

# Particules et interactions



matière

molécule

atome

noyau

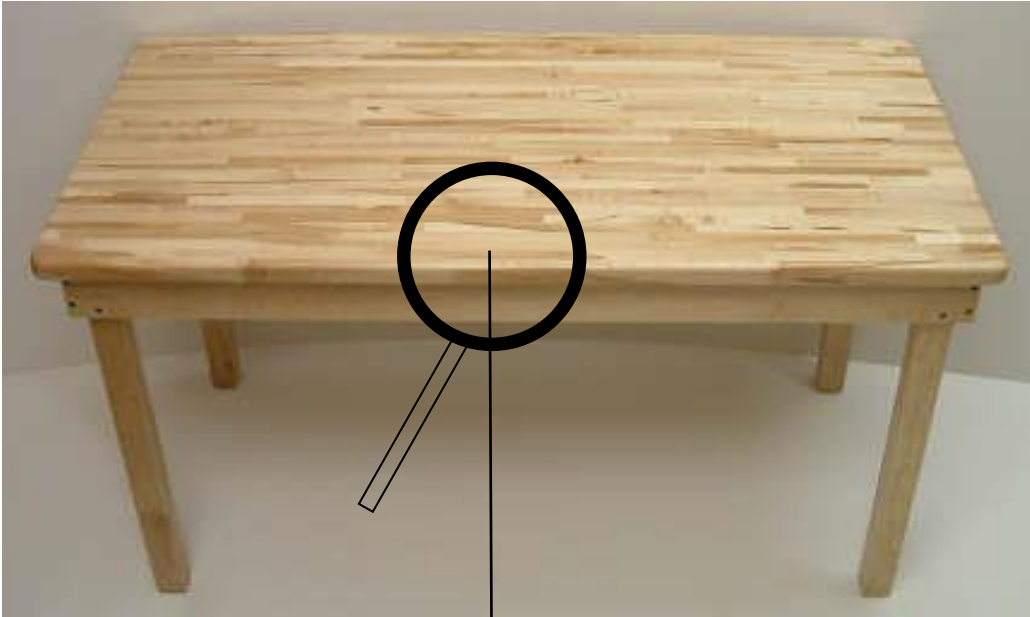
nucléon

quark

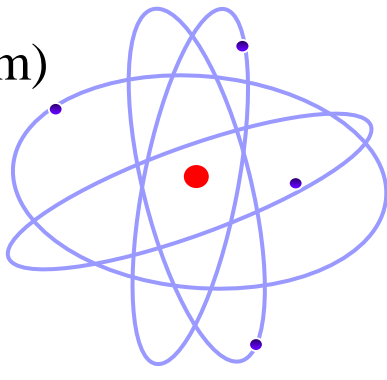
lepton

# Atome

- matière faite d'atomes
- atomes=noyau + et électrons -



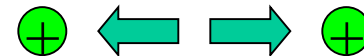
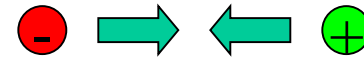
électrons  
(taille  $< 10^{-18}$  m)



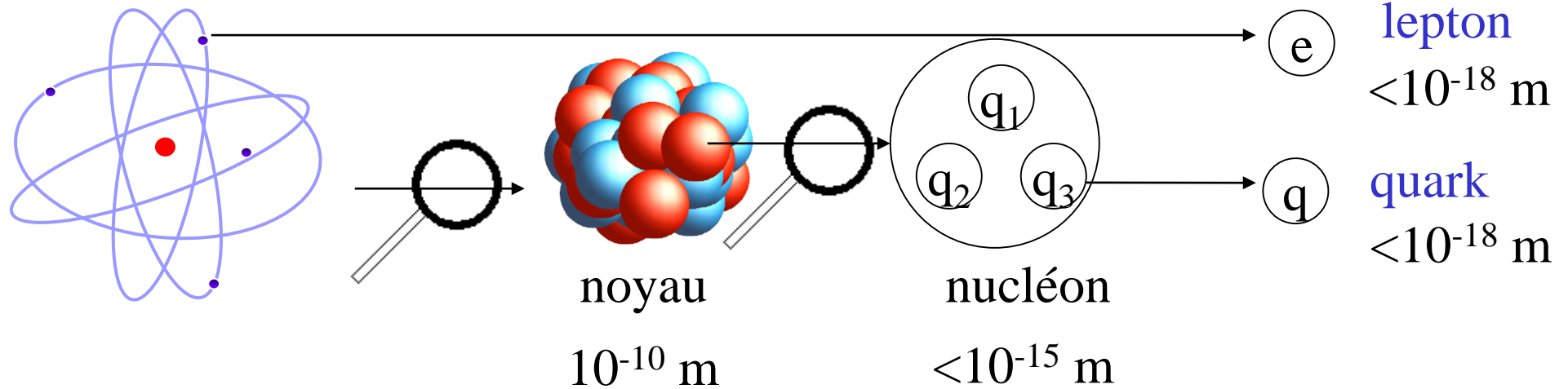
1 Angstrom  
( $10^{-10}$  m)

