

# Des atomes au plasma quarks-gluons

François Arleo, SUBATECH



École de printemps



# Des particules et des interactions

---

L'histoire de la physique des particules est un **va-et-vient permanent entre expérience et théorie**

## Découverte de nouvelles particules par les expérimentateurs

- À l'intérieur de celles qui étaient considérées comme élémentaires
  - Atomes → noyaux → nucléons → quarks
  - ou produites par ailleurs : rayons cosmiques, accélérateurs...

## Modélisation de leurs interactions par les théoriciens

- Comment les particules élémentaires interagissent-elles ?
- Quelles sont les lois fondamentales qui régissent l'Univers ?
- Parfois, prédire de nouvelles particules et de nouveaux phénomènes !

# Sommaire

---

- De l'atome aux nucléons 1895–1928
- L'ère du nucléon 1928–1947
- Le zoo hadronique 1947–1964
- Le modèle des quarks 1964–1974
- L'interaction forte et la liberté asymptotique 1970-1980
- Le plasma de quarks et de gluons 1975 à aujourd'hui



# Le tableau de Mendeleïev

- Premier tableau paru en 1869
- Système de **classification**
  - Éléments ordonnés par masse croissante et périodicité des propriétés physiques
- Basé sur des observations **expérimentales**
- Prédications de nouveaux éléments
- Régulièrement mis à jour

**TABELLE II**

REIHEN	GRUPPE I. — R <sup>2</sup> O	GRUPPE II. — RO	GRUPPE III. — R <sup>2</sup> O <sup>3</sup>	GRUPPE IV. RH <sup>4</sup> RO <sup>2</sup>	GRUPPE V. RH <sup>3</sup> R <sup>2</sup> O <sup>5</sup>	GRUPPE VI. RH <sup>2</sup> RO <sup>3</sup>	GRUPPE VII. RH R <sup>2</sup> O <sup>7</sup>	GRUPPE VIII. — RO <sup>4</sup>
1	H=1							
2	Li=7	Be=9,4	B=11	C=12	N=14	O=16	F=19	
3	Na=23	Mg=24	Al=27,3	Si=28	P=31	S=32	Cl=35,5	
4	K=39	Ca=40	—=44	Ti=48	V=51	Cr=52	Mn=55	Fe=56, Co=59, Ni=59, Cu=63.
5	(Cu=63)	Zn=65	—=68	—=72	As=75	Se=78	Br=80	
6	Rb=85	Sr=87	?Yt=88	Zr=90	Nb=94	Mo=96	—=100	Ru=104, Rh=104, Pd=106, Ag=108.
7	(Ag=108)	Cd=112	In=113	Sn=118	Sb=122	Te=125	J=127	
8	Cs=133	Ba=137	?Di=138	?Ce=140	—	—	—	— — — —
9	(—)	—	—	—	—	—	—	
10	—	—	?Er=178	?La=180	Ta=182	W=184	—	Os=195, Ir=197, Pt=198, Au=199.
11	(Au=199)	Hg=200	Tl=204	Pb=207	Bi=208	—	—	— — — —
12	—	—	—	Th=231	—	U=240	—	— — — —

**Figure 2.5** Dmitri Mendeleev's 1872 periodic table. The spaces marked with blank lines represent elements that Mendeleev deduced existed but were unknown at the time, so he left places for them in the table. The symbols at the top of the columns (e.g., R<sup>2</sup>O and RH<sup>4</sup>) are molecular formulas written in the style of the 19th century.

**La loi périodique** : « Les propriétés des corps simples et composés dépendent d'une fonction périodique des poids atomiques des éléments, pour la seule raison que **ces propriétés sont elles-mêmes les propriétés des éléments dont ces corps dérivent** »

# Le tableau de Mendeleïev

**PRINCIPE**

Conçu en 1869 par le chimiste russe Dimitri Ivanovitch Mendeleïev, le tableau périodique classe tous les éléments chimiques selon leur numéro atomique et leurs propriétés chimiques. Quatre éléments ont été identifiés entre 2004 et 2010 et viennent d'être validés par l'Union internationale de chimie pure et appliquée (IUPAC).

1 H Hydrogène	2 He Hélium											18					
3 Li Lithium	4 Be Béryllium											13 B Bore	14 C Carbone	15 N Azote	16 O Oxygène	17 F Fluor	10 Ne Néon
11 Na Sodium	12 Mg Magnésium											13 Al Aluminium	14 Si Silicium	15 P Phosphore	16 S Soufre	17 Cl Chlore	18 Ar Argon
19 K Potassium	20 Ca Calcium	21 Sc Scandium	22 Ti Titane	23 V Vanadium	24 Cr Chrome	25 Mn Manganèse	26 Fe Fer	27 Co Cobalt	28 Ni Nickel	29 Cu Cuivre	30 Zn Zinc	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsenic	34 Se Sélénium	35 Br Brome	36 Kr Krypton
37 Rb Rubidium	38 Sr Strontium	39 Y Yttrium	40 Zr Zirconium	41 Nb Niobium	42 Mo Molybdène	43 Tc Technétium	44 Ru Ruthénium	45 Rh Rhodium	46 Pd Palladium	47 Ag Argent	48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Étain	51 Sb Antimoine	52 Te Tellure	53 I Iode	54 Xe Xénon
55 Cs Césium	56 Ba Baryum	57-71 La-Lu Lanthanides	72 Hf Hafnium	73 Ta Tantale	74 W Tungstène	76 Re Rhenium	76 Os Osmium	77 Ir Iridium	78 Pt Platine	79 Au Or	80 Hg Mercure	81 Tl Thallium	82 Pb Plomb	83 Bi Bismuth	84 Po Polonium	85 At Astate	86 Rn Radon
87 Fr Francium	88 Ra Radium	89-103 Ac-Lr Actinides	104 Rf Rutherfordium	105 Db Dubnium	106 Sg Seaborgium	107 Bh Bohrium	108 Hs Hassium	109 Mt Meitnerium	110 Ds Darmstadtium	111 Rg Roentgenium	112 Cn Copernicium	113 *Nh Nihonium	114 Fl Flerovium	115 *Mc Moscovium	116 Lv Livermorium	117 *Ts Tennessine	118 *Og Oganesson
		57 La Lanthane	58 Ce Cérium	59 Pr Praséodyme	60 Nd Néodyme	61 Pm Prométhium	62 Sm Samarium	63 Eu Europium	64 Gd Gadolinium	65 Tb Terbium	66 Dy Dysprosium	67 Ho Holmium	68 Er Erbium	69 Tm Thulium	70 Yb Ytterbium	71 Lu Lutétium	
		89 Ac Actinium	90 Th Thorium	91 Pa Protactinium	92 U Uranium	93 Np Neptunium	94 Pu Plutonium	95 Am Américium	96 Cm Curium	97 Bk Berkélium	98 Cf Californium	99 Es Einsteinium	100 Fm Fermium	101 Md Mendélévium	102 No Nobelium	103 Lr Lawrencium	

— Éléments synthétiques créés artificiellement dans des accélérateurs de particules ou lors de réactions nucléaires  
 ✕ Éléments n'ayant pas d'utilisation  
 ★ Nouveaux éléments chimiques validés en 2016 par l'IUPAC

## Familles

Classement des éléments en fonction d'un comportement chimique proche.

- Non-métaux
- Métaux alcalins
- Métaux alcalino-terreux
- Métaux de transition
- Lanthanides (ou terres rares)
- Actinides
- Métaux pauvres
- Halogènes
- Gaz rares
- Métalloïdes

## État physiques

Ne gaz Hg liquide Fe solide

## Atome



Constituant fondamental de la matière formé par un noyau (au centre), composé de protons et de neutrons, autour duquel

se répartissent des électrons en différents niveaux d'énergies appelés couches électroniques (ellipses).

Les atomes stables connus ont jusqu'à 7 couches électroniques (correspondant aux 7 lignes du tableau) dont les électrons occupent au fur et à mesure des orbitales électroniques (il existe jusqu'à 44 types de ces orbitales pouvant contenir des sous-couches électroniques : s(1), p(3), d(5) et f(7)).

## Élément chimique



Ensemble des atomes caractérisés par un nombre défini de protons dans leur noyau. Ces atomes ont différentes formes possibles :

les isotopes (même nombre de protons et d'électrons mais nombre différent de neutrons).

**Numéro atomique** : nombre de protons et d'électrons de l'élément

**Symbole atomique** : représentation universelle de l'élément

## Périodes (I à VII)

Classement des éléments selon leur configuration électronique (pour prévoir l'évolution de leurs propriétés) : nombre d'orbitales occupées par des électrons.

Les éléments de la ligne I ont 1 couche occupée, ceux de la ligne II en ont 2, etc.

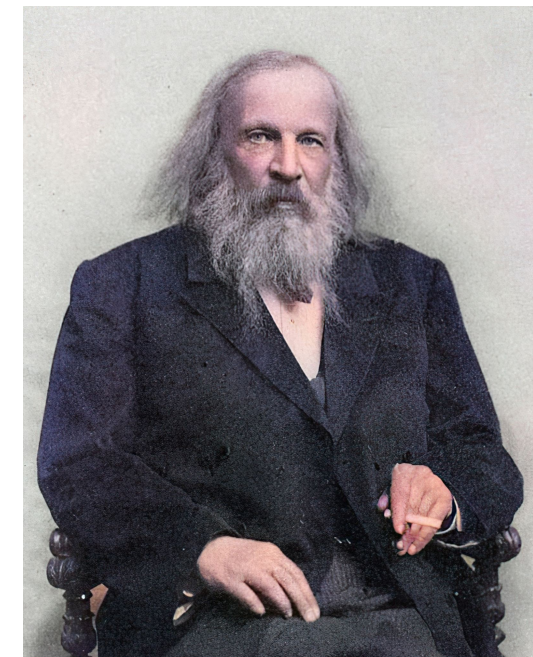
## Groupes (1 à 18)

Organisation des éléments selon leurs propriétés communes, comme la réactivité (capacité de l'élément à céder ou recevoir des électrons).

Colonnes 1, 2 et 13 à 17 : éléments remplissant progressivement les orbitales « s » et « p » et ayant le même nombre d'électrons sur leur couche électronique : col. 1 = 1 électron, col. 13 = 3 électrons, col. 14 = 4, etc.

Colonnes 3 à 12 : éléments remplissant les orbitales « d » et « f ».

Colonne 18 : éléments dont la couche électronique externe est saturée.

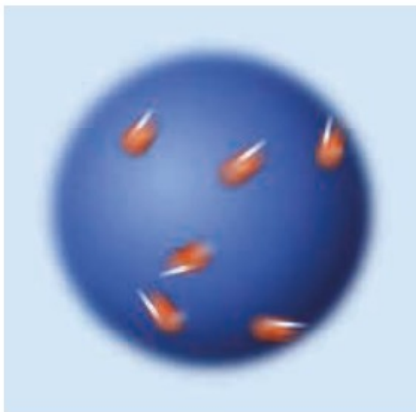


# Que nous dit le tableau de Mendeleïev ?

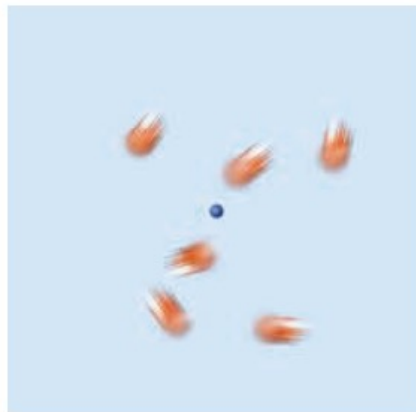
---

- Volonté de **classer** les éléments chimiques connus en fonction d'observations **empiriques**
- Loi périodique : lien entre propriété des éléments (microscopiques) et des corps simples (macroscopiques)
- Ce schéma de pensée se retrouvera un siècle plus tard avec la **découverte des quarks** !
- Pas de description sous-jacente « des éléments dont ces corps dérivent »

Quel **modèle** pour l'atome ?



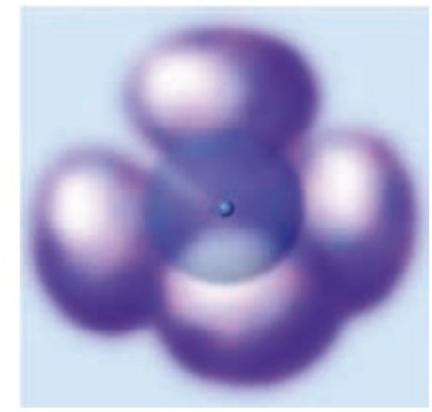
Atome de Thomson



Atome de Rutherford



Atome de Bohr



Atome « moderne »

# À quoi ressemble un atome ?

---

Une première tentative par **Dalton en 1803**

- Les éléments sont constitués de **particules très petites appelées atomes**
- Les atomes de différents éléments se combinent dans des rapports simples de nombres entiers pour former des composés chimiques
- Dans les réactions chimiques, les atomes sont combinés, séparés ou réarrangés
- **Les atomes d'un élément donné sont identiques en termes de taille, de masse et d'autres propriétés** ; les atomes d'éléments différents diffèrent en termes de taille, de masse et d'autres propriétés
- Les atomes ne peuvent pas être subdivisés, créés ou détruits



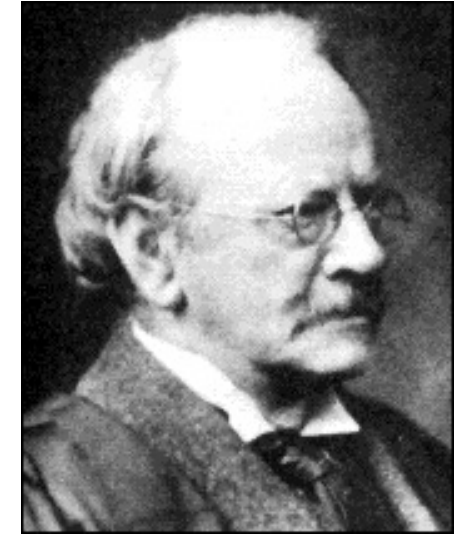
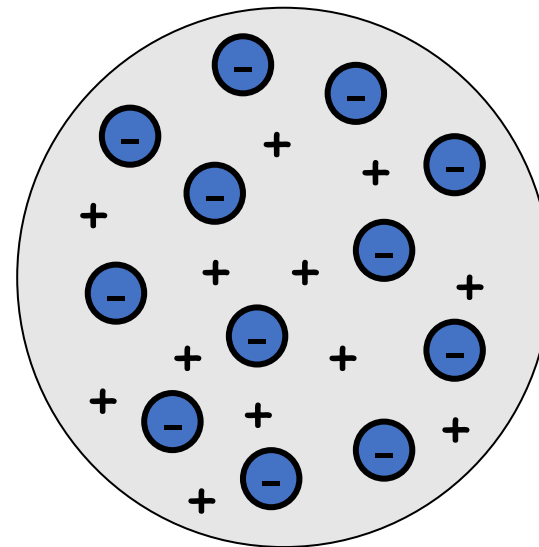
# L'atome de Thomson

En 1897 Thomson découvre l'électron

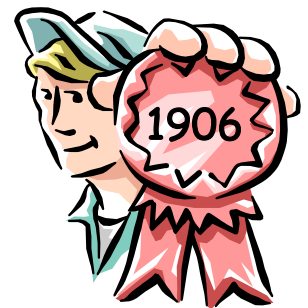
- Déflexion des rayons cathodiques
- Particule de charge négative et de masse  $\simeq m_{\text{H}}/1800$
- Toujours considéré comme une particule élémentaire

Modèle du « pudding aux raisins » en 1904

- Charge positive uniformément répartie (pudding)
- Charges négatives attachées au pudding (raisins)



« Qu'est-ce qui pouvait à première vue sembler plus improbable qu'un corps soit si petit que sa masse correspondrait à une fraction insignifiante de la masse d'un atome d'hydrogène ? – qui est lui-même si petit qu'un groupe de ces atomes d'un nombre égal à la population de la terre serait trop petit pour être détecté par quelque moyen alors connu de la science. »

