

# L'ALBIREOSCOPE

www.albireo78.com

## Les neutrinos dans l'Univers...

Michel

### SOMMAIRE

**I DOSSIER**

les neutrinos dans l'Univers...

**23 TJMS**

Épisodes 2, 3 et 4

**28 le pôle nord**

céleste

**18 C'est arrivé ce jour-là...**

les anniversaires d'a-

**32 Mots croisés**

**22 AL78**

Une question de temps...

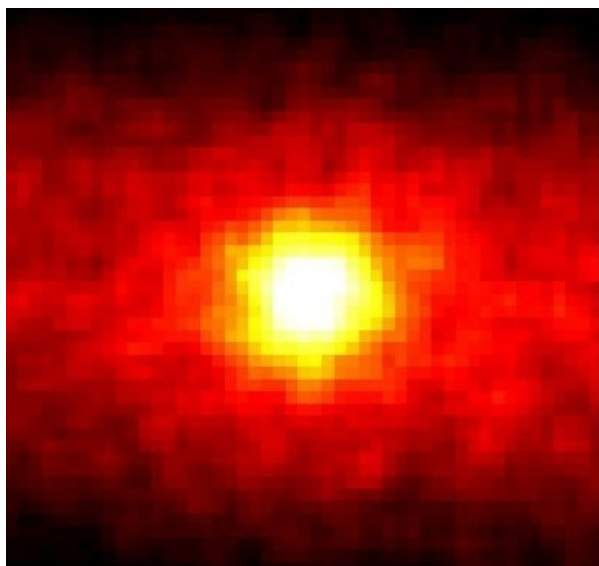
**33 Galerie photos**

Résumé d'une conférence donnée aux rencontres Ciel & Espaces en novembre 2010 par Thierry Lasserre (astrophysicien au Commissariat à l'Énergie Atomique).

Thierry Lasserre a d'abord commencé sa carrière auprès des télescopes, surtout à La Silla, à traquer la matière noire, les objets sombres, un projet nommé EROS (Expérience de Recherche d'Objets Sombres) et qui s'est terminé en 2003. Les neutrinos sont des particules élémentaires qui interagissent très peu avec la matière. Ce sont les particules de matière connues les plus abondantes de l'univers. Notre corps contient des millions de neutrinos issus du Big Bang, et émet quelques

milliers de neutrinos liés à sa radioactivité naturelle. Traversé en permanence par des milliards de neutrinos par  $\text{cm}^2$  et par seconde venus du Soleil, notre corps a été irradié le 23 février 1987 par quelques milliards de neutrinos émis il y a 150 000 ans par l'explosion d'une supernova dans le Grand Nuage de Magellan. Les neutrinos sont également produits dans l'interaction des rayons cosmiques dans l'atmosphère et dans les noyaux actifs des galaxies. Allons à la découverte de cette particule aux propriétés surprenantes, et examinons la façon dont les physiciens la traquent.

Voici une image du soleil, mais vue « en neutrinos » (l'explication en sera donnée dans les pages suivantes) :



Super Kamiokande—photo du Soleil en neutrinos  
Temps de pose : 500 jours

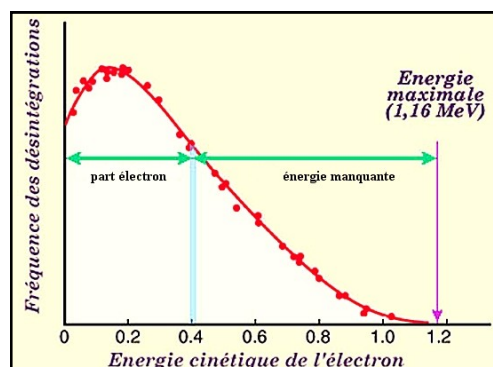
Une idée reçue qu'on apprend à l'école et dans les universités : toute la matière est composée de particules élémentaires (l'atome avec protons et neutrons en son cœur, son noyau, et des électrons qui gravitent autour) et toute la matière de l'Univers serait ainsi constituée. En fait, la matière autour de nous est bien faite d'électrons, de protons, de neutrons mais ces derniers sont très, très minoritaires dans l'Univers. Car pour chaque proton, chaque neutron, chaque électron de l'Univers, il y a un milliard de neutrinos qui leur sont associés. C'est énorme, et on peut dire que le neutrino est la particule de matière la plus abondante de l'Univers. Cela justifie bien d'en parler ici. A titre d'exemple : un être humain contient 30 millions de neutrinos du Big Bang et il est traversé

par 100 000 milliards de neutrinos par seconde émis par le soleil. Le neutrino : c'est une particule très petite, plus petite que la longueur d'onde que dessine la lumière, qu'on ne peut voir à l'œil nu ; sa taille est de l'ordre du millième de la taille d'un noyau. On est bien en deçà des nanoparticules : au niveau des particules élémentaires, celui des électrons, des quarks à savoir les briques élémentaires fondamentales de la matière.

### Le paradoxe de la radioactivité bêta ( $\beta$ ).

Cela a été observé au début du XX<sup>ème</sup> siècle. Au cœur de la matière se trouvent les noyaux et la plupart sont stables, ils n'évoluent pas. Mais certains de ces assemblages de protons et de neutrons que sont les noyaux, évoluent vers des configurations plus stables. Un noyau X se transforme en un noyau Y plus stable – on dira qu'il a une configuration énergétique plus favorable – avec une masse plus faible ; la différence de masse entre le noyau initial X et le noyau final Y est transformée en énergie selon la célèbre formule  $E=mc^2$ . Cette transformation s'accompagne de l'émission d'une particule élémentaire : un électron, caractéristique de la radioactivité  $\beta$  (il y a d'autres type de radioactivité :  $\alpha$  et  $\gamma$ , qui sont des phénomènes tout à fait naturels mais dans ce document, nous retiendrons essentiellement la radioactivité  $\beta$ ).

En 1914, Monsieur Chadwick étudiait ces désintégrations  $\beta$  et mesurait l'énergie de l'électron en sortie. Sur le diagramme suivant, on représente l'énergie cinétique des électrons en fonction de la fréquence des désintégrations. Dans une telle configuration, pour un électron émis seul, on s'attend toujours à ce qu'il soit émis avec la même énergie, en correspondance avec la différence de masse des noyaux. On s'attendait donc à un pic dans ce type de diagramme :



Spectre bêta du Bismuth 210



mais en fait la situation était beaucoup plus compliquée. L'observation montre une distribution continue de l'énergie des électrons qui restait inexplicable et cela avait amenés certains à penser qu'il pouvait y avoir violation du principe de conservation de l'énergie dans ce type de désintégration. Une loi sacro-sainte de la physique était déjà mise à mal à cette époque... Il se trouve que dans cette affaire, on avait oublié une particule en sortie car on ne la connaissait pas ; cela a été annoncé, sous forme de remède désespéré, par Monsieur Pauli en 1930, en écrivant une lettre destinée aux membres d'une conférence à laquelle il ne pouvait assister.



Wolfgang Pauli (1900-1958). Un des créateurs de la théorie quantique des champs. Il est à l'origine du principe d'exclusion et de l'hypothèse du neutrino.

Traduction de la lettre adressée par Wolfgang Pauli (extrait) :

Zurich, le 4 décembre 1930

Chers dames et messieurs radioactifs,  
Je vous prie d'écouter avec beaucoup de bienveillance le message de cette lettre...

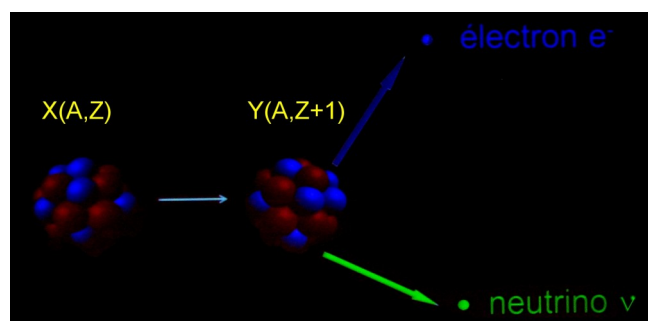
Le spectre bêta serait alors compréhensible si l'on suppose que pendant la désintégration bêta, avec chaque électron est émis un neutron, de manière que la somme des énergies du neutron et de l'électron est constante...

J'admets que mon remède puisse paraître invraisemblable, car on aurait dû 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 être moi-même à Tübingen, ma présence étant indispensable ici pour un bal qui aura lieu pendant la nuit du 6 au 7 décembre.

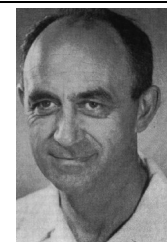
Votre serviteur le plus dévoué,  
W. Pauli.

Si on n'observe pas la distribution attendue, c'est qu'il existe une autre particule (M. Pauli la nomme : neutron, le neutron actuel n'étant pas encore découvert), qui doit être neutre pour conserver la charge électrique. Cette particule, on ne la voit pas car elle a une probabilité d'interaction très, très faible et donc échappe à la détection. Appelé neutron à l'époque, il s'agit en fait, on l'aura compris, du neutrino.



Un noyau avec un nombre de protons et neutrons valant  $A$  se transforme en un autre noyau en émettant un électron et un neutrino, les deux se partageant l'énergie, ce qui donne la courbe vue précédemment.

Le neutrino a donc été inséré par Pauli et un peu plus tard le même Chadwick va découvrir et mettre en évidence le neutron et on comprend alors vraiment comment est fait un atome. Un noyau autour duquel gravitent des électrons ; il ne faudra pas longtemps à Monsieur Fermi pour faire une théorie de ces désintégrations  $\beta$  (1934) et il donnera son nom définitif à cette fameuse particule : neutrino. A cette époque, la désintégration  $\beta$  est vue comme sur le schéma ci-dessus, avec un noyau, dont un neutron se décompose spontanément en un proton, et qui émet un électron et une autre particule : le neutrino (c'est en fait un antineutrino électronique  $\bar{\nu}_e$  qui accompagne la formation d'un électron, pour satisfaire à la conservation du nombre leptonique). Dans la mesure où une théorie devient mature, on peut commencer à faire les premiers calculs pour savoir si ces neutrons sont oui ou non détectables.



Fermi  
Prix Nobel de physique en 1938

Cependant la situation est assez « dramatique » car on se rend compte que le neutrino n'interagit que très faiblement dans tous les cas. Un exemple : si on émet 10.000 milliards de neutrons du type de

ceux du Soleil d'un côté de la Terre, tous vont ressortir de l'autre côté sauf un ! L'interaction est extrêmement faible. Pour les détecter, il faut donc les produire à foison et dans les années 50, existait déjà une source importante de neutrinos :

la bombe atomique à fission. La radioactivité  $\beta$  est source de neutrino, et beaucoup de réactions  $\beta$  sont produites par une telle bombe. Seulement, il n'est pas facile de mettre en place des détecteurs près d'une bombe atomique, mais cela a été essayé... et l'expérience ne donne pas droit à l'erreur, il faut prendre les données immédiatement, les évacuer et ensuite, dire adieu aux détecteurs. C'était la première idée ; viennent ensuite des sources plus paisibles que sont les réacteurs nucléaires qui brûlent de l'uranium ( $^{235}\text{U}$ ) .



Bombe Nuke

	Multiples									
Préfixe	déca-	hecto-	kilo-	méga-	giga-	téra-	péta-	exa-	zetta-	yotta-
Symbole	da	h	k	M	G	T	P	E	Z	Y
Facteur	$10^1$	$10^2$	$10^3$	$10^6$	$10^9$	$10^{12}$	$10^{15}$	$10^{18}$	$10^{21}$	$10^{24}$

### Multiples du SI

Ces neutrinos, produits par les réacteurs nucléaires peuvent être détectés car ils interagissent avec un atome d'hydrogène (proton) du détecteur en générant deux produits : un positron (l'antiparticule de l'électron : même masse mais charge électrique opposée, plus facile à détecter

que l'électron), et un neutron. Ces deux particules permettent, indirectement, de détecter le neutrino. Ce type d'expérience a été réalisé la première fois à Savannah River (U.S.A.) en 1956 par MM. Fred Reines et Clyde Cowan. C'était la première mise en évidence du neutrino.

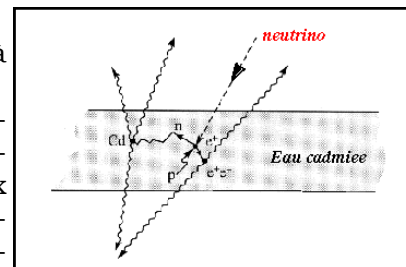


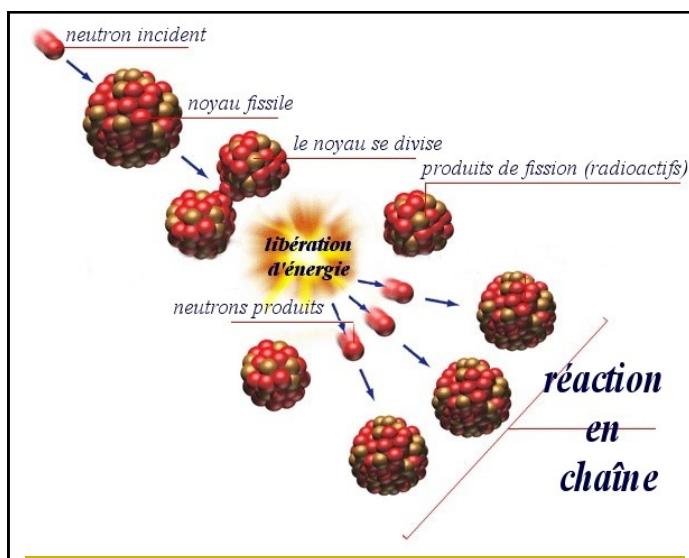
Schéma détecteur Savannah River



Reines & Cowan aux commandes du réacteur nucléaire de Savannah River

Mais comment être sûr que ce qu'on voit est du aux neutrinos ? Le réacteur utilisé ne servait pas à produire de l'électricité pour les besoins civils mais était dédié aux militaires, et servait à fabriquer des matériaux nucléaires enrichis pour les bombes atomiques, comme le plutonium 239. Ces réacteurs fonctionnaient de manière intermittente, avec des périodes d'arrêt et de marche. Les mesures pouvaient donc se faire réacteur « On » et réacteur « Off ». A l'arrêt, un « événement neutrino » se produisait chaque heure, et en marche, quatre fois plus d'événements étaient répertoriés. Cette différence ne pouvait s'expliquer que par la sortie des neutrinos issus du réacteur en marche.

Cette fission dégage de l'énergie, avec le différentiel de masse des particules initiales et finales (une énergie qui est exploitée dans les centrales nucléaires d'EDF par exemple), et des désintégrations  $\beta$  en chaîne qui génèrent 1 zetta neutrinos par seconde qui est un nombre gigantesque ( $10^{21}$  neutrinos/seconde, comme dans le cas d'un réacteur nucléaire EDF avec deux tranches).



Réaction de fission : le noyau d'uranium va fissionner, c'est à dire qu'il va spontanément se scinder en deux fragments très radioactifs.

Cette fission dégage de l'énergie, avec le différentiel de masse des particules initiales et finales (une énergie qui est exploitée dans les centrales nucléaires d'EDF par exemple), et des désintégrations  $\beta$  en chaîne qui génèrent 1 zetta neutrinos par seconde qui est un nombre gigantesque ( $10^{21}$  neutrinos/seconde, comme dans le cas d'un réacteur nucléaire EDF avec deux tranches).



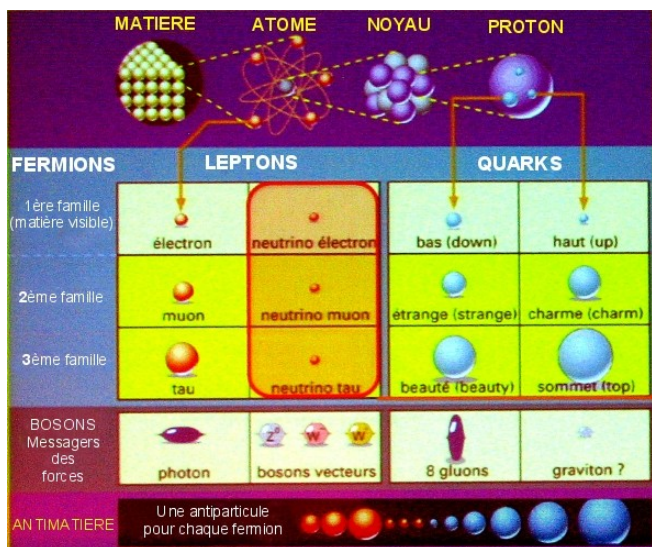
Le neutrino dans le modèle standard de la physique des particules d'aujourd'hui.

