

Comprendre l'infiniment petit

Physique des particules

(Cours basé sur celui de Y. Amhis et S. Descotes-Genon)

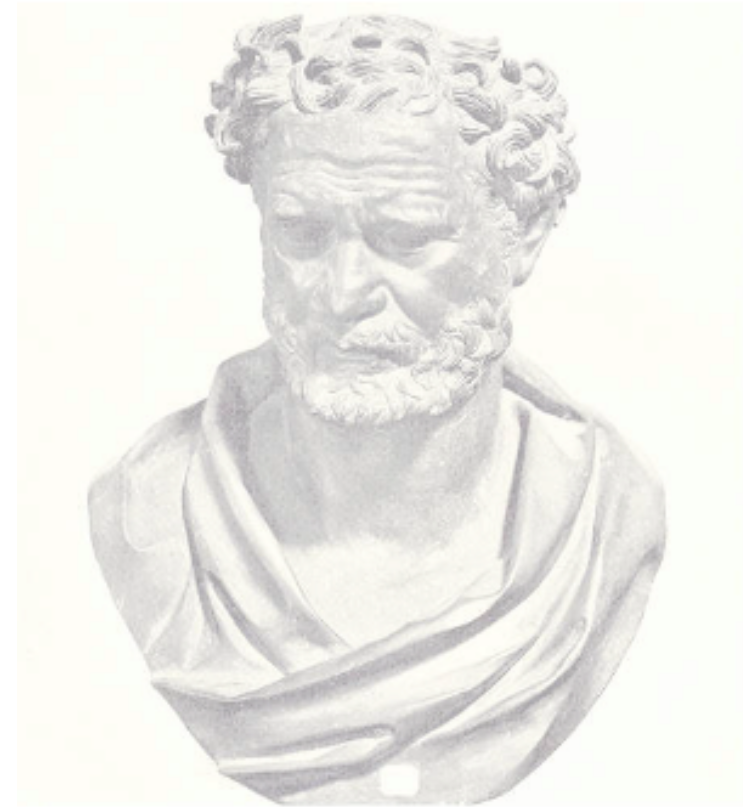
A. de Wit, 29/06/2026

Bonjour!

- Physicienne des particules, expérience CMS au CERN
- Chargée de recherche CNRS au LLR (jeudi!) / enseignement à l'École polytechnique
- Licence aux Pays-Bas, Master et thèse en Angleterre
- Post-doctorats à DESY (Allemagne) et Université de Zurich (Suisse), avant d'atterrir en région Parisienne en 2023.

De quoi est constituée la matière ?

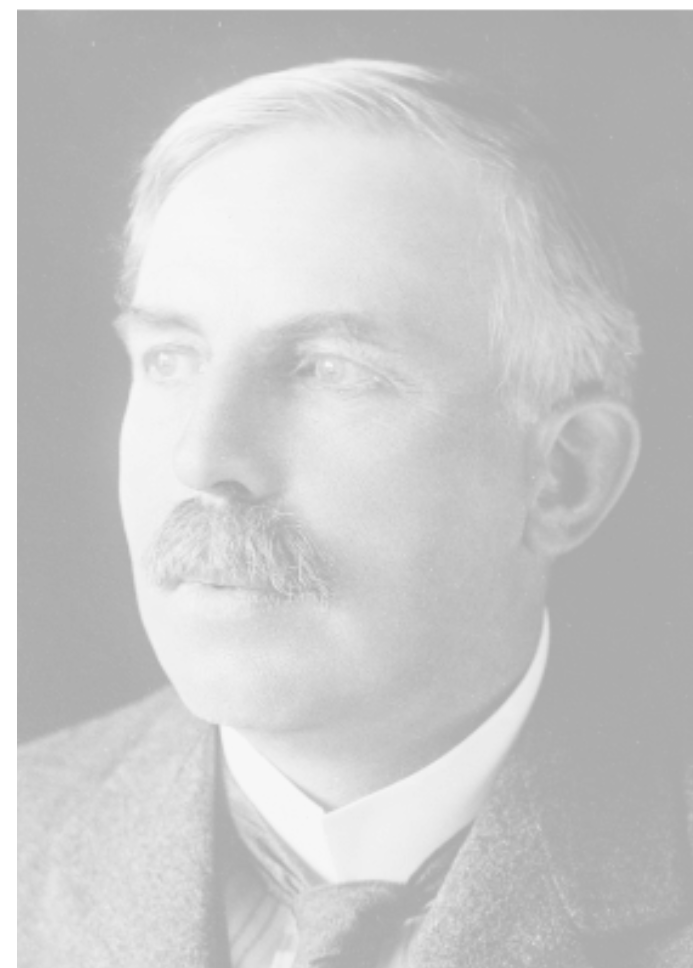
Démocrite



Lavoisier



Rutherford



Weinberg



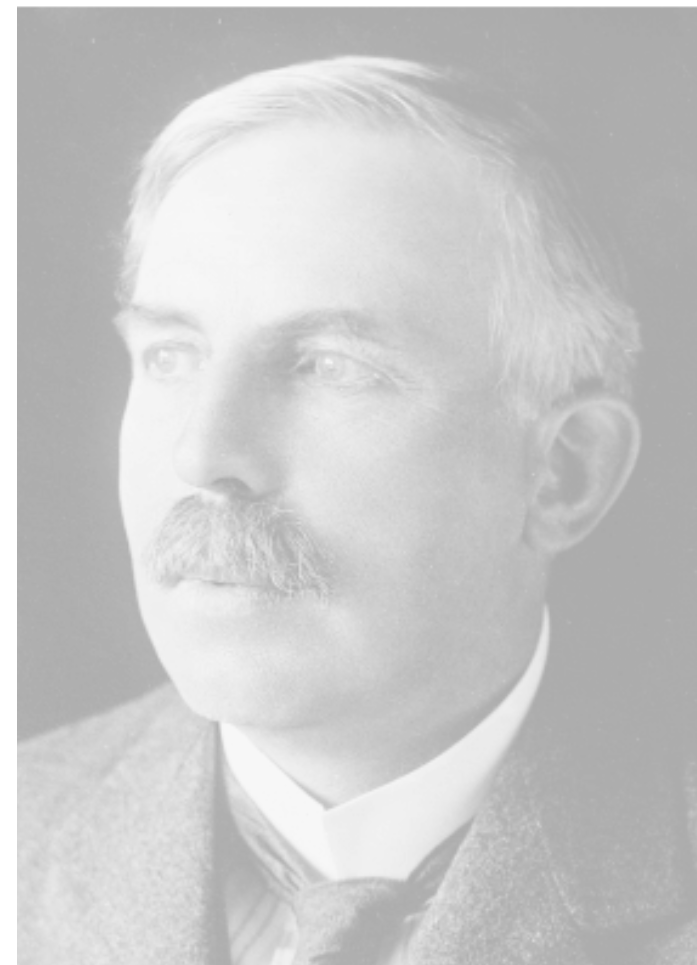
De quoi est constituée la matière ?

Antiquité (philosophe grec): Démocrite
air, eau, terre, feu

Atomes



Rutherford



Weinberg



De quoi est constituée la matière ?

Antiquité (philosophe grec): Démocrite
air, eau, terre, feu

Atomes



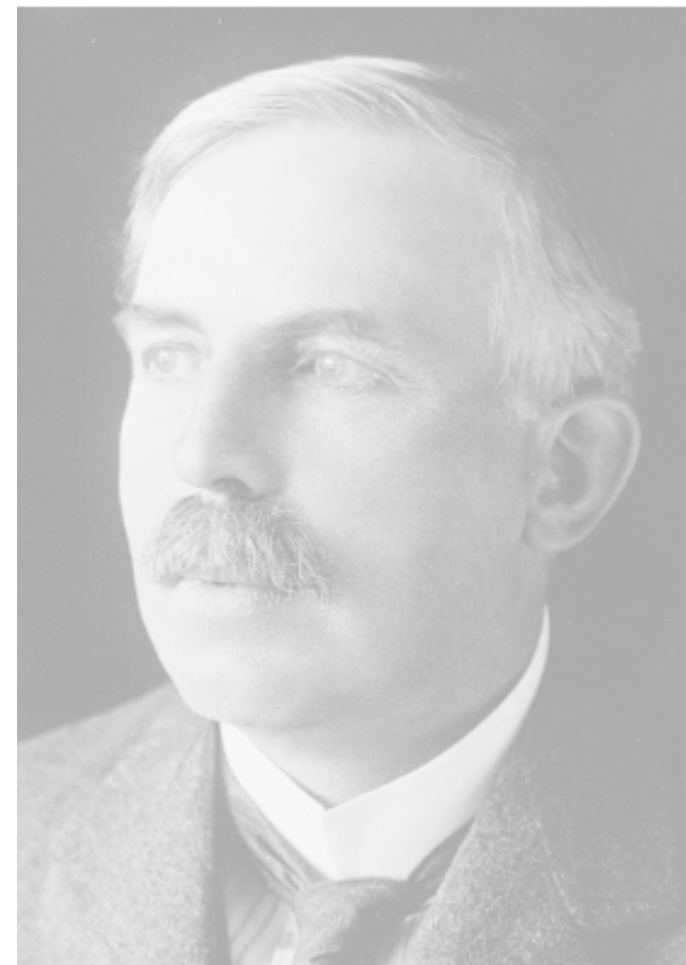
Lavoisier



18-19ième siècle (chimiste)

Molécules faites d'atomes

Rutherford



Weinberg



De quoi est constituée la matière ?

Antiquité (philosophe grec): Démocrite
air, eau, terre, feu

Atomes



Lavoisier



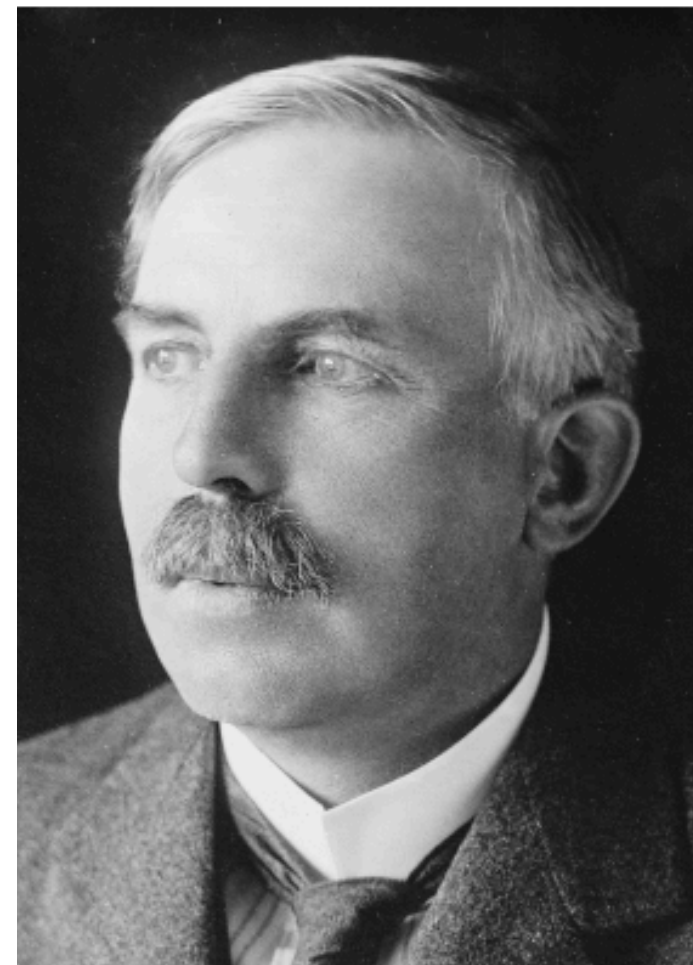
18-19ième siècle (chimiste)

Molécules faites d'atomes

19-20ième siècle
(physicien(ne) atomique &
nucléaire)

Électrons et noyaux atomiques

Rutherford



Weinberg



De quoi est constituée la matière ?

Antiquité (philosophe grec): Démocrite
air, eau, terre, feu

Atomes



Lavoisier



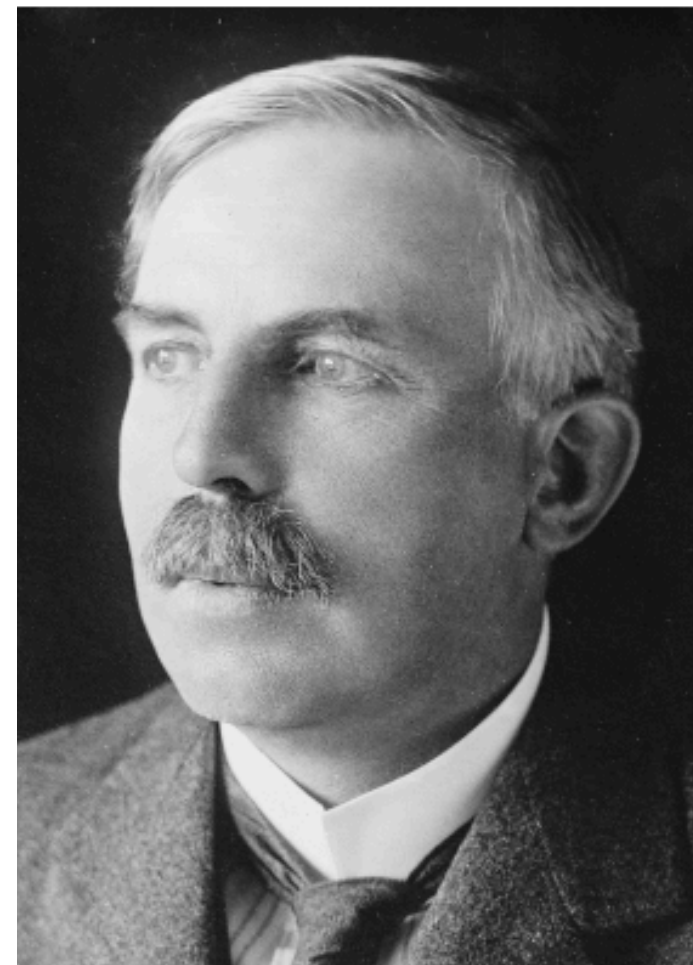
18-19ième siècle (chimiste)

Molécules faites d'atomes

19-20ième siècle
(physicien(ne) atomique &
nucléaire)

Électrons et noyaux atomiques

Rutherford



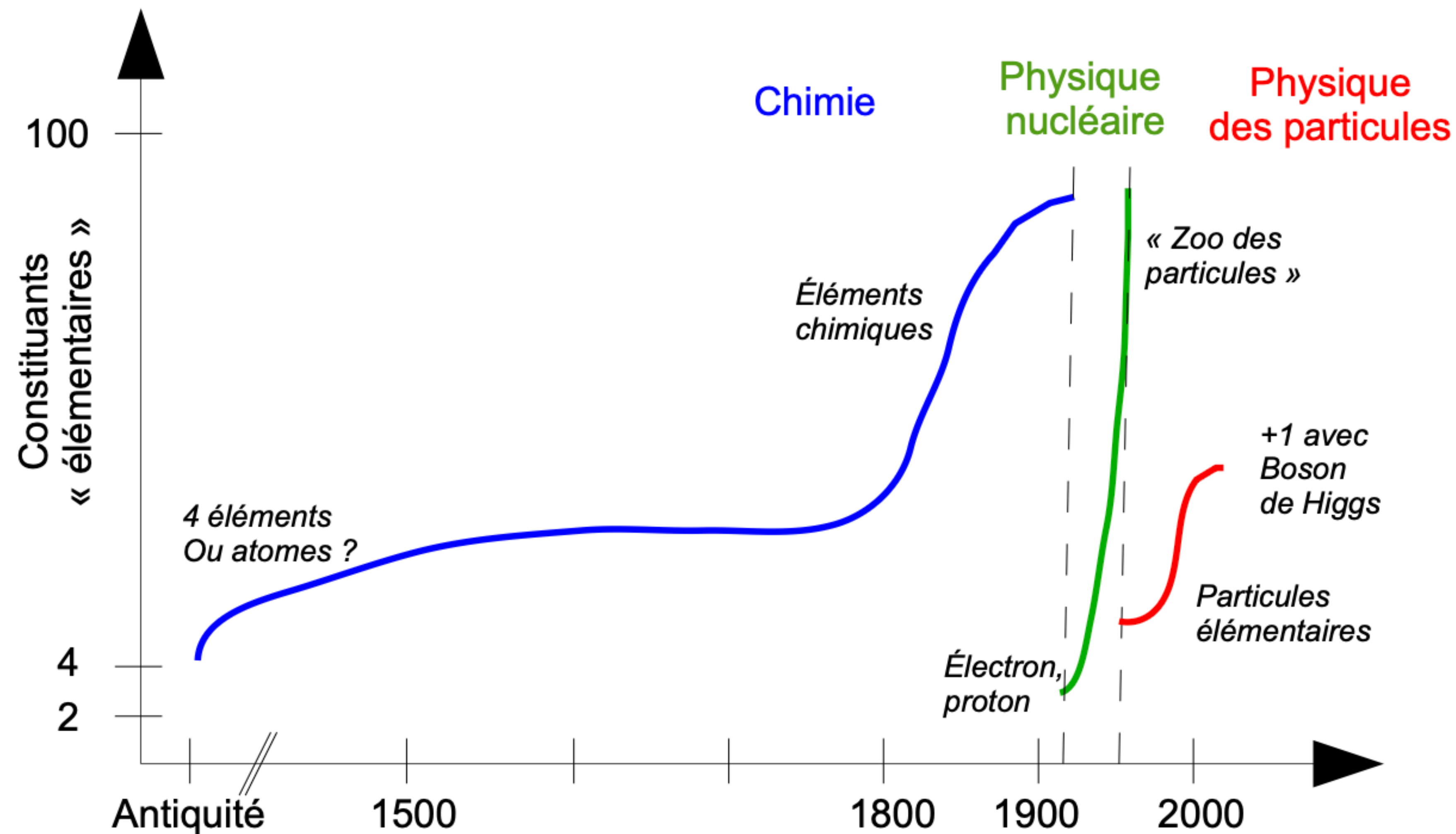
Weinberg



20-21ième siècle (physicien(ne))
des particules)

Particules élémentaires

Constituents "élémentaires" à travers le temps



Nombre de composants de matière peut varier avec les changements de paradigmes

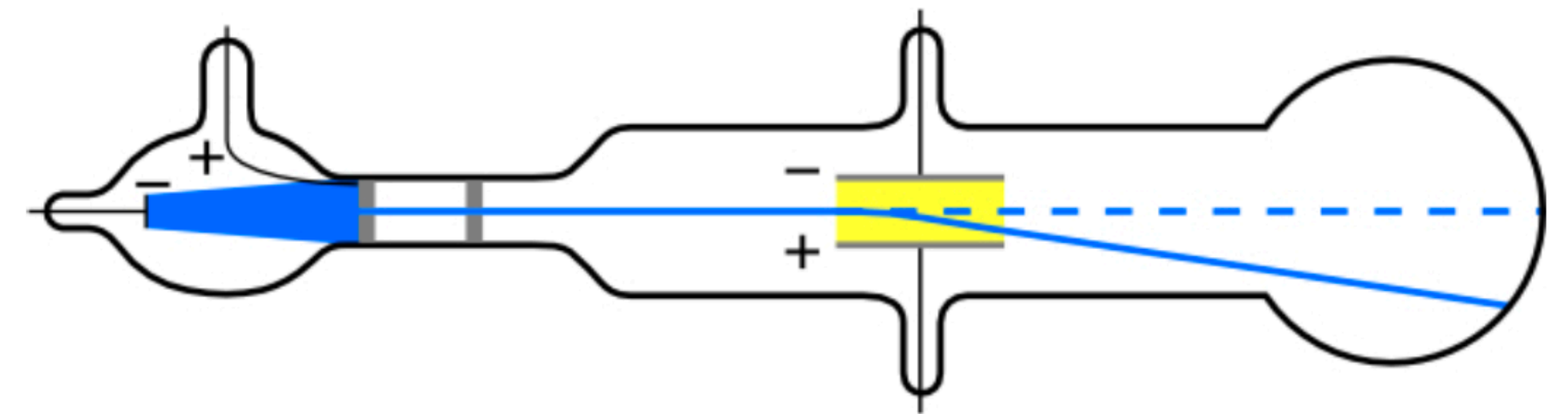
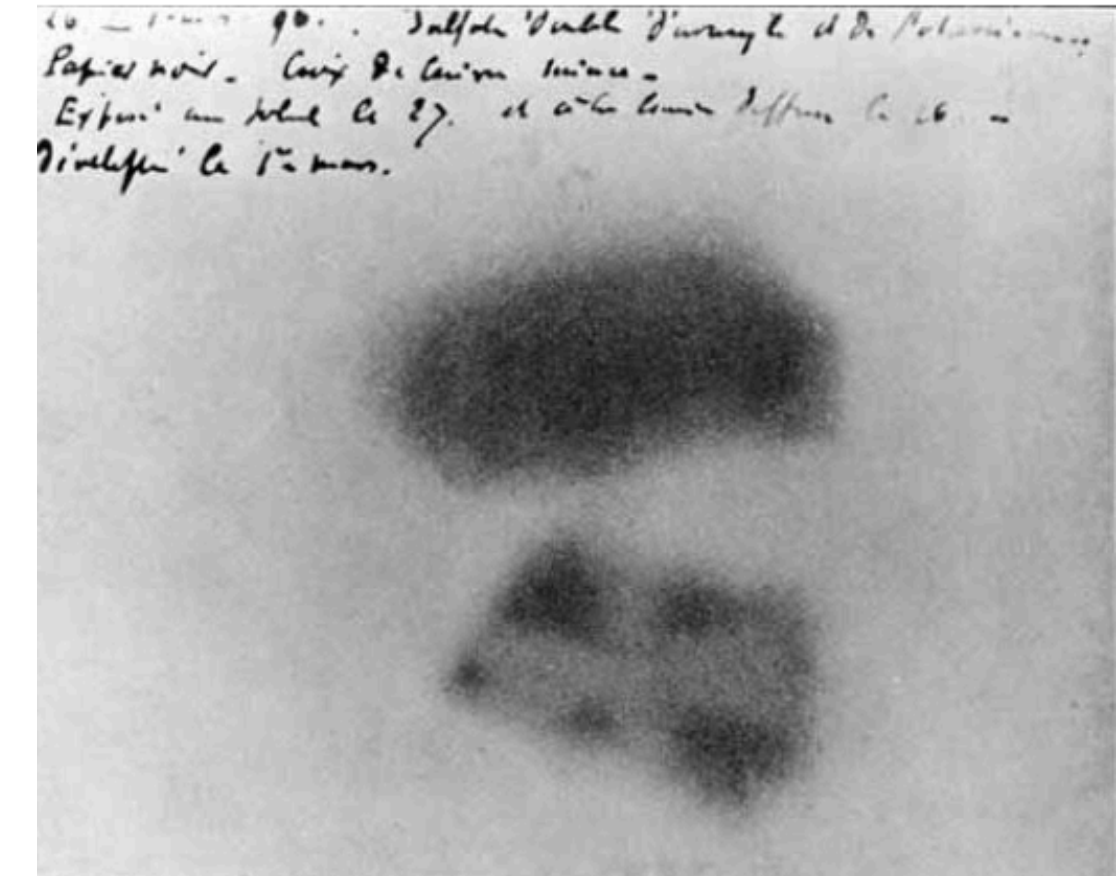
La classification périodique des éléments

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 Lr							

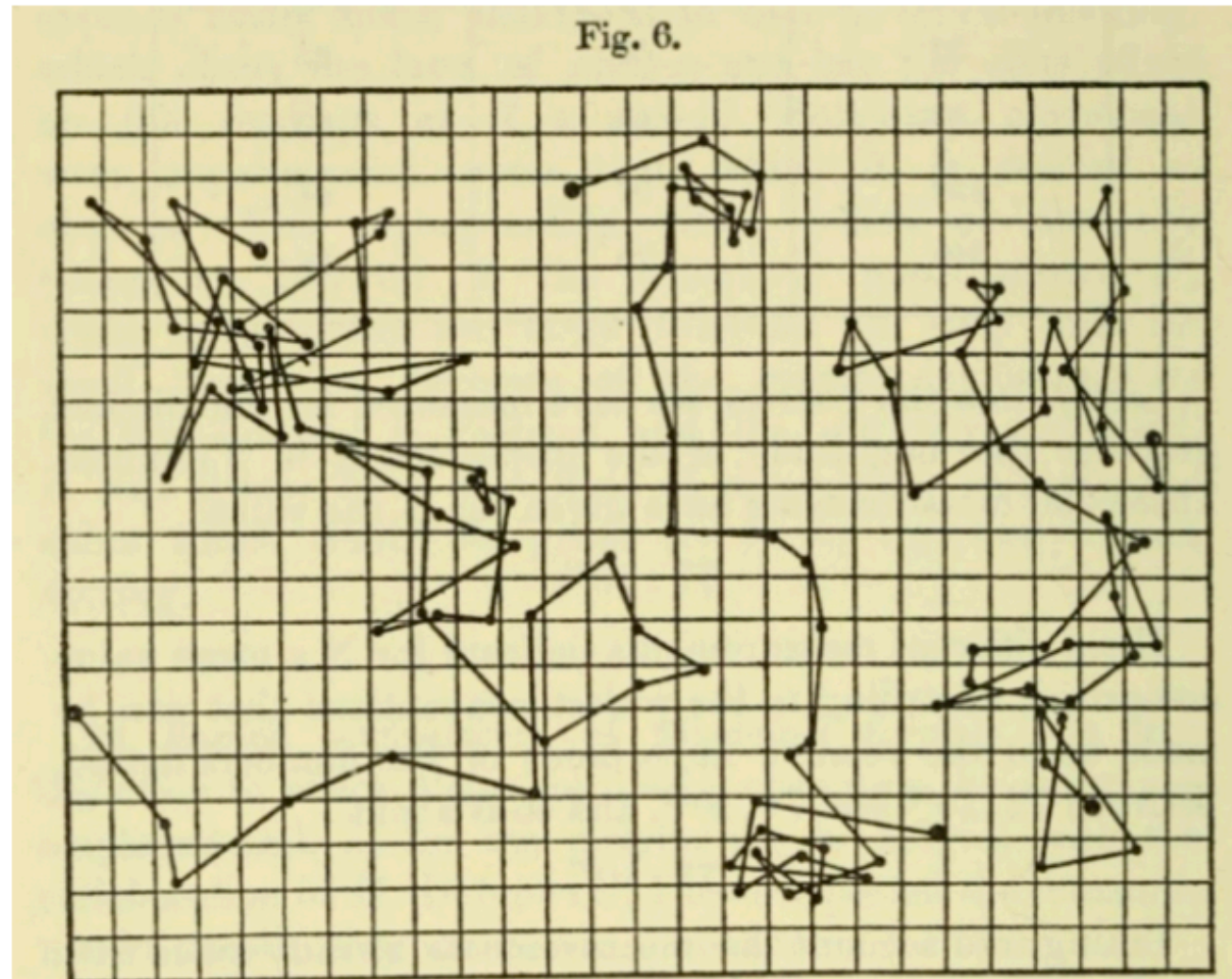
- Proposée par Mendeleïev en 1869
- Basée sur les résultats expérimentaux de l'époque
- Sans connaître la structure électronique des atomes
- De nombreux emplacements vides (remplis depuis !)

