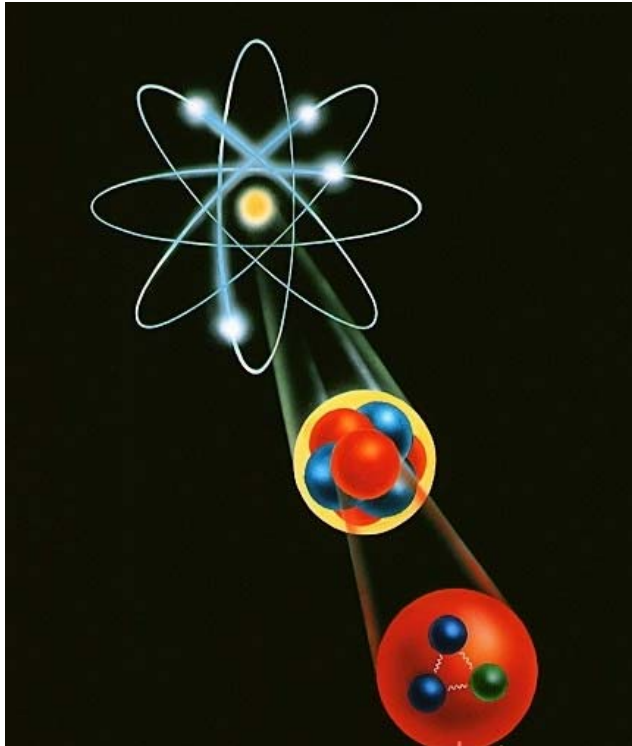


# Jouer aux cartes avec des particules



## 64 cartes:

- + tous les constituants élémentaires
- + les 3 forces

## 32 cartes: on met de côté l'interaction forte

Plusieurs jeux possibles:

- + 7 familles (se familiariser)
- + Quark poker (poker)
- + Collisions (dominos)

Avril 2012

**Faire passer de manière ludique différents concepts de physique.**

*(structure intime de la matière, forces, lois de conservation, radioactivité, matière/antimatière, accélérateurs, ...)*

[elementaire@lal.in2p3.fr](mailto:elementaire@lal.in2p3.fr)

<http://elementaire.lal.in2p3.fr/>



# Rubriques

## Séance 1

- + que sont les constituants élémentaires?
- + les interactions ?
- + une famille de particules
- + description des cartes pour les constituants
- + les antiparticules
- + les différentes familles
- + réactions entre particules
- + pourquoi étudier les particules élémentaires?
- + combinaisons de 2 à 5 cartes
- + le “Quark Poker”.



## Séance 2

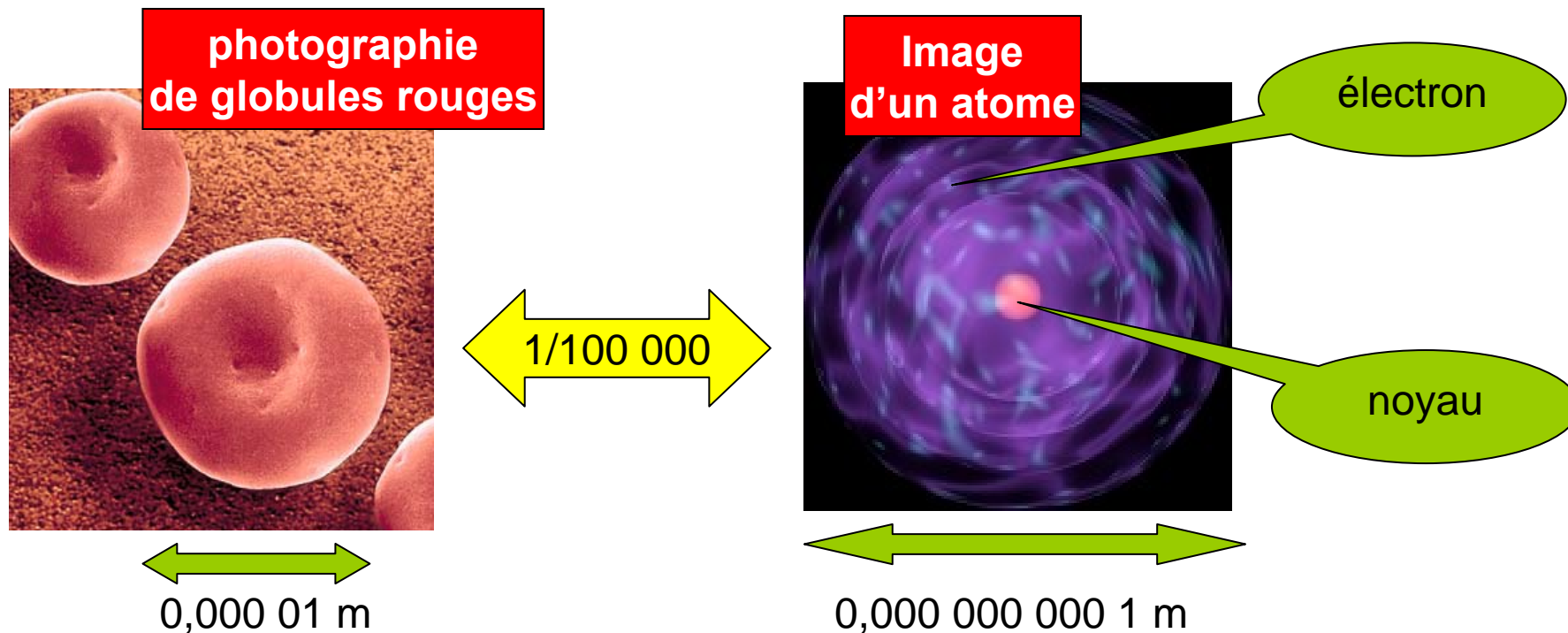
- + le jeu “Collisions”
- + le LHC
- + l’expérience ATLAS
- + démarrage de la collision
- + évolution de la collision
- + séance de jeux

# Qu'est-ce qu'une particule élémentaire?

**particule:** petit morceau de matière

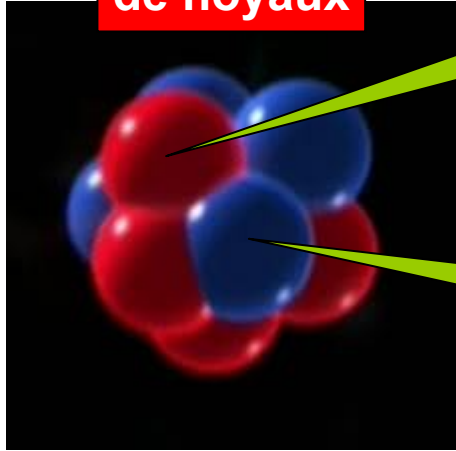
**particule élémentaire:** constituant de la matière que l'on ne peut pas couper (actuellement)

La notion de particule élémentaire a évolué avec le temps: pour les Grecs l'atome était quelque chose que l'on ne pouvait pas diviser.



# Qu'est-ce qu'une particule élémentaire (p.e.)?

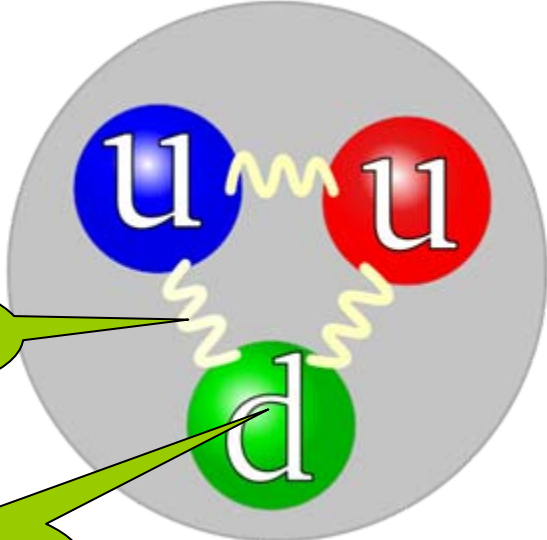
Images de noyaux



proton

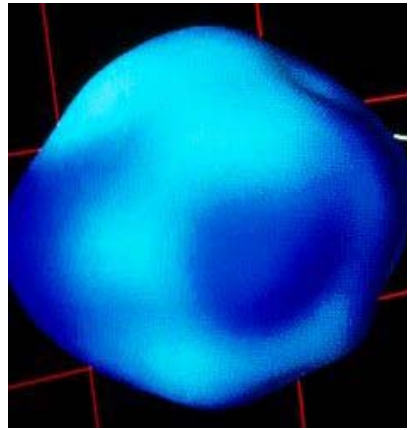
neutron

Image du proton



gluon

quark



0,000 000 000 000 01 m

taille des quarks **inférieure** à  
0,000 000 000 000 000 001 m

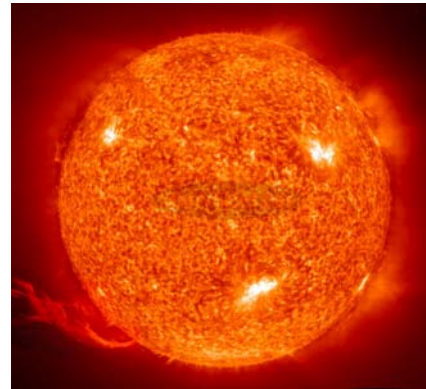
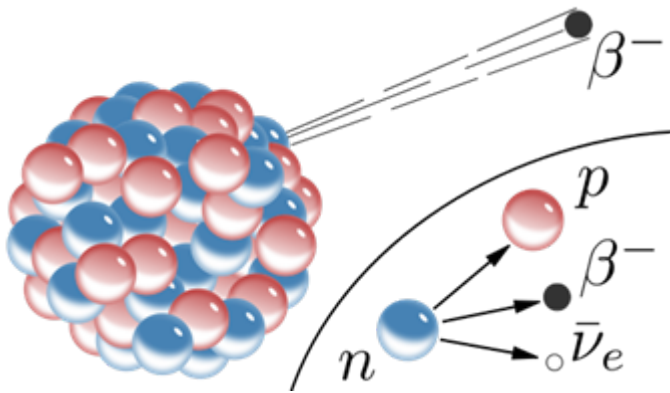
**électron, quark, gluon  
sont des particules élémentaires**

# Les interactions

Les p.e. interagissent entre elles par 3 forces.



