

Paul-Antoine Hervieux

hervieux@unistra.fr

Les cours seront disponibles sur mon site  
dans la rubrique: L1

## Les femmes en Physique...

- Marie Curie (Nobel en Physique 1903 et en Chimie 1911)

*(radioactivité naturelle)*



- Irène Joliot-Curie (Nobel en chimie 1935)

*(radioactivité artificielle)*



- Lise Meitner

*φ nucléaire (fission)*



- Maria Goeppert-Mayer (Nobel en Physique 1963)

*φ nucléaire (structure du noyau)*



## Les femmes en Physique...

- Yalow, Rosalyn Sussman (Nobel en Médecine 1977)

*médecine nucléaire*



- Emmy Noether (1882-1935)

*Physique mathématique*

*Physique théorique*

*lois de conservation et symétries*



# Les physiciennes en Politique...



## LA BIOGRAPHIE DE ANGELA MERKEL

**Née d'un père pasteur et d'une mère institutrice, Angela Merkel fait ses études à l'université de Leipzig en RDA. Docteur en physique en 1986, elle effectue des recherches sur la chimie quantique à l'Académie des sciences de Berlin jusqu'en 1990. Elle rejoint les rangs du SED en 1989, marquant ainsi son entrée en politique. Porte-parole du gouvernement de Lothar de Maizière, elle passe au Service d'information de l'Allemagne réunifiée après être entrée au Parti démocrate chrétien (CDU). Elle siège au Bundestag (Parlement allemand), devient ministre des femmes et de la jeunesse (1991-1994) et ministre de l'environnement (1994-1998) avant de gravir les échelons de CDU. De présidente du CDU du Land Mecklembourg-Poméranie occidentale, elle passe à secrétaire générale du parti avant d'en prendre la tête le 10 avril 2000, et d'y être réélue régulièrement. Angela Merkel devient la première chancelière de la République Fédérale d'Allemagne le 10 octobre 2005, faisant de son gouvernement une 'coalition des nouvelles opportunités'.**

**1986**

Promotion zum Dr. rer. nat. mit einer Dissertation über die Berechnung von Geschwindigkeitskonstanten von Reaktionen einfacher Kohlenwasserstoffe.  
*thèse portant sur le calcul des constantes de vitesse des réactions d'hydrocarbures simples.*

# Madame WU !

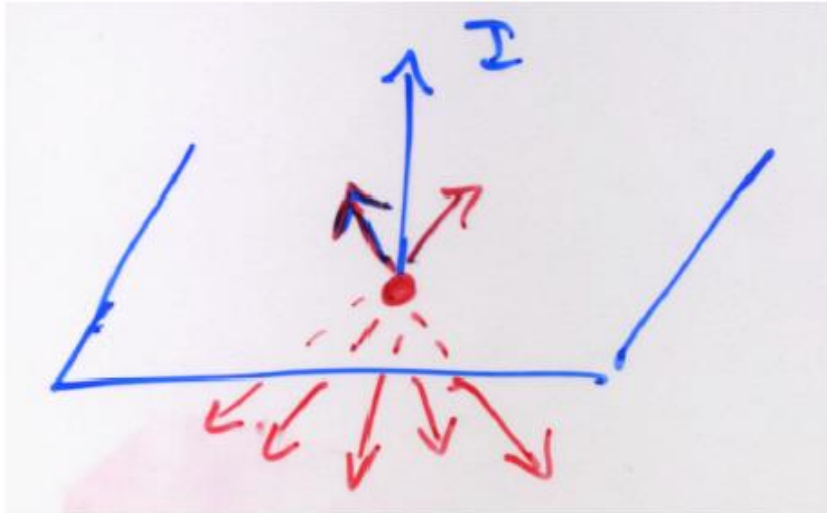


29 MAY 1912 · 16 FEBRUARY 1997

# Violation de la parité

la parité n'est pas conservée par interaction faible (Lee et Yang)

⇒ expérience (Wu)

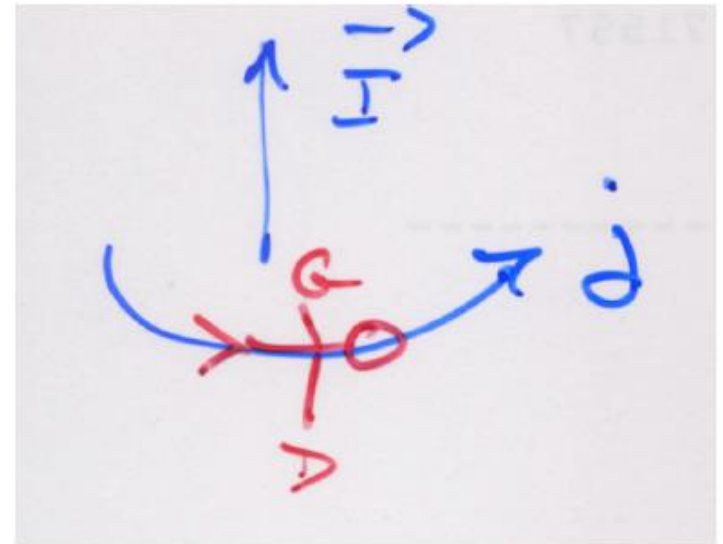


résultat expérimental :  
nombre d' $e^{-}$  inégal en  $z$  et  $-z$

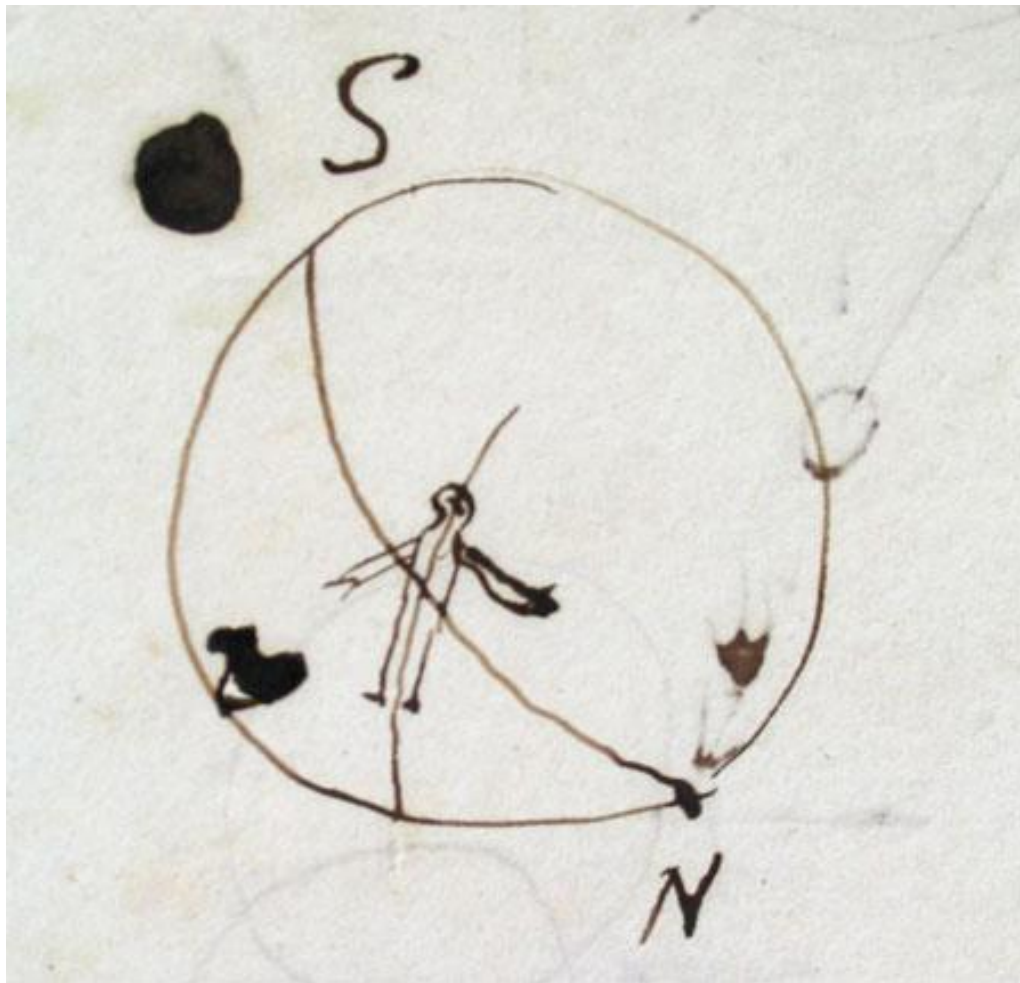
⇒  $p$  non conservé

*Autre formulation*

∃ une expérience de physique qui distingue gauche et droite, la droite du bonhomme d'Ampère est le côté du maximum d' $e^{-}$  du  ${}^{60}\text{Co}$



Brisure de symétrie ...



Lors d'une séance de l'Académie du 18 septembre 1820, André Ampère montra un moyen de connaître le sens de l'action magnétique d'un courant : un homme, traversé par le courant, indique la direction du Nord avec son bras gauche (le bonhomme d'Ampère)

# Fusion thermonucléaire → *ITER*



International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER)



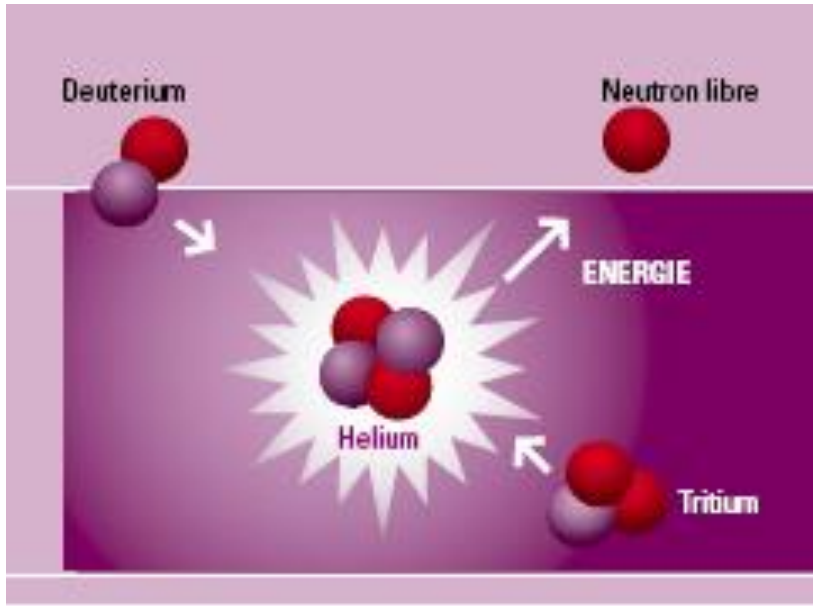
Sur Terre, l'énergie des étoiles





# LA FUSION NUCLÉAIRE

▪ La fusion de noyaux très légers donne naissance à des noyaux plus lourds, en libérant une très forte quantité d'énergie. Nécessitant des températures extrêmes (**plusieurs millions de degrés**), c'est ce phénomène qui est à l'œuvre au cœur du Soleil.



