

Des nouvelles des neutrinos

Ile de la Réunion
Novembre 2022

Thierry Lasserre (CEA)

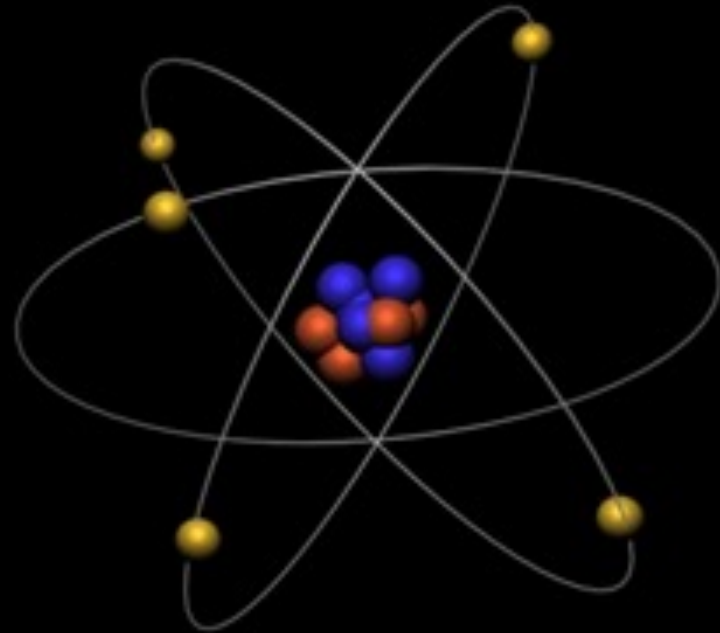
Une idée reçue...

Toute la matière autour de nous est composée des trois constituants des atomes:

● Neutron

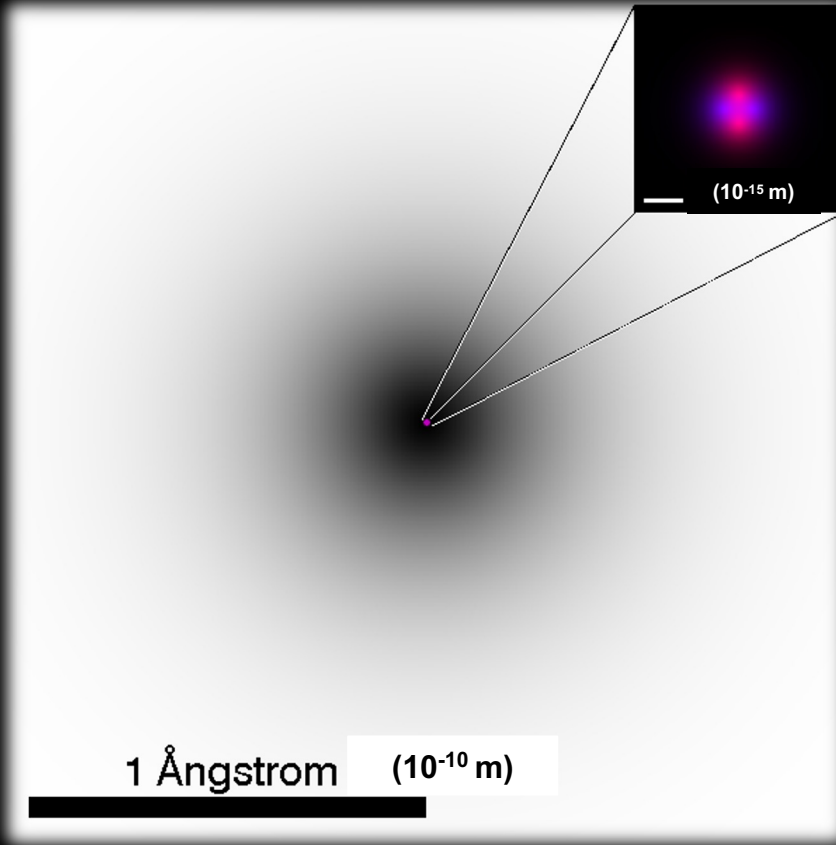
● Proton

● Electron



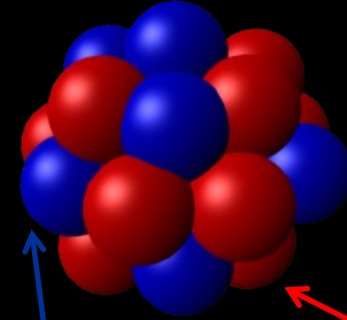
Le Noyau Atomique

Atome (noyau + électrons)



A=40
Z=19 **K**

Noyau Atomique

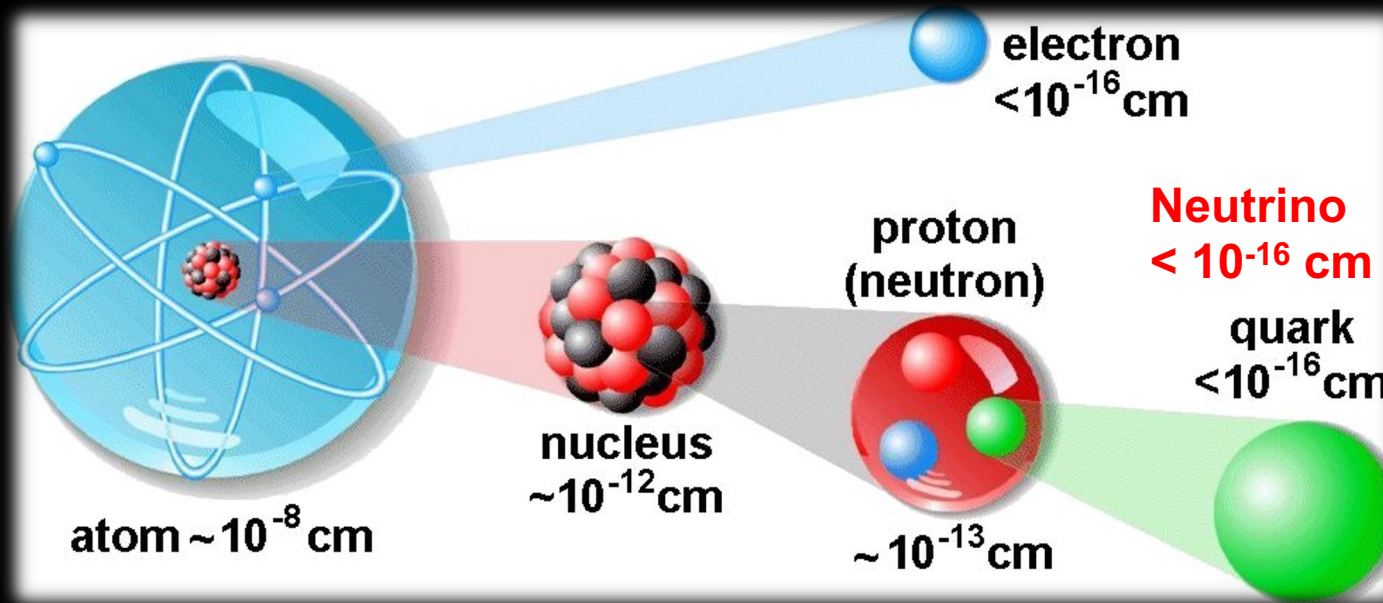


Z protons (charge +e)

N neutrons (neutres)

A = Z + N nucléons

Le neutrino



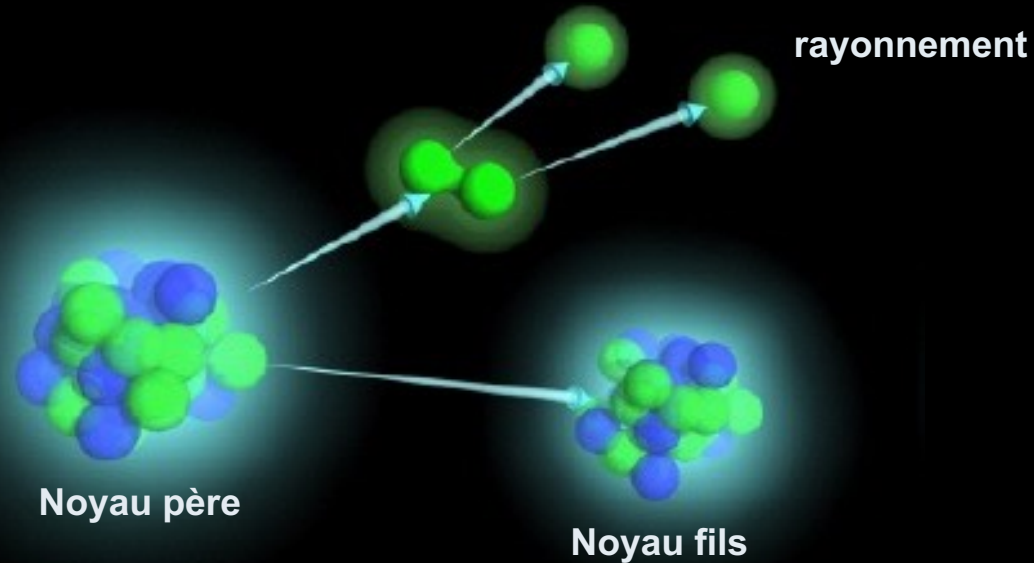
Abondants mais discrets

La matière autour de nous est bien faite **d'électrons de protons et de neutrons** mais ces derniers sont finalement très **minoritaires** dans l'Univers ...

Car pour 1 électron, proton, et neutron de l'Univers il y a 1 000 000 000 de neutrinos !

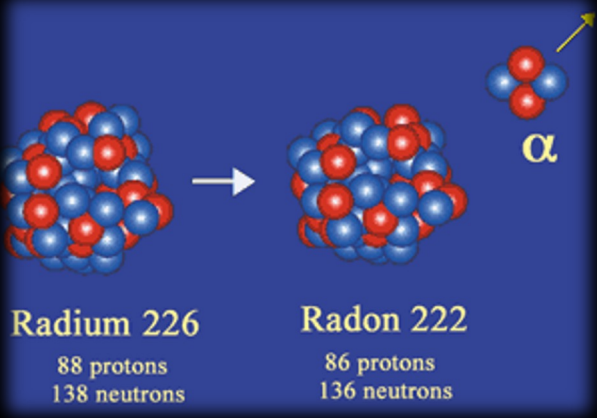
Radioactivité

Phénomène physique naturel au cours duquel des noyaux atomiques instables se désintègrent en dégageant de l'énergie sous forme de rayonnements divers, pour se transformer en des noyaux atomiques plus stables

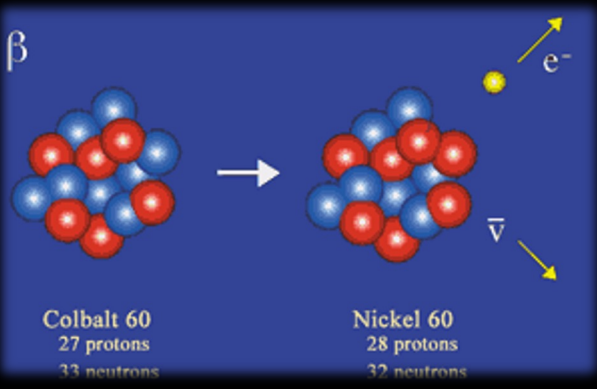


Types de Radioactivité

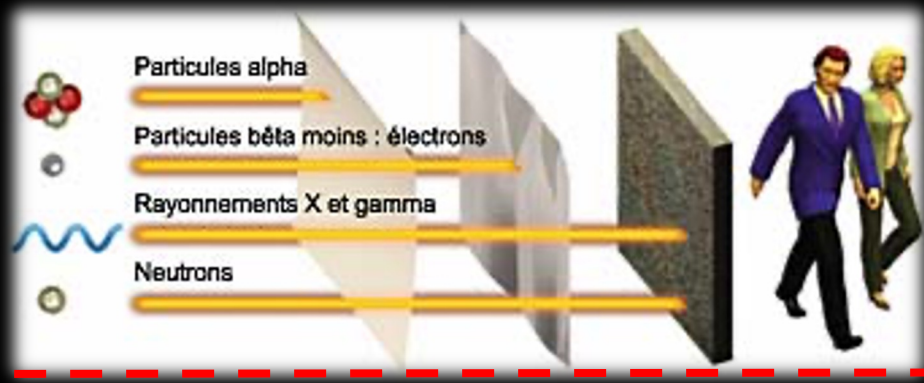
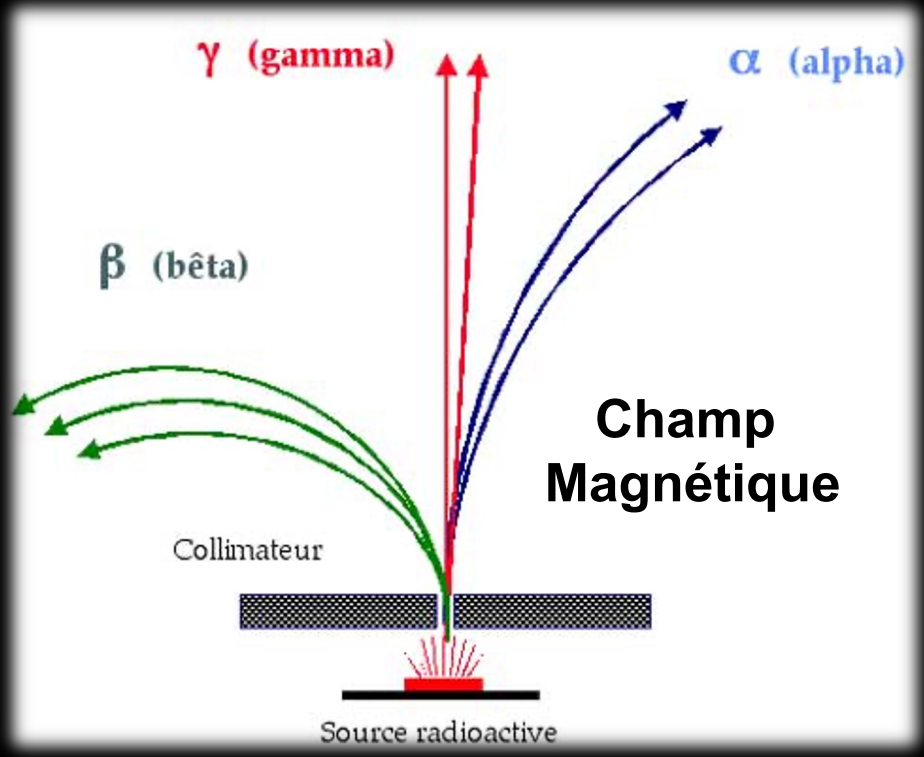
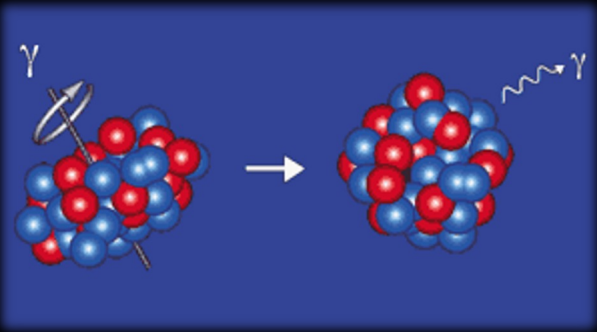
α



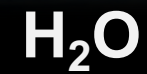
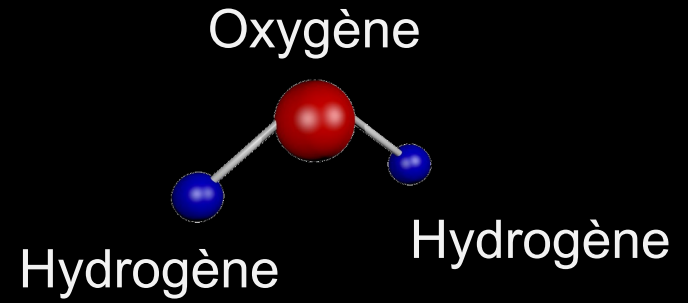
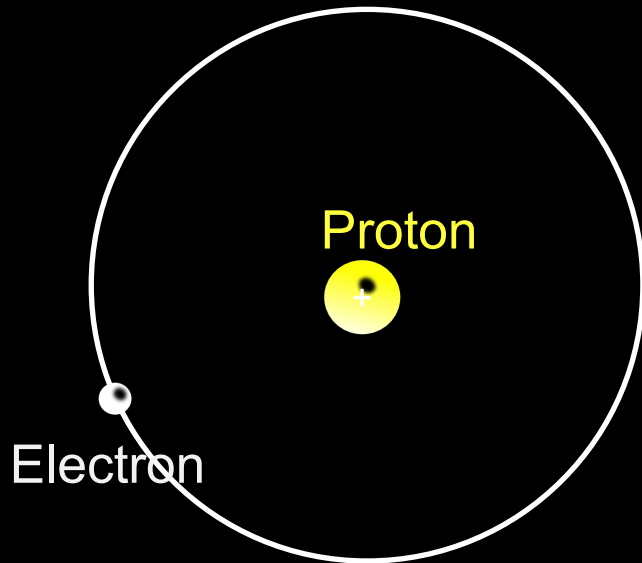
β



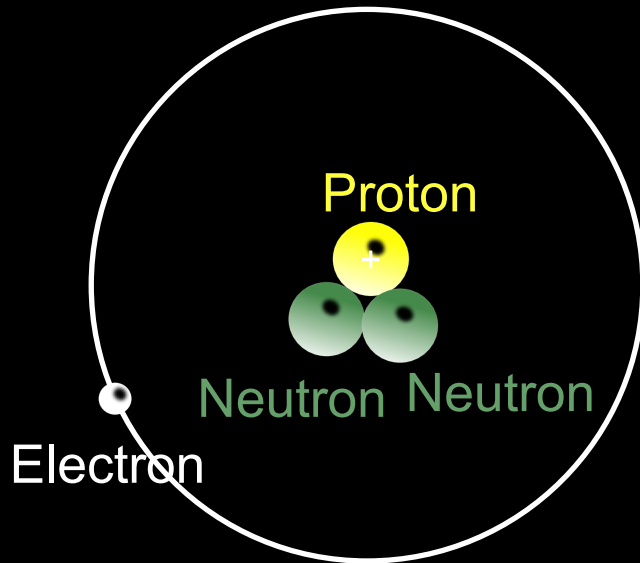
γ



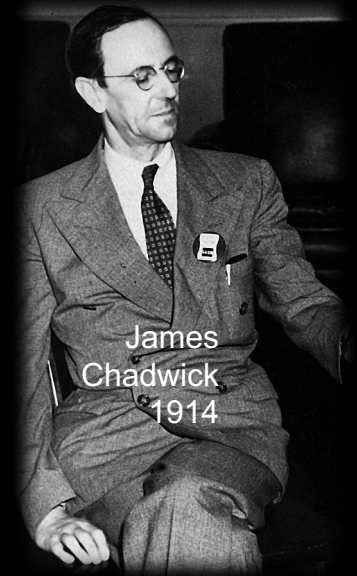
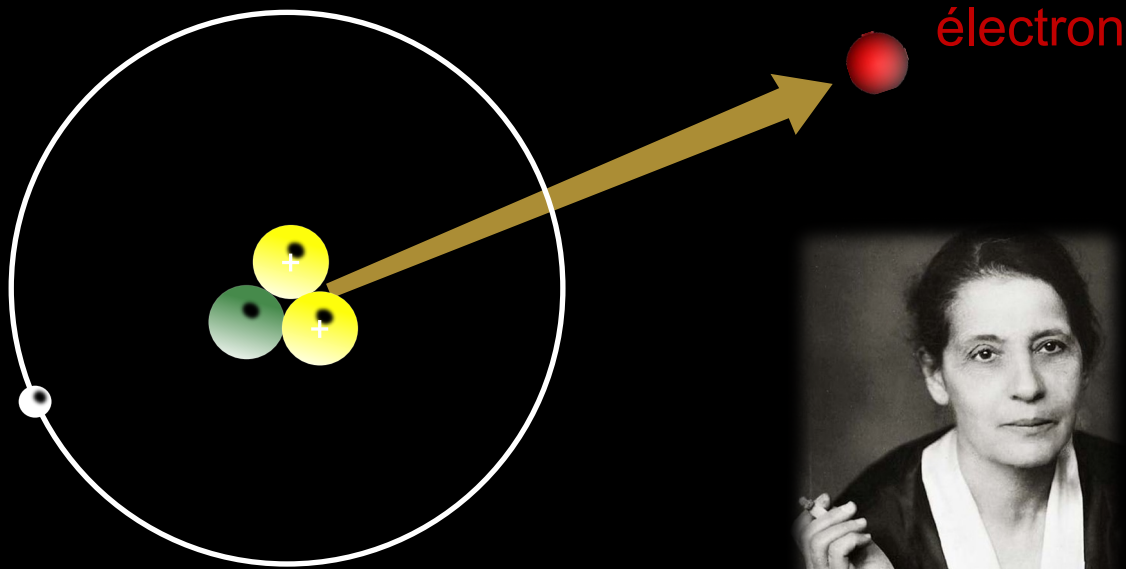
L'hydrogène



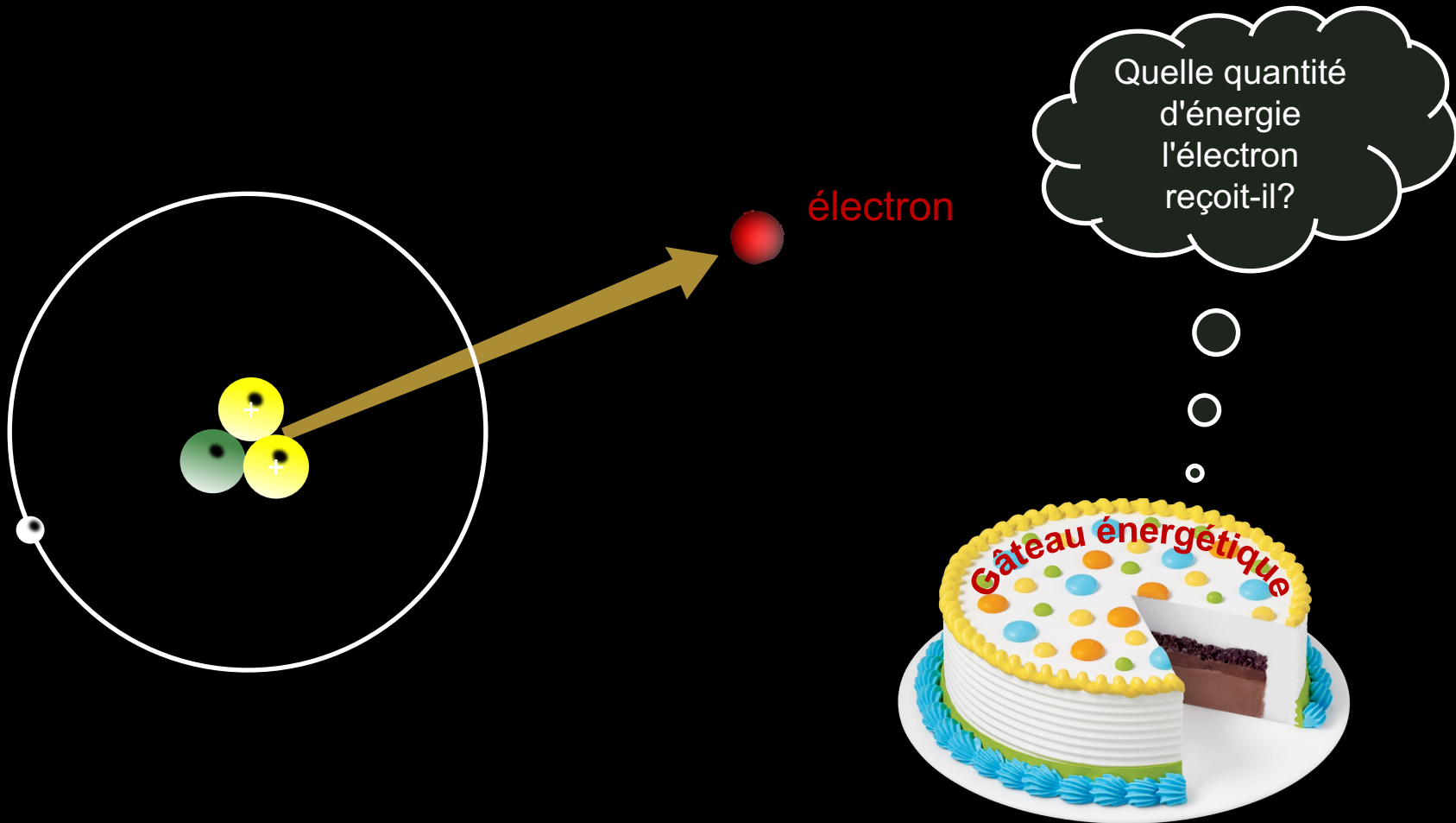
Le tritium (hydrogène super lourd)



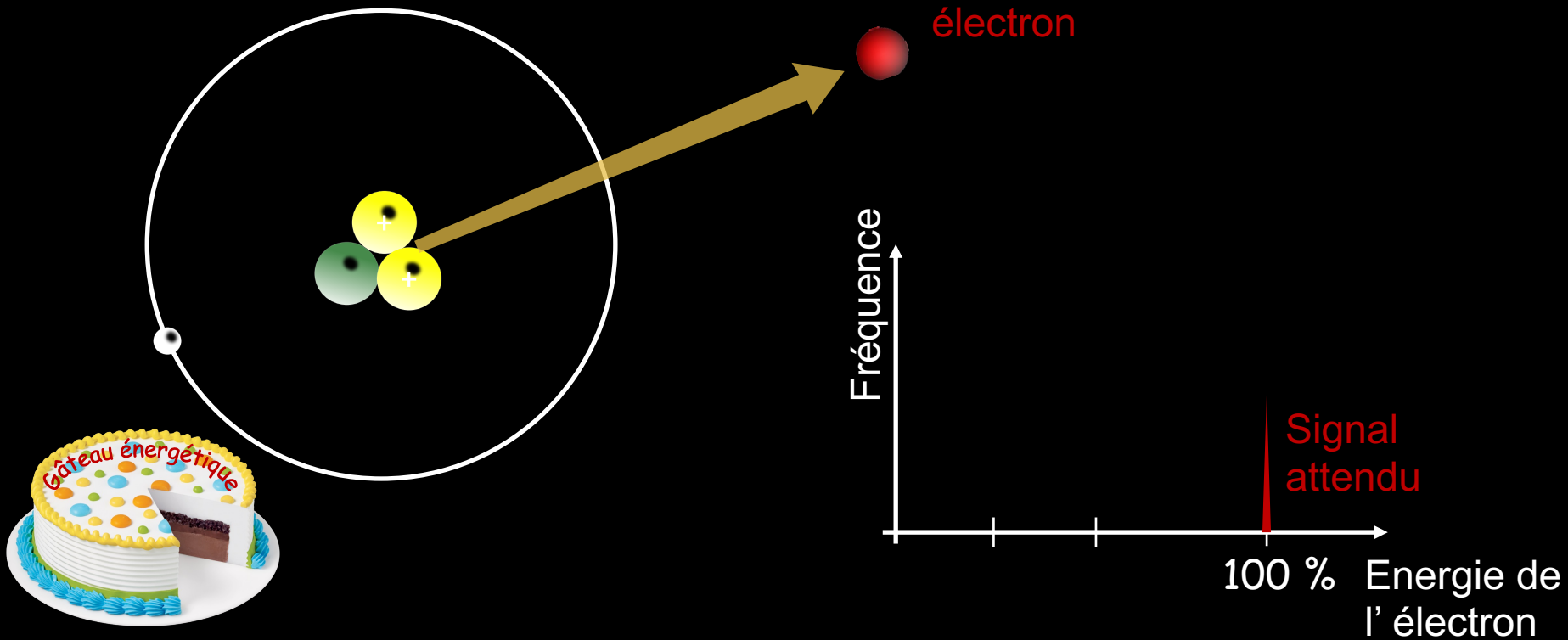
Le Tritium est radioactif (type bêta ou β)



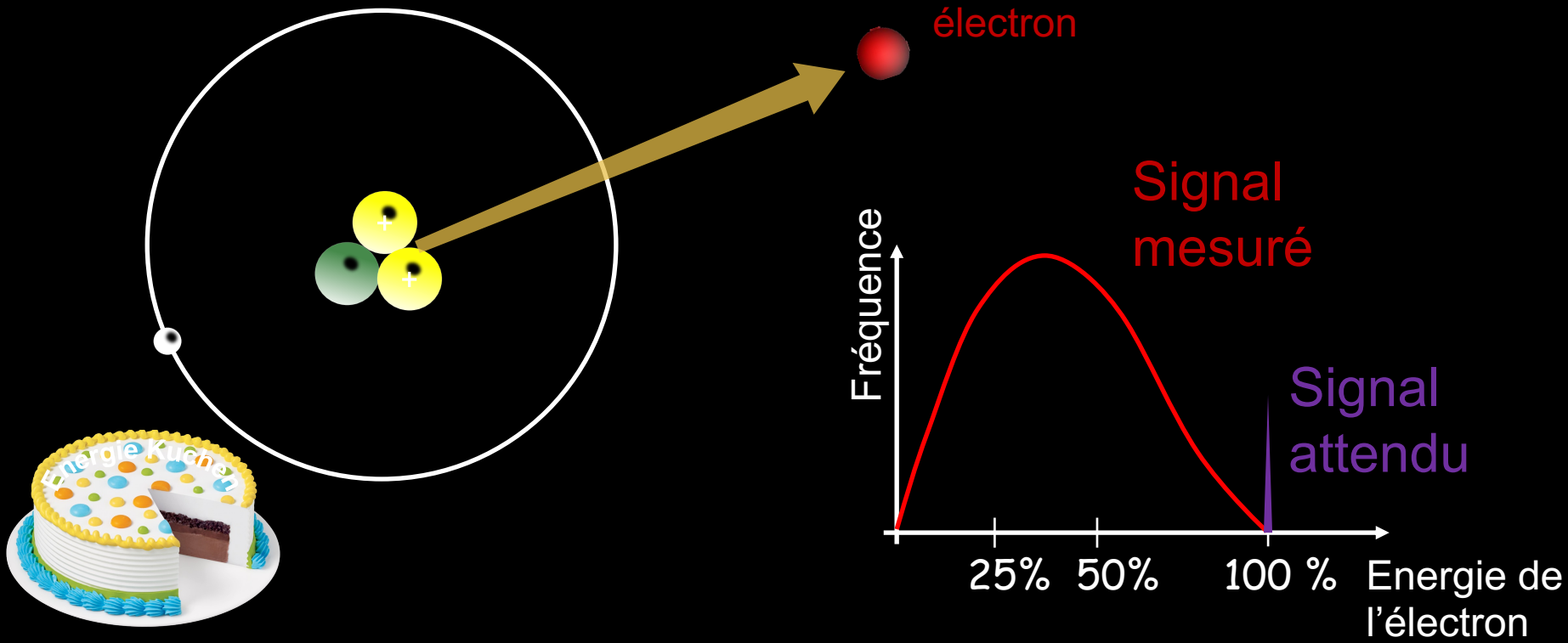
Désintégration « bêta »



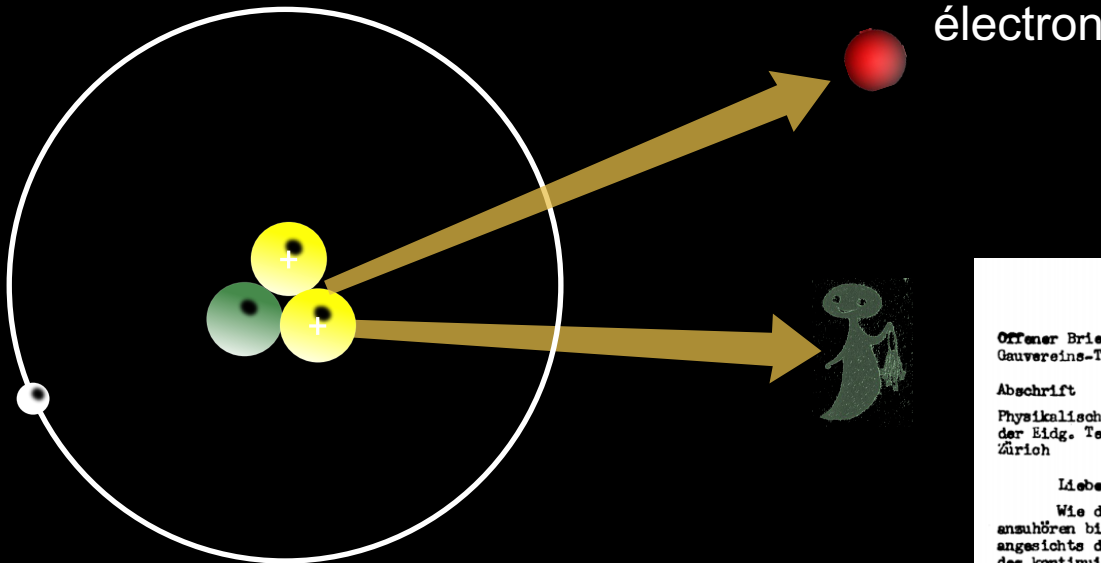
Désintégration « bêta »



Désintégration « bêta »



1930: Postulation du neutrino



Wolfgang Pauli 1930



original - Photocopy of PLC 0393
Abschrift/15.12.56 PW

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der
Gauvereins-Tagung zu Tübingen.

Abschrift
Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

Zürich, 4. Des. 1930
Gloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich halbvollst
ansuhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich
angesichts der "falschen" Statistik der N- und Li-6 Kerne, sowie
des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verzweifelten Ausweg
verfallen um den "Wechselgats" (1) der Statistik und den Energiesatz
zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale
Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren,
welche den Spin 1/2 haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und
sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie
nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen
musste von derselben Grössenordnung wie die Elektronenmasse sein und
jedenfalls nicht grösser als 0,01 Protonenmasse.- Das kontinuierliche
beta-Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim
beta-Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert
wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron
konstant ist.

Le remède désespéré de Pauli (1930)

Zürich, 4 décembre 1930

Chers dames et messieurs radioactifs,

Je vous prie d'écouter avec beaucoup de bienveillance le message de cette lettre. Il vous dira que pour pallier la "mauvaise" statistique des noyaux N et ${}^6\text{Li}$ et le spectre bêta continu, j'ai découvert un remède inespéré pour sauver les lois de conservation de l'énergie et les statistiques. Il s'agit de la possibilité d'existence dans les noyaux de particules neutres de spin $1/2$, obéissent au principe d'exclusion, mais différentes des photons parce qu'elles ne se meuvent pas à la vitesse de la lumière, et que j'appelle neutrons. La masse des neutrons devrait être du même ordre de grandeur que celle des électrons et ne doit en aucun cas excéder 0.01 fois la masse du proton. Le spectre bêta serait alors compréhensible si l'on suppose que, pendant la désintégration bêta, avec chaque électron est émis un neutron, de manière que la somme des énergies du neutron et de l'électron soit constante...

J'admet que mon remède puisse paraître invraisemblable car on aurait du voir ces neutrons bien plus tôt si réellement ils existaient. Mais seul celui qui ose gagne, ... Ainsi, cher peuple radioactif, examinez et jugez. Malheureusement, je ne pourrai pas être moi-même à Tübingen, ma présence étant indispensable ici pour un bal qui aura lieu pendant la nuit du 6 au 7 décembre.

*Votre serviteur le plus dévoué,
W. Pauli*



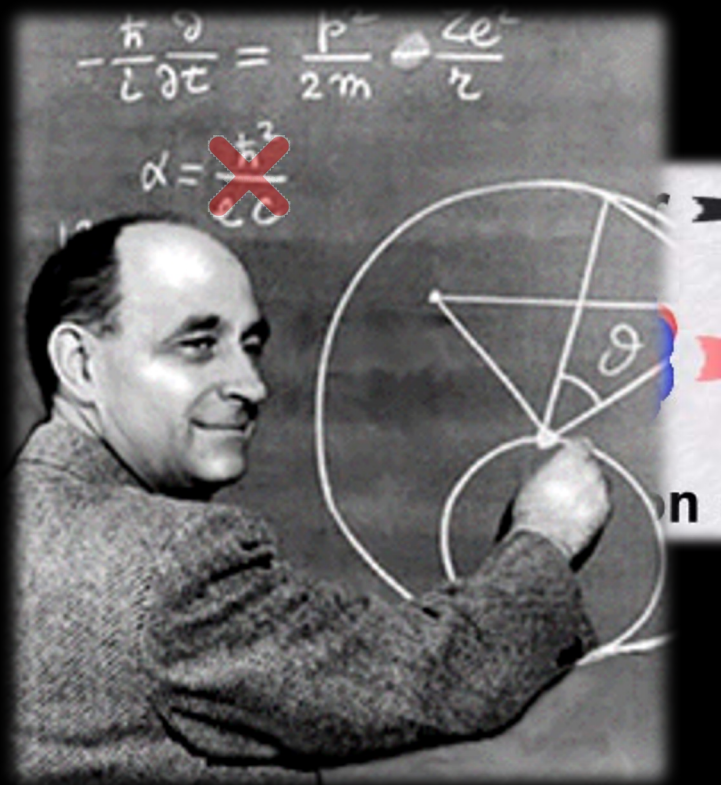
Théorie de la désintégration β (1934)

1932: Découverte du neutron par Chadwick

- Un atome est formé d'un nuage d'électrons orbitant autour d'un noyau constitué de protons et de neutrons

1934: Fermi construit une théorie de la désintégration β

- Baptême du neutrino. La communauté scientifique y croit!



Versuch einer Theorie der β -Strahlen. I¹⁾.

Von E. Fermi in Rom.

Mit 3 Abbildungen. (Eingegangen am 10. Januar 1934.)

Eine quantitative Theorie des β -Zerfalls wird vorgeschlagen, in welcher man die Existenz des Neutrinos annimmt, und die Emission der Elektronen und Neutrinos aus einem Kern beim β -Zerfall mit einer ähnlichen Methode behandelt, wie die Emission eines Lichtquants aus einem angeregten Atom in der Strahlungstheorie. Formeln für die Lebensdauer und für die Form des emittierten kontinuierlichen β -Strahlenspektrums werden abgeleitet und mit der Erfahrung verglichen.

1. Grundannahmen der Theorie.

Bei dem Versuch, eine Theorie der Kernelektronen sowie der β -Emission aufzubauen, begegnet man bekanntlich zwei Schwierigkeiten. Die erste ist durch das kontinuierliche β -Strahlenspektrum bedingt. Falls der Erhaltungssatz der Energie gültig bleiben soll, muß man annehmen, daß ein Bruchteil der beim β -Zerfall frei werdenden Energie unseren bisherigen Beobachtungsmöglichkeiten entgeht. Nach dem Vorschlag von W. Pauli kann man z. B. annehmen, daß beim β -Zerfall nicht nur ein Elektron, sondern auch ein neues Teilchen, das sogenannte „Neutrino“ (Masse von der Größenordnung oder kleiner als die Elektronenmasse, keine elektrische Ladung) emittiert wird. In der vorliegenden Theorie werden wir die Hypothese des Neutrinos zugrunde legen.

Le désespoir de la détection

The Neutrino in Nature 133, No. 3362, April 7, 1934, p.532. H. A. Bethe, R. E. Peierls.

NATURE
A WEEKLY JOURNAL OF SCIENCE
No. 3362, Vol. 133, SATURDAY, APRIL 7, 1934

BRITISH OPTICAL PROJECTION APPARATUS
LECTURE THEATRE LABORATORY
HALLS ROOM

TRANSPARENT VITROSCOPE of OPTICAL QUALITY
No. 10000

HYGROMETERS
The "Hygrometer" gives direct readings of relative humidity.

NEGRETTI & ZAMBRA
of Boston, U.S.A., and London, England

532 NATURE APRIL 7, 1934

The starting operation of the reaction given by Bethe and Peierls for the beta decay of ^{13}C is the first step in the chain of reactions which leads to the production of the neutrino. The neutrino is produced in the first step of the reaction and is emitted in the direction of the beta particle.

It is seen that Bethe's value for the neutrino mass is not far from the value of the neutrino mass obtained by Peierls and Bethe. This result is in agreement with the results of Peierls and Bethe.

Admission Department,
Royal College of Science,
London, W.

1-3 Stationer's Place, W.C.2, ENGL.

The "Neutron"
The view has recently been put forward that a neutral particle of about the mass of a neutron, and with a spin of $\frac{1}{2}$, is the cause of the fission of uranium. This view is based on the assumption that the fission of uranium is caused by the absorption of a neutron by the nucleus of uranium. The fission of uranium is caused by the absorption of a neutron by the nucleus of uranium. The fission of uranium is caused by the absorption of a neutron by the nucleus of uranium.

where λ is the absorption coefficient, μ is the linear absorption coefficient, ρ is the density, and N is the number of atoms per unit volume. The linear absorption coefficient is given by $\mu = N\sigma$, where σ is the cross-section for absorption. The linear absorption coefficient is given by $\mu = N\sigma$, where σ is the cross-section for absorption.

536 NATURE APRIL 7, 1934

BECK MICRO-PROJECTOR
The Beck Micro-Projector is a portable projector which can be used for the projection of micrographs. It is a simple and efficient projector which can be used for the projection of micrographs. It is a simple and efficient projector which can be used for the projection of micrographs.

SPHYGMOMANOMETERS
The "Logan Hill" Sphygmomanometer is a portable sphygmomanometer which can be used for the measurement of blood pressure. It is a simple and efficient sphygmomanometer which can be used for the measurement of blood pressure. It is a simple and efficient sphygmomanometer which can be used for the measurement of blood pressure.

THE ENTIRE RANGE
The entire range of photographic work is covered by the fine series of Watson Microfilm Emulsions. These emulsions are available in a wide range of sensitivities and are suitable for use in a wide range of photographic work. They are available in a wide range of sensitivities and are suitable for use in a wide range of photographic work.

W. WATSON & SONS, LTD.
212 HIGH HOLBORN, LONDON, W.C.1

ENGLISH CHEMICAL GLASSWARE
The English Chemical Glassware is a high quality glassware which is suitable for use in a wide range of chemical work. It is a high quality glassware which is suitable for use in a wide range of chemical work. It is a high quality glassware which is suitable for use in a wide range of chemical work.

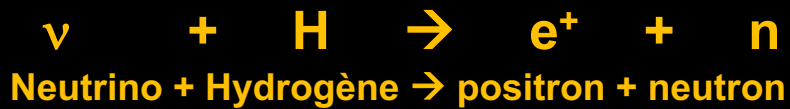
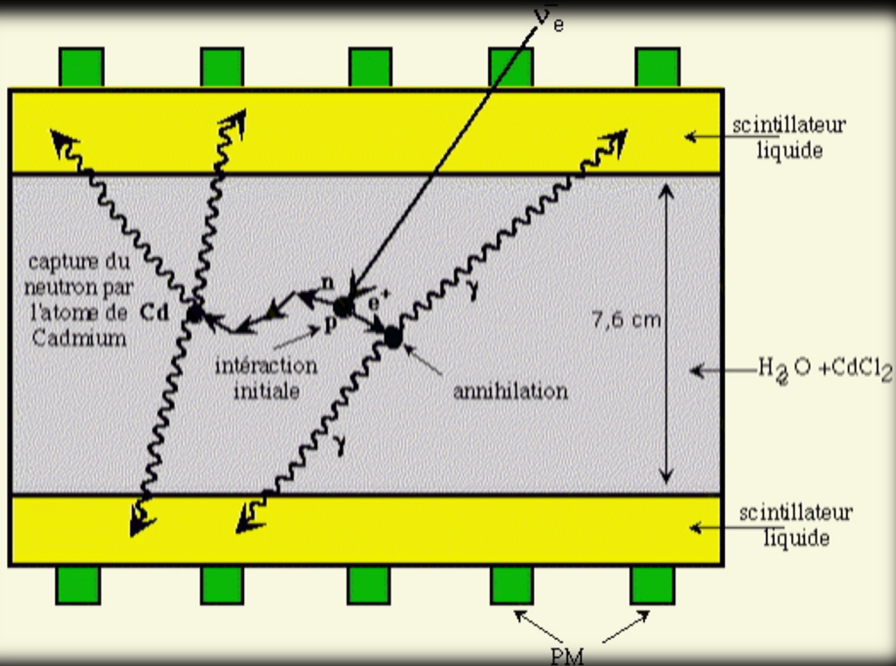
OUR SERVICE IS BEHIND YOU!
W. WATSON & SONS, LTD., 212 HIGH HOLBORN, LONDON, W.C.1



" Il est donc absolument impossible d'observer des processus de ce type avec les neutrinos créés lors des transformations nucléaires. "

Découverte du neutrino (1956)

1956: Reines et Cowan détectent les (anti-) neutrino émis par le réacteur nucléaire de Savannah river (USA)



Réacteur OFF : 1 événement/heure
Réacteur ON : 4 événements/heure

1956: Découverte du neutrino



Clyde Cowan

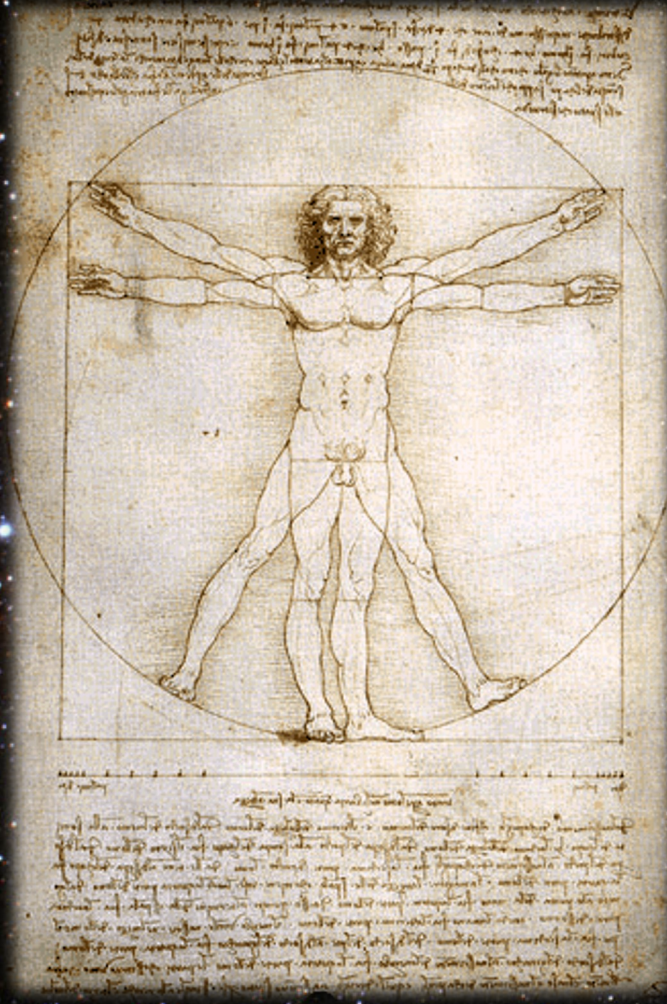
Fred Reines



1955: Frederick Reines " pour la détection du neutrino "



Nous sommes aussi source de neutrinos



Le corps humain contient
20 mg de potassium 40
(émetteur radioactif β)



Nous émettons ainsi 300
millions d'antineutrinos
électroniques par jour !

