

A composite image of Earth from space, showing the blue and white atmosphere and the dark, starry background of space. Several bright, multi-colored streaks (cosmic rays) are shown entering the atmosphere from the bottom left, creating a dramatic effect. The text is overlaid on the image.

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

Denis Allard - Chargé de recherche CNRS

Séminaire du Club d'Astronomie de l'Université du Mans

14/05/2019

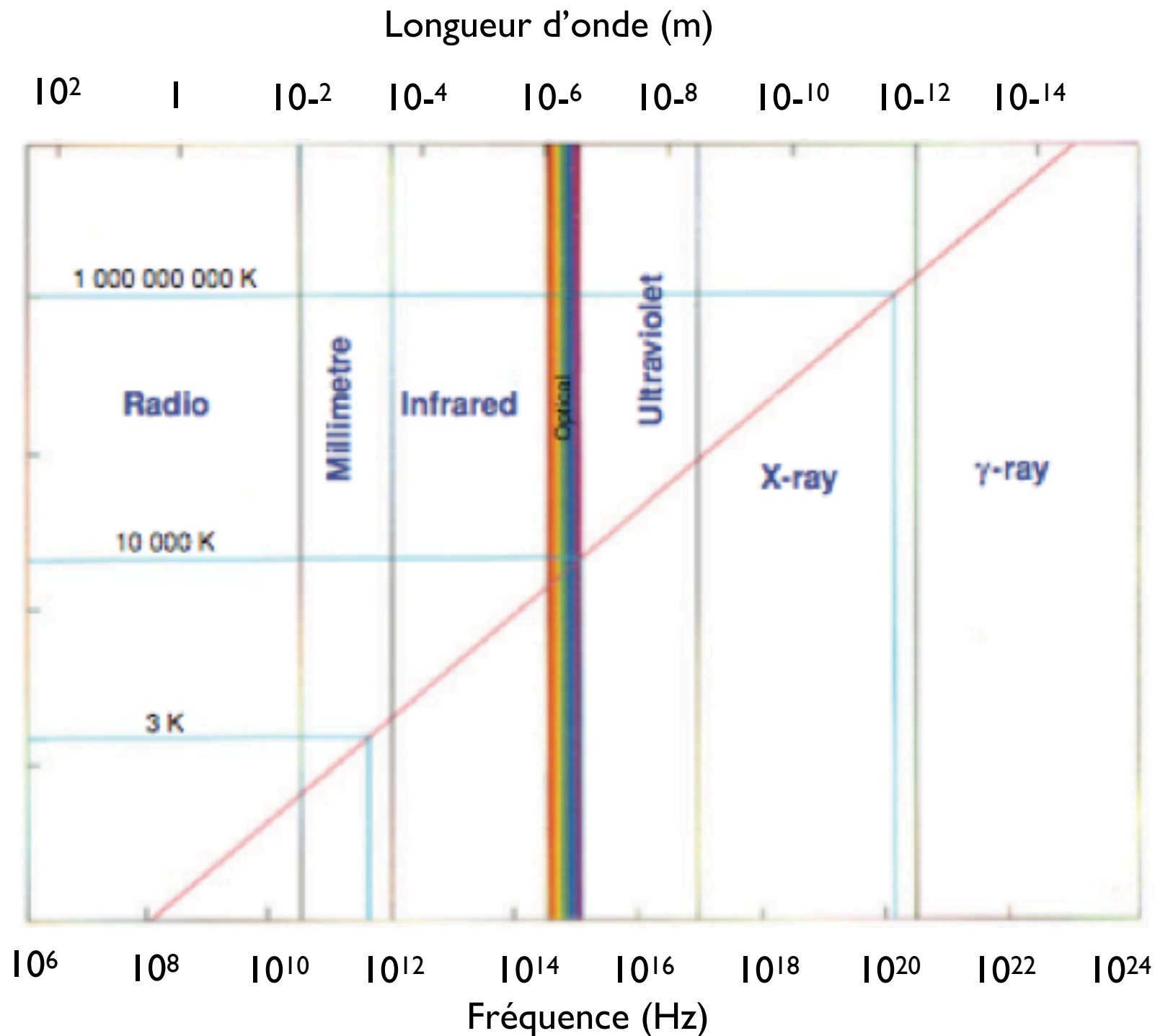
Plan de l'exposé

- 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**

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**

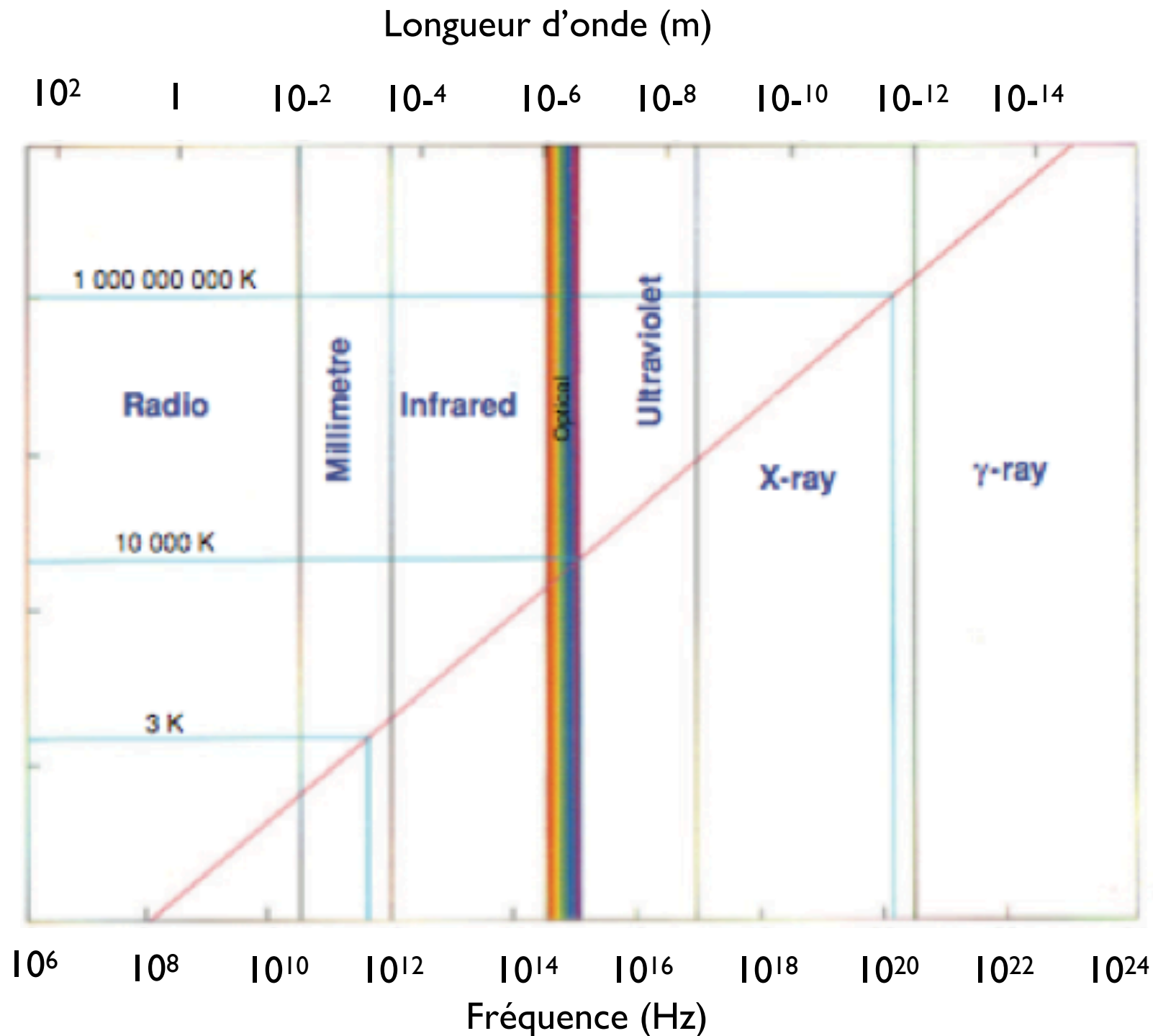
L'astrophysique est multi-longueurs d'onde et multimessagers



“le spectre électromagnétique” s’étend de part et d’autre et bien au delà de la lumière visible :

- du domaine radio (basse fréquences, grandes longueurs d’ondes, basses énergies)
 - aux domaine gamma (γ) (hautes fréquences, courtes longueurs d’ondes, hautes énergies)
- > ~18 ordres de grandeurs de différence en énergie entre les deux domaines extrêmes
—> le domaine visible ne représente qu’une bande très étroite

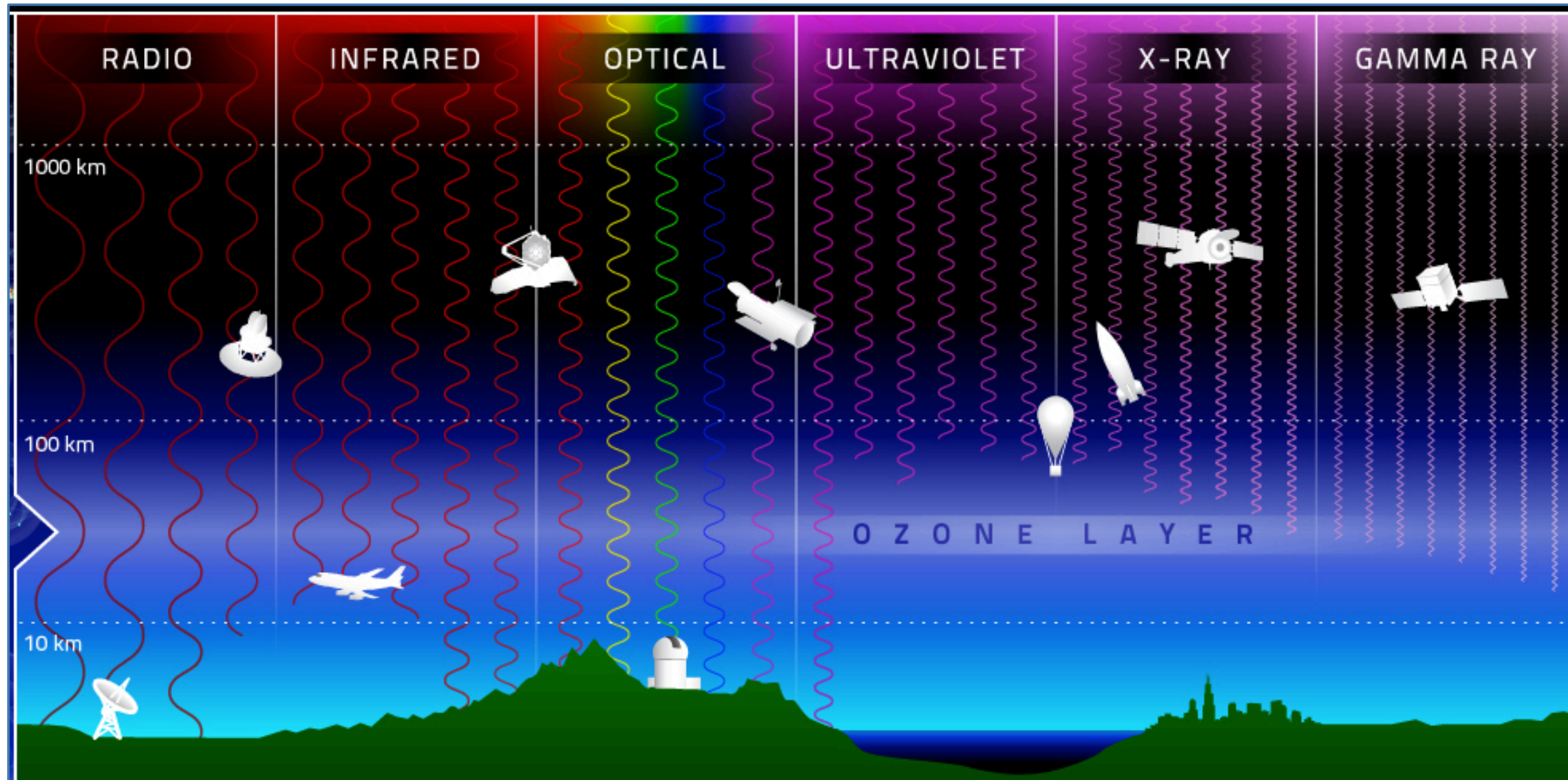
L'astrophysique est multi-longueurs d'onde et multimessagers



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

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

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

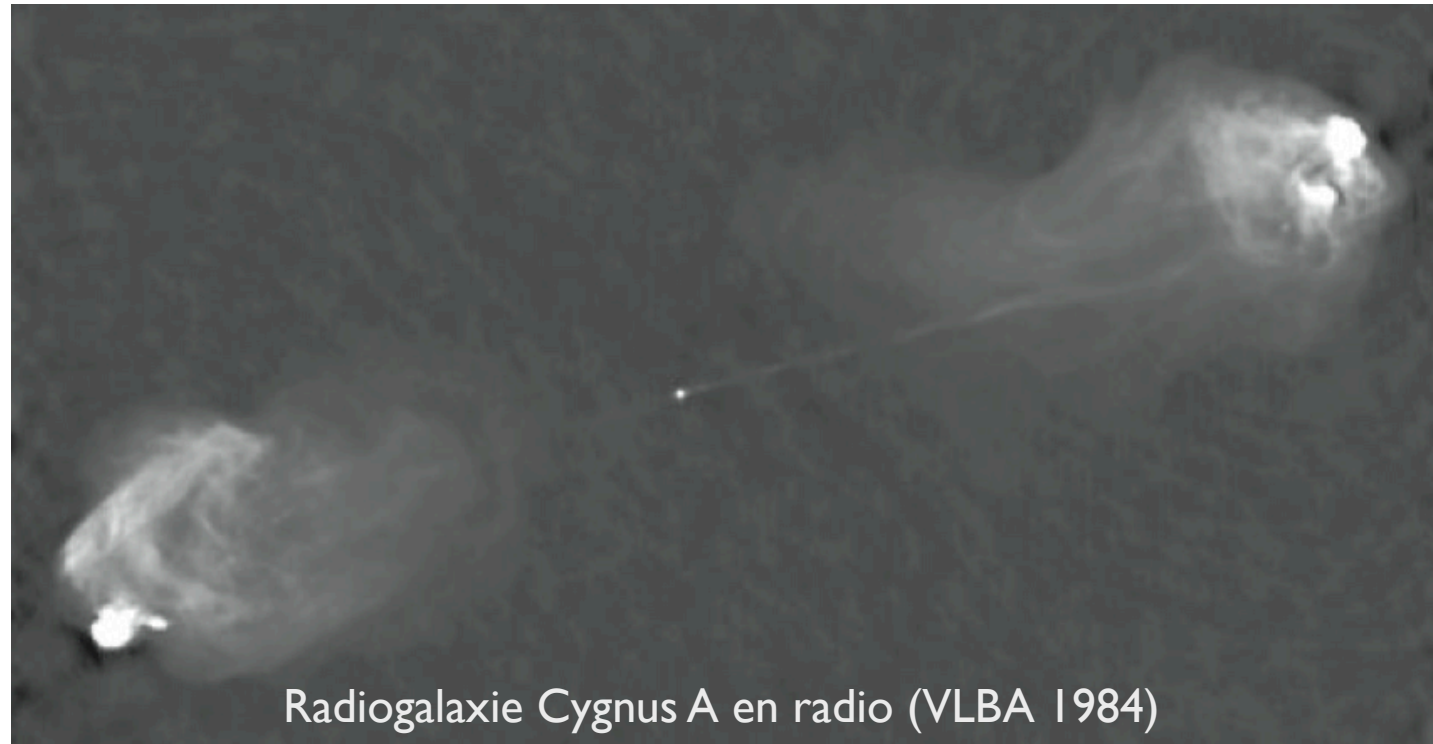


L'exploitation des différents domaines de longueur d'onde a nécessité d'importants développements technologiques

- télécommunications, radar (domaine radio)
- optique, électronique
- possibilité d'atteindre la haute-atmosphère et l'espace

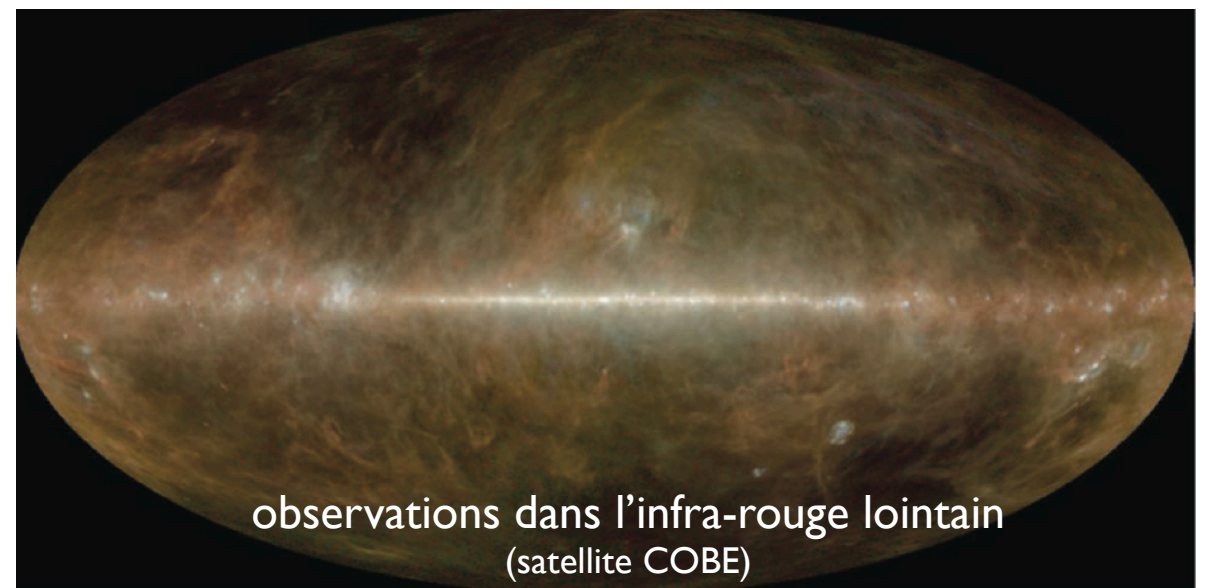
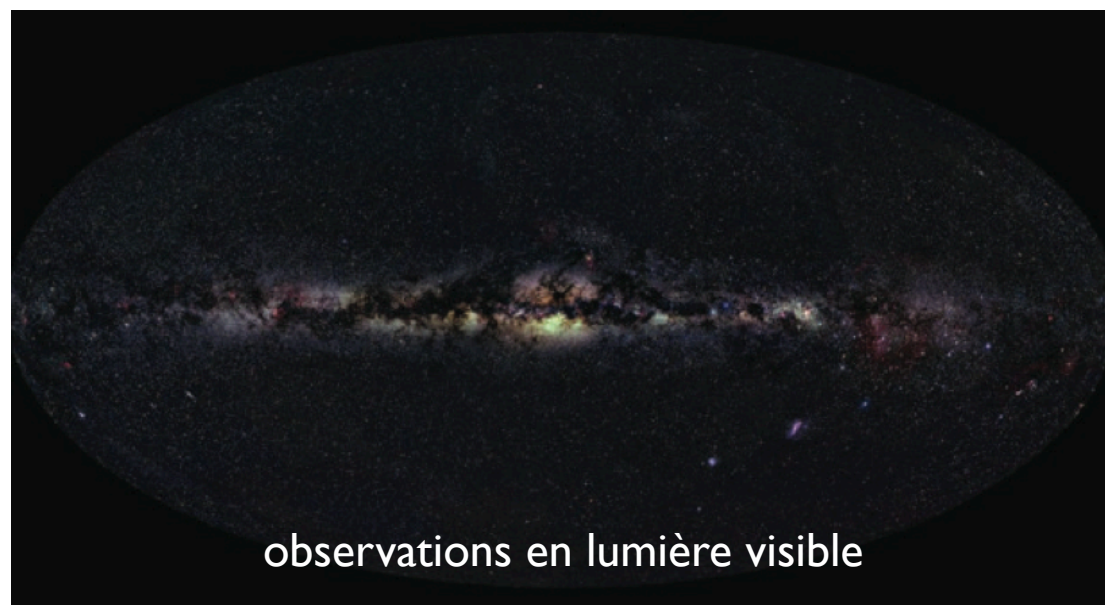
L'astrophysique est multi-longueurs d'onde et multimessagers

Astronomie radio : découverte des radiogalaxies



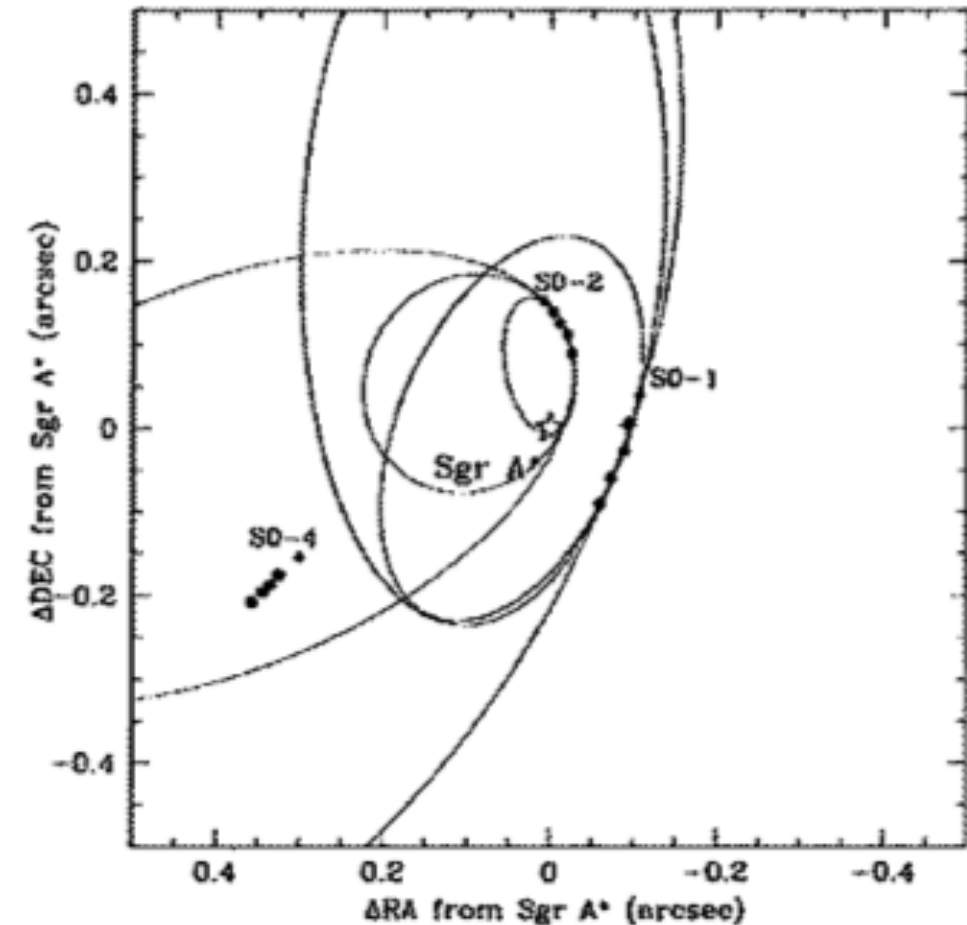
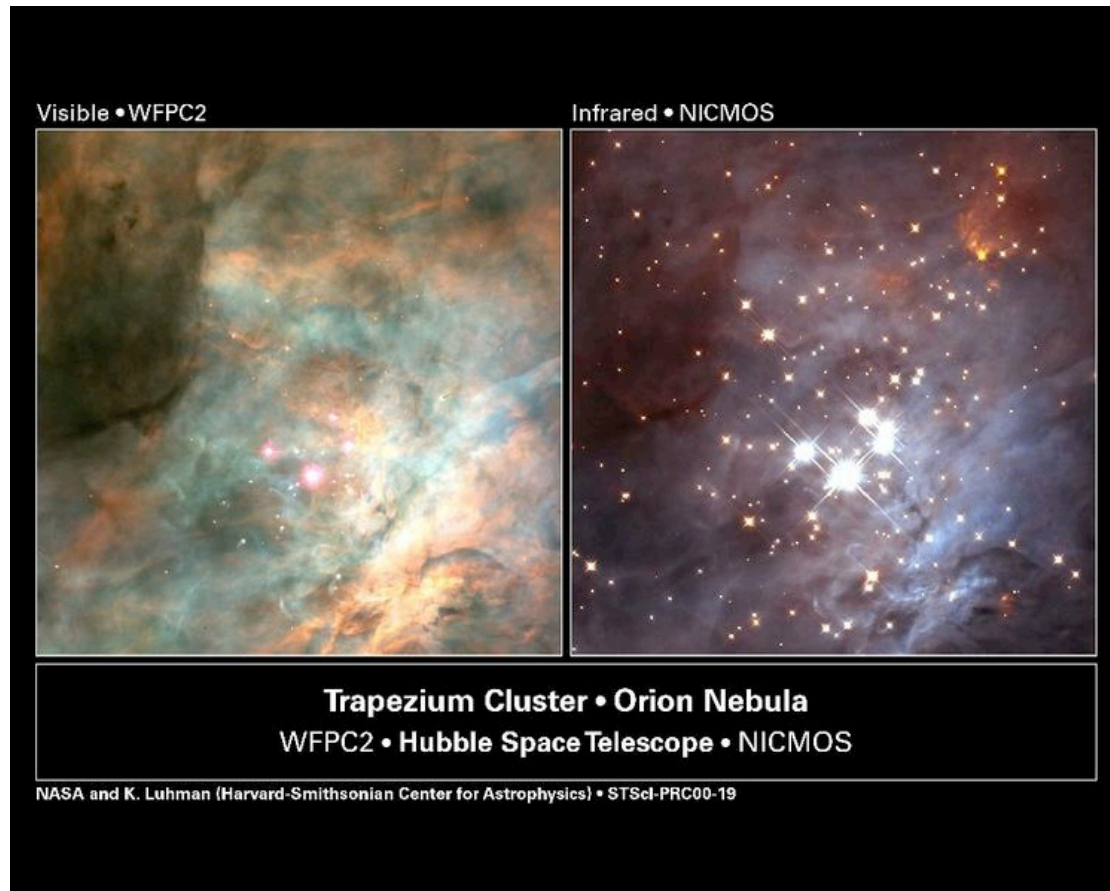
- ➔ énorme émission radio dans des lobes à la terminaison de très long jets de matière provenant du centre de la galaxies
- ➔ centre de la galaxie lui même puissant émetteur radio depuis une région très compacte
- ➔ meilleure explication (de loin) présence d'un trou noir supermassif (jusqu'à $10^9 M_{\text{sol}}$)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

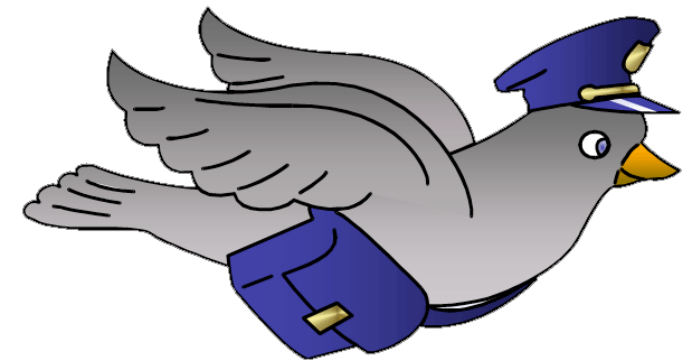


- Suivi infra-rouge du mouvement de quatre étoiles orbitant très près du centre galactique
- ➔ présence d'un objet compact invisible d'environ $2 \cdot 10^6 M_{\text{sol}}$
 - ➔ trou noir central supermassif de la Galaxie

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 haute 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. Autrement dit nous avons seulement parlé de l'astronomie dont le photon est le **messenger**

Il existe d'autres type de messagers au premier rang desquels les rayons cosmiques connus depuis un siècle. L'astronomie des neutrinos et l'astronomie des ondes gravitationnelles sont en train de naître. Ces messagers sont de natures différentes et apportent chacun des informations uniques sur l'Univers.

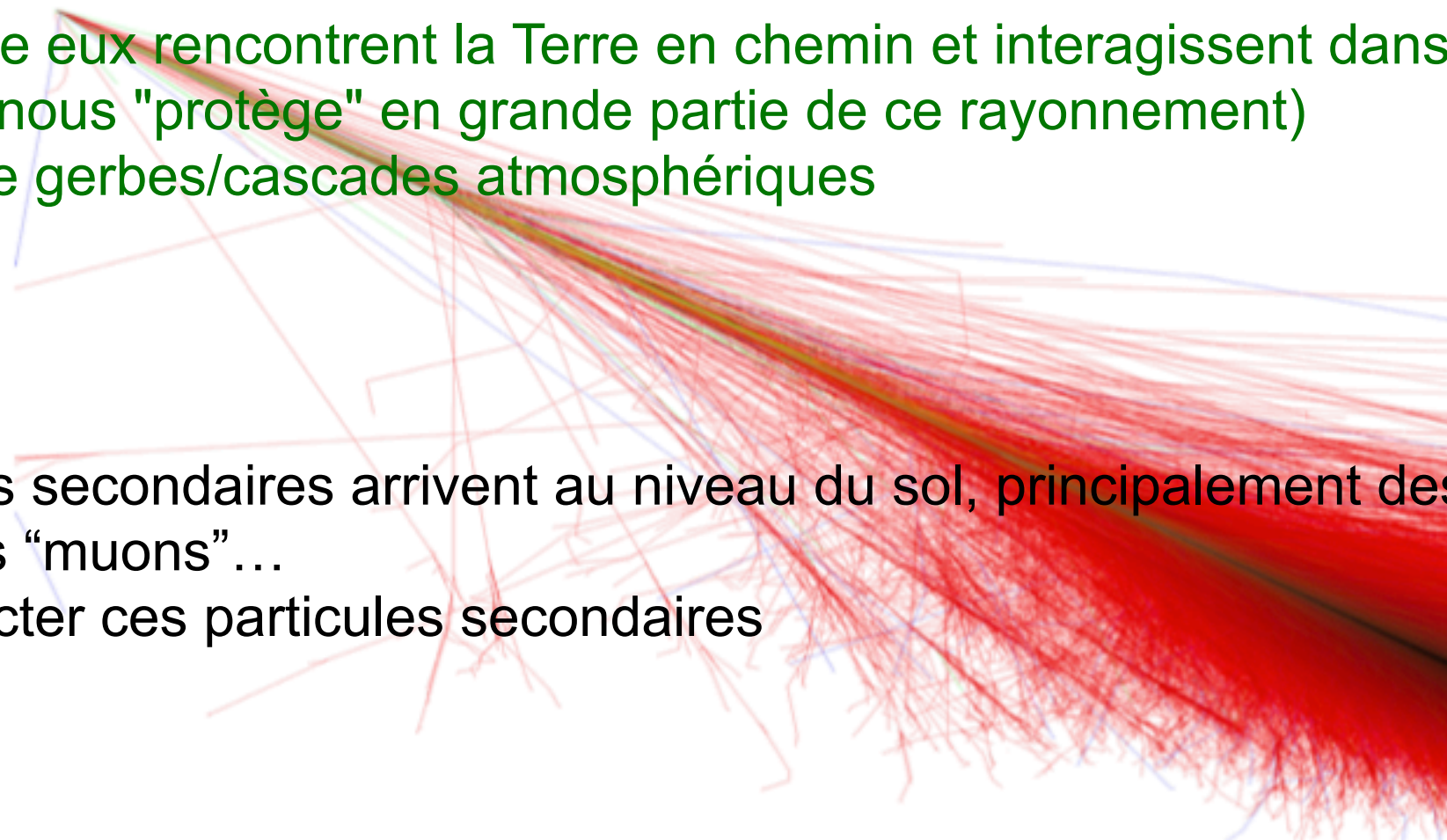
Que sont les rayons cosmiques?