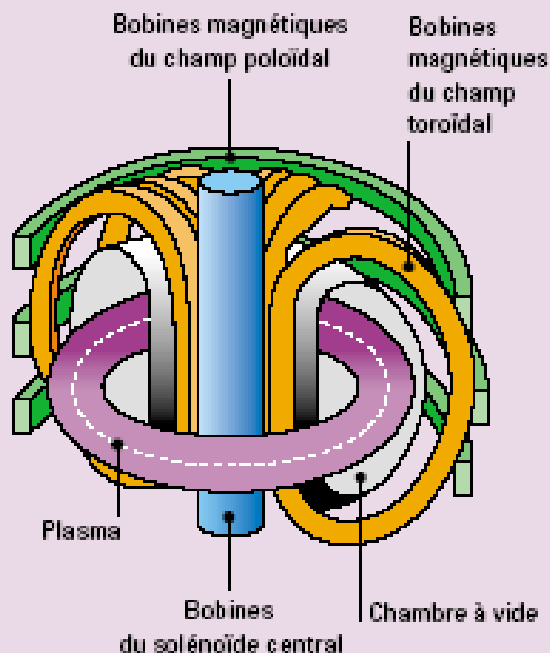
▪ Sur Terre, on recourt à un **plasma** (*quatrième état de la matière*) pour retrouver les conditions nécessaires à la fusion.



*Cadarache*

## Des conditions extrêmes...

### Le fonctionnement de la machine



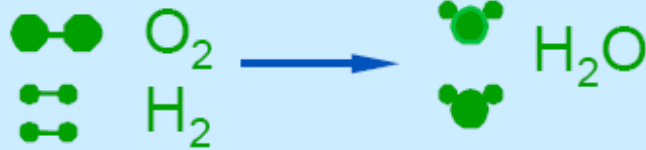
- Dans **ITER**, basé sur le concept du tokamak, le champ magnétique est créé par des bobinages *supraconducteurs* plongés dans un cryostat d'hélium liquide à **-269°C**.
- L'intensité du champ magnétique et le volume de la machine en font l'un des **plus gros aimants du monde**.
- Le courant circulant dans le plasma atteint **15 millions d'ampères**, assurant l'équilibre et la stabilité de la décharge en plus d'un bon confinement du plasma.
- Des dispositifs de chauffage du plasma (ondes électromagnétiques ou faisceaux de particules énergétiques) permettent d'atteindre des températures de plus de **100 millions de degrés** au cœur du plasma, donnant ainsi naissance aux réactions de fusion.

La puissance de chauffage injectée dans ITER est de 50 MW tandis que la puissance de fusion produite est de 500 MW, réalisant **un gain de 10**.

# Les sources d'énergie

## De l'énergie avec de l'antimatière ?

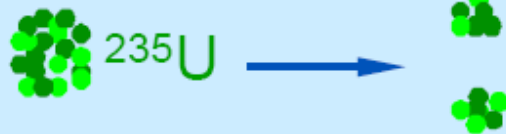
chimique



1

Pile à combustible

fission



30 000

Centrales nucléaires

fusion



200 000

ITER ?

annihilation



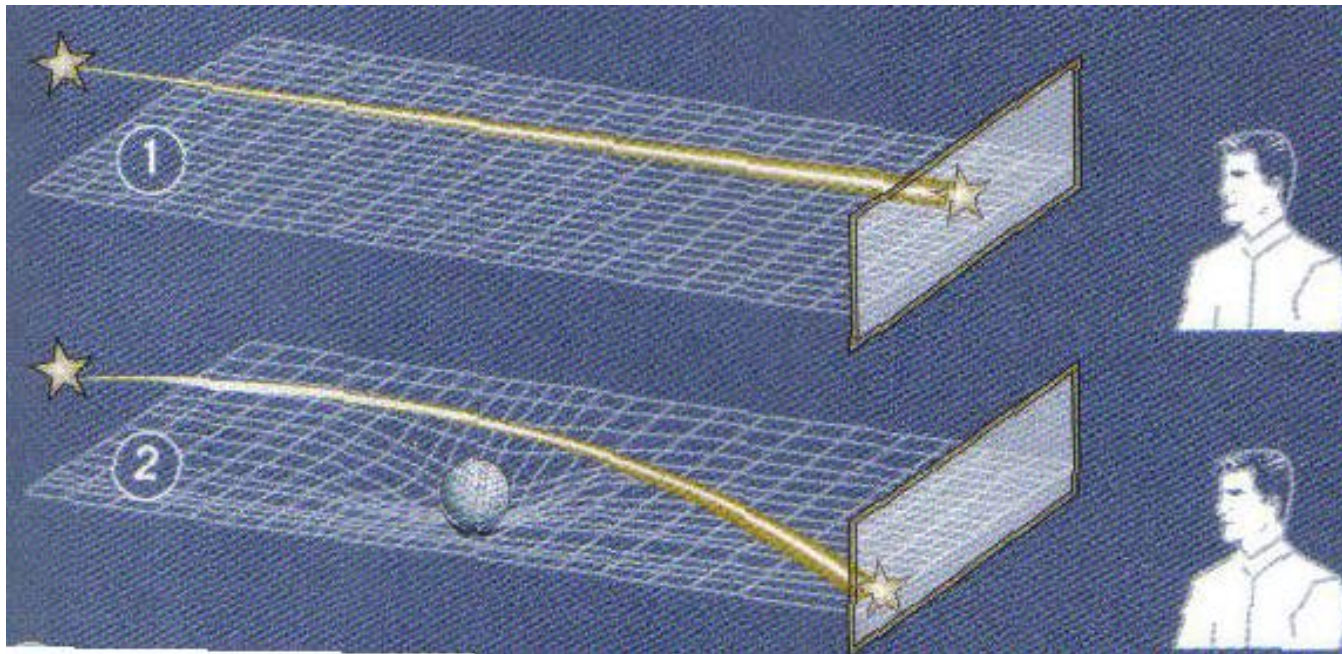
30 000 000

Star Trek

Conversion masse  $\rightarrow$  énergie TRÈS TRÈS efficace

# Théorie de la gravitation générale (1916)

*Une nouvelle conception de l'espace-temps*



- La masse « courbe » l'espace-temps
- La lumière suit les géodésiques de cet espace de **Riemann**



Expédition de 1919: Arthur **Eddington**

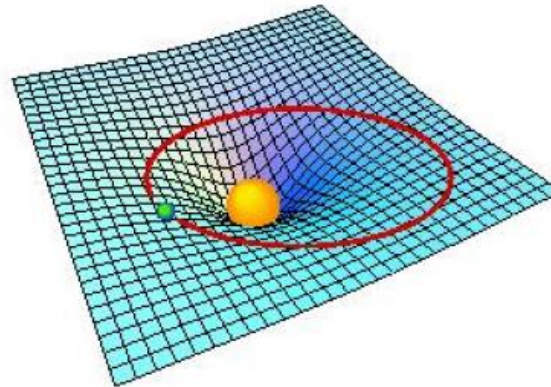
Une histoire merveilleuse ...

# Théorie de la gravitation générale (1916)

## VIRGO (débutée en 1996)

vérifier la théorie de la relativité d'Einstein...

