

# Des atomes aux quarks

❖ 100 ans d'avancées 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 leurs interactions

# La genèse

- ❖ État des lieux à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle
- ❖ Révolutions conceptuelles
- ❖ Les particules ordinaires

# État des lieux à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle

## Mécanique newtonienne [Newton (1643-1727)]

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

## Mécanique analytique [Lagrange (1736-1813)]

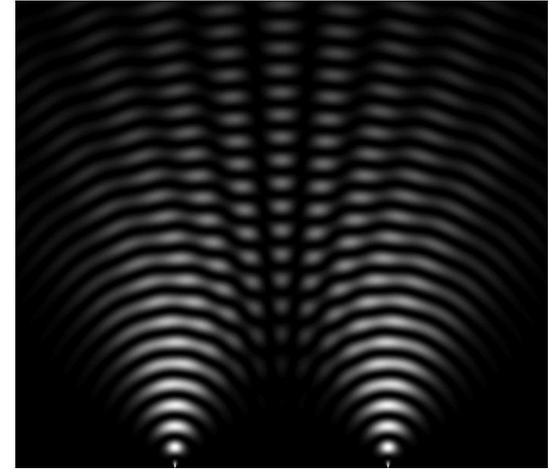
- principe de moindre action

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

- nature ondulatoire de la lumière

## Électromagnétisme [Maxwell (1831-1879)]

- unification électricité - magnétisme



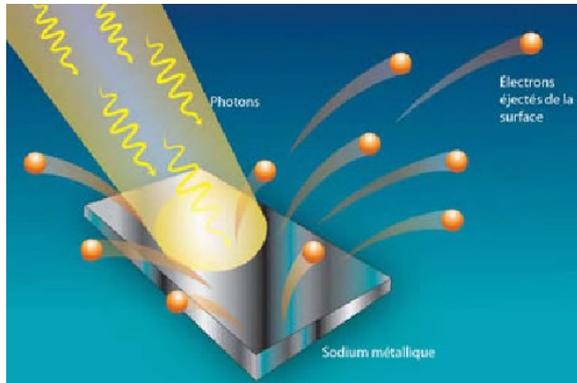
- ↘ Existence des atomes : pas prouvée – en débat
- ↘ Lumière : onde électromagnétique se propageant dans un *éther*

# Révolutions conceptuelles

- ❖ D'après Lord Kelvin en 1900 (British Association for the advancement of Science) :
  - «There is nothing new to be discovered in physics now. All that remains is more and more precise measurement.»
- ❖ 2 théories fondamentales voient le jour au début du XX<sup>e</sup> Siècle
  - La relativité restreinte
  - La mécanique quantique

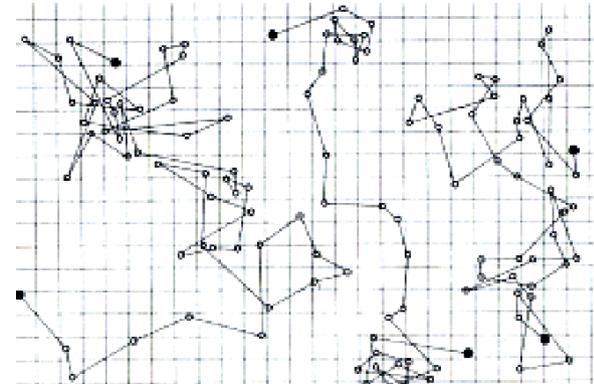
# 1905, Annus Mirabilis (articles clefs publiés par Einstein)

## effet photo-électrique



nature corpusculaire de la lumière (photon)

## mouvement brownien

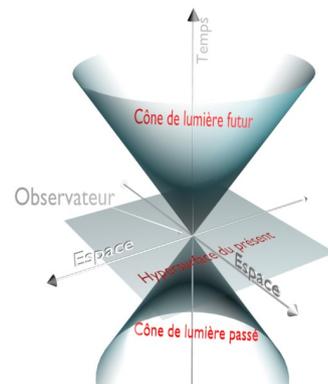


argument en faveur de la théorie atomiste de la matière

## relativité restreinte

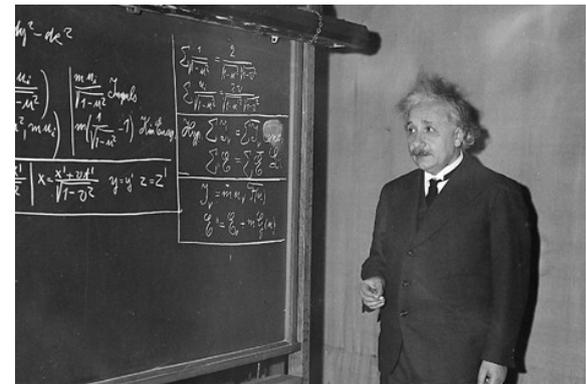
Postulats :

- 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  $v$ :

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

$c$  = vitesse de la lumière dans le vide

- exemple : une bombe programmée pour exploser après 1 s



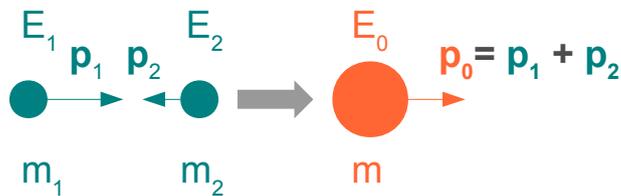
1) $v =$	300 km/s (0,1 % $c$ )	→ $L =$	300 km (t= 1s)
2) $v =$	29 979 km/s (10 % $c$ )	→ $L =$	30 130 km (t= 1s)
3) $v =$	269 813 km/s (90 % $c$ )	→ $L =$	618 994 km (t= 2s)
4) $v =$	296 794 km/s (99 % $c$ )	→ $L =$	2 103 921 km (t= 7s)
5) $v =$	299 493 km/s (99,9 % $c$ )	→ $L =$	6 698 534 km (t=22s)

↘ relativité restreinte à prendre en compte quand les vitesses considérées s'approchent de la vitesse limite ( $c$ )

# Relativité restreinte : masse et énergie

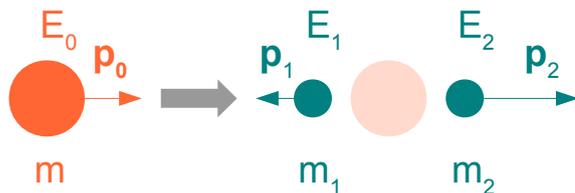
## Équivalence masse-énergie

- la masse est une forme d'énergie
- si un corps perd une quantité d'énergie  $E$ , sa masse diminue de  $\Delta m = E/c^2$
- $E_0 = m c^2$  : énergie au repos (dans le référentiel 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  $E_1 = E_2 = 7$  TeV  
→ énergie disponible :  $E_0 = 14$  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

## Équivalence masse-énergie

### 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/c<sup>2</sup>

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

Multiples usuels : keV (10<sup>3</sup>), MeV(10<sup>6</sup>), GeV(10<sup>9</sup>), TeV (10<sup>12</sup>)

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

- l'ångström : 1 Å = 10<sup>-10</sup> m

- le *fermi* (ou *femtomètre*) : 1 fm = 10<sup>-15</sup> m

c<sup>2</sup>  
e)  
ent)

# Mécanique quantique : dualité onde-corpuscule

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

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

$$E = h\nu \quad (\nu = \text{fréquence})$$

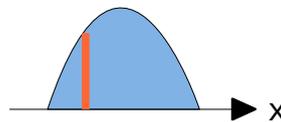
$$p = h/\lambda \quad (\lambda = \text{longueur d'onde})$$

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

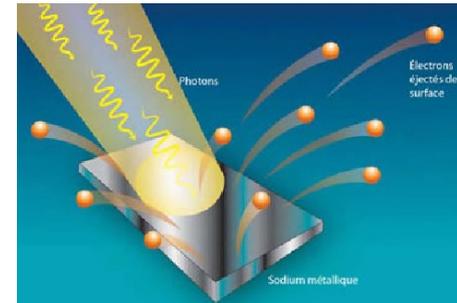
2 descriptions a priori antagonistes !

- 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.

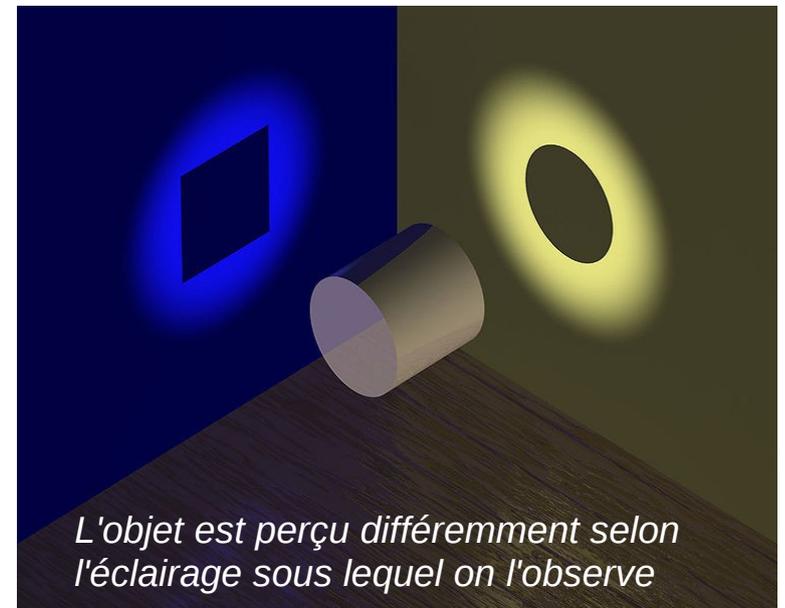
ex : la position d'une particule



Effet photo-électrique, Einstein, 1905

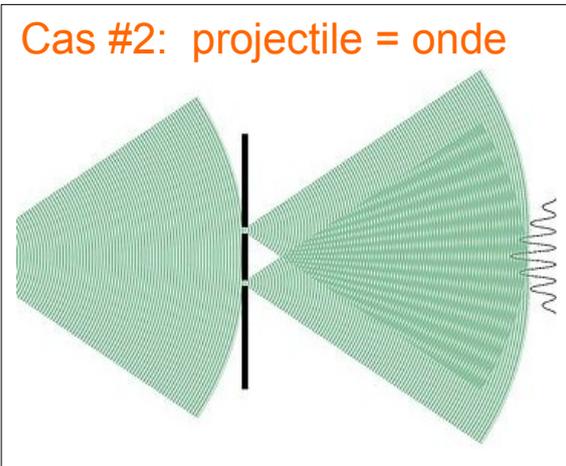
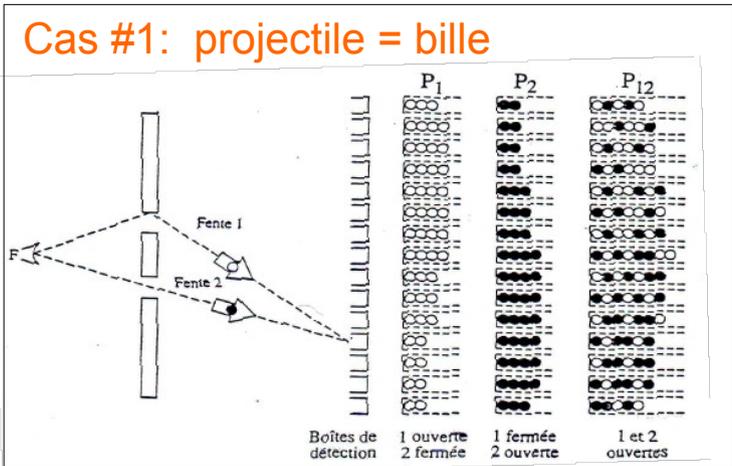
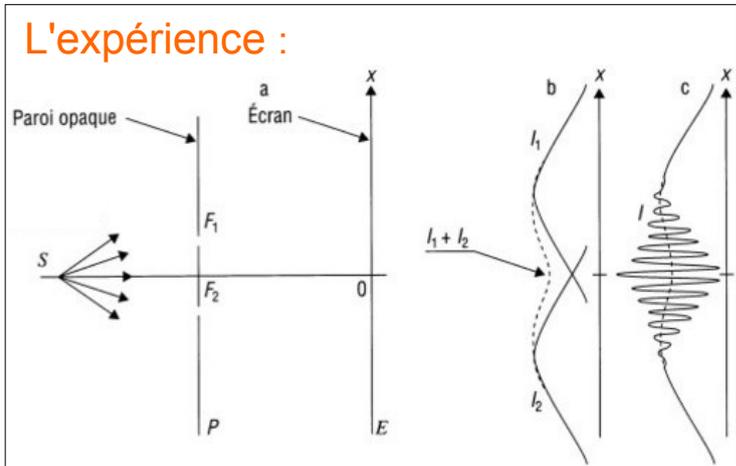


L'énergie de l'onde électromagnétique est portée par le photon

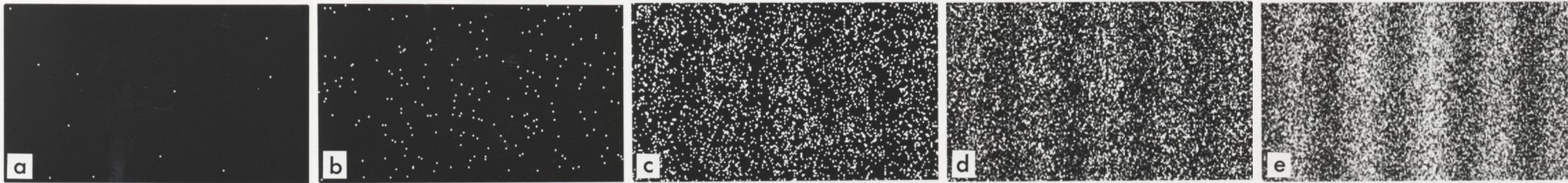


# Mécanique quantique : illustration

## L'expérience des fentes d'Young

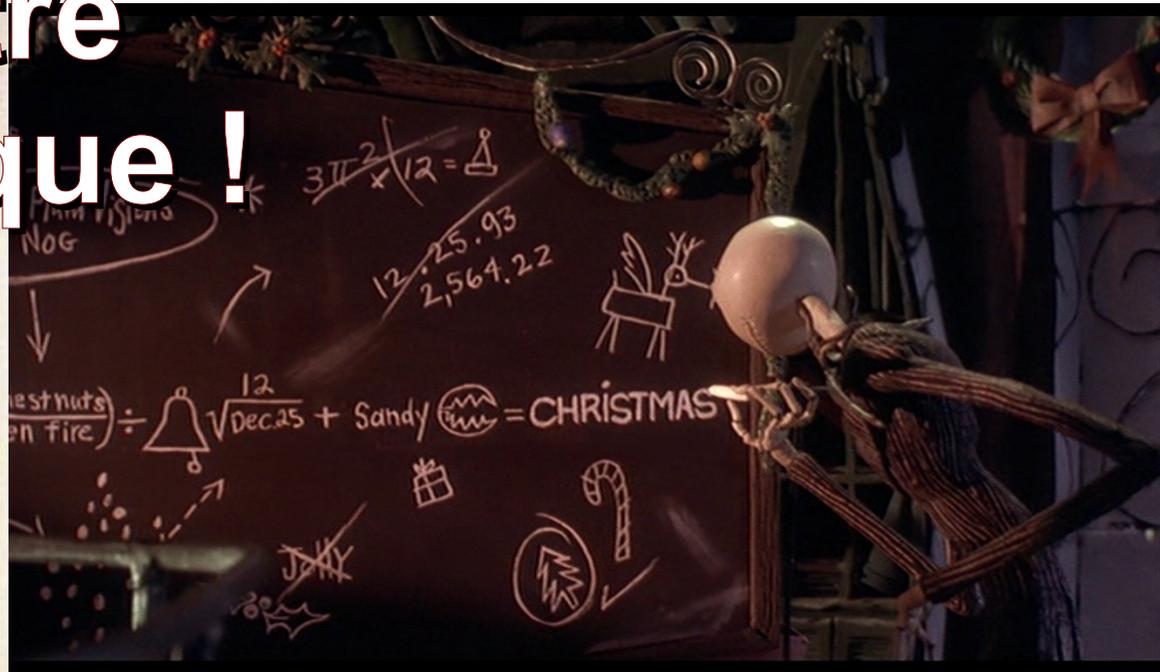


### Cas #3: projectile = objet quantique (électron, photon)



On peut observer les impacts individuels et les franges d'interférences !  
Remarque : si on détecte par quelle fente la particule passe, l'interférence disparaît

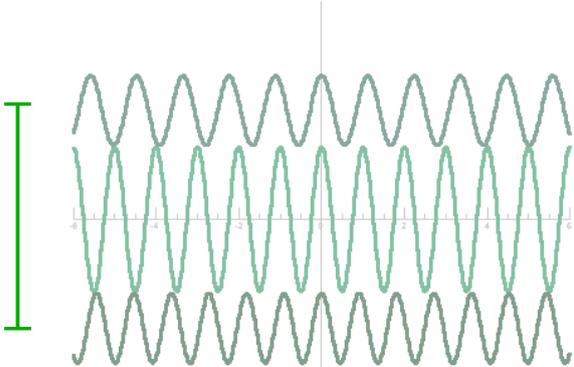
# Mécanique quantique : illustration



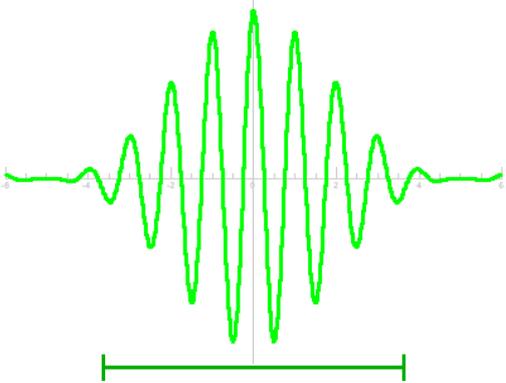
Très léger car quantique ( $\lambda = h/mc$ ) :  
taille  $\sim 1$  m  $\rightarrow$  masse inférieure à  $10^{-42}$  kg

# Mécanique quantique : le paquet d'onde

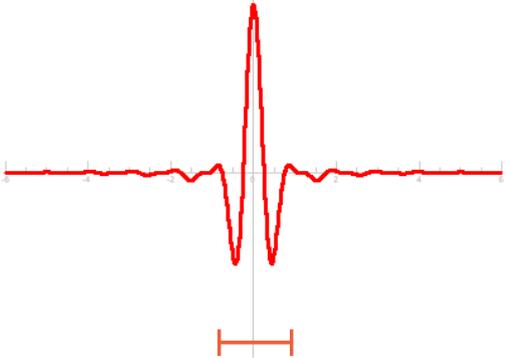
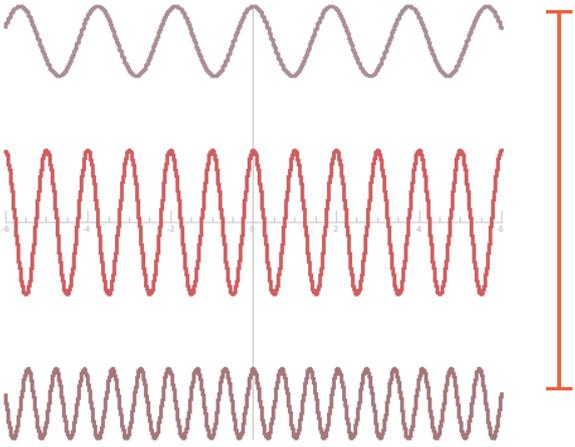
Superposition de plusieurs ondes (planes) de fréquences différentes



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

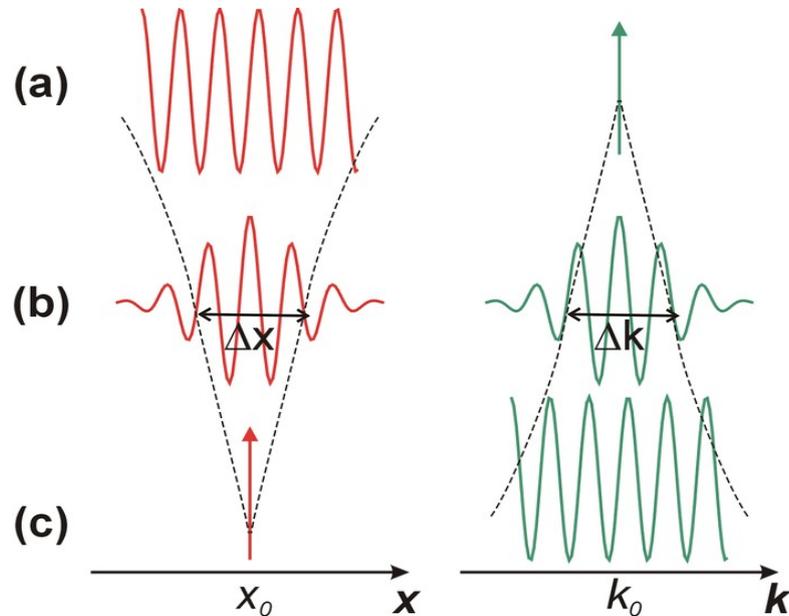


Bande de fréquences étroite  
⇒ paquet étendu



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

### Avantage de ce flou quantique :

- une énergie ( $\Delta E$ ) peut être « empruntée » au vide pendant un laps de temps ( $\Delta t$ ) 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]

Malgré les réticences et les aspects non-intuitifs, toutes les expériences confirment les prédictions de la mécanique quantique

# Les particules *ordinaires*

❖ Quelles sont-elles ?

