



Les rayons cosmiques de haute énergie

Corinne Bérat
LPSC Grenoble



- Introduction
- L'histoire des rayons cosmiques
- D'où viennent les rayons cosmiques ?

- Les grandes gerbes atmosphériques
- Observation de RC de très haute énergie
- Propagation et origine

- Nouvelles expériences
- Projet de détecteur spatial
- Vers d'autres moyens de détections



Introduction

Ondes, particules, échelle d'énergie

- Les rayons cosmiques sont des particules qui nous viennent du cosmos. Ils bombardent la Terre en permanence.
- Ils représentent $\sim 14\%$ de la radioactivité naturelle totale, et contribuent légèrement moins que la radioactivité du sol
- Comme la lumière en astronomie, les rayons cosmiques sont l'un des rares moyens d'étudier les phénomènes astrophysiques qui leur ont donné naissance.

© Denis C. Anderson

➤ Une « expérience » en astrophysique

- l'astrophysique échappe complètement au contrôle de l'expérimentateur

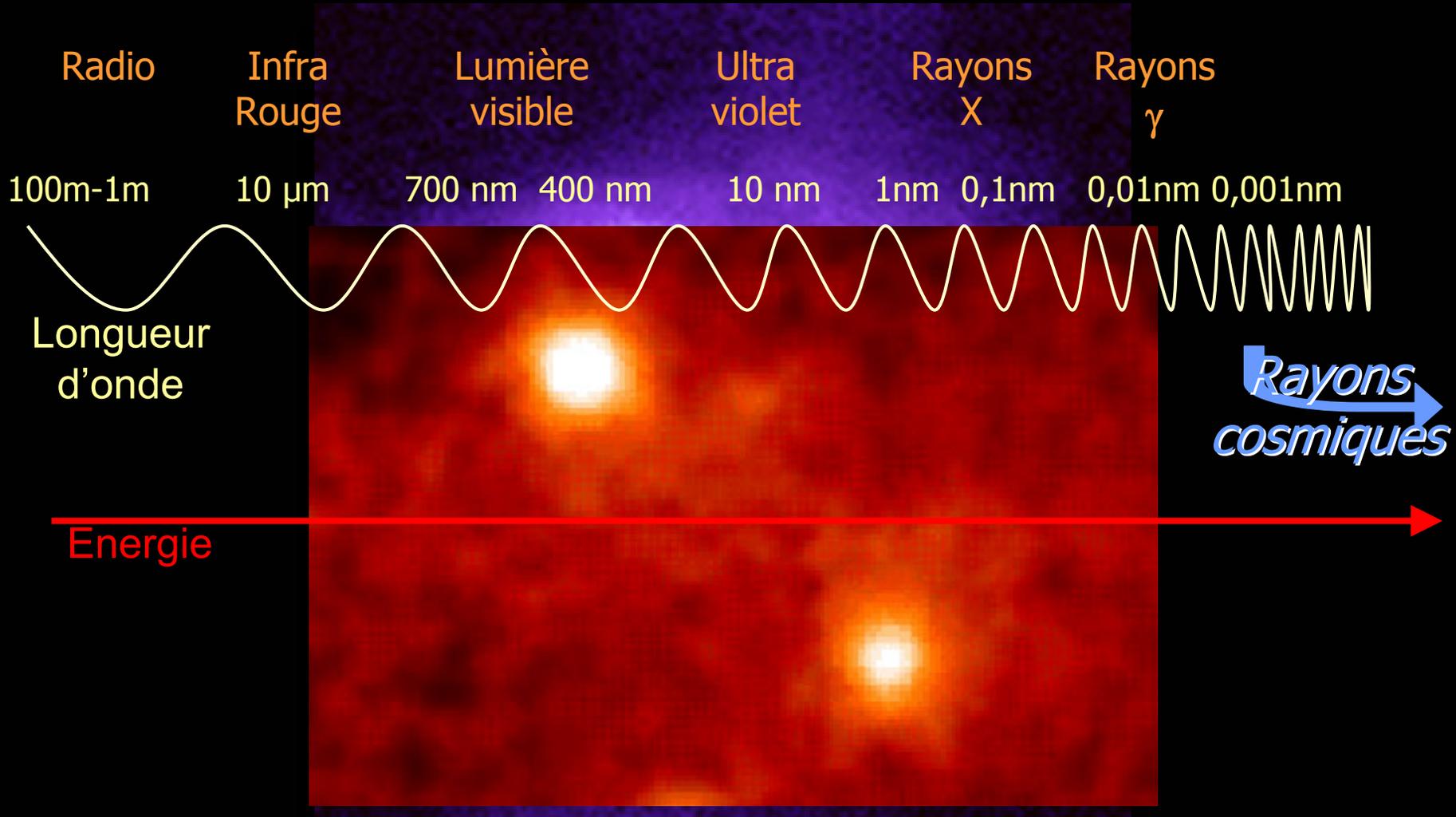
Un phénomène cosmique violent : collision de deux galaxies spirales

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

- Ondes électromagnétiques
- Rayons cosmiques

Nos informateurs sur le cosmos : les rayonnements

Les lumières de la nébuleuse du Crabe

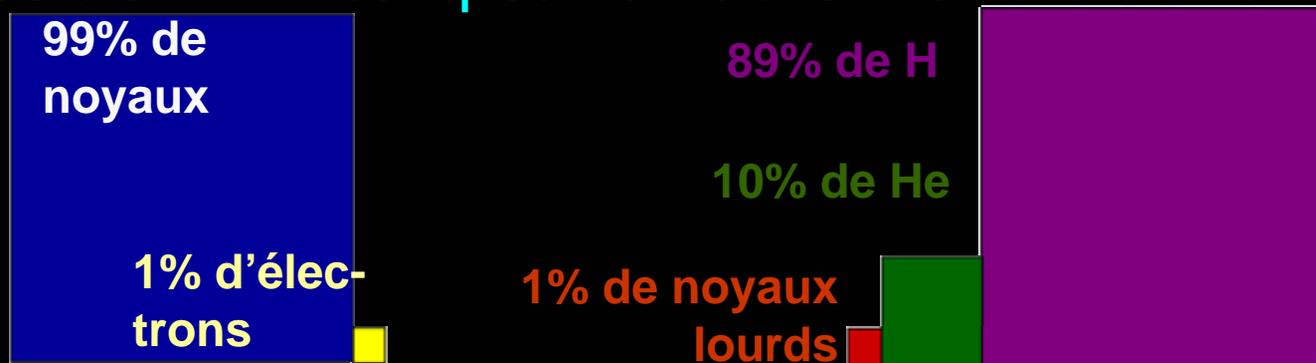


➤ particules ordinaires stables :

- Protons (noyau d'hydrogène) et autres noyaux atomiques
- électrons
- Photons
- Neutrinos ν

En moyenne 4 RC /cm²/s ~ 1 kg/an,
<< 40 000 tonnes/an (météorites).

➤ Composition : ~ composition de la matière de l'univers

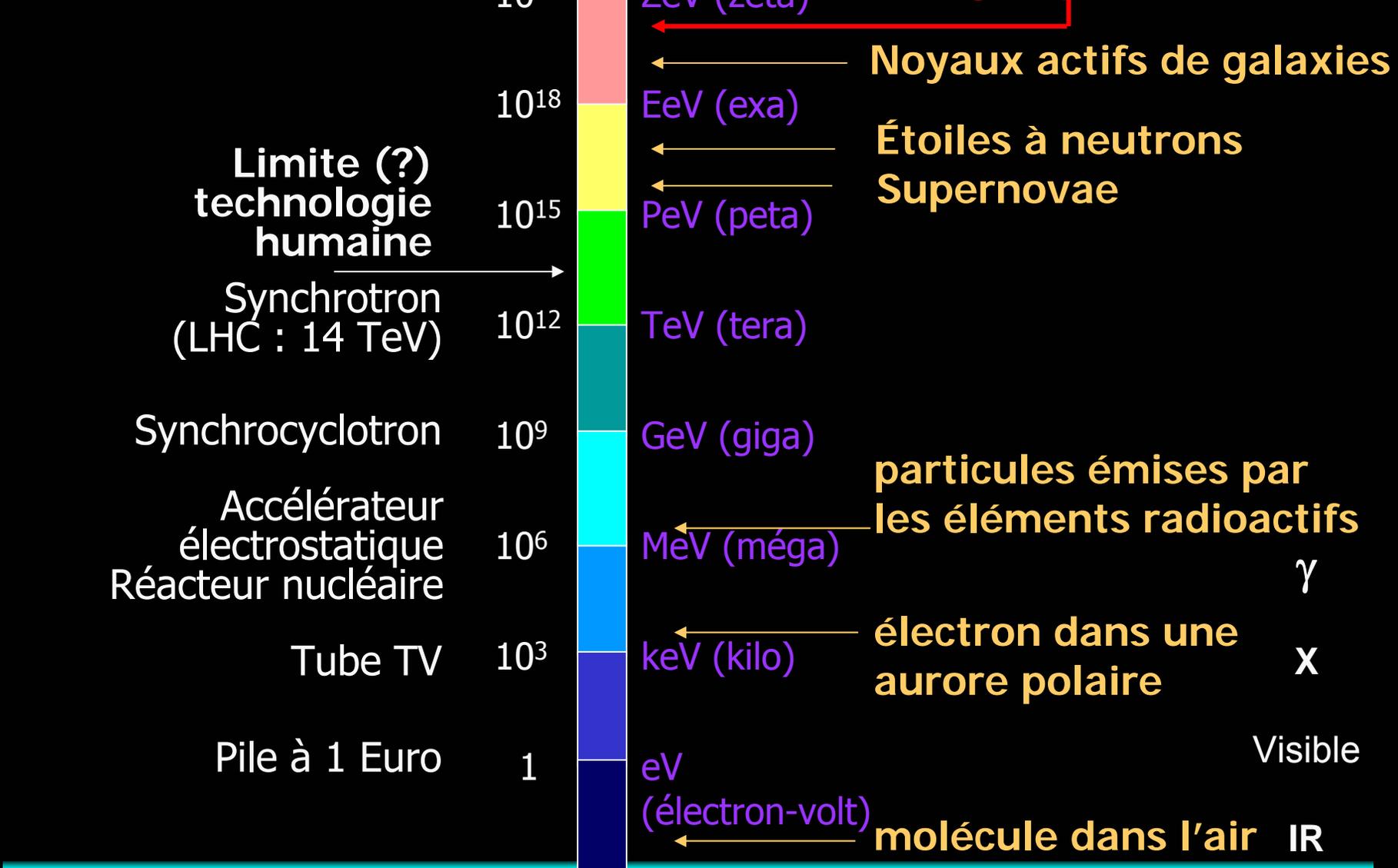


- cas des neutrinos :
 - ~ 64 milliards de ν traversent votre corps chaque seconde
 - Statistiquement : un seul arrêté par votre corps pendant toute votre vie

Introduction

1 eV = 1,602 · 10⁻¹⁹ J

0,000 000 000 000 000 000 16 J
10²¹

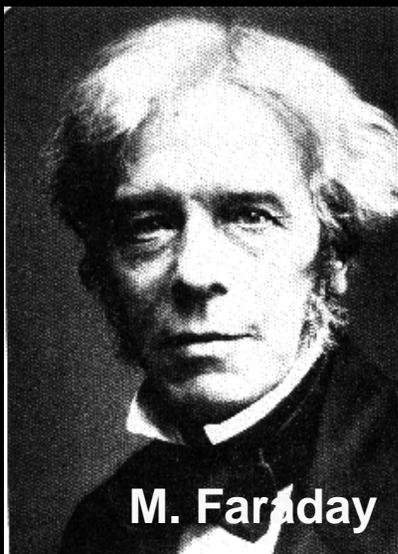




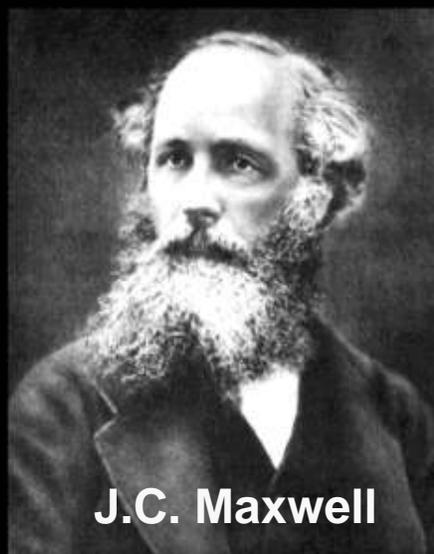
L'histoire des rayons cosmiques

➤ Contexte scientifique

- au XIXe siècle
 - Unification électricité et magnétisme
 - Identification de la nature de la lumière (onde EM)



M. Faraday



J.C. Maxwell



H.R. Hertz

- Matière : théorie atomique primitive (noyau et électrons inconnus)
- À la fin du XIXe siècle, nouveaux rayonnements

➤ Rayonnements : lumière ou matière ?

- Rayonnements cathodiques
 - Étudiés par **W. Crookes**, **J. Perrin**, **J.J. Thomson** ⇨ en présence d'aimants et de champs électriques, les rayons sont déviés
 - **J. J. Thomson** conclut que ces rayons sont des particules chargées négativement qu'il appelle «**électrons**» (1898)
- Rayons X
 - Découverts par **W. Röntgen** en 1895
 - Nature incertaine jusqu'à **M. von Laue** (1912)
- Radioactivité
 - Découverte par **H. Becquerel** en 1896 (uranium)
 - 1898-1900 **P. et M. Curie**, **E. Rutherford** et **P. Villard** : il y a plusieurs types de radioactivité (**α** , **β** , **γ**)

➤ Découverte des rayons cosmiques

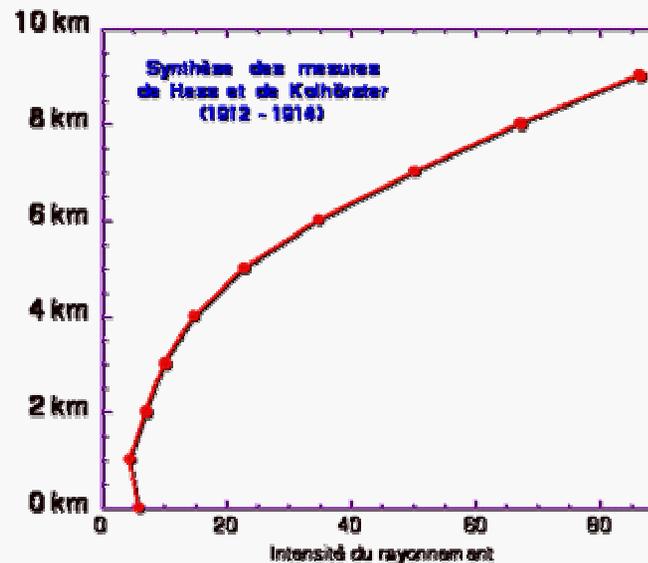
- 1901
 - Observation de **C. Wilson** : les électroscopes se déchargent tout seuls sous terre aussi bien que sur terre
 - **E. Rutherford** \Rightarrow radioactivité naturelle, effet dominant.
- 1910
 - Le père **Wulf** fait des études en montant à la tour Eiffel : l'électroscope se décharge moins vite, mais pas autant que ce qui était prévu !

➔ Donc « ça » vient d'au dessus...



➤ Découverte des rayons cosmiques

- 1912 :
 - **Victor Hess** monte en ballon à 5350 m : découverte du rayonnement cosmique.



- 1914 :
 - **W. Kolhörster** monte à 9 Km

Route des Entdeckungsfluges der kosmischen Strahlung.

