



Enquête sur les Rayons Cosmiques

Delphine Monnier Ragainie
Enseignant Chercheur
Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire
Université Paris-sud, Orsay

A photograph of the aurora borealis (Northern Lights) in a dark night sky. The aurora is a vibrant green and blue glow that curves across the sky. In the foreground, the dark silhouettes of evergreen trees are visible against the dark ground.

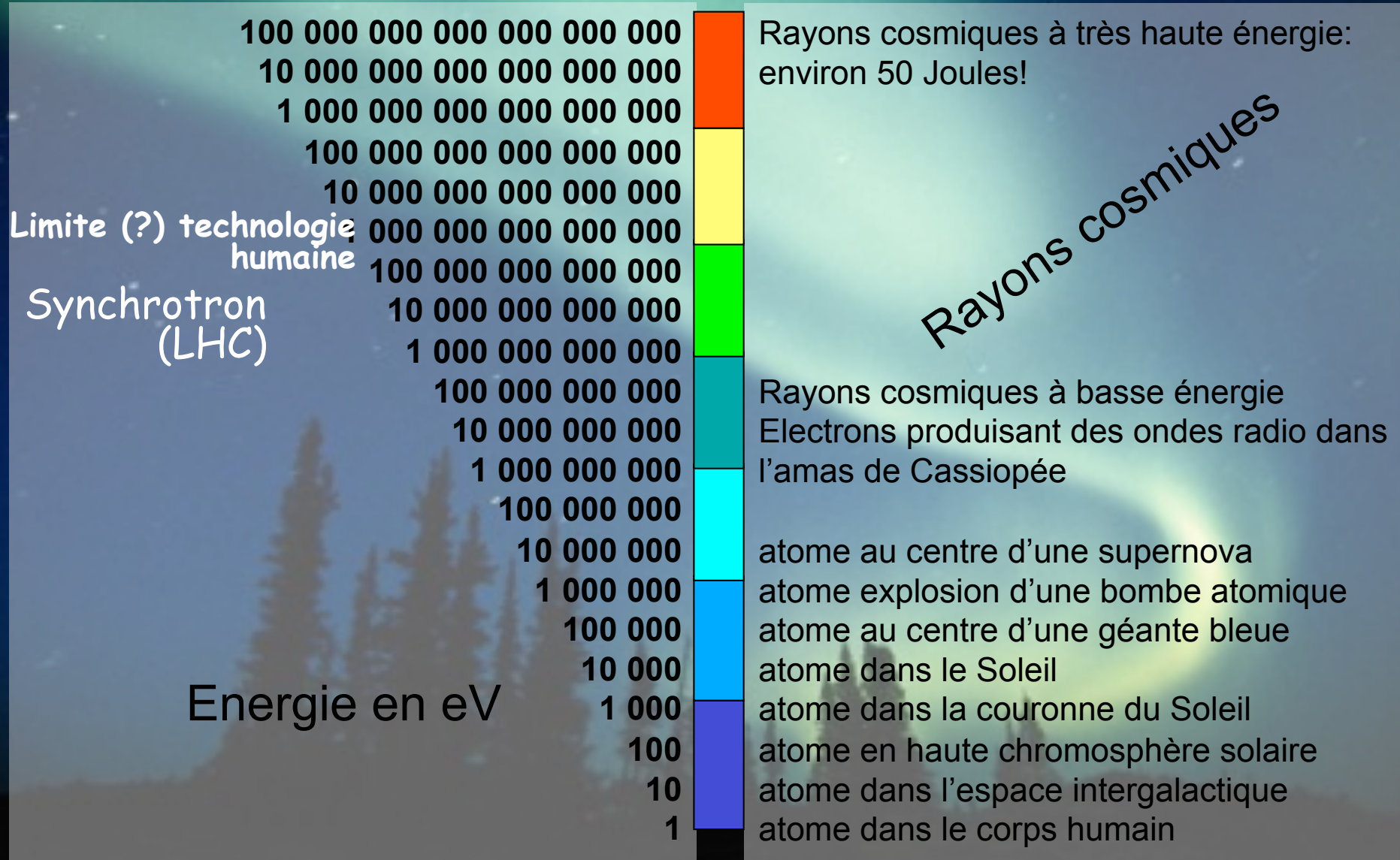
1

Pour se situer...énergie et taille
des Rayons Cosmiques

Une question d'énergie

- L'énergie s'exprime généralement en Joule dans le **domaine macroscopique= à notre échelle**
 - Autre unité: 1 calorie=4,186 J
 - 1 Watt-heure(Wh)= 3600 J
- L'énergie = force(N) x longueur (m)
 - Pour soulever 1 kg sur une hauteur de 1m on doit fournir 9,81 J
- L'énergie en **physique des particules** s'exprime en électron-volt (eV)
 - **1eV= 1,602 x10⁻¹⁹ J**
- 1 eV= 0,000 000 000 000 000 000 000 16 J

Une question d'énergie(2)



Une question de taille aussi !!

Les Rayons Cosmiques sont des particules chargées comme des protons par exemple.

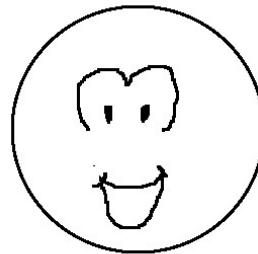
Un proton fait une taille de 10^{-15} mètres

Un grain de riz= environ 10^{-3} m

Le diamètre du soleil=environ 10^6 km= 10^9 m

l'écart entre la taille d'un grain de riz et celle d'un proton
l'écart entre le soleil et ce grain de riz sont équivalents

Energie colossale pour un élément aussi petit!!!!



Je suis Petit mais costaud!!

A photograph of the Aurora Borealis (Northern Lights) in a dark night sky. The aurora is a vibrant green and blue glow that curves across the sky. In the foreground, the dark silhouettes of evergreen trees are visible against the dark ground.

2

Rayons Cosmiques: Carte d'identité

Un peu d'histoire

. Fin du XIXeme, début du XXeme:

un étrange phénomène est observé: les chambres à ionisation (mesure de charge, on connaît l'électron) se déchargent toutes seules -> il existe un rayonnement ionisant non identifié

Joseph John Thomson (~1900) « J'ai beau faire... j'ai toujours des petites fuites! »
Est ce la radioactivité? Le blindage de plomb ne l'arrête pas -> NON

Charles Wilson fut le premier dès 1901 à émettre l'hypothèse d'une ionisation provoquée par un rayonnement cosmique = **rayonnement provenant du cosmos.**

... hypothèse peu convaincante pour l'époque!

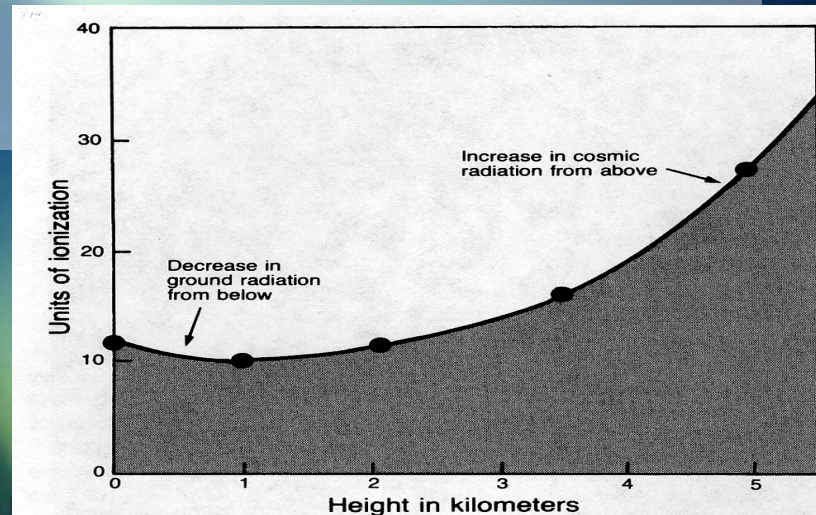
Et pourtant...

