

Observatoire Pierre Auger Enquête sur les Rayons Cosmiques

Delphine Monnier Ragaigne
Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire
Université Paris-sud, Orsay



**UNIVERSITÉ
PARIS-SUD 11**

Plan

- Pour se situer...énergie et taille des Rayons Cosmiques
- Les Rayons Cosmiques: Carte d'identité
- Un peu d'Histoire
- L'observatoire Pierre Auger: Pourquoi? Comment?
- Et demain

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

Une question d'énergie(2)

- 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

1000 eV= 1 keV

1000 000 eV= 1 MeV

1000 000 000 eV= 1 GeV

1 000 000 000 000 eV= 1 TeV

1 000 000 000 000 000 000 eV= 1 EeV = 0,16 J

Une question d'énergie(3)

Et les Rayons Cosmiques les plus énergétiques:

Energie= au delà de 10^{20} eV=**100 000 000 000 000 000 000 000 eV**

Ou encore

Energie de l'ordre de **50 Joules**



2 exemples de mouvements
d'énergie 50J



Une question de taille aussi !!

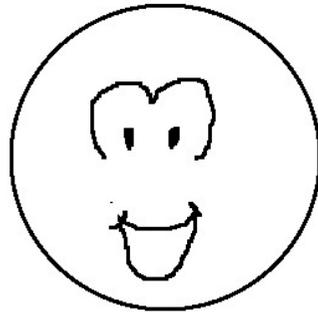
Les Rayons Cosmiques sont des particules chargées comme des protons par exemple.

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

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

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

Rayons cosmiques: carte d'identité

Nom: Cosmiques

Prénom: Particule (surnom « Rayon »)

Caractéristiques: particules chargées très énergétiques en provenance du cosmos

Lieu de Naissance: **INCONNU**

Vraisemblablement dans les sources les plus puissantes de l'Univers

Date de naissance:

Des millions d'années avant d'arriver jusqu'à nous!

Détection:

Depuis l'espace via des satellites en détection directe, depuis le sol via une cascade de particules secondaires dans l'atmosphère

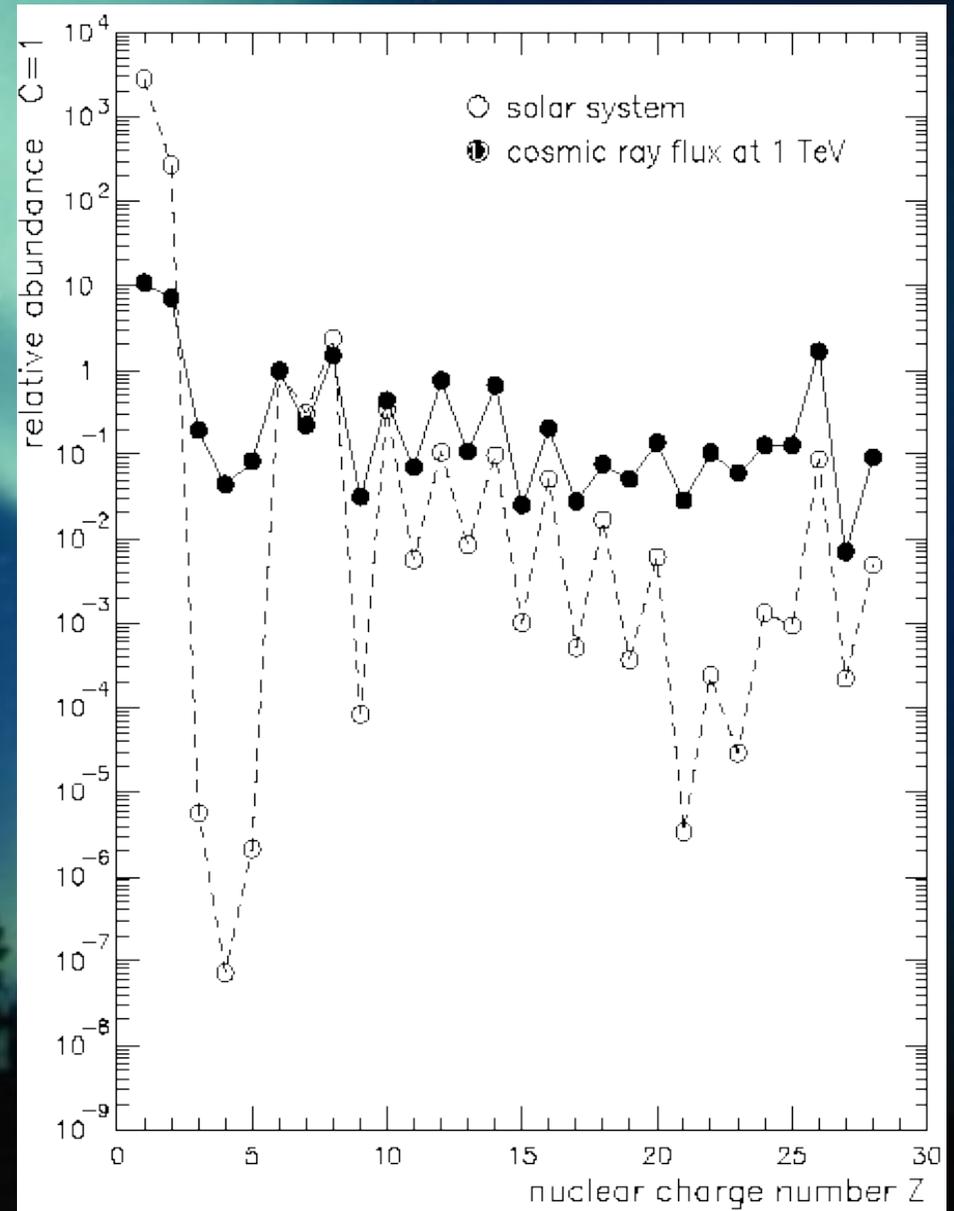
Population:

flux très important pour les particules de « basses énergie » mais diminuant fortement pour les particules les plus énergétiques

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 d'atomes qui sont en route depuis des dizaines de millions d'années



Que sont les rayons cosmiques? (2)

Mais que veut dire cette composition (à basse énergie)??

C'est la composition de la matière de l'Univers.

Au départ, on a principalement de l'hydrogène, de l'hélium, du carbone et du fer qui sont produits et accélérés dans des sources cosmiques.

Ces particules chargées pour la grande majorité vont errer au grès des champs magnétiques pendant des dizaines voir centaines de millions d'années avant de nous parvenir.

Elles vont connaître la spallation durant leur périple:

Elles vont heurter des protons au repos qui vont leur faire perdre un ou plusieurs éléments (nucléons) et donc se « transformer » en d'autres éléments plus légers

D'où viennent les rayons cosmiques?

De partout!!

Est ce normal?

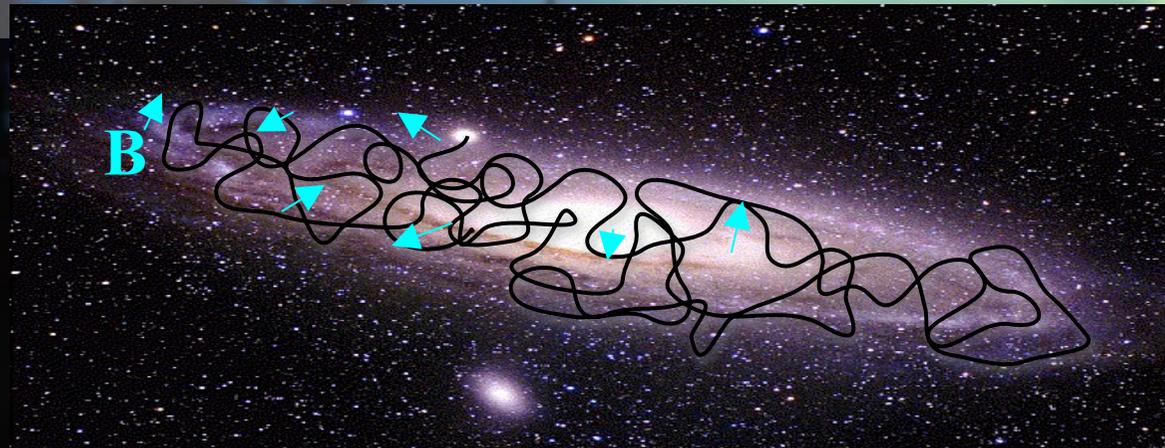
Oui!

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?

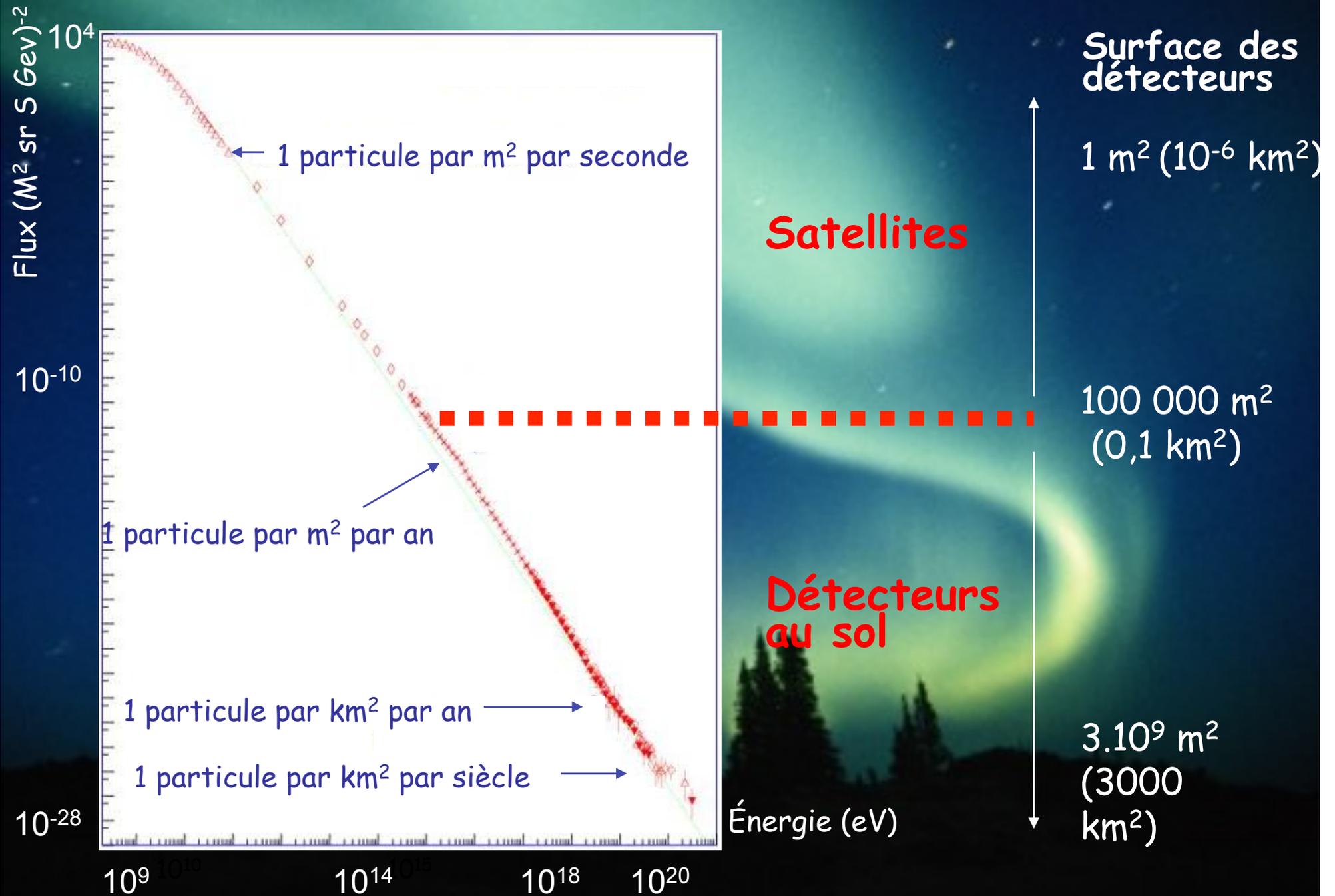
Le flux des rayons cosmiques mesure leur taux d'arrivée sur une surface donnée pendant un temps donné.