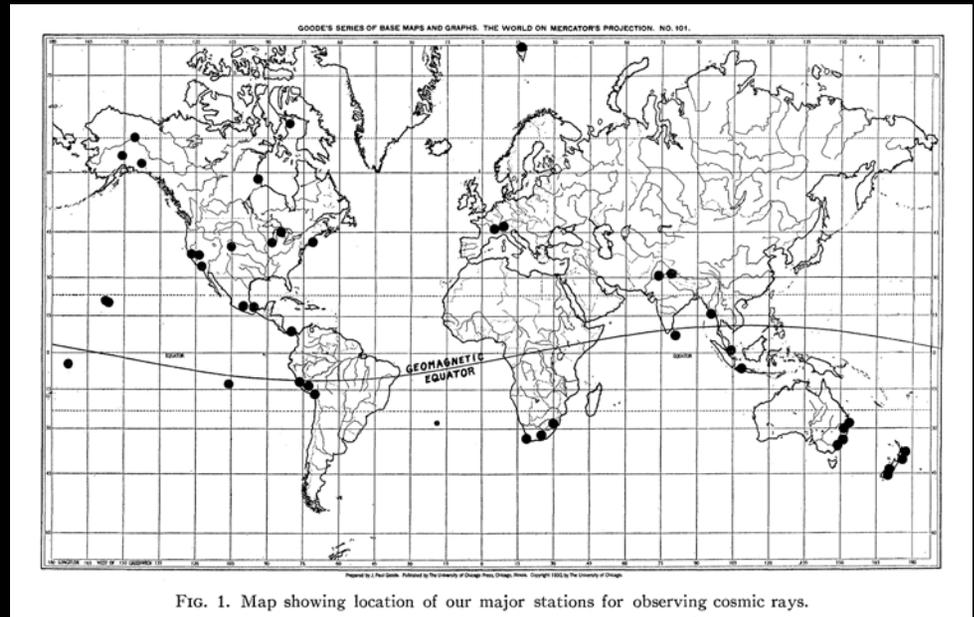
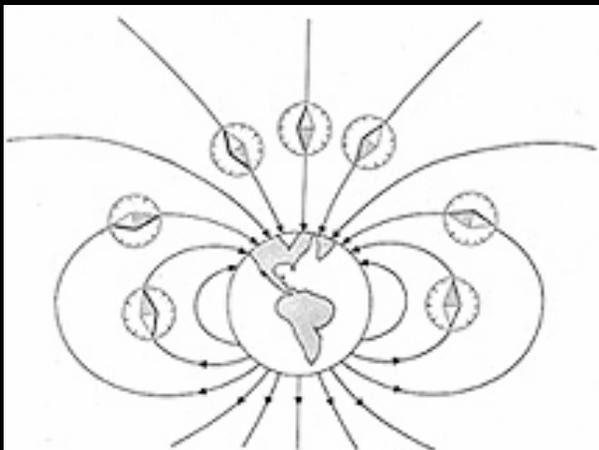
➤ Nature des rayons cosmiques ?

- 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...
 - **Skobeltzyn** montre aussi que c'est de la matière grâce aux chambres à brouillard
 - mais rien n'y fait....



➤ Nature des rayons cosmiques ?

- 1930 :
 - **A. Compton** (un autre prix Nobel) fait rendre raison à Millikan, grâce à l'effet de latitude (effet du champ magnétique terrestre) :



- il envoie ~60 chercheurs dans le monde le vérifier...

➤ Découverte de nouvelles particules

- Au sol, on ne voit que les particules secondaires, issues de l'interaction des rayons cosmiques (RC) avec l'atmosphère.
- Les RC ont ainsi permis la découverte de nombreuses particules ⇒ **naissance de la physique des particules**

- **1932 : positron**

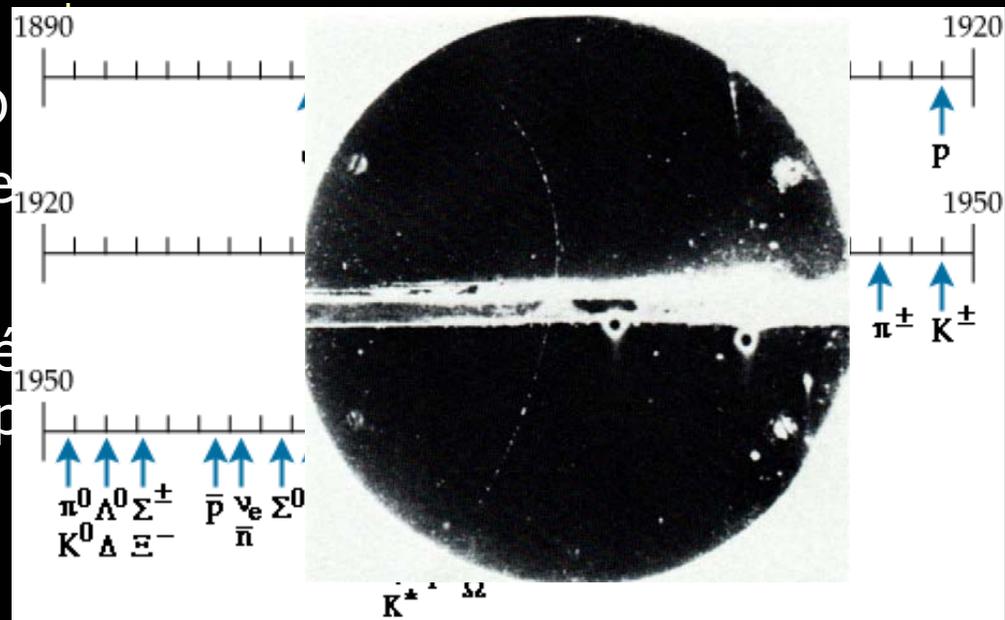
- Prédit par P. Dirac
- dans une trace

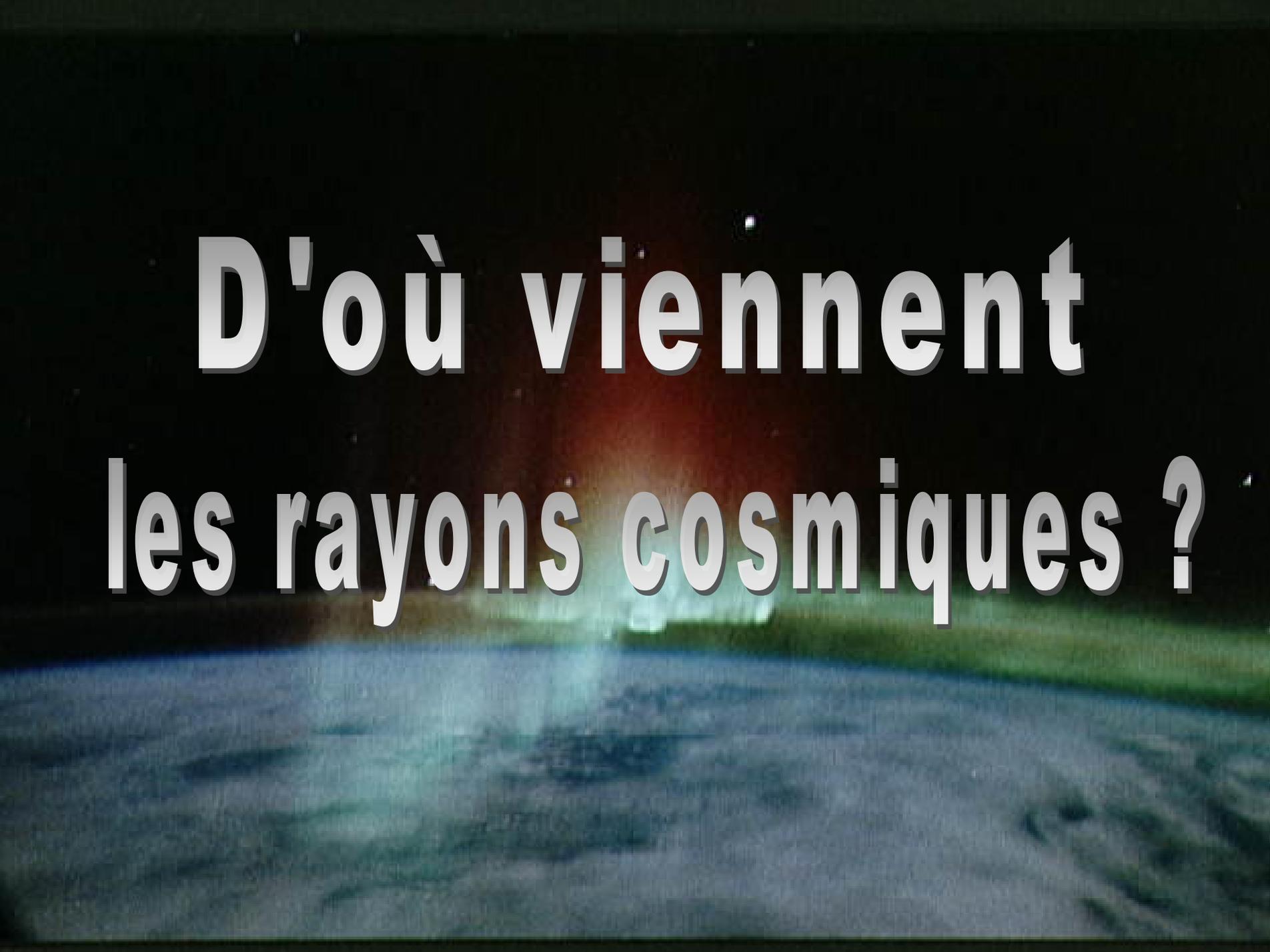
- **1936 : muon μ**

- Semblable à l'électron
- mais 200 fois plus massif

- **1947 : pion π**

- au pic du Midi





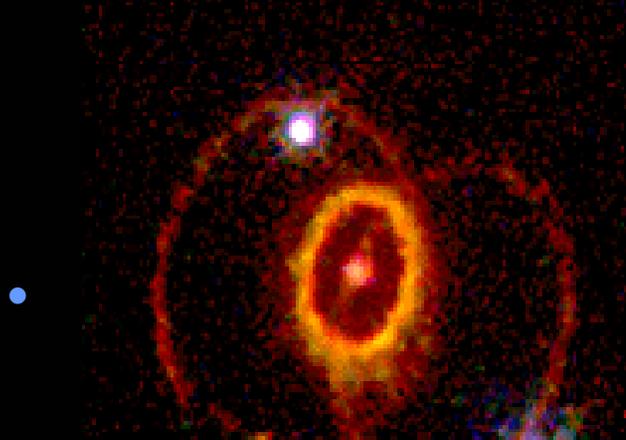
**D'où viennent
les rayons cosmiques ?**

➤ Rayons cosmiques primaires et secondaires

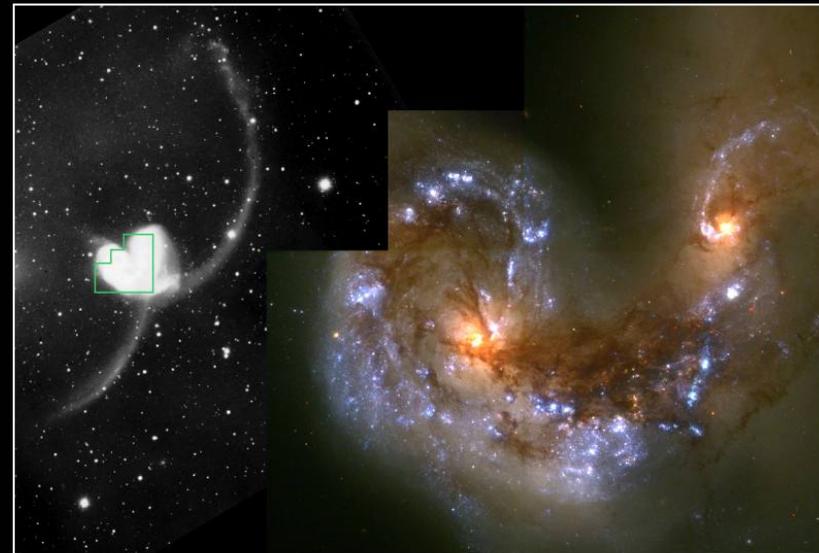
- Primaire
 - toute particule qui arrive sur terre venant de l'espace
 - Secondaires
 - Particules détectées sur terre = principalement produits d'interaction de rayons cosmiques primaires avec la partie supérieure de l'atmosphère
 - Essentiellement des muons, des électrons, des photons
 - ⇒ Les rayons cosmiques secondaires sont
 - des particules
 - venant des couches supérieures de l'atmosphère
 - produits par de véritables rayons cosmiques !
- D'où viennent-ils ?**

➤ Origine des rayons cosmiques

- Particules produites par des mécanismes astrophysiques plus ou moins violents
 - réactions de fusion au cœur des étoiles
 - supernovae (effondrement d'étoiles à bout de « carburant »)
 - collisions de galaxies



Supernova 1987A – image d'Hubble



Colliding Galaxies NGC 4038 and NGC 4039
PRC97-34a • ST Scl OPO • October 21, 1997 • B, Whitmore (ST Scl) and NASA

HST • WFPC2

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

➤ Propagation des rayons cosmiques

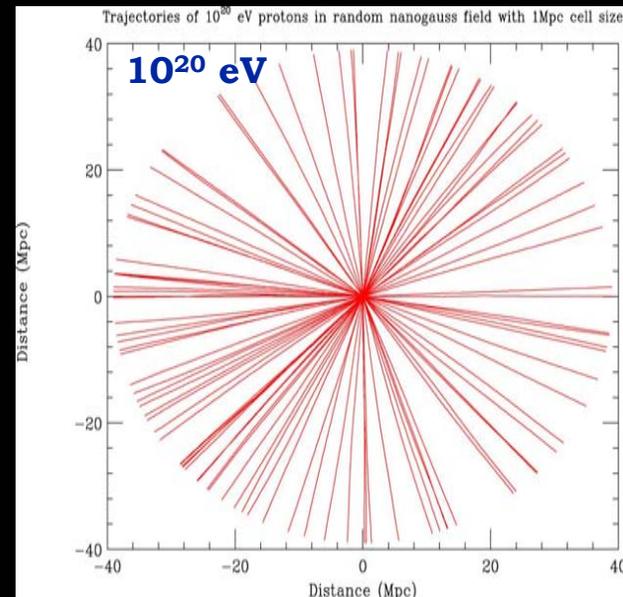
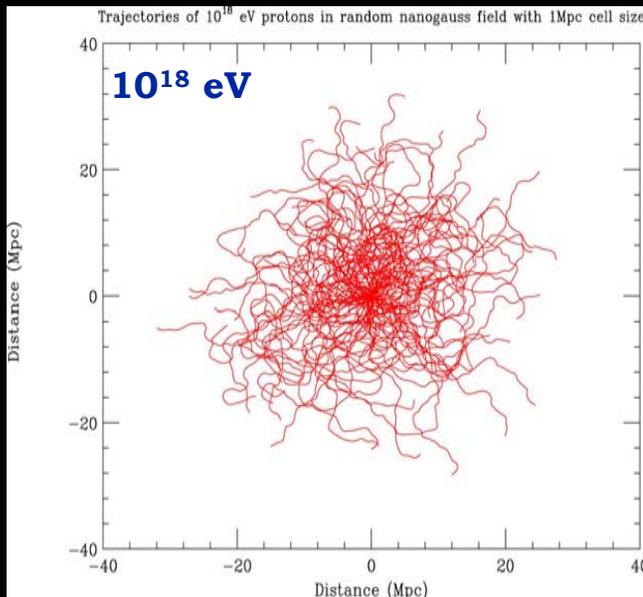
- Origine des cosmiques chargés : hypothétique
 - Impossible de repérer la source d'un cosmique chargé du fait qu'il a traversé le champ magnétique de la galaxie (μG), voire le champ magnétique intergalactique (nG) !
- Rayon gyromagnétique et angle d'inflexion
 - $R_{\text{gyro}} = E/B$: rayon du cercle décrit par la particule d'énergie E , dans un champ uniforme B (en négligeant le rayonnement de freinage)
 - Après avoir parcouru une distance d perpendiculairement au champ, la particule a infléchi sa trajectoire d'un angle $\theta = d/R_{\text{gyro}} = d \times B/E$

➤ Propagation des rayons cosmiques

- En unités appropriées, ceci donne :

$$\theta^\circ = \frac{d(\text{Mpc})B(\text{nG})}{E/(3 \cdot 10^{19} \text{ eV})} = \frac{d(\text{kpc})B(\mu\text{G})}{E/(3 \cdot 10^{19} \text{ eV})}$$