10 ans plus tard... la découverte des rayons cosmiques

Victor Hess, en 1911, prouva l'existence du rayonnement cosmique avec des mesures en ballon :

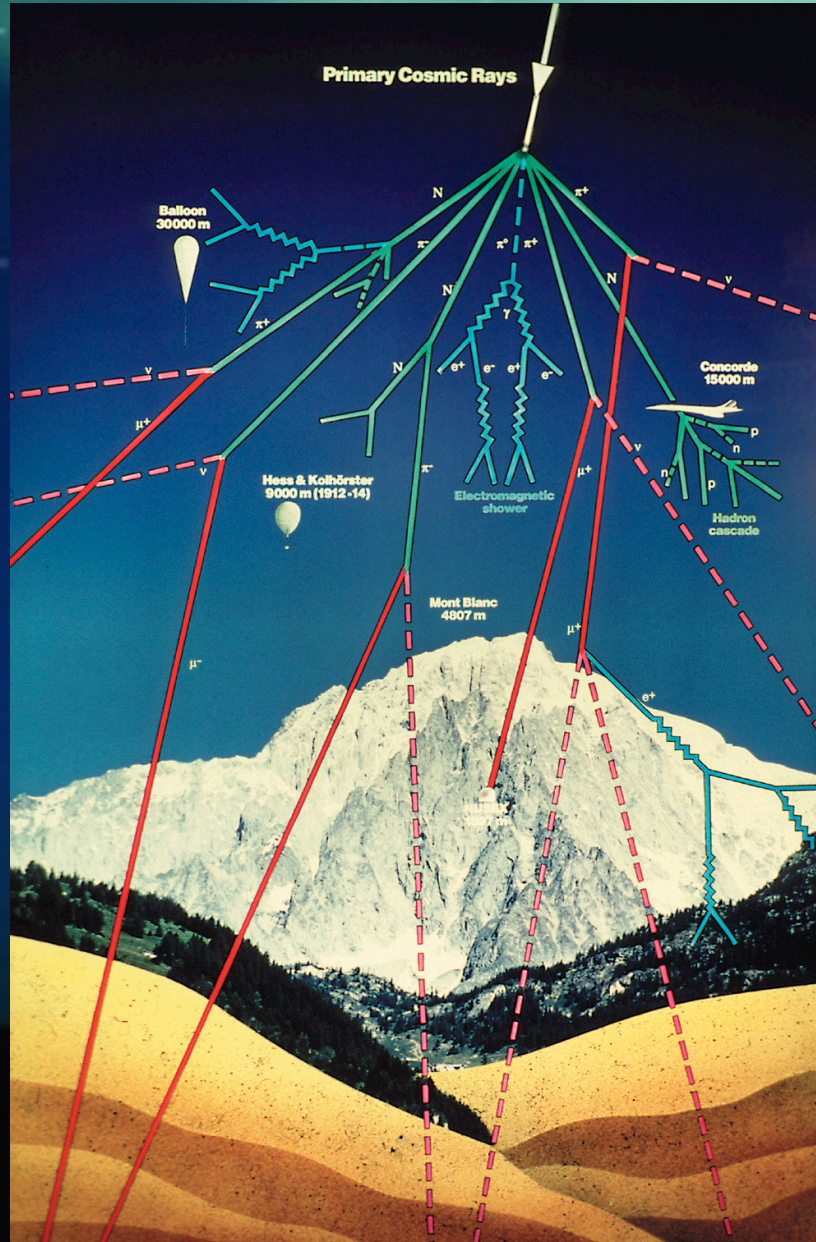
Plus on monte plus l'ionisation augmente
-> cela vient « d'en haut »!!!

Ils sont fous ces chercheurs



Readings on ionization chamber Victor Hess carried aloft in the Böhmen. Above four kilometers the ionization rose rapidly indicating "that rays of very great penetrating power are entering our atmosphere from above". These cosmic rays contain the only modern samples of matter from outside our solar system which can be investigated directly.

Du rayon cosmique à la gerbe atmosphérique



Découverte en 1938
par Pierre Auger:

La gerbe contient des milliers de particules secondaires interagissant tour à tour sur l'ensemble de l'atmosphère et couvrant au sol une zone d'autant plus grande que l'énergie est élevée

Les grandes découvertes liées aux rayons cosmiques

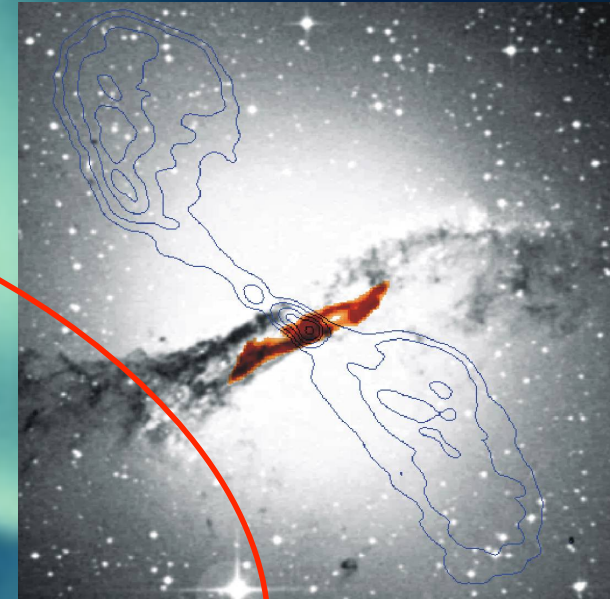
L'étude des rayons cosmiques et des gerbes en particulier va permettre notamment:

- La découverte du positron en 1932 (prédit en 1928)
- La découverte du Muon en 1934
- La découverte en 1947 du méson chargé (pion chargé) en altitude, ce dernier se désintègre en muon par le phénomène des gerbes atmosphériques
- La découverte en 1950 du méson neutre (pion neutre) qui se désintègre en 2 photons

A la croisée des chemins

1953

Etude du rayonnement
cosmique



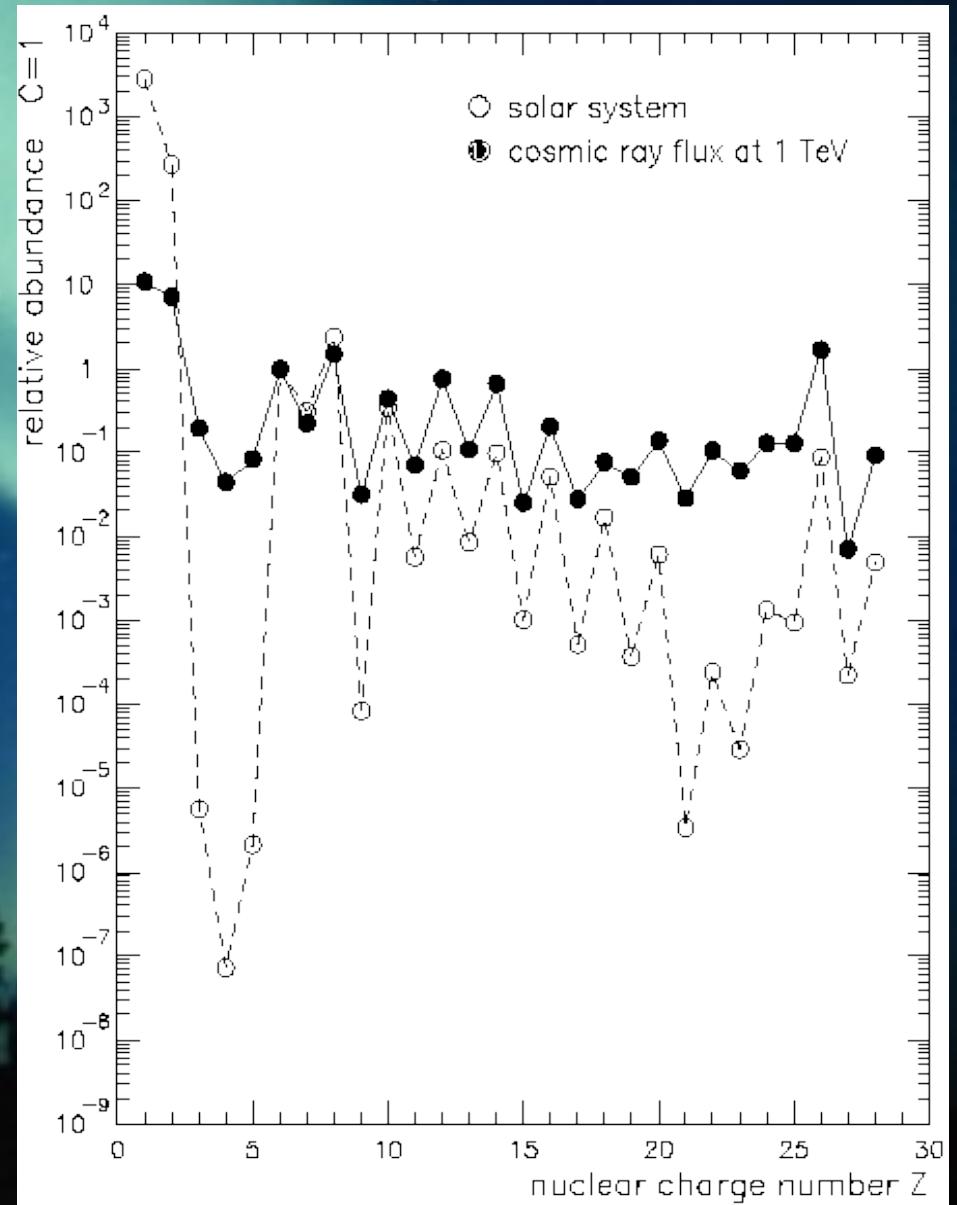
Astroparticules:
Détection directe et indirecte
Des rayons cosmiques

Physique des particules:
Modèle standard

Que sont les rayons cosmiques?