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 m² pour les énergies les plus faibles jusqu'à plusieurs milliers de km² 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



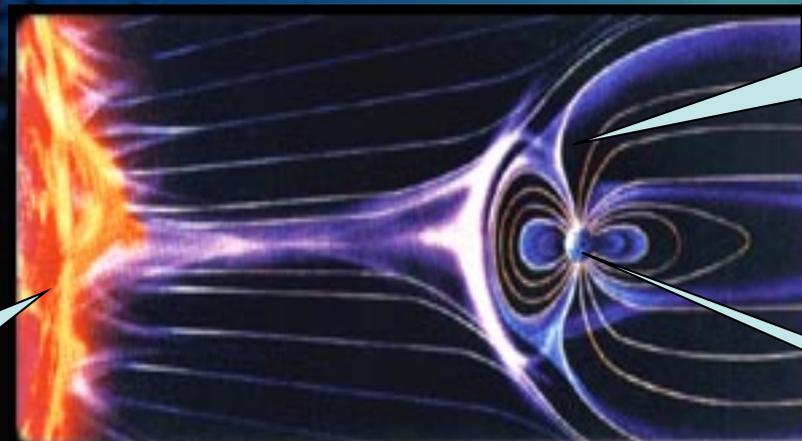
A photograph of the Aurora Borealis (Northern Lights) in a dark night sky. The aurora is a vibrant green and blue glow that curves across the sky. In the foreground, the dark silhouettes of evergreen trees are visible against the dark ground.

**Mais qui est 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

Les restes de Supernovae

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

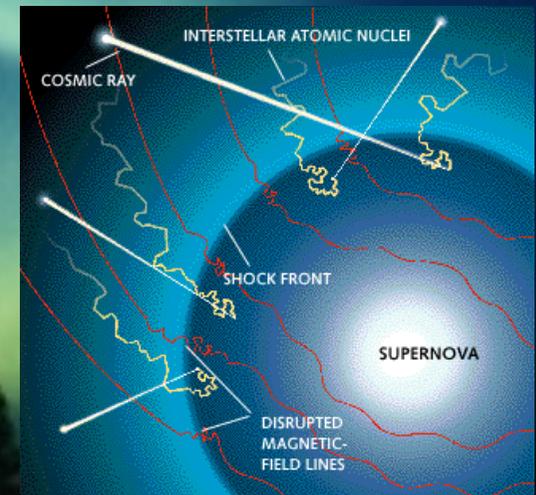
A ces énergies, le champ magnétique galactique « confine » les rayons cosmiques au sein de notre Galaxie.

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...

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)

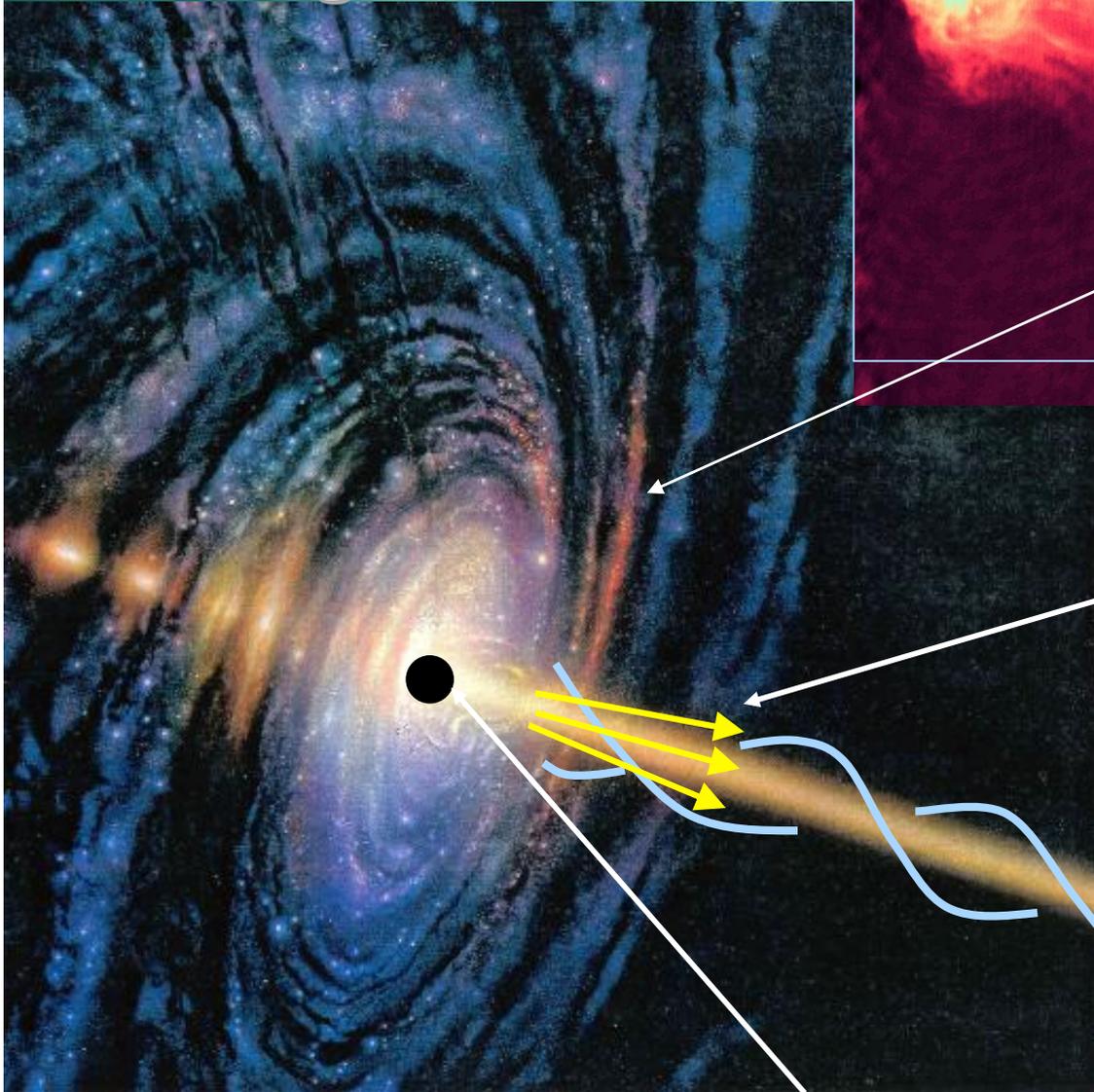
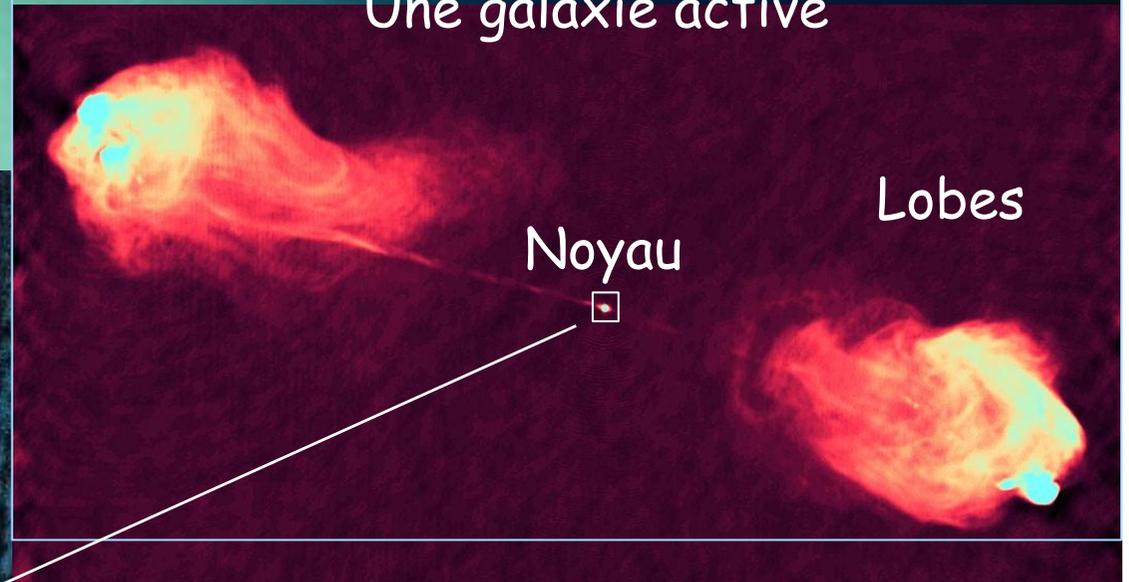
Les sursauts gamma (GRB)

Une autre possibilité:

pas d'accélération de particules mais des particules extrêmement énergétiques nées avec l'Univers qui se désintègrent lentement en rayons cosmiques très énergétiques

Les noyaux actifs de galaxies

Une galaxie active



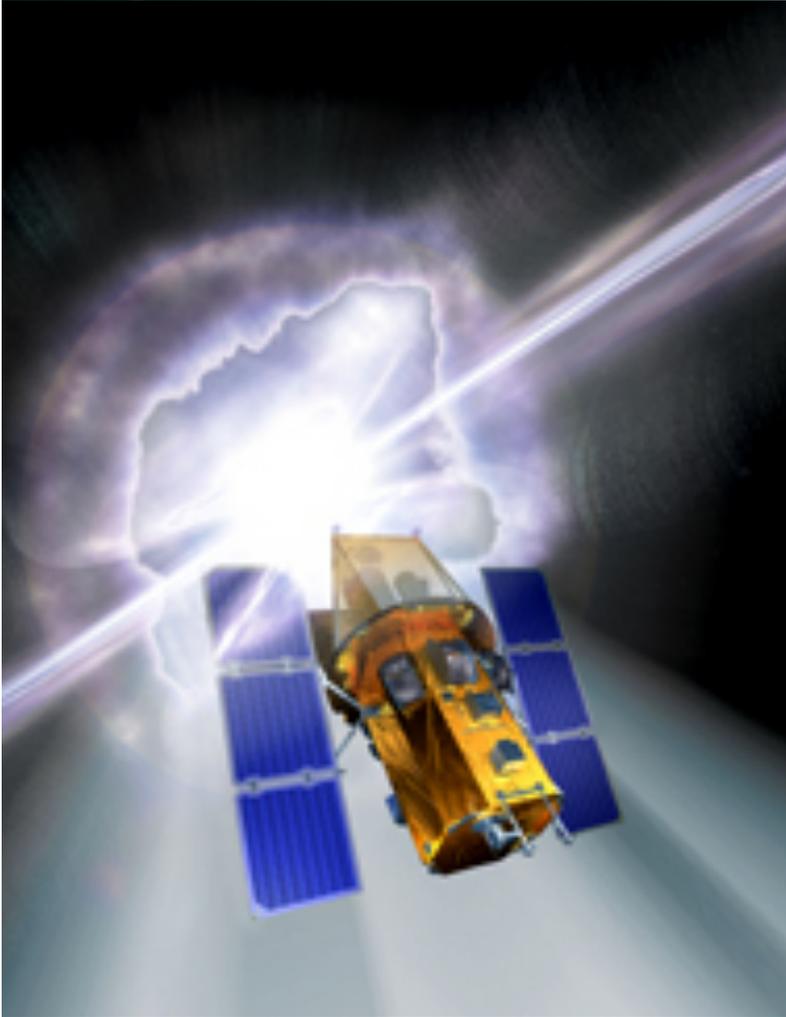
Faisceau de matière à 99% de la vitesse de la lumière, neutrinos, photons

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 light that curves across the sky. In the foreground, the dark silhouettes of evergreen trees are visible against the dark ground.

