

Détecteurs en Vrac

11 Mars au 13 Mars, Fréjus

- 1/ Détecter quoi \leftrightarrow pourquoi (1h)
- 2/ Interaction particules matière (1h)
- 3/ Généralités sur les détecteurs (1h)
- 4/ Application sociétales (1h)
- 5/ Exemple avec D0/ATLAS (Fermilab/CERN) (1h)




Laurent Chevalier

CEA Saclay DRF/irfu/DPhP

laurent.chevalier@cea.fr

CERN (CH)	LEP	DELPHI	1988-1992
Mesures paramètres modèle standard			
FERMILAB (USA)	TeVatron	D0	1991-1995
première observation du quark top			
CERN (CH)	LHC	ATLAS	1994-2024
première observation du boson de Higgs			
Saclay (FR)		G-LEAD	2017-2024
recherche matière sombre (DM) sous forme d'Axion _{QCD}			
Mainz (DE)		P2	2023-2024
mesure de $\sin^2(\theta) \sim 100$ MeV			

Références


 **PDG**
particle data group
1957-2017

<http://pdg.lbl.gov>

About PDG | PDG Authors | PDG Citation | News

The Review of Particle Physics (2018)

M. Tanabashi et al. (Particle Data Group), Phys. Rev. D **98**, 030001 (2018).



- pdgLive - Interactive Listings
- Summary Tables
- Reviews, Tables, Plots
- Particle Listings
- Search

ORDER: Book & Booklet

DOWNLOAD: Book, Booklet, more

Previous Editions (& Errata) 1957-2017	Physical Constants
Errata in current edition	Astrophysical Constants
Figures in reviews	Atomic & Nuclear Properties
Mirror Sites	Astrophysics & Cosmology



WIKIPÉDIA
L'encyclopédie libre

Remarques liminaires

Équivalence entre Énergie

Fréquence (longueur d'onde) $\rightarrow E=h\nu$

Température $\rightarrow E=kT$

Masse $\rightarrow E=mc^2$

Énergies sont exprimées en électron Volts : MeV, GeV, TeV...

$$1\text{eV}=1.610^{-19}\text{J}$$

$h\sim 4.10^{-24}\text{ GeV}\cdot\text{s}$ constante de Planck

Les masses sont en MeV/c^2 , GeV/c^2 ... (*souvent on oublie le c^2 !*)

proton = $0,938\dots\text{ GeV}/c^2 = 1,672\dots 10^{-27}\text{ kg}$

électron = $511\dots\text{keV}/c^2 = 1.11\dots 10^{-31}\text{ kg}$

Les températures sont exprimées en énergie...

$1\text{ eV} = 11627\text{ K}$, $E=1/2kT$ par degré de liberté

$k\sim 10^{-13}\text{GeV} / \text{K}$ constante de Boltzman

Remarques liminaires

Équivalence entre Énergie

Fréquence (longueur d'onde) $\rightarrow E=h\nu$

Température $\rightarrow E=kT$

Masse $\rightarrow E=mc^2$

Énergies sont exprimées en électron Volts : MeV, GeV, TeV...

$$1\text{eV}=1.610^{-19}\text{J}$$

$$h\sim 4.10^{-24}\text{ GeV}\cdot\text{s}\text{ constante de Planck}$$

Les masses sont en MeV/c^2 , GeV/c^2 ... (*souvent on oublie le c^2 !*)

$$\text{proton} = 0,938... \text{ GeV}/c^2 = 1,672... 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\text{électron} = 511.....\text{keV}/c^2 = 1.11.....10^{-31} \text{ kg}$$

Les températures sont exprimées en énergie...

$$1 \text{ eV} = 11627 \text{ K} , E=1/2kT \text{ par degré de liberté}$$

$$k\sim 10^{-13}\text{GeV} / \text{K}\text{ constante de Boltzman}$$

Remarques liminaires

Équivalence entre Énergie

Fréquence (longueur d'onde) $\rightarrow E=h\nu$

Température $\rightarrow E=kT$

Masse $\rightarrow E=mc^2$

Énergies sont exprimées en électron Volts : MeV, GeV, TeV...

$$1\text{eV}=1.610^{-19}\text{J}$$

$h\sim 4.10^{-24}$ GeV.s constante de Planck

Les masses sont en MeV/c^2 , GeV/c^2 ... (*souvent on oublie le c^2 !*)

proton = $0,938\dots \text{GeV}/c^2 = 1,672\dots 10^{-27}$ kg

électron = $511\dots \text{keV}/c^2 = 1.11\dots 10^{-31}$ kg

Les températures sont exprimées en énergie...

$1 \text{ eV} = 11627 \text{ K}$, $E=1/2kT$ par degré de liberté

$k\sim 10^{-13}\text{GeV} / \text{K}$ constante de Boltzman

Remarques liminaires

Équivalence entre Énergie

Fréquence (longueur d'onde) $\rightarrow E=h\nu$

Température $\rightarrow E=kT$

Masse $\rightarrow E=mc^2$

Énergies sont exprimées en électron Volts : MeV, GeV, TeV...

$$1\text{eV}=1.610^{-19}\text{J}$$

$$h\sim 4.10^{-24}\text{ GeV}\cdot\text{s}\text{ constante de Planck}$$

Les masses sont en MeV/c^2 , GeV/c^2 ... (*souvent on oublie le c^2 !*)

$$\text{proton} = 0,938... \text{ GeV}/c^2 = 1,672... 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\text{électron} = 511.....\text{keV}/c^2 = 1.11.....10^{-31} \text{ kg}$$

Les températures sont exprimées en énergie...

$$1 \text{ eV} = 11627 \text{ K} , E=1/2kT \text{ par degré de liberté}$$

$$k\sim 10^{-13}\text{GeV} / \text{K}\text{ constante de Boltzman}$$

Remarques liminaires

Anthropomorphisme

C=299 792 458 m/s

↓ tableau

unités naturelles



Remarques liminaires

sérendipité

aptitude à faire par hasard une découverte inattendue
et à en saisir l'utilité scientifique

Fullerènes
Velcro
Micro-onde

Infra-rouge
Rayon X
Radioactivité
Noyau atomique

Aspirine
Quinine
Pénicilline
Structure hélicoïdale de l'ADN



Détecteurs en Vrac

11 Mars au 13 Mars, Fréjus

- 1/ Détecter quoi \leftrightarrow pourquoi (1h)
- 2/ Interaction particules matière (1h)
- 3/ Généralités sur les détecteurs (1h)
- 4/ Application sociétales (1h)
- 5/ Exemple avec D0/ATLAS (Fermilab/CERN) (1h)



1/ Détecter quoi ↔ pourquoi

- Pourquoi → comprendre
 - engendre d'autres « Pourquoi »
 - meilleures connaissances
- Quoi → ce qui est détectable ;-)
 - avec quoi ?
 - dépend de l'échelle d'énergie

Remarques liminaires

Karl Popper

étude de la nature

- mathématique
champ: particules \leftrightarrow ondes
- mesures & erreurs de mesures
échelle d'observation
dimension \rightarrow extension spatiale
- détection
- modélisation

Remarques liminaires

étude de la nature

- mathématique
 - champ: particules \leftrightarrow ondes
- mesures & erreurs de mesures
 - échelle d'observation
 - dimension \rightarrow extension spatiale
- détection
- modélisation