Des rayonnements

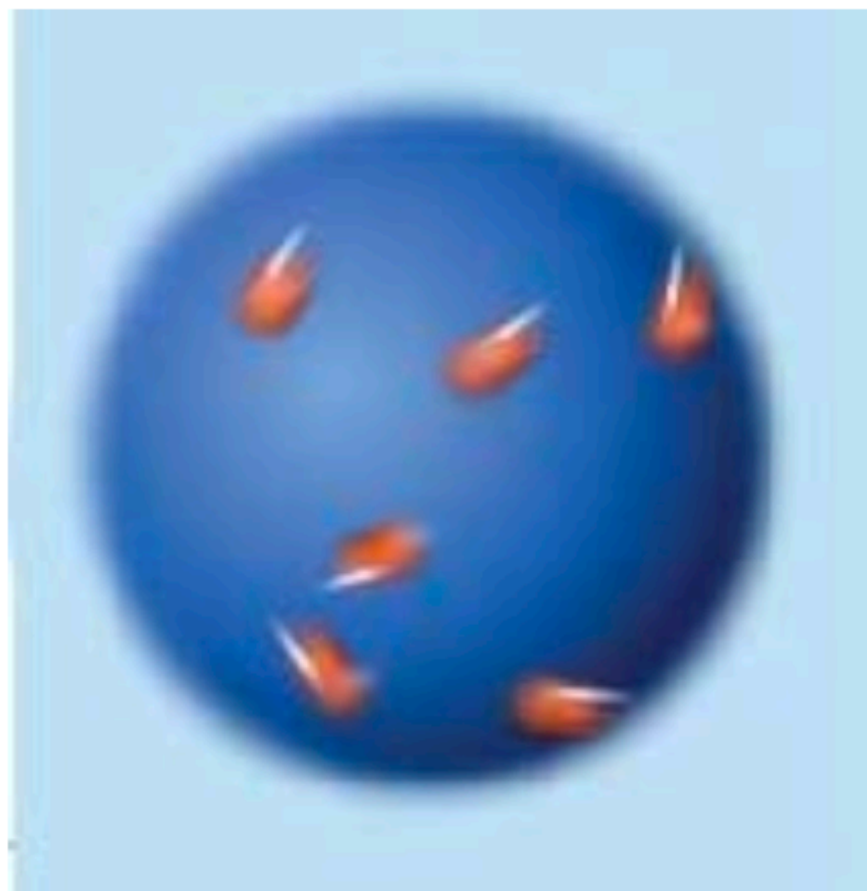
- 1892: certains composés sont instables et se désintègrent en émettant un rayonnement
 - Découverte de la radioactivité (H. Becquerel, P. et M. Curie)
- 1897: rayonnement cathodique infléchi par $\vec{E}$, $\vec{B}$ (J.J. Thomson)
 - Charge négative
 - rapport charge/masse très élevé
 - Indépendant du matériau utilisé
 - l'électron, constituant de l'atome



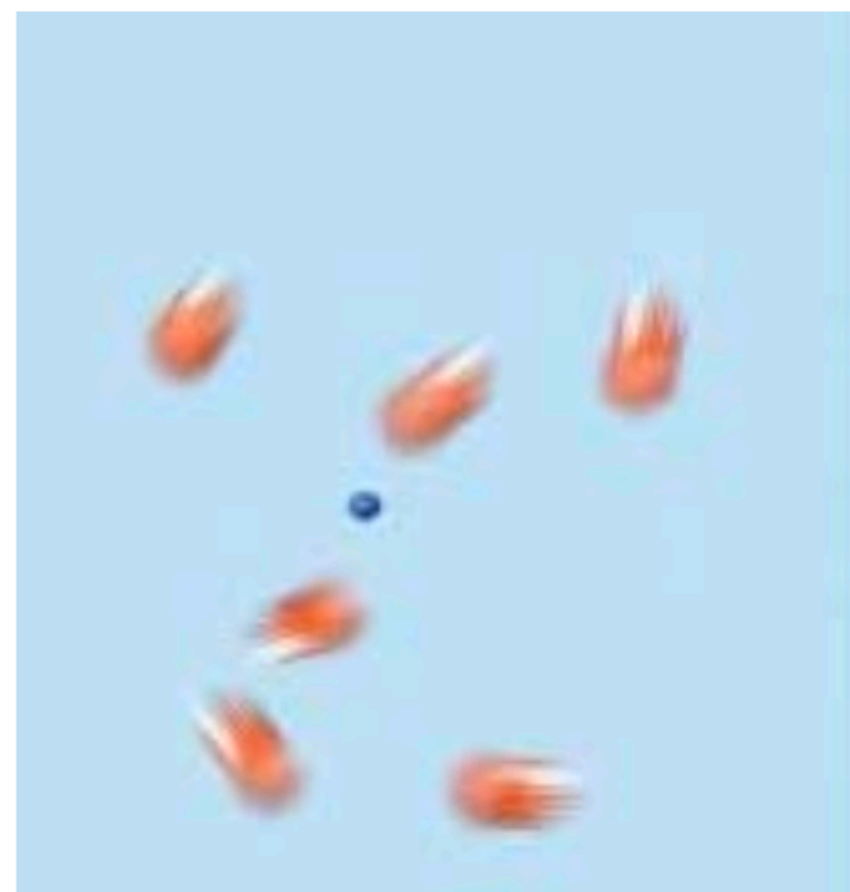
L'hypothèse atomique



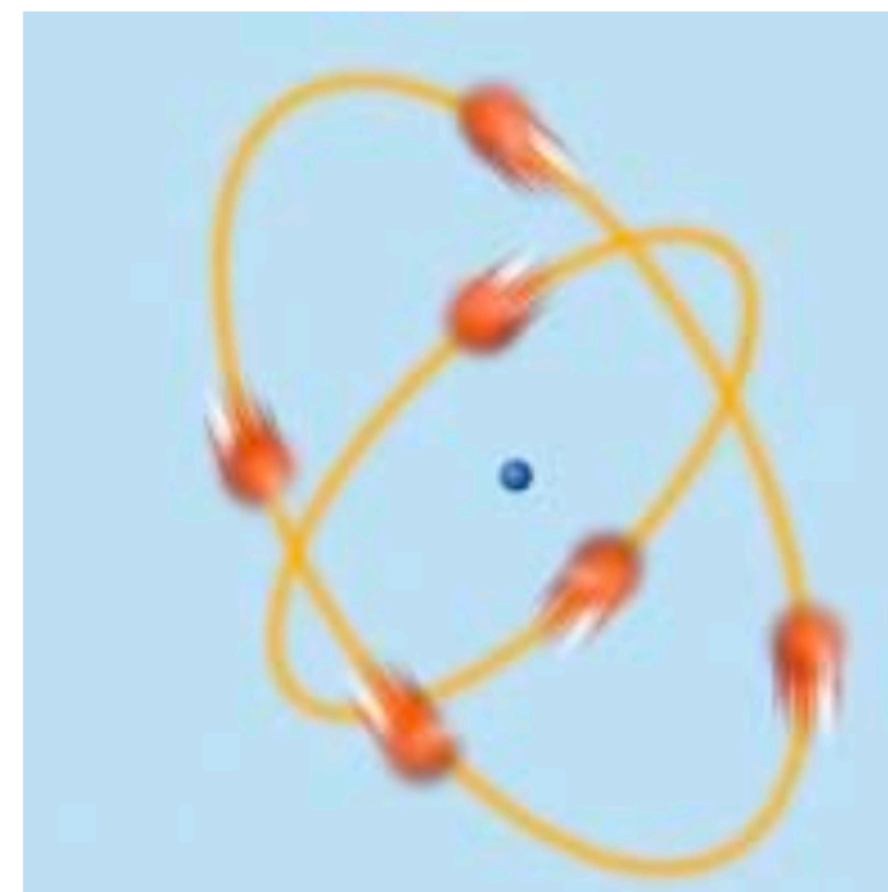
- Mouvement aléatoire de pollen dans l'eau (Brown, 1827)
- Due aux collisions du pollen avec les molécules d'eau (Einstein 1905, vérifié par Perrin 1908)
- Diverses visions de plus en plus quantiques sur le rôle de l'électron (probabilité de présence autour du noyau)



Thomson (1903)



Rutherford(1909)

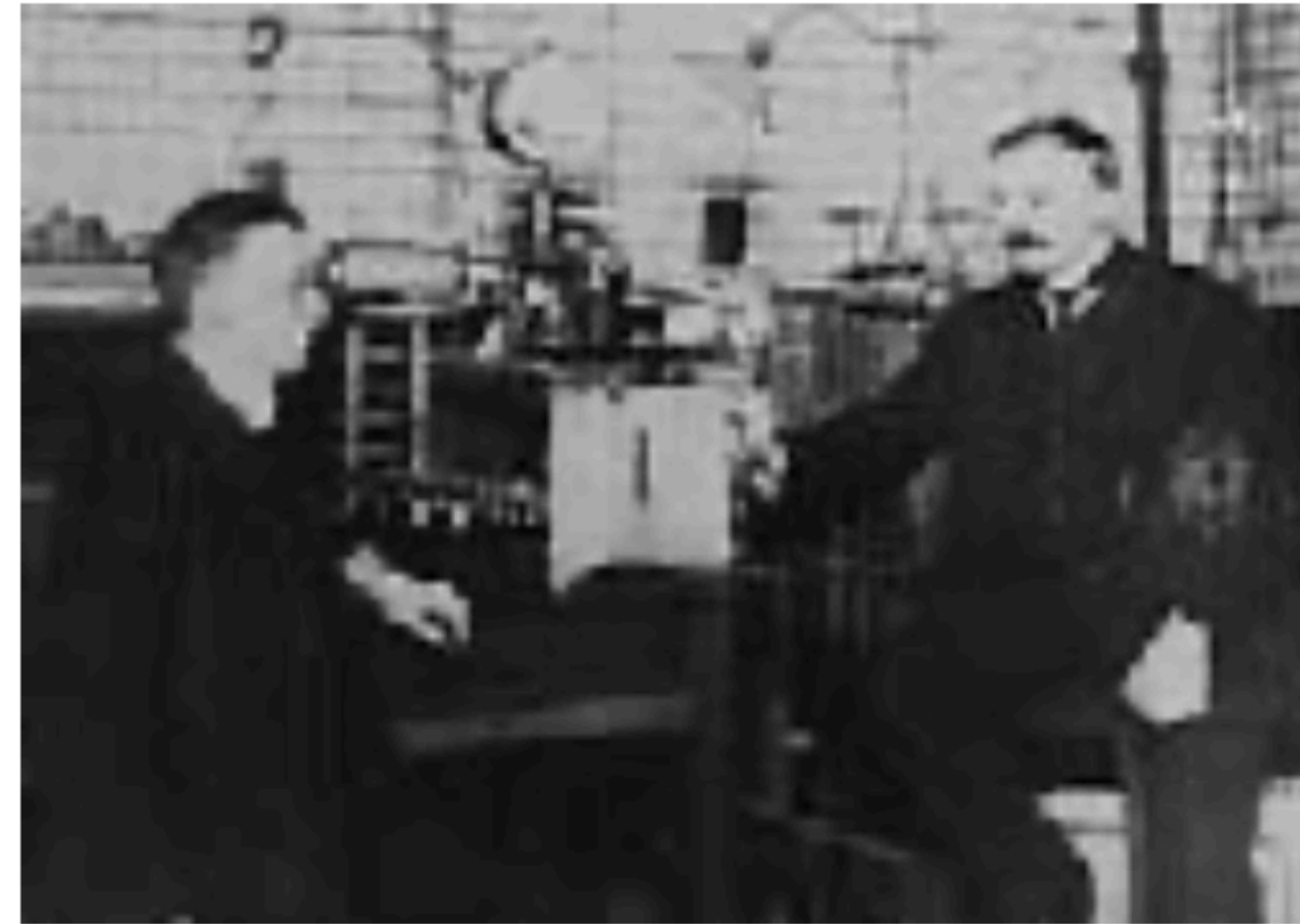
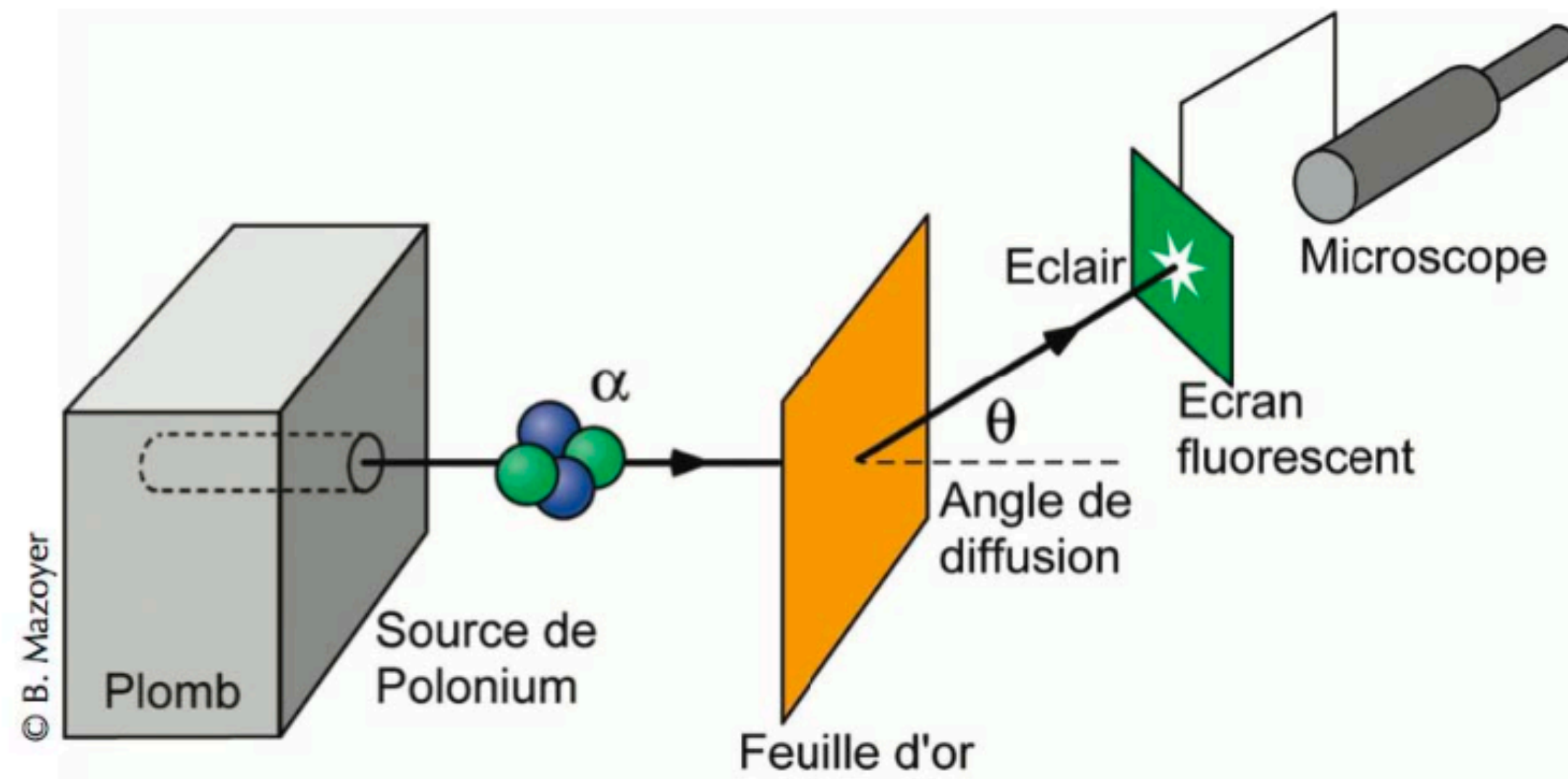


Bohr (1913)



Vision moderne

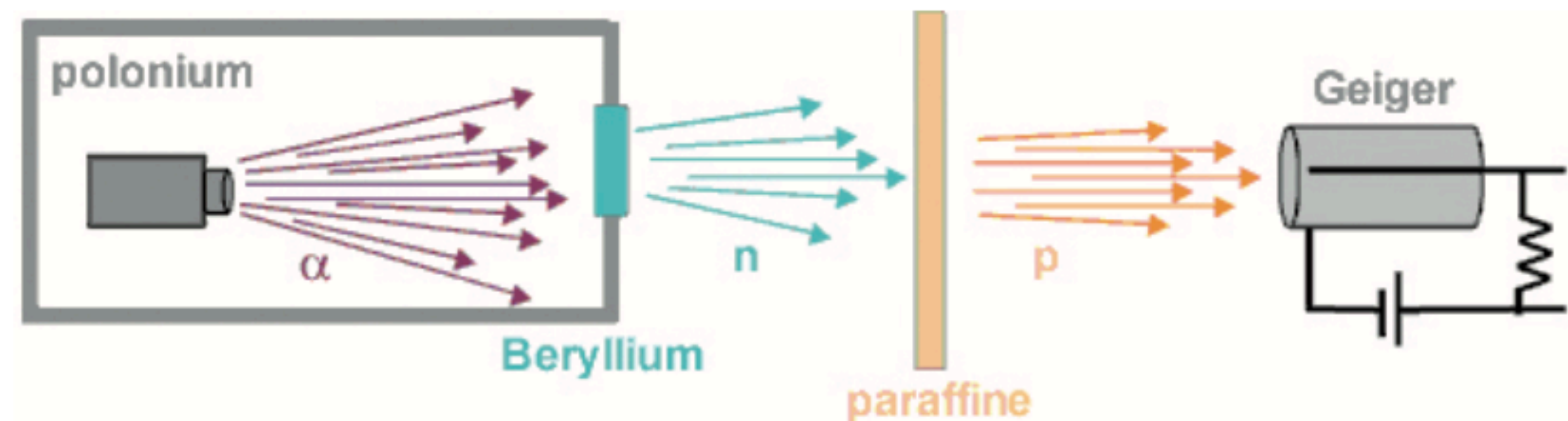
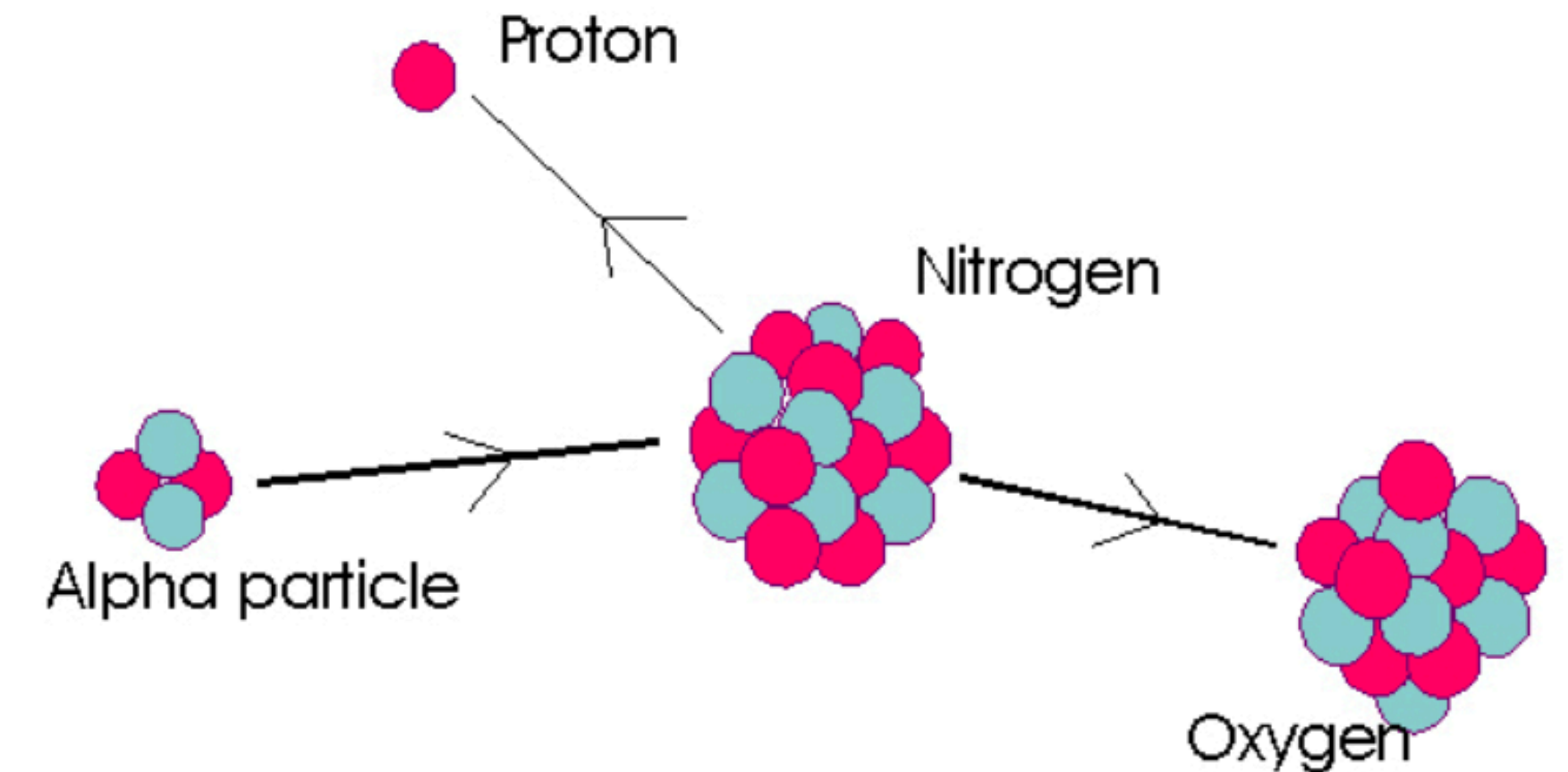
Le noyau



- 1909: Geiger, Marsden, Rutherford frappent une feuille d'or avec des particules α
- La plupart traverse la feuille sans problème
- Une petite fraction rebondit sur un obstacle de petite taille
 - Le noyau atomique (100000 fois plus petit que l'atome)

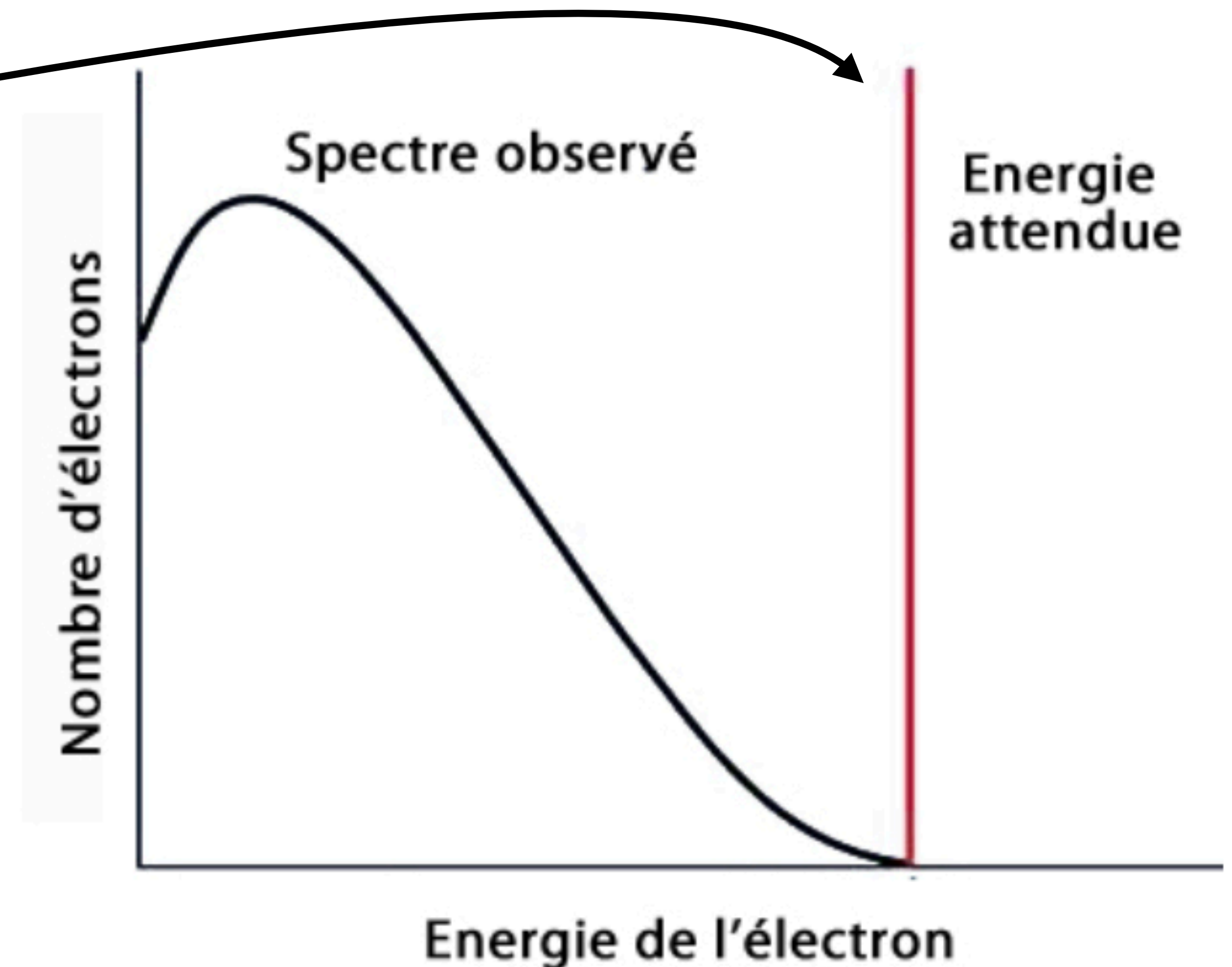
Le proton et le neutron

- 1917-1919 première réaction nucléaire
 - $^{14}\text{N} + \alpha \rightarrow ^{17}\text{O} + p$ (Noyau d'H, proton, constituant de tous les noyaux)
- 1932: nouveau rayonnement inconnu, fait de particules de masse quasi-identique au proton, mais neutres
- Neutron (Chadwick, prédit par Rutherford en 1920)



Le neutrino

- 1930: si les désintégrations β conservent l'énergie, $X \rightarrow Y + e^-$ aboutirait à E_e fixe
- Pas ce qui est observé: en fait, $X \rightarrow Y + e + \nu$
- Neutrino imaginé par Pauli, décrit par Fermi



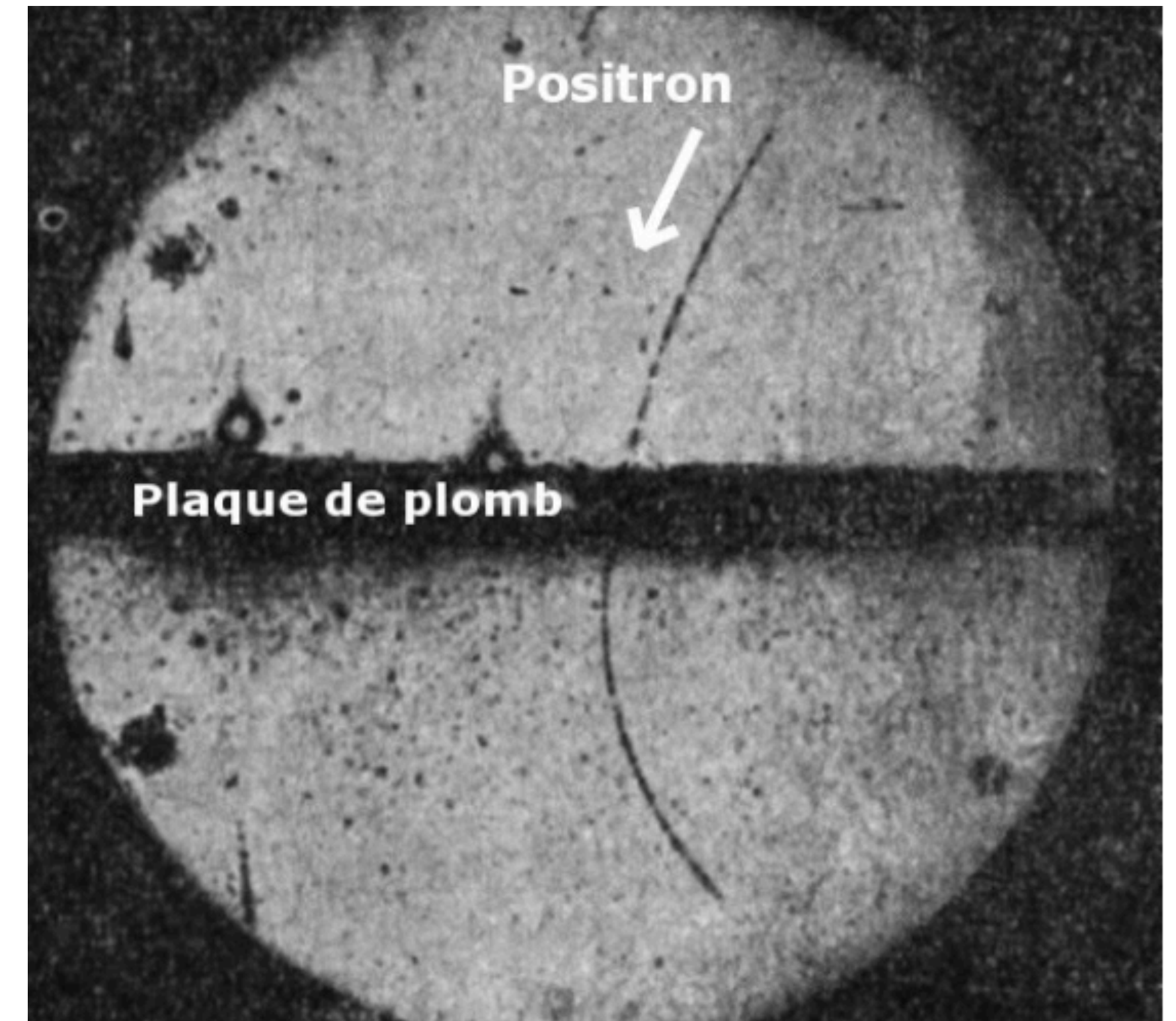
Le neutrino

- 1956: détection du neutrino électronique par Reines et Cowan auprès d'une central nucléaire
- Réaction $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^- + n$
- A ce stade nous avons donc:
proton, neutron, electron, neutrino

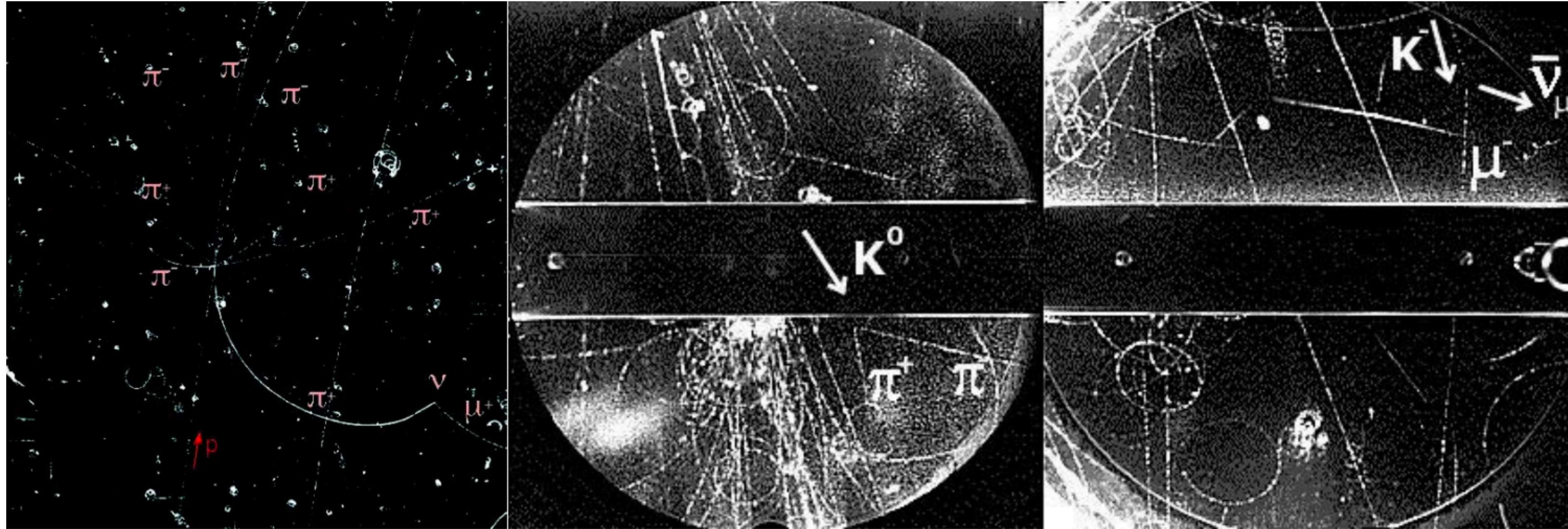


Des particules de l'espace

- 1932: Anderson analyse les particules dans les rayons cosmiques arrivant sur Terre
- Chambre à brouillard pour visualiser particules chargées ($\vec{B}$ pour courber trajectoires)
- Observation d'une particule avec la même masse qu'un électron, mais charge électrique opposée: positron



Des particules de l'espace



- Clichés de rayons cosmiques dans des chambres à brouillard
 - 1937: muon μ^- (sorte d'électron massif et instable)
 - 1947: pions π , particules "étranges" K , Λ^0
- I. Rabi à propos du muon: "Who ordered that?"

