



International Master Class
on IceCube experiment

Introductory talk



Les neutrinos

- En physique nucléaire \Rightarrow radioactivité
 - Dans le rayonnement cosmique
 - Quel genre de particules ?
 - & la physique des particules
 - Comment les détecter ?
- historique
définition
détection

1

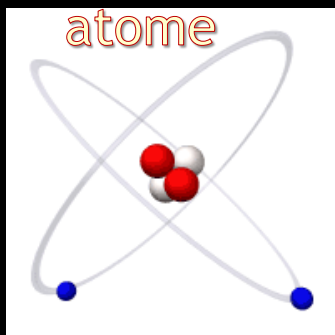
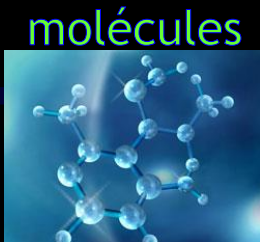
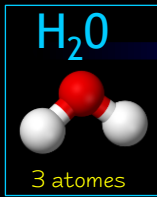
1 Les neutrinos & la physique nucléaire



la radioactivité

2

les constituants de la matière



- 1 électrons 1897
- 2 protons **noyau** 1911
- 3 neutrons 1932

3

© Musée Curie



son laboratoire

Découverte de la radioactivité

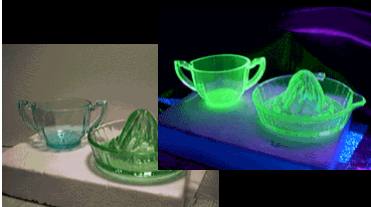
Henri Becquerel

1896

fluorescence



minerais d'uranium



verre d'urane ou uranyle (= oxyde d'U)

Pendant des siècles l'uranium a été utilisé comme pigment pour le verre

4

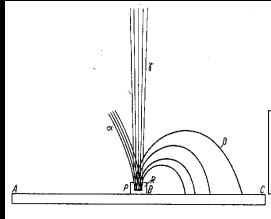
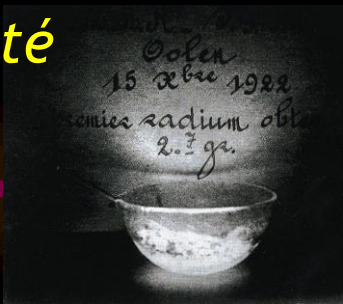
Etude de la radioactivité

Pierre & Marie Curie

1898

Découverte éléments : Ra Po

Éléments naturels radioactifs



Extrait de la thèse de Mme Curie, 1904: *déflexion des rayonnements α β γ dans un champ magnétique*

Le tableau des éléments

Year of Discovery
Ancients have no year
"Discovery of the Elements", Weeks and Leicester, 1968.
Also, see www.webelements.com

Century Discovered
Pre 18th 18th 19th 20th

1766 1 H																	1868 2 He																												
1817 3 Li	1797 4 Be															1808 5 B	1772 6 C	1774 7 N	1774 8 O	1866 9 F	1866 10 Ne																								
1807 11 Na	1755 12 Mg															1825 13 Al	1824 14 Si	1669 15 P	1774 16 S	1774 17 Cl	1894 18 Ar																								
1807 19 K	1808 20 Ca	1879 21 Sc	1791 22 Ti	1801 23 V	1797 24 Cr	1774 25 Mn	1300 BC 26 Fe	1735 27 Co	1751 28 Ni	1500 29 Cu	1500 30 Zn	1875 31 Ga	1886 32 Ge	1869 33 As	1817 34 Se	1826 35 Br	1898 36 Kr																												
1861 37 Rb	1790 38 Sr	1794 39 Y	1789 40 Zr	1801 41 Nb	1778 42 Mo	1937 43 Tc	1844 44 Ru	1803 45 Rh	1803 46 Pd	1817 47 Ag	1817 48 Cd	1863 49 In	1863 50 Sn	1863 51 Sb	1783 52 Te	1811 53 I	1898 54 Xe																												
1860 55 Cs	1808 56 Ba	1907 71 Lu	1923 72 Hf	1802 73 Ta	1783 74 W	1925 75 Re	1803 76 Os	1803 77 Ir	1735 78 Pt	1861 79 Au	1861 80 Hg	1861 81 Tl	1861 82 Pb	1861 83 Bi	1898 84 Po	1940 85 At	1900 86 Rn																												
1938 87 Fr	1898 88 Ra	1961 103 Lr	1964 104 Rf	1970 105 Db	1974 106 Sg	1981 107 Bh	1984 108 Hs	1982 109 Mt	1994 110 Ds	1994 111 Rg	1996 112 Cn	1999 113 Nh	1999 114 Fl	1999 115 Mc	1999 116 Lv	1999 117 Ts	1999 118 Og																												
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <td>1839 57 La</td> <td>1803 58 Ce</td> <td>1885 59 Pr</td> <td>1885 60 Nd</td> <td>1945 61 Pm</td> <td>1879 62 Sm</td> <td>1901 63 Eu</td> <td>1840 64 Gd</td> <td>1843 65 Tb</td> <td>1886 66 Dy</td> <td>1878 67 Ho</td> <td>1842 68 Er</td> <td>1879 69 Tm</td> <td>1878 70 Yb</td> </tr> <tr> <td>1899 89 Ac</td> <td>1829 90 Th</td> <td>1913 91 Pa</td> <td>1789 92 U</td> <td>1940 93 Np</td> <td>1940 94 Pu</td> <td>1944 95 Am</td> <td>1944 96 Cm</td> <td>1949 97 Bk</td> <td>1950 98 Cf</td> <td>1952 99 Es</td> <td>1952 100 Fm</td> <td>1955 101 Md</td> <td>1958 102 No</td> </tr> </table>																		1839 57 La	1803 58 Ce	1885 59 Pr	1885 60 Nd	1945 61 Pm	1879 62 Sm	1901 63 Eu	1840 64 Gd	1843 65 Tb	1886 66 Dy	1878 67 Ho	1842 68 Er	1879 69 Tm	1878 70 Yb	1899 89 Ac	1829 90 Th	1913 91 Pa	1789 92 U	1940 93 Np	1940 94 Pu	1944 95 Am	1944 96 Cm	1949 97 Bk	1950 98 Cf	1952 99 Es	1952 100 Fm	1955 101 Md	1958 102 No
1839 57 La	1803 58 Ce	1885 59 Pr	1885 60 Nd	1945 61 Pm	1879 62 Sm	1901 63 Eu	1840 64 Gd	1843 65 Tb	1886 66 Dy	1878 67 Ho	1842 68 Er	1879 69 Tm	1878 70 Yb																																
1899 89 Ac	1829 90 Th	1913 91 Pa	1789 92 U	1940 93 Np	1940 94 Pu	1944 95 Am	1944 96 Cm	1949 97 Bk	1950 98 Cf	1952 99 Es	1952 100 Fm	1955 101 Md	1958 102 No																																

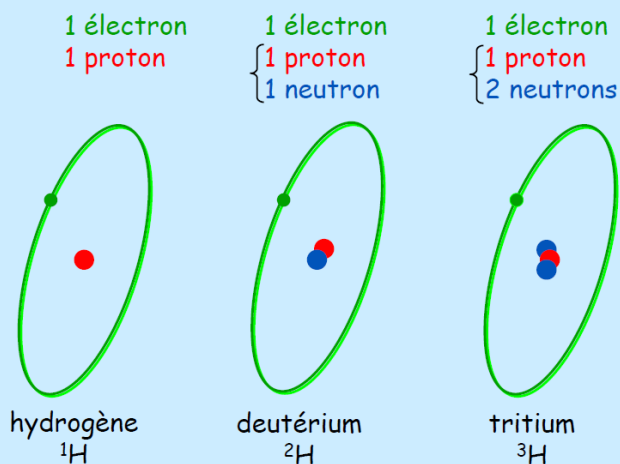
isos (égal) - topos (lieu)

