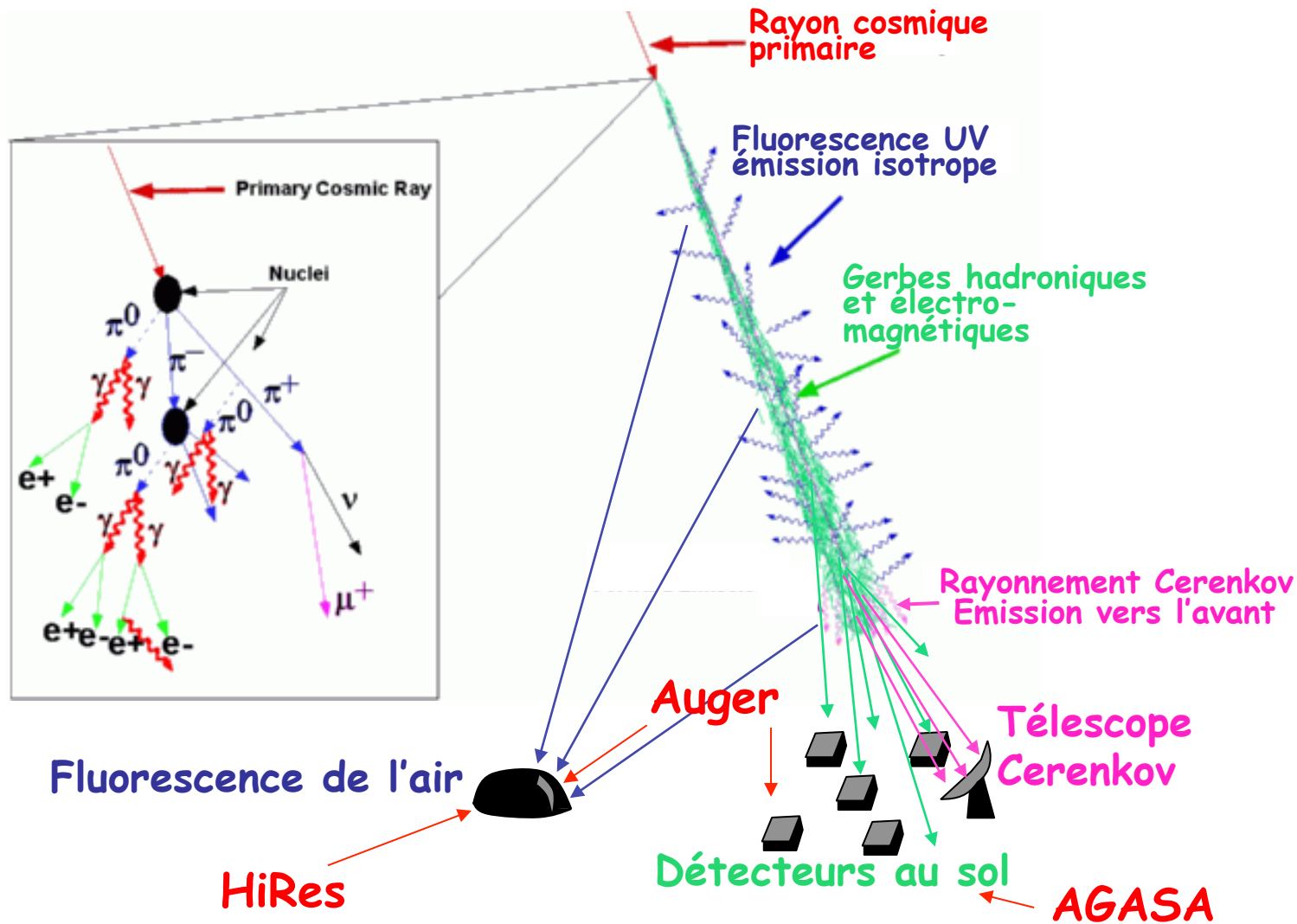


Rayons cosmiques:
détection

Détecteurs de rayons cosmiques



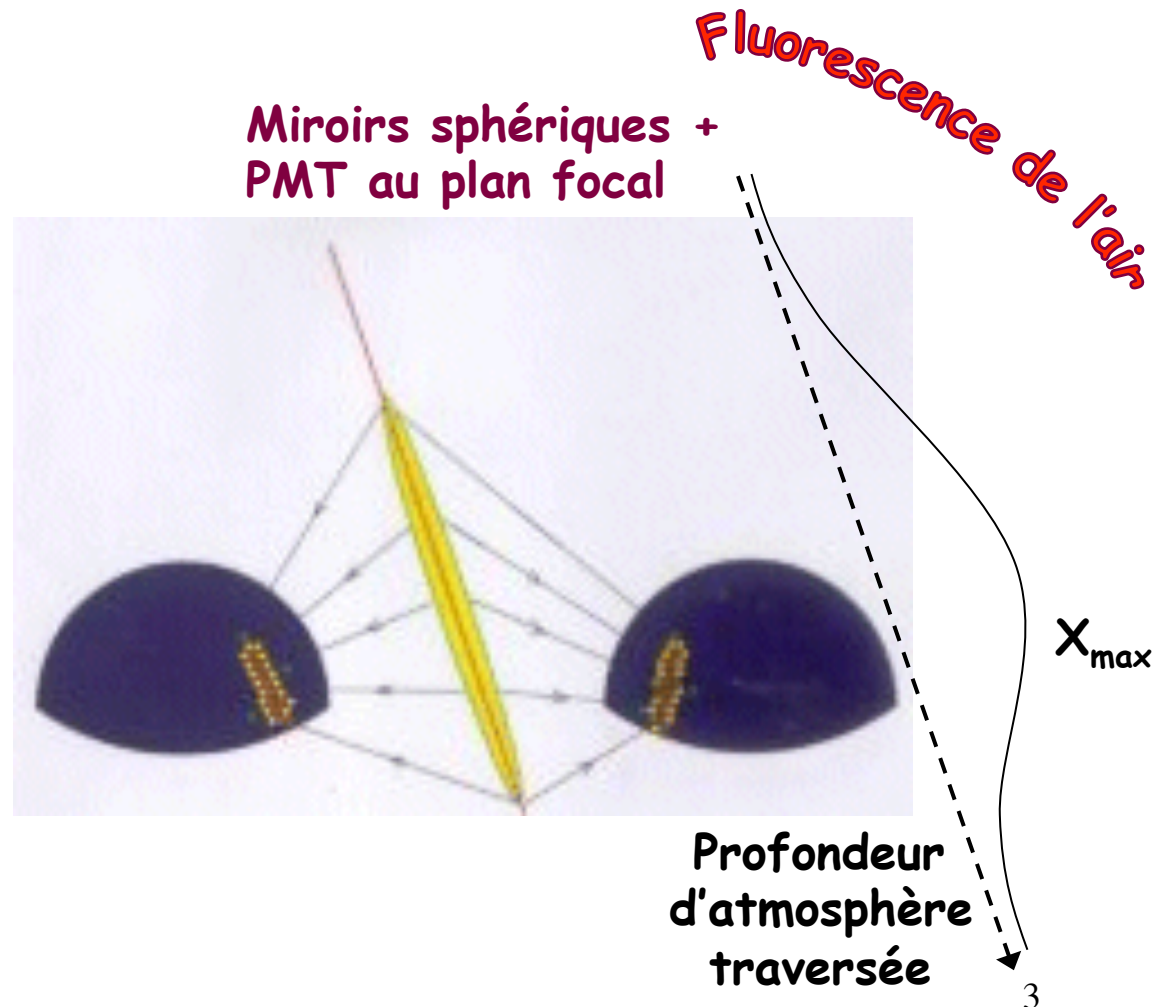
Techniques de détection

Uniquement
par nuits claires
et sans lune

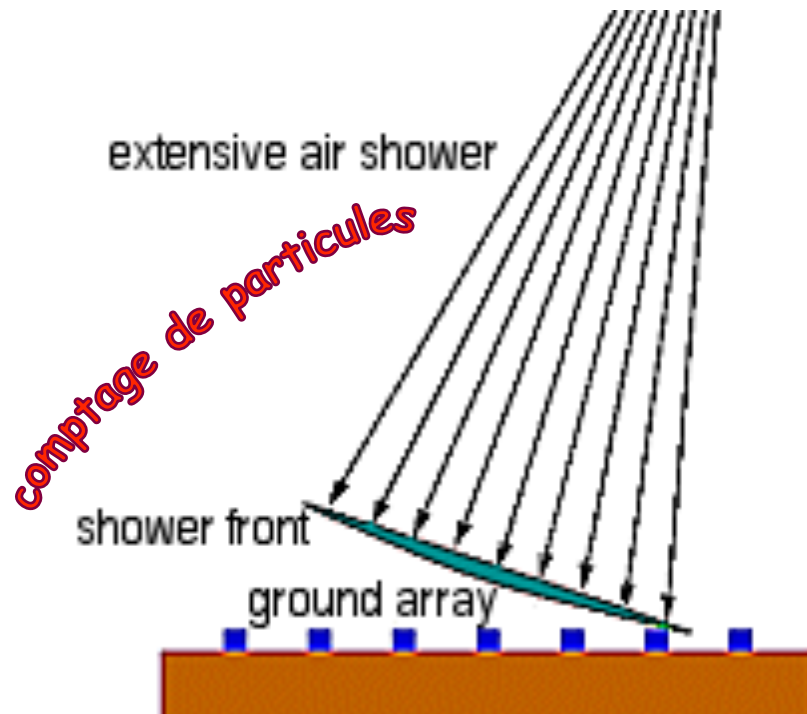
(lumière UV)

Trajectoire à partir de
géométrie + timing
ou
mode dual (mieux)

Energie: largeur
de la gerbe