Noyau  
( $10^{-14}$ - $10^{-15}$  m)

99.9 % masse de l'atome



# Dans l'atome

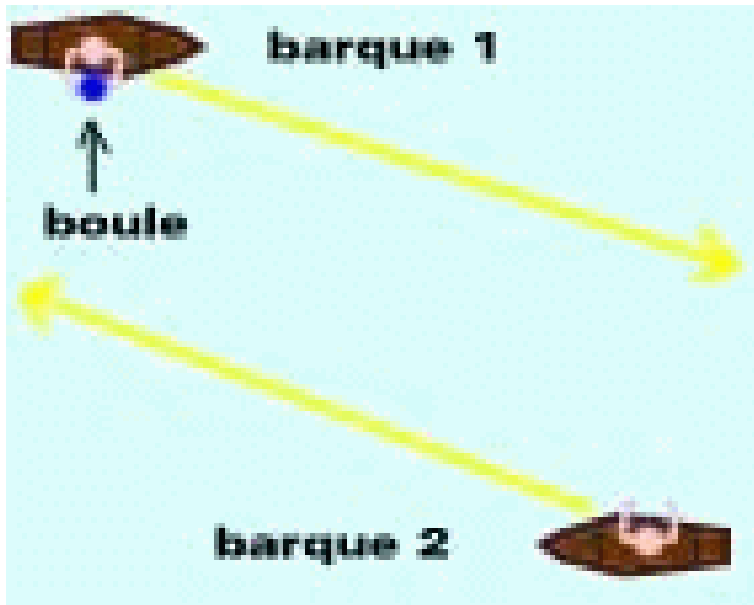


- électrons : famille des leptons (e,  $\mu$ ,  $\tau$ , et neutrinos)
- noyau : nucléons :
  - proton (chargé +)
  - neutron (neutre)
  - constitué de quarks [il existe 6 quarks : u, d, s, c, b, t et  $\bar{q}$ ]  
(proton : u, u, d, neutron : d, d, u)
  - quarks n'existent pas à l'état libre : hadrons (assemblage)

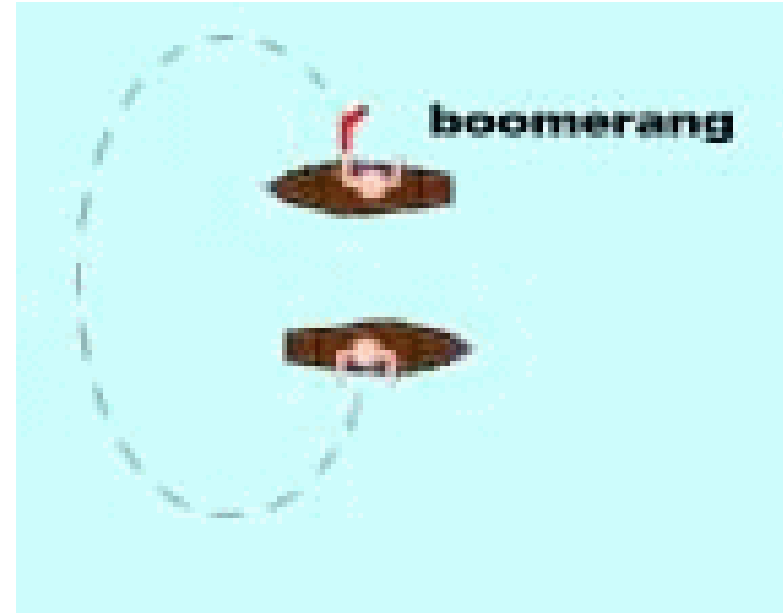
# Les interactions

Interaction particules par échange d'autres particules : bosons de jauge ('bosons vecteur')

