

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)]

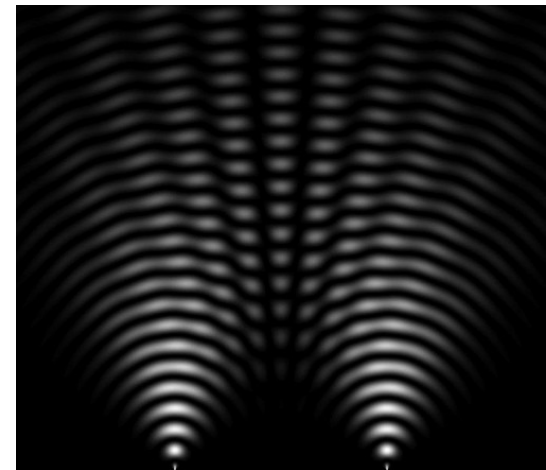
- principe de moindre action

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

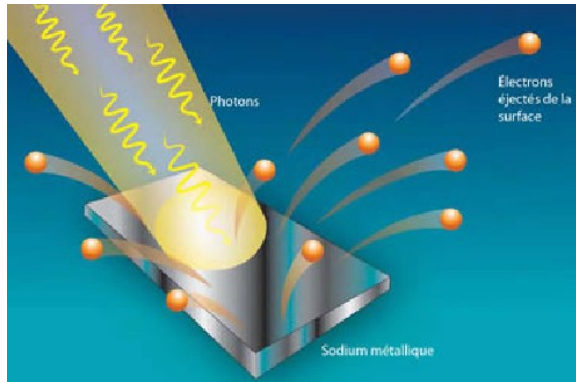
↘ Lumière : onde électromagnétique se propageant dans un *éther*

Révolutions conceptuelles

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

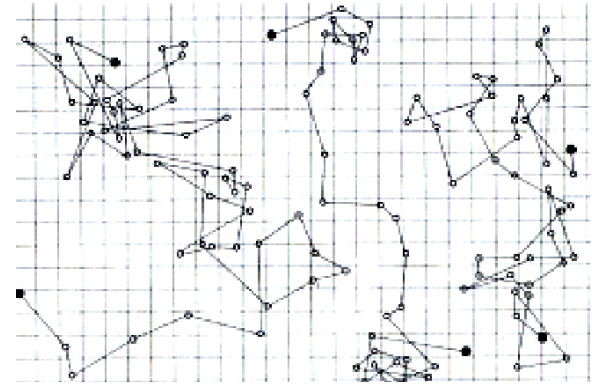
1905, Annus Mirabilis (articles clefs publiés par Einstein)

effet photo-électrique



nature corpusculaire de la lumière (photon)

mouvement brownien

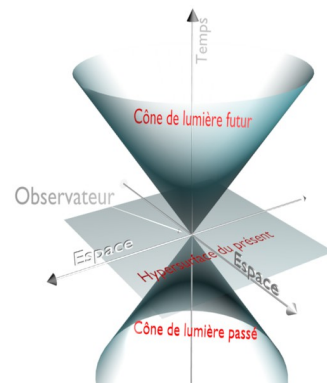


argument en faveur de la théorie atomiste de la matière

relativité restreinte

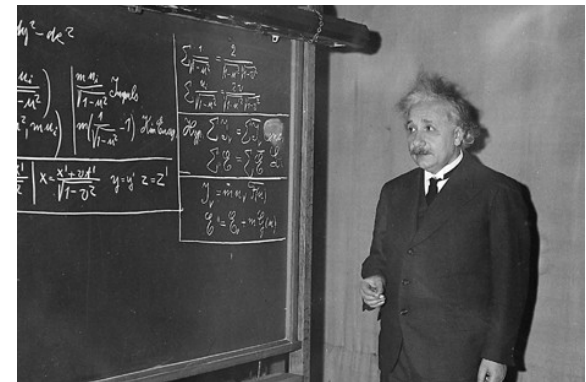
Postulats :

- 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



$E=mc^2$!!

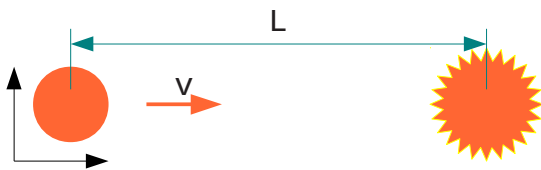
Relativité restreinte : espace-temps

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



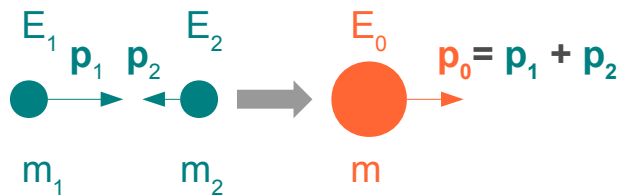
1) $v =$	300 km/s	(0,1 % c)	→ $L =$	300 km	($t = 1s$)
2) $v =$	29 979 km/s	(10 % c)	→ $L =$	30 130 km	($t = 1s$)
3) $v =$	269 813 km/s	(90 % c)	→ $L =$	618 994 km	($t = 2s$)
4) $v =$	296 794 km/s	(99 % c)	→ $L =$	2 103 921 km	($t = 7s$)
5) $v =$	299 493 km/s	(99,9 % c)	→ $L =$	6 698 534 km	($t = 22s$)

- 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

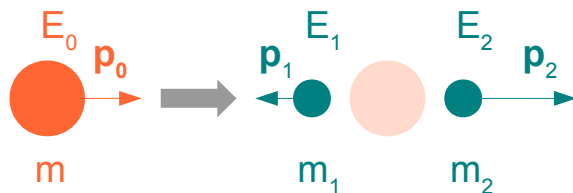


$$E_0 = E_1 + E_2 = \sqrt{(m_1^2 + p_1^2)} + \sqrt{(m_2^2 + p_2^2)}$$

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

Relativité restreinte : masse et énergie

Équiv

LES UNITES

→ Les unités usuelles sont souvent inadaptés à la physique des particules

- On utilisera :

→ - Energie : eV (*électron-volt*)

→ $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

→ énergie acquise par un électron dans un champ électrique de 1V

Et, en vertu de l'équivalence masse-énergie ($E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$) :

- Impulsion : eV/c

- Masse : eV/c²

$1\text{eV}/c^2 = 1.8 \cdot 10^{-36} \text{ kg}$

→ Multiples usuels : keV (10³), MeV(10⁶), GeV(10⁹), TeV (10¹²)

Pour les distances (peu utiliser en physique des particules), on verra :

- l'ångström : $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$

- le *fermi* (ou *femtomètre*) : $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$

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

Δmc^2

t)

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 corporelle et ondulatoire

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

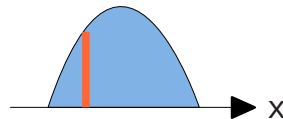
$$p = \hbar k \quad (k: \text{ vecteur d'onde } |k|=2\pi/\lambda)$$

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

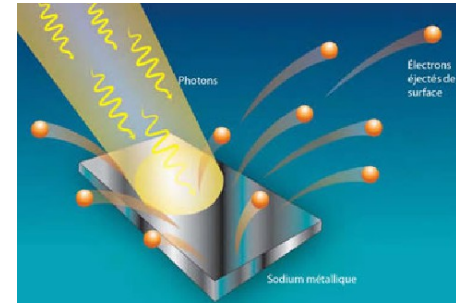
2 descriptions antagonistes !

- corporelle : 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.

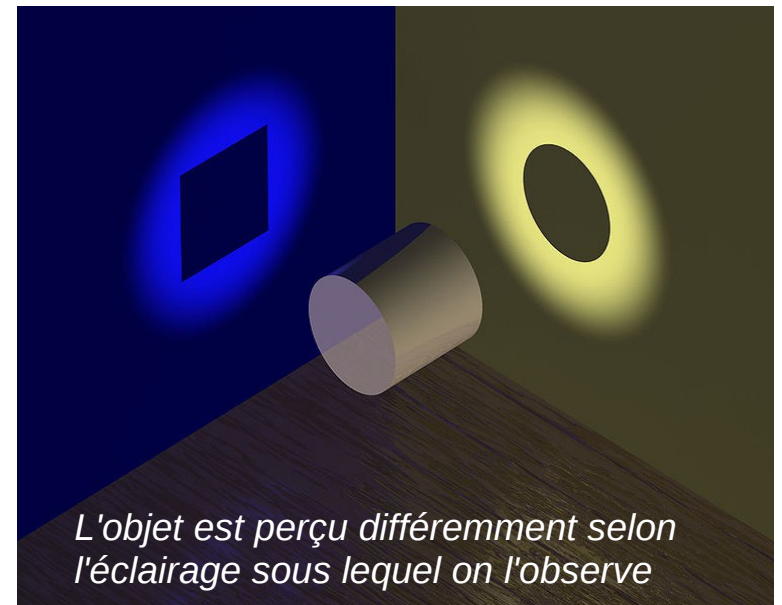
ex : la position d'une particule



Effet photo-électrique, Einstein, 1905



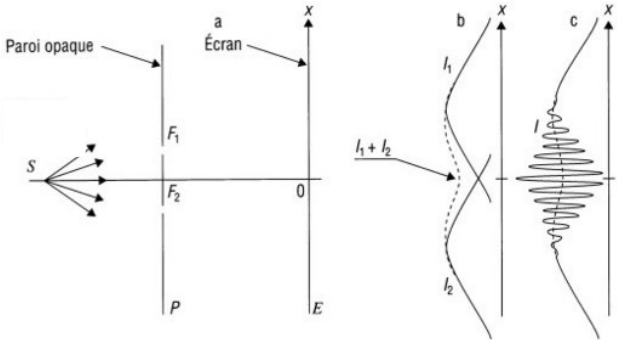
L'énergie de l'onde électromagnétique est portée par le photon



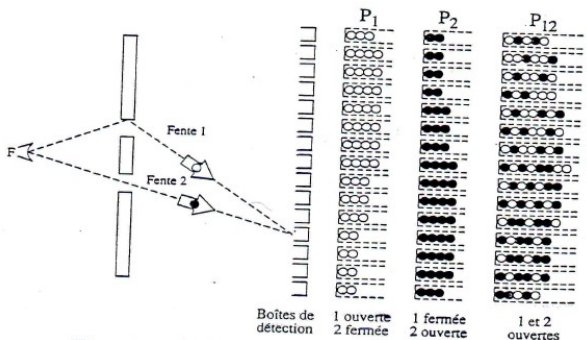
Mécanique quantique : illustration

L'EXPERIENCE DES FENTES D'YOUNG

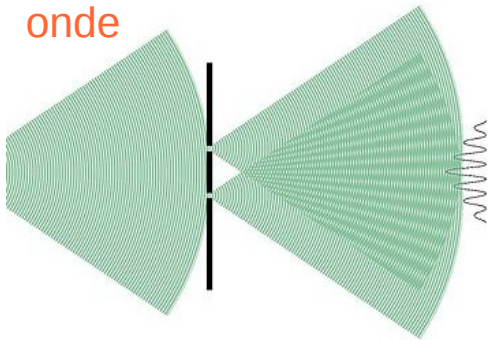
L'expérience :



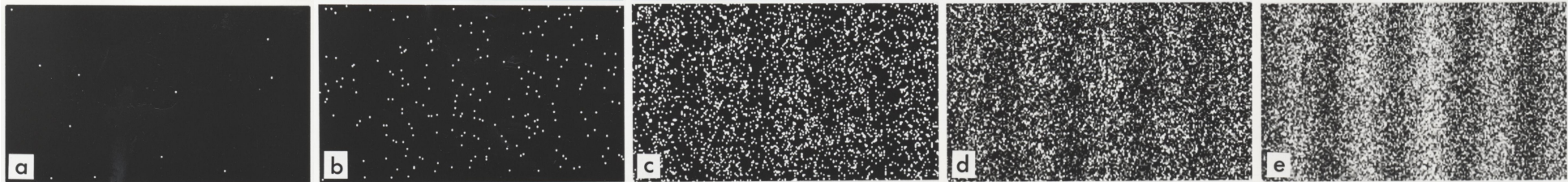
Cas #1: projectile = bille



Cas #2: projectile = onde



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

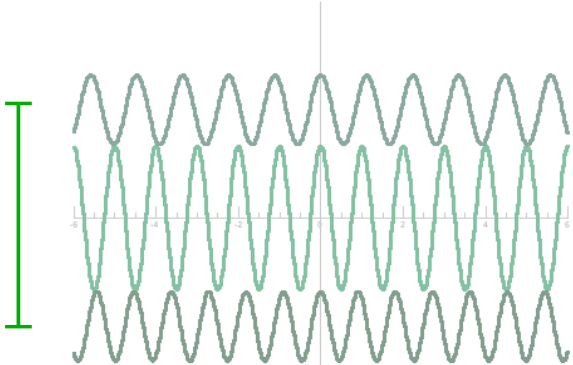


On peut observer les impacts individuels et les franges d'interférences !

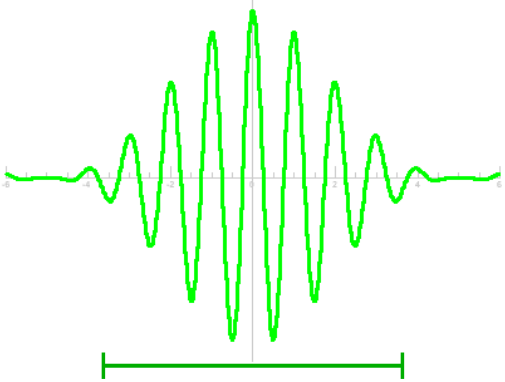
Remarque : si on détecte par quel fente la particule passe, l'interférence disparaît.

Mécanique quantique : le paquet d'onde

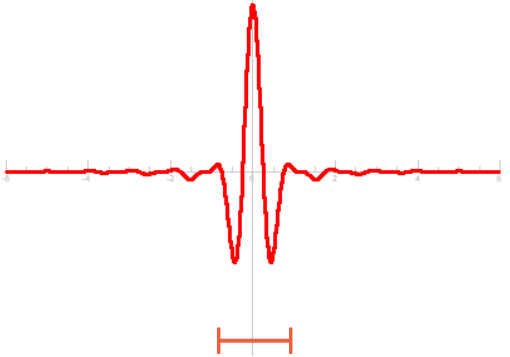
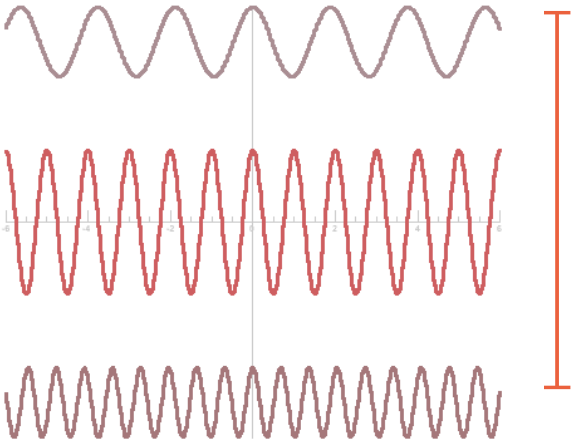
Superposition de plusieurs ondes (planes) de fréquences différentes



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

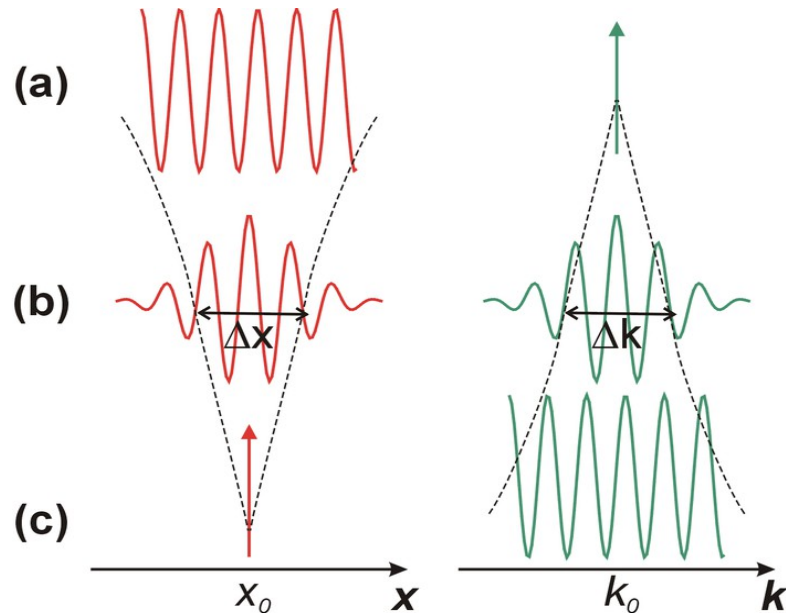


Bande de fréquences étroite
⇒ paquet étendu



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 :

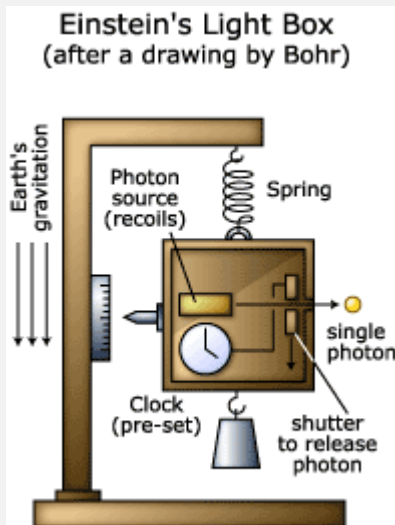
- une énergie (ΔE) peut être « emprunter » au vide pendant un laps de temps (Δt) suffisamment court pour que $\Delta E \cdot \Delta t > \hbar/2$
- ... et comme $E=mc^2$, des particules (virtuelles) peuvent être créées et « vivre » pendant un temps d'autant plus court que la particule est lourde !

Mécanique quantique : interprétation

La mécanique quantique : artifice mathématique ou réalité ?

- aspects probabilistes heurtent les partisans du déterminisme
- « Dieu ne joue pas aux dés avec l'Univers », Einstein (1927)
- dualité onde-corpuscule
- difficile à interpréter (chat de Schrödinger)
- a fait longtemps débat
- fait toujours l'objet d'études actives [S. Haroche, prix Nobel 2012]

La boîte d'Einstein : expérience de pensée mettant en défaut les relations d'incertitude ?



Réfutation d'Einstein des relations d'Heisenberg :

- **horloge** : mesure l'instant t auquel le photon quitte la boîte avec une précision Δt .
- **balance** : pèse la boîte avant (1) et après (2) l'émission du photon ; l'énergie du photon émis est donnée par $E = (m_2 - m_1) c^2$ avec une précision ΔE .

Il n'y a pas de limites aux précisions Δt et ΔE , en contradiction avec $\Delta t \cdot \Delta E > \hbar$!!

Réponse de Bohr :

Pendant l'émission du photon, la boîte s'allège et remonte. L'écoulement du temps dans la boîte en mouvement est donc modifié et la mesure du temps entachée d'une certaine incertitude. **On a donc bien $\Delta t \cdot \Delta E > \hbar$**

[débat au cours du 5^{ème} congrès de Solvay, 1927]

Les particules *ordinaires*

- ❖ Quelles sont-elles ?