Les Neutrinos interagissent très ... très ... très peu !

La probabilité d'interaction d'un neutrino (solaire)
avec un humain est de $1 / 10\,000\,000\,000\,000\,000$

Vu par nos yeux

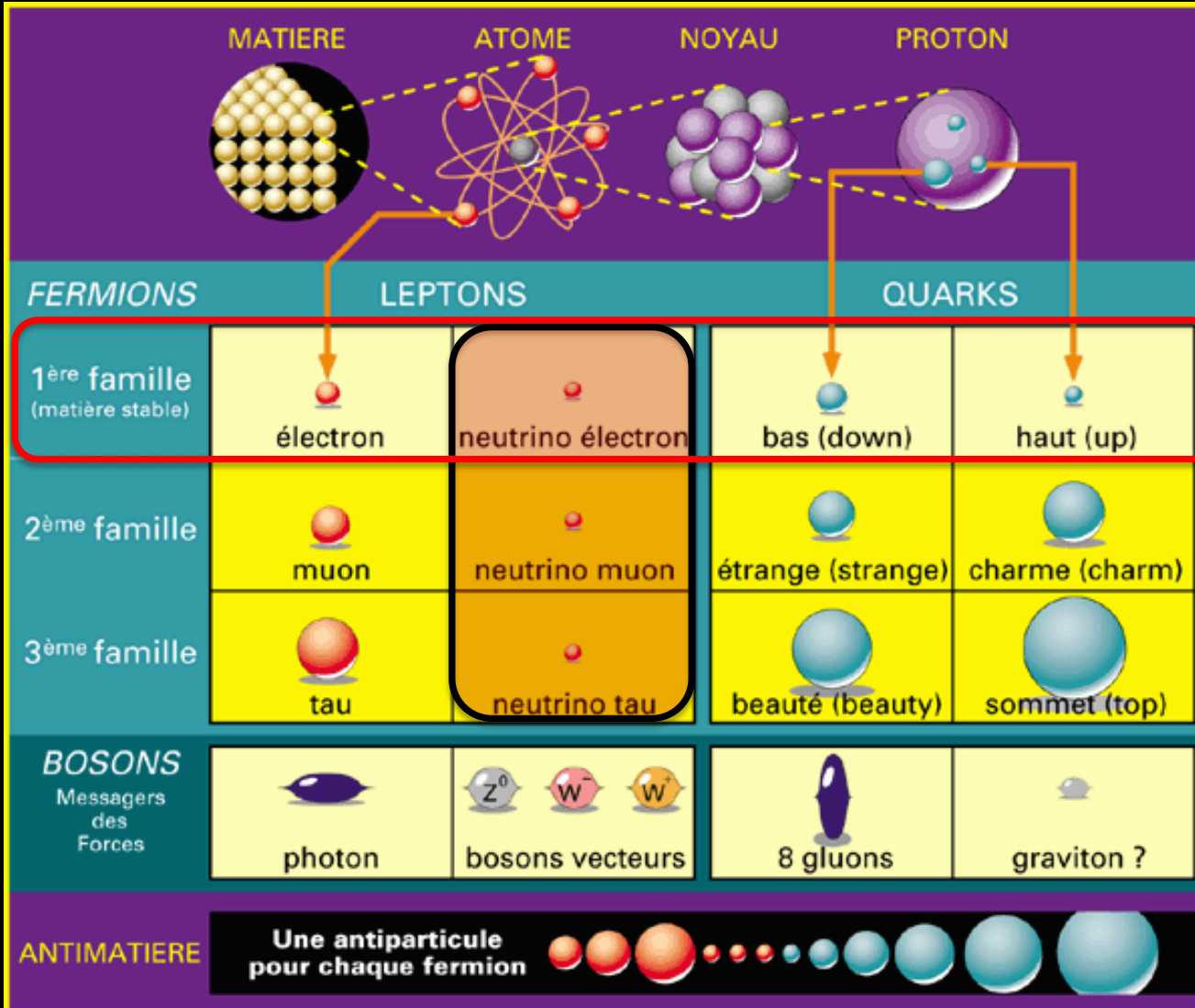


Vu par un neutrino



La détection des neutrinos est donc difficile ...

Le modèle standard: les particules



Matière Stable

**Boson de Higgs
+ Découvert en 2012
au LHC (CERN)**

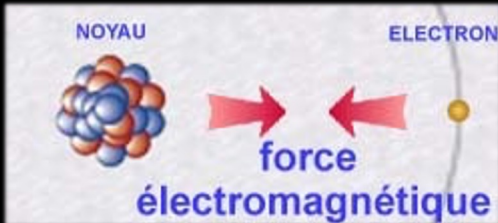
Le modèle standard: forces



Interaction entre deux objets 'massifs'



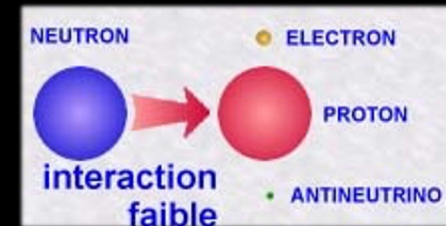
Maintien la cohésion des noyaux



Electricité et Magnétisme



Higgs
Origine de la masse des particules (sauf peut être le neutrino?)

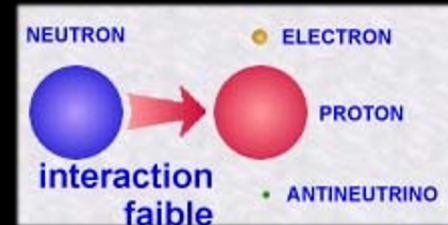
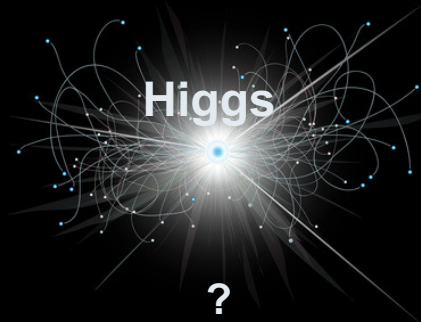


Permet aux particules de changer de nature

Deux forces affectent le neutrino



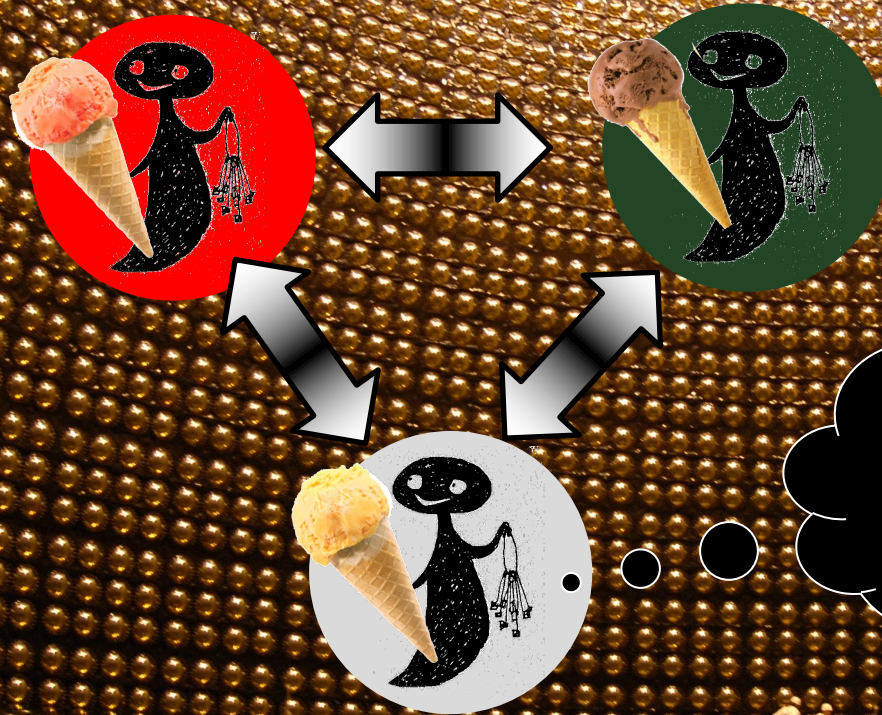
Interaction entre deux objets 'massifs'



Permet aux particules de changer de nature

Les neutrinos ne sont sensibles qu'à l'interaction faible et à la gravitation

L'oscillation des Neutrinos



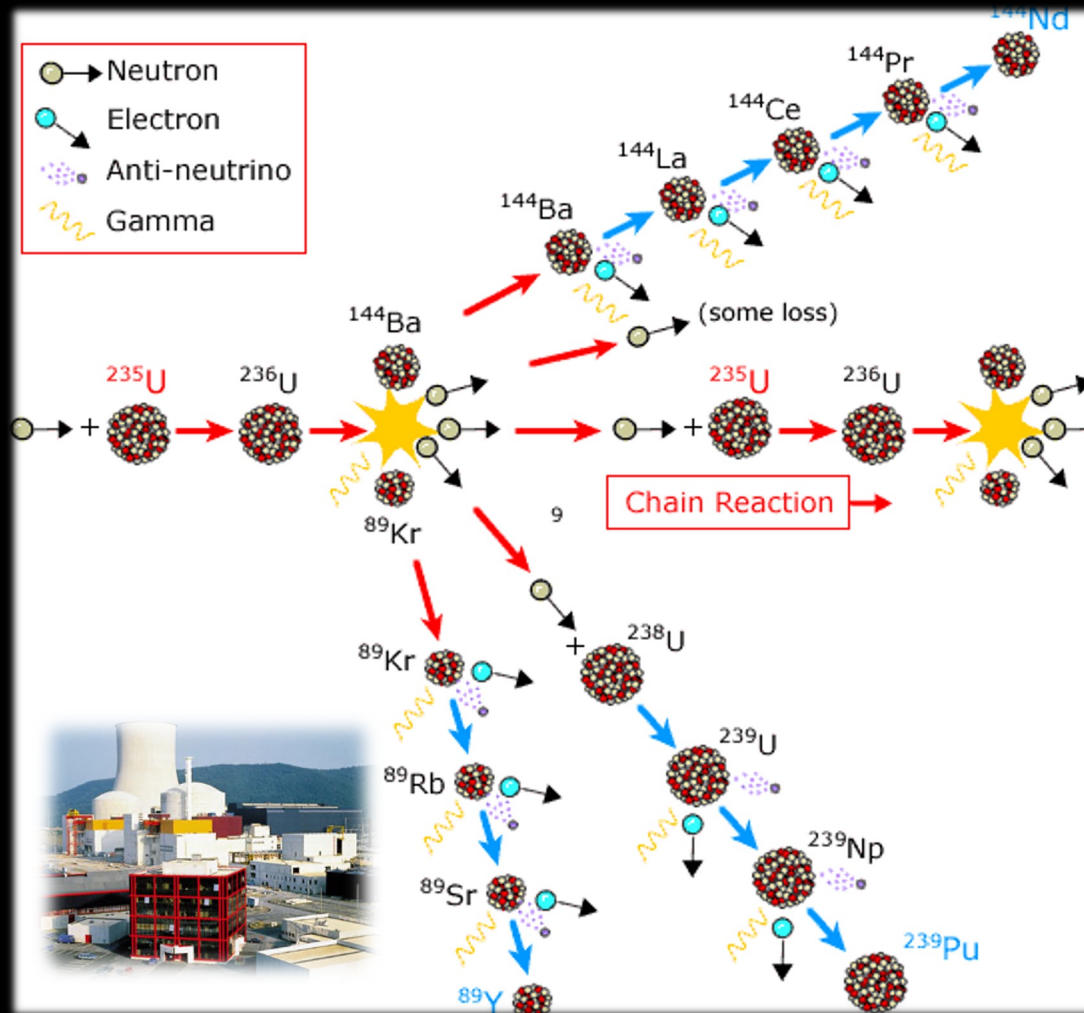
Les neutrinos
peuvent
spontanément
changer de saveur

Comment détecter les neutrinos?

Etude des neutrinos à Chooz

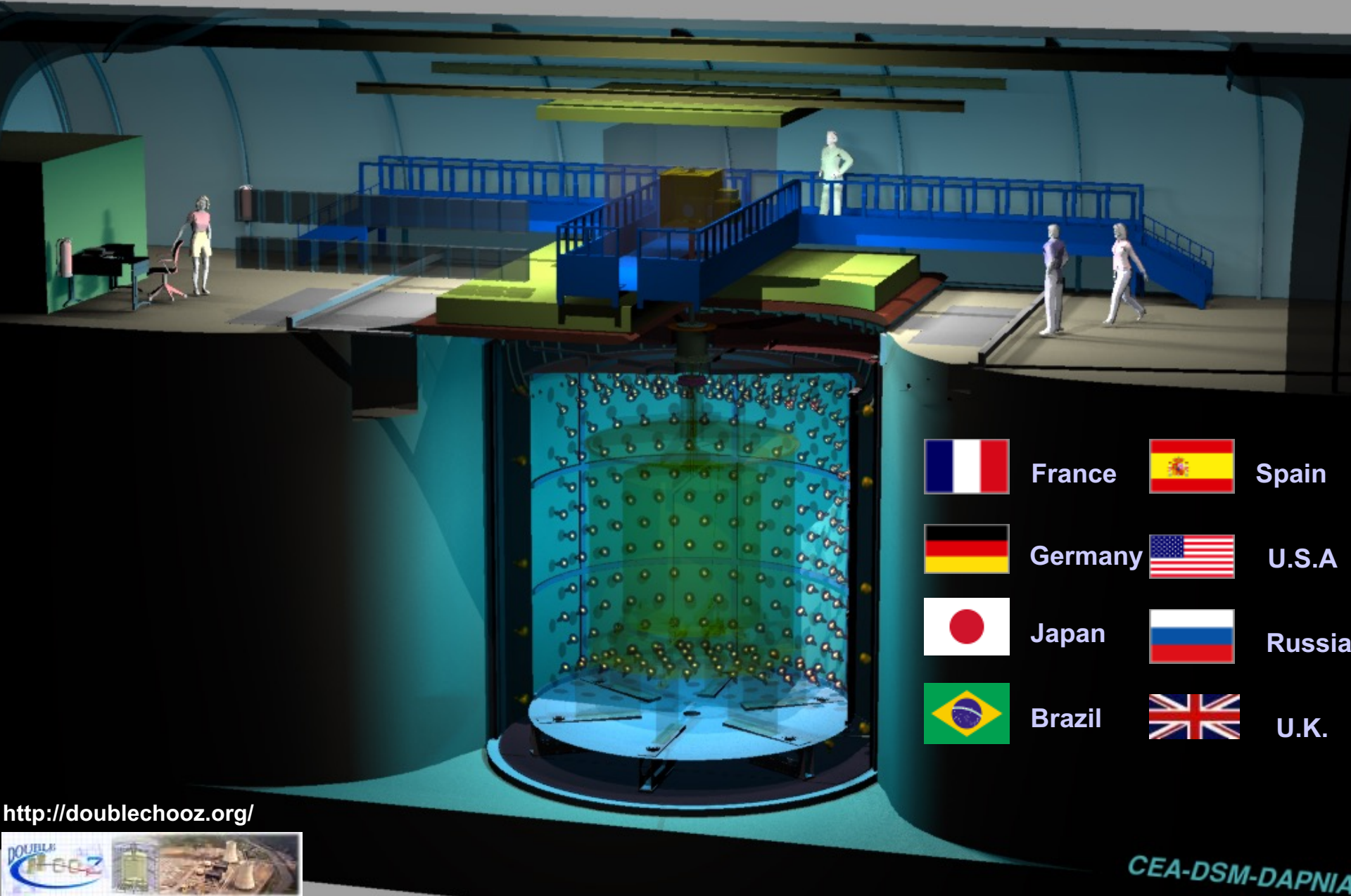


Fissions nucléaires en chaîne



1 Zetta Neutrinos par seconde (10^{21})

Le détecteur



France



Spain



Germany



U.S.A



Japan



Russia



Brazil



U.K.

<http://doublechooz.org/>





La traque des neutrinos à Chooz

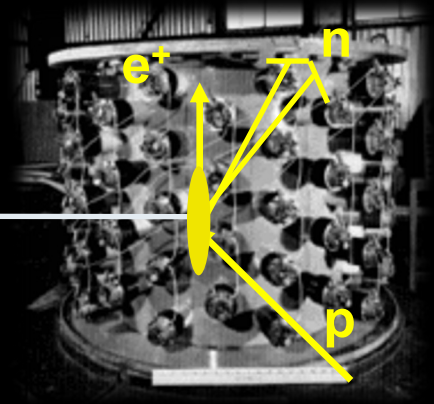
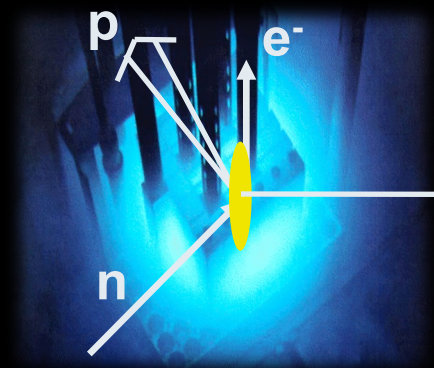
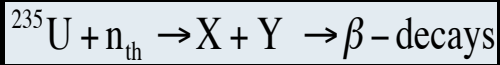
1 00 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000
neutrino / jour émis par la centrale (26 zéros)

1 000 000 000 0000 000 000 000
neutrinos / jour dans le détecteur (19 zéros)

50 neutrinos / jour détectés à 1 km

A photograph of a large, cylindrical hay bale in a golden field under a blue sky. A long, thin, white object, representing a neutrino, is shown passing through the center of the hay bale. In the background, there are rolling hills and other smaller hay bales.

Emission, propagation, détection



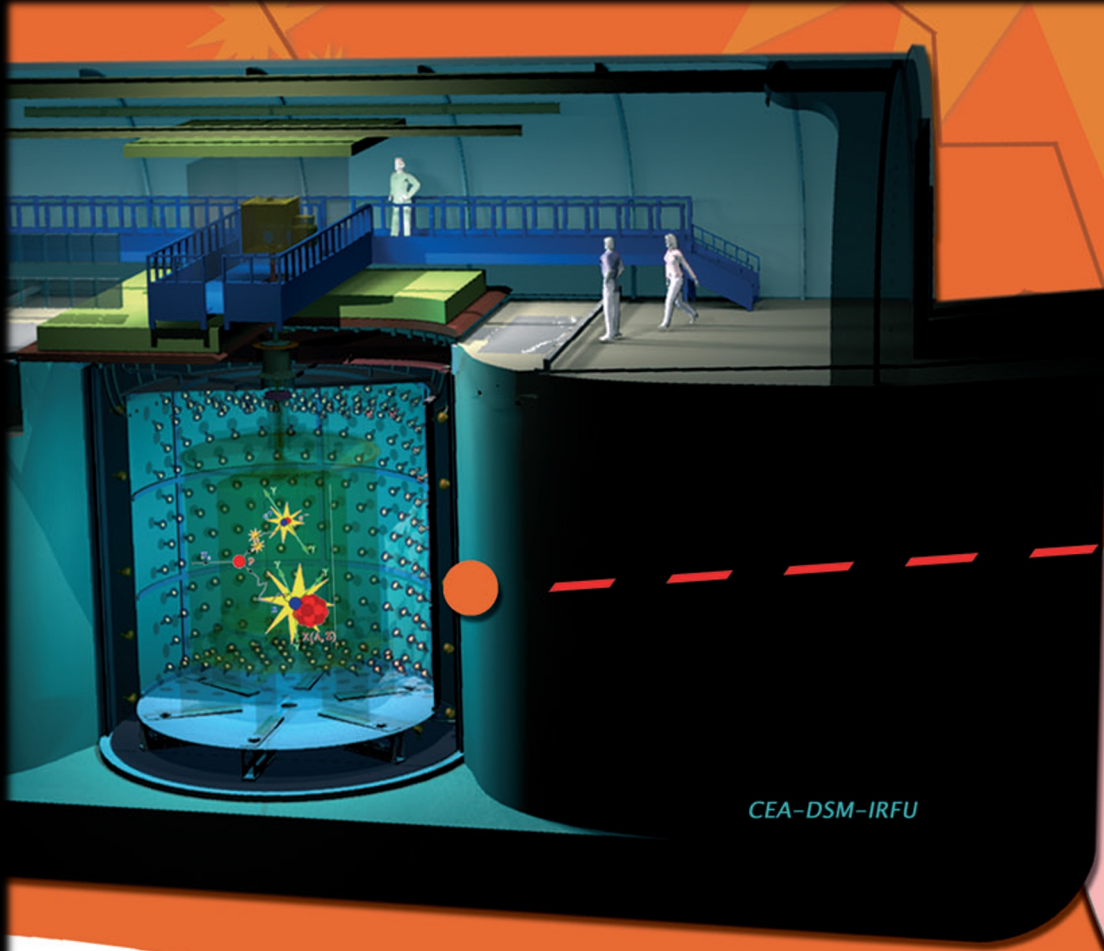
Production dans le cœur
du réacteur nucléaire

Détecteur de Neutrinos



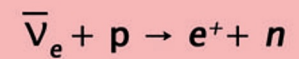
Temps de vol ou distance parcourue depuis sa création

Intéraction neutrino - proton

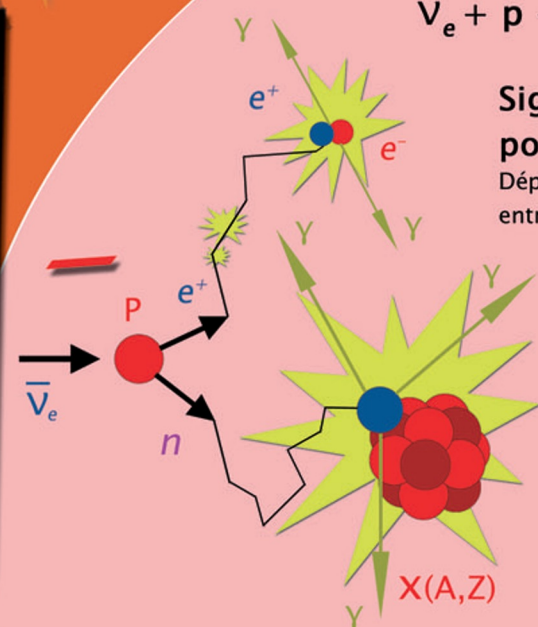


CEA-DSM-IRFU

Le signal de la réaction β inverse



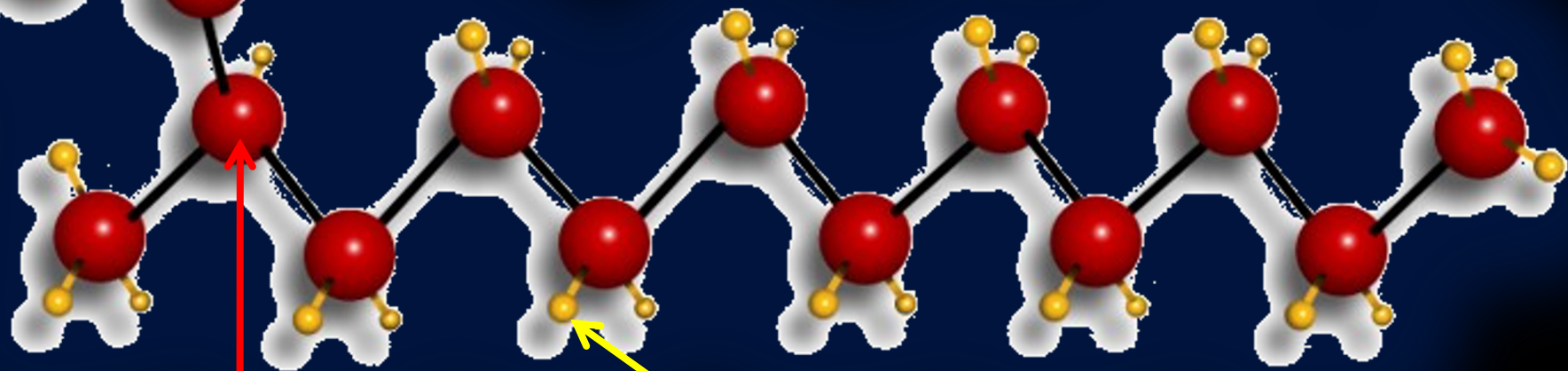
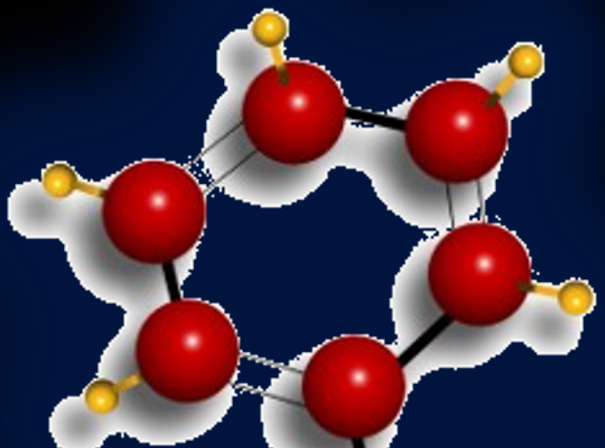
Signal prompt :
positron e^+
Dépôt d'énergie
entre 1 et 10 MeV



Signal retardé :
neutron n
capturé par un noyau
de Gd
Dépôt d'énergie
de 8 MeV

La détection des antineutrinos utilise la réaction $\text{anti-}\nu_e + p \rightarrow e^+ + n$. Le positron et le neutron sont détectés en coïncidence à quelques dizaines de microsecondes d'intervalle et avec une séparation d'une dizaine de centimètres.

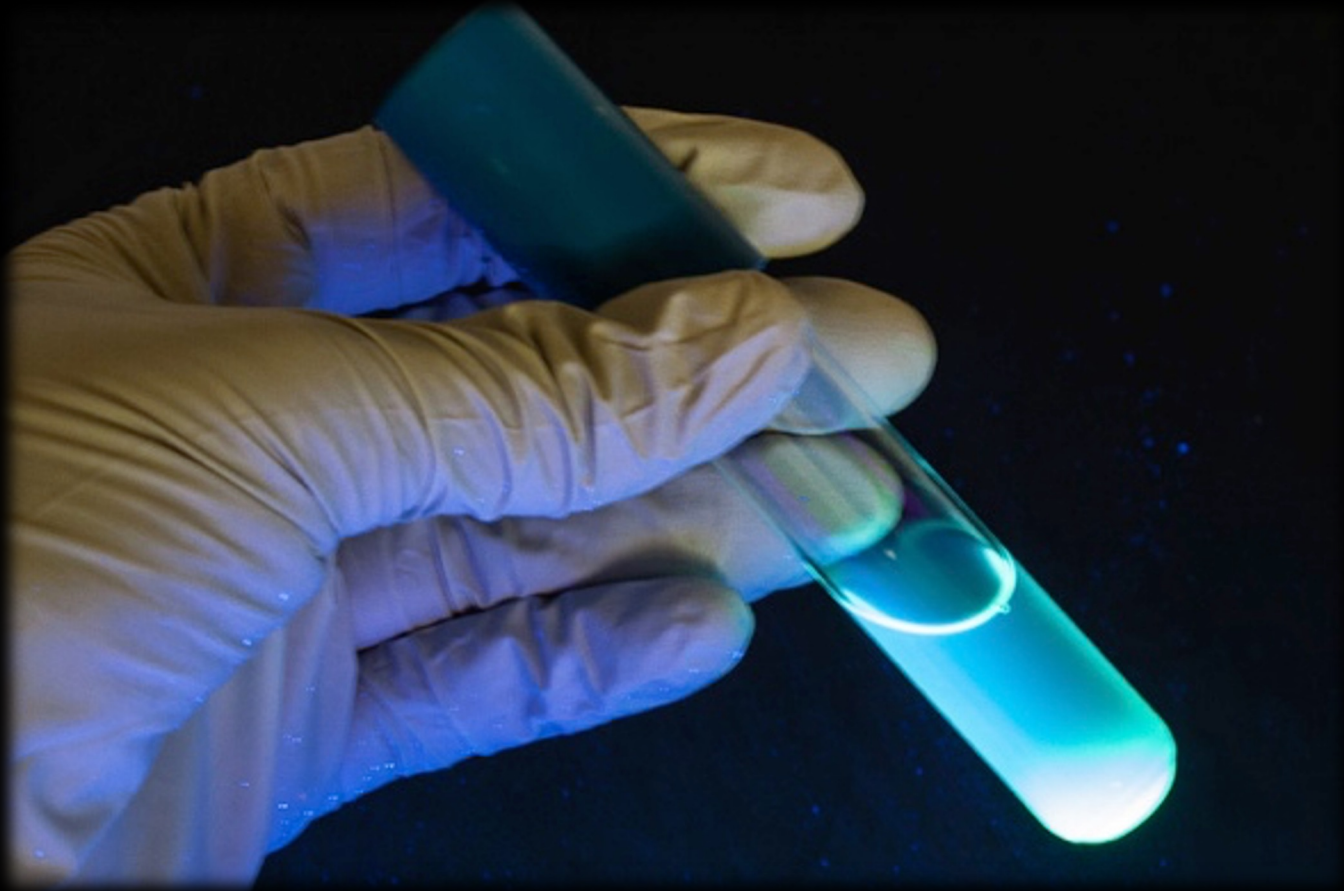
Huiles Organiques Scintillantes



Atome de carbone

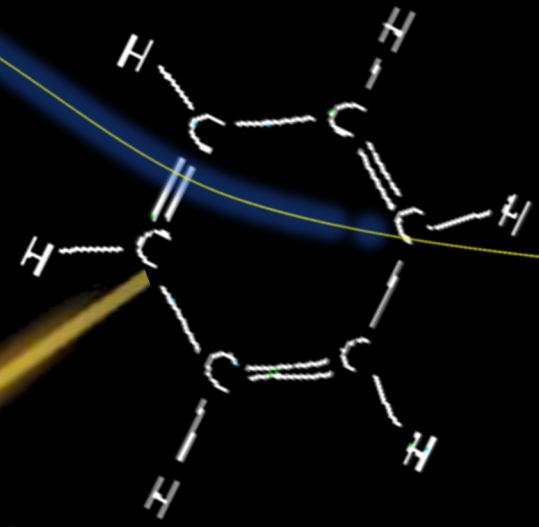
Atome d'hydrogène

Fluorescence



Transfer d'énergie

Rayonnement ionisant
(positron) induit par le neutrino

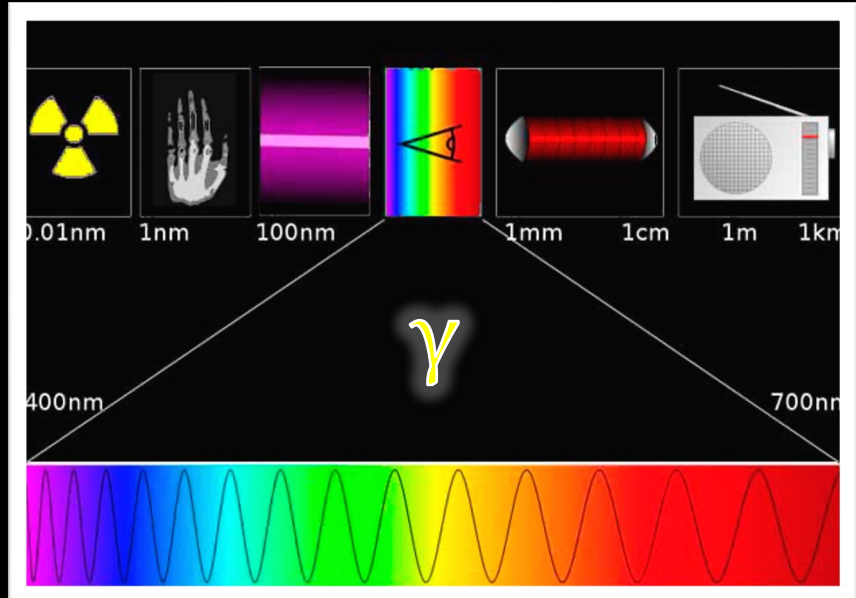


e^-

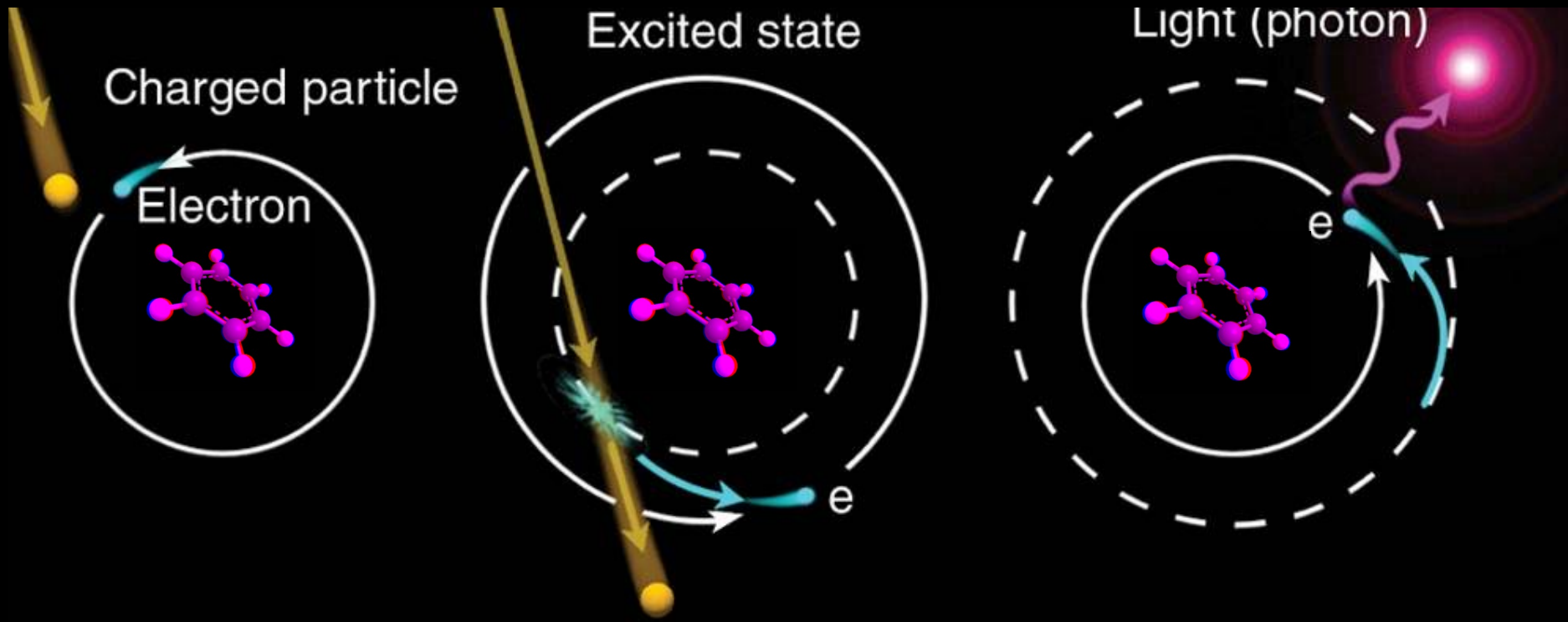
γ



Détecteur de photons (γ)

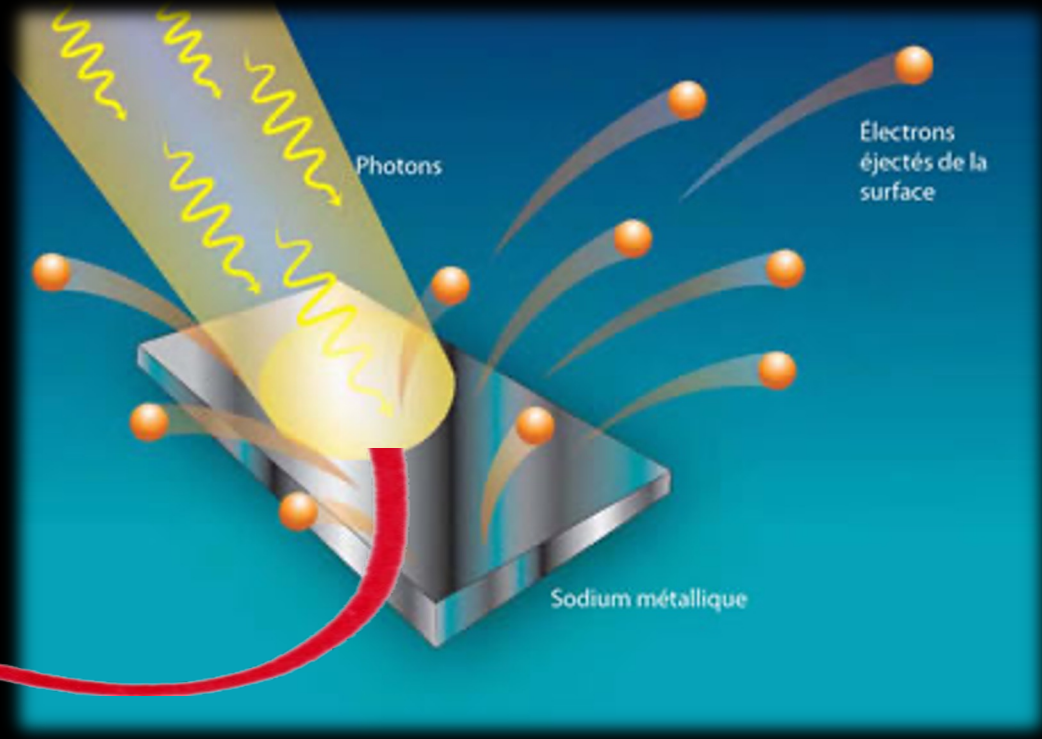
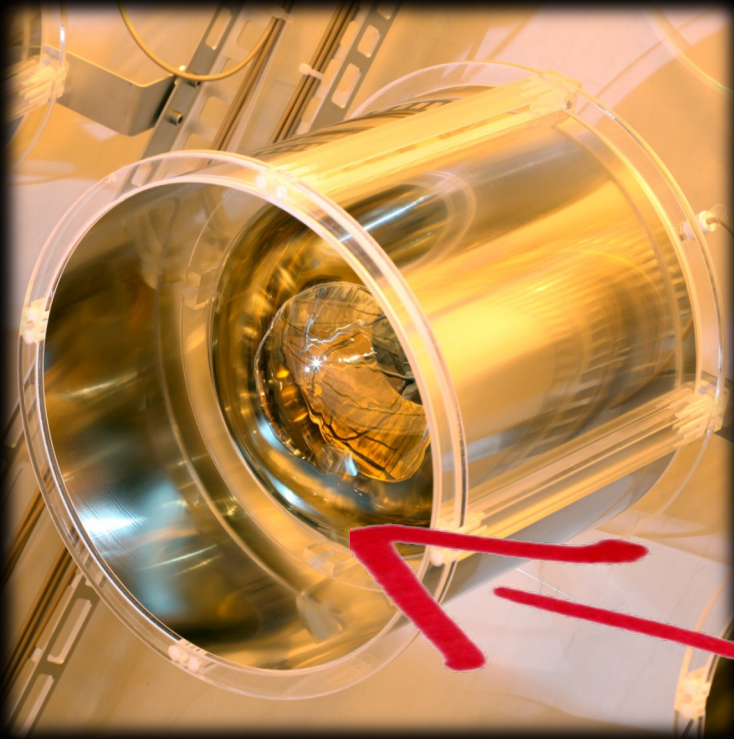


Excitation des atomes/molécules



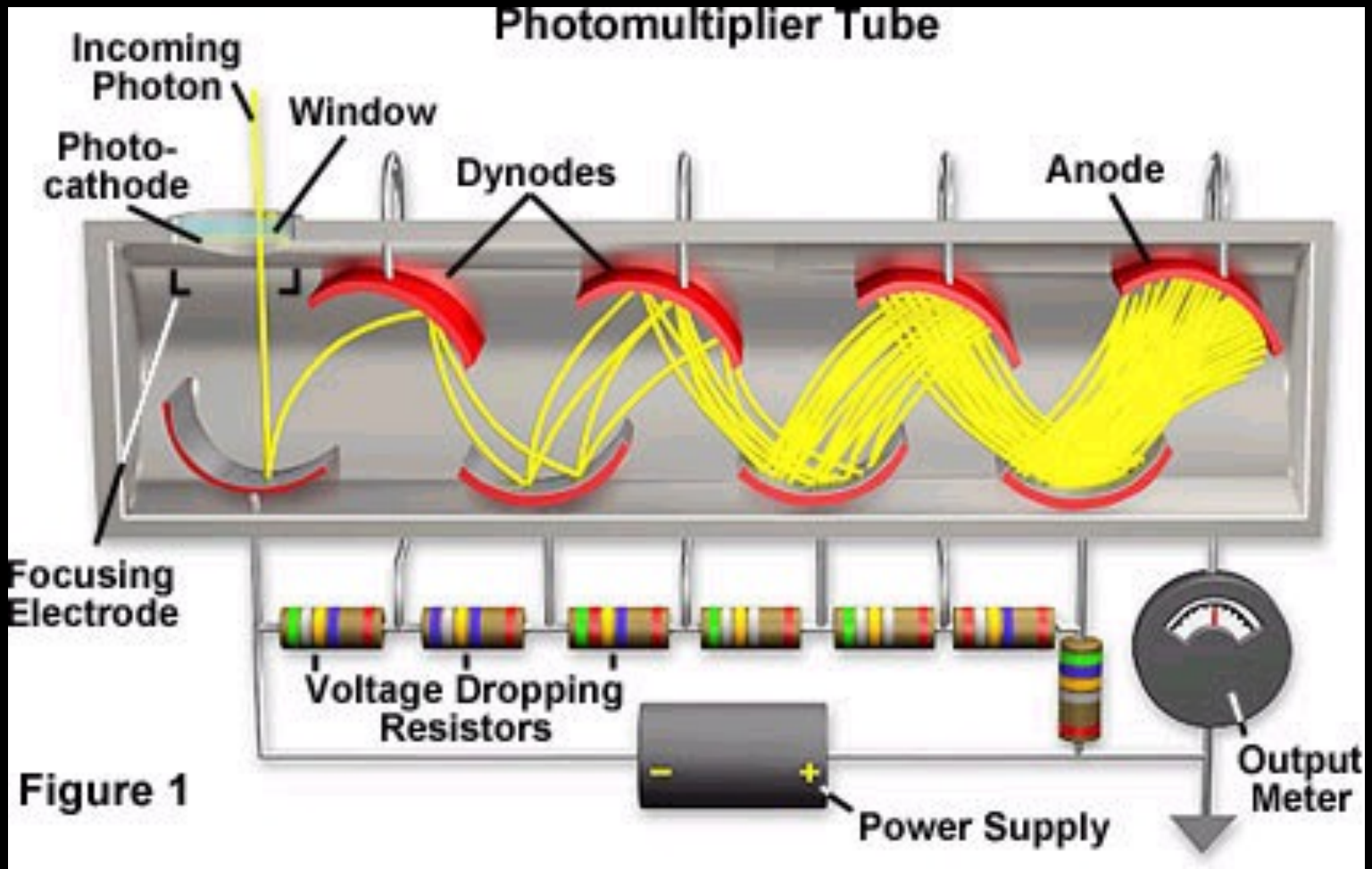
Conversion photons \rightarrow électrons

(effet photoélectrique, Einstein , 1905)

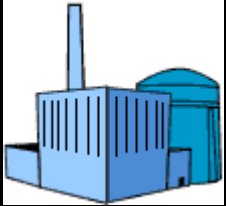


Transformation d'un flux de photons (lumière) en flux d'électrons (courant électrique)

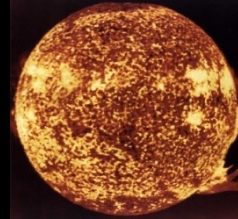
Amplification du signal électrique



Sources de neutrinos



Réacteur nucléaires



Le Soleil
 $66e9 / \text{cm}^3/\text{sec}$



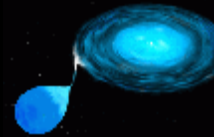
Accélérateurs de particules



Explosion d'étoiles
supernova (1987A)



La Terre



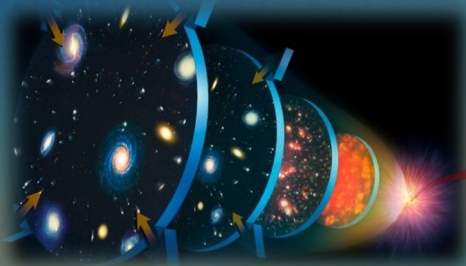
Les accélérateur
astrophysiques



L'atmosphère



L'Univers ...
 $330 \text{ neutrinos} / \text{cm}^3$



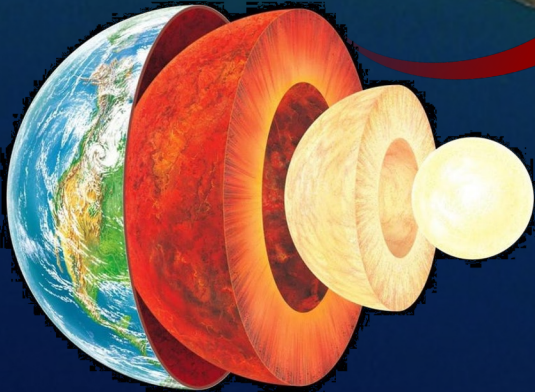
10 000 milliards /cm²/sec



66 milliards /cm²/sec

10 millions /cm²/sec

<1 millions /cm²/sec



Les neutrinos solaires:

**66 milliards $\text{cm}^2/\text{seconde}$
de neutrinos ELECTRONIQUES
attendus sur terre...**

Emission des neutrinos au cœur du Soleil

masse : $2 \cdot 10^{30}$ kg

rayon: 700 000 km

T = 15 millions
de degrés

T = 6000 degrés

Gravité

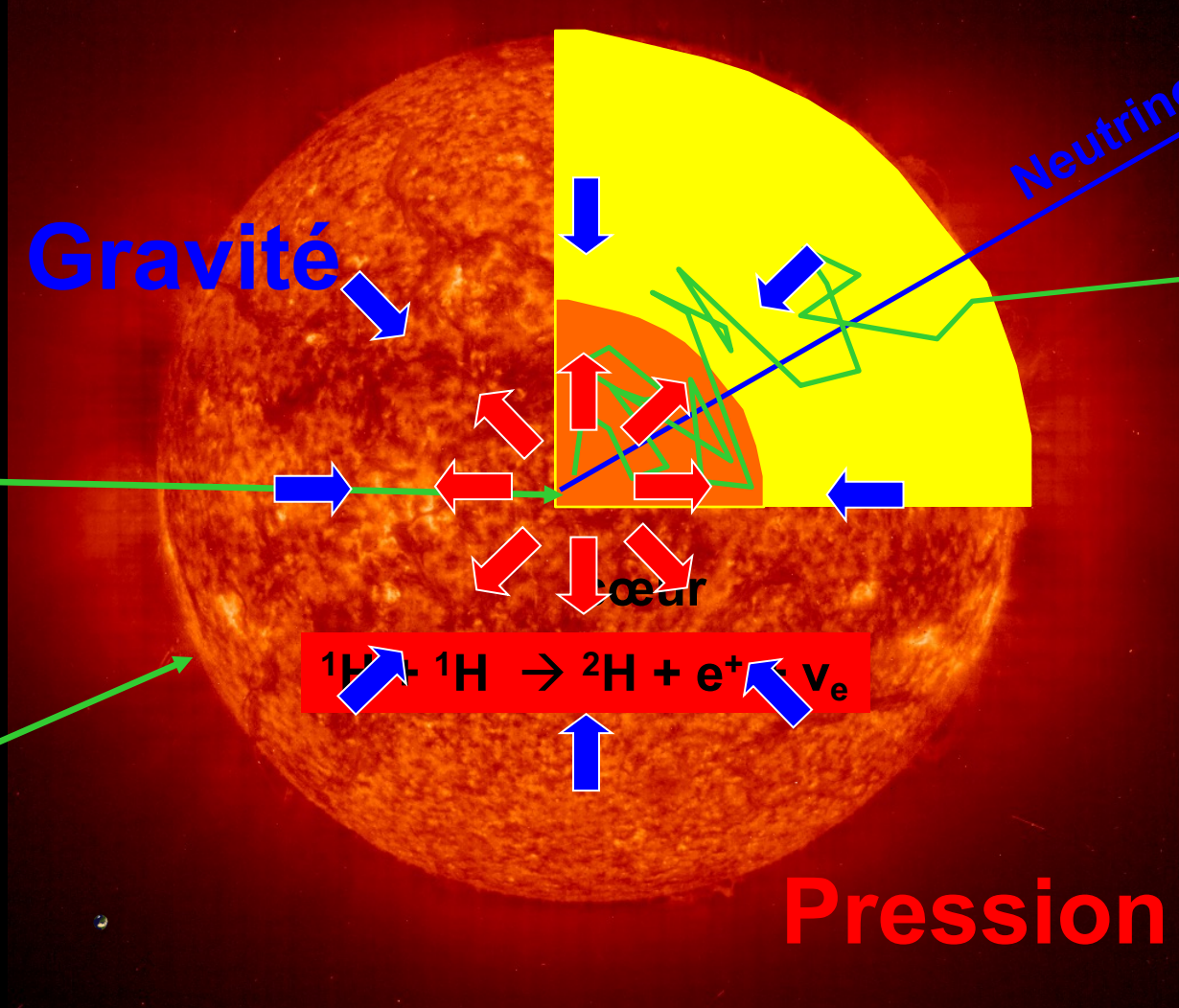
Neutrinos

lumière

cœur



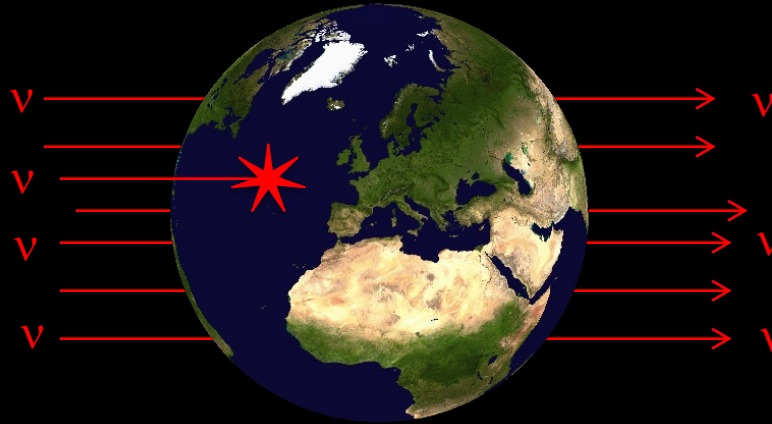
Pression



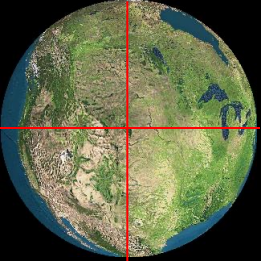
Détecter les neutrinos solaires?