Encore plus, voire trop, de particules



Années 1950: trop de particules "élémentaires":

p , n , π , K , Λ , Ω , Θ , ρ , σ , η , π' , D , D_s , B , B_s , a_0 , f_0 , $X(3850)$...

Wolfgang Pauli: *Si je pouvais me souvenir du nom de toutes ces particules, je serais devenu botaniste !*

Ou alors ce ne sont pas des particules élémentaires

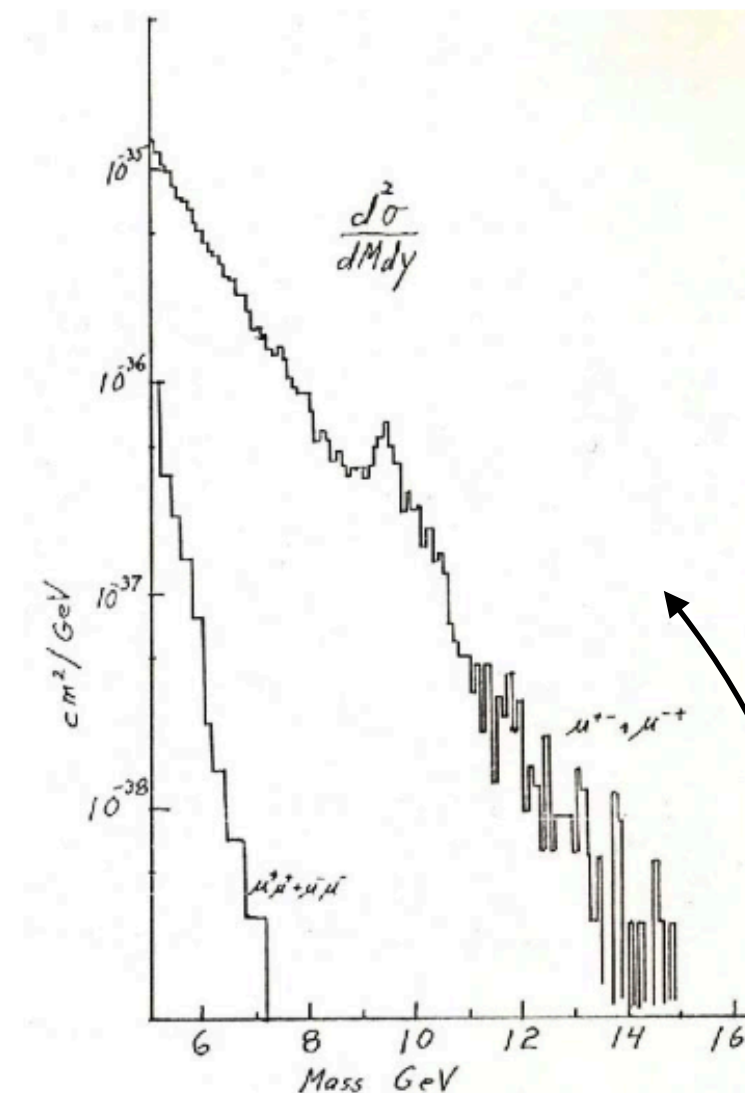
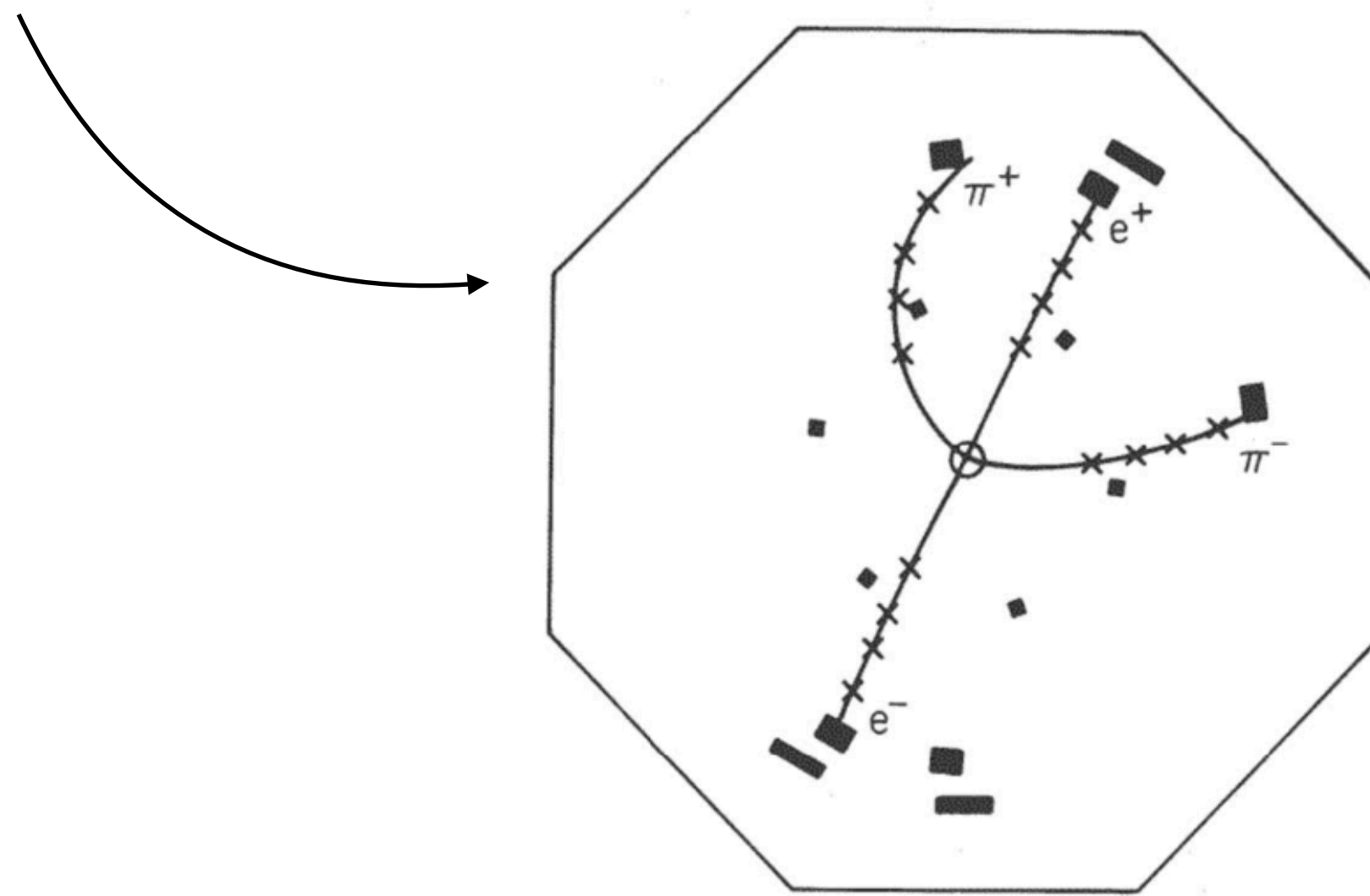
- 1964: Gell-Mann, Zweig proposent les quarks comme constituants de toutes ces particules (pas si élémentaires)
- $p = uud$, $n = udd$, $\Lambda^0 = uds$
 - u: up, d : down, s: étrange
- Prédit de nouvelles combinaisons ($\Delta = uuu$, $\Omega = sss$)
 - Ainsi que leurs masses, caractéristiques et désintégrations
- Sous-structure du proton confirmée en 1968
- ... Mais d'où vient de ce quark étrange ? et le muon ?

Comment analyser la matière?

- Casser la matière avec particules d'E de plus en plus élevée, photons de plus en plus énergétiques, projectiles déviés par constituants...
- Particule ou onde ?
 - Les deux ! Probabilité de présence
- En même temps: relativité restreinte: Equivalence entre énergie et matière $E=mc^2$
- avec énergie suffisamment élevée on peut créer de nouvelles particules !

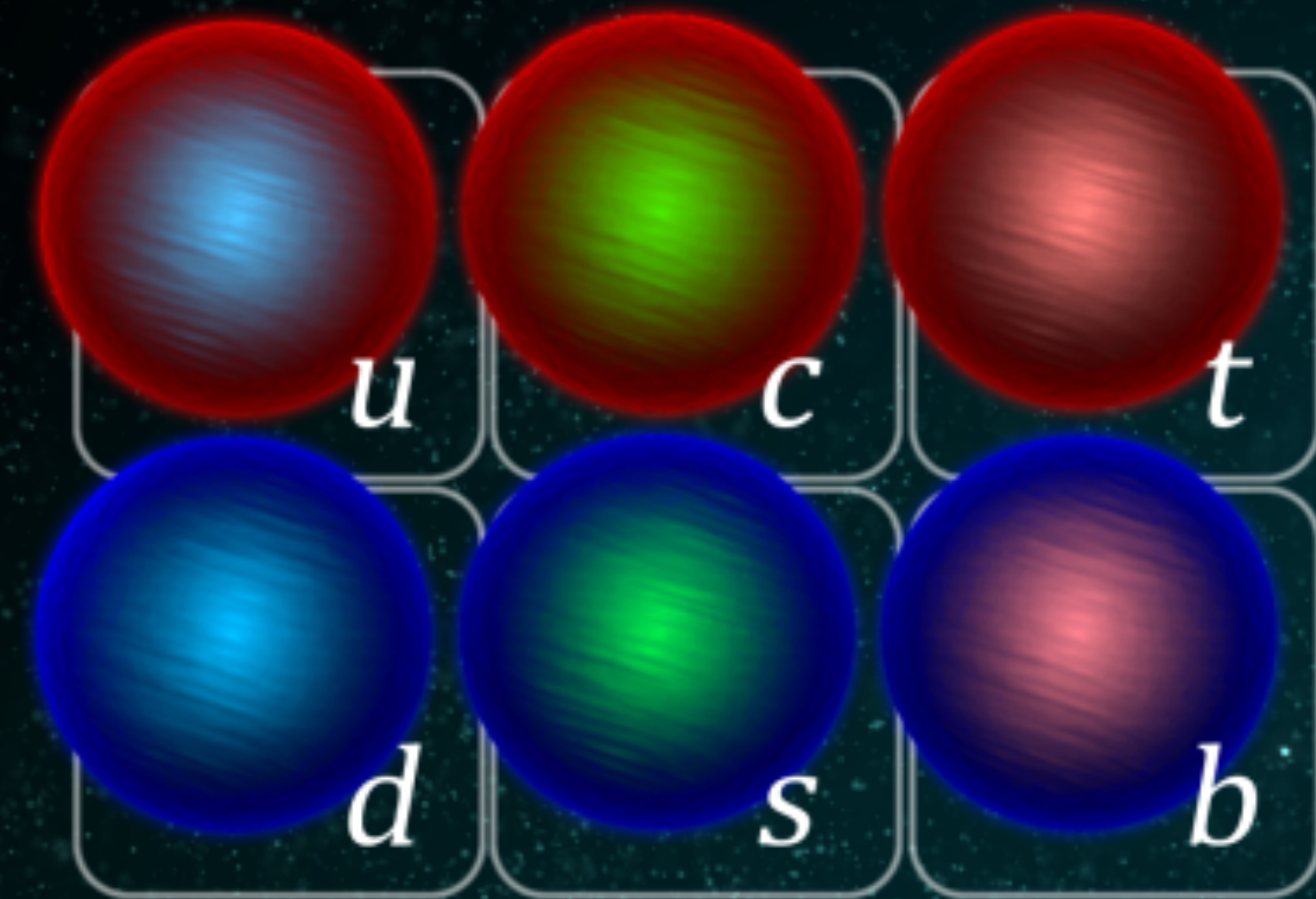
La révolution de novembre

- Le 11 novembre 1974, SLAC (Californie) et Brookhaven (New York) annoncent une nouvelle particule, le J/ψ
- Produite dans collisions e^+e^- , constituée d'un quark charmé et d'un antiquark charmé ($c\bar{c}$)

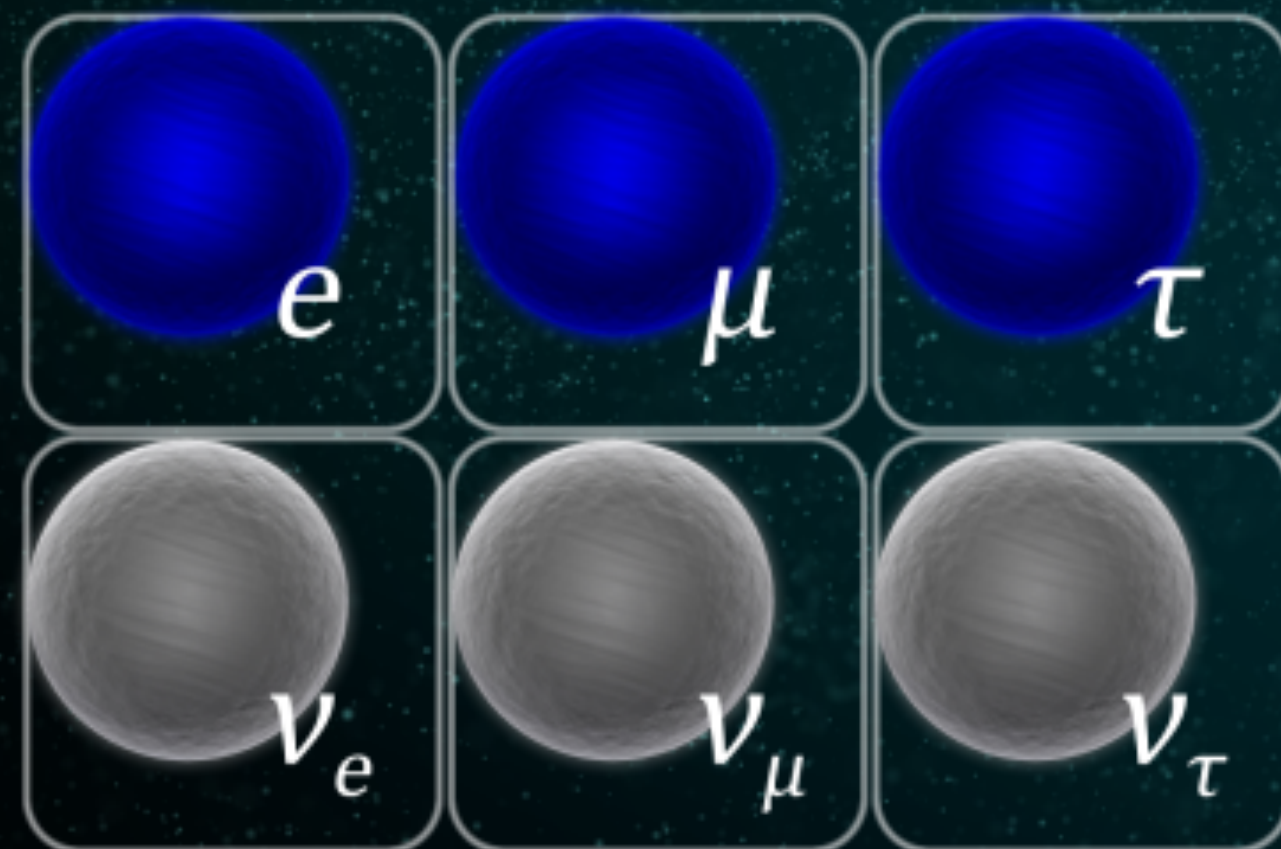


Découverte en 1977 d'un cinquième quark b (sous forme de $\Upsilon(b\bar{b})$)