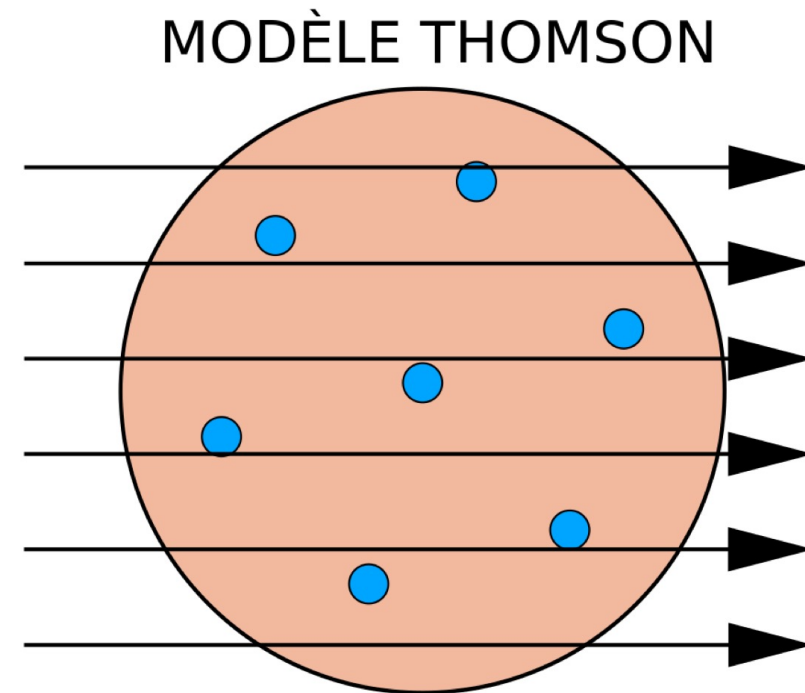
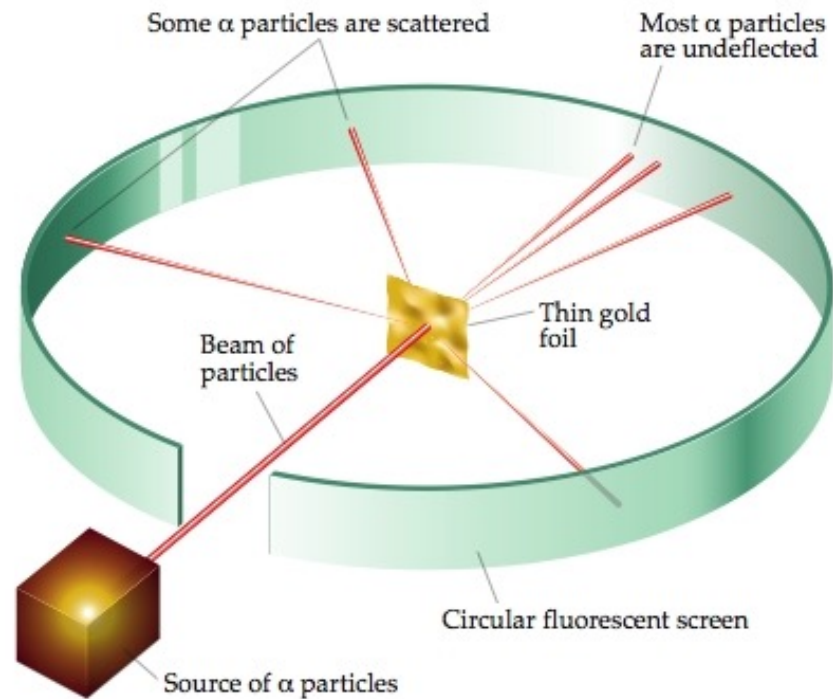


[Enregistrement vidéo](#)

# L'expérience de Rutherford (1909)

Expérience de Geiger, Marsden et Rutherford (1909) étudie la diffusion de particules  $\alpha$  sur une feuille d'or

- Pas ou peu de diffusion de particules  $\alpha$  à grand angle attendue dans le modèle de Thomson



# L'interprétation de Rutherford

Dans un article de 1911, Rutherford écrit :

*« We shall suppose that for distances less than  $10^{-12}$  cm the central charge and also the charge of the  $\alpha$ -particle may be supposed to be concentrated at a point »*

## Un modèle « planétaire »

- Petit noyau dense et chargé, qui concentre la majeure partie de la masse de l'atome : le noyau atomique !
- Les électrons tournent en orbite autour du noyau
- ... avec deux gros problèmes :
- Les électrons en orbite rayonnent de la lumière → rapide effondrement sur le noyau positif ( $t \sim 10^{-12}$ s)
- Le spectre de lumière rayonnée doit être continu → contredit les mesures expérimentales montrant des raies discrètes

[Document entier](#)

LXXIX. *The Scattering of  $\alpha$  and  $\beta$  Particles by Matter and the Structure of the Atom.* By Professor E. RUTHERFORD, F.R.S., University of Manchester\*.

§ 1. **I**T is well known that the  $\alpha$  and  $\beta$  particles suffer deflexions from their rectilinear paths by encounters with atoms of matter. This scattering is far more marked for the  $\beta$  than for the  $\alpha$  particle on account of the much smaller momentum and energy of the former particle. There seems to be no doubt that such swiftly moving particles pass through the atoms in their path, and that the deflexions observed are due to the strong electric field traversed within the atomic system. It has generally been supposed that the scattering of a pencil of  $\alpha$  or  $\beta$  rays in passing through a thin plate of matter is the result of a multitude of small scatterings by the atoms of matter traversed. The observations, however, of Geiger and Marsden † on the scattering of  $\alpha$  rays indicate that some of the  $\alpha$  particles must suffer a deflexion of more than a right angle at a single encounter. They found, for example, that a small fraction of the incident  $\alpha$  particles, about 1 in 20,000, were turned through an average angle of  $90^\circ$  in passing through a layer of gold-foil about  $\cdot 00004$  cm. thick, which was equivalent in stopping-power of the  $\alpha$  particle to 1·6 millimetres of air. Geiger ‡ showed later that the most probable angle of deflexion for a pencil of  $\alpha$  particles traversing a gold-foil of this thickness was about  $0^\circ\cdot 87$ . A simple calculation based on the theory of probability shows that the chance of an  $\alpha$  particle being deflected through  $90^\circ$  is vanishingly small. In addition, it will be seen later that the distribution of the  $\alpha$  particles for various angles of large deflexion does not follow the probability law to be expected if such large deflexions are made up of a large number of small deviations. It seems reasonable to suppose that the deflexion through a large angle is due to a single atomic encounter, for the chance of a second encounter of a kind to produce a large deflexion must in most cases be exceedingly small. A simple calculation shows that the atom must be a seat of an intense electric field in order to produce such a large deflexion at a single encounter.

Recently Sir J. J. Thomson § has put forward a theory to

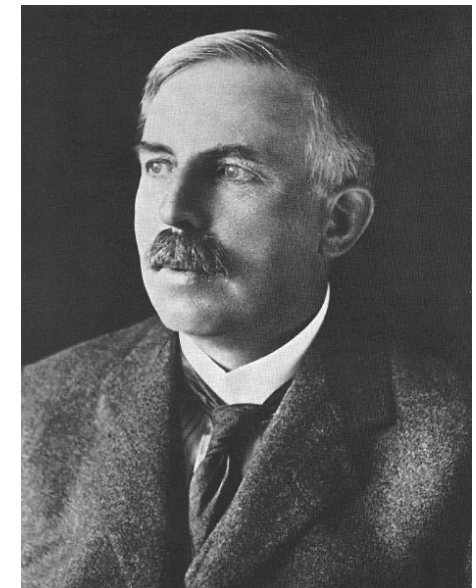
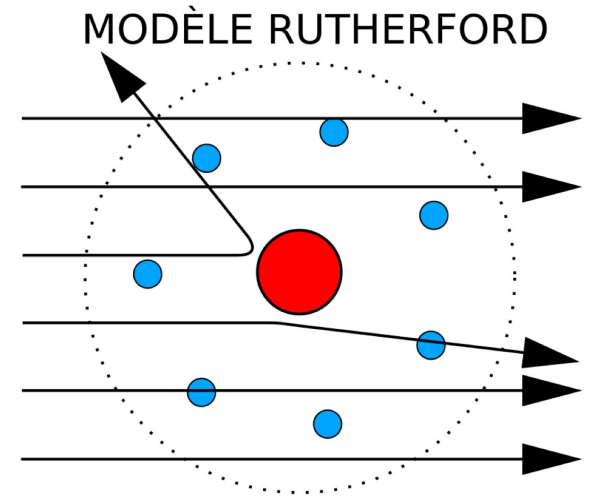
# L'interprétation de Rutherford

Dans un article de 1911, Rutherford écrit :

*« We shall suppose that for distances less than  $10^{-12}$  cm the central charge and also the charge of the  $\alpha$ -particle may be supposed to be concentrated at a point »*

## Un modèle « planétaire »

- Petit noyau dense et chargé, qui concentre la majeure partie de la masse de l'atome : le noyau atomique !
- Les électrons tournent en orbite autour du noyau
- ... avec deux gros problèmes :
- Les électrons en orbite rayonnent de la lumière → rapide effondrement sur le noyau positif ( $t \sim 10^{-12}$ s)
- Le spectre de lumière rayonnée doit être continu → contredit les mesures expérimentales montrant des raies discrètes

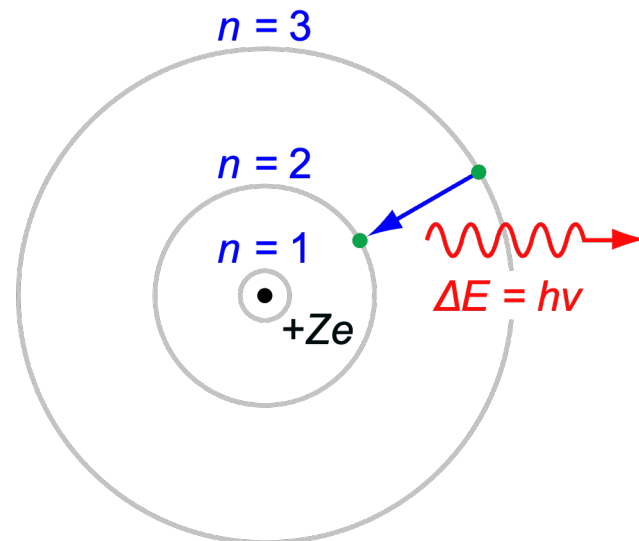


# L'atome de Bohr

En 1913, **Bohr propose un modèle** pour résoudre les carences de l'atome de Rutherford

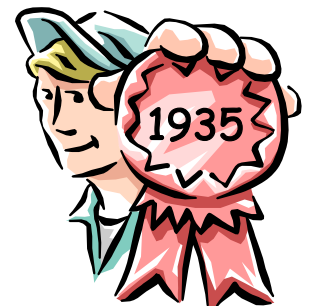
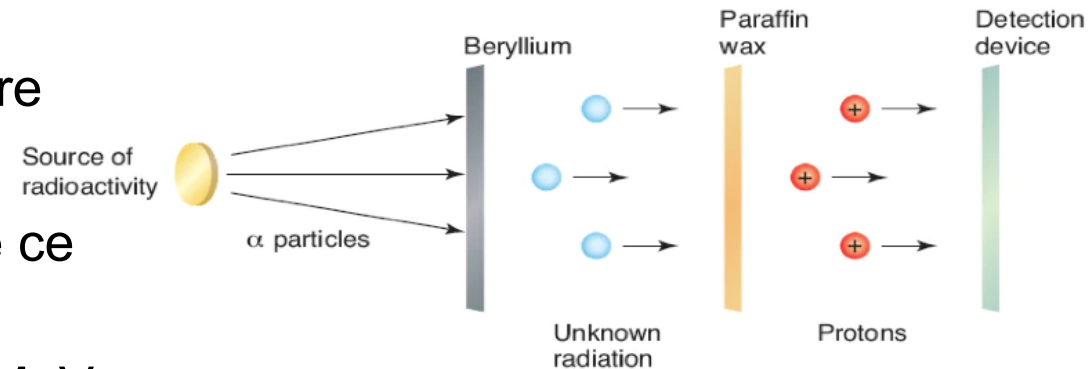
- États d'énergie stationnaires de  $E_n = E_1/n^2$
- Les électrons circulent selon des orbites bien définies
- Ils ne rayonnent que des photons d'énergies discrètes

$$\Delta E = h\nu = E_n - E_m$$



# Un nouveau rayonnement ?

- En 1928, **Bothe et Becker** observent un nouveau rayonnement de haute énergie dans des collisions entre particules  $\alpha$  et des cibles de lithium, béryllium et bore
- En 1931, **Irène et Frédéric Joliot-Curie** découvrent que ce rayonnement arrache des protons de la paraffine
  - Trop énergétiques pour être des rayons  $\gamma$  :  $E_\gamma \simeq 52 \text{ MeV}$
- En 1932, **Chadwick** mesure l'énergie des noyaux arrachés dans la collision  $\alpha + \text{Be} \rightarrow \text{C} + \text{n}$ 
  - Particule de masse similaire au proton ( $m \simeq 1,005 m_p$ ) mais de charge électrique nulle : c'est le neutron !
- Explication naturelle de la différence entre le nombre atomique  $Z$  et le nombre de masse  $A$
- Le neutron avait été imaginé par Rutherford, dont Chadwick avait été l'étudiant ! De l'importance de la transmission...



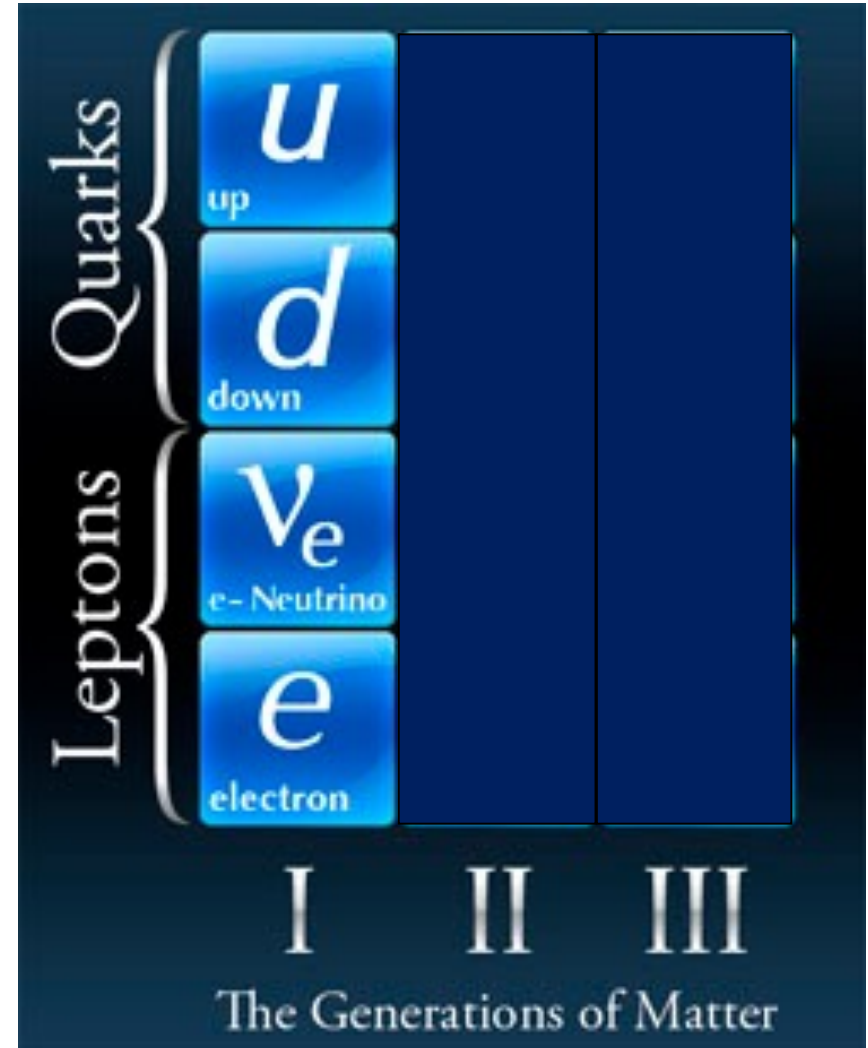
# Une formidable simplification

Souvenez-vous, le tableau de Mendeleïev contenait une centaine d'éléments chimiques (et des milliers d'isotopes !)

- Comment comprendre qu'il y ait autant de particules élémentaires dans la nature ?
- Croyance profonde que le nombre de particules élémentaires doit être petit (réductionnisme)
  - De l'empirisme vers une théorie...

De fait, tous les éléments chimiques se réduisent à l'existence de trois particules (à l'époque) fondamentales

- l'électron, le proton, et le neutron
- ... et le neutrino pour expliquer les désintégrations  $\beta$



# Une nouvelle interaction...

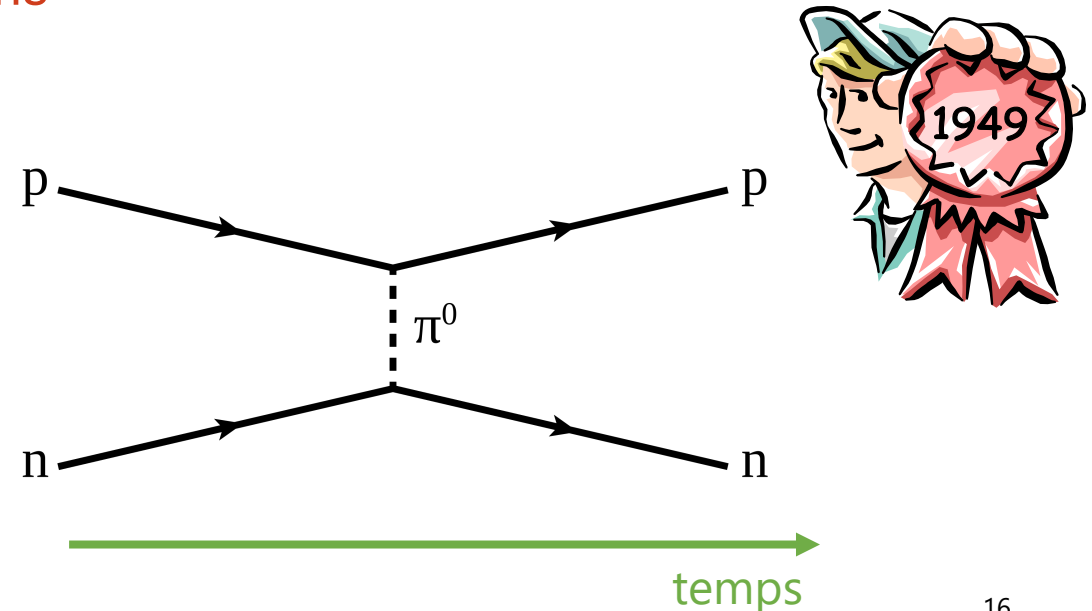
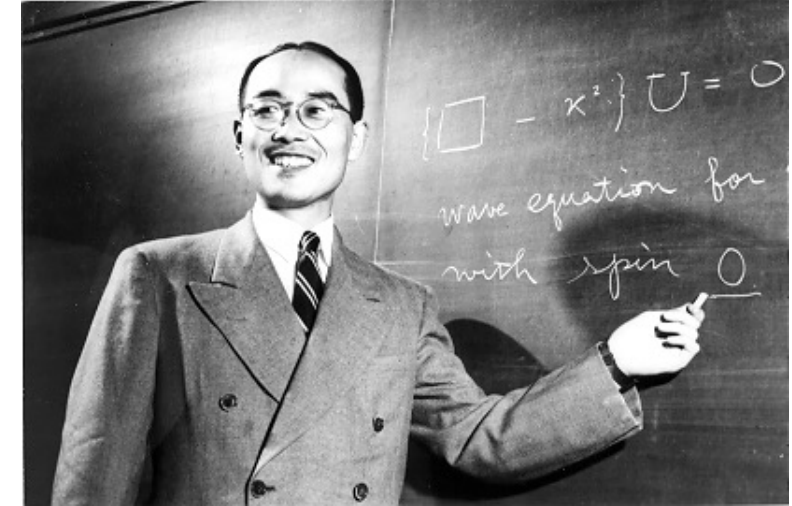
D'où vient la cohésion du noyau atomique ?