3

Un peu d'Histoire...

Un étrange phénomène

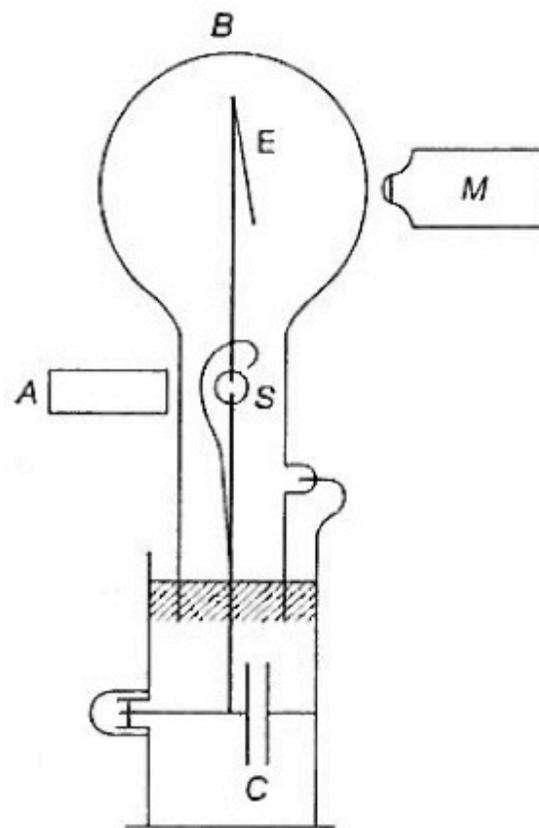
Joseph John Thomson (~1900) « J'ai beau faire... j'ai toujours des petites fuites! »

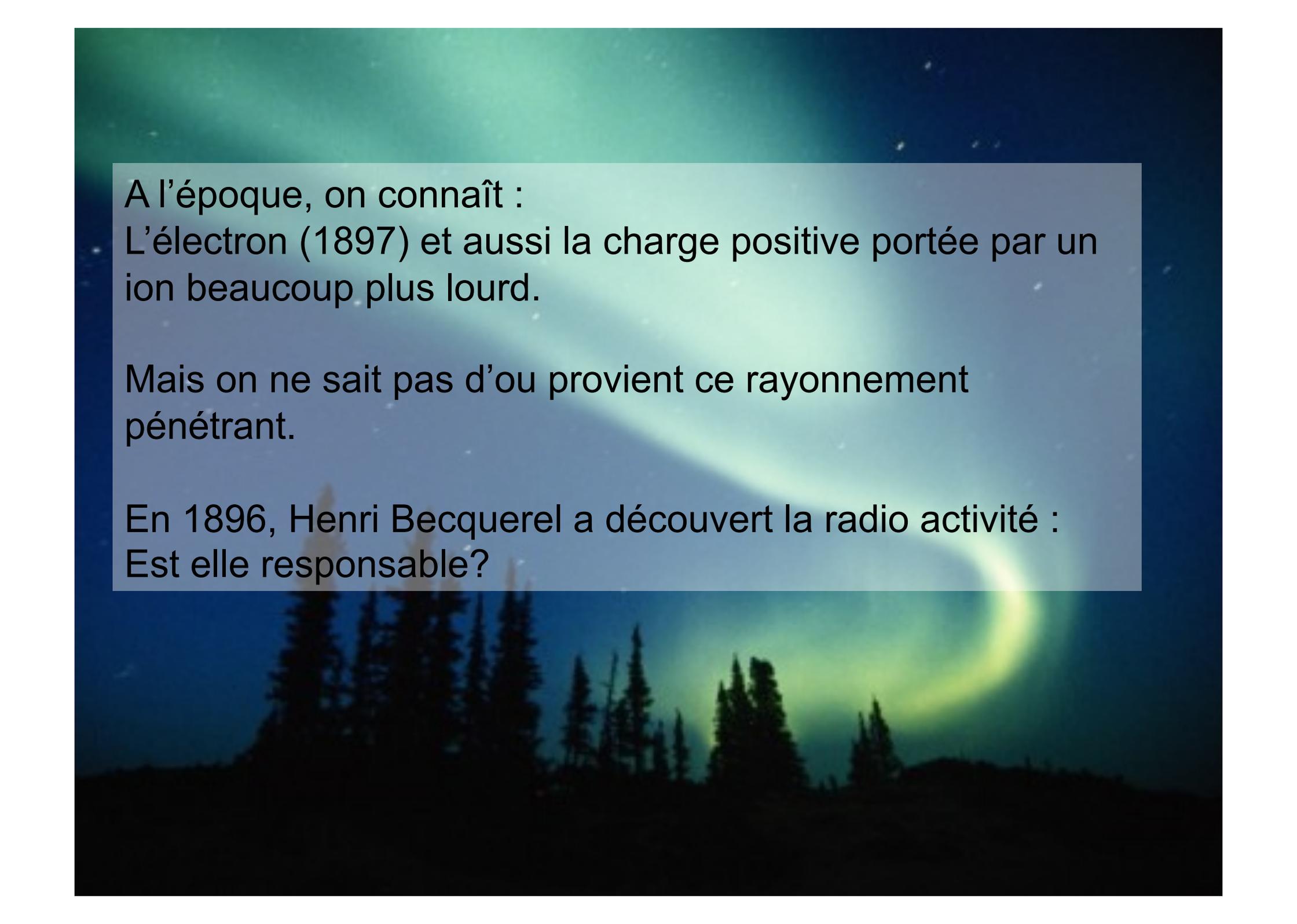
Figure 1.2. Chambre à ionisation utilisée par Wilson

Cette chambre fut construite en 1901 par C. T. R. Wilson pour étudier la « radiation pénétrante ».

Un ballon de verre *B* intérieurement argenté constitue l'une des électrodes (certaines variantes utilisent des récipients en matériaux métalliques divers). L'autre électrode est constituée essentiellement d'un électromètre à feuille d'or *E*. Isolé par une perle de soufre *S*, il peut être chargé électriquement à l'aide d'un dispositif magnétique *A* qui le met en contact avec un condensateur *C* de grande capacité. La lunette *M* permet de mesurer l'angle entre la feuille *E* et son support.

(D'après A. Dauvillier, *Les rayons cosmiques*, Dunod 1954, p. 56)





A l'époque, on connaît :

L'électron (1897) et aussi la charge positive portée par un ion beaucoup plus lourd.

Mais on ne sait pas d'où provient ce rayonnement pénétrant.

En 1896, Henri Becquerel a découvert la radio activité :
Est elle responsable?

NON

Un blindage de 5 cm en plomb diminue le rayonnement ionisant mais ne l'arrête pas!!!

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...

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

**la découverte des
«rayons cosmiques »**

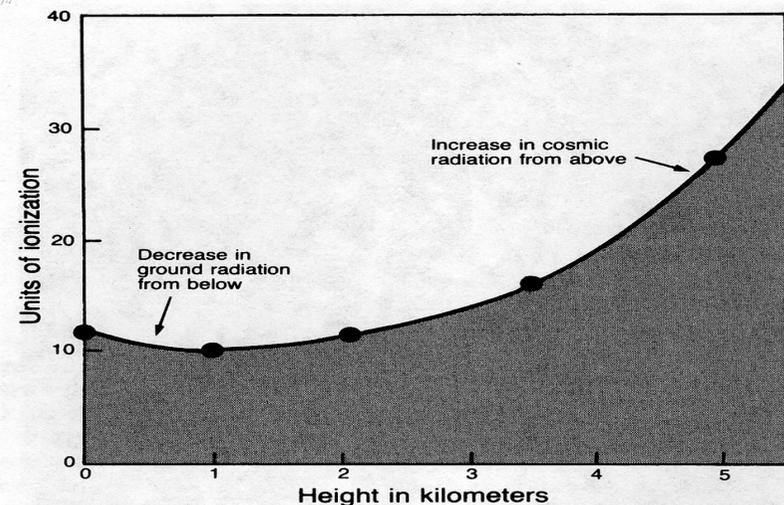
10 ans plus tard...

la découverte des rayons cosmiques

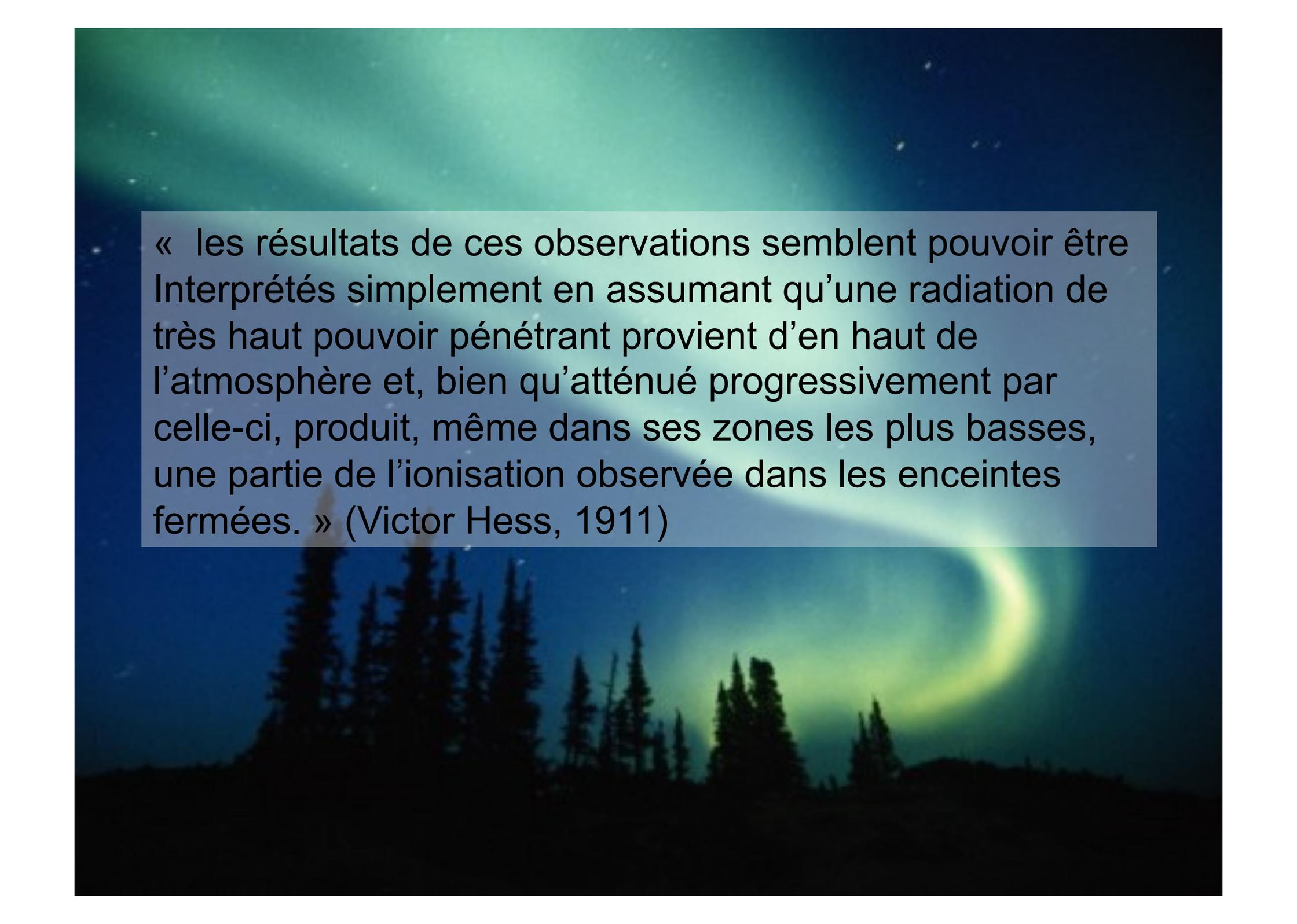
Victor Hess, en 1911, prouva l'existence du rayonnement cosmique avec des mesures en ballon :

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.



