

# Comprendre l'infiniment petit (1)

Sébastien Descotes-Genon

`descotes@th.u-psud.fr`

Laboratoire de Physique Théorique  
CNRS & Université Paris-Sud 11, 91405 Orsay, France

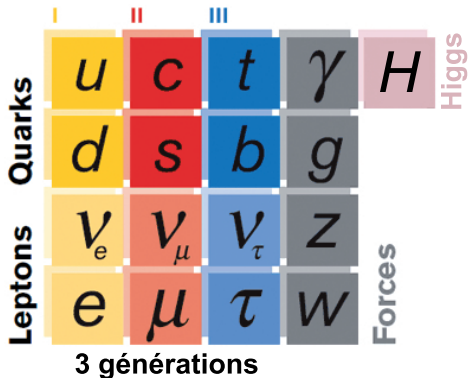
Orsay, 15 juillet 2014



# D'une démarche analytique...

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
87 Fr	88 Ra	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lw	

... à une autre, un siècle plus tard



# Comprendre l'infiniment petit

- Aujourd'hui : Ce qu'est une particule, ce qu'est une interaction
- 2ème cours : Electromagnétisme et interaction forte
- 3ème cours : Interaction faible, Higgs et ce qui reste à trouver
- Cours de Corinne Augier sur les neutrinos



# Comprendre l'infiniment petit

- Aujourd'hui : Ce qu'est une particule, ce qu'est une interaction
- 2ème cours : Electromagnétisme et interaction forte
- 3ème cours : Interaction faible, Higgs et ce qui reste à trouver
- Cours de Corinne Augier sur les neutrinos



*Cette théorie décrit la Nature d'une façon absurde si nous suivons notre bon sens. Et elle est en parfait accord avec l'expérience. Donc j'espère que vous allez accepter la Nature telle qu'elle est. Absurde.*

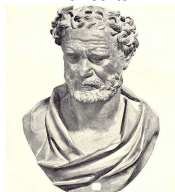
Richard Feynman (1918-1988)

# Physique des particules

Au fond, de quoi la matière est-elle constituée ?

- Antiquité (philosophe grec)  
air, eau, terre, feu ou atomes ?
- 18-19ème siècle (chimiste)  
molécules faites d'atomes
- 19-20ème siècle  
(physicien(ne) atomique & nucléaire)  
électrons et noyaux atomiques
- 21ème siècle  
(physicien(ne) des particules)  
particules élémentaires

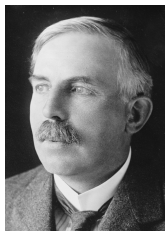
Démocrite



Lavoisier



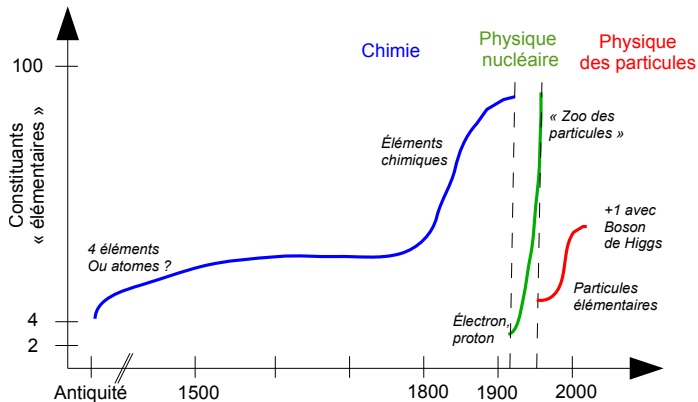
Rutherford



Weinberg

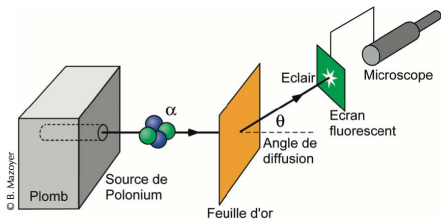
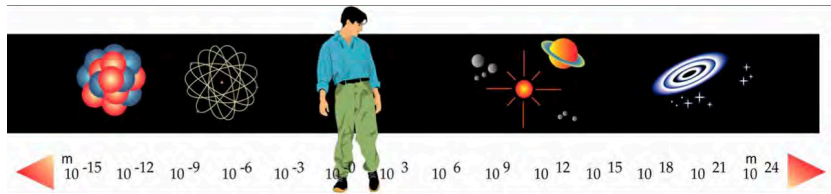


# A la bourse des particules élémentaires



- les "krachs" ne sont pas rares...
- ... du fait de changements de paradigmes (évolution de la notion de constituants élémentaires)

# Monter en énergie, diminuer en taille



- sonder sur des distances plus petites
- c'est sonder avec des particules d'énergie de plus en plus élevée
- photons de plus en plus énergétiques (UV, X,  $\gamma$ )

- ou d'autres projectiles déviés par constituants
  - 1909: Geiger, Marsden, Rutherford "voient" le noyau avec  $\alpha$  sur atome d'or
  - 1968: SLAC (Stanford) "voit" les quarks avec  $e$  sur protons et neutrons

## Quelques ordre de grandeur

$E$ : accélération d'un électron soumis à 1 volt de différence de potentiel

1 electron-volt:  $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Energie thermique d'une molécule	0.04 eV
Lumière visible	1.5-3.5 eV
Energie de dissociation NaCl en ions	4.2 eV
Energie d'ionisation d'un atome d'hydrogène	13.6 eV
Energie d'un électron frappant un écran cathodique	20 keV
Rayons X pour la médecine	0.2 MeV
Rayonnements nucléaires ( $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$ )	1-10 MeV
Energie de masse d'un proton	1 GeV
Énergie de collision au LHC	7-14 TeV
Rayons cosmiques	1 MeV à 1000 TeV

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

Unités "naturelles": Cte de Planck  $\hbar =$  vitesse de la lumière  $c = 1$ :

$\implies 1 \text{ eV} = 1 / (0.2 \mu\text{m}) = 10^{-36} \text{ kg} = 1 / (0.7 \text{ fs})$

# La matière

# Les composants de l'atome



	I	II	III	
Quarks	$u$	$c$	$t$	$\gamma$
	$d$	$s$	$b$	$g$
Leptons	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	$Z$
	$e$	$\mu$	$\tau$	$W$
				Forces

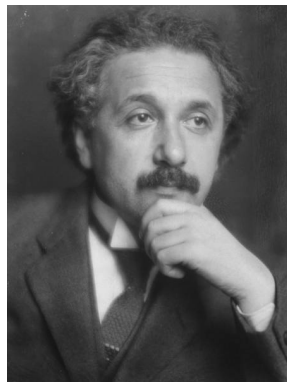
**3 générations**

- Quarks: protons, neutrons
- Électron: liaisons chimiques, électricité
- Neutrino: désintégrations radioactives:  $n \rightarrow pe^- \bar{\nu}_e$  (15 min)

Mais  $E$  augmentant, des surprises avec cette approche analytique...