Les particules se regroupent en familles :  
 La première des familles : les quarks. Il existe le quark Up et le quark Down. Ils constituent, en les combinant, les protons et les neutrons : un proton = 2 quark Up + 1 quark Down ; on forme aussi le neutron de manière similaire. A côté de cela se trouve l'électron : on crée ainsi les atomes. Mais il ne faut pas oublier le petit dernier, à savoir le neutrino. La première famille est constituée avec ces quatre particules. Le neutrino est la plus faible, la plus légère, arrivée alors que l'on ne l'attendait pas. Le neutrino attire donc l'attention, notamment en ce moment.

La deuxième famille ne comporte pas d'électron mais possède le muon, qui est un cousin de l'électron, deux cents fois plus lourd que celui-ci. Un neutrino muon est aussi associé à ce muon, et deux autres quarks (strange, charm) complètent la famille.

La troisième famille comporte également un cousin lourd de l'électron, 3500 fois plus lourd que celui-ci : le Tau, qui est associé à un neutrino tau, et deux autres quarks (beauty, top) complètent également cette famille.

Dans ce tableau, on constate que trois familles résument aujourd'hui le monde des particules :



Toutes ces particules constituent la matière connue aujourd'hui.

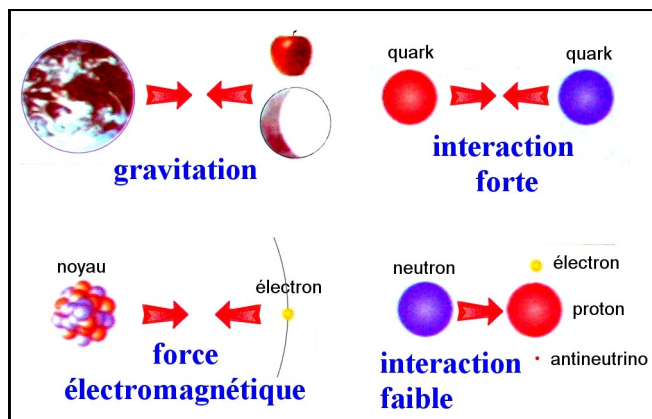
Elles échangent de l'information via les bosons, qui sont des messagers : les bosons vecteurs.

Pour l'interaction électromagnétique, deux particules chargées échangent de l'information grâce aux photons : le photon est le vecteur de l'interaction électromagnétique.

En ce qui concerne la gravitation, le modèle n'existe pas, mais on suppose que le graviton serait la particule qui véhicule l'information entre deux masses.

L'interaction forte permet au noyau de rester intègre et ce sont les gluons qui permettent de maintenir la cohésion des quarks dans le noyau.

L'interaction faible qui véhicule la force de la radioactivité  $\beta$ , ce sont les particules W et Z, très lourdes (ce qui explique la faiblesse de l'interaction faible).



Les forces, dans le modèle standard.

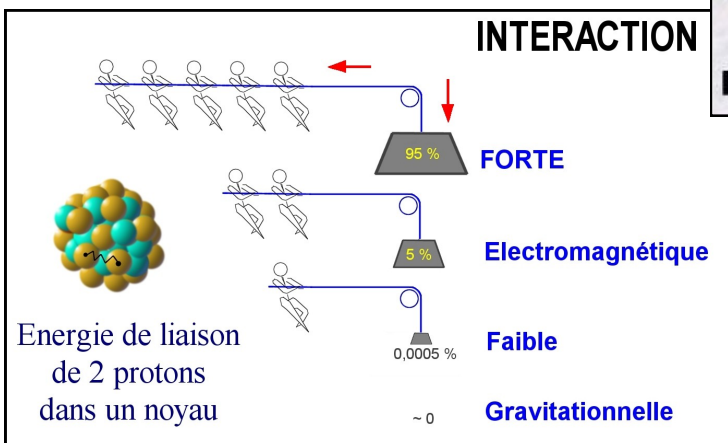
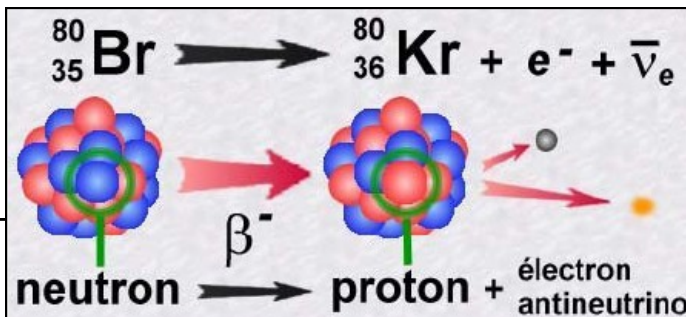
Les neutrinos sont sensibles à la gravitation mais aussi aux interactions faibles, tout en interagissant très peu. Ils ne sont pas sensibles à l'interaction forte car ce ne sont pas des quarks, et ils ne sont pas sensibles à l'interaction électromagnétique car ils n'ont pas de charge électrique d'où la faiblesse de leur interaction.

Revenons aux interactions fondamentales : comment sont liés deux protons dans un noyau ?

Prenons deux protons très proches, de charges électriques identiques. A priori, il n'est pas

possible de faire se rapprocher deux charges électriques identiques car la répulsion deviendrait beaucoup trop forte. Cependant, il y a bien quelque chose qui forme un ciment : l'interaction forte, qui contribue à 95 % pour cette union. L'interaction faible n'œuvre ici que pour 0,0005 %, tandis que la part électromagnétique n'est que de 5 %. La gravitation est ici considérée négligeable.

La désintégration  $\beta$  vue par Fermi



**Radioactivité bêta**

Un neutron se désintègre en proton en émettant un électron et un anti-neutrino (dans le modèle standard de la physique des particules).

**La vision moderne de la désintégration  $\beta$**

Ce qui se passe réellement est un peu plus compliqué ; dans un neutron, on trouve deux quarks D (down) et un quark U (up). Un de ces quarks D se désintègre en émettant un quark U et un de ces bosons W<sup>-</sup>, 100 fois plus lourd que le proton, qui se désintègre lui aussi en émettant un électron et un antineutrino.

La portée des forces au niveau du noyau atomique.

La gravitation a une portée théoriquement infinie, à l'échelle des galaxies et même au-delà.

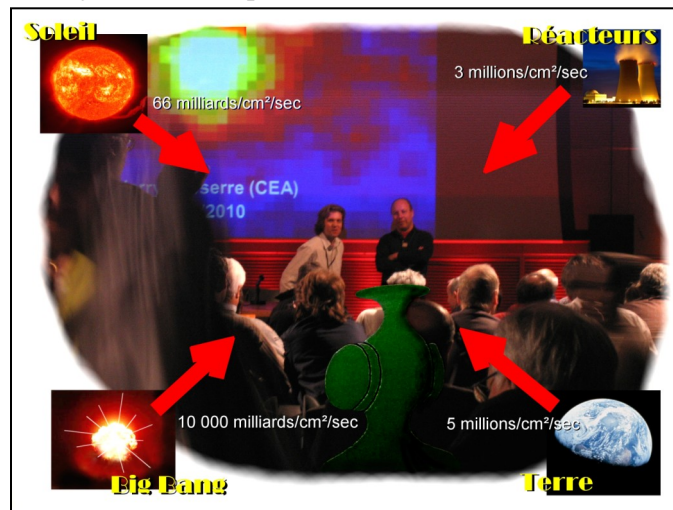
L'interaction électromagnétique porte théoriquement à l'infini. Cependant, la matière à l'échelle d'une planète, même moins, est neutre. L'interaction électromagnétique perd son influence entre deux parties neutres.

L'interaction forte agit à l'échelle du noyau (unité de Fermi : 10<sup>-15</sup> mètre).

L'interaction faible agit encore moins, puisqu'elle n'intervient qu'à des distances 1000 fois plus faibles que l'interaction forte.

Donc un neutrino envoyé dans la matière ne va interagir que s'il passe à moins de 10<sup>-18</sup> mètre d'un électron ou d'un quark. La matière est constituée essentiellement de vide... Ce phénomène est donc rare et le neutrino rate souvent sa cible en agissant que très peu avec la matière.

Des neutrinos, il y en a beaucoup... et partout car il y a beaucoup de sources de neutrinos.



Thierry Lasserre aux rencontres de Ciel & Espaces – nov. 2010

Cha- que

se-

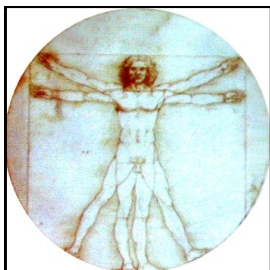


conde, dans une salle de spectacle, le soleil nous envoie 66 milliards de neutrinos qui traversent chaque  $\text{cm}^2$  de surface ; c'est un chiffre colossal ! Trois millions par seconde et par  $\text{cm}^2$  de surface sont en provenance des centrales nucléaires (EDF est un gros exportateur de neutrinos... mais ça ne rapporte rien à la France). Cinq millions par seconde et par  $\text{cm}^2$  proviennent de la croûte terrestre. Et rien que le Big Bang, à lui seul, en fournit 10 000 milliards par seconde et par  $\text{cm}^2$ .

Le neutrino est la particule la plus abondante de l'Univers.

### Les sources de neutrinos

Les accélérateurs de particules, les explosions d'étoiles, les accélérateurs astrophysiques, l'atmosphère terrestre sont aussi des sources importantes de neutrinos.

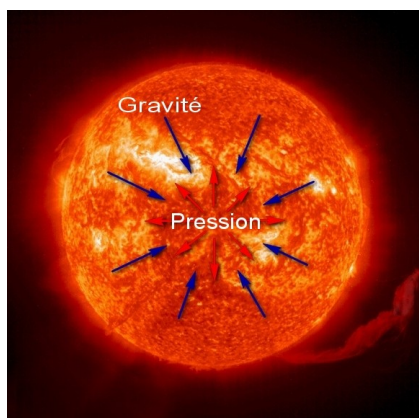


Mais notre corps lui-même en génère car il contient quelques milligrammes de potassium 40 radioactif qui se désintègre chaque jour (radioactivité  $\beta$ ) en 340 millions de neutrinos, et qui s'échappent à la vitesse de la lumière vers les confins de

l'Univers.

### L'énigme des neutrinos solaires.

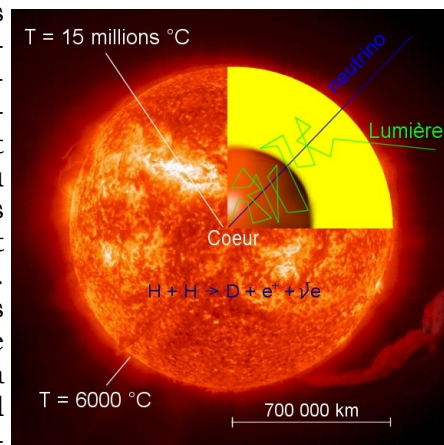
Résolue il y a une dizaine d'années, elle montre la difficulté de détection des neutrinos. Voici le soleil qui est en équilibre entre les forces de gravitation et la pression interne qui empêche son effondrement. Le soleil émet vers la Terre 66 milliards de neutrinos par  $\text{cm}^2$  et par seconde (un chiffre qui est assez faramineux, et nous sommes loin de lui...). Quelles sont les particules émises au cœur de la réaction thermonucléaire où règne une température



Le Soleil  
Rayon = 700 000 km  
masse =  $2 \cdot 10^{30}$  kg

de plusieurs millions de degrés ? Les atomes d'hydrogène fusionnent pour former du deutérium, des positrons ( $e^+$ ) et des neutrinos. Puisque nous trouvons de neutrinos, cela veut dire qu'il n'y a pas d'interaction forte mais plutôt une interaction faible, et

on peut dire heureusement, car le soleil pourra durer en mettant longtemps à brûler son « combustible ». Ici bas, nos réacteurs à fusion travaillent par interaction forte (on ne reproduit pas le soleil sur Terre). Les photons vont mettre un certain temps à diffuser au travers du Soleil mais les neutrinos, produits au cœur du Soleil, traversent celui-ci à la vitesse de la lumière et arrivent sur Terre en 8 minutes ; ils donnent vraiment une information quasi instantanée, en direct, de ce qui se passe au cœur de notre étoile.



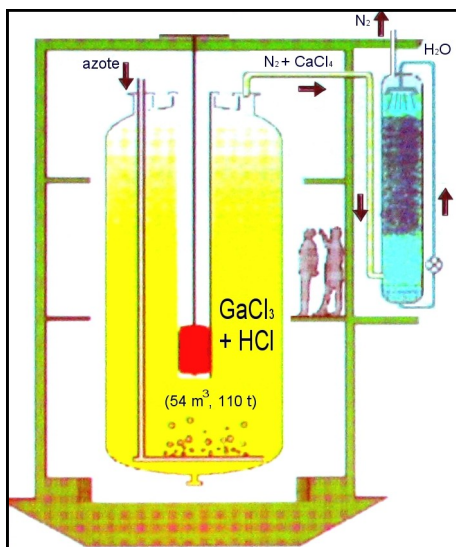
Emission des neutrinos par le soleil



Homestake  
Détecteur de neutrino

combien de neutrinos pourraient être détectés par un tel appareil et montrer que le soleil fonctionnait bien « au nucléaire ». On expose donc le liquide qui contient du chlore, enfoui au fond du mine de Nickel au Dakota (Homestake), au flux de neutrinos solaires. La réaction du neutrino sur le chlore va produire de l'argon 37



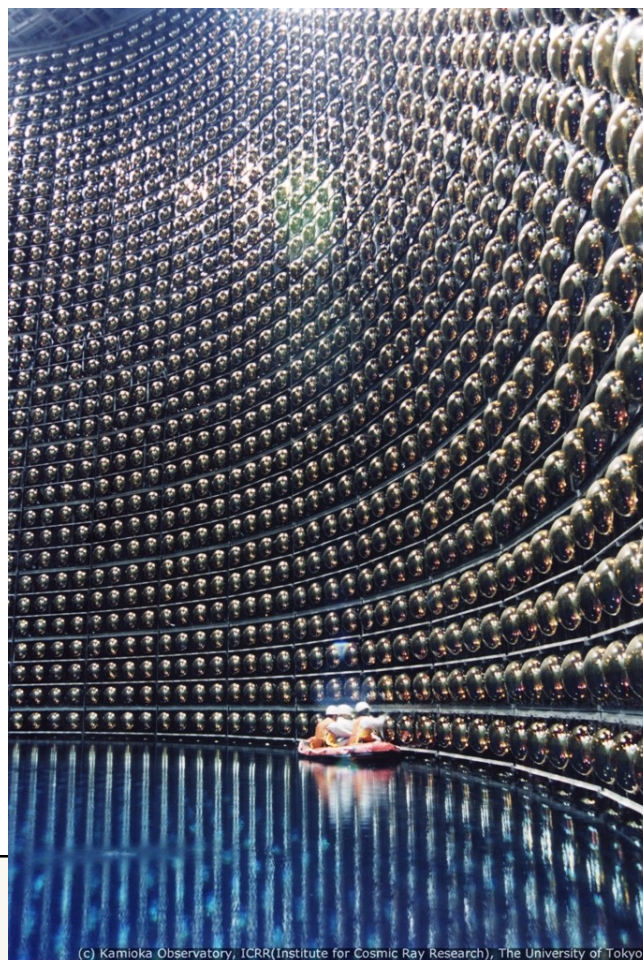


Gallex

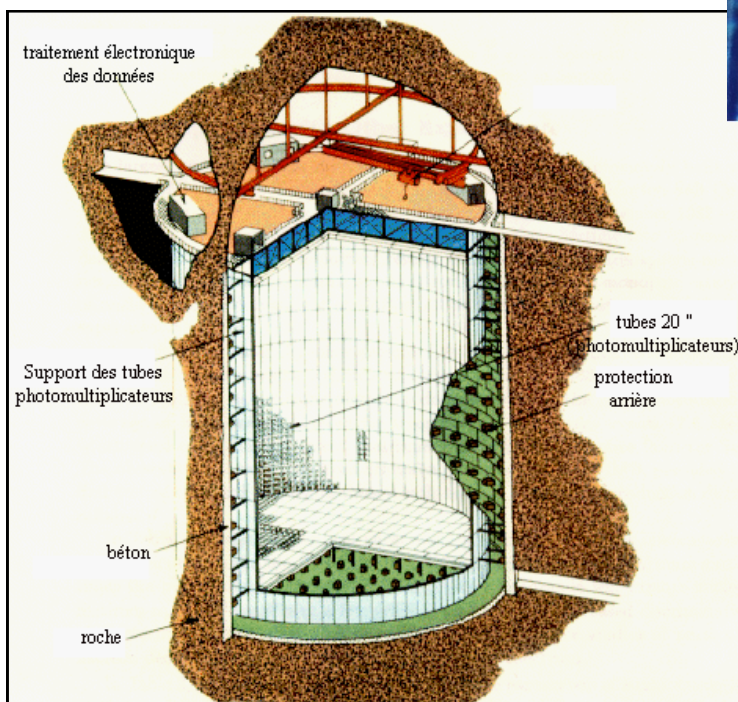
radioactif qui pourra être mesuré. Au bout d'un mois d'exposition, le liquide est purgé en injectant de l'hélium afin d'extraire les quelques atomes d'argon et les mesurer par des compteurs sensibles. A cette époque, les résultats des mesures s'avèrent

inférieurs de deux tiers aux prévisions d'où l'énigme des neutrinos solaires. D'autres expériences sont montées comme Gallex (qui utilise 30 tonnes de gallium) sous les montagnes du Gran Sasso en Italie – à noter que les recherches sur les neutrinos, la matière noire, nécessitent elles aussi de s'enterrer pour être à l'abri de la pluie des rayons cosmiques – mais là encore, le déficit en neutrinos est observé, et on ne trouve que la moitié des neutrinos attendus. Le problème est pris plus au sérieux. En 1996 est mis en place le plus gros détecteur de neutrinos jamais construit : Super-Kamiokande.