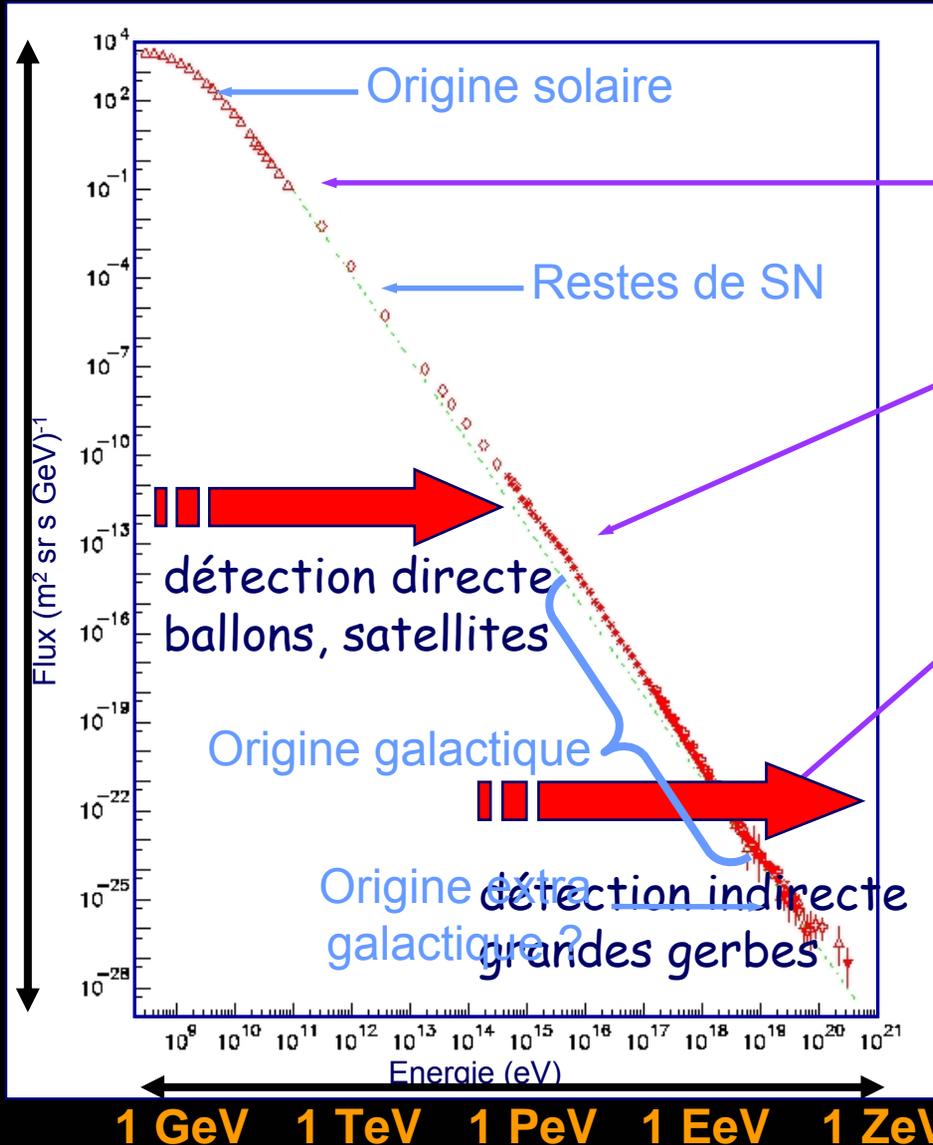
1 pc (parsec) $\sim 3 \cdot 10^{13}$ Km ; \emptyset de notre galaxie : 25 kpc



angle de déflexion inférieur à 1° pour une énergie $\sim 10^{20}$ eV

D'où viennent les rayons cosmiques ?

➤ Les rayons cosmiques aujourd'hui



Le flux mesuré s'étend sur
~~12 ordres de grandeur~~
 12 ordres de grandeur 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

- Les rayons cosmiques les plus énergétiques pénètrent dans l'atmosphère terrestre :
 - ⇒ réaction en chaîne appelée « gerbe atmosphérique ».
- Ce sont des averses soudaines de particules, résultant d'un seul rayon cosmique initial très énergétique.

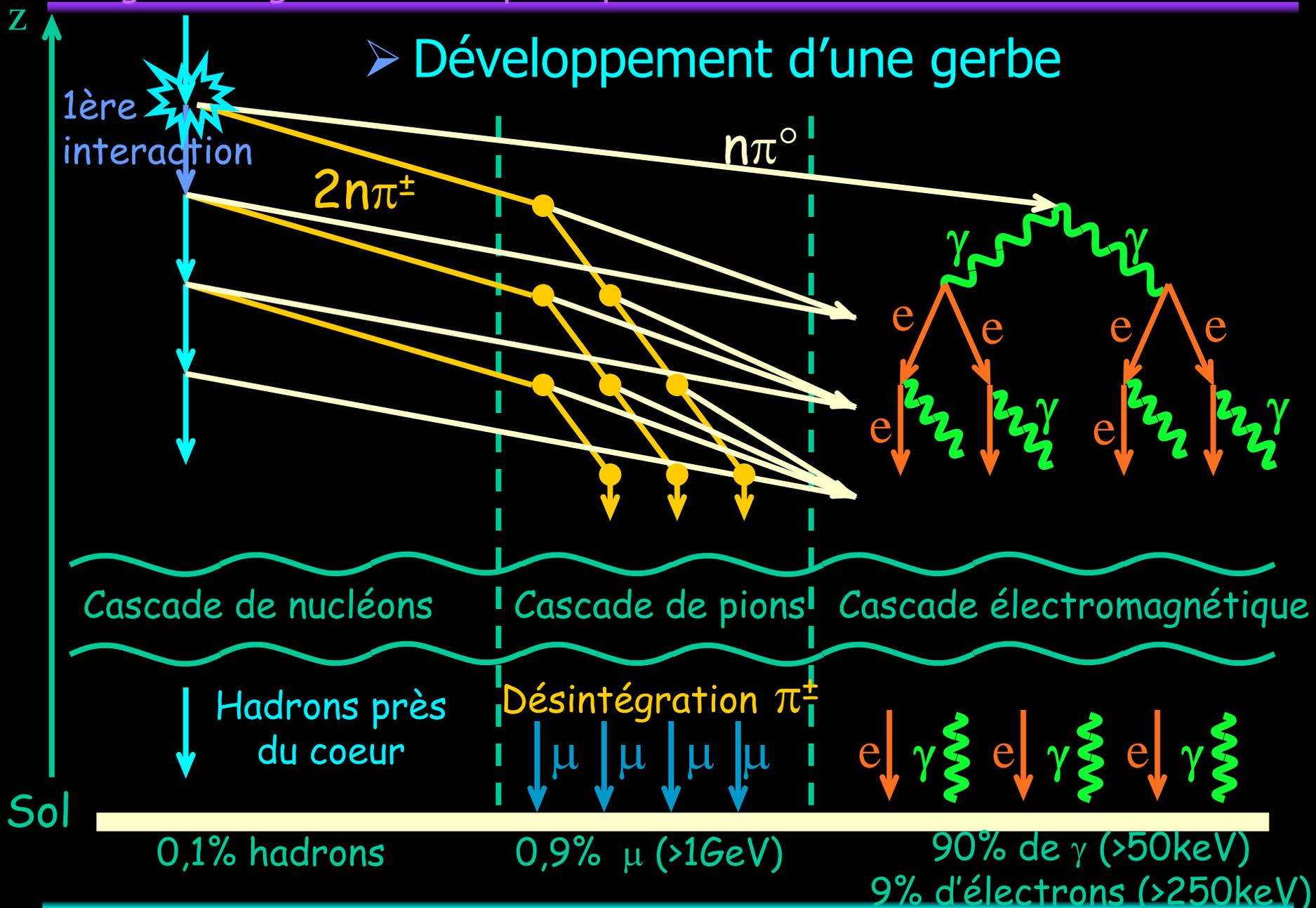


découvertes par Pierre Auger en 1938, au laboratoire Jean Perrin au JungFraujoch



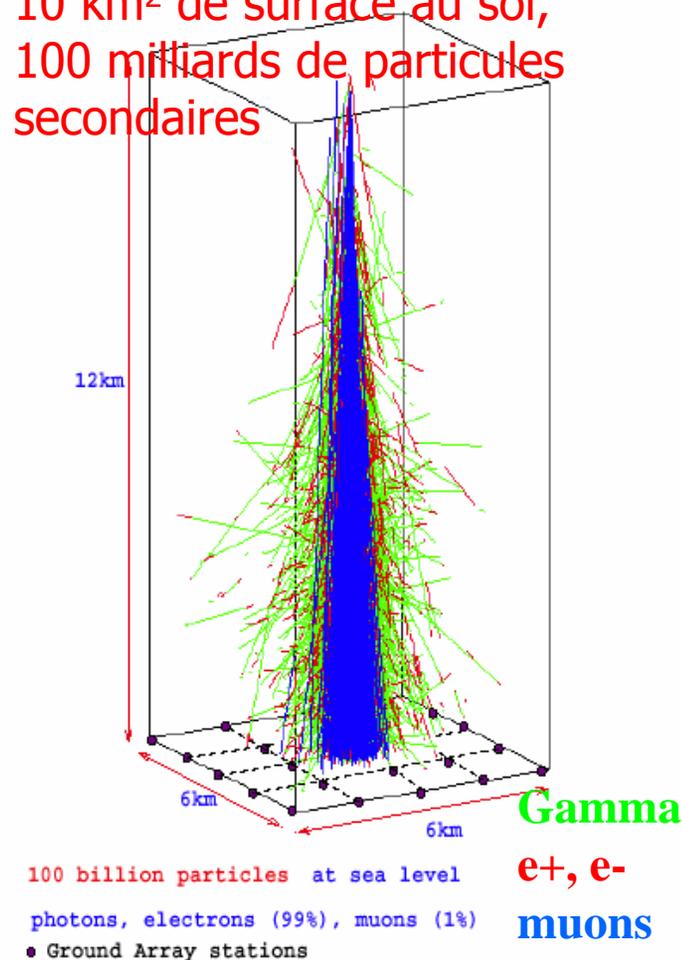
Les grandes gerbes atmosphériques

➤ Développement d'une gerbe



➤ Energie et taille stupéfiantes

Ex: Une gerbe de 10^{19} eV
12 km de haut,
10 km² de surface au sol,
100 milliards de particules
secondaires



Domaine d'énergies $> 10^{19}$ eV

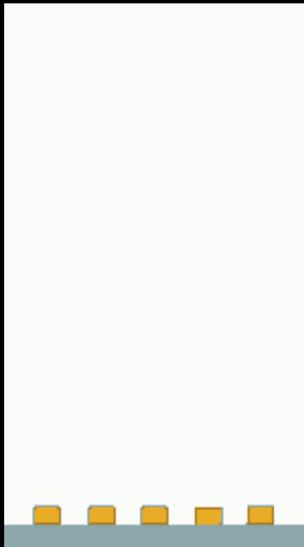
- Rayon cosmique primaire très énergétique interagissant dans les hautes couches de l'atmosphère
⇒ cascade de particules
- Au niveau du sol :
 - plusieurs centaines de milliers de particules (photons et électrons essentiellement)
 - réparties sur plusieurs km².
- **EXTREMEMENT RARE :**
flux de l'ordre de
1 RC/km²/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, produites en cascade, 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 (utilisée pour des particules de plus de $10^{17}eV$)
- 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'intérêt du réseau est triple:**



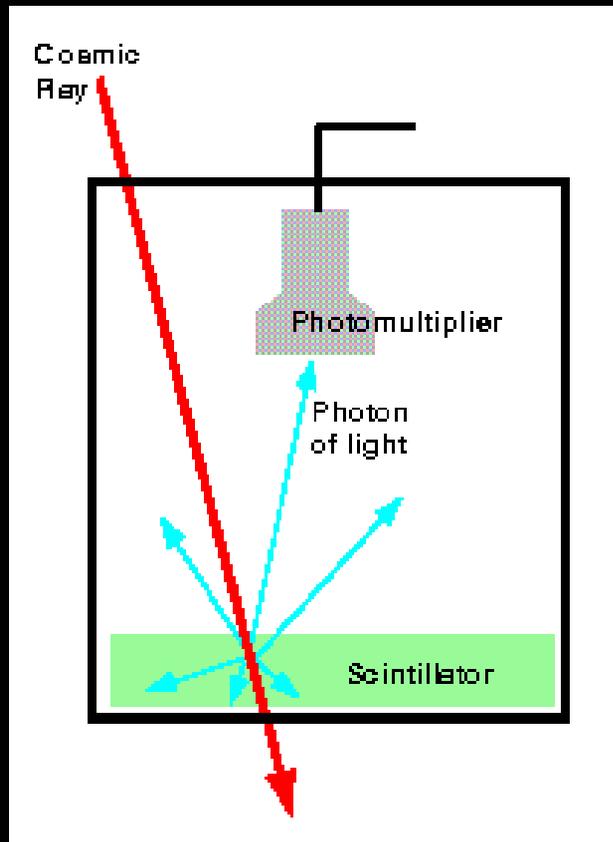
- Ajout du nombre de particules enregistrées par chaque détecteur \Rightarrow meilleure estimation du nombre de particules présentes dans la gerbe.
- Plus le réseau est grand plus le nombre d'événements détectés est grand.
- dessin ci-contre : la gerbe atteint d'abord le détecteur sur la gauche avant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

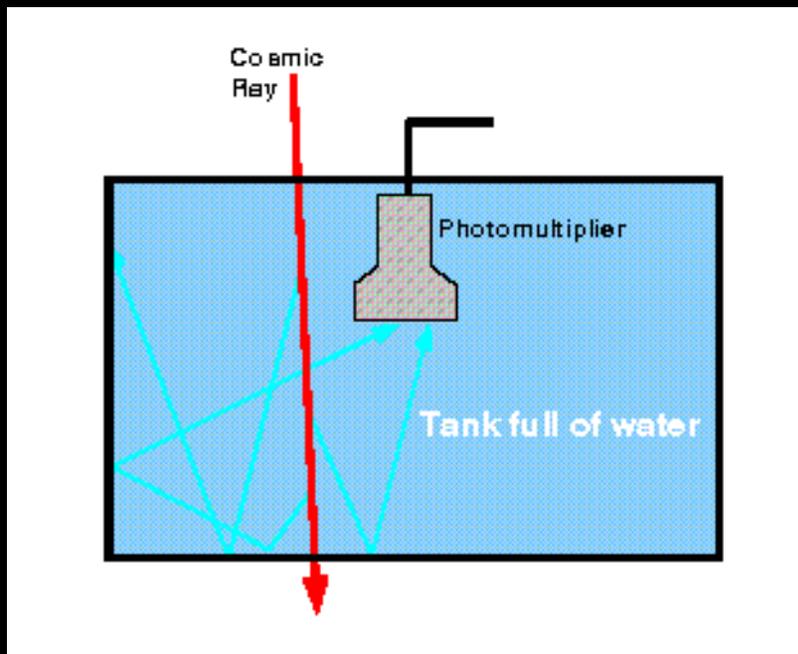
- détecteurs à scintillation - plastique spécial, scintillant.



- particule chargée incidente traversant le détecteur
⇒ excitation d'une molécule du plastique scintillant
⇒ désexcitation par émission de photons.
- photons émis détectés par un photomultiplicateur
⇒ signal électrique amplifié proportionnel au nombre de photons perçus.

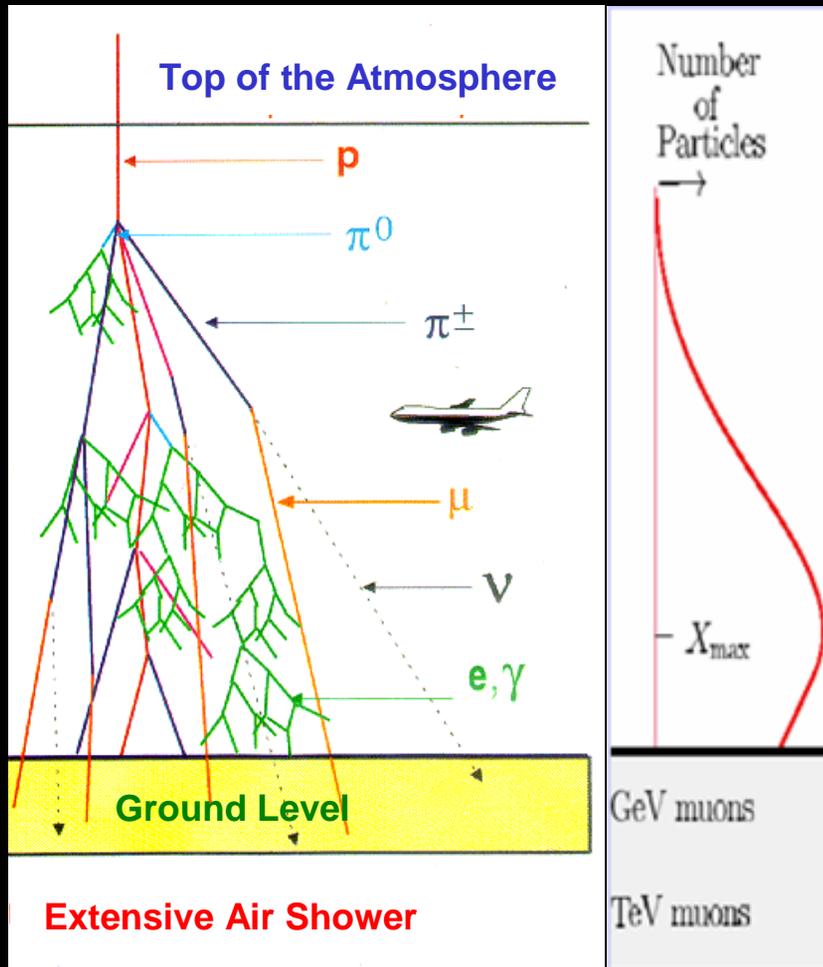
➤ Les détecteurs de lumière Cherenkov

- 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.