# Réconcilier deux célèbres adversaires

*Albert Einstein*



**Relativité restreinte**

(Poincaré, Lorentz...)

$c$  vitesse de la lumière ( $v$  max)

objets rapides

*Niels Bohr*



**Mécanique quantique**

(Schrödinger, Heisenberg...)

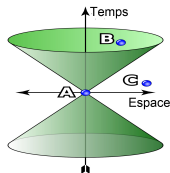
$h$  quantum d'action ( $E \cdot t$  min)

temps courts



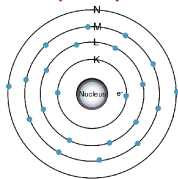
# ... défiant le sens commun

## Relativité restreinte



- Espace et temps reliés
- Loi de composition des vitesses modifiée
- Simultanéité dépendant du référentiel, notion de causalité à modifier
- Equivalence entre énergie et matière  $E = mc^2$

## Mécanique quantique



- Processus discontinus ( $\Delta E$  niveaux atomiques)
- Etats qu'on peut superposer (chat de Schrödinger)
- Probabilités (être dans un état, changer d'état)
- Principe d'incertitude d'Heisenberg

Plus de temps, d'espace absolus

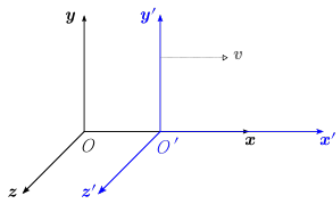
Plus de déterminisme classique

# ABC de relativité restreinte (1)

- Lois de la nature identiques dans tous refs. en déplacement uniforme les uns par rapport aux autres (référentiels galiléens)
- Vitesse de la lumière identique dans tous les référentiels galiléens

# ABC de relativité restreinte (1)

- Lois de la nature identiques dans tous refs. en déplacement uniforme les uns par rapport aux autres (référentiels galiléens)
- Vitesse de la lumière identique dans tous les référentiels galiléens
- En plus des rotations, transformation de Lorentz  
entre deux réfs galiléens avec vitesse relative  $v$

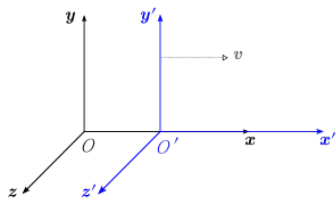


$$x' = \gamma[x - \beta c \cdot t], \quad ct' = \gamma[c \cdot t - \beta x]$$
$$y' = y, \quad z' = z$$

avec  $\beta = v/c$  et  $\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$   
[Unité "naturelle":  $c = 1$ ]

# ABC de relativité restreinte (1)

- Lois de la nature identiques dans tous refs. en déplacement uniforme les uns par rapport aux autres (référentiels galiléens)
- Vitesse de la lumière identique dans tous les référentiels galiléens
- En plus des rotations, transformation de Lorentz  
entre deux réfs galiléens avec vitesse relative  $v$



$$x' = \gamma[x - \beta c \cdot t], \quad ct' = \gamma[c \cdot t - \beta x]$$
$$y' = y, \quad z' = z$$

avec  $\beta = v/c$  et  $\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$   
[Unité "naturelle":  $c = 1$ ]

- vitesse de la lumière identique dans tous les référentiels galiléens
- plus de temps et d'espace indépendants
- dilatation des temps, contraction des longueurs
- notion de référentiel propre (au repos) de la particule

## ABC de relativité restreinte (2)

4-vecteur position  $x^\mu = (c \cdot t, x, y, z)$  ( $\mu = 0, 1, 2, 3$ )

- Les transformations de Lorentz  $x'^\mu = \Lambda_{\mu\nu} x^\nu$  laissent invariant l'intervalle d'espace-temps ( $\sum$  implicite sur indices répétés)

$$x^\mu x^\nu g_{\mu\nu} = (c \cdot t)^2 - x^2 - y^2 - z^2 \quad g_{\mu\nu} = \text{diag}(1, -1, -1, -1)$$

## ABC de relativité restreinte (2)

4-vecteur position  $x^\mu = (c \cdot t, x, y, z)$  ( $\mu = 0, 1, 2, 3$ )

- Les transformations de Lorentz  $x'^\mu = \Lambda_{\mu\nu} x^\nu$  laissent invariant l'intervalle d'espace-temps ( $\sum$  implicite sur indices répétés)

$$\begin{aligned}x^\mu x^\nu g_{\mu\nu} &= (c \cdot t)^2 - x^2 - y^2 - z^2 & g_{\mu\nu} &= \text{diag}(1, -1, -1, -1) \\ &= x^\mu x_\mu = x^2 & x_\mu &= g_{\mu\nu} x^\nu = (c \cdot t, -x, -y, -z)\end{aligned}$$

## ABC de relativité restreinte (2)

4-vecteur position  $x^\mu = (c \cdot t, x, y, z)$  ( $\mu = 0, 1, 2, 3$ )

- Les transformations de Lorentz  $x'^\mu = \Lambda_{\mu\nu} x^\nu$  laissent invariant l'intervalle d'espace-temps ( $\sum$  implicite sur indices répétés)

$$\begin{aligned}x^\mu x^\nu g_{\mu\nu} &= (c \cdot t)^2 - x^2 - y^2 - z^2 & g_{\mu\nu} &= \text{diag}(1, -1, -1, -1) \\ &= x^\mu x_\mu = x^2 & x_\mu &= g_{\mu\nu} x^\nu = (c \cdot t, -x, -y, -z)\end{aligned}$$

- Sous un boost

$$(c \cdot t')^2 - x'^2 - y'^2 - z'^2 = (\gamma[c \cdot t - \beta x])^2 - (\gamma[x - \beta c \cdot t])^2 - y^2 - z^2 = (c \cdot t)^2 - x^2 - y^2 - z^2$$

## ABC de relativité restreinte (2)

4-vecteur position  $x^\mu = (c \cdot t, x, y, z)$  ( $\mu = 0, 1, 2, 3$ )