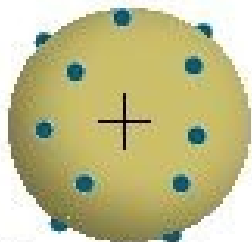
L'électron

Découvert par J-J Thomson en 1897

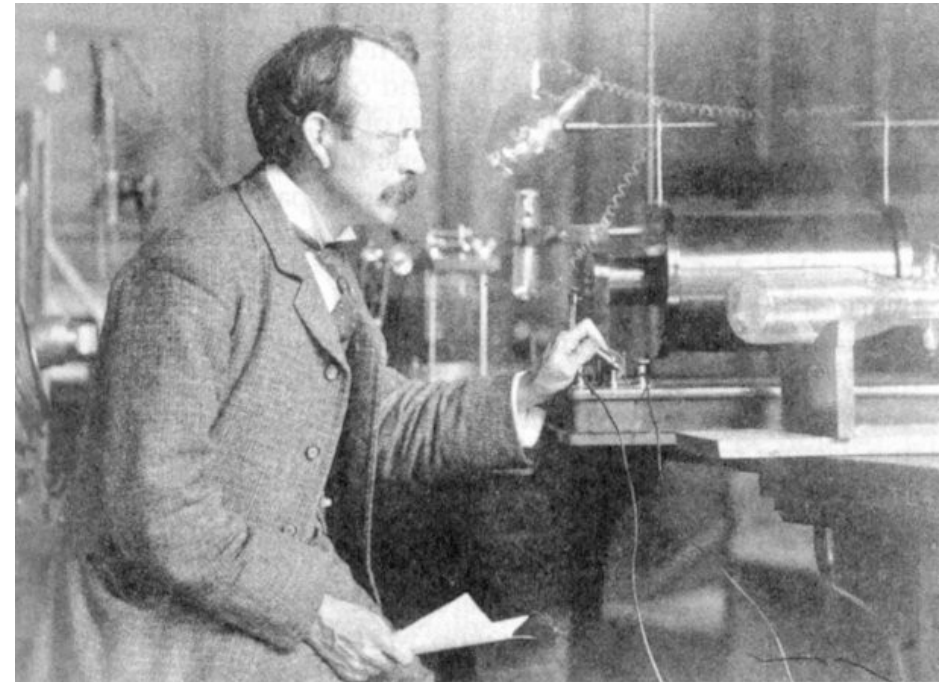
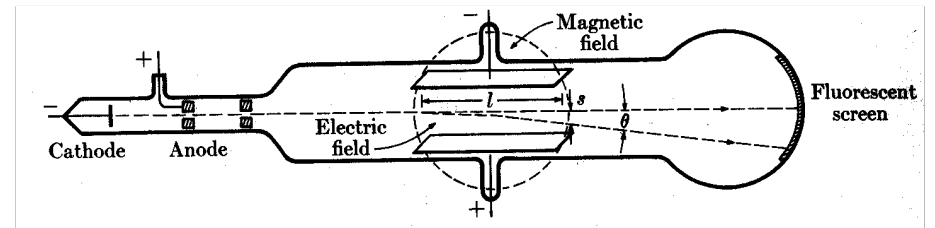
- charge électrique $= -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- charge électrique élémentaire = -1
- mesure sa masse
 $m_e = 1/1800 m_{\text{Hydrogène}}$

L'atome selon Thomson

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



«Plum-Pudding»
1897



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

Le noyau atomique

Expérience de Rutherford (1911)

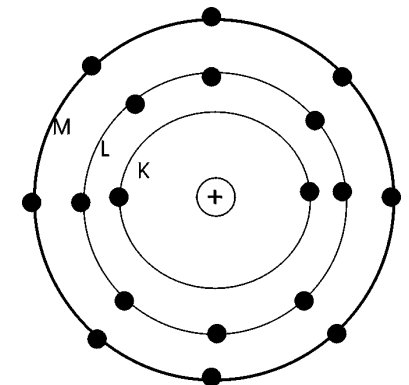
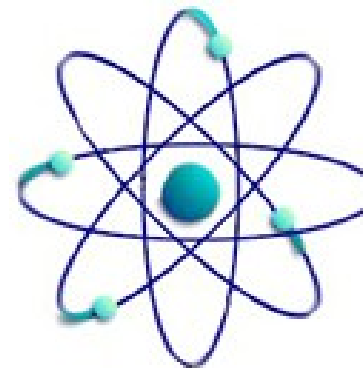
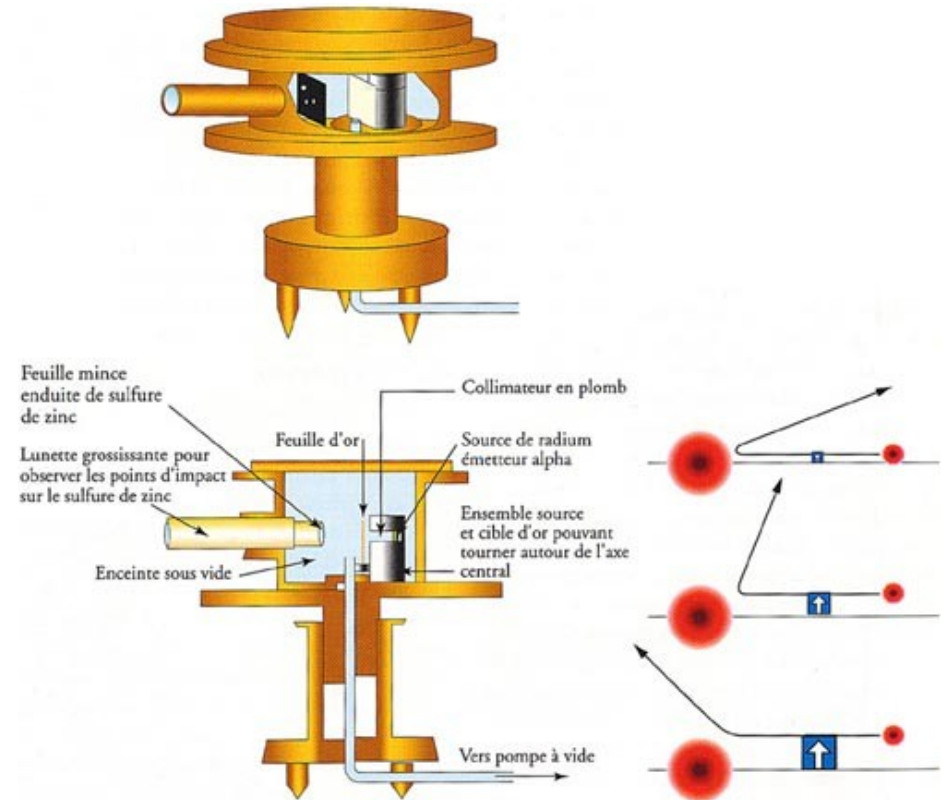
- la masse est concentrée au cœur d'un atome composé de vide
- « c'est comme si vous bombardiez un buvard avec un obus de 75 et que vous le voyez rebondir »

Nouveau modèle atomique

- L'atome est essentiellement vide
- noyau extrêmement petit
- nuage d'électrons qui orbitent très loin du noyau

Modèle atomique de Bohr (1913)

- atome en couche
- électrons assujettis à des orbites quantifiées



Le noyau atomique

Expéri

→ la
c

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

«
u
c

Désintégration α du radium

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

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

Nouve

→ L
- r
- r
l

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

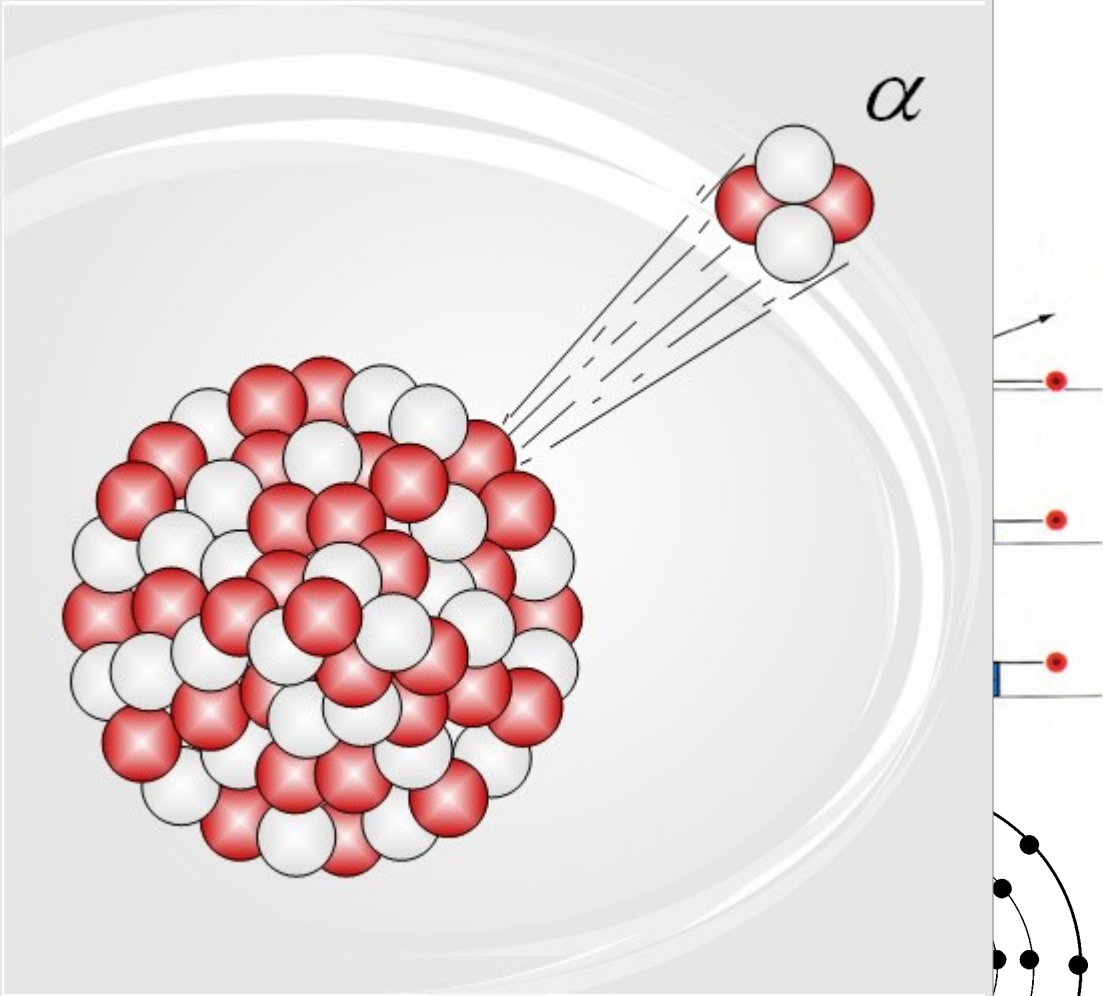
\Rightarrow longueur d'onde permettant
de sonder l'intérieur de l'atome !

Modèle

→ a
- é
c

augmenter l'énergie
 \Rightarrow diminuer la longueur d'onde
 \Rightarrow accès à des détails plus fins

SONDE ET LONGUEUR D'ONDE

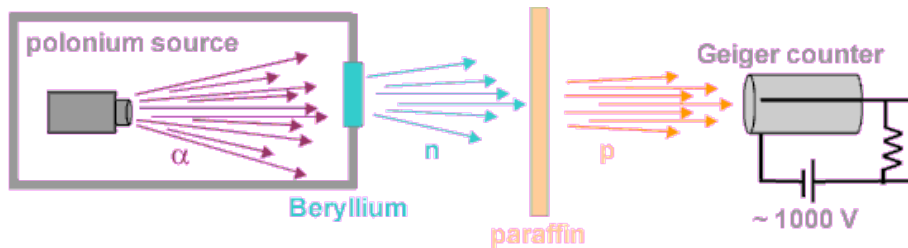


Les nucléons, constituants du noyau

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

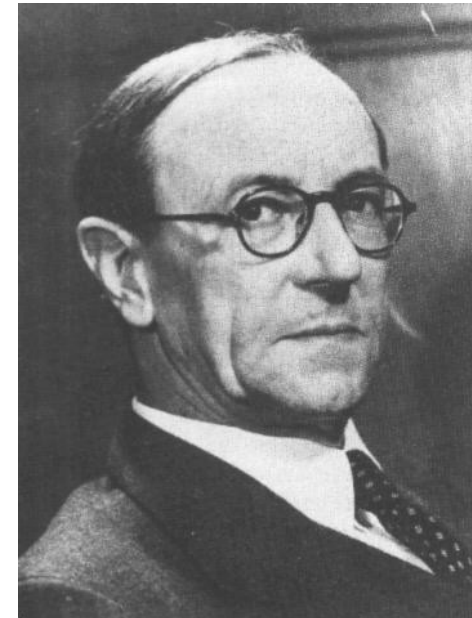
→ charge +1

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



→ neutre : charge = 0

→ ~ même masse que le proton



Les particules *ordinaires*

- ❖ Les constituants de l'atome :
 - nucléon (proton ou 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

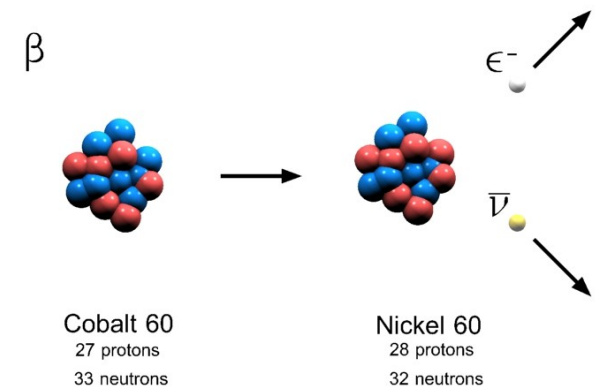
Les désintégrations β posent problème :

→ 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

Les particules *ordinaires*

- ❖ Les constituants de l'atome :
 - nucléon (proton ou neutron)
 - électron
 - neutrino, émis lors de la désintégration de certains noyaux instables
- ❖ Comment tout ça tient ensemble ?
 - les interactions

Les interactions : principe

(1/2)

Interaction :

→ résultat d'une force exercée entre 2 corps

Caractéristiques :

→ **nature des corps** sur lesquels elles s'exercent

→ **intensité**

→ **porté**

Exemples :

→ interaction électrostatique

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

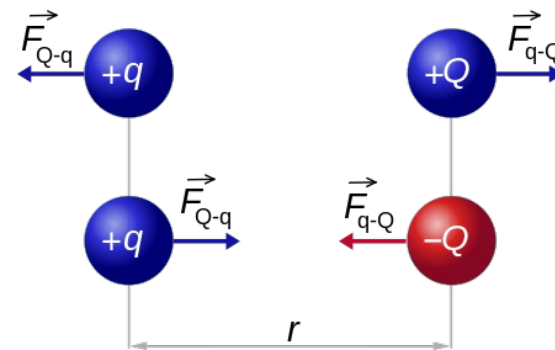
$$- \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9,0 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2 / \text{C}^2$$

→ interaction gravitationnelle

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

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

⇒ trop faible pour jouer un rôle en physique des particules



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



Les interactions : principe

(1/2)

Interaction :

→ résultat

Caractéristique

- nature
- intensité
- porté

Exemples :

- interaction gravitationnelle
- $F_{12} = 1/(4\pi\epsilon_0) \times \dots$
- interaction électrostatique

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

- $F_{12} = -G \times m_1 m_2 / r^2 \times u_{12}$
- $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2 / \text{kg}^2$

⇒ trop faible pour jouer un rôle en physique des particules

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

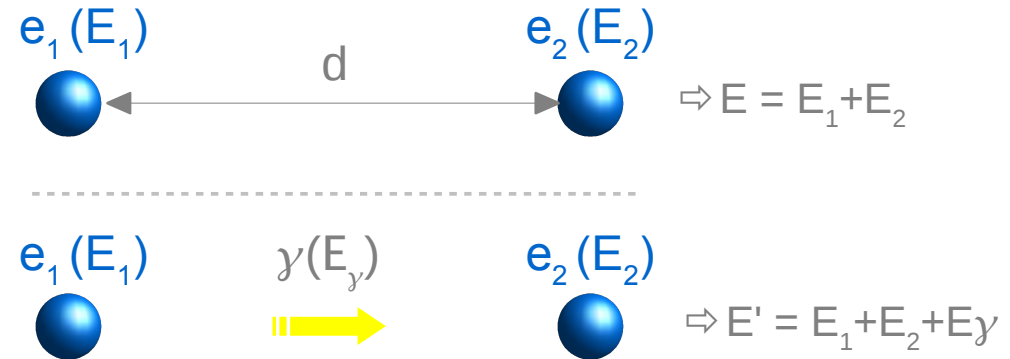


Les interactions : principe

(2/2)

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*



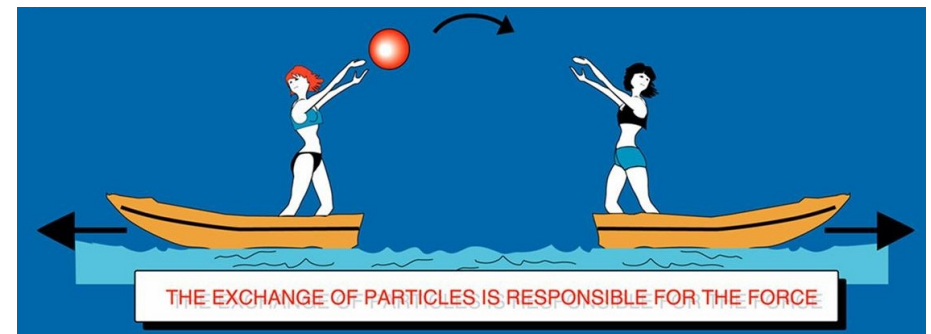
$E' > E$!! OK si $\Delta t < \hbar/E_\gamma \Rightarrow \Delta t_{\max} = \hbar/E_\gamma$

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

$m_\gamma = 0 \Rightarrow E_\gamma$ 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 électromagnétique

→ électrons (-) \leftrightarrow noyau (+)

Interaction nucléaire forte

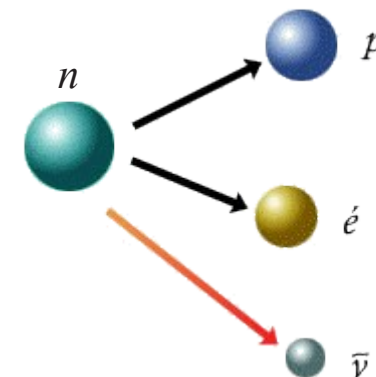
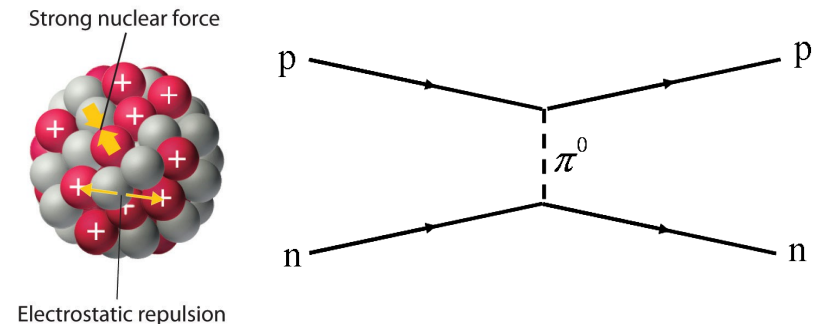
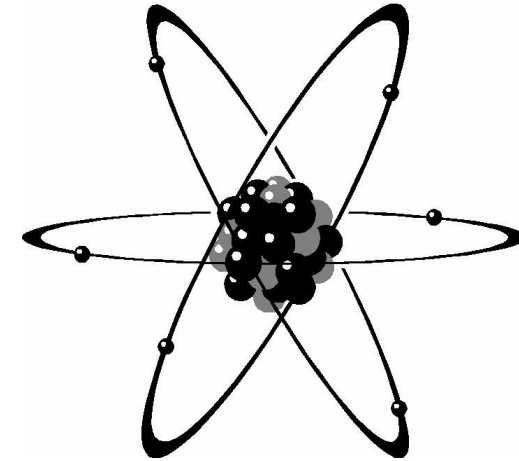
- entre les nucléons du noyau
- opposée à la répulsion coulombienne
- portée : $\sim 2 \text{ fm}$ ($= 2 \cdot 10^{-15} \text{ m}$)
- vecteur (prédiction):

1934, Hypothèse de Yukawa

pion (π), masse $m_{\pi} \approx 3 \cdot 10^{-28} \text{ kg}$

Interaction faible

- nucléons, électron & neutrino
- $n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}$
- intensité $\approx 10^{-7} - 10^{-6}$ int. forte
- portée très limitée
- vecteur ? ponctuelle ?



