

Les rayonnements cosmiques

Corinne Bérat

Laboratoire de Physique Subatomique et de
Cosmologie, Grenoble



La Terre est en permanence bombardée de particules qui viennent du cosmos.

Les rayons cosmiques représente environ 15% de la radioactivité naturelle totale (à peine moins que la radioactivité du sol)

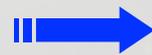
- 
- A photograph of a vibrant green aurora borealis (Northern Lights) dancing across a dark night sky. The aurora is seen over a silhouette of mountain ranges. The text of the presentation is overlaid on the left side of the image.
- **Les rayons cosmiques**
 - Un siècle d'histoire
 - Que sont-ils et d'où viennent-ils ?
 - Energie et flux
 - **Les rayons cosmiques de *très* haute énergie**
 - Des « averses » de particules
 - Des énergies extrêmes !
 - Origine et propagation dans le cosmos
 - **L'Observatoire Pierre Auger**
 - **Les futurs observatoires de rayons cosmiques**

Pourquoi étudier les rayons cosmiques ?

- Une « expérience » en astrophysique
 - l'astrophysique échappe complètement au contrôle de l'expérimentateur

collision de deux galaxies spirales

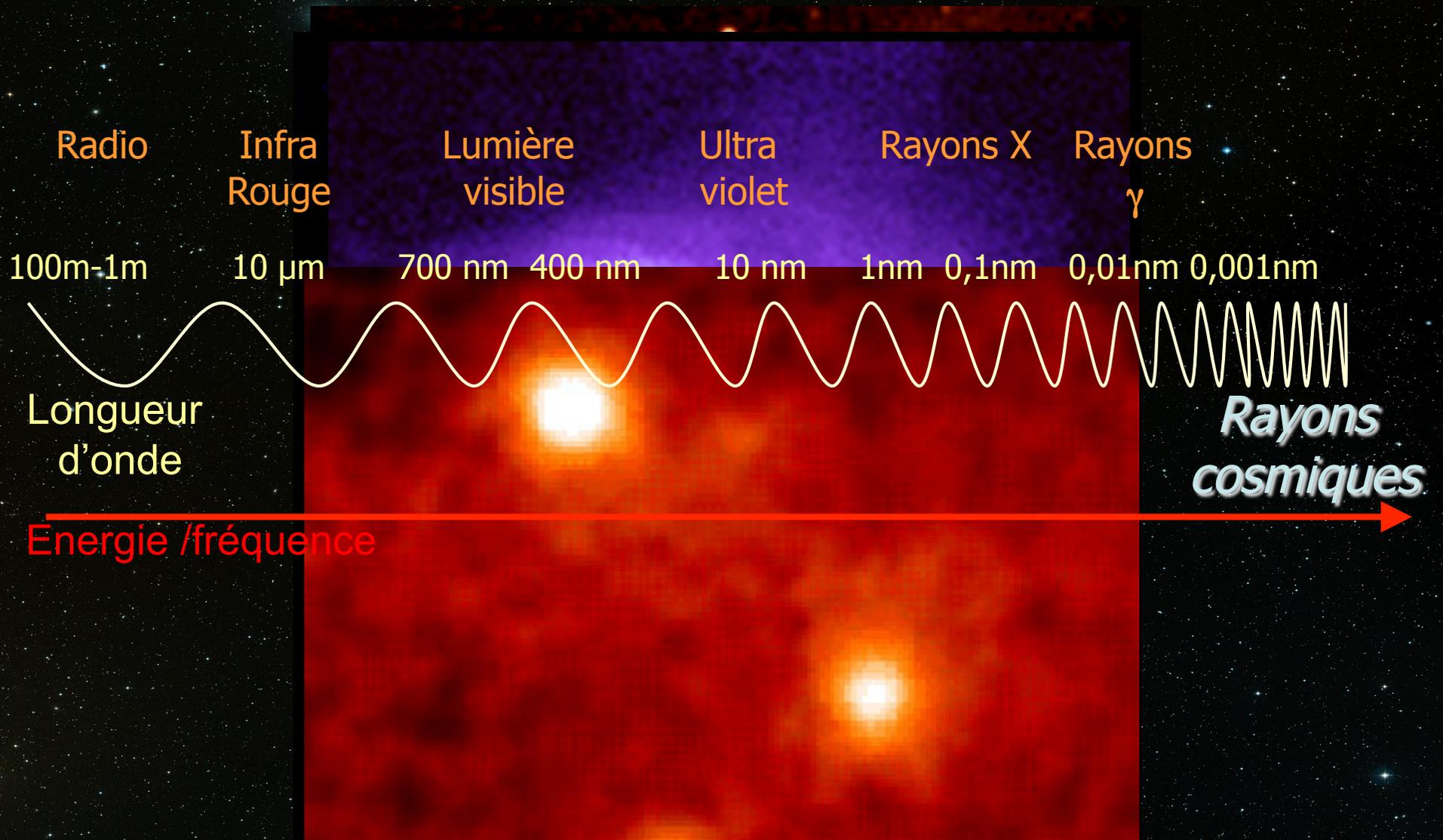
Seuls « messagers » pour étudier les phénomènes astrophysiques à distance :



- Ondes électromagnétiques
- Rayons cosmiques

Pourquoi étudier les rayons cosmiques ?

Les lumières de la nébuleuse du Crabe





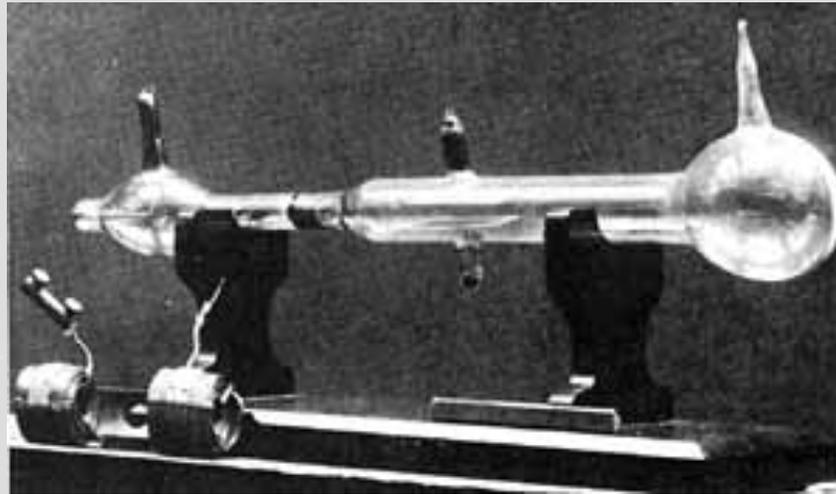
**Un siècle
d'histoire**

Un siècle d'histoire

- Rayonnements : lumière ou matière ?

- Fin du XIXe siècle, observation de nouveaux rayonnements « cathodiques »

- étudiés par Crookes, Perrin et Thomson
⇒ rayons déviés en présence d'aimants et de champs électriques



- J. J. Thomson : rayons = particules chargées négativement
⇒ « électrons » (1898)

Un siècle d'histoire

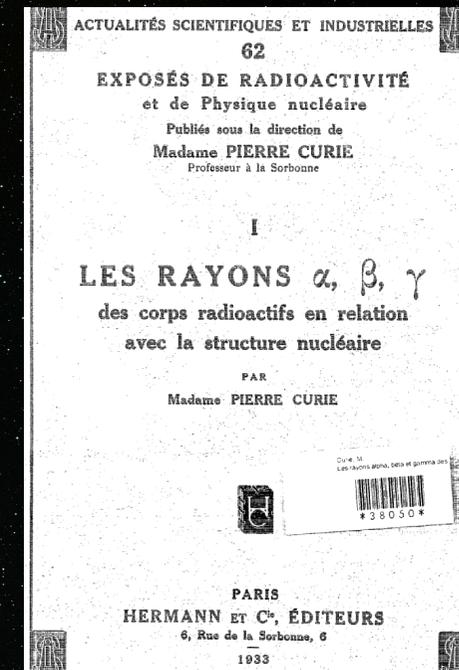
- Rayonnements : lumière ou matière ?

- Rayons X

- Découverts par **W. Röntgen** en 1895
 - Nature incertaine jusqu'à **Von Laue** (1912)

- Radioactivité

- Découverte par **H. Becquerel** en 1896 (uranium)
 - 1898-1900 **P. et M. Curie**, **E. Rutherford** et **P. Villard** : plusieurs types de radioactivité (α , β , γ)



Un siècle d'histoire

• Découverte des rayons cosmiques

- 1901

- Observation de **C. Wilson** :
les **électroscopes** se déchargent tout seuls sous terre aussi bien que sur terre
- **E. Rutherford** \Rightarrow radioactivité naturelle, effet dominant.

- 1910

- Le père **Wulf** fait des études en montant à la tour Eiffel : l'électroscope se décharge moins vite, mais pas autant que ce qui était prévu !

 Donc « ça » vient d'au dessus...



Un siècle d'histoire

• Découverte des rayons cosmiques

- 1912 :

- Victor Hess monte en ballon à 5350 m : découverte du rayonnement cosmique.



W. Kolhörster monte à 9 Km



Intensité du | Route des Entdeckungsfluges der kosmischen Strahlung.

centenaire de la découverte en 2012

Un siècle d'histoire

• Nature des rayons cosmiques ?

- 1925 :

- R. Millikan pense que les rayons de V. Hess sont des rayons gamma \Rightarrow « rayons cosmiques »

- 1929 :

- W. Bothe et W. Kohlörster, utilisant des compteurs Geiger montrent que les rayons de V. Hess sont chargés \Rightarrow matière !!

mais Millikan est prix Nobel et ne veut pas en démordre...

- D. Skobeltzyn montre aussi que c'est de la matière grâce aux chambres à brouillard

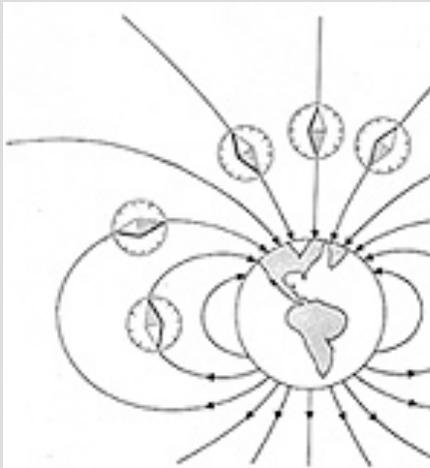
mais rien n'y fait....

Un siècle d'histoire

• Nature des rayons cosmiques

- 1930 :

- A. Compton (prix Nobel de physique en 1927 pour son travail sur l'effet Compton, grâce à l'effort de la communauté scientifique internationale) : il propose que les rayons cosmiques sont constitués de particules chargées (protons, électrons, etc.)
- il envoie une lettre à Millikan, lui proposant de vérifier ses conclusions (à l'époque, Millikan était le leader de la physique des rayons cosmiques)



The New York Times

VOL. LXXXII...No. 27,370.

December 31, 1932

MILLIKAN RETORTS HOTLY TO COMPTON IN COSMIC RAY CLASH

Debate of Rival Theorists
Brings Drama to Session
of Nation's Scientists.

THEIR DATA AT VARIANCE

New Findings of His Ex-Pupil
Lead to Thrust by Millikan
at 'Less Cautious' Work.

Compton (prix Nobel de physique en 1927 pour son travail sur l'effet Compton, grâce à l'effort de la communauté scientifique internationale) : il propose que les rayons cosmiques sont constitués de particules chargées (protons, électrons, etc.)

à Millikan, (prix Nobel de physique en 1935 pour son travail sur l'effet Compton, grâce à l'effort de la communauté scientifique internationale) : il propose que les rayons cosmiques sont constitués de particules chargées (protons, électrons, etc.)

monde le vérifier...

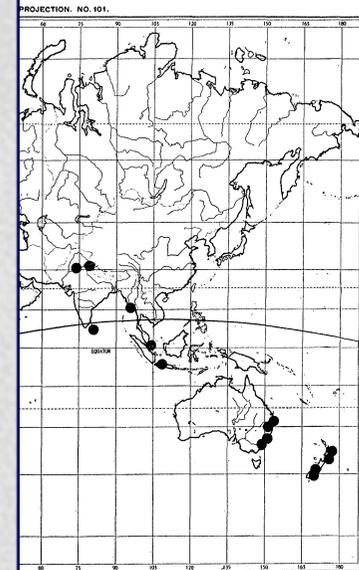


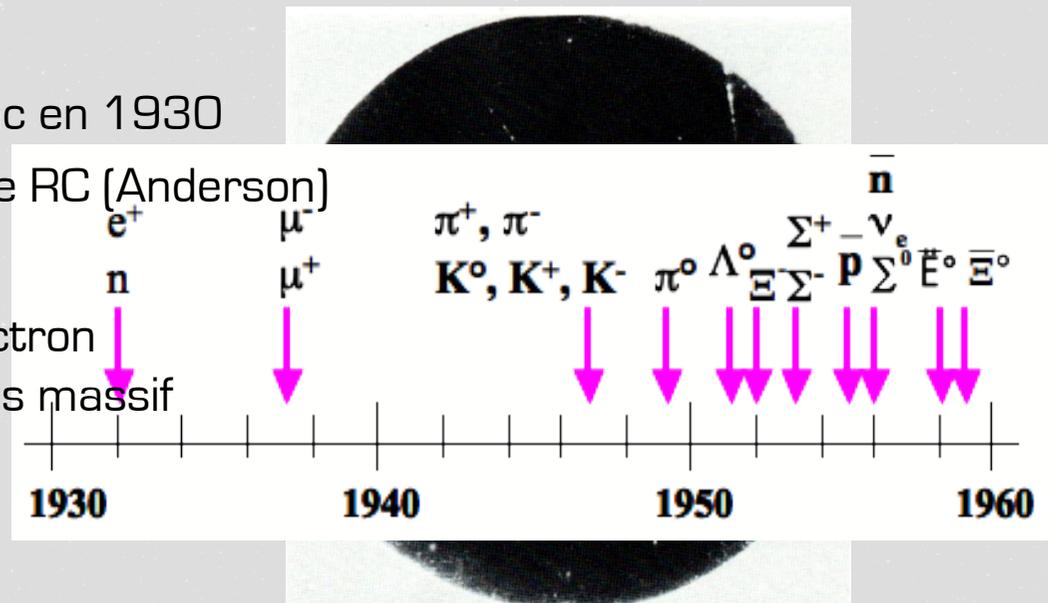
Diagram for observing cosmic rays.