Le neutrino n'est sensible qu'à l'interaction faible

66 milliard
per cm^2 / s



**Seul 1 neutrino sur 10 000 milliards
est intercepté en traversant la terre !**

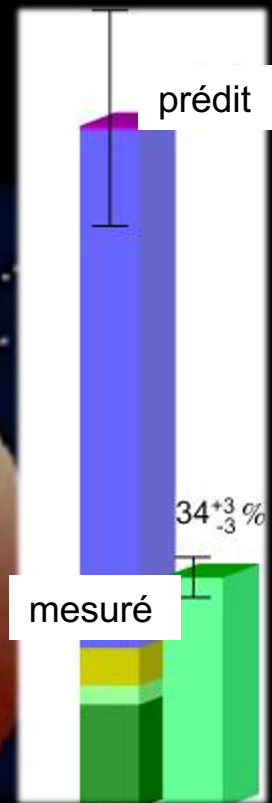
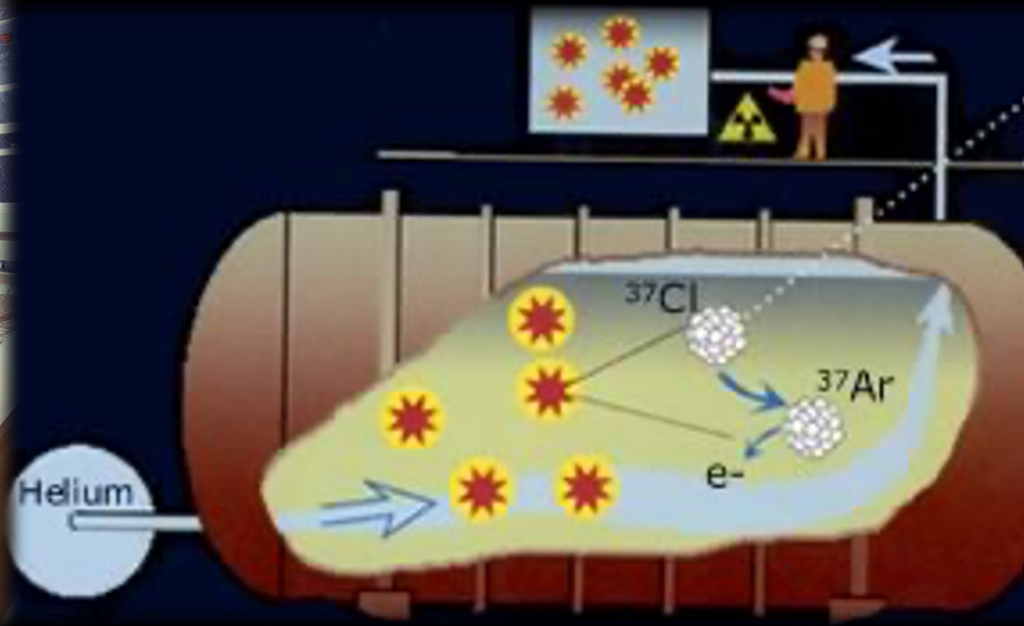


Détecteur Homestake (1967-1995)

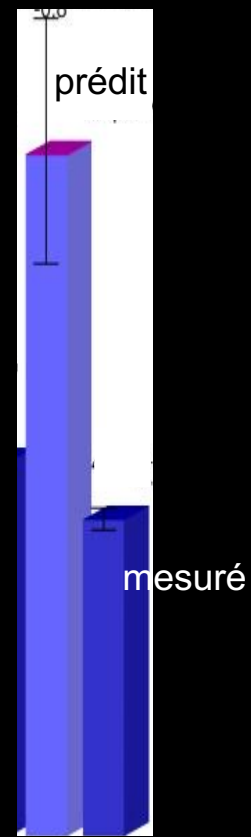
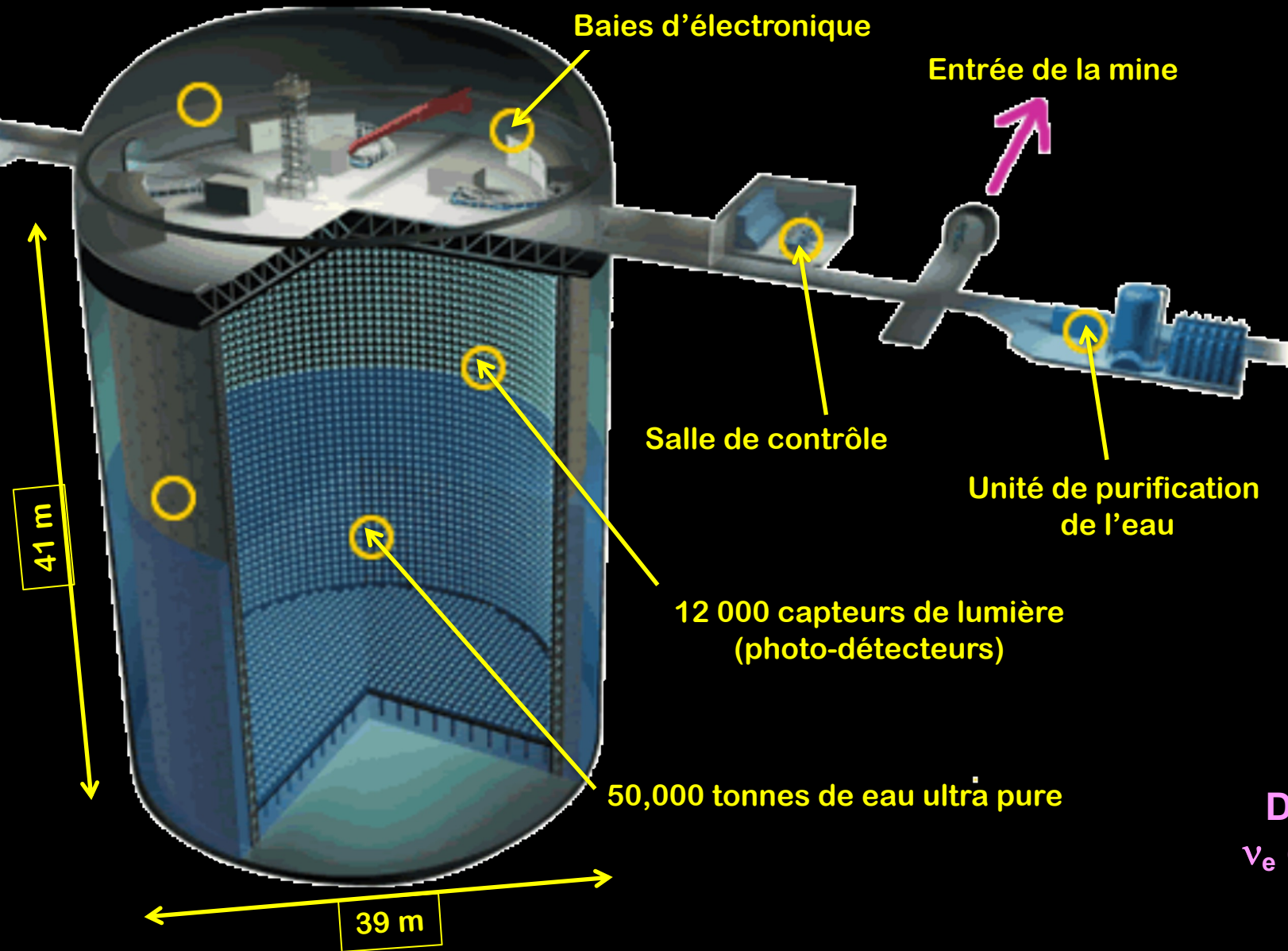
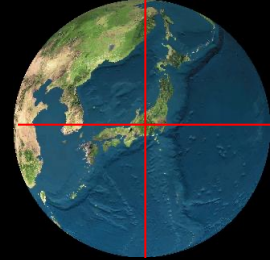


~1960 Davis construit le 1^{er} détecteur dans la mine de Homestake, USA
600 tonnes de détergent – 1 neutrino attendu chaque jour....

But: “... pour voir à l’intérieur d’une étoile et donc vérifier directement l’hypothèse de la production d’énergie nucléaire au sein des étoiles ...”

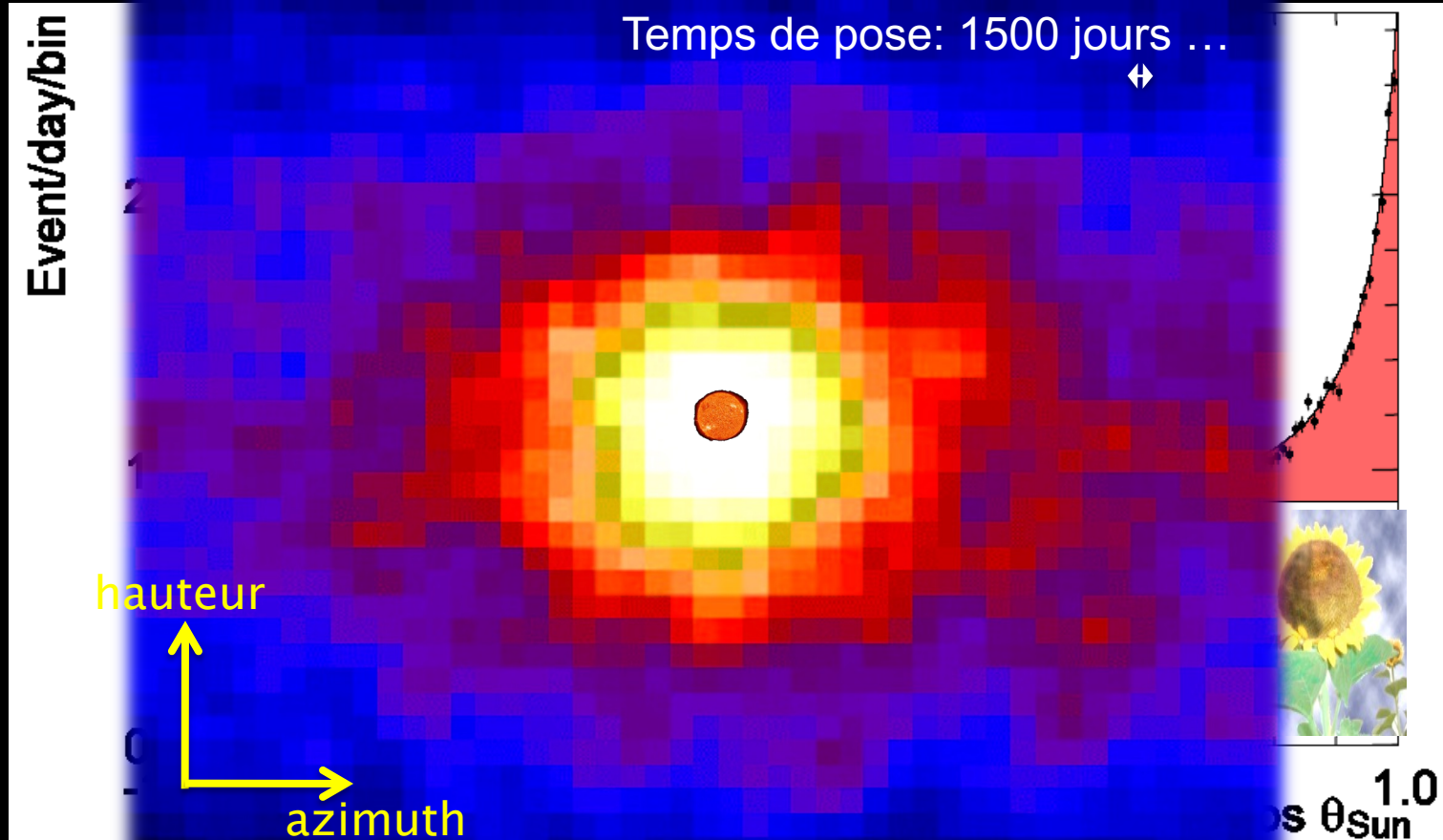


Super-Kamiokande

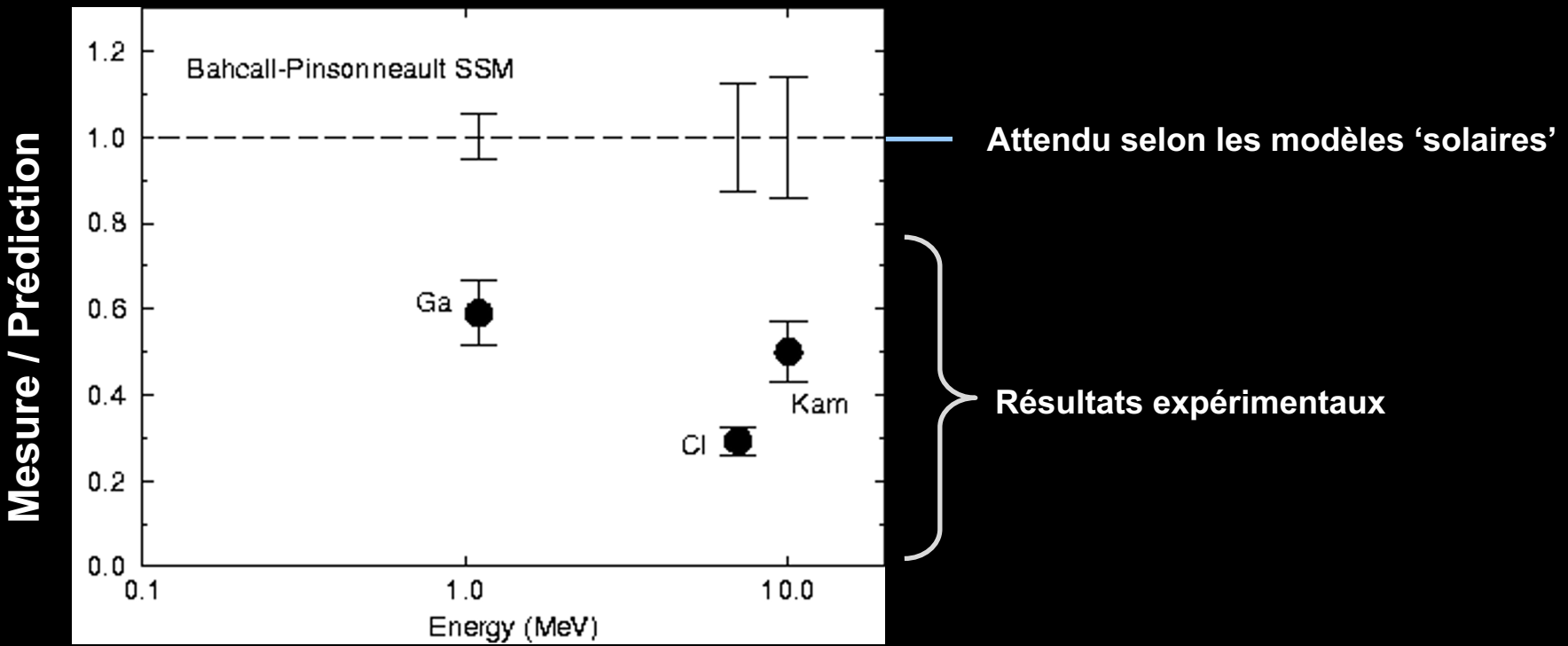


Déficit de ν_e confirmé !

Le soleil vu en neutrinos !



L'anomalie des neutrinos solaires



- Compréhension imparfaite du fonctionnement du cœur des étoiles

MAIS seuls les ν_e étaient mesurés.

- Nouvelle physique des neutrinos !

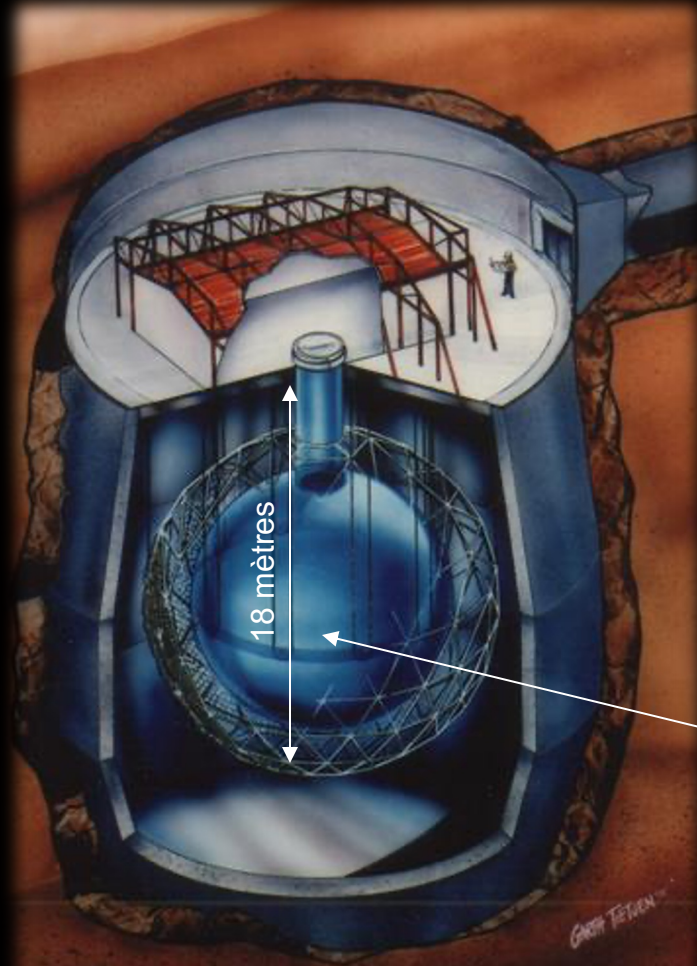
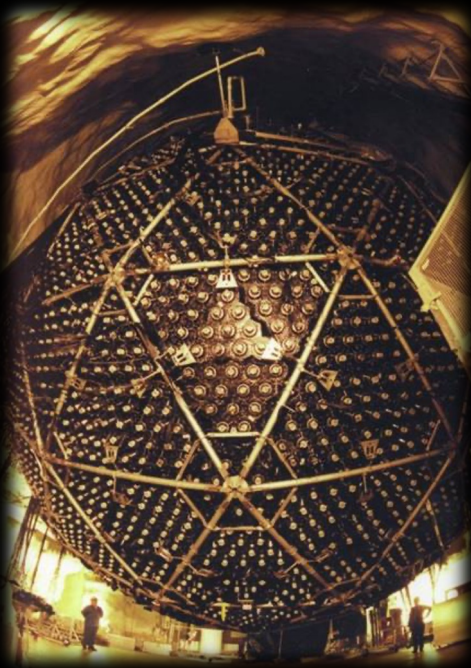
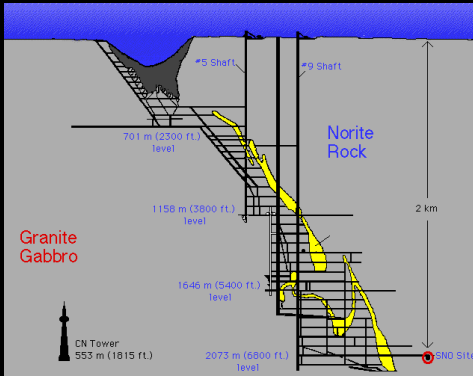
Nécessité d'une expérience mesurant aussi ν_μ , ν_τ

- Oscillation des neutrinos

Le détecteur SNO



Mesure de TOUS les 'types' de neutrinos solaires ν_e , ν_μ , ν_τ



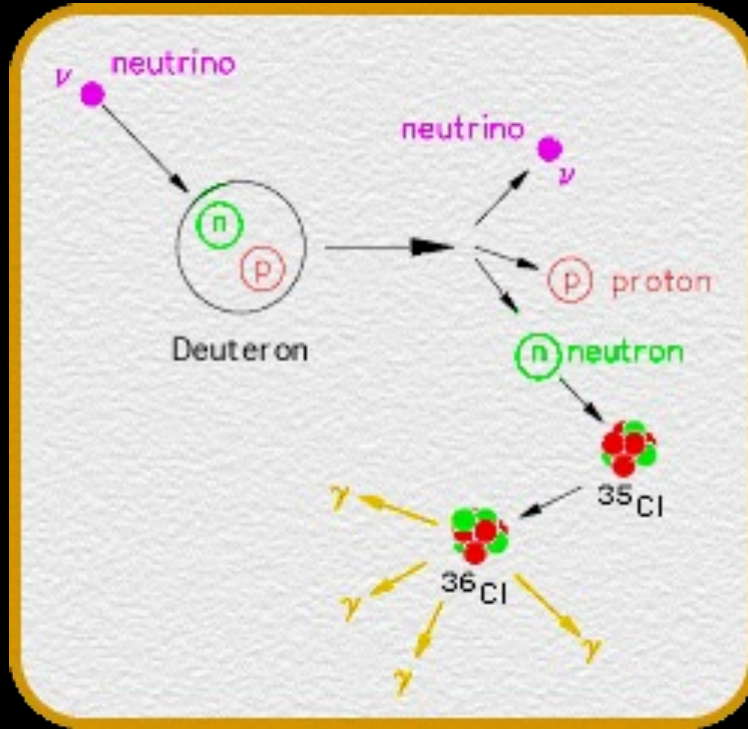
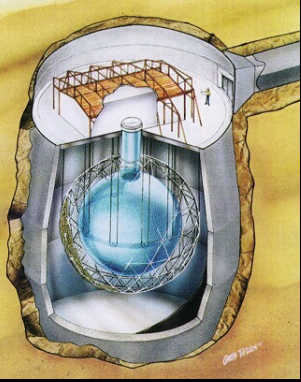
18 mètres

	Hydrogène
${}^1_1\text{H}$	
	Deutérium
${}^2_1\text{H}$	
	Proton
	Neutron

1000 tonnes d'eau lourde

10,000 tubes photomultiplicateurs

2001: L'énigme résolue !



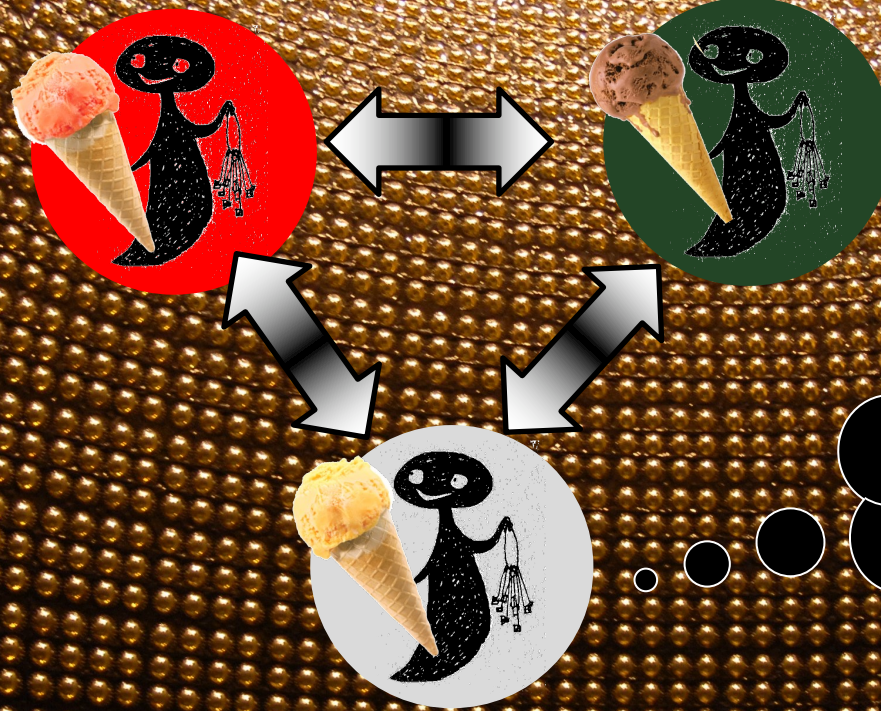
Réaction sensible aux ν_e , ν_μ , ν_τ



Au cours de leur trajet vers la Terre une partie des neutrinos ν_e se convertissent en neutrinos ν_μ / ν_τ

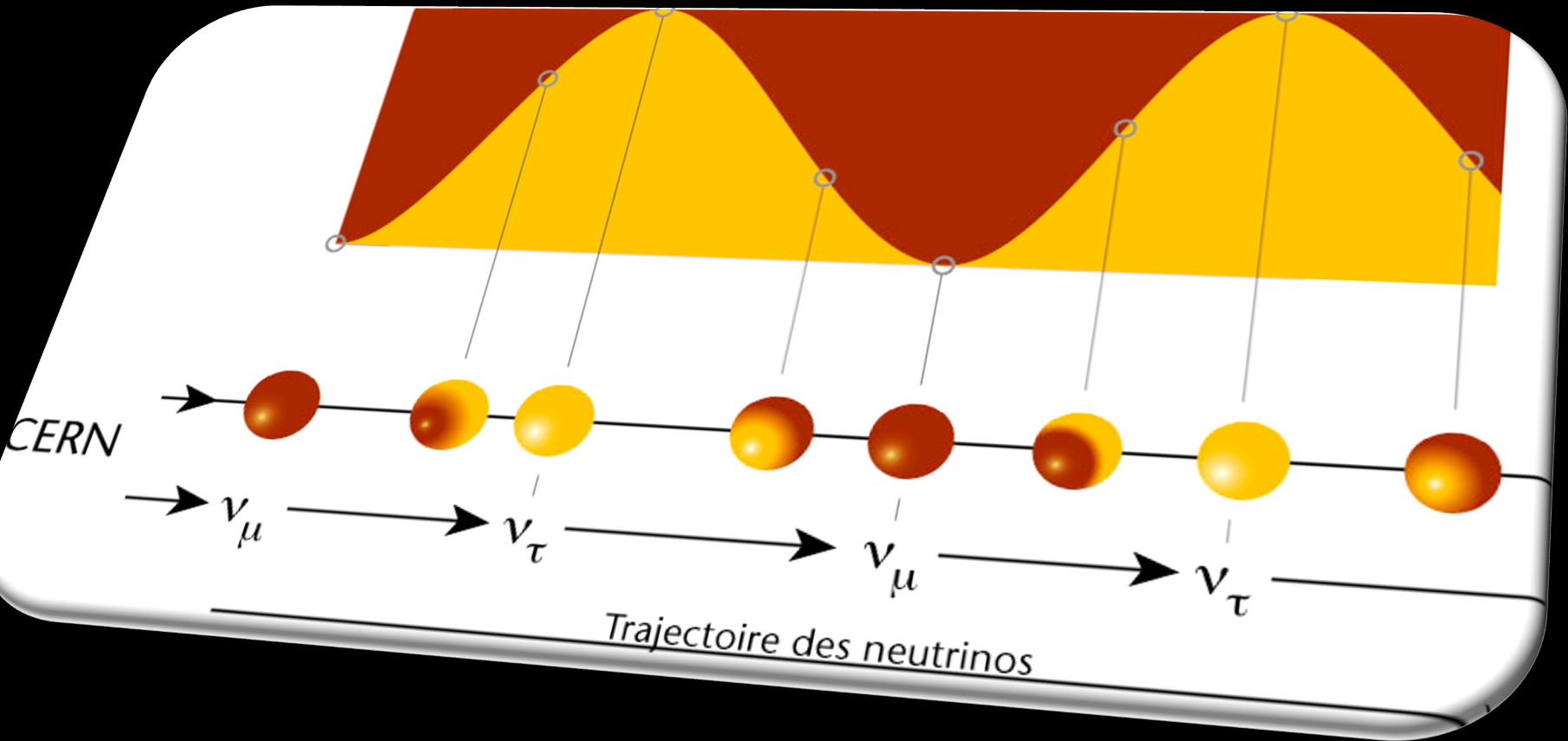


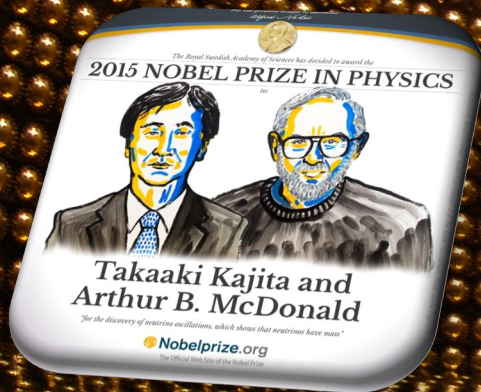
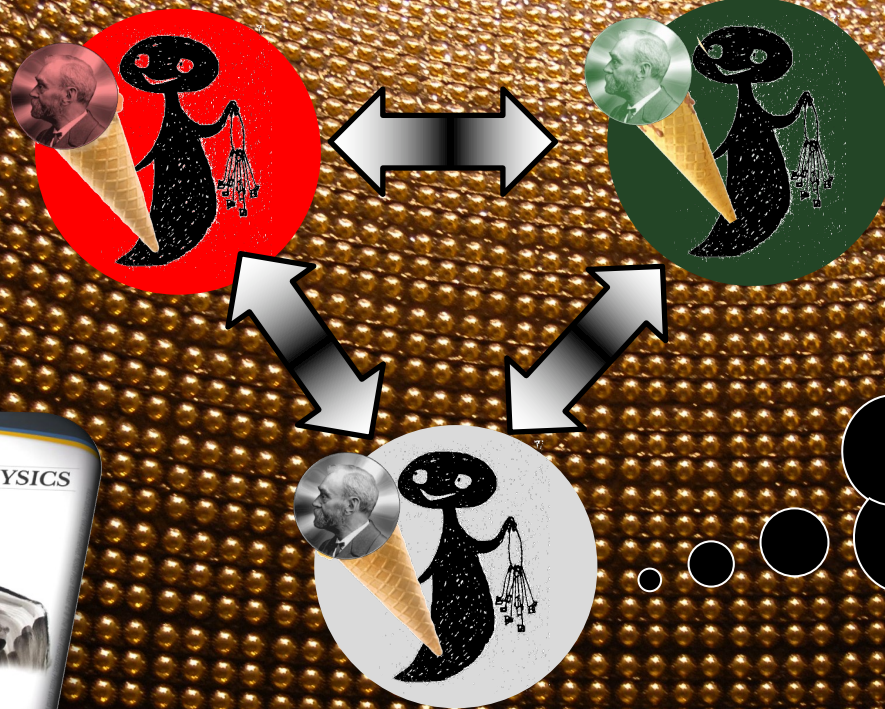
Les neutrinos
existent en
trois saveurs



Les neutrinos
peuvent
spontanément
changer de
saveur

Oscillation des neutrinos

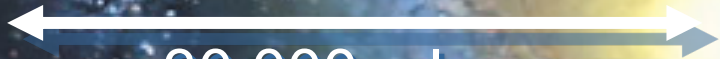




Les neutrinos ne pèsent pas lourd...
Mais ils ont une masse non nulle!

Neutrinos & Explosion d'étoiles

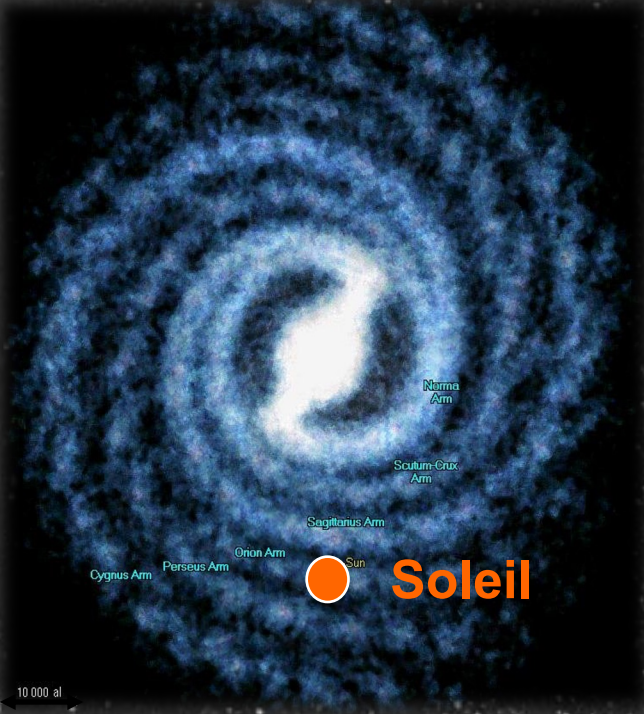
Notre Galaxie



30 000 a.l.

160 000 000 années-lumière

Voie lactée



Soleil

Grand Nuage de Magellan



160 000 années-lumière

La supernova 1987A, 23/02/1987



Sanduleak - 69 202
(15 masses solaires)

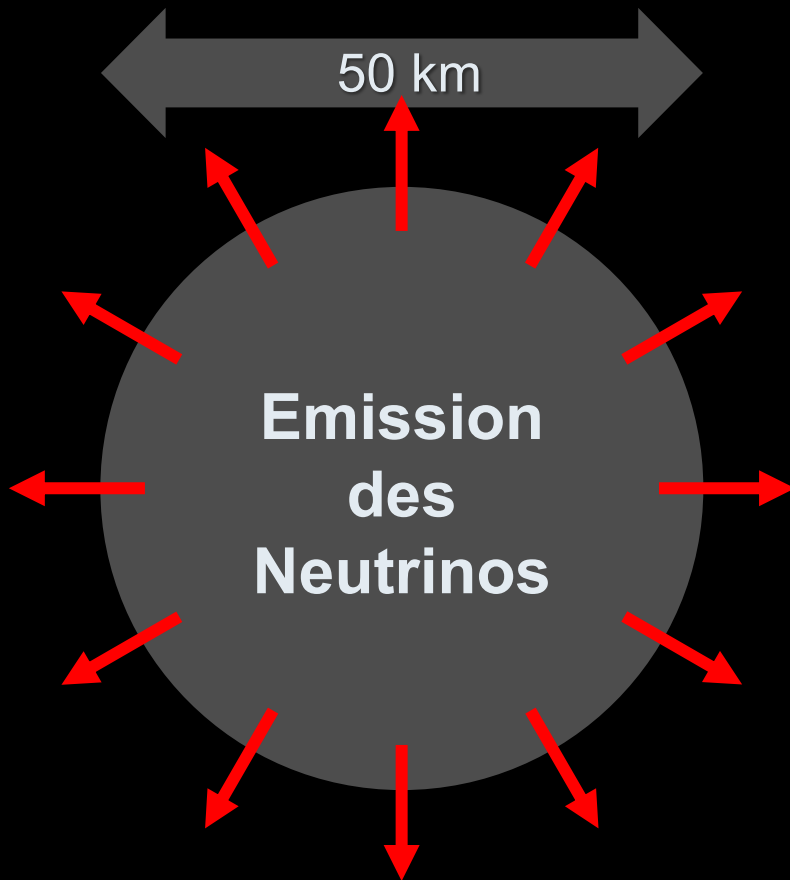
Découverte de SN1987A à l'œil nu !
Observatoire de Las Campanas (Chili)

© Anglo-Australian Observatory

160,000 années lumières

Supernova

Proto-étoile à neutrons



- Implosion d'une étoile supermassive (8-40 masses solaire)
- Masse de l'étoile convertie en énergie : 10^{46} J
- 99 % de l'énergie émise est sous forme de neutrinos.
- 1% sous forme d'énergie cinétique liée à l'explosion
- Seulement 0,01% de l'énergie est émise sous forme de lumière... Mais aussi brillante qu'une galaxie entière !

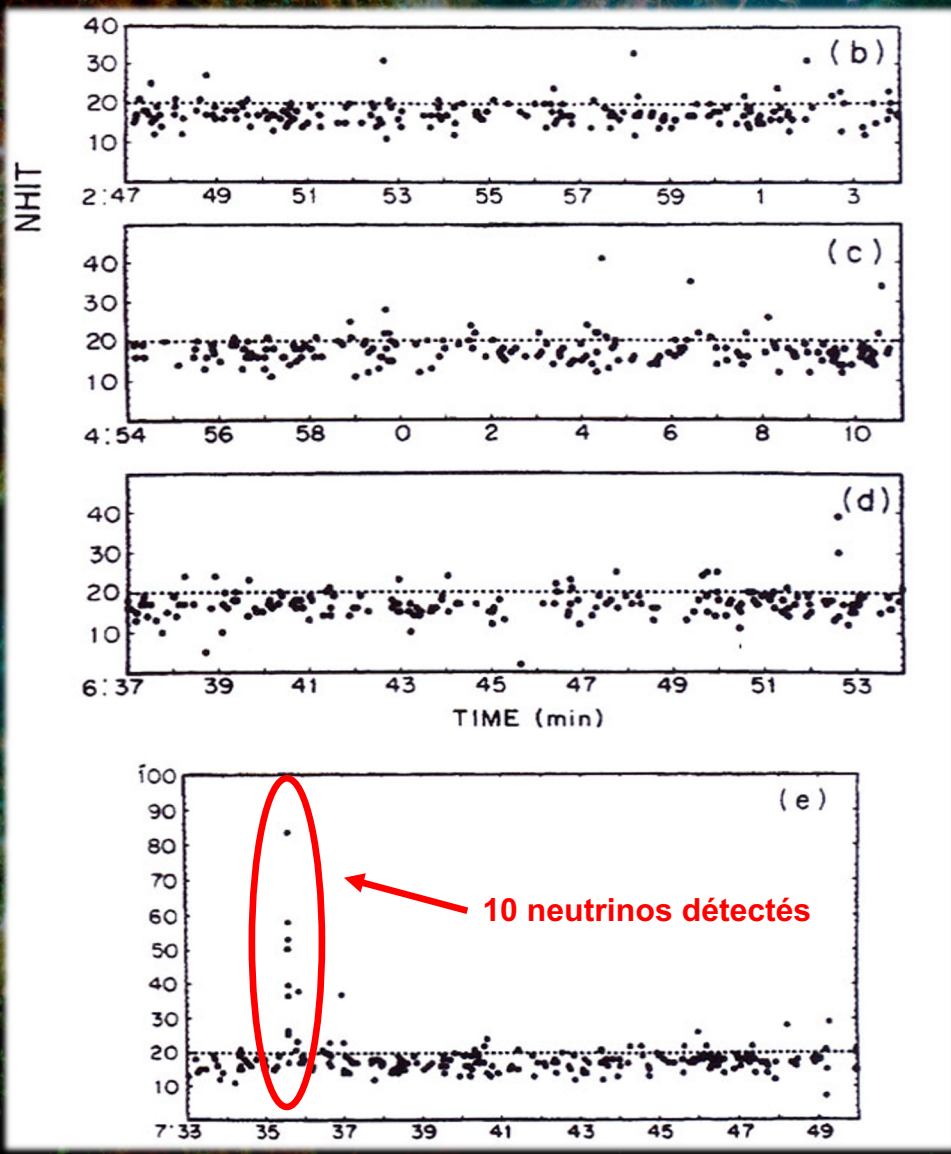
Signal observé dans Kamiokande

2h47

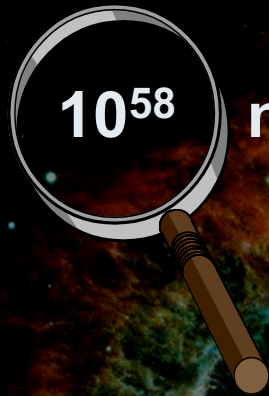
4h34

6h37

7h32



SN 1987A : retour sur les neutrinos



10^{58} neutrinos émis par SN1987A

il y a 150000 ans !

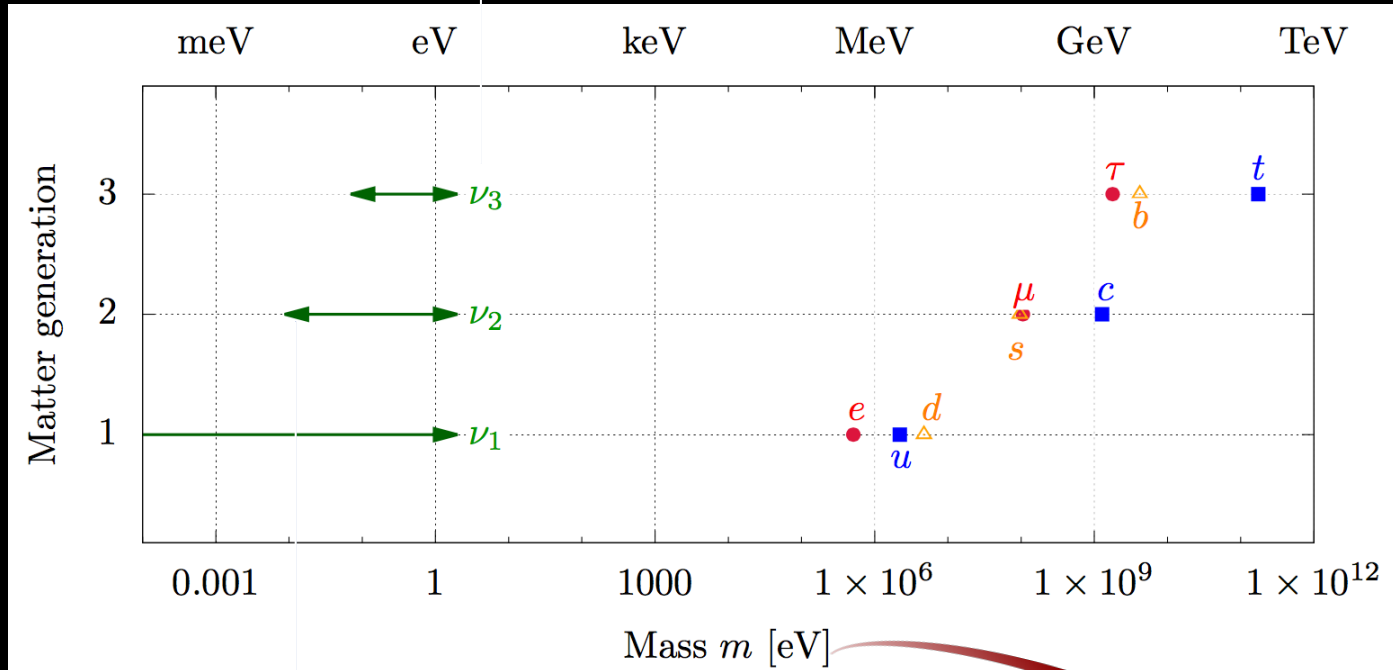
450 millions de milliards traversent Kamiokande
($4,5 \cdot 10^{17}$) quelques heures avant la lumière de l'explosion...

