

Le mystère des rayons cosmiques

Delphine Monnier Ragaïgne
Université Paris Sud
Laboratoire de L'accélérateur Linéaire

D'après une exposition réalisée
par l'IN2P3, l'Institut National de Physique
Nucléaire et de Physique des Particules du
CNRS, à l'occasion du centenaire de la
découverte des rayons cosmiques et fortement
inspiré d'une présentation de Corinne Bérat.

Les indices précurseurs

La mystérieuse décharge
des électroscopes

L'électro- scope

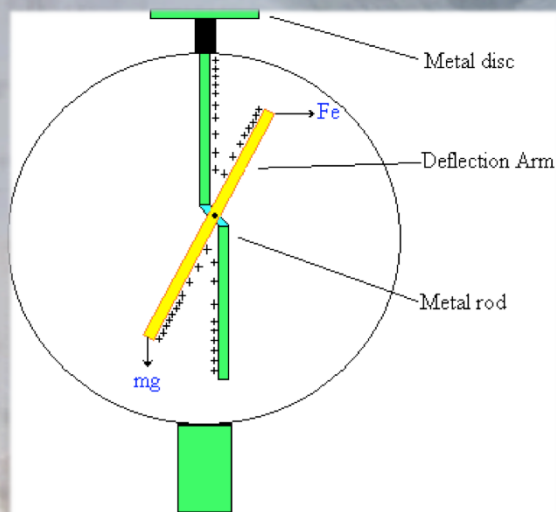


Figure 1: Electroscopie



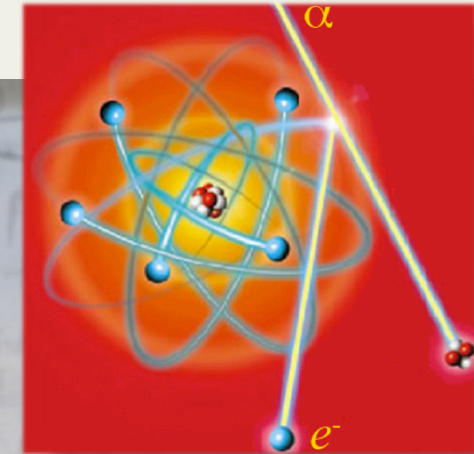
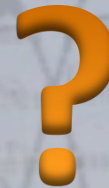
- Électroscope chargé \Rightarrow les « bras » se repoussent
- Les chercheurs observent que lorsqu'un électroscope est chargé et isolé, ses feuilles se rapprochent lentement. Cela indique qu'il se décharge spontanément. **Pourquoi ?**

Ionisation de l'air

- fin du XIXe siècle : la lente décharge des électroscopes imputée au phénomène d'**ionisation**.
- L'ionisation rend l'air ambiant conducteur et décharge peu à peu l'électroscope. Plus l'air est ionisé, plus les feuilles se rapprochent rapidement

- Qu'est-ce qui ionise l'air

- Pour les physiciens, tel H. Becquerel, qui travaillent sur le sujet, la **radioactivité terrestre** est responsable de l'ionisation de l'air autour de l'électroscope.



- Vers 1898, C. Wilson avance une autre explication
- la cause de l'ionisation atmosphérique pourrait résider dans un **rayonnement d'origine extraterrestre** !



Terrestre ou extraterrestre ?

1910

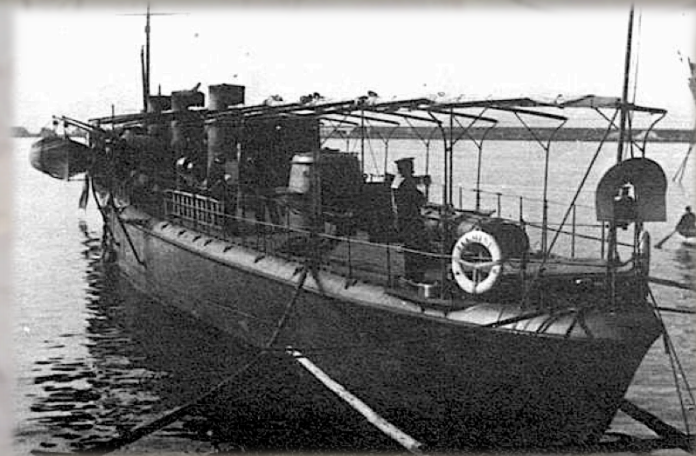
- Radioactivité des matériaux ?
 - E. Rutherford montre que non (blindage)



- Radioactivité du sol ?
 - 1910 : T. Wulf monte à la tour Eiffel avec son électroscope : le rayonnement diminue avec l'altitude, pas autant qu'attendu
 - 1911 : D. Pacini compare les décharges d'un électroscope sur/sous l'eau, et confirme les observations de Wulf
 - L'hypothèse de l'origine terrestre est mise à mal



T. Wulf



La découverte

Des vols en ballons
aux expéditions autour
du globe

La quête en haute altitude

1912

- V. Hess, en 1911 et 1912 : près de dix vols en ballon équipé d'électroscopes adaptés à la haute altitude.
 - mesures de nuit et lors de l'éclipse du 17 avril 1912 a le Soleil ne peut être la source principale de ces radiations...
 - 7 août 1912 : altitude de 5350 mètres a le rayonnement ionisant vient de plus haut
- **Origine très probablement extraterrestre...**



- 1913 - 1914, W. Kolhörster monte jusqu'à 9000 mètres, toujours en ballon !
 - effets d'ionisation dix fois plus importants qu'au sol
 - **Confirmation des résultats de V. Hess.**



Nouveaux instruments, nouvelles techniques

1920

- Compteurs Geiger (1928)
 - Remplie de gaz + fil à haute tension
 - Ionisation du gaz au passage d'une particule chargée + décharge
- Couplage de compteurs
 - Passage de particules chargées venant du ciel

- Chambre à brouillard (1912) C. Wilson
 - Remplie de vapeur d'eau saturée
 - le passage des particules chargées laissent des traces de condensation.
- Chambre à brouillard dans un champ magnétique
 - Trajectoires courbées pour les particules chargées

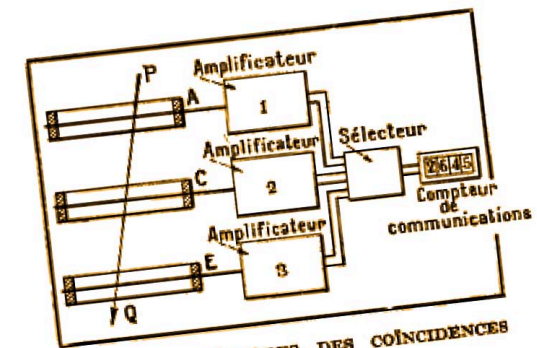
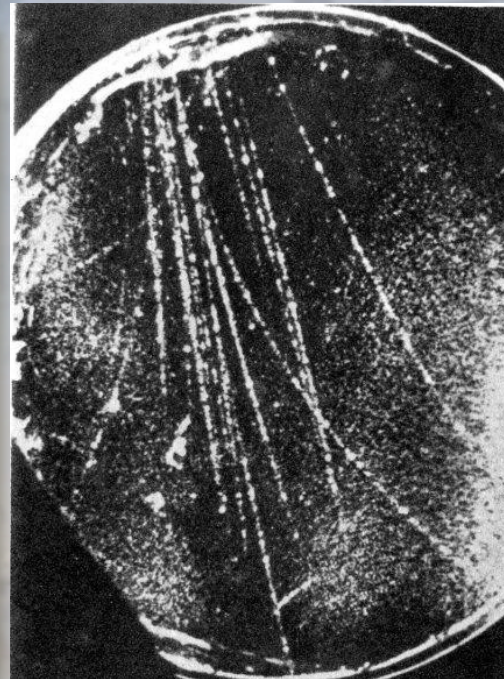


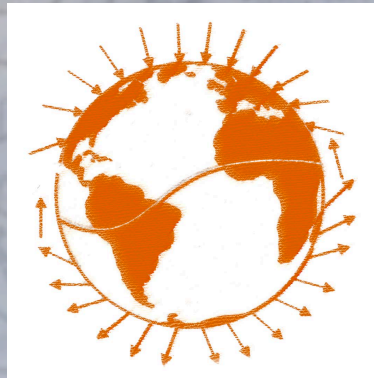
FIG. 5. — MÉTHODES DES COÏNCIDENCES

- Photos de chambres à brouillard déclenchées par des compteurs Geiger : clichés de rayons cosmiques

L'origine extraterrestre des rayons cosmiques se confirme

La controverse: rayons ou particules ?