C'est un cylindre de 50 mètres de diamètre, 50 mètres de hauteur et rempli d'eau ultra pure et cerné par 10.000 photomultiplicateurs.



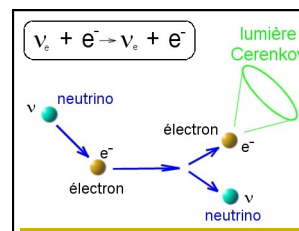
(c) Kamioka Observatory, ICRR (Institute for Cosmic Ray Research), The University of Tokyo



Japon - Le détecteur Super Kamiokande (50000 tonnes d'eau et 11200 photomultiplicateurs).  
Ci-dessous : nettoyage des tubes lors de la mise en eau.

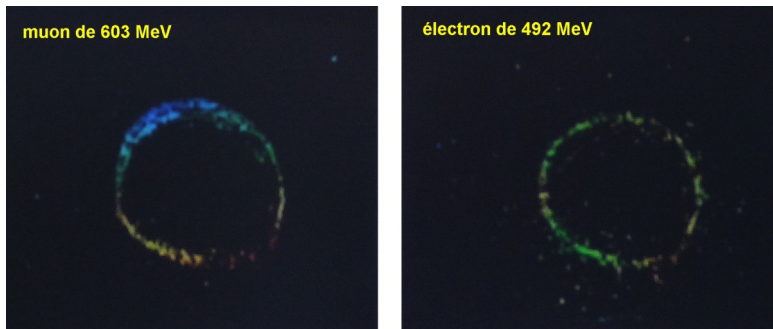
La méthode de détection repose sur la diffusion élastique du neutrino sur l'électron.

Un neutrino qui vient du soleil frappe un électron dans le milieu ; ce dernier va accroître son énergie et la vitesse de l'électron dans l'eau pourra dépasser 220.000 km/s qui est la vitesse de la lumière dans l'eau. Une particule chargée qui dépasse la vitesse de la lumière dans l'eau produit un « bang » lumineux (assimilable au bang supersonique d'un avion qui franchit le mur du son) : c'est l'effet Cherenkov. Cela fait des anneaux lumineux et on dit que



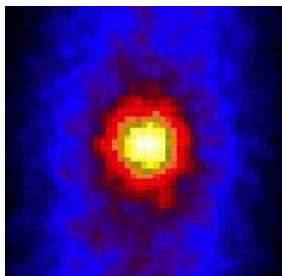
Diffusion élastique du neutrino



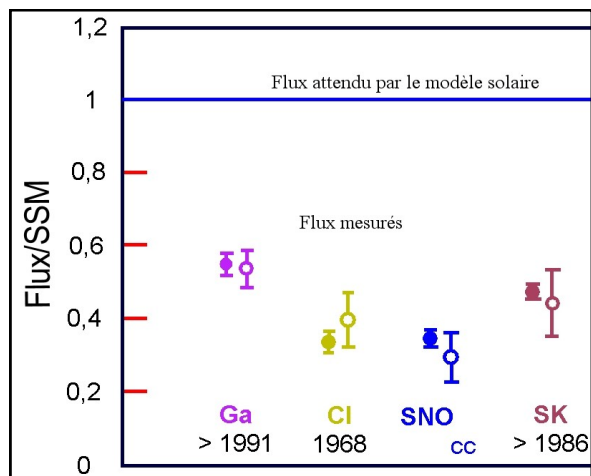


Effet Cerenkov : distinction entre muon et électron

les neutrinos font des ronds dans l'eau... qui seront détectés par la batterie de photomultiplicateurs placés au niveau des parois du détecteur. De plus, Super-Kamiokande permet de faire la différence entre deux types de neutrinos : électronique ou muonique selon la forme des anneaux. Les Etats-Unis envisagent de construire des détecteurs cinq à six fois plus grands que Super-Kamiokande dans les années qui viennent. L'expérience Super-Kamiokande a encore observé un déficit de neutrinos du soleil mais a fait un peu plus. En effet un neutrino venant du Soleil, tape sur un électron, et celui-ci garde en mémoire la direction du neutrino incident. On peut donc reconstruire la direction du neutrino et, dans un diagramme, reporter la différence entre la direction trouvée et celle du soleil. On observe ainsi un pic dans cette distribu-



Première photo du Soleil en neutrinos. Pose : 1500 jours



Flux de neutrinos mesurés par les différents détecteurs construits

tion et on reconstruit ainsi la position du soleil grâce à la détection des neutrinos ; il est ainsi possible de faire une photo du soleil en neutrinos.

Toutes les expériences mesurent les neutrinos électroniques en provenance du soleil mais subsiste donc un déficit de neutrinos.

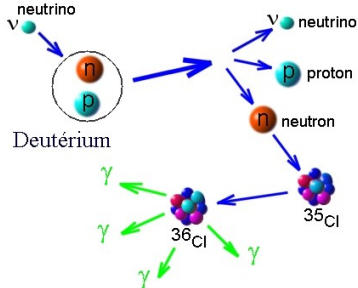
Deux causes : soit le modèle théorique du soleil est incorrect, mal compris - il n'est pas simple de faire un modèle juste à un facteur deux près malgré ce que pensaient certains scientifiques de l'époque - soit existe une nouvelle physique des neutrinos, et bientôt on parlera d'oscillation des neutrinos : il se passe quelque chose entre le moment de la création du neutrino au cœur du soleil et son arrivée sur Terre. A l'époque, seule une des trois saveurs du neutrino était mesurable par les détecteurs : le neutrino électronique ne. Il fallait d'autres expériences pour mesurer les neutrinos  $\nu_\mu$  (muonique) et  $\nu_\tau$  (tauique). Ces expériences n'allaient arriver qu'en 2000. SNO Sudbury Neutrino Observatory est un observatoire construit tout au fond d'une mine de zinc au Canada, à 2 km de profondeur. C'est une sphère en acrylique de 13 mètre de diamètre et 5 cm d'épaisseur qui est remplie, non pas d'eau pure ( $H_2O$ ) comme Super Kamiokande, mais d'eau lourde ( $D_2O$ ). L'atome d'hydro-



SNO : sphère entourée par les PMT

gène est remplacé par un atome de deutérium (1 proton + 1 neutron). L'eau lourde est un élément très utilisé au Canada de part de la choix de leur filière de réacteurs nucléaire de type Candu (CANada Deuterium Uranium) qui nécessite un moindre enrichissement de l'uranium que dans nos centrales. L'eau lourde

était donc disponible en quantité mais a été restituée à la fin de l'expérience car elle est précieuse (300 millions de \$). Plusieurs réactions sont possibles dans ce type de détecteur : un neutrino électronique interagit sur le deutérium, transforme un neutron en proton, et génère également un électron (équivalent à ce que faisaient les premières expériences comme Super-Kamiokande pour la mesure du neutrino électronique  $\nu_e$ ) et aussi, n'importe quel des trois types de neutrino :  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$  peut casser un atome de deutérium (puis s'en va...), en produisant un proton et un neutron qui pourra ensuite être détecté. Pour détecter plus facilement le neutron, on ajoute du sel dans l'eau lourde ; le chlore va capturer le neutron qui va le passer dans un état excité ; et sa désexcitation va émettre une bouffée de lumière très significative qui signe l'interaction des neutrinos par diffusion sur du deutérium.



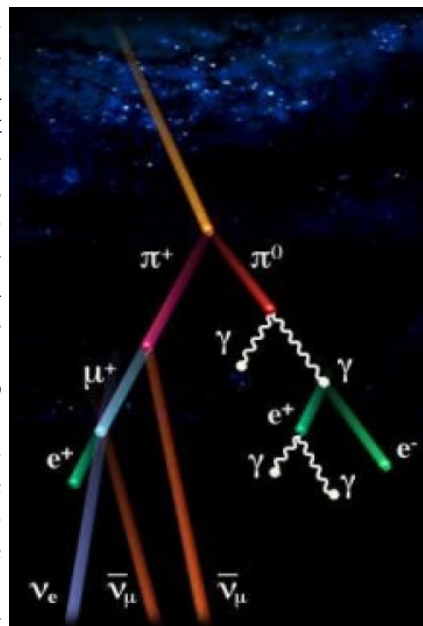
Courant neutre : sensible à  $\nu_e, \nu_\mu$  et  $\nu_\tau$

alors dans SNO permet de se rendre compte que le comptage de la totalité des neutrinos  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$  donne un résultat conforme à ce que prédisait la théorie. Au cours de leur voyage vers la Terre, une partie des neutrinos électroniques se transforme en neutrino muonique ou tauique : cela est interprété aujourd'hui comme étant l'oscillation des neutrinos.

**L'énigme de neutrinos atmosphériques**

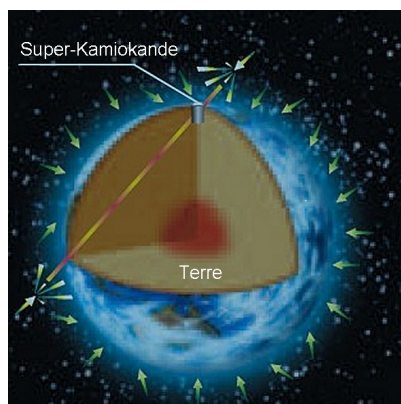
Nous sommes sans cesse bombardés par une pluie de particules : les rayons cosmiques ; des protons et des noyaux légers arrivent de l'espace, qui interagissent dans la haute atmosphère, essentiellement sur l'azote. Il produisent des particules instables qui sont des assemblages de quarks appelés pions (p) ; ceux-ci sont des

particules instables qui se désintègrent en muons ( $\mu$ ) et neutrinos muoniques ( $\nu_\mu$ ). Les muons se désintègrent aussi en électron ( $e$ ), neutrinos muonique ( $\nu_\mu$ ) et neutrino électronique ( $\nu_e$ ). On observe donc une pluie de neutrinos venant de l'atmosphère, ce sont les neutrinos atmosphériques. De la même manière, une pluie de muons descend vers la Terre.



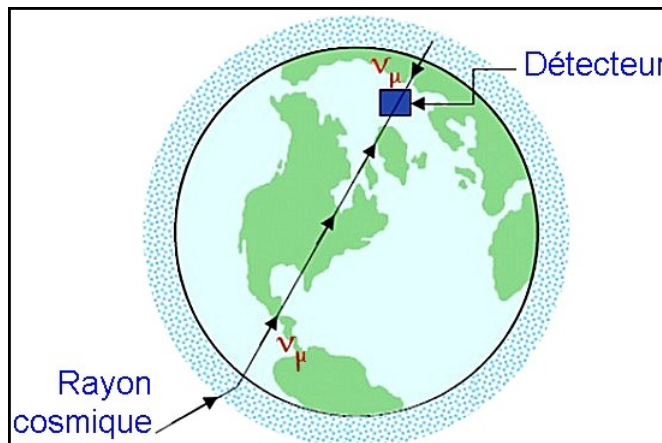
Interaction des rayons cosmiques dans l'atmosphère

Chaque seconde et par  $m^2$  de surface, 100 muons traversent le sol.



20 ou 13000 km à traverser...

C'est pourquoi, il faut s'enterrer pour détecter les neutrinos afin de ne pas être pollué par tous ces muons qui aveugleraient les détecteurs. Super-Kamiokande a mesuré ces neutrinos atmosphériques ; quand on fait le bilan entre neutrinos électroniques et neutrinos muoniques dans ce type de réac-

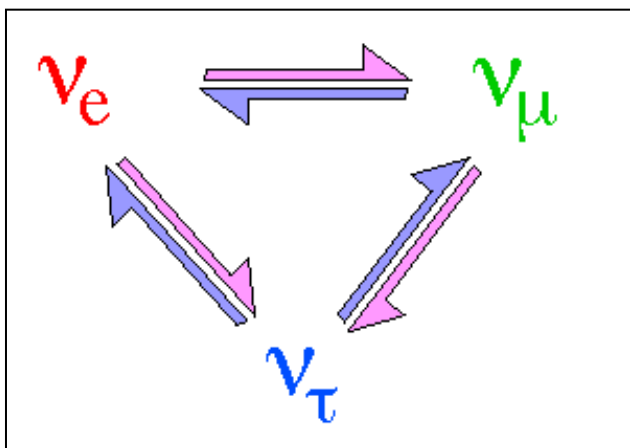




tion, on s'attend à avoir deux neutrinos muoniques pour un neutrino électronique. On a donc cherché à voir si ce rapport de 2 était obtenu. Comme avec une Terre coupée en deux, est donc mesuré ce qui vient de l'atmosphère et ce qui vient des antipodes (la Terre étant transparente aux neutrinos).

Stupéfaction : pour les neutrinos descendants, le rapport de 2 était vérifié mais pas pour les neutrinos montants, car il manquait la moitié des neutrinos muoniques (comme on peut le constater, la physique des neutrinos ne se fait avec des mesures à  $10^{-5}$ , les variations vont du simple au double...). Comment l'expliquer ? Là aussi, par l'oscillation des neutrinos : un neutrino muonique produit aux antipodes, se transforme en neutrino tauique, d'où le déficit observé des neutrinos muoniques. A noter que la probabilité de rencontre de deux neutrinos est quasi nulle, sauf lors de l'explosion des étoiles massives, dans les cœurs des étoiles qui engendrent les supernovas (découverte relativement récente et qui explique les observations réalisées – voir la suite).

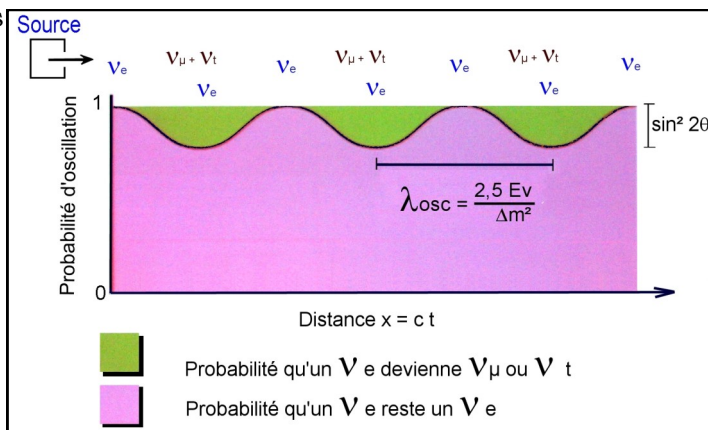
### Les oscillations



C'est un phénomène d'interférence quantique au cours duquel un neutrino d'une saveur donnée se métamorphose spontanément en un neutrino d'une autre saveur avec des règles qui dépendent de certaines particules qui sont les constantes fondamentales de la nature (et qu'il faut mesurer), et des masses des neutrinos.

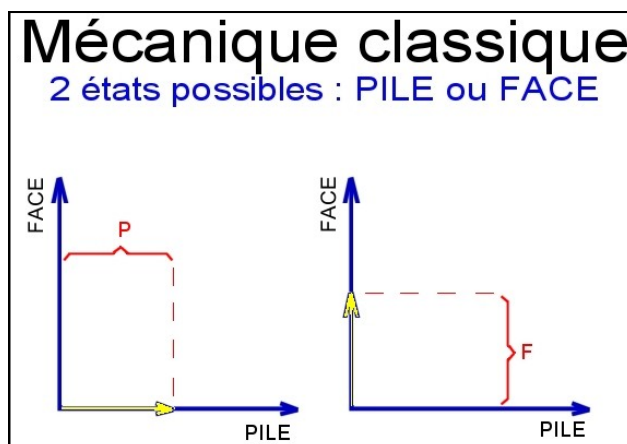
Toutes les particules qui ont été décrites précédemment ont une masse bien définie, sauf trois : les neutrinos. Les neutrinos n'ont pas de masse bien définie. Déterminée à un instant

donnée, la masse du neutrino évolue au cours du temps. C'est pour cela qu'on invoque l'existence de trois autres particules qui sont les combinaisons de  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ , et  $\nu_\tau$  appelées tout simplement **1**, **2** et **3** et qui sont des particules massives. Une source de neutrinos électroniques purs (réacteur nucléaire ou le soleil) émet vers un détecteur distant et au cours de la propagation, nous aurons une probabilité de mesurer un neutrino tauique ou muonique, d'où la disparition du neutrino électronique. Il y a une longueur d'onde associée à ce phénomène qui dépend de l'énergie des neutrinos et de la différence de masse au carré (mais la masse est très faible... ) entre deux neutrinos. On y voit une application essentielle : si on observe l'oscillation des neutrinos, on en déduit que les neutrinos ont une masse, contrairement au modèle initial de la physique des particules qui avait été construit. Sur le diagramme suivant, l'amplitude correspond au mélange des particules qui reste à déterminer.