- Les transformations de Lorentz  $x'^\mu = \Lambda_{\mu\nu} x^\nu$  laissent invariant l'intervalle d'espace-temps ( $\sum$  implicite sur indices répétés)

$$\begin{aligned}x^\mu x^\nu g_{\mu\nu} &= (c \cdot t)^2 - x^2 - y^2 - z^2 & g_{\mu\nu} &= \text{diag}(1, -1, -1, -1) \\ &= x^\mu x_\mu = x^2 & x_\mu &= g_{\mu\nu} x^\nu = (c \cdot t, -x, -y, -z)\end{aligned}$$

- Sous un boost

$$(c \cdot t')^2 - x'^2 - y'^2 - z'^2 = (\gamma[c \cdot t - \beta x])^2 - (\gamma[x - \beta c \cdot t])^2 - y^2 - z^2 = (c \cdot t)^2 - x^2 - y^2 - z^2$$

- Sous une rotation qui conserve  $\vec{x}^2 = x^2 + y^2 + z^2$  et  $t$

$$(ct')^2 - x'^2 - y'^2 - z'^2 = (ct)^2 - x^2 - y^2 - z^2$$



## ABC de relativité restreinte (2)

4-vecteur position  $x^\mu = (c \cdot t, x, y, z)$  ( $\mu = 0, 1, 2, 3$ )

- Les transformations de Lorentz  $x'^\mu = \Lambda_{\mu\nu} x^\nu$  laissent invariant l'intervalle d'espace-temps ( $\sum$  implicite sur indices répétés)

$$\begin{aligned}x^\mu x^\nu g_{\mu\nu} &= (c \cdot t)^2 - x^2 - y^2 - z^2 & g_{\mu\nu} &= \text{diag}(1, -1, -1, -1) \\ &= x^\mu x_\mu = x^2 & x_\mu &= g_{\mu\nu} x^\nu = (c \cdot t, -x, -y, -z)\end{aligned}$$

- Sous un boost

$$(c \cdot t')^2 - x'^2 - y'^2 - z'^2 = (\gamma[c \cdot t - \beta x])^2 - (\gamma[x - \beta c \cdot t])^2 - y^2 - z^2 = (c \cdot t)^2 - x^2 - y^2 - z^2$$

- Sous une rotation qui conserve  $\vec{x}^2 = x^2 + y^2 + z^2$  et  $t$

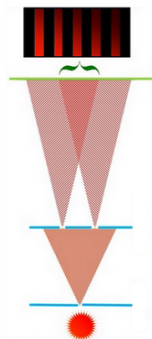
$$(ct')^2 - x'^2 - y'^2 - z'^2 = (ct)^2 - x^2 - y^2 - z^2$$

4-vecteur impulsion  $p^\mu = (E/c, p_x, p_y, p_z)$

- Nouvel invariant:  $p^2 = p^\mu p_\mu = E^2/c^2 - \vec{p}^2 = m^2 c^2 \dots$  la masse !
- Equivalence entre masse et énergie (conversion matière/énergie)

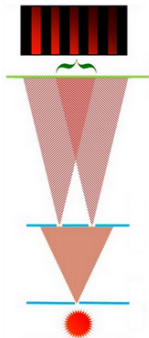
# ABC de mécanique quantique (1)

- Lumière
  - Onde: expériences des fentes de Young
  - Particule: explication de l'effet photoélectrique



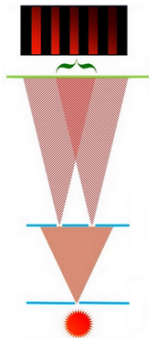
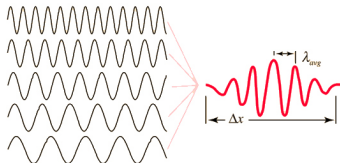
# ABC de mécanique quantique (1)

- Lumière
  - Onde: expériences des fentes de Young
  - Particule: explication de l'effet photoélectrique
- Probabilités
  - Proba de présence ( $\equiv$  intensité) donnée par  $|A|^2$
  - $P(X \rightarrow Y) = |\sum_{\mathcal{C} \text{ chemin } X \rightarrow Y} A(\mathcal{C})|^2$   
avec  $A(\mathcal{C})$  amplitudes complexes  $\langle Y|X \rangle_{\mathcal{C}}$
  - Principe d'incertitude d'Heisenberg  $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$



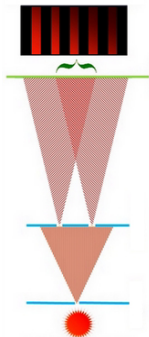
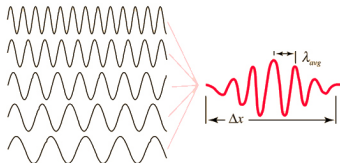
# ABC de mécanique quantique (1)

- Lumière
  - Onde: expériences des fentes de Young
  - Particule: explication de l'effet photoélectrique
- Probabilités
  - Proba de présence ( $\equiv$  intensité) donnée par  $|A|^2$
  - $P(X \rightarrow Y) = |\sum_{\mathcal{C} \text{ chemin } X \rightarrow Y} A(\mathcal{C})|^2$   
avec  $A(\mathcal{C})$  amplitudes complexes  $\langle Y|X \rangle_{\mathcal{C}}$
  - Principe d'incertitude d'Heisenberg  $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$
- Toute particule décrite par une superposition d'ondes planes  $e^{i(Et - \vec{p} \cdot \vec{x})}$  avec  $p = h/\lambda$ ,  $E = h\nu$



# ABC de mécanique quantique (1)

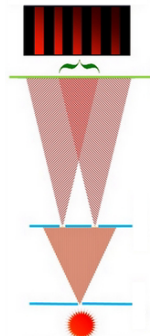
- Lumière
  - Onde: expériences des fentes de Young
  - Particule: explication de l'effet photoélectrique
- Probabilités
  - Proba de présence ( $\equiv$  intensité) donnée par  $|A|^2$
  - $P(X \rightarrow Y) = |\sum_{\text{chemin } X \rightarrow Y} A(C)|^2$   
avec  $A(C)$  amplitudes complexes  $\langle Y|X \rangle_C$
  - Principe d'incertitude d'Heisenberg  $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$
- Toute particule décrite par une superposition d'ondes planes  $e^{i(Et - \vec{p} \cdot \vec{x})}$  avec  $p = h/\lambda$ ,  $E = h\nu$



$\implies$  Purement quantique : le spin (moment angulaire intrinsèque) !

