

# Les rayons cosmiques ultra-énergétiques : Une énigme pour l'astrophysique

Denis Allard - Laboratoire AstroParticule et Cosmologie (APC)

Semaine de l'Astronomie de la société astronomique de Nantes

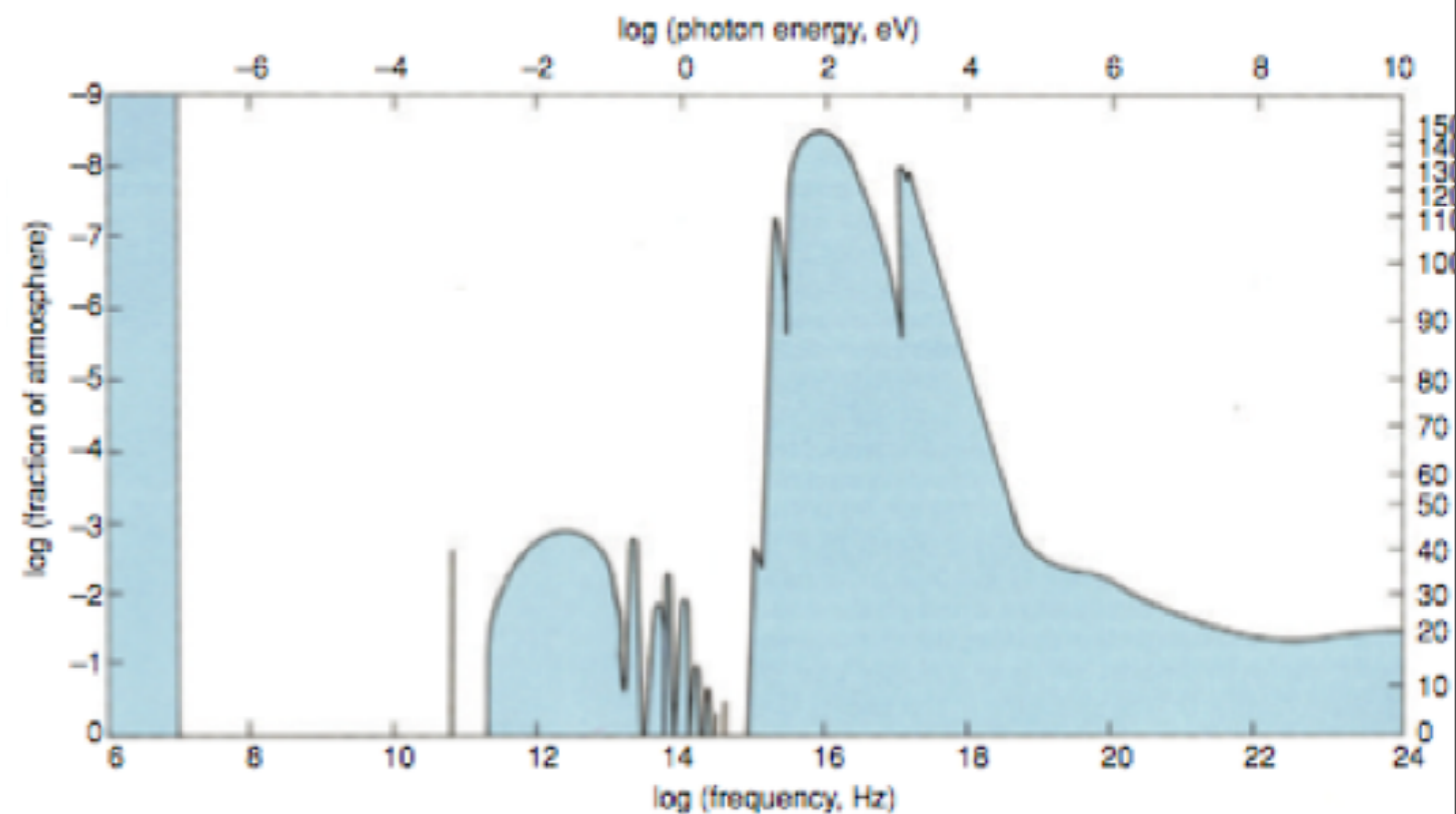
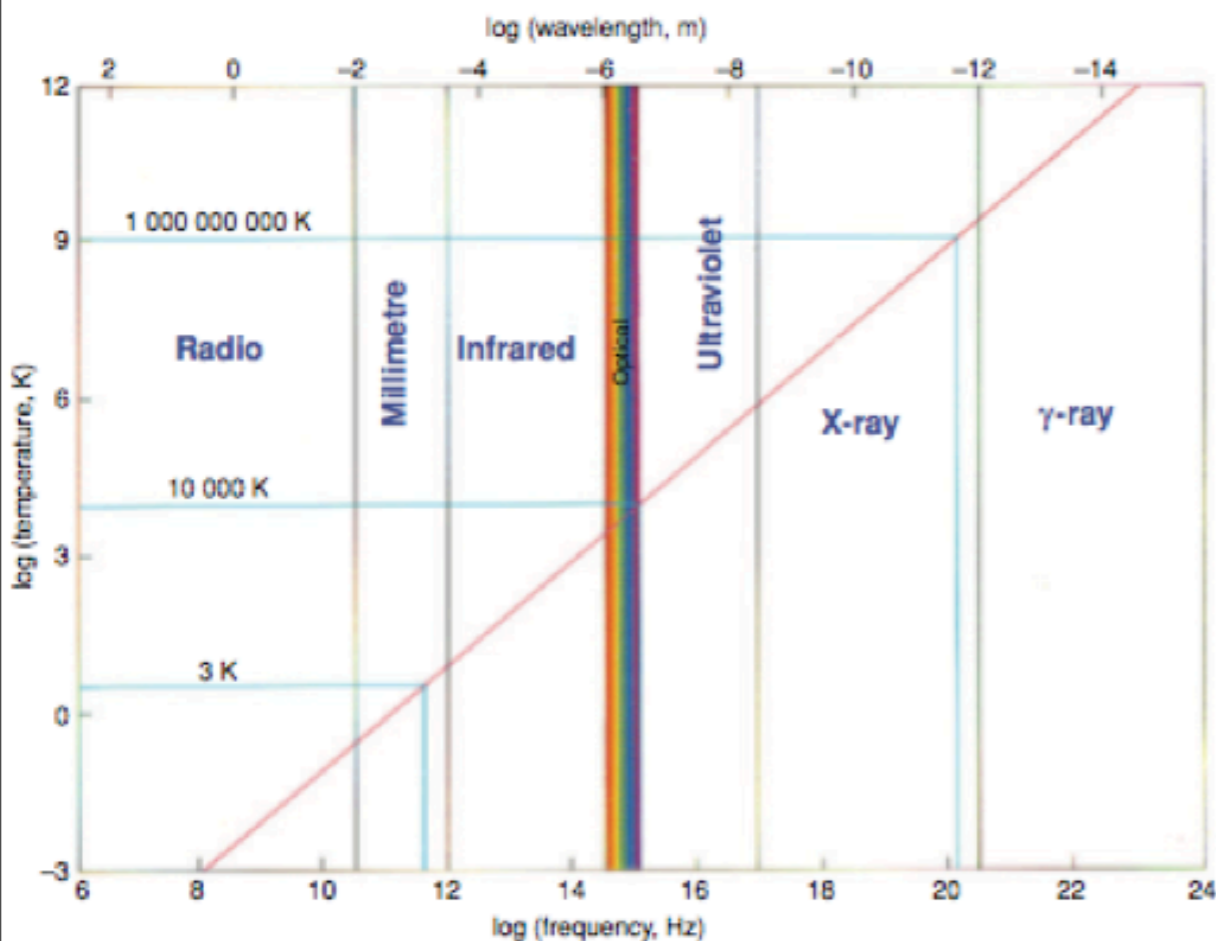
23/01/2015

# Plan de l'exposé

- L'astrophysique est multi-longueurs d'onde et multi-messagers  
(Qu'est ce qu'un rayon cosmique?)
- L'histoire de l'observation des rayons cosmiques
- Le spectre du rayonnement cosmique (une des sept merveilles du cosmos)  
(une problématique en trois dimensions)
- Ce que l'on sait sur les rayons cosmiques de "basse énergie"
- Détection des gerbes atmosphériques, détection des rayons cosmiques de très haute et d'ultra-haute énergie
- L'observatoire Pierre Auger : le détecteur hybride géant
- Résultats principaux à ultra-haute énergie
- Les questions ouvertes et le futur de l'astronomie des rayons cosmiques
- **Rayons cosmiques, les héros méconnus du cosmos**

# L'astrophysique est multi-longueurs d'onde et multimessagers

- Après la fin de la deuxième guerre mondiale, l'observation du cosmos à des longueurs non visible a révolutionné notre compréhension de l'Univers

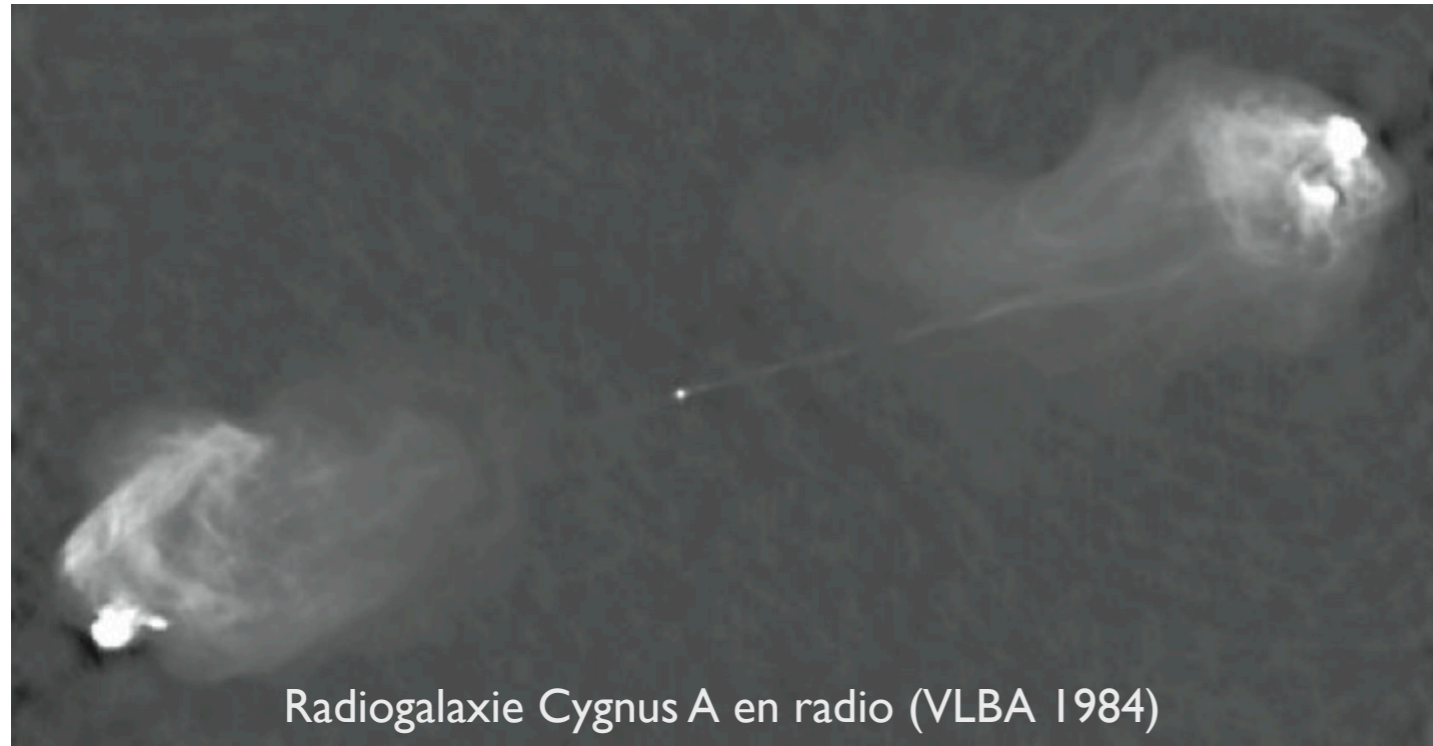


(Longair, "High energy astrophysics" 2011)

➡ Découverte d'objets et de phénomènes jusqu'alors inconnus et parfois même insoupçonnés

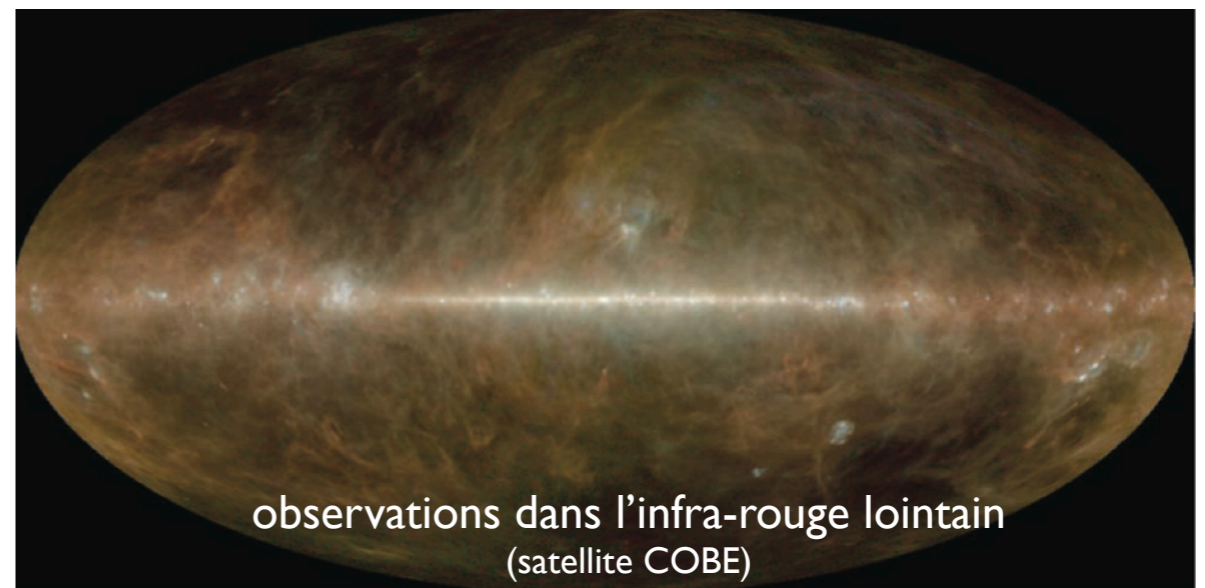
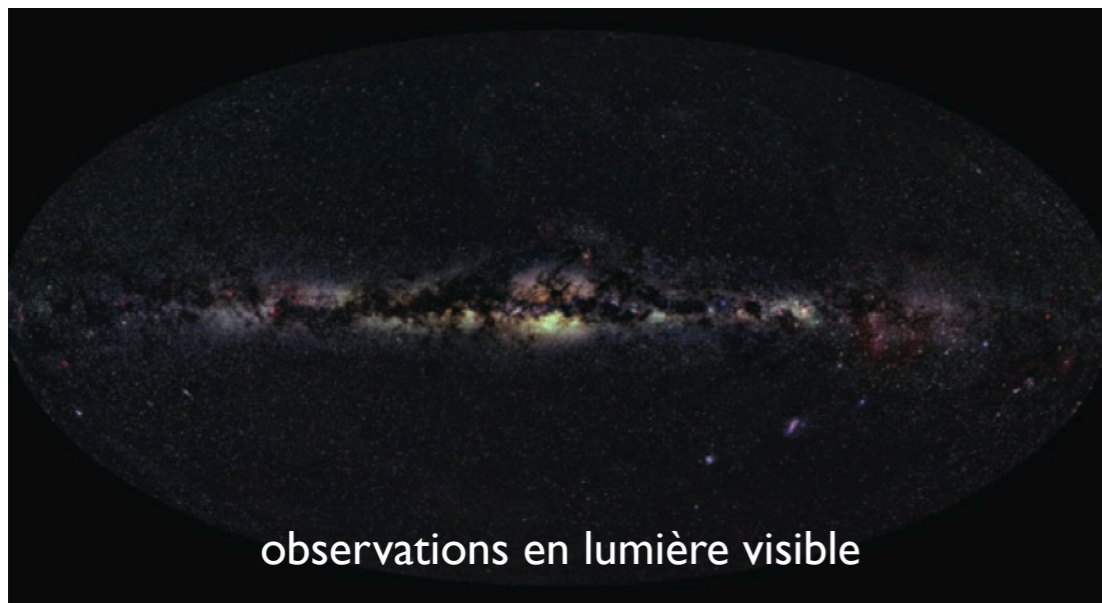
# L'astrophysique est multi-longueurs d'onde et multimessagers

## Astronomie radio : découverte des radiogalaxies



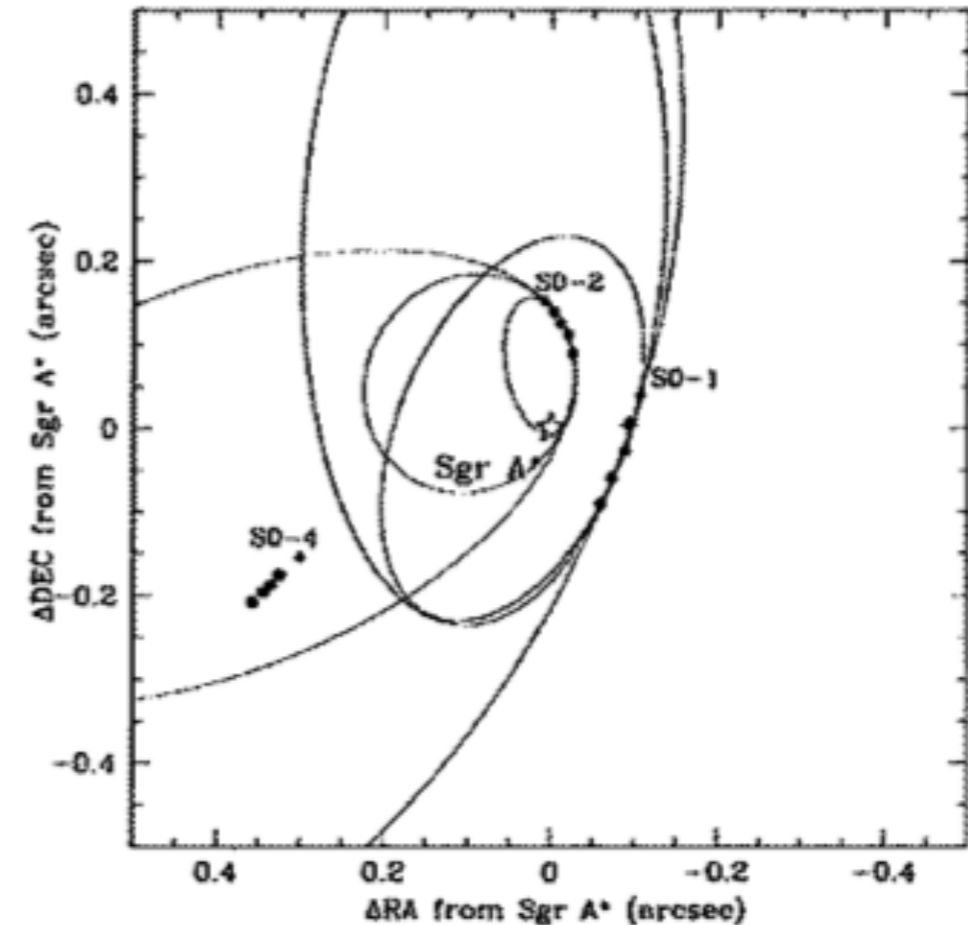
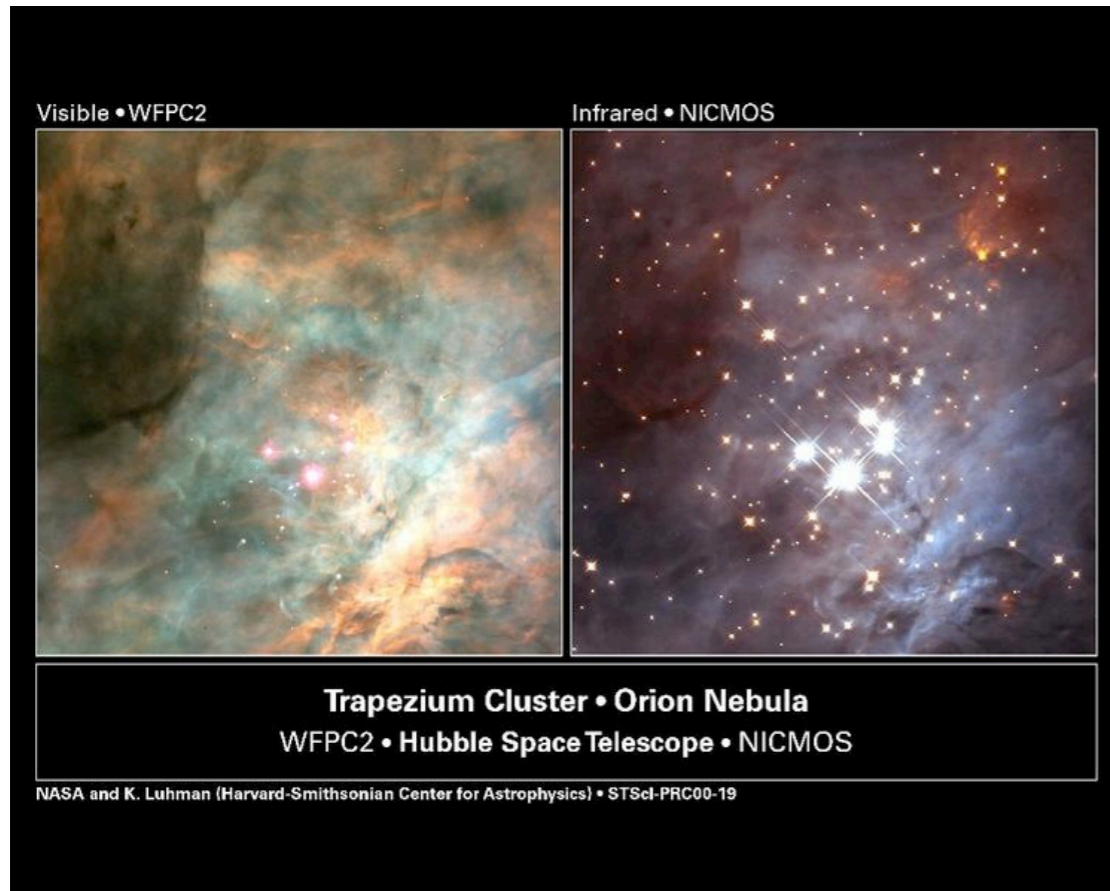
- ➔ énorme émission radio dans des lobes à la terminaison de très long jets de matière provenant du centre de la galaxies
- ➔ centre de la galaxie lui même puissant émetteur radio depuis une région très compacte
- ➔ meilleure explication (de loin) présence d'un trou noir supermassif (jusqu'à  $10^9 M_{\text{sol}}$ ) au centre des radiogalaxies
- ➔ Noyaux actifs de galaxies

## Astronomie infra-rouge : révèle les phénomènes masqués par la poussière



# L'astrophysique est multi-longueurs d'onde et multimessagers

Régions de formation d'étoiles révélées en infra-rouge



- Suivi infra-rouge du mouvement de quatre étoiles orbitant très près du centre galactique
- ➔ présence d'un objet compact invisible d'environ  $2 \cdot 10^6 M_{\text{sol}}$
  - ➔ trou noir central supermassif de la Galaxie

# L'astrophysique est multi-longueurs d'onde et multimessagers

Tout cela n'est qu'une petite illustration, une très large gamme d'objets et de phénomènes physiques ont été découverts grâce aux astronomies radio, infra-rouge, ultra-violet, X ou gamma...

- ➔ pulsars
- ➔ phénomènes d'accrétion
- ➔ sursauts-gamma
- ➔ galaxies à formation d'étoiles
- ➔ systèmes solaires en formation



Jusqu'à présent nous avons seulement parlé de l'astronomie "électromagnétique" c'est-à-dire de l'astronomie utilisant des ondes électromagnétiques/photons dans diverses gammes de longueurs d'onde/énergie pour sonder l'univers.

Il existe d'autres types de messagers au premier rang desquels les rayons cosmiques connus depuis 1 siècle. L'astronomie neutrinos est en train de naître et l'astronomie des ondes gravitationnelles devrait débuter dans la prochaine décennie. Ces "messagers" sont de natures différentes et apportent chacun des informations uniques sur l'Univers.

# Qu'est ce qu'un rayon cosmique?

★ Particules de haute énergie sillonnant la Galaxie en tout sens, et même l'espace intergalactique !

★ Protons, noyaux d'atome divers, ayant des énergies variées et des électrons (Hélium, Carbone, Oxygène, Fer, Or, Plomb, etc.)

★ Ils rencontrent la Terre en chemin et interagissent dans la haute atmosphère (qui nous "protège" en grande partie de ce rayonnement)

★ Des particules secondaires arrivent au niveau du sol, principalement des « muons »...



# L'histoire du rayonnement cosmique : quelques faits saillants

- Électroscope chargé 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 intense



- 1785: Coulomb note la décharge spontanée des électroscopes, et comprend qu'elle est due à l'air (et non un défaut d'isolation électrique)
- Confirmé par Faraday



# L'histoire du rayonnement cosmique : quelques faits saillants

A la fin du XIX<sup>ème</sup> la radioactivité est découverte par Bequerel



- 1901: Wilson mesure la décharge des électroscope sous terre, elle est identique à celle mesurée au sol
- Rutherford montre que l'ionisation de l'atmosphère au niveau du sol et sous terre est principalement due à la radioactivité naturelle

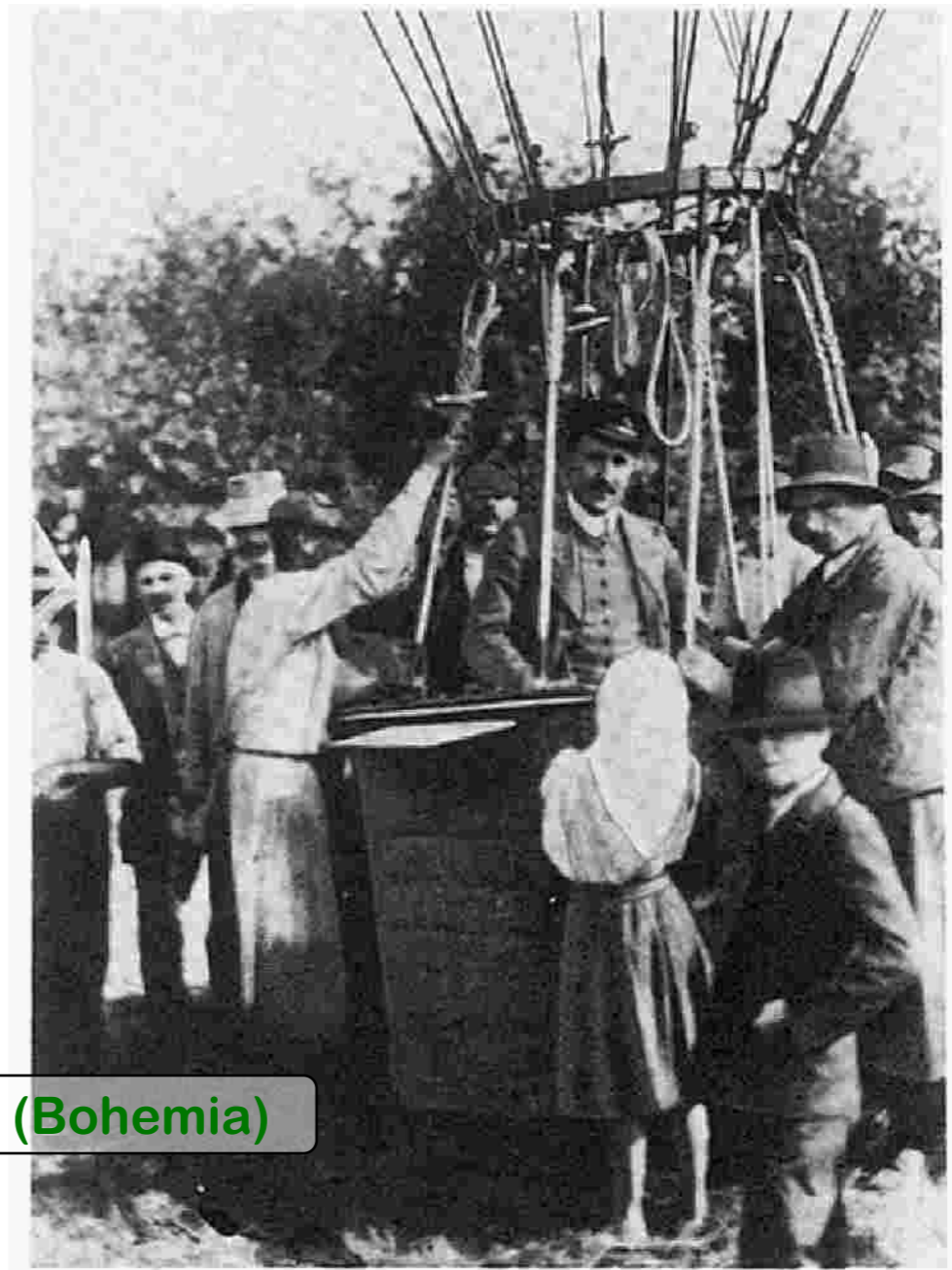
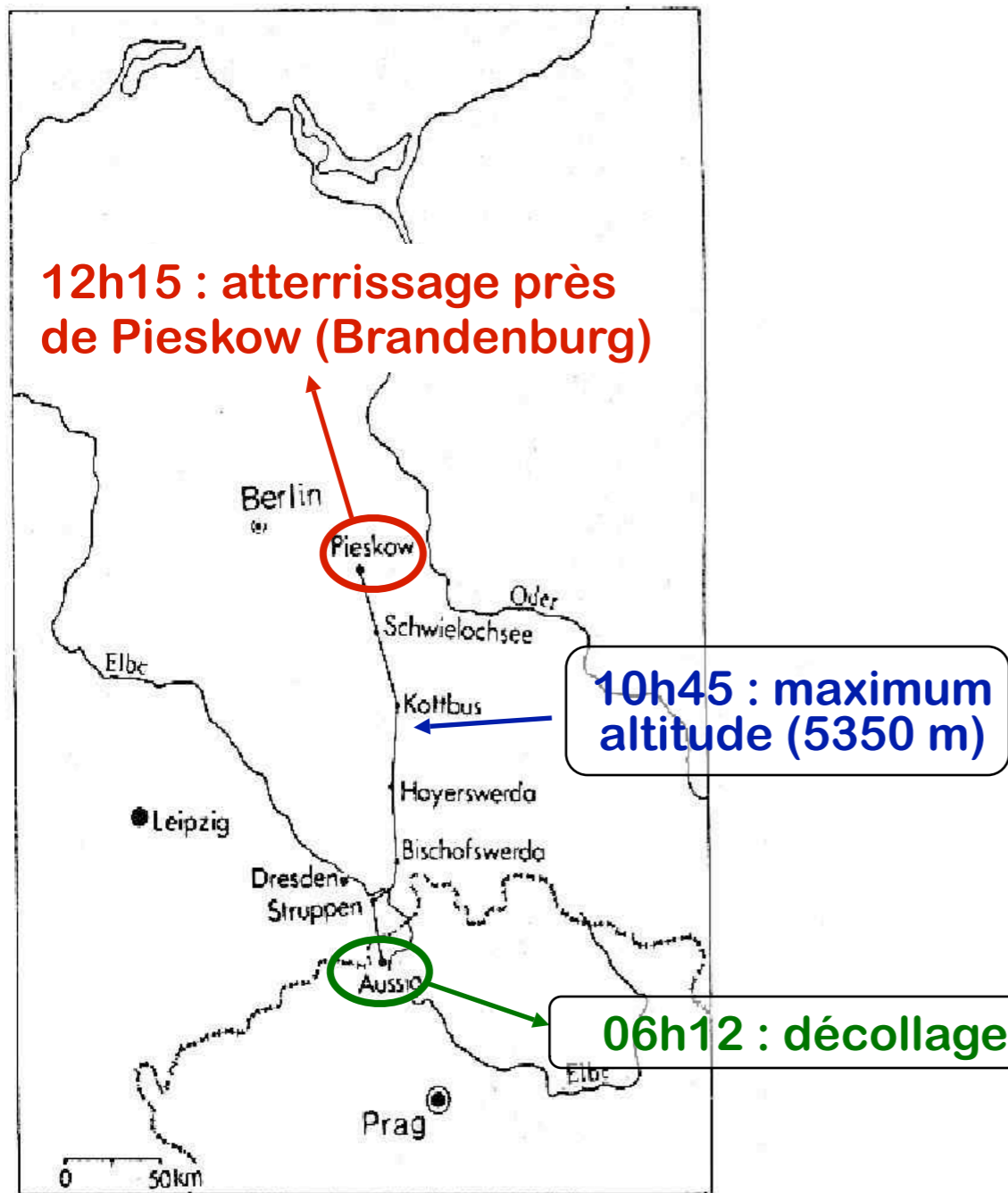
- 1910: Theodore Wulf (prêtre jésuite et physiciens amateur expert dans la conception d'électroscopes très précis) fait des mesure au sommet de la tour Eiffel