Répulsion par échange d'une boule



Attraction par échange d'un boomerang



• Barque → particules matière (« fermion »)



Fermi

• Boule/boomerang → particule médiatrice (« boson »)



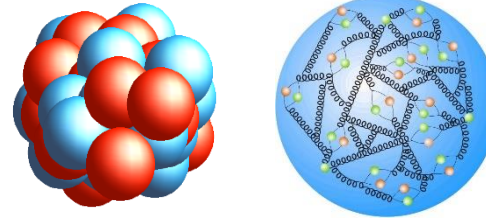
Bose

# Les interactions

- Interaction forte

Stabilité noyaux et proton

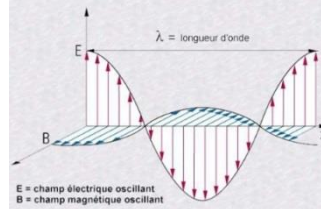
Médiateur : gluons (g), portée :  $10^{-15}$  m



force  $\sim 1$

- Interaction électromagnétique

électricité, magnétique, lumière (onde électromagnétique), chimie



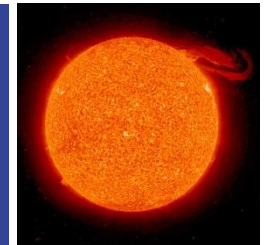
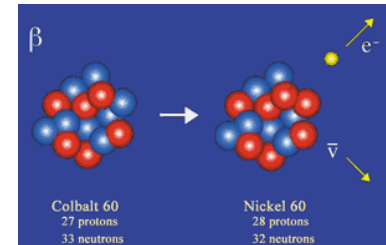
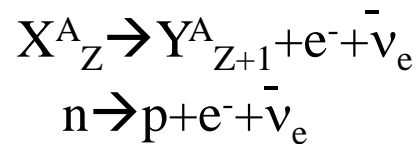
force  $\sim 10^{-3}$

Médiateur : photon ( $\gamma$ ), masse : nulle, portée : infinie

- Interaction faible

Radioactivité  $\beta$

Réactions nucléaires soleil



Médiateurs : bosons W et Z ( $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$ ), masses : lourds, portée :  $10^{-18}$  m