# ABC de mécanique quantique (2)

- Dualité onde/particule (particule = paquet d'onde)

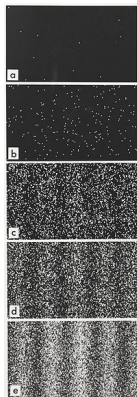


## ABC de mécanique quantique (2)

- Dualité onde/particule (particule = paquet d'onde)
- Etat décrit par un vecteur  $|\psi\rangle$
- Probabilité de présence  $|\psi(\vec{r})|^2$  avec amplitude de probabilité  $\psi(\vec{r}) = \langle r|\psi\rangle$
- Observables: opérateurs sur ce vecteur d'état

$$\hat{H} = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \quad \hat{p} = -i\hbar \left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right) = -i\hbar \vec{\nabla}$$

[Unité "naturelle"  $\hbar = 1$ ]

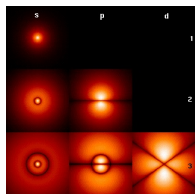
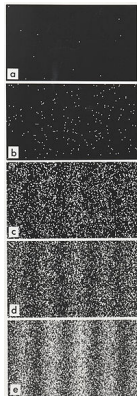


# ABC de mécanique quantique (2)

- Dualité onde/particule (particule = paquet d'onde)
- Etat décrit par un vecteur  $|\psi\rangle$
- Probabilité de présence  $|\psi(\vec{r})|^2$  avec amplitude de probabilité  $\psi(\vec{r}) = \langle r|\psi\rangle$
- Observables: opérateurs sur ce vecteur d'état

$$\hat{H} = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \quad \hat{p} = -i\hbar \left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right) = -i\hbar \vec{\nabla}$$

[Unité "naturelle"  $\hbar = 1$ ]

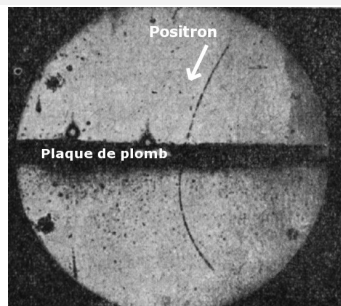


## Equation de Schrödinger

$$\frac{\vec{p}^2}{2m} + V(r) = E \longrightarrow -\frac{\hbar^2}{2m} \vec{\nabla}^2 \psi + V(r)\psi = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi$$



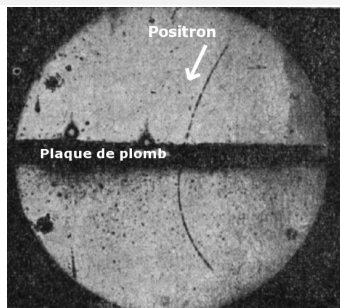
# Les antiparticules



Anderson (1932): rayons cosmiques

- Chambre de Wilson remplie de vapeur d'eau avec  $\vec{B}$
- Des gouttes d'eau se forment sur le passage des particules chargées
- Même masse qu'un électron, mais charge opposée : **positron**

# Les antiparticules



Anderson (1932): rayons cosmiques

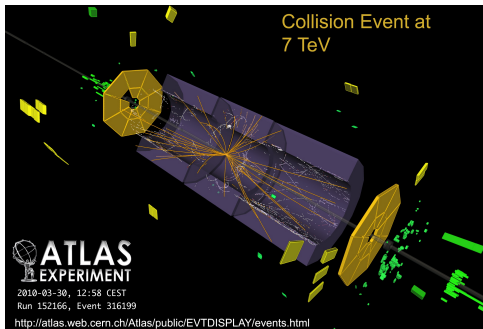
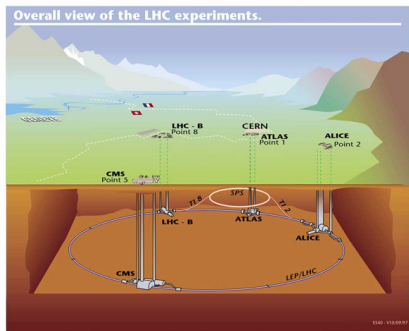
- Chambre de Wilson remplie de vapeur d'eau avec  $\vec{B}$
- Des gouttes d'eau se forment sur le passage des particules chargées
- Même masse qu'un électron, mais charge opposée : **positron**

Dirac (1928): équation pour décrire l'électron

- Mécanique Quantique + Relativité restreinte
$$E = p^2 / (2m_e) \rightarrow E^2 = p^2 c^2 + m_e^2 c^4$$
- Solution  $E < 0$  vue comme **anti-particule**
- Permet l'équivalence Énergie ( $E = 2m_e c^2$ )  
↔ Masse (paire particule/antiparticule)
- De nouvelles particules dans des collisions ?



# On ne casse plus, on crée



- Relativité: équiv.masse/énergie, création et annihilation matière  
⇒ Création de particules lors de collisions, et désintégration
- Mécanique quantique : probabilités comme modules d'amplitudes complexes, principe de superposition, interférences  
⇒ Accumulation de nombreux événements nécessaire

Illustration avec ATLAS

# Les trois générations



	I	II	III	
Quarks	$u$	$c$	$t$	$\gamma$
	$d$	$s$	$b$	$g$
Leptons	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	$Z$
	$e$	$\mu$	$\tau$	$W$

3 générations

Forces

- Dans les rayons cosmiques ('30), puis accélérateurs de particules
- Copies de la première famille (charge électrique. . .) **sauf masses** !  
top  $t$  60 000 fois plus lourd que up  $u$  ( $\simeq$  atome d'or)
- Créées en paires particule-antipart. dans collisions  $E > 2m_q c^2$
- Instables (sauf  $\nu$ 's):  $t$  se désintègre en quelques  $10^{-25}$  secondes  
 $t \rightarrow be^+ \nu$  (99.8%),  $t \rightarrow se^+ \nu$  (0.15%),  $t \rightarrow de^+ \nu$  ( $6 \times 10^{-5}$ )...

# Carte d'identité d'une particule

- Masse
- Spin (moment angulaire intrinsèque)
- Charge(s)
- Temps de vie et modes de désintégration

Citation: J. Beringer et al. (Particle Data Group), PR D86, 010001 (2012) (URL: <http://pdg.lbl.gov>)

**T**

$$J = \frac{1}{2}$$

$\tau$  discovery paper was PERL 75.  $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$  cross-section threshold behavior and magnitude are consistent with pointlike spin-1/2 Dirac particle. BRANDELIK 78 ruled out pointlike spin-0 or spin-1 particle. FELDMAN 78 ruled out  $J = 3/2$ . KIRKBY 79 also ruled out  $J = \text{integer}$ ,  $J = 3/2$ .

