

A l'occasion de la parution du livre  
« Etonnants Infinis » aux Editions CNRS

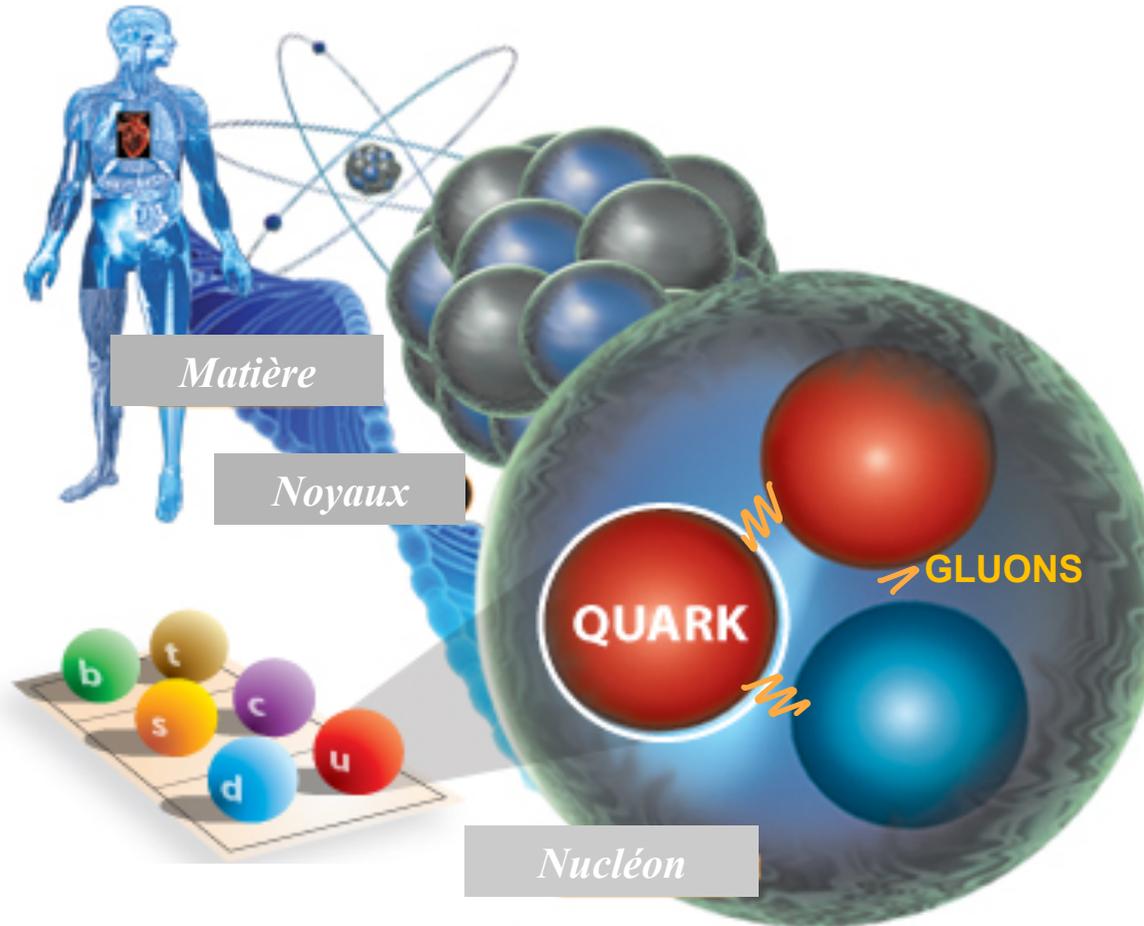
Par des auteurs du Laboratoire de Physique  
des 2 Infinis Irène Joliot-Curie (IJCLab)

**Silvia Niccolai** : *Insaisissable proton*

**David Rousseau** : *Mon assistant est un  
algorithme*

**Vincent Tatischeff** : *Des éléments et des étoiles  
(avec Olivier Sorlin)*

## Silvia Niccolai : *Insaisissable proton*

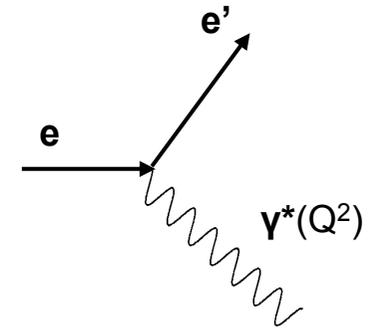


- Les **protons** et les **neutrons (nucléons)** sont les constituants des noyaux atomiques
- Les **nucléons** fournissent **~99% de la masse** de l'univers visible
- **~99% de la masse du nucléon** naît des **dynamiques et interactions** entre ses constituants (les **quarks** et les **gluons**)

# Comment sonder le cœur de la matière

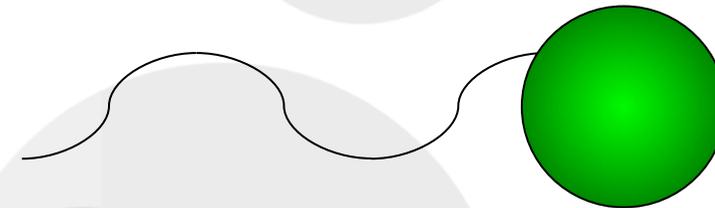
Avec la **sonde électromagnétique**,  $\gamma$  réel ou  $\gamma$  virtuel ( $e^-$ ) :

- pas de structure interne
- pas d'interaction forte (seul interaction électromagnétique, bien connue)

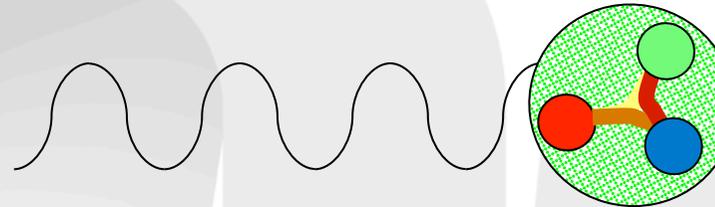


**Pouvoir de résolution:**  $\lambda \sim 1/Q$  ( $Q^2$  = impulsion transférée)

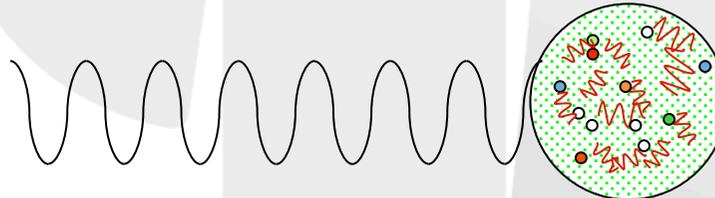
$Q^2 \sim 0.1$  GeV  
Taille proton  $\sim 10^{-15}$  m



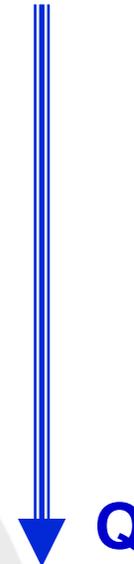
$Q^2 \geq 1$  GeV



$Q^2$  de plusieurs GeV



**Baisse  
résolution**



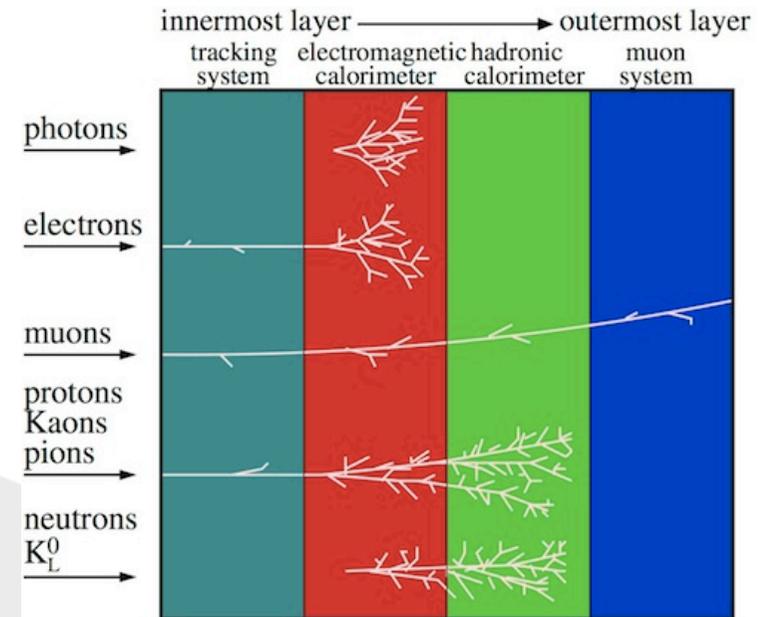
**Q**

**Haute  
résolution**

Exemple: l'accélérateur CEBAF et le détecteur CLAS12 à Jefferson Lab (USA)



Les détecteurs exploitent les différents moyens d'interaction des particules dans la matière pour pouvoir les reconnaître et en mesurer la trajectoire et la « vitesse » (impulsion)



C. Lippmann - 2003

Tracker (trajectoire), Calorimètre (énergie), Champ magnétique (impulsion / charge), Temps de vol (PID)



# Diffusion d'électrons sur les protons : histoire

➤ 1950: Diffusion **élastique** :  $ep \rightarrow e'p'$  (Hofstadter, prix Nobel, 1961)

$$Q^2 = 0.2 \text{ GeV}^2$$

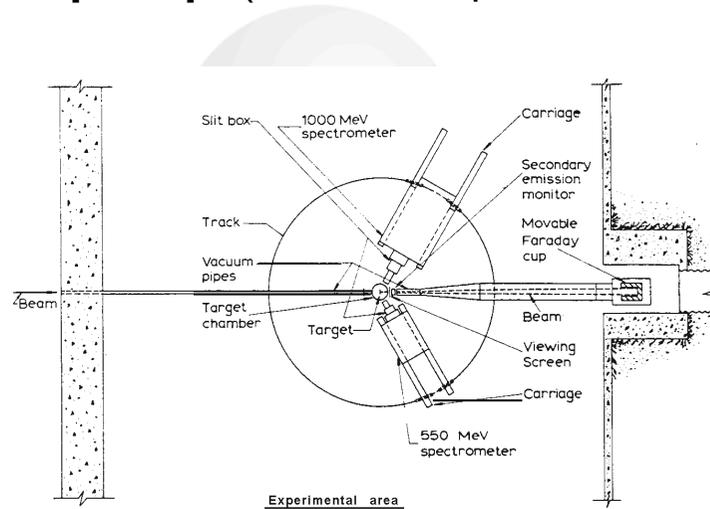
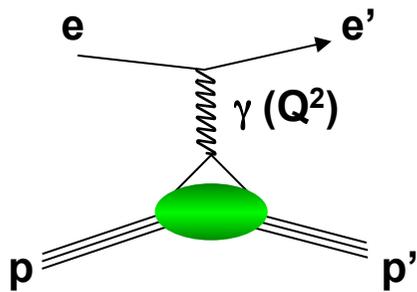


Fig. 2. This figure shows a schematic diagram of a modern electron-scattering experimental area. The track on which the spectrometers roll has an approximate radius of 13.5 feet.

$$\sigma(Q^2) = F(Q^2) \sigma_{\text{Mott}}(Q^2)$$



- Le proton n'est pas ponctuel, il a une **structure interne**
- Mesure des distributions de **charge et courant** du proton (**facteurs de forme,  $F_1/F_2$** )

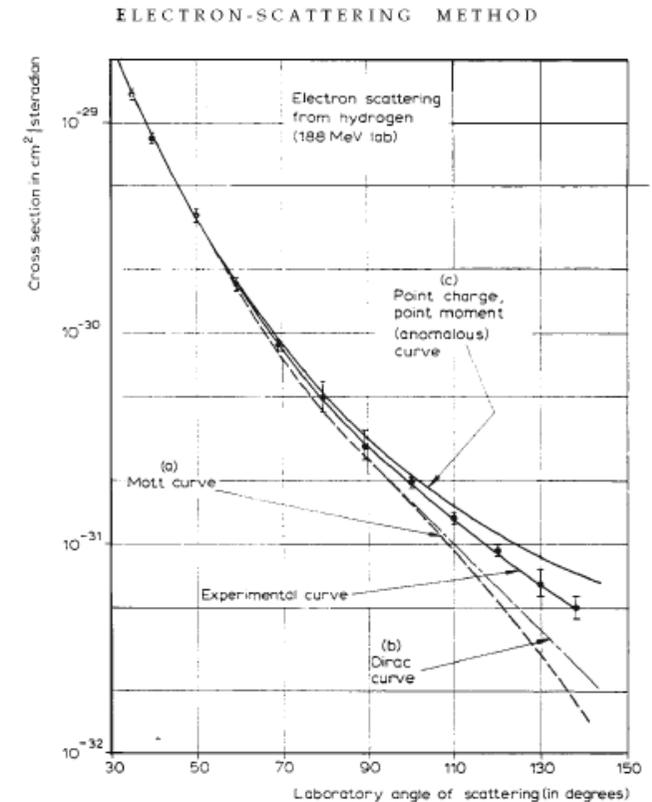


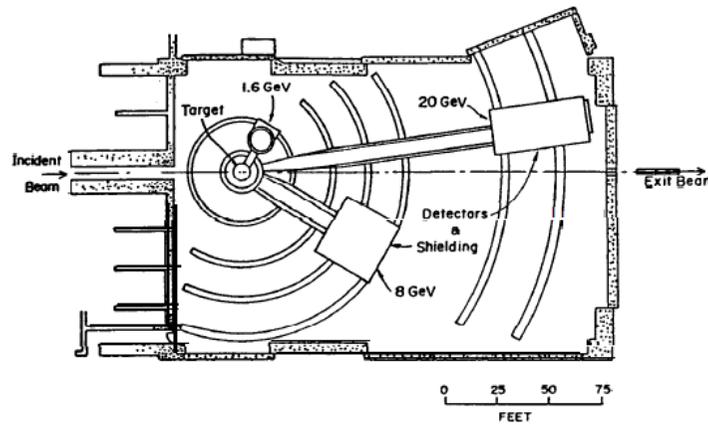
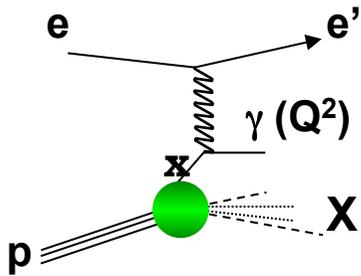
Fig. 9. Electron scattering from the proton at an incident energy of 188 MeV. Curve (a) shows the theoretical Mott curve for a spinless point proton. Curve (b) shows the theoretical curve for a point proton with a Dirac magnetic moment alone. Curve (c) shows the theoretical behavior of a point proton having the anomalous Pauli contribution in addition to the Dirac value of the magnetic moment. The deviation of the experimental curve from the Curve (c) represents the effect of form factors for the proton and indicates structure within the proton. The best fit in this figure indicates an rms radius close to  $0.7 \cdot 10^{-10}$  cm.



