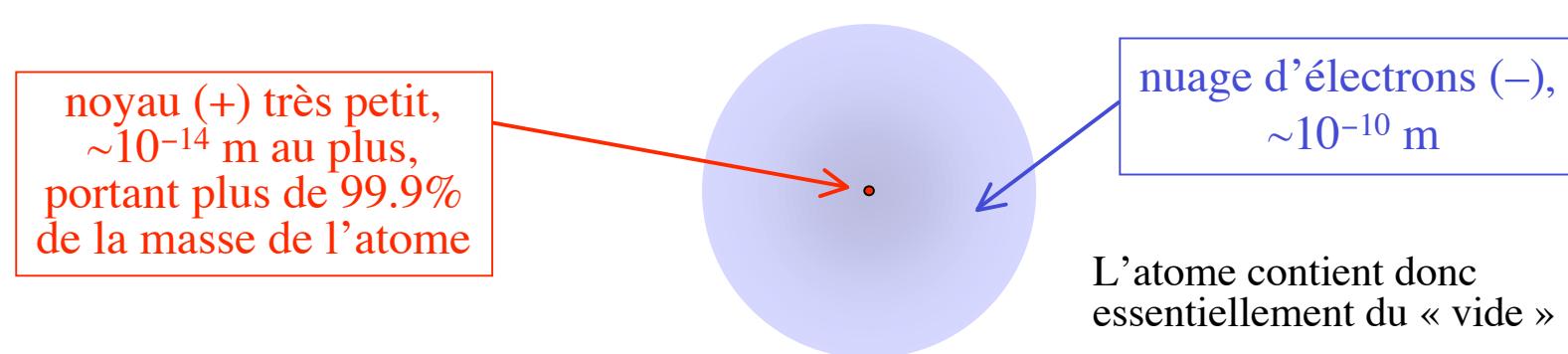
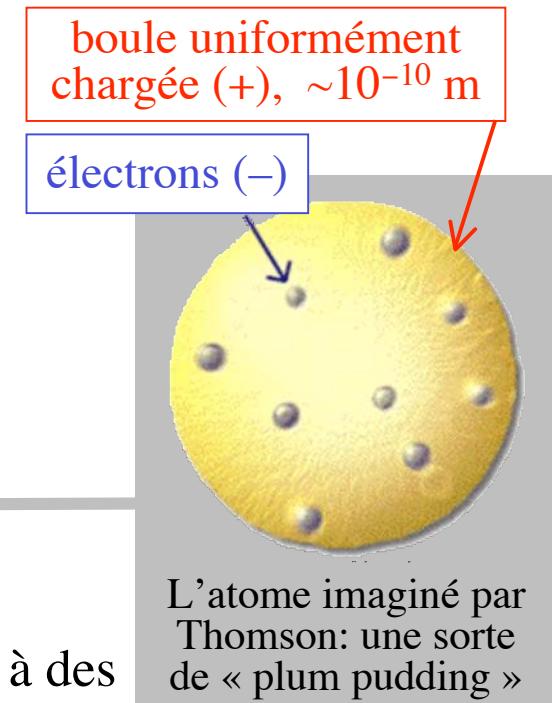


Vers la découverte du noyau des atomes

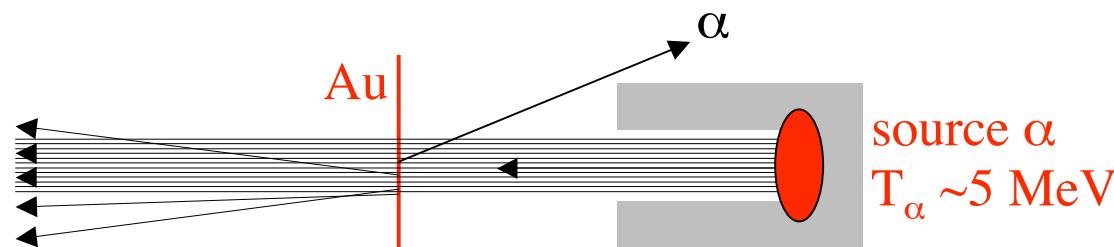
Historique du début du 20ème siècle:

- 1895: découverte des rayons X (Roentgen)
- 1896: découverte de la radioactivité (Becquerel)
- 1897: découverte de l'électron (Thomson)
- 1900: trois types différents de radioactivité connus: α , β , γ
- 1902: radioactivité $\beta \equiv$ émission d'électrons (Kaufman)
- 1903: premier modèle de l'atome (Thomson)
- 1908: radioactivité $\alpha \equiv$ émission d'hélium (Rutherford)
- 1909: expérience de diffusion de particules α sur des feuilles d'or (Rutherford, Marsden, Geiger), menant à des observations incompatibles avec le modèle de Thomson !
- 1911: vision révolutionnaire de l'atome (Rutherford)