## $\tau$ MASS

VALUE (MeV)	EVTS	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT
<b>1776.82 ± 0.16 OUR AVERAGE</b>				
1776.68 ± 0.12 ± 0.41	682k	<sup>1</sup> AUBERT	09AK BABR	423 fb <sup>-1</sup> , $E_{\text{cm}}^{\text{ex}} = 10.6$ GeV
1776.81 <sup>+0.25</sup> <sub>-0.23</sub> ± 0.15	81	ANASHIN	07 KEDR	6.7 pb <sup>-1</sup> , $E_{\text{cm}}^{\text{ex}} = 3.54\text{--}3.78$ GeV
1776.61 ± 0.13 ± 0.35		<sup>1</sup> BELOUS	07 BELL	414 fb <sup>-1</sup> , $E_{\text{cm}}^{\text{ex}} = 10.6$ GeV
1775.1 ± 1.6 ± 1.0	13.3k	<sup>2</sup> ABBIENDI	00A OPAL	1990–1995 LEP runs
1778.2 ± 0.8 ± 1.2		ANASTASSOV	97 CLEO	$E_{\text{cm}}^{\text{ex}} = 10.6$ GeV
1776.96 <sup>+0.18+0.25</sup> <sub>-0.21-0.17</sub>	65	<sup>3</sup> BAI	96 BES	$E_{\text{cm}}^{\text{ex}} = 3.54\text{--}3.57$ GeV
1776.3 ± 2.4 ± 1.4	11k	<sup>4</sup> ALBRECHT	92M ARG	$E_{\text{cm}}^{\text{ex}} = 9.4\text{--}10.6$ GeV
1783 <sup>+3</sup> <sub>-4</sub>	692	<sup>5</sup> BACINO	78B DLCO	$E_{\text{cm}}^{\text{ex}} = 3.1\text{--}7.4$ GeV
● ● ● We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. ● ● ●				
1777.8 ± 0.7 ± 1.7	35k	<sup>6</sup> BALEST	93 CLEO	Repl. by ANASTASSOV 97
1776.9 ± 0.4 ± 0.2	14	<sup>7</sup> BAI	92 BES	Repl. by BAI 96

Citation: J. Beringer et al. (Particle Data Group), PR D86, 010001 (2012) (URL: <http://pdg.lbl.gov>)

## Modes with one charged particle

$\Gamma_1$	particle <sup>-</sup> ≥ 0 neutrals ≥ 0 $K_L^0 \nu_\tau$	(85.35 ± 0.07) %	S=1.3
$\Gamma_2$	particle <sup>-</sup> ≥ 0 neutrals ≥ 0 $K_L^0 \nu_\tau$	(84.71 ± 0.08) %	S=1.3
$\Gamma_3$	$\mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau$	[a] (17.41 ± 0.04) %	S=1.1
$\Gamma_4$	$\mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau \gamma$	[b] (3.6 ± 0.4) × 10 <sup>-3</sup>	
$\Gamma_5$	$e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau$	[a] (17.83 ± 0.04) %	
$\Gamma_6$	$e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau \gamma$	[b] (1.75 ± 0.18) %	
$\Gamma_7$	$h^- \geq 0 K_L^0 \nu_\tau$	(12.06 ± 0.06) %	S=1.2
$\Gamma_8$	$h^- \nu_\tau$	(11.53 ± 0.06) %	S=1.2
$\Gamma_9$	$\pi^- \nu_\tau$	[a] (10.83 ± 0.06) %	S=1.2
$\Gamma_{10}$	$K^- \nu_\tau$	[a] (7.00 ± 0.10) × 10 <sup>-3</sup>	S=1.1
$\Gamma_{11}$	$h^- \geq 1$ neutrals $\nu_\tau$	(37.10 ± 0.10) %	S=1.2
$\Gamma_{12}$	$h^- \geq 1 \pi^0 \nu_\tau$ (ex. $K^0$ )	(36.57 ± 0.10) %	S=1.2
$\Gamma_{13}$	$h^- \pi^0 \nu_\tau$	(25.95 ± 0.09) %	S=1.1
$\Gamma_{14}$	$\pi^- \pi^0 \nu_\tau$	[a] (25.52 ± 0.09) %	S=1.1
$\Gamma_{15}$	$\pi^- \pi^0$ non- $\rho(770) \nu_\tau$	(3.0 ± 3.2) × 10 <sup>-3</sup>	
$\Gamma_{16}$	$K^- \pi^0 \nu_\tau$	[a] (4.29 ± 0.15) × 10 <sup>-3</sup>	
$\Gamma_{17}$	$h^- \geq 2 \pi^0 \nu_\tau$	(10.87 ± 0.11) %	S=1.2
$\Gamma_{18}$	$h^- 2 \pi^0 \nu_\tau$	(9.52 ± 0.11) %	S=1.1
$\Gamma_{19}$	$h^- 2 \pi^0 \nu_\tau$ (ex. $K^0$ )	(9.36 ± 0.11) %	S=1.2
$\Gamma_{20}$	$\pi^- 2 \pi^0 \nu_\tau$ (ex. $K^0$ )	[a] (9.30 ± 0.11) %	S=1.2

# Spin, hélicité, polarisation

**Spin:** Moment angulaire intrinsèque (vs orbital  $\vec{L} = \vec{r} \wedge \vec{p}$ )

- Transformations de Lorentz

spin 0 (scalaire)  $x \rightarrow x$       spin 1 (vecteur)  $x_i \rightarrow R_{ij}x_j$

spin 1/2 (fermion) ... à mi chemin !

- Spin/statistique: bosons grégaires, fermions asociaux

# Spin, hélicité, polarisation

**Spin:** Moment angulaire intrinsèque (vs orbital  $\vec{L} = \vec{r} \wedge \vec{p}$ )

- Transformations de Lorentz

spin 0 (scalaire)  $x \rightarrow x$       spin 1 (vecteur)  $x_i \rightarrow R_{ij}x_j$

spin 1/2 (fermion) ... à mi chemin !