## Diffusion d'électrons sur les protons : histoire

- **1967: Diffusion profondément inélastique (DIS) :  $ep \rightarrow e'X$**   
(Friedman, Kendall, Taylor, prix Nobel, 1990)

$$Q^2 = 20 \text{ GeV}^2$$



$$\sigma(Q^2) \sim \sigma_{\text{Mott}}(Q^2)$$



- Découverte des **quarks** (ou "partons")
- Mesure de **distributions d'impulsion et spin** des partons:  $q(x)$ ,  $\Delta q(x)$

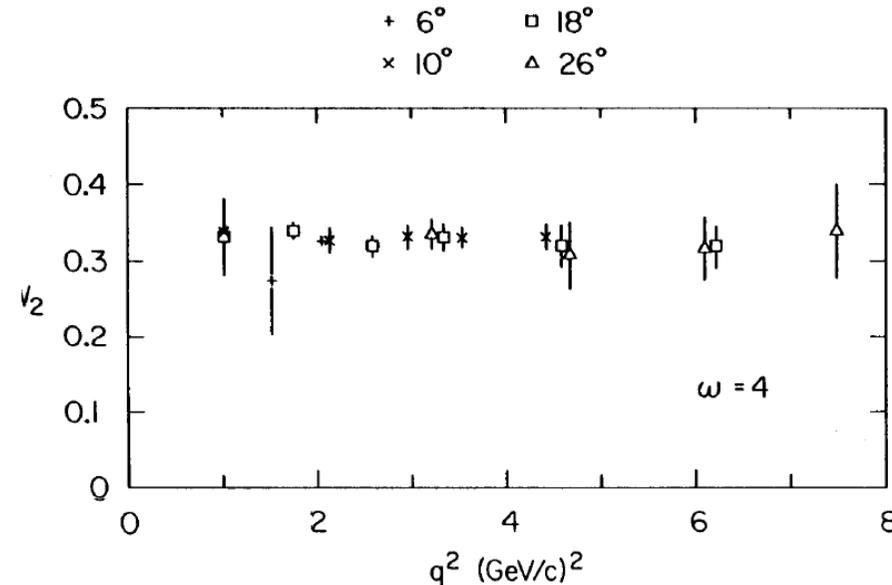
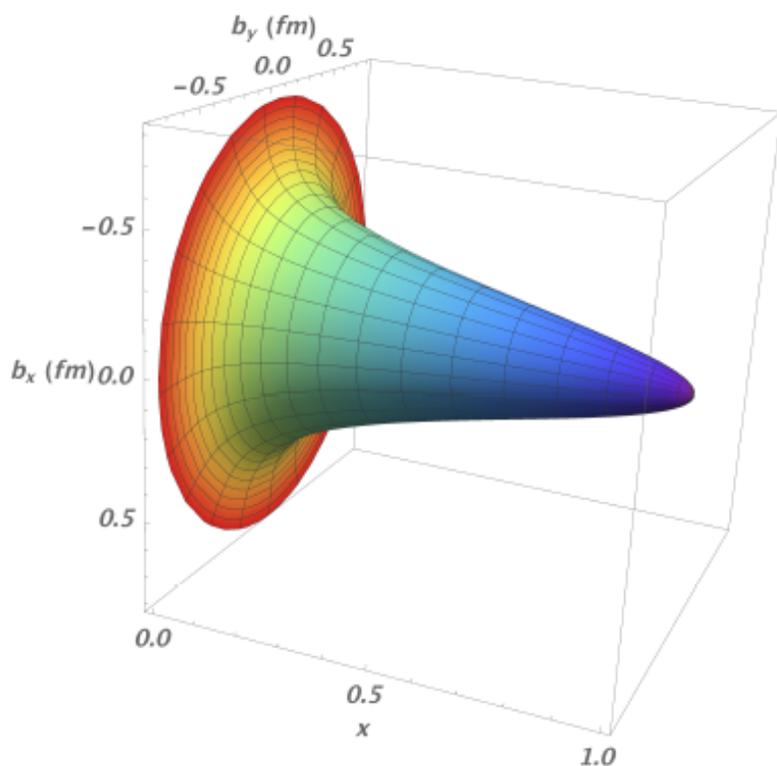


Fig. 13. An early observation of scaling:  $\bar{\nu}W_2^+$  for the proton as a function of  $\bar{q}^2$  for  $W > 2$  GeV, at  $\omega = 4$ .

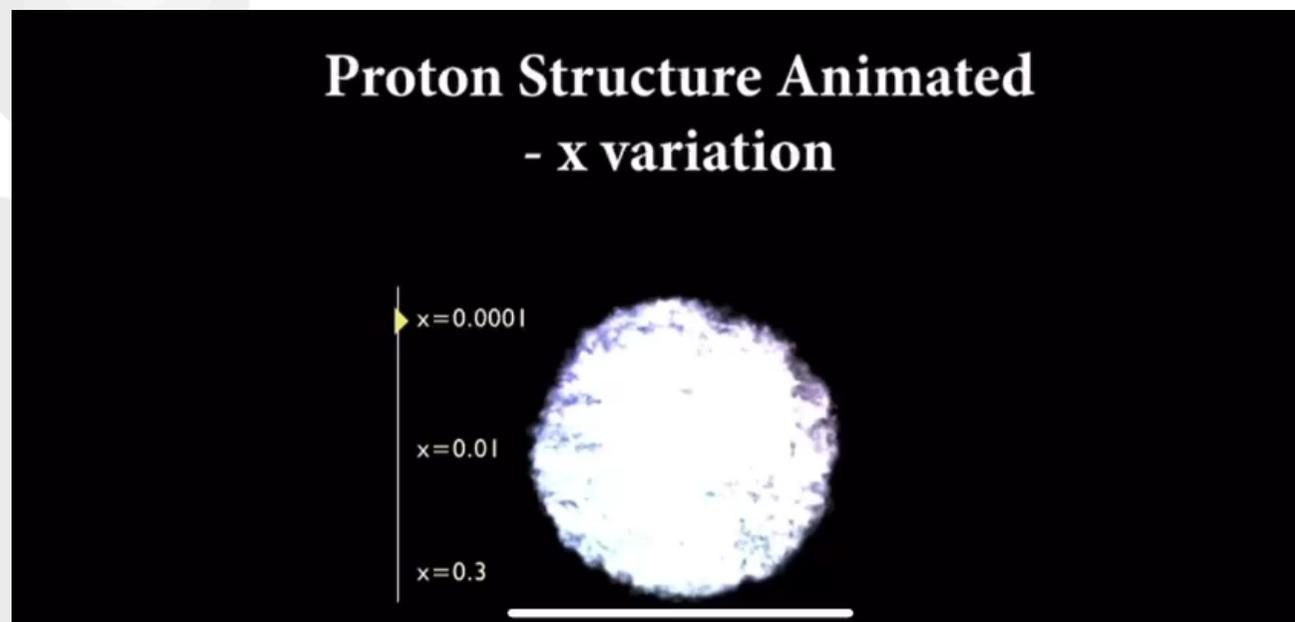


## Aujourd'hui : tomographie du proton

Grace au progrès dans les accélérateurs et dans les détecteurs de particules, réactions plus complexes peuvent être mesurées. Elles permettent de construire une image multidimensionnelle du proton en termes de position et impulsion ( $x$ ) de ses constituants.



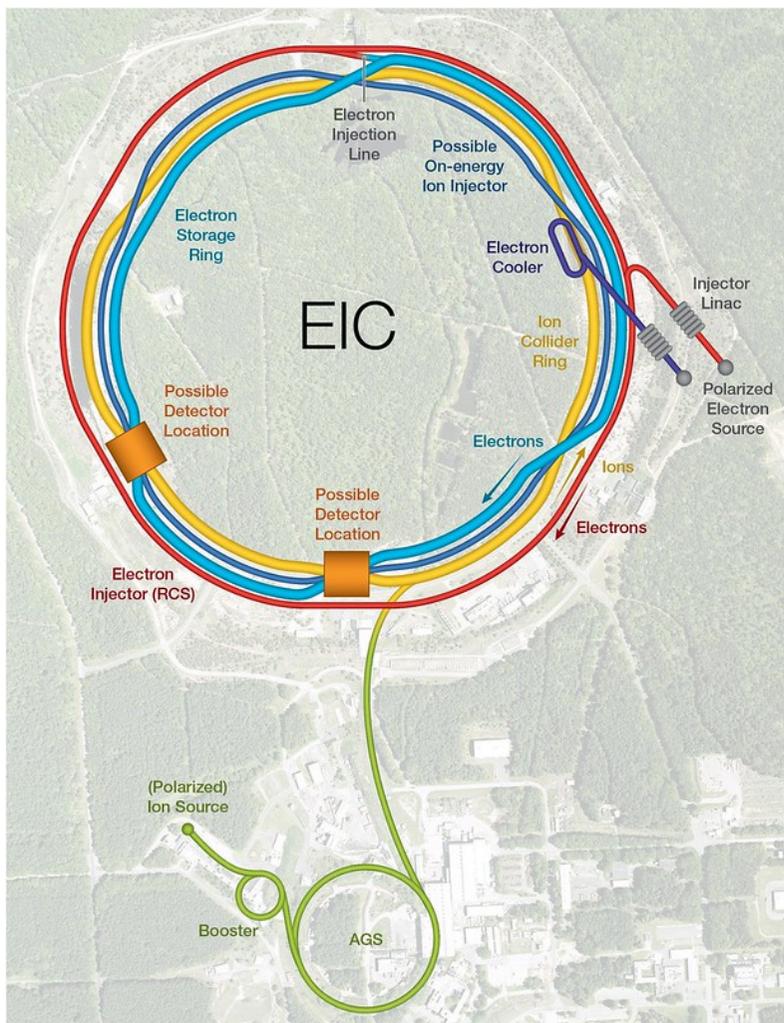
Les quarks plus « rapides » (valence) sont au centre du proton, les quarks plus « lents » (mer) sont en périphérie



<https://www.youtube.com/watch?v=G-9I0buDi4s>

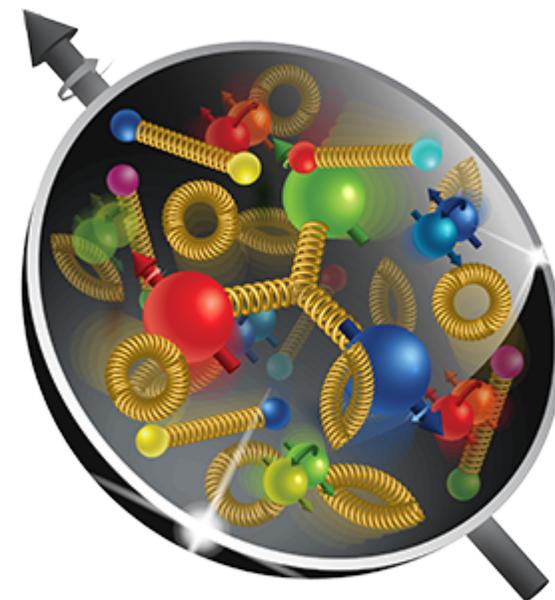


## Le futur : étude des gluons au collisionneur Electron-ion (EIC)



EIC: Brookhaven, USA

- Le collisionneur Electron-Ion (EIC) prendra des “photos” en multi-dimensions et à haute précision de la structure interne des protons.
- En changeant l'énergie des faisceaux, l'EIC révélera les propriétés des gluons et des quarks de « la mer », en mesurant leurs distributions en position et impulsion
- Ces études aideront à comprendre comment l'énergie des gluons (qui ont masse nulle) est transférée, via  $E=mc^2$ , pour générer la plupart de la masse de l'univers visible



