

The background of the slide is a composite image. The upper portion shows the Earth's horizon from space, with a blue atmosphere and white clouds. The lower portion is a dark field of space with a starburst of light rays emanating from a point, creating a sense of depth and cosmic energy. The text is overlaid on this background.

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

Denis Allard - Chargé de recherche CNRS

Université Ouverte de Paris-Diderot, cycle "*histoire du cosmos*"

16/03/2021

(Bâtiment Condorcet, Bureau 516A - 01 57 27 61 43)

allard@apc.in2p3.fr

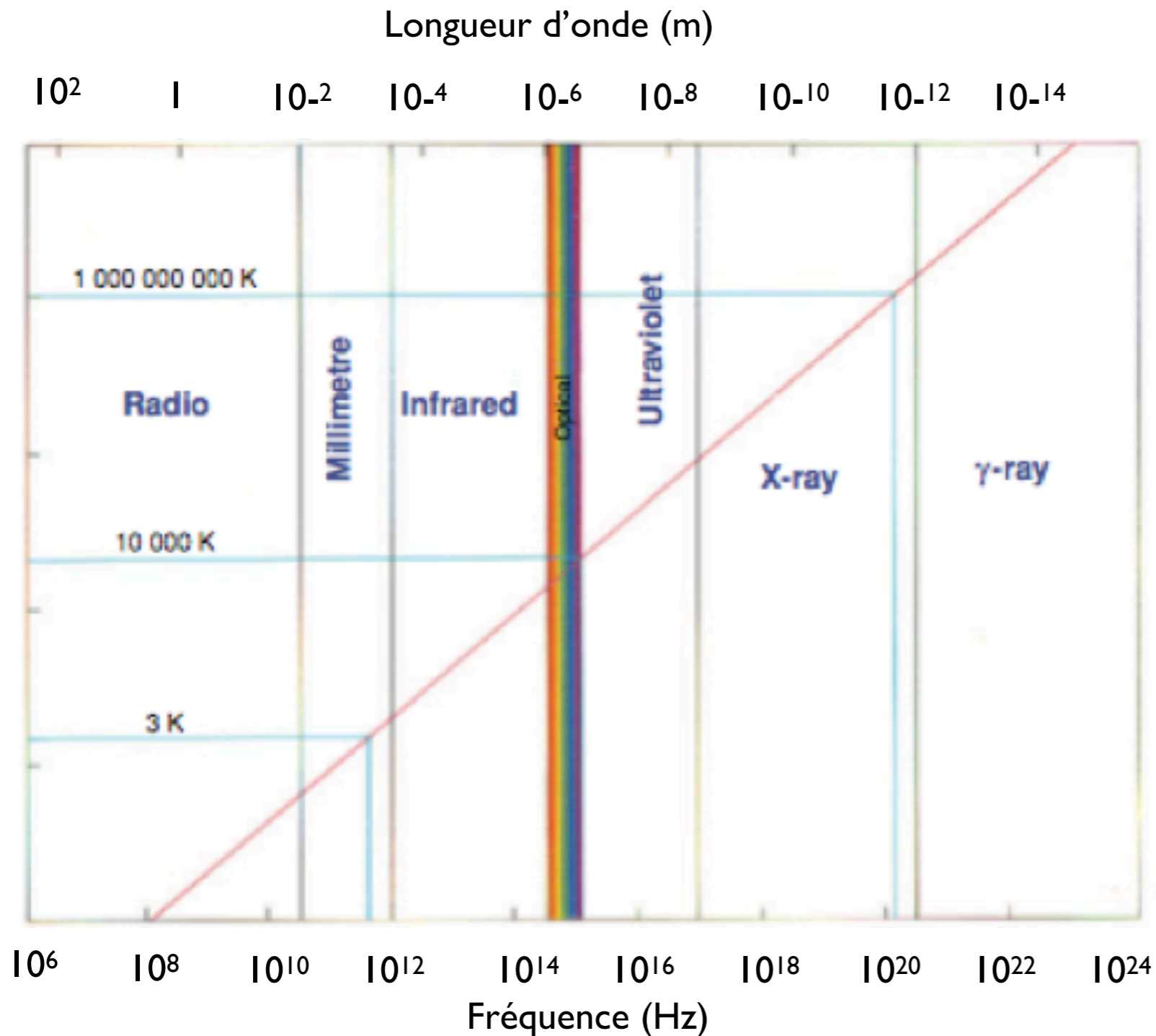
Plan de l'exposé

- 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 multi-messagers

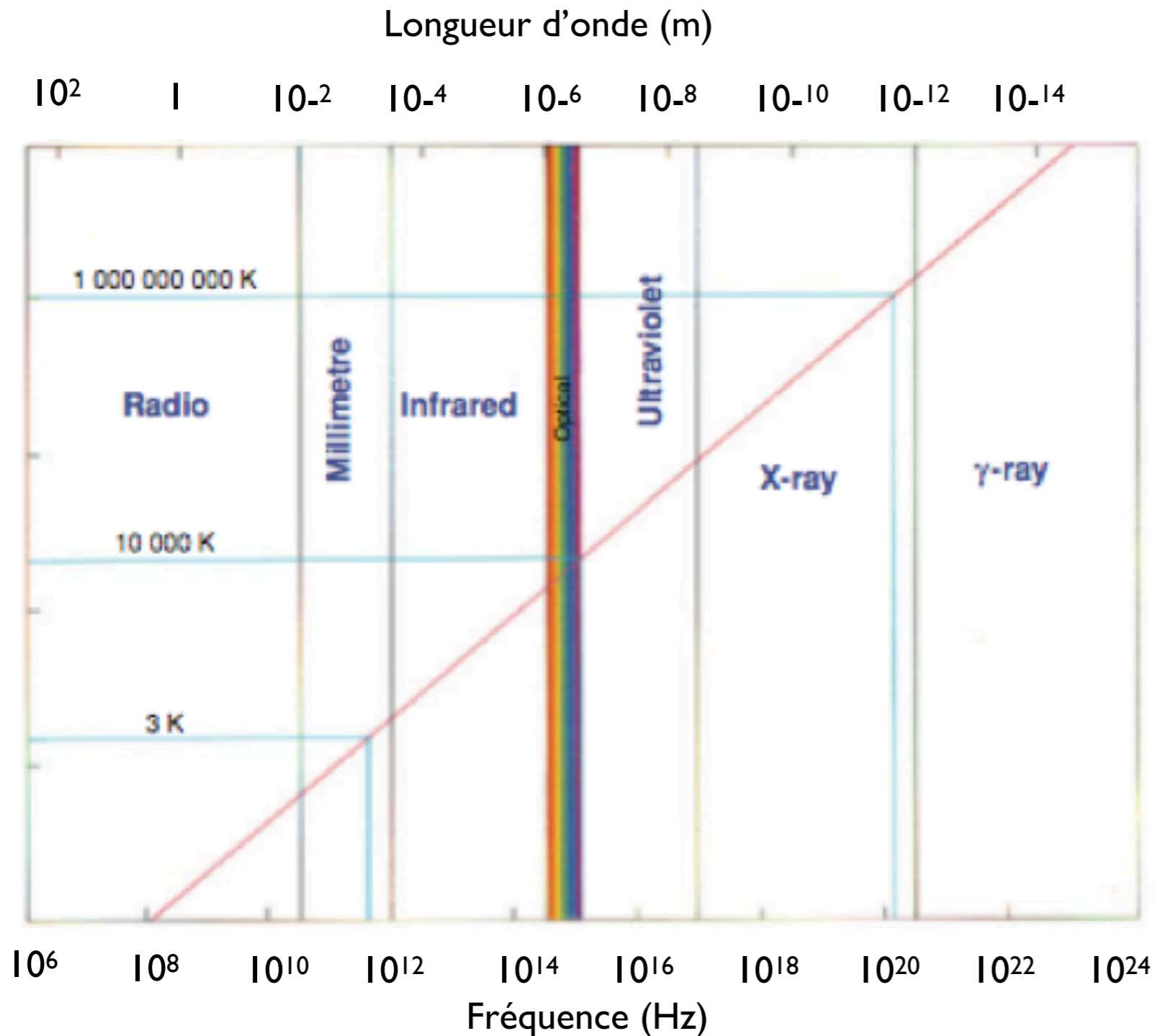


“le spectre électromagnétique”
s'étend de part et d'autre et
bien au delà de la lumière visible

:

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

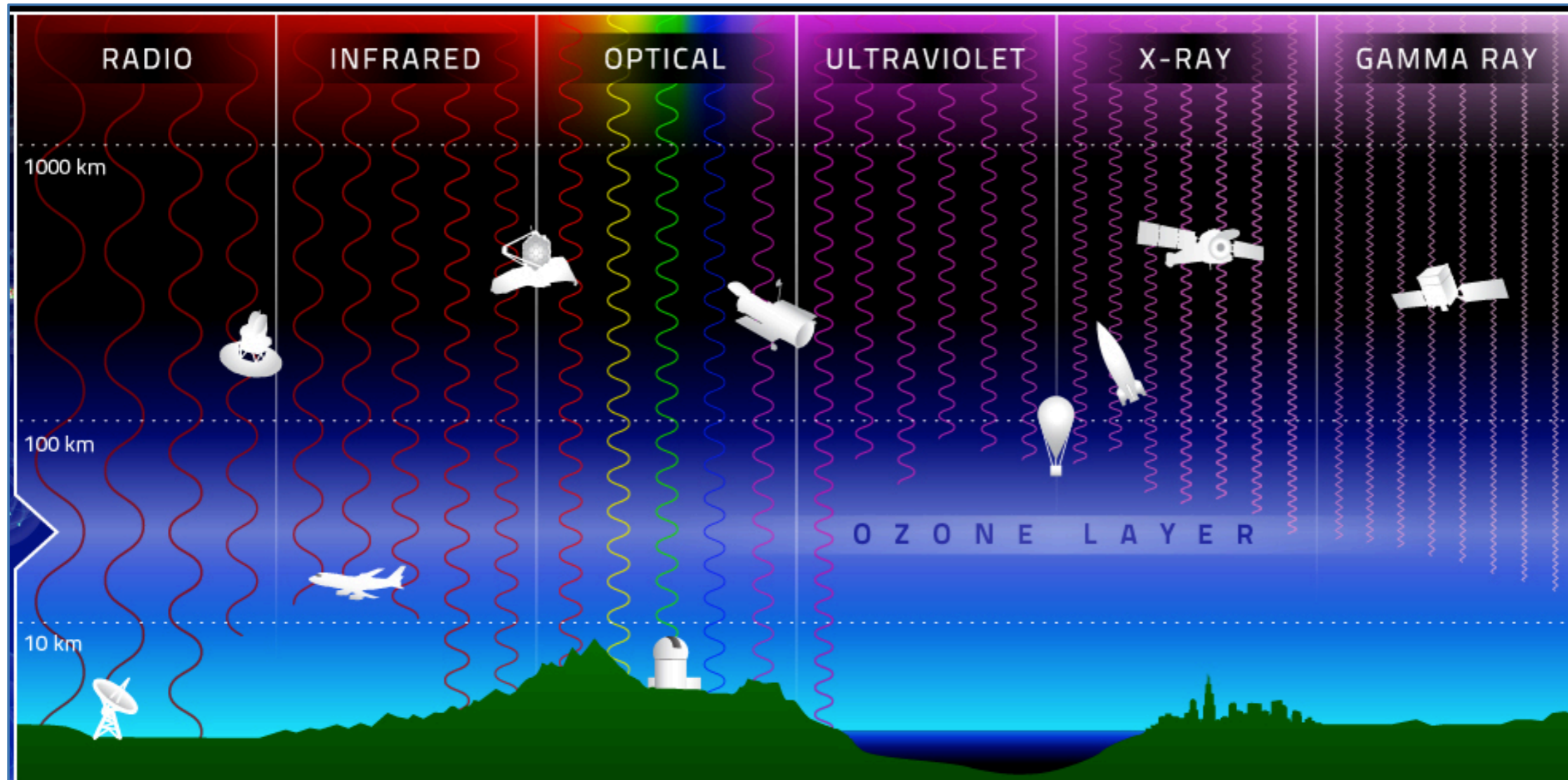
L'astrophysique est multi-longueurs d'onde et multi-messagers



- Durant la deuxième moitié du 20^{ème} siècle (principalement), 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 et scientifiques qui se sont concrétisés durant les décennies précédentes