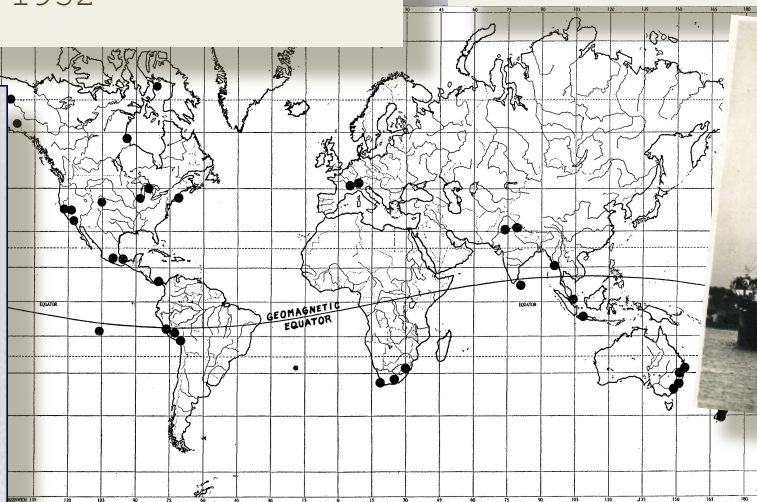
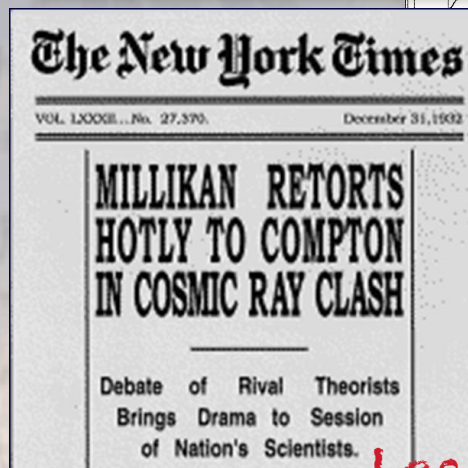
1930



- Le champ magnétique terrestre : un élément expérimental pour trancher la question

- R. Millikan :
 - de même nature que les rayons X
- A. Compton :
 - particules chargées
- Le débat fait rage ... et la une du New-York Times en 1932

- Dans les années 1930, des physiciens parcourent le monde pour résoudre la controverse sur la nature du rayonnement cosmique...
 - J. Clay, en 1932, Indonésie
 - P. Auger et L. Leprince-Ringuet en 1933 à bord du paquebot Le Kerguelen entre le Havre et Buenos Aires.



Les rayons cosmiques sont des particules chargées !
L'asymétrie est-ouest permet d'affirmer qu'elles sont
en majorité chargées positivement



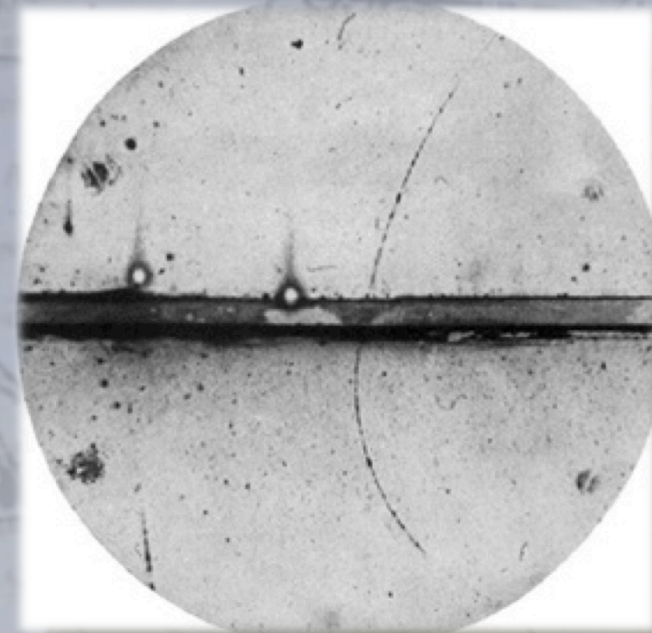
La naissance de la physique des particules

Découverte
de l'antimatière,
de nouvelles particules ...

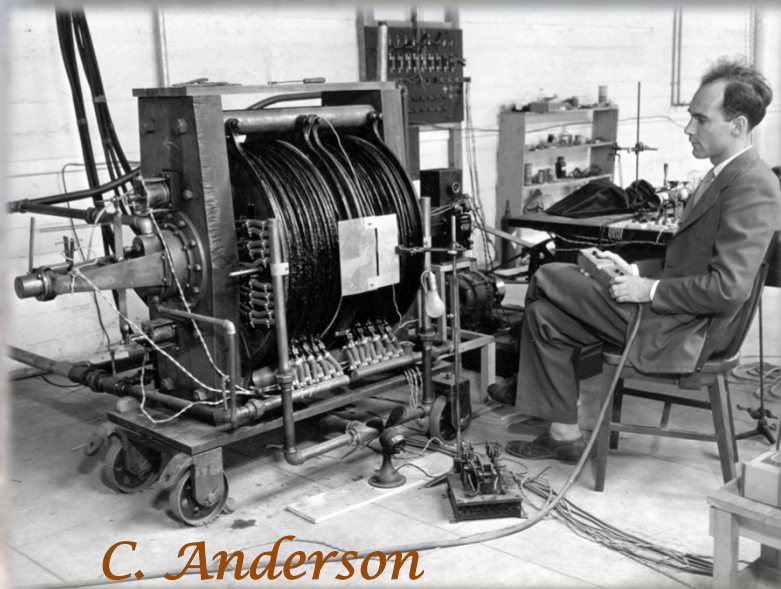
Découverte de l'anti- matière

1930

- En 1932, C. Anderson observe dans un cliché de chambre à brouillard une trajectoire identique à celle d'un électron mais portant une charge électrique positive...



- en 1931 les travaux en physique théorique de P. Dirac l'avaient conduit à postuler l'existence **du positron, l'antiparticule associée à l'électron.**



C. Anderson



P. Dirac

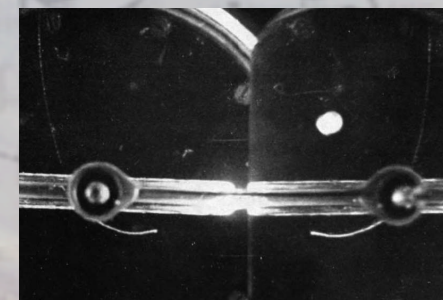
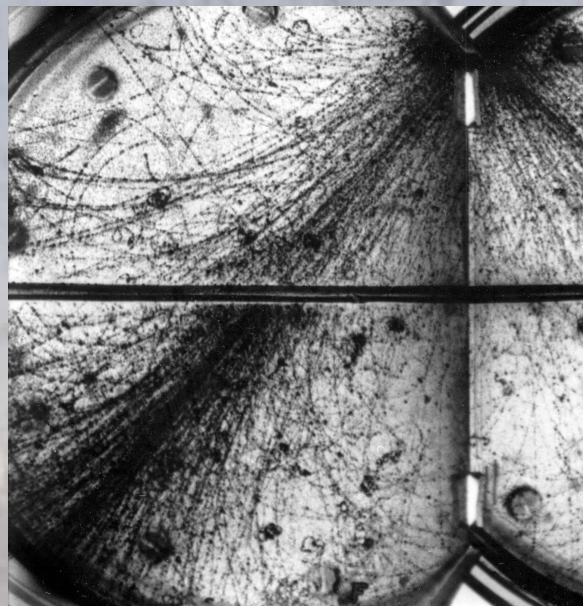
Le positron est le premier d'une longue série de nouvelles particules qui vont être découvertes

Composantes du rayonnement

1935

- Les physiciens analysent le rayonnement cosmique
 - à différentes altitudes
 - en se plaçant dans des salles profondément enterrées
 - derrière des écrans absorbants, de nature et d'épaisseur variables.
- « Composante molle »
- « Composante dure »

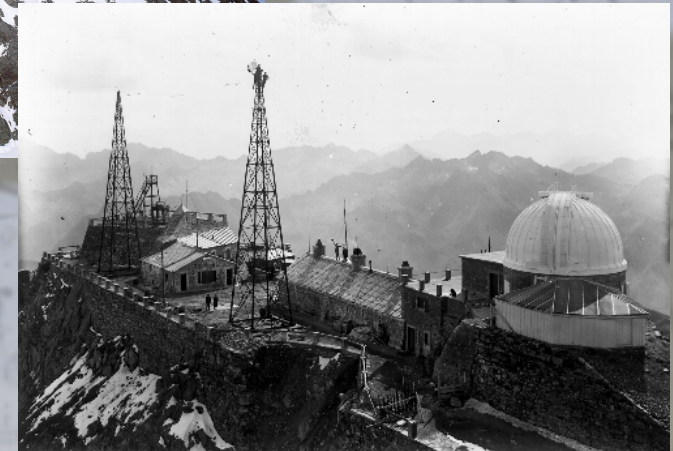
- En 1936, au sommet du Pike's Peak (4300 mètres) C. Anderson et S. Neddermeyer identifient avec une chambre à brouillard **une nouvelle particule fortement pénétrante**.
- Baptisée «mésotron», cette particule (appelée aujourd'hui «**muon**») s'avère très semblable à l'électron, bien que 200 fois plus lourde !



Les montagnes sont des endroits bien appropriés pour étudier les rayons cosmiques. Les physiciens montagnards ne sont pas au bout de leurs surprises

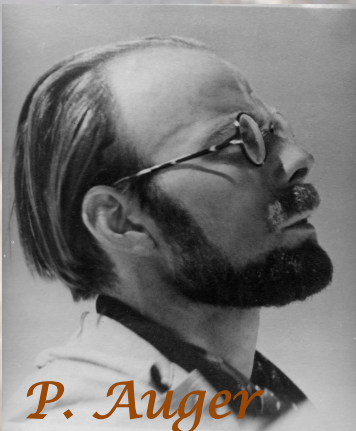
Sur la piste des grandes gerbes

1937



- En 1934, B. Rossi: décharges simultanées dans 2 compteurs Geiger séparés de plusieurs mètres.
- ne peuvent être dues à des coïncidences fortuites.

- En 1937, P. Auger et ses collaborateurs : étude systématique
 - à Paris
 - à l'Observatoire du Pic du Midi (2900 m)
 - à la station scientifique du Jungfraujoch (3500 m), en Suisse.



P. Auger

Une seule particule cosmique qui interagit avec l'atmosphère génère une cascade d'autres particules ! Ces pluies furent baptisées les "grandes gerbes de l'air".