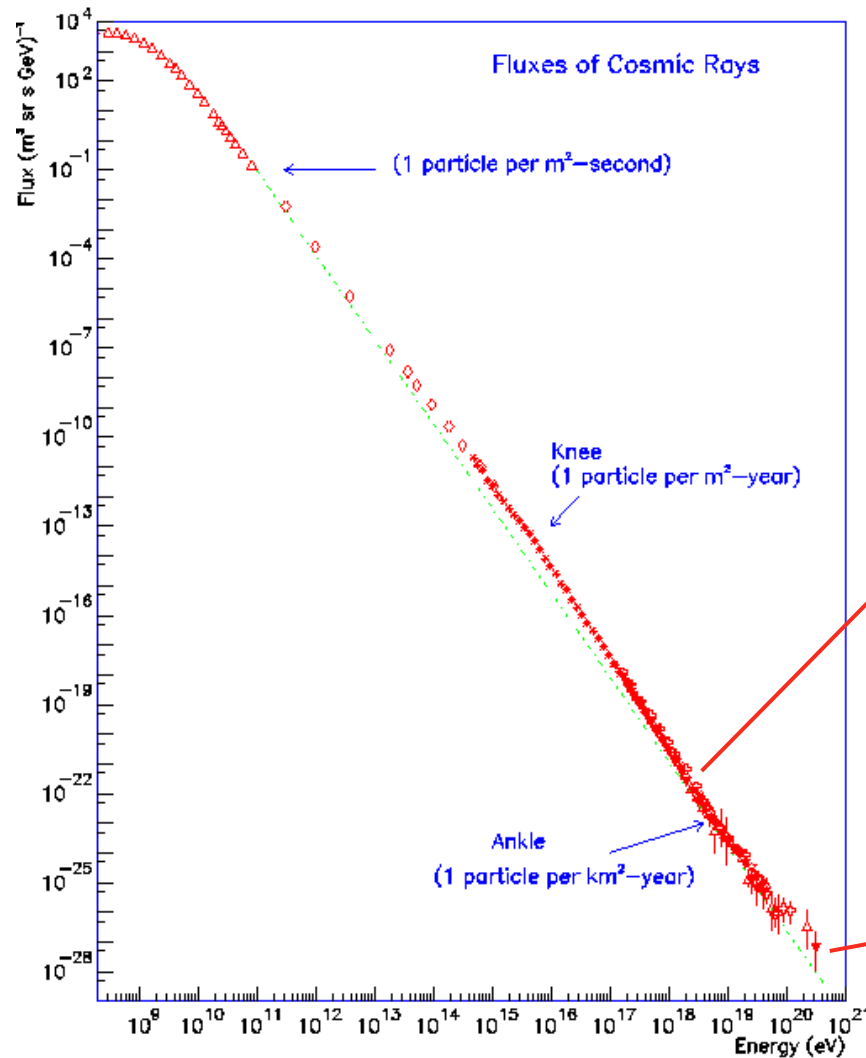
Techniques de détection



Trajectoire déterminée
à partir des temps d'arrivée
du front d'onde
sur détecteurs au sol

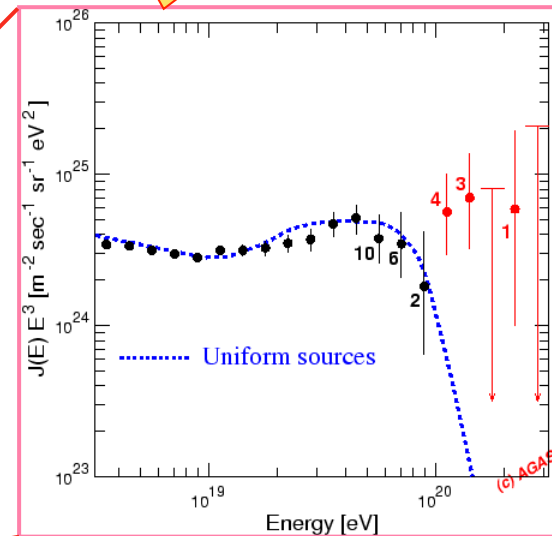
Energie déterminée
à partir des comptages

Ultra High Energy Cosmic Rays



AGASA : 17 evts à $E > 5 \times 10^{19}$ eV
 HiRes : 2 events (~ 20 attendus)

inter-calibration !

