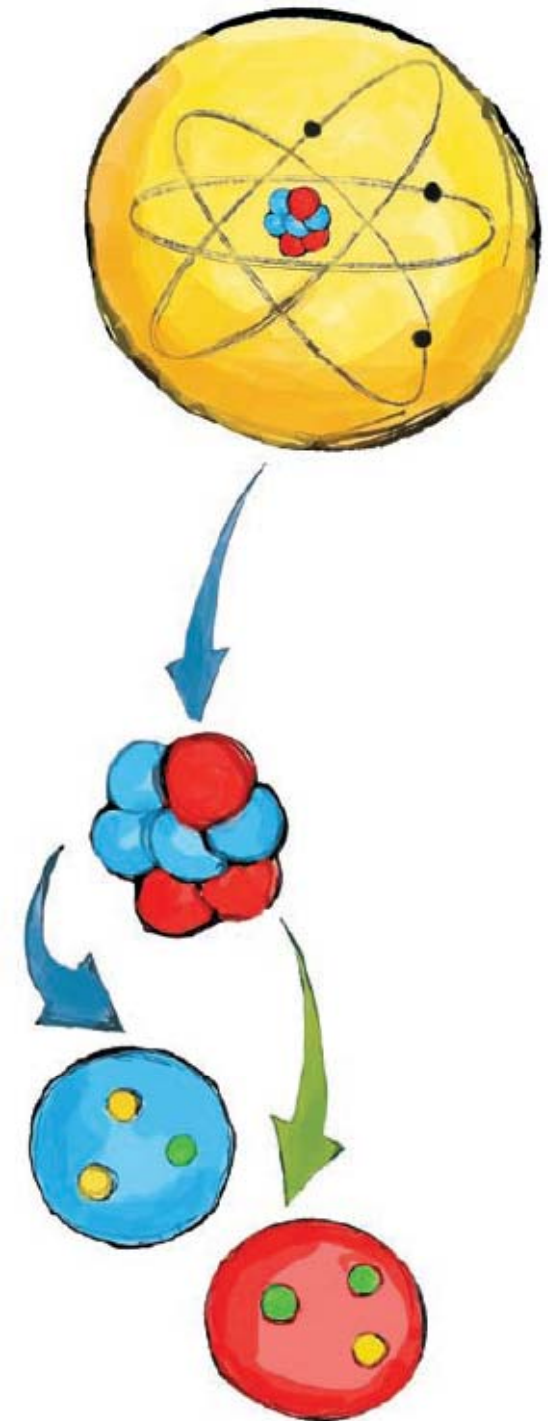


Particules et Interactions

Nikola Makovec

LAL/IN2P3/CNRS

Université Paris XI



Einstein in the 21st Century

Particules élémentaires : blocs fondamentaux qui constituent l'ensemble de la matière de l'univers



- De l'atome aux particules élémentaires
- Les interactions
- Le Modèle Standard de la Physique des Particules

Les particules

Voyage au coeur de la matière

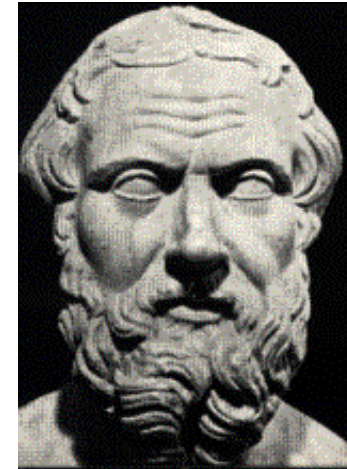
Les atomes

Démocrite (-500 av. JC):

Toute chose est faite de petits grains incassables et de vide : **atomos**


John Dalton (1808):

1 g de dihydrogène réagit avec 8 g de dioxygène pour former 9 g d'eau. Selon Dalton, ces résultats s'expliquent si l'on suppose que la matière est constituée d'atomes



Periodic Table of the Elements 2005

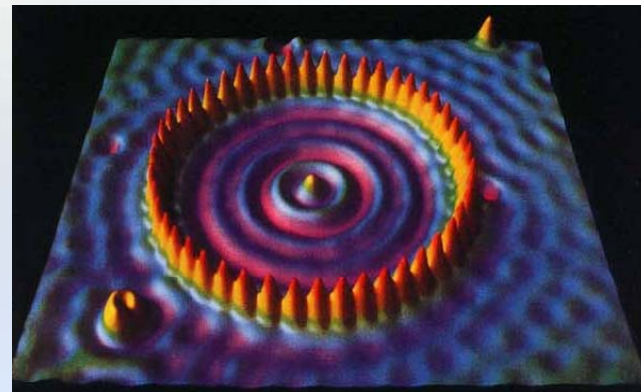
1 H 1.01																	2 He 4.00																		
3 Li 6.94	4 Be 9.01																	19 K 39.10	20 Ca 40.08	21 Sc 44.96	22 Ti 47.87	23 V 50.94	24 Cr 52.00	25 Mn 54.94	26 Fe 55.85	27 Co 58.93	28 Ni 58.69	29 Cu 63.55	30 Zn 65.41	31 Ga 69.72	32 Ge 72.64	33 As 74.92	34 Se 78.96	35 Br 79.90	36 Kr 83.80
11 Na 22.99	12 Mg 24.31																	37 Rb 85.47	38 Sr 87.62	39 Y 88.91	40 Zr 91.22	41 Nb 92.91	42 Mo 95.94	43 Tc (98)	44 Ru 101.07	45 Rh 102.91	46 Pd 106.42	47 Ag 107.87	48 Cd 112.41	49 In 114.82	50 Sn 118.71	51 Sb 121.76	52 Te 127.60	53 I 126.90	54 Xe 131.29
55 Cs 132.91	56 Ba 137.33	57 La 138.91	58 Ce 140.12	59 Pr 140.91	60 Nd 144.24	61 Pm (145)	62 Sm 150.36	63 Eu 151.97	64 Gd 157.25	65 Tb 158.93	66 Dy 162.50	67 Ho 164.93	68 Er 167.26	69 Tm 168.93	70 Yb 173.04	71 Lu 174.97	72 Hf 178.49	73 Ta 180.95	74 W 183.84	75 Re 186.21	76 Os 190.23	77 Ir 192.22	78 Pt 195.08	79 Au 196.97	80 Hg 200.59	81 Tl 204.38	82 Pb 207.2	83 Bi 208.98	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)				
87 Fr (223)	88 Ra (226)	89 Ac (227)	90 Th 232.04	91 Pa 231.04	92 U 238.03	93 Np (237)	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)	103 Lr (262)																			



Molecular
Research
Institute

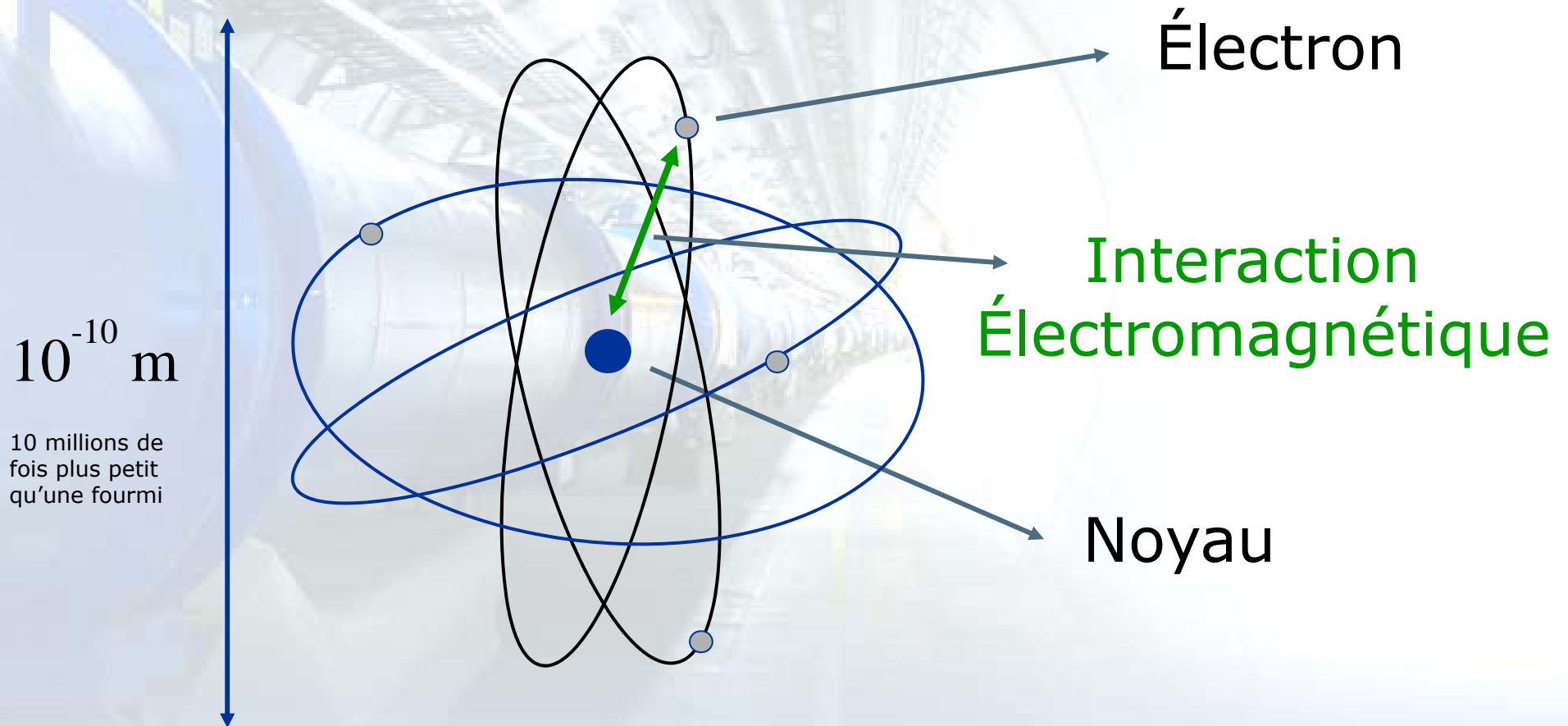
Mendeleiev (1870):

