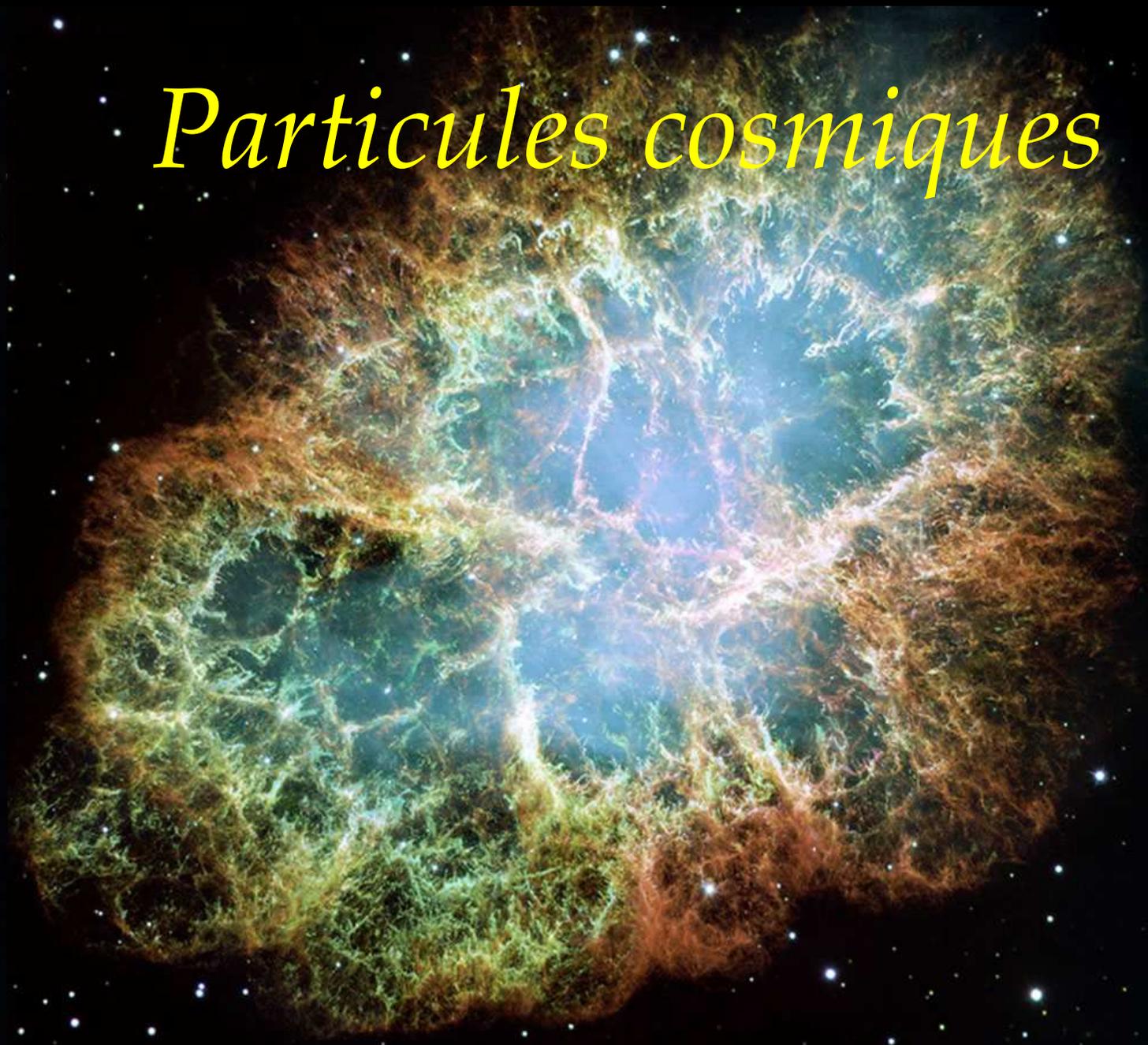
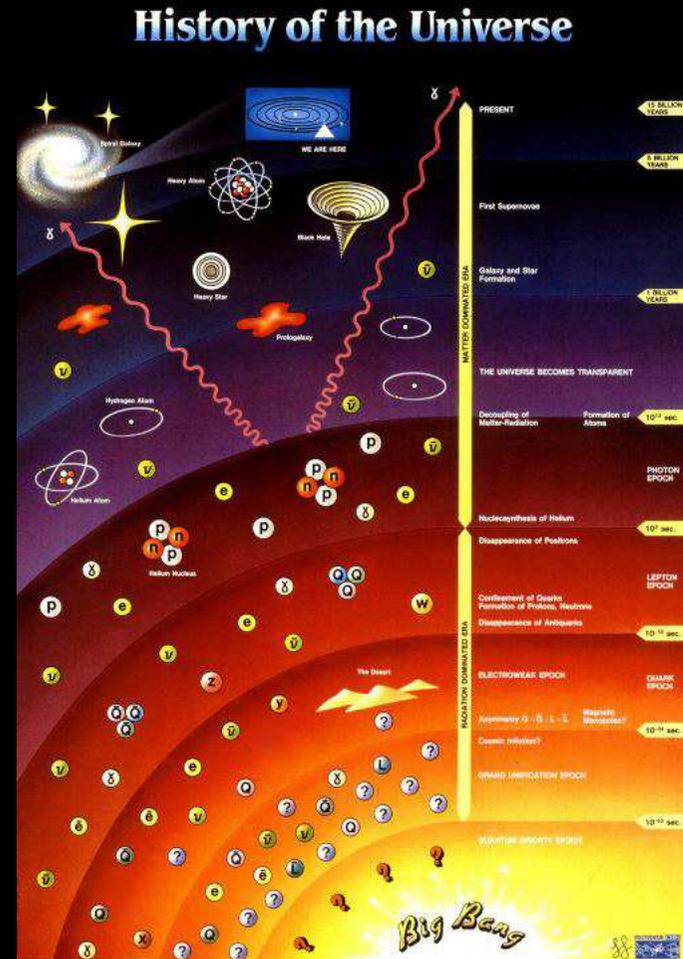
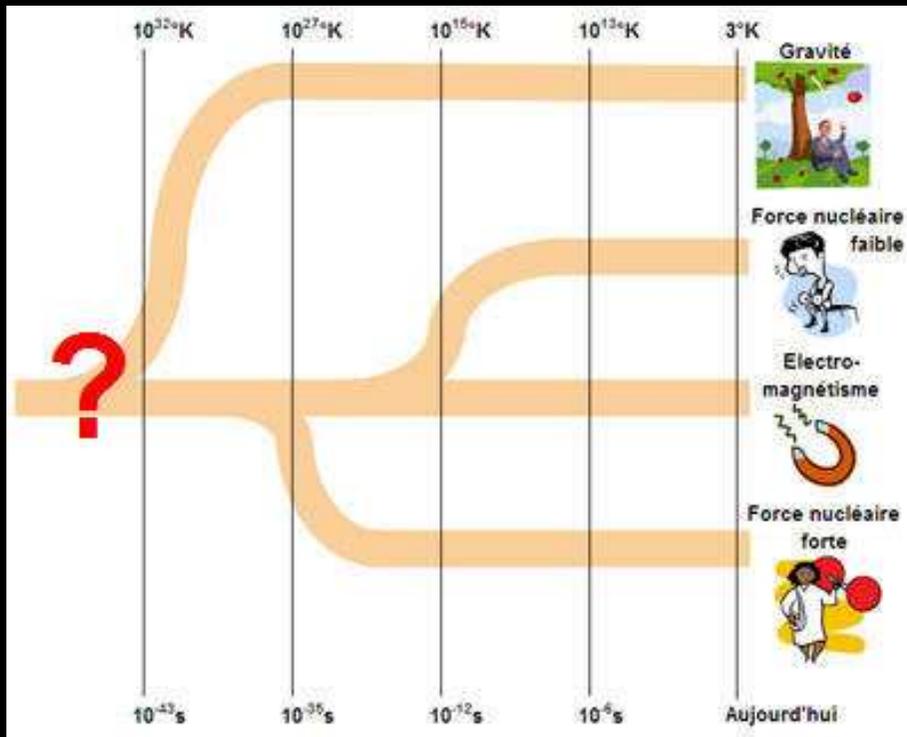


# *Particules cosmiques*



# Les 4 forces fondamentales



### La force électromagnétique

Sans elle, pas d'électricité, pas d'aimant, pas de lumière ! Sélective, l'interaction électromagnétique n'agit qu'entre les particules électriquement chargées. Par exemple, au sein des atomes : les protons des noyaux (de charge « + ») et les électrons (de charge «-») qui tournent autour, s'attirent mutuellement, assurant la cohésion de l'ensemble. Inversement, deux charges de même signe se repoussent.

### La force forte

Comme son nom l'indique, c'est la plus puissante des quatre interactions fondamentales, mais sa portée est si réduite qu'elle n'agit qu'au cœur des noyaux. C'est elle qui assure la cohésion de toutes les particules composées de quarks, et donc des protons et neutrons qui s'agglutinent dans les noyaux atomiques. Une sorte de colle très forte, en fait, qui agit par l'intermédiaire de petites particules justement appelées gluons.

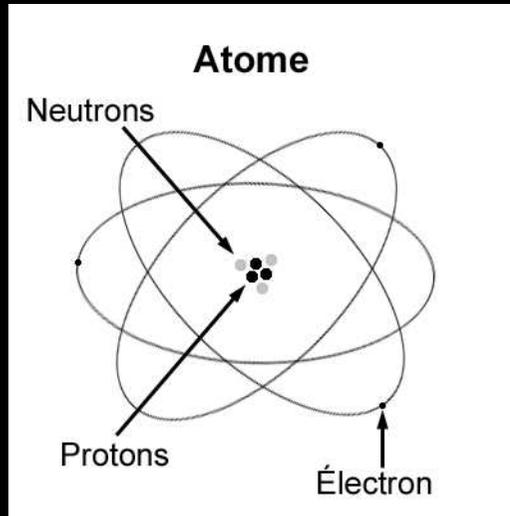
### La force faible

On dit qu'elle est faible car elle est 100 000 fois moindre que l'interaction forte. C'est elle qui est responsable de la radioactivité bêta (désintégration). Ce qui veut dire qu'elle peut modifier la nature d'un quark, alors des neutrons peuvent spontanément devenir des protons, l'inverse étant possible mais plus rare. Ceci est un phénomène indispensable aux étoiles pour briller.