Remarques liminaires

Particules



élémentaires

pas de structure interne **déTECTABLE**

Remarques liminaires

Particules



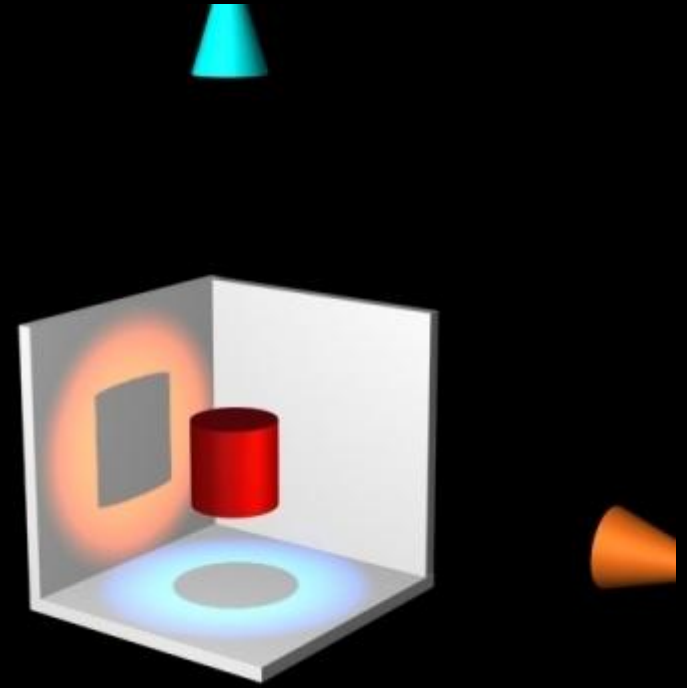
Dualité ondes/particules

Ondes



Description mathématique

Champs



Remarques liminaires

Particules



Dualité ondes/particules → fentes de Young

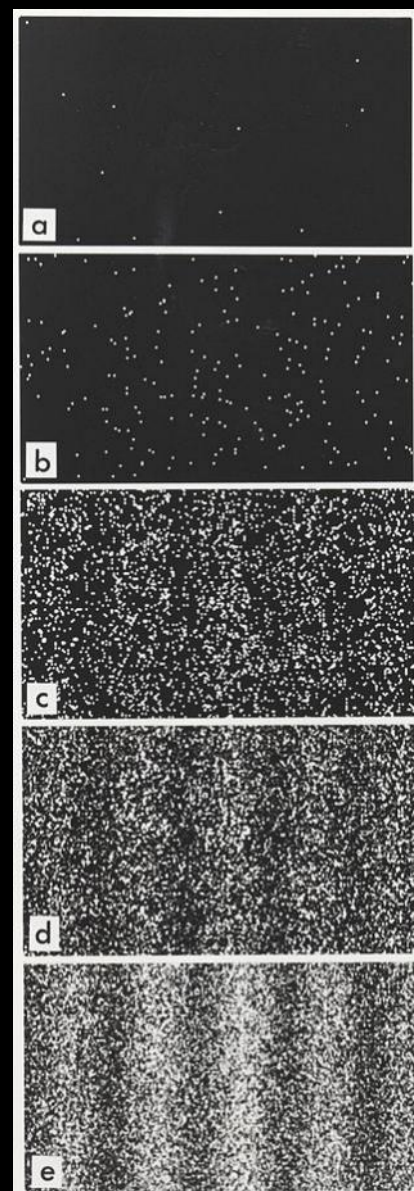
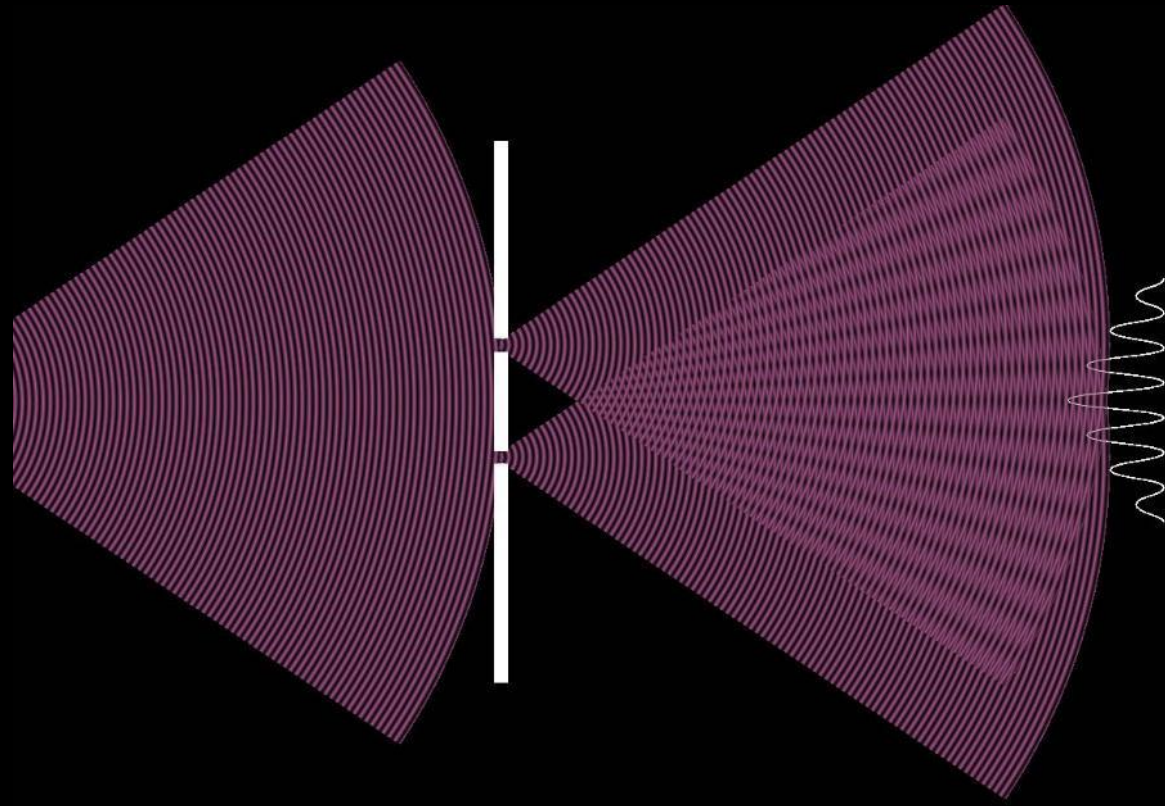
Ondes



Description mathématique

Champs

Fentes de Young



temps a → b



Remarques liminaires

Particules



Dualité ondes/particules → fentes de Young

Ondes



Description mathématique

Champs

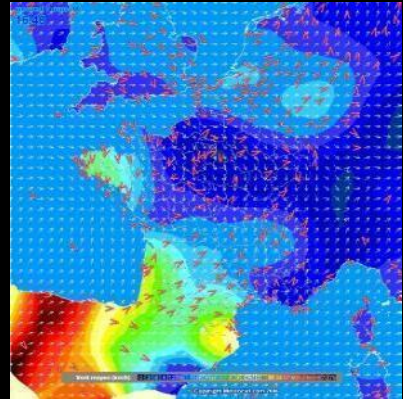
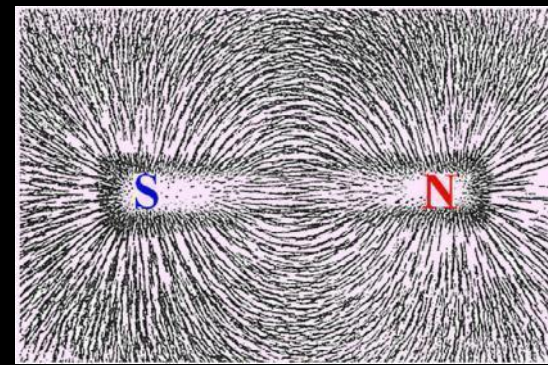
Remarques liminaires

notion de champ

- Champ électrique
- Champ magnétique
- Champ de gravitation
- Champ de température
- Champ de vitesse de vent
- ...