force  $\sim 10^{-5}$

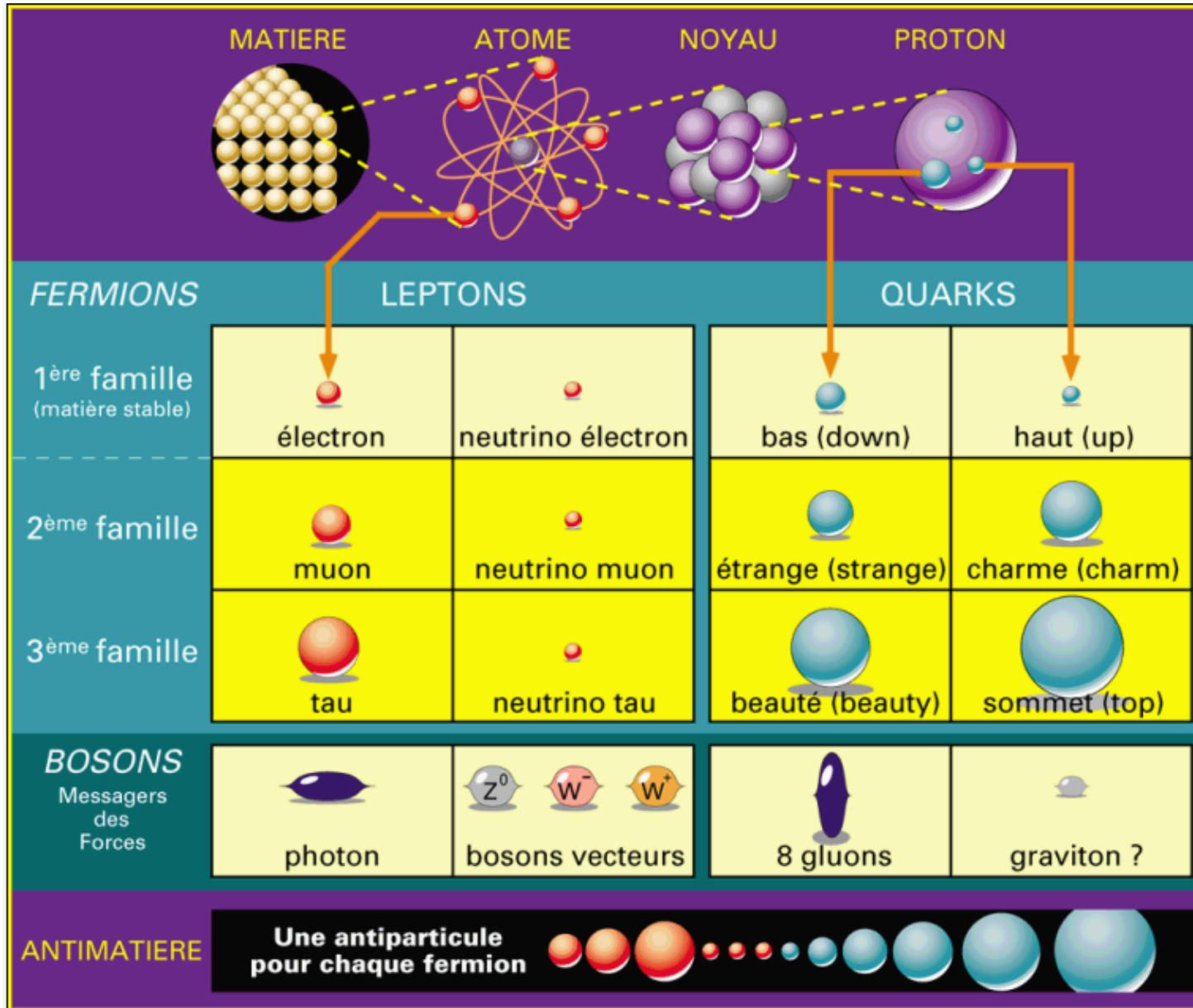
- Interaction gravitationnelle



Médiateur : graviton [jamais observé, mais onde gravitationnelle observée]

force  $\sim 10^{-38}$

# Les interactions

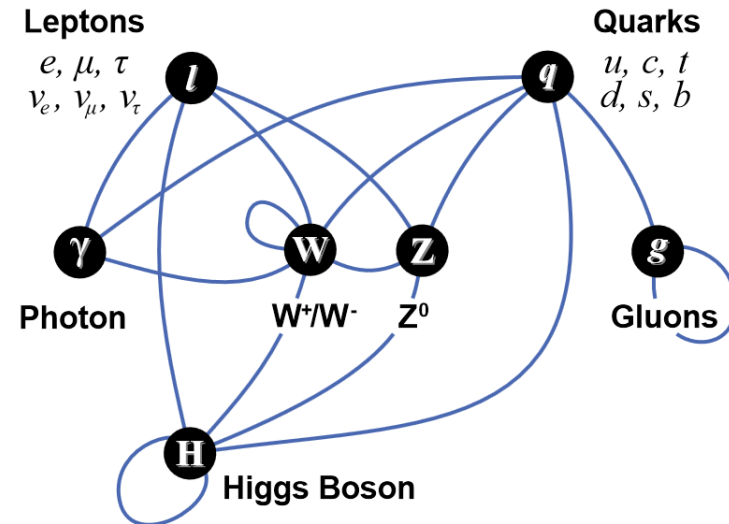


# Modèle Standard

- élaboré années 1960-1970

Description comportement particules et interactions (sauf gravitation)

- Testé avec précision
- Interactions entre diverses particules

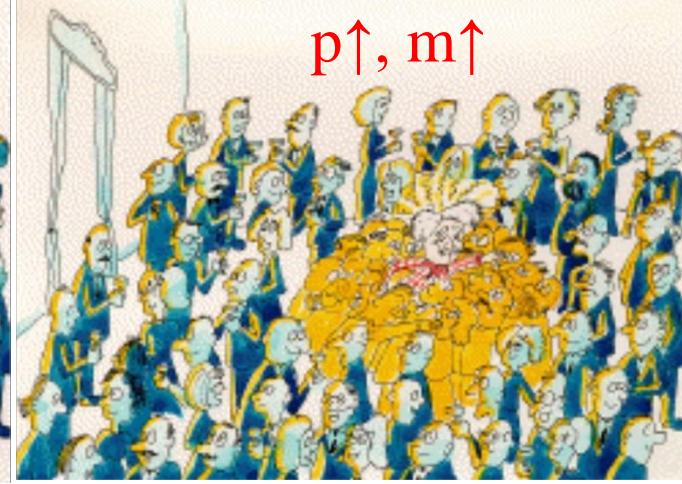


- Masse particules : Mécanisme de Brout, Englert, Higgs  
→ boson de Higgs

# Vulgarisation : mécanisme de Higgs

Résoudre le problème de la masse des particules [Brout, Englert, Higgs]

