

The background of the slide is a deep space image featuring a dense field of stars of various colors (white, yellow, blue) against a dark, starry sky. A prominent feature is a large, glowing red nebula or emission region, possibly a supernova remnant, located in the lower-left and central areas. The text is overlaid on this background.

Energie Extrême et Rayons Cosmiques

2^{ème} partie

- ◆ Qu'appelle-t-on *énergie extrême* ?
- ◆ L'histoire des rayons cosmiques
- ◆ Les rayons cosmiques



- ◆ Les grandes gerbes atmosphériques
- ◆ Les rayons cosmiques aux énergies extrêmes

- ◆ Origine et propagation des rayons cosmiques aux énergies extrêmes
- ◆ Le projet EUSO

Energie et particules

◆ Energie exprimée en **électron-Volt (eV)** dans le domaine des particules

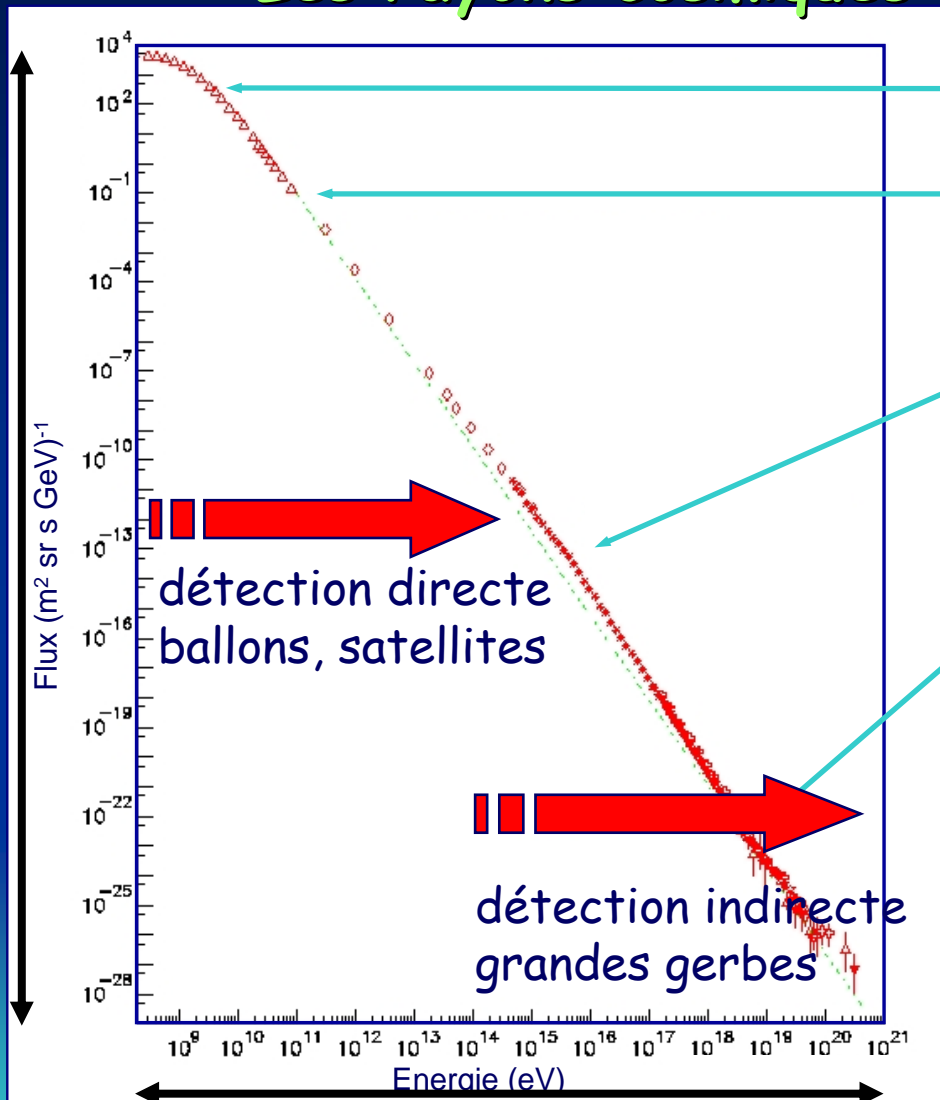
$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

0,000 000 000 000 000 000 000 16 J

Besoin d'autres unités !

o 1 000 eV	= 10^3 eV	= 1 keV	⇒ aurore polaire, rayons X
o 1 000 000 eV	= 10^6 eV	= 1 MeV	⇒ radioactivité
o 1 000 000 000 eV	= 10^9 eV	= 1 GeV	⇒ premiers collisionneurs p-p
o 1 000 000 000 000 eV	= 10^{12} eV	= 1 TeV	⇒ LHC
o 10^{15} eV		= 1 PeV	⇒ RC de haute énergie
o 10^{18} eV		= 1 EeV	⇒ ENERGIES
o 10^{21} eV		= 1 ZeV	⇒ EXTREMES pour des particules

Les rayons cosmiques aujourd'hui



origine solaire

Le flux mesuré s'étend sur

32 ordres de grandeurs :

1 particule par m^2 par sec

De la taille d'un cheveu à 10

milliards d'année lumière

Le « genou »

1 particule par m^2 par an

La « cheville »