**colorée**  
**(forte)**

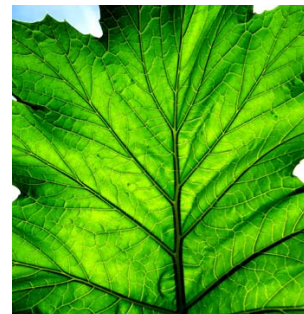
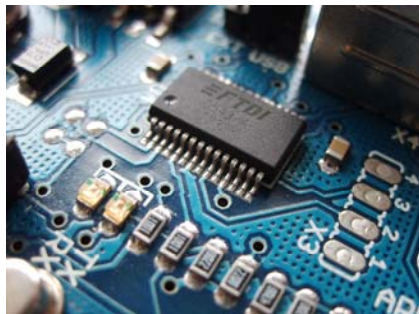


**non colorée**

**faible**

**électro-**  
**magnétique**

**unifiées (~1970)**





# Les interactions

Peut-on exister sans interagir?

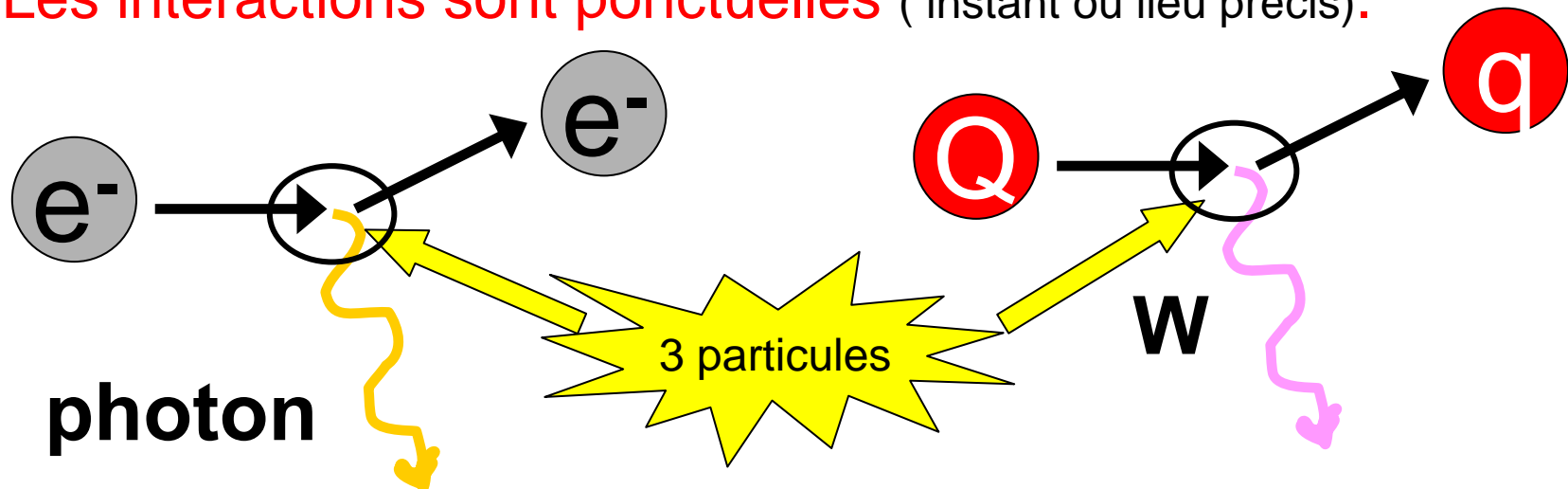
Les interactions obéissent à des règles.

Exemples:

- l'énergie de départ est égale à l'énergie finale
- une particule neutre n'a pas d'interaction électromagnétique
- la charge électrique de départ est égale à la charge électrique finale

Les interactions sont transmises par des particules élémentaires ( Ex: le photon transmet l'interaction électrique, le W transmet l'interaction faible)

Les interactions sont ponctuelles ( instant ou lieu précis).



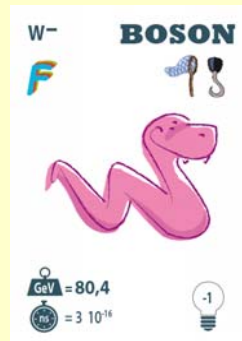
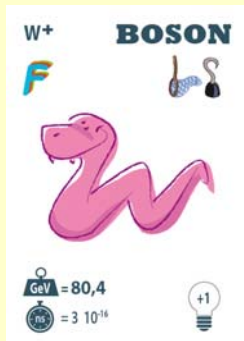
# Les interactions sont véhiculées par des particules



colorée  
(forte)



... il y en a 8



non colorée

faible



électro-  
magnétique

unifiées (~1970)

# Jeux avec 32 cartes





On se limite à 2 interactions: électromagnétique et faible

L'interaction forte n'est cependant pas totalement absente on va distinguer les particules ayant une telle interaction (fond coloré) de celles qui n'en ont pas (fond blanc ou gris).



# Une première famille de particules

## La famille Plume

<p>Up <b>PLUME</b></p>  <p>GeV = 0,002 = stable</p> <p>+2/3</p>	<p>Down <b>PLUME</b></p>  <p>GeV = 0,005 = 10</p> <p>-1/3</p>	<p>Neutrino <b>PLUME</b> Électron</p>  <p>GeV &lt; <math>2 \cdot 10^{-10}</math> = inconnue</p> <p>0</p>	<p>Électron <b>PLUME</b></p>  <p>GeV = 0,0005485799 = stable</p> <p>-1</p>
--	--	---	---

les rouges

les gris

quarks

leptons


# Une première famille de particules

## La famille Plume

« inventé » par le théoricien W. Pauli (1930).  
Observé en 1956 par F. Reines et C. Cowan.




Up **PLUME**



GeV = 0,002  
= stable

+2/3


Down **PLUME**



GeV = 0,005  
= 10

-1/3

Neutrino **PLUME**



Electron

GeV < 2 10<sup>-10</sup>  
= inconnue

0

Électron **PLUME**

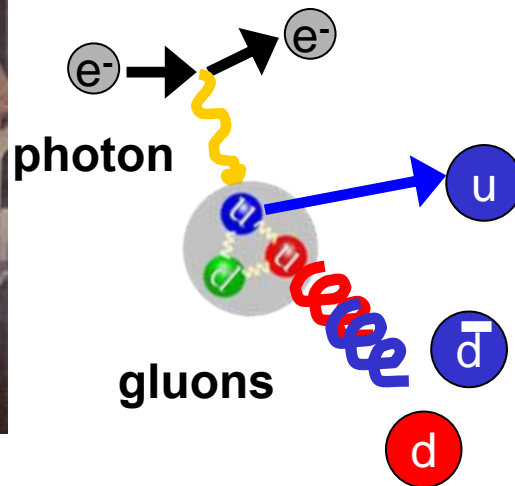


GeV = 0,0005485799  
= stable

-1

découverts en 1967 à SLAC (USA)

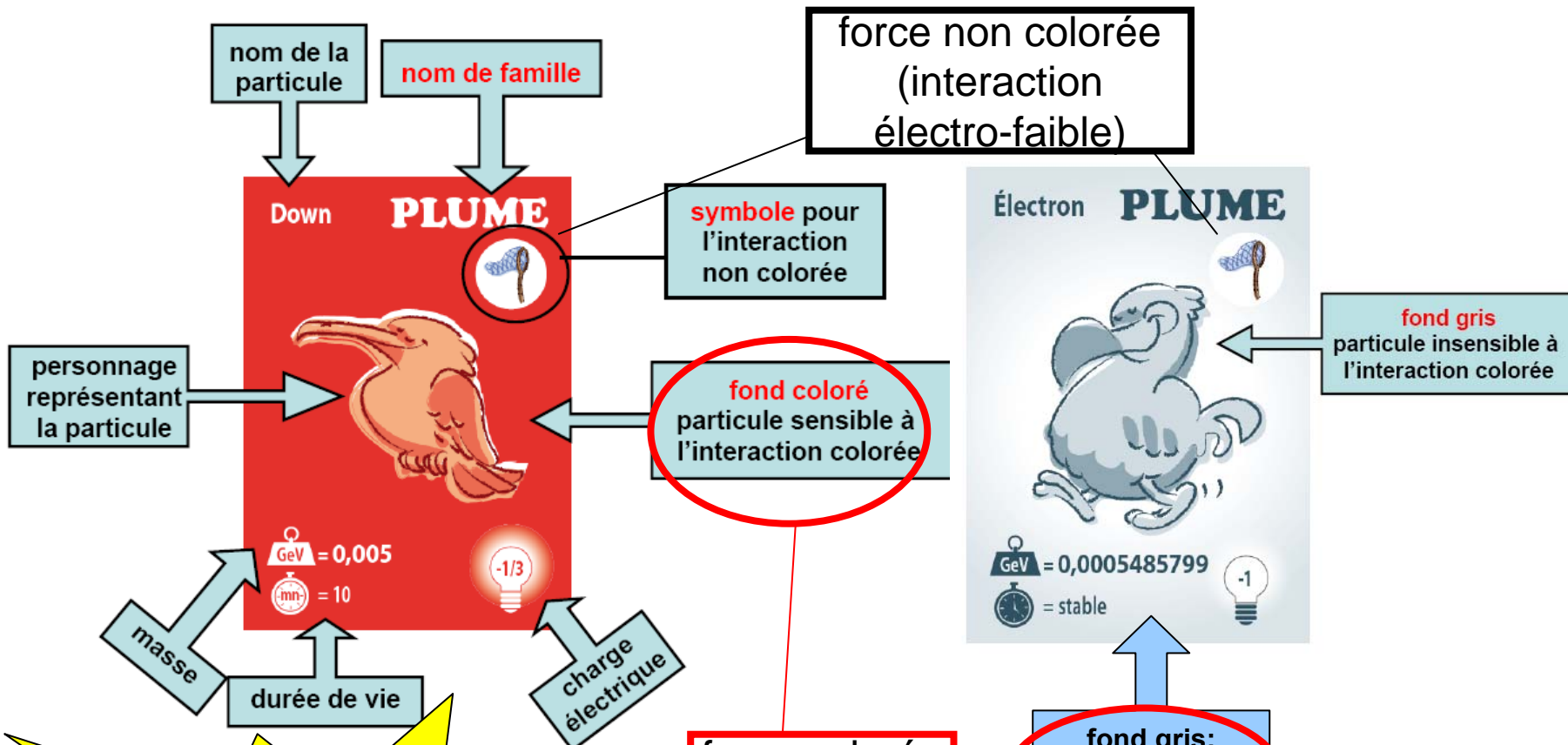
la plus ancienne p.e. connue (J.J. Thomson, 1897)