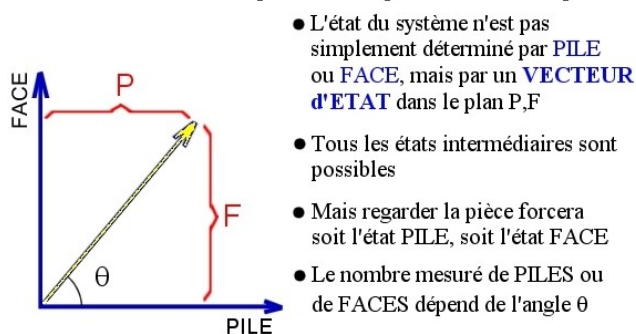
### Oscillation du neutrino

En mécanique classique, si je tire à pile ou face avec une pièce, deux états sont possibles : pile ou face. C'est ce qui est observé dans la vie courante :



Dans le monde quantique, l'état du système ne sera pas défini seulement par pile ou face mais aussi par un vecteur d'état dans le plan pile/face. Tous les états intermédiaires autres que tout pile ou tout face sont possibles et dépendent de l'angle  $\theta$ . Il faut donc un nombre très grand de mesures pour reconstruire l'état du système qui varie entre pile ou face. La mesure réalisée à une distance donnée ne sera pas celle faite à une distance autre, il y a évolution du système : la dynamique du système est donnée par une règle qui donne l'orientation du vecteur d'état (sa rotation) en fonction du temps :

## Mécanique quantique



En résumé, pour un neutrino purement électronique (émis par le soleil par exemple), le système évolue et une certaine probabilité existe d'observer un neutrino muonique ou tauique au bout d'un certain temps écoulé. Oscillation et masse du neutrinos sont une des dernières découvertes en physique de particules (1998).  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ , et  $\nu_\tau$  ne sont pas des particules de masse bien définies : on leur préfère  $\nu_1$ ,  $\nu_2$ , et  $\nu_3$  (la combinaison des particules précédentes) de masse  $m_1$ ,  $m_2$  et  $m_3$ . Le plus lourd, arbitrairement  $m_3$ , est plus léger que un millionième de



Le soleil dans la voie Lactée...

la masse de l'électron ! Ce résultat est obtenu, non pas par la physique des particules, mais en examinant la répartition des grandes structures de l'Univers. Le neutrino a eu un impact sur la formation de ces structures. L'oscillation des neutrinos donne une borne inférieure à la masse du neutrino : un dix millionième de la masse de l'électron. Un des grands mystères reste aujourd'hui le pourquoi de cette petitesse de la masse des neutrinos. Les neutrinos sont aujourd'hui étudiés dans le monde mais aussi en France. Une expérience est d'ailleurs en cours autour de la centrale nucléaire de Chooz (Ardennes), avec l'aide de 7 autres pays. Le détecteur de neutrinos s'appelle



Double Chooz constitué de deux détecteurs éloignés respectivement de 400 m, et 1 km. Chaque jour,  $10^{26}$  neutrinos sont émis dans toutes les directions par la centrale ; le détecteur, qui n'est pas au cœur du réacteur mais à 1 km, reçoit  $10^{19}$  neutrinos. On espère détecter seulement 50 neutrinos par jour à 1 km de la centrale.

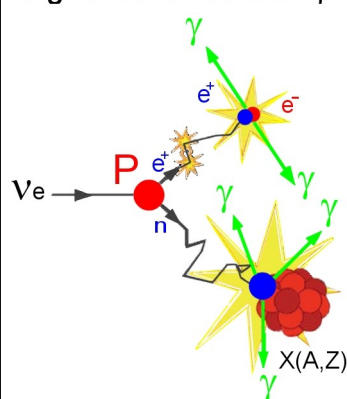


Centrale EDF de Chooz – Site de Double Chooz



La détection se fait toujours selon le même principe : le neutrino interagit avec un proton pour créer un positron et un neutron ; le positron, particule chargée, va interagir avec le mi-

Signal de la réaction  $\beta$  inverse  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$



**Signal prompt :**

positron  $e^+$

Dépôt d'énergie  
entre 1 et 10 MeV

**Signal retardé :**

neutron  $n$

capturé par un noyau  
de Cd

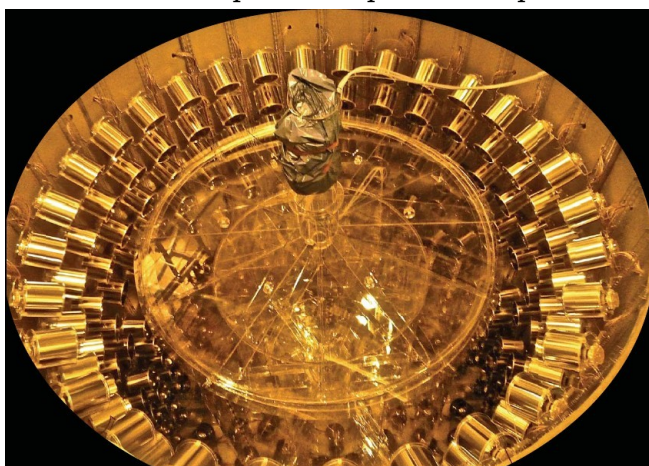
Dépôt d'énergie  
de 5 MeV

lieu en excitant les atomes et les molécules. La désexcitation des atomes provoque l'émission de photons, de la lumière visible, détectée par des photomultiplicateurs.

Quant au neutron, il est ralenti successivement par collision avec les atomes d'hydrogène du milieu puis finalement absorbé par un ralentisseur (du gadolinium : noyau neutrophage) qui émet alors une bouffée de photons, elle aussi détectée par les photomultiplicateurs



Tube photomultiplicateur

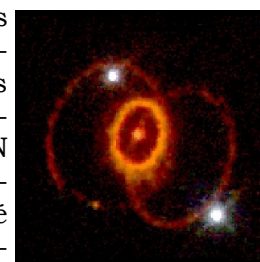


Paroi d'un détecteur de Double Chooz tapissée par les tubes PM.

Ainsi, deux impulsions lumineuses séparées d'une trentaine de  $\mu$ s confirment la détection d'un neutrino. Les photomultiplicateurs sont les instruments indispensables des détecteurs de neutrinos car ce sont aujourd'hui les seuls dispositifs suffisamment sensibles capables de détecter un seul photon reçu : un neutrino qui interagit dans le détecteur émet typiquement 200 photons pour 400 photomultiplicateurs, donc en moyenne un photon reçu par photomultiplicateur. Le photomultiplicateur transforme le photon reçu en un courant électrique mesurable ; c'est un dispositif beaucoup plus performant que la meilleure des caméras CCD actuelles, notamment du point de vue rapport signal/bruit. L'analyse des informations recueillies par Double Chooz se fait dans 35 laboratoires de 8 pays.

### Sonder l'Univers avec les neutrinos

Regardons dans le Grand Nuage de Magellan (qui est une galaxie voisine, visible dans l'hémisphère sud) ; situé à 160 000 années lumière de la Terre, le 23 février 1987, il s'y est passé un événement particulier ; en effet, l'étoile Sanduleak, observée à l'œil nu par l'observatoire de Las Campanas au Chili, a brusquement augmenté sa luminosité, comparable à plus de 100 milliards d'étoiles, aussi visible que toute une galaxie bien que ce ne soit que 0,01 % de l'énergie émise par l'étoile. C'était une supernova : l'explosion d'une étoile supermassive (8 à 40 masses solaires) ; la masse de l'étoile s'est alors convertie en énergie ( $10^{59}$  MeV !) dont 1 % est de l'énergie cinétique due à l'explosion. Mais sans neutrinos, point de supernova, car à eux seuls, ils représentent 99 % de l'énergie. Des chiffres : SN 1987A a émis  $10^{58}$  neutrinos (la supernova a explosé il y a 150 000 ans, et le détecteur Super Kamiokande n'était opérationnel que depuis deux mois quand l'événement a été observé sur Terre). 450 millions de milliards ( $4,5 \cdot 10^{17}$ ) de neutrinos ont traversé le détecteur de neutrinos, quelques heures avant que la lumière de l'explosion ne soit vue car les neutrinos ne voyagent pas plus vite que la vitesse de la lumière mais ont été émis plus tôt. Super kamiokande a détecté 10 événements...



Reste de SN1987A

une belle moisson toutefois.

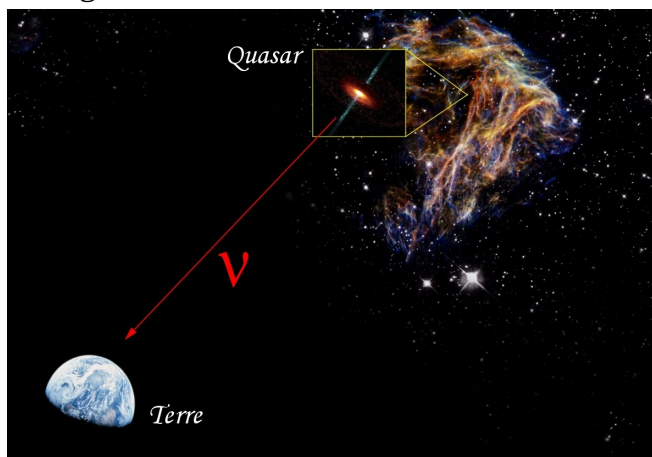


Prix nobel en 2002 à Raymond Davis (neutrinos du Soleil) et Mastoshi Koshiba (SN1987A)

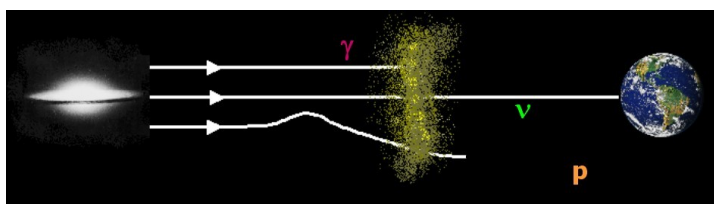
*Nota : on pense aujourd'hui que les neutrinos jouent un rôle essentiel (de part leur nombre) dans l'explosion d'une supernova, en évitant l'effondrement total de l'étoile massive et en repoussant la*

*matière vers l'extérieur.*

Eloignons-nous plus encore... on pense pouvoir aujourd'hui utiliser le neutrino comme messager cosmique parce qu'il est stable, neutre et interagit faiblement.



Dans l'Univers, se trouvent de nombreuses sources (ex : quasars). Les photons émis sont cependant facilement absorbés ou masqués durant leur trajet vers nous, et les champs magnétiques faibles ou puissants ont une grande influence sur les particules chargées en déviant leurs trajectoires mais le neutrino a l'avantage de pouvoir sortir des sources les plus denses et de traverser sans peine tout l'Univers.

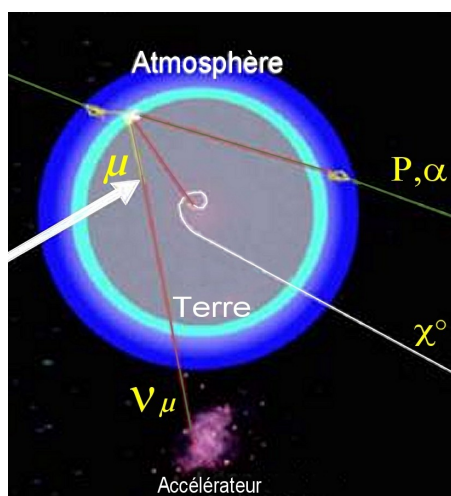


Le neutrino passe-muraille

Cependant, il faut des volumes énormes de détection et la construction du premier télescope à neutrinos est en cours. Le km<sup>3</sup> est donc l'unité de volume minimale envisagée.

Et contrairement à ce qui se fait habituellement en astronomie, ces télescopes observent ce qui se passe sous nos pieds.

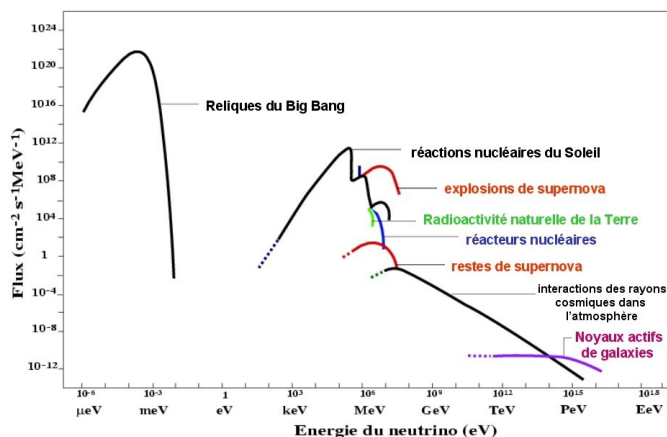
Le neutrino cosmique traverse la Terre et va interagir et produire un muon qui va remonter ; il faut donc instrumenter le fond de la



Le télescope à neutrinos voit le ciel sous la Terre

glace ou le fond de l'océan pour observer ces muons montants car les muons qui viennent de l'atmosphère sont absorbés rapidement par la croûte terrestre.

Sur le schéma ci-dessous est représenté l'énergie des neutrinos reçus sur Terre selon les différentes sources répertoriées :

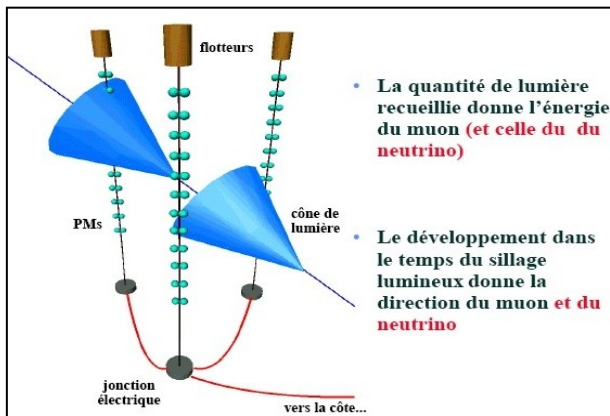


**Les détecteurs construits (ou en construction)**

ANTARES : construit à 2500 mètres de profondeur au large de Toulon. De longues lignes

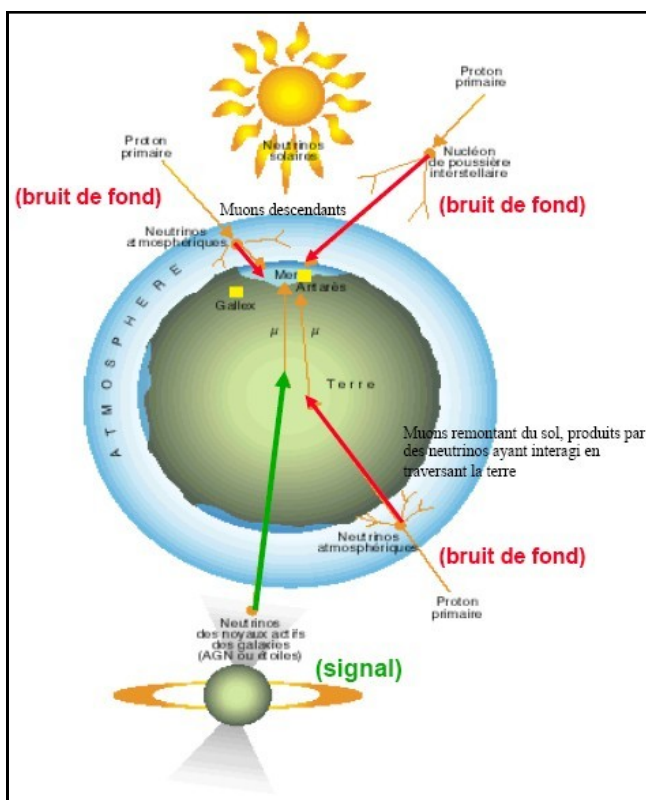


de tubes photomultiplicateurs observent les muons qui remontent des profondeurs de la Terre. Cette expérience associe le NRS/IN2P3, le CEA et l'IFREMER.



Antares : principe de fonctionnement

A noter que l'installation d'Antares associe également des laboratoires de biologie marine car ces installations donnent des informations sur la vie marine dans les profondeurs de la mer (la luminescence des organismes marins est un bruit de fond pour Antares mais sa détection donne des informations sur la vie dans les profondeurs ; voir aussi LIDO : listen to the Deep Ocean).