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

exemple : les débuts de la radio-astronomie

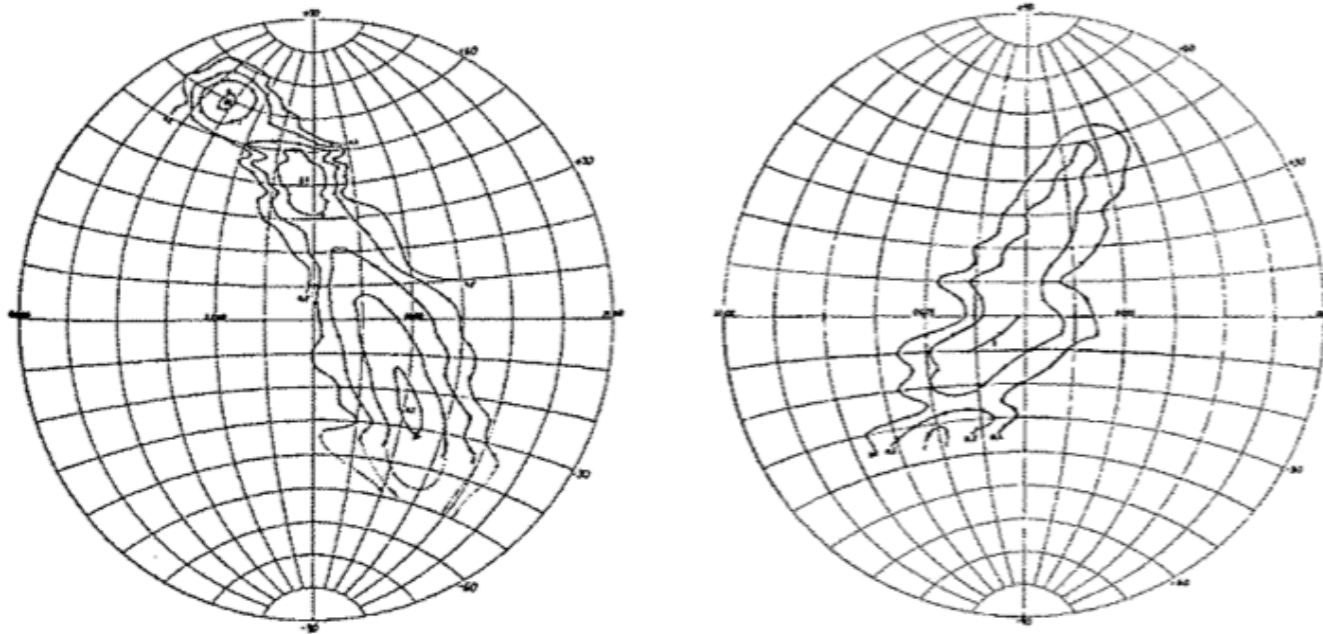


Figure 7.4: Reber's map of the radio emission of the Galaxy, made at a radio frequency of 160 MHz (1.87 m). The contours of radio emission are plotted in celestial coordinates and are more or less coincident with the Milky Way (Reber, 1944).

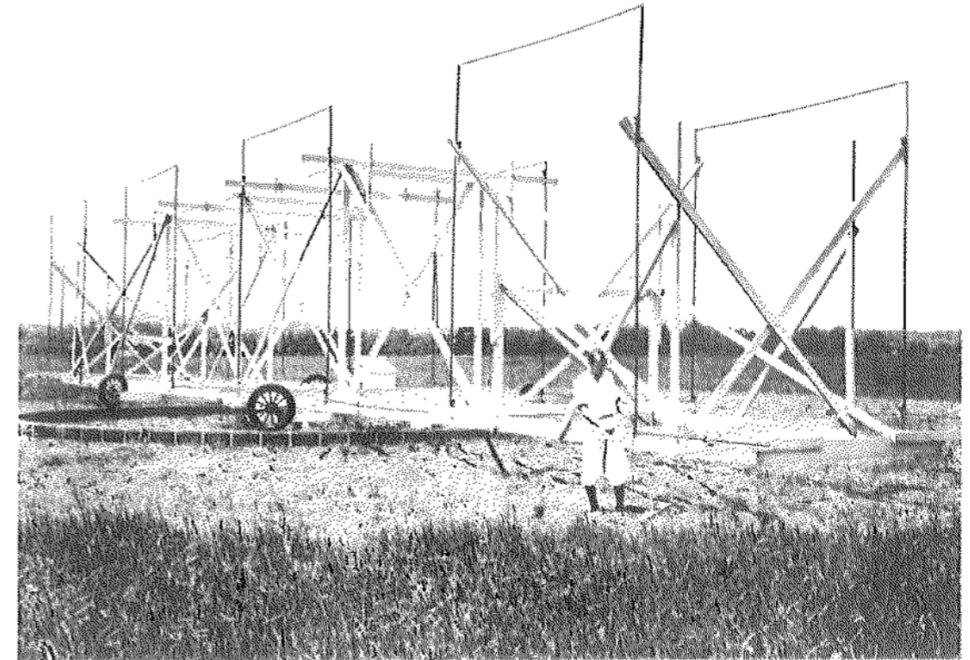


Figure 7.3: Karl Jansky's radio antenna with which he discovered the radio emission of the Galaxy in 1933. (Courtesy of the US National Radio Astronomy Observatory.)

illustrations empruntées au livre de M. Longair "Cosmic Century", Cambridge University press (2006)

Au début des années 40, premier relevé de l'émission radio dans le ciel par Reber (après le travail pionnier de Jansky dans les années 30)

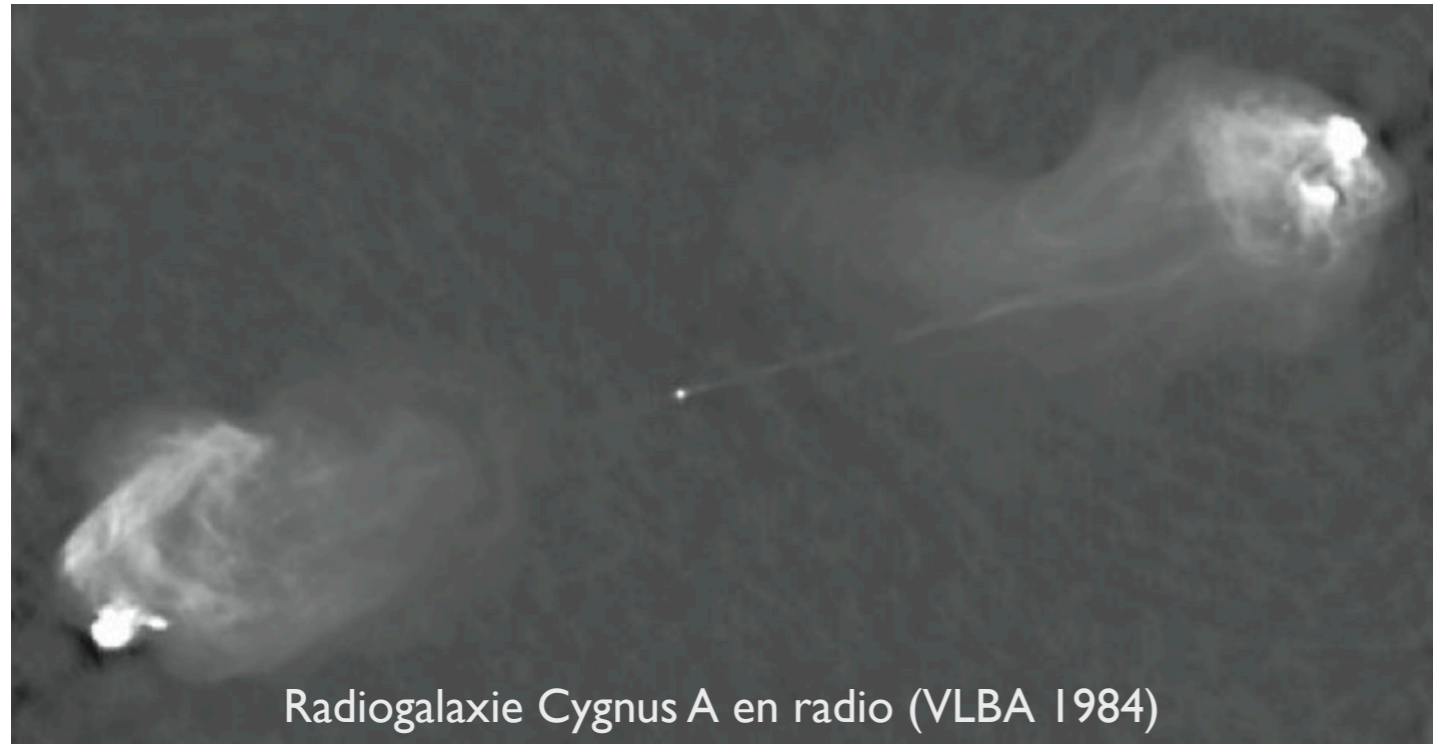
==> coïncidence avec le plan de la Galaxie

==> interprétée plus tard comme l'émission (synchrotron) d'électrons de haute énergie dans le champ magnétique de la Galaxies

À la fin des années 40, identification des premières contreparties optiques de sources "ponctuelles" en radio (Cygnus A, Cassiopée A)

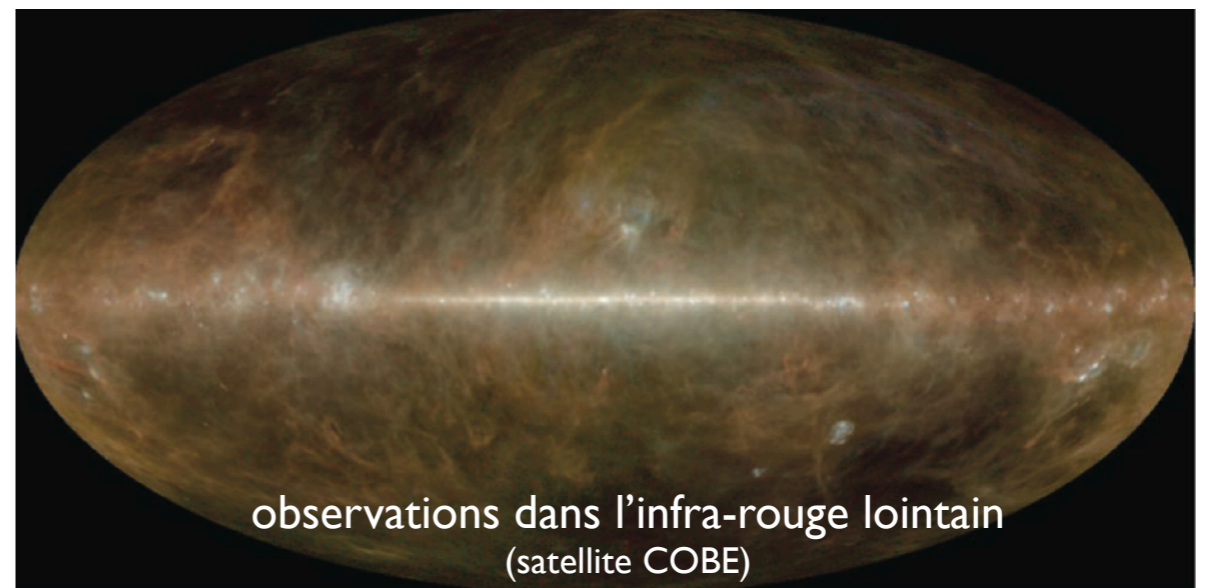
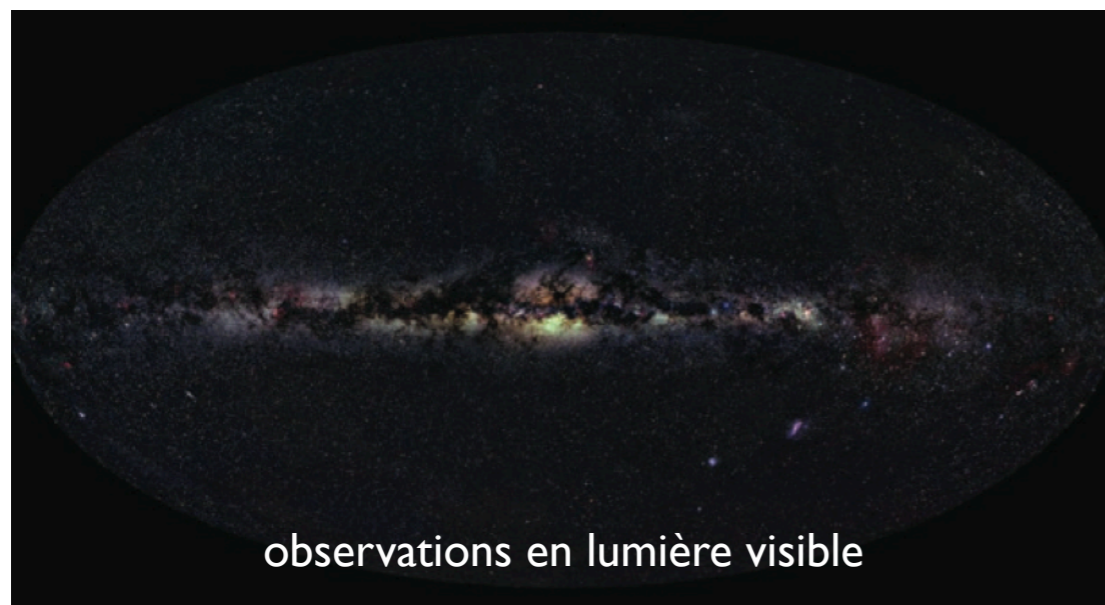
L'astrophysique est multi-longueurs d'onde et multimessagers