### La gravitation

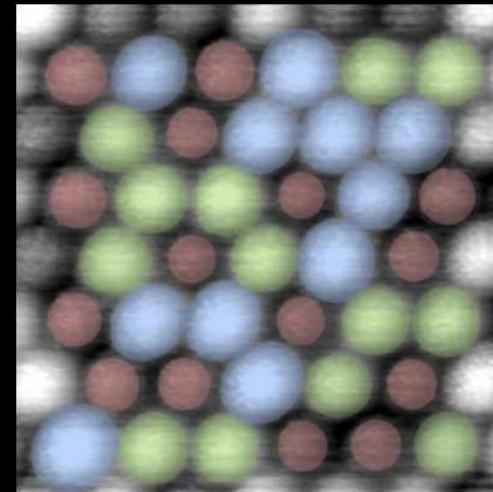
Elle se résume ainsi : deux corps massifs s'attirent l'un vers l'autre en proportion de leur masse et d'autant plus si ils sont proches. Cette force est très surprenante : c'est la plus faible des quatre interactions mais c'est aussi celle qui a la plus grande portée. Elle est responsable de la formation des planètes, des étoiles et autres galaxies.

# De quoi est constituée la matière ?

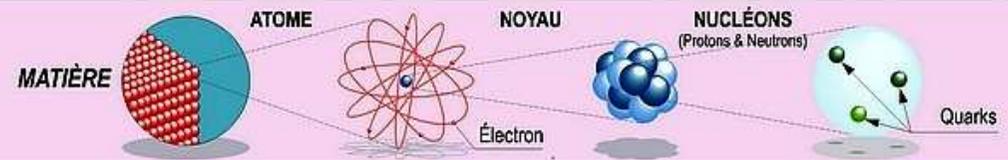


- Toute la matière est constituée d'atomes.
- Un atome est composé d'un noyau, le nucléon, (formé de neutrons et de protons), autour duquel tourne des électrons.
- Le nombre de protons détermine le numéro atomique et le nombre de neutrons l'isotope.
- Le noyau d'un atome concentre 99.9 % de sa masse.
- Les électrons évoluent dans un nuage 40000 fois plus étendu que le noyau.

- Il y a le même nombre d'électrons que de protons dans un atome
- La taille d'un atome est d'environ  $10^{-10}$  m. Il y a par exemple, environ « 11 milliards de milliards d'atomes dans 1 mg de fer.



## • TABLEAU DES PARTICULES ÉLÉMENTAIRES DANS LE CADRE DU MODÈLE STANDARD •



FERMIONS		LEPTONS		QUARKS	
		peuvent se déplacer librement		prisonniers de particules plus grandes, ils ne sont pas observés individuellement.	
<p>La matière ordinaire est composée de particules de ce groupe</p> <p>Pour la plupart, ces particules étaient présentes juste après le Big Bang. Aujourd'hui, on ne les trouve que dans les rayons cosmiques et auprès des accélérateurs.</p>	<p><b>Première Famille</b></p> <p><b>ELECTRON</b> Responsable de l'électricité et des réactions chimiques. Sa charge est -1.</p> 	<p><b>NEUTRINO ELECTRON</b> Sans charge électrique et interagissant rarement avec le milieu environnant.</p> 	<p><b>BAS</b> Sa charge électrique est - 1/3e. Le Proton en contient 1, le Neutron 2.</p> 	<p><b>HAUT</b> Sa charge électrique est + 2/3e. Le Neutron en contient 1, le Proton 2.</p> 	
	<p><b>Deuxième Famille</b></p> <p><b>MUON</b> Un compagnon plus massif de l'électron.</p> 	<p><b>NEUTRINO MUON</b> Propriétés similaires à celles du Neutrino électron.</p> 	<p><b>ETRANGE</b> Un compagnon plus lourd du "Bas".</p> 	<p><b>CHARME</b> Un compagnon plus lourd du "Haut".</p> 	
	<p><b>Troisième Famille</b></p> <p><b>TAU</b> Un compagnon encore plus lourd que le Muon.</p> 	<p><b>NEUTRINO TAU</b> Propriétés similaires à celles du Neutrino électron.</p> 	<p><b>BEAUTÉ</b> Un compagnon encore plus lourd du "Bas".</p> 	<p><b>VÉRITÉ ou TOP</b> Hypothétique jusqu'en 1995, un compagnon encore plus lourd du "Haut".</p> 	
<p><b>BOSONS VECTEURS</b> Particules fondamentales qui assurent la transmission des forces de la nature.</p>	<p><b>PHOTON</b> Grain élémentaire de la lumière porteur de la force électromagnétique.</p> 	<p><b>GLUON</b> Porteur de la force "forte" entre Quarks.</p> 	<p><b>BOSONS INTERMÉDIAIRES : W<sup>+</sup>, W<sup>-</sup> et Z<sup>0</sup></b> Porteurs de la force "faible", responsables de certaines formes de désintégrations radioactives.</p> 		
<p><b>BOSON DE HIGGS ?</b></p> <p>Hypothétique</p>	<p><b>Responsable de la "brisure de symétrie électro-faible"</b></p> 		<p><b>GRAVITON ?</b></p> <p>Hypothétique</p>		

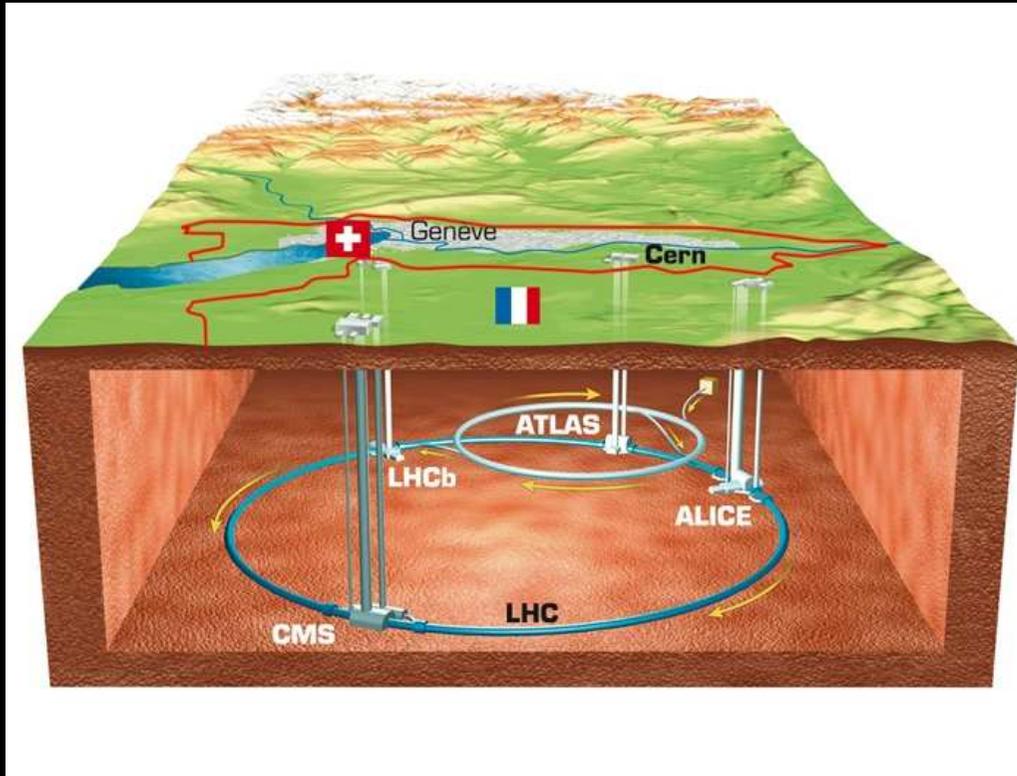
Daniel BONNÉROUÉ - CEA/DSM/DAFNA/In2P2 1992 (MAJ sept. 2005)

Les particules élémentaires sont les ingrédients de la matière. Elles sont appelées élémentaires, car elles ne sont pas constituées d'autres particules. Les particules élémentaires sont classées en deux familles : les fermions et les bosons, au nombre de 12 chacun.

Tout ce qui nous entoure est donc constitué de particules de matière : les quarks et les leptons.

Il s'agit ici du modèle standard, mais il ne constitue pas une théorie complète, car il ne décrit pas la force de gravitation et dépend de l'existence du boson de Higgs. Sans compter le problème de l'antimatière...

# Le LHC



27 km de diamètre ; 100 m sous terre ; accélération de protons de très haute énergie et d'ions à une vitesse très proche de celle de la lumière., guidés par de puissants aimants supraconducteurs. Les détecteurs sont capables de voir jusqu'à 600 millions de collisions/s.

Le plus puissant des accélérateurs de particules en service. Il doit permettre de valider le modèle standard, recréer les premiers instants de l'Univers, donner des pistes sur la matière noire et l'origine de la masse des particules élémentaires : le fameux boson de Higgs.