Les expériences avec les sondes spatiales vont permettre de donner la composition du rayonnement cosmique pour les « basses » énergies **mais on ne sait rien des très hautes énergie!**

-Ce sont vraisemblablement des noyaux qui sont en route depuis des dizaines de millions d'années



D'où viennent les rayons cosmiques?

De partout!!

Est ce normal?

Oui!

Car les champs magnétiques courbent leur directions :

Un proton de 10^{12} eV est incurvé par le champ magnétique galactique (de l'ordre de 10^{-9} Tesla) avec un rayon de courbure de 20 UA (environ la distance Soleil-Uranus).

Il faut monter en énergie à $10^{19.5-20}$ eV pour espérer pointer vers les sources.

Remarque: pour le RC le temps est beaucoup moins long (merci la relativité)



Quel est le flux des rayons cosmiques?

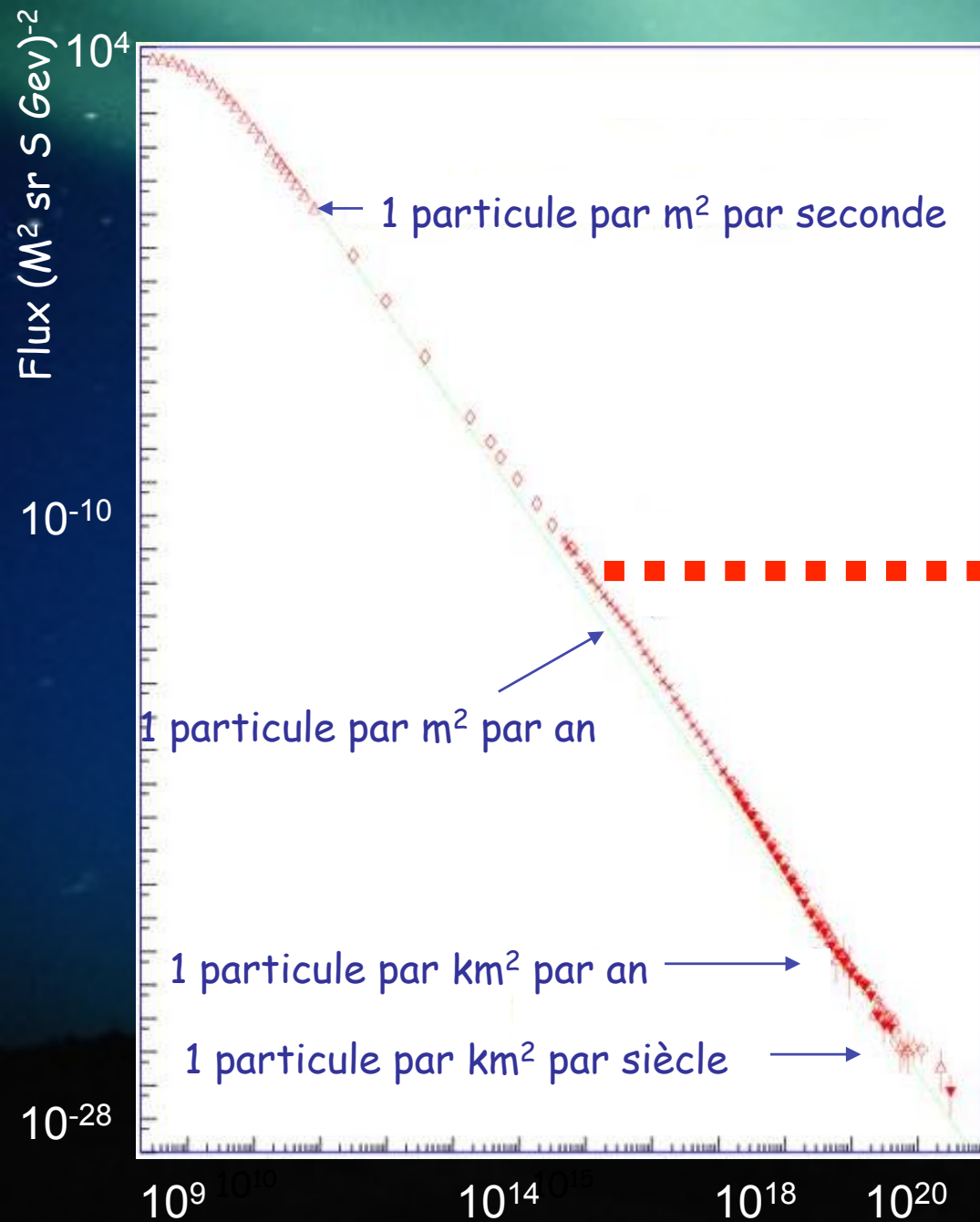
Le flux des rayons cosmiques mesure leur taux d'arrivée sur une surface donnée pendant un temps donné.

Ce flux varie très fortement avec l'énergie : quand celle-ci augmente d'un facteur 10, le flux diminue d'un facteur 1000.

La taille des détecteurs de rayons cosmiques doit s'adapter au flux : de quelques m^2 pour les énergies les plus faibles jusqu'à plusieurs milliers de km^2 pour les plus hautes énergies.

*Sur terre on reçoit en moyenne
4 RC/cm²/s ~1 kg/an << 30 000 tonnes /an estimé
(principalement micrométéorites et seulement 30 tonnes/an
pour les météorites au dessus 0.01g)*

le flux des rayons cosmiques



Satellites

Surface des
détecteurs

1 m² (10⁻⁶ km²)

100 000 m²
(0,1 km²)

Détecteurs
au sol

3.10⁹ m²
(3000
km²)

Énergie (eV)

A photograph of the aurora borealis (Northern Lights) in a dark night sky. The aurora is a vibrant green and blue glow that curves across the sky. In the foreground, the dark silhouettes of evergreen trees are visible against the dark ground.

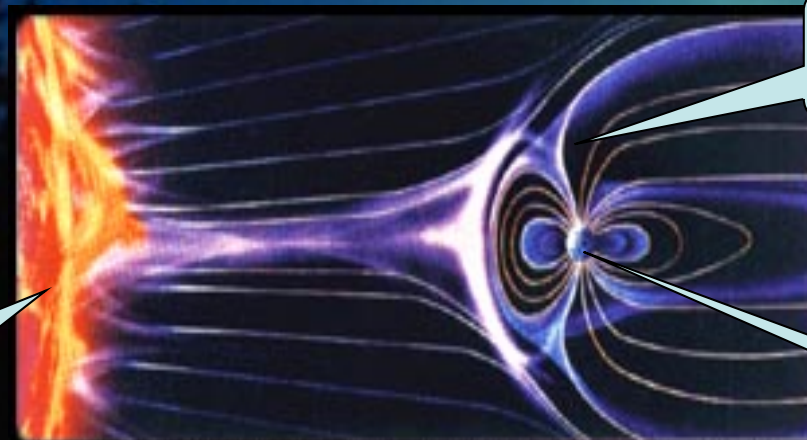
3

**Mais qui est (sont) à l'origine
des Rayons Cosmiques??**

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



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

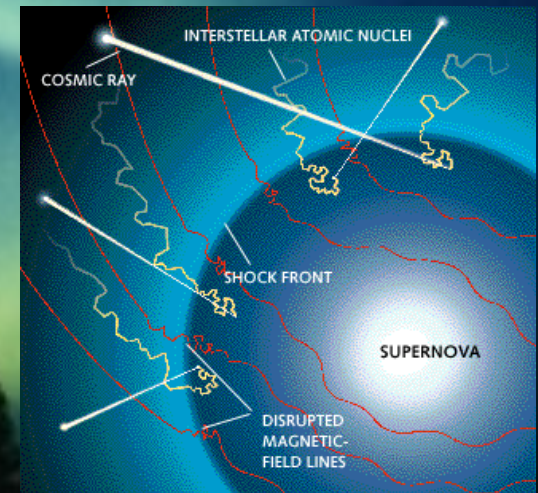
magnétosphère

La Terre

Naissance dans une SuperNova

Une ou 2 fois par siècle, une étoile de notre Galaxie se désintègre en une **supernova**. Pour les énergies jusqu'à 10^{15-16} eV: 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.