# L'électron

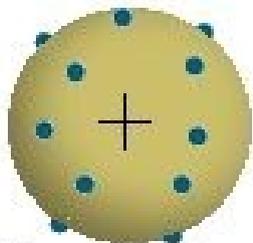
## Découvert par J-J Thomson en 1897

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

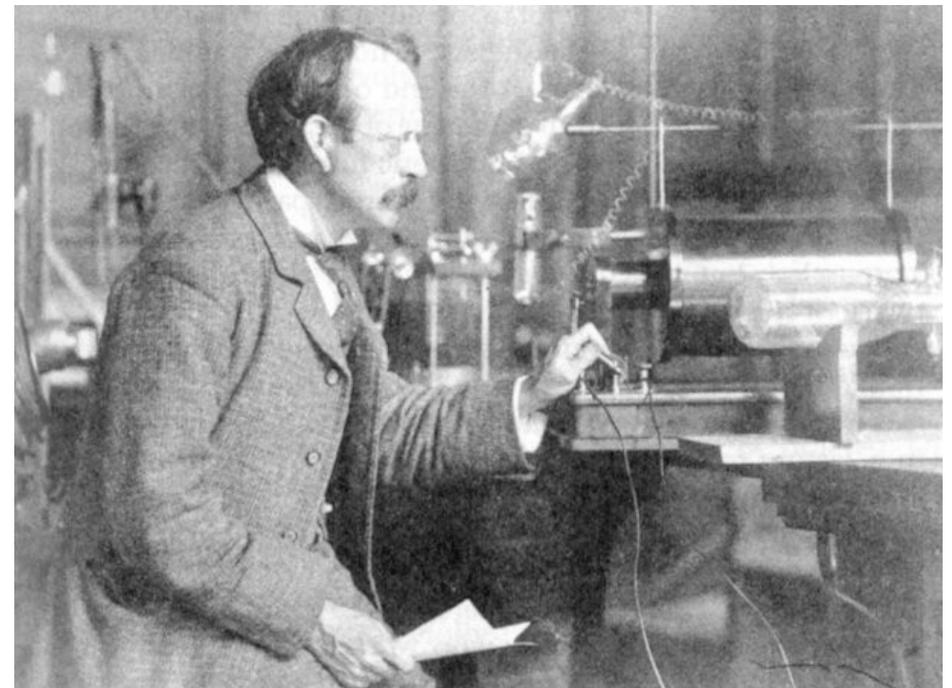
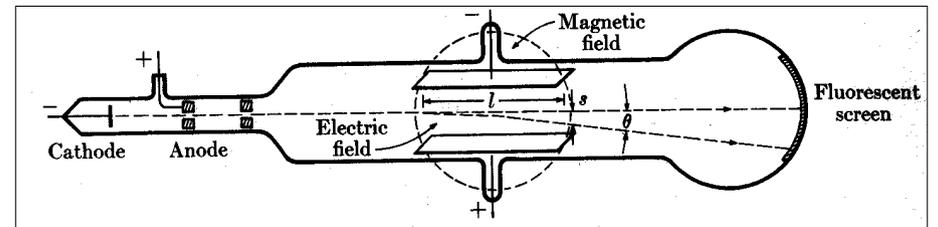
$$m_e = 1/1800 m_{\text{Hydrogène}}$$

## 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)

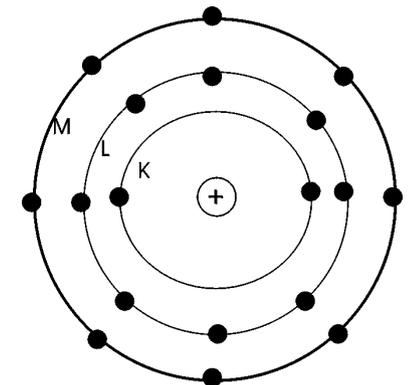
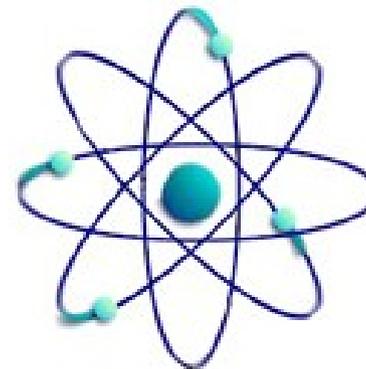
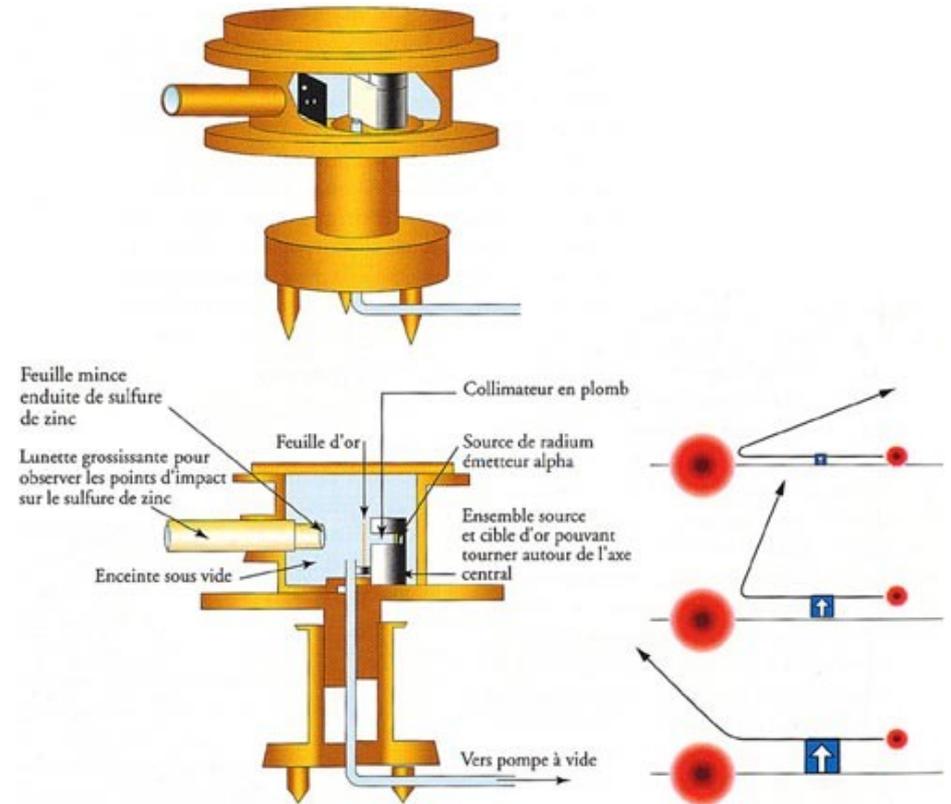
- la masse est concentrée au cœur d'un atome composé de vide
- « c'est comme si vous bombardiez un buvard avec un obus de 75 et que vous le voyez rebondir »

## 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

Expér

→

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

Désintégration  $\alpha$  du radium

$E_{\alpha} = 4.6$  MeV

$\Rightarrow v = 5\% c$

Nouve

→

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 !

Modè

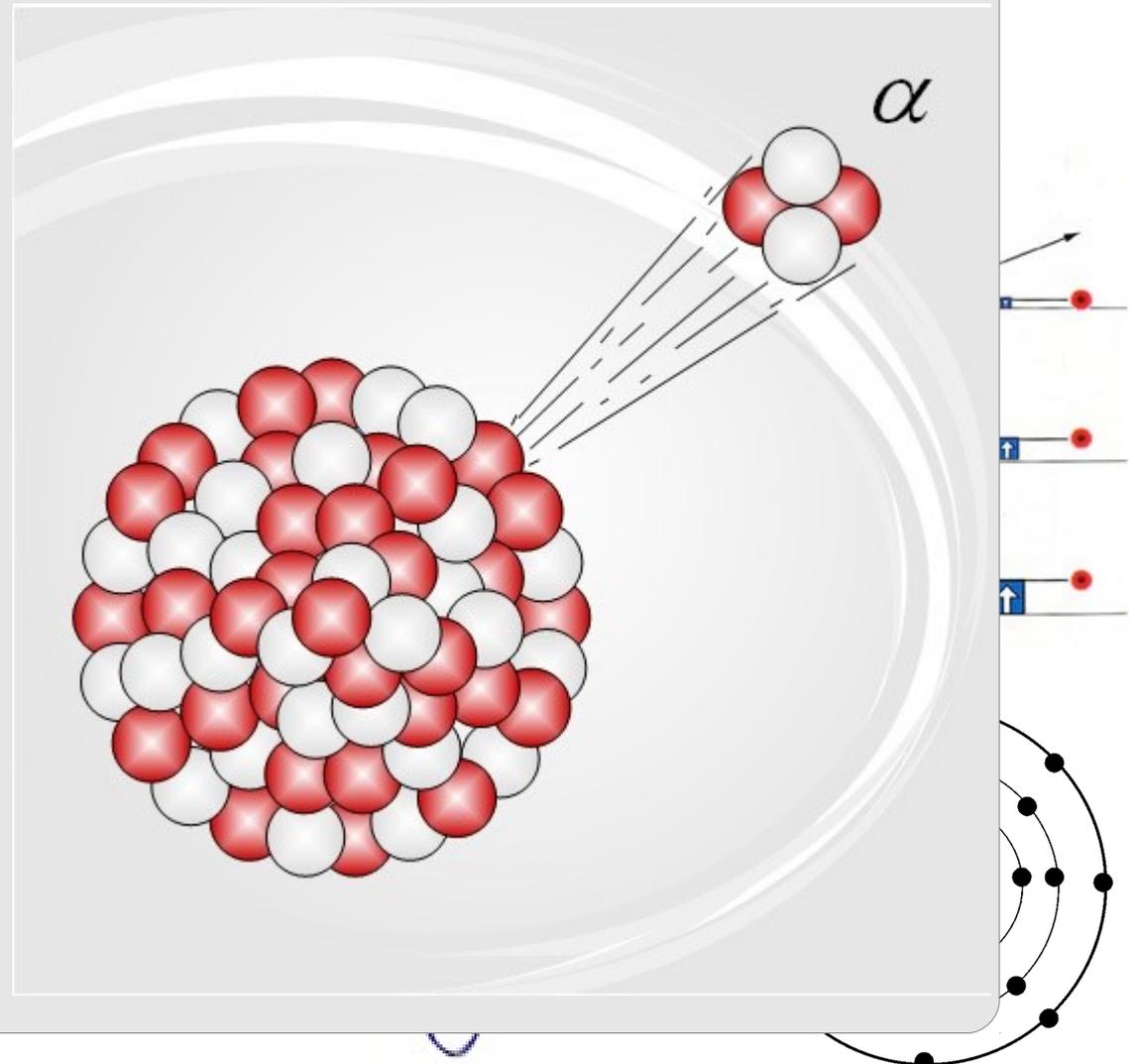
→

augmenter l'énergie

$\Rightarrow$  diminuer la longueur d'onde

$\Rightarrow$  accès à des détails plus fins

## SONDE ET LONGUEUR D'ONDE

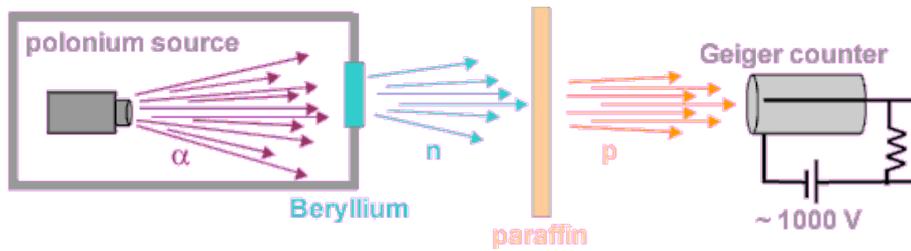


# Les nucléons, constituants du noyau

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

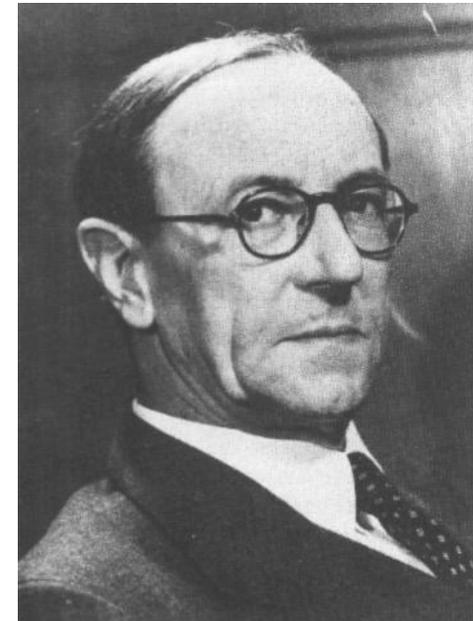
→ charge +1

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



→ neutre : charge = 0

→  $\sim$  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  $\alpha$**  : identifié à des noyaux d'hélium
- **rayon  $\beta$**  : identifié à des électrons
- **rayon  $\gamma$**  : identifié à des photons énergétiques émis par les noyaux



Pierre & Marie Curie

# Les désintégrations $\beta$

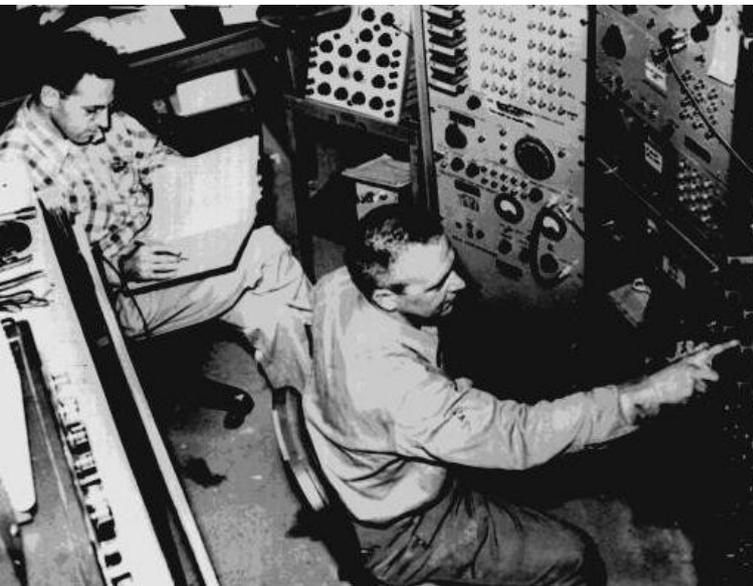
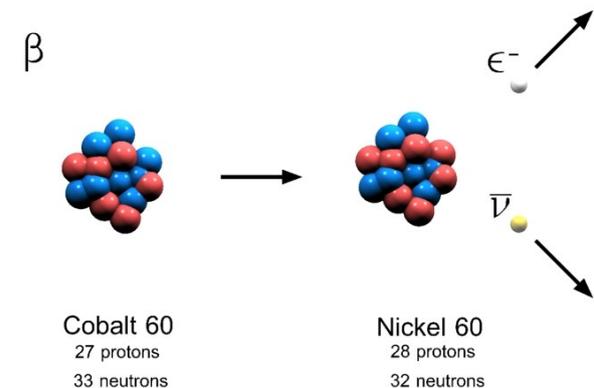
Les désintégrations  $\beta$  posent problème :

→ de l'énergie semble manquer

Hypothèse d'une nouvelle particule

1930, Pauli

→ le **neutrino**



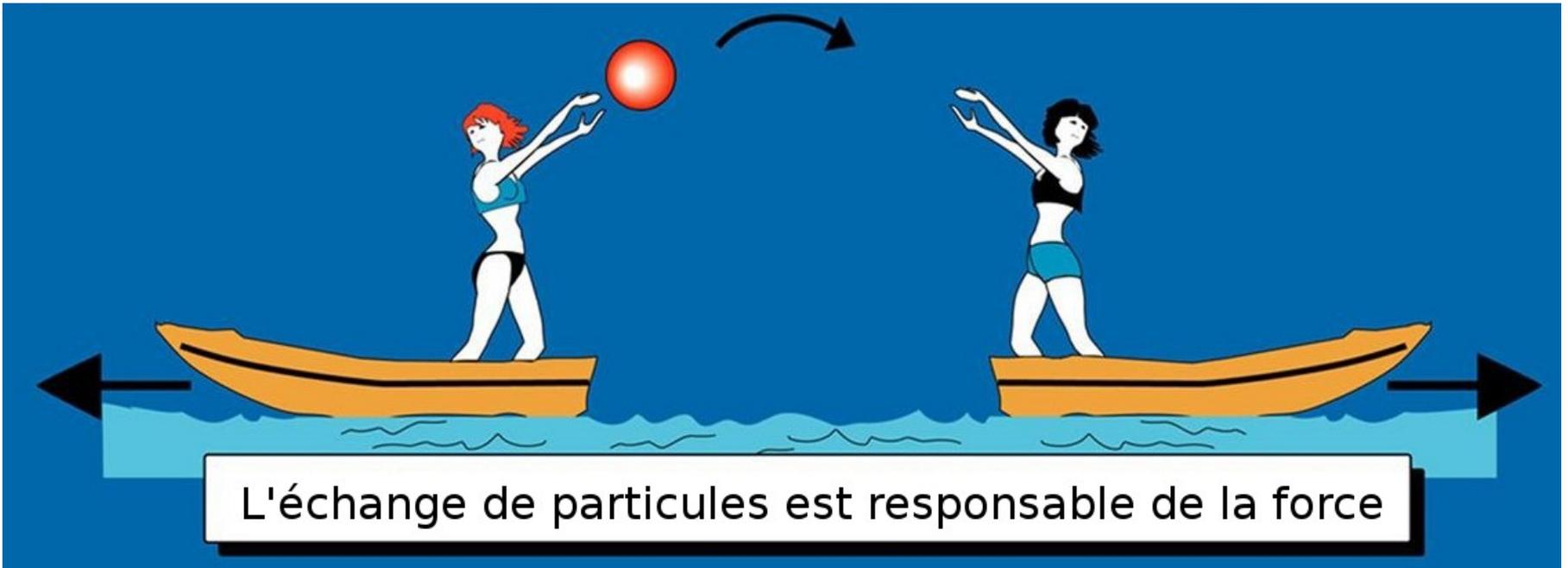
- 1956 : 1ère mise en évidence d'un neutrino
- Première expérience auprès d'un réacteur nucléaire (Savannah River, USA)
  - Cowan et Reines observent la capture d'un (anti-)neutrino par un proton