« les résultats de ces observations semblent pouvoir être interprétés simplement en assumant qu'une radiation de très haut pouvoir pénétrant provient d'en haut de l'atmosphère et, bien qu'atténué progressivement par celle-ci, produit, même dans ses zones les plus basses, une partie de l'ionisation observée dans les enceintes fermées. » (Victor Hess, 1911)

Une origine inconnue

Les mesures complémentaires (notamment de Robert Milikan dans les années 20) montrèrent que:

- cela provient de très haut (plus de 15km)
- c'est uniforme sur la terre (si on écarte un effet du champ magnétique terrestre)
- le rayonnement est bien plus pénétrant que la radioactivité alpha et beta
- il y a des « sursauts » brefs d'ionisation accompagnés d'un nombre conséquent d'ions
-> l'origine est très énergétique

Il faut de nouveaux instruments de mesure!!

Deux systèmes très complémentaires

La chambre à brouillard (1912, Wilson) contient un gaz saturé qui au passage des ions permet la condensation de gouttelettes qui matérialisent la trajectoire des ions.

La chambre permet de « visualiser » la particule (vitesses, directions, charges...) mais ne permet pas de déclenchement efficace.

Le compteur Geiger-Muller (1928):

le passage des ions ionise le gaz dans le tube permettant une décharge.

Cela permet la détection de particules en coïncidence et donne la direction.

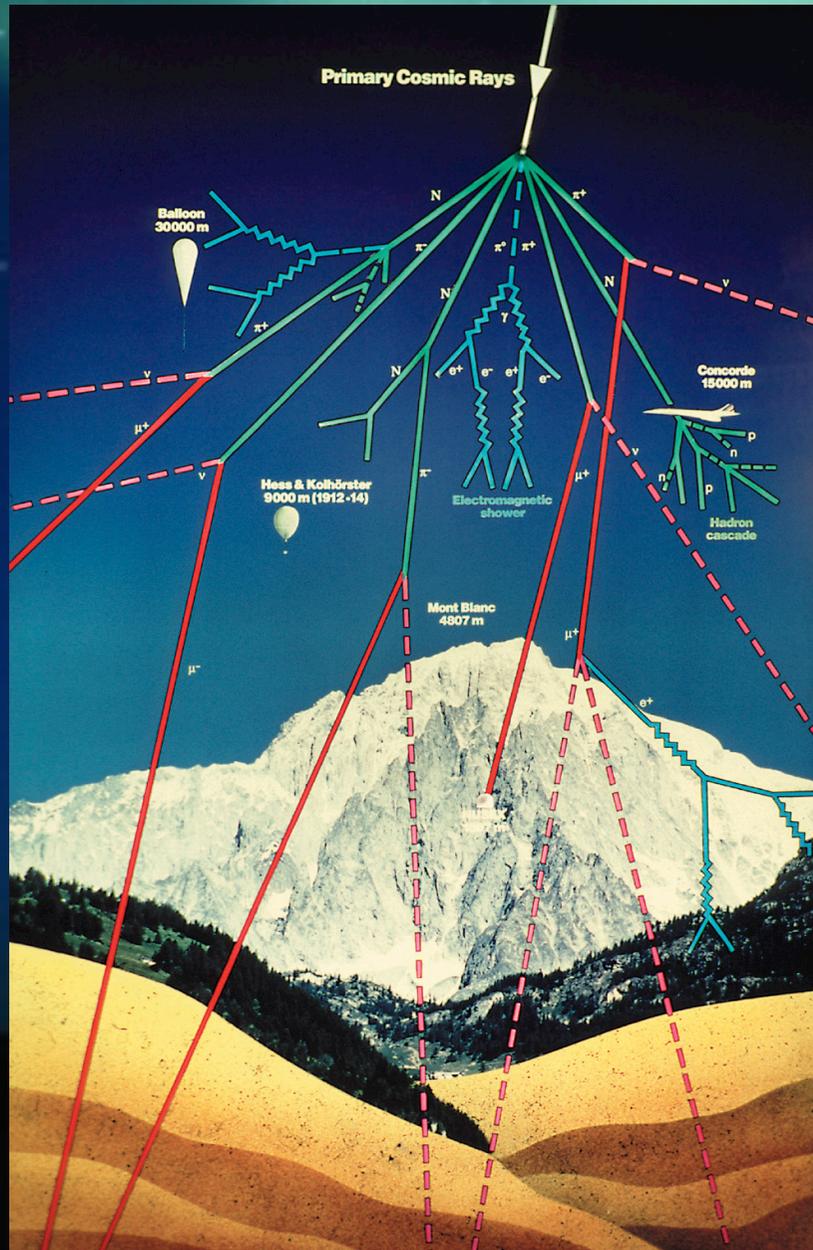
L'association des deux va donner des merveilles!

Du rayon cosmique à la gerbe atmosphérique

Pierre Auger en 1938 utilisa plusieurs compteurs geiger à des distances différentes:

1. Les détecteurs marchent en coïncidence!
2. Ils sont déclenchés par des particules ayant une origine commune
3. Ils forment une «gerbe» ou pluie de particules secondaires produites par l'interaction entre l'atmosphère et le rayon cosmique

Du rayon cosmique à la gerbe atmosphérique



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
-> « tache » au sol de plusieurs km de rayon

Les grandes découvertes liées aux rayons cosmiques

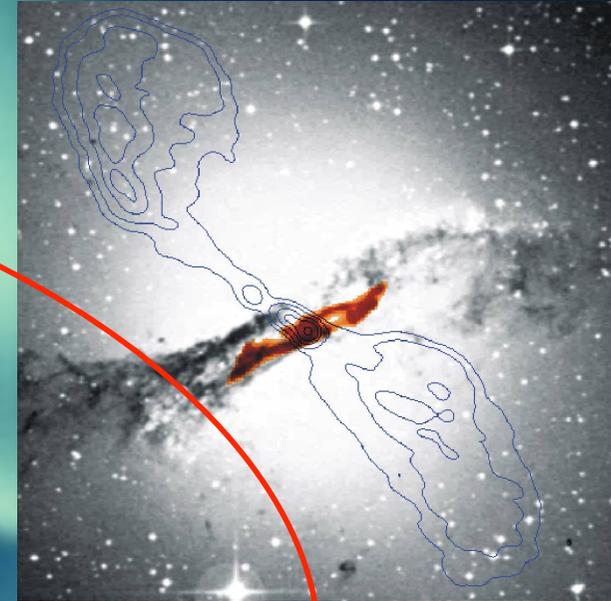
L'étude des rayons cosmiques et des gerbes en particulier va permettre notamment:

- 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

Physique des particules

Deux approches

Les premiers accélérateurs voient le jour après la guerre, ils prendront progressivement le pas sur l'étude des rayons cosmiques pour sonder la matière.

Les développements des accélérateurs, notamment au CERN, permettront entre le milieu des années 50 et les années 80 de mettre en place le modèle standard qui décrit l'ensemble de la matière et caractérise chaque particule.

C'est le domaine de la **PHYSIQUE DES PARTICULES**

Deux approches

Parallèlement aux développements des accélérateurs, l'étude du rayonnement cosmique se poursuit via les ballons, les avions puis, la conquête spatiale.

En cherchant plus haut, on peut ainsi observer directement la particule primaire -> **détection directe**

En observant au sol la gerbe atmosphérique, on peut aussi étudier ce rayonnement -> **détection indirecte obligatoire pour les énergies les plus élevées**

C'est le domaine de l'**ASTROPARTICULE**

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

4

L'observatoire Pierre Auger

L'observatoire Pierre Auger

Les rayons cosmiques d'énergies extrêmes sont très rares : une particule par km² et par siècle au-delà de 10¹⁹ eV !

Pour les étudier, il faut construire un détecteur géant : plusieurs milliers de km² pour détecter quelques dizaines de particules par an.

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



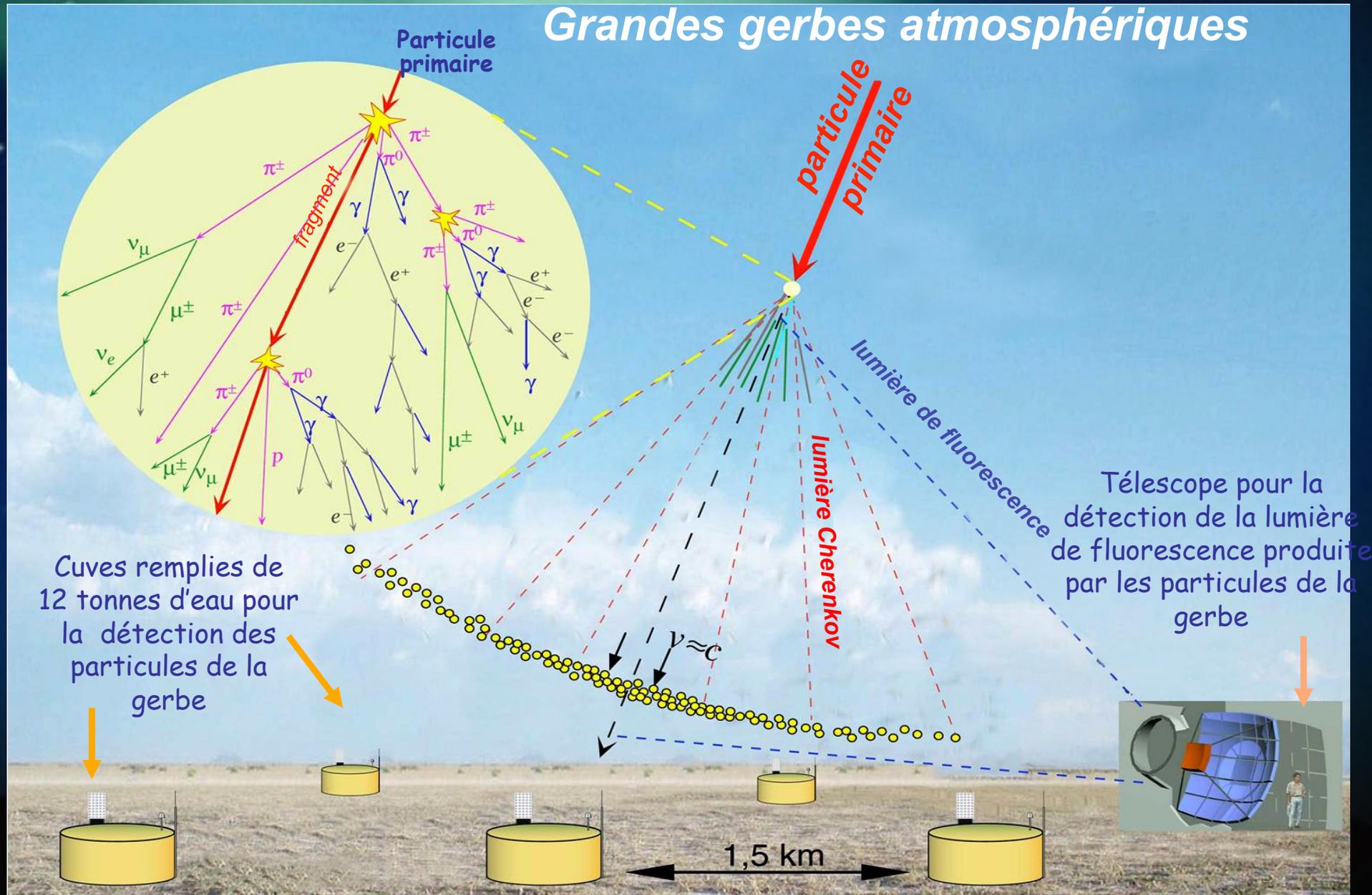
James W. Cronin de l'université de Chicago (USA) et Prix Nobel, et **Alan A. Watson** de l'université de Leeds (Grande Bretagne), Les pionniers de l'Observatoire Pierre Auger

