

Quelques notions
en
Physique des Particules
Elémentaires

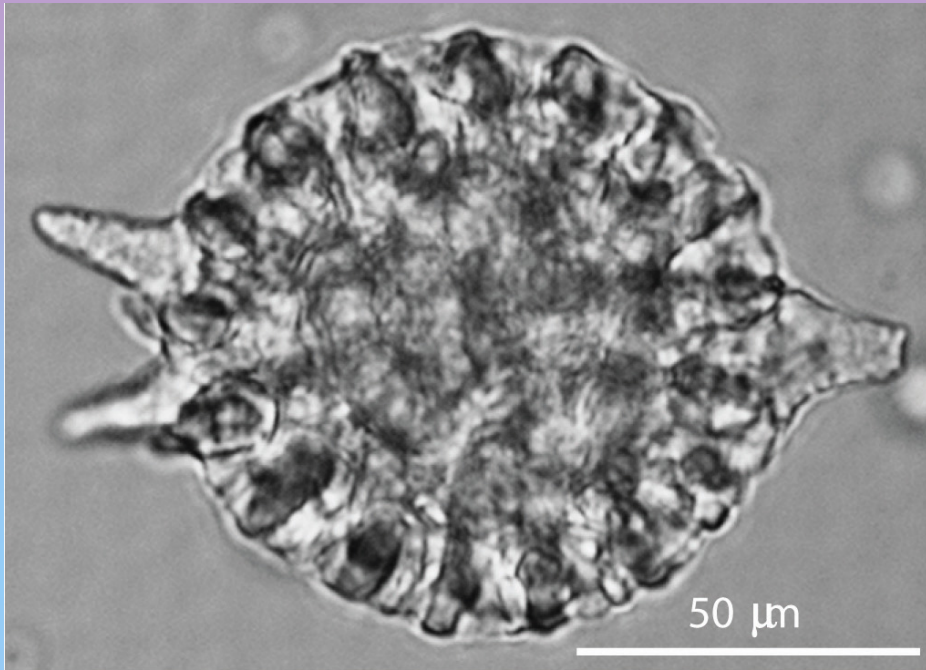
La physique des particules



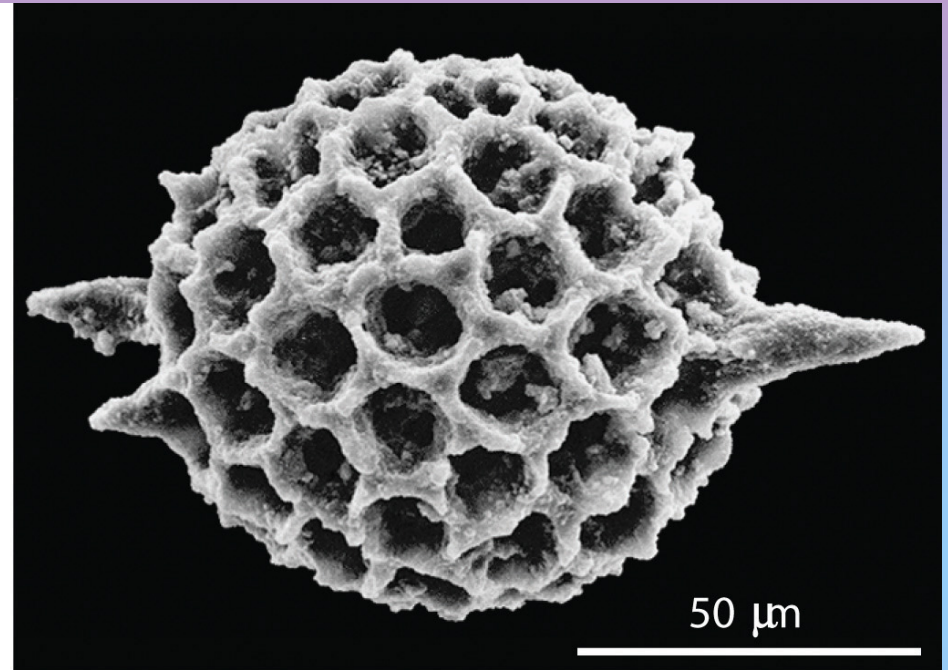
« Atome »
vient du Grec:
« que l'on ne peut
pas couper »

Identifier les composants
ultimes de la matière
et comprendre comment
ils interagissent.

...ou physique des hautes énergies



radiolaire, microscope optique



radiolaire, microscope électronique

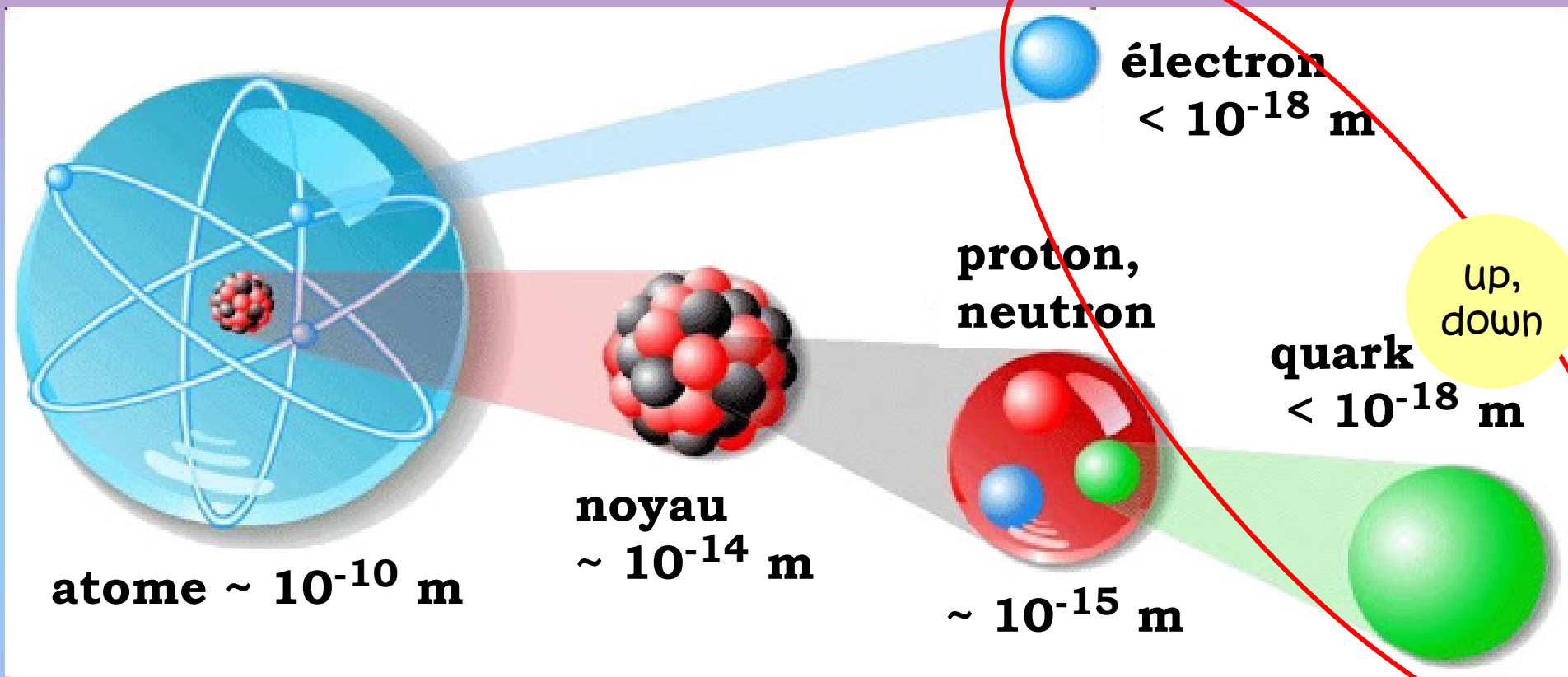
Lumière visible: $\lambda \sim 0,5 \mu\text{m}$, $E \sim 2,5 \text{ eV}$

De Broglie: particule \leftrightarrow onde

À haute énergie
 $E \gg m$
 $\lambda \sim 1/E$

Accélérateur
= microscope géant

...ou physique des hautes énergies



particules élémentaires

Comprendre l'origine de l'Univers

Hi

BIG BANG

BIG BANG

Inflation

Accelerators

LHC

Tevatron

RHIC

high-energy cosmic rays

possible dark matter relicts



Ke
q
g
e
μ
ν

Recréer des conditions et les particules existant aux premiers instants du Big-Bang.

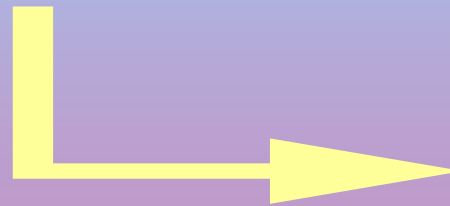
...aller vers le plus simple



<http://www.periodni.com>

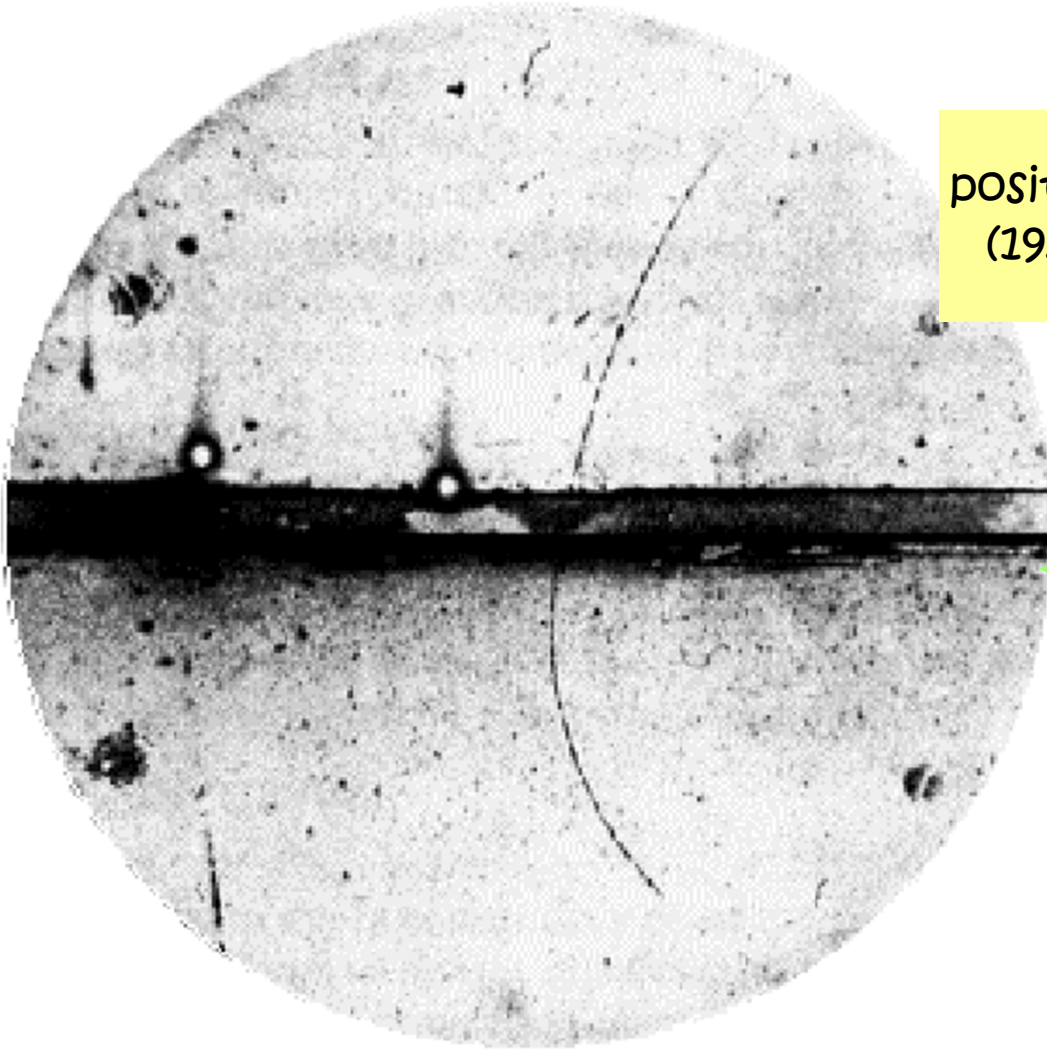
1 1.0079 H HYDROGÈNE	2 4.0026 He HÉLIUM																
3 6.941 Li LITHIUM	4 9.0122 Be BÉRYLLIUM	5 10.811 B BORE	6 12.011 C CARBONE	7 14.007 N AZOTE	8 15.999 O OXYGÈNE	9 18.998 F FLUOR	10 20.180 Ne NÉON										
11 22.990 Na SODIUM	12 24.305 Mg MAGNÉSIIUM	13 26.982 Al ALUMINIUM	14 28.086 Si SILICIUM	15 30.974 P PHOSPHORE	16 32.065 S SOUFRE	17 35.453 Cl CHLORE	18 39.948 Ar ARGON										
19 39.098 K POTASSIUM	20 40.078 Ca CALCIUM	21 44.956 Sc SCANDIUM	22 47.867 Ti TITANE	23 50.942 V VANADIUM	24 51.996 Cr CHROME	25 54.938 Mn MANGANÈSE	26 55.845 Fe FER	27 58.933 Co COBALT	28 58.693 Ni NICKEL	29 63.546 Cu CUIVRE	30 65.38 Zn ZINC	31 69.723 Ga GALLIUM	32 72.64 Ge GERMANIUM	33 74.922 As ARSENIC	34 78.96 Se SÉLÉNIUM	35 79.904 Br BROME	36 83.798 Kr KRYPTON
37 85.468 Rb RUBIDIUM	38 87.62 Sr STRONTIUM	39 88.906 Y YTRIUM	40 91.224 Zr ZIRCONIUM	41 92.906 Nb NIOBIUM	42 95.94 Mo MOLYBDÈNE	43 (98) Tc TECHNÉTIUM	44 101.07 Ru RUTHÉNIUM	45 102.91 Rh RHODIUM	46 106.42 Pd PALLADIUM	47 107.87 Ag ARGENT	48 112.41 Cd CADMIUM	49 114.82 In INDIUM	50 118.71 Sn ETAIN	51 121.76 Sb ANTIMOINE	52 127.60 Te TELLURE	53 126.90 I IODE	54 131.29 Xe XÉNON
55 132.91 Cs CÉSIIUM	56 137.33 Ba BARYUM	57-71 La-Lu Lanthanides	72 178.49 Hf HAFNIUM	73 180.95 Ta TANTALE	74 183.84 W TUNGSTÈNE	75 186.21 Re RHÉNIUM	76 190.23 Os OSMIUM	77 192.22 Ir IRIDIUM	78 195.08 Pt PLATINE	79 196.97 Au OR	80 200.59 Hg MERCURE	81 204.38 Tl THALLIUM	82 207.2 Pb PLOMB	83 208.98 Bi BISMUTH	84 (209) Po POLONIUM	85 (210) At ASTATE	86 (222) Rn RADON
87 (223) Fr FRANCIUM	88 (226) Ra RADIUM	89-103 Ac-Lr Actinides	104 (267) Rf RUTHERFORDIUM	105 (268) Db DUBNIUM	106 (271) Sg SEABORGIUM	107 (272) Bh BOHRIUM	108 (277) Hs HASSIUM	109 (276) Mt MEITNERIUM	110 (281) Ds DARMSTADTIUM	111 (280) Rg ROENTGENIUM	112 (285) Cn COPERNICIUM						

57 138.91 La LANTHANE	58 140.12 Ce CÉRIUM	59 140.91 Pr PRASÉODYME	60 144.24 Nd NÉODYME	61 (145) Pm PROMÉTHIUM	62 150.36 Sm SAMARIUM	63 151.96 Eu EUROPIUM	64 157.25 Gd GADOLINIUM	65 158.93 Tb TERBIUM	66 162.50 Dy DYSPROSIUM	67 164.93 Ho HOLMIUM	68 167.26 Er ERBIUM	69 168.93 Tm THULIUM	70 173.05 Yb YTTERBIUM	71 174.97 Lu LUTÉTIUM
89 (227) Ac ACTINIUM	90 232.04 Th THORIUM	91 231.04 Pa PROTACTINIUM	92 238.03 U URANIUM	93 (237) Np NEPTUNIUM	94 (244) Pu PLUTONIUM	95 (243) Am AMÉRICIUM	96 (247) Cm CURIUM	97 (247) Bk BERKÉLIUM	98 (251) Cf CALIFORNIUM	99 (252) Es EINSTEINIUM	100 (257) Fm FERMIUM	101 (258) Md MENDELÉVIUM	102 (259) No NOBÉLIUM	103 (262) Lr LAWRENCIUM



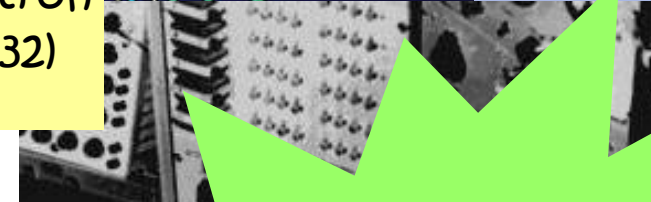
>1932, tous les atomes
= p, n, e, γ
(+force forte
+radioactivité bêta)

...mais cela se complique



positron
(1932)

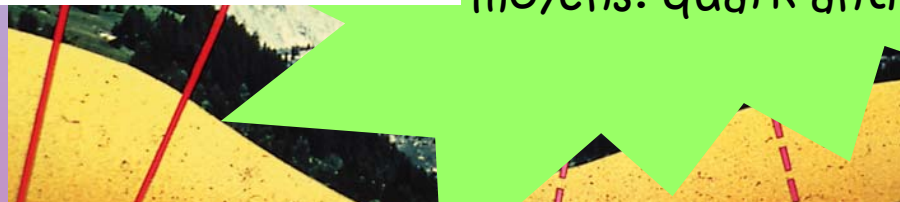
muon
(1932 ?, 1936 ?)