*gravitation* = courbure de l'espace-temps

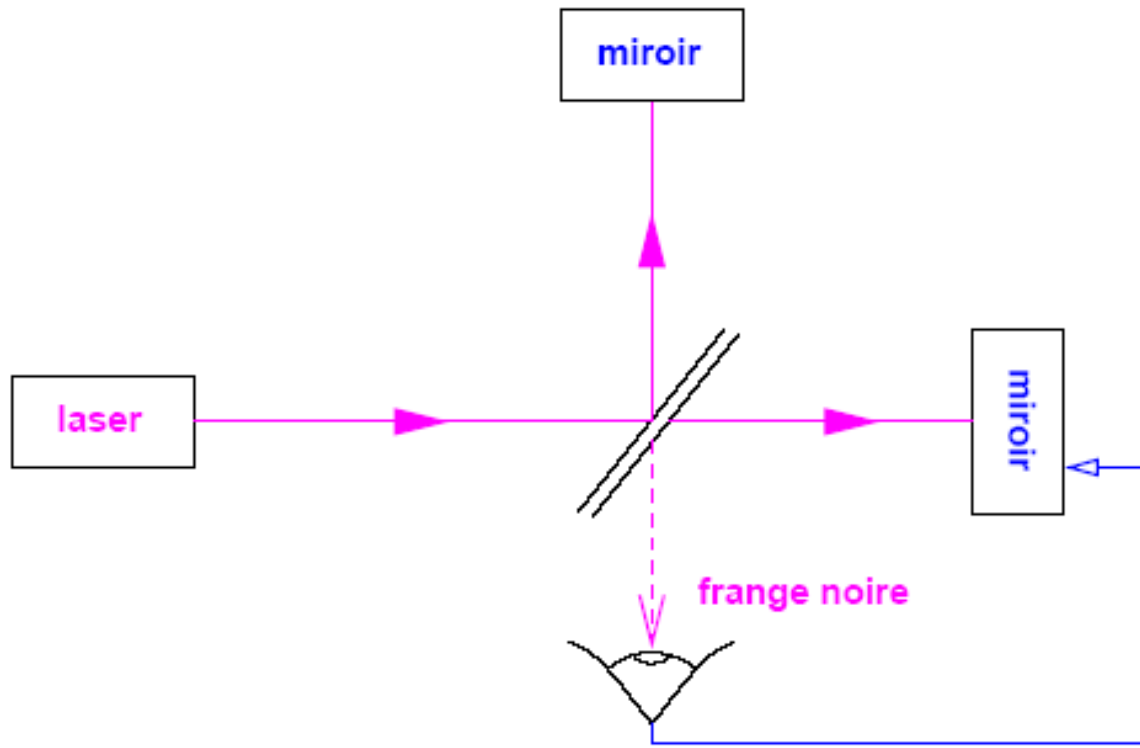


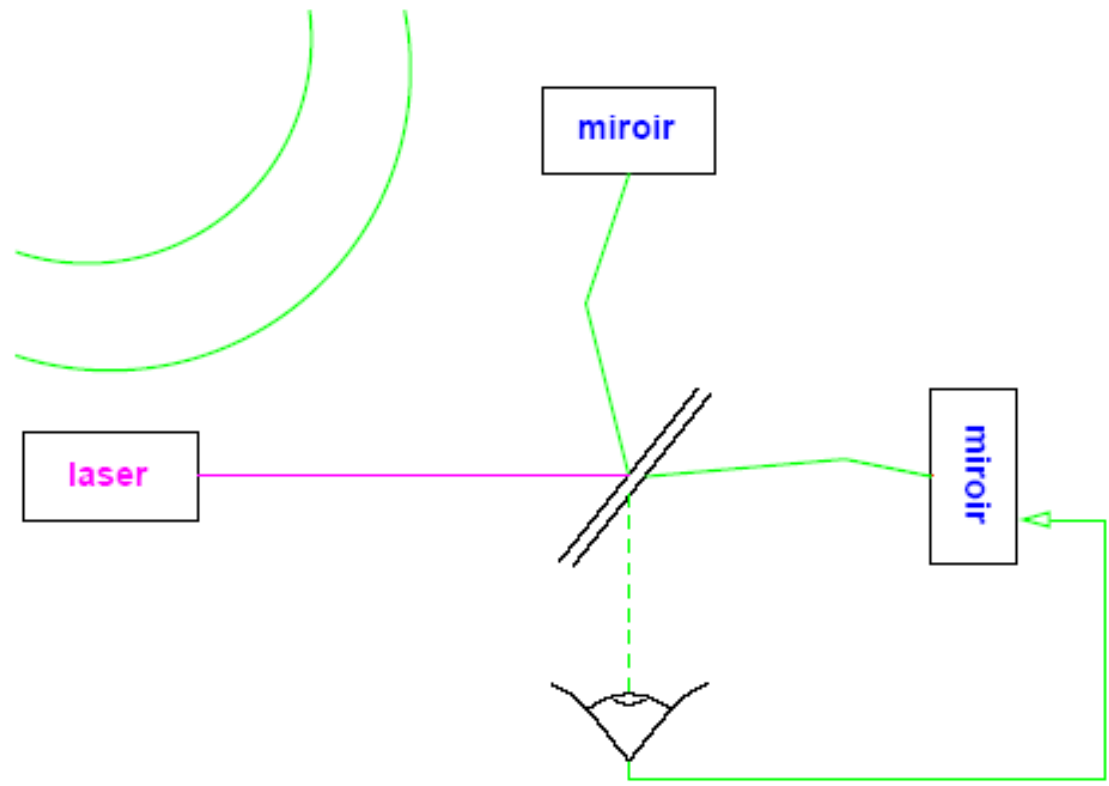
*onde gravitationnelle* = petite perturbation (“vaguelette”) qui se propage à la vitesse de la lumière

- L'existence **d'ondes gravitationnelles** est prédite par la théorie de la relativité générale: des masses en mouvement les unes par rapport aux autres pourraient perdre une partie de leur énergie, qui serait émise dans l'espace sous la forme d'ondes avec une vitesse proche de celle de la lumière.
- Parmi les sources possibles des ondes gravitationnelles, on peut citer les explosions de supernovae, les trous noirs agissant les uns sur les autres, les pulsars (étoiles à neutrons en rotation) et les systèmes binaires d'étoiles neutroniques, lorsque leurs composants fondent puis disparaissent.
- Plusieurs équipes réunissant des milliers de chercheurs sont à la traque des ondes gravitationnelles depuis des décennies. Deux grands instruments de détection ont été développés: LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) aux États-Unis, et Virgo en Europe (en Italie près de Pise). La première détection d'ondes gravitationnelles a été réalisée **le 14 septembre 2015** par LIGO, avec l'aide de l'équipe Virgo pour l'analyse des données.

# Détection des ondes gravitationnelles

detecteur interferometrique d'OG = Michelson





mesure precise de  $\Delta l = L_2 - L_1$

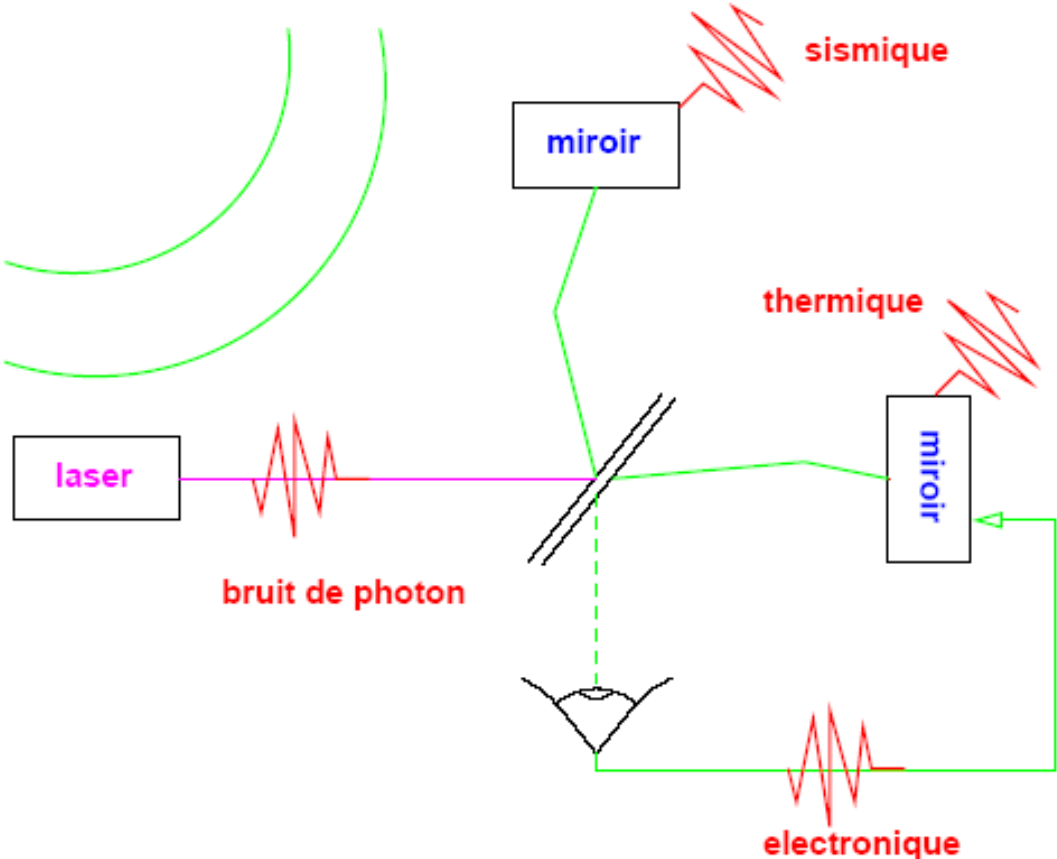
detecte le changement de phase



# Détection des ondes gravitationnelles (4): bruits

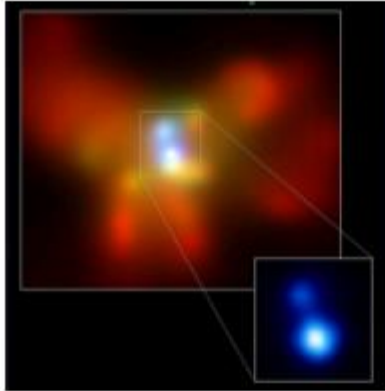


source d'OG

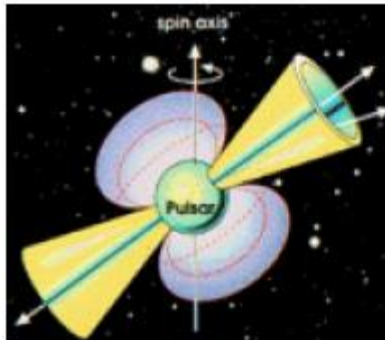




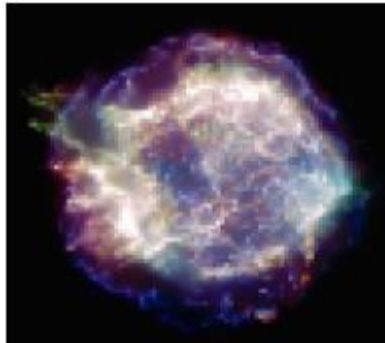
# Sources astrophysiques



binaires d'objets compacts



étoiles neutroniques (excentricité)