Les isotopes

99,9% 0,01% traces

Z=1 Hydrogène, deutérium, tritium

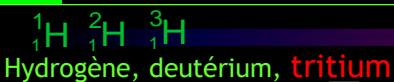
Les isotopes de l'hydrogène



9

Les radio-isotopes

Z=1



Isotopes stables

Radio-isotopes

Z=6



Uranium naturel
3 isotopes radioactifs

^{234}U (99,275 %)

^{235}U (0,720 %)

^{238}U (0,005 %)

Z=92

Les isotopes de l'hydrogène

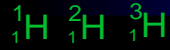
1 électron
{ 1 proton
2 neutrons



tritium
 ^3_1H

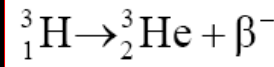
10

radio-isotopes = instables



Hydrogène, deutérium, tritium

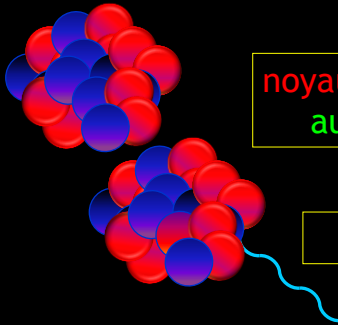
ou ${}^{40}\text{K}$



Radio-isotopes

noyau instable \rightarrow spontanément
autre noyau

avec émission de rayonnement



11

Les rayonnements émis

électrons

β^-

positrons

Onde

électromagnétique

β^+

γ

α

Noyaux
d'hélium

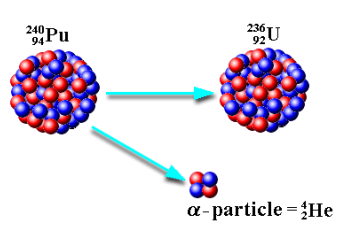


Noyau instable

12

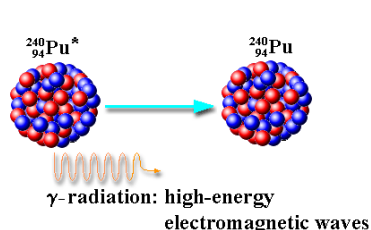
En résumé, la radioactivité α β γ

alpha decay



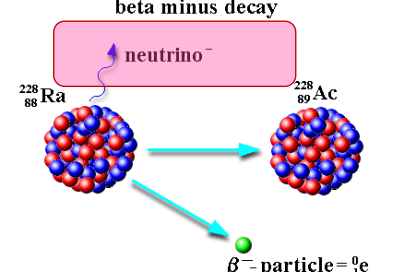
α -particle = ${}^4_2\text{He}$

gamma decay



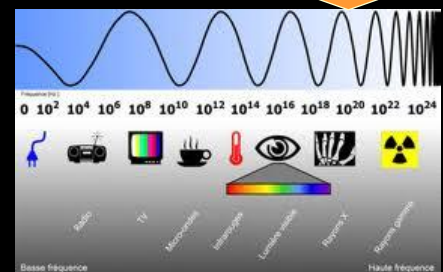
γ -radiation: high-energy electromagnetic waves

beta minus decay



neutrino⁻

β^- -particle = ${}^0_{-1}\text{e}$



0 10² 10⁴ 10⁶ 10⁸ 10¹⁰ 10¹² 10¹⁴ 10¹⁶ 10¹⁸ 10²⁰ 10²² 10²⁴

Radio, TV, Microondes, Infrarouge, Lumière visible, Rayons X, Rayons gamma

Basse fréquence Haute fréquence

2 les neutrinos & les rayons cosmiques



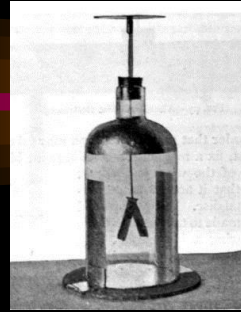
Découverte du rayonnement cosmique



Viktor Hess

PN 1936

1910



radioactivité ↑ avec altitude
pas de différence jour / nuit

Rayonnement ne peut pas provenir de la terre ni du soleil

15

Années 30 – 50 : étude du rayonnement cosmique



Protons =
rayons primaires

Collisions avec [N] ou [O]