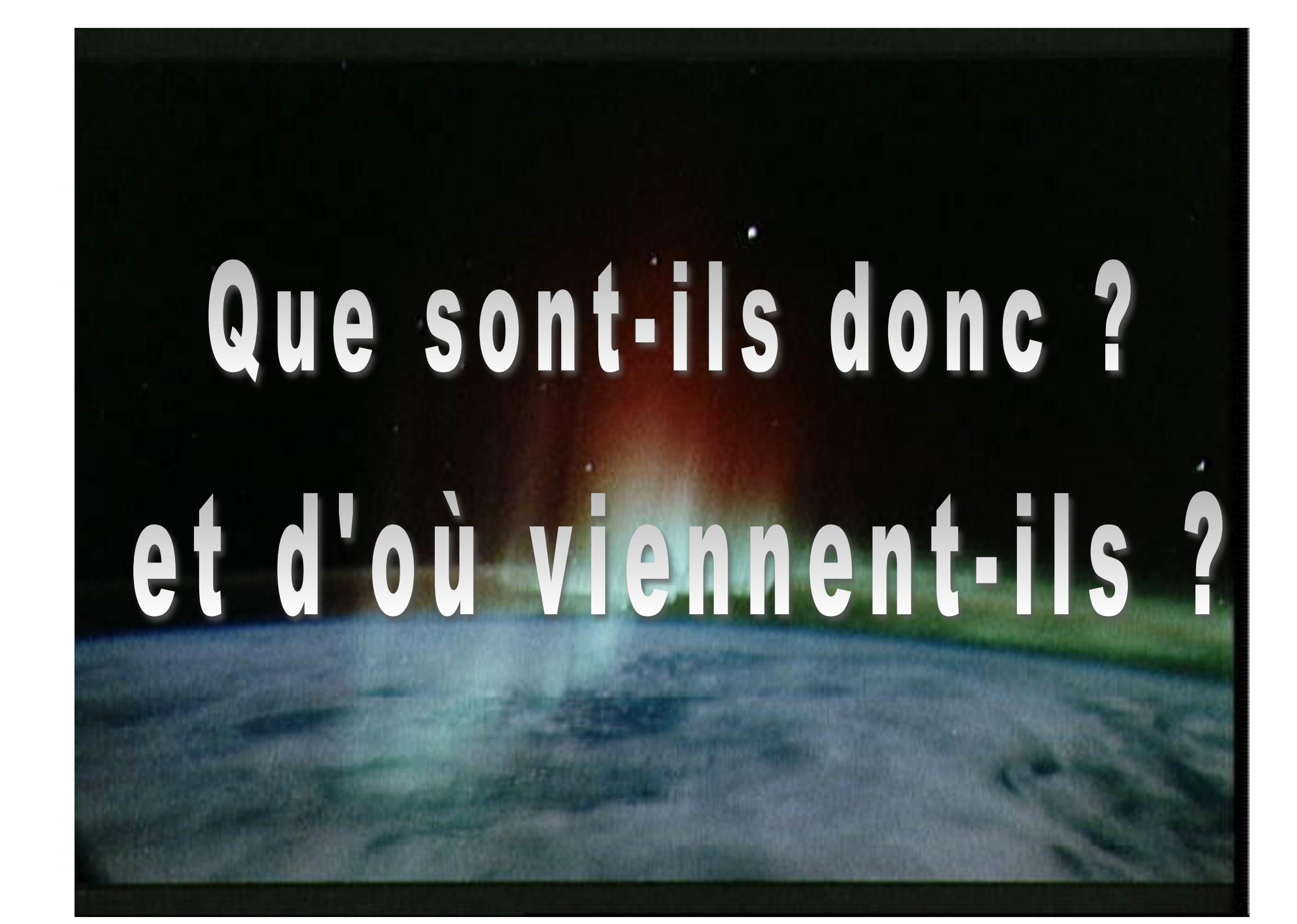
Un siècle d'histoire

• Découverte de nouvelles particules

- Au sol : particules secondaires, issues de l'interaction des rayons cosmiques (RC) avec l'atmosphère.
- Les RC ont ainsi permis la découverte de nombreuses particules \Rightarrow **naissance de la physique des particules**

- 1932 : positron e^+
 - Prédit par P. Dirac en 1930
 - dans une trace de RC (Anderson)
- 1936 : muon μ
 - Semblable à l'électron mais 200 fois plus massif
- 1947 : pion π
 - au pic du Midi



A dark, atmospheric night scene with a road leading into the distance under a starry sky. The road is illuminated by a soft, blueish light, possibly from a street lamp or a low-angle light source. The sky is dark with several bright stars and a faint, colorful nebula or aurora in the background. The overall mood is mysterious and contemplative.

**Que sont-ils donc ?
et d'où viennent-ils ?**

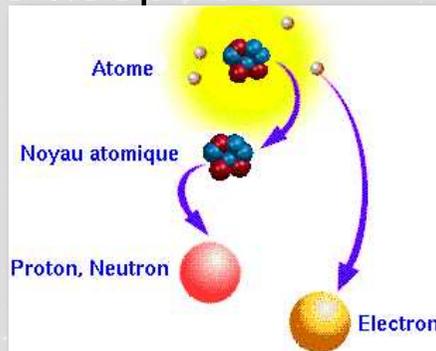
Les rayons cosmiques : qu'est-ce ?

• Rayons cosmiques *primaires*

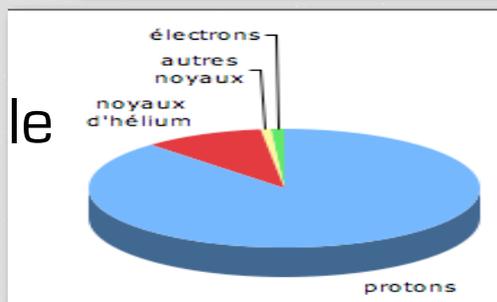
– **Primaires** : particules qui arrivent sur terre venant de l'espace

– Particules stables

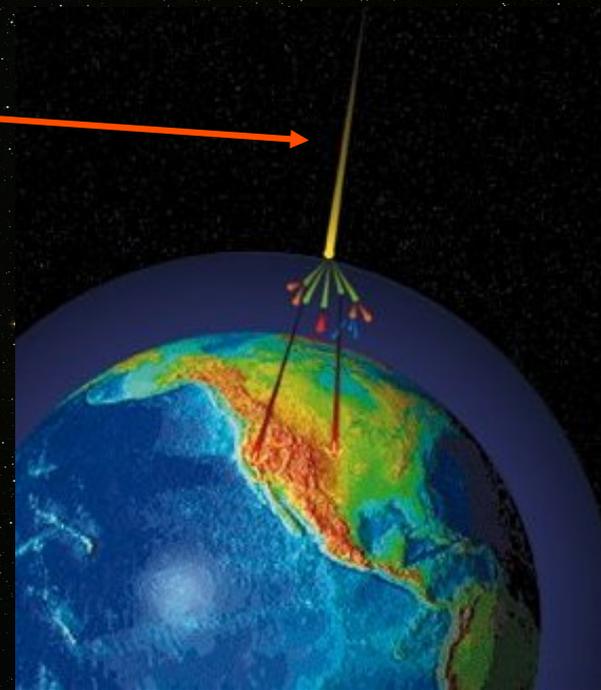
- Protons et autres noyaux d'atomes
- Electrons



~ composition de la matière dans le système solaire



- Photons (« grains » de lumière)
- Neutrinos ν (particules « fantomes »)



cas des neutrinos :

- ~ 64 milliards de ν traversent votre corps / seconde
- un seul arrêté par votre corps pendant toute votre vie

Les rayons cosmiques : qu'est-ce ?

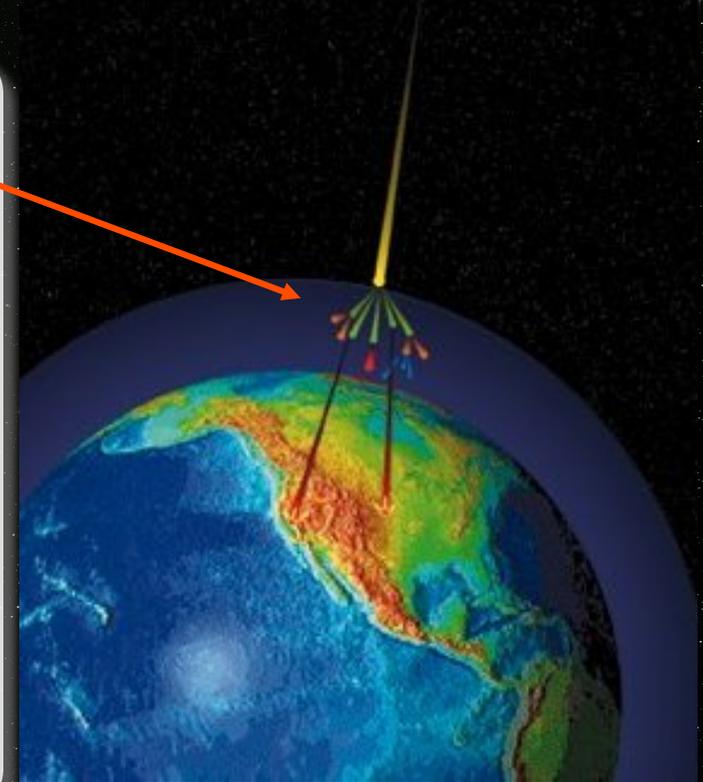
- Rayons cosmiques *secondaires*

- **Secondaires** : particules observées sur terre produites par l'interaction d'un primaire avec des molécules de la haute atmosphère

- ⇒ des électrons, muons, protons, neutrons... créés dans les couches supérieures de l'atmosphère

- particule la plus abondante au niveau de la mer : le muon

- en moyenne un muon /cm²/mn.



- Les particules cosmiques *primaires*

- voyagent dans l'espace interstellaire
 - sur des millions d'années lumière,
 - à des vitesses proches de celle de la lumière

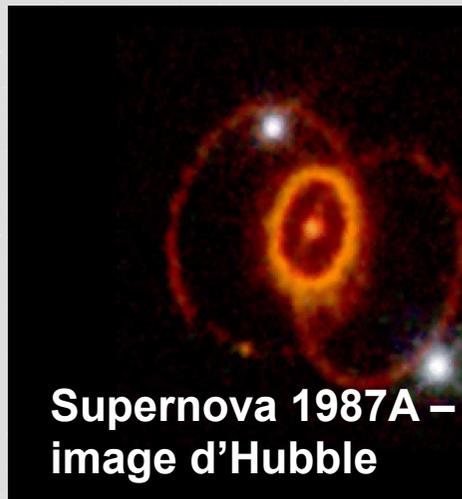
d'où
viennent-
elles ?

D'où viennent les rayons cosmiques ?

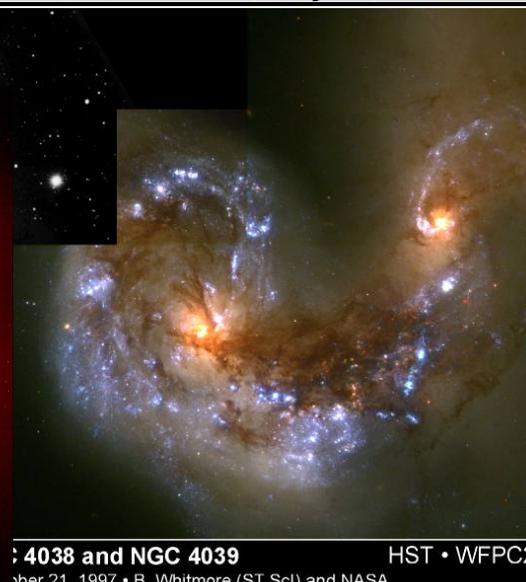
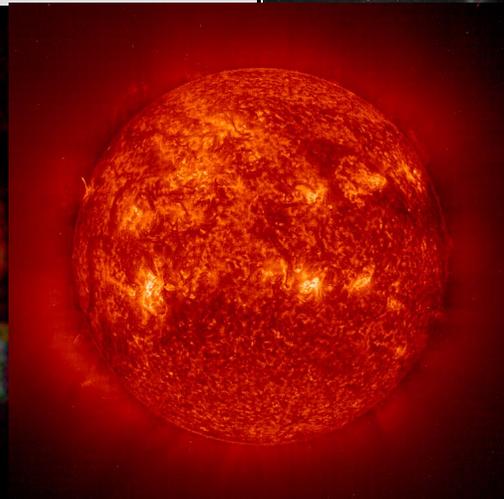
- Origine cosmique !

- Particules produites par des mécanismes astrophysiques plus ou moins violents

- réactions de fusion au coeur des étoiles
- supernovae (effondrement d'étoiles à bout de « carburant »)
- collisions de galaxies



**Supernova 1987A –
image d'Hubble**

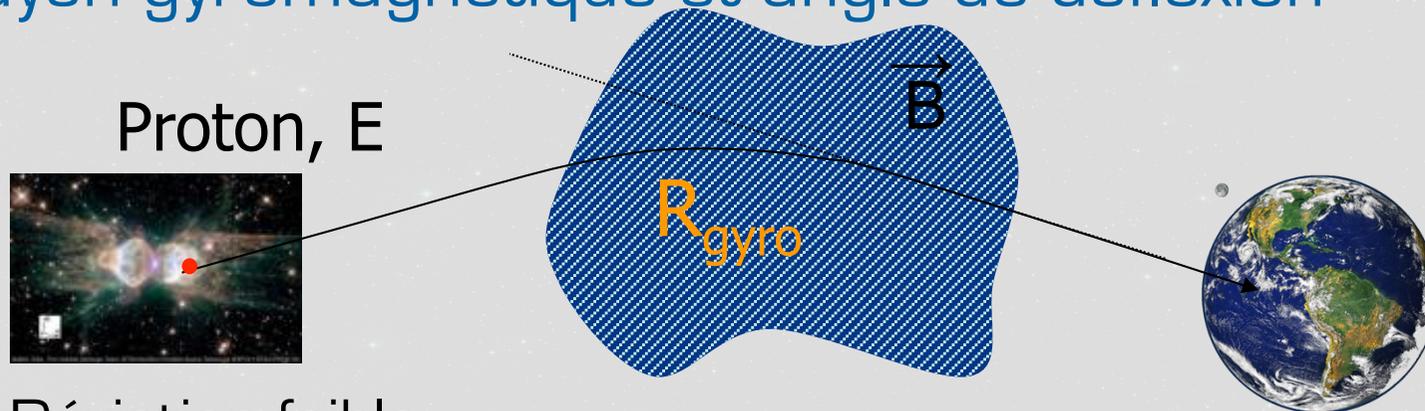


NGC 4038 and NGC 4039 HST • WFPC2
October 21, 1997 • B. Whitmore (ST ScI) and NASA

- phénomènes exceptionnels provoqués par des trous noirs se trouvant au centre de certaines galaxies (noyaux actifs)

D'où viennent les rayons cosmiques ?

- Origine des cosmiques chargés : hypothétique
 - Impossible de repérer la source d'un cosmique chargé du fait qu'il a traversé le champ magnétique de la galaxie (μG), voire le champ magnétique intergalactique (nG) !
- Rayon gyromagnétique et angle de déflexion



- Déviation faible
 - si la zone magnétique est pas trop grande et d'intensité faible
 - si la particule a une énergie « colossale » (par rapport à sa taille)
 - ex : angle de déflexion $< 1^\circ$ pour une énergie $\sim 10^{20}$ eV

Intermède sémantique

Les rayons cosmiques ...