supernovae

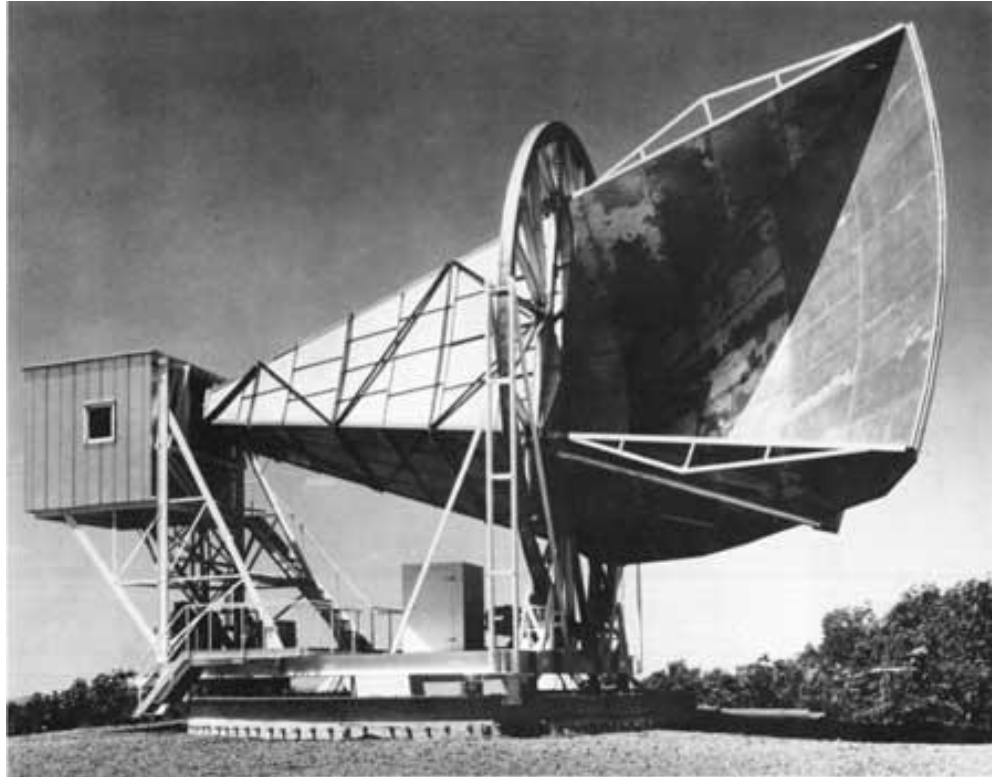
bras 3km



*localisation: Cascina, près de Pise (Italie)*

## le rayonnement fossile (1965)

2.7 K



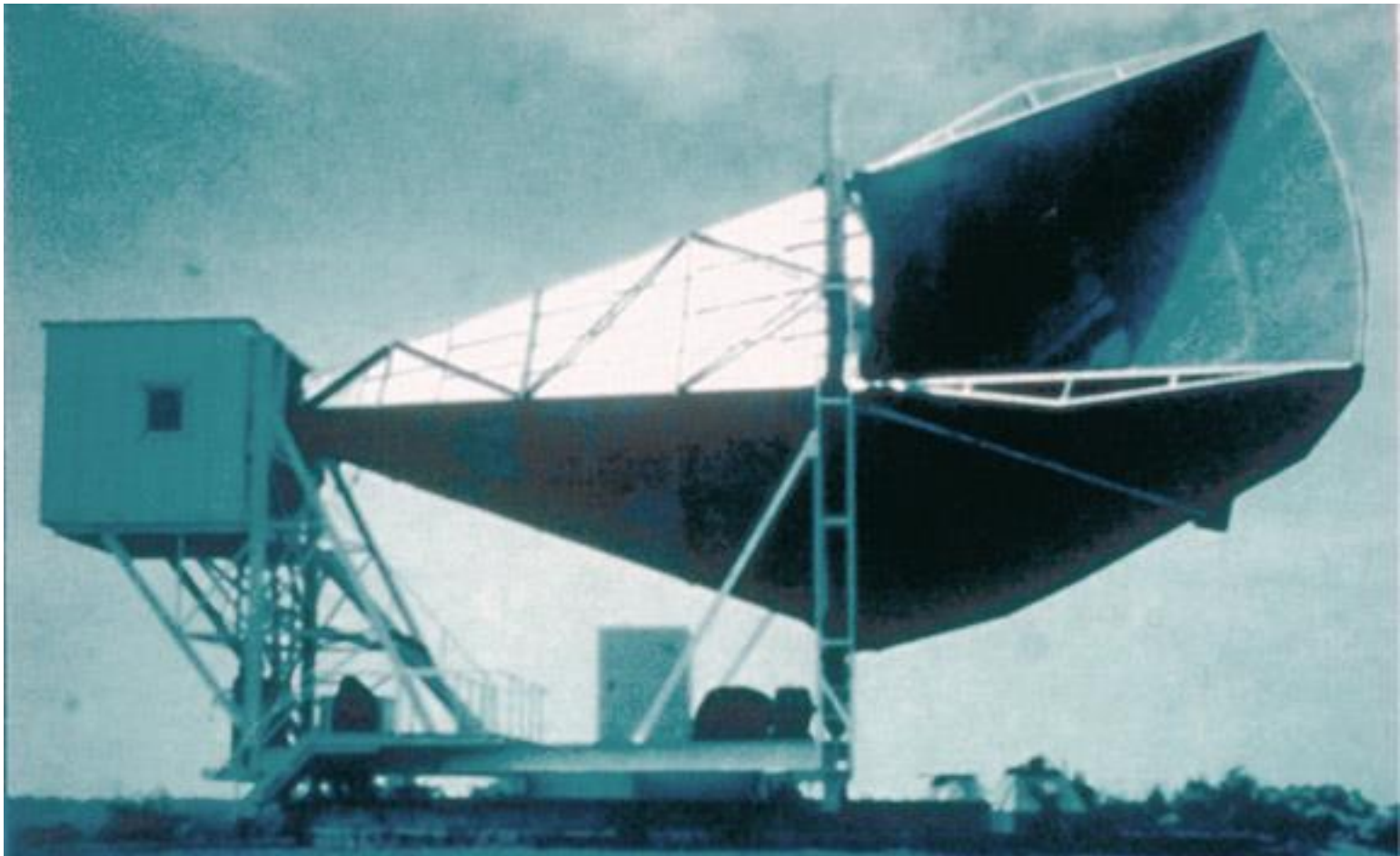
L'antenne des laboratoires Bell à Holmdel où Arno **Penzias** et Robert **Wilson** découvrirent le rayonnement fossile en 1965.

# Le bruit primordial

Cosmic microwave background

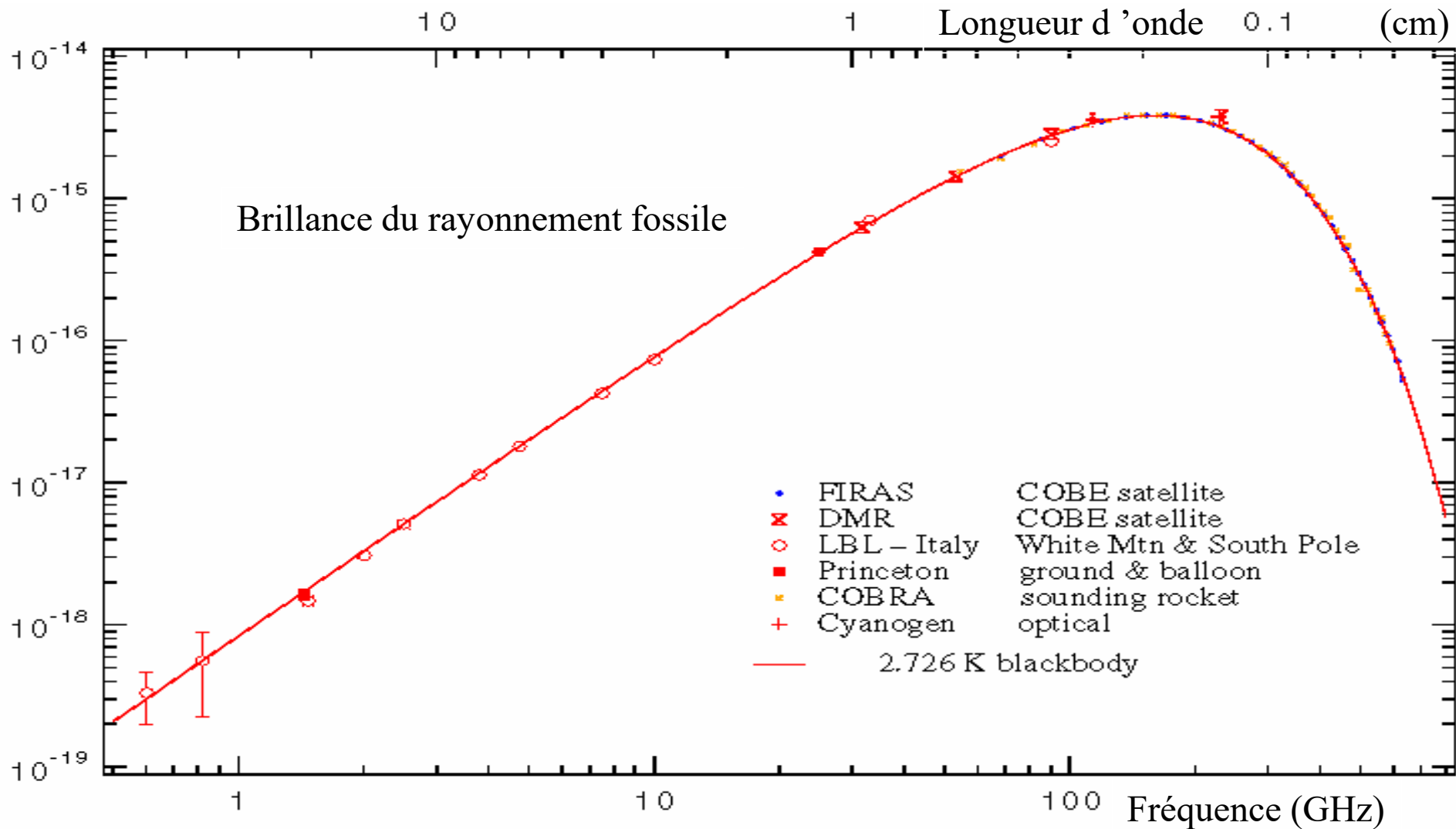
# Première détection du rayonnement cosmologique

- Première détection du CMB en 1965 par Penzias & Wilson  
« Excès de bruit »



# Spectre du rayonnement fossile

Corps noir à  $T = 2.72$  K





***Nous baignons dans une lumière diffuse émise il y a une douzaine de milliards d'années,  
alors que l'Univers était trois milliards de fois plus petit qu'aujourd'hui.  
C'est l'une des preuves les plus solides de la justesse de la théorie du big bang...***

*Christian Magnan  
Collège de France, Paris  
Université de Montpellier II*

Notre oeil ne perçoit que les rayonnement « visibles », c'est-à-dire ceux dont la longueur d'onde se situe en gros entre 0,4 et 0,8 micron. De ce fait nous avons tendance à penser que nous pourrions connaître l'Univers en nous en tenant à ce seul domaine spectral. Mais les techniques de ce siècle nous ont permis d'accéder de façon courante à d'autres classes de longueur d'onde, soit plus courtes (au-delà du violet, dans l'ultraviolet et plus loin), soit plus longues (en deçà du rouge, dans l'infrarouge et plus loin), et cette ouverture sur d'autres fenêtres nous a fait réaliser des découvertes marquantes. Ainsi nous détectons actuellement dans l'infrarouge une lumière diffuse émise peu après la naissance de l'Univers mais avant la formation des étoiles et des galaxies, à une époque où le monde devait consister en une masse gazeuse plus ou moins indifférenciée. Expliquons ce qu'il en est.

Selon la théorie du big bang, elle-même issue des équations de la théorie de la gravitation d'Einstein, l'Univers était à l'origine dans un état de température et de densité si élevées que le rayonnement était hautement prépondérant sur la matière. Celle-ci n'a pu se former que par la suite, lorsque la température fut devenue suffisamment basse (si l'on peut dire !), de l'ordre du milliard de degrés. Puis a débuté une phase au cours de laquelle les échanges ont contribué à maintenir un équilibre entre l'une et l'autre forme d'énergie.

Enfin, au bout de quelques centaines de milliers d'années, se produisit un événement qui explique la présence actuelle d'un rayonnement diffus : le milieu universel ne cessant sous l'effet de l'expansion de se diluer dans un volume de plus en plus vaste se trouva s'éclaircir assez brutalement en libérant d'un seul coup la lumière que la matière retenait prisonnière. Alors qu'auparavant la densité de matière était si forte que les photons, sans cesse absorbés dès qu'ils étaient émis, n'avaient pas pu nous parvenir, au contraire, une fois établie la transparence du monde à l'échelle universelle, la lumière se propagea librement sans rencontrer d'obstacle.

Lors du découplage entre matière et rayonnement qui donna lieu à cet éclaircissement de l'Univers, la température commune de ces deux constituants était d'environ **4500 degrés**. C'est dans ces conditions que fut émis le rayonnement que nous pouvons qualifier de « primordial » et qui, depuis quelque douze milliards d'années, poursuit sa route à travers le monde. Nous recevons aujourd'hui ceux de ses photons que la Terre intercepte. Seulement le rayonnement a changé d'aspect.

Rappelons-nous: la longueur d'onde d'un rayonnement suit fidèlement l'étirement de l'espace (comme l'intervalle entre les deux fourmis suivait l'allongement de l'élastique). Par conséquent, les différentes radiations constituant la lumière fossile ont vu leur longueur d'onde augmenter en accompagnant l'espace dans son expansion. Plus précisément l'Univers aurait grossi dans ses dimensions linéaires d'un facteur 1500 environ (auquel correspond un facteur  $1500 \times 1500 \times 1500$ , soit plus de 3 milliards en volume) entre l'époque où le rayonnement a été émis et celle où nous le recevons. Les longueurs d'onde sont donc toutes 1500 fois plus grandes qu'à l'origine : au départ exprimées en fractions de microns elles appartiennent aujourd'hui au domaine millimétrique.