Le modèle standard d'aujourd'hui

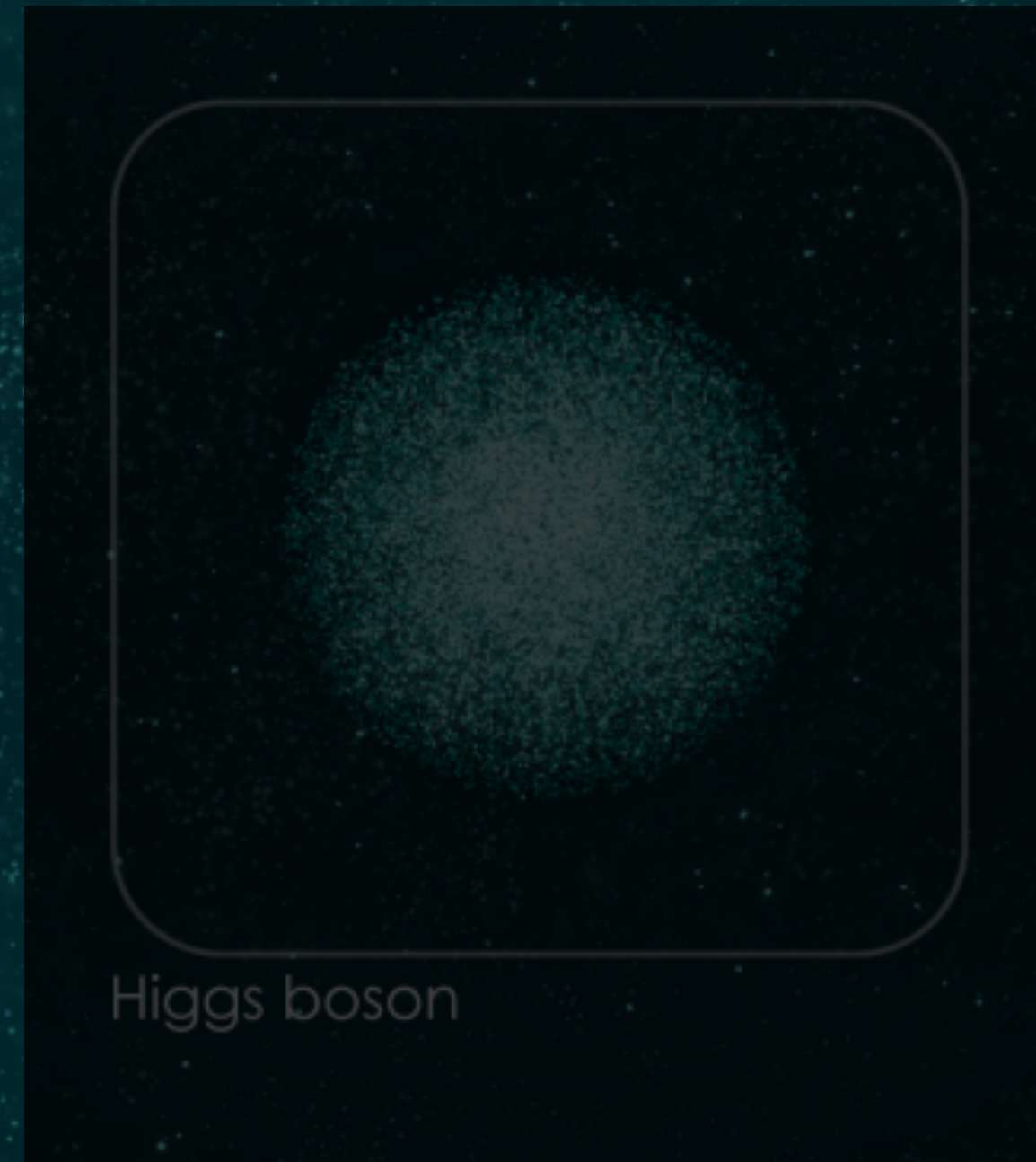


Quarks



Leptons

Matière



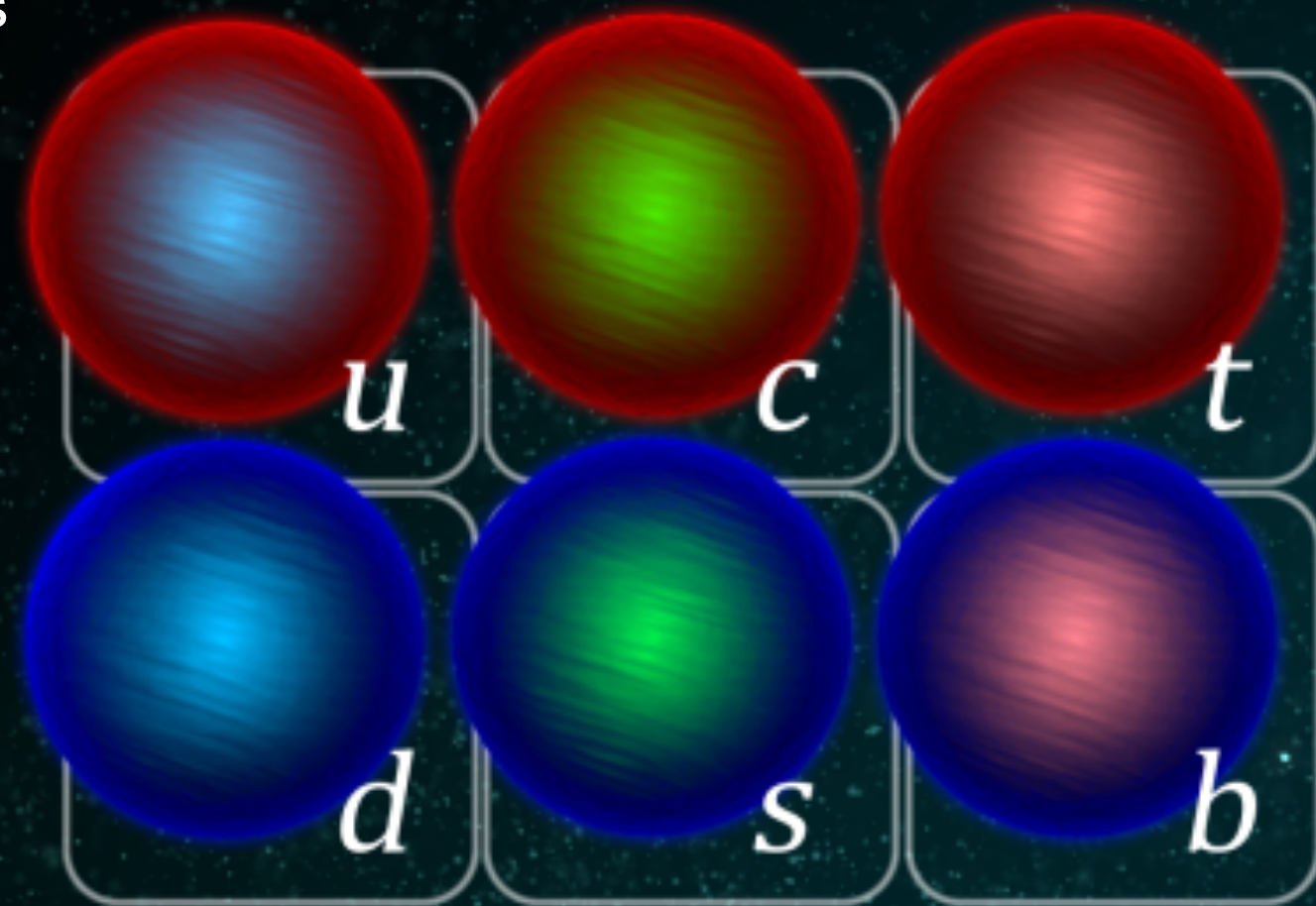
Higgs boson



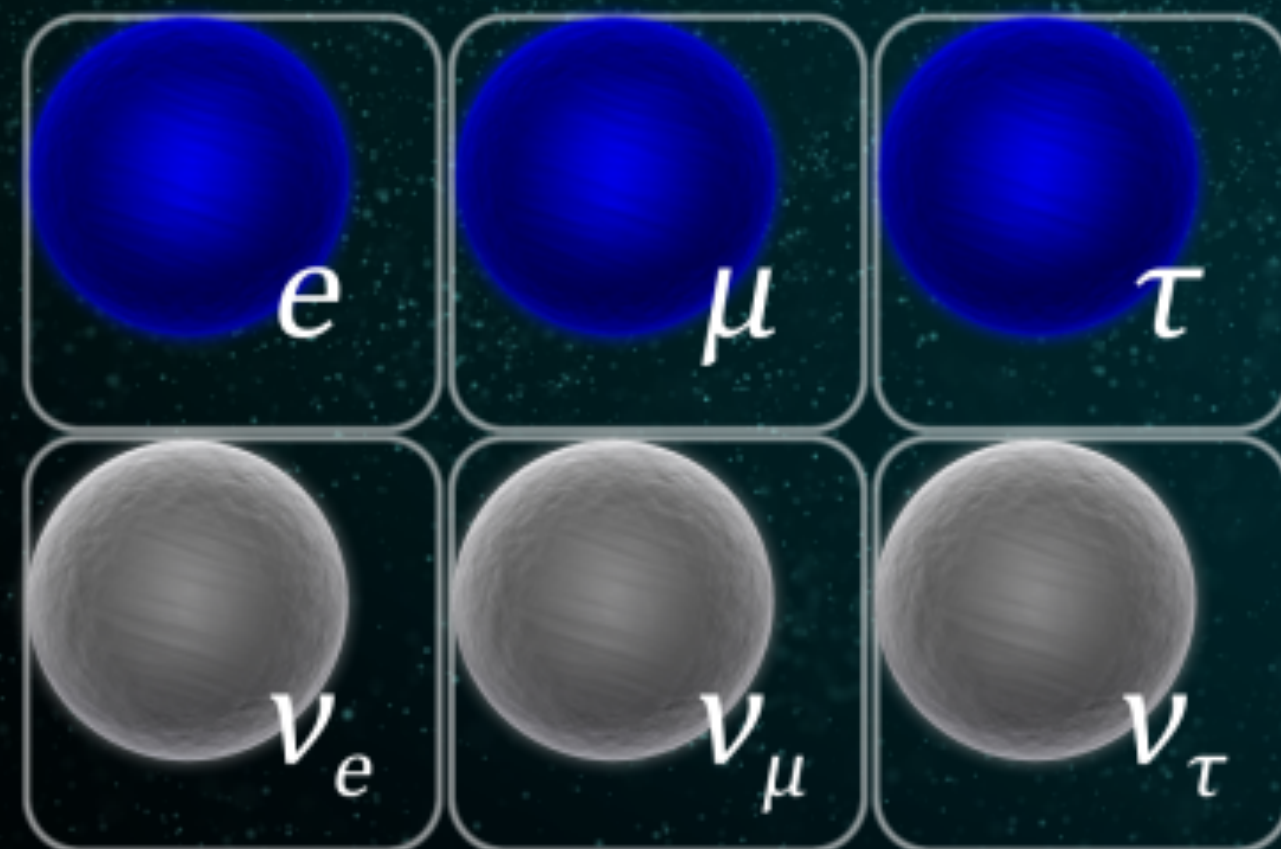
Forces

Le modèle standard d'aujourd'hui

Génération

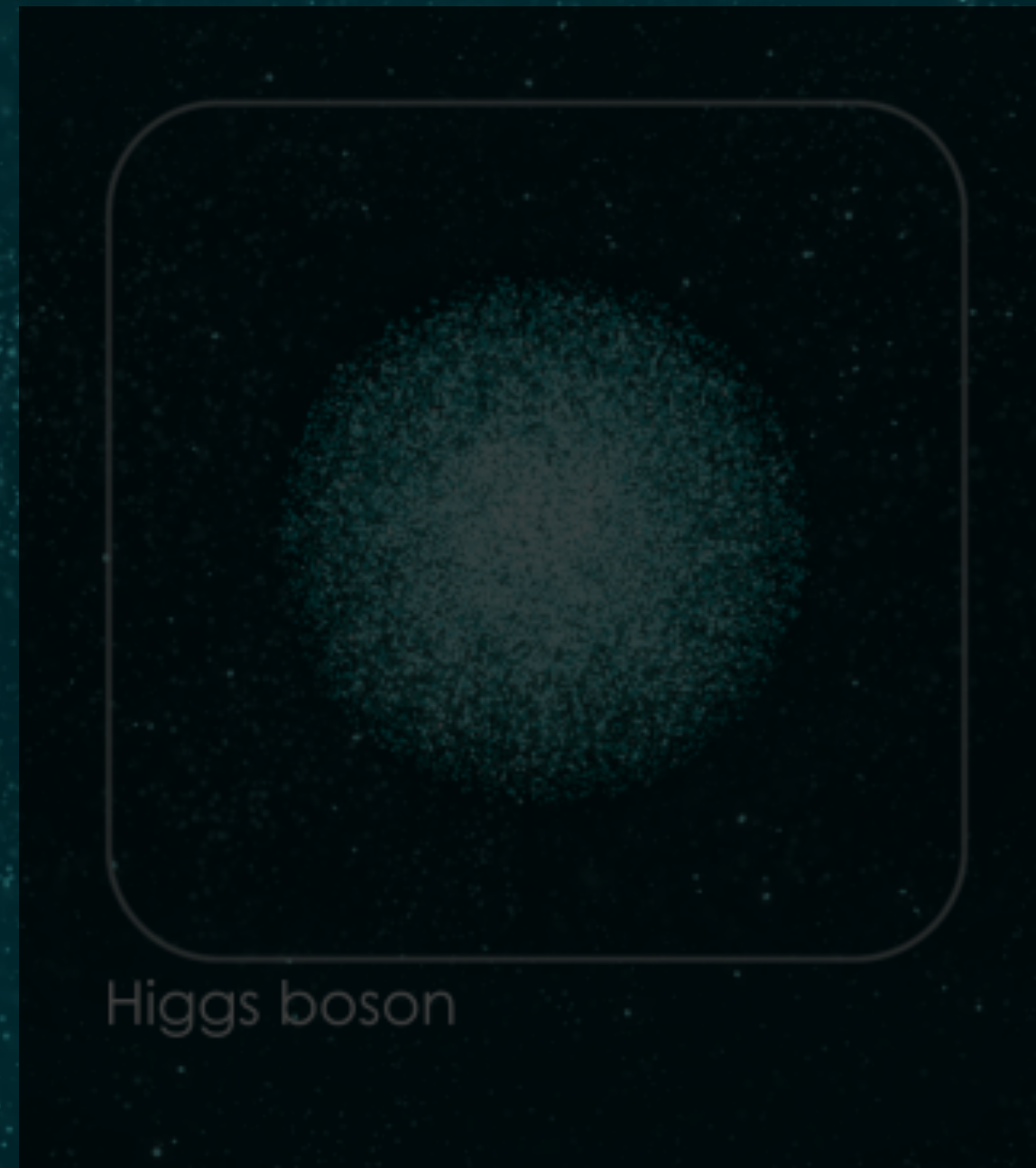


Quarks



Leptons

Matière



Higgs boson



Forces

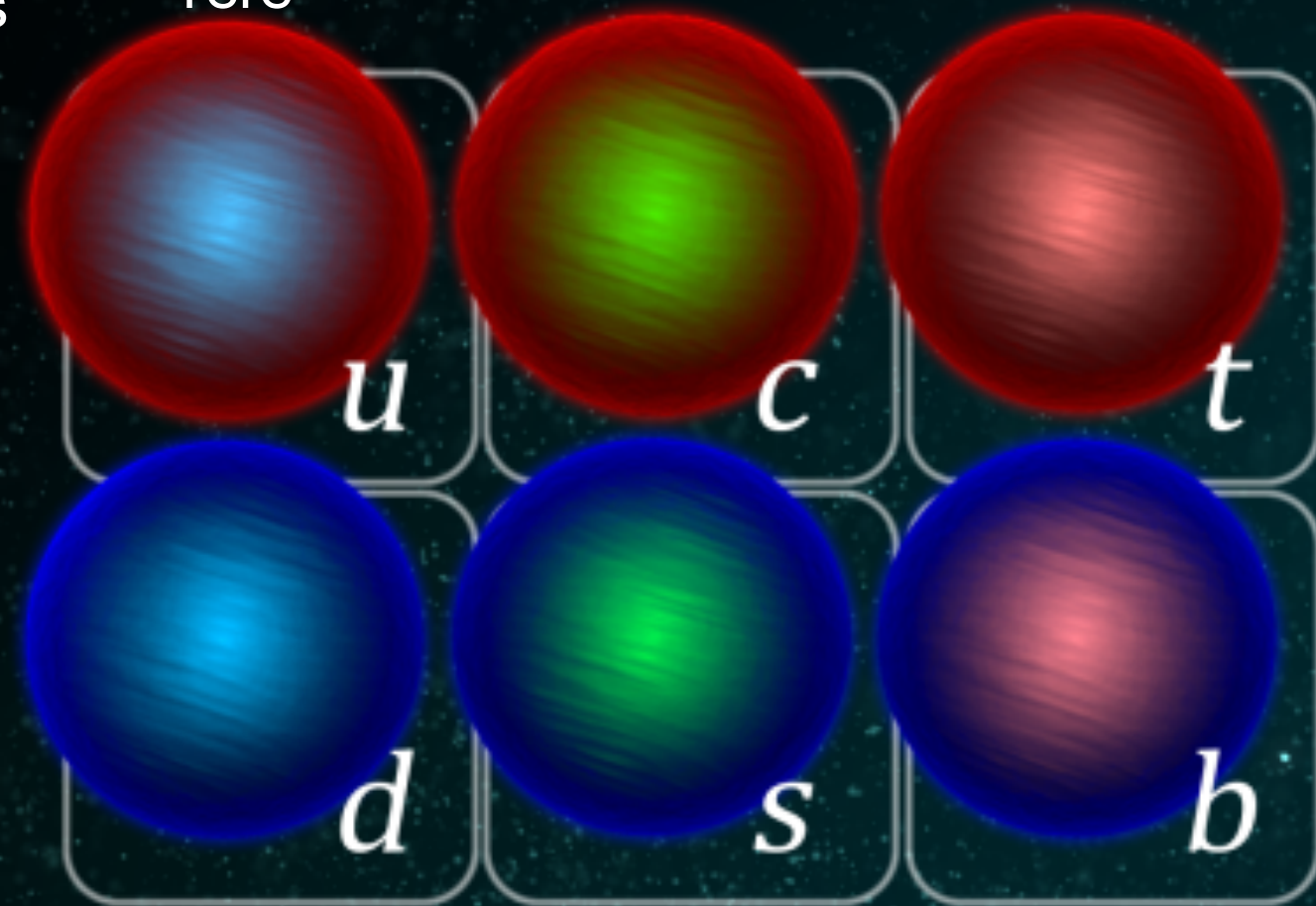


ACCELERATING SCIENCE

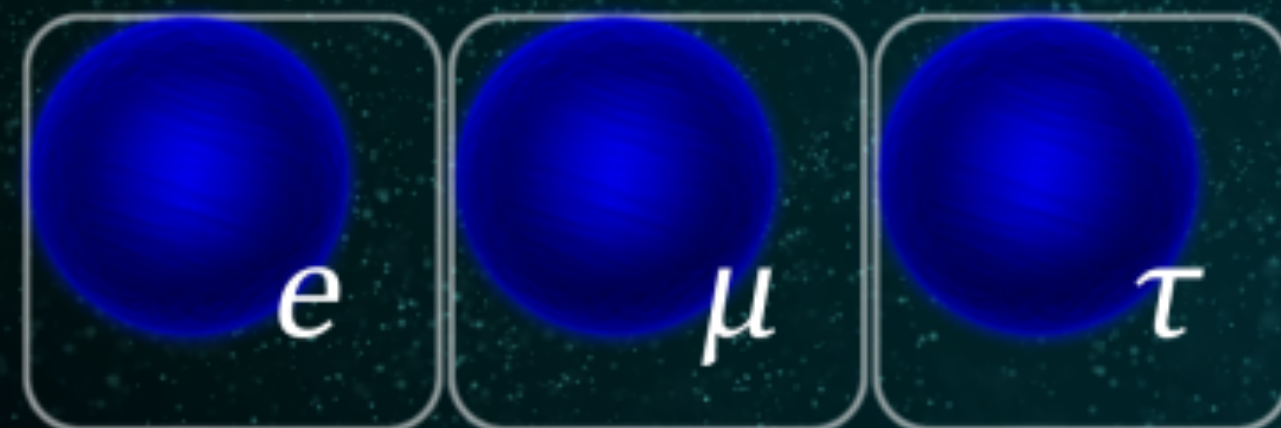
Le modèle standard d'aujourd'hui

Génération

1ère



Quarks



Leptons



Matière



Higgs boson

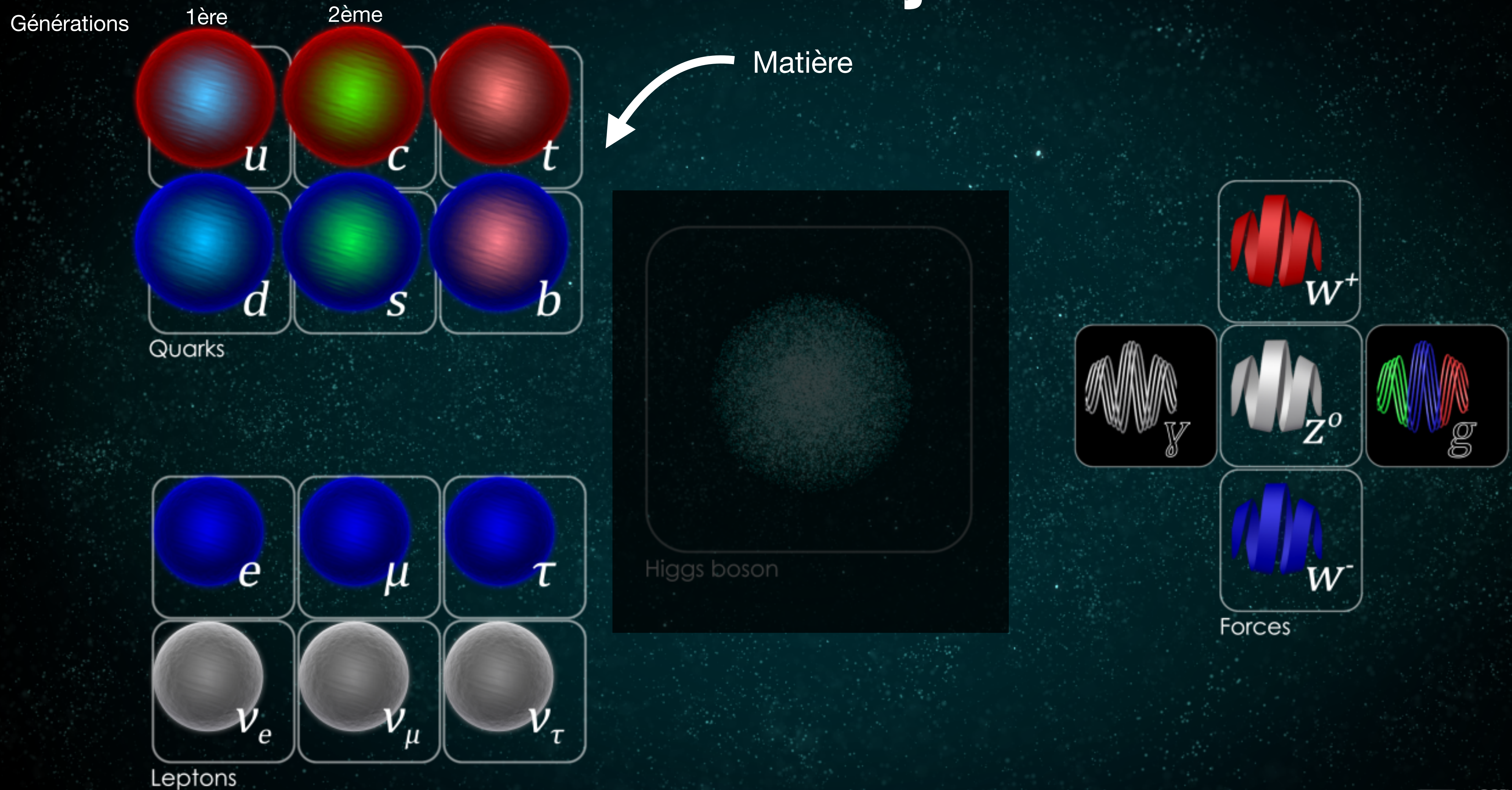


Forces

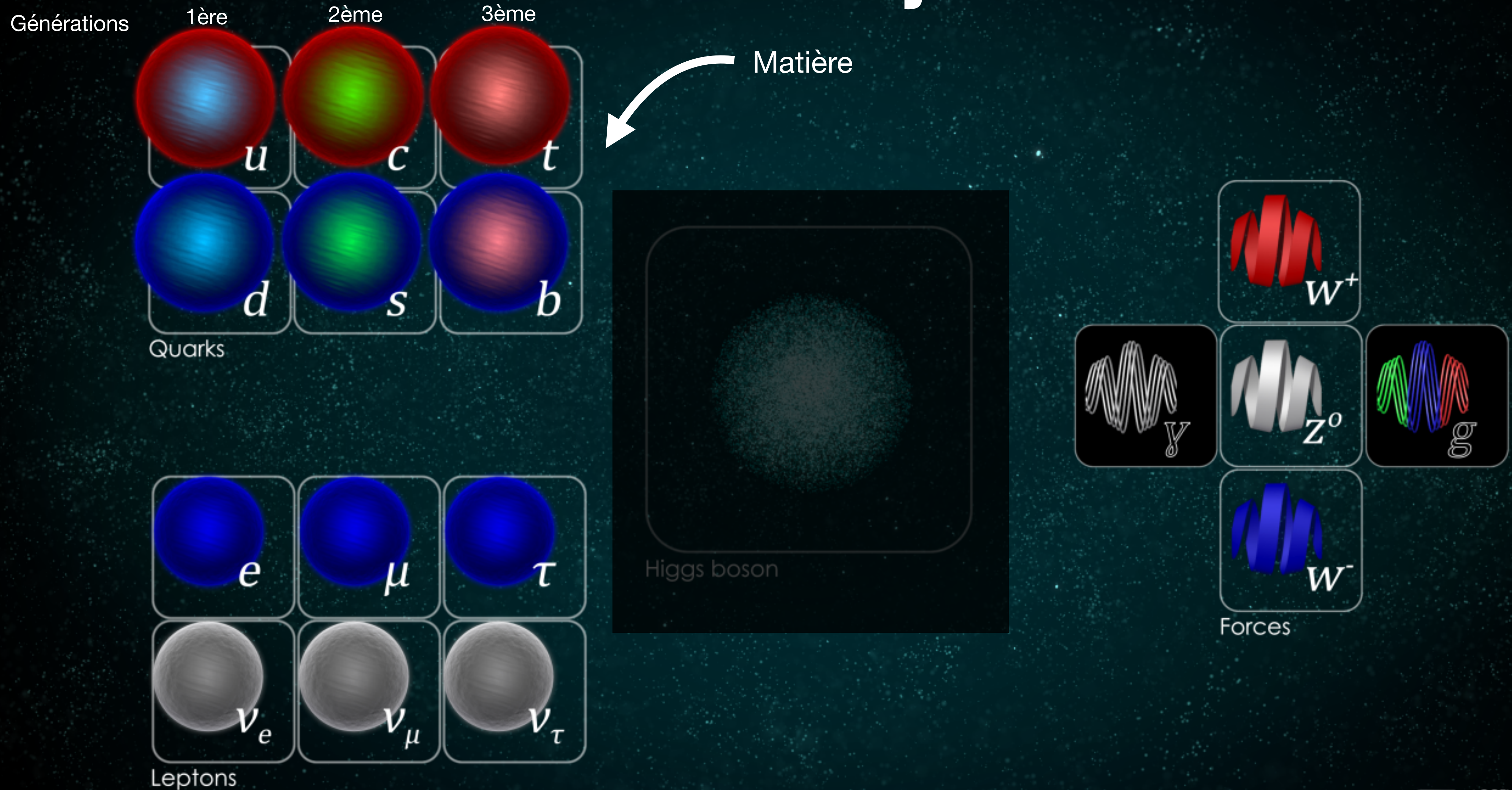


ACCELERATING SCIENCE

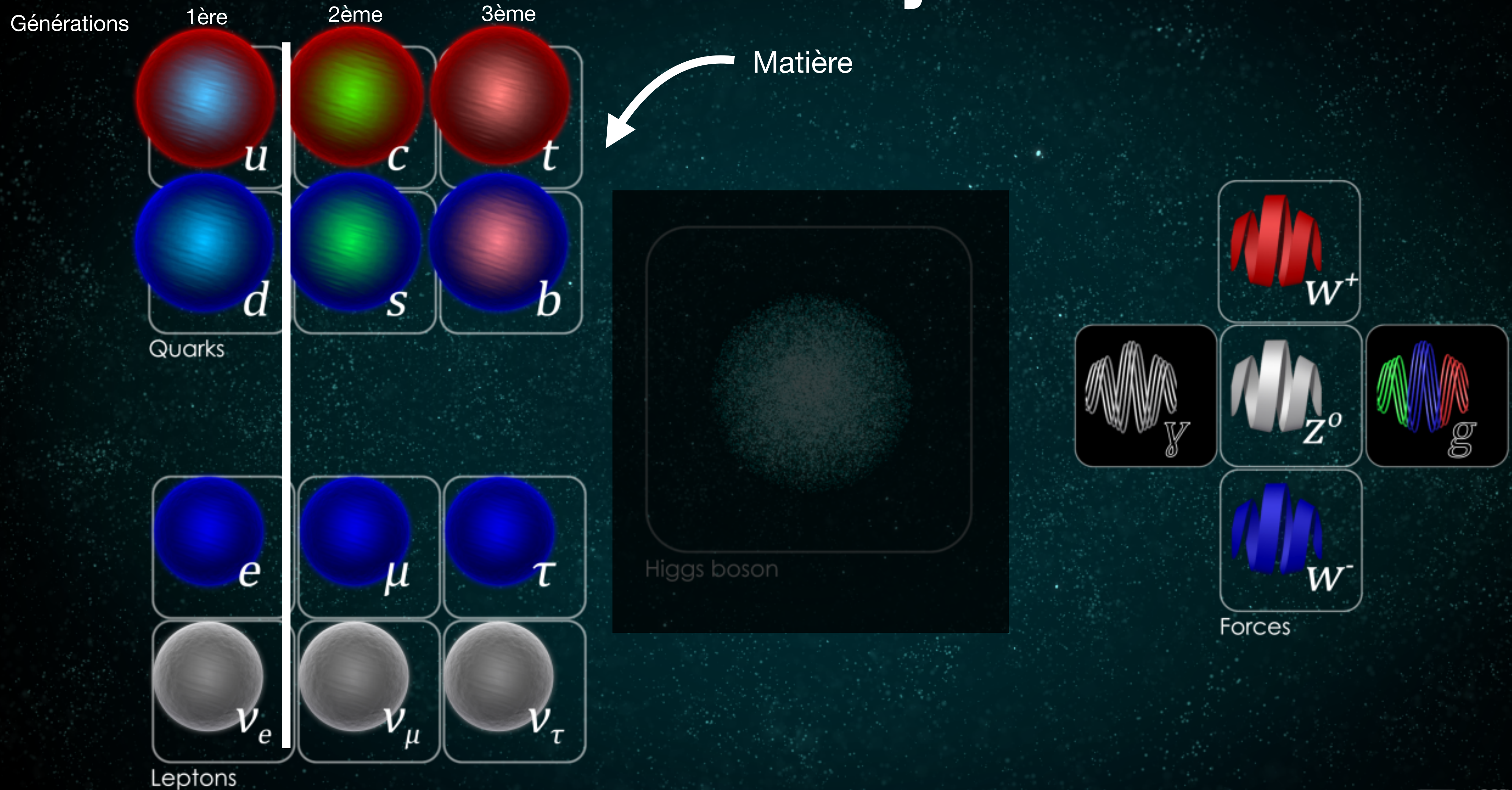
Le modèle standard d'aujourd'hui



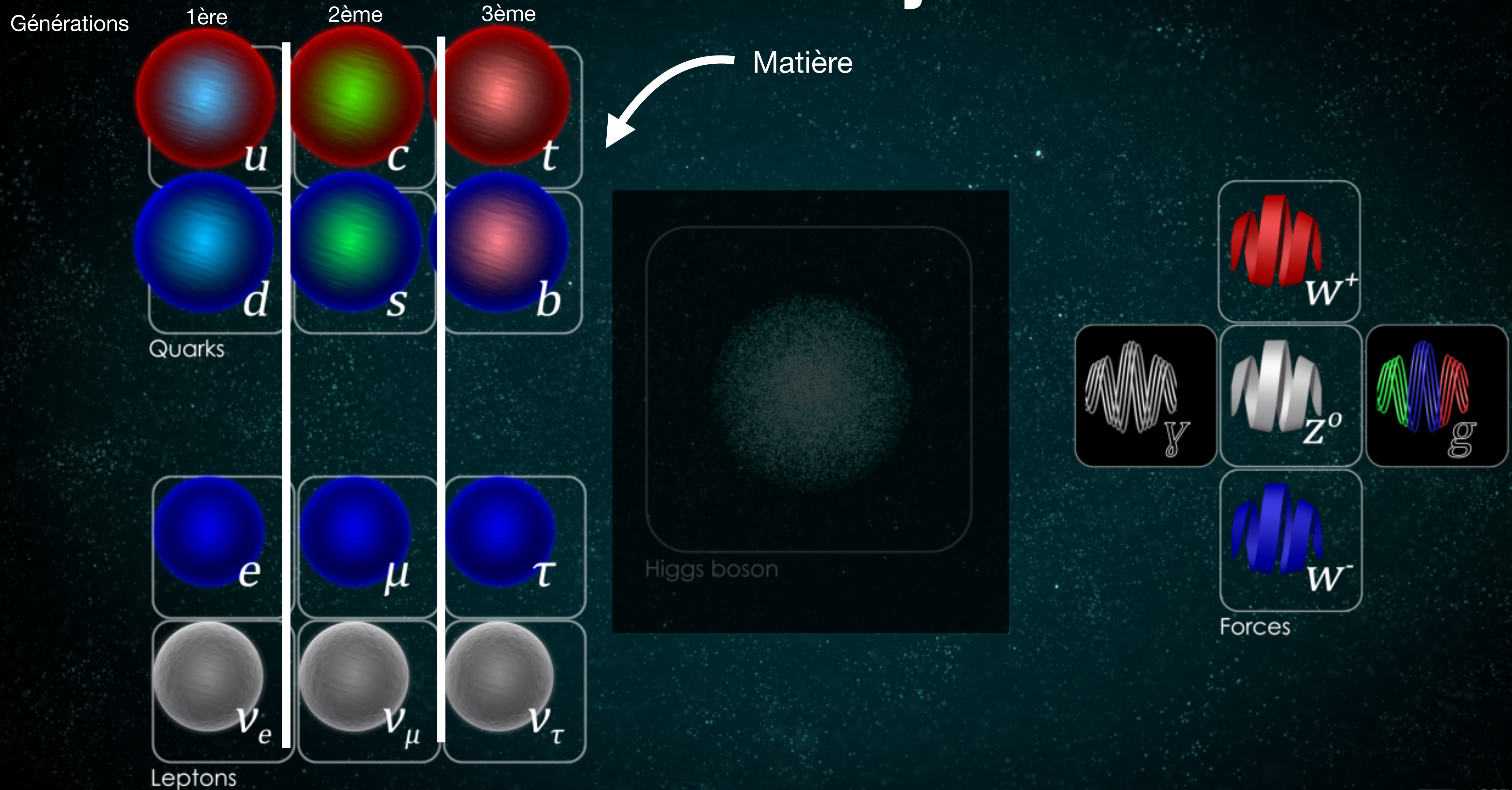
Le modèle standard d'aujourd'hui



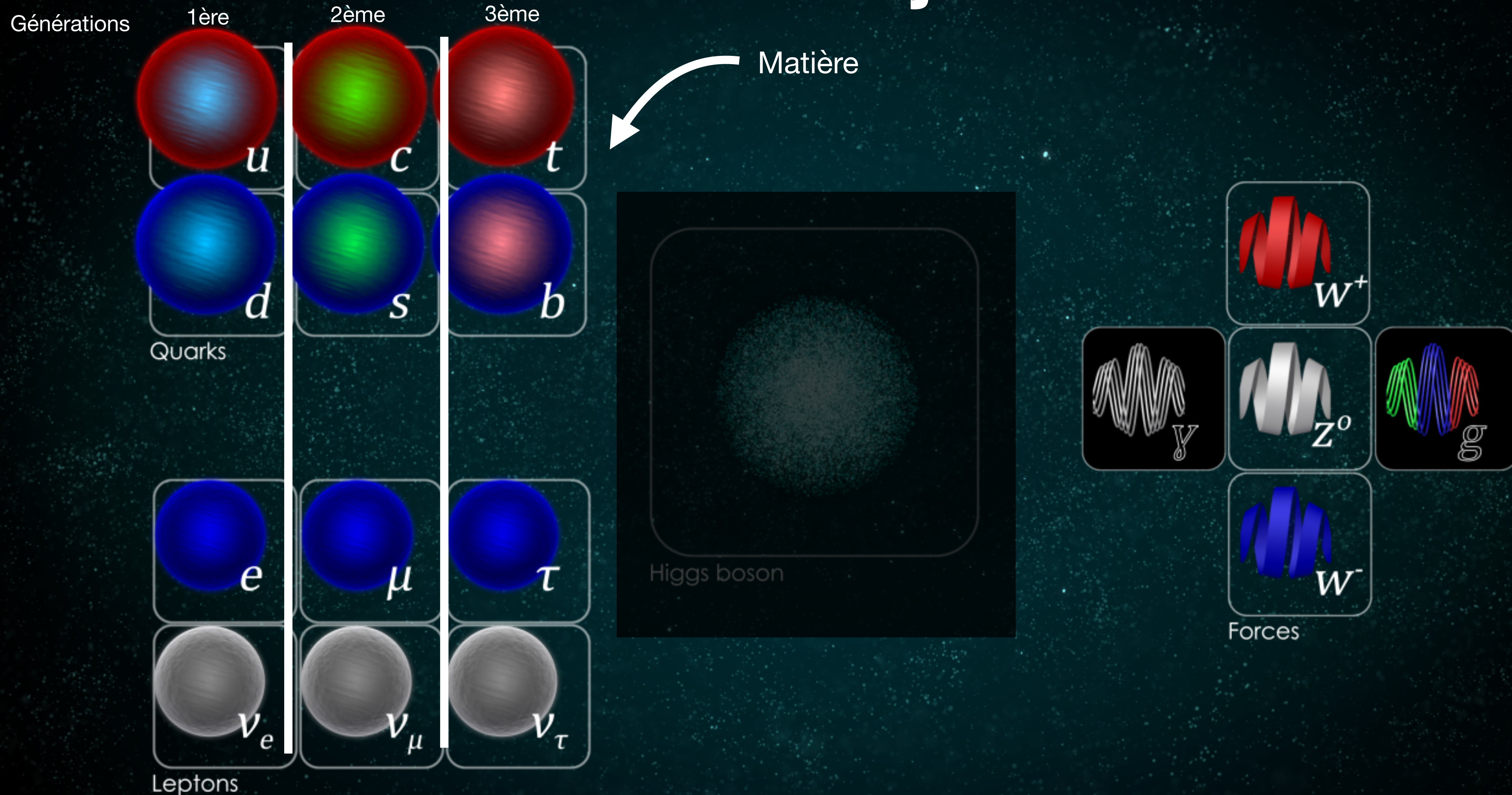
Le modèle standard d'aujourd'hui



Le modèle standard d'aujourd'hui



Le modèle standard d'aujourd'hui



Trois générations: copies de la première génération, sauf masse
Quark top 60 000 fois plus lourd que quark u, se désintègre en 10^{-25} s

Carte d'identité d'une particule

- Nom
- Constitution (si particule composée)
- Masse
- Spin (moment angulaire intrinsèque, d'origine quantique)
- Sensibilité aux interactions (charge électrique, couleur)
- Durée de vie
- Modes de désintégration dans des particules plus légères, et probabilités associées

c $\bar{c}$ MESONS

(including possibly non- $q\bar{q}$ states)