Astronomie radio : découverte des radiogalaxies



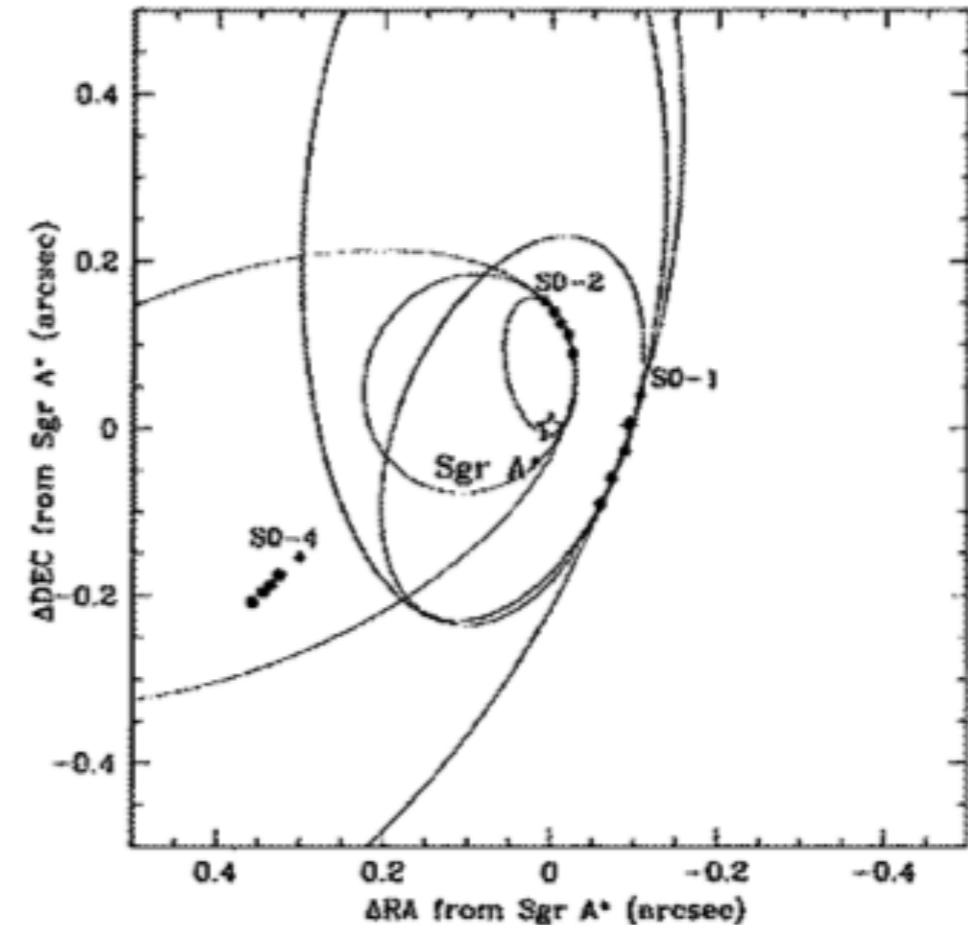
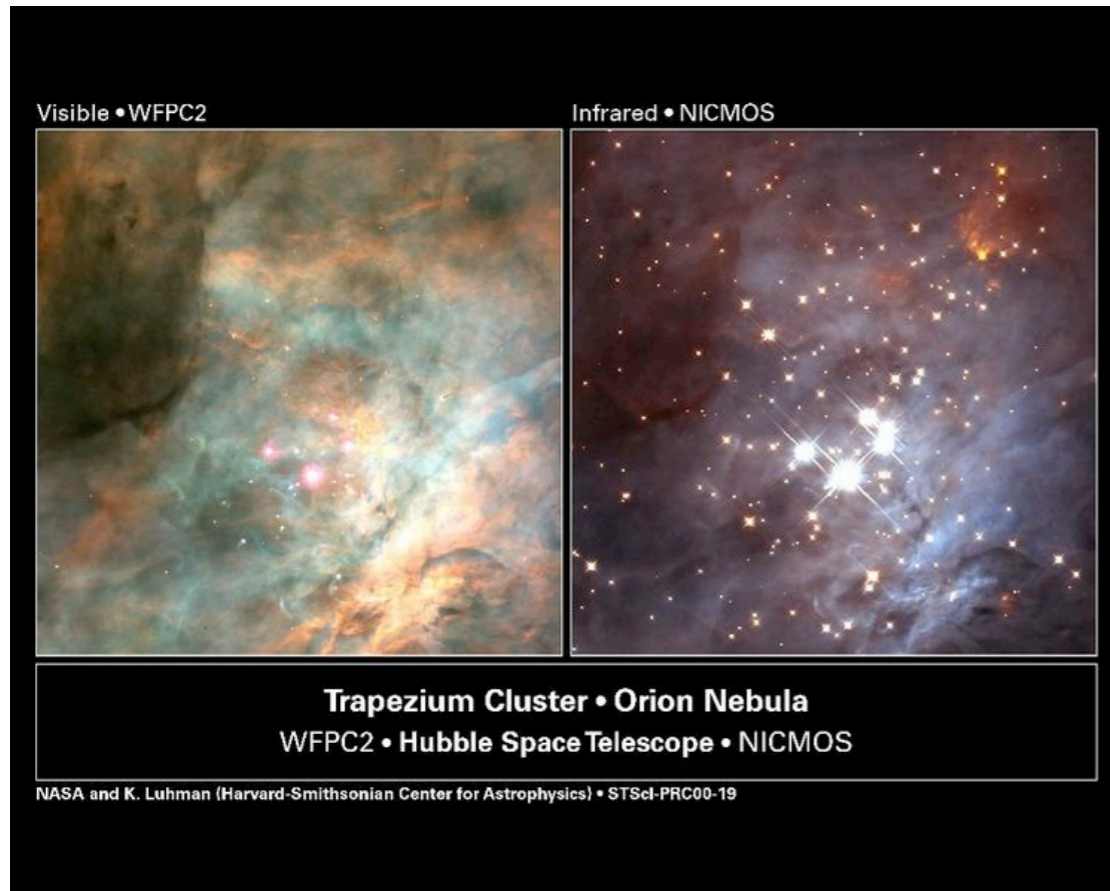
- ➔ énorme émission radio dans des lobes à la terminaison de très long jets de matière provenant du centre de la galaxies
- ➔ centre de la galaxie lui même puissant émetteur radio depuis une région très compacte
- ➔ meilleure explication (de loin) présence d'un trou noir supermassif (jusqu'à $10^9 M_{\text{sol}}$)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

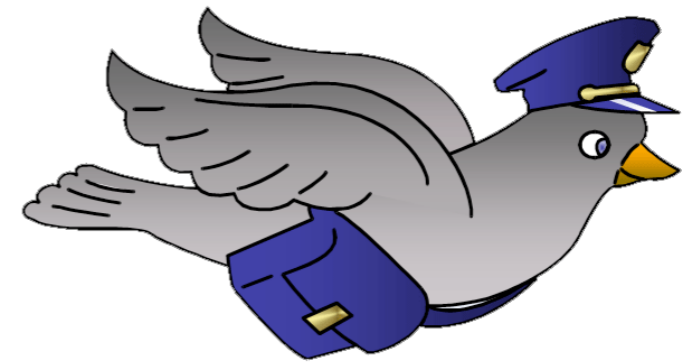


- Suivi infra-rouge du mouvement de quatre étoiles orbitant très près du centre galactique
- ➡ présence d'un objet compact invisible d'environ $2.10^6 M_{\text{sol}}$
 - ➡ trou noir central supermassif de la Galaxie

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

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.

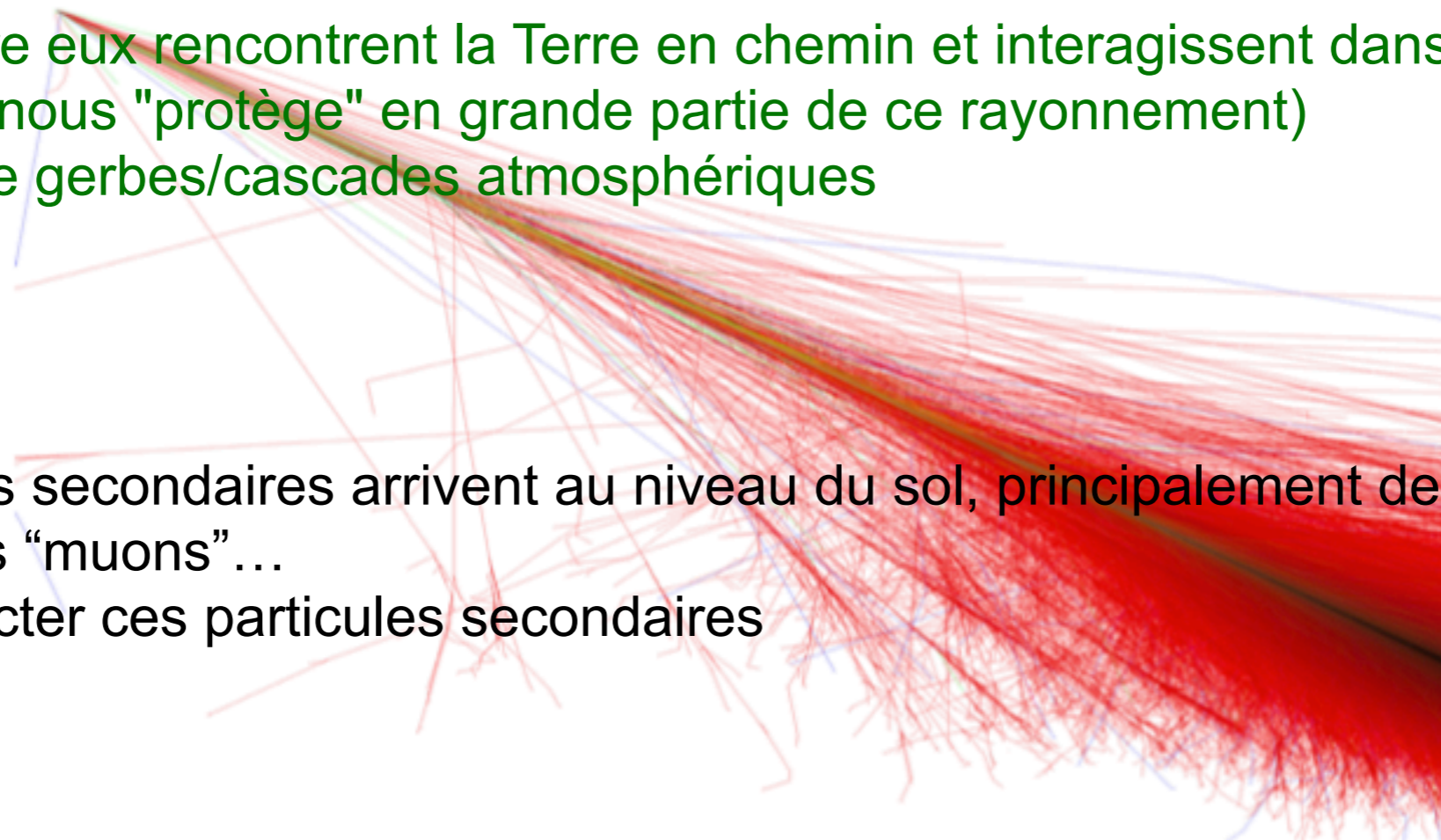
Que sont les rayons cosmiques?