3.5 ions/cm<sup>3</sup>  
(instead of  
0.4 ions/cm<sup>3</sup>  
expected)



6 ions/cm<sup>3</sup>

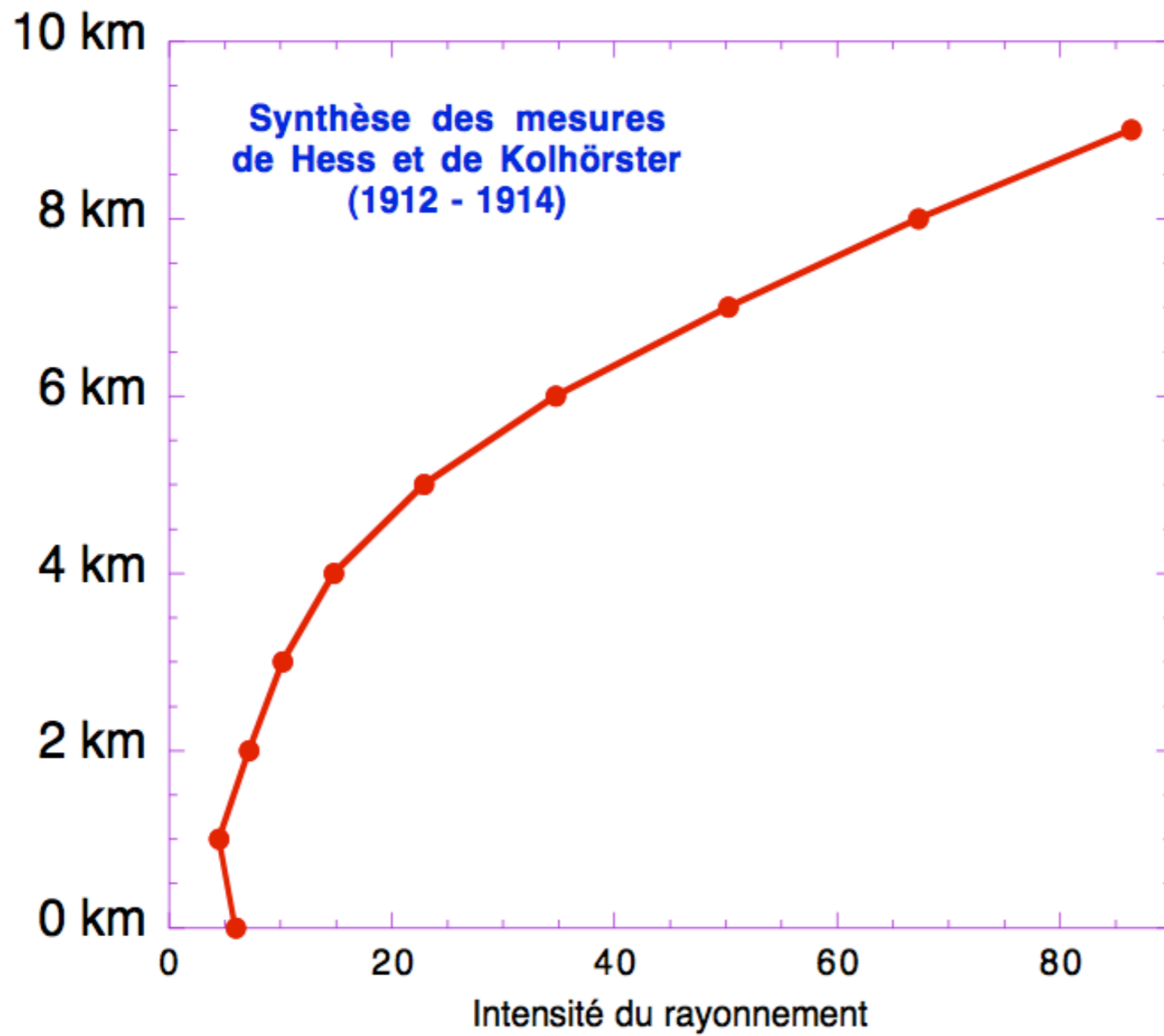
# Hess à l'assaut du ciel - vol du 7 août 1912



Hess bei Ballonlandung (1912).

Route des Entdeckungsfluges der kosmischen Strahlung.

# Synthèse des mesures en ballons



# 15 années de confusion!

◆Lumière ? Matière ? De 1912 à 1929, la confusion règne.

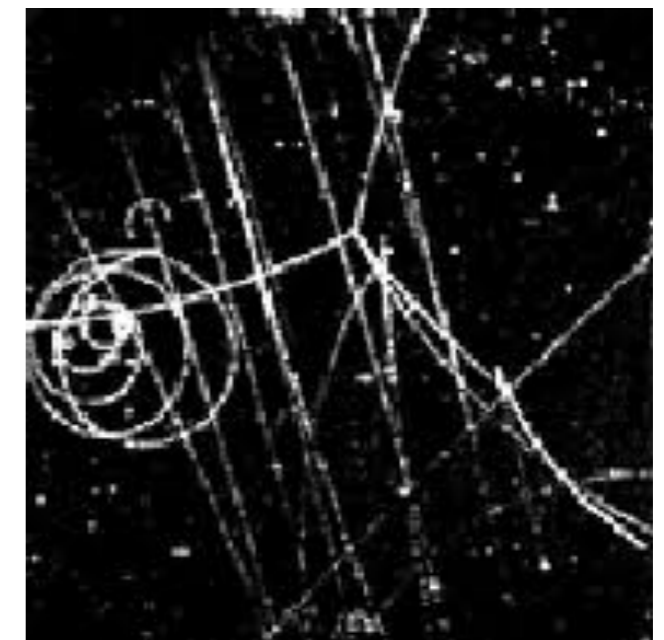
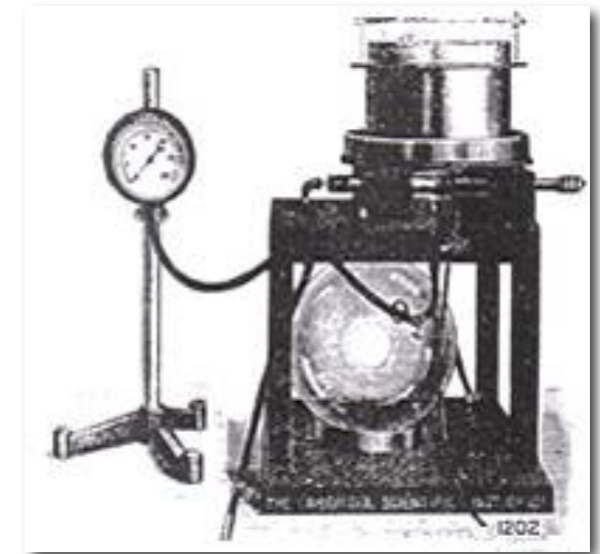
◆Robert Millikan pense que les rayons de Hess sont des rayons gamma de très haute énergie ( 1925 : « rayons cosmiques »).

• Difficulté : on ne connaît pas les particules à détecter, et on n'a pas de détecteurs !

• On n'a accès qu'aux particules secondaires

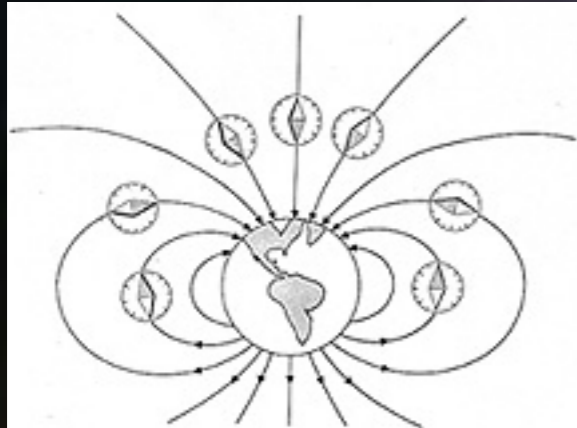
• En 1929, Bothe et Kohlörster travaillent avec les détecteurs de Geiger et montrent que les rayons de Hess sont chargés !

• D. Skobeltzyn travaille avec des chambres à brouillard et trouve également des trajectoires courbées par le champ magnétique



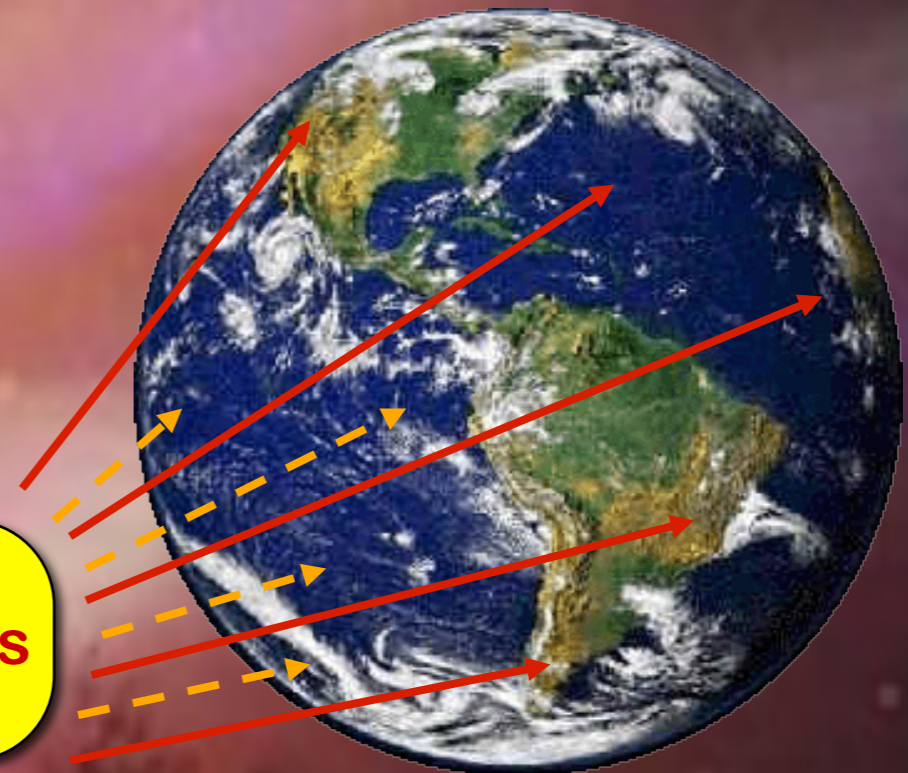
# Quid des rayons cosmiques primaires!

(ceux qui interagissent en haute atmosphère)



**Effet de latitude**  
(déjà observé  
par Clay en 1927-1928)

En 1930, Compton lance  
une série d'expéditions



**60 chercheurs  
aux quatre coins  
du monde !**

La synthèse des mesures met en évidence une variation du flux de particules au sol avec la latitude

→ Les rayons cosmiques primaires sont chargés !!

# Rayons cosmiques et physiques des particules

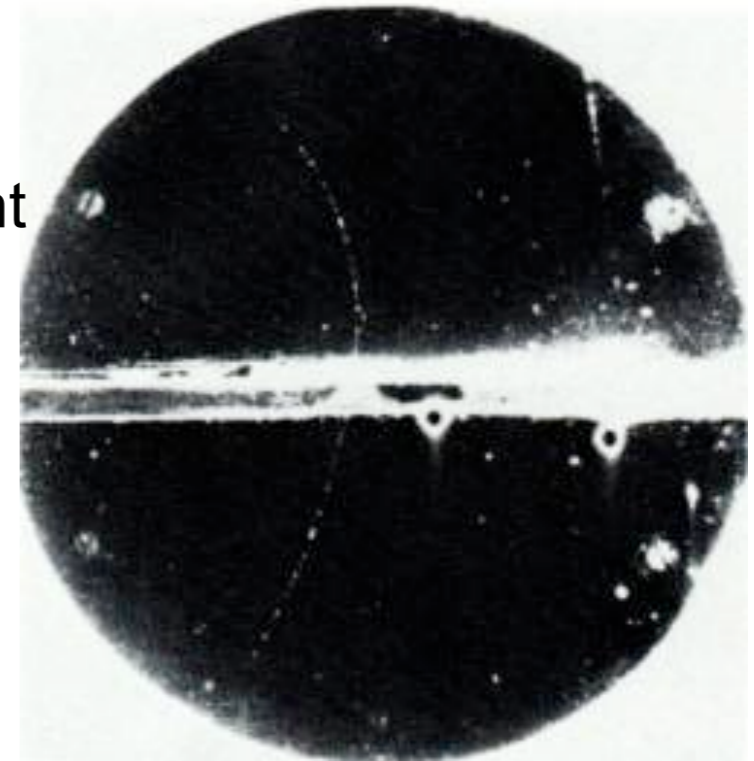
Bien avant l'émergence des accélérateurs, la physique des particules expérimentale est née en observant les particules secondaires, beaucoup de particules inconnues jusqu'alors ont été découvertes !

- 1932: Anderson découvre le positron (anti-électron, prédit in 1930 by Dirac) dans des traces de rayons cosmiques

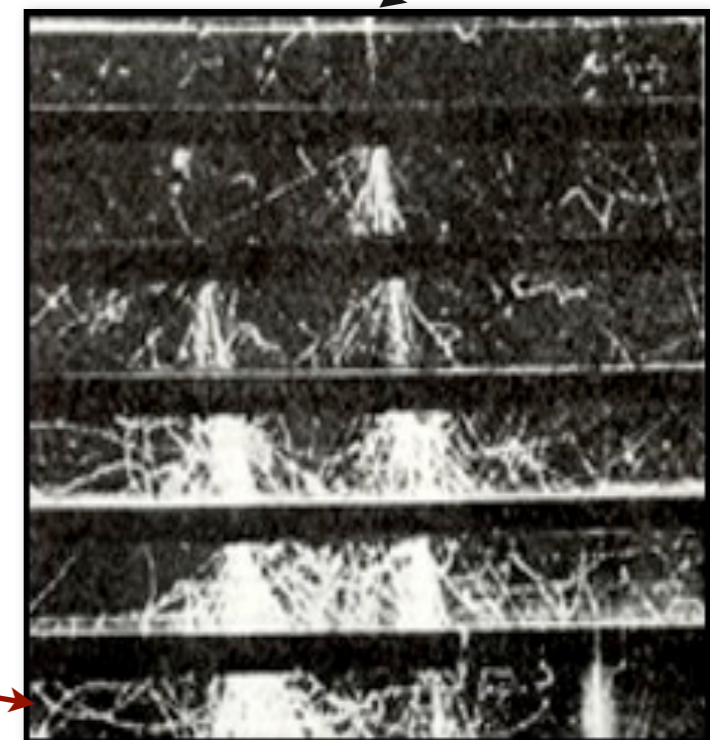
1936: Neddermeyer et Anderson découvre le muon (même charge que l'électron mais plus lourd et instable)

- 1947: Powel découvre the pion (prédit en 1936 by Yukawa)

+ particules étranges, etc.



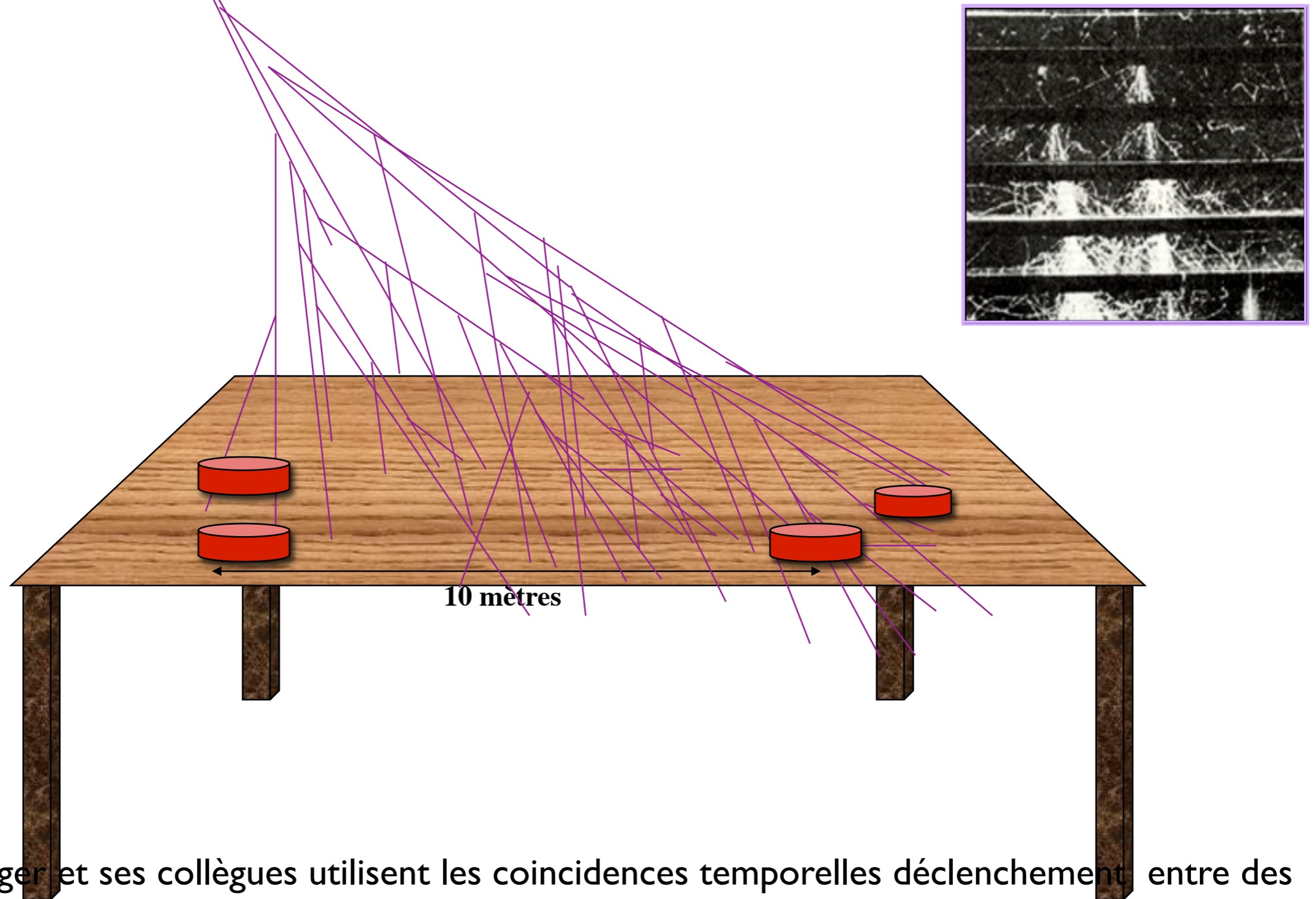
↑ particule très énergétique



↑ nombreuses particules moins énergétiques

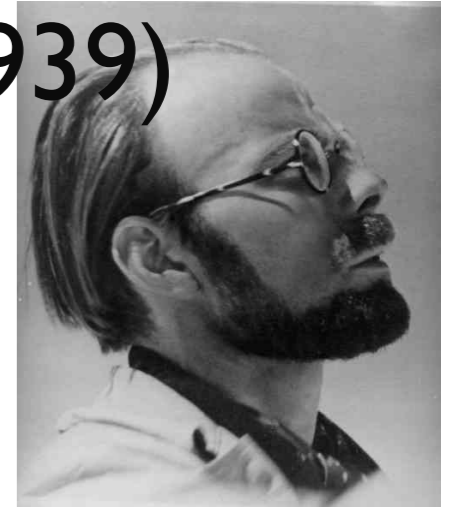
Mise en évidence du phénomène de cascade (ou gerbe) de particules

# Mise en évidence du phénomène de gerbe atmosphérique par Pierre Auger et ses collègues (1938-1939)



Pierre Auger et ses collègues utilisent les coïncidences temporelles déclenchement entre des détecteurs séparés par 2 puis 5 puis 10... puis 100m

# Mise en évidence du phénomène de gerbe atmosphérique par Pierre Auger et ses collègues (1938-1939)



- Les progrès de l'électronique permettent d'étudier des coïncidences à la microseconde
- coïncidences aléatoires très peu probable

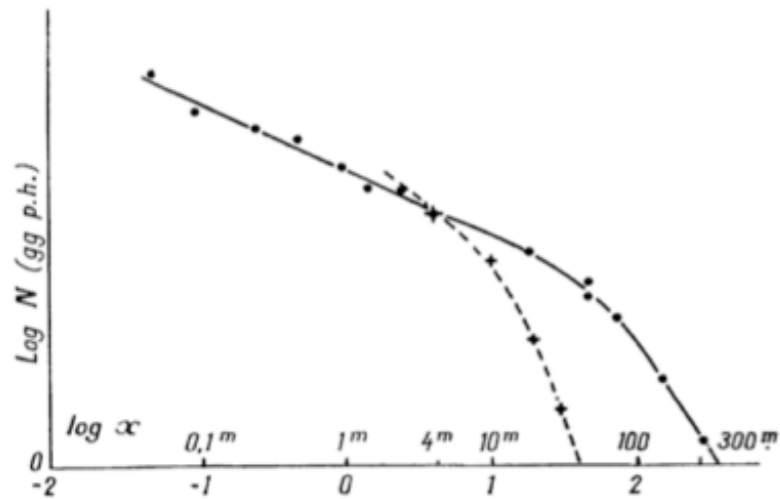
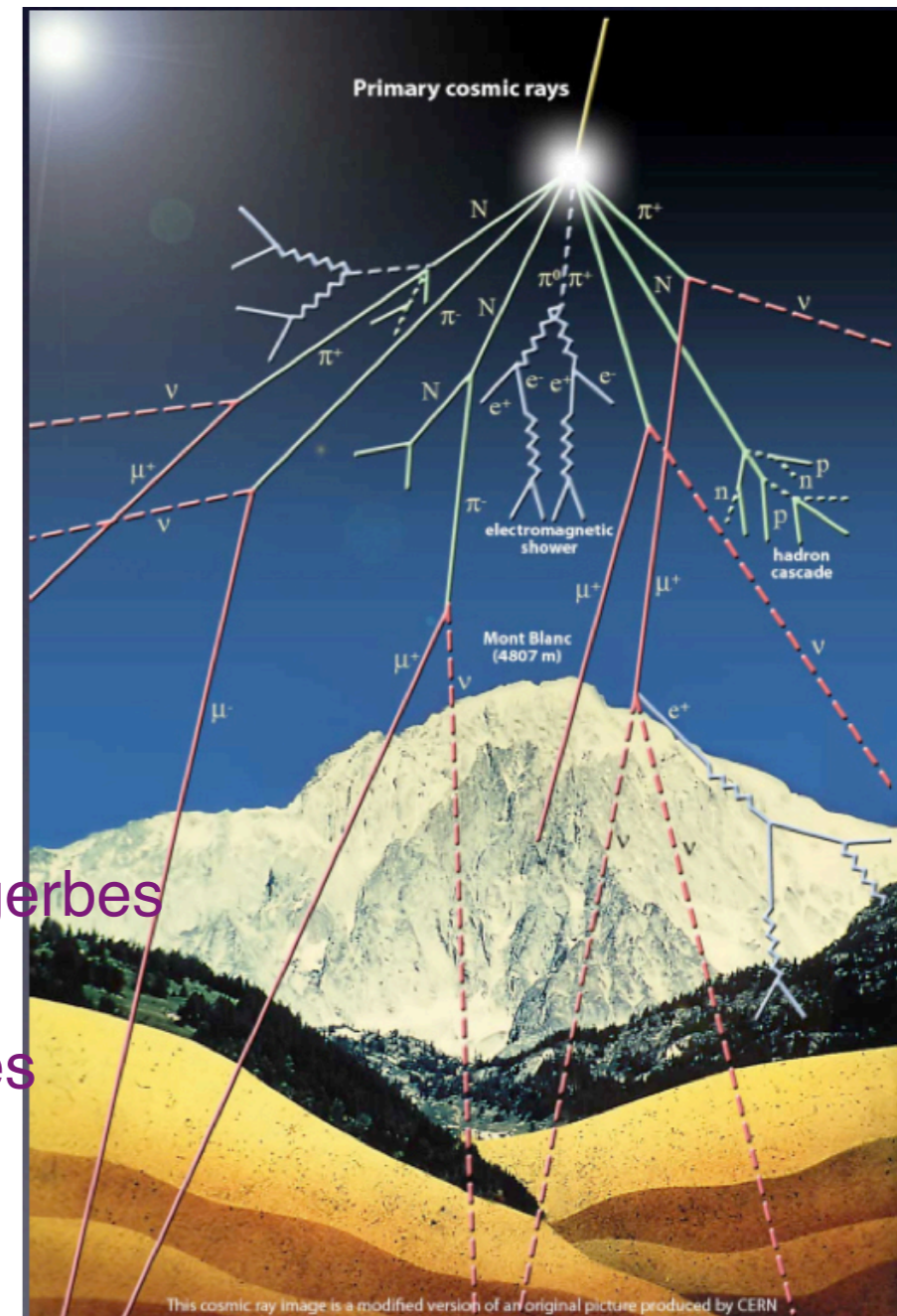


Fig. 14. — Décroissance du nombre  $N$  des gerbes atmosphériques avec l'écartement  $X$  des compteurs. Coordonnées logarithmiques (--- calcul.)

Le nombre de coïncidences est bien supérieur au taux attendu pour des événements aléatoires  
-> les particules qui déclenchent les détecteurs espacés simultanément ont une origine commune

- L'excès du nombre de coïncidences montre l'existence des gerbes atmosphériques
- Les particules ionisantes sont bien des particules secondaires
- Coïncidences obtenues avec des espacements  $>100$  m correspond à des rayons cosmiques d'énergie  $> 10^{15}$  eV





# 1953 : la séparation

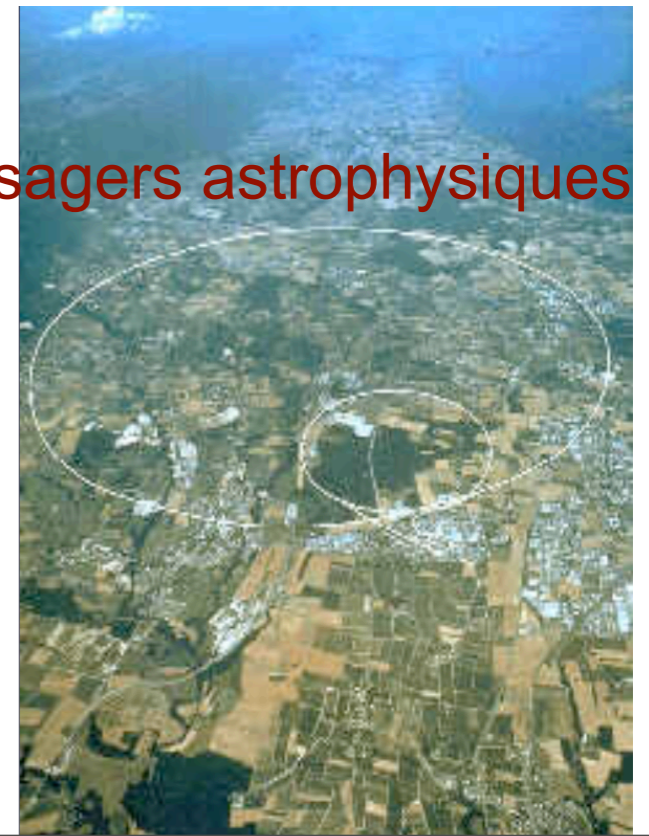
- distinction importante :

- ★ Rayons cosmiques : particules chargées très énergétiques (majoritairement protons et noyaux composés de He à Fe, et une petite fraction d'électrons) à l'origine des gerbes atmosphériques -> messagers du cosmos -> intéressent les astrophysiciens

- ★ Les particules secondaires : particules créées par l'interaction des rayons cosmiques avec l'atmosphère (ce que Hess a en fait découvert) -> intéressent les physiciens des particules

- A partir de 1953 les physiciens des particules délaissent l'étude des particules secondaires au profit des accélérateurs (congrès de Bagnères de Bigorre)

- Les rayons cosmiques commencent à être étudiés en tant que messagers astrophysiques

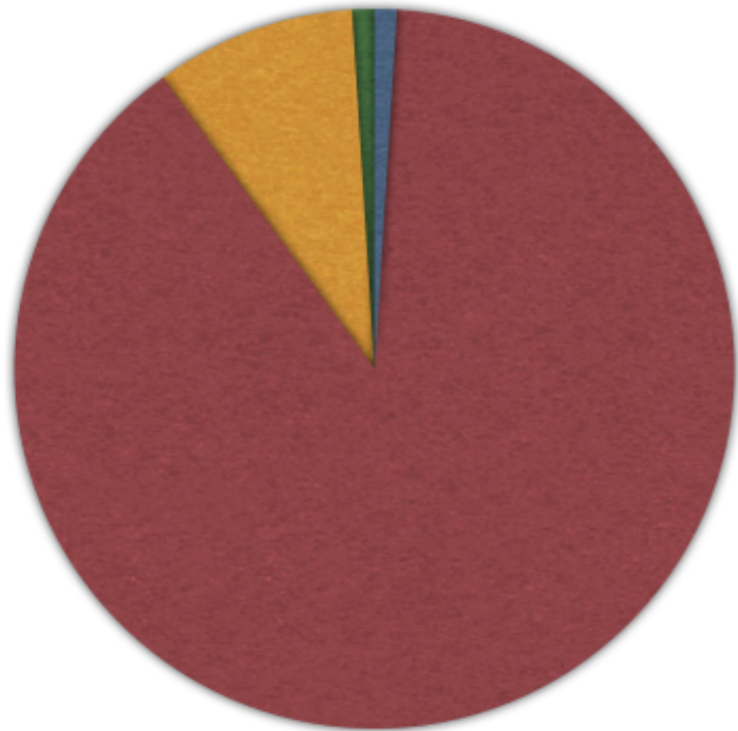


# L'étude des rayons cosmiques comme messenger astrophysique

- électrons
- noyaux d'hydrogène
- noyaux d'hélium
- noyaux plus lourds

4 rayons cosmiques / cm<sup>2</sup> / seconde

1 kg/an « 40 000 tonnes/an (météorites)



Grande nouveauté : qch vient du cosmos, mais ce n'est pas de la lumière !

