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, with intricate filamentary structures. The overall color palette is dominated by the dark blues and blacks of space, punctuated by the bright colors of the stars and the vibrant reds of the nebula.

Energie Extrême et Rayons Cosmiques

3^{ème} partie

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



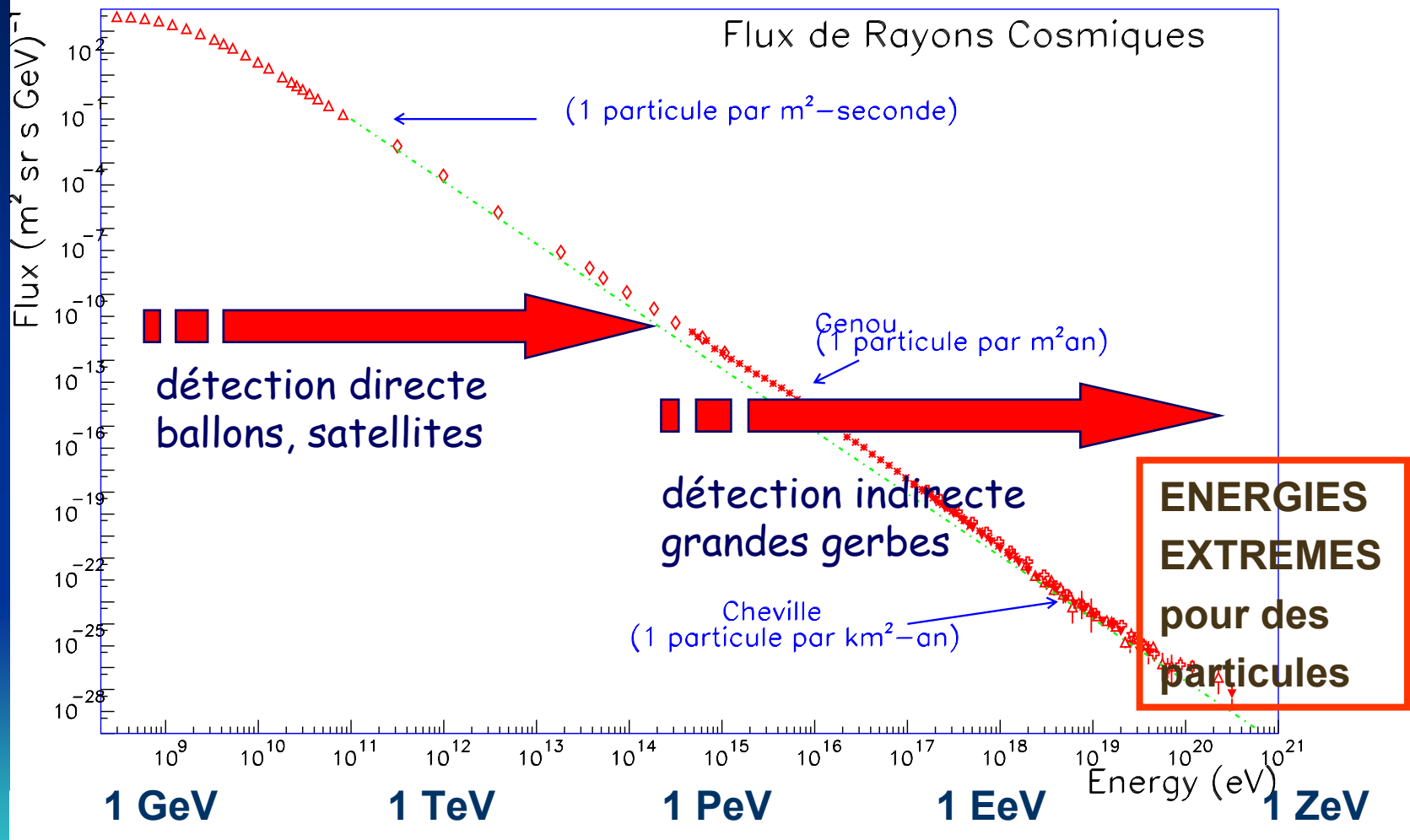
- ◆ Les grandes gerbes atmosphériques
- ◆ Les rayons cosmiques aux énergies extrêmes



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

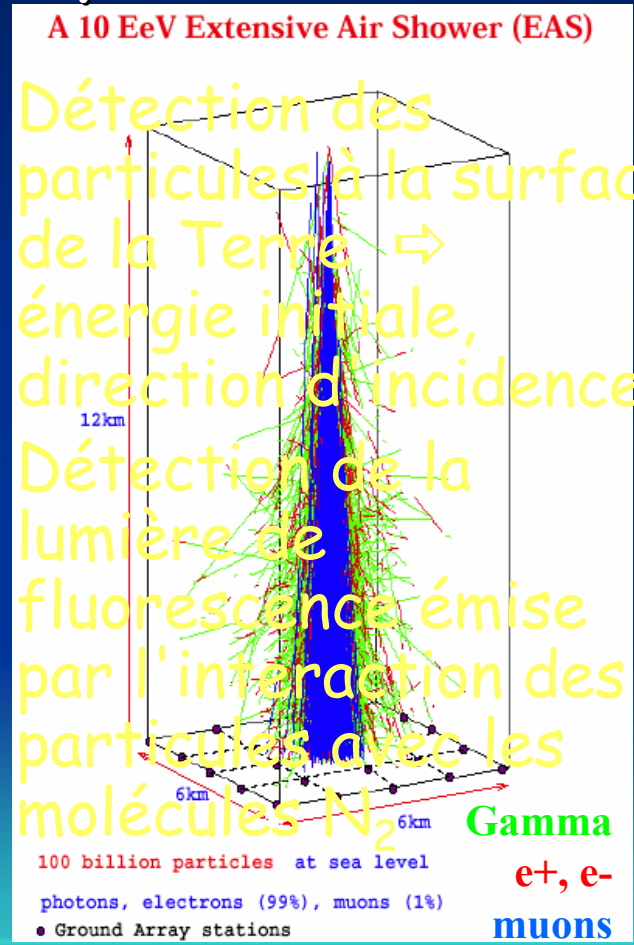
Le spectre des RC : flux en fonction de l'énergie

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 0,000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 16 \text{ J}$$



Cascades de particules

Energie > 10 000 000 000 000 000 000 eV
 ⇒ environ 100 milliards de particules au sol



RC d'énergie $> 10^{20}$ eV détectés par plusieurs expériences

Volcano Ranch
(59-63) 8 km²
HiRes
(1)

Haverah Park
(67-87) 12 km²
(4)

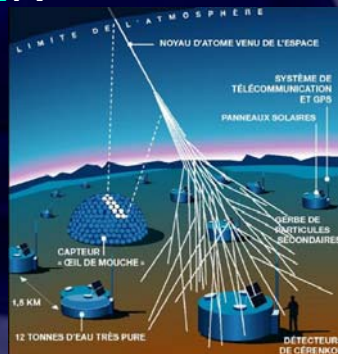
Yakutz
(70-95)
(1)

AGASA

Fly's eyes
(81-92) (1*)

Observatoire
Pierre AUGER

Sugar
(68-79)
(8)



RCEE (Rayons Cosmiques aux Energies Extrêmes)

- ◆ 10^{20} eV c'est : 100 000 000 000 000 000 000 eV
 - Une énergie macroscopique : 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 ...

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...



« 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.

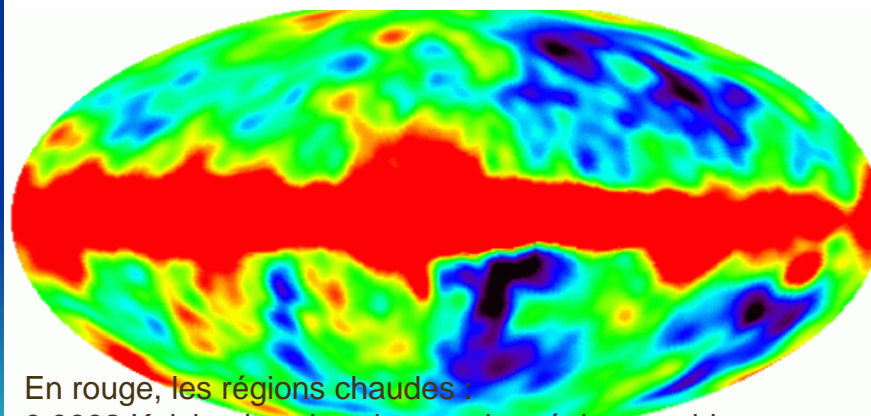


Origine et propagation des RCEE

Interaction des RC avec le CMB

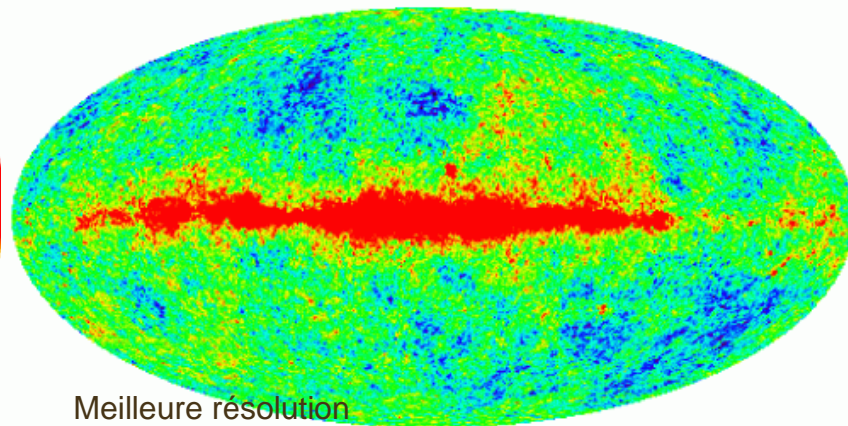
- ◆ Le CMB (cosmic microwave background) ou rayonnement fossile à $2,7^{\circ}\text{K}$
 - Découvert en 1965 par Penzias et Wilson
 - L'Univers est rempli de photons très froids (peu d'énergie) en grand nombre ($400/\text{cm}^3$)

Mesuré par COBE



En rouge, les régions chaudes :
0.0002 Kelvin plus chaudes que les régions en bleu.