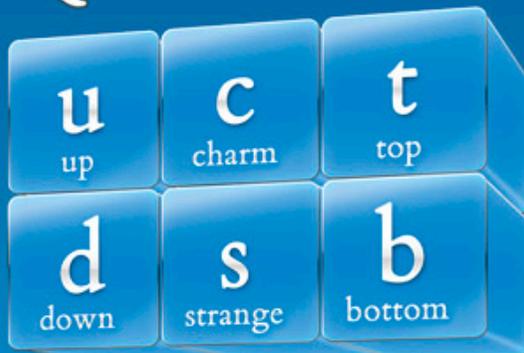
**David Rousseau :**

*Mon assistant est un algorithme*

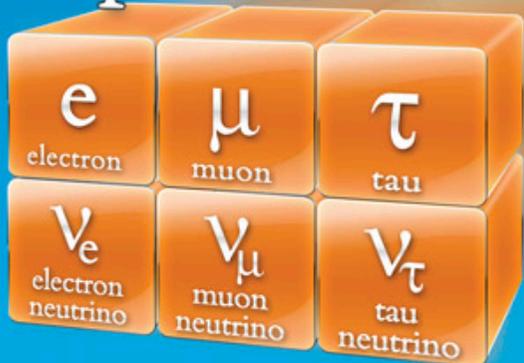
# La Matière: les FERMIONS

Modèle Standard  
des particules

## Quarks

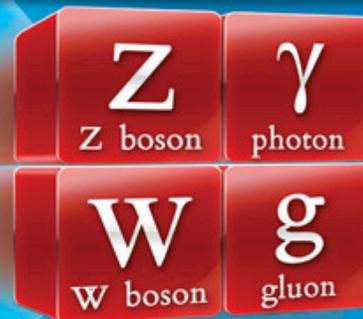


## Leptons



## Les Forces: les BOSONS

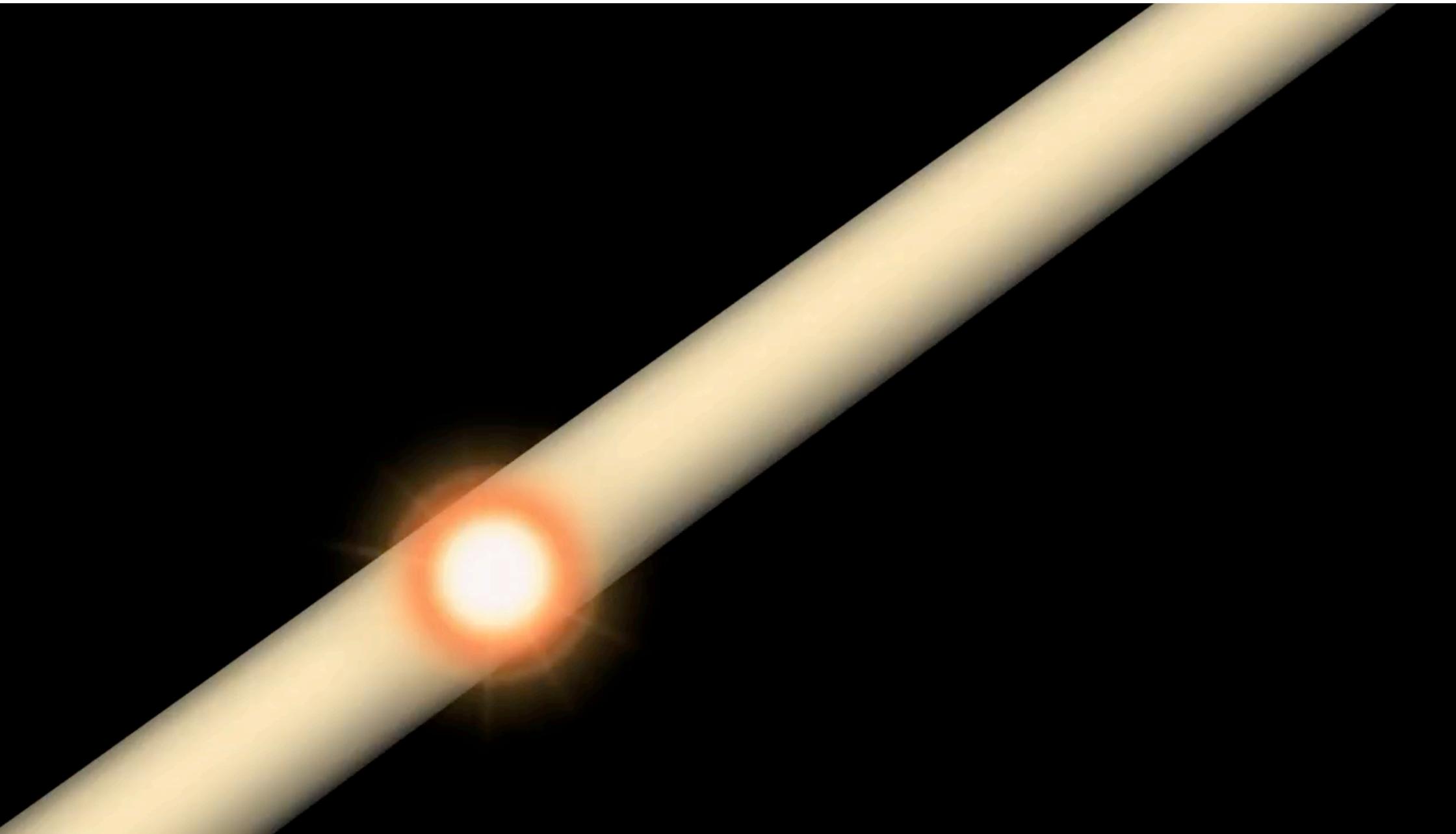
?  
La masse!  
H  
Higgs boson



+Antiparticules



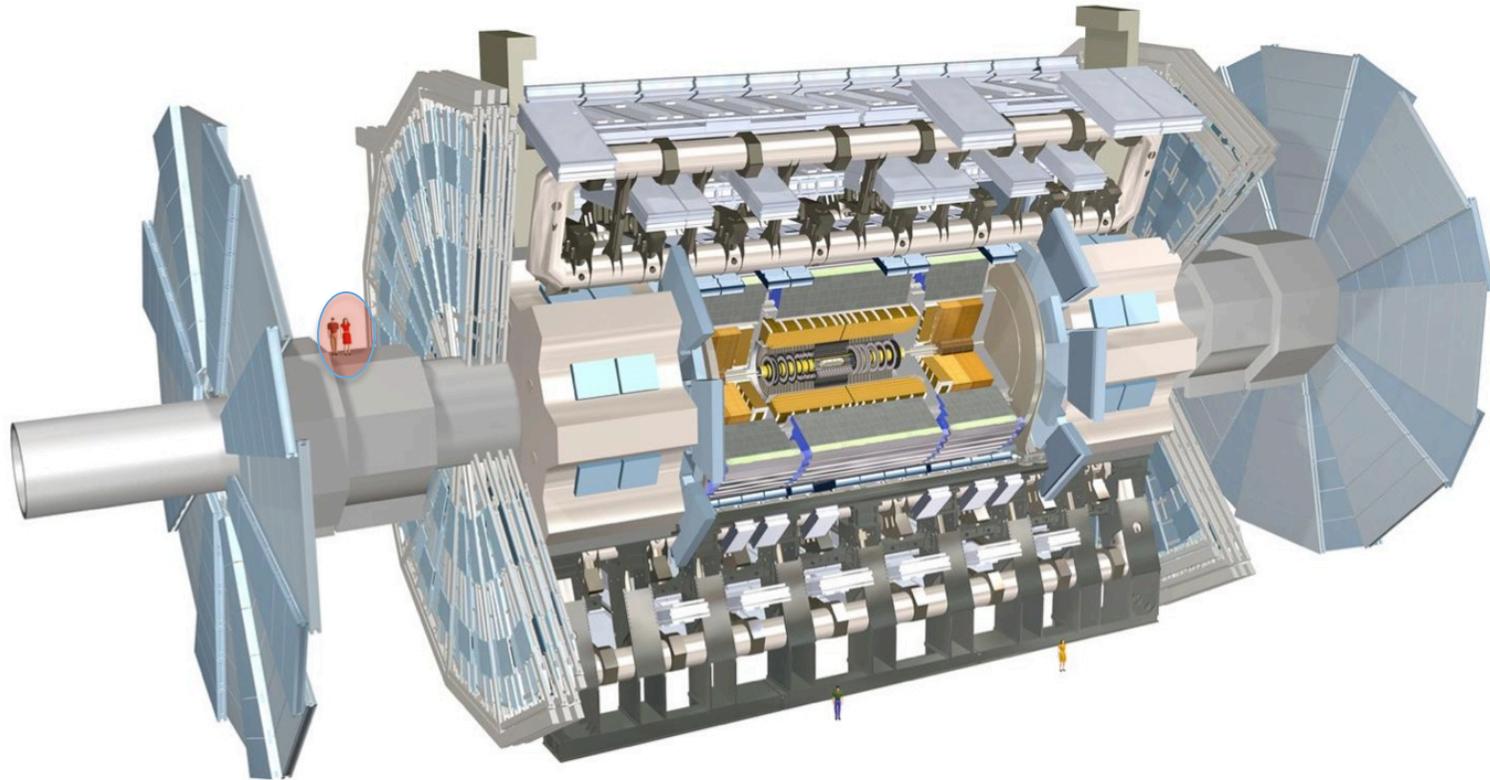
VOIR les particules ?



# Le détecteur Atlas

Diamètre: 25m  
Longueur: 46m  
Poids: 7000  
tonnes

3000 km de câbles  
100 millions de canaux

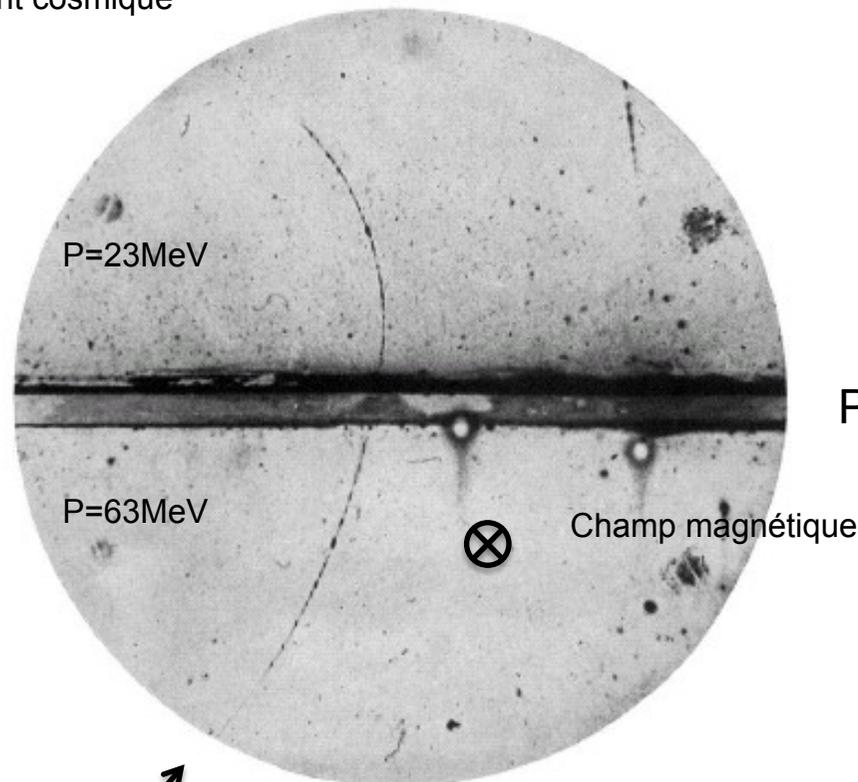


Découverte du positron (Anderson 1932), l'anti-électron  
postulé par Dirac (mais Anderson l'ignorait)  
(en joignant les équations de la mécanique quantique et de la relativité restreinte  
Dirac a vu apparaître comme solutions des électrons d'énergie négative)