.... sont des particules

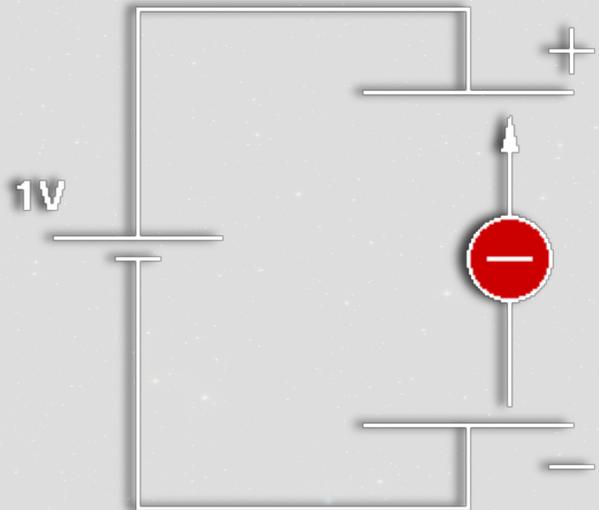
... émises par des astres...

des astroparticules !!!

- L'astroparticule, ou "physique des astroparticules" est un nouveau domaine, à l'intersection de la physique des particules, de l'astronomie et de la cosmologie

Echelle d'énergie

- Energie et infiniment petit



Électron
 $q = 1,602 \times 10^{-19} \text{C}$

$$E = 0,000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 16 \text{ J}$$

- Exprimée en **électron-Volt** (eV) dans le domaine des particules

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

$$1 \text{ J} = 6\ 240\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000 \text{ eV}$$

Echelle d'énergie

- De mille en mille

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

$$1 \text{ 000 eV} = 10^3 \text{ eV} = 1 \text{ keV}$$

$$10^{12} \text{ eV} = 1 \text{ TeV}$$

$$1 \text{ 000 000 eV} = 10^6 \text{ eV} = 1 \text{ MeV}$$

$$10^{15} \text{ eV} = 1 \text{ PeV}$$

$$1 \text{ 000 000 000 eV} = 10^9 \text{ eV} = 1 \text{ GeV}$$

$$10^{18} \text{ eV} = 1 \text{ EeV}$$

- Quelques ordres de grandeurs

- 0,03 eV

- énergie d'une molécule (O_2 , N_2) dans l'air

- 1000 - 15 000 eV , 200 000 eV

- énergie typique d'un électron dans une aurore polaire
- ...d'un rayon X d'une radio dentaire !

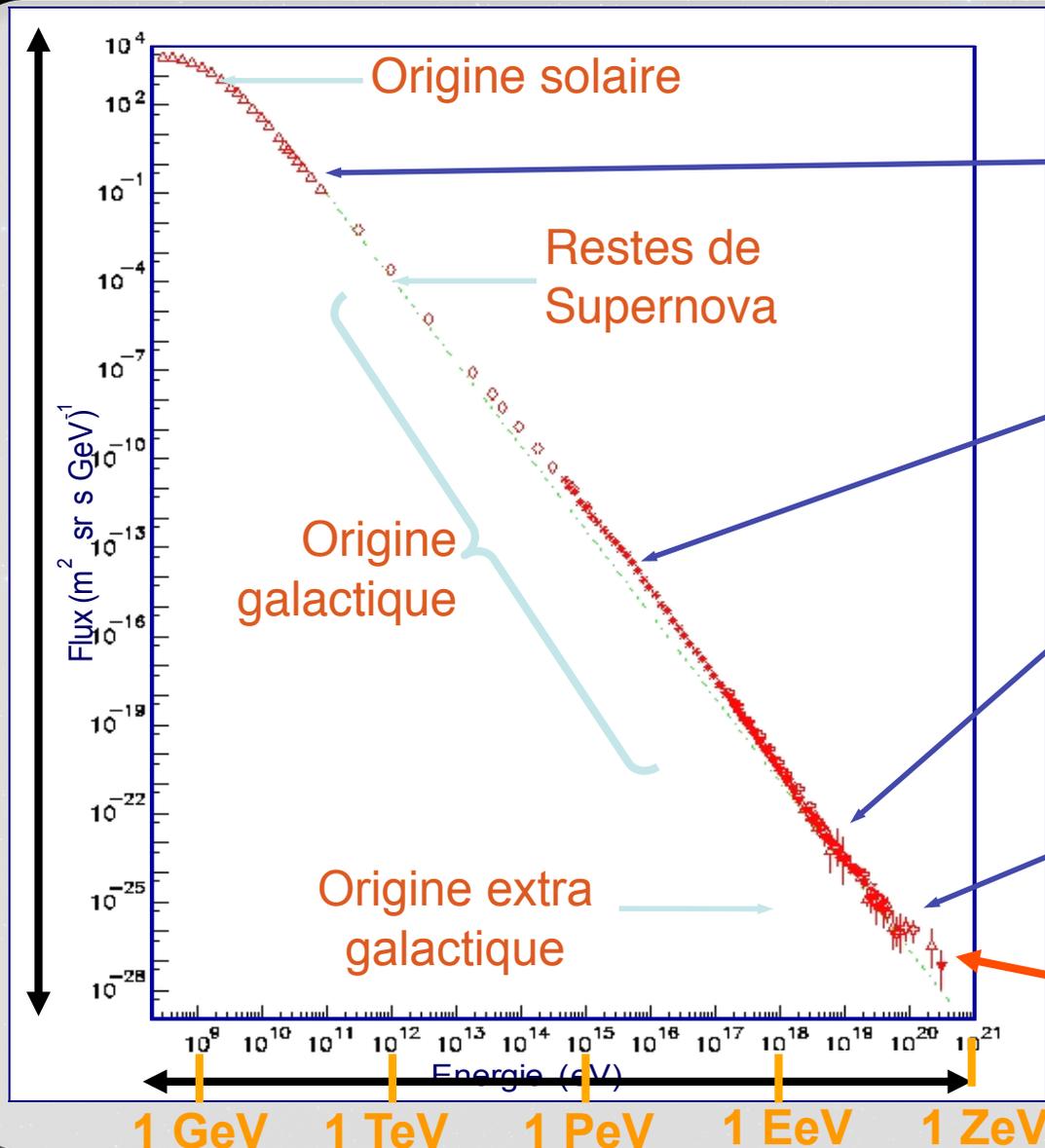
- 1 - 10 MeV

- énergie des particules émises par les éléments radioactifs

- 14 000 GeV (14 TeV)

- collisions proton-proton au LHC (CERN)

Flux des rayons cosmiques



1 particule par m^2 par sec
L'énergie mesurée s'étend sur 12 ordres de grandeur

De la taille d'un cheveu à 100 000 Km

1 particule par m^2 par an

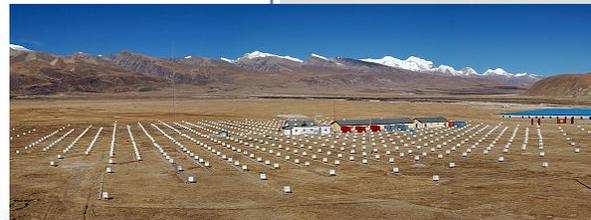
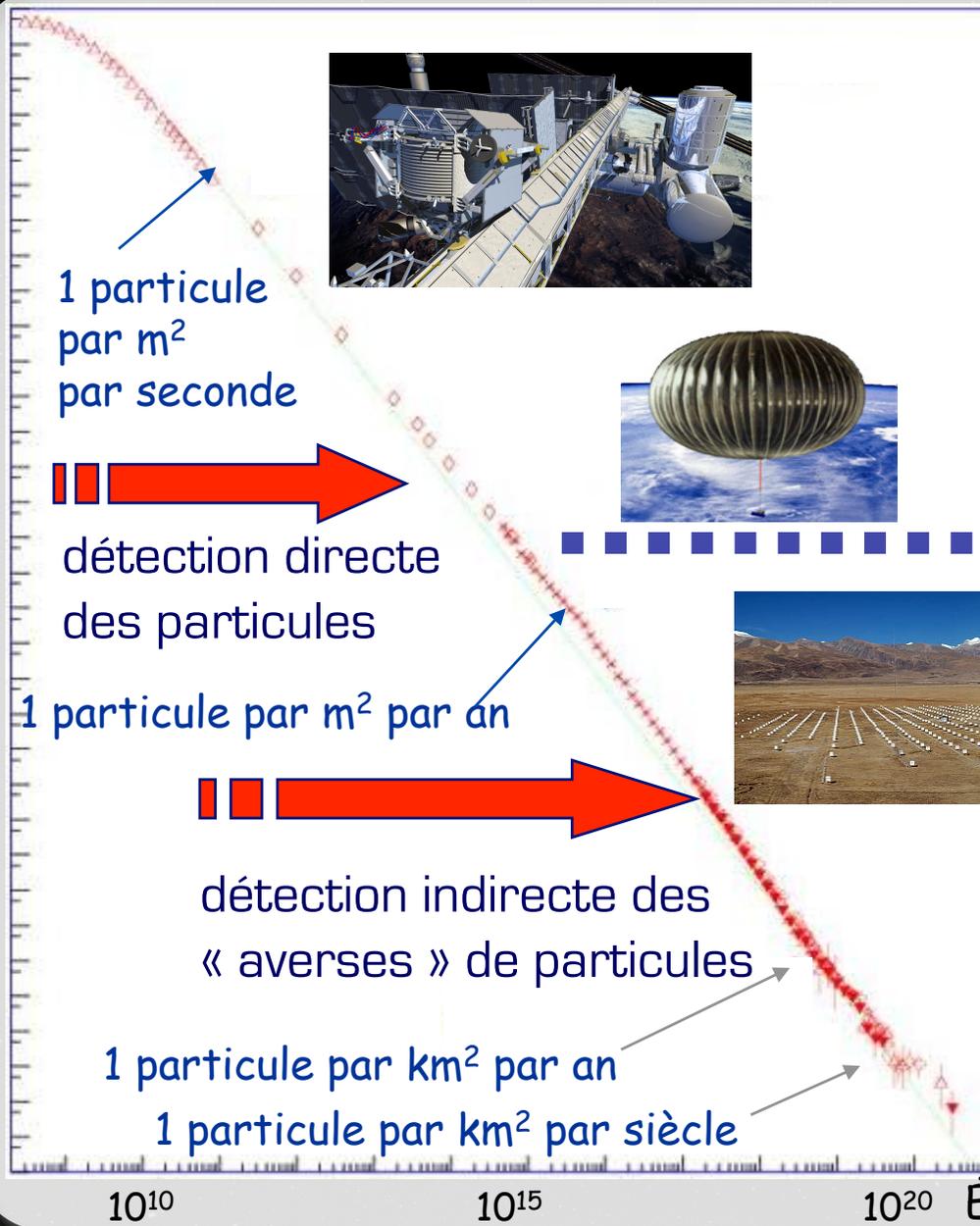
Le flux mesuré s'étend sur 32 ordres de grandeurs :

De la taille d'un cheveu à 10 milliards d'année lumière

1 particule par km^2 par siècle

Energies extrêmes pour des particules

Flux des rayons cosmiques



Satellites,
ballons

Surface des
détecteurs

1 m² (10⁻⁶ km²)

100 000 m²
(0,1 km²)

Détecteurs
au sol

3.10⁹ m²
(3000 km²)

A night sky with a meteor shower and particle tracks. The background is a dark blue night sky filled with stars. In the foreground, there are silhouettes of mountains and a town with lights. A bright star is visible in the upper right, with several meteor trails radiating from it. The text "Des aversees de particules" is overlaid in white, bold, sans-serif font.

Des aversees de particules

Des « averse » de particules

• Découverte d'une pluie céleste

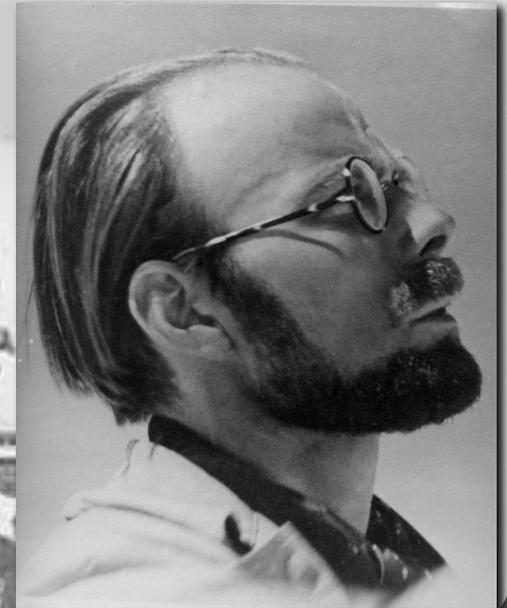
- Les rayons cosmiques les plus énergétiques pénètrent dans l'atmosphère terrestre :

⇒ réaction en chaîne appelée « *gerbe atmosphérique* ».