Corrélativement - car qui dit longueur d'onde plus grande dit énergie plus petite et donc aussi température plus petite, dans la même proportion - le rayonnement observé correspond de nos jours à une température de trois degrés (2,7 si on tient à être précis), ce nombre trois provenant, d'après le raisonnement, de la réduction par le facteur 1500 (représentant l'effet de l'expansion) des 4500 degrés de départ. Vieux de douze milliards d'années puisque s'étant propagé pendant ce laps de temps mais aussi étonnamment jeune puisque témoin de phases fort précoces de l'histoire du monde, ce rayonnement fossile diffus constitue l'une des preuves éclatantes de la justesse de l'idée connue sous le nom de « big bang » selon laquelle notre monde est né dans un état de compression extrême pour entamer une prodigieuse expansion. Bien que le soubassement théorique de cette vision du monde soit fourni par la théorie de la relativité d'Einstein, l'invention du big bang est à porter au crédit de Alexandre Friedmann (1888-1925) et Georges Lemaître (1894-1966).

Pour avoir découvert ce rayonnement fossile en 1963, de façon fortuite d'ailleurs, **Penzias** et **Wilson** reçurent le prix Nobel. Ils projetaient d'utiliser pour des observations de radioastronomie une antenne chargée à l'origine de capter les signaux des satellites Echo et Telstar. L'instrument avait été conçu selon des caractéristiques spéciales qui le rendaient particulièrement apte à observer de très faibles émissions radio à des longueurs d'onde relativement peu courantes, de l'ordre de quelques centimètres, alors que les grands radio-télescopes classiques étaient prévus pour observer des longueurs d'onde plus grandes. Procédant au réglage et au calibrage de leur instrument ils s'aperçurent de la présence d'un bruit de fond radio parasite dont ils ne parvenaient pas à se débarrasser. Bien leur a pris de s'acharner sur la difficulté et de faire confiance à leur savoir-faire technique. Bien leur a pris aussi de faire part de leur problème à d'autres chercheurs qui, eux, pour les raisons théoriques exposées ci-dessus, pouvaient s'attendre plus ou moins à l'existence d'une telle émission dans cette région de longueur d'onde. S'il pouvait subsister quelques doutes dans l'identification du rayonnement à l'époque même où il fut découvert, ceux-ci sont dorénavant complètement levés. Étant donné l'importance de l'étude du fond diffus cosmologique, un satellite, COBE, lui a été entièrement consacré.

Le rayonnement cosmique fossile possède deux caractéristiques tout à fait exceptionnelles, que voici.

La première est l'extrême degré de précision avec laquelle la répartition de son intensité lumineuse en fonction de la couleur suit la loi théorique connue sous le nom de loi du « corps noir ». C'est même le seul rayonnement de corps noir qu'on trouve dans la nature. Cette loi de corps noir, appelée aussi loi de Planck est valable lorsque le rayonnement est emprisonné par la matière (d'où le nom de corps noir) et que de ce fait il se trouve en équilibre avec elle. Le caractère de corps noir du rayonnement cosmologique montre que les conditions nécessaires à la réalisation de cet équilibre (appelé équilibre thermodynamique) régnaient dans la mixture cosmique d'où provient ce rayonnement, à la manière décrite plus haut. Dans un état d'équilibre thermodynamique, le rayonnement est entièrement défini par *un seul* paramètre, à savoir sa température (qui se trouve alors justement la même que celle de la matière), ici de **2,7 degrés**.

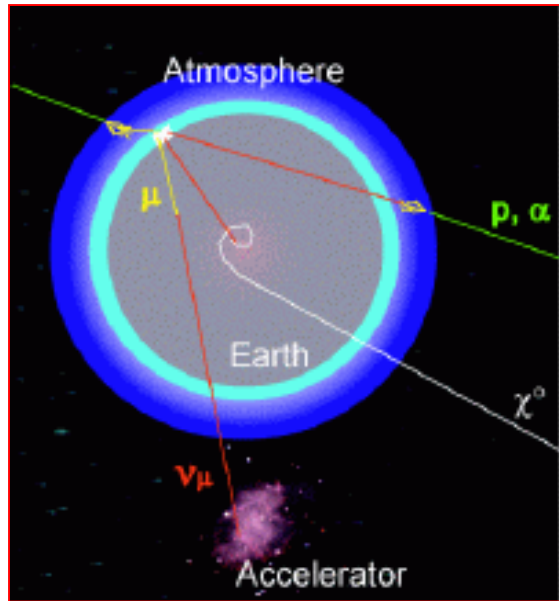
Le deuxième trait exceptionnel du rayonnement cosmologique est son haut **degré d'isotropie**. Cela est incompréhensible dans le cadre de nos théories actuelles. En effet dans les modèles homogènes satisfaisant aux équations d'Einstein (modèles de Friedmann-Robertson-Walker) il se trouve que l'expansion est tellement rapide à l'origine que les différents points composant l'Univers n'ont pas eu le temps d'établir un lien causal entre eux, la lumière ne parvenant pas à rattraper l'expansion. Autrement dit, les différents points se comportent de façon indépendante et dans ces conditions on ne comprend pas comment a pu se réaliser l'isotropie constatée. Je pense personnellement qu'en tentant d'analyser l'origine de l'Univers nous touchons aux limites de validité de nos théories actuelles, lesquelles sont, sans surprise, insuffisantes sur certains points - comme est insuffisante n'importe quelle théorie au-delà de son domaine possible d'application. Pour avancer, il faut d'autres théories, que nous ne possédons pas.

Le rayonnement fossile occupe de ce point de vue une situation centrale en cosmologie : il est à la fois la confirmation éclatante et l'infirmité définitive de notre théorie. Nul doute que notre monde soit né de façon *singulière* et qu'il est en expansion, comme le prévoit le modèle du big bang, mais la description de la *singularité* originelle est impossible (à mon sens) sans un renouvellement théorique complet de nos idées.

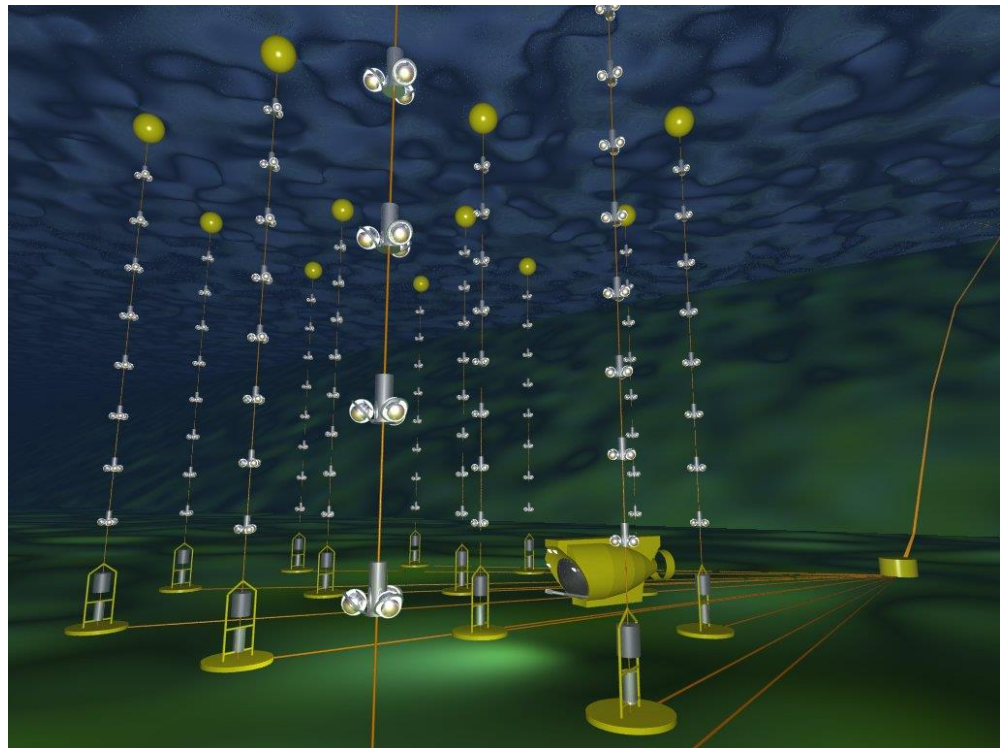
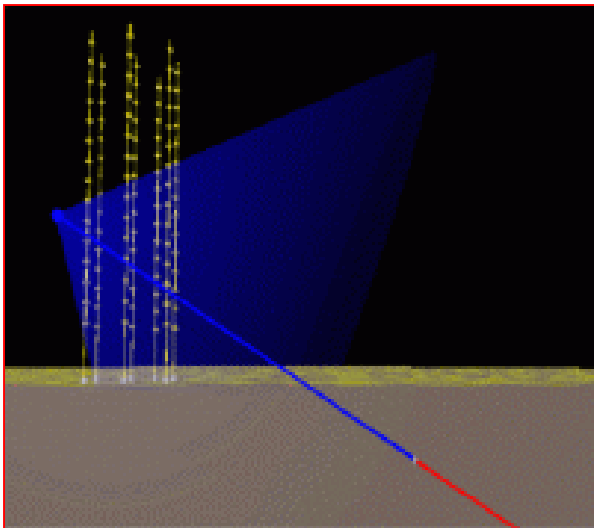
# Les neutrinos

# Les plus fantomatiques des particules

- En provenance du **Soleil**, nous en recevons, de jour comme de nuit, **65 milliards par centimètre carré et par seconde**
- La quasi-totalité traversent la Terre sans que rien ne leur arrive
- Pour avoir **une chance sur deux de les arrêter** il faudrait une **barrière de plomb d'une année-lumière d'épaisseur**