Résoudre le problème de la divergence de  $W_L W_L \rightarrow W_L W_L$





# Higgs : plus de détails

1929 : Weyl, London : MQ de électromagnétisme (électrodynamique quantique)

Lagrangien Dirac  $\mathcal{L}_e^{(0)}(x) = \bar{\psi}(x) (i\gamma^\mu \partial_\mu - m_e) \psi(x)$

- Invariant avec transformation globale
- Non invariant avec transformation locale

$$\psi(x) \rightarrow e^{i\alpha} \psi(x)$$

$$\psi(x) \rightarrow e^{i\alpha(x)} \psi(x)$$

$$\mathcal{L}_e^{(0)}(x) \rightarrow \bar{\psi}(x) (i\gamma^\mu (\partial_\mu + i(\partial_\mu \alpha(x))) - m_e) \psi(x)$$

Lagrangien non conservé :

Nécessité lois de physique immuables : solution : modifier terme dérivée et ajout champ A

$$\partial_\mu \rightarrow D_\mu = \partial_\mu - ieA_\mu(x) \quad A_\mu(x) \rightarrow A_\mu(x) + \frac{1}{e} \partial_\mu \alpha$$

- Approche similaire pour interaction faible et forte
- Ajout à théorie champ scalaire (Higgs)

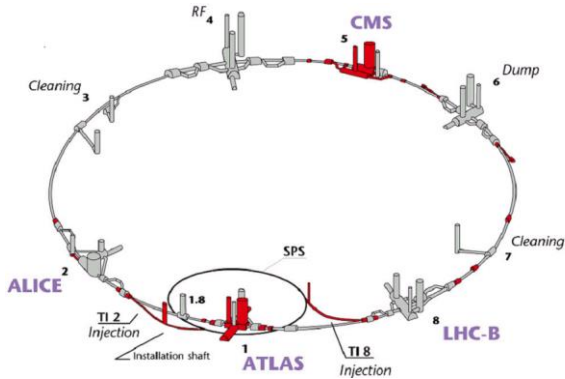
$$\mathcal{L} = \partial_\mu \phi^\dagger \partial^\mu \phi - \mu^2 \phi^\dagger \phi - \lambda(\phi^\dagger \phi)^2$$

Grâce aux dérivées covariantes précédemment introduites, terme cinétique du Higgs fait apparaître ‘par magie’ : masses aux bosons W, Z, pas de masse pour photon

# Démarche pour recherche particule

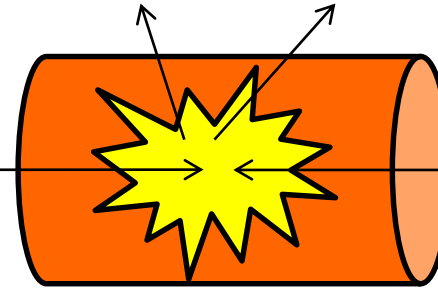
- Accélérateur : accélérer particules : linéaire, circulaire, ou naturel (cosmos)