les quarks n'existent pas à l'état libre

particules

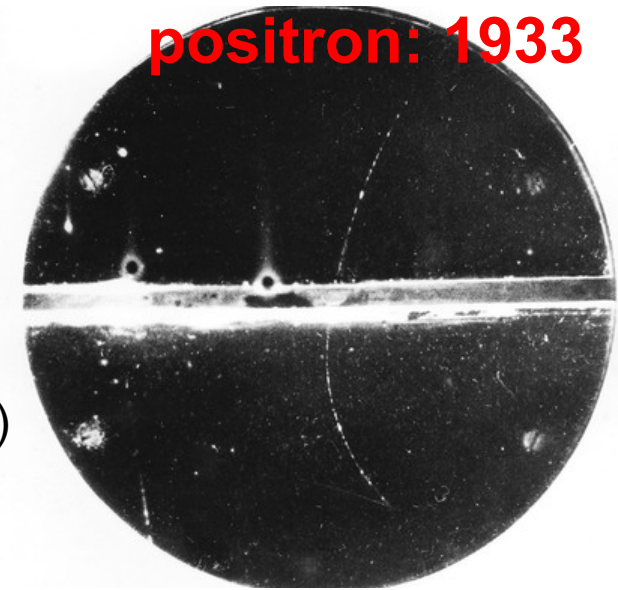
# Les rouges et les gris (quarks et leptons) sur une carte



**3 infos importantes:**  
famille, symbole, couleur

# Les antiparticules

À chaque particule élémentaire on associe une antiparticule de même masse et dont les charges sont opposées.



Traduction sur les cartes:

- couleur voisine de celle de la particule (**anticouleur**)
- même symbole mais inversé



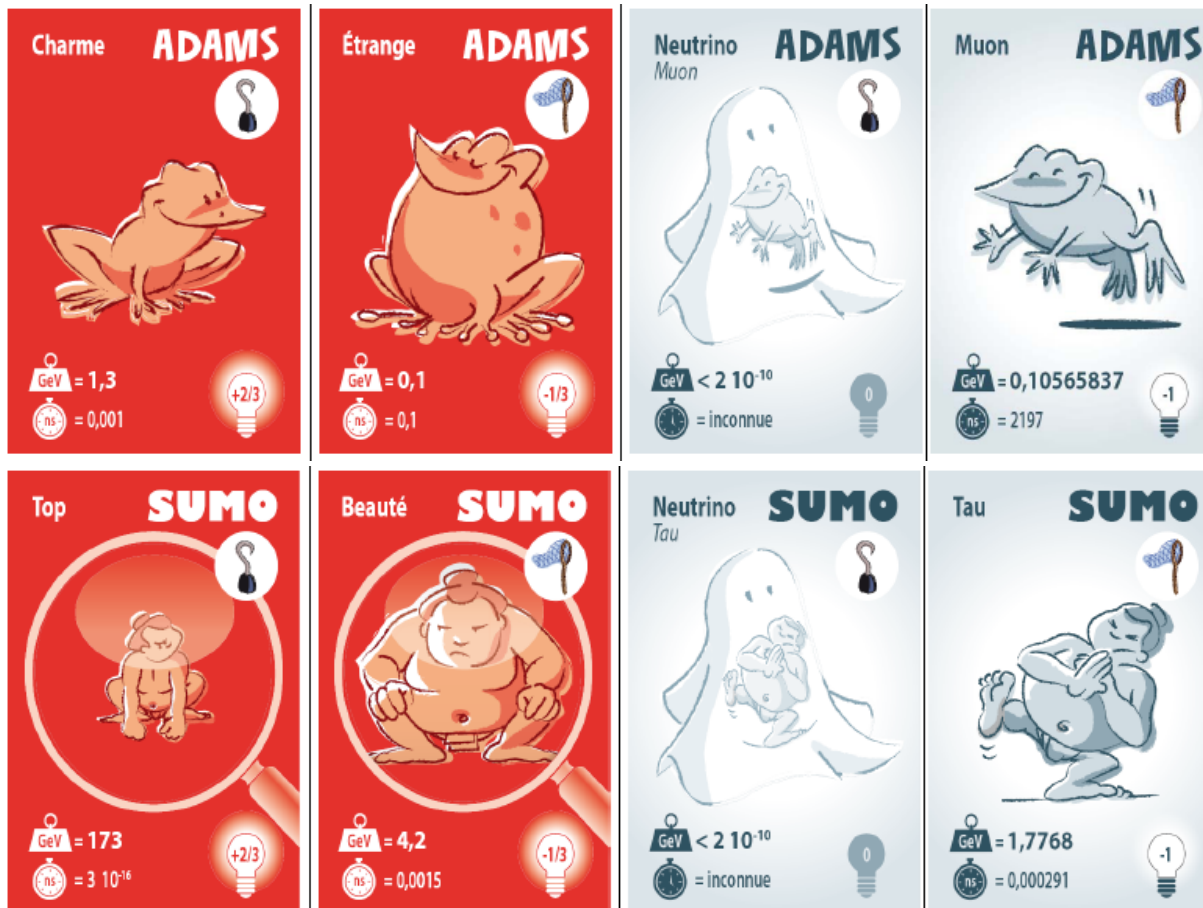


# Deux nouvelles familles

De 1950 à 2005 de nouveaux quarks et de nouveaux leptons ont été découverts. Ils peuvent être répartis dans 2 nouvelles familles qui sont des **répliques** de la famille "Plume".

Cela signifie que ces nouveaux quarks et leptons ont le même comportement que leurs prédécesseurs vis à vis des 3 interactions.

Ils en diffèrent par leur masse. Étant plus lourds : ils sont instables.



famille  
Adams

famille  
Sumo

# Exercice

Enlever les “gluons” (8 cartes bicolores) ainsi que les quarks et les antiquarks de couleur bleue et verte ( 24 cartes) du paquet initial de 64 cartes.

Ranger les cartes restantes par nom de famille.

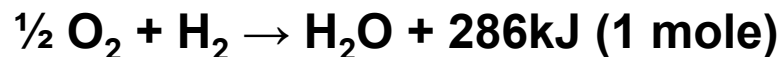


# Réactions entre particules

- La radioactivité

$E = m c^2$  : la masse peut être transformée en énergie

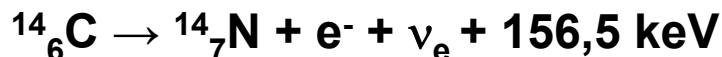
+ en chimie: réactions exothermiques



$$1\text{eV} = 1,8 \cdot 10^{-36} \text{ kg}$$

$$\frac{1}{2} m(\text{O}_2) + m(\text{H}_2) = m(\text{H}_2\text{O}) + 3 \text{ eV (1 molécule)}$$

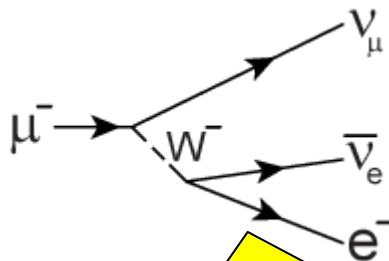
+ radioactivité bêta:



+ désintégration du muon

$$m(\mu) = m(e) + 105,147 \text{ MeV}$$

Ici aussi **la nature des particules peut changer** entre le départ et l'arrivée (ce n'est pas un simple réarrangement)



$\times 50\,000$

$\times 1\,000$

Les particules les plus lourdes se désintègrent vers les plus légères.

Seules les particules les plus légères sont stables

# Réactions entre particules (2)

- Les échelles d'énergie et de distance

$10^{-10}$  m

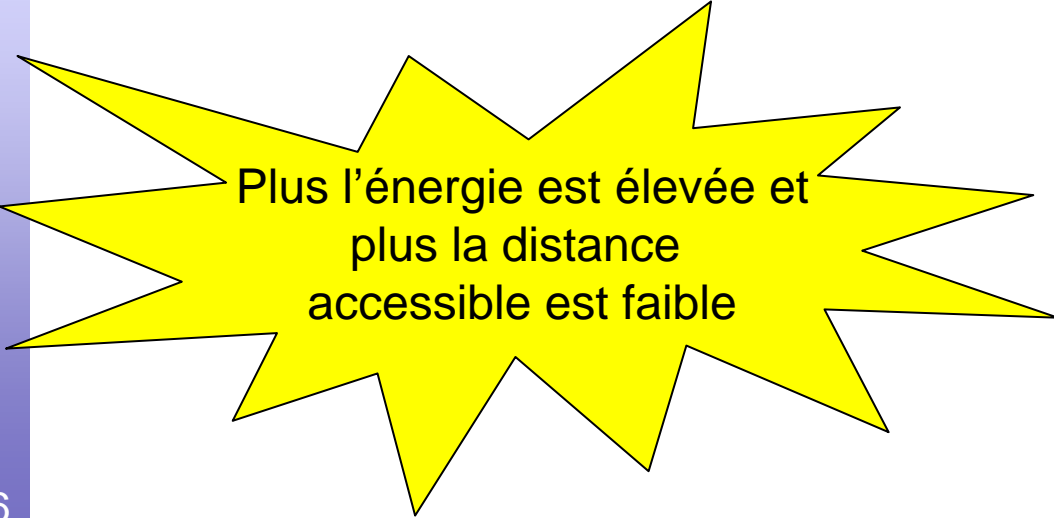
Chimie, biologie → eV – keV : énergie de liaison des électrons dans les atomes ou les molécules