1 particule par km^2 par an

L'énergie mesurée s'étend sur

12 ordres de grandeur

De la taille d'un cheveu à

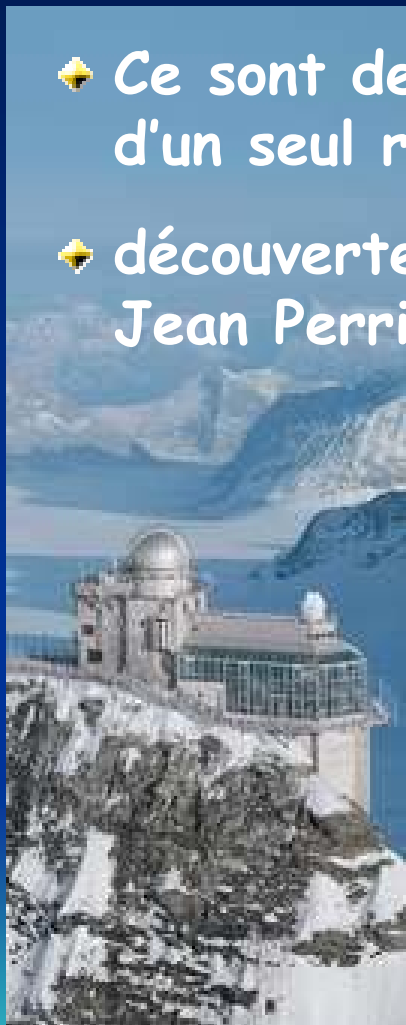
100 000 km



Les grandes gerbes atmosphériques

Découverte des gerbes atmosphériques

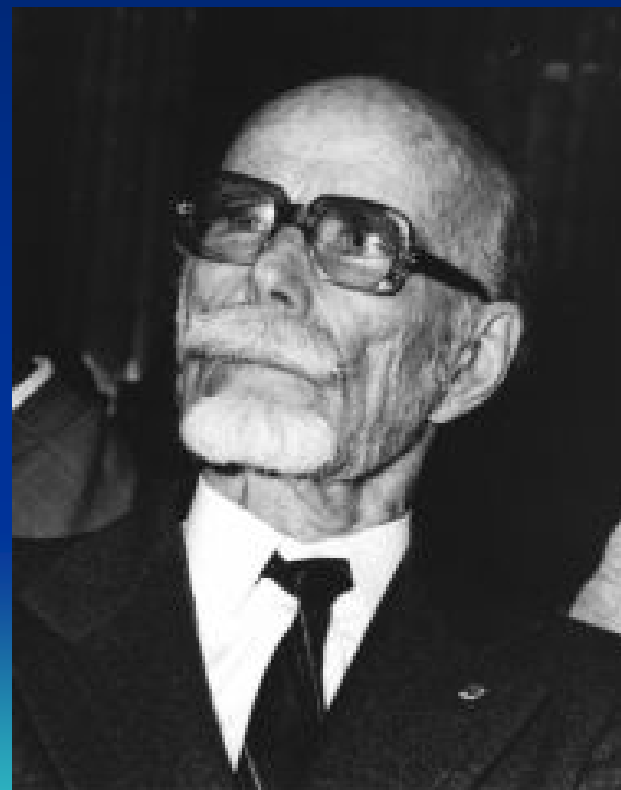
- ✦ Ce sont des averses soudaines de particules, résultant d'un seul rayon cosmique initial d'énergie colossale.
- ✦ découvertes par Pierre Auger en 1938, au laboratoire Jean Perrin au JungFraujoch



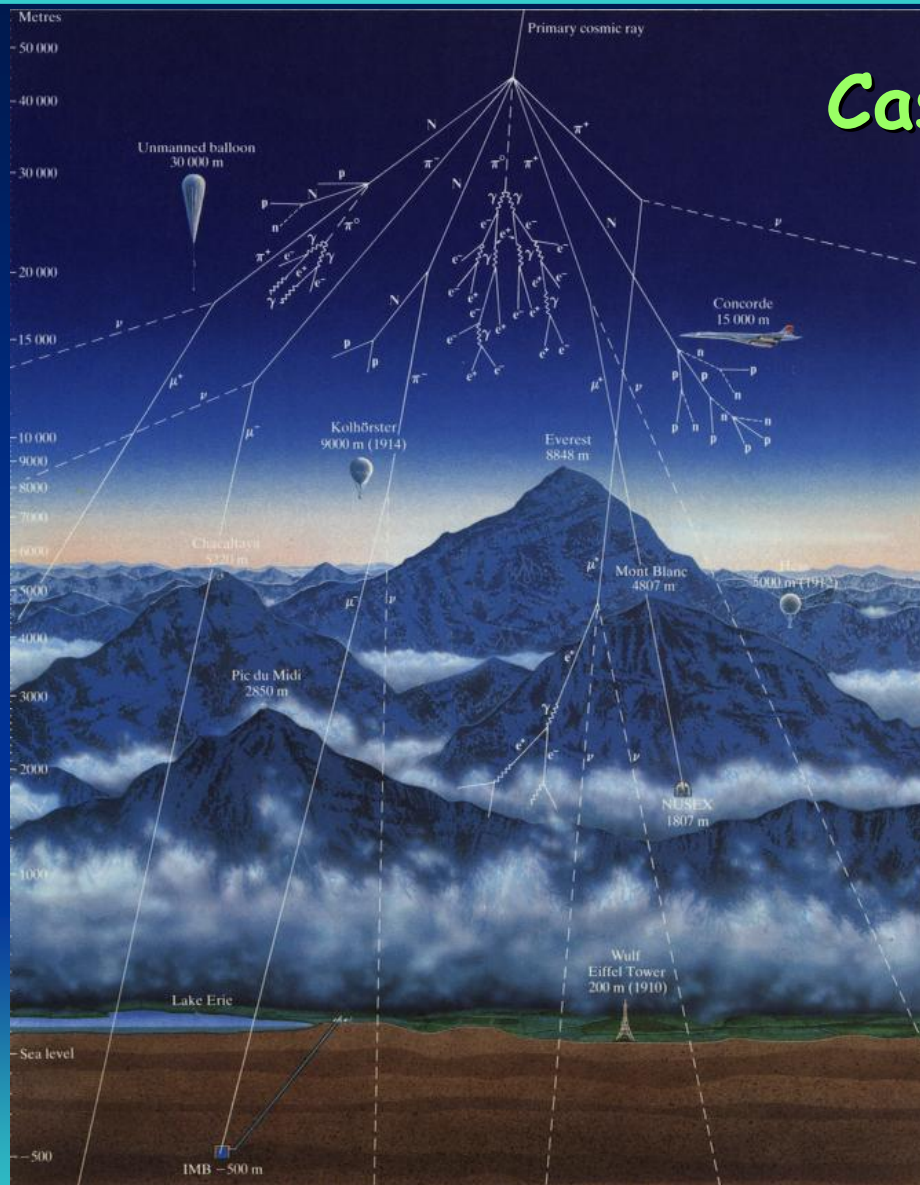
Découverte des gerbes atmosphériques

◆ Pierre Auger, Académie des Sciences, séance du 18 Juillet 1938 :