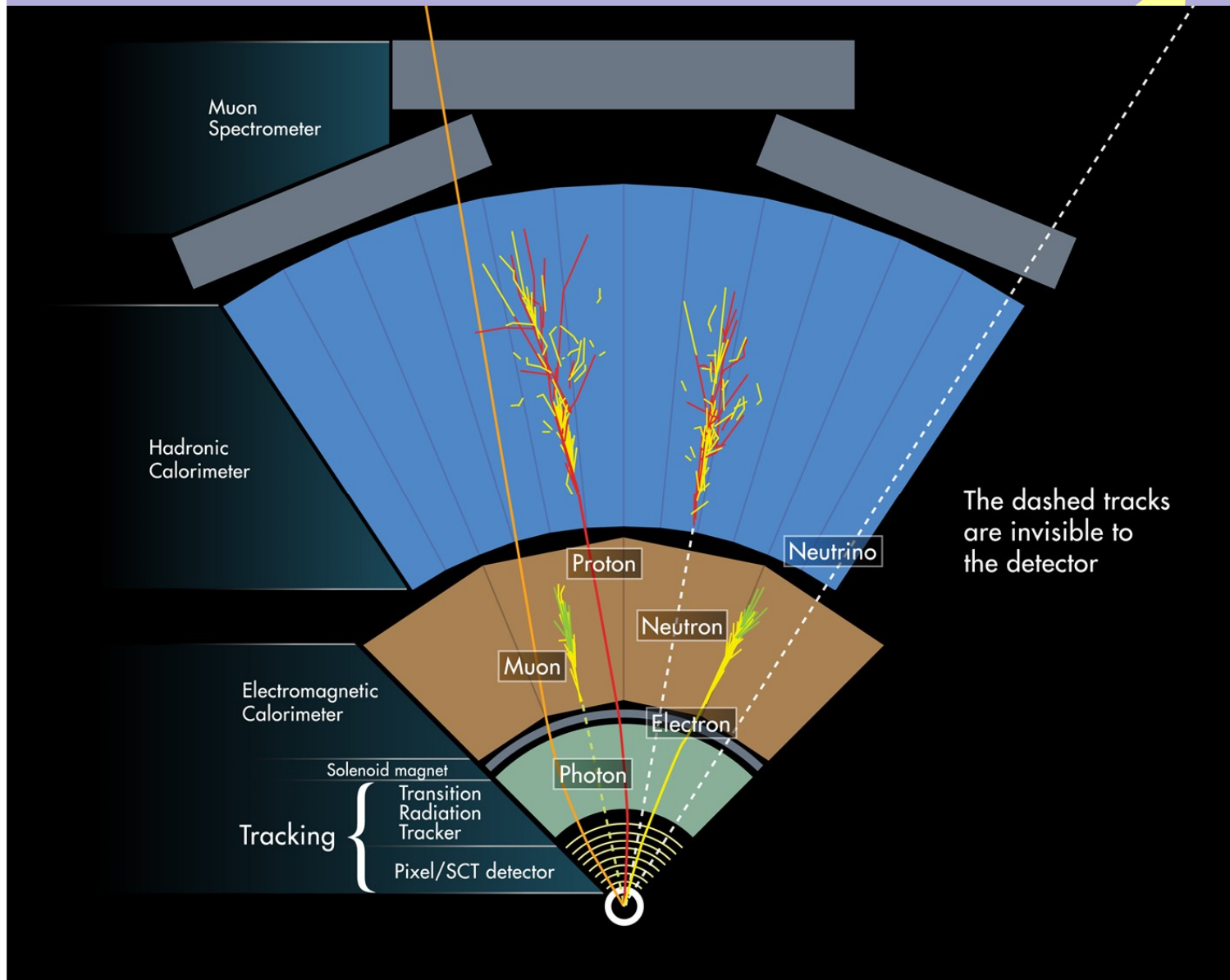
muon

Pour toute particule
il existe une
antiparticule

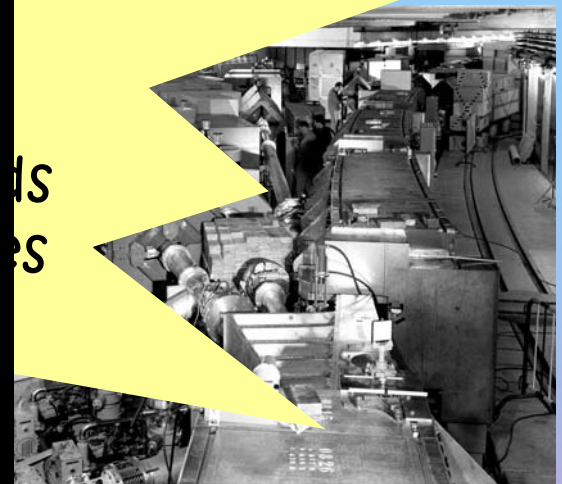
1960-...
Modele des quarks
3 quarks et leurs
antiquarks corresp.
lourds : 3 quarks
moyens: quark-antiquark



Comment étudier les particules élémentaires? (technologie)

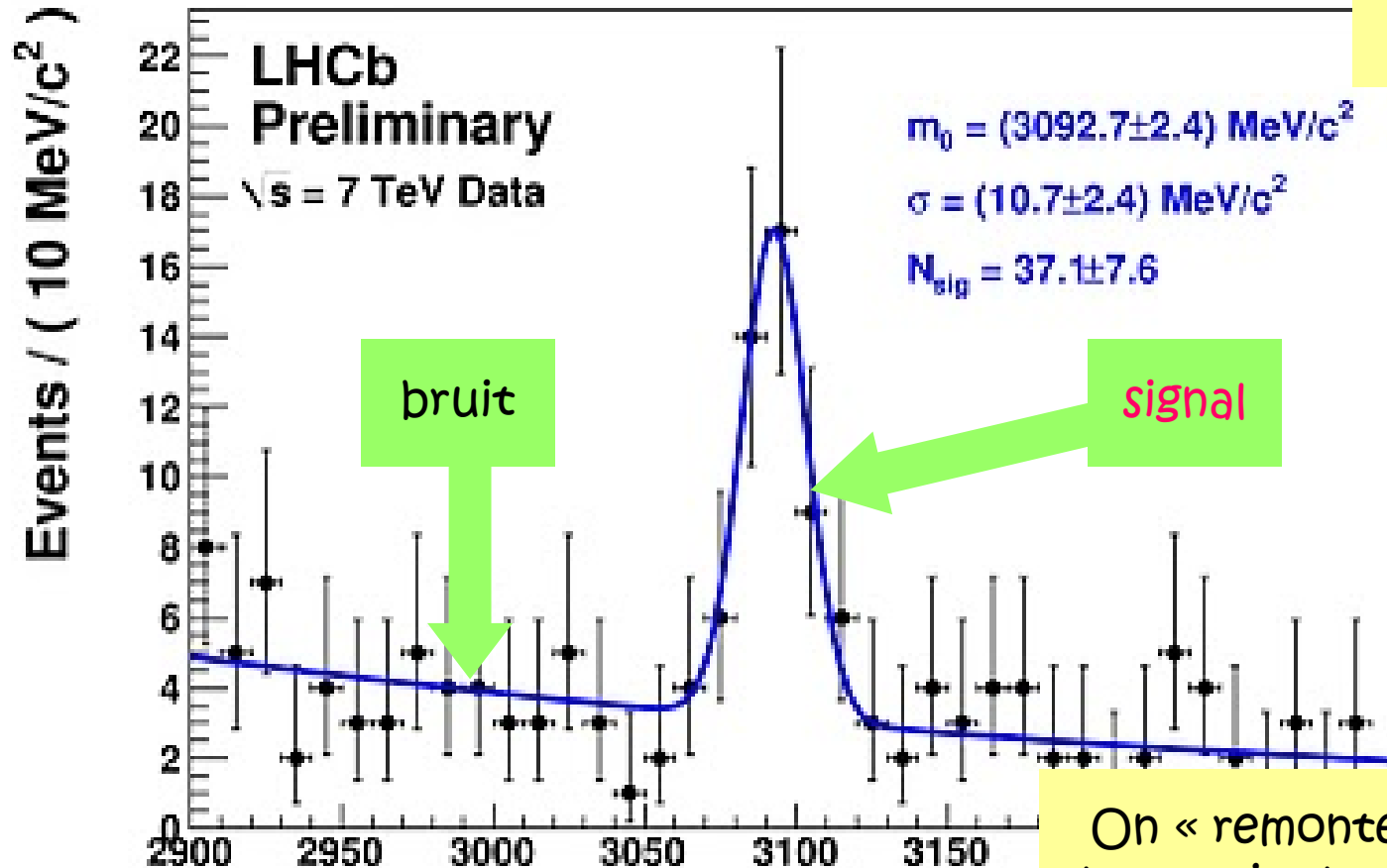


Appareillage (détecteur)



Comment étudier les particules élémentaires?(analyses)

analyse des mesures
($m, E,$
direction,
position)



On « remonte » vers les particules les plus lourdes, produites aux premiers instants de la collision.

Comment étudier les particules élémentaires? (organisation)

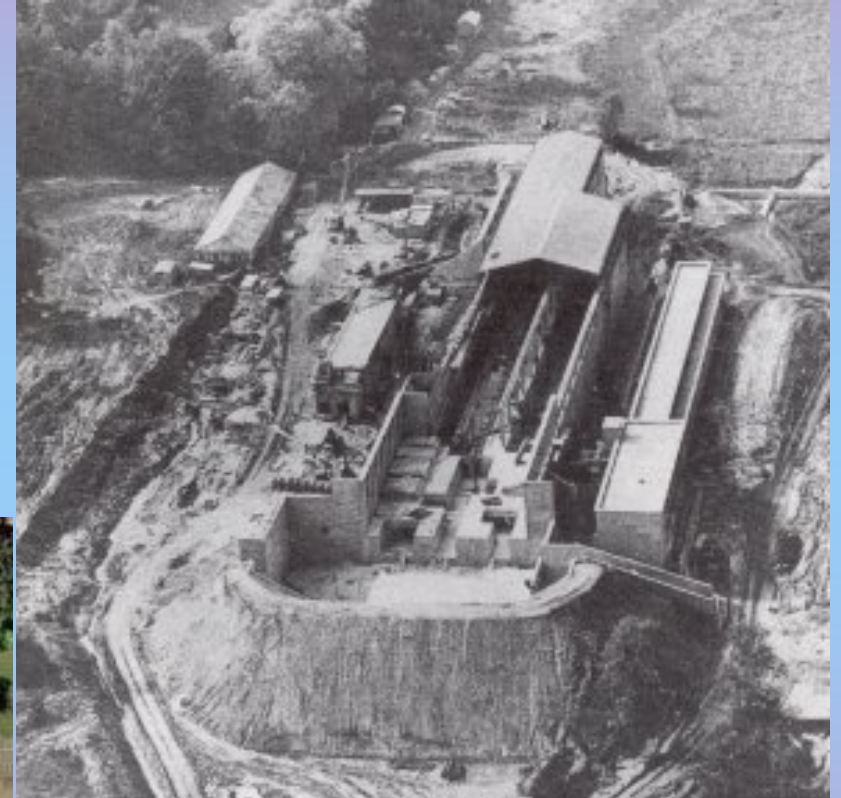
Mise en commun des moyens pour construire les appareils et analyser les mesures.

Création de centres nationaux et internationaux pour les accélérateurs

Travail en collaboration entre laboratoires nationaux et internationaux
(LAL ↔ IN2P3, **CERN**, DESY, SLAC, KEK, Italie, Espagne, ...)

Le Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire (LAL)

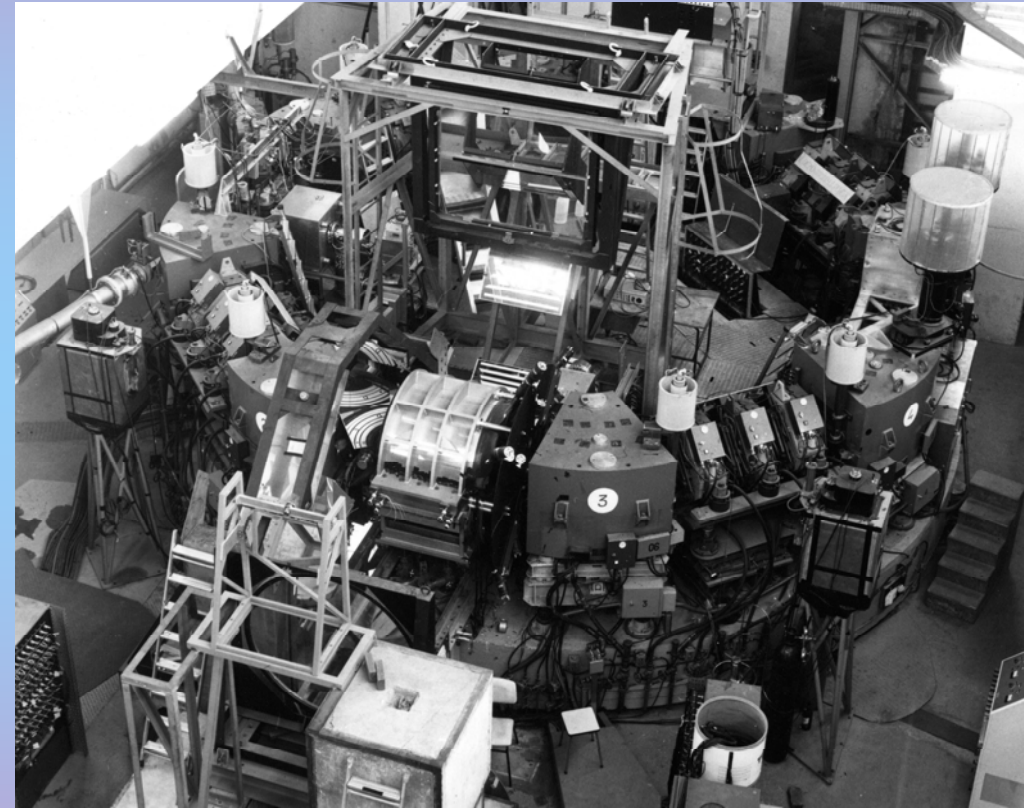
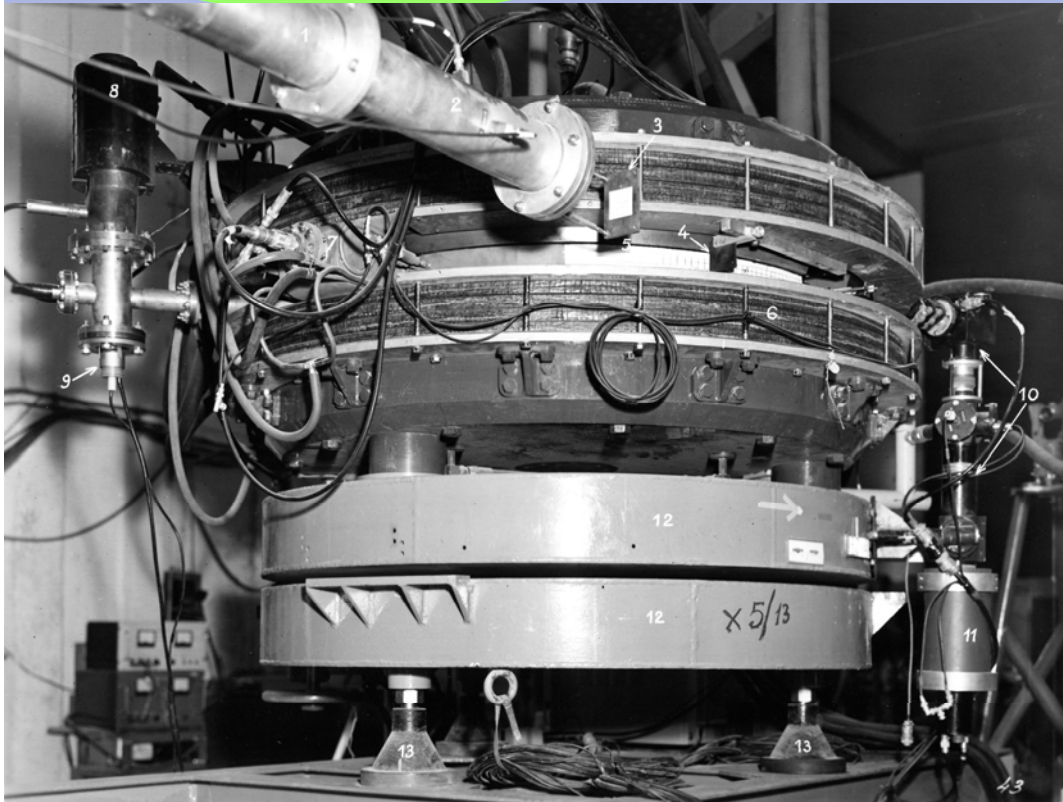
Créé en 1955. Émanation
du laboratoire de physique
de l'École Normale Supérieure