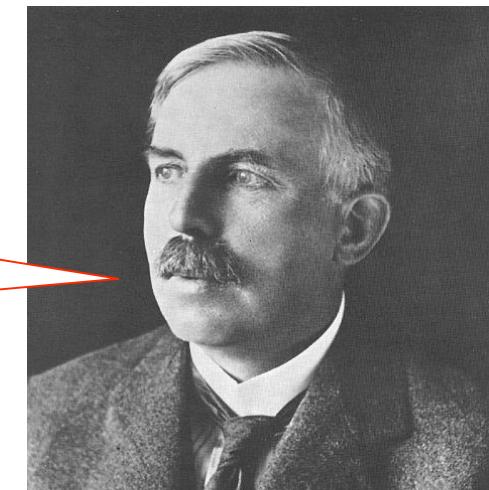
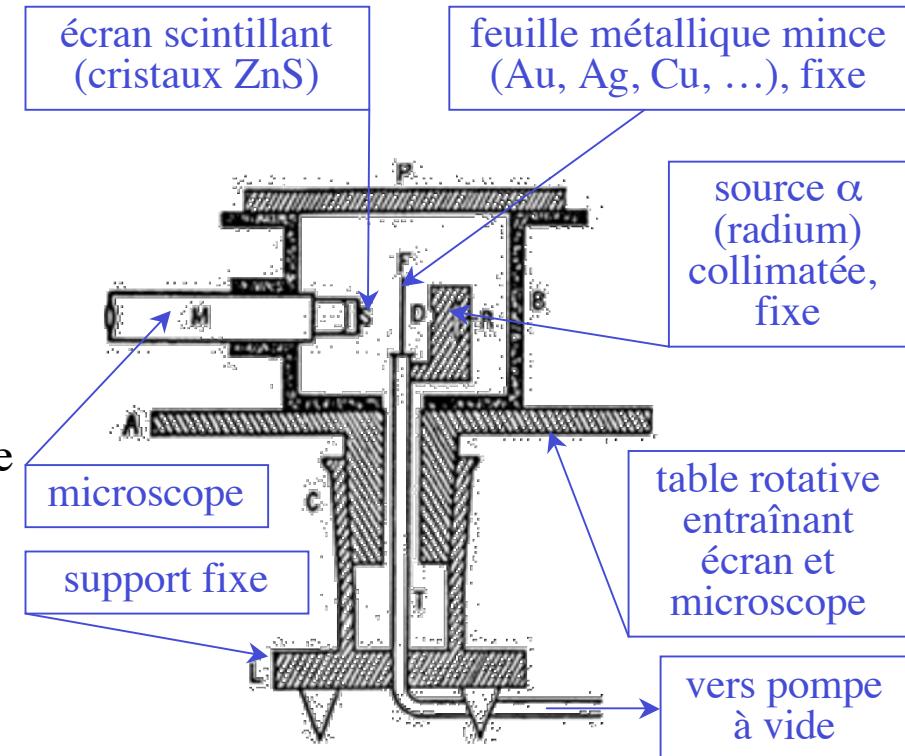


Rétrodiffusion de Rutherford

- Résultats:
 - La plupart du temps la particule α n'est que très peu déviée en traversant la feuille (voir pas du tout)
 - Elle a pourtant une probabilité non nulle qu'elle rebondisse vers l'arrière !!



It was quite the most incredible event that has ever happened in my life. It was as incredible as if you fired a 15-inch shell on a piece of tissue paper and it came back and hit you

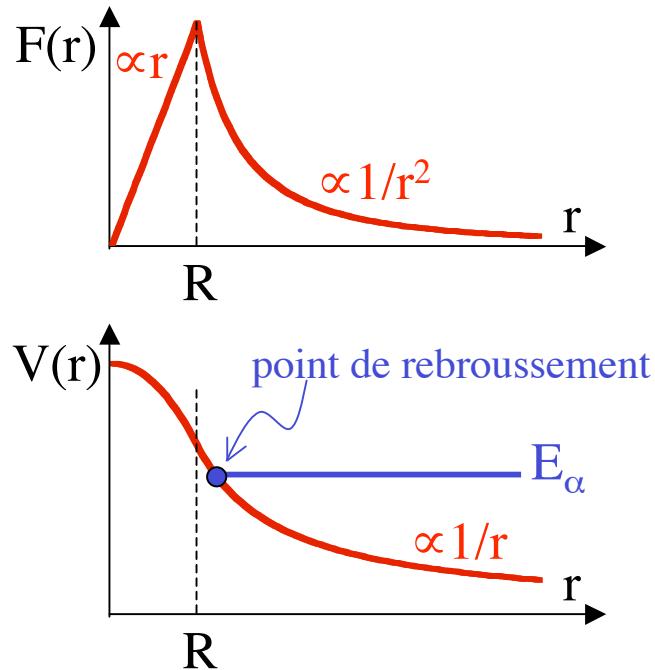


Ernest Rutherford
1871–1937

- Conclusion:
 - présence dans la matière de très petits objets chargés plus massifs que les particules α , donc autres que les électrons ($m_\alpha \sim 8000 m_e$): les noyaux atomiques !

Limite sur la taille des noyaux

- Modèle:
 - on peut ignorer la présence des électrons, car $m_e \ll m_\alpha$ et la particule α n'est (presque) pas déviée lors des collisions sur les électrons
 - la seule interaction est la force de Coulomb entre le noyau de charge positive Ze et la particule α de charge positive ze ($=2e$)
 - on suppose que le noyau est une boule de rayon R uniformément chargée
- Force et énergie potentielle en fonction de la distance r entre le noyau et la particule α :



$$F(r) = \begin{cases} Cr/R^3 & \text{si } r < R \\ C/r^2 & \text{si } r > R \end{cases} \quad \text{où } C = \frac{Zze^2}{4\pi\epsilon_0}$$

$$V(r) = - \int F(r) dr = \begin{cases} -Cr^2/(2R^3) + A & \text{si } r < R \\ C/r + B & \text{si } r > R \end{cases}$$

$$V(\infty) = 0 \Rightarrow B = 0$$

$$V(R) = C/R = -C/(2R) + A \Rightarrow A = 3C/(2R)$$

- Comme il existe un point de rebroussement:

$$E_\alpha < V^{\max} = V(0) = A \Rightarrow R < \frac{3}{2} \left(\frac{Zze^2}{4\pi\epsilon_0 E_\alpha} \right)$$

$$E_\alpha \approx 5 \text{ MeV} \Rightarrow R < Z(0.86 \times 10^{-15} \text{ m})$$