# 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 cela tient ensemble ?
  - les interactions

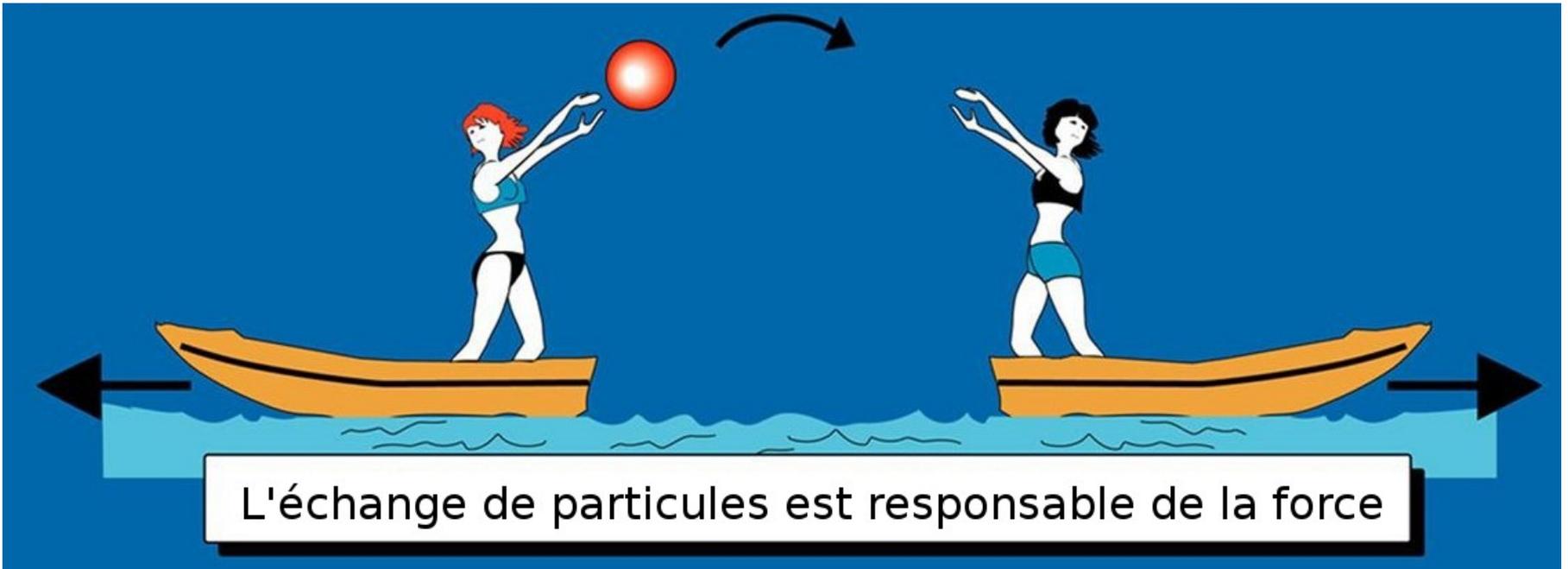
# Interaction fondamentale

Échange de particules (bosons) entre particules de matière (fermions, comme les électrons)

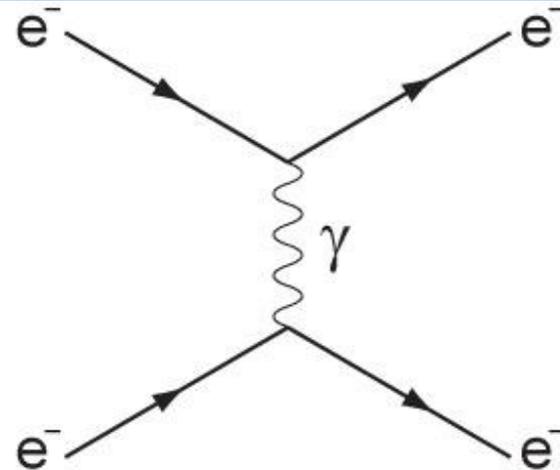


# Interaction fondamentale

Échange de particules (bosons) entre particules de matière (fermions, comme les électrons)



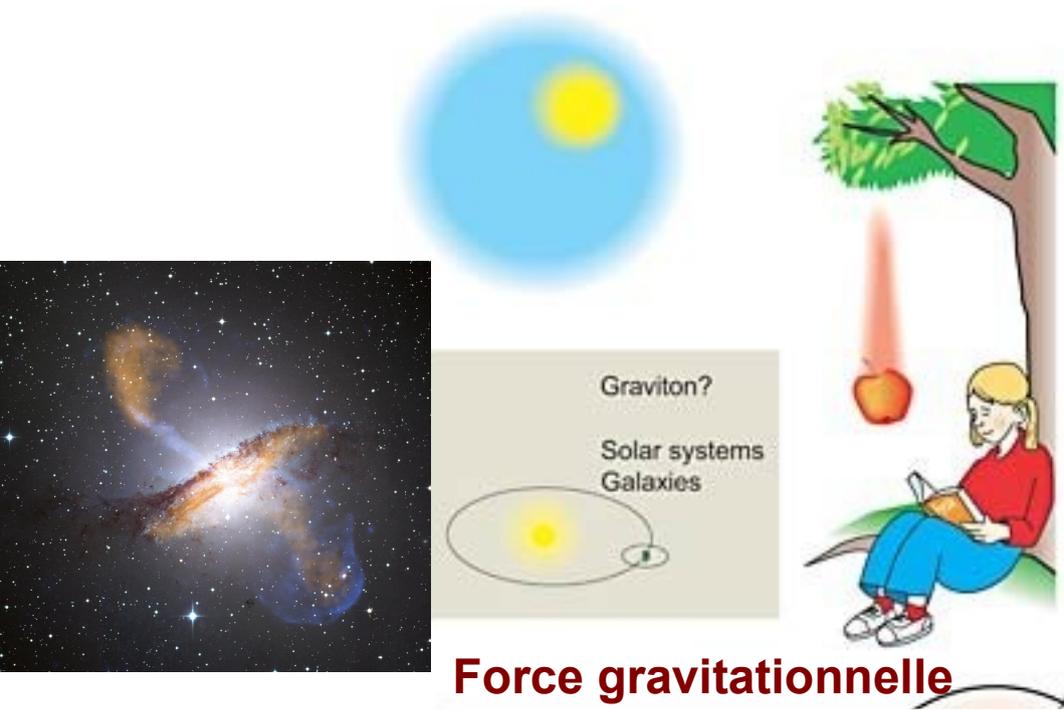
En physique des particules :



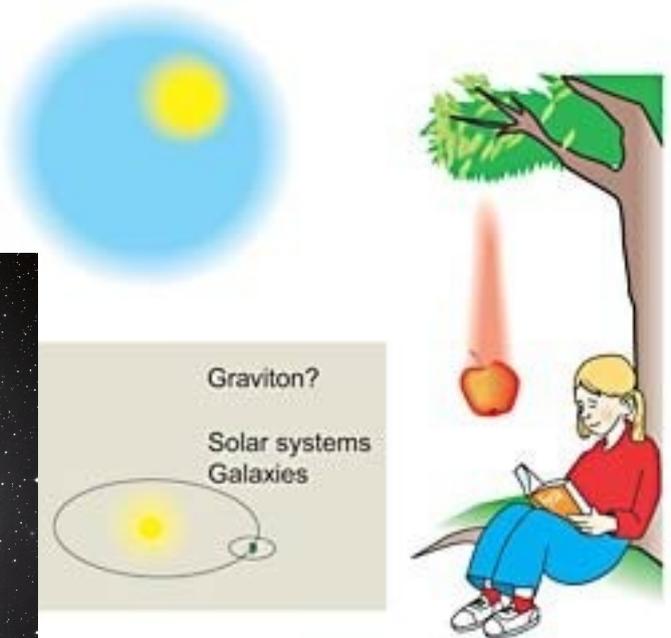
# Les forces

---

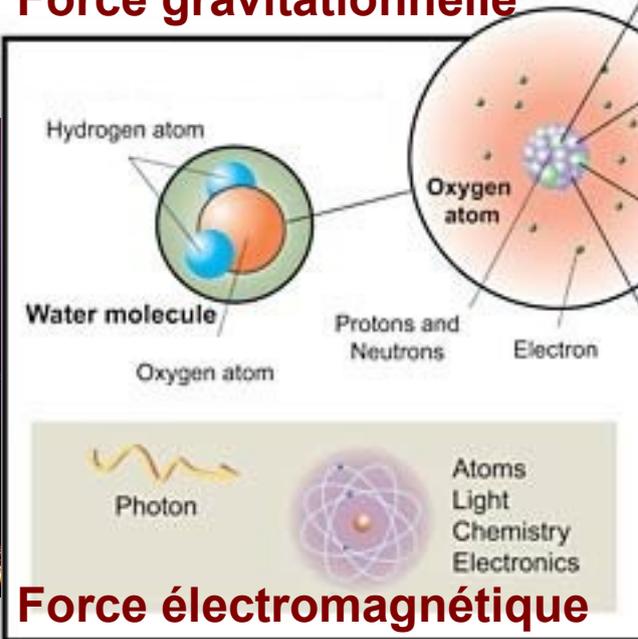
# Les forces



# Les forces

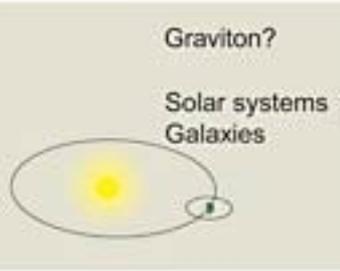


**Force gravitationnelle**

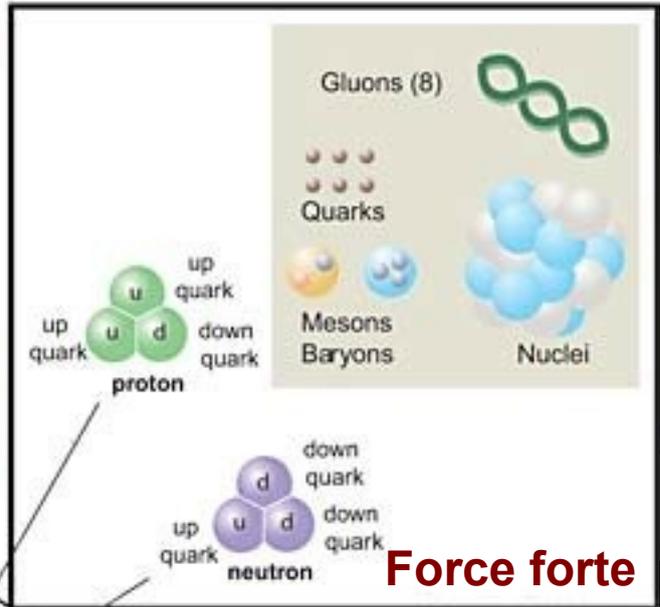


**Force électromagnétique**

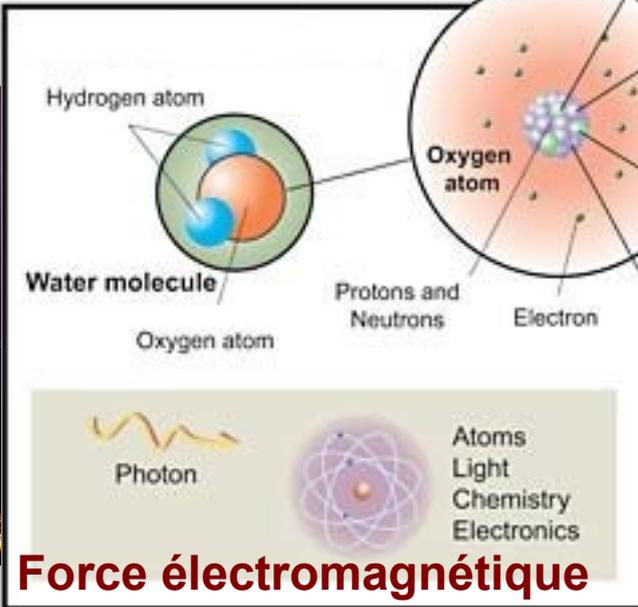
# Les forces



**Force gravitationnelle**



**Force forte**

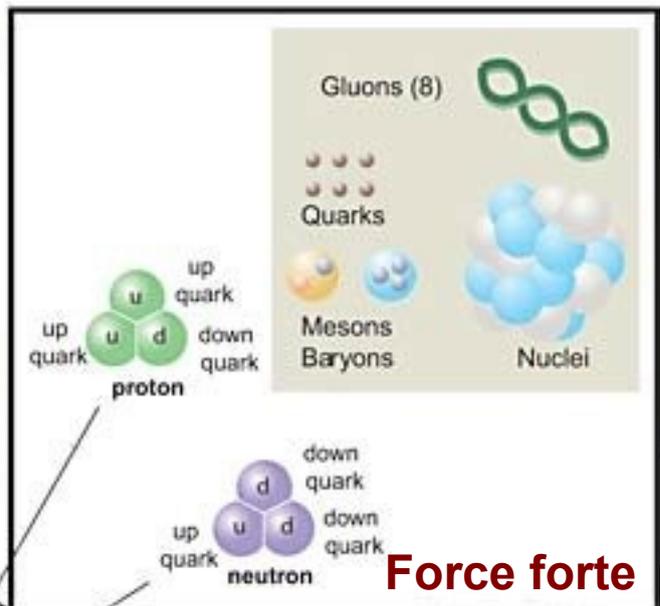


**Force électromagnétique**

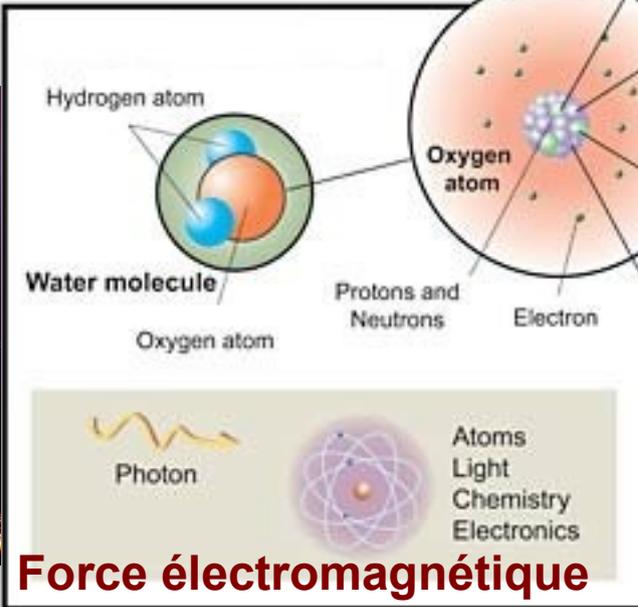
# Les forces



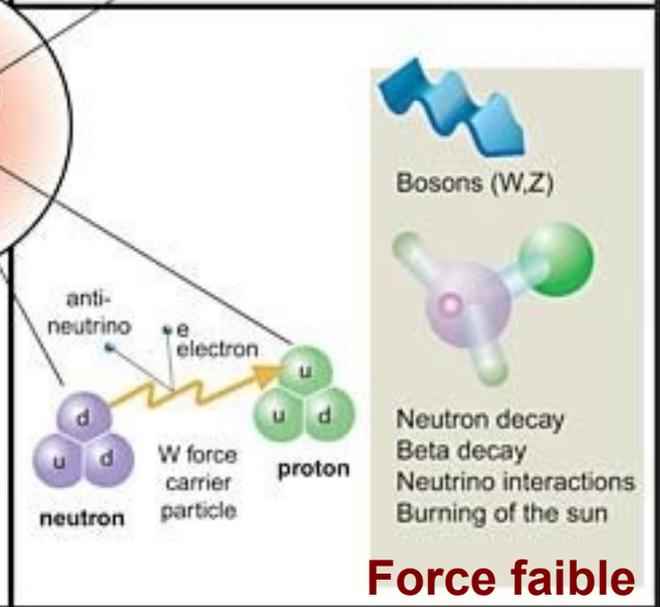
**Force gravitationnelle**



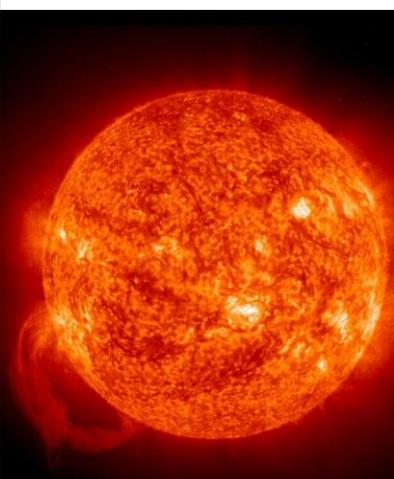
**Force forte**



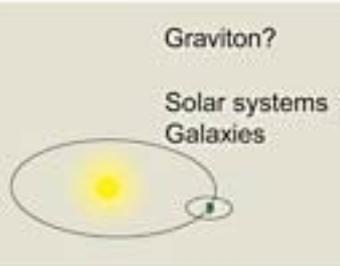
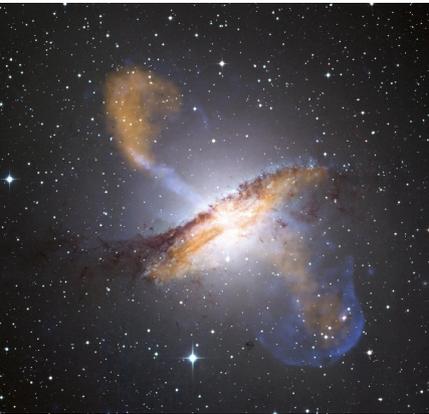
**Force électromagnétique**