Rayonnement secondaire

Électron e^-

antiélectron e^+ 1932

muon μ^-

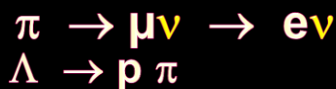
Photon γ

Proton p
neutron n
1947

Pion π
kaon K
lambda Λ



Particules instables



neutrinos

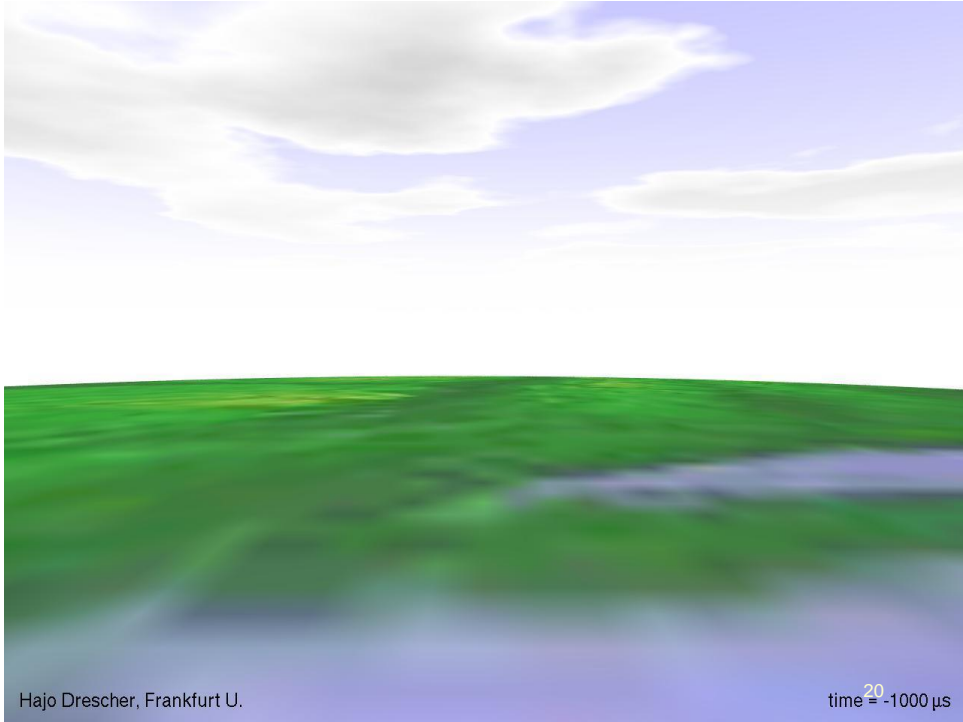
non détectés

16



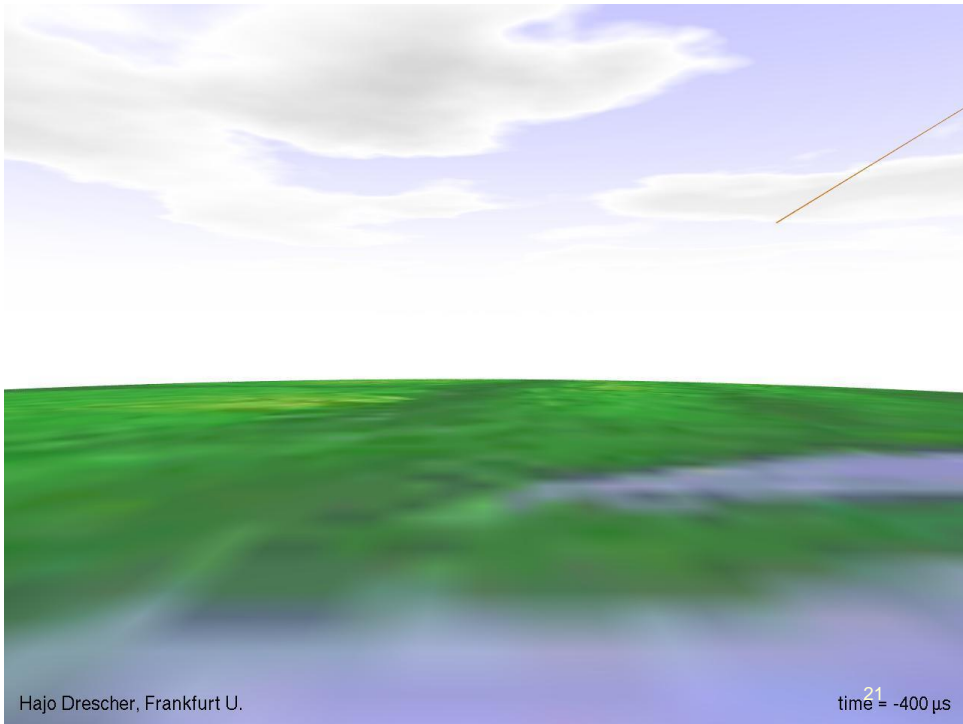
Gerbe cosmique

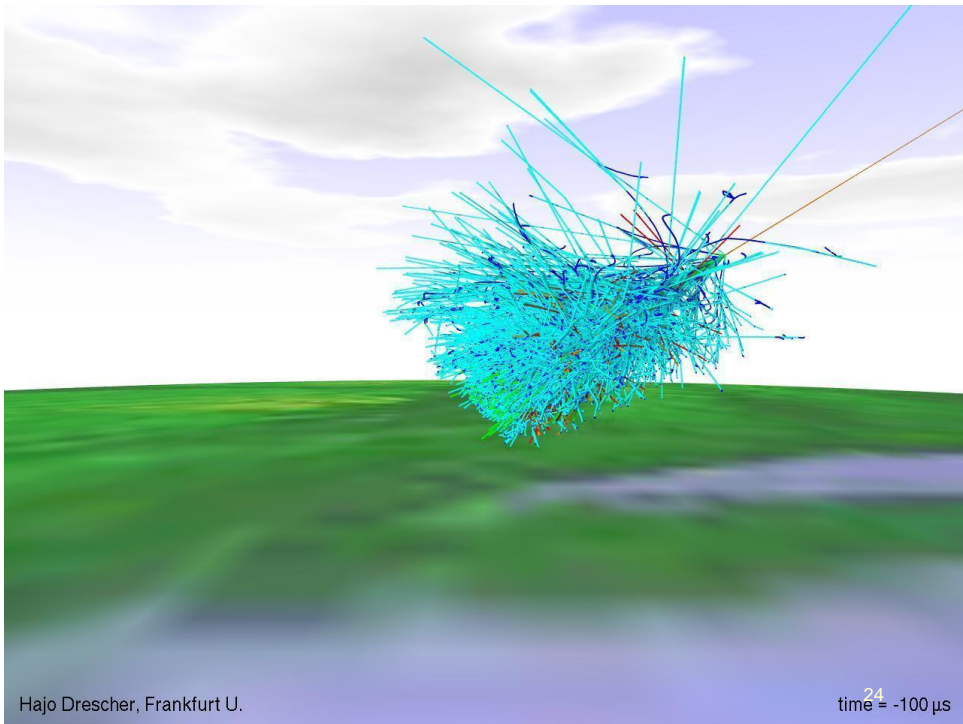
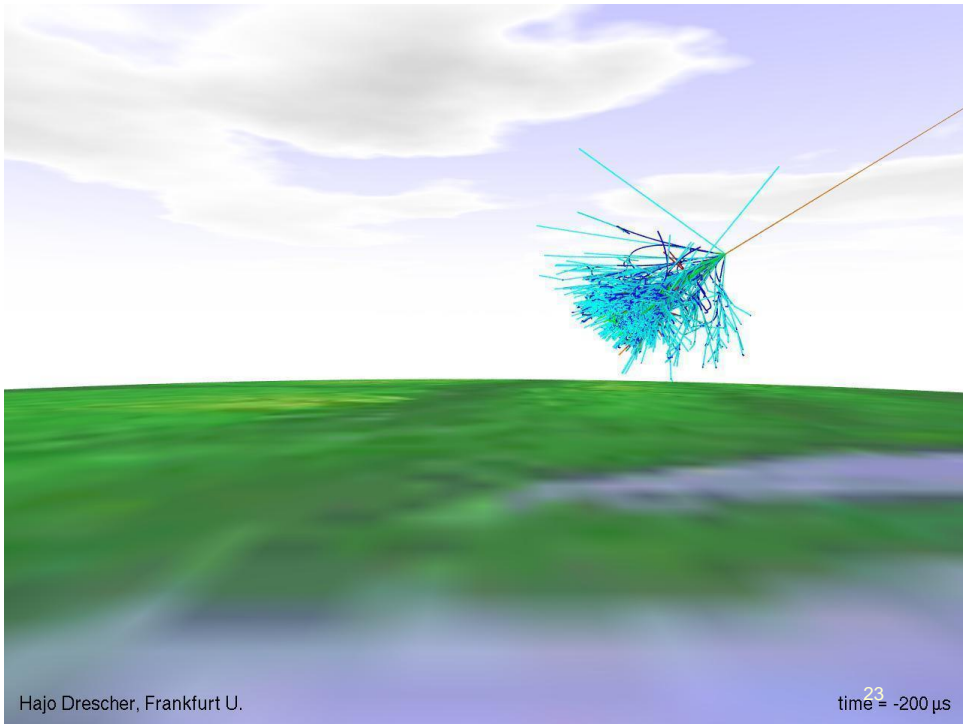
Lepton-photon 2005 - Uppsala

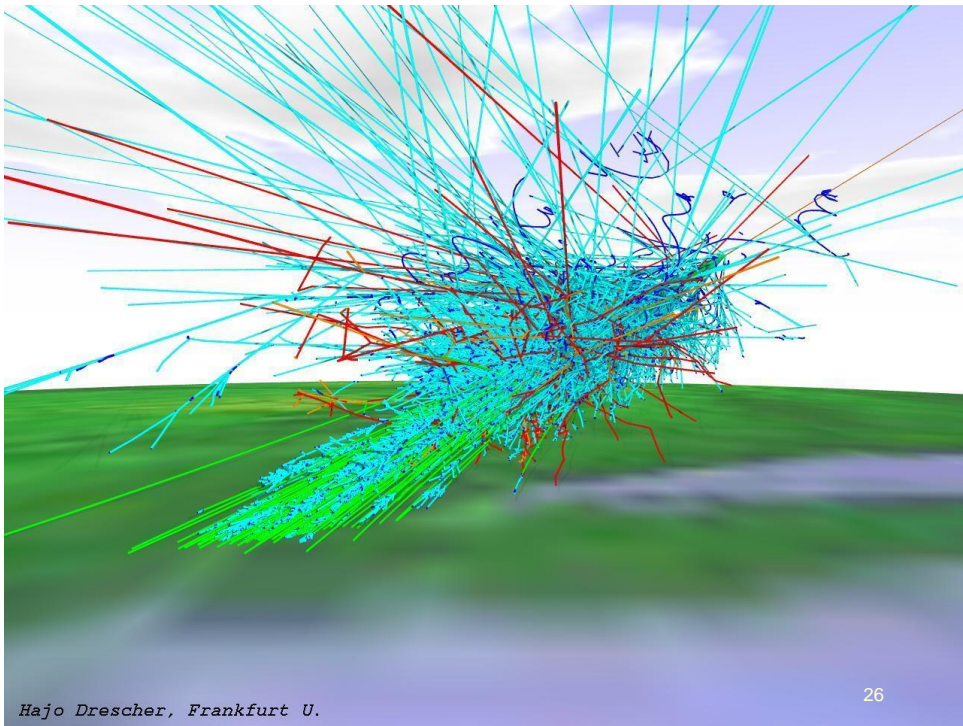
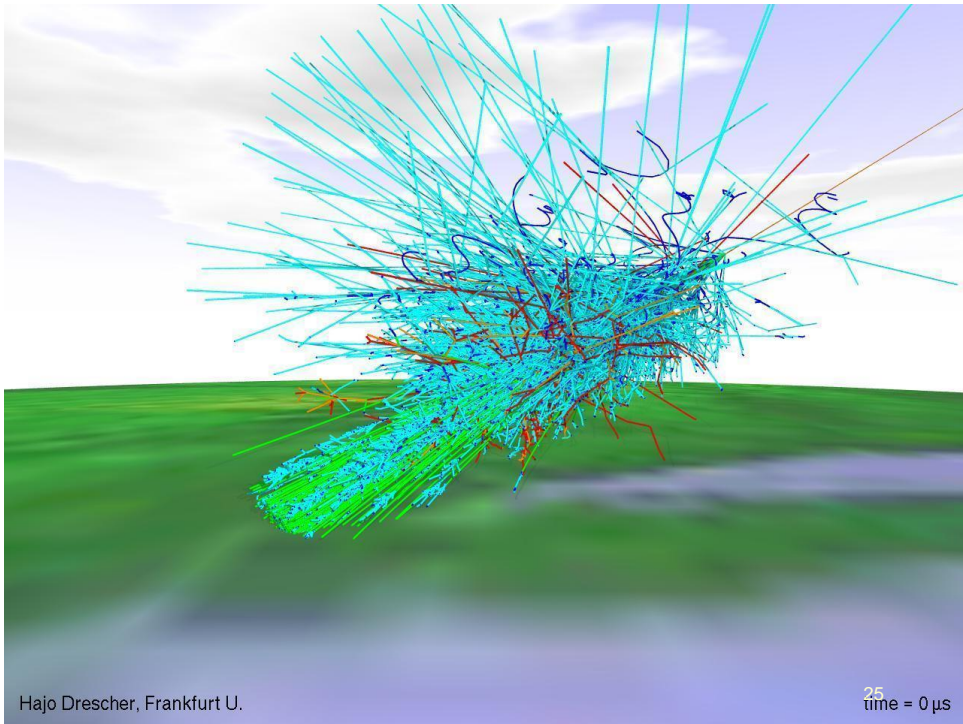