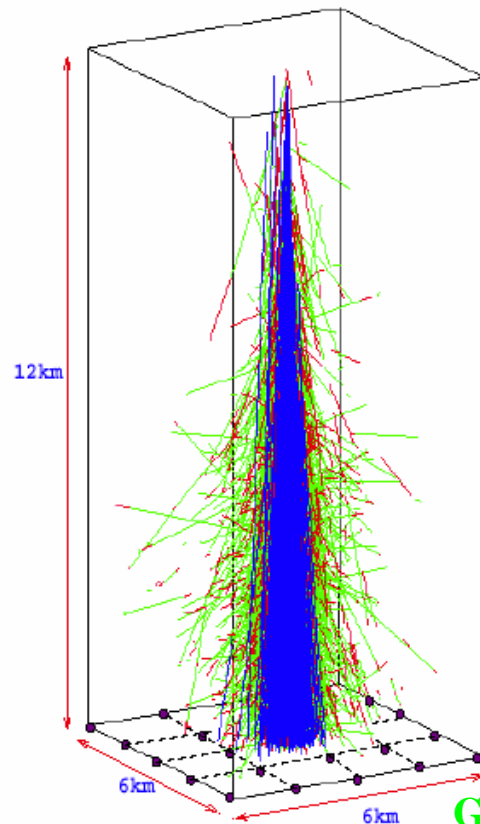
- *« On voit d'après ces résultats que les averses soudaines de rayons cosmiques décrites ici peuvent couvrir des surfaces de l'ordre de 1000 m², et comportent donc plusieurs dizaines de milliers de corpuscules, dont une moitié environ peut traverser 5cm de plomb »*



Cascades de particules



A 10 EeV Extensive Air Shower (EAS)



100 billion particles at sea level
photons, electrons (99%), muons (1%)
● Ground Array stations

Gamma
e+, e-
muons

Energie et taille stupéfiantes

- ◆ Energie initiale supérieure à 10^{15} eV !
 - \Rightarrow vitesse relativiste
 - \Rightarrow 1 km correspond à 1 mm et 1 seconde à 3 semaines.
- ◆ Domaine d'énergies supérieures à 10^{19} eV
 - les particules interagissant dans les hautes couches de l'atmosphère (plusieurs dizaines de km) créent des gerbes dont l'impact au niveau du sol comporte environ 100 milliards de particules (photons et électrons essentiellement)
 - réparties sur une dizaine de km^2 .

EXTREMEMENT RARE :
flux de l'ordre de 1 RC/ km^2 /siècle

Moyens de détection

- ◆ **trop rares pour être détectés directement !!!**
- ◆ mesure de l'énergie déposée par les gerbes dans l'atmosphère.
 1. Détection des particules à la surface de la Terre
⇒ énergie initiale, direction d'incidence.
 2. Détection de la lumière de fluorescence émise par l'interaction des particules avec les molécules N_2
- ◆ Aucune technique efficace pour identifier la particule initiale
(indispensable pour la compréhension du mécanisme d'accélération).

Détection des gerbes par la détection des particules au sol

◆ Nécessaire de couvrir une grande surface

◆ Réseau de détecteurs de particules

• l'intêret du réseau est triple:

- Ajout du nombre de particules enregistrées par chaque détecteur
⇒ meilleure estimation du nombre de particules présentes dans la gerbe.
- Plus le réseau est grand plus le nombre d'événements détectés est grand.
- dessin ci-contre : la gerbe atteint d'abord le détecteur sur la gauche avant celui sur la droite ⇒ détermination de la direction d'incidence du rayon cosmique.

<http://ast.leads.ac.uk/haverah/dets.shtml>

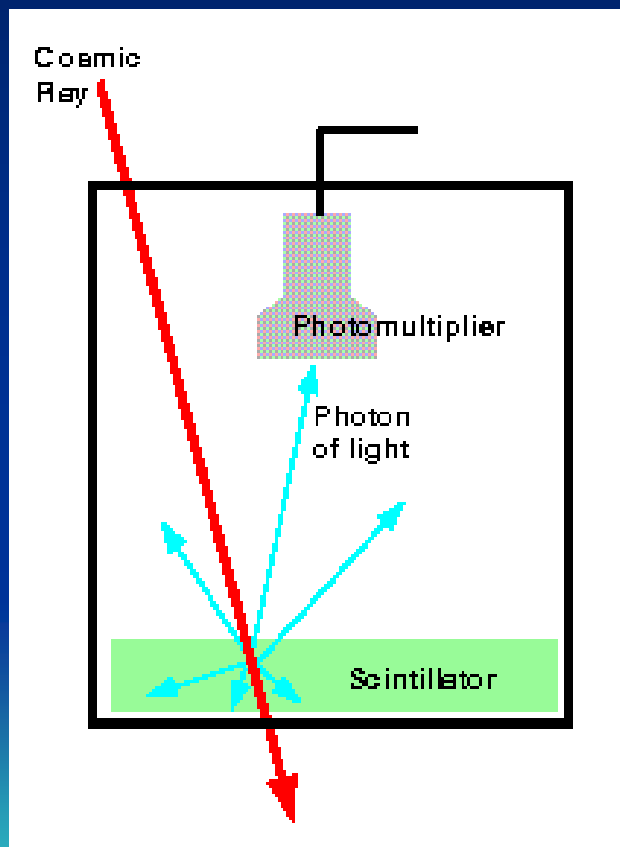


◆ Type de détecteurs utilisés :