Un premier bilan

Différents types de radiation ont été observés, et on a montré que la terre est constamment bombardée de particules

De nombreuses techniques de production, et de détection de ces radiations et de ces particules sont mises au point

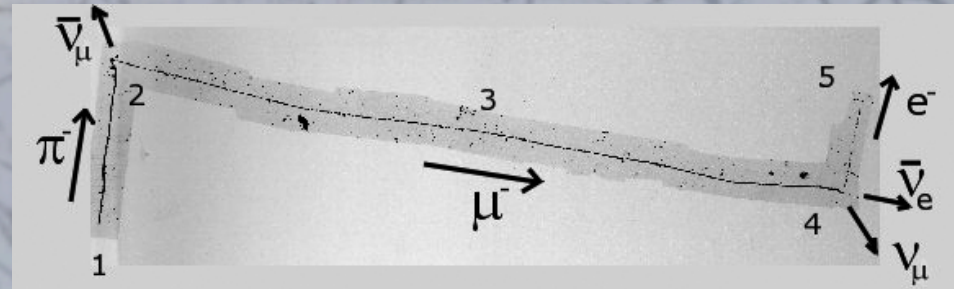
La 2ème guerre mondiale met provisoirement ces recherches entre parenthèse en Europe

La physique nucléaire devient un enjeu stratégique majeur

Les détecteurs progressent

1947

- Dès 1937, de nouvelles techniques de détection apparaissent, basées sur les **émulsions photographiques**.
- C. Powell améliore les émulsions pour les rendre plus sensibles



- en 1947, à la découverte d'une nouvelle particule, le «**pion**», dans les interactions de rayons cosmiques

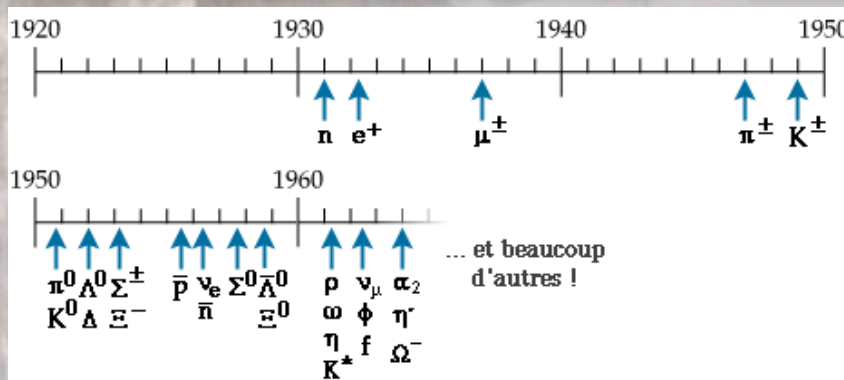
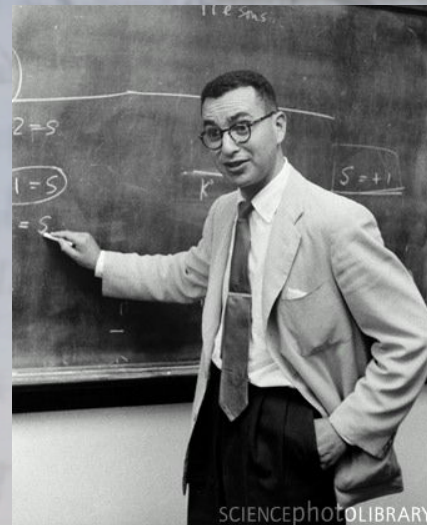


Le « bestiaire » s'agrandit

1947

- Dans les années 1960 : besoin d'une classification !
- M. Gell-Mann et G. Zweig élaborent **le modèle des quarks**, les constituants élémentaires de tous les hadrons.

- Observation d'autres nouvelles particules
- De caractéristiques surprenantes, on les nomme particules «étranges» !
 - Le «kaon» découvert en 1947.
- Toute une zoologie de nouvelles particules émerge au fil des années.



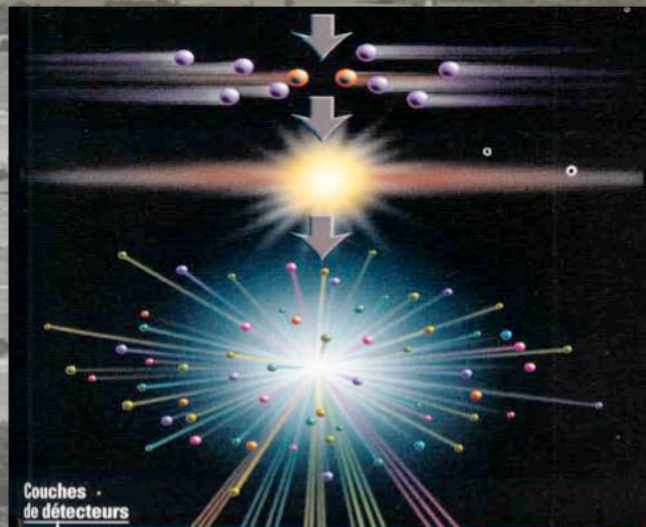
Des machines à particules

1950

- Pour progresser dans leur enquête sur les constituants de la matière, les physiciens construisent des **accélérateurs de particules**



- Le «Cosmotron», dans les années 1950, à Brookhaven aux Etats-Unis.
- Il devait accélérer des protons à des énergies record, comparables à celles des rayons cosmiques.



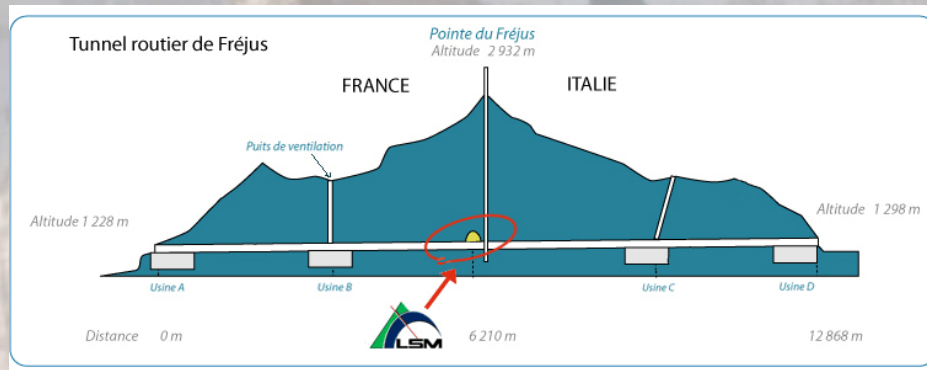
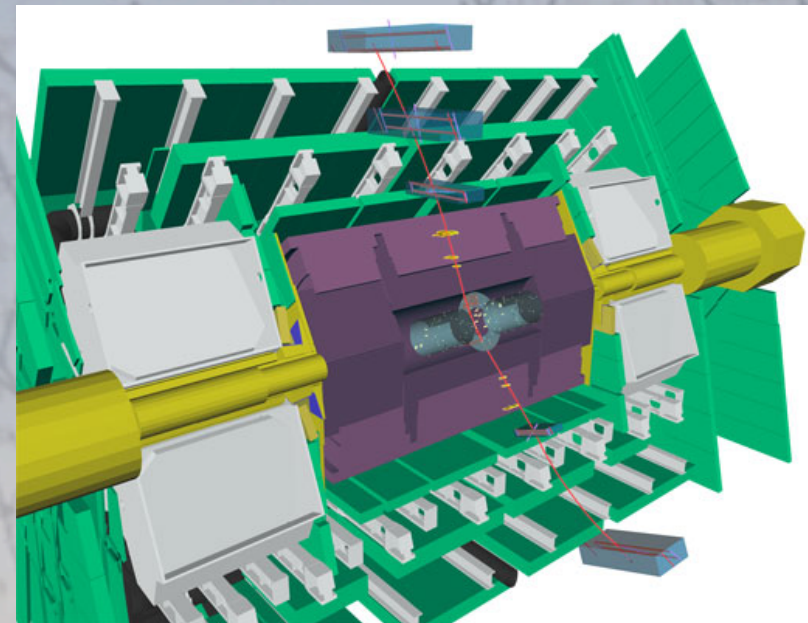
- Ces instruments apportent une énergie considérable à des particules transformées en projectiles.
- L'énergie libérée dans les collisions se transforme en matière \Rightarrow création de nouvelles particules
 $E=mc^2$

L'Europe voit naître le CERN à Genève, où le premier accélérateur est mis en service en 1957.

S'en protéger
ou s'en
servir !

- La plupart des particules issues de rayons cosmiques et arrivant sur Terre sont **des muons énergétiques**.

- Les rayons cosmiques peuvent gêner certaines mesures de précision.
- Pour s'en protéger, on utilise un blindage épais.
- On peut aussi installer des expériences sous une montagne, comme dans le tunnel du Fréjus entre la France et l'Italie, ou même au fond de mines, comme à Sudbury au Canada.



- Aujourd'hui, **les plus grandes expériences de physique des particules au LHC** y observent les traces de muons cosmiques qui traversent les détecteurs... pour vérifier **leur alignement et leurs performances**.

