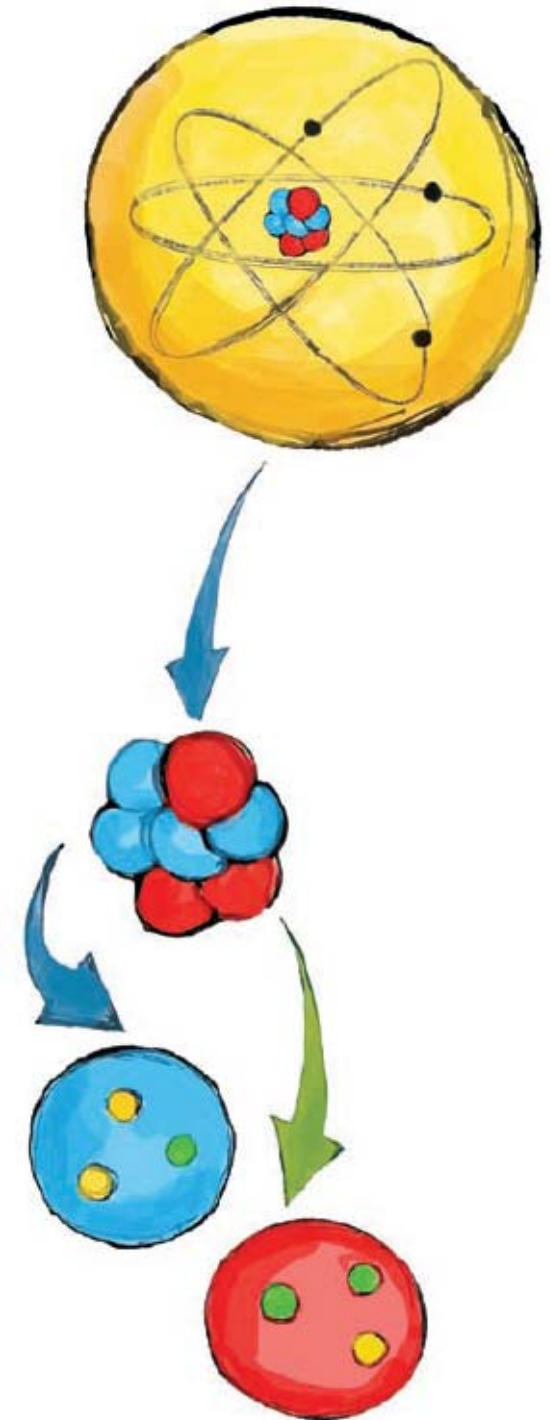


Particules et Interactions

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



L'atome

3



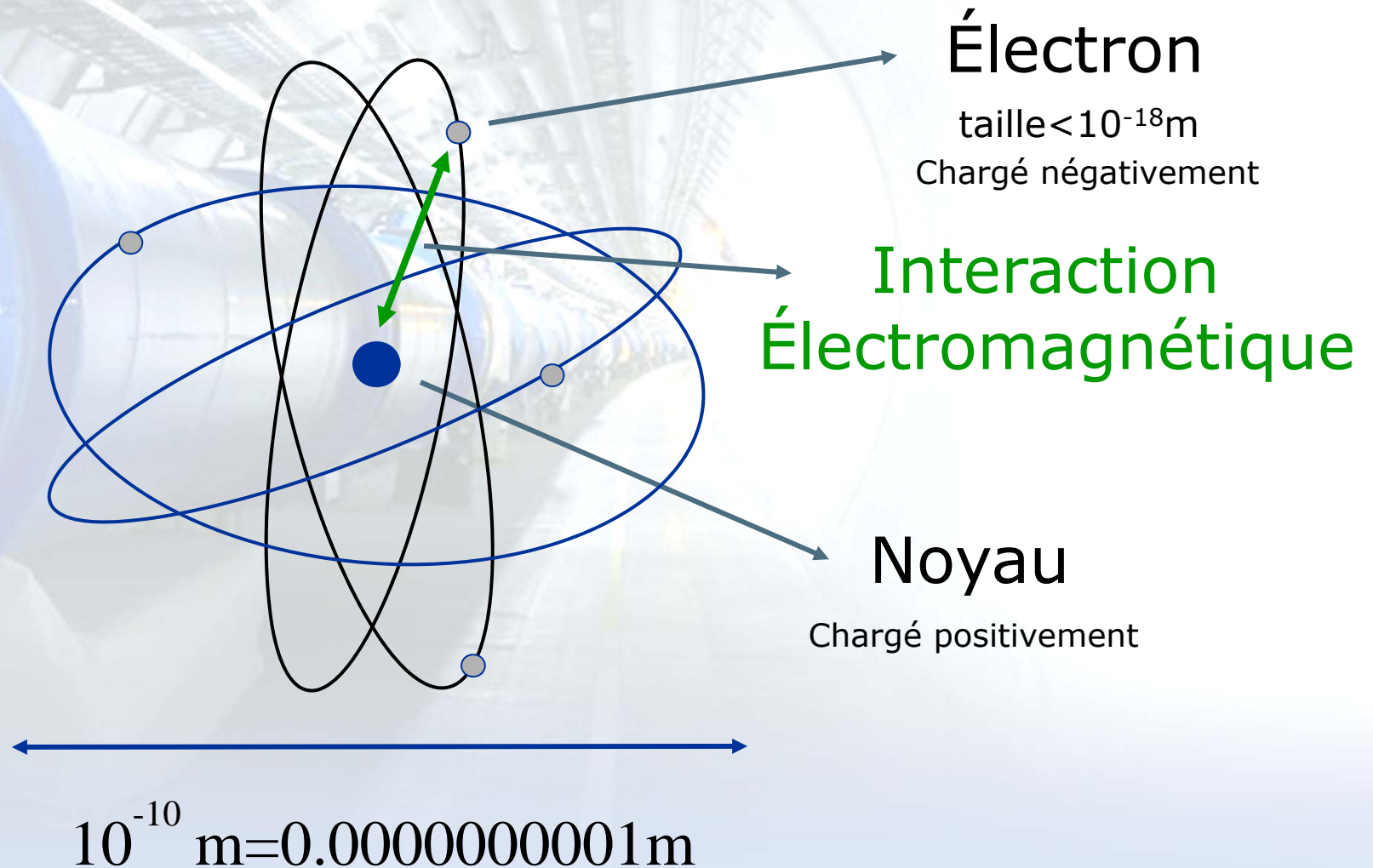
Taille d'un atome: 10^{-10} m = 0.0000000001m