# Antares



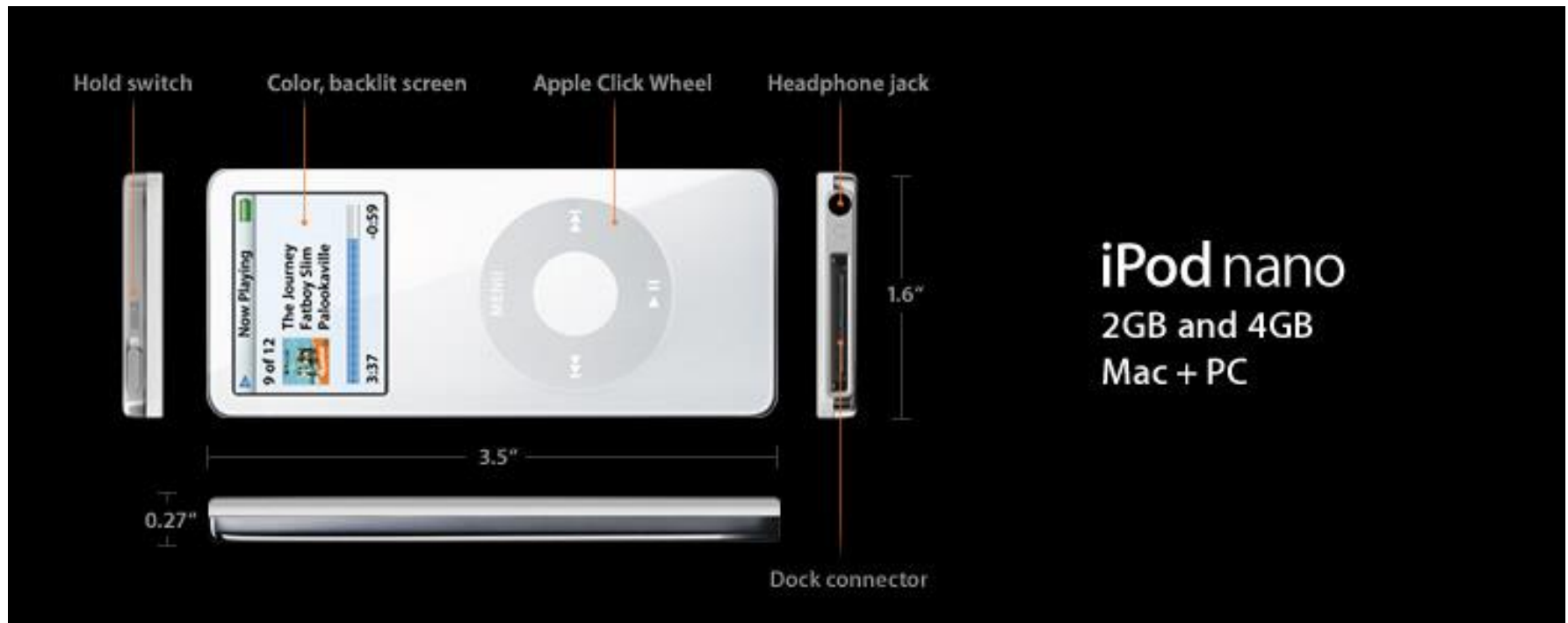
La Terre constituant un blindage naturel contre toutes les particules sauf les neutrinos, un télescope à neutrino s'intéresse à la détection des muons montants produits par l'interaction des neutrinos de haute énergie dans la matière sous le détecteur. Le muon peut alors être détecté dans un grand volume instrumenté d'eau ou de glace. En effet, à la traversée de ces milieux, le muon émet un rayonnement lumineux, dit Cerenkov, qui se propage selon un cône. La détection de cette lumière Cerenkov permet de remonter aux caractéristiques du muon, et, de façon indirecte, à celles du neutrino incident.

## Les nouveaux matériaux → **nanomatériaux**

Hier: jusqu'en 1990 ère de la microélectronique ( $1\ \mu\text{m}=10^{-6}\ \text{m}$ )

- Silicon Valley, le silicium et les semiconducteurs sont rois
- Circuits intégrés à base de puce en silicium

Aujourd'hui ... ( $1\ \text{nm}=10^{-9}\ \text{m}$ )

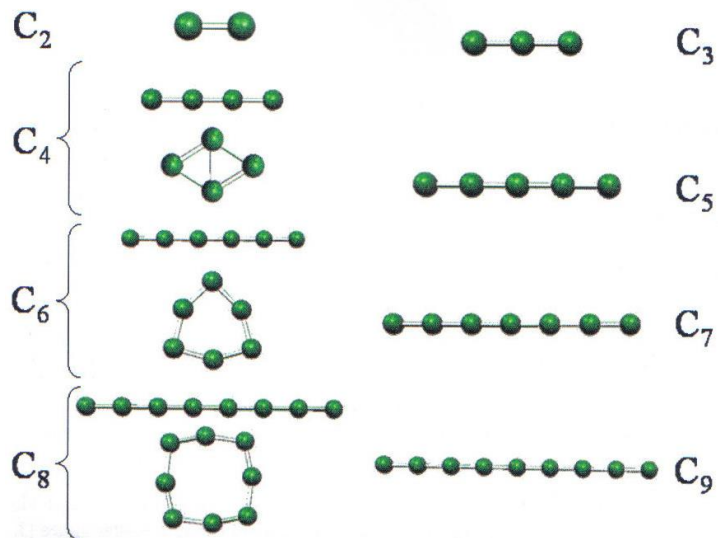


Vers une domestication de la matière ...

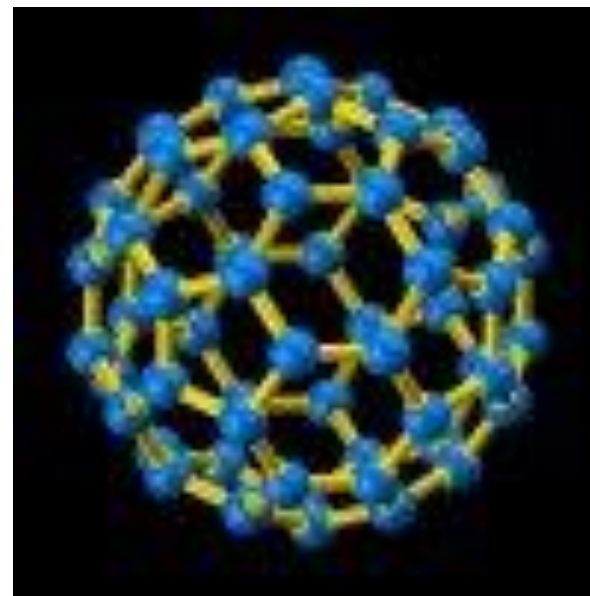
*Bottom-Up*



# Le carbone dans tous ses états



Molécules - Agrégats

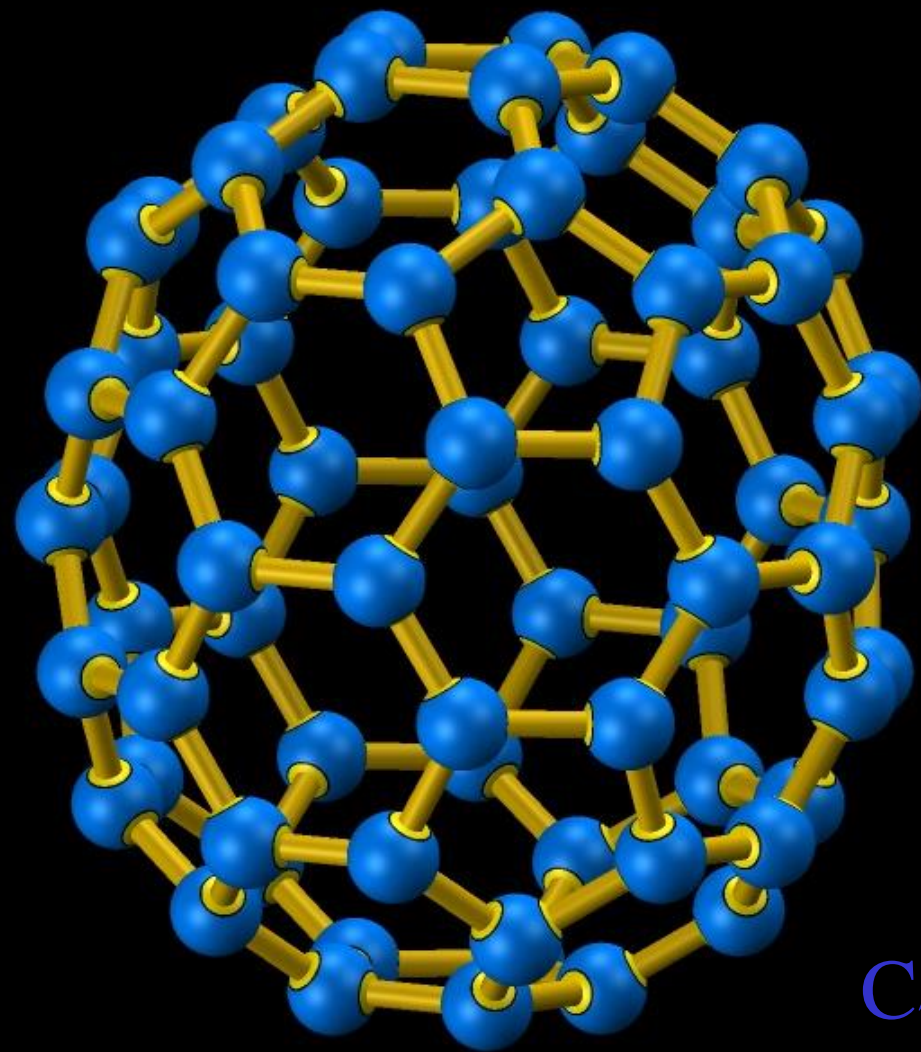


$C_{60}$

Structure en icosaèdre

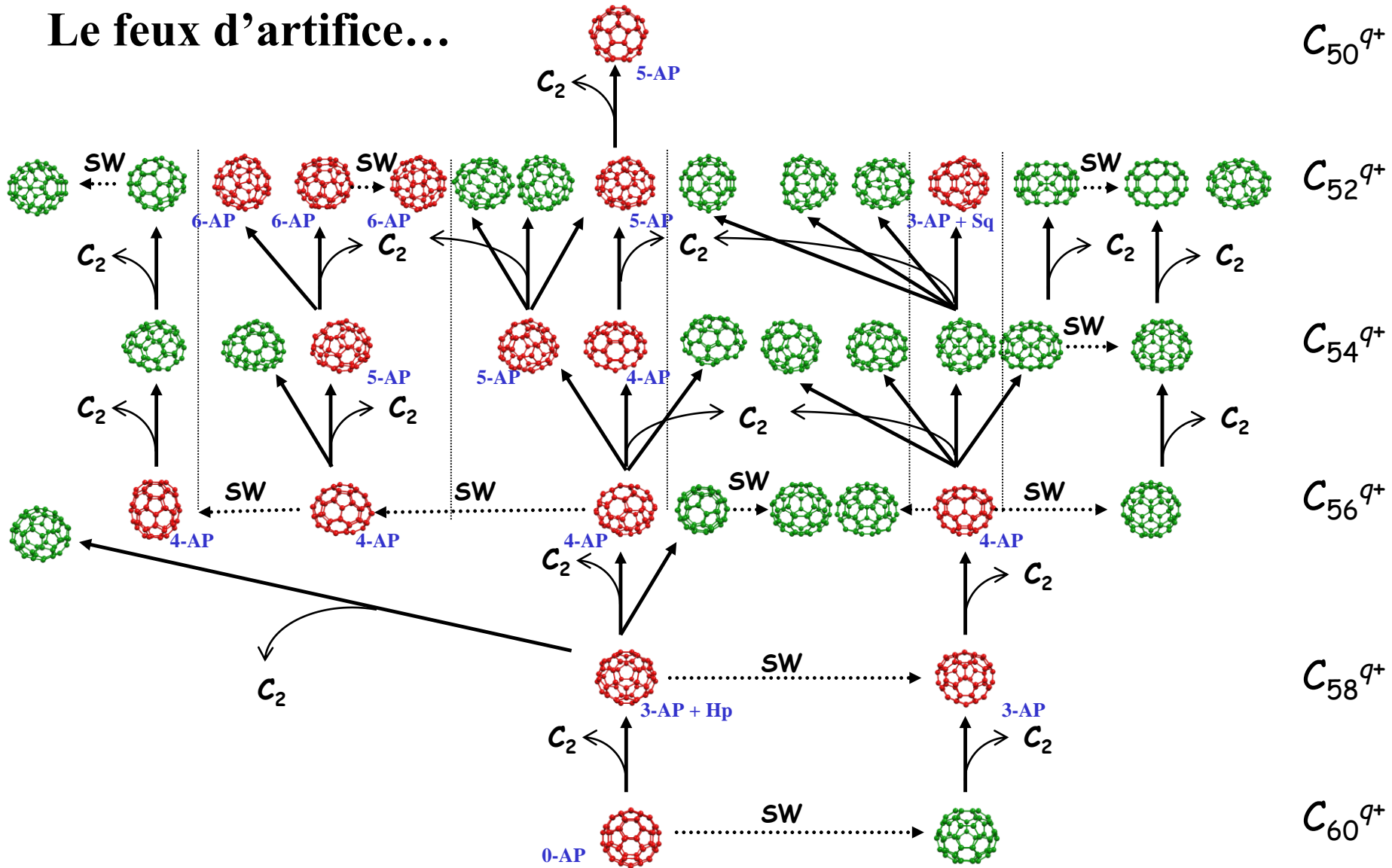
(1985: Smalley et al.; Prix Nobel en 1996)