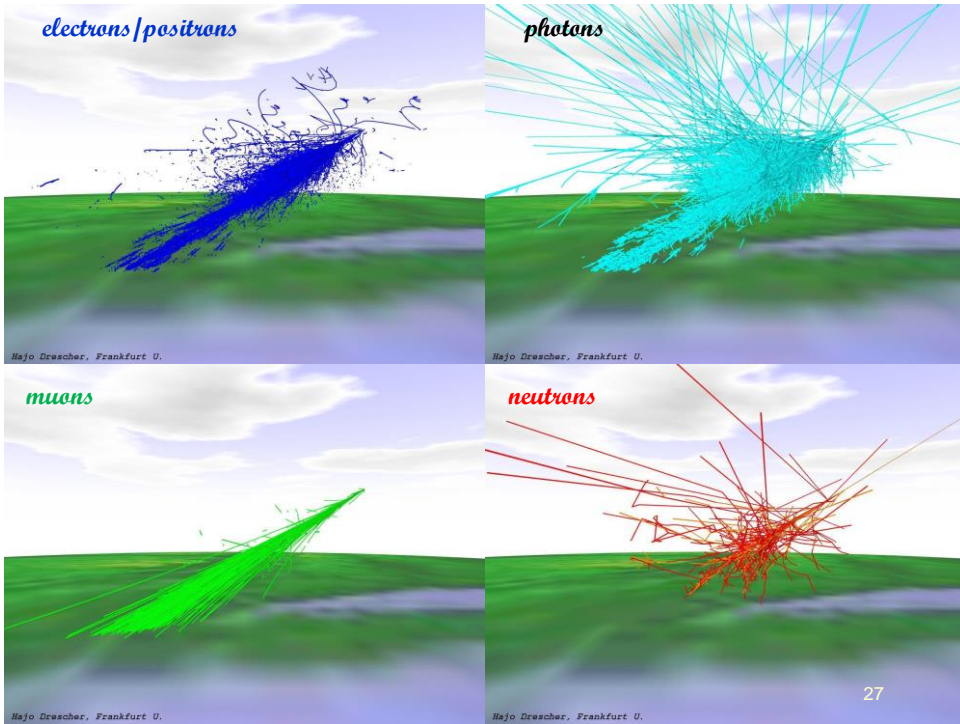
Hajo Drescher, Frankfurt U.

time = -1000 μ s

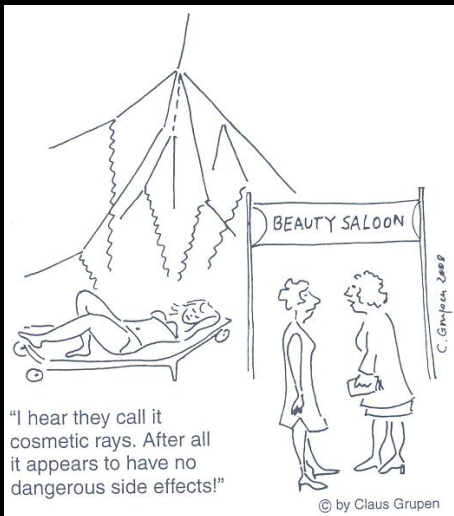








Interlude humoristique



"I hear they call it cosmetic rays. After all it appears to have no dangerous side effects!"

Questions ?

3 Qu'est-ce que les neutrinos ?

des dizaines de milliards de neutrinos dont ≈ 60 milliards émis par le soleil traversent notre corps chaque seconde & un seul est arrêté par notre corps pendant toute notre vie

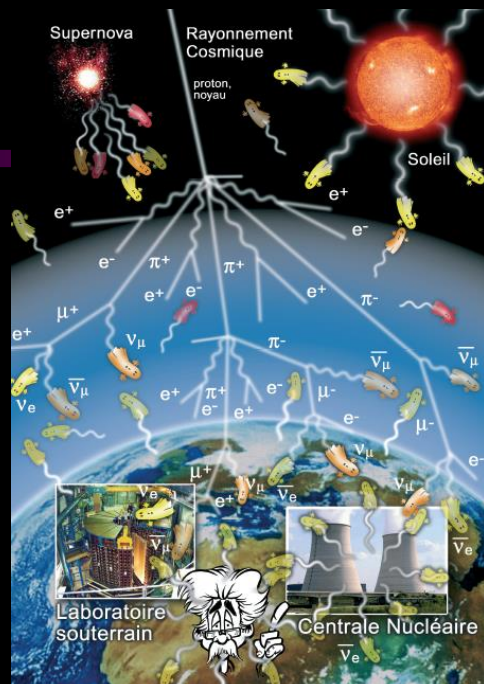


ils nous frappent du « dessous » pendant la nuit, après avoir traversé la terre

29

Les sources de neutrinos

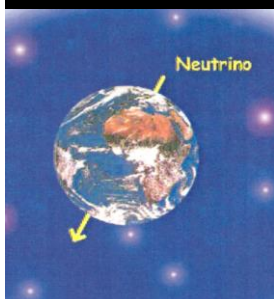
- objets cosmiques
- supernova
- soleil
- rayonnement cosmique
- centrales nucléaires
- expériences de physique des particules



Les neutrinos, ce sont ...

des particules qui se rapprochent le plus de "rien"

sans charge et quasi sans masse



qui interagissent très peu avec matière
⇒ difficilement détectable

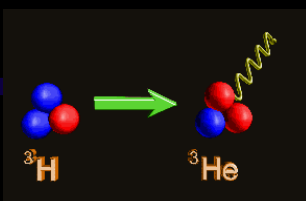
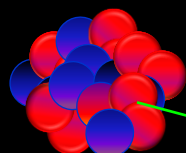
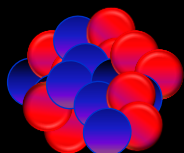
probabilité qu'un neutrino de qqs MeV soit absorbé par la terre $\approx 10^{-10}$

31

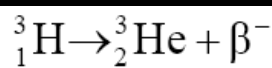
Comment a-t-on deviné l'existence des neutrinos ?

tritium

ou ^{40}K



Radioactif



noyau instable → spontanément autre noyau

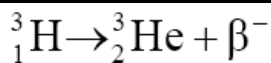
avec émission de rayonnement

+ émission d'un neutrino léger neutre

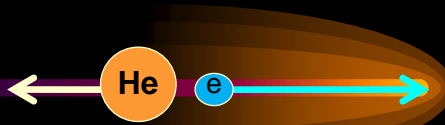
Quasi invisible dans un détecteur !