Antares et son environnement

IceCube : 1 km<sup>3</sup> instrumenté sous la glace de l'antarctique, avec 4800 capteurs ; il succède à AMANDA, plus modeste (670 capteurs de lumière placés à plus d'un kilomètre sous la glace entre 1996 et 1999).

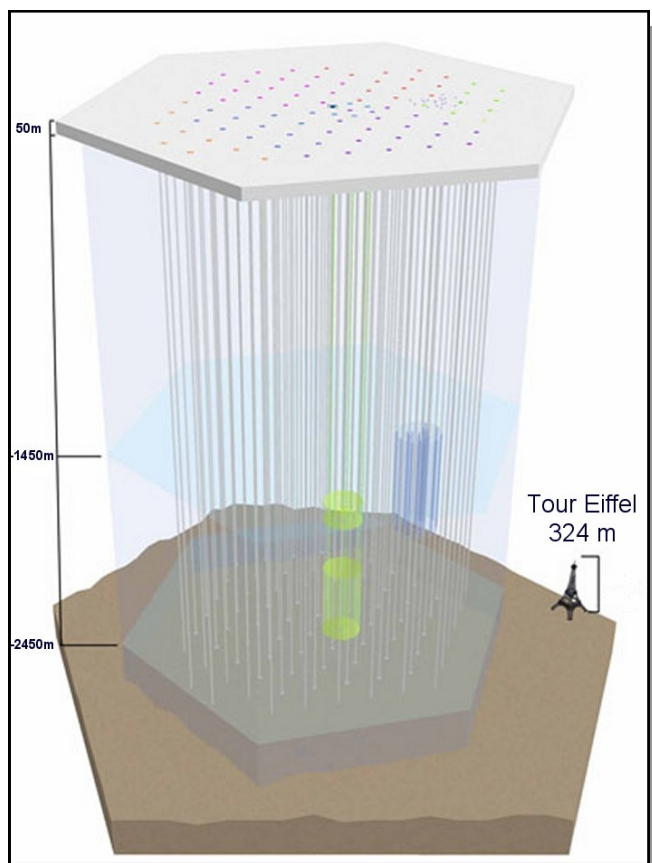


Un détecteur élémentaire d'AMANDA

Les conditions climatiques froides du Pôle Sud font que les équipes qui travaillent au projet IceCube ne travaillent que de novembre à février, période autorisant les ravitaillements par avion. Les trous de forage atteignent une profondeur de 2,5 km et la pression sur la glace est telle que les bulles d'air sont chassées et la glace est donc très transparente à cette profondeur.



la glace est donc très transparente à cette profondeur.



Antarctique : IceCube



Laboratoire IceCube - Antarctique

IceCube n'est pas le premier détecteur de neutrino à être construit mais c'est sans doute le plus grand aujourd'hui. Des expériences ont aussi été réalisées par des équipes russes et allemandes qui ont descendu 192 détecteurs de lumière dans l'eau claire et profonde du lac Baïkal, transformant 10 mégatonnes d'eau en détecteur de neutrino tout comme Antares au large de Toulon qui est le complément pour l'hémisphère nord de Ice Cube au Pôle Sud. Mais à peine un observatoire est terminé que l'on pense déjà au prochain, encore plus grand tel Arianna, 100 km<sup>3</sup>, prévu également dans les glaces de l'Antarctique.

**En conclusion :**

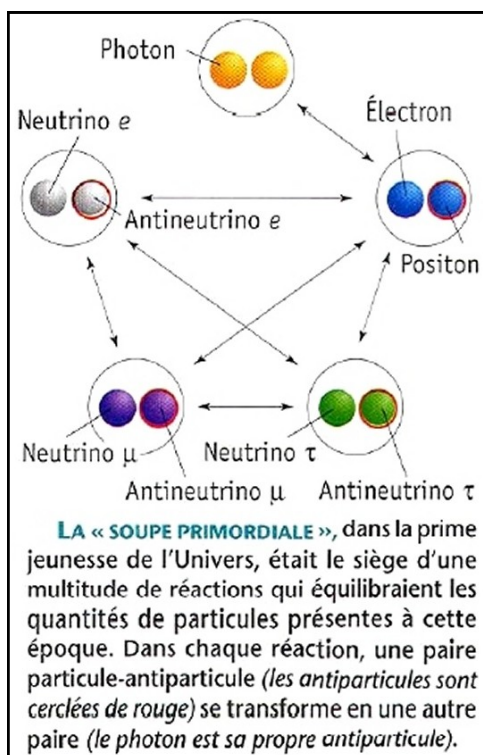
L'univers connu aujourd'hui est constitué en majeure partie d'énergie noire, et de matière noire encore mal connue ; les neutrinos constituent moins de 1 % du contenu énergétique de

l'Univers et les étoiles et les galaxies (et nous...) ne comptent que pour moins de 1 %...

Quelle était la situation 380 000 ans avant le big bang ?

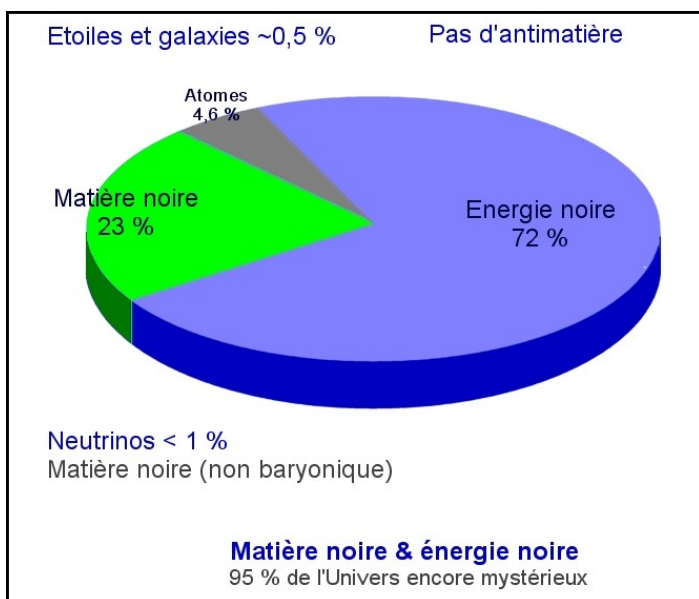
Il n'y avait pas d'énergie noire mais que de la matière noire, et 10 % de neutrinos, donc plus que maintenant. Ce sont les neutrinos créés peu de temps après le Big Bang (les photons se découplent du reste de la matière lorsque les atomes se forment 380 000 ans après le Big Bang). Quelques minutes après le Big bang, les

neutrinos étaient en interaction avec tout le reste (l'Univers était à l'époque très chaud et très dense, il y avait beaucoup de rencontres entre neutrinos) mais l'Univers se diluant, ils se découplent comme les photons le feront plus tard. On a



donc aussi un fond diffus de neutrinos, pas à la même température que le fond diffus cosmologique, un peu plus froid : 1,9° K. Ils sont peu énergétiques et donc il est difficile de les détecter (330 neutrinos/cm<sup>3</sup> dans l'Univers).

On sait aujourd'hui qu'on a plus de matière que d'antimatière dans l'Univers. Au moment du Big bang, pour des raisons de symétrie, matière et antimatière étaient à égalité. Matière et antimatière s'annihilent en produisant de la lumière mais la prépondérance de la matière sur l'antimatière s'est développée avec la création des premières particules. On pense aujourd'hui qu'une différence de comportement des neutrinos, beaucoup plus lourds,





qui auraient existé au début de l'Univers seraient à l'origine de l'excès de matière sur l'antimatière (neutrino et anti-neutrino de l'univers primordial). C'est un scénario appelé Leptogénèse, étudié attentivement, car on sait qu'il y a une différence de matière entre les quarks et les anti-quarks.

Les neutrinos pour la paix avec l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (IAEA)

Un petit détecteur de neutrinos (1m<sup>3</sup> de liquide scintillant) placé à côté du cœur d'un réacteur nucléaire permet de savoir ce qui se passe dans le réacteur, de connaître son statut de fonctionnement afin de comparer avec ce qui est indiqué par l'opérateur de ce réacteur. Il est possible également de savoir si le réacteur est utilisé à des fins civiles ou militaires.

Il s'agit donc de contrôler, au nom de la communauté internationale, que les états membres ne détournent pas leurs installations nucléaires civiles à des fins militaires.

#### En résumé :

**1- 1 milliard de neutrinos pour chaque électron, proton et neutron.**

**2- les neutrinos interagissent très, très faiblement.**

**3- les neutrinos ont une masse d'au plus 1 milliardième de la masse de l'électron.**

**4- les neutrinos oscillent d'une saveur à l'autre.**

**5- l'univers est observable au travers des neutrinos.**

**6- les neutrinos ont une utilité sociétale.**

Poème de J.Updike : Particulot

Neutrino  
 Mon chapeau  
 Je te lève  
 Toi, p'tite sève,  
 Tu te passes  
 Et de masse  
 Et de charge !  
 La terre large  
 Tu la perces,  
 La traverses  
 En éclair,  
 Comme du verre  
 Un photon.  
 En un bond  
 Tu nous flânes  
 Par le crâne,  
 Puis du --- cou --  
 V'là qu'tu nous  
 Guillotines.  
 Par la Chine,  
 En hélice,  
 Tu te glisses  
 D'en dessous  
 Le lit où  
 Elle et lui  
 Juste ont joué.  
 Quel culot,  
 Neutrino !

Adaptation de D. Hofstadter

# C'est arrivé ce jour-là...

## Avril 1981, il y a 30 ans



retour sur Terre, il s'avérera que 16 tuiles ont purement et simplement disparu et 148 autres étaient endommagées. Ces avaries ont été causées par une onde de surpression d'un des boosters latéraux. D'autres dégâts ont été constatés par la suite, et John Young déclarera que s'ils avaient été au courant de toutes ces avaries en orbite, ils auraient envoyé la navette sur une orbite plus haute et se seraient éjectés. En dépit de tous ces problèmes, Columbia s'est posée sans encombre le 14 avril sur la base Edwards en Californie. Le 28 avril, la navette était de retour en Floride, sur le dos d'un Boeing et elle a assuré les 4 vols suivants.

STS-1 était la première mission d'une navette spatiale. Columbia a décollé de Cap Kennedy le 12 avril 1981. Ce premier équipage était composé de deux membres : le commandant de mission John Young et le pilote Bob Crippen. Pour cette mission de deux jours, la navette a effectué 37 fois le tour de la Terre à une altitude de 307 km. La charge utile de la navette était composée d'appareils de mesures pour suivre en détails tous les paramètres du vol. Après une inspection en orbite, John Yong rapporte que 2 tuiles sont endommagées sur le nez de la navette. De



*John Young et Bob Crippen*

## Avril 1961, il y a 50 ans



*Yuri Gagarine*

Youri Alexeïevitch Gagarine naît le 9 mars 1934 près de la ville de Gjatsk. En 1949, après des études secondaires, il passe 2 années à l'école des machines agricoles de Lioubertsy, puis 4 ans à l'école des techniques industrielles de Saratov. C'est pendant cette période qu'il rejoint un club de pilotage amateur. En 1955, il entre à l'école de pilotage d'Orenbourg où il rencontre sa femme Valentina Goriatcheva. En 1957, il obtient son brevet de pilote de chasse sur MiG-15 et est affecté à Mourmansk près de la frontière norvégienne. En



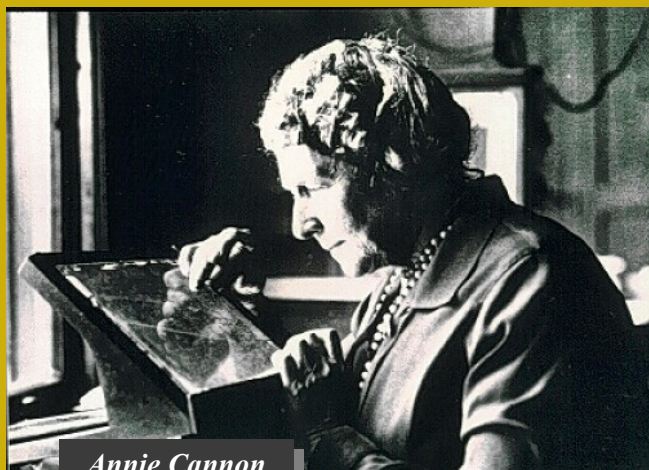
1960, il est sélectionné avec 19 autres pilotes parmi 200 pour devenir cosmonaute. En janvier 1961, suite à des entraînements et des tests très sélectifs, il ne reste plus que 3 cosmonautes : Youri Gagarine, Guerman Titov et Grigori Nelioubov. Youri Gagarine est favori ; il est remarqué pour ses qualités par le responsable du programme spatial habité soviétique : Sergueï Korolev. Il est doué en mathématiques, attentif à son entourage et dispose d'une excellente mémoire. Guerman Titov est plus cultivé mais il est plus rebelle quant à Grigori Nelioubov, il était considéré comme le plus doué sur le plan technique mais aussi le plus rebelle des 3. Il sera licencié suite à un problème d'alcool et il se suicidera en 1966. Le 12 avril 1961, Youri Gagarine décolle de la base de Baïkonour à bord de la capsule Vostok-1. Il effectue une révolution autour de la Terre en 1h 48min à une altitude moyenne de 250 km. Le retour dans l'atmosphère est très chaotique car le module de service ne parvient pas à se séparer du module de rentrée ; pendant 10 minutes, Gagarine est secoué dans tous les sens. La séparation s'effectue finalement et, à quelques kilomètres du sol, il s'éjecte de la capsule pour finir sa descente en parachute. Les autorités soviétiques prétendent à l'époque que Gagarine est revenu au sol dans la capsule ; le déroulement réel des événements ne sera connu qu'en 1990.

Sa gloire le transforme, il se met à boire. Il est assigné au programme Soyouz mais ne sera plus jamais autorisé à retourner dans l'espace. Il est responsable de l'entraînement des cosmonautes et il amorce une reconversion en tant que pilote de chasse. Le 27 mars 1968, il meurt dans un accident avec son MiG-15. La version officielle précise que sous des conditions météorologiques difficiles, Gagarine serait resté à bord du MiG pour éviter de s'écraser sur une école. D'après un témoin de l'accident, le ciel était clair et l'avion est tombé comme s'il était impossible de le redresser. L'hypothèse maintenant admise allie une erreur de pilotage à une impossibilité technique de s'éjecter. Gagarine a été inhumé dans le mur du Kremlin. En son honneur, la ville de Gjatsk fut rebaptisée Gagarine en 1968.



Vostok-1

## Avril 1941, il y a 70 ans



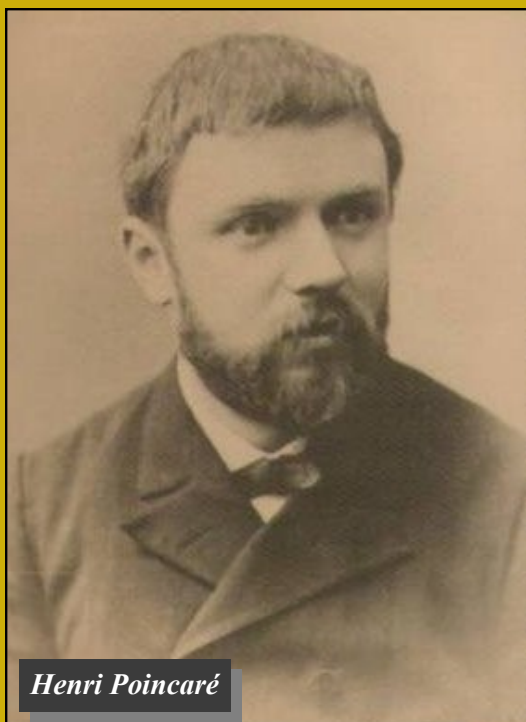
Annie Cannon

Elle est née le 11 décembre 1863. Après des études en sciences, elle est diplômée en physique et en astronomie en 1884. Au début du XXème siècle, Edward Pickering engage de nombreuses femmes comme calculatrices qui formeront un groupe qu'on appellera « le harem de Pickering ». Annie Cannon est l'une des plus célèbres, et, à Harvard, elle devient une experte mondiale en classification des étoiles. Elle s'occupe plus particulièrement des étoiles de l'hémisphère sud. Elle réutilise les lettres d'Antonia Maury,

les réarrange, supprime les classes inutiles, et en arrive au système actuel OBAFGKM. Comment s'en rappeler ? ***Oh Be A Fine Girl Kiss Me***. Ce nouveau classement ne modifie rien pour les étoiles, celles qui étaient dans la classe A y restent. Pour Pickering, ce nouveau classement, qui ne bouleverse pas tout, est acceptable. Ce que Pickering apprécie avant tout c'est qu'Annie Cannon est capable de classer 3 étoiles par minute. En 10 ans, elle va classer 350 000 étoiles, et finalement le catalogue des étoiles qui a pratiquement été entièrement réalisé par

Annie Cannon est relativement homogène. D'ailleurs ses assistants lui ont parfois donné à classer des étoiles déjà classées, juste pour voir si tout était vraiment homogène. Au bout de 27 ans de travail, à 75 ans, elle obtient officiellement le titre d'astronome, et c'est la première femme à l'avoir. A l'époque on ne tient pas encore compte de l'extinction interstellaire, on a un immense catalogue de spectres d'étoiles, mais on ne sait pas encore à quoi cela correspond. Annie Cannon s'éteint le 13 avril 1941.