scintillateurs, détecteurs cherenkov

Scintillateurs

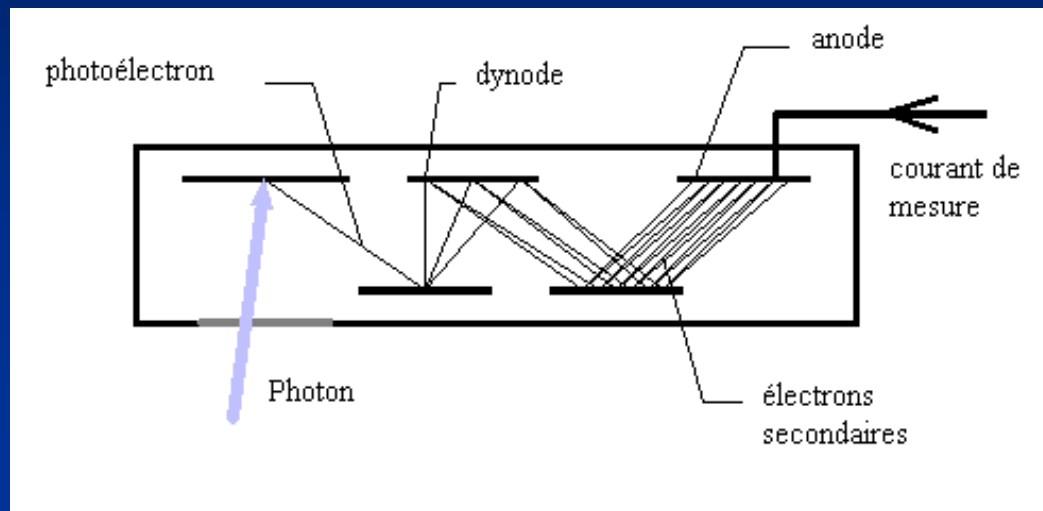
- ◆ Les scintillateurs (ou détecteurs à scintillation) sont faits dans un plastique spécial, scintillant.



- Lorsque une particule chargée incidente traverse le détecteur, elle excite une molécule du plastique scintillant. Celle-ci se désexcite en émettant des photons.
- Un photomultiplicateur détecte ensuite les photons émis et on obtient un signal électrique amplifié proportionnel au nombre de photons perçus.

PhotoMultiplieurs (PM)

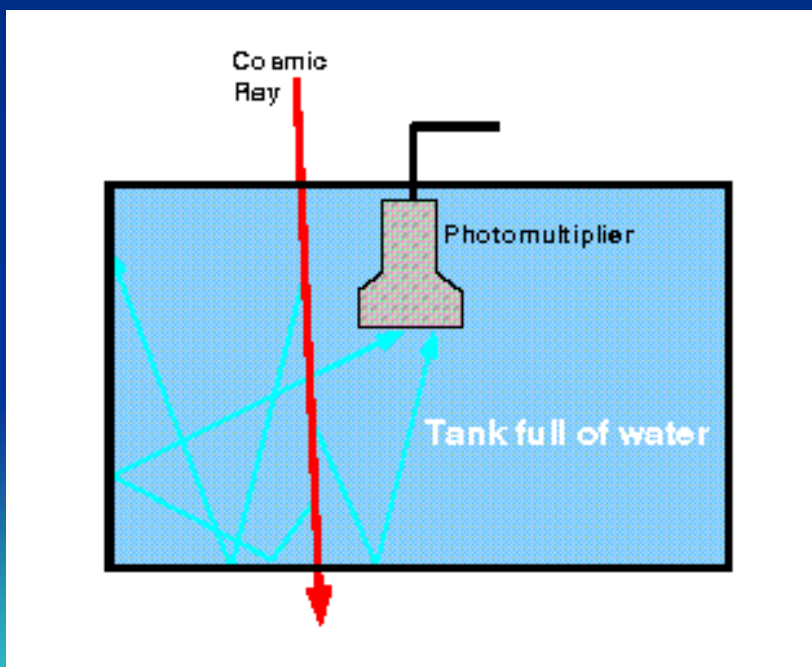
- ◆ Comme son nom l'indique, le photomultiplicateur transforme un faible signal lumineux en un signal électrique qui peut être mesuré



- ◆ La forme et la taille du signal électrique informent sur la quantité de lumière reçue, et donc sur le nombre de particules chargées ayant traversé le détecteur

Les détecteurs de lumière Cherenkov

- ◆ Dans ce type de détecteur, le scintillateur est remplacé par une cuve d'eau pure.
- ◆ Lorsque les rayons cosmiques secondaires traversent l'eau, ils émettent de faibles flashes de lumière bleue par effet Cherenkov.



- ◆ Les bords du réservoir sont recouverts d'un matériau réfléchissant de sorte que la plus grande partie des photons soit réfléchi en direction du photomultiplicateur.