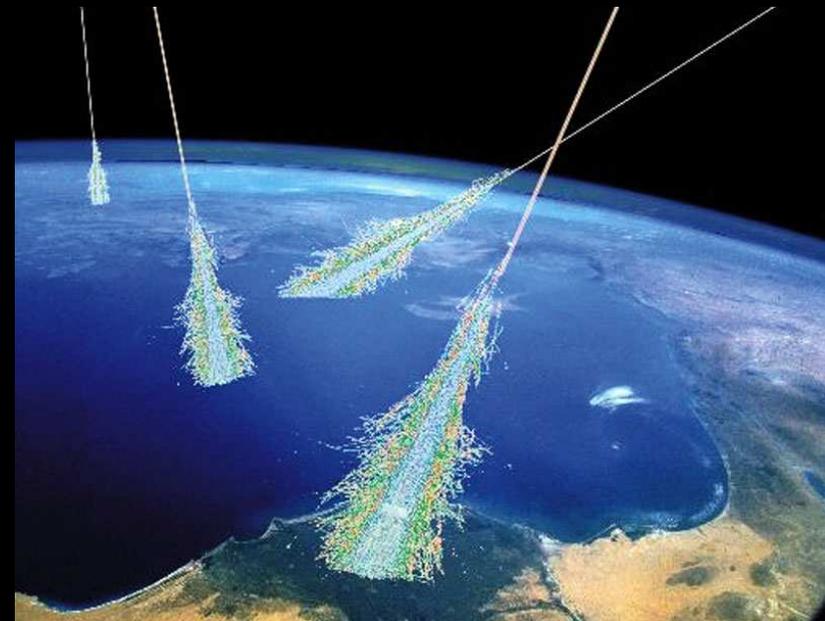
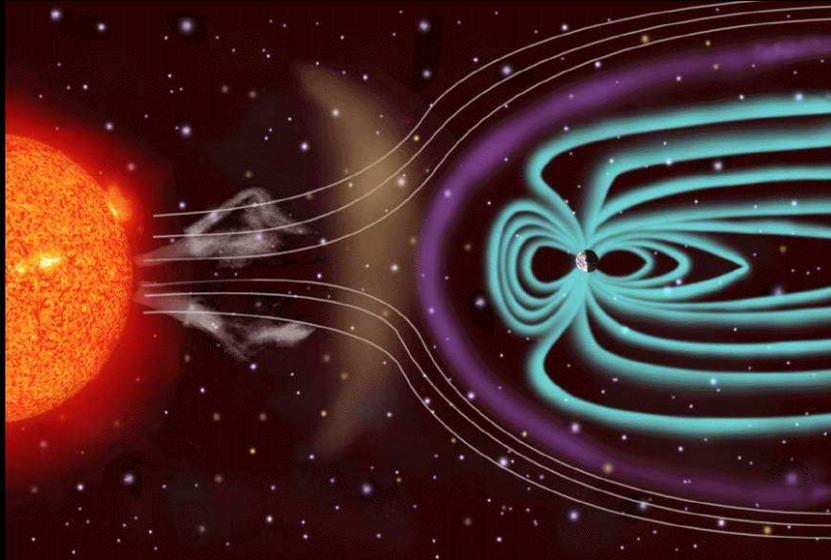
# Quelques particules venues du cosmos

Le vent solaire

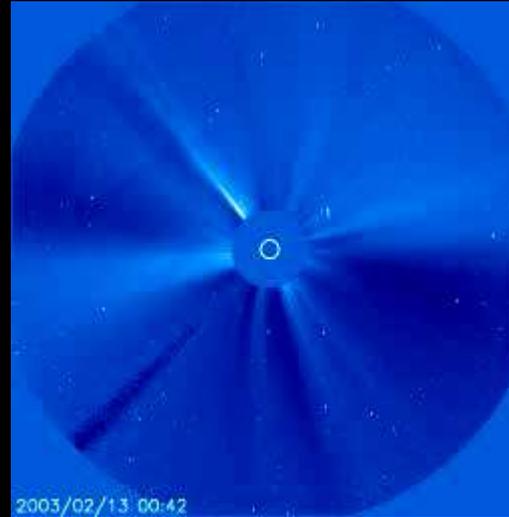
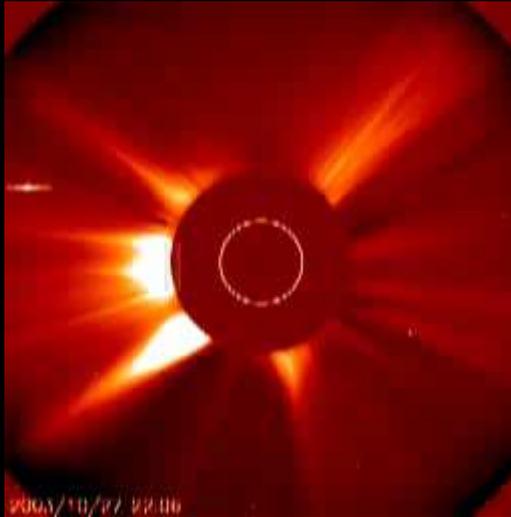
Les neutrinos

Les rayons cosmiques

Les ondes gravitationnelles



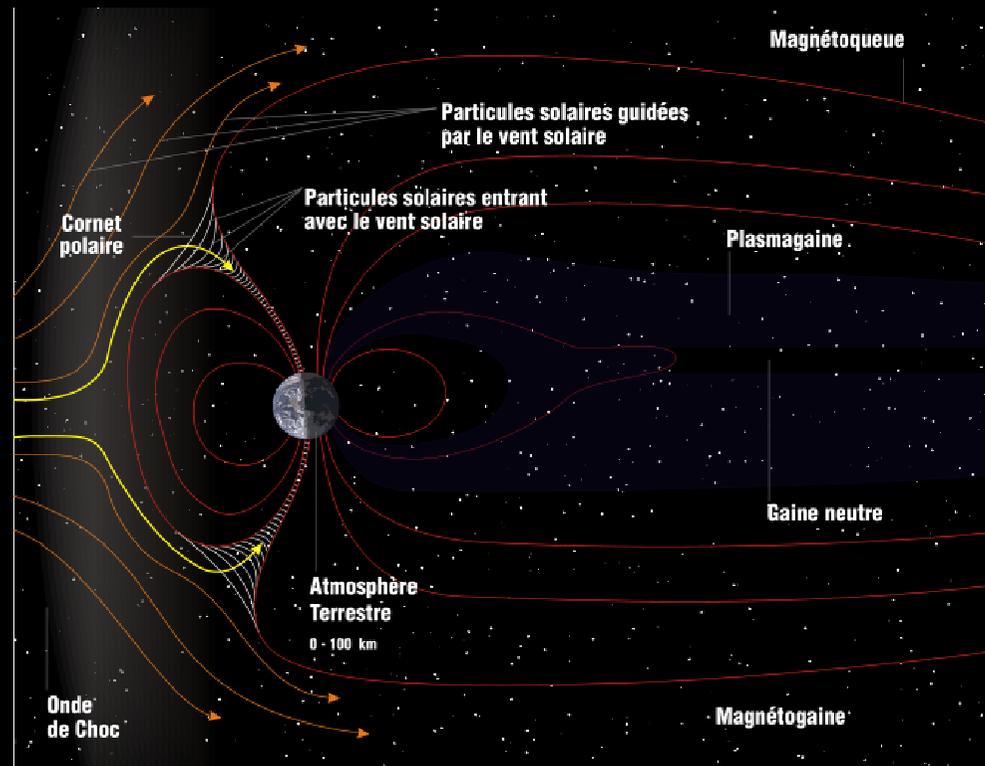
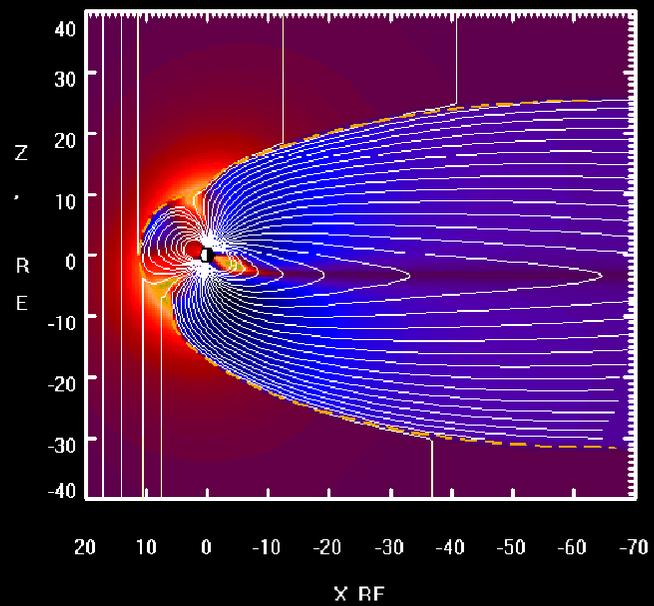
# Le vent solaire



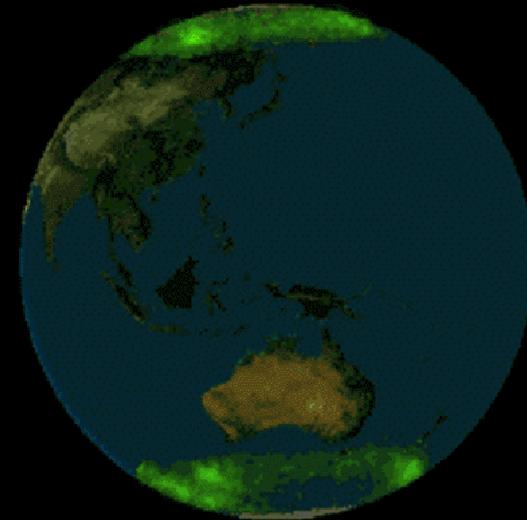
Flux de particules émit en permanence par le Soleil, composé d'ions et d'électrons (plasma). Il fluctue en fonction de l'activité magnétique du Soleil.

Vitesse moyenne d'éjection : 450 km/s

# Protection naturelle



# Les conséquences



- Aurores polaires
- Perturbations radios
- Dysfonctionnement des satellites
- Pannes électriques de grande ampleur
- ...

# Les neutrinos

## Histoire de sa découverte

En 1930, W. Pauli propose comme « remède du désespoir » l'existence d'une particule neutre de faible masse pour expliquer l'apparente non-conservation de l'énergie dans la désintégration radioactive  $\beta$ .

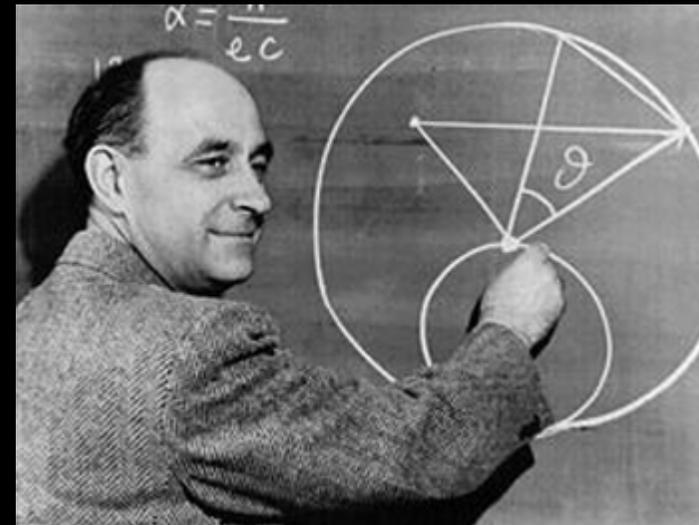
En 1933, E. Fermi lui donne le nom de neutrino, en l'intégrant à sa théorie de l'interaction faible.