★ 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.)

★ certains d'entre eux rencontrent la Terre en chemin et interagissent dans la haute atmosphère (qui nous "protège" en grande partie de ce rayonnement)
—> production de gerbes/cascades atmosphériques

★ Des particules secondaires arrivent au niveau du sol, principalement des "photons", des "électrons" et des "muons" ...
—> on peut détecter ces particules secondaires



Les gerbes atmosphériques

(aussi connues sous le nom de “cascades atmosphériques”)



- (i) Dans le milieu galactique, les rayons cosmiques interagissent très peu ou pas du tout (l'espace est vide par rapport à nos standards terrestres)
- (ii) Lorsque leur trajectoire intercepte la terre le RC entrent dans l'atmosphère
 - > milieu beaucoup plus dense
 - > le rayon cosmique (très énergétique) interagit avec un noyau de l'atmosphère (au repos)

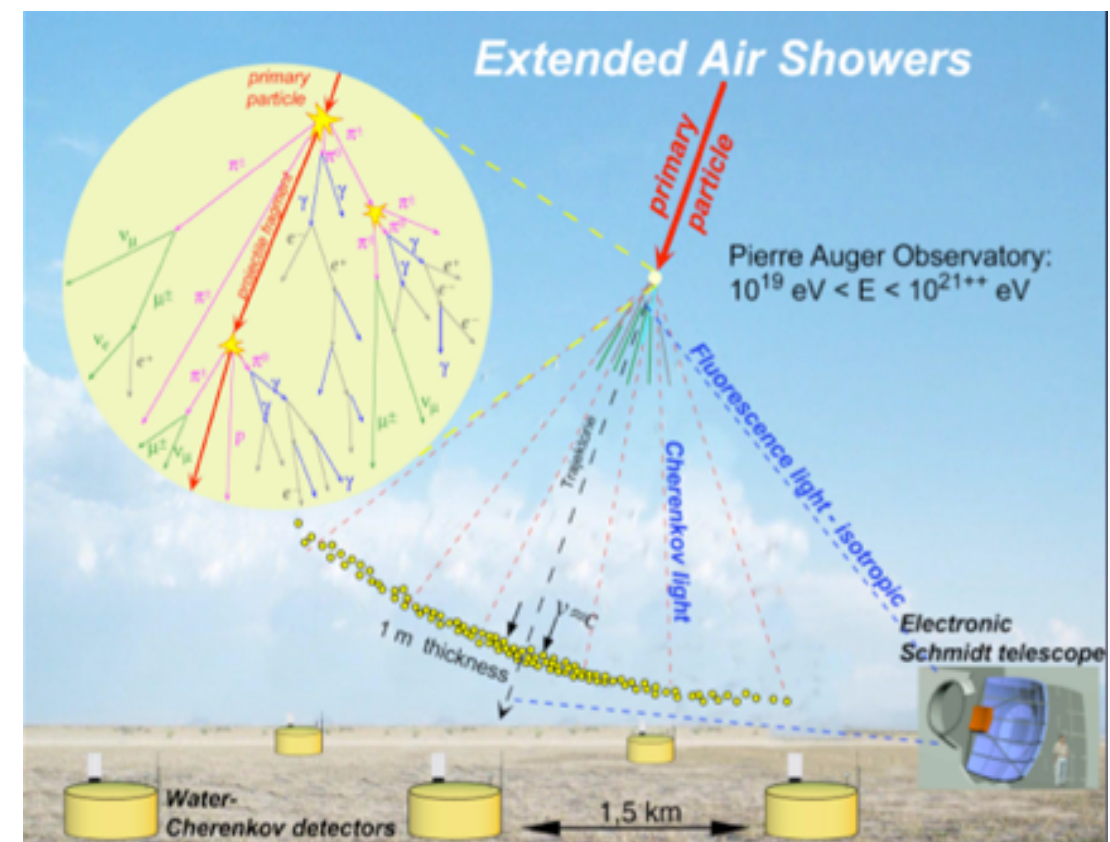
Les gerbes atmosphériques

(aussi connues sous le nom de “cascades atmosphériques”)



- (i) Dans le milieu galactique, les rayons cosmiques interagissent très peu ou pas du tout (l'espace est vide par rapport à nos standards terrestres)
- (ii) Lorsque leur trajectoire intercepte la terre le RC entre dans l'atmosphère
 - > milieu beaucoup plus dense
 - > le rayon cosmique (très énergétique) interagit avec un noyau de l'atmosphère (au repos)

- (iii) beaucoup d'énergie mise en jeu dans l'interaction
 - > permet de créer de nouvelles particules ($E=mc^2$!) qui se “partagent” du rayon cosmique initial
- (iv) Ces particules elles mêmes très énergétiques vont interagir à leur tour et de nouvelles particules vont être créés et ainsi de suite
 - > multiplication des particules
 - > développement d'une gerbe/cascade de particules



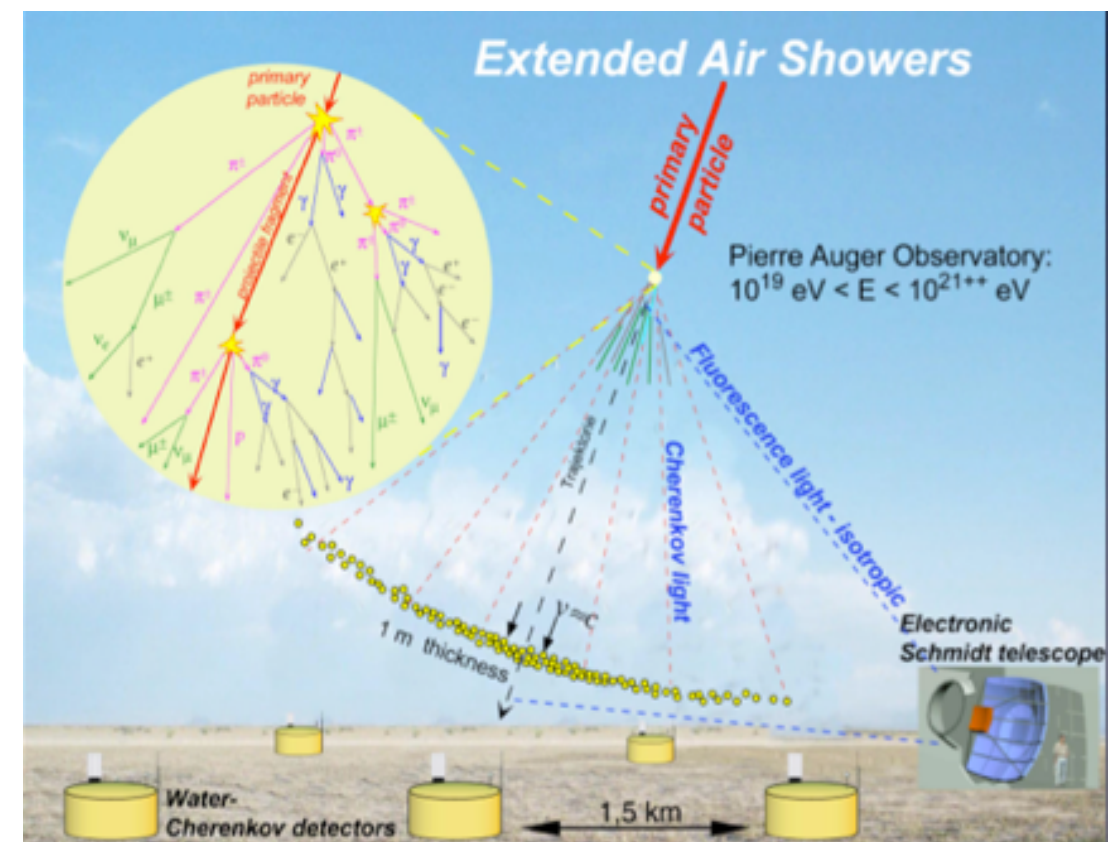
Les gerbes atmosphériques

(aussi connues sous le nom de “cascades atmosphériques”)



- (v) Au bout d'un certain nombre de générations (dont le nombre dépend de l'énergie du rayon cosmique primaire), il n'y a plus assez d'énergie pour créer de nouvelles particules
—> la gerbe atteint son maximum
- (vi) Le nombre de particules impliquées dans le développement de la gerbe dépend de l'énergie du rayon cosmique primaire (jusqu'à 100 milliards aux plus hautes énergies dont plusieurs milliards atteignent le sol)
- (vii) On peut observer le développement de la gerbe ou détecter les particules au sol afin de **reconstruire** les caractéristiques du rayon cosmique primaire

- (iii) beaucoup d'énergie mise en jeu dans l'interaction
—> permet de créer de nouvelles particules ($E=mc^2$!) qui se “partagent” du rayon cosmique initial
- (iv) Ces particules elles mêmes très énergétiques vont interagir à leur tour et de nouvelles particules vont être créés et ainsi de suite
—> multiplication des particules
—> développement d'une gerbe/cascade de particules



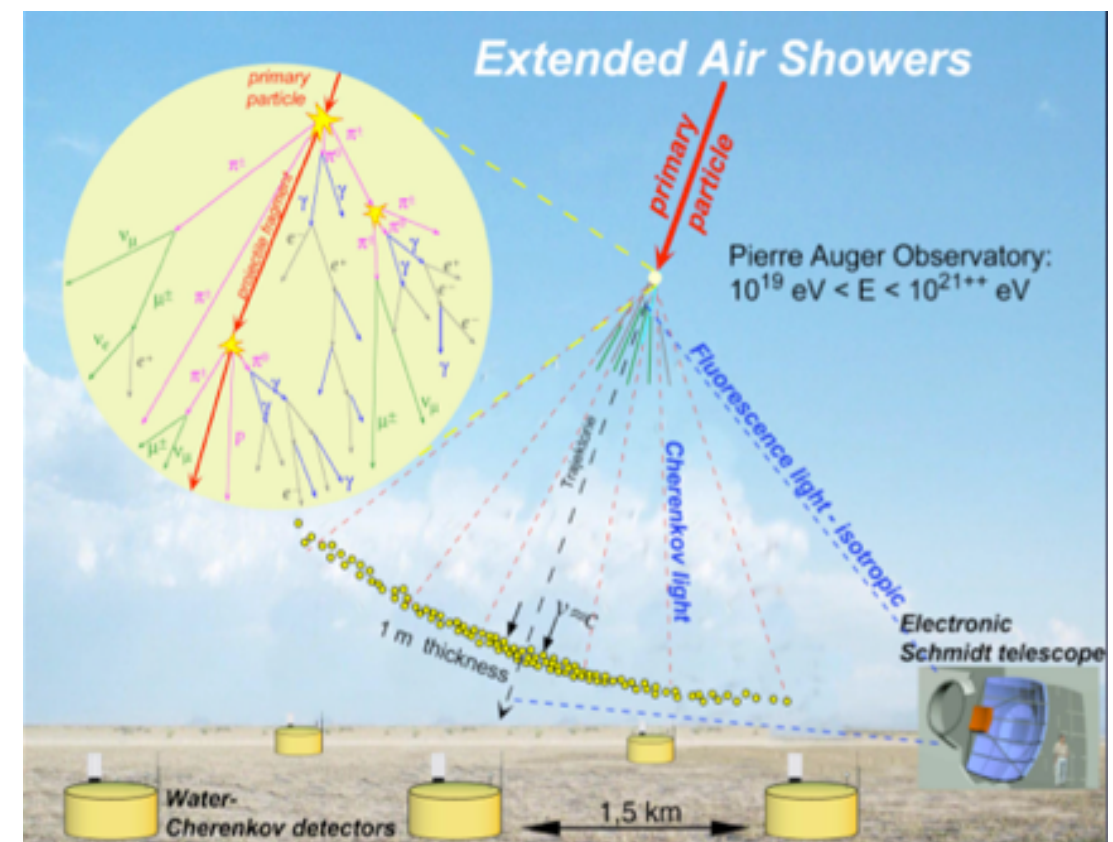
Les gerbes atmosphériques

(aussi connues sous le nom de “cascades atmosphériques”)



- (v) Au bout d'un certain nombre de générations (dont le nombre dépend de l'énergie du rayon cosmique primaire), il n'y a plus assez d'énergie pour créer de nouvelles particules
—> la gerbe atteint son maximum
- (vi) Le nombre de particules impliquées dans le développement de la gerbe dépend de l'énergie du rayon cosmique primaire (jusqu'à 100 milliards aux plus hautes énergies dont plusieurs milliards atteignent le sol)
- (vii) On peut observer le développement de la gerbe ou détecter les particules au sol afin de **reconstruire** les caractéristiques du rayon cosmique primaire

- (viii) **Important pour la suite** : on distingue donc le **rayon cosmique primaire** qui vient de l'espace et initie une gerbe atmosphérique **des rayons cosmiques secondaires** qui sont les particules créées durant le développement de la gerbe atmosphérique



L'histoire du rayonnement cosmique : quelques faits saillants

- 1785: Coulomb découvre que l'atmosphère terrestre au niveau du sol est partiellement ionisé
- Confirmé plus tard par Faraday
 - > L'air soumis à un type de “rayonnement” énergétique est partiellement ionisé (des électrons peuvent être arrachés à leur molécules par l'action de ce rayonnement et devenir libres)

Jusqu'au début du XX^{ème} siècle, l'origine de cette ionisation demeure inconnue...

Puis Becquerel découvre la radioactivité

—> les noyaux atomiques se désintégrant sont effectivement des sources de “rayonnement” ionisant

—> explication possible pour l'ionisation de l'atmosphère au niveau du sol

L'histoire du rayonnement cosmique : quelques faits saillants

A la fin du XIX^{ème} la radioactivité est découverte par Becquerel

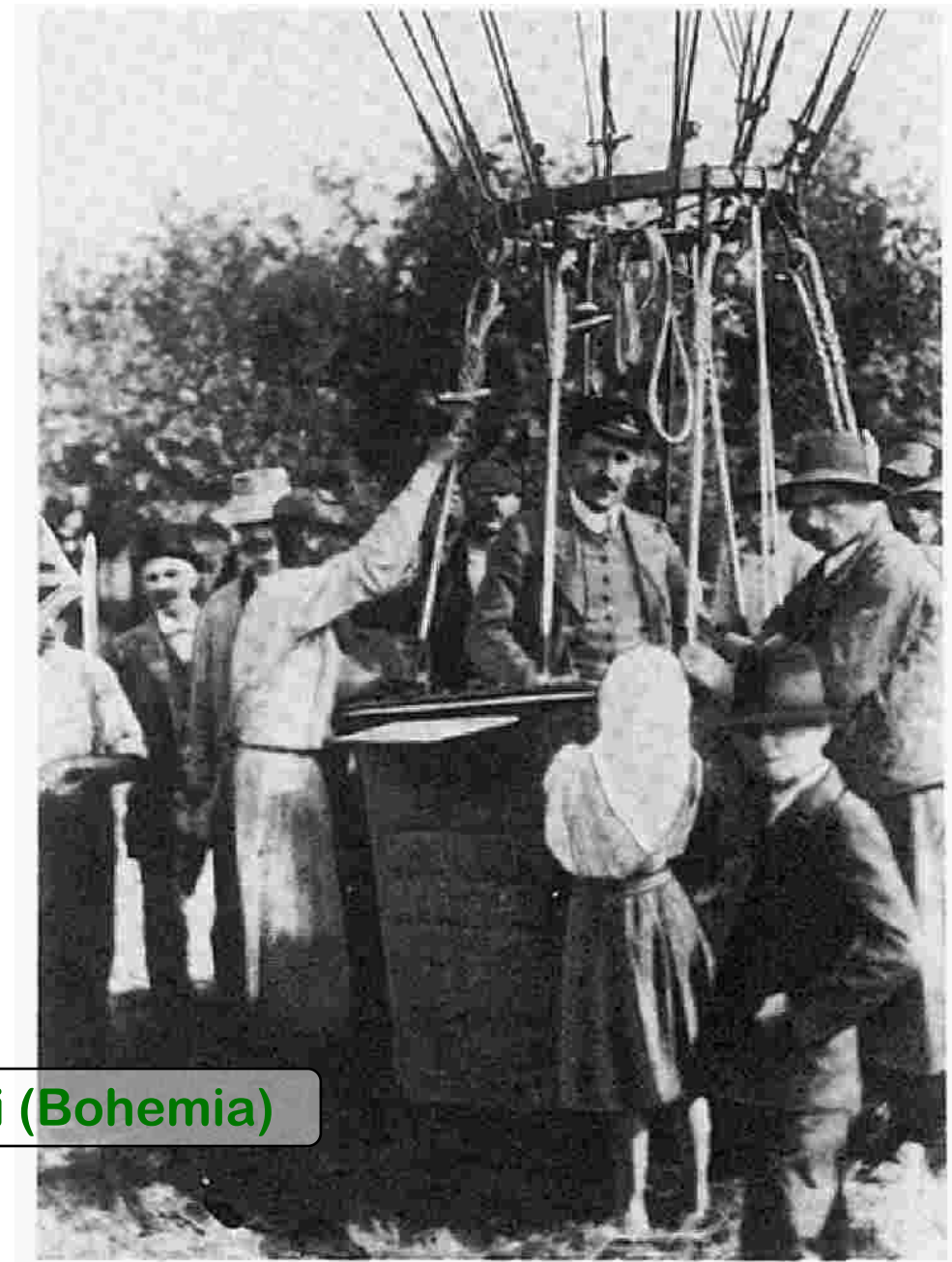
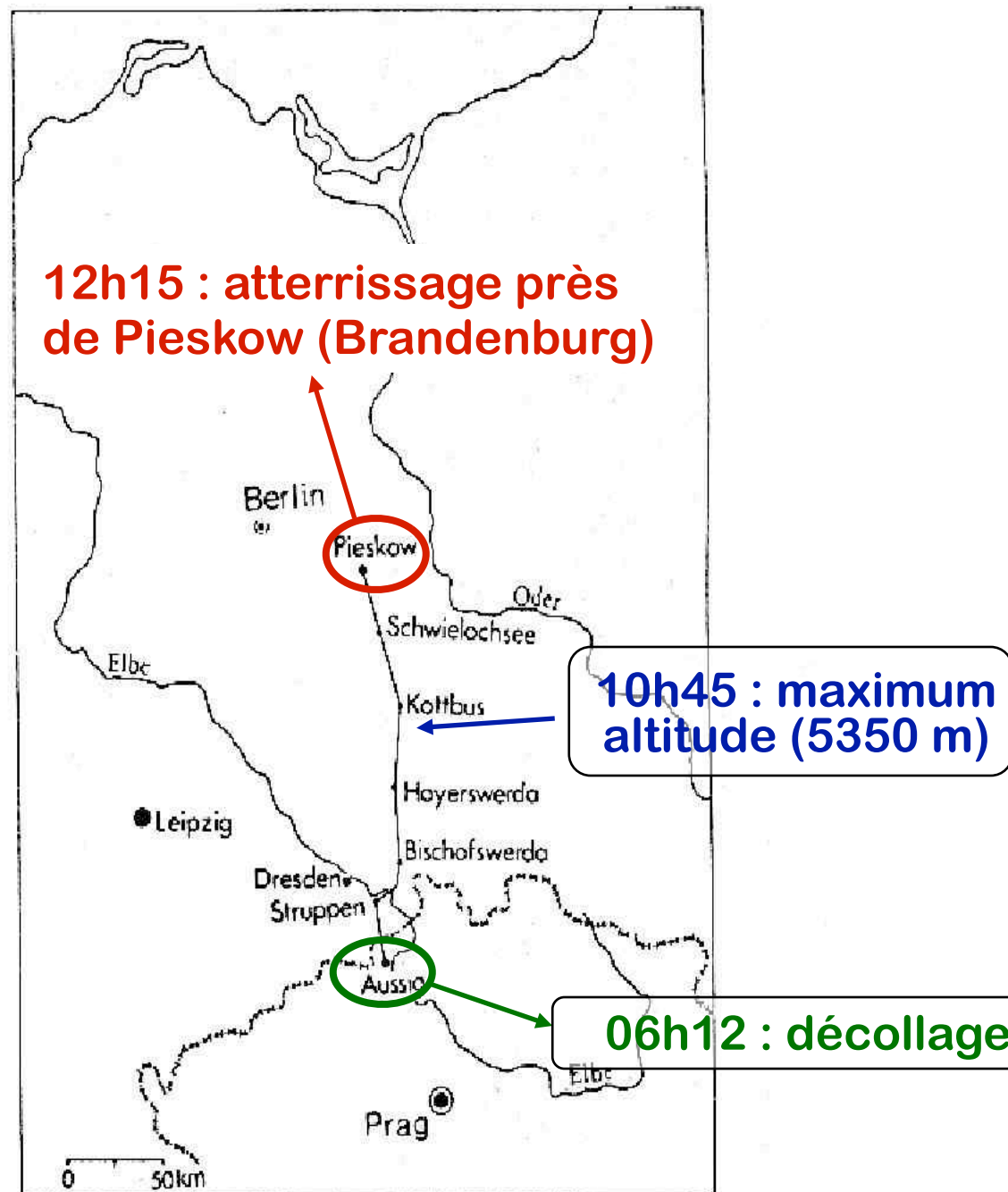


- 1901: Wilson mesure l'ionisation sous terre (dans une mine), elle est identique à celle mesurée au sol
- Rutherford montre que l'ionisation de l'atmosphère au niveau du sol et sous terre est principalement due à la radioactivité naturelle

- 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
- > si l'hypothèse du lien entre l'ionisation de l'atmosphère et la radioactivité est correcte, le taux d'ionisation doit chuter lorsque l'on s'éloigne du sol
- > une expérience au sommet de la tour Eiffel ne permet pas de mettre l'effet attendu en évidence



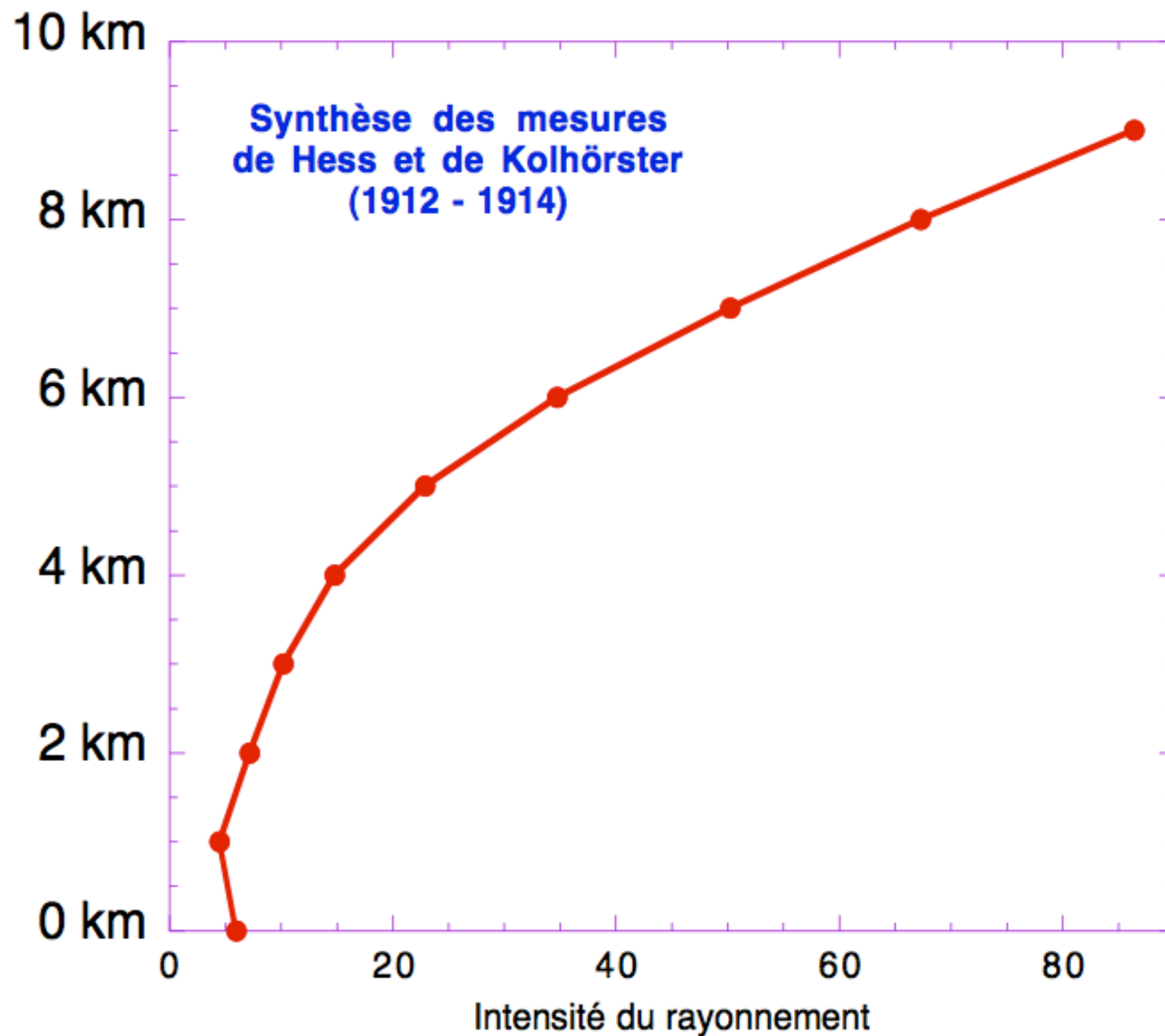
Hess à l'assaut du ciel - vol du 7 août 1912



Hess bei Ballonlandung (1912).

Route des Entdeckungsfluges der kosmischen Strahlung.

Synthèse des mesures en ballons



l'intensité du rayonnement ionisant augmente avec l'altitude

—> totalement inattendu avec l'hypothèse de la radioactivité naturelle comme seule origine

—> il y a nécessairement une contribution qui vient d'en haut et pas du sol

—> l'origine du rayonnement s'avérera être **les rayons cosmiques secondaires** créés dans les gerbes atmosphériques mais on mettra du temps à le comprendre... et on fera beaucoup de découvertes dans le processus

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

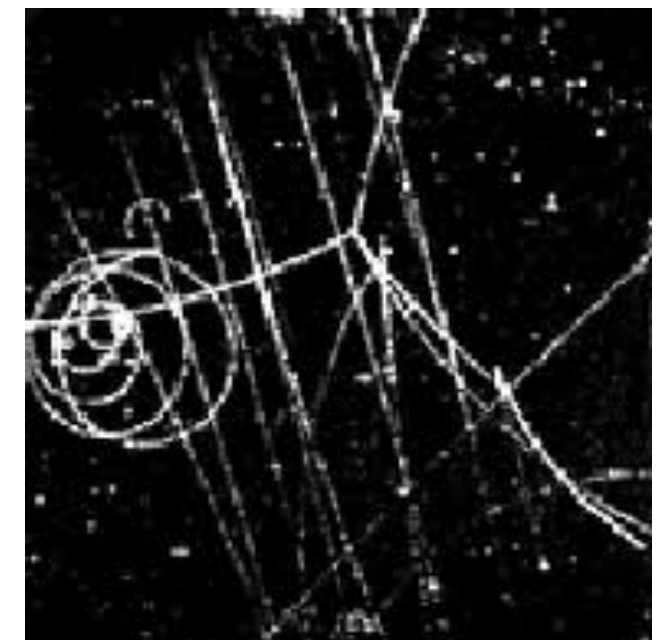
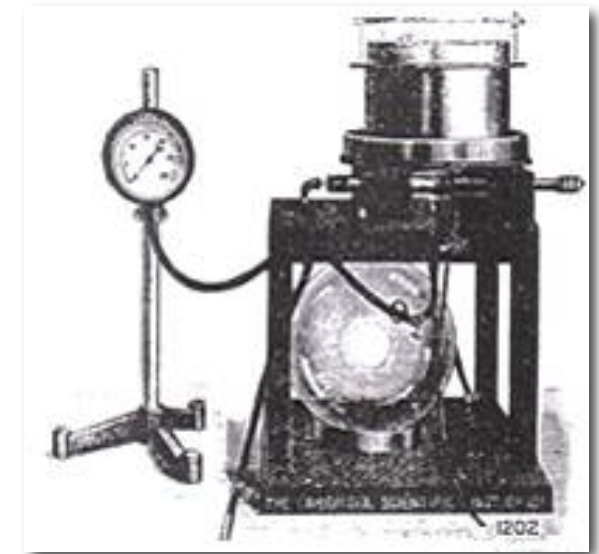
- Vers la fin des années 20 les premiers véritables détecteurs de particules sont créés (compteurs Geiger, chambre à brouillard)

- D. Skobeltzyn travaille avec des chambres à brouillard qu'il soumet à un champ magnétique (1929)

- Il observe des trajectoires courbées par le champ magnétique

- > particules chargées

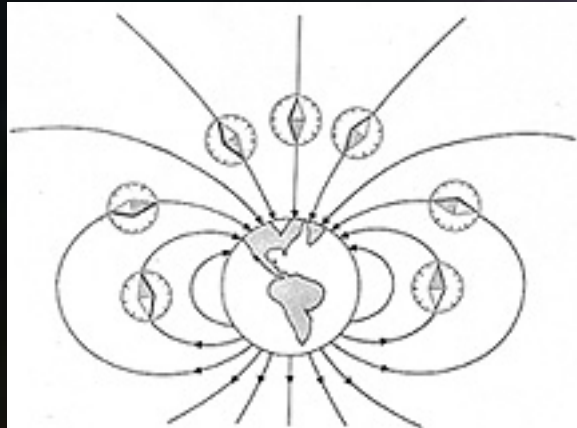
- > **une partie des rayons cosmiques secondaires sont des particules chargées**



Cela ne nous dit rien sur la nature des rayons cosmiques primaires !!

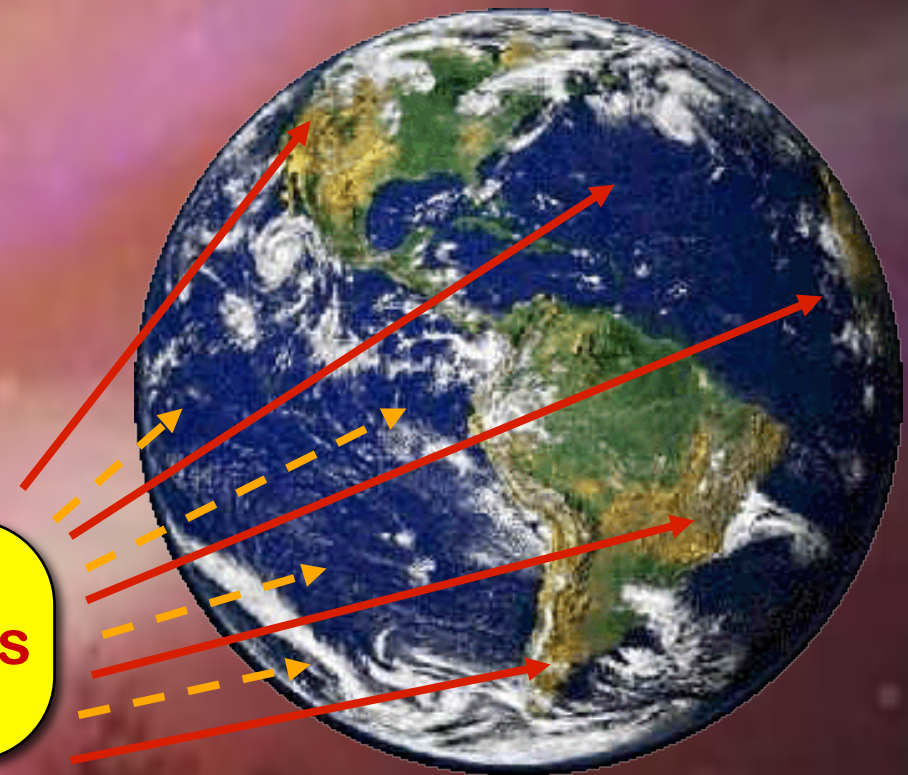
Quid des rayons cosmiques primaires!