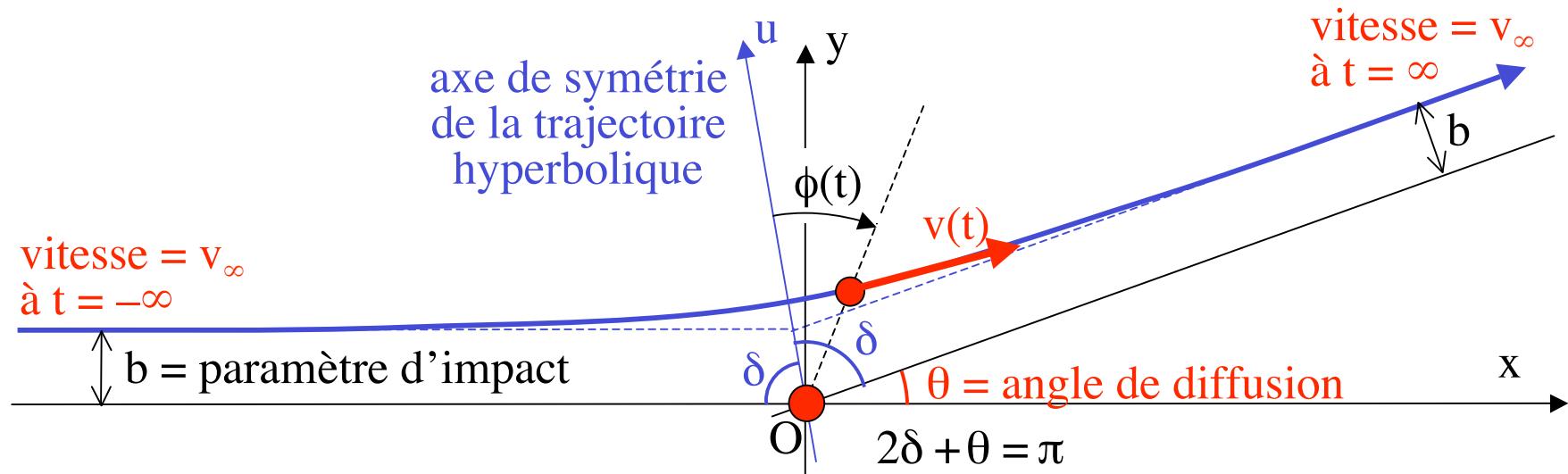
Diffusion coulombienne

- diffusion élastique d'une masse ponctuelle m de charge ze (particule α) sur une masse ponctuelle M de charge Ze (noyau), sous l'effet de la seule force de Coulomb répulsive
- on travaille avec les coordonnées relatives; l'origine O est placée sur le noyau et on considère la diffusion d'une particule relative de masse réduite μ et d'énergie mécanique $E > 0$:

$$\mu = \frac{mM}{m+M}, \quad E = \frac{1}{2}\mu v_\infty^2$$

- la trajectoire est une hyperbole, avec un axe de symétrie u , et le moment cinétique est conservé (car la force est centrale):

$$L = \mu r^2 \dot{\phi} = \mu v_\infty b \Rightarrow \frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{v_\infty b}{r(t)^2} \Rightarrow \frac{dt}{r(t)^2} = \frac{d\phi}{v_\infty b}$$



Diffusion coulombienne (suite)

- Impulsion reçue par le projectile
(en composantes selon les axes u et v, où v est perpendiculaire à u):

– intégrale sur le temps

$$\vec{I} = \begin{pmatrix} I_u \\ I_v \end{pmatrix} = \int_{t=-\infty}^{t=+\infty} \vec{F}(t) dt = \int_{t=-\infty}^{t=+\infty} \frac{C}{r^2(t)} \hat{r}(t) dt = C \int_{t=-\infty}^{t=+\infty} \begin{pmatrix} \cos \phi(t) \\ \sin \phi(t) \end{pmatrix} \frac{dt}{r^2(t)}$$

$$= C \int_{\phi=-\delta}^{\phi=+\delta} \begin{pmatrix} \cos \phi \\ \sin \phi \end{pmatrix} \frac{d\phi}{v_\infty b} = \frac{C}{v_\infty b} \begin{pmatrix} \sin \phi \\ -\cos \phi \end{pmatrix} \Big|_{\phi=-\delta}^{\phi=+\delta} = \frac{2C}{v_\infty b} \begin{pmatrix} \sin \delta \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{où } C = \frac{Zze^2}{4\pi \epsilon_0}$$

– différence des quantités de mouvement

$$\vec{I} = \begin{pmatrix} I_u \\ I_v \end{pmatrix} = \vec{p}_\infty - \vec{p}_{-\infty} = \mu v_\infty \begin{pmatrix} \cos \delta \\ \sin \delta \end{pmatrix} - \mu v_\infty \begin{pmatrix} -\cos \delta \\ \sin \delta \end{pmatrix} = 2\mu v_\infty \begin{pmatrix} \cos \delta \\ 0 \end{pmatrix}$$

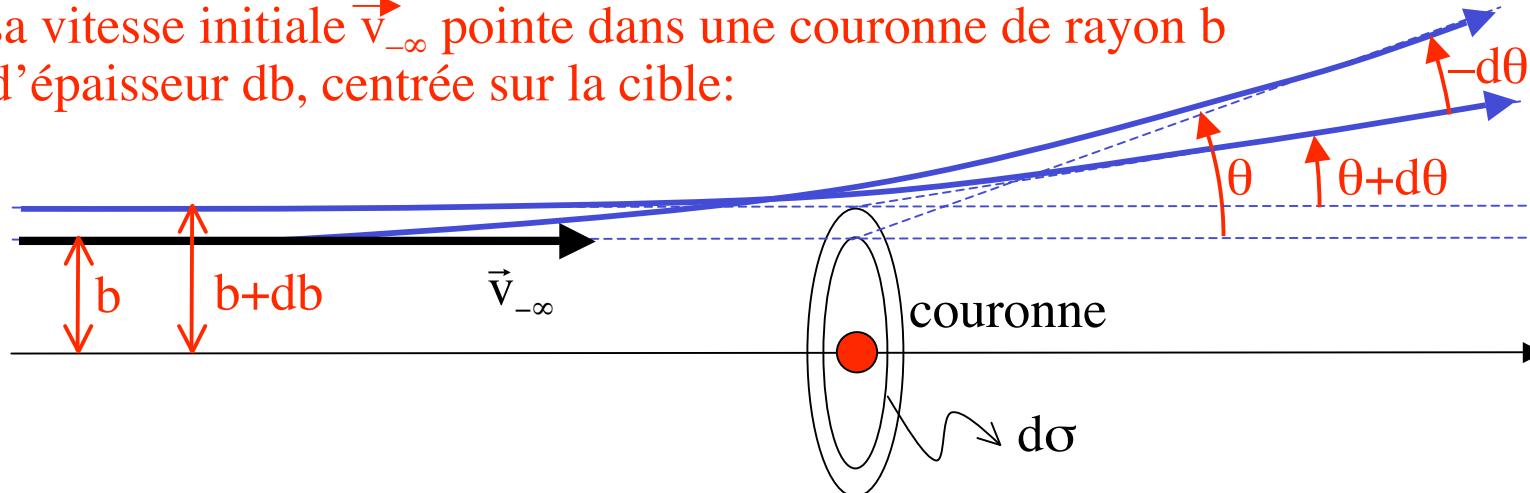
$$\Rightarrow \frac{2C}{v_\infty b} \sin \delta = 2\mu v_\infty \cos \delta \Rightarrow \tan \delta = \frac{\mu v_\infty^2 b}{C} = \frac{2E b}{C}$$