Nombre total de neutrinos détectés : **10** (en 10s)

Mesure de la masse des neutrinos avec l'expérience KATRIN

Masse des neutrinos

Limite supérieure
à partir de mesures en laboratoire



Limite inférieure
à partir d'expériences d'oscillation

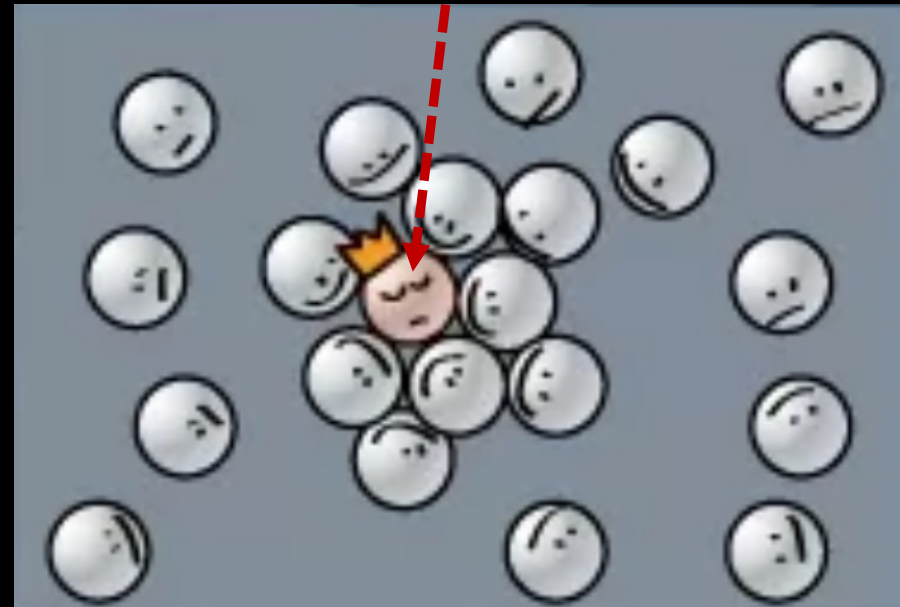
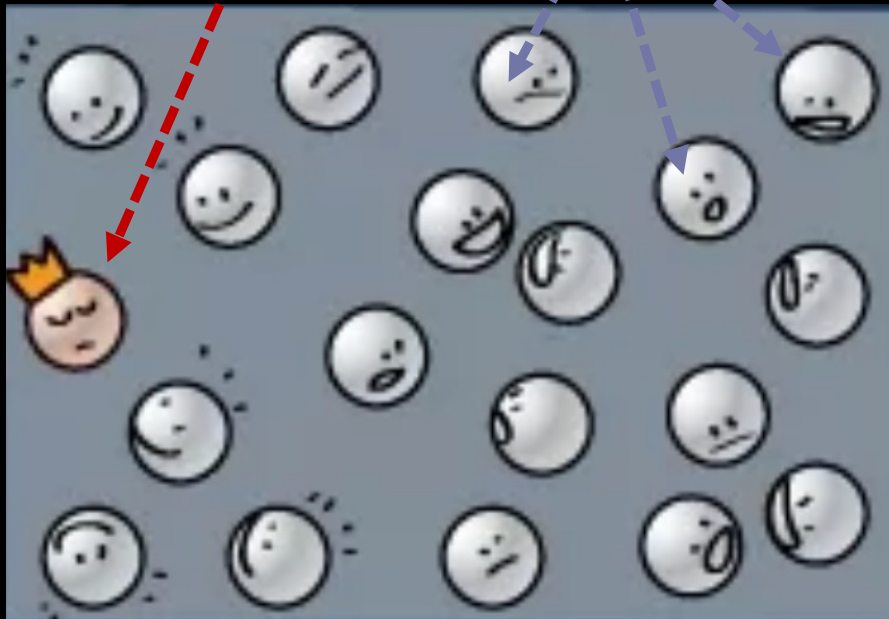
Unité de mesure d'énergie (et de masse)

Découverte du Boson de Higgs

électron,
quark, ...

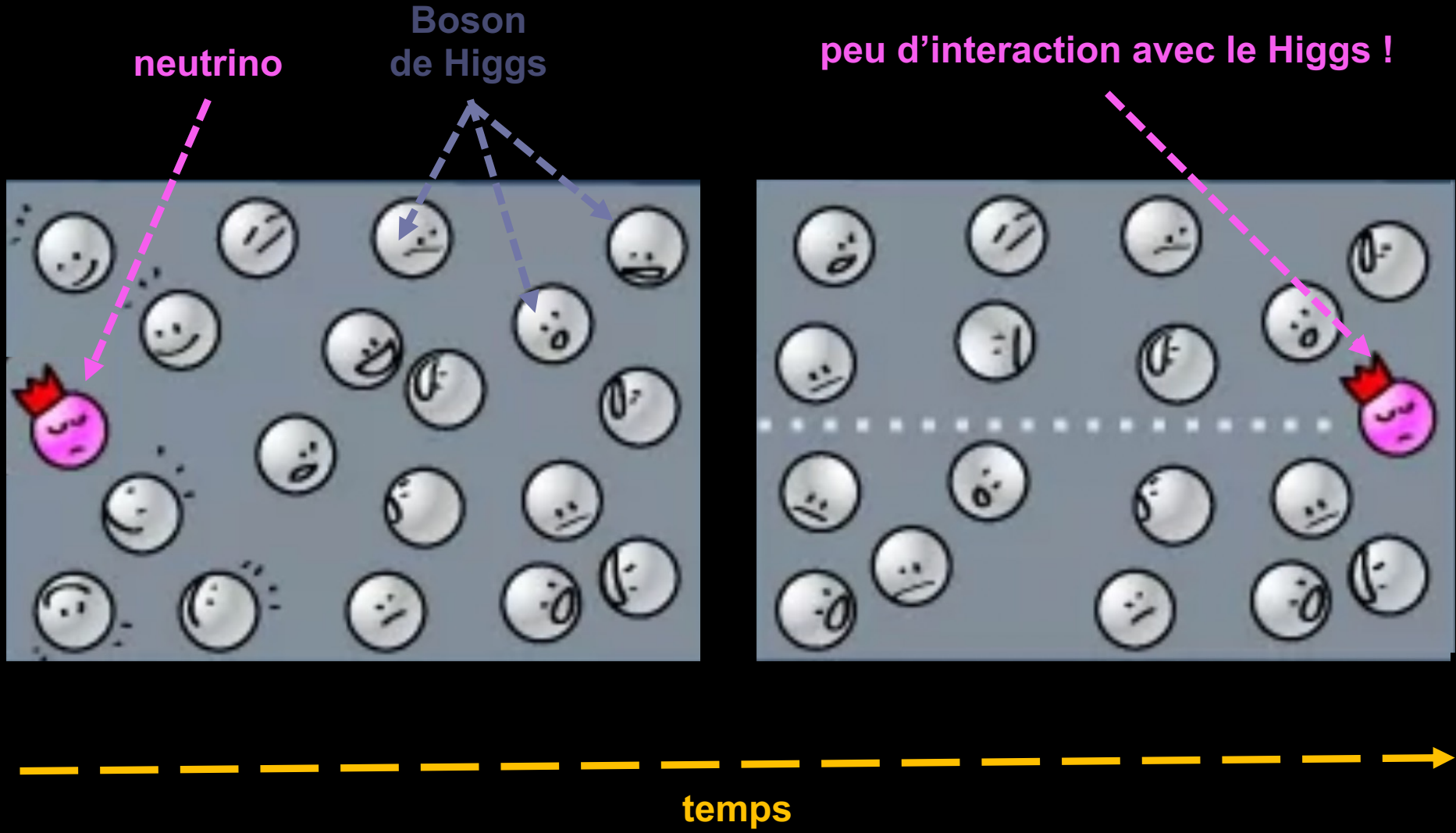
Boson
de Higgs

électron, quark, ... acquièrent une
masse par interaction avec le higgs



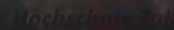
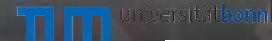
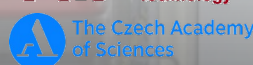
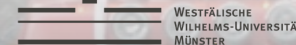
temps

Boson de Higgs & Neutrinos

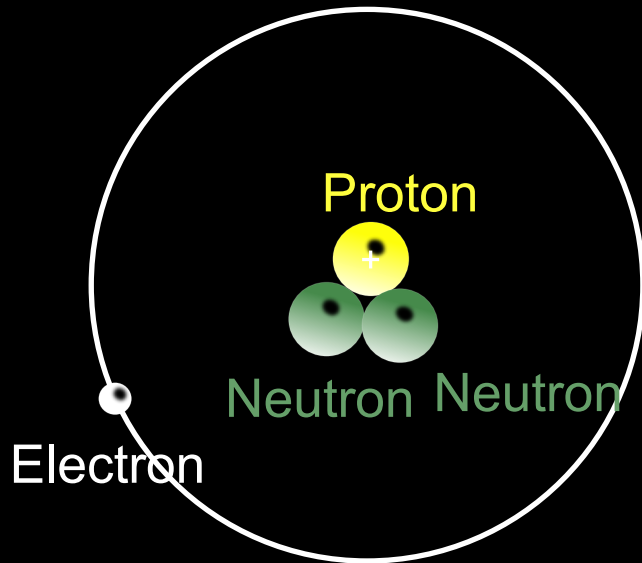


Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment

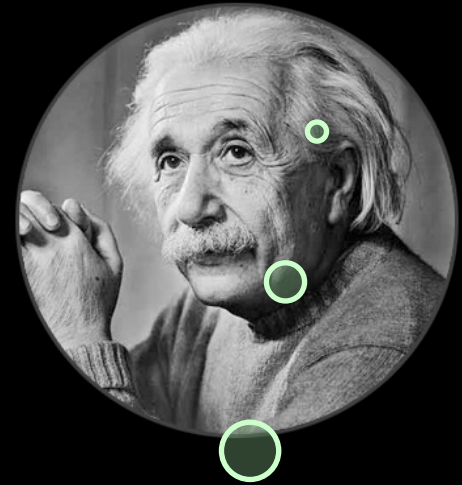
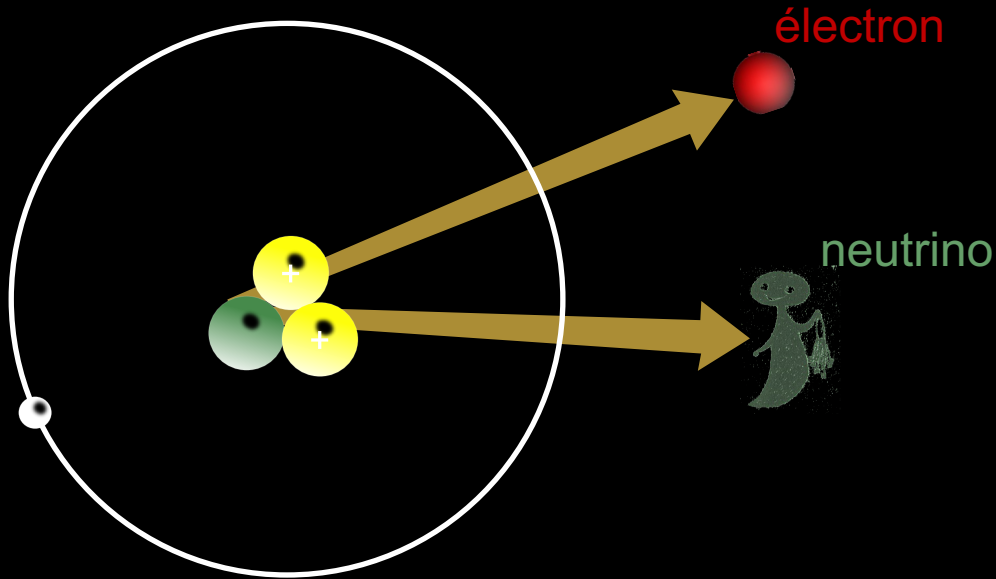
- Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
- Collaboration Internationale (150 participants)
- Mesure de la masse des neutrinos avec une sensibilité de 3.5×10^{-37} kg



Tritium (hydrogène super lourd)

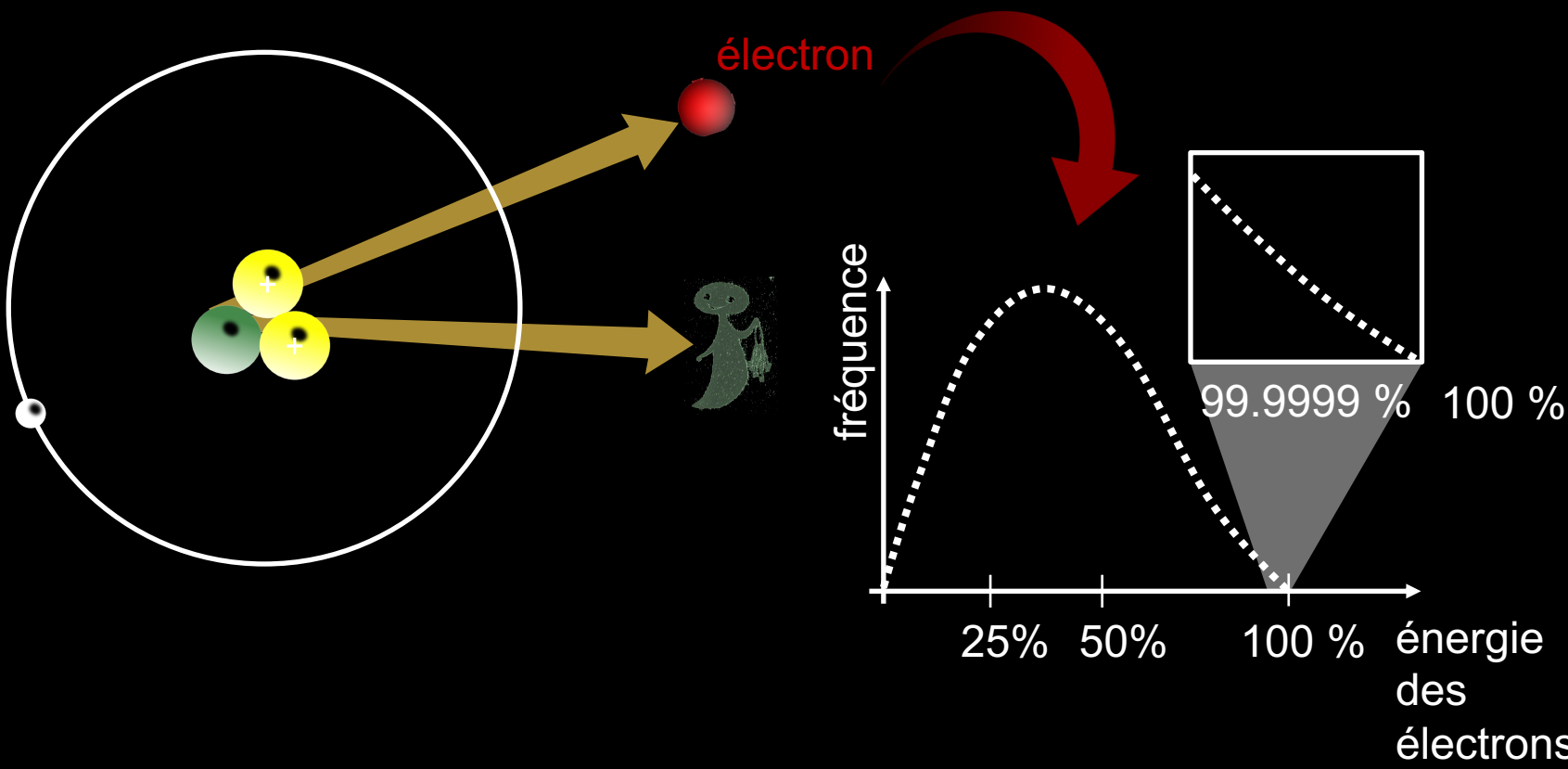


Principe de la mesure de masse

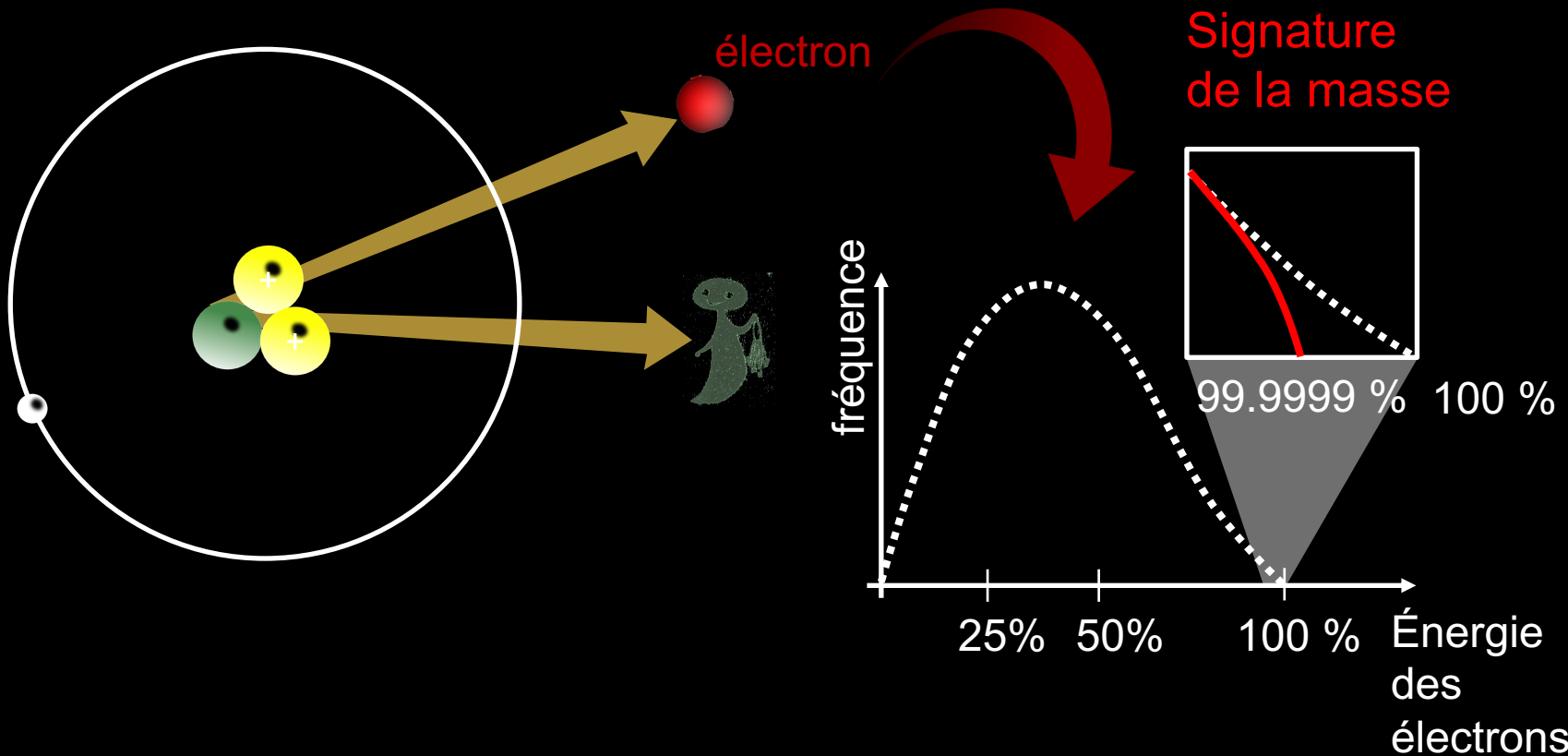


Le neutrino
prends au
moins
 $E = mc^2$

Principe de la mesure de masse

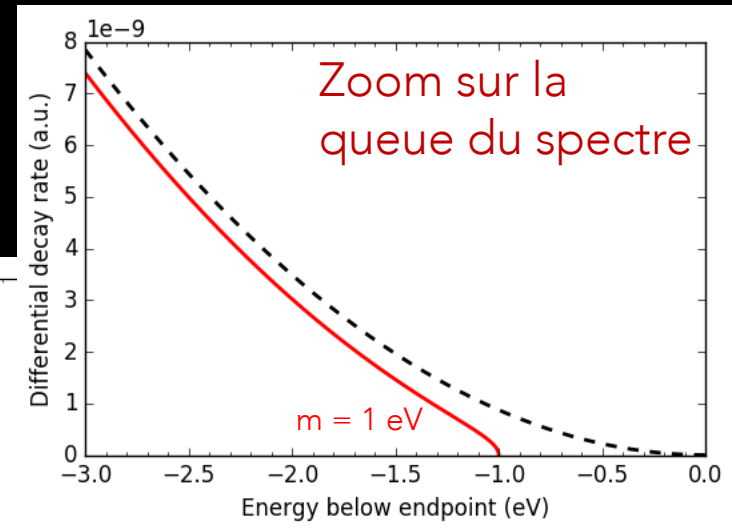
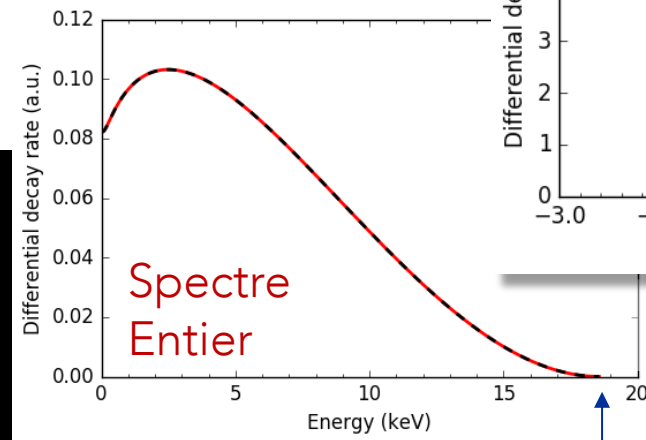
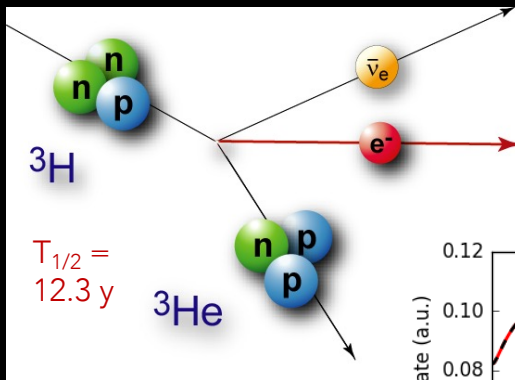


Principe de la mesure de masse



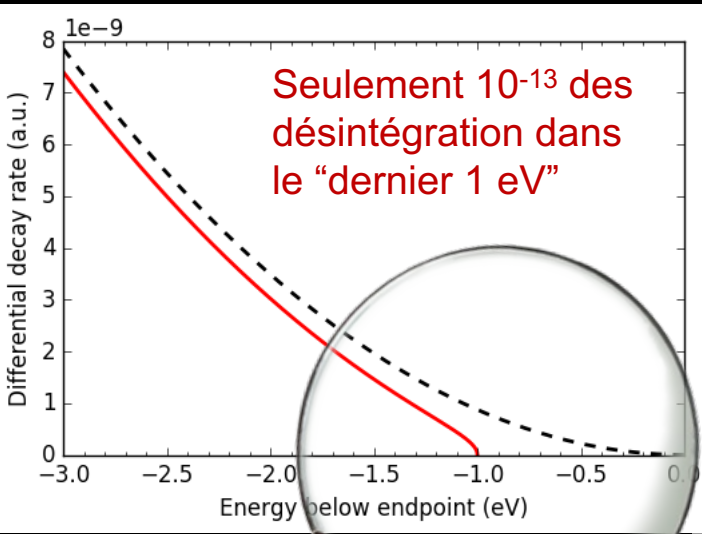
KATRIN & Masse du Neutrino

- Détermination cinématique de la masse des neutrinos
- Une masse de neutrinos non nulle réduit le “endpoint” et déforme le spectre

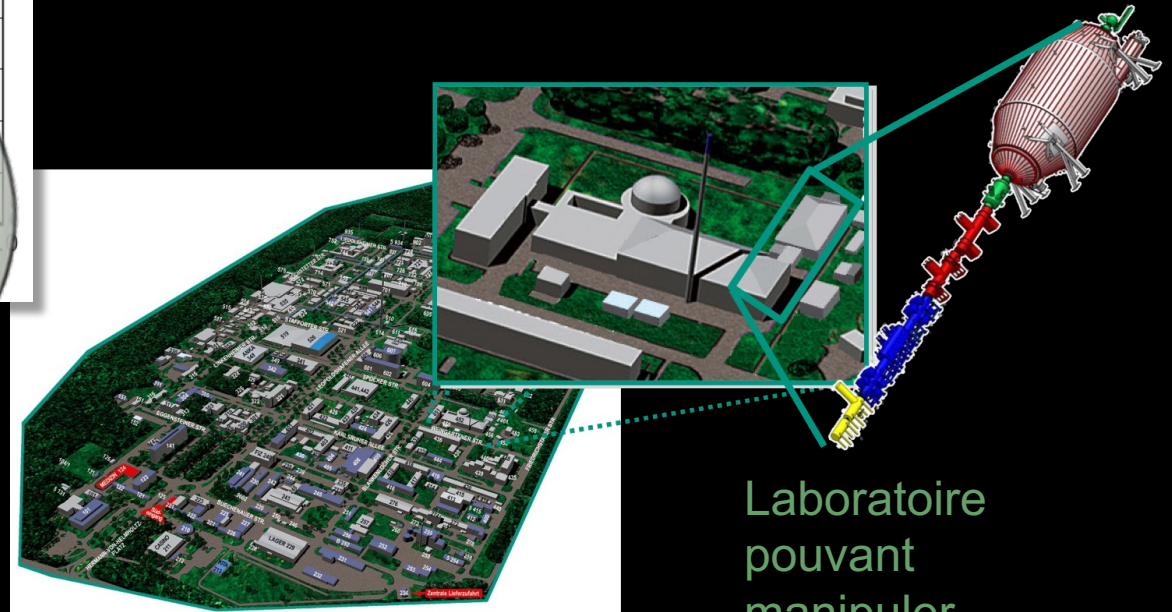


endpoint

KATRIN: Source de Tritium

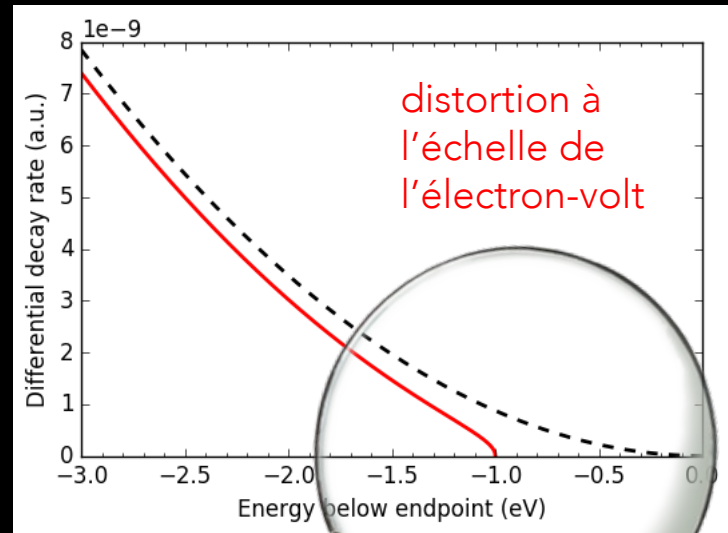


Besoin d'une source de tritium de 10^{11} Bq
Expérience réalisée au KIT, en Allemagne



Laboratoire pouvant manipuler 25 g de Tritium

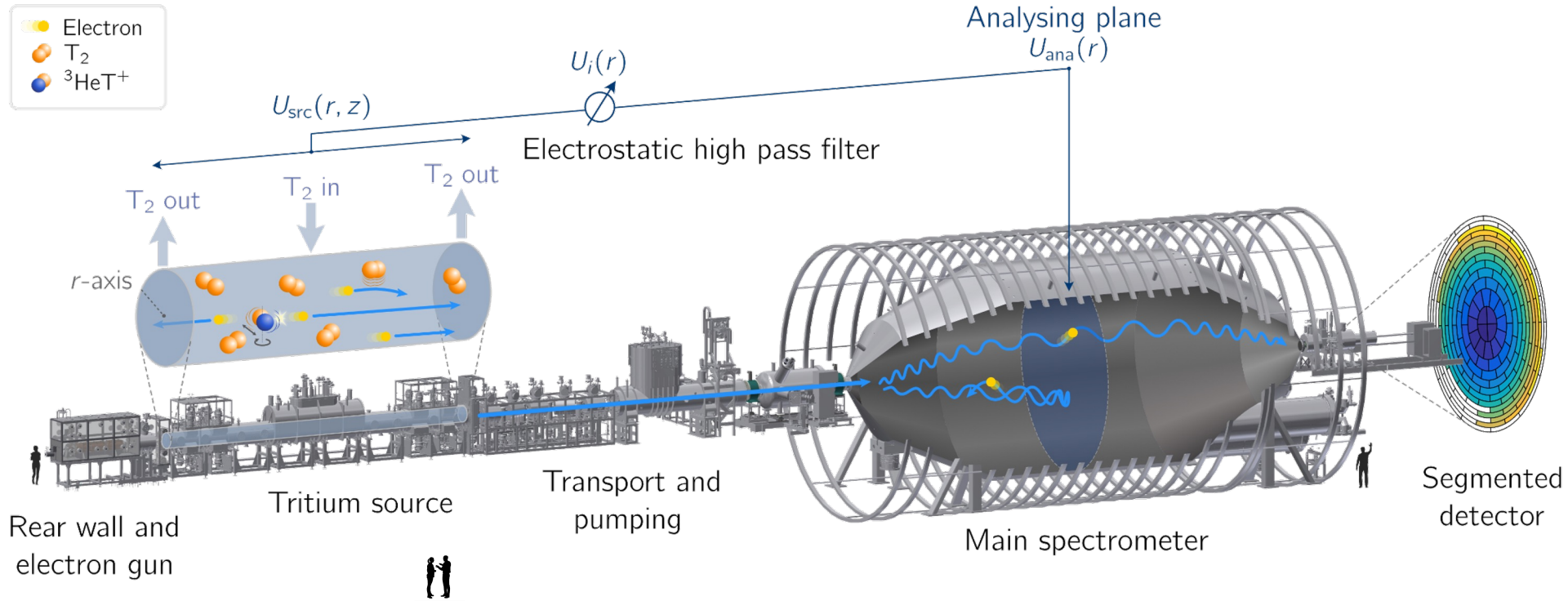
KATRIN: Résolution en Energie



Nécessité d'un spectromètre de résolution en énergie à l'échelle de l'électron-volt

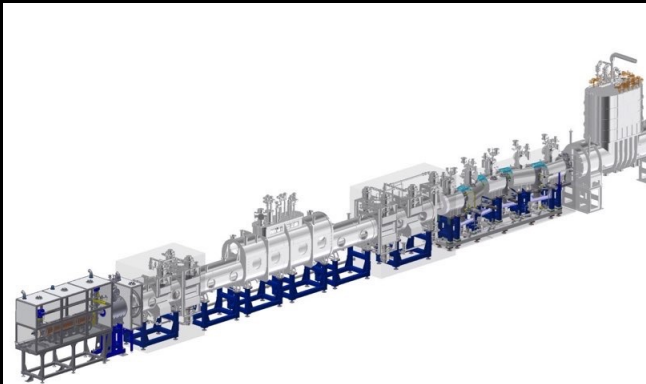


L'expérience KATRIN

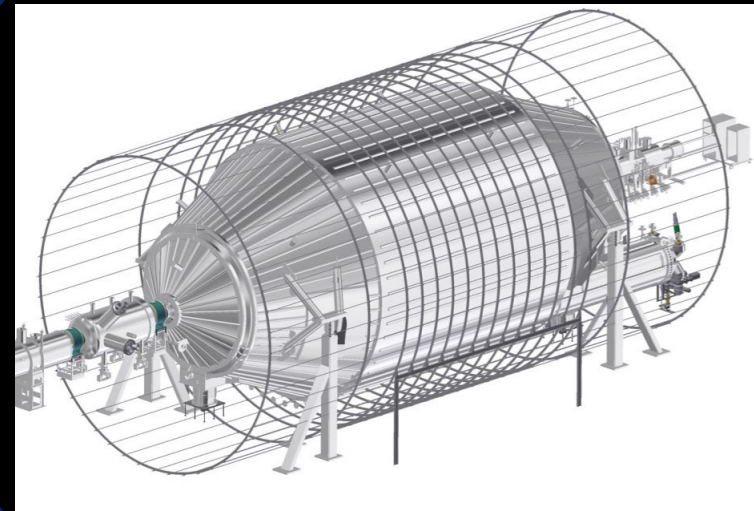


Ce qu'il faut retenir !

Source de Tritium



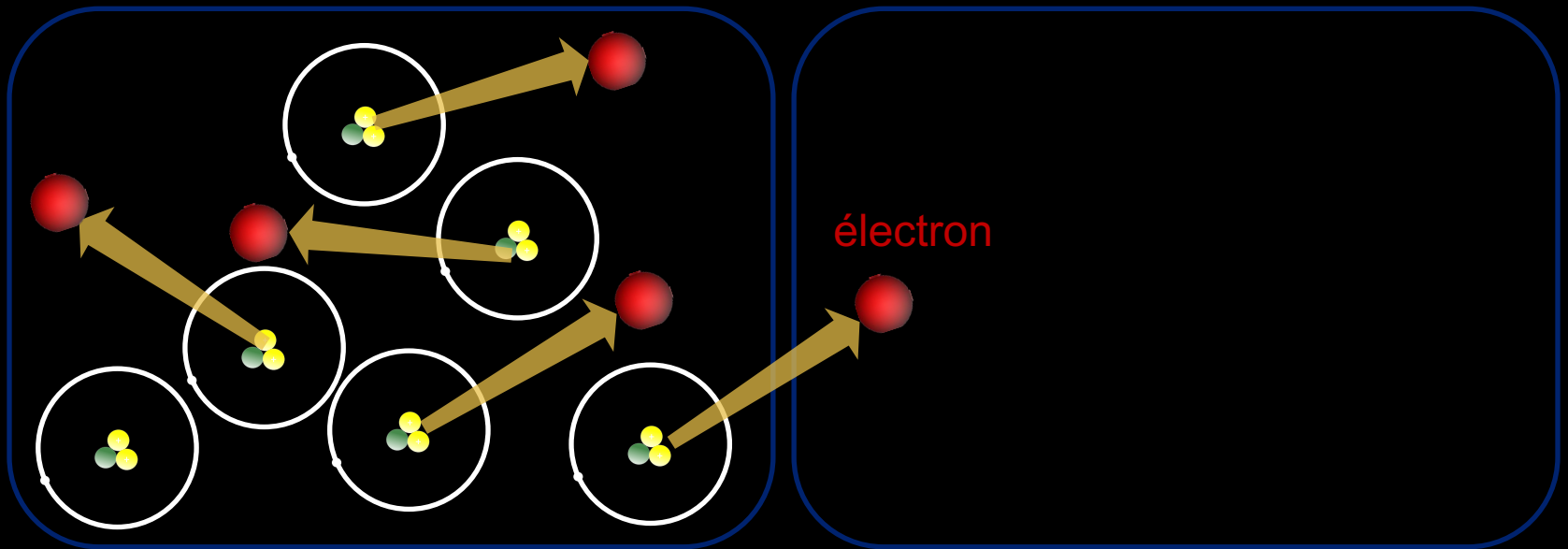
Spectromètre



Principe de base

Source de Tritium

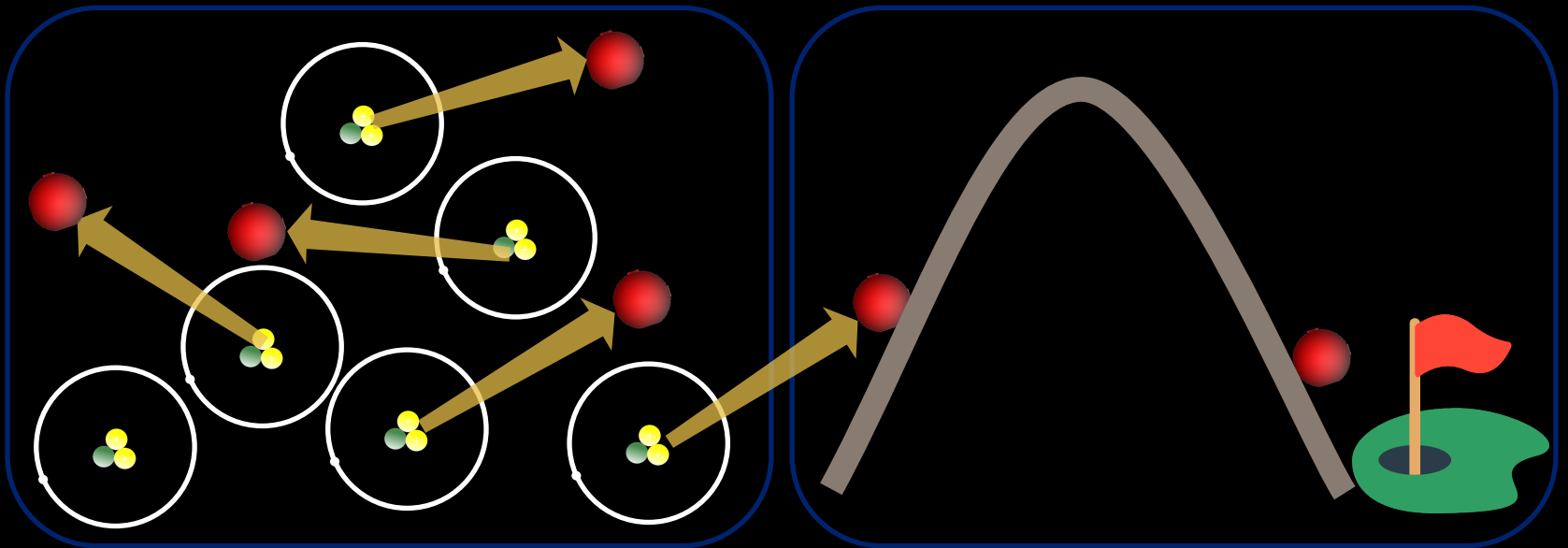
Spectromètre



Comment fonctionne KATRIN ?

Source de Tritium

Spectromètre

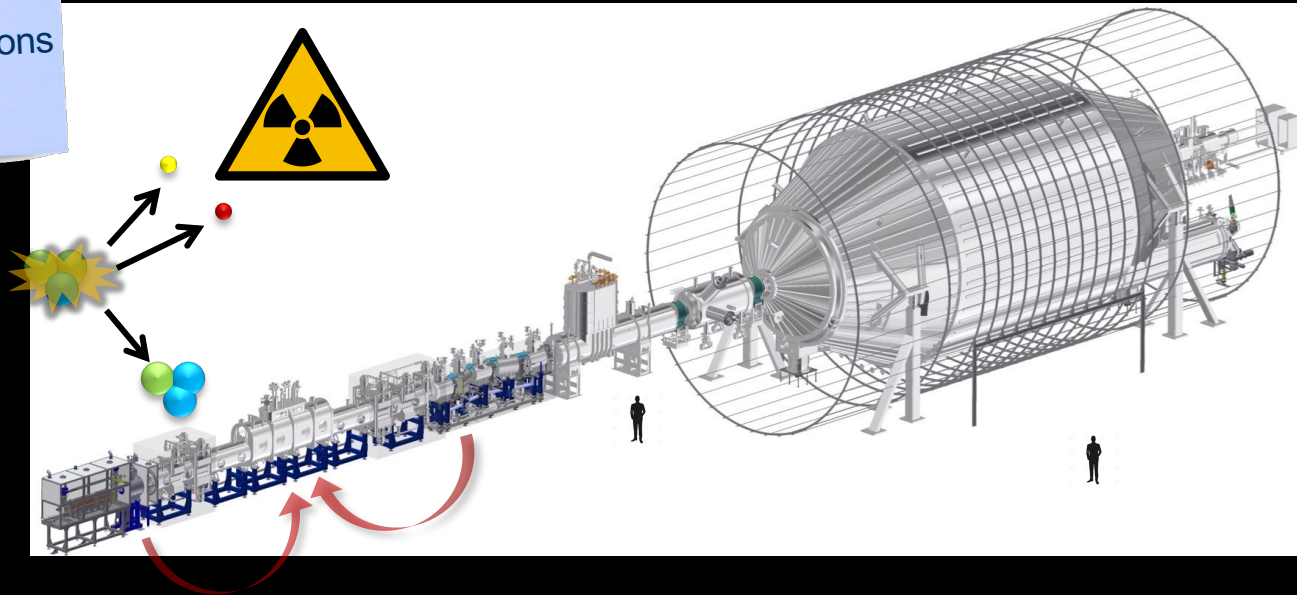


Comment fonctionne KATRIN ?

200 μg Tritium gazeux

10^{11} désintégrations par seconde

Désintégration β



Comment fonctionne KATRIN ?