330 personnes
dont
205 ingénieurs et techniciens
et 125 physiciens

Le Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire (LAL)

Collisionneurs e+e-
jusqu'en 1984



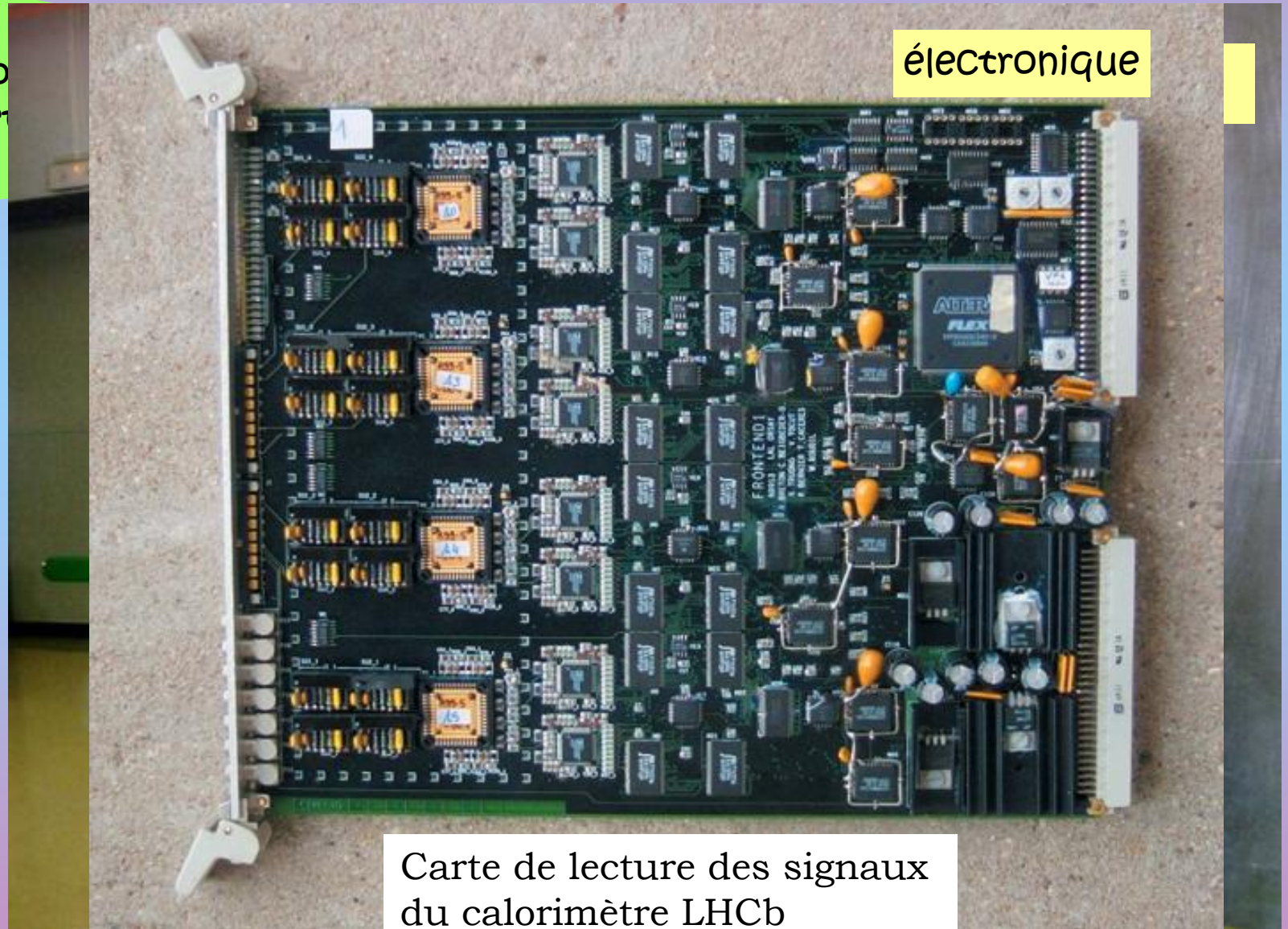
50^{ème} anniversaire des premières collisions
électron-positron au monde
(Frascati-LAL).

24/09/2014

Sciences ACO
(musée, site historique EPS,
nouvelle salle d'exposition, ...)
<http://www.sciencesaco.fr/>

Le Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire (LAL)

Construction d'app
pour de grands dé



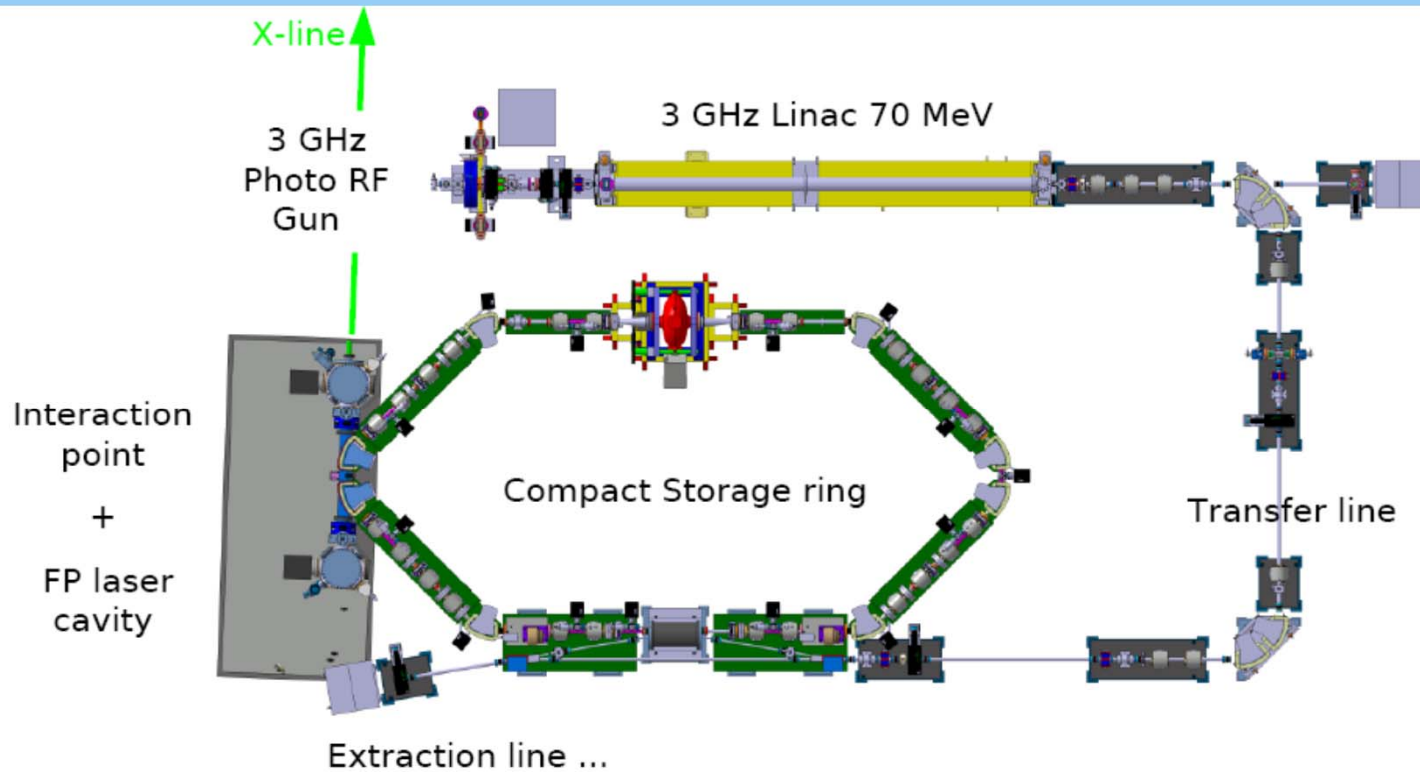
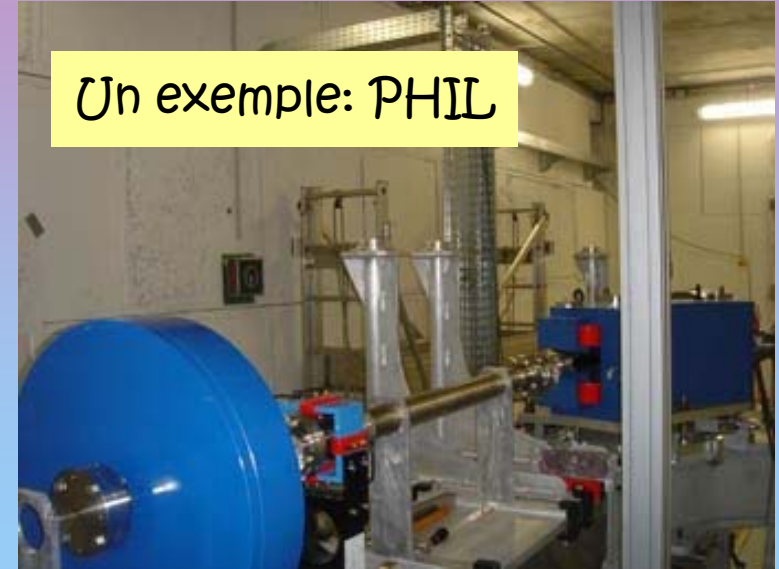
Le LAL

Recherche sur
les accélérateurs

LIL, CLIC

FFTB, Tesla,
projets locaux

Un exemple: PHIL



ThomX

Le CERN

- Devient en 1954: l'Organisation Européenne pour la recherche nucléaire: installée à Genève, pas de recherche militaire, les résultats sont publics
- Missions:
 - recherche:** questions concernant l'Univers
 - technologie:** faire reculer les limites
 - collaboration:** rassembler les nations autour de la science
 - éducation:** formation des scientifiques
- Conseil du CERN (assisté du Conseil des initiatives scientifiques et du conseil des finances) : 2 délégués et 1 voix par état, décisions à la majorité simple. Le directeur général (Rolf Heuer) est nommé pour 5 ans par le conseil.



Le CERN

- **20 états membres** (votent au Conseil, contribuent au budget : accélérateurs, fonctionnement : 2400 personnes, ~ 1 milliard d'Euros)

- **observateurs** (assistent aux réunions du Conseil)

Commission européenne, l'Inde, Israël, le Japon, la Fédération de Russie, la Turquie, l'UNESCO et les États-Unis d'Amérique

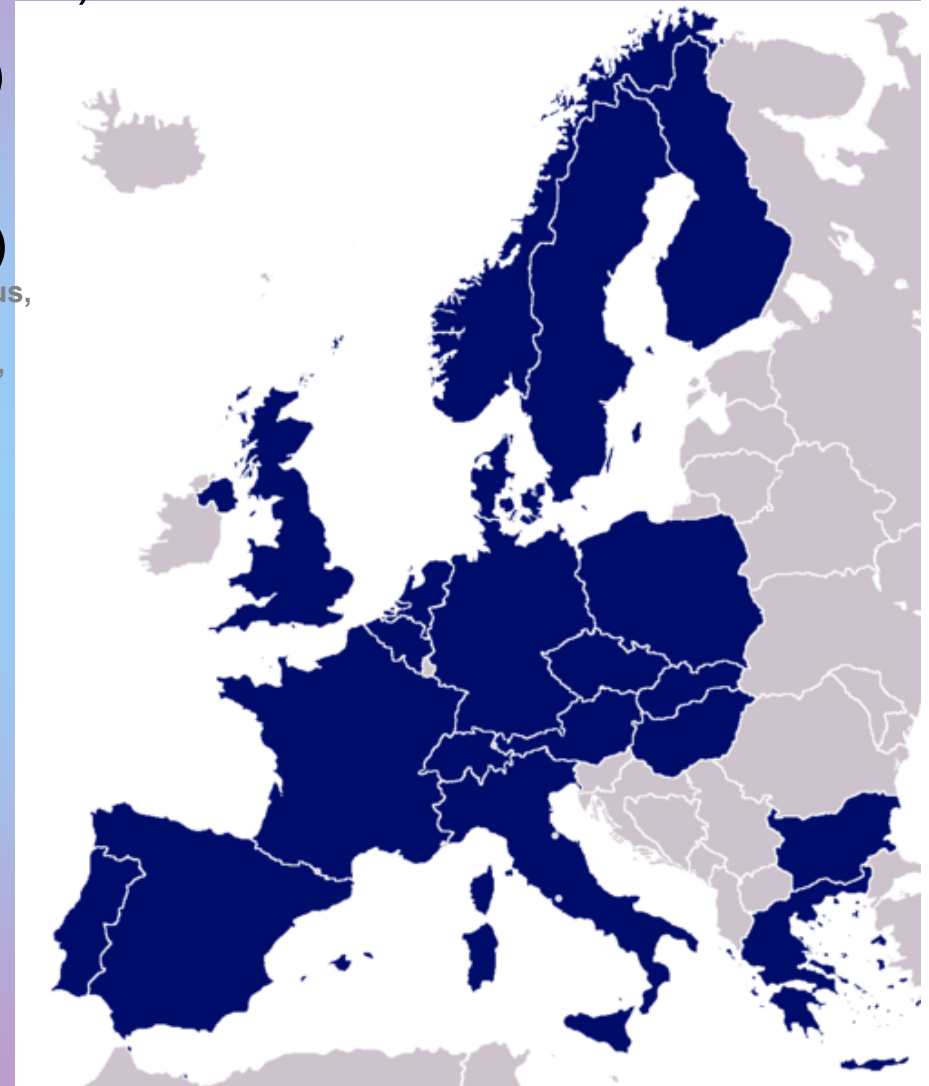
- **états non-membres** (participent aux expériences)

l'Afrique du Sud, l'Algérie, l'Argentine, l'Arménie, l'Australie, l'Azerbaïdjan, le Bélarus, le Brésil, le Canada, la Chine, Chypre, la Croatie, l'Estonie, la Géorgie, l'Inde, l'Iran, l'Irlande, l'Islande, le Maroc, le Mexique, le Pakistan, le Pérou, la Roumanie, la Serbie,

la Slovénie, la Corée du Sud, Taiwan et l'Ukraine

Les physiciens, ingénieurs, techniciens assurent la construction et l'exploitation des expériences (le CERN a une contribution minoritaire dans les expériences ~15-20%)

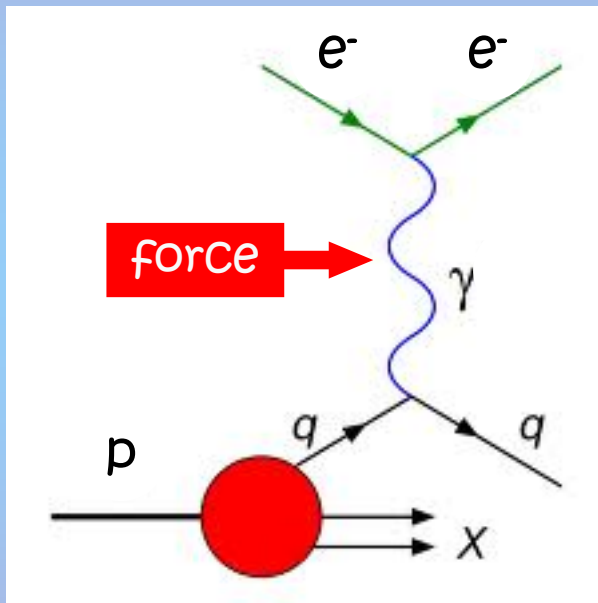
10 000 visiteurs
608 instituts, 113 nationalités