C'est aussi au cours de son explosion 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...

Par delà notre galaxie...

Si on monte plus haut encore en énergie, au delà de 10^{18} eV (0,2 J), les rayons cosmiques ne sont plus confinés dans notre Galaxie, ils peuvent en sortir (et donc y entrer!)

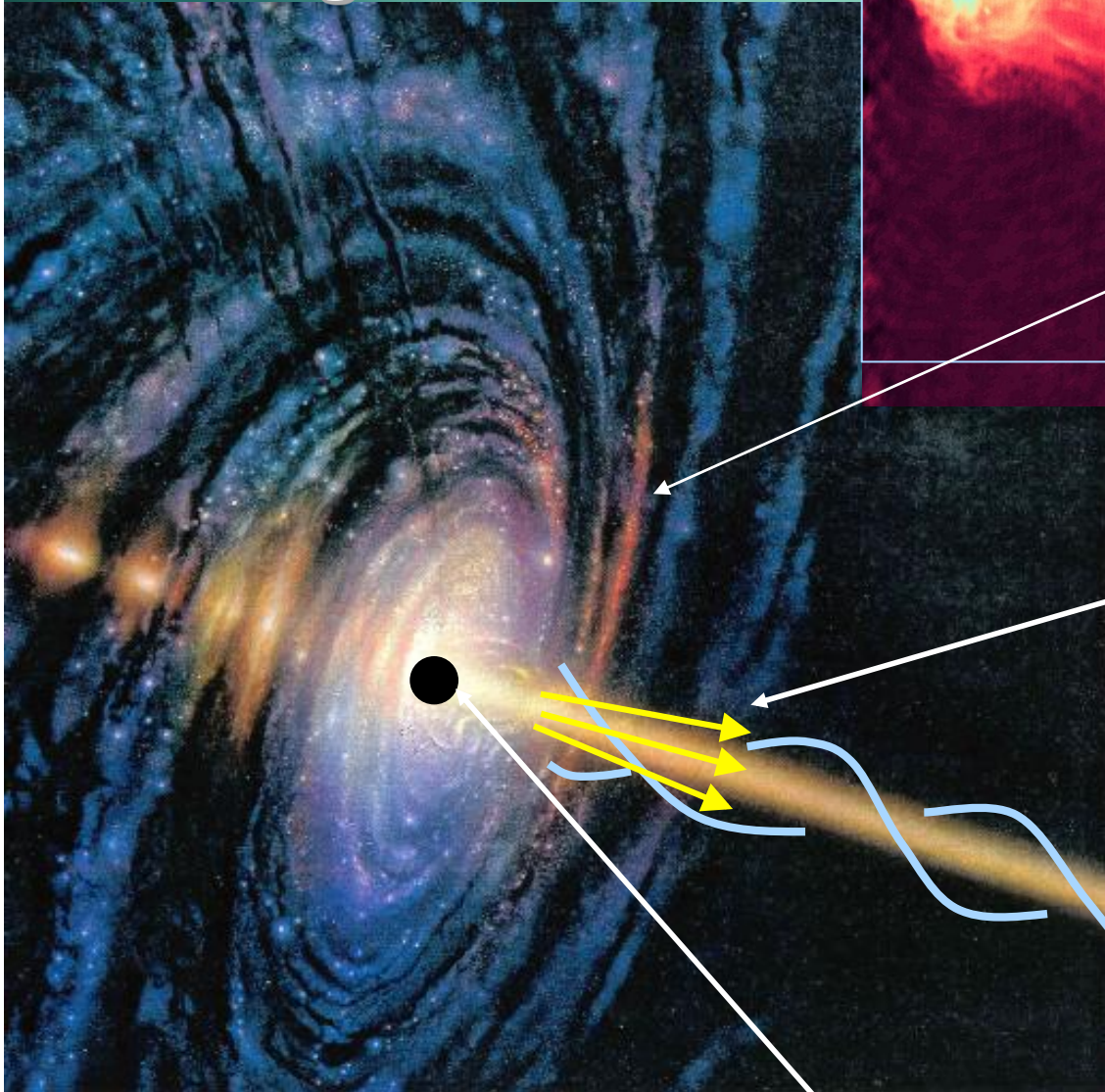
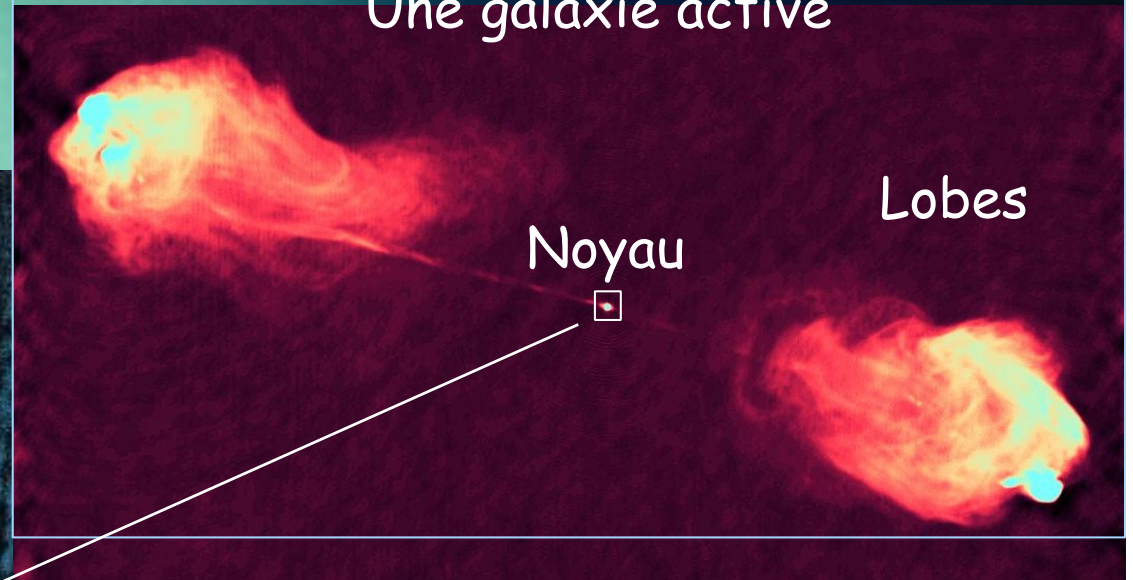
D'après les modèles, deux principales sources seraient possibles:

Les noyaux actifs de galaxies (AGN)

Les sursauts gamma (GRB)

