

# 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

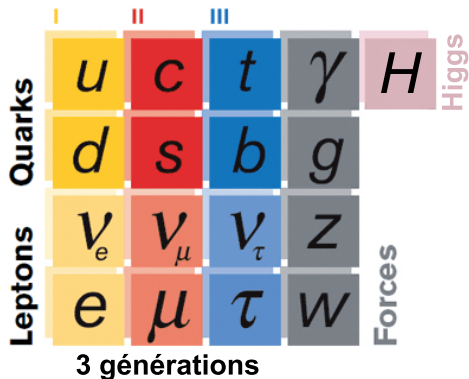
Orsay, 15 juillet 2013



# 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 Hf	59 Ta	60 W	61 Re	62 Os	63 Ir	64 Pt	65 Au	66 Hg	67 Tl	68 Pb	69 Bi	70 Po	71 At	72 Rn
87 Fr	88 Ra	89 Ac	90 U <sub>90</sub>														
				91 G	92 Pr	93 Nd	94 Pm	95 Sm	96 Eu	97 Gd	98 Tb	99 Dy	100 Ho	101 Er	102 Tm	103 Yb	104 Lu
				94 Th	95 Pa	96 U	97 Np	98 Pu	99 Am	100 Cm	101 Bk	102 Cf	103 Es	104 Fm	105 Md	106 No	107 Lw

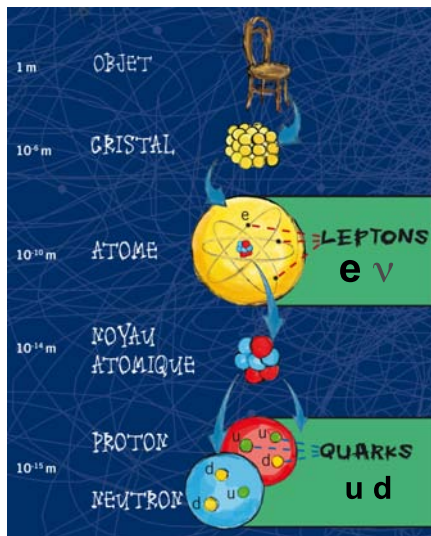
... à une autre, un siècle plus tard



# Quelle approche ?

- Approche historique ou **thématique** ?
- Plutôt orienté vers l'expérience ou **la théorie** ?
- Aujourd'hui: Ce qu'est une particule, ce qu'est une interaction
- Demain : Electromagnétisme et interaction forte
- Après-demain : Interaction faible, Higgs et ce qui reste à trouver

# La matière ordinaire



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

3 générations

Forces

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

# 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:  
par ex, top  $t$  60 000 fois plus lourd que up  $u$  ( $\simeq$  atome d'or)
- Instables:  $t$  se désintègre en quelques  $10^{-25}$  secondes
- Plusieurs voies de désintégration:  
 $t \rightarrow be^+\nu$  ( $\simeq 100\%$ ),  $t \rightarrow se^+\nu$  (0.15%),  $t \rightarrow de^+\nu$  ( $6 \times 10^{-5}$ )...

# Les forces fondamentales

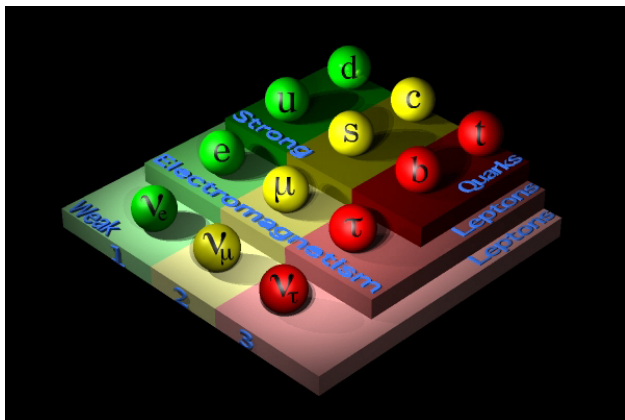
	I	II	III	
Quarks	$u$	$c$	$t$	$\gamma$
	$d$	$s$	$b$	$g$
Leptons	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	$Z$
	$e$	$\mu$	$\tau$	$W$
	3 générations			Forces

- 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
- gravitation négligeable [intensité relative au niveau subatomique]

# A chaque interaction ses particules



- Interaction faible: leptons et quarks
- Interaction électromagnétique: leptons chargés et quarks
- Interaction forte: seulement les quarks