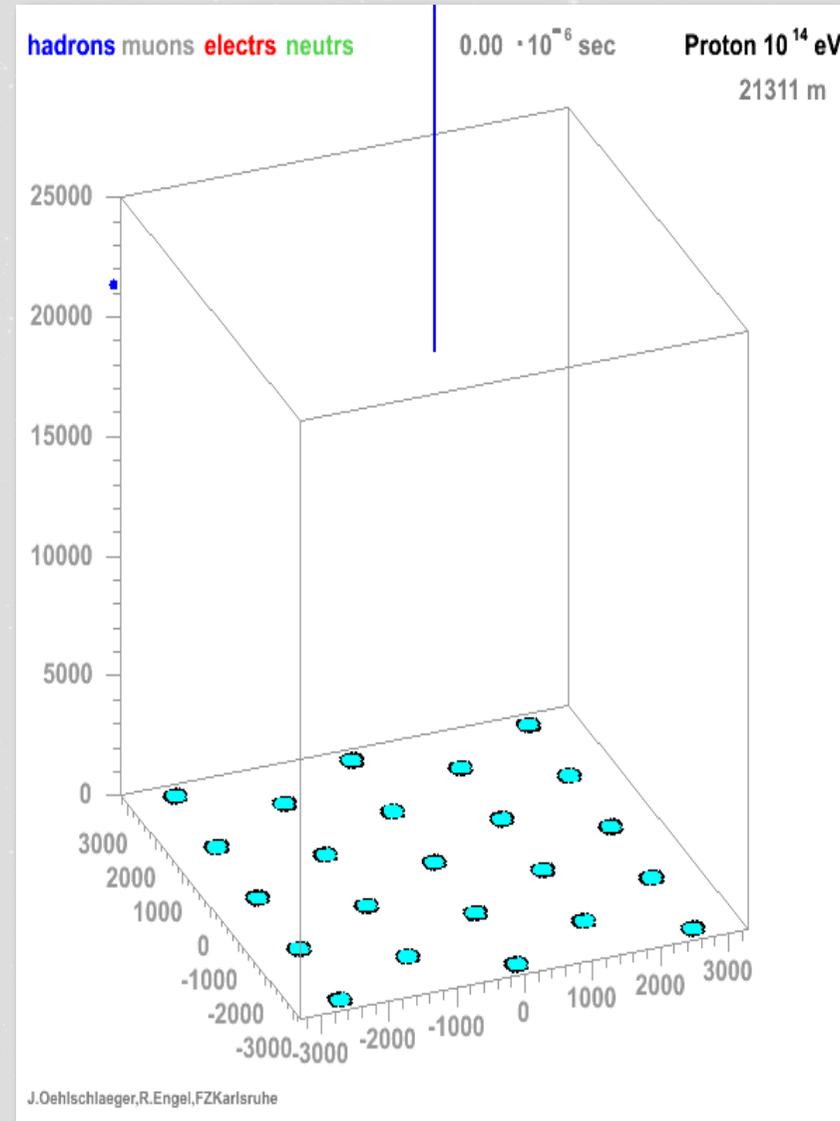
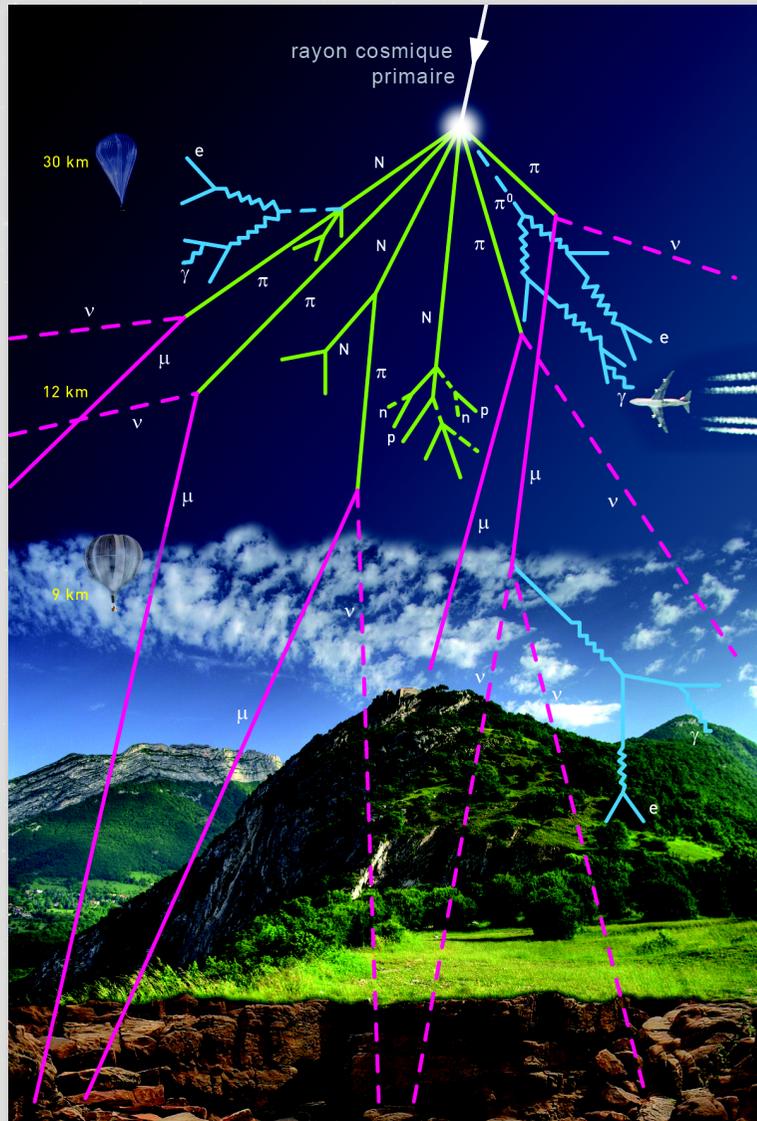
= averse soudaine de particules, issue d'un seul rayon cosmique initial très énergétique.



découvertes par Pierre Auger en 1938, au laboratoire Jean Perrin au Jungfrauoch



Des « averse » de particules



Des « averse » de particules

- Quelle est la particule cosmique primaire à l'origine de la gerbe atmosphérique ?
 - On mesure le plus d'informations utiles possibles concernant cette gerbe de particules
 - On la reconstitue à partir des informations collectées



une sorte de puzzle



**But : carte
d'identité de la
particule primaire**

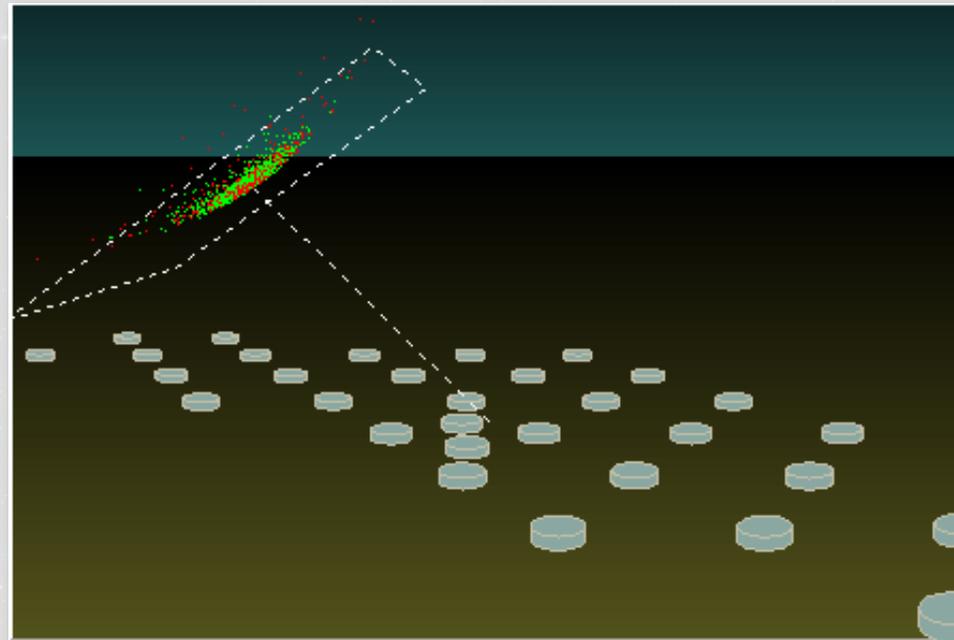
- Nom
- Origine
- Energie

Des « averse » de particules

- Observation des gerbes par la détection des particules au sol

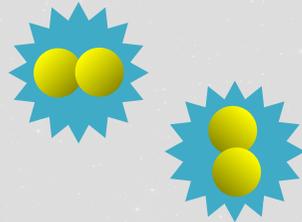
- Nécessaire de couvrir une grande surface
- Réseau de détecteurs de particules (échantillonnage)

- Type de détecteurs utilisés :
scintillateurs,
détecteurs cherenkov



Des « averse » de particules

- Observation des gerbes par la mesure de la lumière de fluorescence

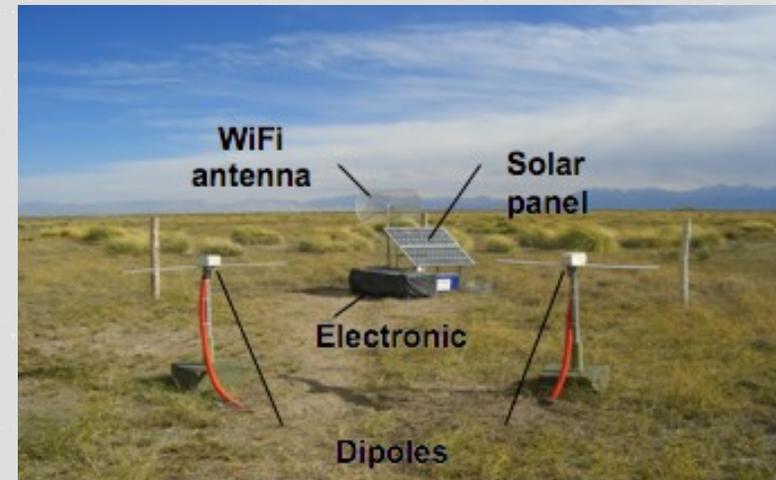


particules chargées de la gerbe
↓
excitation des molécules d'azote
de l'atmosphère.
↓
désexcitation par fluorescence

- 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 \Leftrightarrow énergie du RC primaire

Des « averse » de particules

- Observation des gerbes par la détection des ondes radio
 - Prédiction théorique des 1962, 1^{er} tests pour la détection des gerbes de rayons cosmiques à partir de 2000
 - Technique de détection avec des antennes en phase de R&D
 - Faible coût et 100% cycle utile
 - 1^{er}s résultats prometteurs, vers caractérisation du primaire



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

Rayons cosmiques aux énergies extrêmes

Rayons cosmiques aux énergies extrêmes

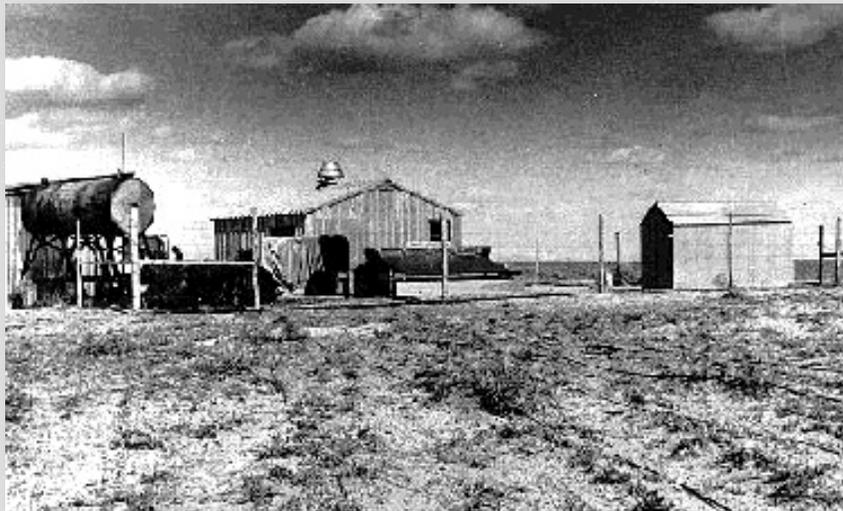
- Les premières détections

- Volcano Ranch (US, 59-63)

- Premier réseau géant de détecteurs

- 19 détecteurs répartis sur 8 km²

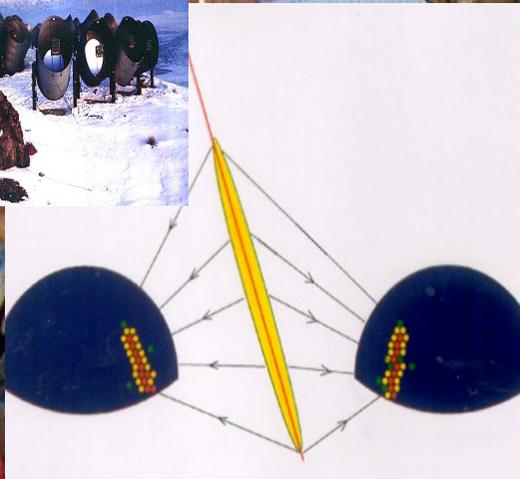
- Compteurs en plastique scintillant de 3.3 m²



1 rayon cosmique d'énergie supérieure à 10^{20} eV

Rayons cosmiques aux énergies extrêmes

- 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



Rayons cosmiques aux énergies extrêmes

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

Volcano Ranch
(59-63) 8 km²

Haverah Park
(67-87) 12 km²

Yakutz
(70-95)

HiRes
Fly's eyes
(81-92)

AGASA

10^{20} eV = 100 000 000 000 000 000 000 000 = 16 J !!
Une énergie macroscopique

Sugar
(68-79)

Observatoire
Pierre Auger
3000 km²

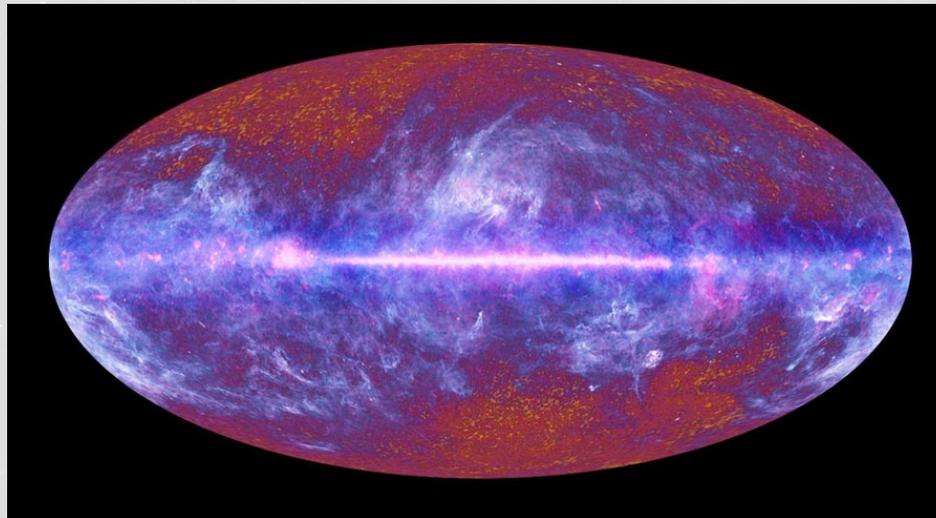
**Événement *extrêmement rare*
de l'ordre de 1 /km²/siècle**



Origine et propagation

Origine et propagation des RCEE

- Propagation : interaction des RC avec le CMB (ou rayonnement fossile à 2,7°K)
 - L'Univers est rempli de photons très froids (peu d'énergie) en grand nombre ($400/\text{cm}^3$)
 - Ces photons sont inoffensifs, car d'énergie très faible...
... à moins de se jeter sur eux à toute allure !!!