Les noyaux actifs de galaxies

Une galaxie active



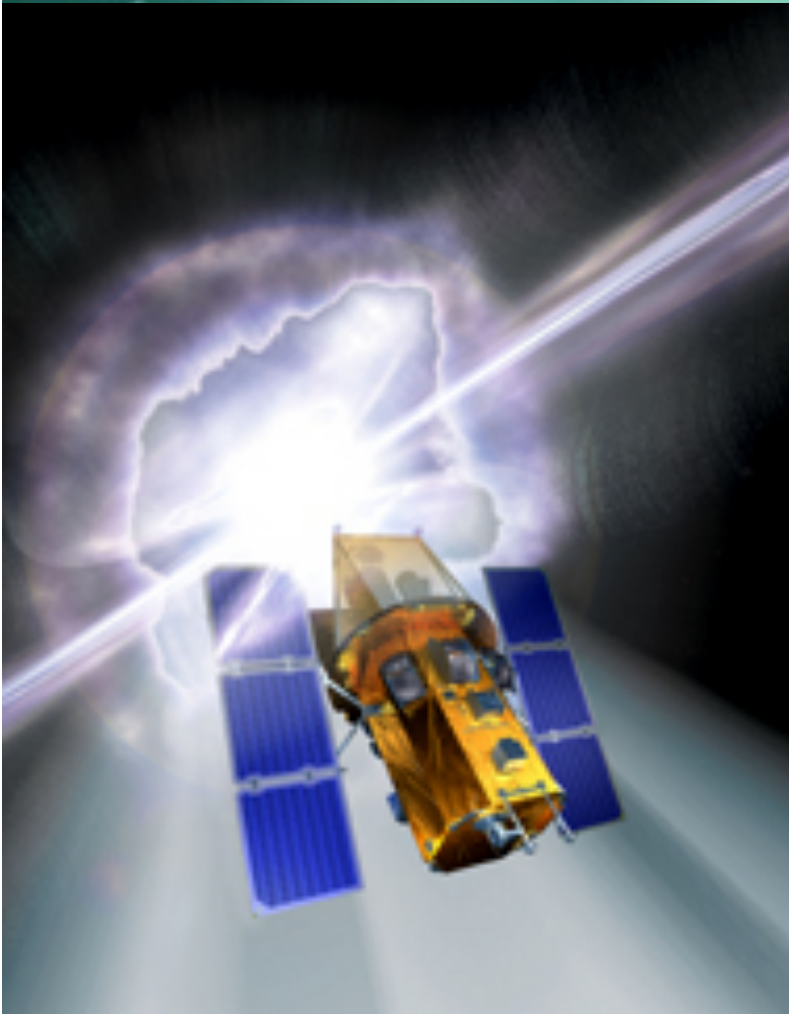
Faisceau de matière à 99% de la vitesse de la lumière, neutrinos, photons

Détecteur



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

A photograph of the aurora borealis (Northern Lights) in a dark night sky. The aurora is a vibrant green and blue glow that curves across the sky. In the foreground, the dark silhouettes of evergreen trees are visible against the night sky.

4

Les observatoires de rayons cosmiques à haute énergie



Observatoire Pierre Auger:
Pampa amarilla, Province de Mendoza, Argentine, Terre, Voie Lactée

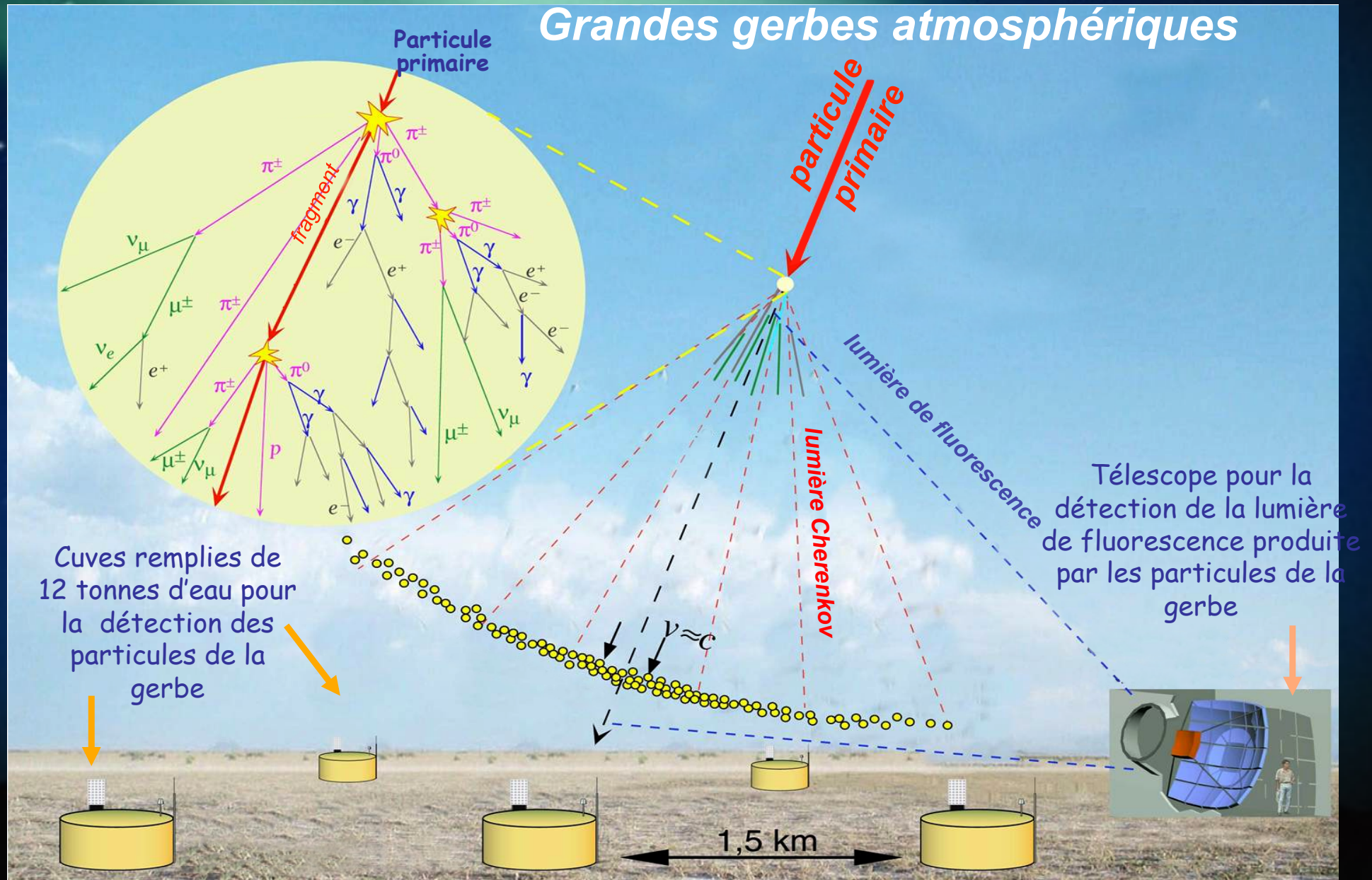
Les rayons cosmiques d'énergies extrêmes sont très rares : une particule par km^2 et par siècle au-delà de 10^{19} eV !

Pour les étudier, il faut construire un détecteur géant : plusieurs milliers de km^2 pour détecter quelques dizaines de particules par an.

C'est l'idée extravagante proposée en 1992 par Jim Cronin et Alan Watson.

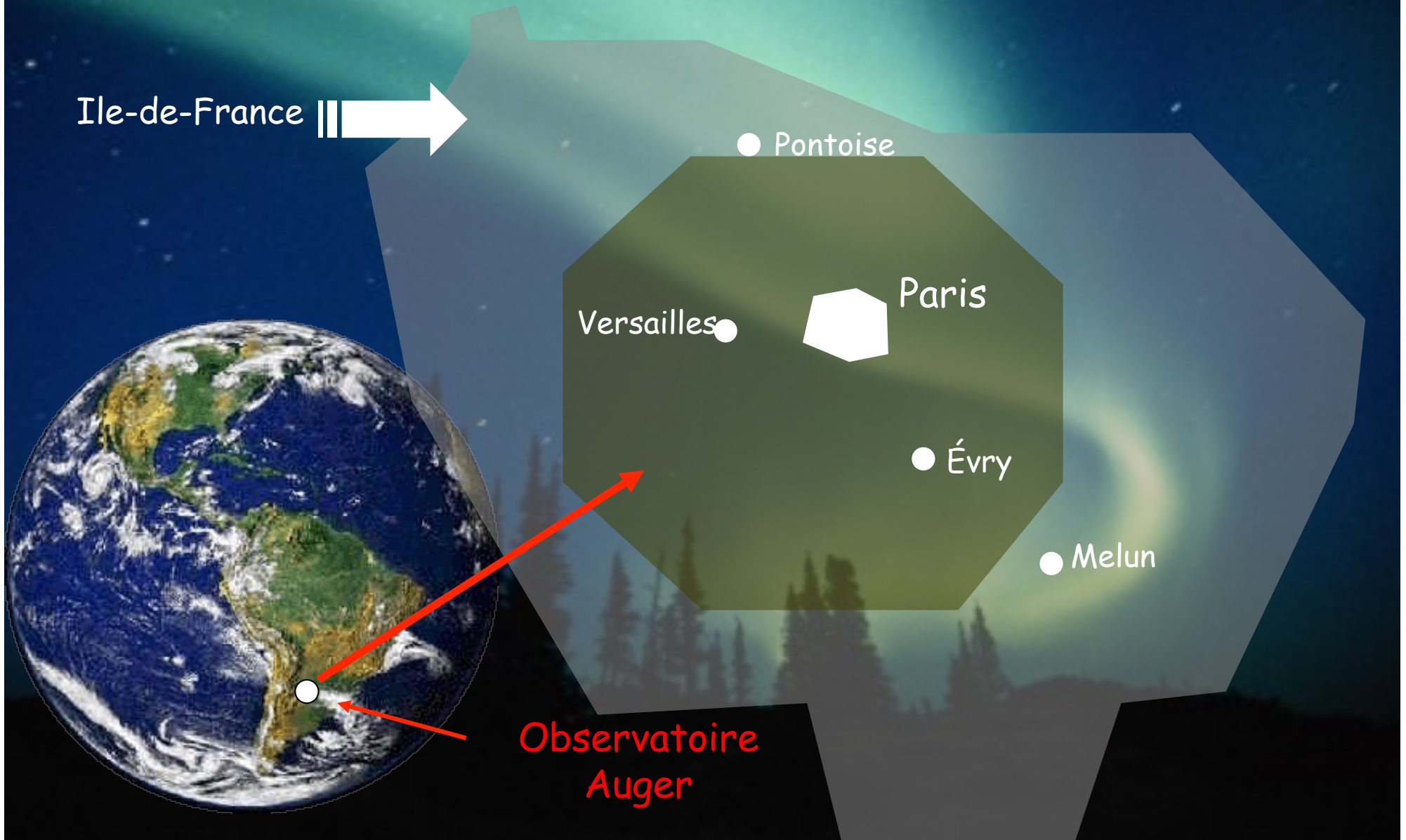
Principe de fonctionnement de l'Observatoire Auger