# 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>)

$\tau$

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

$\tau$  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  $J$ =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> , $E_{cm}^{0.6} = 10.6$ GeV
1776.81 <sup>+0.25</sup> <sub>-0.23</sub> ± 0.15	81	ANASHIN	07 KEDR	6.7 pb <sup>-1</sup> , $E_{cm}^{0.6} = 3.54-3.78$ GeV
1776.61 ± 0.13 ± 0.35		<sup>1</sup> BELOUS	07 BELL	414 fb <sup>-1</sup> , $E_{cm}^{0.6} = 10.6$ 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	$E_{cm}^{0.6} = 10.6$ GeV
1776.96 <sup>+0.18+0.25</sup> <sub>-0.21-0.17</sub>	65	<sup>3</sup> BAI	96 BES	$E_{cm}^{0.6} = 3.54-3.57$ GeV
1776.3 ± 2.4 ± 1.4	11k	<sup>4</sup> ALBRECHT	92M ARG	$E_{cm}^{0.6} = 9.4-10.6$ GeV
1783 <sup>+3</sup> <sub>-4</sub>	692	<sup>5</sup> BACINO	78B DLCO	$E_{cm}^{0.6} = 3.1-7.4$ 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

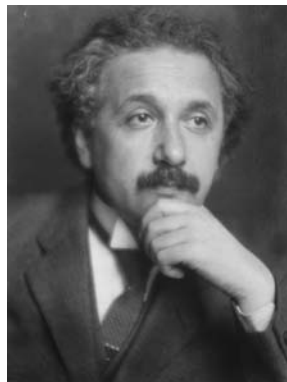
Citation: J. Beringer et al. (Particle Data Group), PR D86, 010001 (2012) (URL: <http://pdg.lbl.gov>)

## 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
	("1-prong")		
$\Gamma_2$	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

# 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)

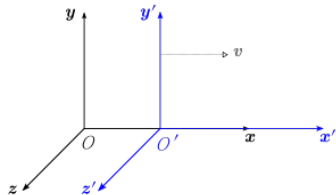
temps courts

# ABC de relativité restreinte

- 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

- 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
- Transf. de Lorentz (rotation + boosts) entre deux réfs galiléens



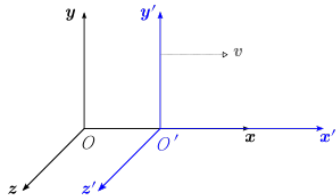
$$z' = \gamma[z - \beta ct] \quad ct' = \gamma[ct - \beta z]$$

$$\text{avec } \beta = v/c \text{ et } \gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$$

[Unités naturelles:  $c = 1$ ]

# ABC de relativité restreinte

- 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
- Transf. de Lorentz (rotation + boosts) entre deux réfs galiléens



$$z' = \gamma[z - \beta ct] \quad ct' = \gamma[ct - \beta z]$$

$$\text{avec } \beta = v/c \text{ et } \gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$$

[Unités naturelles:  $c = 1$ ]

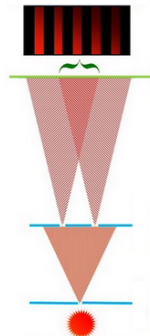
- 4-vecteurs position  $x^\mu = (t, x, y, z)$ , impulsion  $p^\mu = (E, p_x, p_y, p_z)$
- Quantités invariantes sous transformation de Lorentz

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

- Invariant important:  $p^2 = E^2 - \vec{p}^2 = m^2 \quad [E^2 = \vec{p}^2 c^2 + m^2 c^4]$

# ABC de mécanique quantique

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

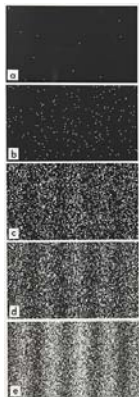


# ABC de mécanique quantique

- 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 agissant sur ce vecteur

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

[Unités naturelles  $\hbar = 1$ ]

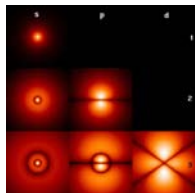
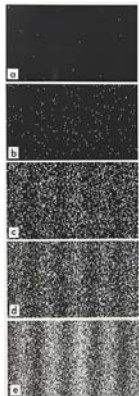


# ABC de mécanique quantique

- 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 agissant sur ce vecteur

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

[Unités naturelles  $\hbar = 1$ ]

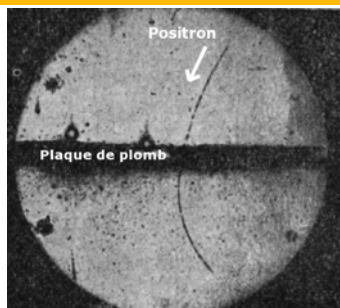


Equation de Schrödinger

$$\frac{\vec{p}^2}{2m} + V(r) = E \longrightarrow -\frac{1}{2m}\vec{\nabla}^2\psi + V(r)\psi = i\frac{\partial}{\partial t}\psi$$



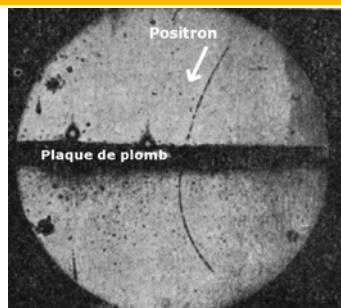
# Une union impossible à éviter...