10 millions de fois plus petit qu'une fourmi



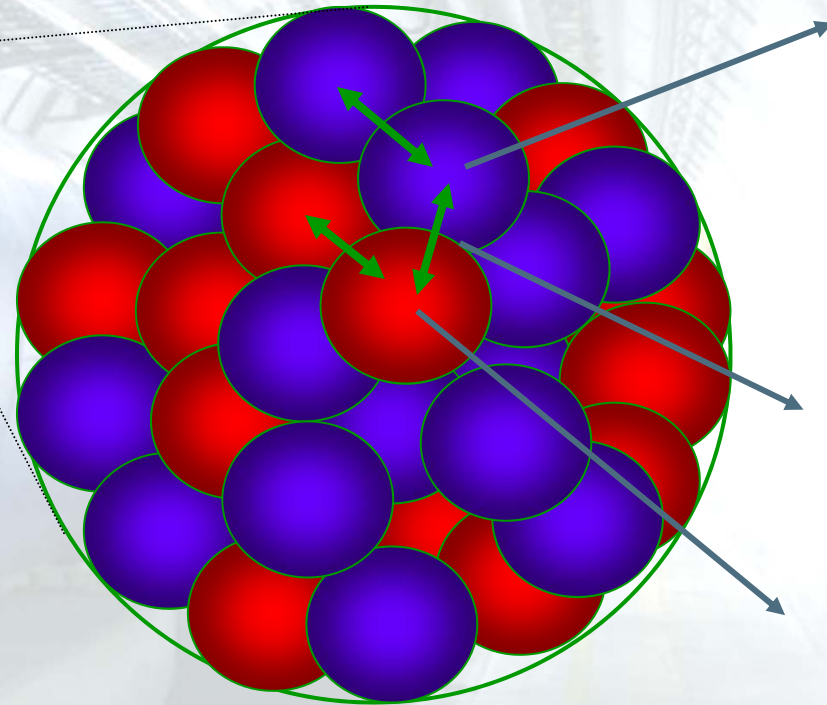
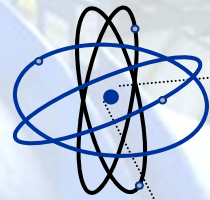
Structure de l'atome

4



L'image n'est pas à l'échelle

Structure du noyau



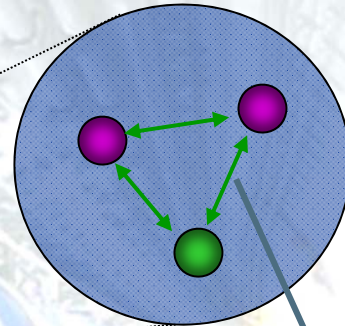
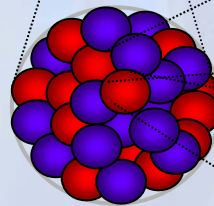
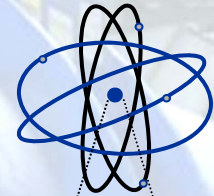
Proton

Interaction forte

Neutron

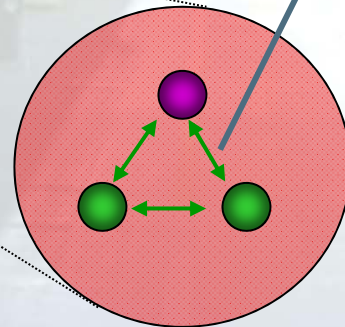
10^{-14} m = 0.0000000000000001 m

Structure des protons et des neutrons

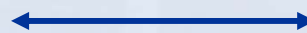


Proton :
2 quarks up
1 quark down

Interaction forte



Neutron :
1 quark up
2 quarks down

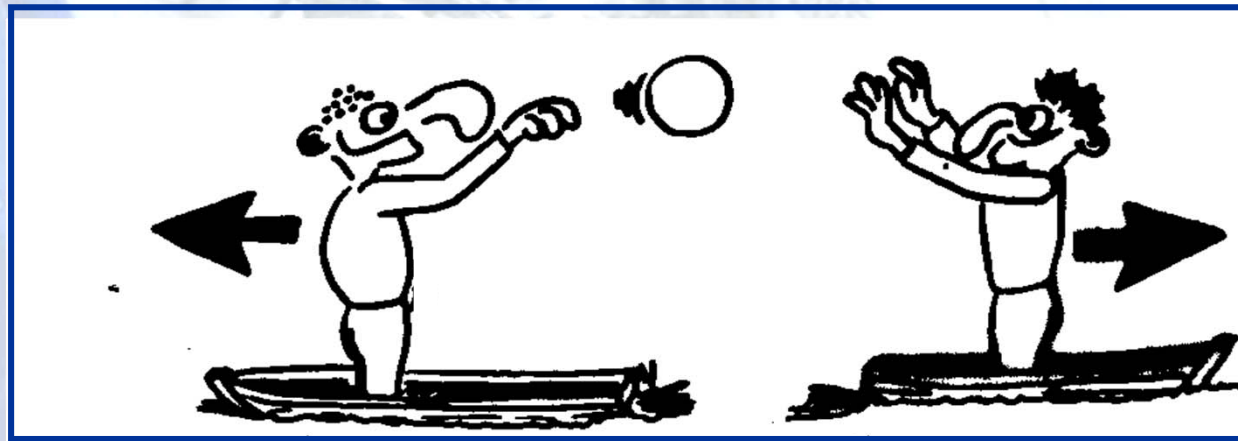


10^{-15} m = 0.0000000000000001 m

Les interactions (forces)

7

Vision « moderne » : **échange de particules**
que l'on appelle bosons



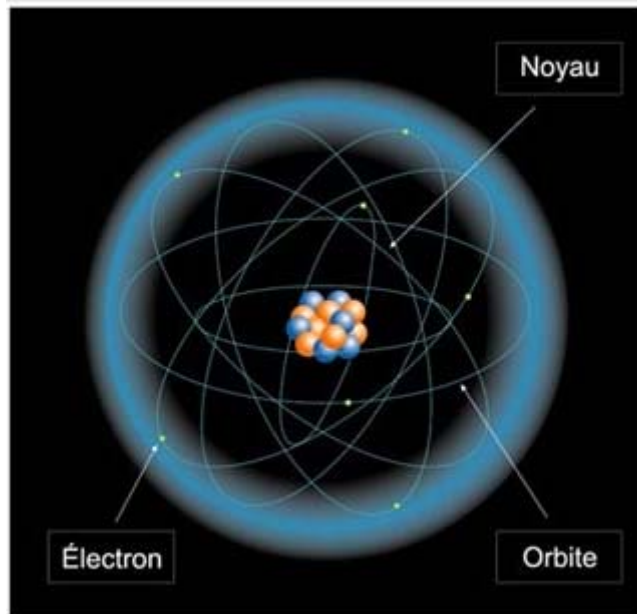
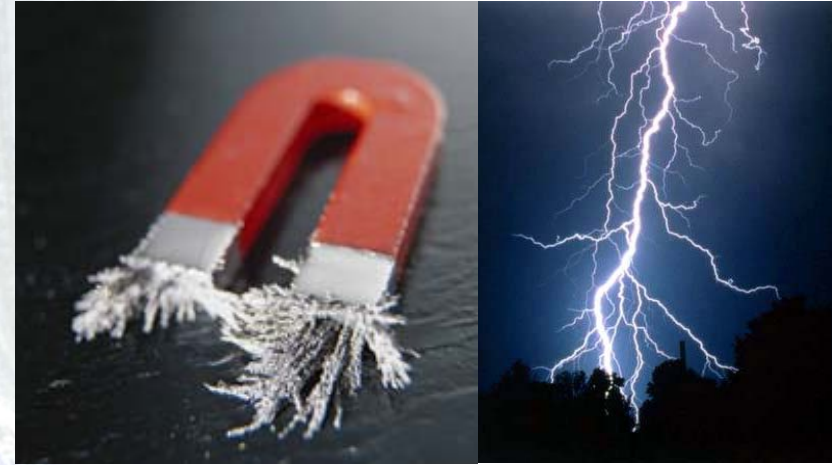
- Chaque interaction se différencie par:
 - **son type de messenger**
 - Photon, gluon, ...
 - **sa portée de l'interaction**
 - Plus le messenger est massif plus l'interaction est de courte portée

L'interaction électromagnétique

8

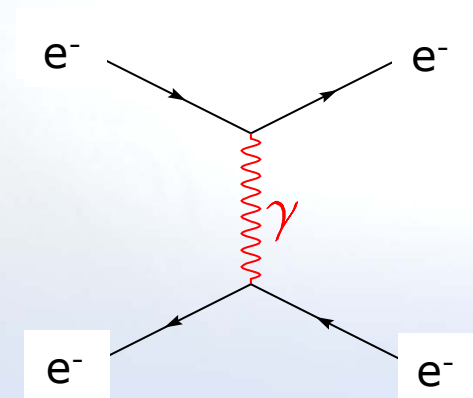
Responsable des phénomènes **électriques et magnétiques** :
aimantation, lumière,
cohésion des atomes,...