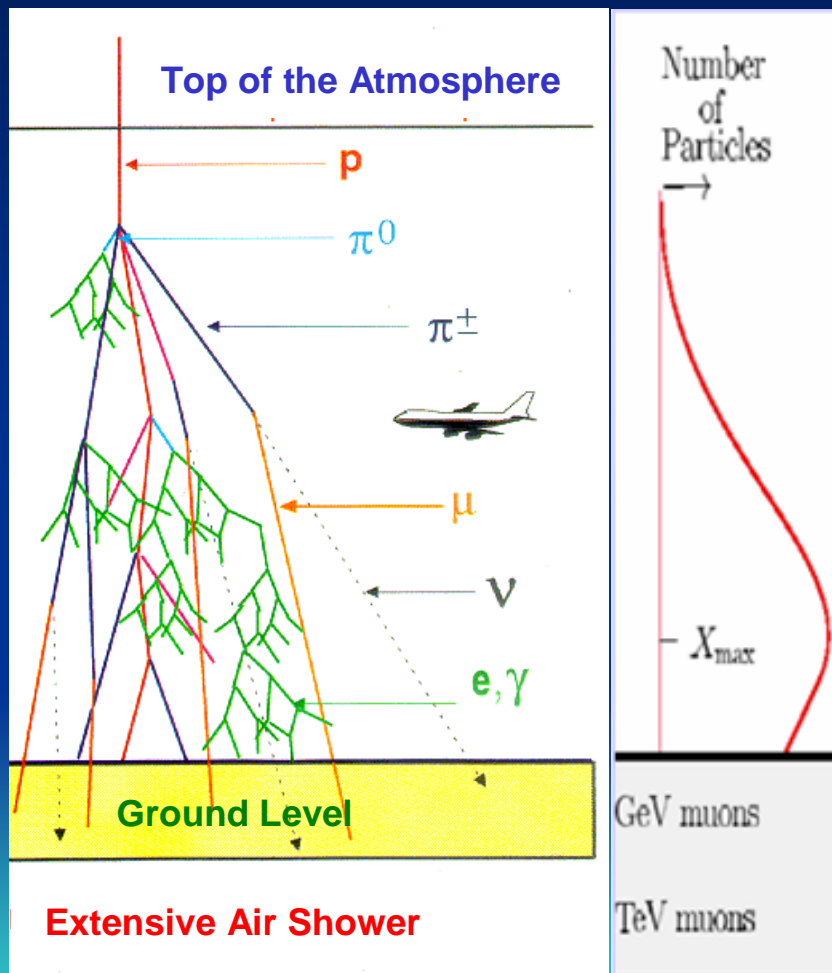
Effet Cherenkov

- Observation d'une lumière bleutée par Mme Curie, 1910
- Interprété par le physicien russe P. Cherenkov, \Rightarrow prix Nobel en 1958.
- se produit lorsqu'une particule se déplace plus vite que la vitesse de la lumière dans le milieu considéré.
Elle ne va toutefois pas plus vite que la vitesse de la lumière dans le vide, il n'y a donc rien de contradictoire avec la théorie de la relativité.
- Si v est la vitesse de la particule, et n l'indice du milieu, on a : $c/n \leq v < c$
- Une particule qui atteint la vitesse de la lumière dans le milieu dans lequel elle se déplace émet une lumière intense, de couleur bleue.
- Au-delà de la vitesse de la lumière, cette particule constitue la pointe d'un cône lumineux de couleur bleue dont l'angle au sommet dépend de la vitesse de la particule.

$$\cos \theta = 1/\beta n$$




Détection des gerbes par la détection de la lumière de fluorescence



- ◆ Les particules secondaires chargées créées tout au long du développement de la gerbe excitent les molécules d'azote de l'atmosphère
- ◆ Ces molécules se dés excitent en émettant une lumière de fluorescence dans toutes les directions.

Détection des gerbes par la détection de la lumière de fluorescence

- ◆ Il s'agit d'une lumière de très faible intensité, dans l'UV (300-400 nm).
- ◆ **Inconvénient : détection possible uniquement par nuit sans lune.** (environ 10 % du temps).
- ◆ Mesure de la lumière émise \Rightarrow énergie du RC primaire
- ◆ Position du maximum \Rightarrow nature du RC primaire
- ◆ Avec un dispositif de photomultiplicateurs on peut reconstruire le profil de développement de la gerbe
- ◆ Une connaissance absolue de la fluorescence de l'azote et du gain quantique des photomultiplicateurs est requise.

A visualization of cosmic ray energy distribution, showing a complex, multi-colored structure with a central bright blue region and surrounding areas of green, yellow, and orange, set against a dark background with scattered white stars.

**Les rayons cosmiques
aux énergies extrêmes**

Les premières détections

◆ Volcano Ranch (US, 59-63)

- Premier réseau géant de détecteurs
- 19 détecteurs répartis sur 8 km²
 - Compteurs en plastique scintillant (communément appelés « scintillateurs ») de 3.3 m²

1 rayon cosmique d'énergie supérieure à 10²⁰ eV



Les premières détections

◆ Haverah Park (UK, 67-87)

- Réseau de détecteurs Cherenkov à eau sur 12 km²



4 rayons cosmiques d'énergie supérieure à 10²⁰ eV

◆ Yakutsk (Sibérie, 70-95...)

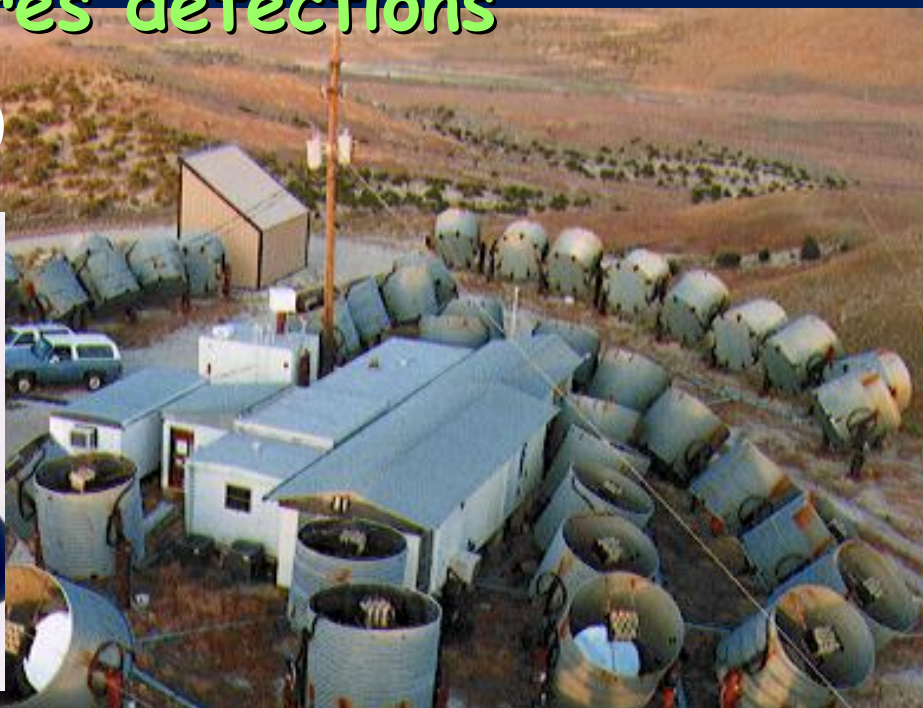
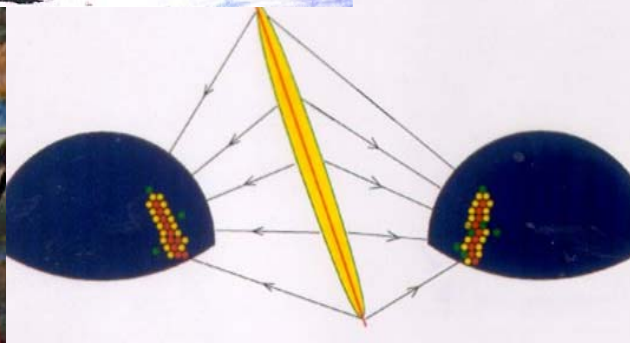
- Scintillateurs + détection de la lumière Cherenkov émise

1 rayon cosmique d'énergie supérieure à 10²⁰ eV

Les premières détections



♦ Fly 's eye (US, 81-92)



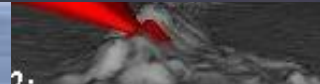
- 67 miroirs de 1,6 m de diamètre
- Point focal équipé de 12–14 PM
⇒ 880 PM couvrant le ciel