exemple : LHC



- Détecteur au point de collision

particules  
projectiles

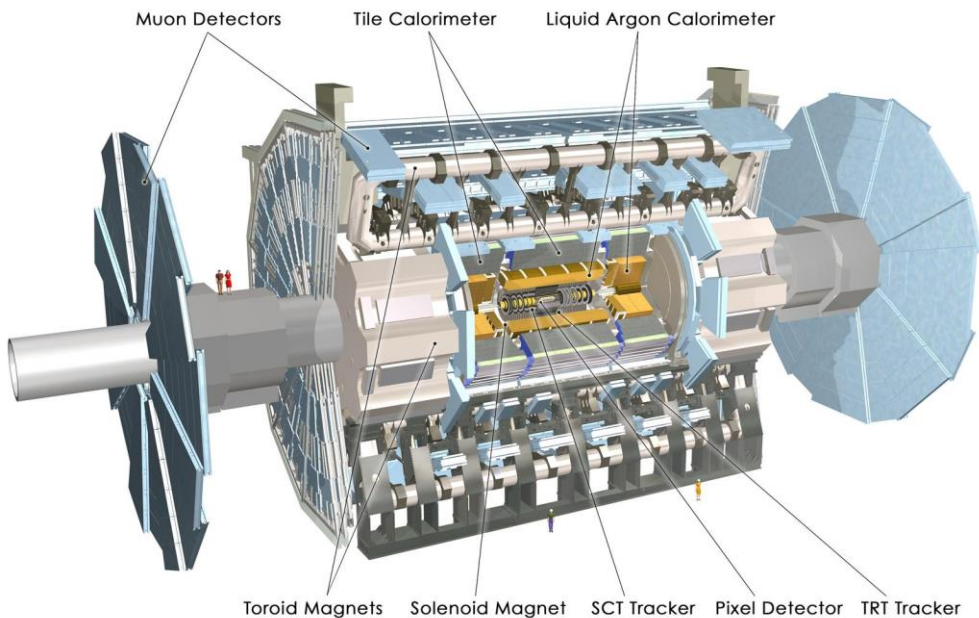


particules  
projectiles

détecteur

interaction

Exemple : ATLAS

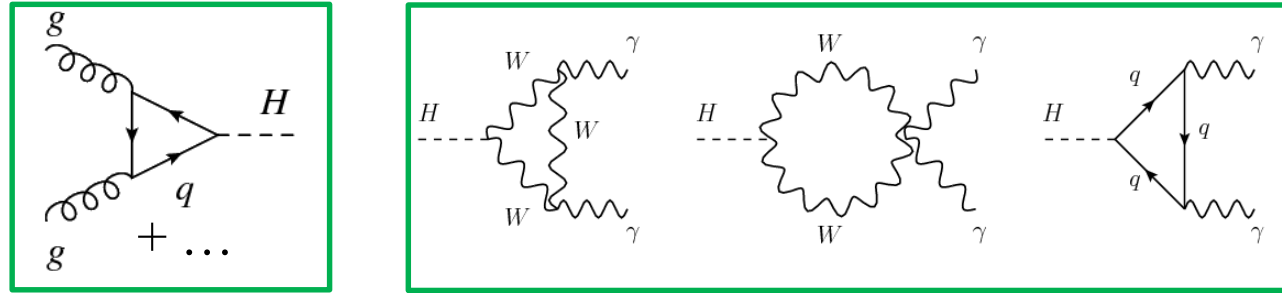


- Connaissance des lois d'interaction particules/matière

# Signal et bruit de fond

- Canal de physique / **signal** : processus production et désintégration état final

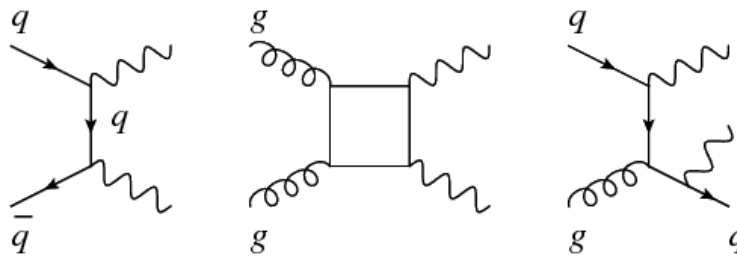
eg : Higgs in photon pairs



- Bruit de fond** : processus  $\neq$  signal, mais avec même état final que signal

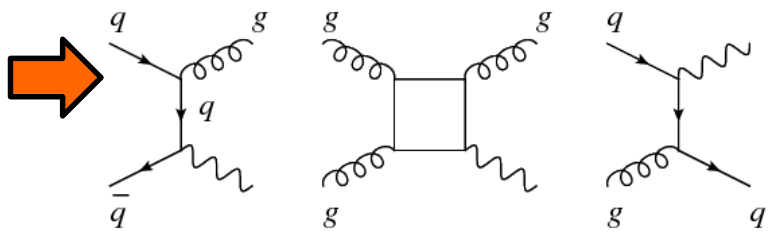
-intrinsèque : **irréductible**

eg : diphotons

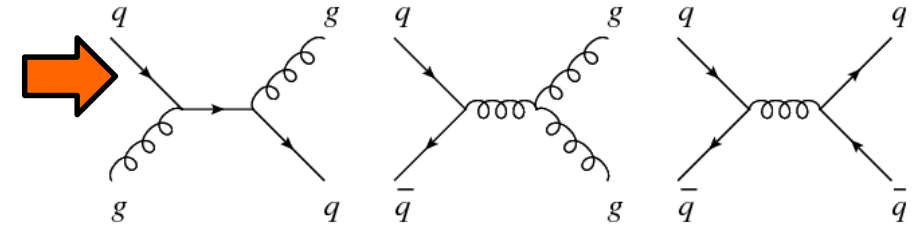


-lié aux performances limitées du détecteur : **réductible**

eg :  $\gamma$ +jets



eg : dijets



Topologie/coupures :  $\downarrow$  bruit de fond, bonne efficacité signal : **signature**