➤ 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

- Fluorescence : lumière de très faible intensité, dans l'UV (300-400 nm).
- Inconvénient : détection possible uniquement par nuit sans lune. (environ 10 % du temps).
- Dispositif de photomultiplicateurs \Rightarrow reconstruction du profil de développement de la gerbe
- Mesure de la lumière émise \Rightarrow énergie du RC primaire
- Position du maximum \Rightarrow nature du RC primaire

Connaissance absolue de la fluorescence de l'azote et du gain quantique des photomultiplicateurs requise.

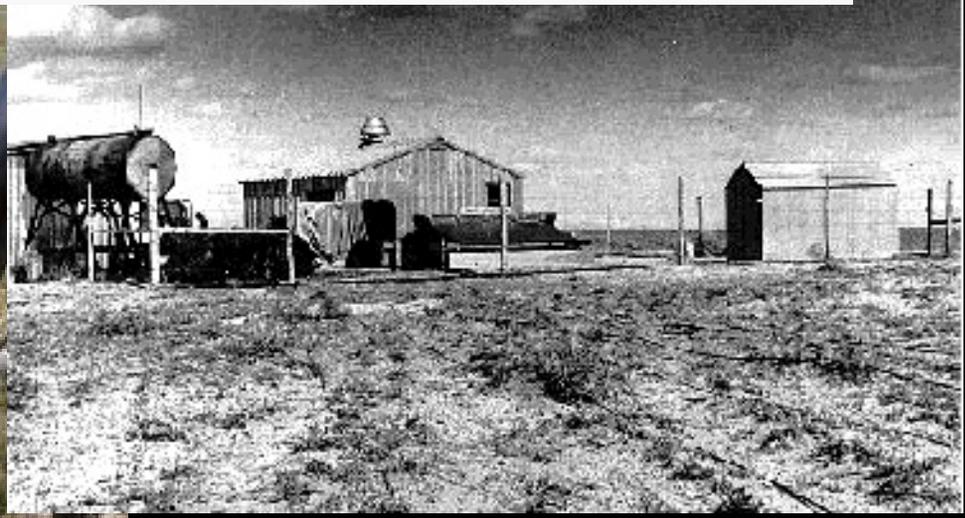
The background of the slide is a vibrant, multi-colored cosmic image, likely a representation of a galaxy or a nebula. It features a central bright blue and cyan region that transitions into green and yellow, and finally into dark red and orange towards the edges. The entire scene is filled with numerous small, bright white and blue stars, creating a sense of depth and vastness in space.

**Observation
de rayons cosmiques
de très haute énergie**

➤ 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 10^{20} eV



➤ Les premières détections

- Haverah Park (UK, 67-87)
 - Réseau de détecteurs Cherenkov à eau sur 12 km²



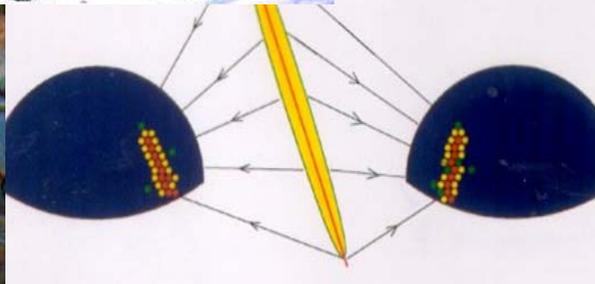
4 rayons cosmiques d'énergie supérieure à 10²⁰ eV

- Yakutsk (Sibérie, 70-95...)
 - Scintillateurs + détection de la lumière Cherenkov émise dans l'air

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

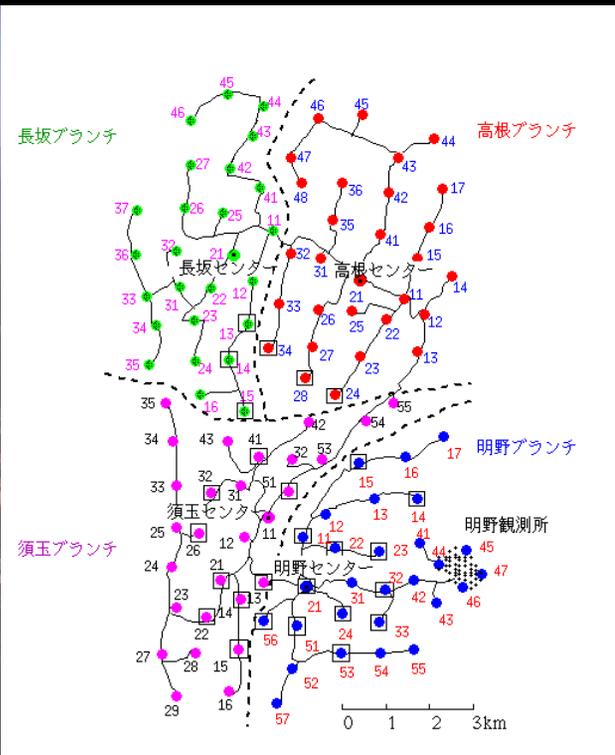
- HiRes (High Resolution Fly's eye detector)
- Technique de fluorescence



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

➤ Expériences récentes

- AGASA (Akeno Giant Air Shower Array, Japon)
 - 100 km²
 - 111 détecteurs en surface (cherenkov) + 27 détecteurs à muons



plusieurs
rayons
cosmiques
d'énergie
 $> 10^{20}$ eV

➤ RCEE (Rayons Cosmiques aux Energies 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)
(1)

10^{20} eV = 100 000 000 000 000 000 000 eV

- correspond à des dizaines de joules !
- Énergie macroscopique exceptionnelle pour une particule microscopique :
- l'énergie
 - d'un volant de badminton envoyé à 300km/h
 - d'une balle de tennis servie par un champion
 - d'un tir de penalty ...
- Loin devant l'énergie du LHC : $7 \cdot 10^{12}$ eV par faisceau

Sugar
(68-79)
(8)

➤ RCEE (Rayons Cosmiques aux Energies Extrêmes)

- 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 :
 - Qui sont-ils ?
 - D'où viennent-ils ?
 - Comment arrivent-ils jusqu'à la terre ?
 - Ils ne devraient pas pouvoir...

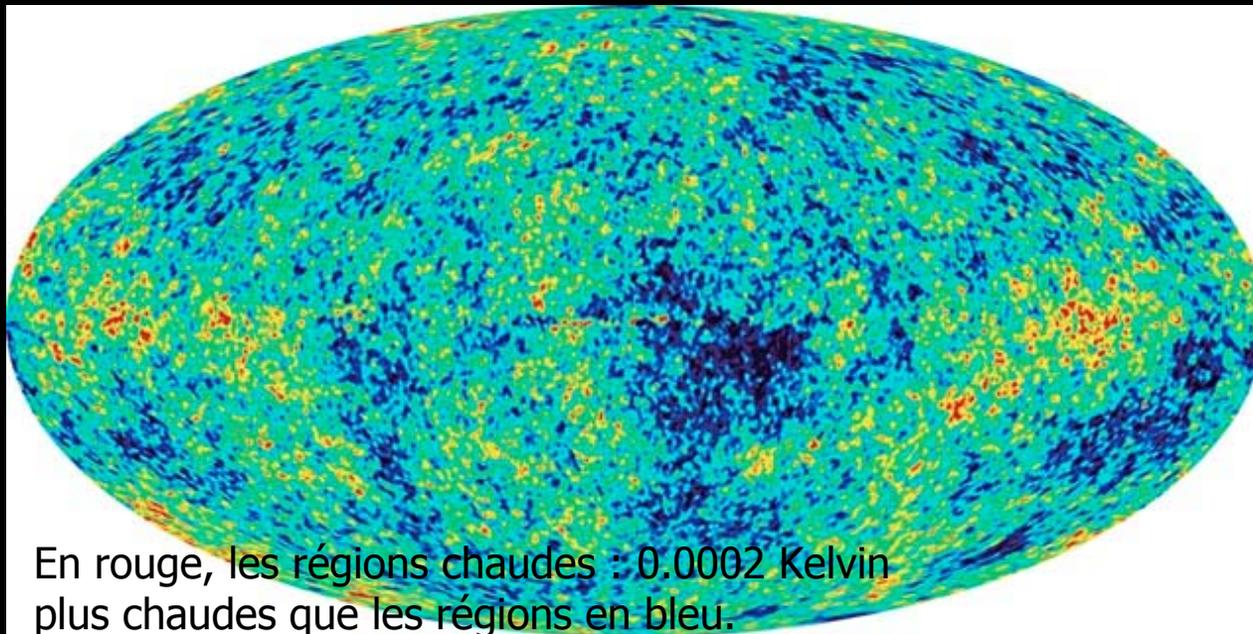


Propagation et origine

des RCEE

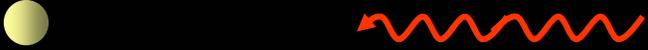
➤ Interaction des RC avec le CMB

- Le CMB (cosmic microwave background) ou rayonnement fossile à $2,7^{\circ}\text{K}$
 - Découvert en 1965 par Penzias et Wilson
 - L'Univers est rempli de photons très froids (peu d'énergie) en grand nombre ($400/\text{cm}^3$)



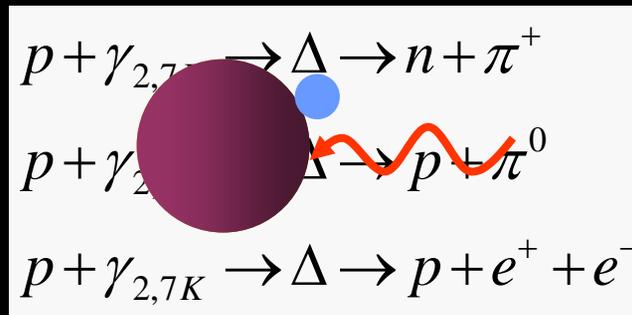
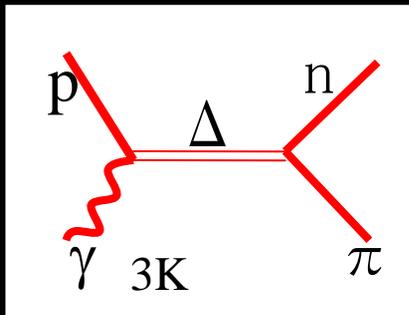
➤ Propagation : interaction des RC avec le CMB

- Ces photons sont inoffensifs, car d'énergie très faible...
... à moins de se jeter sur eux à toute allure !!!

	proton	photon
Système du laboratoire 	10^{20} eV	0.5 meV
Référentiel du proton 	$E_{\text{cin}} = 0$	300 MeV

➤ Interaction des RC avec le CMB

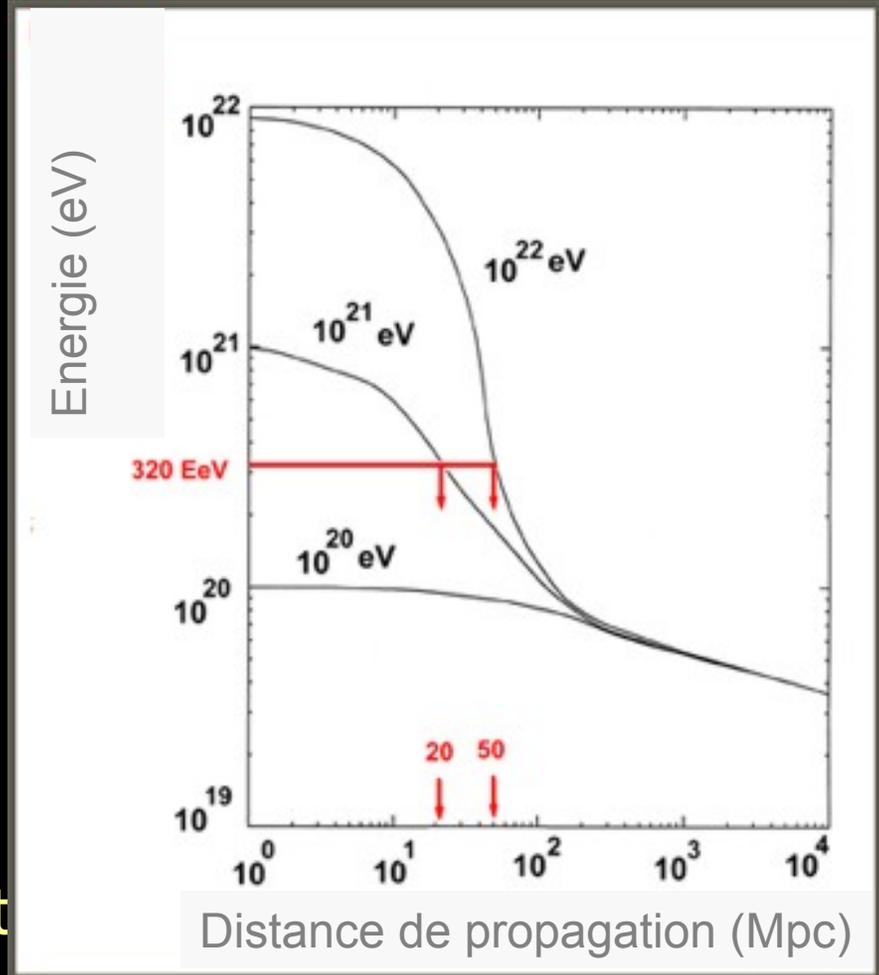
- Interaction des protons
 - photoproduction de pions :



- À chaque interaction, perte d'environ 22% d'énergie
- Processus se répète jusqu'à ce que l'énergie totale p-γ dans leur centre de masse soit inférieure au seuil de production de la résonance Δ :
c'est **l'effet Greisen-Zatsepin-Kuzmin (1966)**
ou effet GZK

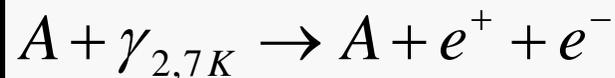
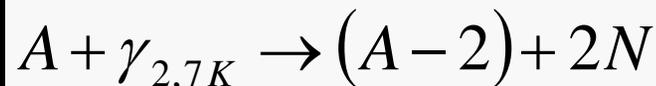
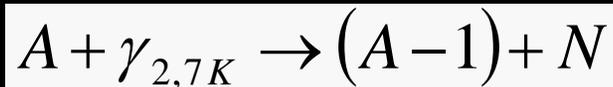
➤ Conséquences de l'effet GZK sur les protons

- Libre parcours moyen
 - Au dessus de $5 \cdot 10^{19}$ eV :
10Mpc.
(1 pc = $3.09 \cdot 10^{16}$ m)
- Brutalité de la coupure GZK:
 - record à $3 \cdot 10^{20}$ eV \Rightarrow
 - Source dépassant largement cette énergie
 - Ou située à quelques dizaines de Mpc
 - Problème : on ne connaît pas de telle source !!!