- Relation entre angle de diffusion θ et paramètre d'impact b:

$$\theta = \pi - 2\delta \Rightarrow \tan \frac{\theta}{2} = \tan \left(\frac{\pi}{2} - \delta \right) = \frac{1}{\tan \delta} = \frac{C}{2E b} \Leftrightarrow b = \frac{C}{2E} \frac{1}{\tan(\theta/2)}$$

Notion de section efficace

- Un projectile est dévié d'un angle compris entre θ et $\theta+d\theta$ si sa vitesse initiale $\vec{v}_{-\infty}$ pointe dans une couronne de rayon b et d'épaisseur db , centrée sur la cible:



$$\begin{cases} \text{surface de la couronne (perpendiculaire à } \vec{v}_{-\infty} \text{)}: & d\sigma = 2\pi b |db| \\ \text{angle solide dans lequel le projectile est dévié:} & d\Omega = 2\pi \sin\theta |d\theta| \end{cases} \quad \begin{matrix} \text{Note: } db > 0 \\ \Rightarrow d\theta < 0 \end{matrix}$$

- Nombre dN de projectiles déviés d'un angle compris entre θ et $\theta+d\theta$, si N projectiles sont envoyés uniformément sur une cible mince de surface S contenant N' noyaux (ces noyaux ne se cachent pas les uns derrière les autres):

$$dN = N \frac{N' d\sigma}{S} \Rightarrow \frac{dN}{d\Omega} = N n \frac{d\sigma}{d\Omega} \quad \text{où } n = \text{nombre de noyaux par unité de surface}$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{b}{\sin\theta} \left| \frac{db}{d\theta} \right| = \text{section efficace différentielle}$$

Formule de Rutherford

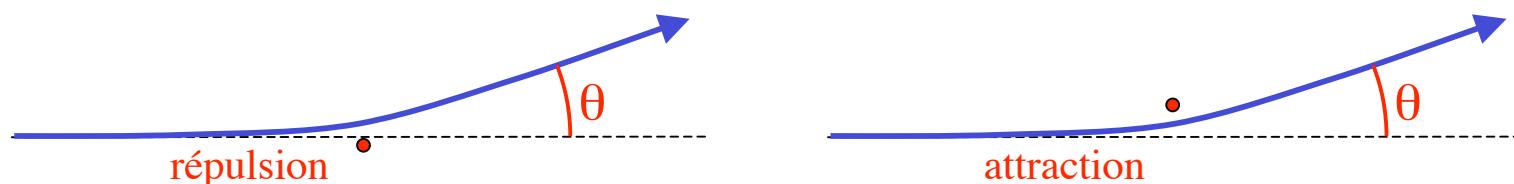
$$b = \frac{C}{2E} \frac{1}{\tan(\theta/2)} \Rightarrow \frac{db}{d\theta} = -\frac{C}{4E} \frac{1}{\sin^2(\theta/2)} \quad \text{où} \quad C = \frac{Zze^2}{4\pi\epsilon_0}$$

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma}{d\Omega} &= \frac{b}{\sin\theta} \left| \frac{db}{d\theta} \right| = \frac{C^2}{8E^2} \frac{1}{\sin\theta \sin^2(\theta/2) \tan(\theta/2)} \\ &= \frac{C^2}{8E^2} \frac{1}{2 \sin(\theta/2) \cos(\theta/2) \sin^2(\theta/2) \tan(\theta/2)} = \frac{C^2}{16E^2} \frac{1}{\sin^4(\theta/2)} \end{aligned}$$

$$\boxed{\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{Zze^2}{16\pi\epsilon_0 E} \right)^2 \frac{1}{\sin^4(\theta/2)}}$$

section efficace différentielle de la diffusion coulombienne élastique de charges ponctuelles (Rutherford)

- Probabilité de diffusion vers l'arrière ($\pi/2 < \theta < \pi$) très petite, mais non nulle
- Dépendance en $Z^2/\sin^4(\theta/2)$ très bien vérifiée expérimentalement par Geiger et Marsden (étudiants de Rutherford) pour de nombreux noyaux lourds
- **Note:** la section efficace ne dépend pas des signes des charges \Rightarrow on ne peut pas dire si le projectile et la cible sont de mêmes signes ou de signes opposés par une simple expérience de diffusion !



Les interactions fondamentales

- La compréhension des interactions (« forces ») est un des buts ultimes de la physique fondamentale:
 - expérimentalement, les **collisions entre particules** se révèlent être les meilleurs moyens d'investigation (« même technique » que Rutherford)
 - **symétries, invariances et lois de conservation** ont joué un rôle absolument capital pour cette compréhension
- Questions:
 - Qu'est-ce qu'une interaction ?
 - Comment une interaction peut-elle agir à distance ?
Qu'est-ce qu'un « champ » ?
 - Les interactions sont-elles toutes de même nature ?
Si non, qu'est-ce qui les distingue ?
Combien existe-t-il de type d'interactions ?

