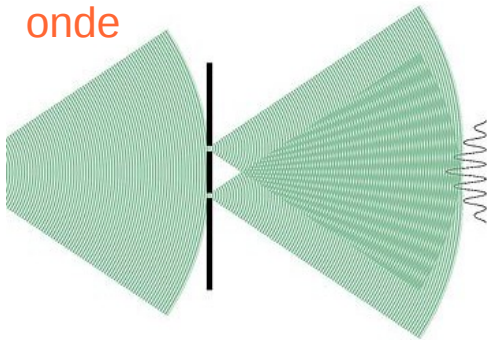
L'expérience :



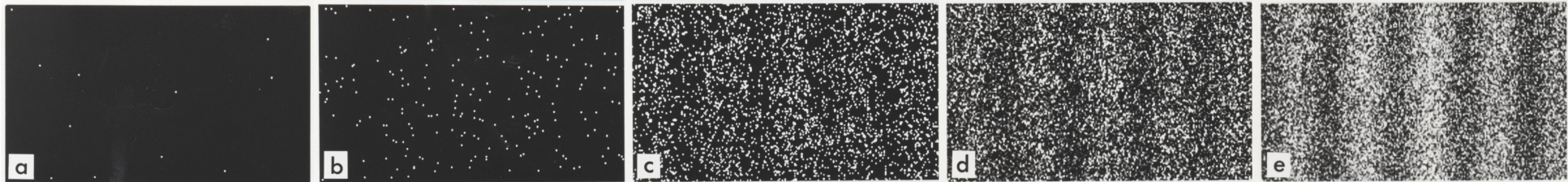
Cas #1: projectile = bille



Cas #2: projectile = onde



Cas #3: projectile = objet quantique (électron, photon)

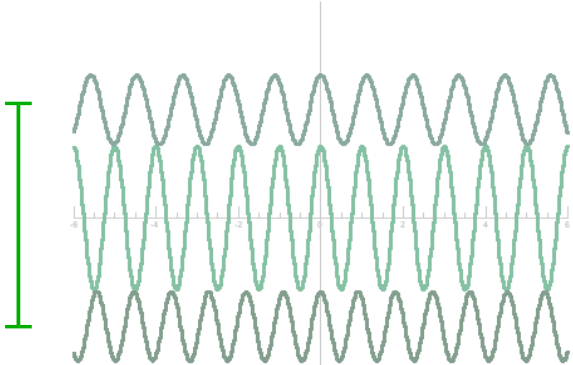


On peut observer les impacts individuels et les franges d'interférences !

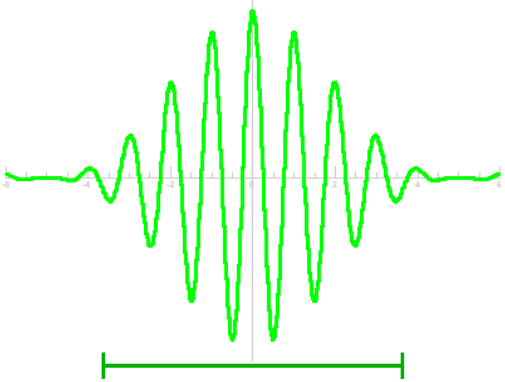
Remarque : si on détecte par quel fente la particule passe, l'interférence disparaît.

Mécanique quantique : le paquet d'onde

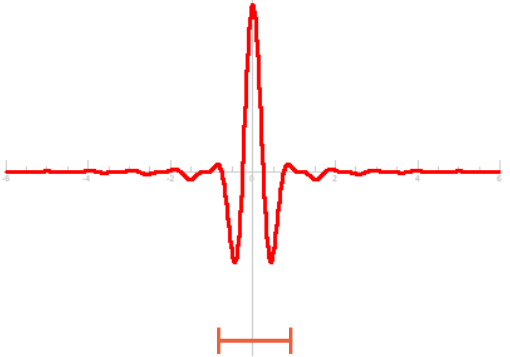
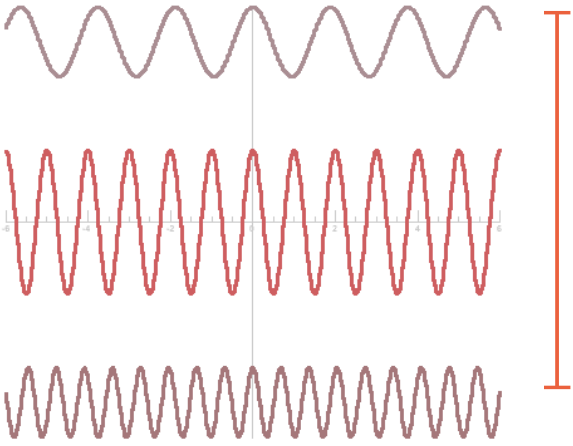
Superposition de plusieurs ondes (planes) de fréquences différentes



L'interférence (destructive) entre ces ondes donne naissance à un *paquet d'onde*

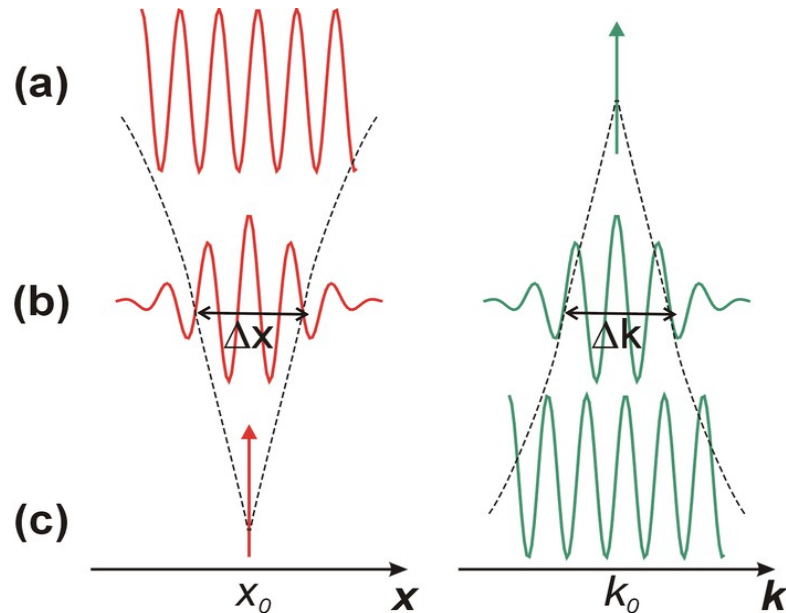


Bande de fréquences étroite
⇒ paquet étendu



Bande de fréquences large
⇒ paquet étroit

Mécanique quantique : les relations d'incertitude



- (a) onde : $A = \cos(k.x)$
- extension spatiale infinie
- fréquence pure
- (b) paquet d'onde : $A = \sum_k \cos(k.x)$
- extension spatiale limitée
- distribué en fréquence
- (c) corpuscule : $A = 1$ si $x=x_0$ sinon 0 ($\forall k$)
- localisée spatialement
- pas de fréquence déterminée

Relations d'Heisenberg (1927) :

- si la précision sur la position d'une particule est Δx , son impulsion a une précision Δp telle que :
 $\Delta p \cdot \Delta x > \hbar/2$
- si la précision sur le temps (de passage) d'une particule est Δt , son énergie a une précision ΔE telle que : $\Delta E \cdot \Delta t > \hbar/2$

Avantage de ce flou quantique :

- une énergie (ΔE) peut être « emprunter » au vide pendant un laps de temps (Δt) suffisamment court pour que $\Delta E \cdot \Delta t > \hbar/2$
- ... et comme $E=mc^2$, des particules (virtuelles) peuvent être créées et « vivre » pendant un temps d'autant plus court que la particule est lourde !

Les particules *ordinaires*

❖ Quelles sont-elles ?

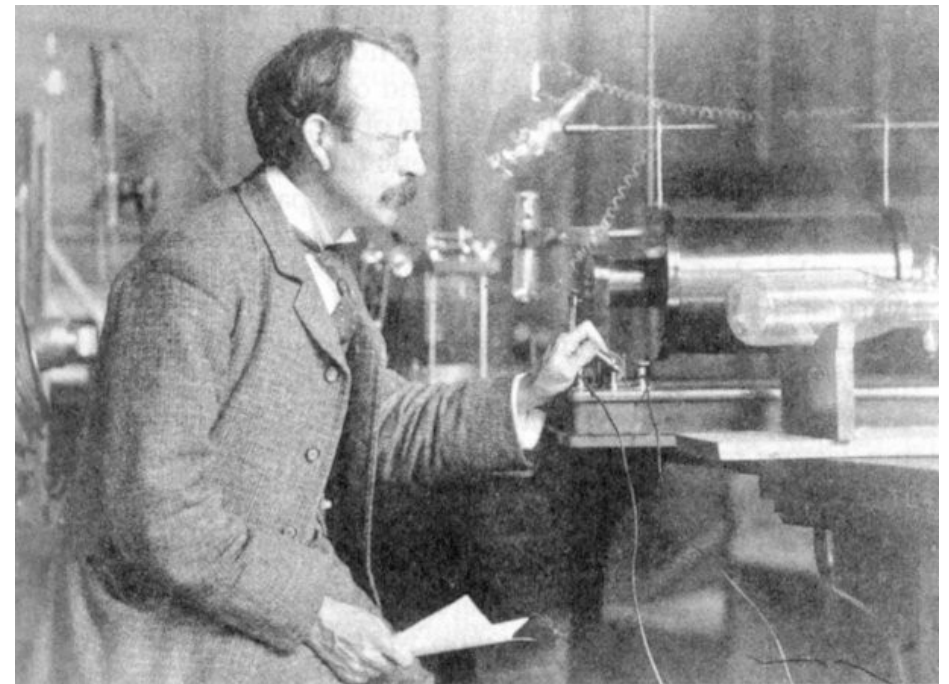
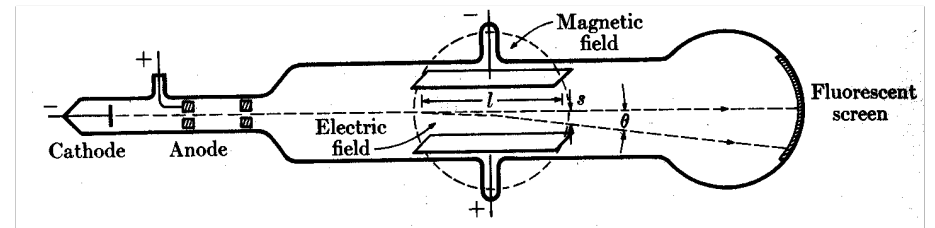
L'électron

Découvert par J-J Thomson en 1897

- charge électrique $= -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- **charge électrique élémentaire** = -1
- mesure sa masse
 $m_e = 1/1800 m_{\text{Hydrogène}}$

L'atome selon Thomson

- « plum-pudding »
- électrons plongés dans un atome lourd composé de charges positives de nature inconnue



↘ l'électron est aujourd'hui encore considéré comme élémentaire

Le noyau atomique

Expe

SONDE ET LONGUEUR D'ONDE

Particule alpha :
masse = 3.7 MeV (7.10^{-27} kg)

Désintégration α du radium

$$E_{\alpha} = 4.6 \text{ MeV}$$

$$\Rightarrow v = 5\% c$$

Nouv

Du point de vue quantique :
 $\lambda = \sim 0.07 \text{ \AA}$
($\sim 10\%$ de la taille de l'atome)