Mais il faudra attendre 1956, pour que le neutrino soit détecté

1991 : au moyen de l'accélérateur du CERN, on démontre qu'il y a 3 sortes de neutrinos

1995 : mise en évidence du déficit des neutrinos solaires (expérience GALEX)

1998 : les neutrinos possèdent une masse (très faible) et découverte de l'oscillation des neutrinos solaires



## Les propriétés des neutrinos

- Sensible uniquement à l'interaction faible : une épaisseur 1 a-1 de plomb arrêterait la moitié des neutrinos qui la traverse !
- 3 types (saveurs) de neutrinos : électronique, muonique, tauïque
- Masse non nulle : 1 millionième de milliardième de milliardième de la masse d'un moustique
- Charge nulle

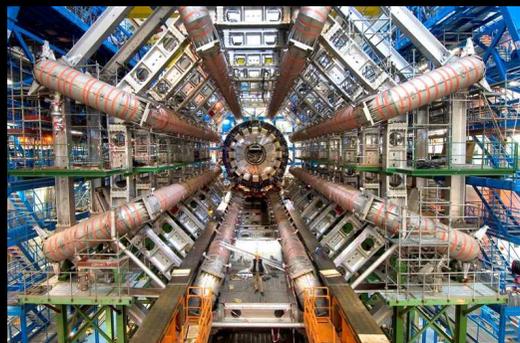
## Les sources de neutrinos

- **Les neutrinos solaires**
- **Les neutrinos « humains »**
- **Les neutrinos de la Terre**
- **Les neutrinos atmosphériques**
- **Les neutrinos du Big-Bang**
- **Les neutrinos astrophysiques**

## Les neutrinos « humains »



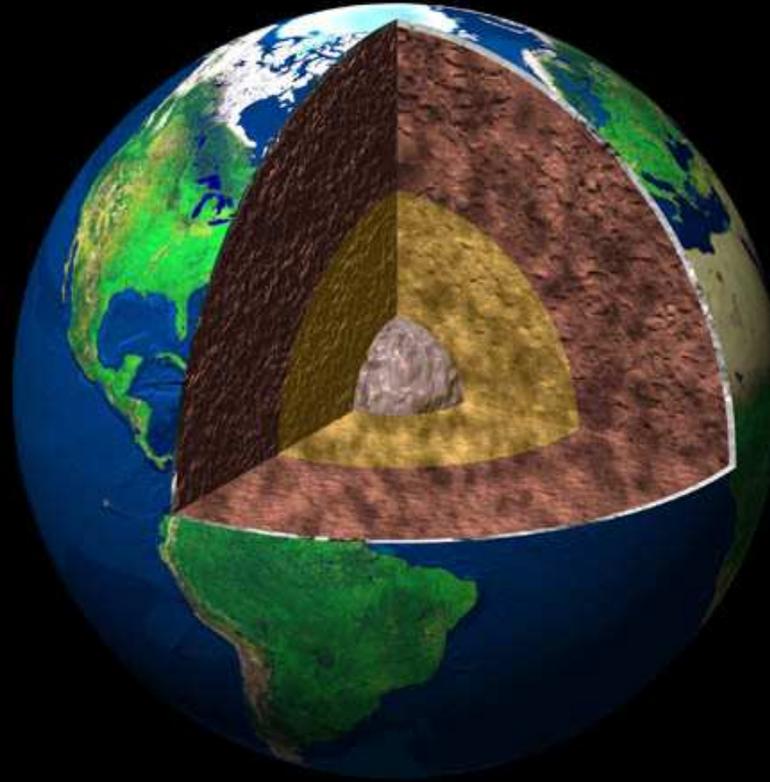
Du fait de la désintégration de l'isotope radioactif du potassium contenu dans nos os, nous produisons environ 340 millions de neutrinos/jour.



Les accélérateurs de particules et les centrales nucléaires produisent 10-100 milliards/s/homme).



# Les neutrinos de la Terre



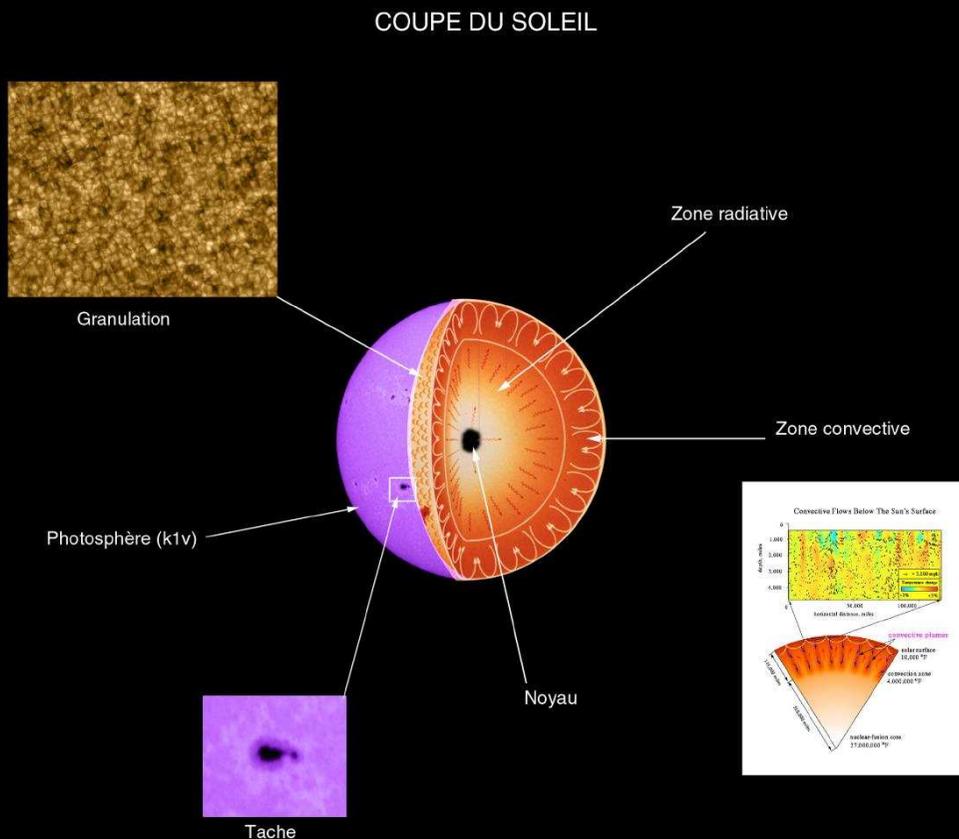
Les substances radioactives contenues dans la croûte et le manteau terrestre émettent aussi des neutrinos en se désintégrant : résultat, 50 milliards de neutrinos supplémentaires nous traversent chaque seconde ! Ces désintégrations maintiennent le noyau terrestre en fusion en fournissant une chaleur équivalente à 40 000 centrales nucléaires.

## Les neutrinos atmosphériques



Les rayons cosmiques qui pénètrent dans l'atmosphère terrestre, interagissent avec les molécules de celle-ci et donnent naissance à des neutrinos. Là aussi, on constate un déficit de neutrinos par rapport au modèle théorique.

# Les neutrinos solaires

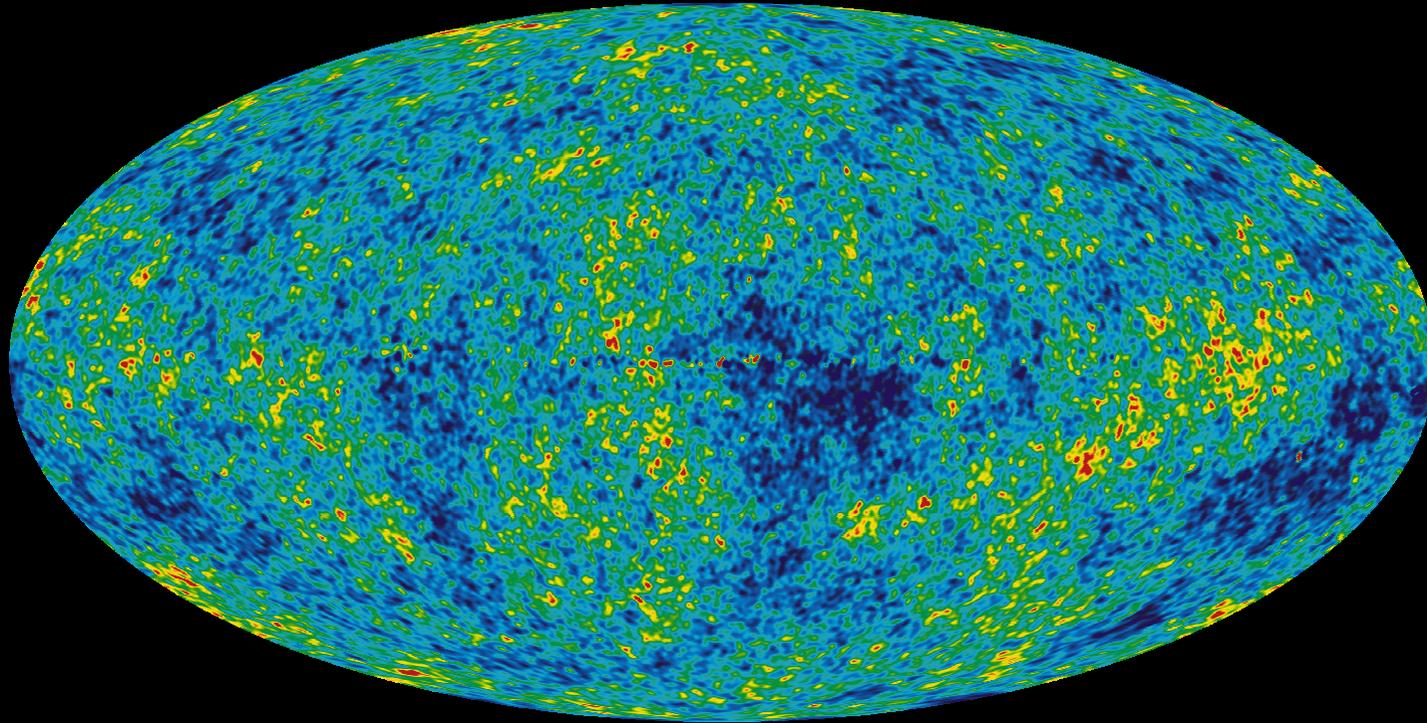


La fusion thermonucléaires au cœur du soleil produit de nombreux neutrinos (de basse énergie). Chaque seconde, environ 700000 milliards/m<sup>2</sup> arrive sur Terre, que le Soleil soit présent dans le ciel ou coucher

En 1991, l'expérience Gallex prouve ce qu'on soupçonnait depuis 1968 : nous recevons moins de neutrinos solaires que le prévoit le modèle : l'énigme des neutrinos solaires.