## Avril 1854, il y a 157 ans



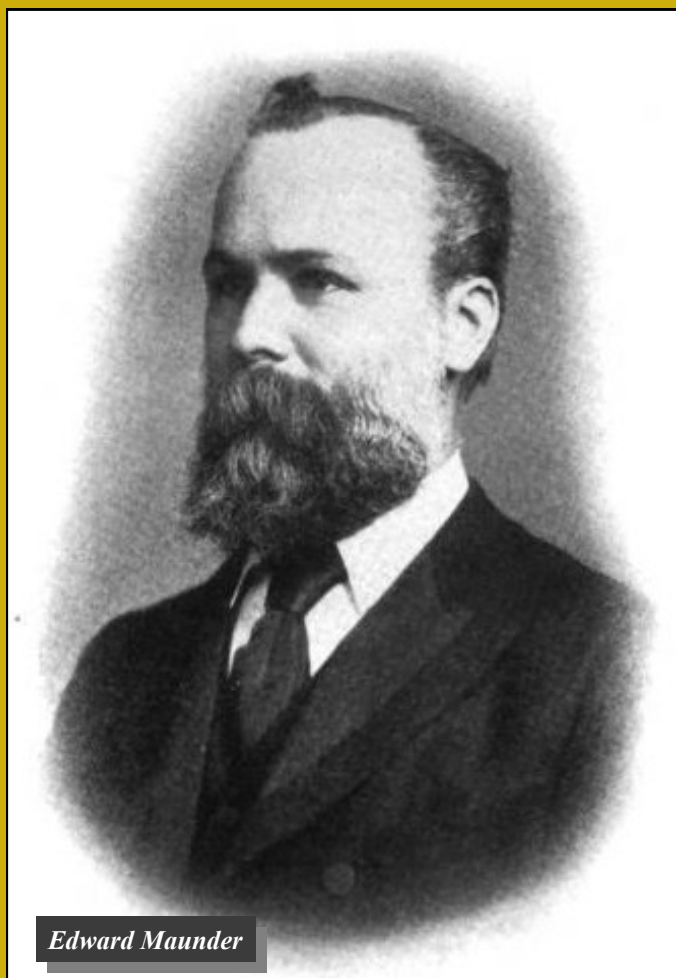
Henri Poincaré

Henri Poincaré est le dernier des grands savants universels. Il maîtrisait en particulier l'ensemble des branches des mathématiques. Il est né le 29 avril 1854 à Nancy. Fils d'un professeur à la faculté de médecine de Nancy et cousin germain du président de la République Raymond Poincaré, il remporte deux fois le concours général de mathématiques. Il est classé premier au concours d'entrée à l'École Polytechnique en 1873 puis à l'École des Mines en 1875. En 1901, il est le premier lauréat de la médaille Sylvester de la Royal So-

ciety. Le 1<sup>er</sup> octobre 1904 il est nommé professeur d'astronomie générale à l'École Polytechnique. Il accepte de ne pas être rémunéré, juste pour éviter la suppression de la chaire. En 1905, il présente, à l'Académie des Sciences, les équations d'Henrick Antoon Lorentz avec qui il correspondait. Ces mêmes équations sont à la base de la théorie de la Relativité Restreinte, mais alors que Poincaré s'évertue à conserver un temps absolu, Einstein retrouve les mêmes transformations en partant simplement du principe de relativité. Il s'est aussi intéressé à la gravitation, en affirmant que les « ondes gravifiques » se propagent à la vitesse de la lumière. Cette représentation explique mieux que les lois de Newton les mouvements des astres, notamment celui de la planète Mercure, qui sera complètement expliqué par Albert Einstein avec sa théorie de la Relativité Générale. Alors qu'il est à l'origine de la théorie de la Relativité, c'est Einstein qui est passé à la postérité. Henri Poincaré s'est également attaché au problème des 3 corps : alors même qu'il est impossible d'expliciter des solutions, on peut sous certaines conditions trouver que leurs trajectoires sont extrêmement sensibles aux conditions initiales et qu'il devient impossible d'en déterminer le destin. Ce sont les prémices de la théorie du chaos. Il meurt le 17 juillet 1912 à Paris.



## Avril 1851, il y a 160 ans

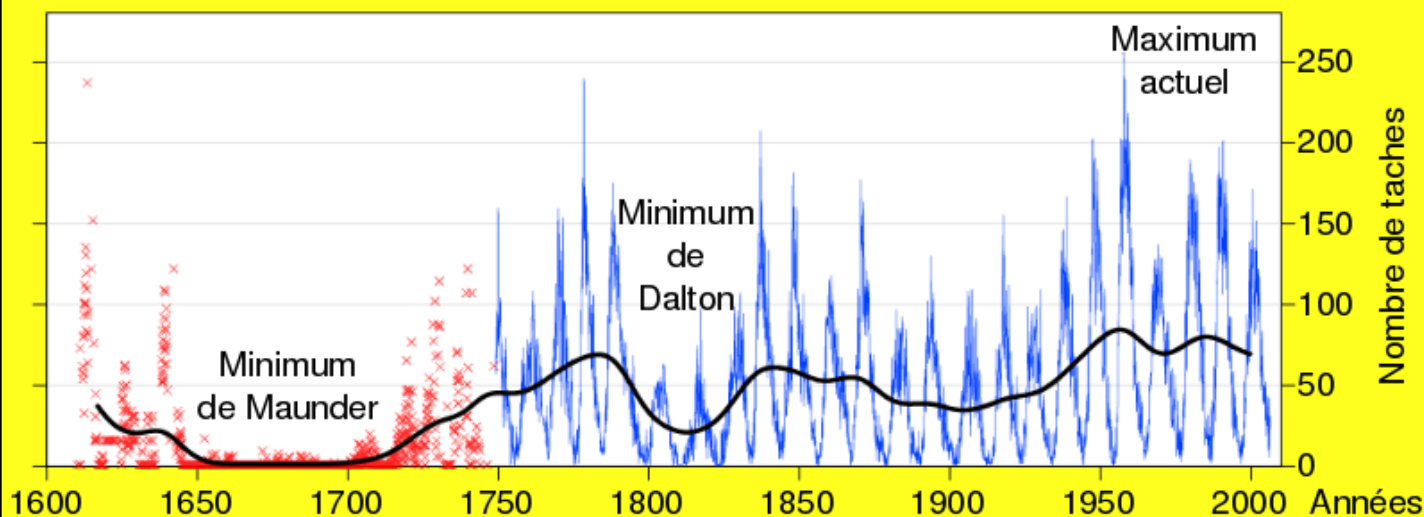


Edward Maunder

Edward Maunder est né le 12 avril 1851 à Londres. En 1873, il occupe un poste d'assistant spectroscopiste à l'Observatoire Royal ; une partie de son travail consiste à photographier et à mesurer les taches solaires. Il constate que la latitude des taches évolue selon un cycle de 11 ans. En étudiant les travaux de Gustav Spörer, il remarque que pendant une période qui s'étend de 1400 à 1510, les taches solaires étaient rares : le minimum de Spörer. Il examine alors d'autres archives de l'observatoire à la recherche de périodes qui présenteraient la même particularité. En 1893, il annonce l'existence d'une période durant laquelle le Soleil était dépourvu de taches entre 1645 et 1715 : cette période porte maintenant son nom. Il a aussi observé Mars : il ne croyait pas en l'existence des canaux. A la suite d'expériences concernant la vision, il conclut que les canaux ne sont que le résultat d'une illusion d'optique.

### Evolution du nombre de taches solaires par an

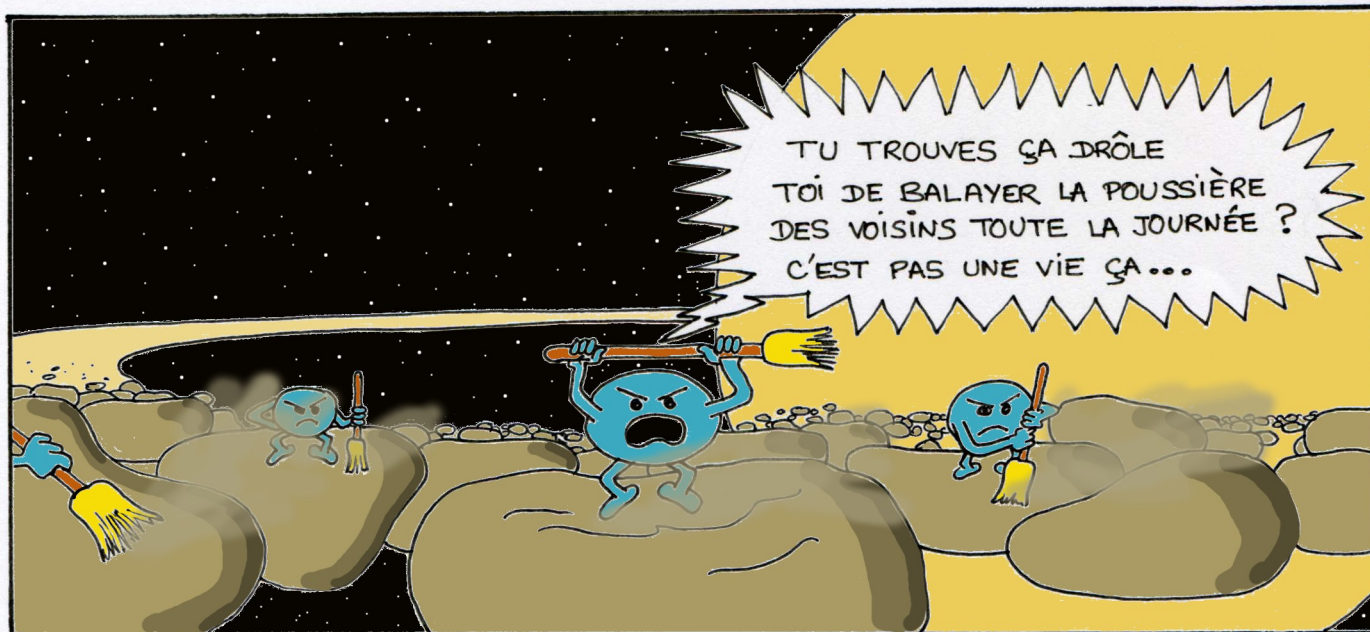
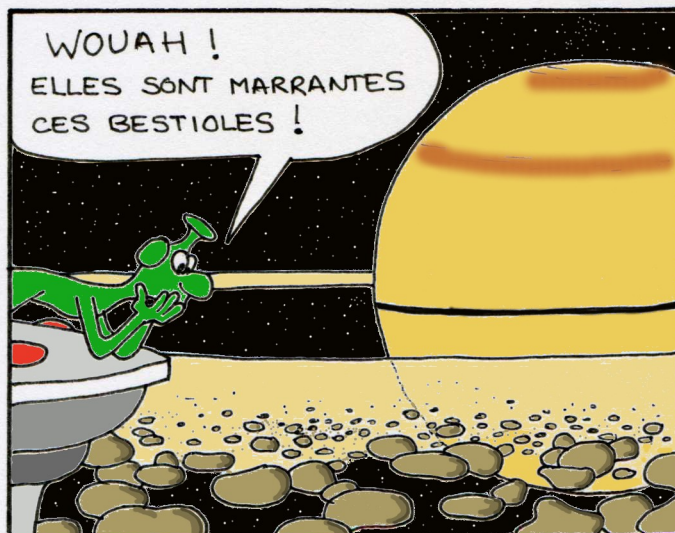
× Observations sporadiques  
| Observations régulières





# Al 78 Ménage quand tu nous tiens...

Parmi les mystères qui demeurent à propos des anneaux de Saturne, leur étonnante clarté car avec les collisions entre les cailloux dont ils sont faits, ils auraient dû être recouverts de poussière depuis longtemps...





# TJMS - Buthiers

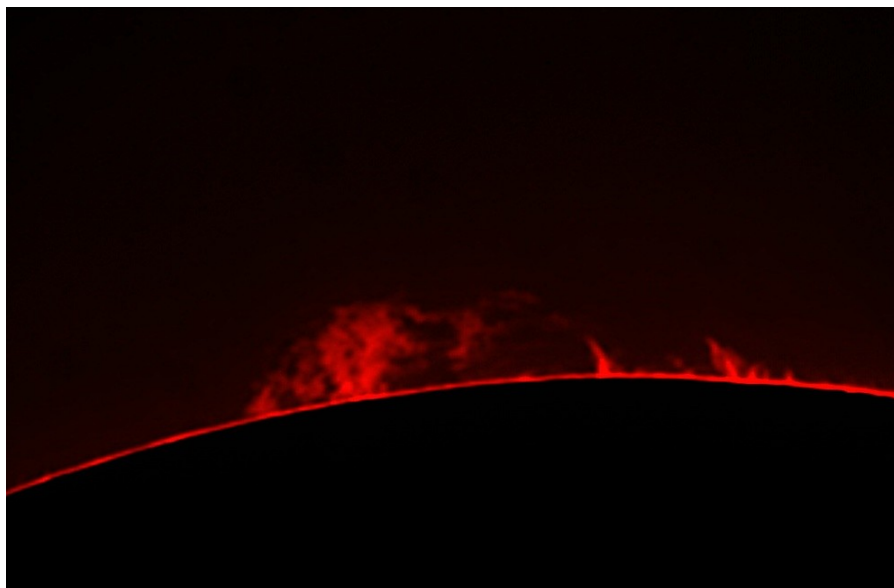
## Saison 1

## épisodes 2 et 3

### Dimanche 30 janvier

Nous avons réservé le télescope il y a trois jours ; la météo prévoyait du beau temps pour aujourd'hui avec une très bonne probabilité. Avec David, nous arrivons en même temps dans le parking à 14h 30, pour récupérer les clés. Nous nous sommes donné rendez-vous dès le début de l'après-midi pour observer le Soleil avec le coronographe monté en parallèle sur le télescope. Cet instrument est muni d'un masque derrière lequel on positionne l'image du Soleil pour faire apparaître les protubérances sur le bord du disque à la manière de ce qu'il se passe lors des éclipses totales de Soleil. Comme la Terre ne se trouve pas toujours à la même distance du Soleil, pour être sûr que le masque dissimule le Soleil mais pas trop pour ne pas ca-

cher les protubérances, il faut en changer régulièrement : c'est le groupe de soutien du télescope (le GST) qui s'occupe de l'opération lors des séances de maintenance. En une demi-heure le coronographe est opérationnel, nous observons déjà les protubé-

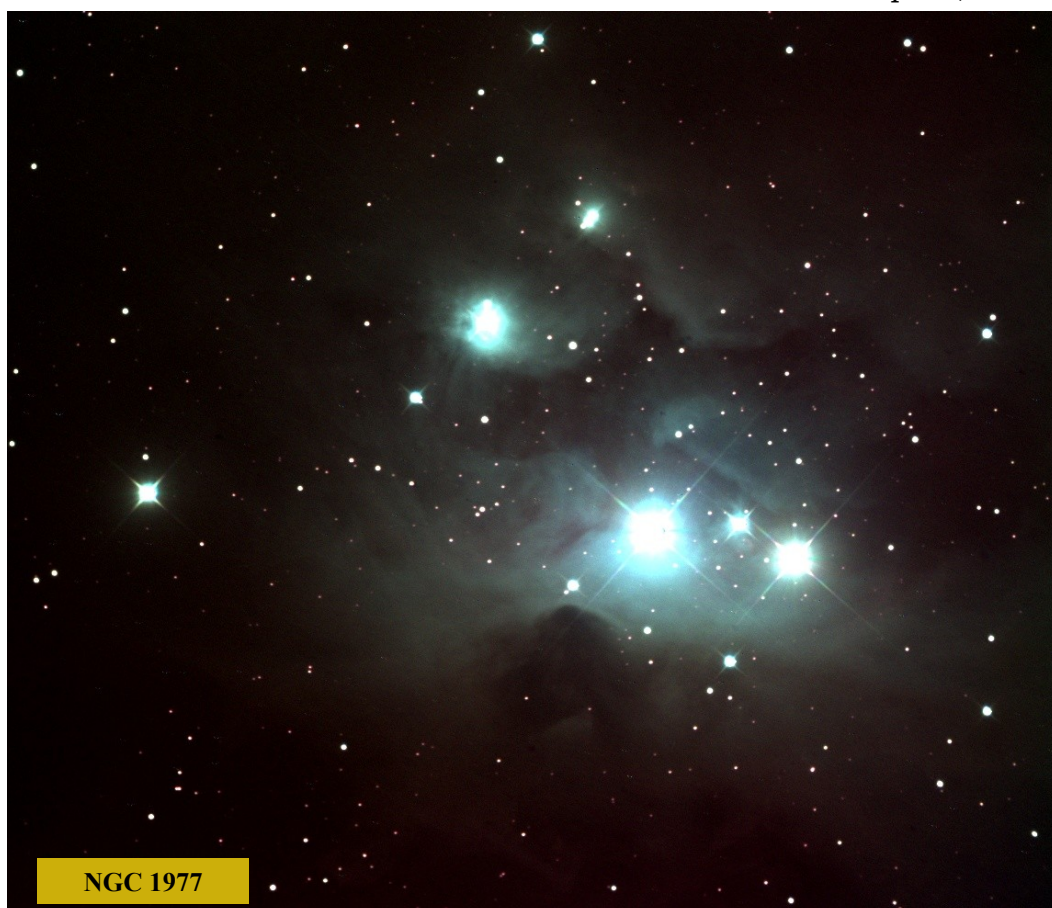




rances autour du Soleil. Nous commençons par pester quelques minutes sur le fait qu'il n'y a pas assez de tirage pour enfile les oculaires, nous sommes obligés de tenir l'oculaire à la main derrière le porte oculaire pour que l'image soit nette : un comble, qui a conçu l'instrument ? On a beau changer d'oculaire, rien n'y fait, il est toujours quelques millimètres en dehors du porte-oculaire. David a alors l'idée d'utiliser notre ustensile favori : le renvoi coudé.