$\eta_c(1S)$

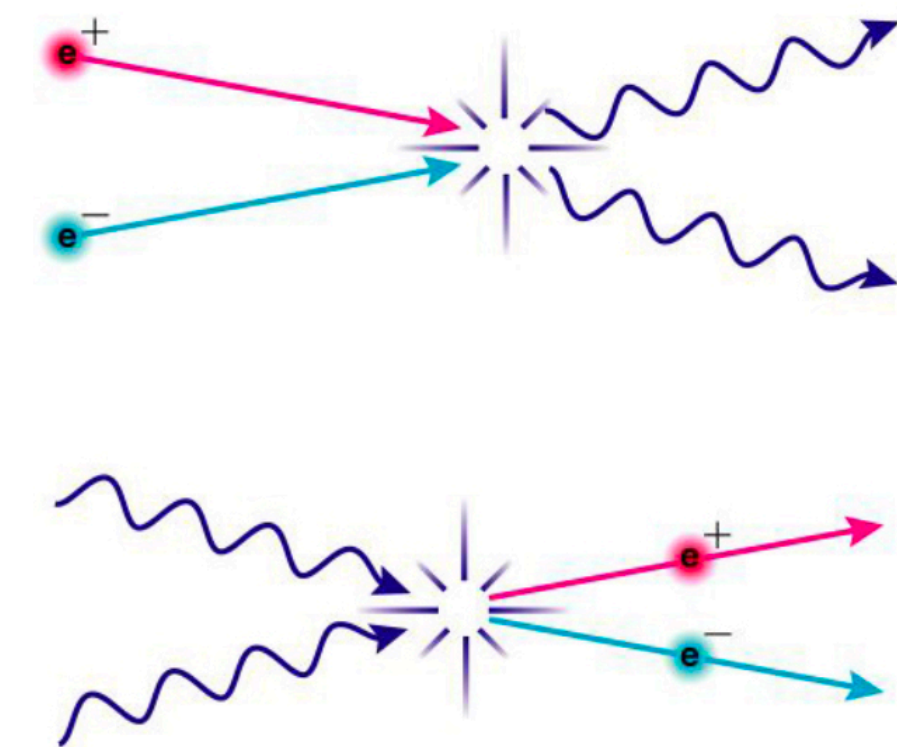
$J^{PC} = 0^+(0^-+)$

Mass $m = 2984.1 \pm 0.4$ MeV (S = 1.2)
 Full width $\Gamma = 30.5 \pm 0.5$ MeV (S = 1.2)

$\eta_c(1S)$ DECAY MODES	Fraction (Γ_i/Γ)	Scale factor/ Confidence level	p (MeV/c)
Decays involving hadronic resonances			
$\eta'(958)\pi\pi$	(2.0 $\pm$ 0.4) %	S=1.4	1323
$\eta'(958)K\bar{K}$	(1.73 $\pm$ 0.35) %		1131
$\eta'(958)\eta\eta$	(3.4 $\pm$ 0.6) $\times 10^{-3}$		1081
$\rho\rho$	(1.8 $\pm$ 0.4) %		1275
$K^*(892)^0 K^- \pi^+ + \text{c.c.}$	(1.8 $\pm$ 0.5) %		1278
$K^*(892)\bar{K}^*(892)$	(7.0 $\pm$ 1.2) $\times 10^{-3}$		1196
$K^*(892)^0 \bar{K}^*(892)^0 \pi^+ \pi^-$	(1.4 $\pm$ 0.6) %		1074
$\phi K^+ K^-$	(3.3 $\pm^{+1.2}_{-1.1}$) $\times 10^{-3}$		1104
$\phi\phi$	(1.8 $\pm$ 0.4) $\times 10^{-3}$	S=2.3	1089
$\phi 2(\pi^+ \pi^-)$	< 4 $\times 10^{-3}$	CL=90%	1251
$a_0(980)\pi$	seen		1327
$a_2(1320)\pi$	seen		1196
$K^*(892)\bar{K} + \text{c.c.}$	< 1.28 %	CL=90%	1310
$f_2(1270)\eta$	seen		1145
$f_2(1270)\eta'$	seen		984
$\omega\omega$	(2.7 $\pm$ 0.9) $\times 10^{-3}$	S=2.1	1270
$\omega\phi$	< 2.5 $\times 10^{-4}$	CL=90%	1185
$f_2(1270)f_2(1270)$	(1.08 $\pm$ 0.27) %		774
$f_2(1270)f_2'(1525)$	(9.7 $\pm$ 3.2) $\times 10^{-3}$		524
$f_0(500)\eta$	seen		—
$f_0(500)\eta'$	seen		—
$f_0(980)\eta$	seen		1265

Antiparticule et antimatière

- Solution de l'équation de Dirac pour l'électron (et particules de spin 1/2)
 - $E = \pm \sqrt{\vec{p}^2 + m^2}$ - $E < 0$: antiparticule (même masse, charges opposées)
 - Chaque particule de matière a son antiparticule
- $E = mc^2$, electron et positron peuvent subir
 - **Annihilation** $e^+e^- \rightarrow$ photons (p.ex PET-scan)
 - **Création** de nouvelles paires particule-antiparticule
- **Annihilation** $\neq$ **Désintégration**, particules qui annihilent peuvent être stables dans le vide



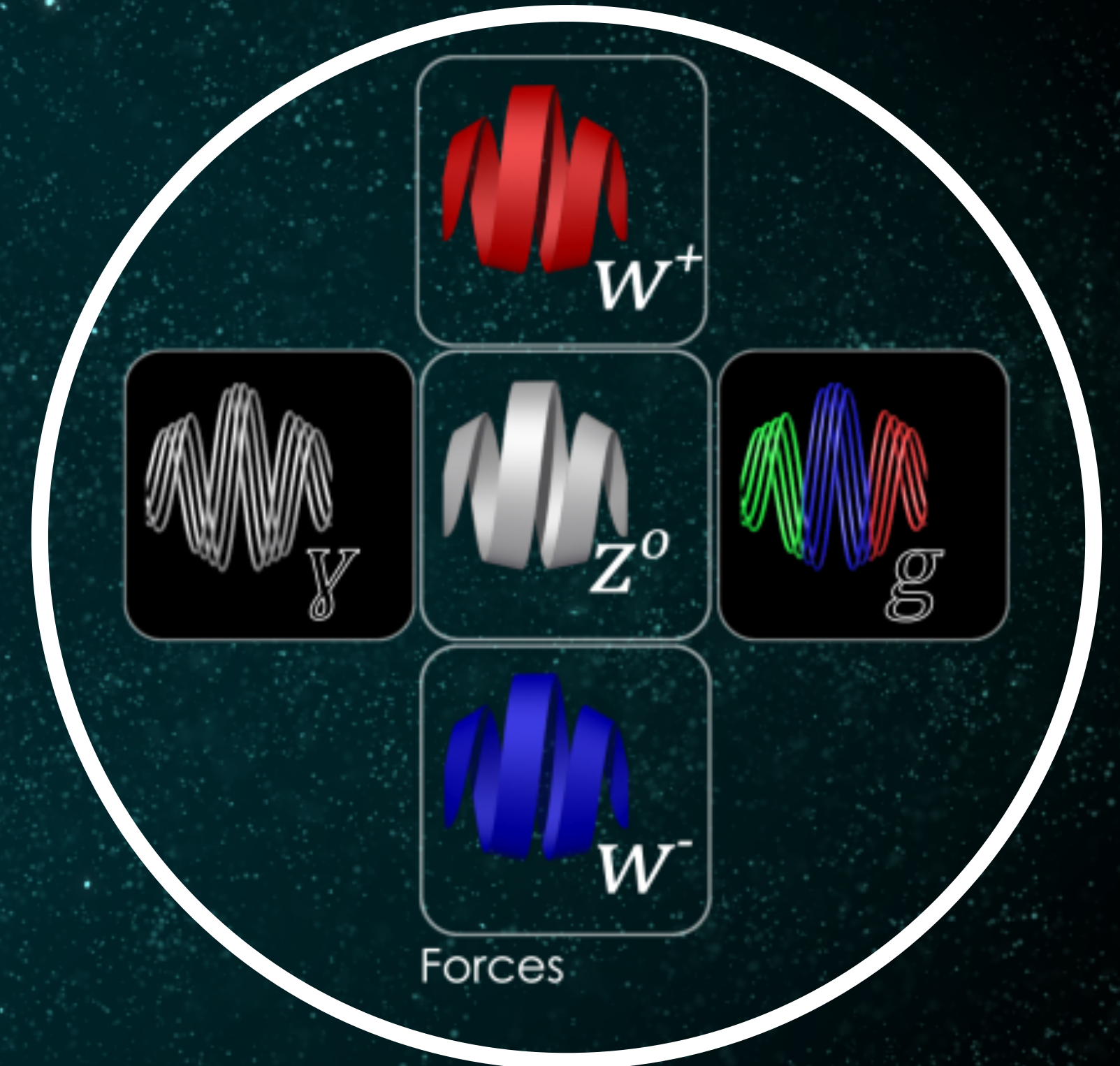
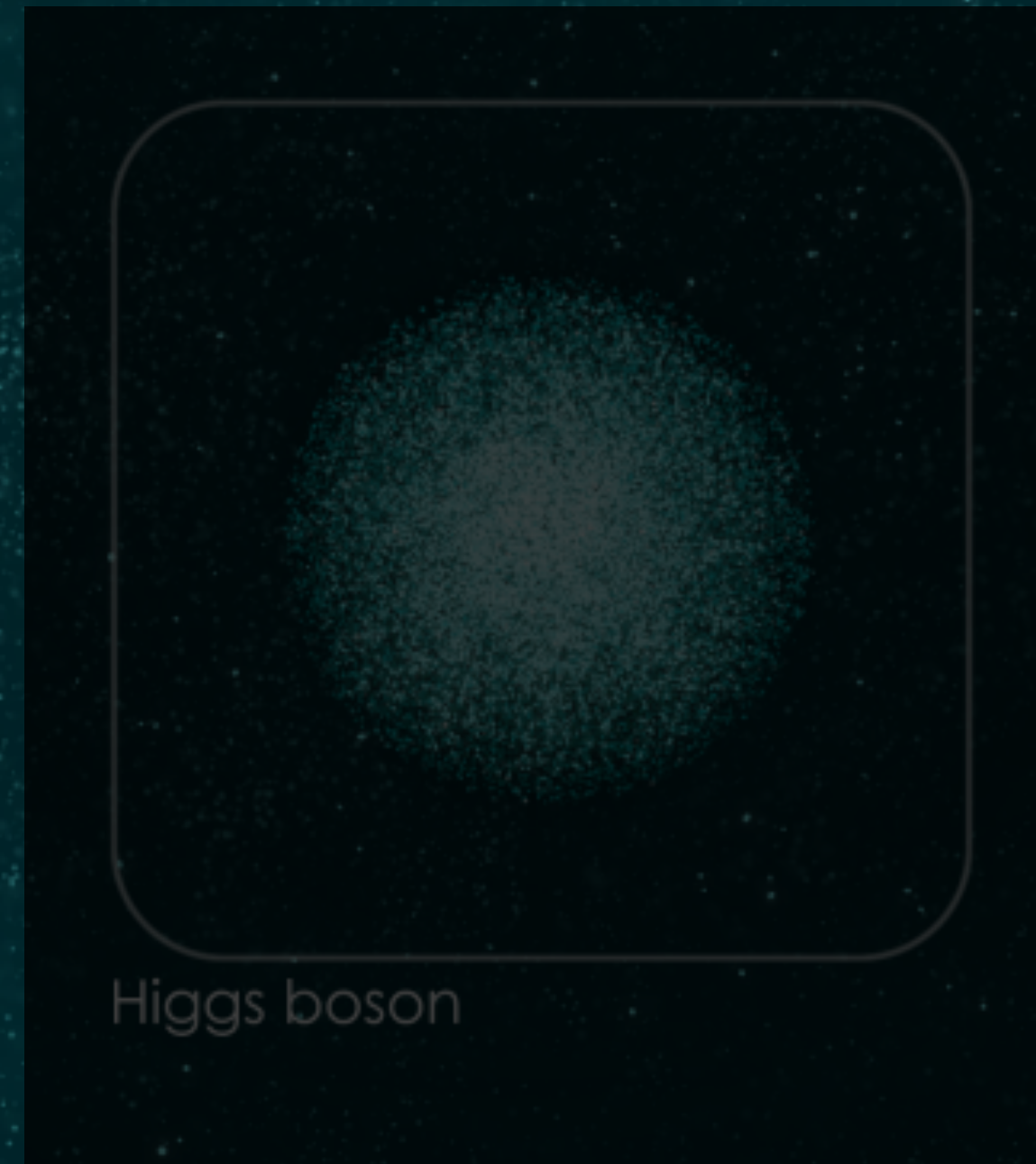
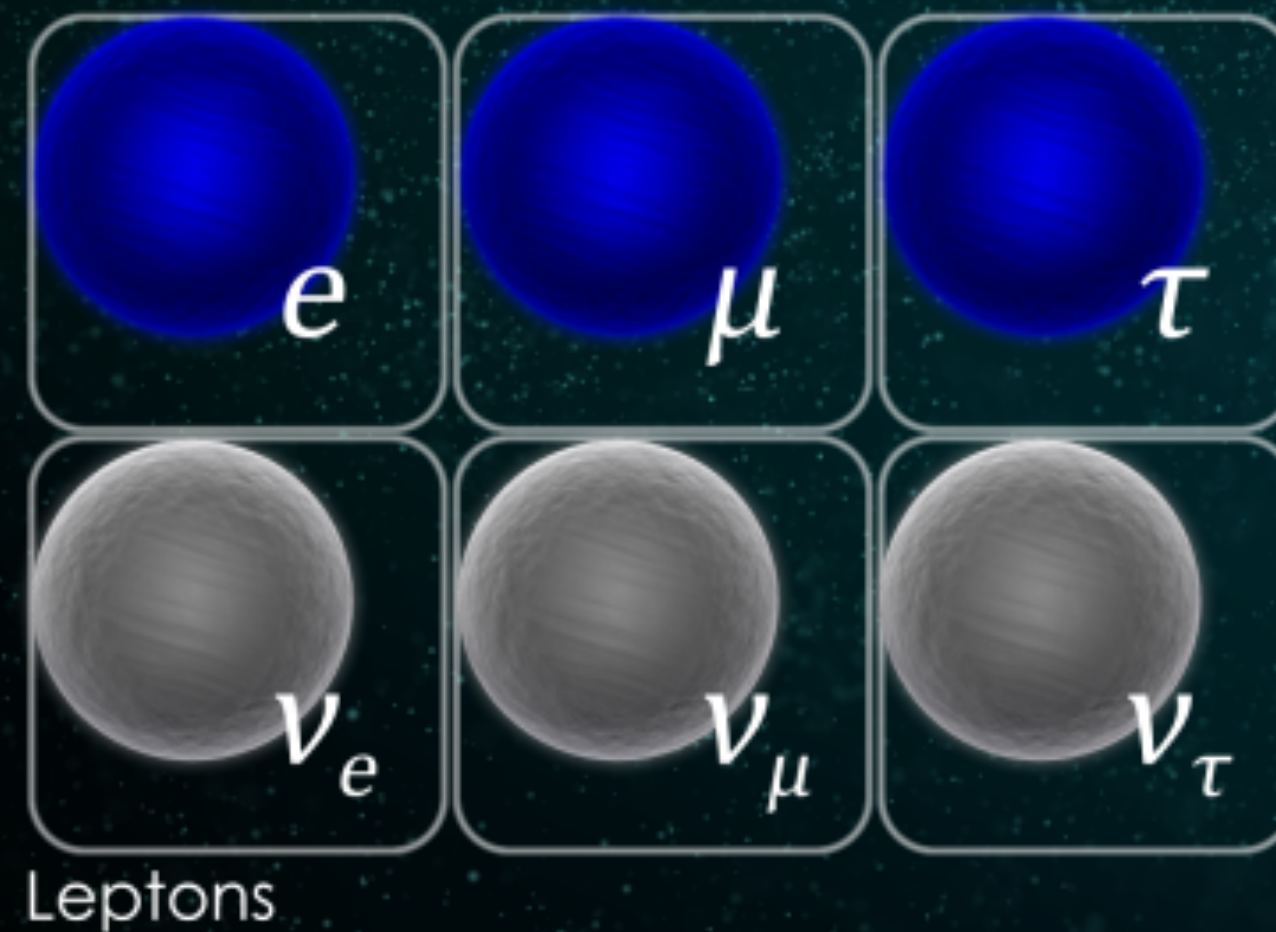
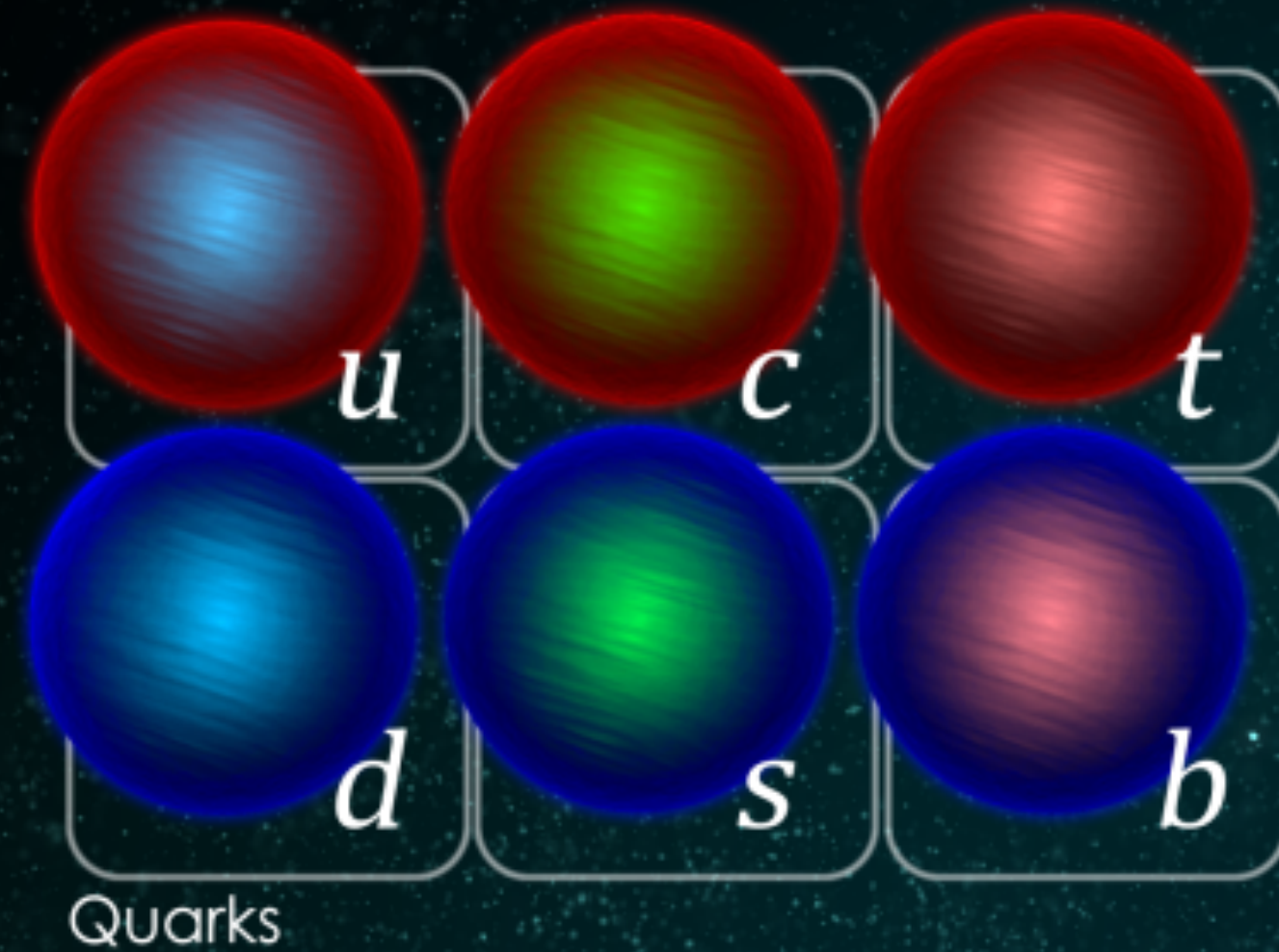
Les interactions fondamentales

- Quatre interactions fondamentales
 - Gravitation
étoiles, galaxies, monde autour de nous 10^{-38}
 - Force faible
Radioactivité β 10^{-5}
 - Electromagnétisme
électricité, chimie... 10^{-3}
 - Force forte
cohésion des noyaux 1

Des intensités très différents

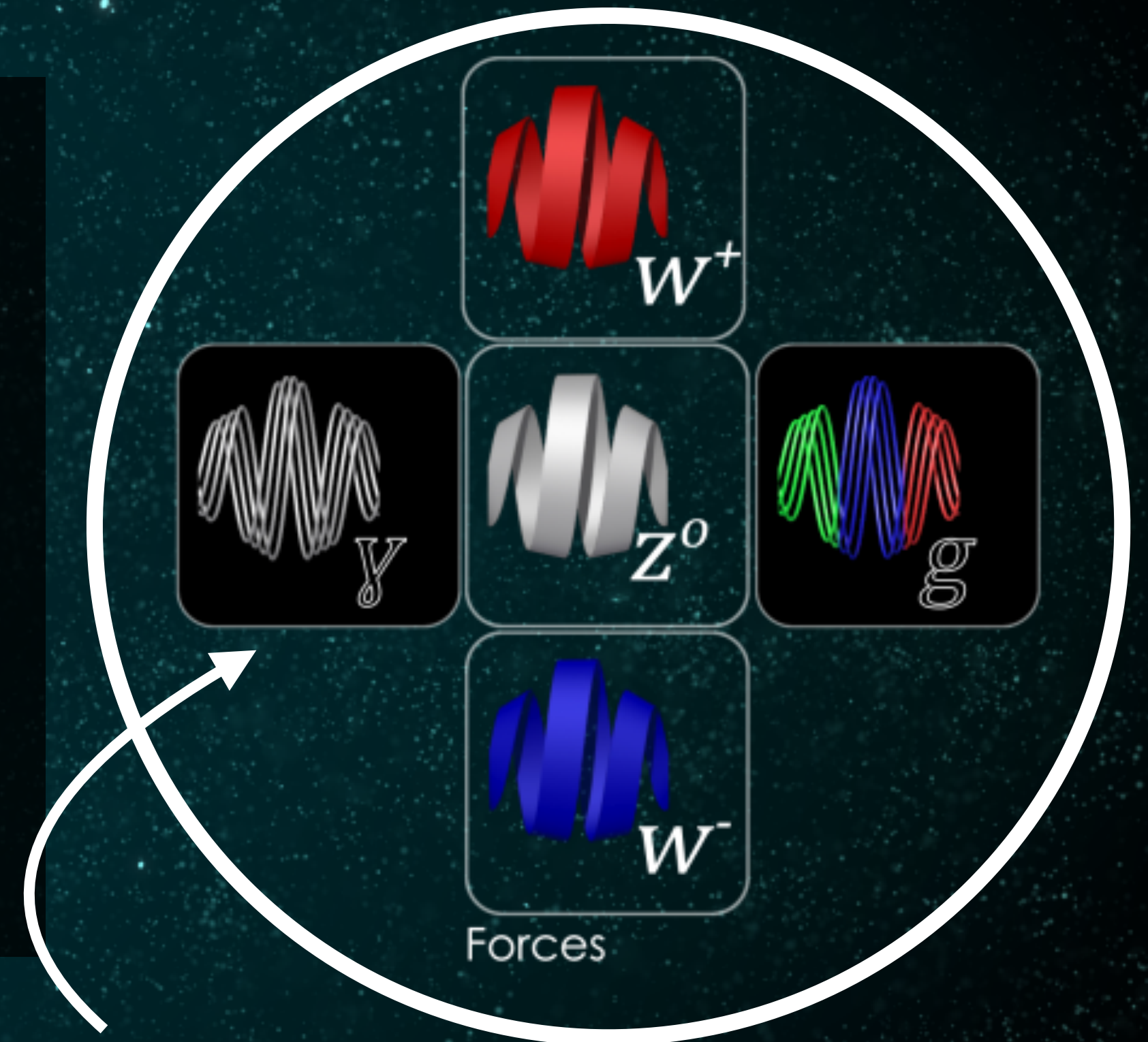
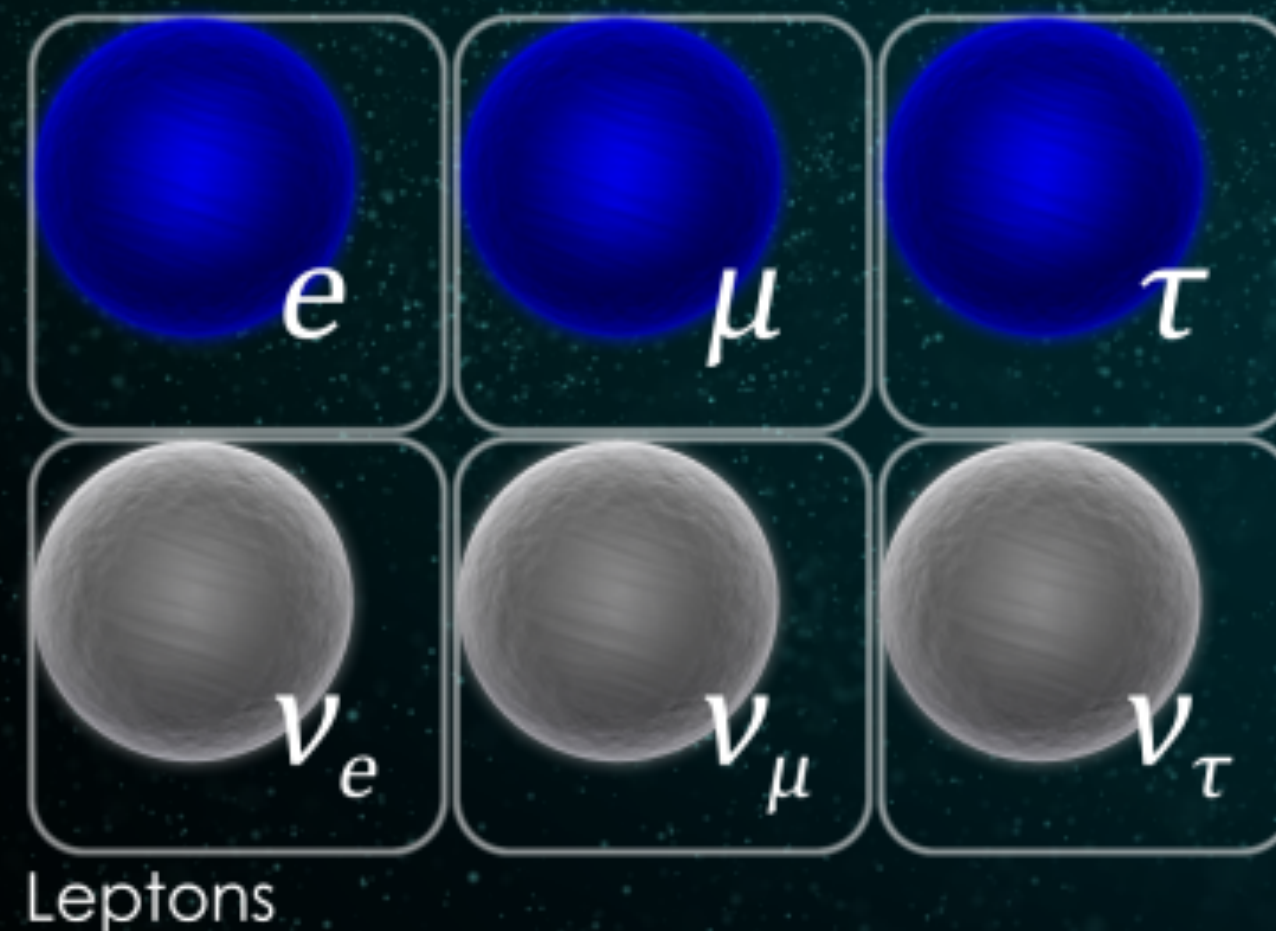
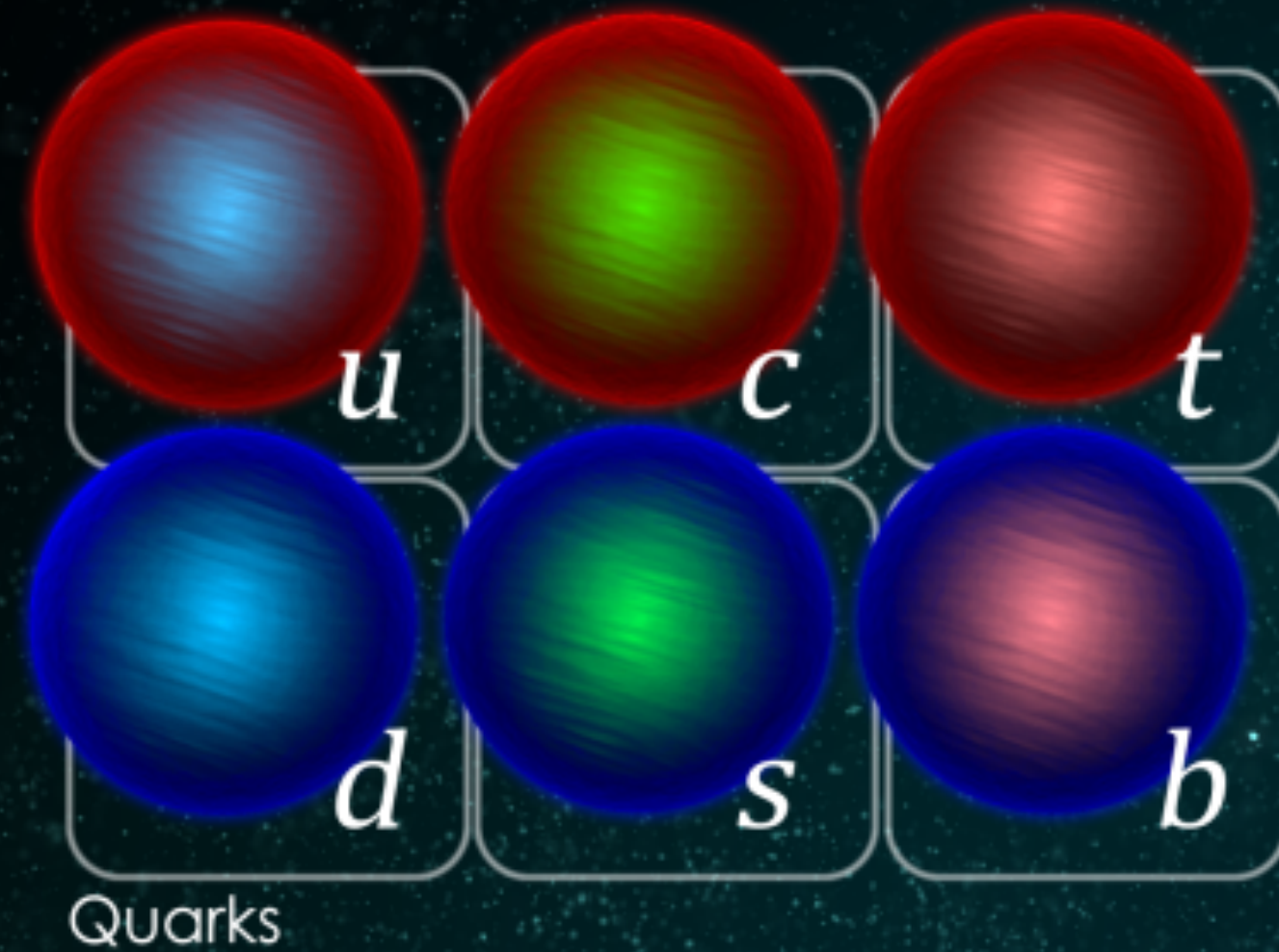
Les interactions fondamentales