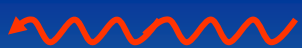
simulation des mesures de WMAP



Meilleure résolution

Propagation : interaction des RC avec le CMB

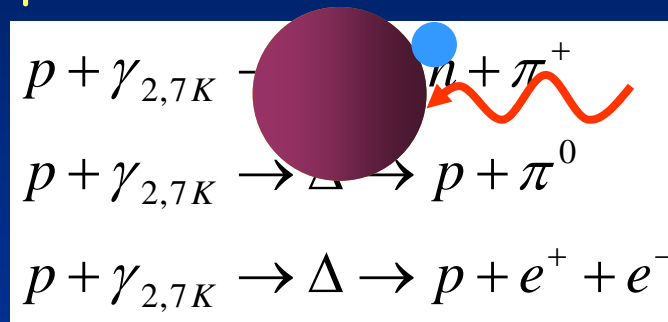
- ◆ Ces photons sont inoffensifs, car d'énergie très faible...
... à moins de se jeter sur eux à toute allure !!!

	proton	photon
Système du laboratoire	10^{20} eV 	0.5 meV 
Référentiel du proton	$E_{cin}=0$ 	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 $p-\gamma$ 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

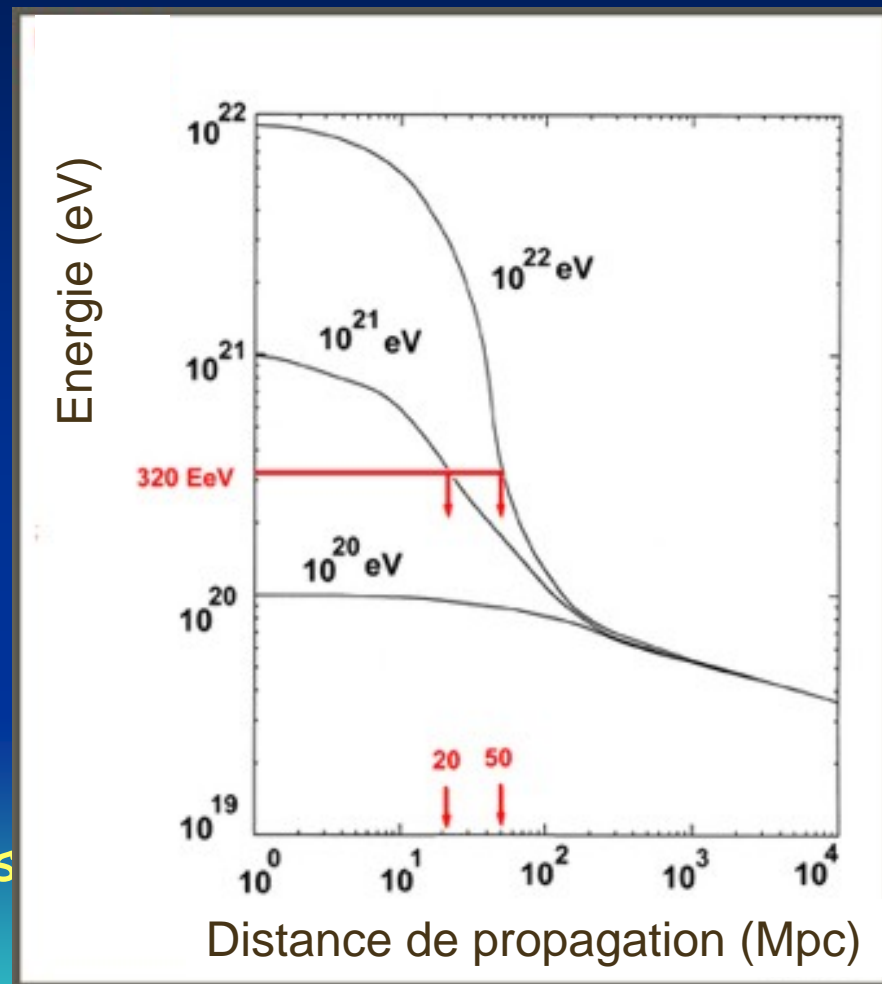
Conséquences de l'effet GZK sur les protons

◆ Libre parcours moyen

- Au dessus de $5 \cdot 10^{19}$ eV :
10Mpc.
(1 pc = $3.09 \cdot 10^{16}$ m)

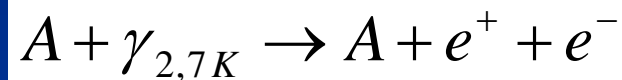
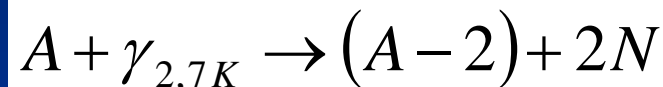
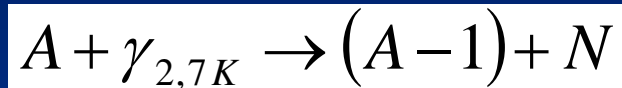
◆ Brutalité de la coupure GZK:

- 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 $10^{14}eV$

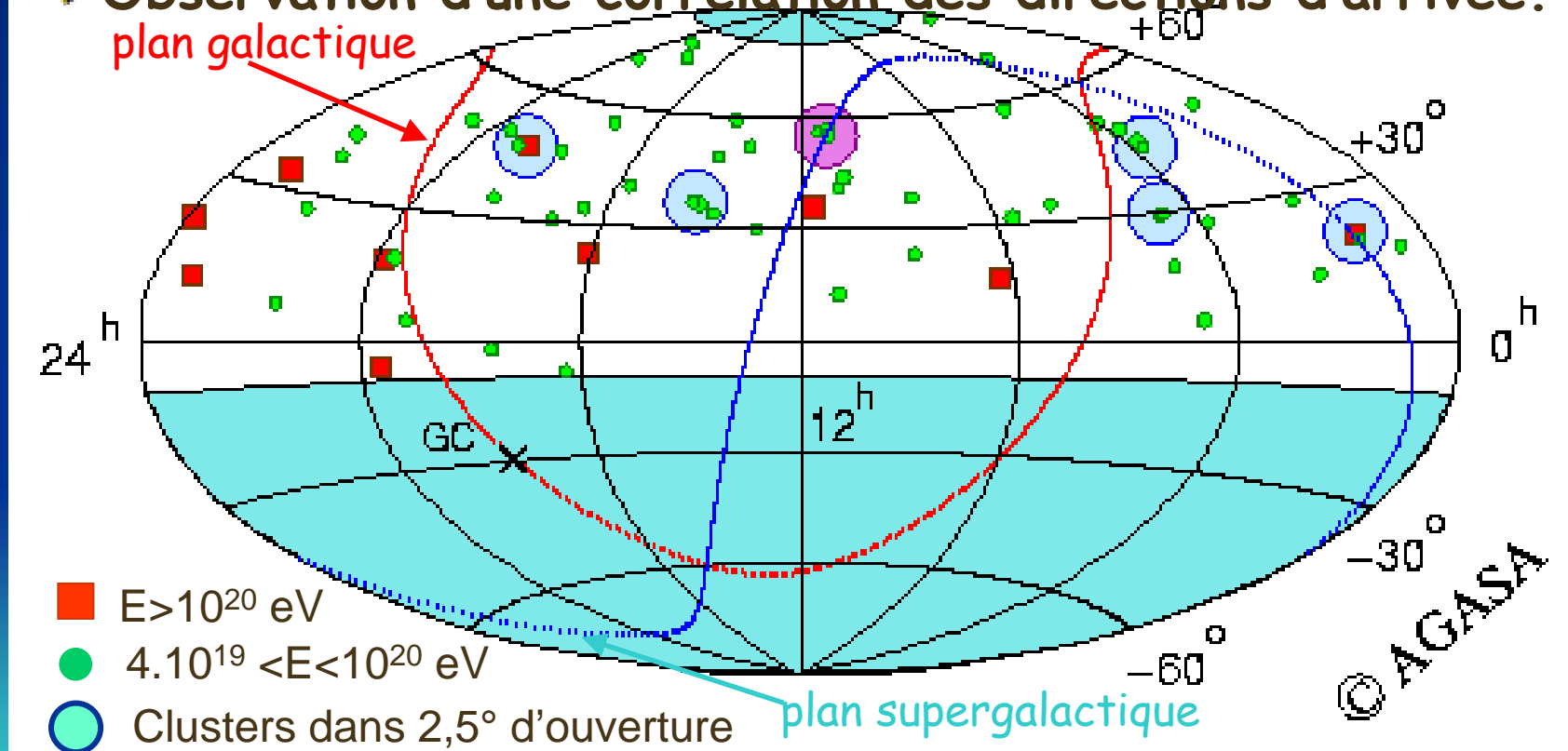
- ◆ Neutrinos

- Parfaitement insensible à tous les obstacles : sondes idéales... oui, mais extrêmement difficile de les détecter