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



Médiateur : **photon**

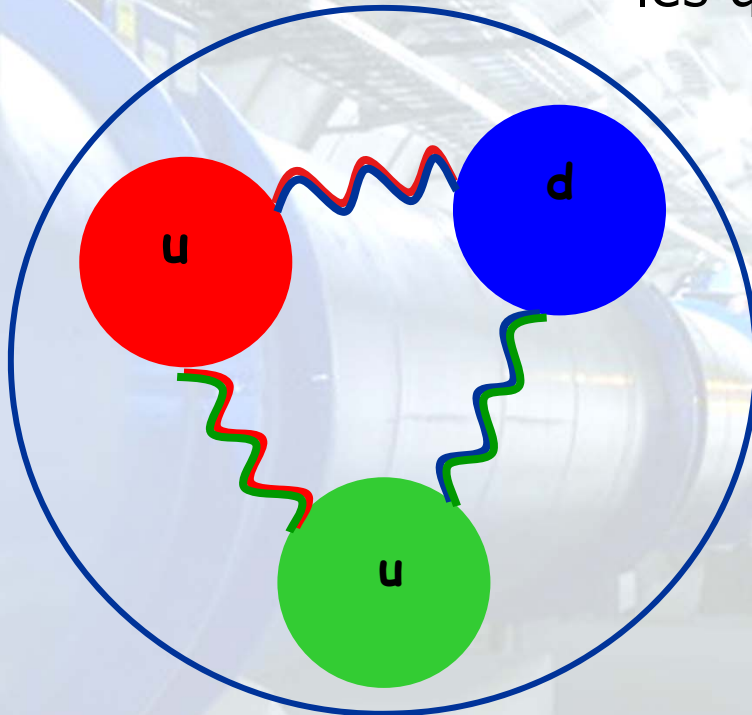
$m=0$ (vitesse= c)
portée infinie



L'interaction forte

9

En plus de la charge électrique, les quarks portent une charge de "couleur":
Bleu vert rouge



Ainsi le proton est "incolore"

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

Médiateurs: **gluons**

⇒ Stabilité des noyaux

Médiateurs : W^+ , W^- et Z^0

- Interaction faible
 - Radioactivité β
 - Participe aux réactions nucléaires au coeur du Soleil
- 100,000 fois plus faible que l'interaction forte,
 - Influence limitée au noyau atomique.
 - Expliquée par la grande masse des bosons vecteurs de l'interaction faible.



Le modèle standard

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

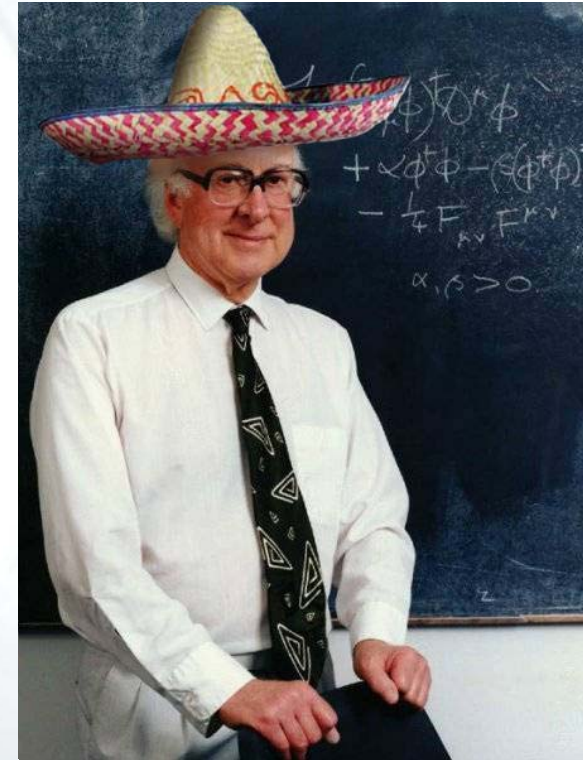
$\mathcal{L}_{SM} =$

$$\begin{aligned} & -\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 \Lambda_\nu \partial_\mu \Lambda_\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 \Lambda_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - \Lambda_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + \Lambda_\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 (Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- - Z_\mu^0 Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w^2 (\Lambda_\mu W_\mu^+ \Lambda_\nu W_\nu^- - \Lambda_\mu \Lambda_\mu W_\nu^+ W_\nu^-) \\ & +g^2 s_w c_w \left[\Lambda_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - 2\Lambda_\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] - gM W_\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 \Lambda_\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 \Lambda_\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 \Lambda_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) \\ & +\frac{1}{2}ig^2 s_w \Lambda_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 \Lambda_\mu \phi^+ \phi^- - g^1 s_w^2 \Lambda_\mu \Lambda_\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 \Lambda_\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)
 - Faible (W et Z)
 - Forte (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 : $\cos(-x) = \cos(x)$

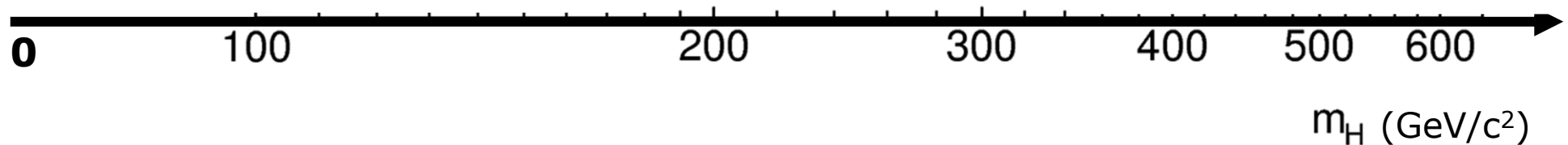


- Sans boson de Higgs:
 - Toutes les particules voyageraient à la vitesse de la lumière.
 - masse=0
 - l'interaction faible auraient une portée infinie
- Quelque chose ralentit les particules
⇒ Mécanisme de Higgs
 - Plus une particule interagit avec le boson de Higgs plus elle est ralentie
- Le boson de Higgs est la pierre angulaire du Modèle Standard mais il n'a pas (encore?) été découvert!