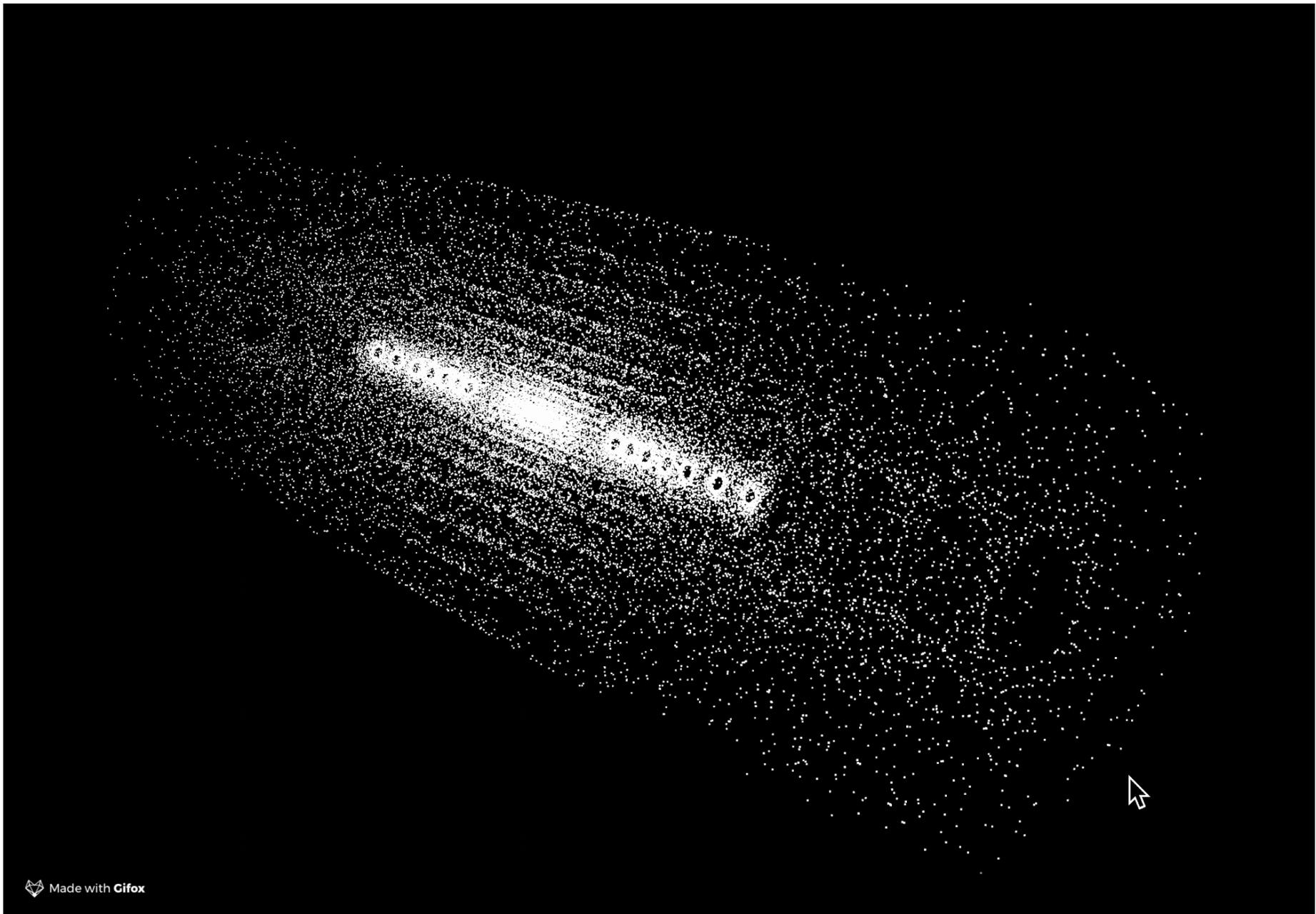
Photo dans une chambre à brouillard (« de Wilson »),  
soumise au rayonnement cosmique

Nobel 1936

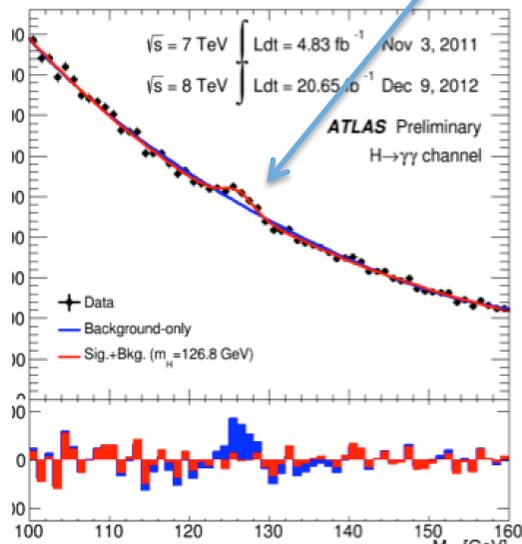


Plaque de plomb

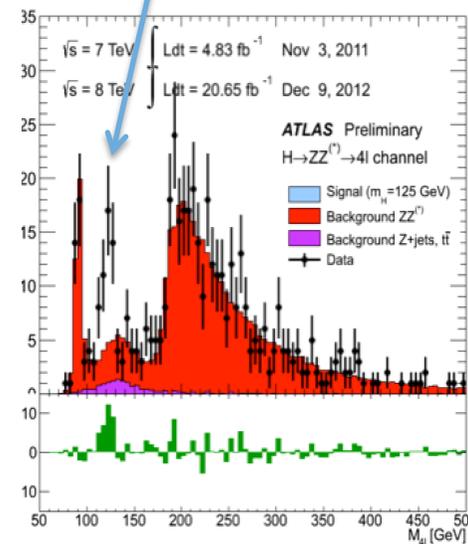
FIG. 1. A 63 million volt positron ( $H\rho=2.1 \times 10^6$  gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ( $H\rho=7.5 \times 10^4$  gauss-cm). The length of this latter path is at least two times greater than the possible length of a proton path of this curvature.



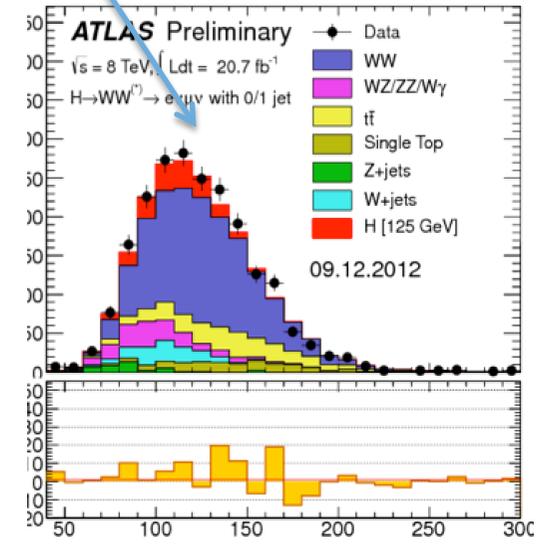
# « Voir » le boson de Higgs



Masse invariante



Masse invariante

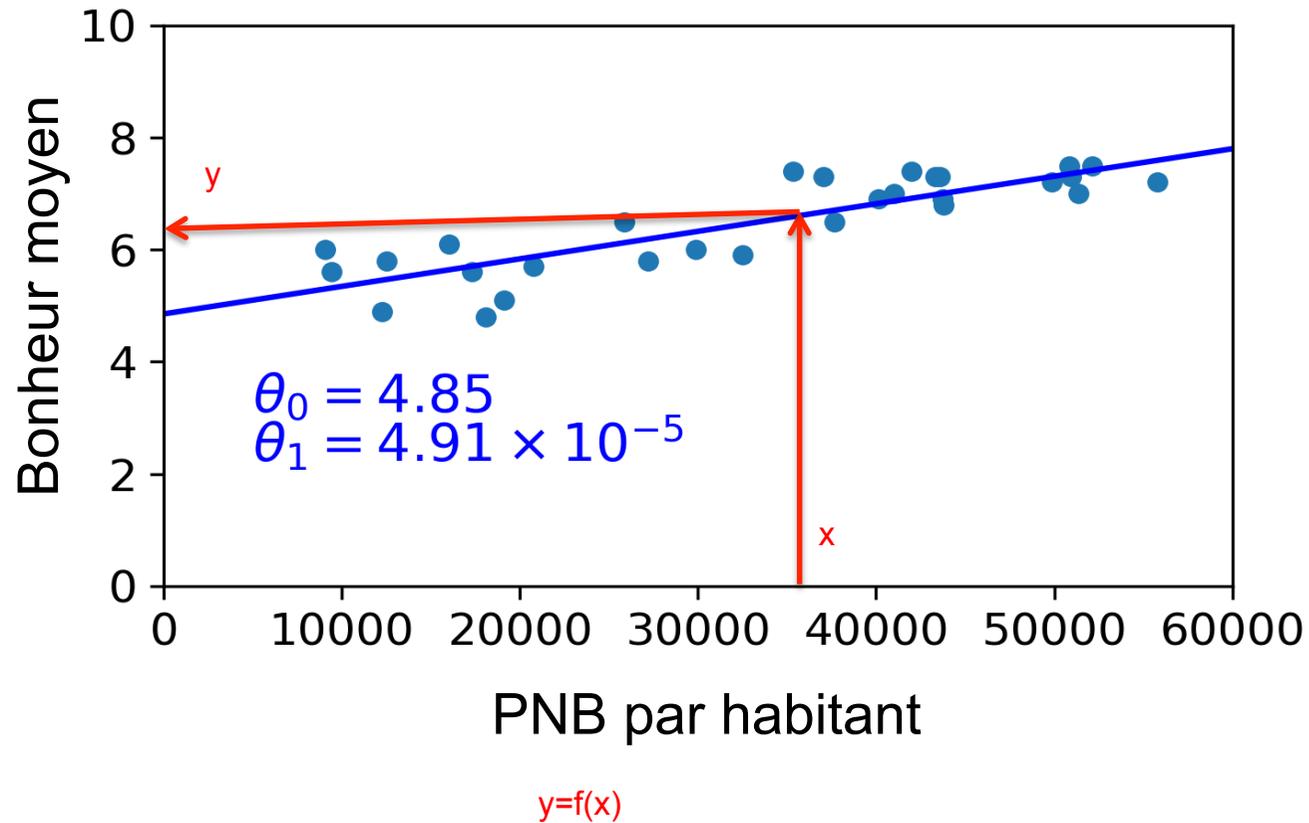


Masse invariante

# Intelligence Artificielle

# Régression Linéaire

Boskovic, Legendre, Laplace, Gauss



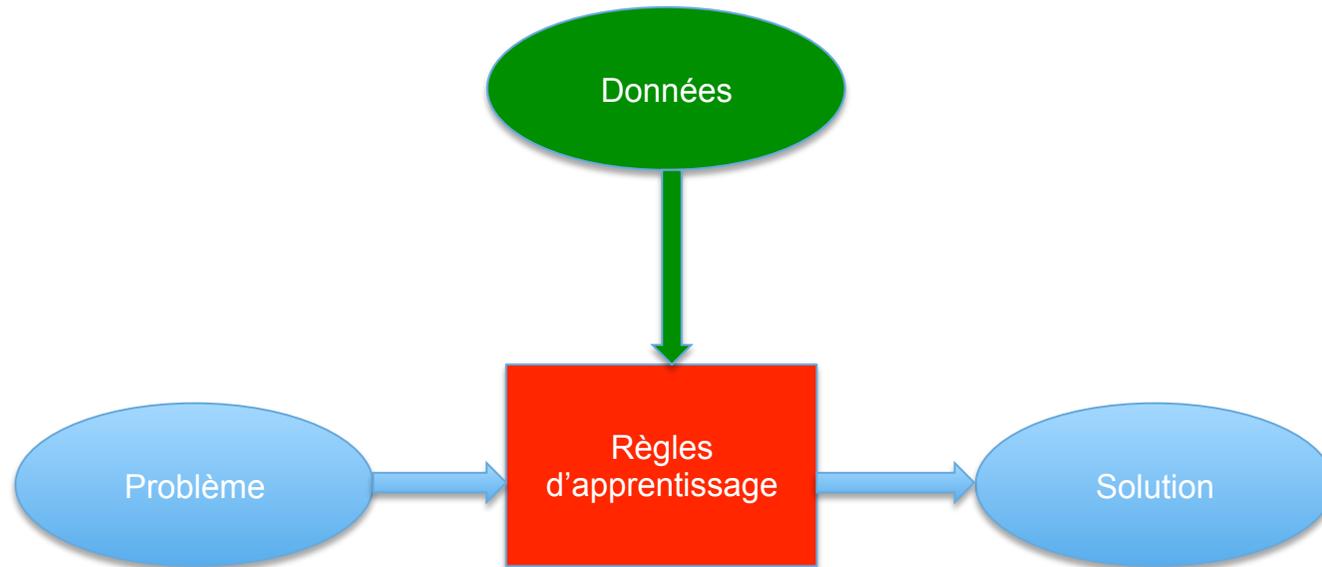
Etant donné  $x$ , on veut  $y \rightarrow$  comment construire  $f$  ?