Effet GZK et résultats expérimentaux

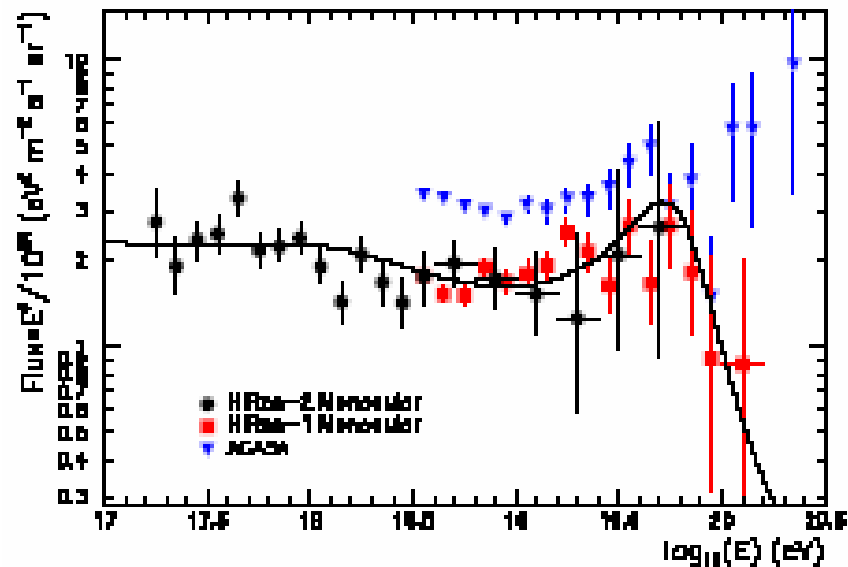
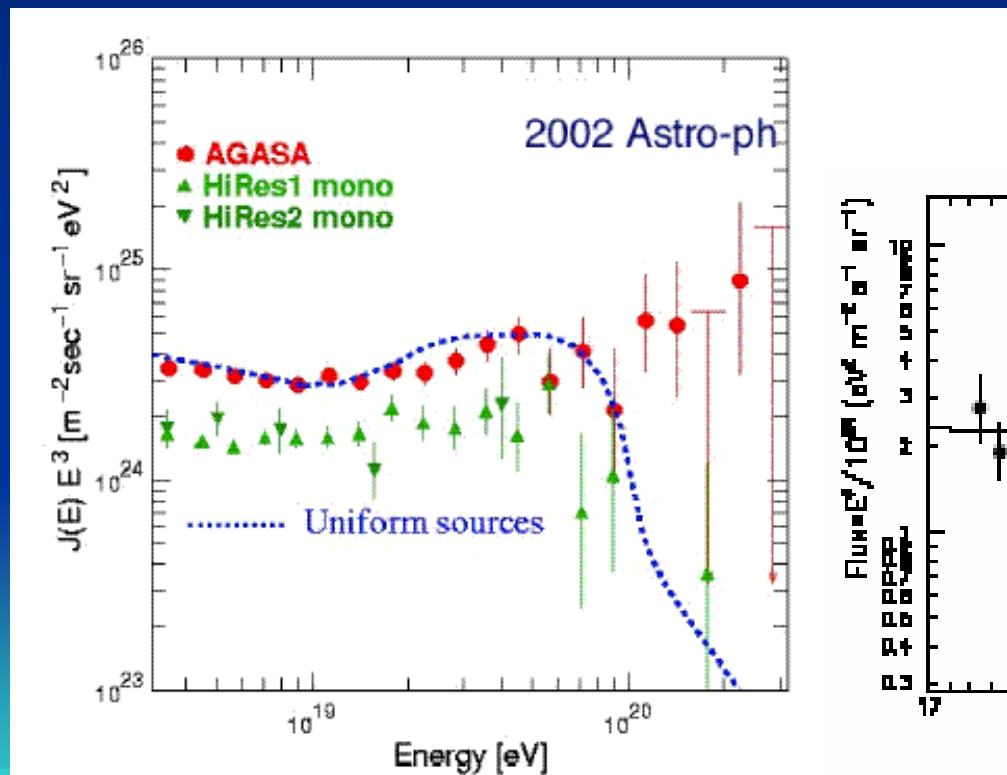
- ◆ AGASA : 10 événements au-dessus de 10^{20} eV \Rightarrow sources proches, dans un rayon de ~ 100 Mpc

- ◆ Observation d'une corrélation des directions d'arrivée.



Effet GZK et résultats expérimentaux

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



Origine des RCEE

Problème de l'origine non trivial : aucune source identifiée

◆ Schéma bas-haut (bottom-up)

- Accélération progressive des chargés, jusqu'à des énergies suffisantes pour nous parvenir aux énergies observées malgré le « frottement » sur le CMB
- Comment fonctionne l'accélérateur ? Pourquoi ne l'observe-t-on pas directement (malgré les énergies mises en jeu) ?

◆ Schéma haut-bas (top-down)

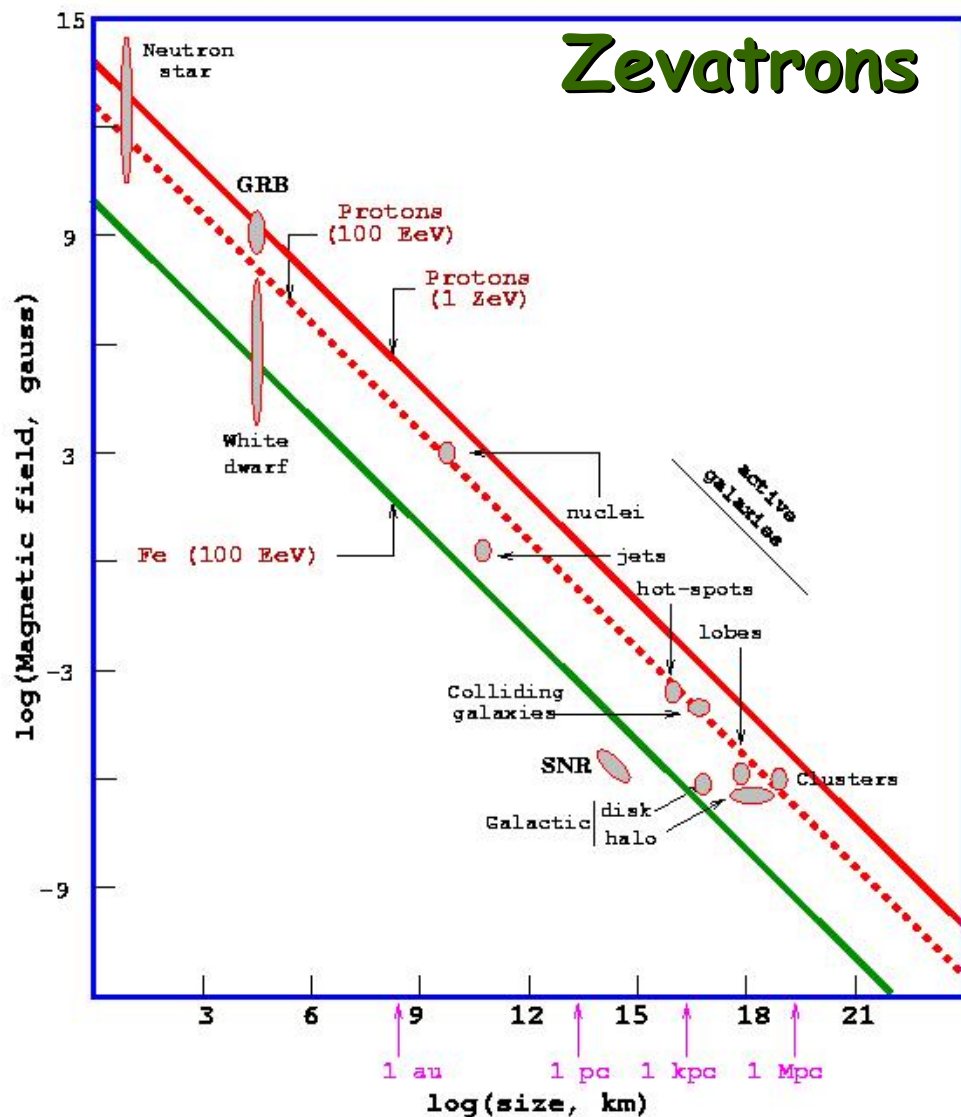
- Particules très massives ($M > 10^{21} eV$) qui se désintègrent

◆ Signe d'une Nouvelle physique ?