scalaire (spin 0)

vecteur (spin 1)



Le **champ** est un objet mathématique qui associe aux points de l'espace des valeurs (température, direction et sens du vent,...)
→ champ électromagnétique

Remarques liminaires

étude de la nature

- mathématique
champ: Particules ↔ Ondes
- mesures & erreurs de mesures
échelle d'observation
dimension → extension spatiale
- détection
- modélisation

Remarques liminaires

étude de la nature & mesures

1. Observation (mesures: construction d'un détecteur)

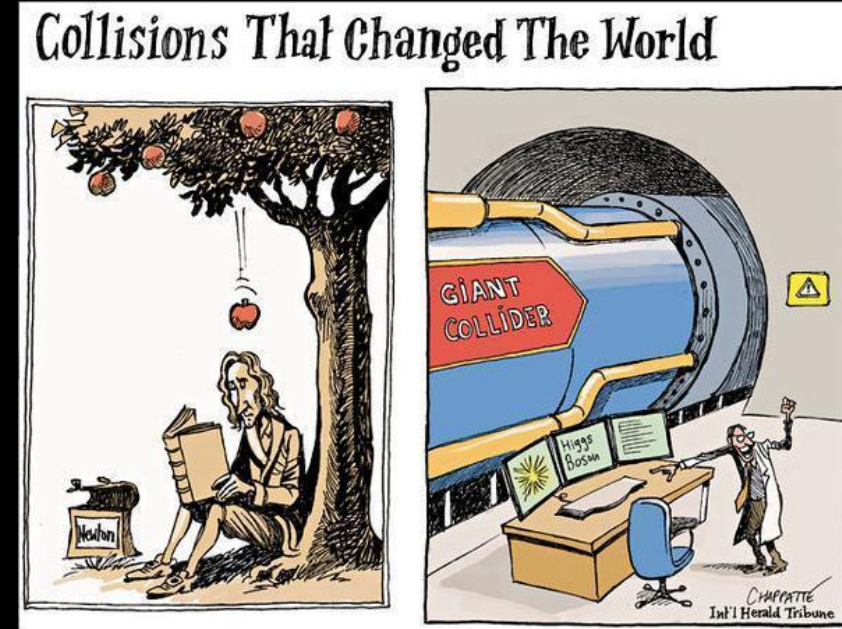
1. Chute d'une Pomme d'un arbre
2. **matière** + **forces**

2. Modélisation (simulations)

1. $P=GmM/R^2$
2. **Modèle standard**

3. Prédiction

1. La position des planètes dans le ciel d'été
2. **Observation du boson de Higgs**



Remarques liminaires

mesures



erreurs de mesures

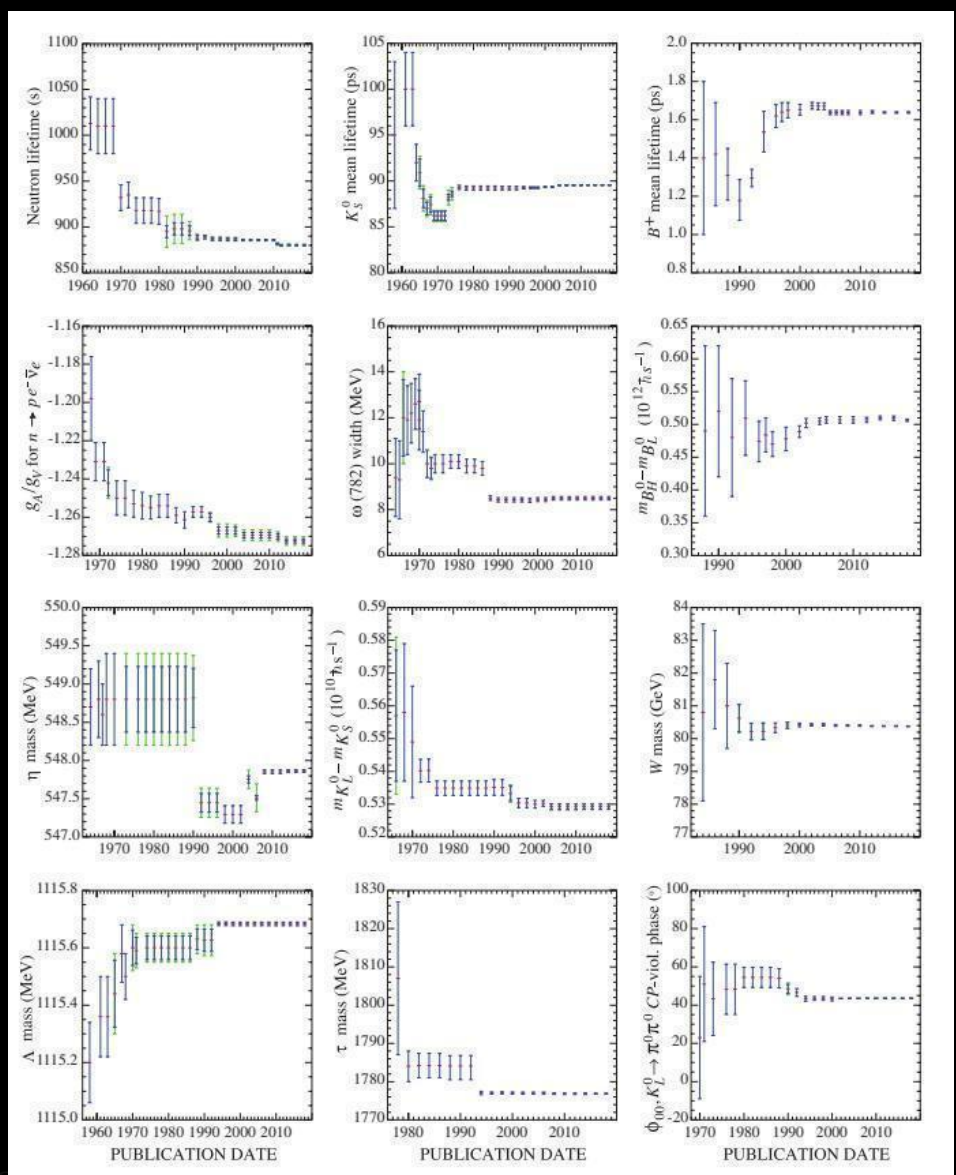


incertitudes de mesures

remarque :