- Spin/statistique: bosons grégaires, fermions asociaux

**Hélicité:** Projection du spin sur l'impulsion



*right-handed*



*left-handed*

- Pour spin 1/2  
hélicités gauche et droite

- Pour spin 1/2 massif, dépend du référentiel

$\implies$  Cousine mieux définie (identique pour  $m = 0$ ): la chiralité

# Spin, hélicité, polarisation

**Spin:** Moment angulaire intrinsèque (vs orbital  $\vec{L} = \vec{r} \wedge \vec{p}$ )

- Transformations de Lorentz

spin 0 (scalaire)  $x \rightarrow x$       spin 1 (vecteur)  $x_i \rightarrow R_{ij}x_j$

spin 1/2 (fermion) ... à mi chemin !

- Spin/statistique: bosons grégaires, fermions asociaux

**Hélicité:** Projection du spin sur l'impulsion



*right-handed*



*left-handed*

- Pour spin 1/2  
hélicités gauche et droite

- Pour spin 1/2 massif, dépend du référentiel

⇒ Cousine mieux définie (identique pour  $m = 0$ ): la chiralité

**Polarisation:** Cousine de l'hélicité pour spin 1

- 2 polarisations pour particule de masse nulle (photon)
- 3 polarisations pour particule massive



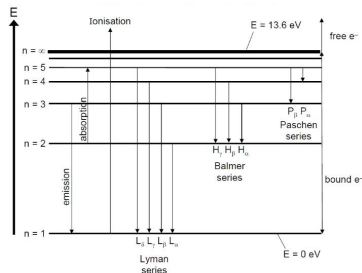
# Comment décrire les particules

## Champ classique (champ électromagnétique)

- Fonction de l'espace et du temps  $\vec{E}(t, \vec{x})$ ,  $\vec{B}(t, \vec{x})$
- Evolution de ce champ et de son interaction avec la matière

## Mécanique quantique (oscillateur harmonique, atome $H$ )

- Nombre de particules fixé
- Différentes excitations (niveaux d' $E$ )
- Opérateurs de création et d'annihilation



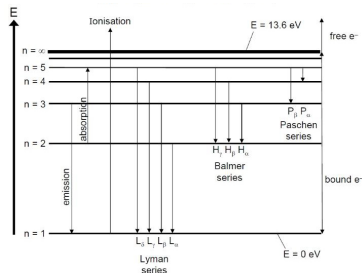
# Comment décrire les particules

## Champ classique (champ électromagnétique)

- Fonction de l'espace et du temps  $\vec{E}(t, \vec{x})$ ,  $\vec{B}(t, \vec{x})$
- Evolution de ce champ et de son interaction avec la matière

## Mécanique quantique (oscillateur harmonique, atome $H$ )

- Nombre de particules fixé
- Différentes excitations (niveaux d' $E$ )
- Opérateurs de création et d'annihilation



## Champ quantique (relativité + mécanique quantique)

- Somme d'opérateurs capable de créer ou d'annihiler une particule
- ... avec une impulsion ou une position donnée
- ... en agissant sur un état (par exemple état fondamental)

$$\phi(x) = \int [d^4 p] [a_p e^{-ip \cdot x} + a_p^\dagger e^{ip \cdot x}] \quad a_p^\dagger |0\rangle = |H(p)\rangle$$

# Particules sans interactions

- En mécanique quantique

$$\vec{p} \equiv -i\vec{\nabla} \quad E \equiv i\frac{\partial}{\partial t}$$

$$E = \frac{\vec{p}^2}{2m} \implies i\frac{\partial}{\partial t}\Psi = -\frac{\vec{\nabla}^2}{2m}\Psi \quad [\hbar = c = 1]$$

- Généralisation relativiste

$$p^\mu = (E, \vec{p}) \equiv i\frac{\partial}{\partial x_\mu} = i\partial^\mu$$

$$g_{\mu\nu}\partial^\mu\partial^\nu = \partial^\mu\partial_\mu = \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \vec{\nabla}^2$$

# Particules sans interactions

- En mécanique quantique

$$\vec{p} \equiv -i\vec{\nabla} \quad E \equiv i\frac{\partial}{\partial t} \quad E = \frac{\vec{p}^2}{2m} \implies i\frac{\partial}{\partial t}\Psi = -\frac{\vec{\nabla}^2}{2m}\Psi \quad [\hbar = c = 1]$$

- Généralisation relativiste

$$p^\mu = (E, \vec{p}) \equiv i\frac{\partial}{\partial x_\mu} = i\partial^\mu \quad g_{\mu\nu}\partial^\mu\partial^\nu = \partial^\mu\partial_\mu = \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \vec{\nabla}^2$$

- Pour spin 0, équation de Klein-Gordon

$$E^2 - \vec{p}^2 = m^2 \quad (\partial^\mu\partial_\mu + m^2)\phi = 0$$

# Particules sans interactions

- En mécanique quantique

$$\vec{p} \equiv -i\vec{\nabla} \quad E \equiv i\frac{\partial}{\partial t} \quad E = \frac{\vec{p}^2}{2m} \implies i\frac{\partial}{\partial t}\Psi = -\frac{\vec{\nabla}^2}{2m}\Psi \quad [\hbar = c = 1]$$

- Généralisation relativiste

$$p^\mu = (E, \vec{p}) \equiv i\frac{\partial}{\partial x_\mu} = i\partial^\mu \quad g_{\mu\nu}\partial^\mu\partial^\nu = \partial^\mu\partial_\mu = \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \vec{\nabla}^2$$

- Pour spin 0, équation de Klein-Gordon

$$E^2 - \vec{p}^2 = m^2 \quad (\partial^\mu\partial_\mu + m^2)\phi = 0$$

- Pour spin 1/2 (e.g.  $e^-$ ), équation de Dirac

$$(i\gamma^\mu\partial_\mu - m)\psi = 0$$

# Particules sans interactions

- En mécanique quantique

$$\vec{p} \equiv -i\vec{\nabla} \quad E \equiv i\frac{\partial}{\partial t} \quad E = \frac{\vec{p}^2}{2m} \implies i\frac{\partial}{\partial t}\Psi = -\frac{\vec{\nabla}^2}{2m}\Psi \quad [\hbar = c = 1]$$

- Généralisation relativiste

$$p^\mu = (E, \vec{p}) \equiv i\frac{\partial}{\partial x_\mu} = i\partial^\mu \quad g_{\mu\nu}\partial^\mu\partial^\nu = \partial^\mu\partial_\mu = \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \vec{\nabla}^2$$