Les particules *ordinaires* : résumé

FERMIONS : LES PARTICULES DE MATIERE

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

BOSONS : VECTEUR D'INTERACTION

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

Des particules un peu moins *ordinaires*

- ❖ Conséquence de la relativité restreinte en mécanique quantique

Le positron

Equation du mouvement d'un électron

1928, Dirac

- mécanique quantique
- cas relativiste
- Equation de Dirac
- $i\hbar \frac{d|\psi(t)\rangle}{dt} = H(t) |\psi(t)\rangle$
où $H(t) = mc^2\alpha_0 - c\alpha.p$
- 2 solutions :
- énergie positive \Rightarrow électron
- énergie négative \Rightarrow **positron**

Observation :

1932, Anderson

- enregistré dans une chambre de Wilson, une particule avec les mêmes caractéristiques que l'électron mais une charge opposée

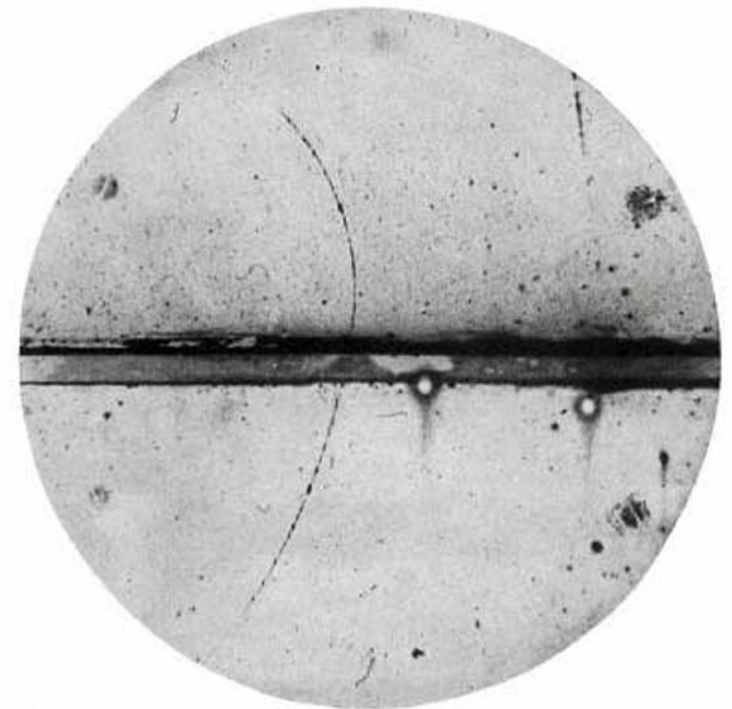
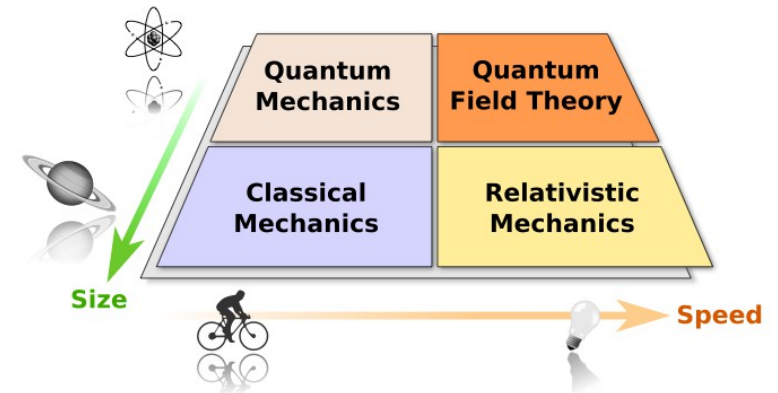


Fig. 1. A 65 million volt positron ($H_p = 2.1 \times 10^6$ gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ($H_p = 1.5 \times 10^6$ gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.

L'anti-matière

La découverte de l'anti-électron marque la naissance de l'anti-matière

→ positron = anti-électron

Généralisation : à chaque particule correspond une anti-particule :

→ de même masse

→ de même *spin*

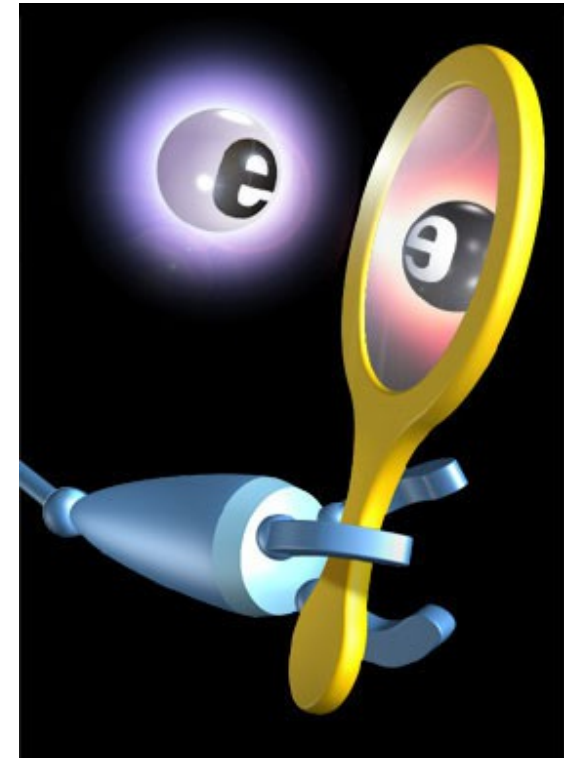
→ de charge opposée

L'anti-matière se comporte comme la matière (vu dans un miroir)

→ mais pas exactement

→ il existe une petite asymétrie

– sujet d'étude très actif



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

L'âge d'or

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

Le muon

« Who ordered this ? » (I. Rabi – Nobel 1944)

- découverte du muon par Anderson en 1936
- charge électrique -1
- beaucoup plus lourd que l'électron
- à peu près la masse attendue pour le méson de Yukawa
... mais pas les bonnes propriétés
- n'interagit pas par interaction forte ⇒ **lepton** (comme l'électron et le neutrino)
- caractéristiques :
 - $m = 105 \text{ GeV}/c^2$
 - instable : $\tau = 2.2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$

↘ Le muon est un « cousin » de l'électron

- caractéristiques similaires mais beaucoup plus lourd

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 :

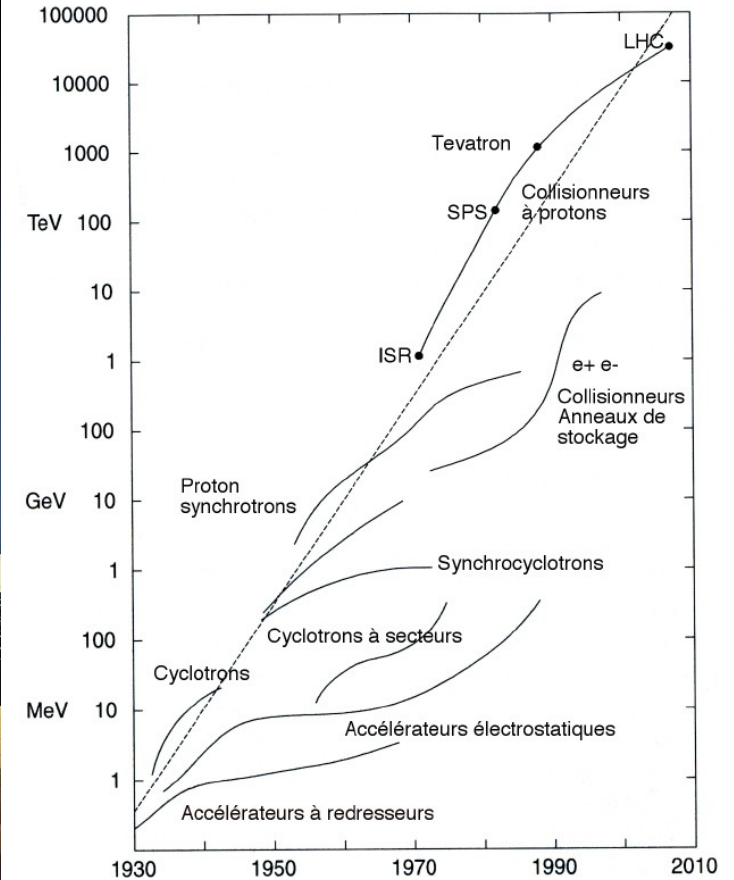
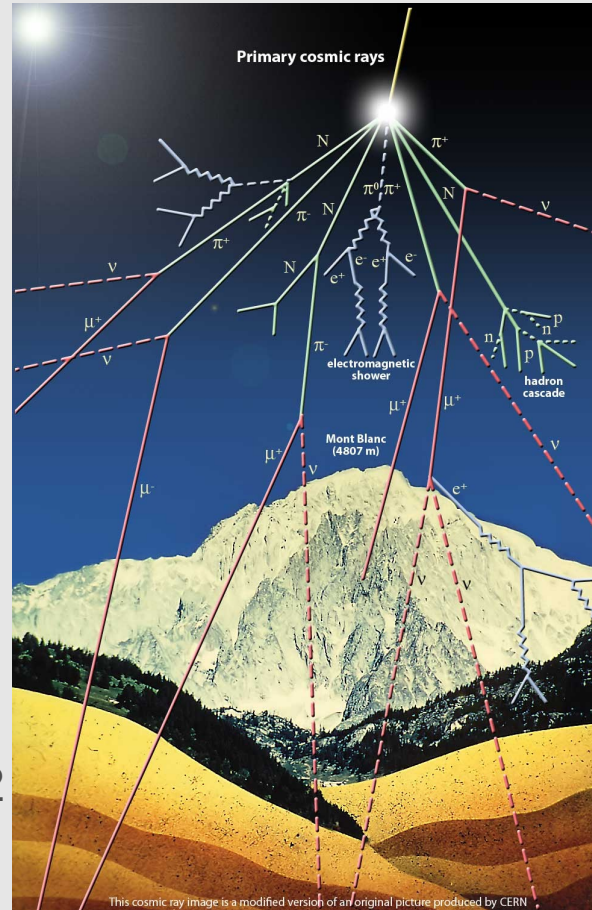
$$E_1 + E_2 > mc^2$$



SOURCES D'ENERGIE

- Rayons cosmiques
 - source « naturelles »
 - découvert par Hess en 1912
- Accélérateurs de particules
 - de + en + puissants

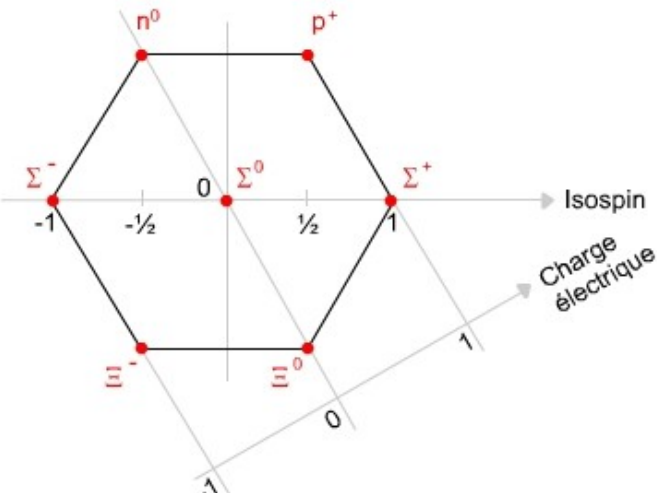
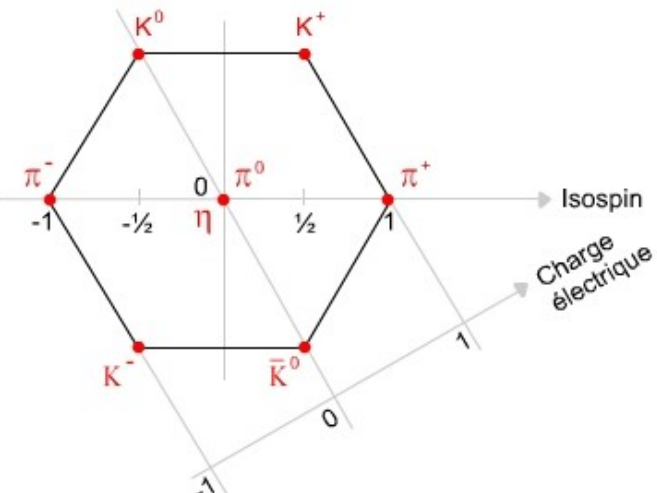
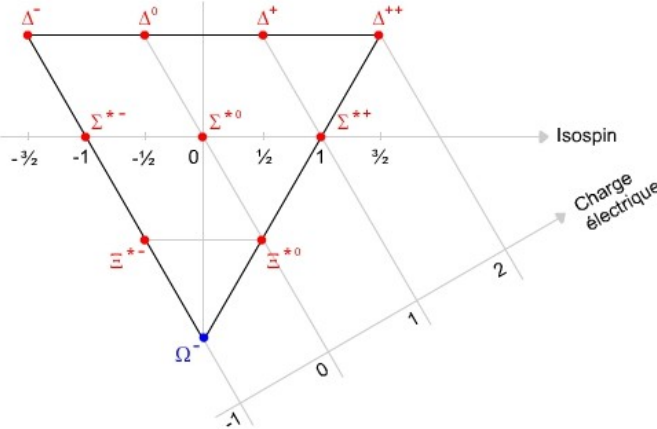
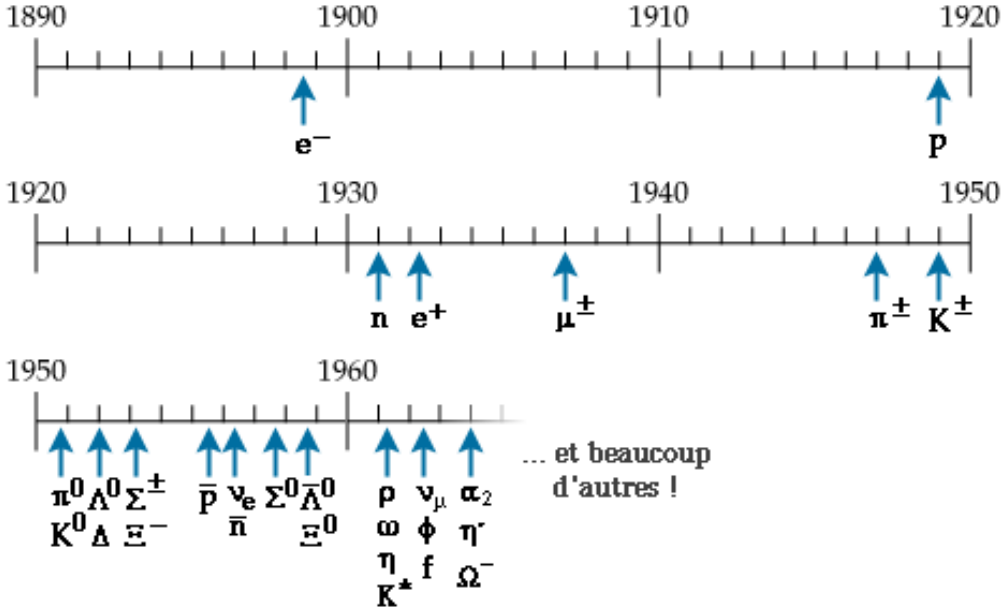
NOUVELLES PARTICULES : COMMENT SONT-ELLES PRODUITES ?



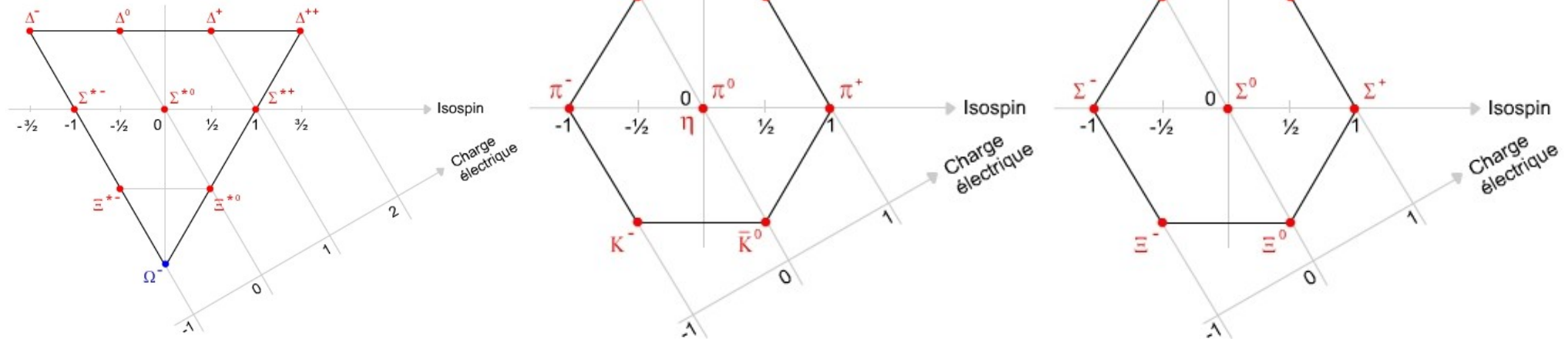
Une pluie de nouvelles particules

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*

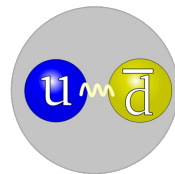
Les quarks

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

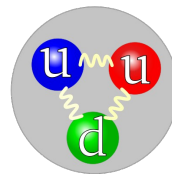
Les quarks ne se déplacent pas librement

- 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 : proton, neutron, ...
- les *mésons* contiennent 1 quarks et 1 anti-quark; ex : pion (π), Kaon (K),...



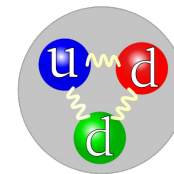
π^+

Un méson léger :
le *pion* chargé



p

Des baryons « ordinaires » :
le proton et le neutron



n

Les quarks

Charge électrique

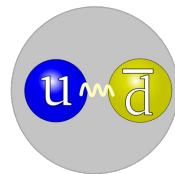
- les quarks portent des charges fractionnaires :
- $-1/3$ ou $+2/3$ pour les quarks
- $+1/3$ ou $-2/3$ pour les anti-quarks

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 : proton, neutron, ...
- les *mésons* contiennent 1 quarks et 1 anti-quark; ex : pion (π), Kaon (K),...

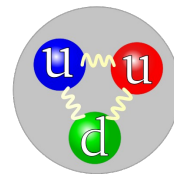
Les *protons* et les *neutrons* ne sont donc pas des particules élémentaires.

Leurs constituants, les *quarks*, sont considérés (aujourd'hui) comme élémentaires.



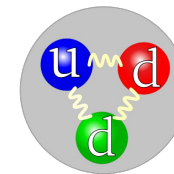
π^+

Un méson léger :
le *pion* chargé



p

Des baryons « ordinaires » :
le proton et le neutron



n

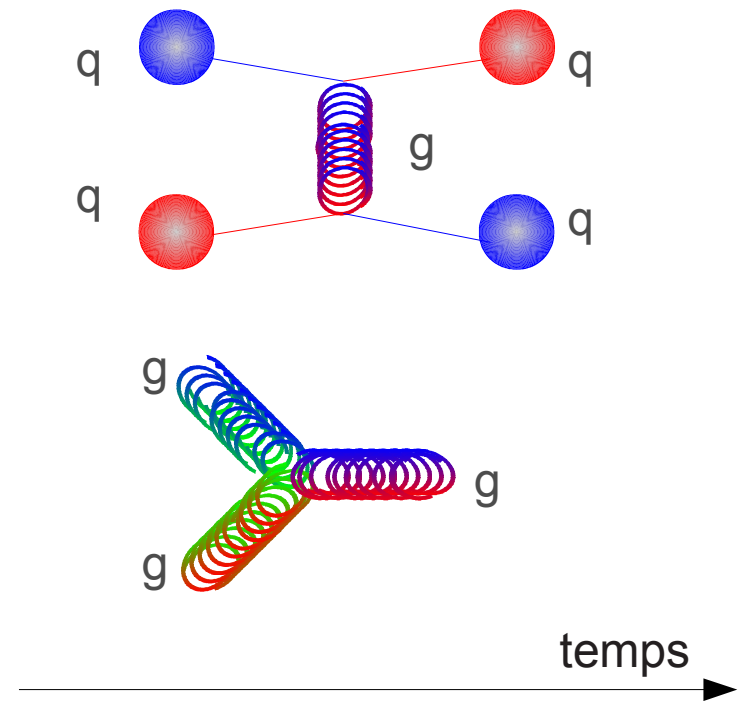
Les quarks et l'interaction forte

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 forte agit comme un élastique :

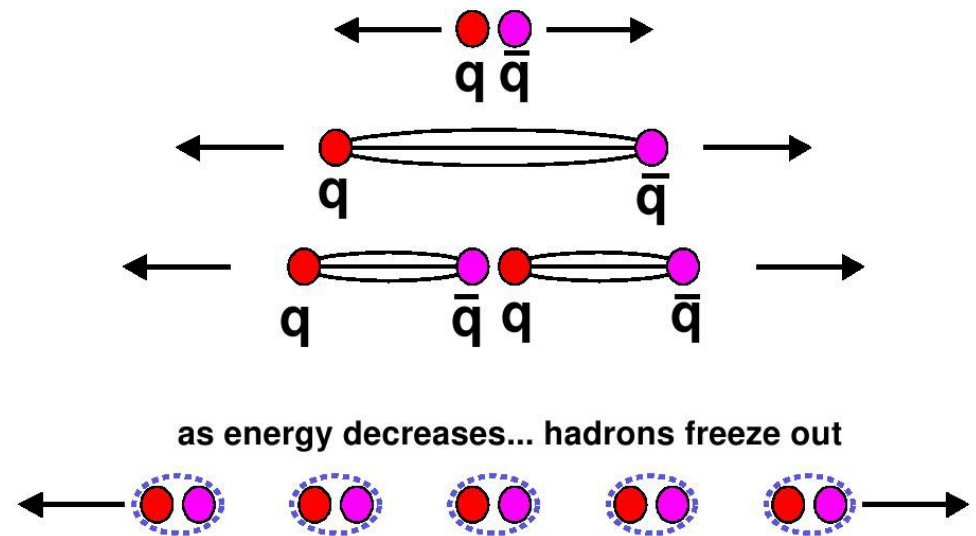
- son intensité augmente avec la distance (1 GeV/fm)
- quand l'énergie disponible est suffisante, des nouvelles paires de quarks sont créées ($E > 2m_q$)