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



Principe de fonctionnement de l'Observatoire Auger

Grandes gerbes atmosphériques



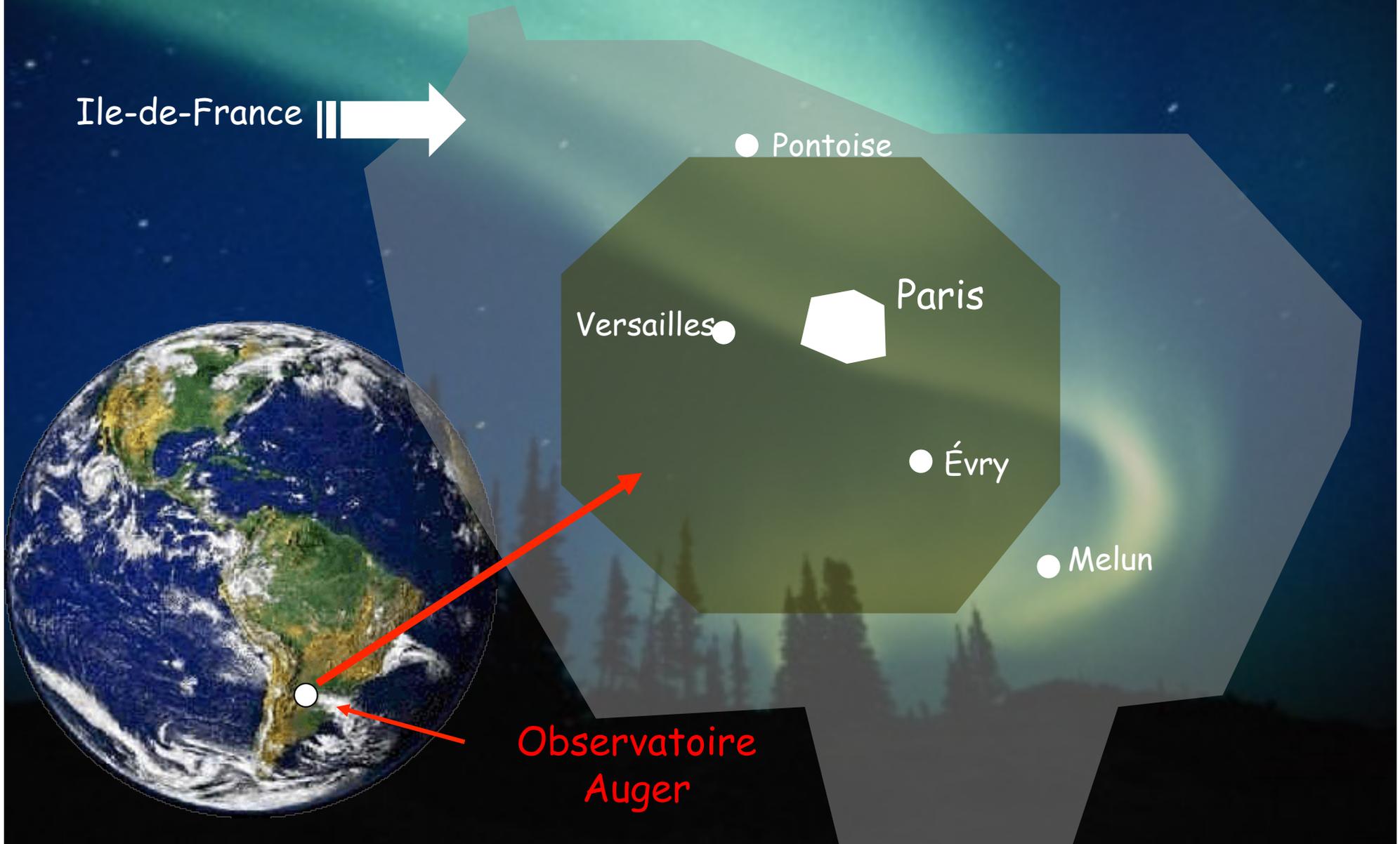
L'étude des gerbes atmosphériques

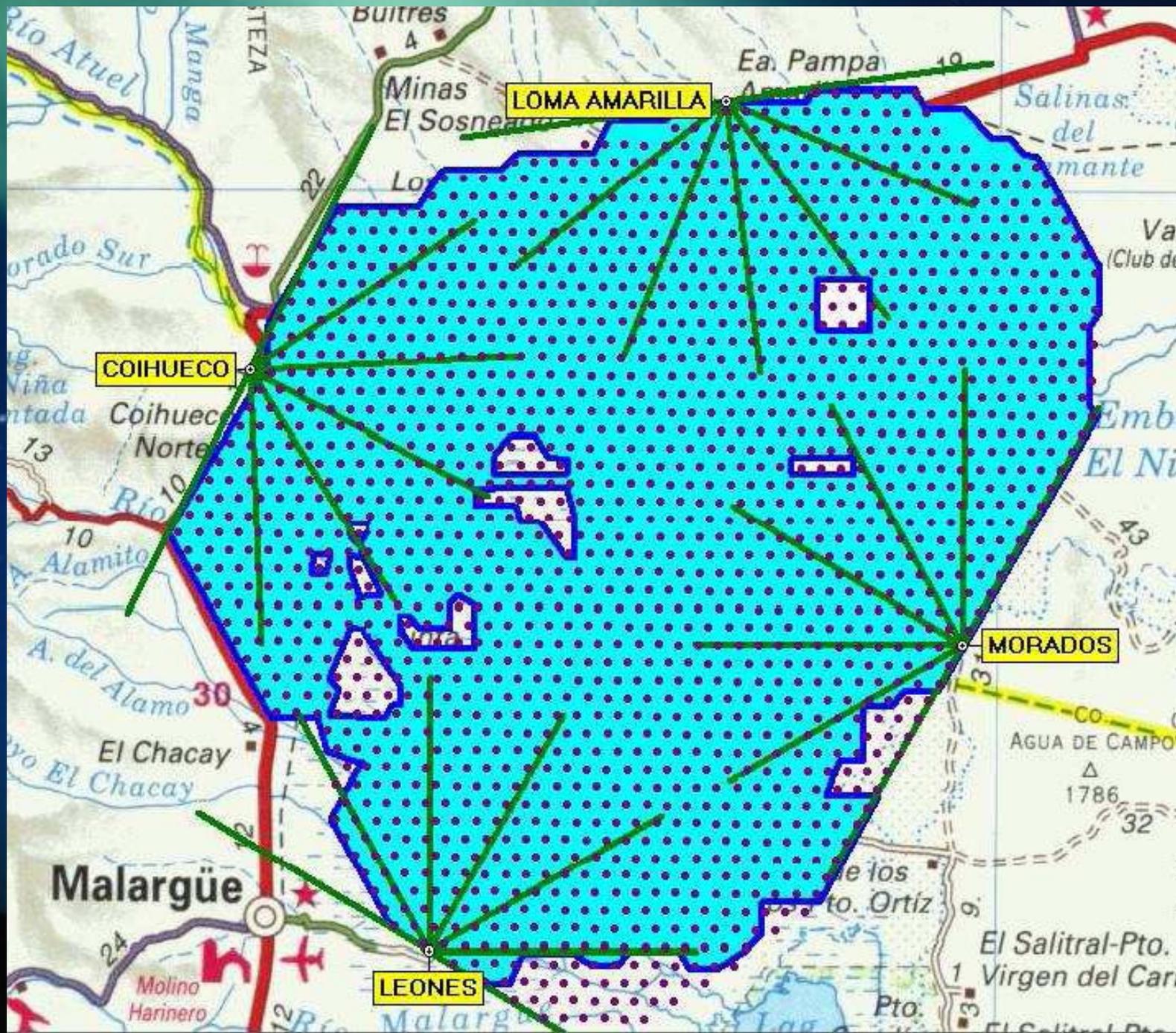
La détection depuis le sol se fait selon deux principales méthodes:

- **Détection de la « lumière » de la gerbe:** La gerbe traversant l'atmosphère ionise l'azote sur son passage et l'azote revient à son état d'origine en émettant de la **lumière de fluorescence** (UV proche) détectable avec un télescope
- **Détection des particules** au sol: des détecteurs de particules (scintillateur ou détecteur à effet Cherenkov) couvrent une grande surface pour « échantillonner » et identifier les particules secondaires arrivant au sol

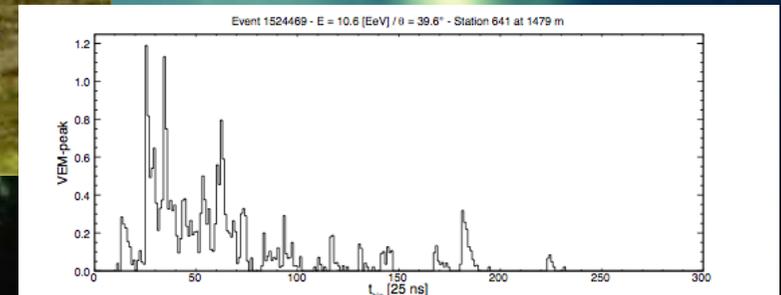
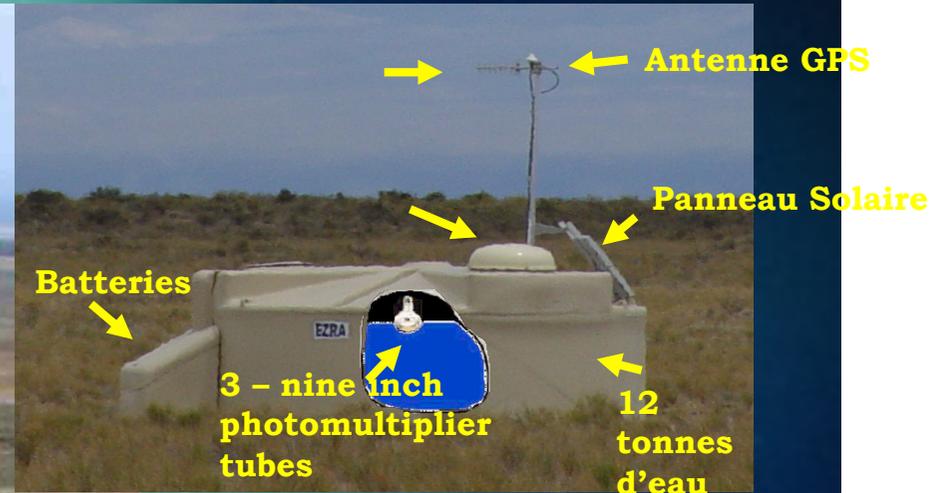
La taille de l'Observatoire Auger