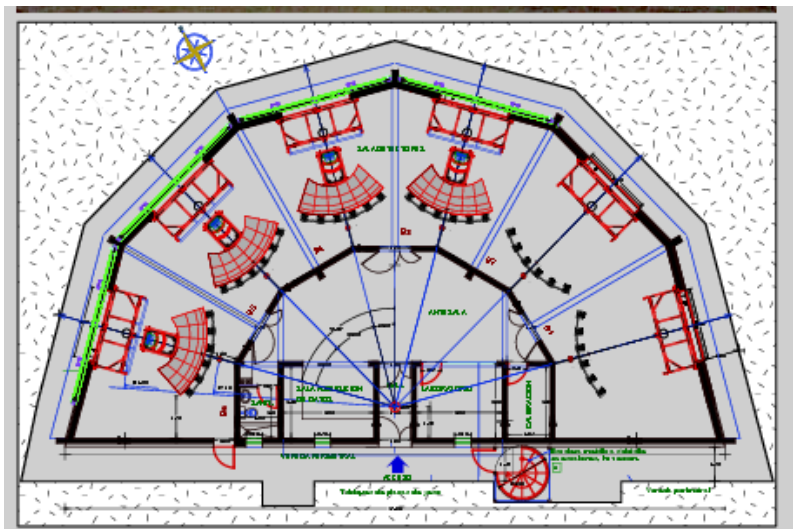


$E_{\max} = 3.2 \cdot 10^{20}$ eV = 50 J !

AUGER

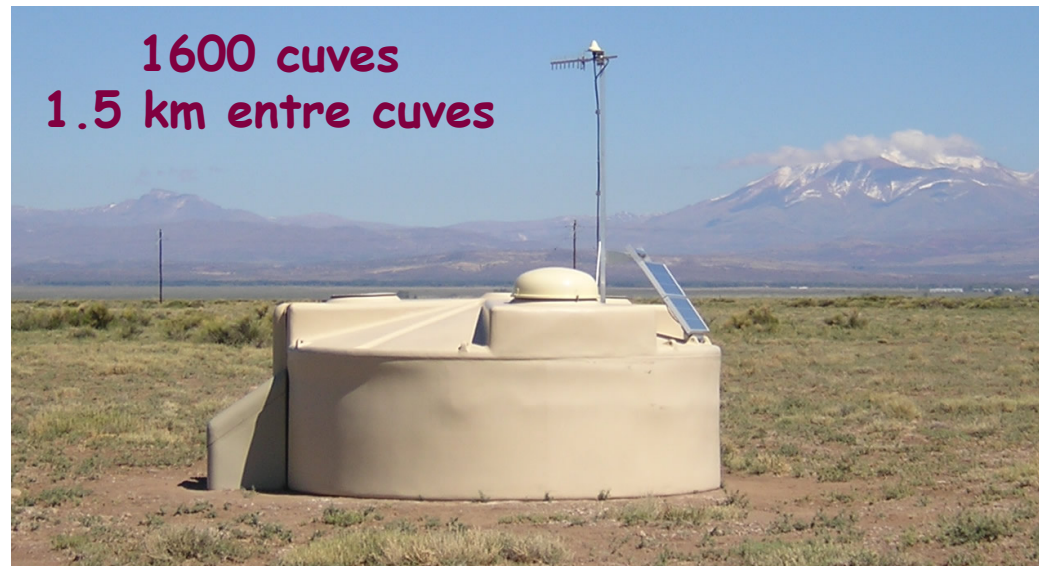
Fluorescence de l'air + détecteurs au sol
sur 3000 km²
de pampa argentine