⇒ nouvelle astronomie !

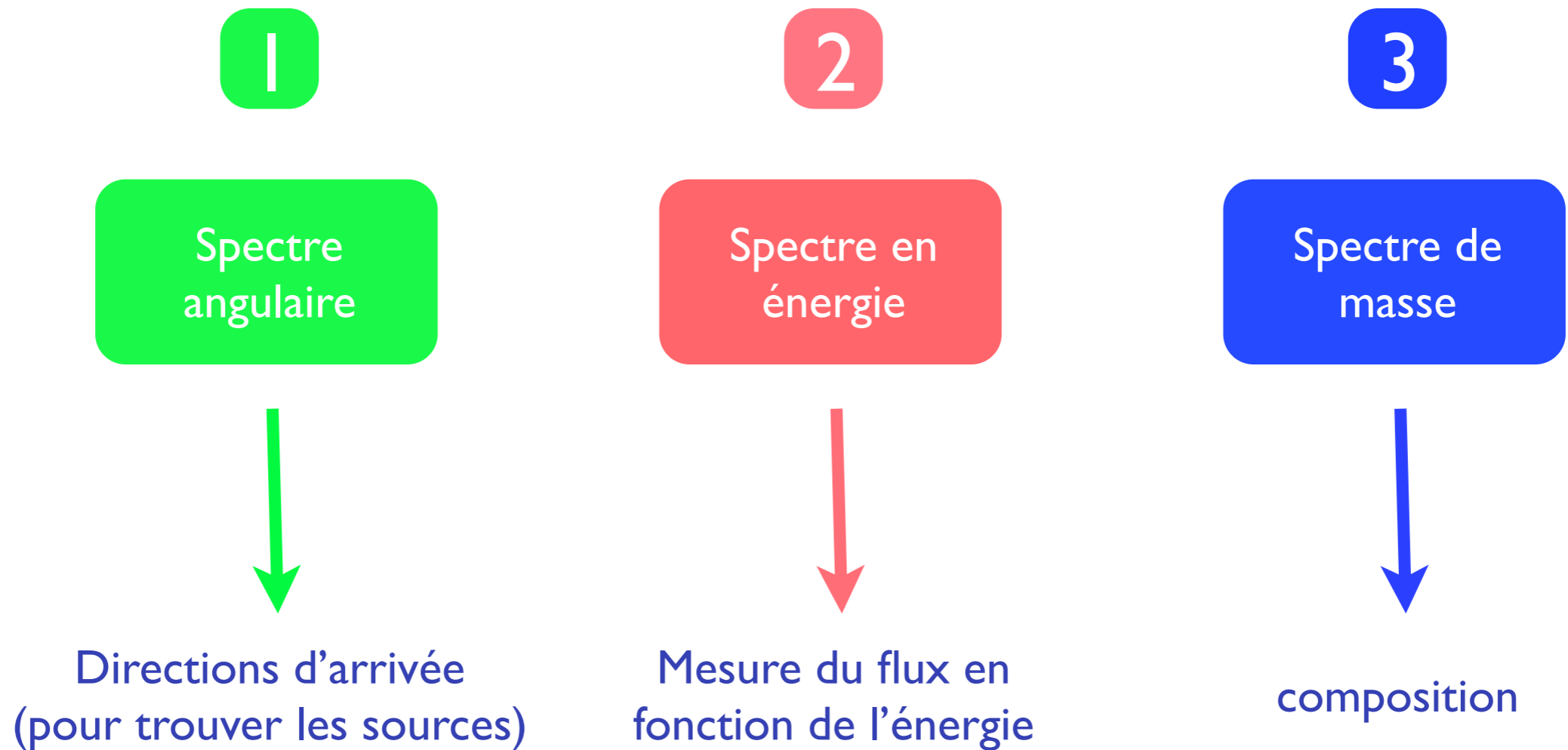
≠ astronomie photonique étendue  
(radio, infrarouge, UV, X, gamma, TeV...)



→ spectre de masse



# 3 observables clés pour comprendre l'origine du rayonnement cosmique



# “une nouvelle astronomie” avec les rayons cosmiques?

↓  
Oui !

Récolte de matière extraterrestre, et même extragalactique !

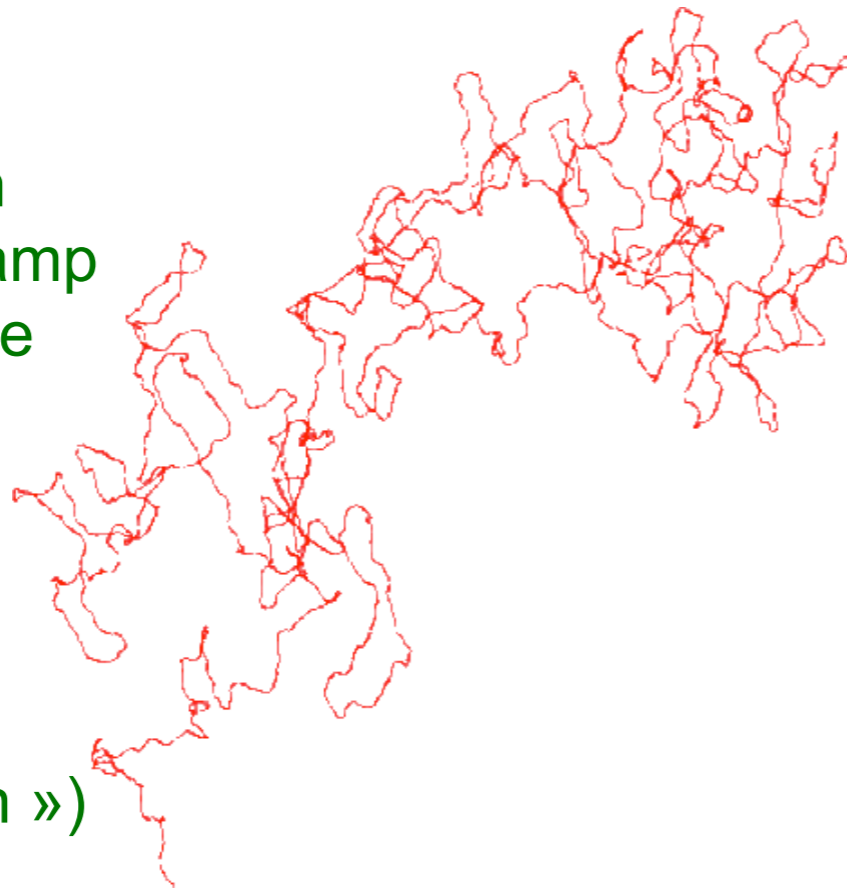
↓  
Non !

Pas de pointage, hélas !

Particule chargée + champ magnétique = déflexion !



Trajectoire d'un rayon cosmique dans le champ magnétique galactique



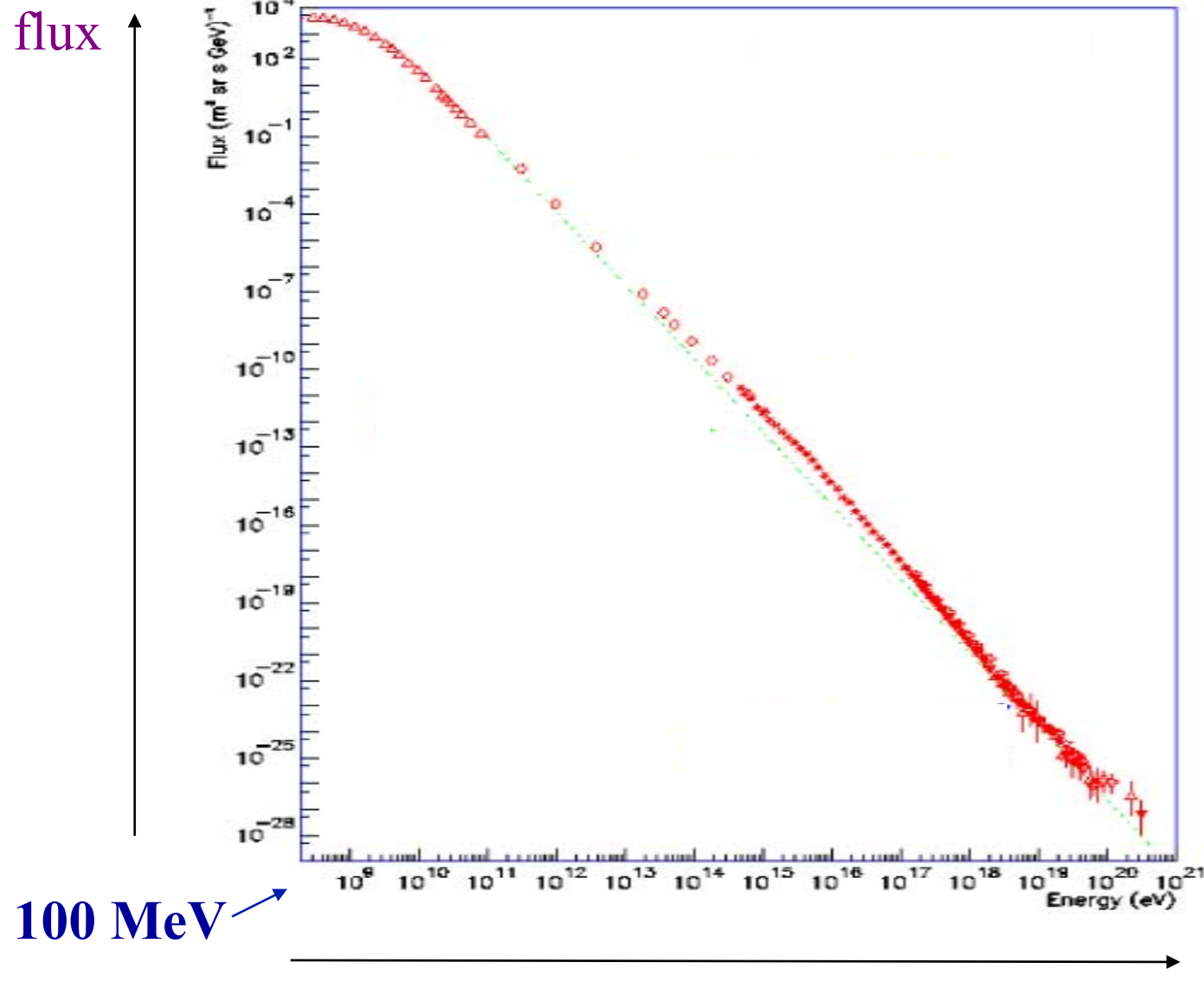
(« isotropisation »)

→ Impossible de repérer la direction des sources

→ pas d'astronomie !

→ Les sources du rayonnement cosmique sont toujours inconnues !

# Le spectre des rayons cosmiques (une merveille du cosmos)



Spectre d'une régularité extraordinaire sur  $\sim 11$  ordres de grandeur en énergie (facteur 1000 milliards)

Le flux décroît selon une loi de puissance quasi-parfaite :  $F(E) \propto E^{-x}$   
 $x \sim 2.7$

➡ le nombre de rayons cosmique décroît très vite lorsque l'énergie augmente

$10^{21}$  eV

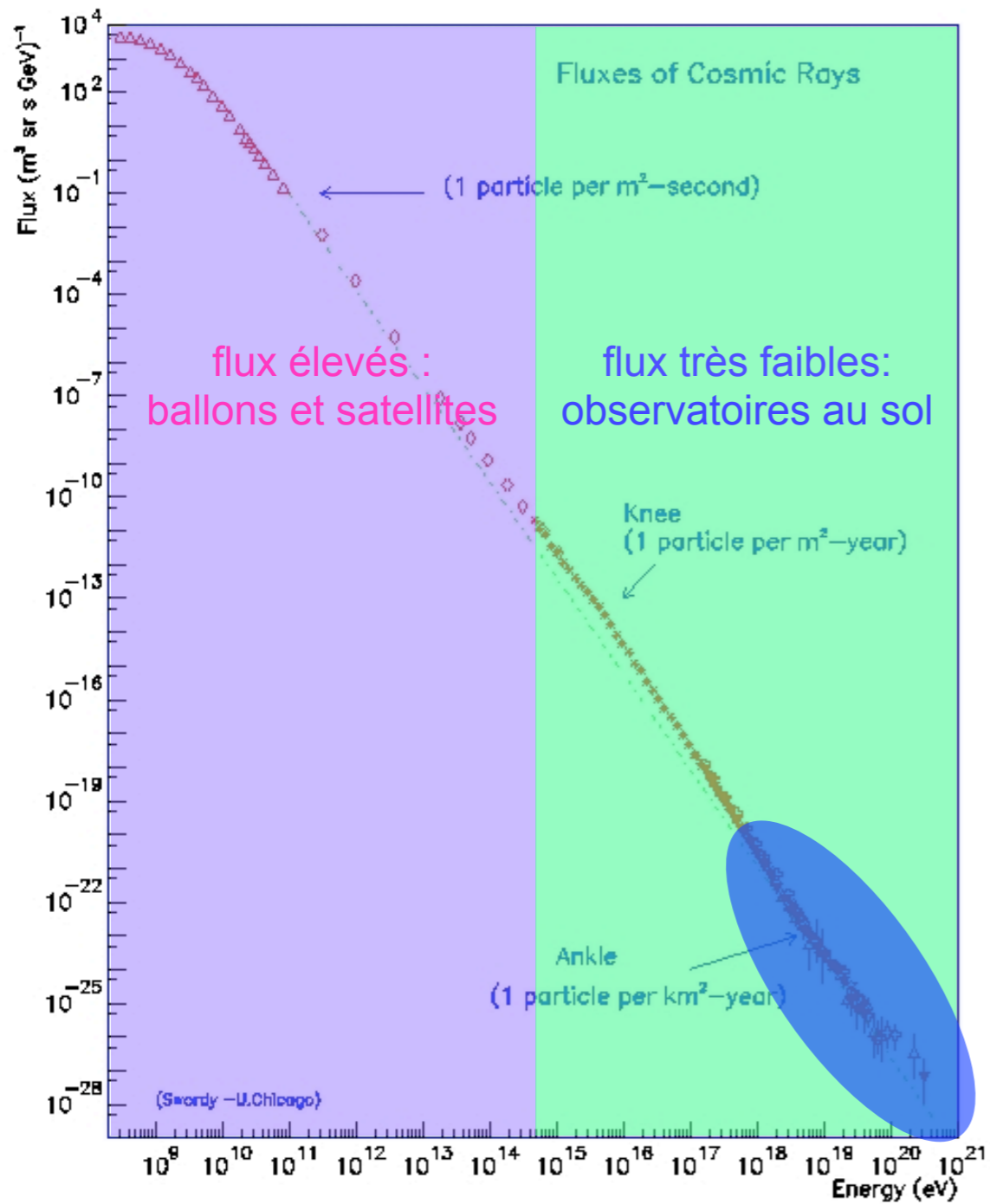
➡ la plus grande part de l'énergie est concentrée dans la partie basse énergie du spectre

Non seulement il y a des rayons cosmiques de  $10^{15}$  eV (100 fois le LHC), mais certains atteignent des énergies au delà de  $10^{20}$  eV (16 joules) !!

Ils sont extraordinairement rares, comment sont-ils produits?

➡ ils sont accélérés dans des sources astrophysiques

# Le spectre des rayons cosmiques (une merveille du cosmos)



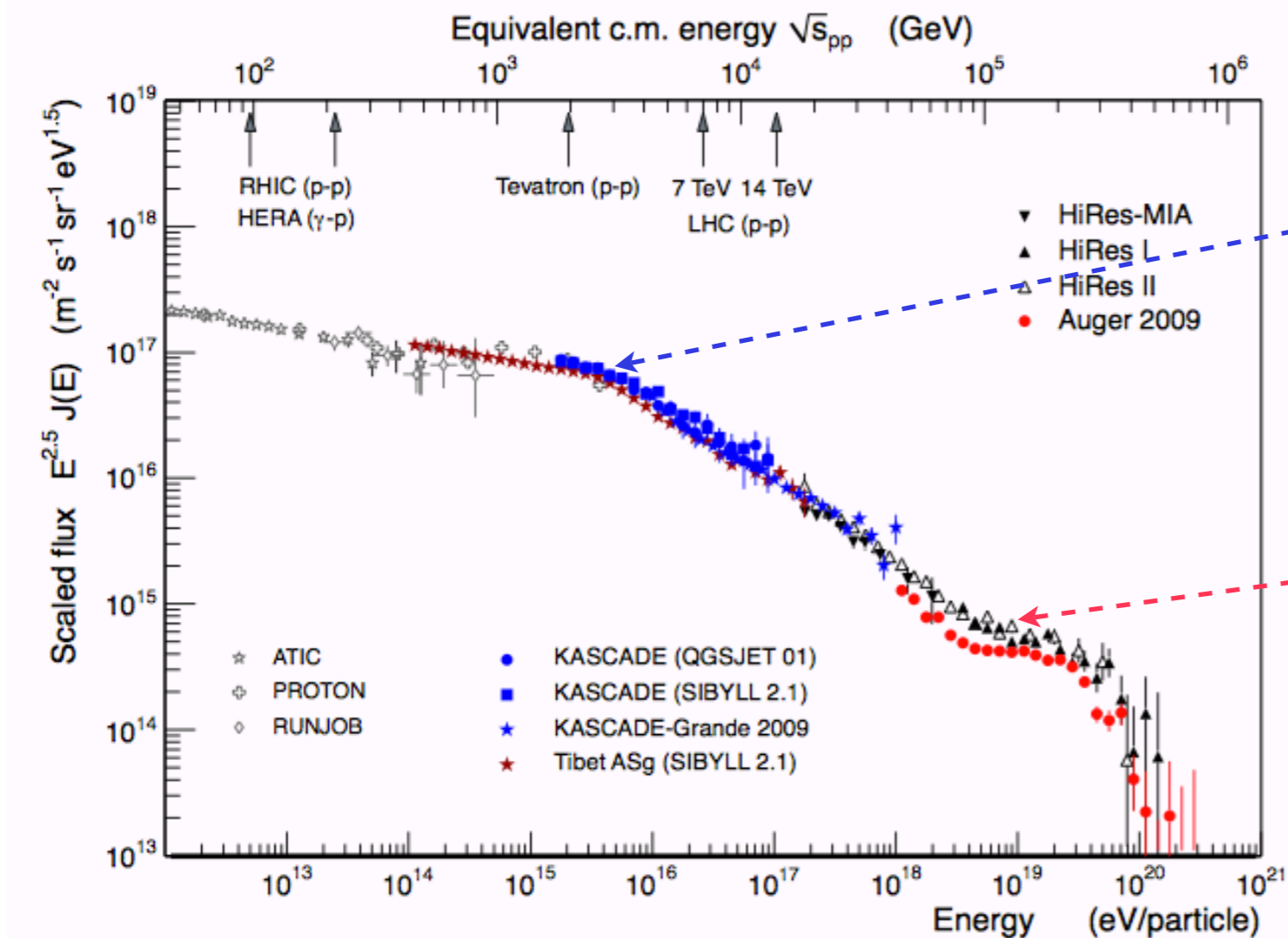
Régularité extraordinaire sur 12 ordres de grandeur en énergie et 32 en flux  
-> témoin d'un mécanisme de production commun pour l'ensemble du spectre

Evolution rapide du flux avec l'énergie  
1 part/ $\text{m}^2/\text{s}$  à  $10^{10}$  eV  
<1 part/ $\text{km}^2/\text{siècle}$  à  $10^{20}$  eV  
-> différents détecteurs utilisés dans différentes gammes d'énergie

$E < 10^{14}$  eV :  
détection directe depuis l'espace ou en très haut atmosphère

$E > 10^{14}$  eV :  
détection indirecte depuis le sol (détection et reconstruction des gerbes atmosphériques)

# Une autre vue du spectre : des imperfections clés pour la compréhension



Le genou  
 $E \sim 3-4 \cdot 10^{15}$  eV

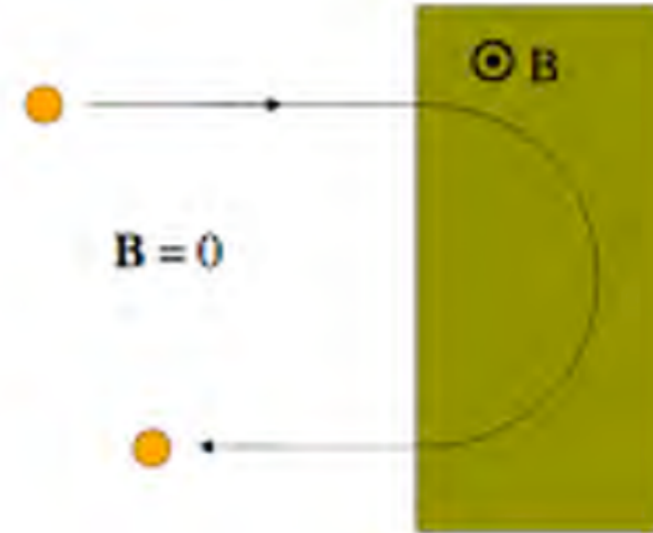
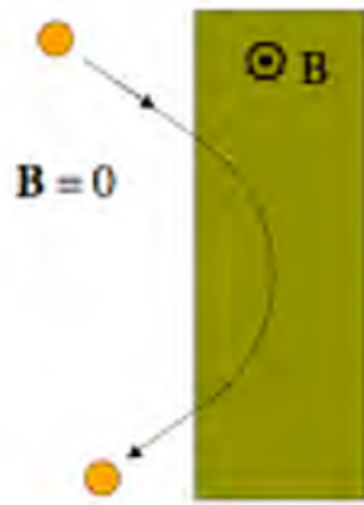
La cheville  
 $E \sim 3-4 \cdot 10^{18}$  eV

Pierog, 2012

La compréhension du genou et de la cheville du spectre est cruciale pour la compréhension globale du phénomène

# Comment accélère t'on des rayons cosmiques?

- Les rayons cosmiques sont des particules chargées on suspecte donc très fortement que les champs électromagnétiques présents dans les objets astrophysiques interviennent dans le processus d'accélération
- Dès 1949, Enrico Fermi proposa un mécanisme permettant d'accélérer des noyaux chargés ou des électrons **et** d'obtenir des spectres en loi de puissance  
--> réflexion des particules chargées par des nuages magnétiques

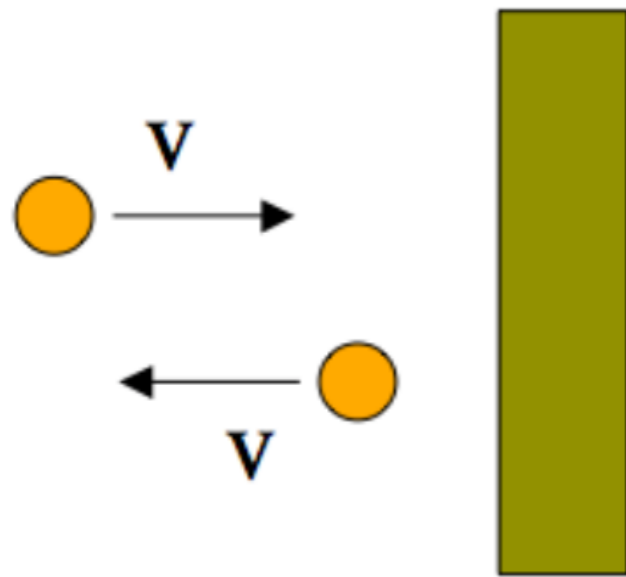


Les particules chargées peuvent être réfléchies par le “nuage magnétique”

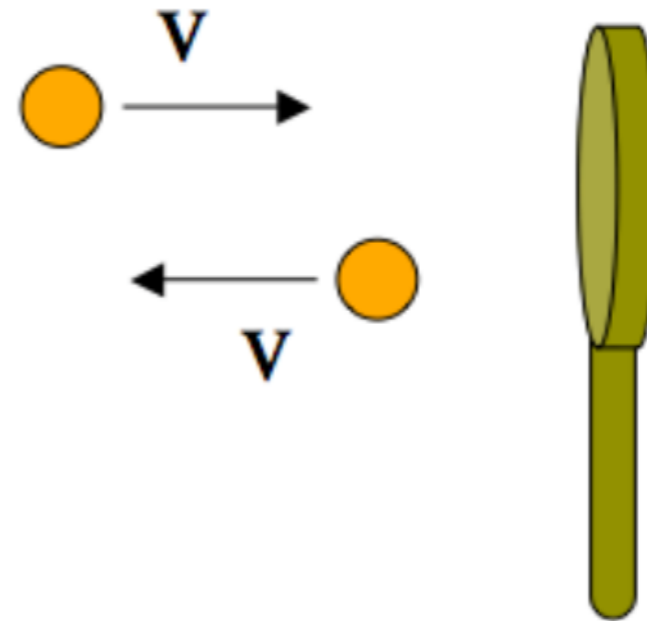
si le nuage est au repos, l'énergie est conservée



# Analogie tennistique (idéalisée)!

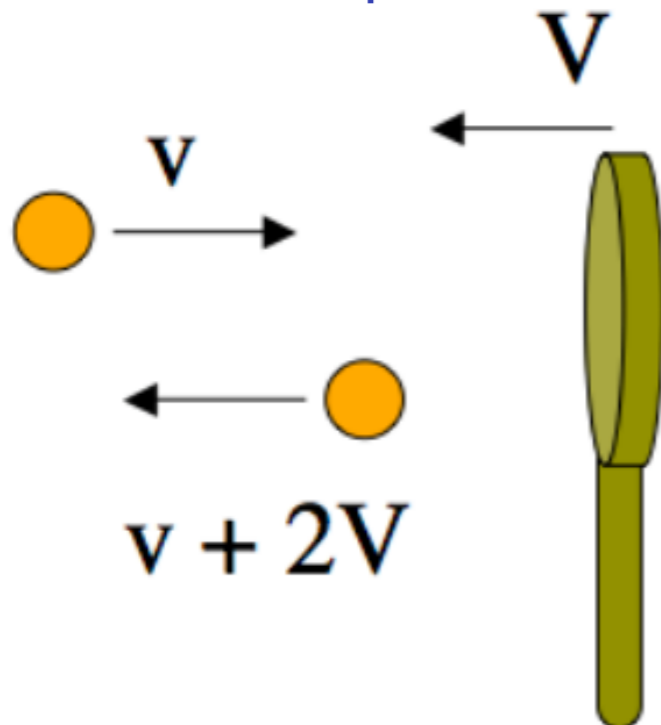


Balle contre un mur



Balle contre une raquette immobile

maintenant la raquette est en mouvement !



Avant le choc :

- référentiel du court la balle a pour vitesse  $v$
- passage dans le référentiel de la raquette, la balle a une vitesse  $v+V$

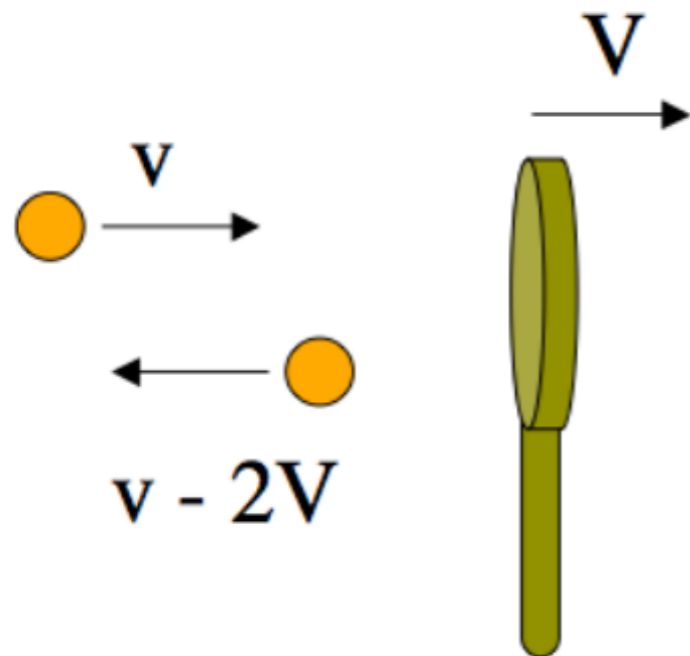


Après le choc :

- référentiel de la raquette la balle a pour vitesse  $v+V$
- (re)passage dans le référentiel du court, la balle a une vitesse  $v+2V$

➡ Accélération de la balle par double changement de référentiel lors d'un choc frontal entre la balle et la raquette

# Analogie tennistique (idéalisée)!



Amortie cette fois le choc est fuyant entre la raquette et la balle !

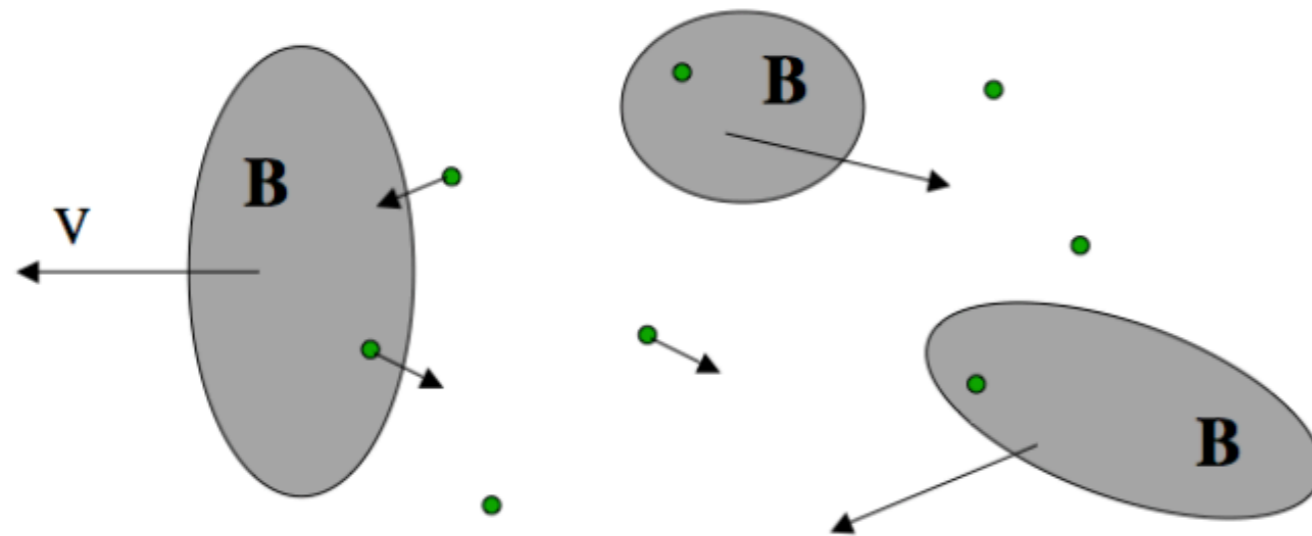
➔ Décelération de la balle par double changement de référentiel lors d'un choc fuyant entre la balle et la raquette

Mécanisme de Fermi :

- Nuage magnétique  $\Leftrightarrow$  raquette de tennis
- Particule chargée  $\Leftrightarrow$  balle de tennis

- Lorsque la particule rencontre un nuage magnétique venant vers elle  $\Rightarrow$  gain d'énergie
- Lorsque la particule rencontre un nuage magnétique qui la fuit  $\Rightarrow$  perte d'énergie

# Mécanisme original de Fermi



Dans la galaxie on s'attend à ce qu'une particule rencontre des nuages dans toutes les directions, l'effet final ne devrait il pas être nul ?