Relations entre les propriétés et les poids atomiques des éléments



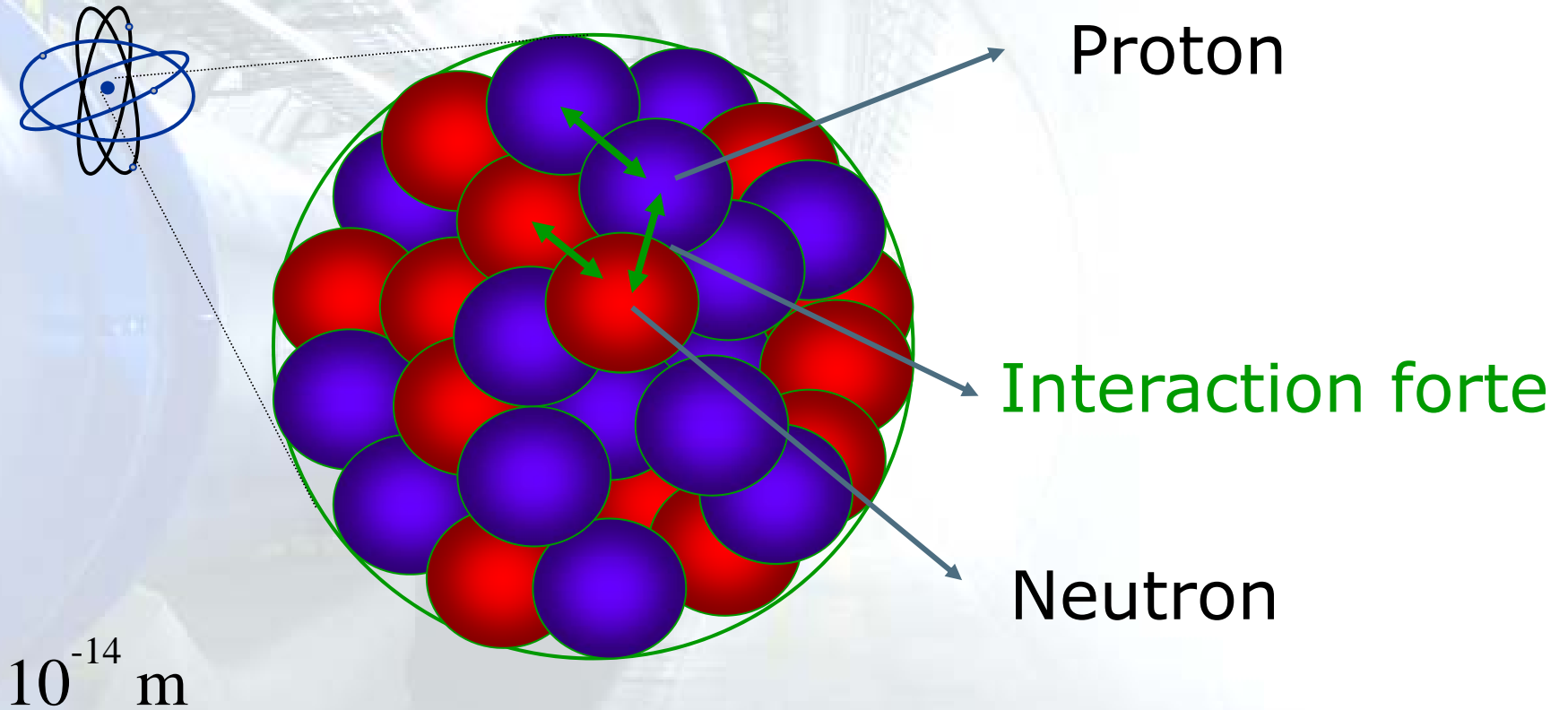
Structure de l'atome

6



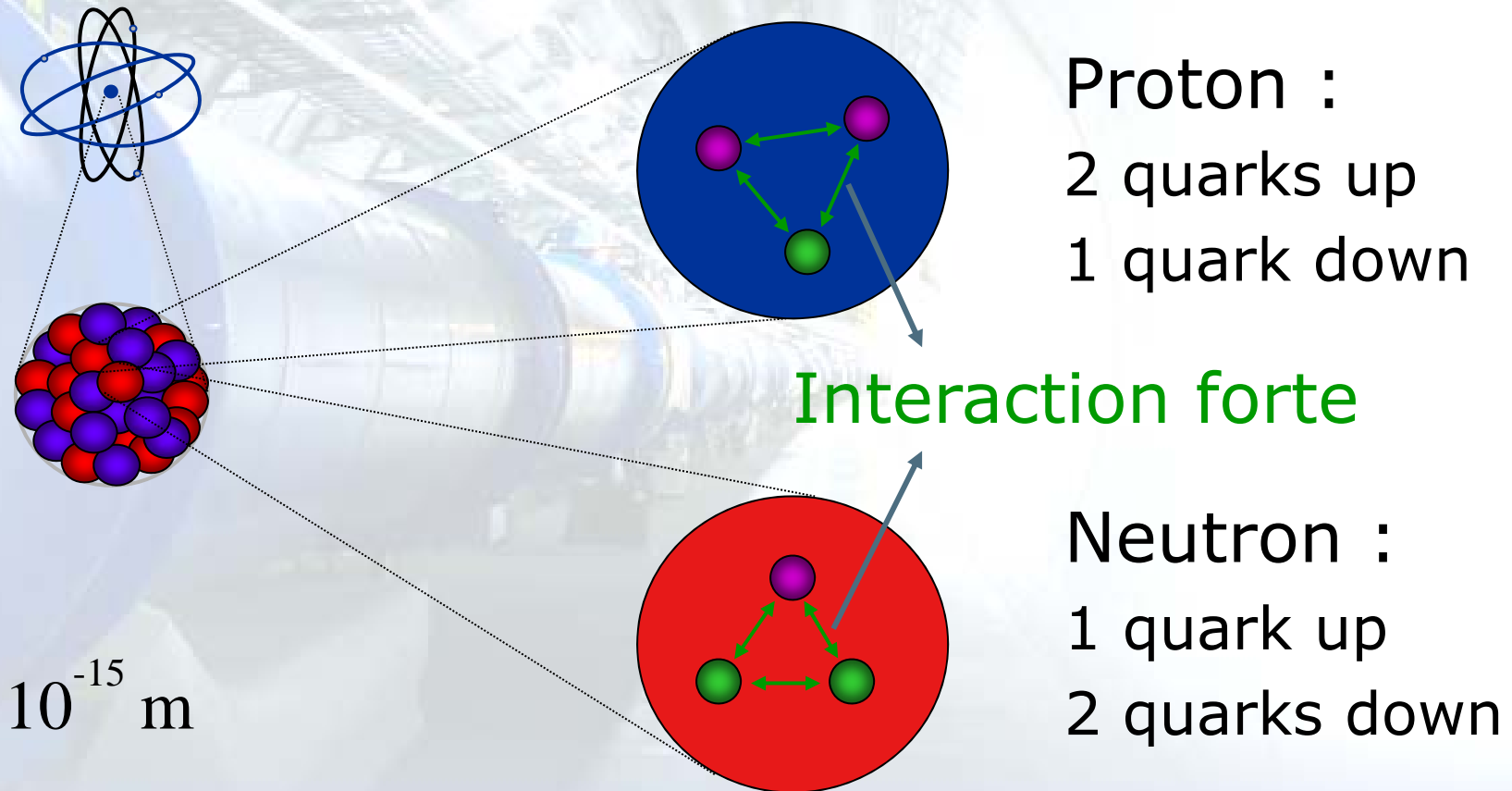
Structure du noyau

7



Structure des protons et des neutrons

8



Hadrons = particules faites de quarks
Ex: protons, neutrons,...

Particules et antiparticules

9

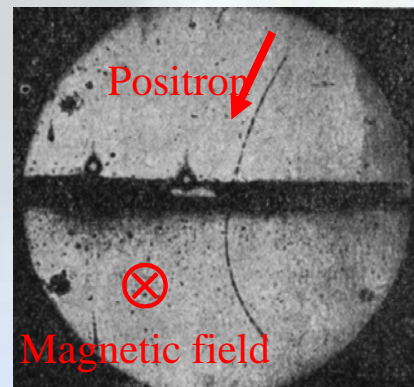
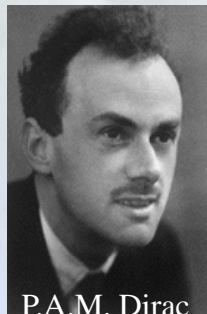
- A toute particule est associée une antiparticule
 - Masse, temps de vie, spin identiques
 - Nombres quantiques opposés

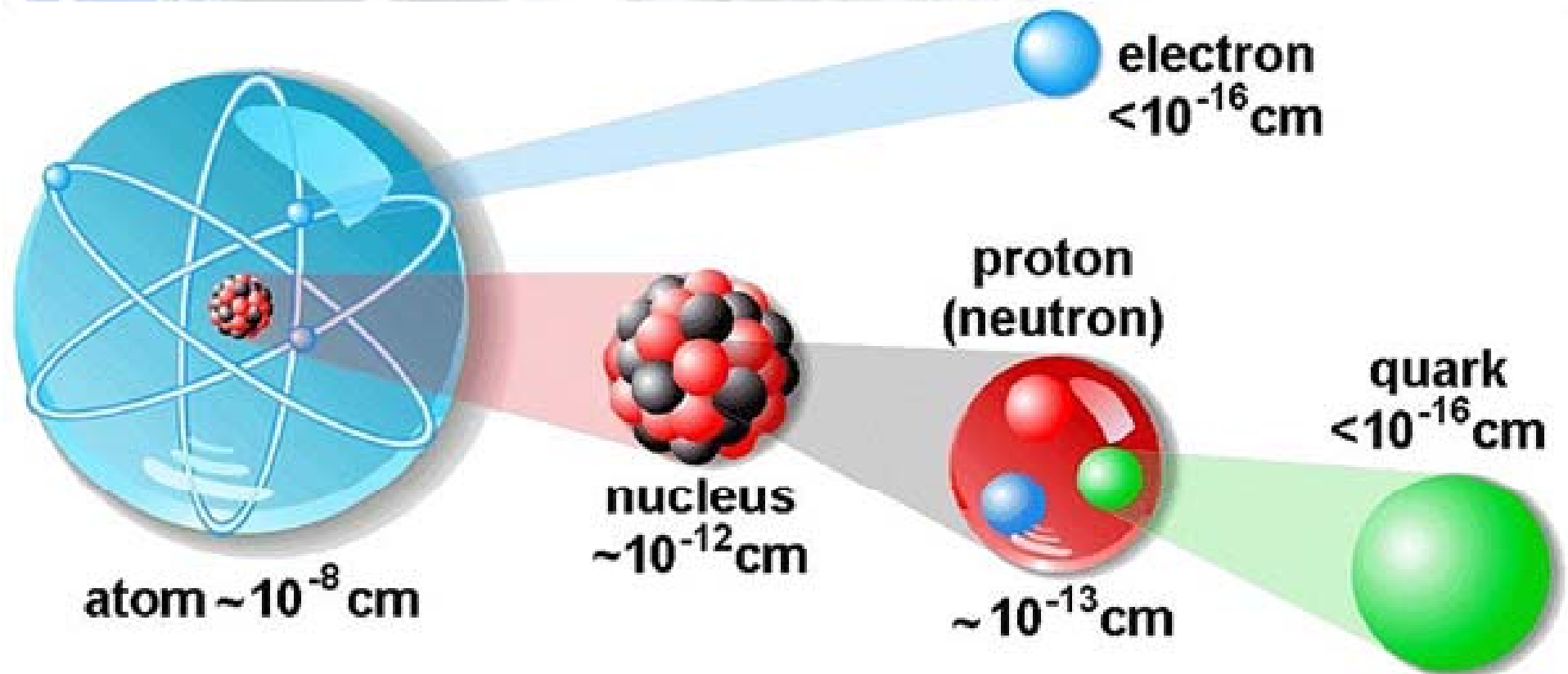
■ L'électron:

- Charge négative
- Découverte par Thomson (1897)
- Plus ancienne particule élémentaire

■ Le positron:

- Charge positive
- Existence prédite par Dirac (1928)
- Découverte par Anderson (1932)





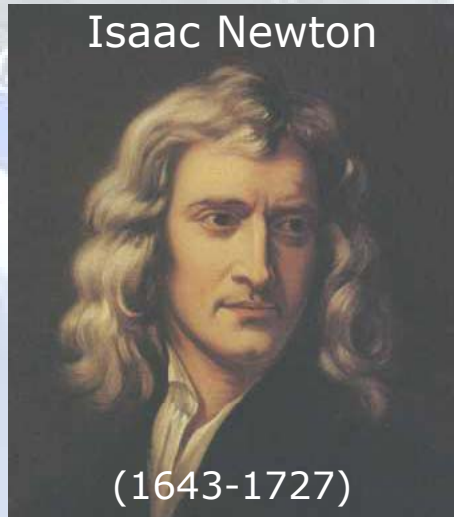
A background image of a tunnel with blue pipes and a train. The text "Les interactions" is overlaid in red.

Les interactions

Les interactions

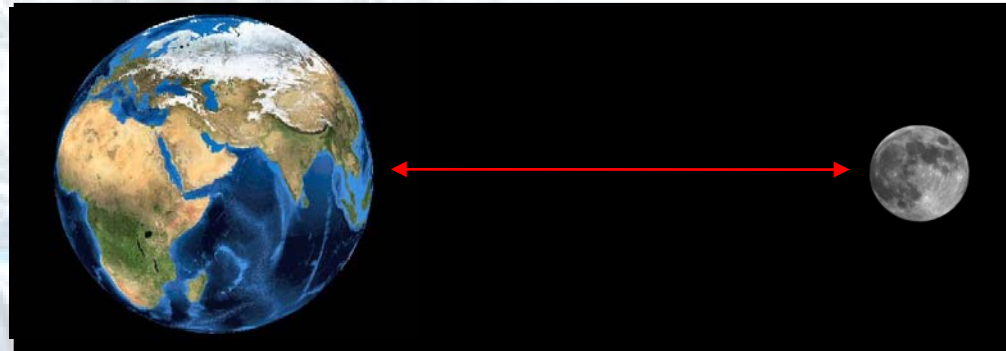
12

Isaac Newton

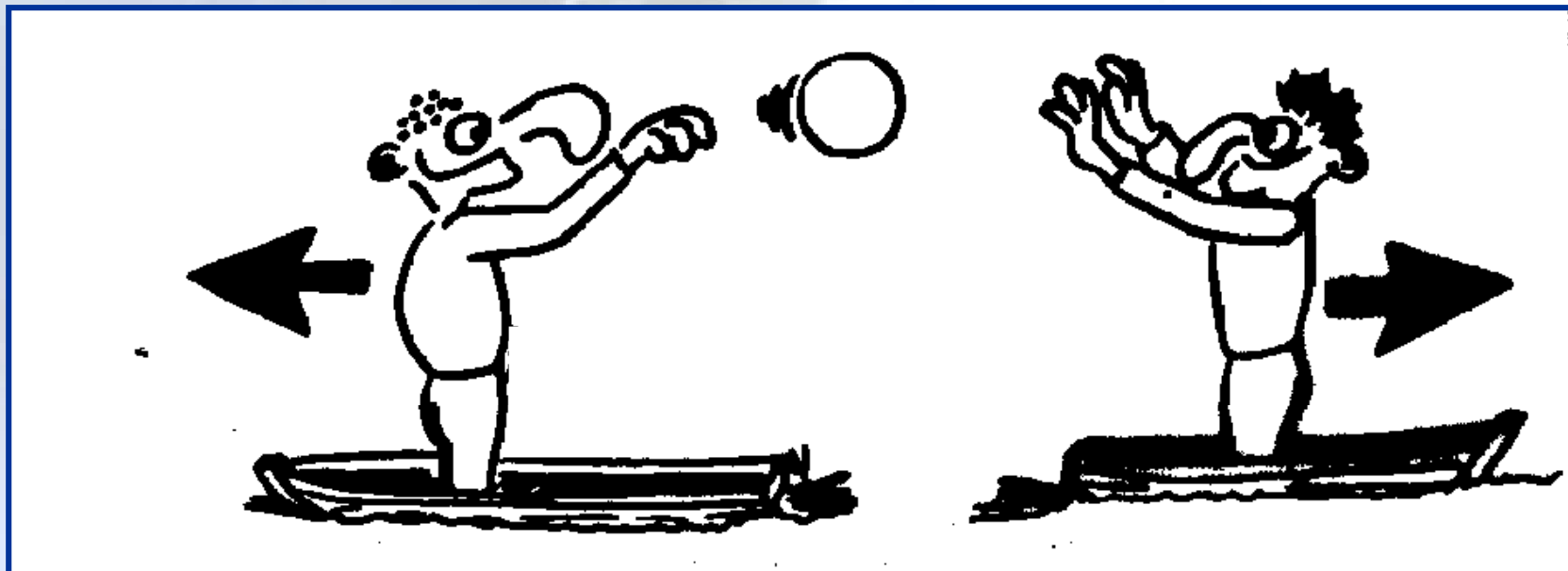


(1643-1727)

Vision « classique » :
Action instantanée à distance



Vision « moderne » : échange de particules

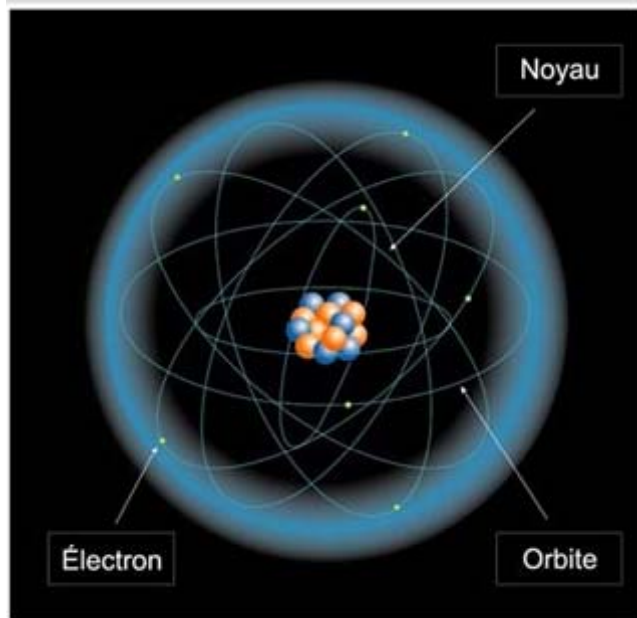


L'interaction électromagnétique

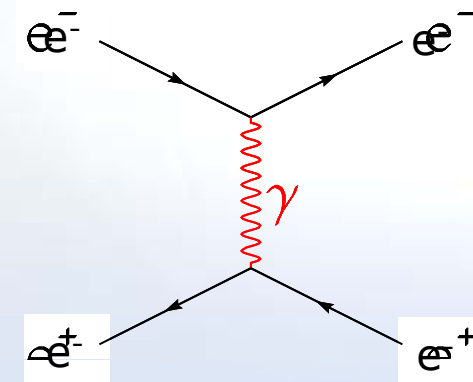
13

Responsable des phénomènes
électriques et magnétiques :
aimantation, lumière,
cohésion des atomes,...