4 stations de
téléscopes pour la fluorescence

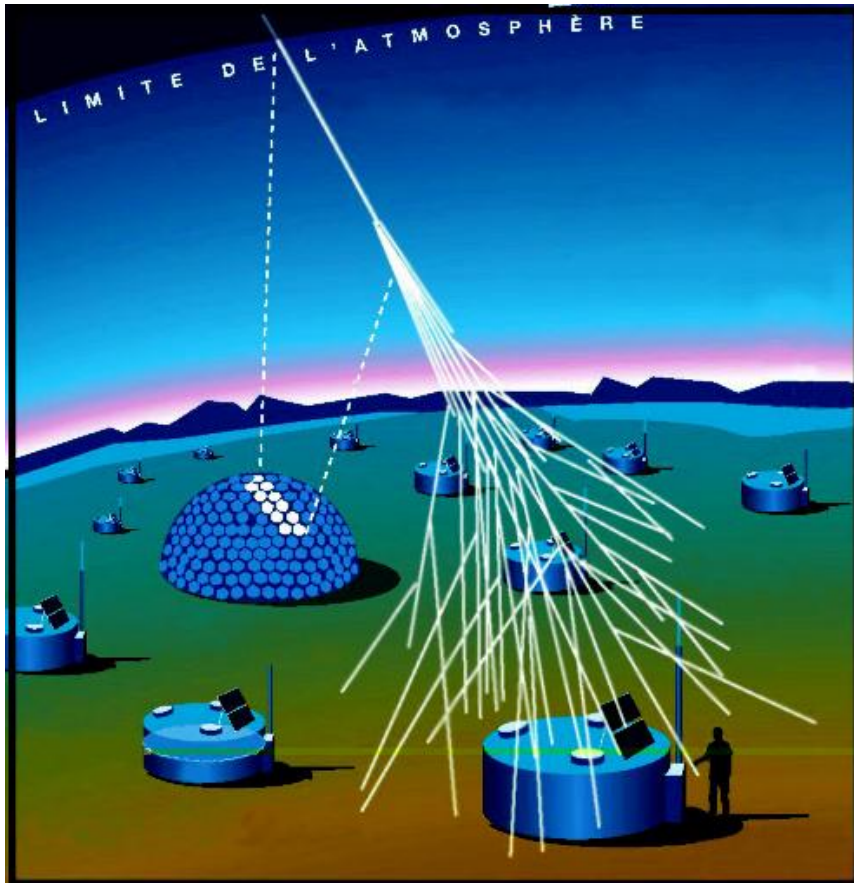


June 2009

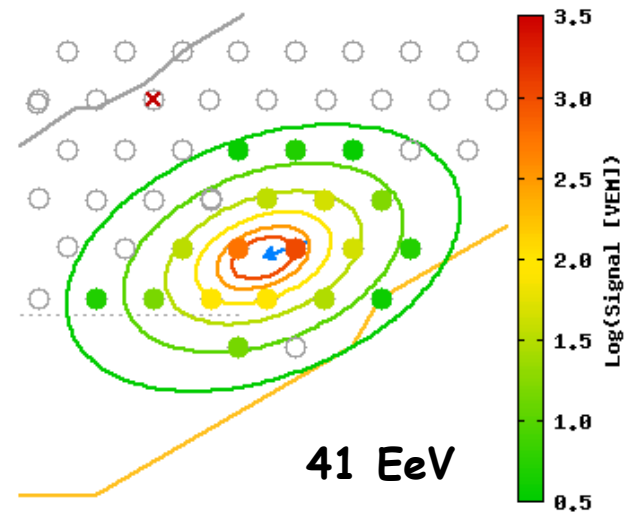
1600 cuves
1.5 km entre cuves



AUGER

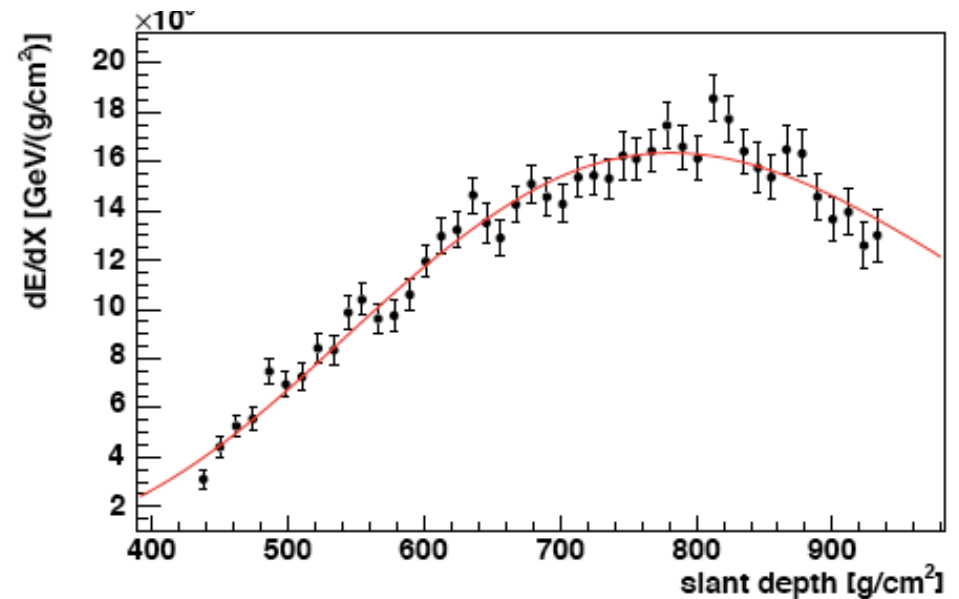
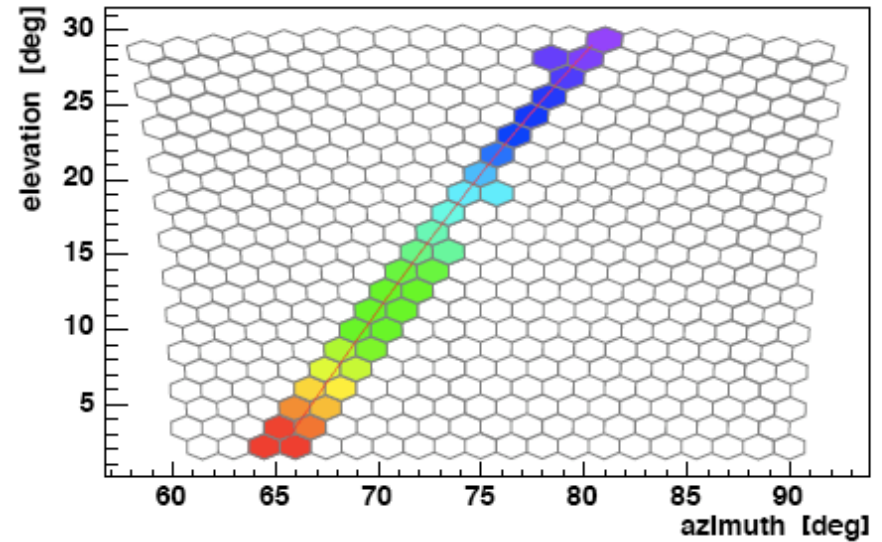
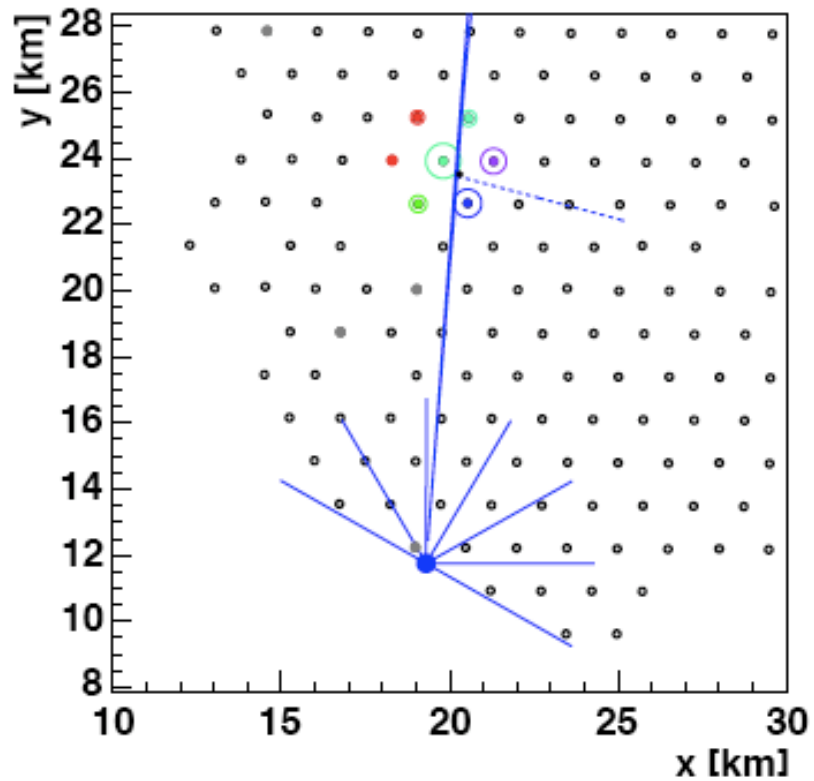