Là, effectivement ça change tout, on peut enfin observer à loisir et affiner la mise au point pour découvrir de magnifiques protubérances disposées aux quatre points cardinaux. Le masque est au centre du champ de l'oculaire mais la platine du porte-oculaire peut se décaler pour centrer les protubérances, on peut alors faire des images avec notre webcam. En cette saison, le soleil ne monte pas très haut dans le ciel et il nous est impossible de faire une séquence de films pour animer l'évolution des

protubérances, mais c'est une idée que nous réaliserons plus tard dans l'année, lorsque nous disposerons de plusieurs heures devant nous. Avec le coucher du soleil, nous envisageons d'enregistrer nos « flat » de la nuit pendant le crépuscule. Il faut suivre le crépuscule de près car trop tôt, les images sont saturées même avec des temps de pose très courts et trop tard les étoiles apparaissent déjà sur les images. Malgré tout nous arrivons à moyenner nos « flat » de manière à supprimer les premières étoiles de nos images. Nous décidons de nous diriger vers Jupiter pour voir où en est la maintenant célèbre SEB (bande équatoriale sud). Bonne surprise, la turbulence n'est pas aussi mauvaise que prévu et la SEB apparaît maintenant sous la forme de deux lignes parallèles de part et d'autre de la tache rouge. Alors que j'observe du haut de l'escabeau, je vois deux personnes pénétrer dans l'enceinte de l'observatoire. Depuis la coupole, j'apprends qu'ils font partie du groupe d'amis de Pierre qui étaient prévus pour observer avec nous ce soir. Tout le monde observe Jupiter, cer-







STL. Lorsque l'image s'affiche nous sommes agréablement surpris par le nombre d'étoiles disponibles pour le guidage. Nous effectuons la calibration et nous lançons le guidage. Sur le capteur principal nous essayons des poses de 1 puis 2 min ; l'autoguidage fonctionne parfaitement ; nous lançons des acquisitions de 5 min, 6 pour la luminance, puis 2 dans chaque filtre pour faire de la quadrichromie. Sur les images brutes nous voyons déjà parfaitement le quintet de

tains sont même étonnés de pouvoir aussi bien la voir alors que la nuit n'est pas encore tombée : on ne devine que Jupiter dans le ciel. J'en profite pour faire un film de la planète. Sébastien nous rejoint, suivi de Pierre et du dernier membre de son groupe. Nous sommes maintenant 7. Sébastien tente d'utiliser le C8 installé en parallèle sur le T60 pour faire un film de Jupiter avec son appareil photo contrôlé par son ordinateur mais, pas de chance, windows plante... Il est 19h 30, le soleil est suffisamment bas sous l'horizon pour commencer nos images du ciel profond. Notre première cible est NGC 7331, une grande galaxie dans la constellation de Pégase près de laquelle se trouve le quintet de Stéphane. Aujourd'hui, nous comptons bien utiliser l'autoguidage pour faire des poses plus longues. Nous réglons tout d'abord la CCD, le centrage, la mise au point, puis nous sélectionnons le capteur d'autoguidage. Lors de notre tentative précédente, nous n'avions trouvé aucune étoile sur ce petit capteur mais notre déception avait été largement compensée par la facilité avec laquelle nous pouvions néanmoins réaliser des images avec le seul capteur de 11 millions de pixel de la

Stéphane. Sébastien utilise le C8 pour faire des images de la même région du ciel avec son appareil photo en même temps que nous, mais son champ est plus petit et son image est centrée juste entre NGC 7331 et le quintet de Stéphane : re - pas de chance ! Autre problème : côté ouest, Pégase n'est plus très haute sur l'horizon à cette époque et, de plus, juste dans le halo de la ville de Malesherbes. Nous n'avons pas le temps de réaliser les poses avec les filtres de couleurs. Nous changeons de cible pour revenir vers le méridien et nous choisissons une autre galaxie, dans Andromède, située pratiquement au zénith : NGC 891, une galaxie vue par la tranche sur laquelle on peut voir la bande de nuages de poussière. C'est un objet que nous cherchions à immortaliser depuis des années mais nous avons maintenant un équipement qui doit nous permettre de faire des images magnifiques. Dès la première image, la bande sombre apparaît clairement, c'est parti pour 1h de poses. J'installe les jumelles sur la terrasse. La nébuleuse d'Orion est vraiment impressionnante dans les 25 x 100. Nous observons aussi M81 et M82, les célèbres galaxies dans la Grande Ourse. Notre cible suivante :



NGC 2371

NGC 1977, la nébuleuse de « l'homme qui court » située juste à côté de la grande nébuleuse d'Orion. Nous gardons nos séries de poses qui nous révèlent nettement les nébulosités de la région. Pendant ce temps je traite les images de NGC 891 et les images sont vraiment belles. Notre dernière cible de la soirée, l'amas ouvert M46 dans la constellation de la Poupe qui contient une nébuleuse planétaire NGC 2438. Avant de refermer la coupole, nous effectuons nos « dark » et nous offset pour traiter les images correctement. Il est 2h du matin et nous enclenchons l'alarme pour quitter l'observatoire : encore une super soirée et la nuit sera suffisamment longue pour ne pas être complètement dans le cirage le lendemain.

### Dimanche 3 mars

Cette fois-ci, l'organisation s'améliore, puisque contrairement à l'habitude où nous arrivons avec autant de voitures que de participants, nous testons le co-voiturage. J'arrive le premier avec Maguy, Pierre et Gilles suivent, quant à David, suite à des travaux sur l'autoroute il m'appelle une première fois pour me dire qu'il doit inaugurer un nouvel itinéraire et qu'il aura un peu de retard. Une bonne demi-heure plus tard, je reçois un nouvel appel de David qui, pensant qu'il n'aurait pas besoin de son GPS, m'annonce qu'il a dépassé Buthiers de 50 km, qu'il fait demi-tour et ne sera pas là avant une bonne demi-heure. Comme nous envisageons de faire un film en timelapse de l'ouverture de la coupole sur un Soleil couchant et que c'est lui qui dispose de l'objec-



tif grand angle, nous attendons qu'il arrive pour ouvrir le cimier. A son arrivée, nous installons les appareils photos sur la terrasse. Aujourd'hui nous comptons faire les poses autrement. Les images couleurs n'étaient pas assez nombreuses pour éliminer efficacement le bruit, il faut donc en faire plus. Sur nos prochaines cibles nous ferons donc 6 poses de 5 min en luminance, et 5 poses de 3 min dans chaque filtre pour apporter la couleur. Nous dirigeons le télescope vers NGC 2371, une petite nébuleuse planétaire de magnitude 13 dans la constellation des Gémeaux. Pendant les prises d'images nous nous restaurons. Nous montons régulièrement sur la terrasse avec le sèche-cheveux pour désembuer les appareils photos : celui de David et le mien pour faire un timelapse et Gilles pour la rotation du ciel autour du pôle. De la terrasse nous constatons qu'un voile de cirrus obscurcit le ciel sur l'horizon sud, justement vers les Gémeaux, il va falloir changer d'horizon, et parmi les constellations les plus visi-

bles nous décidons d'aller dans la Grande-Ourse. C'est la galaxie M101 que nous sélectionnons pour la prochaine série de photos. Dès les premières images nous voyons clairement les bras spiraux. Pendant que nous faisons l'acquisition de M101, je traite les images de NGC2371 et nous n'oublions pas de remonter avec le sèche-cheveux pour nous occuper des appareils photos. Notre dernière cible de la nuit : la célèbre galaxie M51 dans les Chiens de Chasse. Sur les images qui apparaissent au fur et à mesure sur l'écran de l'ordinateur, on voit même d'innombrables autres galaxies bien plus lointaines que M51 déjà située à 23 millions d'années-lumière. Une analyse approfondie de l'image montrera que certaines se trouvent même à plus de 2 milliards d'années-lumière ! Avant de refermer l'observatoire, nous observons Saturne, mais la turbulence est importante : inutile de faire le moindre film. Encore une super soirée avec de magnifiques images à la clé.



M 101

# Le pôle nord céleste.

Le but de cette étude est de mesurer précisément la position du pôle céleste Nord pointé par l'axe de rotation de la Terre. Cet axe est actuellement proche de l'étoile polaire, mais il se déplace sur la voûte céleste à cause du phénomène de précession de l'axe de rotation. En mesurant précisément la position du pôle céleste, il doit être possible de mettre ce mouvement en évidence et de pouvoir le mesurer : vitesse de déplacement et période.

## Les photos

Pour prendre ces images il suffit d'installer l'appareil photo sur un pied fixe. Il ne faut pas de monture entraînée pour ne pas compenser la rotation de la terre. Il faut avoir une focale suffisante pour se concentrer sur un champ proche du pôle céleste et faire une pose suffisamment longue pour avoir les arcs de cercles les plus grands possibles sans être gêné par la pollution lumineuse. C'est Gilles qui, le premier, a commencé à récolter ces données ; à mesure que les années passe-

ront, elles nous permettront de gagner en précision dans la mesure de la dérive du pôle céleste et la détermination de la trajectoire de l'axe de la Terre sur la voûte céleste. Dernièrement, nos prises de vues ont évolué. Sébastien a inauguré les images fractionnées pour, d'une part limiter la pollution lumineuse et, d'autre part, allonger la taille des arcs de cercles. Chaque arc est matérialisé par les pointillés laissés par les étoiles des poses individuelles. L'assemblage des images se fait avec le logiciel « starmax ».

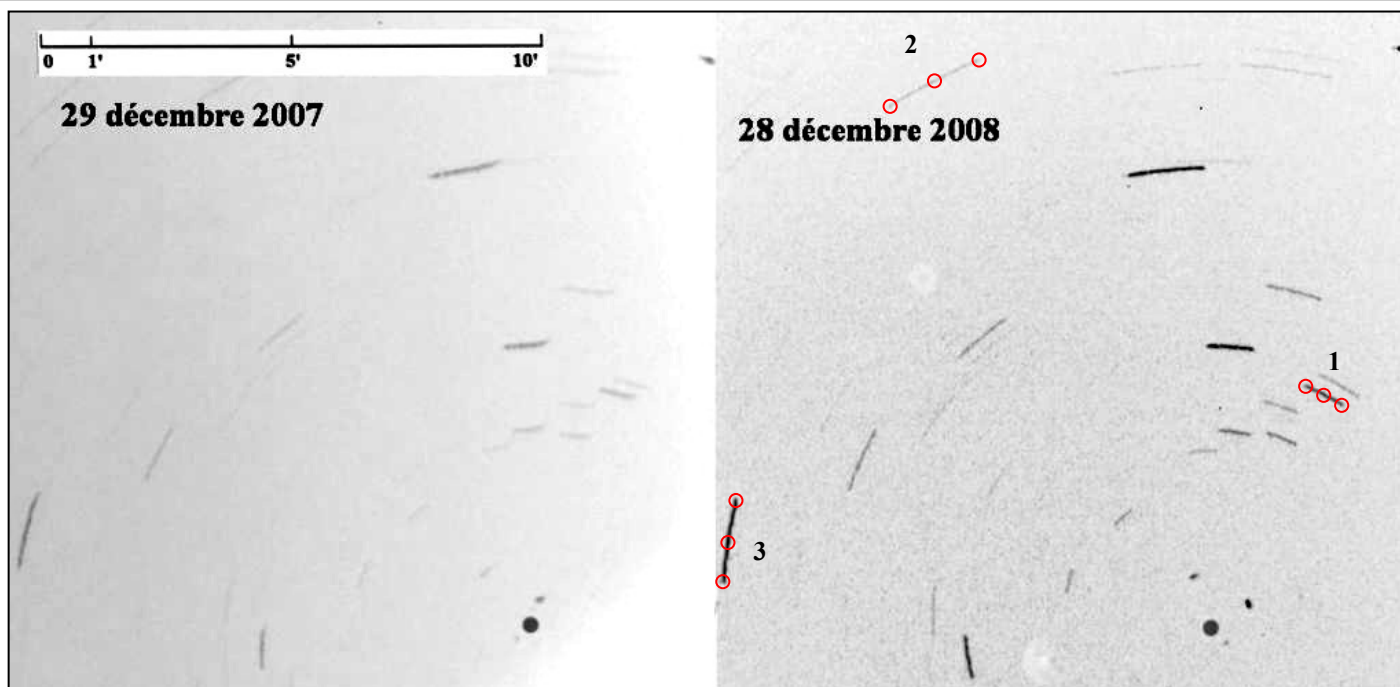
## Détermination de la position du pôle

C'est le centre de rotation des photos. Il faut déterminer sa position à partir des arcs décrits par les étoiles au cours de la pose.

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer le centre d'un cercle à partir d'arcs ; elles découlent des propriétés des cercles :

- 1- Par 3 points passe un cercle unique, dont on peut déterminer le centre et le rayon.
- 2- Les médiatrices des cordes des arcs se coupent toutes au centre de rotation.





### Méthode 1

Il existe un cercle unique passant par 3 points. Il suffit donc de mesurer les positions de 3 points appartenant à un arc pour en connaître le centre. En reproduisant l'opération sur plusieurs arcs on peut d'une part vérifier la cohérence des calculs à partir des différents arcs (les centres calculés à partir des arcs doivent être proches) et d'autre part affiner la position du centre de tous ces arcs par un « moyennage » de tous les centres.