(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

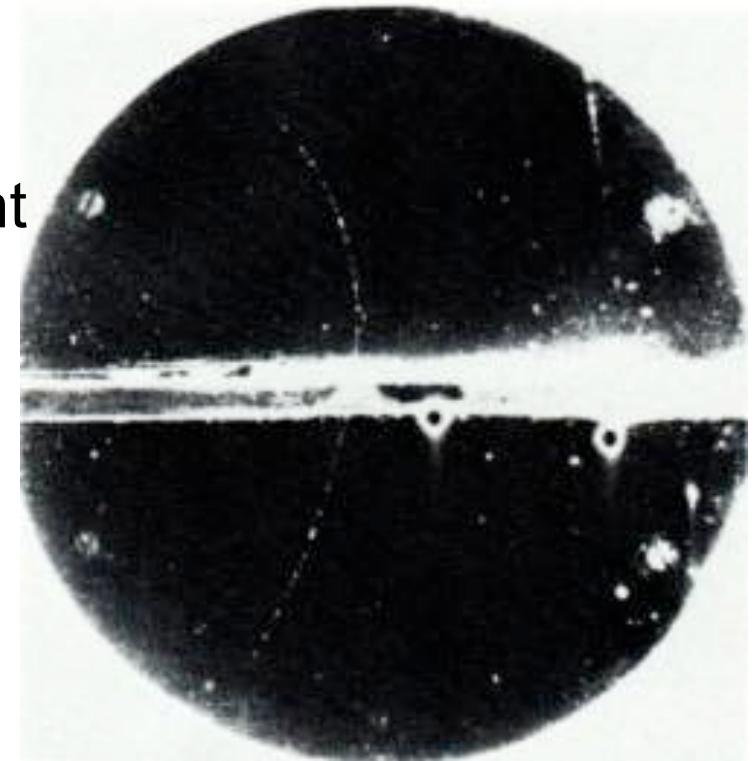
Bien avant l'émergence des accélérateurs, la physique des particules expérimentale est née en observant les particules secondaires, beaucoup de particules inconnues jusqu'alors ont été découvertes !

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

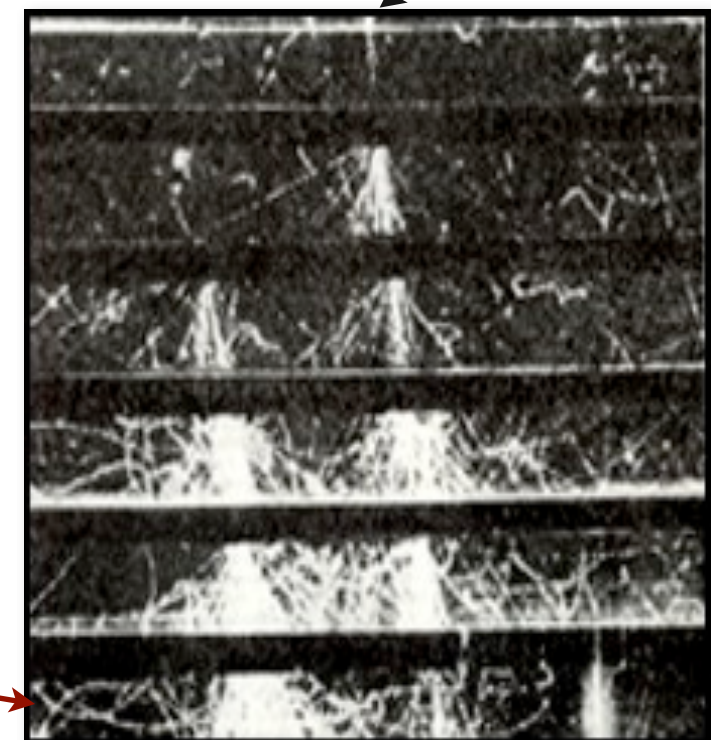
1936: Neddermeyer et Anderson découvre le muon (même charge que l'électron mais plus lourd et instable)

- 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 au début des années 30

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

Comment mettre en évidence expérimentalement l'existence des gerbes atmosphériques ?

—> une gerbe suffisamment énergétique produit un front de particules qui vont arriver jusqu'au sol

—> l'emprunte de la gerbe au sol aura une surface qui dépendra de l'énergie du rayon cosmique primaire (de quelques dizaines de m^2 à quelques dizaines de km^2), et le flux de particules durera quelques microsecondes au maximum

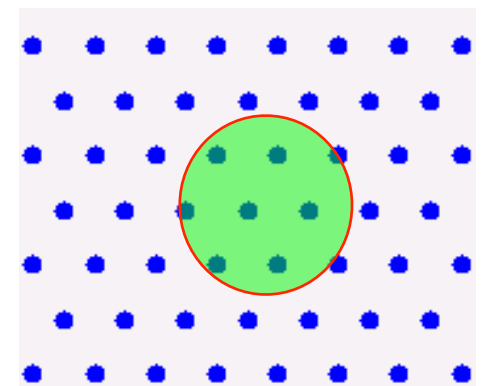
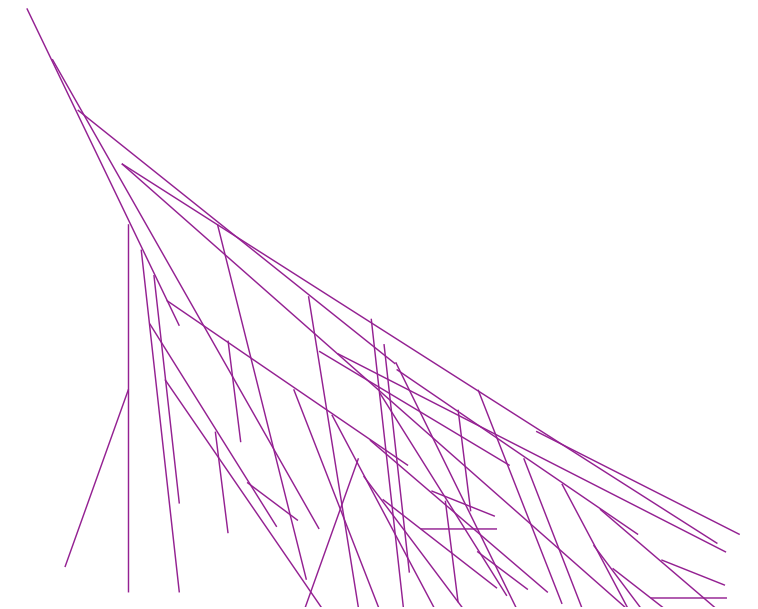
—> si l'on crée un réseau de détecteur, la détection d'un signal dans une fenêtre de quelques microsecondes dans plusieurs détecteurs voisins permettra de montrer qu'une gerbe atmosphérique est passée

—> l'électronique de déclenchement doit être suffisamment précise pour pouvoir établir des coïncidence temporelle à l'échelle de la microseconde

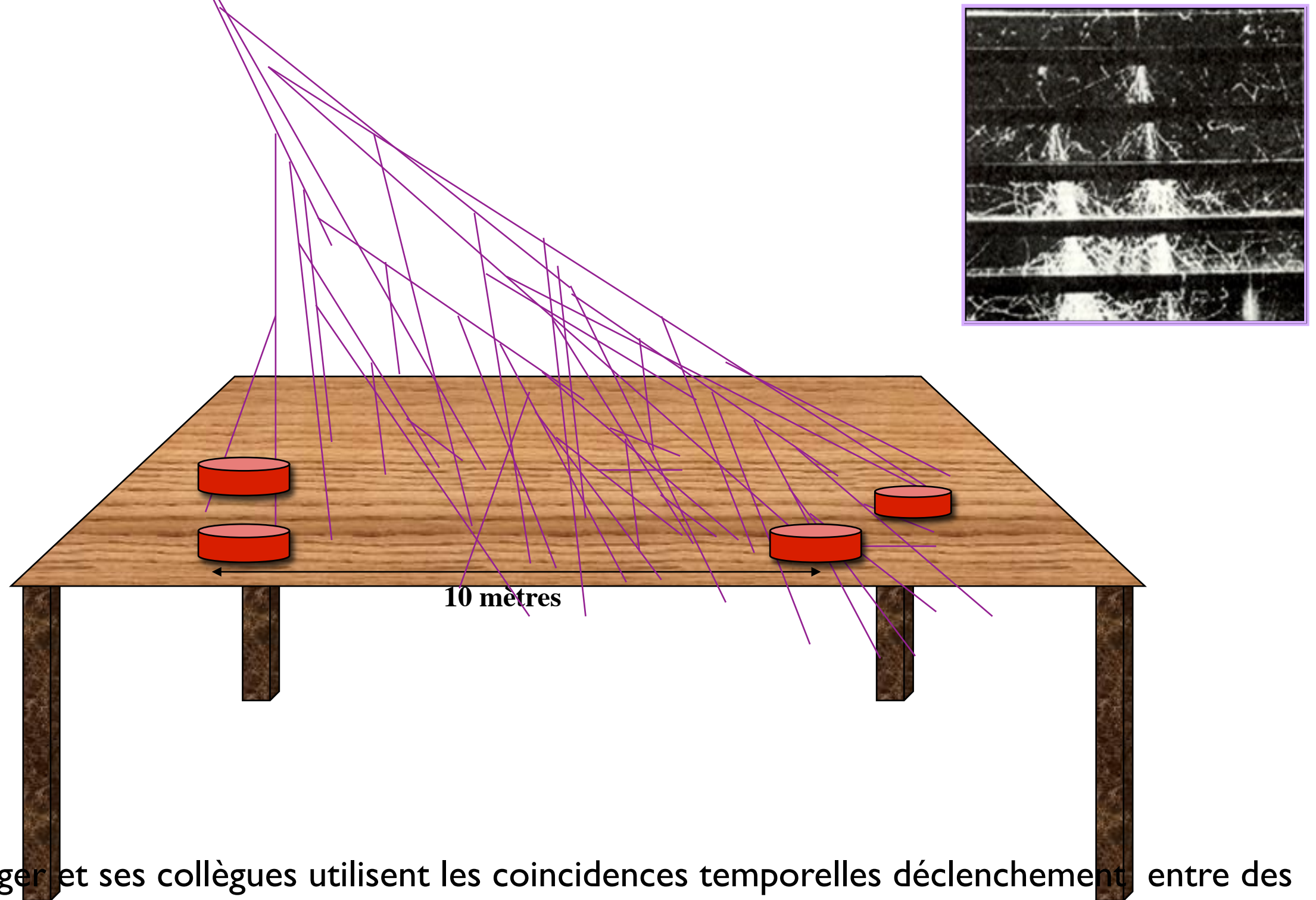
❖ Pourquoi ne pas se contenter d'une milliseconde ?

parce que dans ce cas la probabilité de coïncidence fortuite est trop grande pour pouvoir détecter des gerbes avec certitude

❖ Il a fallu attendre 1938 et l'équipe de Pierre Auger pour disposer d'une électronique capable de relever ce défi

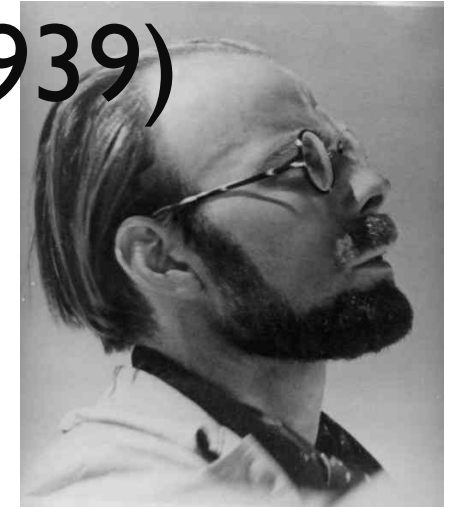


Mise en évidence du phénomène de gerbe atmosphérique par Pierre Auger et ses collègues (1938-1939)



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

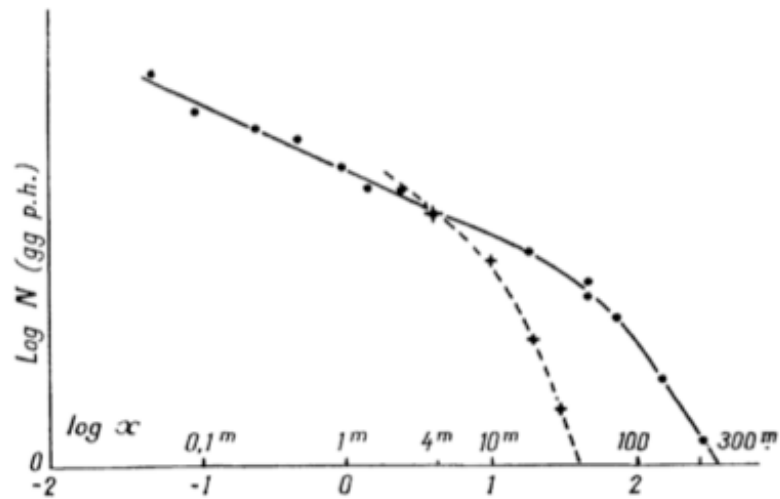
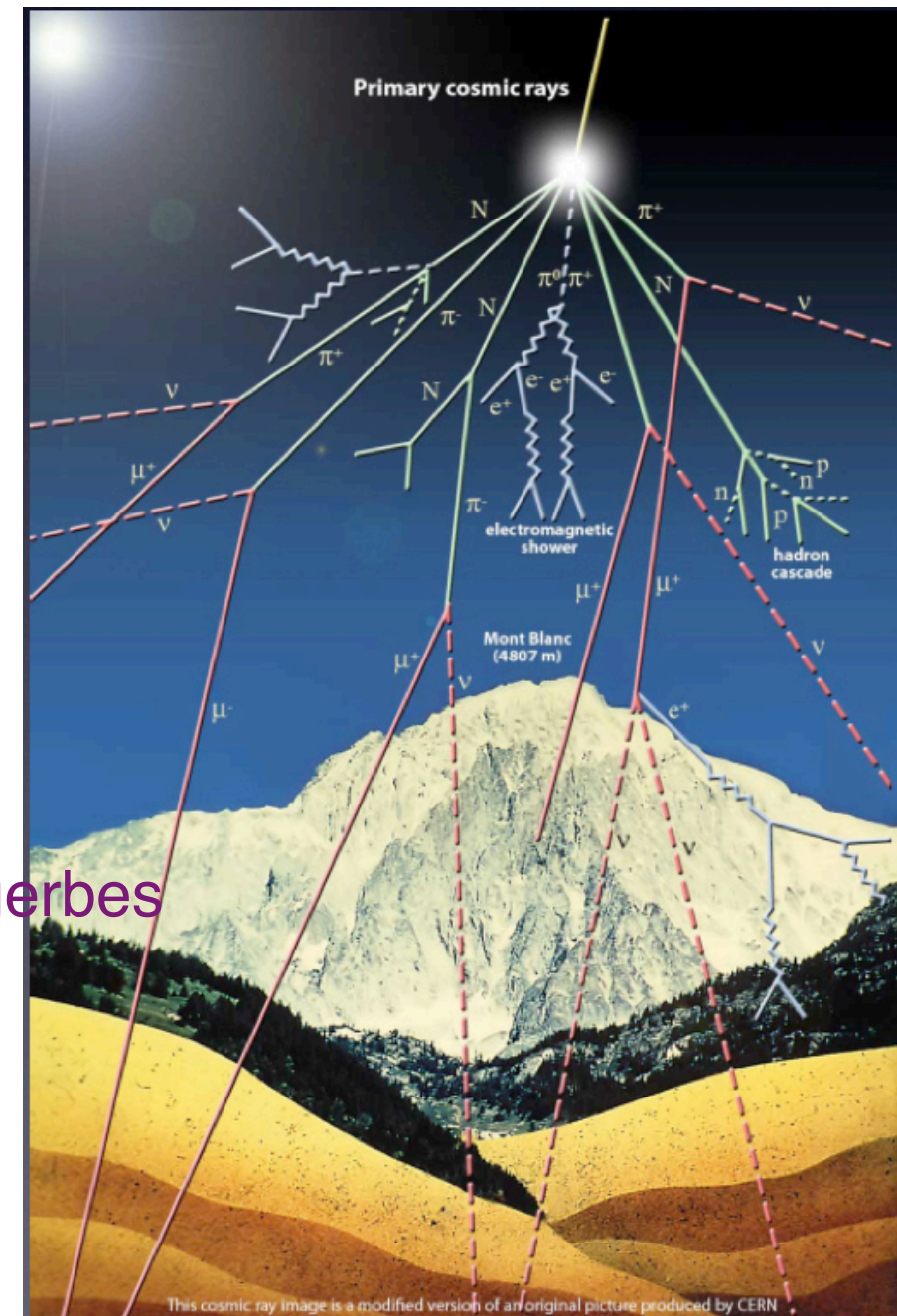


Fig. 14. — Décroissance du nombre N des gerbes atmosphériques avec l'écartement X des compteurs. Coordonnées logarithmiques (--- calcul.)

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
- 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

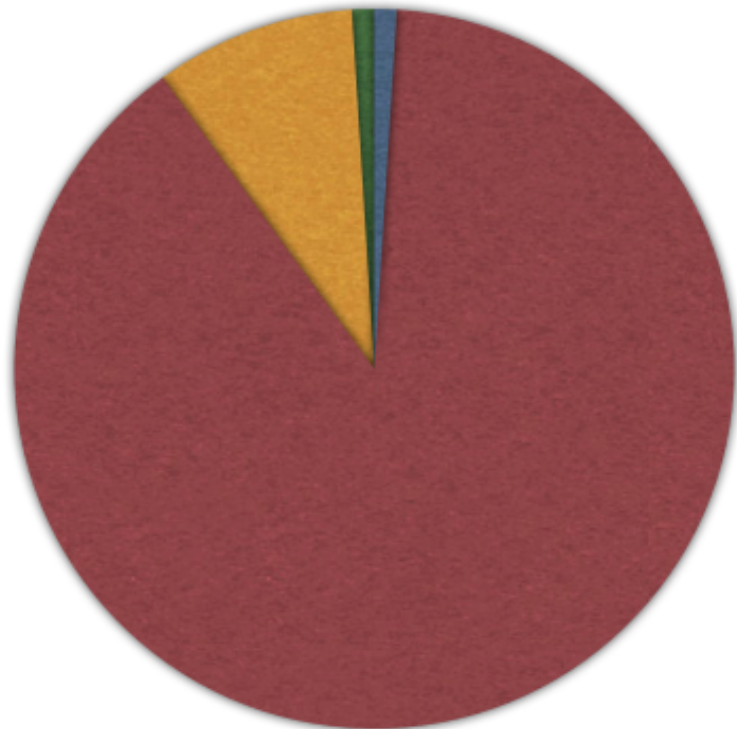


L'étude des rayons cosmiques comme messenger astrophysique

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

4 rayons cosmiques / cm² / 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 !

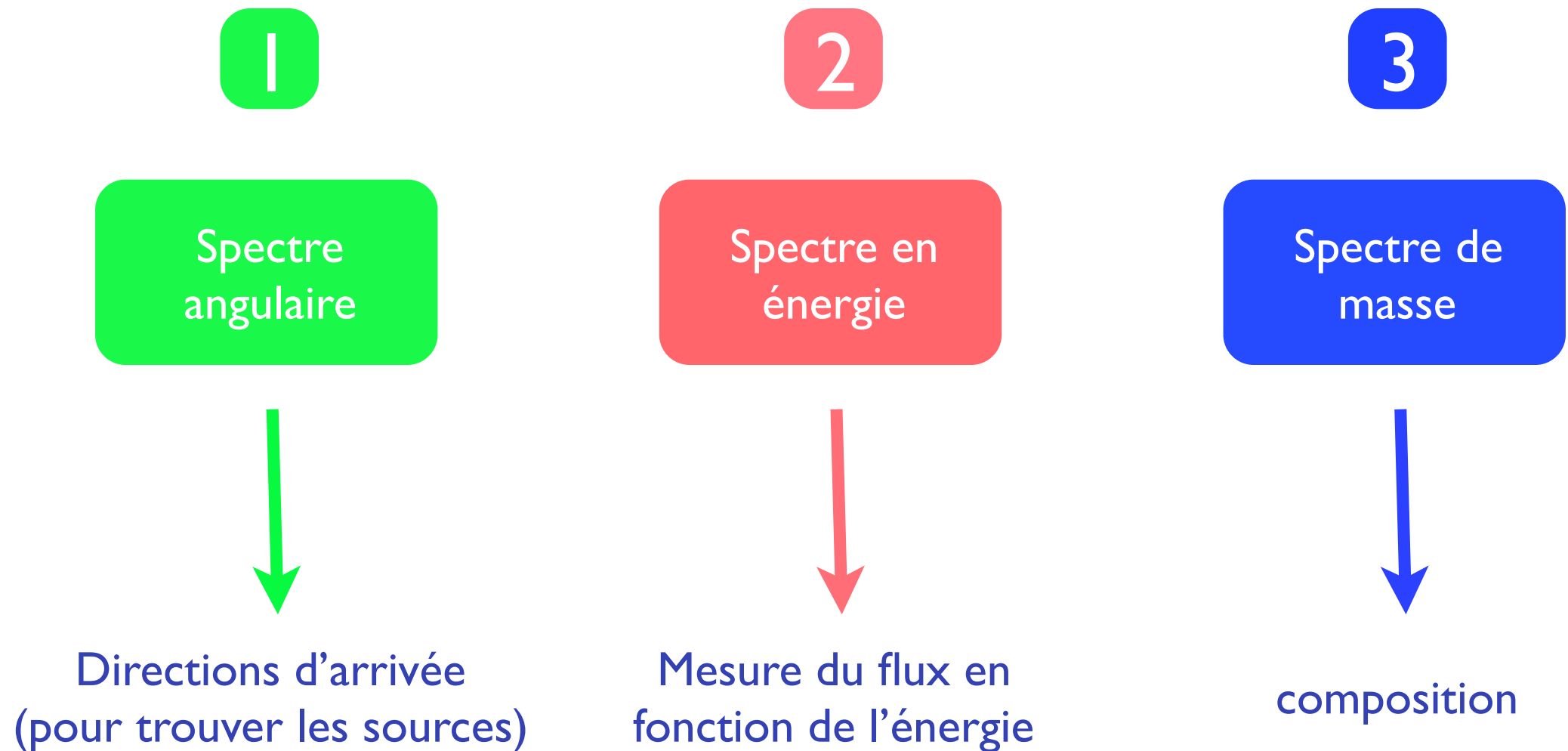
≠ astronomie photonique étendue
(radio, infrarouge, UV, X, gamma, TeV...)



→ 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 !

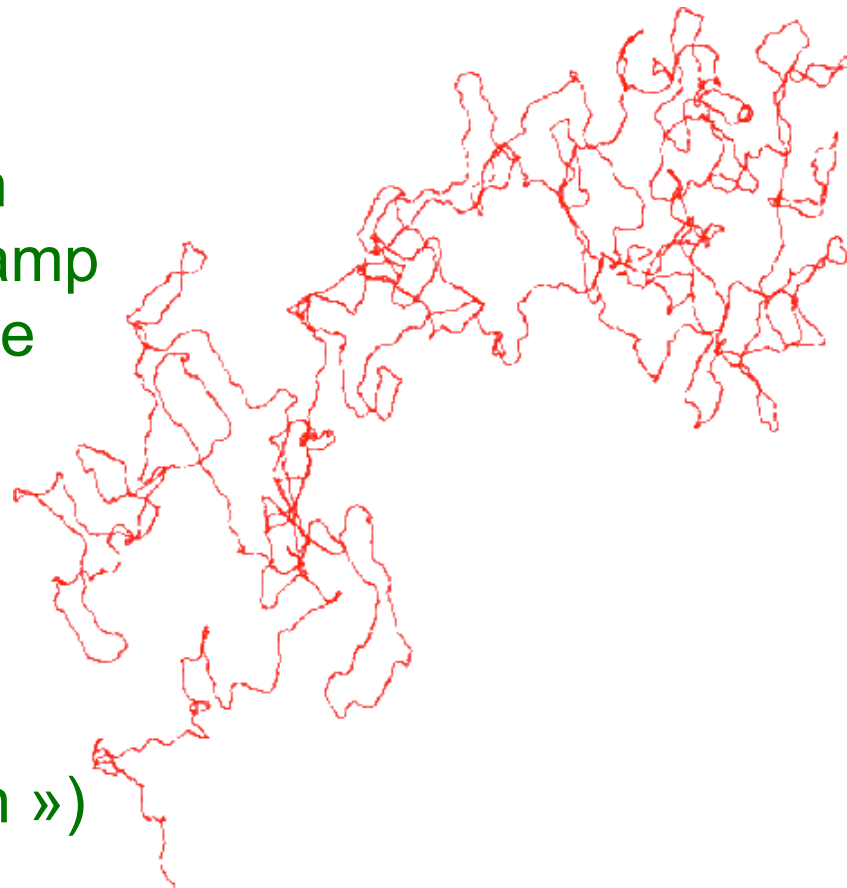
↓
Non !

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 !

Courte parenthèse sur les énergies

En physique des particules, en astrophysique des hautes énergies et en physique des rayons cosmiques on utilise l'électron-volt (eV) comme unité d'énergie

—> la Joule est l'unité d'énergie en physique macroscopique

—> l'eV est l'unité d'énergie typique des systèmes microscopiques et des particules individuelles

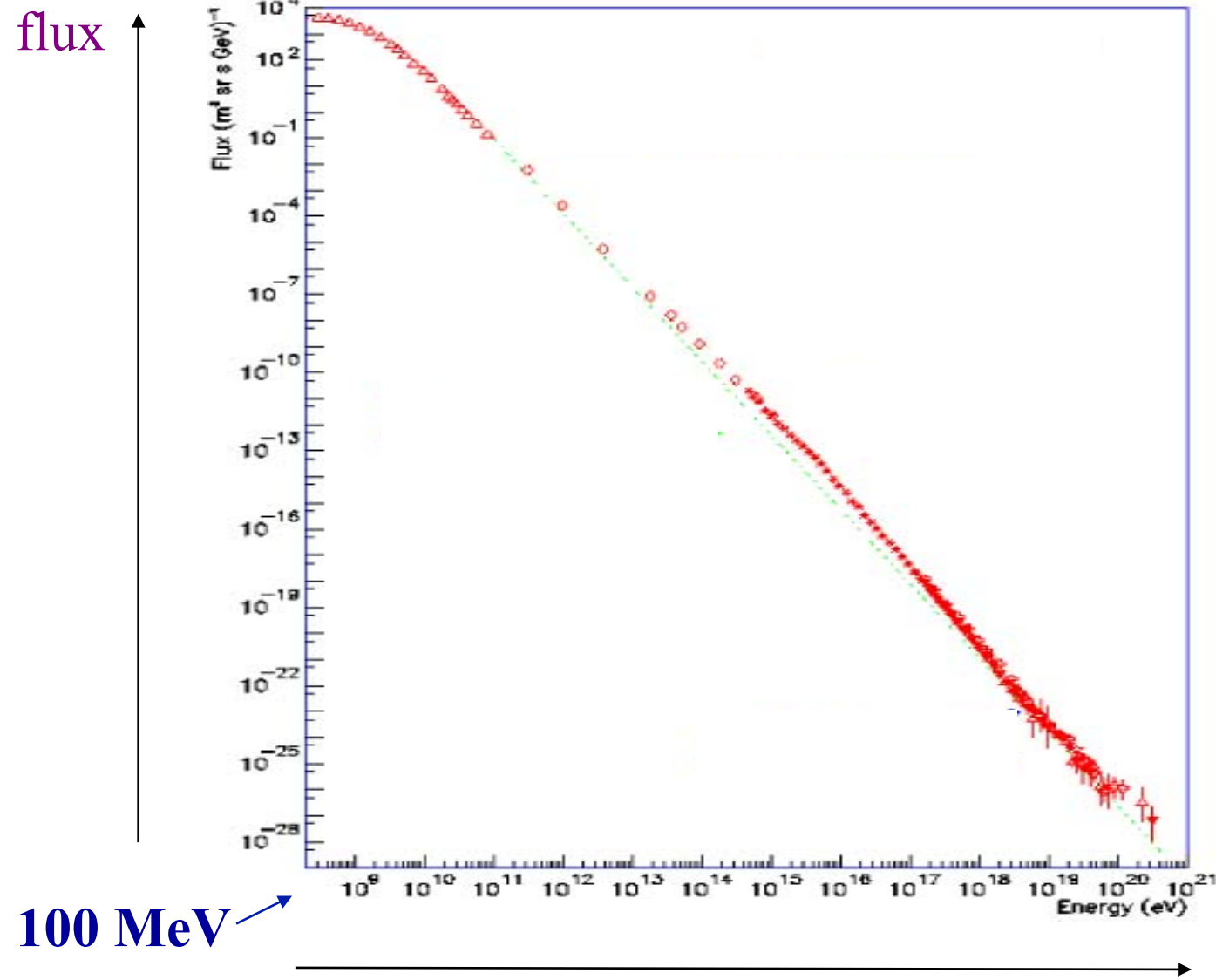
1 eV = 1.6×10^{-19} J (!) c'est l'énergie cinétique acquise par un électron initialement au repos accéléré par une différence de potentiel de 1V

Quelques repères :

- 1 photon dans le domaine radio : $E < 1 \times 10^{-4}$ eV
- 1 photon dans le domaine gamma : $E > 1 \times 10^6$ eV (1 MeV)
- énergie maximale atteinte par les accélérateurs du CERN : $E \sim 10^{13}$ eV (10 TeV)
- énergie des rayons cosmiques les plus énergétiques mis en évidence par P.Auger en 1939 : $E \sim 1 \times 10^{15}$ eV (1 PeV)
- énergie des rayons cosmiques les plus énergétiques détectés de nos jours : $E \sim 10^{20}$ eV (100 EeV)

- 1000 eV = 1 keV (kilo)
- 10^6 eV = 1 MeV (Mega)
- 10^9 eV = 1 GeV (Giga)
- 10^{12} eV = 1 TeV (Tera)
- 10^{15} eV = 1 PeV (Peta)
- 10^{18} eV = 1 EeV (Exa)
- 10^{21} eV = 1 ZeV (Zetta)

Le spectre des rayons cosmiques (une merveille du cosmos)



Spectre d'une régularité extraordinaire sur ~ 11 ordres de grandeur en énergie (facteur 100 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 (très) vite lorsque l'énergie augmente

~ 50 fois plus de RC entre 100 GeV et 1 TeV qu'entre 1 TeV et 10 TeV, et 2500 fois plus qu'entre 10 TeV et 100 TeV

10²¹ eV

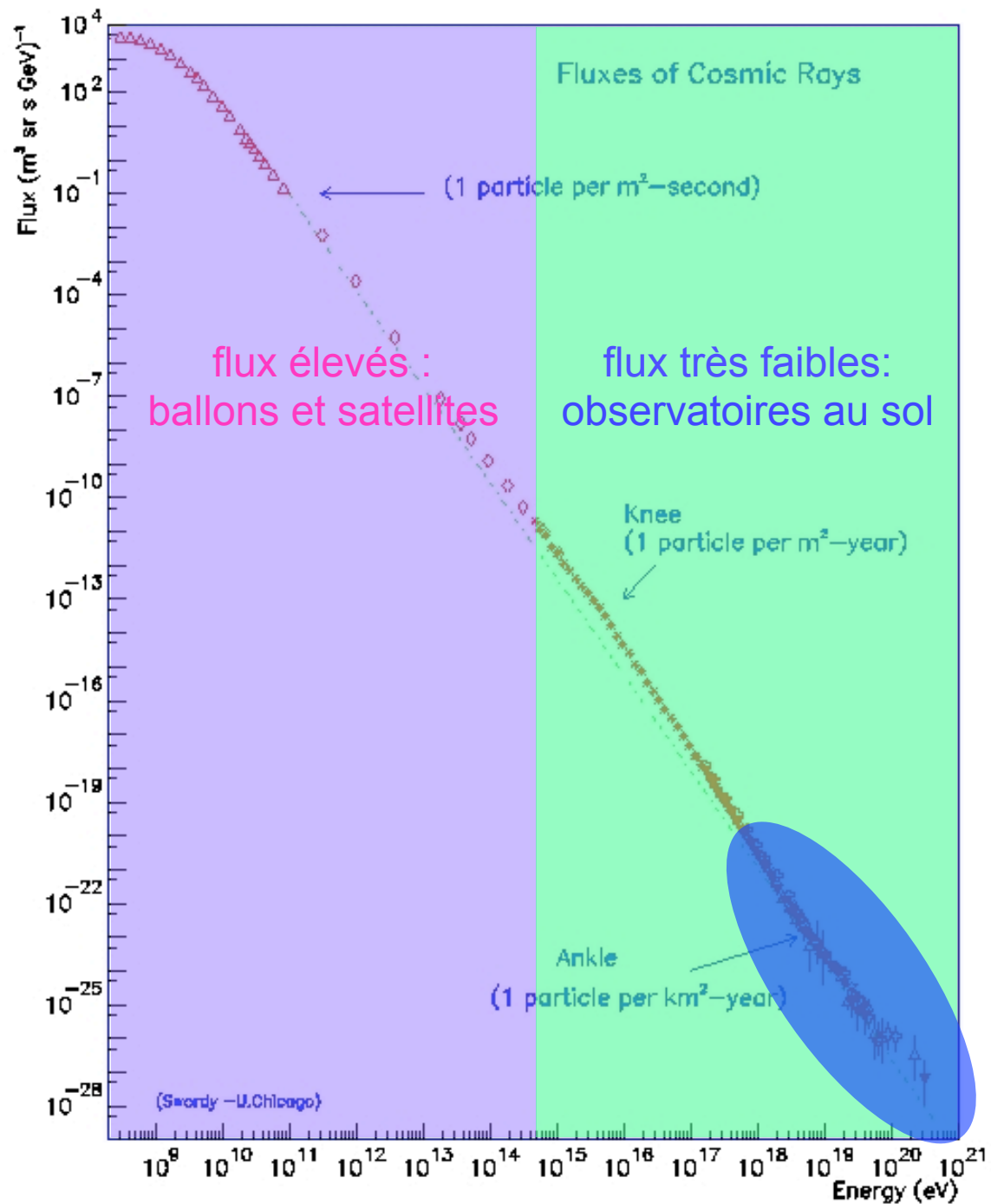
➡ la plus grande part de l'énergie est concentrée dans la partie basse énergie du spectre

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/ m^2/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)

Comment accélère t'on des rayons cosmiques?