Trois interactions décrit dans le modèle standard en
terme d'échangeurs de particules
Gravitation négligeable à l'échelle subatomique



Les interactions fondamentales

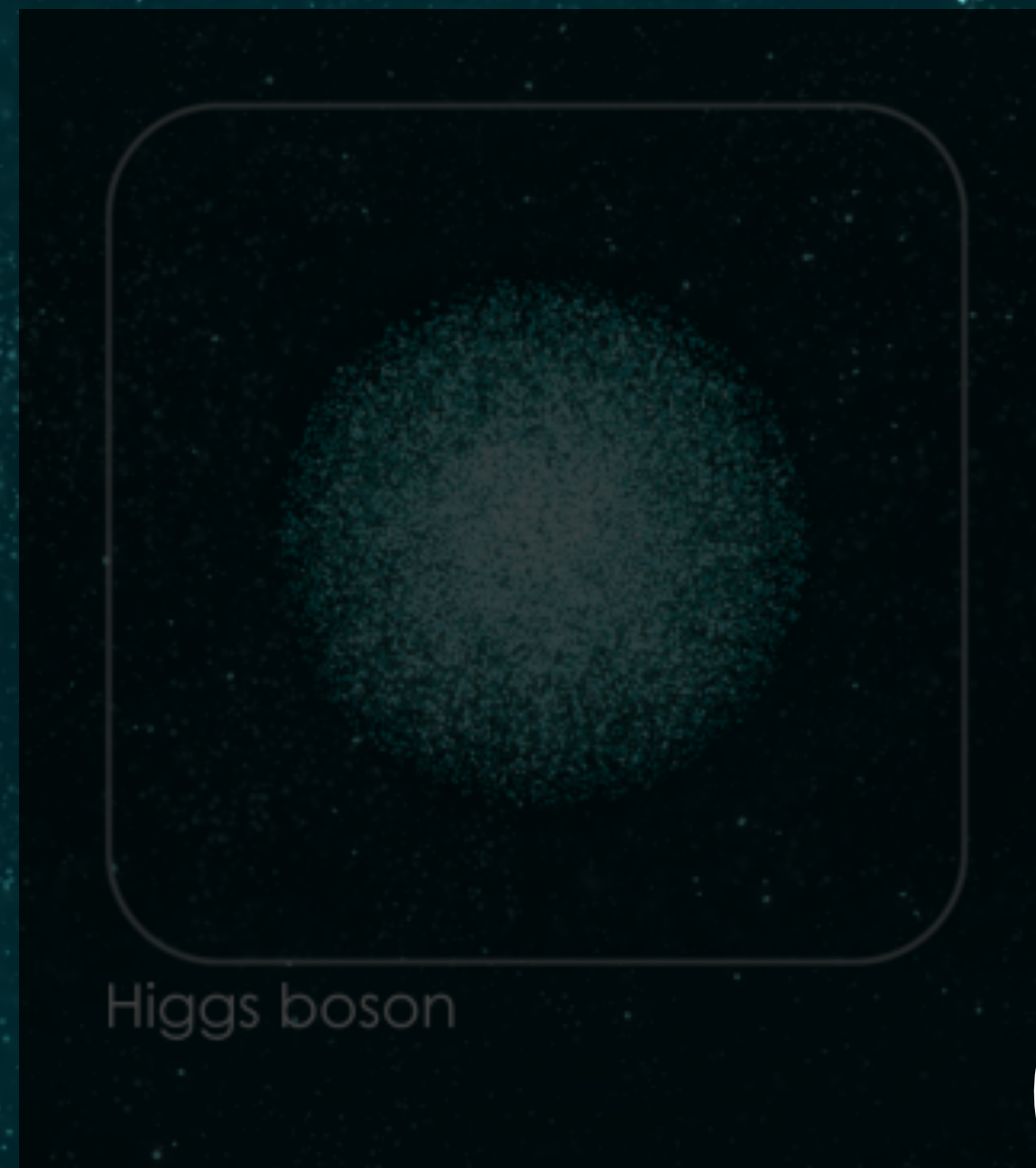
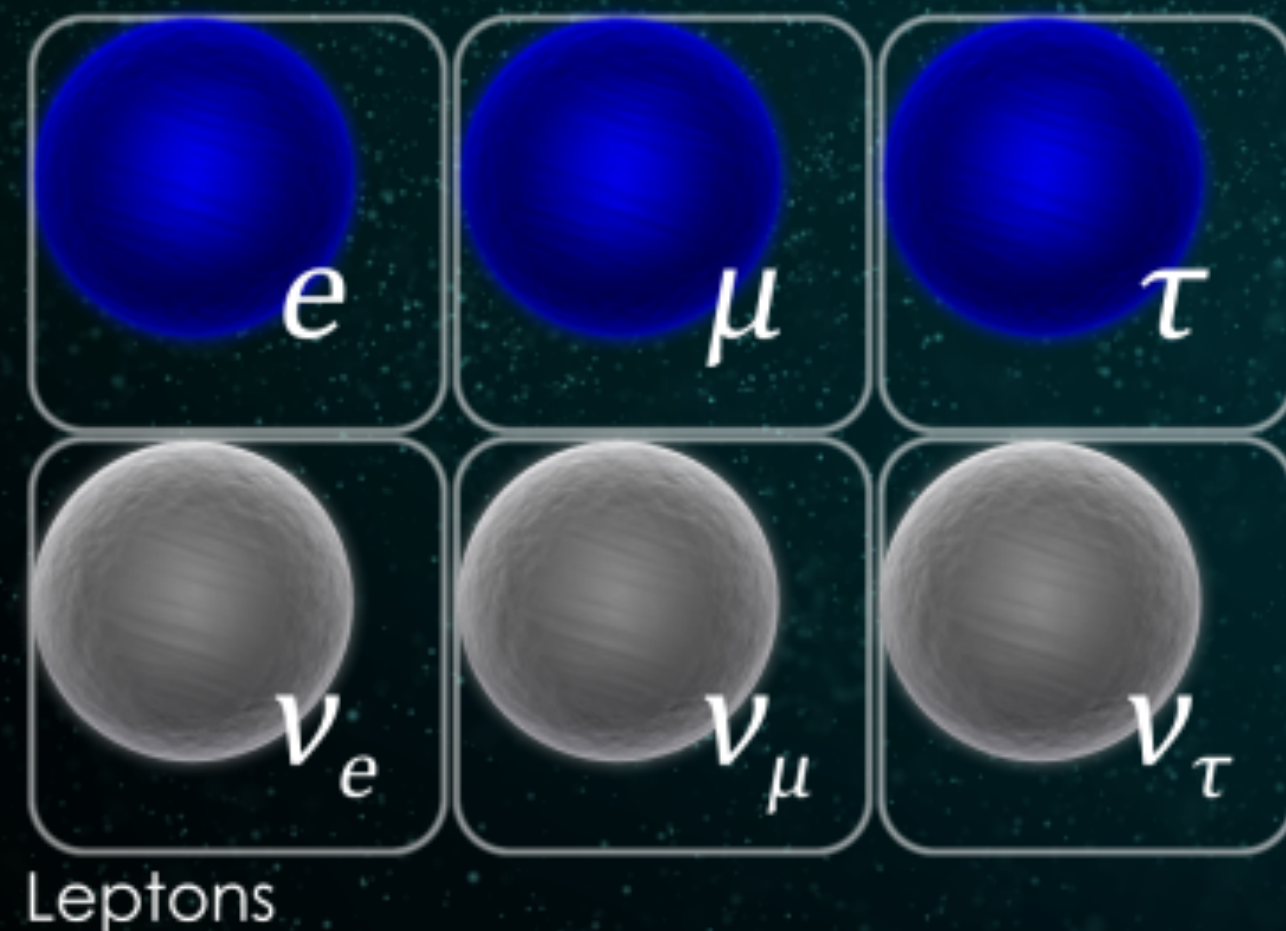
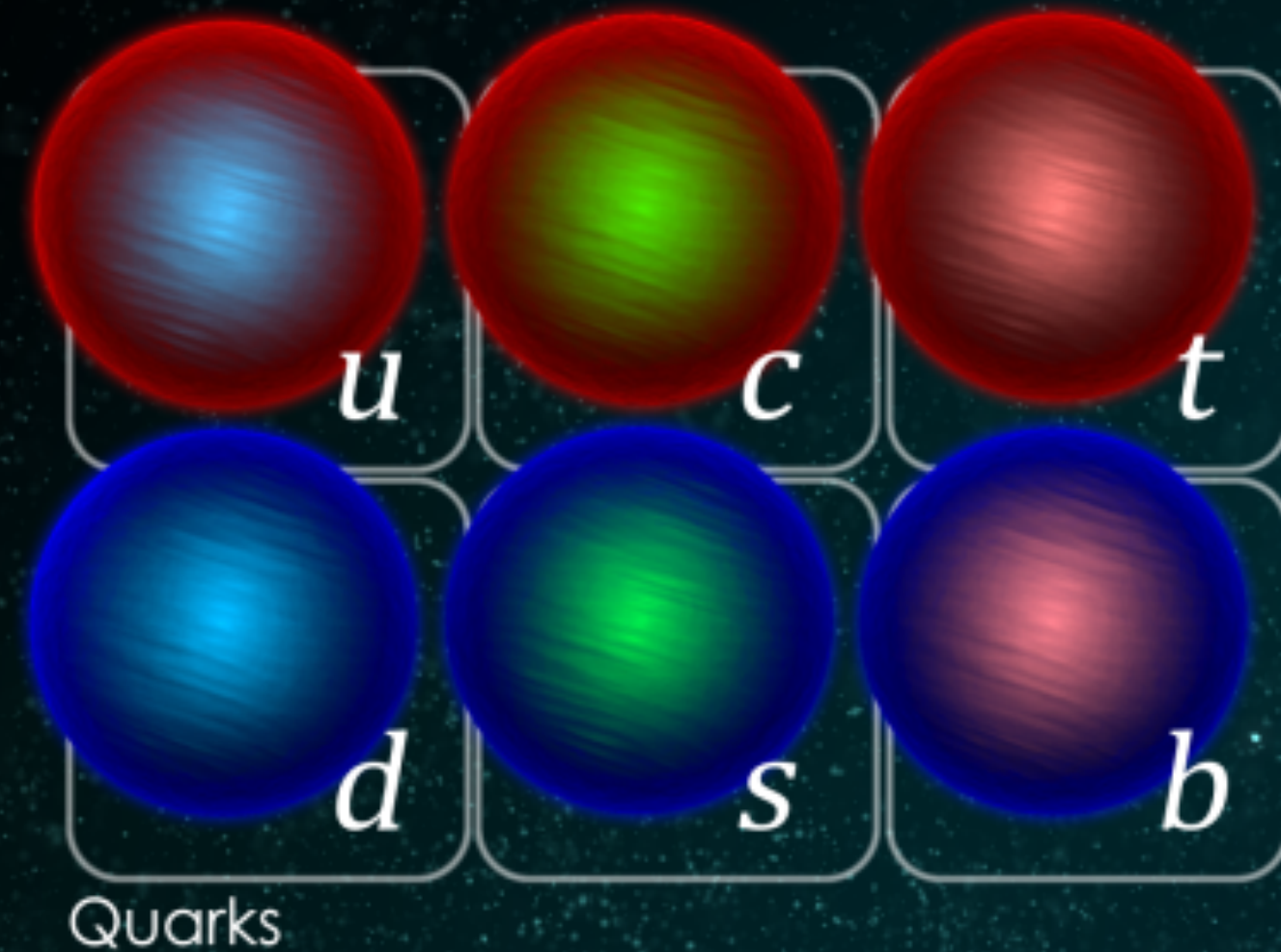
Trois interactions décrit dans le modèle standard en
terme d'échangeurs de particules
Gravitation négligeable à l'échelle subatomique



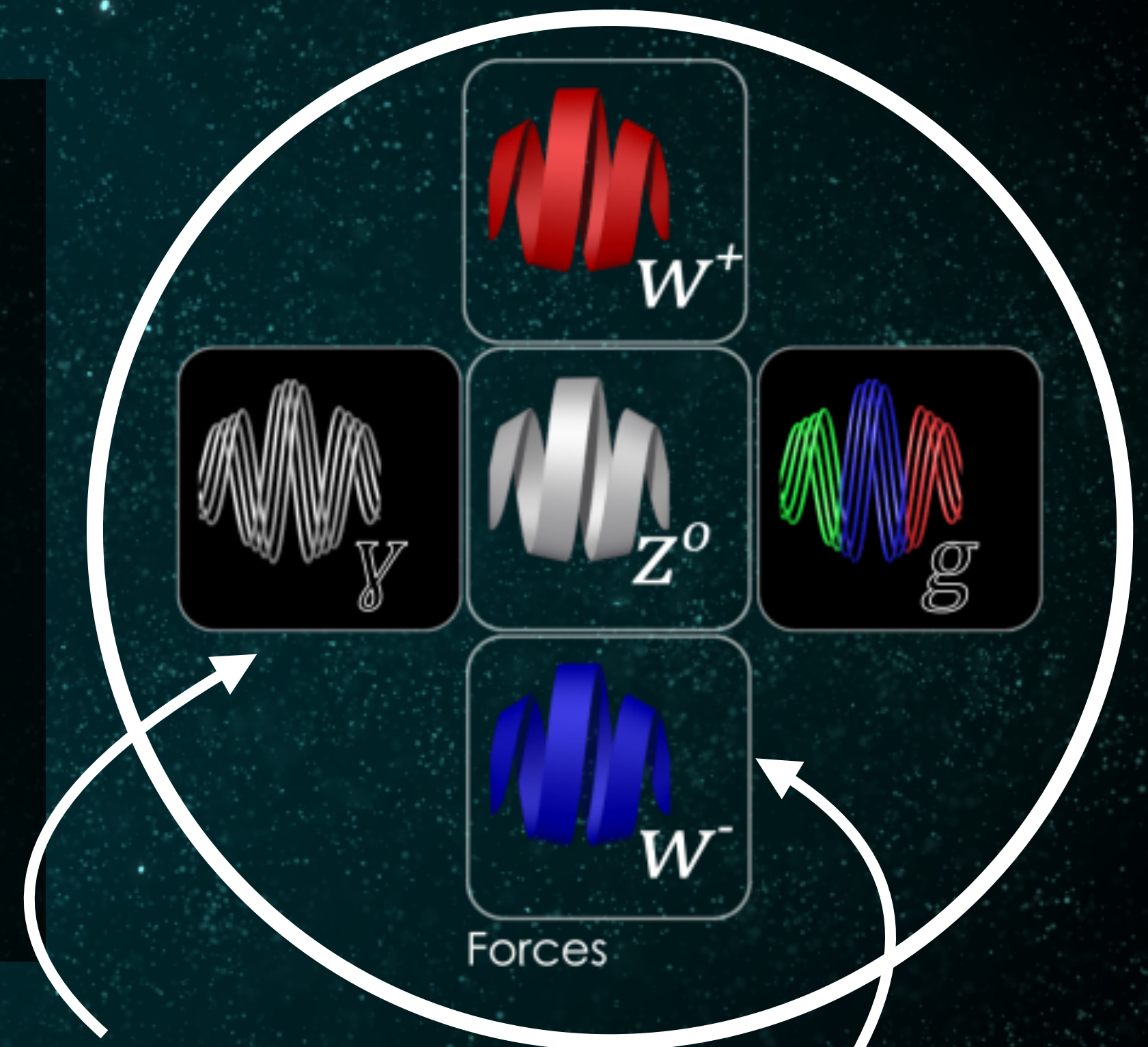
Force électromagnétique
Photon

Les interactions fondamentales

Trois interactions décrit dans le modèle standard en
terme d'échangeurs de particules
Gravitation négligeable à l'échelle subatomique



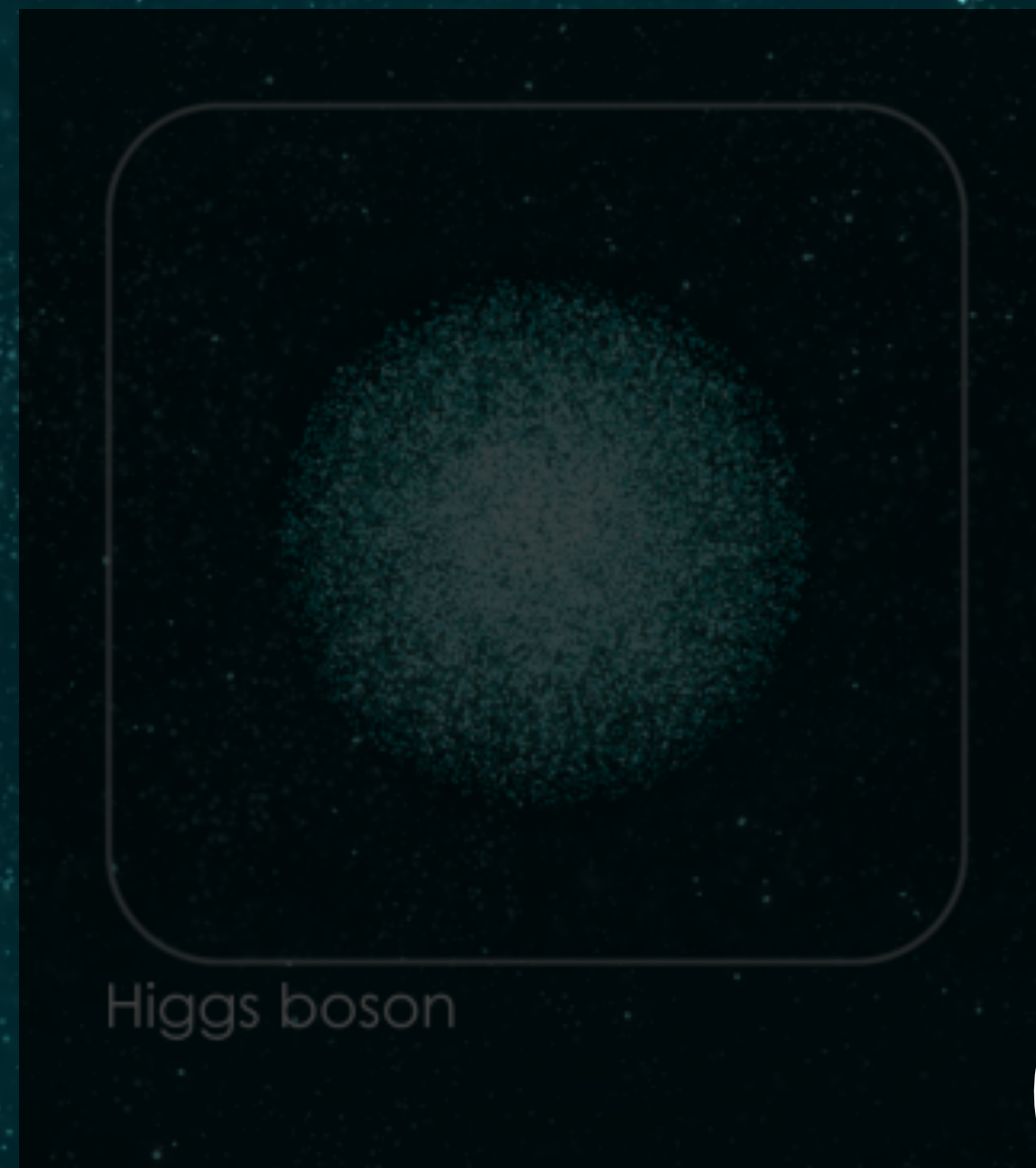
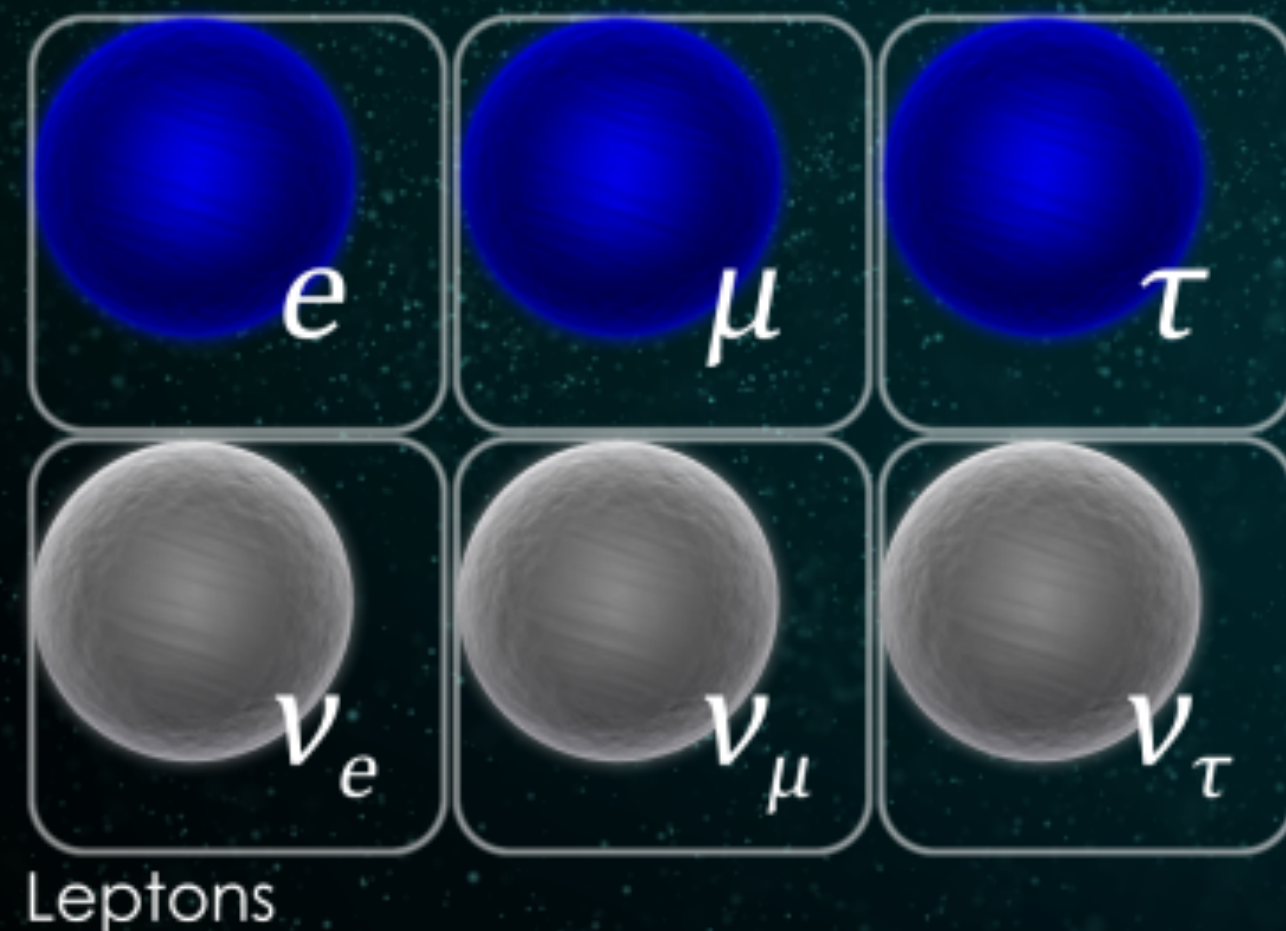
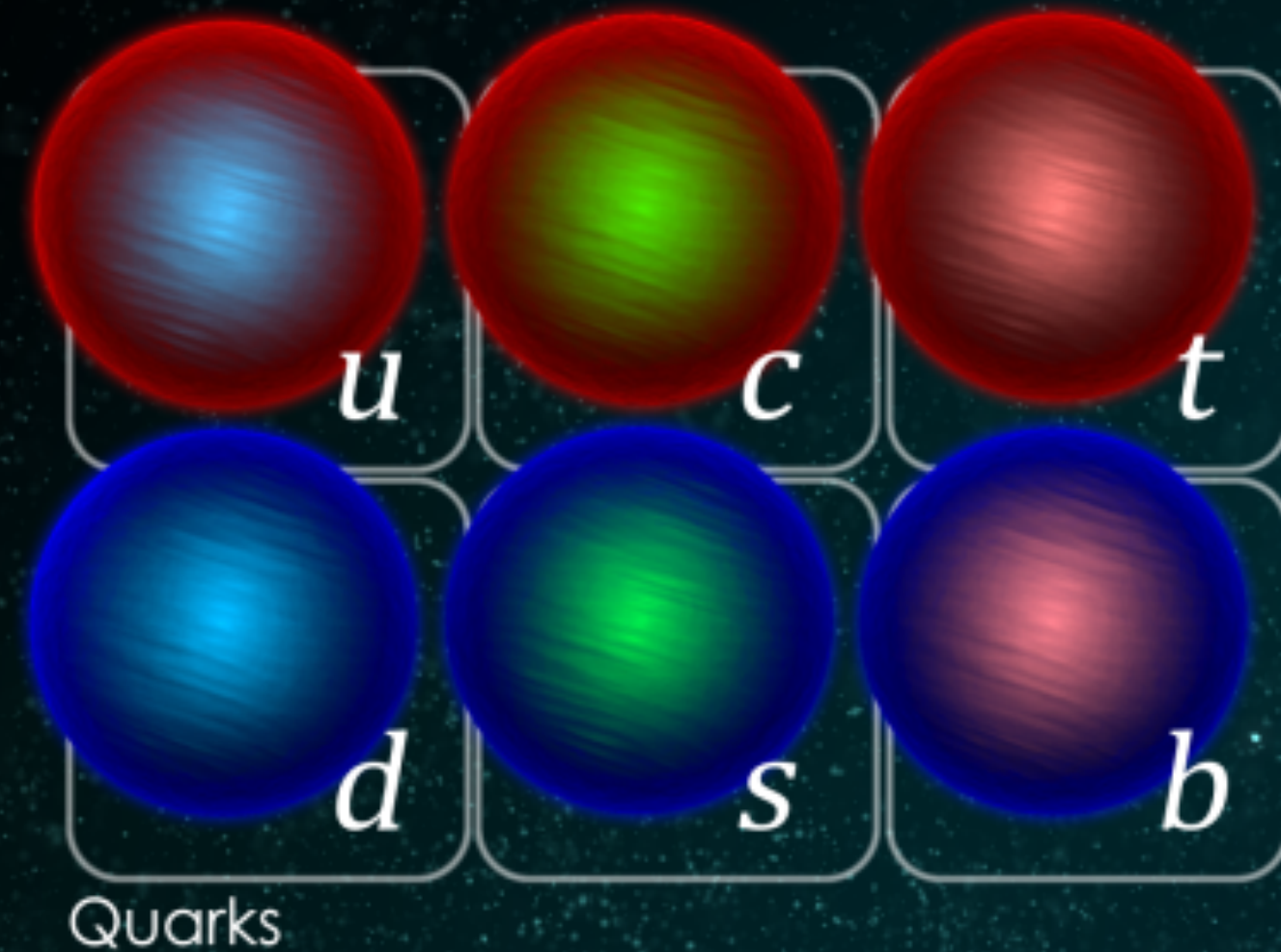
Force électromagnétique
Photon