- | $x$                     | $f$           | $y$               |
|-------------------------|---------------|-------------------|
| • Ecriture manuscrite   | $\rightarrow$ | texte             |
| • Photo                 | $\rightarrow$ | maman ou mamie ?  |
| • « Comment ça va ? »   | $\rightarrow$ | « Wie geht's ? »  |
| • Parole                | $\rightarrow$ | texte             |
| • Position des pièces   | $\rightarrow$ | prochain coup     |
| • Camera + capteurs+GPS | $\rightarrow$ | action sur volant |
| • Compte facebook       | $\rightarrow$ | publicité ciblée  |

# Informatique traditionnelle

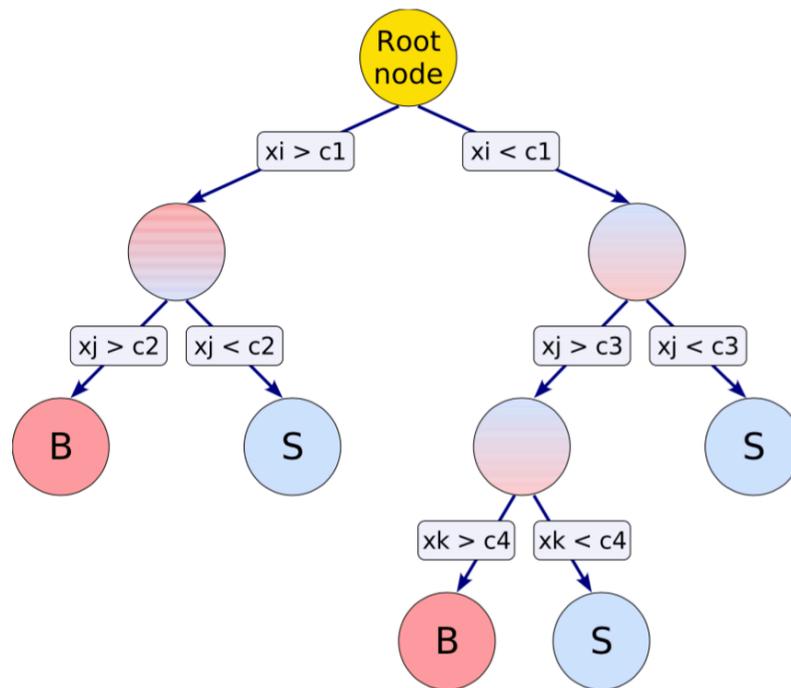


# Apprentissage Automatique



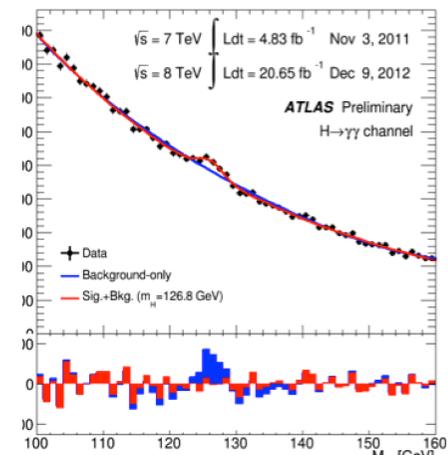
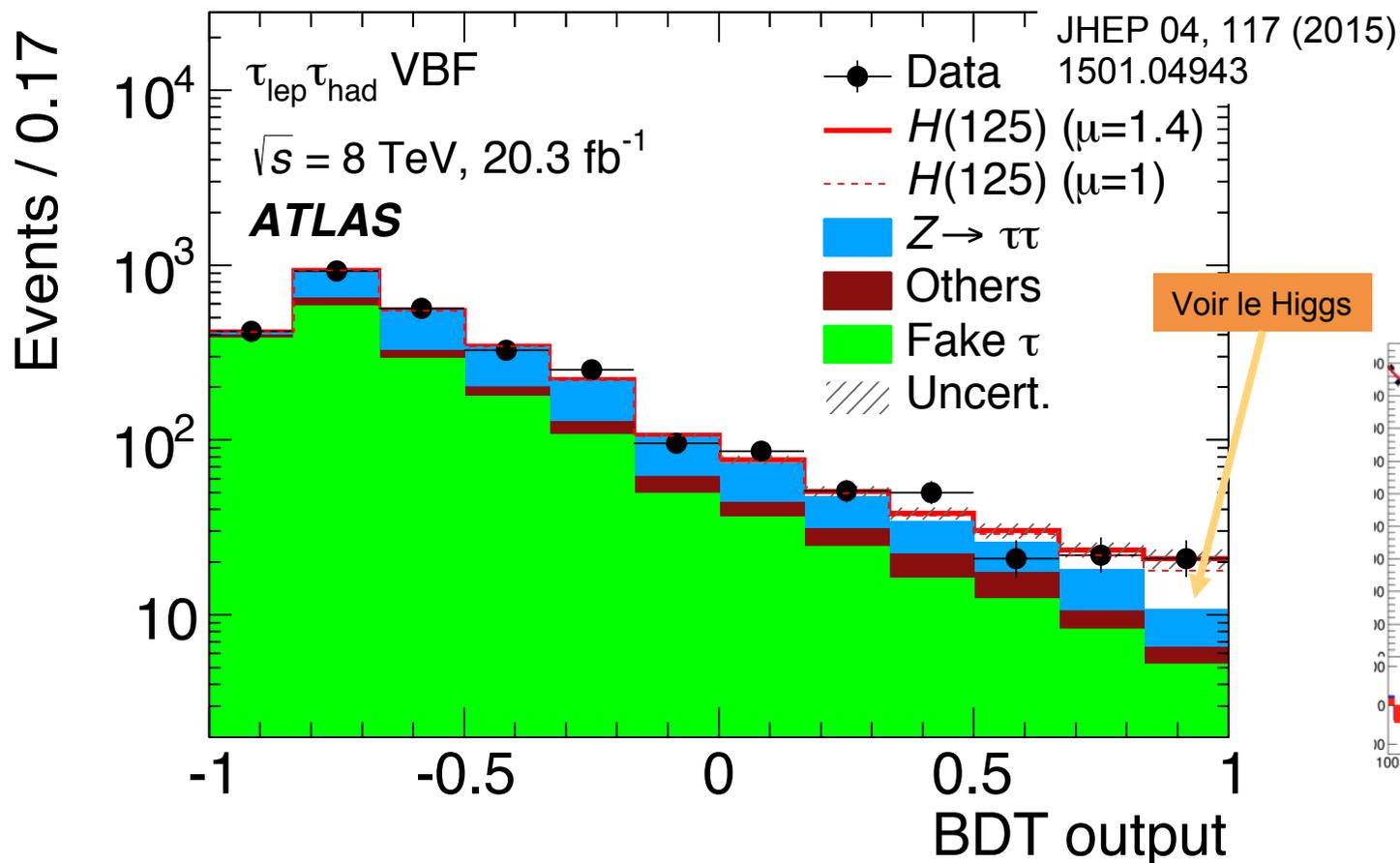
Apprendre = optimiser les paramètres internes de l'algorithme :  $n=2$  à  $10^{12}$

# Arbre de Décision Boosté



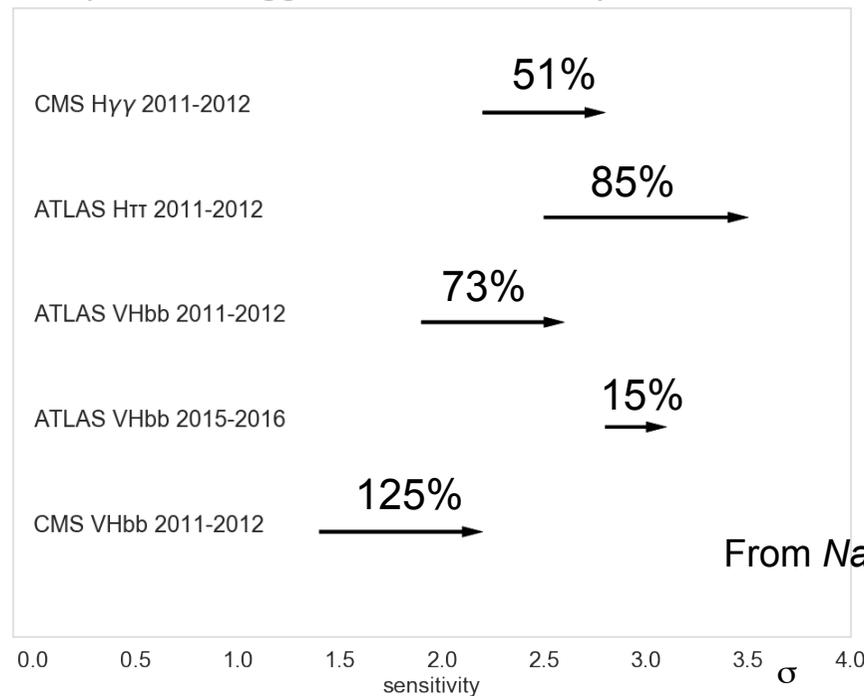
# Voir le boson de Higgs

Boosted Decision Tree utilisant une douzaine de variables



# ML on Higgs Physics

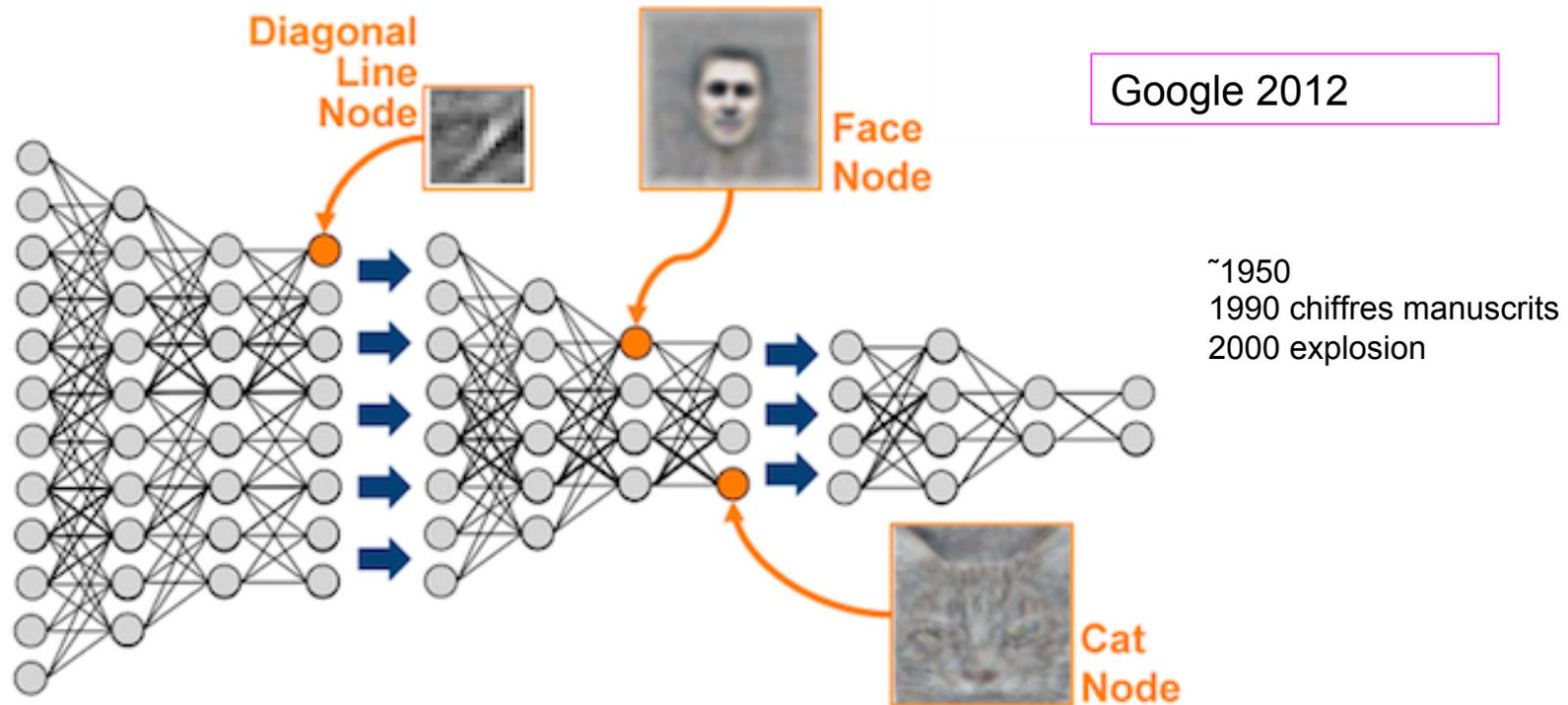
- At LHC, Machine Learning used almost since first data taking (2010) for reconstruction and analysis
- In most cases, Boosted Decision Tree on  $\sim 10$  variables
- For example, impact on Higgs boson sensitivity at LHC:



From *Nature* **560**, 41–48 (2018) |

→  $\sim 50\%$  gain on LHC running

# Apprentissage profond





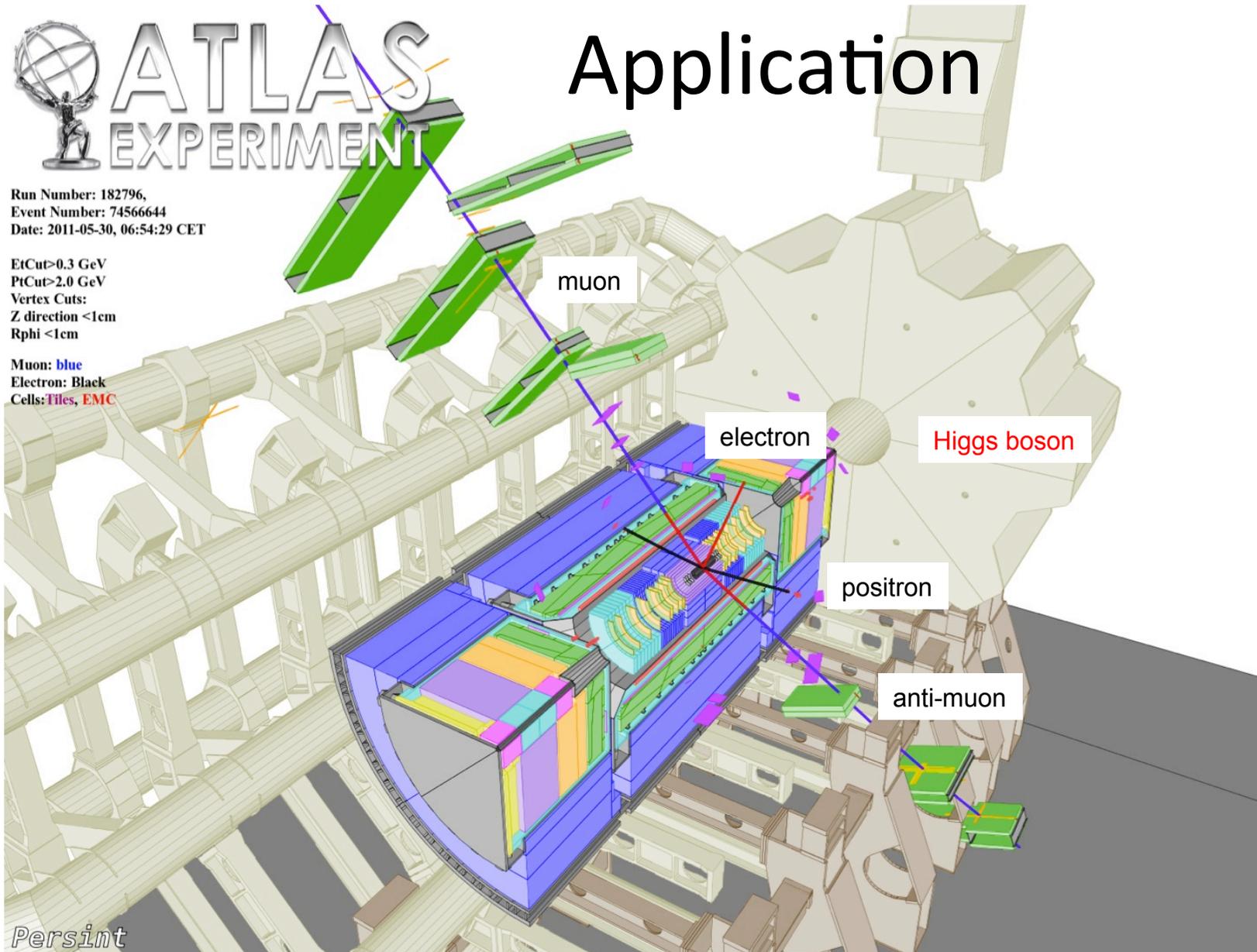
# ATLAS EXPERIMENT

## Application

Run Number: 182796,  
Event Number: 74566644  
Date: 2011-05-30, 06:54:29 CET

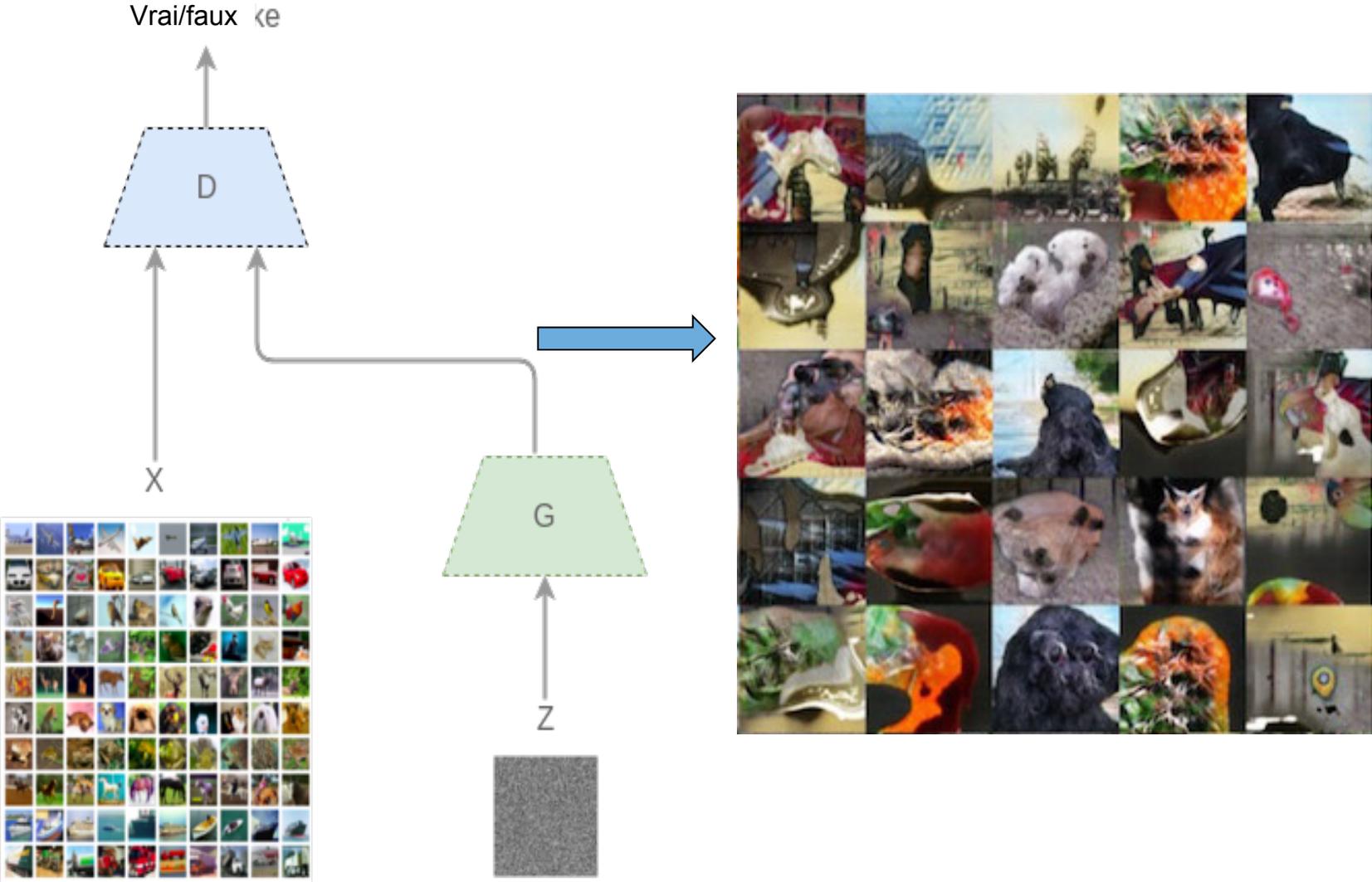
EtCut>0.3 GeV  
PtCut>2.0 GeV  
Vertex Cuts:  
Z direction <1cm  
Rphi <1cm

Muon: blue  
Electron: Black  
Cells: Tiles, EMC



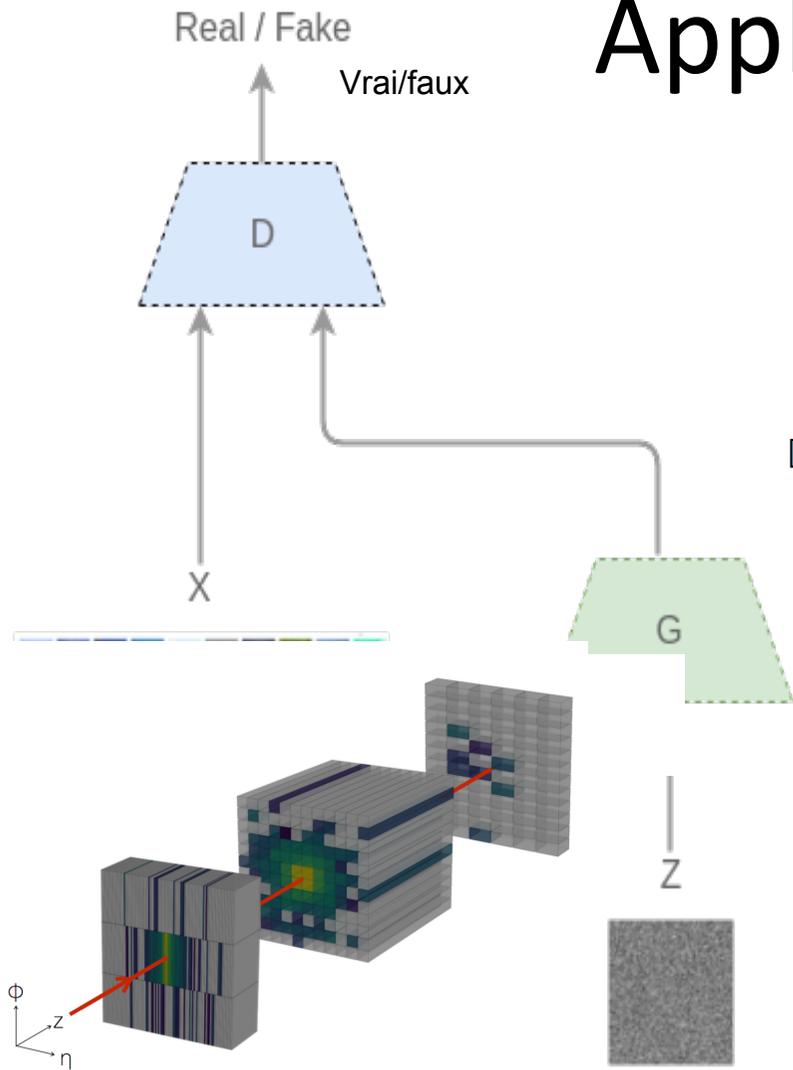
Persint

# Réseau Génératif Adversaire (GAN)

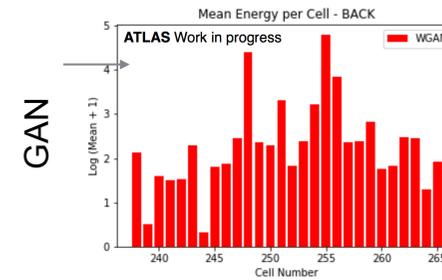
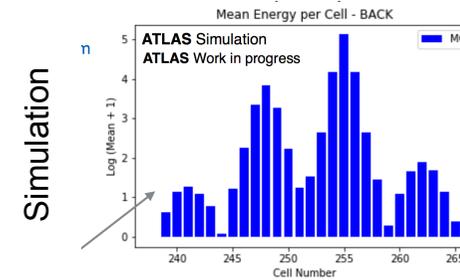
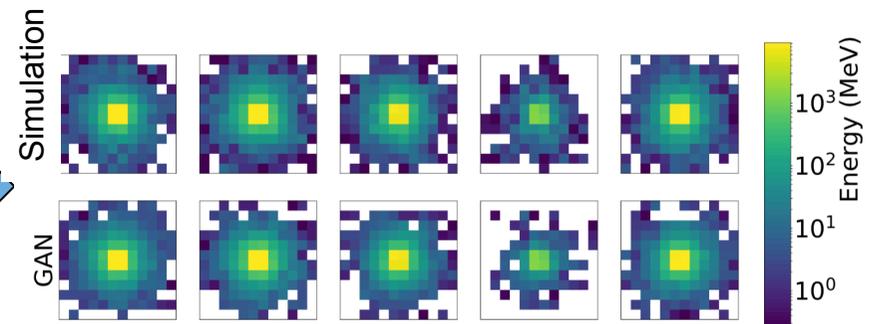


# Application: simulation

CaloGAN



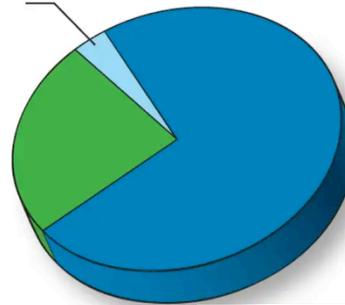
Gain en temps de calcul x1000



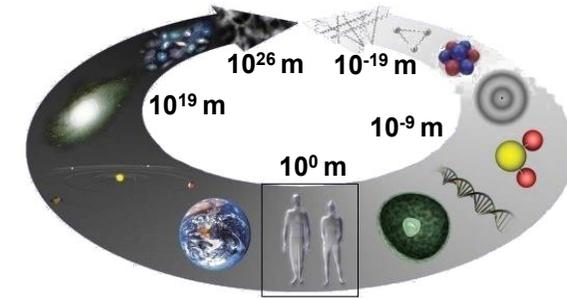


**Vincent Tatischeff :**  
*Des éléments et des étoiles*

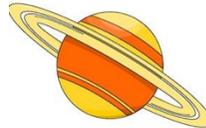
**Matière  
ordinaire 5%**  
**Matière noire  
29%**