Répulsion entre objets de
charges électriques identiques
(attraction si charges opposées)

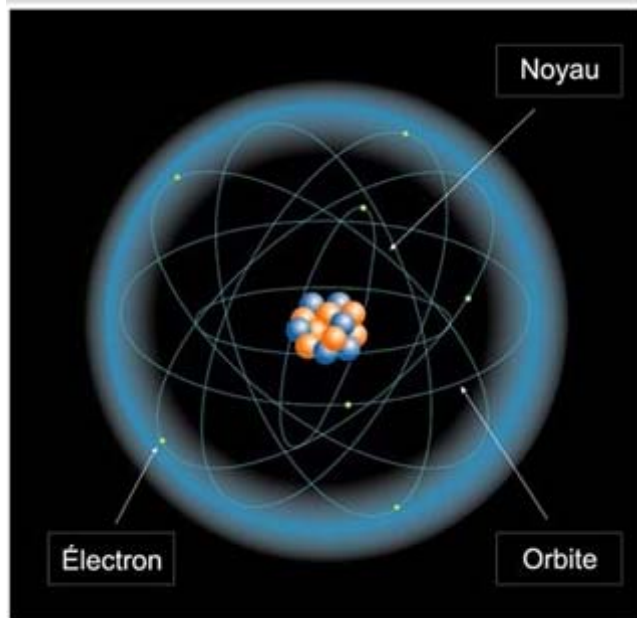
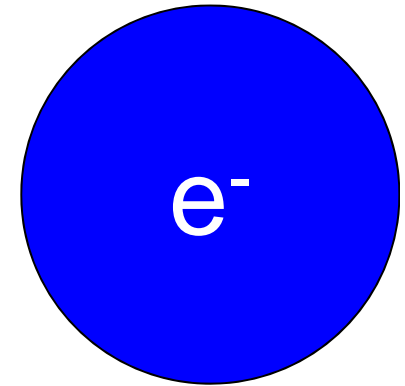
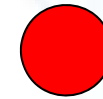


Médiateur : **photon**

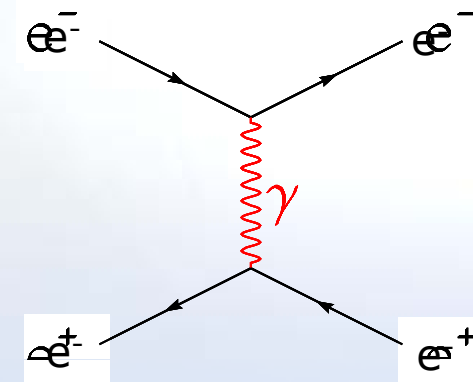


L'interaction électromagnétique

14



Médiateur : **photon**



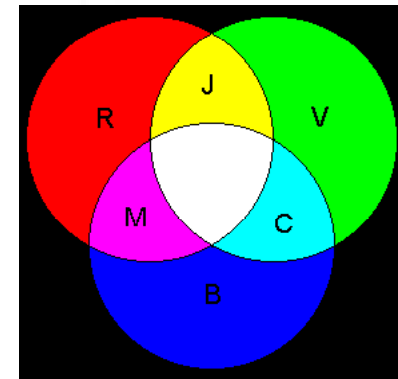
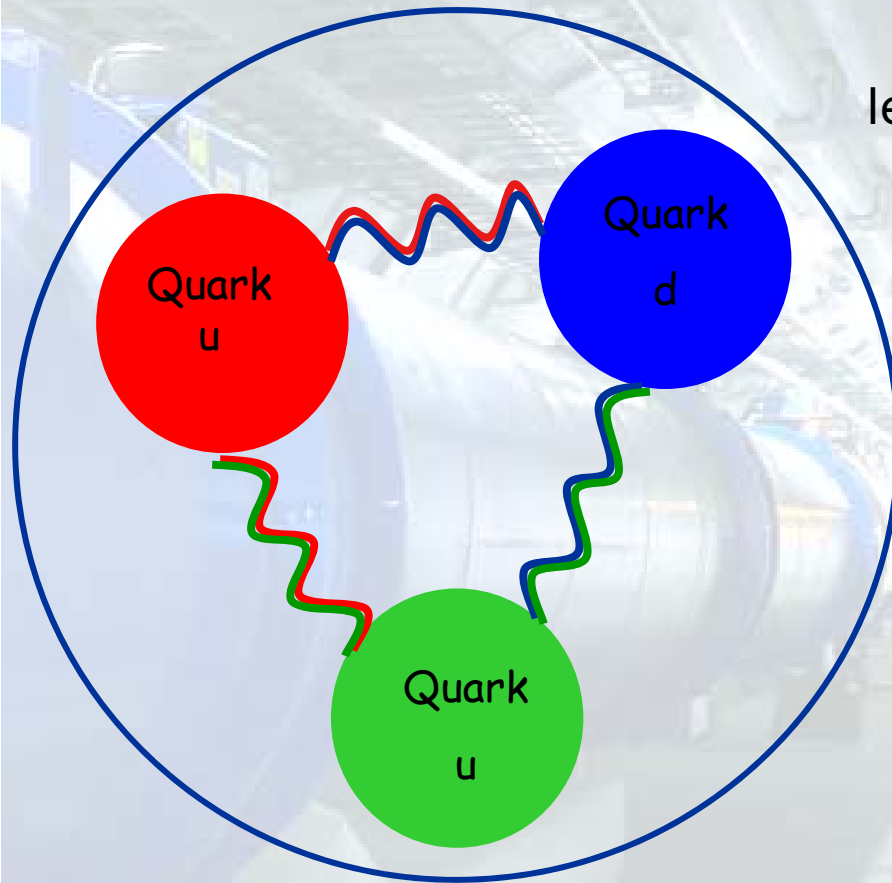
L'interaction forte

15

En plus de la charge électrique,
les quarks portent une charge de couleur:

Bleu vert rouge

Ainsi le proton est "incolore"



Médiateurs: **gluons**

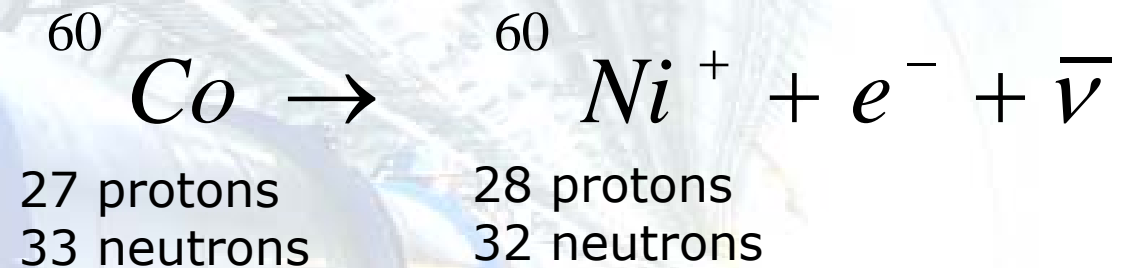
Les gluons « **collent** » les quarks entre eux : ils sont confinés à l'intérieur des hadrons (proton, neutron,...)

⇒ Stabilité des noyaux

La radioactivité β

16

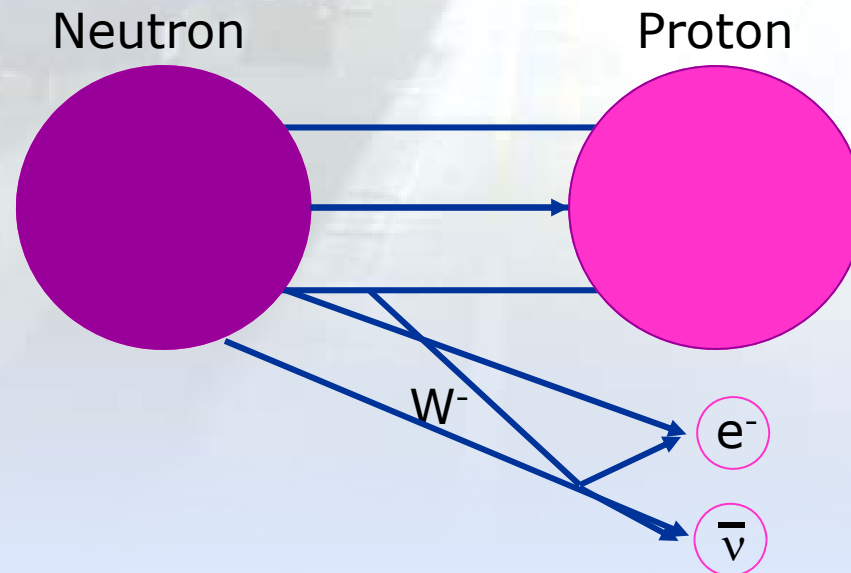
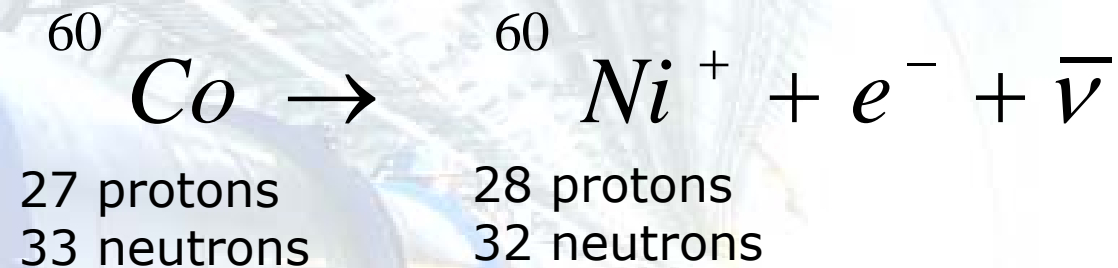
Radioactivité: Phénomène physique naturel au cours duquel des **noyaux atomiques instables**, se **transforment spontanément** en dégageant de l'**énergie** sous forme de **rayonnements** divers.



La radioactivité β

17

Radioactivité: Phénomène physique naturel au cours duquel des **noyaux atomiques instables**, se **transforment spontanément** en dégageant de l'**énergie** sous forme de **rayonnements** divers.

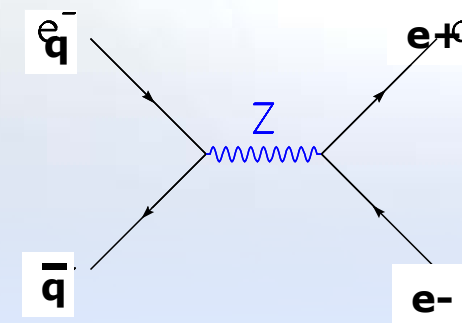
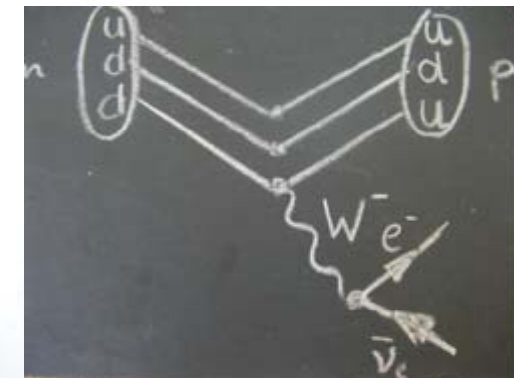
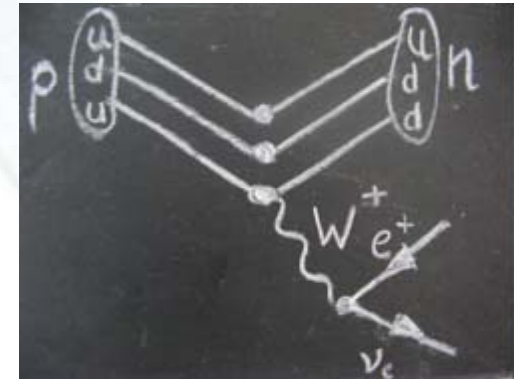


L'interaction faible

18

Médiateurs : **W^+ , W^- et Z**

- Radioactivité β (désintégration):
 - Boson W
- Découverte des bosons W^+ , W^- et Z au CERN en 1983
- Avec un champ 10^9 fois plus faible que celui de l'interaction forte, son influence est limitée au noyau atomique. Cette courte portée est expliquée par la grande masse des bosons vecteurs de l'interaction faible.