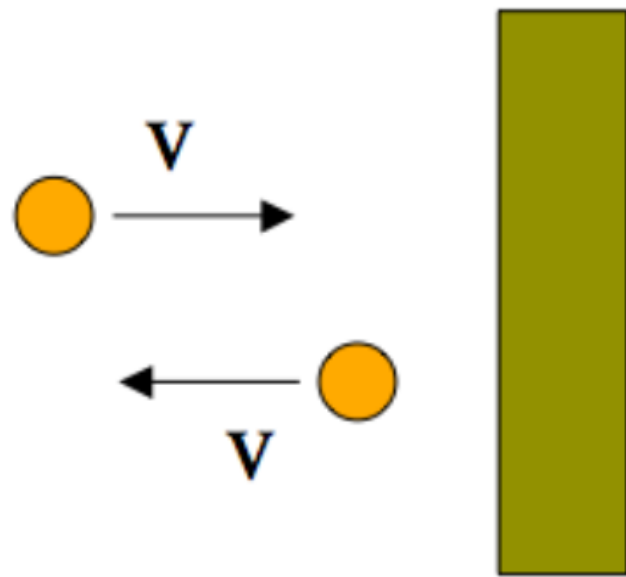
- Les rayons cosmiques sont des particules chargées on suspecte donc très fortement que les champs électromagnétiques présents dans les objets astrophysiques interviennent dans le processus d'accélération
- Dès 1949, Enrico Fermi proposa un mécanisme permettant d'accélérer des noyaux chargés ou des électrons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



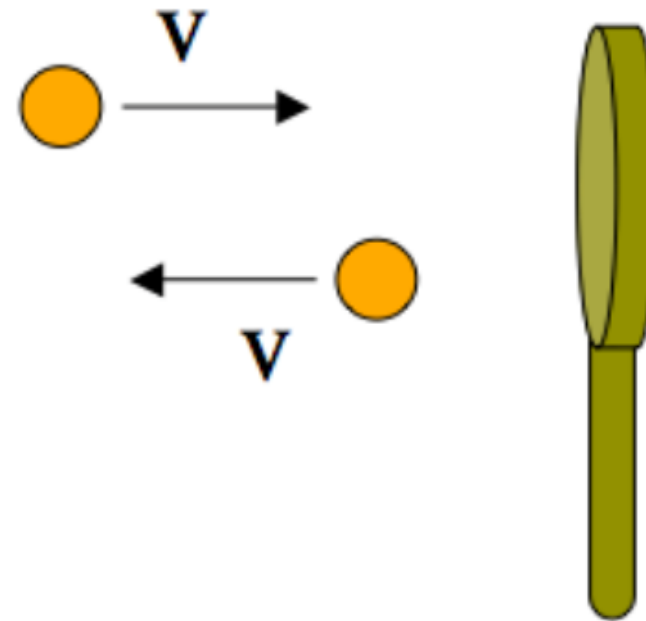
Les particules chargées peuvent être réfléchies par le “nuage magnétique”

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

Analogie tennistique (idéalisée)!

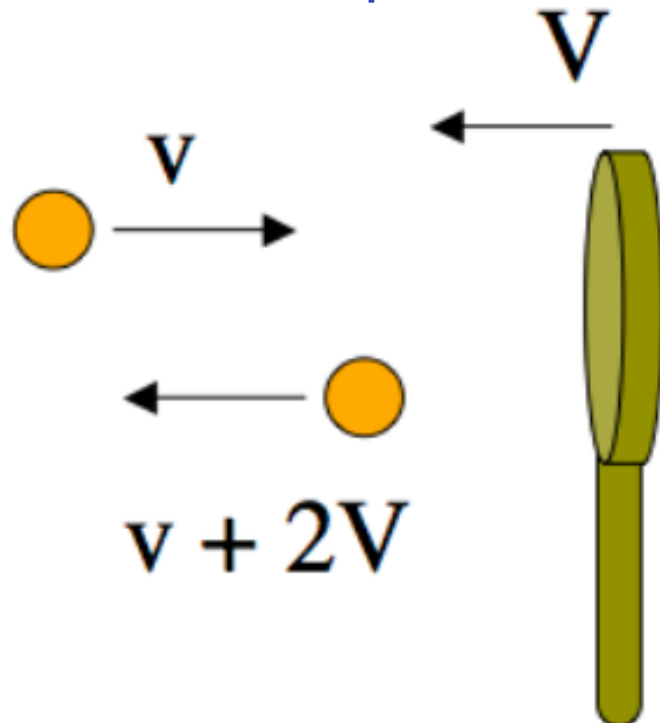


Balle contre un mur



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 $v+V$

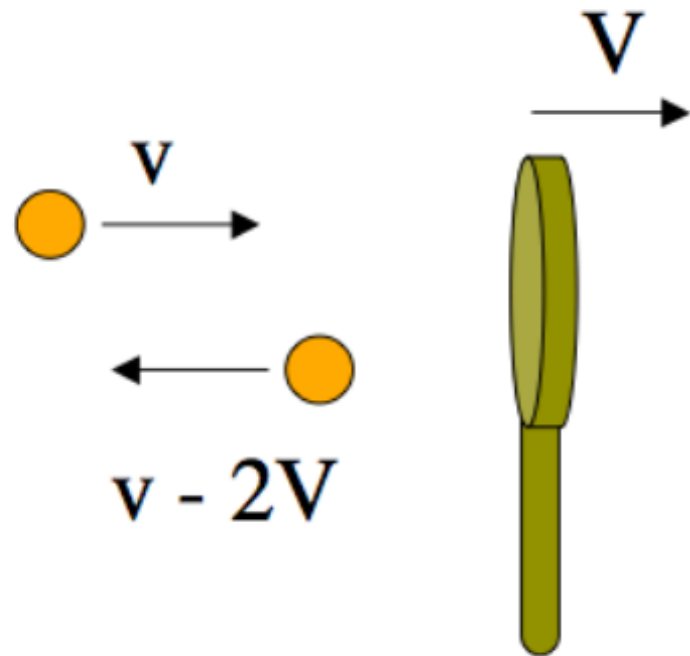


Après le choc :

- 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 !

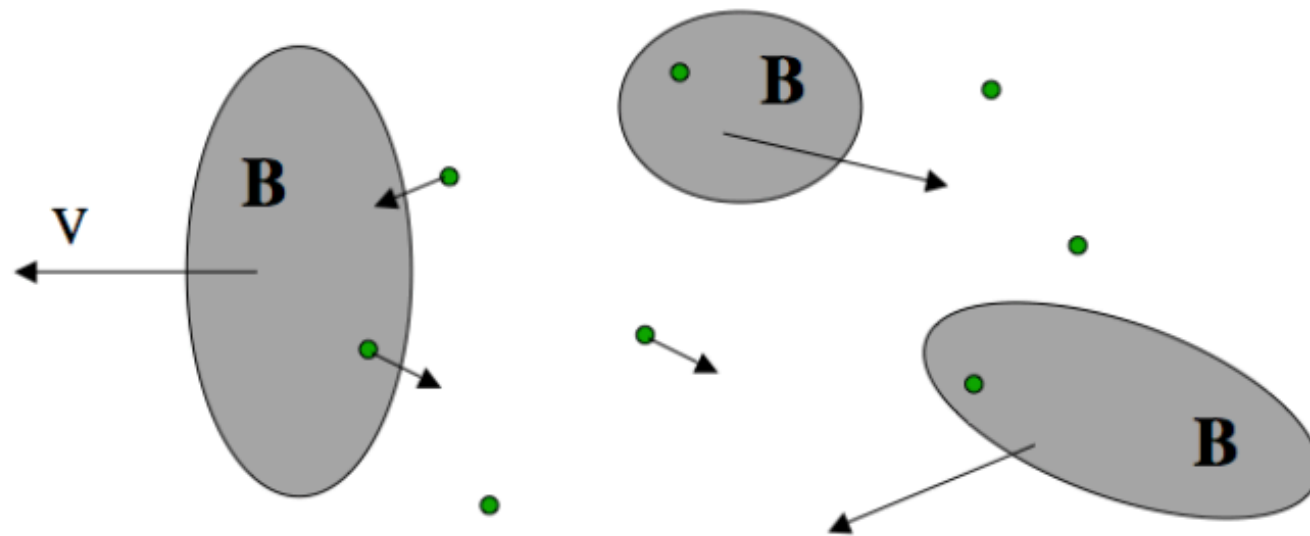
➔ Décelération de la balle par double changement de référentiel lors d'un choc fuyant entre la balle et la raquette

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

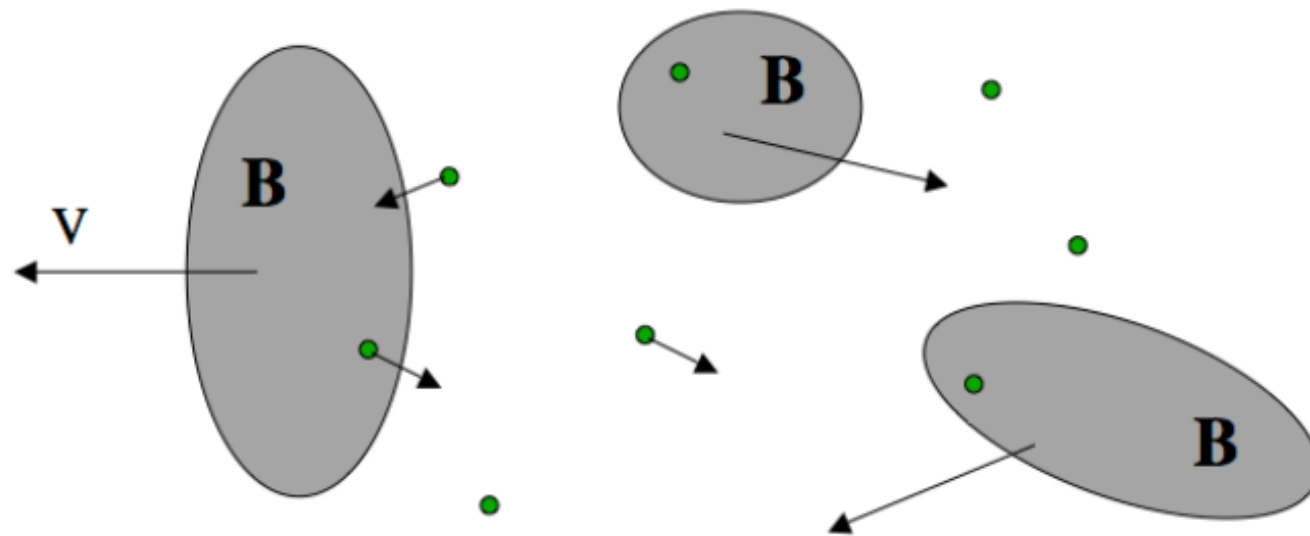


Dans la galaxie on s'attend à ce qu'une particule rencontre des nuages dans toutes les directions, l'effet final ne devrait il pas être nul ?

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

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



Reste de la supernova de Tycho (1572) en rayon X

(diamètre de la région délimitée par l'onde de choc \sim 10 années-lumière)

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

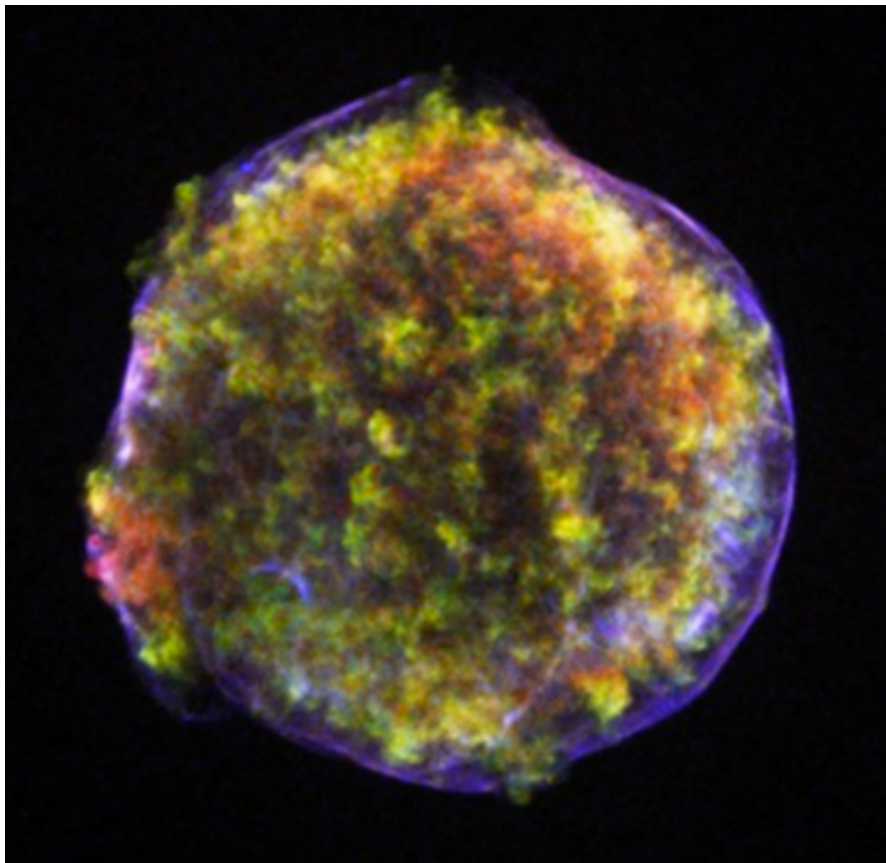
➔ gain d'énergie à chaque cycle

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



Les ondes de choc et l'accélération des rayons cosmiques

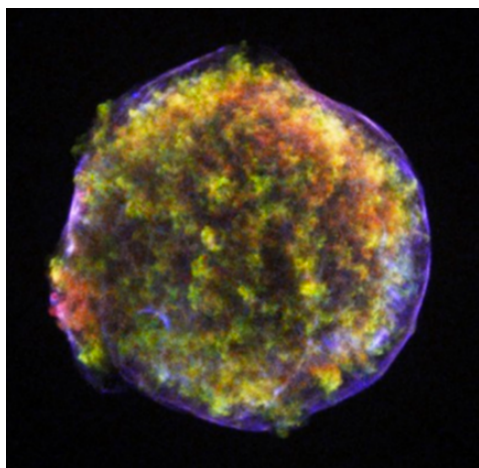
➔ Uniquement des chocs frontaux => mécanisme beaucoup plus rapide que le scénario original de Fermi

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 énergie 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



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 énergie arbitrairement grandes ?

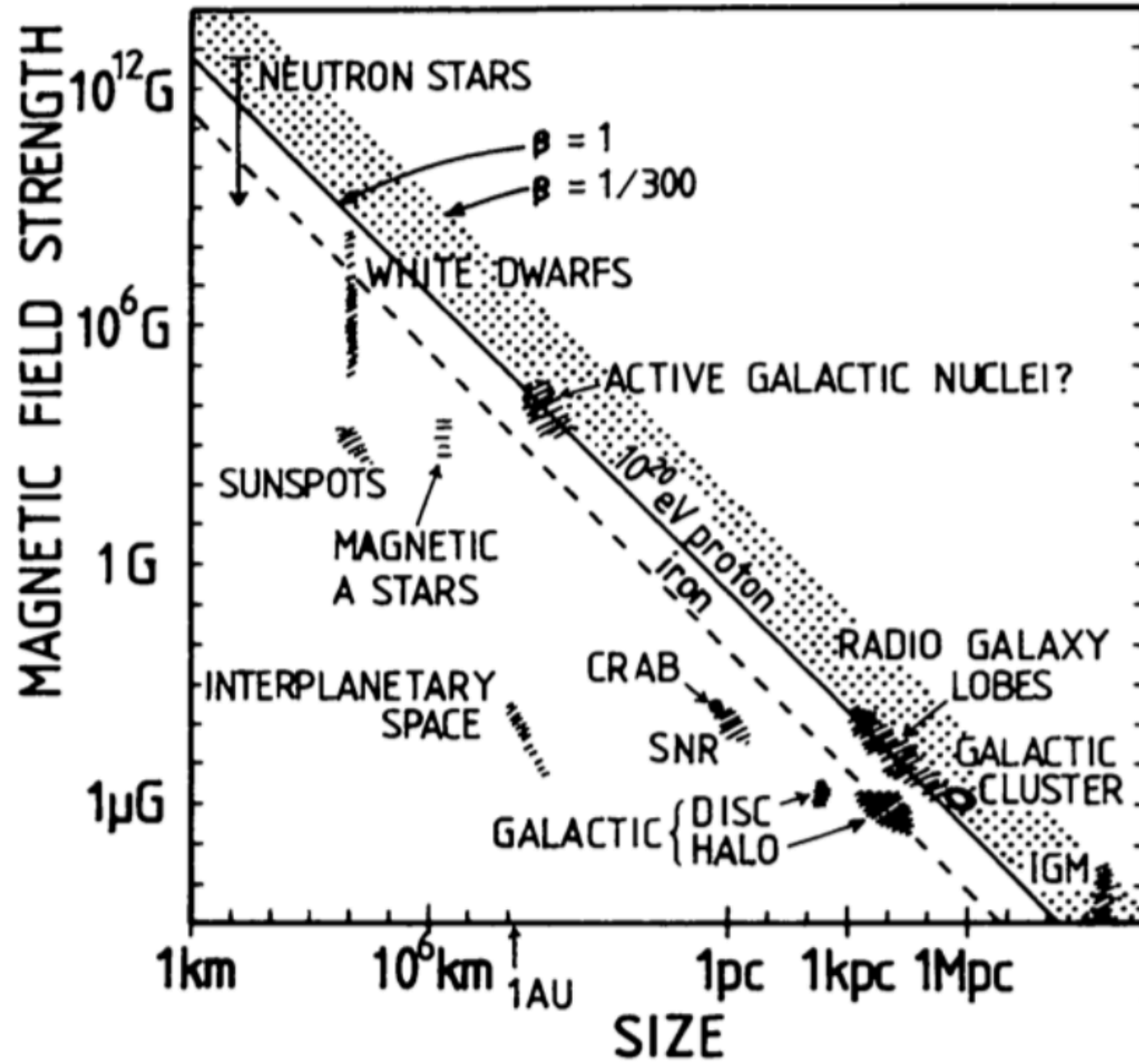
➔ Non !

➔ 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

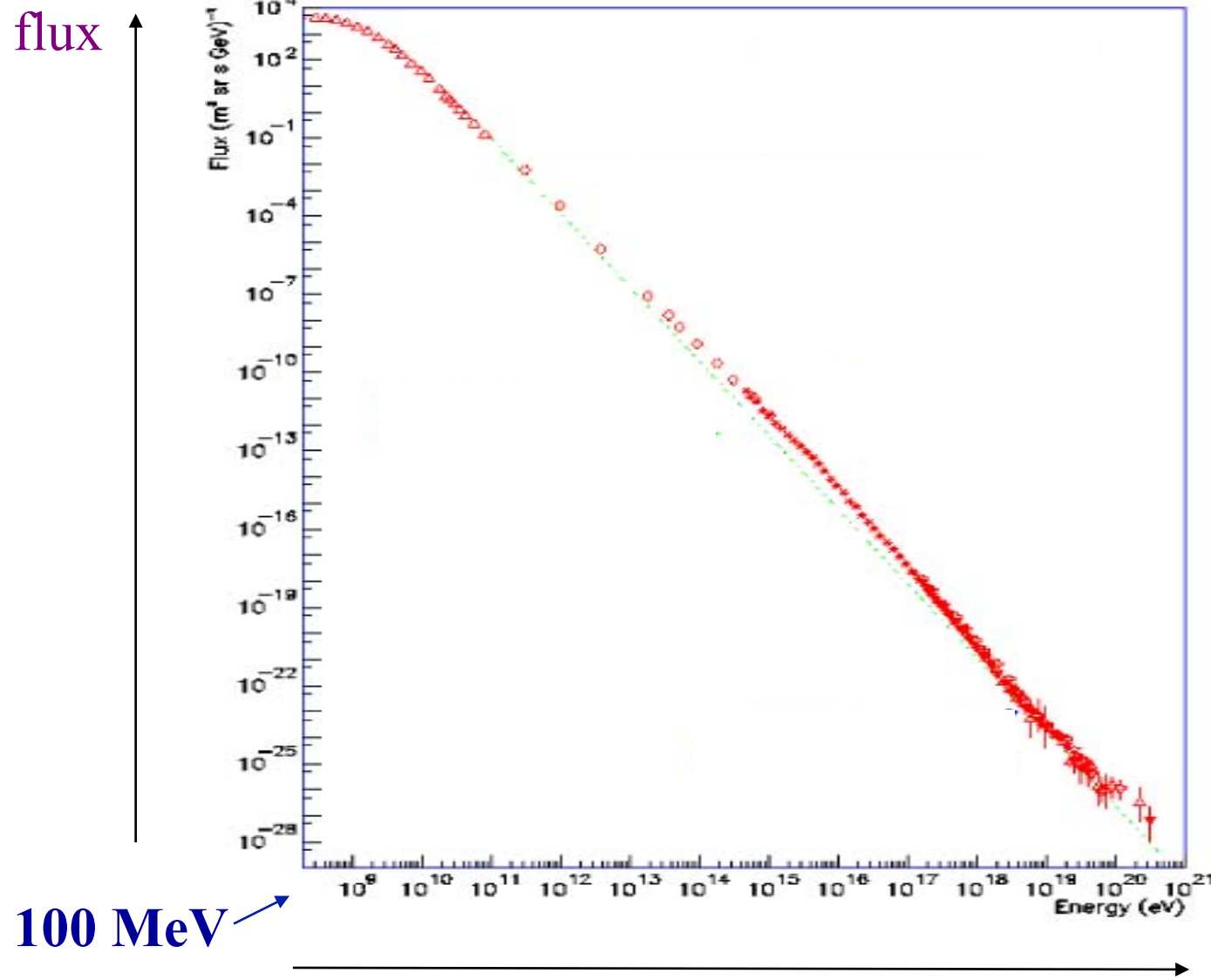
➔ Une des conséquences de l'argument de confinement est que l'on s'attend à ce que l'énergie maximale atteinte par un noyau de charge donnée soit proportionnelle à sa charge

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

Diagramme de Hillas



Le spectre des rayons cosmiques (une merveille du cosmos)



Spectre d'une régularité extraordinaire sur ~ 11 ordres de grandeur en énergie (facteur 100 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 (très) vite lorsque l'énergie augmente

~ 50 fois plus de RC entre 100 GeV et 1 TeV qu'entre 1 TeV et 10 TeV, et 2500 fois plus qu'entre 10 TeV et 100 TeV

10^{21} eV

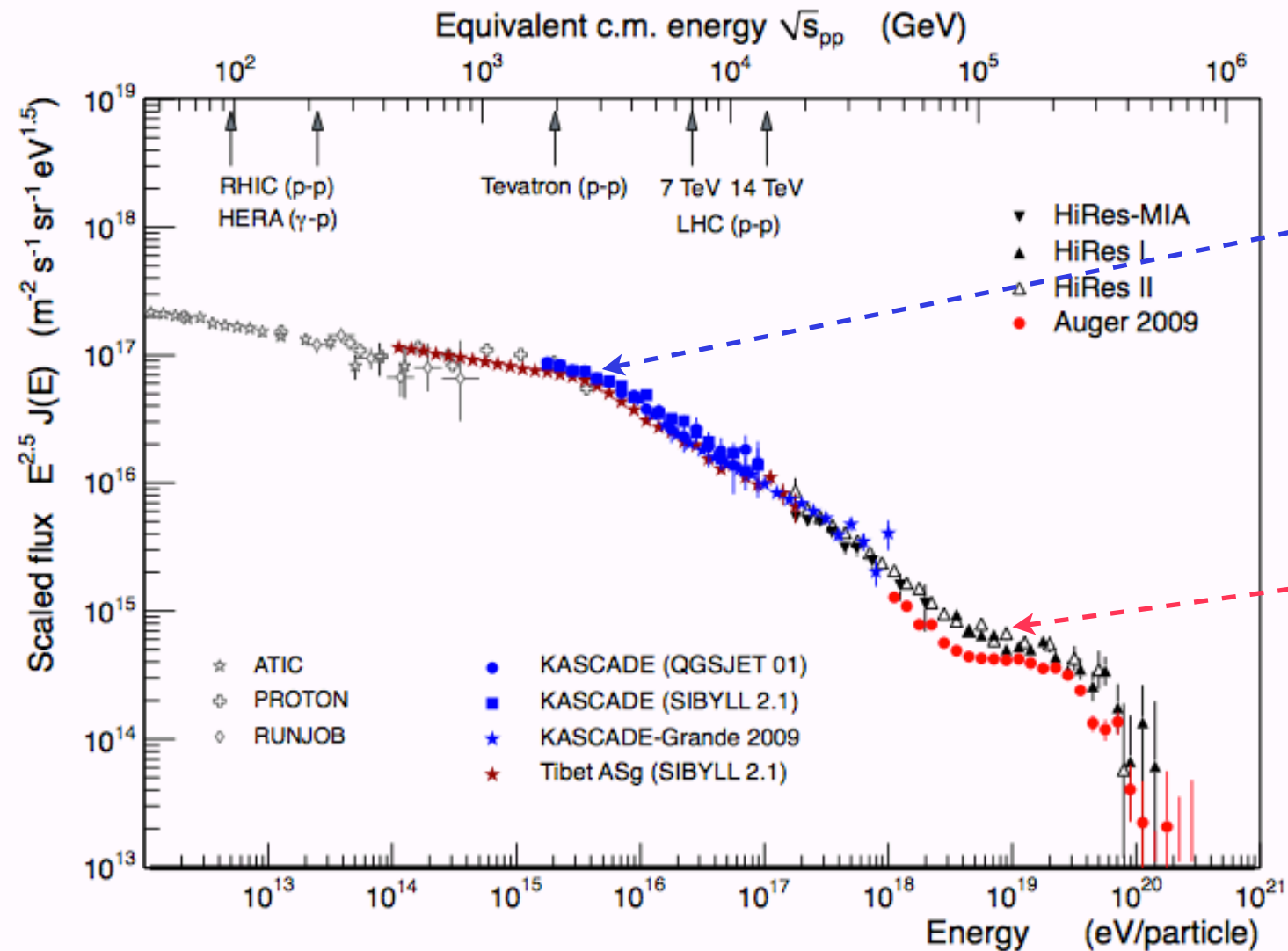
➡ la plus grande part de l'énergie est concentrée dans la partie basse énergie du spectre

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

Une autre vue du spectre : des “irrégularités” clés pour la compréhension



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

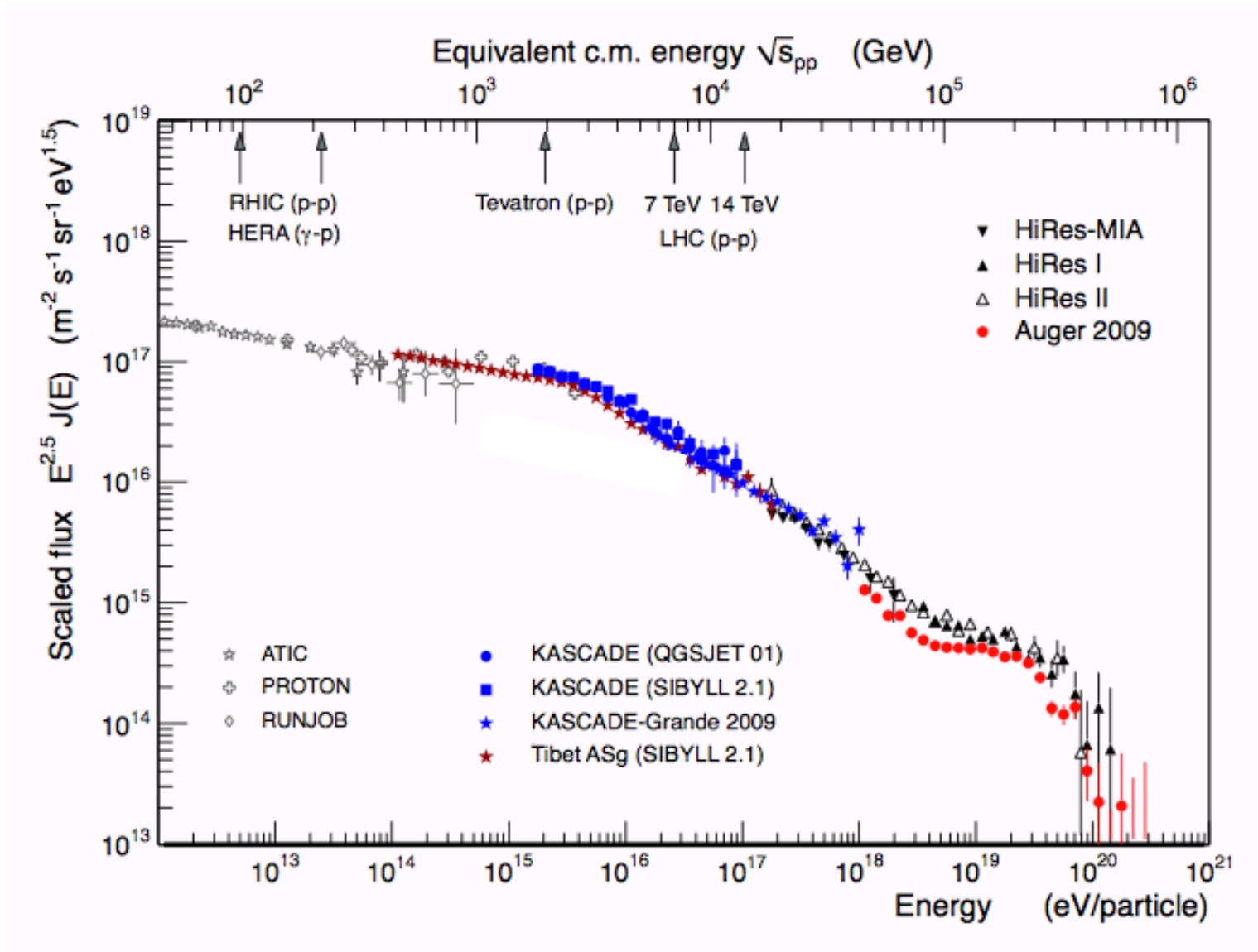
La cheville
 $E \sim 3-4 \cdot 10^{18}$ eV