1 rayon cosmique d'énergie de $3 \cdot 10^{20}$ eV



Expériences récentes ou en cours

- ◆ HiRes (High Resolution Fly's eye detector)
 - Technique de fluorescence



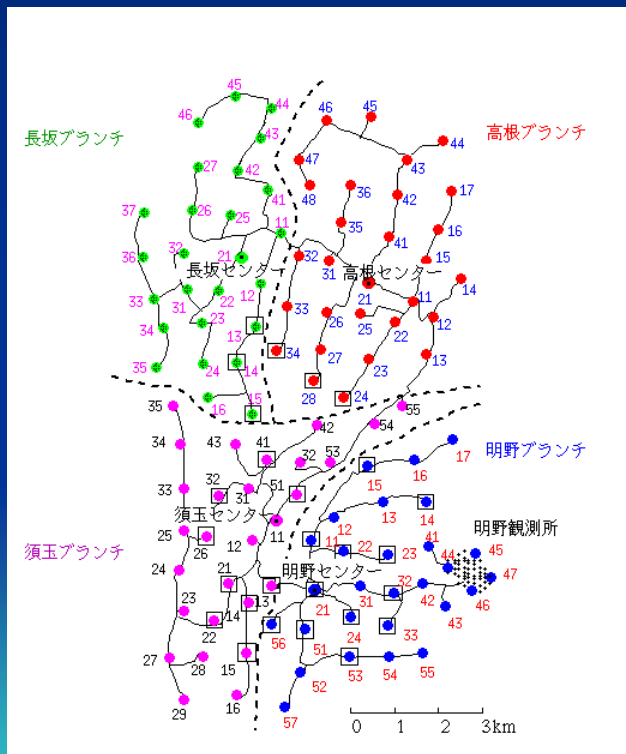
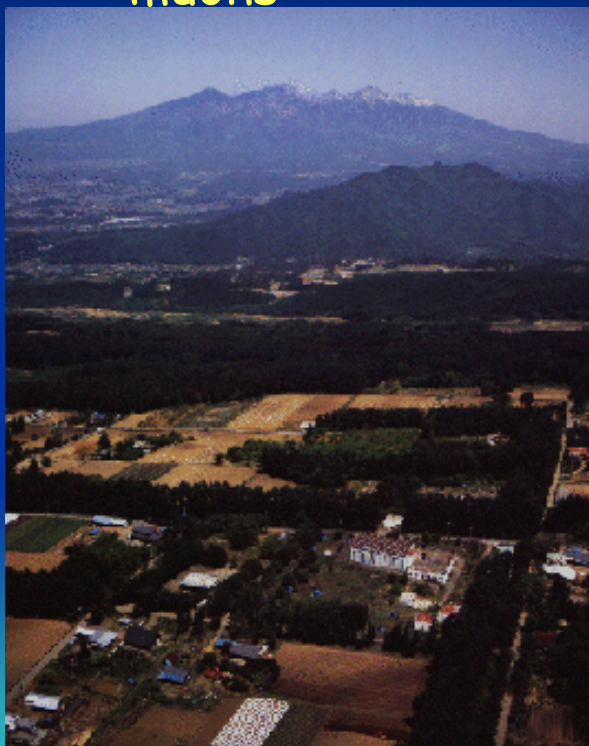
2:
rs
po
ér
tor

**rayon cosmique
d'énergie $> 10^{20}$ eV**

Expériences récentes ou en cours

◆ AGASA (Akeno Giant Air Shower Array, Japon)

- 100 km²
- 111 détecteurs en surface (cherenkov) + 27 détecteurs à muons



plusieurs
rayons
cosmiques
d'énergie
> 10²⁰ eV

RCEE (Rayons Cosmiques aux Energies Extrêmes)

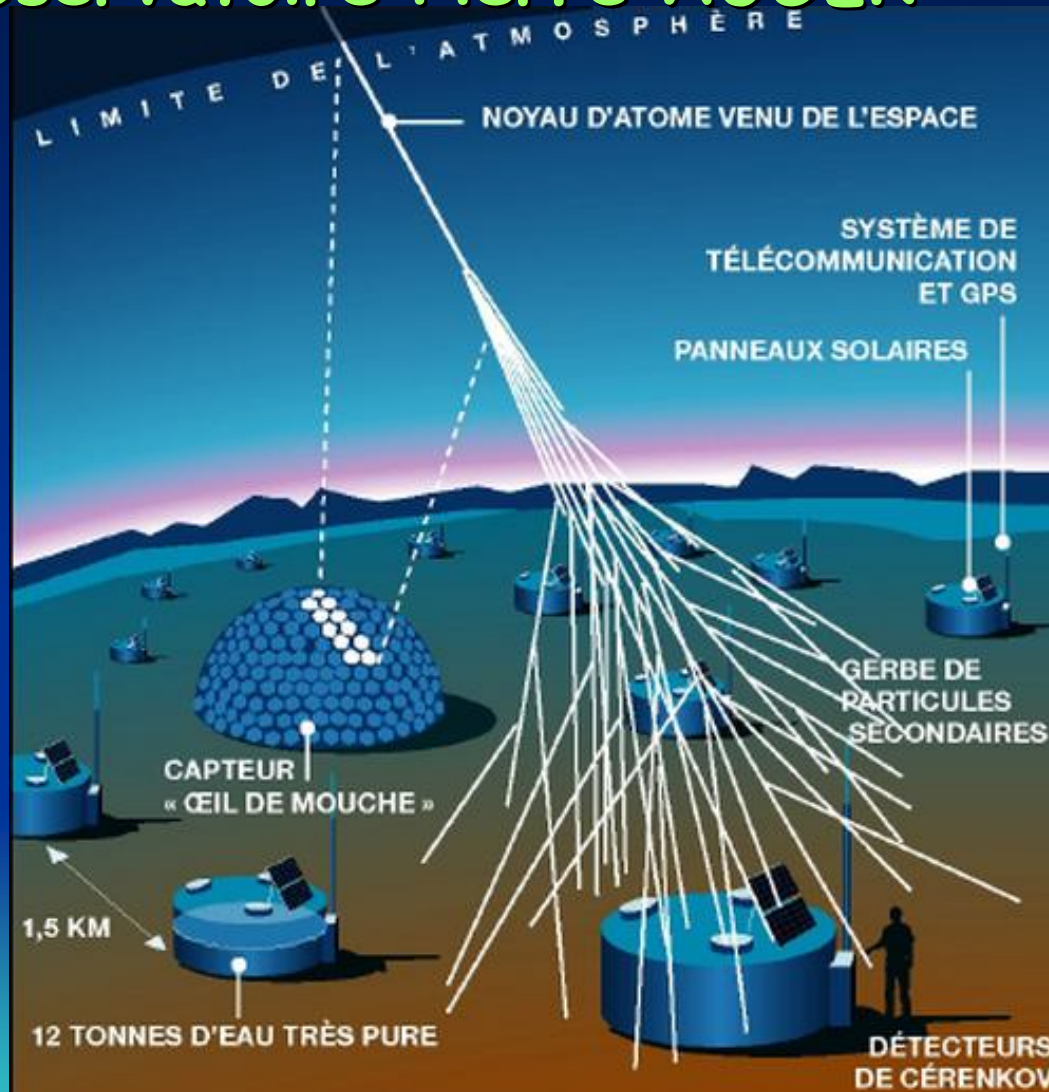
Observations de plusieurs RC d'énergie $> 10^{20}$ eV