➤ Propagation : interaction des RC avec le CMB

- Les noyaux ultra énergétiques se brisent sur les photons du rayonnement fossile



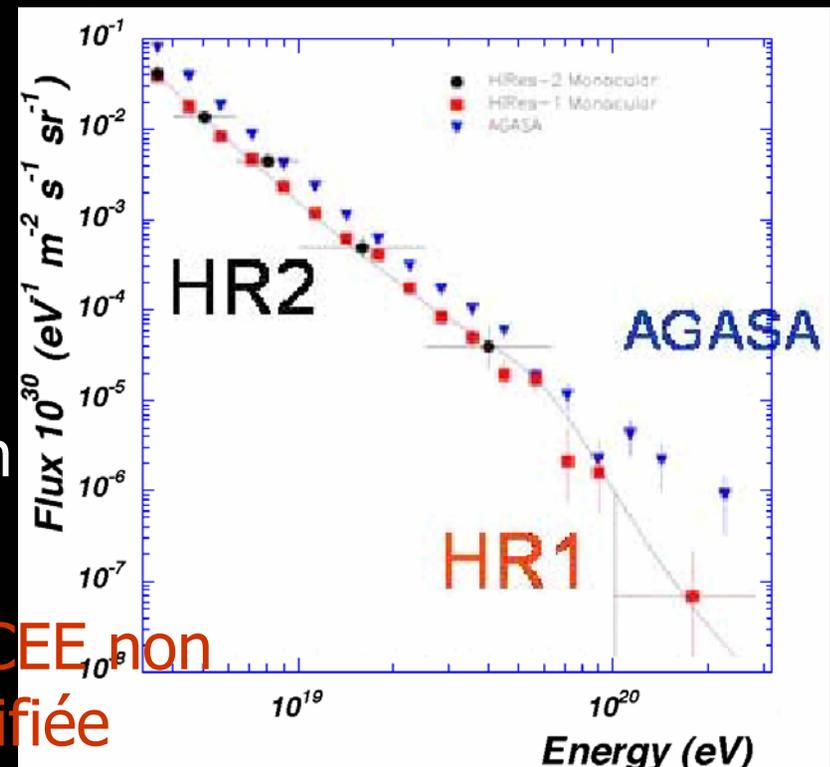
- Photons
 - Seuil de création de paires e^+e^- atteint rapidement.
Coupure GZK vers 10^{14}eV
- Neutrinos
 - Parfaitement insensible à tous les obstacles : sondes idéales... oui, mais extrêmement difficile de les détecter

➤ Effet GZK et résultats expérimentaux

- AGASA :
 - 10 événements au-dessus de 10^{20} eV
 - Observation d'une corrélation des directions d'arrivée.
⇒ sources proches, dans un rayon de ~ 100 Mpc

- HiRes :
 - meilleur accord avec la prédiction de l'effet GZK
- Mesures « contradictoires » (?) de AGASA et HiRes
⇒ problème de l'observation de l'effet GZK

Problème de l'origine des RCEE non trivial : aucune source identifiée



➤ Origine des RCEE - Schéma « bas-haut » :

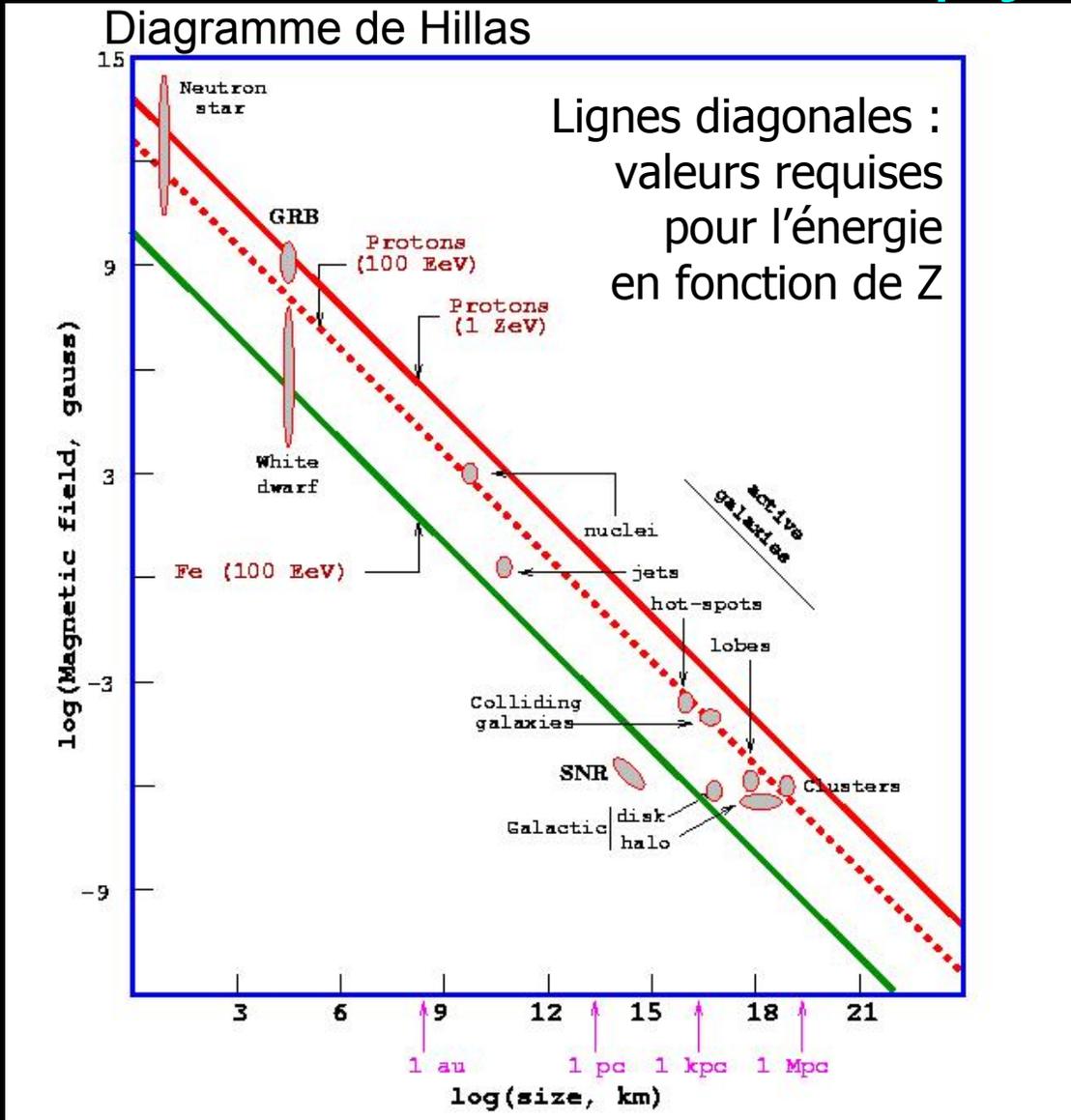
- Accélération progressive des chargés, jusqu'à des énergies suffisantes pour nous parvenir aux énergies observées malgré le « frottement » sur le CMB
- Le site accélérateur doit vérifier une certaine contrainte
 - rayon de giration < dimension du site (rayon R)
 - Impose une condition sur la rigidité magnétique (avec des approximations) :

$$\rightarrow B.R > E/Z$$

B en μG , R en kpc, E en EeV

- Recherche des sources potentielles limitée aux objets astrophysiques vérifiant cette condition

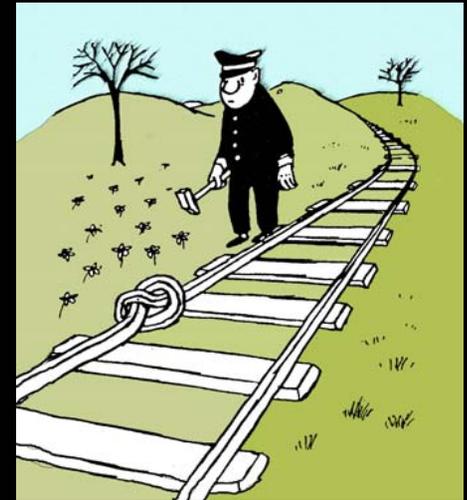
➤ Zevatrons Accélérateurs Astrophysiques atteignant le ZeV



- survivants au critère
 $B.R > E/Z$
- Etoiles à Neutron
 - Gamma Ray Bursts
 - Noyaux actifs de galaxie
 - Lobes Radio
 - Clusters
 - Galaxies/Clusters en collision

➤ Scénario « haut-bas » (+ nouvelle physique)

- Désintégration/annihilation particules très massives ($M > 10^{21} \text{eV}$) \Rightarrow flux de ν et de γ , leptons, qq. protons
 - Défauts topologiques \Leftrightarrow émission de particules « X »
 - Reliques de l'univers primordial
- solution à l'énigme GZK
- dépendant de la nouvelle physique
- problématique de la matière noire.
- Désintégration de Z^0
 - produits par des collisions de ν d'énergie 10^{21}eV et des ν d'énergie de l'ordre de l'eV.
 - mécanisme supposant un flux important de ν de très haute énergie, à expliquer !



➤ Scénario impliquant une nouvelle physique

- Brisure de l'invariance de Lorentz à très haute énergie
 - affecterait la cinématique des particules
 - seuil de la réaction conduisant à la perte d'énergie des protons modifié \Leftrightarrow les protons pourraient donc parcourir dans l'espace des distances cosmologiques
- Autres hypothèses (liste non exhaustive !)
 - évaporation de micros trous noirs...
 - monopoles magnétiques de masse $< 10^{10}\text{GeV}$ accélérés dans le champ magnétique galactique
 - extraterrestres belliqueux avec méga canons à protons

➤ Beaucoup de questions ouvertes

- Forme du spectre autour et au delà de la coupure GZK : en accord avec la prédiction ou non ?
- Si sources : Répartition des sources dans l'univers et dans le voisinage "GZK" de la terre (<50Mpc)
- Si nouvelle physique, laquelle ?
- Nature des rayons cosmiques (indispensable pour trier les scénarios)

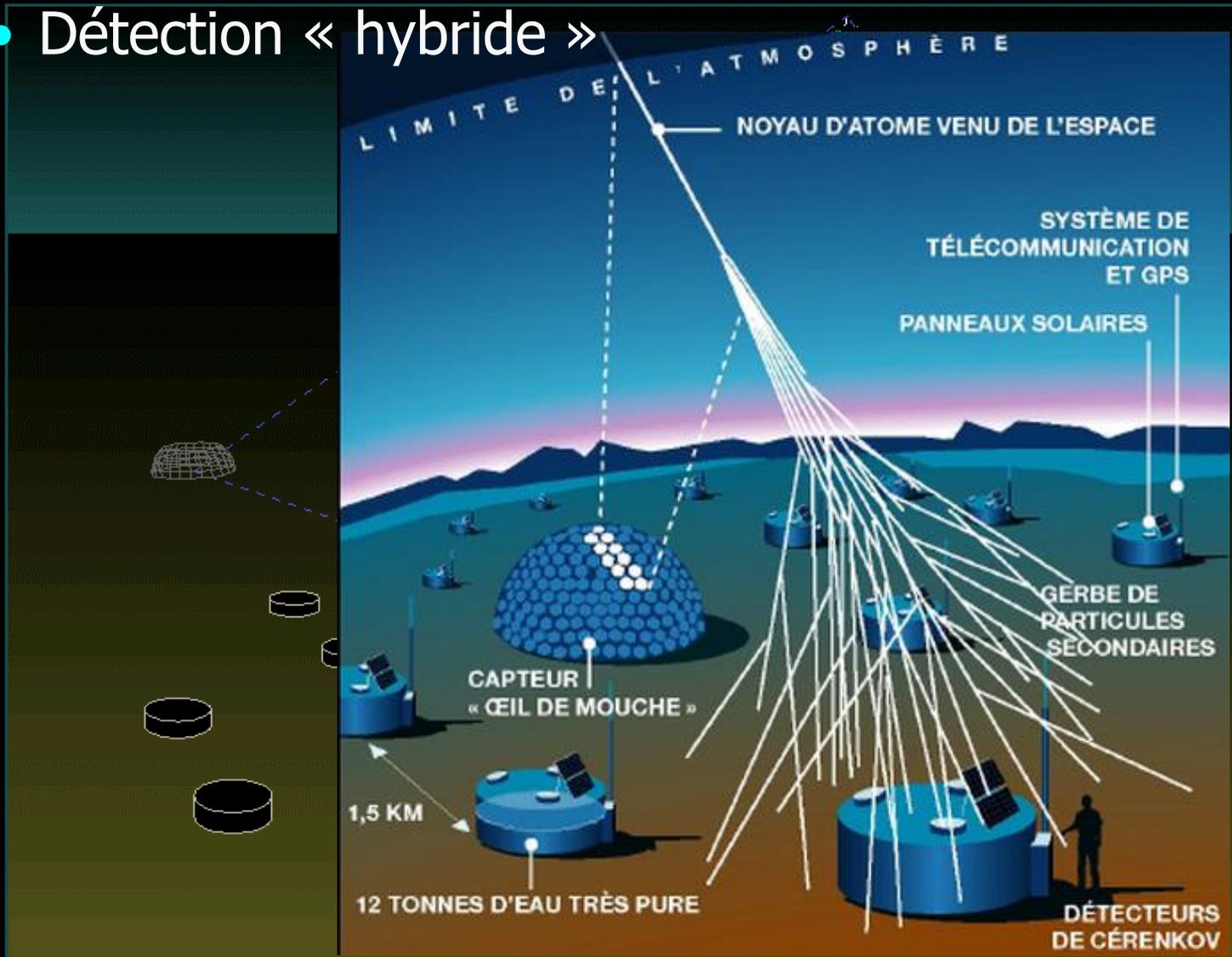
- Pour répondre à ces questions, il faut collecter plus d'événements et déterminer leur énergie, leur angle d'arrivée, leur nature avec un maximum de précision possible



Nouvelles expériences

➤ Observatoire Pierre AUGER

- Détection « hybride »

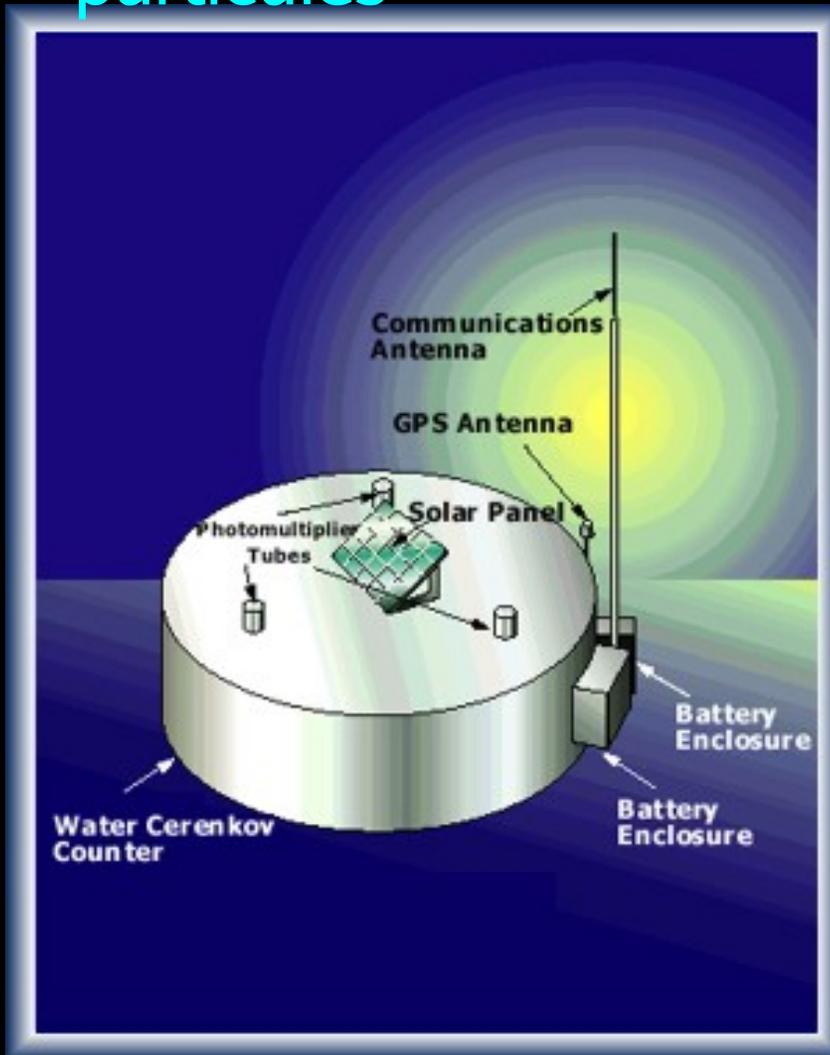


➤ Observatoire Pierre AUGER – site sud

- 1600 détecteurs, espacés de 1,5 km
- 3000 km²
- 24 télescopes



➤ Observatoire Pierre AUGER : détecteurs de particules



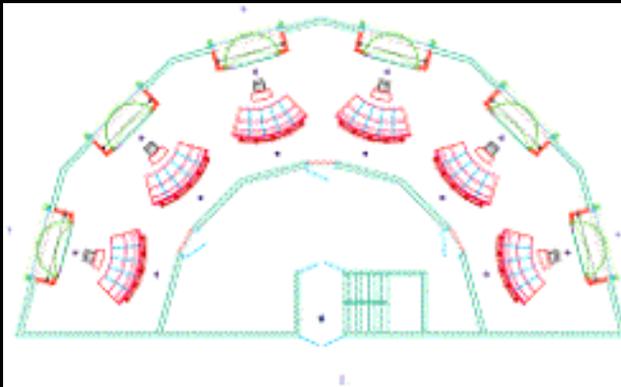
Un détecteur de surface est l'objet de la curiosité d'habitants de la pampa