- >1 million d'événements enregistrés
- $E_{\max} \sim 1 \cdot 10^{20}$ eV



AUGER

événement hybride
 $\theta = 30^\circ$, $E \sim 8 \text{ EeV}$

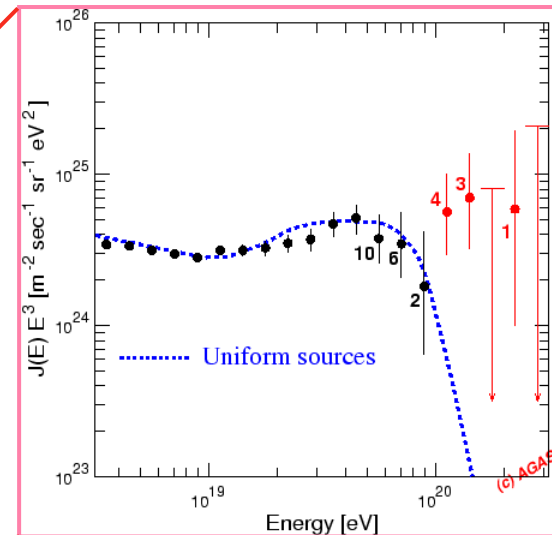
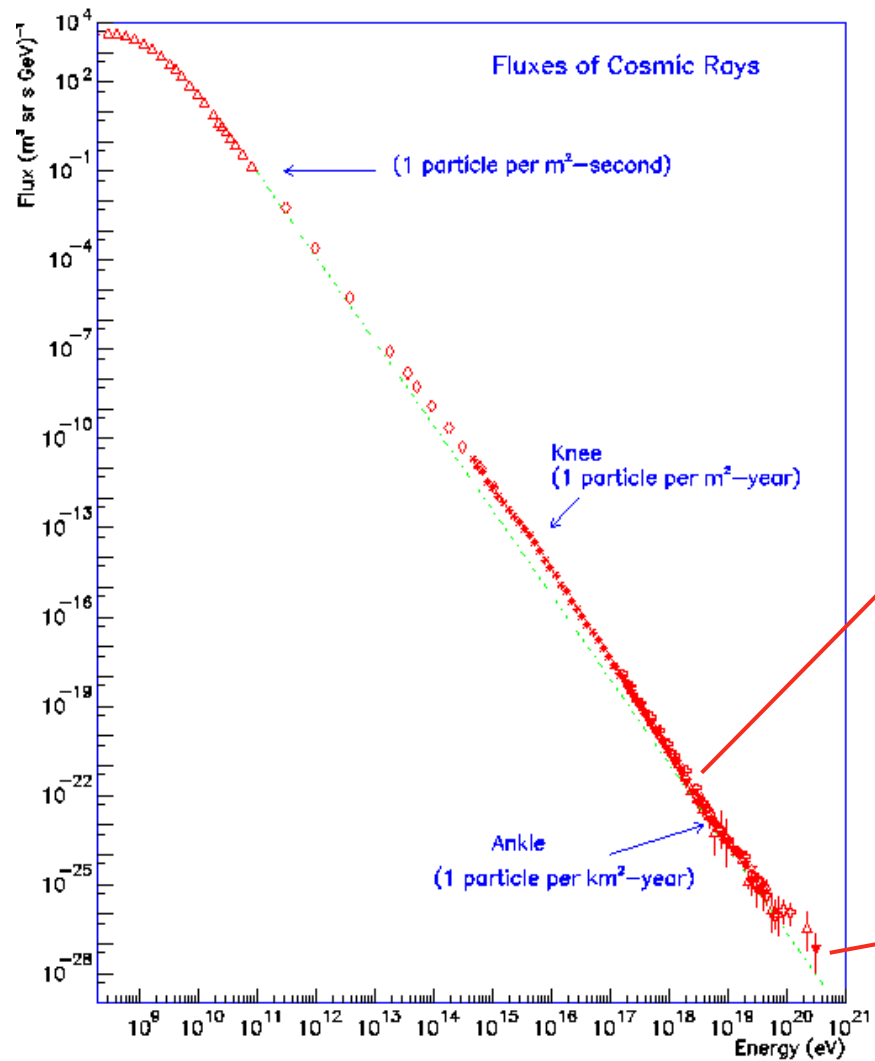


AUGER

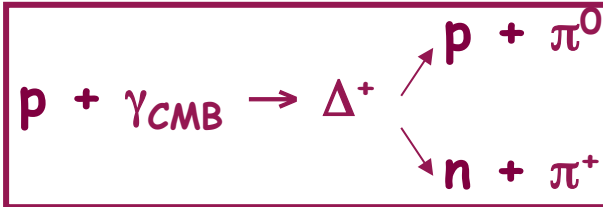
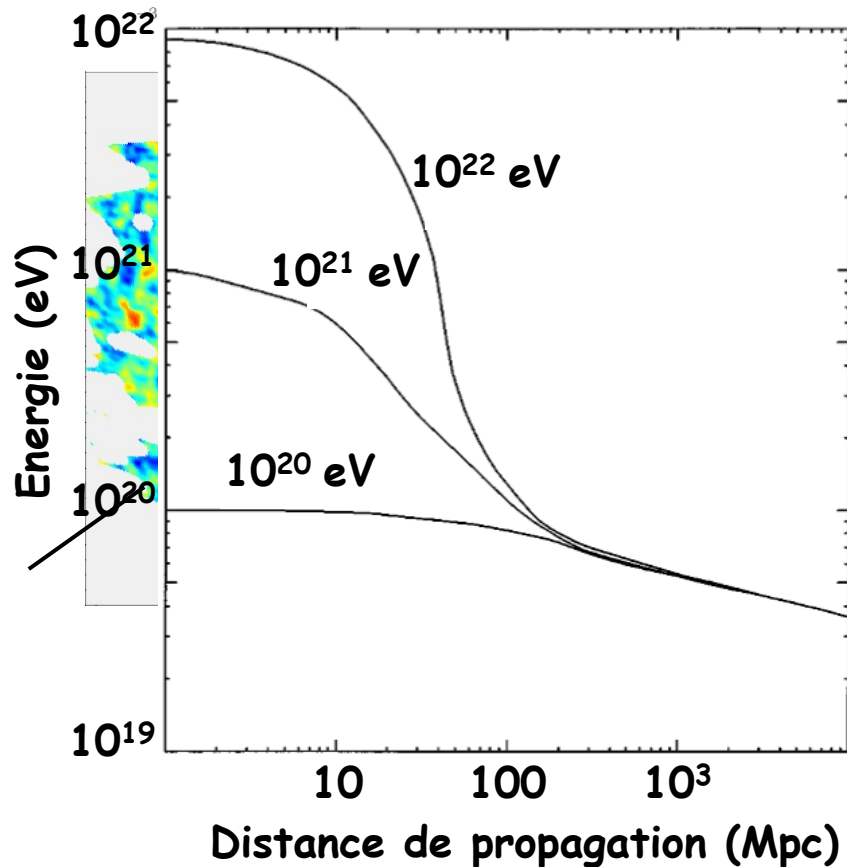
10^{19} eV	détecteur de surface	détecteur de fluorescence	hybride
$\Delta\theta$	2°	1°	0,4°
Δ impact	80 m	400 m	35 m
$\Delta E / E$	18%	15%	5%