Pierog, 2012

Astuce : pour mieux visualiser les détails du spectre des rayons cosmiques, au lieu de représenter le flux en fonction de l'énergie $f(E)$, on représente $f(E) \times E^{2.5}$ qui décroît beaucoup moins vite
—> permet de visualiser simplement deux irrégularités significatives dans le spectre : le genou et la cheville

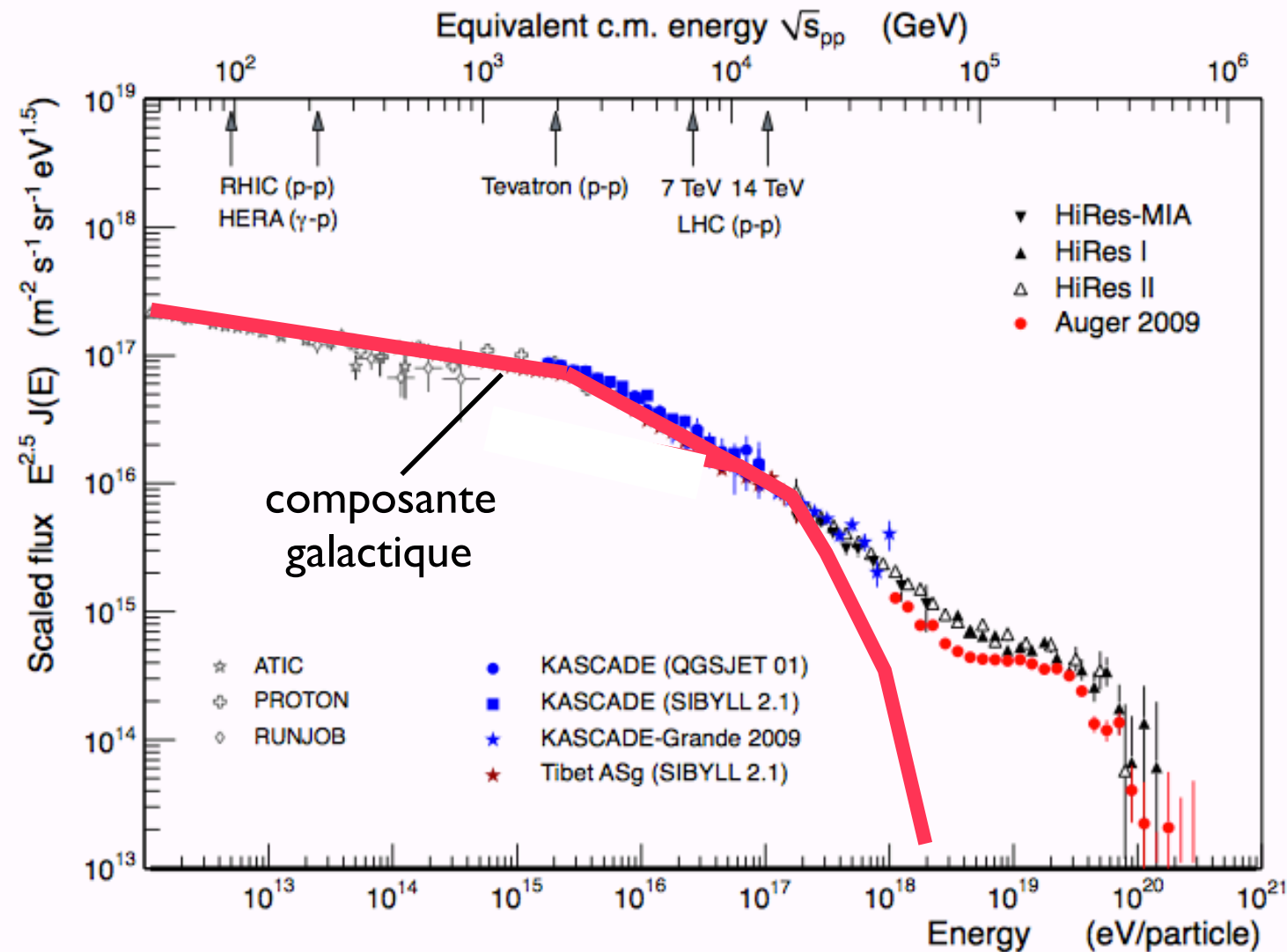
La compréhension du genou et de la cheville du spectre est cruciale pour la compréhension globale du phénomène

Comment comprendre la présence d'un “genou” dans le spectre?



Pierog, 2012

Comment comprendre la présence d'un "genou" dans le spectre?



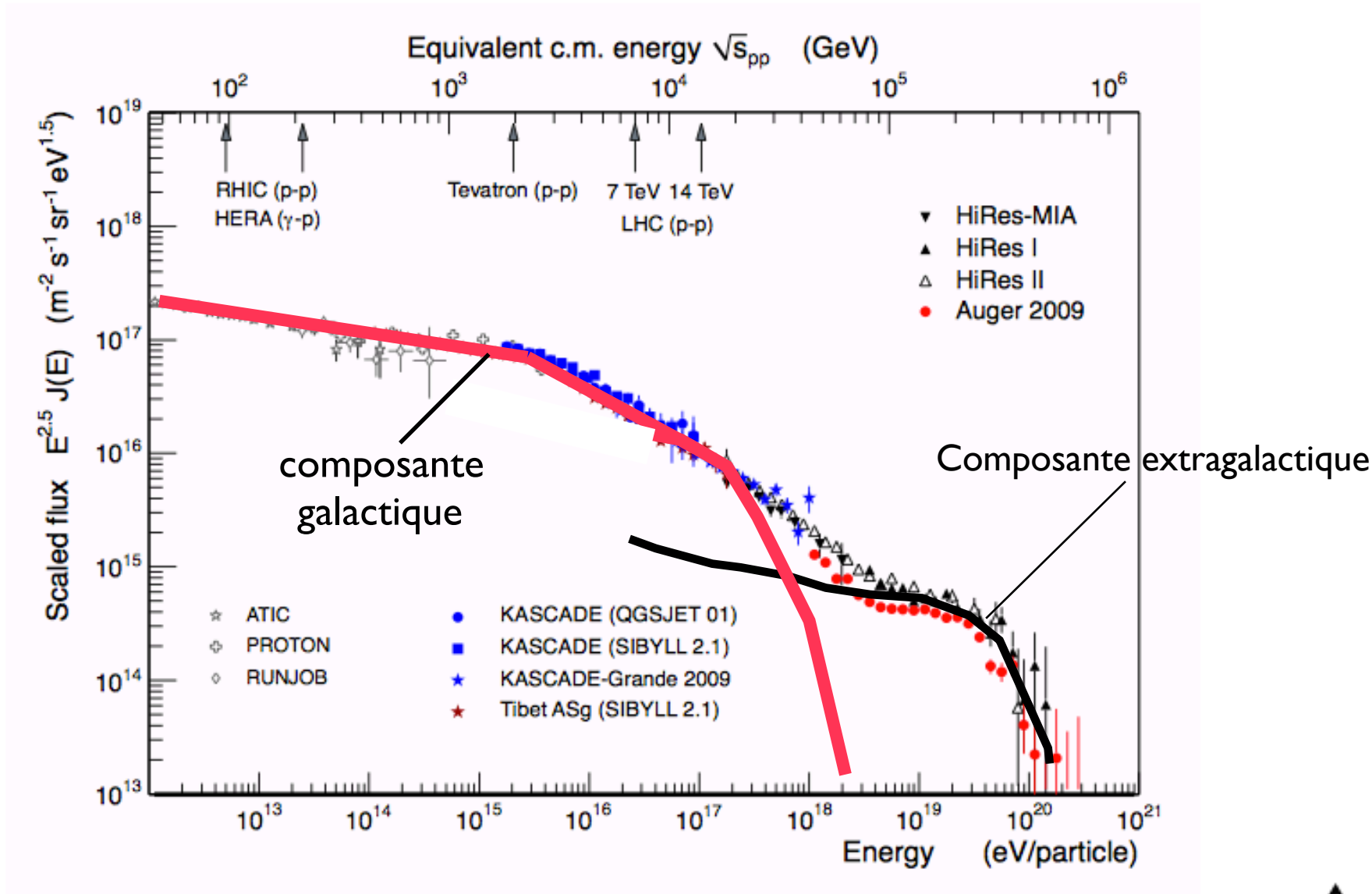
Une interprétation logique serait que le genou marque l'énergie à laquelle la plupart des sources galactiques deviennent incapables d'accélérer des protons

La composante galactique diminue donc plus vite au dessus du genou

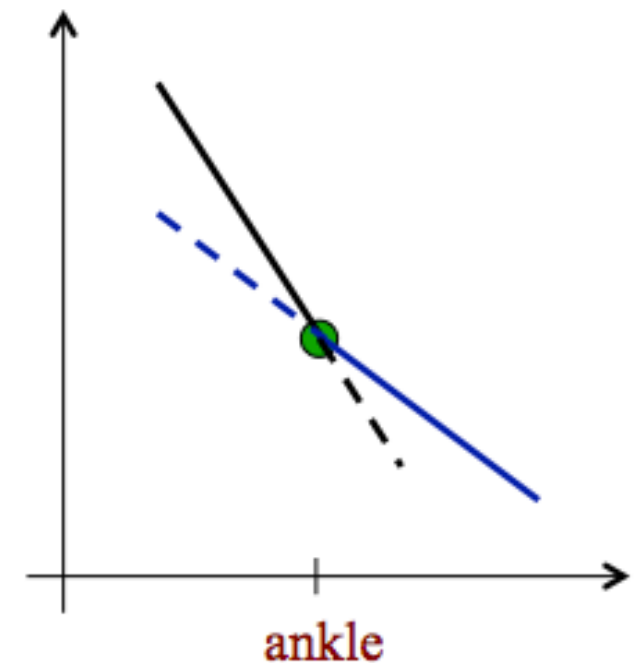
Pierog, 2012

Interprétation logique mais il en existe d'autres

Après le genou, la cheville



Si une composante extragalactique (sous dominante à plus basse énergie) succède à la composante galactique moribonde 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

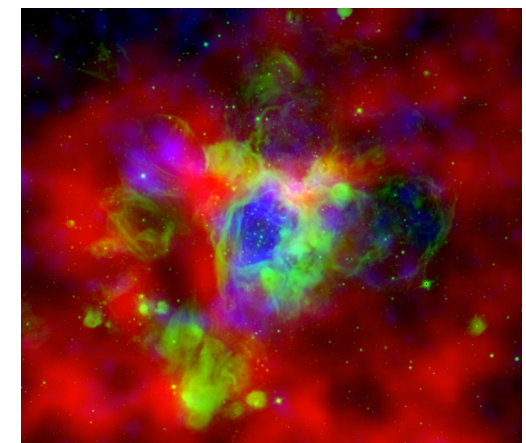
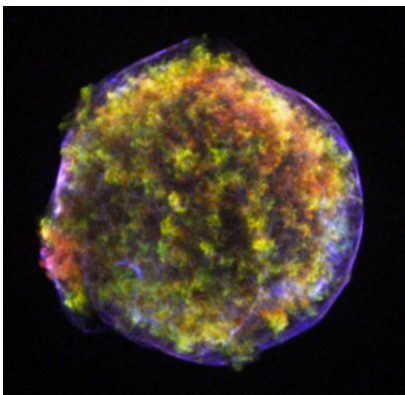
- ➡ brouillard complet !!!!
- ➡ les directions d'arrivées des rayons cosmiques ne permettent pas de dévoiler les sources

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

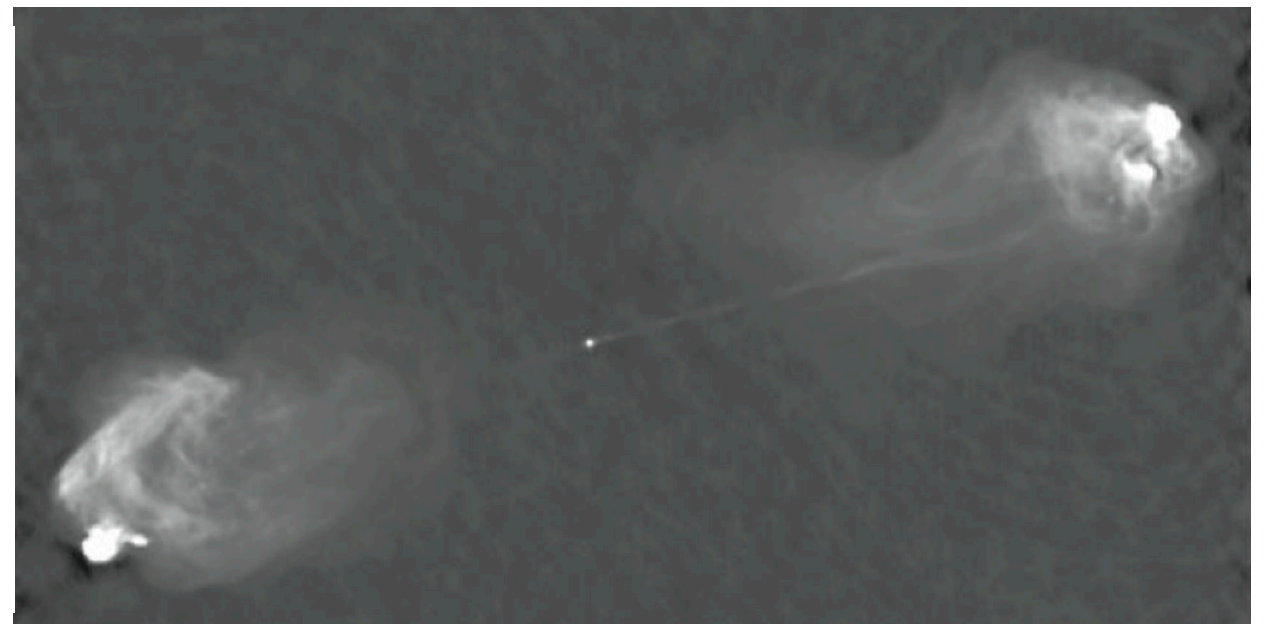
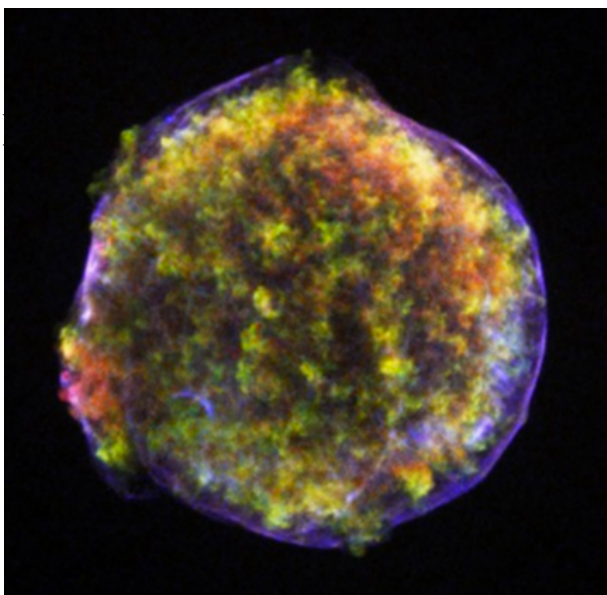
↙ Photons ➔ Pointage du lieu d'interaction

■ 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

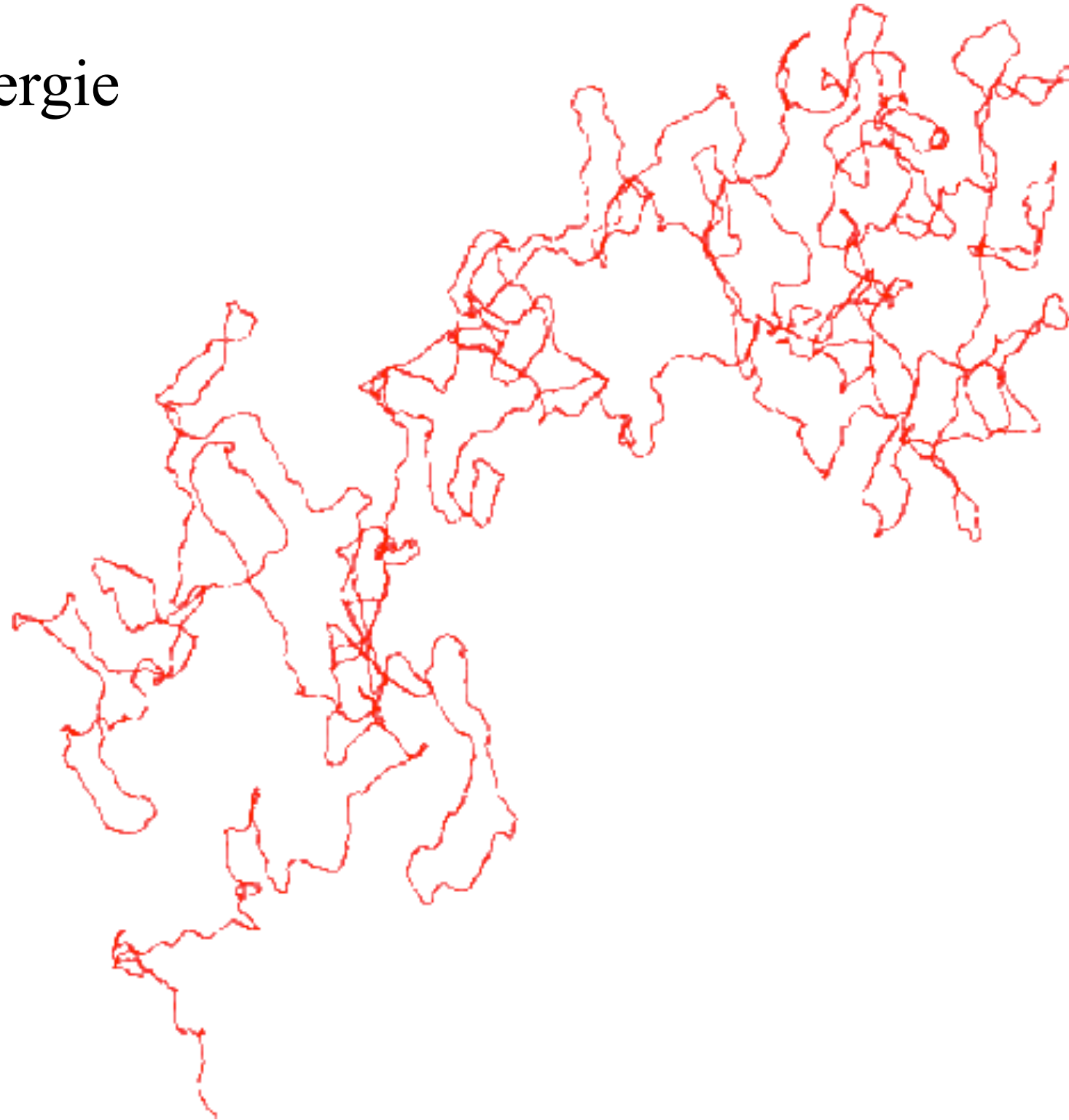
⇒ origine extragalactique !

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

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

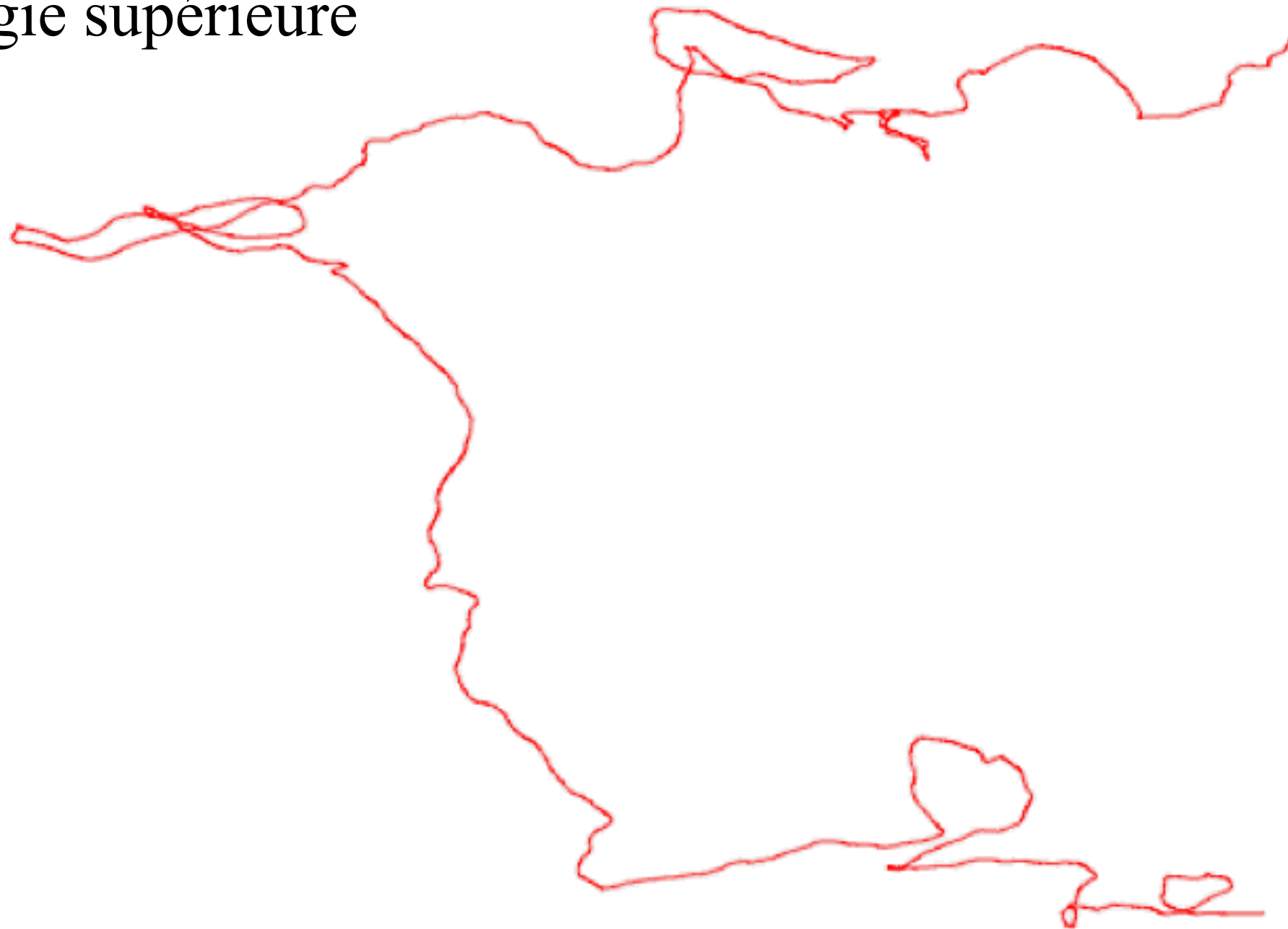
L'espoir aux énergies extrêmes

Basse énergie



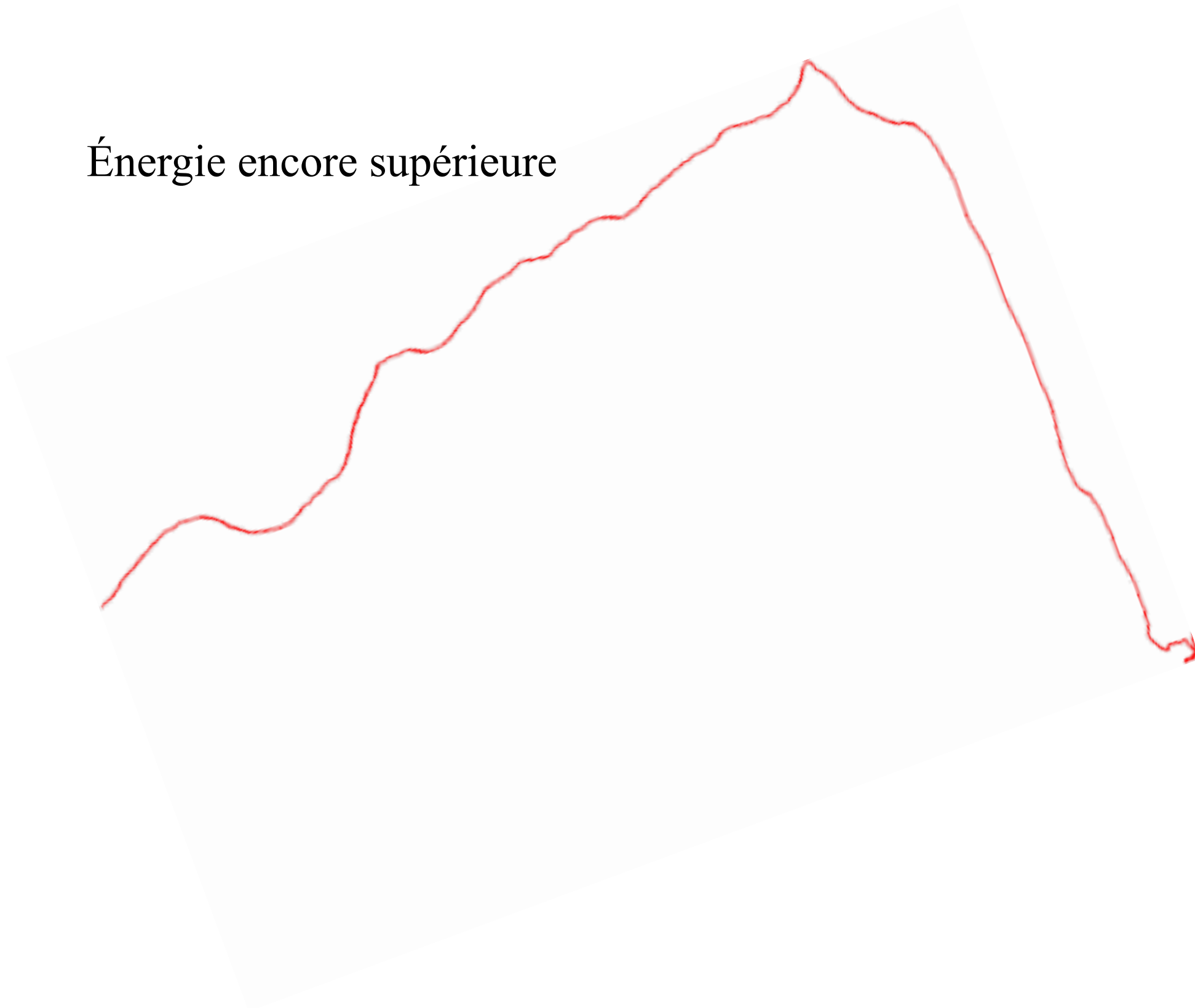
L'espoir aux énergies extrêmes

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 :

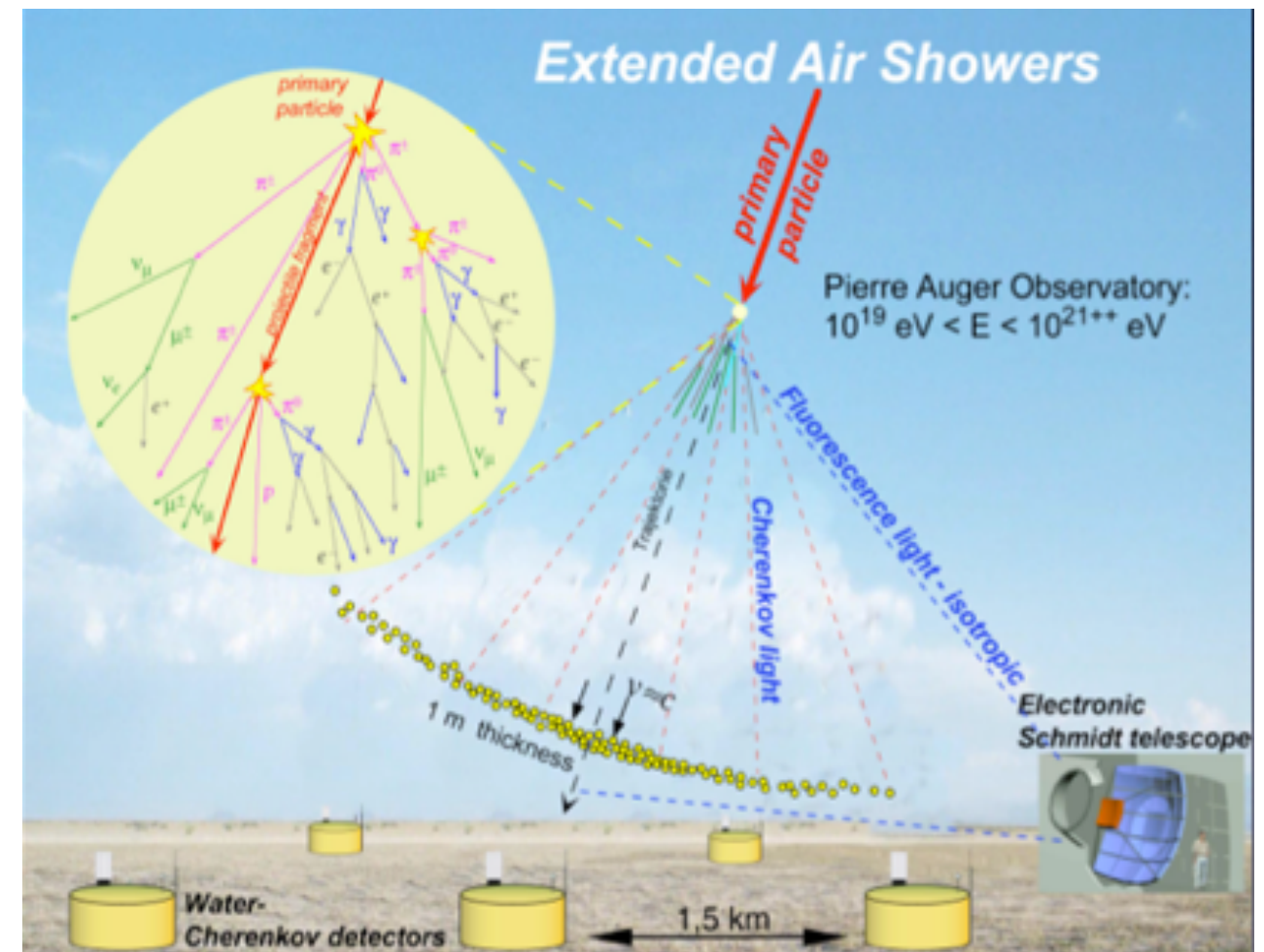
- flux trop bas pour les ballons et satellites