Récapitulatif

19

Les quarks

Les leptons

Matière stable

Matière instable

 up	 down	 electron	 neutrino e
 charm	 strange	 muon	 neutrino μ
 top	 beauty	 tau	 neutrino τ

Les fermions



Les bosons



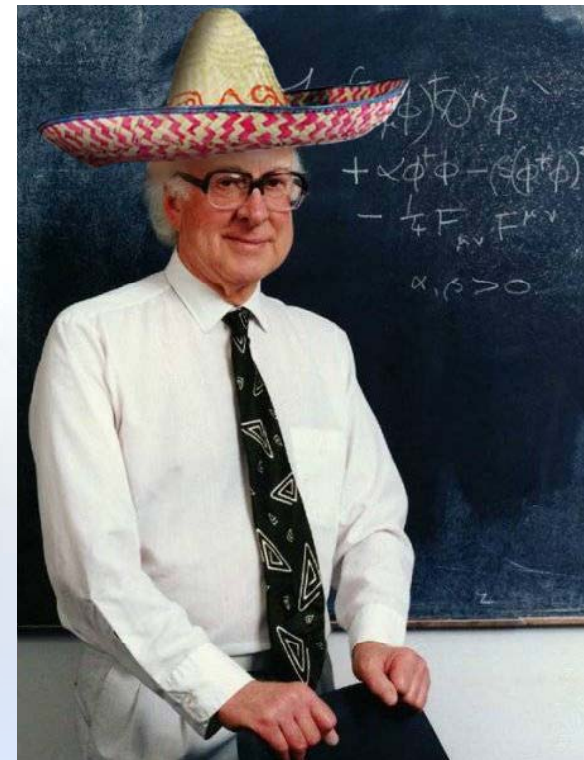
Le Modèle Standard

$$\begin{aligned}
\mathcal{L}_{\text{SM}} = & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e + \frac{1}{2}ig_s^2 (\bar{q}_i^\sigma \gamma^\mu q_j^\sigma) g_\mu^a + \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{G}^a G^b g_\mu^c \\
& -\partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - \frac{1}{2}m_h^2 H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- \\
& -M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \frac{1}{2c_w^2} M \phi^0 \phi^0 - \beta_h \left[\frac{2M^2}{g^2} + \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right] + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h \\
& -igc_w \left[\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+) \right] \\
& -igs_w \left[\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+) \right] \\
& -\frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\nu^+ W_\nu^- + \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^+ W_\nu^- + g^2 c_w^2 \left(Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- - Z_\mu^0 Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^- \right) + g^2 s_w^2 \left(A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\mu W_\nu^+ W_\nu^- \right) \\
& + g^2 s_w c_w \left[A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^- \right] - g\alpha \left[H^3 + H\phi^0 \phi^0 + 2H\phi^+ \phi^- \right] \\
& -\frac{1}{8}g^2 \alpha_h \left[H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2 \right] - gMW_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2}g \frac{M}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H \\
& -\frac{1}{2}ig \left[W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0) \right] + \frac{1}{2}g \left[W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) - W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu H) \right] \\
& + \frac{1}{2}g \frac{1}{c_w} Z_\mu^0 (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) - ig \frac{s_w^2}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + igs_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- \\
& - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + igs_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{4}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- \left[H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^- \right] - \frac{1}{4}g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 [H^2 + (\phi^0)^2 \\
& + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{2}g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) \\
& + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - g^1 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- - \bar{e}^\lambda (\gamma \partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda \gamma \partial \nu^\lambda \\
& - \bar{u}_j^\lambda (\gamma \partial + m_u^\lambda) u_j^\lambda - \bar{d}_j^\lambda (\gamma \partial + m_d^\lambda) d_j^\lambda + igs_w A_\mu [-(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \frac{1}{3}(\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda)] \\
& + \frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 \left[(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5) u_j^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 - \gamma^5) d_j^\lambda) \right] \\
& + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ \left[(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda\kappa} d_j^\kappa) \right] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- \left[(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\kappa C_{\lambda\kappa}^\dagger \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^\lambda) \right] \\
& + \frac{ig}{2\sqrt{2}} \frac{m_e^\lambda}{M} \left[-\phi^+ (\bar{\nu}^\lambda (1 - \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (\bar{e}^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) \right] - \frac{g}{2} \frac{m_e^\lambda}{M} \left[H(\bar{e}^\lambda e^\lambda) + i\phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda) \right]
\end{aligned}$$

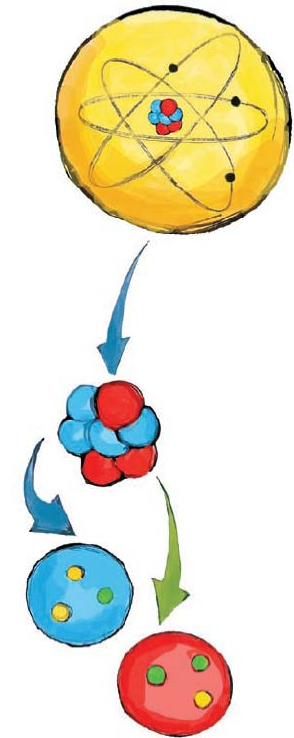
- Il décrit dans un même cadre les **particules élémentaires** et leurs **interactions** :
 - Électromagnétique (le photon)
 - Faibles (W et Z)
 - Fortes (gluons)
 - Mais pas la gravitation ☹
- Il a été élaboré dans les années **1960-70**
- Il a été testée aux **accélérateurs de particules**, en particulier au CERN.
 - L'accord entre le Modèle Standard et les mesures est excellent
- Il est basé sur:
 - Relativité restreinte
 - $E = mc^2$
 - Mécanique quantique
 - Description du monde microscopique
 - Symétrie
 - Exemple de symétrie : $\cos(-x) = \cos(x)$



- **Masse** : caractéristique d'un corps à résister aux accélérations
 - Plus un corps est massif plus il est difficile de le mettre en mouvement
- 2 types de particules:
 - Une particule de **masse nulle** voyage à la **vitesse de la lumière**:
 - Ex : le photon
 - Une **particule massive** voyage à une vitesse **inférieure** à la vitesse de la lumière
 - Qu'est ce qui ralentit cette particule?
 - Interaction avec un autre type de particule:
 - Le **boson de Higgs**
- Pierre angulaire du Modèle Standard mais il n'a toujours pas été découvert!



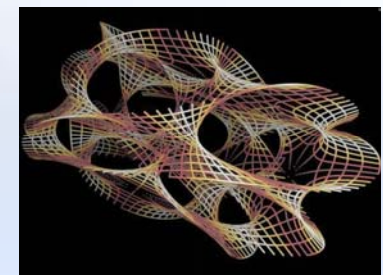
- Particules de matières: **fermions**
 - électron, muon, tau, neutrino, quarks,...
 - Et leurs antiparticules
- Particules d'interactions: **bosons**
 - Photon: interaction électromagnétique
 - Boson Z/W: interaction faible
 - Gluon: interaction forte
- Le **boson de Higgs** est la particule qui permettrait d'expliquer la masse de toutes les autres particules.
- Le **Modèle Standard** est le cadre théorique qui permet de décrire les particules et leurs interactions



Questions ouvertes

25

- Quel mécanisme donne leur masse aux particules?
 - Boson de Higgs existe t'il?
- Les forces de la nature ont-elles une origine commune?
- Pourquoi l'antimatière est-elle si rare ?
- Comment décrire introduire la gravité dans le modèle standard?
- Notre espace-temps a-t-il plus de quatre dimensions ?
-





Back Up

Caractéristiques d'une particule

27

- **Masse m**
 - Energie de masse $E=mc^2$
- **Spin S**
 - Lié à la rotation de la particule sur elle-même
- **Nombres quantiques**
 - Charge électrique
 - « Couleur »
 - ...
- Muon: « cousin » de l'électron mais 200 fois plus lourd
- Tau: « cousin » de l'électron mais 3400 fois plus lourd
- **Temps de vie τ**
 - Particules stables (électron)
 - Instables (Muon/tau)
 - Largeur de désintégration $\Gamma=\hbar/\tau$



electron



muon



tau

La gravité : une interaction à part...

28

Explique le phénomène de **pesanteur**
(chute des corps terrestres)

Explique les orbites des planètes du
Système Solaire... mais aussi les
galaxies et l'évolution de l'Univers !



Portée : **infinie...**

Médiateur : **graviton ?**
(non encore découvert)

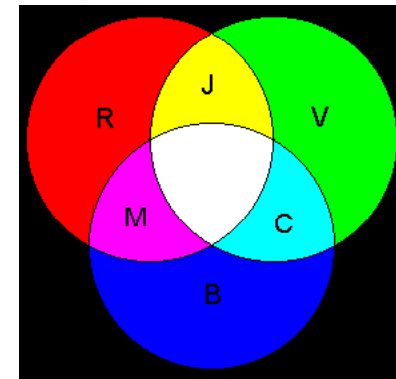
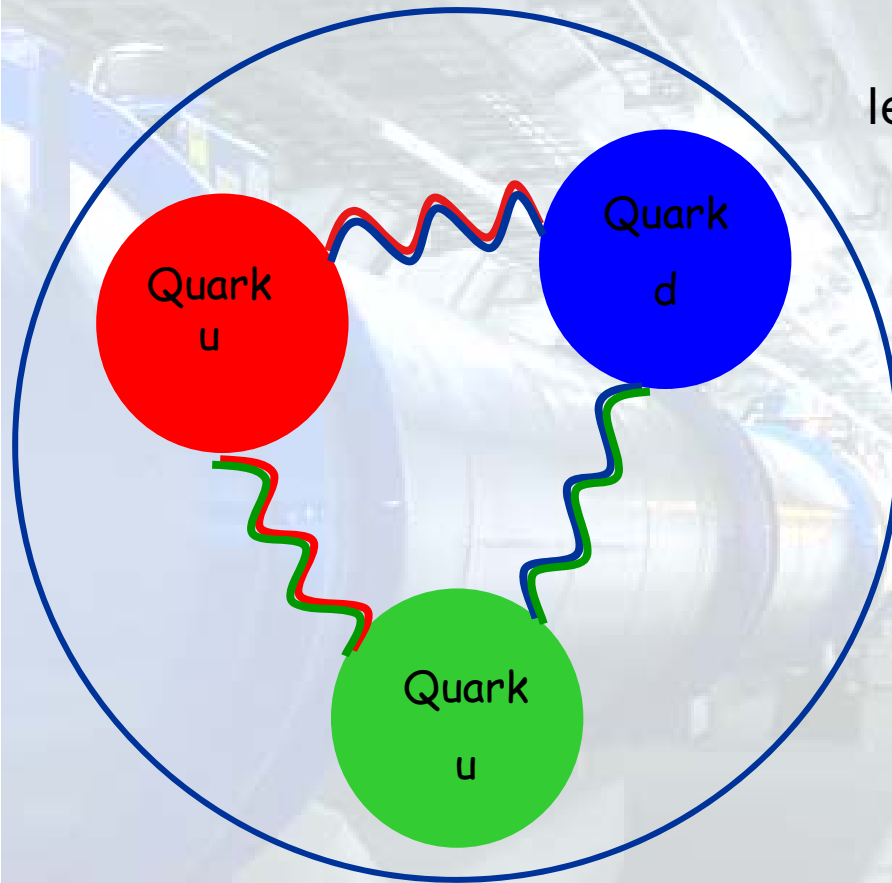
L'interaction forte

29

En plus de la charge électrique, les quarks portent une charge de couleur:

Bleu vert rouge

Ainsi le proton est "incolore"



Médiateurs: **gluons**

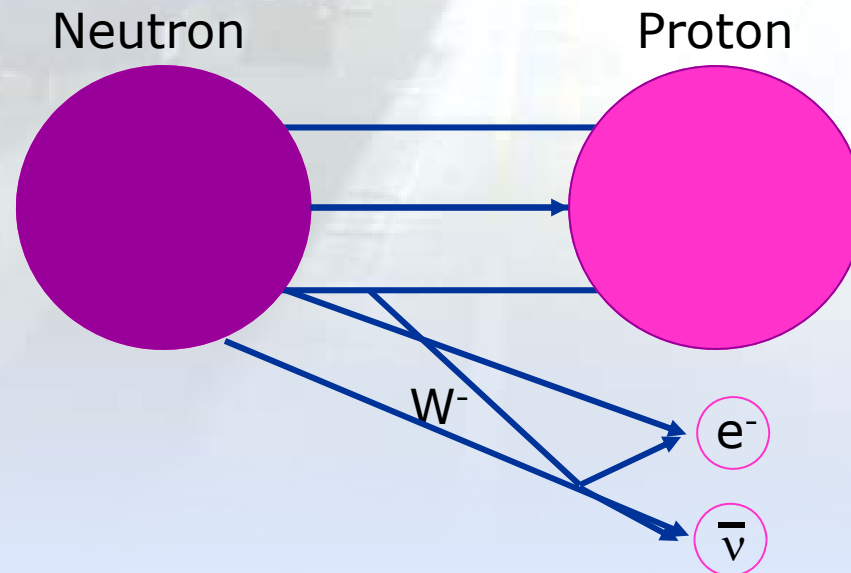
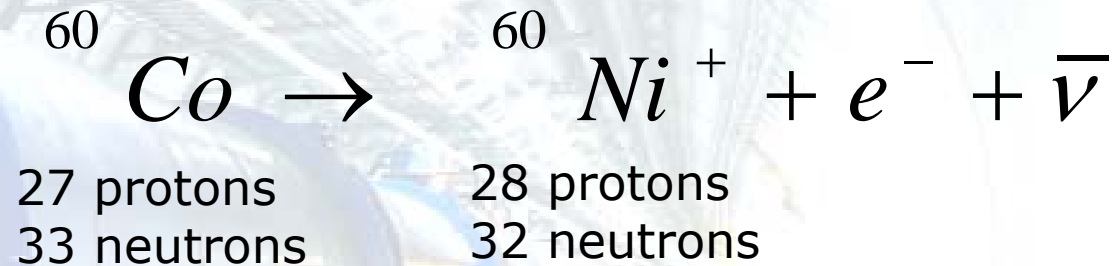
Les gluons « **collent** » les quarks entre eux : ils sont confinés à l'intérieur des hadrons (proton, neutron,...)

⇒ Stabilité des noyaux

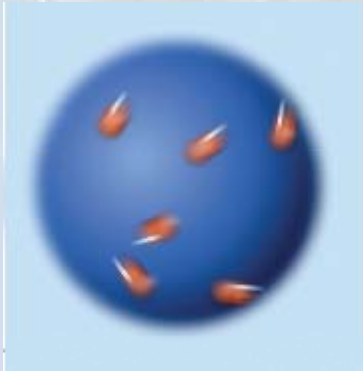
La radioactivité β

30

Radioactivité: Phénomène physique naturel au cours duquel des noyaux atomiques instables, se transforment spontanément en dégageant de l'énergie sous forme de rayonnements divers.



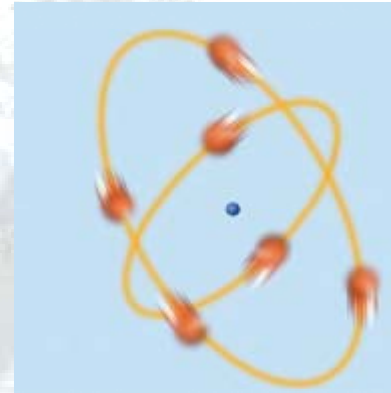
What does an atom look like?