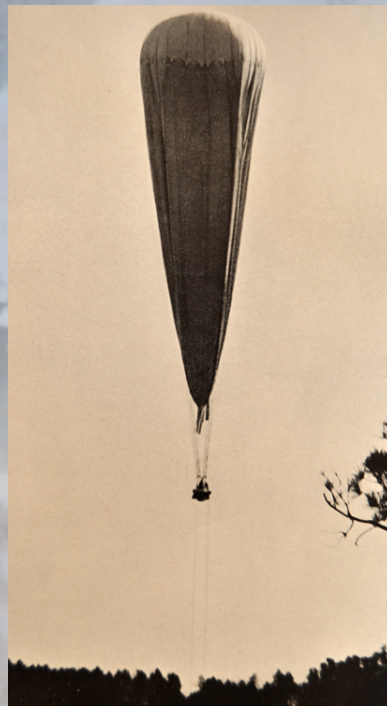
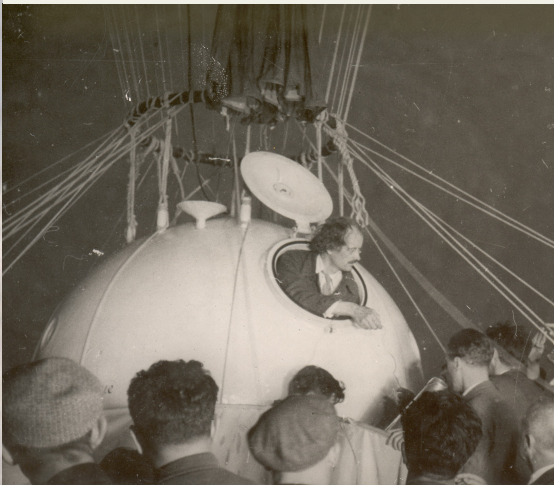


Toujours plus haut

Pour étudier les propriétés
des rayons cosmiques
primaires, il faut s'élever
au-delà des sommets.

En ballon, en avion....

- Avant la 2eme guerre mondiale
 - altitude record de 22 km dans des cabines pressurisées.
- Après
 - utilisation de ballons sondes : vols de longue durée à très haute altitude.



- C. Anderson : clichés de rayons cosmiques à une altitude d'environ 10 km, grâce à une chambre à brouillard installée dans la soute d'un bombardier B29 spécialement équipé pour l'occasion...

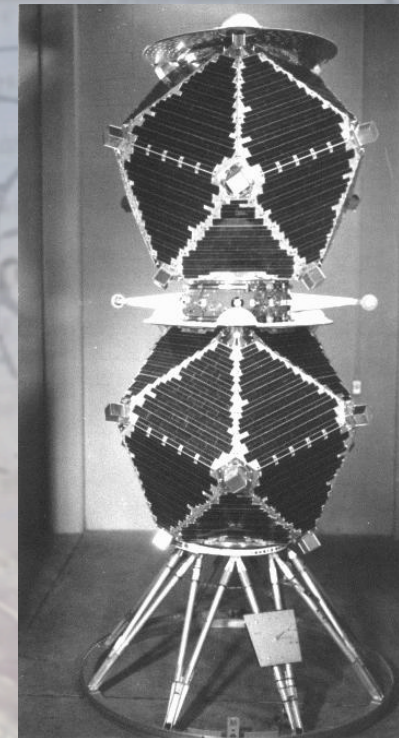
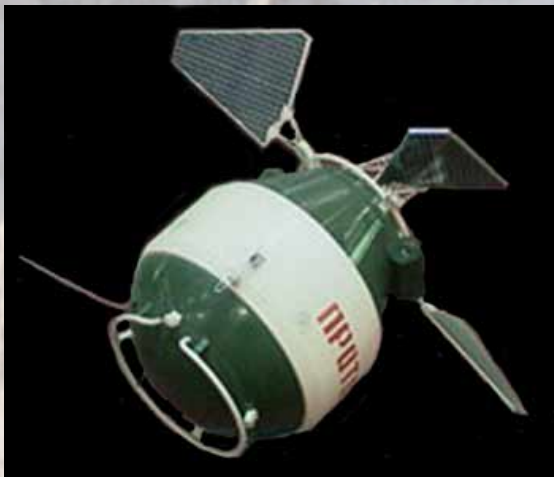


- De 1979 à 1995: ECHOS, passage de particules cosmiques d'énergies exceptionnellement élevées enregistré dans des chambres à émulsion transportées dans les soutes du Concorde, à plus de 17 km !

... et en orbite !

- A partir des années 1960, les programmes spatiaux ouvrent de nouveaux horizons avec des mesures de longue durée par satellite.
- Satellites Protons : mesure de l'intensité et de l'énergie du rayonnement cosmique.

- Impact de la Guerre froide
- 1967 (1973) découverte des sursauts gamma
 - Satellites espions, surveillance des essais nucléaires
 - Découverte de bouffées de rayons gamma, provenant de l'espace



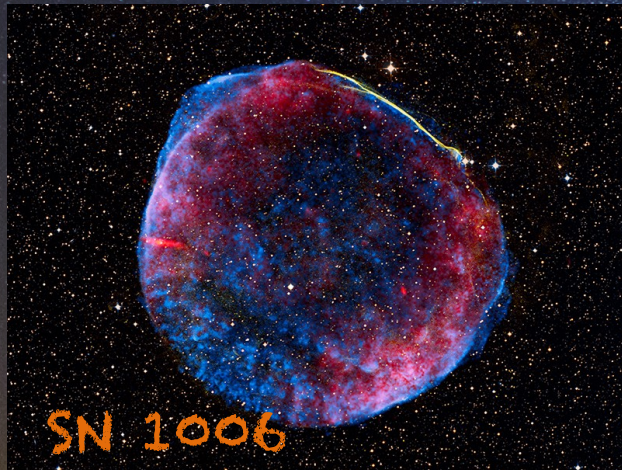
The background is a collage of historical and scientific imagery. It features a globe, a microscope, and various pages of handwritten text in cursive script, likely from an old manuscript or journal. The overall tone is historical and academic.

De nos jours

A la conquête
des grands espaces !

L'astronomie gamma

- Production de gammas
 - Tout phénomène ou objet céleste impliquant les particules en accélération émet à priori des rayons gamma

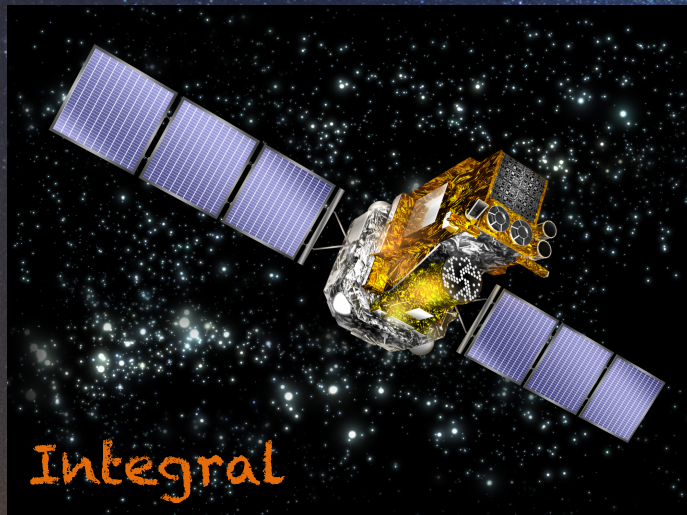


- Les rayons gamma ne sont pas déviés par les champs magnétiques interstellaires, et voyagent en ligne droite !!!
- Ils gardent la mémoire de leur origine