- Invariance de Lorentz brisée aux énergies extrêmes

Schéma « bas-haut » : accélération

- ◆ 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) :
 - $B.R > E/Z$
B en μG , R en kpc, E en EeV
- ◆ Recherche des sources potentielles limitée aux objets astrophysiques vérifiant cette condition
 - Diagramme de Hillas :
ZeVatrons
Accélérateurs Astrophysiques atteignant le ZeV



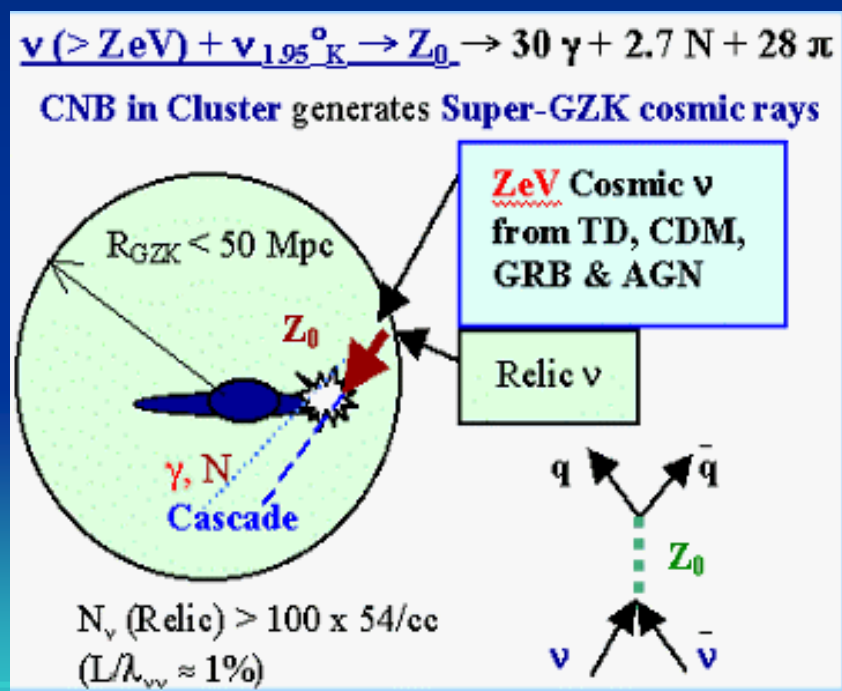
Lignes diagonales :
valeurs requises
pour l'énergie en
fonction de Z

survivants au critère
B.R > E/Z

Etoiles à Neutron
Gamma Ray Bursts
Noyaux actifs de
galaxie
Lobes Radio
Clusters
Galaxies/Clusters en
collision

Scenario « haut-bas » (+ nouvelle physique)

- ◆ Désintégration/annihilation particules massives
 - ⇒ flux de neutrinos et de gammas, leptons, qq protons
 - Défauts topologiques ⇒ émission de particules « X »
 - Reliques de l'univers primordial
 - problématique de la matière noire.
 - solution à l'énigme GZK
- ◆ Désintégration de Z^0
 - mécanisme supposant un flux important de ν de très haute énergie, à expliquer !



Scenario impliquant une nouvelle physique

- ◆ Brisure de l'invariance de Lorentz à très haute énergie
 - seuil de la réaction conduisant à la perte d'énergie des protons modifié \Rightarrow 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

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

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 ($< 50 \text{ Mpc}$)
- ◆ Si nouvelle physique, laquelle ?
- ◆ Nature des rayons cosmiques (indispensable pour trier scenarios)

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

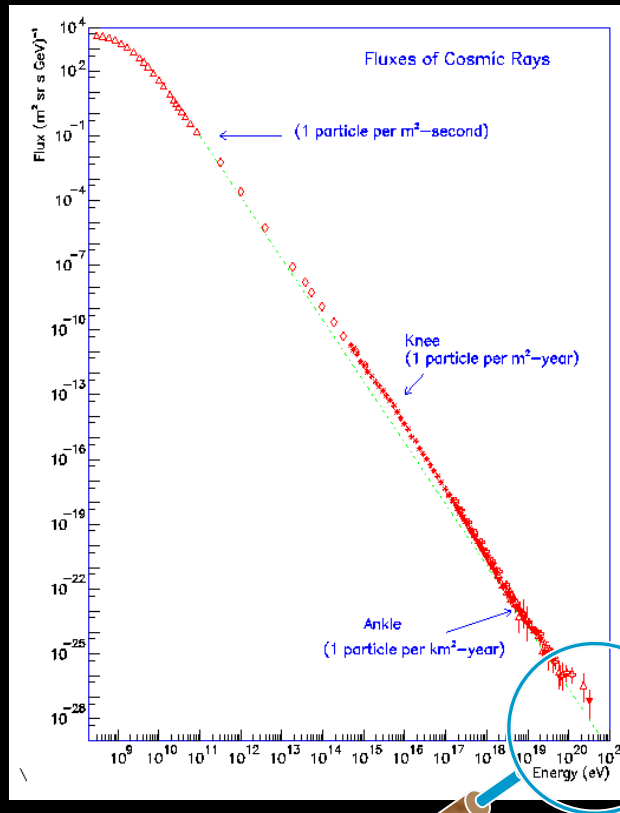
- ◆ AUGER va résoudre l'énigme AGASA-HiRes
 - Quelle que soit la réponse de AUGER :
- ◆ EUSO pourra étudier, en détail, la physique au delà de la coupure GZK



EUSO

Extreme Universe Space Observatory

➤ Les objectifs scientifiques d'EUSO

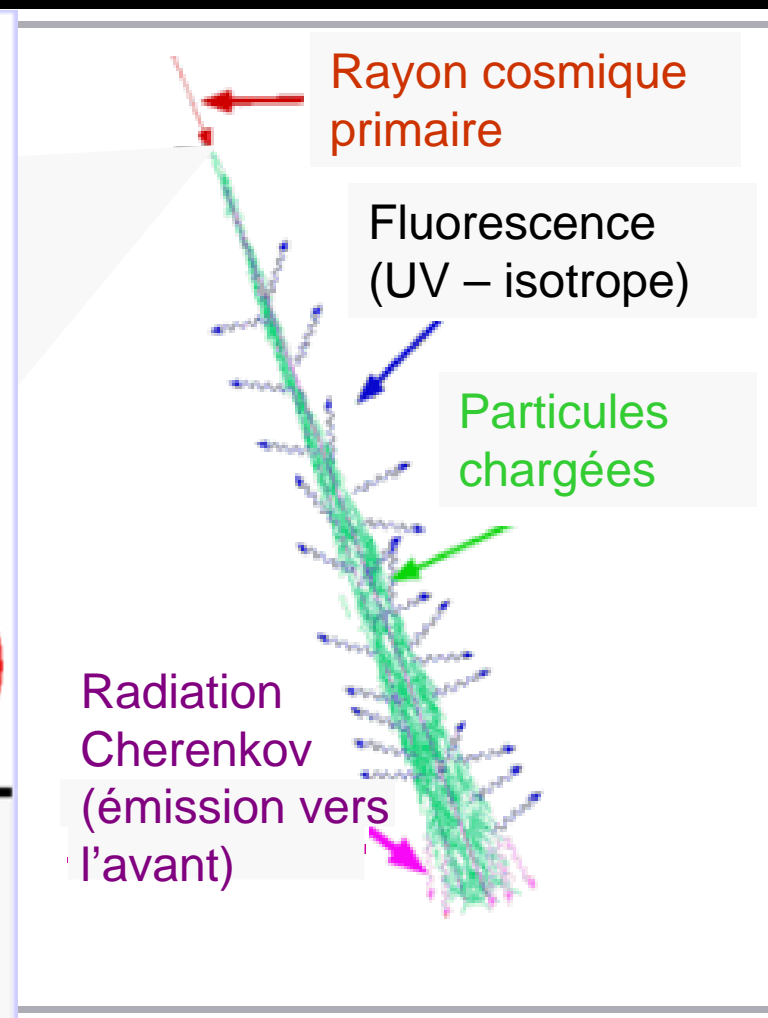
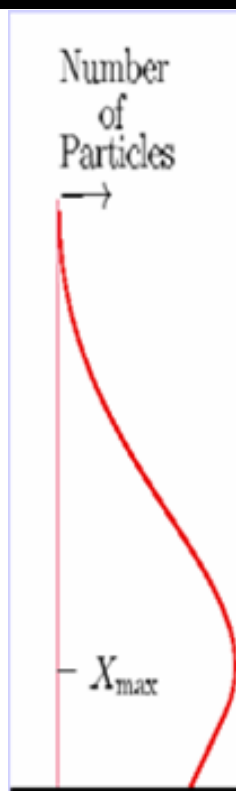
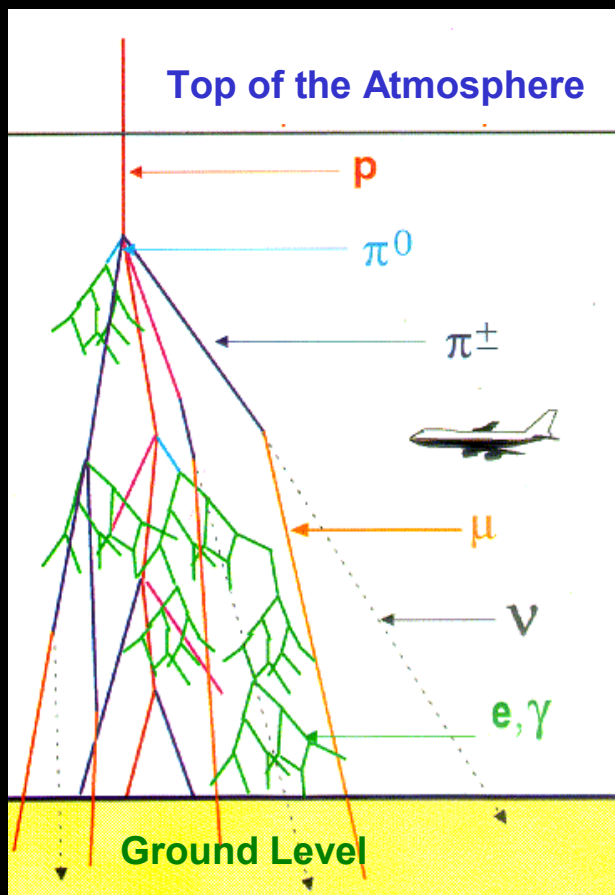