relation d'incertitude d'Heisenberg

relation d'indétermination d'Heisenberg

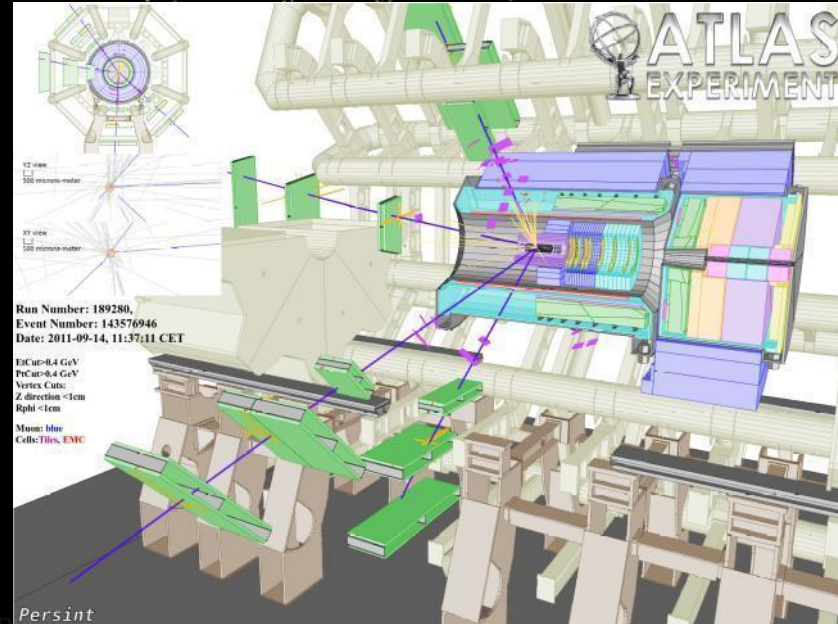
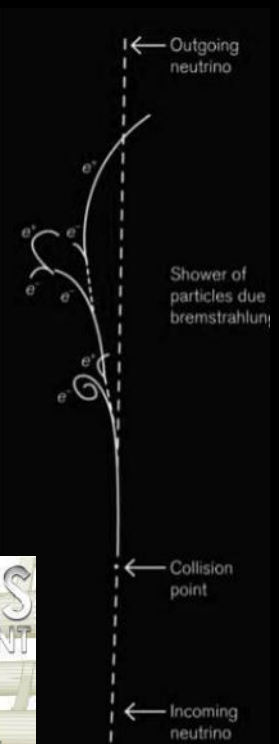


Remarques liminaires

étude de la nature

- mathématique
champ: Particules ↔ Ondes
- mesures & erreurs de mesures
échelle d'observation
dimension → extension spatiale
- **détection**
- modélisation

Remarques liminaires



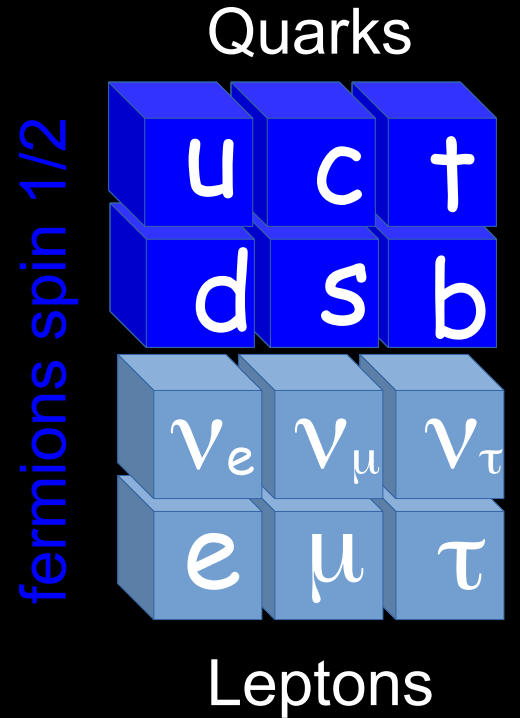
étude de la nature

- mathématique
champ: Particules ↔ Ondes
- mesures & erreurs de mesures
échelle d'observation
dimension → extension spatiale
- détection
- modélisation

Modèle Standard

modélisation

Matière



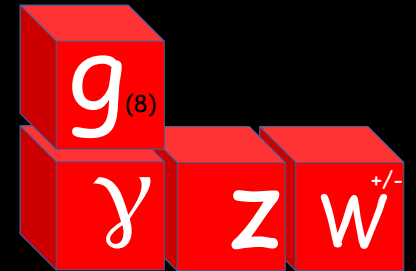
Modèle Standard

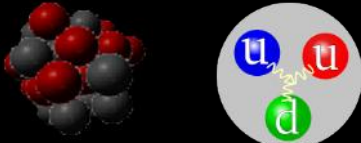

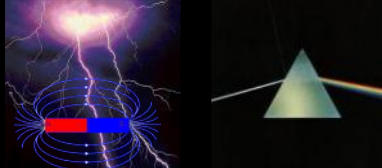



modélisation

Interaction
(force)



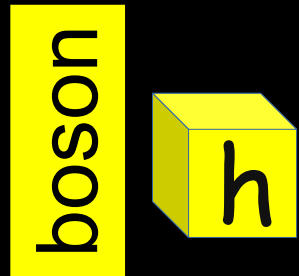
bosons Spin 1



	Interaction Forte		messenger Gluons (8)
	Électromagnétisme Électricité, magnétisme, optique		Photon lumière
	Interaction Faible $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$		W^+, W^-, Z

	Gravitation		Graviton (?)
---	--------------------	--	---------------------

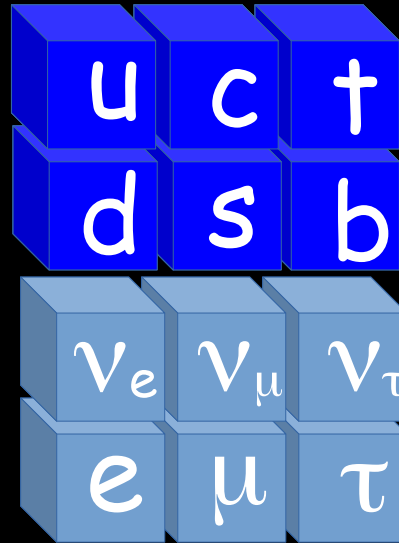
Modèle Standard



Spin 0

Quarks

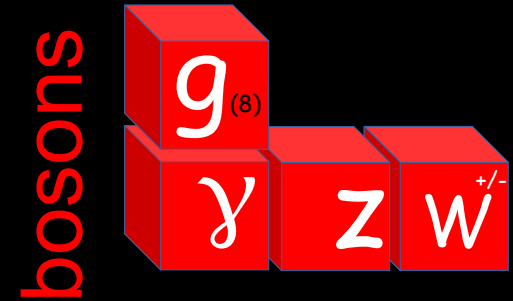
fermions



Leptons

spin 1/2

modélisation



spin 1

Détecter quoi ↔ pourquoi ?