Déploiement de 1600 cuves et 24 télescopes sur 3000 km²





Les détecteurs de surface

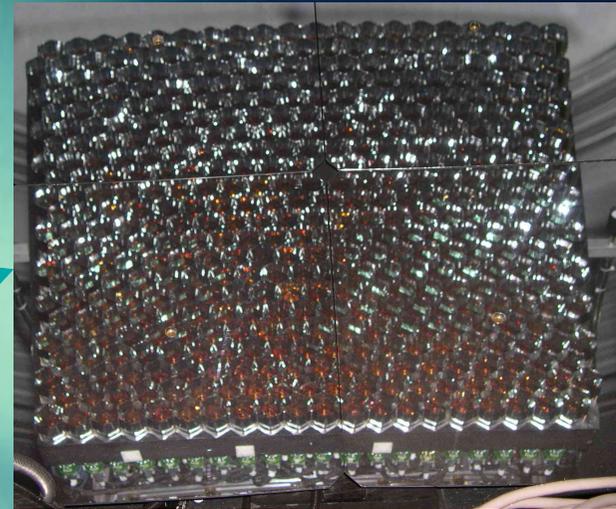
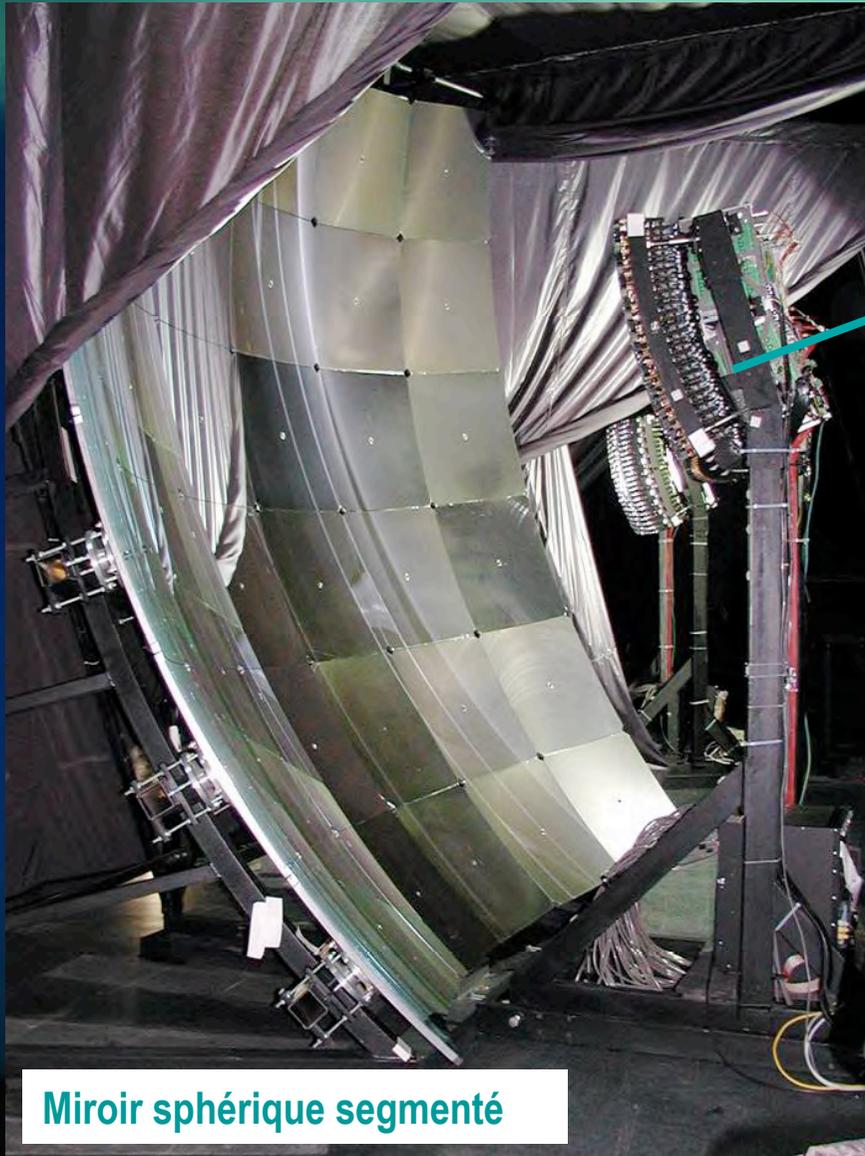


- 1600 cuves, réseau triangulaire de 1,5km de coté
- fonctionne tout le temps

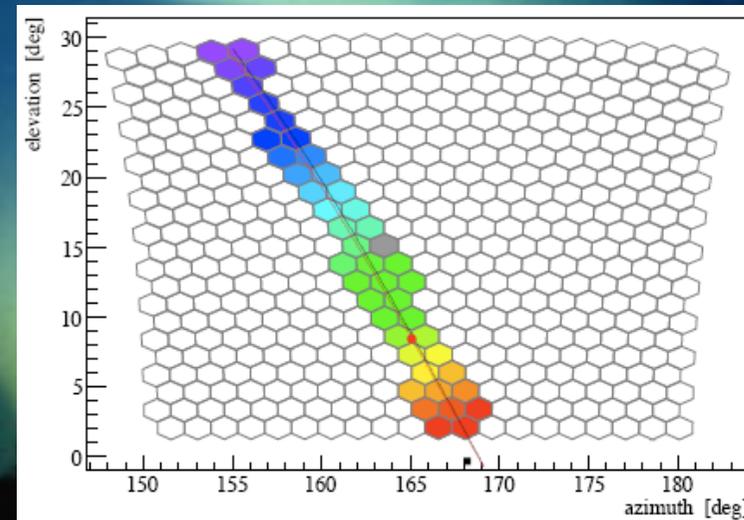
Les (4x6) télescopes de fluorescence



Un des « yeux de fluorescence »



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



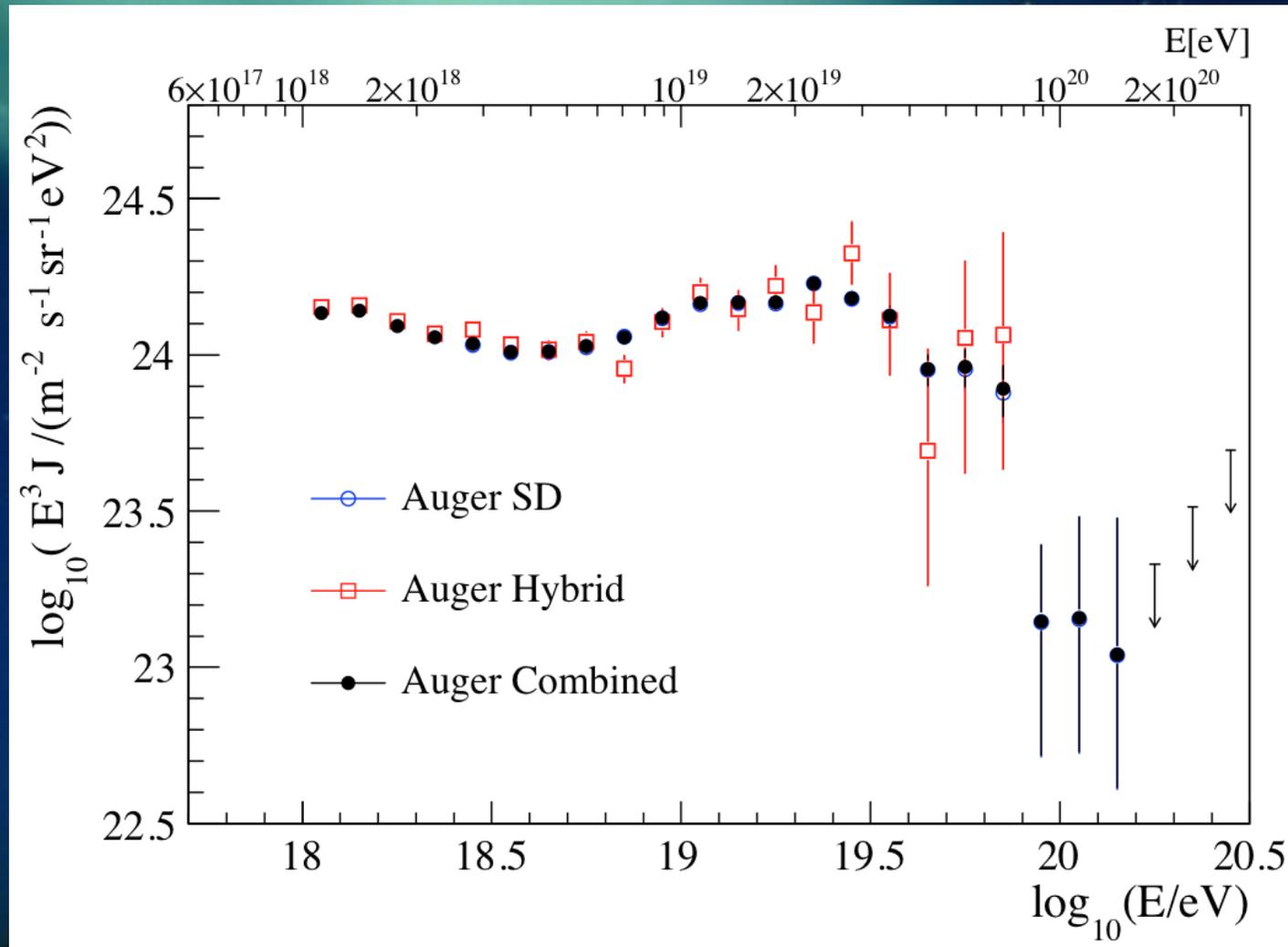
Le quotidien à Malargüe



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.