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

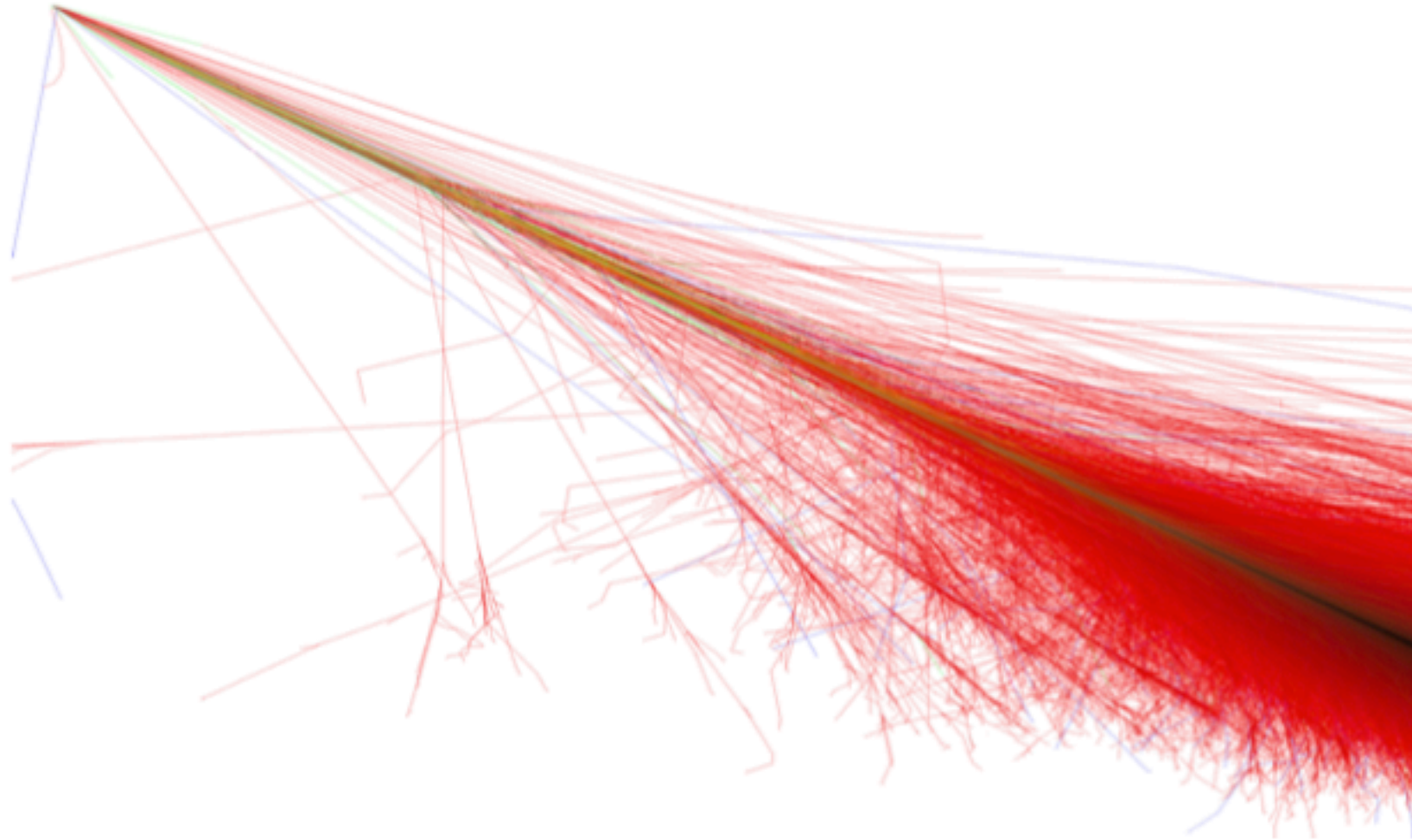
- Deux types de détecteurs au sol :

➔ réseaux de surface

➔ télescopes de fluorescence



Détection des gerbes atmosphériques



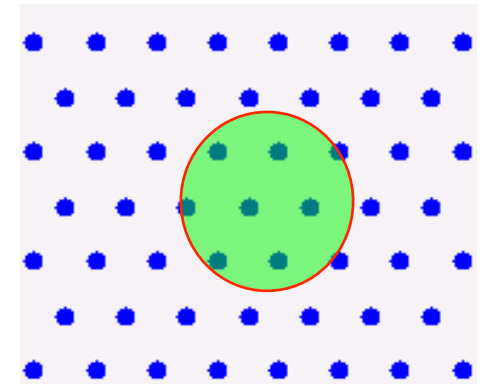
Pour une gerbe individuelle :

- l'énergie du rayon cosmique primaire peut être reconstruite assez précisément
- la direction d'arrivée du rayon cosmique primaire également
- La composition est plus compliquée à reconstruire

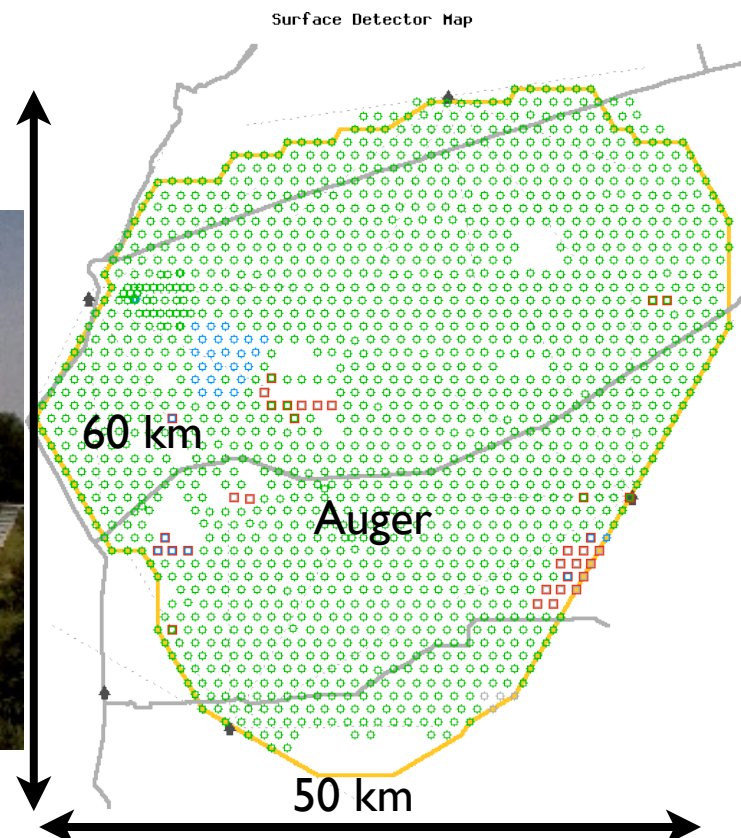
Les réseaux de surface

Echantillonnage des gerbes au niveau du sol

- La surface couverte et l'espacement des détecteurs dépend du domaine d'énergie observé
- Observatoire KASCADE (10^{15} - 10^{17} eV) : surface 40000 m² (0.04 km²) 252 détecteurs, espacement 13m
- Observatoire Pierre Auger (10^{18} - $>10^{20}$ eV) : surface 3000 km², 1600 détecteurs, espacement 1500 m

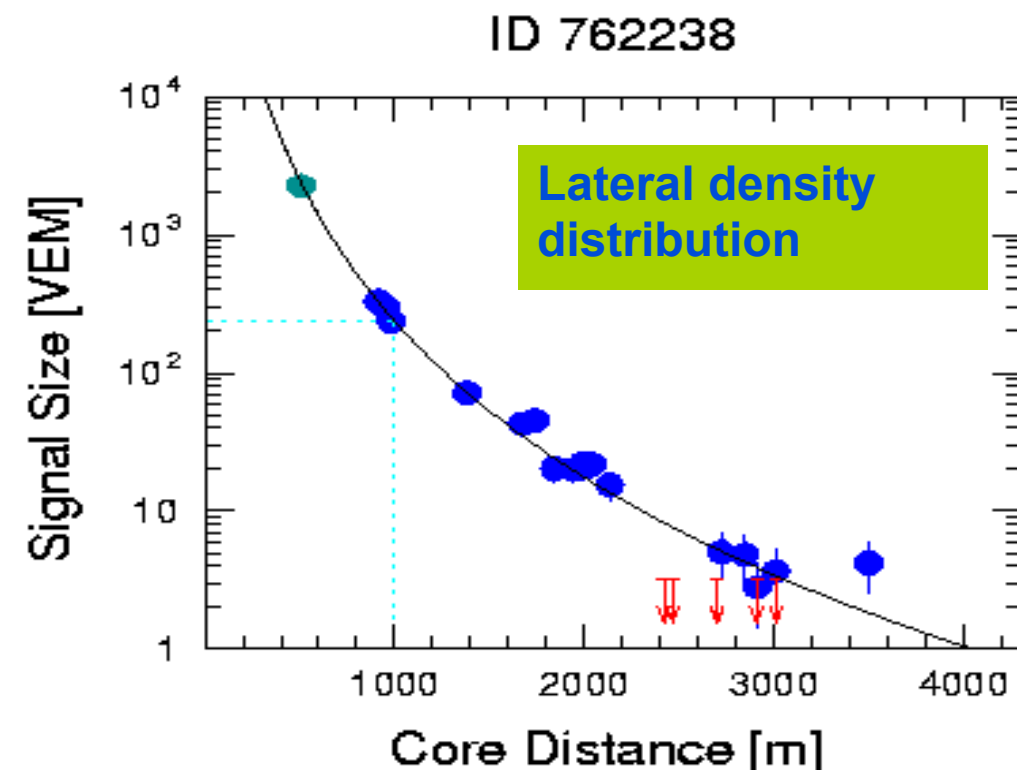
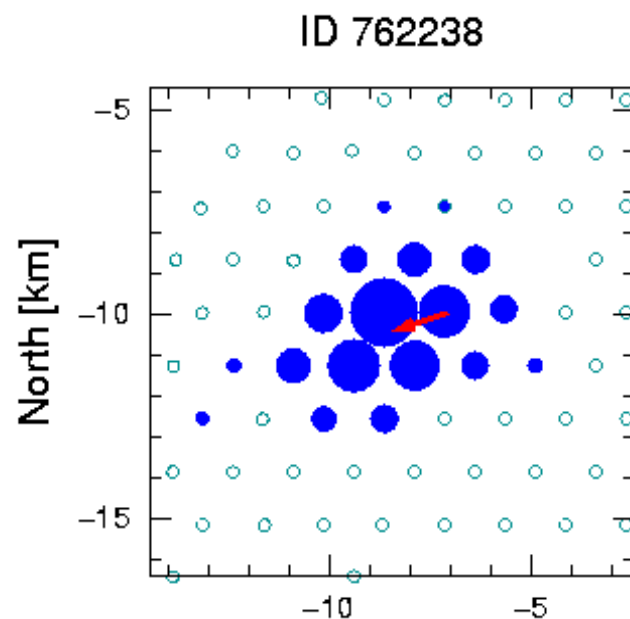


KASCADE



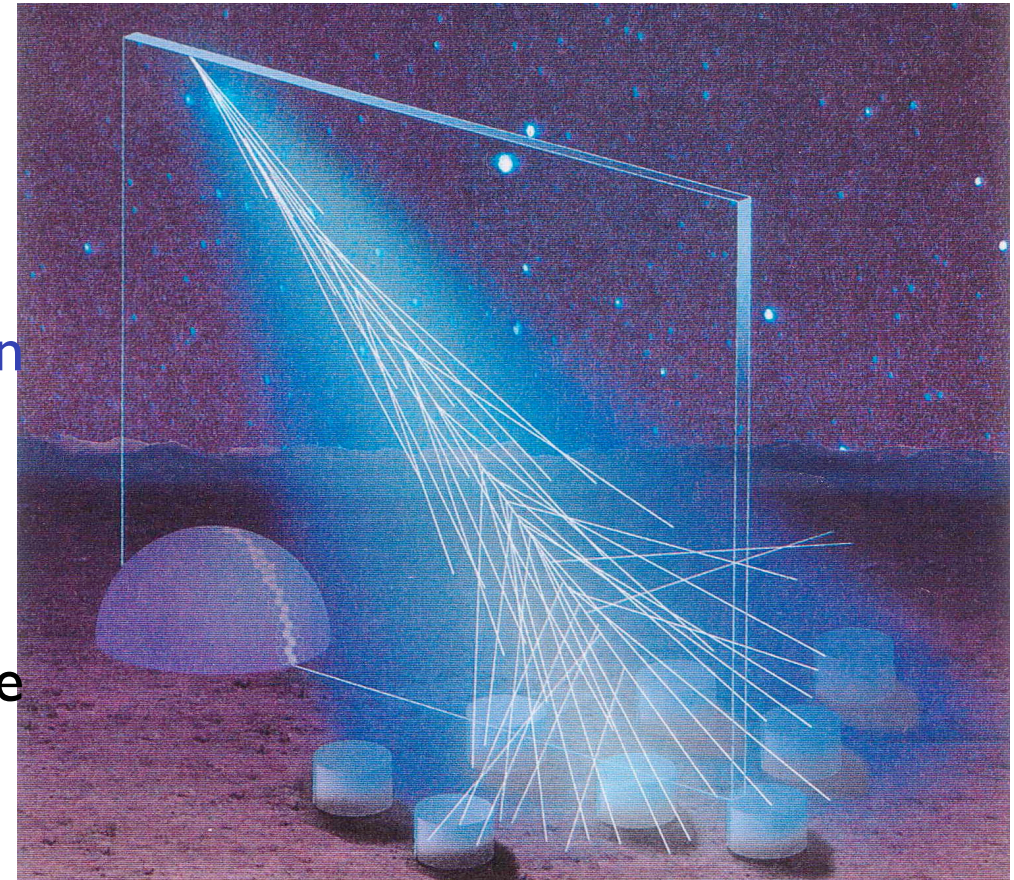
Les réseaux de surface

- 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



Les télescopes de fluorescence

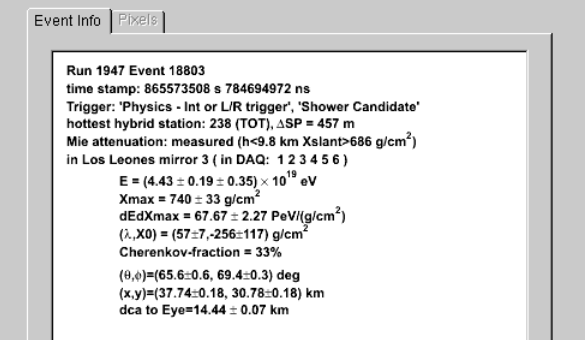
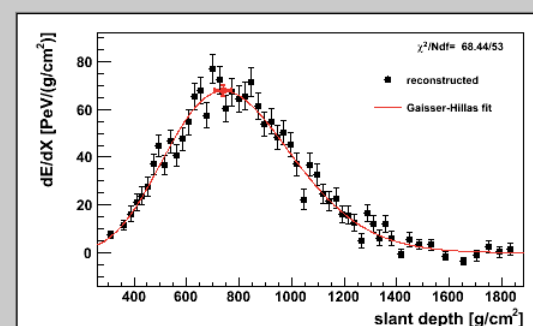
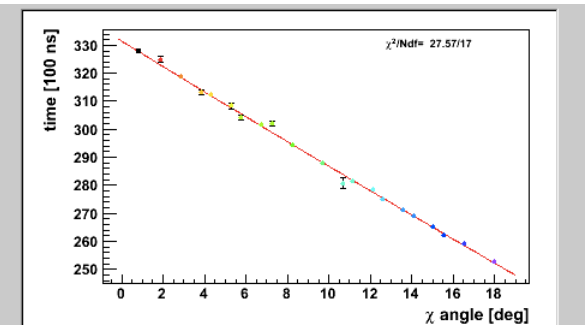
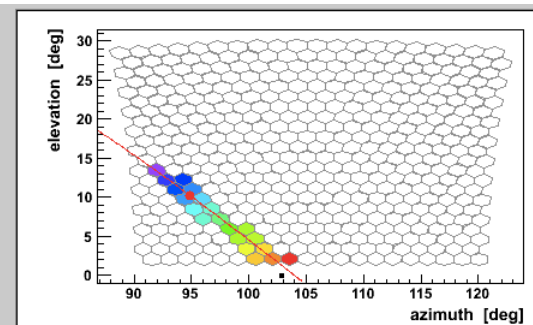
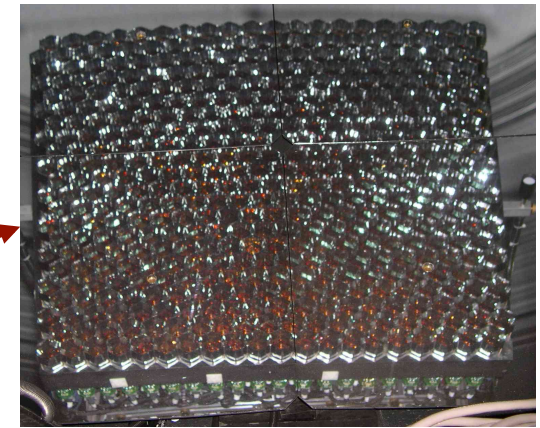
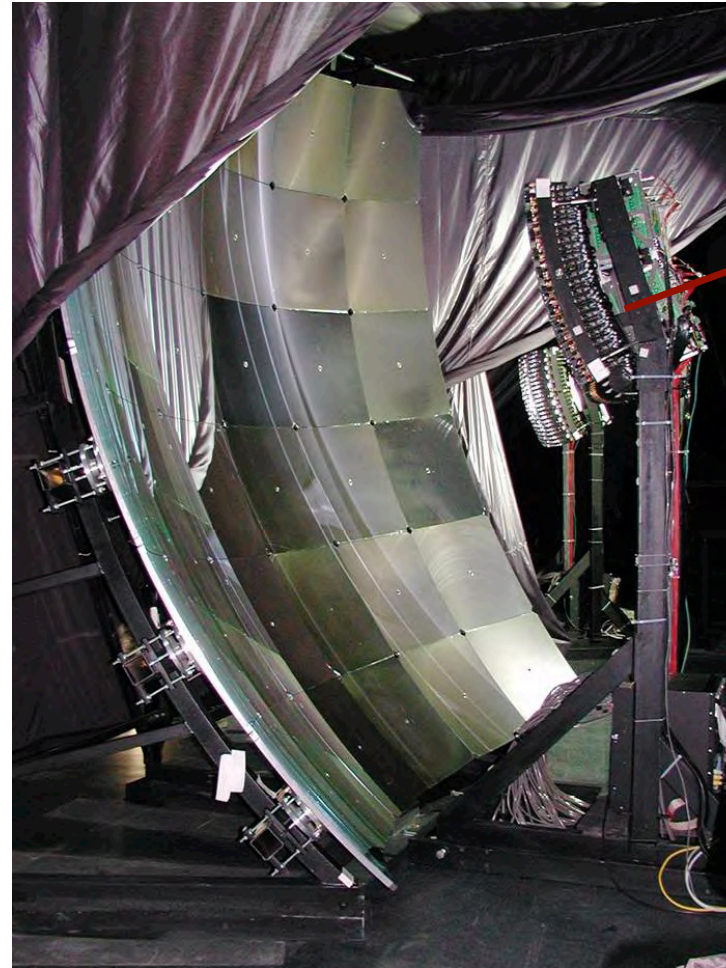
- Détection de la lumière UV émise lors de l'excitation des molécules de N_2 par les e^+e^- de la gerbe
- La lumière de fluorescence est proportionnelle au nombre de particules électromagnétiques dans la gerbe
-> proportionnel à l'énergie du Rayon Cosmique
- mesures possible seulement les nuits sans lune -> ~15% de cycle utile
- Technique utilisée depuis les 80's



Les télescopes de fluorescence

Méthodes de reconstruction :

- La photographie “dans l’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 détection des différents pixels
- L’énergie est estimée en intégrant le profil de la gerbe (revient à compter le nombre de particules impliquées dans le développement de la gerbe)
- La profondeur atmosphérique du maximum de développement de la gerbe permet de déterminer la composition —> les gerbes initiées par des noyaux légers sont en général plus pénétrantes

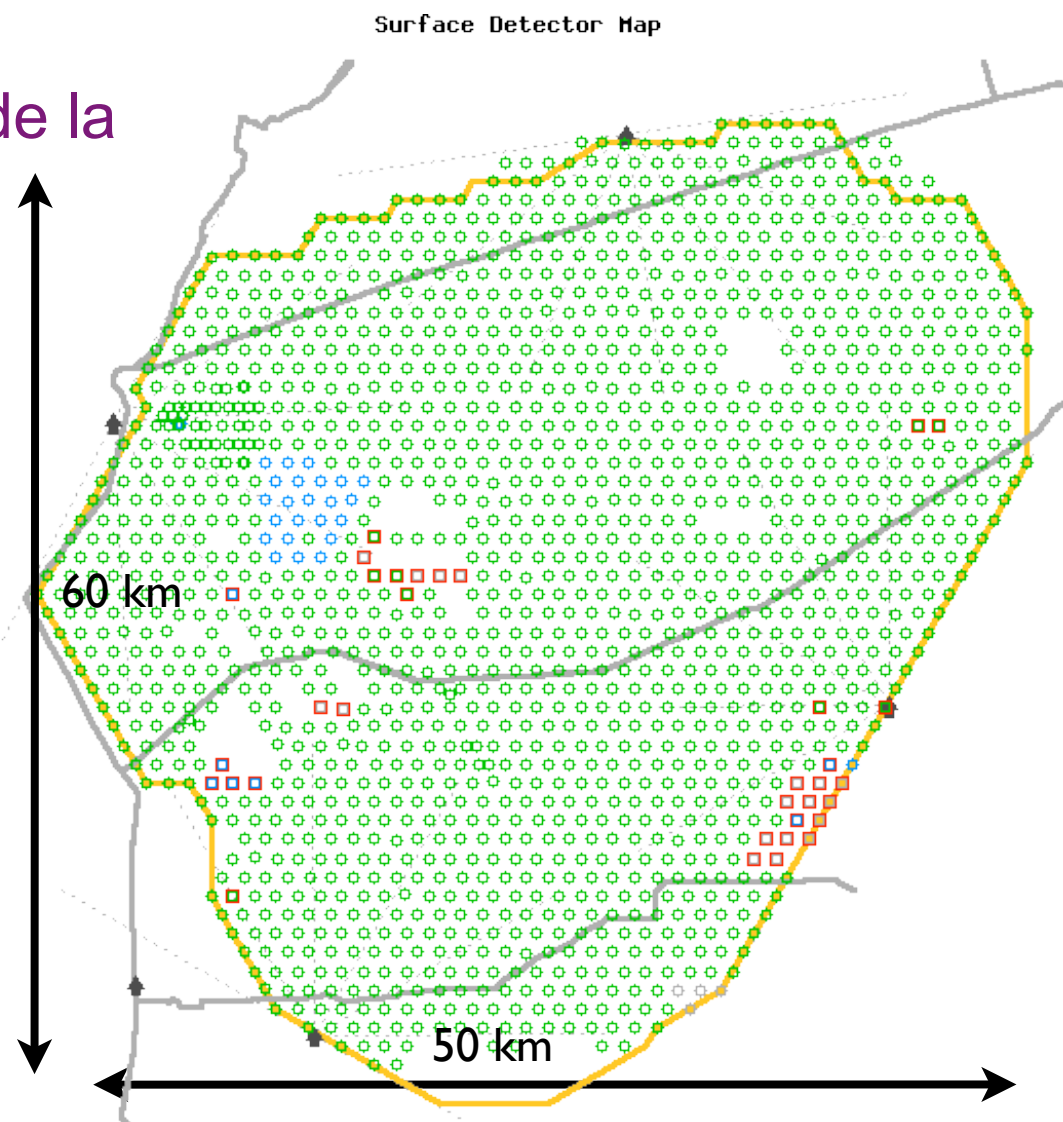
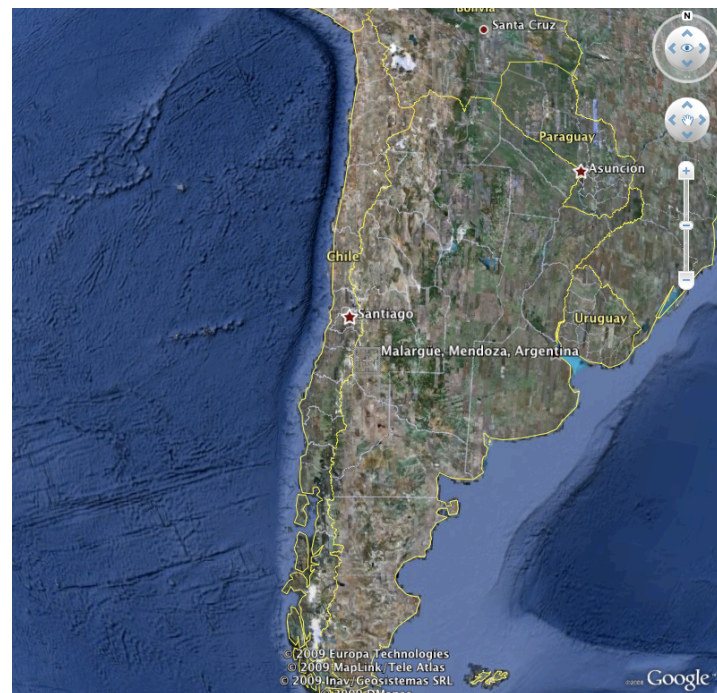


L'observatoire Pierre Auger : le géant hybride

- Situé à Malargue (Mendoza, Argentine, 1400m d'altitude)
- 1600 Cuves à eau à effet Cerenkov, espacés de 1500 m
-> surface du réseau 3000 km²
- 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

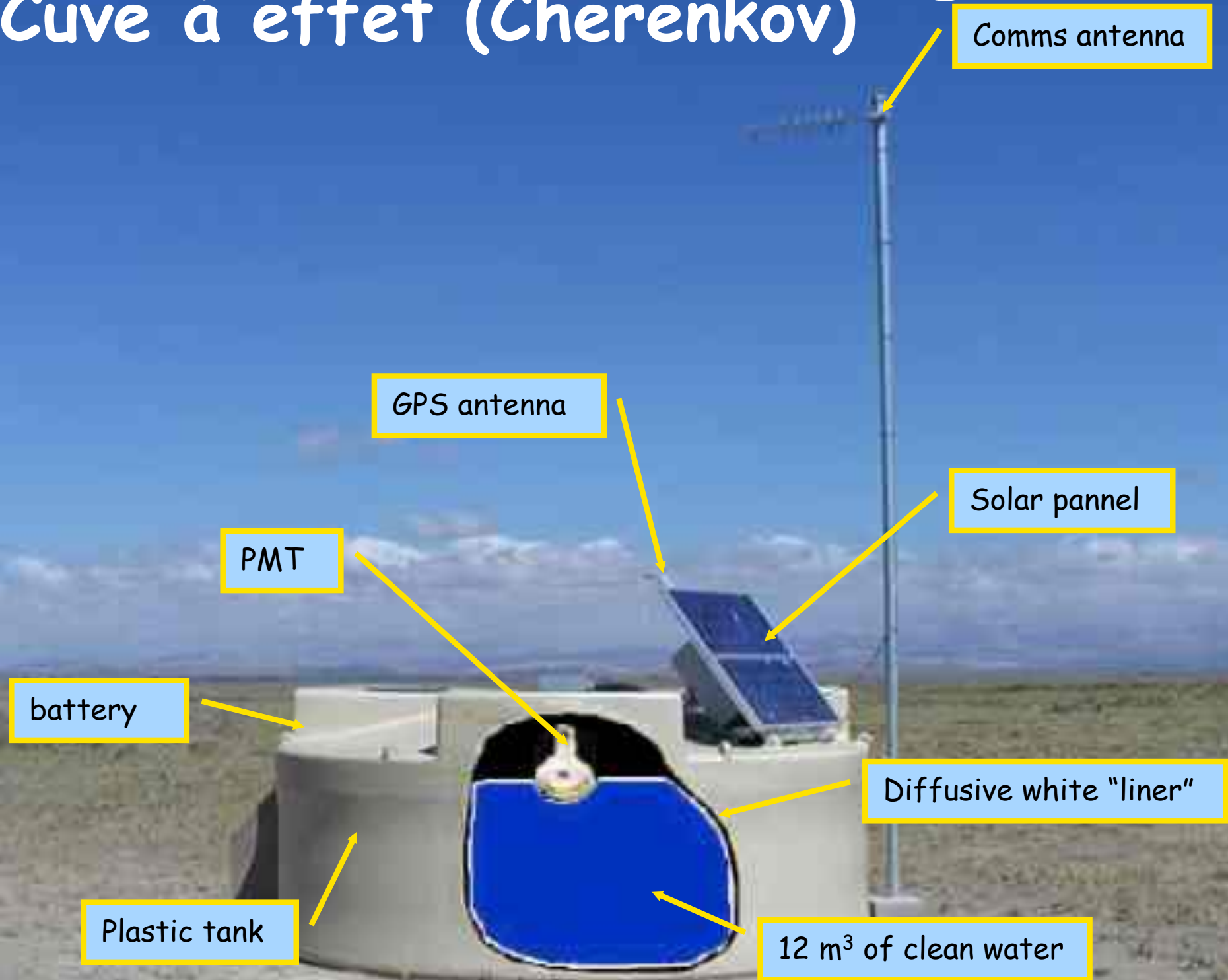


L'observatoire Pierre Auger : le géant hybride

Pierre Auger Observatory
Mendoza, Argentina



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



Une petite partie du réseau de surface

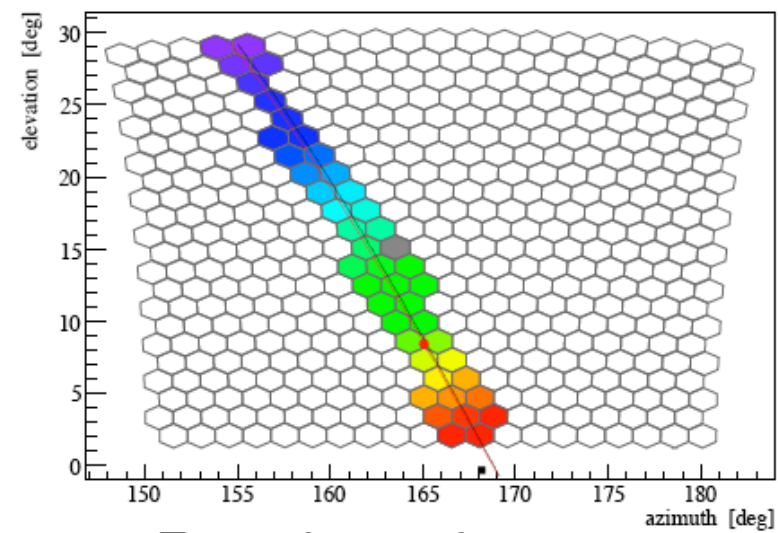
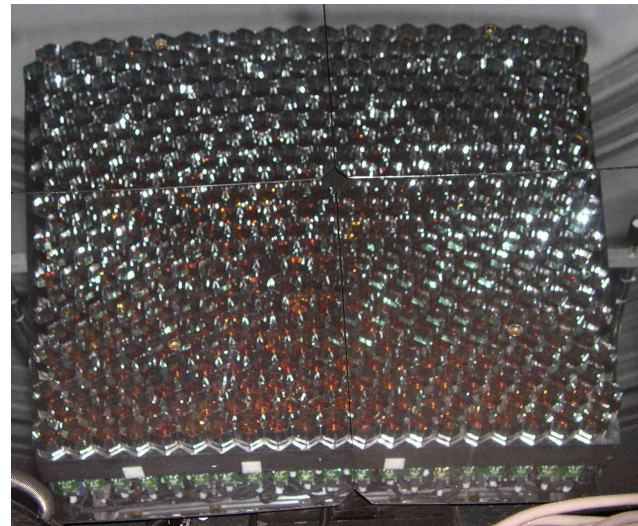
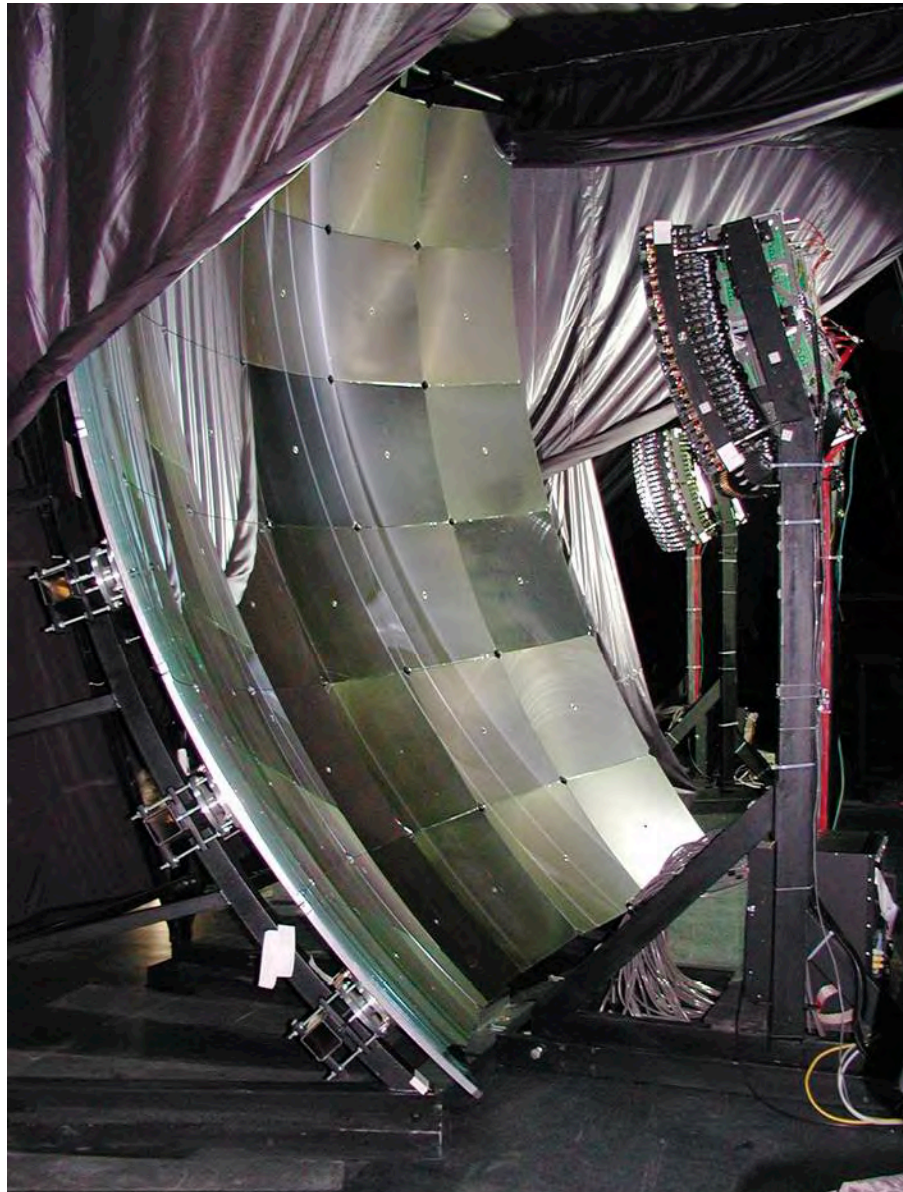
(espacement 1.5 km, surface totale 3000 km²)