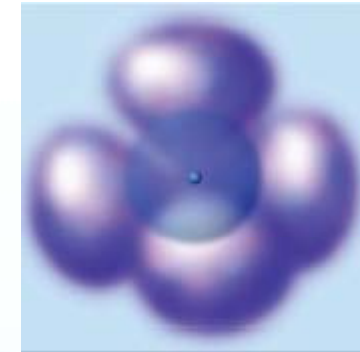
Thomson (1903)
« Plum-Pudding »



Rutherford (1909)



Bohr (1913)

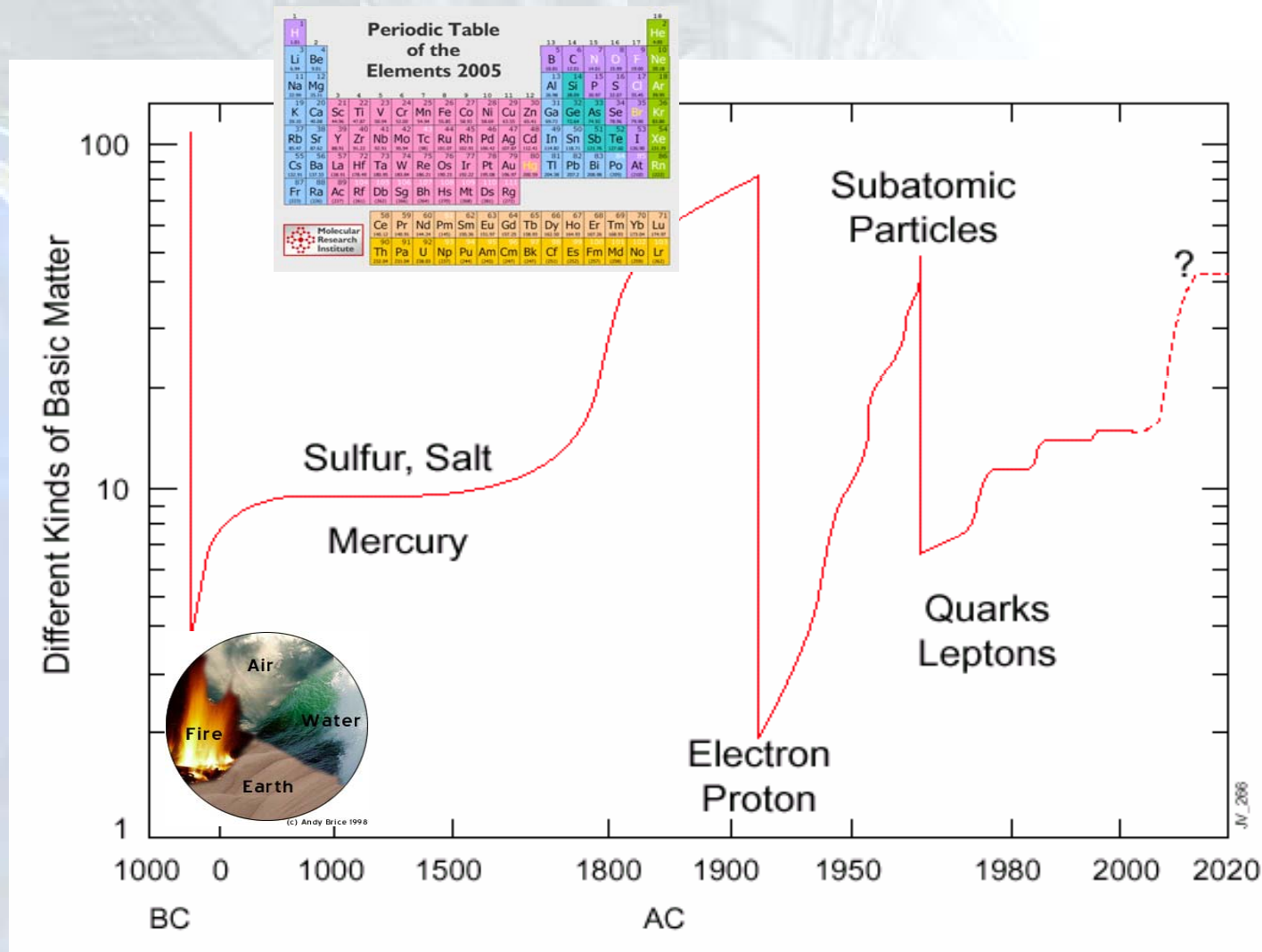


« Modern » atom

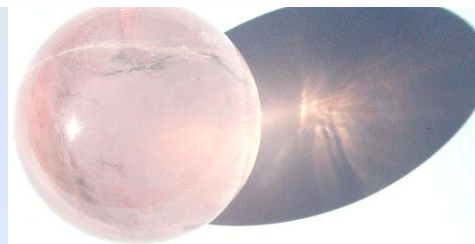
- Electrons are living on different energy levels
- They are more like clouds than point particles
→ Probabilities

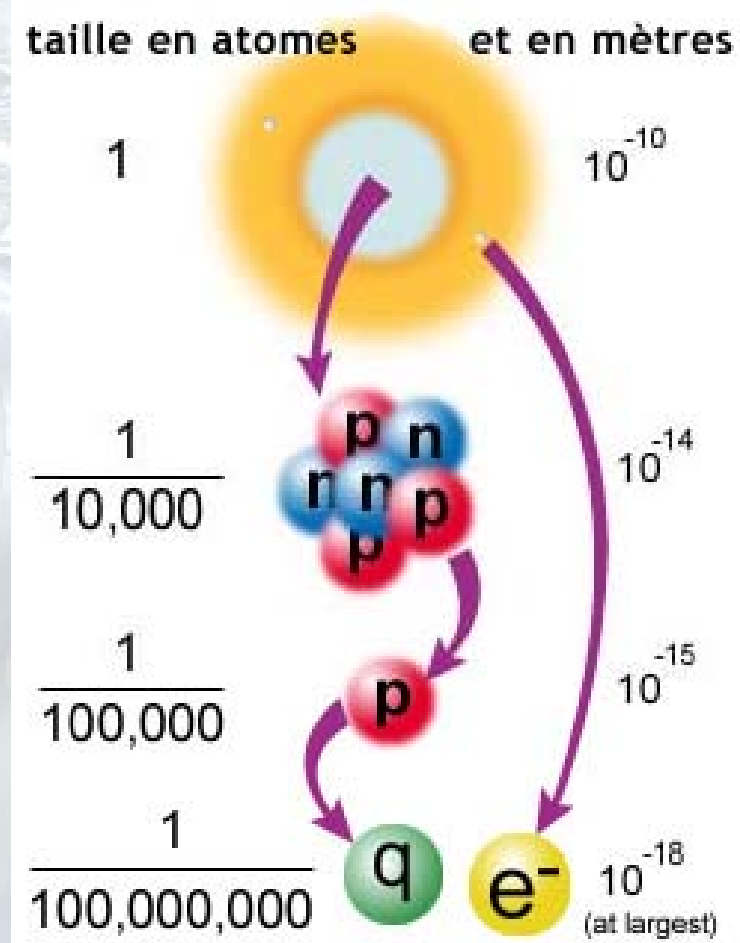
Vers l'infiniment petit

32



Au V^{ème} siècle avant JC, Démocrite pense que la matière est constituée de grains indivisibles : « les atomes ».



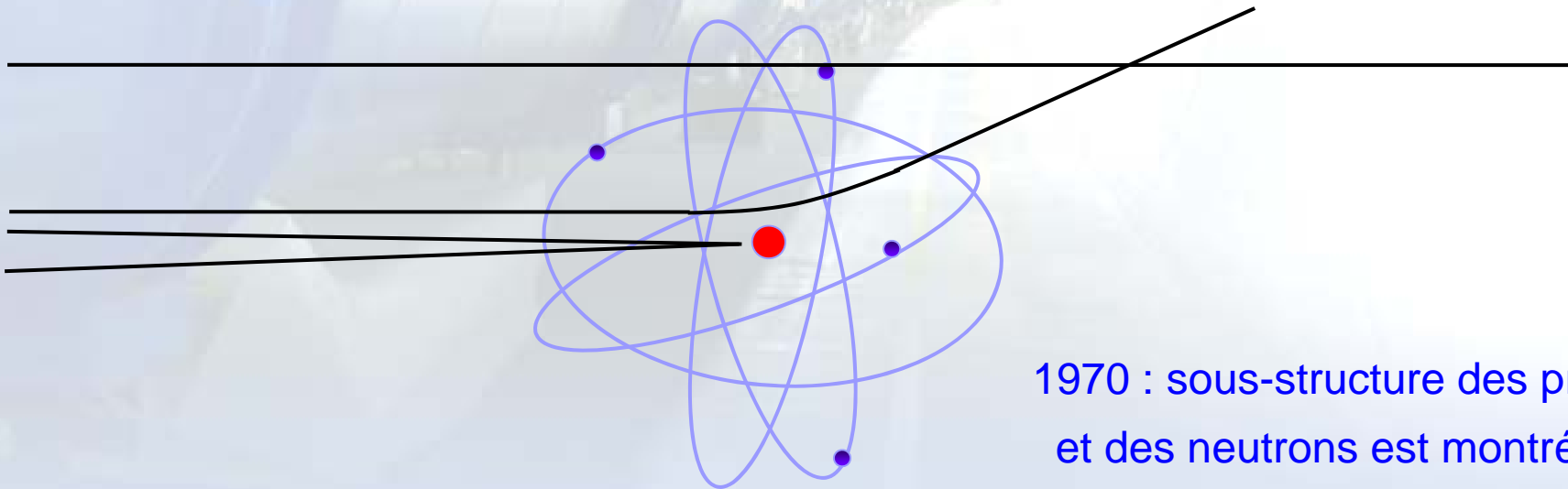


L'expérience de Rutherford

34

Rutherford en 1912 bombarde des atomes d'or avec des noyaux d'hélium : matière faite de grands vides + points durs chargés positivement

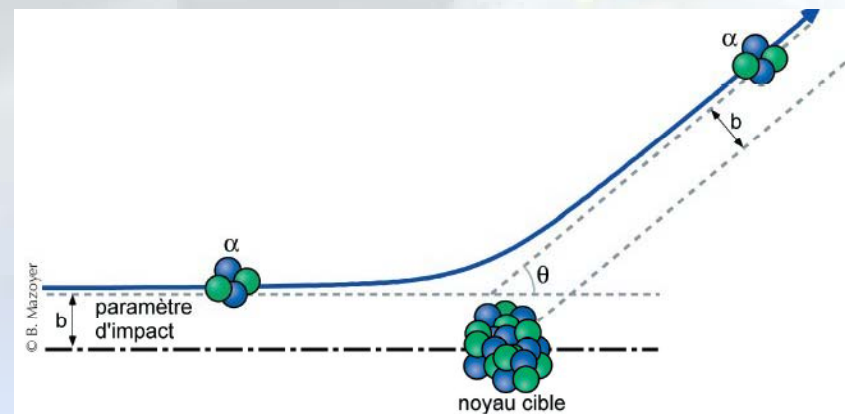
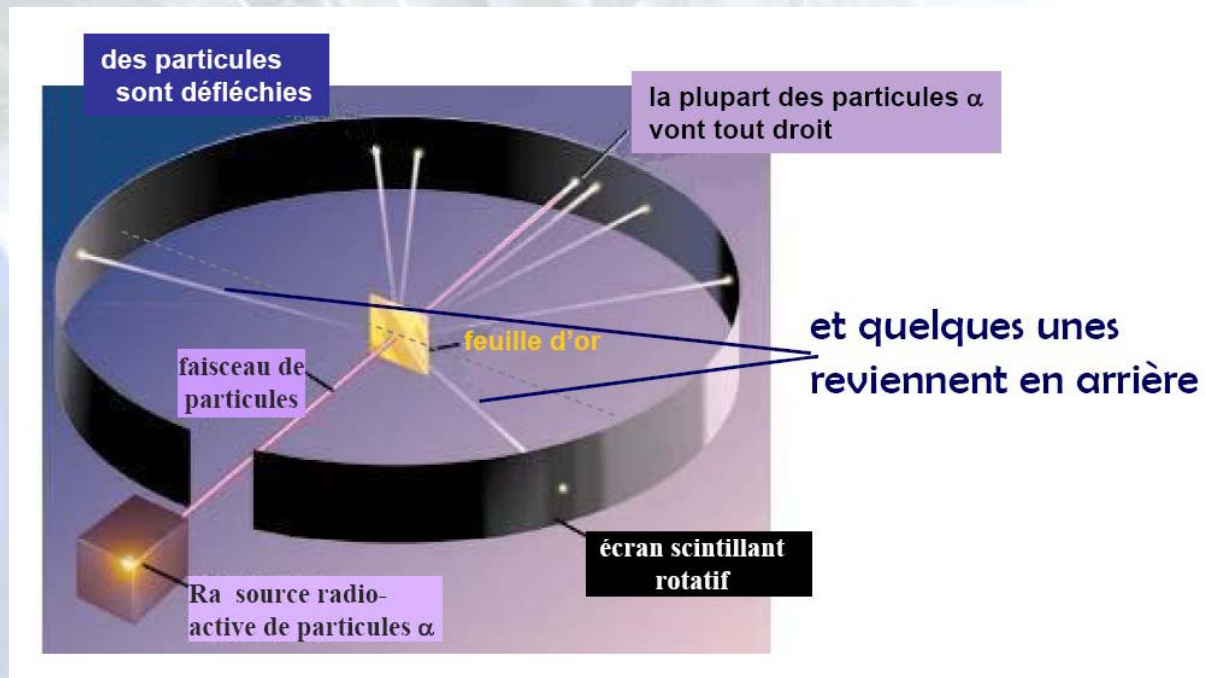
Si les protons et les neutrons faisaient un cm de diamètre, les électrons et les quarks auraient le diamètre d'un cheveu, la taille de l'atome serait alors de 30 terrains de football 99.99999999999999% de l'atome est faite de vide



1970 : sous-structure des protons et des neutrons est montrée en utilisant des électrons comme projectiles

L'expérience de Rutherford

35



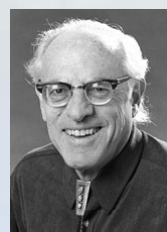
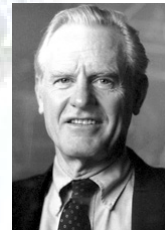
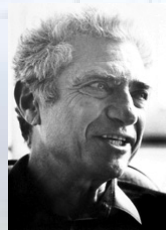
Classique versus quantique