Seules les objets blancs circulent

- le vide est opaque à la couleur

↘ on n'observe pas les quarks isolément

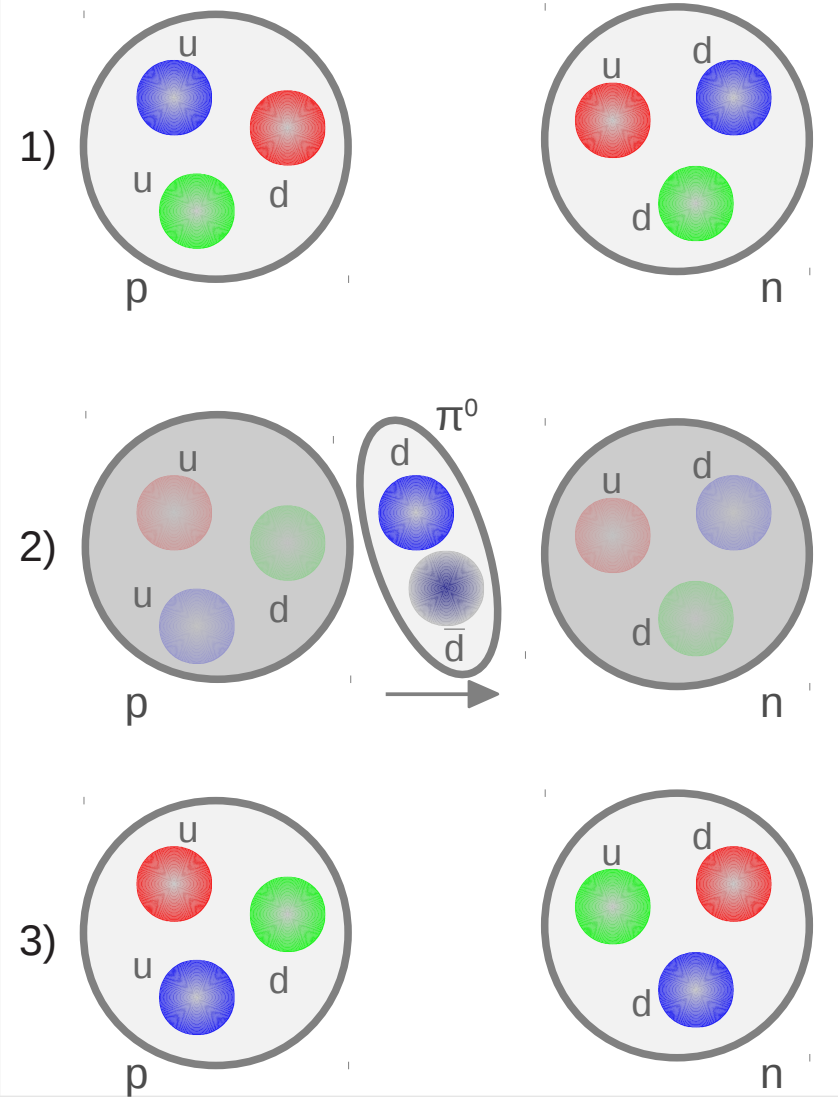
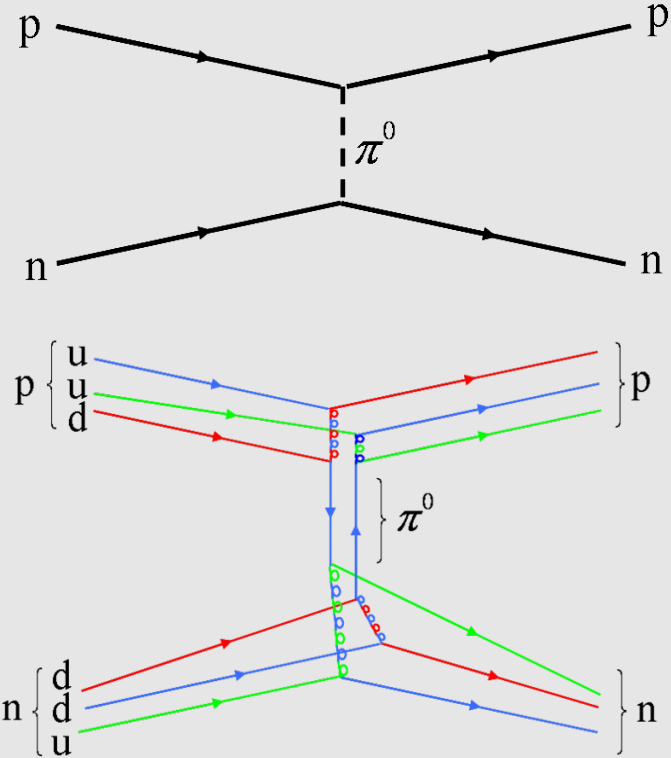
- ils sont confinés dans des *baryons* ou des *mésons*



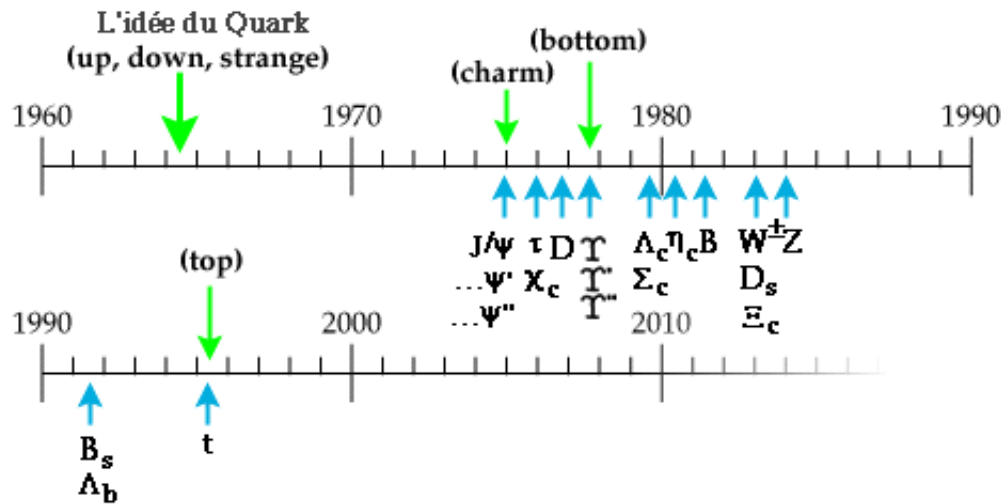
Hadronisation

L'INTERACTION NUCLEAIRE FORTE ?

Une résultante de l'interaction forte entre les quarks



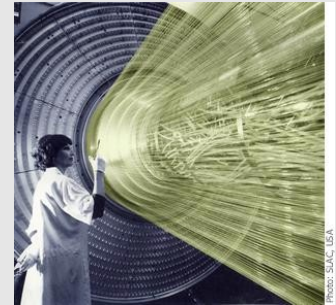
Les découvertes continuent



Essor de l'électronique

Des détecteurs de plus en plus rapides et automatisés

ex : les chambres à fils
[Charpak – Nobel 1992]



1962: découverte d'une nouvelle espèce de neutrino

→ ν_μ : le compagnon neutre du muon

1967: hypothèse de l'existence de messagers pour l'interaction faible

→ W^\pm, Z^0 [découvert au CERN en 1983]

1970: prédiction d'un nouveau quark

→ c : le quark charmé [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: un nouveau lepton chargé

→ τ (tau) : cousin encore plus lourd de l'électron et du muon

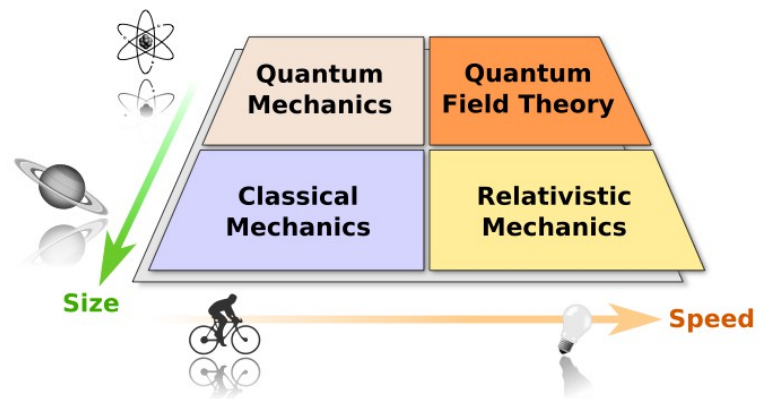
2000: le dernier lepton de la bande

→ ν_τ : le compagnon neutre du tau

↘ Élaboration du Modèle Standard de la physique des particules₄₂

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

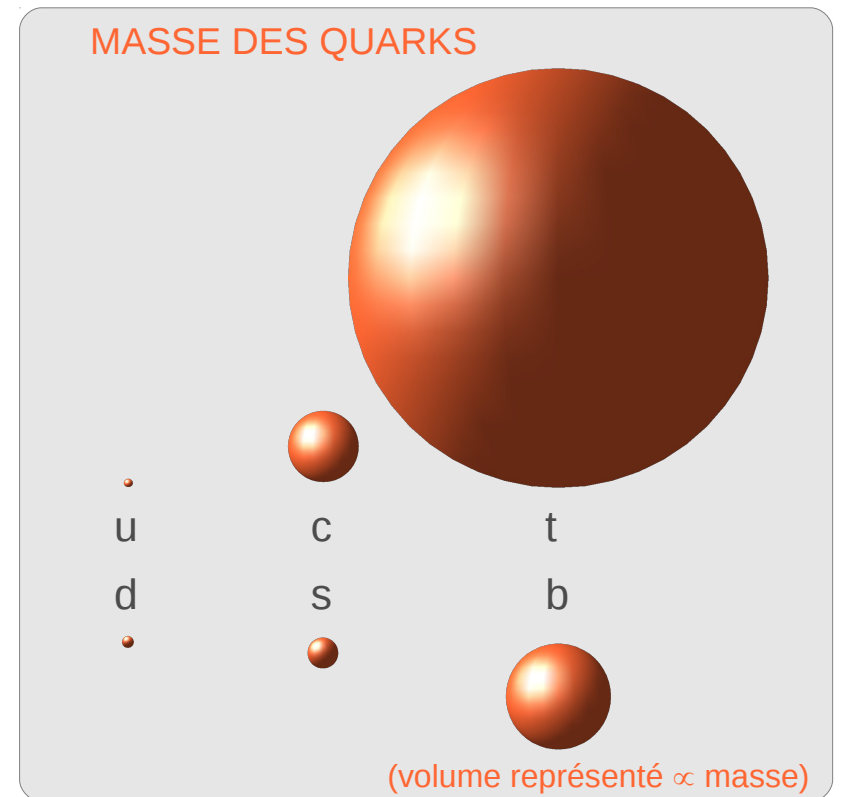
leptons	masse (GeV/c ²)	quarks	masse (GeV/c ²)
e	0.0005	u	0.002
ν_μ	~0	d	0.005
μ	0.1	c	1.3
ν_μ	~0	s	0.1
τ	1.8	t	171
ν_τ	~0	b	4.2

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**



Les particules de matière

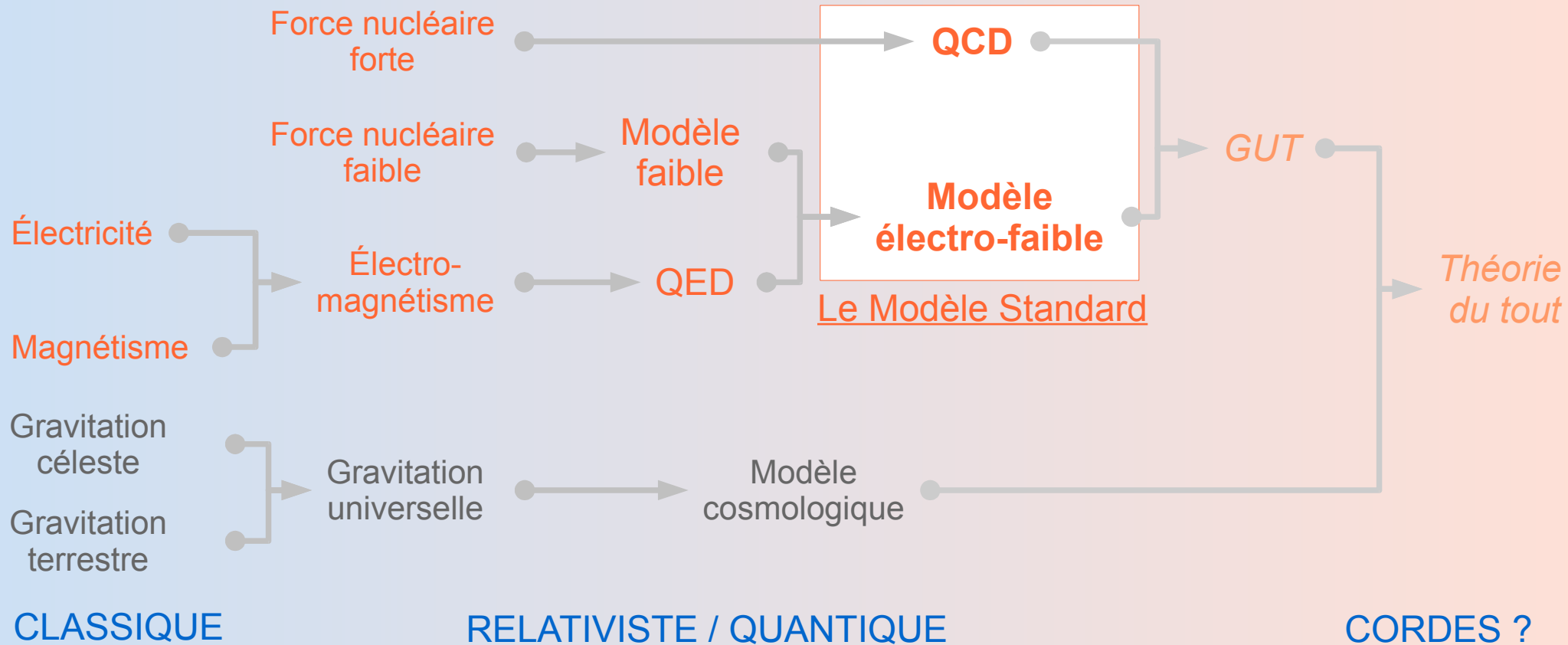
Quarks	+2/3	up	u	charm	c	top	t
	-1/3	down	d	strange	s	bottom (beauty)	b
Leptons	-1	electron	e	muon	μ	tau	τ
	0	neutrino	ν_e	neutrino muon	ν_μ	neutrino tau	ν_τ

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

leptons	masse (GeV/c ²)	quarks	masse (GeV/c ²)
e	0.0005	u	0.002
ν_μ	~0	d	0.005
μ	0.1	c	1.3
ν_μ	~0	s	0.1
τ	1.8	t	171
ν_τ	~0	b	4.2

Les théories fondamentales



Le Modèle Standard décrit les interactions entre les particules élémentaires

- QCD : interaction entre les charges de couleurs
- **Modèle électro-faible** : unification des forces faible et électromagnétique

L'interaction électro-faible

Interaction faible

→ décrit par la théorie de Fermi (locale)

1960' : unification des interactions faible et électromagnétique

[S. Glashow, A. Salam et S. Weinberg, Prix Nobel 1979]

→ formation du modèle **électro-faible**

→ 4 bosons vecteurs:

W^+ , W^- , Z^0 , γ

Problème de la masse des bosons vecteurs :

→ théorie : naturellement de masses nulles

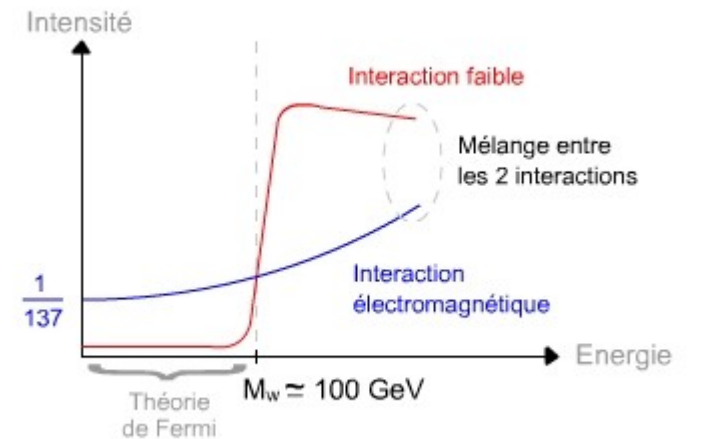
→ observation : (très) massifs.

1964 : *mécanisme de Higgs*

→ permet de donner une masse au W et Z ainsi qu'à toutes les autres particules

→ prévoit l'existence d'une particule supplémentaire : le **boson de Higgs**

- découvert au CERN en 2012 ?



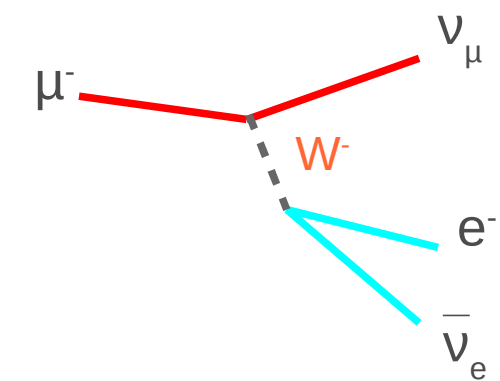
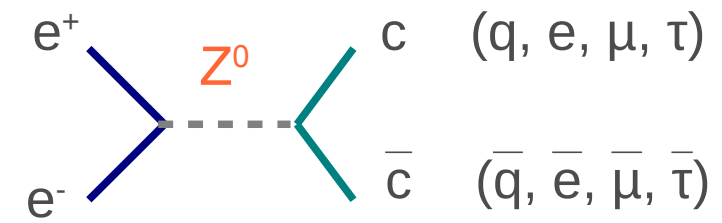
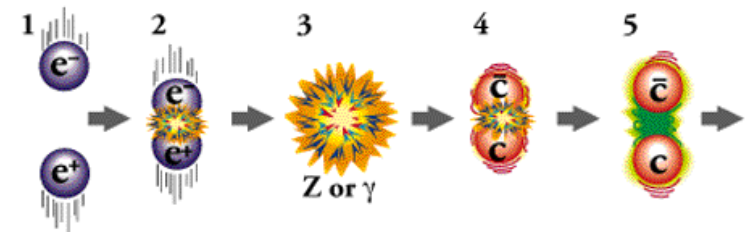
© 3xplus.com

L'interaction faible



Caractéristiques :

- interagit entre toutes les particules
- 3 vecteurs : W^+ , W^- , Z^0
- $m(W) = 80 \text{ GeV}/c^2$
- $m(Z) = 91 \text{ GeV}/c^2$
- **lourds** donc courte portée
- autorise les transitions entre un type de quark (lepton) et un autre (ne conserve pas les saveurs)
- légèrement différente entre matière et anti-matière !

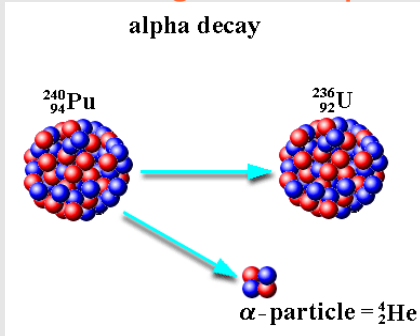


Loi de conservation :

- énergie totale
- charge électrique
- « nombre leptonique »
- ...

LES DESINTEGRATIONS

Désintégration alpha



Désintégration d'un noyau de Plutonium :

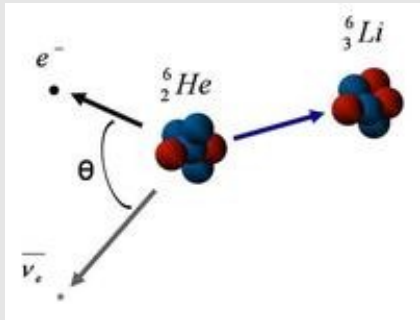


Mêmes composants avant / après :

- protons : $94 = 92 + 2$
- neutrons : $146 = 144 + 2$

→ « simple » scission du noyau

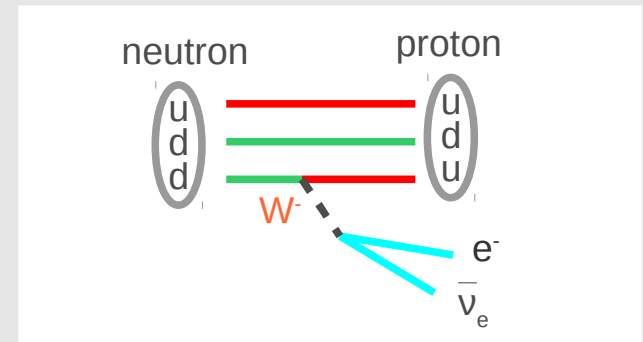
Désintégrations beta



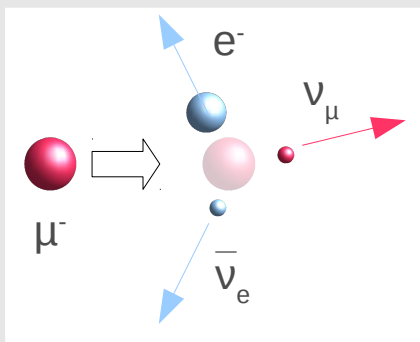
Désintégration d'un noyau d'Helium :



Au niveau élémentaire :



L'interaction faible en action !