Origine et propagation des RCEE

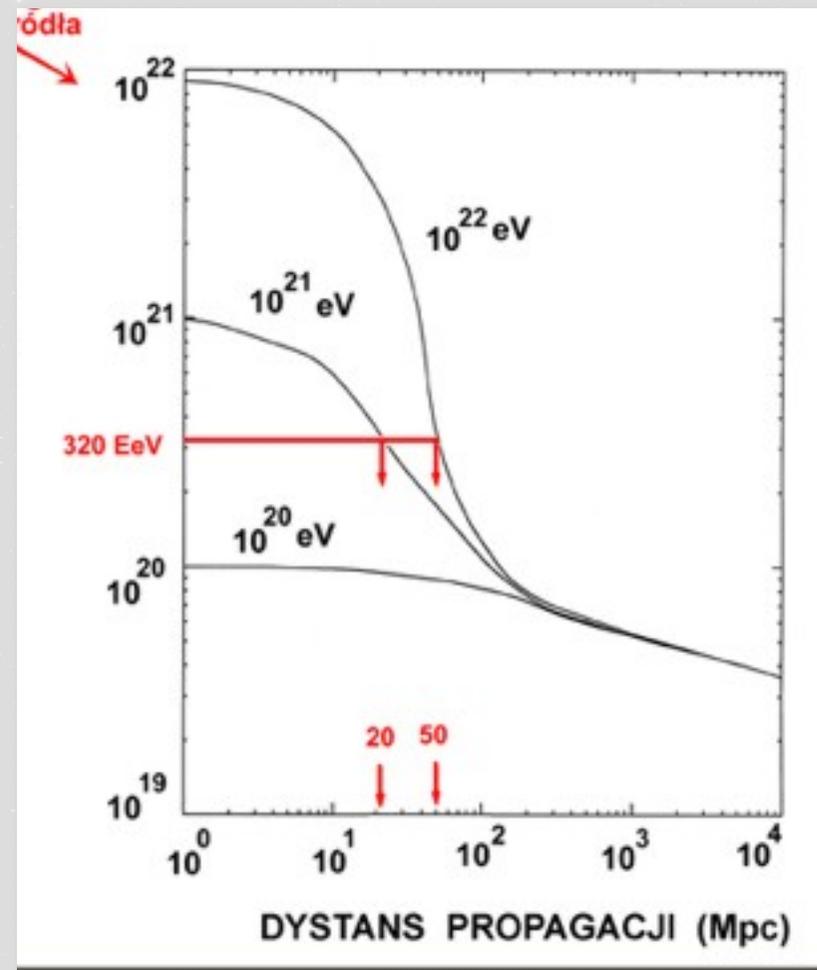
- Effet GZK

- Brutalité de la « coupure GZK »:
- à partir de 100 Mpc, toutes les énergies sont ramenées sous 10^{20} eV

- Horizon GZK

- Si des protons de ultra hautes énergies sont observés les sources éventuelles ne peuvent pas être trop éloignées

- Interactions plus complexes pour les noyaux

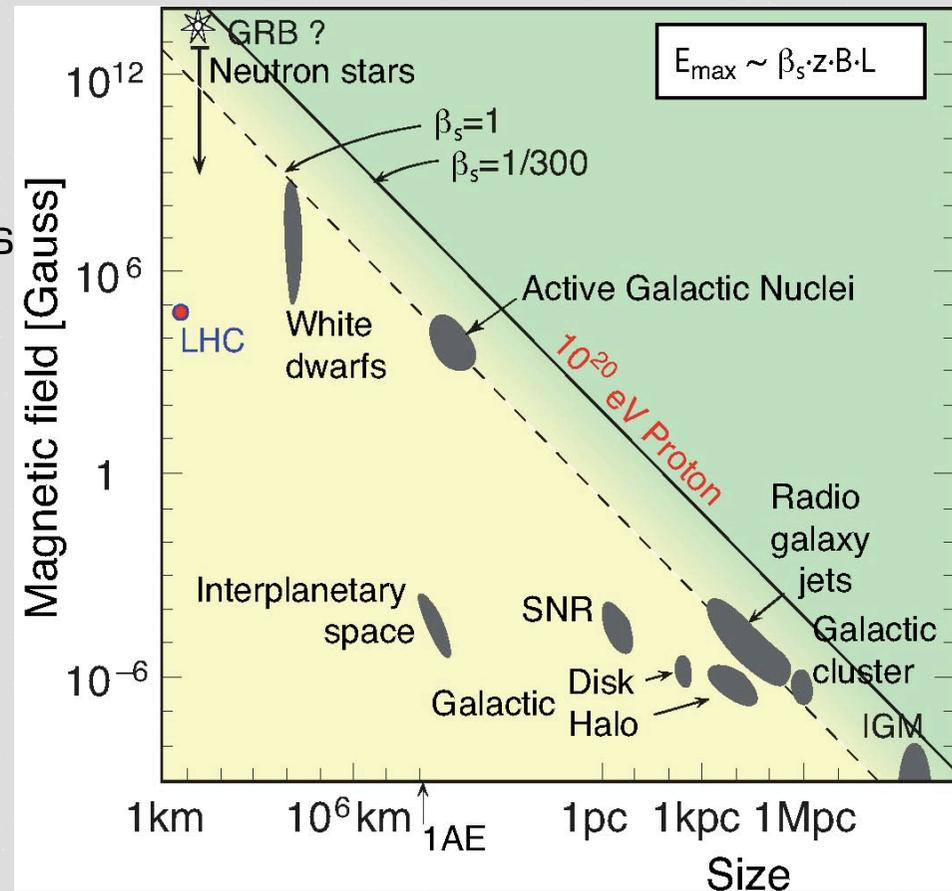


Origine et propagation des RCEE

• Zevatrons, sources de RCEE ?

- Accélération progressive des particules chargées
- Energies suffisantes pour nous parvenir aux énergies mesurées malgré le « freinage » par le fond diffus (CMB)

⇒ Le site accélérateur doit vérifier une certaine contrainte



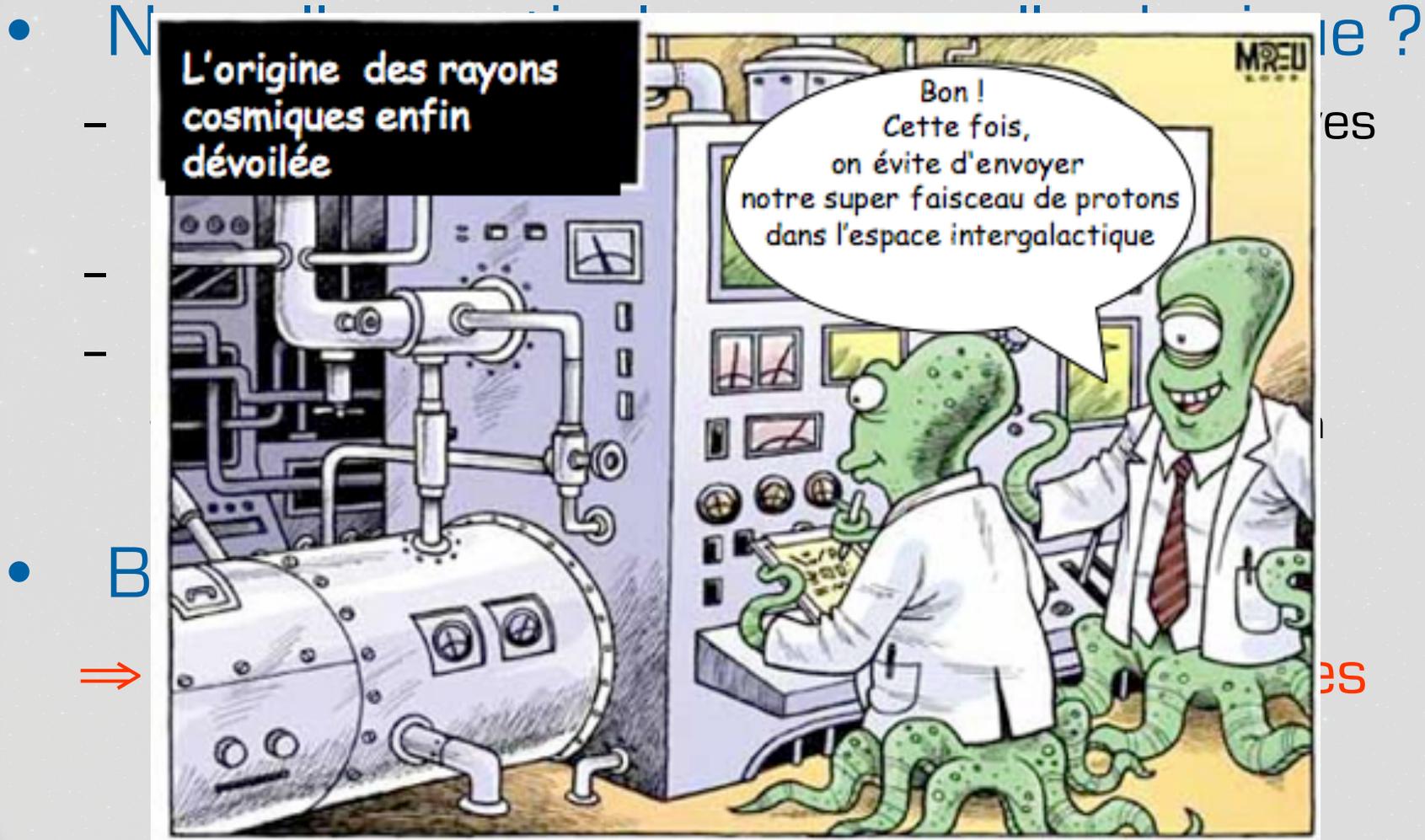
Origine et propagation des RCEE

- Les noyaux actifs de galaxie
- Le centre de certaines galaxies est occupé par un **trou noir** de très grande masse
- Il peut jouer le rôle d'une **machine accélératrice** très puissante.

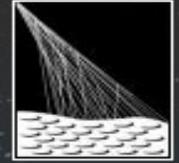


- Galaxies caractérisées par l'émission d'un jet de particules énergétiques partant du centre.
- À des centaines d'années-lumière du centre, ces jets frappent la matière interstellaire créant des « **lobes** » caractéristiques des radio-galaxies

Origine et propagation des RCEE



Pierre Auger Observatory
studying the universe's highest energy particles



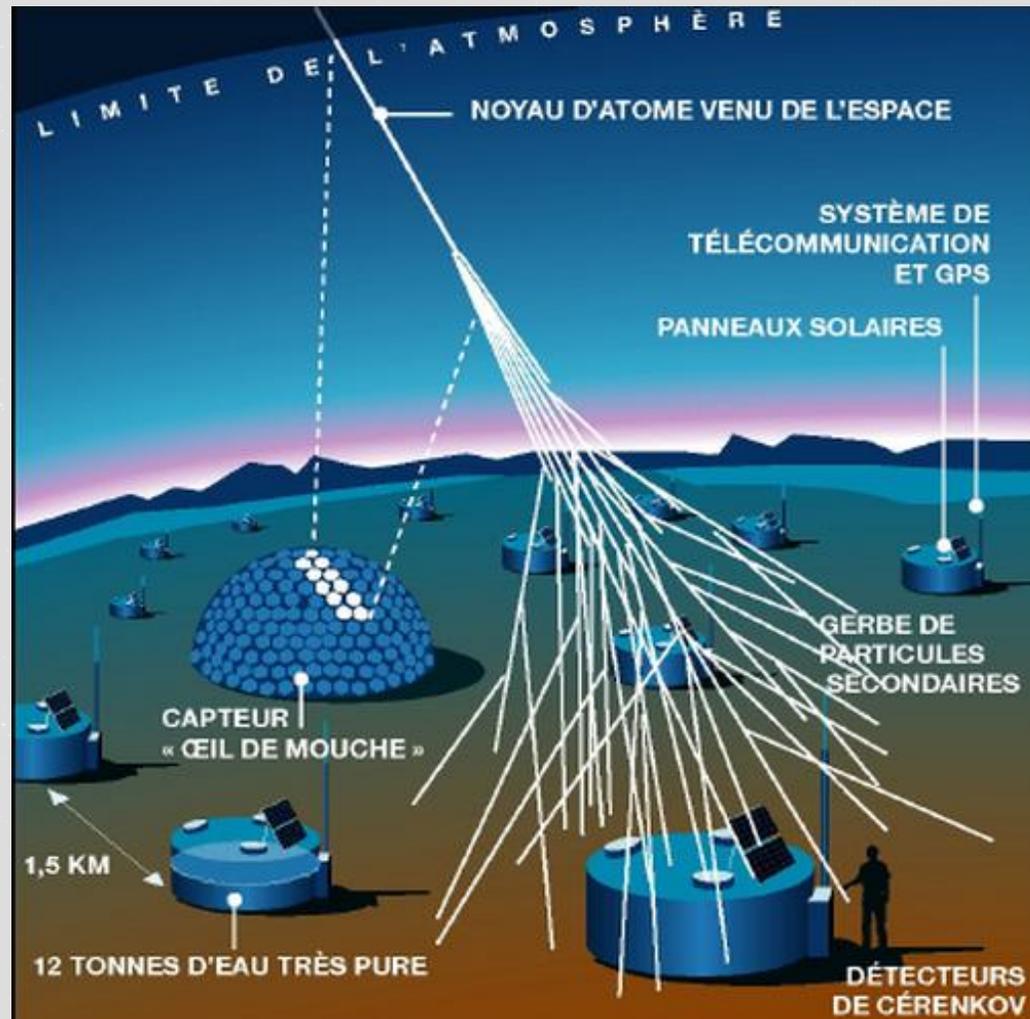
L'Observatoire

Pierre Auger

L'Observatoire Pierre Auger

- Détection « hybride »

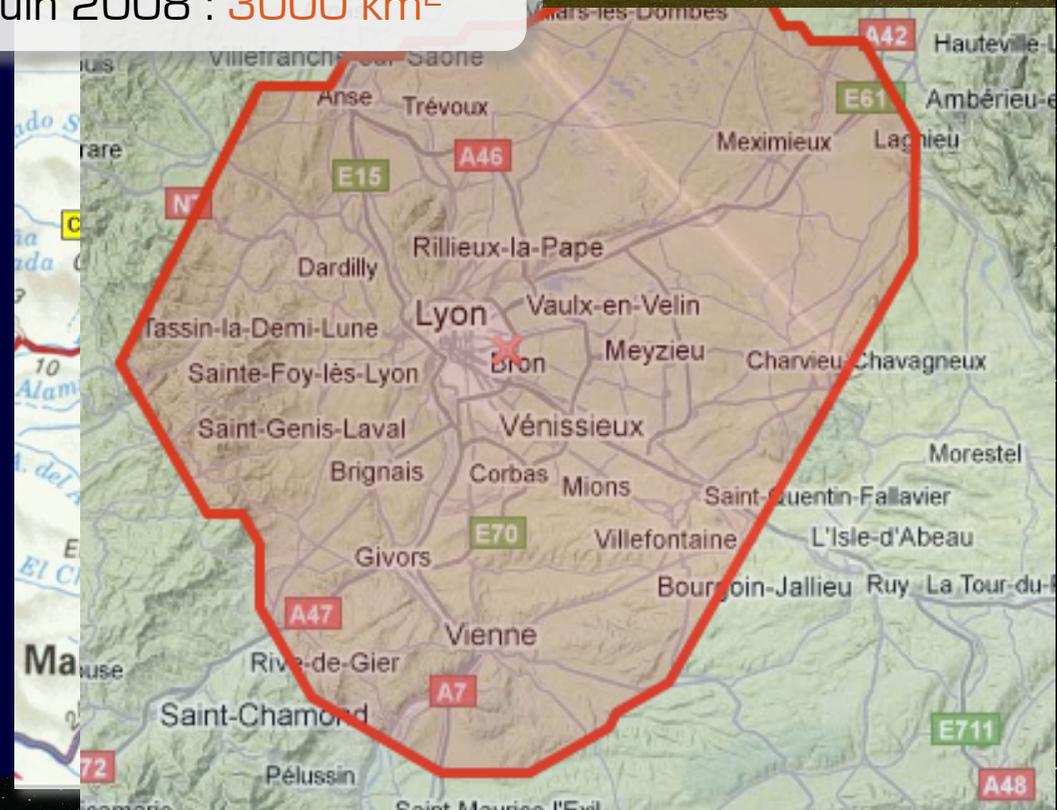
- 3000 km²
- 1600 détecteurs, espacés de 1,5 km
- 24 télescopes de fluorescence dans 4 points