La réponse est apportée en 1998 : les neutrinos solaires se transforment en d'autres types de neutrinos : **l'oscillation des neutrinos**.

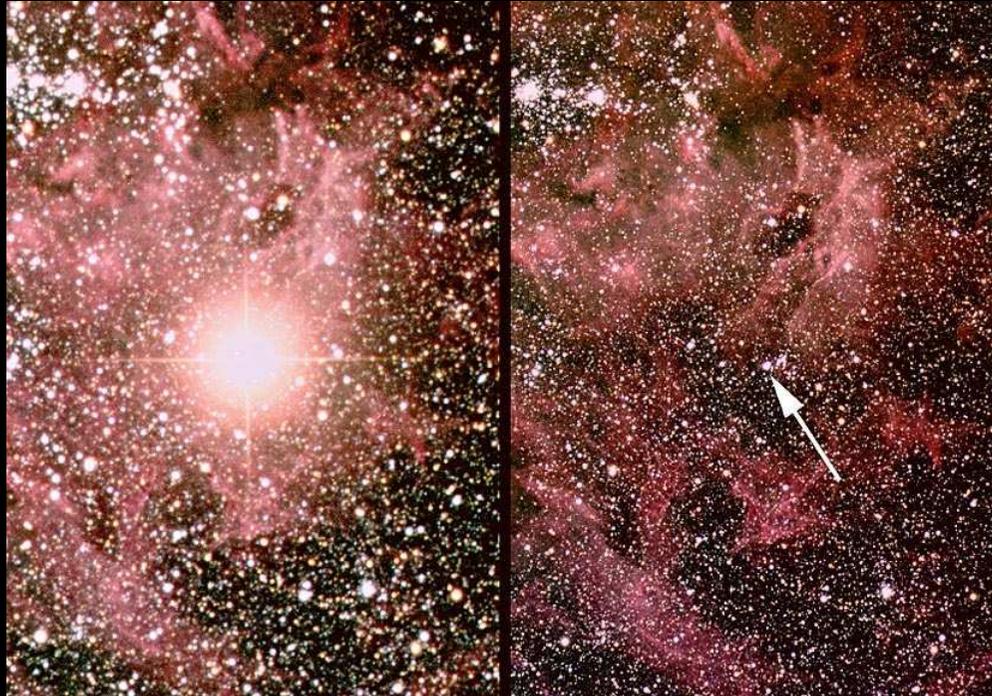
# Les neutrinos issus du Big Bang



Des neutrinos ont été produits lors du Big Bang. Il existerait également un fonds cosmologique de neutrinos mesuré à 1.95 K. Ces neutrinos permettraient d'expliquer la nucléosynthèse primordiale (présence de deutérium, hélium 4 et lithium 7).

Environ  $330 \text{ neutrinos/cm}^3$ , mais ils sont impossibles à détecter !

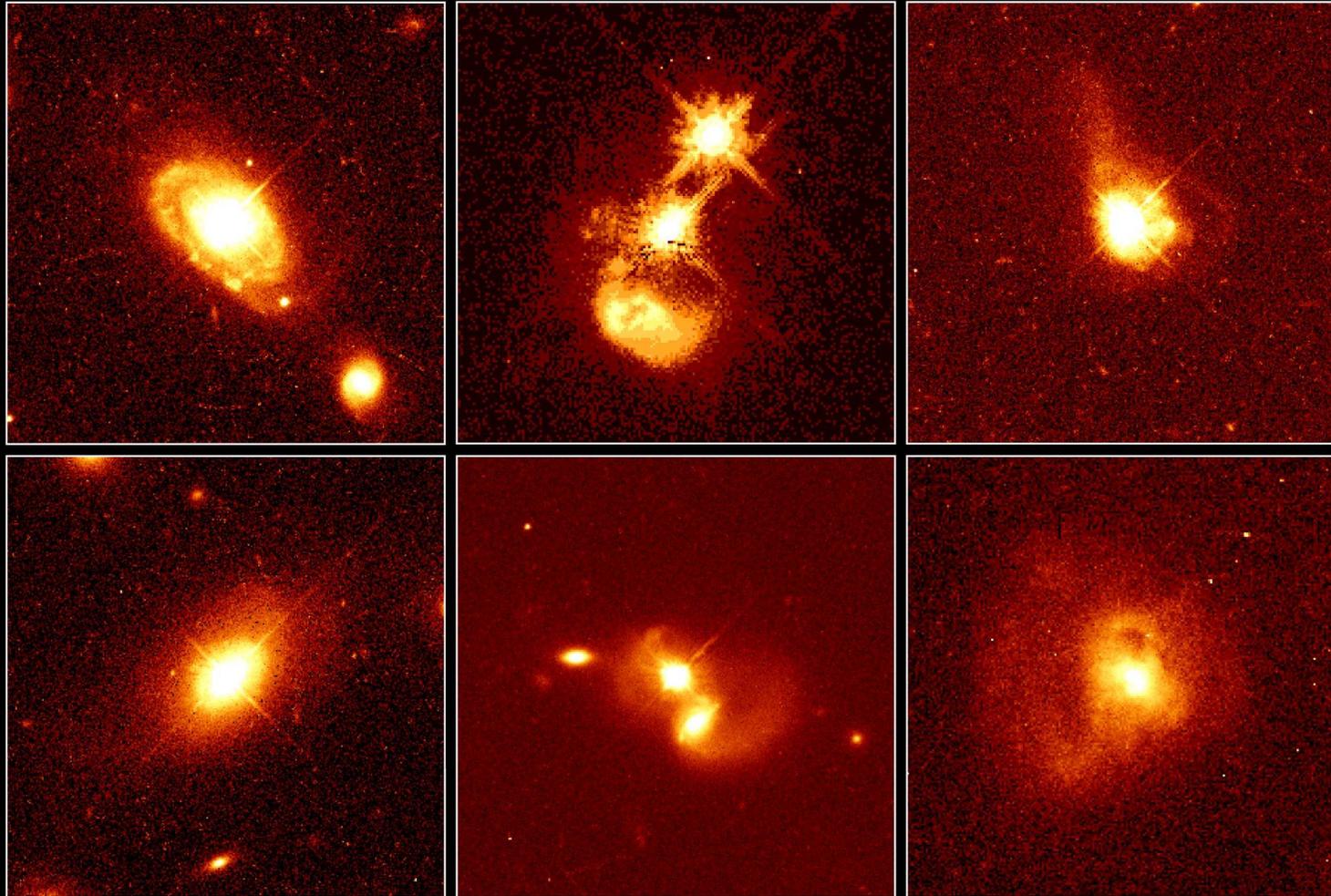
# Les neutrinos astrophysiques



Produit lors de l'explosion d'une étoile massive. Ils se produisent au moment de la supernova, lorsque les protons et les neutrons se combinent pour former des électrons. La plus grande partie de l'énergie émise par une supernova l'est sous forme de neutrino : 99 %, contre 0.01 % sous forme de photons.

La première preuve observationnelle arrive en 1987 avec la supernova du Grand Nuage de Magellan (SN1987), où des neutrinos ont été détecté 3h avant de voir l'explosion.

Ils sont les premiers messagers de la mort d'une étoile massive.



## Quasar Host Galaxies

Hubble Space Telescope • Wide Field Planetary Camera 2

PRC96-35a • ST ScI OPO • November 19, 1996 • J. Bahcall (Institute for Advanced Study), M. Disney (University of Wales) and NASA

Les quasars et les galaxies actives sont également une source importante de neutrinos.

## Que nous apportent les neutrinos ?

Les neutrinos sont les particules les plus abondantes de notre Univers. Ils nous ouvrent une nouvelle fenêtre sur l'Univers, pour 4 raisons principales :

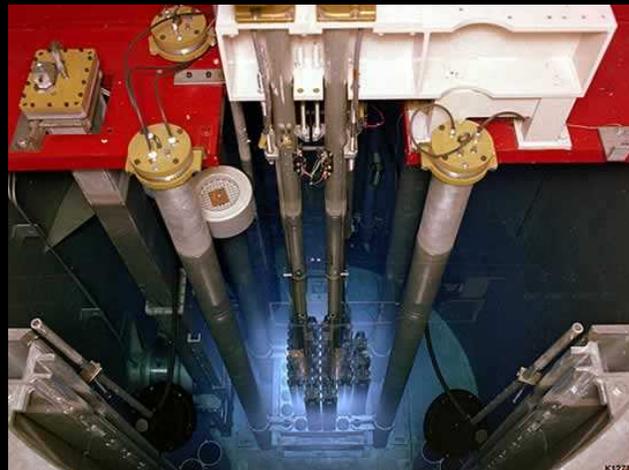
- Ils sont très stables
- Ils sont neutres et ne peuvent pas être déviés par les champs magnétiques
- Ils peuvent facilement sortir des zones denses
- Ils n'interagissent que très peu avec leur environnement et du coup ils peuvent nous renseigner sur des phénomènes nucléaires.