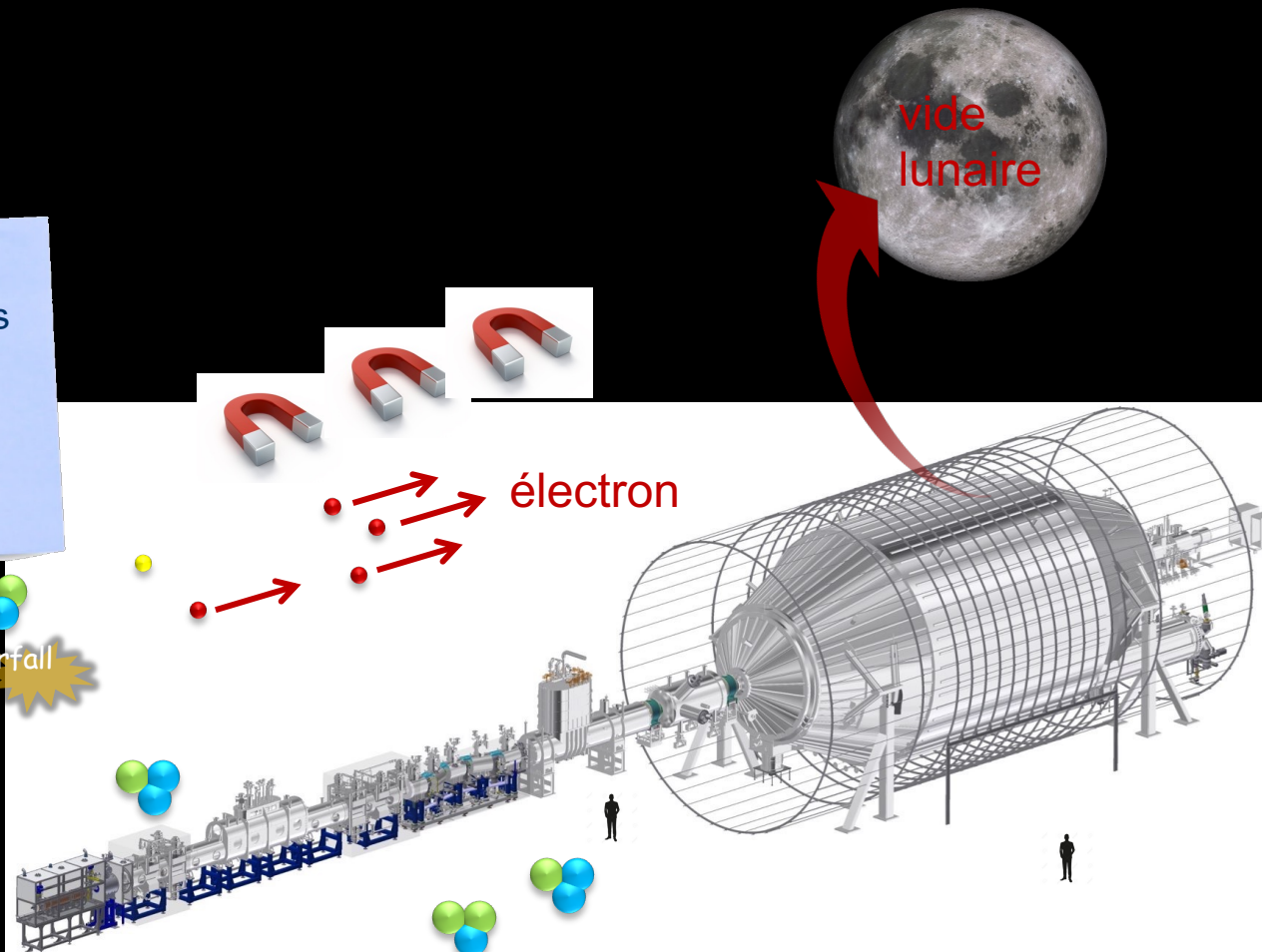
Aimants supraconducteurs

Système de pompage complexe

β -zénithal

électron

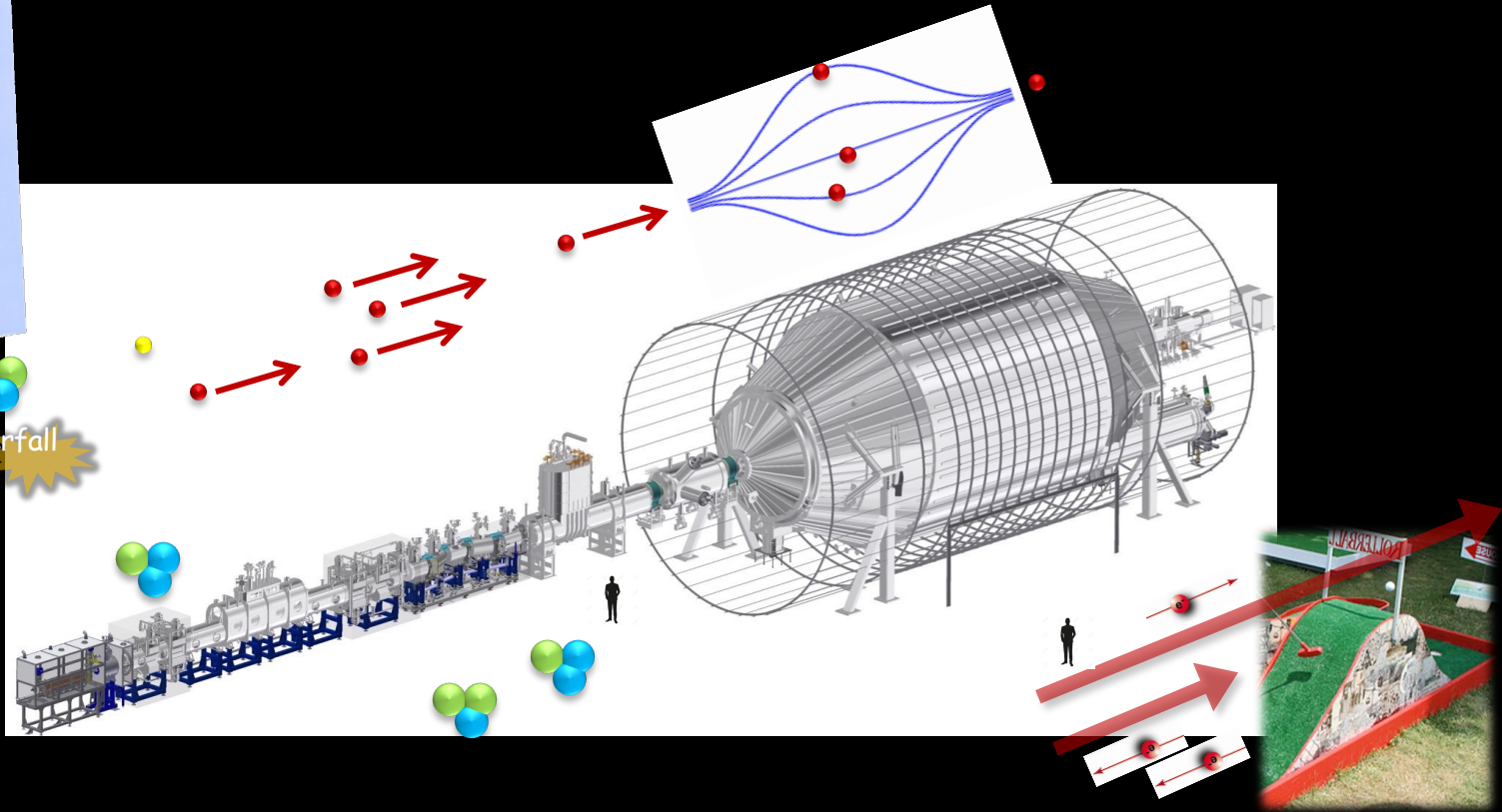
vide lunaire



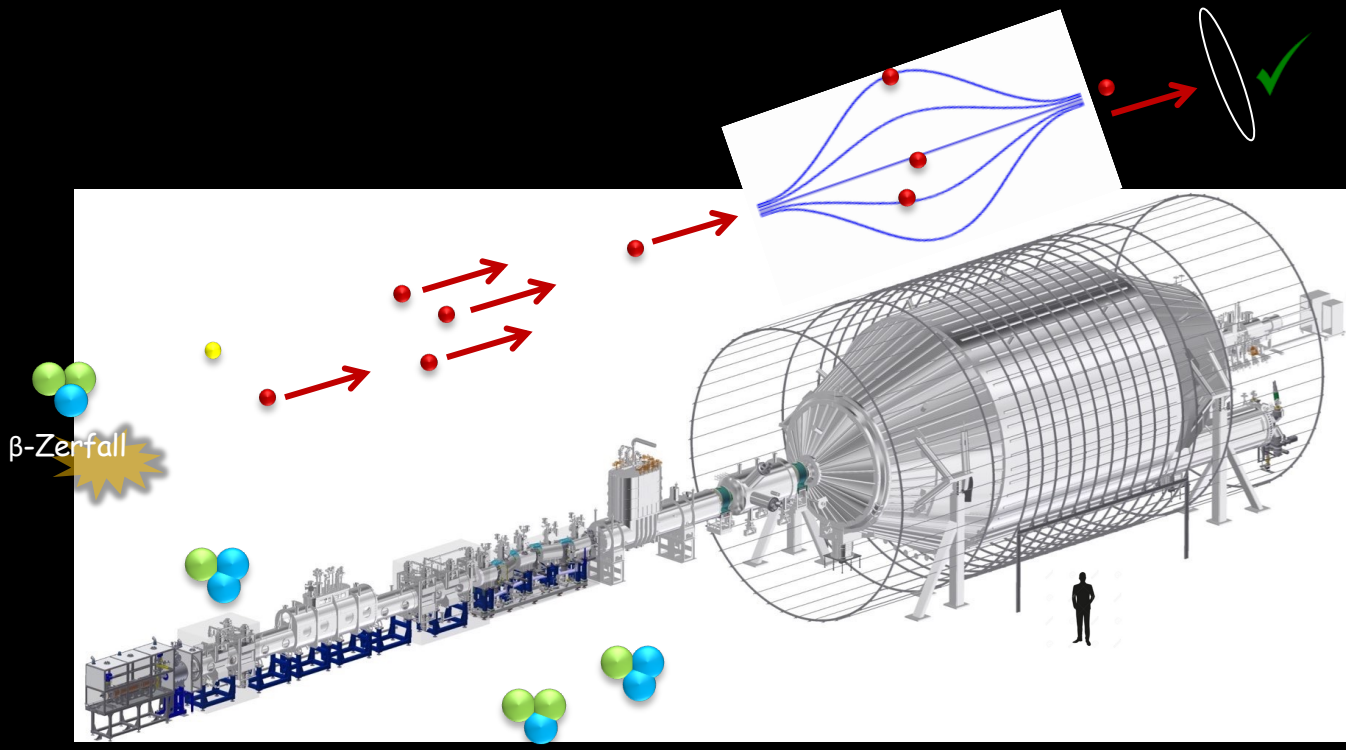
Comment fonctionne KATRIN ?

Filtre électrostatique ultra-précis

β -Zerfall

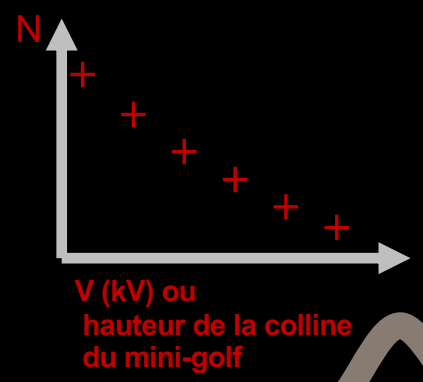


Comment fonctionne KATRIN ?

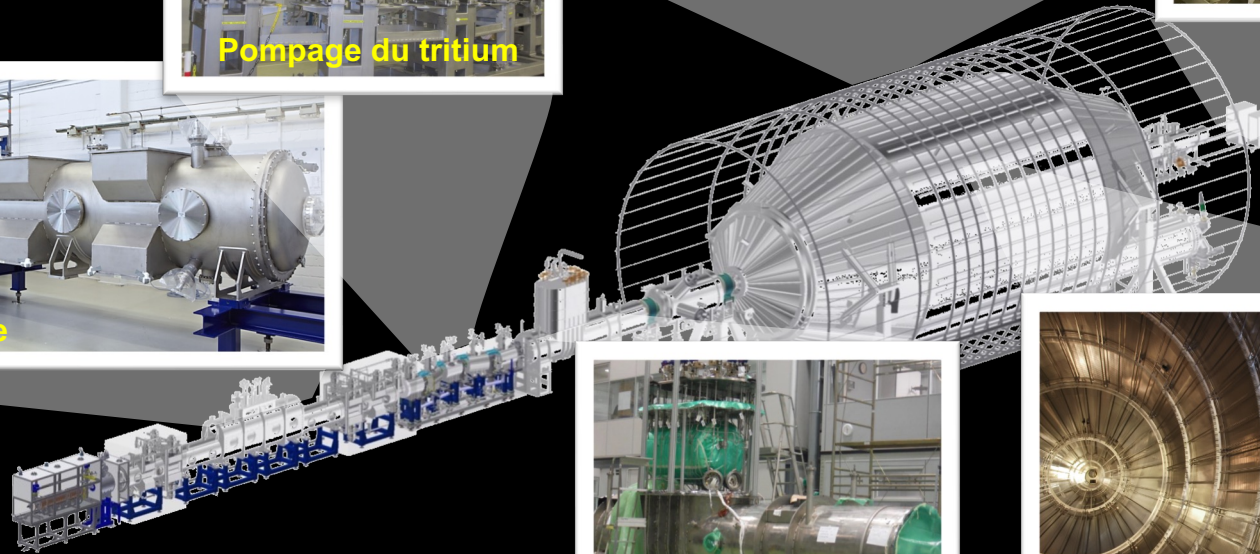


β -Zerfall

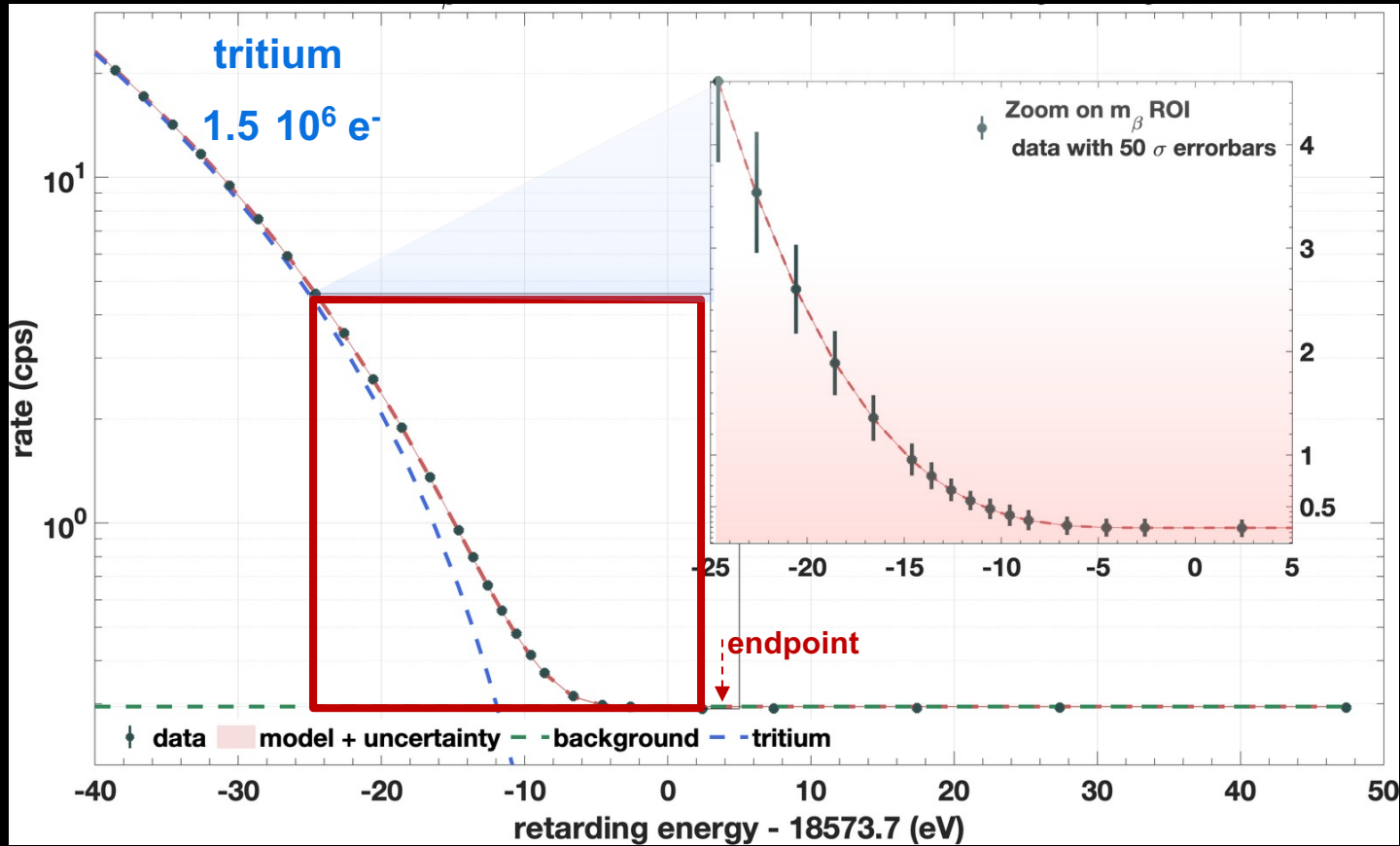
Le détecteur de silicium compte les électrons



KATRIN en image



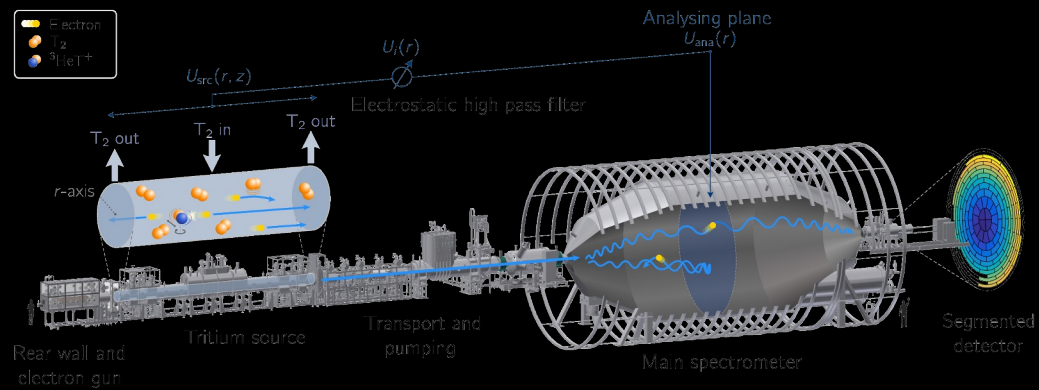
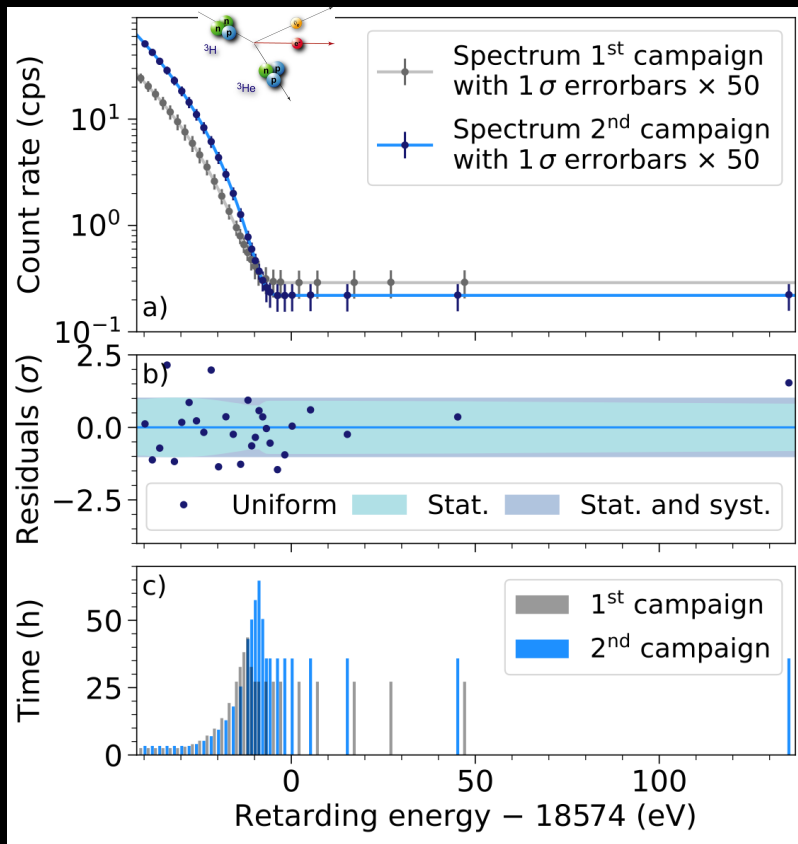
Premier Run de Physique (2019)



bruit de
fond

$0.5 \cdot 10^6 e^-$

Mesure de masse du neutrino



Derniers résultats :

6.5 million d'électrons
 $m_{\nu}^2 = (0.1^{+0.3}_{-0.3})\text{eV}^2$
 $m_{\nu} < 0.8 \text{ eV (90\% CL)}$



Limite Supérieure...



La balance ne mesure rien !?

- Normal ! Ce petit nounours pèse moins de 3 g !
- La balance n'est pas (encore) assez précise!

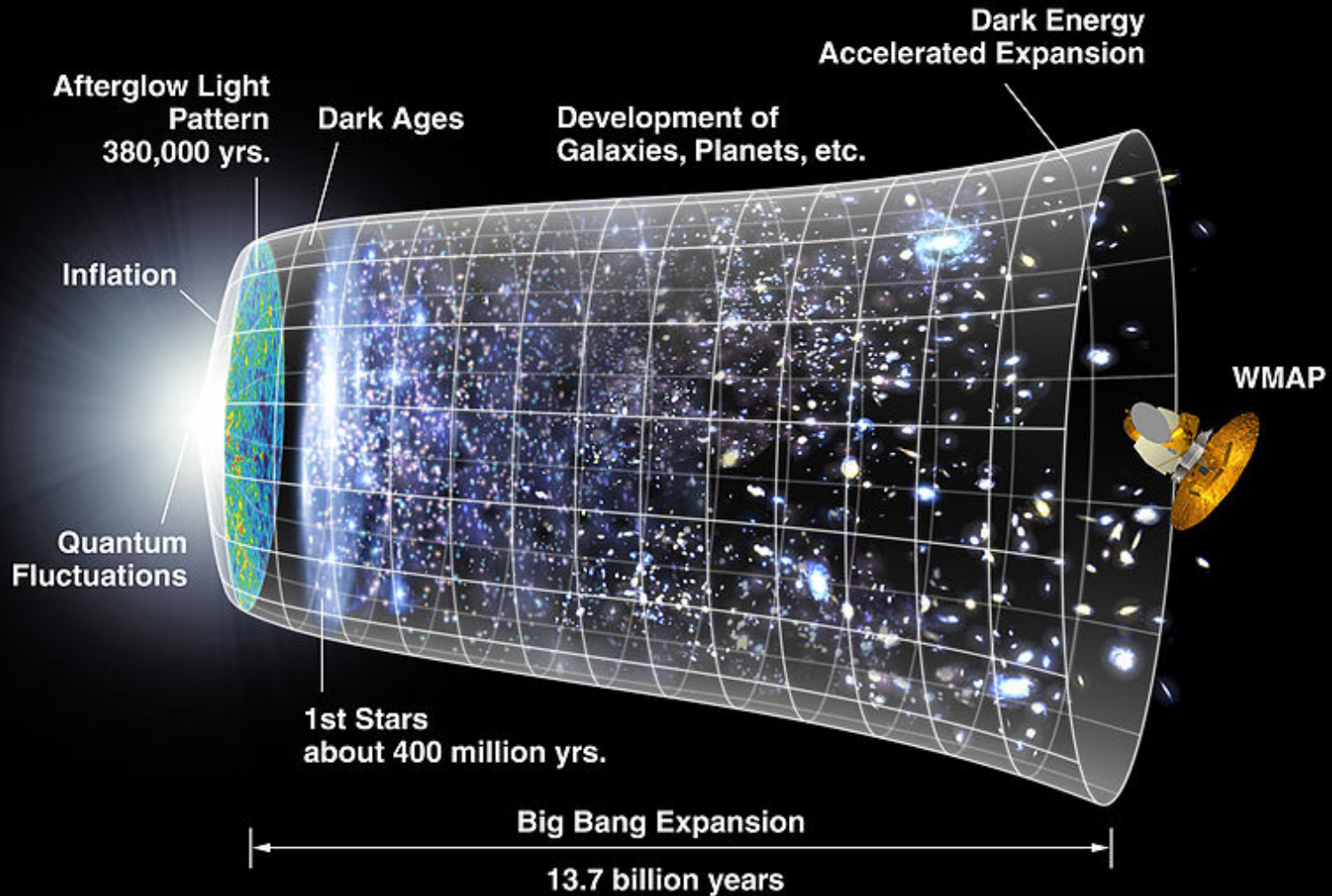
En quête des neutrinos du Big-Bang

Big-Bang



Peu après le Big-Bang les neutrinos étaient couplés aux autres constituants

Le fond de neutrinos cosmiques



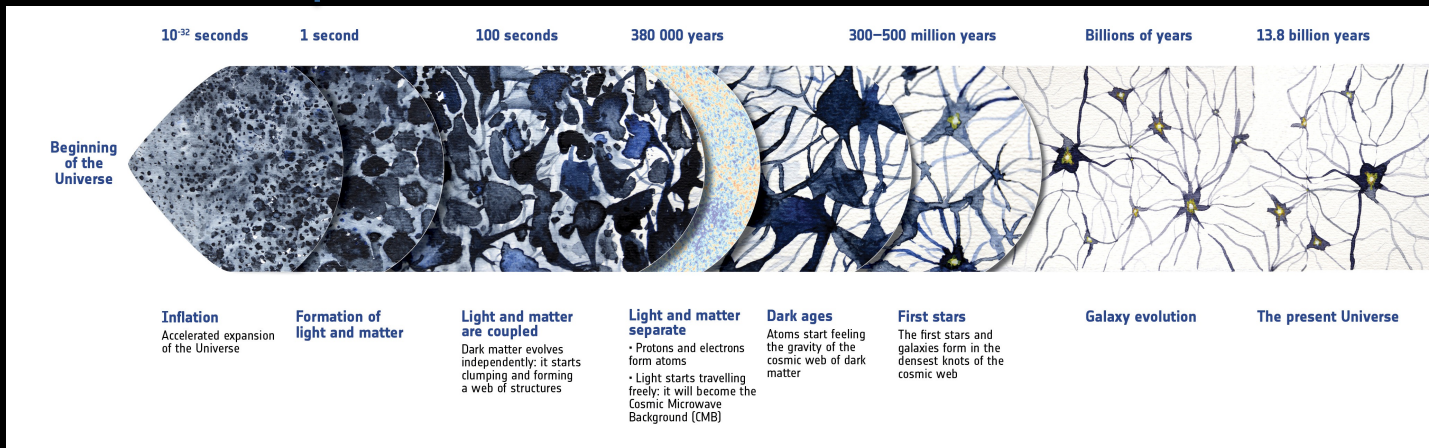
Découplage $t_{\text{big-bang}}+1\text{s}$ → Rayonnement fossile de neutrinos

Le fond cosmologique de neutrinos en chiffres

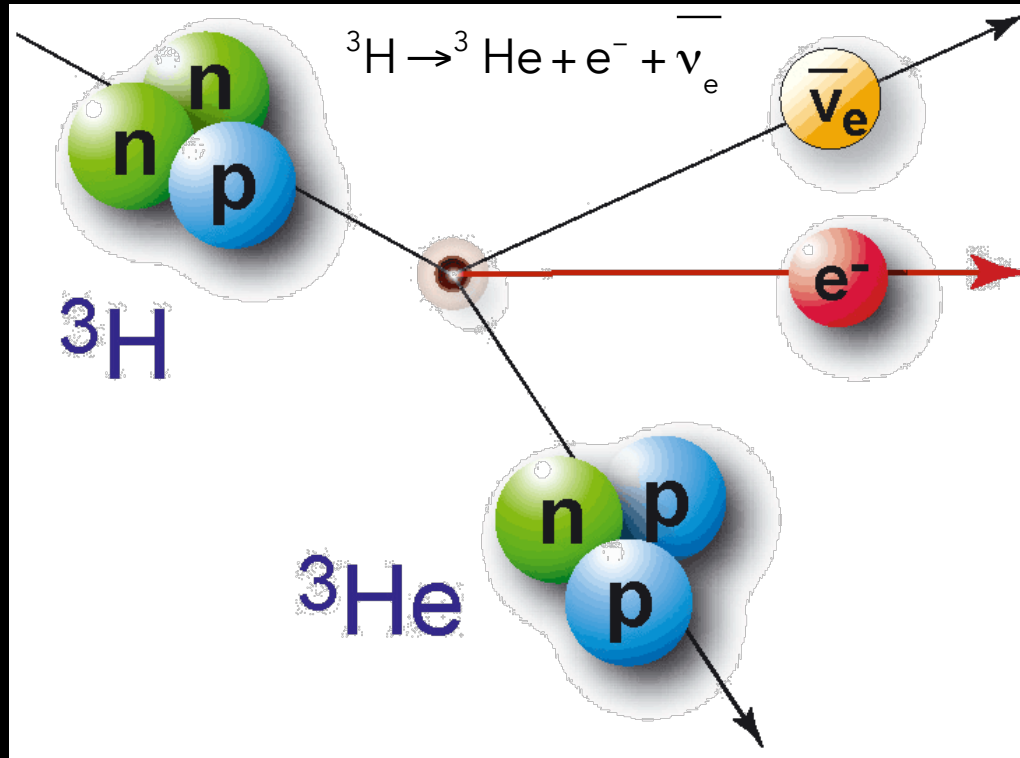
	1 ^{ERE} GÉNÉRATION	2 ^{ÈME} GÉNÉRATION	3 ^{ÈME} GÉNÉRATION		
masse →	~2.3 MeV/c ²	~1.275 GeV/c ²	~173.07 GeV/c ²	0	~126 GeV/c ²
charge →	2/3	2/3	2/3	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H boson de Higgs
QUARKS	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	~4.8 MeV/c ²	~95 MeV/c ²	~4.18 GeV/c ²	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	e électron	μ muon	τ tau	Z boson Z	
LEPTONS	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²	91.2 GeV/c ²	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	ν_e neutrino électronique	ν_μ neutrino muonique	ν_τ neutrino tauique	W[±] bosons W [±]	
	0	0	0	~80.4 GeV/c ²	
	1/2	1/2	1/2	±1	
				W[±] bosons W [±]	
					BOSONS DE JAUGE

- 110 cm⁻³ pour chaque saveur: 3x110=330/cm³ (les particules de matière les plus abondantes)
- 0,0000005 protons / cm³
- Détecté de manière indirecte
- Mais pas encore de manière directe ...

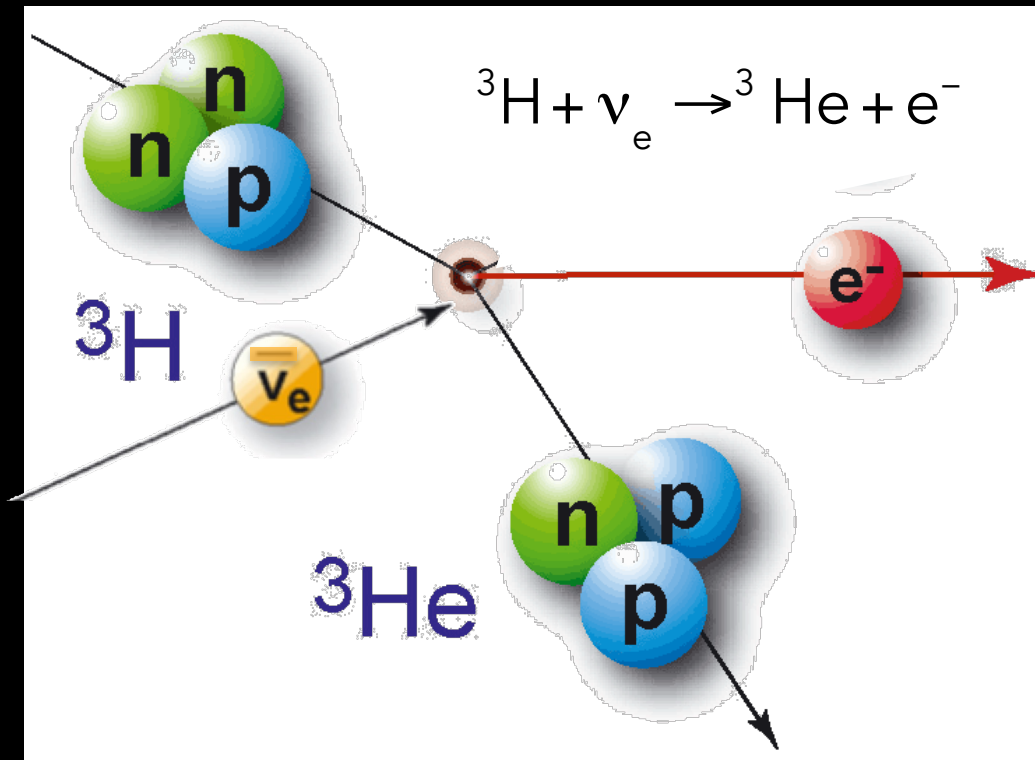
Emission du rayonnement de neutrinos



Rappel: désintégration du Tritium



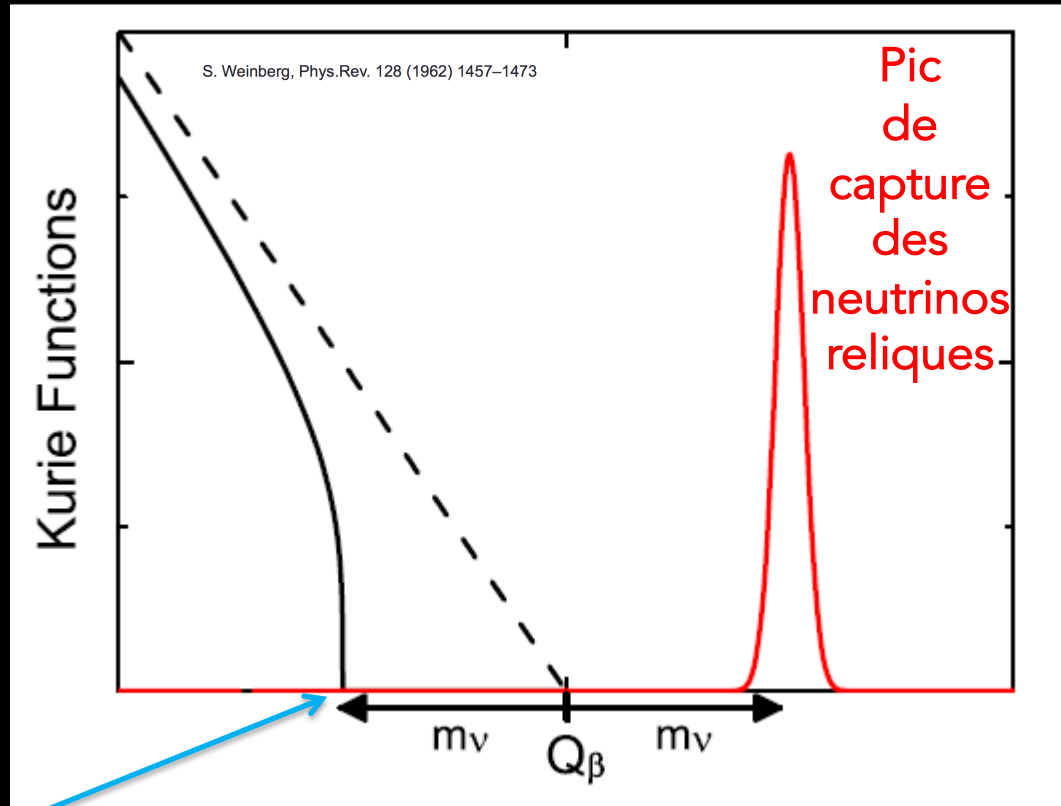
Capture des neutrinos cosmologique par le Tritium



Permet théoriquement la détection des neutrinos reliques!

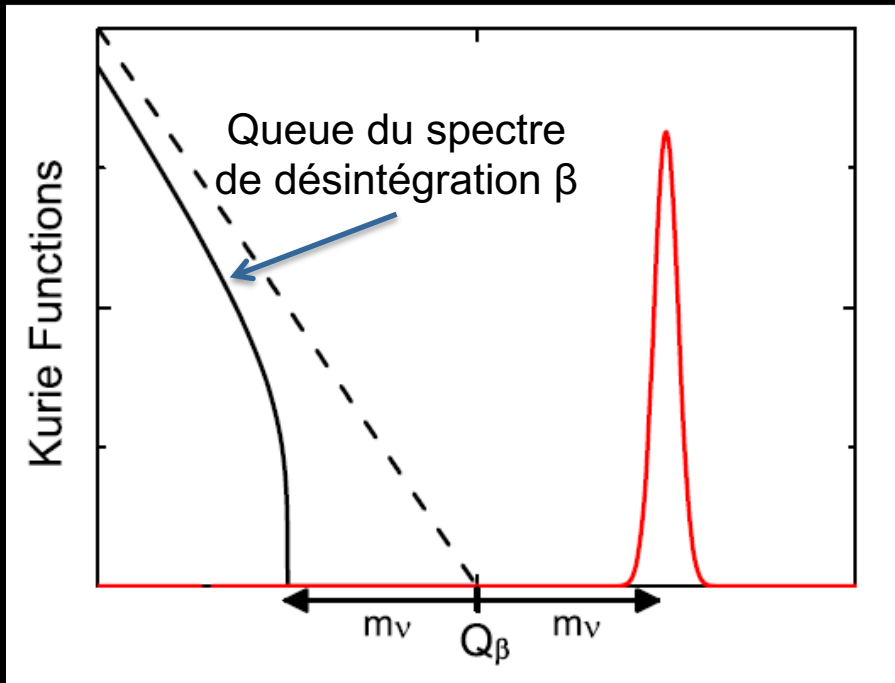
Signal théoriquement attendu

Signature : un pic d'électron mono-énergétique au-delà de l'énergie finale de désintégration β



"endpoint"

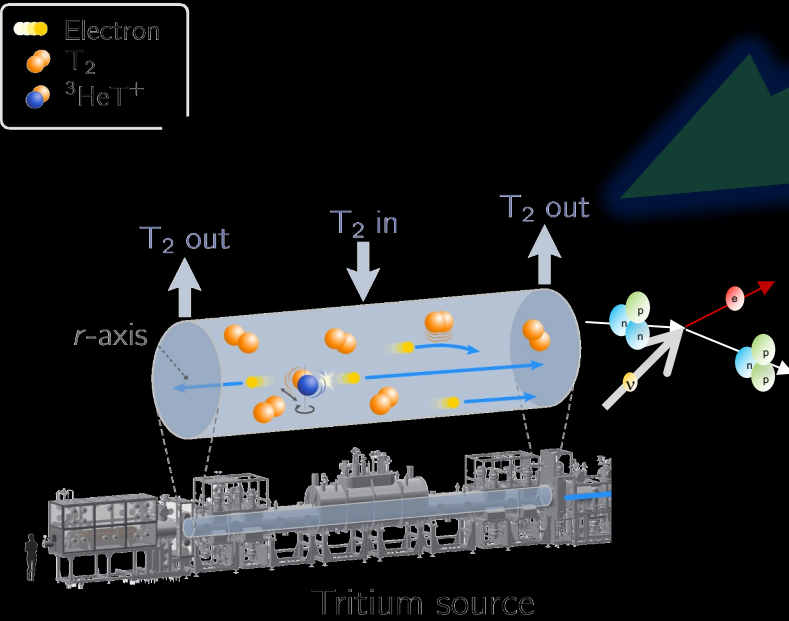
Signal théoriquement attendu



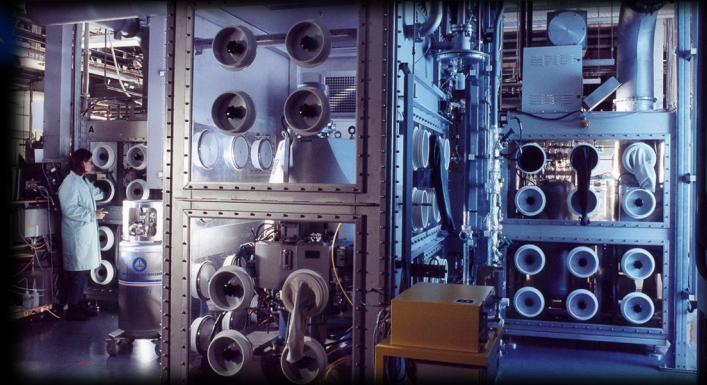
100 g de tritium
permettent de capturer
10 neutrinos
cosmologiques par an

Nécessité d'une résolution
énergétique sub-eV

Mais combien de tritium dans KATRIN?



200 μg of tritium

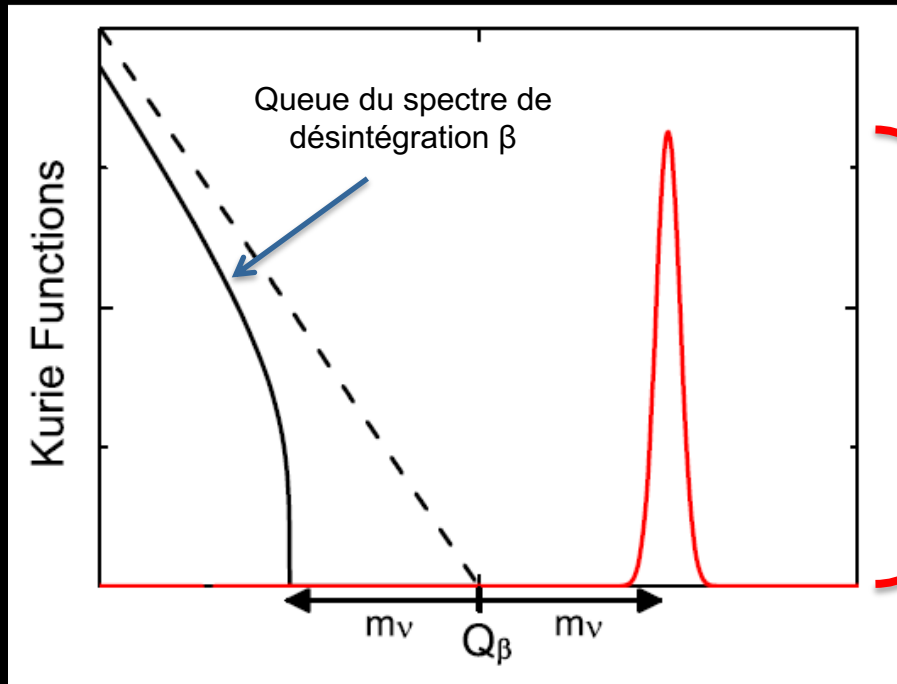


Overall gaseous tritium quantity at TLK: currently 25 g

KATRIN ne peut que sonder la possibilité d'agrégats de neutrinos cosmiques autour du système solaire

$$\eta = n_{\nu} / \langle n_{\nu} \rangle$$

Impossible a-priori avec KATRIN



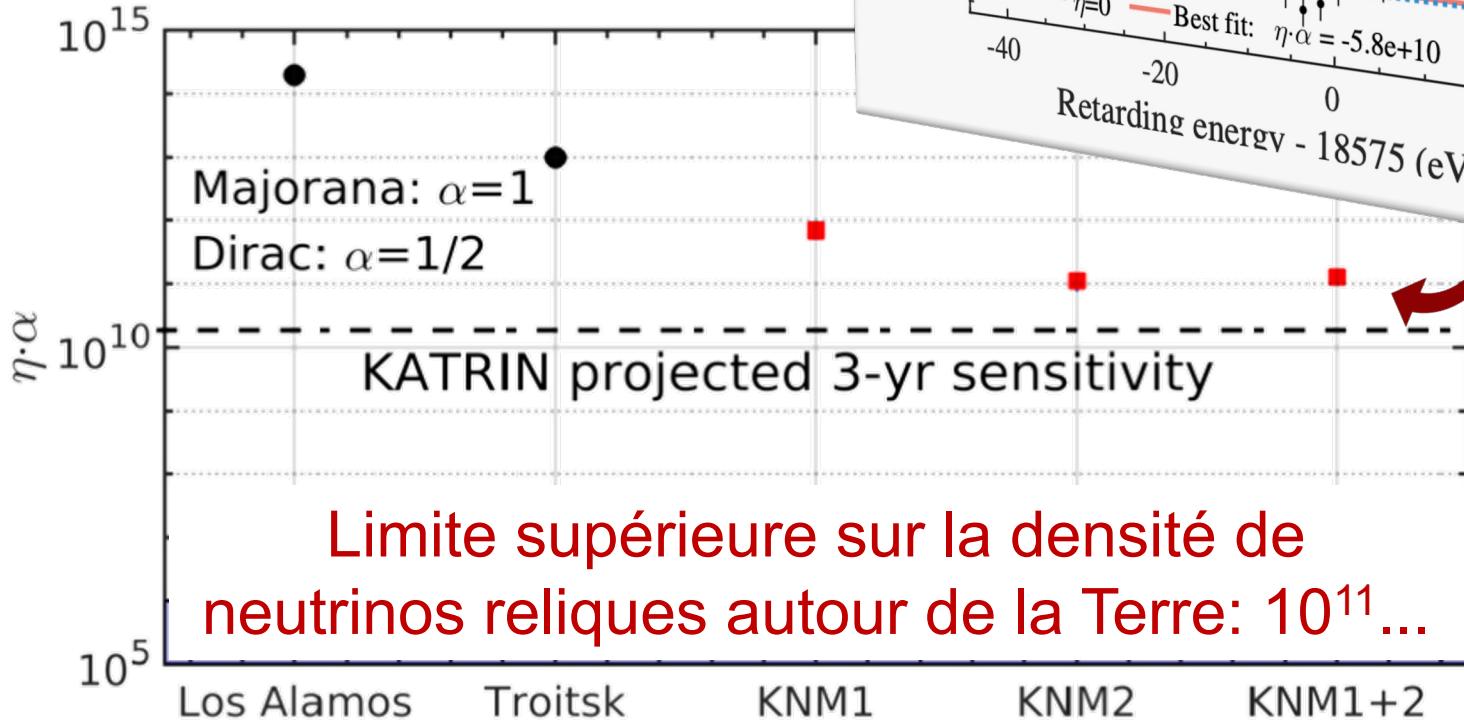
50 microgrammes de tritium dans KATRIN
 $\rightarrow \ll 1$ capture de neutrino du CvB par an

Résolution de 3 eV

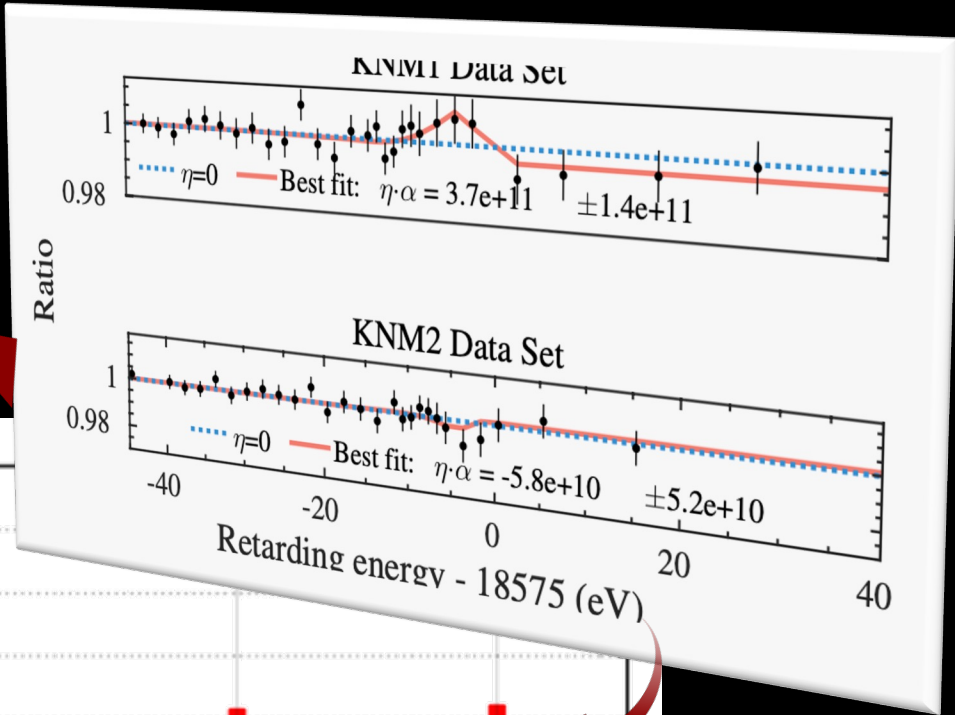


Mais on essaye tout de même !

Mesure actuelle de KATRIN (2022)



Limite supérieure sur la densité de neutrinos reliques autour de la Terre: $10^{11} \dots$

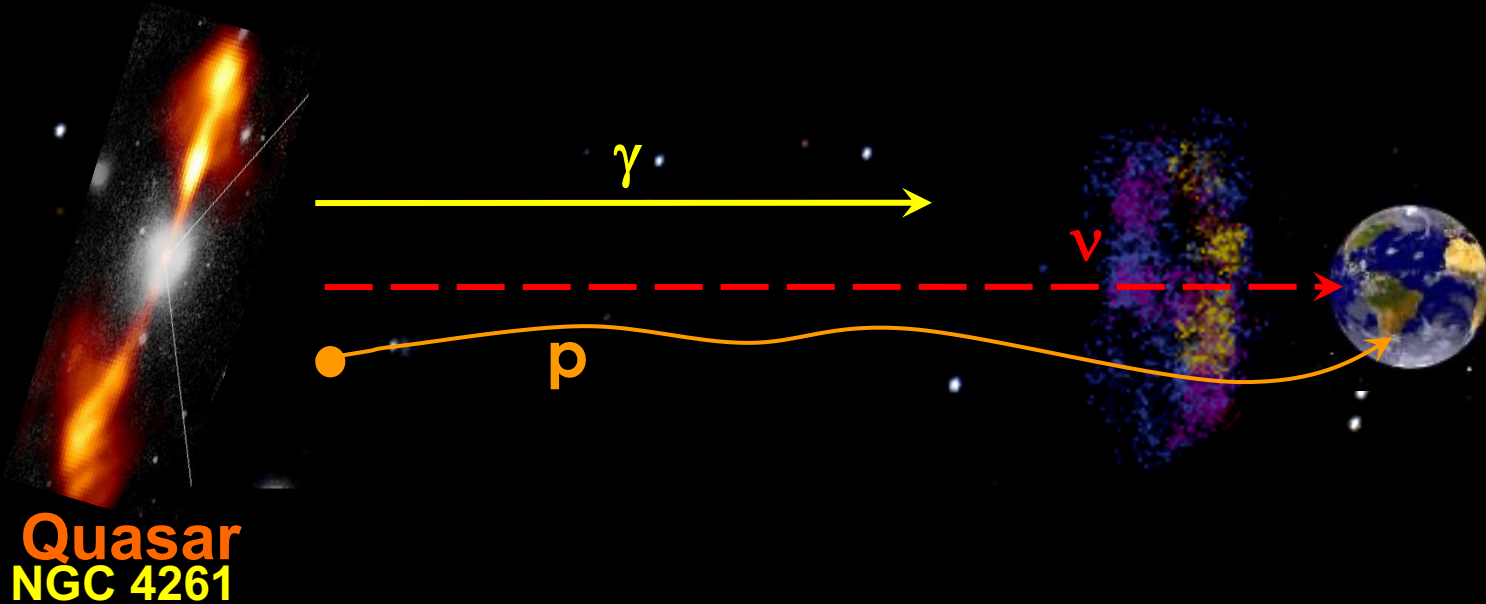


Neutrino:

Messenger Cosmique

> 100 000 000 années-lumière

- Le neutrino comme message cosmique:
 - stable
 - neutre
 - interagit faiblement



- Mais nécessite de TRES gros volumes de détection...