★ 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)

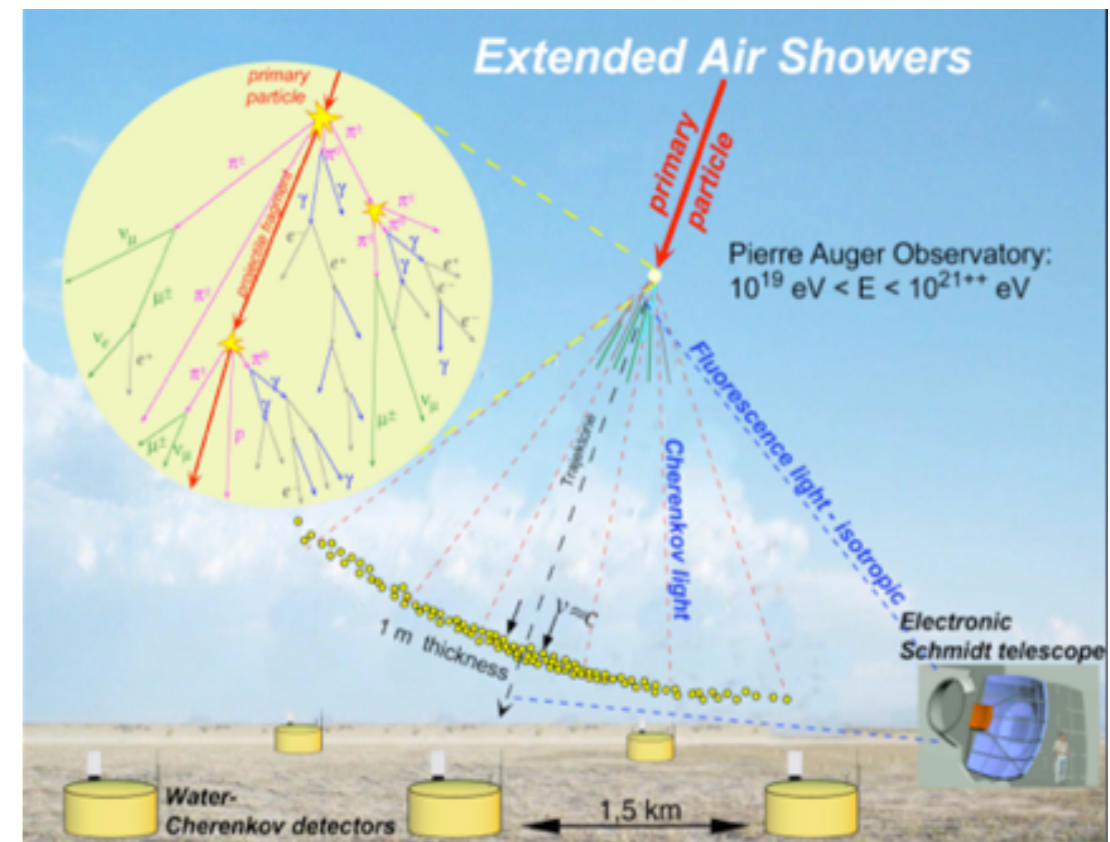
Les gerbes atmosphériques

(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 entrent 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” l'énergie 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



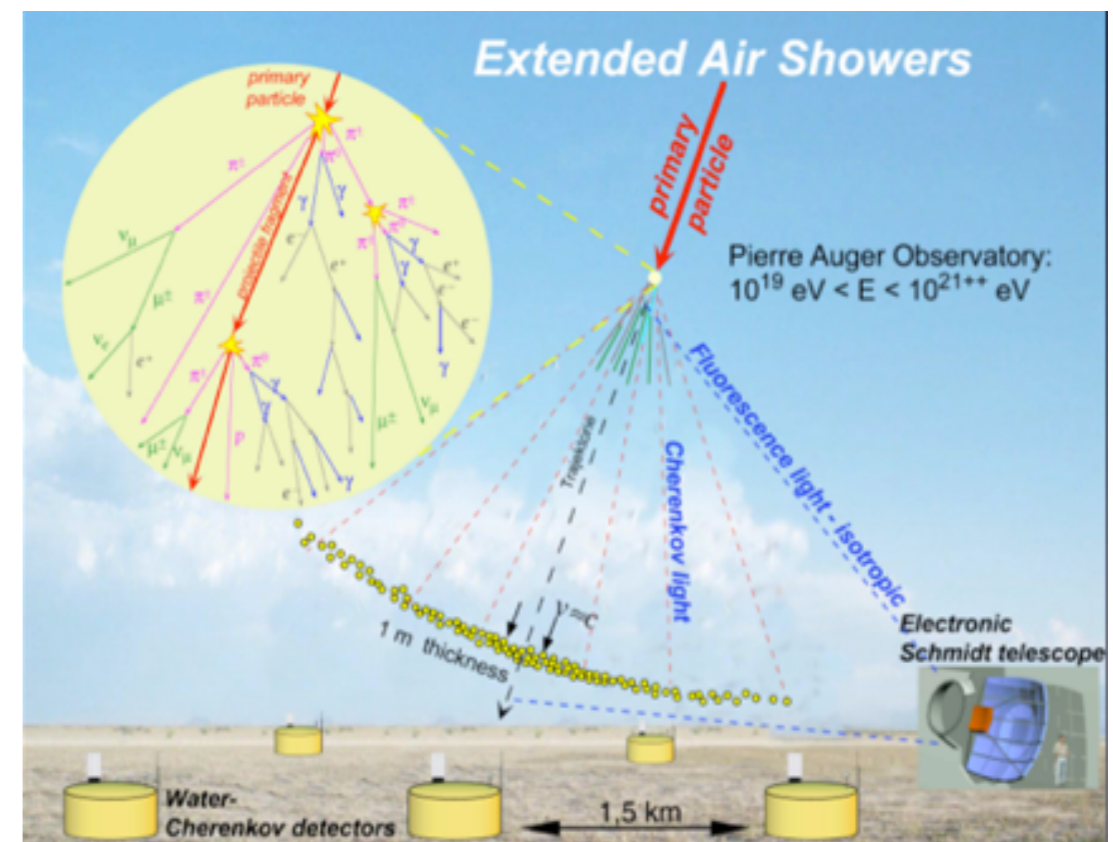
Les gerbes atmosphériques

(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



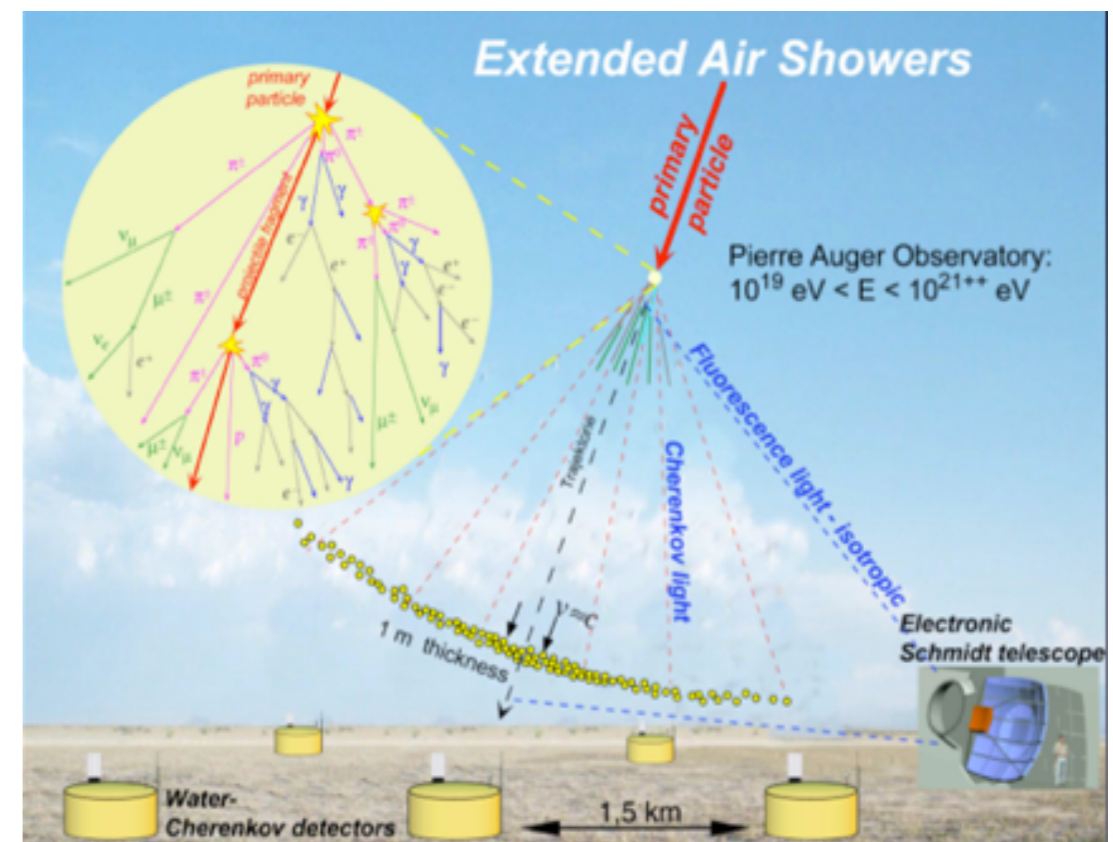
Les gerbes atmosphériques

(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



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'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