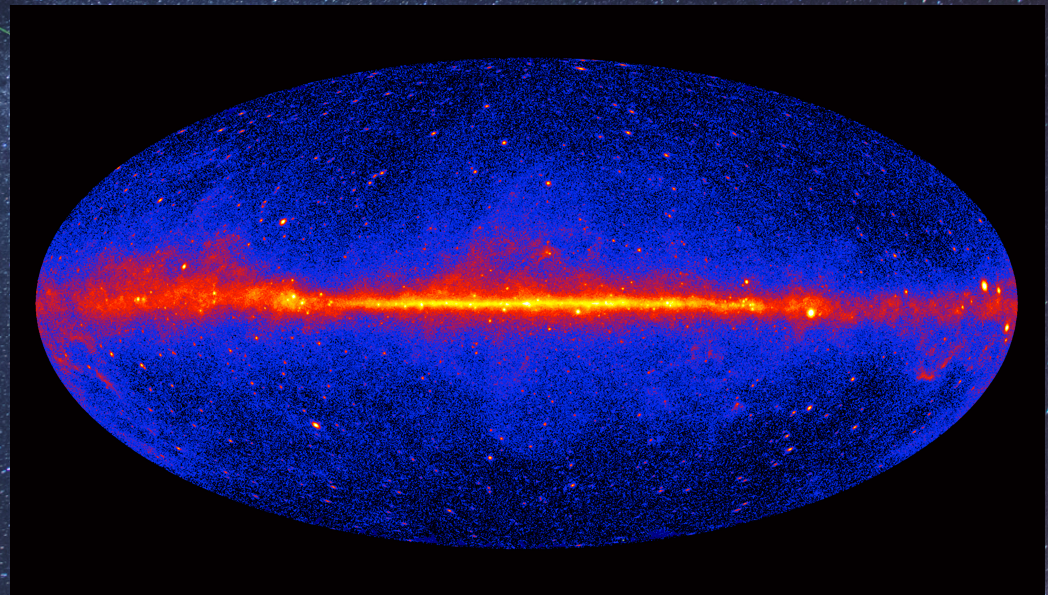
Détecteurs dans l'espace



Fermi



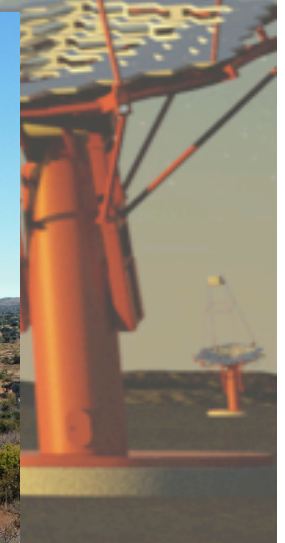
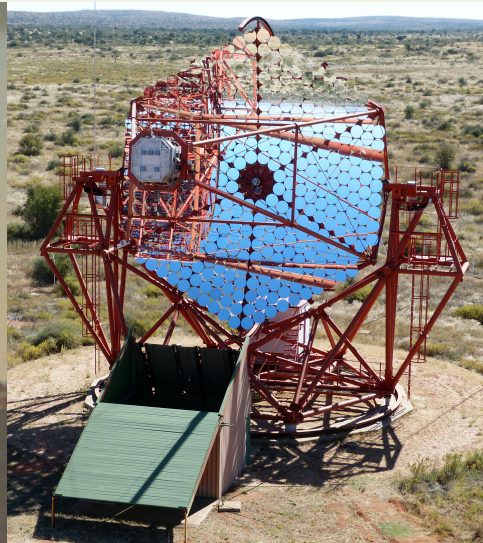
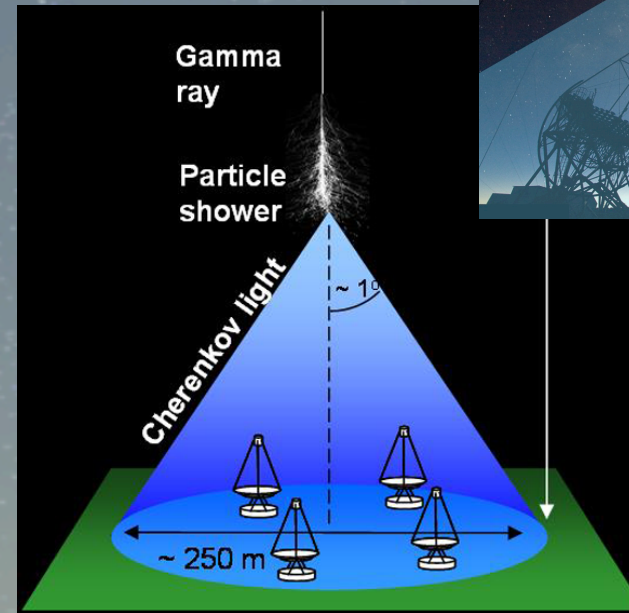
Integral



- Le satellite Fermi cartographie le ciel en rayonnement gamma dans un domaine en énergie de 0,02 à 300 GeV.
- Sur ce cliché du ciel, les régions en rouge orangé marquent les zones d'émission les plus intenses.

Observatoires terrestres

- Gamma de très haute énergie : rares, besoin de grande surface de détection
- Telescope HESS : Observation des sources de gamma, $E > 10$ GeV
 - En Namibie - phase I, 4 télescopes (2003)
 - H.E.S.S 2 : miroir de 28 m, le plus grand télescope Cherenkov au monde



Des systèmes de détection dans l'espace

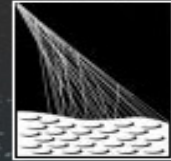
- Les rayons cosmiques sont constitués à environ 89% de protons, 10% de noyaux d'hélium et 1% d'électrons.
- La petite fraction restante est constituée de noyaux plus lourds.

- AMS-02, à bord de la station spatiale internationale depuis 2011
- flux et nature des rayons cosmiques d'énergie variant entre le GeV et quelques centaines de GeV avec une précision sans précédent.



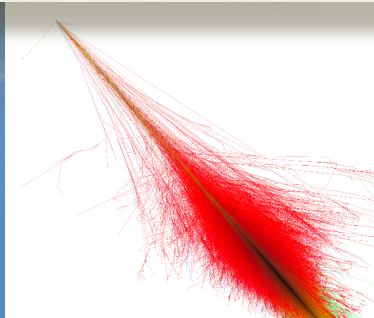
Des observatoires gigantesques

Pierre Auger Observatory
studying the universe's highest energy particles

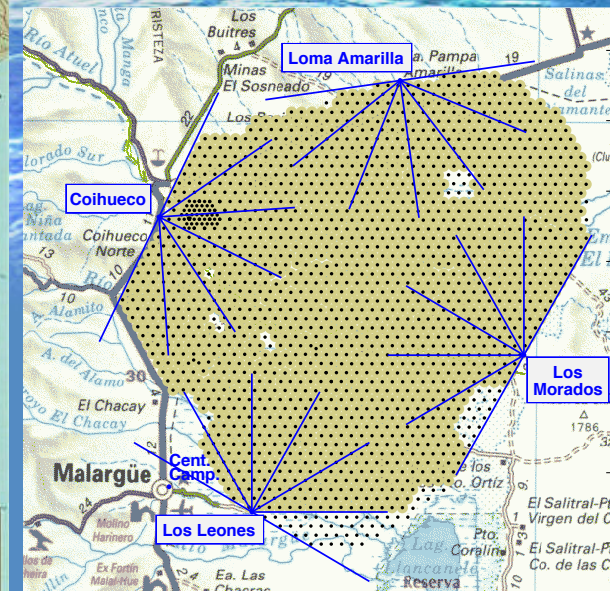


- L'observatoire Pierre Auger en Argentine
 - 1660 détecteurs de particules espacés de 1,5 km
 - 27 télescopes de fluorescence
 - Sur 3000 km² dans la pampa

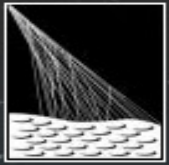
- Le flux des particules cosmiques décroît rapidement avec leur énergie.
- Aux énergies les plus extrêmes : quelques particules par km² et par siècle,
- Dans ces cas, l'énergie, concentrée en une seule particule, est comparable à celle d'une balle de tennis frappée à 200 km/h.



- Pour les observer, de vastes surfaces au sol sont équipées de systèmes de détection mesurant les très grandes gerbes de particules secondaires.