Désintégration d'un muon :



- disparition de l'élément initial
- apparition de nouveaux éléments

Les désintégrations par interaction faible

L'interaction faible est responsable de l'instabilité des particules de la 2^{ème} et 3^{ème} familles et de la plupart des hadrons lourds

↘ **particules lourdes**

- suffisamment d'énergie (de masse) disponible
- seules les particules les plus légères sont stables

↘ **modes de désintégration**

- multiples états finaux possibles
- résultat probabiliste

↘ **temps de vie**

- loi de décroissance exponentiel
- temps de vie = demi-période
- faiblesse de l'interaction faible
 - temps de vie relativement longs de certaines particules

J/ψ(1S)

$$J^G(J^{PC}) = 0^-(1^{--})$$

Mass $m = 3096.916 \pm 0.011$ MeV
 Full width $\Gamma = 92.9 \pm 2.8$ keV ($S = 1.1$)
 $\Gamma_{ee} = 5.55 \pm 0.14 \pm 0.02$ keV

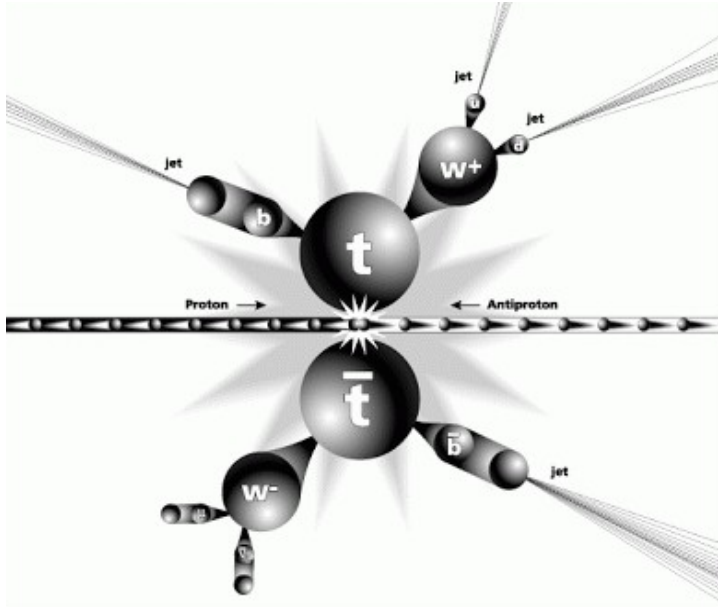
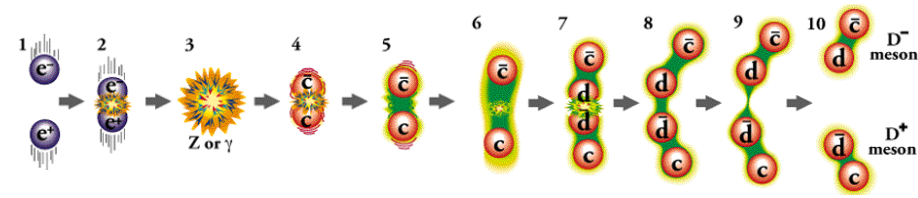
J/ψ(1S) DECAY MODES	Fraction (Γ_i/Γ)	Scale factor/ Confidence level	ρ (MeV/c)
hadrons	(87.7 ± 0.5) %		-
virtual $\gamma \rightarrow$ hadrons	(13.50 ± 0.30) %		-
$g g g$	(64.1 ± 1.0) %		-
$\gamma g g$	(8.8 ± 0.5) %		-
$e^+ e^-$	(5.94 ± 0.06) %		1548
$e^+ e^- \gamma$	[a] (8.8 ± 1.4) × 10 ⁻³		1548
$\mu^+ \mu^-$	(5.93 ± 0.06) %		1545

Decays involving hadronic resonances

$\rho \pi$	(1.69 ± 0.15) %	S=2.4	1448
$\rho^0 \pi^0$	(5.6 ± 0.7) × 10 ⁻³		1448
$a_2(1320) \rho$	(1.09 ± 0.22) %		1123
$\omega \pi^+ \pi^+ \pi^- \pi^-$	(8.5 ± 3.4) × 10 ⁻³		1392
$\omega \pi^+ \pi^- \pi^0$	(4.0 ± 0.7) × 10 ⁻³		1418
$\omega \pi^+ \pi^-$	(8.6 ± 0.7) × 10 ⁻³	S=1.1	1435
$\omega f_2(1270)$	(4.3 ± 0.6) × 10 ⁻³		1142
$K^*(892)^0 \bar{K}^*(892)^0$	(2.3 ± 0.7) × 10 ⁻⁴		1266
$K^*(892)^\pm \bar{K}^*(892)^\mp$	(1.00 ^{+0.22} _{-0.40}) × 10 ⁻³		1266
$K^*(892)^\pm \bar{K}^*(800)^\mp$	(1.1 ^{+1.0} _{-0.6}) × 10 ⁻³		-
$\eta K^*(892)^0 \bar{K}^*(892)^0$	(1.15 ± 0.26) × 10 ⁻³		1003
$K^*(892)^0 \bar{K}_2^*(1430)^0 + c.c.$	(6.0 ± 0.6) × 10 ⁻³		1012
$K^*(892)^0 \bar{K}_2^*(1770)^0 + c.c. \rightarrow$ $K^*(892)^0 K^- \pi^+ + c.c.$	(6.9 ± 0.9) × 10 ⁻⁴		-
$\omega K^*(892) \bar{K} + c.c.$	(6.1 ± 0.9) × 10 ⁻³		1097
$K^+ \bar{K}^*(892)^- + c.c.$	(5.12 ± 0.30) × 10 ⁻³		1373
$K^+ \bar{K}^*(892)^- + c.c. \rightarrow$ $K^+ K^- \pi^0$	(1.97 ± 0.20) × 10 ⁻³		-
$K^+ \bar{K}^*(892)^- + c.c. \rightarrow$ $K^0 K^\pm \pi^\mp$	(3.0 ± 0.4) × 10 ⁻³		-

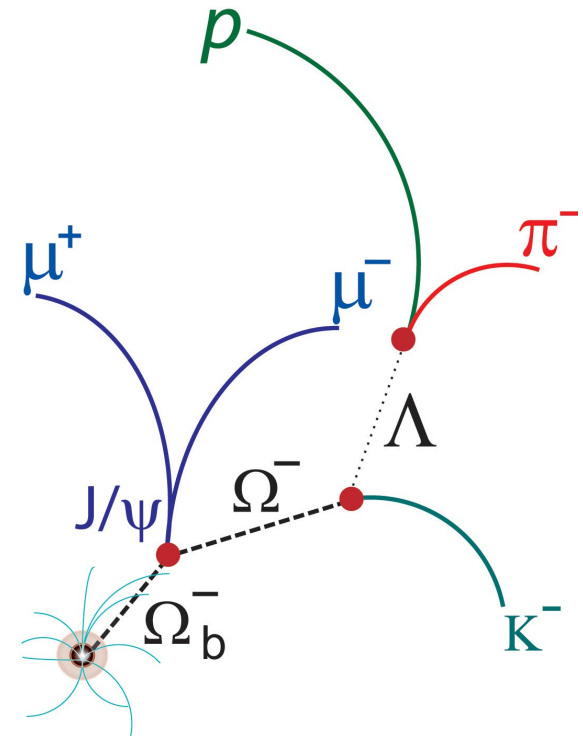
⋮

Exemples

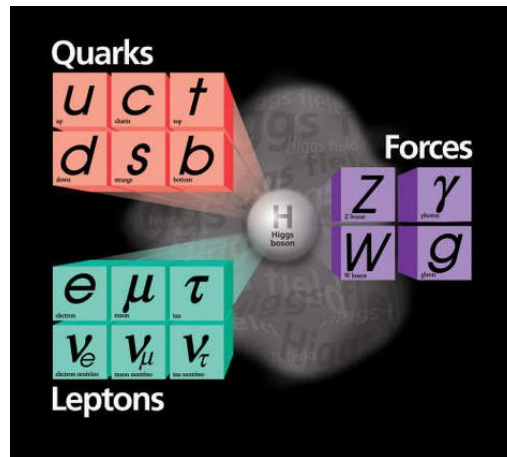


- $p + \bar{p} \rightarrow t + \bar{t}$ (*int. forte*)
- $\rightarrow t \rightarrow W^+ + b$ (*int. faible*)
- $\rightarrow W^+ \rightarrow u + \bar{d} \rightarrow \text{jet} + \text{jet}$
- $\rightarrow b \rightarrow \text{jet}$ (*hadronisation par int. forte*)
- $\rightarrow \bar{t} \rightarrow W^- + \bar{b}$
- $\rightarrow W^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$
- $\rightarrow \bar{b} \rightarrow \text{jet}$

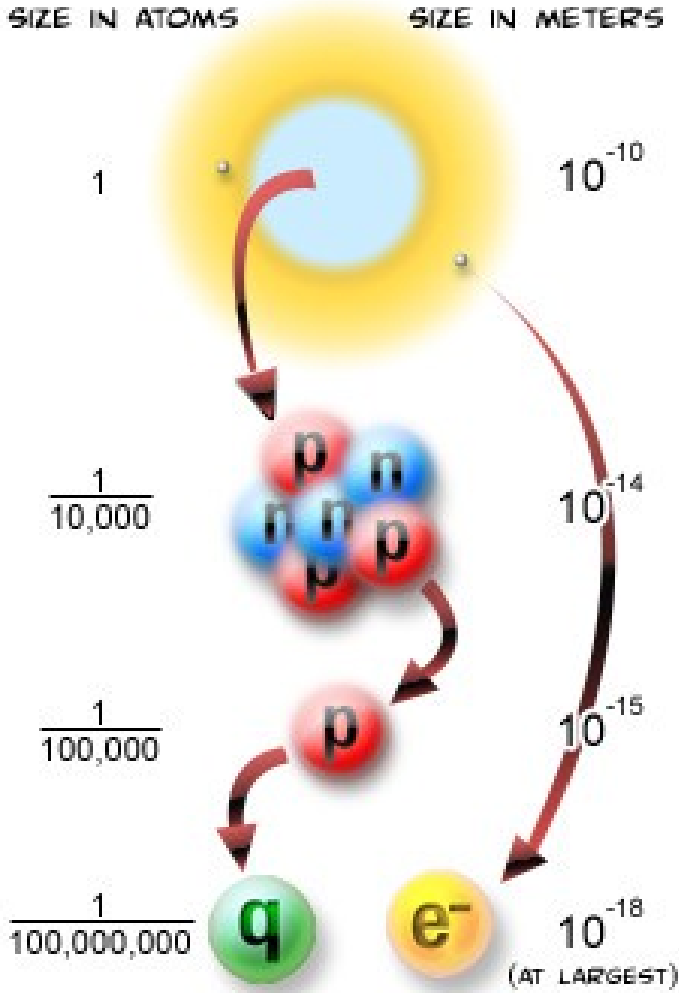
- $\Omega_b^- (sbb) \rightarrow J/\psi (c\bar{c}) + \Omega^- (ssb)$
- $\rightarrow J/\psi \rightarrow \mu^+ + \mu^-$
- $\rightarrow \Omega^- (ssb) \rightarrow \Lambda (uds) + K^- (\bar{u}s)$
- $\rightarrow \Lambda (uds) \rightarrow p (uud) + \pi^- (\bar{u}d)$



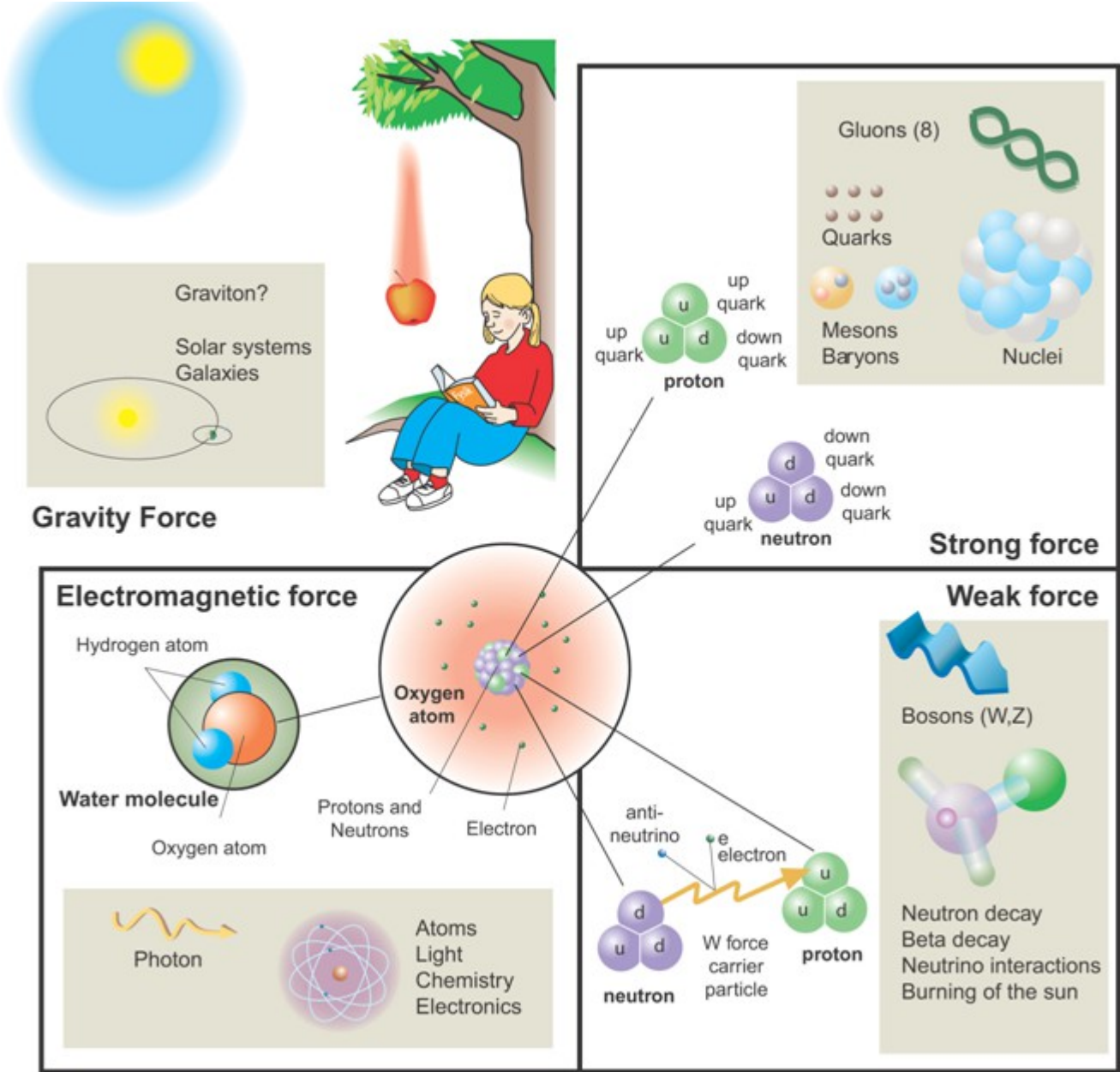
Pour finir



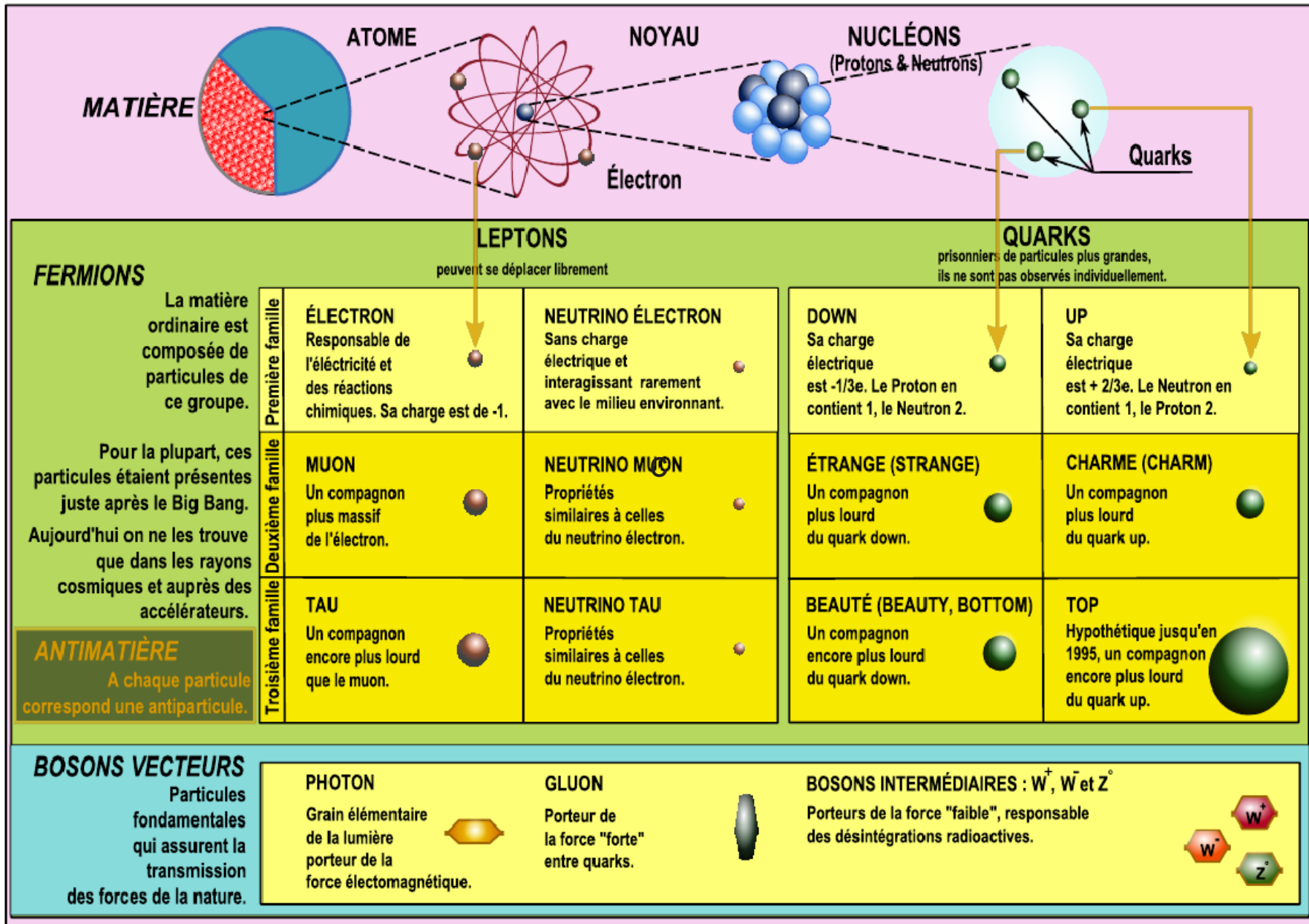
De l'atome aux quarks



Les interactions fondamentales



Le Modèle standard



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

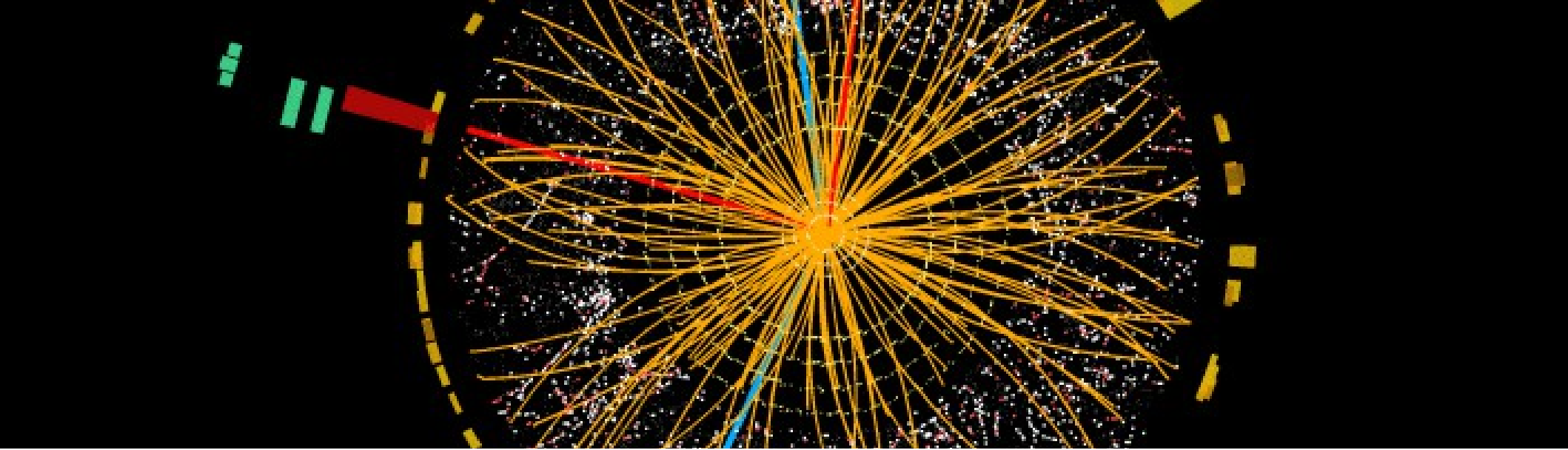
Au delà du Modèle standard

→ 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 ?