32

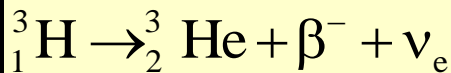
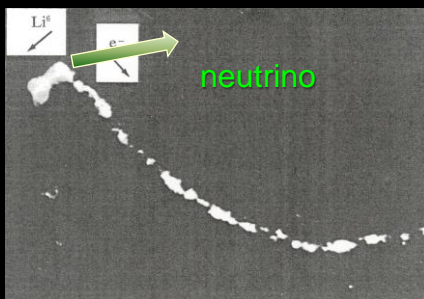
Oui, les neutrinos existent ...



Si réaction à 2 corps:



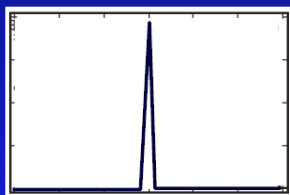
Impulsion du noyau qui se désintègre doit être opposée à celle β



33

Oui, les neutrinos existent ...

2-body decay

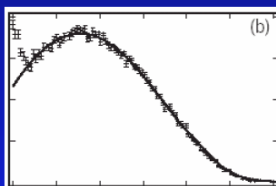


alpha Energy

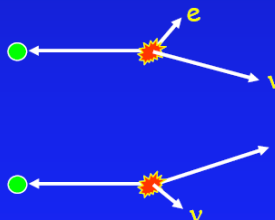


$E_{\text{cin}} \alpha$ déterminée

3-body decay



Beta Energy



Énergie cinétique des β : non déterminée \Rightarrow réaction à 3 corps

34

Les physiciens du neutrino

The "desperate remedy"

Wolfgang Pauli (1931) désintégration β
 accompagnée de l'émission d'une
 nouvelle particule: sans charge et
 quasi sans masse



Enrico Fermi reprend hypothèse de Pauli
 baptise particule petit neutron ou neutrino



⇒ notée ν

25

4 Les neutrinos en physique des particules

particules
 fondamentales

Quarks	Leptons	Bosons
 up  down	 electron  neutrino e	 photon  gluon
 charm  strange	 muon  neutrino μ	 Z^0 W^\pm
 top  beauty	 tau  neutrino τ	 Higgs

The Standard Model

A. Pich - CERN Summer Lectures 2006

36

physique des particules :

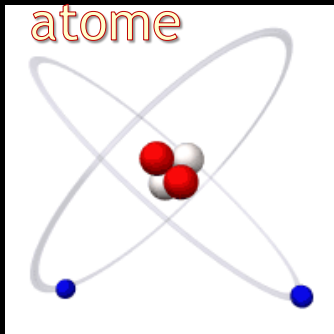


Toute matière

les constituants ultimes de la matière

1932

3 particules



He

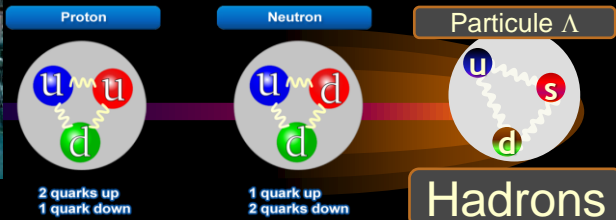
- ① électrons
- ② protons
- ③ neutrons

37

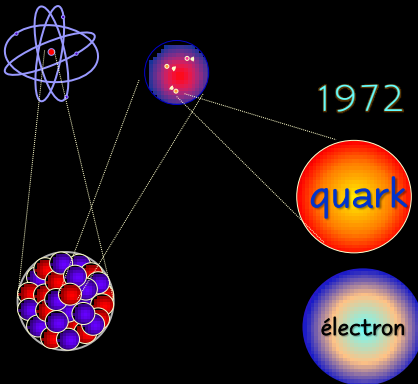


Années 60 – 90
accélérateurs

constituants ultimes en 2016



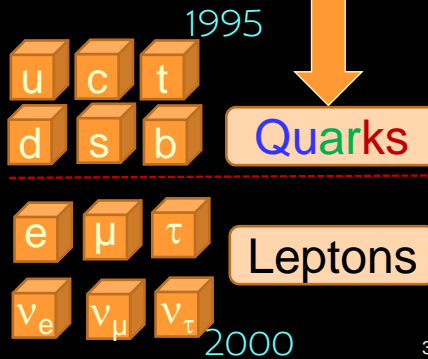
Hadrons



1972

quark

électron



1995

Quarks

Leptons

2000

38

3 interactions entre constituants de matière = échange de particules

3 forces



- électromagnétique

portée infinie

Cohésion atomes



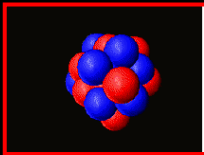
quanta d'énergie $h\nu$
= photons



très courte portée

- nucléaire forte

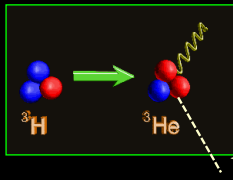
Cohésion noyaux



8 gluons

- nucléaire faible

Désintégrations β



$W^\pm Z^0$ Bosons

tableau des particules élémentaires

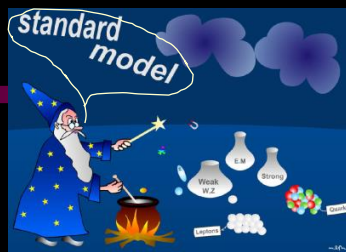
Quarks



Forces



Leptons



le modèle standard de la physique des particules

6 quarks
6 leptons < 3 chargés
12 bosons < 3 neutrinos : $\nu_e \nu_\mu \nu_\tau$

3 saveurs

tableau COMPLET des particules élémentaires

Quarks			Forces		
u	c	t	H	Z	γ
d	s	b		W	g
Leptons					
e	μ	τ			
ν_e	ν_μ	ν_τ			

Bosons de Higgs

champ de Higgs

⇒ masse des particules

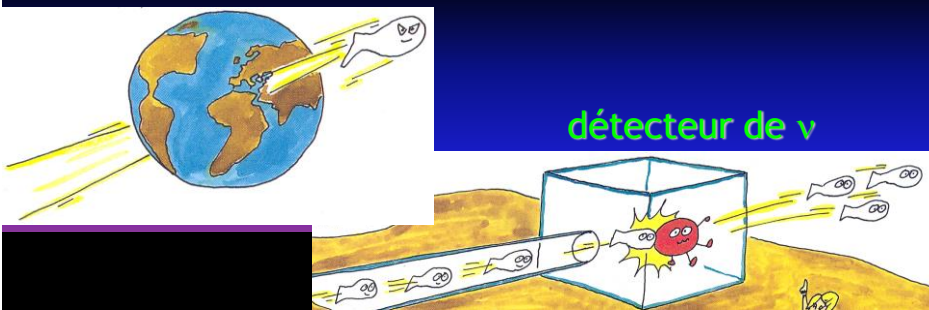
Le mécanisme de Higgs Brout-Englert



41

5 comment détecter les neutrinos ?

Interactions particules neutrinos - matière



42

Détection pas facile : il faut

- sources intenses de neutrinos
- détecteurs de grand volume sensible
- interaction préalable :

$$\nu_e + \text{matière} \rightarrow e^- + \text{autres particules}$$

ou $\nu_\mu + \text{matière} \rightarrow \mu^- + \text{autres particules}$

ou $\nu_\tau + \text{matière} \rightarrow \tau^- + \text{autres particules}$

La détection dépend aussi de l'énergie des neutrinos



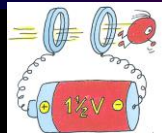
Oups!