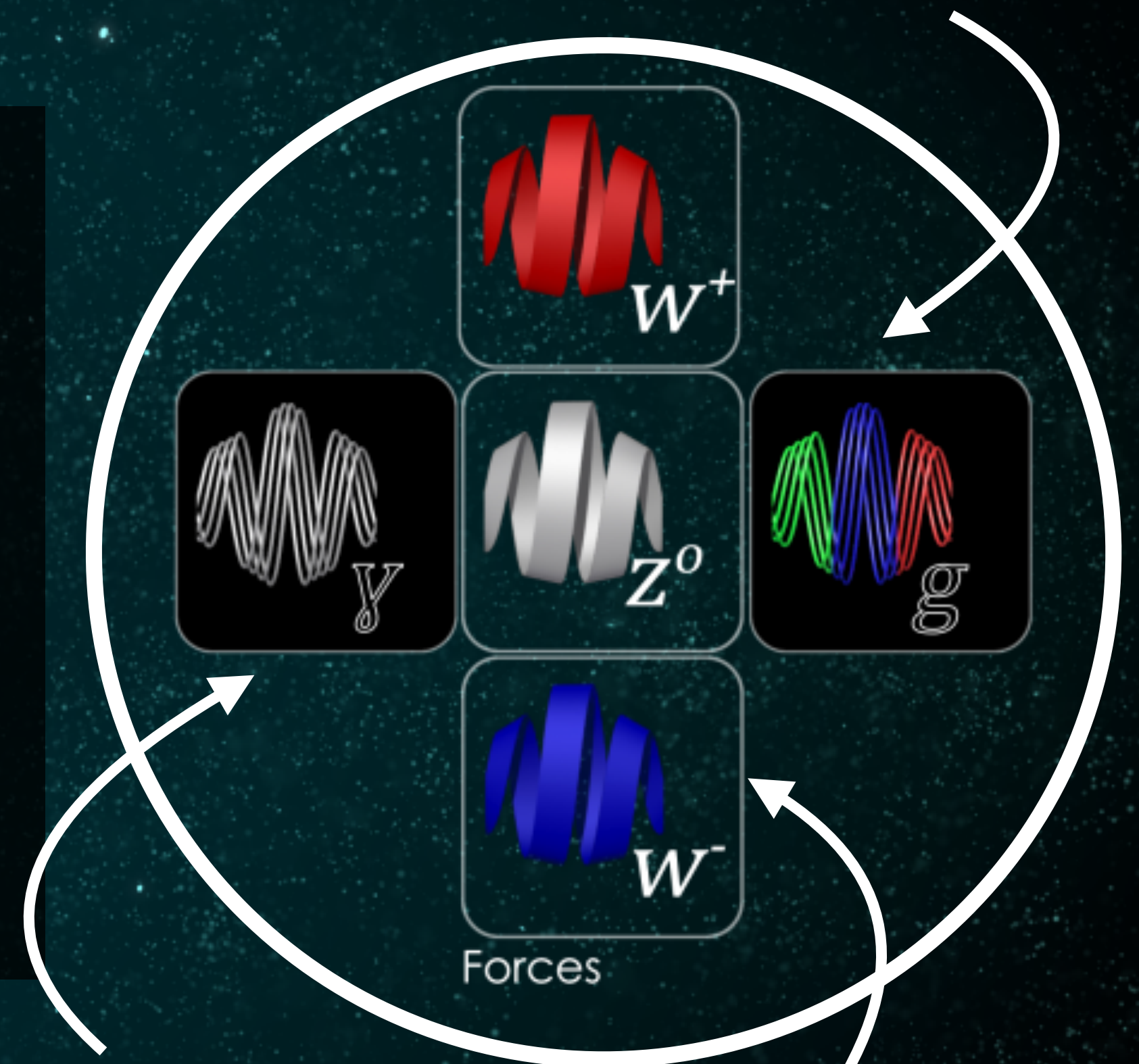
Force faible
Bosons W,Z

Les interactions fondamentales

Trois interactions décrit dans le modèle standard en
terme d'échangeurs de particules
Gravitation négligeable à l'échelle subatomique



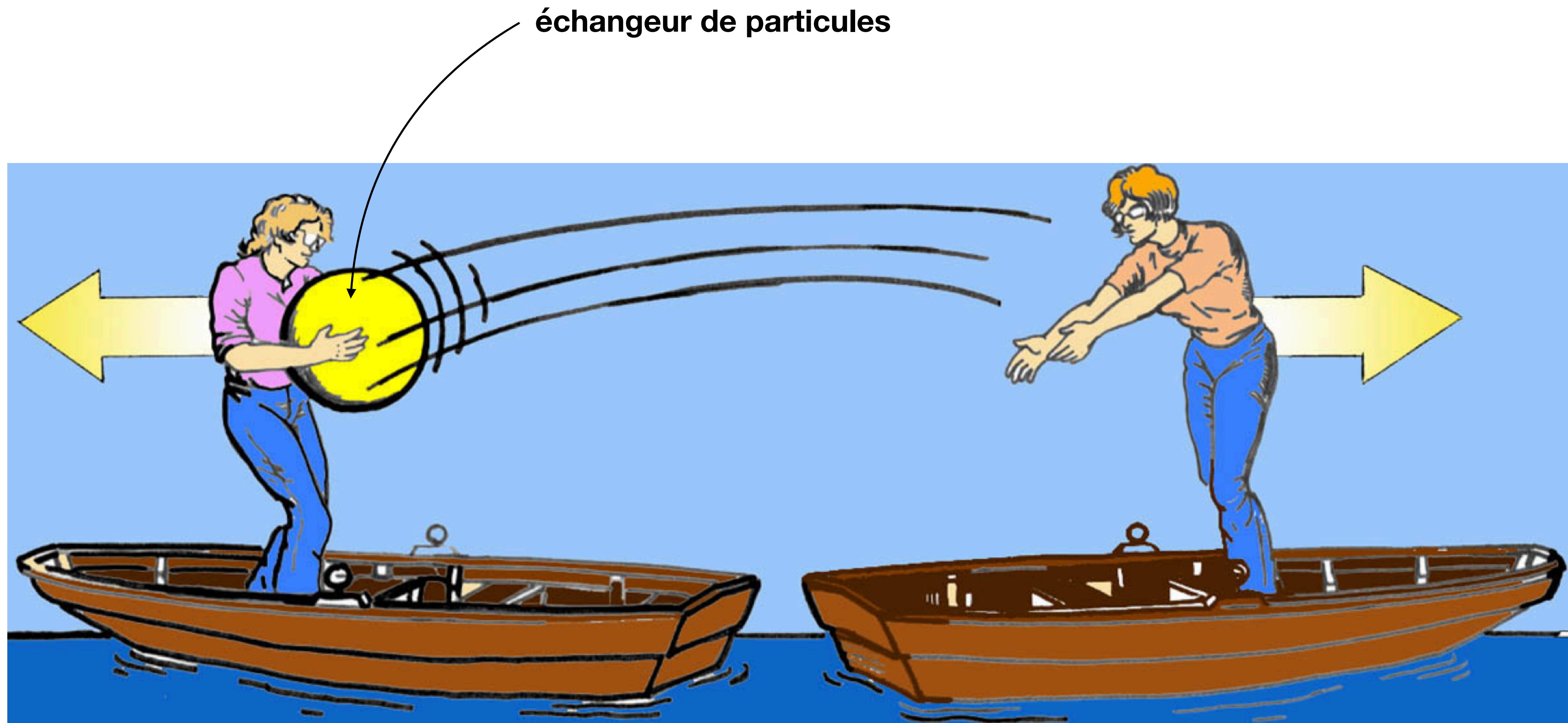
Force électromagnetique
Photon



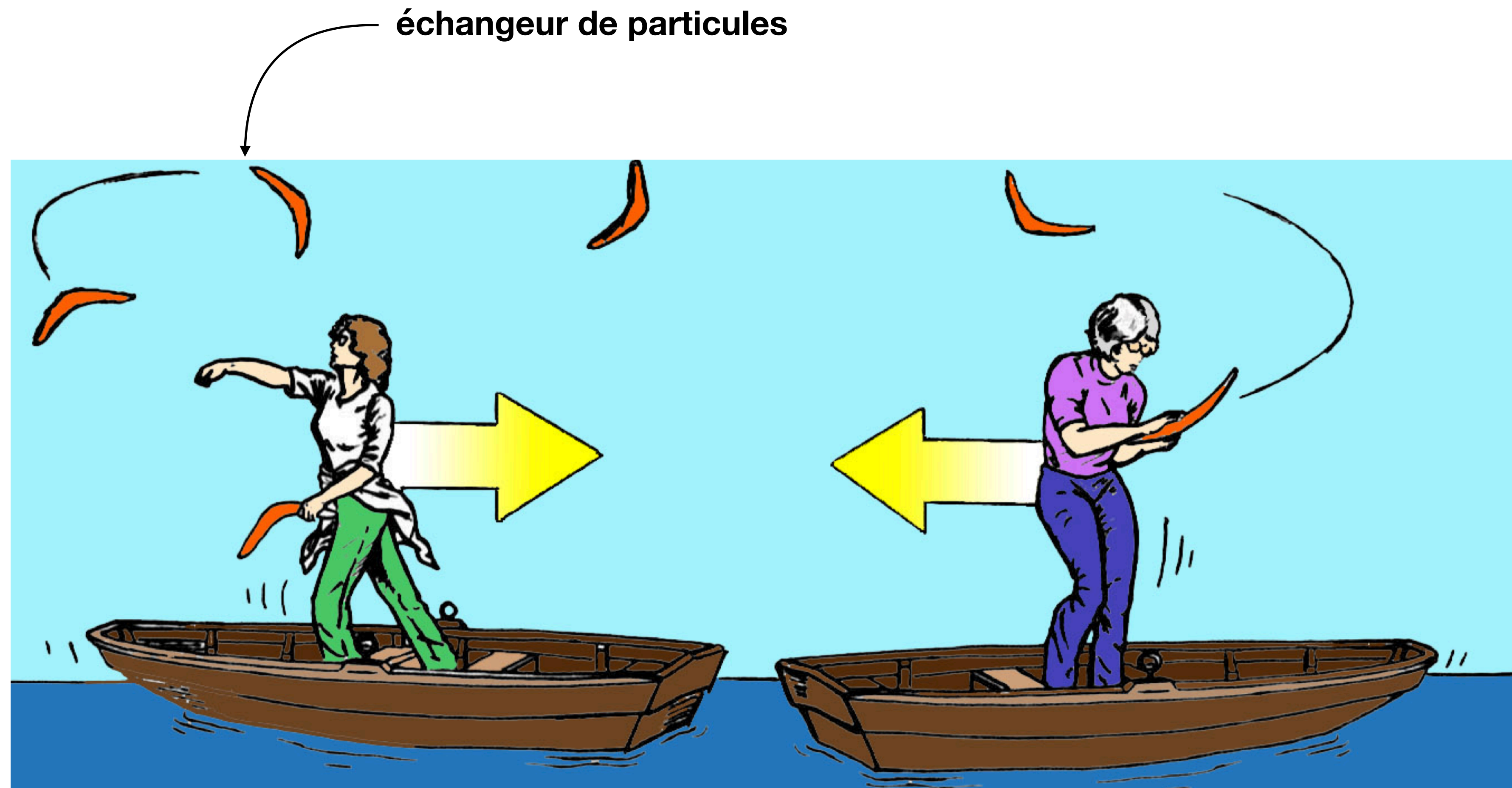
Force forte
gluon

Force faible
Bosons W,Z

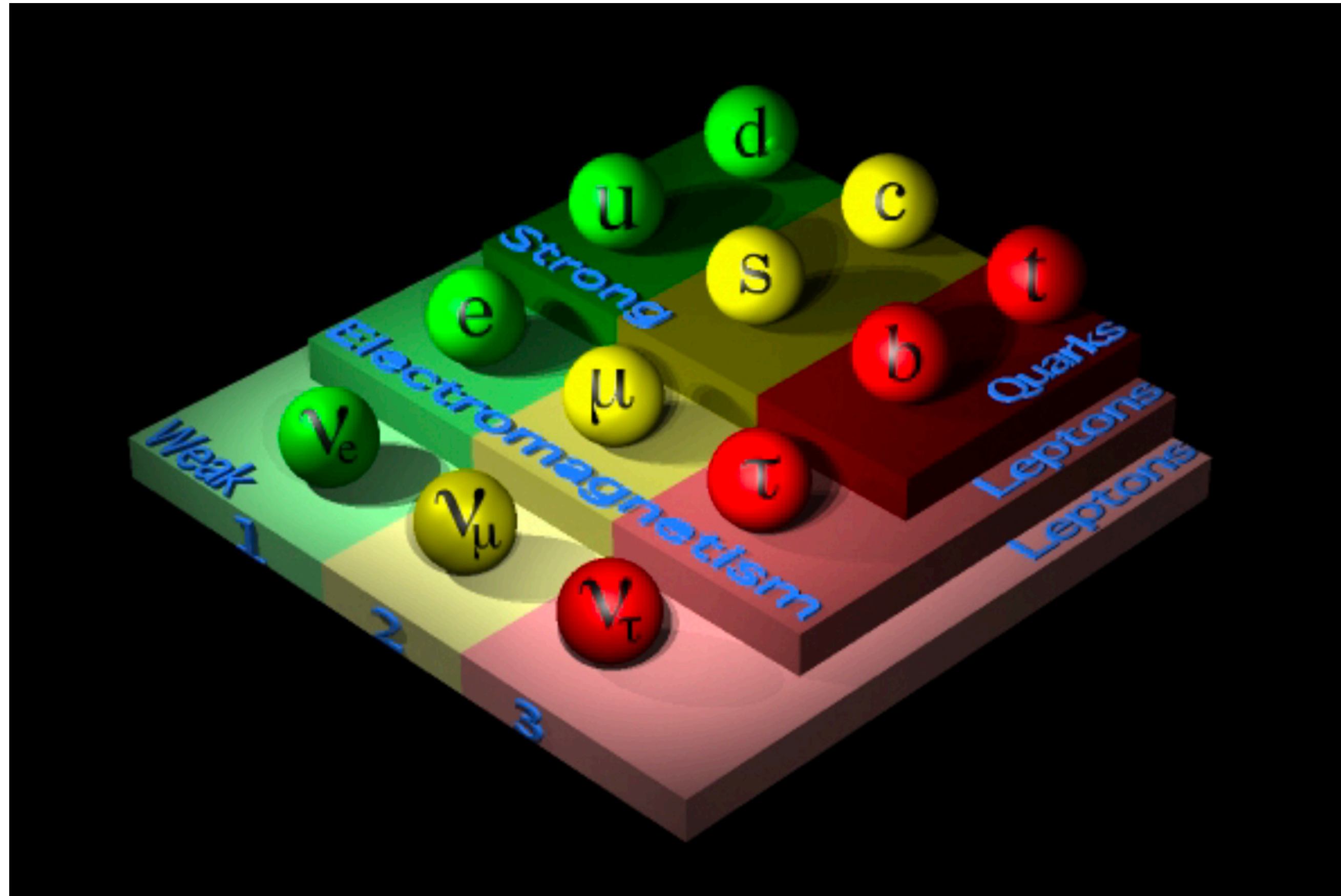
Interaction, échange de particules



Interaction, échange de particules



Trois interactions très différentes

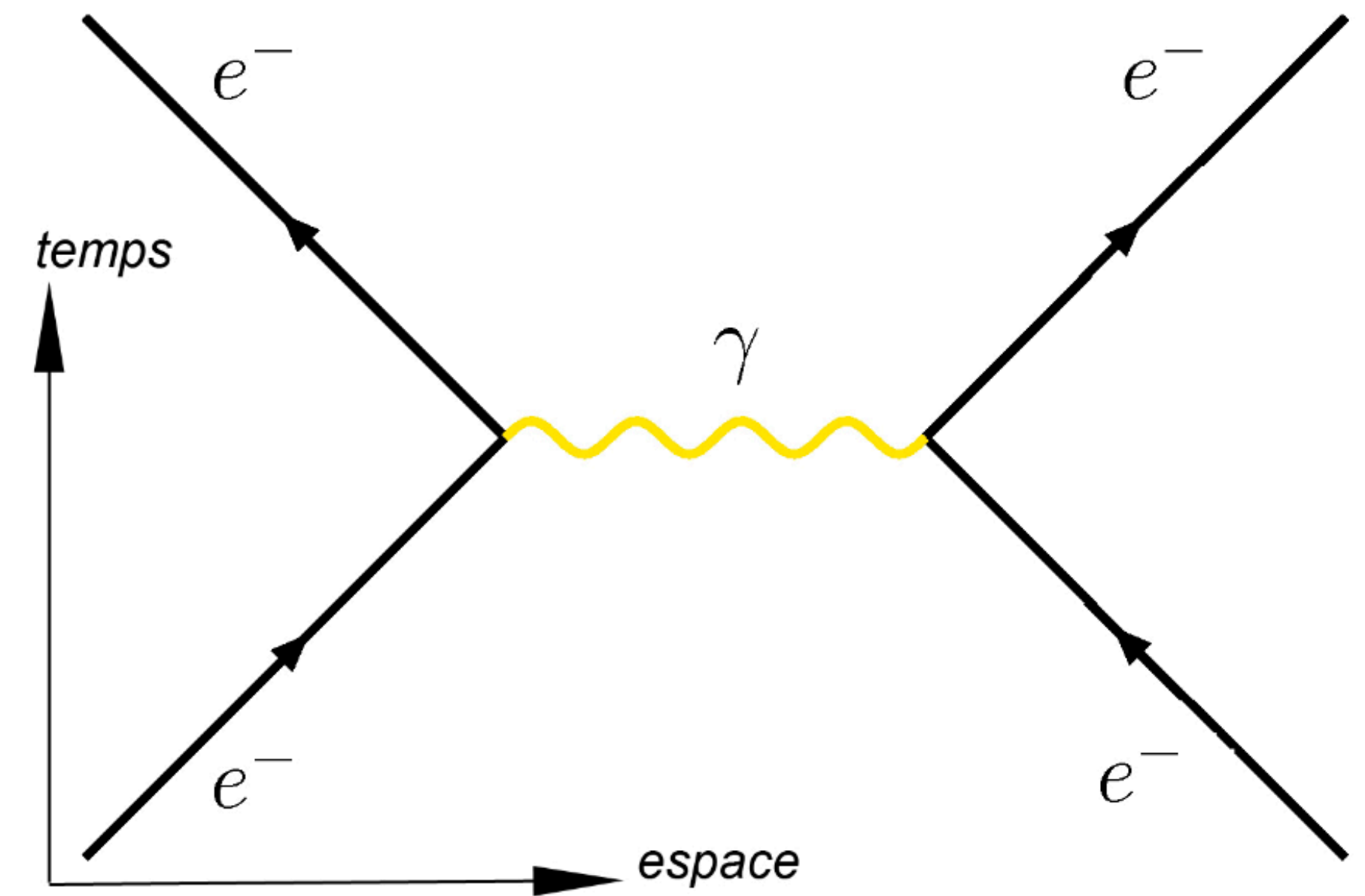


Les trois interactions dans le modèle standard ne parlent pas toutes aux mêmes particules et ont des portées différentes

Interaction électromagnétique

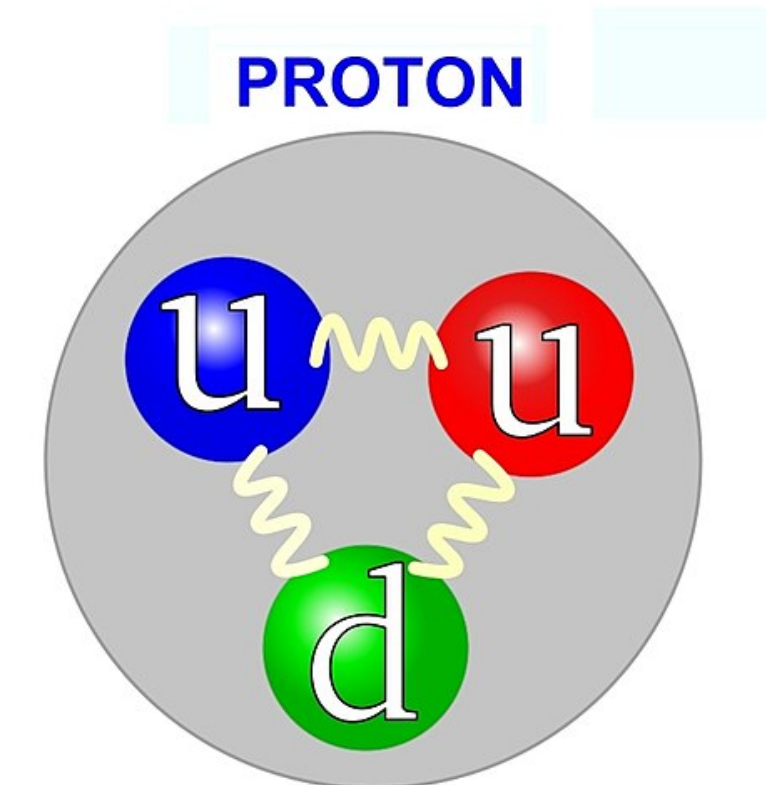
- Photon (de masse nulle) interagit avec les particules chargées électriquement
- A grand r , potentiel $V(r) \sim 1/r$ de portée infinie

- Interaction lumière-matière
- Atomes



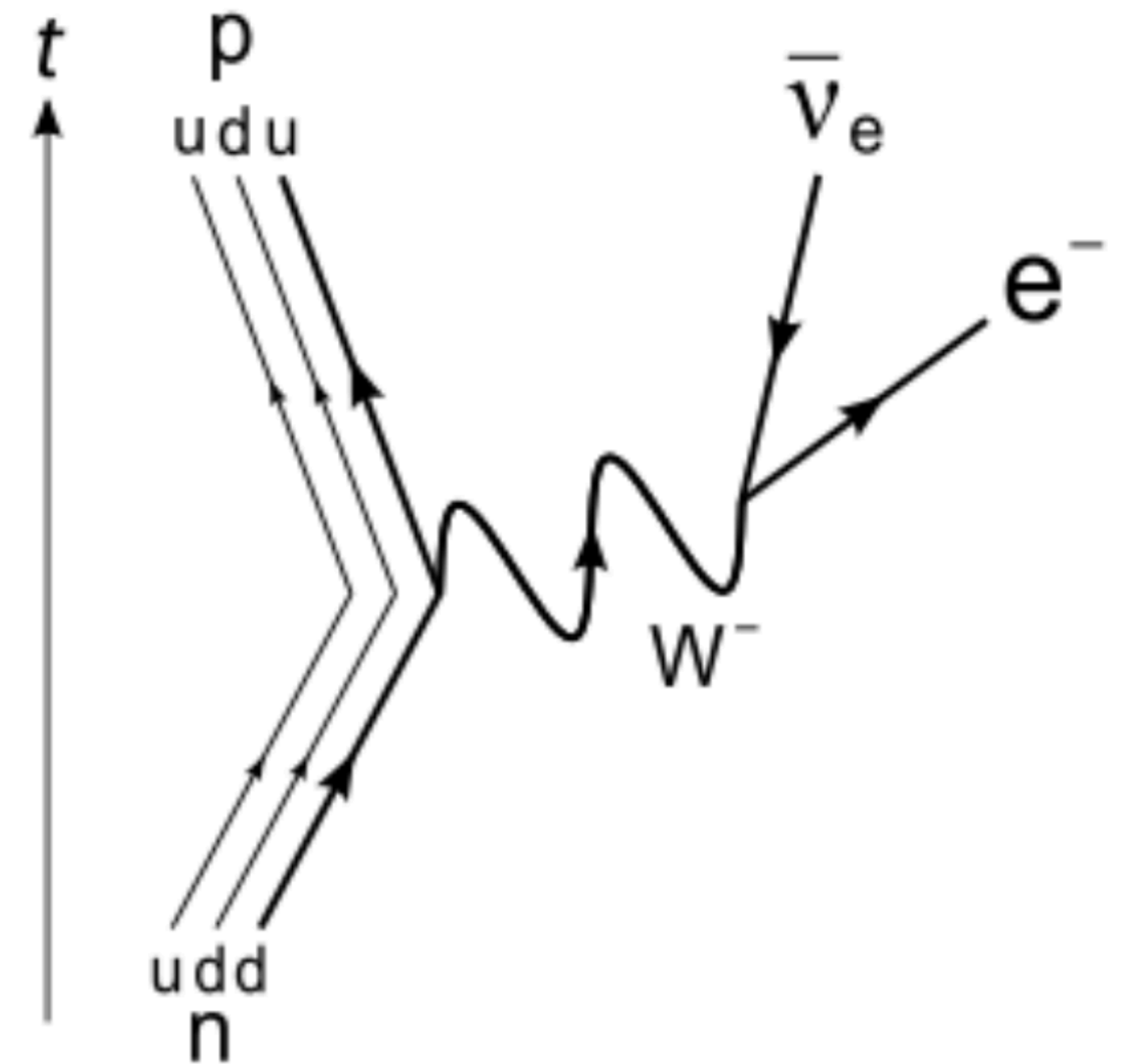
Interaction forte

- 8 gluons interagissant avec particules portant une charge de "couleur"
 - Les quarks (vert, rouge, bleu) et les gluons eux-mêmes
- A grand r , potentiel $V(r) \sim r$
- Les quarks restent confinés dans des objets de rayon $O(1\text{fm})$
 - Hadrons: états liés de trois quarks (baryon), ou quark-antiquark (meson)
 - Stabilité des noyaux



Interaction faible

- Bosons médiateurs: 2 bosons chargés électriquement ($W^\pm$) et un boson neutre (Z), masse 80 à 90 GeV
- Interactions avec toutes les particules sauf les gluons
- $V(r) \propto \frac{e^{-Mr}}{r}$ ($M = M_{W,Z}$), portée $O(10^{-17}\text{m})$
- Désintégrations, en particulier désintégration nucléaire β (via boson $W^\pm$)



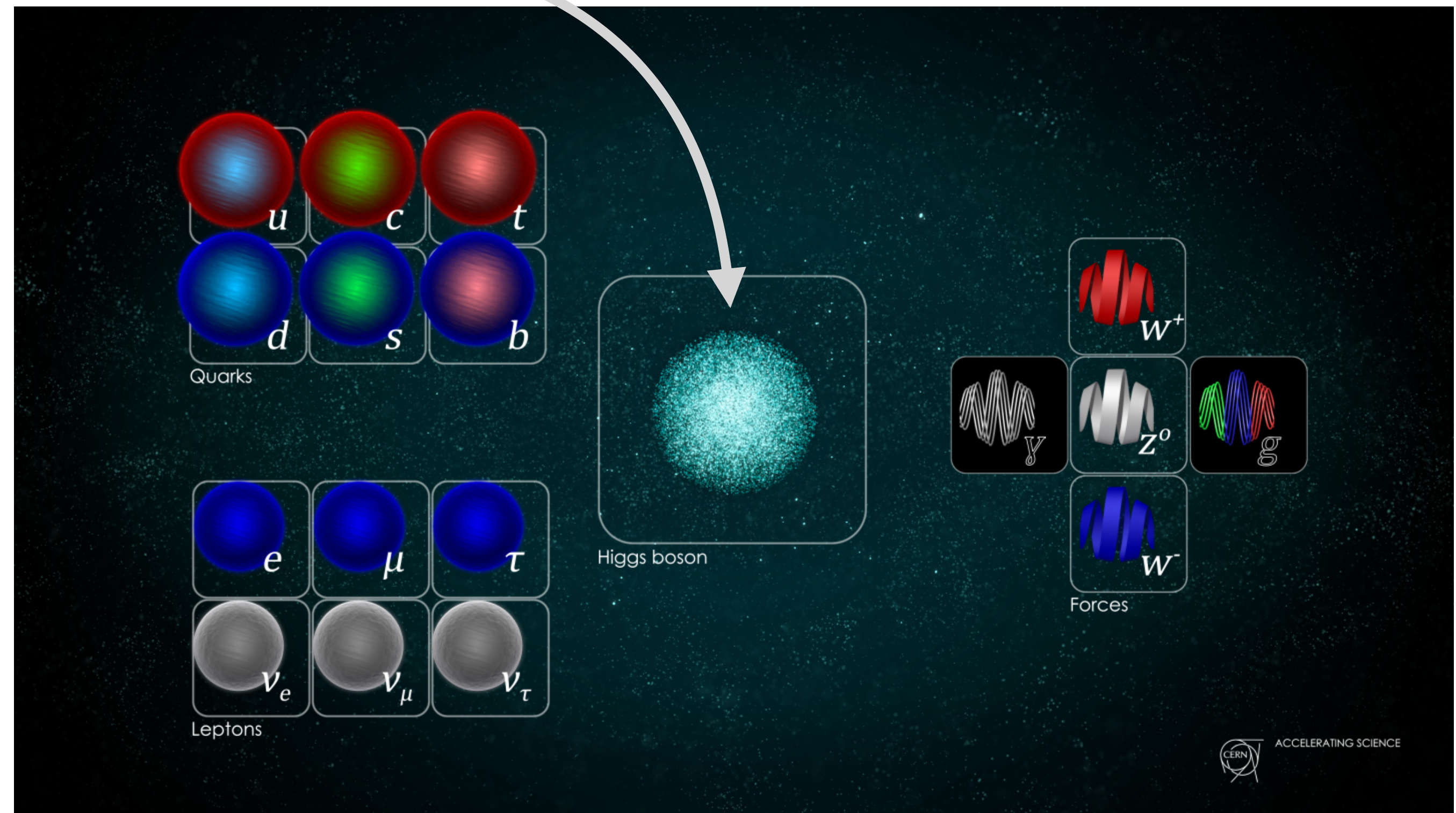
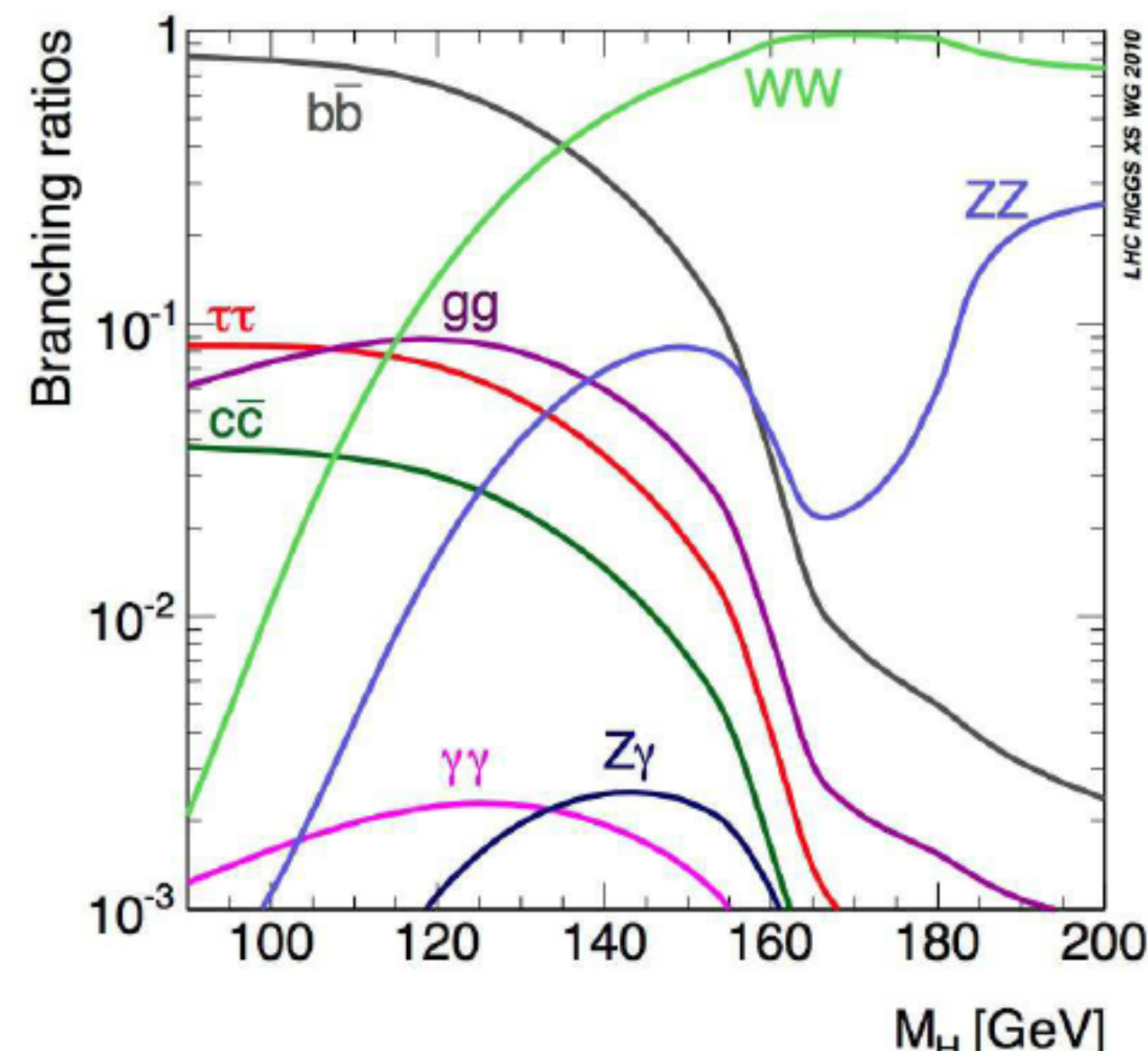
Le mécanisme de Higgs