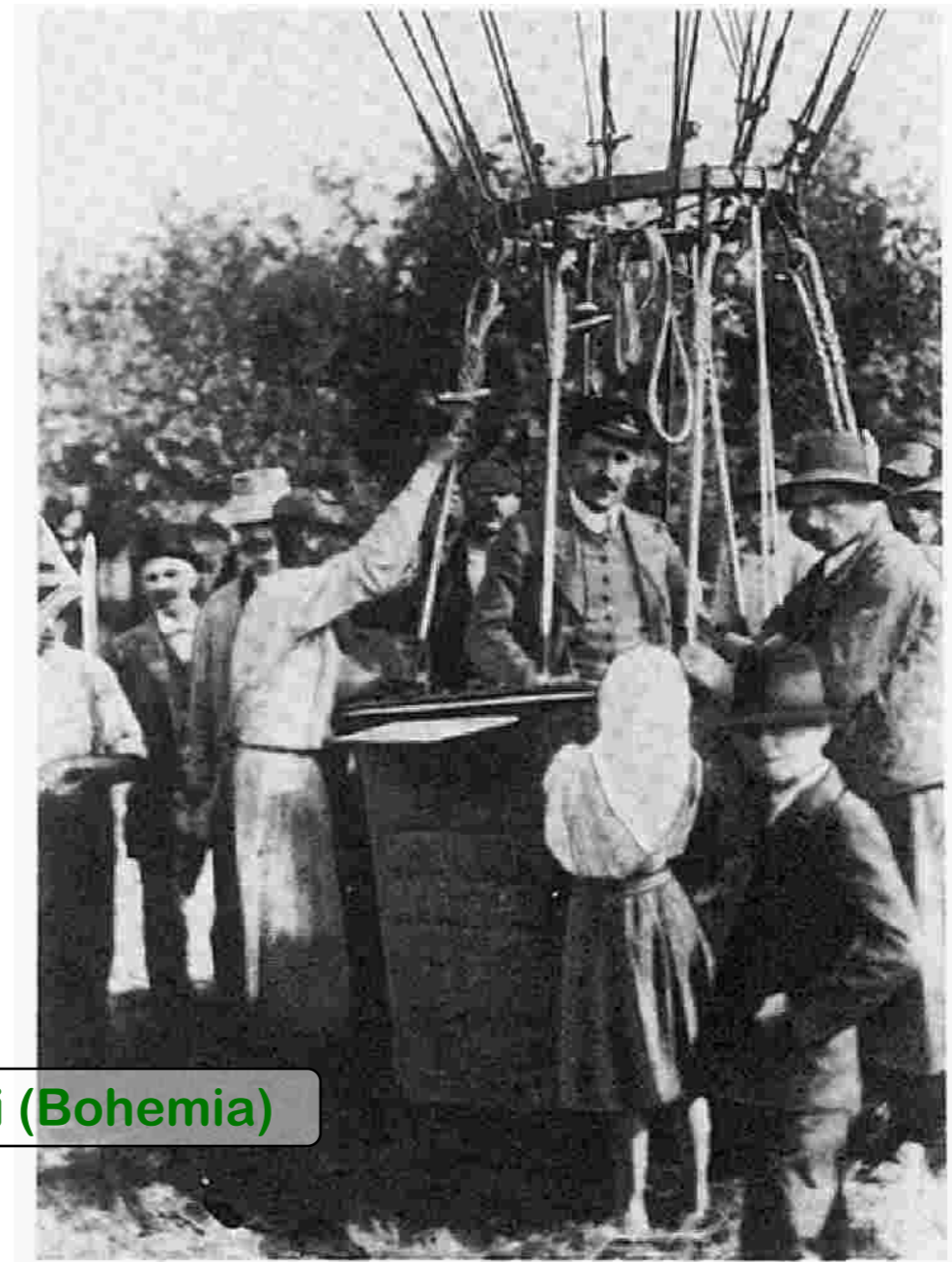
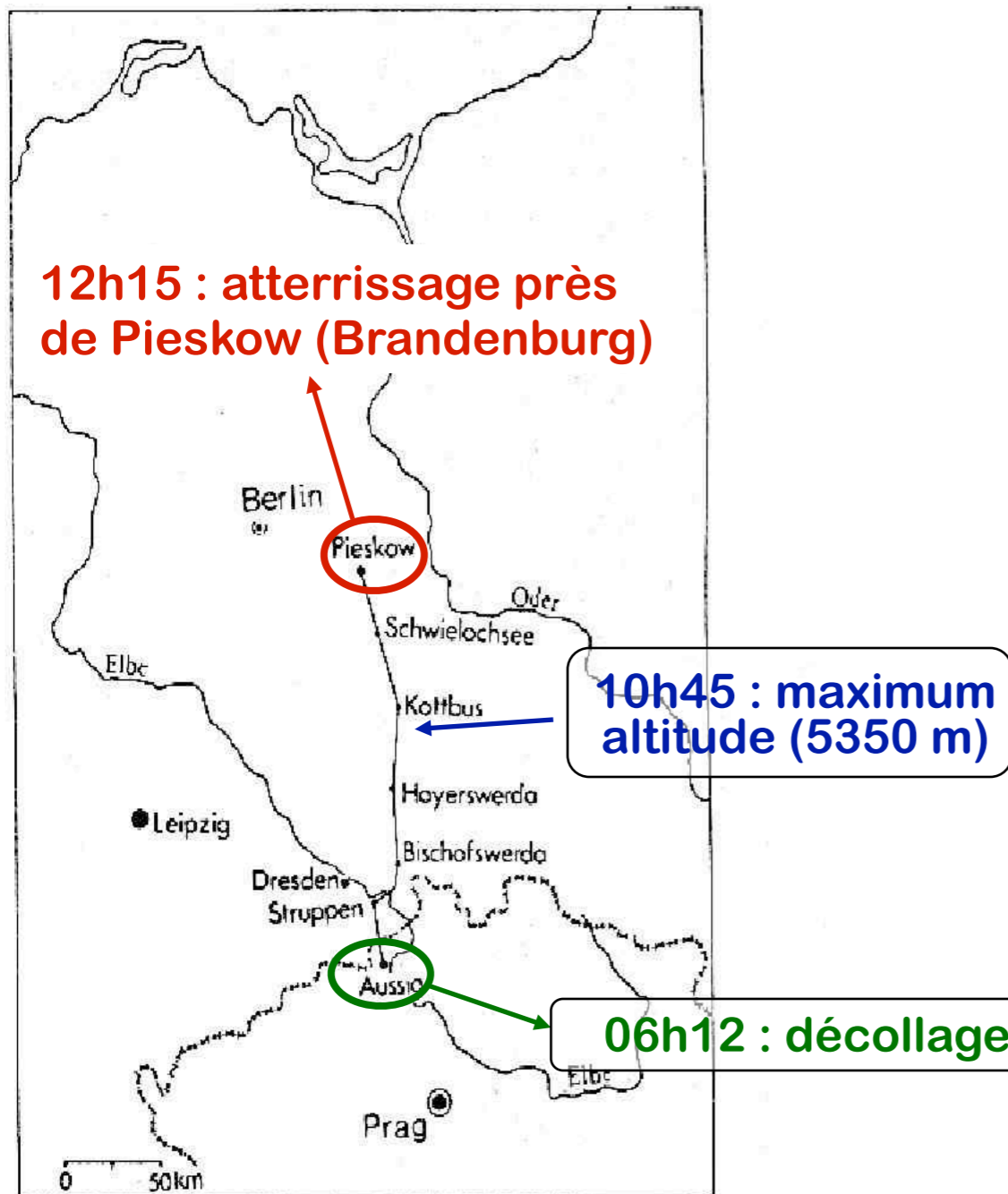


- 1901: Wilson mesure l'ionisation sous terre (dans une mine), elle est identique à celle mesurée au sol
- Rutherford montre que l'ionisation de l'atmosphère au niveau du sol et sous terre est principalement due à la radioactivité naturelle

- 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



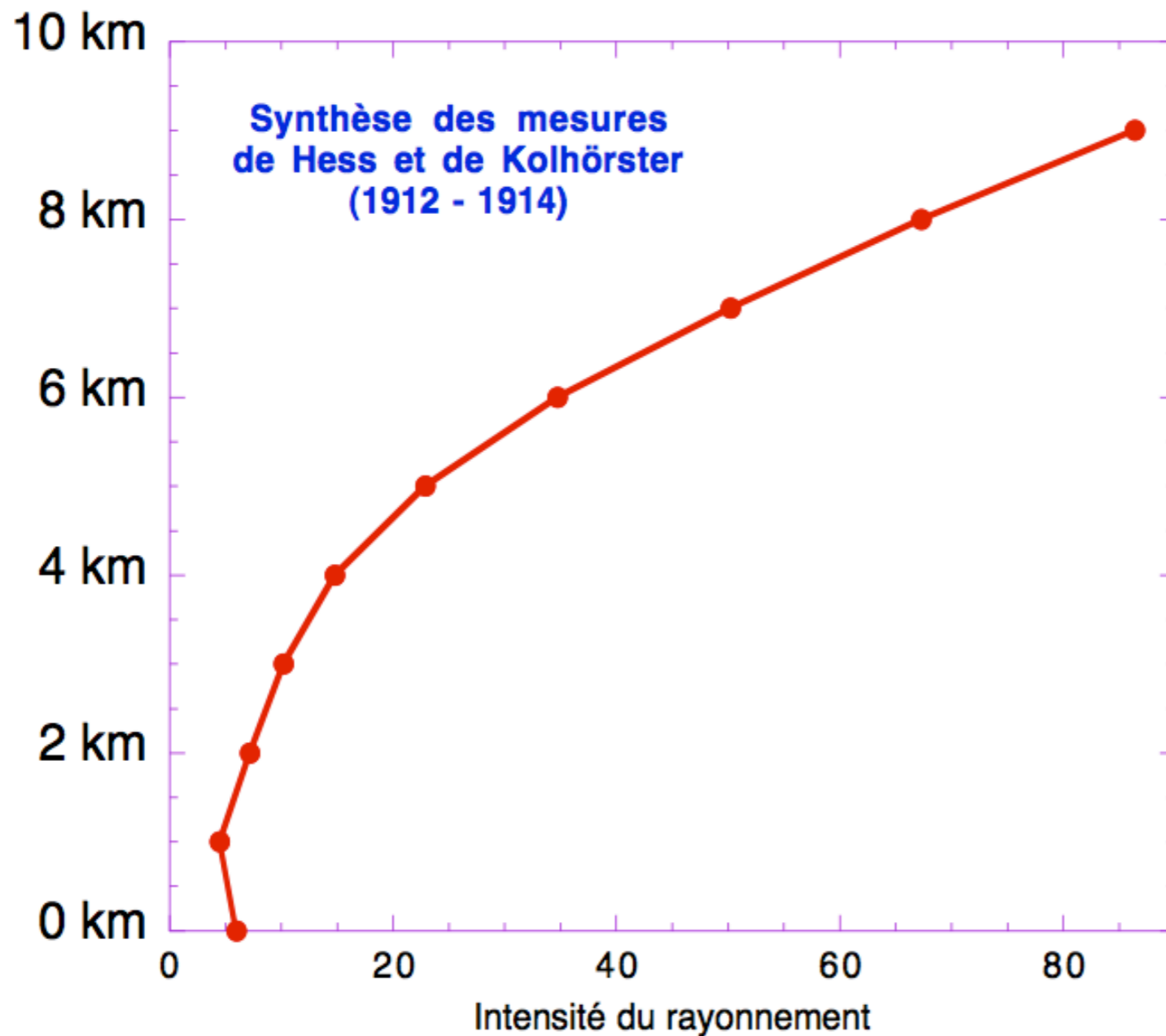
Hess à l'assaut du ciel - vol du 7 août 1912



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 dans 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 (photons) 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

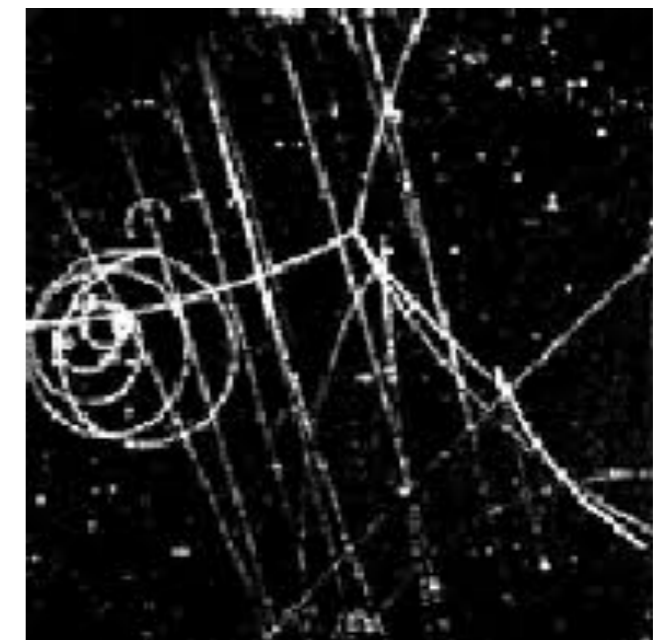
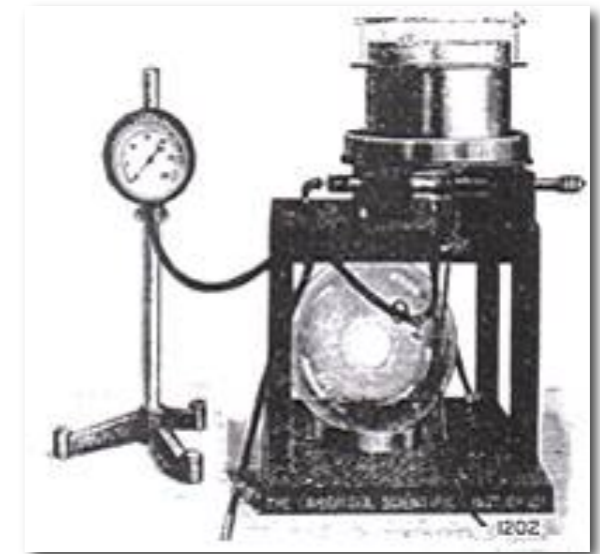
- Vers la fin des années 20 les premiers véritables détecteurs de particules sont créés (compteurs Geiger, chambre à brouillard)

- 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

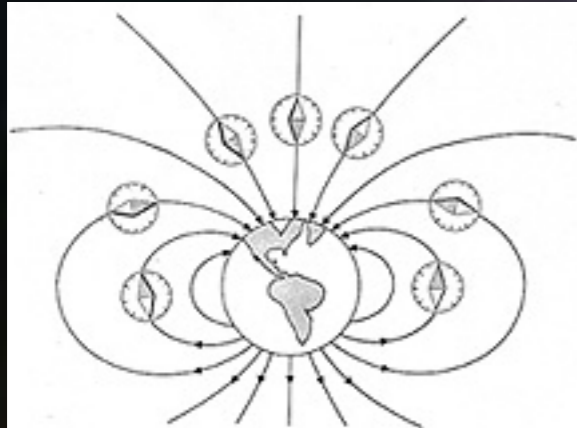
- > **les rayons cosmiques secondaires sont (pour une partie d'entre eux) des particules chargées**



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

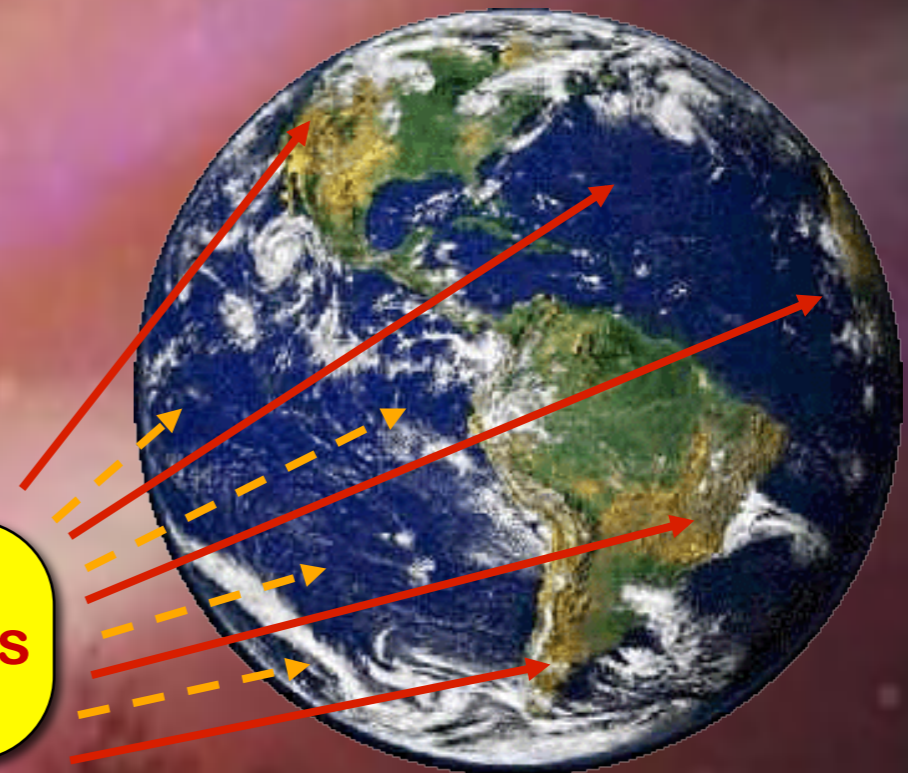
Quid des rayons cosmiques primaires!