36

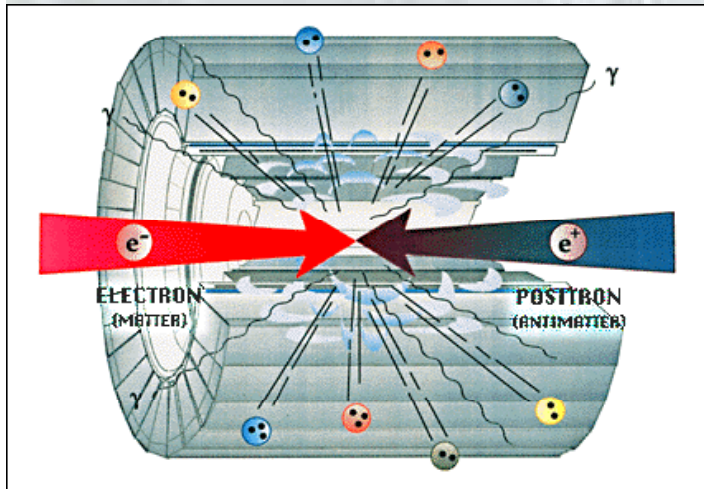


La galerie des nobels

37

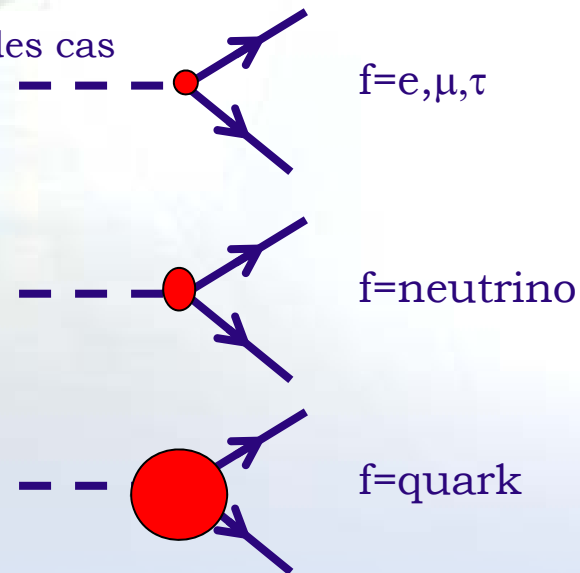
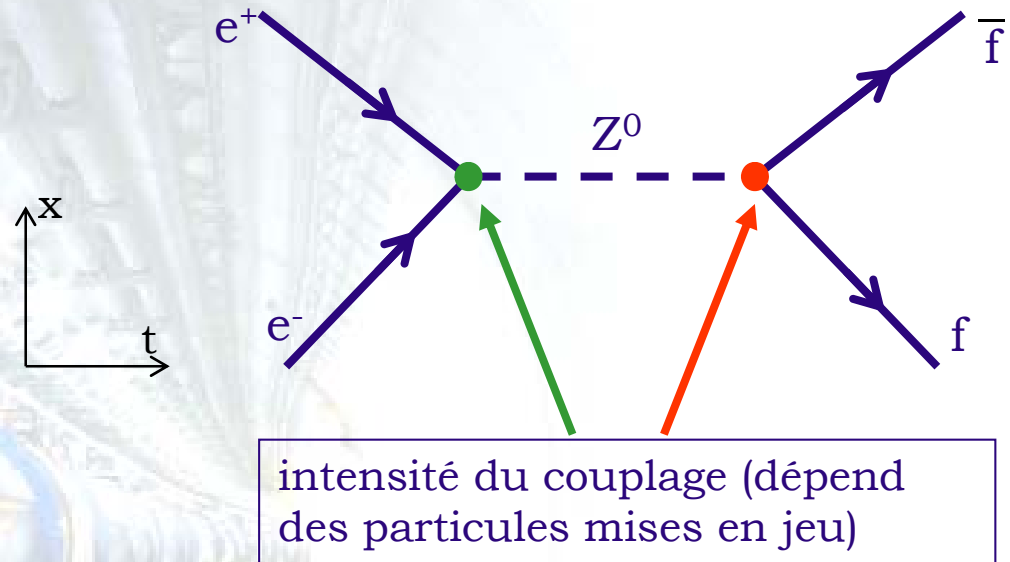


Un outil très utile : le graphe de Feynman ³⁸



Le Z^0 se désintègre en :

- paire de leptons chargés: electrons, muons, taus : 10% des cas
- paire de neutrinos (invisibles) : 20 % des cas
- paire de quarks (quarks u,d,c,s,b) : 70 % des cas

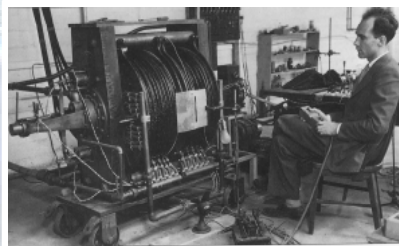
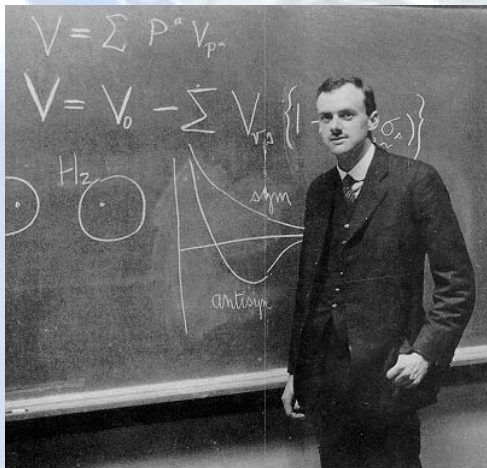


15 % des Z^0 donnent une paire de quarks $b\bar{b}$

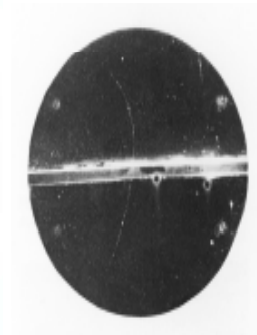
Asymétrie matière/antimatière

39

Paul Dirac prédit l'existence
du positron en 1928



Anderson (1932) découvre
le positron
prédit par Dirac



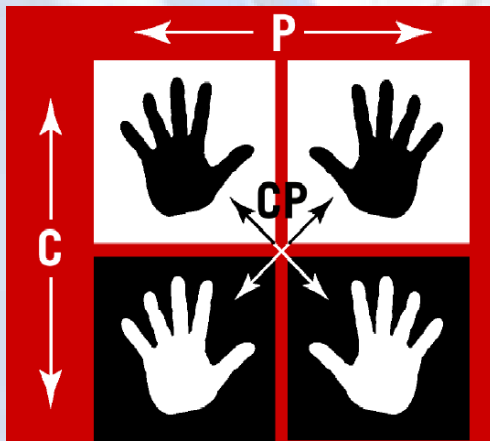
L'Univers n'est pourtant fait que
de matière !
Pourquoi et comment l'antimatière
a-t-elle disparue ?



Asymétrie matière/antimatière

40

La violation de CP avec les mains...



Andrei Sakharov (1967)

- Big-Bang : autant de matière que d'anti-matière
- Aujourd'hui dans l'Univers : matière

Si il y a conservation de CP
matière et anti-matière
s'annihilent...

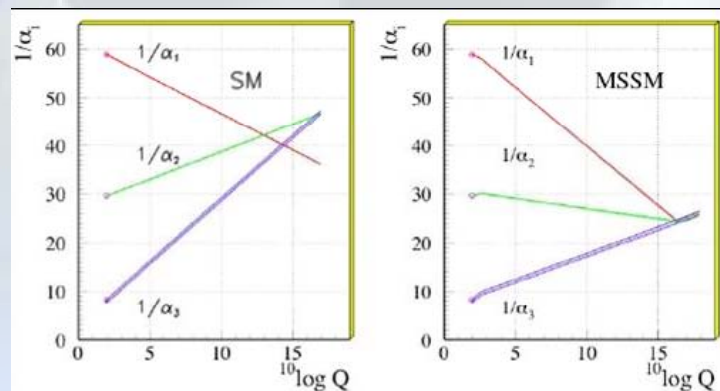


...comme ces mains si on
les superposaient.

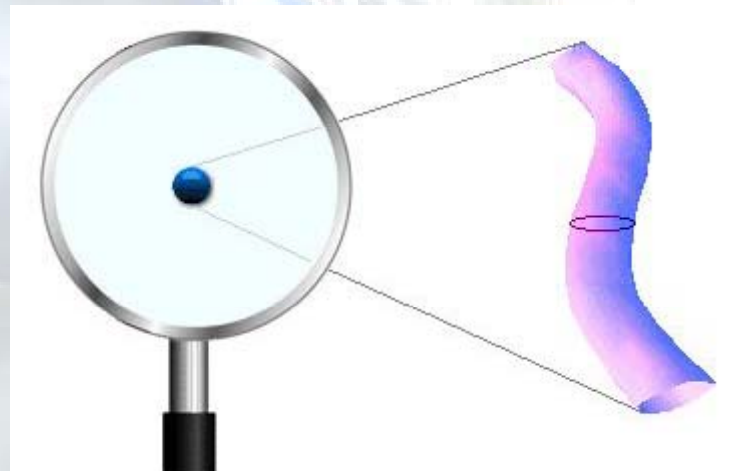
Il faut un désalignement : c'est la **violation de CP**

Le taux de violation de CP dans le Modèle Standard est 10000000000 fois trop faible pour expliquer l'asymétrie matière/anti-matière dans l'univers ...

- Problème pour définir correctement la masse du Higgs
 - Solution : supersymétrie
- Symétrie entre particules de matière (fermions) et particules véhiculant les interactions (bosons)
 - Fermion \leftrightarrow Boson
- Conséquences:
 - Unification des forces
 - Candidat pour la matière noire

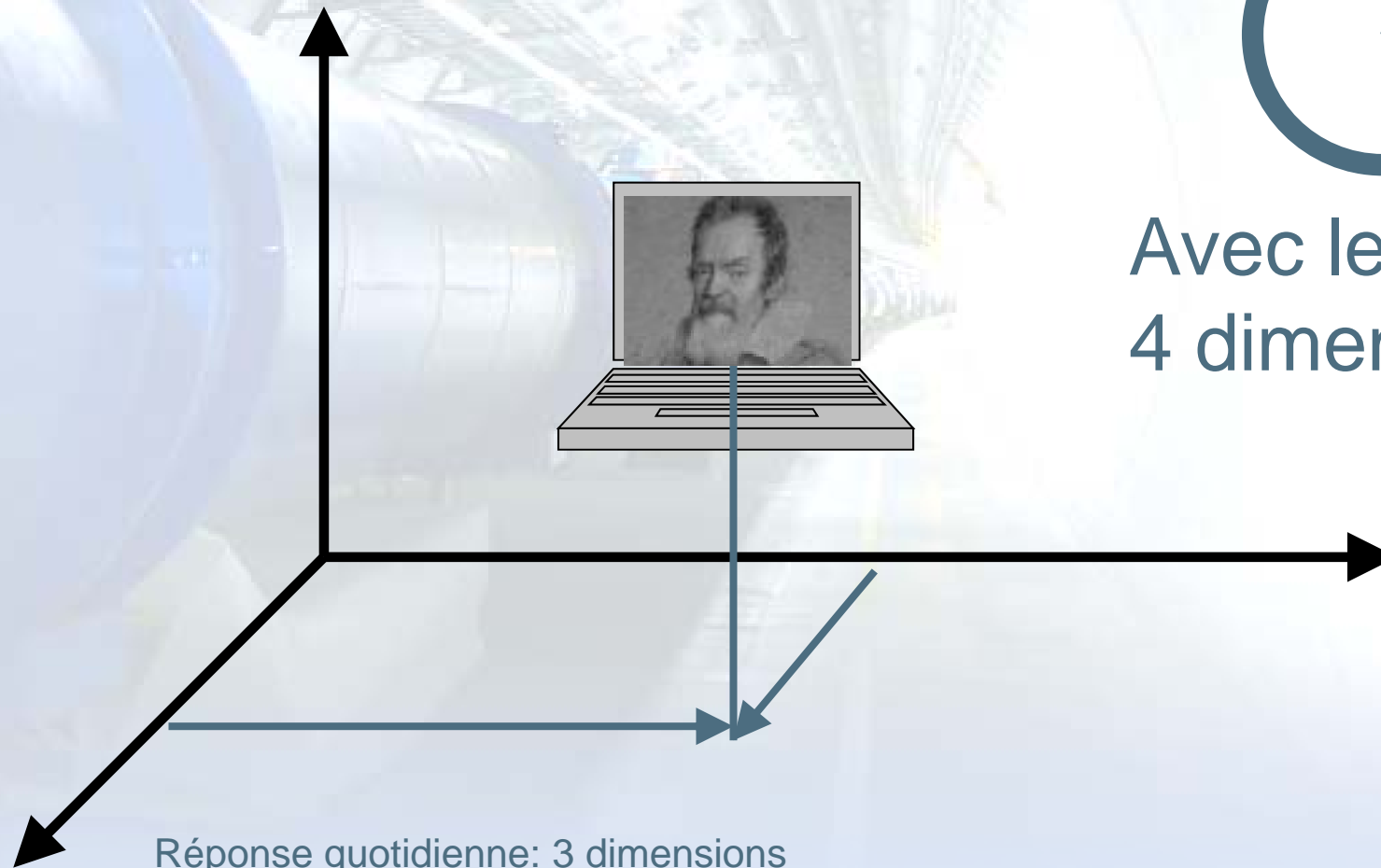


- Réconcilier la gravitation et la mécanique quantique
 - l'infiniment petit et l'infiniment grand
- Objets fondamentaux : cordes
 - Les particules dites « fondamentales » seraient les modes d'oscillation de ces cordes.

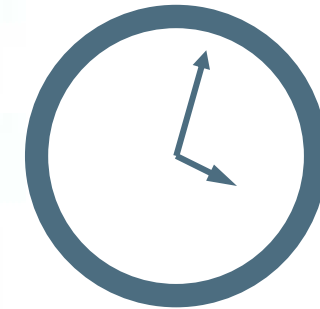


- Unification des 4 interactions fondamentales
- Fonctionne si le nombre de dimension spatiale est supérieur à 3

Dans combien de dimensions vivons-nous?⁴³



Réponse quotidienne: 3 dimensions
= 3 nombres pour repérer un objet



Avec le temps:
4 dimensions

Dans combien de dimensions vit-il?