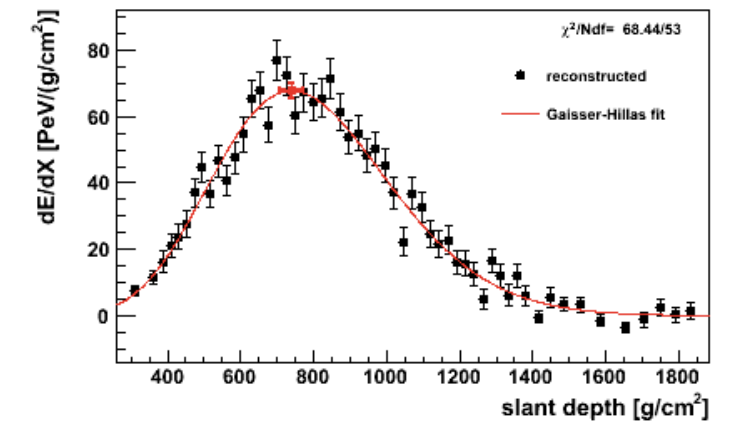
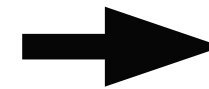
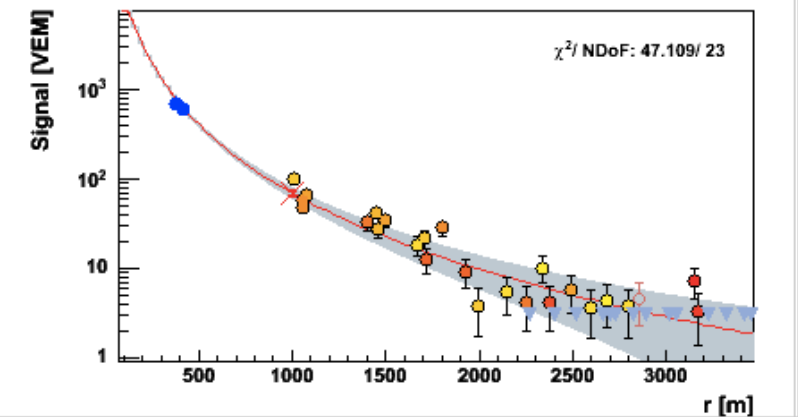
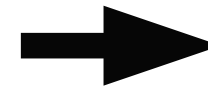
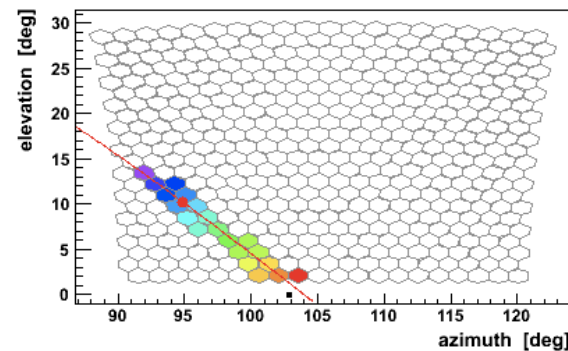
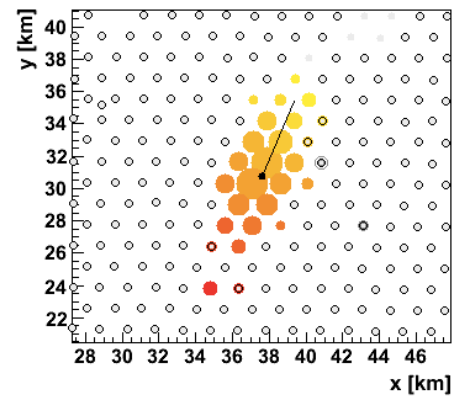
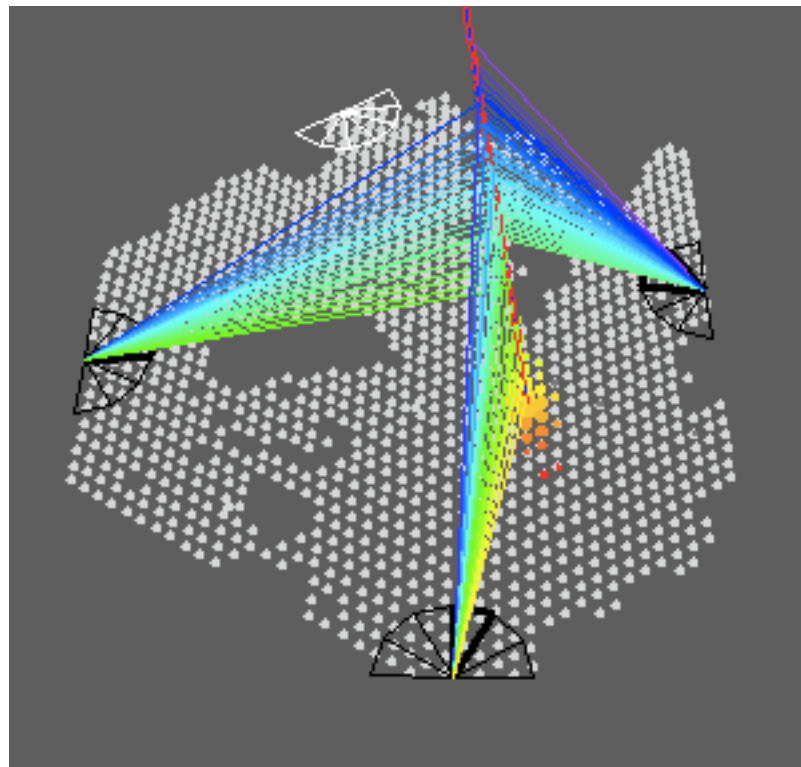
4 sites de 6 télescopes de fluorescence couvrent tout le réseau



Un télescope de fluorescence



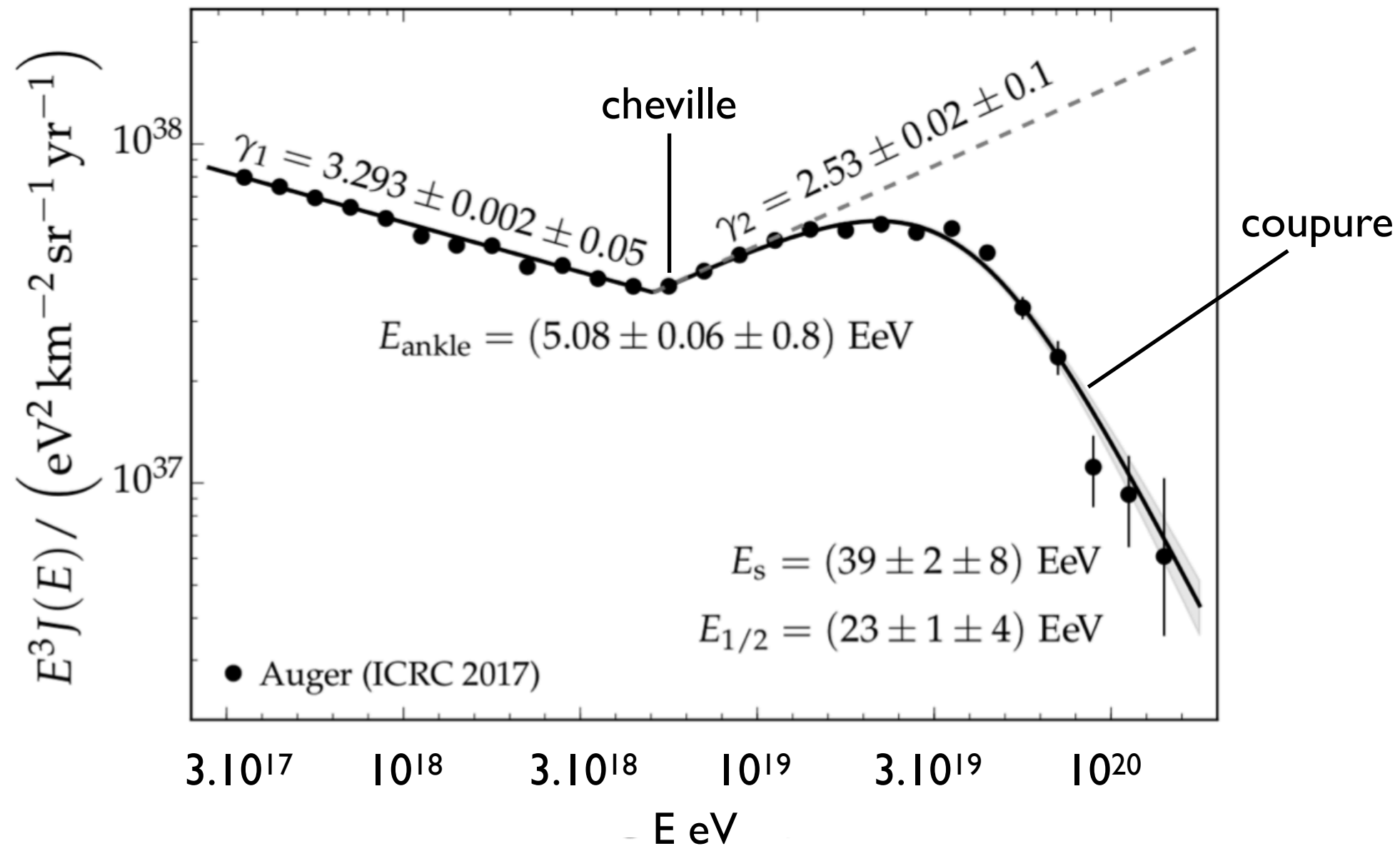
La détection hybride



Parmi les gerbes détectées par l'observatoire Pierre Auger, une fraction ($\sim 10\%$) est vue par les deux types de détecteurs

—> lot de données extrêmement précieux notamment pour déterminer la composition

Principaux résultats d'Auger : le spectre et la composition



Spectre de l'observatoire Pierre Auger ($f(E) \times E^3$ en fonction de E) après 13 ans de prise de données
Observation de la cheville et d'une coupure au delà de $3-4 \cdot 10^{19}$ eV

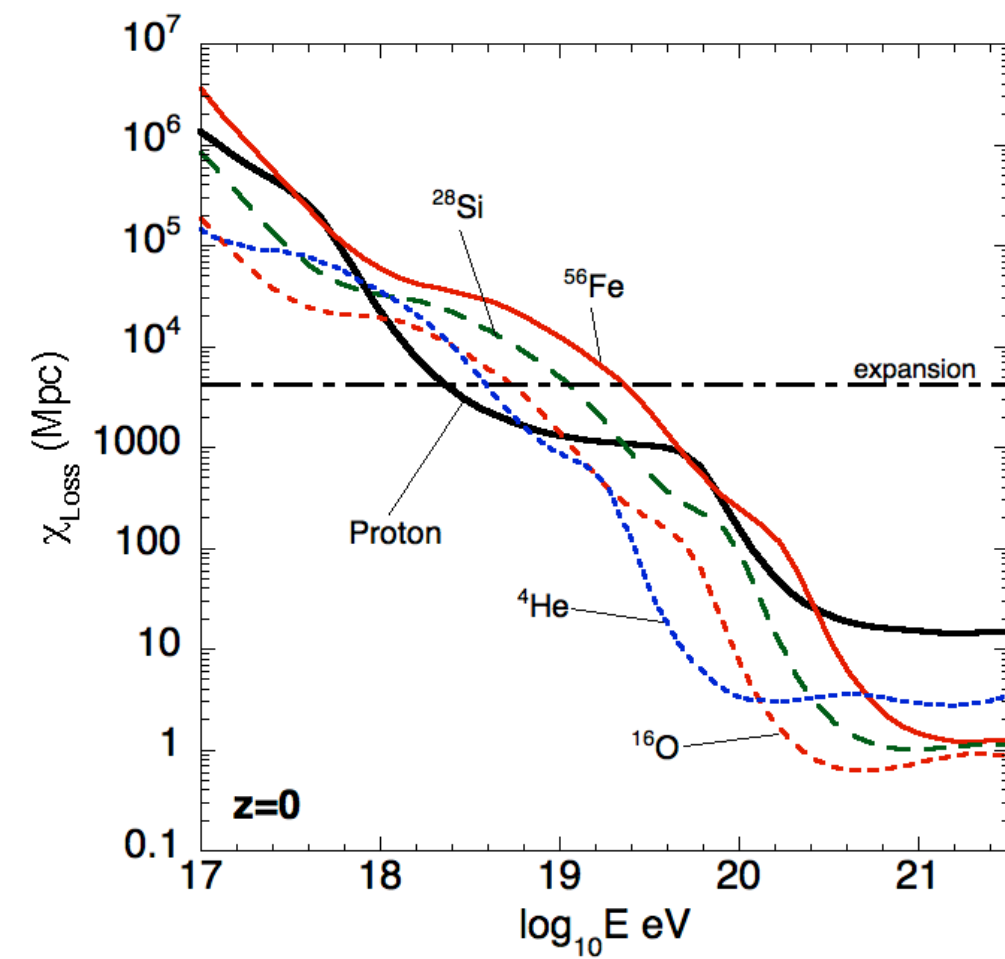
Composition : on passe d'une composition légère vers l'énergie de la cheville à une composition plus lourdes aux plus hautes énergies

—> mauvaise nouvelle, perspectives moins favorable pour que les rayons cosmiques les plus énergétiques pointent vers leurs sources

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)

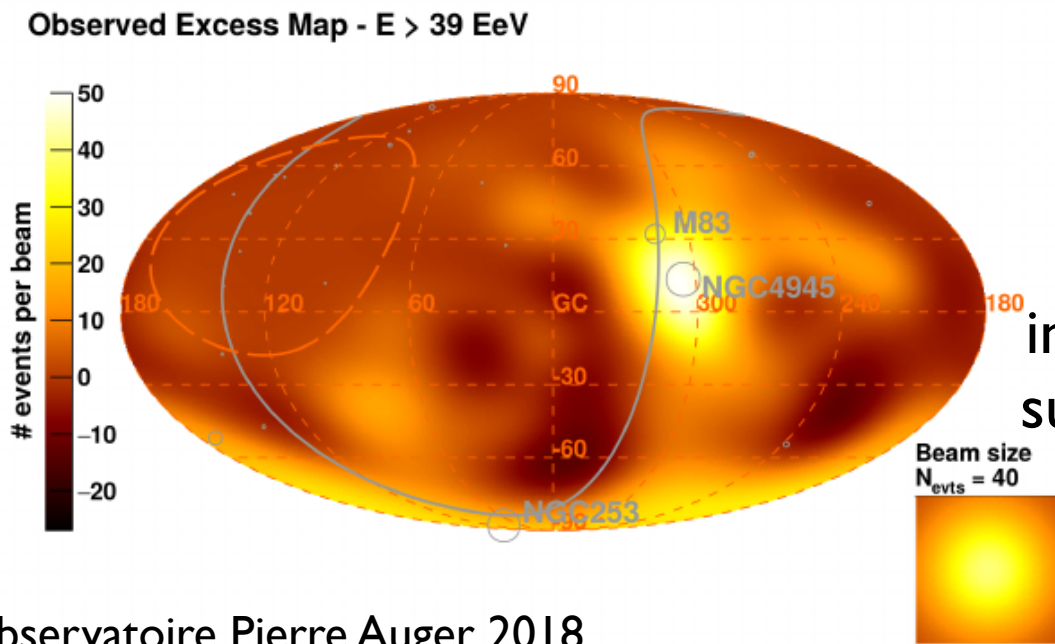
- les protons perdent de l'énergie
 - les noyaux sont photodésintégrés
- ➔ au dessus des seuils d'interaction, l'horizon des particules est brutalement réduit
- ➔ seules des sources relativement proches peuvent contribuer aux plus hautes énergies
- ➔ une coupure est attendue dans le spectre (quelle que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



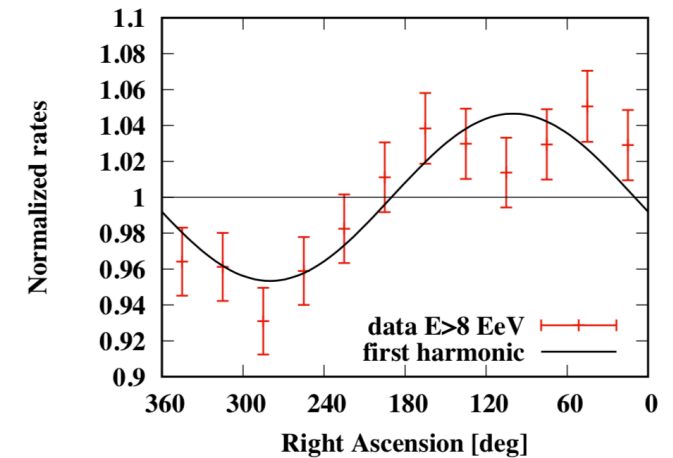
Coupure GZK

Directions d'arrivées

Toujours pas d'indication très claire de la nature des sources des rayons cosmiques d'ultra-haute énergie mais tout de même quelques éléments montrant que le brouillard commence à se dissiper aux plus hautes énergies



Observatoire Pierre Auger 2018



indication d'une accumulation de rayons cosmiques d'énergie supérieure à $4 \cdot 10^{19} \text{ eV}$ dans la direction de galaxies proches à fort taux de formation d'étoiles mais difficile de tirer des conclusion définitives

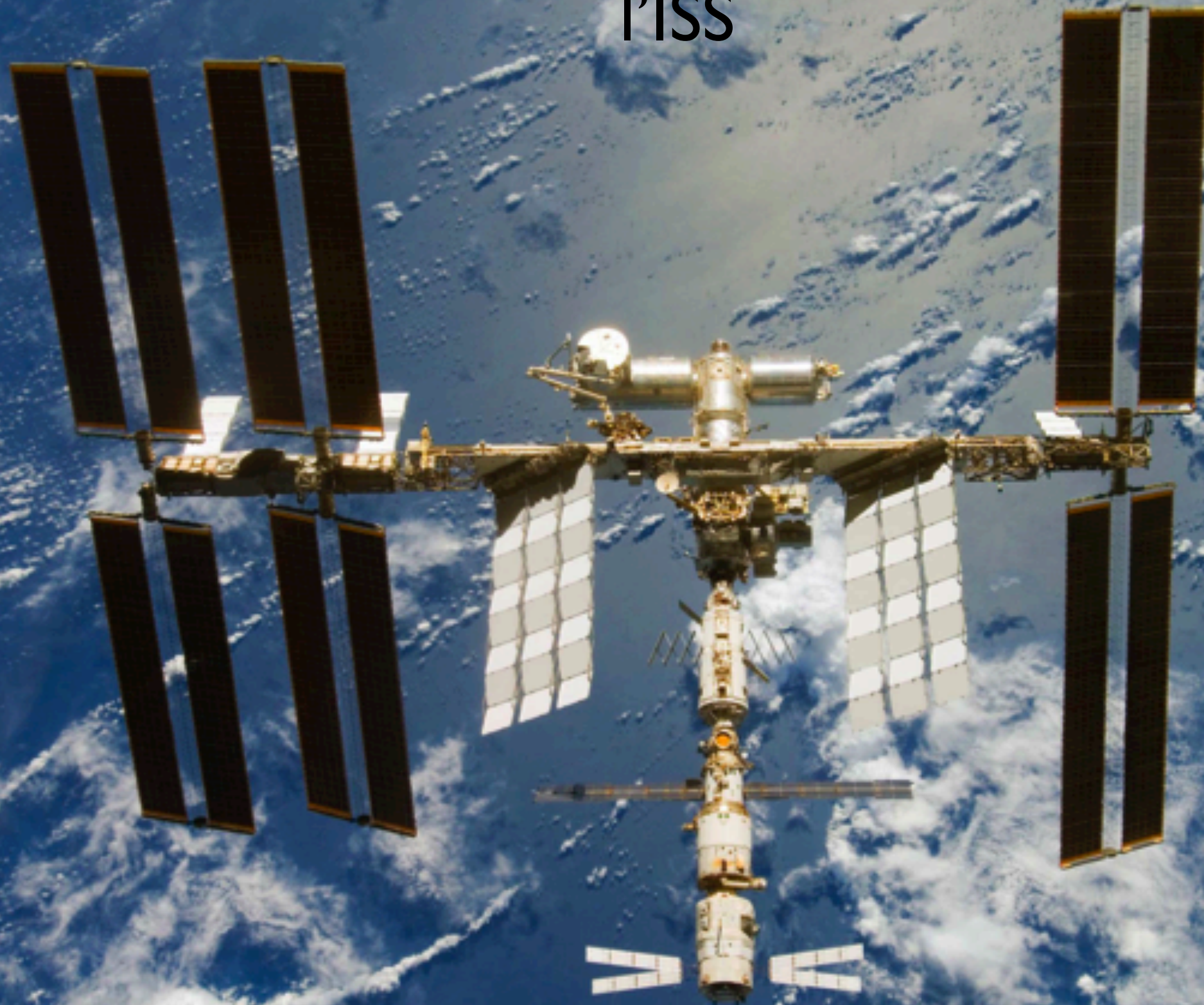
➡ Le signal n'est pas clair sans doute à cause du fait que les deflexions dans les champs magnétiques restent grandes même aux plus hautes énergies (conséquence d'une composition dominée par des noyaux tels que l'oxygène ou le fer aux plus hautes énergies)

➡ Malgré sa taille, la statistique d'Auger reste trop faible aux énergies extrêmes (environ 300 rayons cosmiques au delà de $5 \cdot 10^{19} \text{ eV}$)

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 de façon certaine
- ➡ Les détecteurs de l'observatoire Pierre Auger sont en cours d'amélioration pour augmenter notamment leur sensibilité à la composition
- ➡ Des non-uniformités (anisotropies) sont observées dans les directions d'arrivées aux plus hautes énergies
- ➡ 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
- ➡ Solution évidente, construire un observatoire au sol plus grand
- ➡ Une solution possible détecter les gerbes depuis l'espace

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



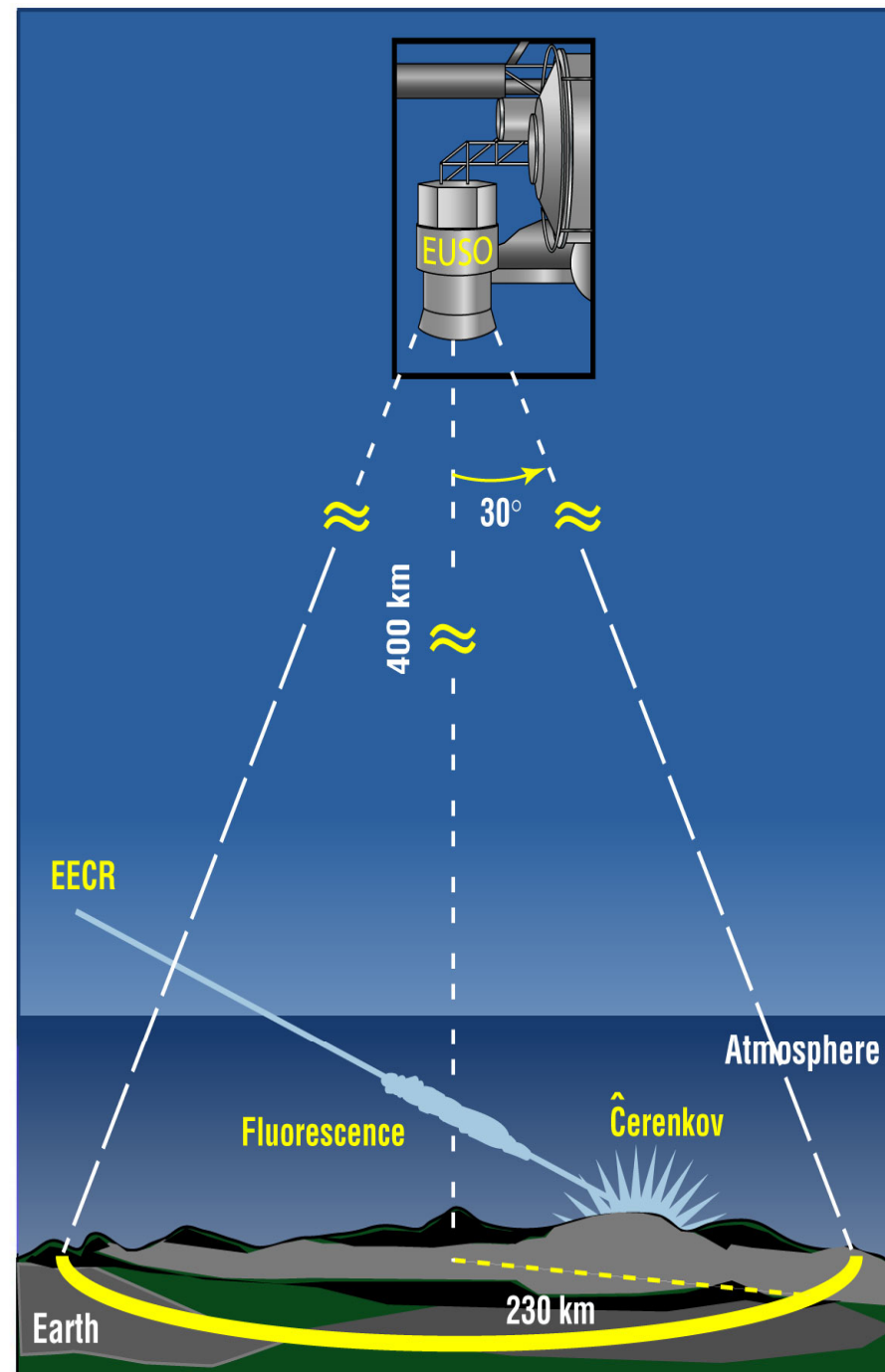
(Extreme Universe Space Observatory)

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 !