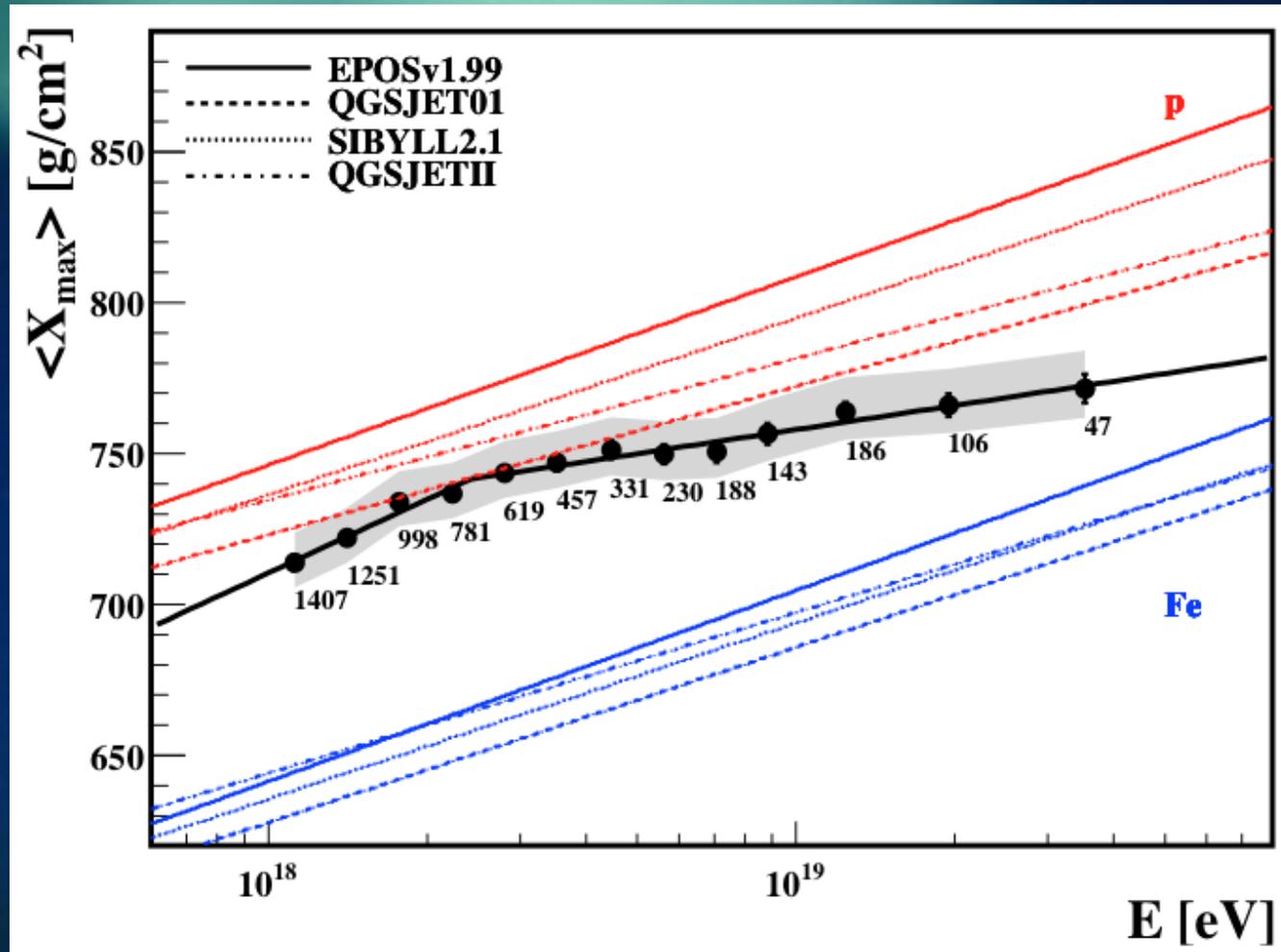
Premiers résultats (préliminaires) de l'Observatoire Pierre Auger

Le Flux des Rayons Cosmiques



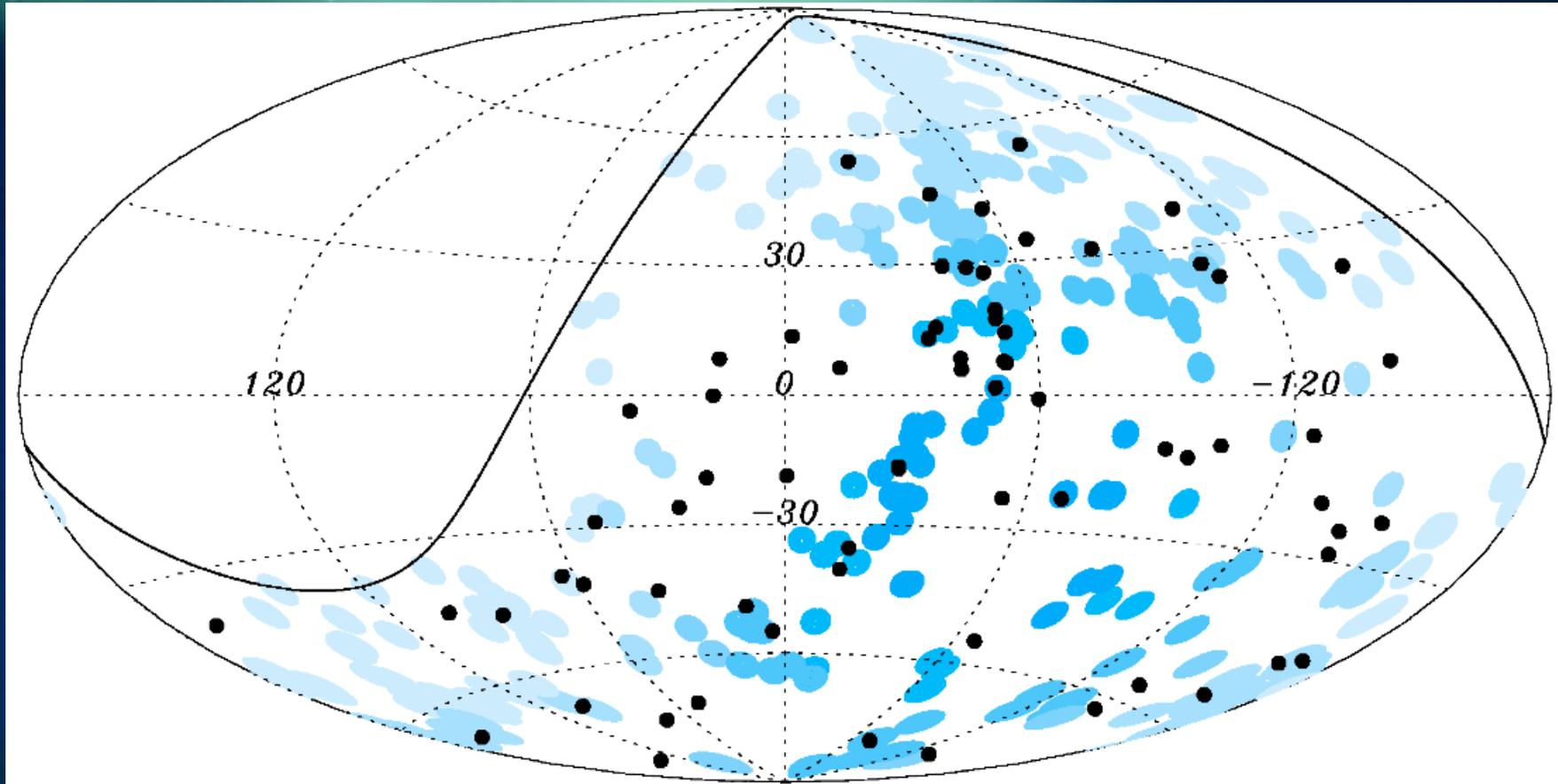
On observe une diminution du flux qui s'explique par une perte d'énergie (effet GZK). Les plus énergétiques devraient venir de l'Univers « proches » (100 Mpc)

La composition des Rayons Cosmiques



Y a t il une évolution dans la composition:
changement de sources ou effets magnétique?

Les directions d'origine des Rayons Cosmiques



Pour le moment pas de corrélation nette avec les « galaxies actives » proches mais la répartition n'est pas pour autant isotrope

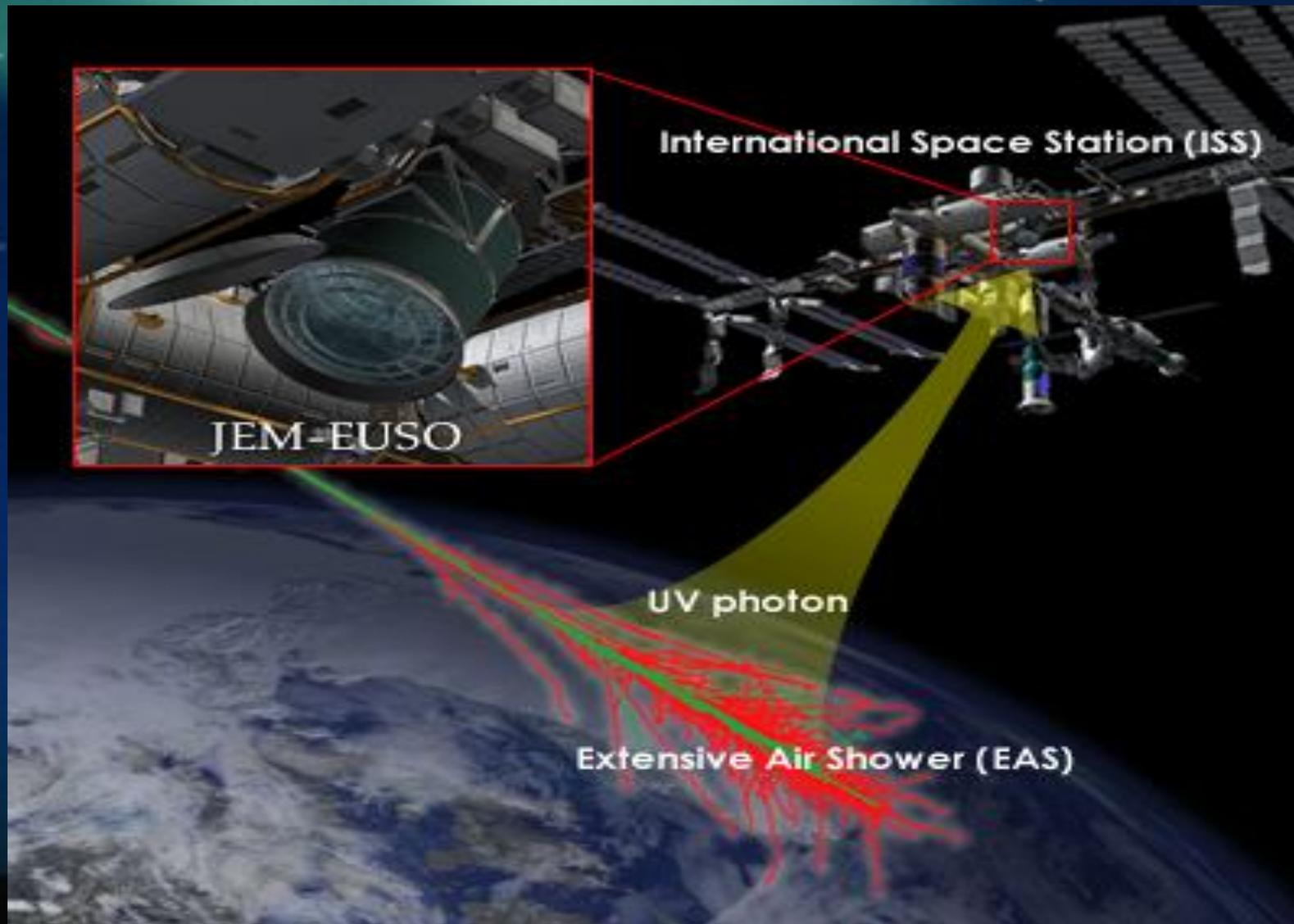
Et demain?

Auger : compléter l'observatoire Pierre Auger avec d'autres détecteurs pour mieux comprendre les gerbes de particules.

Retour dans l'espace: observer les gerbes atmosphériques depuis l'espace avec un télescope, c'est le projet **JEM-EUSO**.