### Application

Sur la photo ci-dessus, j'ai déterminé la position de 3 points sur différents arcs. Voici les triplets ainsi définis et les paramètres des cercles qu'ils définissent :

A <sub>1</sub> (969 ; 211)	B <sub>1</sub> (958 ; 217)	C <sub>1</sub> (946 ; 223)
<b>O<sub>1</sub> (789 ; -105)</b>		<b>r<sub>1</sub> = 363</b>
A <sub>2</sub> (704 ; 460)	B <sub>2</sub> (673 ; 445)	C <sub>2</sub> (642 ; 427)
<b>O<sub>2</sub> (891 ; 33)</b>		<b>r<sub>2</sub> = 466</b>
A <sub>3</sub> (529 ; 141)	B <sub>3</sub> (523 ; 108)	C <sub>3</sub> (521 ; 82)
<b>O<sub>3</sub> (810 ; 73)</b>		<b>r<sub>3</sub> = 289</b>

### Sensibilité de la méthode

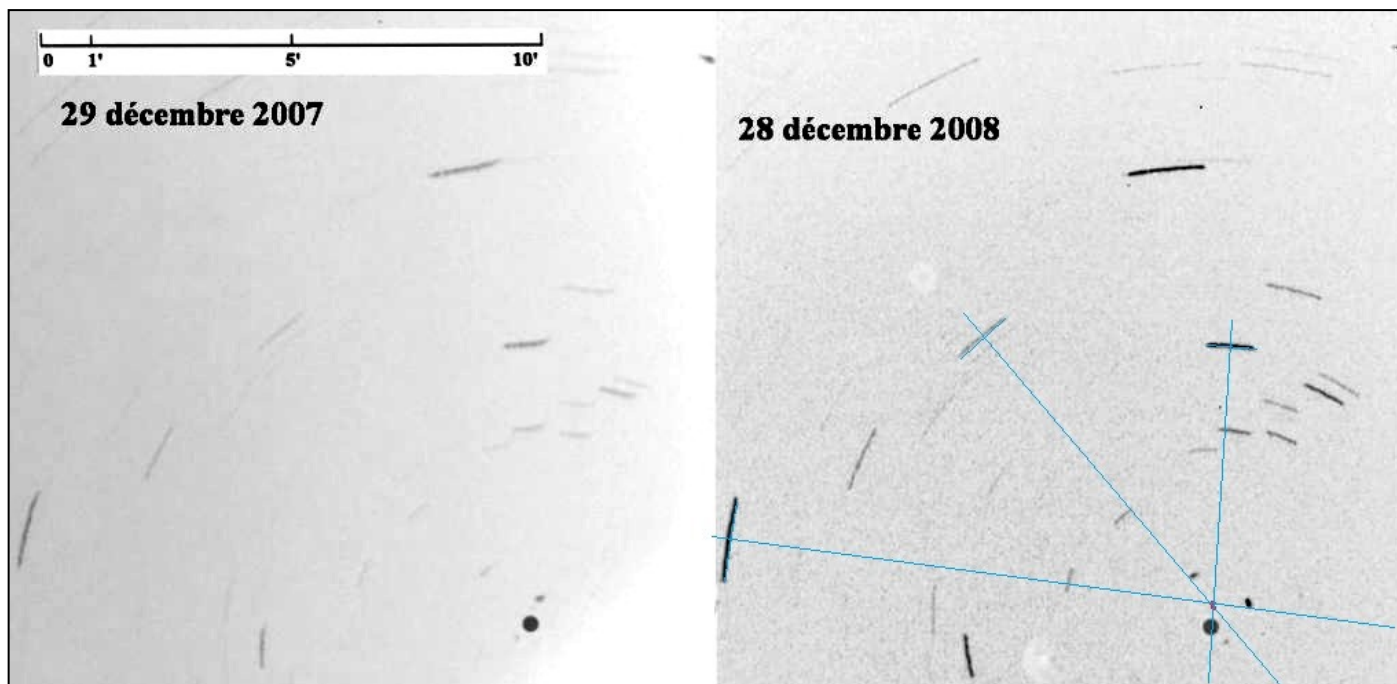
Les paramètres des cercles calculés par cette méthode dépendent de manière extrêmement sensible des positions des points par lesquels ils passent. En changeant la position du point B d'un seul pixel sur l'axe des abs-

### Programme Maple

```
> restart: with(geometry):
> circle(c1,[point(A,704,460),
point(B,673,445),
point(C,642,427)],
'centername'=O1):
center(c1),
coordinates(center(c1));
O1, [55267, 199]
      [62, 6]
O1 (891 ; 33)
> evalf(radius(c1));
466.1616280
```

cisses, on déplace le centre du cercle de 121 pixels et le rayon est diminué de 122 pixels !!

On voit que l'extrême sensibilité aux conditions initiales, à savoir la position précise des points dans les arcs, rend la méthode inutilisable, les cercles ainsi définis étant totalement différents !



### Méthode 2

Le centre de rotation est le point d'intersection des médiatrices des cordes définies par les extrémités des arcs. A partir de différents couples de cordes on peut déterminer la position moyenne de tous les centres.

### Application

A partir de 3 arcs on peut définir 3 couples de médiatrices qui se coupent aux coordonnées suivantes :

**(876 ; 61)    (876 ; 64)    (875 ; 64)**

Cette fois-ci les différents centres ainsi calculés sont proches les uns des autres ce qui montre que la méthode est applicable et peut donner facilement des résultats exploitables.

On peut en plus calculer le centre du triangle défini par les 3 points pour affiner sa position et considérer que les écarts entre les points obtenus sont dus aux incertitudes.

### Sensibilité de la méthode

Si on change d'un pixel la position d'un point, le centre ne se déplace que de quelques pixels. Cette méthode est donc moins sensible que la précédente aux conditions initiales.

### Programme Maple

```
> restart;with(geometry):
> _EnvHorizontalName := x:
  _EnvVerticalName := y:

>      x1:=704: y1:=460:
      x2:=642: y2:=427:
      x3:=529: y3:=141:
      x4:=521: y4:=82:

> point(A,x1,y1),point(B,x2,y2):
> line(l1,[A,B]);
                                     ll
> Equation(l1);
      5288 + 33 x - 62 y = 0

> point(P1,(x1+x2)/2,(y1+y2)/2):
> PerpendicularLine(lp1, P1, l1);
                                     lp1
> Equation(lp1);
      112723
      2 - 62 x - 33 y = 0

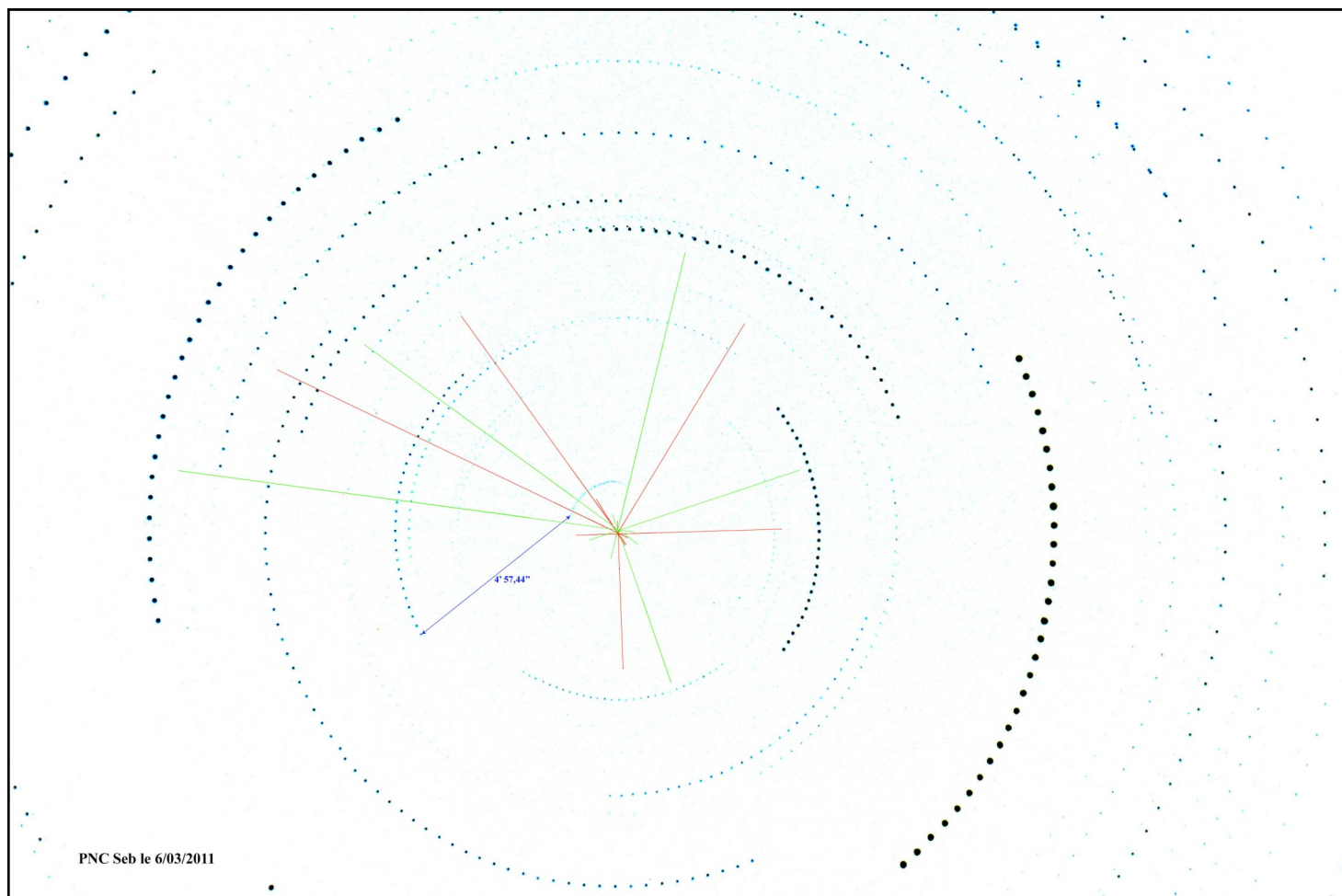
> point(C,x3,y3),point(D,x4,y4):
```



Gilles applique cette même méthode, tout d'abord à la main puis maintenant avec une feuille de calcul Excel, pour déterminer la position du centre de rotation sur les images. La méthode est facile à mettre en œuvre, elle donne des résultats précis, suffisamment en tous cas pour mettre en évidence des bizarreries sur nos images. Aurions-nous découvert que la Terre ne tourne pas si rond que cela ?

Suite dans le prochain numéro : les anomalies de l'axe de rotation...

```
> line(l2,[C,D]);
                                l2
> point(P2,(x3+x4)/2,(y3+y4)/2);
> PerpendicularLine(lp2, P2, l2);
                                lp2
> Equation(lp2);
                                 $\frac{21557}{2} - 8x - 59y = 0$ 
> intersection(G, lp1, lp2);
                                G
> coordinates(G);
                                 $\left[ \frac{1484819}{1697}, \frac{217375}{3394} \right]$ 
                                G (875 ; 64)
```



PNC Seb le 6/03/2011



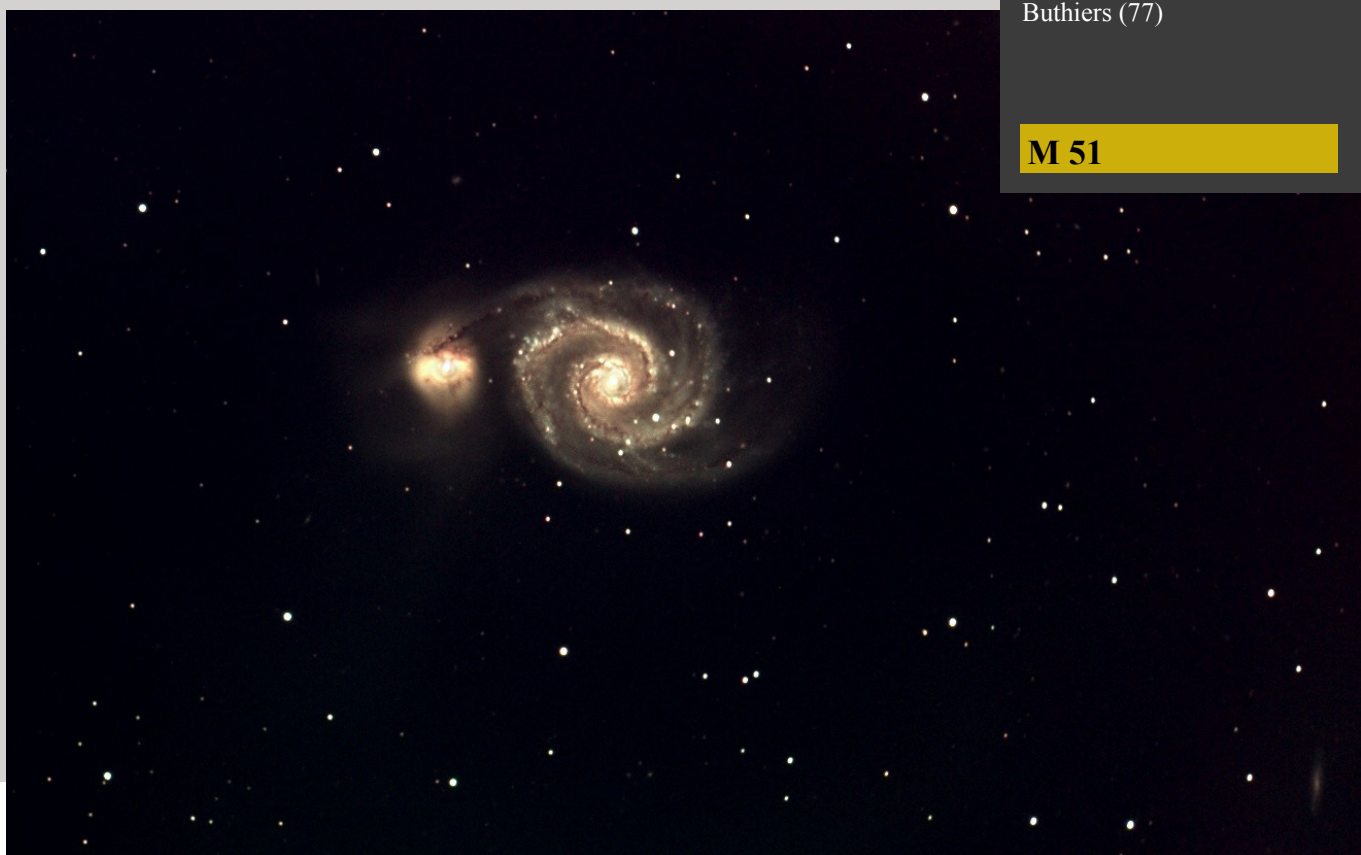


# Galerie



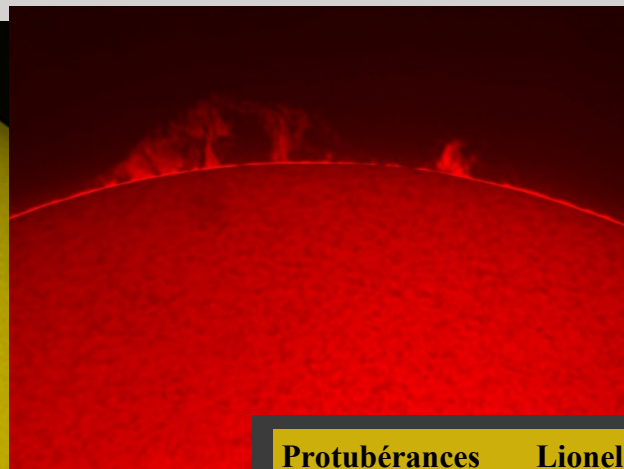
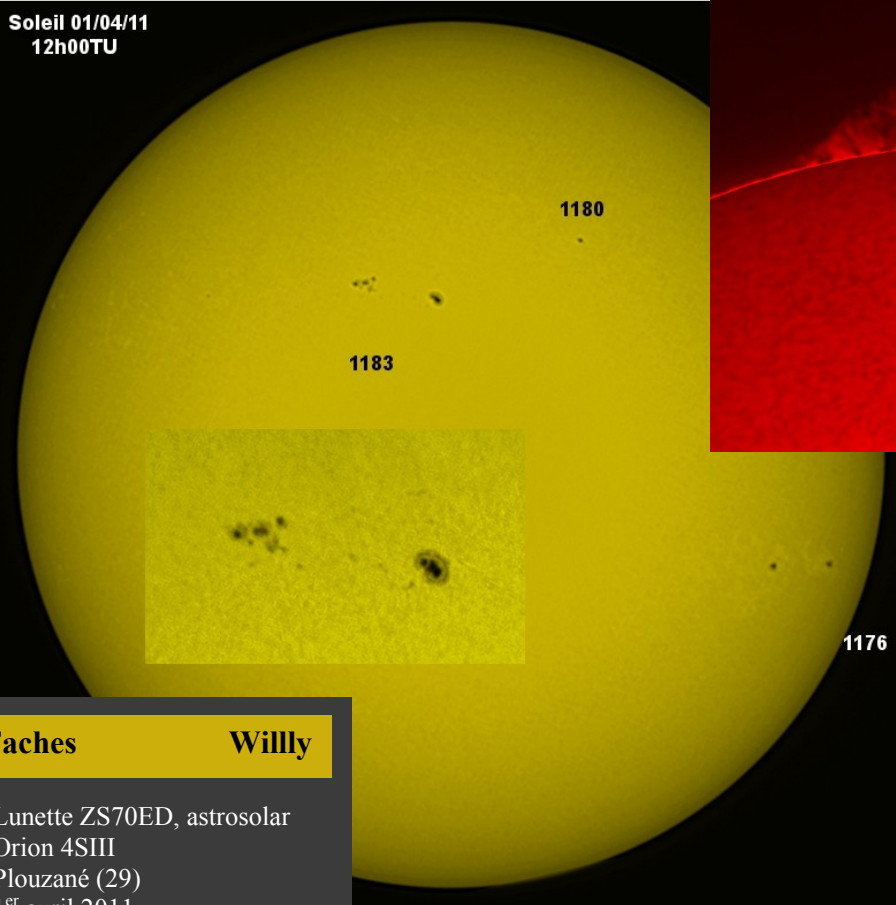
## NGC 891

T60 - TJMS  
CCD STL 11k  
L (6x5min), RVB (5x3min)  
Buthiers (77)



## M 51

Soleil 01/04/11  
12h00TU



**Protubérances Lionel**

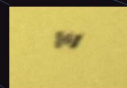
Lunette 120/1200, H alpha  
PLA C  
Bonville (28)  
20 mars 2011

**Taches Willy**

Lunette ZS70ED, astrosolar  
Orion 4SIII  
Plouzané (29)  
1<sup>er</sup> avril 2011

**ISS Bruno**

C8, Canon 30D



*Transit de la station spatiale internationale  
devant le soleil  
Alpes de Haute Provence 9 Aout 2009  
distance 452 kms  
temps de transit 0.6 seconde  
11h 11min 40.2s*



**Lune Sébastien**

C9, Canon 450D  
6 mars 2011