Comprendre

1.00794 1 H Hydrogène																	4.002602 2 He Hélium
6.941 3 Li Lithium	9.012182 4 Be Béryllium											10.811 5 B Bore	12.0107 6 C Carbone	14.0067 7 N Azote	15.9994 8 O Oxygène	18.998403 9 F Fluor	20.1797 10 Ne Néon
22.98976 11 Na Sodium	24.3050 12 Mg Magnésium											26.98153 13 Al Aluminium	28.0855 14 Si Silicium	30.97696 15 P Phosphore	32.065 16 S Soufre	35.453 17 Cl Chlore	39.948 18 Ar Argon
39.0983 19 K Potassium	40.078 20 Ca Calcium	44.95591 21 Sc Scandium	47.867 22 Ti Titane	50.9415 23 V Vanadium	51.9962 24 Cr Chrome	54.93804 25 Mn Manganèse	55.845 26 Fe Fer	58.93319 27 Co Cobalt	58.6934 28 Ni Nickel	63.546 29 Cu Cuivre	65.36 30 Zn Zinc	69.723 31 Ga Gallium	72.64 32 Ge Germanium	74.92160 33 As Arsenic	78.96 34 Se Sélénium	79.904 35 Br Brome	83.798 36 Kr Krypton
85.4678 37 Rb Rubidium	87.62 38 Sr Strontium	88.90585 39 Y Yttrium	91.224 40 Zr Zirconium	92.90638 41 Nb Niobium	95.96 42 Mo Molybdène	(98) 43 Tc Technetium	101.07 44 Ru Ruthénium	102.9055 45 Rh Rhodium	106.42 46 Pd Palladium	107.8662 47 Ag Argent	112.441 48 Cd Cadmium	114.818 49 In Indium	118.710 50 Sn Étain	121.760 51 Sb Antimoine	127.60 52 Te Tellure	126.9044 53 I Iode	131.293 54 Xe Xénon
132.9054 55 Cs Césium	137.327 56 Ba Baryum	174.9668 71 Lu Lutécium	178.49 72 Hf Hafnium	180.9478 73 Ta Tantale	183.84 74 W Tungstène	186.207 75 Re Rhenium	188.23 76 Os Osmium	192.217 77 Ir Iridium	195.084 78 Pt Platine	196.9665 79 Au Or	200.59 80 Hg Mercure	204.3833 81 Tl Thallium	207.2 82 Pb Plomb	208.9804 83 Bi Bismuth	(210) 84 Po Polonium	(210) 85 At Astatine	(220) 86 Rn Radon
(223) 87 Fr Francium	(226) 88 Ra Radium	(261) 103 Lr Lawrencium	(261) 104 Rf Rutherfordium	(262) 105 Db Dubnium	(266) 106 Sg Seaborgium	(264) 107 Bh Bohrium	(268) 108 Hs Hassium	(268) 109 Mt Meitnerium	(271) 110 Ds Darmstadtium	(272) 111 Rg Roentgenium	(285) 112 Cn Copernicium	(284) 113 Uut Ununtrium	(289) 114 Fl Flerovium	(289) 115 Uup Ununpentium	(292) 116 Lv Livermorium	117 Uus Ununseptium	(294) 118 Uuo Ununoctium

138.9054 57 La Lanthane	140.116 58 Ce Cérium	140.9076 59 Pr Praseodyme	144.242 60 Nd Néodyme	(145) 61 Pm Prométhium	150.36 62 Sm Samarium	151.964 63 Eu Europium	157.25 64 Gd Gadolinium	158.9253 65 Tb Terbium	162.500 66 Dy Dysprosium	164.9303 67 Ho Holmium	167.259 68 Er Erbium	168.9342 69 Tm Thulium	173.054 70 Yb Ytterbium
(227) 89 Ac Actinium	232.0380 90 Th Thorium	231.0368 91 Pa Protactinium	238.0289 92 U Uranium	(237) 93 Np Neptunium	(244) 94 Pu Plutonium	(243) 95 Am Americium	(247) 96 Cm Curium	(247) 97 Bk Berkélium	(251) 98 Cf Californium	(252) 99 Es Einsteinium	(257) 100 Fm Fermium	(258) 101 Md Mendelevium	(259) 102 No Nobelium

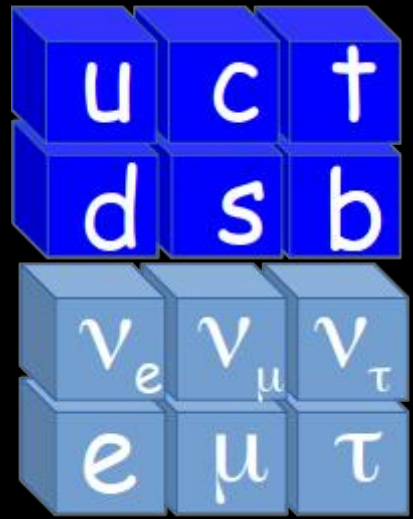
Détecter quoi ↔ pourquoi ?

Comprendre

Hydrogène = proton + e⁻

Proton = u+u+d

Neutron = u+d+d

Leptons Quarks

...and this is how, in 1869, Dmitri Mendeleev completed the first periodic table.



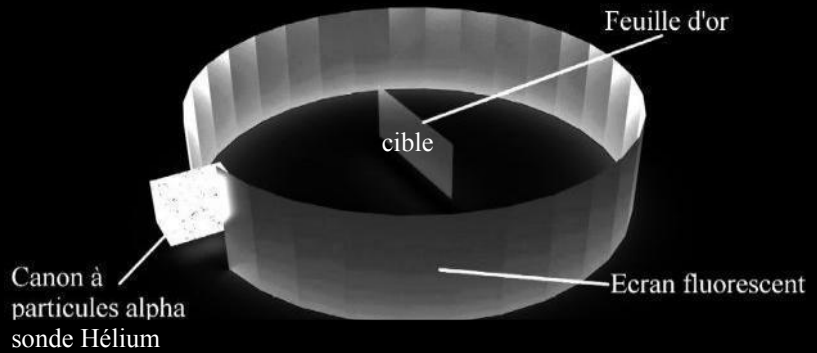
A complete, colorful periodic table of elements, showing all elements from Hydrogen (H) to Oganesson (Og). The table is organized into groups and periods, with elements color-coded by their chemical properties.

Détecter quoi ↔ pourquoi ?

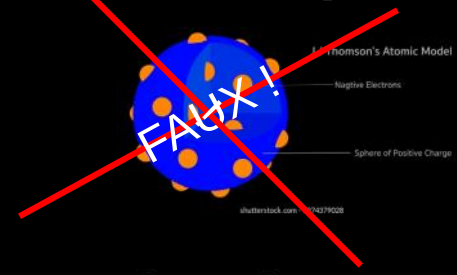
Détecteur

138.9054 57	140.116 58	140.9076 59	144.242 60	(145) 61	150.36 62	151.964 63	157.25 64	158.9253 65	162.500 66	164.9303 67	167.259 68	168.9342 69	173.054 70
La Lanthane	Ce Cérium	Pr Praseodyme	Nd Néodyme	Pm Prométhium	Sm Samarium	Eu Europium	Gd Gadolinium	Tb Terbium	Dy Dysprosium	Ho Holmium	Er Erbium	Tm Thulium	Yb Ytterbium
(227) 89	232.0380 90	231.0368 91	238.0289 92	(237) 93	(244) 94	(243) 95	(247) 96	(247) 97	(251) 98	(252) 99	(257) 100	(258) 101	(259) 102
Ac Actinium	Th Thorium	Pa Protactinium	U Uranium	Np Neptunium	Pu Plutonium	Am Americium	Cm Curium	Bk Berkélium	Cf Californium	Es Einsteinium	Fm Fermium	Md Mendelevium	No Nobelium

Rutherford 1911

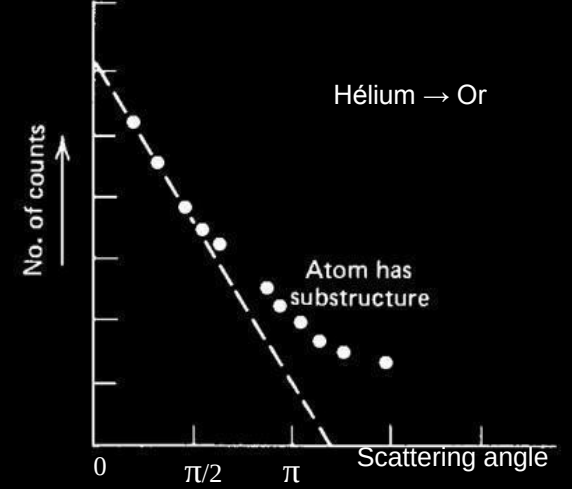


Comprendre

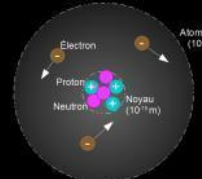


Au target *Phil. Mag.* xxi, 669 (1911)