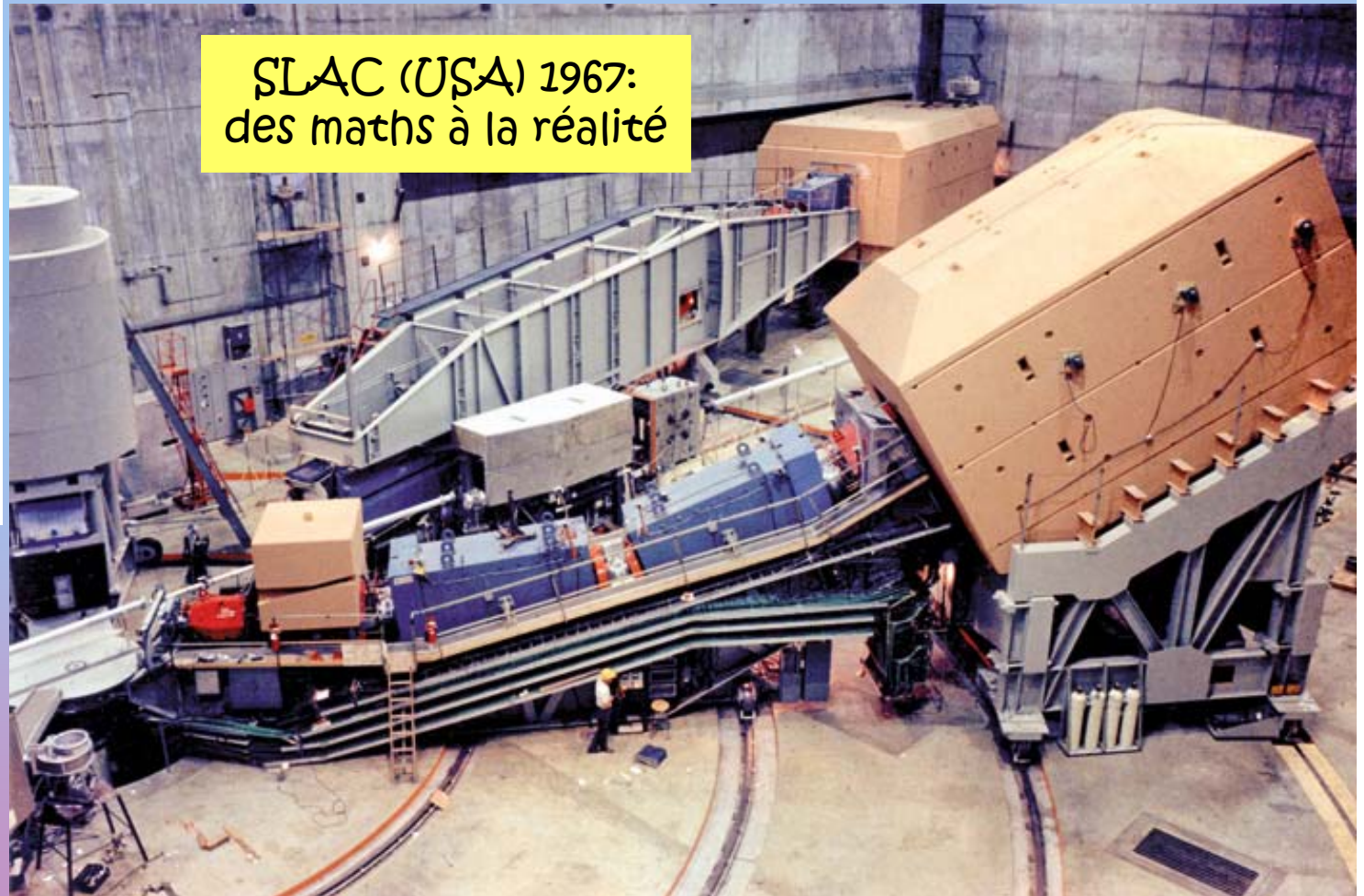
Les quarks « up » et « down »



quarks



SLAC (USA) 1967:
des maths à la réalité



Les neutrinos

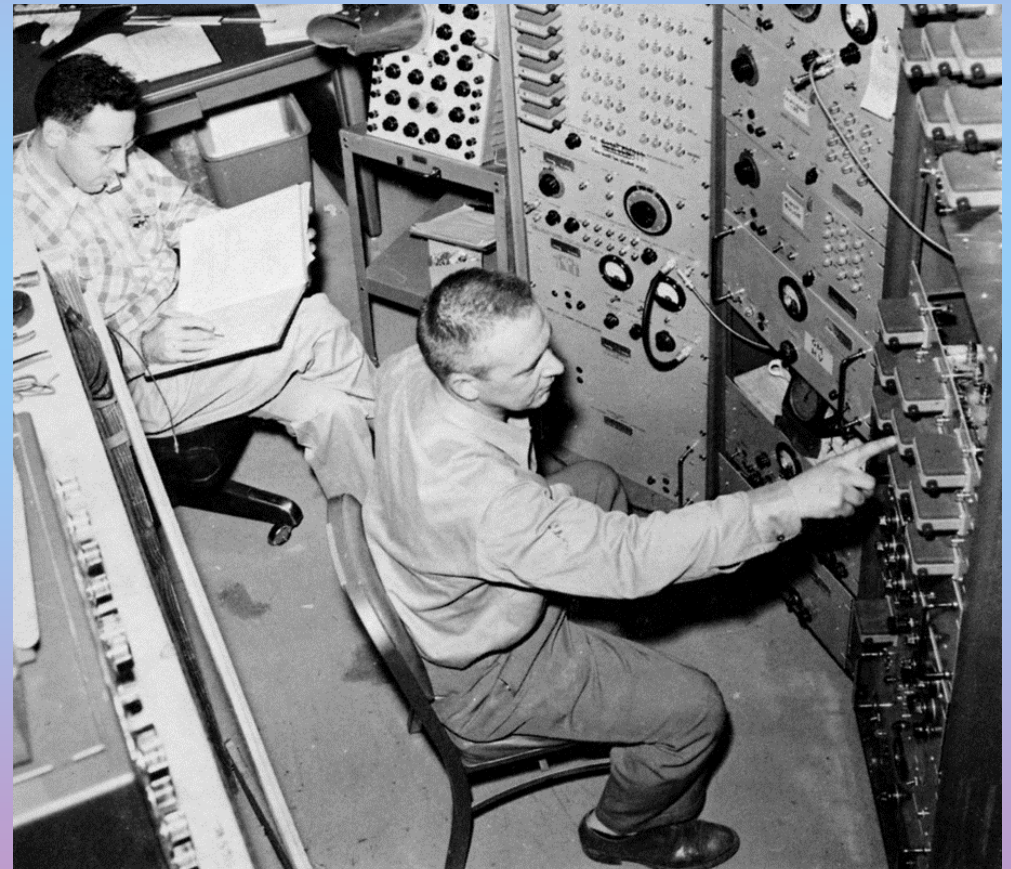
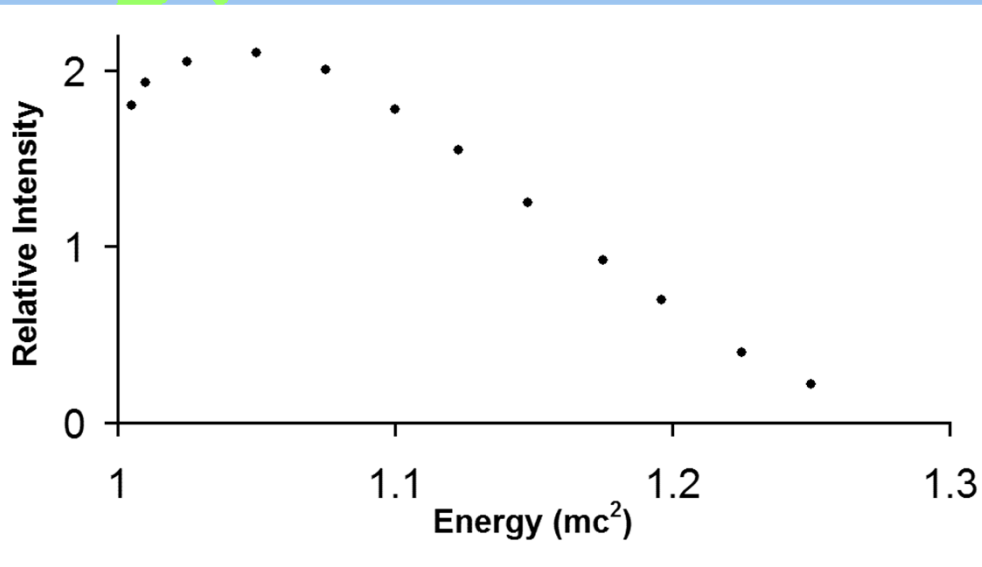


Neutrinos:
interagissent
TRÈS peu

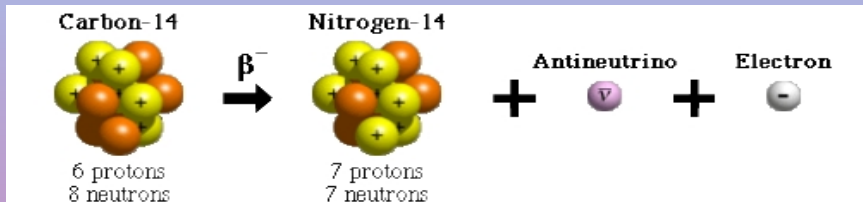
- « inventés » en 1932 par Pauli
- observés en 1956 (F. Reines and C. Cowan)
- deux types de neutrinos (1962)

ν_e et ν_μ

- on sait faire des faisceaux de neutrinos mu ou d'antineutrinos



Frederick Reines (left) and Clyde L. Cowan, Jr. with the control equipment used in their first tentative observations of the neutrino at Hanford, Washington in 1953. Their definitive detection of the (anti) neutrino was performed at Savannah River, Georgia, three years later. (Courtesy General Electric Co.)



Particules élémentaires en 1970

<p>Up PLUME</p> <p>$m = 0,002$ = stable</p>			<p>Down PLUME</p> <p>$m = 0,005$ = 10</p>
<p>Up PLUME</p> <p>$m < 2 \cdot 10^{-18}$ = inconnue</p>			<p>Down PLUME</p> <p>$m = 0,0005485799$ = stable</p>

			<p>Up ADAMS</p> <p>$m < 2 \cdot 10^{-18}$ = inconnue</p>
<p>étrange DAMS</p> <p>$m = 0,1$ = 0,1</p>			<p>Down ADAMS</p> <p>$m = 0,10565837$ = 2197</p>

Photon **BOSON**

$m = 0$
= stable

Interactions
Faibles ?
Forte ?

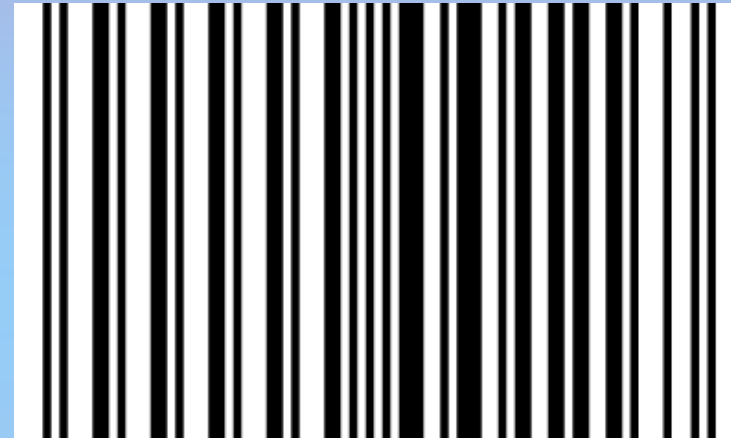
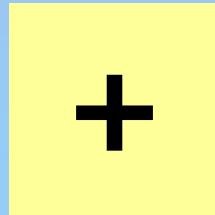
<p>Up MEPLU</p> <p>$m = 0,002$ = stable</p>			<p>Down MEPLU</p> <p>$m = 0,005$ = 10</p>
<p>Up MEPLU</p> <p>$m < 2 \cdot 10^{-18}$ = inconnue</p>			<p>Down MEPLU</p> <p>$m = 0,0005485799$ = stable</p>

			<p>Up SMADA</p> <p>$m < 2 \cdot 10^{-18}$ = inconnue</p>
<p>étrange SMADA</p> <p>$m = 0,1$ = 0,1</p>			<p>Down SMADA</p> <p>$m = 0,10565837$ = 2197</p>

Particule élémentaire



masse



code

Charge :
0, ± 1 , $\pm 1/3$, $\pm 2/3$
Couleur :
0, 1, 2, 3
Spin :
0, $1/2$, 1
Etc ...

Gargamelle

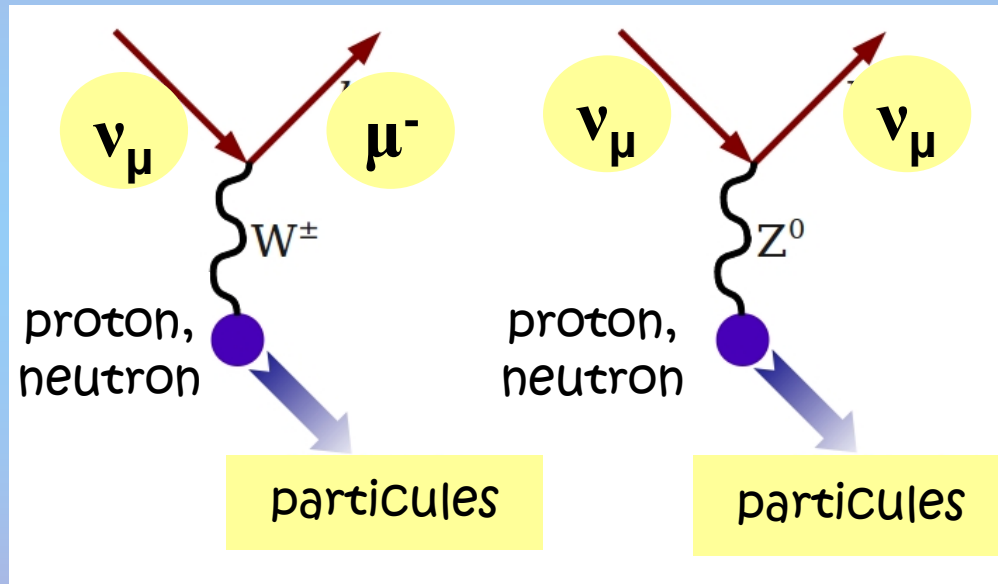
- pas de « théorie »
- le modèle proposé par Fermi (1934) diverge à haute énergie
- particules W^\pm ?



l'interaction faible?

« Courants »
chargés et neutres

interaction = échange
de particule(s)

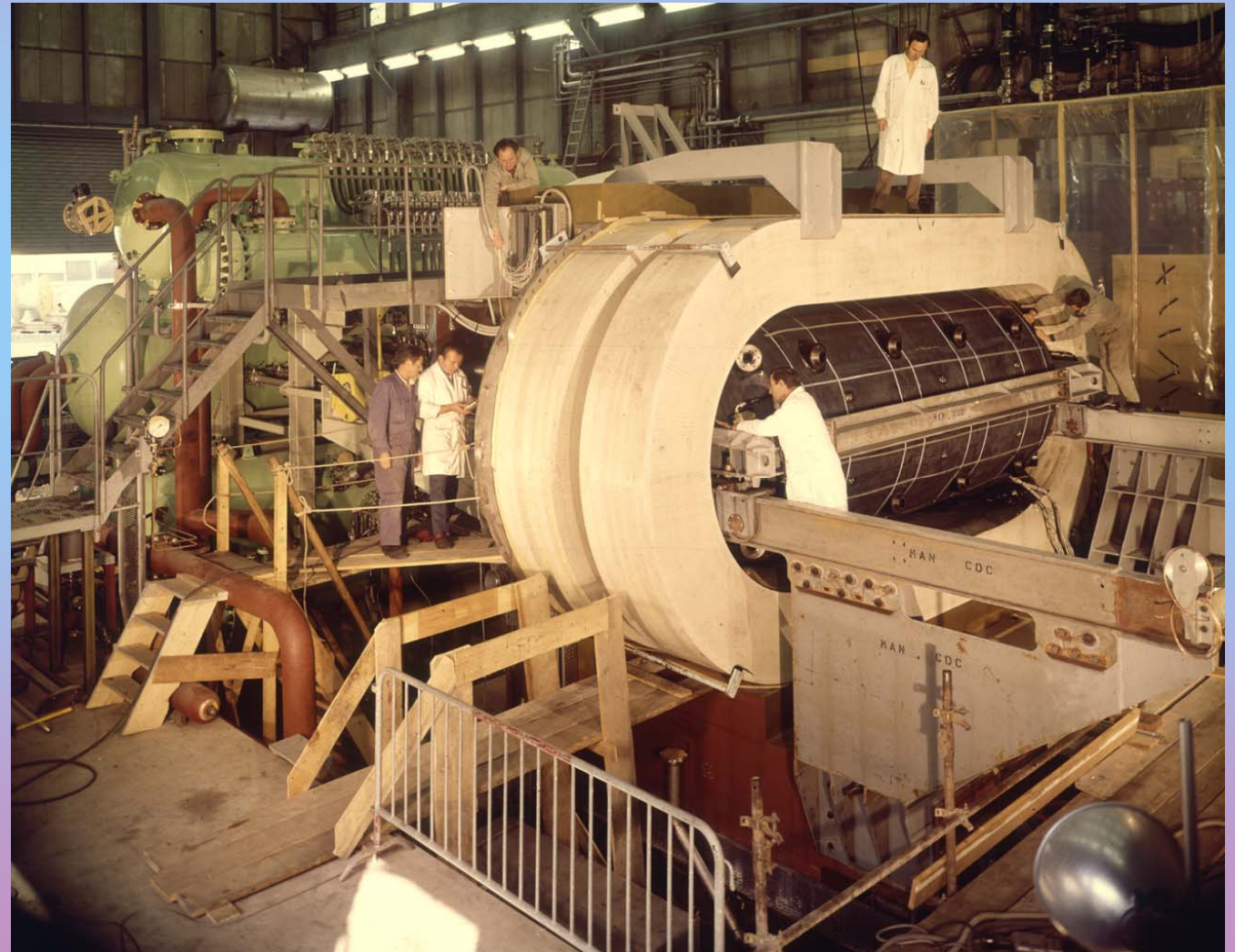
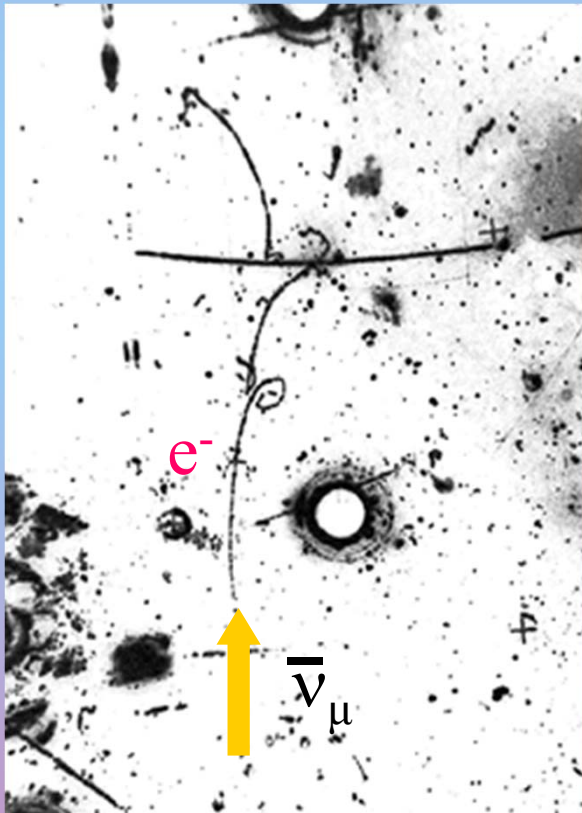


Courant chargé

Courant neutre?