- ◆ 10^{20} eV c'est : 100 000 000 000 000 000 000 000 eV
 - Une énergie macroscopique : l'énergie d'un volant de badminton envoyé à 300km/h, ou celle d'une balle de tennis servie par un champion, ou un tir de penalty ...
- ◆ 10^{20} eV c'est :
 - Un facteur de Lorentz de 10^{11}
 - La distance terre - soleil (150 millions de km) ramenée à 1,5m
 - Une seconde qui dure 3200 ans

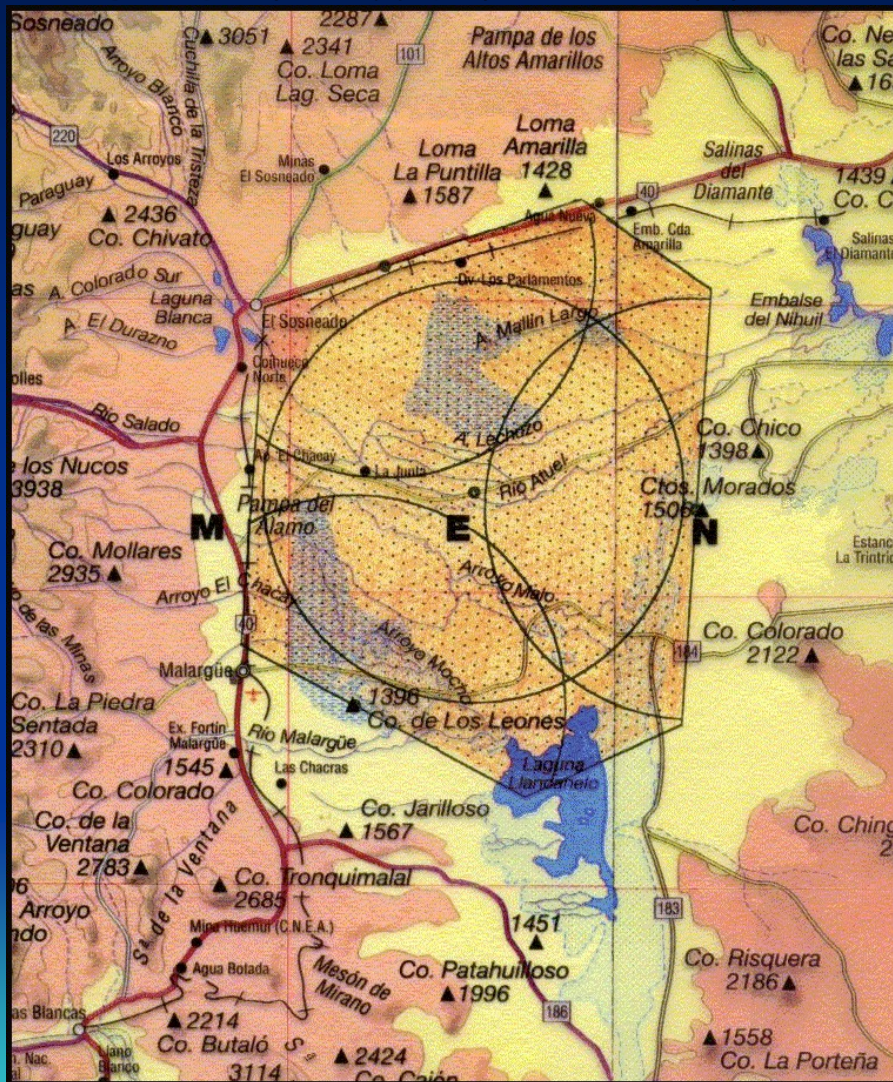
Enorme !

- ◆ L'existence des RCEE pose des problèmes :
 - Origine mal comprise, propagation dans l'univers, nature des primaires