**Energie noire  
66%**



- Matière ordinaire**



- Matière noire**

Détectée par son influence gravitationnelle ; n'interagit pas avec la matière ordinaire

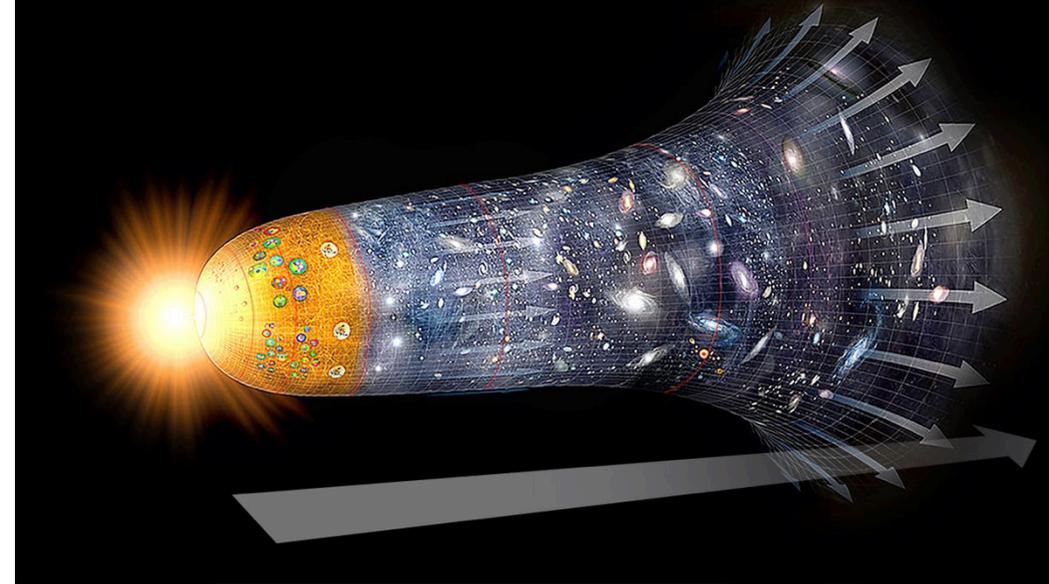


- Energie noire**

Energie hypothétique pour expliquer l'accélération de l'expansion de l'Univers

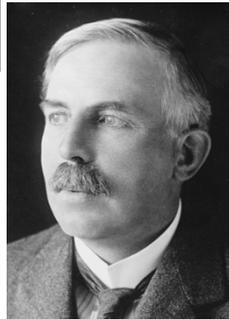
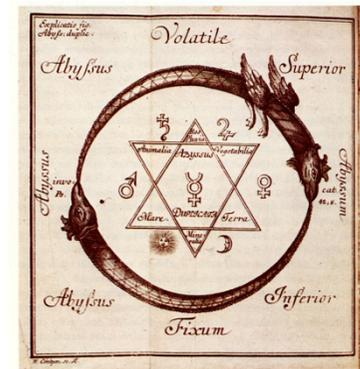
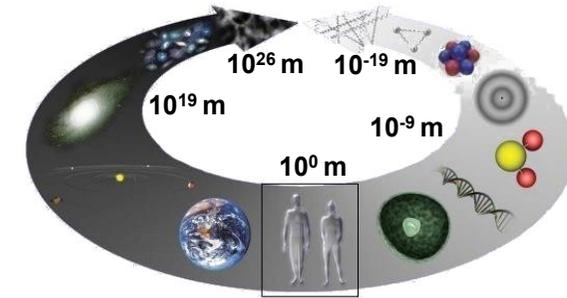


**Big Bang (début de l'Univers) il y a 13,8 milliards d'années**  
**Expansion accélérée depuis environ 5 milliards d'années**



... une question « vieille comme le monde »

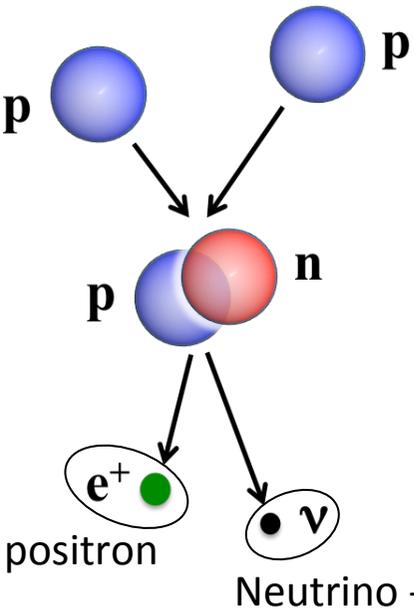
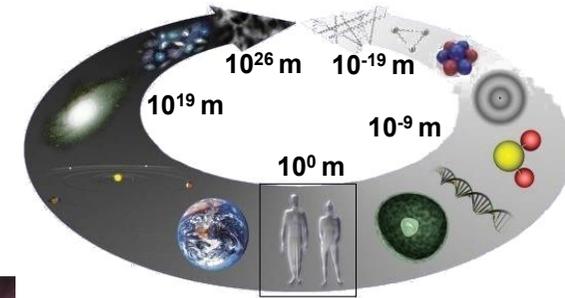
- **Anaxagore** (500 - 428 av. J.-C.) : « Rien ne naît ni ne périt, mais des choses déjà existantes se combinent, puis se séparent de nouveau »
- **Démocrite** (460 - 370 av. J.-C.) : « La liaison fortuite des est l'origine de tout ce qui est »
- Tentatives alchimiques infructueuses de **transmutation de la matière** (plomb → or) pendant plus de 2000 ans...



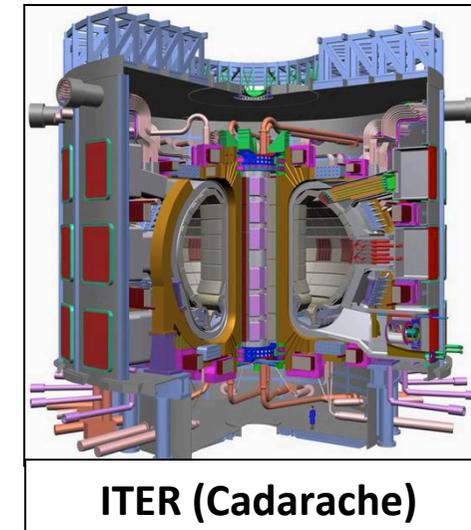
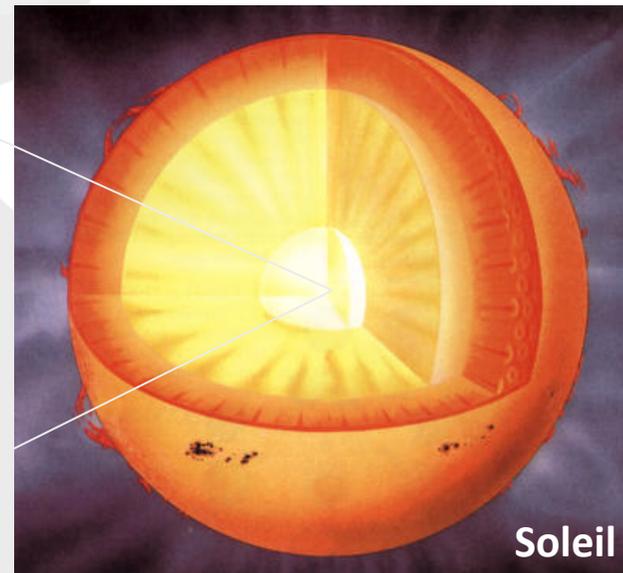
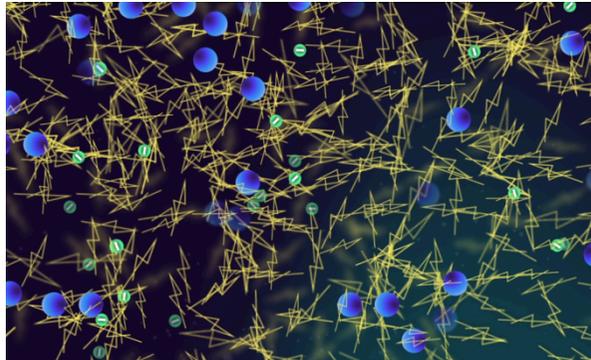
... jusqu'à la découverte de la **radioactivité** et des **réactions nucléaires**

- **1902** Rutherford & Soddy découvrent la **transmutation radioactive**  $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{228}\text{Ra} + \alpha$
- **1919** Rutherford & Blackett réalisent la 1<sup>re</sup> **transmutation artificielle**  $^{14}\text{N} + ^4\text{He} \rightarrow ^{17}\text{O} + p$

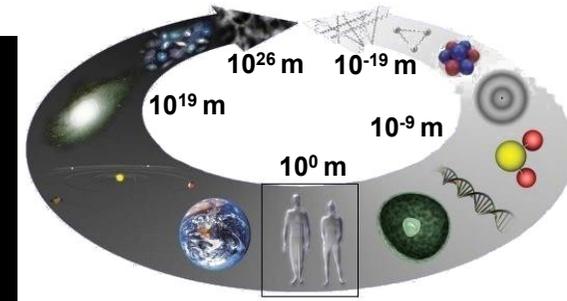
**1919** Jean Perrin, puis Arthur Eddington suggèrent que les étoiles tirent leur énergie de la fusion de noyaux d'hydrogène (protons)



Coeur du soleil à environ 15 MK



- Une étoile est un réacteur à **fusion thermonucléaire** stabilisé par sa gravité



Etoile comme le Soleil, qui brûle en son cœur l'hydrogène en hélium

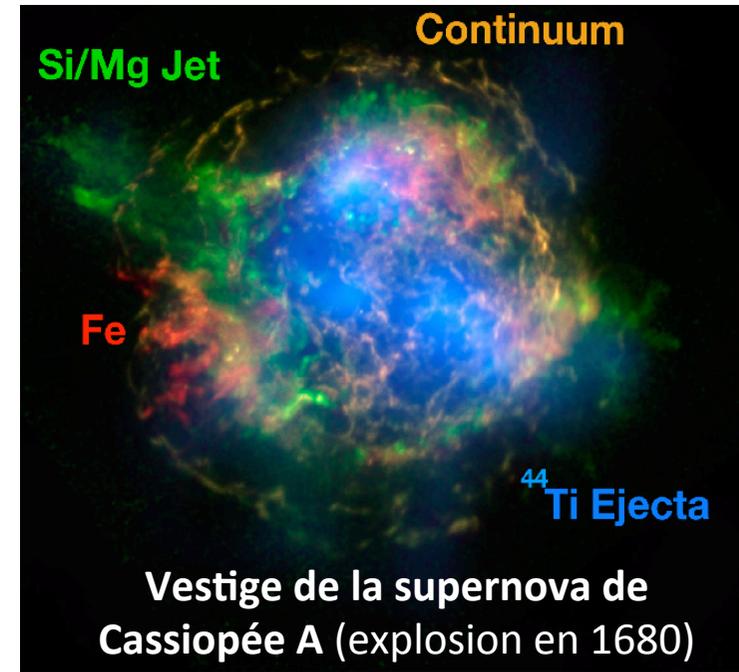
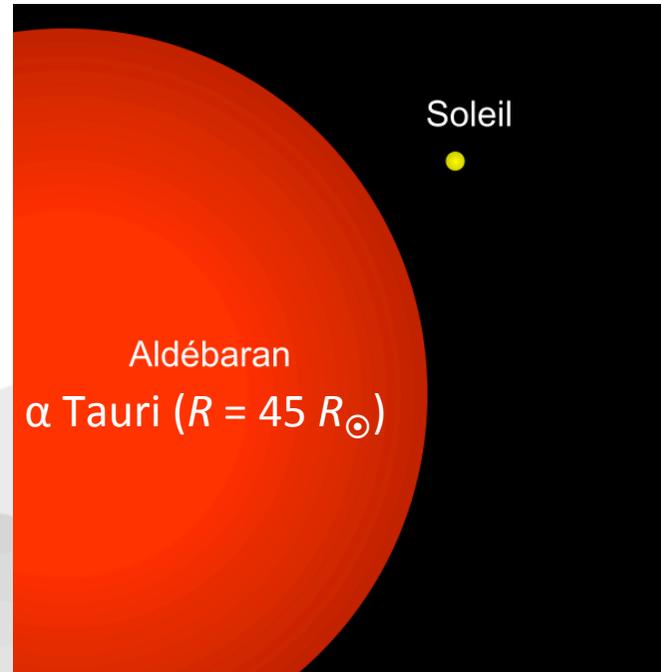
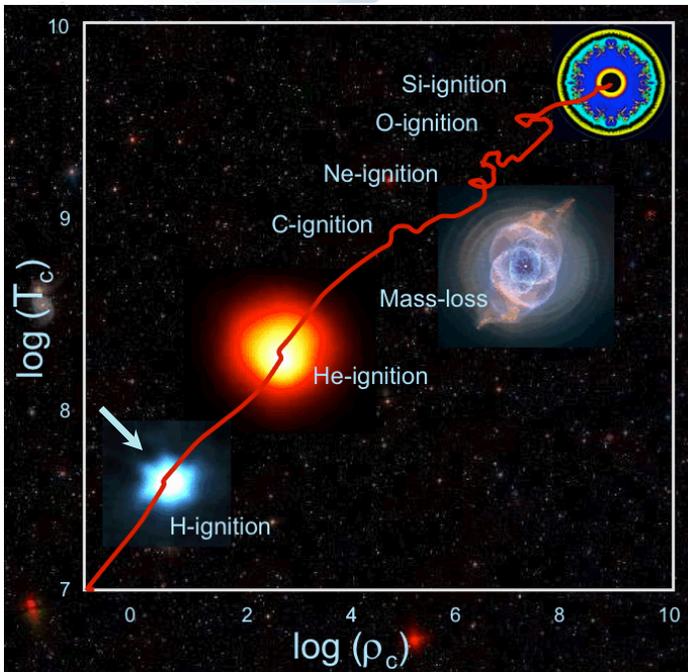
Etoile de la «branche horizontale», qui brûle en son cœur l'hélium en carbone et oxygène