Gargamelle : la découverte

Janvier 1973: Candidat $\bar{\nu}_\mu + e^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu + e^-$ observé à Aachen (100 000 photos).



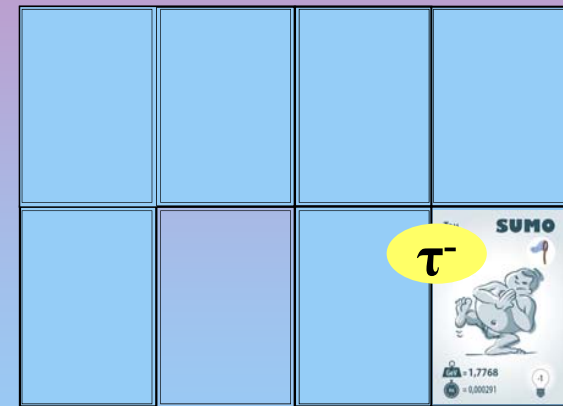
Particules élémentaires en 1975



charm



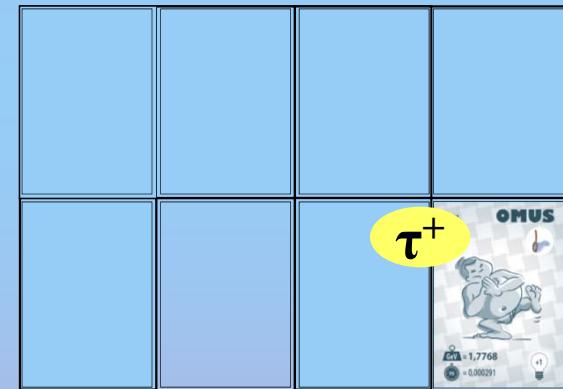
3 couleurs



τ

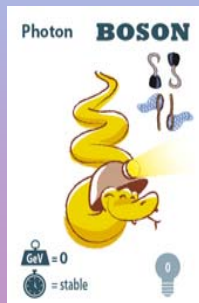


charm



τ^+

1 famille



- W^+ , W^- , Z^0 doivent exister, masses élevées
- 8 gluons doivent exister, masses nulles
- boson de Higgs?

UA1 / UA2

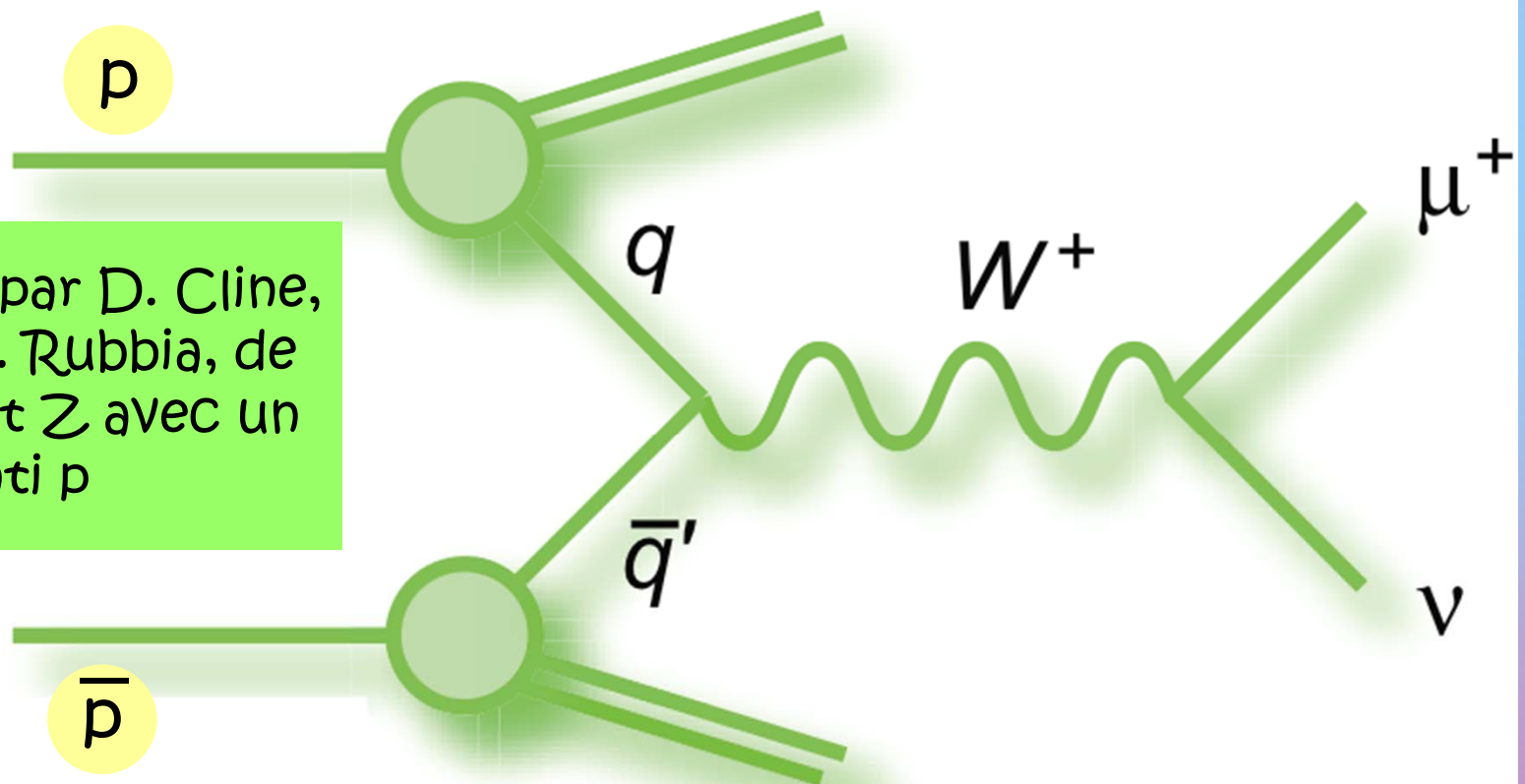


Masses des W
et du Z

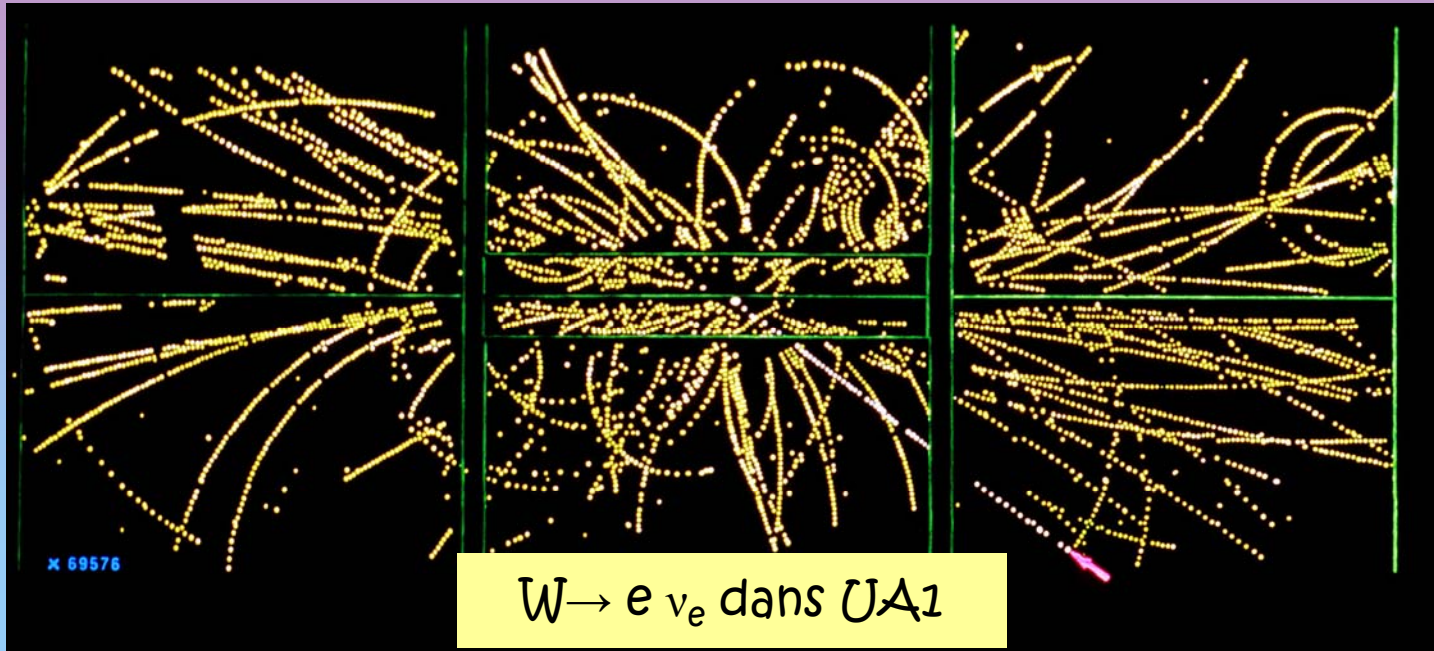
À partir des mesures de Gargamelle et en utilisant la théorie de Glashow, Salam et Weinberg on peut estimer la masse des particules W et Z .

$$m_W \sim 70 \text{ GeV et } m_Z > m_W$$

1976: proposition par D. Cline, P. McIntyre et C. Rubbia, de produire les W_{\pm} et Z avec un collisionneur p-anti p

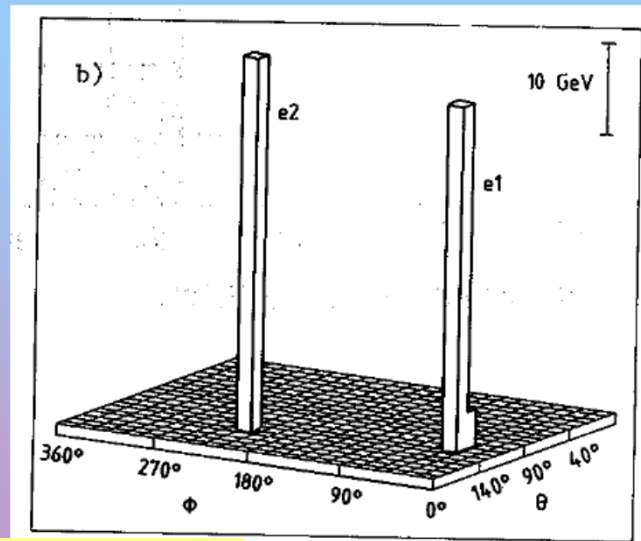
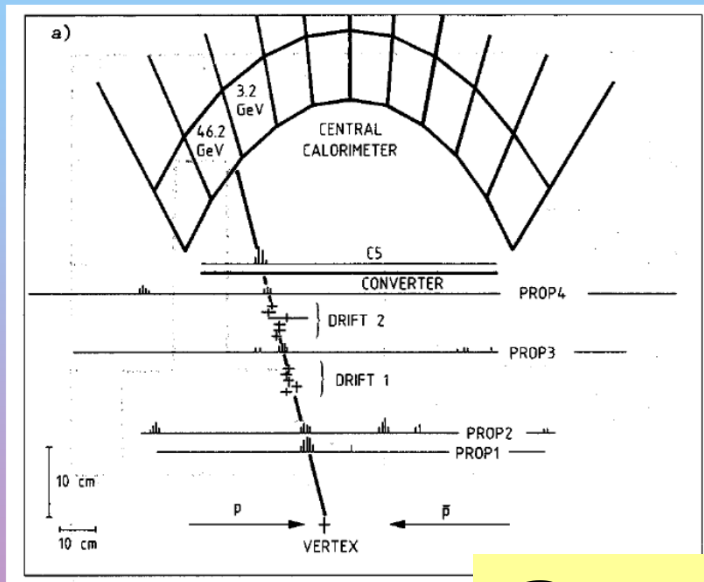


UA1 / UA2



Collisions complexes,
beaucoup de particules
produites.

Seules les désintégrations
des W^\pm en $e \nu_e$ ou $\mu \nu_\mu$
et du Z en $e^+ e^-$ ou $\mu^+ \mu^-$
peuvent être étudiées.



$Z \rightarrow e^+ e^-$ dans UA2

$$m_W = 81 \pm 1 \text{ GeV}$$

$$m_Z = 92 \pm 1 \text{ GeV}$$

UA1 / UA2

- 1982: premières collisions dans le $S\bar{p}\bar{p}S$ et premiers W observés, découverte de jets dans UA2
- 1983: plus de données accumulées et le Z^0 est observé
- 1984: prix Nobel de Physique à C. Rubbia et S. Van der Meer

Annnonce de la découverte des bosons W ,
le 25-1-1983 au CERN



S. Van der Meer

E. Gabathuler

H. Schopper

P. Darriulat

C. Rubbia

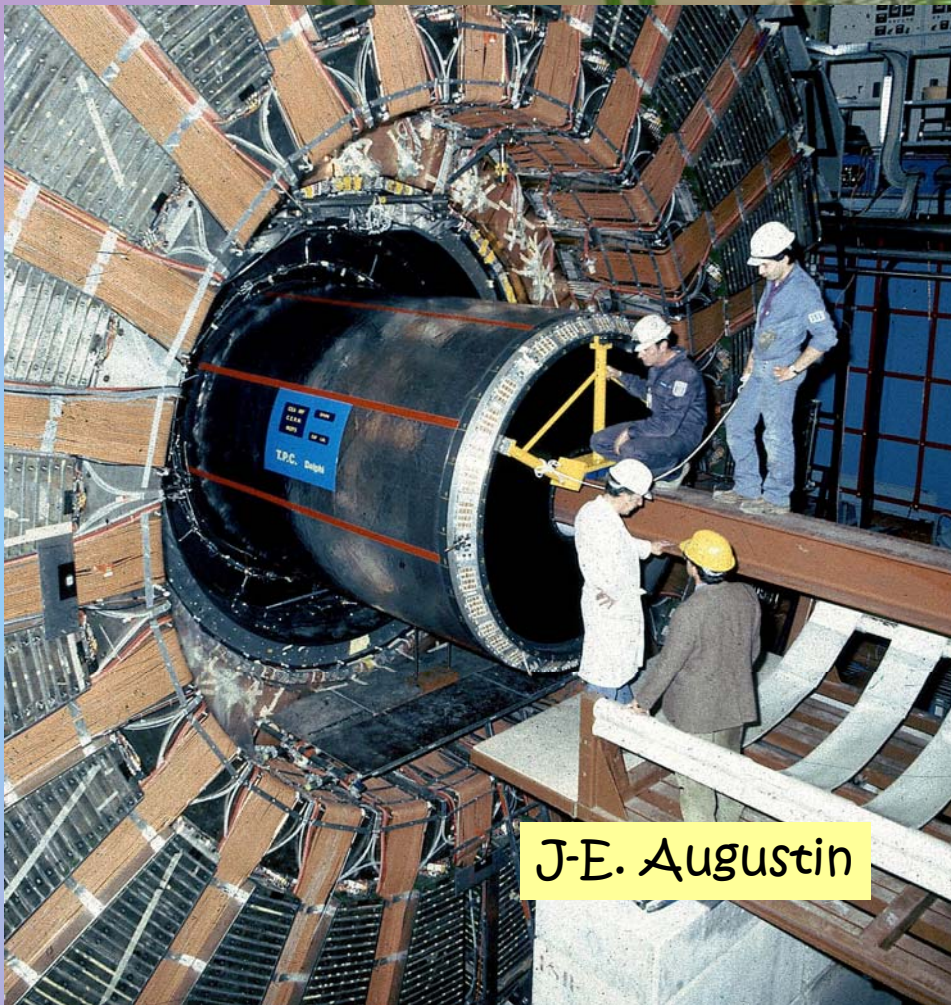
Le LEP

- 1976: premières études ECFA ($e^+ e^-$, 100+100 GeV, 50km)
- 1981: décision de construction au CERN
- 1989: premières collisions