Non! Analogie(!) de l'autoroute !

Au final on peut montrer que les collisions frontales sont plus fréquentes et que ce mécanisme permet aux particules chargées de gagner de l'énergie en moyenne

Problème : les "nuages magnétiques" présents dans la Galaxie sont beaucoup trop lent et trop espacés

➡ Le mécanisme original de Fermi est trop "lent" pour expliquer l'accélération des rayons cosmiques au delà de quelques  $10^9$  GeV

➡ Un mécanisme moderne basé sur le même genre d'intuition (réflexion par des milieux magnétisés) et impliquant des ondes de choc astrophysiques donne de bien meilleurs résultats (garde le nom de mécanisme de Fermi)

# Les ondes de choc et l'accélération des rayons cosmiques

Les ondes de choc sont très fréquentes en astrophysique on en trouve dans les restes de supernovae, dans les jets des noyaux actifs de galaxies mais également dans le système solaire

elles se forment dès qu'un plasma/vent est éjecté d'une source avec une vitesse supersonique dans le milieu de propagation



L'accélération par onde de choc reprend les grandes lignes du scénario de Fermi

- ➔ les milieux magnétisés devant (milieu interstellaire) et derrière le front de choc font office de nuages magnétiques
- ➔ Les particules chargées peuvent faire des cycles de part et d'autre du front de choc
- ➔ A chaque passage du front de choc, choc frontal avec un nuage magnétique
- ➔ gain d'énergie à chaque cycle

# Les ondes de choc et l'accélération des rayons cosmiques

➔ Uniquement des chocs frontaux => mécanisme beaucoup plus rapide que le scénario original de Fermi

Pourquoi un spectre loi de puissance ?

➔ parce qu'à chaque cycle il y a une probabilité que la particule sorte du système plutôt que de retraverser le front de choc

➔ plus le nombre de cycle est grand, plus l'énergie des particules est grande mais moins il reste de particules dans le système

➔ en posant le calcul on obtient rapidement une loi de puissance

Cela signifie-t-il que l'on peut atteindre des énergies arbitrairement grandes ?

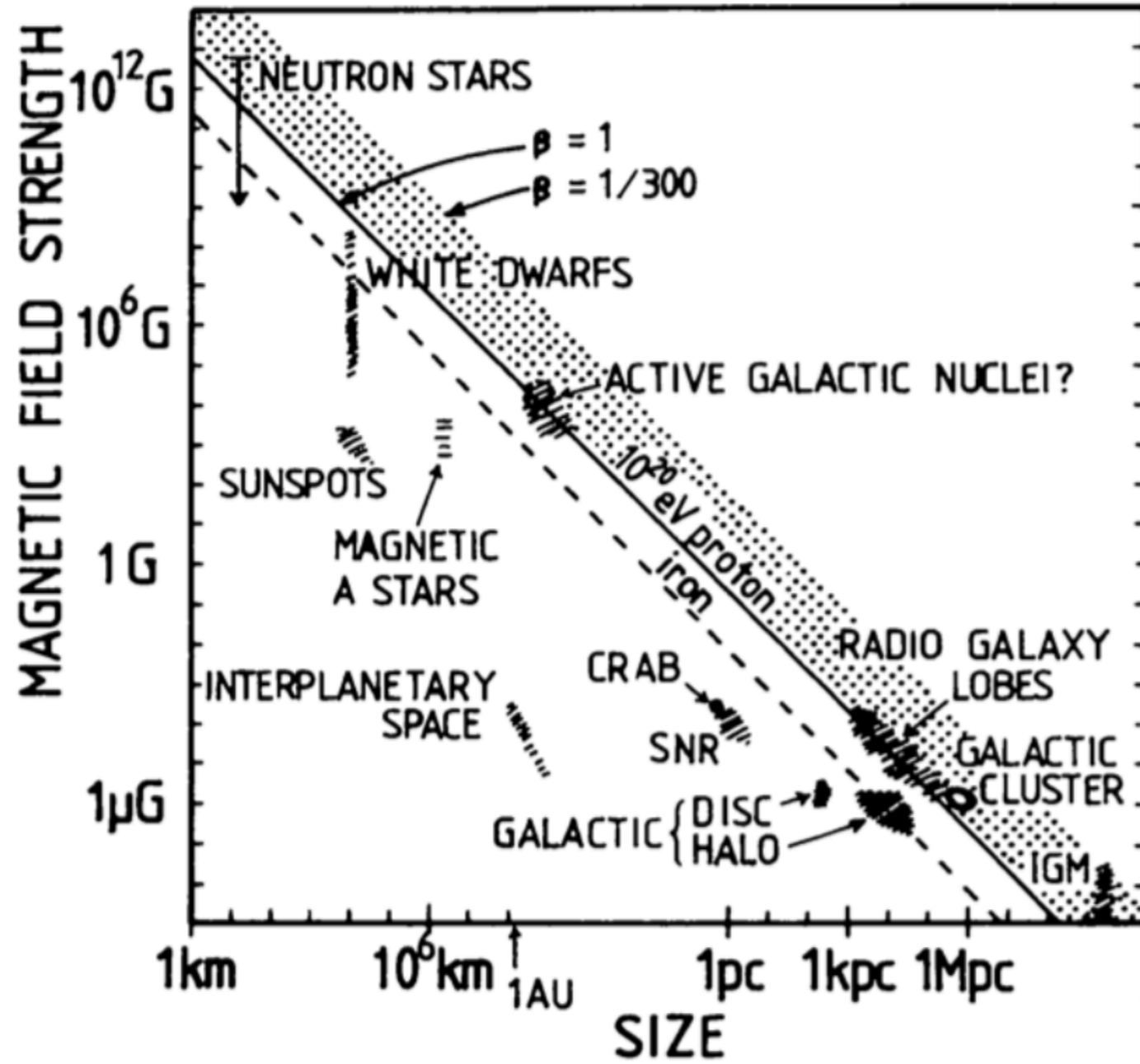
➔ Non !

➔ L'énergie maximale que l'on peut atteindre pour une source donnée dépend de la capacité du champ magnétique de la source à confiner les particules énergétiques

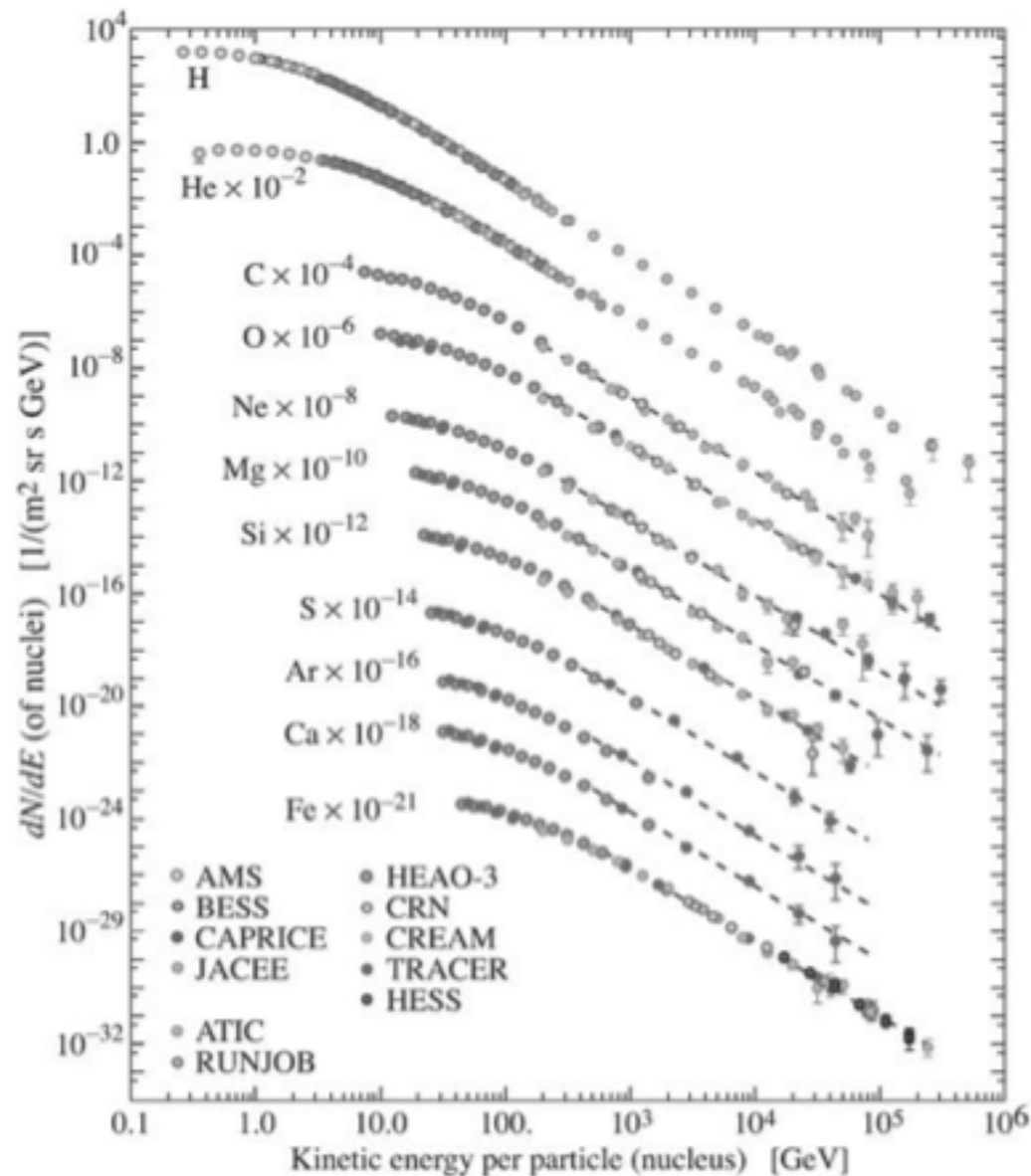
➔ Une des conséquences de l'argument de déconfinement est que l'on s'attend à ce que l'énergie maximale atteinte par un noyau de charge donnée soit proportionnelle à sa charge

On s'attend à ce que des noyaux d'oxygène ( $Z=8$ ) ou de Fer ( $Z=26$ ) soient accélérés jusqu'à des énergies respectivement 8 et 26 fois plus élevées que l'énergie maximale des protons

# Diagramme de Hillas

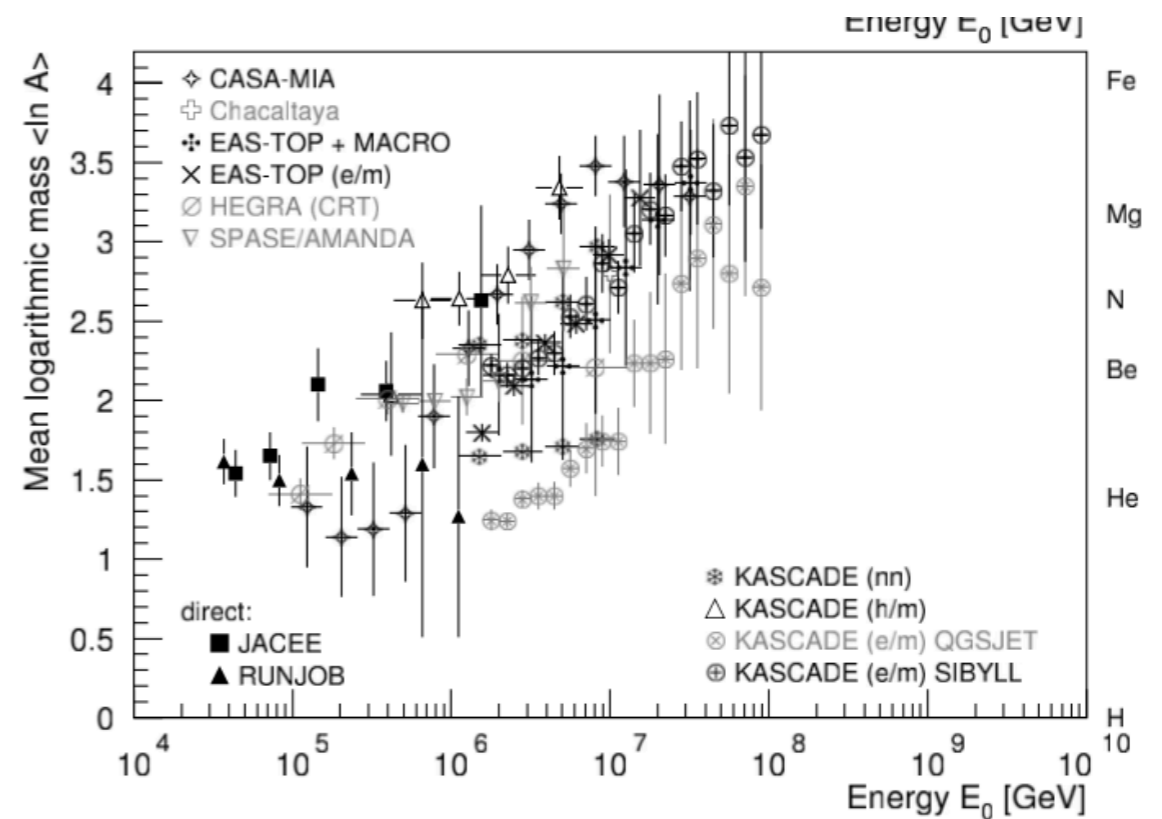


# Situation en dessous de la cheville



Composition entre  $10^{10}$  et  $10^{14}$  eV  
(ballons et satellites)

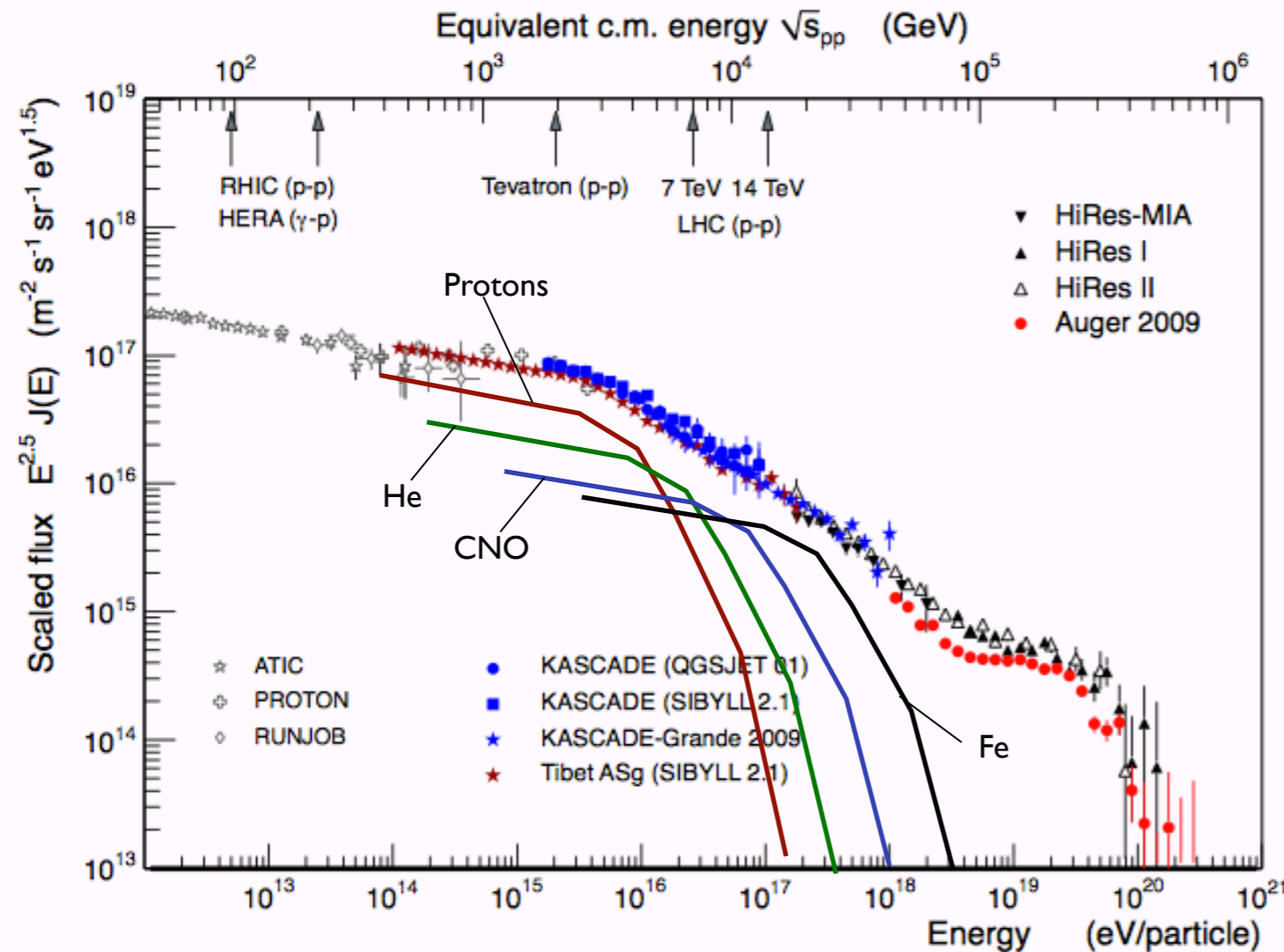
Spectres des différents éléments ~ parallèles  
les abondances relatives évoluent peu avec l'énergie



compilation par Blumer et al., 2009

Composition entre  $10^{14}$  et  $10^{17}$  eV  
(uniquement depuis le sol au delà de  $\sim 10^{15}$  eV)  
net alourdissement dans la région du genou et au dessus

# Comment comprendre l'alourdissement dans la région du genou?



Pierog, 2012

Une interprétation logique serait que le genou marque l'énergie à laquelle la plupart des sources galactiques deviennent incapables d'accélérer des protons

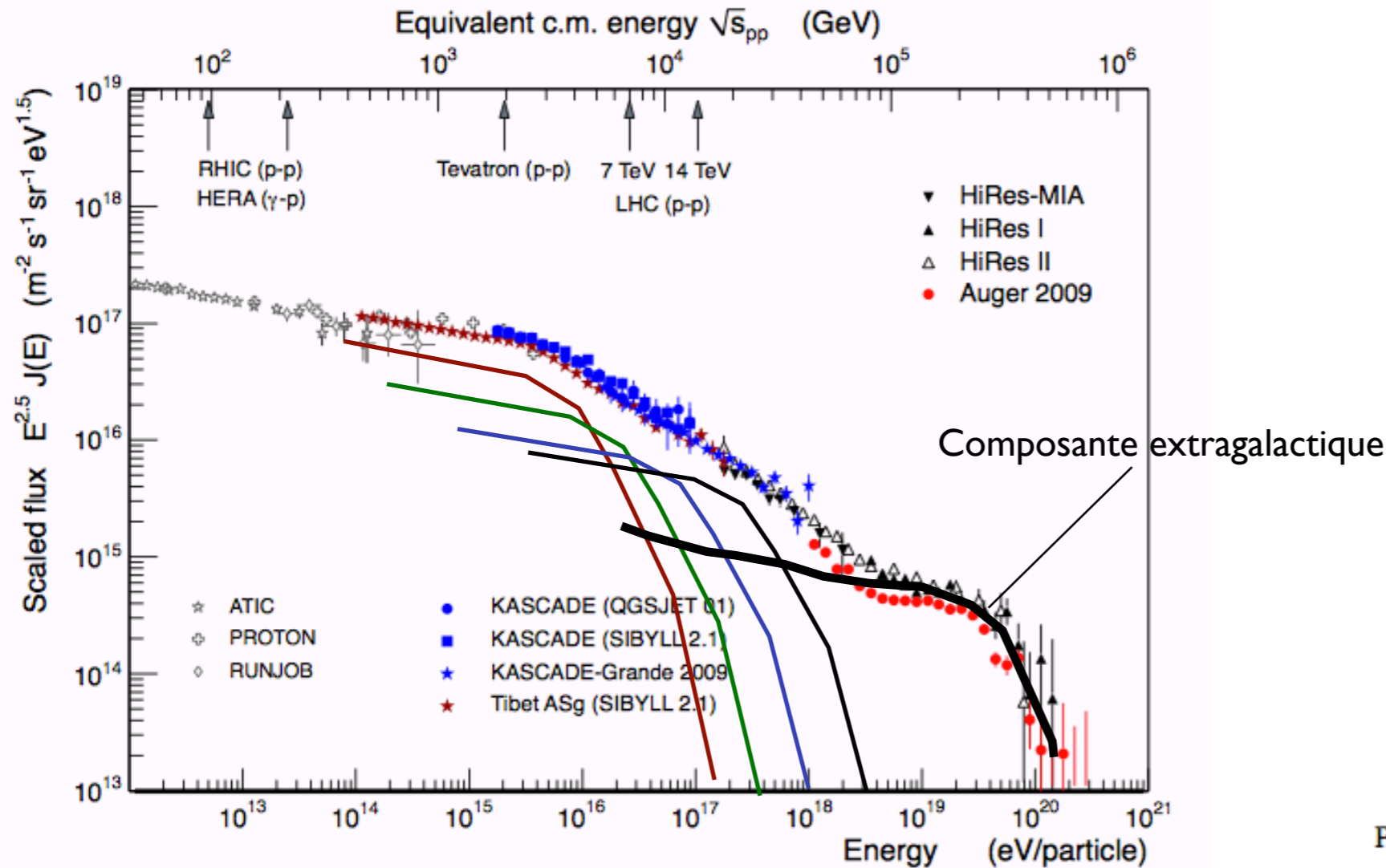
Les autres éléments subissent le même sort à des énergies plus élevées proportionnelles à leur charge

La composante galactique diminue plus vite au dessus du genou mais moins vite que s'il n'y avait que des protons

Interprétation logique mais il en existe d'autres



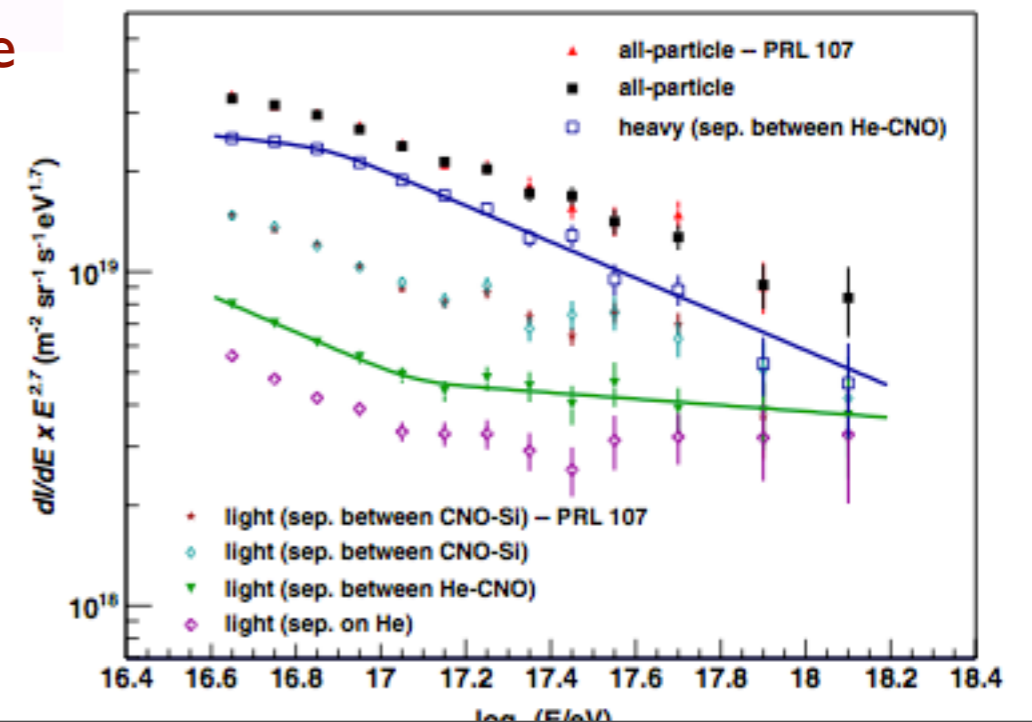
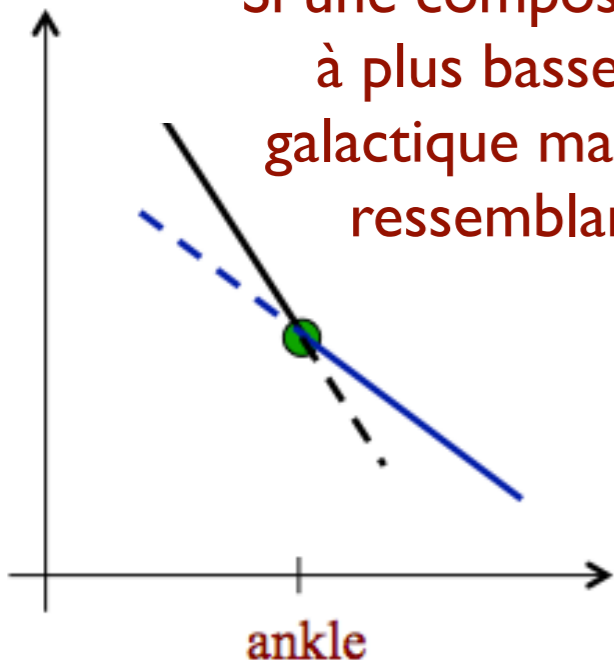
# Après le genou, la cheville



Hypothèse supportée par la composition qui semble s'alléger entre  $10^{17}$  et  $10^{18}$  eV

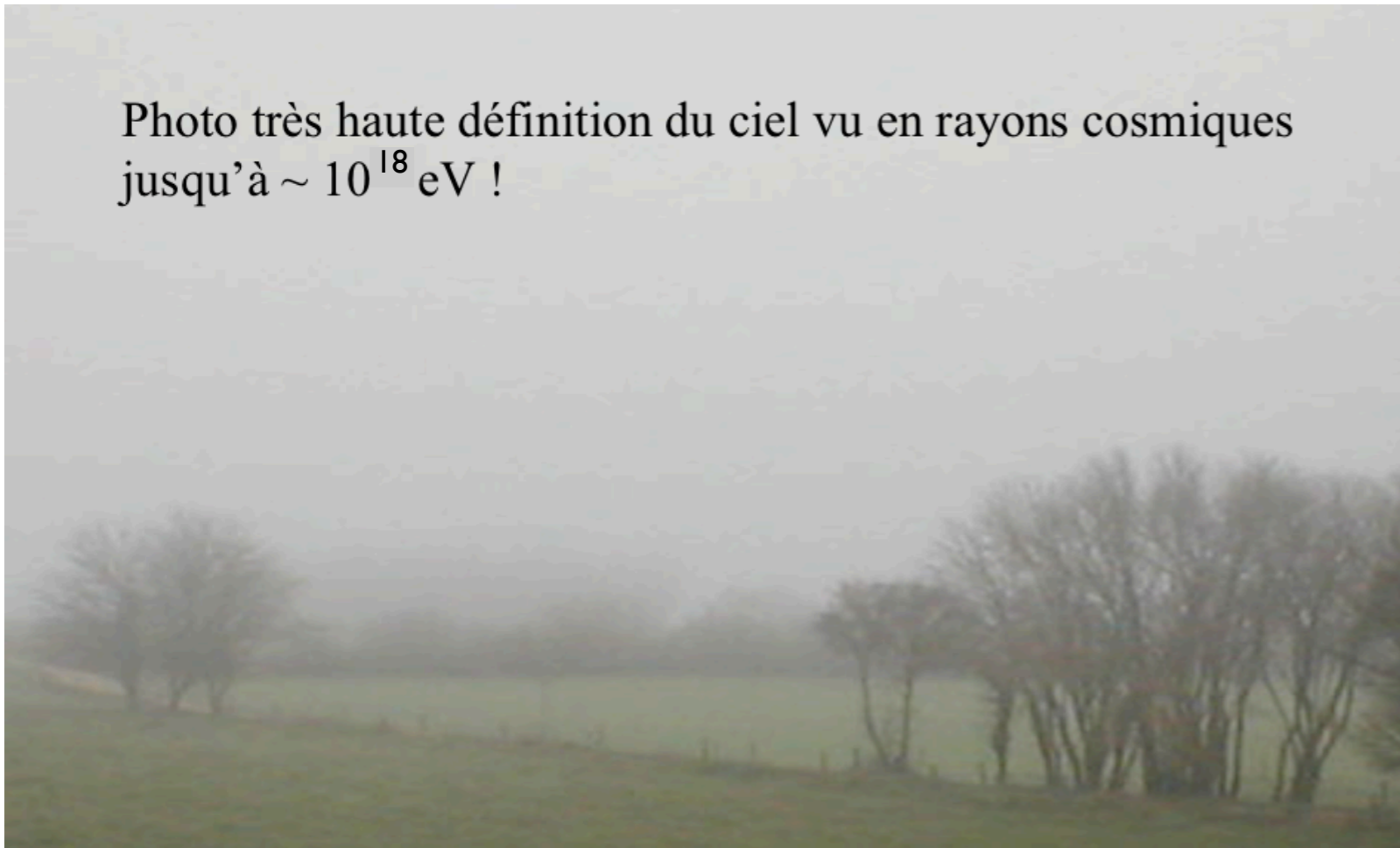
PHYSICAL REVIEW D **87**, 031101(R) (2013)

Si une composante extragalactique (sous dominante à plus basse énergie) succède à la composante galactique mauribonde on s'attend à une signature ressemblant à "une cheville" dans le spectre



# Quelles sont les sources du rayonnement cosmique galactique?

Photo très haute définition du ciel vu en rayons cosmiques jusqu'à  $\sim 10^{18}$  eV !