- Pour spin 0, équation de Klein-Gordon

$$E^2 - \vec{p}^2 = m^2 \quad (\partial^\mu\partial_\mu + m^2)\phi = 0$$

- Pour spin 1/2 (e.g.  $e^-$ ), équation de Dirac

$$(i\gamma^\mu\partial_\mu - m)\psi = 0$$

$$\gamma_\mu ? \quad (-i\gamma^\mu\partial_\mu - m)(i\gamma^\nu\partial_\nu - m)\psi = 0 = (\partial^\mu\partial_\mu + m^2)\psi \\ \implies \gamma^\mu\gamma^\nu + \gamma^\nu\gamma^\mu = 2g^{\mu\nu}$$

# Equation de Dirac

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0 \quad \gamma^\mu \gamma^\nu + \gamma^\nu \gamma^\mu = 2g^{\mu\nu}$$

De tels  $\gamma^\mu$  forcément des matrices  $4 \times 4$  (dites de Dirac)

$$\gamma^0 = \begin{pmatrix} 0 & I_2 \\ I_2 & 0 \end{pmatrix} \quad \gamma^{i=1,2,3} = \begin{pmatrix} 0 & \sigma^i \\ -\sigma^i & 0 \end{pmatrix}$$

avec  $I_2$  identité  $2 \times 2$  et les matrices de Pauli

$$\sigma_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \sigma_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \sigma_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

# Equation de Dirac

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0 \quad \gamma^\mu \gamma^\nu + \gamma^\nu \gamma^\mu = 2g^{\mu\nu}$$

De tels  $\gamma^\mu$  forcément des matrices  $4 \times 4$  (dites de Dirac)

$$\gamma^0 = \begin{pmatrix} 0 & I_2 \\ I_2 & 0 \end{pmatrix} \quad \gamma^{i=1,2,3} = \begin{pmatrix} 0 & \sigma^i \\ -\sigma^i & 0 \end{pmatrix}$$

avec  $I_2$  identité  $2 \times 2$  et les matrices de Pauli

$$\sigma_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \sigma_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \sigma_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

**Pourquoi des matrices  $4 \times 4$  ?** Fermion (spin 1/2) a 4 degrés de liberté

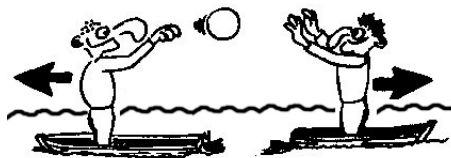
- 2 : Orientation du spin (up et down)
- 2 : Particule et antiparticule



# Les interactions

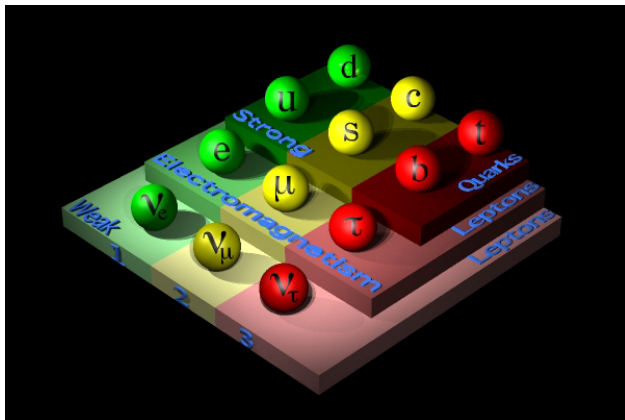
# Les forces fondamentales

	I	II	III	
Quarks	$u$	$c$	$t$	$\gamma$
	$d$	$s$	$b$	$g$
Leptons	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	$Z$
	$e$	$\mu$	$\tau$	$W$
	3 générations			Forces



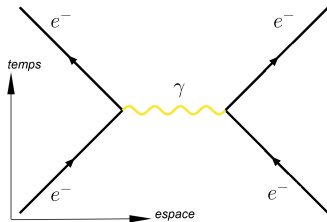
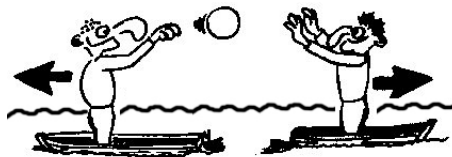
- Gravitation  
étoiles, galaxies... [10<sup>-40</sup>]
  - Force faible (bosons  $W, Z$ )  
radioactivité  $\beta$  [10<sup>-8</sup>]
  - Electromagnétisme (photon  $\gamma$ )  
électricité, chimie... [10<sup>-2</sup>]
  - Force forte (gluons  $g$ )  
cohésion des noyaux [1]
- 
- 3 interactions sur 4 en termes d'échanges de particules (boson médiateurs)
  - gravitation négligeable [intensité relative au niveau subatomique]

# Des différences de sensibilités



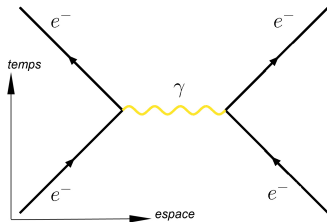
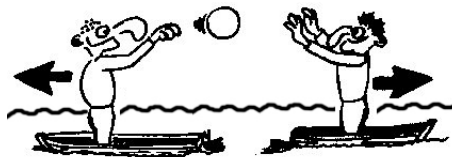
- Faible : tout le monde
- Electromagnétique : tout le monde sauf les neutrinos
- Forte : seulement les quarks

# Forces fondamentales et bosons médiateurs



- Echange ponctuel de particules = action à distance

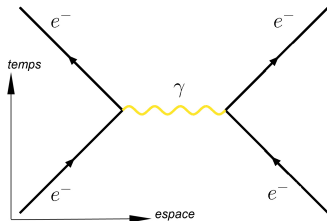
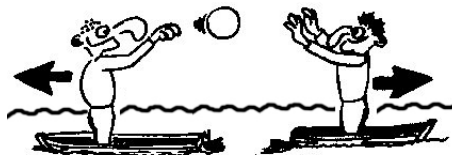
# Forces fondamentales et bosons médiateurs



- Echange ponctuel de particules = action à distance
- Pour l'échange de particule de spin 0, la composante statique du potentiel avec symétrie sphérique  $\phi(x_\mu) \equiv U(r)$

$$0 = \left( \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \vec{\nabla}^2 + M^2 \right) U(r) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial}{\partial r} U \right) + M^2 U \rightarrow U(r) = \frac{g}{4\pi r} e^{-Mr}$$