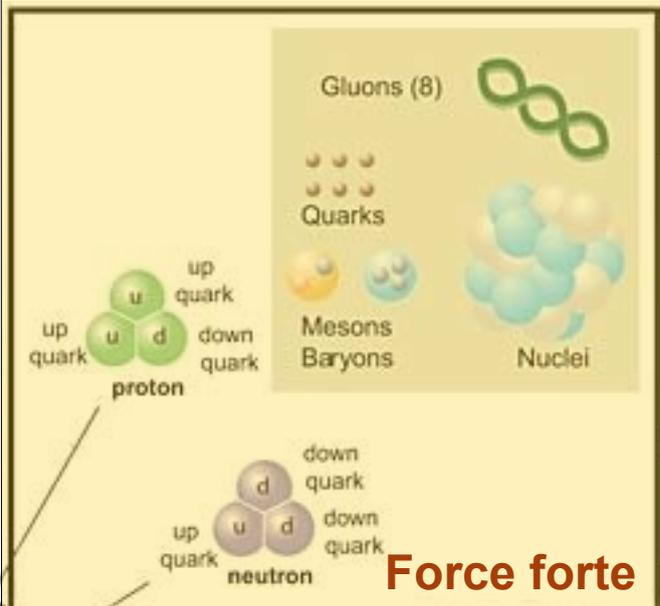
**Force faible**



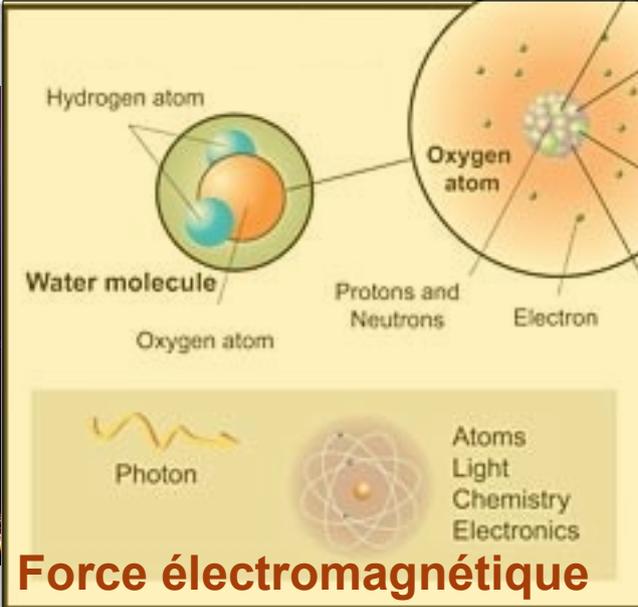
# Les forces



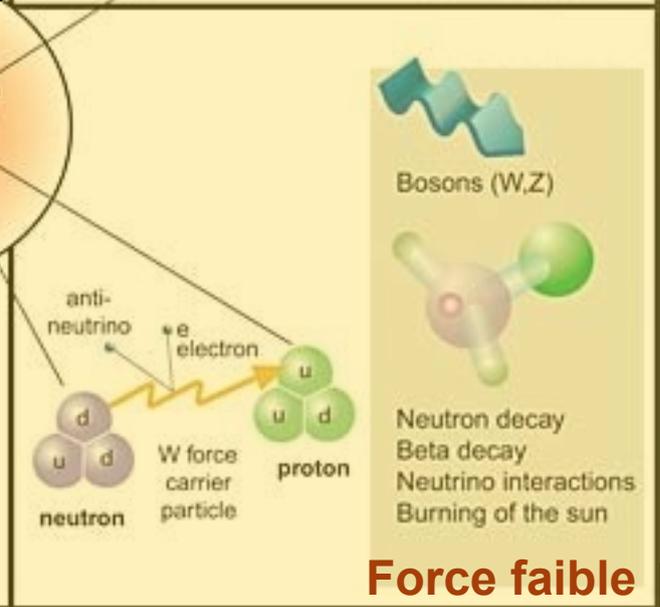
**Force gravitationnelle**



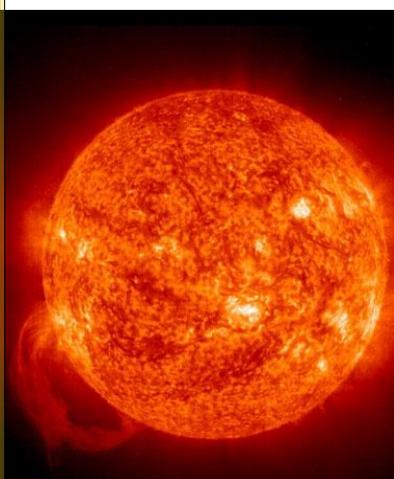
**Force forte**



**Force électromagnétique**



**Force 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
- équation de Dirac avec 2 solutions :
  - électron
  - **positron**

## Observation :

1932, Anderson

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

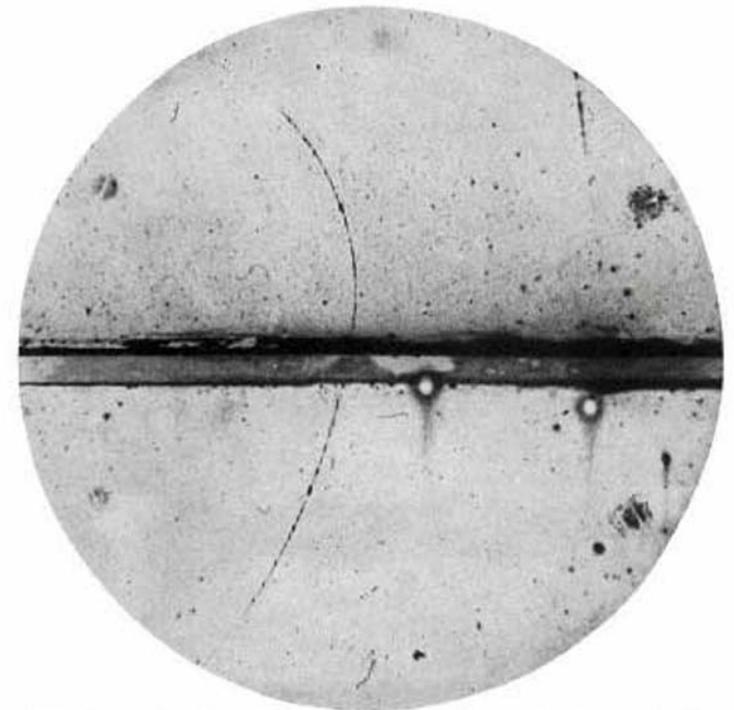
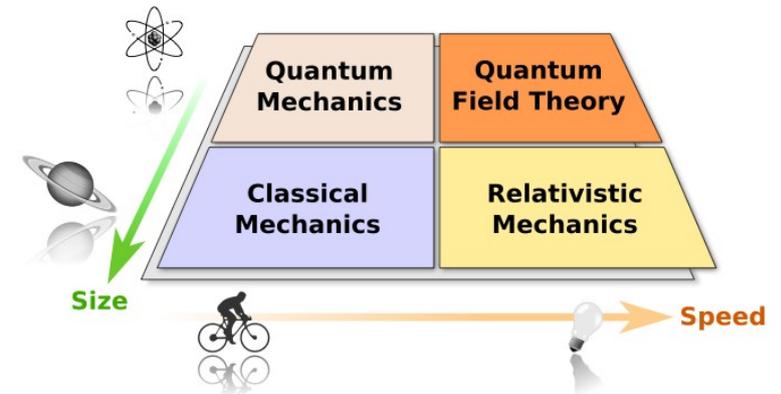


Fig. 1. A 65 million volt positron ( $H_D = 2.1 \times 10^6$  gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ( $H_D = 1.5 \times 10^6$  gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.

# 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*

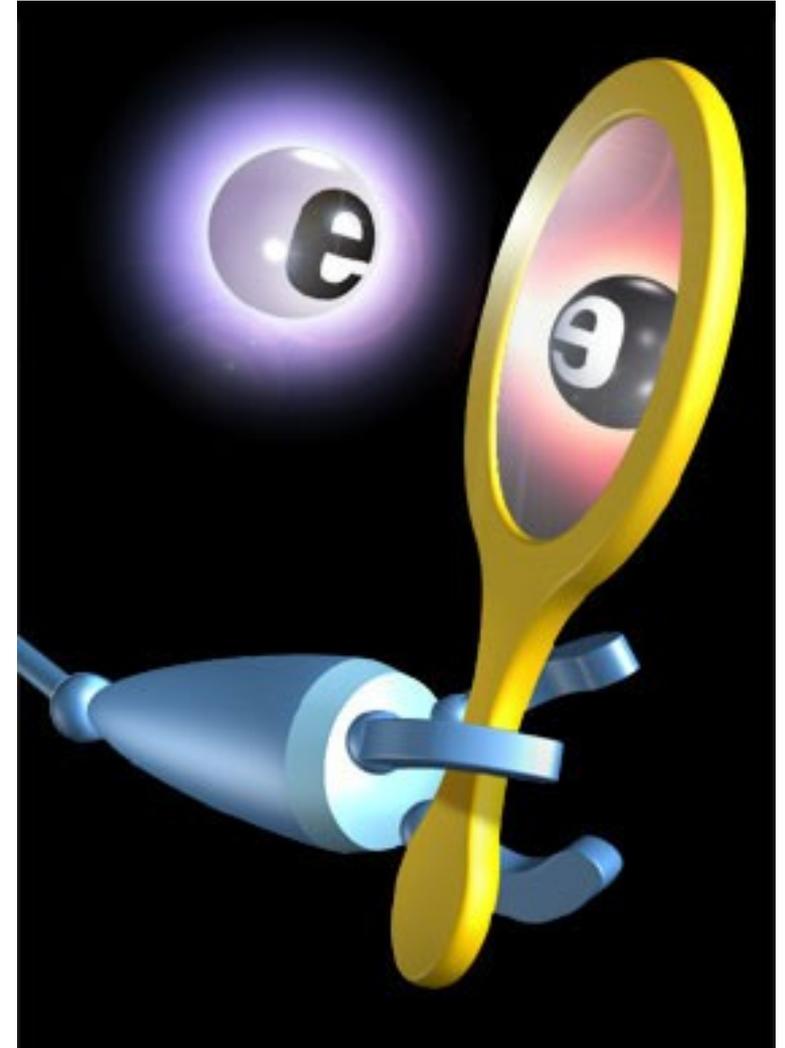
→ de charge(s) opposée(s)

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

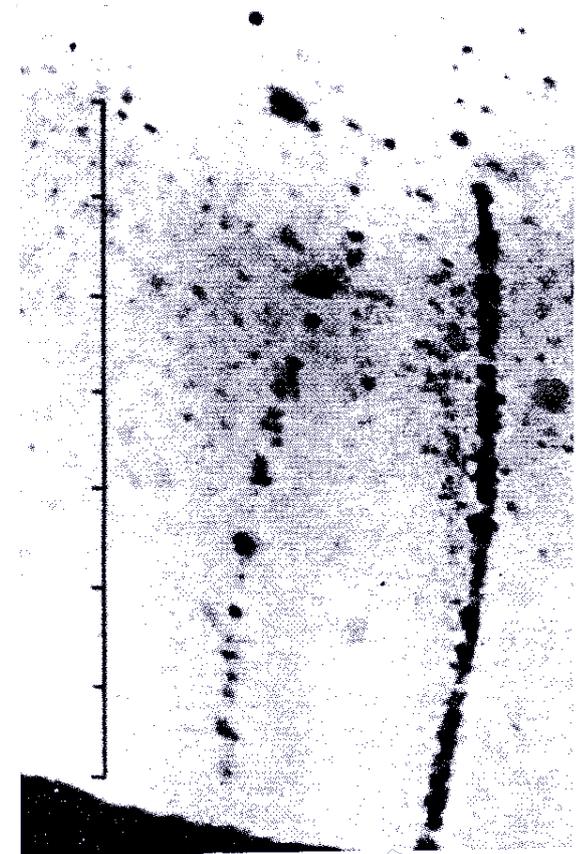
# Le muon

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

- découverte du muon par Anderson en 1936
- charge électrique -1
- beaucoup plus lourd que l'électron
- n'interagit pas par interaction forte  
⇒ **lepton** (comme l'électron et le neutrino)
- caractéristiques :
  - $m = 105 \text{ MeV}/c^2$
  - 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 :

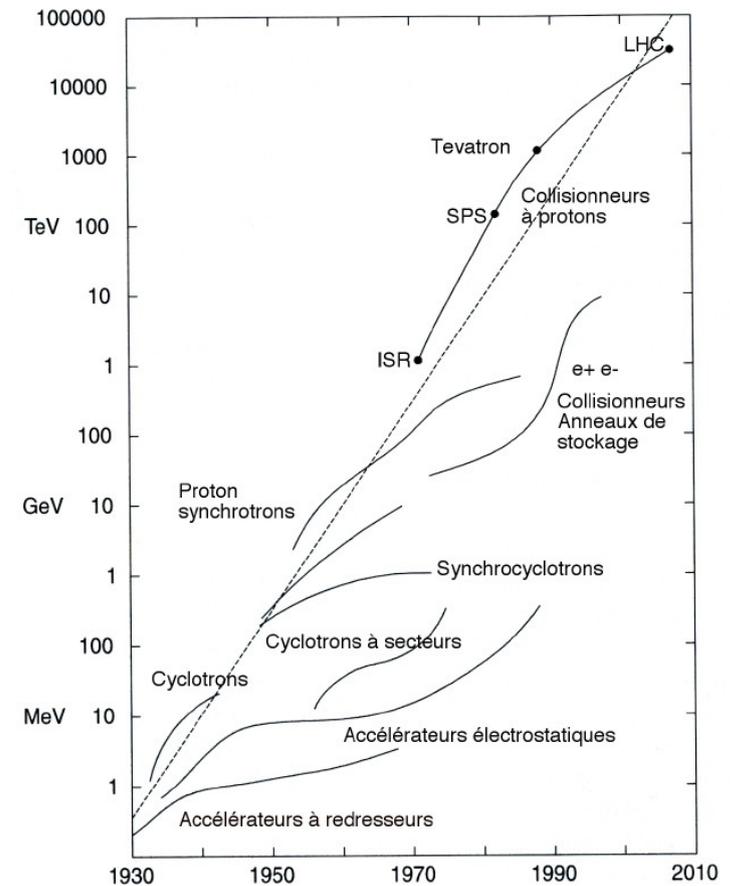
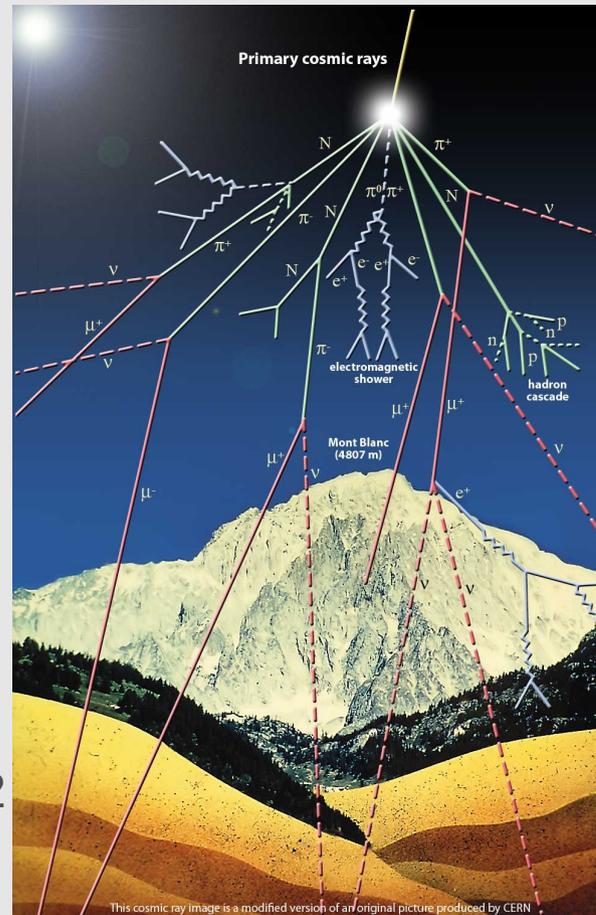
$$E_1 + E_2 > mc^2$$



## SOURCES D'ENERGIE

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

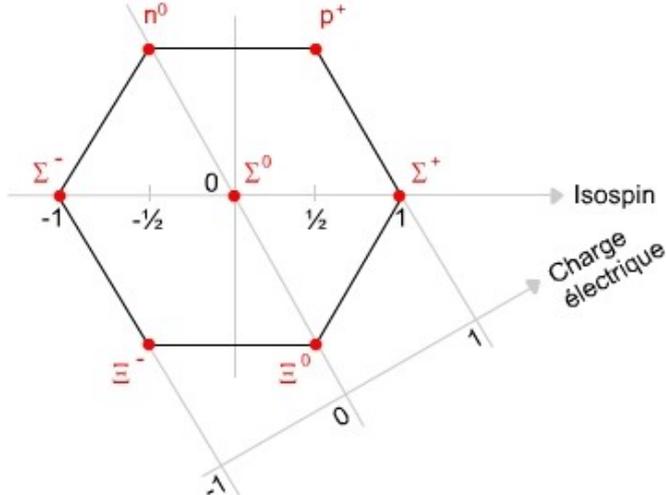
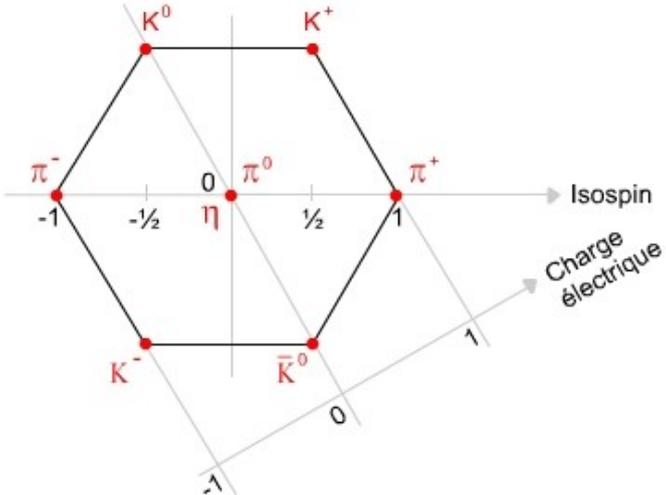
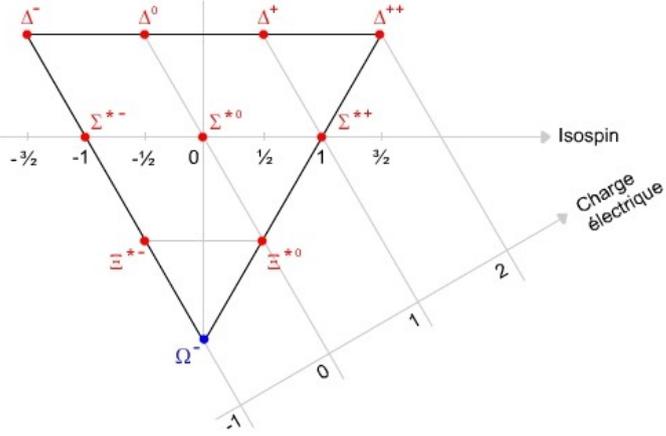
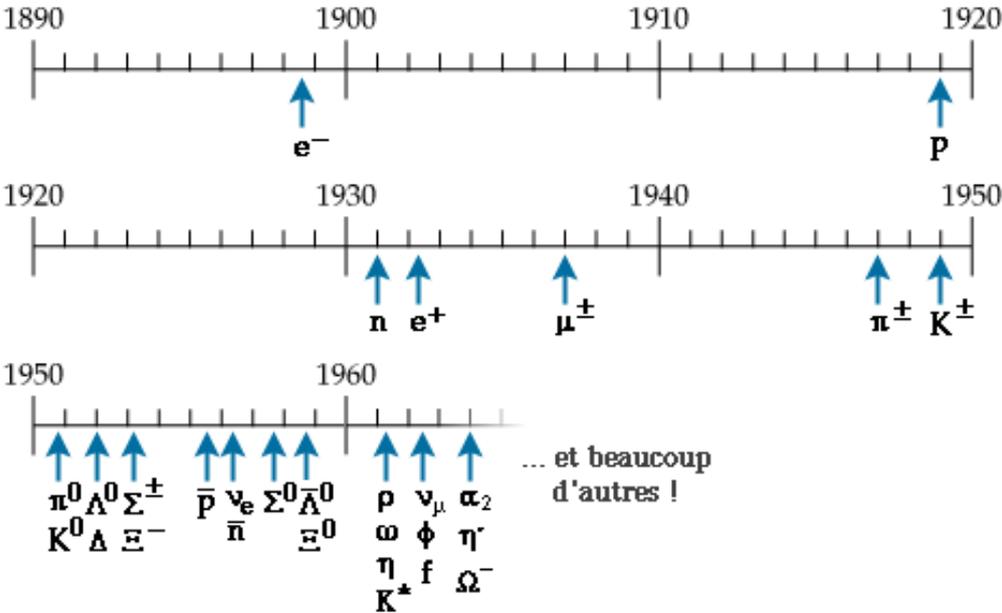
## NOUVELLES PARTICULES : COMMENT SONT-ELLES PRODUITES ?