Les rayons cosmiques galactiques sont isotropisés par les champs magnétiques galactiques

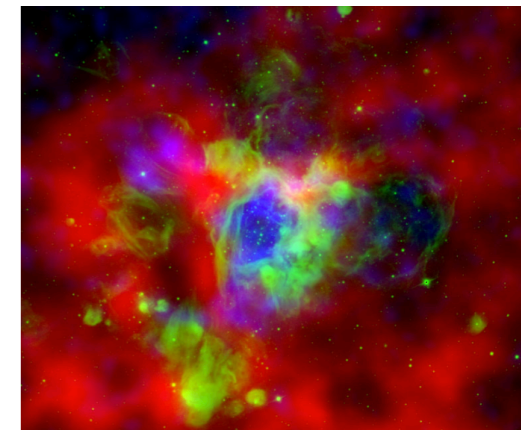
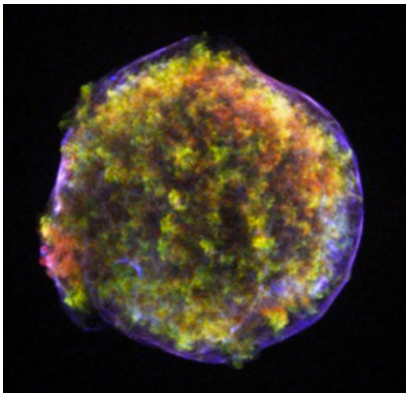
- ➔ brouillard complet !!!!
- ➔ les directions d'arrivées des rayons cosmiques ne permettent pas de dévoiler les sources

Connexion supernovae/rayons cosmiques, un argument énergétique :  
10-20% de l'énergie libérée dans la galaxie par les explosions de supernovae suffirait à produire les rayons cosmiques galactique

➔ Modèle "standard" : les restes de supernovae sont les sources du rayonnement cosmique galactique

Cette hypothèse rencontre quelques problèmes :  
- énergie maximale  
- certains aspects fins de la composition à basse énergie

Les superbules représentent une alternative séduisante



# Comment sortir du brouillard magnétique?

➔ transformer les rayons cosmiques en vrais “rayons”

- En deça de la cheville : Étudier les particules énergétiques en observant le rayonnement induit

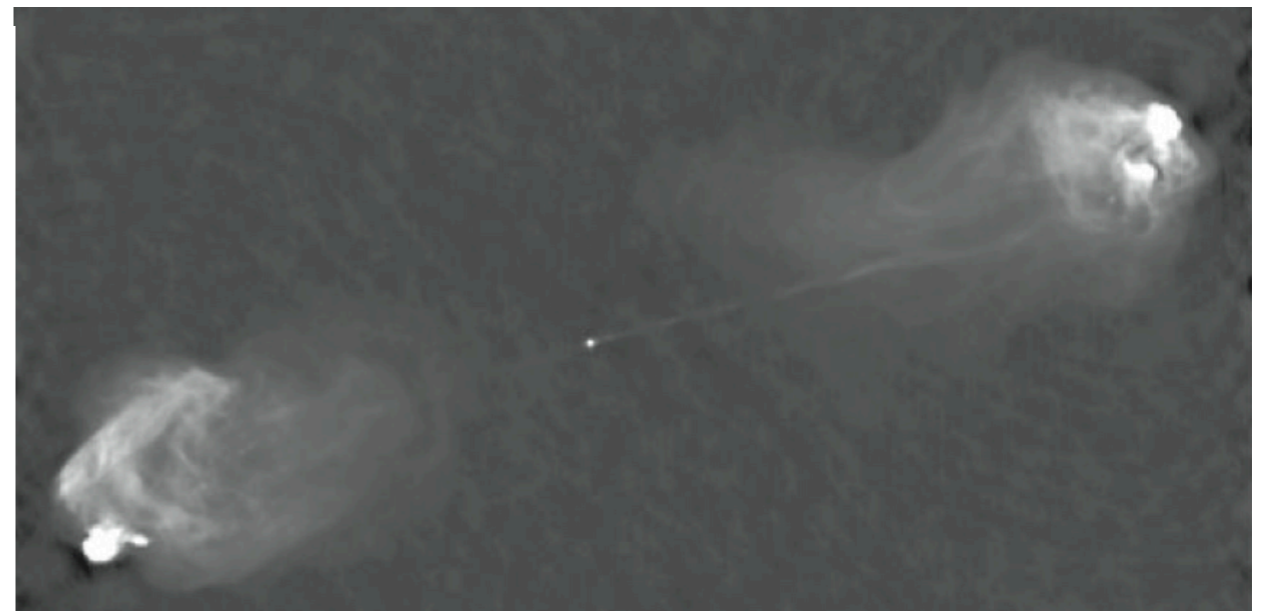
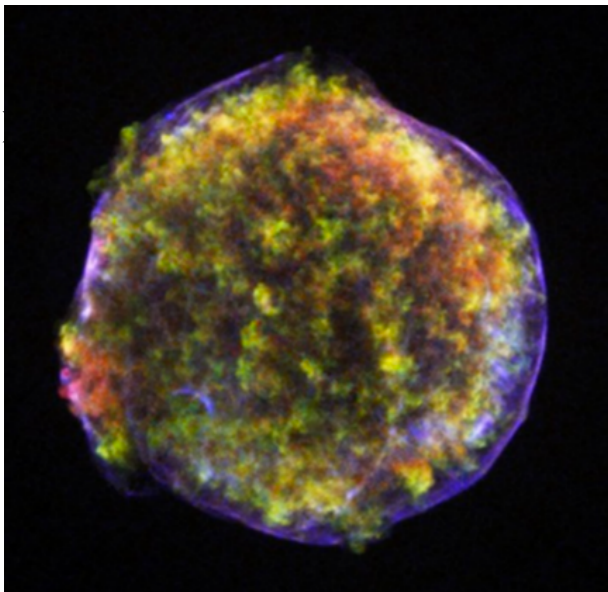
↙ Photons ➔ Pointage du lieu d'interaction

## ■ Interactions diverses

➔ production de photons cf. HESS, INTEGRAL, Fermi...

- Les rayonnements secondaires donnent accès à un monde nouveau, où des processus astrophysiques très énergétiques accélèrent des particules

Toutes les sources de haute énergie nous sont connues principalement par l'effet des particules énergétiques qu'elles accélèrent !



# Comment sortir du brouillard magnétique? transformer les rayons cosmiques en vrais “rayons”

- Plus l'énergie des particules augmente, moins elles sont déviées par les champs magnétiques



- Proton ayant une énergie de  $10^{18}$  eV : rayon de courbure  $>$  épaisseur de la Galaxie

⇒ perte de confinement dans la Galaxie

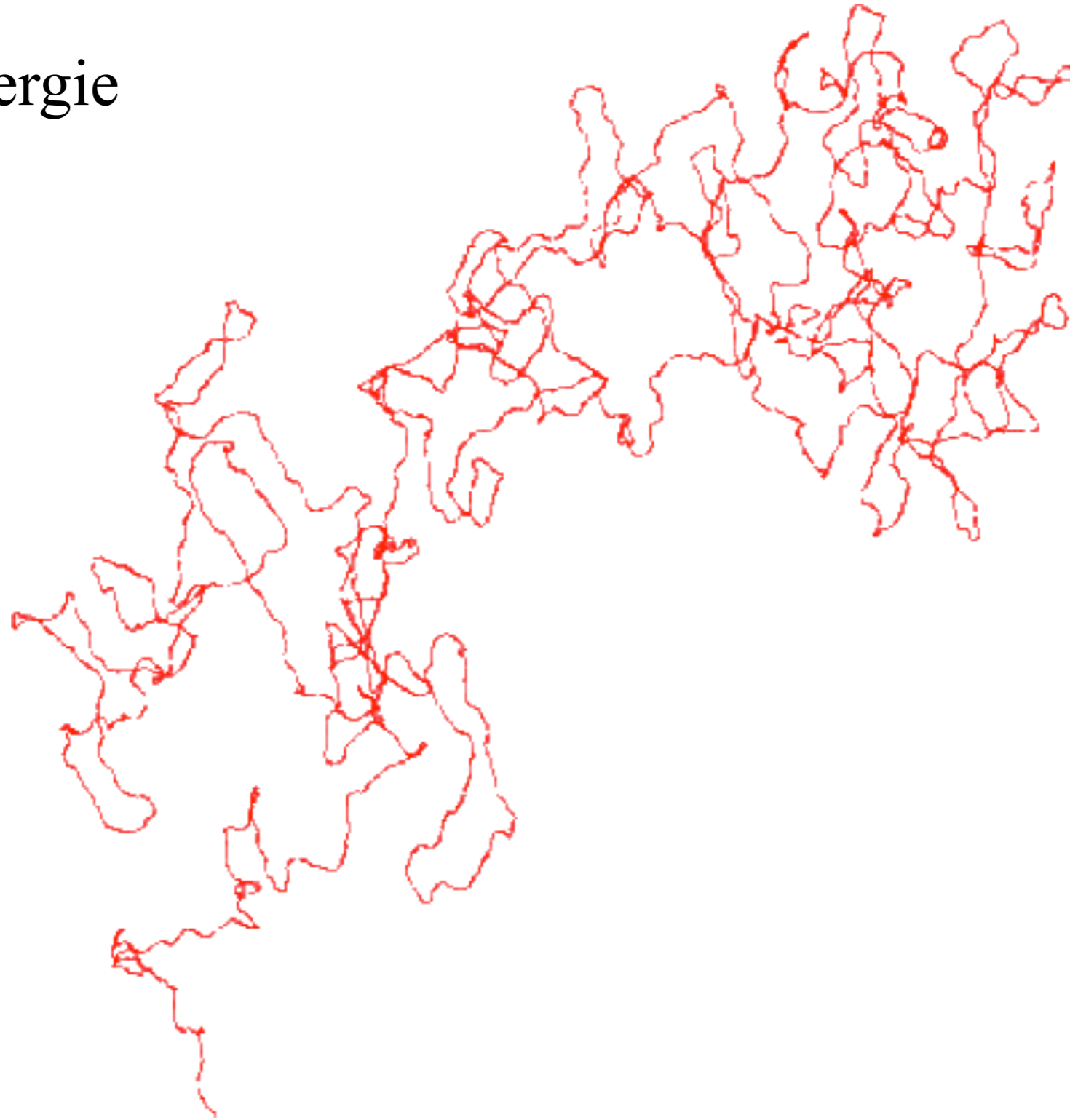
⇒ origine extragalactique !

- Proton ayant une énergie  $E = 10^{20}$  eV : trajectoire quasi rectiligne ?

- Le brouillard se dissipe-t-il à très haute énergie ?

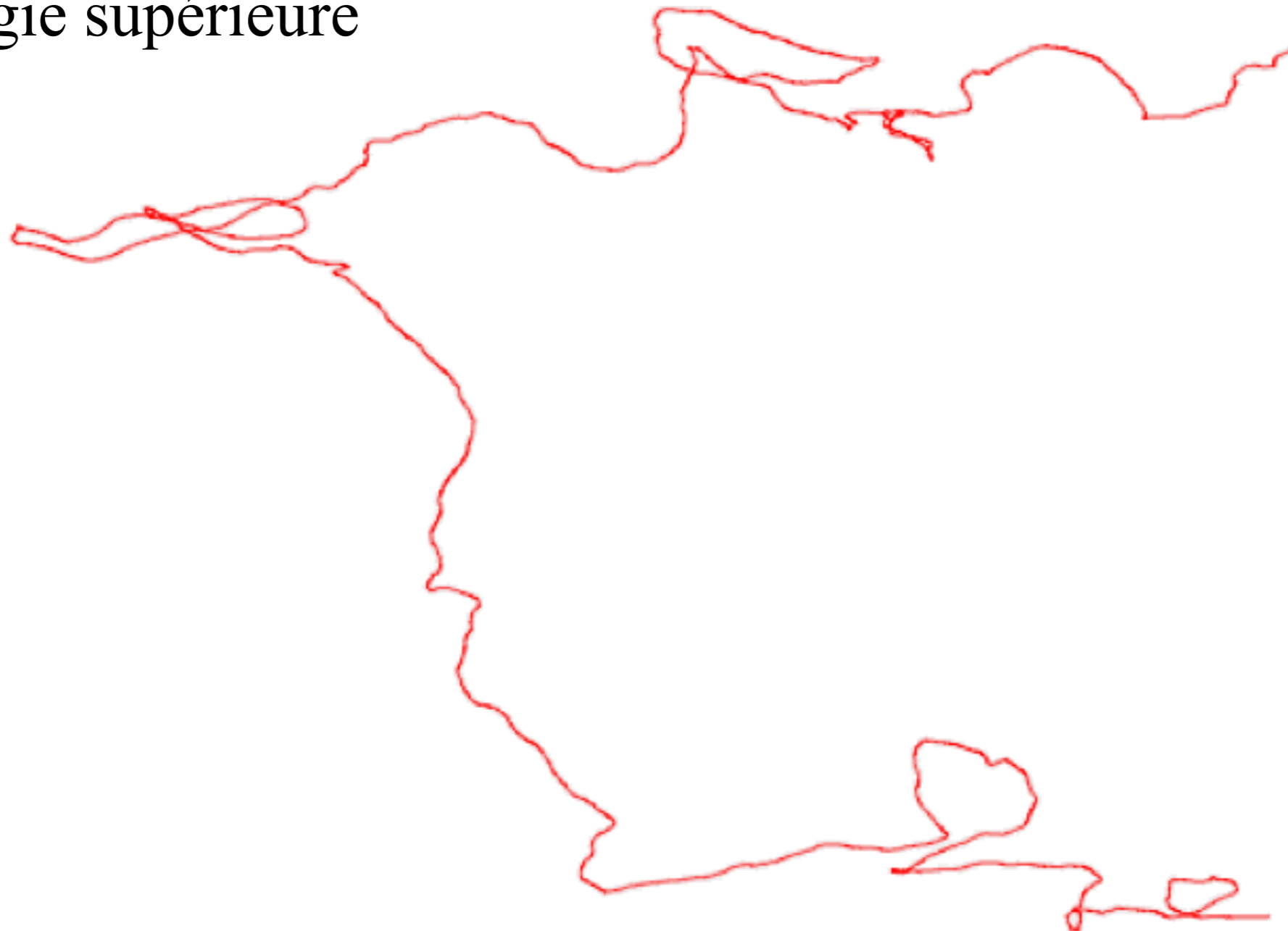
# L'espoir aux énergies extrêmes

Basse énergie



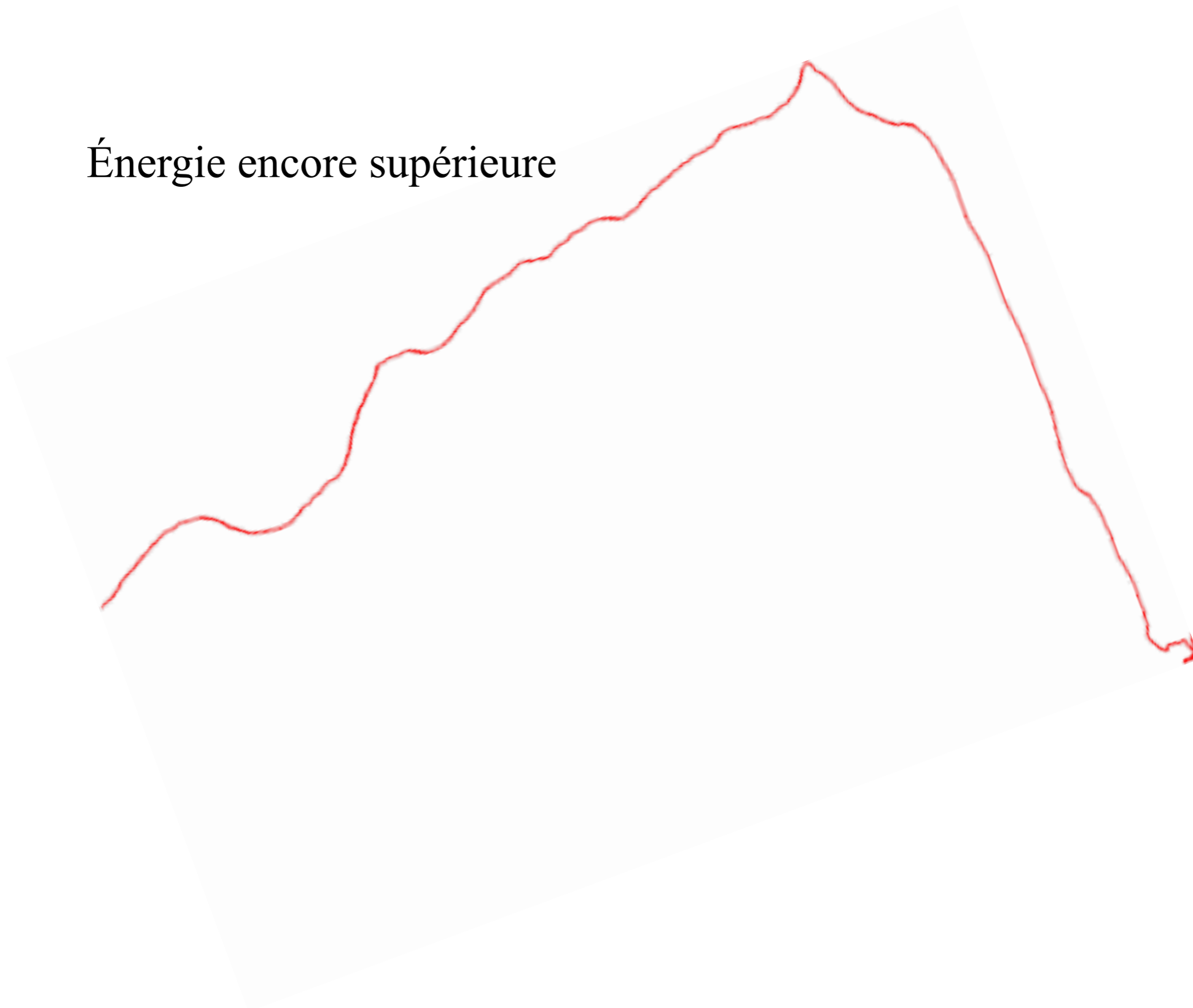
# L'espoir aux énergies extrêmes

Énergie supérieure



# L'espoir aux énergies extrêmes

Énergie encore supérieure



# L'espoir aux énergies extrêmes

Énergie vraiment très élevée !

**Propagation quasi rectiligne**

à  $10^{20}$  eV on s'attend à ce qu'un proton traverse les champs magnétiques extragalactiques et galactiques quasiment en ligne droite

Attention ! L'argument perd beaucoup de sa puissance si les noyaux plus lourds (charge élevée) dominant à ultra-haute énergie



# Détection les rayons cosmiques de très haute et d'ultra haute énergie depuis le sol

au dessus de  $10^{14}$  eV :

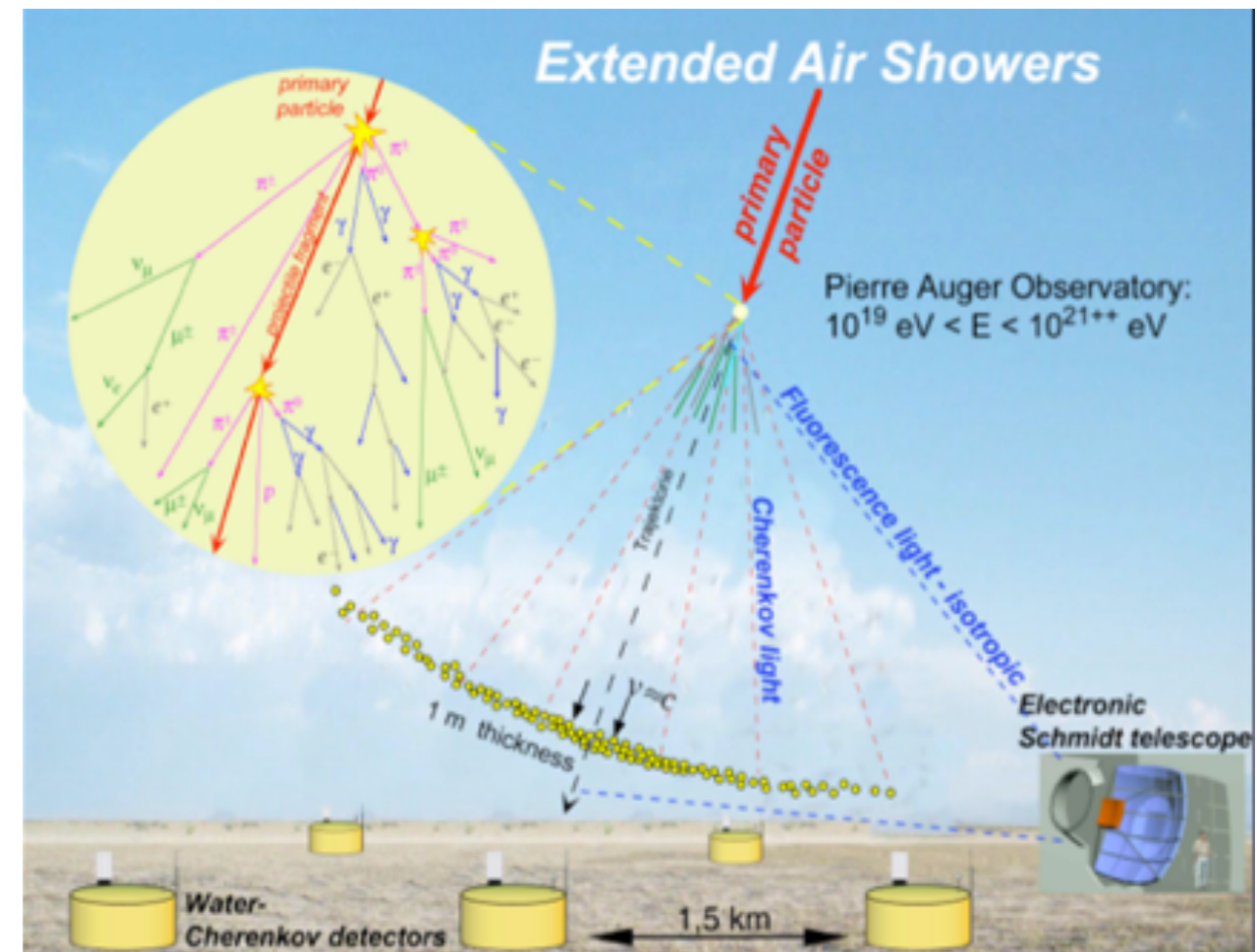
- flux trop bas pour les ballons et satellites

➔ des observatoires au sols reconstruisent les gerbes atmosphériques pour déterminer les caractéristiques des rayons cosmiques primaires

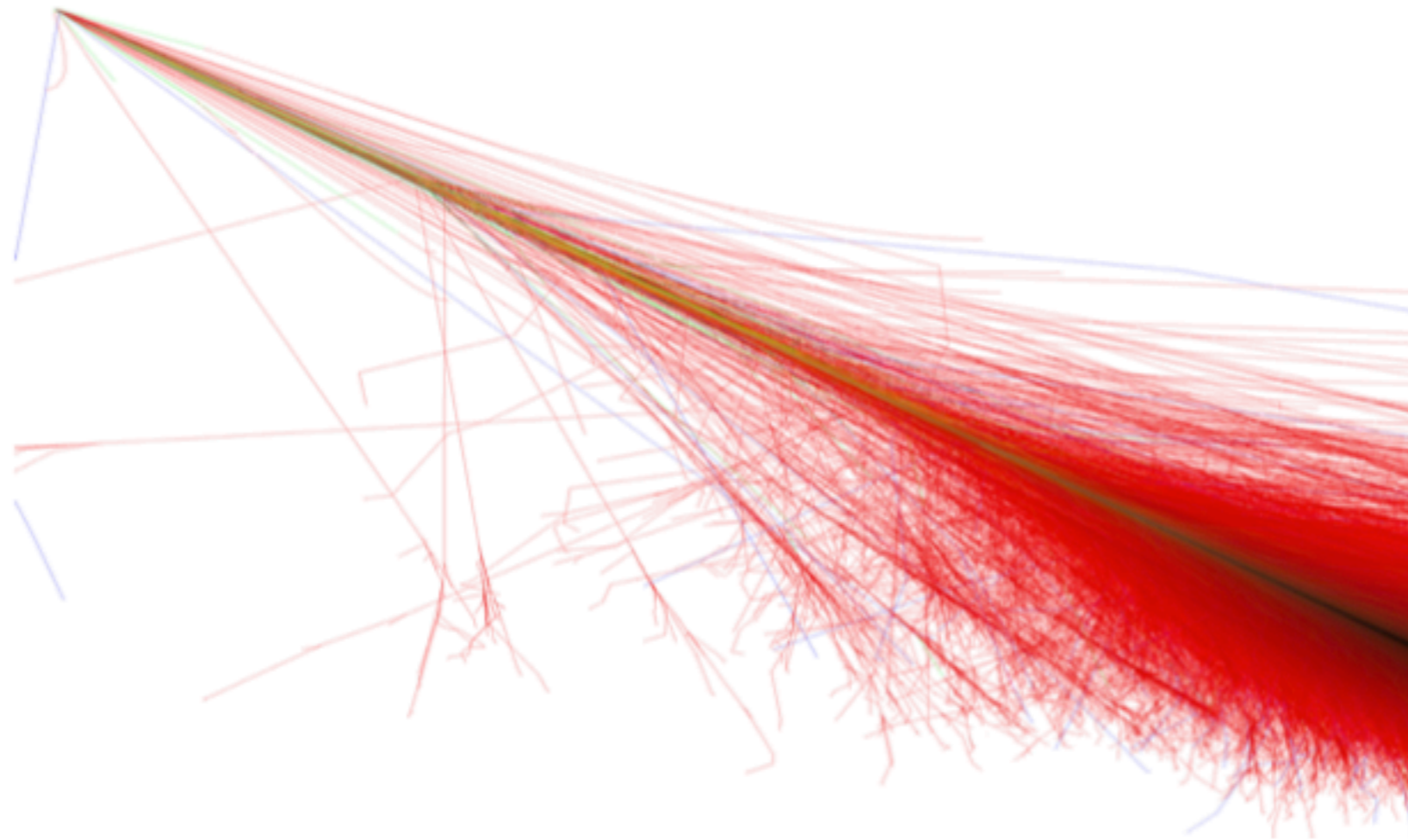
- Deux types de détecteurs au sol :

➔ réseaux de surface

➔ télescopes de fluorescence



# Détection des gerbes atmosphériques



Pour une gerbe individuelle :

- l'énergie du rayon cosmique primaire peut être reconstruite assez
- la direction d'arrivée du rayon cosmique primaire également
- La composition ne peut pas être déterminée pour une gerbe individuelle ==> "fluctuations de gerbe à gerbe" ==> on a besoin d'un large ensemble de gerbes à une énergie donnée pour isoler des sous ensemble "légers" (proton, He), "intermediates" (CNO) ou "lourds" (Si, Fe)

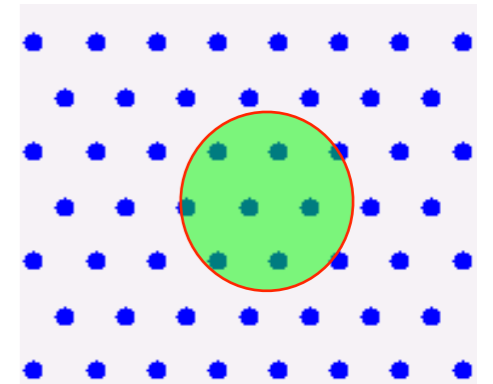
# Les réseaux de surface

Echantillonnage des gerbes au niveau du sol

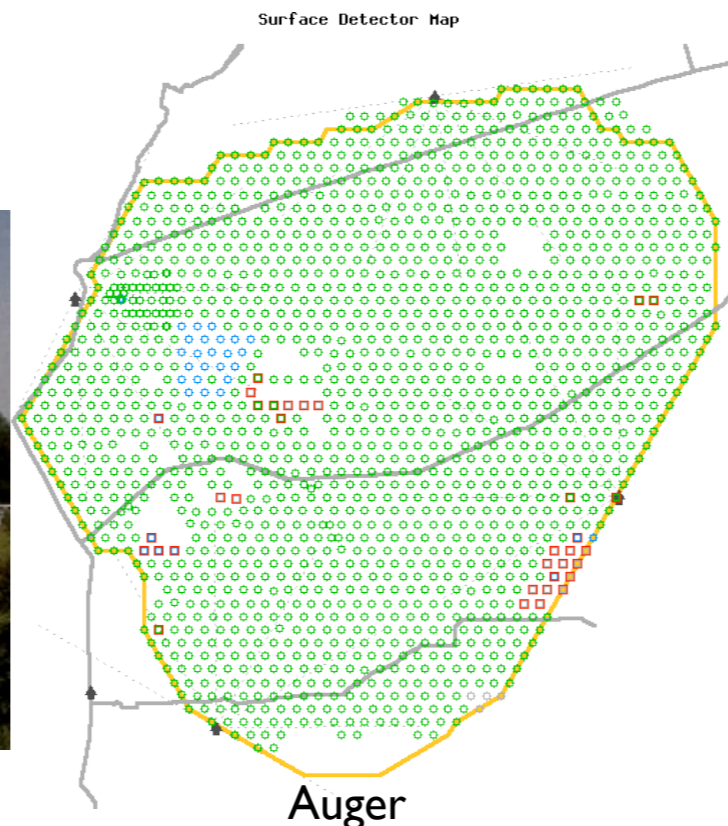
- La surface couverte et l'espacement des détecteurs dépend du domaine d'énergie observé
- Kascade ( $10^{15}$ - $10^{17}$  eV) : surface 40000 m<sup>2</sup>, 252 détecteurs, espacement 13m
- Auger ( $10^{18}$ -  $>10^{20}$  eV) : surface 3000 km<sup>2</sup>, 1600 détecteurs, espacement 1500 m

• Different types de détecteurs :

- Scintillateurs (Kascade) (==> electrons)
- Scintillateurs blindés (Kascade) (==> muons)
- Cuve à eau à effet Cerenkov (Auger) (==> all particles)



Kascade



# Les réseaux de surface



Kascade

Scintillateurs liquides  $\Rightarrow e^+e^-$   
Scintillateurs plastiques blindés  $\Rightarrow$  muons