Noyaux Actifs de Galaxie

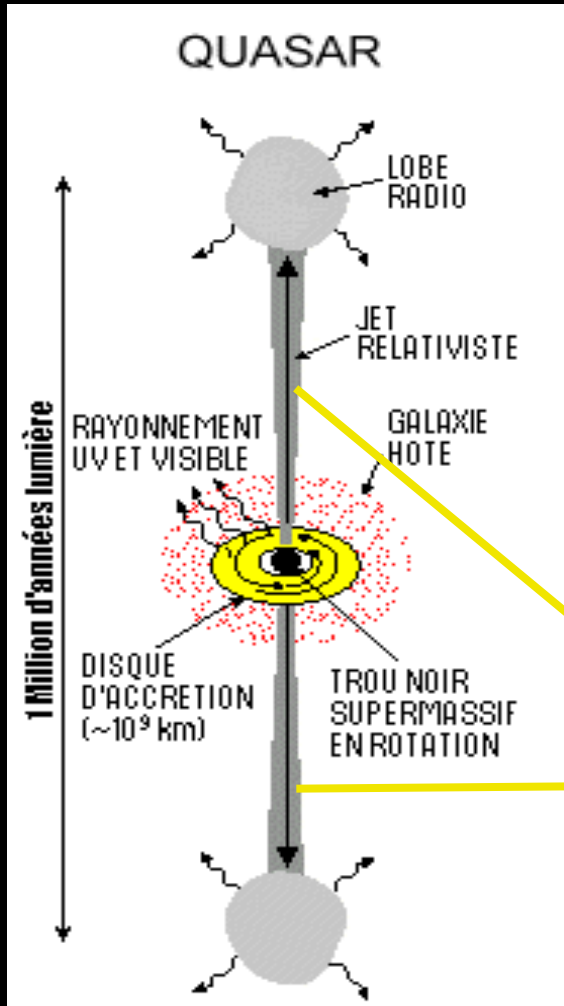
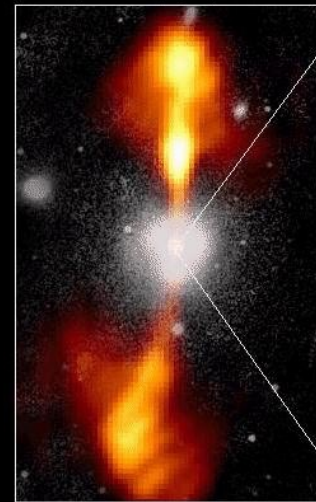
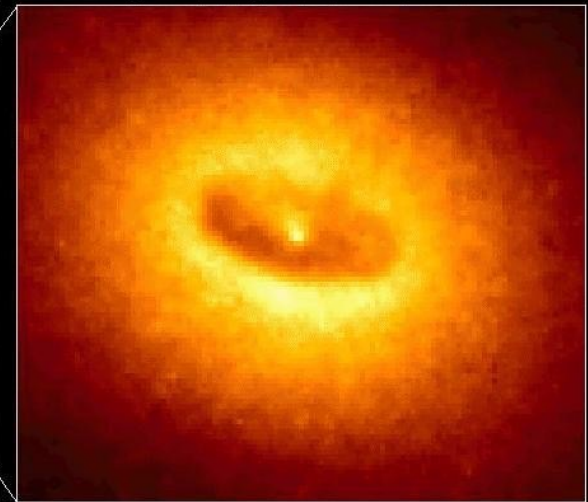


Image Radio /Optique prise au sol



360 secondes d'arc
88000 années-lumière

Image du disque de gaz et de poussière prise avec le HST

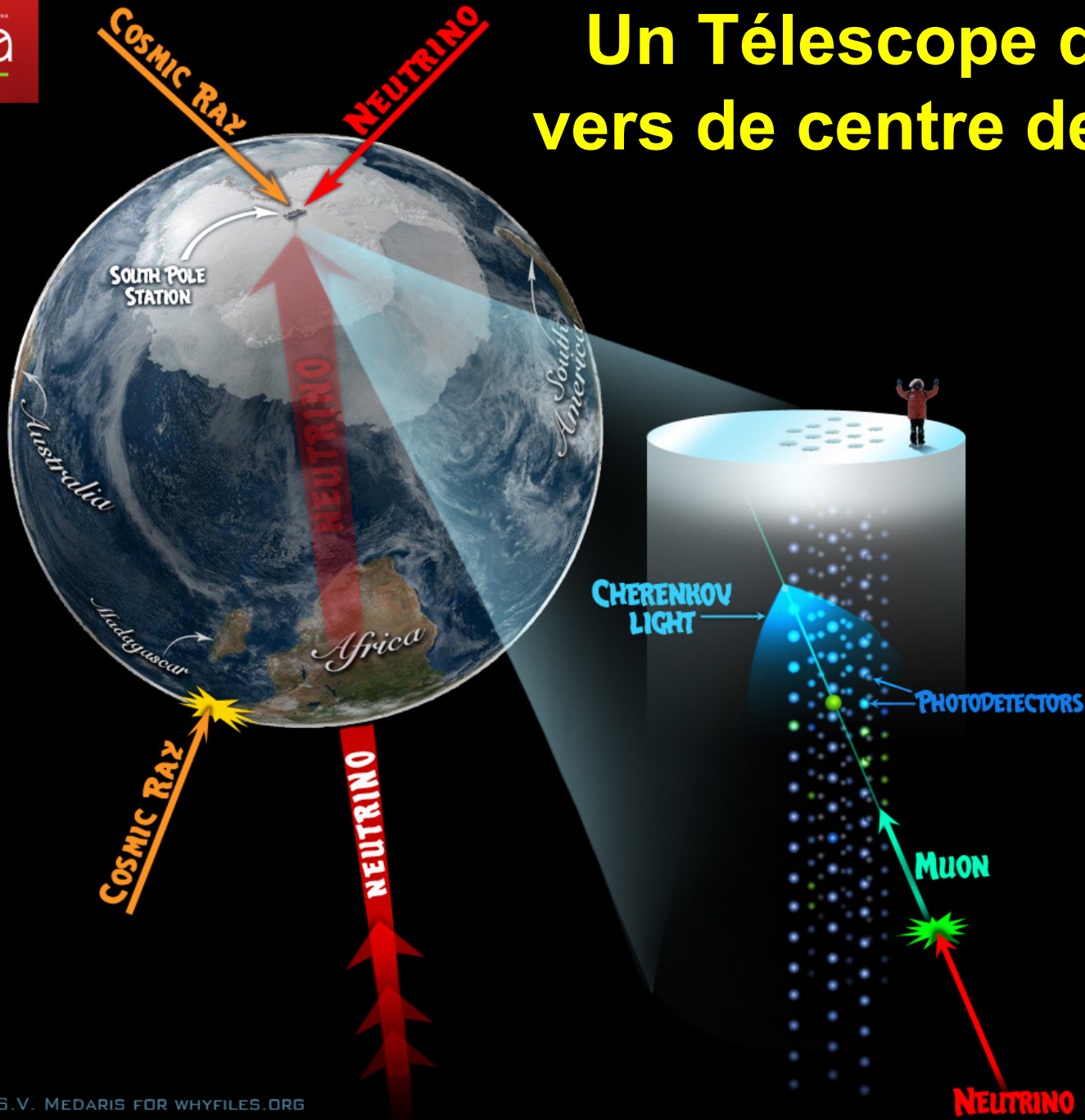


1.7 secondes d'arc
400 années-lumière

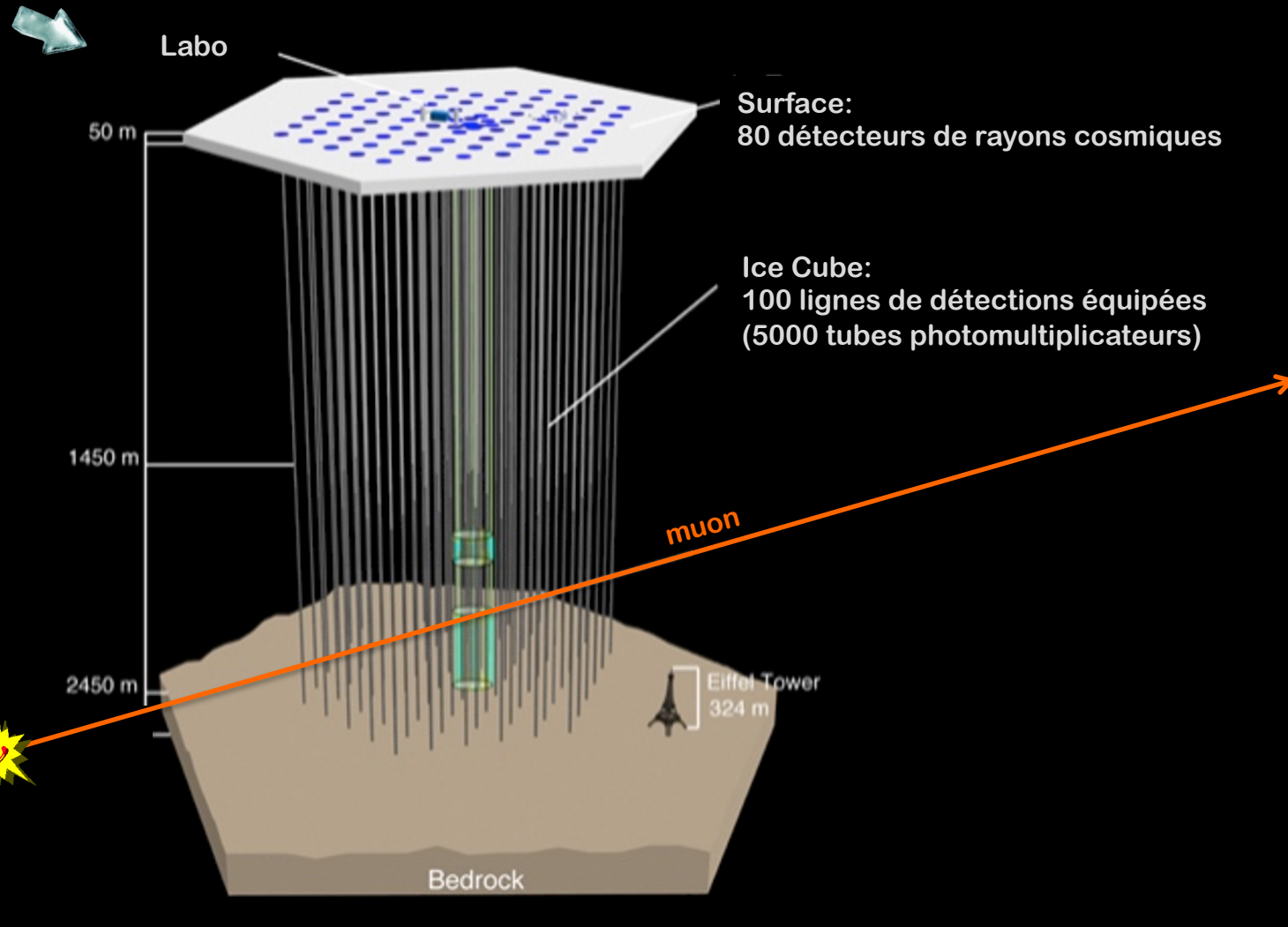
Electrons → Photons (γ)

Protons → π et K → Neutrinos

Un Télescope qui pointe vers de centre de la Terre...

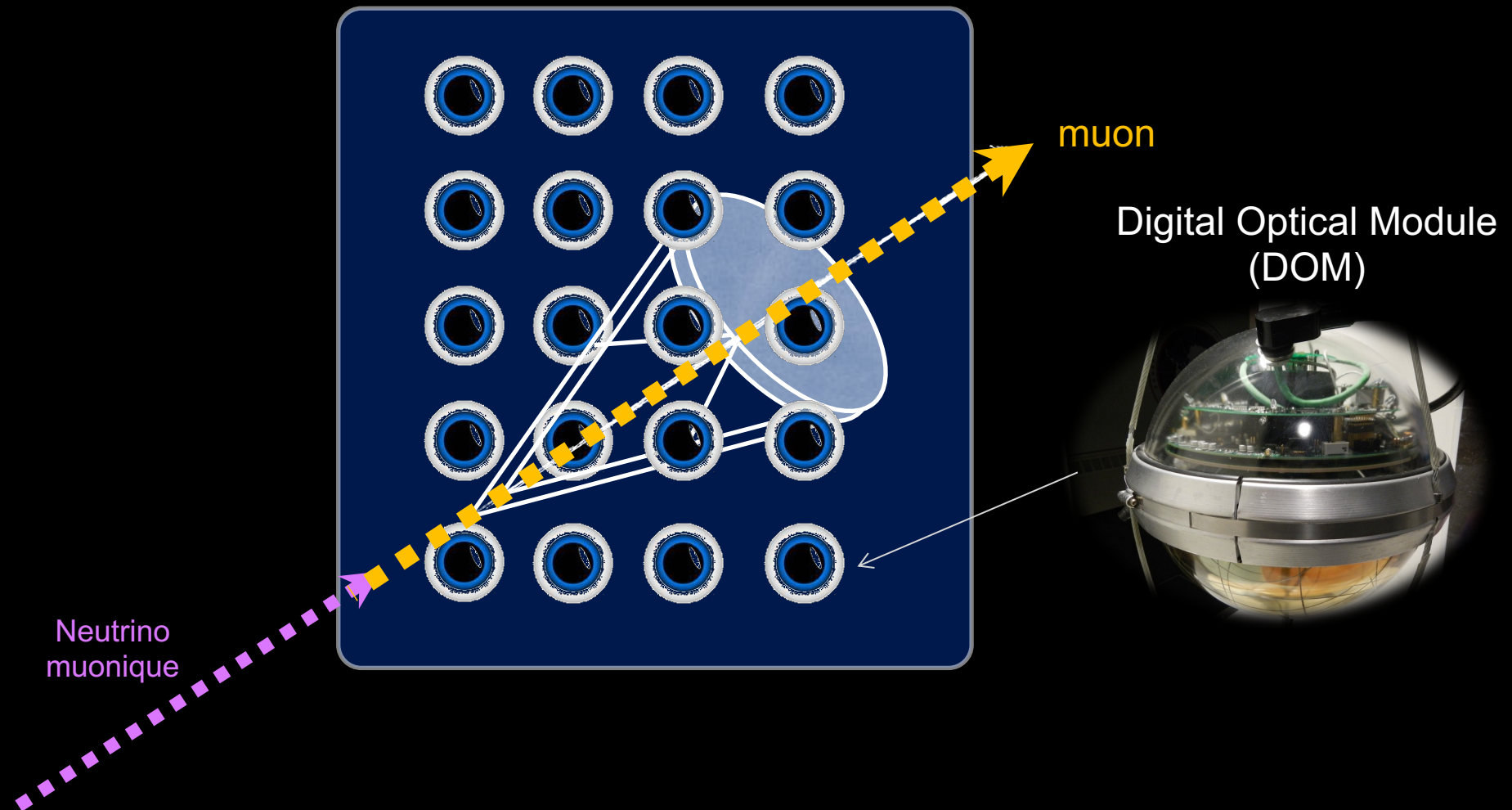


Télescope à neutrinos ICE CUBE

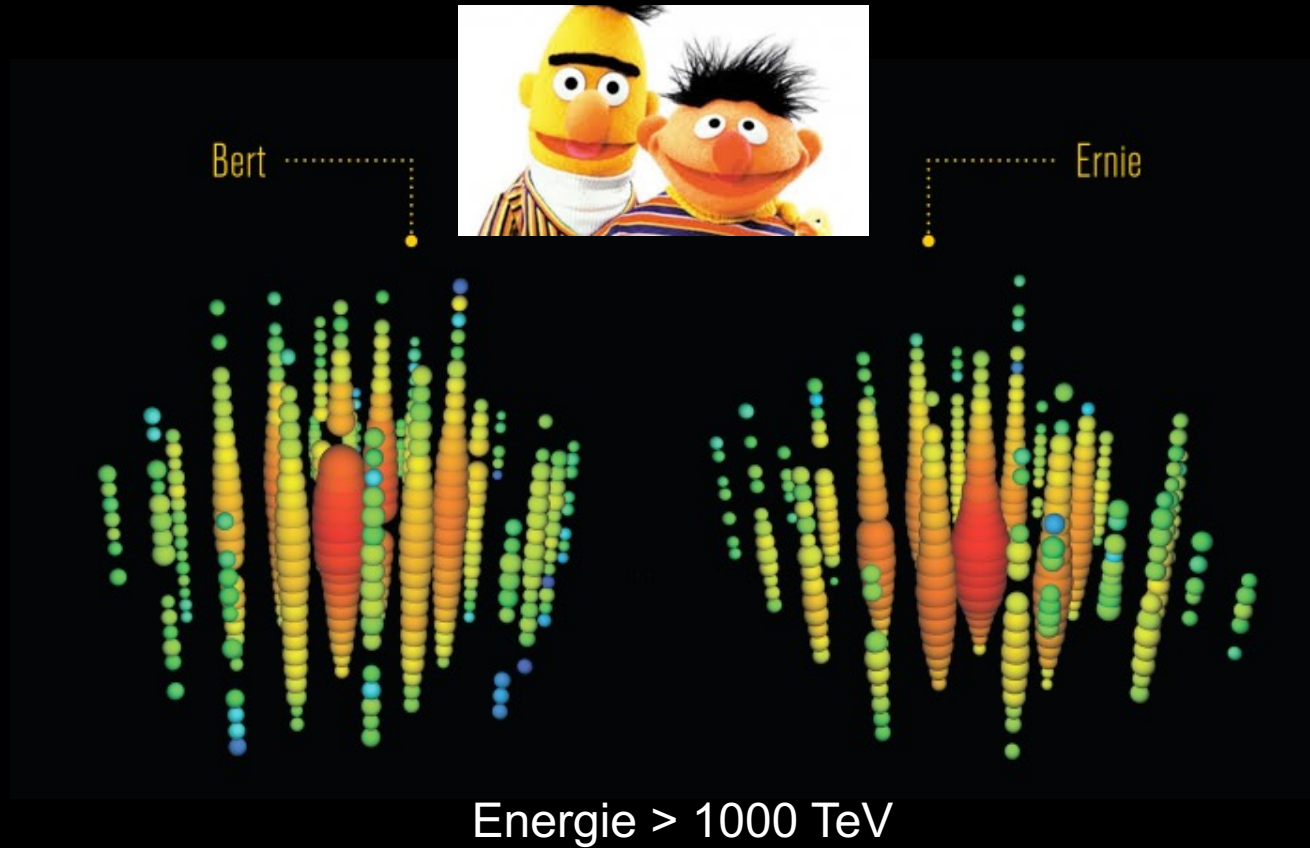


Détecter les neutrinos avec IceCube

Détection de la lumière Cherenkov par une matrice de modules optiques (tubes photomultiplicateurs)



2 Neutrinos atypiques



Neutrinos 'Electroniques' Extraterrestres

Neutrino & Matière Noire

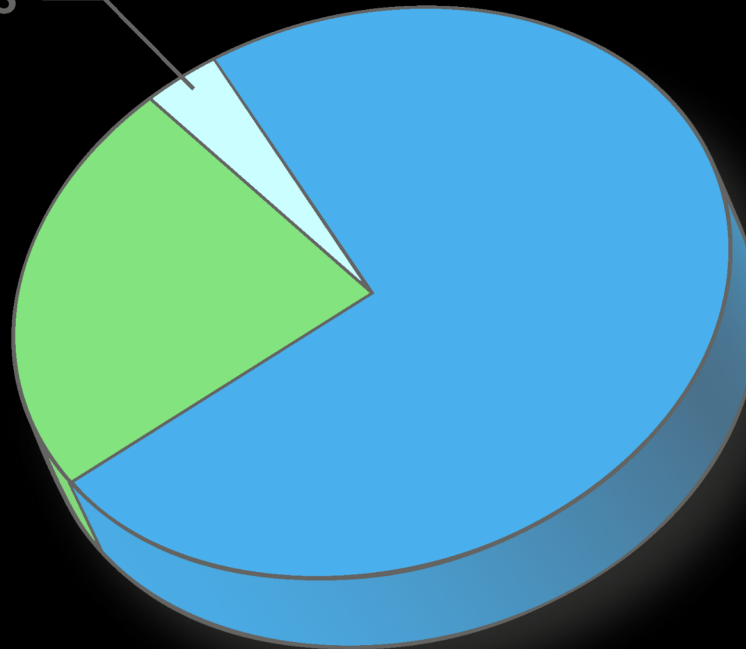
Notre Univers, si sombre!

- Neutrinos ~0.5%
- Etoiles & Galaxies ~0.5%
- Gaz ~3.5 %



Atoms
4.6%

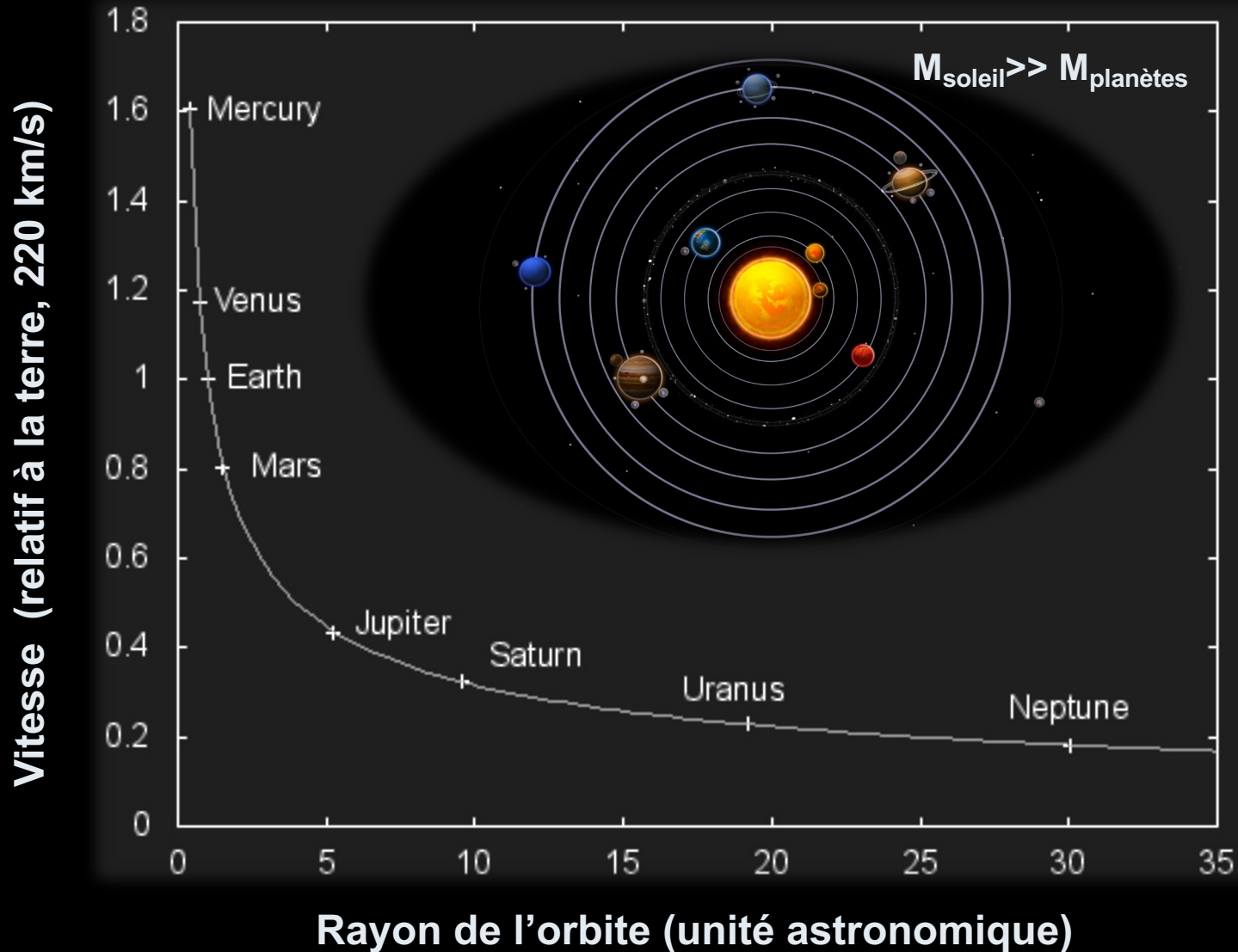
Dark
Matter
23%



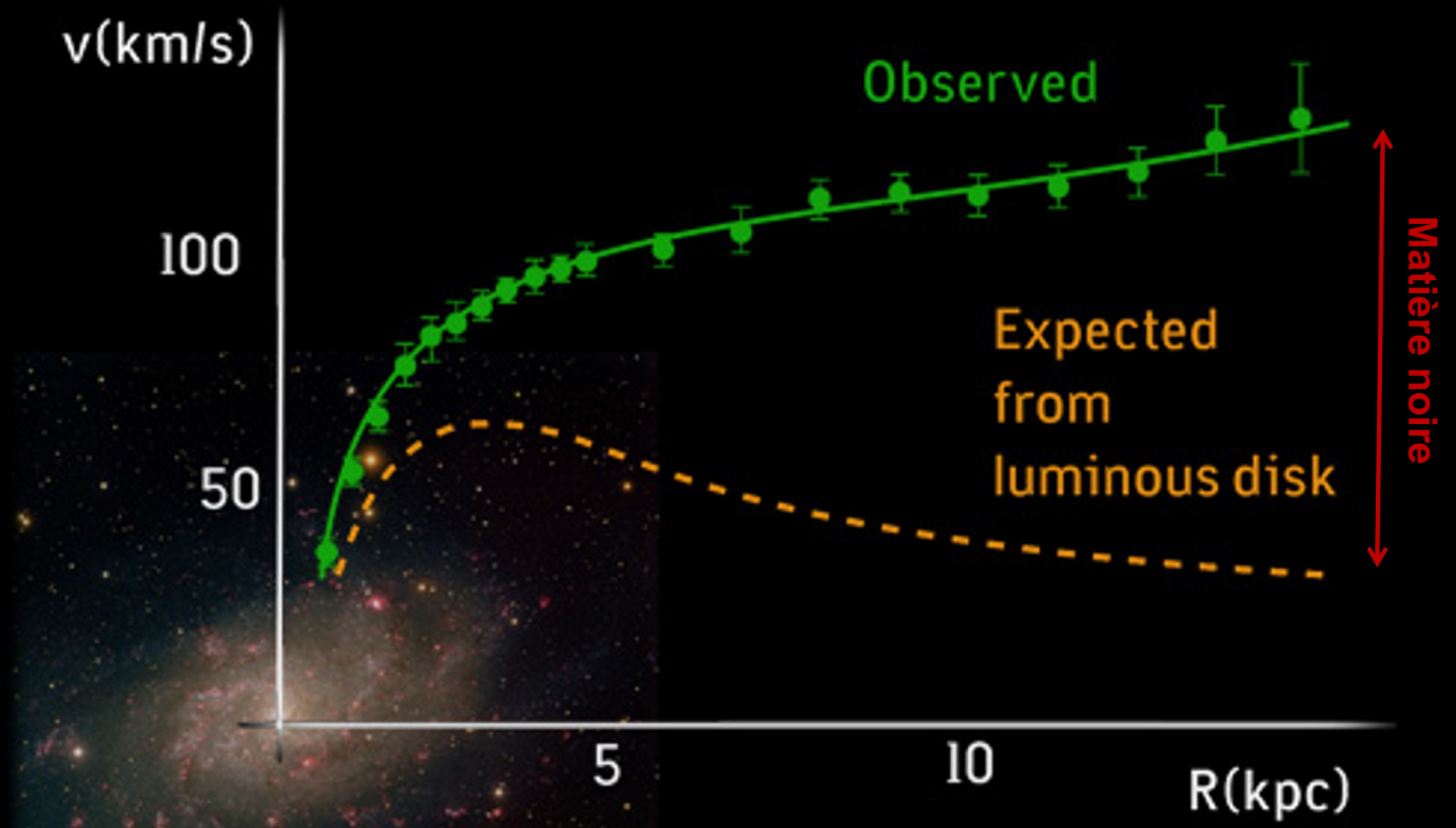
Dark
Energy
72%

Matière noire & Energie noire :
95% de l'Univers reste encore inconnu...

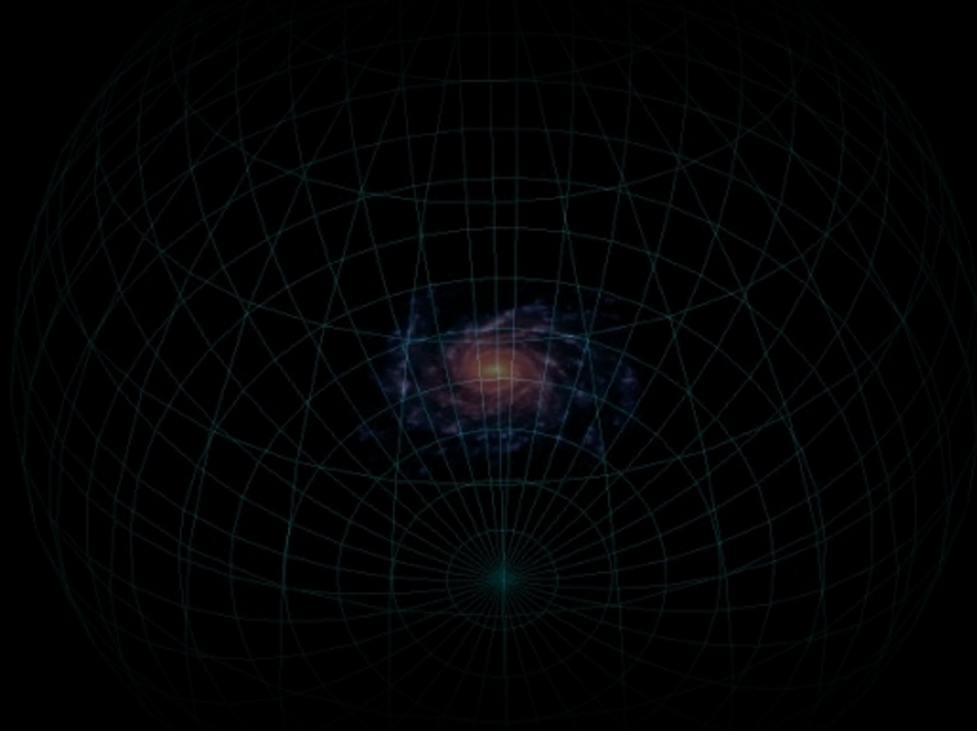
Le système solaire



Matière noire dans la Galaxie

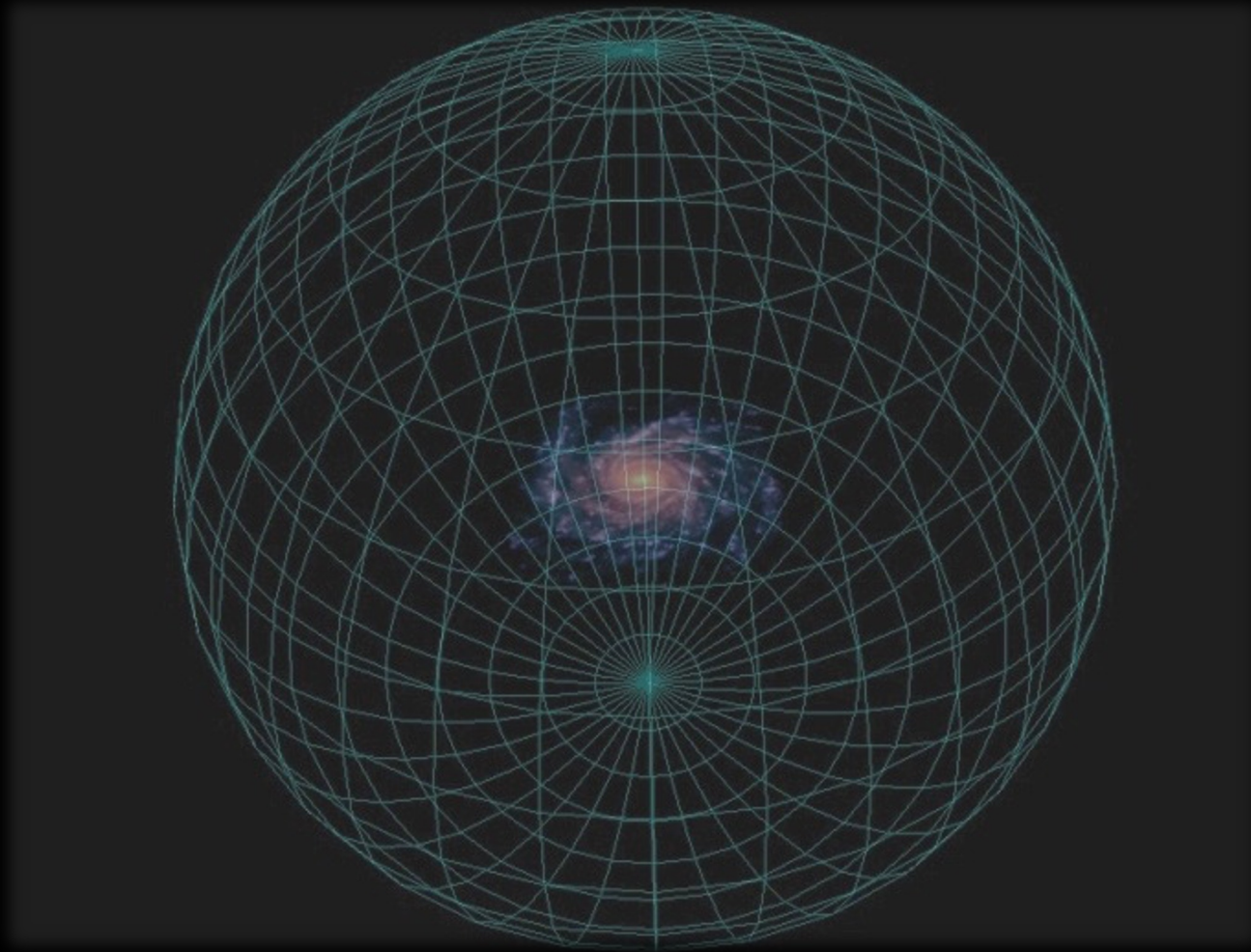


Halo de Matière Noire Galactique



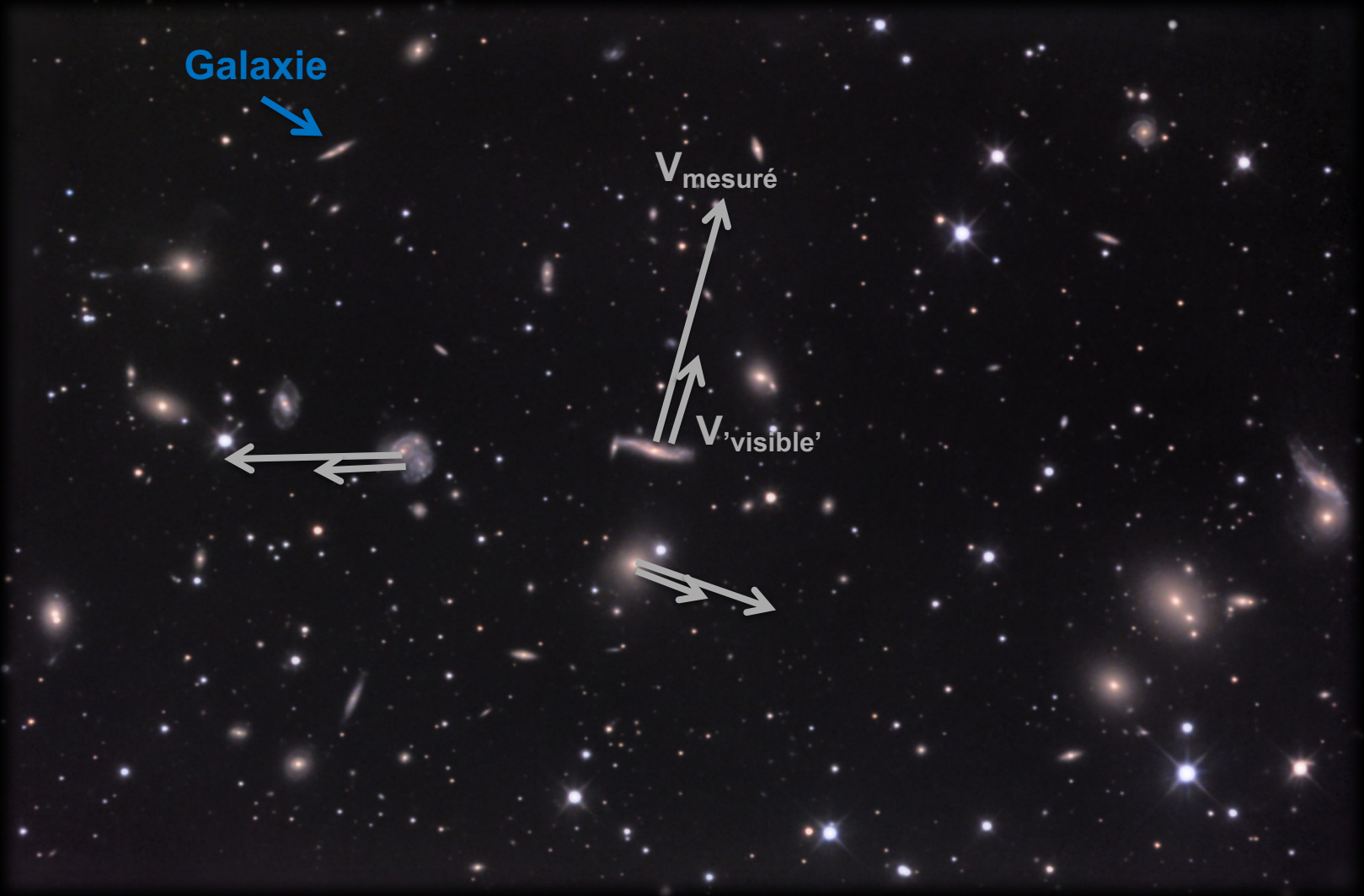
Galaxie → Matière visible: 10% - Matière noire: 90%

Halo de Matière Noire Galactique



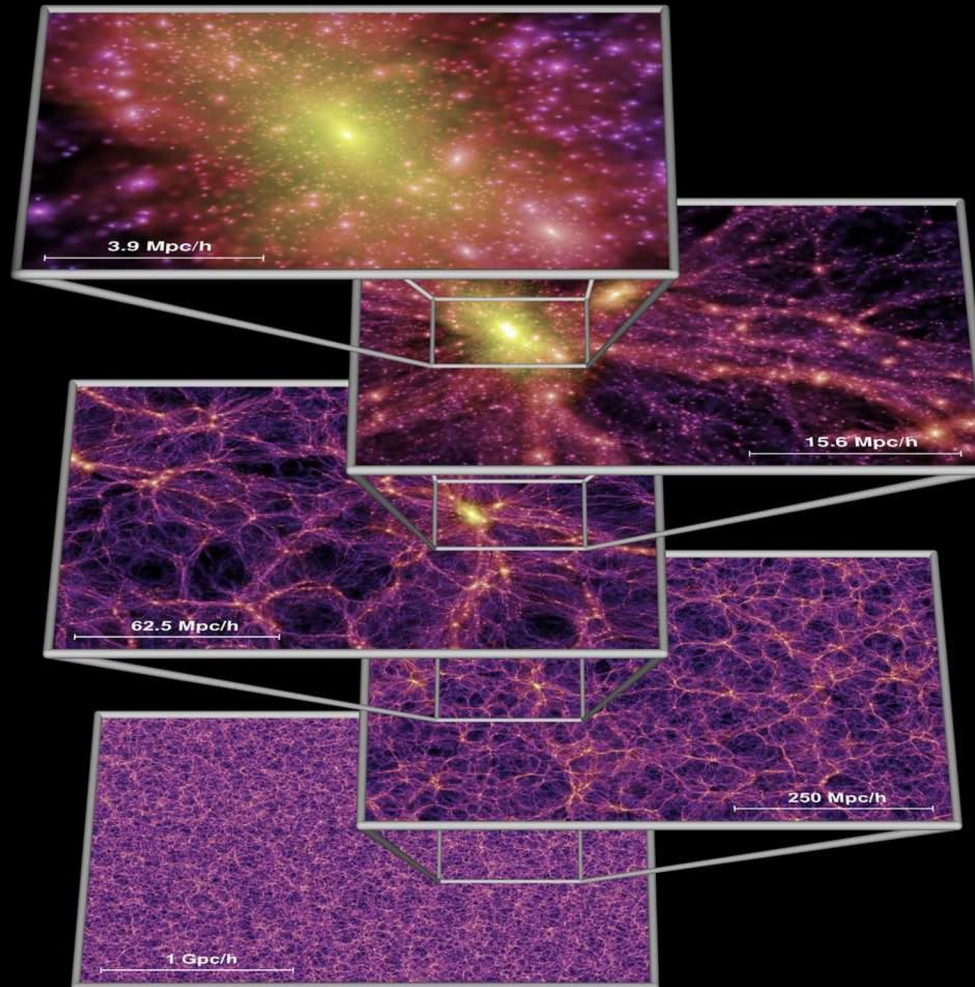
Galaxie → Matière visible: 10% - Matière noire: 90%

Amas de Galaxies



Matière visible: 5% - Matière/Energie noire: 95%

Un univers sombre & structuré



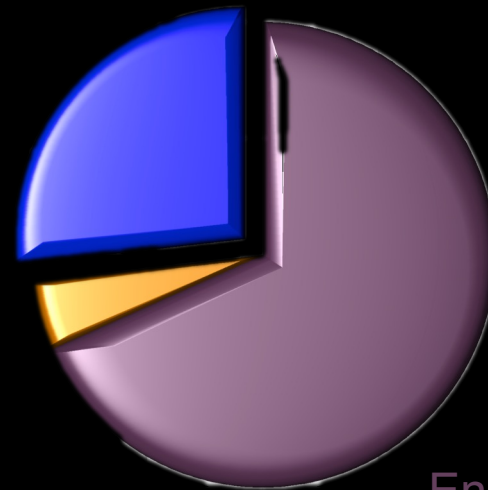
Les grandes structures de l'Univers telles qu'observées sont le fruit de la coexistence de la matière noire, de l'énergie noire et des neutrinos !

Matière noire = 27%

Mais aucune particule connue
du modèle standard ne peut
rendre compte de son
existence

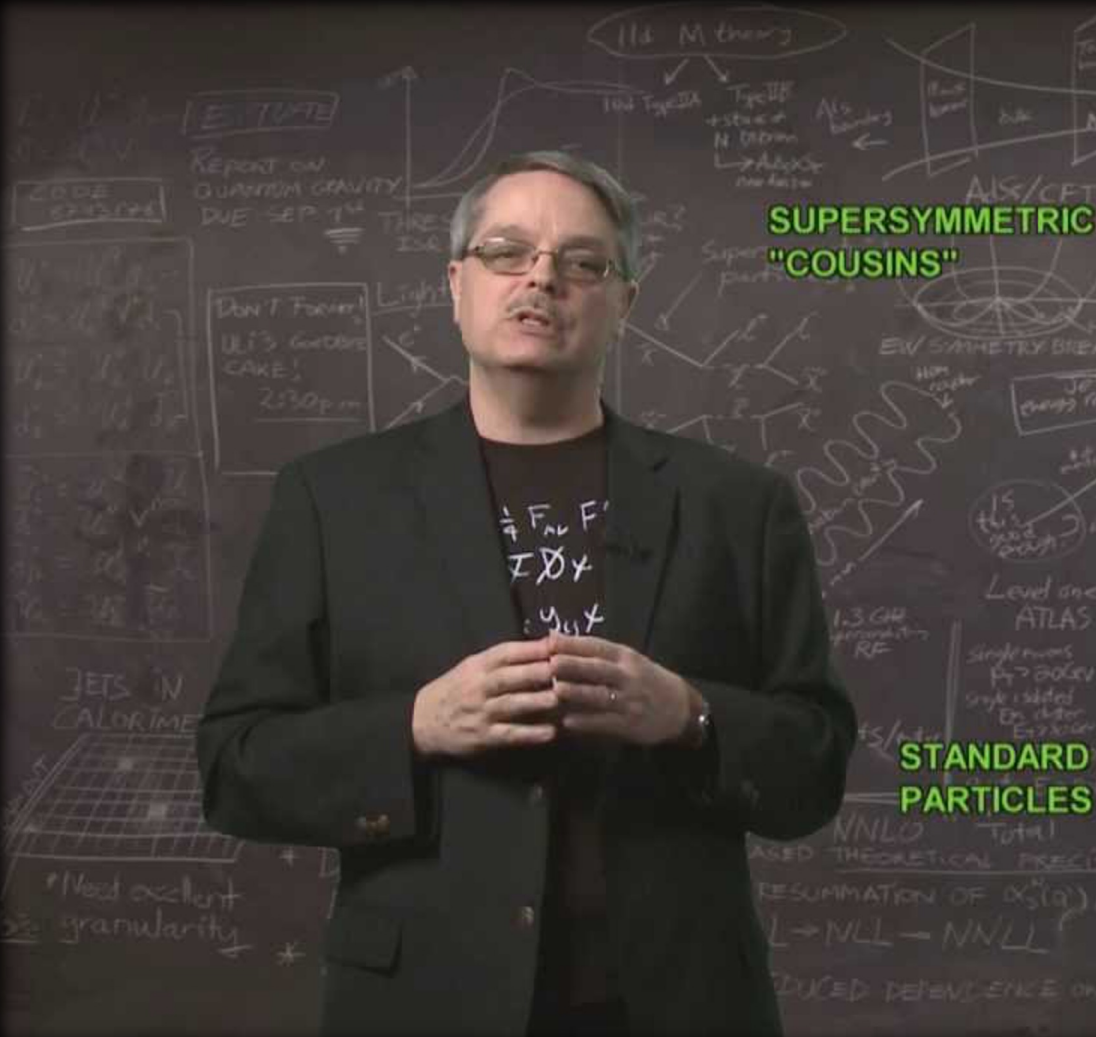


Matière
ordinaire
4.9%



Energie noire
68.3 %

De nouvelles particules?