Pierre Auger Observatory
studying the universe's highest energy particles



Ile-de-France

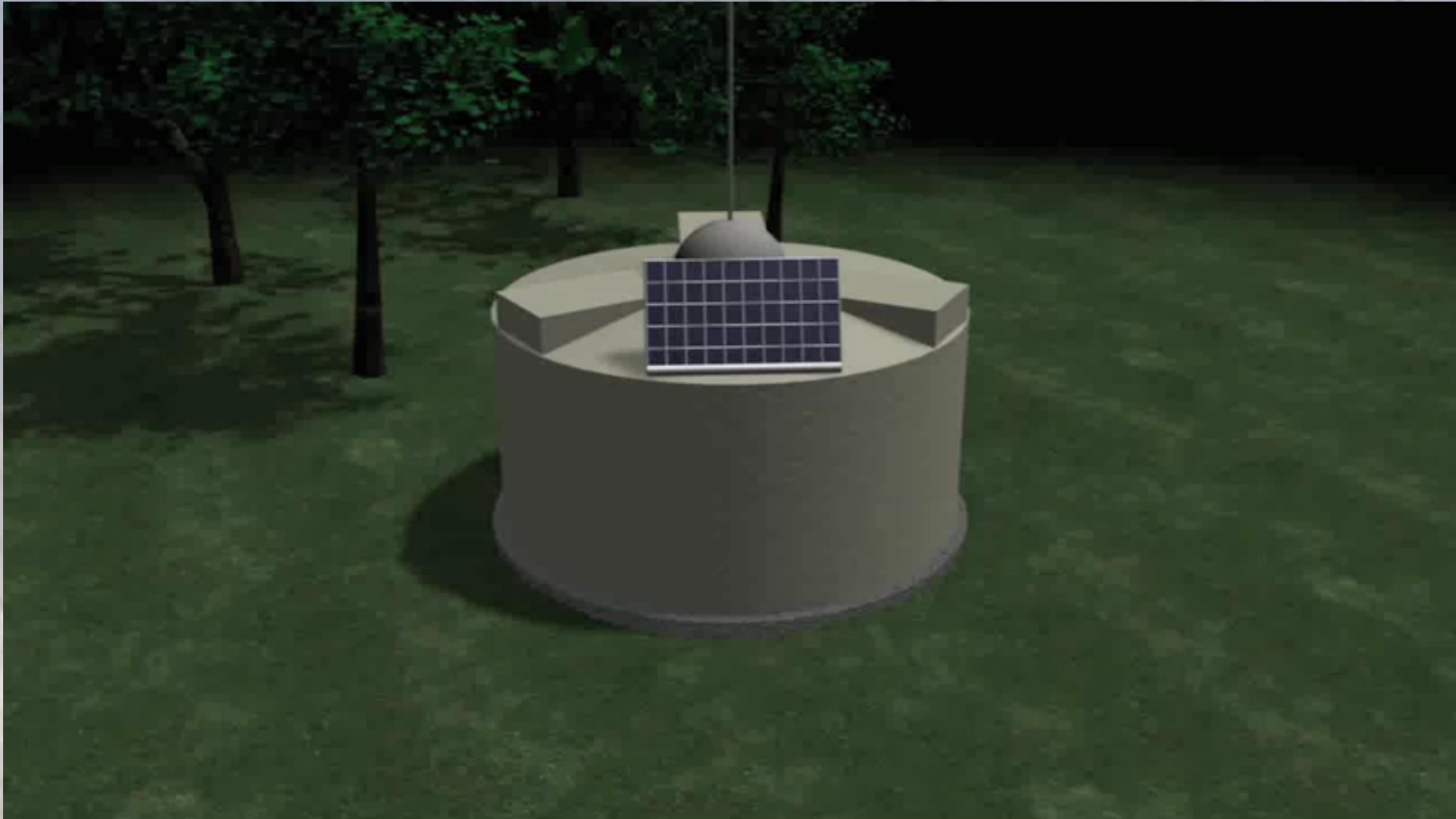


Observatoire Auger

Les cuves du réseau au sol



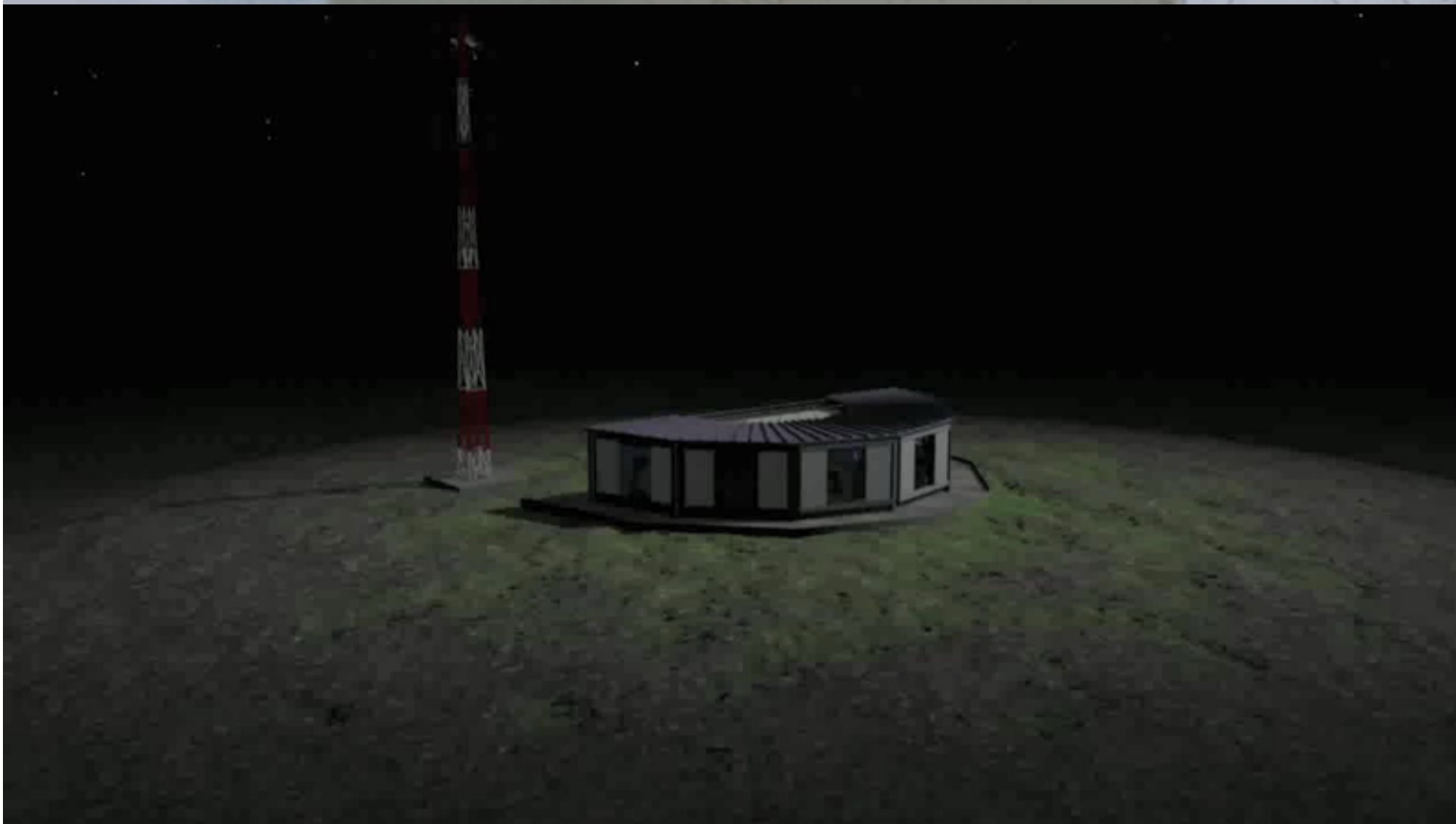
Le fonctionnement d'une cuve



Les
téléscopes de
fluorescence



Les Télescopes



Les Télescopes



Un rayon cosmique
arrive...



Auger...sous un
autre angle



Les « quatters... »



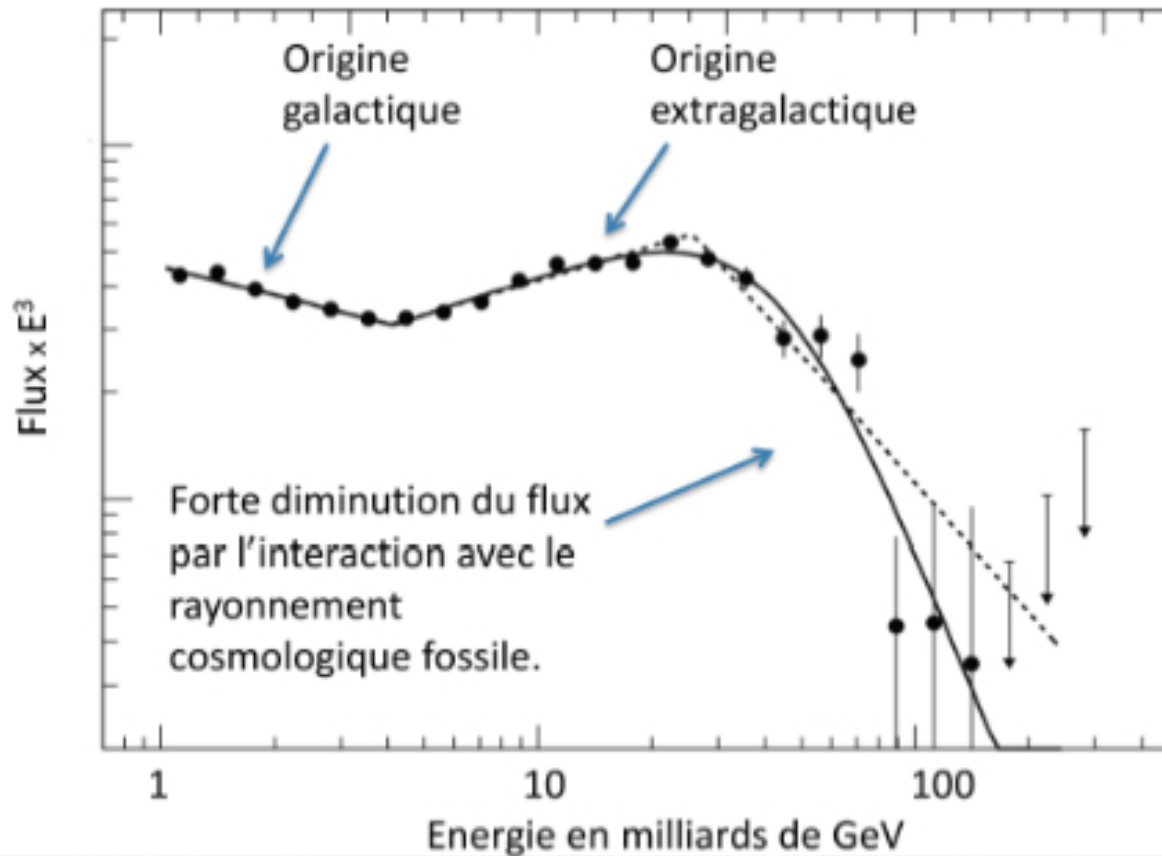
Les « quatters »



Comment
déplacer une
cuve?



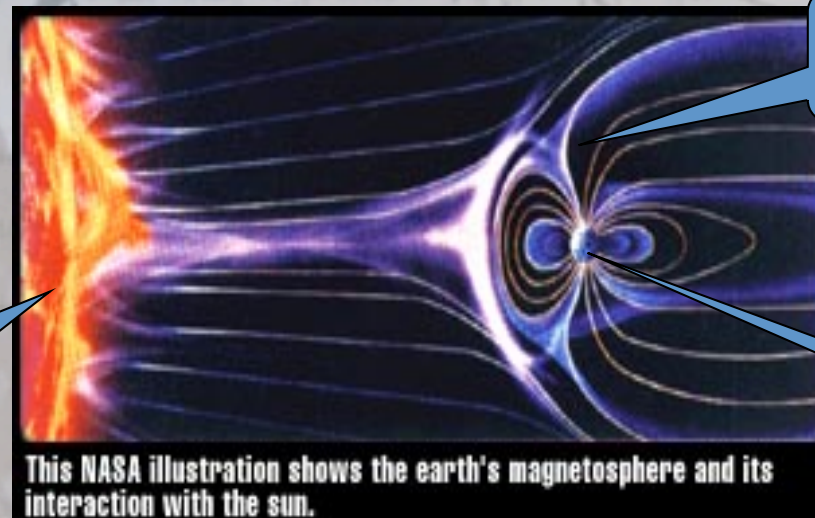
Retour vers la science...



Le soleil

- A basse énergie (en dessous de 10^{10} eV), les rayons cosmiques sont issus principalement du soleil, ils sont expulsés par le vent solaire et les éruptions solaires, nous sommes en partie protégés de ce flux de particules grâce à notre magnétosphère.

Le Soleil



magnétosphère

La Terre

This NASA illustration shows the earth's magnetosphere and its interaction with the sun.

Et au delà?

Plus haut en énergie (jusqu'à 10^{15-16} eV), les supernovae sont les sources supposées des rayons cosmiques.

A ces énergies, le champ magnétique galactique « confine » les rayons cosmiques au sein de notre Galaxie.