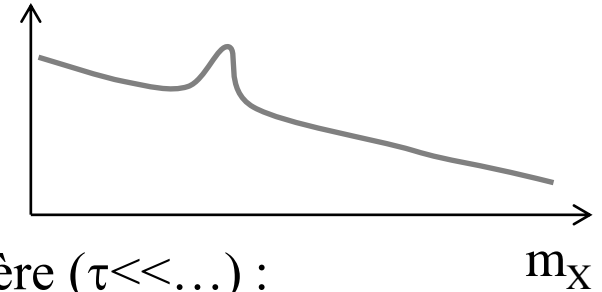
# Variables discriminantes

Variable discriminante typique : masse invariante événements

• Particule de signal X : mass :  $m_X$

Einstein : au repos :  $E_X = m_X c^2$

cas général :  $E_X^2 - \vec{p}_X^2 = m_X^2 c^4$



En général, on n'a pas directement la particule candidate mère ( $\tau \ll \dots$ ) :

on a ses produits de désintégration

→ utilisation du système objets état final i :

Au repos :  $\sum_i E_i = mc^2$

cas général :  $(\sum_i E_i)^2 - (\sum_i \vec{p}_i)^2 = m^2 c^4$

Cas concret : quantité de données non infinie : fluctuations

Si excès apparaît : cela peut être :

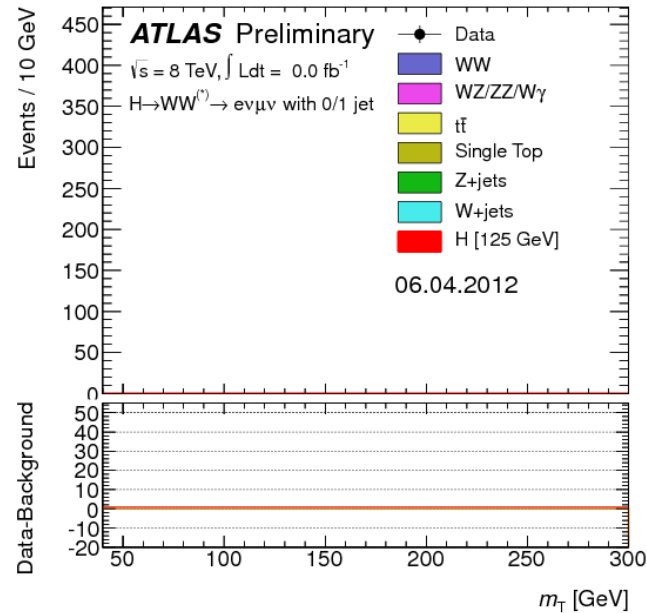
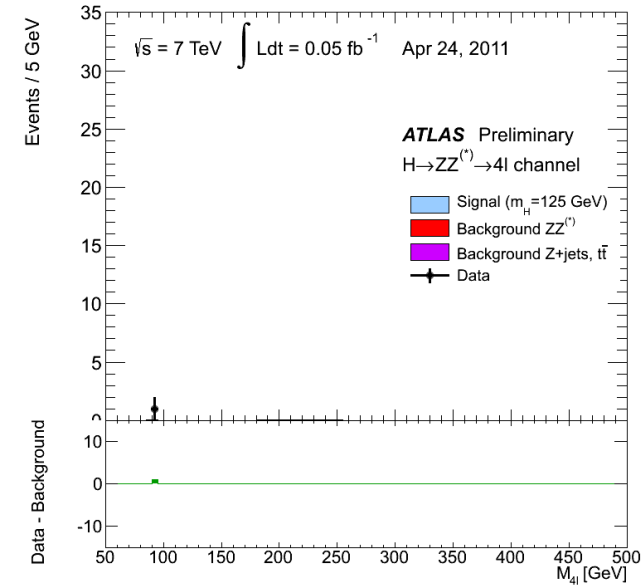
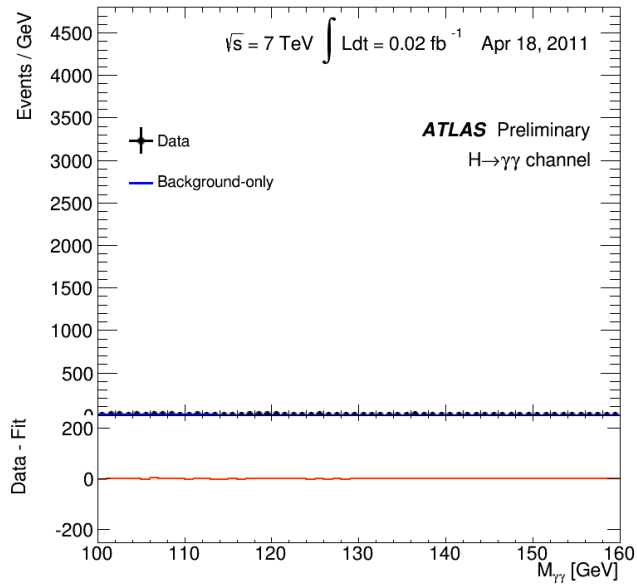
-fluctuation statistique de mécanique quantique