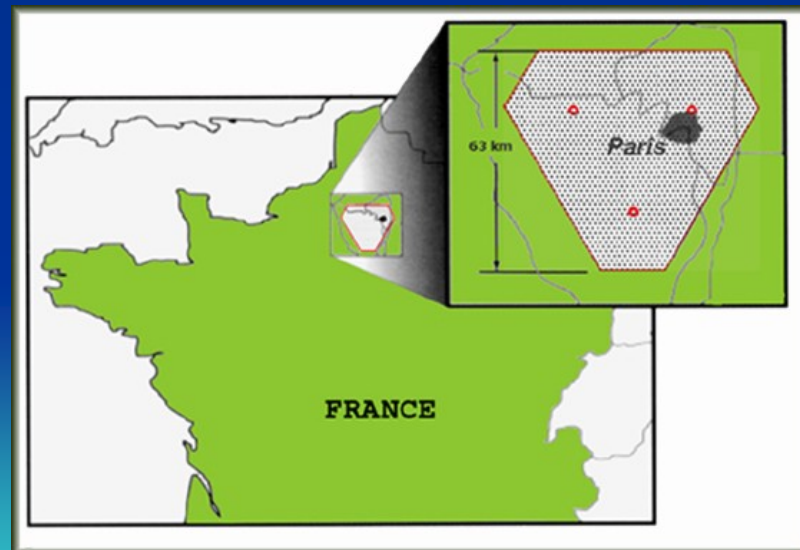
Observatoire Pierre AUGER



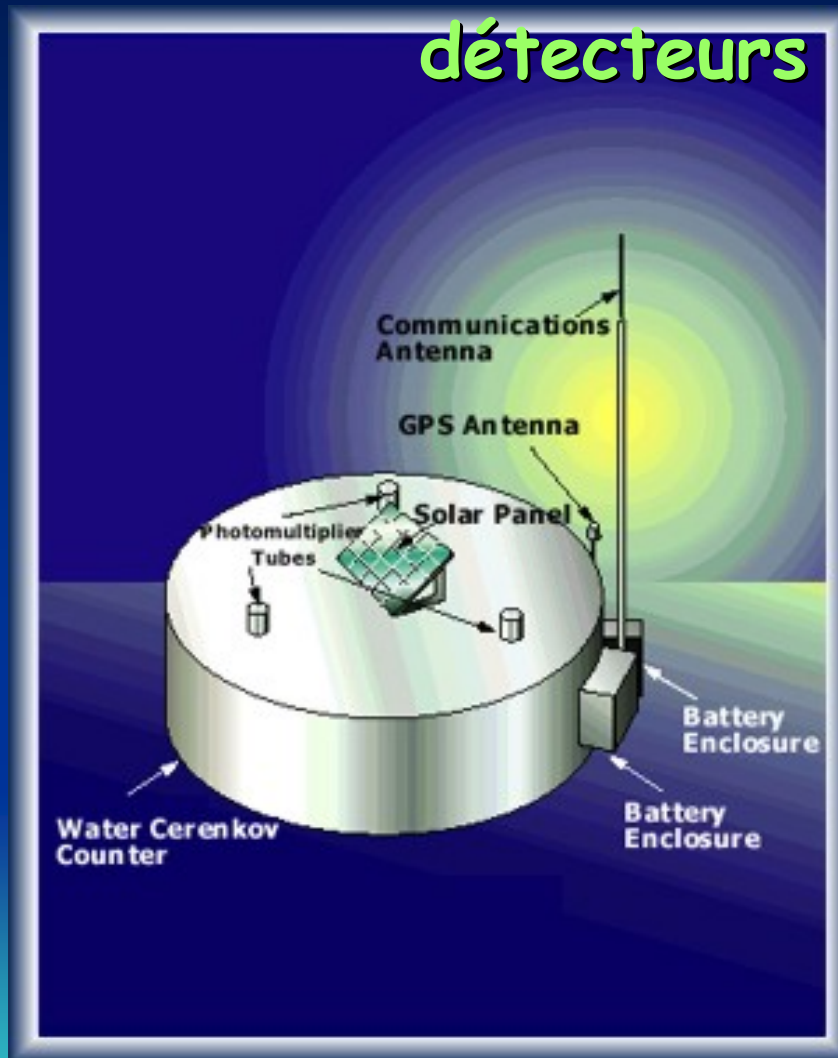
Observatoire Pierre AUGER - site sud



- ◆ 1600 détecteurs, espacés de 1,5 km
- ◆ 3000 km²
- ◆ 24 télescopes de fluorescence dans 4 points



Observatoire Pierre AUGER détecteurs de particules



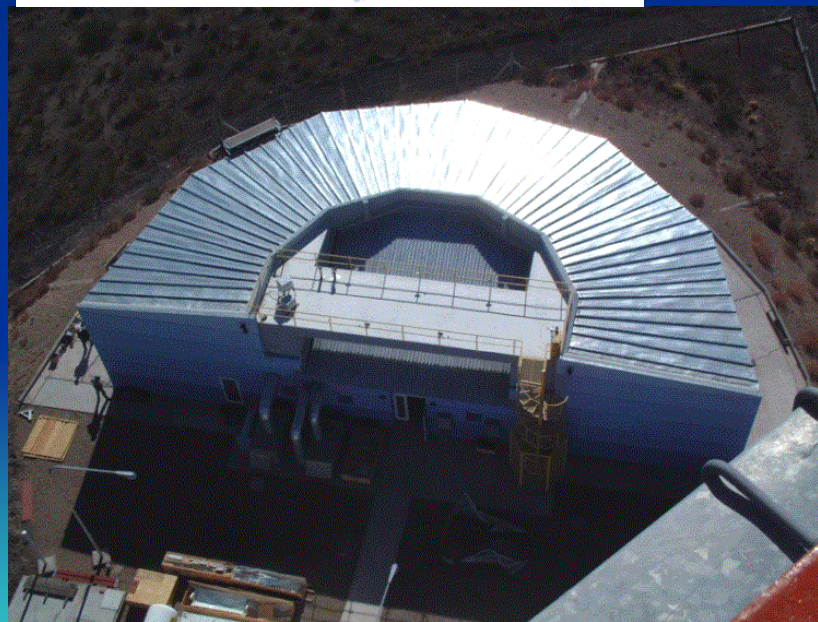
Un détecteur de surface
est l'objet de la curiosité
d'habitants de la pampa



Observatoire Pierre Auger détecteurs de fluorescence



Miroir sphérique segmenté
440 photomultiplicateurs
($1,5^\circ$ par pixel)
Lentille correctrice



Observatoire Pierre Auger : statut

- ◆ phase prototype terminée :
 - Validation du concept
 - Objectifs atteints
- ◆ Plus d'une centaine de stations détectrices installées et opérationnelles sur une surface de plus de 100 km²
 - l'Observatoire Pierre Auger est devenu depuis octobre le plus grand réseau de détecteurs de rayons cosmiques au monde.
- ◆ Détection d'événements « hybrides »
 - Détectés par les stations opérationnelles
 - Détectés également par des détecteurs de fluorescence
- ◆ Production jusqu'à fin 2005
 - Déploiement et prise de données continuent
 - Observatoire Sud complet
- ◆ Vers une couverture complète du ciel

dans le prochain épisode

Je vous remercie de votre

Comment arrivent-ils sur terre ?

ATTENTION !

EUSO : comment ça marche ?