Merci de votre attention

Petit rappel (?) : loi fondamentale de la dynamique

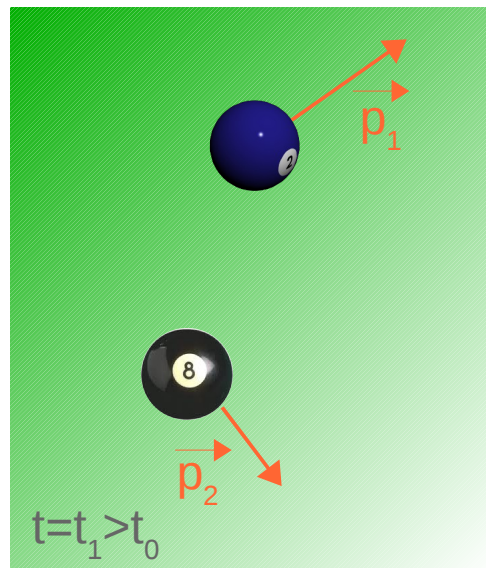
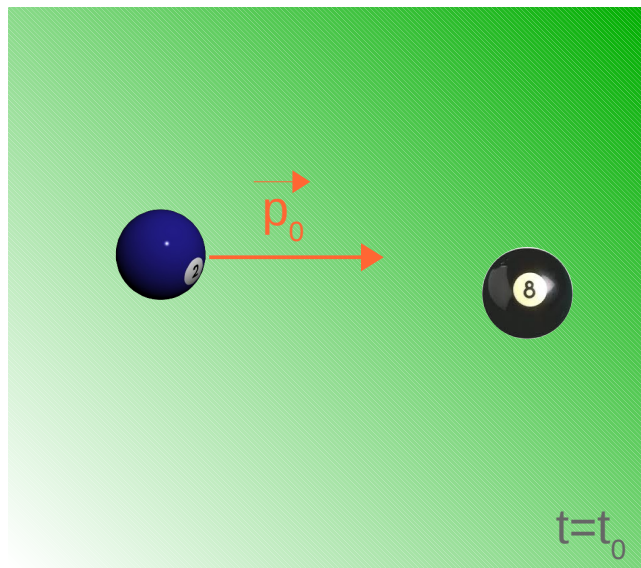
$$\sum_i \mathbf{F}_i = m \mathbf{a}$$

- \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

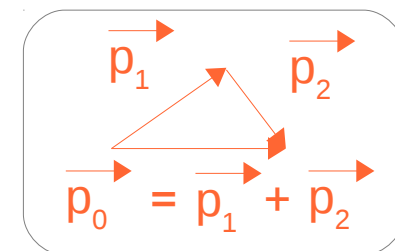
- classiquement : $\mathbf{p} = m \mathbf{v}$ (kg.m/s)

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



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

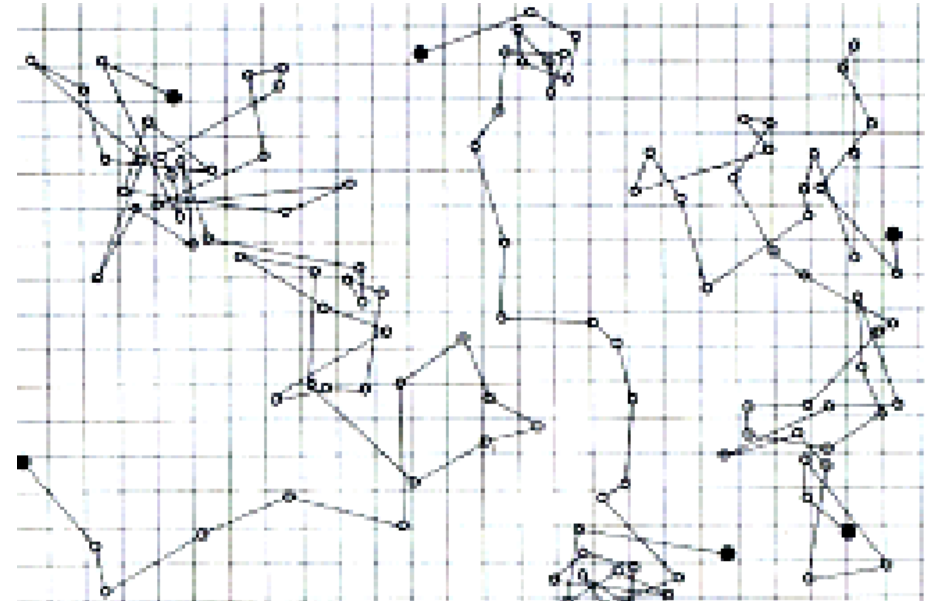
Mouvement de petites particules en suspension dans un fluide

- 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

Quantum d'action :

1900, Max Planck, rayonnement du corps noir

- $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$: action élémentaire
- $\hbar = h / 2\pi$: moment cinétique élémentaire

Quanta de lumière

1905, Albert Einstein, effet photo-électrique

- $E = h \nu$: le *photon* transporte l'énergie du champ électromagnétique

Longueur d'onde de de Broglie

1924, Louis de Broglie, hypothèse confirmée par Thomson et Davisson (1927)

- $p = h / \lambda$: particule avec une quantité de mouvement p est caractérisée par une longueur d'onde λ

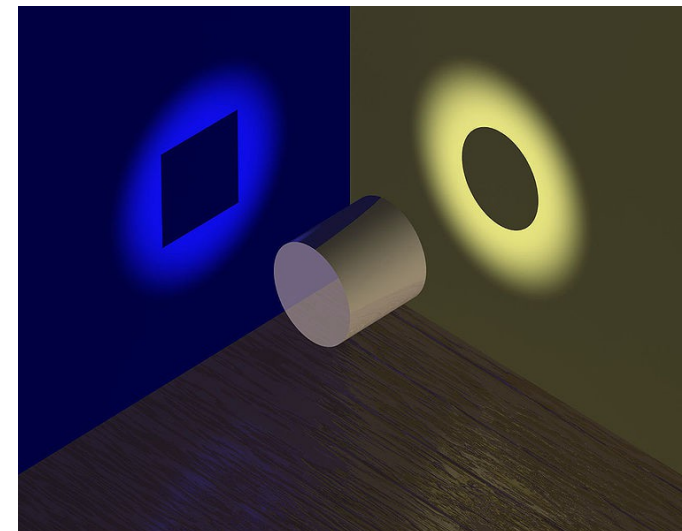
↘ Dualité onde-corpuscule

- $E = \hbar \omega$ (ω : pulsation = $2\pi\nu$)
- $p = \hbar k$ (k : vecteur d'onde $|k|=2\pi/\lambda$)

Ordres de grandeurs

Échelle	Énergie (J)	Temps (s)	Action (Js)
macro	1	1	$1 \ll h$
micro	10^{-13} (1 MeV)	10^{-19} (1 Å / c)	$10^{-32} \approx h$

Système (Caractéristiques)	p (Ns)	λ (Å)
Poussière (m= 1g; v= 1m/s)	10^{-3}	10^{-20}
Électron (T=10 eV $\Rightarrow v \ll c$)	$2 \cdot 10^{-24}$ (3 keV/c)	4.
Électron (T=10 keV $\Rightarrow v = 0.2 c$)	$5 \cdot 10^{-23}$ (100 keV/c)	0.1
Électron (T=10 MeV $\Rightarrow v \approx c$)	$6 \cdot 10^{-21}$ (10 MeV/c)	10^{-3} (100 fm)



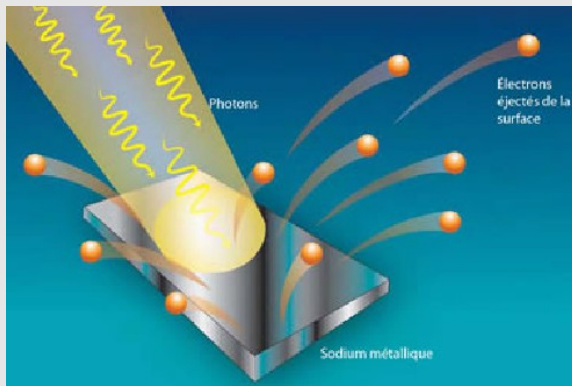
Les quanta

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

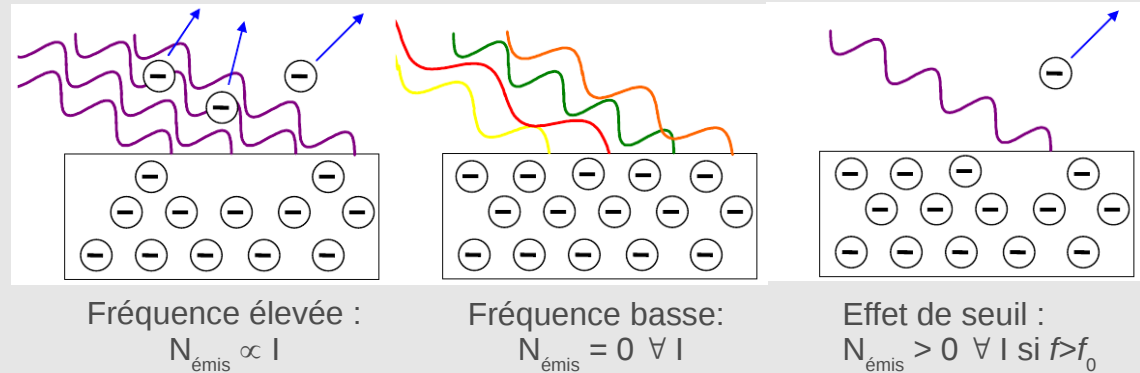
L'EFFET PHOTO-ELECTRIQUE

Un matériau métallique exposé à la lumière peut émettre des électrons



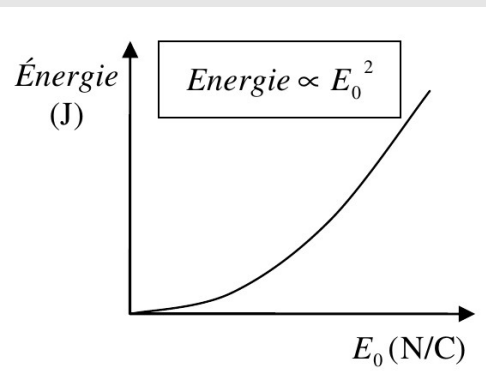
La lumière apporte l'énergie nécessaire pour libérer l'électron de sa structure

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

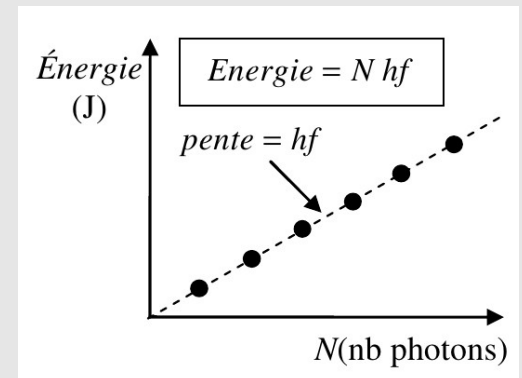


... rôle non expliquée par l'optique ondulatoire ou l'électromagnétisme

INTERPRETATION



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



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

Quantum d'action :

1900, Max Planck, rayonnement du corps noir

- $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$: action élémentaire
- $\hbar = h / 2\pi$: moment cinétique élémentaire

Quanta de lumière

1905, Albert Einstein, effet photo-électrique

- $E = h \nu$: le *photon* transporte l'énergie du champ électromagnétique

Longueur d'onde de de Broglie

1924, Louis de Broglie, hypothèse confirmée par Thomson et Davisson (1927)

- $p = h / \lambda$: particule avec une quantité de mouvement p est caractérisée par une longueur d'onde λ

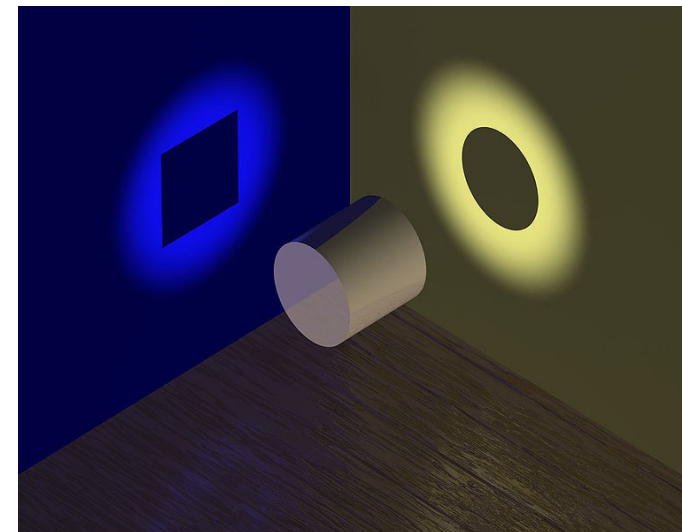
↘ Dualité onde-corpuscule

- $E = \hbar \omega$ (ω : pulsation = $2\pi\nu$)
- $p = \hbar k$ (k : vecteur d'onde $|k|=2\pi/\lambda$)

Ordres de grandeurs

Échelle	Énergie (J)	Temps (s)	Action (Js)
macro	1	1	$1 \ll h$
micro	10^{-13} (1 MeV)	10^{-19} (1 Å / c)	$10^{-32} \approx h$

Système (Caractéristiques)	p (Ns)	λ (Å)
Poussière (m= 1g; v= 1m/s)	10^{-3}	10^{-20}
Électron (T=10 eV $\Rightarrow v \ll c$)	$2 \cdot 10^{-24}$ (3 keV/c)	4.
Électron (T=10 keV $\Rightarrow v = 0.2 c$)	$5 \cdot 10^{-23}$ (100 keV/c)	0.1
Électron (T=10 MeV $\Rightarrow v \approx c$)	$6 \cdot 10^{-21}$ (10 MeV/c)	10^{-3} (100 fm)



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 : $e^{ix} = \cos(x) + i \sin(x)$

Description

- paquet d'ondes: $\Psi(\mathbf{r},t) \propto \int A(\mathbf{r}) e^{-i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})} d\mathbf{k}$
↔ état quantique $|\psi(t)\rangle$
- relations d'Heisenberg: $\Delta P \cdot \Delta x > \hbar/2$; $\Delta E \cdot \Delta t > \hbar/2$

Propagation

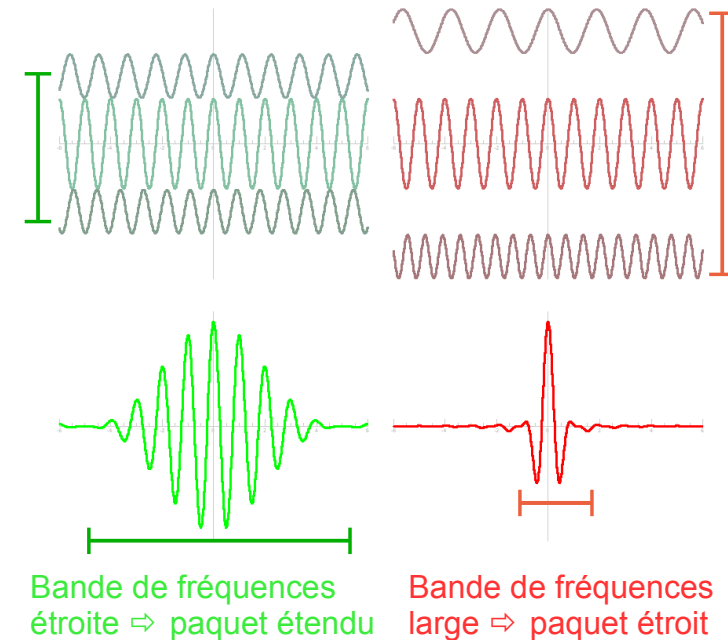
- équation de Schrödinger (déterministe):
- $i\hbar d|\psi(t)\rangle/dt = H(t)|\psi(t)\rangle$ où $H(t)$: opérateur énergie
- solutions: $|\psi(t)\rangle = \sum_a c_a(t) |\psi_a\rangle$
 $|\psi_a\rangle$: état correspondant à la valeur $a \in \{a\}$

Le problème de la mesure

- résultat d'une mesure est probabiliste: $P_a = |c_a|^2$
- réduction du paquet d'onde
mesure donnant 'a' place le système dans l'état $|\psi_a\rangle$

Interprétation ?

- artefact mathématique (Copenhague)
- physique universelle (décohérence) [S. Haroche – nobel 2012]



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 : $e^{ix} = \cos(x) + i \sin(x)$

Desc

→

Prop

→

-

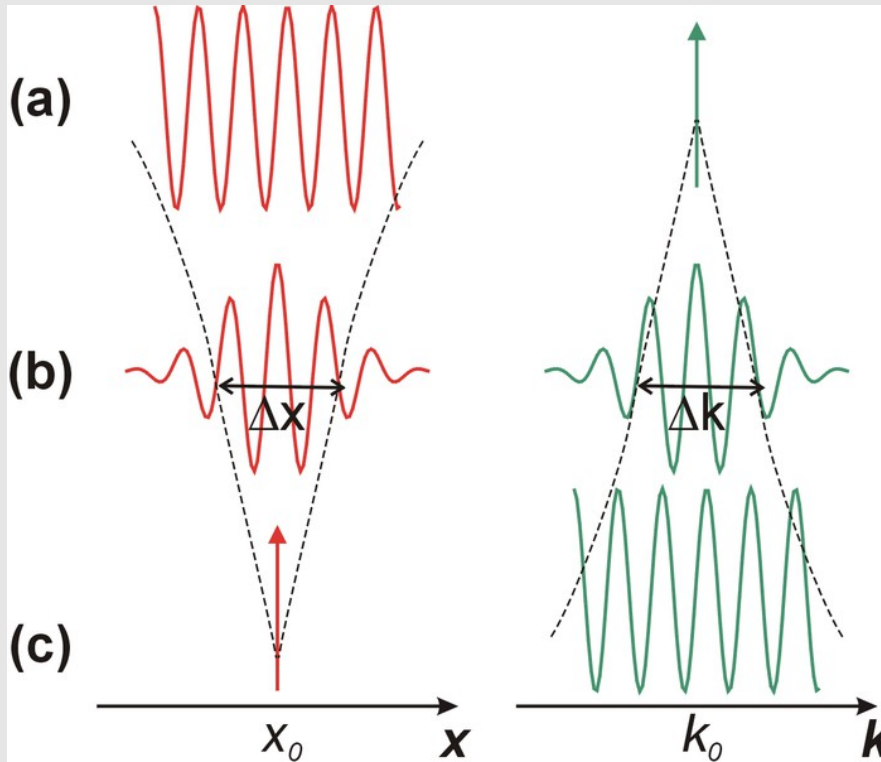
→

Le pr

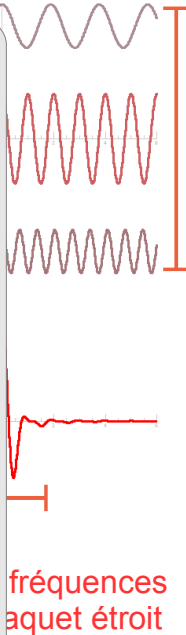
→

→

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



Interprétation ?