Grandes gerbes atmosphériques

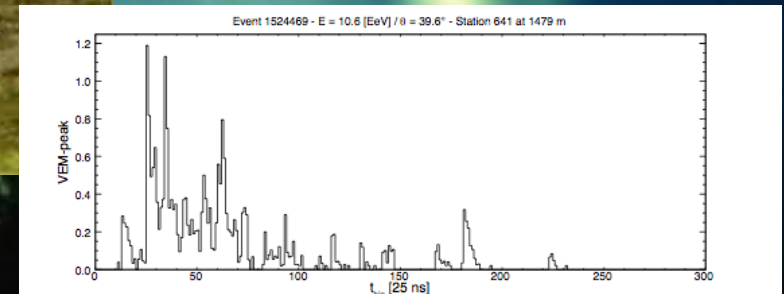
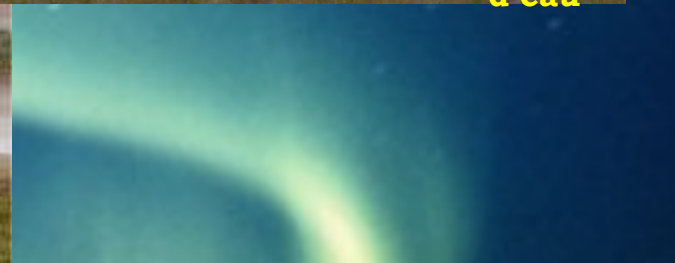
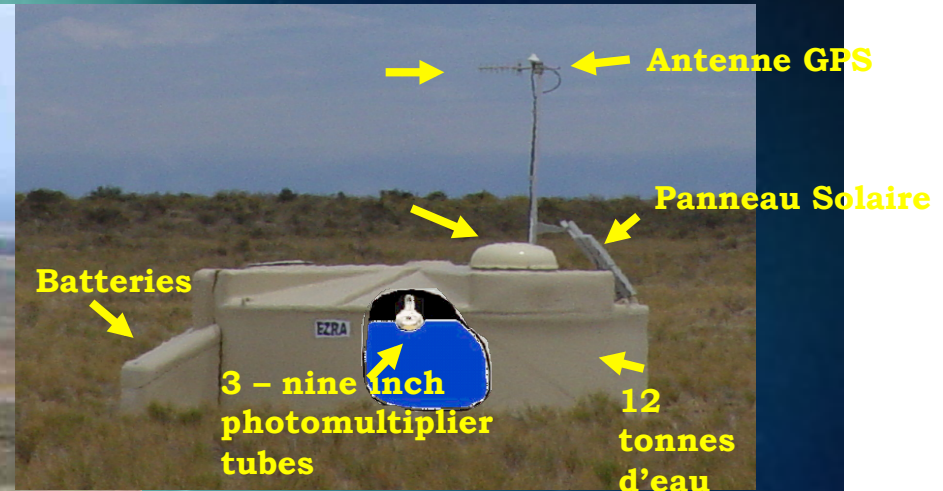


La taille de l'Observatoire Auger

Déploiement de 1600 cuves et 24 télescopes sur 3000 km²



Les détecteurs de surface

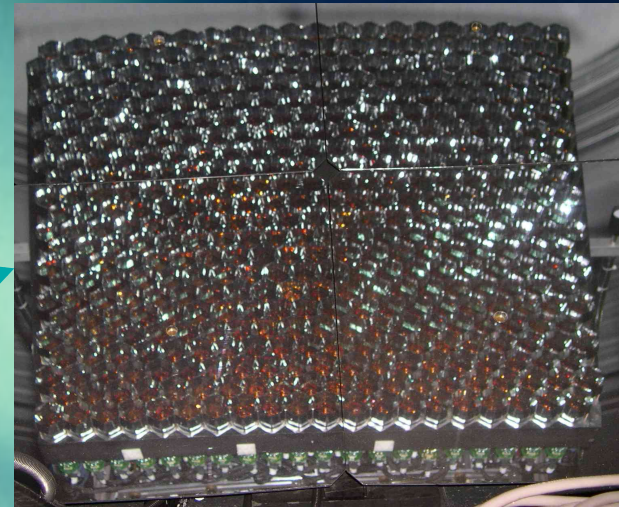
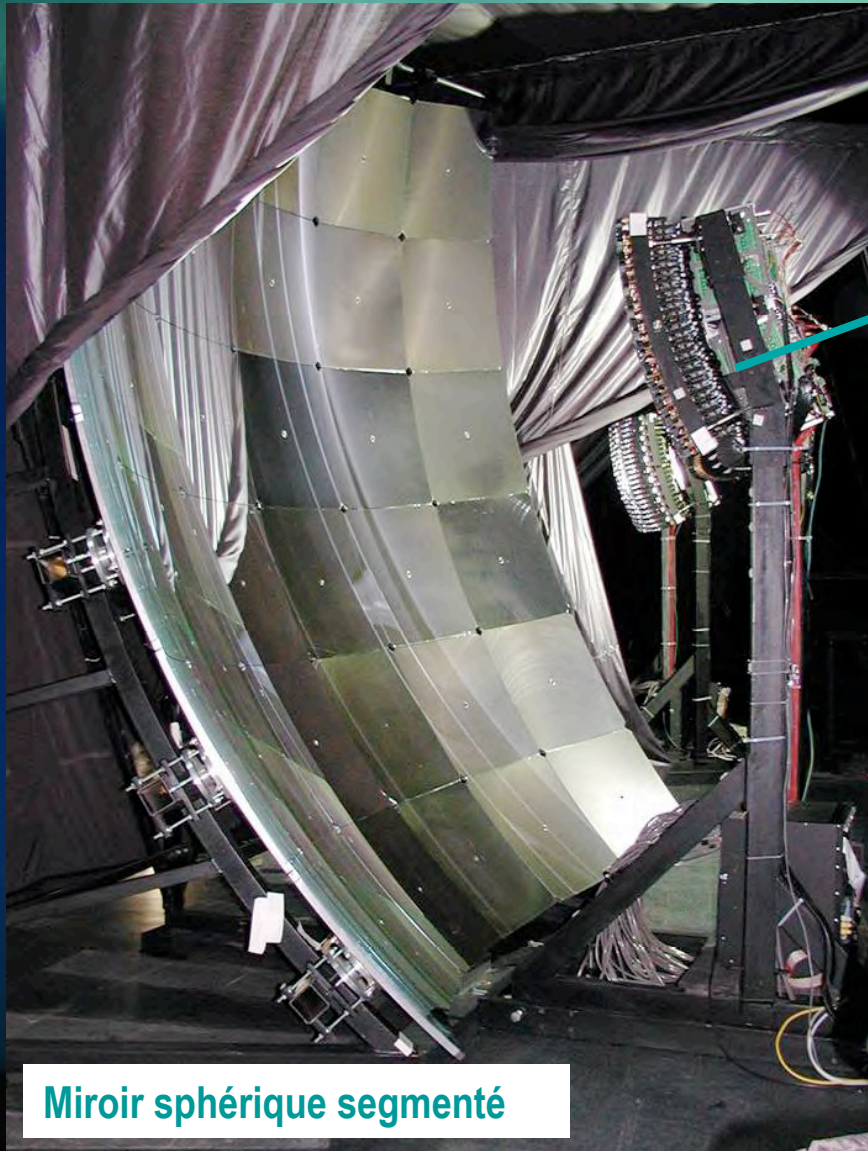