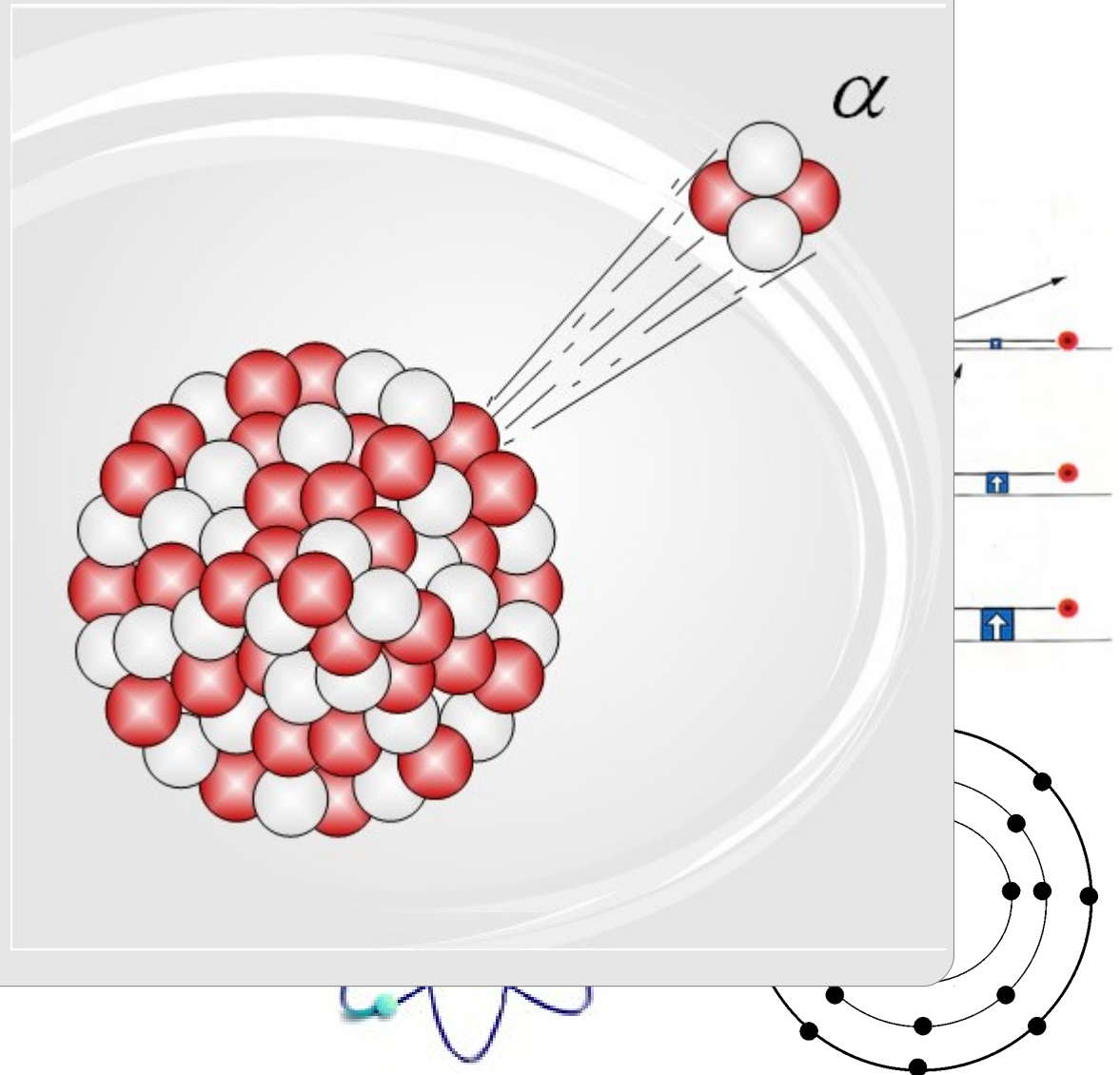
\Rightarrow longueur d'onde permettant
de sonder l'intérieur de l'atome !

Mod

augmenter l'énergie

\Rightarrow diminuer la longueur d'onde

\Rightarrow accès à des détails plus fins

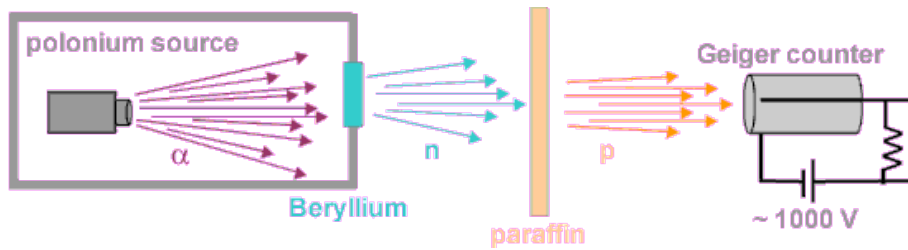


Les nucléons, constituants du noyau

Mise en évidence du **proton** (1919, Rutherford)

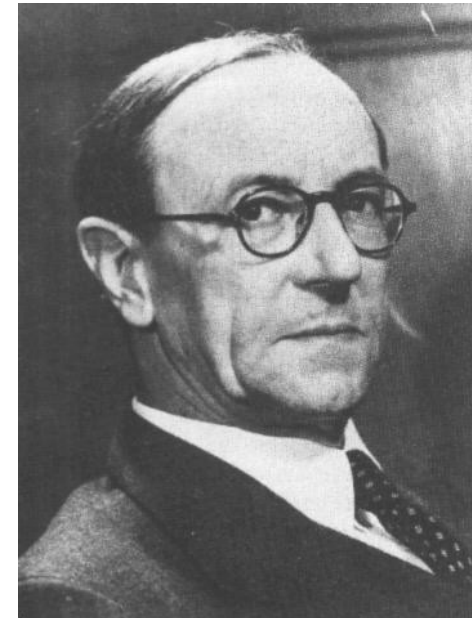
→ charge +1

Découverte du **neutron** (1932, Chadwick)



→ neutre : charge = 0

→ ~ même masse que le proton



Les particules *ordinaires*

- ❖ Les constituants de l'atome :
 - nucléons (proton & neutron), électron
 - et ... ?

La radioactivité

Fluorescence des sels d'uranium

1896 - Henri Becquerel

L'uranium émet un rayonnement qui lui est propre

Pierre & Marie Curie

→ ce n'est pas une réaction chimique

3 types de radioactivité selon leur degré de pénétration :

- **rayon α** : identifié à des noyaux d'hélium
- **rayon β** : identifié à des électrons
- **rayon γ** : identifié à des photons énergétiques émis par les noyaux



Pierre & Marie Curie

Les désintégrations β

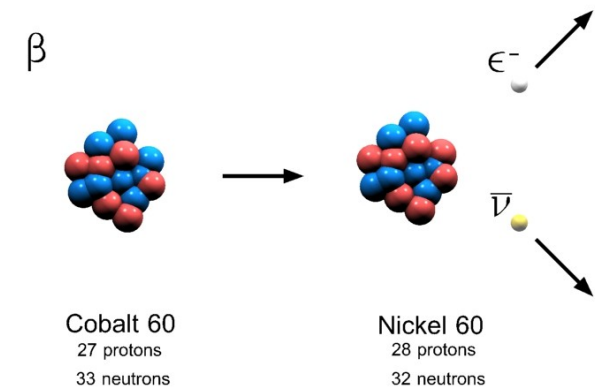
Les désintégrations β posent problème :

→ de l'énergie semble manquer

Hypothèse d'une nouvelle particule

1930, Pauli

→ le **neutrino**



→ 1956 : 1ère mise en évidence d'un neutrino

- Première expérience auprès d'un réacteur nucléaire (Savannah River, USA)
- Cowan et Reines observent la capture d'un (anti-)neutrino par un proton

(Aparté) les interactions : principe

(1/2)

Interaction :

→ résultat

Caractéristique

→ nature

→ intensité

→ portée

Exemples :

→ interaction gravitationnelle

- $\mathbf{F}_{12} = 1/(4\pi\epsilon_0) \times \frac{q_1 q_2}{r^2} \times \mathbf{u}_{12}$

- $1/(4\pi\epsilon_0)$

→ interaction gravitationnelle

- $\mathbf{F}_{12} = -G \times m_1 m_2 / r^2 \times \mathbf{u}_{12}$

- $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2 / \text{kg}^2$

⇒ trop faible pour jouer un rôle en physique des particules

LOIS DE CONSERVATION

Les interactions respectent certaines lois de conservation

⇔ Certaines grandeurs sont conservées

⇒ Elles sont les mêmes avant et après l'interaction

Exemples :

- l'impulsion

- l'énergie

- la charge électrique

- ...

Les interactions sont déterminées par des lois de conservation

$$|\vec{F}_{Q-q}| = |\vec{F}_{q-Q}| = k \frac{|q \times q'|}{r^2}$$



La force électrostatique entre 2 électrons e_1 et e_2 :

- comment e_1 sait-il que e_2 existe et qu'il est donc soumis à une force ?
- échange d'information à la vitesse de propagation du champ électromagnétique
- ⇔ échange d'un photon *virtuel*



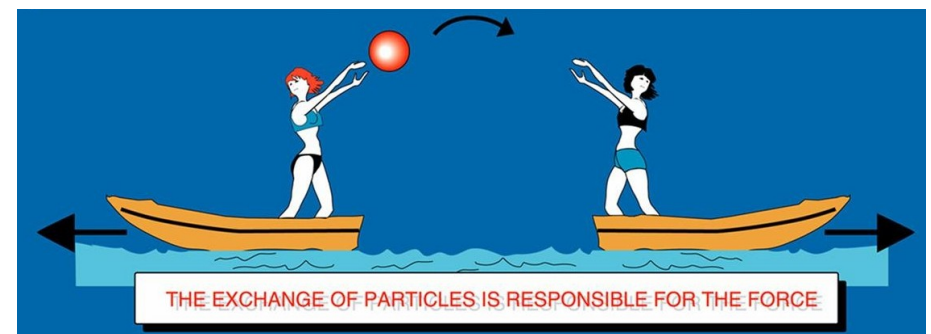
$E' > E$!! OK si $\Delta t < \hbar/E_\gamma \Rightarrow \Delta t_{\max} = \hbar/E_\gamma$

$\Delta t_{\max} = d_{\max}/c \Rightarrow d_{\max} = \hbar c/E_\gamma$

$m_\gamma = 0 \Rightarrow E_\gamma$ aussi petit qu'on veut $\Rightarrow d_{\max} = \infty$

↘ Interaction fondamentale:

- échange de particules
- particule échangée = vecteur de l'interaction
- portée de l'interaction $\propto 1/m_{\text{vecteur}}$



Interactions dans l'atome

Interaction

→ élect

Interaction

→ entre

→ oppo

→ porté

→ vecte

1934,

pion

Interaction

→ nucl

n →

→ inten

→ porté

→ vecteur ? ponctuelle ?

PARTICULE DE MATIERE

	M	Q	agit par interaction			Obs.
			forte	électro-magnétique	faible	
proton	1	+1	✓	✓	✓	1919
neutron	1	0	✓	✗	✓	1932
électron	1/2000	-1	✗	✓	✓	1897
neutrino	0 ?	0	✗	✗	✓	1930

VECTEUR D'INTERACTION

vecteur	M	interaction	
photon	0	électro-magnétique	1905
pion	1/10	nucléaire forte	1934
??	1000	faible	✗



Le positron

Equation du mouvement d'un électron

1928, Dirac

- méca
- cas re
- Equat
- $i\hbar \nabla^2 \psi = H\psi$
- où $H = \frac{p^2}{2m} + V$
- 2 solu
- énergi
- énergi

Observatio

1932, Anderson

- enreg
- Wilson, une particule avec les mêmes caractéristiques que l'électron mais une charge opposée

L'ANTI-MATIERE

positon = anti-électron
 la découverte de l'anti-électron marque la naissance de l'**anti-matière**

Le concept peut-être généralisé à toute particule.

- Ainsi à chaque particule correspond une anti-particule :
- de même masse
 - de même *spin*
 - de charge opposée

Par convention, l'anti-particule de x est notée \bar{x}

spin : moment angulaire interne d'une particule.



Quantum

Quantum
Field Theory

Relativistic
Mechanics

Speed



Fig. 1. A 65 million volt positron ($H_p = 2.1 \times 10^6$ gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ($H_p = 1.5 \times 10^6$ gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.

L'âge d'or

- ❖ Une foison de nouvelles particules
- ❖ Le modèle des quarks

Le muon

leptons : particules n'interagissant pas par interaction forte par opposition aux **hadrons**

Avec de l'énergie cinétique :
 $E = mc^2$
 équivalence masse-énergie

Pour produire une particule de masse m , il faut :

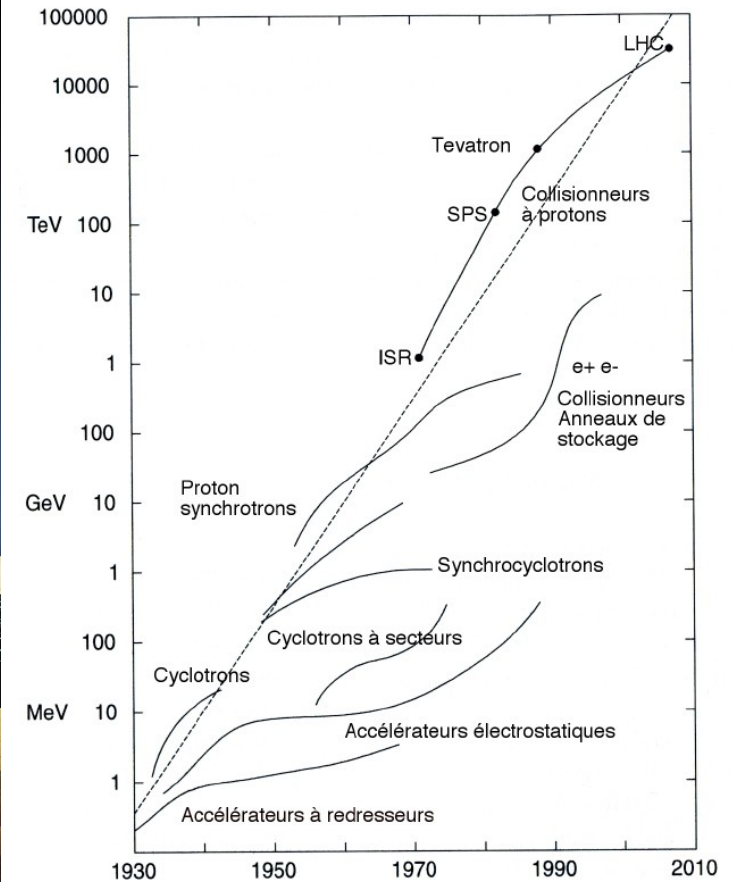
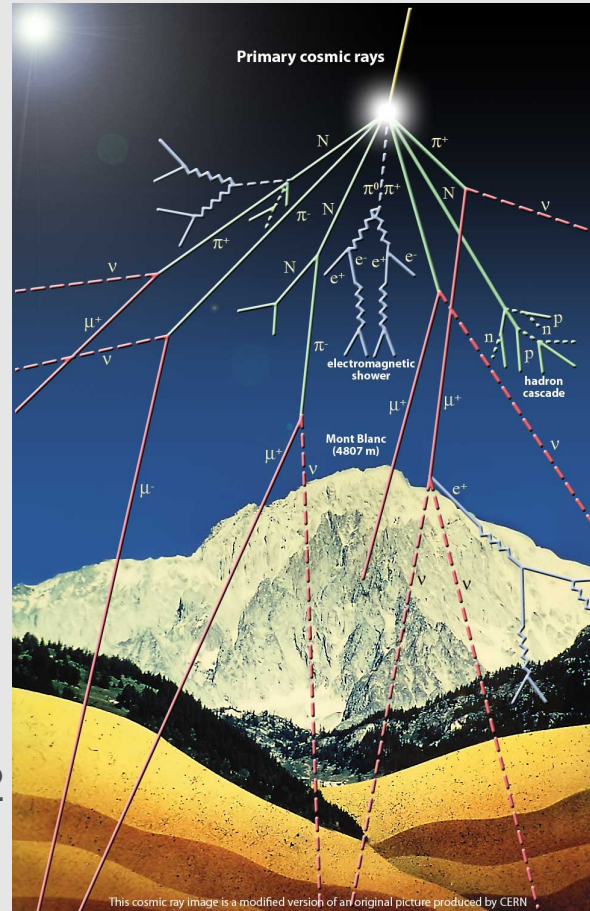
$$E_1 + E_2 > mc^2$$