10^{20} eV	détecteur de surface	détecteur de fluorescence	hybride
$\Delta\theta$	1°	1°	0,4°
Δ impact	40 m	400 m	30 m
$\Delta E / E$	7%	10%	3%

La « fin » du spectre



GZK (Greisen Zatsepin Kuzmin) cut-off



Processus possible
énergétiquement ($>5 \times 10^{19}$ eV)



Univers **opaque** aux rayons cosmiques

Sources avec $E > E_{\text{GZK}}$ sont à
 $d < 100$ Mpc (amas local)

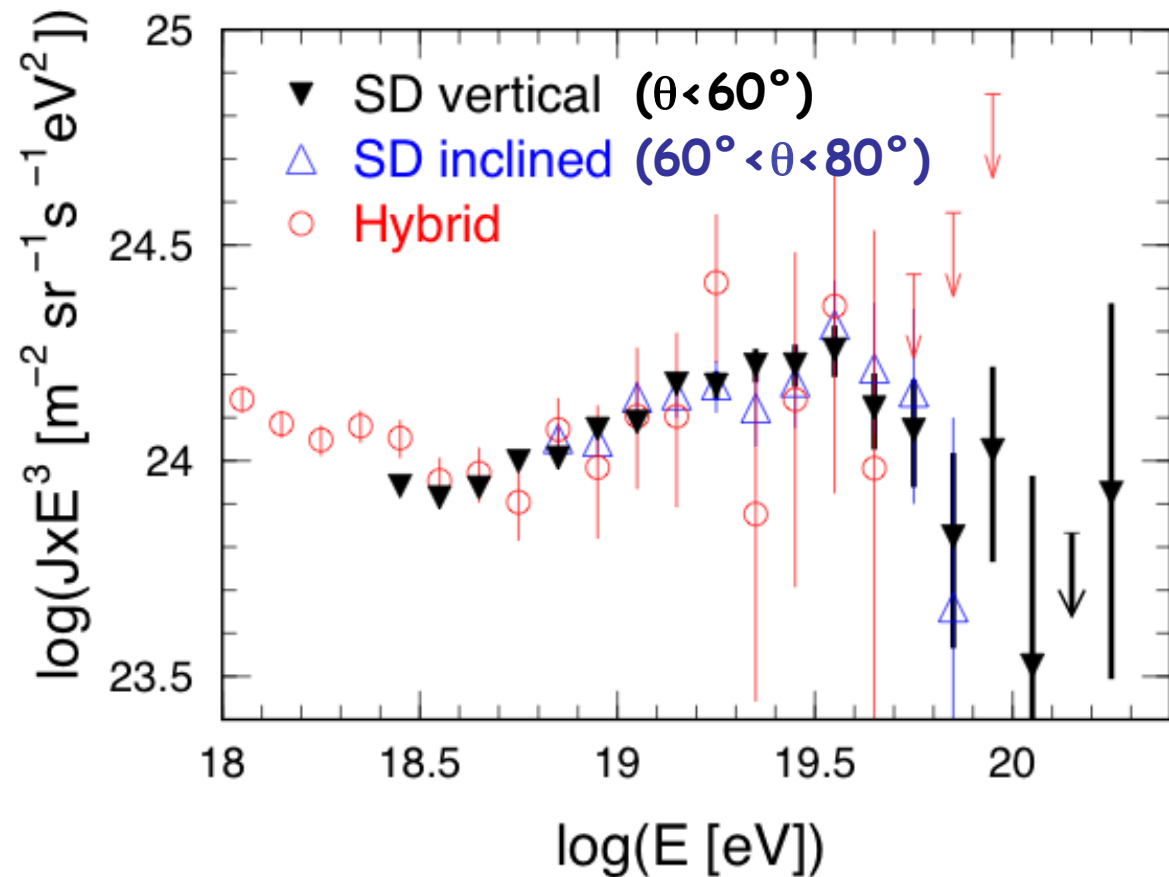
AUGER - spectre UHE

3 lots indépendants

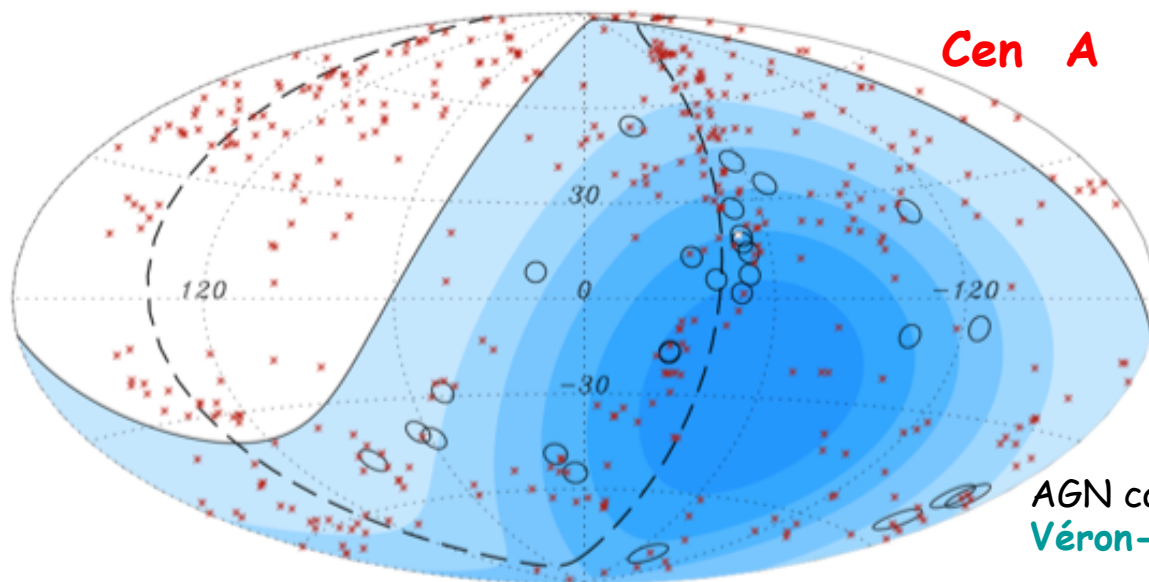
Présence de
coupure GZK

spectre plat
au delà de $4 \cdot 10^{19}$ eV
exclu à 6σ

Rayons cosmiques
proviennent
de sources lointaines



AUGER - origine des UHECR



Bonne résolution angulaire
($< 1^\circ$)
⇒ **Etude des anisotropies**

- Evts $E > 57 \text{ EeV}$
- ✗ AGNs $d < 71 \text{ Mpc}$

AGN catalog:
Véron-Céty and Véron, *A&A* 2006, 455 773

Number $E > 57 \text{ EeV}$	Number correlated within 3°	Expected if isotropy
27	20	5.6

Abraham et al., arXiv:0712.2843

Premiers indices de
correlation des UHECR
avec **sources astronomiques**

... mais non confirmés ...
2014: Correlation de 28%
pour 21% (isotropie)

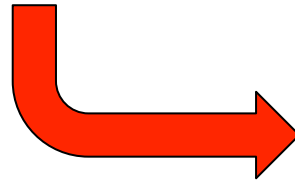
[arXiv:1411:6111]

autres messagers...

particules chargées
protons, noyaux

Confirmations indépendantes?