**SUPERSYMMETRIC
"COUSINS"**

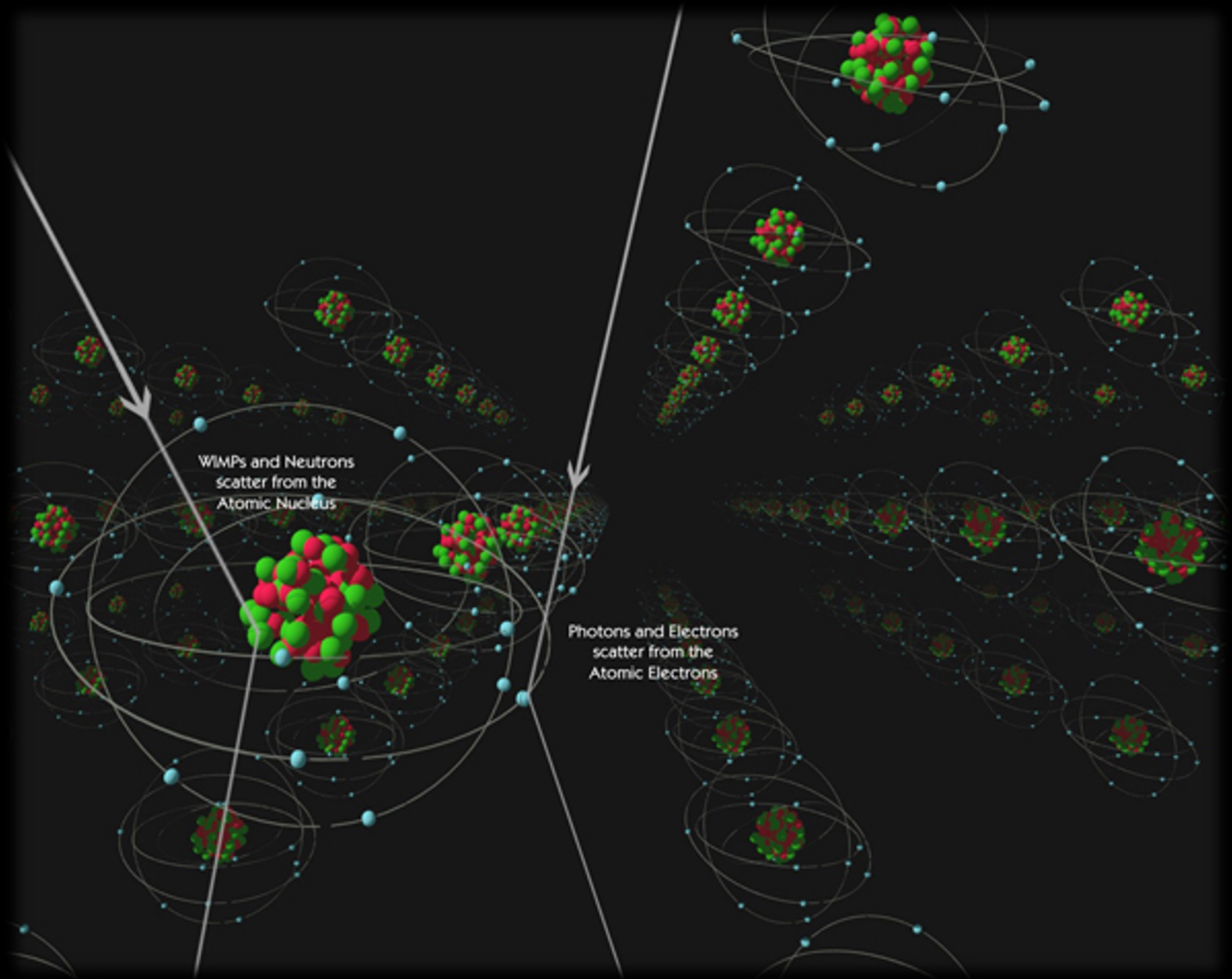
**STANDARD
PARTICLES**



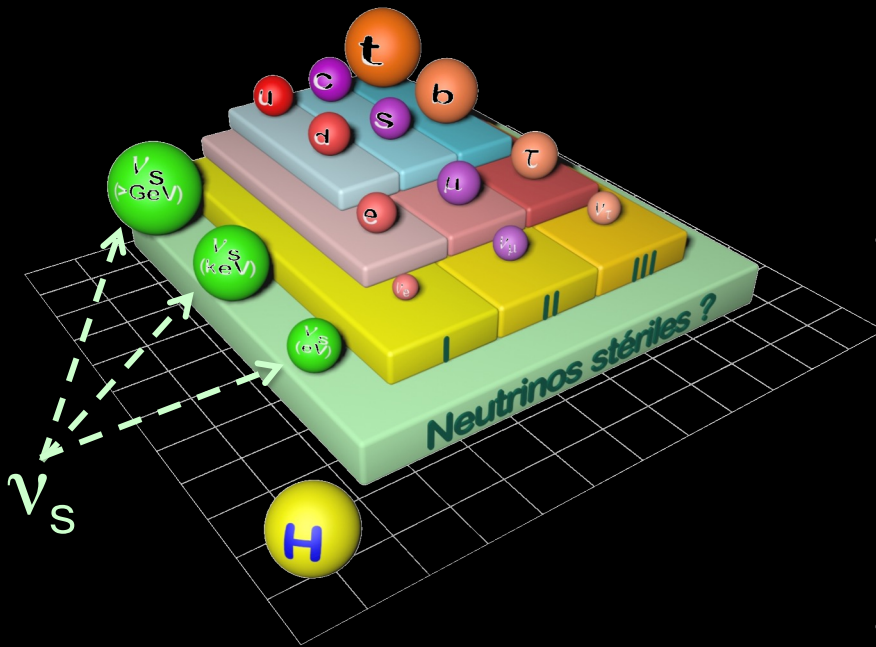
Higgsino

?

Principe de détection



L'hypothèse des neutrinos stériles



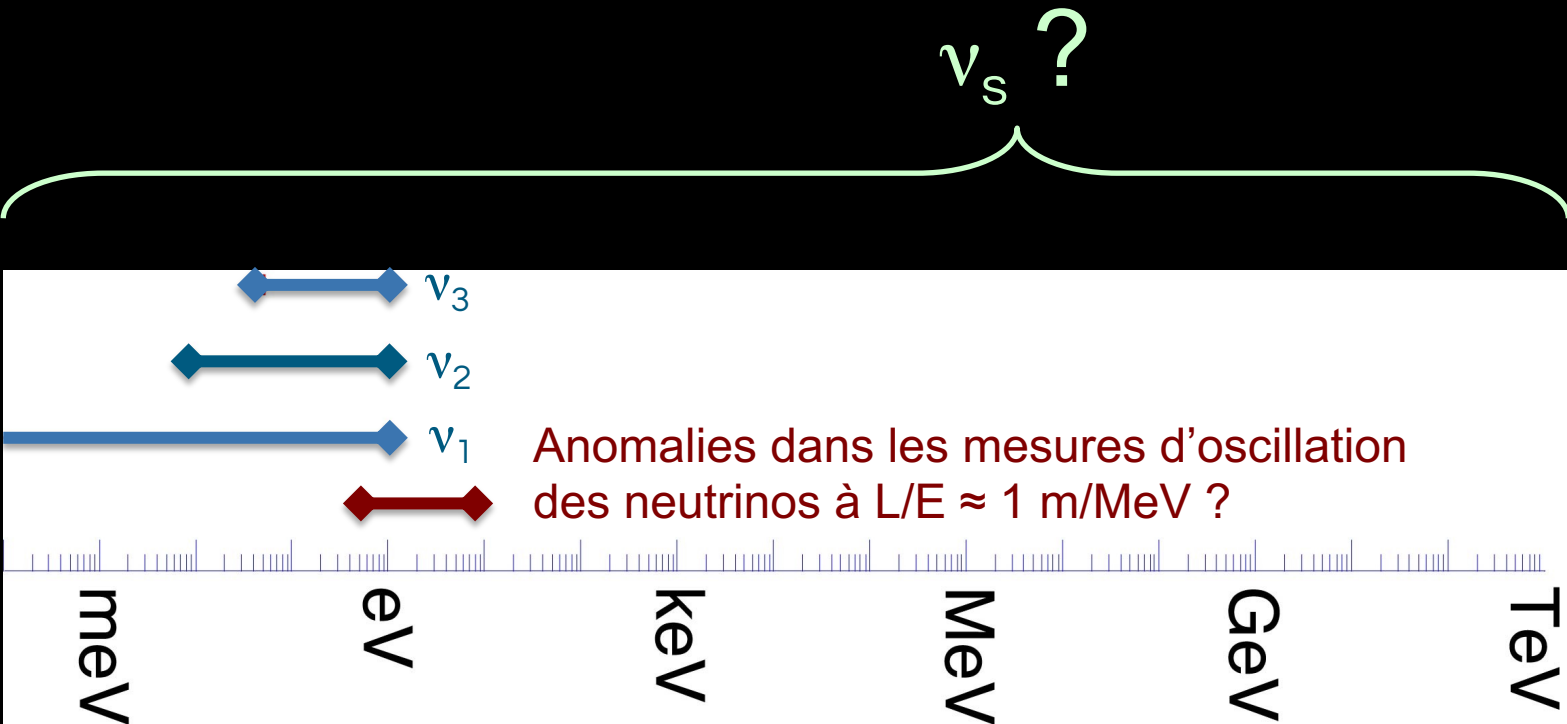
- Certaines extensions du Modèle Standard prévoient l'existence de nouveaux types de neutrinos
- Ils n'auraient pas d'interaction avec la matière. On les appelle donc neutrinos stériles
- Ces corpuscules complèteraient le bestiaire des particules élémentaires

Carte d'identité du neutrino stérile

ν_s

Composition	Particule élémentaire
Spin	1/2
Charge électrique	0
Charge d'interaction forte	0
Interaction	Aucune
Masse	Inconnue mais non nulle
Oscillation	Possible avec ν_e , ν_μ , ν_τ
Statut	Hypothétique

A quelle masse chercher ?



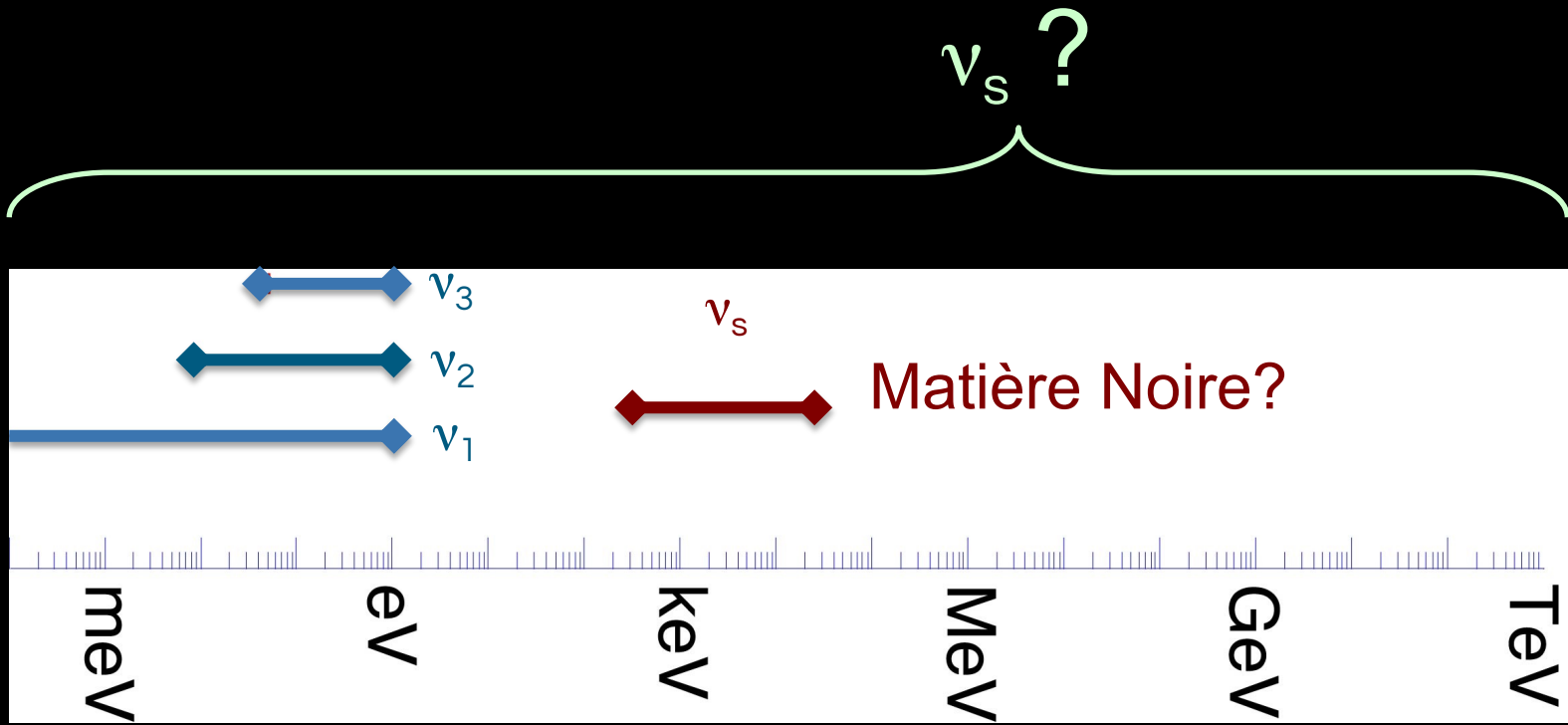
Ces neutrinos expliqueraient un ensemble de données expérimentales accumulées depuis 20 ans mais encore non comprises

électron

proton

Higgs

A quelle masse chercher ?

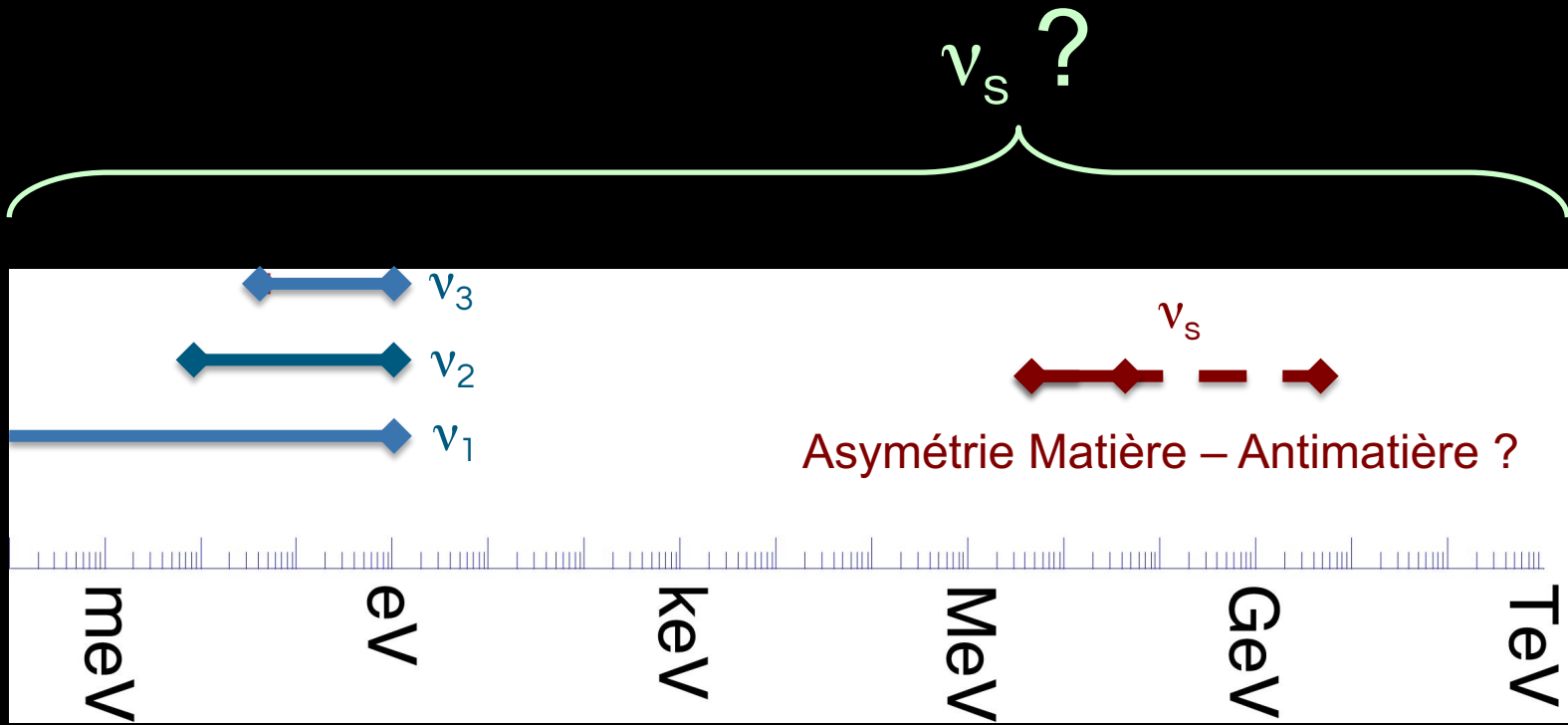


↑
électron

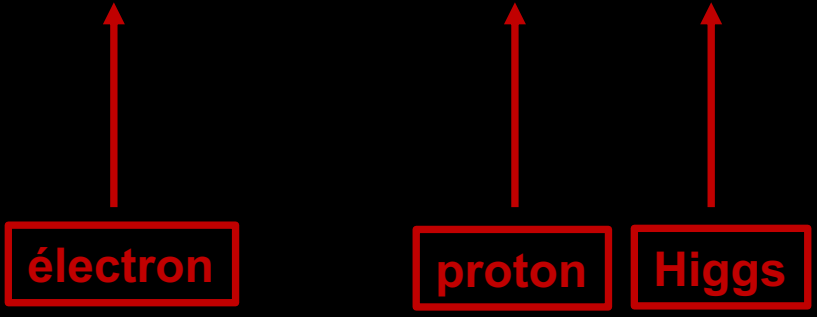
↑
proton

↑
Higgs

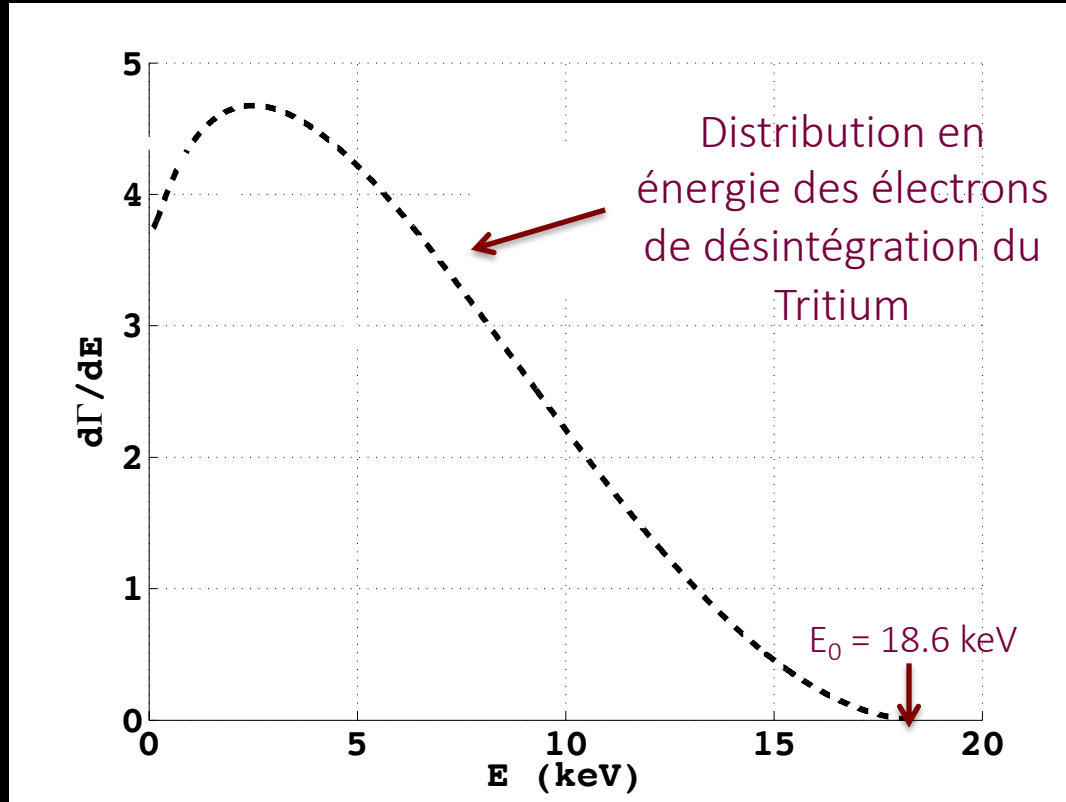
A quelle masse chercher ?



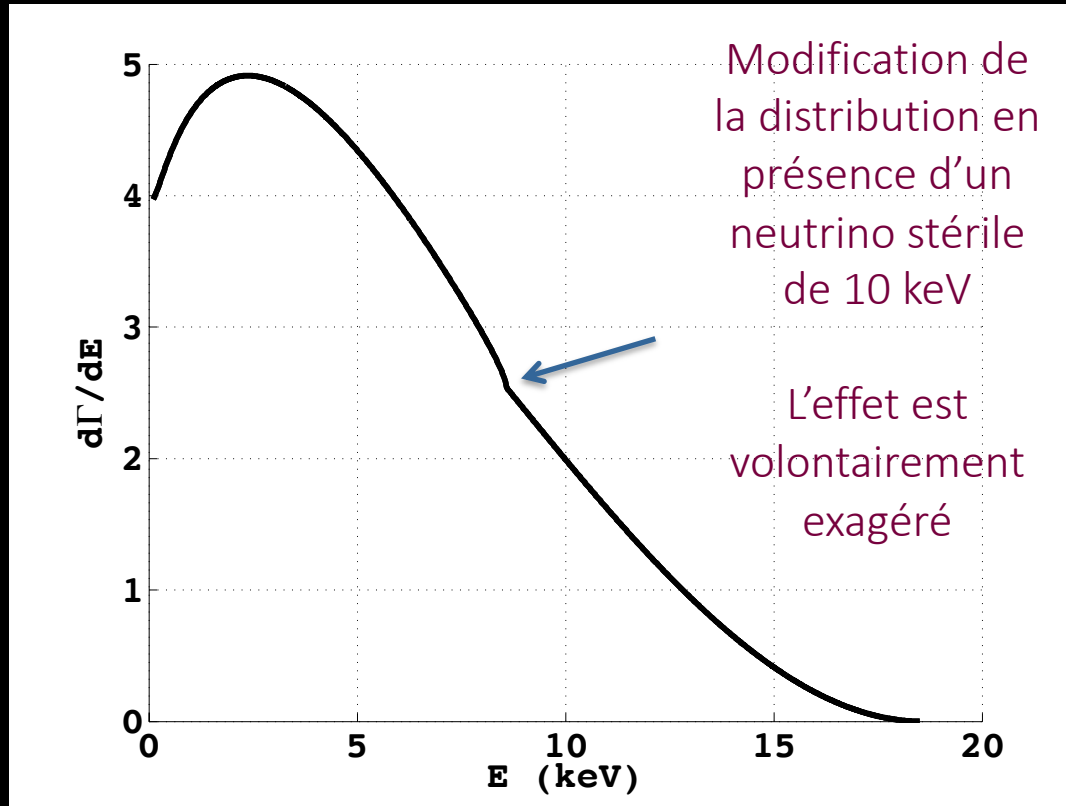
Ces neutrinos pourraient expliquer l'asymétrie matière-antimatière dans l'Univers, au travers d'un mécanisme de Leptogénèse.



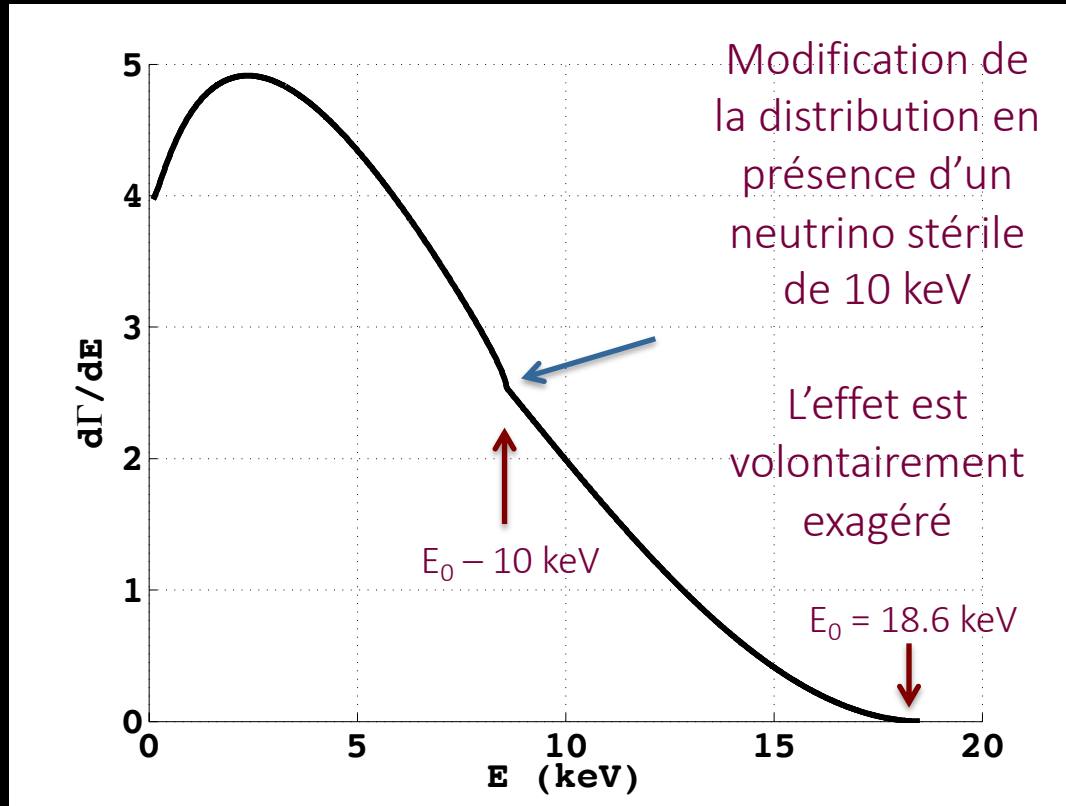
Signal attendu dans KATRIN SANS neutrino stérile



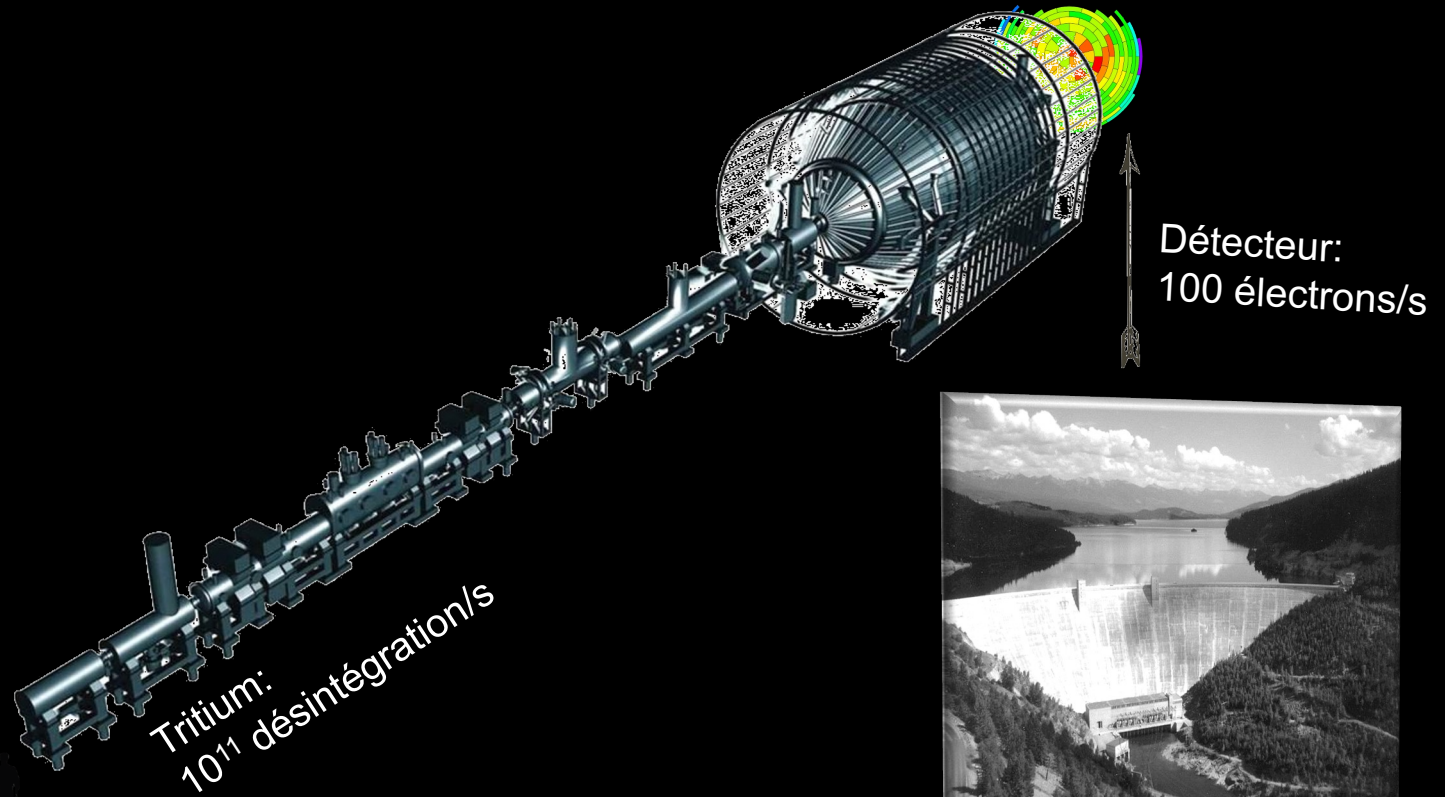
Signal attendu AVEC un neutrino stérile de 10 keV



Signal attendu AVEC un neutrino stérile de 10 keV



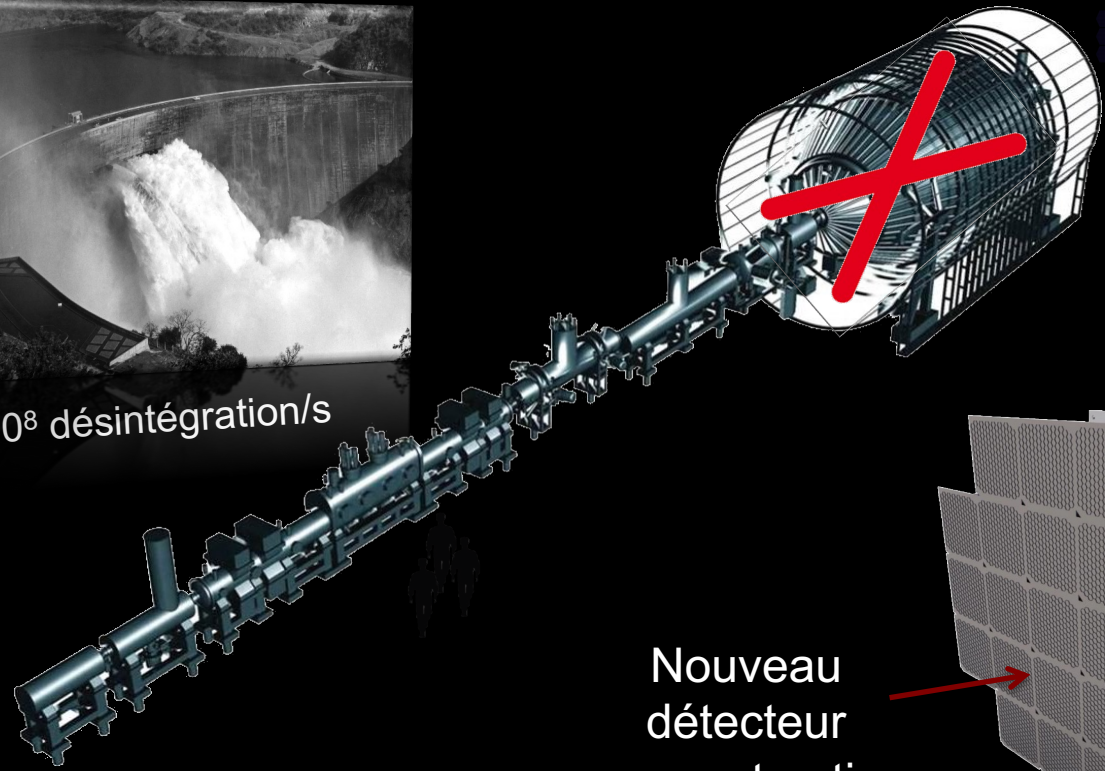
Configuration actuelle de l'expérience KATRIN



Le Projet TRISTAN (2025)

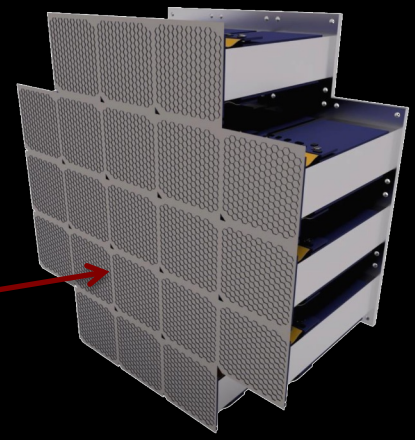


10^8 désintégration/s



10^8 électrons/s

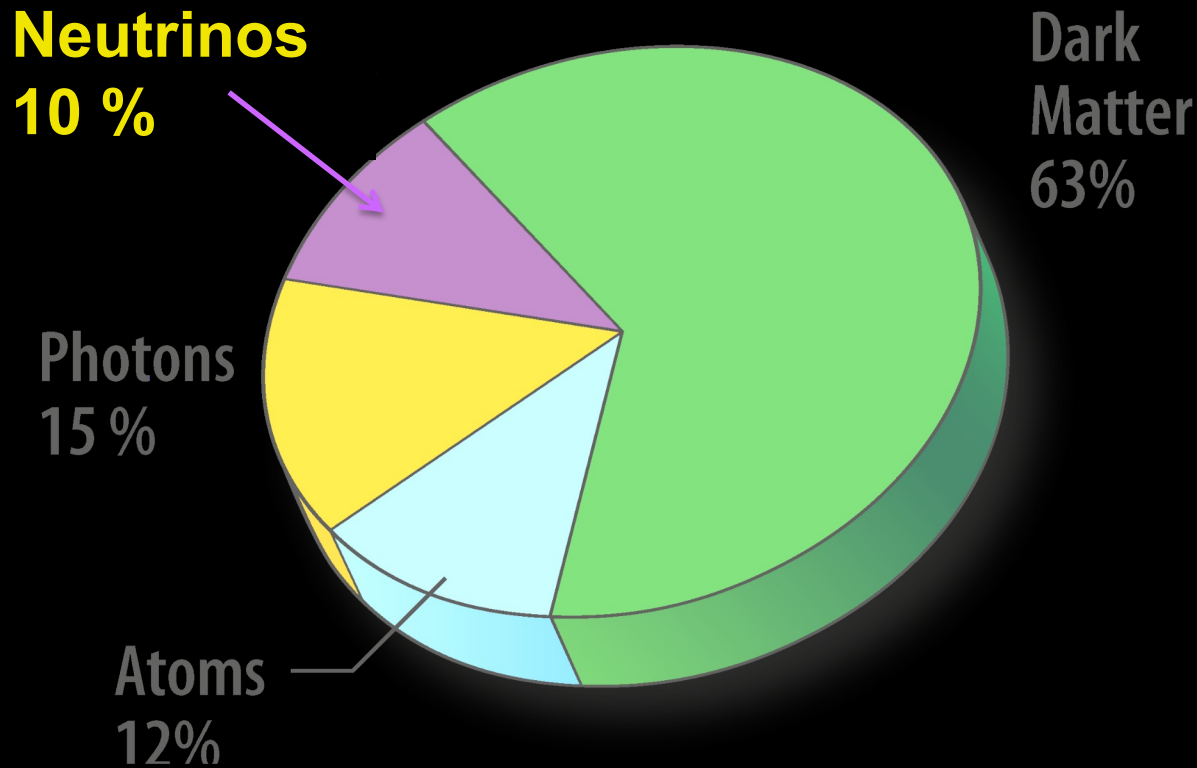
Nouveau détecteur
en construction



Retour vers nos origine: le rôle des neutrinos...

L'Univers âgé de 380,000 ans

Composition énergétique ($E=mc^2$)



Asymétrie Matière - Antimatière

Au moment du **Big-Bang**: autant de matière que d'antimatière



La prépondérance de la matière sur l'antimatière (**1 milliard contre 1**) s'est développée après la création des premières particules

Une différence de comportement entre Neutrino et anti-neutrinos de l'Univers primordial pourrait être à l'Origine de l'excès de Matière: c'est la Leptogénèse

Ce qu'il faut retenir..

1 milliard de neutrinos pour chaque e^- , p, n

Les neutrinos interagissent très ... très faiblement

Les neutrinos ont une masse d'au plus $10^{-6} m_{\text{electron}}$

Les neutrinos oscillent d'une saveur à l'autre

L'Univers est observable au travers des neutrinos

Les neutrinos ont une utilité sociétale

Existe t'il un 4^e neutrino ?

Merci
pour
votre
attention



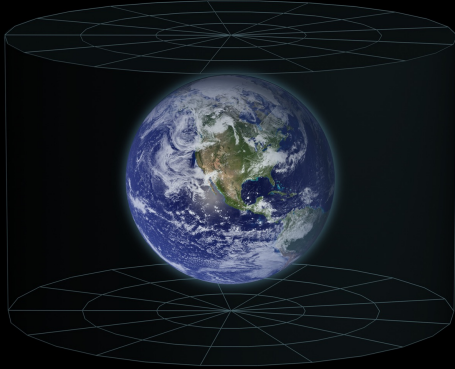
$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i\bar{\psi} \not{D} \psi + \text{h.c.} \\ & + \psi_i Y_{ij} \psi_j \phi + \text{h.c.} \\ & + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)\end{aligned}$$

Merci pour votre attention

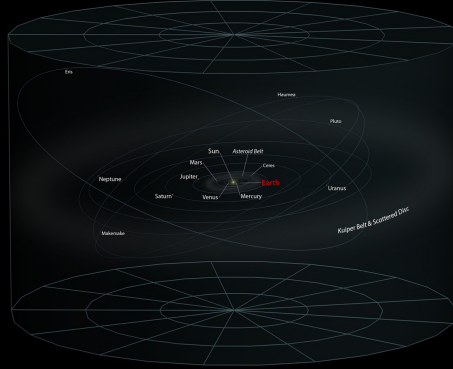
L'Univers et ses constituants

Un Univers structuré

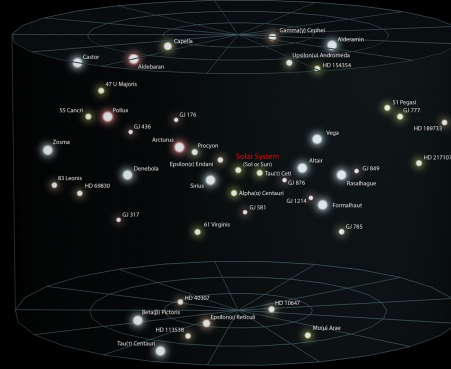
Terre



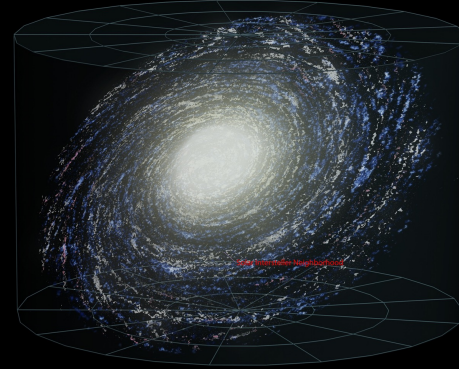
Système Solaire



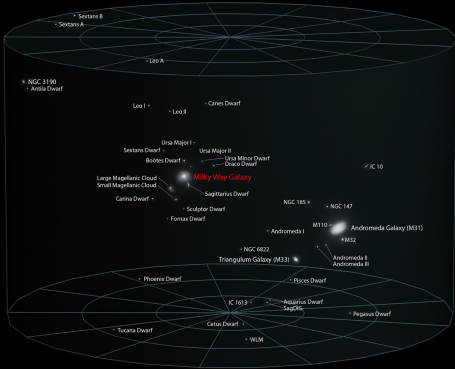
Voisinage solaire



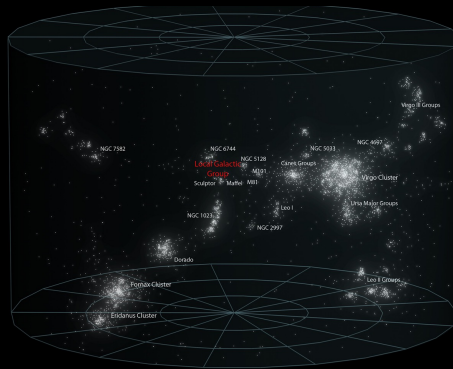
Voie Lactée



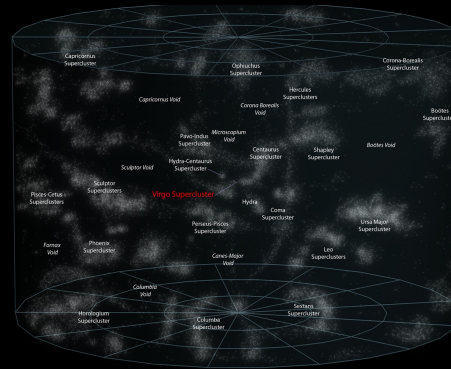
Groupe galactique local



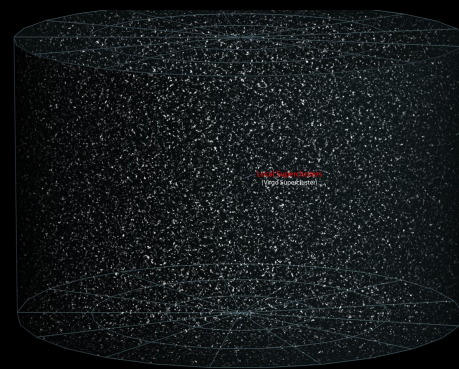
Superamas de Virgo



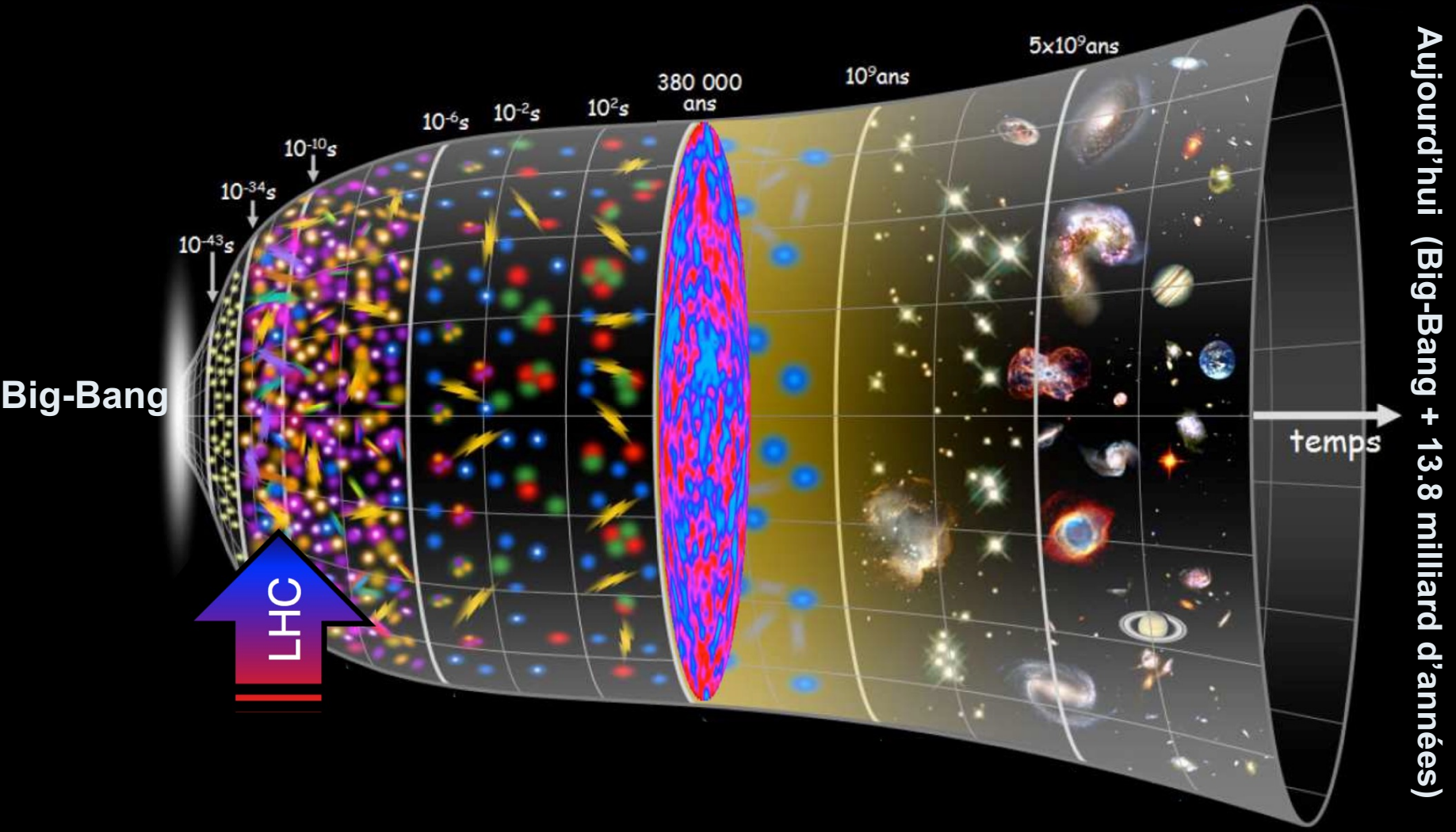
Superamas locaux



Univers observable

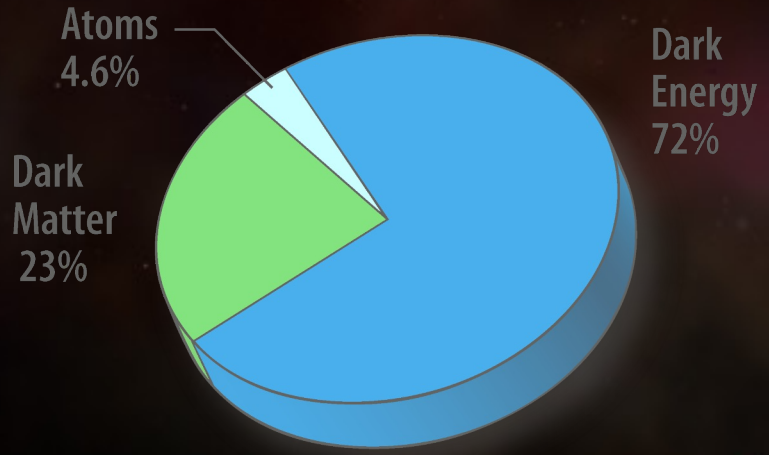


Un Univers en expansion

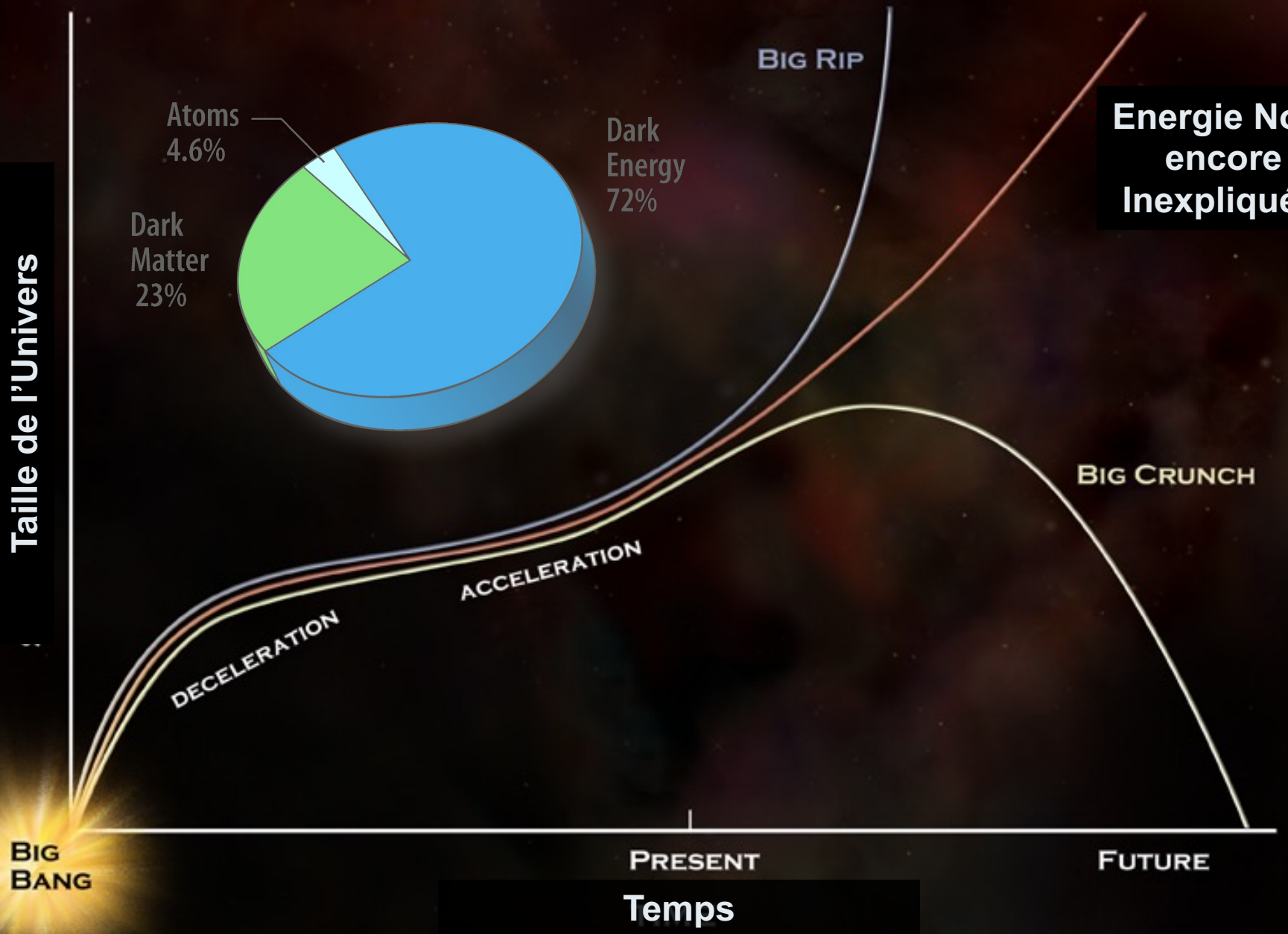


Expansion accélérée... Energie noire

Taille de l'Univers



Energie Noire encore Inexpliqué...