SOURCES D'ENERGIE

- rayons cosmiques
- source « naturelles »
- découvert par Hess en 1912
- accélérateurs de particules
- de + en + puissants

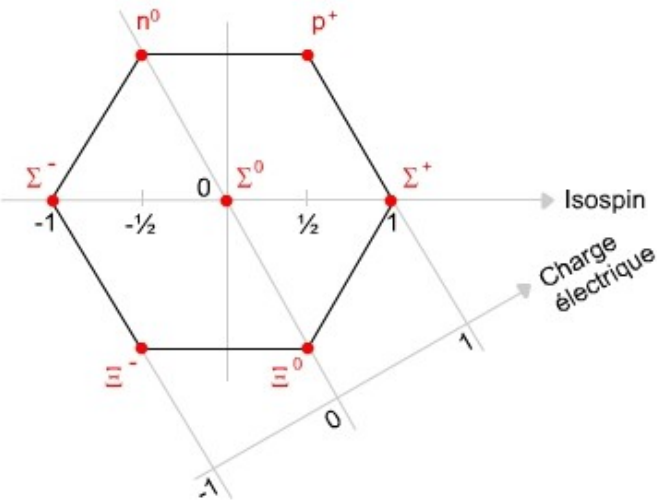
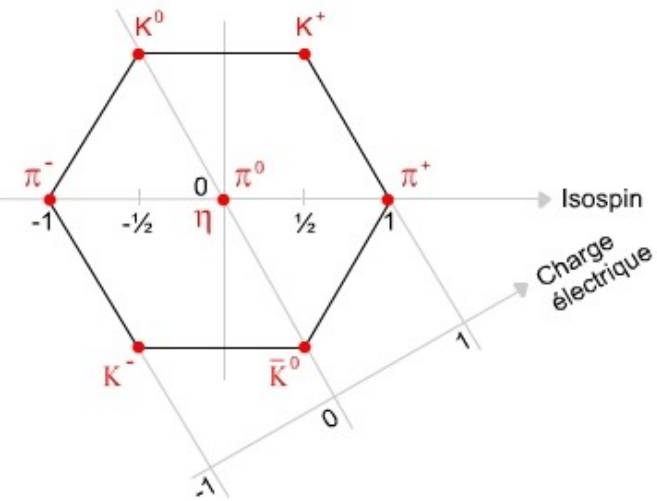
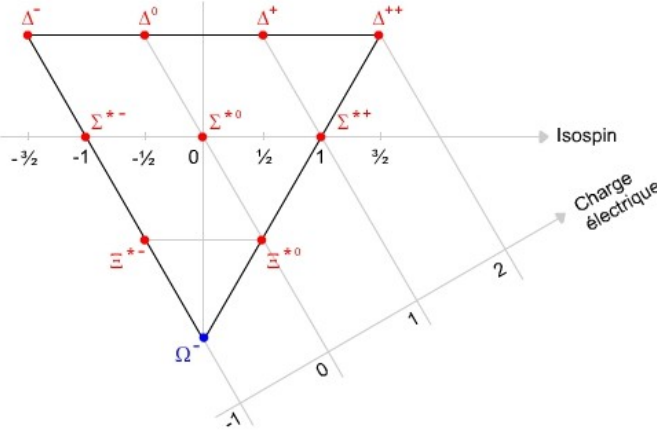
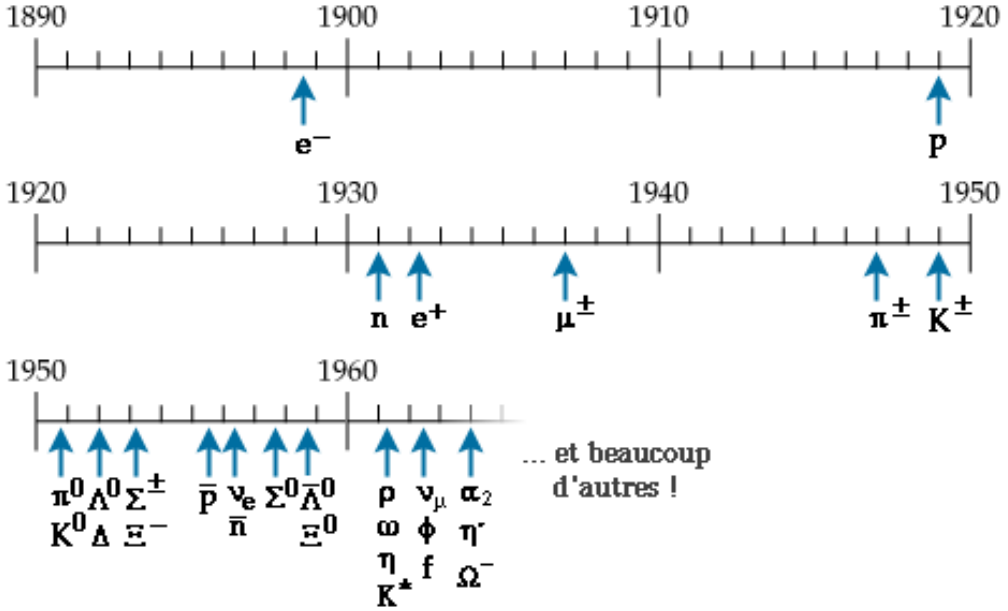
NOUVELLES PARTICULES : COMMENT SONT-ELLES PRODUITES ?



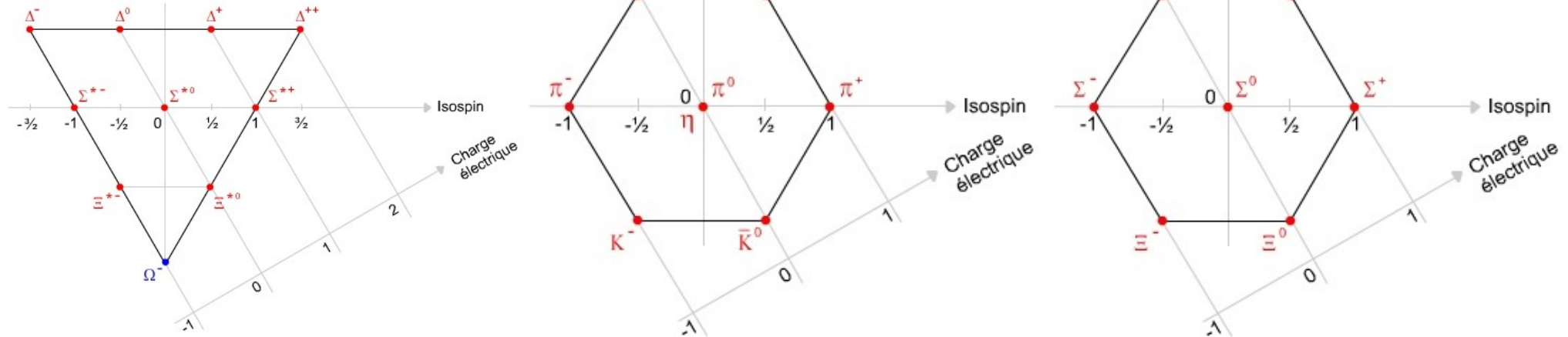
Une pluie de nouvelles particules

1957-1965 : les chambres à bulles

- pluie de nouvelles particules
- K^0, Λ^0 semblent produits par paire ... étrange
- quand on ne comprend pas, on classe



Le modèle des quarks



« Three quarks for Munster Mark » ([Finnegans Wake](#), James Joyce)

1964, Gell-Mann et Nee'mann

- tous les *hadrons* alors connus peuvent être formés à partir de 3 quarks **u** (up), **d** (down) et **s** (strange !) et 3 anti-quarks : $\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}$
- n'est-ce qu'un simple artifice mathématique ?

Mise en évidence

1968, Slac (grand accélérateur d'électron) (Stanford)

- répétition l'expérience de Rutherford (à plus haute énergie)
- mise en évidence de « points durs » à l'intérieur des *hadrons*

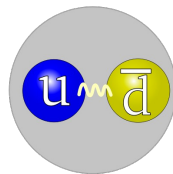
Les quarks

Charge électrique

- les quarks portent des charges fractionnaires :
- $-1/3$ ou $+2/3$ pour les quarks
- $+1/3$ ou $-2/3$ pour les anti-quarks

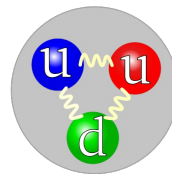
Les quarks ne se déplacent pas librement

- on ne peut pas les observer seuls
- ils sont confinés à l'intérieur de hadrons
- 2 types de hadrons :
- les *baryons* contiennent 3 quarks; ex : protons, neutrons, ...
- les *mésons* contiennent 1 quarks et 1 anti-quark; ex : pion (π), Kaon (K),...



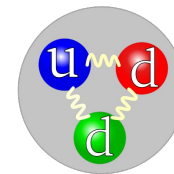
π^+

Un méson léger :
le *pion* chargé



p

Des baryons « ordinaires » :
le proton et le neutron



n

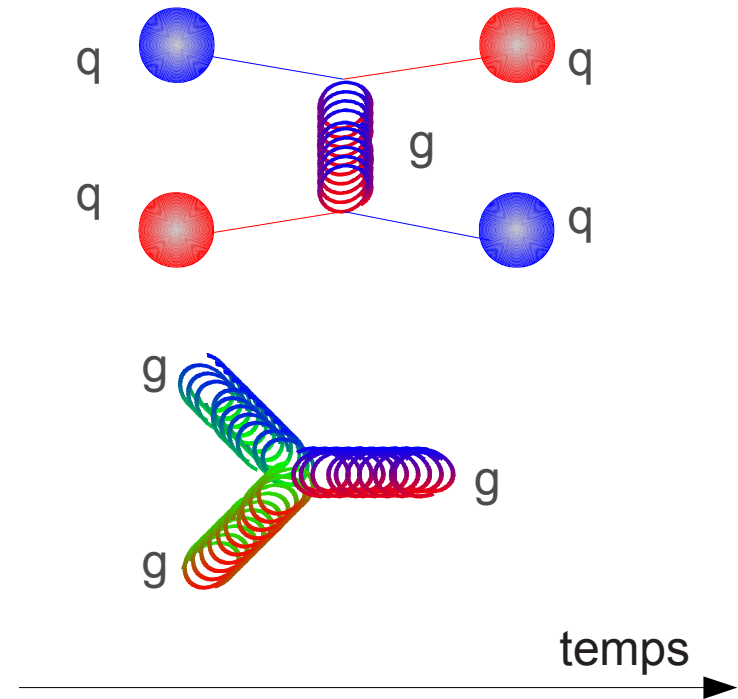
Les quarks et l'interaction forte

Charges de couleur

- nouveau type de charge porté par les quarks
- 6 charges différentes :
 - rouge, vert, bleu pour les quarks
 - $\overline{\text{rouge}}, \overline{\text{vert}}, \overline{\text{bleu}}$ pour les anti-quarks
- combinaisons blanches :
 $rvb = \overline{rvb} = \overline{rr} = \overline{vv} = \overline{bb} = \text{BLANC}$