44

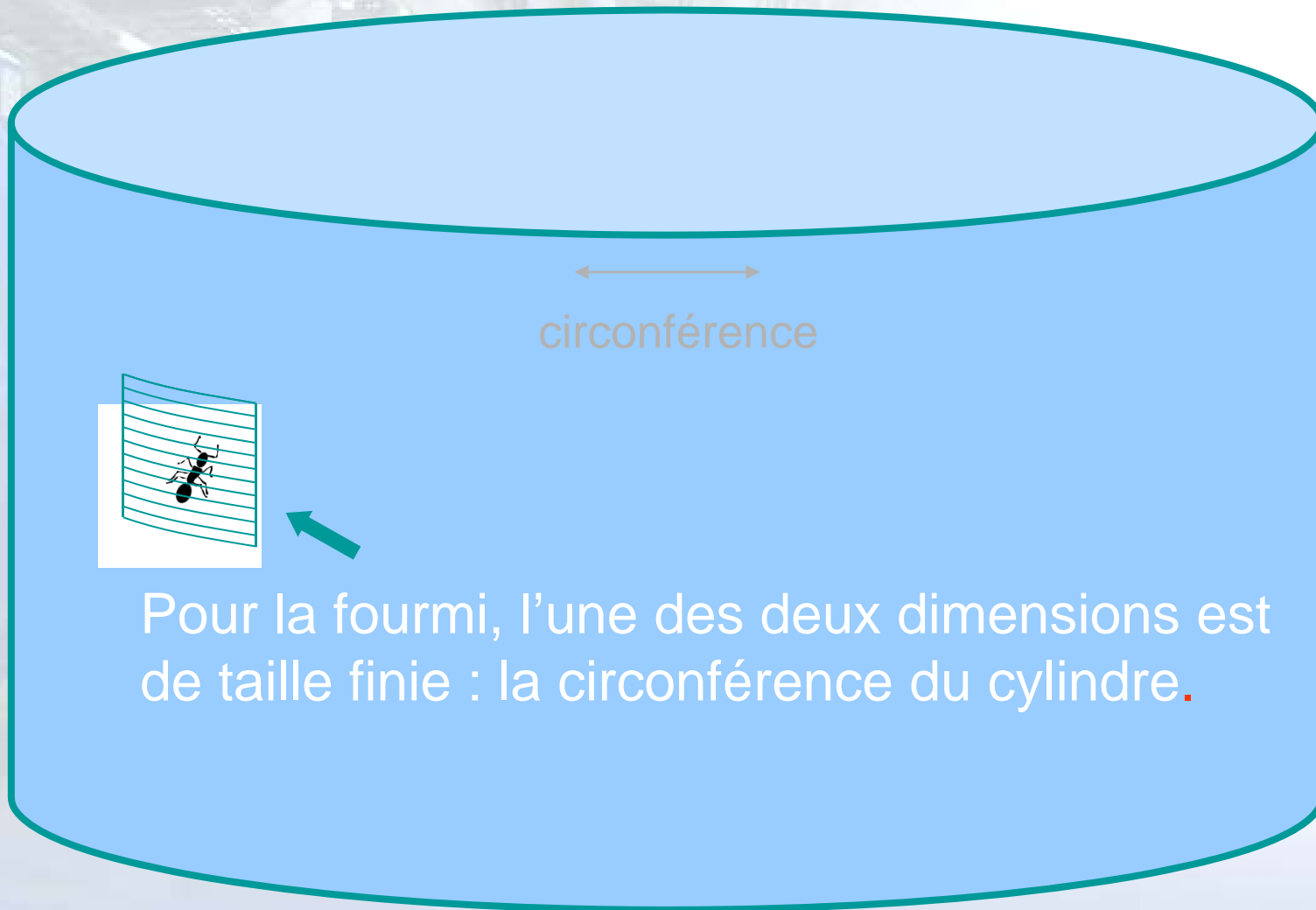


Le fildeferiste a intérêt à ne s'aventurer que dans une seule dimension !



Mais la fourmi explore les deux dimensions du fil

Si nous vivions à la surface d'un cylindre ⁴⁵



Pour la fourmi, l'une des deux dimensions est de taille finie : la circonférence du cylindre.

Certaines dimensions pourraient nous avoir échappé parce qu'elles sont de taille microscopique.

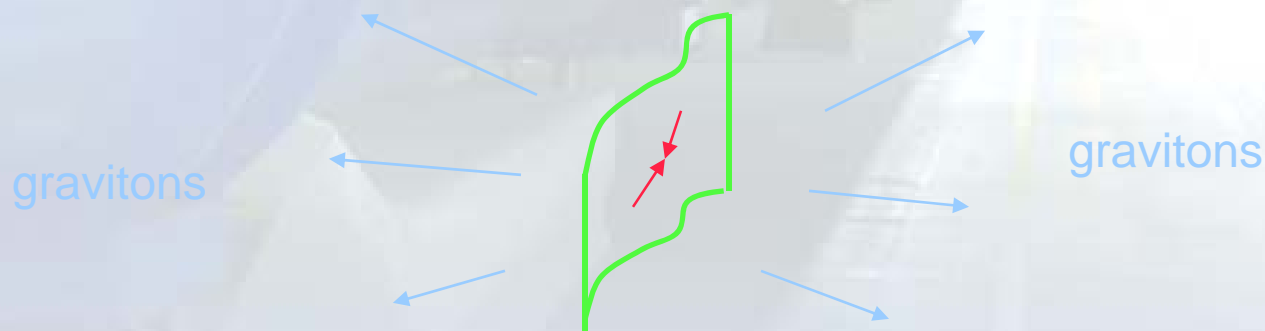
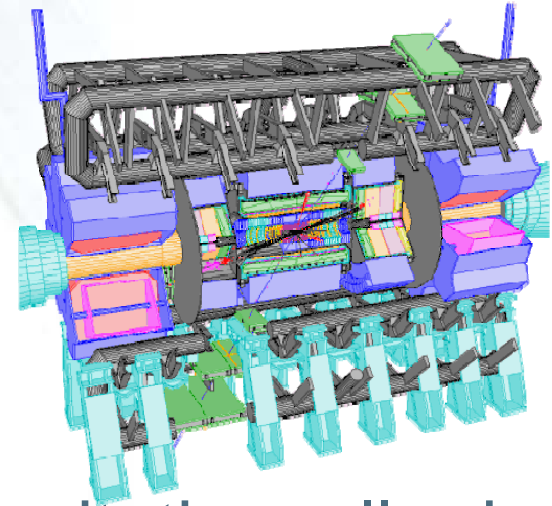


Proposé par Th. Kaluza et O. Klein dans les années 1920 pour unifier géométriquement électromagnétisme et gravitation

Est-ce observable?

47

- ✓ Observable dans les accélérateurs de particules
 - par perte d'énergie sous forme gravitationnelle dans les dimensions supplémentaires



- par production de mini-trous noirs

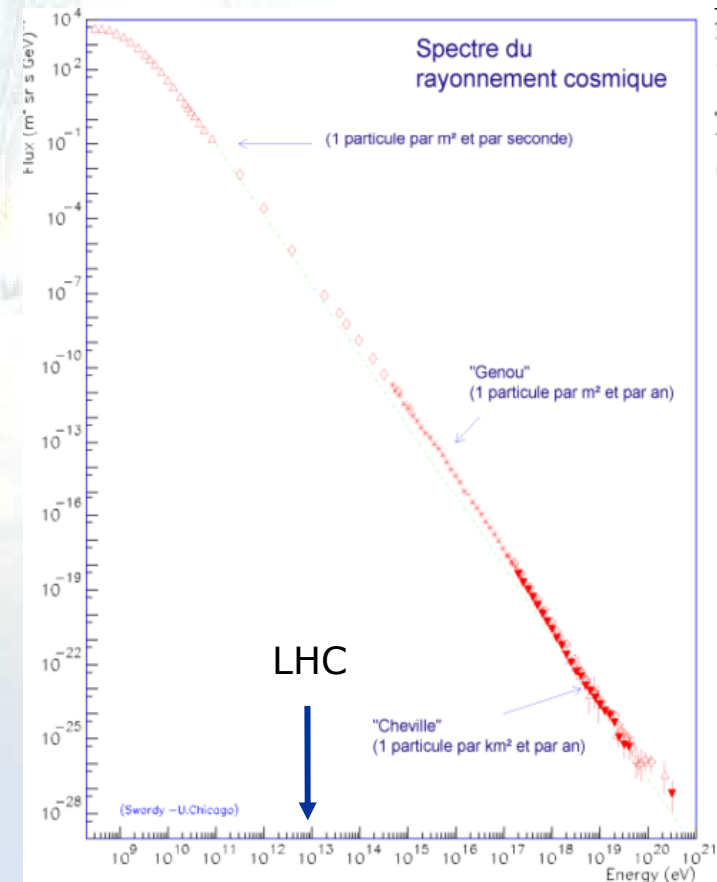


$$G_{\text{grav}} = G_{\text{Newton}} R^D$$

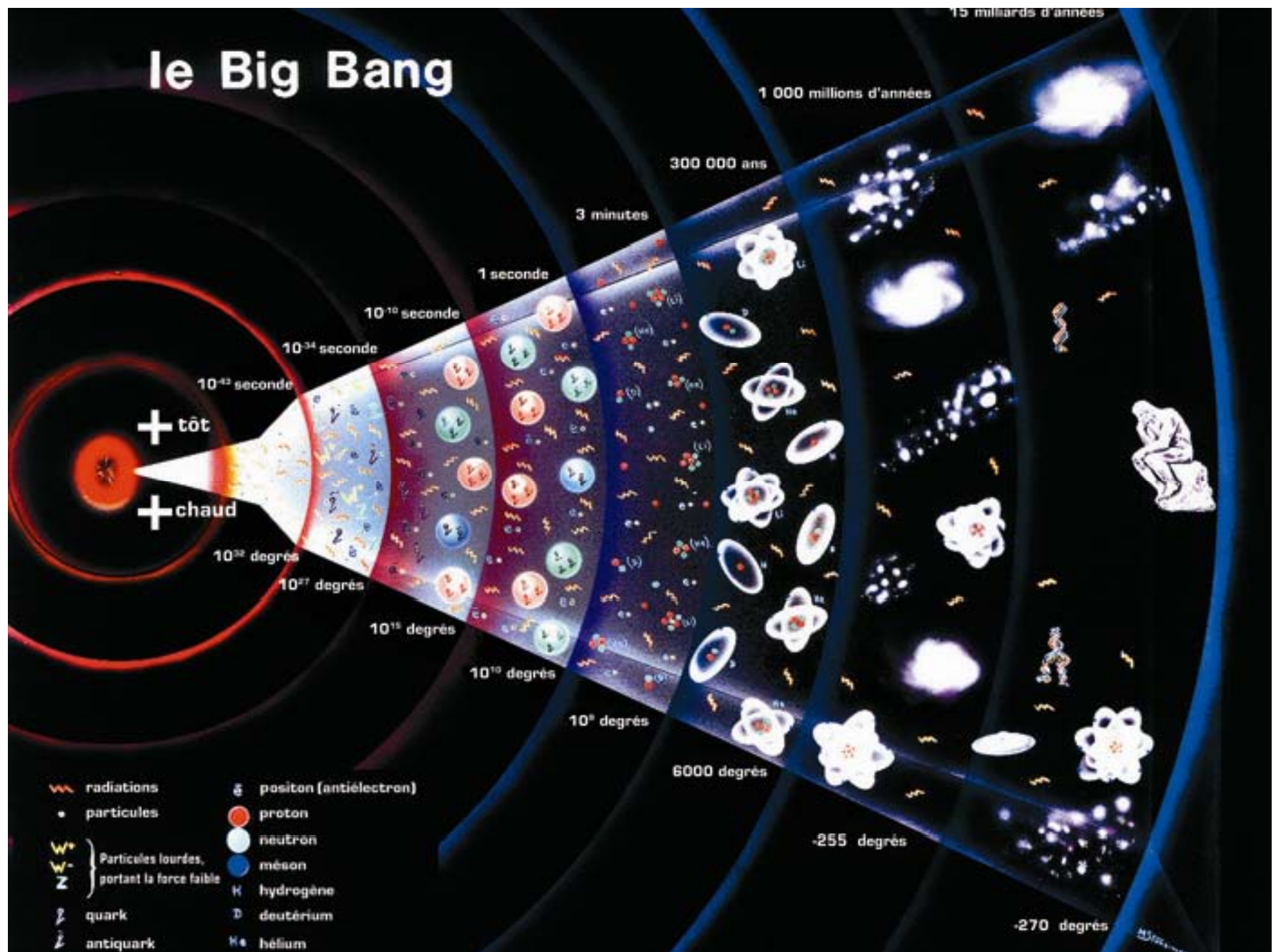
Rayon cosmique

48

- Rayon cosmique : flux de particules de haute énergie présent dans tout l'Univers.