(plus il y a de données, moins il y a de fluctuations)

-artefact (biais coupures, reconstruction, problème, systématique, erreur, etc.)

# Variables discriminantes

Evolution  $m_{inv}$  pour ATLAS en 2011, 2012, différentes recherche Higgs ( $m_H \approx 125$  GeV)



# Conclusion

- Matière constituée de briques fondamentales :
  - fermions (matière)
  - bosons de gauge (interaction)
- Modèle Standard : cadre théorique décrivant comportement des particules
- Masse des particules apportée par boson de Higgs
- Comprendre nature : utilisation d'accélérateurs et de détecteurs pour :
  - observer des phénomènes nouveaux
  - mesurer avec davantage de précision les phénomènes connus
- Déviation par rapport modèle Standard  $\Leftrightarrow$  'nouvelle physique'



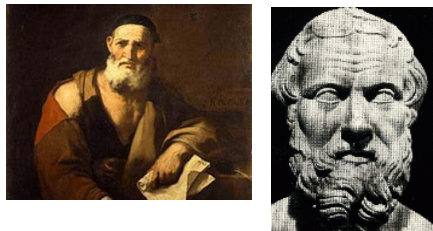
# Précurseurs



- Empédocle (~-493;-433)
- Aristote (- 384; - 322 ; Grèce)

4 **éléments**: air, terre, eau, feu  
(et caractéristiques)  
+ quintessence (constit. astres)~éther  
matière **continue**

objets médiateurs (**interactions**) entre éléments:  
-amour (**attraction**)  
-haine (**répulsion**)



- Leucippe (~ -460;~-370)
- Démocrite (son disciple) (~-460;~-370)
- limite à division corps : atome
- matière **discontinue**

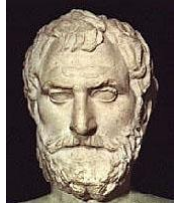
Reprend idées de :

- Thalès de Milet (eau) ;
- Anaximandre de Milet (apeiron=infini)
- Anaximène de Milet/Diogène d'Apollonie (air)
- Héraclite d'Ephèse/Hippasos de Métaponte (feu)





# ~2000 ans pour aboutir à vision de l'atome

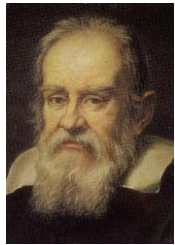


Thalès de Milet (~-600)

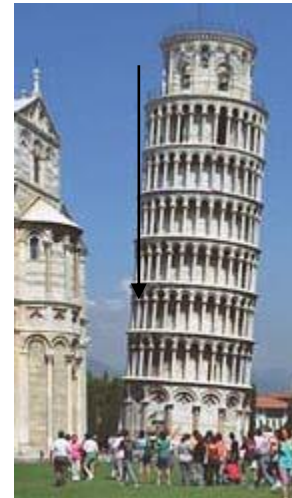
-ambre (résine végétale restée longtemps dans terre)  
frottement peau de chat → attire tissus/plumes → **électricité**



-Pierre d'aimant : attire limaille de fer → **magnétisme**



Galilée, 1602, « tour de Pise »  
(en fait tour Padoue)  
1604, mouvement sur plan incliné



Newton, 1687  
→ **gravitation**



~1800 : Dalton, divers atomes

Rutherford, 1911 : noyau