Les 4 interactions fondamentales

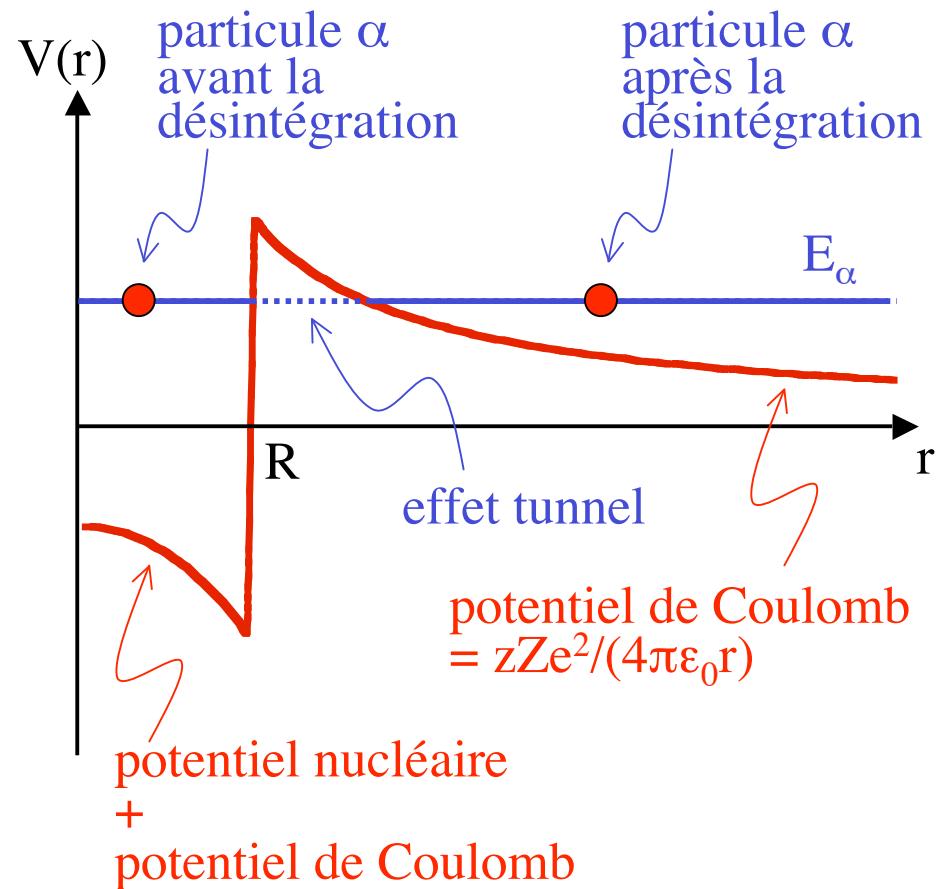
Interaction	Intensité relative	Portée	Exemple	Structures liées stables	Source d'énergie (libération d'énergie potentielle)
Gravifique	$\sim 10^{-40}$	infinie	force de pesanteur	système solaire, galaxies	hydraulique (barrages, marées)
Electro-magnétique	$\sim 10^{-2}$	infinie	force musculaire	atomes, molécules	fossile (hydrocarbures)
Faible	$\sim 10^{-5}$	$\sim 10^{-17} \text{ m}$	radio-activité β	-	solaire, nucléaire (fusion ou fission)
Forte	1	$\sim 10^{-15} \text{ m}$	bombe atomique	noyaux des atomes	

- Tout phénomène connu peut être attribué à l'une de ces interactions
- L'interaction forte est la plus compliquée et la moins bien connue

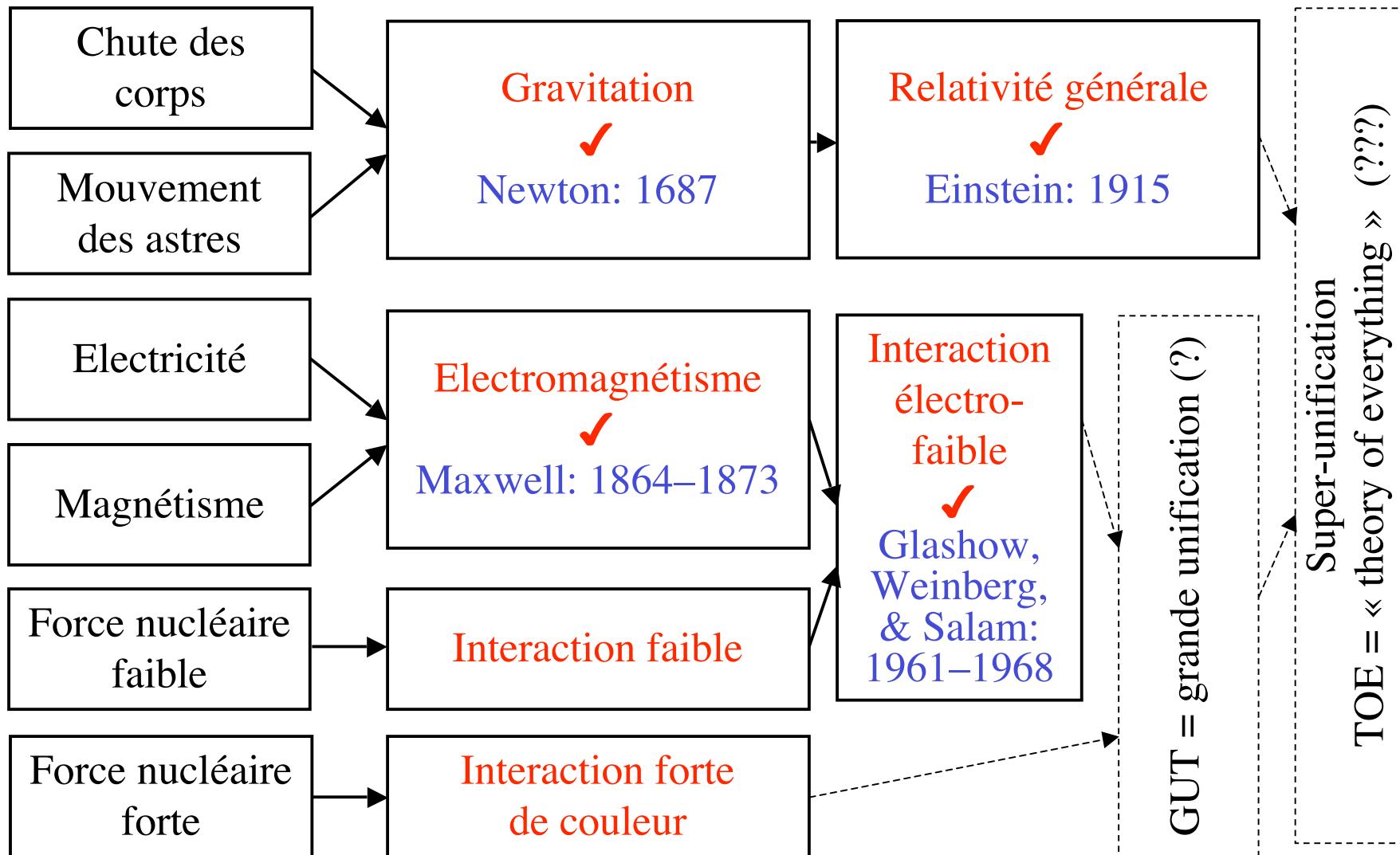
Note historique: en 1919, Rutherford a observé des déviations importantes par rapport à sa formule pour $r < 4 \cdot 10^{-15} \text{ m}$; il aurait alors pu découvrir les forces nucléaires fortes !