(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

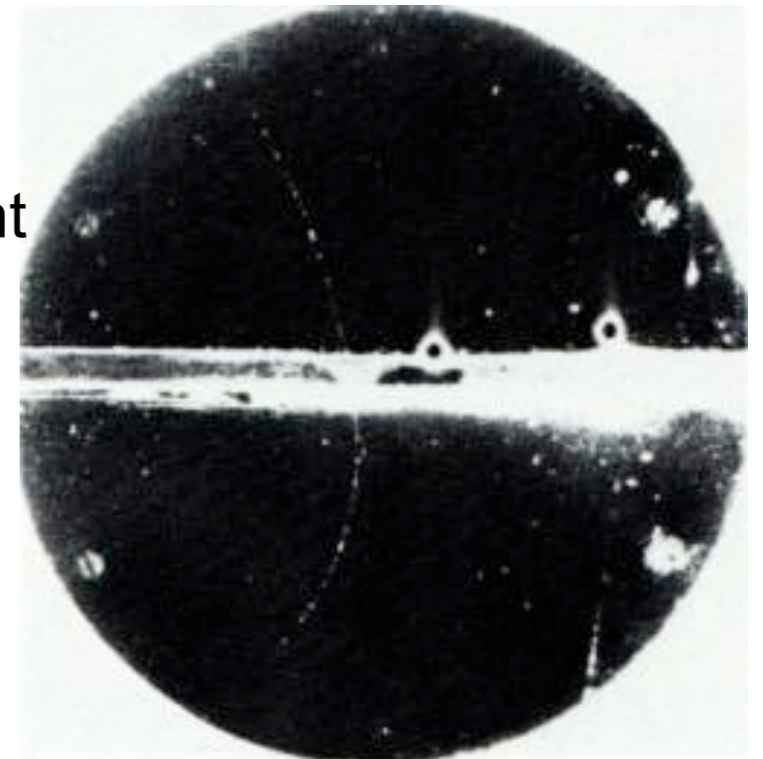
Bien avant l'émergence des accélérateurs, la physique des particules expérimentale est née en observant les particules secondaires, beaucoup de particules inconnues jusqu'alors ont été découvertes !

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

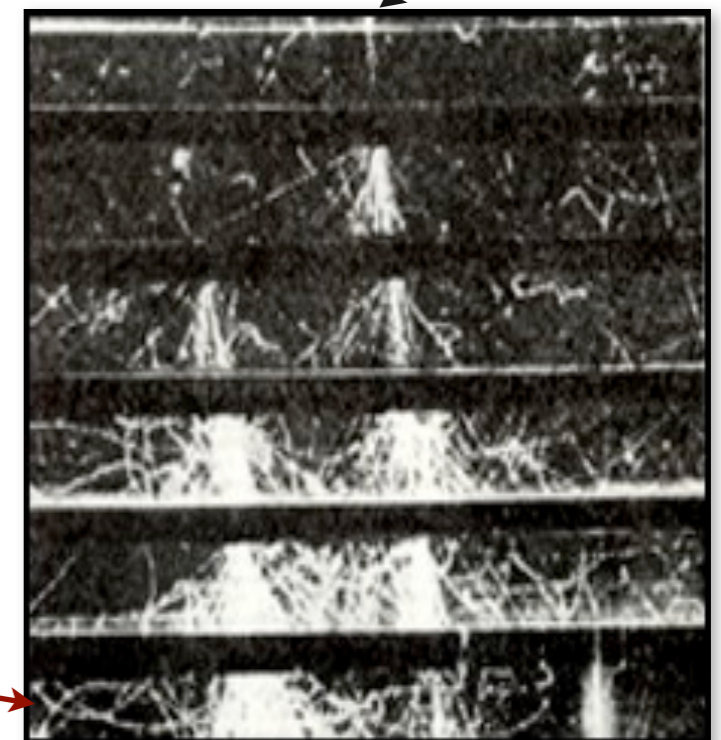
1936: Neddermeyer et Anderson découvre le muon (même charge que l'électron mais plus lourd et instable)

- 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'empreinte 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

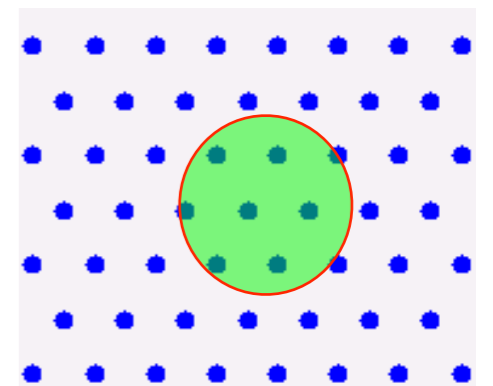
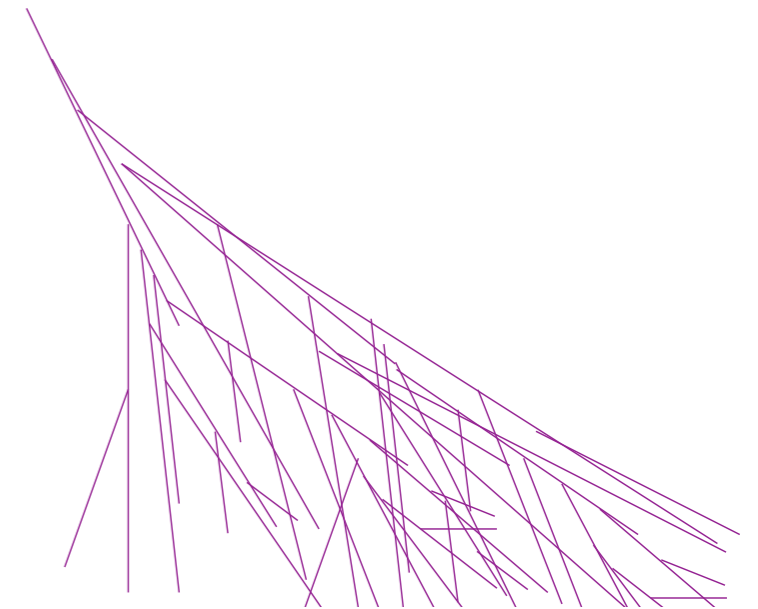
—> si l'on crée un réseau de détecteurs, la détection d'un signal dans une fenêtre de quelques microsecondes dans plusieurs détecteurs voisins permettra de montrer qu'une gerbe atmosphérique est passée

—> l'électronique de déclenchement doit être suffisamment précise pour pouvoir établir des coïncidences temporelles 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



Comprendre l'importance de la fenêtre temporelle

exemple simple : dispositif à 2 détecteurs (purement illustratif)

- (i) Supposons que des particules isolées (rayons cosmiques d'énergie trop faible pour créer de grandes gerbes) arrivent dans chaque détecteur à un taux de 10 par seconde
- (ii) Supposons que les gerbes que nous cherchons à détecter "déclenchent" ont un taux de 1 toutes les 300s

Cas d'une fenêtre de coïncidence de 1 ms :

—> probabilité pour qu'une particule isolée touche 1 détecteur durant 1ms donnée : $\sim 1/100$

—> probabilité pour que les deux détecteur soient fortuitement touchés durant une même ms donnée : $\sim 1/100 \times 1/100 = 1/10000$

—> une coïncidence fortuite toutes les 10000ms donc toutes les 10s

—> 30 fois plus probable que le signal que l'on cherche à voir

Cas d'une fenêtre de coïncidence de 1 μ s :

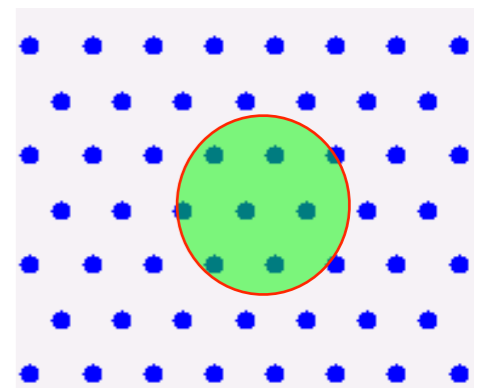
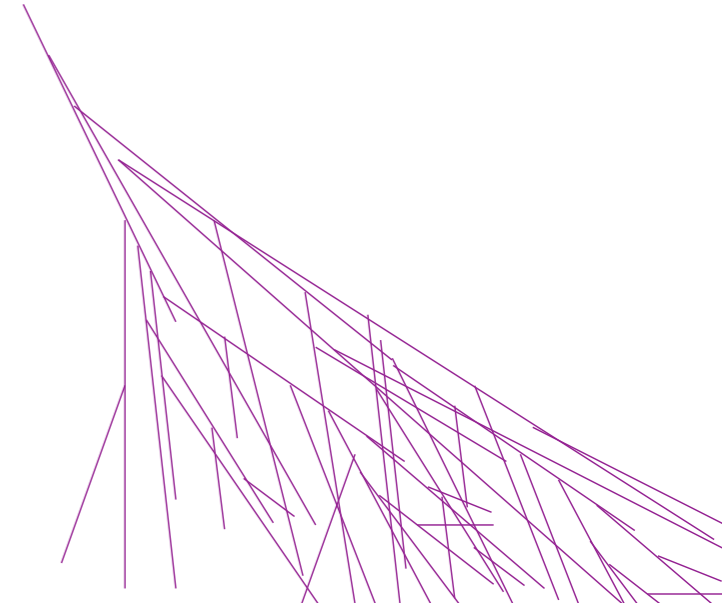
—> probabilité pour qu'une particule isolée touche 1 détecteur durant 1 μ s donnée : $\sim 1/1000000$ (100 mille)

—> probabilité pour que les deux détecteur soient fortuitement touchés durant une même μ s donnée : $\sim 1/1000000 \times 1/1000000 = 1/10^{10}$ (10 milliards)