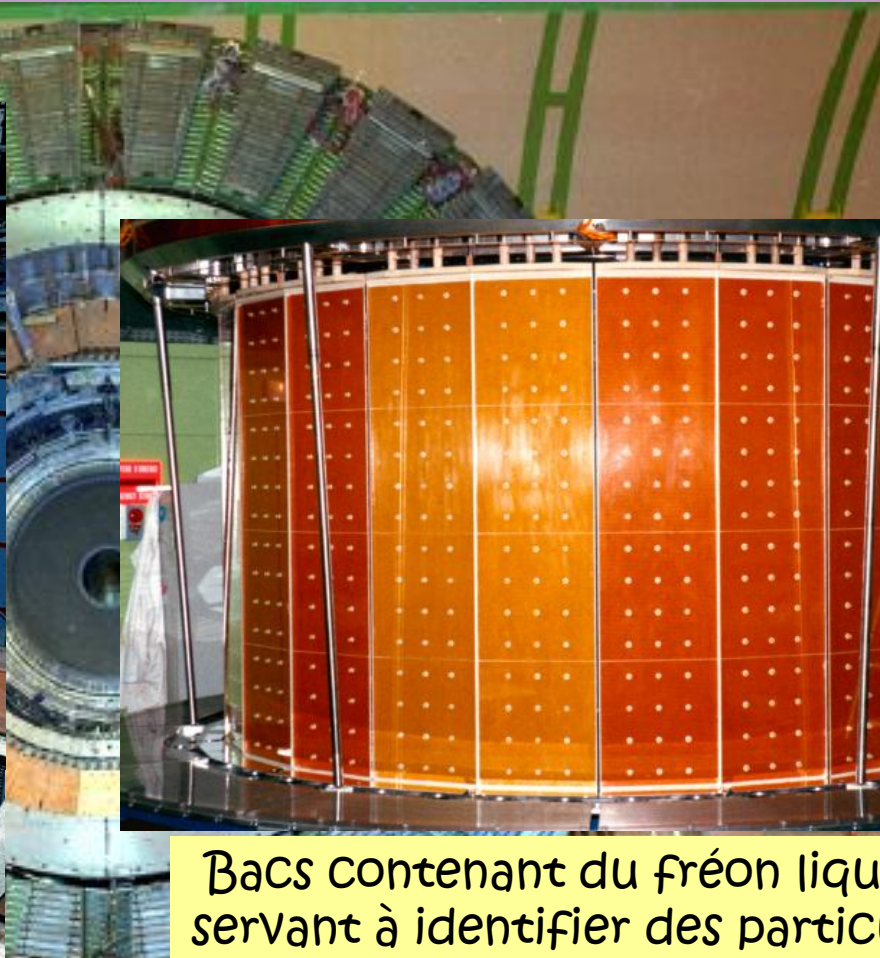
Dans le tunnel du LEP

Delphi



J-E. Augustin

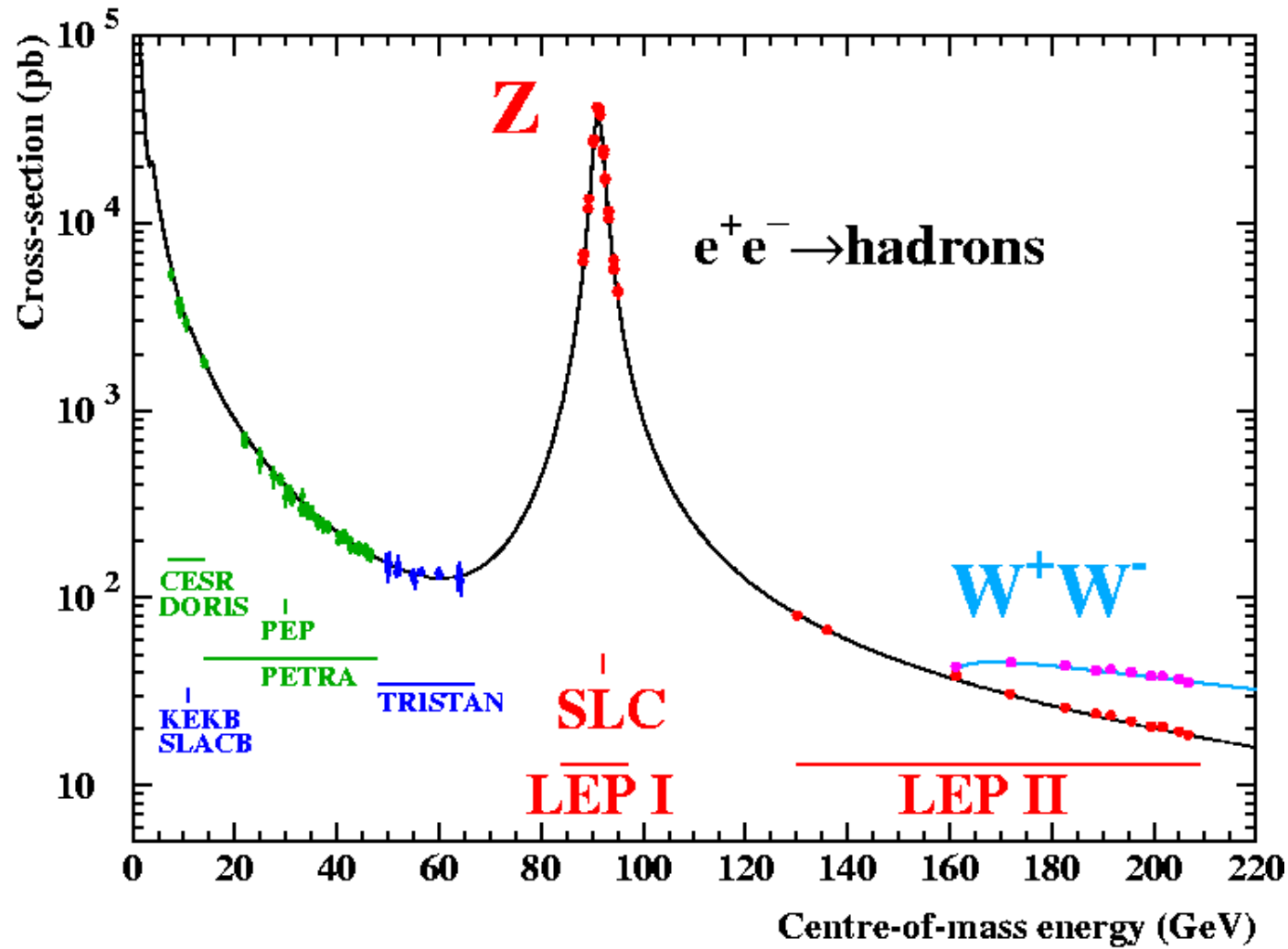
Chambre à dérive



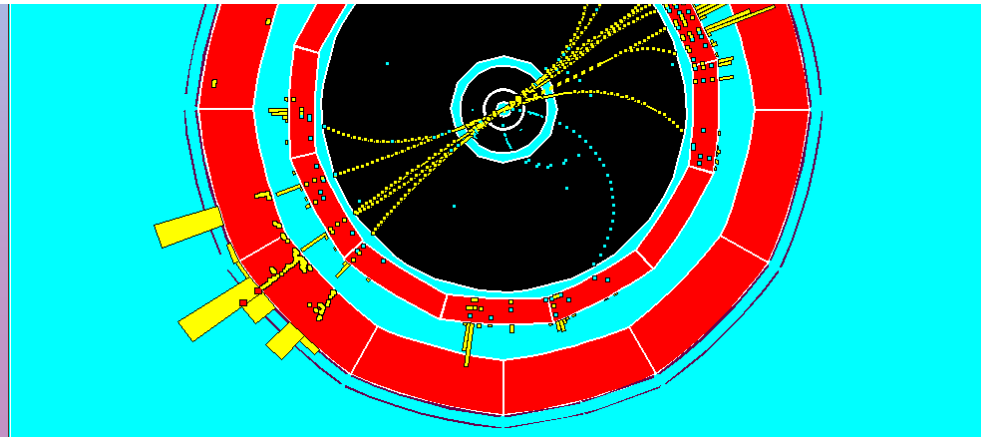
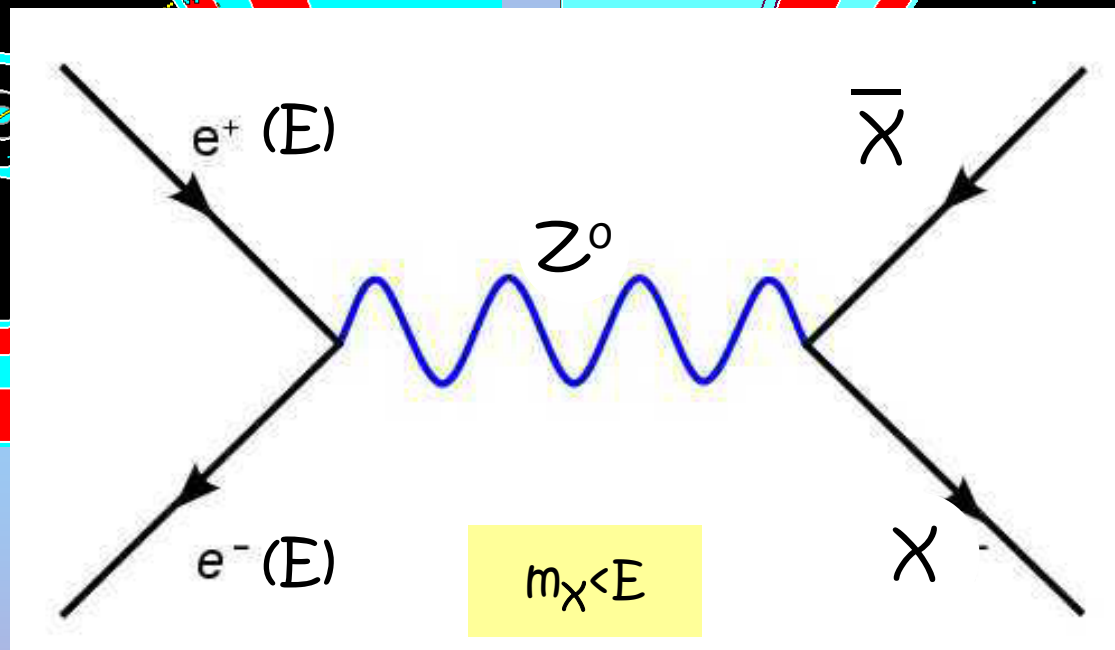
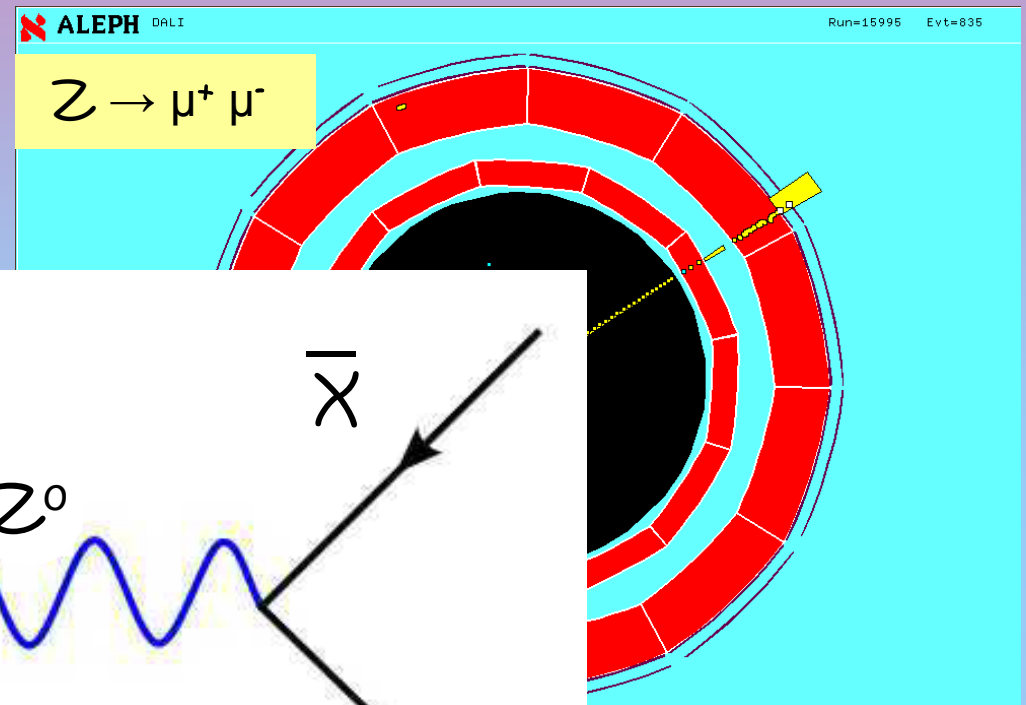
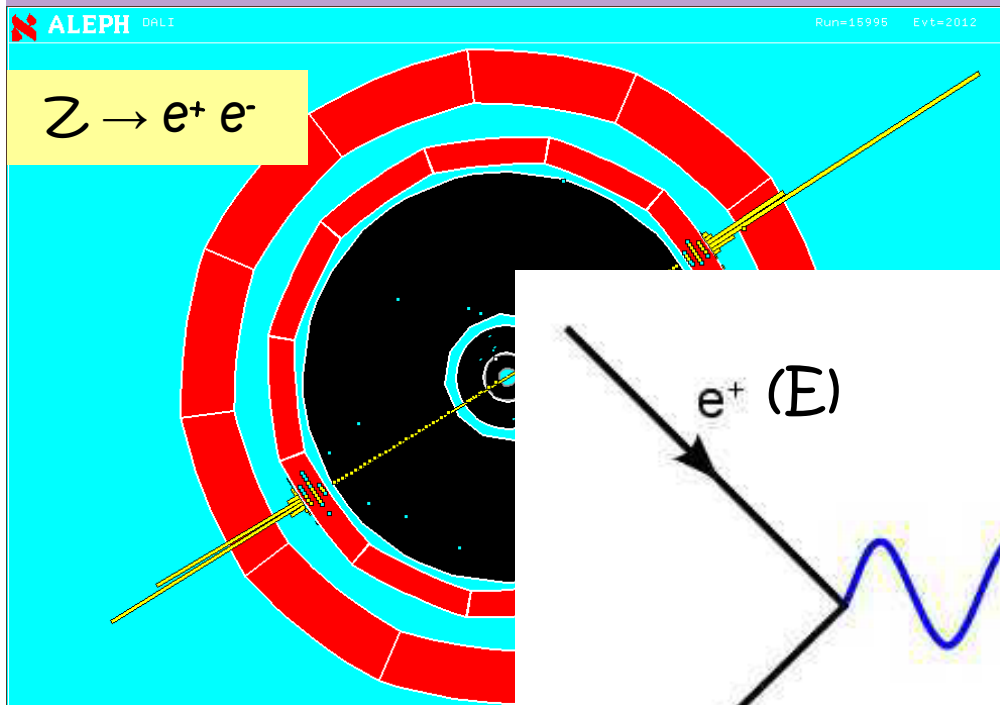
Bacs contenant du fréon liquide servant à identifier des particules



LEP1 (1989-1995)