1.00794 1 H Hydrogène																	4.002602 2 He Hélium						
6.941 3 Li Lithium	9.012182 4 Be Béryllium																	10.811 5 B Bore	12.0107 6 C Carbone	14.0067 7 N Azote	15.9994 8 O Oxygène	18.998403 9 F Fluor	20.1797 10 Ne Néon
22.98976 11 Na Sodium	24.3050 12 Mg Magnésium																	26.98153 13 Al Aluminium	28.0855 14 Si Silicium	30.97696 15 P Phosphore	32.065 16 S Soufre	35.453 17 Cl Chlore	39.948 18 Ar Argon
39.0983 19 K Potassium	40.078 20 Ca Calcium	44.95591 21 Sc Scandium	47.867 22 Ti Titane	50.9415 23 V Vanadium	51.9962 24 Cr Chrome	54.93804 25 Mn Manganèse	55.845 26 Fe Fer	58.93319 27 Co Cobalt	58.6934 28 Ni Nickel	63.546 29 Cu Cuivre	65.36 30 Zn Zinc	69.723 31 Ga Gallium	72.64 32 Ge Germanium	74.92160 33 As Arsenic	78.96 34 Se Sélénium	79.904 35 Br Brome	83.798 36 Kr Krypton						
85.4678 37 Rb Rubidium	87.62 38 Sr Strontium	88.90585 39 Y Yttrium	91.224 40 Zr Zirconium	92.90638 41 Nb Niobium	95.96 42 Mo Molybdène	(98) 43 Tc Technetium	101.07 44 Ru Ruthénium	102.9055 45 Rh Rhodium	106.42 46 Pd Paladium	107.8662 47 Ag Argent	112.441 48 Cd Cadmium	114.818 49 In Indium	118.710 50 Sn Étain	121.760 51 Sb Antimoine	127.60 52 Te Tellure	126.9044 53 I Iode	131.293 54 Xe Xénon						
132.9054 55 Cs Césium	137.327 56 Ba Baryum	174.9668 71 Lu Lutécium	178.49 72 Hf Hafnium	180.9478 73 Ta Tantale	183.84 74 W Wolfram	186.207 75 Re Rhenium	190.23 76 Os Osmium	192.217 77 Ir Iridium	195.084 78 Pt Platine	196.9665 79 Au Or	200.59 80 Hg Mercure	204.3833 81 Tl Thallium	207.2 82 Pb Plomb	208.9804 83 Bi Bismuth	(210) 84 Po Polonium	(210) 85 At Astatine	(220) 86 Rn Radon						
(223) 87 Fr Francium	(226) 88 Ra Radium	(262) 103 Lr Lawrencium	(261) 104 Rf Rutherfordium	(262) 105 Db Dubnium	(266) 106 Sg Seaborgium	(264) 107 Bh Bohrium	(271) 108 Hs Hassium	(268) 109 Mt Meitnerium	(271) 110 Ds Darmstadtium	(272) 111 Rg Roentgenium	(285) 112 Cn Copernicium	(284) 113 Uut Ununtrium	(289) 114 Fl Flerovium	(288) 115 Uup Ununpentium	(292) 116 Uuq Ununquadium	117 Uus Ununseptium	(294) 118 Uuo Ununoctium						

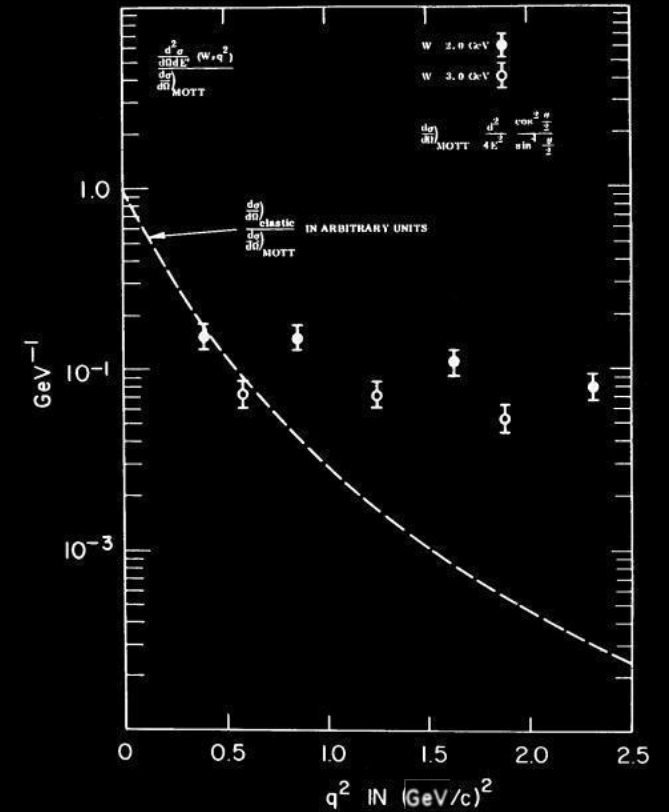
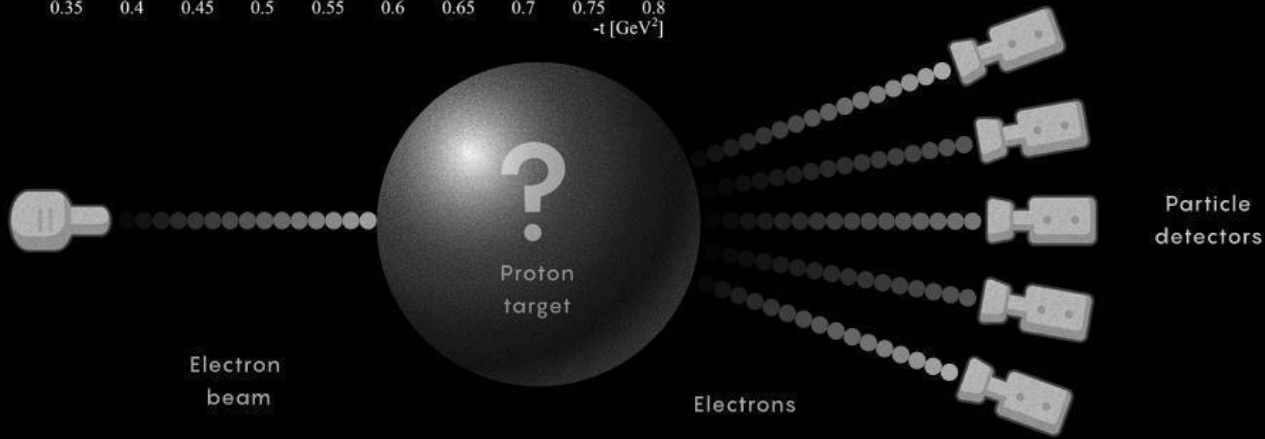
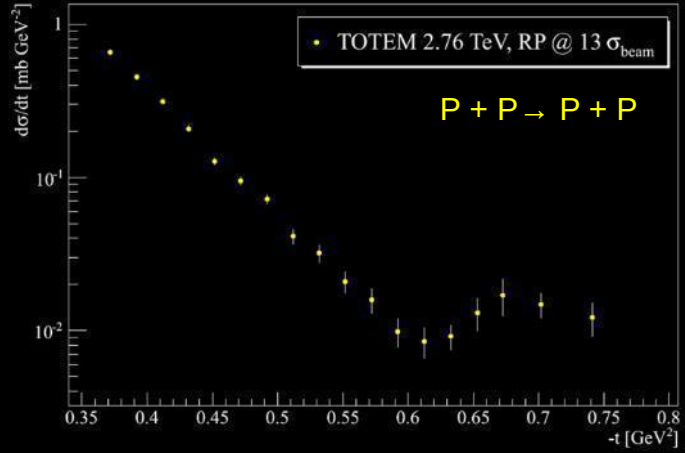