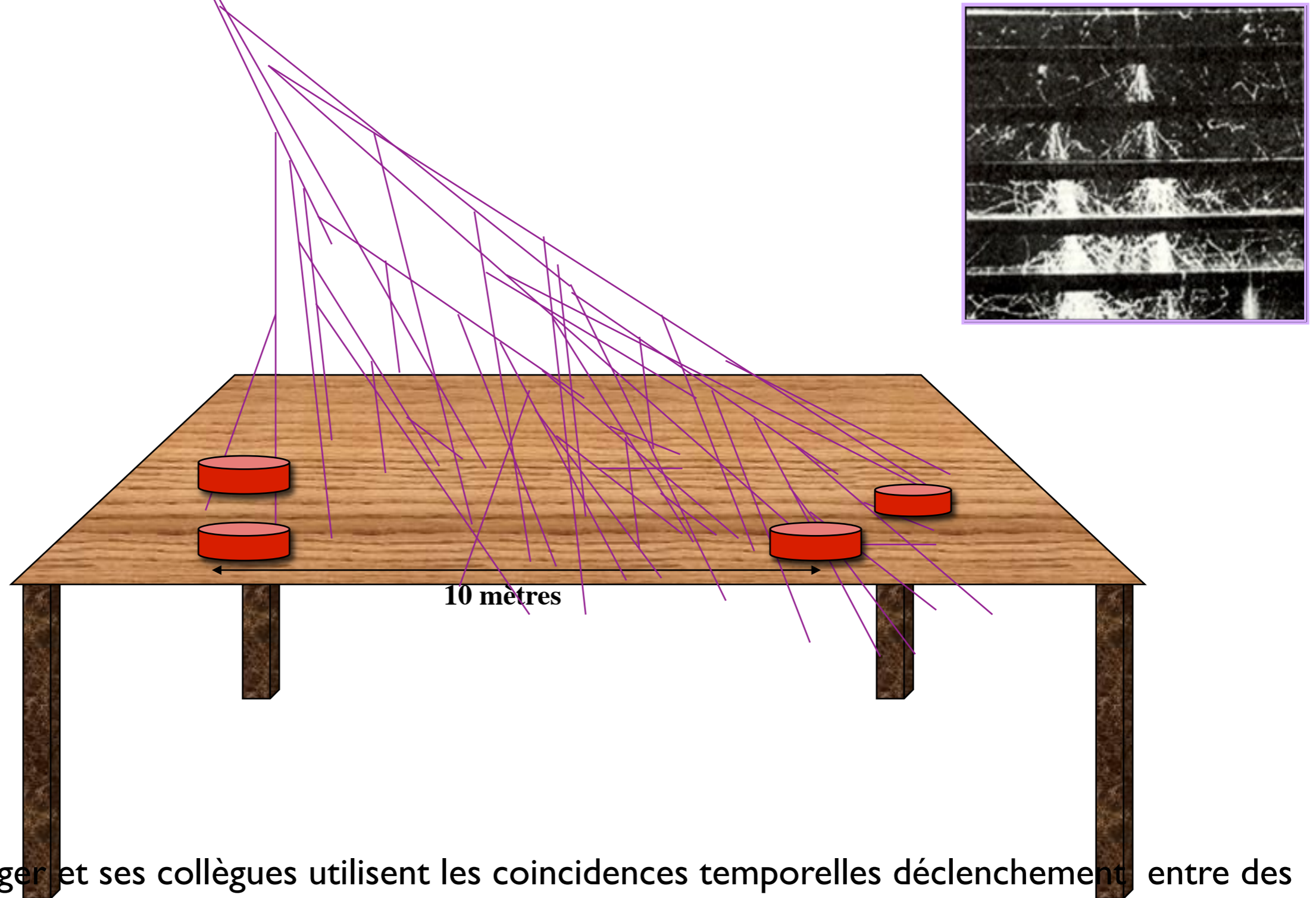
—> une coïncidence fortuite toutes les 10^{10} μ s donc toutes les 10000s

—> ~ 30 fois moins probable que le signal que l'on cherche à voir

—> **le signal (gerbe) est beaucoup plus aisément séparé du bruit (coïncidences fortuites) avec une petite fenêtre en temps**

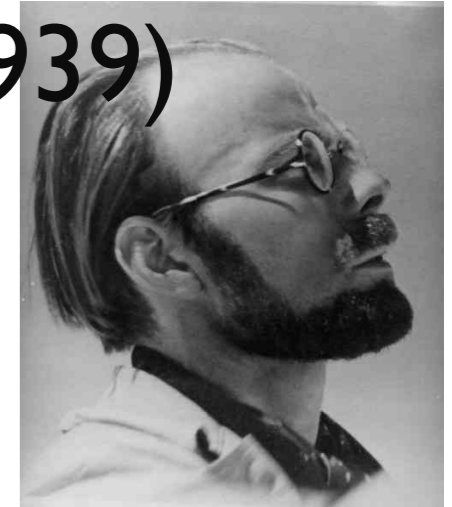


Mise en évidence du phénomène de gerbe atmosphérique par Pierre Auger et ses collègues (1938-1939)



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

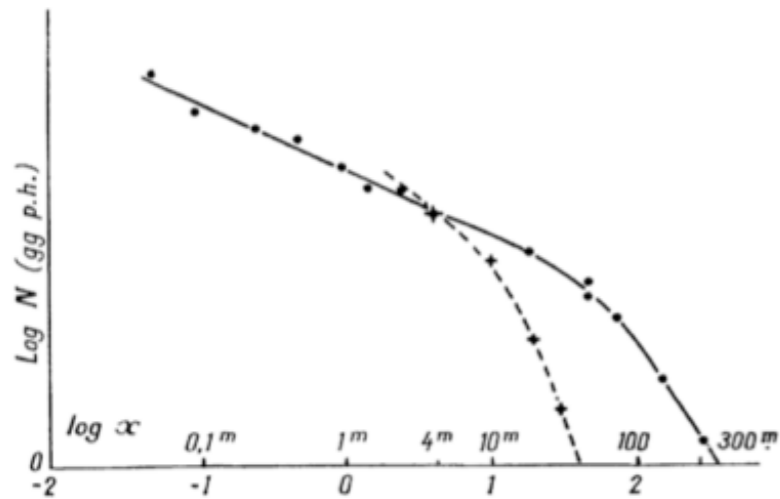
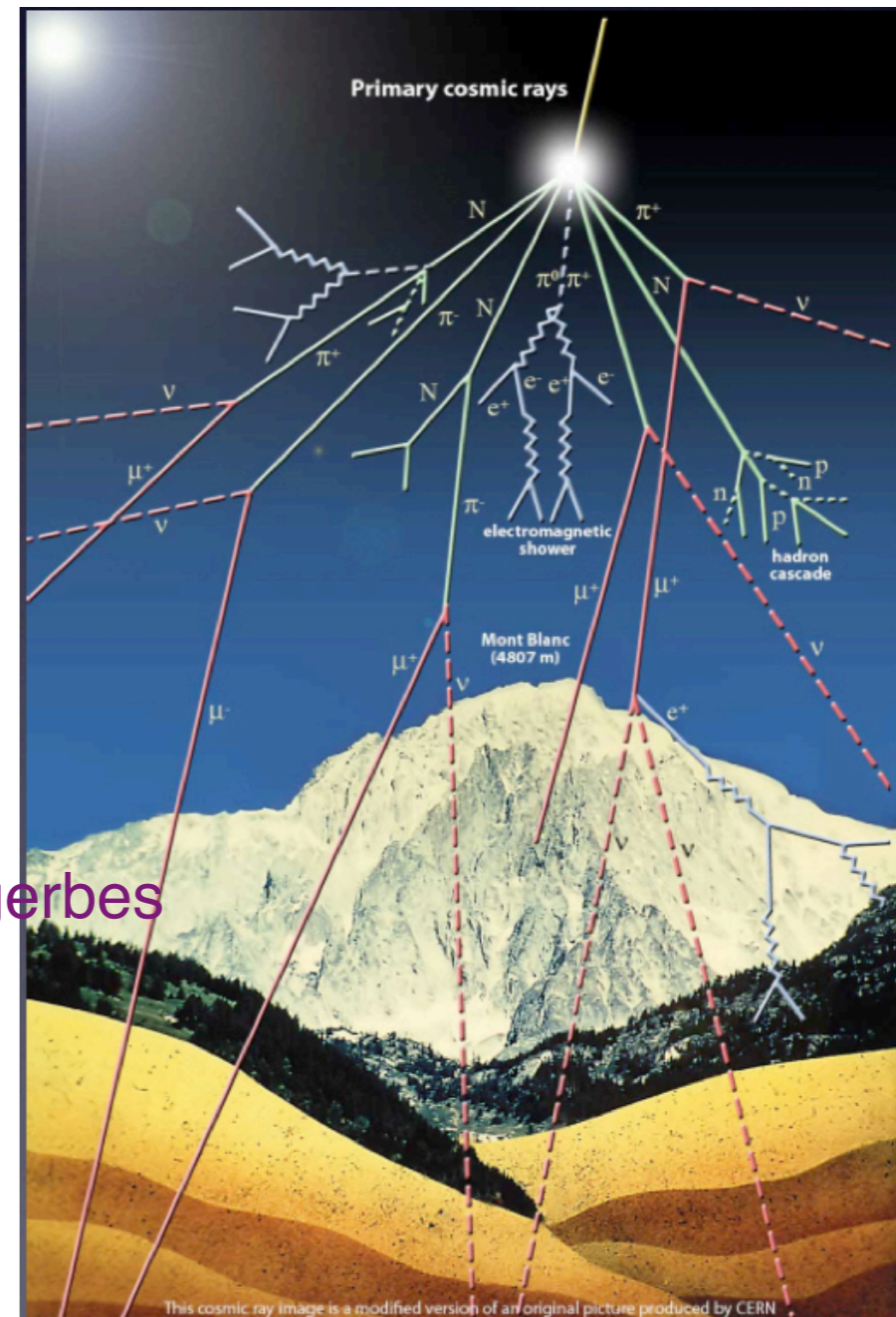


Fig. 14. — Décroissance du nombre N des gerbes atmosphériques avec l'écartement X des compteurs. Coordonnées logarithmiques (--- calcul.)

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

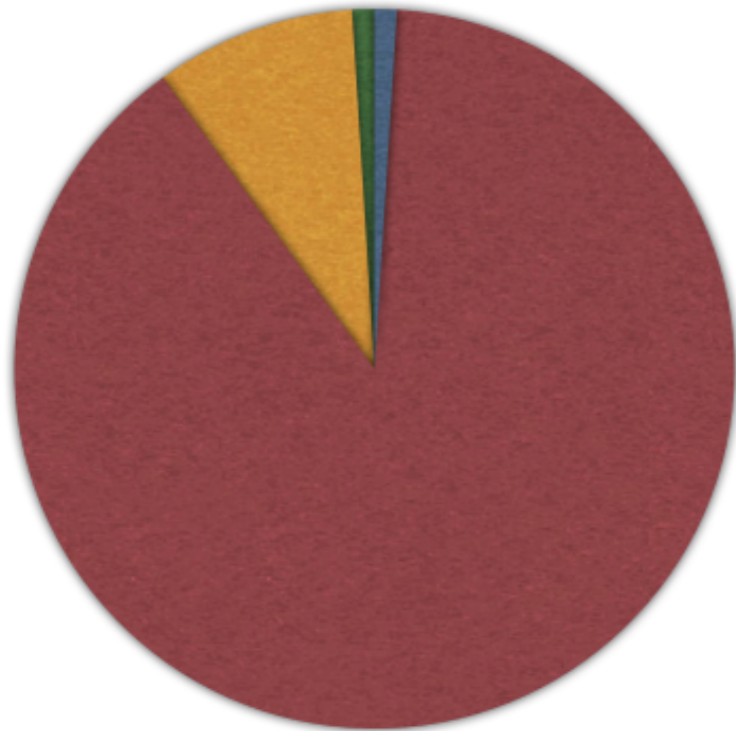


L'étude des rayons cosmiques comme messenger astrophysique

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

4 rayons cosmiques / cm^2 / 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 multi-longueur d'onde
(radio, infrarouge, UV, X, gamma, TeV...)