Etoile «géante rouge» constitué d'un cœur d'hélium entouré d'une couche d'hydrogène en combustion

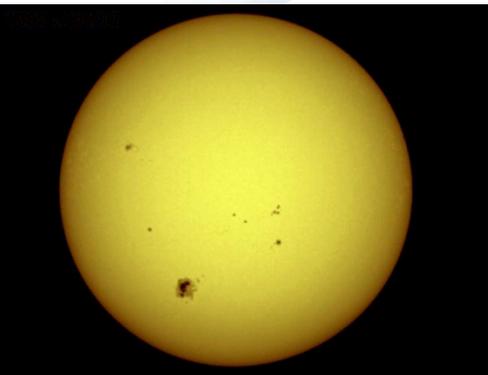
Constellation du Taureau

Amas globulaire M10





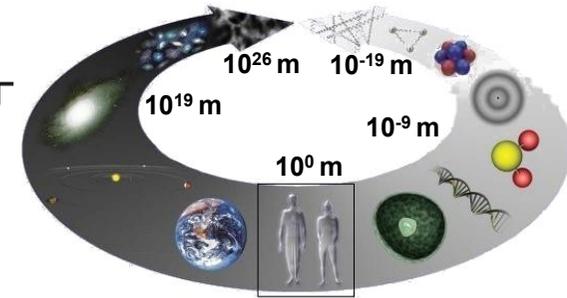
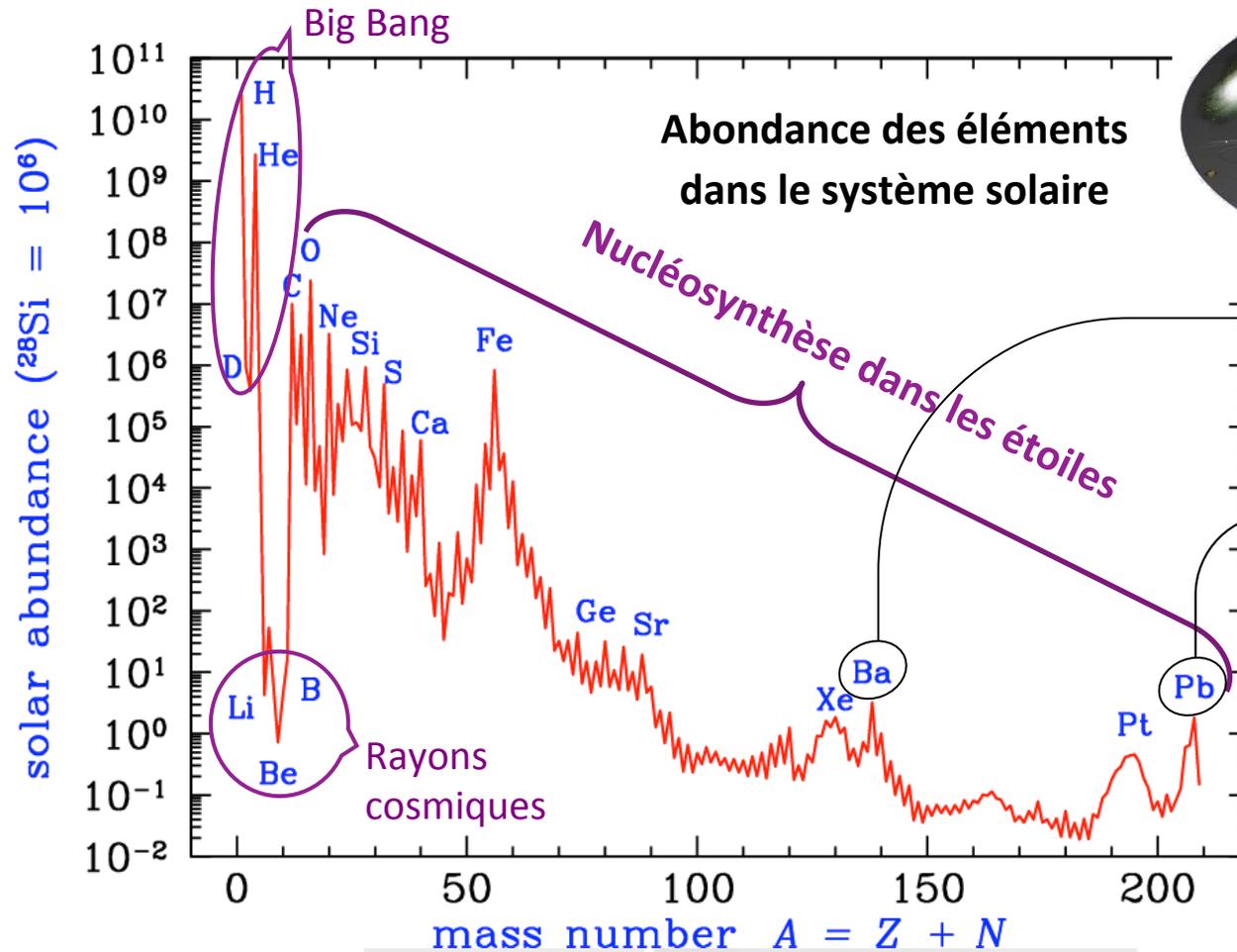
- Le Soleil deviendra une **géante rouge** dans 5 milliards d'années, son enveloppe gonflera alors jusqu'à atteindre l'orbite de Mercure, puis l'étoile évoluera en une **naine blanche** inerte
- Les étoiles de masse supérieure à 8 fois celle du Soleil finissent leur vie en **supernova**



La photosphère du Soleil

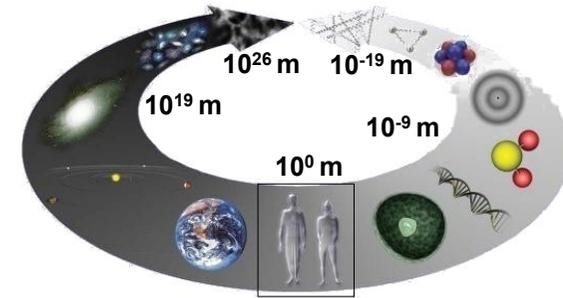


Fragment de la météorite d'Orgueil



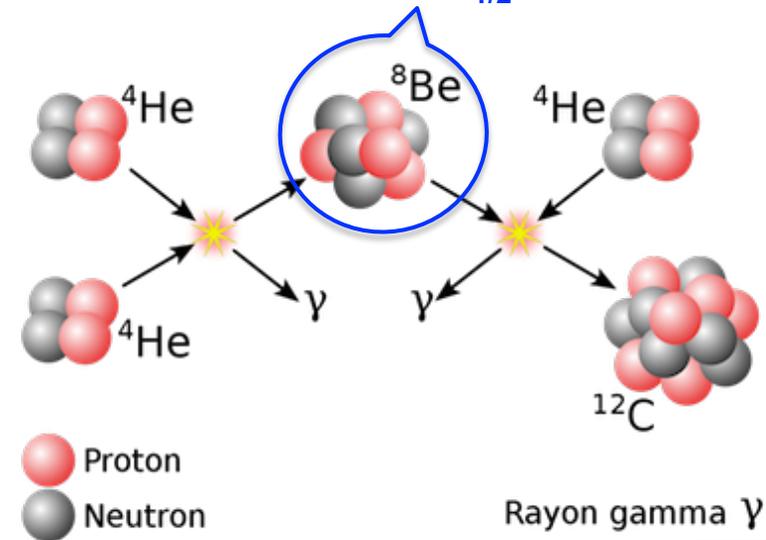
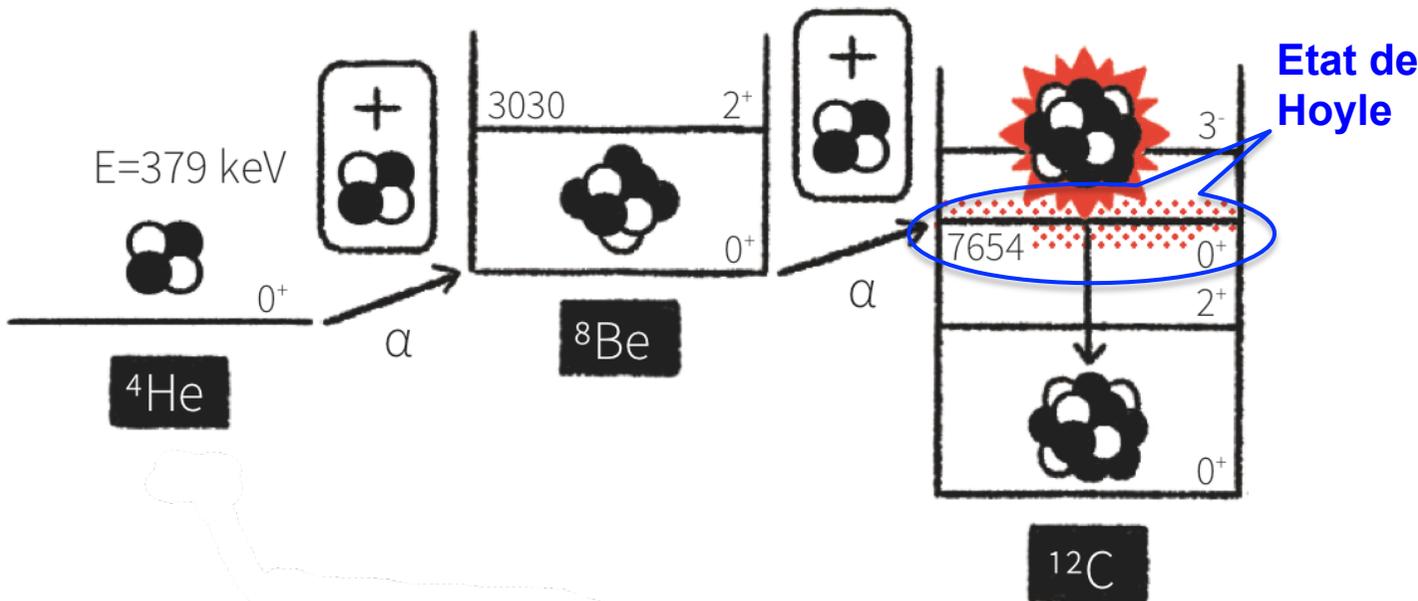
## L'état de Hoyle du carbone-12

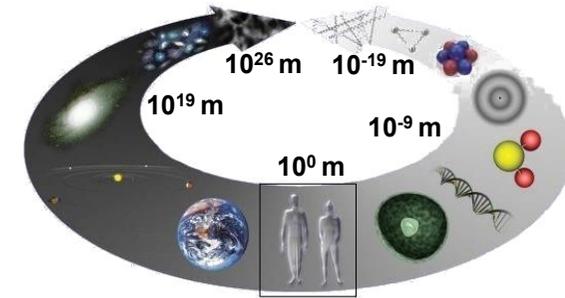
- $^{12}\text{C}$  (6 p et 6 n) est synthétisé par la fusion de 3 noyaux de  $^4\text{He}$  dans des cœurs stellaires à 100 millions de °K



- En 1954 **Fred Hoyle** prédit l'existence d'un **état excité du  $^{12}\text{C}$  à 7,7 MeV** pour expliquer l'abondance cosmique du carbone (4<sup>e</sup> élément le plus abondant ; chimie organique) => **fusion résonante** = bien plus probable
- L'état « de Hoyle » est mis en évidence par **Cook et al.** en 1957

Noyau instable (radioactif) de demi-vie  $T_{1/2} = 8,2 \times 10^{-17}$  s





- Les 2 « infinis » sont intimement liés :
  - Les propriétés macroscopiques des étoiles et de l'Univers dans son ensemble conditionnent les interactions entre particules élémentaires
  - En retour, la physique des particules et la physique nucléaire sont indispensables à la description de l'Univers
- Le livre « Etonnants Infinis » rend compte en trente courts chapitres des recherches actuelles dans ce domaine