# Détecter les neutrinos

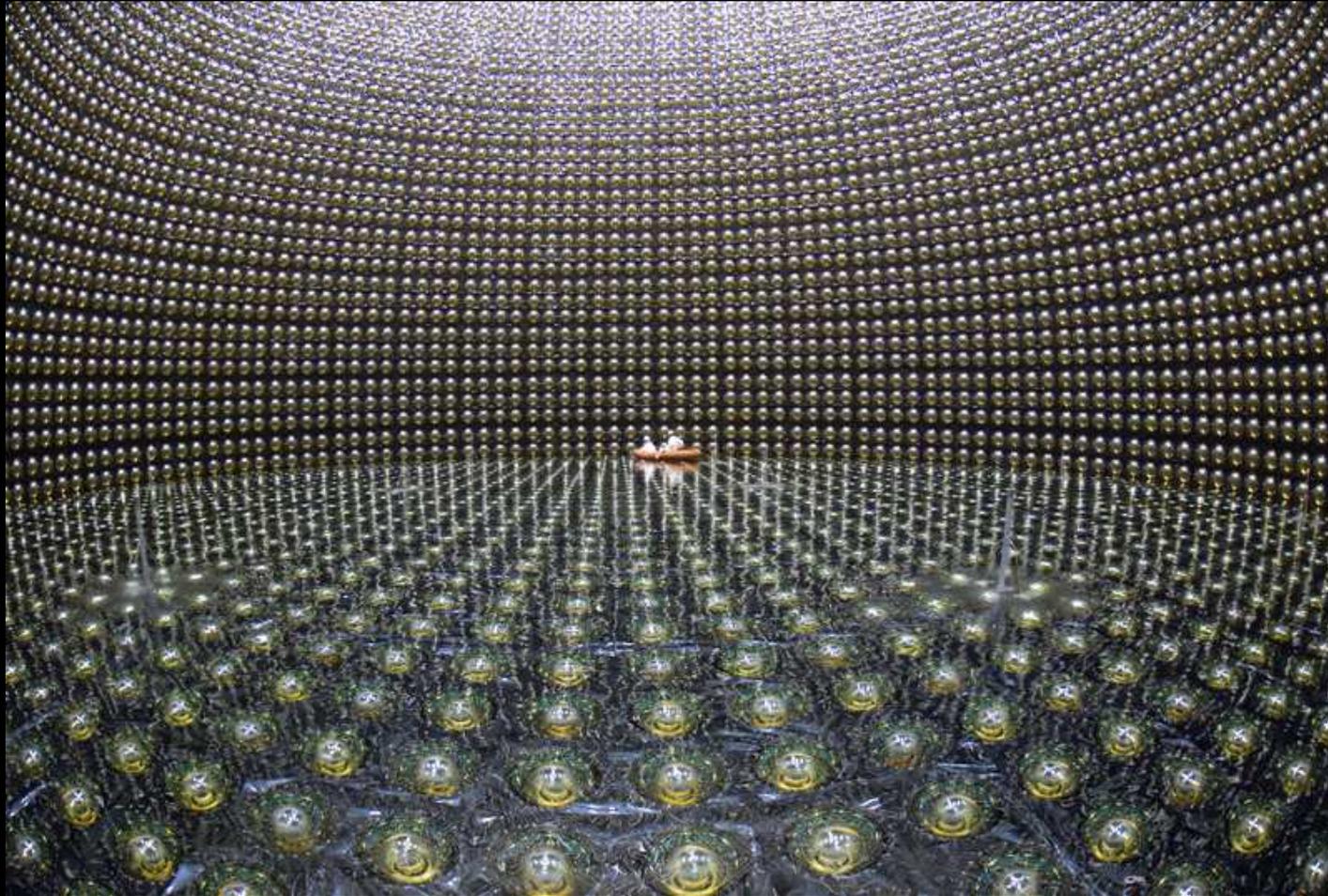
Vu la faible interaction des neutrinos avec leur environnement, il faut des détecteurs particuliers, situés profondément sous terre ou sous la mer, pour ne pas être sensibles au bruit de fond.

Plusieurs types de détecteurs sont utilisés, parmi lesquels :

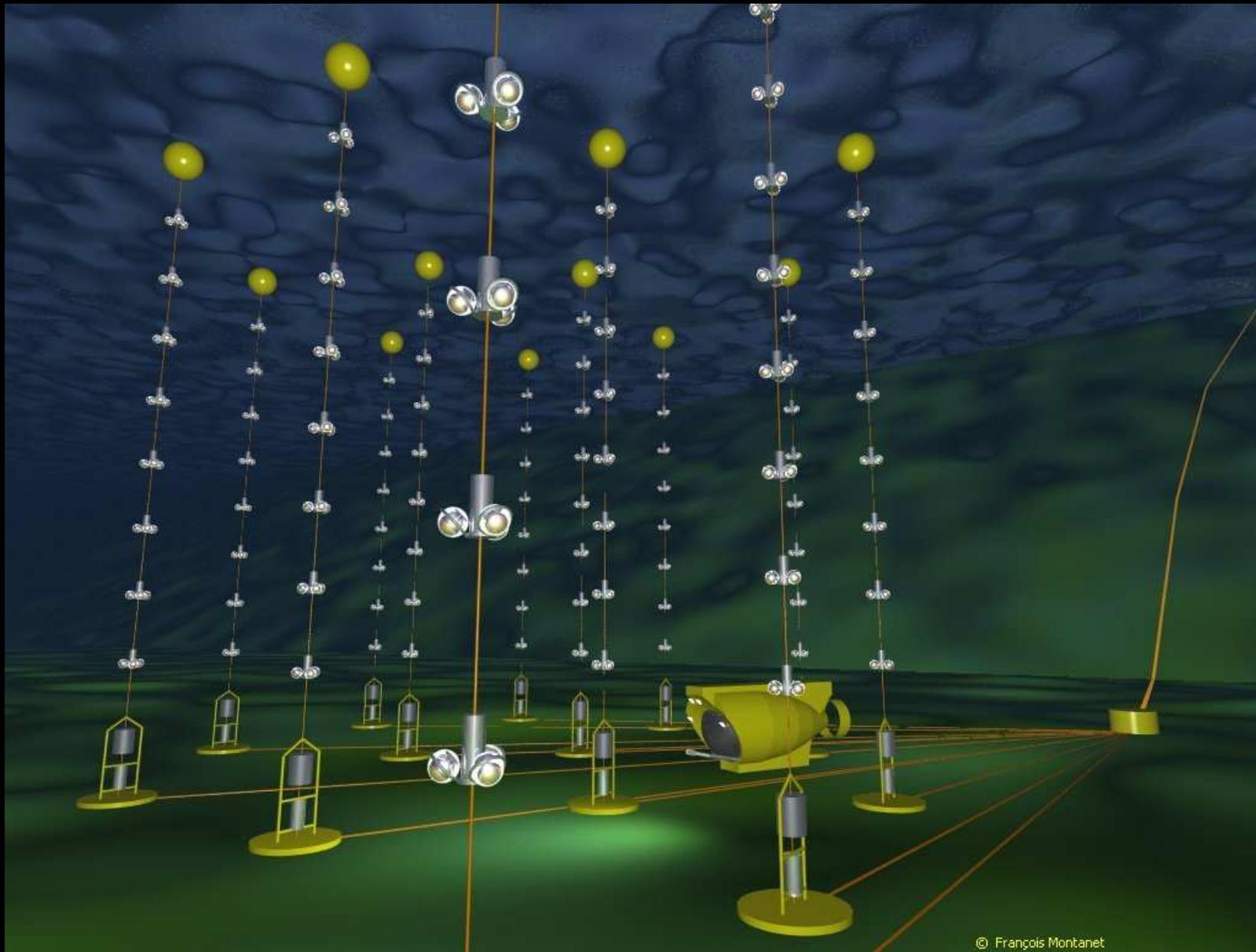
- **détecteurs au chlore** : Il s'agit du premier détecteur de neutrino mise en service. Un neutrino convertit un atome de chlore en un atome d'argon. Ce type de détecteur avait l'inconvénient de ne pas donner la direction du neutrino entrant.
- **détecteurs au gallium** : convertit un atome de gallium en germanium. Plus sensible au neutrino de faible énergie, mais ne donne pas non plus la direction d'arrivée du neutrino.
- **détecteurs à eau ordinaire** : très grand réservoir d'eau entouré d'une multitude de détecteurs très sensibles à la lumière (photomultiplicateurs) qui par effet Tcherenkov (transfert de l'énergie d'un neutrino à un lepton). Ces détecteurs permettent de connaître la direction, le type de neutrino et son énergie.



Effet Tcherenkov dans un réacteur nucléaire

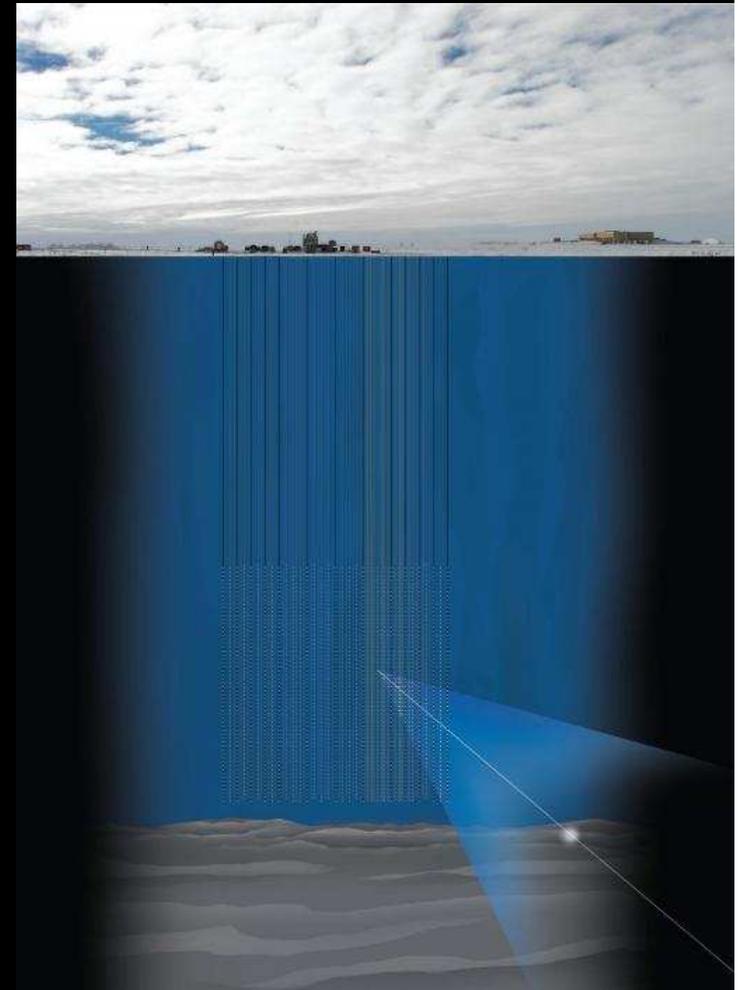


Détecteur de neutrinos d'eau ordinaire de Super Kamiokande au Japon  
Un cylindre de 40 m de diamètre pour 40 m de haut ; 50000 T d'eau et 10000 tubes photomultiplicateurs.



© François Montanet

Antarès (Var) : France, Russie, Espagne, Pays-Bas, Italie, Allemagne et Italie. Détecter des neutrinos de hautes énergies ; 900 photomultiplicateurs qui regardent vers la Terre à 2500 m de profondeur.