Kascade-Grande

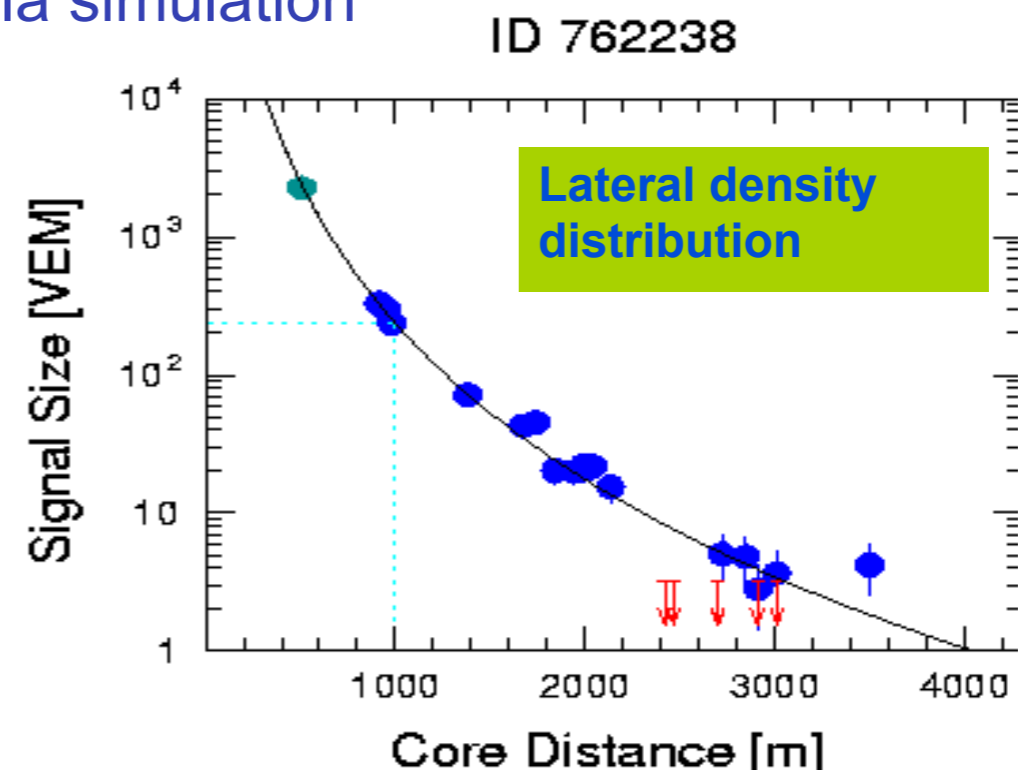
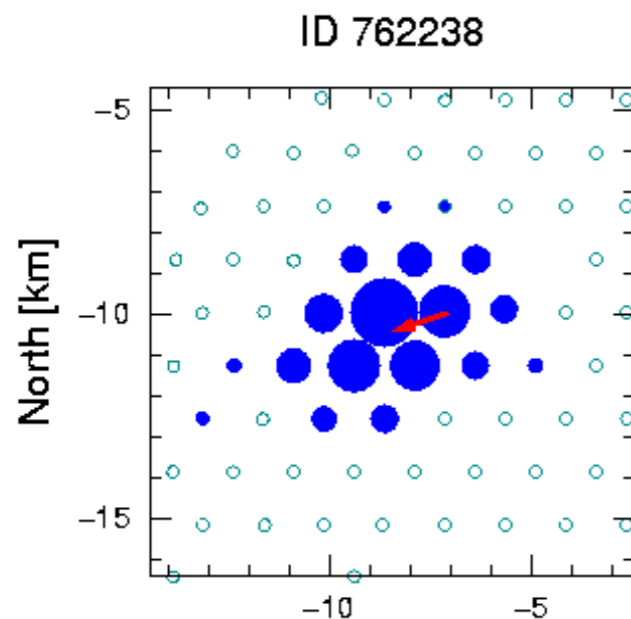
# Les réseaux de surface

- Méthodes de reconstruction
- Direction estimée en utilisant la structure en temps du front de gerbe
- Energie reconstruite en utilisant l'évolution du signal en fonction de la distance au coeur de la gerbe
- nature estimatée principalement grâce au nombre de muons (pas de gerbe à gerbe)

La relation Signal/Energy est déduite des simulations de gerbes atmosphériques

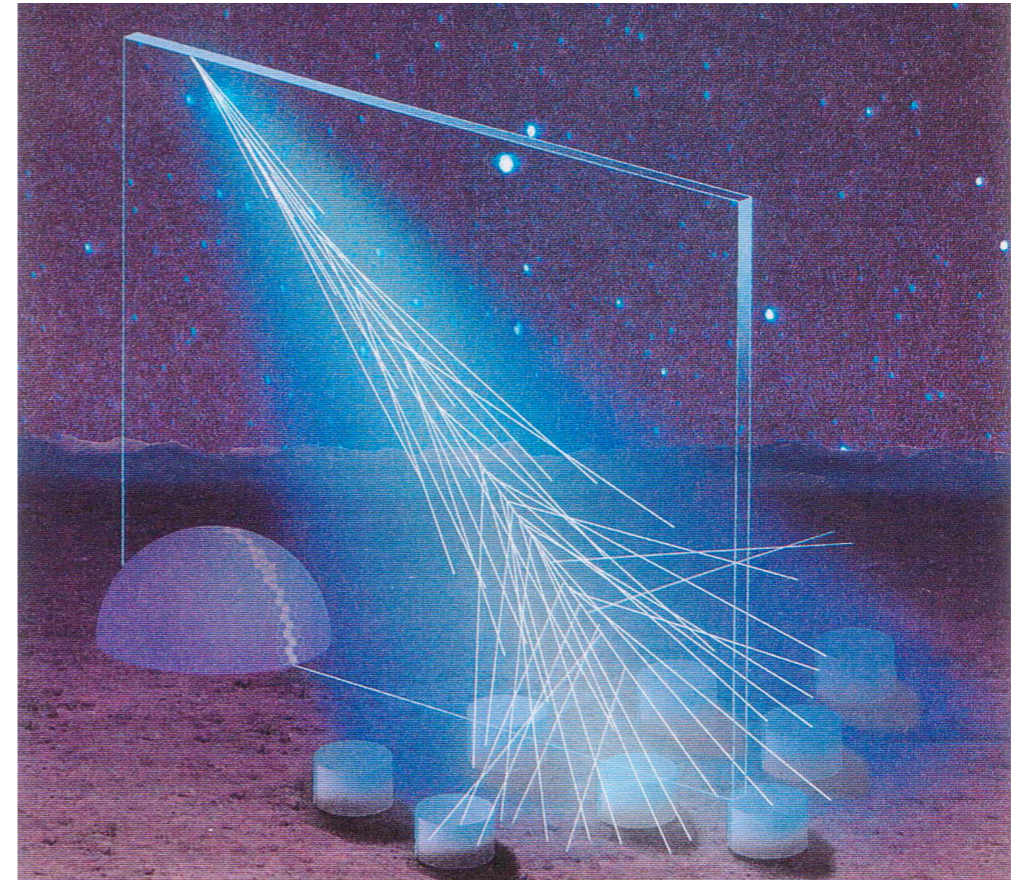
La relation nombre de muons/composition également

-> dépend des modèles hadroniques utilisés pour la simulation



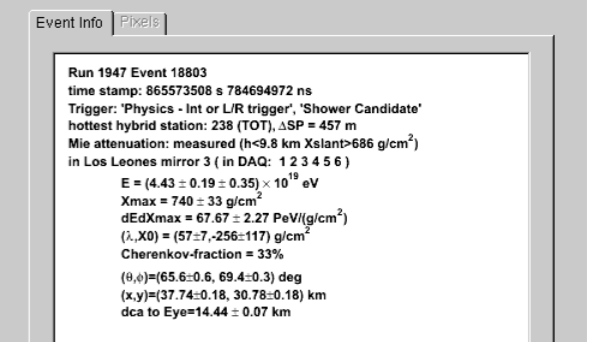
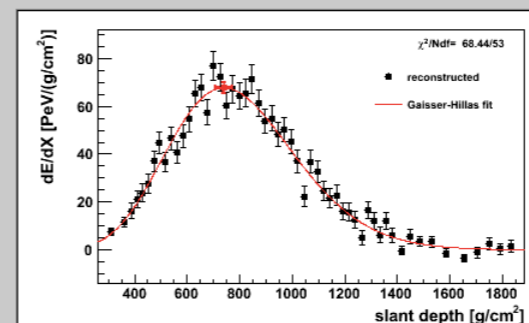
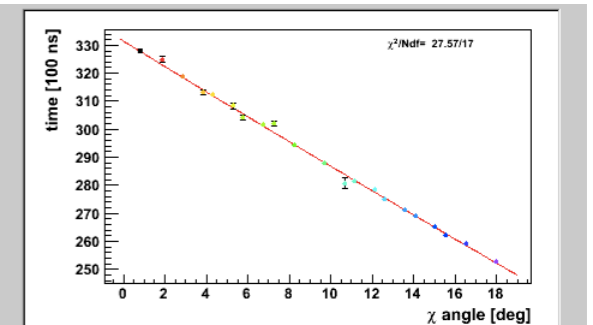
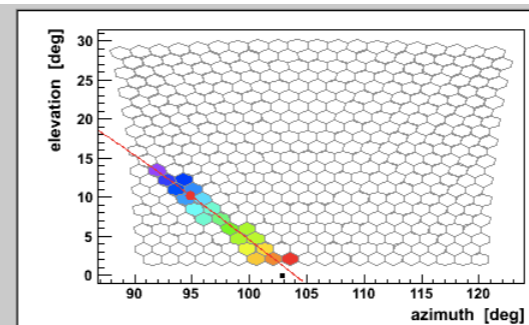
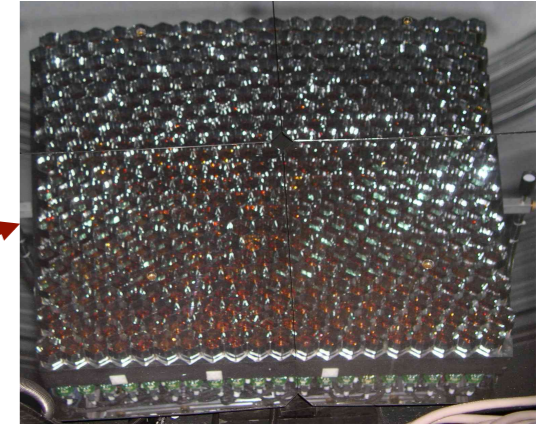
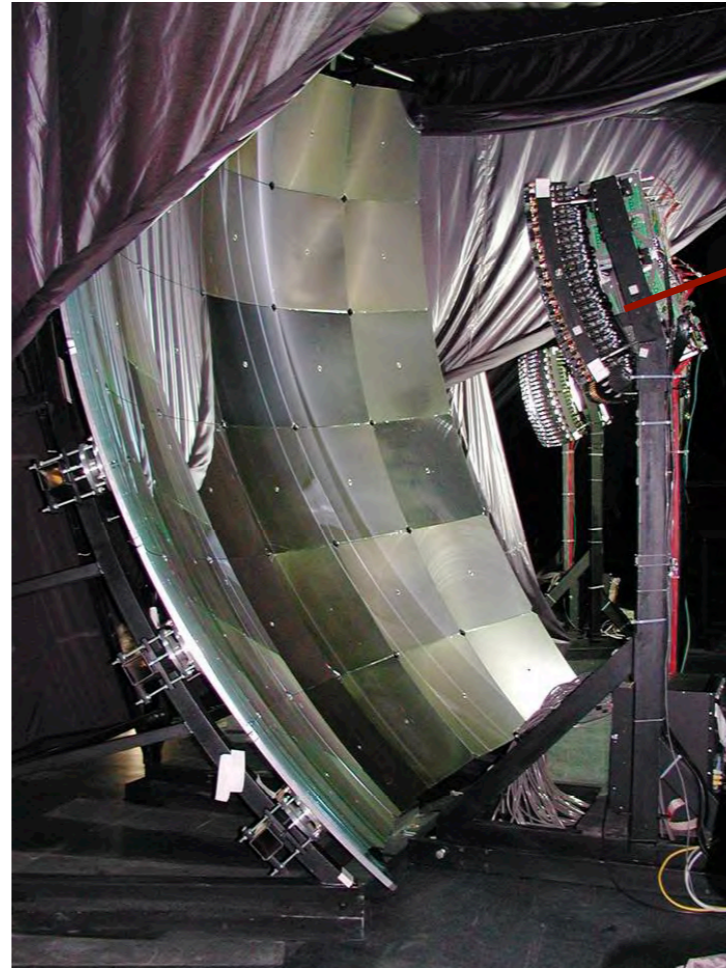
# Les télescopes de fluorescence

- Détection de la lumière UV émise lors de l'excitation des molécules de  $N_2$  par les  $e^+e^-$  de la gerbe
- La lumière de fluorescence est proportionnelle au nombre de particules électromagnétiques dans la gerbe -> proportionnel à l'énergie du RC
- mesures possible les nuits sans lune -> ~15% de cycle utile
- Mesure calorimétrique -> largement indépendant des modèles d'interactions hadroniques
- Technique utilisée depuis les 80's



# Les télescopes de fluorescence

- Méthodes de reconstruction :
- La photographie UV du développement de la gerbe est capturée par les photomultiplicateurs de la caméra
- La géométrie de la gerbe est contrainte par les temps de déclenchement des différents pixels
- L'énergie est estimée en intégrant le profil de la gerbe
- La profondeur atmosphérique du maximum de développement de la gerbe ( $X_{MAX}$ ) permet de déterminer la composition (discrimination statistique)

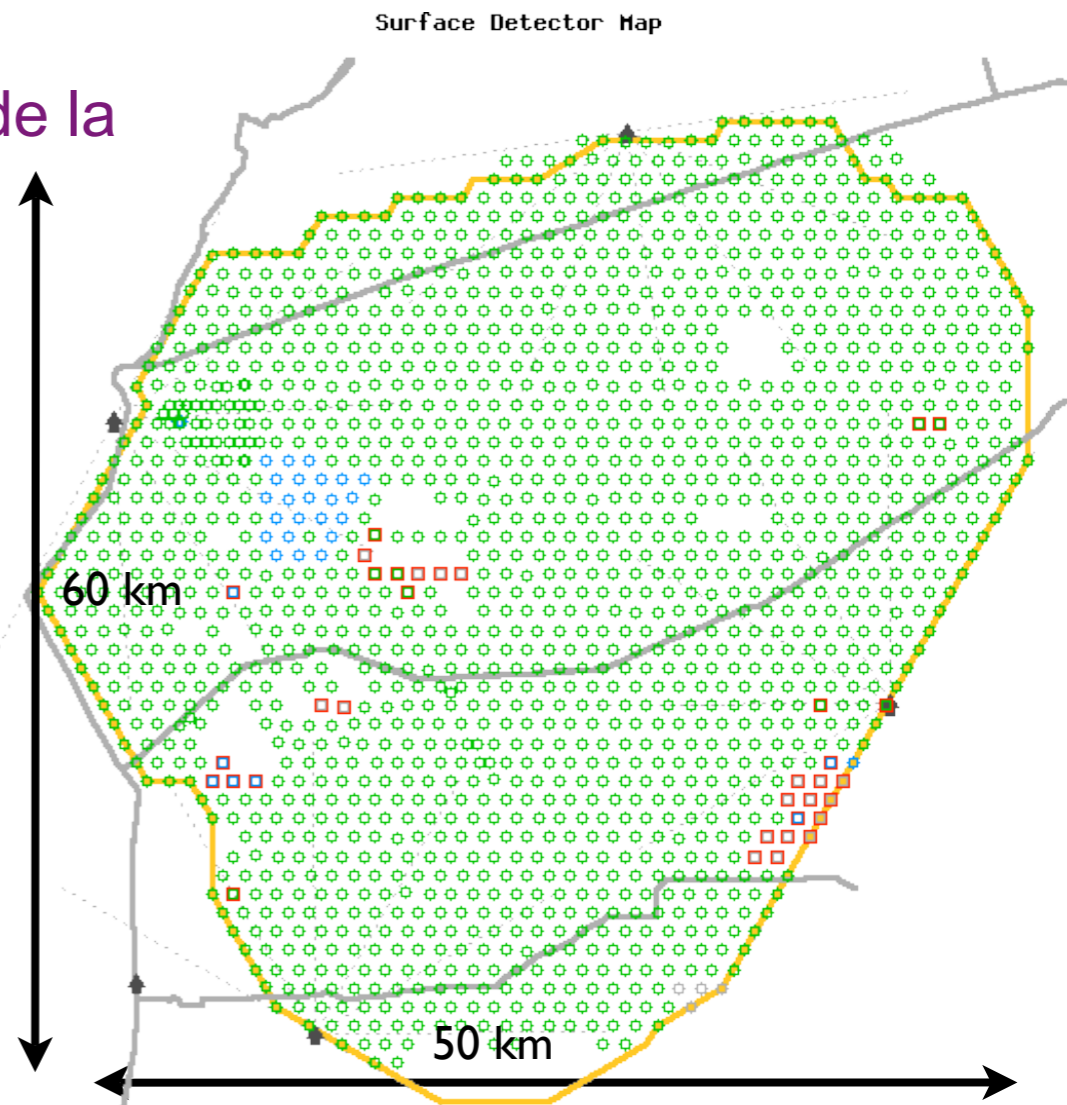
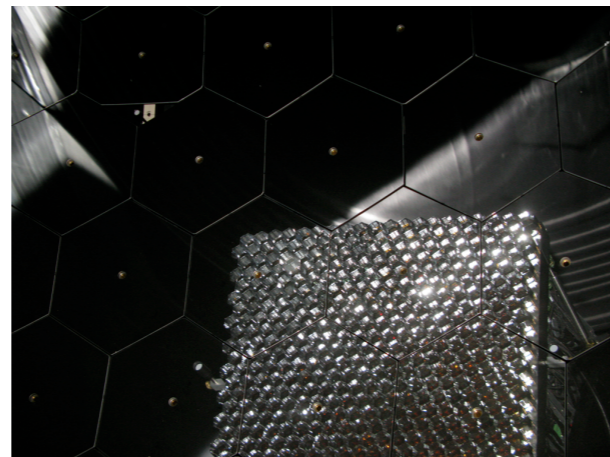
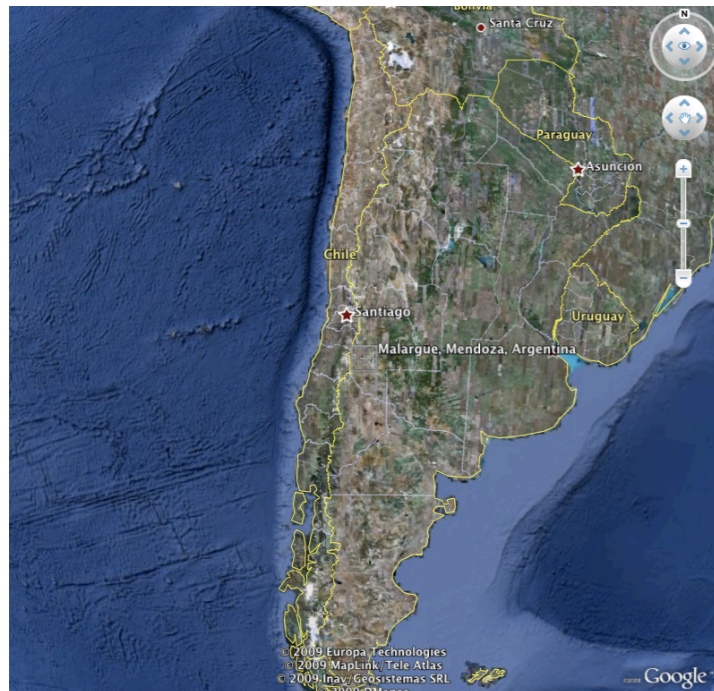
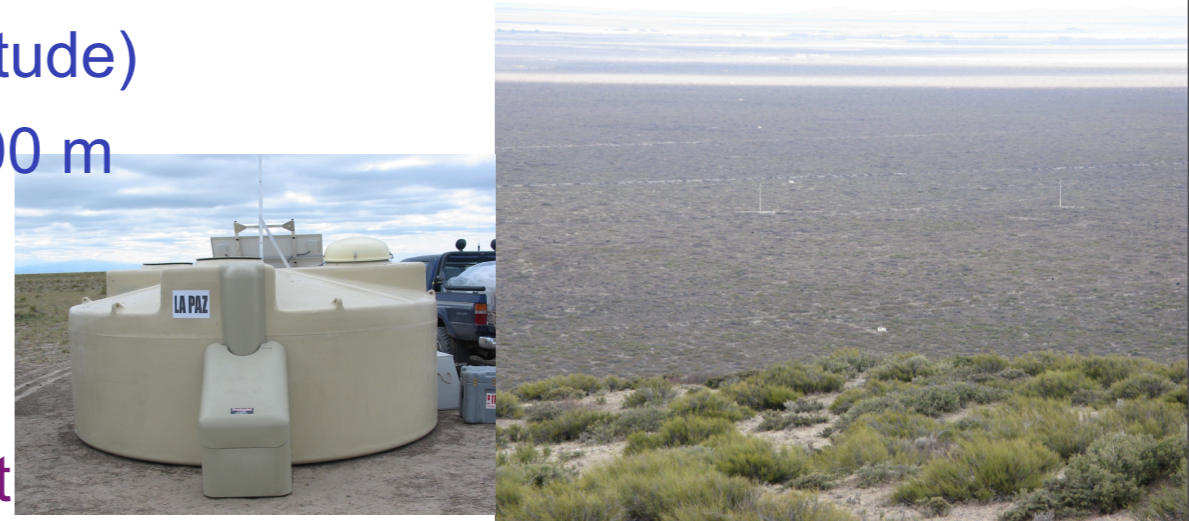


# L'observatoire Pierre Auger : le géant hybride

- Situé à Malargue (Mendoza, Argentine, 1400m d'altitude)
- 1600 Cuves à eau à effet Cerenkov, espacés de 1500 m  
-> surface du réseau 3000 km<sup>2</sup>
- 4 télescopes de fluorescence surplombent le réseau

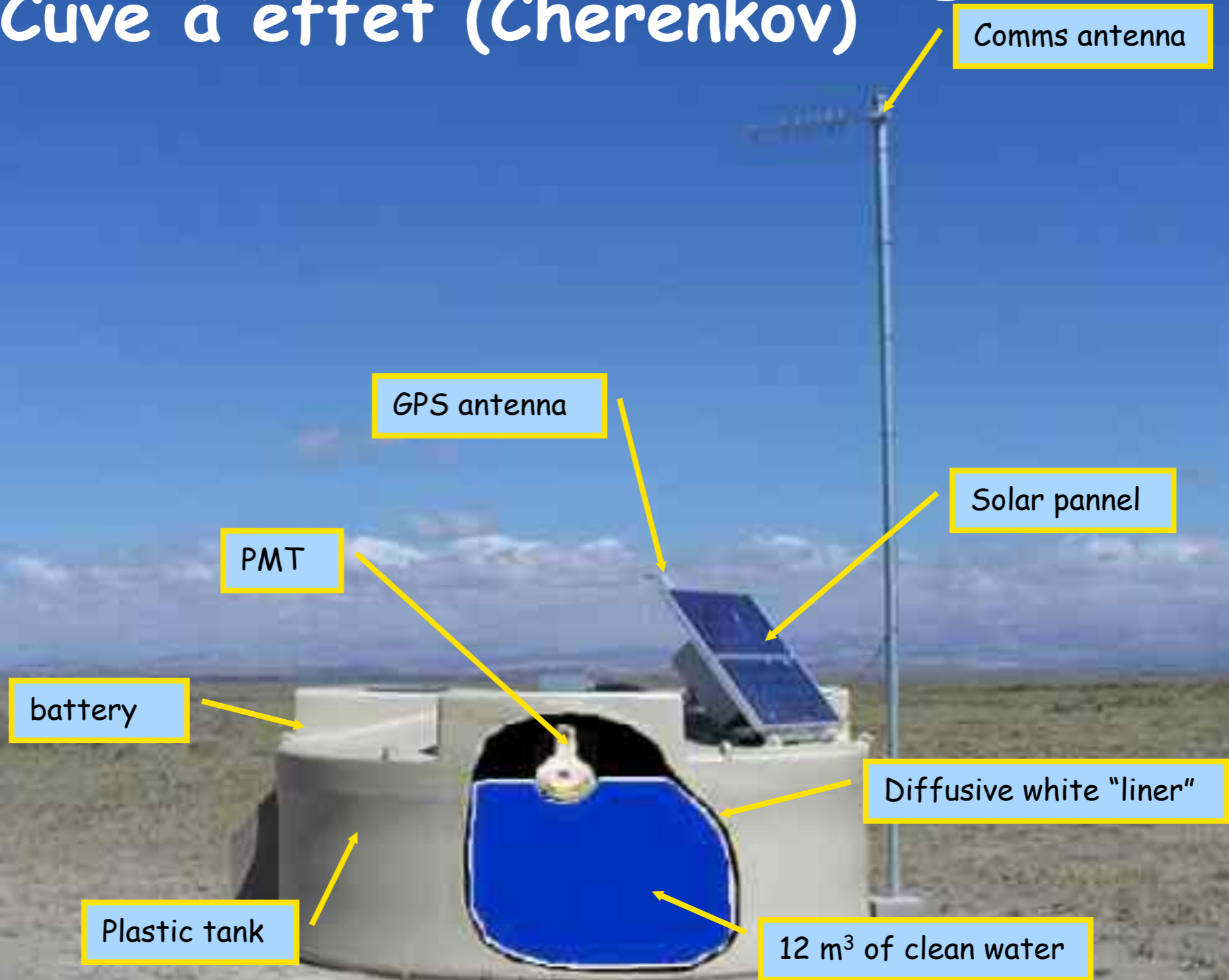
➔énorme surface pour une statistique sans précédent aux énergies extrêmes

➔Détection hybride pour une meilleure compréhension de la physique des gerbes





# Une des stations d'Auger Cuve à effet (Cherenkov)



# Une petite partie du réseau de surface

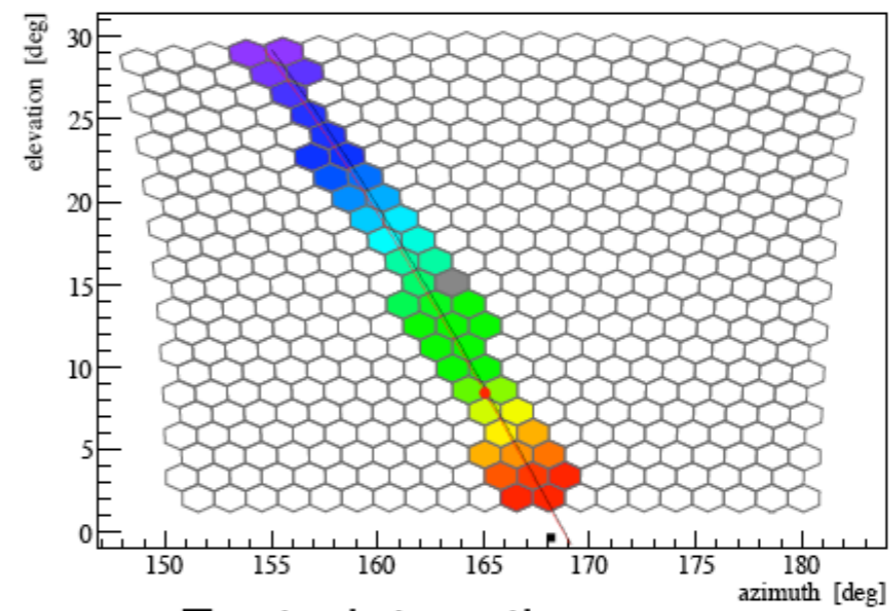
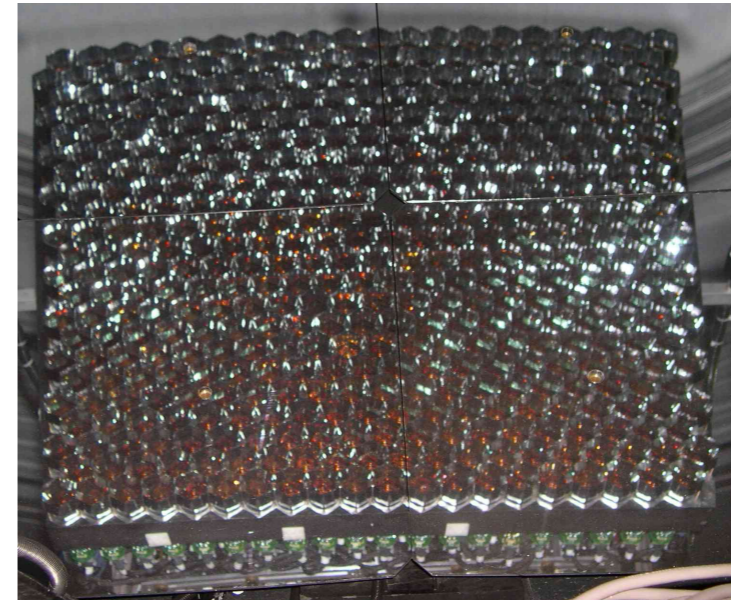
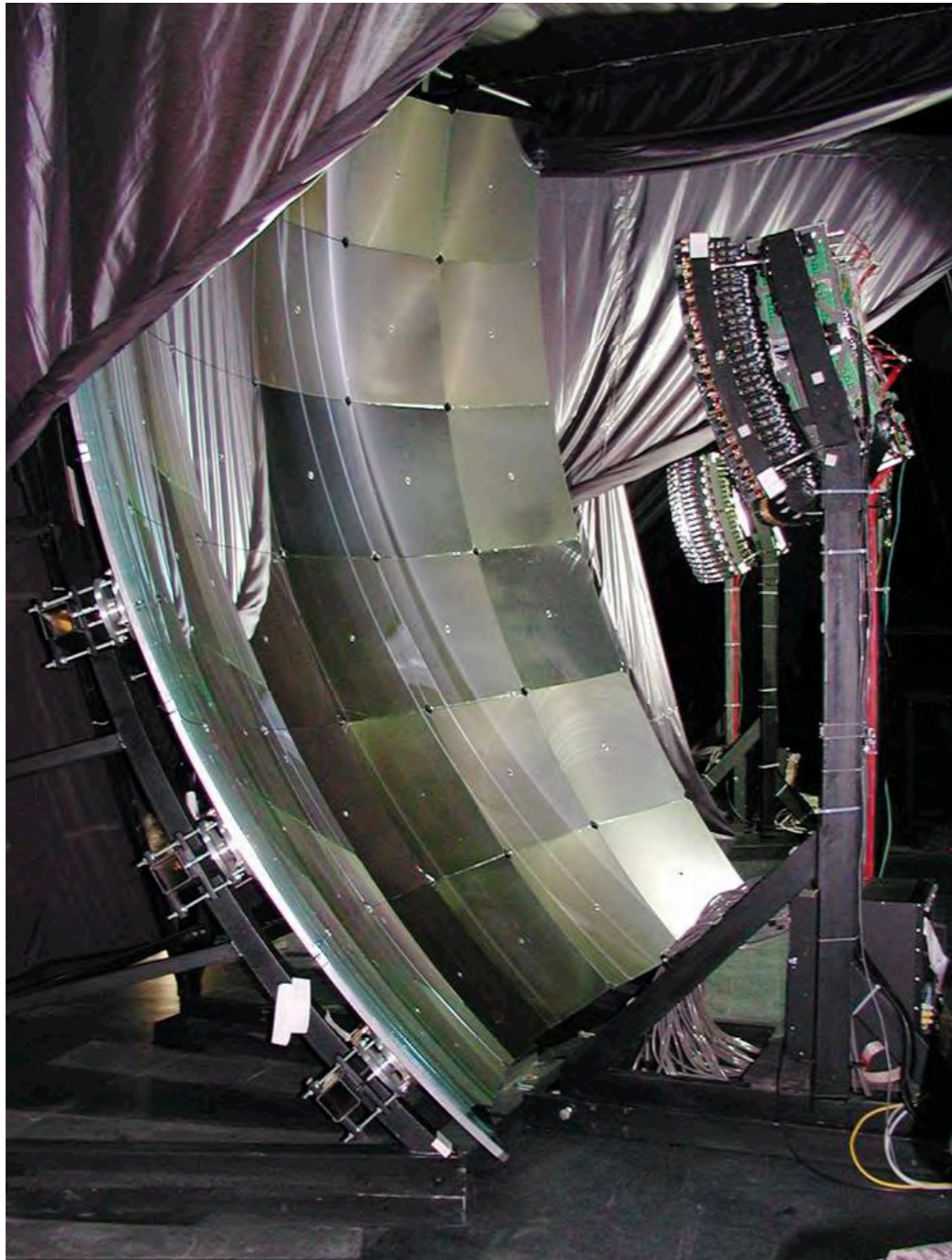
(espacement 1.5 km, surface totale 3000 km<sup>2</sup>)