$10^{-15}$  m

Soleil, centrales nucléaires, radioactivité → MeV : énergie de liaison des protons et neutrons dans le noyau

$<10^{-18}$  m

Physique des p.e. → GeV, TeV : énergie du faisceau



Plus l'énergie est élevée et plus la distance accessible est faible

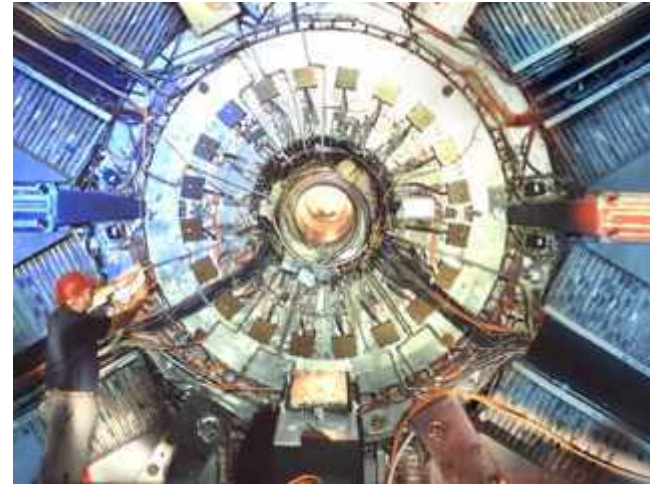
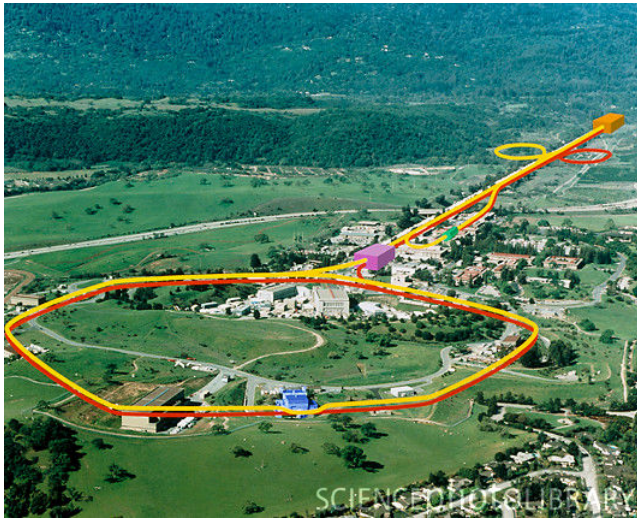
$$D = R_{\text{proton}} / E(\text{GeV})$$

$$\sim 10^{-15}\text{m} / E(\text{GeV})$$

# Réactions entre particules (3)

## - Les collisions

Analogie avec les réactions endothermiques en chimie



Avec de l'énergie on peut  
recréer de nouvelles  
particules lourdes.

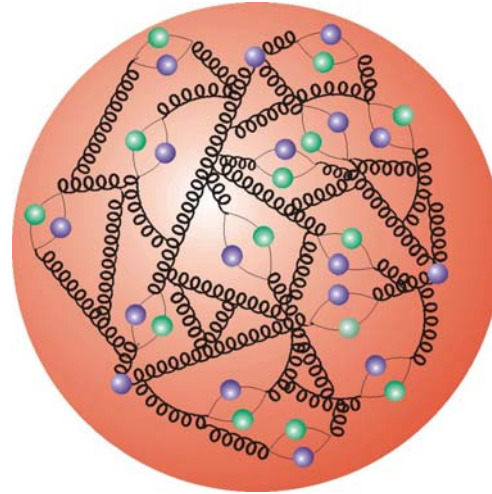
$e^+ e^- \rightarrow b \bar{b}$   
Production d'un quark  
et d'un antiquark beaux

$E = m c^2$  : l'énergie peut être transformée en masse

# Pourquoi étudier les p.e.?

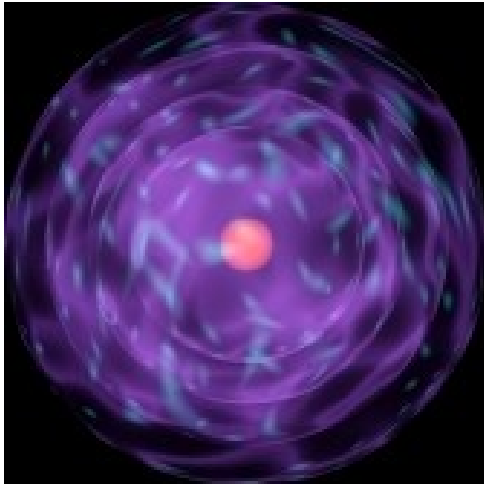
- Comprendre les objets qu'ils forment et la manière dont ils interagissent

Nous sommes formés de vide  
ou plutôt d'énergie



Dans le proton, **seulement 3%** de la masse est concentrée dans les quarks.

$E = m c^2$  : l'essentiel de la masse des protons (de notre masse) est l'énergie qui maintient les quarks dans le proton.



Dans l'atome, la masse est concentrée dans le noyau qui est 10 000 fois plus petit

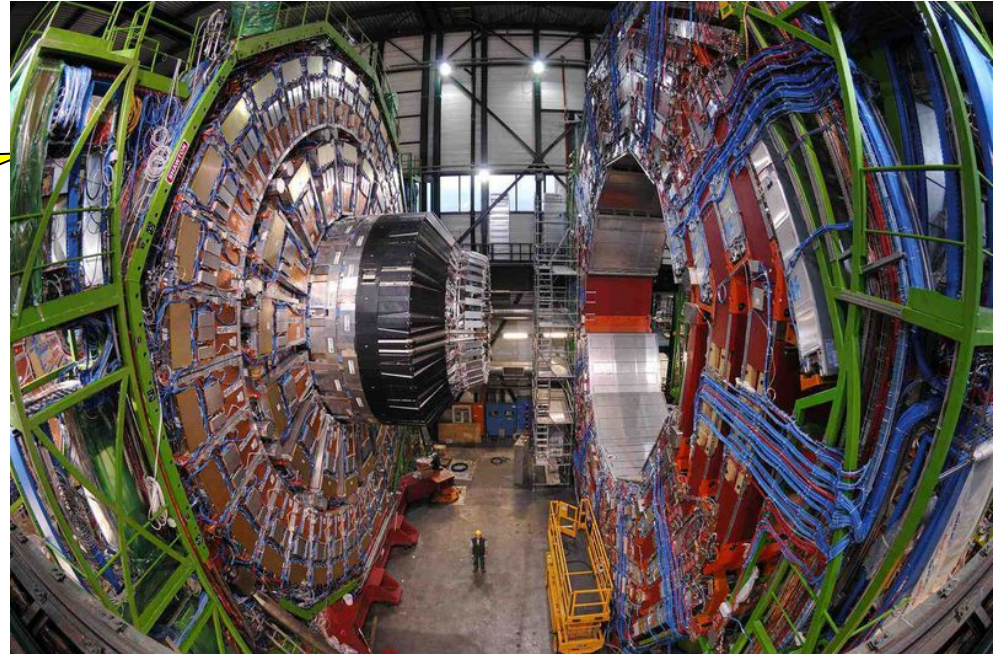
Dans 3 g d'hydrogène  
Il y a autant d'énergie  
que celle fournie  
par 1 réacteur nucléaire  
en 1 journée



# Pourquoi étudier les p.e.?

- Comprendre l'origine des forces et des constituants de la matière

Recréer en laboratoire  
les particules qui ont disparu.



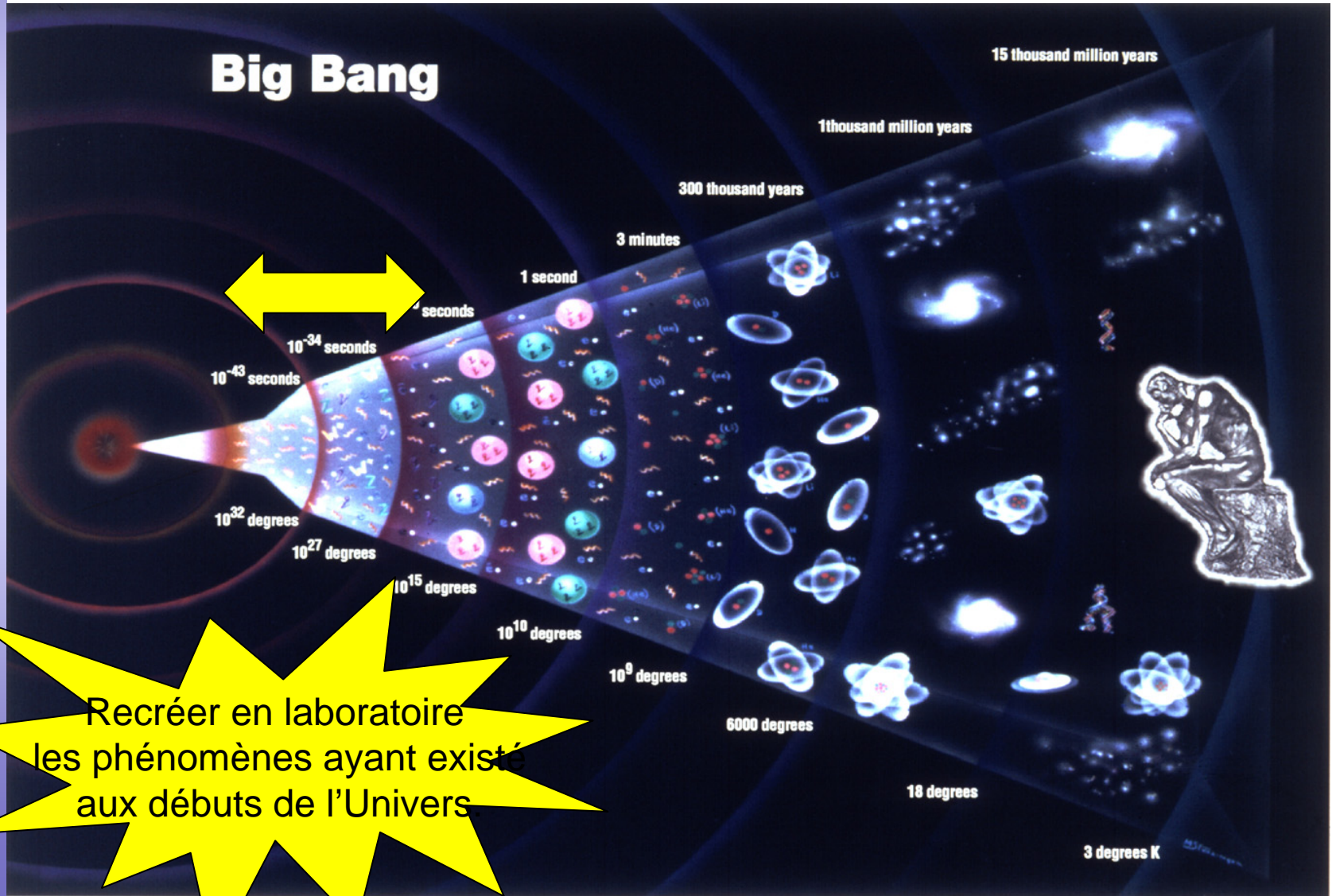
- Former un modèle cohérent qui permet d'expliquer toutes les observations (Modèle Standard)