- Les protons devraient se repousser en raison de leur charge électrique identique !

En 1935 **Yukawa imagine une nouvelle interaction**

- Force forte entre nucléons, beaucoup plus intense que la force électromagnétique
- Il prédit l'existence de particules médiatrices : **les pions**
- Modification du potentiel pour tenir compte de la portée finie de l'interaction

$$V_{\text{Yukawa}} = -\frac{4\pi \alpha_s}{r} \exp(-m r)$$



# ... et deux nouvelles particules dans les rayons cosmiques

En 1937, Neddermeyer et Anderson puis Street et Stevenson découvrent une **particule de masse intermédiaire**  $m_e < m < m_p$  dans des chambres à émulsion

- Est-ce le pion de Yukawa ? Non, il s'agit du muon : un électron « lourd »  $m_\mu \simeq 200 m_e$ 
  - « Qui a commandé ça ? » se demande Rabi

En 1947, découverte du pion par **Lattes, Occhialini et Powell**

- Masse  $m_\pi \simeq 135 - 140 \text{ MeV}$ , responsable de l'interaction forte

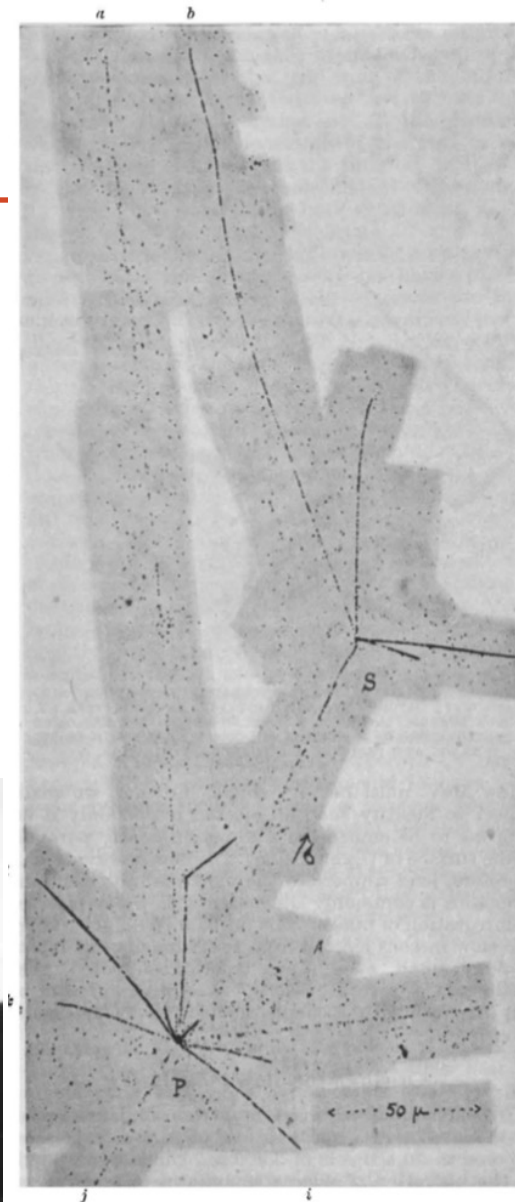
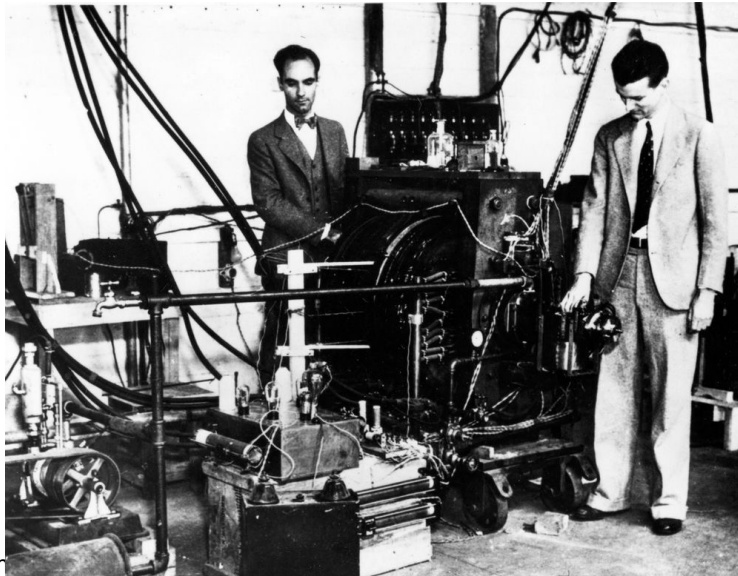


Fig. 9. MOSAIC OF PHOTOMICROGRAPHS WITH COOKE  $\times 95$  ACHROMAT; ILFORD 'NUCLEAR RESEARCH' EMULSION TYPE C2, BORON LOADED. A MESON,  $\sigma$ , EJECTED DURING THE EXPLOSIVE DISINTEGRATION OF A NUCLEUS,  $P$ , COMES TO THE END OF ITS RANGE AND PRODUCES A SECOND DISINTEGRATION,  $S$ . THE TRACKS LABELLED 'b', 'c' AND 'e' ARE DUE TO PROTONS WHICH REACHED THE END OF THEIR RANGE IN THE EMULSION. MOST OF THE OTHER TRACKS END IN ONE OF THE SURFACES OF THE EMULSION

# Interactions fondamentales

<i>Type</i>	<i>Intensité relative</i>	<i>Particules médiatrices</i>	<i>Domine dans</i>
Force forte	$\sim 1$	Gluons	noyau atomique
Force électromagnétique	$\sim 10^{-3}$	Photon	électrons entourant le noyau
Force faible	$\sim 10^{-5}$	Boson $Z^0$ , $W^+$ , $W^-$	désintégration radioactive bêta
Gravitation	$\sim 10^{-38}$	Graviton ? (pas encore observé)	astres

Chadwick (1921), Yukawa (1934), Gell-Mann (1973), Gross, Politzer, Wilczek (1973)

Maxwell (1873), Dirac (1927), Feynman, Dyson, Schwinger, Tomonaga (1940...)

Becquerel (1896), Fermi (1933), Weinberg, Salam (1967)

Newton (1687), Einstein (1915)

# Interactions fondamentales

Type	Intensité relative	Particules médiatrices	Domine dans
Force forte	$\sim 1$	Gluons	noyau atomique
Force électromagnétique	$\sim 10^{-3}$	Photon	électrons entourant le noyau
Force faible	$\sim 10^{-5}$	Boson $Z^0$ , $W^+$ , $W^-$	désintégration radioactive bêta
Gravitation	$\sim 10^{-38}$	Graviton ? (pas encore observé)	astres

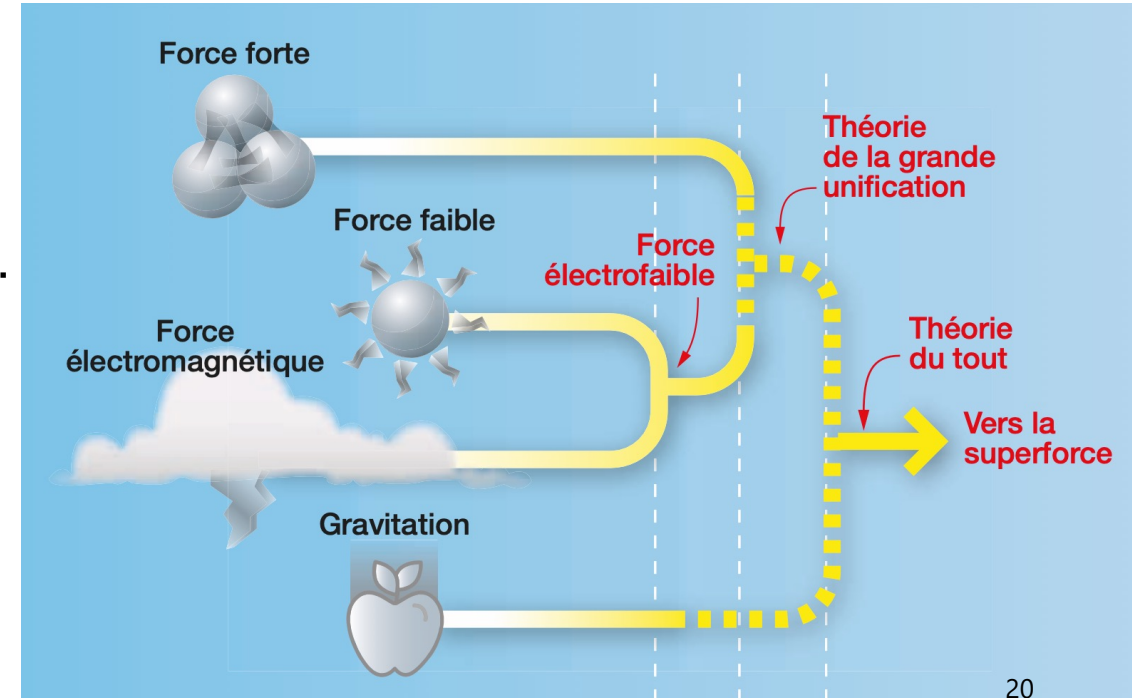


- La **force électromagnétique** n'agit que sur les particules possédant une **charge électrique**
  - Électrons, quarks, protons, ... mais pas les neutrons, neutrinos !
- La **force forte** n'agit que sur les particules possédant une **charge forte**
  - les quarks et les gluons, mais pas les leptons (électrons, neutrinos...) !

# Unification des interactions ?

Longue histoire pour tenter d'**unifier les forces de la Nature**

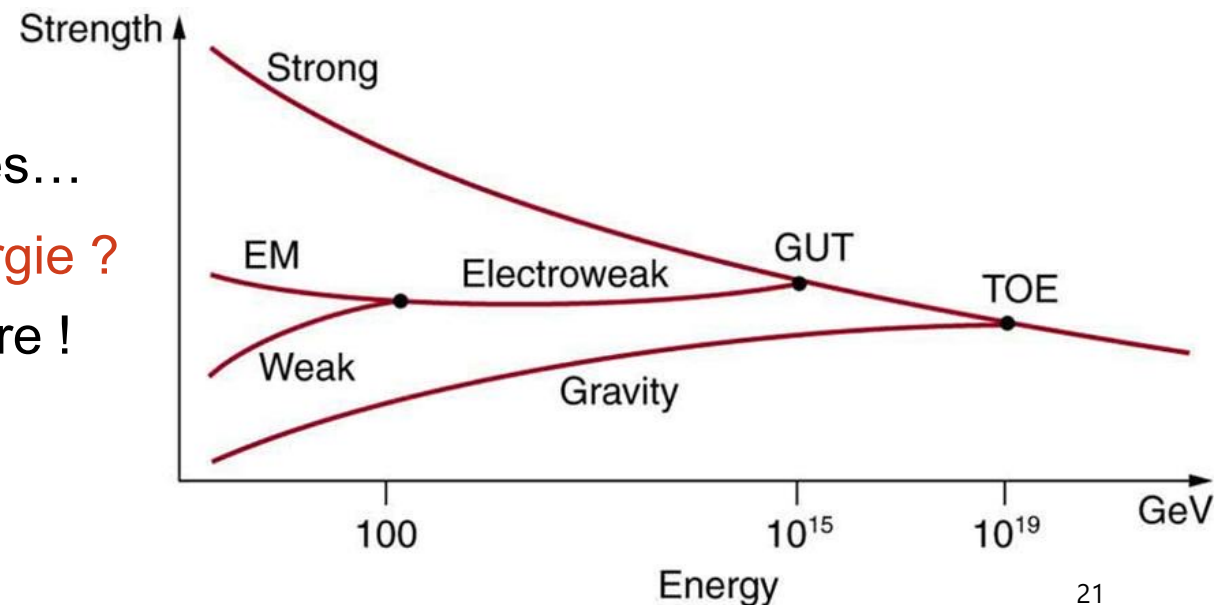
- **Mécanique** terrestre et mécanique céleste (Newton 1687)
- Électricité et le magnétisme : **l'électromagnétisme** (Maxwell 1865)
- Mécanique quantique et relativité restreinte : électrodynamique quantique (Feynman et al. 1940s)
- Interaction faible et électromagnétique : **théorie électrofaible** (Modèle Standard 1960s)
- Électrofaible et forte : **Grand Unified Theory ?**
- Théorie du tout : vers une **gravité quantique ?**
- Théorie des cordes, gravité quantique à boucles...



# Unification des interactions ?

Longue histoire pour tenter d'**unifier les forces de la Nature**

- **Mécanique** terrestre et mécanique céleste (Newton 1687)
- Électricité et le magnétisme : **l'électromagnétisme** (Maxwell 1865)
- Mécanique quantique et relativité restreinte : électrodynamique quantique (Feynman et al. 1940s)
- Interaction faible et électromagnétique : **théorie électrofaible** (Modèle Standard 1960s)
- Électrofaible et forte : **Grand Unified Theory ?**
- Théorie du tout : vers une **gravité quantique ?**
  - Théorie des cordes, gravité quantique à boucles...
- **N'y aurait-il qu'une seule interaction à haute énergie ?**
  - $E_{\text{GUT}} \approx 10^{16} \text{ GeV}$ , impossible à atteindre sur Terre !



# Au milieu du XX<sup>e</sup> siècle

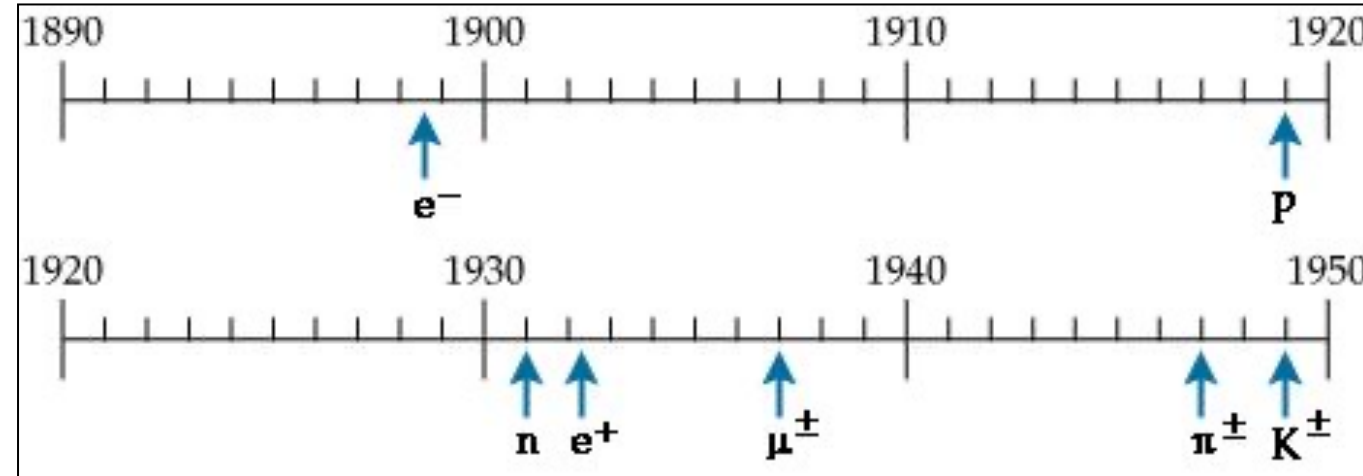
À chaque **interaction** sa théorie

- Électrodynamique quantique (**Dirac, Feynman, Schwinger, Tomonaga...**)
- Interaction faible (**Fermi**)
- Interaction forte (**Yukawa**)



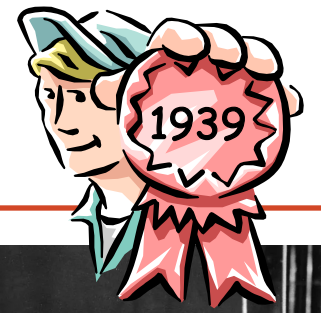
## Particules élémentaires

- Électrons / positrons
  - Photons (messenger int EM)
- Protons et neutrons
  - Pions (messenger int forte)
- L'hypothèse des neutrinos par Pauli
- Et des muons !