Radioactivité alpha et puits de potentiel

- Certains noyaux sont instables et peuvent se désintégrer en émettant une particule α (noyau d'hélium)
- Modèle simple:
 - la particule α est piégée dans le potentiel nucléaire (de courte portée R = rayon du noyau)
 - une « barrière » coulombienne l'empêche de sortir
 - cette barrière peut être franchie par « effet tunnel » (effet probabiliste de mécanique quantique) sans violer la conservation de l'énergie

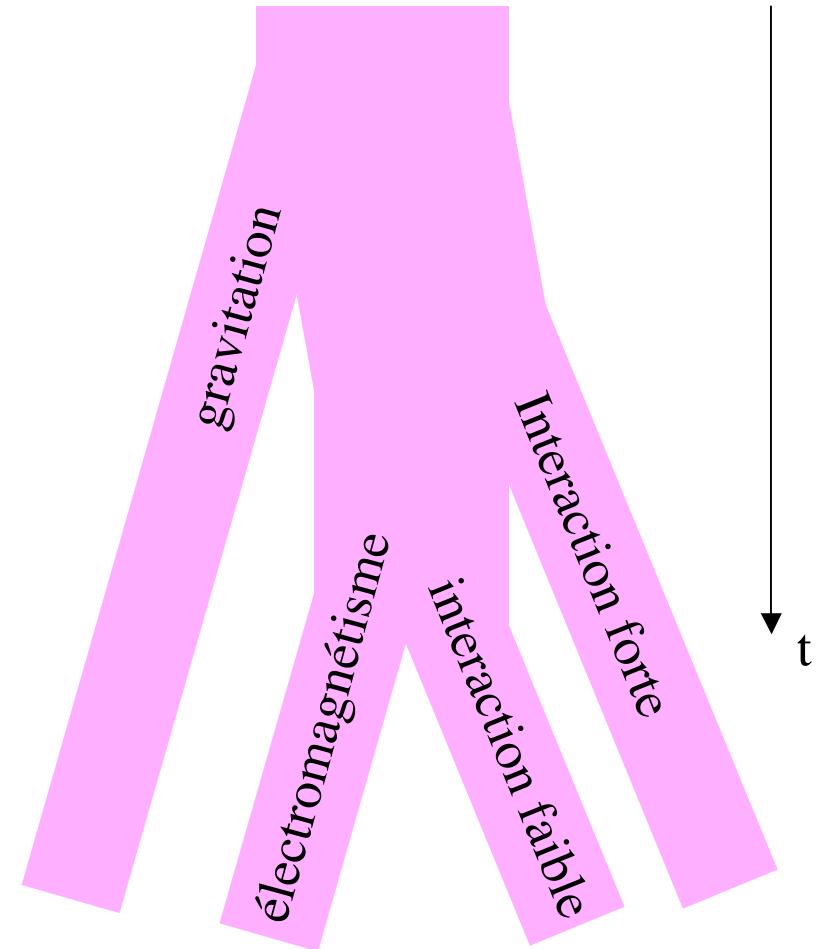


L'unification des interactions



La « différenciation » des interactions

- $t = 0, T = \infty$: Big Bang
 - une seule super-interaction
- $t = 10^{-43} \text{ s}, T = 10^{32} \text{ K}$:
 - la gravitation se différencie
- $t = 10^{-35} \text{ s}, T = 10^{27} \text{ K}$:
 - l'interaction forte se différencie
- $t = 10^{-11} \text{ s}, T = 10^{15} \text{ K}$:
 - les interactions faible et électromagnétique se séparent
- $t = 10^{10} \text{ ans}, T = 2.7 \text{ K}$:
 - aujourd'hui,
4 interactions différentes



En se refroidissant, l'Univers a (et les lois de la physique ont) perdu de la symétrie !

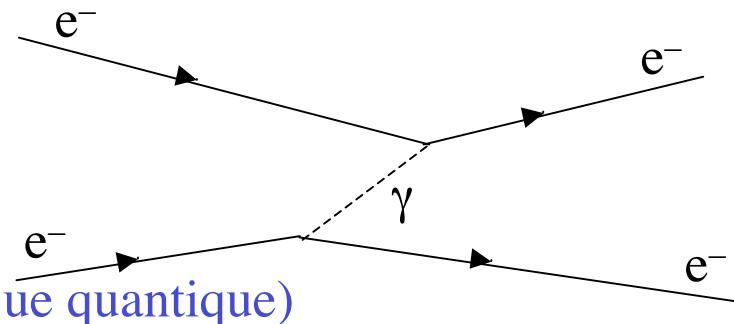
Analogie: transition de phase eau → glace

Interaction entre deux particules

- Description moderne d'une interaction:
 - Deux particules en interaction échangent une troisième particule
 - Cette particule d'échange leur permet de transférer de la quantité de mouvement, de l'énergie, du moment cinétique, et bien d'autres choses ...