$E = m c^2$  : l'énergie peut être transformée en masse

# Pourquoi étudier les p.e.?

- Comprendre l'origine de l'Univers

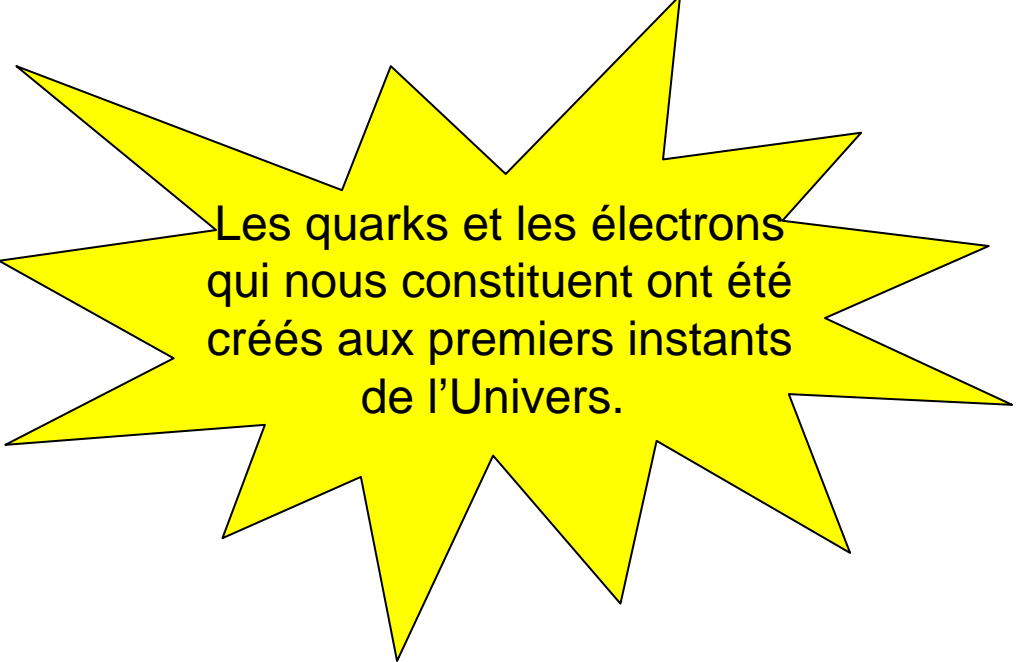
L'énergie permet de remonter le temps.



Recréer en laboratoire  
les phénomènes ayant existé  
aux débuts de l'Univers.



# *Pourquoi étudier les p.e.?*



Les quarks et les électrons  
qui nous constituent ont été  
créés aux premiers instants  
de l'Univers.

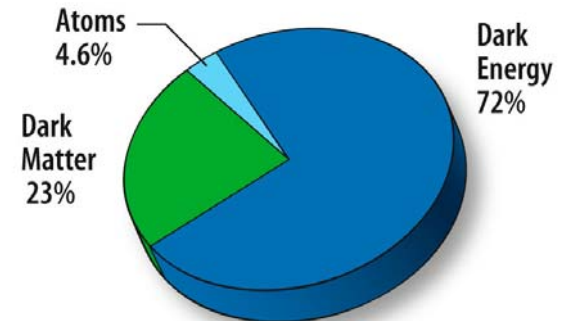
Actuellement, lorsque l'on crée un quark ou bien un électron, il sont toujours accompagnés par un antiquark ou bien par un antiélectron.

# Pourquoi étudier les p.e.?

Il existe encore de nombreux mystères...

LHC

- pourquoi  $Q_e = -Q_p$ ?
- pourquoi 3 familles?
- où est passée l'antimatière?
- d'où vient la masse ?
- de nouvelles particules doivent apparaître si  $E > 1000$  Gev.
- qu'est-ce que la matière noire?
- ..... etc



# Jeux avec 32 cartes : Quark poker, Collisions

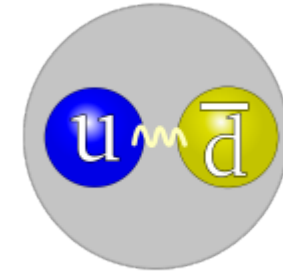
Combinaisons à 2, 3, 4 et 5 cartes



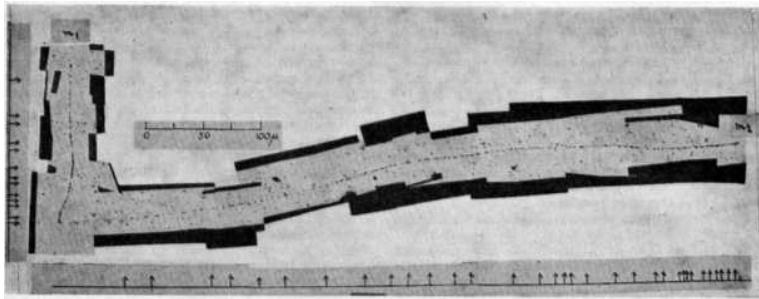
**Transformation!!!**

# 2 "cartes" : les mésons (les paires)

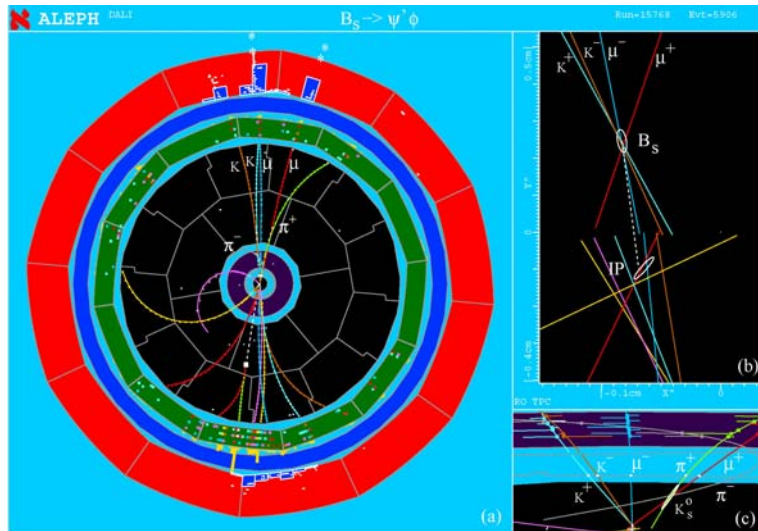
**Méson** = particule formée d'un quark et d'un antiquark, liés par l'interaction forte.  
Stable pour l'interaction forte, instable pour les interactions faible ou électromagnétique



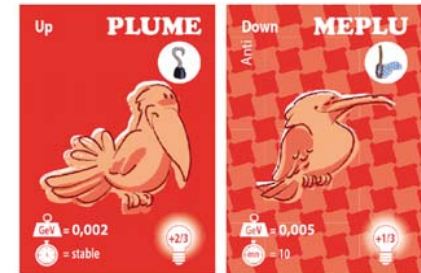
up-antidown



**pion (1947),**  
 $2,6 \cdot 10^{-8} \text{ s}$



**B<sub>s</sub> (1991),**  
 $1,5 \cdot 10^{-12} \text{ s}$

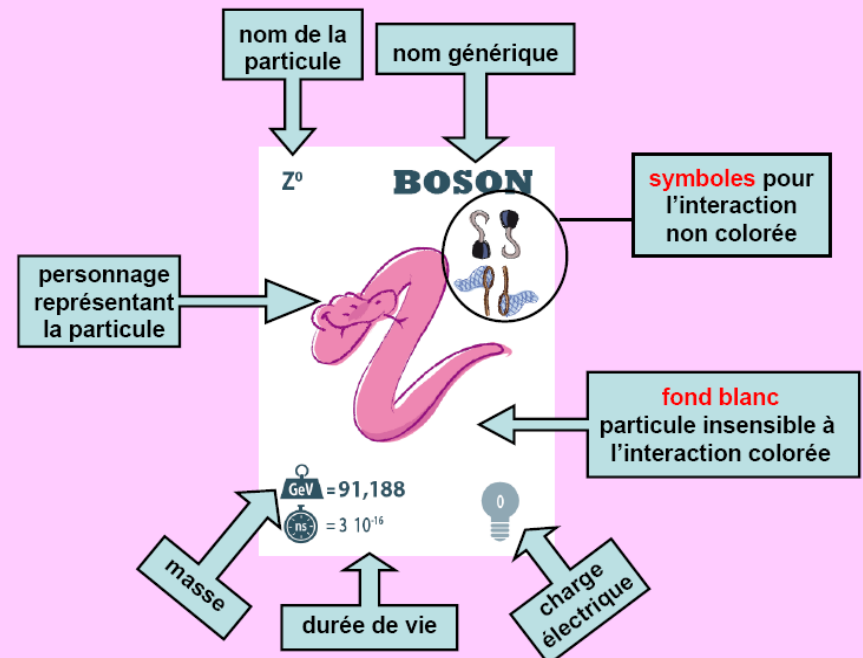


*une paire est formée par un rouge et un anti-rouge (un quark et un antiquark).*

# Les forces non colorées (bosons) sur les cartes



Les 2 symboles (crochet et filet) indiquent les manières dont les bosons communiquent les forces non colorées aux autres particules élémentaires.