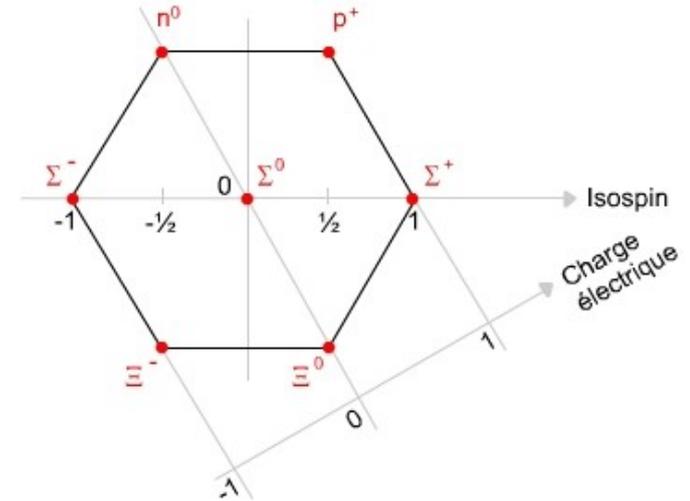
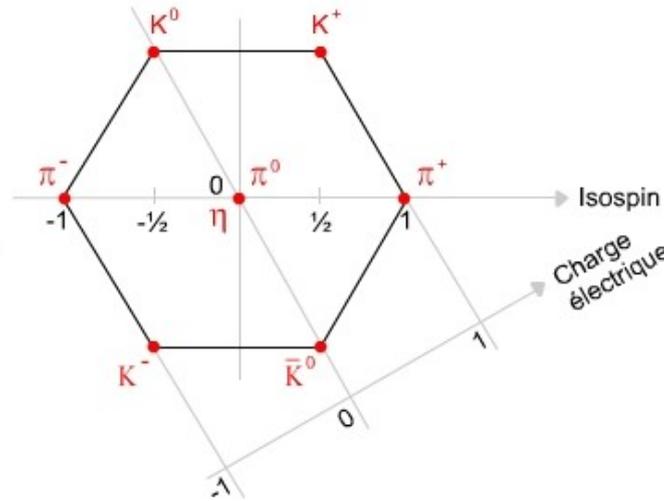
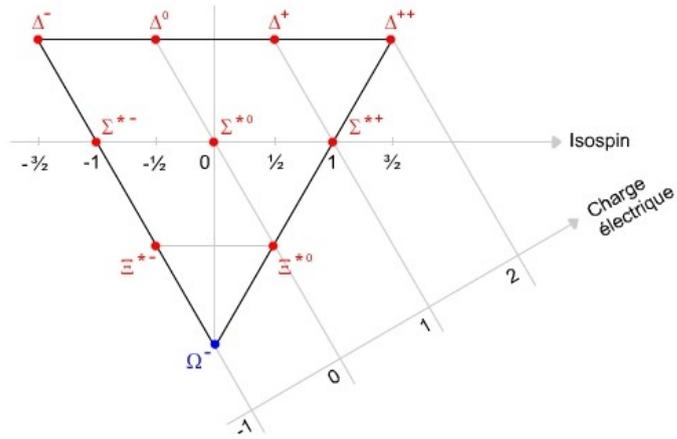
# Une pluie de nouvelles particules

## 1957-1965 : les chambres à bulles

- pluie de nouvelles particules
- $K^0$ ,  $\Lambda^0$  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*

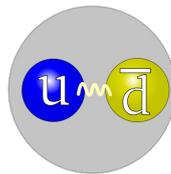
# Les quarks

## 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

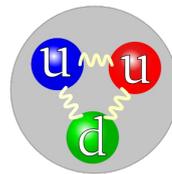
## Les quarks ne se déplacent pas librement

- 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 ( $\pi$ ), Kaon (K),...



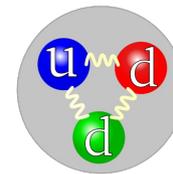
$\pi^+$

Un méson léger :  
le *pion* chargé



p

Des baryons « ordinaires » :  
le proton et le neutron



n

# Les quarks

## Charge électrique

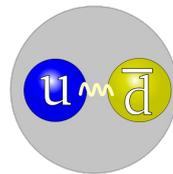
- les quarks portent des charges fractionnaires :
- $-1/3$  ou  $+2/3$  pour les quarks
- $+1/3$  ou  $-2/3$  pour les anti-quarks

## 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 ( $\pi$ ), Kaon (K),...

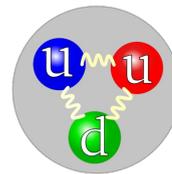
Les **protons** et les **neutrons** ne sont donc pas des particules élémentaires.

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



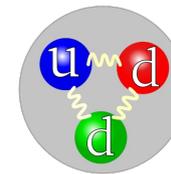
$\pi^+$

Un méson léger :  
le **pion** chargé



p

Des baryons « ordinaires » :  
le proton et le neutron



n

# Hadronisation

L'interaction forte agit comme un élastique :

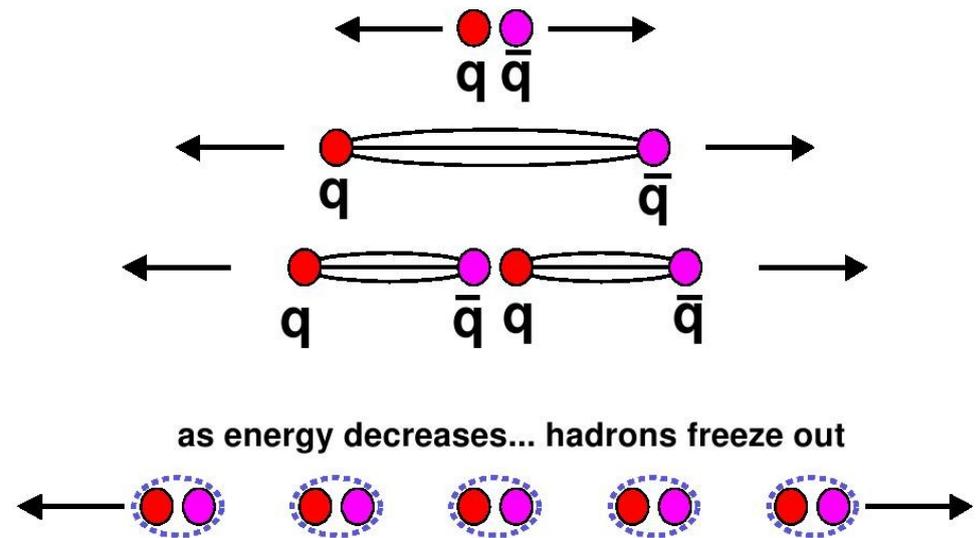
- son intensité augmente avec la distance ( 1 GeV/fm)
- quand l'énergie disponible est suffisante, des nouvelles paires de quarks sont créées ( $E > 2m_q$ )

Seuls les objets blancs circulent

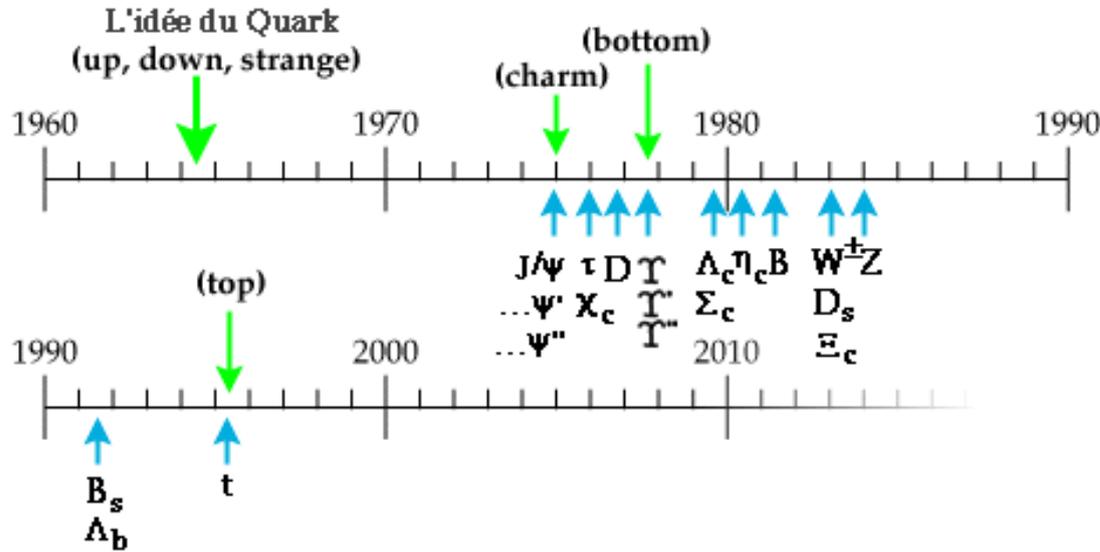
- le vide est opaque à la couleur

↘ on n'observe pas les quarks isolément

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



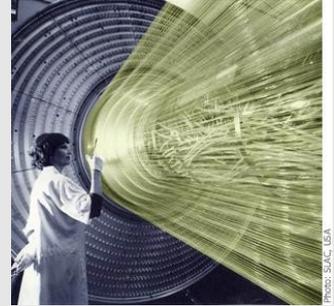
# Les découvertes continuent



## 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

→  $\nu_{\mu}$  : 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]

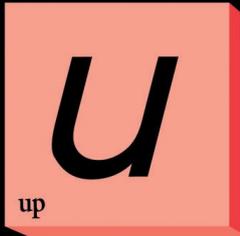
1977 : un nouveau lepton chargé

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

2000 : le dernier lepton de la bande

→  $\nu_{\tau}$  : le compagnon neutre du tau

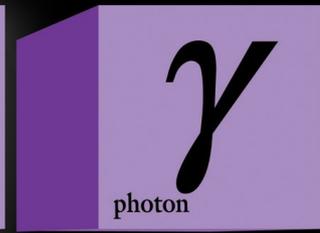
# Quarks



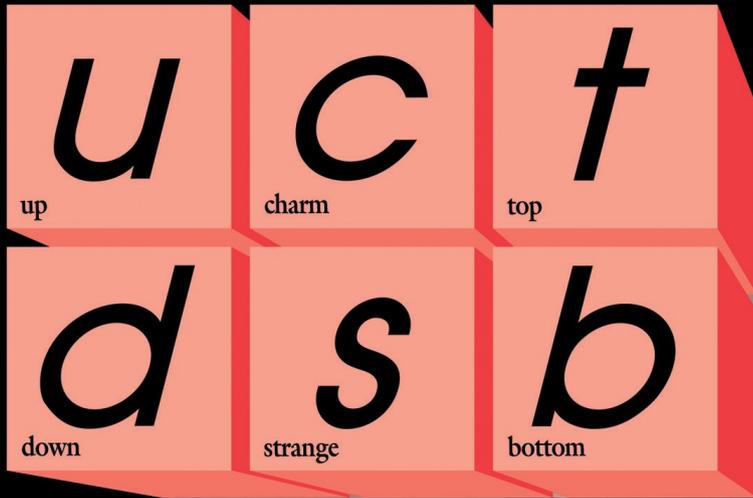
# Leptons

# Le modèle standard

# Forces

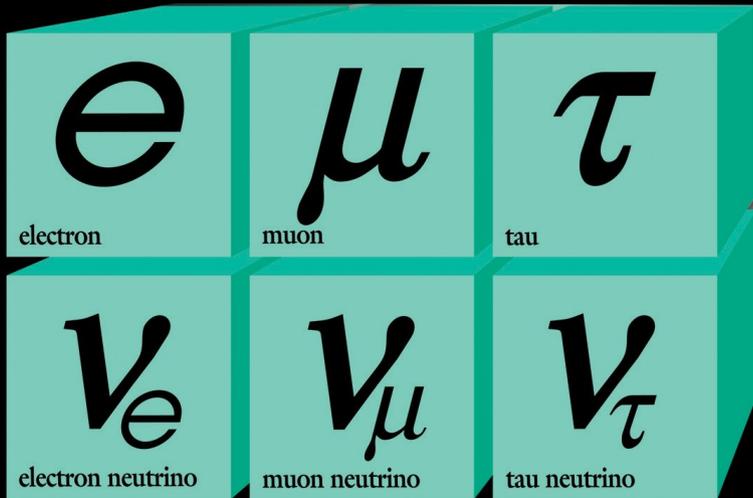
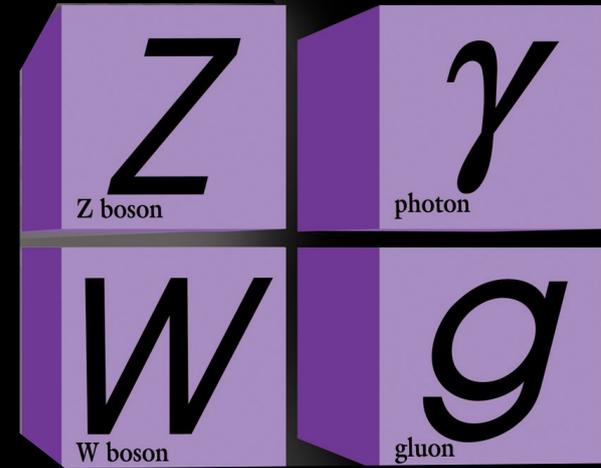


# Quarks



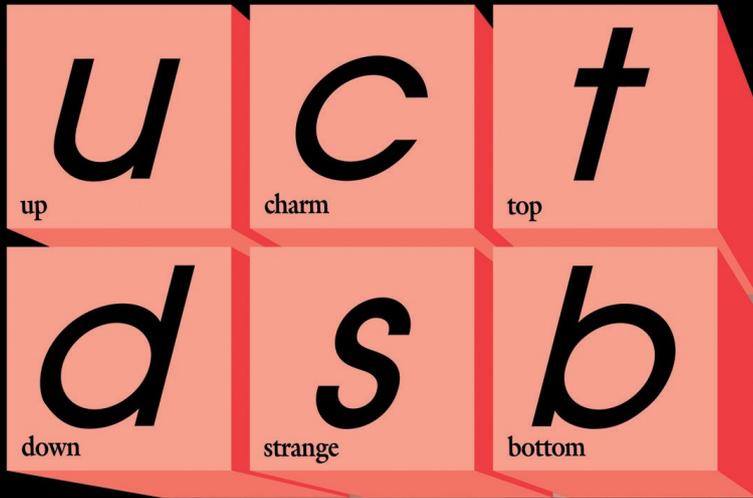
# Le modèle standard

# Forces

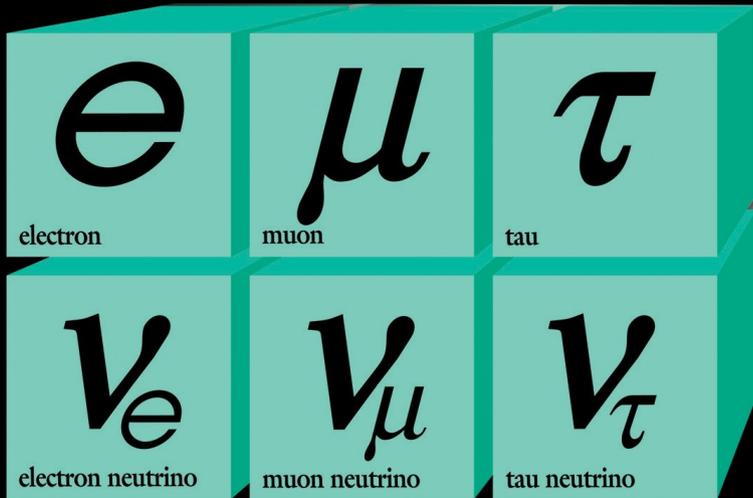


# Leptons

# Quarks



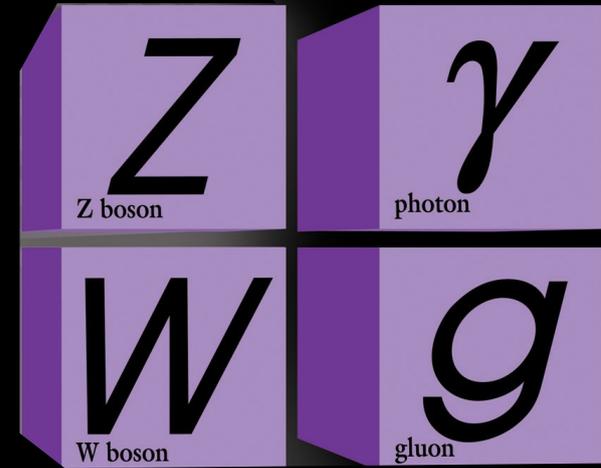
+ anti-matière



# Leptons

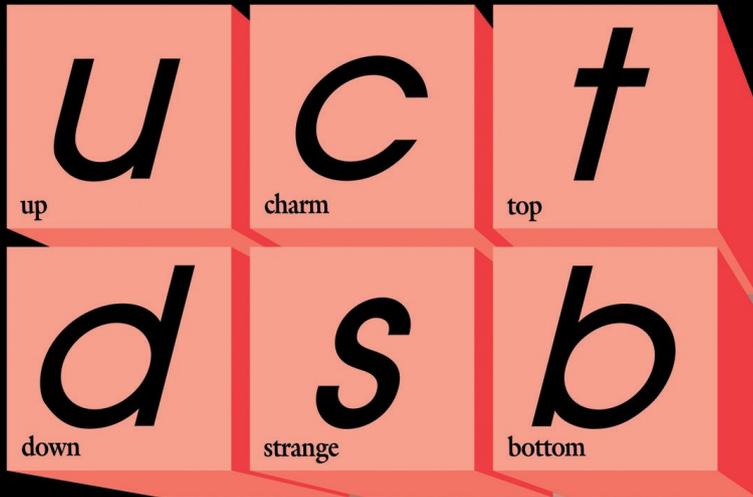
# Le modèle standard

# Forces



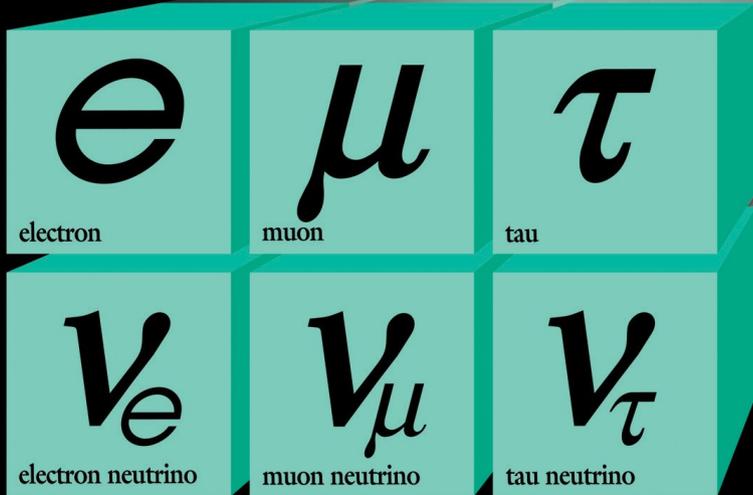
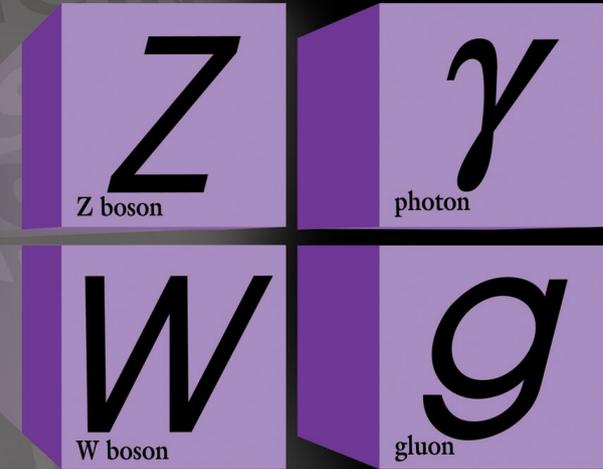
# Quarks