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**

# Une union impossible à éviter...



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

$$E = p^2/(2m) \rightarrow E^2 = p^2 + m^2$$

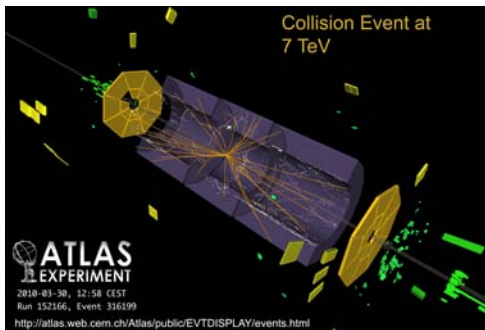
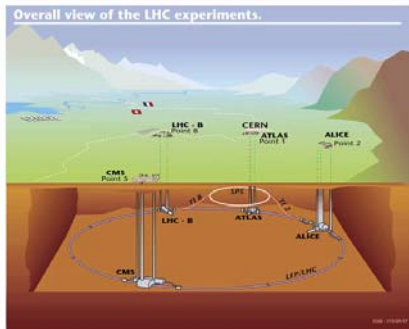
- Solution  $E < 0$  vue comme **anti-particule**
- Indispensable pour équivalence

Énergie ( $E = 2m_e c^2$ )

↔ Masse (paire particule/antiparticule)



# ... et à la base des expériences



- 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

# Particules sans interactions

- En mécanique quantique

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

- Généralisation relativiste

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

# Particules sans interactions

- En mécanique quantique

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

- Généralisation relativiste

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

- 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

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

- Généralisation relativiste

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

- 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

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

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

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0 \quad \{\gamma^\mu, \gamma^\nu\} = 2g^{\mu\nu} I_4$$

De tels  $\gamma^\mu$  forment des matrices, en fait  $4 \times 4$

$$\gamma^0 = \begin{pmatrix} 0 & I_2 \\ I_2 & 0 \end{pmatrix} \quad \vec{\gamma} = \begin{pmatrix} 0 & \vec{\sigma} \\ -\vec{\sigma} & 0 \end{pmatrix}$$

avec les matrices de Pauli

$$\vec{\sigma} = [\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3] = \left[ \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \right]$$

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

- 2 : Orientation du spin (up et down)
- 2 : Particle vs. antiparticle

# 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

⇒ 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

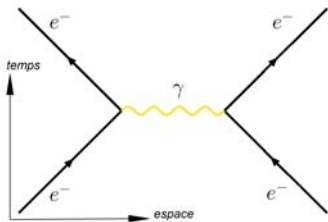
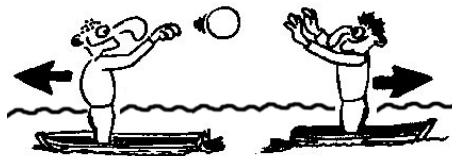
- Pour spin 1/2 massif, dépend du référentiel

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

Polarisation : Cousine de l'hélicité pour spin 1      [ $\epsilon \cdot p = 0, \epsilon^2 = -1$ ]

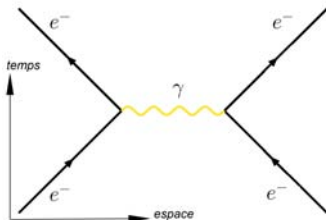
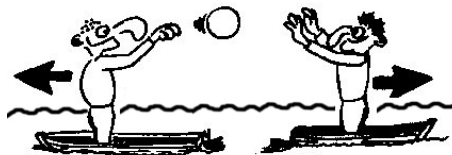
- 2 polarisations pour particule de masse nulle (photon)
- 3 polarisations pour particule massive

# Forces fondamentales et bosons médiateurs



- Echange ponctuel de particules = action à distance

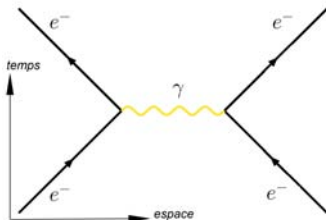
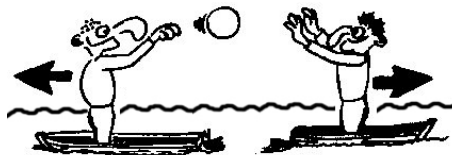
# Forces fondamentales et bosons médiateurs



- Echange ponctuel de particules = action à distance
- Particule scalaire, compos. statique, sym. sphérique  $\phi(x_\mu) \equiv U(r)$

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

# Forces fondamentales et bosons médiateurs

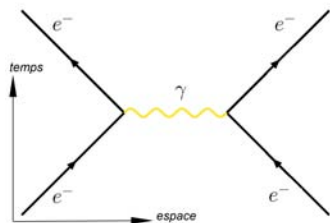


- Echange ponctuel de particules = action à distance
- Particule scalaire, compos. statique, sym. sphérique  $\phi(x_\mu) \equiv U(r)$

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

- 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 ( $r_0 = \hbar c/M = 2 \cdot 10^{-18} \text{ m}$ )

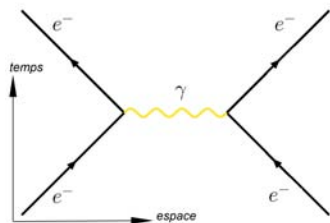
# Particules virtuelles, particules réelles



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 ?