Unité : eV

Proton de 1,5 eV

électron-Volt

$$1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$



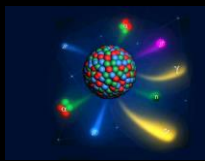
eV

keV

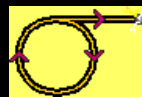
MeV

GeV -
TeV

eV \Rightarrow PeV -
EeV



Physique des
particules



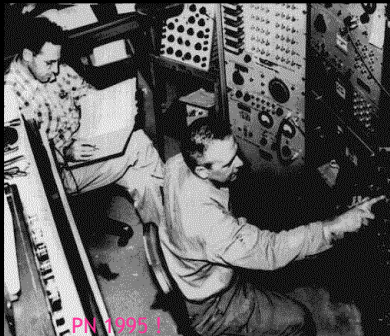
Rayonnement cosmique

La détection du neutrino électronique

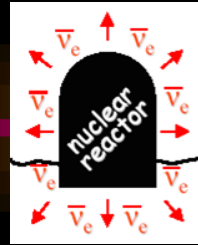
- sources intenses de neutrinos

Physiciens expérimentateurs

Fred Reines & Clyde Cowan



- 1951
- Avaient pensé chercher les neutrinos lors de l'explosion d'une **bombe atomique**
- Ont finalement réalisé leur recherche auprès d'un **réacteur nucléaire** (à fissions)



ν_e

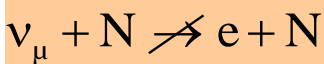
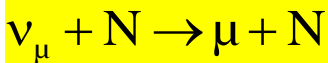
attendu : $\approx 5.10^{13} \nu \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ détecté : 2-3 /h

Le neutrino, c'est "... la quantité de réel la plus tenue jamais imaginée par un être humain" ... F. Reines

La détection du neutrino muonique

1962

@accélérateur de Brookhaven



Neutrino detector
Spark chambers

Muon - electron separation

- μ : long track
- e: short, multi-spark event from electromagnetic shower



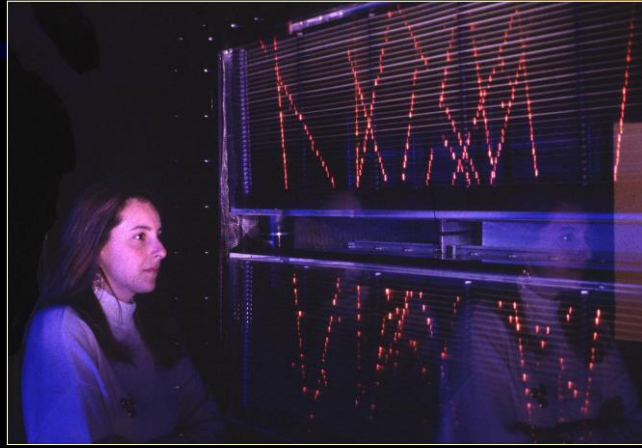
PN 1988

observed

- μ tracks
- ≈ 0 electron track

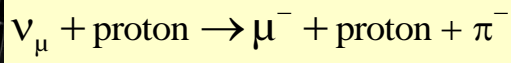


Interlude film



Environ $100 \mu \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

détection du neutrino muonique

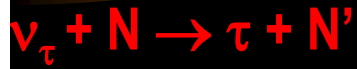
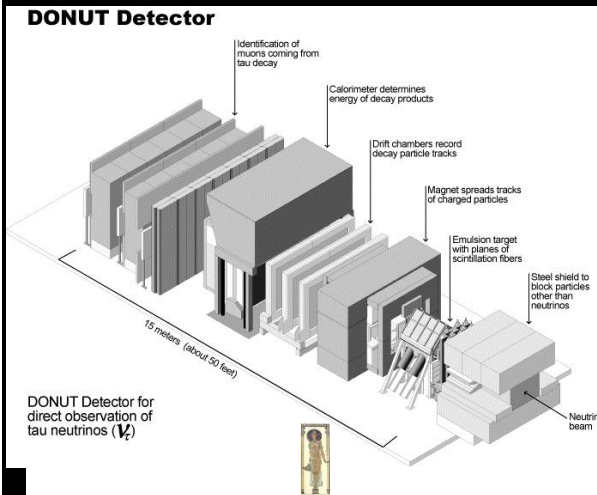
 This block contains a collage of images related to neutrino detection. On the left, a black and white photograph shows two people in white lab coats working inside a large, circular bubble chamber. On the right, a photograph shows a large, red, cylindrical detector model outdoors. The central part of the collage features a detailed black and white photograph of a bubble chamber track with several labels: 'Proton path', 'Neutrino transformed into μ ', 'Collision creates π -meson', and 'Invisible neutrino collides with proton'. An orange arrow points to the collision point.


détecteur de grand volume sensible

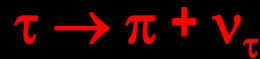
GeV

The 'Neutrino Event'
 Nov. 13, 1970 — World's first observation of a neutrino in a hydrogen bubble chamber.

La détection du neutrino tauique



suivi de



pluie caractéristique à $< 1 \text{ mm}$ de l'interaction indique **désintégration du τ**

2000 DONUT Direct Observation of NU Tau @Fermilab

Autres détecteurs

Activités de cette aprem



Dans lesquels les particules laissent des traces



Moniteurs de radiations

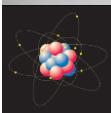
☑ Comprendre les unités :

- Bq (activité) 1 désintégration/sec
- cps (coups par seconde)
- dose efficace (Sv)
- débit de dose (Sv/heure)

☑ Procéder à des mesures de comptage:

- Émission de radiations du verre d'urane
- Avec ≠types d'absorbant

Autre moniteur de radiations ($\alpha\beta\gamma$)

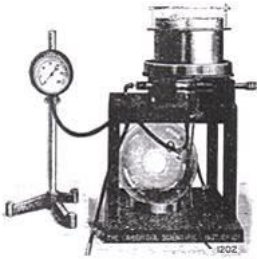


Sonde pour les particules α β

Radiagem 2000 :



mesureur de dose portable (pour les γ)



La chambre à brouillard ou chambre de Wilson



Principe:

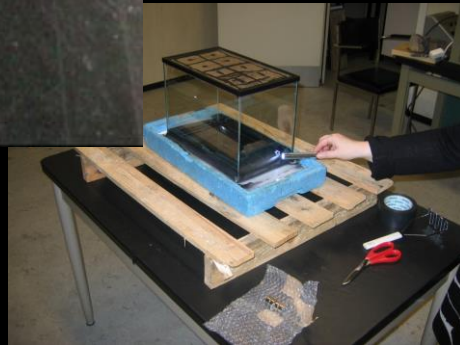


Détecteur « maison »

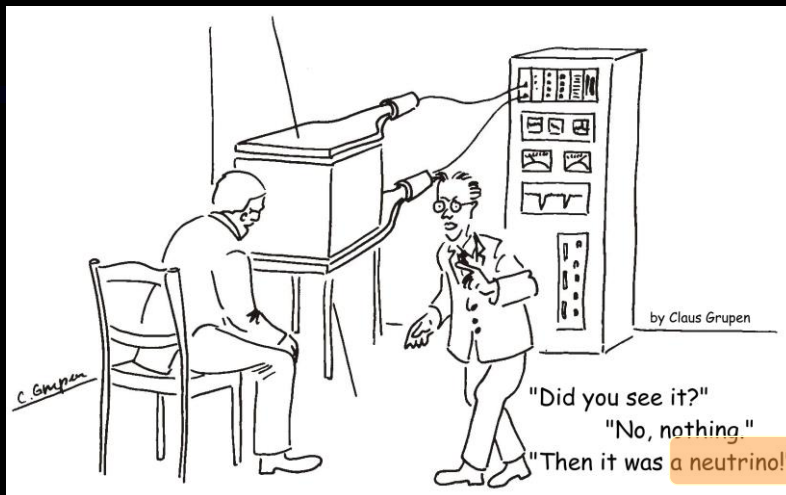


Pour visualiser le rayonnement
cosmique
atmosphérique

Interlude film



hodoscope à muons cosmiques



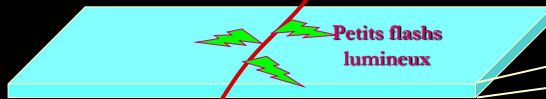
Pour mesurer le taux de particules cosmiques
particules par m^2 et par sec