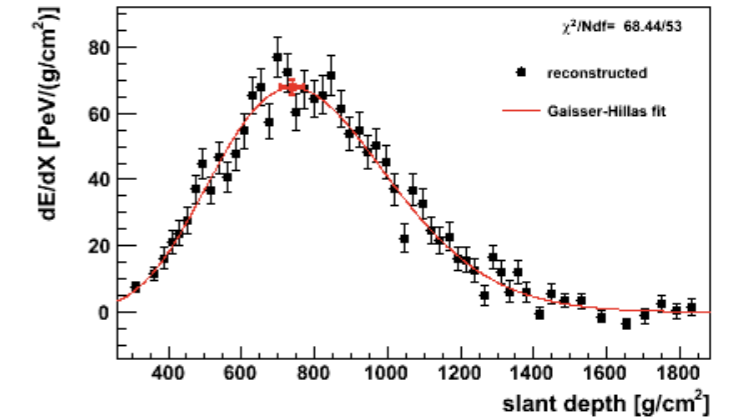
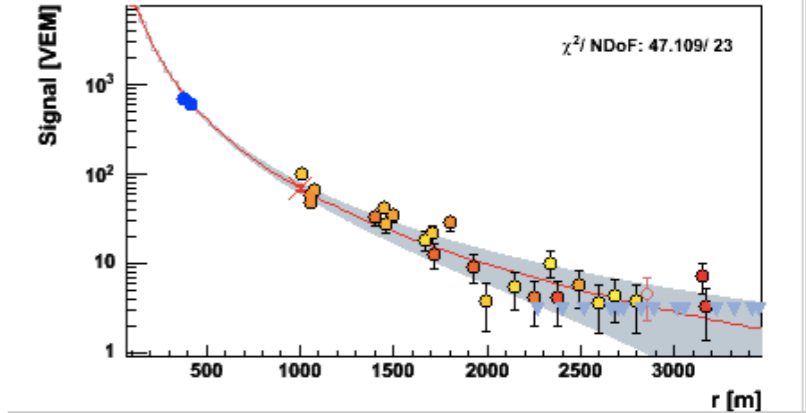
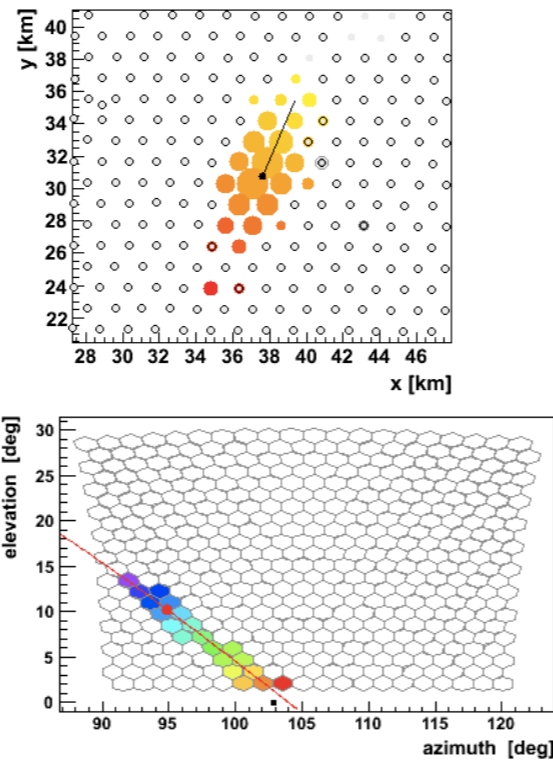
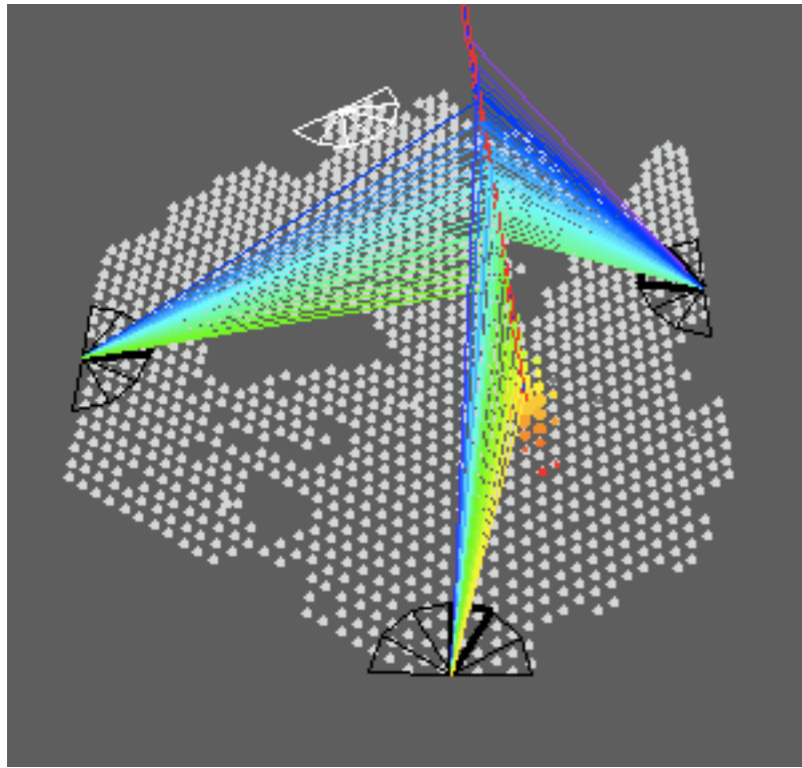
# 4 sites de 6 télescopes de fluorescence couvrent tout le réseau



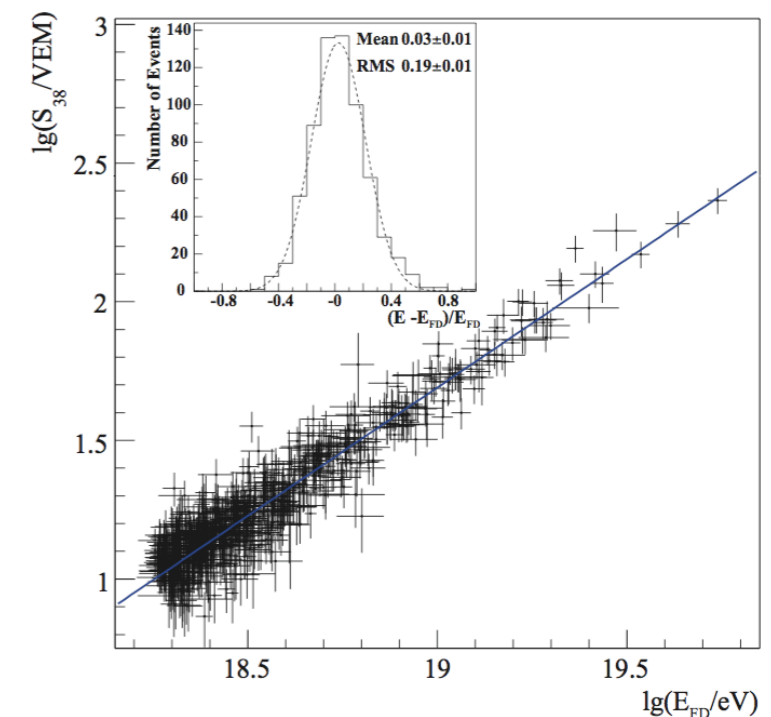
# I télescope de fluorescence



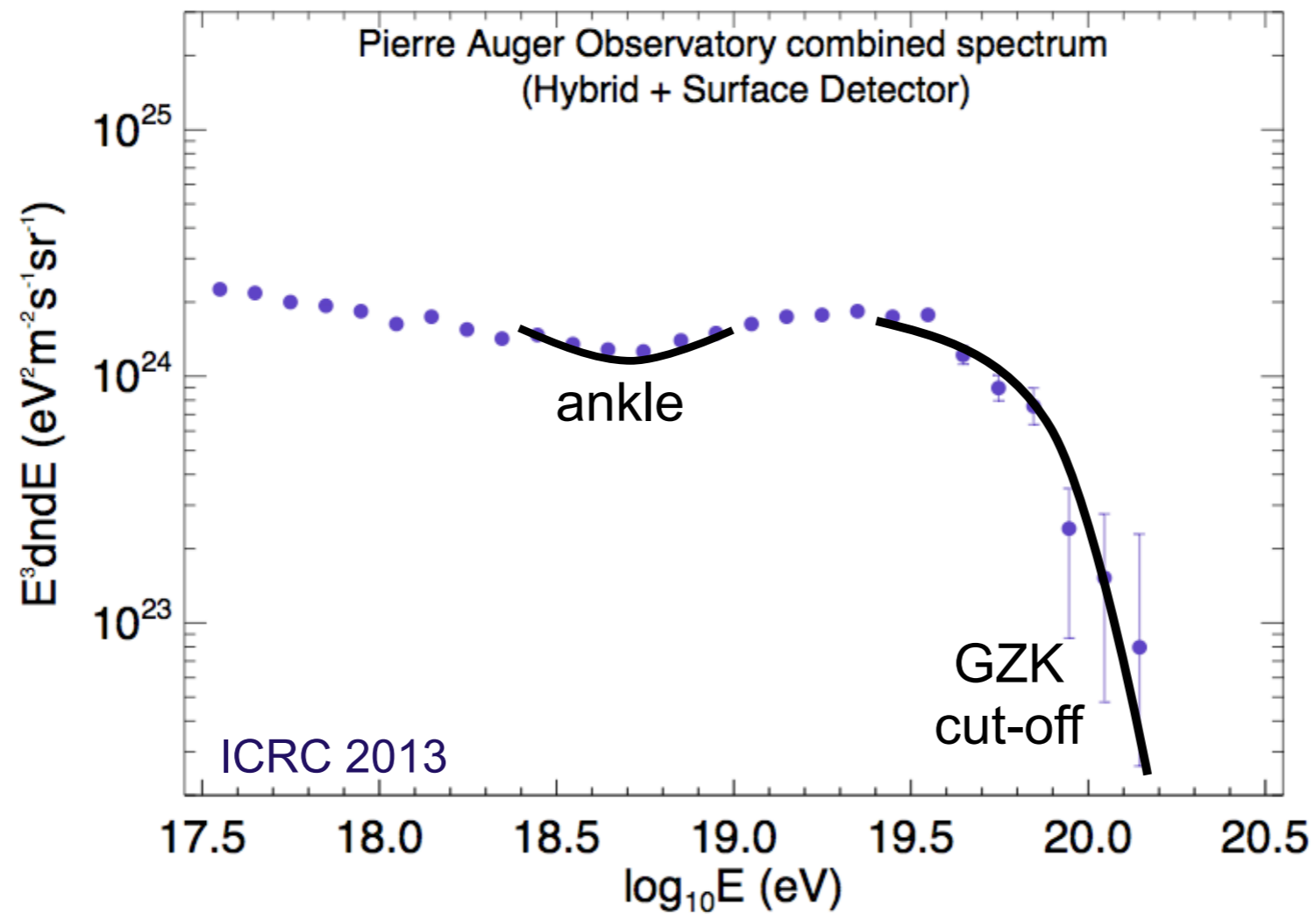
# La détection hybride



- On peut calibrer la relation  $E/\text{Signal}$  en utilisant les événements hybrides
  - Le réseau donne S1000
  - La fluorescence donne une mesure calorimétrique de l'énergie
  - L'évolution avec l'énergie est mesurée empiriquement
  - Pas de dépendance dans les modèles hadroniques
- ➔ Tire pleinement partie des avantages des 2 types de détecteurs



# Principaux résultats d'Auger : le spectre

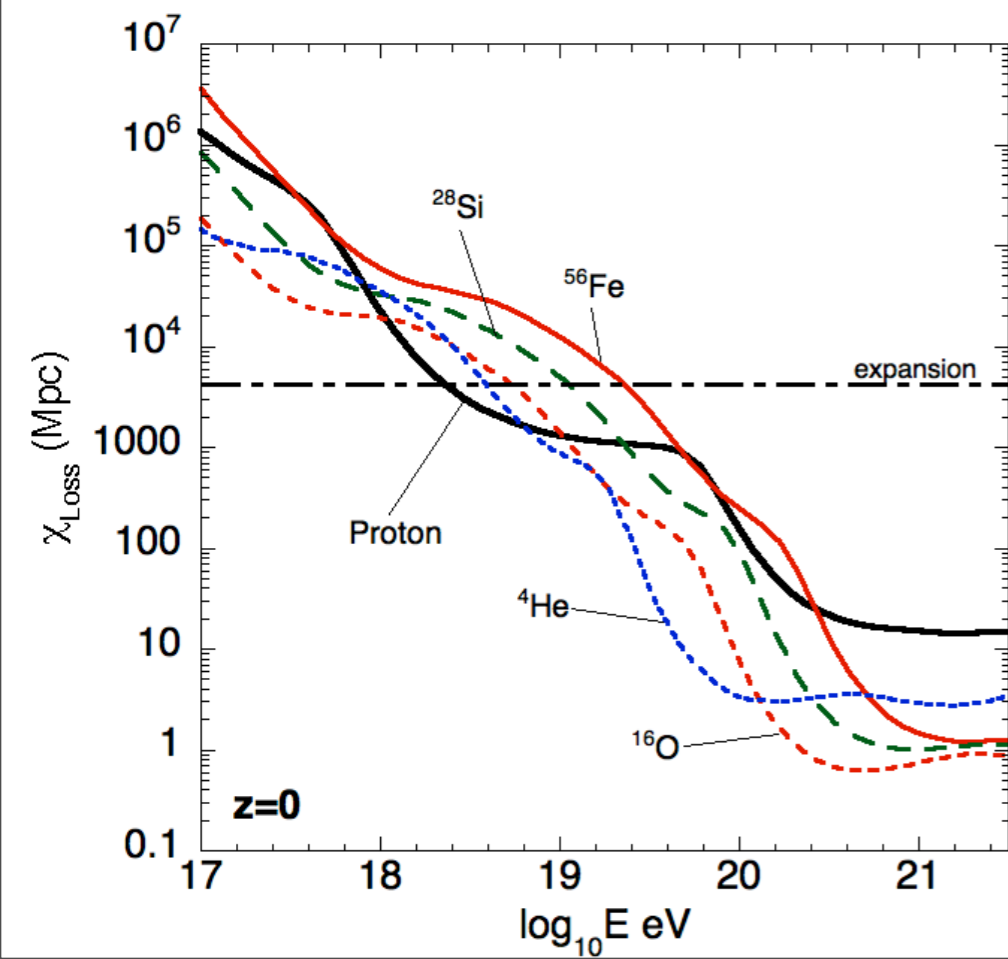


Observation de la cheville  
et d'une coupure au delà de  
 $3-4 \cdot 10^{19}$  eV

# Une coupure très attendue au delà de $10^{19}$ eV

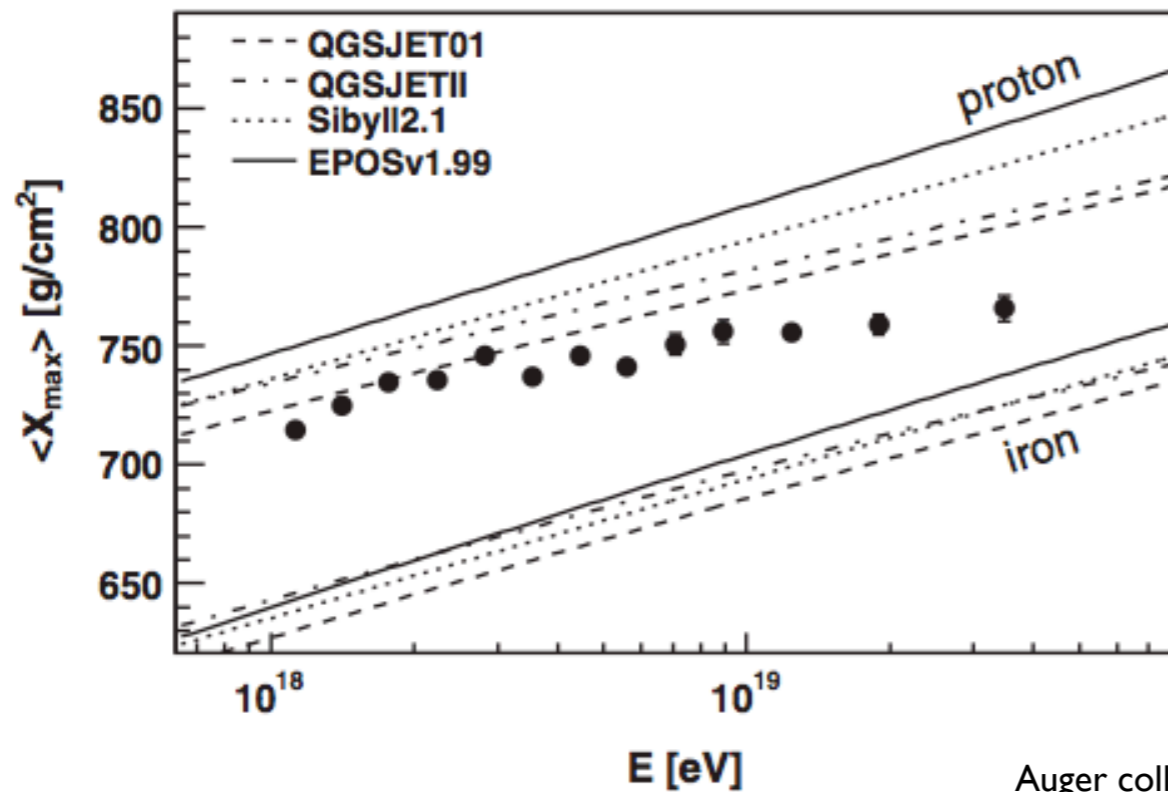
Au delà de quelques  $10^{19}$  eV, protons et noyaux provenant des sources extragalactiques interagissent fortement avec les fonds de photons (principalement le fond diffus cosmologique)

- les protons perdent de l'énergie
  - les noyaux sont photodésintégrés
- ➔ au dessus des seuils d'interaction, l'horizon des particules est brutalement réduit
- ➔ seules des sources relativement proches peuvent contribuer aux plus hautes énergies
- ➔ une coupure est attendue dans le spectre (quelle que soit la composition aux sources)

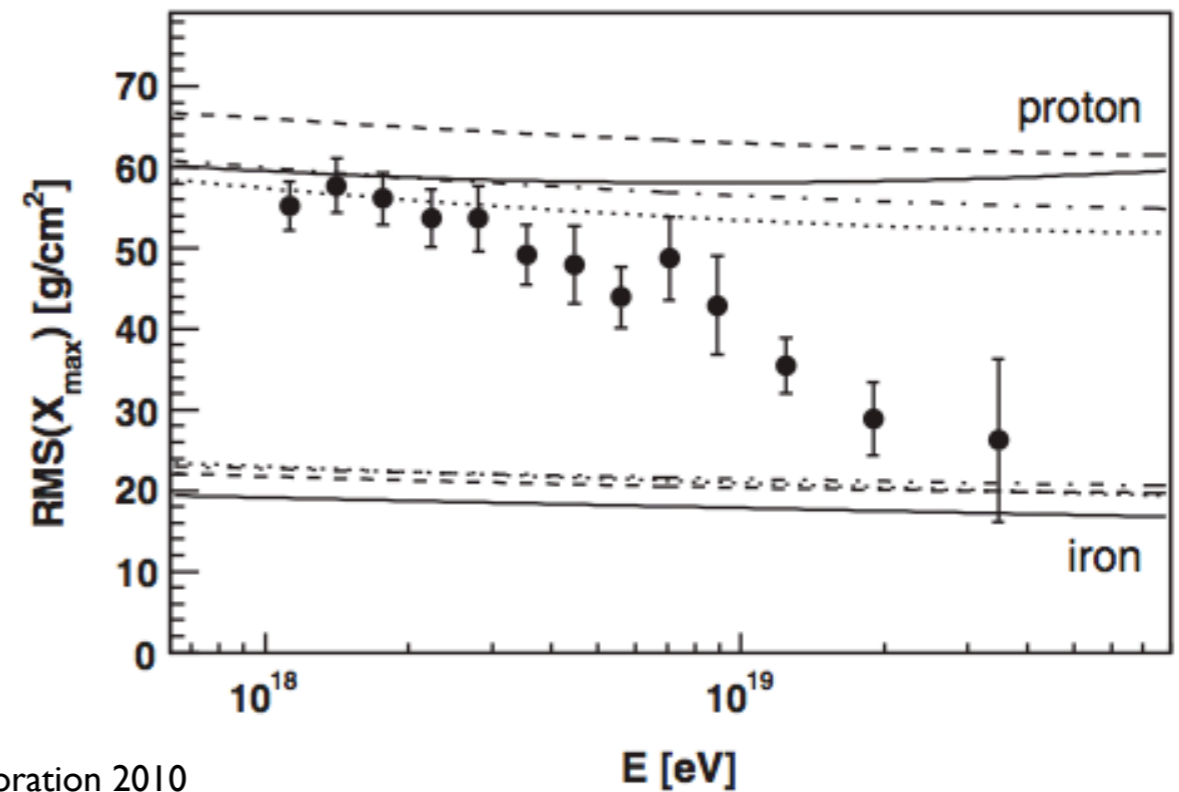


Coupure GZK

# Composition



Auger collaboration 2010



La composition qui est légère à la cheville semble s'alourdir lorsque l'énergie augmente

- ➔ la plupart des sources qui dominant le flux détecté sur Terre sont probablement incapable d'accélérer des protons au delà de  $\sim 10^{19}$  eV
- ➔ les rayons cosmiques au delà de  $10^{19}$  eV sont probablement des noyaux plus lourds (énergie maximale proportionnelle à la charge des noyaux)
- ➔ Charges élevées aux plus hautes énergies => moins bonnes perspectives pour la propagation rectiligne



# Directions d'arrivées

Pas d'évidence très significative de déviation à l'isotropie

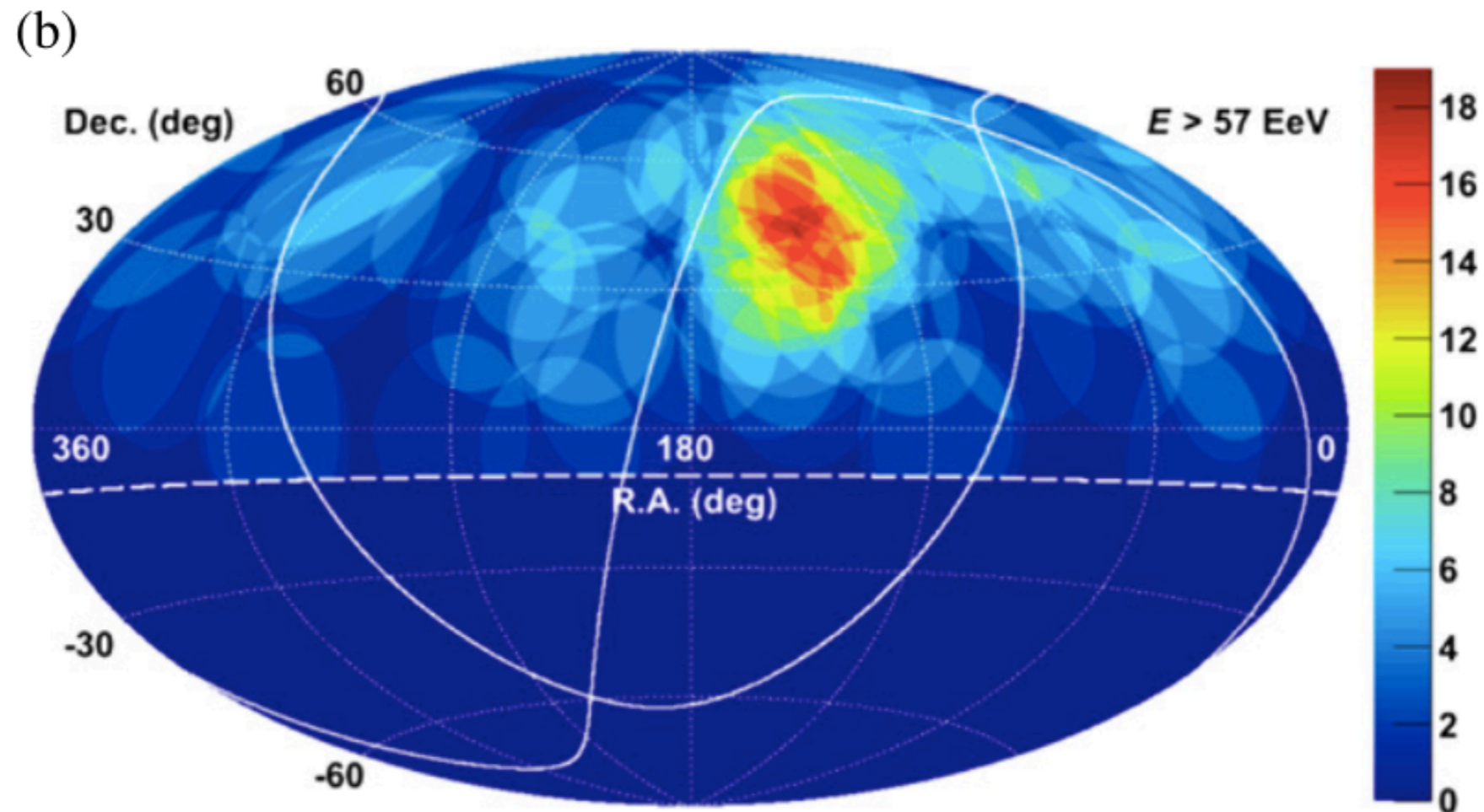
➡ On reste dans le flou

➡ Malgré sa taille, la statistique d'Auger reste trop faible aux énergies extrêmes (environ 150 rayons cosmiques au delà de  $5 \cdot 10^{19}$  eV)



# L'espoir vient du nord

- ✧ “Telescope Array”: Observatoire d'UHECRs situé en Utah, couvrant 700 km<sup>2</sup> (collaboration États-Unis/Japon)
- ✧ Le brouillard magnétique semble commencer à être percé, dans l'hémisphère nord !

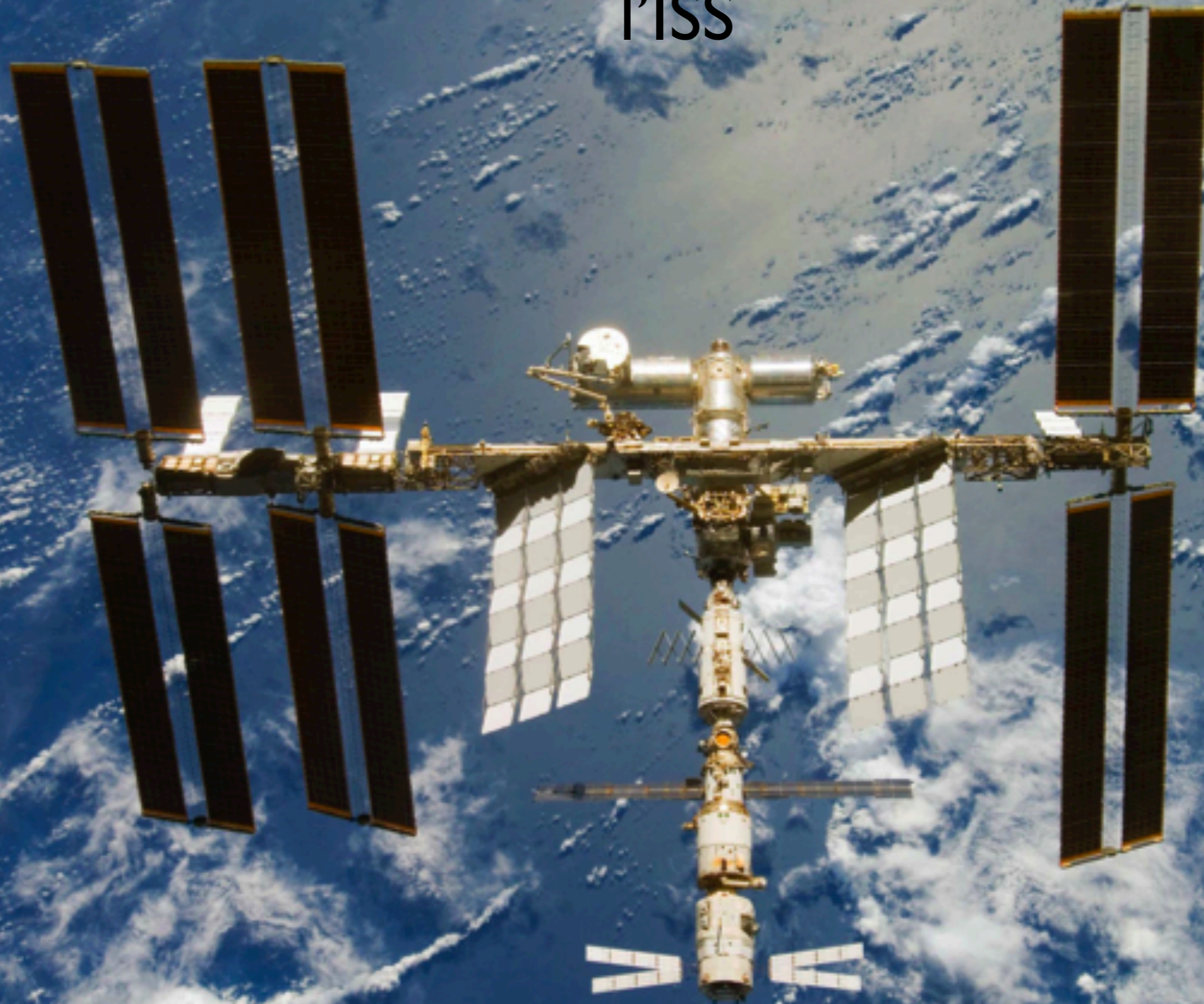


➡ Un espoir à confirmer avec plus de statistique

# Le futur

- ➡ L'observatoire Pierre Auger nous a beaucoup appris sur les rayons cosmiques d'énergies extrême (spectre, composition, statistique) sans pour autant révéler les sources
- ➡ Les détecteurs de l'observatoire Pierre Auger sont en cours d'amélioration pour augmenter sa sensibilité à la composition
- ➡ Un point chaud dans le ciel semble émerger dans le ciel du nord
- ➡ Anisotropie moins fortes qu'espérées pour des protons de  $10^{20}$  eV
- ➡ Une augmentation substantielle de la statistique sera nécessaire pour tirer profit des directions d'arrivées des rayons cosmiques
- ➡ Une solution possible détecter les gerbes depuis l'espace

# JEM-EUSO : un télescope de fluorescence embarqué sur l'ISS



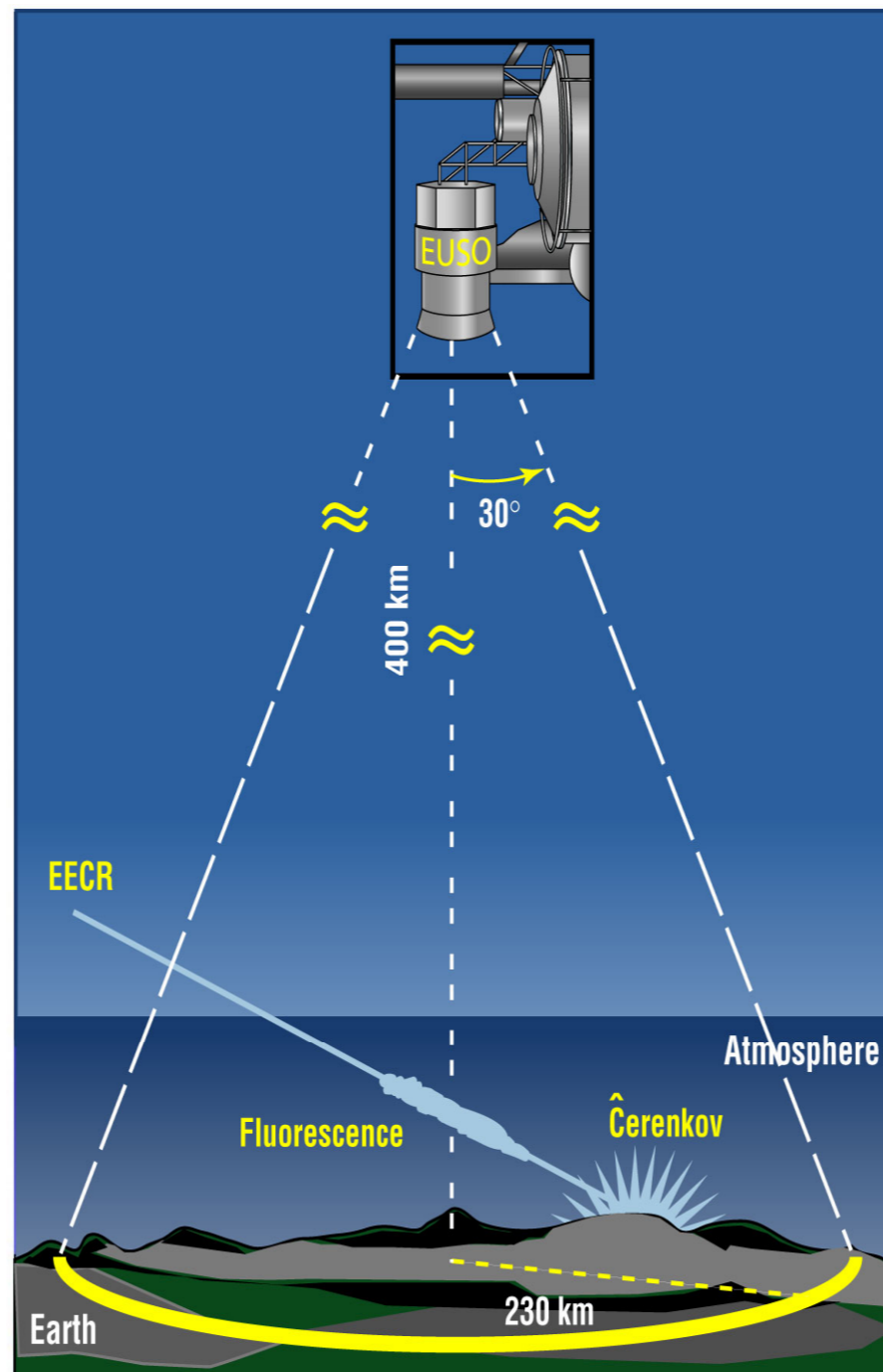
(Extreme Universe Space Observatory)

# JEM-EUSO : de l'astronomie en regardant vers le sol !

A 400 km d'altitude, il pourra détecter les gerbes d'énergie supérieures à  $3 \cdot 10^{19}$  eV

Surface de  
détection  
considérable !