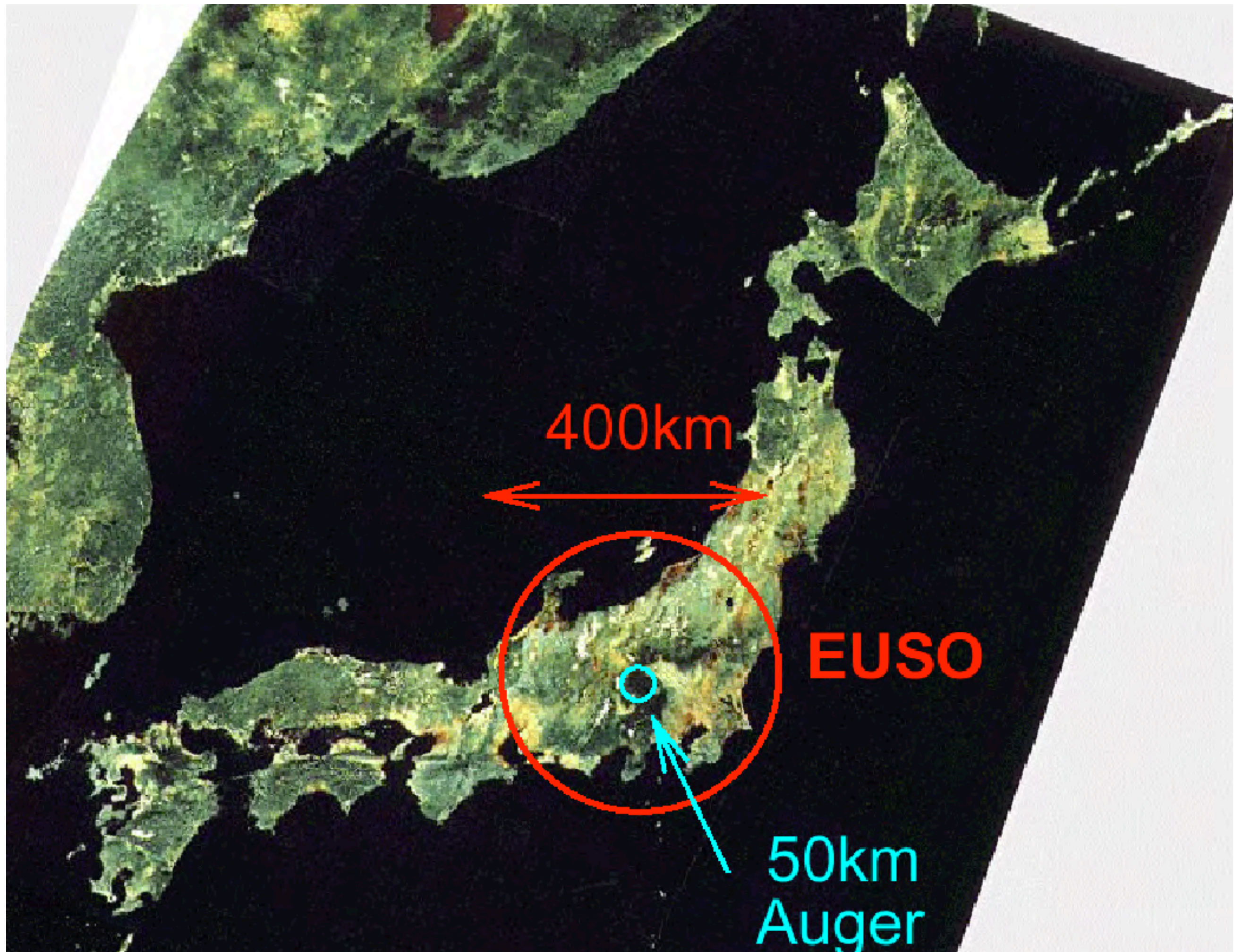
$190\,000 \text{ km}^2$



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

~14% de
cycle utile

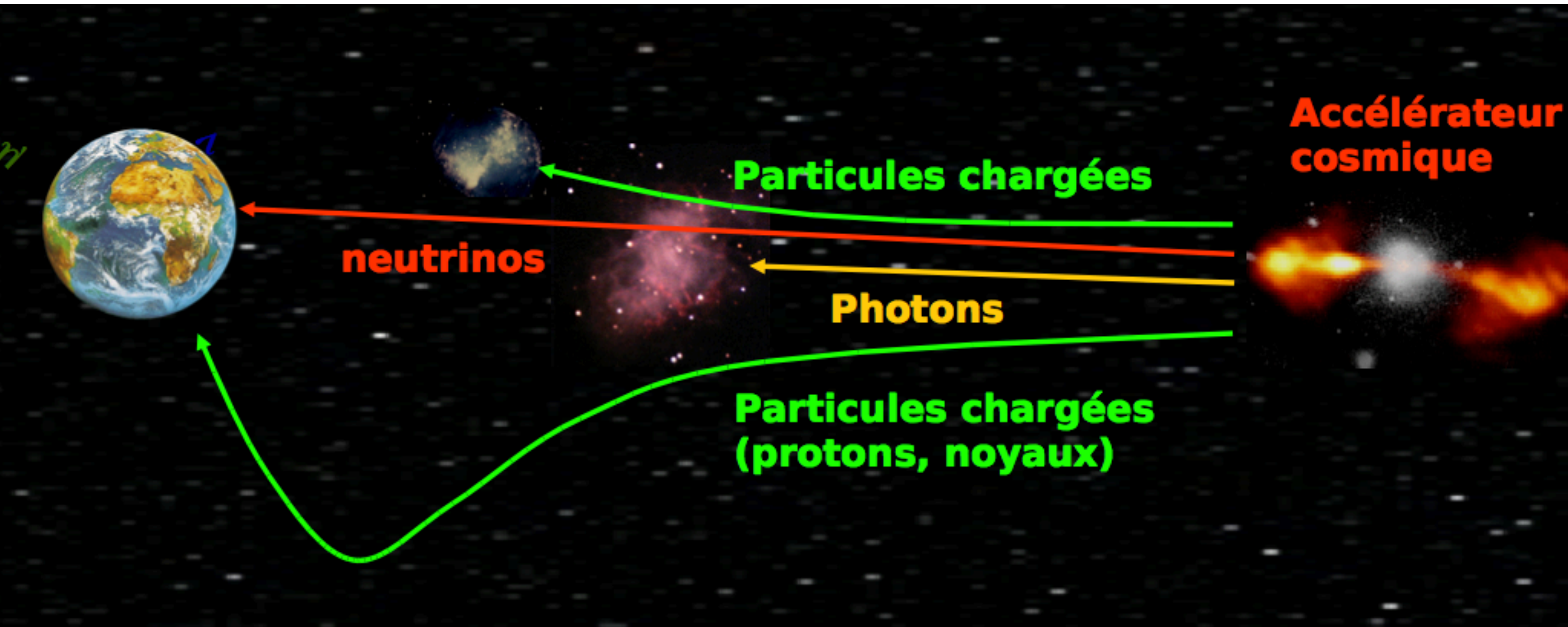
En 5 ans de mission il devrait récolter plusieurs fois la statistique actuelle d'Auger au delà de $5 \cdot 10^{19}$ eV



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

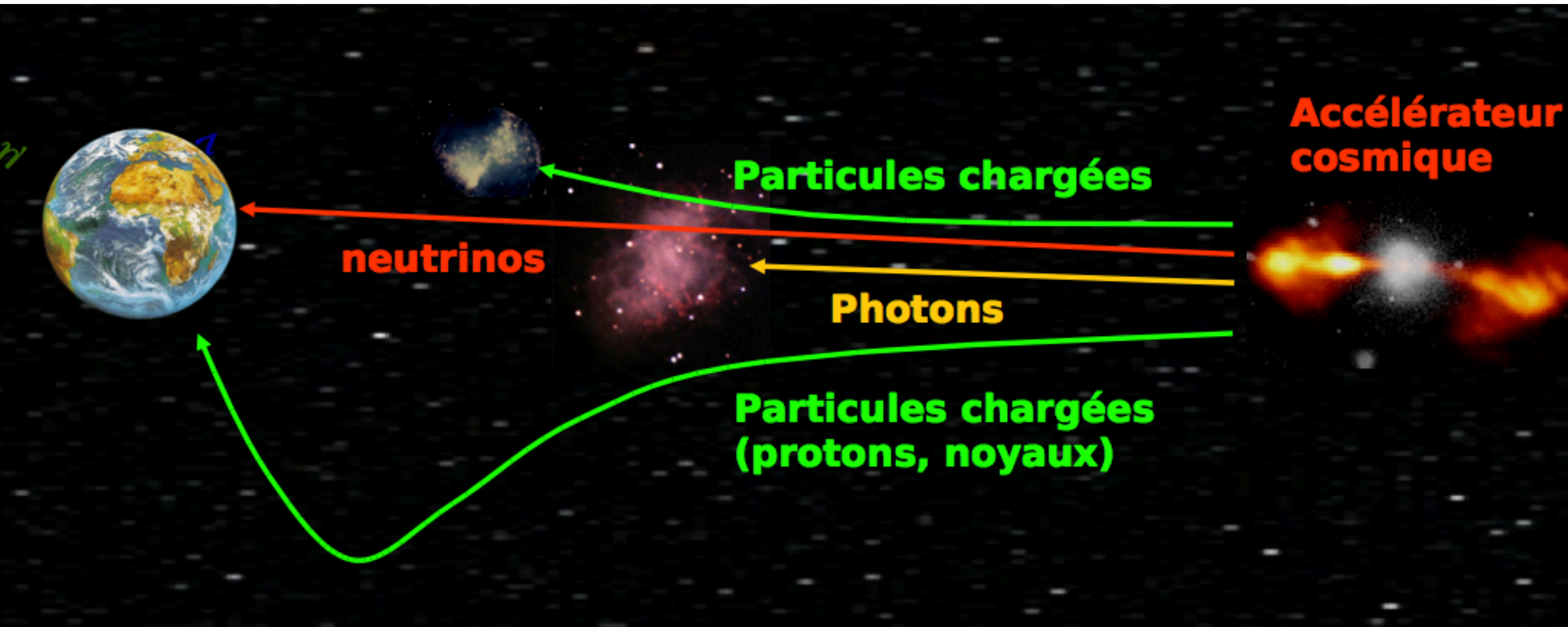
- Les propriétés du neutrino font de lui un messenger très prometteur pour l'astrophysique des hautes énergies
 - Particule insaisissable elle est capable de révéler le coeur d'une étoile totalement opaque à la lumière ==> capable de traverser l'univers sans interagir ==> capable de s'extirper de presque 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 notamment dans la source pendant l'accélération 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, en général quelques %)
- 

Illustration des vertus du neutrino



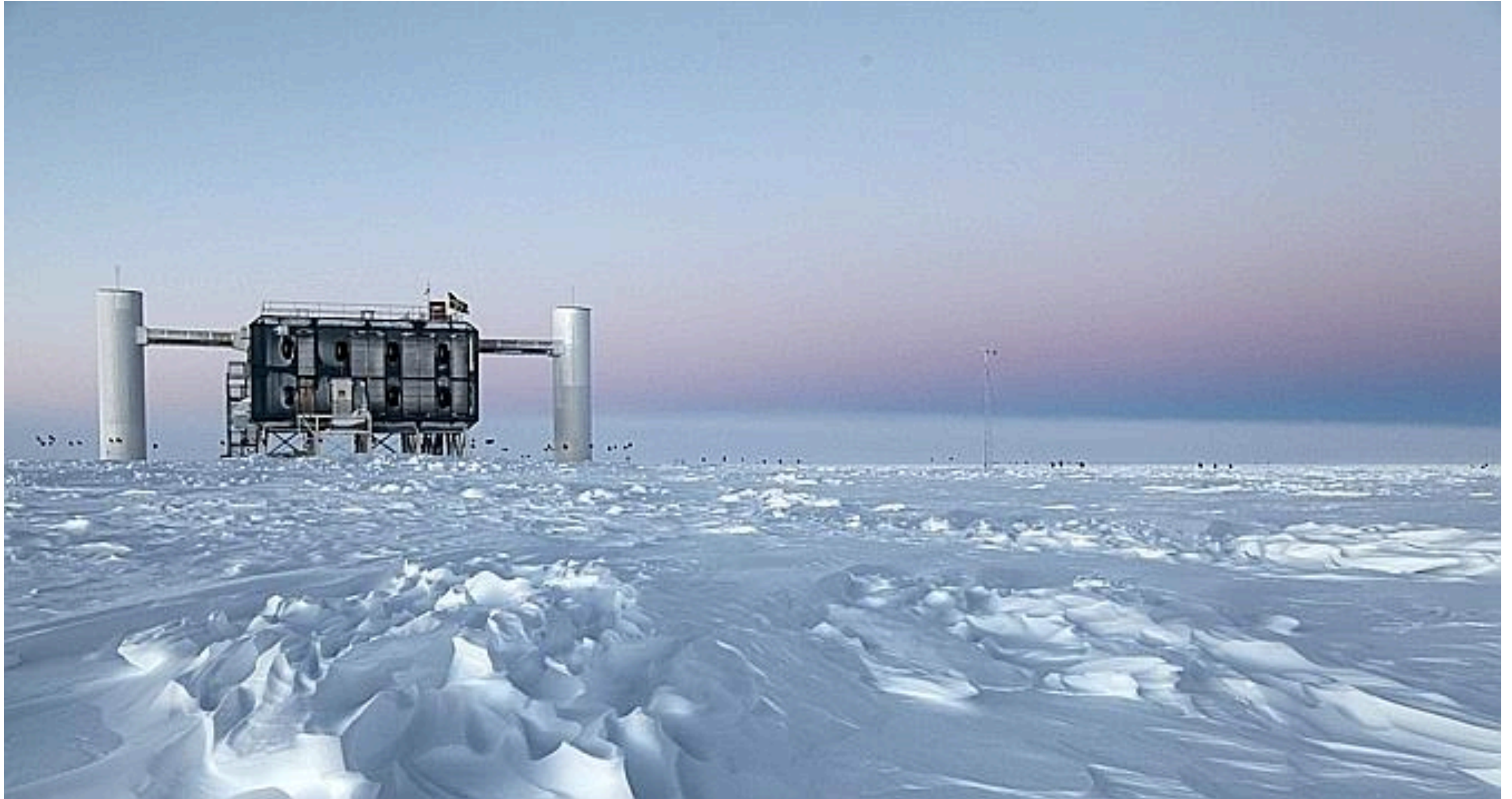
- Les rayons cosmiques sont chargés ils perdent en partie la mémoire de leur direction initiale étant déviés champs magnétiques ==> difficile d'identifier les sources
- Les rayons cosmiques les plus énergétiques vers 10^{20} eV perdent de leur énergie très rapidement ils ne peuvent provenir que de l'Univers 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

Illustration des vertus du neutrino

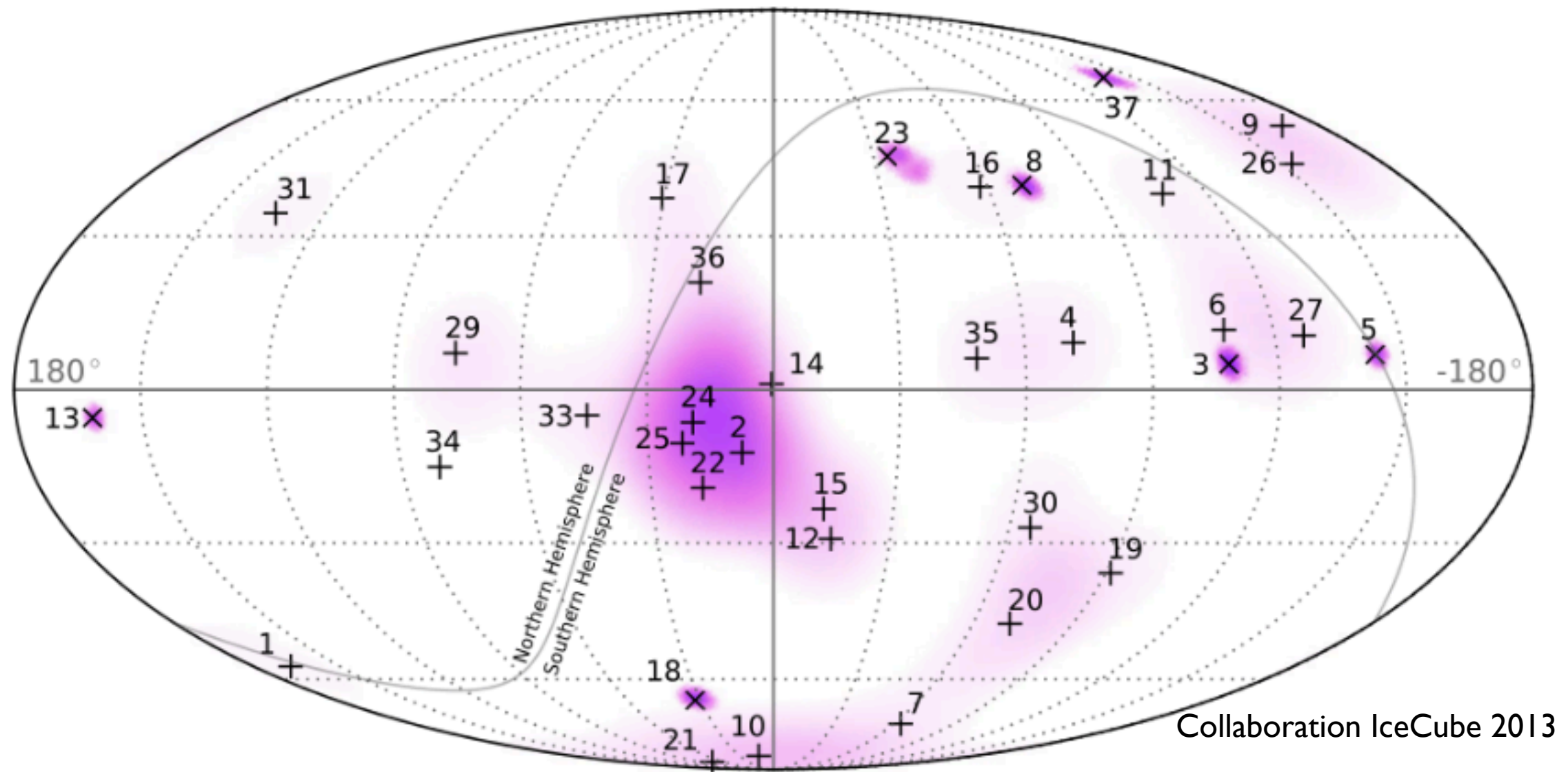


- Les rayons cosmiques sont chargés ils perdent en partie la mémoire de leur direction initiale étant déviés champs magnétiques ==> difficile d'identifier les sources
- Les rayons cosmiques les plus énergétiques vers 10^{20} eV perdent de leur énergie très rapidement ils ne peuvent provenir que de l'Univers 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



Observation des premiers neutrinos astrophysiques



Une nouvelle fenêtre s'ouvre sur l'univers

depuis l'observation des premiers neutrinos astrophysiques par IceCube, une centaine a été détectée entre 10^{14} et 10^{15} eV (produits par des rayons cosmiques entre $<10^{17}$ eV)
—> nombre trop faible pour avoir une idée de la nature des sources

Première observation de neutrinos d'une source extragalactique?

Première détection (sept 2017) d'une source astrophysique avec les neutrinos : le blazar TXS 0506+056

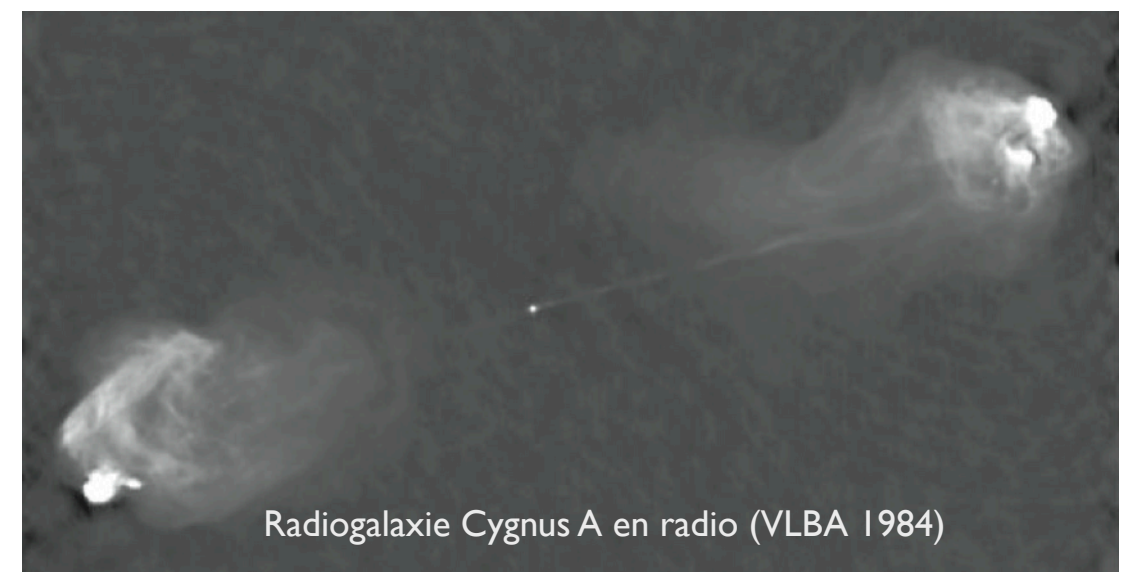
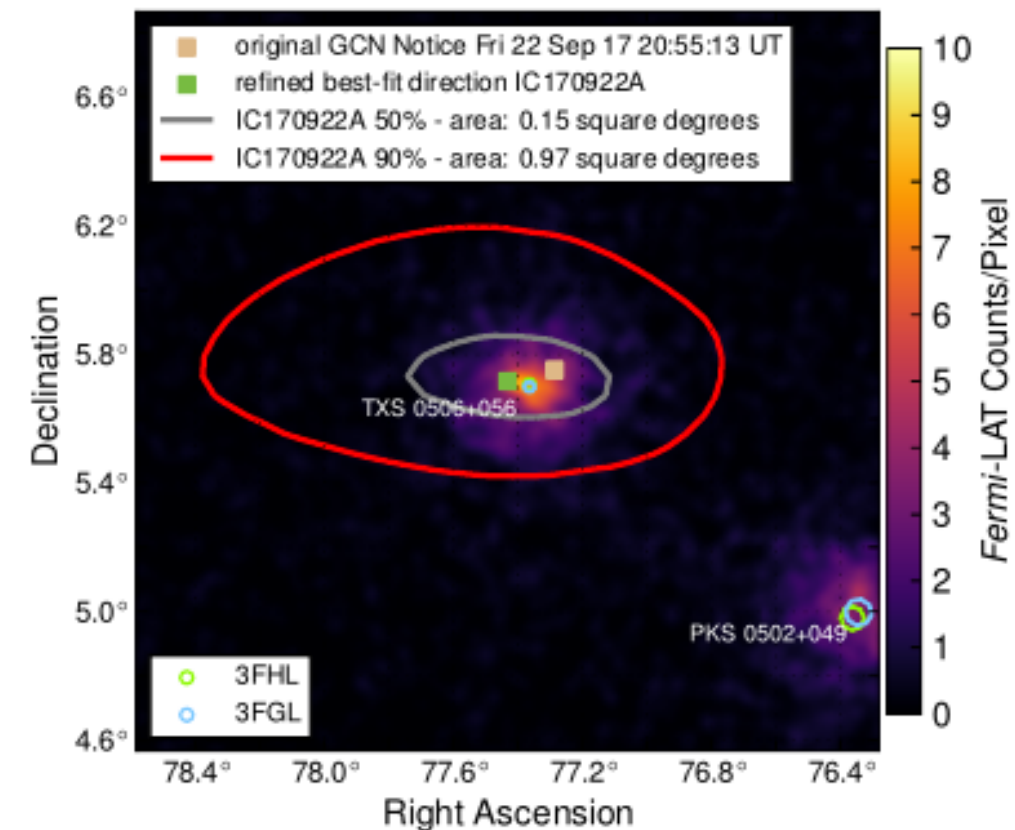
IceCube a détecté un neutrino de très haute énergie ($\sim 300\text{TeV}$) en coïncidence spatio-temporelle avec une source extragalactique vue en photon gamma par le télescope **Fermi**

—> produit secondaire d'un rayon cosmique d'énergie $> 10^{16}$ eV

L'émission proviendrait d'une galaxie à noyau actif, a été observée dans tout le spectre EM de la radio jusqu'aux gamma.

Si confirmé, premier exemple de la connexion multi-messager rayons cosmiques/ neutrinos / photons et première identification de source extragalactique de rayons cosmiques très énergétiques

NB : les blazars ne sont pas forcément pour autant les sources dominantes du rayonnement cosmique ultra-énergétique



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

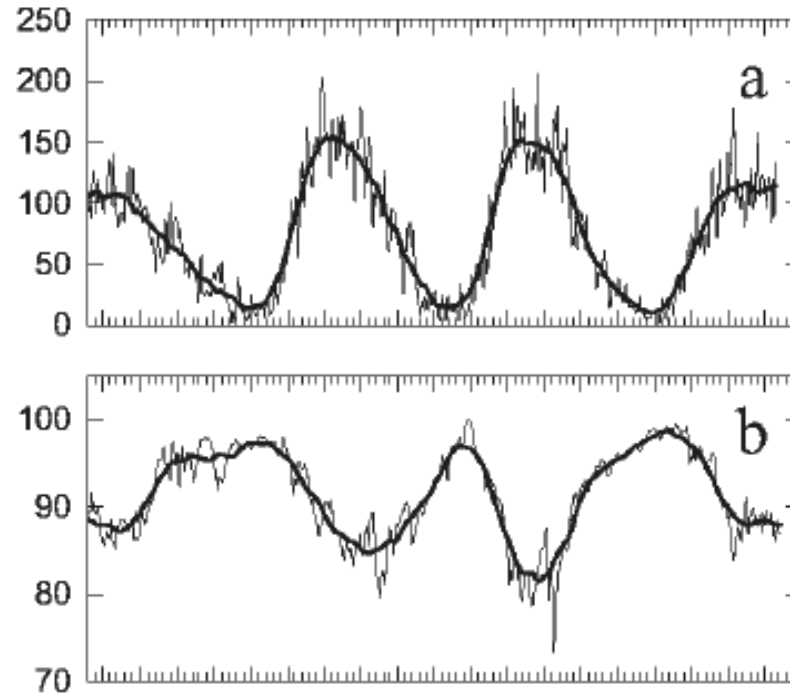
In addition, there are molecules with 10 atoms, (CH₃)₂CO, HOCH₂CH₂OH, CH₃CH₂CHO and CH₃(C≡C)₂CN, 11 atoms, H(C≡C)₄CN and CH₃C₆N, 12 atoms C₆H₆ and 13 atoms, H(C≡C)₅CN.

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

Rayons cosmiques et climat

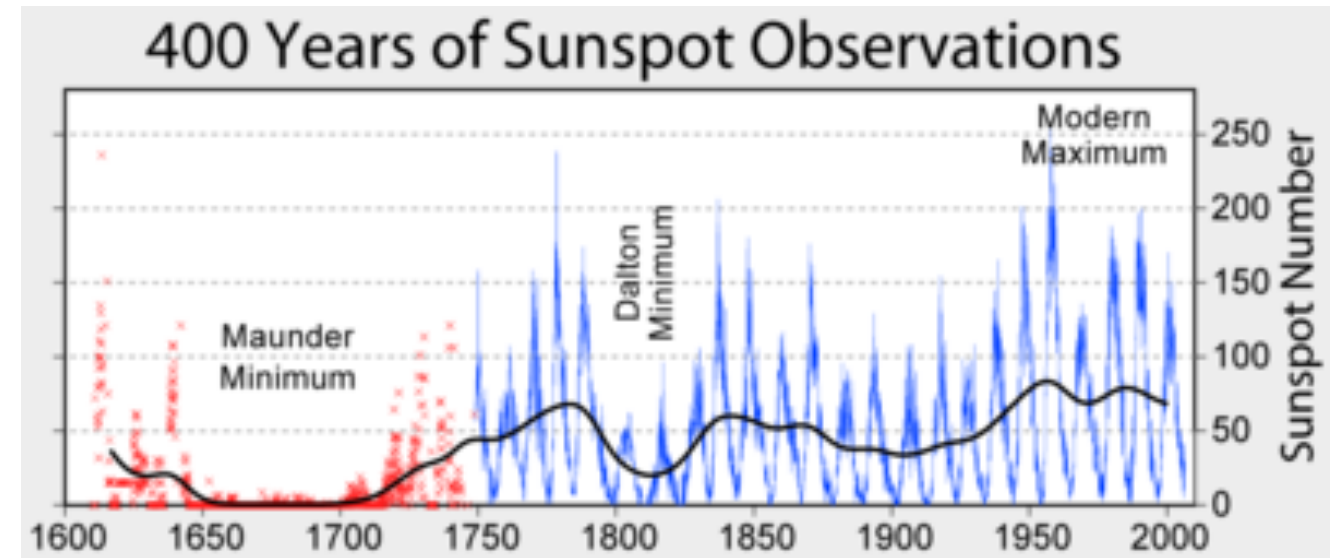
- Variation du flux de rayons cosmiques en coïncidence avec les cycles solaires

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...

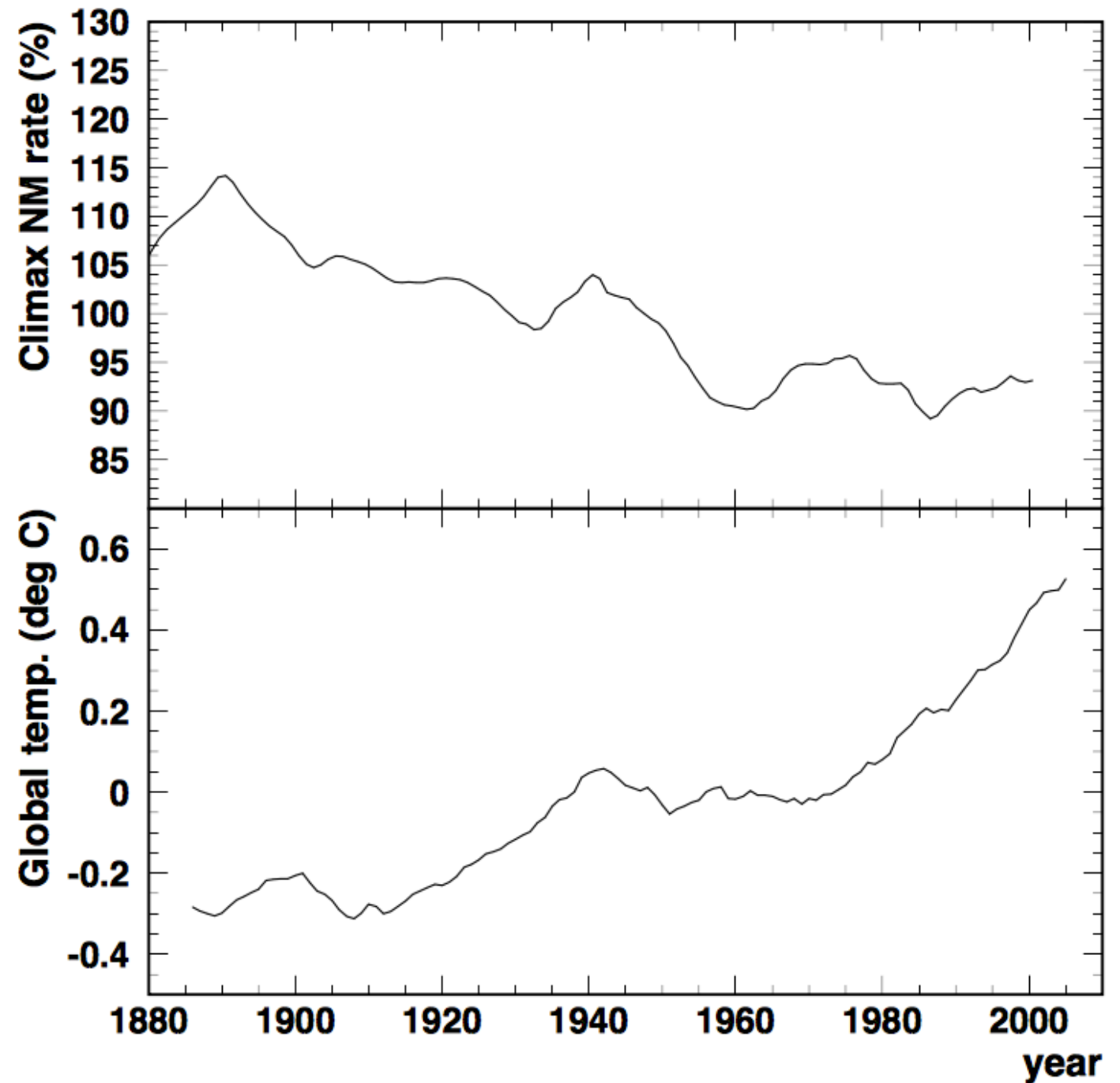
Mécanisme invoqué par certains, faible activité solaire => fort rayonnement cosmique => forte couverture nuageuse

rôle joué par les rayons cosmiques sur la formation des masse nuageuse ? reste pour l'instant spéculatif et controversé —> expérience CLOUD au CERN

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)