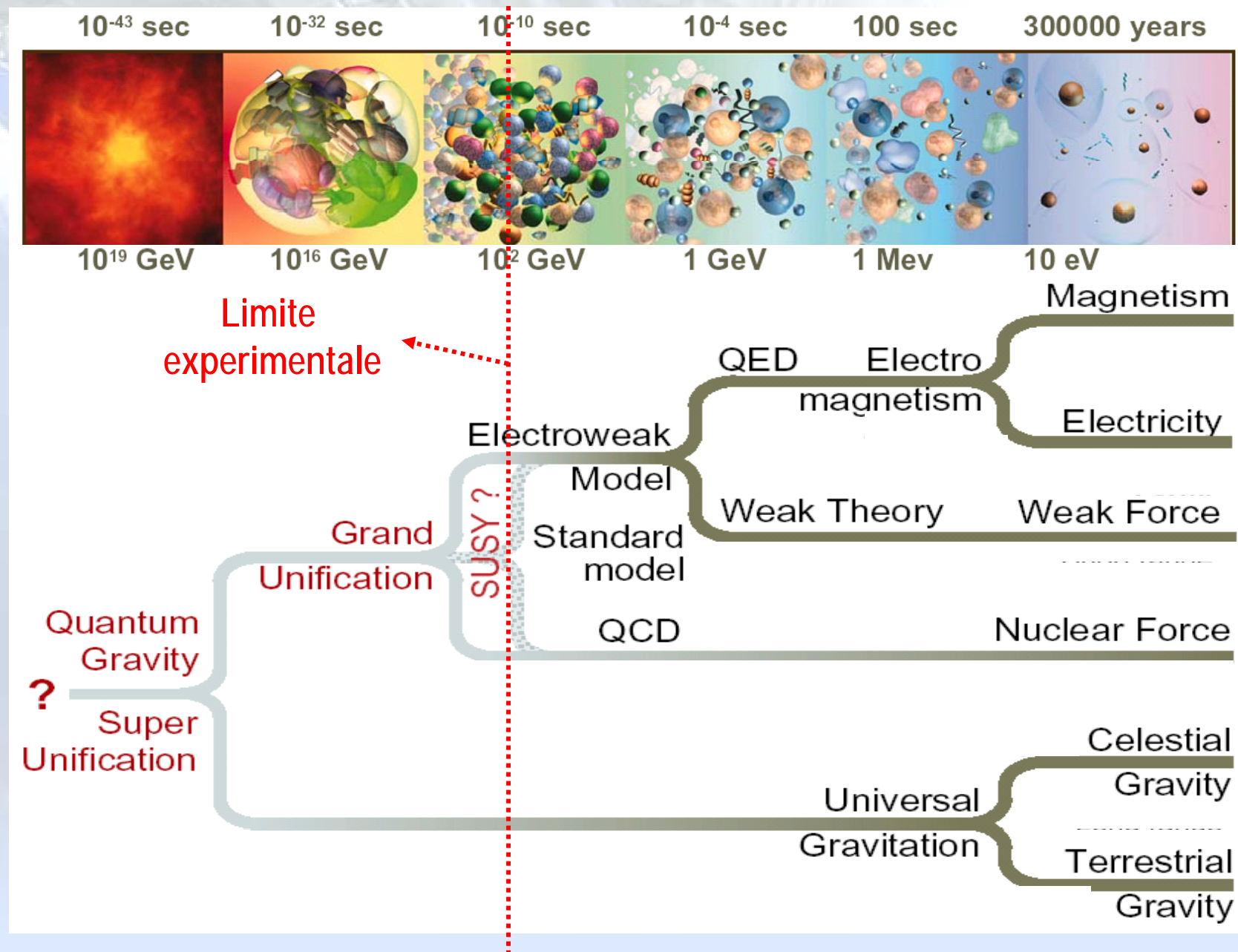


le Big Bang



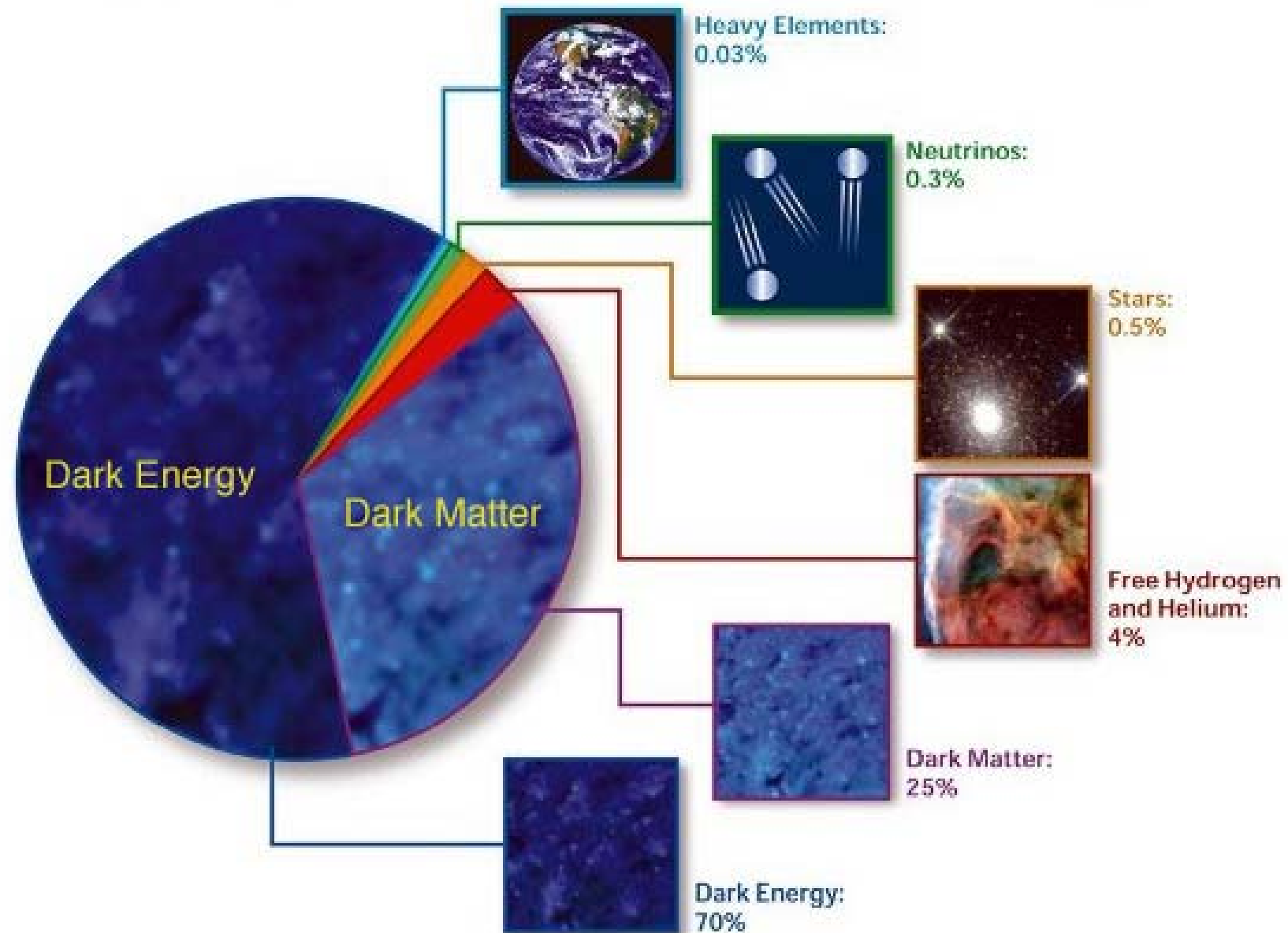
Unification des forces

50



Énergie et matière noires

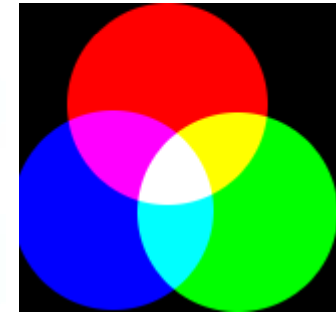
51



Les quarks sont 'colorés' : R, B, V

Ils ne s'observent jamais seuls
mais s'associent pour former
des particules blanches : les hadrons

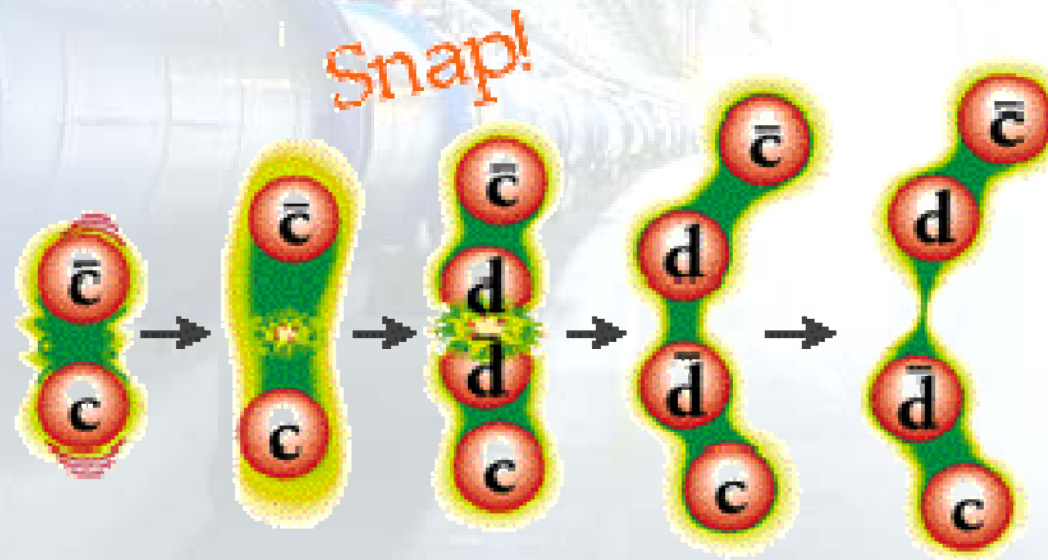
- Baryon = association de trois quarks



- Anti-baryon = association de trois anti-quarks
- Méson = association d'un quark et d'un anti-quark

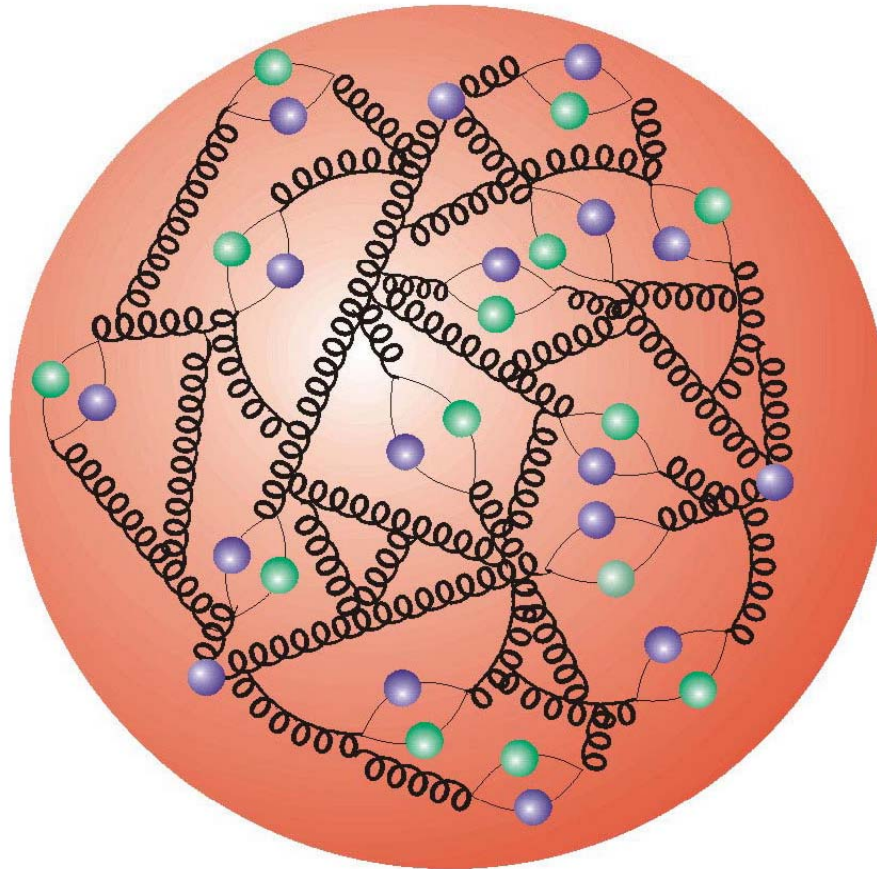
Hadronisation

53



La structure du proton

54



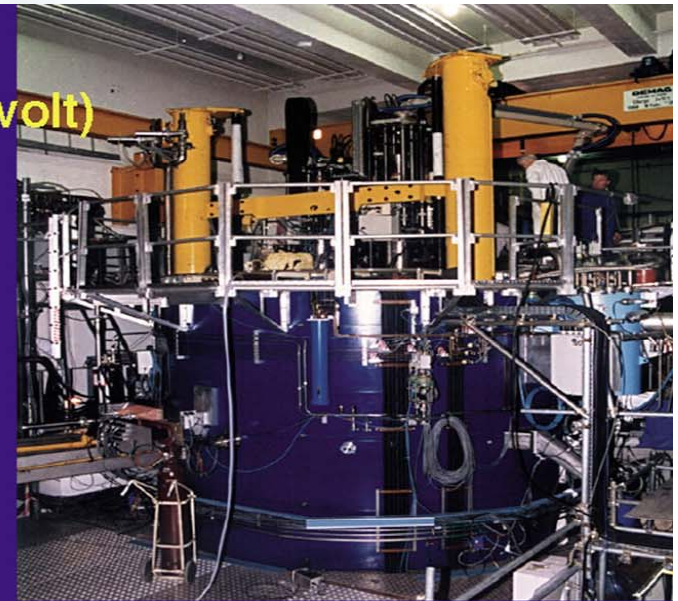
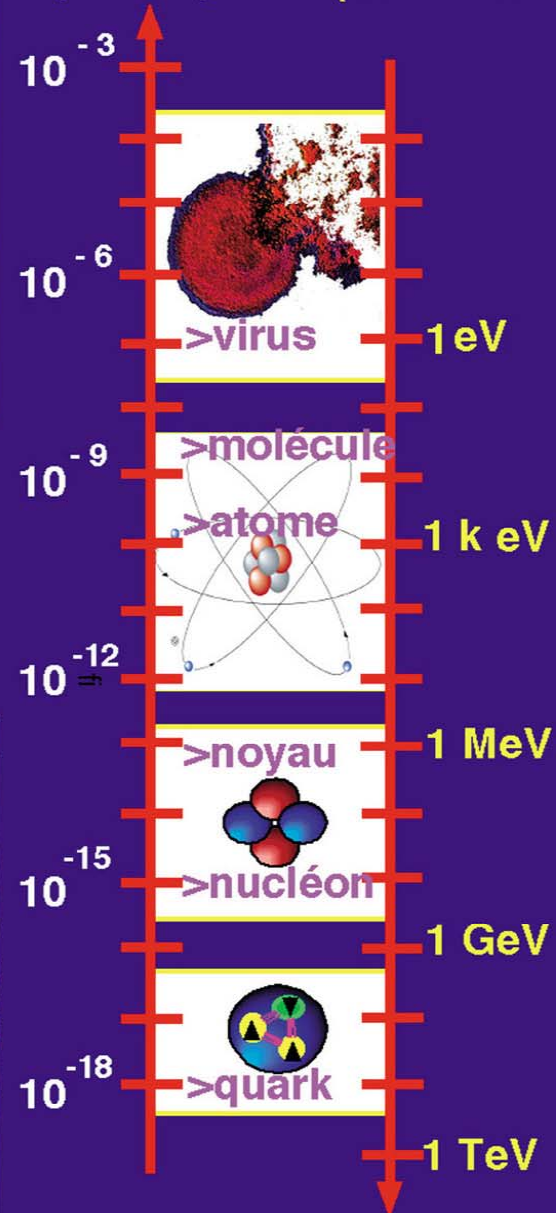


Microscope électronique



Accélérateur linéaire

Longueur
(mètre) Énergie
(électron-volt)



Cyclotron



Synchrotron

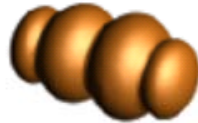
Les interactions

56

Forte

1

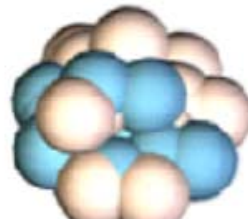
Gluons (8)



Quarks



Mesons
Baryons

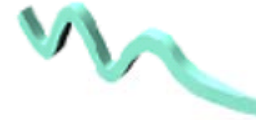


Nuclei

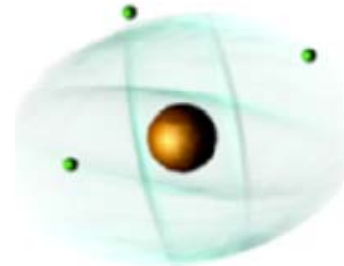
Electromagnétique

10^{-2}

Photon



Atomes
Lumière
Chimie
Électronique



Gravitationnelle

10^{-38}

Graviton ?



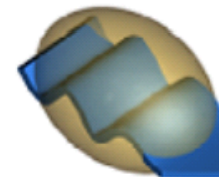
Système solaire
Galaxies



Faible

10^{-5}

Bosons (W,Z)



Radioactivité β