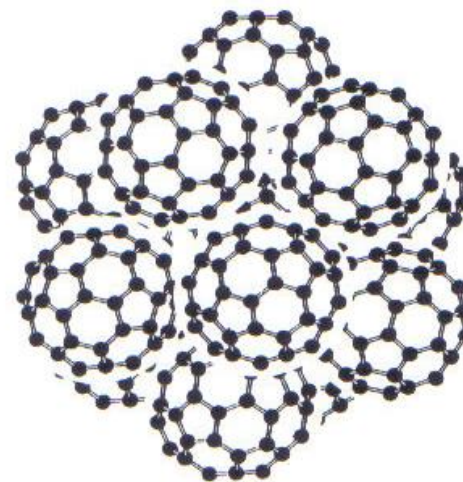
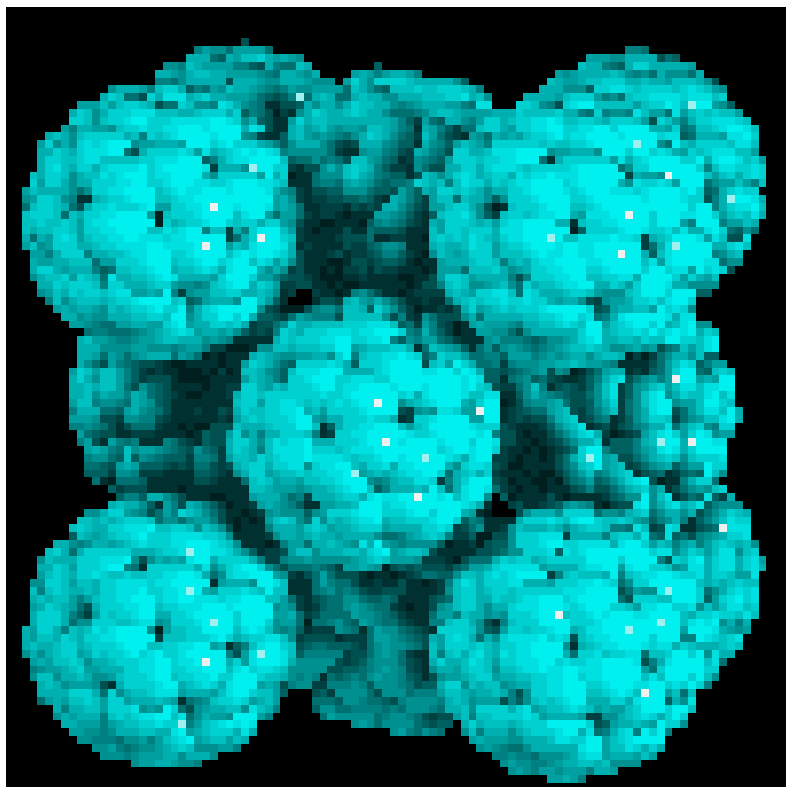
**Physico-chimie**



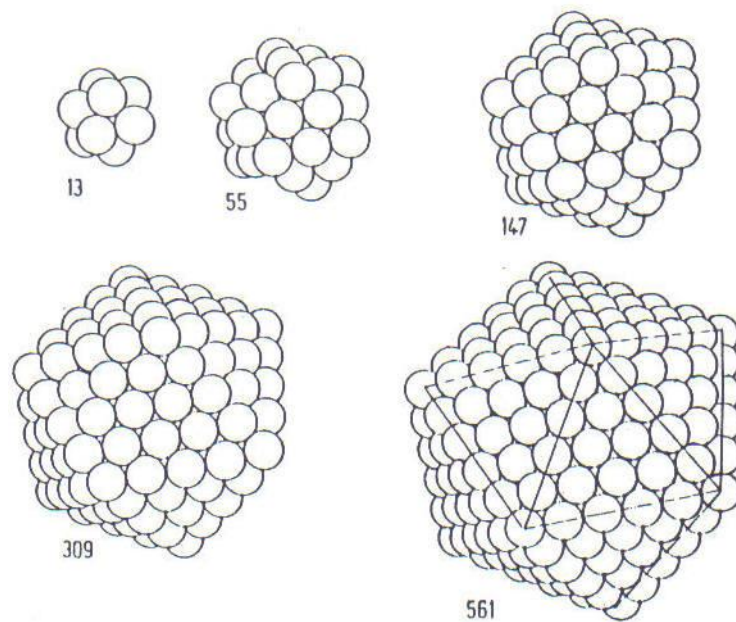
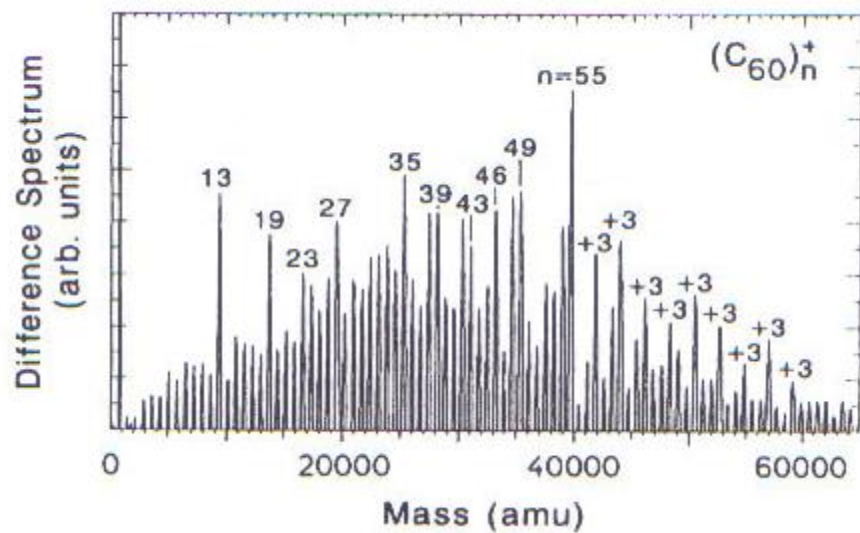
$C_{70}$

# Le feu d'artifice...

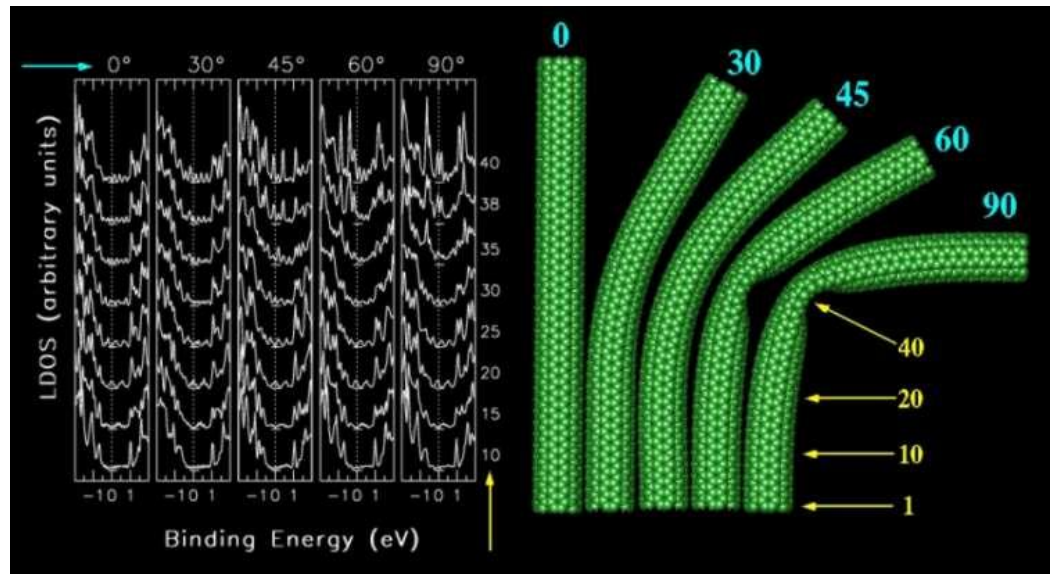
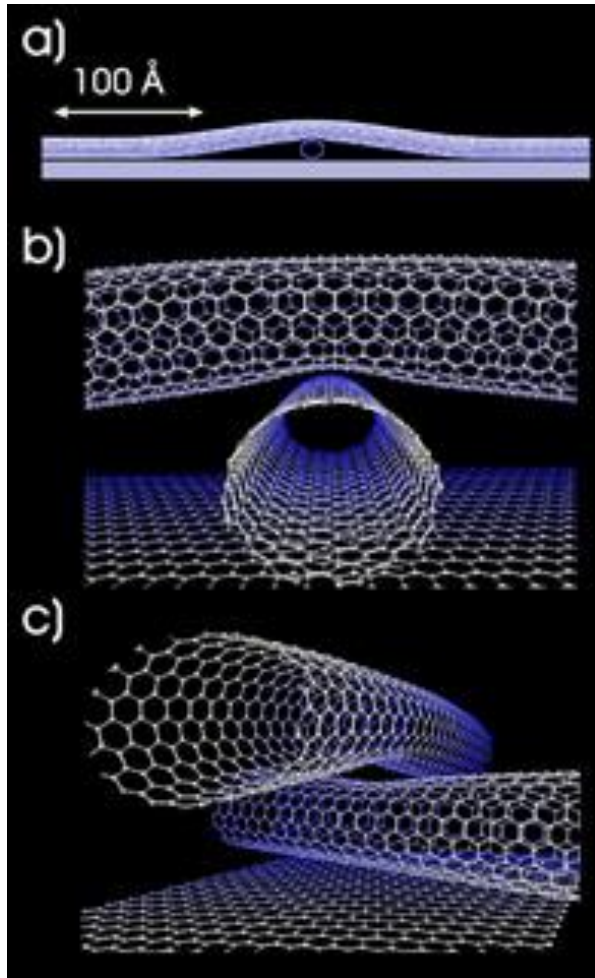




The icosahedral cluster  $(C_{60})_{13}$ .