- Mesure du spectre en énergie au delà de la « coupure » GZK
- Comparaison avec les résultats d'AUGER dans la région GZK
- Carte détaillée des directions d'arrivée et étude des anisotropies éventuelles
- Composition des primaires
- Détection de neutrinos de très haute énergie

⇒ **L'astronomie par les RCEE et les neutrinos**



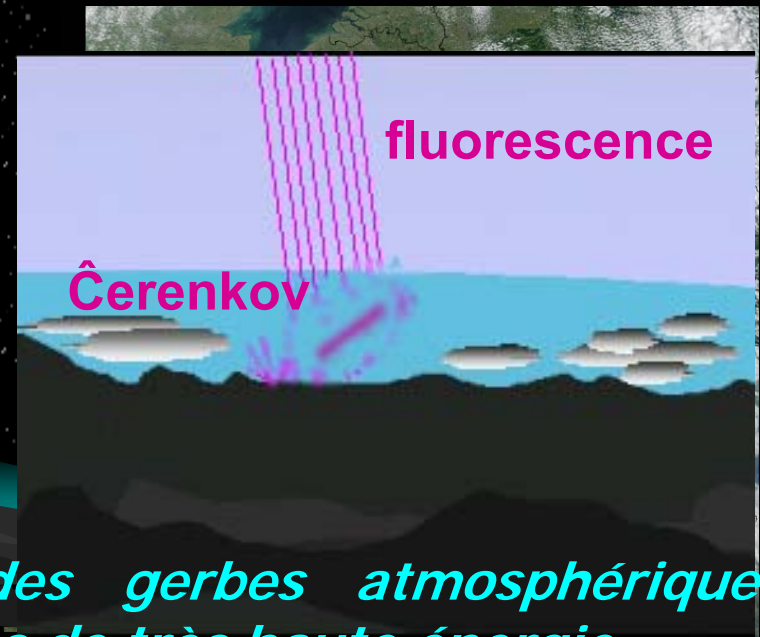
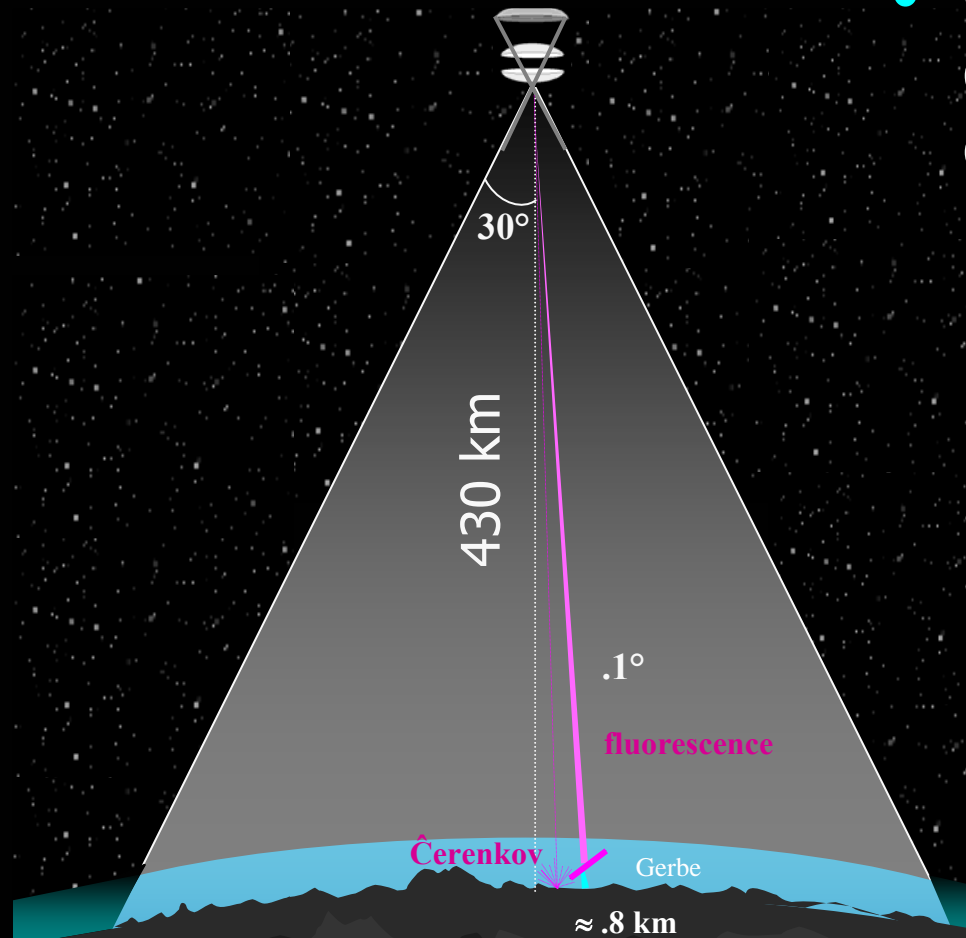
➤ Développement de la gerbe et émission lumineuse





➤ Détection spatiale

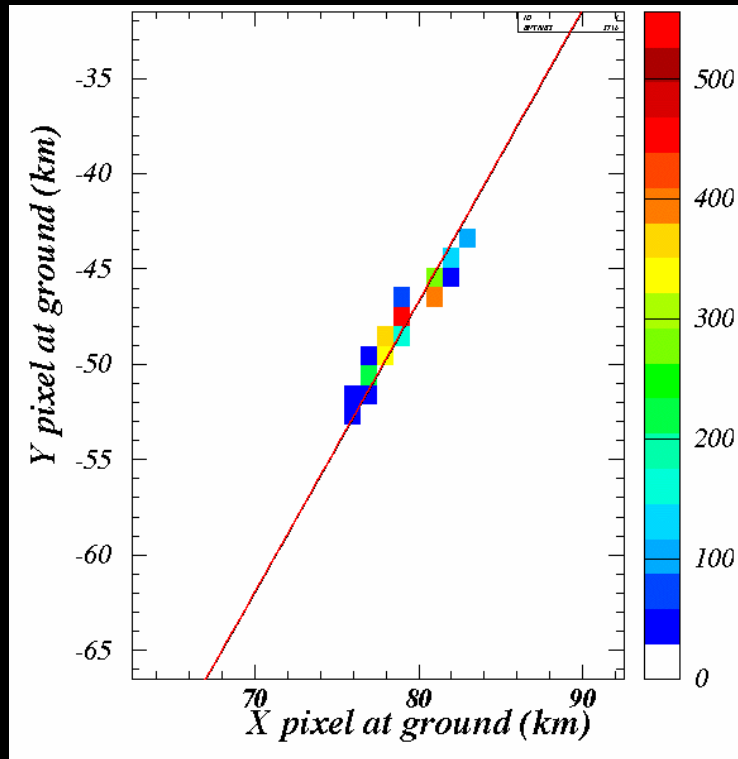
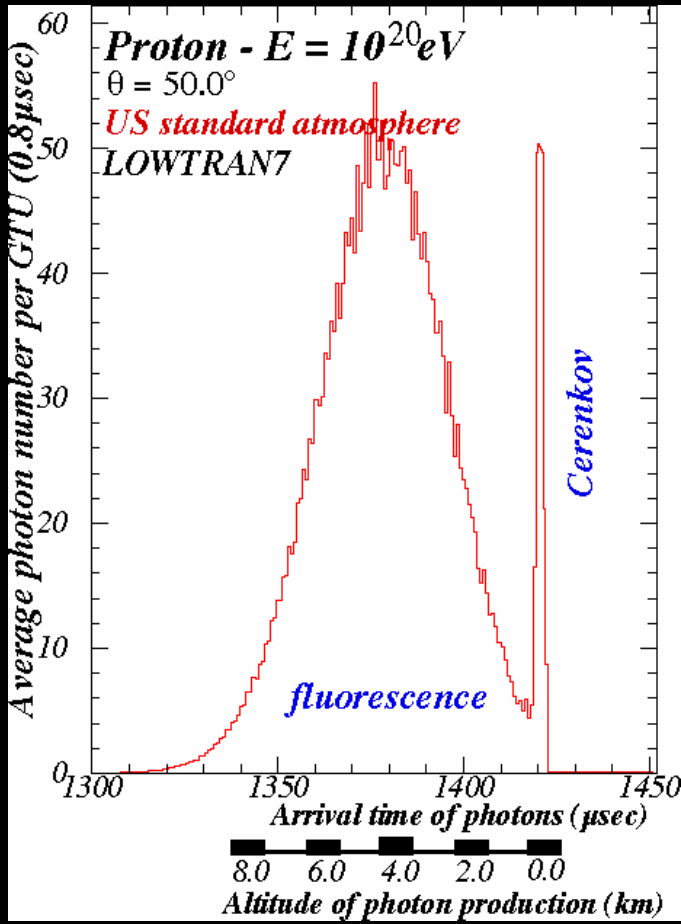
- Grandes surface d'observation et masse de cible :
 - $\sim 190000 \text{ km}^2$
 - $608000 \text{ km}^2 \cdot \text{sr}$
 - $2 \cdot 10^{12}$ tonnes d'atmosphère