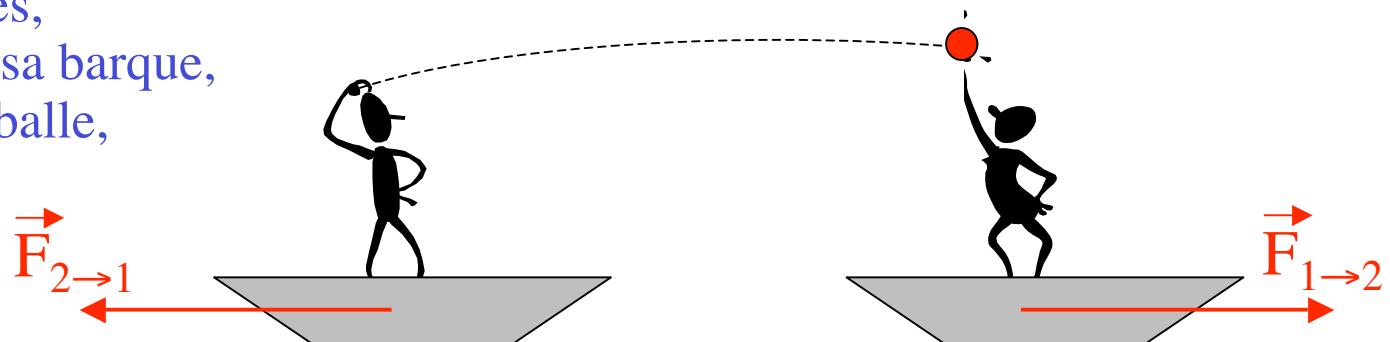
- Exemple:

- les électrons e^- se repoussent en échangeant des photons γ
 - ces photons ne sont rien d'autre que du champ électromagnétique !
(dualité onde \leftrightarrow particule de la mécanique quantique)



- Analogie:

- deux personnes, chacune dans sa barque, se lancent un balle, qui transmet une force répulsive



Les interactions et particules d'échange

Interaction	Particules sensibles	Particules échangées
Gravifique	toutes	(graviton ?)
Electro-magnétique	particules chargées électriquement	photon γ
Faible	toutes	W^+, W^-, Z^0
Forte	particules ayant une « charge forte » = quarks et gluons	gluons

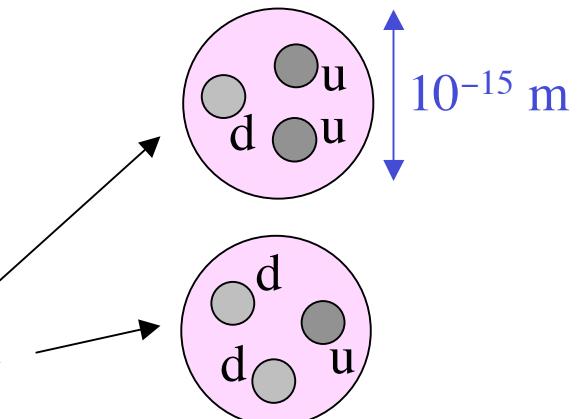
- La portée d'une interaction est inversement proportionnelle à la masse de la particule d'échange:
 - masse nulle du photon \Leftrightarrow portée infinie des forces électromagnétiques
- Les W^+, W^-, Z^0 ont été découvert au CERN en 1983:
 - il sont très massifs (~ 100 fois la masse du proton) \Leftrightarrow la portée de l'interaction faible est très limitée

Les particules élémentaires

- Toute la matière connue est formée de combinaisons de 6 leptons et 6 quarks
- Pour chacune de ces 12 particules, il existe une anti-particule de charge électrique opposée (anti-matière)
- Ces constituants élémentaires n'ont pas de structure connue

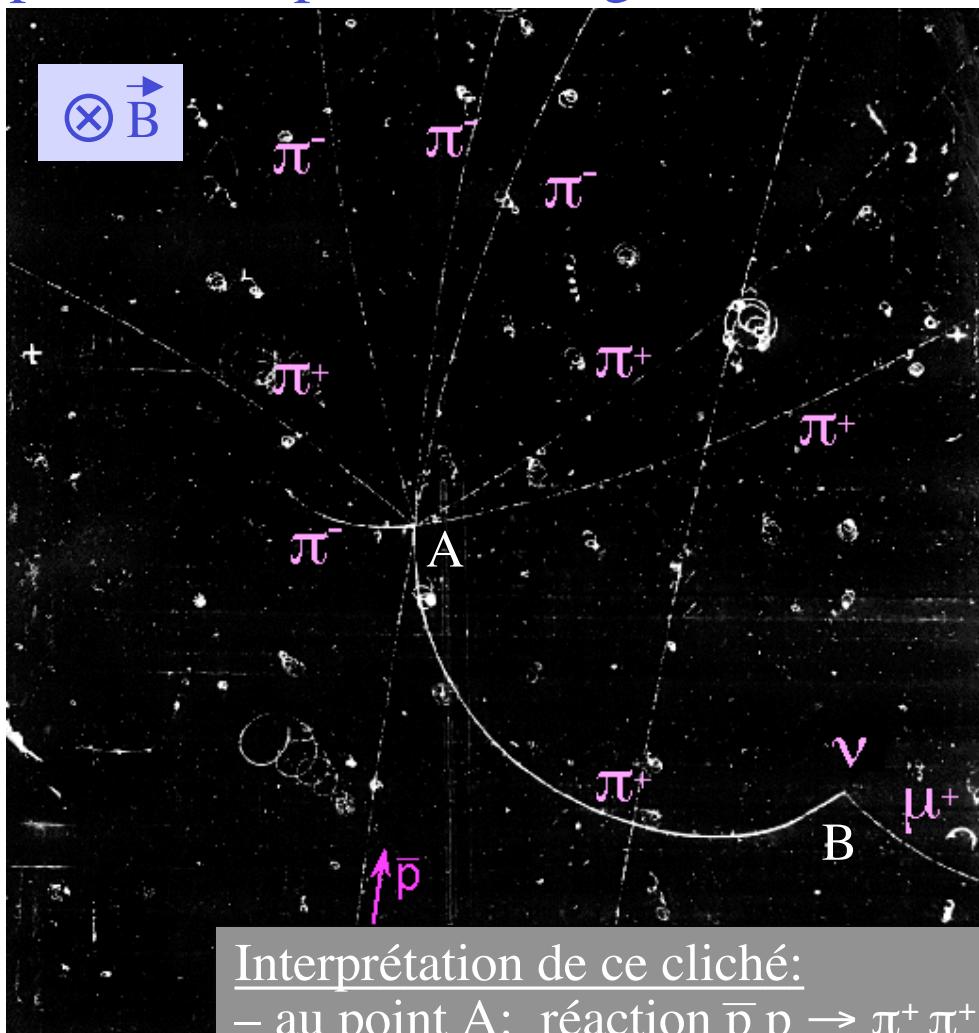
Leptons	électron e	muon μ	tau τ	Charge électrique [e]	« Charge forte »
	neutrino ν_e	neutrino ν_μ	neutrino ν_τ	-1	non
Quarks	up u	charm c	top t		
	down d	strange s	bottom b	+2/3	oui
				-1/3	