La chasse au boson de Higgs

15

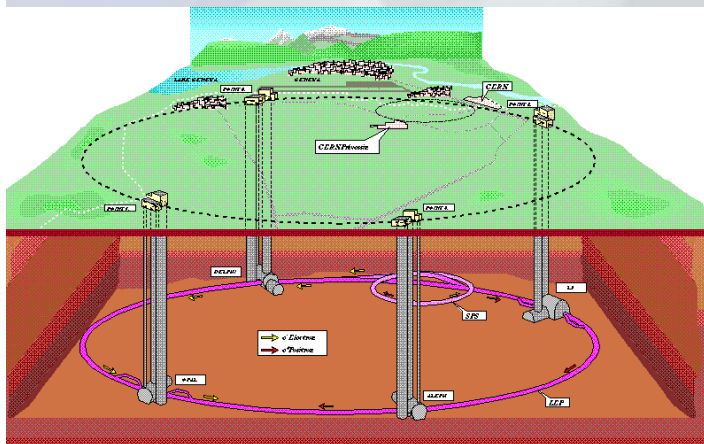
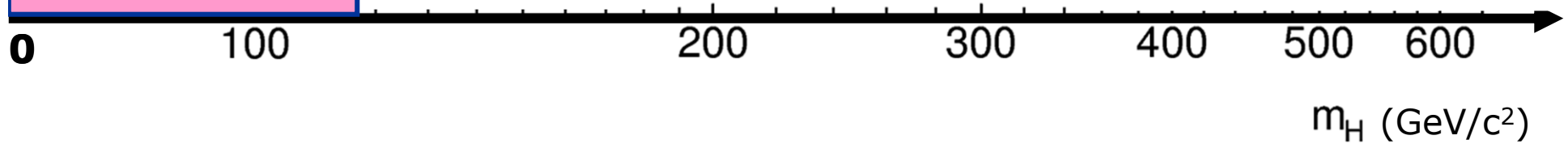
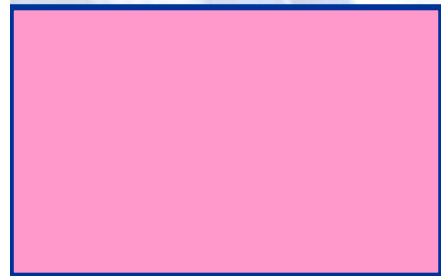


- Toutes les propriétés du boson de Higgs sont prédites par la théorie sauf sa masse
- Théorie $\Rightarrow m_H < 1000 \text{ GeV}/c^2$

$$1 \text{ GeV}/c^2 = 1.8 \times 10^{-25} \text{ kg}$$

La chasse au boson de Higgs

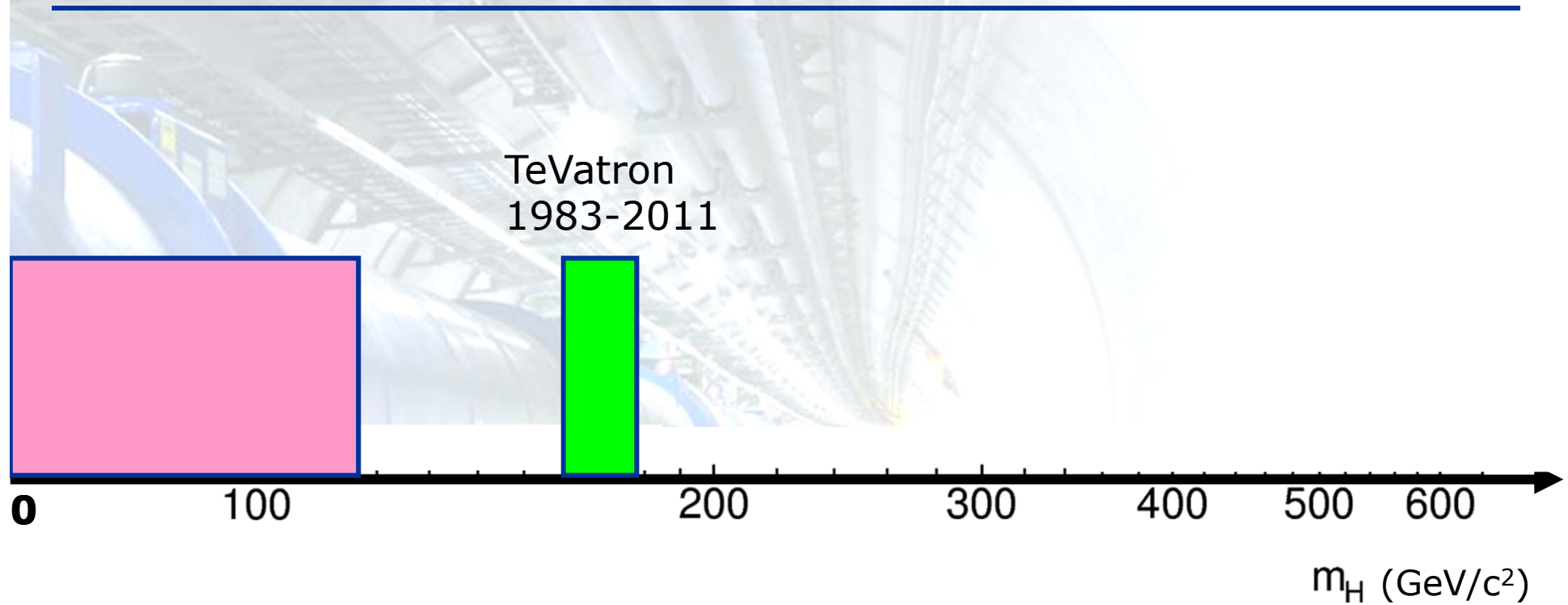
LEP
1989-2000



Le LEP au cern
(pres de Genève)

La chasse au boson de Higgs

17

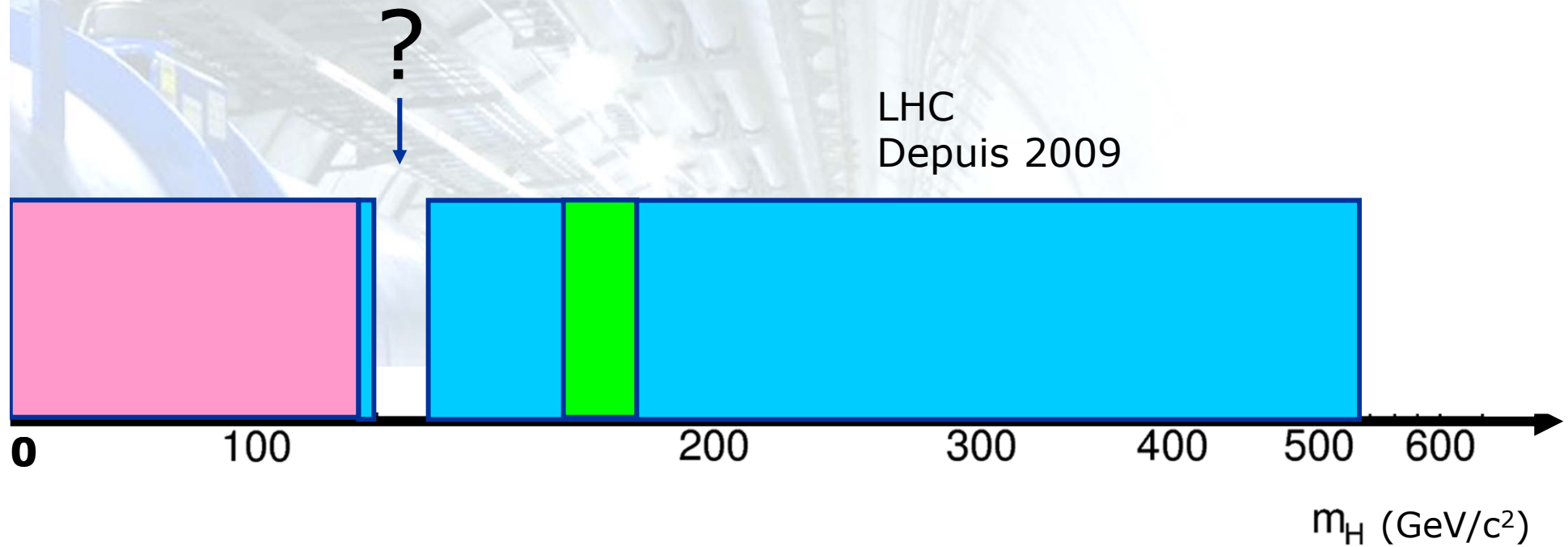


Le TeVatron à Fermilab
(pres de Chicago)