- Propagation de la lumière dans un milieu
 - Indice de réfraction $n = c_{\text{vide}}/c_{\text{milieu}}$
 - Vitesse de la lumière différente de celle prédite par la relativité c_{vide} , mais les équations de Maxwell ont une formulation relativiste → interaction de la lumière avec son environnement
- Problème similaire dans le modèle standard:
 - $m=0$ pour toutes les particules
 - → milieu (champ de Higgs) qui interagit et freine les particules, créant une masse



Le boson de Higgs

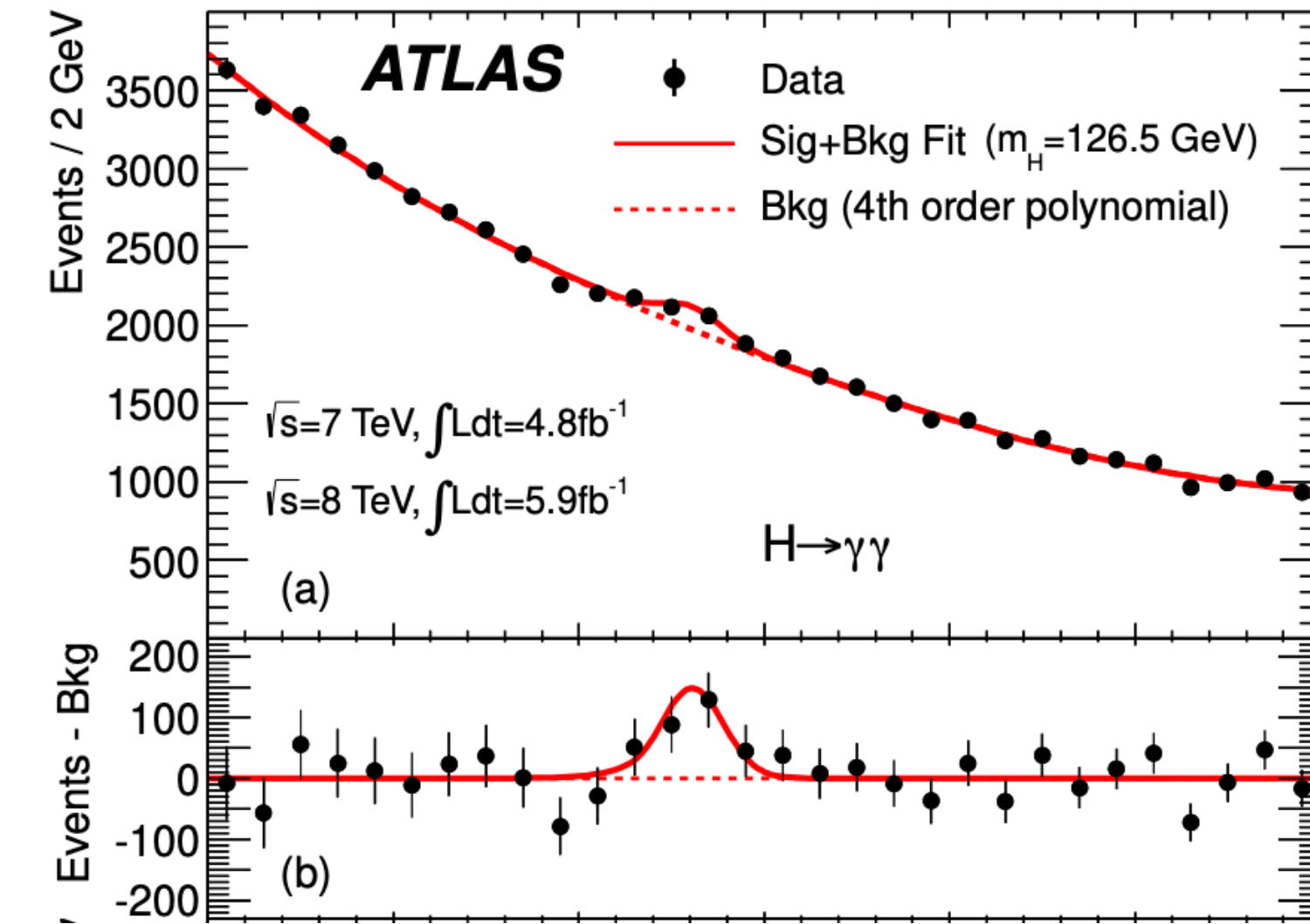
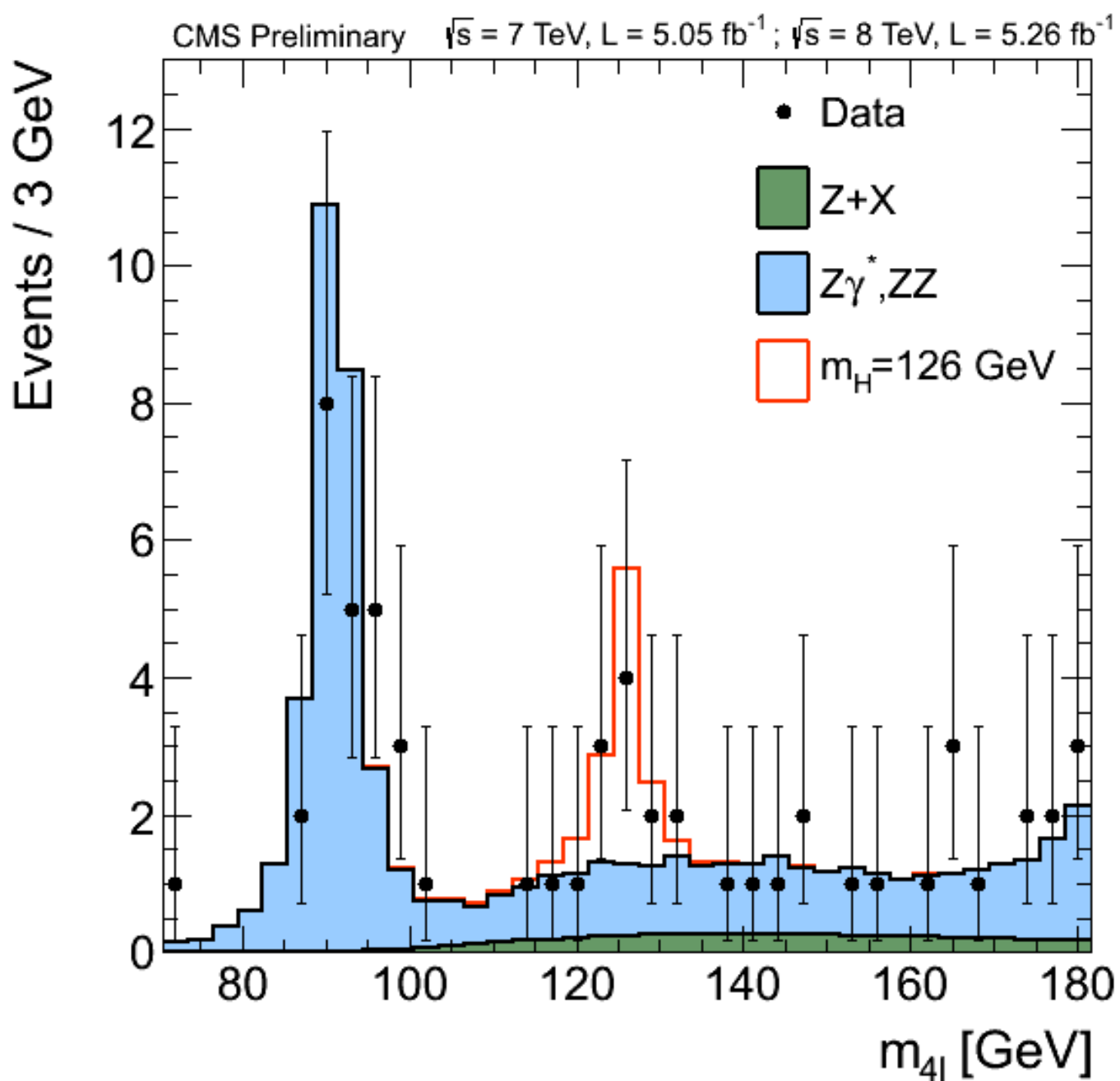
- Excitation du champ de Higgs → boson H (spin 0)
- Prédit dans le modèle standard, mais pas sa masse
- Théorisé dans les années 1960, des décennies de recherches



Canaux de désintégration varient en fonction de la masse

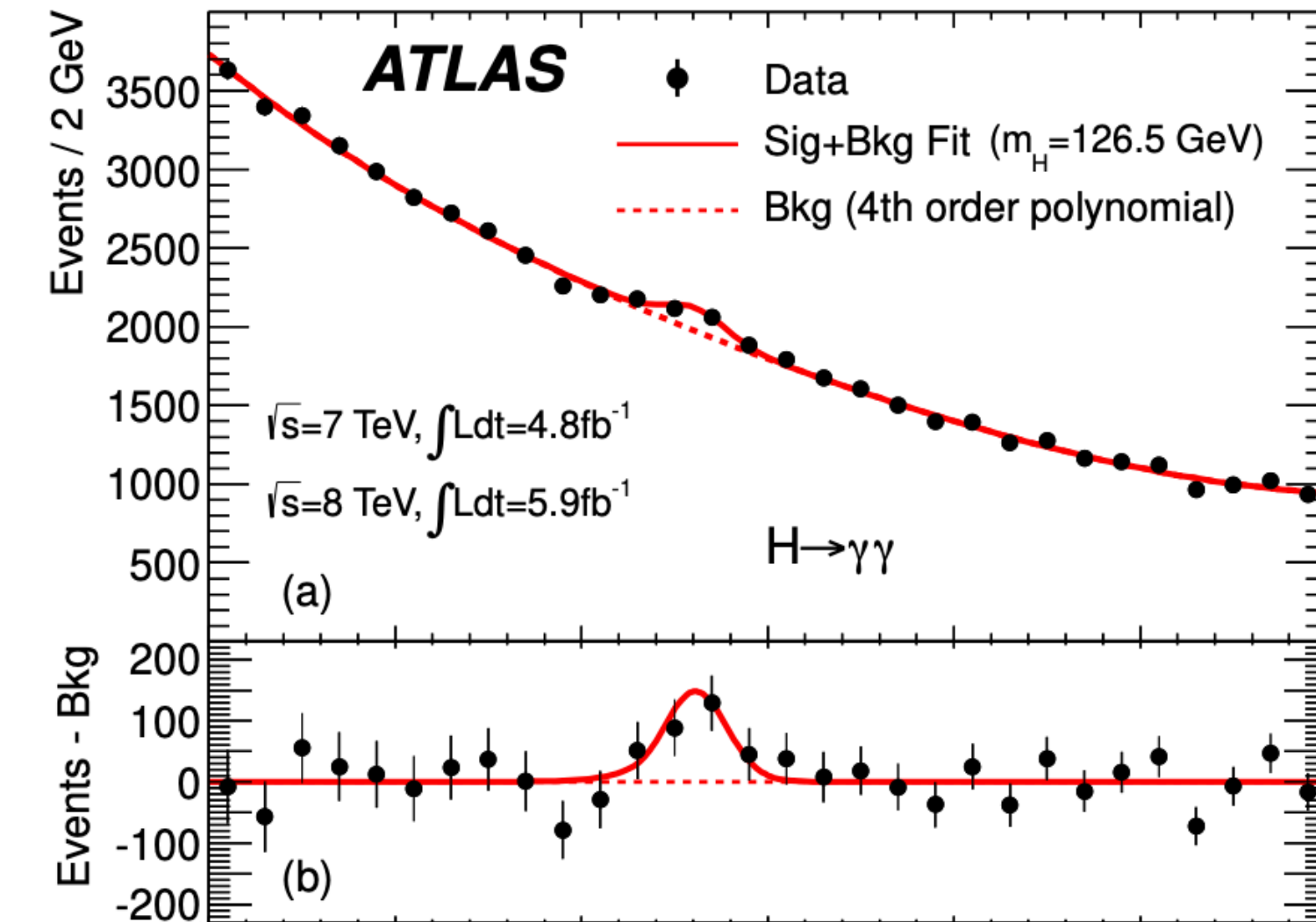
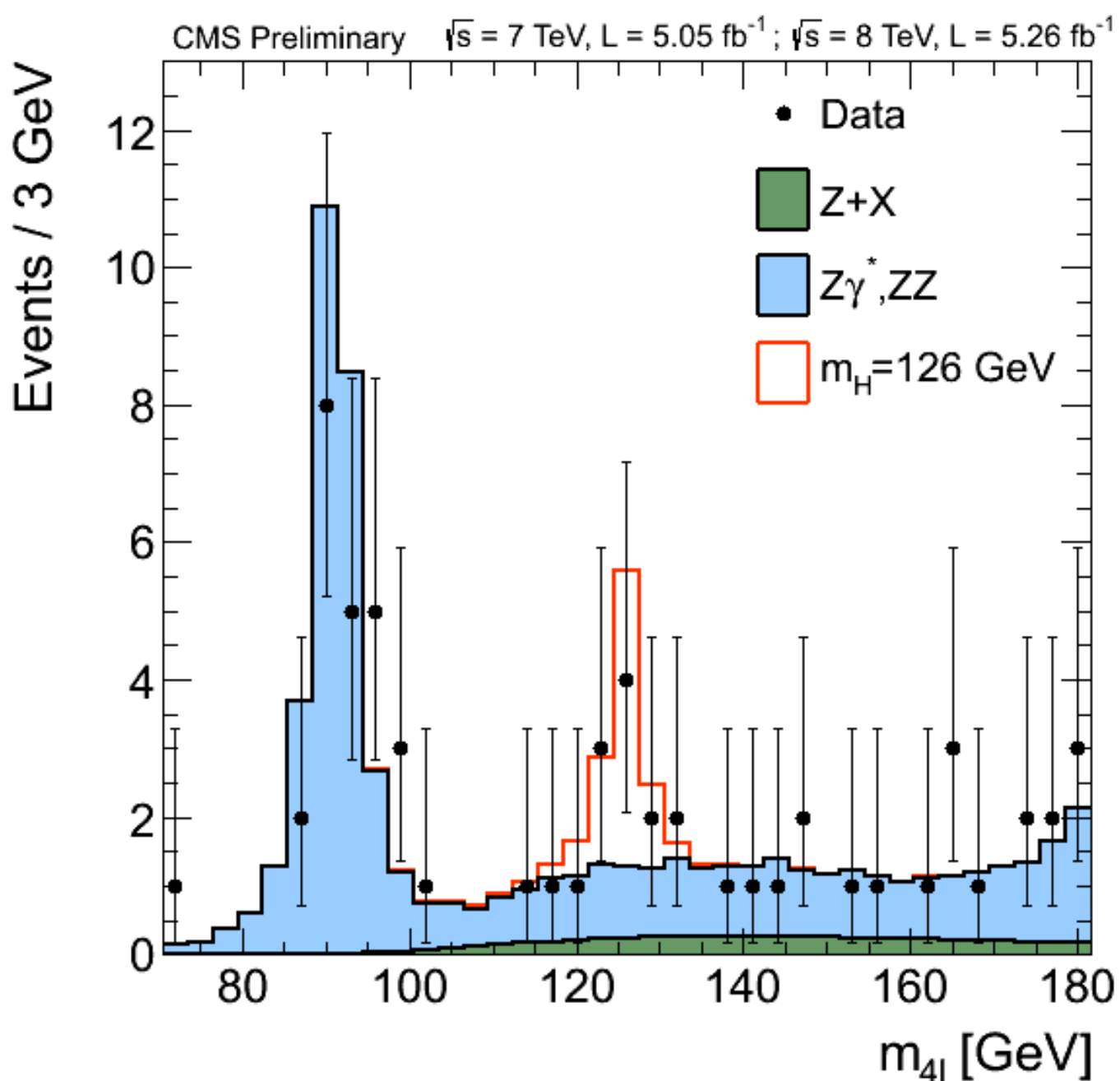
Le boson de Higgs

- Découverte en 2012 par les expériences ATLAS et CMS au LHC
- $m_H \sim 125 \text{ GeV}$
- Les années depuis ont permis une étude précise



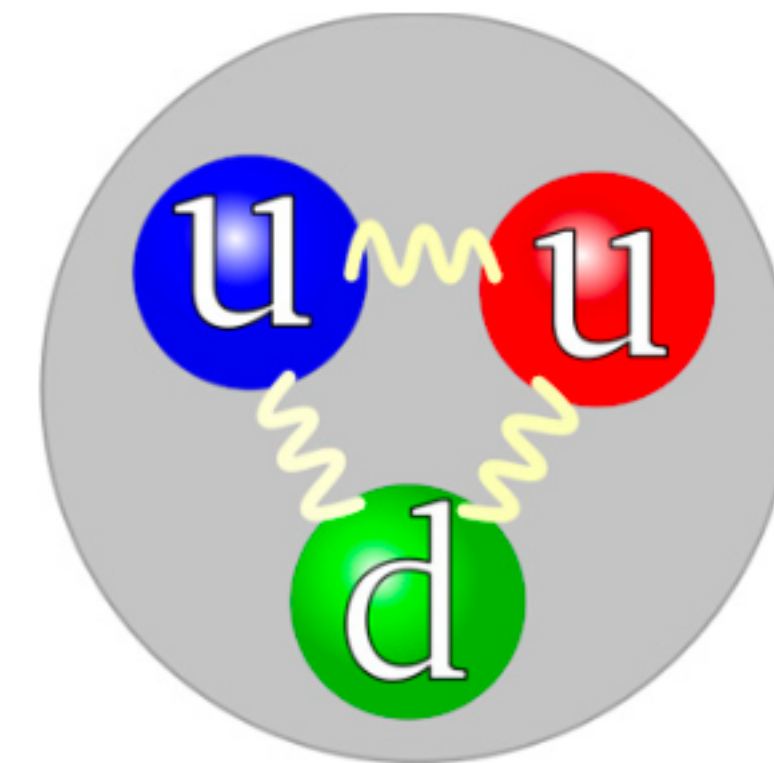
Le boson de Higgs

- Découverte en 2012 par les expériences ATLAS et CMS au LHC
- $m_H \sim 125 \text{ GeV}$
- Les années depuis ont permis une étude précise

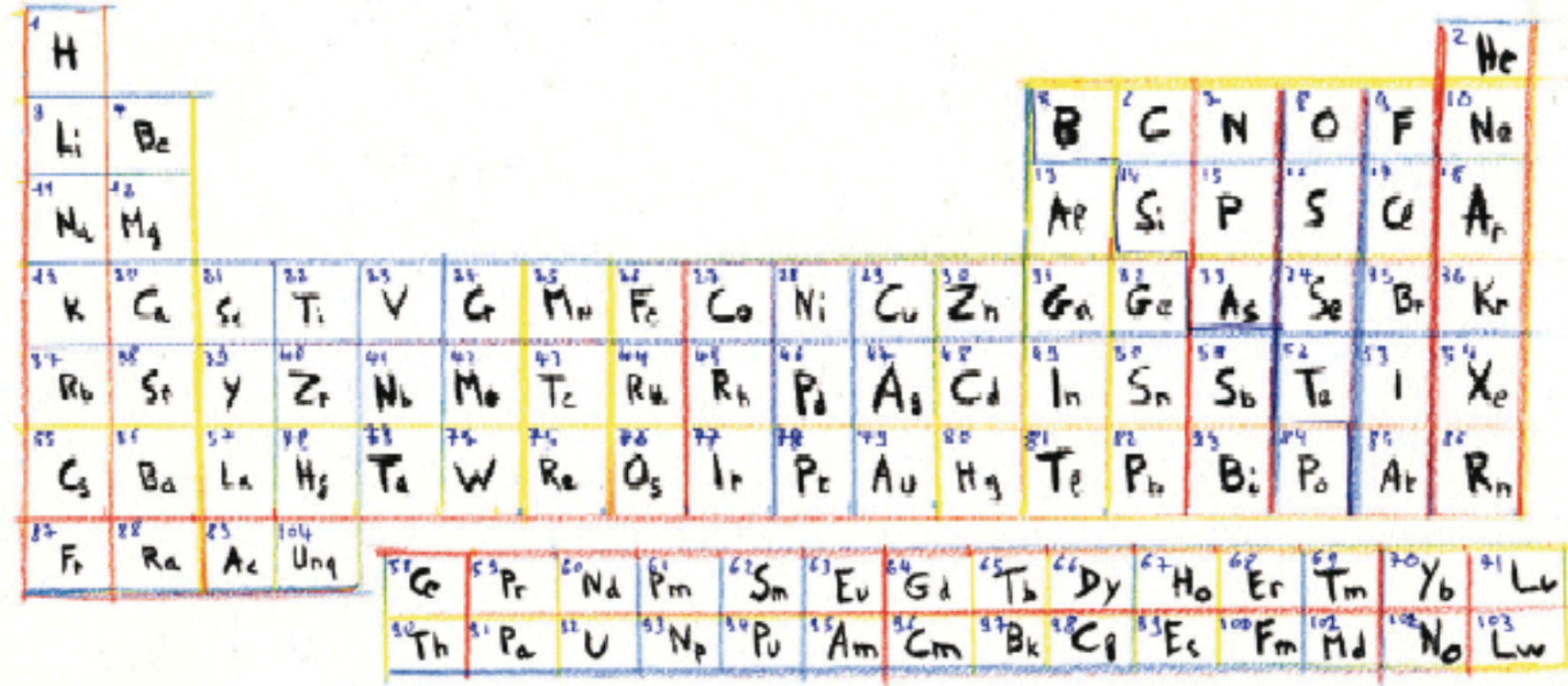


Attention masse

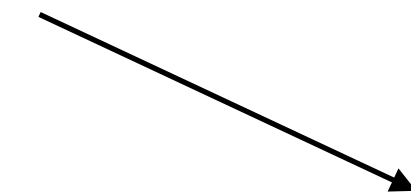
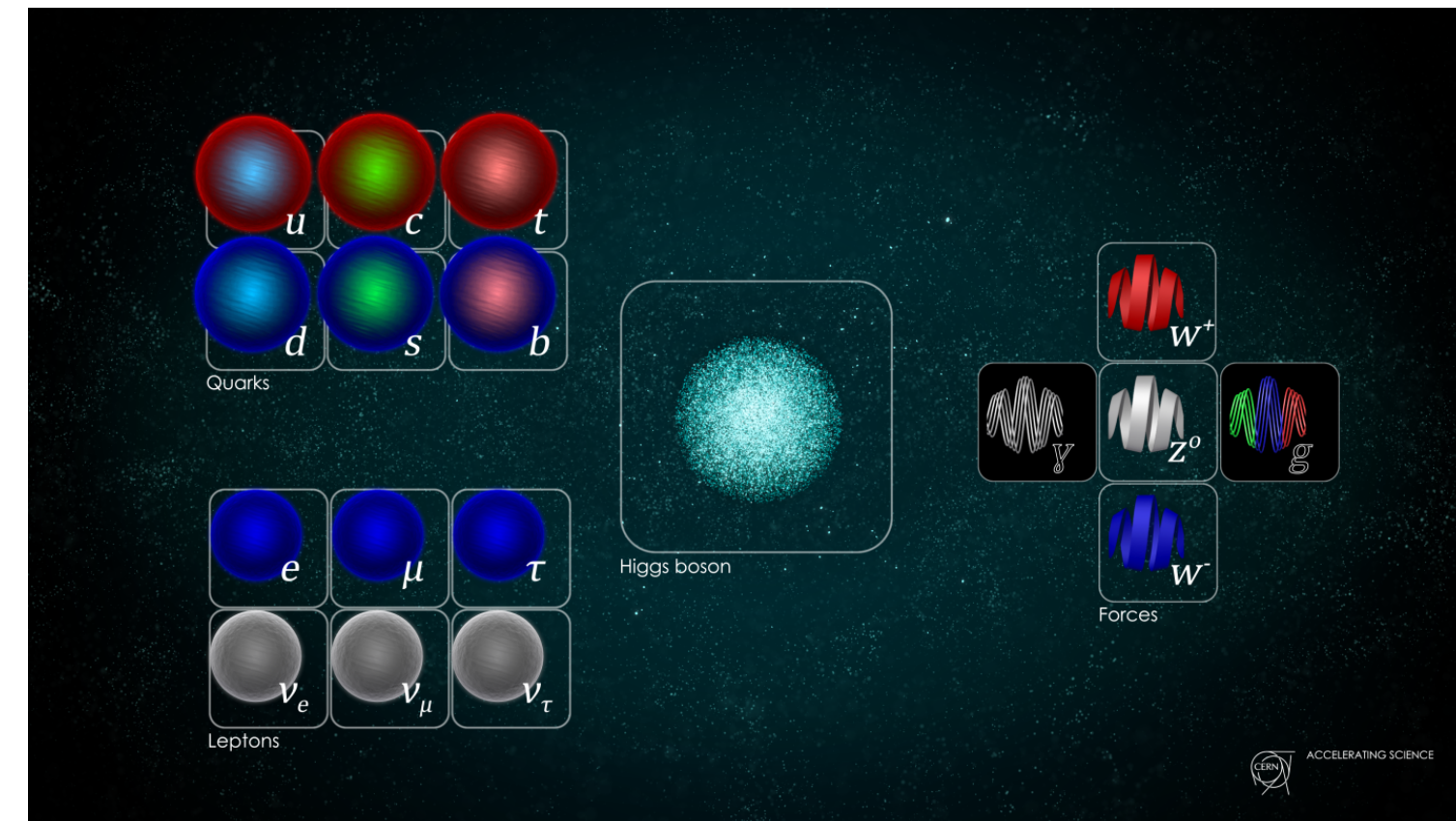
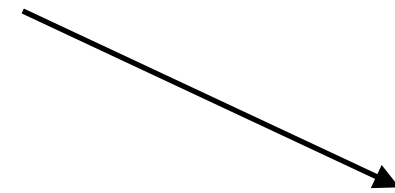
- Champ de Higgs responsable de la masse des particules élémentaires
 - Mais pas toute la masse de particules composées
- Par exemple pour le proton:
 - Masse des quarks: $\sim 1\%$
 - Energie de liaison (interaction forte): $\sim 99\%$



Vers de nouveaux modèles ?



A hand-drawn periodic table of elements, showing atomic numbers and chemical symbols. The table is organized into rows and columns, with elements grouped by their properties. The elements are arranged in a standard periodic table format, with the first row containing H and He, and the last row containing elements from Fr to Og.



?

Des questions ?