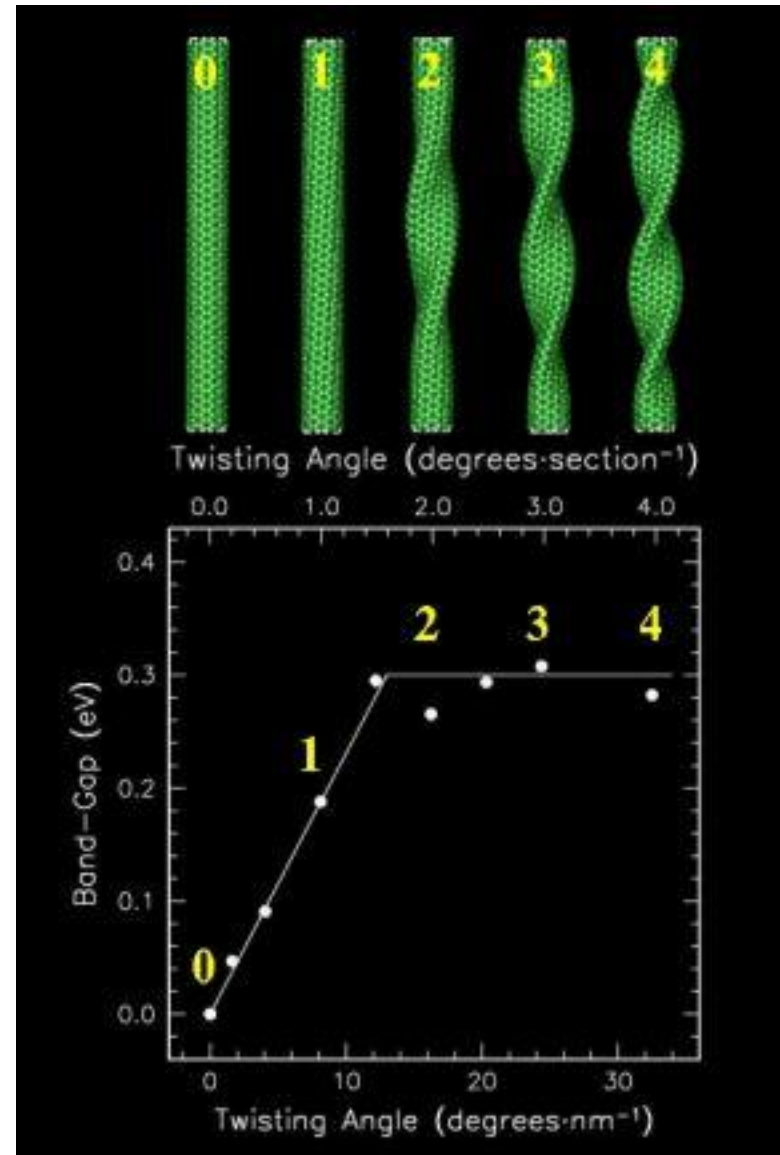


# Les nanotubes

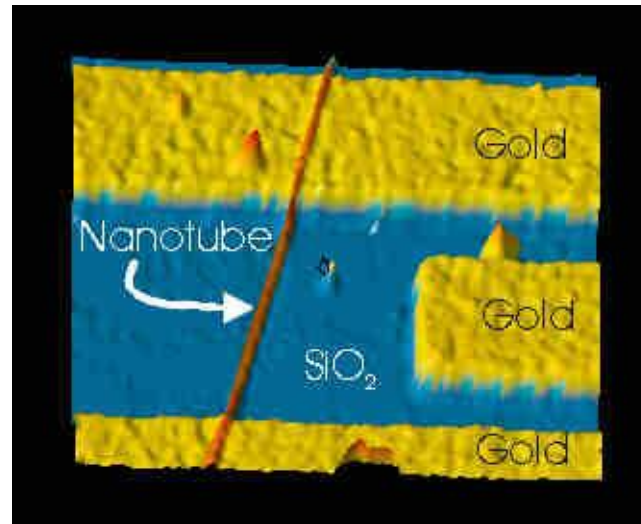
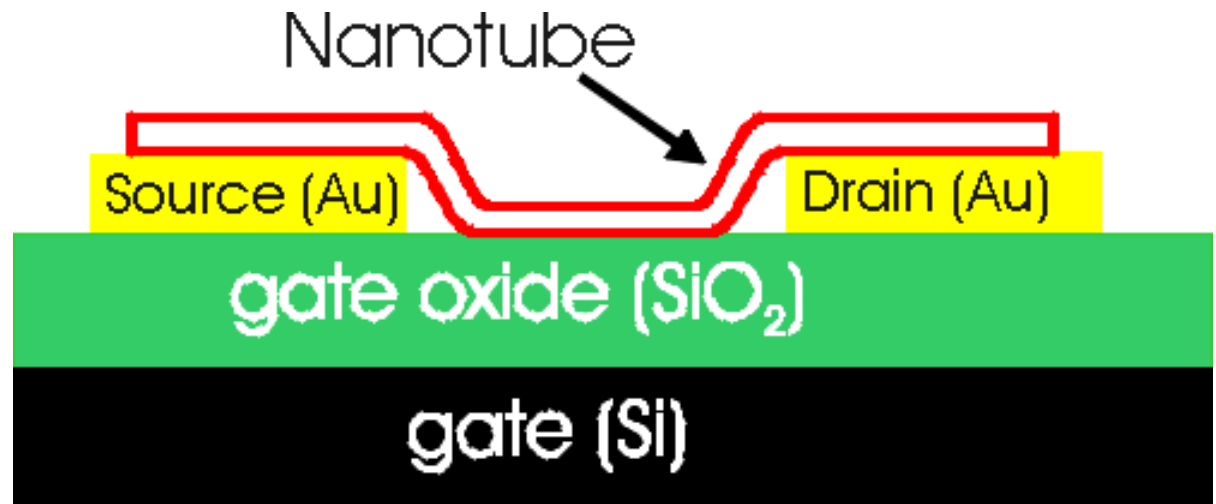
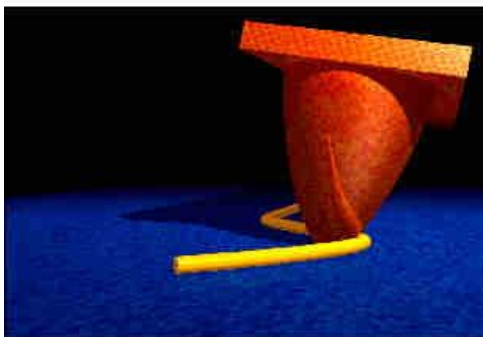
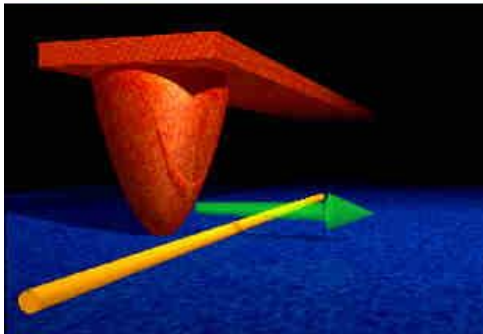
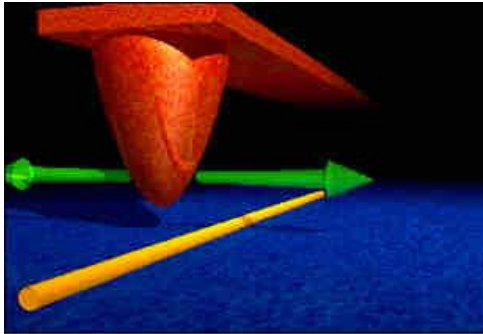


# Les nanotubes

Propriétés électroniques

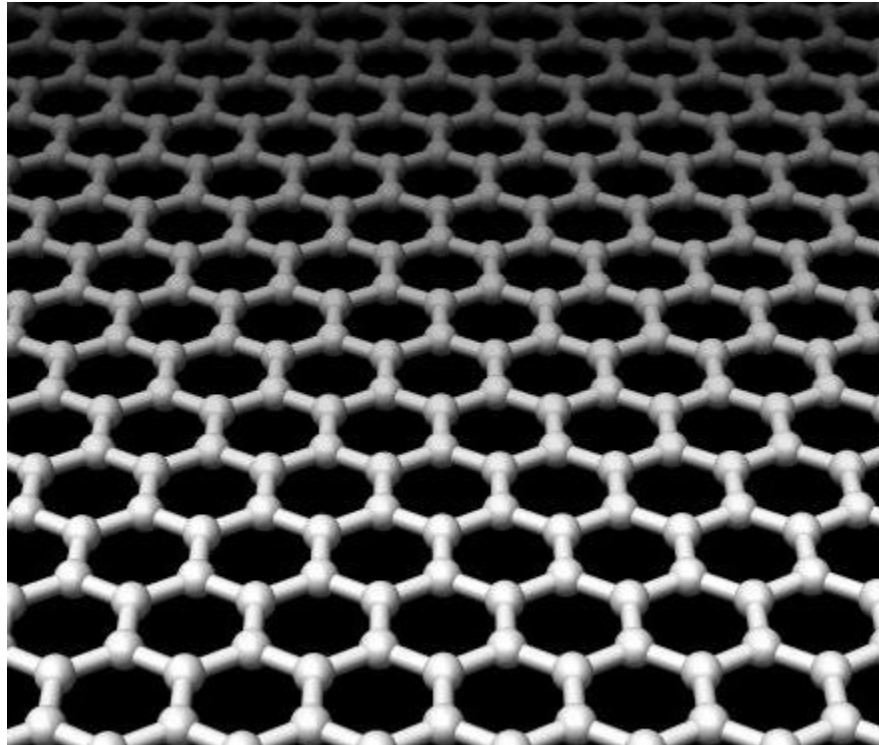


# Les nanotubes



# Le graphène

Le **graphène** est un cristal bidimensionnel (monoplan) de carbone dont l'empilement constitue le graphite. Il fut isolé en 2004 par Andre **Geim**, du département de physique de l'université de Manchester, qui a reçu pour cette découverte le prix Nobel de physique en 2010 avec Konstantin **Novoselov**.





## Autres sujets...

- Supraconductivité Bednorz et Müller (1986)
- Attoseconde (mouvement des électrons)
- Femtoseconde (sonder la dynamique des réactions)
- Contrôle cohérent
- Bottom-Up
- Matériaux, nano-électronique,
- Bio-Matériaux, traitement des tumeurs, transport de médicaments ...
- Condensat de Bose-Einstein, un nouvel état de la matière