La chasse au boson de Higgs

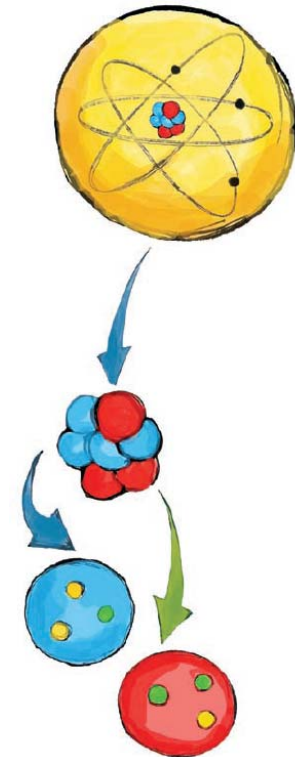
18



Le LHC au cern
(pres de Genève)



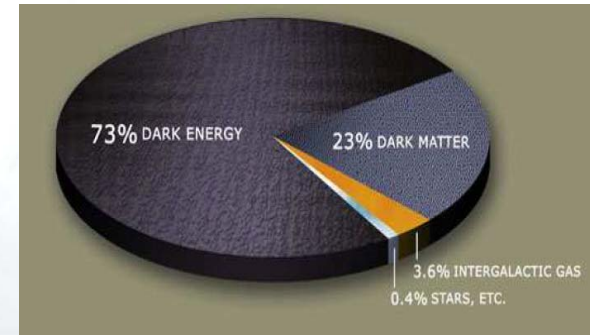
- Particules de matières: **fermions**
 - Particules stables et « utiles » pour bâtir l'univers:
 - électron, quark up et quark down
 - proton = 2 quarks u et un quark d
 - Particules instables:
 - muon, tau, quarks strange,...
 - Produites par exemple dans des collisionneurs
 - A chaque particule est associée une antiparticule
- Particules d'interactions: **bosons**
 - Photon: interaction électromagnétique
 - Boson Z/W: interaction faible
 - Gluon: interaction forte
- Le **Modèle Standard** est le cadre théorique qui permet de décrire les particules et leurs interactions
- Le **boson de Higgs** est la particule qui permettrait d'expliquer la masse de toutes les autres particules.
 - Recherché activement au LHC



Questions ouvertes

20

- Quel mécanisme donne leur masse aux particules?
 - Boson de Higgs existe-t-il?
 - Réponse prévue cette année
- Les forces de la nature ont-elles une origine commune?
- Pourquoi l'antimatière est-elle si rare ?
- Quelle est la composition de l'univers?
 - On ne comprend que 4% du contenu énergétique de l'univers
- Comment décrire introduire la gravité dans le Modèle Standard?
-





Back Up

Particules et antiparticules

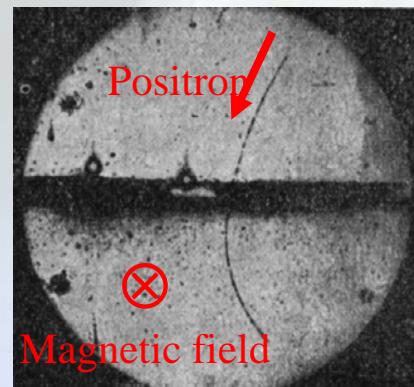
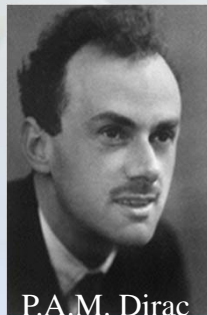
- A toute particule est associée une antiparticule
 - Masse, temps de vie, spin identiques
 - Nombres quantiques opposés

■ L'électron:

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

■ Le positron:

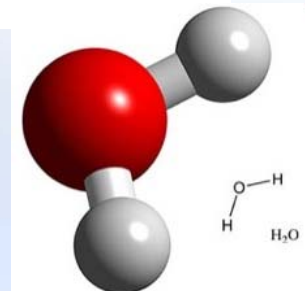
- Charge positive
- Existence prédite par Dirac (1928)
- Découverte par Anderson (1932)



L'atome

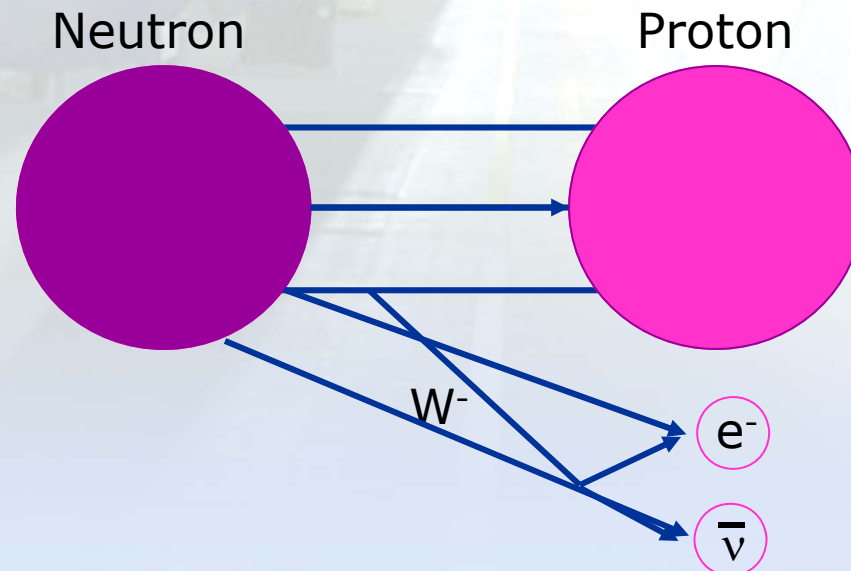
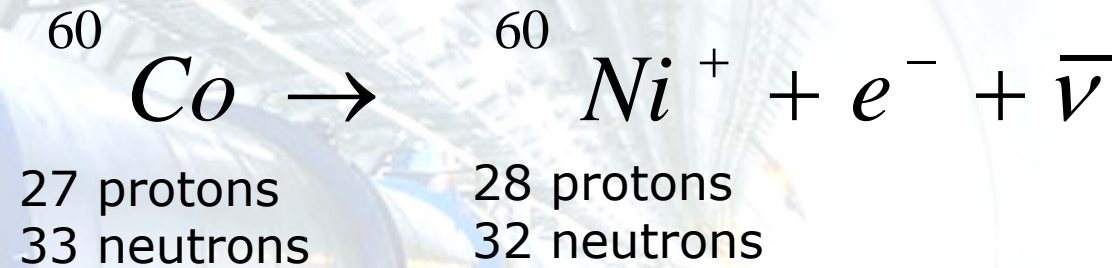
Classification des éléments chimiques (table de Mendeleïev)

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	* 71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	** 103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Uun	111 Uuu	112 Uub	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo
		* 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		
		** 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		



La radioactivité β

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



Caractéristiques d'une particule

25

- **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...