- artefact mathématique (Copenhague)
- physique universelle (décohérence) [S. Haroche – nobel 2012]



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 : $e^{ix} = \cos(x) + i \sin(x)$

Description

- paquet d'ondes: $\Psi(\mathbf{r},t) \propto \int A(\mathbf{r}) e^{-i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})} d\mathbf{k}$
↔ état quantique $|\psi(t)\rangle$
- relations d'Heisenberg: $\Delta P \cdot \Delta x > \hbar/2$; $\Delta E \cdot \Delta t > \hbar/2$

Propagation

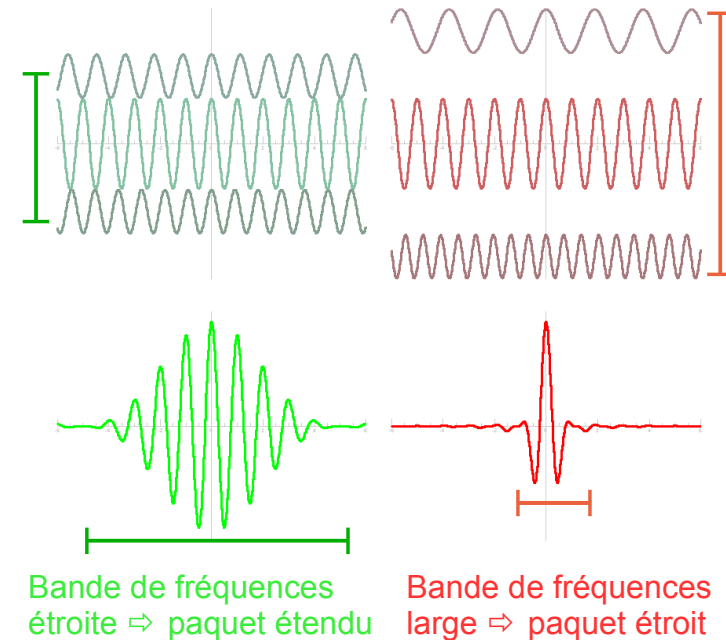
- équation de Schrödinger (déterministe):
- $i\hbar d|\psi(t)\rangle/dt = H(t)|\psi(t)\rangle$ où $H(t)$: opérateur énergie
- solutions: $|\psi(t)\rangle = \sum_a c_a(t) |\psi_a\rangle$
 $|\psi_a\rangle$: état correspondant à la valeur $a \in \{a\}$

Le problème de la mesure

- résultat d'une mesure est probabiliste: $P_a = |c_a|^2$
- réduction du paquet d'onde
mesure donnant 'a' place le système dans l'état $|\psi_a\rangle$

Interprétation ?

- artefact mathématique (Copenhague)
- physique universelle (décohérence) [S. Haroche – nobel 2012]

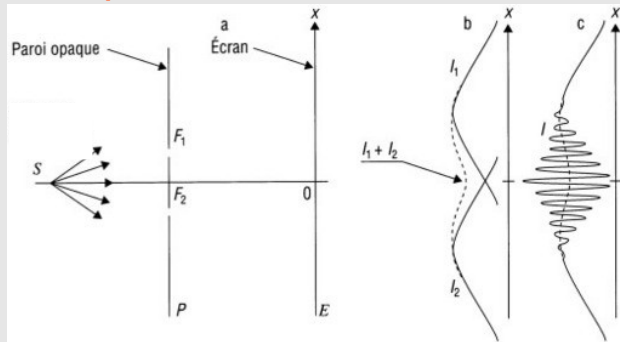


Dualité onde-corpuscule

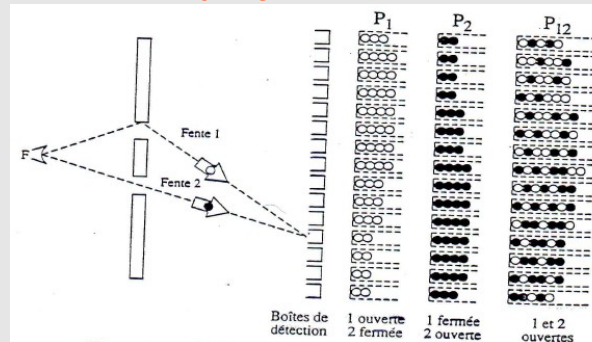
paquet d'ondes :
 exemples :
 - $\varphi(x) = \sum_i A_i \cos(k x)$
 - $\Psi(x) = \sum_i A_i e^{ikx}$
 note : $e^{ix} = \cos(x) + i \sin(x)$

L'EXPERIENCE DES FENTES D'YOUNG

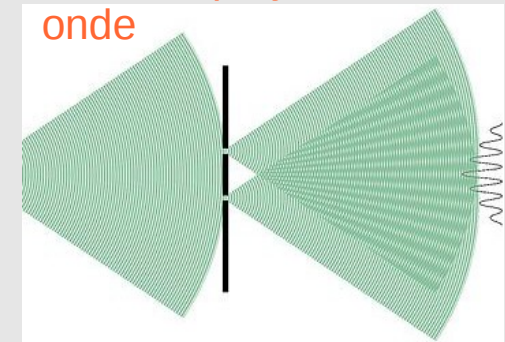
L'expérience :



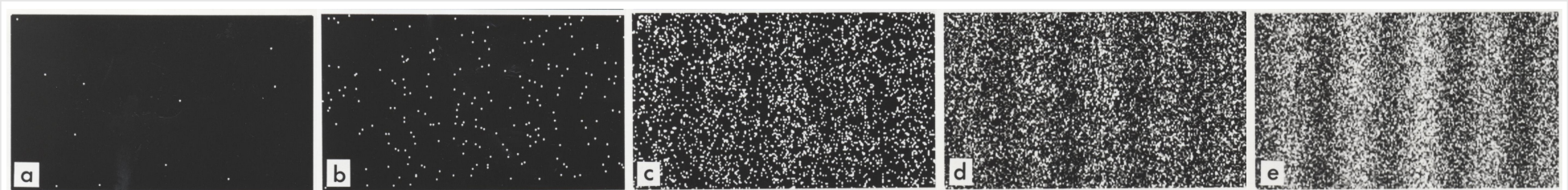
Cas #1: projectile = bille



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.

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

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 : $e^{ix} = \cos(x) + i \sin(x)$

Description

- paquet d'ondes: $\Psi(\mathbf{r},t) \propto \int A(\mathbf{r}) e^{-i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})} d\mathbf{k}$
- ↔ état quantique $|\psi(t)\rangle$
- relations d'Heisenberg: $\Delta P \cdot \Delta x > \hbar/2$; $\Delta E \cdot \Delta t > \hbar/2$

Propagation

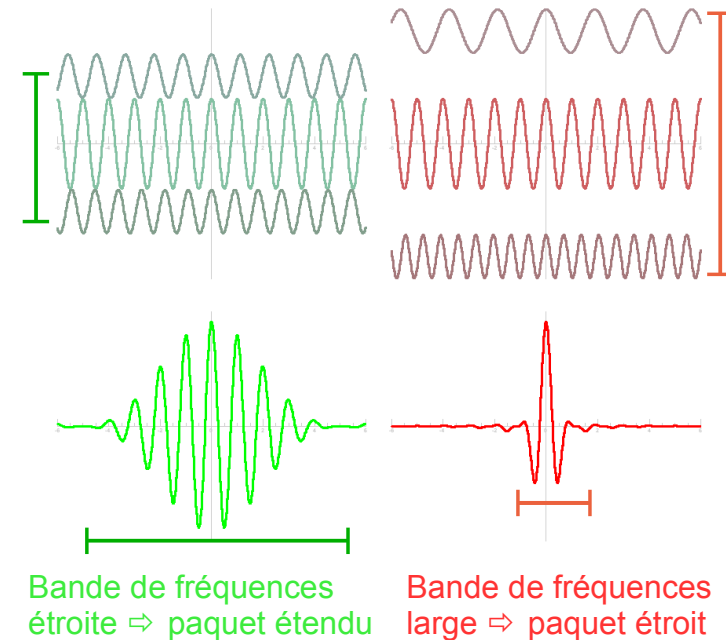
- équation de Schrödinger (déterministe):
- $i\hbar d|\psi(t)\rangle/dt = H(t)|\psi(t)\rangle$ où $H(t)$: opérateur énergie
- solutions: $|\psi(t)\rangle = \sum_a c_a(t) |\psi_a\rangle$
 $|\psi_a\rangle$: état correspondant à la valeur $a \in \{a\}$

Le problème de la mesure

- résultat d'une mesure est probabiliste: $P_a = |c_a|^2$
- réduction du paquet d'onde
mesure donnant 'a' place le système dans l'état $|\psi_a\rangle$

Interprétation ?

- artefact mathématique (Copenhague)
- physique universelle (décohérence) [S. Haroche – nobel 2012]



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 : $e^{ix} = \cos(x) + i \sin(x)$

Desc

→

Propriété purement quantique
(**moment angulaire interne**)

Prop

→

- grandeur vectoriel (\Rightarrow orientation)
- norme = $s \hbar / 2$ où s est entier
- nombre quantique associé : $s/2$

Le pr

→

On distingue les particules portant un spin :
1/2 entier : les fermions

→

- état antisymétrique
- 2 fermions indiscernables ne peuvent être dans le même état quantique

→

- particule de matière
- ex : l'électron

→

entier : les bosons

→

- état symétrique
- les bosons peuvent partager le même état quantique

Interp

→

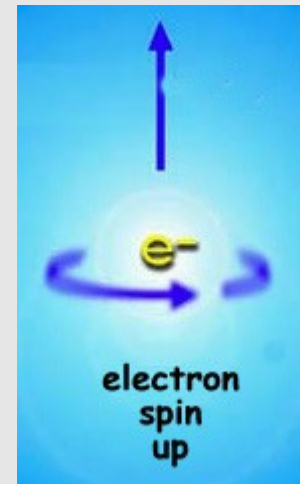
- particule de force
- ex : le photon

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

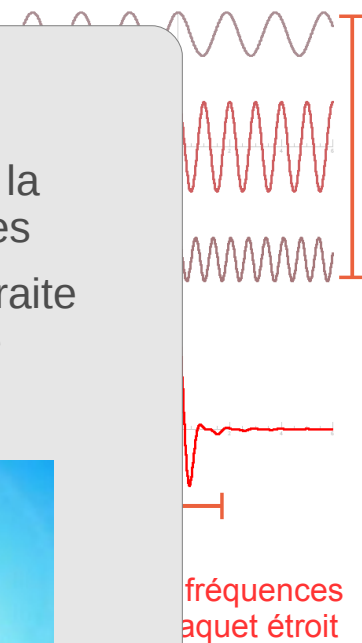
LE SPIN

Introduit en 1925 pour expliquer la structure fine des raies spectrales

Arrive naturellement quand on traite la mécanique quantique dans le cadre relativiste



Aujourd'hui utilisé par ex dans les IRM



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 : $e^{ix} = \cos(x) + i \sin(x)$

Description

- paquet d'ondes: $\Psi(\mathbf{r},t) \propto \int A(\mathbf{r}) e^{-i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})} d\mathbf{k}$
↔ état quantique $|\psi(t)\rangle$
- relations d'Heisenberg: $\Delta P \cdot \Delta x > \hbar/2$; $\Delta E \cdot \Delta t > \hbar/2$

Propagation

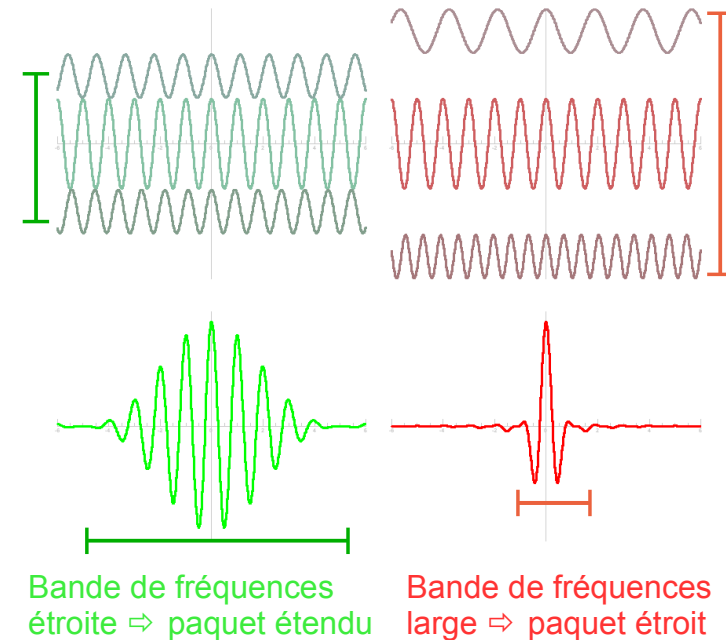
- équation de Schrödinger (déterministe):
- $i\hbar d|\psi(t)\rangle/dt = H(t)|\psi(t)\rangle$ où $H(t)$: opérateur énergie
- solutions: $|\psi(t)\rangle = \sum_a c_a(t) |\psi_a\rangle$
 $|\psi_a\rangle$: état correspondant à la valeur $a \in \{a\}$

Le problème de la mesure

- résultat d'une mesure est probabiliste: $P_a = |c_a|^2$
- réduction du paquet d'onde
mesure donnant 'a' place le système dans l'état $|\psi_a\rangle$

Interprétation ?

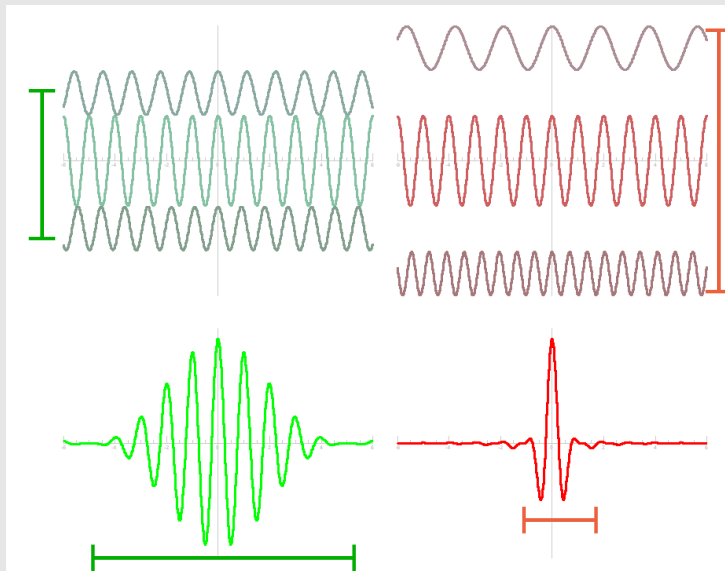
- artefact mathématique (Copenhague)
- physique universelle (décohérence) [S. Haroche – nobel 2012]



ONDE, CORPUSCULE ET PAQUET D'ONDE

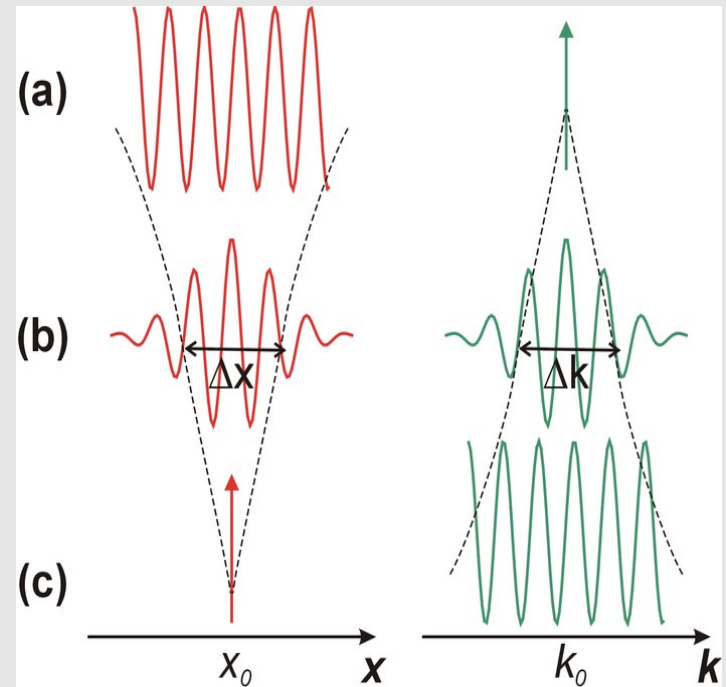
Paquet d'onde :

- 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

Relativité restreinte

Relativité galiléenne (= Newton)

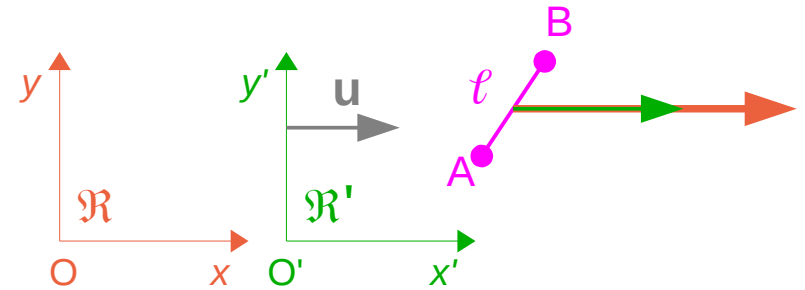
- le mouvement est **relatif**
- $\mathbf{v}_{A/\mathcal{R}} = \mathbf{u}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}} + \mathbf{v}_{A/\mathcal{R}'}$
- lois de Newton (point matériel):
- vrai dans tout réf. inertiel
- temps identique dans tout réf. inertiel = un **temps absolue**
- Lois de transformation

(\mathcal{R} et \mathcal{R}' ont la même origine à $t=0$)

$$\begin{cases} x \rightarrow x' = x - u_x \times t \\ y \rightarrow y' = y - u_y \times t \\ z \rightarrow z' = z - u_z \times t \\ t \rightarrow t' = t \end{cases}$$

les longueurs sont conservées :

$$\ell \rightarrow \ell$$



↳ Les lois de Newton

- basées sur des principes simples
- décrivent tous les phénomènes mécaniques autour de nous

↳ Mais ... et la lumière ?

- ondes électromagnétiques se propagent dans l'*éther luminifère*, une matière fixe liée à un référentiel absolu (?) - pas vérifier !
- vitesse indépendante de la source
- rompt l'invariance galiléenne

Photons ?

Principes de relativité

(1/2)

« Enfermez-vous avec un ami dans la cabine principale à l'intérieur d'un grand bateau et prenez avec vous des mouches, des papillons, et d'autres petits animaux volants. Prenez une grande cuve d'eau avec un poisson dedans, suspendez une bouteille qui se vide goutte à goutte dans un grand récipient en dessous d'elle. Avec le bateau à l'arrêt, observez soigneusement comment les petits animaux volent à des vitesses égales vers tous les côtés de la cabine. Le poisson nage indifféremment dans toutes les directions, les gouttes tombent dans le récipient en dessous, et si vous lancez quelque chose à votre ami, vous n'avez pas besoin de le lancer plus fort dans une direction que dans une autre, les distances étant égales, et si vous sautez à pieds joints, vous franchissez des distances égales dans toutes les directions. Lorsque vous aurez observé toutes ces choses soigneusement (bien qu'il n'y ait aucun doute que lorsque le bateau est à l'arrêt, les choses doivent se passer ainsi), faites avancer le bateau à l'allure qui vous plaira, pour autant que la vitesse soit uniforme [c'est-à-dire constante] et ne fluctue pas de part et d'autre. Vous ne verrez pas le moindre changement dans aucun des effets mentionnés et même aucun d'eux ne vous permettra de dire si le bateau est en mouvement ou à l'arrêt ... »

– Galilée, *Dialogue concernant les deux plus grands systèmes du monde*, 1632

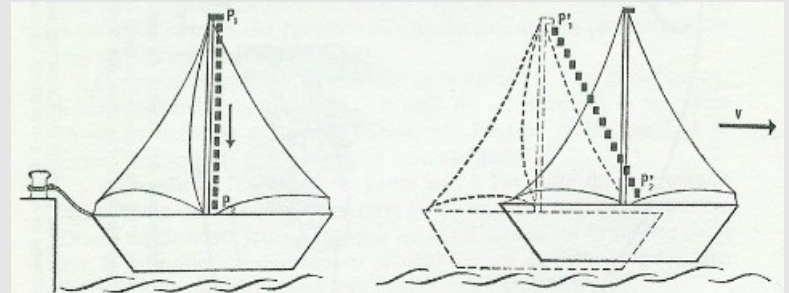


FIG. 7. — La pierre tombant du haut du mât aboutit au pied de celui-ci quel que soit le mouvement du bateau par rapport à la rive.
« Toutes les choses qui se trouvent sur la terre se meuvent avec la terre. La pierre jetée de la hune reviendra en bas de quelque façon que le navire se meuve. »

Giordano BRUNO (*La Cena de le Ceneri*).