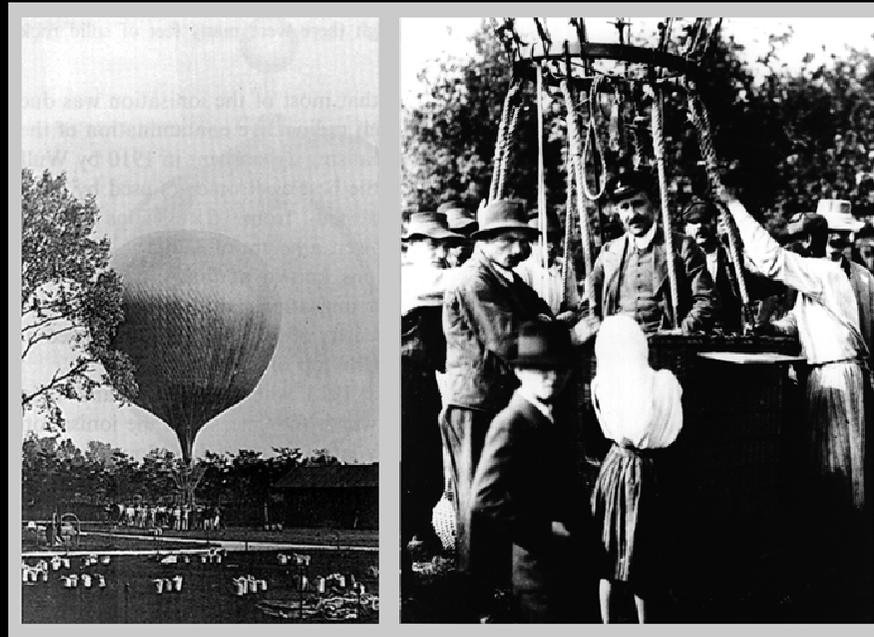
Ice - Cube (E.U, Allemagne, Japon, Suède et Belgique) : installé au pôle sud, il s'étend sur un km<sup>3</sup> et dispose de 5160 photomultiplicateurs plongés entre 1500 et 2500 m de profondeur.

# Les rayons cosmiques

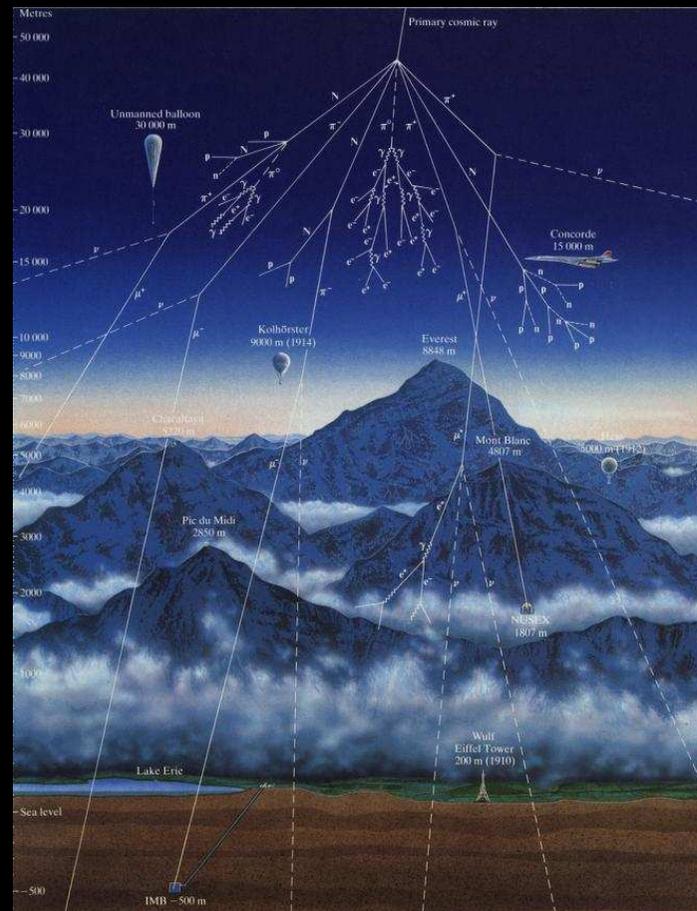
Au début du XX<sup>ème</sup>, les physiciens qui travaillaient sur le pouvoir ionisant des émissions radioactives, sont intrigués par un rayonnement énergétique, en l'absence de toute sources identifiées.

En 1912, après de surprenants relevés effectués au sommet de la Tour Eiffel, Victor Hess s'élève à 5350 m au moyen d'un ballon pour faire des mesures sur ce rayonnement.

Verdict : ce rayonnement vient bien du cosmos !

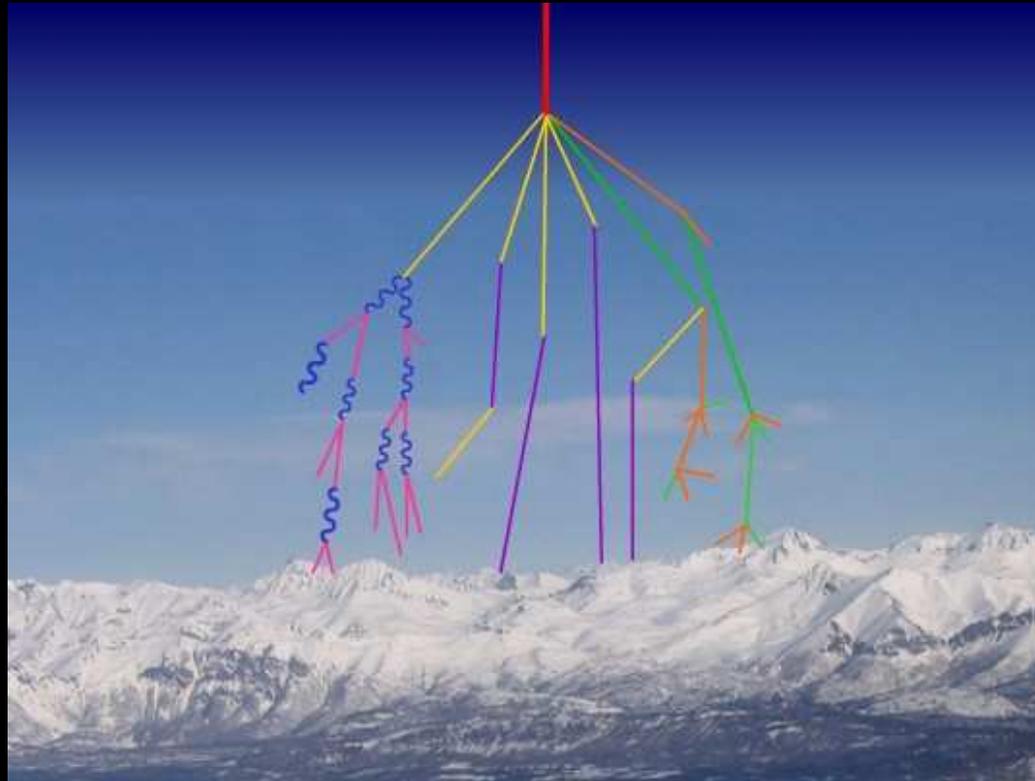


En 1938, Pierre Auger fait une découverte importante : il met en évidence les gerbes atmosphériques géantes. Elle se manifeste par l'arrivée au sol de bouffées de particules énergétiques pouvant être observées simultanément par des détecteurs espacés de plusieurs mètres, voire d'une vingtaine de mètres les uns des autres. Pierre Auger comprit que ces véritables pluies de particules étaient en fait induites par l'arrivée dans l'atmosphère d'un rayon cosmique unique, particulièrement énergétique, qui, par des réactions en chaînes dans l'atmosphère, donnait lieu à la production de particules secondaires traversant le ciel de manière cohérente à la vitesse de la lumière et venant s'abattre sur le sol dans une vaste région couvrant des centaines de mètres carrés



Durant les années 50, les cosmiciens s'installèrent en haute altitude pour détecter ces gerbes atmosphériques. Mais les observations mettent en évidence que ce ne sont pas les rayons cosmiques qu'ils détectent, mais les particules secondaires issues de l'interaction des rayons cosmiques avec l'atmosphère terrestre.

L'énergie produite par ces rayons cosmiques est environ 1000 fois supérieure à ce qu'on est capable de faire dans les accélérateurs de particules !



Aux énergies les plus basses, on compte environ quatre rayons cosmiques entrant chaque seconde par chaque centimètre carré de la haute atmosphère terrestre. À l'énergie des rayons cosmiques découverts par Pierre Auger, on ne compte déjà plus qu'une particule par mètre carré et par an.

Aux plus hautes énergies, il en parvient sur Terre à peine une par kilomètre carré et par siècle !

# Compositions des rayons cosmiques

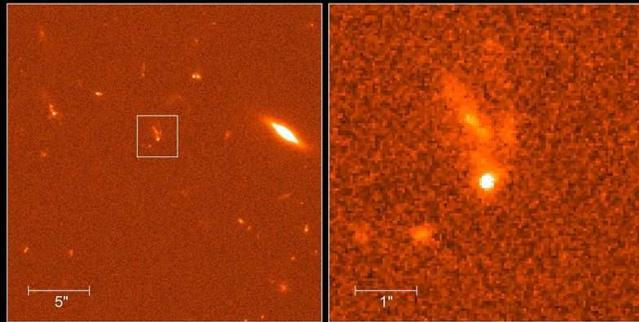
- Environ 89% de noyaux d'hydrogène (simples protons)
- 9% de noyaux d'hélium
- 1% de noyaux plus lourds (comme l'oxygène, le carbone, l'azote ou le fer)
- 1% d'électrons

Ces particules ont manifestement été accélérées quelque part dans l'Univers. Mais où et comment ?

# Origine des rayons cosmiques

Les rayons cosmiques de basse énergie viennent de notre galaxie. Mais ceux de haute énergie ont une origine extragalactique.

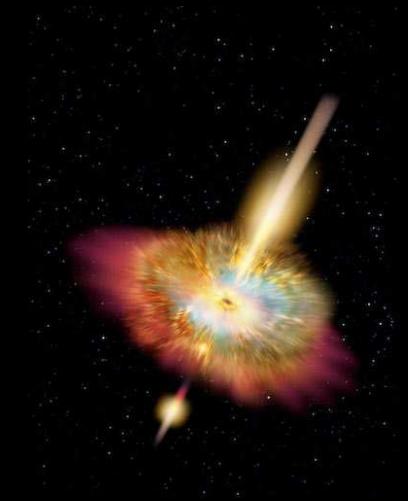
Quelques candidats possibles....