26

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

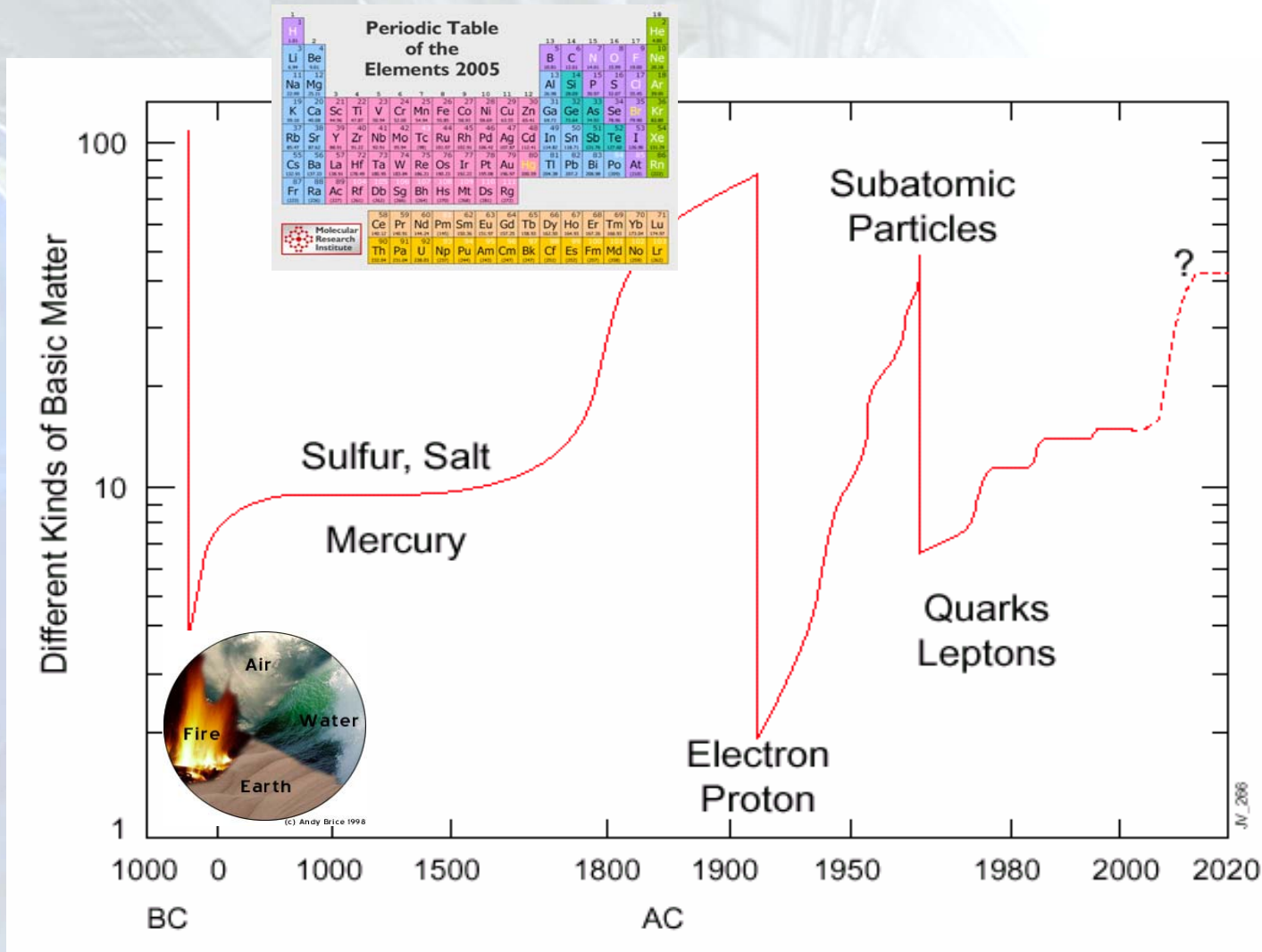
Explique les orbites des planètes du
Système Solaire... mais aussi les
galaxies et l'évolution de l'Univers !



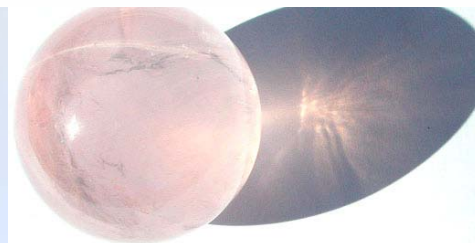
Portée : **infinie...**

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

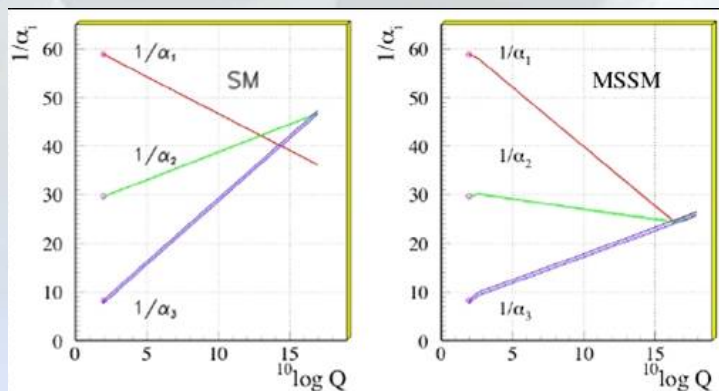
Vers l'infiniment petit



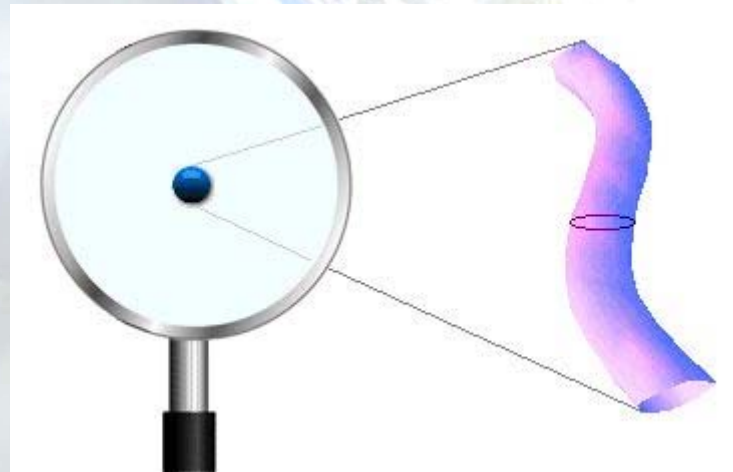
Au V^{ème} siècle avant JC, Démocrite pense que la matière est constituée de grains indivisibles : « les atomes ».



- 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.