# Forces fondamentales et bosons médiateurs



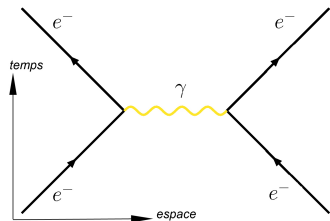
- Echange ponctuel de particules = action à distance
- Pour l'échange de particule de spin 0, la composante statique du potentiel avec symétrie sphérique  $\phi(x_\mu) \equiv U(r)$

$$0 = \left( \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \vec{\nabla}^2 + M^2 \right) U(r) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial U}{\partial r} \right) + M^2 U \rightarrow U(r) = \frac{g}{4\pi r} e^{-Mr}$$

Par analogie, échange de particule de spin 1

- Electromag. ( $M_\gamma = 0$ ): Potentiel de Coulomb  $1/r$  avec portée  $\infty$
- Faible ( $M_{W,Z} \simeq 80 \text{ GeV}$ ): Suppression exponentielle avec  $r$   
portée subatomique ( $r_0 = \hbar c/M = 2 \cdot 10^{-18} \text{ m}$ )

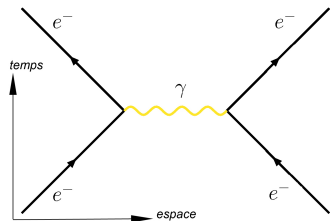
# Particules virtuelles, particules réelles



Photon, grain de lumière  
Pourtant invisible quand médiateur  
de la force électromagnétique ?

$$e^-(p) + e^-(q) \rightarrow e^-(p+k) + e^-(q-k)$$

# Particules virtuelles, particules réelles



Photon, grain de lumière  
Pourtant invisible quand médiateur  
de la force électromagnétique ?

$$e^-(p) + e^-(q) \rightarrow e^-(p+k) + e^-(q-k)$$

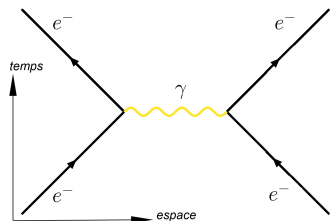
- Si tout le monde satisfait relation d'Einstein (sur couche de masse)

$$p^2 = q^2 = (p+k)^2 = (q-k)^2 = m_e^2 \quad k^2 = 0$$

$$\text{donc } 2k \cdot p = 2k \cdot q = 0 = 2k(p+q)$$



# Particules virtuelles, particules réelles



Photon, grain de lumière  
Pourtant invisible quand médiateur  
de la force électromagnétique ?

$$e^-(p) + e^-(q) \rightarrow e^-(p+k) + e^-(q-k)$$

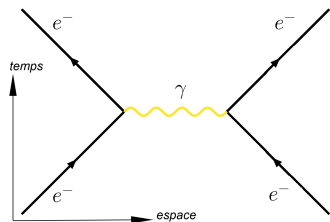
- Si tout le monde satisfait relation d'Einstein (sur couche de masse)

$$p^2 = q^2 = (p+k)^2 = (q-k)^2 = m_e^2 \quad k^2 = 0$$

donc  $2k \cdot p = 2k \cdot q = 0 = 2k(p+q)$

- Dans le ref. du centre de masse  $p^\mu + q^\mu = (E, \vec{0})$ ,  
 $2k(p+q) = 2E_\gamma E = 0$ , d'où  $E_\gamma = 0$  et  $k = (0, \vec{0})$  ???

# Particules virtuelles, particules réelles



Photon, grain de lumière  
Pourtant invisible quand médiateur  
de la force électromagnétique ?

$$e^-(p) + e^-(q) \rightarrow e^-(p+k) + e^-(q-k)$$

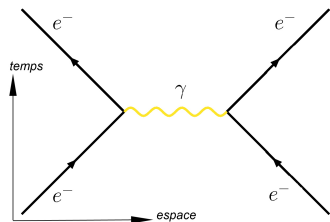
- Si tout le monde satisfait relation d'Einstein (sur couche de masse)

$$p^2 = q^2 = (p+k)^2 = (q-k)^2 = m_e^2 \quad k^2 = 0$$

donc  $2k \cdot p = 2k \cdot q = 0 = 2k(p+q)$

- Dans le ref. du centre de masse  $p^\mu + q^\mu = (E, \vec{0})$ ,  
 $2k(p+q) = 2E_\gamma E = 0$ , d'où  $E_\gamma = 0$  et  $k = (0, \vec{0})$  ???
- Par l'absurde: le photon est hors couche de masse  $k^2 \neq 0$  !

# Particules virtuelles, particules réelles



Photon, grain de lumière  
Pourtant invisible quand médiateur  
de la force électromagnétique ?

$$e^-(p) + e^-(q) \rightarrow e^-(p+k) + e^-(q-k)$$

- Si tout le monde satisfait relation d'Einstein (sur couche de masse)

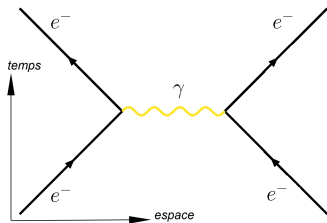
$$p^2 = q^2 = (p+k)^2 = (q-k)^2 = m_e^2 \quad k^2 = 0$$

donc  $2k \cdot p = 2k \cdot q = 0 = 2k(p+q)$

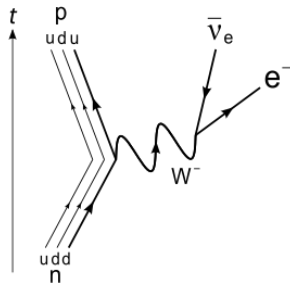
- Dans le ref. du centre de masse  $p^\mu + q^\mu = (E, \vec{0})$ ,  
 $2k(p+q) = 2E_\gamma E = 0$ , d'où  $E_\gamma = 0$  et  $k = (0, \vec{0})$  ???
- Par l'absurde: le photon est hors couche de masse  $k^2 \neq 0$  !

Particule **virtuelle** (intermédiaire, hors couche)  
 $\neq$  particule **réelle** (état initial/final, sur couche)

# Un même cadre, des interactions très différentes



- Portée infinie
- Interaction à distance, capable de créer états liés
- ... via un photon virtuel
- Médiateur de masse nulle (stable), neutre élect.



- Portée très courte
- Désintégration, en particulier désintégration  $\beta$
- ... via un boson  $W^\pm$  virtuel
- Médiateur lourd (instable), chargé électriquement

# Fin de la première partie