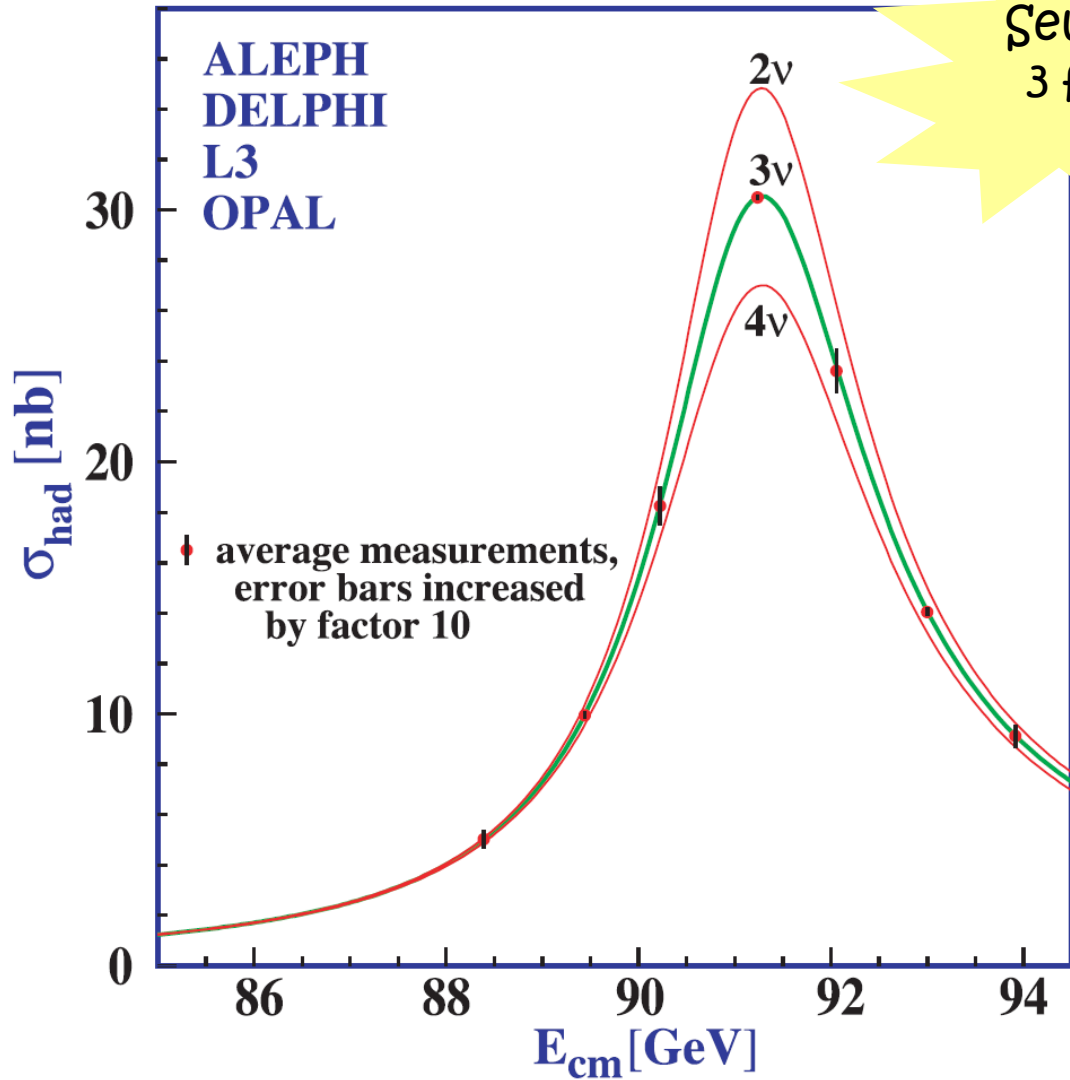
LEP1 (1989-1995)



LEP1 (1989-1995)

Seulement
3 familles

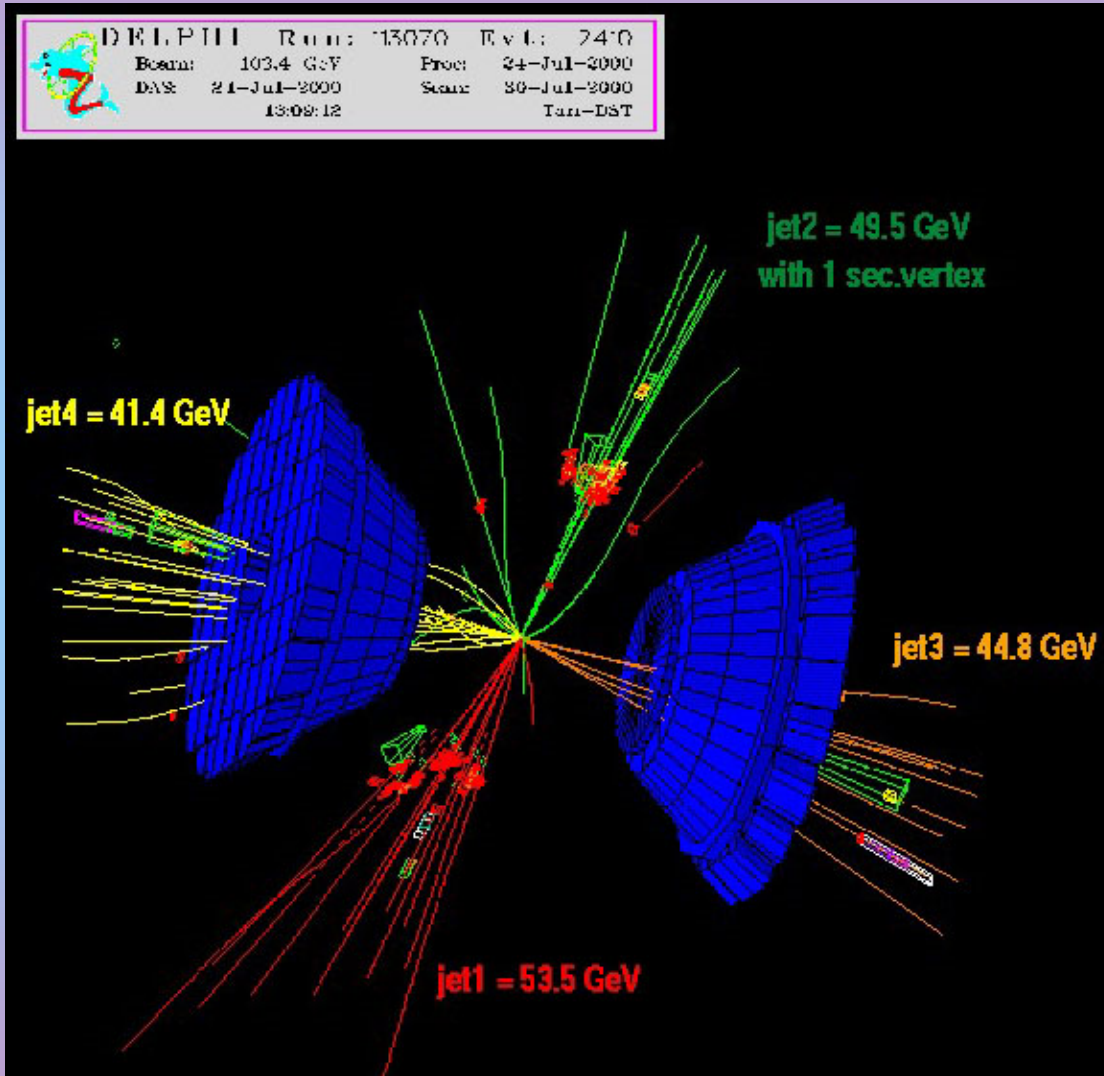
$$m_Z = 91,1875 \pm 0,0021 \text{ GeV}$$



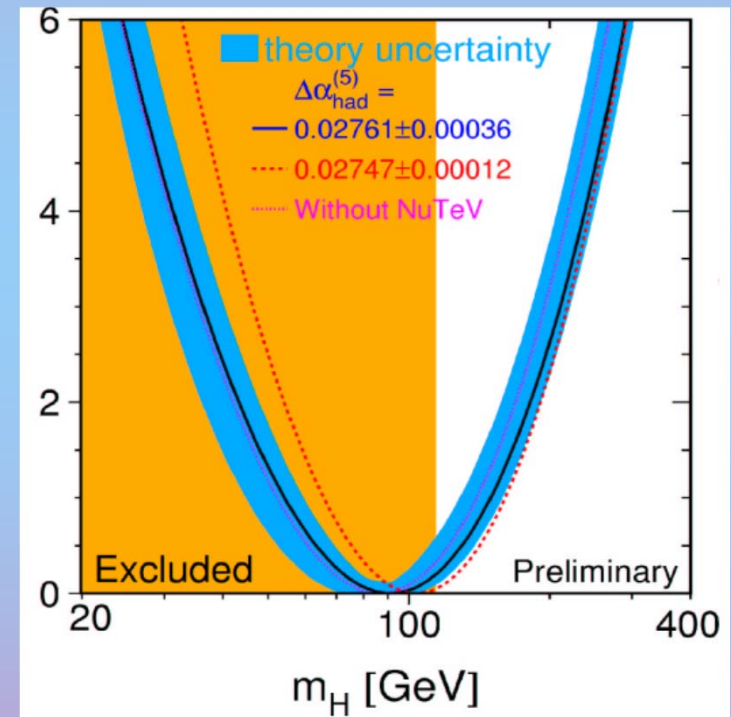
Universalité:
les 3 familles
ont le même
comportement vis-à-vis
des 3 interactions

mesures de précision
de l'interaction forte

LEP2 (1995-2000)

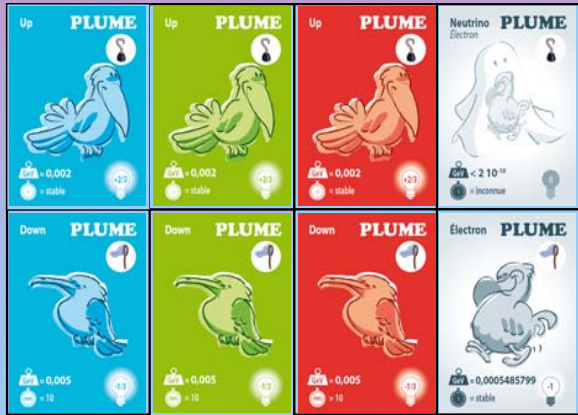


$$m_w = 80.376 \pm 0,033 \text{ GeV}$$



$m_H < 211 \text{ GeV}$ à 95% de confiance
(2003)

Particules élémentaires en 1995



Boson de Higgs?

Le Large Hadron Collider

Conçu dans les années 80, approuvé en 1994, sa construction débute en 1998 dans le tunnel occupé par le LEP.



Collisionneur pp 7 TeV
Supraconducteur (-271,3°C)

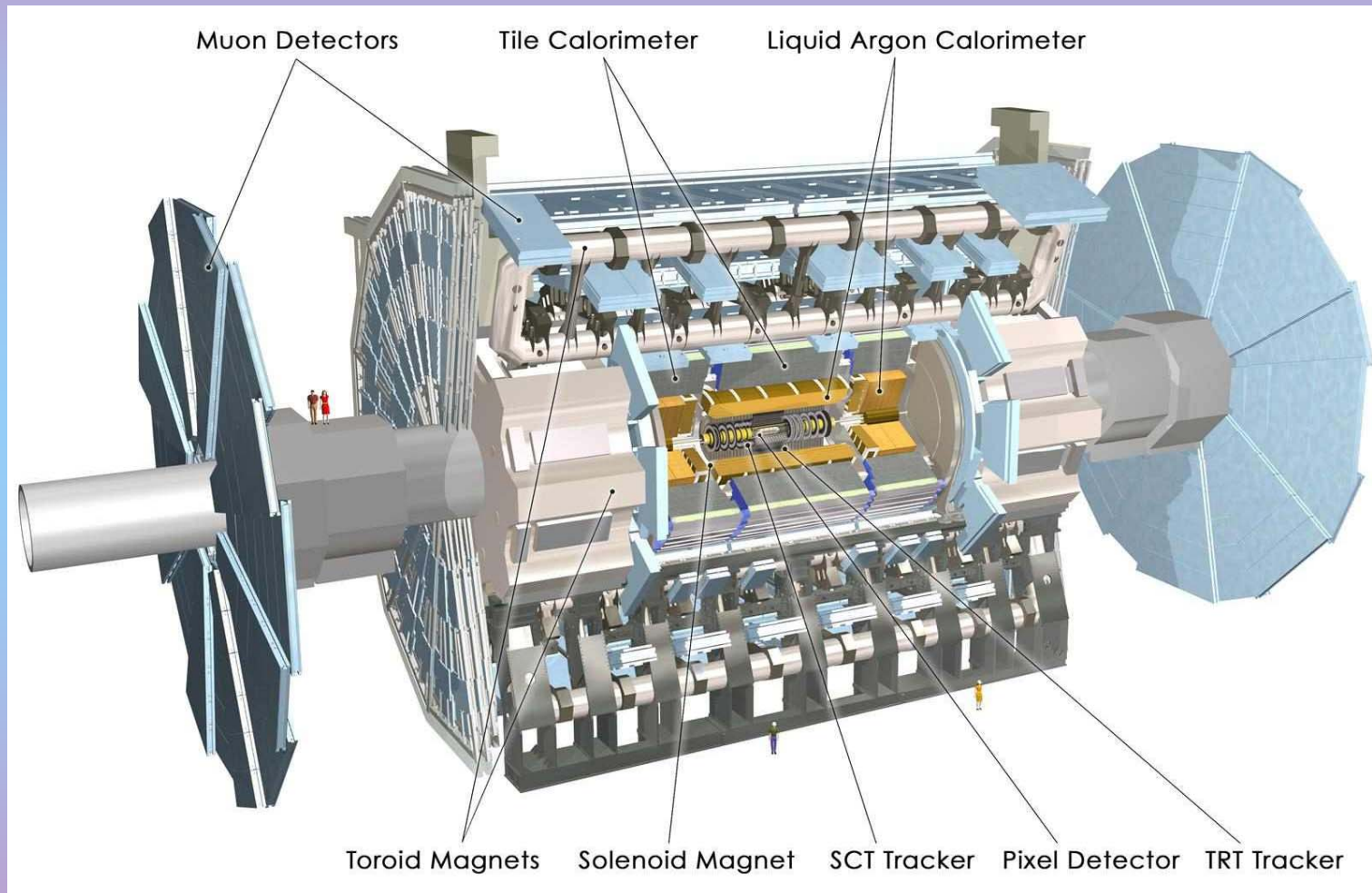
Très intense (600 millions de collisions par seconde)