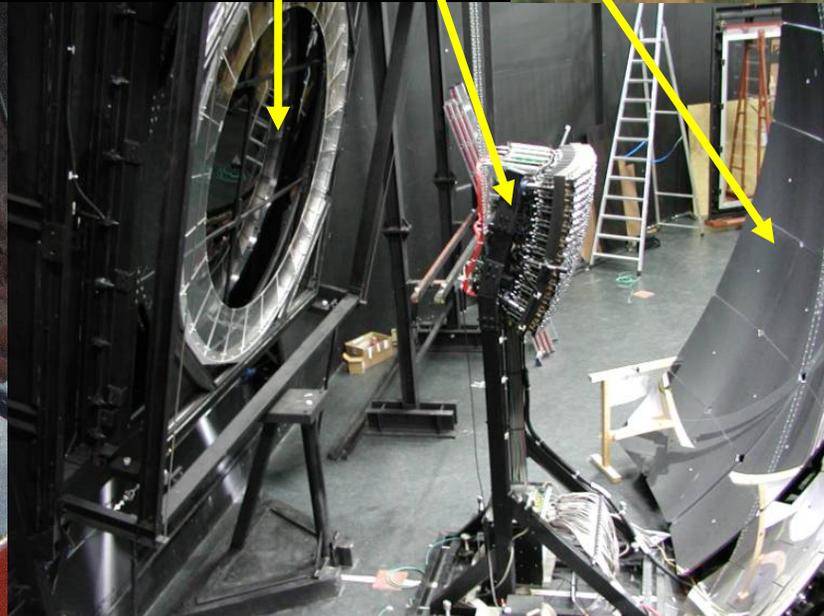
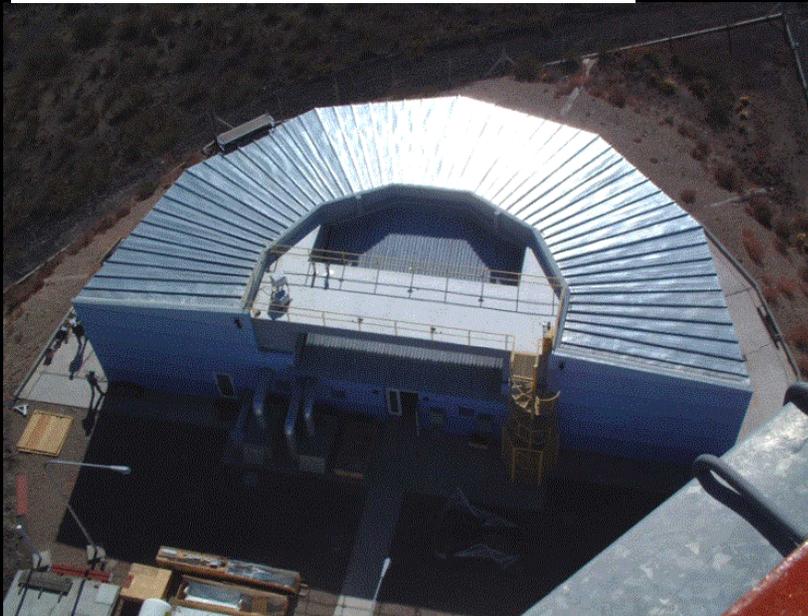
Vue de l'expérience.
Voyez-vous les cuves ?



➤ Observatoire Pierre Auger : détecteurs de fluorescence



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



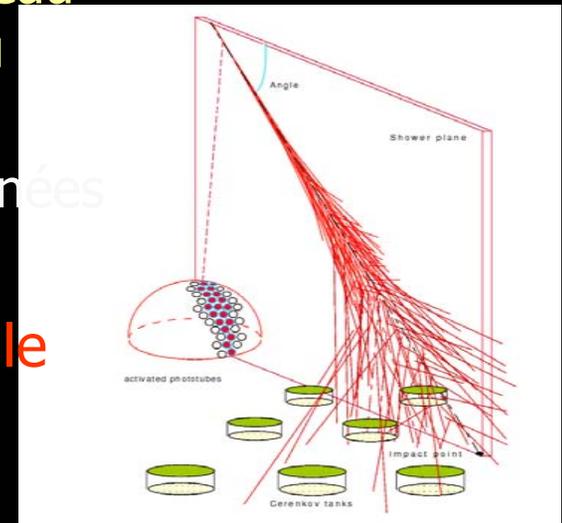
Vue aérienne d'une des stations de détection de la fluorescence (« Los Leones »)



➤ Observatoire Pierre Auger : statut

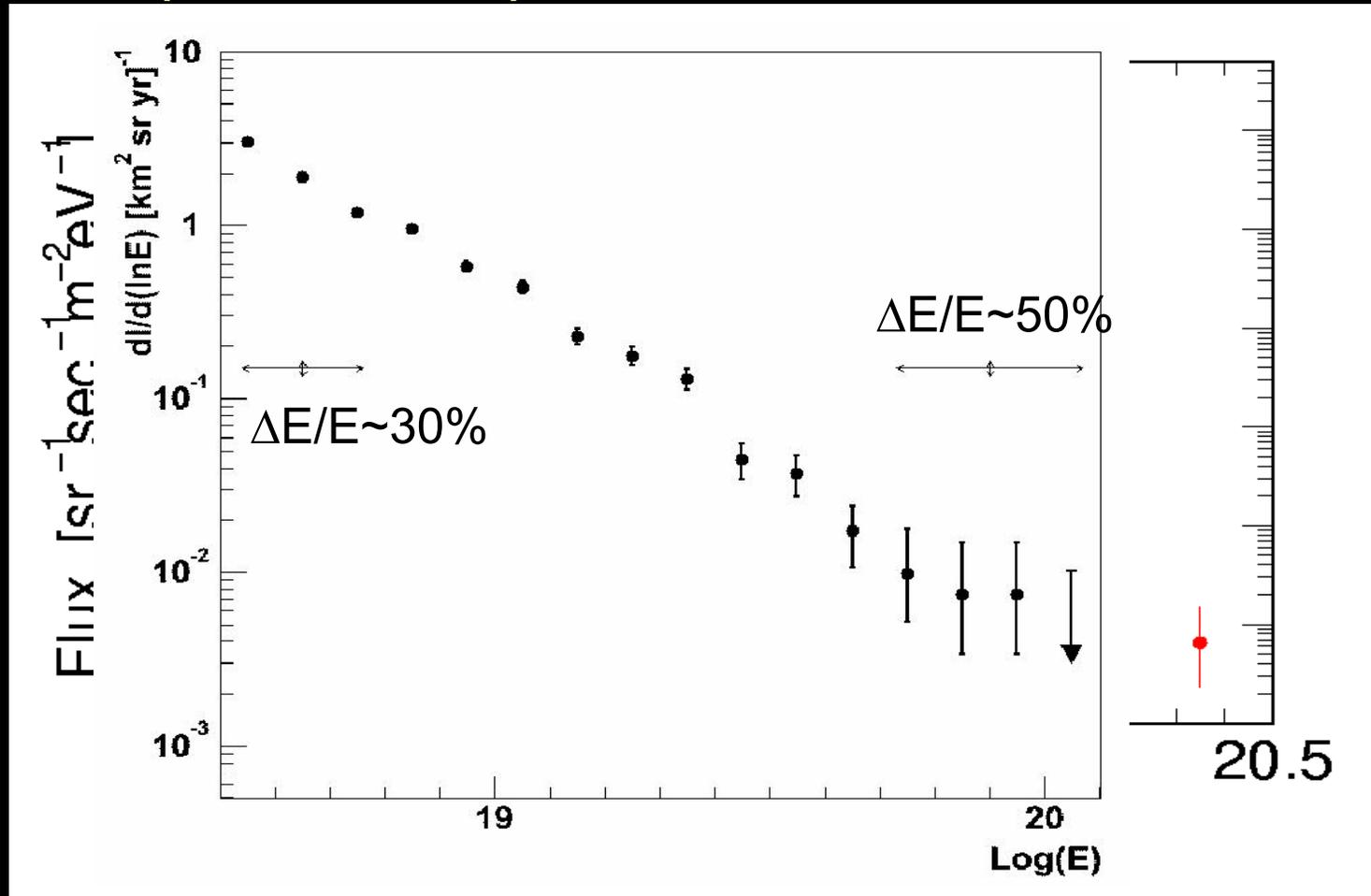
- phase prototype terminée :
 - Validation du concept
 - Objectifs atteints
- De l'ordre de 1000 stations détectrices installées et opérationnelles sur une surface de plus de 100 km²
 - l'Observatoire Pierre Auger est devenu depuis octobre 2003 le plus grand réseau de détecteurs de rayons cosmiques au monde.
 - ~1000 cuves qui enregistrent des données
 - 18 télescopes (3 bâtiments)

⇒ Détection en mode hybride fonctionnelle



➤ Premiers résultats (préliminaires, conf. été 2005)

- Déploiement et prise de données continuent



- Jusqu'à ~ 2015 : prise de données et analyses

➤ Observatoire Pierre Auger : statut

- Vers une couverture complète du ciel :

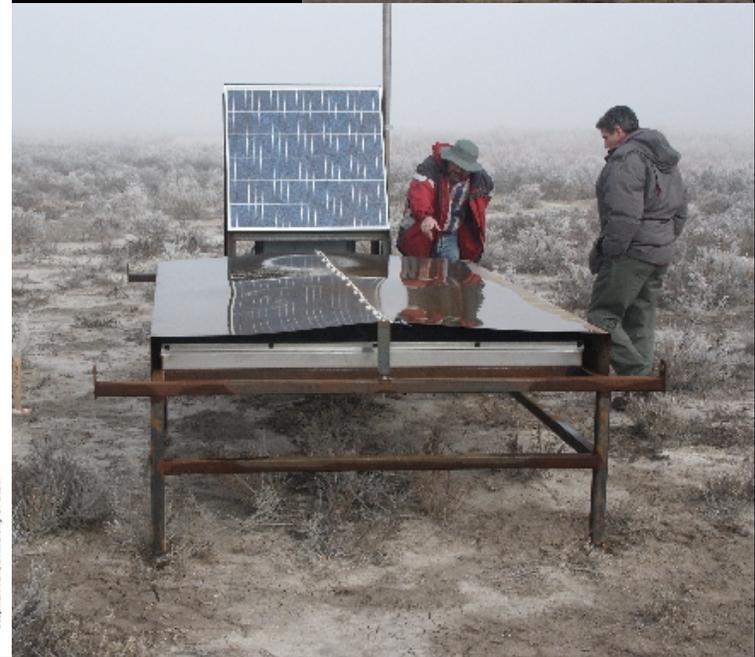
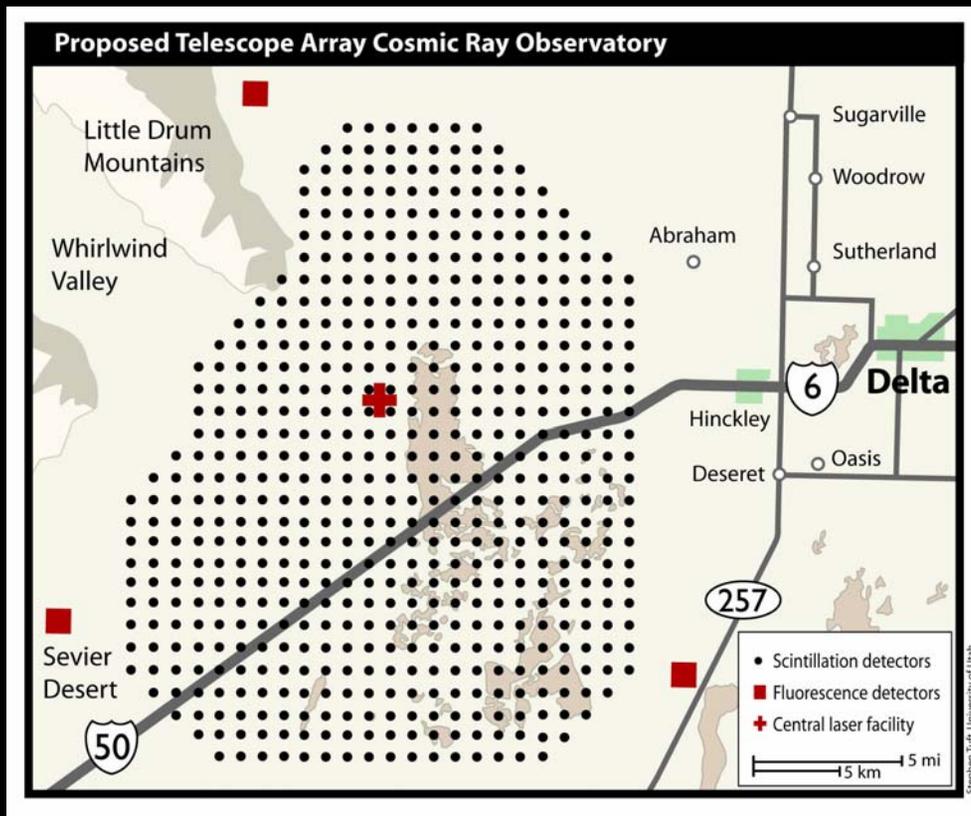


Projet pour un observatoire dans l'hémisphère nord (Colorado)