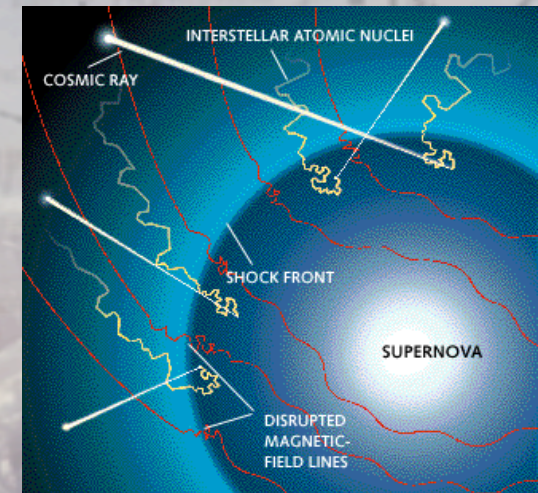
En clair on ne peut voir à ces énergies que des rayons cosmiques produits dans la Galaxie.



Naissance dans une SuperNova

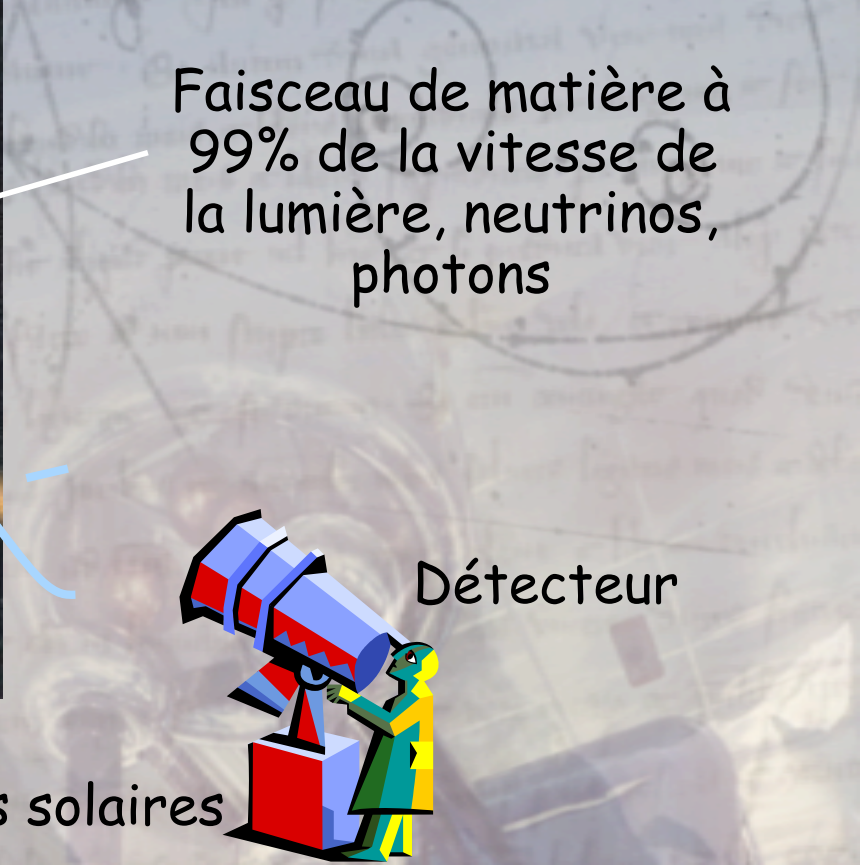
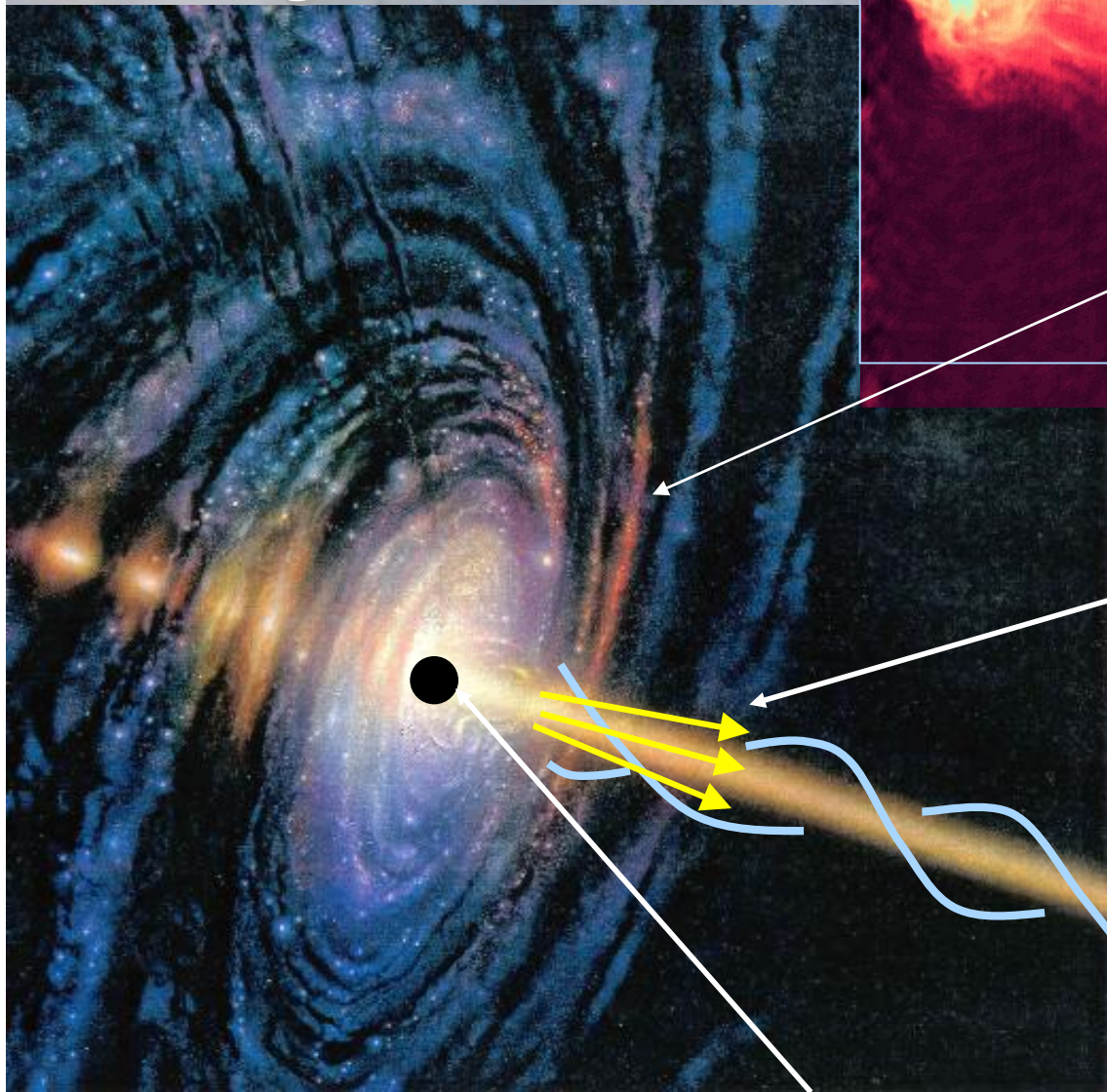
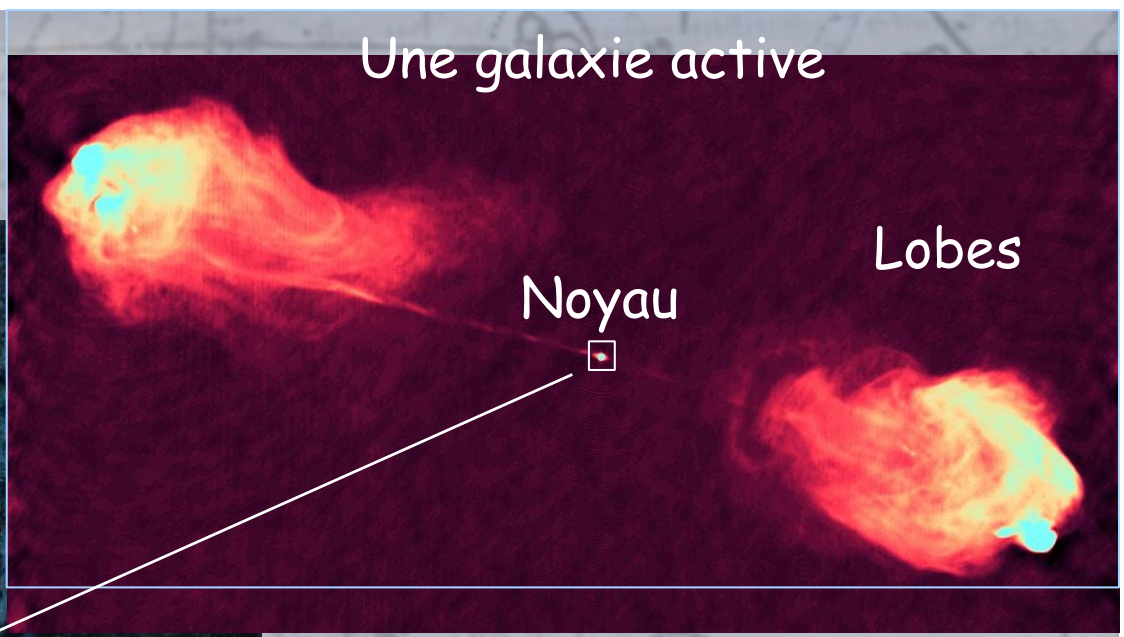
Une ou 2 fois par siècle, une étoile de notre Galaxie se désintègre en une **supernova**.

C'est aussi au cours de ces explosions que des protons et autres éléments plus lourds sont expulsés à des vitesses proches de la lumière dans l'espace intersidéral.