- 1600 cuves, réseau triangulaire de 1,5km de coté
- fonctionne tout le temps

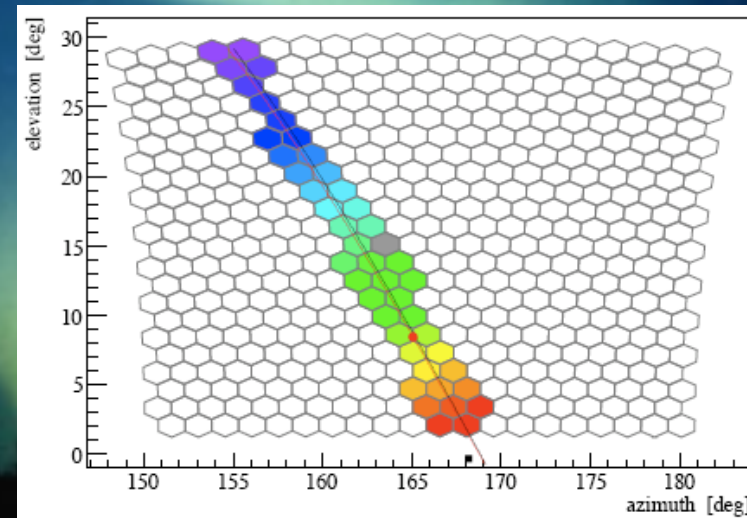
Les (4x6) télescopes de fluorescence



Un des « yeux de fluorescence »



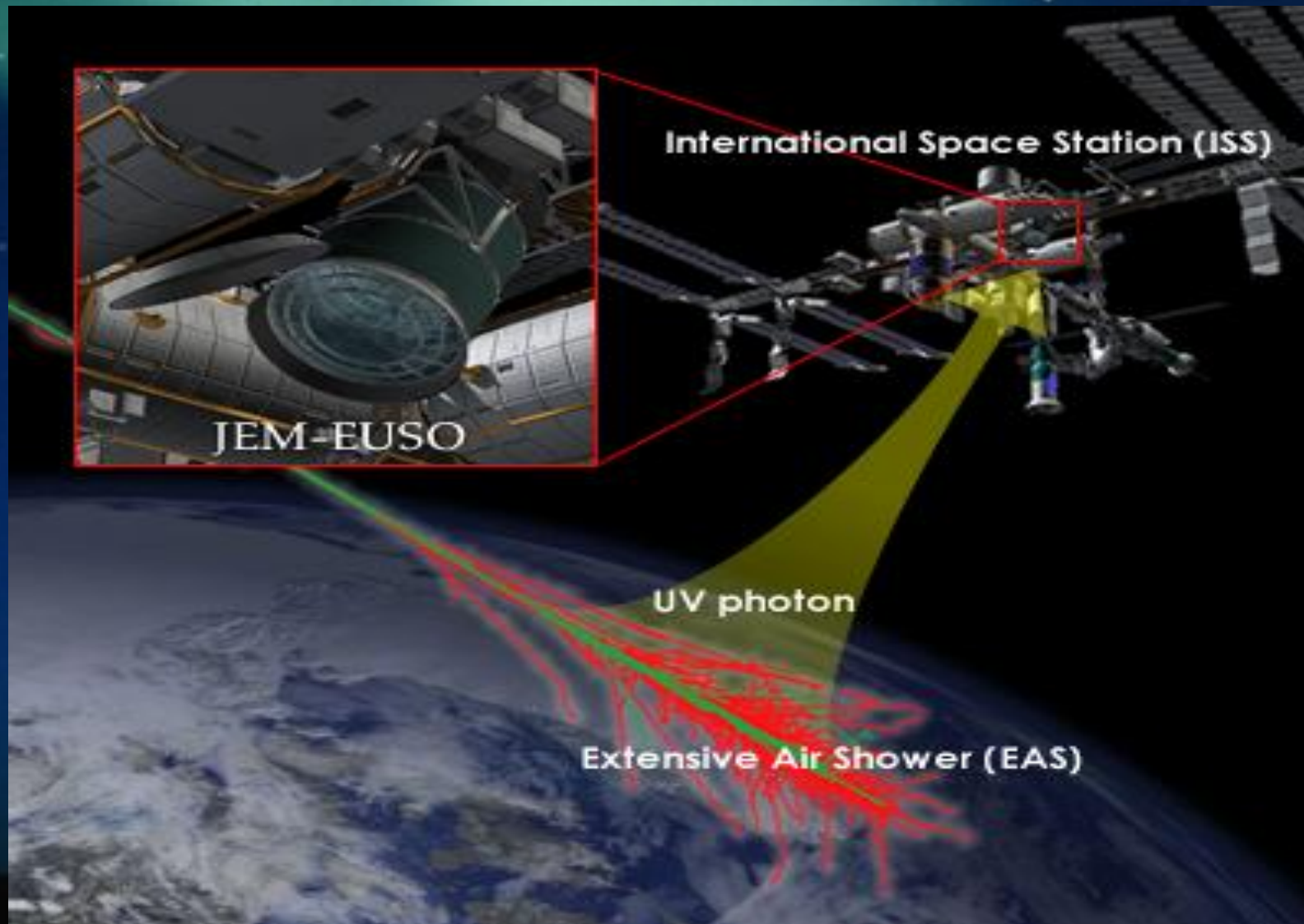
caméra à 440 PMT 1.5° par pixel
Fonctionne 10% du temps (nuit claire sans lune)



Le quotidien à Malargüe



Et demain: JEM-EUSO sur l'ISS



Le mot de la Fin...??

En un peu plus d'un siècle, les rayons cosmiques nous ont ouvert la voix de la Matière et de l'Univers. Ils sont les messagers du cosmos et jouent aussi un rôle sans doute fondamental pour la Terre.

Chaque découverte qui les concerne nous ouvre la route vers de nouvelles énigmes.

On ne sait toujours pas d'où ils viennent ...

ni ce qu'ils sont...

ni comment ils arrivent à de telles énergies!

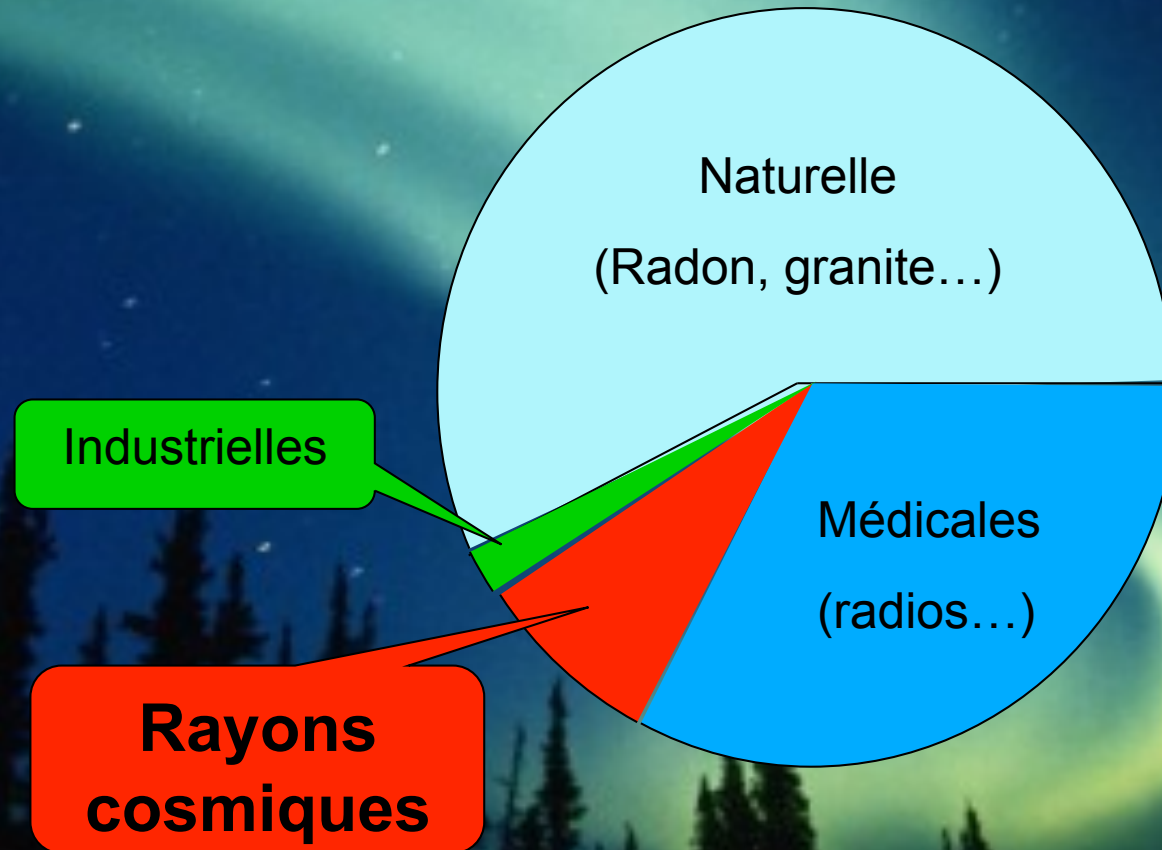
En clair, ils n'ont pas fini de nous passionner!!!