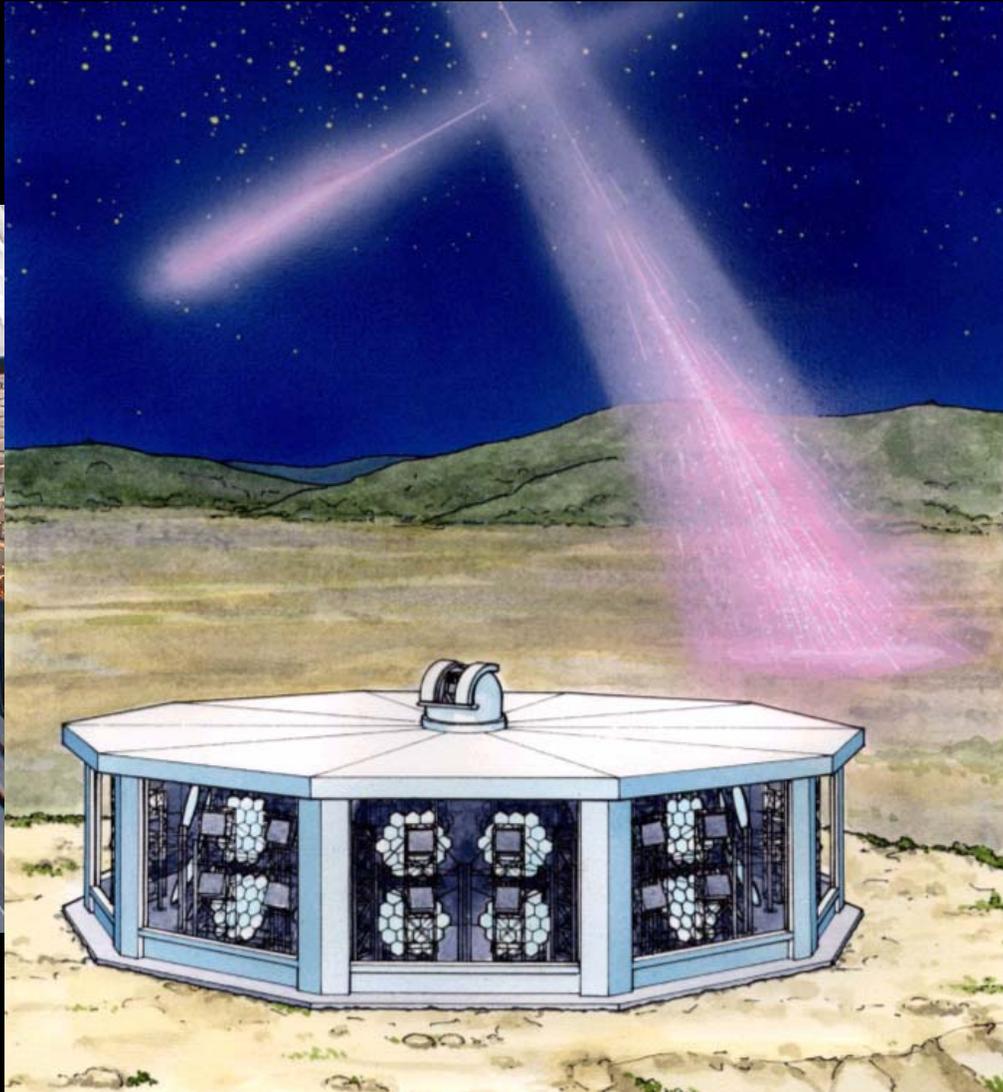


➤ Projet Télescope Array dans l'Utah

- 576 scintillateurs
- 3 télescopes à fluorescence



➤ Détecteurs de fluorescence

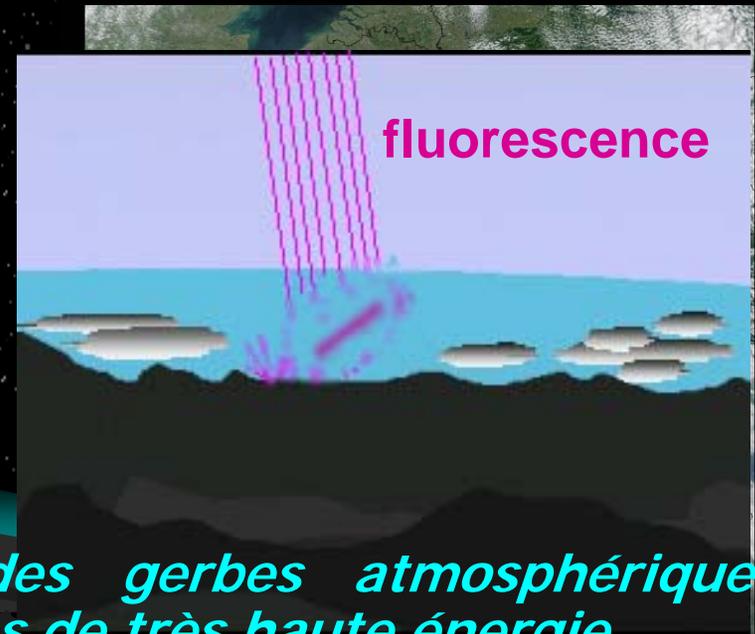
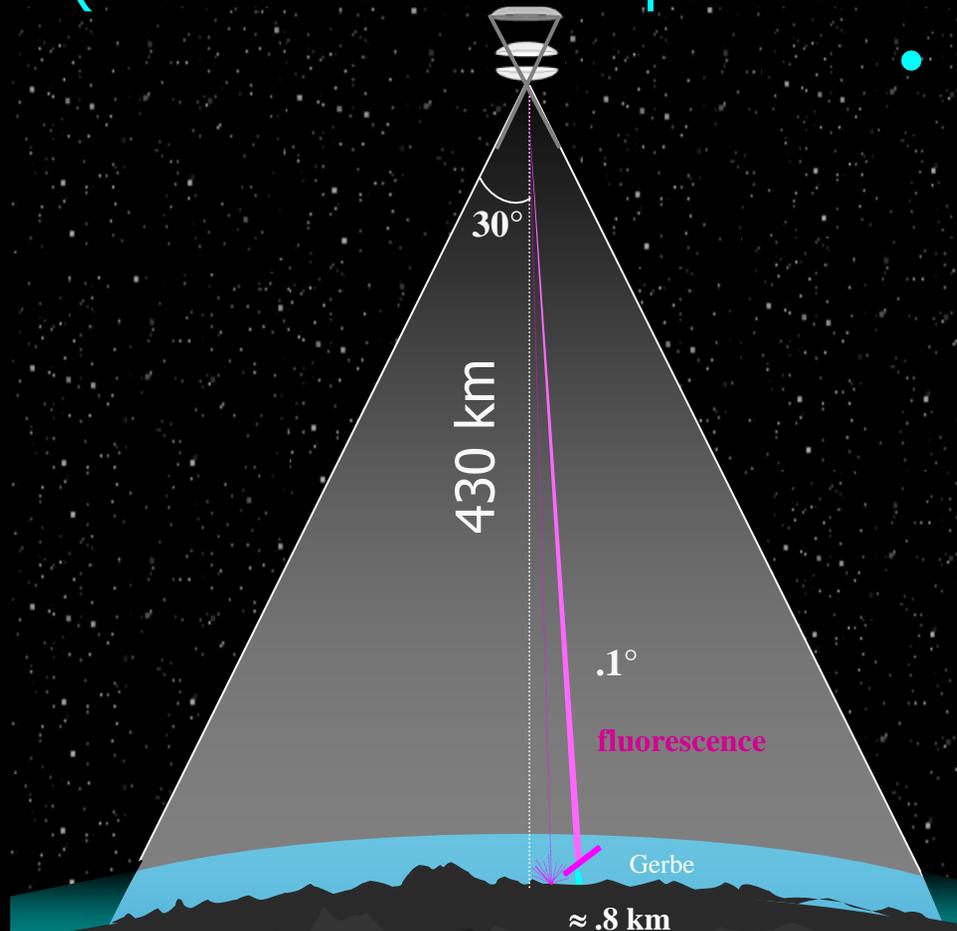




Projet de détecteur spatial

➤ Détection spatiale – ex: projet EUSO (Extreme Universe Space Observatory)

- Grandes surface d'observation et masse de cible :
 - $\sim 190000 \text{ km}^2$
 - $608000 \text{ km}^2 \cdot \text{sr}$
 - $2 \cdot 10^{12}$ tonnes d'atmosphère



➤ *observation depuis l'espace des gerbes atmosphériques*
➔ *détection de rayons cosmiques de très haute énergie*

➤ Avantages

- Grande acceptance géométrique
- Détecteur à \sim égale distance de toutes les gerbes
⇒ pas de problème de proximité
- Atmosphère traversée par les UV de fluorescence :
partie moins dense, plus claire

➤ Inconvénients

- Fonctionnement de nuit (sans lune)
- Faible angle solide de collection de photons (5m^2 à 430 km)
- Variabilité de l'atmosphère
acceptance, atténuation/distorsion du signal

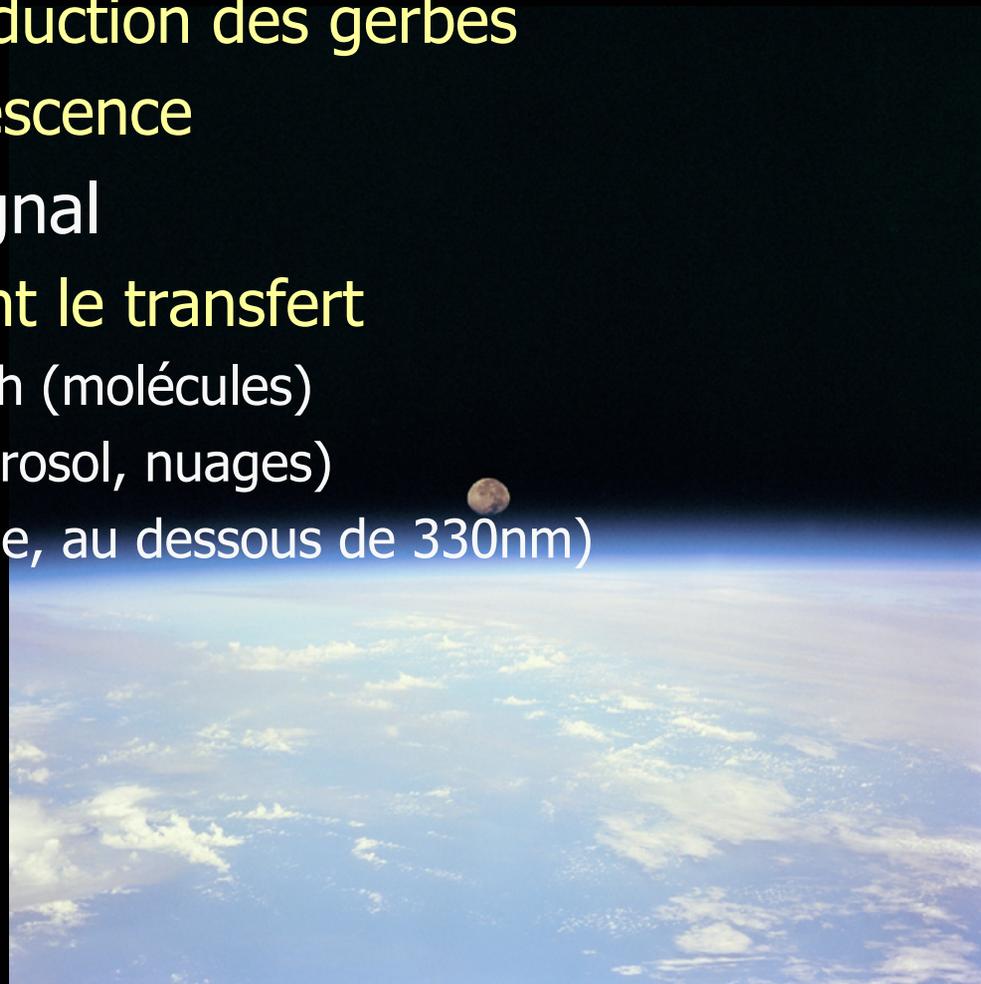
➤ Les exigences requises pour un télescope spatial

- Observation d'une grande masse d'atmosphère
- Sensibilité dans l'UV (330nm – 400nm)
- Grande efficacité de collection de photons \Rightarrow faible quantité de photons pour gerbes les moins énergétiques (seuil de détection)
- Détection de photons rapide, efficace et sensible au photon unique
- Bon rapport signal/bruit
- Dynamique étendue ($5 \cdot 10^{19}$ - $\sim 10^{21}$ eV)
- Moyen de caractériser l'atmosphère

+ Contraintes sur le poids
et la consommation

➤ Rôle crucial de l'atmosphère

- production du signal
 - Calorimètre : production des gerbes
 - Lumière de fluorescence
- transmission du signal
 - Atténuation durant le transfert
 - Diffusion Rayleigh (molécules)
 - Diffusion Mie (aérosol, nuages)
 - Absorption (ozone, au dessous de 330nm)
- source de bruit de fond



The background of the image is a rich, multi-colored nebula or galaxy core. It features a dense field of stars in various colors, including red, orange, yellow, green, and blue. The colors are distributed in a somewhat circular pattern, with a bright blue and white central region. The overall appearance is that of a vast, colorful cosmic structure.

**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

➤ Le champ électrique

Identifiés en 1970

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

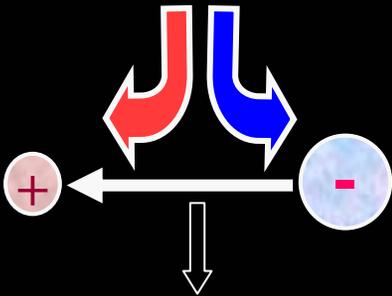


- Effet géomagnétique $F=qVxB$

➔ moment dipolaire



Courant transverse
d'alimentation du dipôle



- Prédictions théoriques sur le signal induit par la superposition 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

➤ Prédiction 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

➤ Technique à valider

- série de mesures avec le réseau décimétrique 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



➤ Education et réseaux de détection des RC

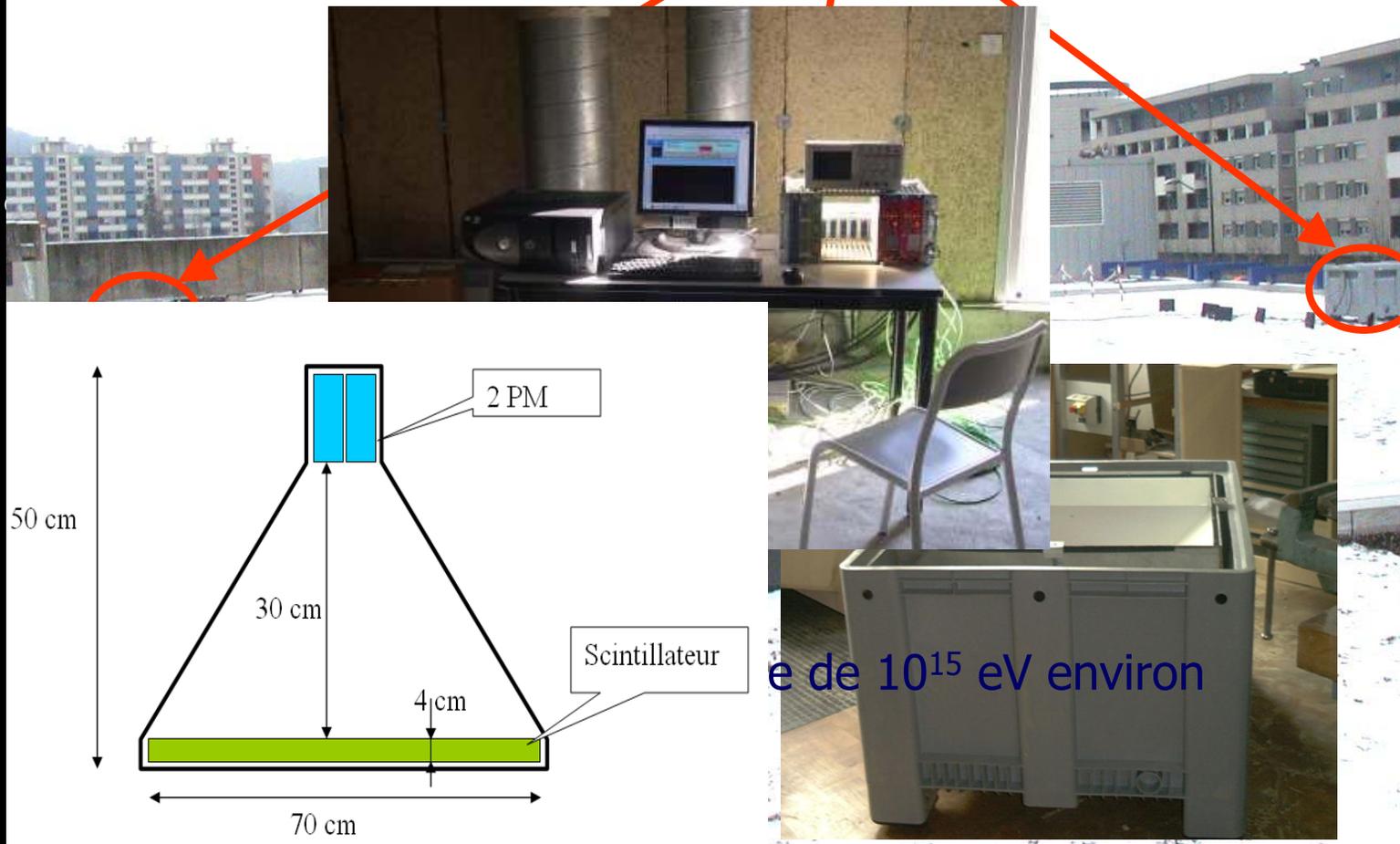
- « Mini-réseaux » de détecteurs de particules dans les lycées et universités
- D'un simple « TP » de physique vers un vrai programme scientifique
- rechercher des RC de haute énergie avec des réseaux dispersés de détecteurs simples