L'interaction forte

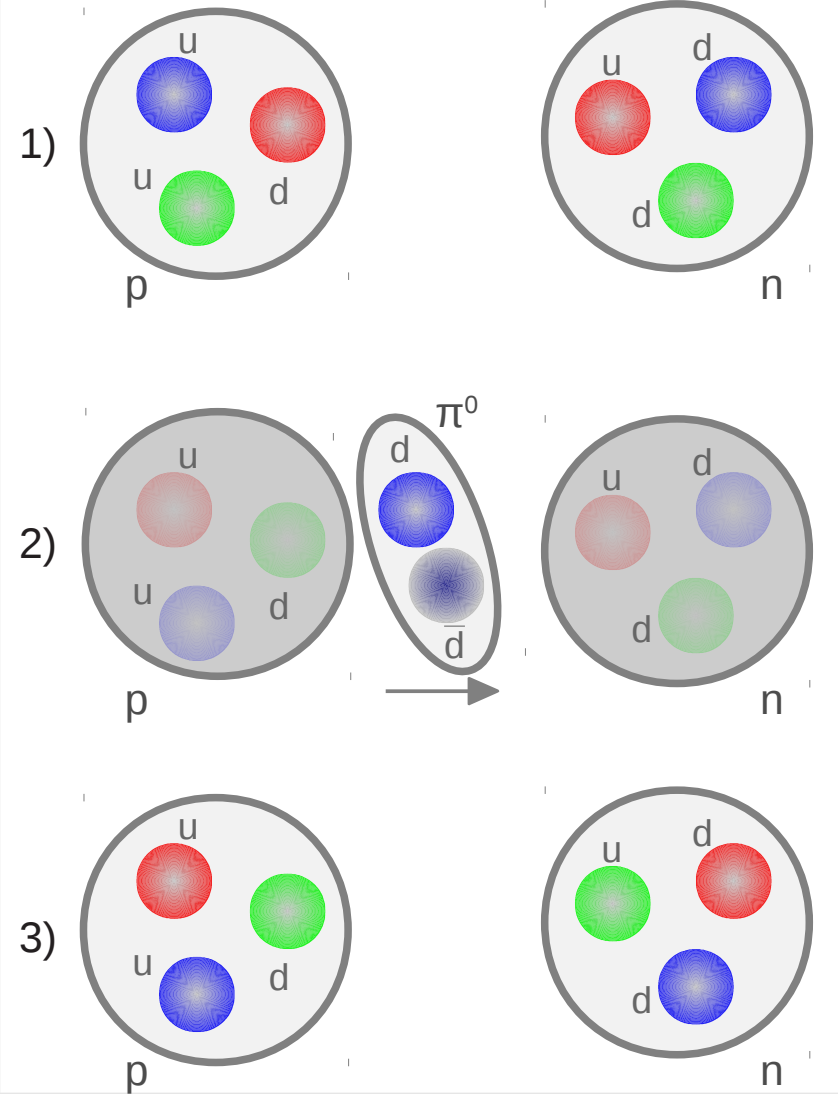
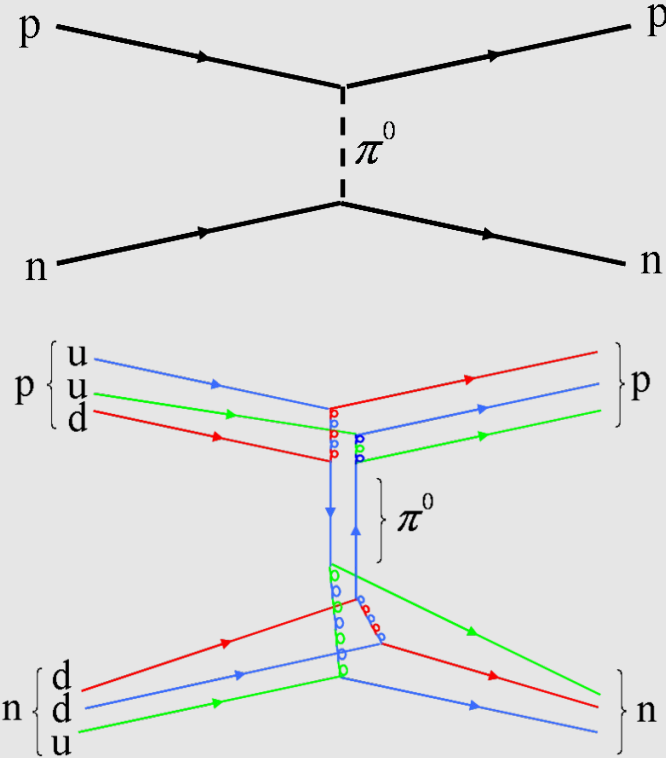
- agit sur les charges de couleur par échange de couleurs
- conserve la saveur
 - saveur totale : avant = après
- vecteur : 8 gluons ($m_g = 0$)
- eux-même porteurs de couleurs
- ils peuvent interagir entre eux



Hadronisation

L'INTERACTION NUCLEAIRE FORTE ?

Une résultante de l'interaction forte entre les quarks



Les découvertes continuent

1962 : découverte d'une nouvelle espèce de neutrino (ν_μ)

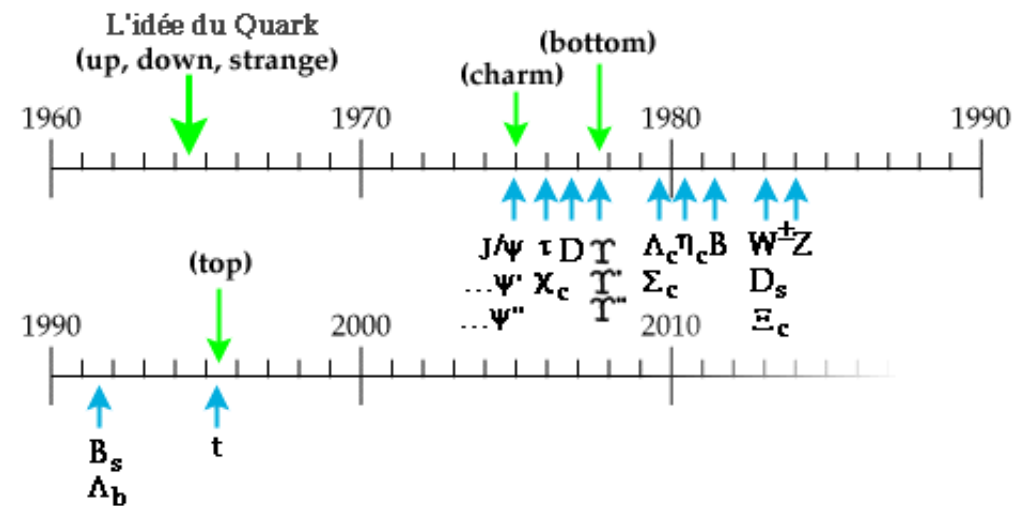
1970 : prédiction du quark charmé (c)
découvert en 1974

1973 : prédiction de l'existence de 2 nouveaux quarks :

- **b** (beau ou bottom)
- découvert en 1976
- **t** (top)
- découvert en 1995

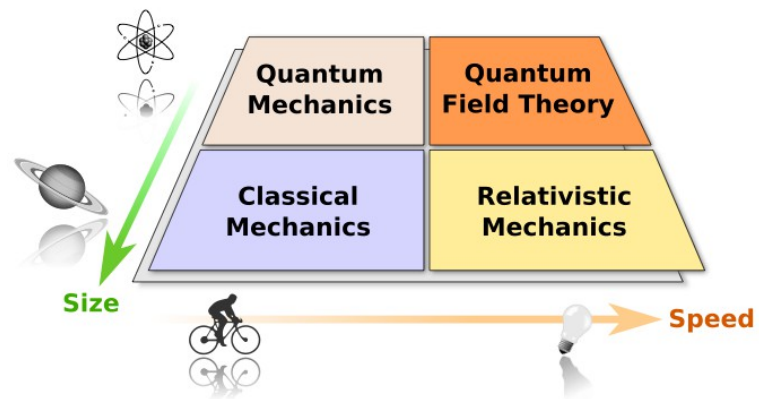
1977 : tau (τ)

2000 : neutrino tauique (ν_τ)



L'ère moderne

❖ Le Modèle Standard

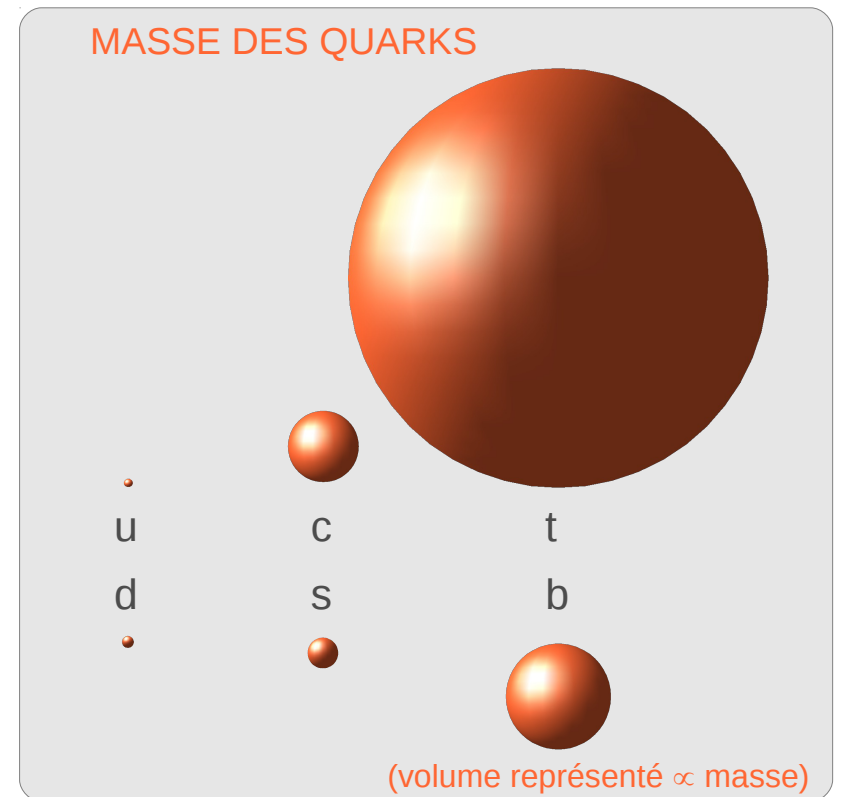


Les particules de matière

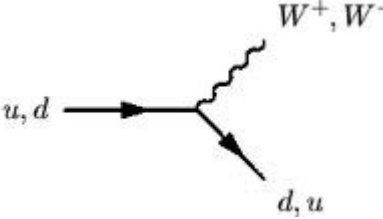
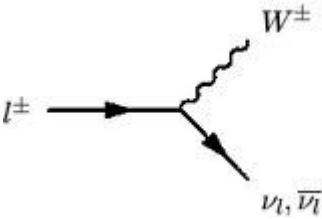
Quarks	+2/3	up	u	charm	c	top	t
	-1/3	down	d	strange	s	bottom (beauty)	b
Leptons	-1	electron	e	muon	μ	tau	τ
	0	neutrino	ν_e	neutrino muon	ν_μ	neutrino tau	ν_τ

Une remarquable organisation

- 3 générations avec la même structure
 - 2 quarks ($q=2/3$, $q=-1/3$)
 - 2 leptons ($q=-1$, $q=0$)
- la première génération comporte les particules de la matière ordinaire
- les membres de la deuxième et troisième familles sont **plus lourds** et **instables**



L'interaction faible



Caractéristique

- interaction
- 3 vecteurs
- m(W)
- m(Z)
- lourd
- ne conserve pas la saveur
- c'est la seule interaction qui agit sur les leptons et les quarks
- ↘ force responsable de la désintégration des particules
- désintégration
- multiples états finaux possibles
- résultat probabiliste

L'INTERACTION ELECTROFAIBLE

1960' : unification des interactions faible et électromagnétique
 Sheldon Glashow, Abdus Salam et Steven Weinberg, Prix Nobel 1979

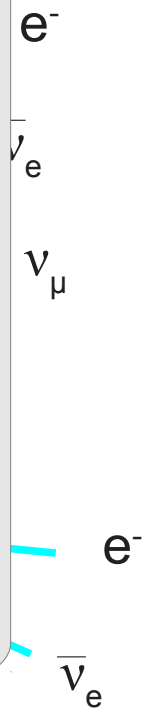
⇒ interaction électrofaible

- comporte 4 bosons : W^+ , W^- , Z^0 , γ

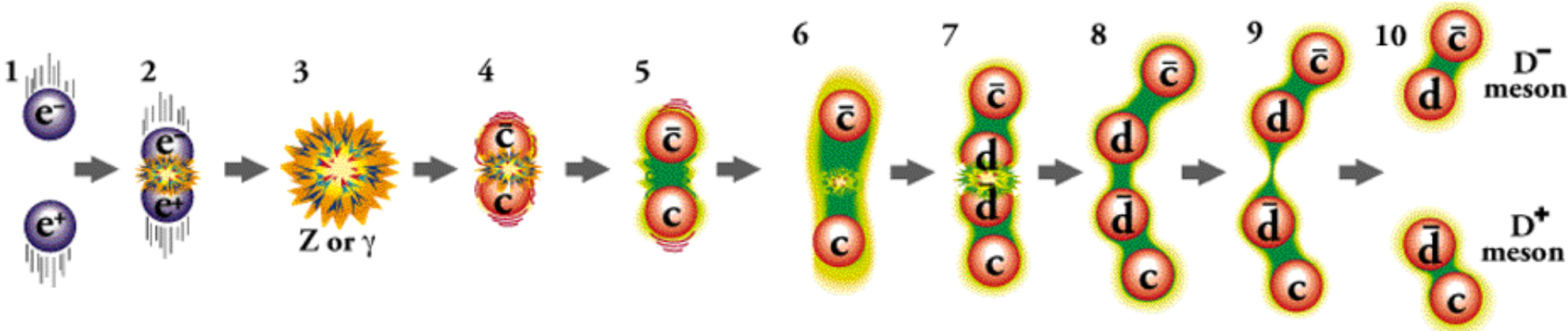
W et Z découverts au CERN en 1983
 Carlo Rubbia et Simon van der Meer, Prix Nobel 1984

Les bosons vecteurs sont naturellement sans masse dans la théorie.
 Or les bosons qu'on observe sont (très) massifs.
 Le mécanisme de Higgs permet de donner une masse au W et Z ainsi qu'à toutes les autres particules.