# Particules et deux interactions : 32 cartes

On laisse de côté pour l'instant les particules transmettant l'interaction forte : les gluons.

Plume	$u_R$			$d_R$			$e^-$	$\nu_e$
Adams	$c_R$			$b_R$			$\mu^-$	$\nu_\mu$
Sumo	$t_R$			$b_R$			$\tau^-$	$\nu_\tau$
Boson	$W^+$	$W^-$	$Z^0$	$Z^0$	$\gamma$	$\gamma$	$\gamma$	$H^0$
Meplu	$-u_R$			$-d_R$			$e^+$	$-\nu_e$
Smada	$-c_R$			$-b_R$			$\mu^+$	$-\nu_\mu$
Omus	$-t_R$			$-b_R$			$\tau^+$	$-\nu_\tau$




**boson de Higgs**  
Encore inconnu,  
il est activement  
recherché au LHC

**Permet d'expliquer  
pourquoi les particules  
élémentaires ont une  
masse**





# 3 "cartes" : les désintégrations (brelans)

<p>Up <b>PLUME</b></p>  <p>GeV = 0,002 = stable</p> <p>+2/3</p>	<p>Down <b>PLUME</b></p>  <p>GeV = 0,005 = 10</p> <p>-1/3</p>
<p>Up → Down + W<sup>+</sup></p>	
<p><b>W<sup>+</sup> BOSON</b></p>  <p>GeV = 80,4 = 3 10<sup>-16</sup></p> <p>+1</p>	



*Une particule (départ) se transforme en deux autres (arrivée).*

*Parmi les trois particules il y a au moins une force pour assurer la transformation.*



# 3 "cartes" : les désintégrations (brelans)

**Top SUMO**

GeV = 173  
ns =  $3 \cdot 10^{-16}$   
+2/3

**Étrange ADAMS**

GeV = 0,1  
ns = 0,1  
-1/3

**W+ BOSON**

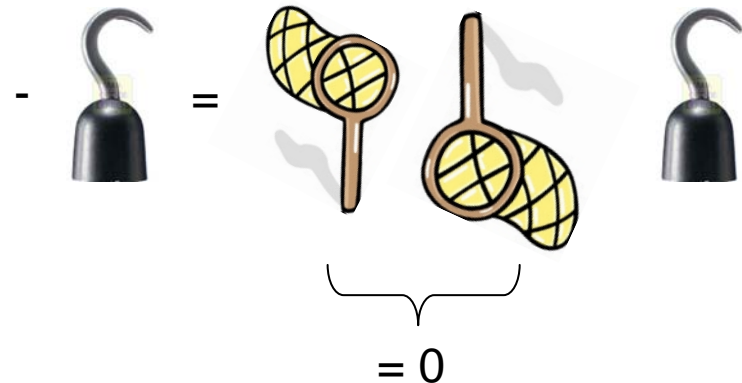
W+  
F

GeV = 80,4  
ns =  $3 \cdot 10^{-16}$   
+1

Top → Étrange + W+

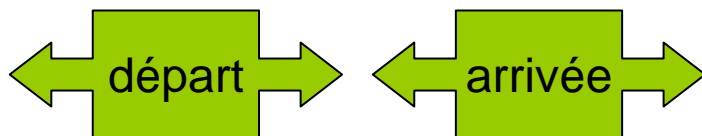
*Les attributs (symboles et couleur) sont conservés entre le départ et l'arrivée.*

- rouge = rouge + non-coloré



*Les deux constituants doivent appartenir à la même famille ou bien à une famille et à son antifamille associée.*

*Exception: si le boson est un W et si les constituants sont des quarks (ou des antiquarks), ces derniers peuvent alors appartenir à des familles différentes.*



# 3 "cartes" : exemples avec les W

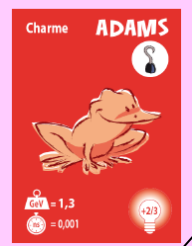
The cards are arranged in three pairs, each pair representing a different decay process:

- Pair 1 (Left):**
  - Top-left: Up **PLUME**. Mass:  $0,002 \text{ GeV}$ , stable. Lightbulb: +2/3.
  - Top-right: Down **PLUME**. Mass:  $0,005 \text{ GeV}$ ,  $10$ . Lightbulb: -1/3.
  - Bottom:  $W^+ \text{ BOSON}$ . Mass:  $80,4 \text{ GeV}$ ,  $3 \cdot 10^{16}$ . Lightbulb: +1.
  - Process:  $W^+ \rightarrow \text{Up} + \text{Down}$
- Pair 2 (Middle):**
  - Top-left:  $W^+ \text{ BOSON}$ . Mass:  $80,4 \text{ GeV}$ ,  $3 \cdot 10^{16}$ . Lightbulb: +1.
  - Top-right: Neutrino **PLUME** / Electron. Mass:  $< 2 \cdot 10^{-10} \text{ GeV}$ , inconnue. Lightbulb: 0.
  - Bottom:  $W^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$
- Pair 3 (Right):**
  - Top-left:  $W^+ \text{ BOSON}$ . Mass:  $80,4 \text{ GeV}$ ,  $3 \cdot 10^{16}$ . Lightbulb: +1.
  - Top-right: Up **PLUME**. Mass:  $0,002 \text{ GeV}$ , stable. Lightbulb: +2/3.
  - Bottom:  $W^+ \rightarrow \text{Up} + \text{Down}$


**Règle 3-3 (optionnelle): les combinaisons autorisées devront en outre vérifier que la masse de la particule de départ est supérieure à la somme des masses des particules à l'arrivée.**

# 3 "cartes" : avec $Z^0$ , $\gamma$ et $H^0$

Charme **ADAMS**

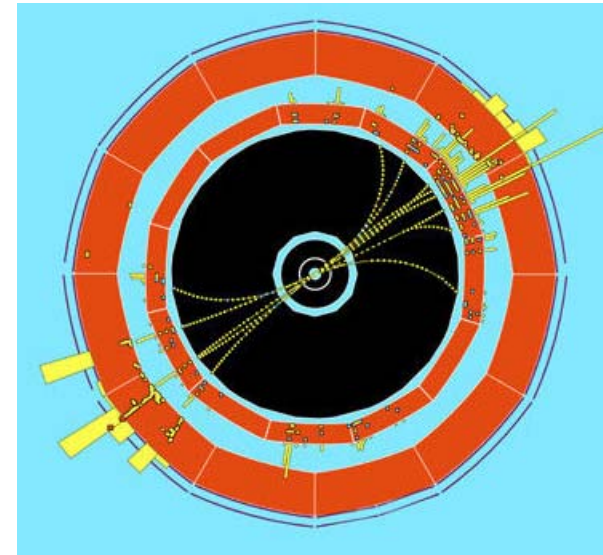


Charme **ADAMS**



Charme  $\rightarrow$  Charme +  $Z^0$

impossible avec ce jeu car 2 cartes identiques



$Z^0$  **BOSON**



$Z^0 \rightarrow \text{Up} + \bar{\text{Up}}$

Up **PLUME**



Up **MEPLU**



$Z^0$  **BOSON**



$Z^0 \rightarrow e^+ + e^-$

Électron **PLUME**



Anti Électron **MEPLU**



*Exception: pour les photons, les autres particules doivent être chargées.*

sont possibles

# 3 “cartes” : exercices

Entraînez-vous à former des combinaisons de 3 cartes.

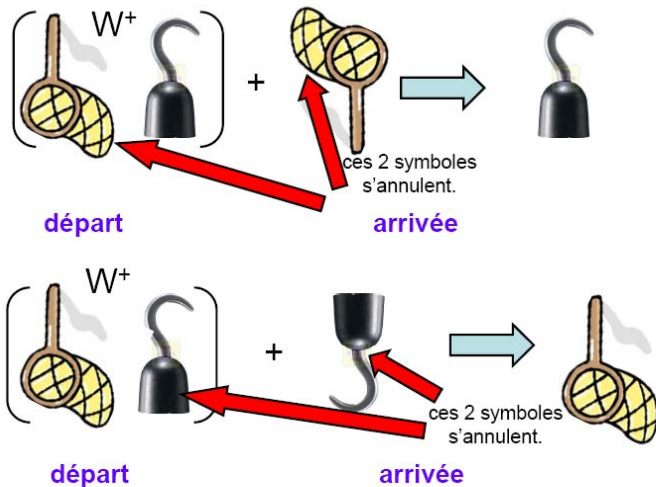
Distinguez celles où la masse de départ est supérieure à la somme des masses des 2 particules d'arrivée.

Écrivez à quoi cela correspond en termes de particules.

Trouvez toutes les manières dont peut se désintégrer le “boson  $Z^0$ ”.