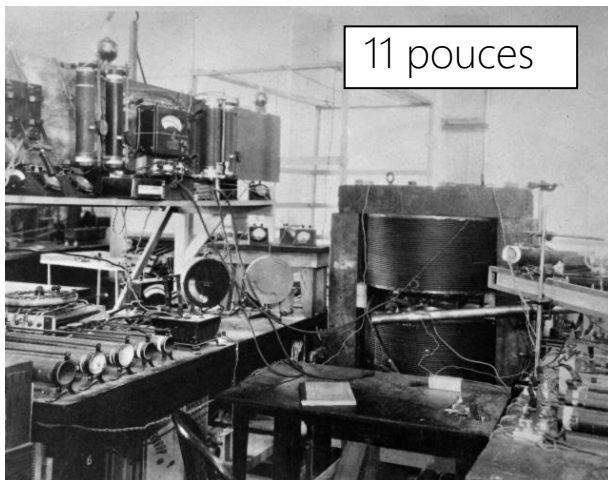


Mais en 1949, des particules **étranges** apparaissent...

# Un nouvel outil : l'accélérateur de particules

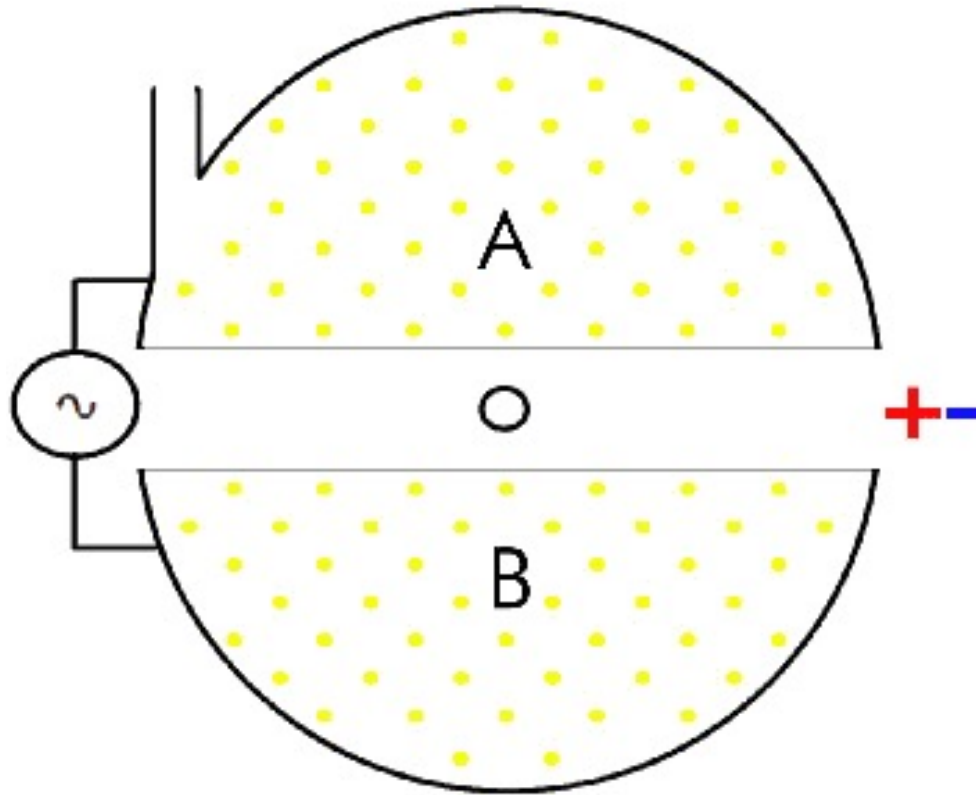


- En 1939 Lawrence et Milton inventent le **cyclotron** à Berkeley
  - 1931: 4 pouces, protons @ 80 keV
  - 1932: 11 pouces, protons @ 1,2 MeV
  - 1936: 27 pouces, protons @ 3,6 MeV
  - 1939: 60 pouces, deuteron @ 20 MeV
    - Berkelium, Californium, Mendelevium, Americium, Curium...
  - 1941: 184 pouces, protons @ 380 MeV
- Création du Lawrence Berkeley National Laboratory



# Principe du cyclotron

---



$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \wedge \vec{B}$$

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} \quad \text{Courant alternatif}$$

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \wedge \vec{B}$$

# Des particules inattendues...

- En 1944, **Leprince-Ringuet et Lheritier** mesurent les rayons cosmiques sur l'Aiguille du Midi
  - Particule chargée de masse  $\approx 990 m_e \approx 505 \text{ MeV}$
- En 1947, **Rochester et Butler** identifient une nouvelle particule « V »
- En 1951, **plusieurs décroissances observées** :
  - “T”  $\rightarrow 3\pi$ , “K”  $\rightarrow \mu(\nu)$ , “ $\theta$ ”  $\rightarrow 2\pi$

Une seule et même particule : le **kaon chargé** !

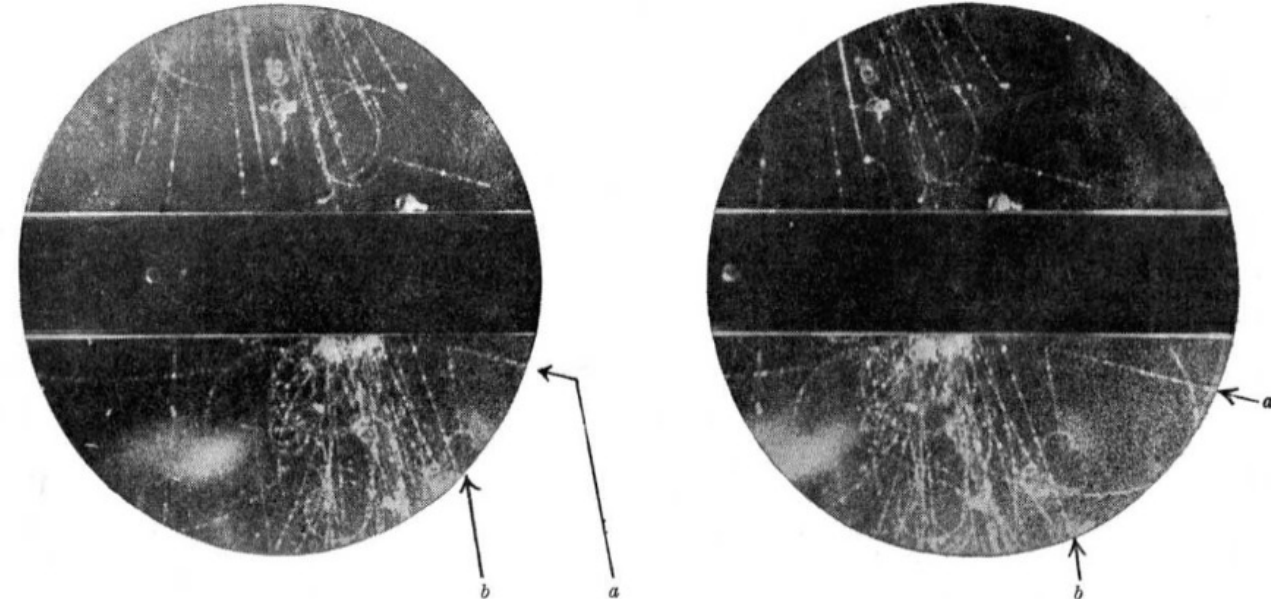
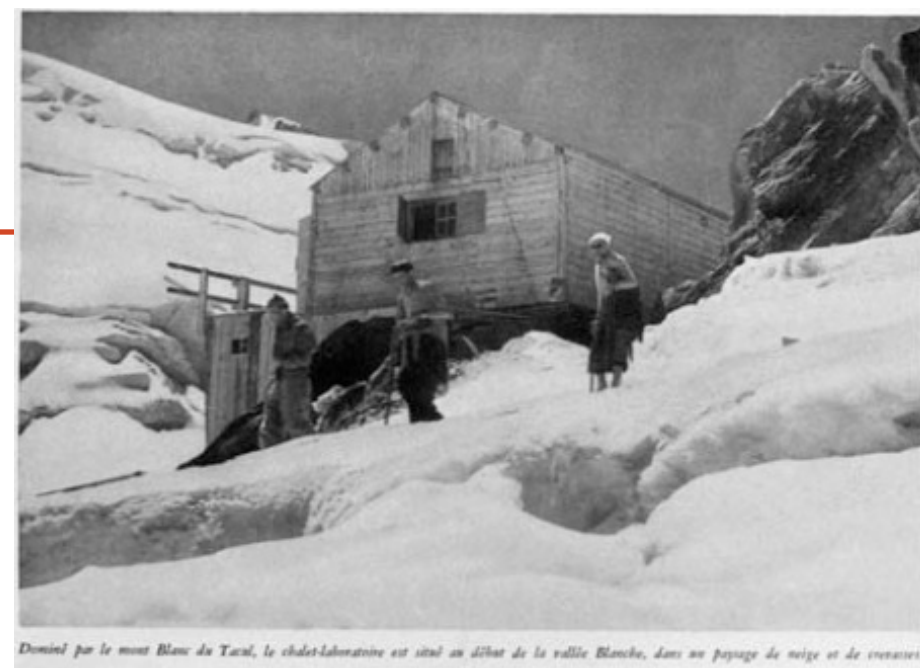


Fig. 1. STEREOSCOPIC PHOTOGRAPHS SHOWING AN UNUSUAL FORK (a b) IN THE GAS. THE DIRECTION OF THE MAGNETIC FIELD IS SUCH THAT A POSITIVE PARTICLE COMING DOWNWARDS IS DEVIATED IN AN ANTICLOCKWISE DIRECTION

## ... plus ou moins lourdes

---

En 1951, Armenteros et al. distinguent deux types de particules “V”s dans les rayons cosmiques

- Le kaon neutre
  - $m_{K^0} \approx 990 m_e$  (proche du kaon chargé)
- Le lambda
  - $m_{\Lambda} \approx 2000-2500 m_e > m_p$  donc « hyper-protonique »

En 1952-53, d'autres « hypérons » sont découverts

- Anderson et al. (Chicago)  $\Delta^0, \Delta^{++}$
- Armenteros et al. (cosmiques)  $\Xi^-$
- Bonetti et al. (cosmiques)  $\Sigma^- \Sigma^+$

# Des règles de conservation chez les baryons

---

Les particules lourdes sont **conservées**...

- « particules lourdes » = baryons = protons, neutrons, hypérons...
- Un fait empirique
  - Ex :  $n \rightarrow p + e^- + \nu$  mais pas  $n \rightarrow e^+ + e^- + \dots$
- Pas de désintégration du proton, la plus légère des particules lourdes

Postulat de la **conservation d'un nombre quantique** : le nombre baryonique

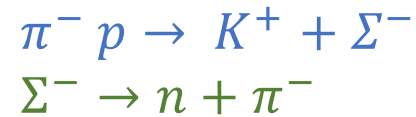
- Les baryons ont  $B = +1$  (anti-baryons  $B = -1$ )
  - Les mésons ont  $B = 0$
  - Les leptons (insensibles à l'interaction forte) ont  $B = 0$
- } Hadrons

## ... et étranges !

---

Certaines particules se comportent **de manière étrange**

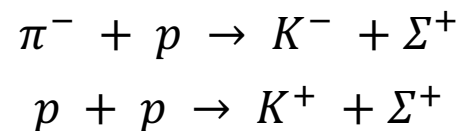
- Elles sont produites par paires via **l'interaction forte** ( $10^{-23}$  s)
- ...mais ont un long temps de vie correspondant à **l'interaction faible** ( $10^{-10}$  s)



En 1955, Nishijima et Gell-Mann introduisent un **nouveau nombre quantique** : l'étrangeté

- Conservé par l'interaction forte (production par paire)
- ... mais pas par l'interaction faible (décroissance possible)
  - $p, n, \pi, \Delta$  (**S = 0**)
  - $\Xi^-$  (**S = -2**)
  - $\bar{K}^0, K^-, \Lambda, \Sigma^\pm$  (**S = -1**)
  - Prédiction du  $\Sigma^0$  (**S = -1**) et  $\Xi^0$  (**S = -2**)

**Exercice** Sachant que l'interaction forte conserve l'étrangeté et le nombre baryonique, ces réactions sont-elles possibles ?



# Une longue liste de nouvelles particules

En 1956, Walker au cosmotron

- $\pi^- + p^+ \rightarrow \Lambda + K^0$  ou  $\Sigma^0 + K^0$  ( $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda + \gamma$ )

En 1955, Chamberlain et Segré @ bevatron

- Antiproton via  $p + p \rightarrow p + p + p + \bar{p}$

En 1956, Cork et al: Antineutron

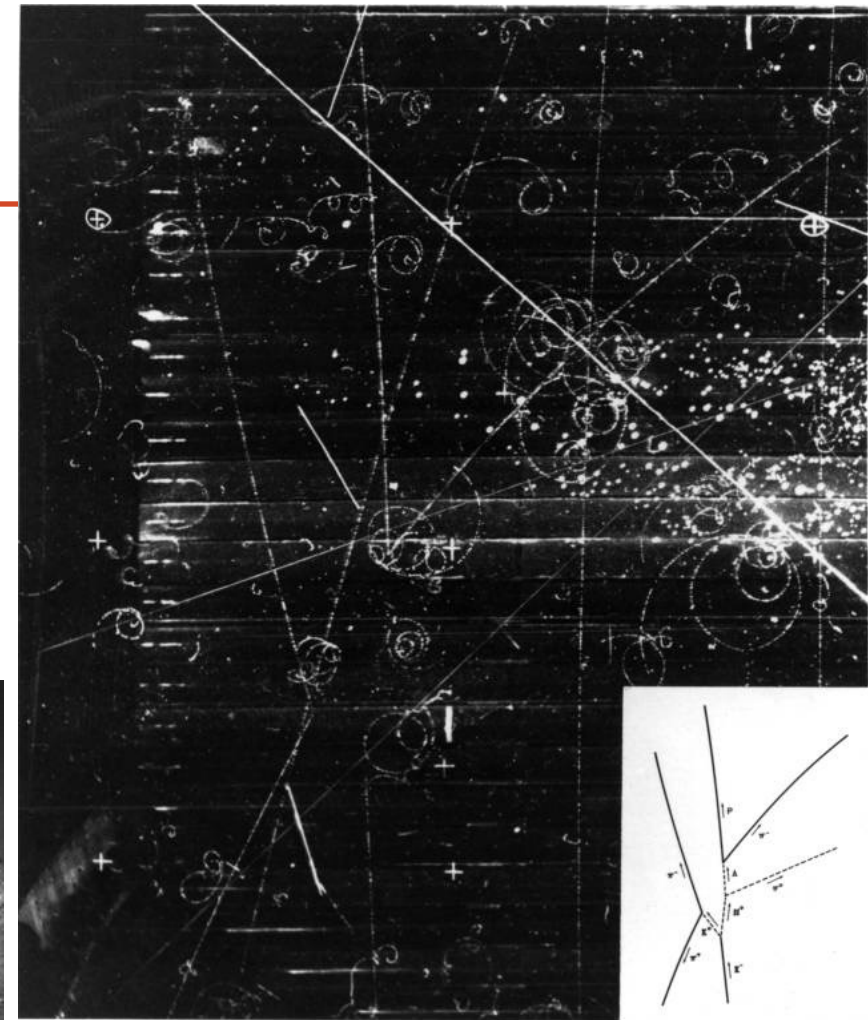
En 1958, Prowse and Baldo-Ceolin: Anti- $\Lambda$

En 1959, Alvarez et al.

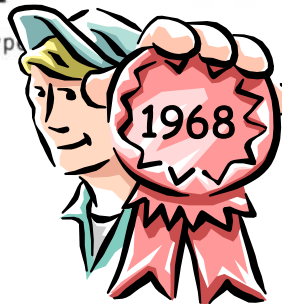
- $K^- + p^+ \rightarrow \Xi^0 + K^0$

En 1960-63 les découvertes continuent...

- Anti- $\Sigma^0$ , Anti- $\Sigma^-$ ,  $K^*$ ,  $\rho$ ,  $\omega$ , Anti- $\Sigma^*$ ,  $\eta$ ,  $\phi$ ...