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

Le principe de détection

- **Télescope + atmosphère \sim TPC**
- **Mesure du temps d'arrivée des photons**
- **Mesure de la position, corrélation xy**



⇒ énergie, direction initiale et nature des RCEE.



➤ Avantages

- Grande acceptance géométrique
- Détecteur à \sim égale distance de toutes les gerbes \Rightarrow 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 (5m² à 430 km)
- Variabilité de l'atmosphère
acceptance, atténuation/distorsion du signal



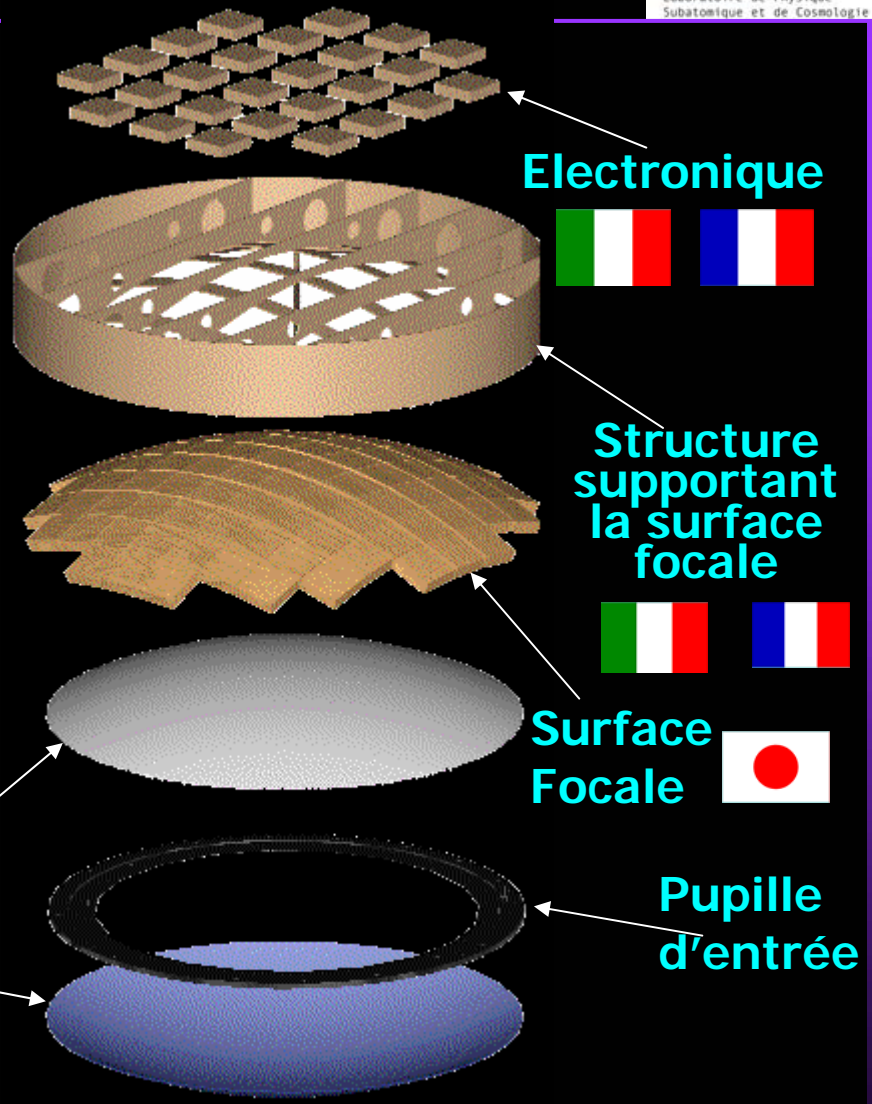
- **Les exigences requises pour le télescope**
- Observation d'une grande masse d'atmosphère
 - Sensibilité dans l'UV (330nm – 400nm)
 - Grande efficacité de collection de photons ⇒ faible quantité de photons pour gerbes les moins énergétiques (seuil de détection)
 - Détection de photons rapide, efficace 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 (1,5T)
et la consommation (~ 1250 W)

L'ensemble de détection

Le télescope



Lentilles de Fresnel



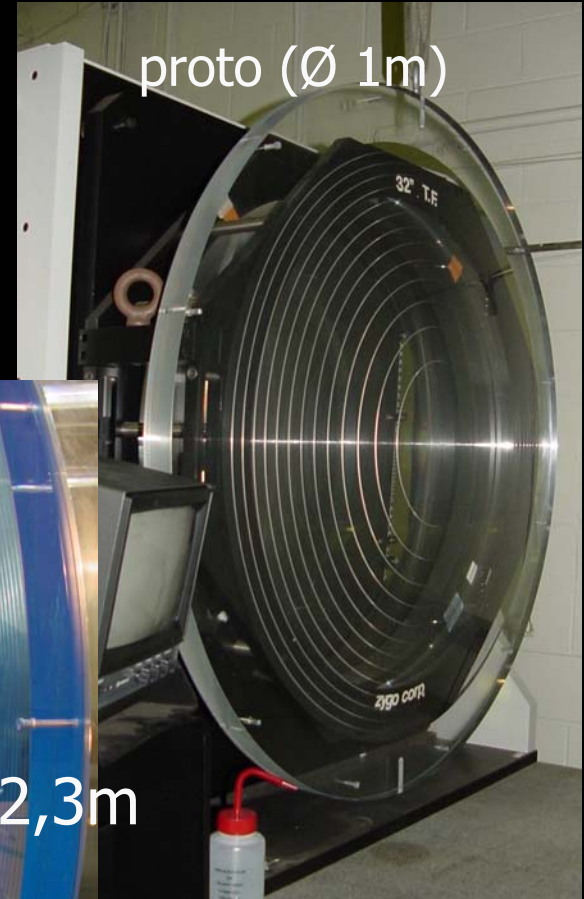
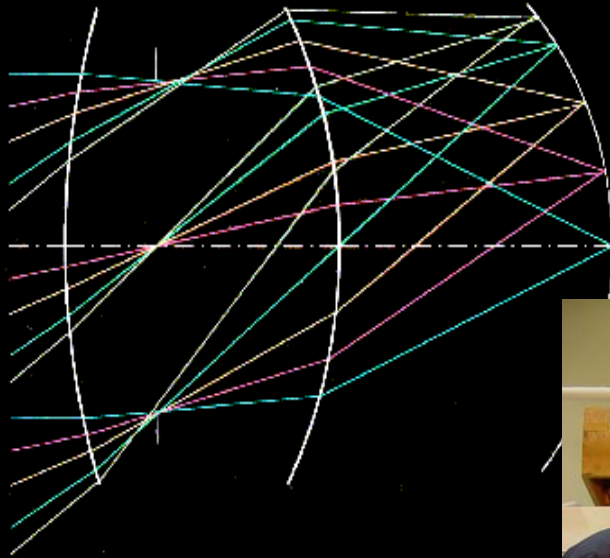
APC/PCC, LAPP, LPSC