# Le modèle standard



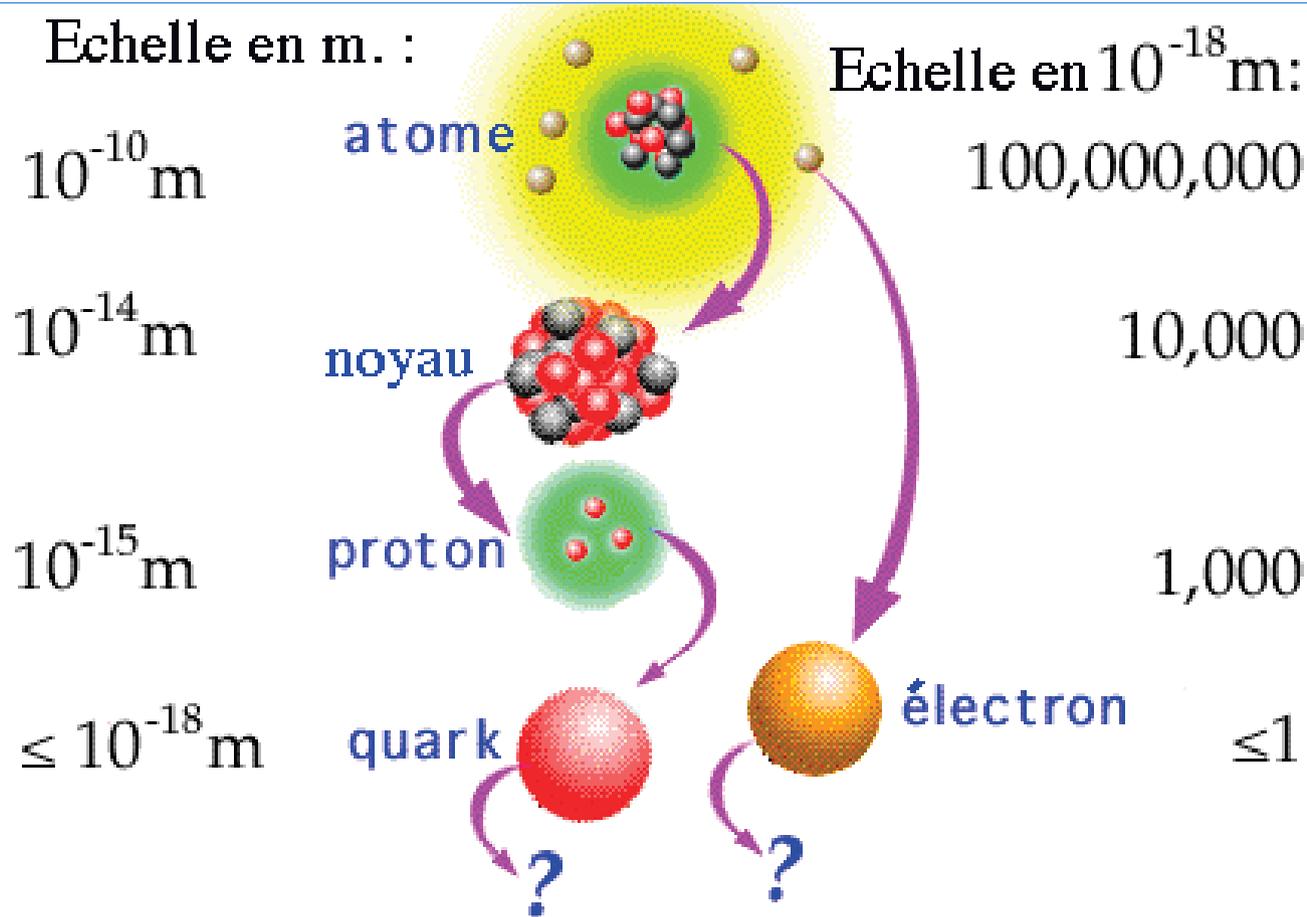
+ anti-matière

# Forces



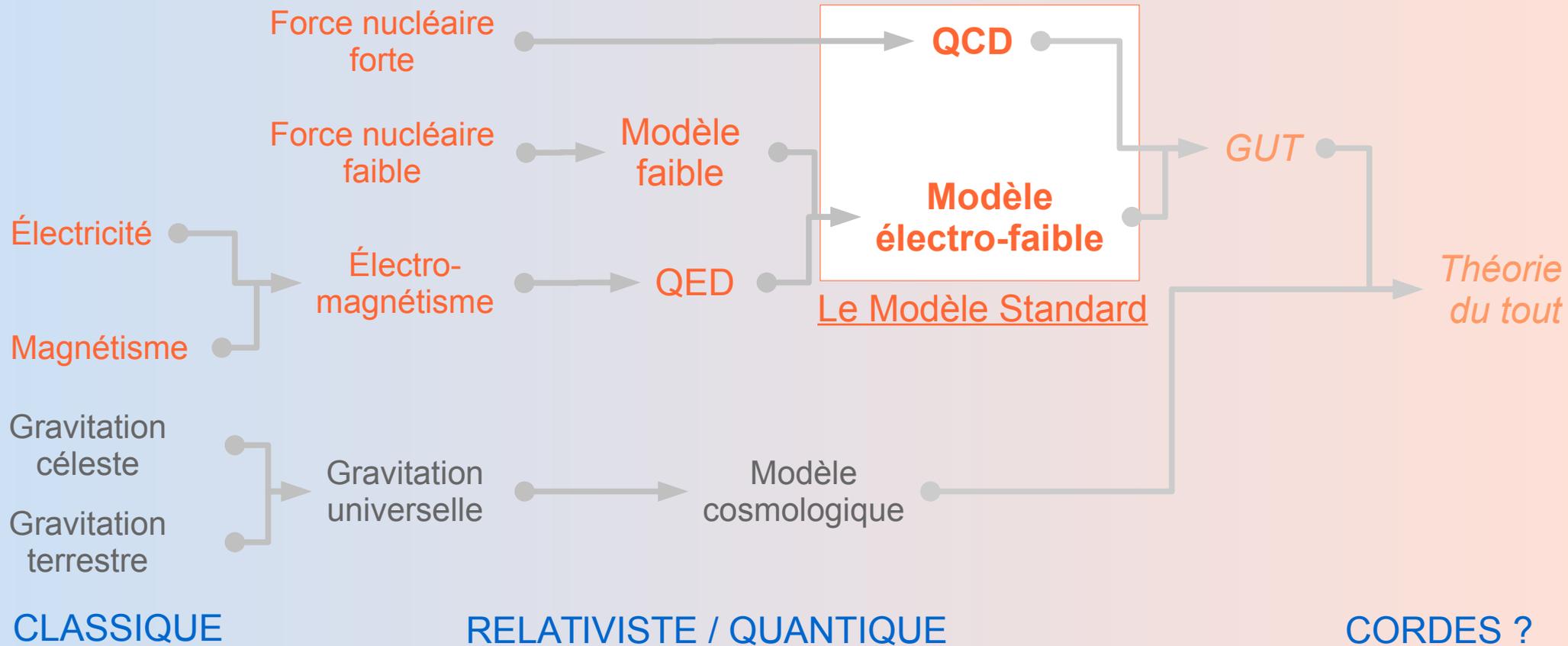
# Leptons

# Échelle des distances en physique des particules



Si protons et neutrons étaient à **10 cm** l'un de l'autre, un quark ou un électron mesurerait **moins de 0,1 mm** et un atome environ **10 km**

# 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

# 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 :
  - ~27 % de matière de nature inconnue (matière noire)
  - ~68 % d'énergie de nature inconnue (énergie noire)
- **95 %** du contenu de l'univers reste mystérieux !

# Perspectives

---

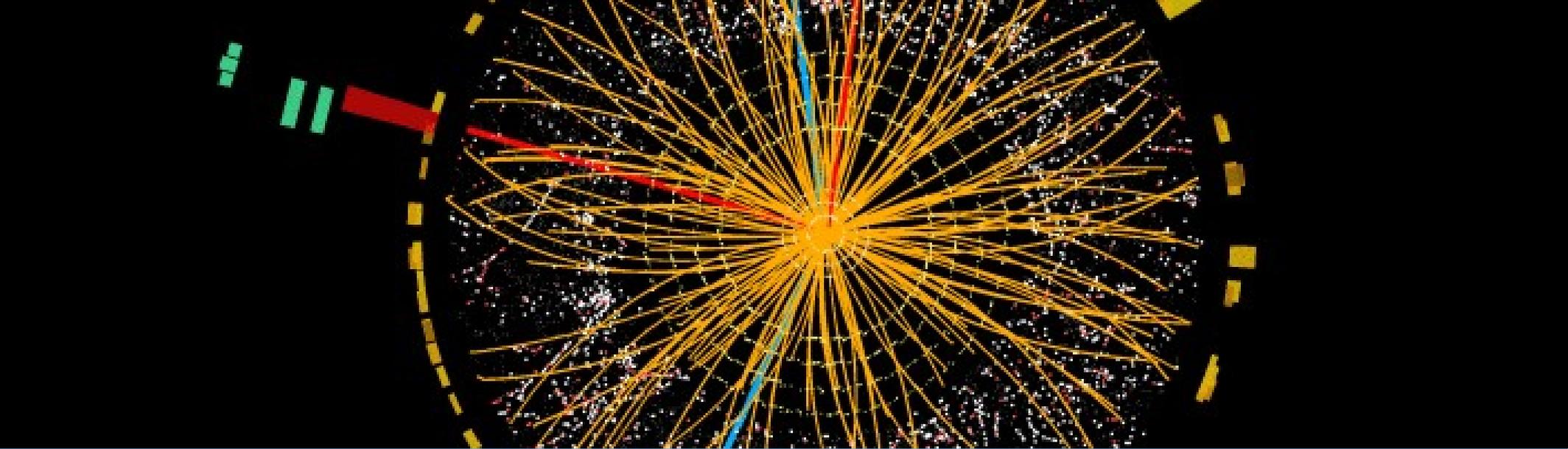
## Au delà du Modèle standard

→ 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

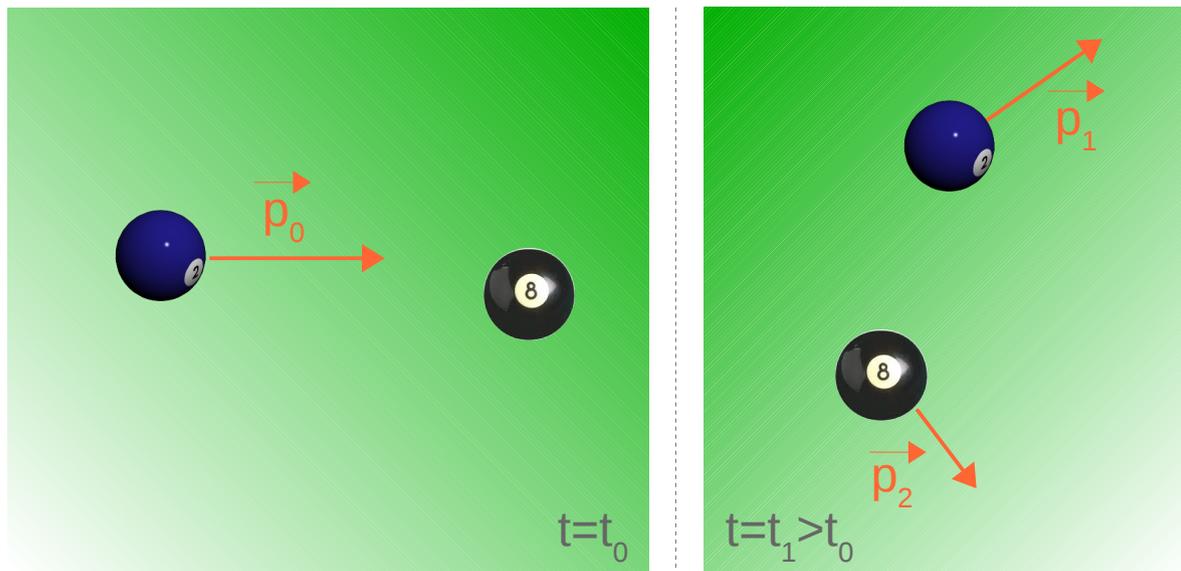
$$\sum_i \mathbf{F}_i = m \mathbf{a}$$

- $\mathbf{F}_i$  : 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

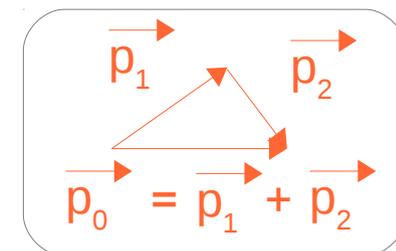
- classiquement :  $\mathbf{p} = m \mathbf{v}$  (kg.m/s)

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



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

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


$$\vec{p}_0 = \vec{p}_1 + \vec{p}_2$$

# 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

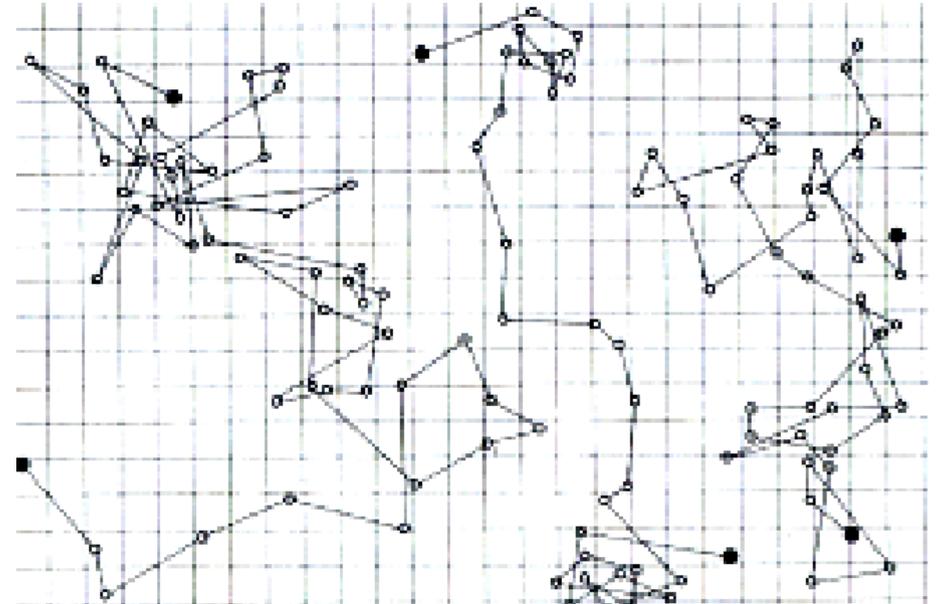
## Mouvement de petites particules en suspension dans un fluide

- 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 :

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

- 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  $\lambda$

## ↘ Dualité onde-corpuscule

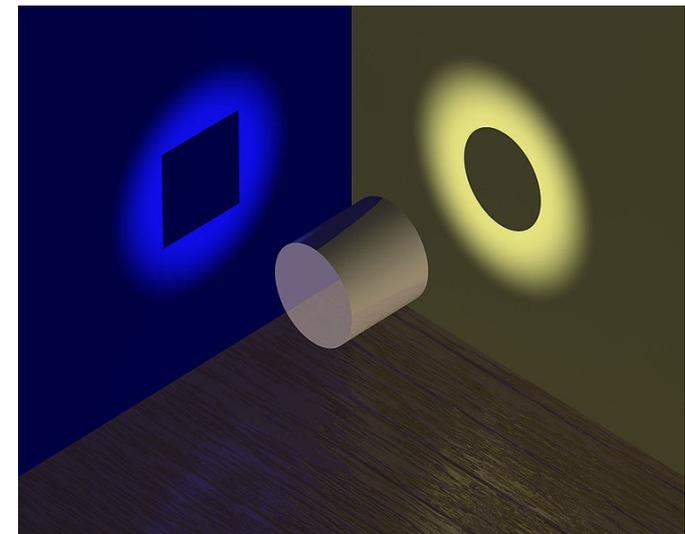
- $E = \hbar \omega$  ( $\omega$ : pulsation =  $2\pi\nu$ )
- $p = \hbar k$  ( $k$ : vecteur d'onde  $|k|=2\pi/\lambda$ )

### 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)	$\lambda$ (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)



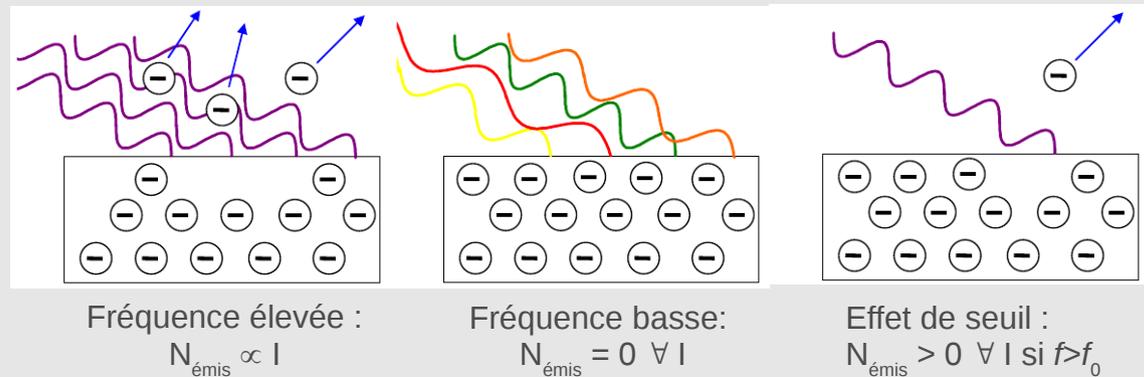
# Les quanta

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

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

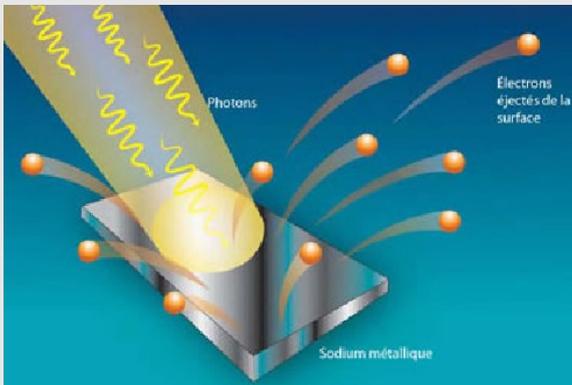


... rôle non expliquée par l'optique ondulatoire ou l'électromagnétisme

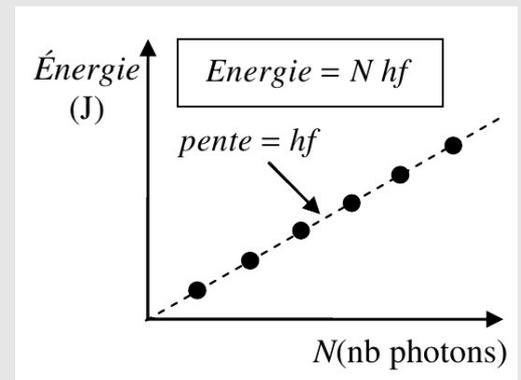
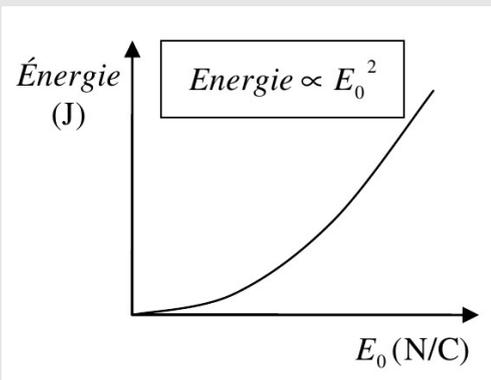
### INTERPRETATION