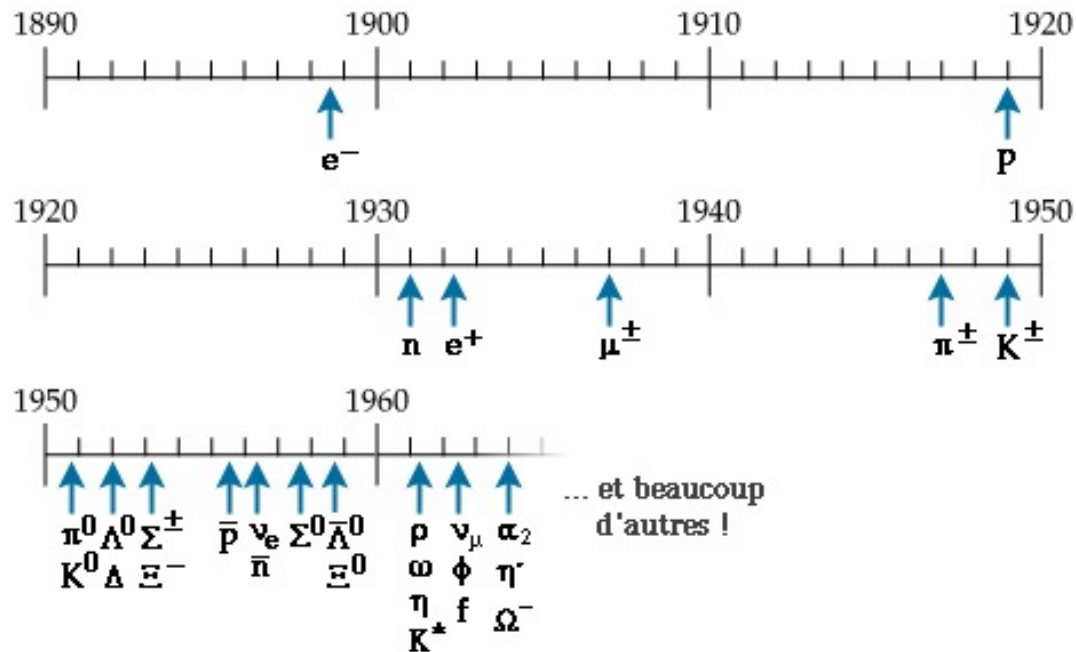
Production and decay of a neutral cascade hyperon



Willis Lamb : « Tout découvreur d'une nouvelle particule élémentaire ne devrait plus être récompensé par un prix Nobel, mais plutôt condamné à une amende de 10 000 \$ »

# Le zoo des particules dans les années 60

- Les antiparticules ne sont pas indiquées
  - Même masse, charge et étrangeté opposée
- Sur une même ligne, masses similaires
- Un désordre complet, un vrai zoo de particules !



m(MeV)	-1	0	+1	+2	S
<b>Baryons (B=+1)</b>					
1530	$\Xi^{*-}$	$\Xi^{*0}$			-2
1385	$\Sigma^{*-}$	$\Sigma^{*0}$	$\Sigma^{*+}$		-1
1318	$\Xi^-$	$\Xi^0$			-2
1232	$\Delta^-$	$\Delta^0$	$\Delta^+$	$\Delta^{++}$	0
1190	$\Sigma^-$	$\Sigma^0$	$\Sigma^+$		-1
1115		$\Lambda^0$			-1
939		$n$	$p$		0
<b>Mesons (B=0)</b>					
547		$\eta$			0
495	$K^-$	$\bar{K}^0$			-1
495		$K^0$	$K^+$		+1
140	$\pi^-$	$\pi^0$	$\pi^+$		0
<b>Leptons (B=0)</b>					
106	$\mu^-$		$\mu^+$		0
0,511	$e^-$		$e^+$		0
0		$\nu$			0

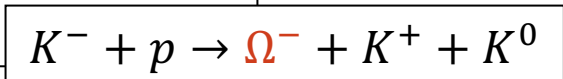
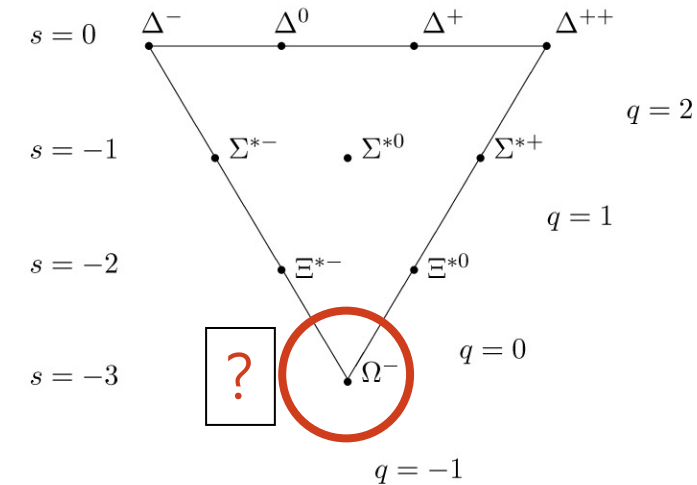
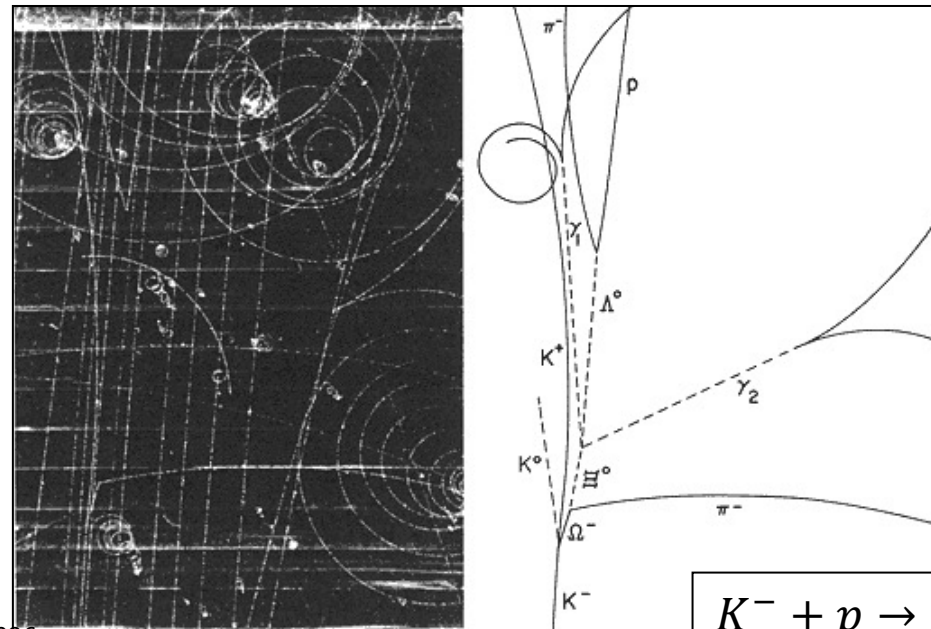
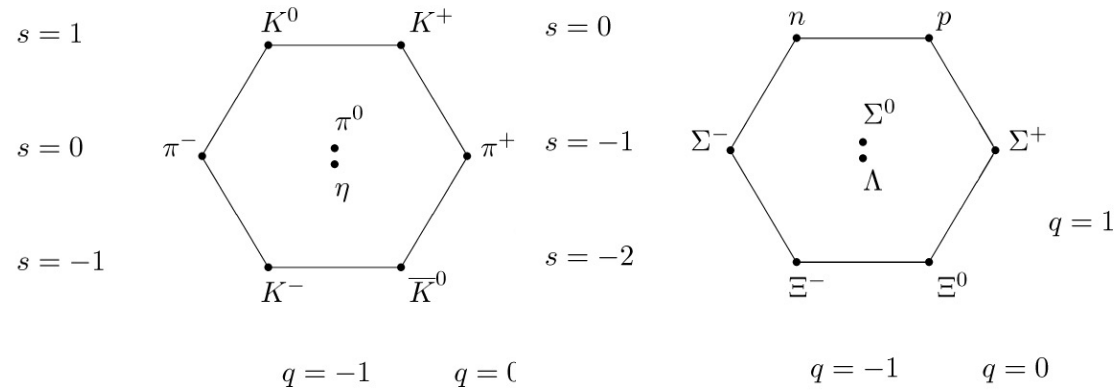
# Un peu d'ordre dans tout ça

En 1961, Murray Gell-Mann et Ne'eman « rangent » les nouvelles particules en fonction de leur étrangeté et leur charge électrique. Des symétries apparaissent...

- Octet de mésons ( $\pi, K, \eta$ )
- Octet et décuplet de baryons ( $p, n, \Sigma, \Xi$ )

## « Modèle de la voie octuple » (Eightfold Way)

- Prédiction du  $\Omega^-$ 
  - Découvert en 1964



# Dans le proton, les « quarks »

---

Les « **quarks** » sont les particules élémentaires qui composent les protons et les neutrons

- Existent en 6 modèles différents : les **saveurs**
  - Le up et le down, l'étrange et le charme, la beauté et le top
- Protons et neutrons composés de 3 quarks, « up » et « down »



- Imaginés par le théoricien Gell-Mann en 1964
- Observés (indirectement) expérimentalement quelques années plus tard

## A SCHEMATIC MODEL OF BARYONS AND MESONS \*

M. GELL-MANN

*California Institute of Technology, Pasadena, California*

Received 4 January 1964

A simpler and more elegant scheme can be constructed if we allow non-integral values for the charges. We can dispense entirely with the basic baryon  $b$  if we assign to the triplet  $t$  the following properties: spin  $\frac{1}{2}$ ,  $z = -\frac{1}{3}$ , and baryon number  $\frac{1}{3}$ .

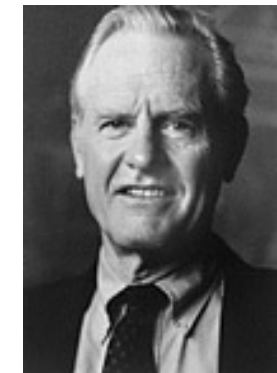
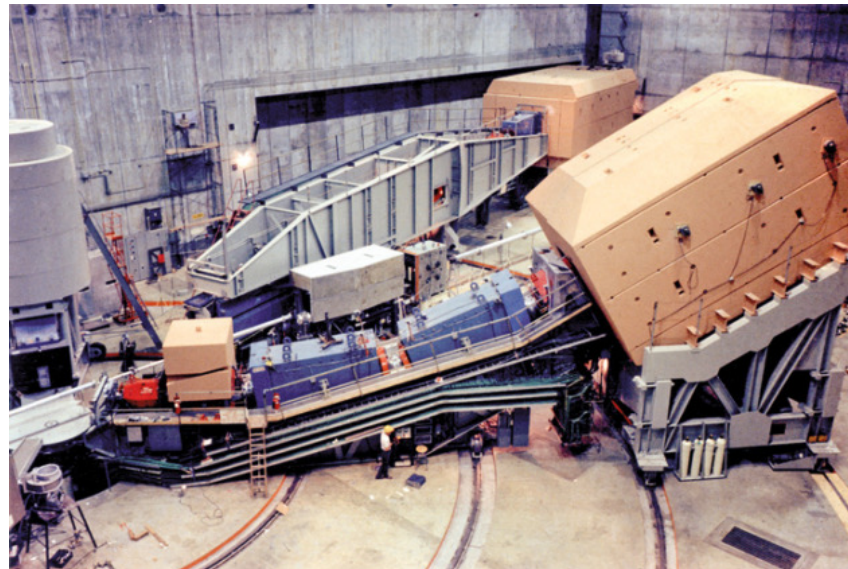
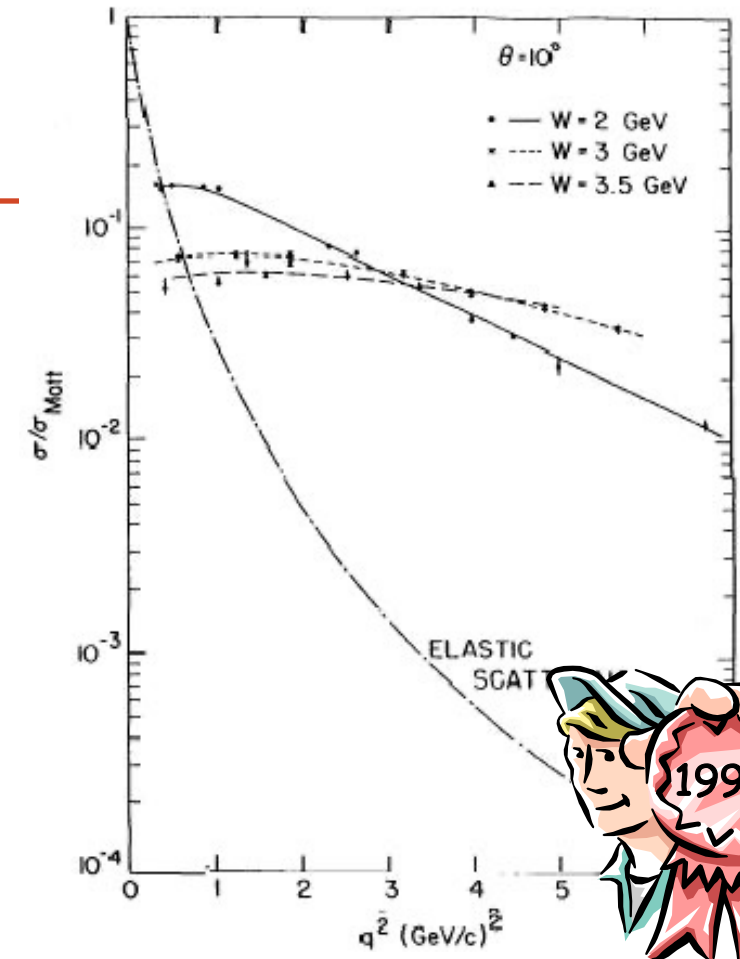
We then refer to the members  $u^{\frac{2}{3}}$ ,  $d^{-\frac{1}{3}}$ , and  $s^{-\frac{1}{3}}$  of the triplet as "quarks"  $q$  and the members of the anti-triplet as anti-quarks  $\bar{q}$ . Baryons can now be constructed from quarks by using the combinations  $(qqq)$ ,  $(qqq\bar{q})$ , etc., while mesons are made out of  $(q\bar{q})$ ,  $(qq\bar{q}\bar{q})$ , etc. It is assuming that the lowest baryon configuration  $(qqq)$  gives just the representations **1**, **8**, and **10** that have been observed, while the lowest meson configuration  $(q\bar{q})$  similarly gives just **1** and **8**.



# Découverte des quarks

En 1969, Friedman, Kendal, Taylor observent des déviations dans la diffusion électron-proton, indiquant des « **partons** » dans les protons

- Accélérateur linéaire 3 km de Stanford
- Similaire à l'expérience de Rutherford
- Les protons ont une sous-structure : les quarks !
  - ... et des gluons découverts en 1979



# Une nouvelle saveur

---

Dans les années 1960, certains articles suggèrent déjà l'existence d'une quatrième saveur de quarks

« It appeared like a charm » – **Glashow, Bjorken**

Lepton	Neutrino	Quark $^{+2/3}$	Quark $^{-1/3}$
Électron	$\nu_e$	Up	Down
Muon	$\nu_\mu$	???	Étrange

La saveur de charme est finalement **découverte en 1974**, une véritable « révolution »

# La révolution de novembre 1974

En novembre 1974, les équipes de Richter et Ting découvrent une nouvelle particule massive : le  $J/\psi$

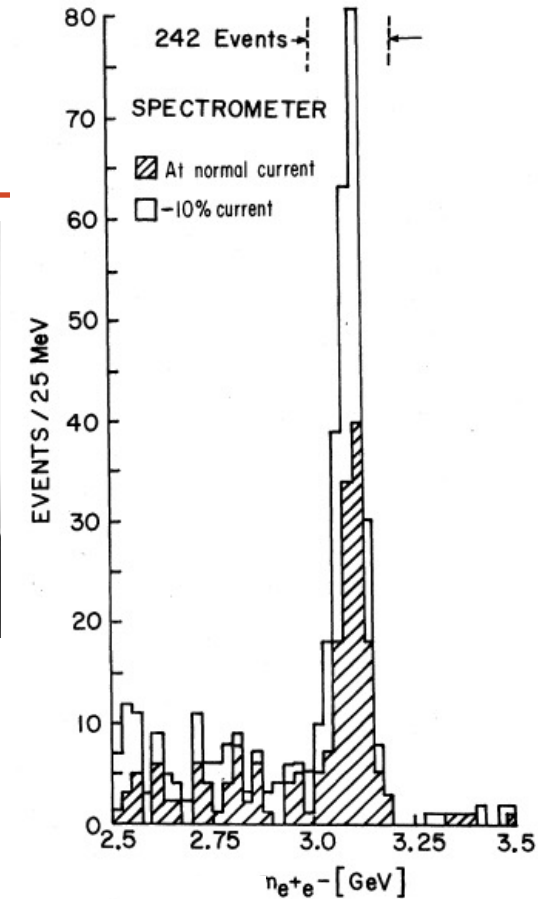
- La première particule « charmée » : un méson  $c\bar{c}$
- Un méson dont la masse est supérieure à 3 protons



Le "ψ"  
@ Stanford  
Collisions  $e^+e^-$



Le "J"  
@ Brookhaven  
Protons sur cibles



## Discovery of a Narrow Resonance in $e^+e^-$ Annihilation\*

J.-E. Augustin,† A. M. Boyarski, M. Breidenbach, F. Bulos, J. T. Dakin, G. J. Feldman, G. E. Fischer, D. Fryberger, G. Hanson, B. Jean-Marie,† R. R. Larsen, V. Lüth, H. L. Lynch, D. Lyon, C. C. Morehouse, J. M. Paterson, M. L. Perl, B. Richter, P. Rapidis, R. F. Schwitters, W. M. Tanenbaum, and F. Vannucci‡

Stanford Linear Accelerator Center, Stanford University, Stanford, California 94305

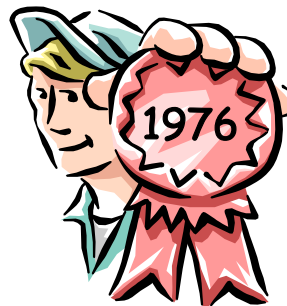
and

G. S. Abrams, D. Briggs, W. Chinowsky, C. E. Friedberg, G. Goldhaber, R. J. Hollebeek, J. A. Kadyk, B. Lulu, F. Pierre,§ G. H. Trilling, J. S. Whitaker, J. Wiss, and J. E. Zipse

Lawrence Berkeley Laboratory and Department of Physics, University of California, Berkeley, California 94720

(Received 13 November 1974)

We have observed a very sharp peak in the cross section for  $e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}$ ,  $e^+e^-$ , and possibly  $\mu^+\mu^-$  at a center-of-mass energy of  $3.105 \pm 0.003$  GeV. The upper limit to the full width at half-maximum is 1.3 MeV.