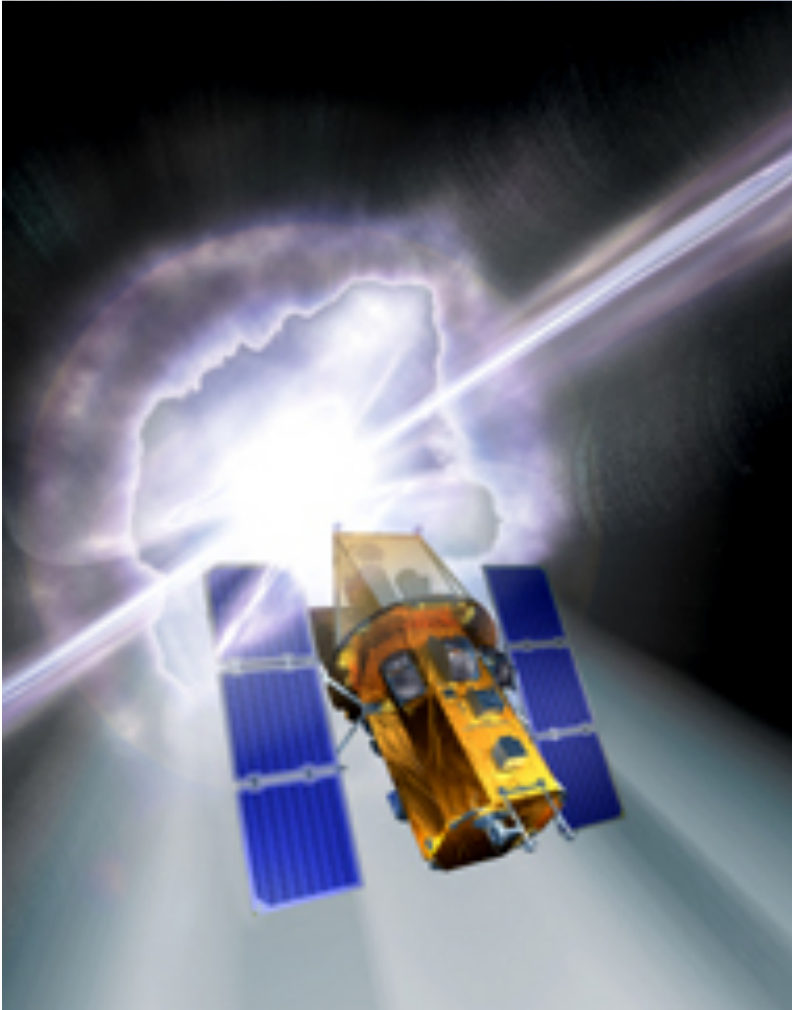
Des rayons cosmiques sont nés...

Les noyaux actifs de galaxies




Trou noir de quelques 100 millions de masses solaires

Les sursauts Gamma



- ❑ Explosions les plus violentes depuis le big-bang
- ❑ Émission très brève (quelques secondes à quelques minutes)
- ❑ fusion de systèmes binaires compacts (2 étoiles à neutrons, étoile à neutrons et d'un trou noir ???)
- ❑ Hypernova ou collapsar (effondrement d'une étoile massive directement en trou noir)
- ❑ Découverts dans les années 60 par les satellites espions militaires américains

Vue d'artiste d'un sursaut gamma et du satellite SWIFT chasseur de sursauts

The background is a composite image. On the left, there's a view of a rugged, snow-capped mountain range. On the right, there's a close-up of a particle detector, possibly a bubble chamber or cloud chamber, showing several glowing tracks of ionizing particles. The entire background is overlaid with a faint, semi-transparent grid and handwritten-style text, giving it a scientific or historical feel.

Les Rayons cosmiques: si « extraordinaires »??

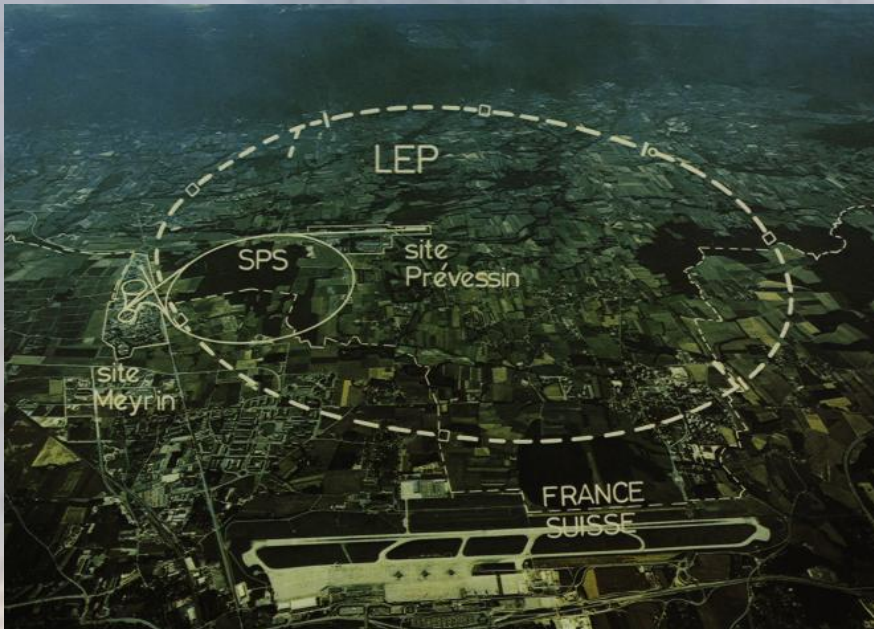
Echelle d'énergie

•Energie des particules dans la nature

- 0,03 eV
 - énergie d'une molécule d'oxygène ou d'azote dans l'air
- 0,67 eV
 - énergie nécessaire à un proton ou un neutron pour échapper à l'attraction terrestre
- 1000 – 15 000 eV , 200 000 eV
 - énergie typique d'un électron dans une aurore polaire
 - ...d'un X d'une radio dentaire !
- 1 – 10 MeV
 - énergie des particules émises par les éléments radioactifs
- 1-100 000 000 000 GeV
 - Domaine d'énergie couvert par les rayons cosmiques
 - 100 000 000 000 GeV = 50 Joules!!!



Echelle d'énergie



•Energie des particules dans les accélérateurs

(exemple du CERN)

- **ISR : Intersecting Storage Rings**
 - le premier collisionneur proton-proton à être mis en service (1971) fournissant au maximum 31 GeV par faisceau.
- **SPS : Super Proton Synchrotron**
 - Synchrotron à protons, atteignant des énergies de 450 GeV.
- **LEP : Large Electron-Positron collider**
 - Faisceaux atteignant 100 GeV, collisions e^+e^- à 200 GeV
- **LHC : Large Hadron Collider**
 - En construction, pour obtenir des collisions proton-proton à une énergie de 14 000 GeV (14 TeV).



Dans la vie de tous les jours (ou presque !)

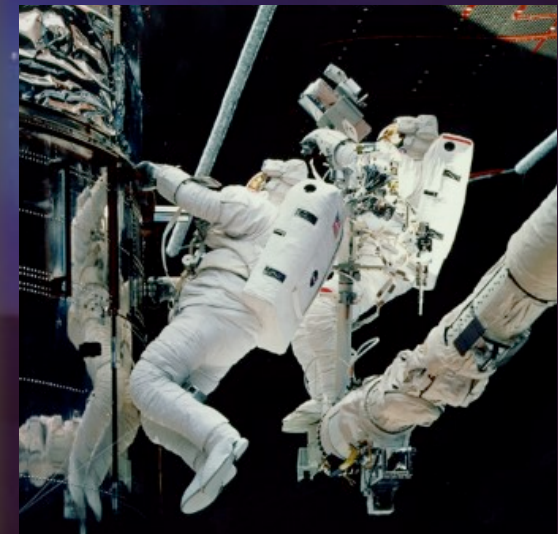
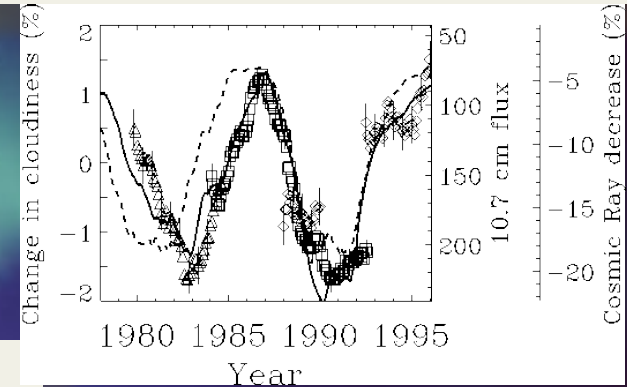
- Les neutrons présents dans les gerbes atmosphériques sont absorbés par la neige.
- En comparant la différence entre le flux de neutrons mesuré au-dessus et au-dessous d'une couche de neige, on en déduit son épaisseur à quelques pourcents près !
- Grâce à des modèles informatiques, cela permet d'évaluer les réserves de neige sur l'ensemble des massifs français.



- Les rayons cosmiques produisent le carbone 14, utilisé pour la datation des vestiges organiques jusqu'à -40000 ans environ



- Tout rayonnement ionisant peut interagir avec les cellules vivantes.
- Le champ magnétique terrestre et l'atmosphère filtrent la plupart des rayons cosmiques !
- Dans l'espace, les astronautes sont exposés aux rayons cosmiques. Les protéger lors d'un long voyage est l'un des défis majeurs à relever pour la conquête spatiale.



Des rayons cosmiques vous traversent par milliers depuis que vous écoutez cette conférence !

The background is a complex collage. At the top left, there is a globe with latitude and longitude lines. Below it, on the left, is a rugged, snow-capped mountain peak. On the right side, there is a detailed illustration of a microscope. The entire background is overlaid with faint, handwritten text in various colors and orientations, creating a sense of intellectual or scientific exploration.

Merci de votre
attention