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

Un matériau métallique exposé à la lumière peut émettre des électrons



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



# 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  $\lambda$

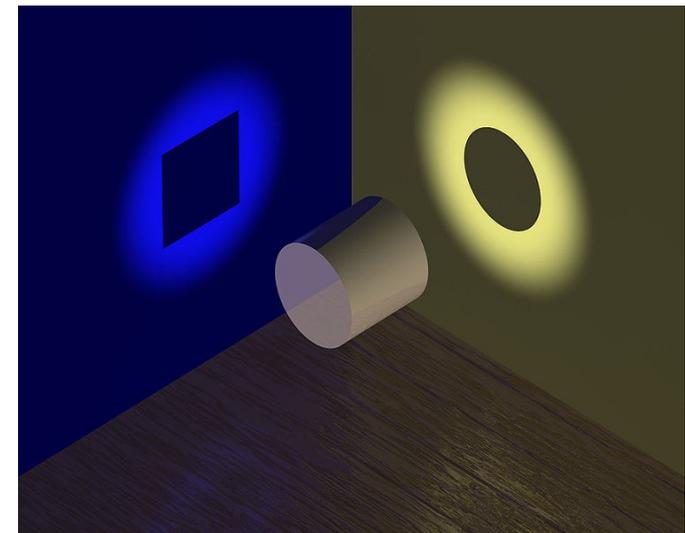
## ↘ Dualité onde-corpuscule

- $E = \hbar \omega$  ( $\omega$ : 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)	$\lambda$ (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

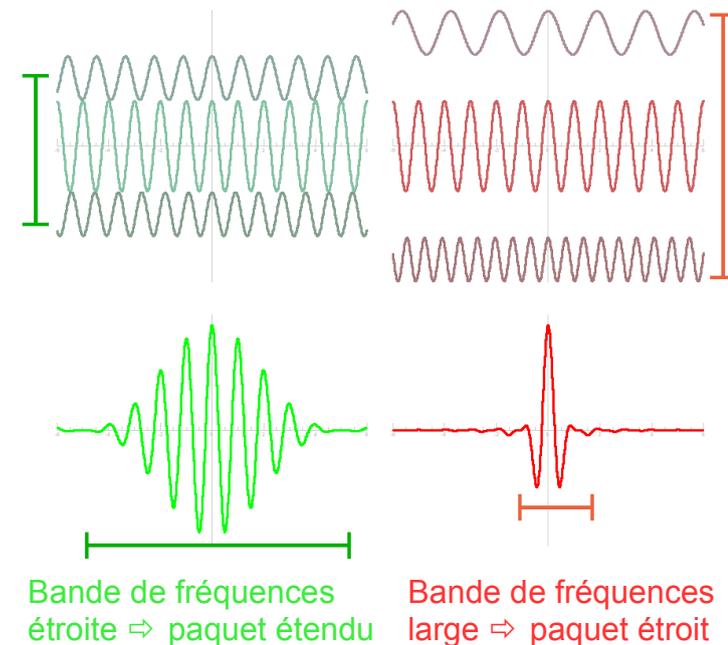
- équation de Schrödinger (déterministe):
  - $i\hbar d|\psi(t)\rangle/dt = H(t)|\psi(t)\rangle$  où  $H(t)$  : opérateur énergie
- solutions:  $|\psi(t)\rangle = \sum_a c_a(t) |\psi_a\rangle$ 
  - $|\psi_a\rangle$ : état correspondant à la valeur  $a \in \{a\}$

## 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

→

-

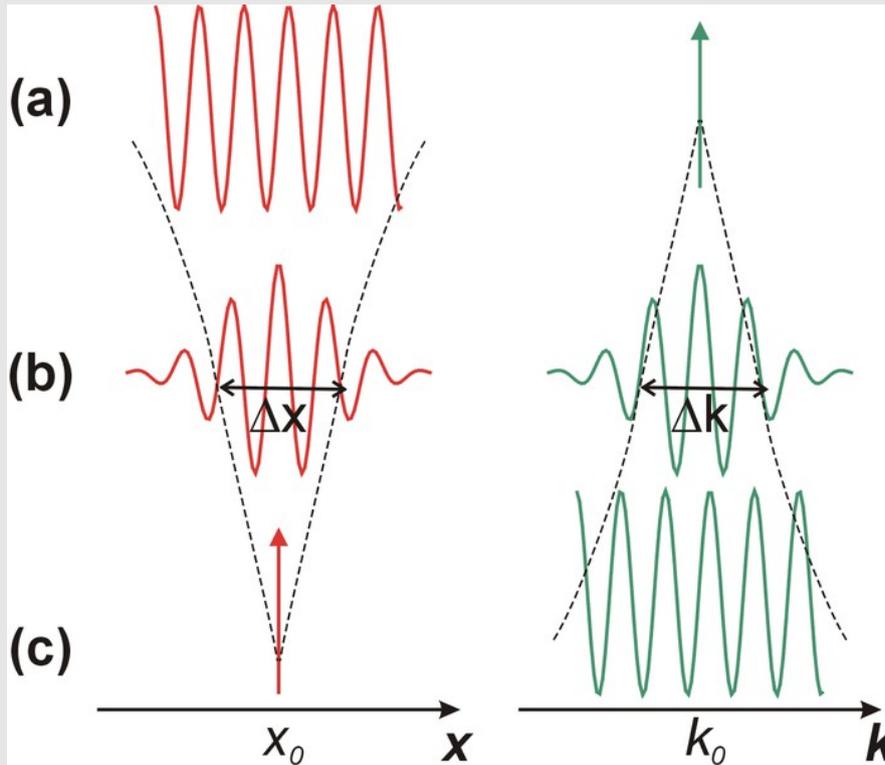
→

Le pr

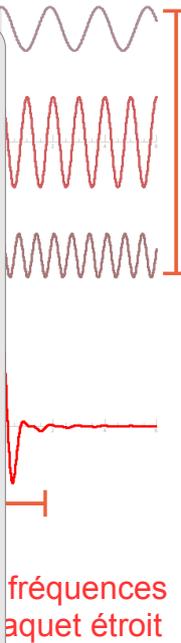
→

→

## 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

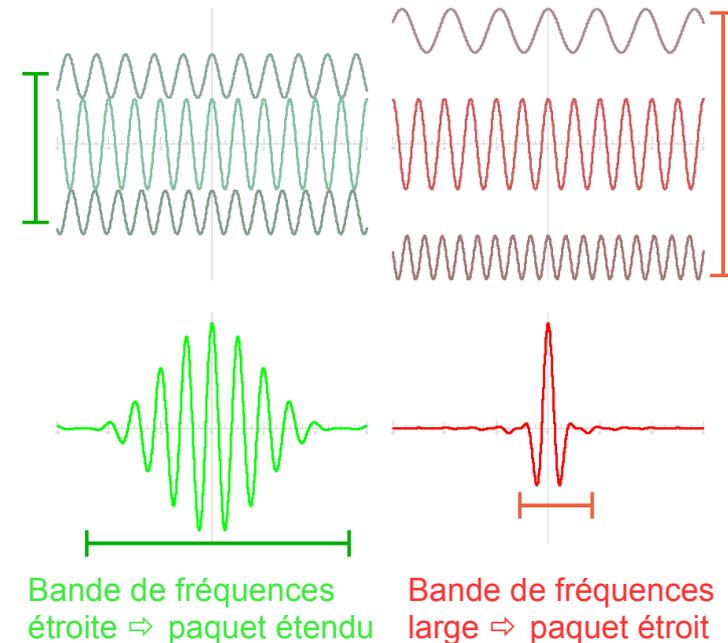
- équation de Schrödinger (déterministe):
  - $i\hbar d|\psi(t)\rangle/dt = H(t)|\psi(t)\rangle$  où  $H(t)$  : opérateur énergie
- solutions:  $|\psi(t)\rangle = \sum_a c_a(t) |\psi_a\rangle$ 
  - $|\psi_a\rangle$ : état correspondant à la valeur  $a \in \{a\}$

## 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]

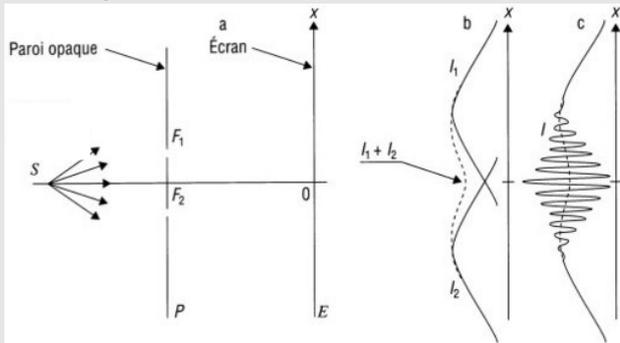


# Dualité onde-corpuscule

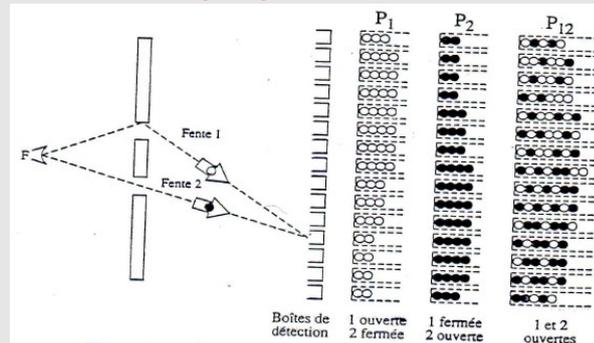
paquet d'ondes :  
 exemples :  
 -  $\varphi(x) = \sum_i A_i \cos(k x)$   
 -  $\Psi(x) = \sum_i A_i e^{ikx}$   
 note :  $e^{ix} = \cos(x) + i \sin(x)$

## L'EXPERIENCE DES FENTES D'YOUNG

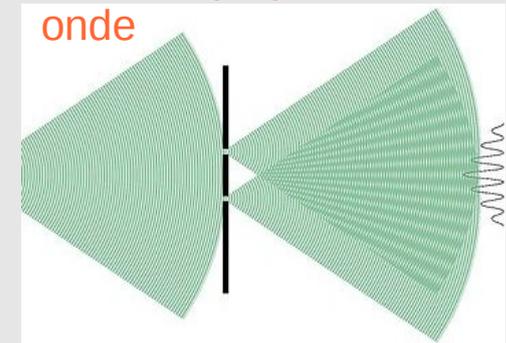
L'expérience :



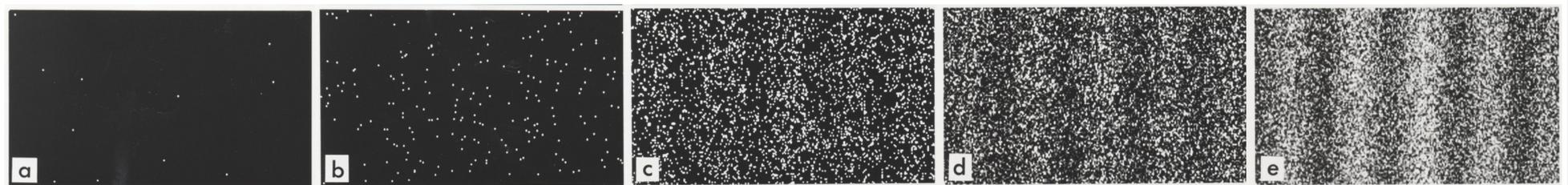
Cas #1: projectile = bille



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

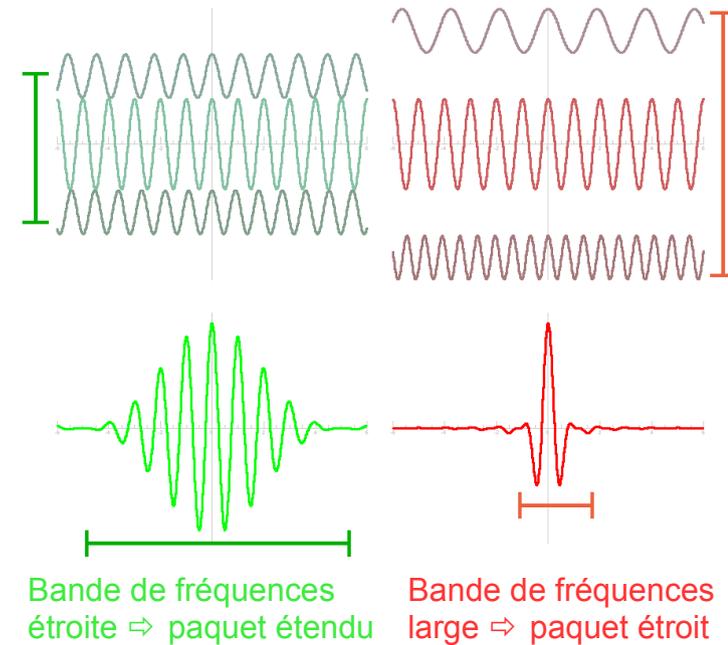
- équation de Schrödinger (*déterministe*):
  - $i\hbar d|\psi(t)\rangle/dt = H(t) |\psi(t)\rangle$  où  $H(t)$  : opérateur énergie
- solutions:  $|\psi(t)\rangle = \sum_a c_a(t) |\psi_a\rangle$ 
  - $|\psi_a\rangle$ : état correspondant à la valeur  $a \in \{a\}$

## 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

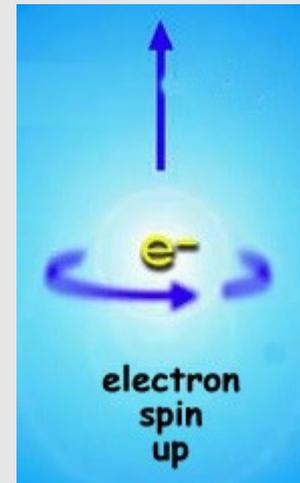
→

- particule de force
- ex : le photon

## 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

→ 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

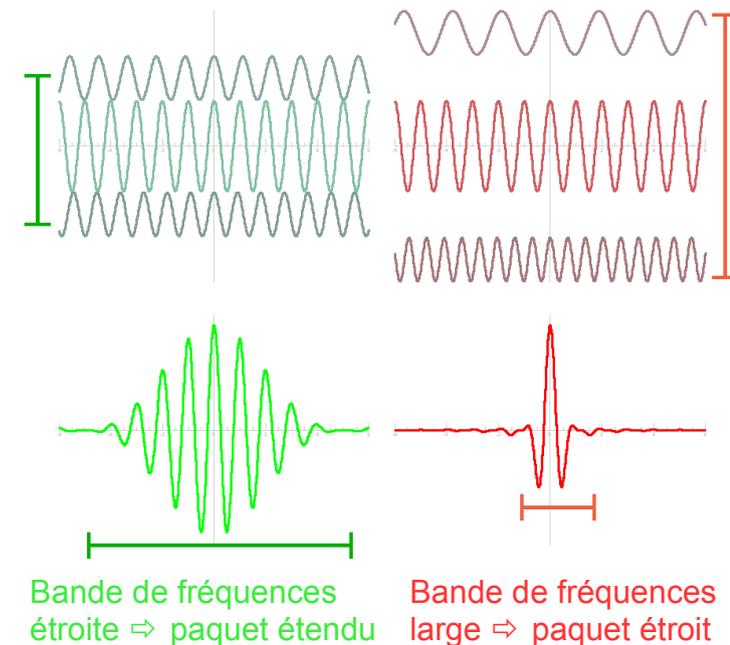
- équation de Schrödinger (*déterministe*):
  - $i\hbar d|\psi(t)\rangle/dt = H(t)|\psi(t)\rangle$  où  $H(t)$  : opérateur énergie
- solutions:  $|\psi(t)\rangle = \sum_a c_a(t) |\psi_a\rangle$ 
  - $|\psi_a\rangle$ : état correspondant à la valeur  $a \in \{a\}$

## 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 ?

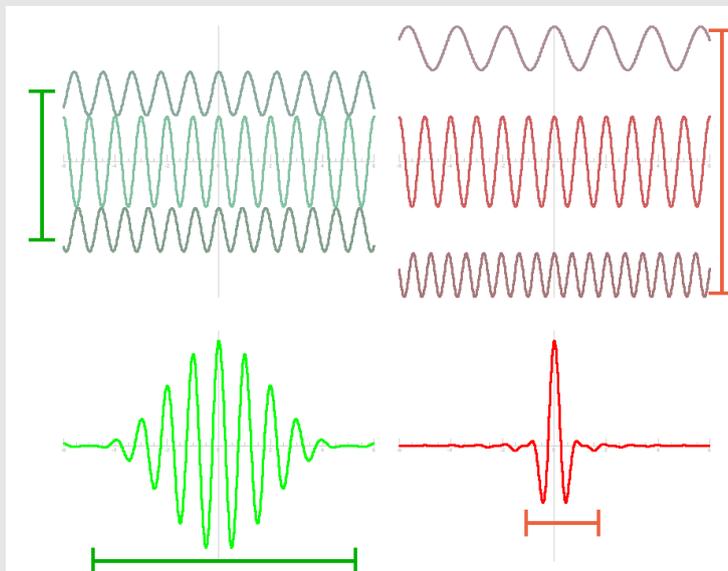
- artefact mathématique (Copenhague)
- physique universelle (décohérence) [S. Haroche – nobel 2012]



## ONDE, CORPUSCULE ET PAQUET D'ONDE

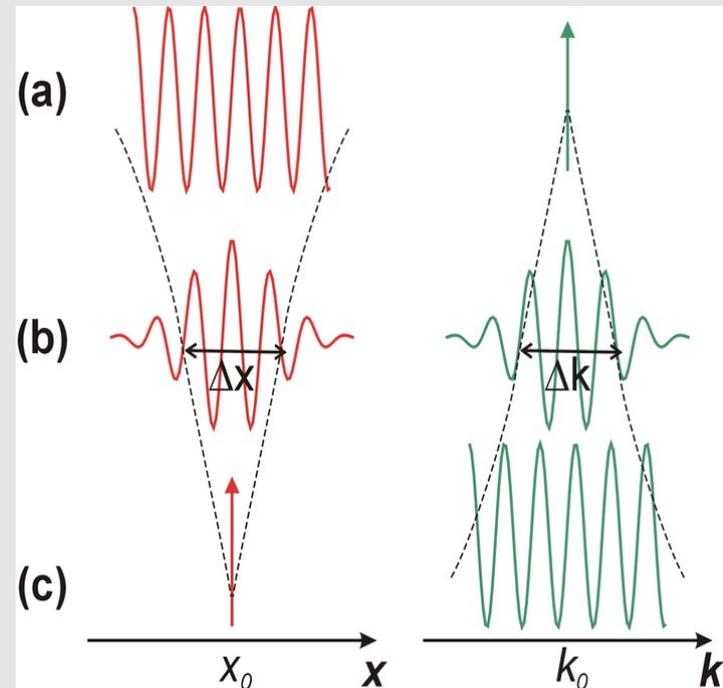
### Paquet d'onde :

- 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)

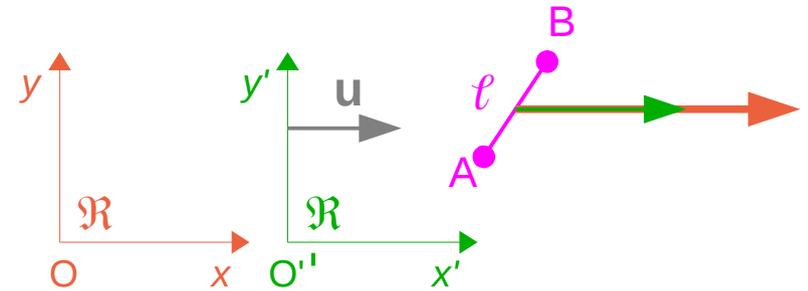
- le mouvement est **relatif**
- $\mathbf{v}_{A/\mathcal{R}} = \mathbf{u}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}} + \mathbf{v}_{A/\mathcal{R}'}$
- lois de Newton (point matériel):
- vrai dans tout réf. inertiel
- temps identique dans tout réf. inertiel = un **temps absolue**
- Lois de transformation