(1) Giordano BRUNO (1568-1600), admet le caractère infini de l'univers copernicien. Emprisonné par l'Inquisition en 1593, Bruno est brûlé à Rome le 17 février 1600.

Relativité galiléenne (= Newton)

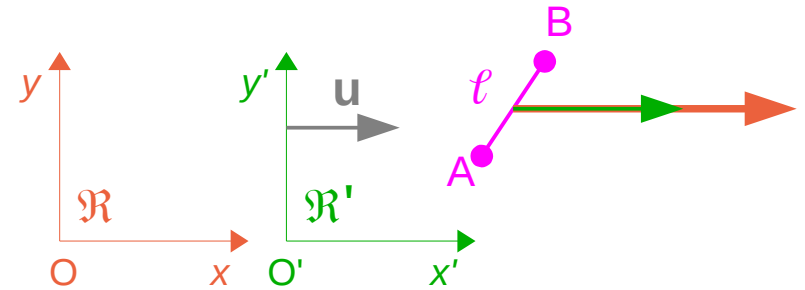
- le mouvement est **relatif**
- $\mathbf{v}_{A/\mathcal{R}} = \mathbf{u}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}} + \mathbf{v}_{A/\mathcal{R}'}$
- lois de Newton (point matériel):
- vrai dans tout réf. inertiel
- temps identique dans tout réf. inertiel = un **temps absolue**
- Lois de transformation

(\mathcal{R} et \mathcal{R}' ont la même origine à $t=0$)

$$\begin{cases} x \rightarrow x' = x - u_x \times t \\ y \rightarrow y' = y - u_y \times t \\ z \rightarrow z' = z - u_z \times t \\ t \rightarrow t' = t \end{cases}$$

les longueurs sont conservées :

$$\ell \rightarrow \ell$$



↳ Les lois de Newton

- basées sur des principes simples
- décrivent tous les phénomènes mécaniques autour de nous

↳ Mais ... et la lumière ?

- ondes électromagnétiques se propagent dans l'*éther luminifère*, une matière fixe liée à un référentiel absolu (?) - pas vérifier !
- vitesse indépendante de la source
- rompt l'invariance galiléenne

Photons ?

Rela

REFERENTIEL INERTIEL (=GALILEEN)

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

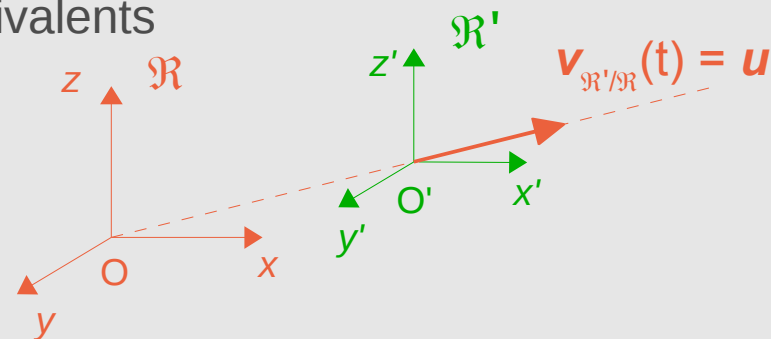
↻ *la principe d'inertie ne s'applique que dans un référentiel inertiel !*

Il existe une famille de référentiels, appelés galiléens ou inertiels, tels que, par rapport à l'un de ces référentiels, tout point matériel isolé (qui n'est soumis à aucune action extérieure) est soit au repos, soit animé d'un mouvement rectiligne et uniforme

⇒ La détermination d'un *bon* référentiel galiléen est expérimentale ; seule la cohérence entre la théorie et la mesure (mouvement rectiligne uniforme) valide le choix a posteriori.

⇒ tous les référentiels galiléens sont équivalents

⇔ pas de référentiel privilégié



Photons ?

Relativité galiléenne (= Newton)

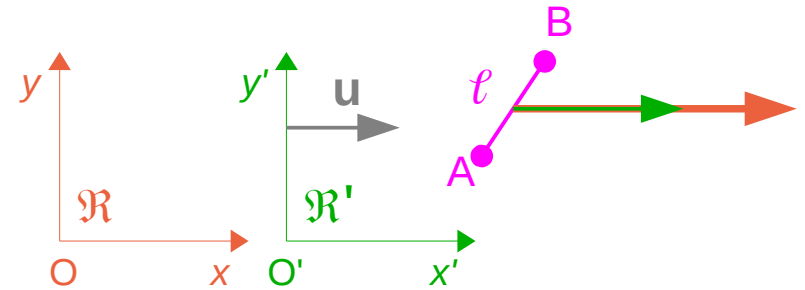
- le mouvement est **relatif**
- $\mathbf{v}_{A/\mathcal{R}} = \mathbf{u}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}} + \mathbf{v}_{A/\mathcal{R}'}$
- lois de Newton (point matériel):
- vrai dans tout réf. inertiel
- temps identique dans tout réf. inertiel = un **temps absolue**
- Lois de transformation

(\mathcal{R} et \mathcal{R}' ont la même origine à $t=0$)

$$\begin{cases} x \rightarrow x' = x - u_x \times t \\ y \rightarrow y' = y - u_y \times t \\ z \rightarrow z' = z - u_z \times t \\ t \rightarrow t' = t \end{cases}$$

les longueurs sont conservées :

$$\ell \rightarrow \ell$$



↳ Les lois de Newton

- basées sur des principes simples
- décrivent tous les phénomènes mécaniques autour de nous

↳ Mais ... et la lumière ?

- ondes électromagnétiques se propagent dans l'*éther luminifère*, une matière fixe liée à un référentiel absolu (?) - pas vérifier !
- vitesse indépendante de la source
- rompt l'invariance galiléenne

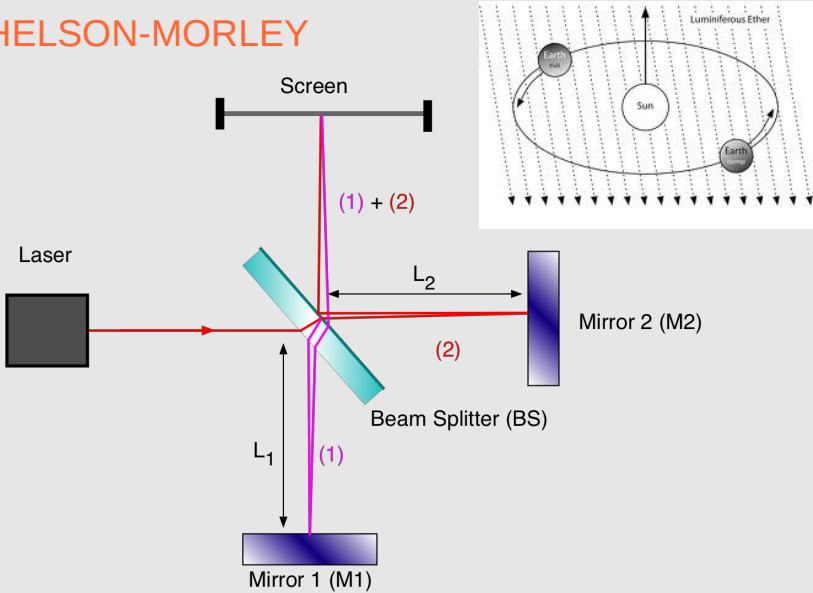
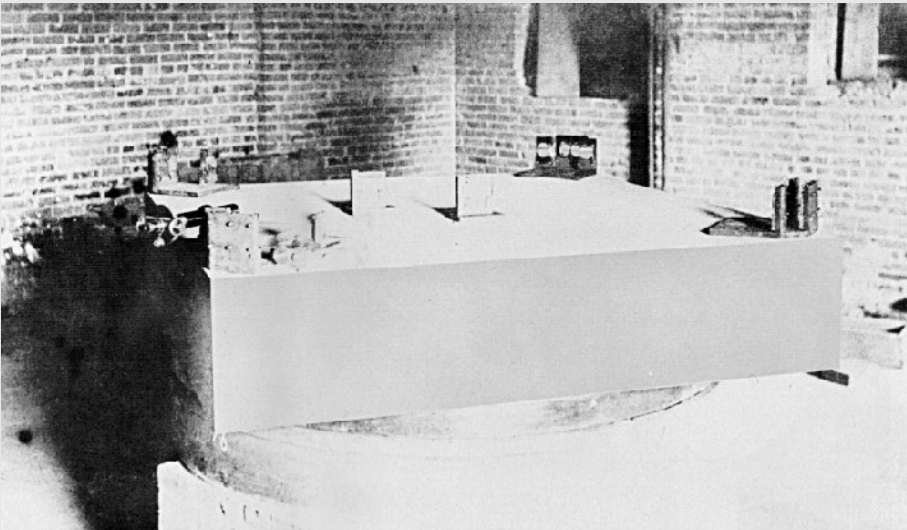
Photons ?

Relativité galiléenne (= Newton)

→ le mouvement est **relatif**



EXPERIENCE DE MICHELSON-MORLEY



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

Photons ?

Relativité galiléenne (= Newton)

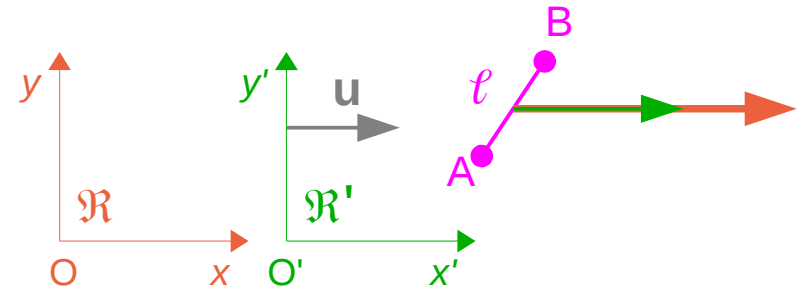
- le mouvement est **relatif**
- $\mathbf{v}_{A/\mathcal{R}} = \mathbf{u}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}} + \mathbf{v}_{A/\mathcal{R}'}$
- lois de Newton (point matériel):
- vrai dans tout réf. inertiel
- temps identique dans tout réf. inertiel = un **temps absolue**
- Lois de transformation

(\mathcal{R} et \mathcal{R}' ont la même origine à $t=0$)

$$\begin{cases} x \rightarrow x' = x - u_x \times t \\ y \rightarrow y' = y - u_y \times t \\ z \rightarrow z' = z - u_z \times t \\ t \rightarrow t' = t \end{cases}$$

les longueurs sont conservées :

$$\ell \rightarrow \ell$$



↳ Les lois de Newton

- basées sur des principes simples
- décrivent tous les phénomènes mécaniques autour de nous

↳ Mais ... et la lumière ?

- ondes électromagnétiques se propagent dans l'*éther luminifère*, une matière fixe liée à un référentiel absolu (?) - pas vérifier !
- vitesse indépendante de la source
- rompt l'invariance galiléenne

Photons ?

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

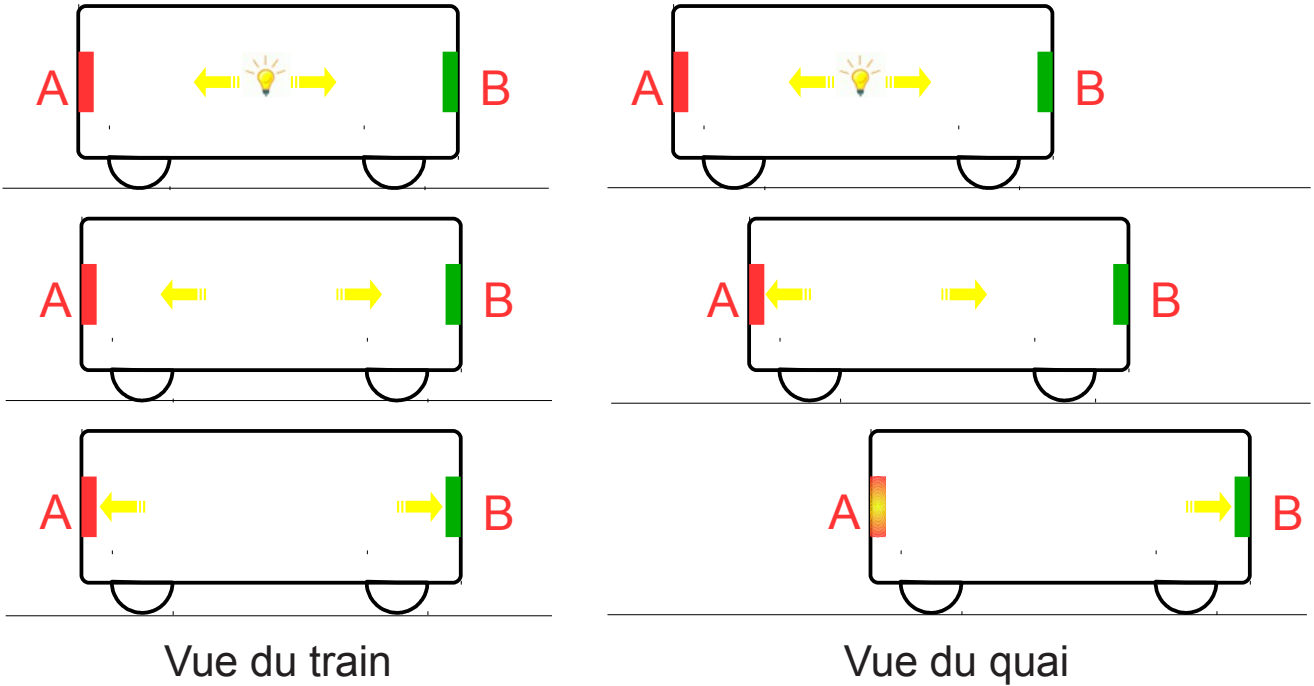
Postulats de la relativité restreinte

- 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

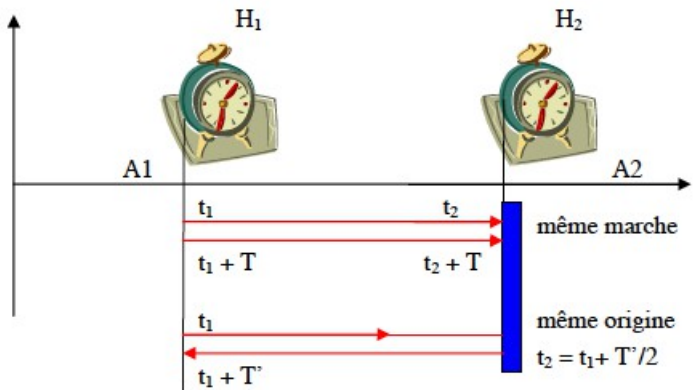


Vue du train :
A et B atteints simultanément

Vue du quai :
A atteint avant B

⇒ Relativité de la simultanéité
Paradoxe du train piégé

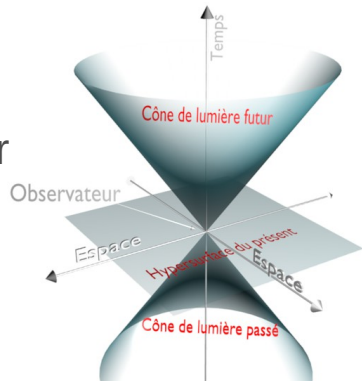
Synchronisation des horloges



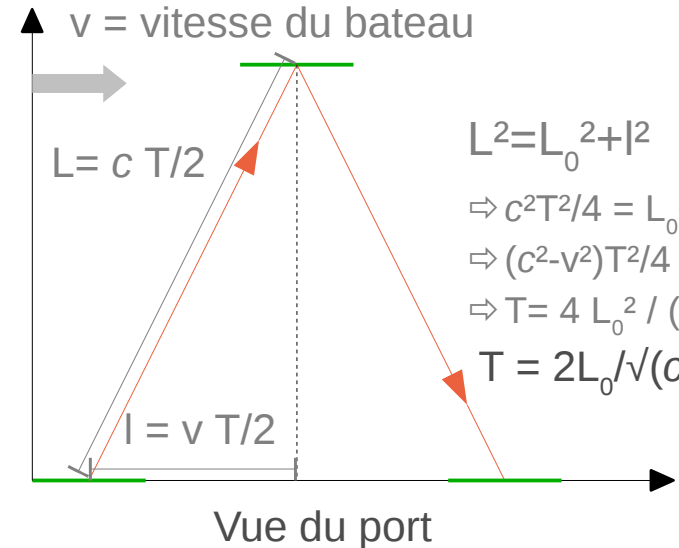
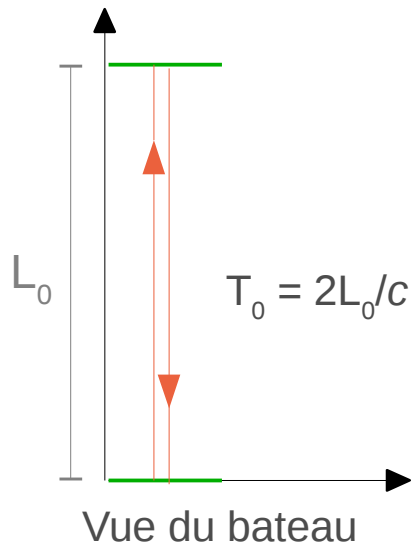
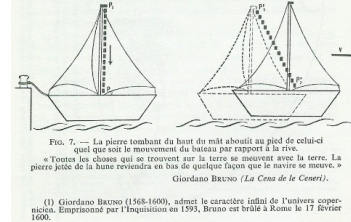
Causalité

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

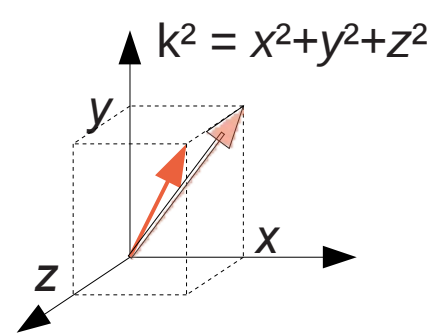
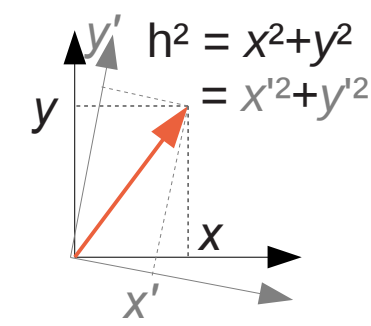
- $v \ll c \Rightarrow \gamma \approx 1$
- $v \rightarrow c \Rightarrow \gamma \rightarrow \infty$

- ↘ Dilatation du temps
- ↘ Contraction des longueurs

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

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

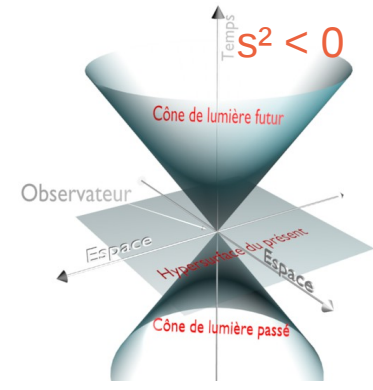
Espace-temps de Minkowski :



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

s : intervalle d'espace-temps invariant par rotation

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



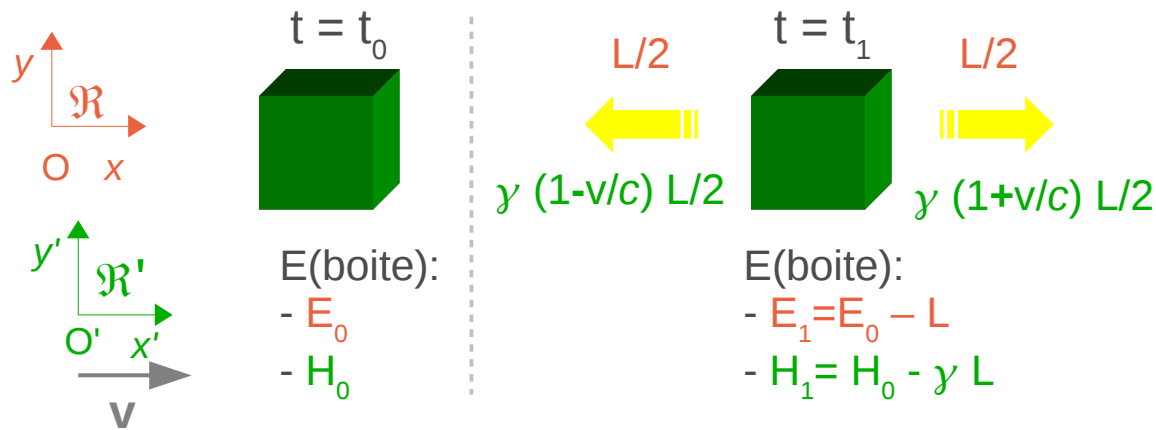
Espace à 2D

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)