Autres preuves, autre approche



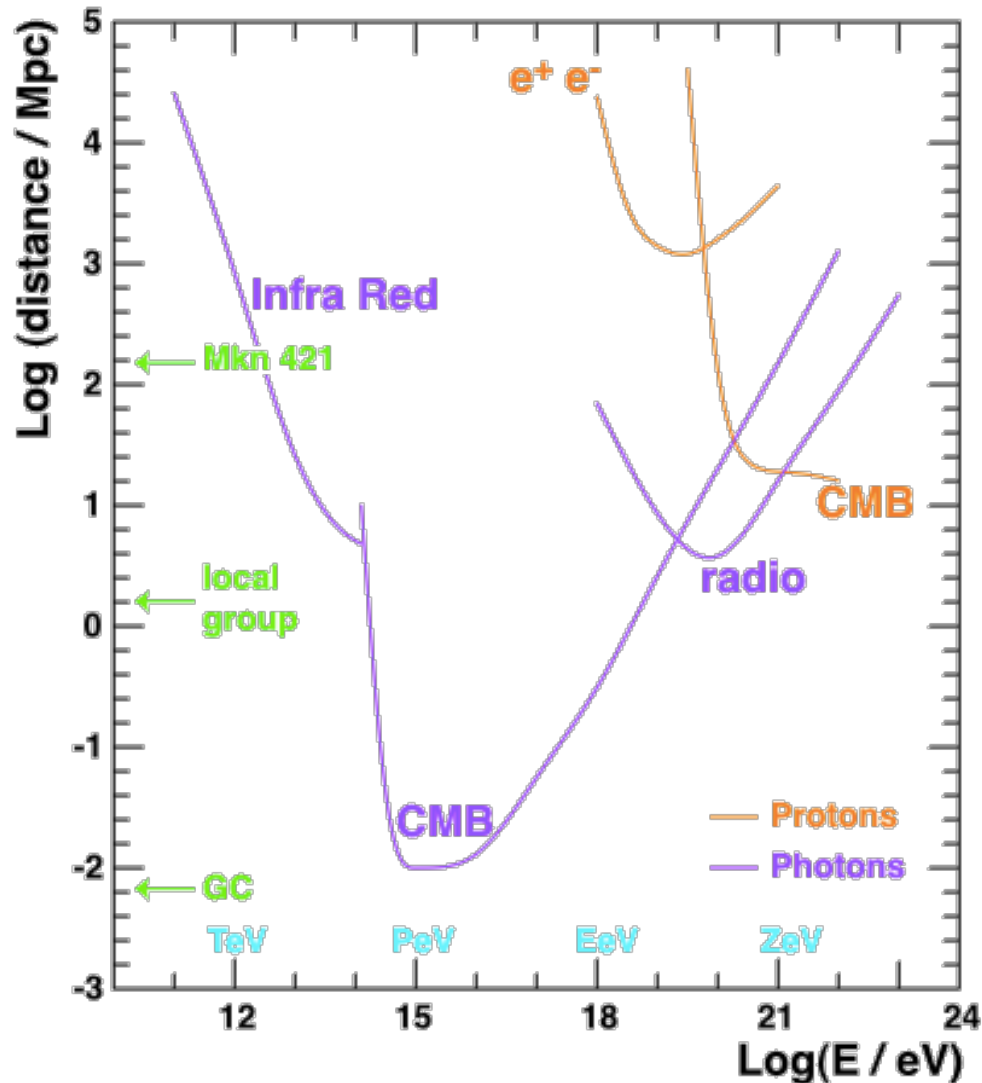
autres messagers

photons
de haute
énergie

ondes gravitationnelles

neutrinos

« Horizon » Gamma



coupure GZK

Absence
de sources
extragalactiques aux
plus hautes énergies

$E > \text{TeV}$
→ limité au groupe local

Astroparticule

1) Approche **multi-messenger**
Rayons cosmiques

2) Approche **multi-messagers**
Astronomie neutrino
Ondes gravitationnelles

3) **Neutrinos (cosmiques ou pas)**

- Saga solaire
- Des neutrinos dans l'atmosphère
- Neutrinos et cosmologie



Astronomie multi-messagers

Photons

Propagation en **ligne droite**
mais proviennent surtout
des **milieus ténus**



Rayons cosmiques (p)

Propagation **chaotique** (B)
mais **ultra haute**
énergie

Neutrons

$\tau \sim 15 \text{ mn}$
 $d_{\text{max}} = 10 \text{ kpc}$ à $E = 10^{18} \text{ eV}$

Neutrinos

Propagation quasi infinie
Propagation en ligne droite
MESSAGER IDEAL
milieux denses
lointains

Astronomie multi-messagers

Photons

Propagation en **ligne droite**
mais proviennent surtout
des **milieux ténus**



libre parcours moyen
d'un $\nu = \infty$

2 s pour sortir

libre parcours moyen
d'un photon = 1 cm

100 000 ans pour sortir

Neutrinos

Propagation quasi infinie
Propagation en ligne droite
MESSAGER IDEAL
milieux denses
lointains