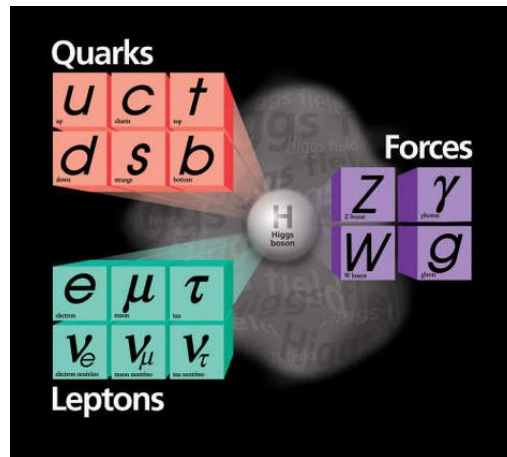
Découverte au CERN du boson de Higgs en 2012 ?



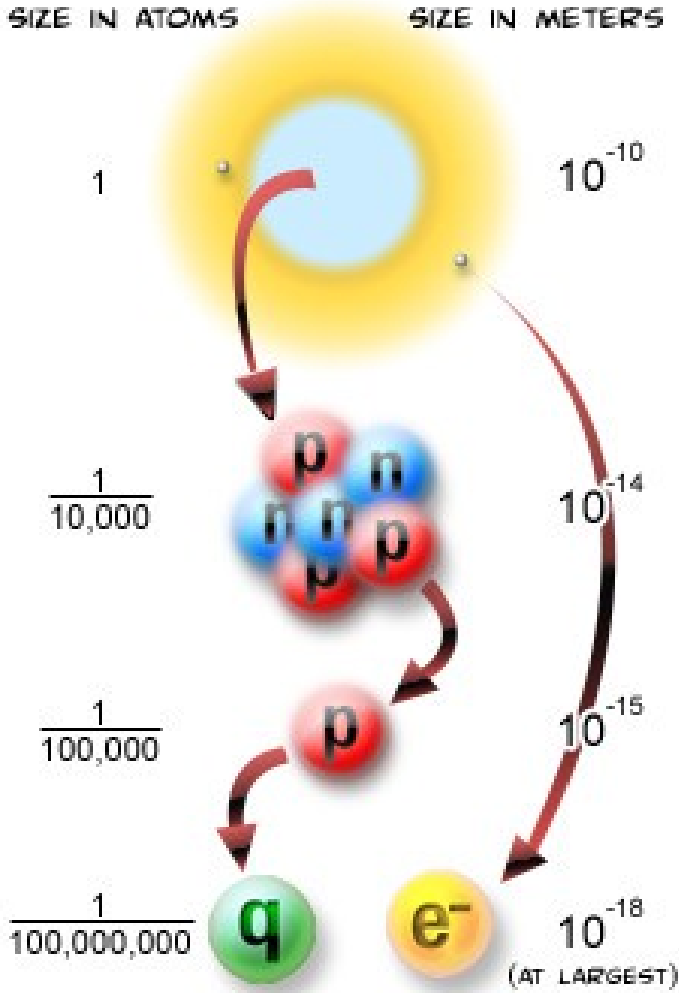
Un exemple complet



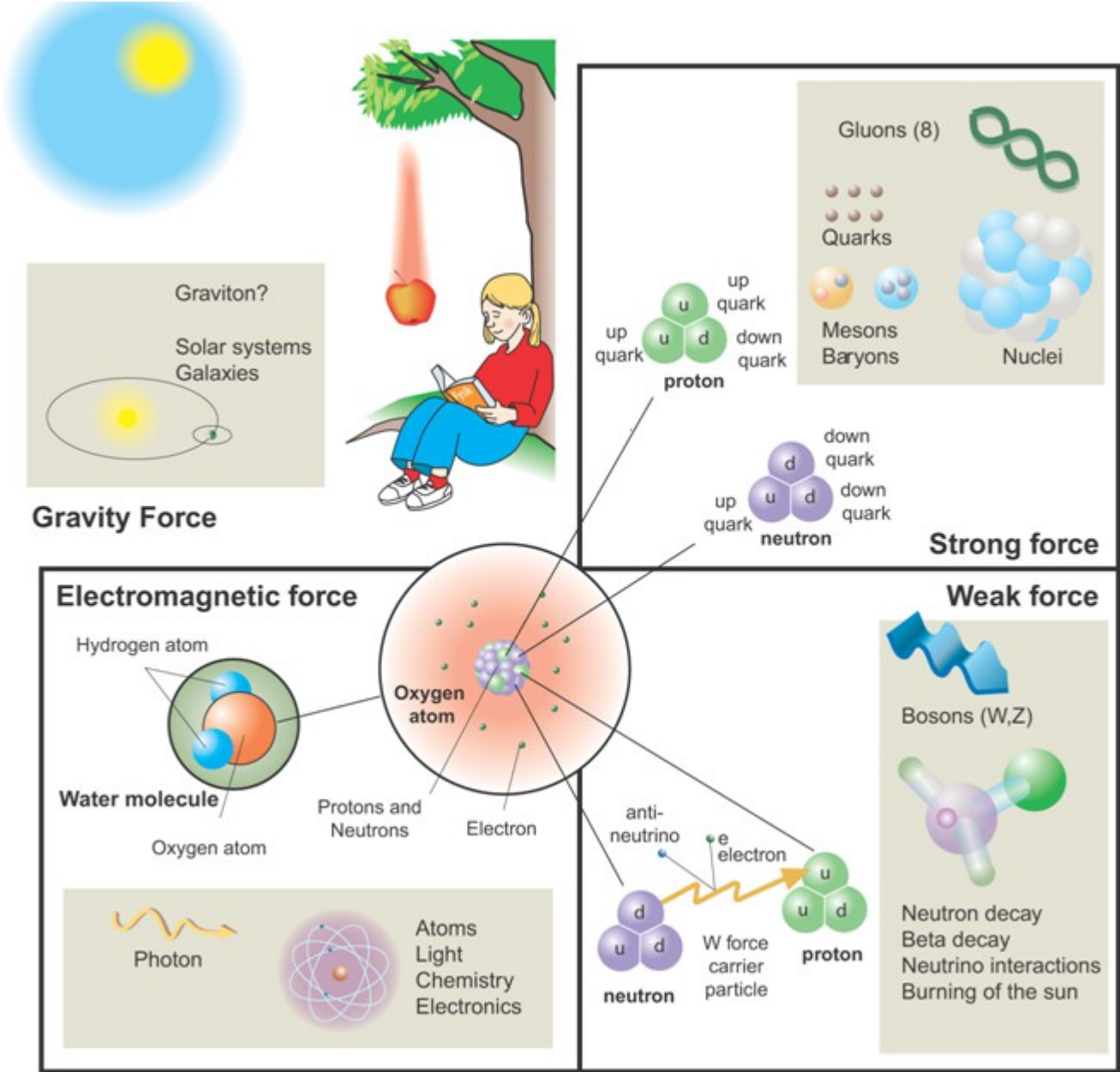
Pour finir



De l'atome aux quarks



Les interactions fondamentales



Le Modèle standard

FERMIONS		LEPTONS <small>peuvent se déplacer librement</small>		QUARKS <small>prisonniers de particules plus grandes, ils ne sont pas observés individuellement.</small>	
<p>La matière ordinaire est composée de particules de ce groupe.</p> <p>Pour la plupart, ces particules étaient présentes juste après le Big Bang. Aujourd'hui on ne les trouve que dans les rayons cosmiques et auprès des accélérateurs.</p> <p style="background-color: #f1c40f; padding: 2px;">ANTIMATIÈRE <small>A chaque particule correspond une antiparticule.</small></p>	Première famille	<p>ÉLECTRON Responsable de l'électricité et des réactions chimiques. Sa charge est de -1.</p>	<p>NEUTRINO ÉLECTRON Sans charge électrique et interagissant rarement avec le milieu environnant.</p>	<p>DOWN Sa charge électrique est -1/3e. Le Proton en contient 1, le Neutron 2.</p>	<p>UP Sa charge électrique est + 2/3e. Le Neutron en contient 1, le Proton 2.</p>
	Deuxième famille	<p>MUON Un compagnon plus massif de l'électron.</p>	<p>NEUTRINO MUON Propriétés similaires à celles du neutrino électron.</p>	<p>ÉTRANGE (STRANGE) Un compagnon plus lourd du quark down.</p>	<p>CHARME (CHARM) Un compagnon plus lourd du quark up.</p>
	Troisième famille	<p>TAU Un compagnon encore plus lourd que le muon.</p>	<p>NEUTRINO TAU Propriétés similaires à celles du neutrino électron.</p>	<p>BEAUTÉ (BEAUTY, BOTTOM) Un compagnon encore plus lourd du quark down.</p>	<p>TOP Hypothétique jusqu'en 1995, un compagnon encore plus lourd du quark up.</p>

BOSONS VECTEURS
Particules fondamentales qui assurent la transmission des forces de la nature.

<p>PHOTON Grain élémentaire de la lumière porteur de la force électromagnétique.</p>	<p>GLUON Porteur de la force "forte" entre quarks.</p>	<p>BOSONS INTERMÉDIAIRES : W⁺, W⁻ et Z⁰ Porteurs de la force "faible", responsable des désintégrations radioactives.</p>
---	---	--

Conclusion

Le Modèle Standard décrit très précisément tous les phénomènes observés en laboratoire de l'eV au TeV

Pour autant, il reste insatisfaisant :

- pourquoi **3 familles** de particules ?
- pourquoi ont-elles des masses si différentes : e.g. $m(t) \sim 10^5 m(u)$!
- le MS décrit la force électromagnétique et la force faible comme une seule et même force (la force électrofaible).
 - pourquoi la force forte est-elle si différente ?
 - GUT (Grand Unified Theory) ? SUSY ?
 - quid de la gravitation ?
- il n'explique pas la disparition de l'anti-matière

De plus, l'astronomie & la cosmologie montre que :

- le modèle standard n'explique que 4% du contenu de l'univers
- l'univers contient :
 - ~22 % de matière de nature inconnue (matière noire)
 - ~74 % d'énergie de nature inconnue (énergie noire)
- **96 %** du contenu de l'univers reste mystérieux !

Perspectives

Au delà du Modèle standard

→ Comment y accéder ?

Les clefs :

- $E=mc^2$!! Pour produire des particules très massives (bosons de Higgs, particules supersymétriques), il faut mettre en jeu suffisamment d'énergie dans les collisions
- Pour voir des effets fins et rares, il faut produire un très grand nombre de collisions

→ réponse : le LHC ?