- La matière courante (stable) est formée seulement de trois types de particules élémentaires: e, u, d
 - Chaque atome contient des électrons et un noyau
 - Les noyaux sont faits de protons et de neutrons
 - Un proton est une combinaison de quarks u, u et d
 - Un neutron est une combinaison de quarks u, d et d



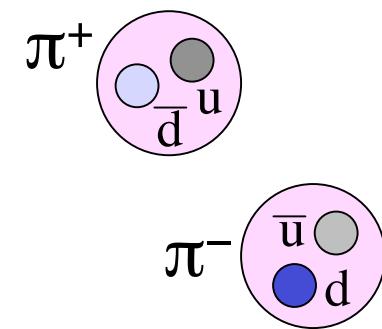
Observation des particules élémentaires (1)

Exemple d'un événement produit par une annihilation proton-antiproton, enregistrée dans une chambre à bulles



Chambre à bulles (1952 – ~1980):

- contient de l'hydrogène liquide (pression ~ 5 atm, $T \sim 3$ K)
- au moment du passage des particules, on réduit la pression (augmentation du volume de $\sim 1\%$ à l'aide d'un piston): le liquide est alors sur le point de bouillir
- le passage de particules chargées permet la formation de bulles qu'on peut photographier

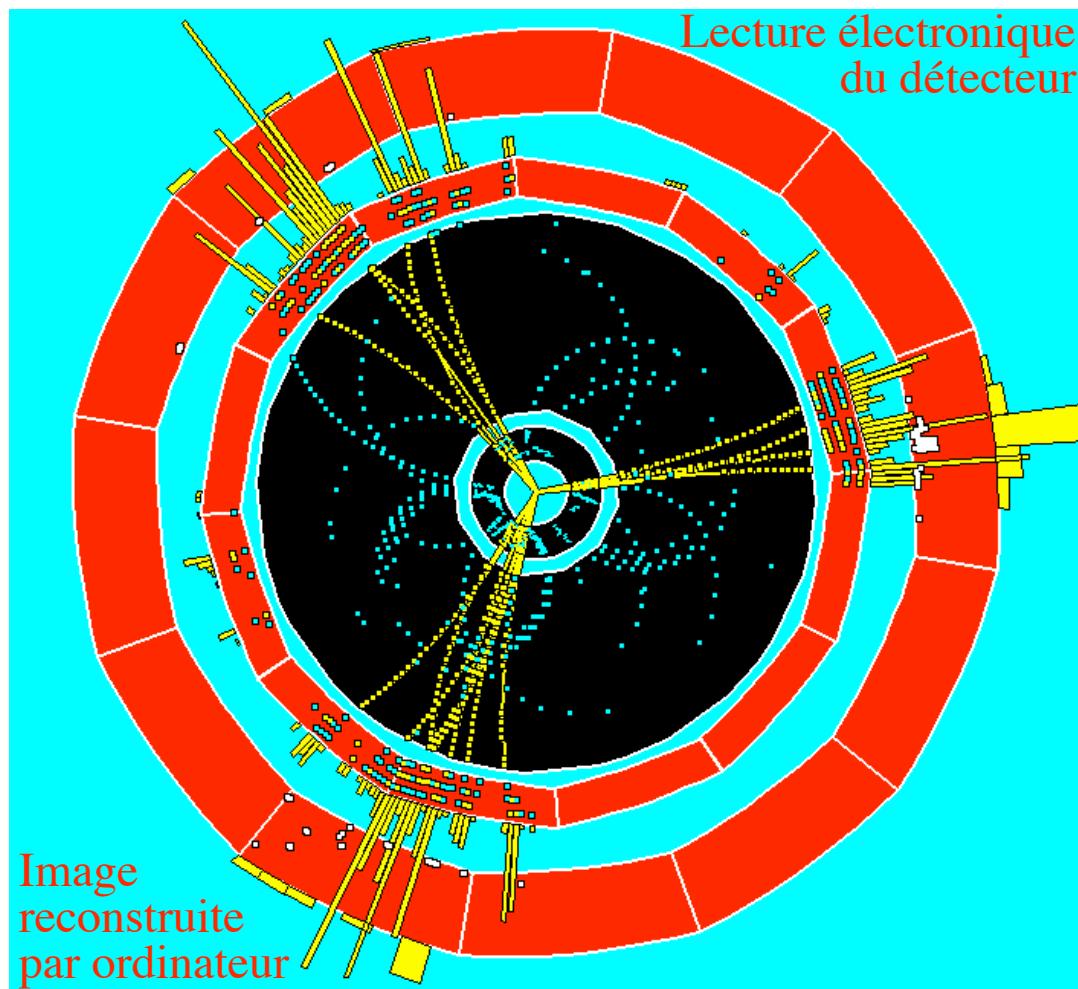


Interprétation de ce cliché:

- au point A: réaction $\bar{p} p \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^+ \pi^+ \pi^- \pi^- \pi^-$
- au point B: désintégration $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$

Observation des particules élémentaires (2)

Exemple d'un événement produit par une collision électron-positon inélastique à très haute énergie, enregistrée dans une expérience au CERN (déTECTeur ALEPH, 1989–2000):



- Vue dans un plan perpendiculaire aux faisceaux d'électrons et positons entrant en collision frontale au centre du détecteur
- Phénomène (faisant intervenir les interactions électrofaible et forte) observé dans cet événement particulier:

électron + positon $\rightarrow Z^0$
immédiatement suivi de
 $Z^0 \rightarrow \text{quark} + \text{anti-quark} + \text{gluon}$

↓ ↓ ↓
trois jets de particules
observables dans
le détecteur