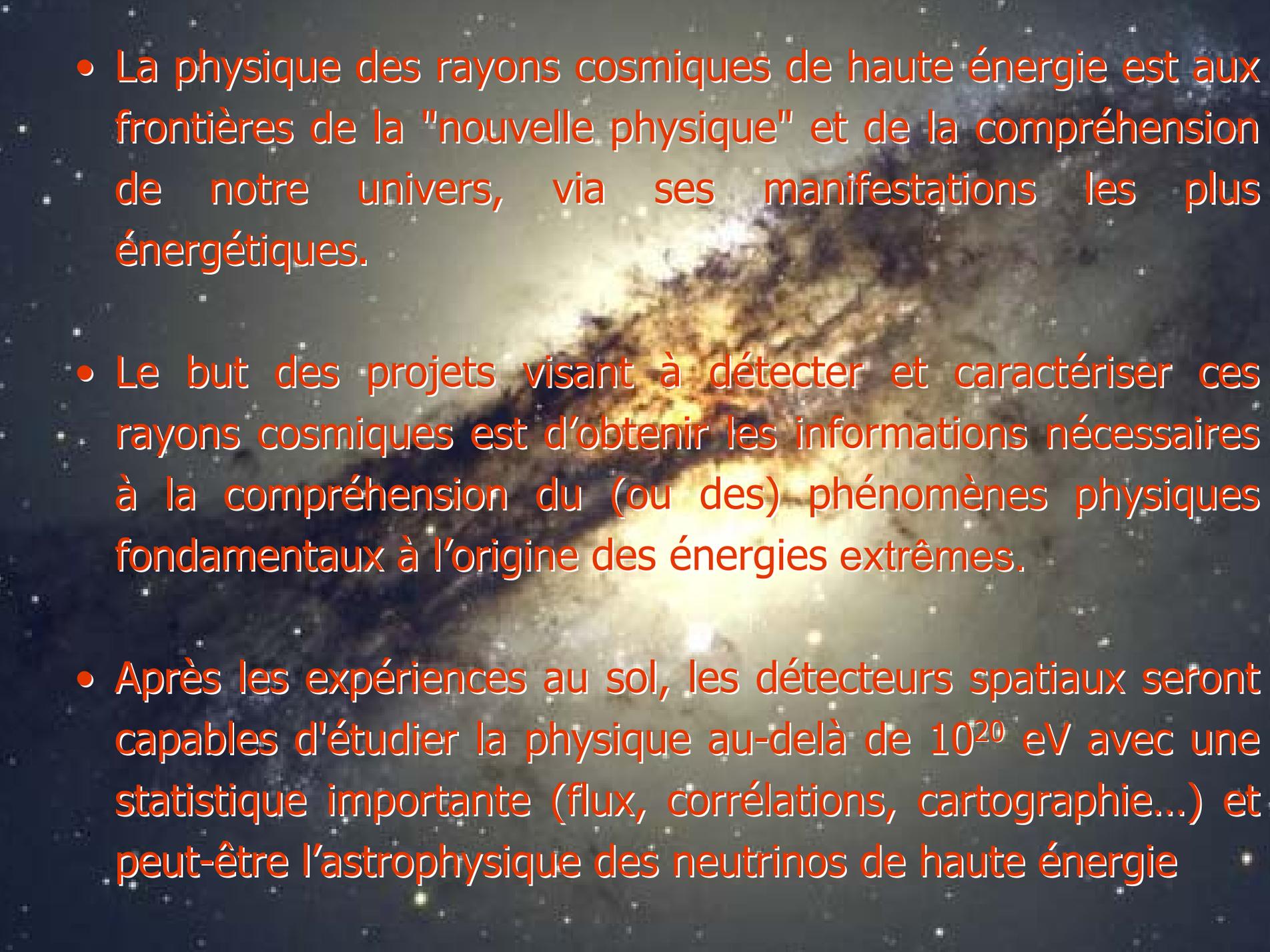
NALTA (North American Large area Time coincidence Arrays)



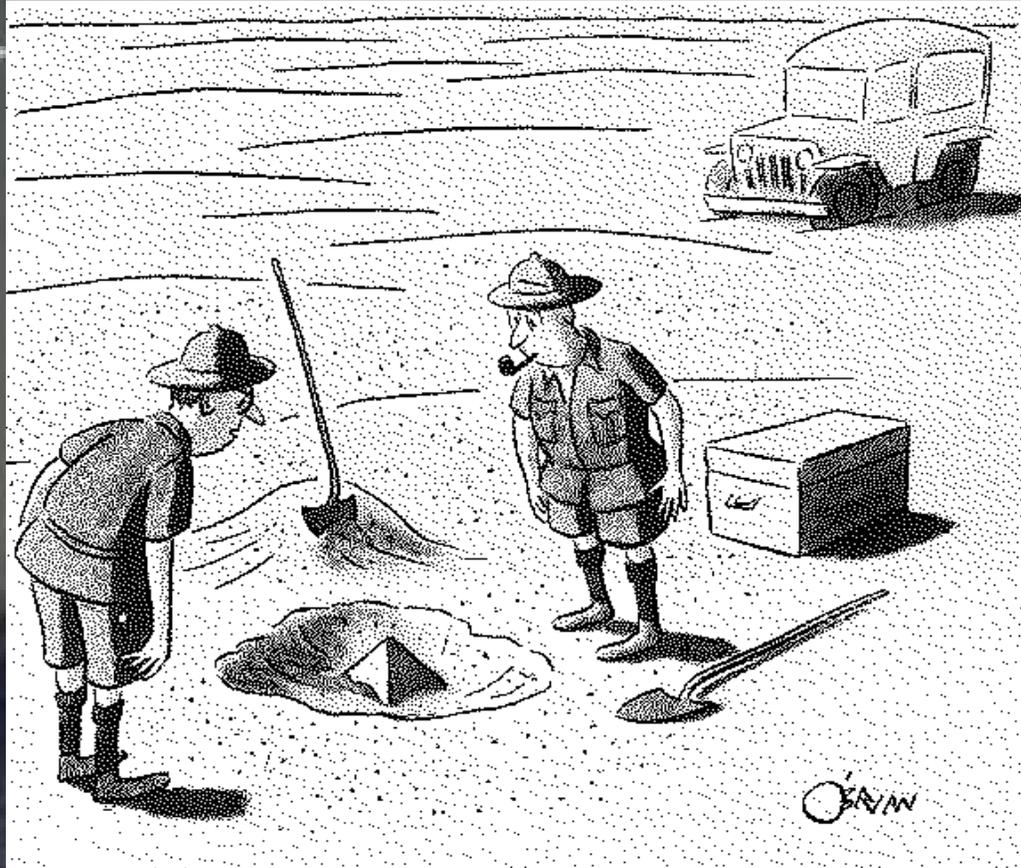
➤ ECRINS

3 détecteurs, espacés de 22 m



- 
- La physique des rayons cosmiques de haute énergie est aux frontières de la "nouvelle physique" et de la compréhension de notre univers, via ses manifestations les plus énergétiques.
 - Le but des projets visant à détecter et caractériser ces rayons cosmiques est d'obtenir les informations nécessaires à la compréhension du (ou des) phénomènes physiques fondamentaux à l'origine des énergies extrêmes.
 - Après les expériences au sol, les détecteurs spatiaux seront capables d'étudier la physique au-delà de 10^{20} eV avec une statistique importante (flux, corrélations, cartographie...) et peut-être l'astrophysique des neutrinos de haute énergie

Je vous remercie de votre



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

ATTENTION !

➤ Rôle crucial de l'atmosphère

- source de bruit de fond

- Sources artificielles

- Sources naturelles

- airglow, étoiles, lune, nuages noctulescents, ...

- Sources naturelles et transitoires

- éclairs, elfes, fusées bleues, sprites.

Pollution lumineuse des villes

Airglow

Fusées bleues

Sprites

« Les questions que se posent les chercheurs semblent parfois ne pas beaucoup changer au cours des années. Ainsi, « l'origine du rayonnement cosmique » aurait très bien pu être le titre d'un article écrit il y a plusieurs décennies. Est-ce à dire que la recherche n'a pas progressé dans ce domaine? Au contraire, l'accumulation récente de découvertes comme les pulsars et le raffinement des méthodes expérimentales dont disposent maintenant les chercheurs éclairent sous un jour nouveau ce problème clef de l'astronomie. »

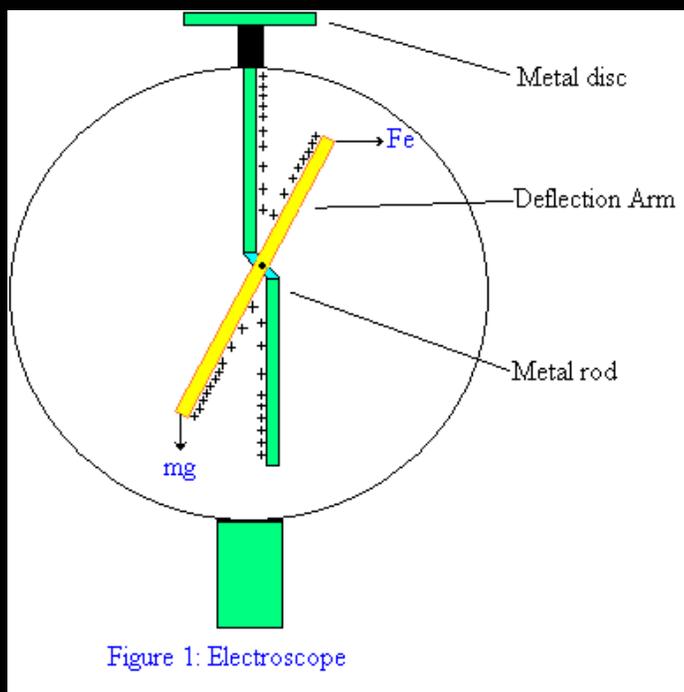
La Recherche, n° 35, juin 1973

Jean Audouze, Chargé de Recherche au CNRS (service d'électronique physique de Saclay et observatoire de Meudon)

Maurice Meneguzzi, Thésard.

➤ L'électroscope

- Électroscope chargé \Rightarrow les « bras » se repoussent
- Soumis à un rayonnement énergétique, l'air se trouve partiellement ionisé et les charges sont évacuées
- L'électroscope se décharge d'autant plus vite que le rayonnement est plus intense



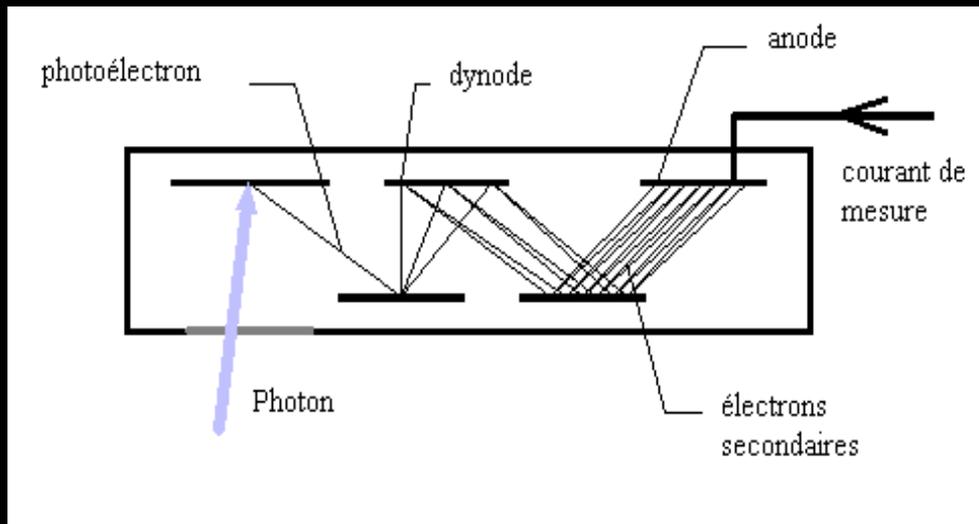
➤ Chambre à brouillard de Wilson

- Un gradient de température est établi entre le haut et le bas d'une enceinte isolée thermiquement et remplie d'un mélange d'air et de vapeur d'alcool.
- Avant de se condenser sur le fond, les vapeurs d'alcool traversent une zone de sursaturation. Dans cette zone, les ions produits par les interactions des particules ionisantes (électrons, positrons, alpha, pions, etc...) avec le gaz se comportent comme des germes de condensation le long des trajectoires.
- Par l'analyse des trajectoires (longueur, densité, profil,..) on peut sélectionner les différents types de particules et caractériser leur comportement par leurs interactions avec la matière.



➤ 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.

➤ Effet Cherenkov

- Observation d'une lumière bleutée (Mme Curie, 1910)
- Interprété par le physicien russe P. Cherenkov
⇒ 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.

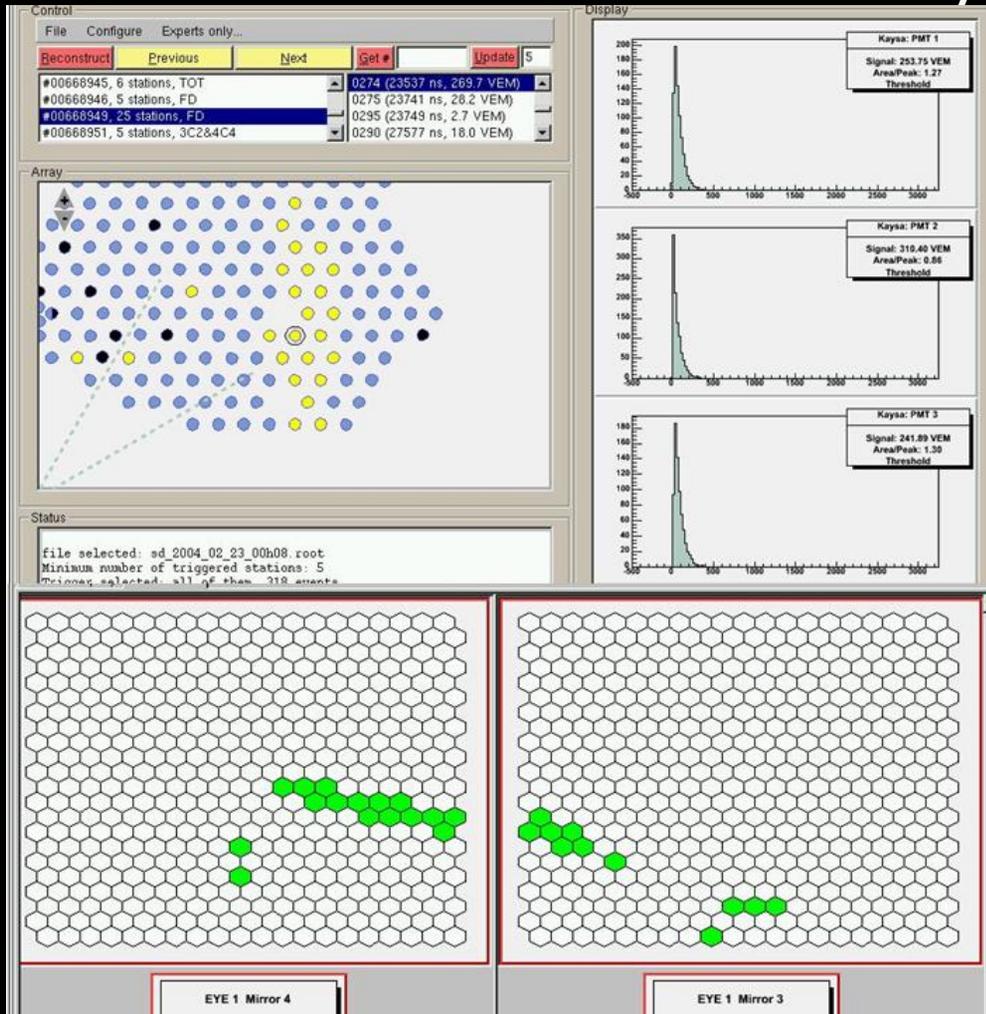


$$\cos \theta = 1/\beta n$$

- *Contemporary astrophysics is faced by a number of acute problems.*
- *One of them concerns **dark matter**, which one might (perhaps mischievously) qualify as the study of **particles which should exist... but until further notice, don't.***
- ***Ultra high energy cosmic rays** constitute the inverse problem:
particles which do exist... but perhaps shouldn't.*

Ludwik M. Celnikier

- Observatoire Pierre Auger : statut
 - Détection d'événements « hybrides »



- Détectés par les stations opérationnelles
- Détectés également par des détecteurs de fluorescence