138.9054 57 La Lanthane	140.116 58 Ce Cérium	140.9076 59 Pr Praseodyme	144.242 60 Nd Néodyme	(145) 61 Pm Prométhium	150.36 62 Sm Samarium	151.964 63 Eu Europium	157.25 64 Gd Gadolinium	158.9253 65 Tb Terbium	162.500 66 Dy Dysprosium	164.9303 67 Ho Holmium	167.259 68 Er Erbium	168.9342 69 Tm Thulium	173.054 70 Yb Ytterbium
(227) 89 Ac Actinium	232.0380 90 Th Thorium	231.0368 91 Pa Protactinium	238.0289 92 U Uranium	(237) 93 Np Neptunium	(244) 94 Pu Plutonium	(243) 95 Am Americium	(247) 96 Cm Curium	(247) 97 Bk Berkélium	(251) 98 Cf Californium	(252) 99 Es Einsteinium	(257) 100 Fm Fermium	(258) 101 Md Mendelevium	(259) 102 No Nobelium



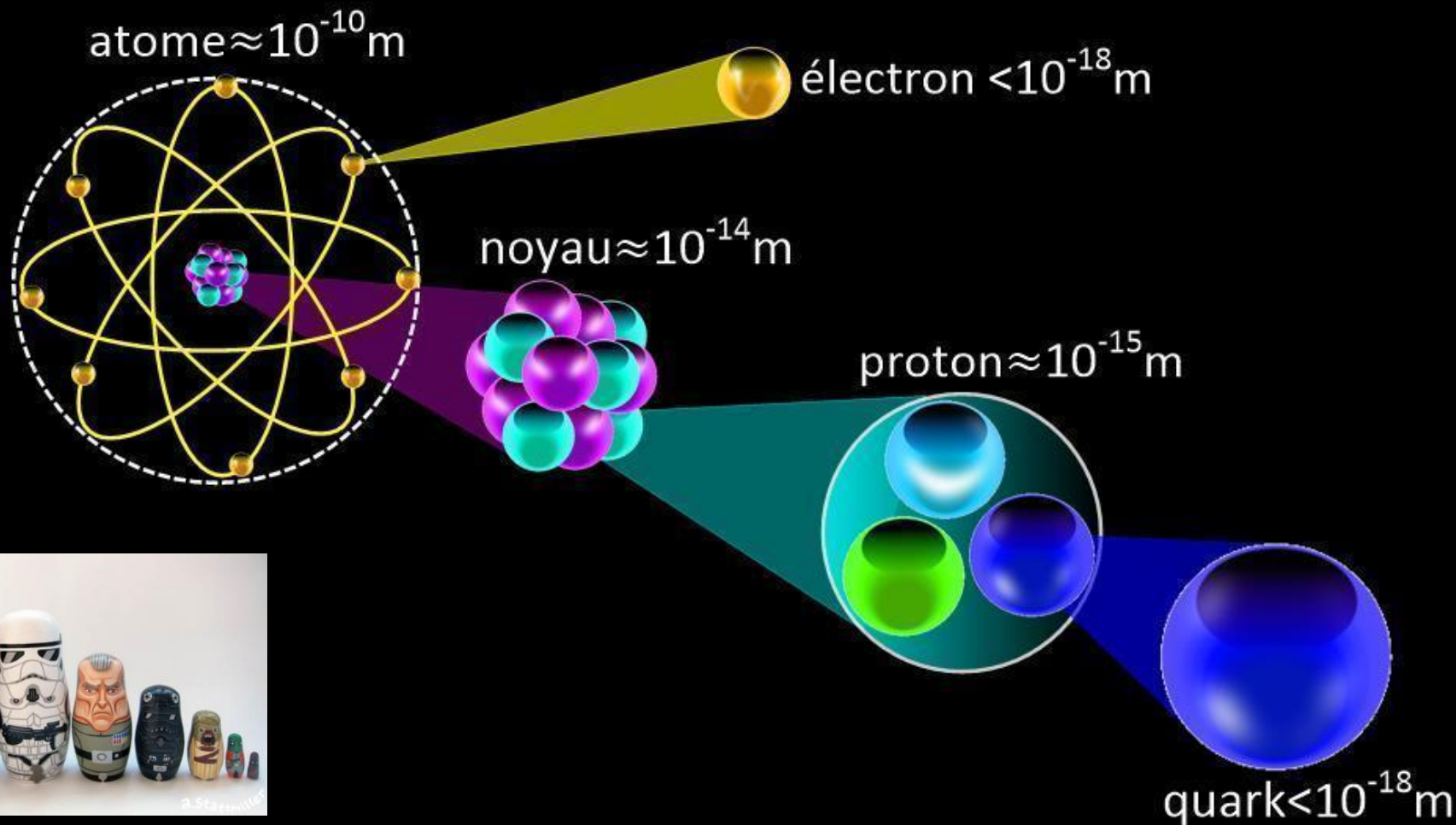
← mieux (?)

Comprendre

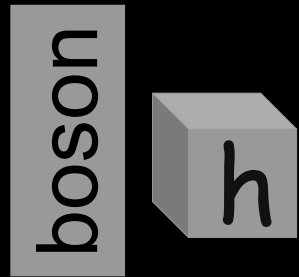


Détecter quoi ↔ pourquoi ?

Comprendre

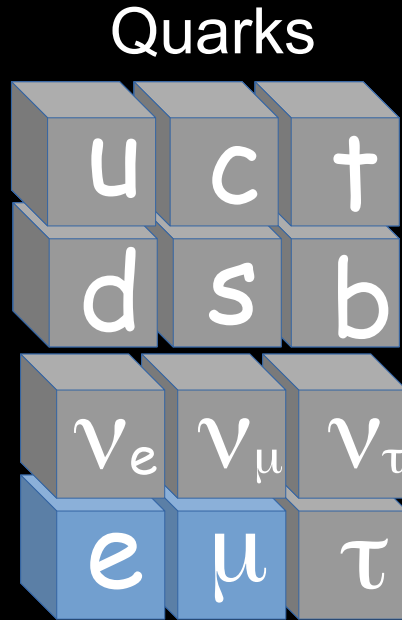


Détecter quoi ?