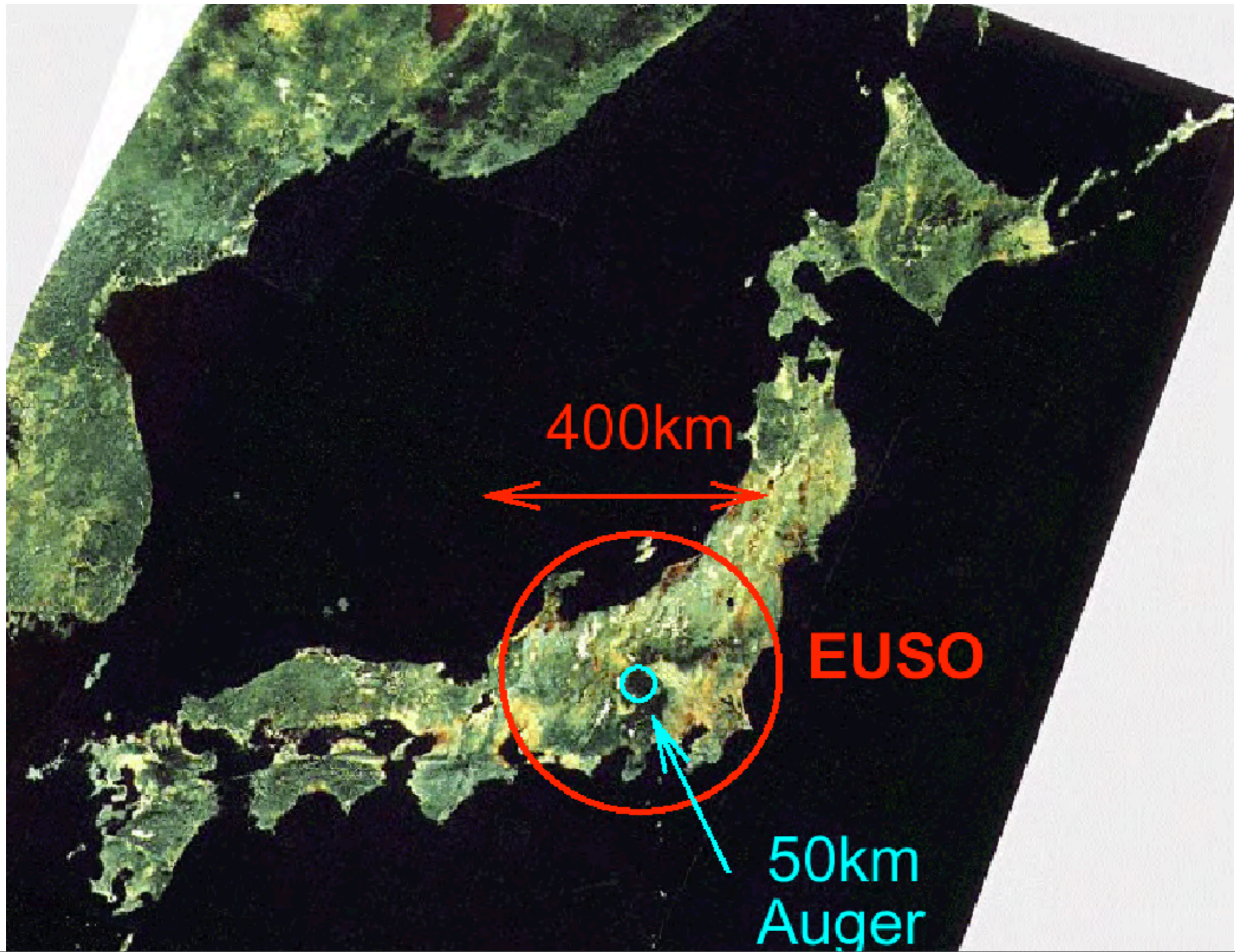
$190\,000 \text{ km}^2$



Ne fonctionne  
que les nuits  
sans trop de  
Lune ni nuages  
en altitude...

~14% de  
cycle utile

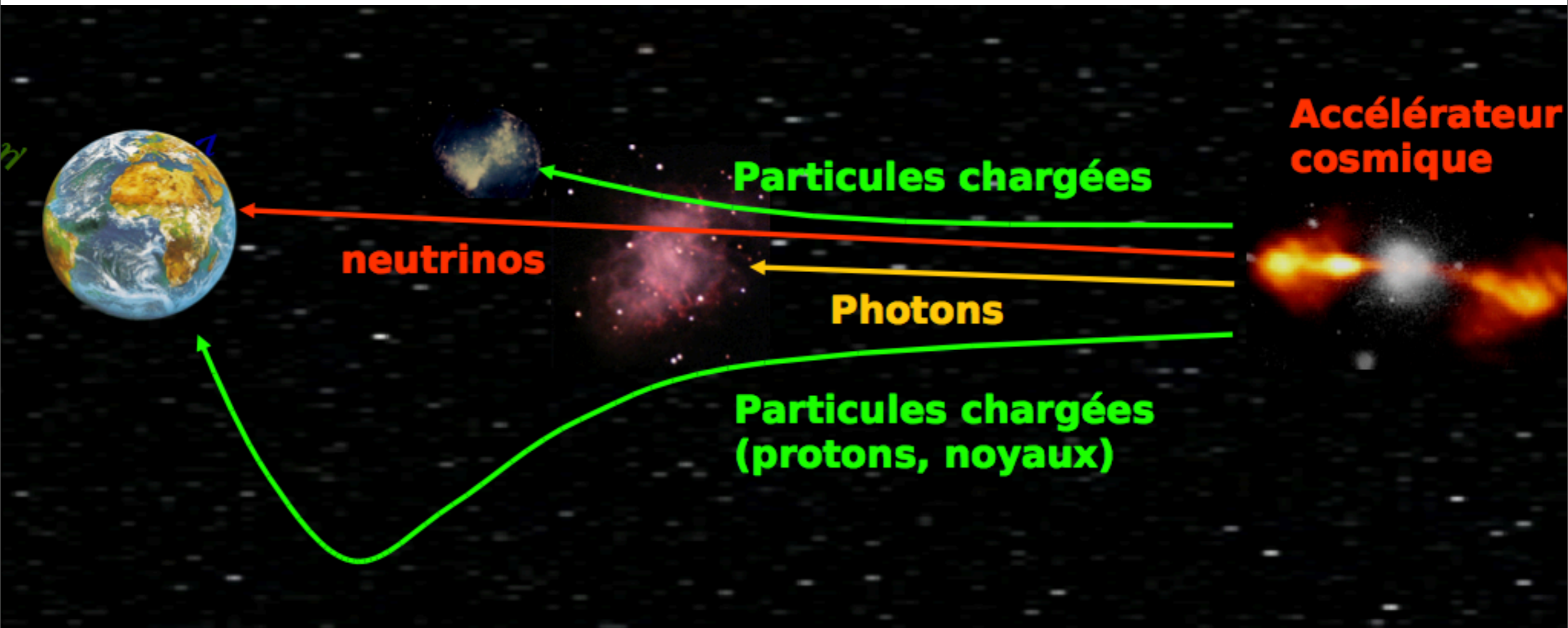
En 5 ans de mission il devrait récolter 10 fois la statistique actuelle d'Auger au delà de  $5 \cdot 10^{19}$  eV



# Le neutrino un nouveau messenger de l'astrophysique des hautes énergies

- Les propriétés du neutrino font de lui un messenger très prometteur pour l'astrophysique des hautes énergies
- Particule insaisissable elle est capable de révéler le coeur d'une étoile totalement opaque à la lumière ==> capable de traverser l'univers sans interagir ==> capable de s'extirper de presque n'importe quel environnement hostile
- Sans charge électrique ils ne sont pas déviés par les champs magnétiques présents dans le cosmos
- En astrophysique des (très) hautes énergies le neutrino est le partenaire inséparable du rayon cosmique ! il est toujours produit consécutivement à l'interaction d'un rayon cosmique avec le milieu ambiant
  - soit dans la source pendant l'accélération du rayon cosmique
  - soit durant la propagation du rayon cosmique
- Il se propage ensuite dans l'univers en conservant sa direction et son énergie (reliée à celle du rayon cosmique qui l'a produit)

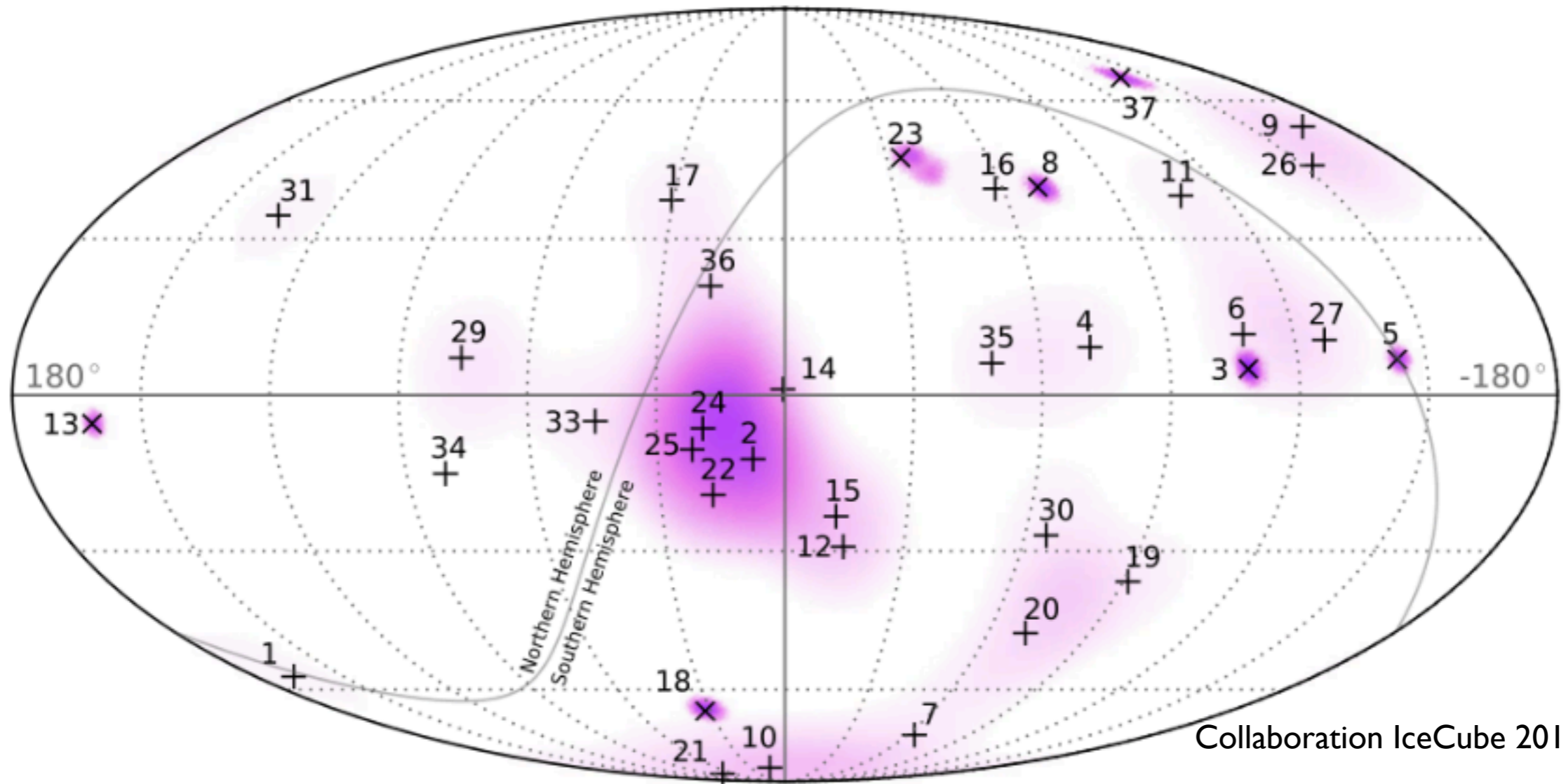
# Illustration des vertues du neutrino



- Les rayons cosmiques sont chargés ils perdent en partie la mémoire de leur direction initiale étant déviés champs magnétiques ==> difficile d'identifier les sources
- Les rayons cosmiques les plus énergétiques vers  $10^{20}$  eV perdent de leur énergie très rapidement ils ne peuvent provenir que de l'Univers relativement local ==> bien plus de sources de ces particules ultra-énergétiques dans l'Univers que ce que nous pouvons voir en détectant des rayons cosmiques
- Les photon gamma au delà de  $10^{13}$  eV perdent leur énergie très rapidement en voyageant dans l'univers ==> ils gardent la mémoire de leur direction initiale mais pas celle de l'énergie du rayon cosmique qui les a produits



# Observation des premiers neutrinos astrophysiques



Une nouvelle fenêtre s'ouvre

bientot la réponse à  
une énigme vieille  
d'un siècle ?



Merci beaucoup !!

# Les héros méconnus du cosmos

Les rayons cosmiques jouent un rôle clé dans écosystème galactique :

- une densité d'énergie très significative (à peu près égale à celle de la lumière des étoiles, du champ magnétique, du fond diffus cosmologique)
- rôle clé dans la chimie du milieu interstellaire
  - ➔ catalysent les réactions chimiques à l'intérieur des nuages moléculaires
  - ➔ rôle clé dans la formation de molécules organiques présentes dans les systèmes solaires en formation

**Table 12.1** This list of interstellar molecules is arranged in columns showing the numbers of atoms which make up each molecule. The data are taken from the web site [http://www.astrochymist.org/astrochymist\\_ism.html](http://www.astrochymist.org/astrochymist_ism.html) maintained by D.E. Woon. In each column, the order is by date of publication of the discovery according to Woon's table. Isotopic species have generally not been listed. Tentative detections are indicated by a question mark. This table was compiled in January 2009.

2	3	4	5	6	7	8	9
CH	H <sub>2</sub> O	NH <sub>3</sub>	HC <sub>3</sub> N	CH <sub>3</sub> OH	CH <sub>3</sub> CHO	CHOOCH <sub>3</sub>	CH <sub>3</sub> OCH <sub>3</sub>
CN	HCO <sup>+</sup>	H <sub>2</sub> CO	HCOOH	CH <sub>3</sub> CN	CH <sub>3</sub> CCH	CH <sub>3</sub> C <sub>3</sub> N	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH
CH <sup>+</sup>	HCN	HNCO	CH <sub>2</sub> NH	NH <sub>2</sub> CHO	CH <sub>3</sub> NH <sub>2</sub>	C <sub>7</sub> H	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CN
OH	OCS	H <sub>2</sub> CS	NH <sub>2</sub> CN	CH <sub>3</sub> SH	CH <sub>2</sub> CHCN	CH <sub>3</sub> COOH	HC <sub>7</sub> N
CO	H <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> N	H <sub>2</sub> CCO	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	HC <sub>5</sub> N	CH <sub>2</sub> OHCHO	CH <sub>3</sub> C <sub>4</sub> H
H <sub>2</sub>	HNC	HNCS	C <sub>4</sub> H	C <sub>5</sub> H	C <sub>6</sub> H	C <sub>6</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>8</sub> H
SiO	N <sub>2</sub> H <sup>+</sup>	HOCO <sup>+</sup>	SiH <sub>4</sub>	CH <sub>3</sub> NC(?)	c-C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O	CH <sub>2</sub> CHCHO	CH <sub>3</sub> CONH <sub>2</sub>
CS	C <sub>2</sub> N	C <sub>3</sub> H	c-C <sub>3</sub> H <sub>2</sub>	HC <sub>2</sub> CHO	CH <sub>2</sub> CHOH	CH <sub>2</sub> CCHCN	C <sub>8</sub> H <sup>-</sup>
SO	SO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> O	CH <sub>2</sub> CN	H <sub>2</sub> CCCC	C <sub>6</sub> H <sup>-</sup>	NH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CN	CH <sub>2</sub> CHCH <sub>3</sub>
SiS	HDO	HCNH <sup>+</sup>	C <sub>5</sub>	HC <sub>3</sub> NH <sup>+</sup>			
NS	HCO	H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>	SiC <sub>4</sub>	C <sub>5</sub> N			
C <sub>2</sub>	HNO	C <sub>3</sub> S	H <sub>2</sub> CCC	C <sub>4</sub> H <sub>2</sub>			
NO	OCN <sup>-</sup>	c-C <sub>3</sub> H	CH <sub>4</sub>	HC <sub>4</sub> N			
HCl	HCS <sup>+</sup>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	HCCNC	c-H <sub>2</sub> C <sub>3</sub> O			
NaCl	HOC <sup>+</sup>	HC <sub>2</sub> N	HNCCC	CH <sub>2</sub> CNH			
AlCl	c-SiC <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> CN	H <sub>2</sub> COH <sup>+</sup>	C <sub>5</sub> N <sup>-</sup>			
KCl	MgNC	SiC <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> H <sup>-</sup>				
AlF	C <sub>2</sub> S	CH <sub>3</sub>	CNCHO				
PN	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> N <sup>-</sup>					
SiC	CO <sub>2</sub>	PH <sub>3</sub> (?)					
CP	CH <sub>2</sub>	HCNO					
NH	C <sub>2</sub> O						
SiN	NH <sub>2</sub>						
SO <sup>+</sup>	N <sub>2</sub> O						
CO <sup>+</sup>	MgCN						
HF	H <sub>3</sub> <sup>+</sup>						
LiH(?)	SiCN						
SH	AlNC						
FeO(?)	SiNC						
N <sub>2</sub>	HCP						
CF <sup>+</sup>	CCP						
O <sub>2</sub>							
PO							

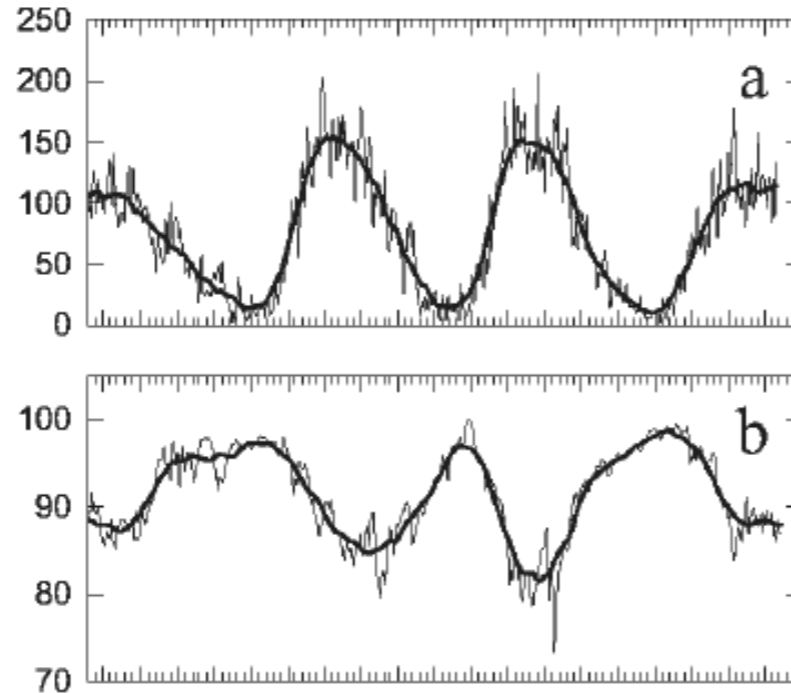
In addition, there are molecules with 10 atoms, (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>CO, HOCH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>OH, CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>CHO and CH<sub>3</sub>(C≡C)<sub>2</sub>CN, 11 atoms, H(C≡C)<sub>4</sub>CN and CH<sub>3</sub>C<sub>6</sub>N, 12 atoms C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> and 13 atoms, H(C≡C)<sub>5</sub>CN.

(From M. Longair's book "High Energy Astrophysics")

# Rayons cosmiques et climat

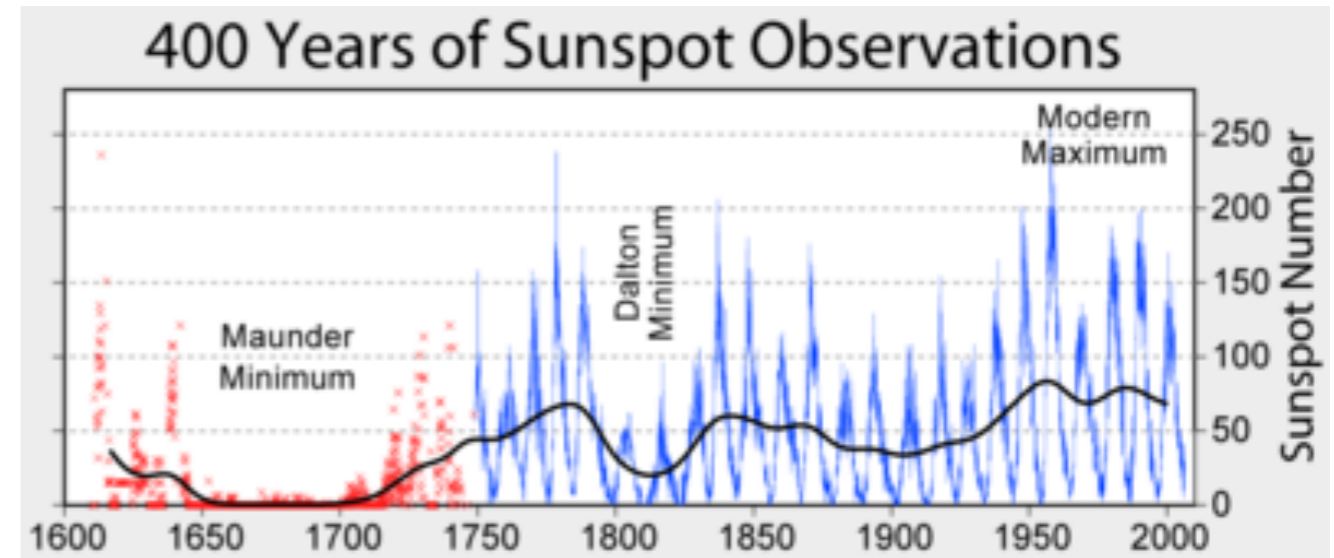
- Variation du flux de rayons cosmiques en coïncidence avec les cycles solaires

activité / tâches solaires



Intensité des rayons cosmiques

- Variation du nombre de tâches solaires (répertorié avec précision depuis 1749)



(source: Wikipédia)

mini âge glaciaire...

Le vent solaire « repousse » les RC de basse énergie...

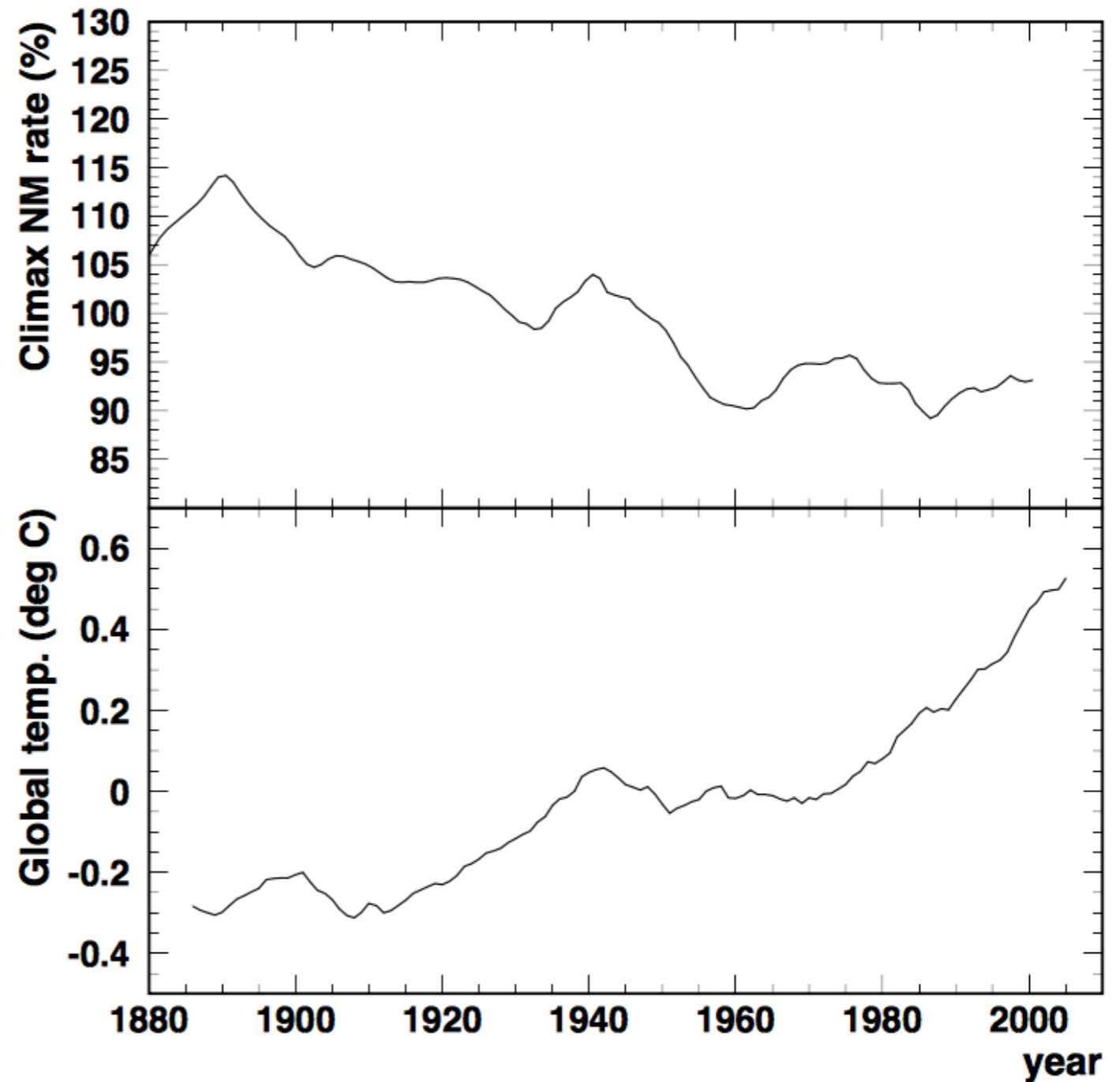
Mécanisme invoqué par certains, faible activité solaire => fort rayonnement cosmique => forte couverture nuageuse

rôle joué par les rayons cosmiques sur la formation des masse nuageuse ? => reste pour l'instant spéculatif et controversé

Important : Même si l'on accepte l'idée que les rayons cosmiques puissent avoir à un moment joué un rôle sur les changements climatiques il est quasiment certain qu'ils ne contribuent pas significativement au "réchauffement global" actuel

# Rayons cosmiques et climat

Important : Même si l'on accepte l'idée que les rayons cosmiques puissent avoir à un moment joué un rôle sur les changements climatiques il est quasiment certain qu'ils ne contribuent pas significativement au "réchauffement global" actuel



# Rayons cosmiques et biodiversité

Medvedev & Melott, 2007 (ApJ 664, 879)

Biodiversité

Flux de RC (modèle  
d'oscillation galactique)