( $\mathcal{R}$  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

« 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

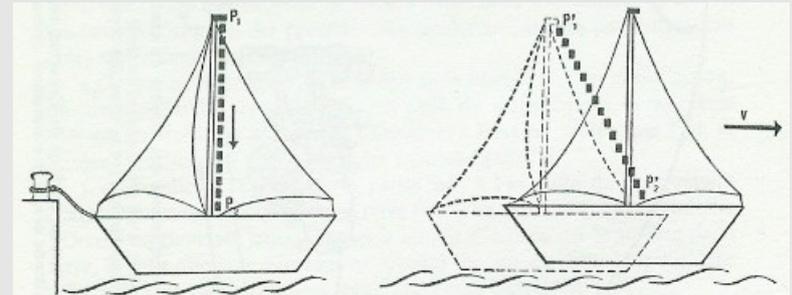


FIG. 7. — La pierre tombant du haut du mât aboutit au pied de celui-ci quel que soit le mouvement du bateau par rapport à la rive.  
« Toutes les choses qui se trouvent sur la terre se meuvent avec la terre. La pierre jetée de la hune reviendra en bas de quelque façon que le navire se meuve. »  
Giordano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

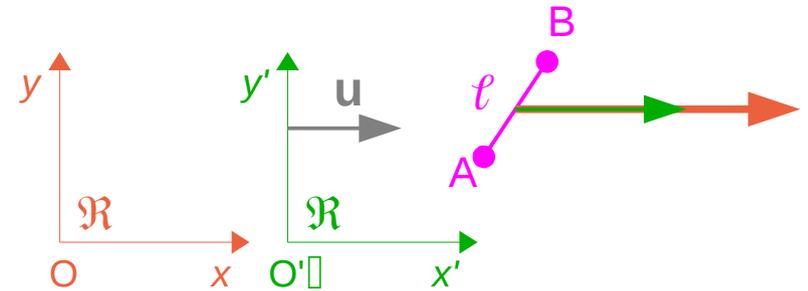
- le mouvement est **relatif**
- $\mathbf{v}_{A/\mathcal{R}} = \mathbf{u}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}} + \mathbf{v}_{A/\mathcal{R}'}$
- lois de Newton (point matériel):
- vrai dans tout réf. inertiel
- temps identique dans tout réf. inertiel = un **temps absolue**
- Lois de transformation

( $\mathcal{R}$  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

Rela

## REFERENTIEL INERTIEL (=GALILEEN)

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

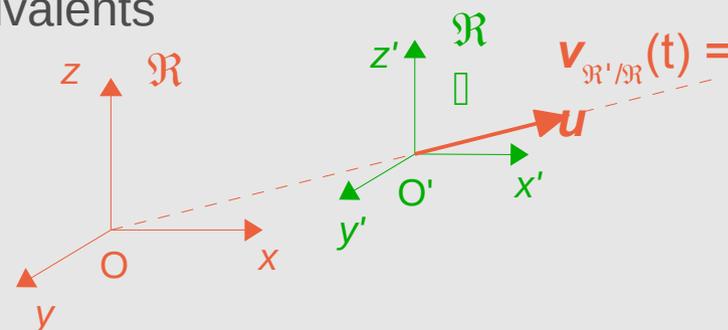
↻ *la principe d'inertie ne s'applique que dans un référentiel inertiel !*

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)

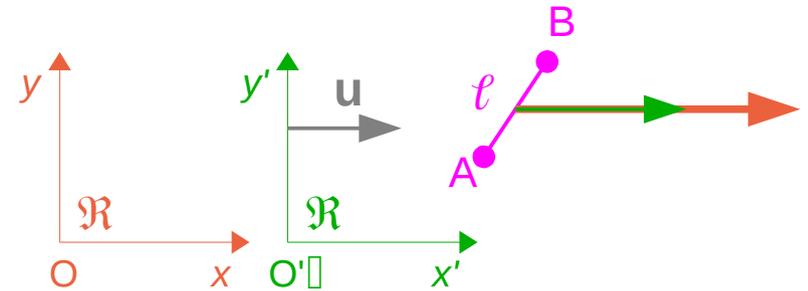
- le mouvement est **relatif**
- $\mathbf{v}_{A/\mathcal{R}} = \mathbf{u}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}} + \mathbf{v}_{A/\mathcal{R}'}$
- lois de Newton (point matériel):
- vrai dans tout réf. inertiel
- temps identique dans tout réf. inertiel = un **temps absolue**
- Lois de transformation

( $\mathcal{R}$  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 ?

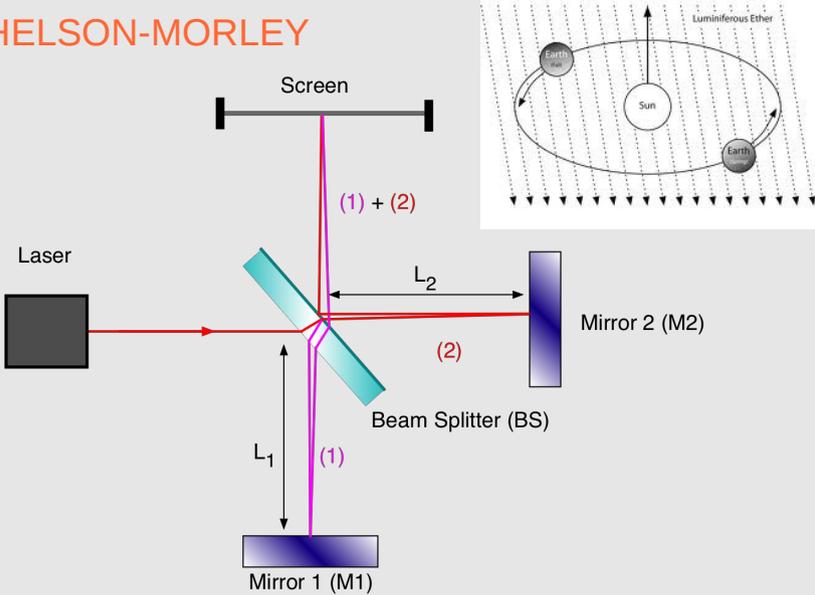
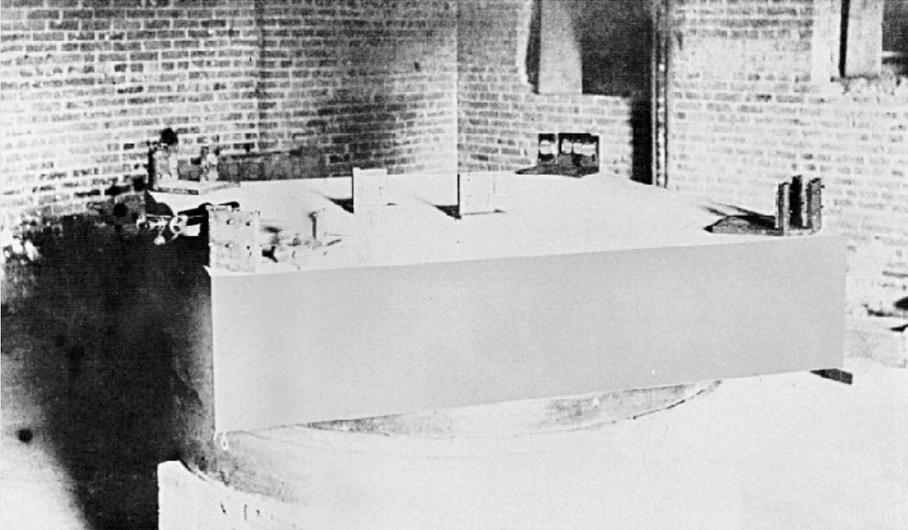
- ondes électromagnétiques se propagent dans l'*éther luminifère*, une matière fixe liée à un référentiel absolu (?) - pas vérifier !
- vitesse indépendante de la source
- rompt l'invariance galiléenne

## 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

## Relativité galiléenne (= Newton)

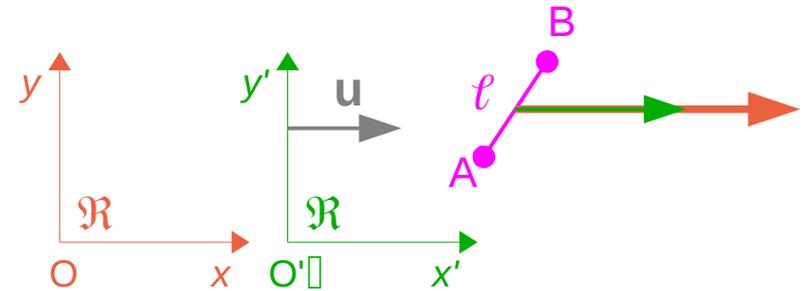
- le mouvement est **relatif**
- $\mathbf{v}_{A/\mathcal{R}} = \mathbf{u}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}} + \mathbf{v}_{A/\mathcal{R}'}$
- lois de Newton (point matériel):
- vrai dans tout réf. inertiel
- temps identique dans tout réf. inertiel = un **temps absolue**
- Lois de transformation

( $\mathcal{R}$  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

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

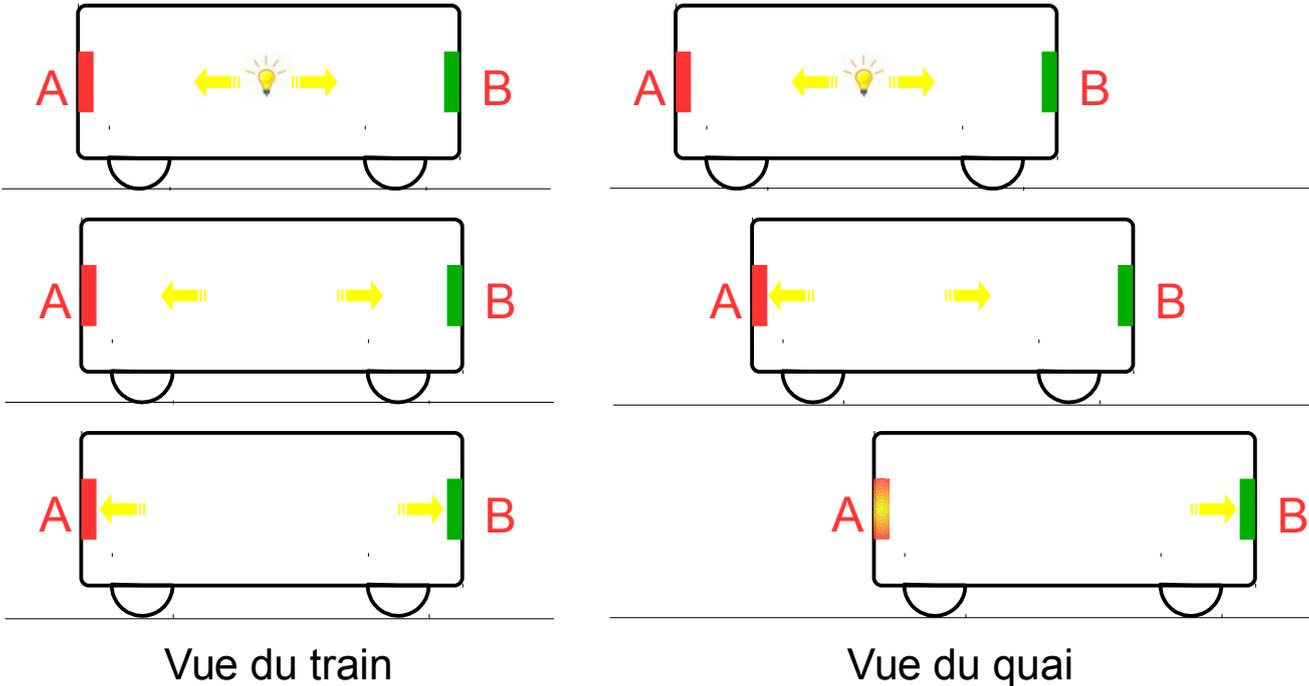
## Postulats de la relativité restreinte

- 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

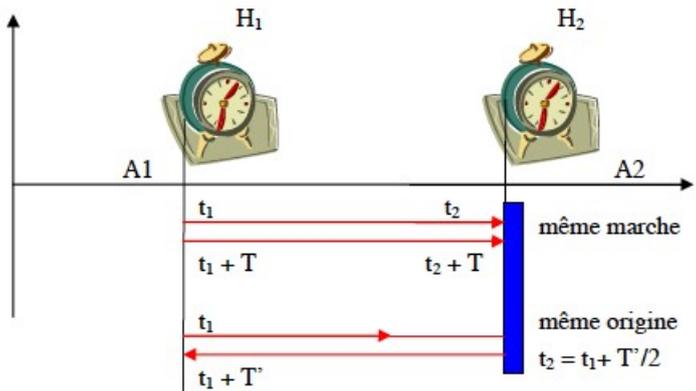


Vue du train :  
A et B atteints simultanément

Vue du quai :  
A atteint avant B

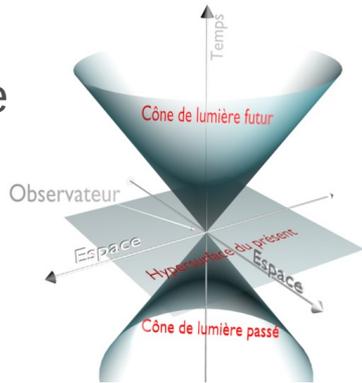
⇒ Relativité de la simultanéité  
*Paradoxe du train piégé*

## Synchronisation des horloges

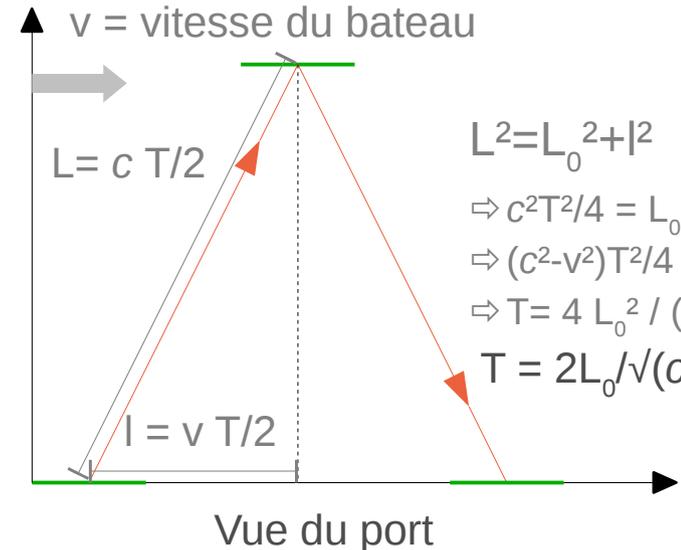
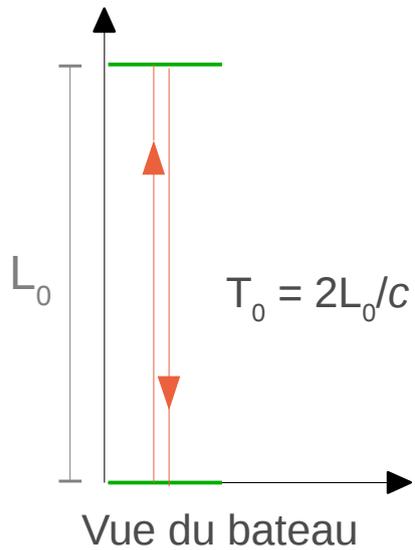
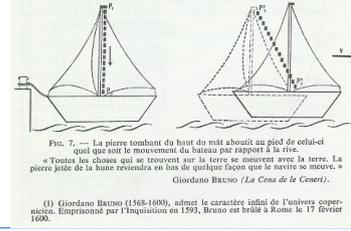


## Causalité

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

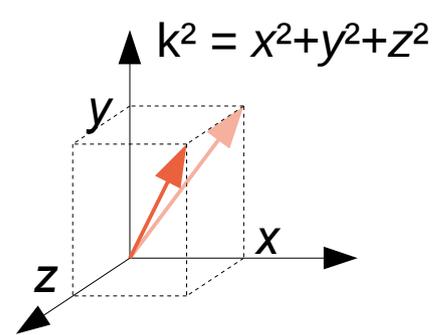
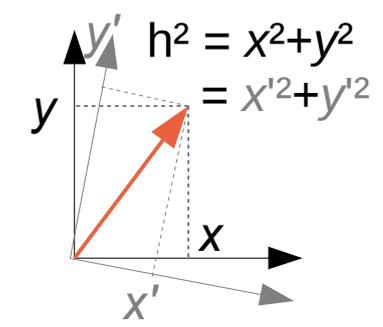
- $v \ll c \Rightarrow \gamma \approx 1$
- $v \rightarrow c \Rightarrow \gamma \rightarrow \infty$

↘ 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 :

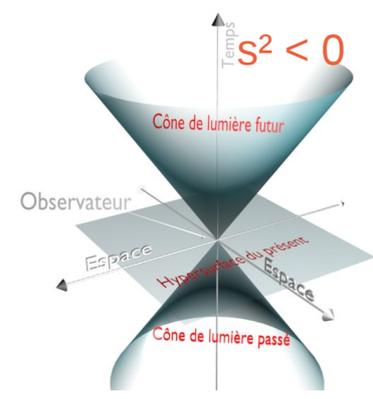


$$s^2 = x^2 + y^2 + z^2 - (ct)^2$$

s : intervalle d'espace-temps invariant par rotation

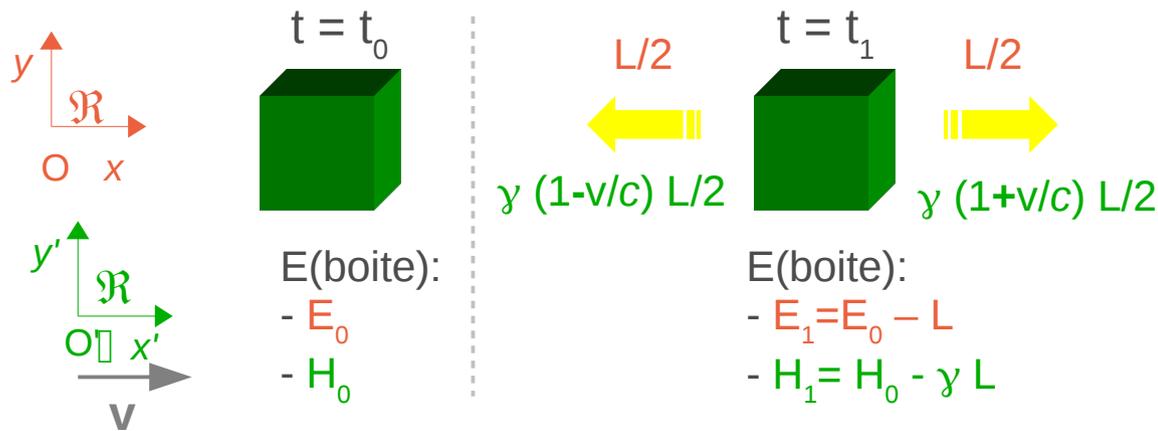
rotation dans l'espace-temps  
 ⇔ changement de réf. inertiel

Espace-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 :

$$H_0 - E_0 = K_0 + C$$

$$H_1 - E_1 = K_1 + C$$

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

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

$\Delta m$  : 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)