Segment Sol

L'ensemble de détection

➤ Module optique

Paire de lentilles de Fresnel

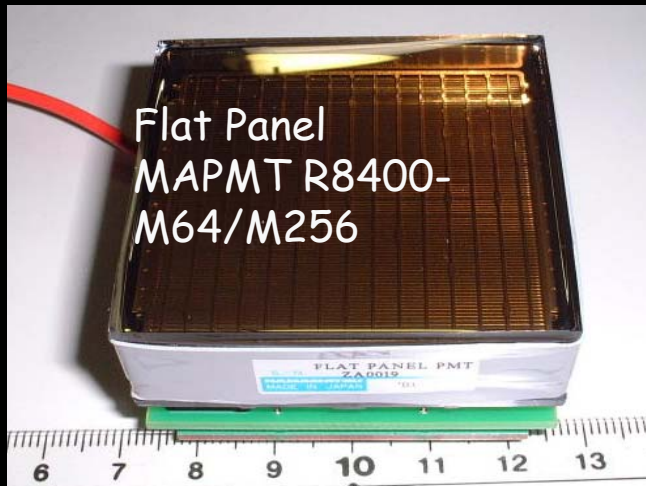


- Diamètre pupille d'entrée de 1,9m \Leftrightarrow 2,3m
- Corrections chromatiques améliorées
- un proto pour fin phase B

L'ensemble de détection

➤ Plan Focal

- équipé de PM multianodes (MAPMTs)
 - "baseline" : Hamamatsu R7600-M36
 - nouveaux MAPMTs Hamamatsu en cours de tests (RIKEN)
 - efforts sur surface de collection et efficacité quantique

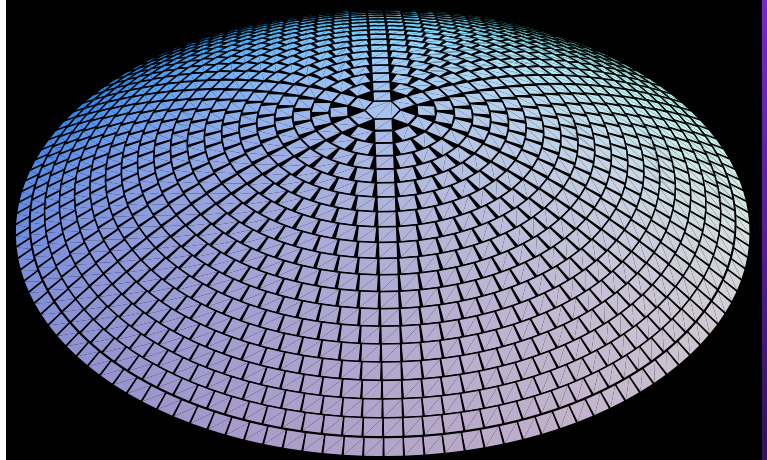
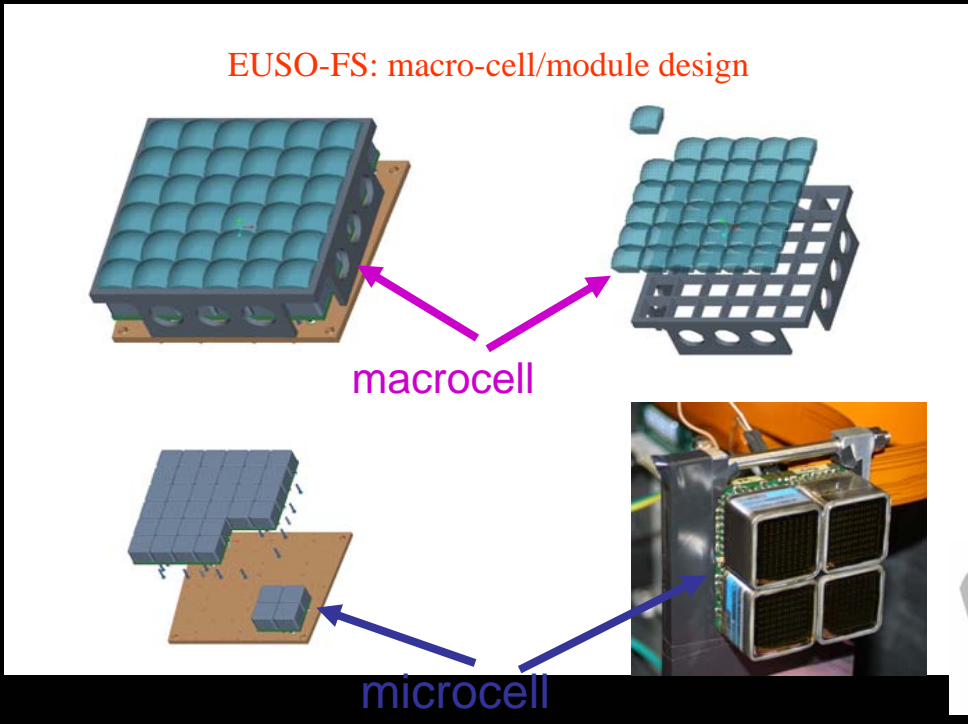


Meilleure efficacité de collection de photons
R8900-M16/M25/M36



➤ Plan Focal

- définition des "microcellules" et "macrocellules" en cours
- plusieurs configurations géométriques à l'étude





➤ Electronique

- Conception de l'électronique digitale, analogique
 - Technique de base : comptage du photo électron unique
 - remplit essentiellement les fonctions de comptage, de marquage, et de déclenchement.
 - analogique : pré amplification, intégration des charges et stockage dans des mémoires analogiques
 - Extension de la gamme dynamique d'énergie au-delà de la 'coupure' GZK ($\sim 10^{21}$ eV),
 - meilleure mesure des impulsions brèves dues à la lumière Cherenkov réfléchi,
 - l'étalonnage et le suivi en vol des gains et des seuils des photo- détecteurs.



- Rôle crucial de l'atmosphère

- production du signal
 - Calorimètre : production de gerbes
 - Fluorescence et Cherenkov

- transmission du signal
 - Atténuation durant le transfert
 - Diffusion Rayleigh, Mie (aérosol, nuages)
 - Absorption (ozone, au dessous de 330nm)



➤ source de bruit de fond

- Sources artificielles

- Sources naturelles

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

- Sources naturelles et transitoires

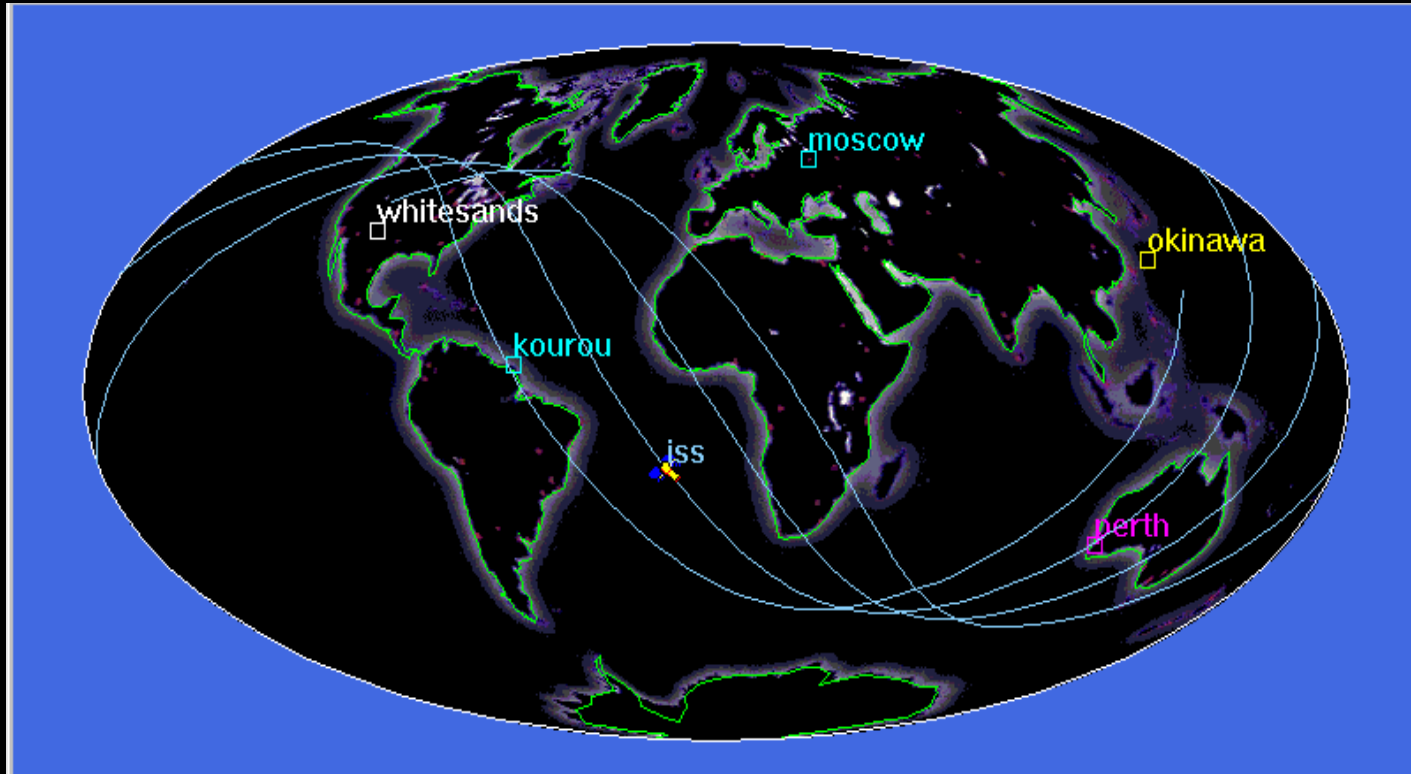
- éclairs, elfes, fusées bleues, sprites...