## Experimental Observation of a Heavy Particle $J/\psi$

J. J. Aubert, U. Becker, P. J. Biggs, J. Burger, M. Chen, G. Everhart, P. Goldhagen, J. Leong, T. McCriston, T. G. Rhoades, M. Rohde, Samuel C. C. Ting, and Sau Lan Wu  
Laboratory for Nuclear Science and Department of Physics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts 02139

and

Y. Y. Lee

Brookhaven National Laboratory, Upton, New York 11973

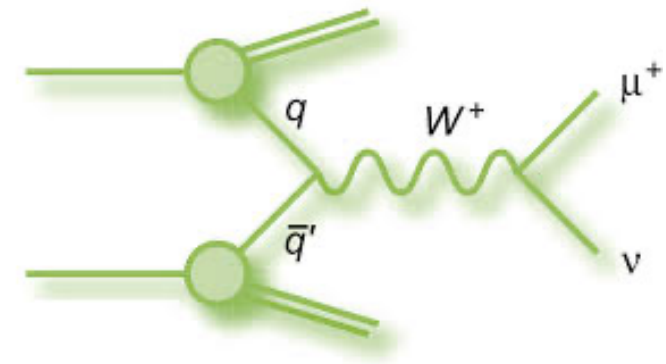
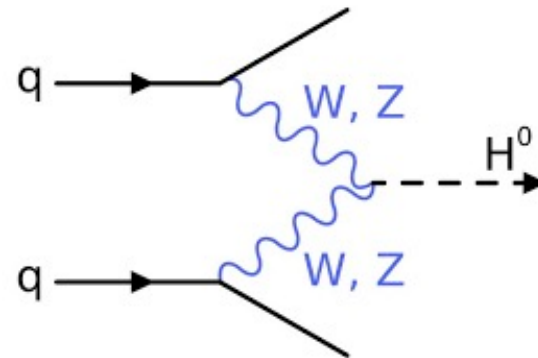
(Received 12 November 1974)

We report the observation of a heavy particle  $J$ , with mass  $m = 3.1$  GeV and width approximately zero. The observation was made from the reaction  $p + \text{Be} \rightarrow e^+ + e^- + x$  by measuring the  $e^+e^-$  mass spectrum with a precise pair spectrometer at the Brookhaven National Laboratory's 80-GeV alternating-gradient synchrotron.



# Succès du Modèle Standard

- Le modèle standard permet de prédire **avec une grande précision** l'abondance des particules produites dans les collisions du LHC
- Les physiciens théoriciens dessinent des « diagrammes de Feynman » leur permettant de calculer les différents processus physiques



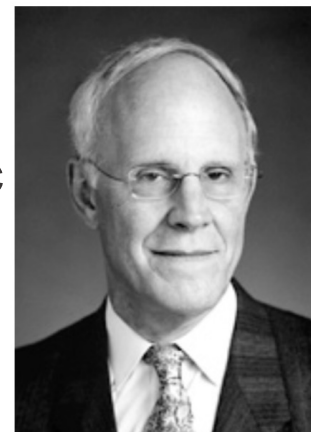
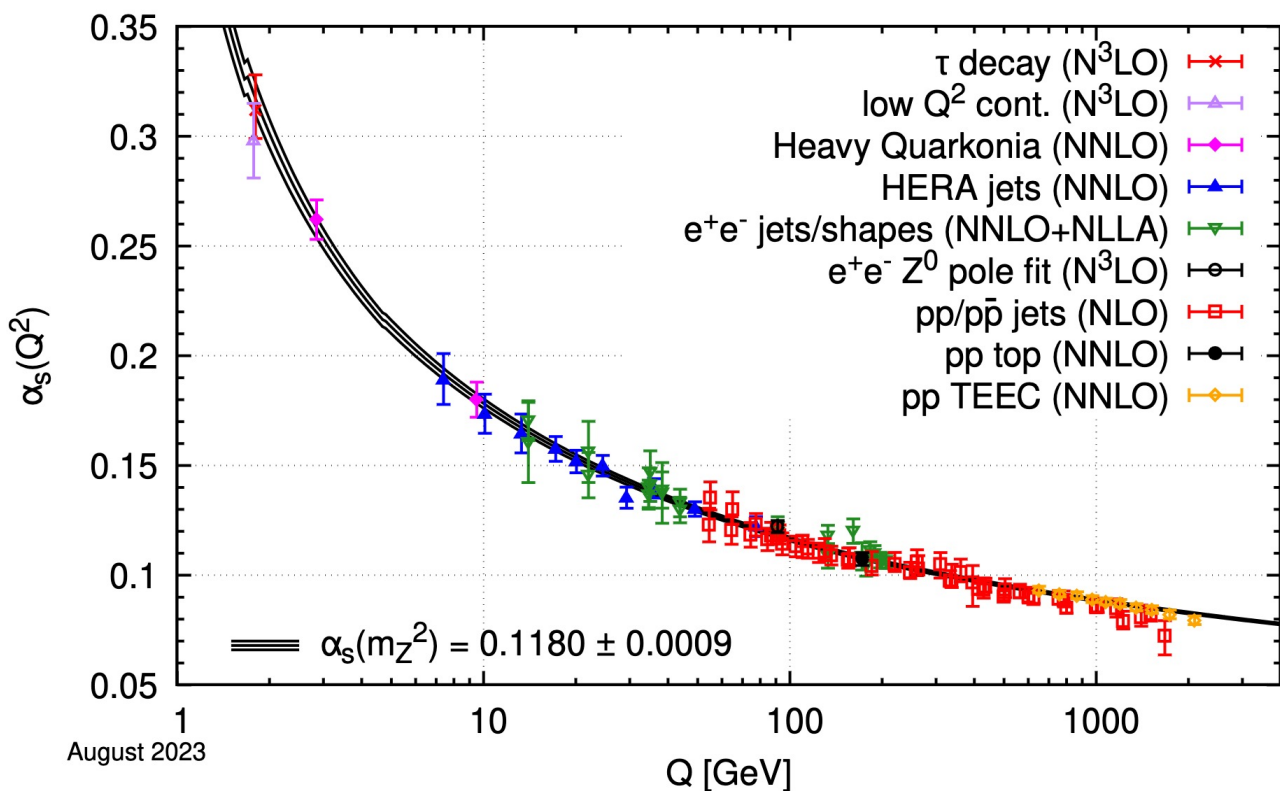
Un exemple célèbre : l'intensité de l'interaction forte entre deux quarks !



# La liberté asymptotique !

La théorie (Gross, Politzer et Wilczek 1973) prédit que l'intensité de l'interaction forte entre deux quarks **diminue quand les quarks se rapprochent**

- C'est la « **liberté asymptotique** » !
- Prédiction vérifiée précisément dans les expériences



David J. Gross



H. David Politzer



Frank Wilczek

$$\alpha_s(Q) = \frac{2\pi N_c}{(11N_c - 2N_f) \ln(Q/\Lambda_{\text{QCD}})}$$

# Le mystère du confinement

---

Jamais un quark n'a été observé de manière isolée

- Plus les quarks sont séparés, plus la force qui les ramène ensemble est importante, comme un ressort
- Pourquoi les quarks s'associent systématiquement par **trois** ( $qqq$ ) pour former des « baryons » ou par **deux** ( $q\bar{q}$ ) ?

**Le confinement !**

# De la liberté asymptotique au plasma quarks-gluons

---

## Superdense Matter: Neutrons or Asymptotically Free Quarks?

J. C. Collins and M. J. Perry

*Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics, University of Cambridge,  
Cambridge CB3 9EW, England*

(Received 6 January 1975)

We note the following: The quark model implies that superdense matter (found in neutron-star cores, exploding black holes, and the early big-bang universe) consists of quarks rather than of hadrons. Bjorken scaling implies that the quarks interact weakly. An asymptotically free gauge theory allows realistic calculations taking full account of strong interactions.

Un neutron a un rayon d'environ 0,5 fm et a donc une densité d'environ  $8 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$ , alors que la densité centrale d'une étoile à neutrons peut atteindre  $10^{16} - 10^{17} \text{ g/cm}^3$ . Il faut donc s'attendre à ce que les hadrons se superposent et perdent leur individualité. Nous suggérons donc **qu'il y a un changement de phase et que la matière nucléaire à de telles densités est une soupe de quarks.**

# De la liberté asymptotique au plasma quarks-gluons

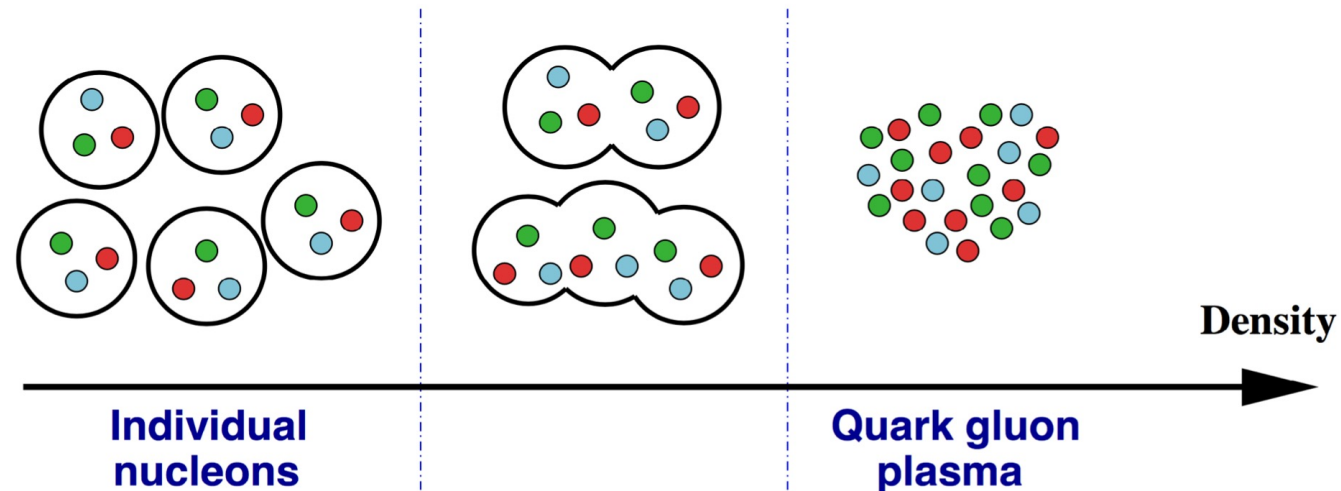
## Superdense Matter: Neutrons or Asymptotically Free Quarks?

J. C. Collins and M. J. Perry

*Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics, University of Cambridge,  
Cambridge CB3 9EW, England*

(Received 6 January 1975)

We note the following: The quark model implies that superdense matter (found in neutron-star cores, exploding black holes, and the early big-bang universe) consists of quarks rather than of hadrons. Bjorken scaling implies that the quarks interact weakly. An asymptotically free gauge theory allows realistic calculations taking full account of strong interactions.

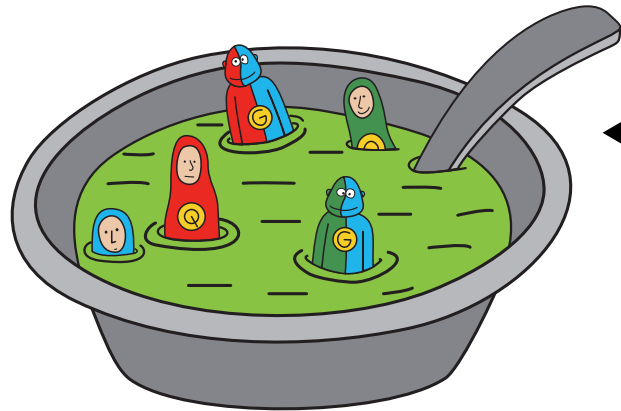


# Vive le quark libre !

---

Environ  $10^{-6}$ s après le Big Bang, la température avoisinait  $T \simeq 200$  MeV

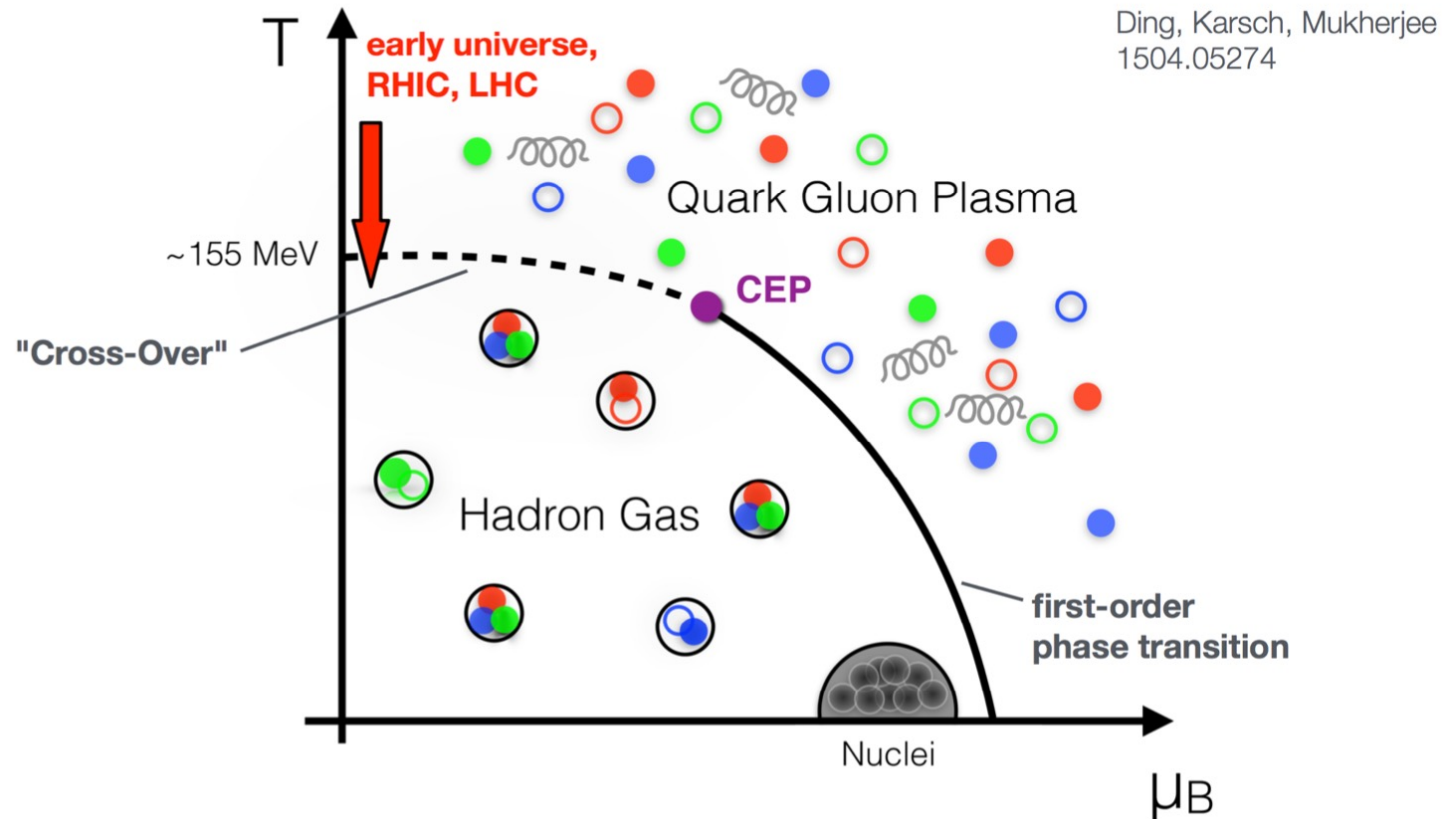
- Pas de confinement à ces températures !
- L'Univers était composé d'une « soupe » de quarks et gluons libres : le plasma quarks-gluons