Sursauts  $\gamma$



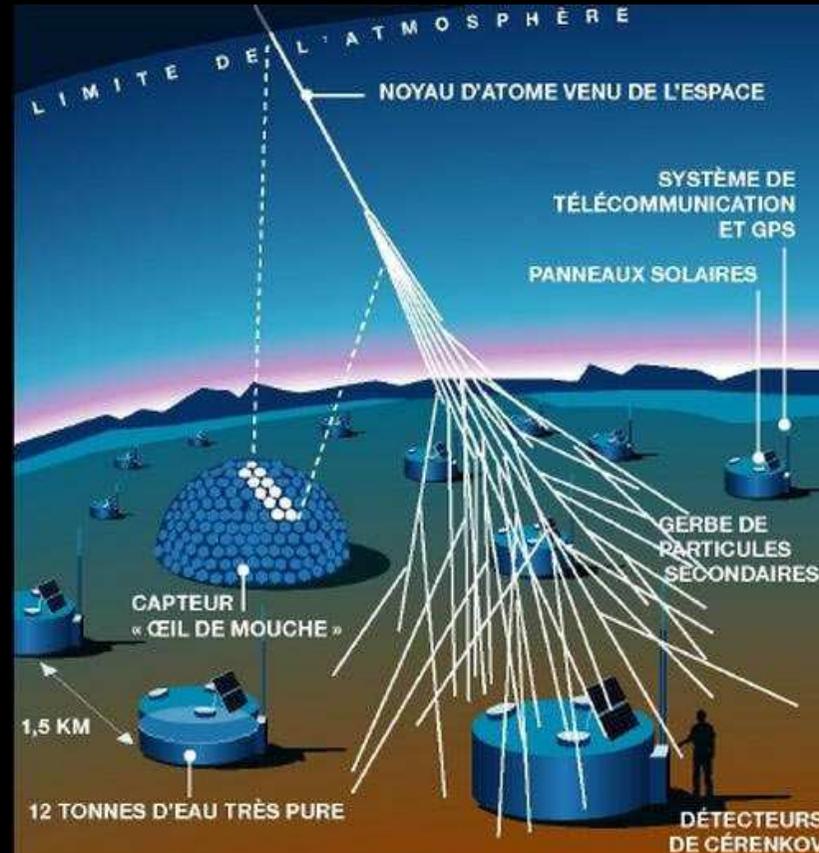
Galaxies au noyau actif



Hypernovae

# La détection des rayons cosmiques

L'observatoire Pierre Auger est le plus grand projet de détection de rayons cosmique de haute énergie. Financé par 17 pays, sa construction a débuté en 1999 dans la Pampa argentine. Il est prévu d'installer son pendant dans l'état du Colorado.

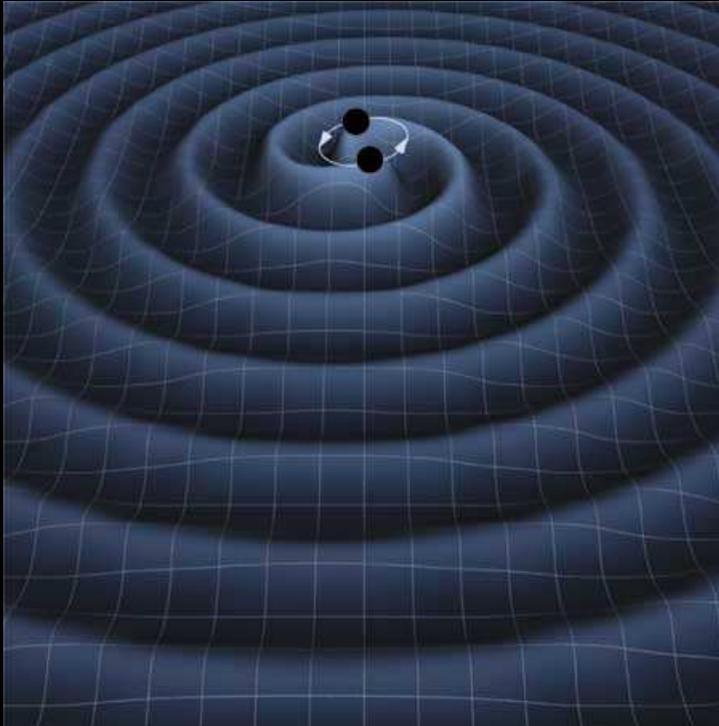




L'Observatoire Pierre Auger détecte les gerbes atmosphériques grâce à un réseau de 1 600 détecteurs de particules, constitués de cuves de  $12 \text{ m}^3$  remplies d'eau très pure, espacés de 1,5 kilomètre, qui s'étendent sur une surface de  $3\,000 \text{ km}^2$ . Les sous-particules qui les traversent y émettent de la "lumière Cherenkov" captée par des photomultiplicateurs.

En plus, 24 télescopes observent la lumière fluorescente produite par la gerbe lors de son passage dans l'atmosphère. Cette combinaison de détecteurs permet une étude optimale et très précise de ces rayons cosmiques.

# Les ondes gravitationnelles



Prédites par Einstein dans la théorie de la relativité générale, les ondes gravitationnelles se produiraient lorsqu'un corps massif est accéléré. L'espace-temps doit alors en permanence se réajuster, ce qui se traduit par l'émission d'ondes gravitationnelles, qui se propageraient à la vitesse de la lumière.

En 1974, l'observation d'un système binaire de pulsars, montra que la période orbitale du couple décroissait très légèrement chaque année. Ce phénomène est interprété comme la conséquence de l'émission d'ondes gravitationnelles.

La très faible intensité de ces ondes fait que pour le moment, il n'est pas possible de les détecter.

## Sources supposées

- Les ondes gravitationnelles sont produites par des objets extrêmement massifs et des phénomènes violents : collision de trous noirs, de pulsars, supernovae, coalescence de systèmes binaires...

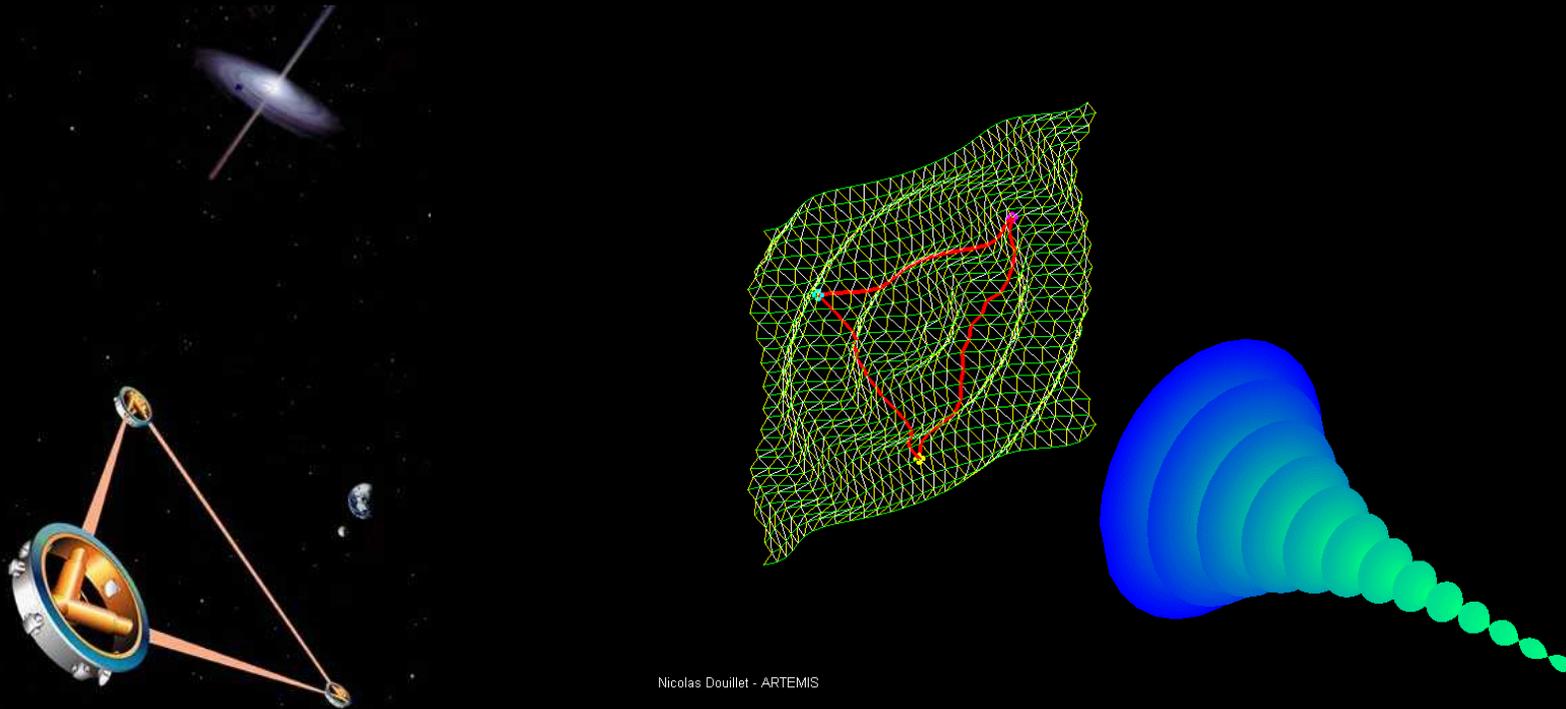
## La détection d'ondes gravitationnelles



VIRGO : détecteur européen, installé près de Pise et inauguré en mai 2007.

Fonctionne sur le principe de l'interféromètre : un laser est envoyé dans deux tunnels de 3 km de long, qui sont perpendiculaires. Grâce à des miroirs, le faisceau parcourt l'équivalent de 120 km. Au passage d'une onde gravitationnelle, la distance du faisceau est modifiée de l'ordre de  $10^{-18}$  m !

# LISA (Laser Interferometra Space Antenna)



Nicolas Douillet - ARTEMIS

Premier détecteur d'ondes gravitationnelles spatiales, prévu pour 2018.

Projet de la NASA et de l'ESA.

3 satellites en orbite héliocentrique, formant un triangle équilatéral de 5 millions de km de côté.