Pollution lumineuse des villes

Airglow

Fusées bleues

Sprites

➤ **Orbite de l'ISS**

trajectoire de l'ISS : $\pm 51^\circ$ en 92mn \Rightarrow
conditions atmosphériques très variables
Type de sol également



➤ Les mesures de physique à réaliser

- Mesure du bruit de fond lumineux (nocturne)
- Meilleure connaissance de la fluorescence
 - Etudes des raies de la fluorescence et de l'influence de P, T et contaminants
- Validation de la détectabilité du Cherenkov
 - Étude de la lumière Cherenkov associée à une gerbe atmosphérique
 - réflectivité (albédo) de la surface selon le type de terrain
 - conditions de transmission de la lumière à basse altitude

➤ programme expérimental ULTRA



ULTRA @ LPSC





➤ Méthode d'évaluation des performances attendues

Simulation de l'ensemble de détection

- Les gerbes : leur développement est paramétré
- La production des photons : Fluorescence et Cherenkov
- Le transport dans l'atmosphère : Rayleigh, Mie, Ozone

- L'optique : Transferts et aberrations
- Les détecteurs : Filtres et efficacité quantique
- Le déclenchement : Seuils et persistance



➤ efficacité

- Les nuages réduisent l'efficacité : $86\% \rightsquigarrow \approx 53\%$

➤ cycle utile

- Le télescope ne peut fonctionner que de nuit
 - absence de lune, fond estimé (mesuré) : $300 \text{ ph/m}^2/\text{nsec/sr}$
 - présence de la lune \Rightarrow limitation du cycle utile
 - 12.8% : lune est sous l'horizon
 - 18% : ajout négligeable
 - 20% : ajout $< 100 \text{ ph/m}^2/\text{nsec/sr}$.

+ soustraction des nuits trop courtes $< 10\%$ du cycle utile



➤ La résolution estimée

- Résolution angulaire

- $\Delta\theta < 1^\circ$ si $\theta_{\text{gerbe}} > 60^\circ$
- Cartographie des grandes gerbes

- Résolution en énergie

- Energie manquante, conversion énergie -> électrons
- Méthode d'extraction
- Fluorescence
- Correction des effets de l'atmosphère
- Optique + détecteur
- Estimation : $\sim 30\%$



- La physique d' EUSO est aux frontières de la "nouvelle physique" et de la compréhension de notre univers, via ses manifestations les plus énergétiques.
- EUSO sera capable, après AUGER, d'étudier la physique au-delà de 10^{20} eV avec une statistique importante (flux, corrélations, cartographie...)
- L'astrophysique des neutrinos de haute énergie est peut-être à la portée d'EUSO
- Des améliorations de la détection devrait permettre un abaissement du seuil de détection.

➤ Où en est le projet EUSO ?



Si tout va bien Installation ~ 2010

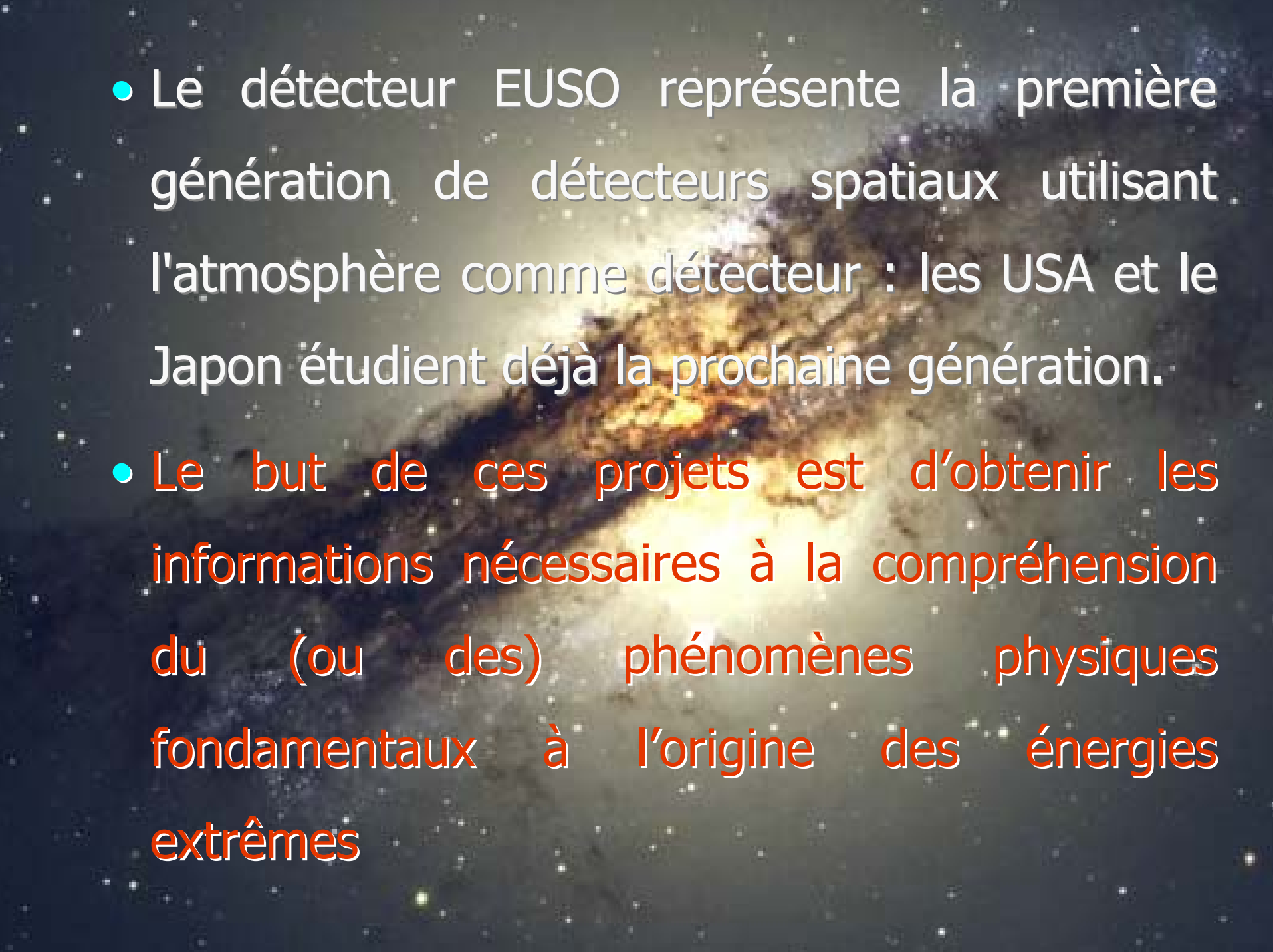
- 
- Le détecteur EUSO représente la première génération de détecteurs spatiaux utilisant l'atmosphère comme détecteur : les USA et le Japon étudient déjà la prochaine génération.
 - Le but de ces projets est d'obtenir les informations nécessaires à la compréhension du (ou des) phénomènes physiques fondamentaux à l'origine des énergies extrêmes

Schéma bas-haut - processus d'accélération

- ◆ Il faut prendre de l'énergie quelque part !
 - Énergie cinétique :
 - translation (chocs, nuages en mouvement → accélération de Fermi)
 - Rotation (pulsars, trous noirs, étoiles à neutrons)
 - Énergie gravitationnelle
 - via l'accrétion...
 - Énergie électromagnétique (EM)
 - turbulence, compression, rotation d'aimants...

Mécanismes d'accélération

◆ Mécanisme de Fermi du second ordre

- Diffusion sur des inhomogénéités magnétiques
 - Dû à un mouvement relatif de nuages ionisés qui piègent le champ magnétique, et par là échangent de l'énergie avec les particules chargées qui les traversent. Le transfert d'énergie est proportionnel au carré de leurs vitesses relatives.
- très inefficace

◆ Mécanisme de Fermi du premier ordre

- Ping-pong entre le front avant et l'arrière d'une onde de choc
 - Le cosmique acquiert à chaque fois une énergie proportionnelle à la vitesse relative β des deux côtés
- Bien plus efficace que le précédent

◆ Effets inductifs

- Corps en rotation rapide, champ B élevé \Rightarrow champ E d'induction
 - La particule chargée qui se trouve à proximité peut être accélérée à de très hautes énergies
- Excellent rendement