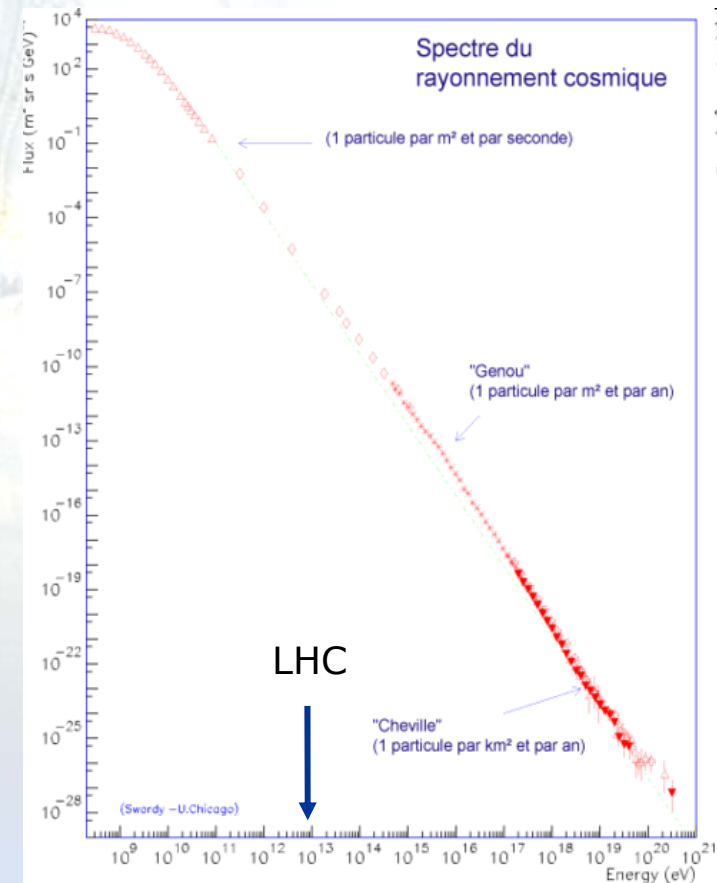


- Unification des 4 interactions fondamentales
- Fonctionne si le nombre de dimension spatiale est supérieur à 3