54

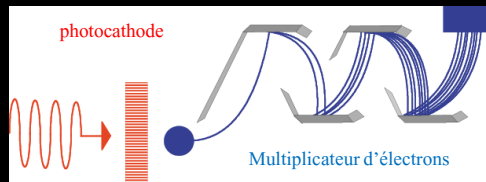
hodoscope à muons cosmiques = 2 détecteurs superposés

Plastique scintillant: milieu transparent qui émet une petite quantité de lumière lorsqu'une particule le traverse

Guide de lumière transparent en plexi



Photomultiplicateur : système photosensible qui transforme la lumière en signal électrique



FIN

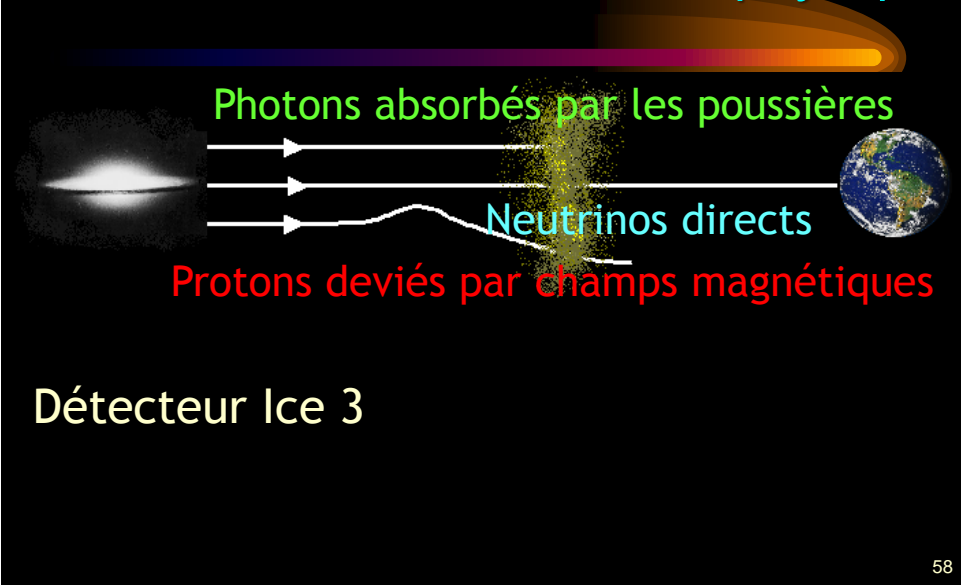
Merci pour votre attention

Faire de l'astrophysique avec des neutrinos



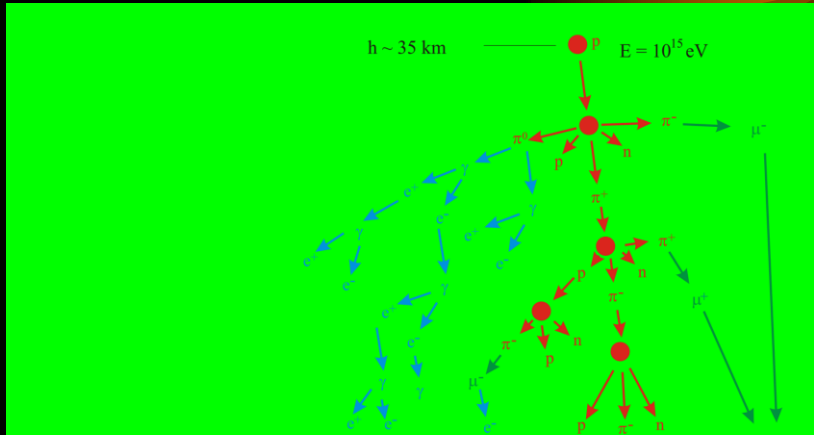
57

Les neutrinos = messagers de l'astrophysique



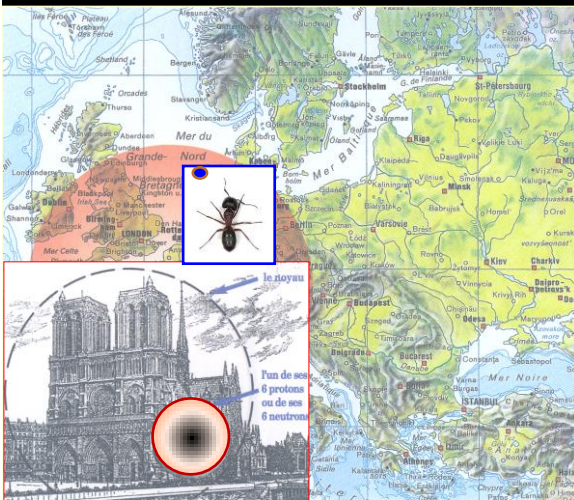
58

Extra – slides



$N = 10^6$ $N(e) = 18\%$ $N(\gamma) = 18\%$ $N(p, n, \pi) = 0,3\%$ $N(\mu) = 1,7\%$

Dans le monde de l'infiniment petit :



Électron
~0,001 fm

10^{-30} kg

NB Force de gravitation négligeable

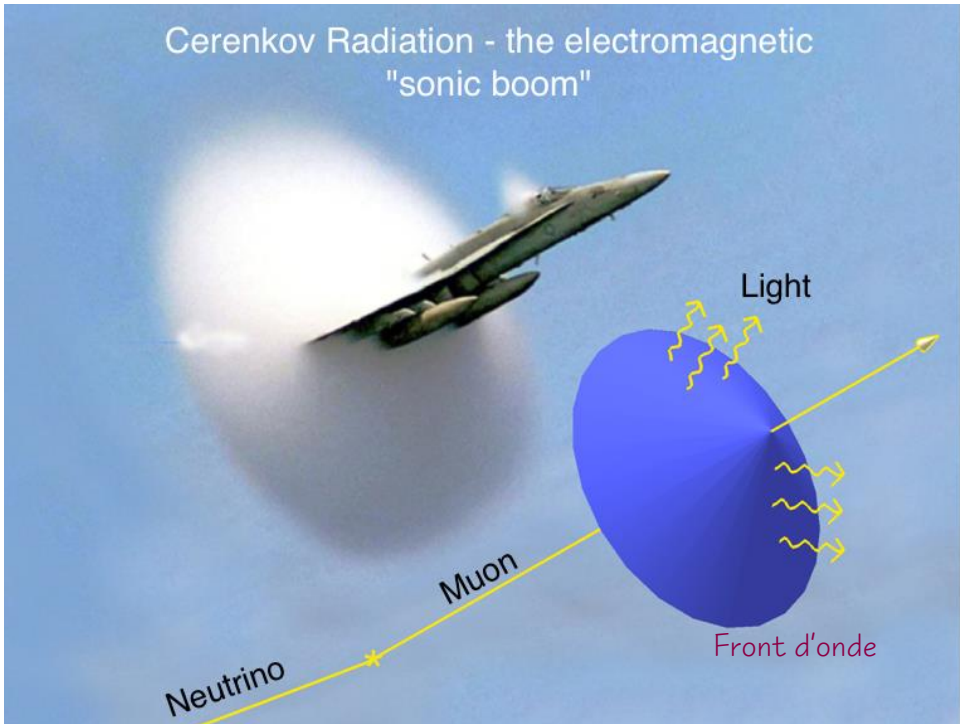


Atome Carbone

Noyau Carbone

proton
neutron

10^{-27} kg
 $= 10^{-15}$ m
 ~ 1 fm = 1 millionième de milliardième de mètre



What does a neutrino in water ?

Usually nothing !