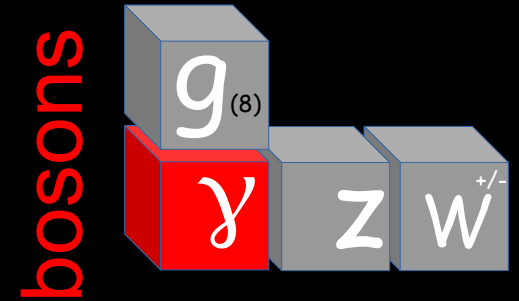


Spin 0

fermions



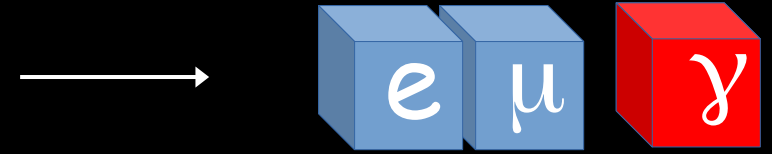
Spin 1/2



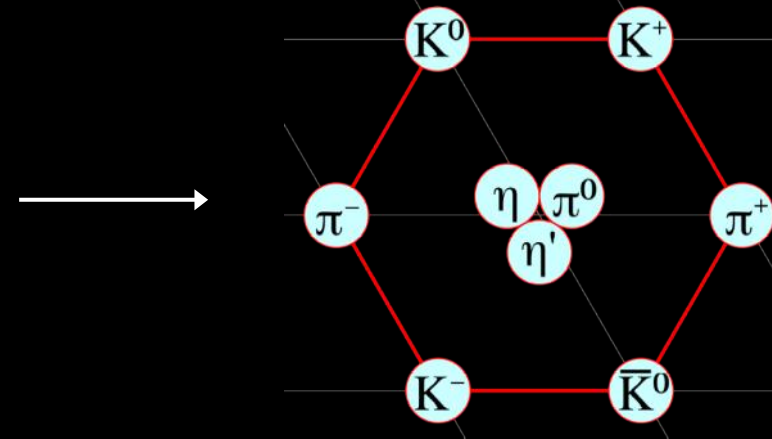
Spin 1

Détecter quoi ?

Particules élémentaires



Particules **hadrons** (mésons & baryons)

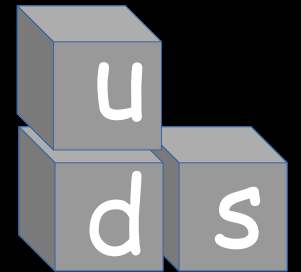
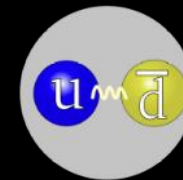


États liés

ρ, π^\pm, k^\pm

n, π^0, λ

Pions : $u\bar{d}, d\bar{u}, (u\bar{u}-d\bar{d})$



Détecter quoi ?

Particules détectables
+ modèle standard
+ logique
+ mesures
+ erreurs de mesures



Détecter quoi ?

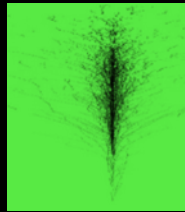
Durée de vie

muon	μ	$\tau \sim 2.2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$	$c\tau \sim 660\text{m}$
pion	π^{\pm}	$\tau \sim 2.6 \cdot 10^{-8} \text{ s}$	
	π^0	$\tau \sim 8.5 \cdot 10^{-17} \text{ s}$	
neutron	n	$\tau \sim 880 \text{ s}$	
proton	p	$\tau > 10^{41} \text{ s}$	

Détecter quoi avec quoi ?

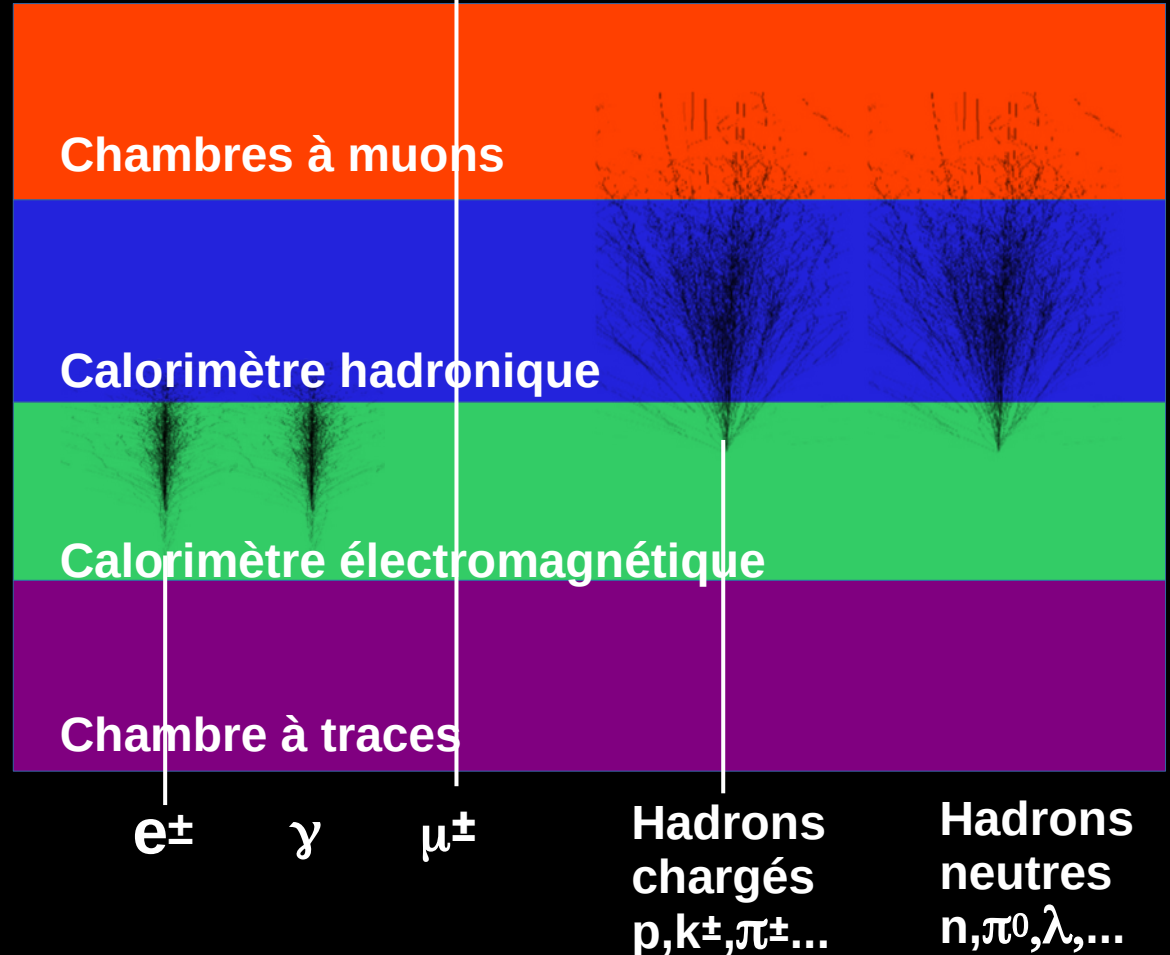
Détecteur

Réponse schématique d'un détecteur
mesure partielle & destructive
(dans un collisionneur)



Gerbe :
électromagnétique ou hadronique

Trace chargée :
mesurée par le détecteur



Détecteurs en Vrac

11 Mars au 13 Mars, Fréjus

- 1/ Détecter quoi \leftrightarrow pourquoi (1h)
- 2/ Interaction particules matière (1h)
- 3/ Généralités sur les détecteurs (1h)
- 4/ Application sociétales (1h)
- 5/ Exemple avec D0/ATLAS (Fermilab/CERN) (1h)