# 3 "cartes" utiles pour la suite



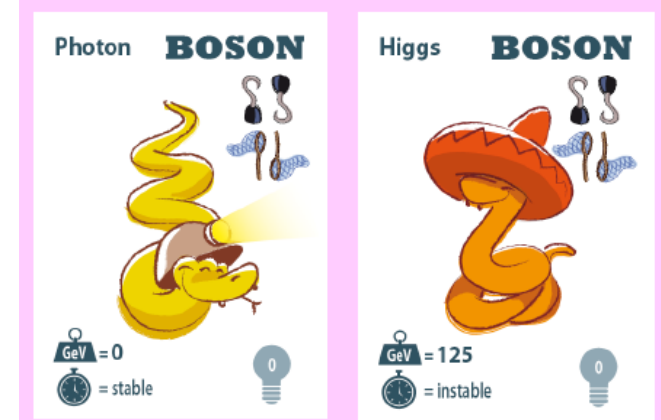
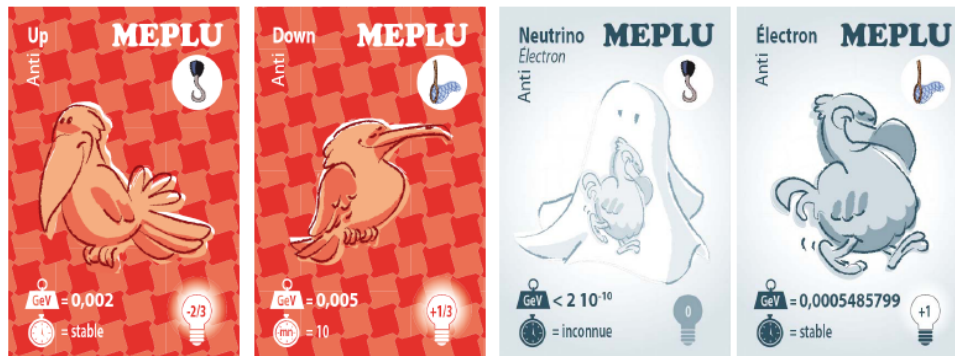
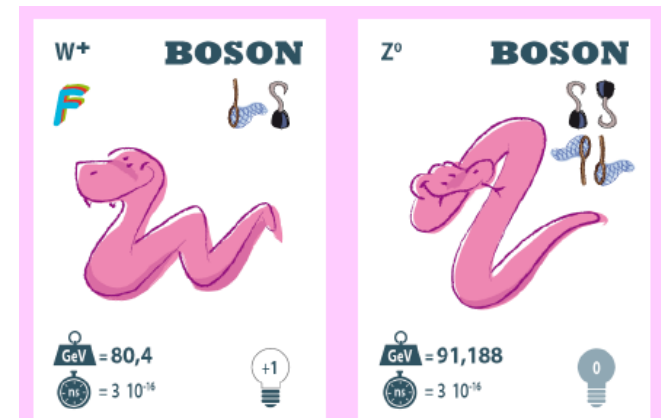
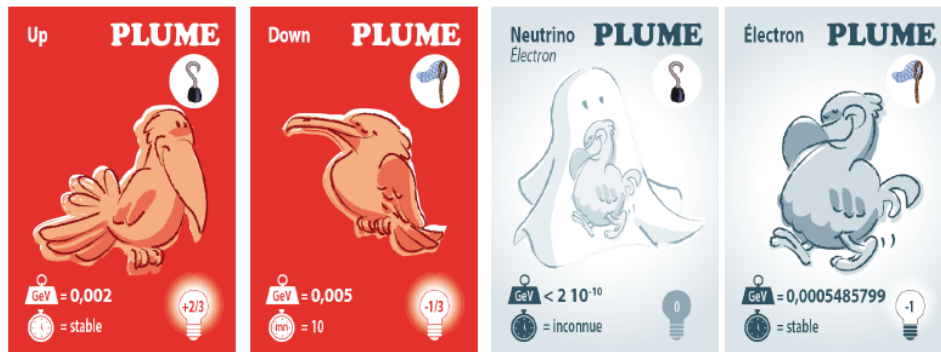
On peut "lire" les configurations précédentes en inversant "départ" et "arrivée".

rappel

Up <b>PLUME</b>  GeV = 0,002 = stable +2/3	Down <b>PLUME</b>  GeV = 0,005 = 10 -1/3
Up → Down + W <sup>+</sup>	
<b>W<sup>+</sup> BOSON</b>  GeV = 80,4 = 3 10 <sup>-16</sup> +1	

<b>W<sup>+</sup> BOSON</b>  GeV = 80,4 = 3 10 <sup>-16</sup> +1	Down + W <sup>+</sup> → Up
Down <b>PLUME</b>  GeV = 0,005 = 10 -1/3	Up <b>PLUME</b>  GeV = 0,002 = stable +2/3

# 4 "cartes" : les familles (carrés)



Un carré peut être formé avec les 4 cartes d'une même famille ou d'une même antifamille. Dans le cas des bosons il doit contenir une particule de chaque type :  $W$ ,  $Z^0$ ,  $\gamma$  et  $H^0$ .