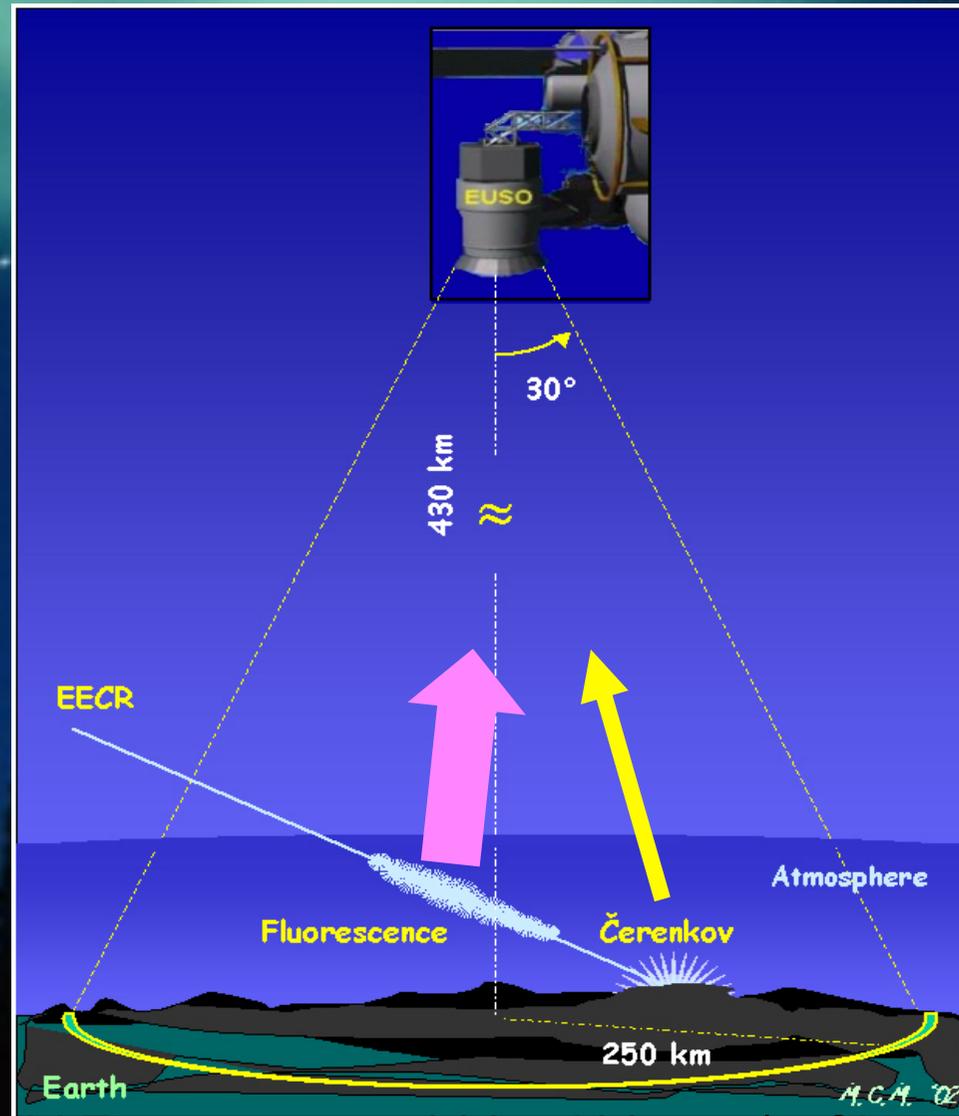
Une nouvelle technique: la radio détection des gerbes atmosphériques (les gerbes sont chargées et avec l'effet du champ magnétique, on peut mesurer le champ électrique de la gerbe)

JEM-EUSO sur l'ISS



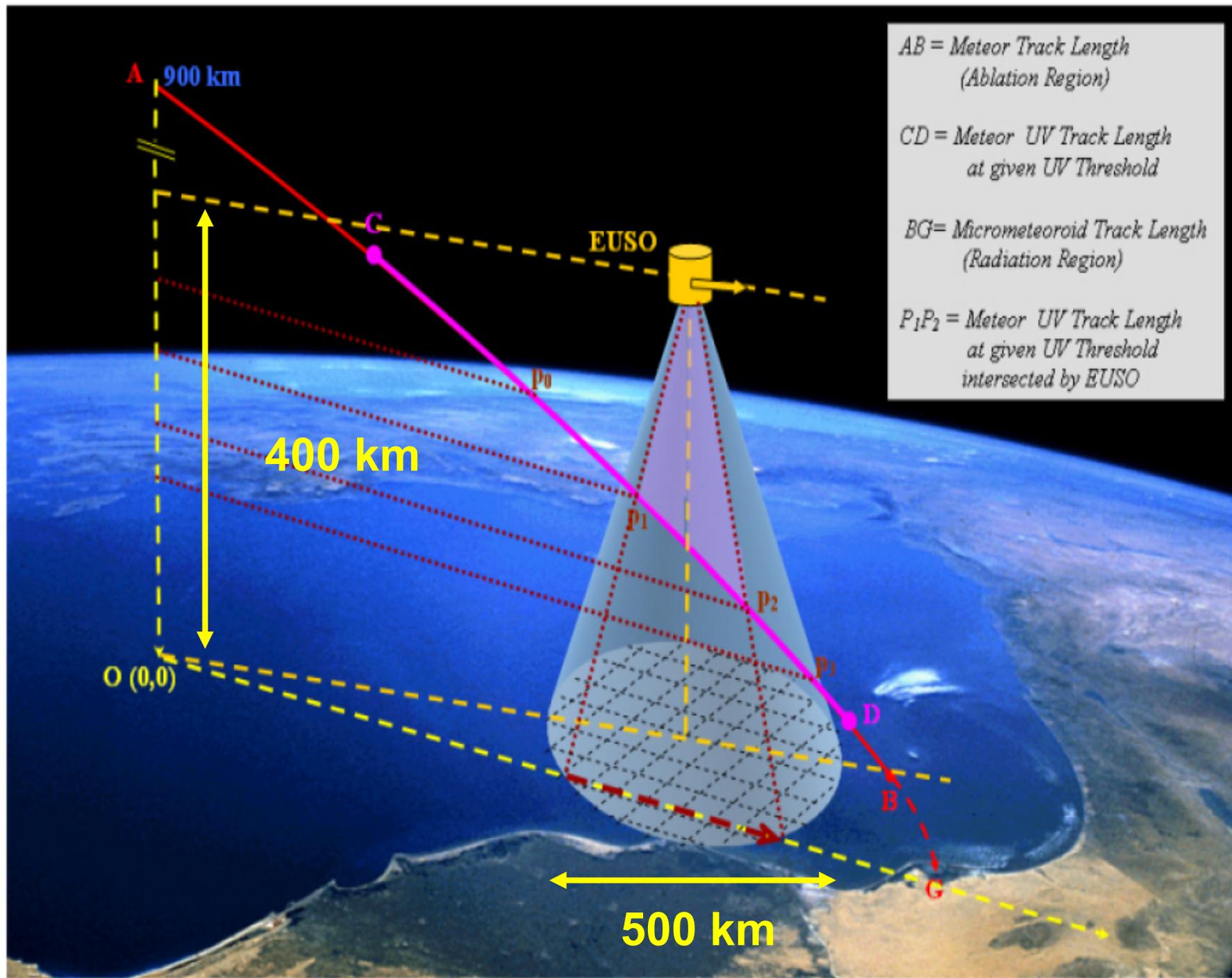
Détection de la fluorescence des gerbes depuis l'espace

Volume de détection considérable !
190 000 km²



Ne fonctionne que les nuits sans Lune...
20% de cycle utile

NUV Fluorescence 300 - 400 nm (+ Čerenkov)



AB = Meteor Track Length
 (Ablation Region)

CD = Meteor UV Track Length
 at given UV Threshold

BG = Micrometeoroid Track Length
 (Radiation Region)

P_1P_2 = Meteor UV Track Length
 at given UV Threshold
 intersected by EUSO

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.

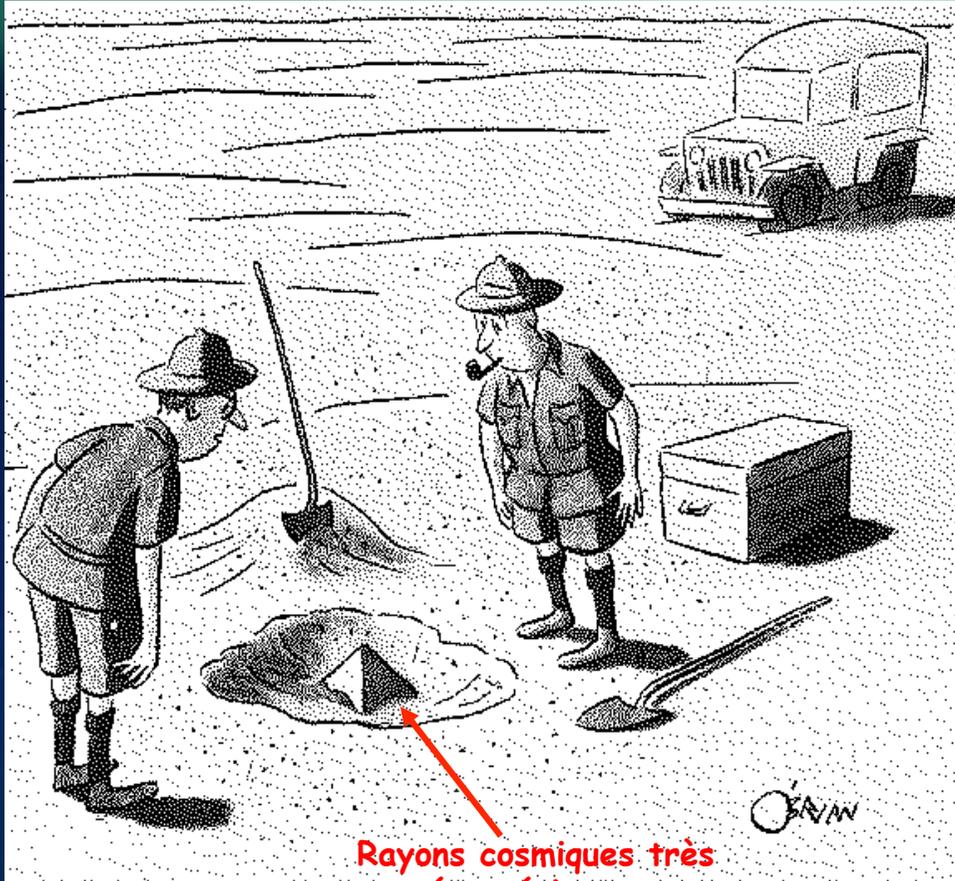
On ne sait toujours pas d'où ils viennent ...

ni ce qu'ils sont...

ni leur influence sur notre vie...

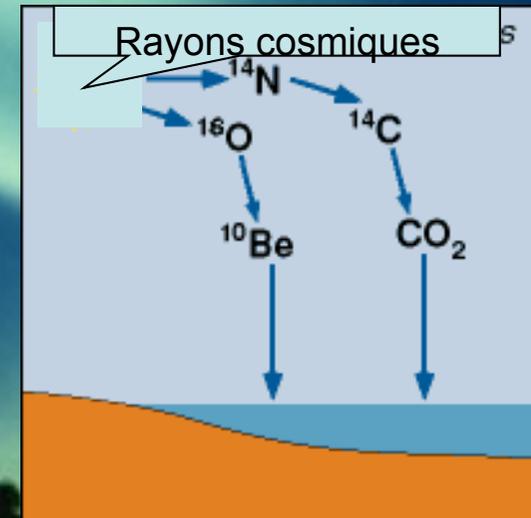
ni comment ils arrivent à de telles énergies!

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



Rayons cosmiques très énergétiques

"C'est peut-être la découverte du siècle !
Cela dépend évidemment de jusqu'où ça descend."



Fusion froide
Effets atmosphériques