En plus

Petit rappel (?) : loi fondamentale de la dynamique

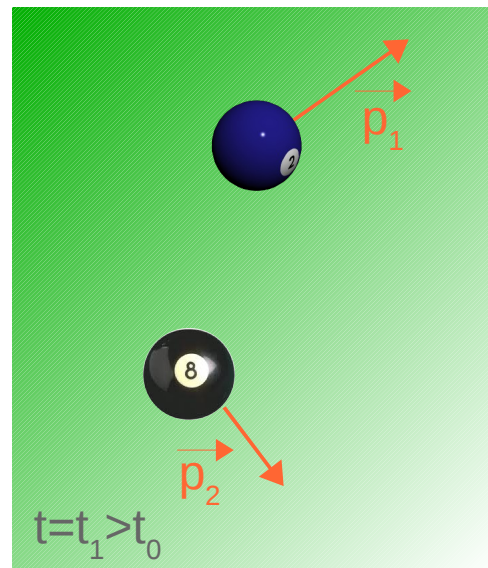
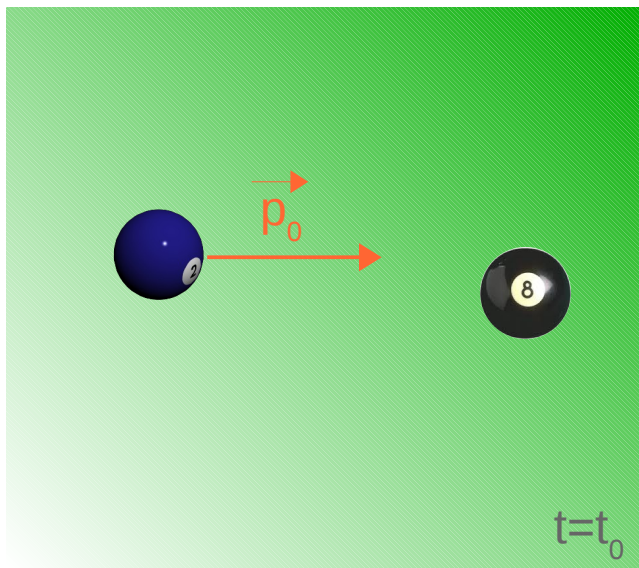
$$\sum_i \mathbf{F}_i = m \mathbf{a}$$

- \mathbf{F}_i : forces exercées sur le système (N)
- m : masse du système (kg)
- $\mathbf{a} = d\mathbf{v}/dt$: accélération du système (m/s^2)

p : quantité de mouvement

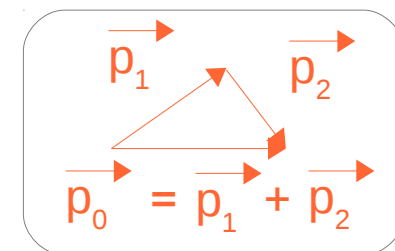
- classiquement : $\mathbf{p} = m \mathbf{v}$ (kg.m/s)

$$\Rightarrow \sum_i \mathbf{F}_i = d\mathbf{p}/dt$$



Dans un système isolé ($\sum_i \mathbf{F}_i = \mathbf{0}$), la quantité de mouvement est conservée

$$d\mathbf{p}/dt = 0 \Rightarrow \mathbf{p} = \text{cst}$$



1905 : Annus Mirabilis

- ❖ Effet photo-électrique (9 juin)
- ❖ Mouvement brownien (18 juillet)
- ❖ Relativité restreinte (26 septembre)
- ❖ Équivalence masse-énergie (21 novembre)

(articles d'Einstein publiés dans « Annalen der Physik »)

Le mouvement brownien

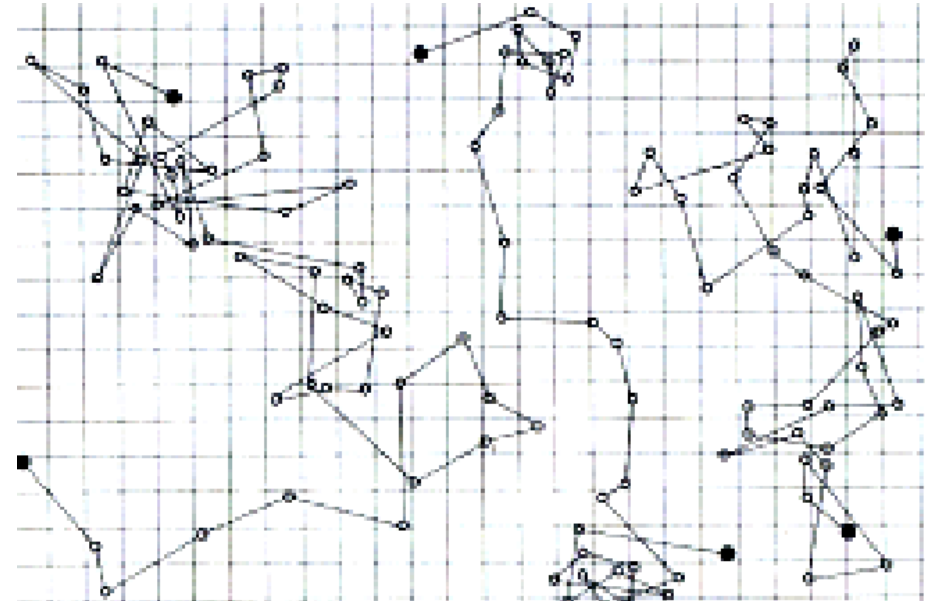
Mouvement de petites particules en suspension dans un fluide

- découvert en 1827 par Brown (botaniste)
- expliqué par Einstein comme la résultante des impulsions transmises à la particule par les molécules du milieu soumis à l'agitation thermique :

$$(\bar{\Delta}x)^2 = \frac{RT}{N_A} \cdot \frac{1}{3\pi\mu a} \tau$$

- formule ayant permis à Jean Perrin de mesurer le nombre d'Avogadro
« Il devient difficile de nier la réalité objective des molécules » J. Perrin

↘ argument en faveur de la théorie atomiste de la matière encore en débat à l'époque



« ce travail a contribué, plus qu'aucun autre, à convaincre les physiciens de la réalité des atomes et des molécules, de la théorie de la chaleur, et du rôle fondamental joué par les probabilités dans les lois de la nature » Max Born

Mécanique quantique

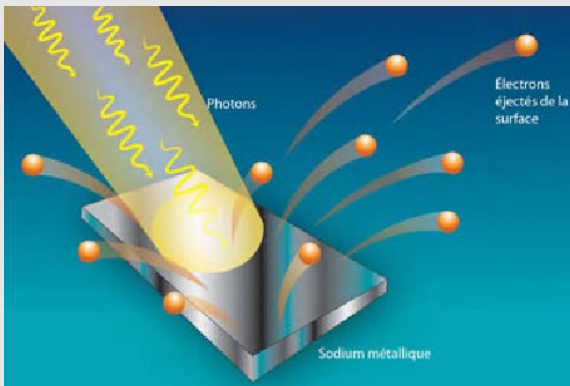
Les quanta

l'**action** [énergie×temps] (Joule×seconde)
 - grandeur caractérisant la trajectoire d'un système
 - *principe de moindre action*: parmi toutes les trajectoires possibles, celle effectivement réalisée est celle qui minimise l'action

Ordres de grandeurs

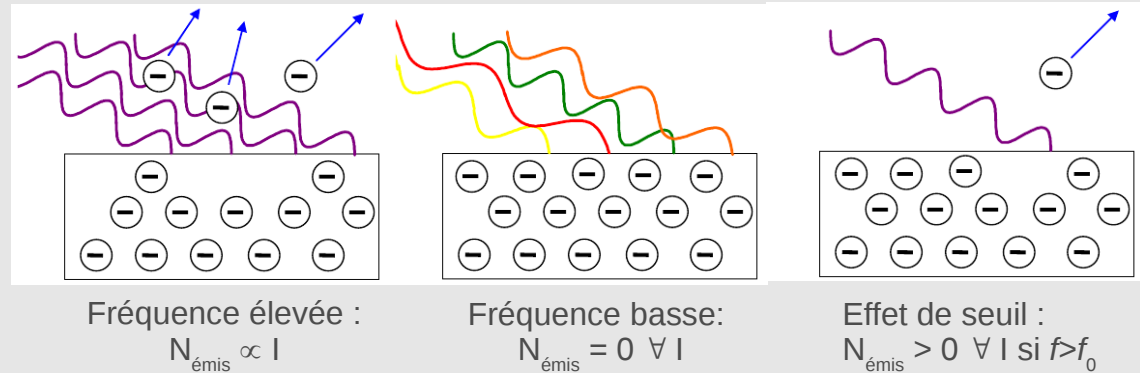
L'EFFET PHOTO-ELECTRIQUE

Un matériau métallique exposé à la lumière peut émettre des électrons



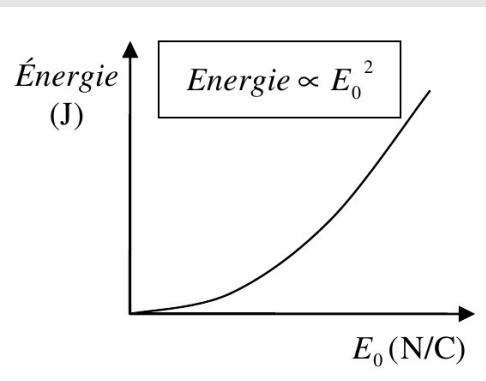
La lumière apporte l'énergie nécessaire pour libérer l'électron de sa structure

Mais la longueur d'onde de la source lumineuse joue un rôle ...

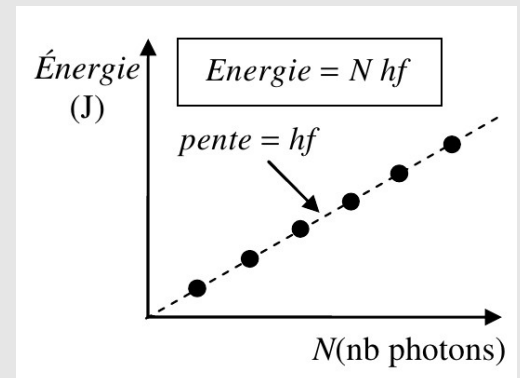


... rôle non expliquée par l'optique ondulatoire ou l'électromagnétisme

INTERPRETATION



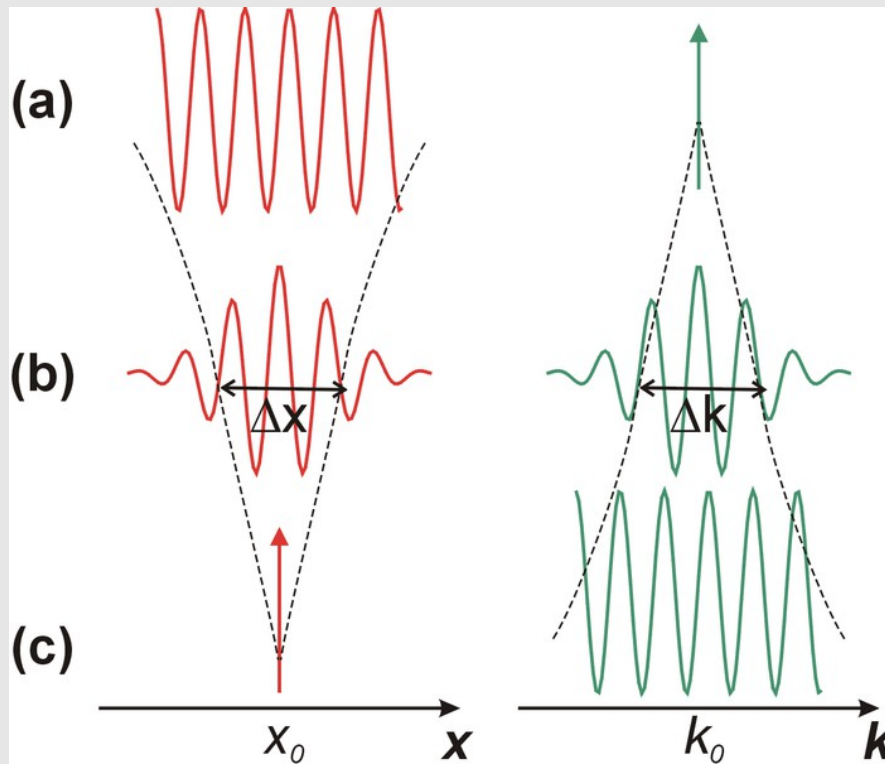
La lumière porte l'énergie par quanta
 - nature corpusculaire (grain) : photon
 - quanta d'énergie du photon :
 $E = h \nu$



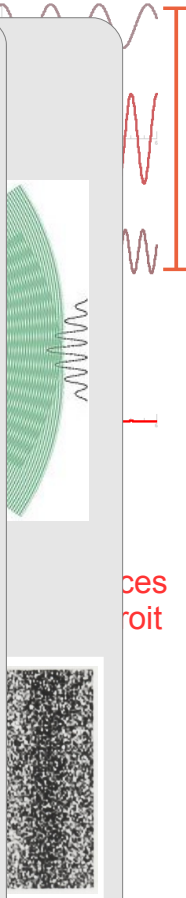
Dualité onde-corpuscule

paquet d'ondes :
 exemples :
 - $\varphi(x) = \sum_i A_i \cos(k x)$
 - $\Psi(x) = \sum_i A_i e^{ikx}$
 note : $e^{ix} = \cos(x) + i \sin(x)$

ONDE ET CORPUSCULE



- (a) onde :
 - extension spatiale infinie
 - fréquence pure
- (b) paquet d'onde :
 - extension spatiale limitée
 - distribué en fréquence
- (c) corpuscule :
 - localisée spatialement
 - pas de fréquence déterminée



ces
roit

- particule de force
- ex : le photon

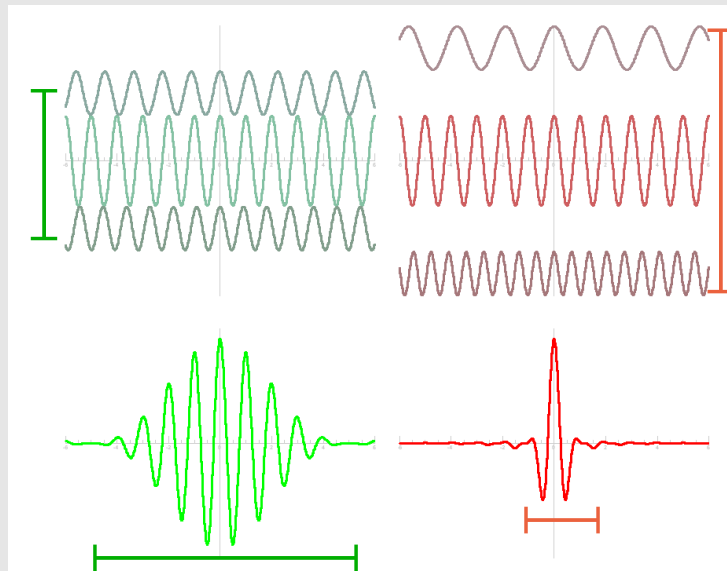
Aujourd'hui utilisé par ex dans les IRM

→ physique universelle (décohérence) [S. Haroche – nobel 2012]