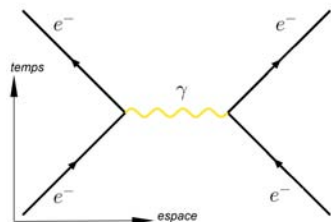
$$e^-(p) + e^-(q) \rightarrow e^-(p+k) + e^-(q-k)$$

- si tout le monde sur couche de masse

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

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

# 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 sur couche de masse

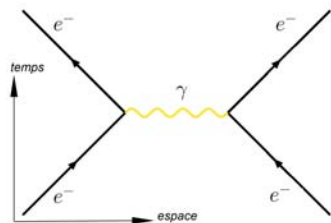
$$p^2 = q^2 = (p+k)^2 = (q-k)^2 = m_e^2 \quad k^2 = 0$$

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 ?

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

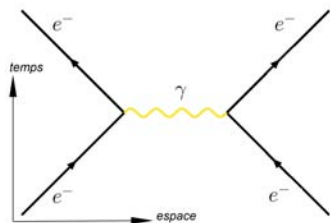
- si tout le monde sur couche de masse

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

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 sur couche de masse

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

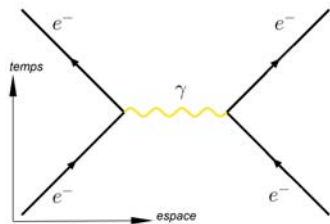
donc  $2k \cdot p = 2k \cdot q = 0 = 2k(p+q)$

- Dans la 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  $k = (0, \vec{0})$  ???

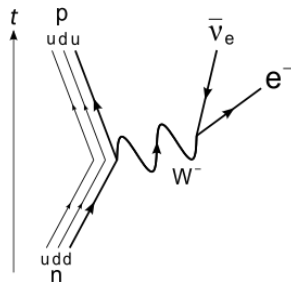
- Par l'absurde: le photon est hors couche de masse  $k^2 \neq 0$  !

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

# Interaction électromagnétique, interaction faible



- 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

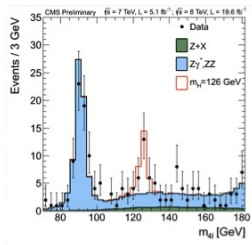
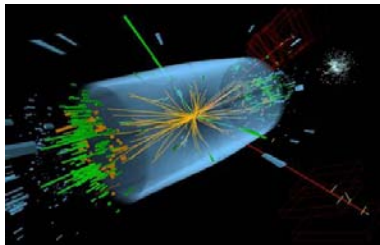
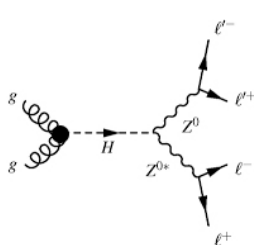
# Résonances et autres bosses

Avec une source  $(\partial_\mu \partial^\mu + m^2)\phi(x) = j(x) \implies \tilde{\phi}(p) = \frac{1}{m^2 - p^2} \tilde{j}(p)$

Propagateur qui décrit l'évolution de la particule

# Résonances et autres bosses

Avec une source  $(\partial_\mu \partial^\mu + m^2)\phi(x) = j(x) \implies \tilde{\phi}(p) = \frac{1}{m^2 - p^2} \tilde{j}(p)$   
**Propagateur** qui décrit l'évolution de la particule



- Probabilité  $P \propto \left| g_{Hgg} \times \frac{1}{m^2 - p^2} \times g_{HZZ} \right|^2$
- Particule instable de temps de vie  $\tau$

$$\psi \propto e^{-imt} \rightarrow e^{-t/(2\tau)} e^{-imt} \implies m \rightarrow m - i\Gamma/2 \quad \Gamma = 1/\tau$$

- Probabilité  $P$  augmente pour  $p^2 = (p_Z + p_{Z^*})^2 \simeq m^2$ ,  
selon une courbe de résonance de largeur  $\Gamma$

# Les particules connues, quid des interactions ?

*Emmy Noether*



**Symétries**

Applications à la physique des particules  
dans les prochains cours

# Fin de la première partie