L'Observatoire Pierre Auger

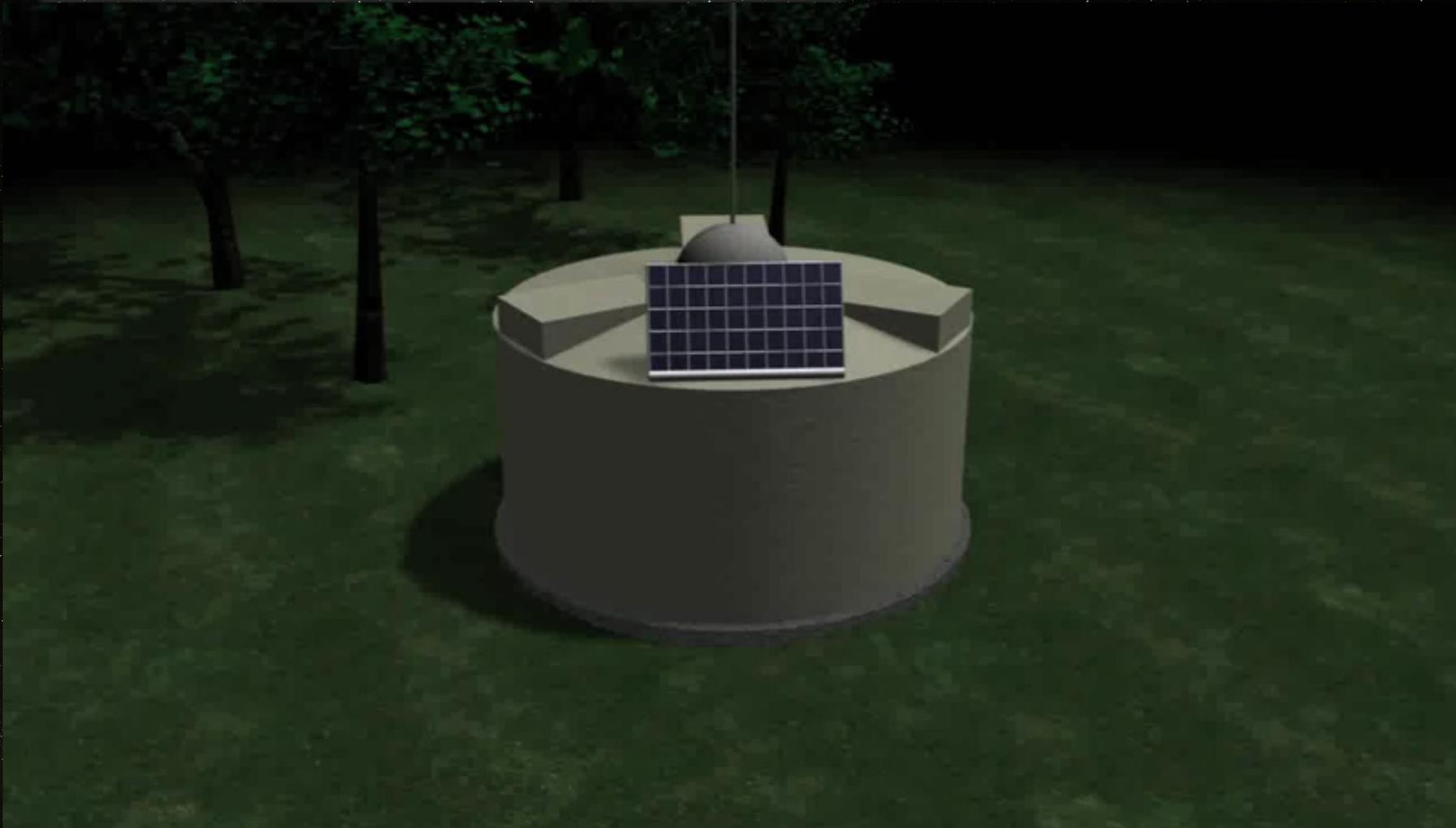
- Site sud : pampa Amarilla, Argentine

- Conception 1992, design 1995
- Choix site 1999, début construction 2000
- 1ere prise de données : Janvier 2004
- Déploiement terminé en juin 2008 : 3000 km²



L'Observatoire Pierre Auger

- Les cuves du réseau au sol



L'Observatoire Pierre Auger

Vue de l'expérience.
Voyez-vous les cuves ?



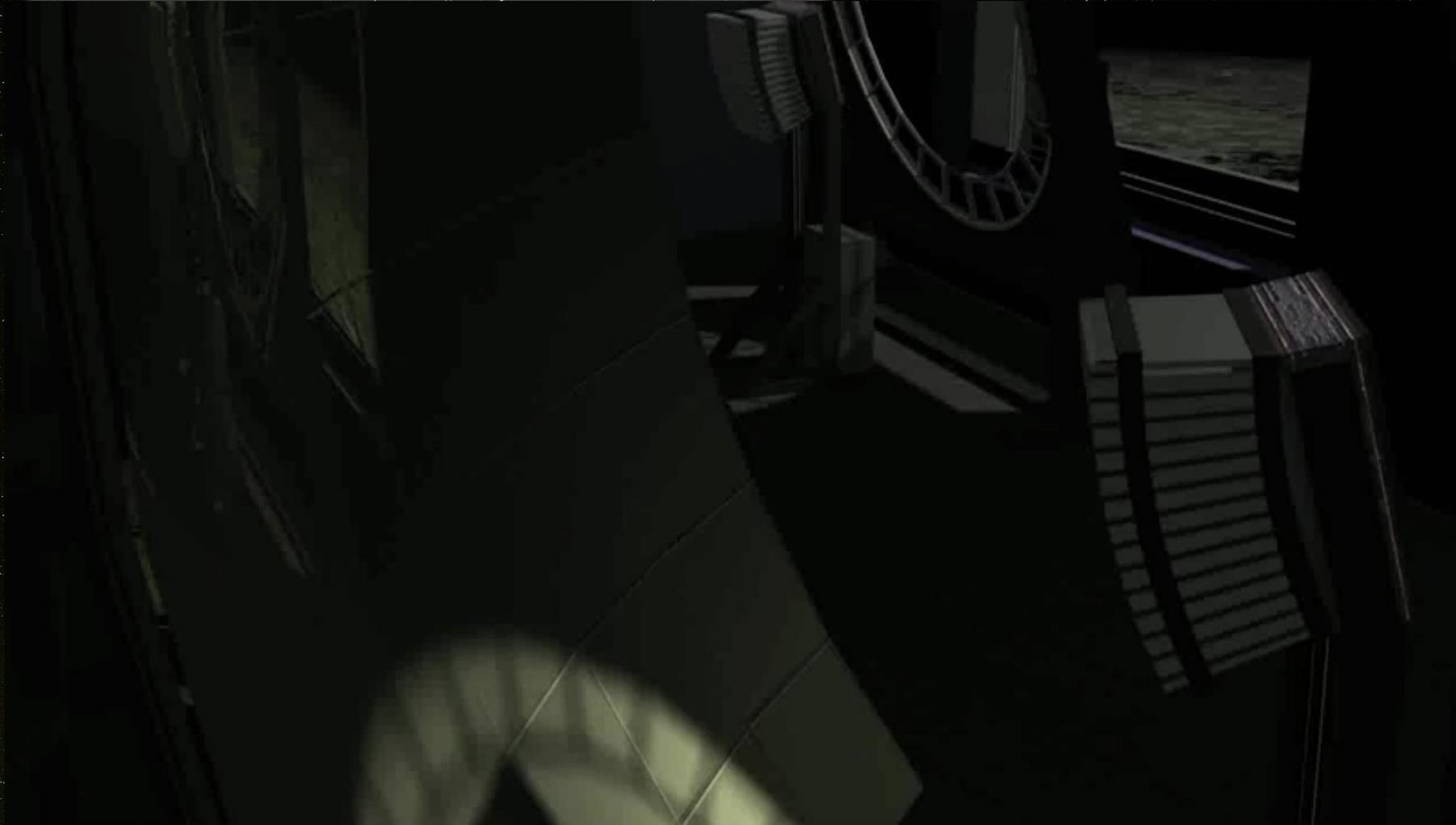
L'observatoire Pierre Auger

- Télescope de fluorescence



L'observatoire Pierre Auger

- Télescope de fluorescence



L'Observatoire Pierre Auger

Vue aérienne d'une des stations de détection de la fluorescence
[« Los Leones »]



Des visiteurs curieux



Des « squatters »



Un environnement pas toujours facile



Un environnement pas toujours facile

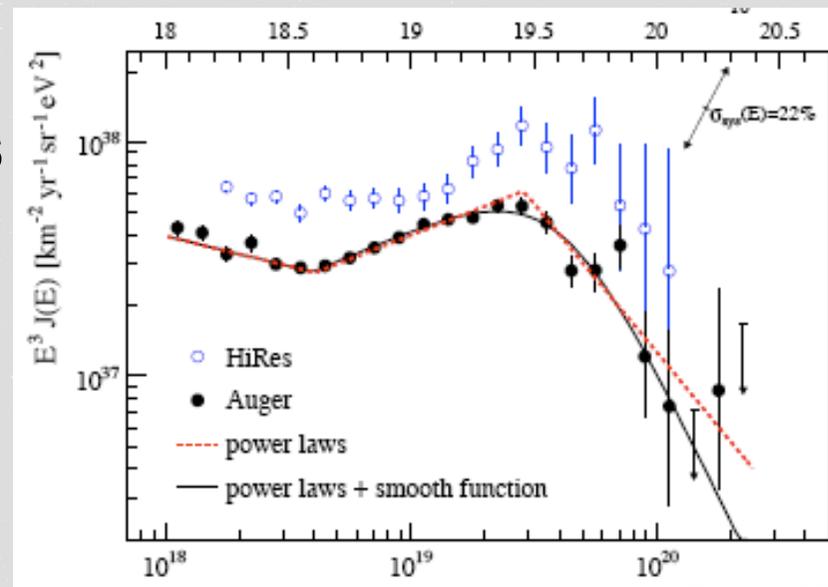




**Des résultats fondamentaux
et des interrogations**

Des résultats fondamentaux

- Détection de rayons cosmiques d'ultra haute énergie
 - De l'ordre d'une centaine d'événements au dessus de $5 \cdot 10^{19}$ eV
- A très haute énergie, le flux s'atténue plus vite
 - Preuve que les particules sont freinées (effet GZK) ou
 - qu'on a atteint les limites des sites accélérateurs !



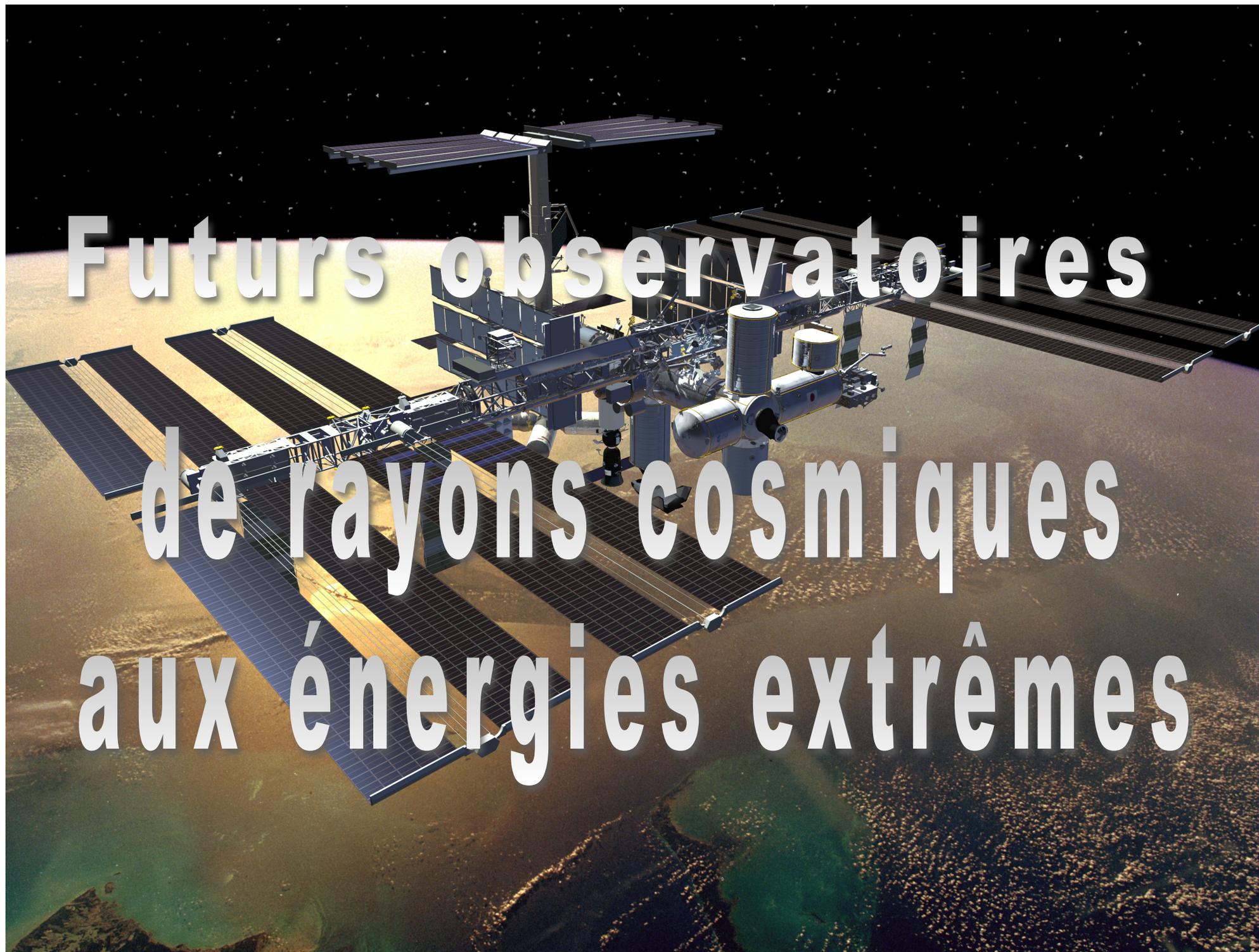
Des résultats fondamentaux

- L'étude du développement des gerbes atmosphériques renseigne sur la nature du rayon cosmique
 - Interprétation à partir de modélisation des interactions à très haute énergie
 - On manque de données mesurées à de telles énergies
 - Avec l'augmentation de l'énergie, tendance vers des noyaux plus lourds
 - Ou alors les interactions entre particules sont différentes de ce qu'on croit dans ces domaines d'énergie inexplorés
 - Les résultats de mesures au LHC permettront sans doute d'avoir un début de réponse