But sometimes it will strike a nucleon and "knock out" an e (or μ) moving in the same direction as the ν was

The e (or μ) will travel a short distance giving off Cherenkov light **in the shape of a cone**

Détection de neutrinos

$\nu_{\mu} + N \rightarrow \mu + N'$

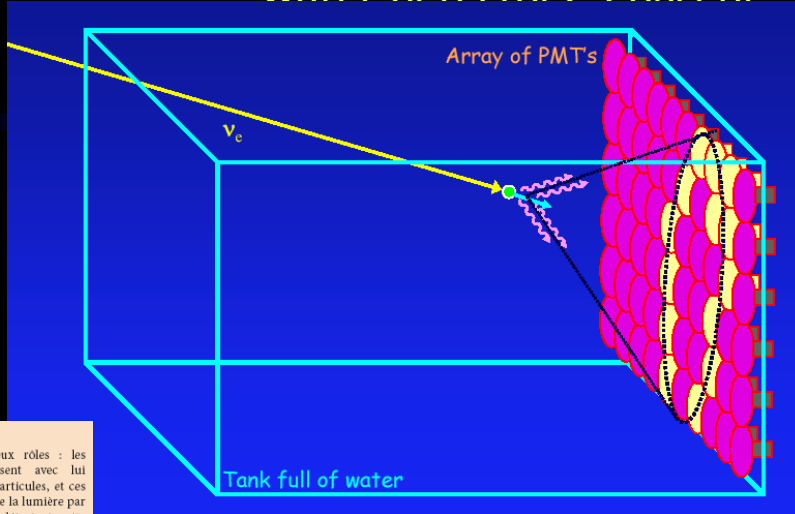
$\nu_e + N \rightarrow e + N'$

θ

$\frac{c}{n} t$

vt

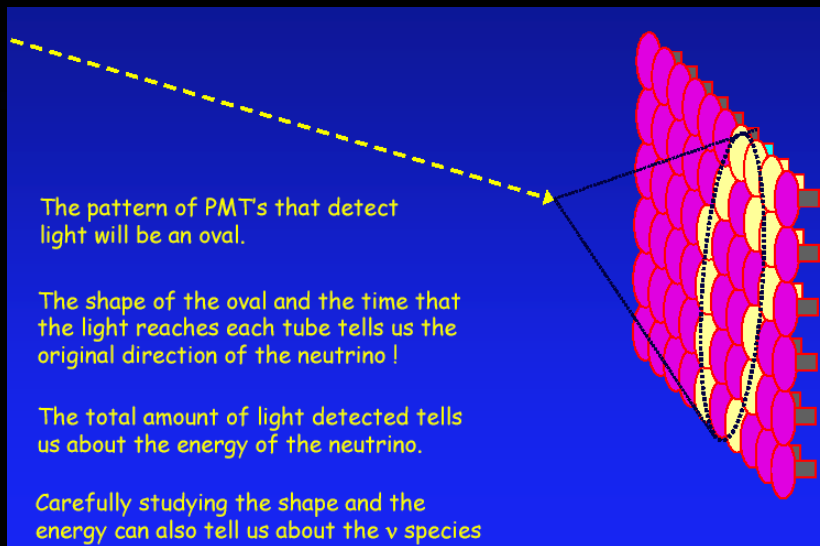
Water detectors: Concept



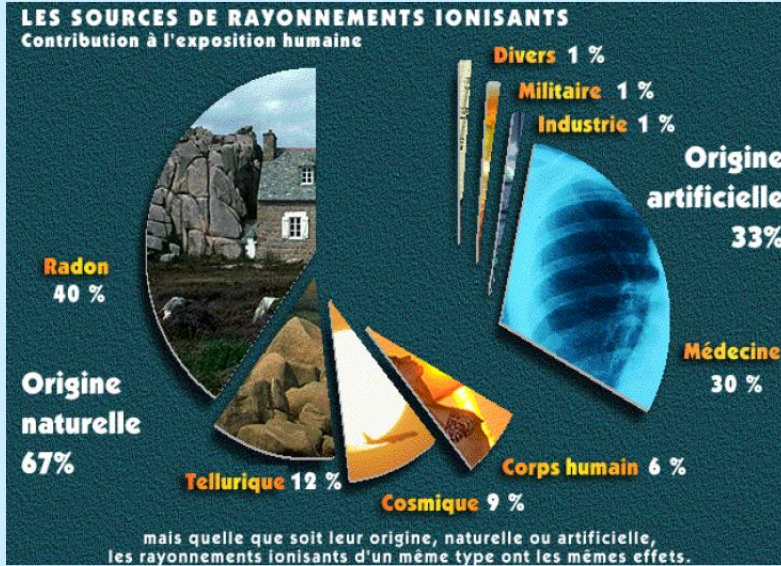
L'eau ultra-pure
Ce milieu joue deux rôles : les neutrinos interagissent avec lui pour produire des particules, et ces dernières émettent de la lumière par effet Cerenkov. En détectant cette lumière avec des capteurs placés sur les parois, on mesure la direction et l'énergie des particules produites. Puisque le point d'émission de la lumière est séparé de plusieurs mètres du capteur, l'eau doit être extrêmement pure afin d'éviter toute atténuation du signal lumineux.

UV – visible photons emitted from a luminous cone whose angle related to n_{medium} and β_{part}

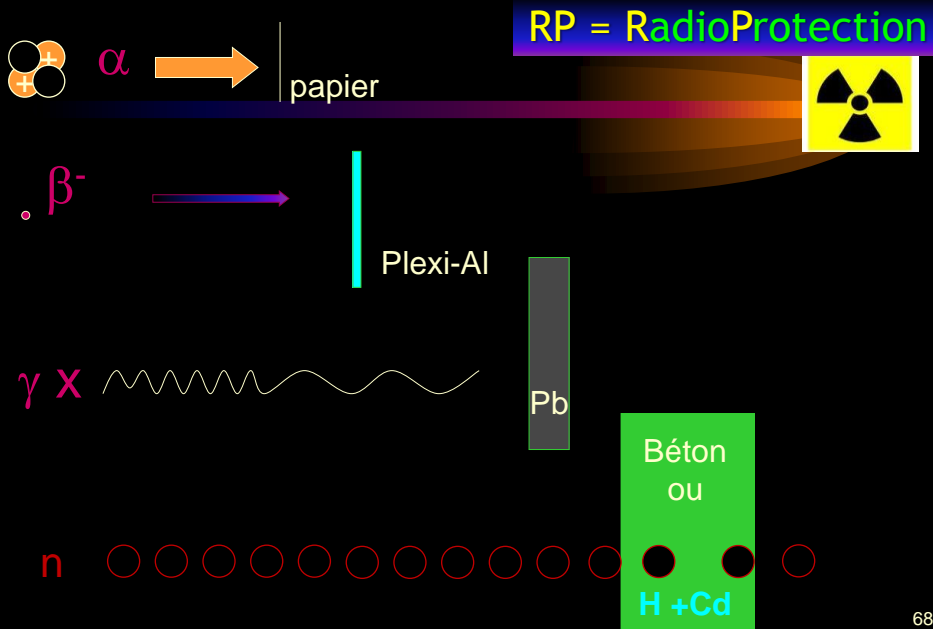
Water detectors: Concept



Quels rayonnements recevons-nous ?



Rayonnements ionisants interaction avec matière

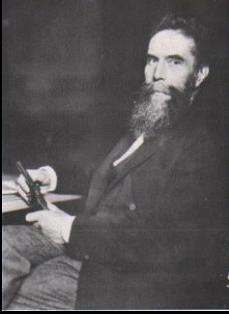


68

Et ... voici les physiciens nucléaires



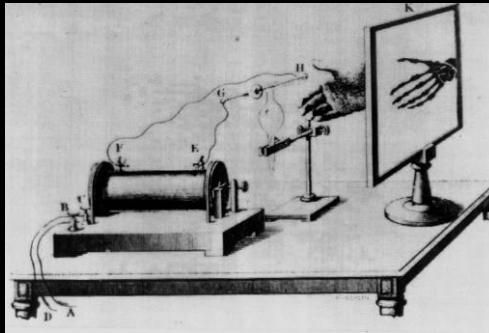
1895 **W. Roentgen**



*Etude courants
dans gaz*



Rayons X



1er PN 1901

69