# 4 "cartes" : brelan + photon (carrés)

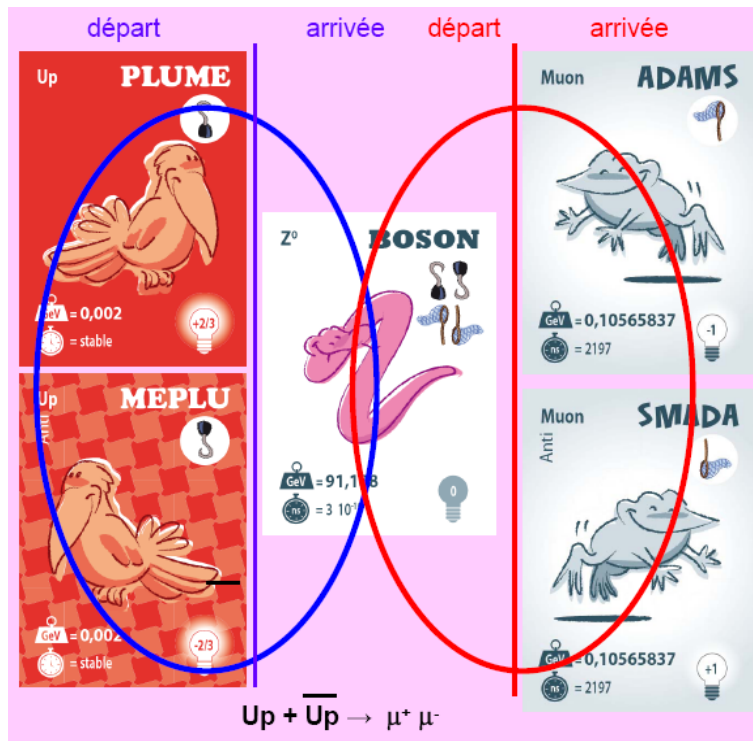
Top + Photon → Étrange + W<sup>+</sup>

Top → Étrange + Photon + W<sup>+</sup>

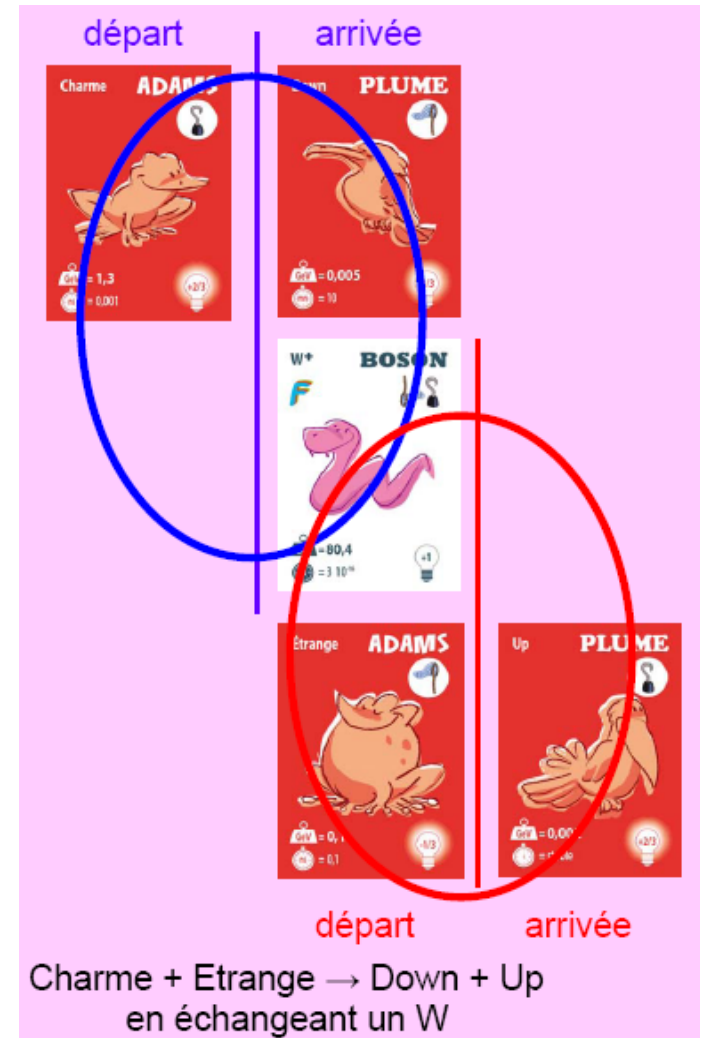
Top → Étrange + W<sup>+</sup> + Photon

*Un carré peut être formé avec les 3 cartes d'un brelan en ajoutant un photon.*

# 5 "cartes" : 2 combinaisons à 3 cartes

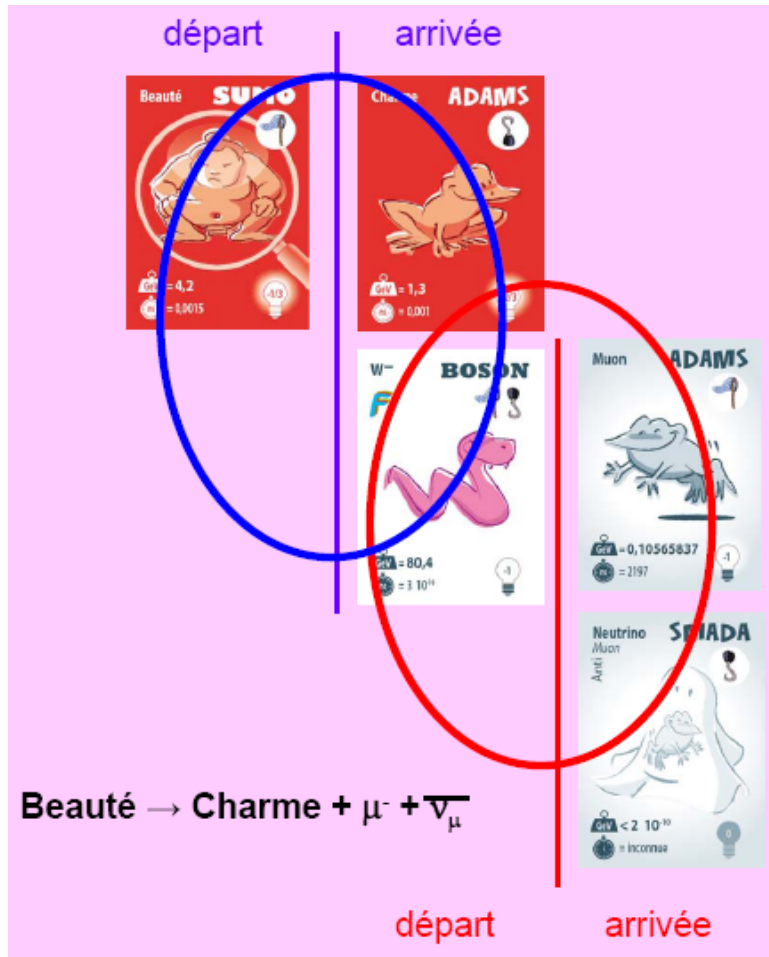


On peut les décomposer en 2 groupes de 3 cartes qui obéissent aux règles précédentes.

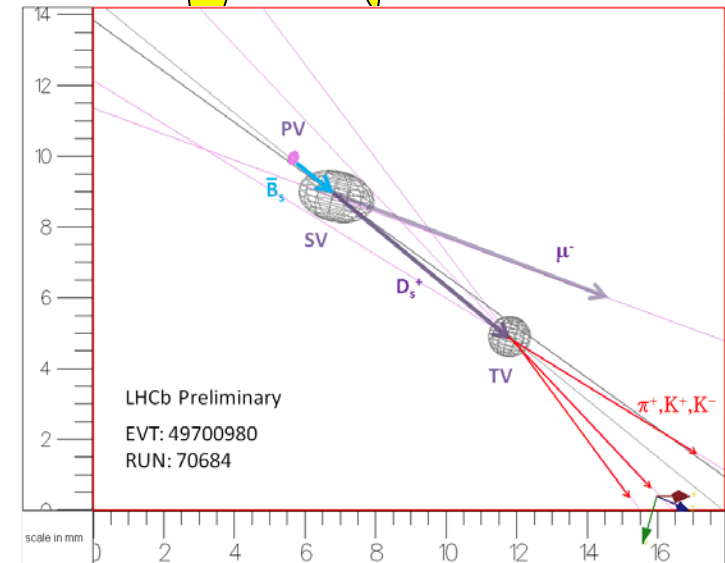


Le  $Z^0$  et le  $W^+$  sont à la fois à l'arrivée d'une combinaison et au départ de l'autre. Ils n'apparaissent pas dans l'état final mais servent à transmettre l'interaction.

# 5 "cartes" : désintégration d'un quark

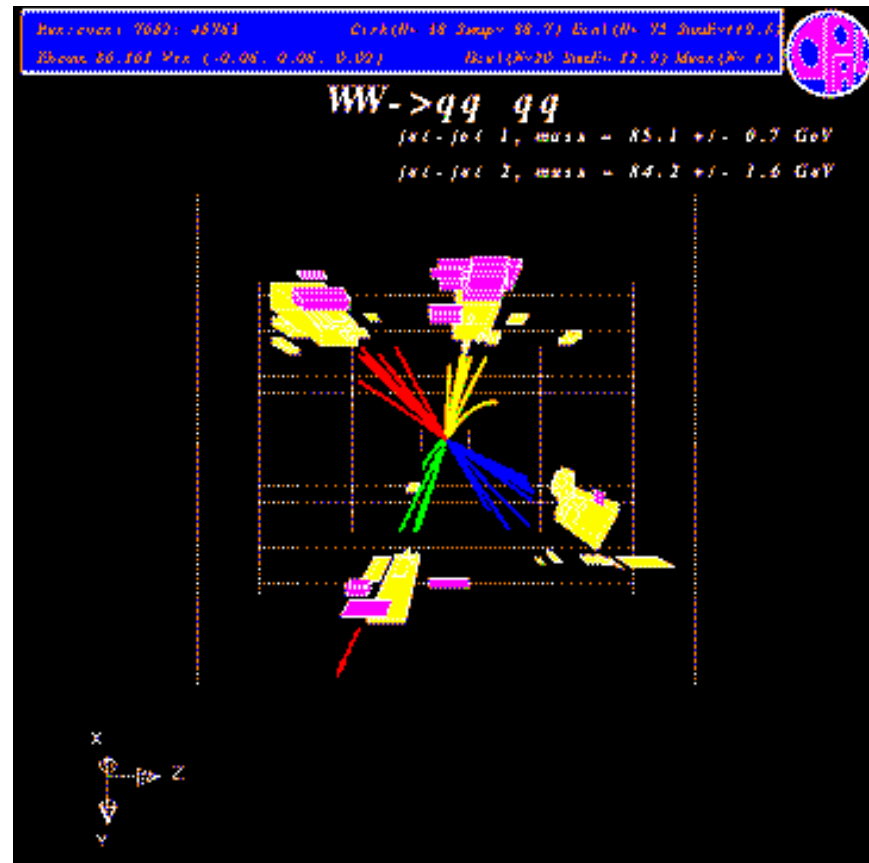
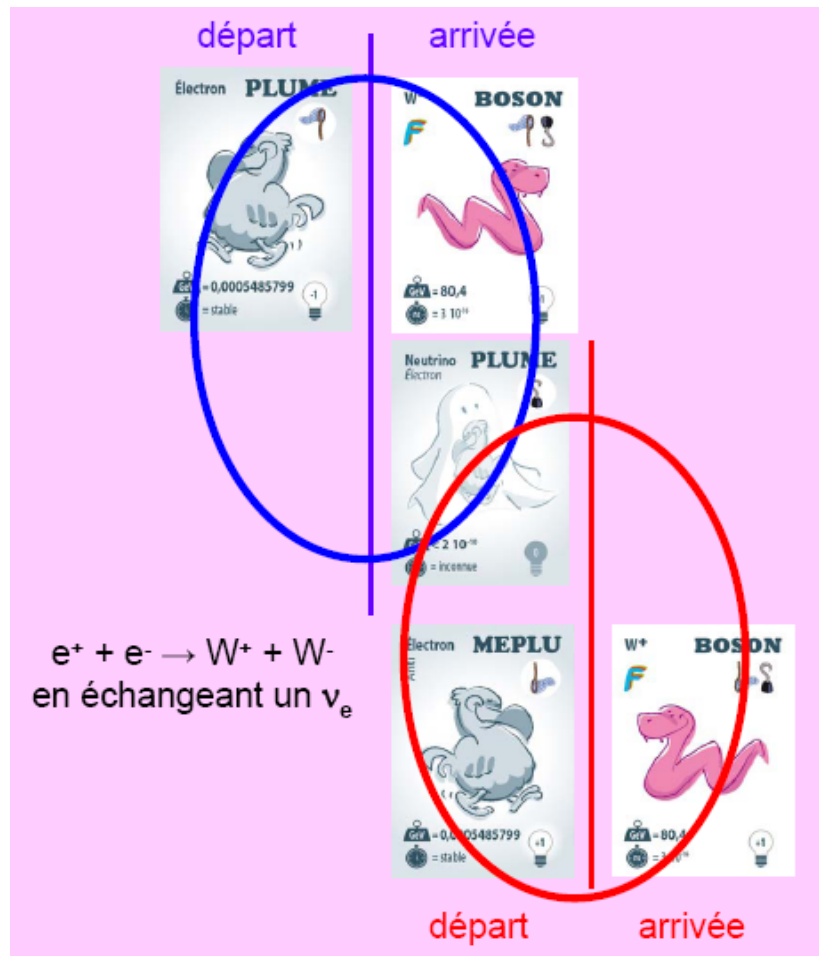


La masse de départ doit être plus grande que la somme des masses des particules produites





# 5 "cartes" : autre exemple avec 2 forces



# 5 “cartes” : exercices

Entraînez-vous à former des combinaisons de 5 cartes.

Trouvez une combinaison qui explique la désintégration du méson  $\pi^+$  (formé d'un quark Up et d'un antiquark Down).

Trouvez toutes les désintégrations possibles du quark Down et du quark Up.

Trouvez toutes les désintégrations possibles du quark Charme.

# Le “quark poker”

**Version pédagogique** (sinon utiliser les règles habituelles du poker).

- on distribue 5 cartes à chaque joueur (5 joueurs au maximum) ;
- le premier joueur étale ses cartes et voit (aidé par les autres joueurs) s'il a une combinaison valide. Il la pose alors devant lui ;
- parmi les cartes restantes il en change tout ou partie;
- il pose devant lui (face vers la table) ses cartes restantes;
- le joueur suivant opère de même et ainsi de suite jusqu'au dernier joueur ;
- si un joueur a réussi à poser ses 5 cartes (quinte ou bien paire + brelan) il a gagné la partie. Si plusieurs joueurs sont dans ce cas c'est celui qui a la somme des masses des 5 cartes la plus grande qui gagne ;
- sinon on fait un second tour en utilisant les cartes restantes. Il est possible de modifier la configuration des cartes déjà posées et de passer à une combinaison avec plus de cartes (ou plus de masse) ;
- le joueur peut à nouveau changer tout ou partie de ses cartes restantes ;
- si aucun joueur n'a réussi à poser ses 5 cartes après 3 tours la partie est arrêtée ;
- le vainqueur est celui qui a la meilleure combinaison. Si plusieurs combinaisons sont de même niveau, celle ayant la plus forte somme des masses gagne.
- chaque manche donne 1 point au vainqueur, le premier joueur qui arrive à 5 points a gagné la partie.