Des résultats fondamentaux

- A très haute énergie, les directions d'arrivées ne sont pas uniformément réparties
 - Preuve que les **particules sont émises par des sources**
 - En corrélation avec des noyaux actifs de galaxies
 - En apparente contradiction avec la tendance observée de noyaux lourds (trajectoires très déviées dans les champs magnétiques)





Futurs observatoires

de rayons cosmiques

aux énergies extrêmes

Futurs observatoires de RCEE

- Extension et amélioration de l'Observatoire Pierre Auger en Argentine

- Couvrir une plus grande surface
- Développer de nouveaux détecteurs (ondes radio)

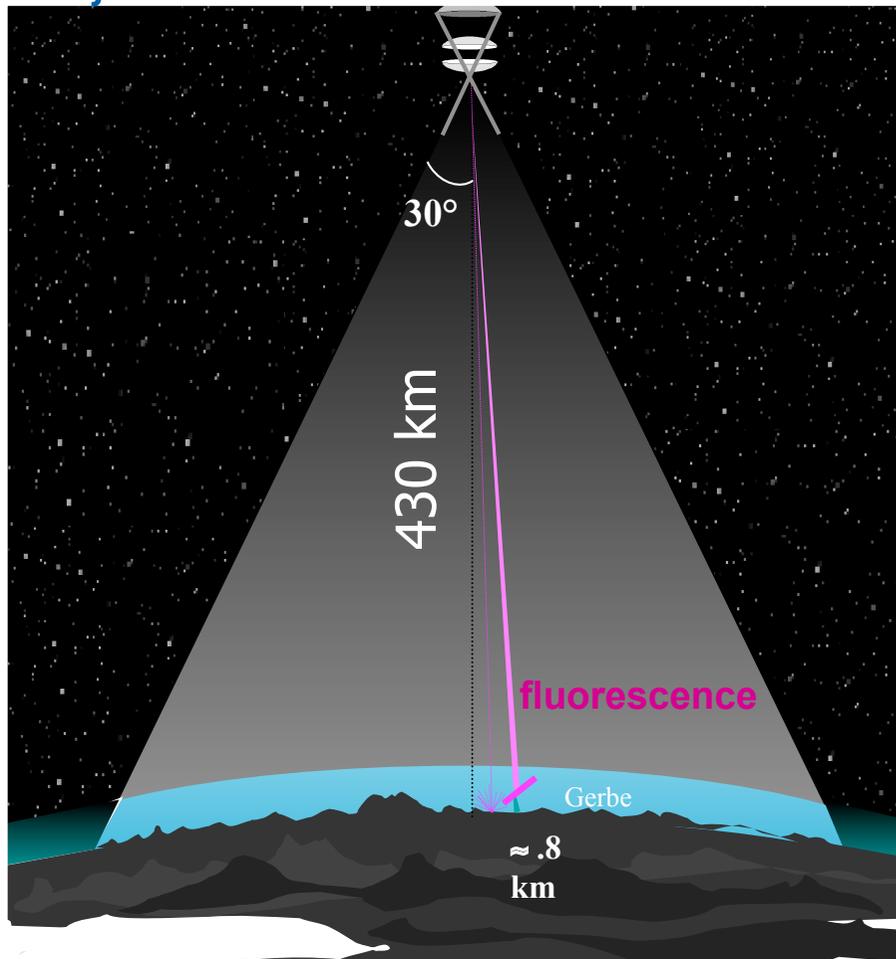


- Observatoire Pierre Auger dans l'hémisphère Nord

- Plus grande surface pour détecter plus de rayons cosmiques de très haute énergie
 - **Identification et caractérisation des sources astrophysiques**
- Nouvelle technologie (détection radio)
- Couverture du ciel visible dans l'hémisphère Nord

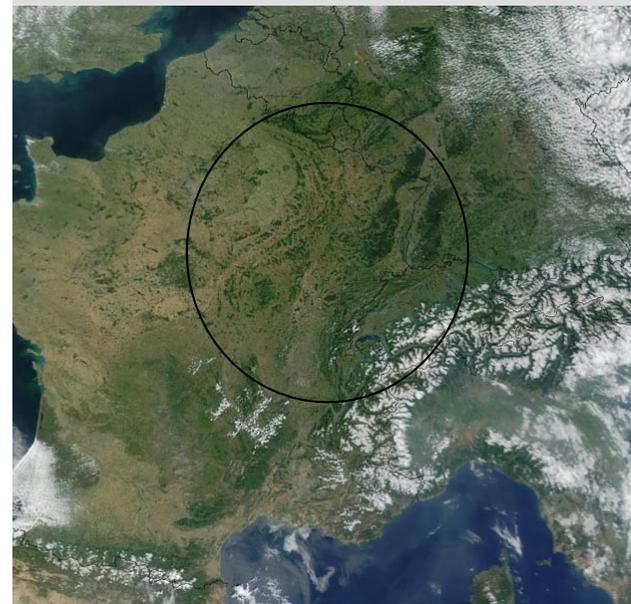
Futurs observatoires de RCEE

- Détection depuis l'espace
projet JEM-EUSO



- Grandes surface
d'observation et masse
de cible :

- 200000 km²
- 2 10¹² tonnes
d'atmosphère

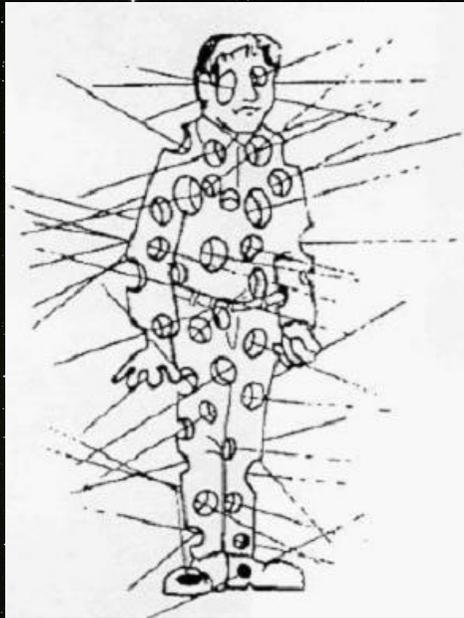


Les rayons cosmiques sont des messagers du cosmos, qu'ils viennent de notre galaxie ou de galaxies plus ou moins proches.

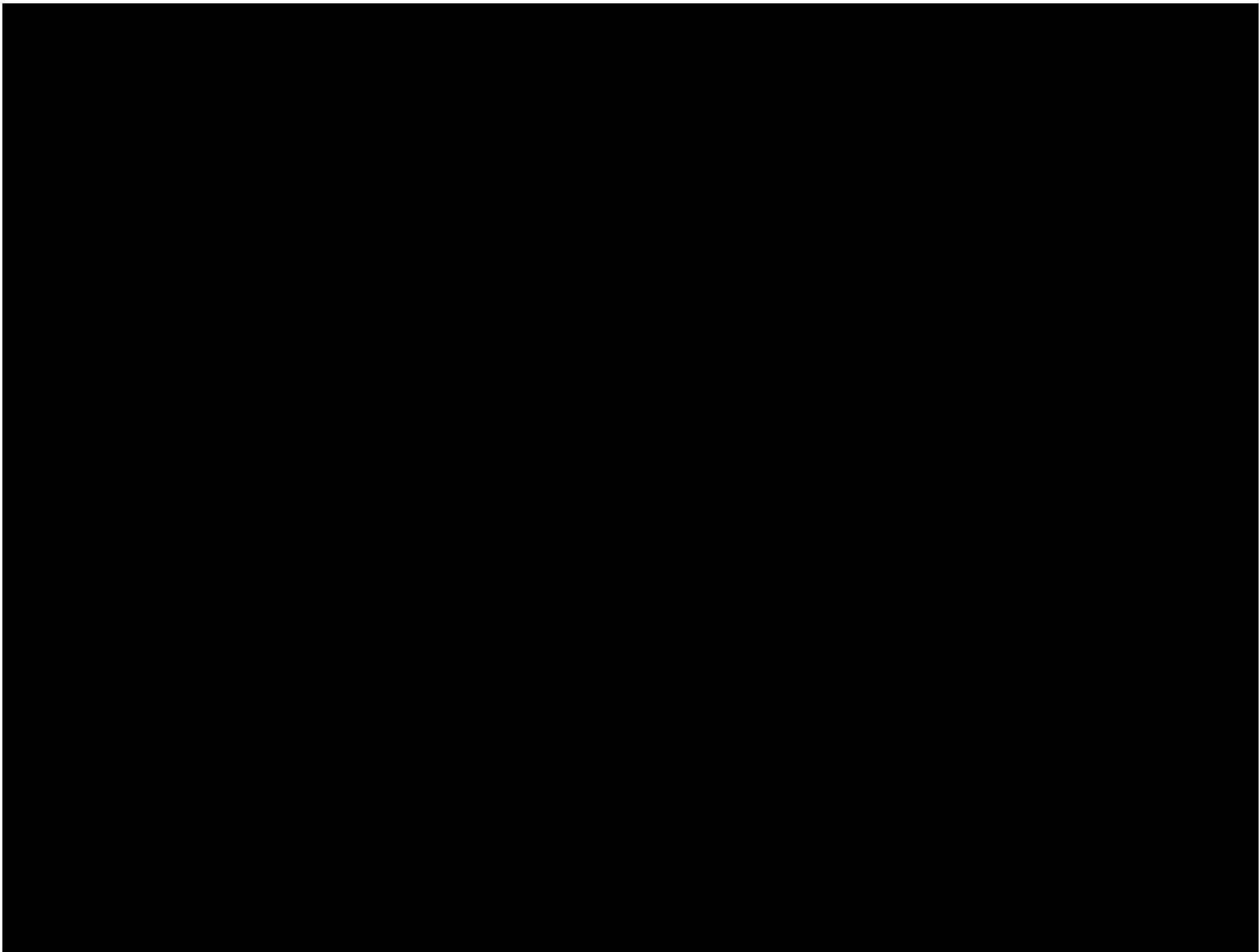
Ils portent en eux les réponses à des questions fondamentales de physique et d'astrophysique

- Les rayons cosmiques les plus énergétiques n'ont pas encore livré tout leurs secrets sur les phénomènes les plus violents de l'univers
- On progresse dans ce domaine de recherche grâce à l'observatoire Pierre Auger, véritable fenêtre sur l'Univers Extrême

Je vous remercie de votre
ATTENTION !



Pendant cette conférence vous
avez été la cible de plus de
100000 rayons cosmiques



Vers de nouveaux moyens de détection

• ECRINS

3 détecteurs, espacés de 22 m

- projet ECRINS (high Energy Cosmic Rays in School)
- ⇒ but : initier les lycéens
 - aux domaines de physique
 - aux techniques expérimentales liés à la détection des RC de haute énergie.
- Installé au lycée Marie Curie d'Echirolles en 2005, puis au Chevalet



Détection de RC d'énergie de 10^{15} eV environ

Ondes, particules et échelle d'énergie

• Unités d'énergie

- Calorie : sur les produits alimentaires (kcal)
 - Ex : 1 cuillère à café de Nutella = 80 kcal
- kilowatt-heure (kWh) : sur les factures EDF-GDF
 - Entre 0,10 et 0,13 € le kWh (mesurée en unité de temps)
- **Joule** : en Physique
 - 1 calorie = 4,186 J
 - 1 Watt-heure (Wh) = 3600 Joules

• Energie

force (N) x longueur (m)



puissance (W) x temps (s)



Ondes, particules et échelle d'énergie

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

Limite (?) technologie humaine

Synchrotron
(LHC : 14 TeV)

Synchrocyclotron

Accélérateur électrostatique
Réacteur nucléaire

Tube TV

Pile à 1 Euro

10^{21}

10^{18}

10^{15}

10^{12}

10^9

10^6

10^3

1

ZeV (zeta)

EeV (exa)

PeV (peta)

TeV (tera)

GeV (giga)

MeV (méga)

keV (kilo)

eV
(électron-volt)

Rayon cosmique le plus énergétique observé

Noyaux actifs de galaxies

Étoiles à neutrons

Supernovae

particules émises par les éléments radioactifs

électron dans une aurore polaire

molécule dans l'air

γ

X

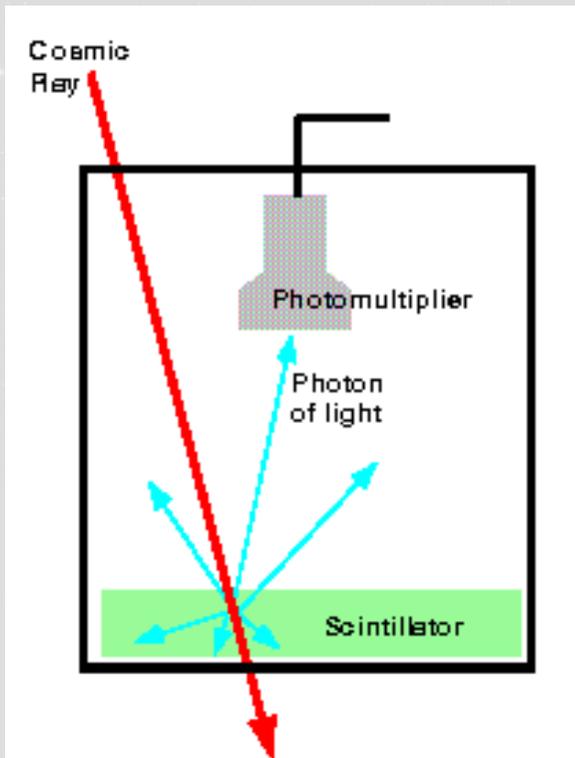
Visible

IR

Comment détecter les RCHE ?

• Scintillateurs

- détecteurs à scintillation
- faits dans un plastique spécial, scintillant.



particule chargée traverse le détecteur
→ excitation d'une molécule du plastique scintillant
→ désexcitation en émettant des photons.