BIG BANG

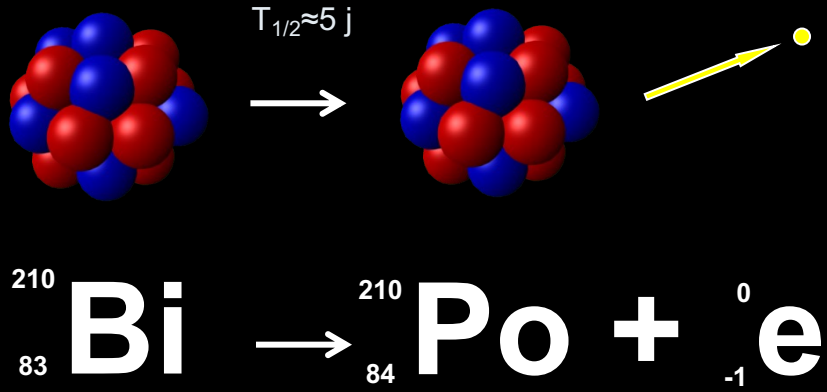
PRESENT

FUTURE

Temps

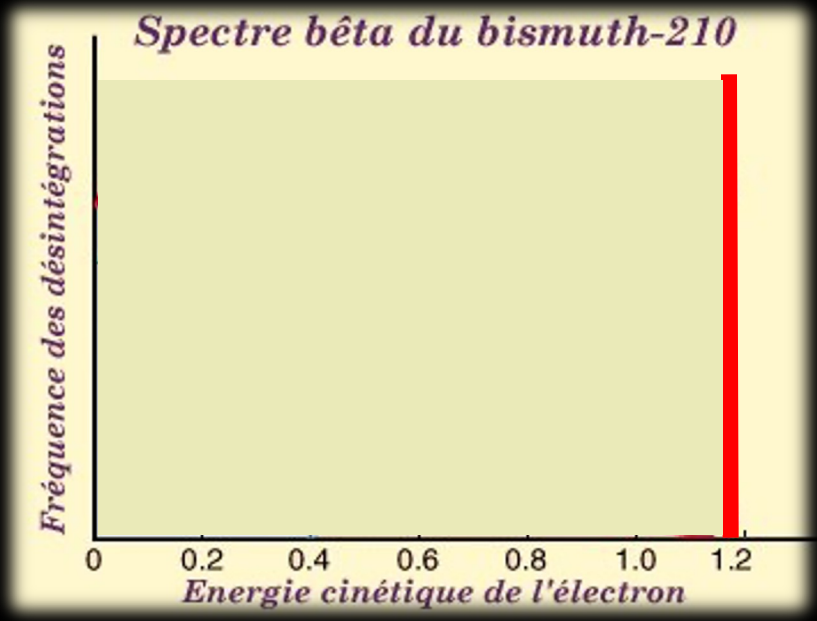
Le paradoxe des désintégrations β

1914: Mesure du spectre de désintégration bêta des noyaux par Chadwick
Un noyau (A,Z) se transforme en un noyau (A,Z+1) avec émission d'un électron

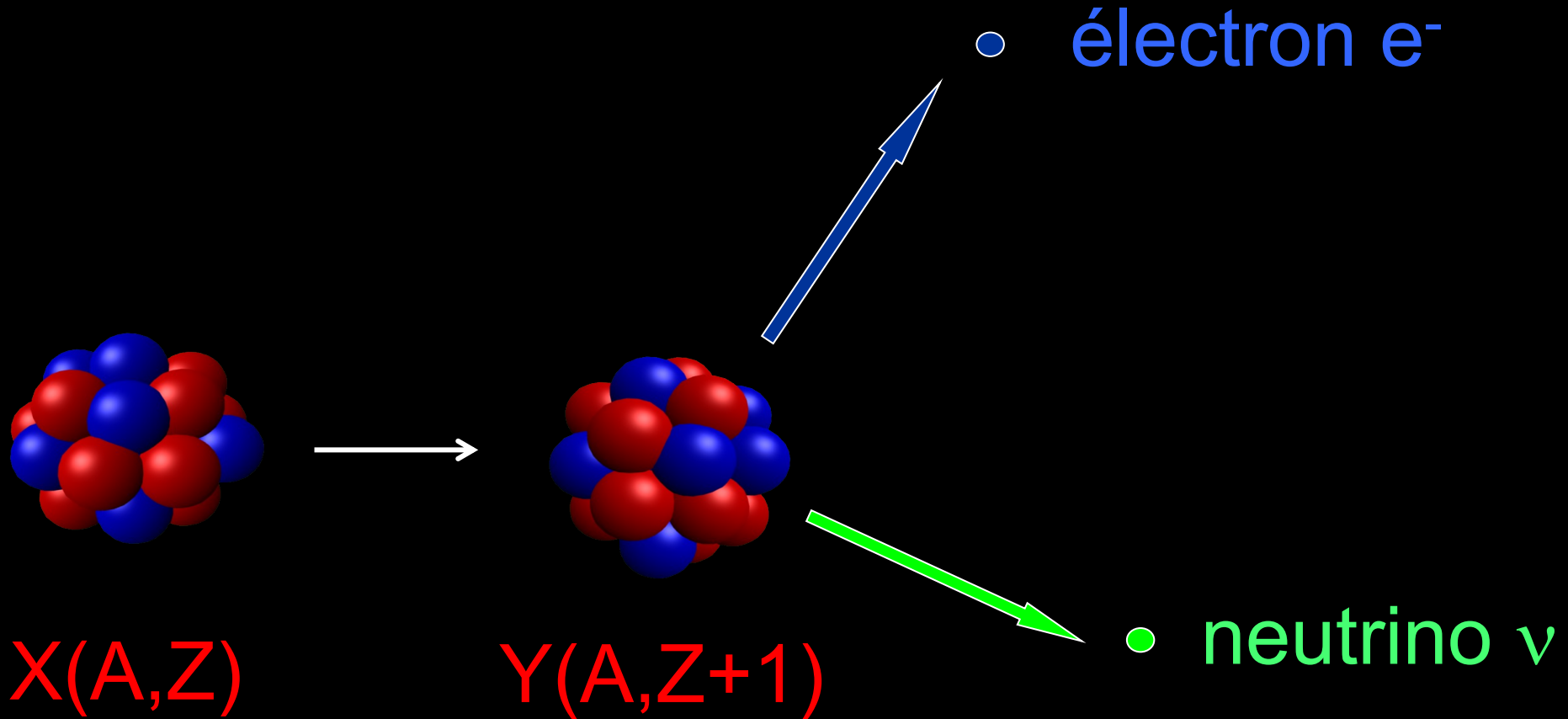


Lois de conservation:

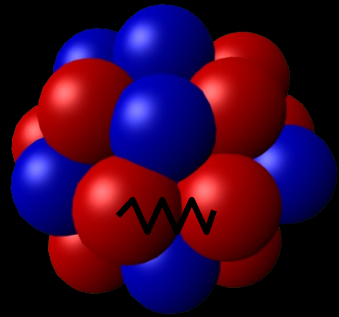
- Energie & Quantité de Mouvement
- Nbx Masse & Charge



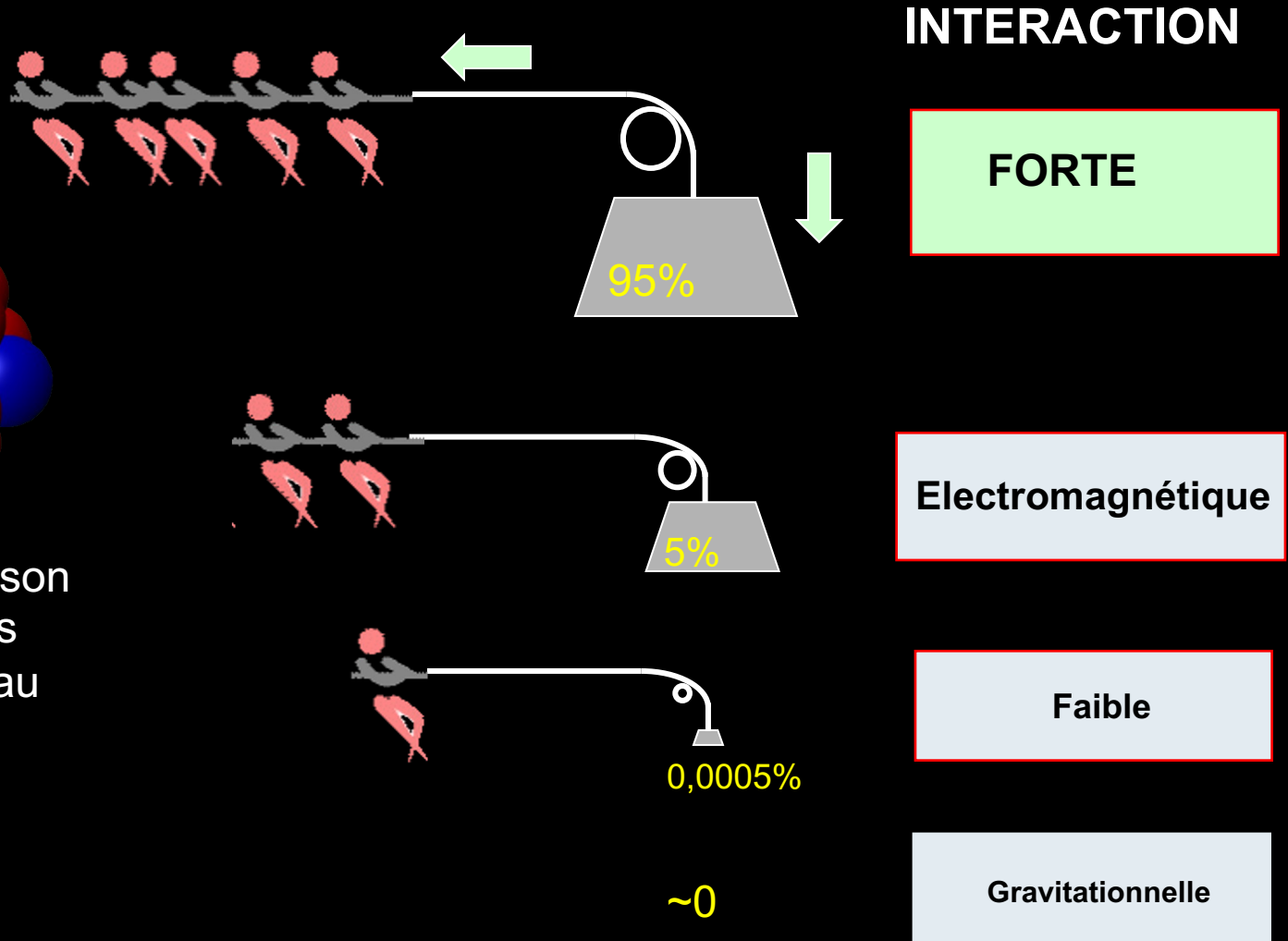
Face cachée des désintégration β



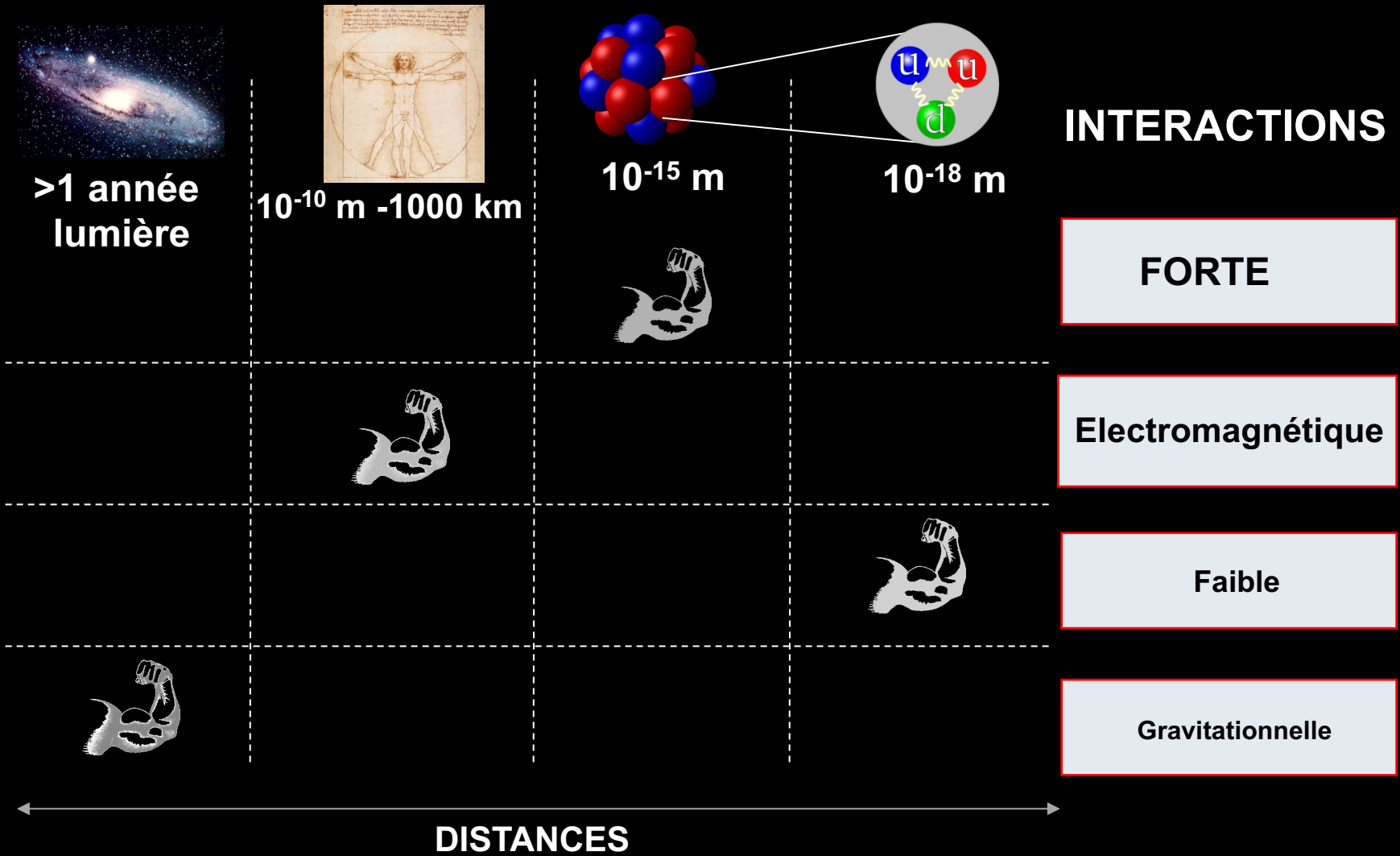
Cohésion d'un noyau atomique



Energie de liaison
de 2 protons
dans un noyau

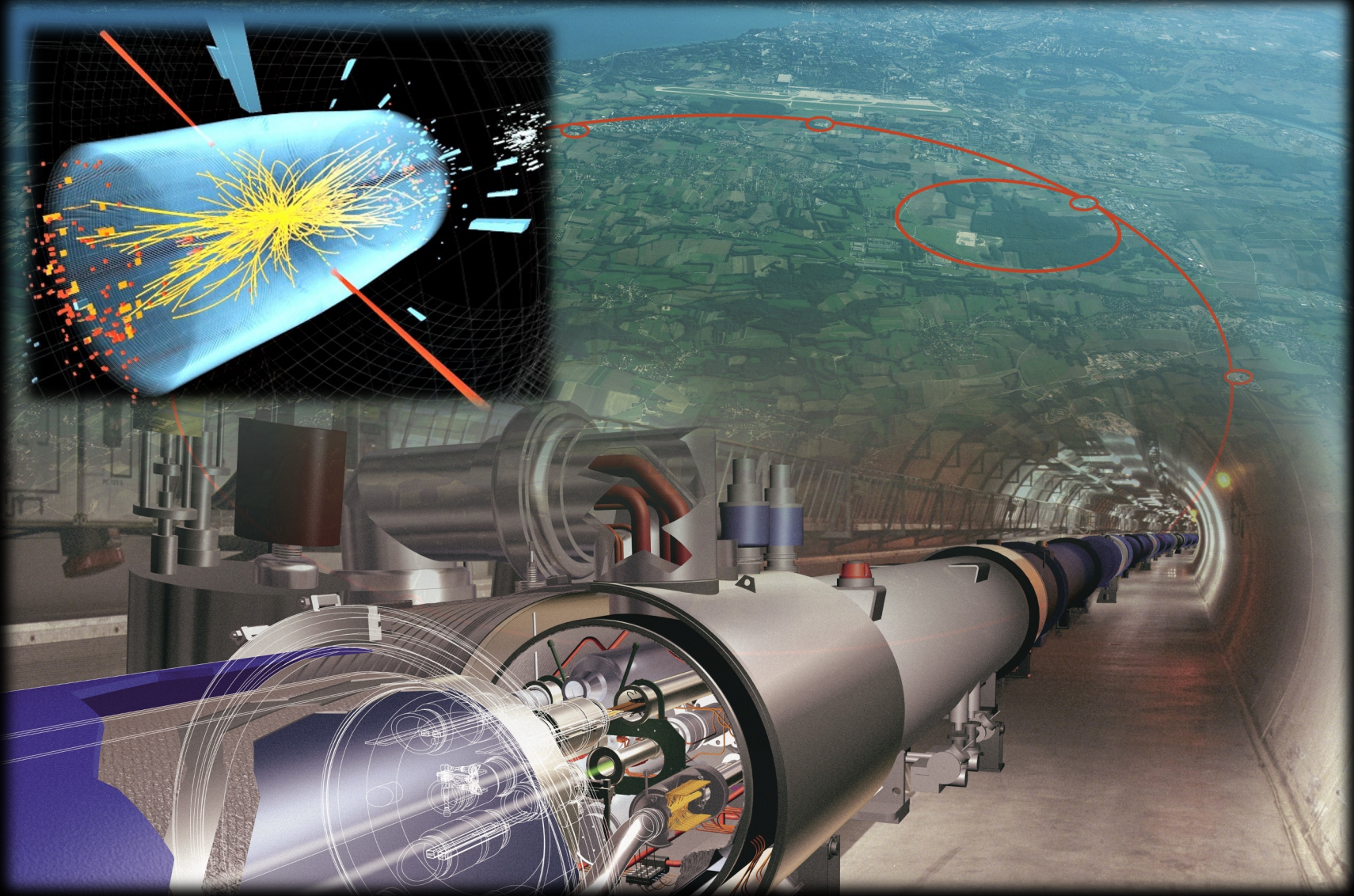


Portée des forces



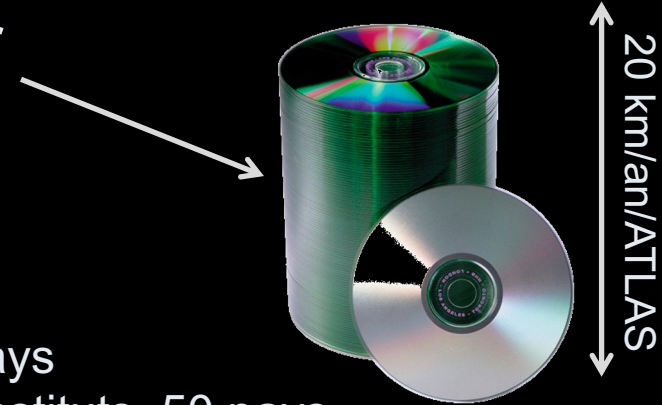
Découverte du Boson de Higgs

Collisions proton – proton au Large Hadron Collider (CERN)



Analyse des Données

- Quantité phénoménale de données à traiter



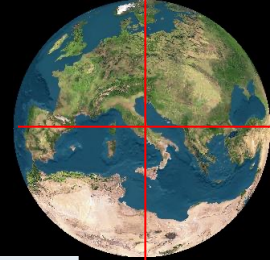
- Analyse des données

- Double Chooz, 150 scientifiques, 35 labos, 8 pays
- ATLAS/CMS (CERN), 5000 scientifiques, 200 instituts, 50 pays

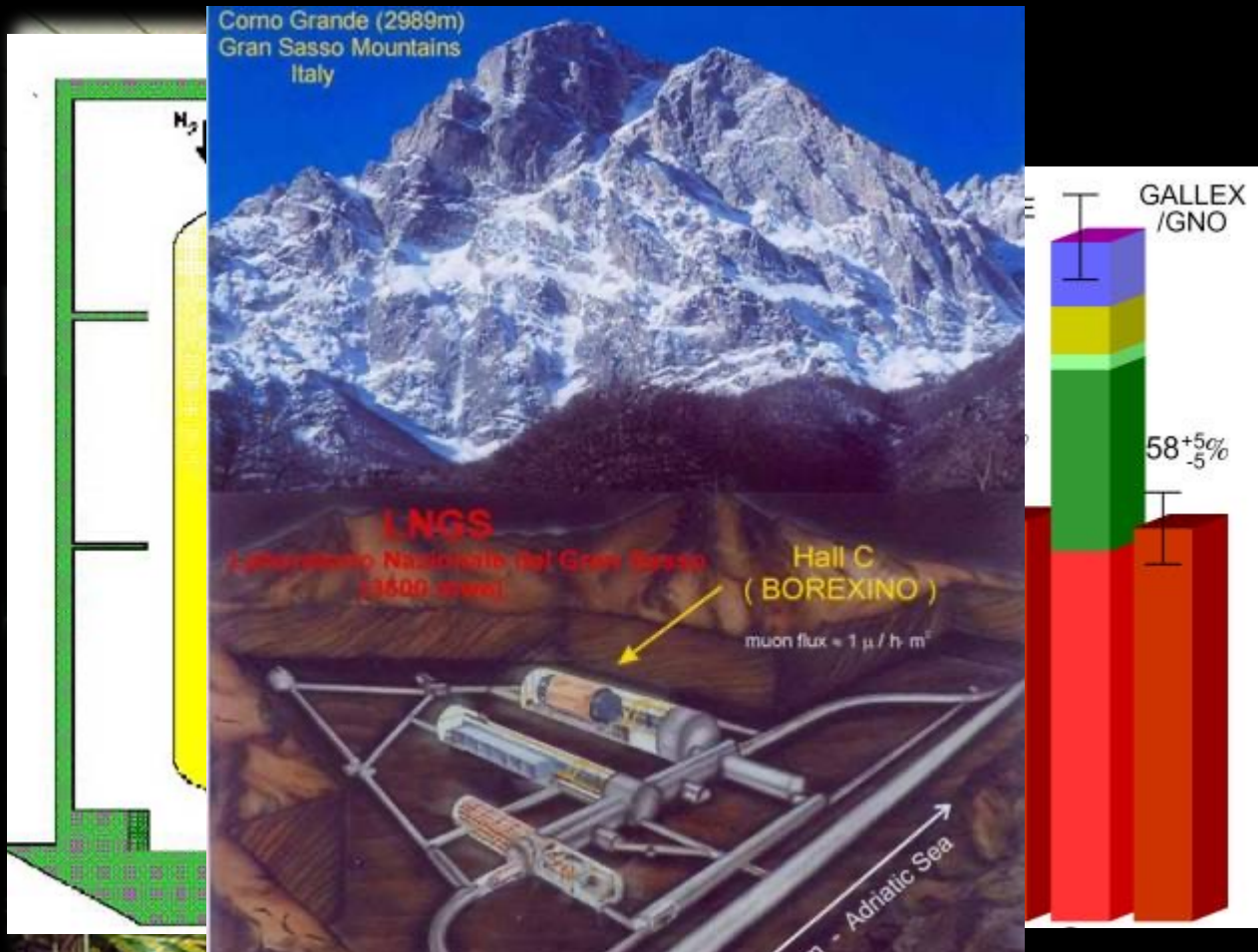
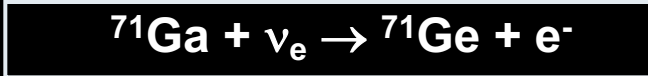




Gallex (1991-2003)

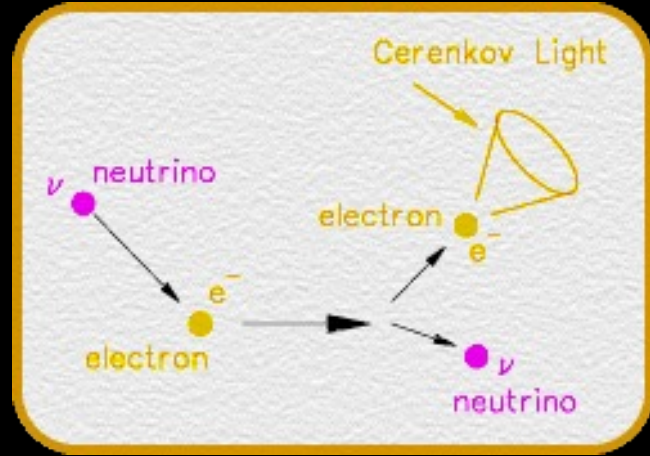
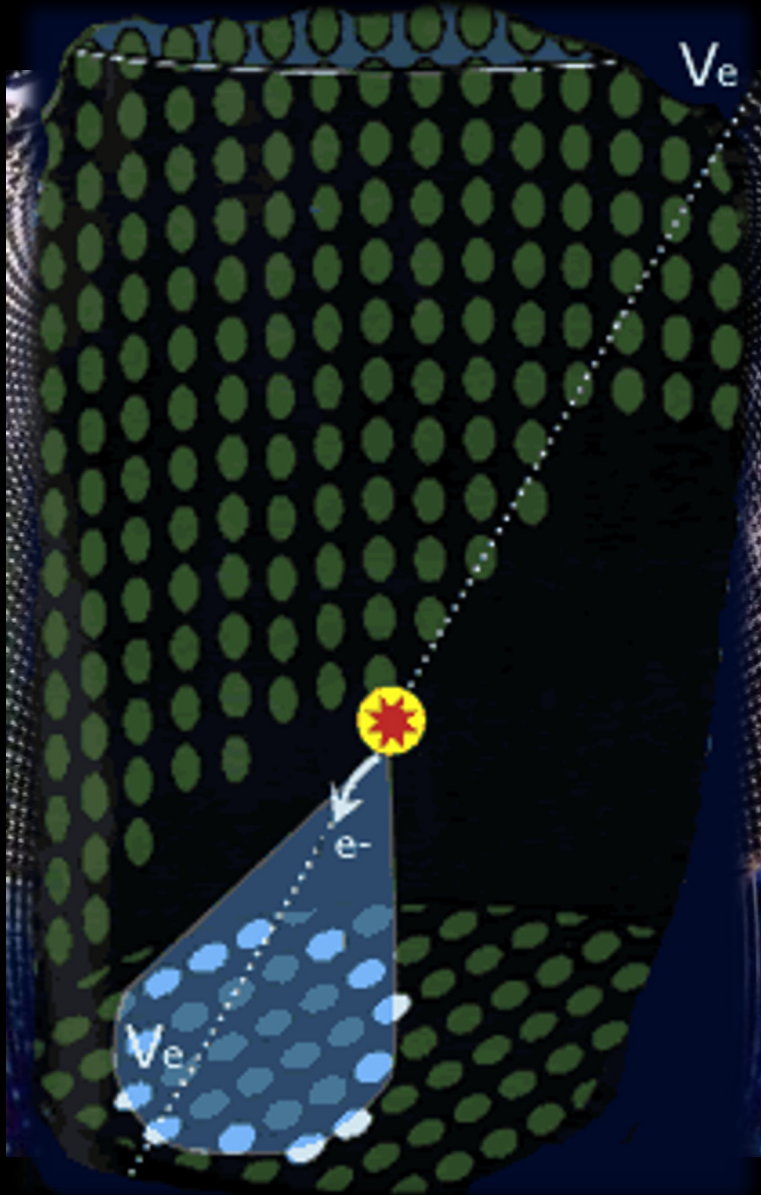
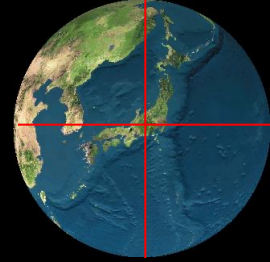


30 tonnes de Gallium (Gran Sasso, Italie)



Première et UNIQUE détection des neutrinos « pp »
preuve des réactions thermonucléaires au cœur du soleil

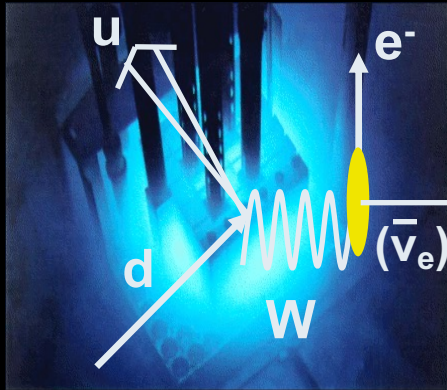
Détecteur Super-Kamiokande



Effet Tcherenkov : émission de lumière causée par le passage d'électrons traversant le détecteur à une vitesse supérieure à celle de la lumière dans ce milieu

$v(e^-, H_2O) \approx c = 300\,000 \text{ km s}^{-1}$
 $v(\gamma, H_2O) \approx c/n = 225\,000 \text{ km s}^{-1}$
 Indice réfraction H_2O : $n = 1.33$

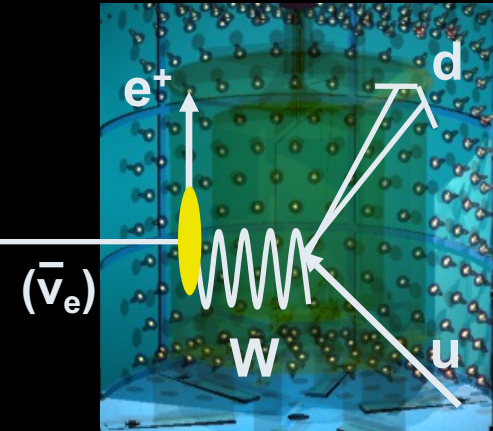
Oscillation de neutrinos à Chooz



Production dans le cœur du réacteur

Saveur purement électronique

$\bar{\nu}$



Détecteur de Neutrinos

Mélange:
Fraction électronique?
Fraction muonique?
Fraction tauique?

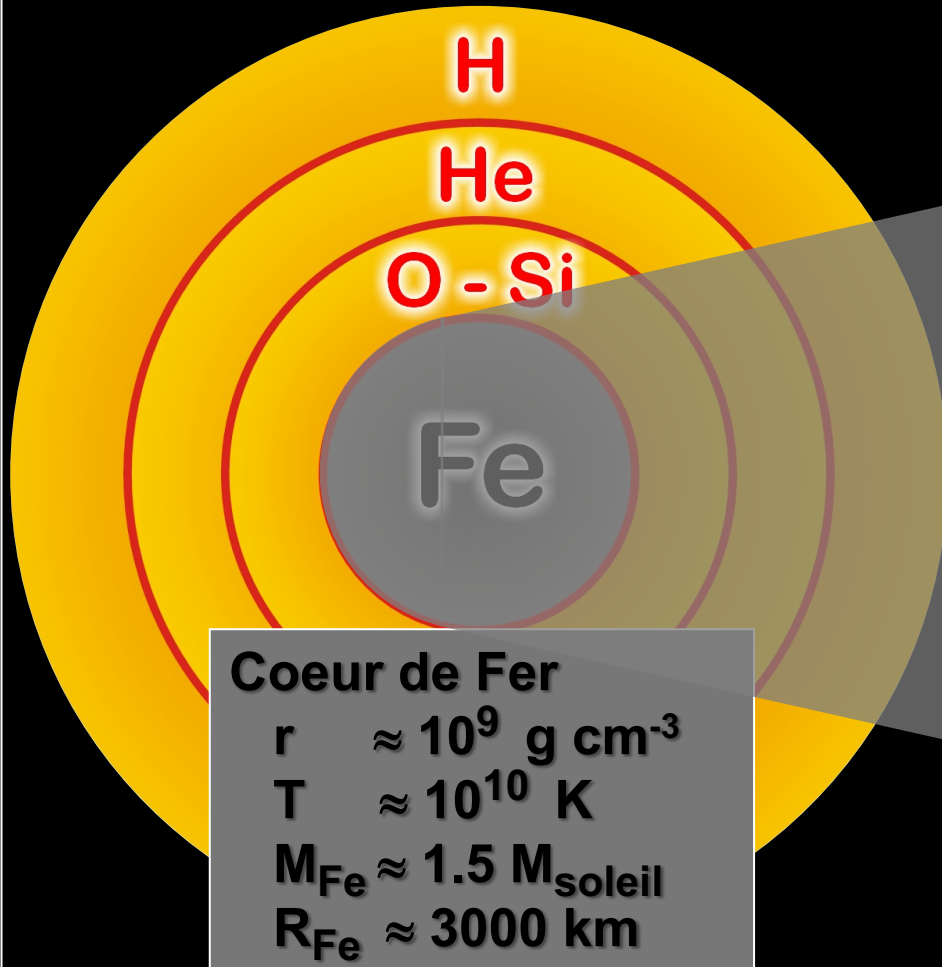
$t_{\text{création}}$

Distance parcourue depuis sa création

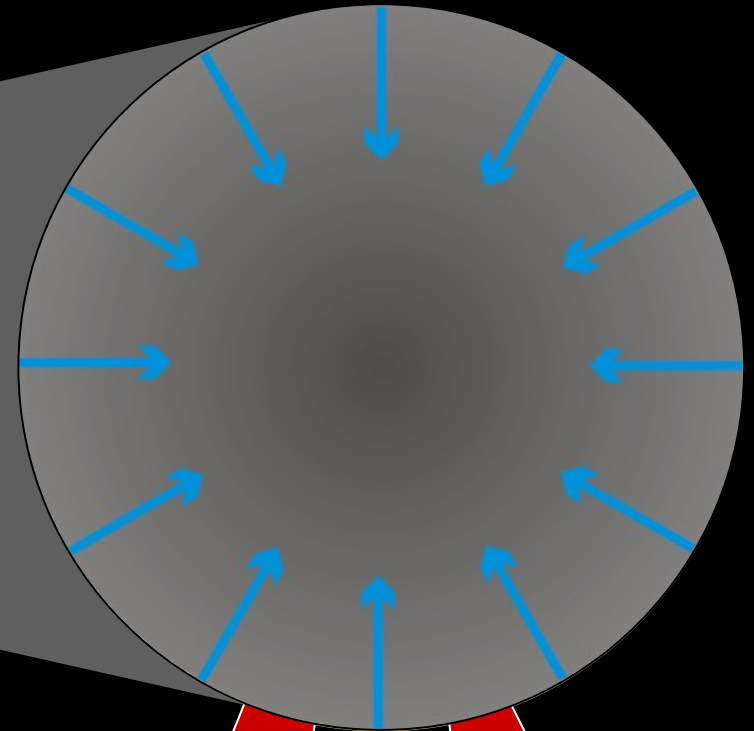
$t_{\text{détection}}$

Effondrement d'une étoile

Structure en pelure d'oignon



Effondrement



**Fusion de
L'hélium**

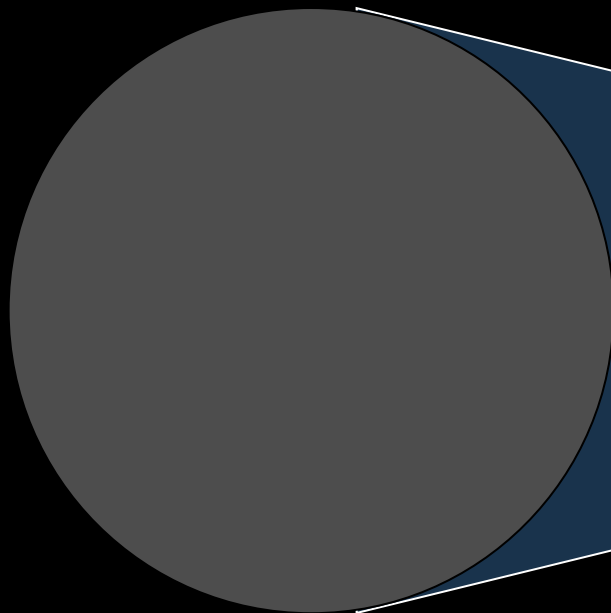
**Fusion de
L'hydrogène**

Supernova

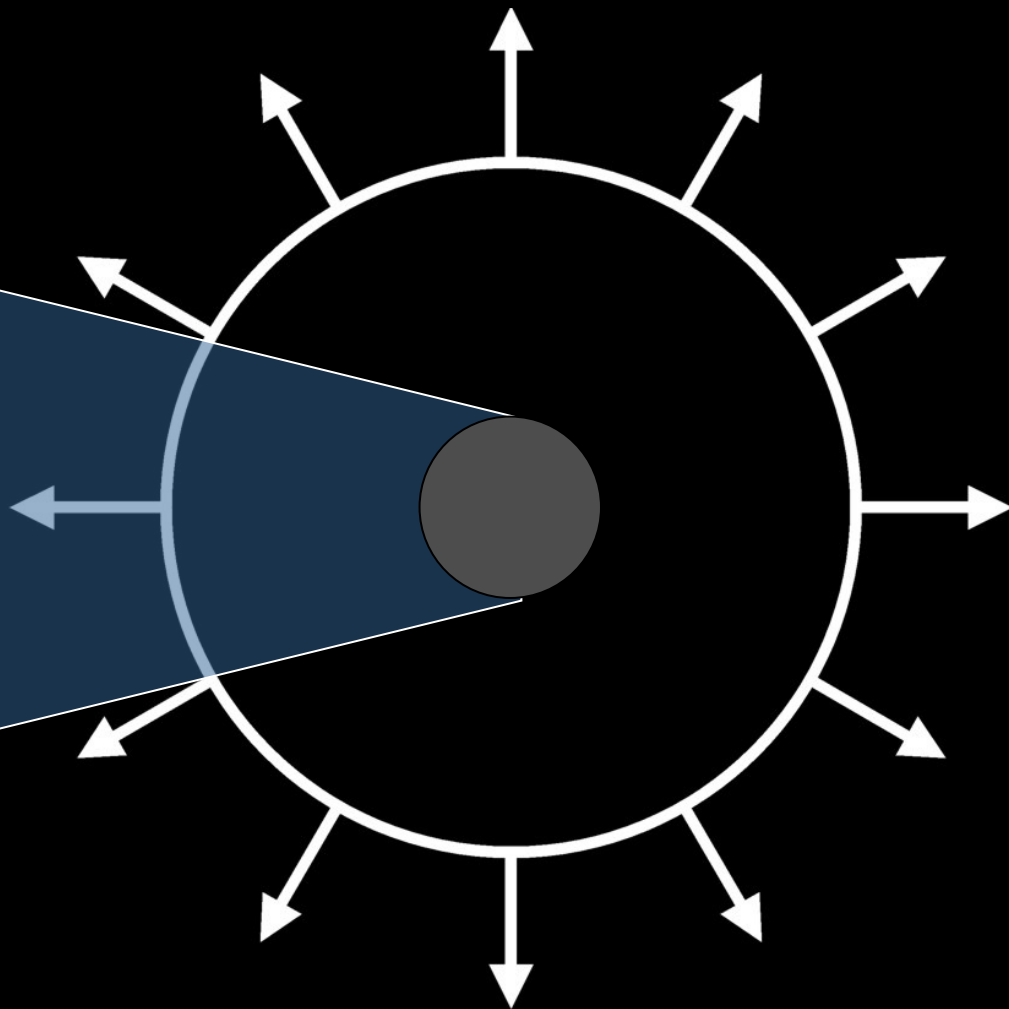
Naissance d'une étoile à neutrons

Explosion

50 km



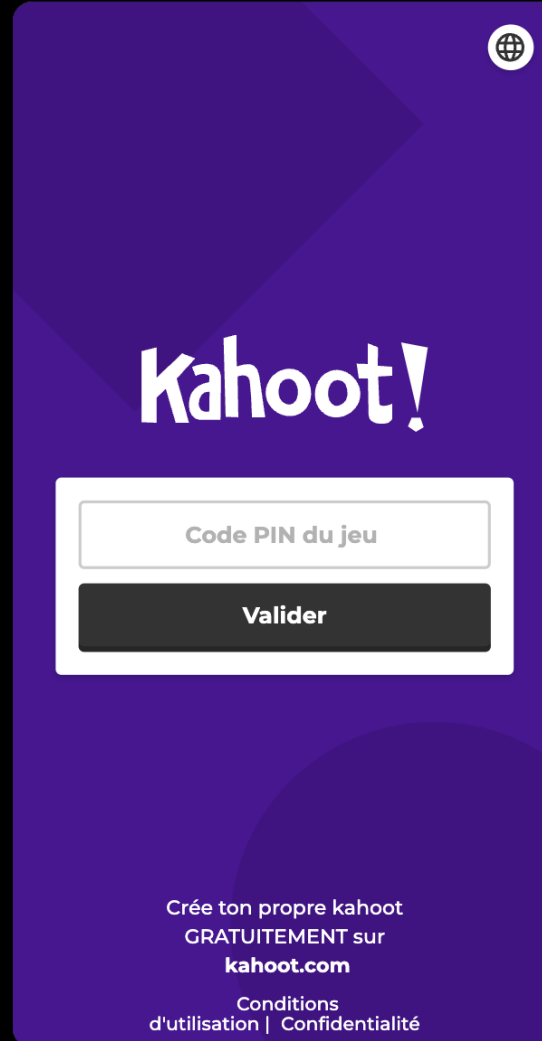
proto-étoile à neutron
densité: $10^{14} \text{ g cm}^{-3}$



Quiz Kahoot

1) sur votre
téléphone,
tablette,
ordinateur:

www.kahoot.it



Kahoot!

Code PIN du jeu

Valider

Crée ton propre kahoot
GRATUITEMENT sur
kahoot.com

Conditions
d'utilisation | Confidentialité

2) code PIN
(à venir)

+

3) valider

+

4) entrer votre
pseudo

+

5) valider