A photograph of the Aurora Borealis (Northern Lights) in a dark night sky. The aurora is a vibrant green and blue light display, appearing as a large, glowing arc that curves across the sky. Below the aurora, the dark silhouettes of evergreen trees are visible against the night sky. The overall scene is serene and awe-inspiring.

4.
Pour nous, simples terriens
À quoi servent ils...?

A nous irradier!

Les rayons cosmiques sont des particules ionisantes qui, en nous traversant, tuent des cellules. Nous en recevons environ 100 par seconde.



Au niveau de la mer **ORIGINES ET PROPORTIONS DES DIFFERENTES RADIOACTIVITES QUE NOUS SUBISSONS**

Au déclenchement des éclairs?

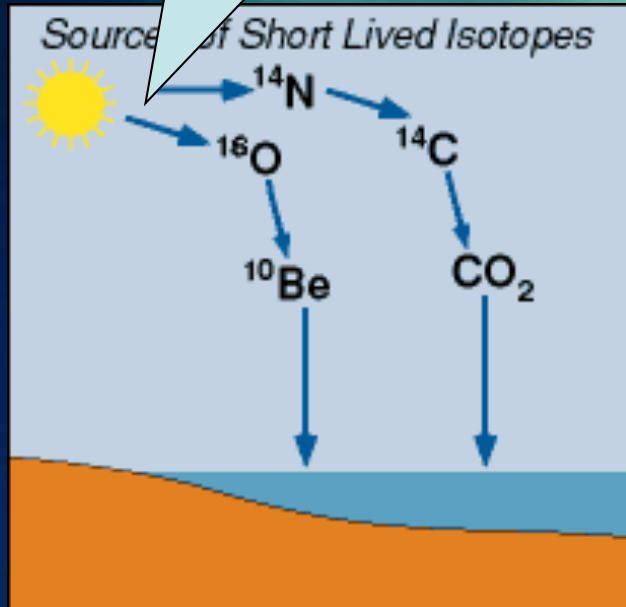


(100 éclairs/s sur Terre)

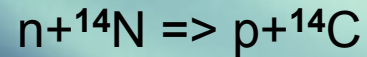
Toujours pas de compréhension
depuis Benjamin FRANKLIN

La belle aventure du ^{14}C

Rayons cosmiques



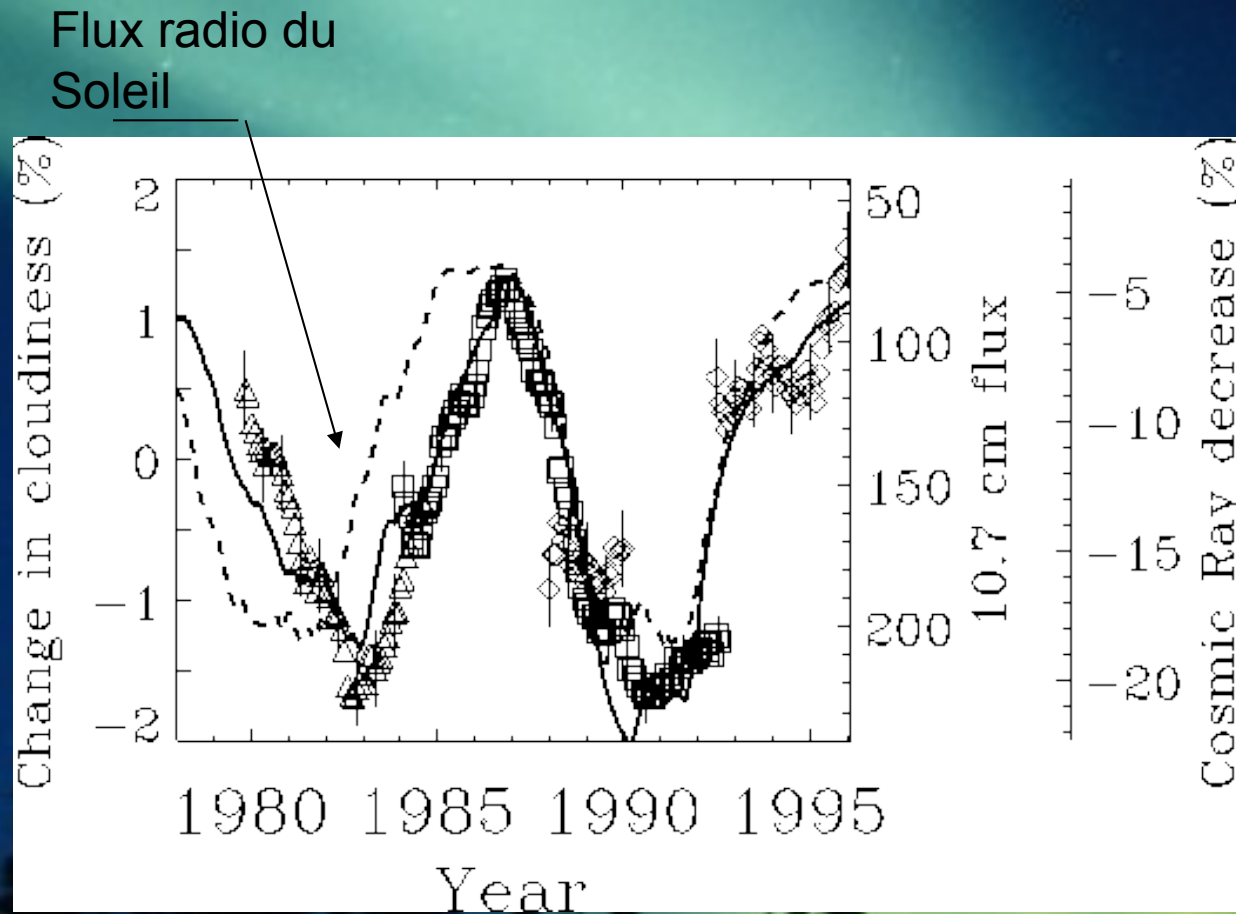
Le ^{14}C est produit dans l'air par les rayons cosmiques à un taux de 7 kg/an. Une fois produit il a une durée de vie de 8300 ans ($\text{C}^{14}/\text{C}^{12} = 10^{-12}$)



Lorsqu'un être vivant naît, il se met en équilibre avec le $^{14}\text{CO}_2$ de l'atmosphère. Quand il meurt, il ne renouvelle plus son stock de ^{14}C => son stock diminue par rapport à ^{12}C qui, lui, est fixe.

W. F. Libby 1949 (Prix Nobel en 1960) a l'idée de s'en servir comme marqueur du temps.

Les rayons cosmiques et les nuages



Peu de rayons cosmiques => peu de nuages => il fait chaud

En conclusion: à quoi servent les rayons cosmiques?

- Ils fabriquent le ^{14}C et le ^{10}Be
- ils nous font muter
- Ils font peut-être la pluie et le beau temps
- Ils nous ont fait découvrir l'antimatière et tout un zoo de particules élémentaires dont le muon