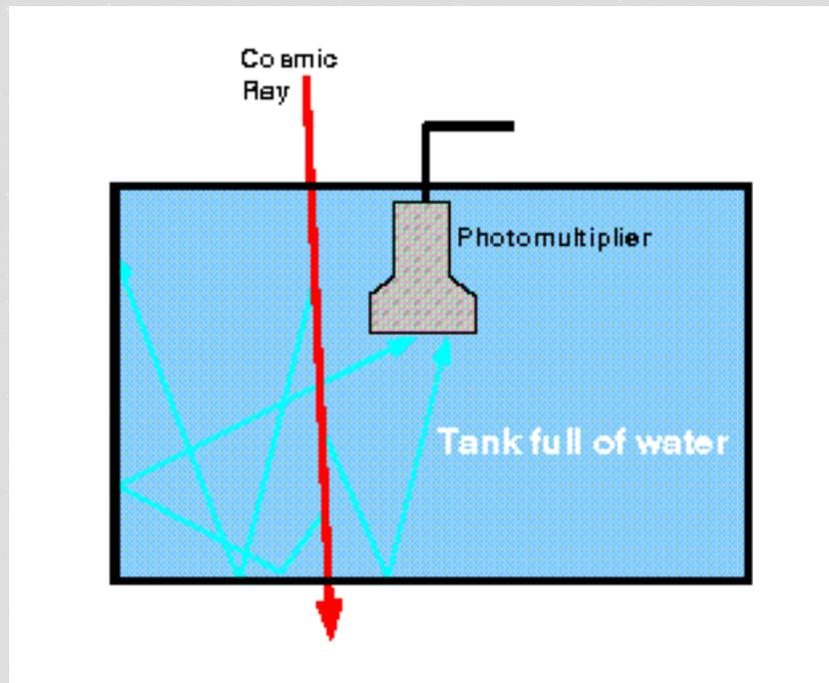


Un photomultiplicateur détecte les photons émis
→ signal électrique amplifié proportionnel au nombre de photons perçus.

Comment détecter les RCHE ?

• Les détecteurs de lumière Cherenkov

- cuve d'eau pure
- Les particules chargées très énergétiques qui traversent l'eau émettent de faibles flashes de lumière bleue par [effet Cherenkov](#).

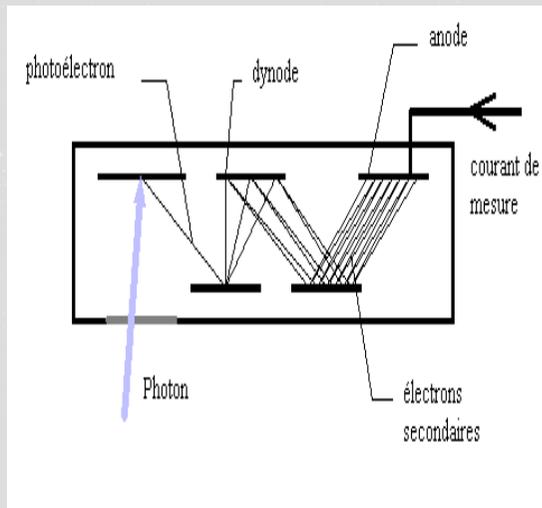


bords du réservoir recouverts d'un matériau réfléchissant a la plus grande partie de la lumière est réfléchi en direction du photomultiplicateur.

Comment détecter les RCHE ?

- Photomultiplicateurs (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.

Rayons cosmiques aux énergies extrêmes

- Les premières détections

- Haverah Park (UK, 67-87)

- Réseau de détecteurs Cherenkov à eau sur 12 km²



4 rayons cosmiques d'énergie supérieure à 10^{20} eV

- Yakutsk (Sibérie, 70-95...)

- Scintillateurs + détection de la lumière Cherenkov émise dans l'air

1 rayon cosmique d'énergie supérieure à 10^{20} eV

Vers de nouveaux moyens de détection

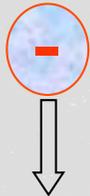
- La radiodétection des grandes gerbes
 - **1962** : Prédiction théorique - effet Askar'yan
 - **1964-65** : Première expérience - T.C. Weekes
 - **Milieu 70'** : Méthode délaissée
difficultés d'interprétation et de détection
+ succès d'autres techniques
 - **Fin 90'** : Redécouverte pour les milieux denses
 - **1999** : preuve du principe sur accélérateur
 - **2000** : expérience sur CASA-MIA
 - **2003** : expérience LOPES sur Kascade

Vers de nouveaux moyens de détection

• Le champ électrique

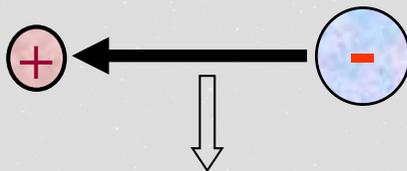
Identifiés en 1970

- Excès de charge $\sim 10\%$ e^- / e^+

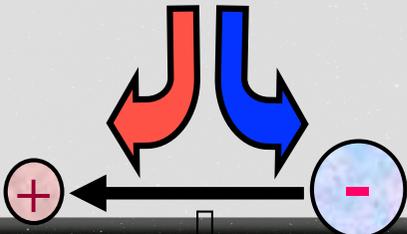


- Effet géomagnétique $F=qV \times B$

➔ moment dipolaire



Courant transverse
d'alimentation du dipôle



– Prédictions théoriques sur le signal induit par la super-position des différents champs

- rapide : de quelques ns à quelques centaines de ns
- d'amplitude détectable : dizaines à centaines de μV
- Spectre de Fourier associé couvre une large gamme de fréquences : du MHz à quelques centaines de MHz

Vers de nouveaux moyens de détection

- Prédications théoriques

- Informations contenues dans la forme du signal

- amplitude \Rightarrow énergie du RC primaire
 - durée \Rightarrow distance au cœur, direction d'arrivée
 - forme \Rightarrow nature du primaire

- Avantages de la radiodétection

- Propagation dans un très grand volume (.vs. particules secondaires)
 - Atténuation dans l'atmosphère moindre (.vs. Fluorescence)
 - renforcement possible du signal par effet de cohérence
 - Simplicité et robustesse des antennes
 - Technique rendue possible grâce au progrès de numérisation rapide

Vers de nouveaux moyens de détection

- Technique à valider

- série de mesures avec le réseau décamétrique de Nançay depuis 2002

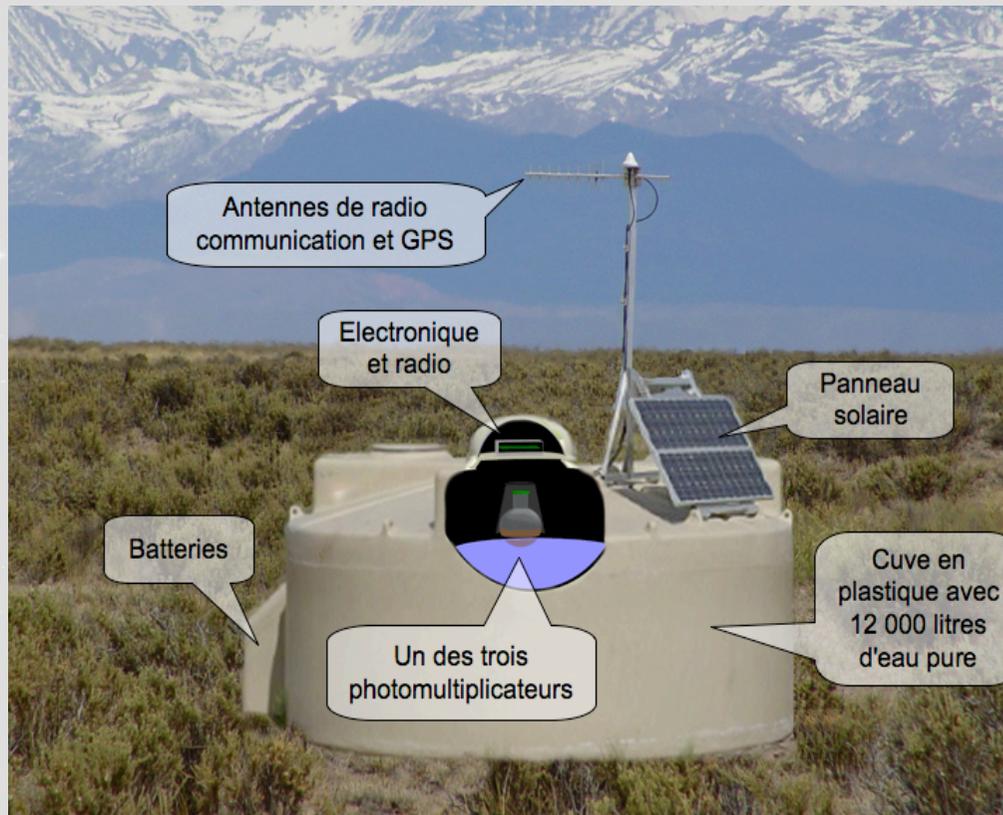
- Il reste à montrer que l'on peut obtenir les informations sur la gerbe

- Installation de détecteurs de particules à Nançay
 - En cours
 - Installation d'antennes sur le site de l'expérience AUGER



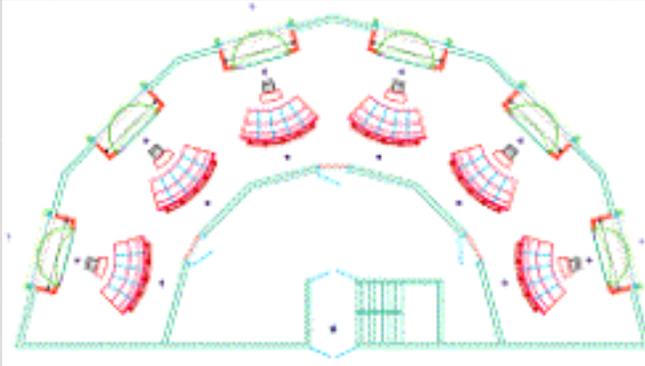
L'Observatoire Pierre Auger

- Détecteurs de particules : cuves

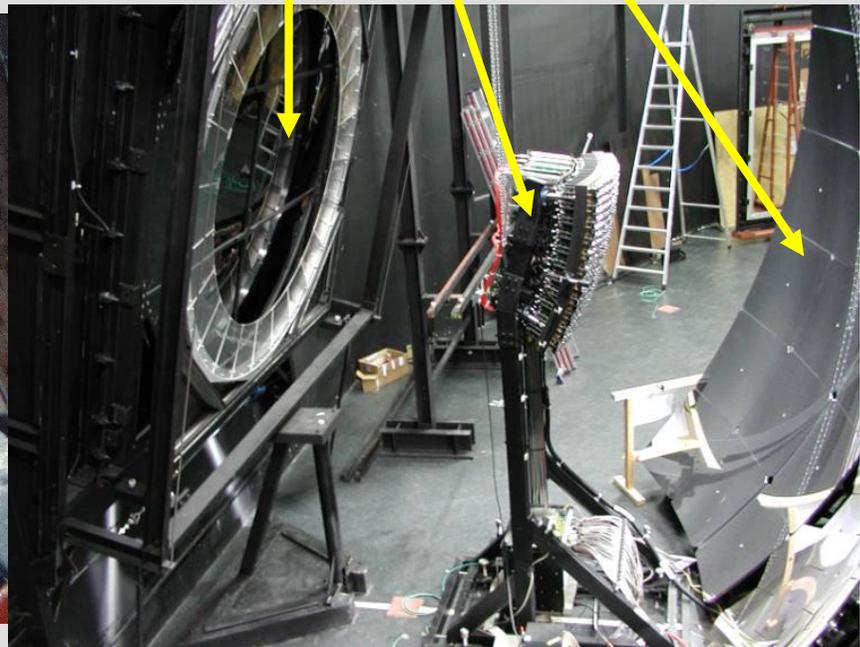


L'Observatoire Pierre Auger

- Détecteurs de fluorescence



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



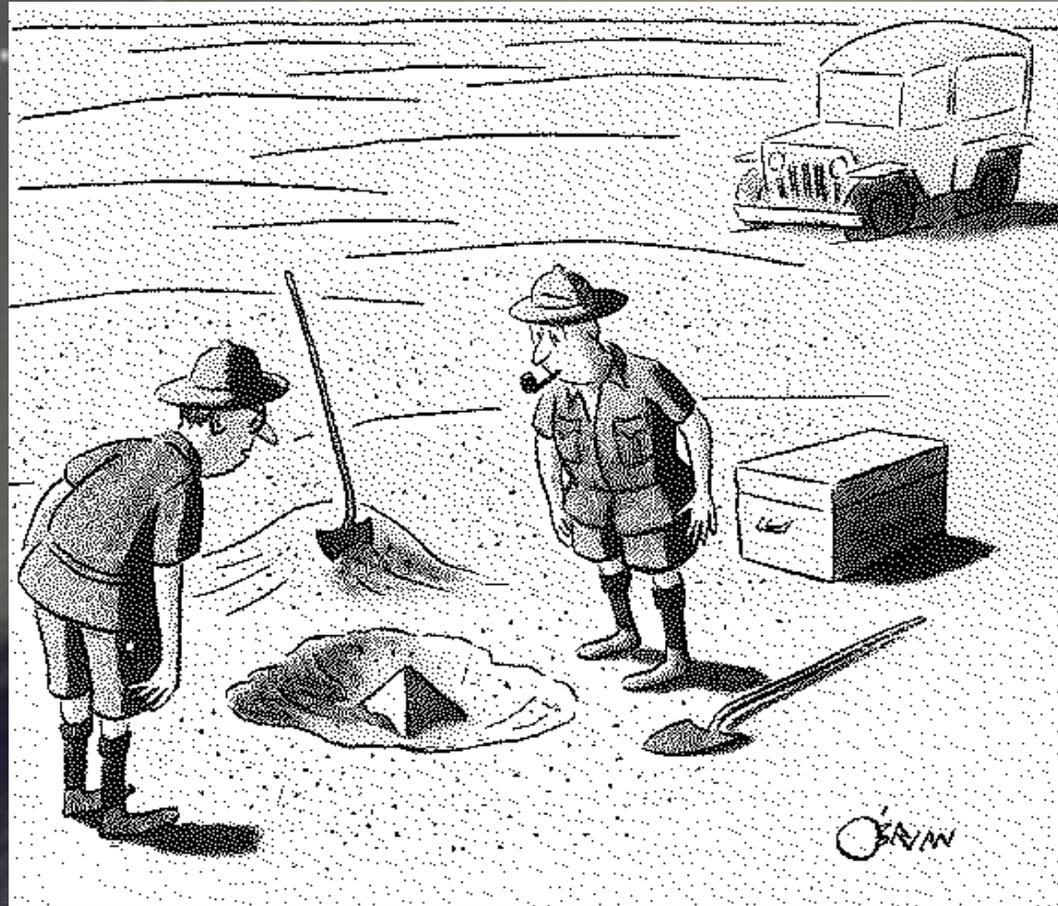
Vers de nouveaux moyens de détection

- Education et réseaux de détection des RC
 - « Mini-réseaux » de détecteurs de particules dans les lycées et universités
 - D'un simple « TP » de physique vers un vrai programme scientifique
 - rechercher des RC de haute énergie avec des réseaux dispersés de détecteurs simples

NALTA (North American Large area Time coincidence Arrays)



Je vous remercie de votre



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

ATTENTION !