ONDE, CORPUSCULE ET PAQUET D'ONDE

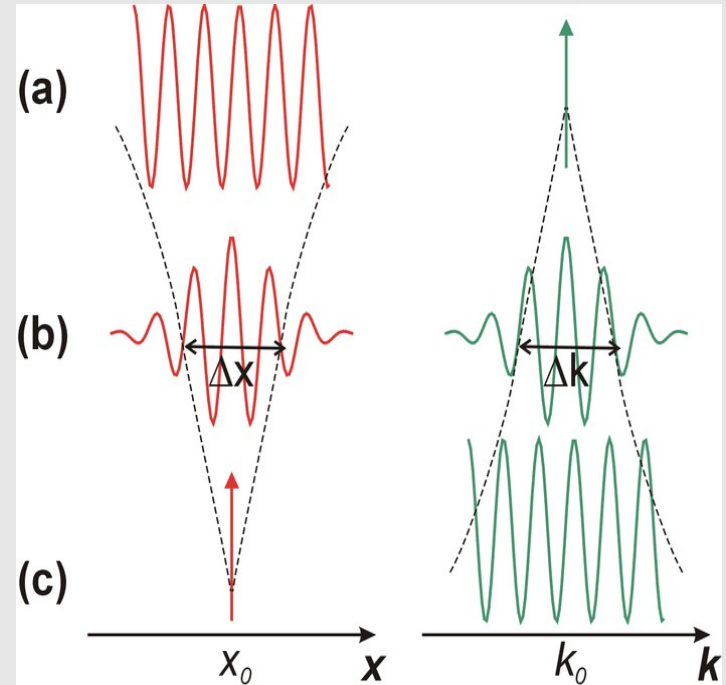
Paquet d'onde :

- superposition de plusieurs ondes (planes) de fréquences différentes
- l'interférence (destructive) entre ces ondes donne naissance à un *paquet d'onde*



Bande de fréquences étroite \Rightarrow paquet étendu

Bande de fréquences large \Rightarrow paquet étroit



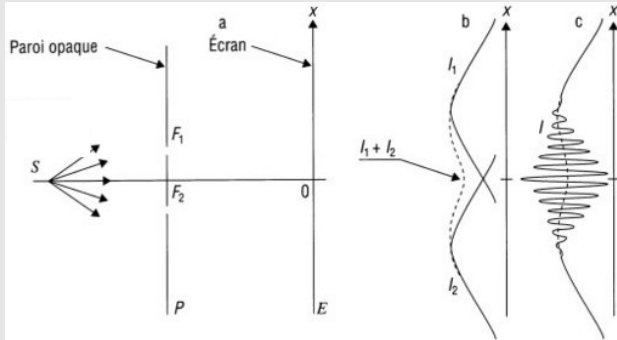
- (a) onde : $A = \cos(k.x)$
- extension spatiale infinie
 - fréquence pure
- (b) paquet d'onde : $A = \sum_k \cos(k.x)$
- extension spatiale limitée
 - distribué en fréquence
- (c) corpuscule : $A = 1$ si $x=x_0$ sinon 0 ($\forall k$)
- localisée spatialement
 - pas de fréquence déterminée

Mécanique quantique : dualité onde-corpuscule

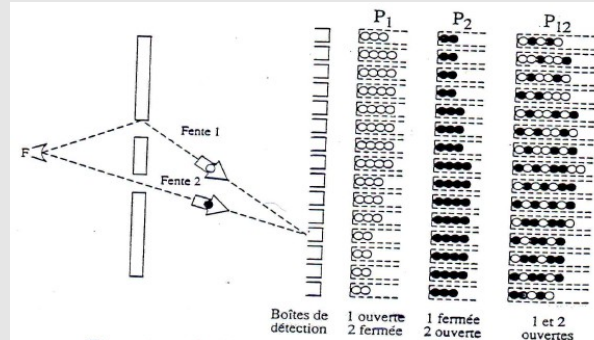
Constante de Planck : $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

L'EXPERIENCE DES FENTES D'YOUNG

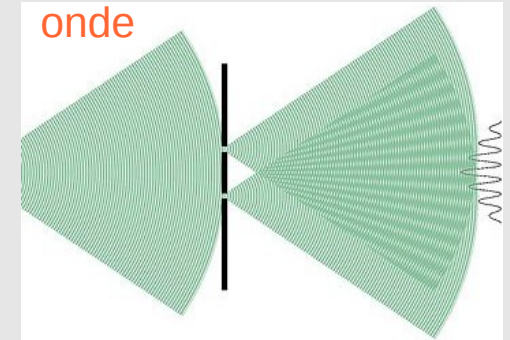
L'expérience :



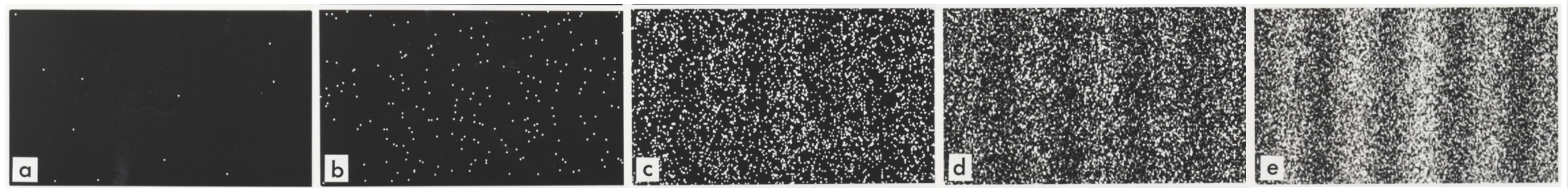
Cas #1: projectile = bille



Cas #2: projectile = onde



Cas #3: projectile = objet quantique (électron, photon)



On peut observer les impacts individuels et les franges d'interférences !

Remarque : si on détecte par quel fente la particule passe, l'interférence disparaît.

macroscopique → non intuitif !

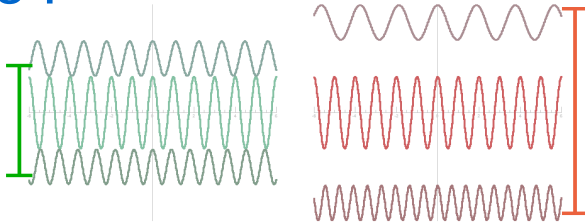
par les caractéristiques de l'onde associée.

ex : la position d'une particule

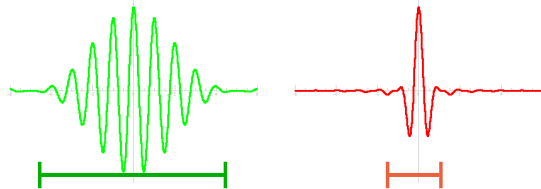
Mécanique quantique : les relations d'incertitude

Paquet d'onde :

superposition de plusieurs ondes (planes) de fréquences différentes

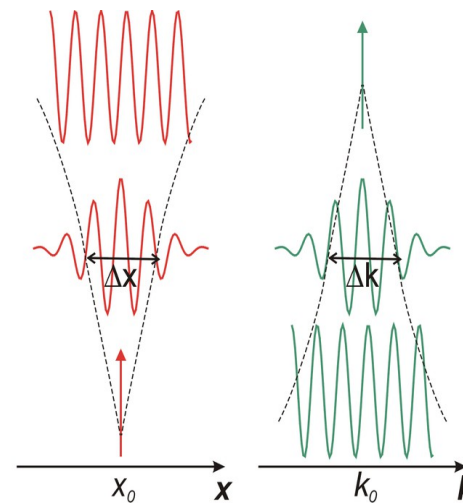


l'interférence (destructive) entre ces ondes donne naissance à un *paquet d'onde*



Bande de fréquences étroite \Rightarrow paquet étendu

Bande de fréquences large \Rightarrow paquet étroit



onde : $A = \cos(k.x)$

- extension spatiale infinie
- fréquence pure

paquet d'onde : $A = \sum_k \cos(k.x)$

- extension spatiale limitée
- distribué en fréquence

corpuscule : $A = 1$ si $x=x_0$ sinon 0 ($\forall k$)

- localisée spatialement
- pas de fréquence déterminée

Relations d'Heisenberg (1927) :

\rightarrow si la précision sur la position d'une particule est Δx , son impulsion a une précision Δp telle que :

$$\Delta p \cdot \Delta x > \hbar/2$$

\rightarrow si la précision sur le temps (de passage) d'une particule est Δt , son énergie a une précision ΔE telle que : $\Delta E \cdot \Delta t > \hbar/2$

Avantage de ce flou quantique :

- une énergie (ΔE) peut être « emprunter » au vide pendant un laps de temps (Δt) suffisamment court pour que $\Delta E \cdot \Delta t > \hbar/2$

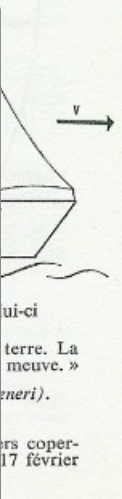
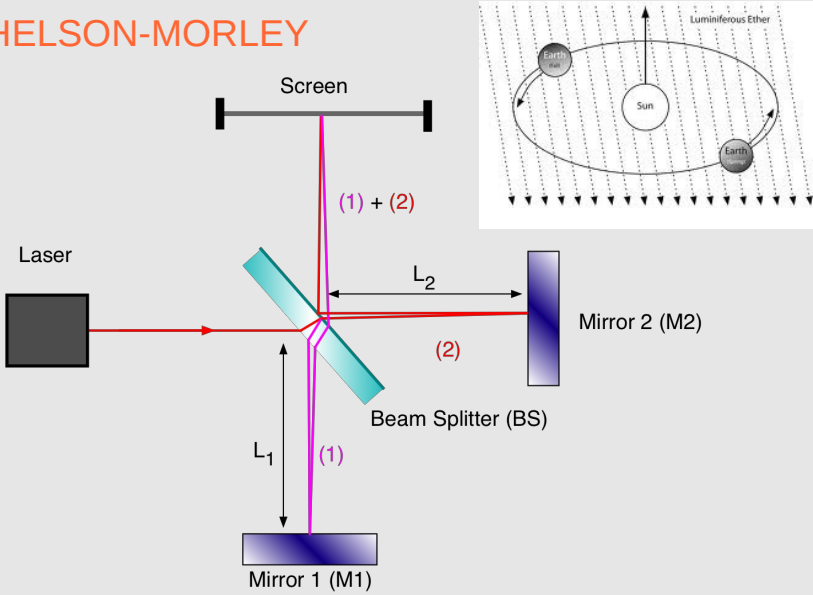
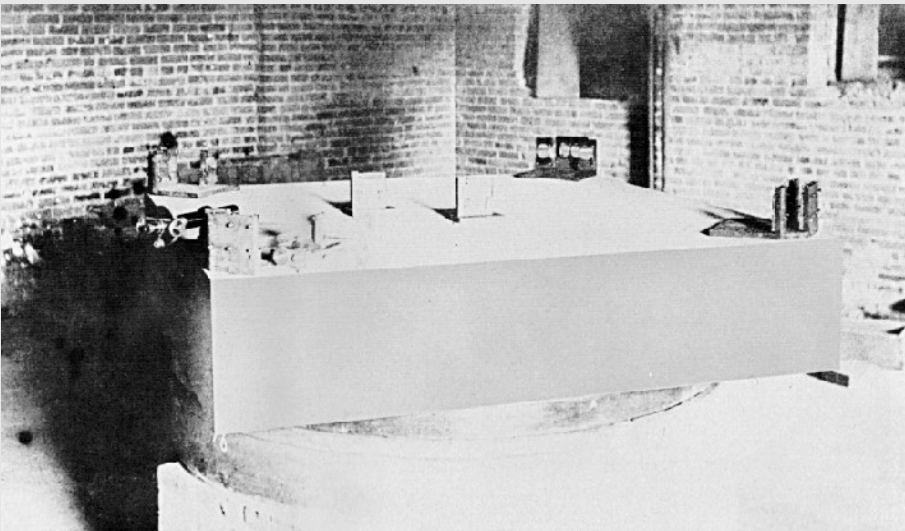
- ... et comme $E=mc^2$, des particules (virtuelles) peuvent être créées et « vivre » pendant un temps d'autant plus court que la particule est lourde !