← Plasma quarks-gluons

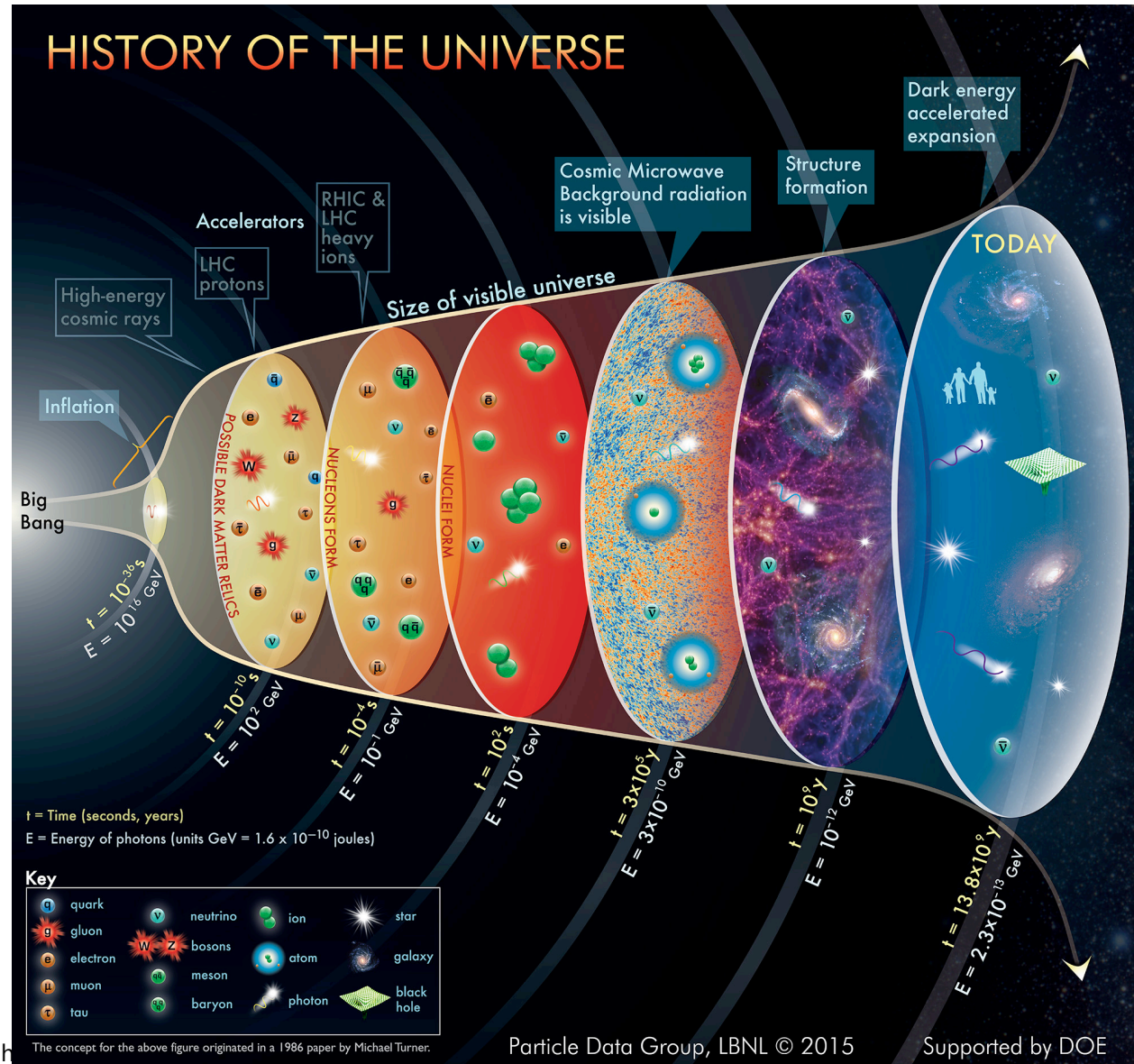
*(attention : chaud)*

# Diagramme de phase de l'interaction forte



- Basse température et/ou densité : quarks/gluons confinés dans des hadrons
- Haute température et/ou densité : **quarks et gluons déconfinés**

# Le plasma quarks-gluons dans l'Univers



# Atelier confection du plasma quarks-gluons

---

**But :** chauffer la matière pour recréer un plasma quarks-gluons

- Comment atteindre des températures aussi extrêmes ?

## Recette du jour

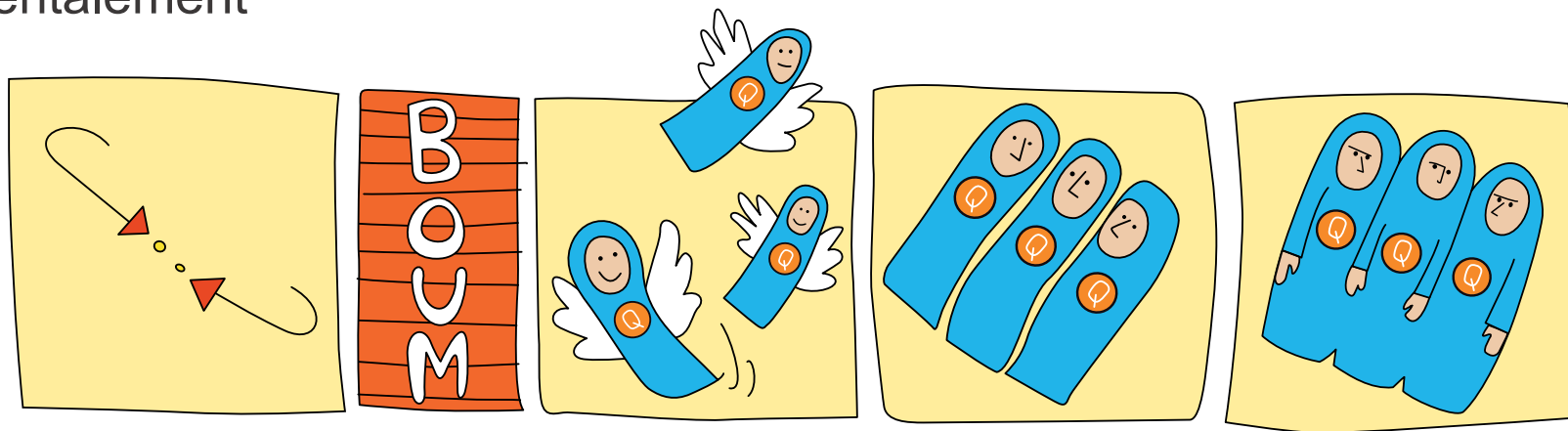
### Le plasma quarks-gluons

1. Choisir des atomes lourds, comme l'or ou le plomb
2. Une fois épluchés/ionisés , accélérer leur noyaux à des vitesses proches de celle de la vitesse de la lumière
3. Les faire entrer en collision
4. C'est prêt ! À déguster très rapidement.

# Scénario du « Little Bang »

Les **collisions plomb – plomb** se déroulent selon plusieurs phases :

1. La collision des noyaux de plomb produit un grand nombre de gluons puis de quarks
2. Quarks et gluons interagissent pour former le plasma
3. Le plasma s'étend, puis **se refroidit**
4. En-deçà de la température critique de deux mille milliards de degrés, **le confinement revient au galop !**
5. Les quarks s'associent pour former de nombreux « hadrons » (pions, protons) observés expérimentalement



# Le LHC – Grand collisionneur de hadrons

---

Grand dispositif expérimental dont le but est d'accélérer des particules puis de les faire entrer en collision

## Caractéristiques

Taille : 27 kilomètres de circonférence

Première mise en route : septembre 2008

Lieu : frontière franco-suisse , près de Genève

Particularité : enfoui à une profondeur de 100 mètres



## Deux types de collisions

- proton – proton : recherche de nouvelles particules (boson de Higgs...) et phénomènes non prévus par le « Modèle Standard »
- plomb – plomb : formation et étude du plasma quarks-gluons





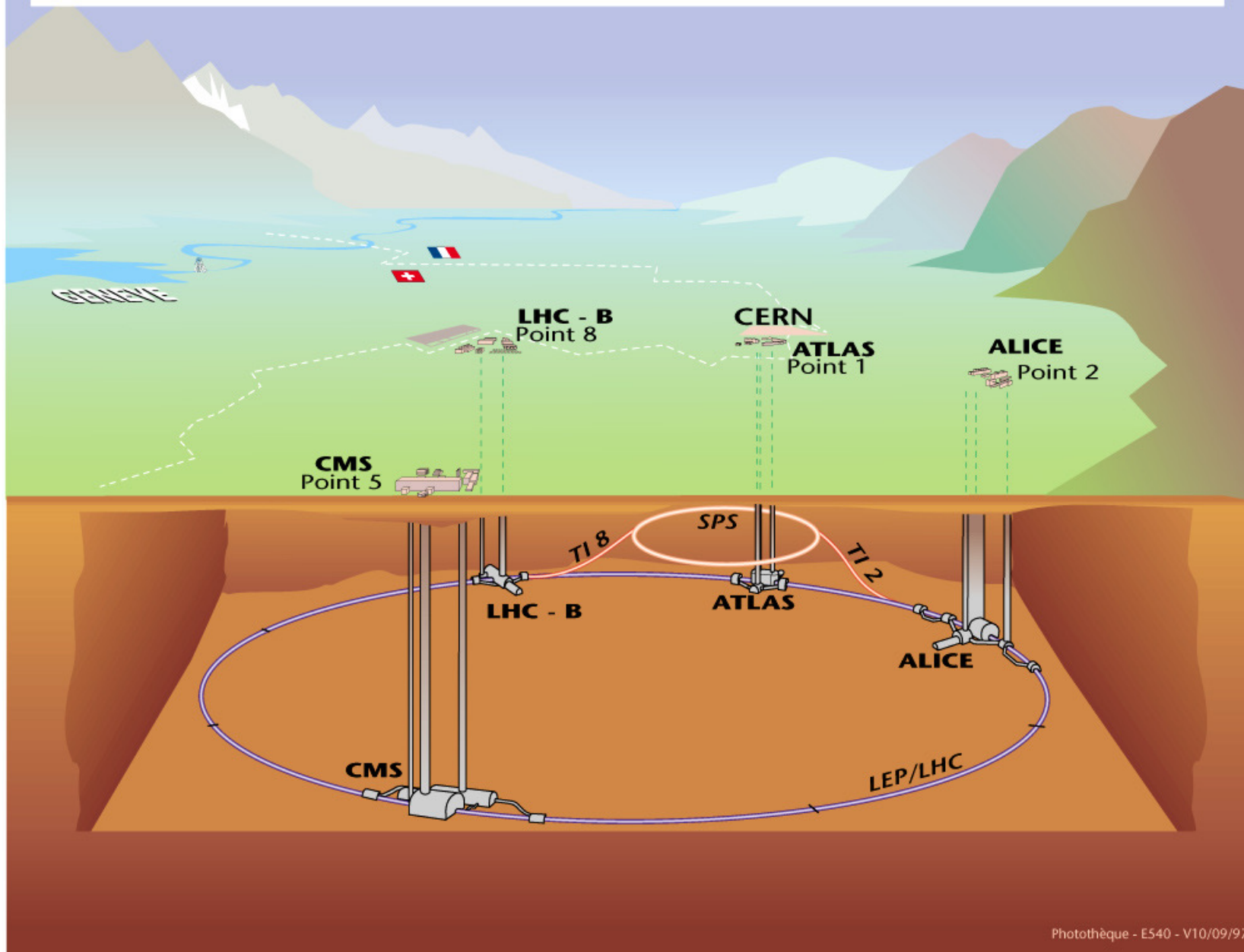
LHC

ALICE

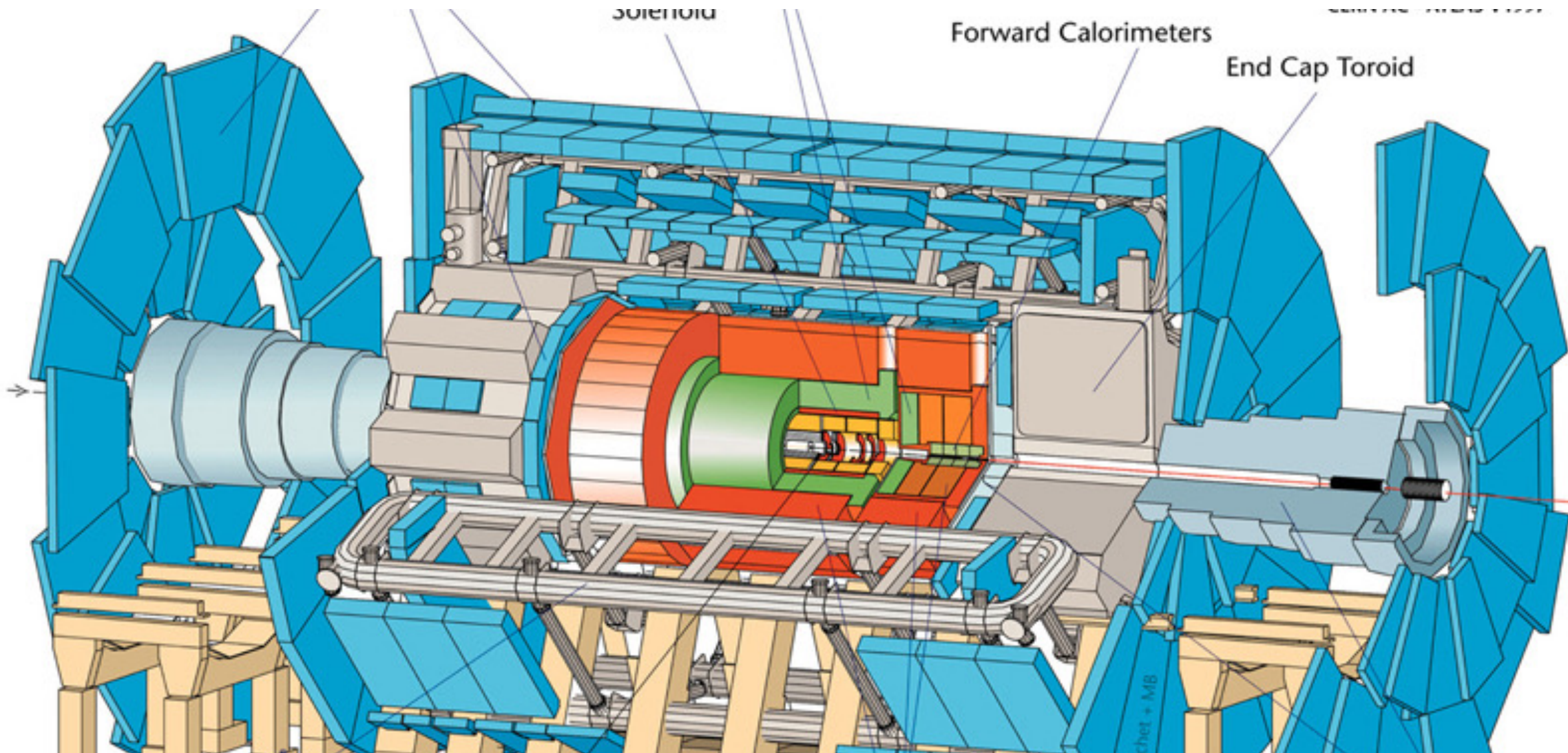
SPS

CERN Meyrin

# Vue d'ensemble des expériences LHC.



Photothèque - E540 - V10/09/97



# ATLAS



# ALICE



## CMS

# L'éphémère destin du plasma

---

Le temps de vie du plasma quarks-gluons formé dans les collisions plomb – plomb est **très** court :

$$t \sim 10^{-22} \text{s}$$

Dès lors, comment **mettre en évidence sa formation** ?

La soupe est **trop fugace** pour être observée directement , mais certaines propriétés du plasma peuvent survivre bien après sa disparition.



Les **signatures**, preuves  
« fossiles » de la formation  
du plasma quarks-gluons

# Signatures

---

Des mesures qui signalent la formation du plasma de quarks et de gluons – pourtant longtemps après son extinction – et qui permettraient d'en étudier les propriétés



**Expérience**



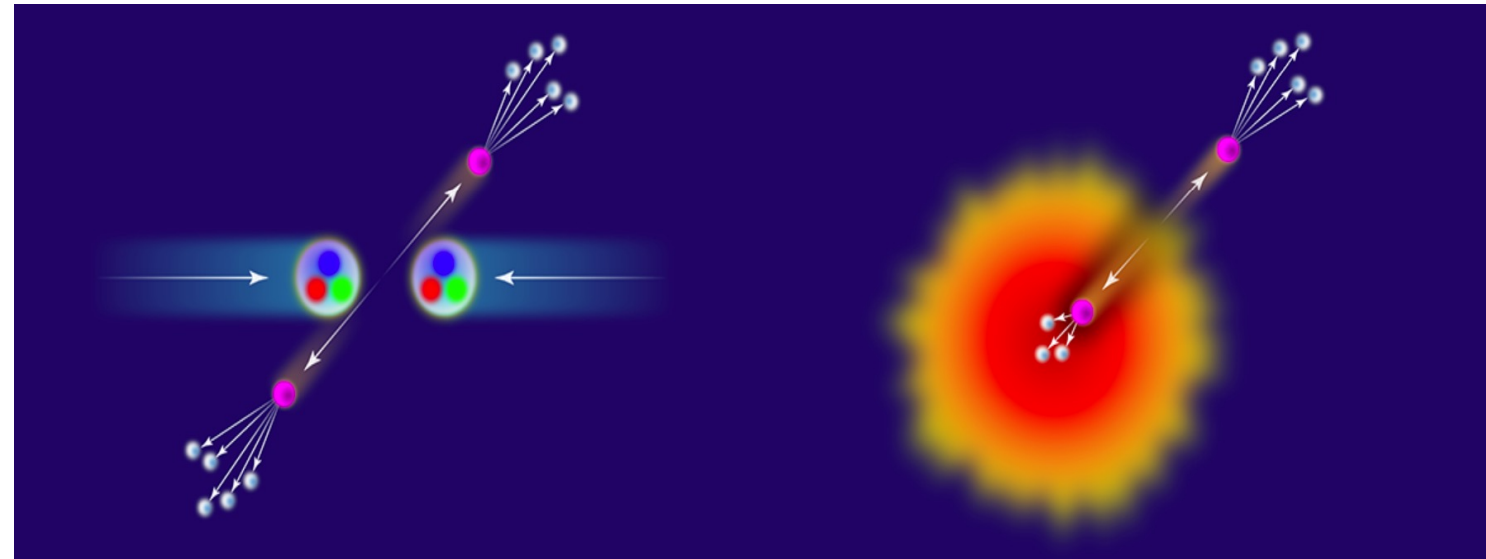
**Théorie**

# Signatures

Des mesures qui signalent la formation du plasma de quarks et de gluons – pourtant longtemps après son extinction – et qui permettraient d'en étudier les propriétés