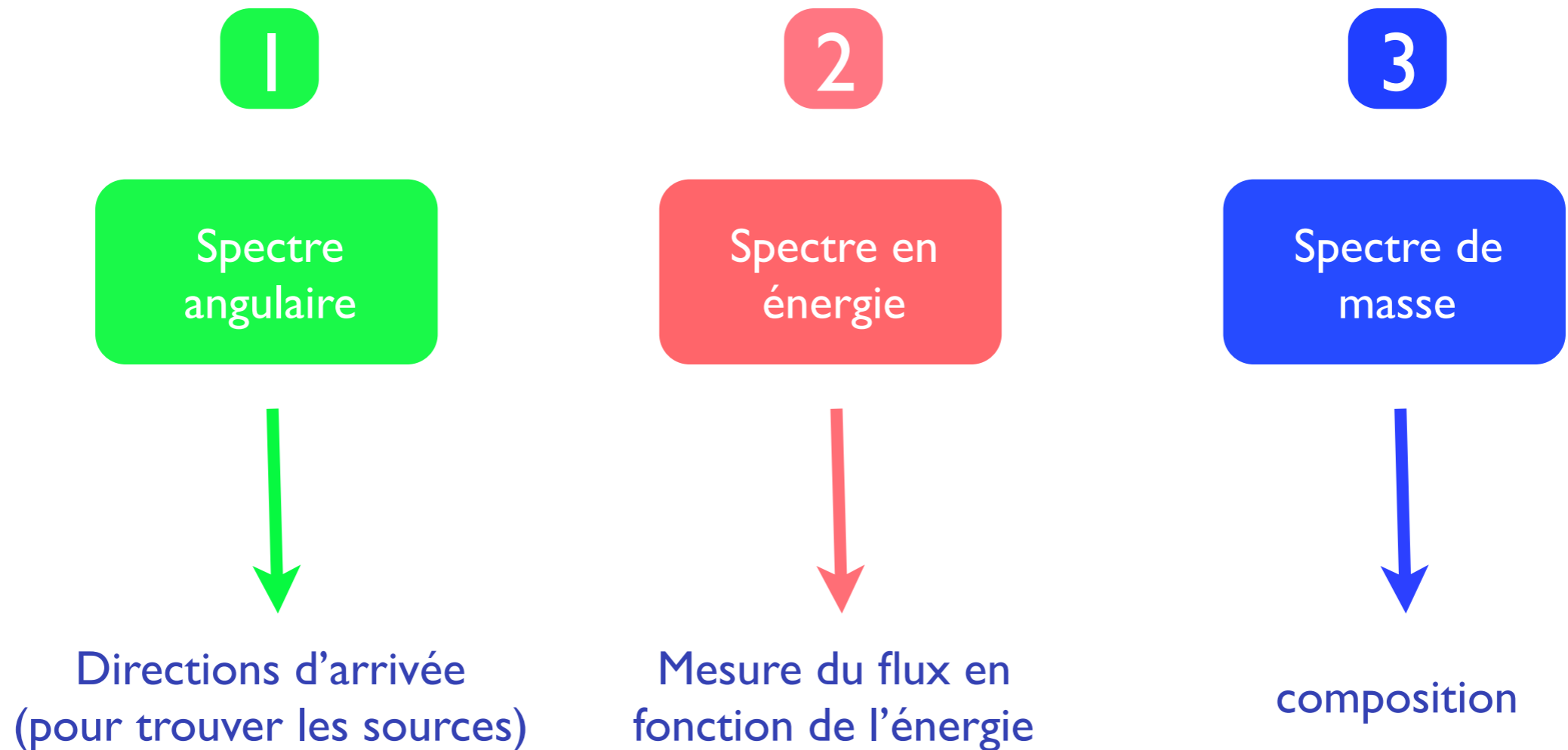
→ spectre de masse



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**

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 !

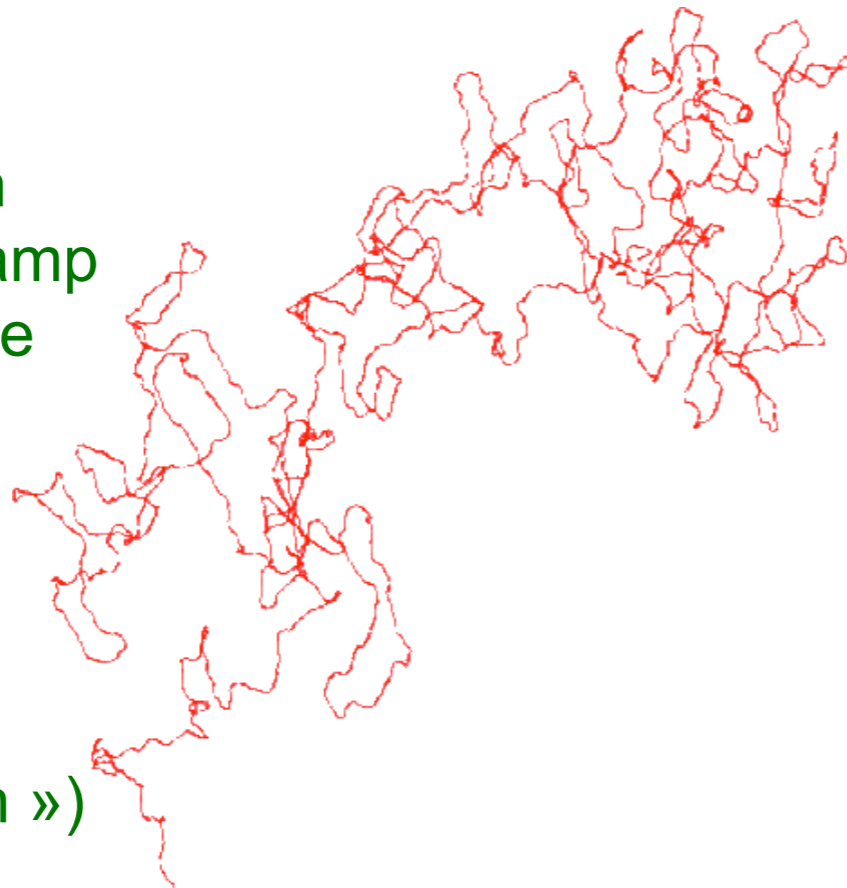
↓
Non !

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

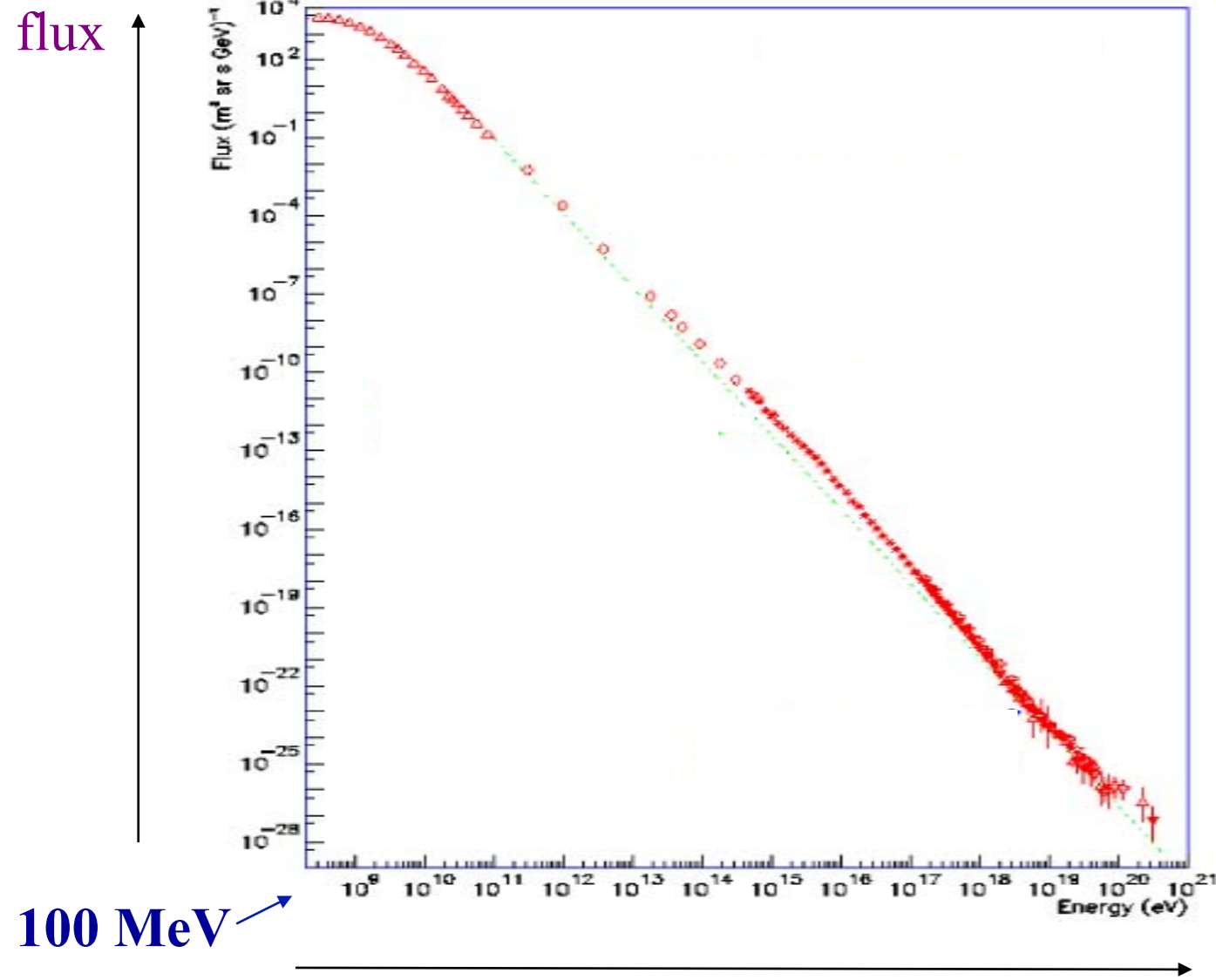
1 eV = 1.6×10^{-19} J (!) c'est l'énergie cinétique acquise par un électron initialement au repos accéléré par une différence de potentiel de 1V

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 cosmiques 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

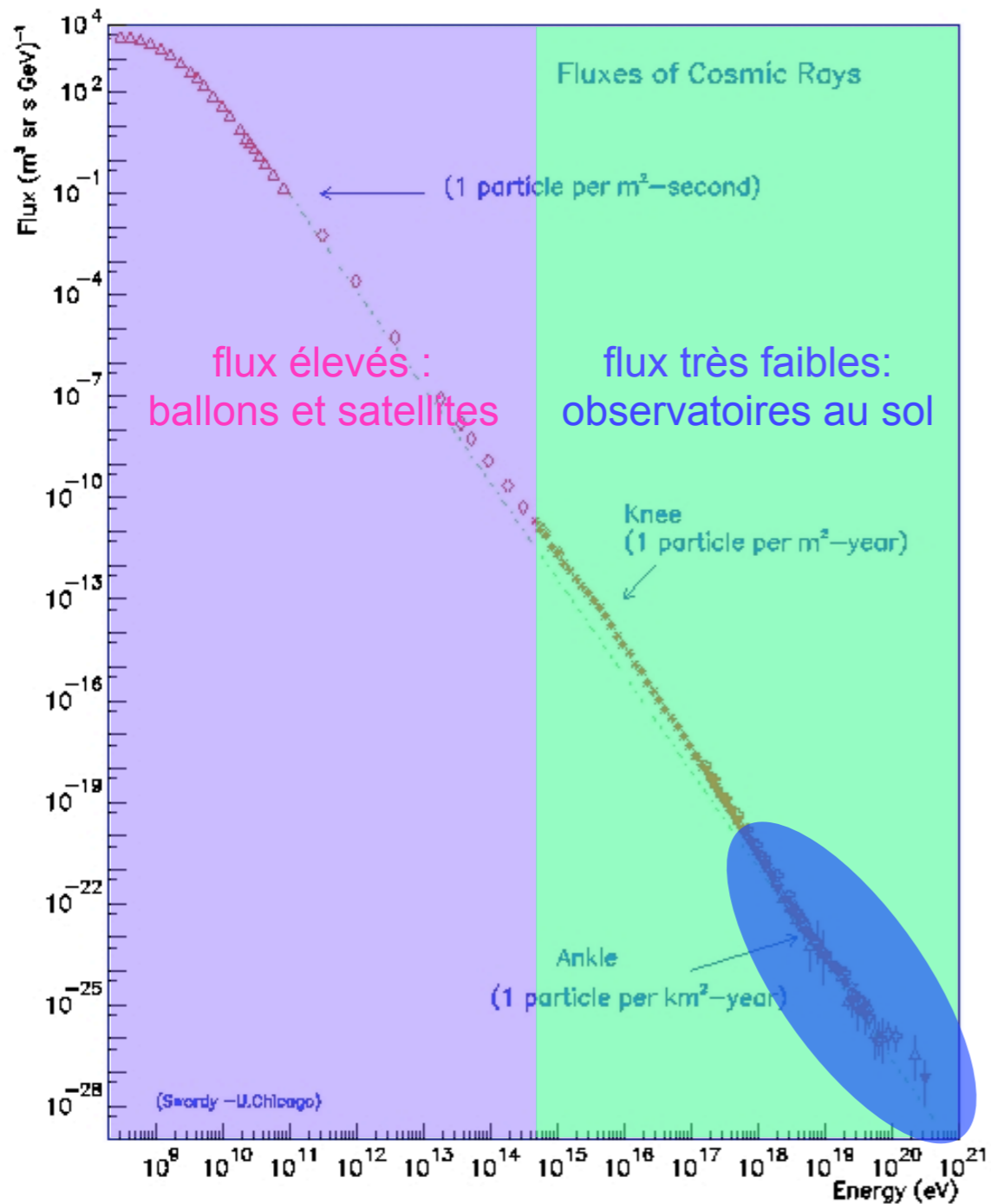
➡ la plus grande part de l'énergie est concentrée dans la partie basse énergie du spectre

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

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)