Car recherche de processus très rares



ATLAS

Recherche du boson de Higgs et de physique nouvelle

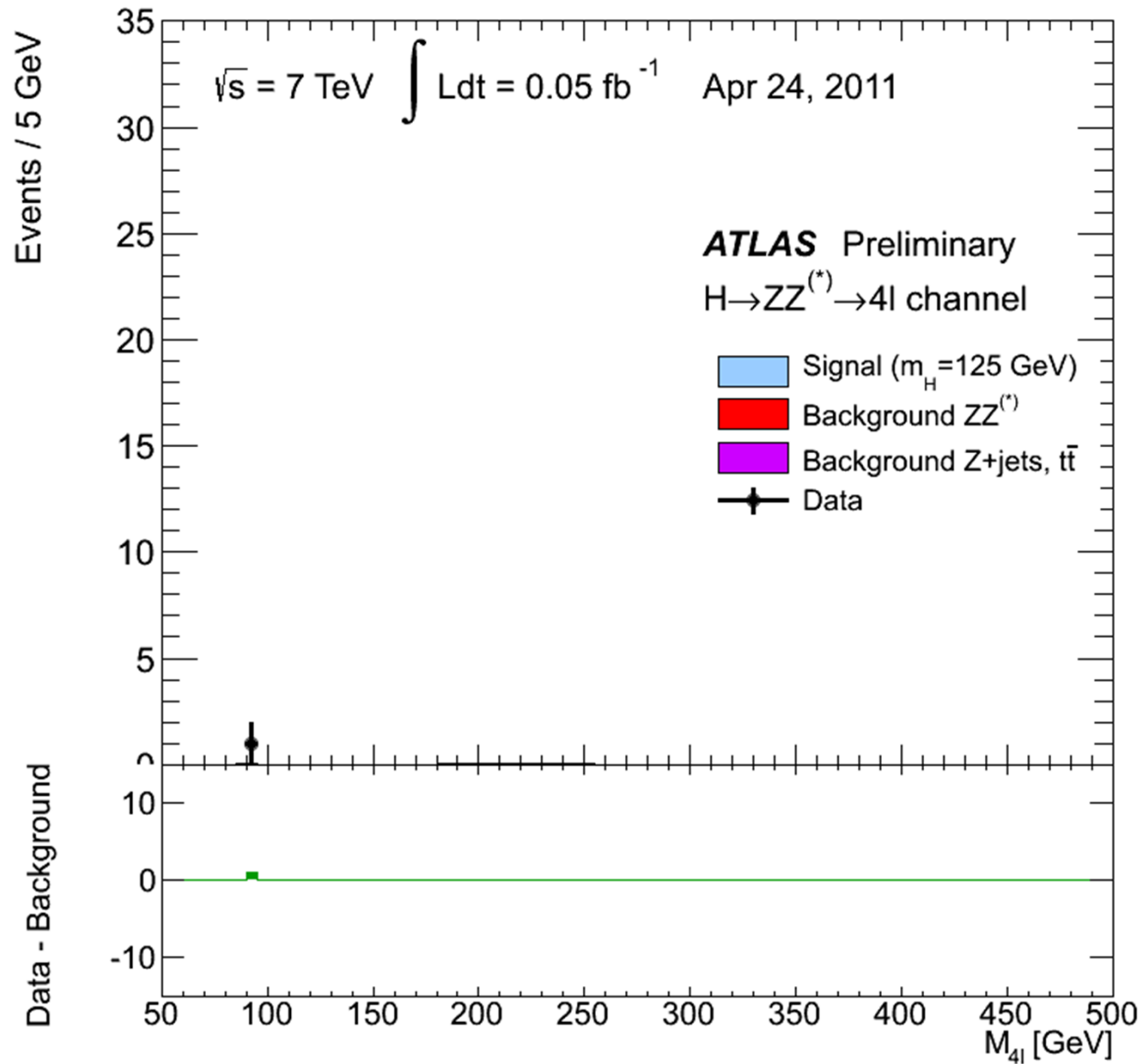


$pp \rightarrow H \chi / pp \rightarrow \chi \sim 1/10\ 000\ 000\ 000$

Le boson de Higgs

Rôle
majeur
du
Calorimètre

$H \rightarrow 4l$



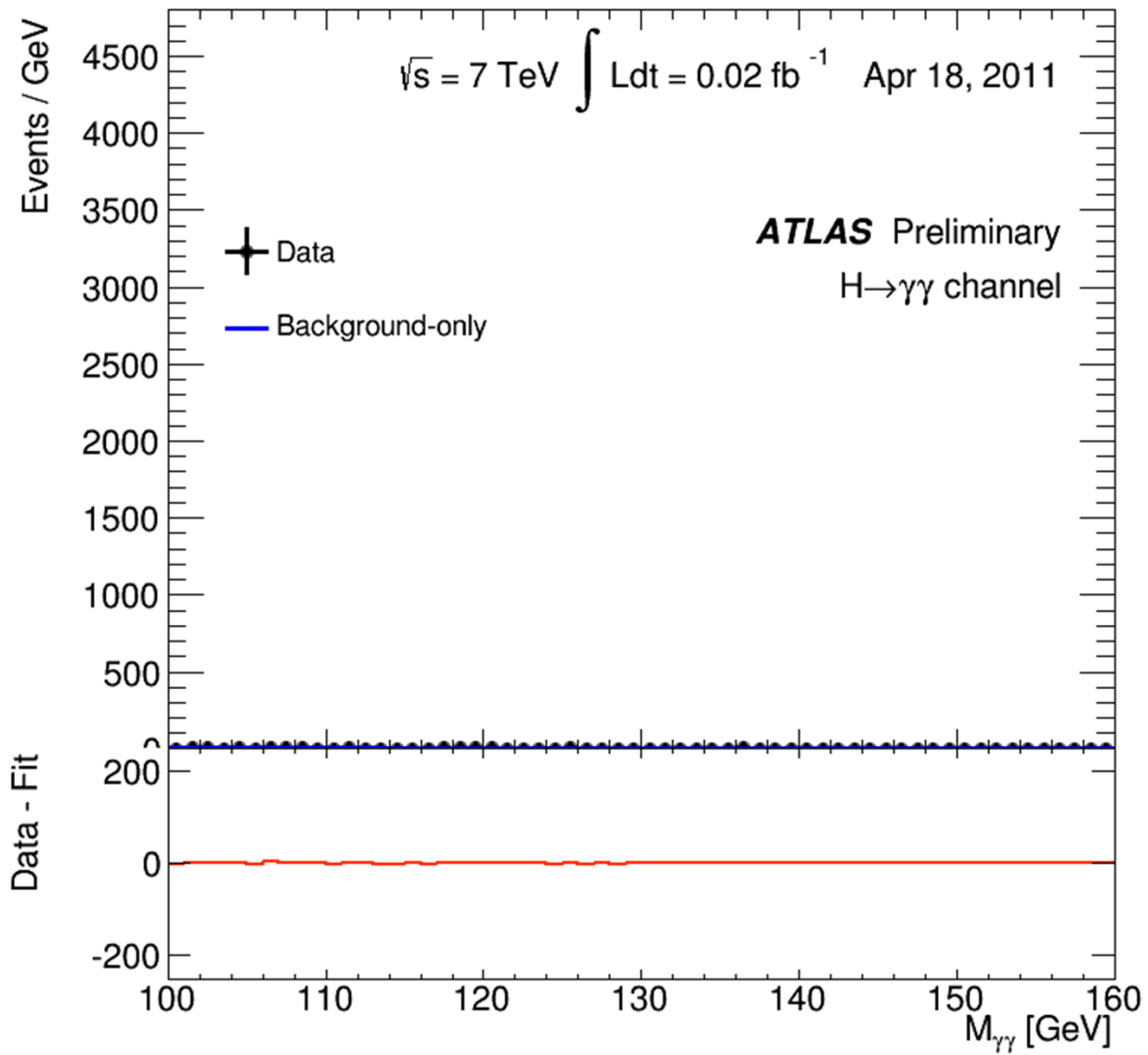
ATLAS
EXPERIMENT
<http://atlas.ch>

e⁻

205113
12611816
12-06-18
10:07:47 CEST

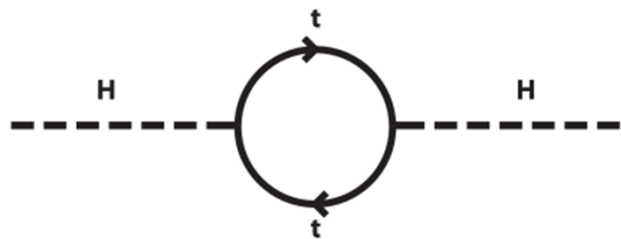
Le boson de Higgs

$H \rightarrow \gamma\gamma$



Et après?

- Pourquoi 3 familles? Leur structure?
- Pourquoi pas d'interaction directe entre légers et quarks?
- Pourquoi les neutrinos ont-ils une masse si faible?
- Comment calculer les masses des quarks et des légers?
- Origine de la matière noire?
- Théorie de la saveur?
- D'où vient la matière de l'Univers?
- Comment empêcher que les masses (calculées avec la théorie actuelle) ne soient infiniment élevées?
- Pourquoi l'interaction forte est-elle symétrique entre matière et antimatière?



$$\Delta(m_H^2) \sim \Lambda^2$$

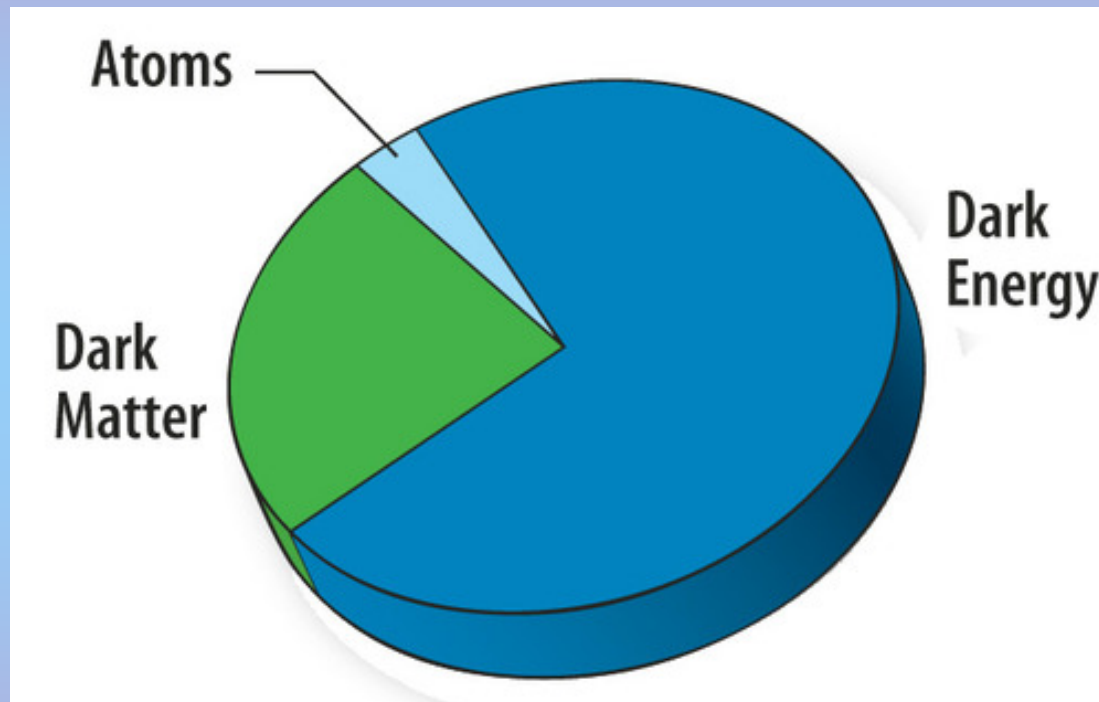
Le boson de Higgs devrait être excessivement lourd avec la théorie actuelle



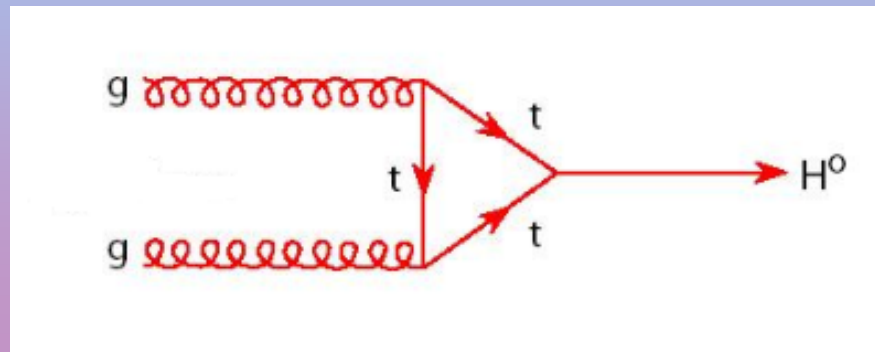
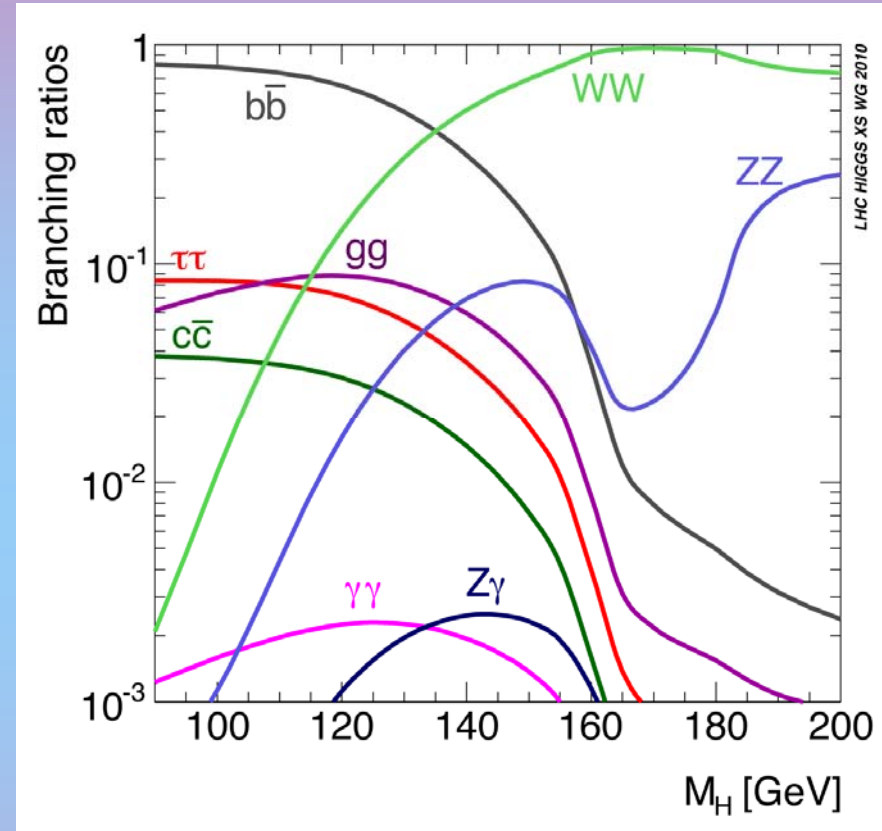
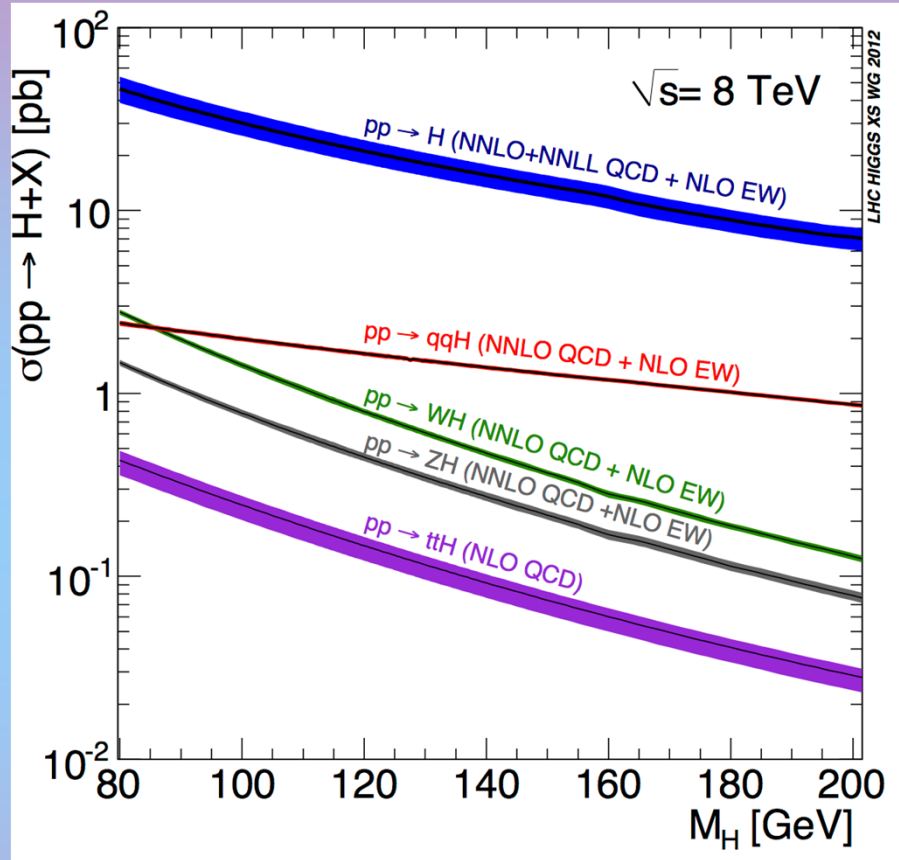
$$\Delta(m_H^2) \sim -\Lambda^2, \text{ supersymétrie}$$

Supplément

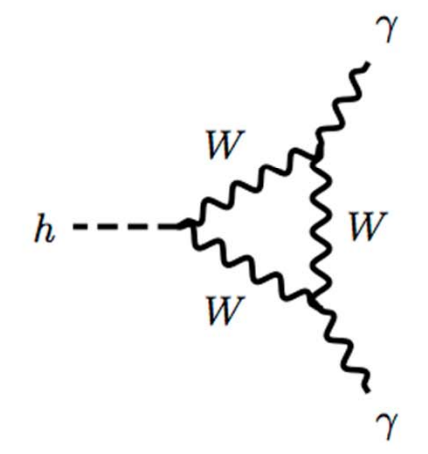
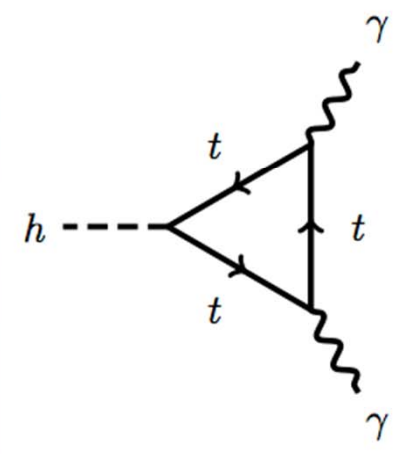
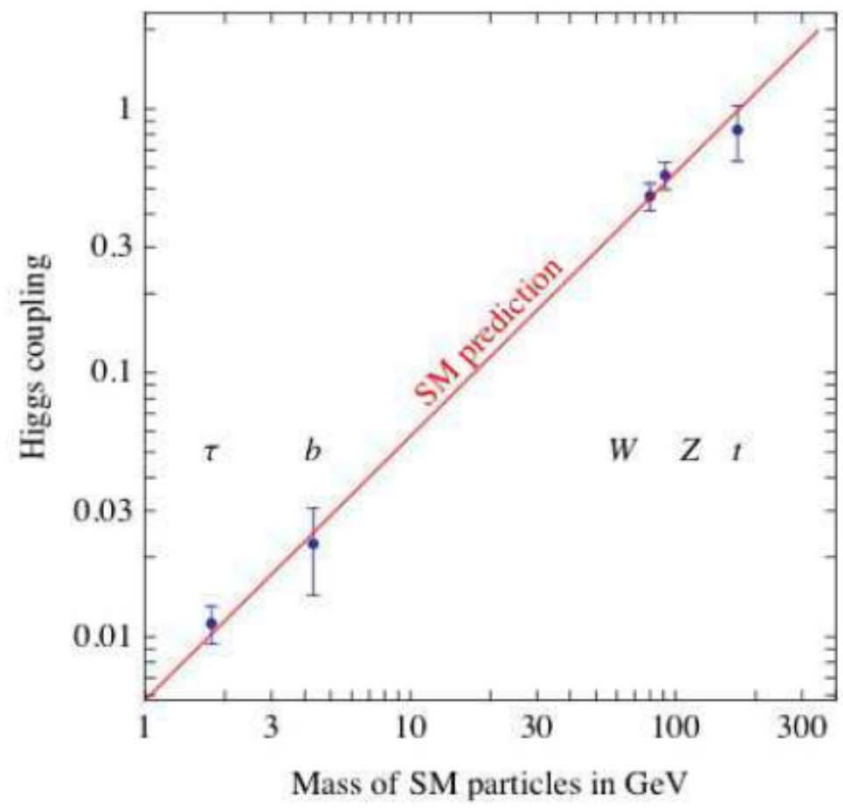
Composition de l'Univers



Higgs production



Higgs properties



Unification des forces