## Liste des signatures historiques du plasma quark-gluon

- Extinction du jet
- Suppression des états quarkonia
- Production de photons thermiques
- Augmentation de l'étrangeté



**Sans plasma**

**Avec plasma**

# Signatures

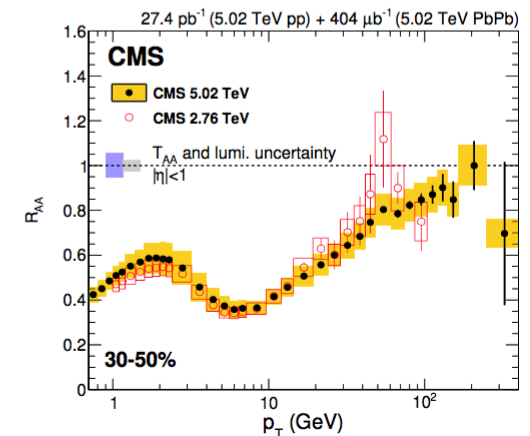
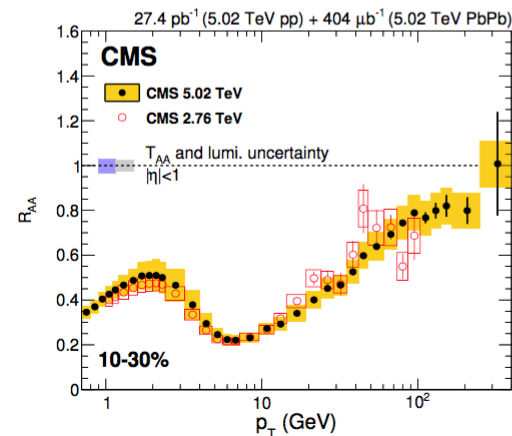
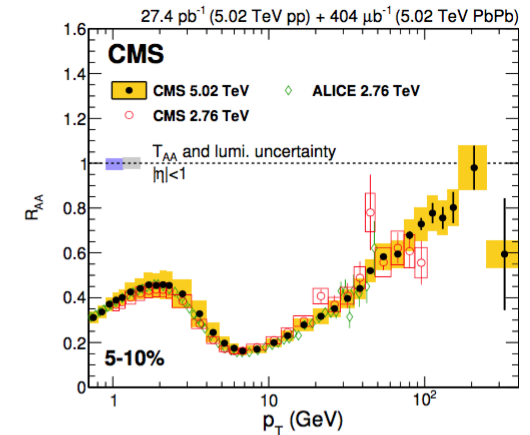
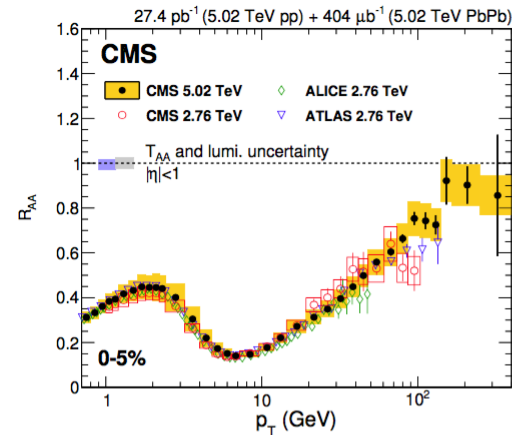
Des mesures qui signalent la formation du plasma de quarks et de gluons – pourtant longtemps après son extinction – et qui permettraient d'en étudier les propriétés

## Liste des signatures historiques du plasma quark-gluon

- Extinction du jet
- Suppression des états quarkonia
- Production de photons thermiques
- Augmentation de l'étrangeté

Suppression des particules produites  
dûe au plasma quark-gluon

CMS

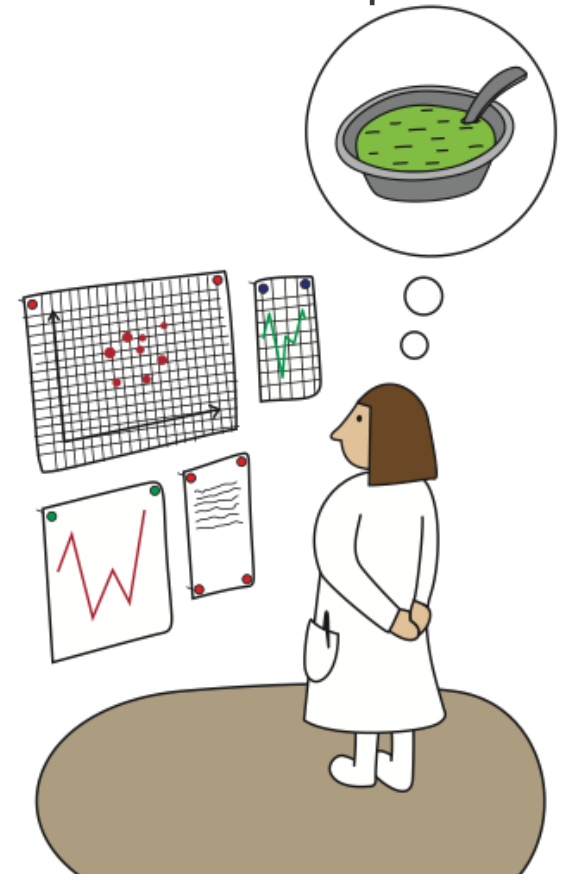


# Conclusion

---

- De la fin du XIXe au début du XXe siècle : **grands bouleversements dans notre compréhension du monde microscopique**
- Cette compréhension est permise par les **résultats expérimentaux et les avancées théoriques**
- Malgré toutes ces découvertes, **de nombreux mystères et questions ouvertes** restent en suspens

Merci pour votre attention !



# Ordres de grandeur et unités – Exercices

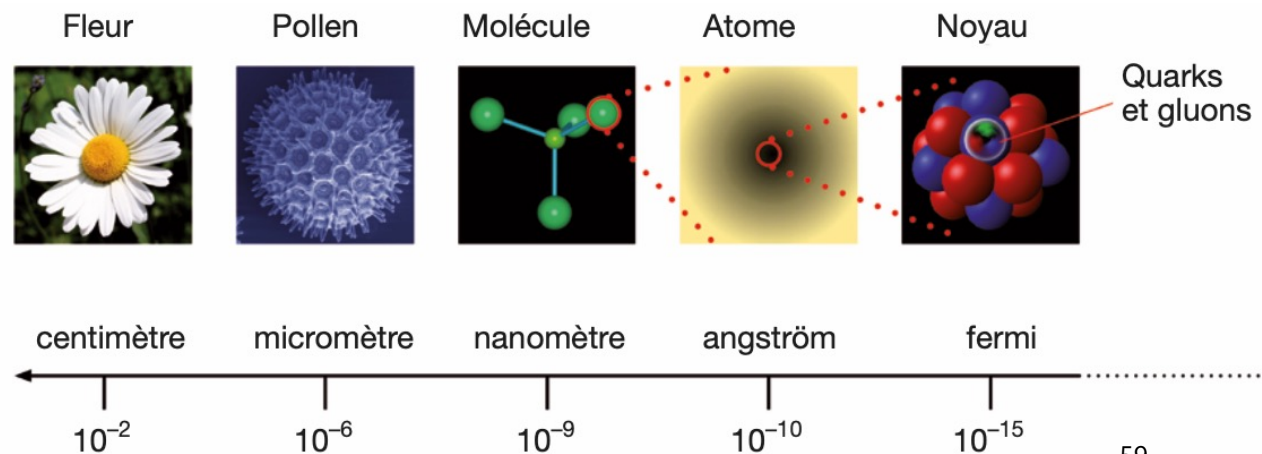
Monde « femtoscopique »... avec des unités qui correspondent !

- Constantes fondamentales :  $c \approx 299.792.458 \text{ m/s}$ ,  $\hbar = \frac{h}{2\pi} \simeq 1.054571817 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$
- En terme de dimensions :  $[\text{Longueur}] = [\text{Temps}] = 1/[\text{Énergie}]!$
- **Exercice 1** Exprimer  $\hbar$  en eV·s puis déterminer  $\hbar c$  en MeV·fm (rappel :  $e \simeq 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$ )
- Distance typique  $d = 1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$  ; durée typique  $t = 1 \text{ fm}/c$  ; masse typique  $M = 1 \text{ GeV}/c^2$
- **Exercice 2** Calculer  $1 \text{ fm}/c$  en s (ordre de grandeur de la durée du plasma quarks-gluons !)
- **Exercice 3**  $c$  en cm/ns,  $\hbar c/M$  en fm
- Les physiciens des particules utilisent toujours  $\hbar = c = 1$  avec  $M = [\text{GeV}/c^2]$  et  $p = [\text{GeV}/c]$

• Ex :  $E = \sqrt{p^2 c^2 + M^2 c^4} = \sqrt{p^2 + M^2}$

• **Exercice 4** Vérifier :

$1 \text{ eV}/c^2 = 1.78 \times 10^{-36} \text{ kg}$ ,  $1 \text{ s}^{-1} = 6.6 \times 10^{-22} \text{ MeV}$



# L'interprétation de Rutherford – Exercices

**Exercice 5** La distance minimale  $\alpha$  -noyau est obtenue quand l'énergie cinétique  $T$  de la particule  $\alpha$  est égale à l'énergie électrostatique :  $T = \alpha_{em} \frac{Z_1 Z_2}{r}$  avec  $\alpha_{em} = 1/137$  (constante de structure fine). Déterminer  $r$  (en fm) en sachant que l'énergie des  $\alpha$  est  $T = 9.1$  MeV.

**Exercice 5b** Retrouver  $T = \frac{1}{2} m u^2 = 9.1$  MeV

**Exercice 6** Le temps de vie d'un atome d'hydrogène dans le modèle de Rutherford est  $t = \frac{a_0^3}{4r_0^2}$  où  $a_0 = 1/m_e \alpha_{em}$  (rayon de Bohr) et  $r_0 = \alpha_{em}/m_e$  (rayon classique de l'électron). Déterminer  $a_0$ ,  $r_0$ ,  $t$

In order to form some idea of the forces required to deflect an  $\alpha$  particle through a large angle, consider an atom containing a positive charge  $Ne$  at its centre, and surrounded by a distribution of negative electricity  $Ne$  uniformly distributed within a sphere of radius  $R$ . The electric force  $X$  and the potential  $V$  at a distance  $r$  from the centre of an atom for a point inside the atom, are given by

$$X = Ne \left( \frac{1}{r^2} - \frac{r}{R^3} \right)$$
$$V = Ne \left( \frac{1}{r} - \frac{3}{2R} + \frac{r^2}{2R^3} \right).$$

Suppose an  $\alpha$  particle of mass  $m$  and velocity  $u$  and charge  $E$  shot directly towards the centre of the atom. It will be brought to rest at a distance  $b$  from the centre given by

$$\frac{1}{2} mu^2 = NeE \left( \frac{1}{b} - \frac{3}{2R} + \frac{b^2}{2R^3} \right).$$

It will be seen that  $b$  is an important quantity in later calculations. Assuming that the central charge is  $100e$ , it can be calculated that the value of  $b$  for an  $\alpha$  particle of velocity  $2.09 \times 10^9$  cms. per second is about  $3.4 \times 10^{-12}$  cm. In this calculation  $b$  is supposed to be very small compared with  $R$ . Since  $R$  is supposed to be of the order of the radius of the atom, viz.  $10^{-8}$  cm., it is obvious that the  $\alpha$  particle before being turned back penetrates so close to

# L'atome de Bohr – Exercice

---

**Exercice 7** L'énergie de l'électron sur la couche la plus basse est

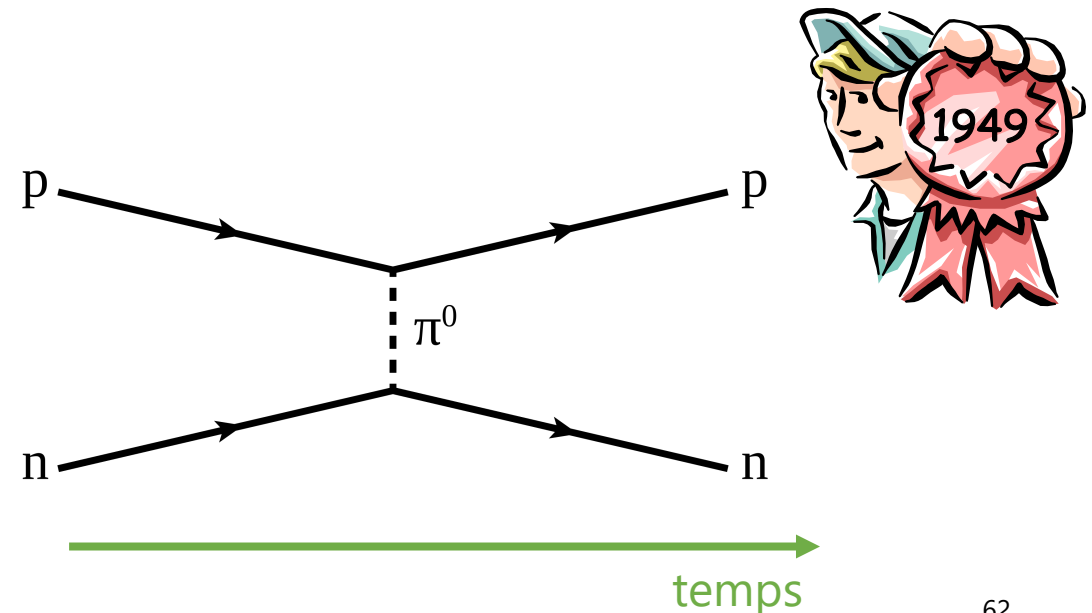
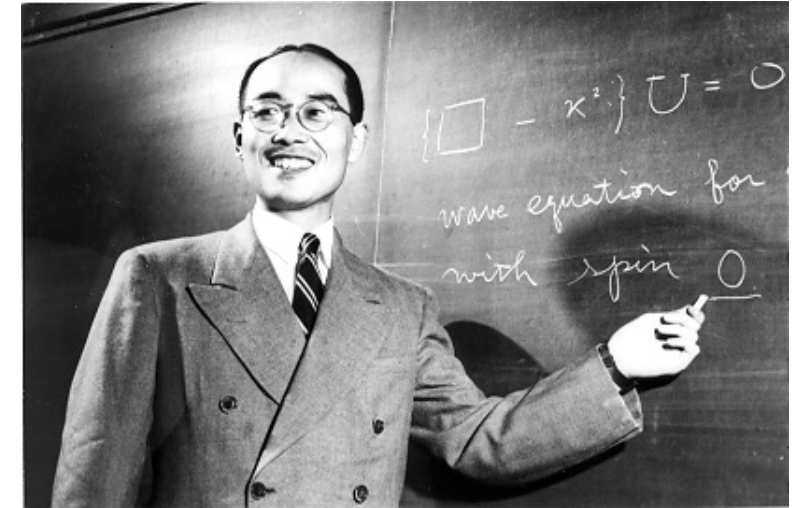
$E_1 = 1 R_y = \frac{1}{2} m_e \alpha_{em}^2$ . Déterminer  $E_1$  (eV) et en déduire la longueur d'onde  $\lambda$  (nm) de la raie d'émission dans la transition  $1 \rightarrow 2$  ( $\lambda = \frac{2\pi}{\Delta E_{1 \rightarrow 2}}$ )

# Une nouvelle interaction – Exercices

$$V_{\text{Yukawa}} = -\frac{4\pi \alpha_s}{r} \exp(-m r)$$

**Exercice 8** Déterminer la masse du pion sachant que la portée de l'interaction forte est d'environ 1 fm

**Exercice 9** Dessiner un diagramme correspondant à l'échange d'un pion de charge positive ou négative



# Principe du cyclotron – Exercices

---

**Exercice 10** L'énergie d'une particule dans un cyclotron est donnée par  $E = eBrc = \alpha Br$ . Déterminer  $\alpha B$  (E est en GeV).

**Exercice 11** Quelle énergie un proton doit-il avoir pour circuler autour de la Terre à l'équateur avec le champ magnétique terrestre ( $\approx 1\text{G} = 10^{-4}\text{T}$ ).

# La liberté asymptotique – Exercice

---

La théorie (Gross, Politzer et Wilczek 1973) prédit que l'intensité de l'interaction forte entre deux quarks **diminue quand les quarks se rapprochent**

$$\alpha_s(Q) = \frac{2\pi N_c}{(11N_c - 2N_f) \ln(Q/\Lambda_{\text{QCD}})}$$

**Exercice 12 :** Calculer  $\alpha_s$  pour  $Q = 1$  GeV et  $Q = 100$  GeV. Prendre  $\Lambda_{\text{QCD}} = 200$  MeV,  $N_c = 3$  et  $N_f = 3$ .

# Vive le quark libre – Exercice

---

**Exercice 13** : que vaut  $T$  en degrés K ? Utiliser la constante de Boltzmann qui relie l'énergie à la température  $E = k_B T$