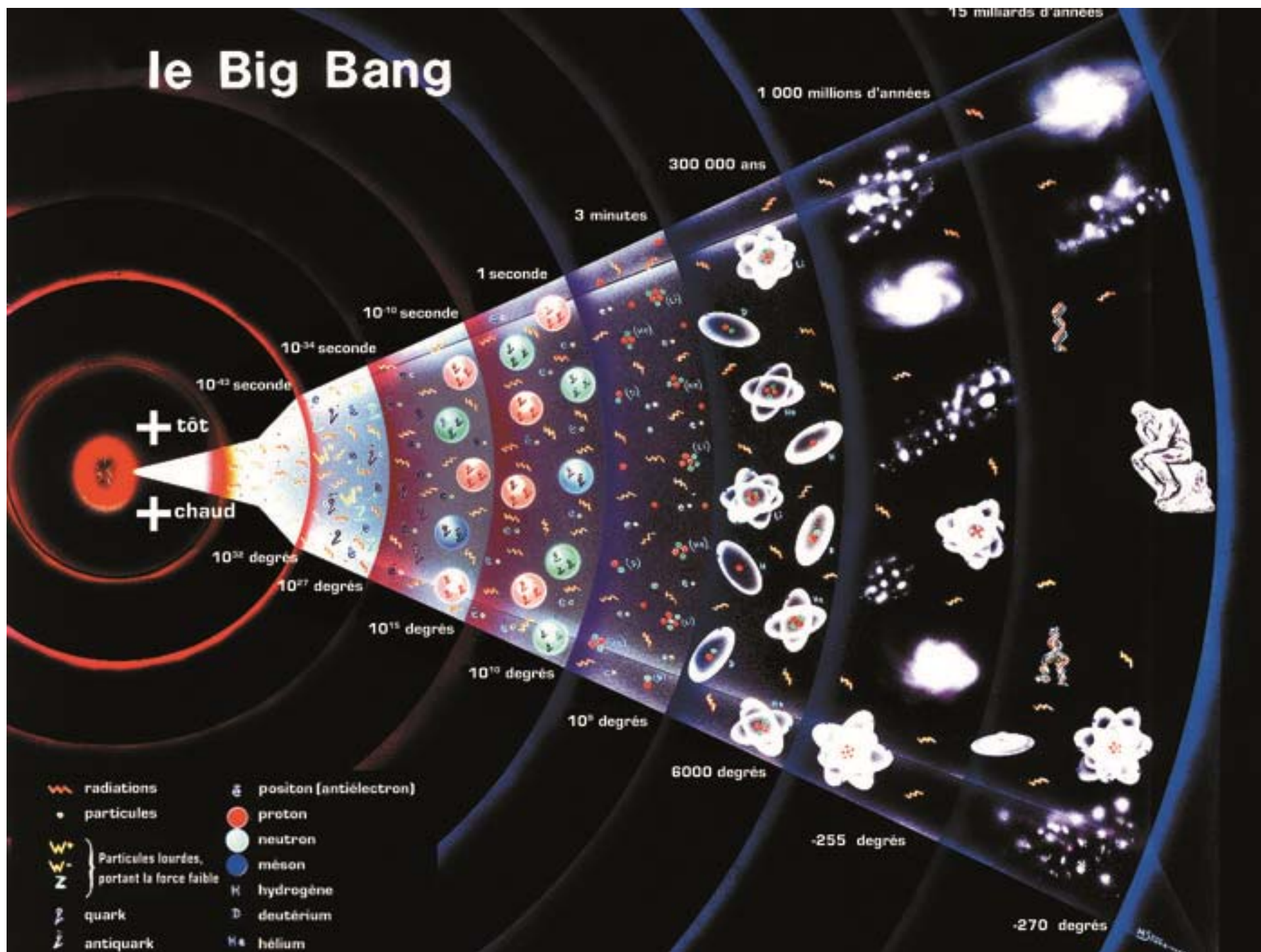
Rayon cosmique

30

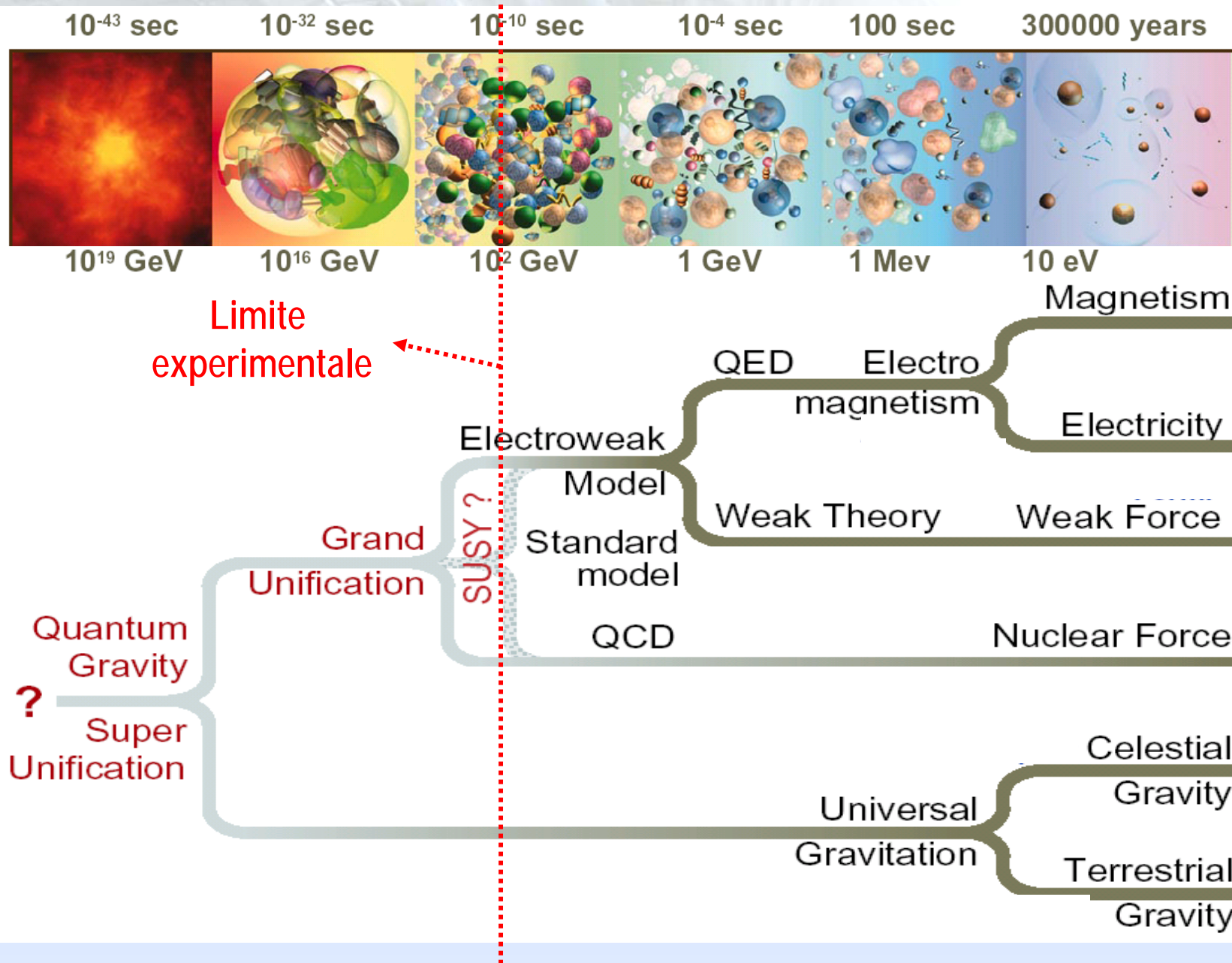
- Rayon cosmique : flux de particules de haute énergie présent dans tout l'Univers.



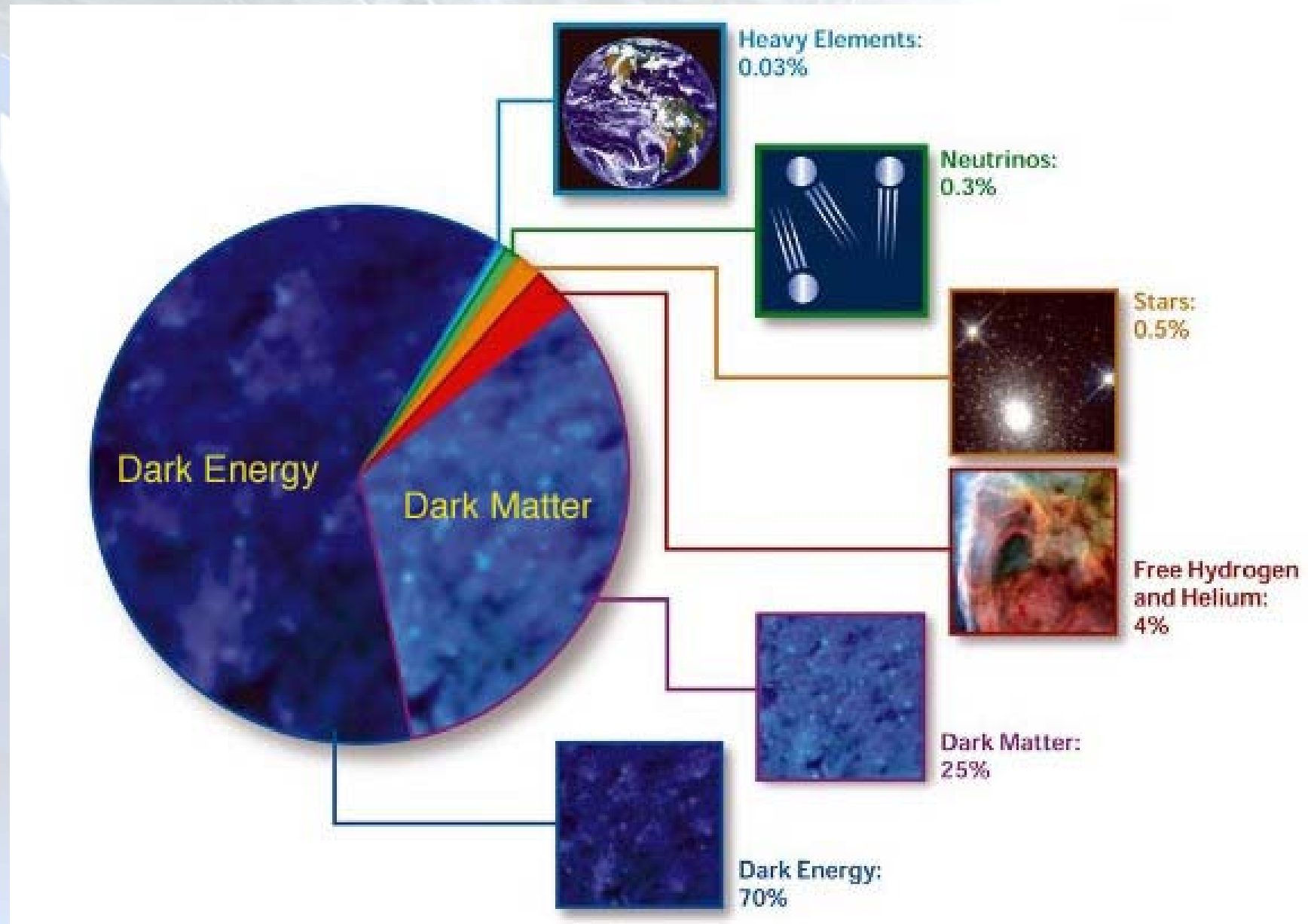
le Big Bang



Unification des forces



Énergie et matière noires

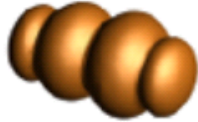


Les interactions

Forte

1

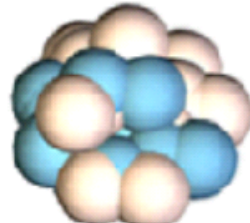
Gluons (8)



Quarks



Mesons
Baryons

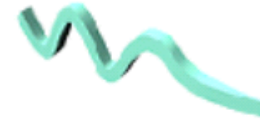


Nuclei

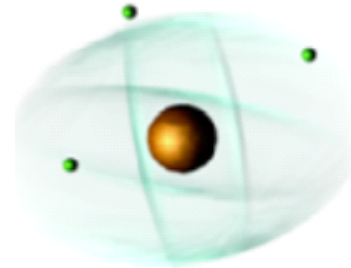
Electromagnétique

10^{-2}

Photon



Atomes
Lumière
Chimie
Électronique



Gravitationnelle

10^{-38}

Graviton ?



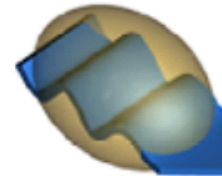
Système solaire
Galaxies



Faible

10^{-5}

Bosons (W,Z)



Radioactivité β