Relativité restreinte

REFERENTIEL INERTIEL (=GALILEEN)

référentiel dans lequel un objet isolé est en translation rectiligne uniforme
⇨ référentiel dans lequel le principe d'inertie s'applique

EXPERIENCE DE MICHELSON-MORLEY



«...
terre. La
meuve.»
Copernic
17 février

Tentative de mesure du mouvement de la terre dans l'éther lumineux
⇨ Pas de direction privilégiée observée

- Galilee, *Dialogue concernant les deux plus grands systemes du monde*, 1632

1905, A. Einstein se référant seulement à Newton, Maxwell, Hertz, Doppler and Lorentz

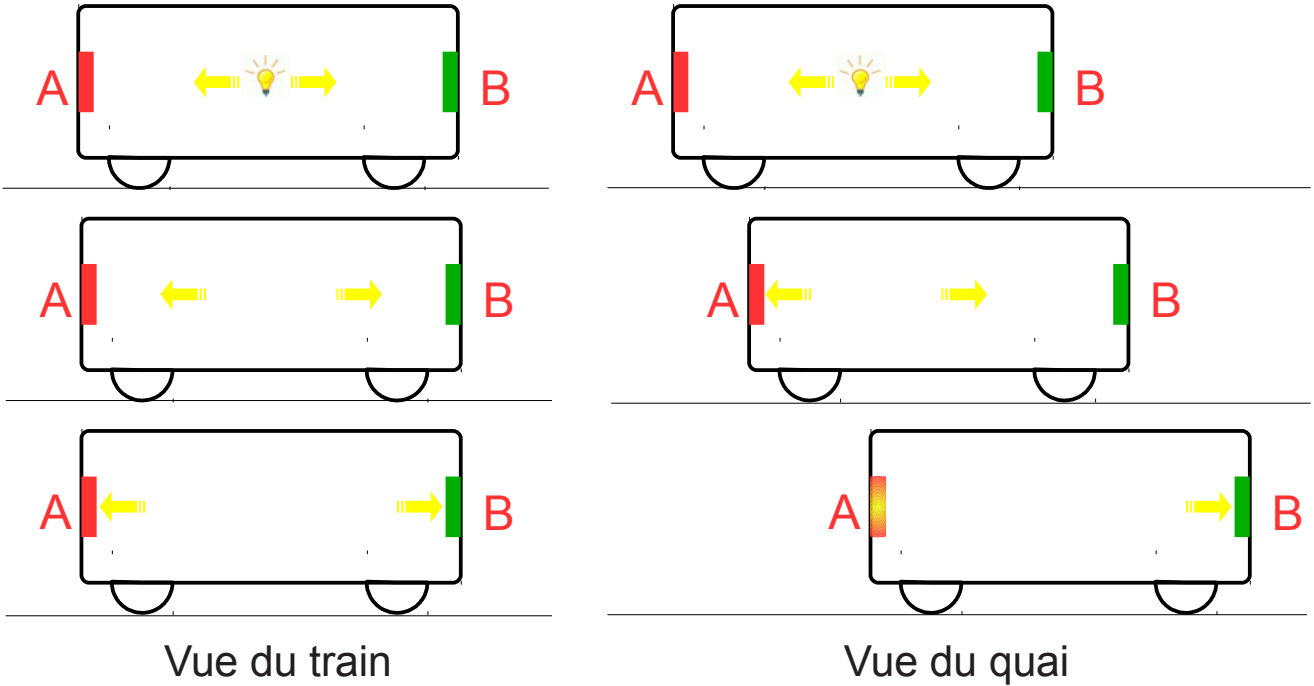
Postulats de la relativité restreinte

- les lois de la physique ont la même forme dans tous les réf. inertiels
- plus seulement les lois de la mécanique !
- « restreinte » aux référentiels inertiels
(étendue à tous les référentiels en relativité générale)
- la vitesse de la lumière dans le vide est la même dans tous les réf. inertiels
- abandon de l'éther

Conséquences

- simultanéité et causalité
- contraction des longueurs et dilatation du temps
- équivalence masse – énergie

Simultanéité – causalité

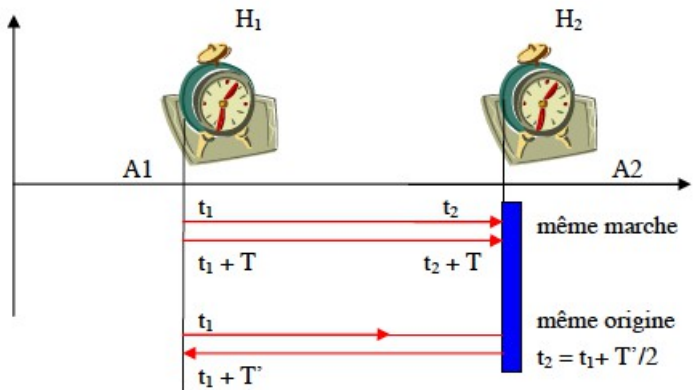


Vue du train :
 A et B atteints simultanément

Vue du quai :
 A atteint avant B

⇒ Relativité de la simultanéité
 Paradoxe du train piégé

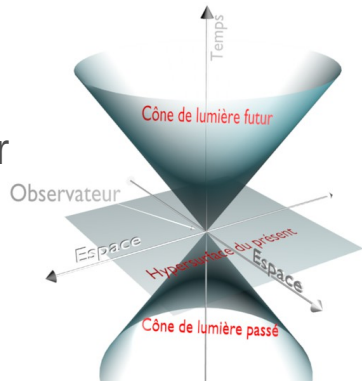
Synchronisation des horloges



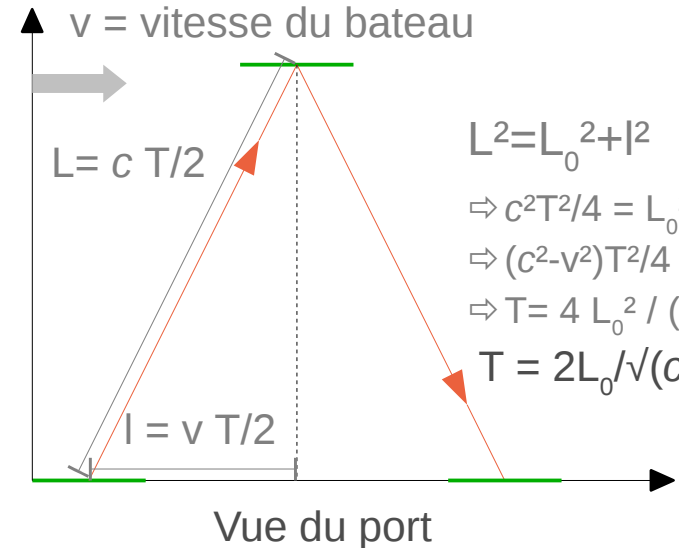
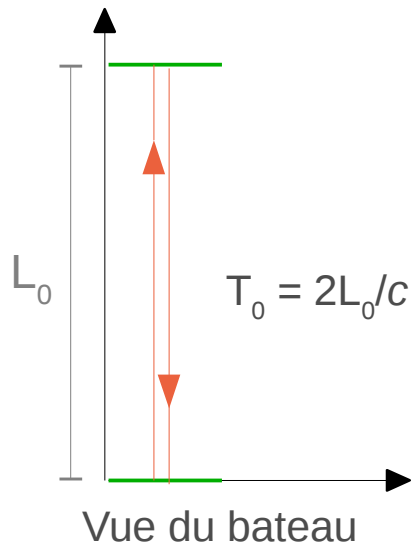
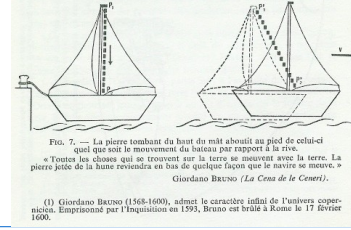
Causalité

- effet postérieur à la cause
- temps de propagation de la lumière
- une cause produite à $t=0$ ne peut avoir d'effet à $t=\Delta t$ que dans périmètre avec $r=c\Delta t$

↘ vitesse de la lumière = vitesse maximale



Espace-temps



$$L^2 = L_0^2 + l^2$$

$$\Rightarrow c^2 T^2 / 4 = L_0^2 + v^2 T^2 / 4$$

$$\Rightarrow (c^2 - v^2) T^2 / 4 = L_0^2$$

$$\Rightarrow T = 4 L_0^2 / (c^2 - v^2)$$

$$T = 2L_0 / \sqrt{c^2 - v^2}$$

$$\Rightarrow T = T_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2} = \gamma T_0$$

où : $\gamma = 1 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$

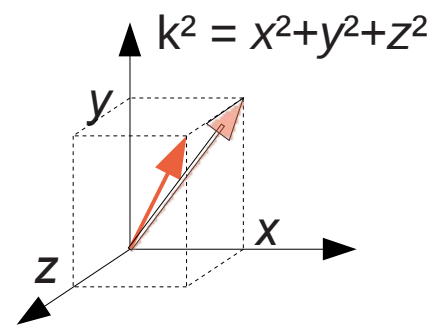
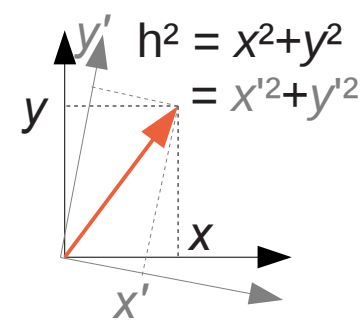
- $v \ll c \Rightarrow \gamma \approx 1$
- $v \rightarrow c \Rightarrow \gamma \rightarrow \infty$

- ↘ Dilatation du temps
- ↘ Contraction des longueurs

Lois de transformation de Lorentz (boost le long de x) :

$$\begin{cases} x \rightarrow x' = \gamma (x - v \times t) \\ y \rightarrow y' = y \\ z \rightarrow z' = z \\ t \rightarrow t' = \gamma (t - v \times x / c^2) \end{cases}$$

Espace-temps de Minkowski :



$s^2 = x^2 + y^2 + z^2 - (ct)^2$

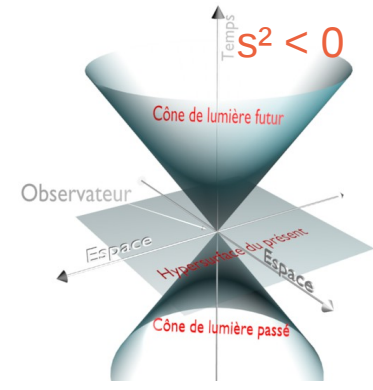
s : intervalle d'espace-temps invariant par rotation

rotation dans l'espace-temps ⇔ changement de réf. inertiel

Espace à 2D

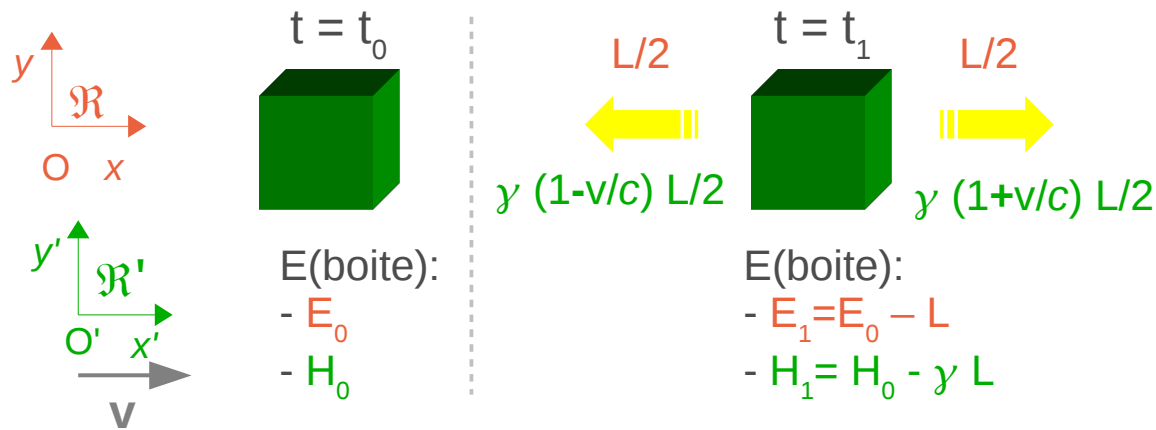
Espace à 3D

Espace-temps (4D)



Équivalence masse-énergie

« Does the inertia of a body depend upon its energy content ? »



$$\Rightarrow (H_0 - E_0) - (H_1 - E_1) = L(\gamma - 1)$$

Seule l'énergie cinétique (K) dépend du mouvement :

$$H_0 - E_0 = K_0 + C$$

$$H_1 - E_1 = K_1 + C$$

$$\Rightarrow K_0 - K_1 = \Delta K \approx \frac{1}{2} [L/c^2] v^2 \equiv \frac{1}{2} \Delta m v^2$$

$$\Rightarrow \Delta m = L/c^2$$

Δm : changement de la masse
 L : énergie émise par radiation

→ si un corps perd une énergie E par radiation, sa masse diminue par E/c^2

↘ la masse d'un corps est une mesure de son contenu en énergie

↘ les radiations transportent de l'inertie

Généralisation :

→ $E_0 = mc^2$: énergie au repos (dans le ref. où le corps est immobile)

→ $E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$: énergie totale (cas relativiste)