« Telescope » à neutrinos

Très faible section efficace d'interaction des ν
Très faibles flux à grand E

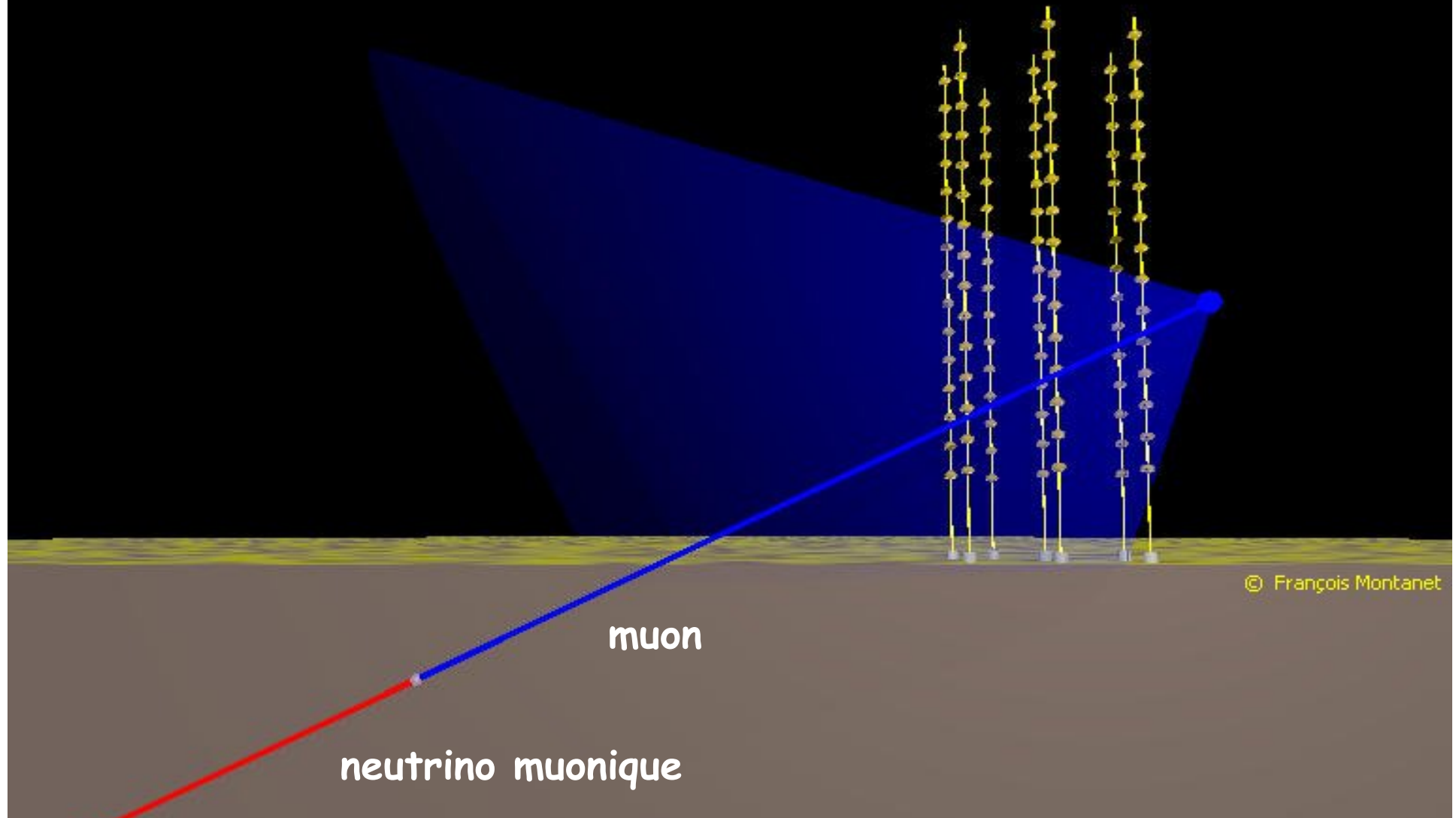


Oscillations donc ν_e , ν_μ et ν_τ
en proportion égale au niveau de
la Terre

Les μ et τ produits peuvent
traverser une grande quantité
de matière (plusieurs km)

⇒ La Terre comme détecteur !

« Telescope » à neutrinos



Effet Cerenkov

progression
lente

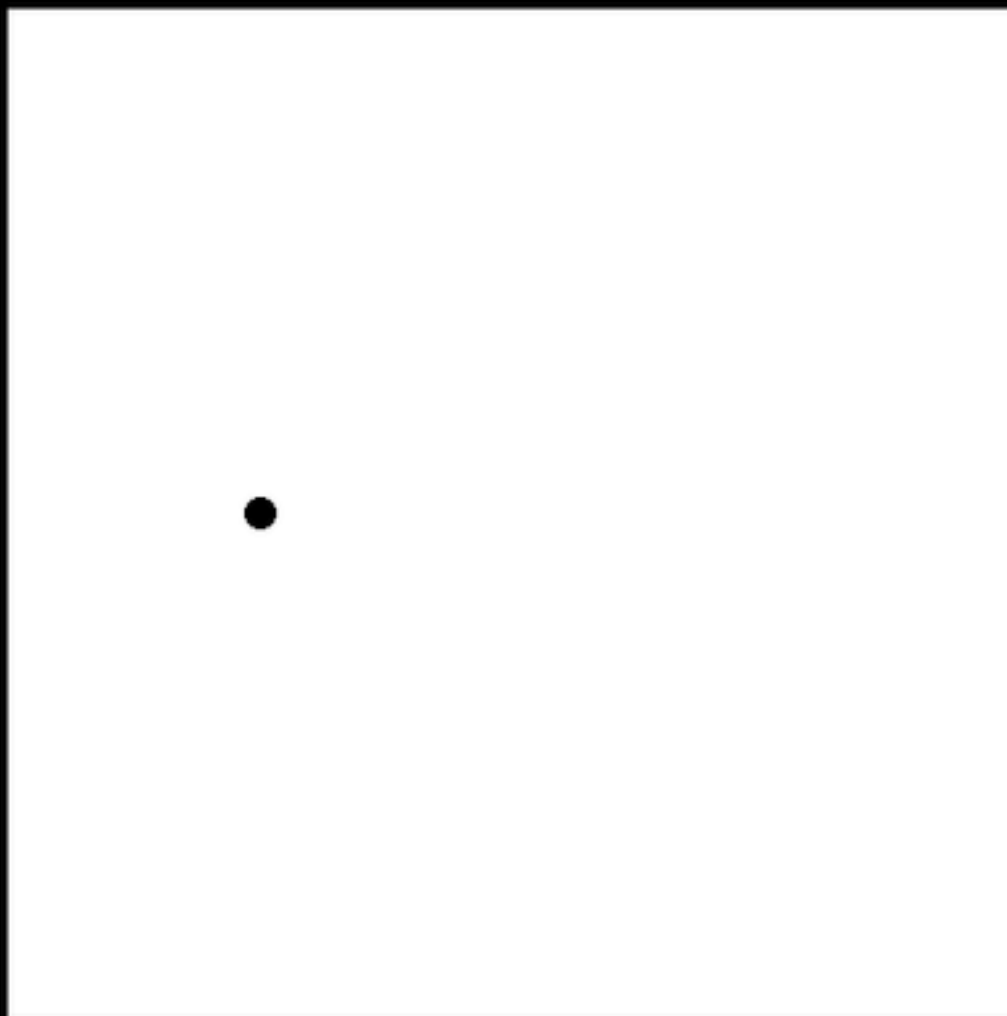
(effet
Doppler)



Effet Cerenkov

progression
rapide

(onde de
choc)

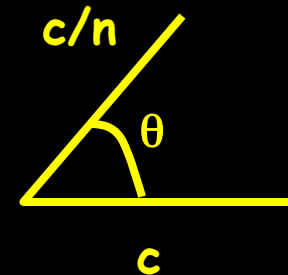


v lumière = c/n

v particule $\sim c$

$\cos \theta = (c/n)/c$

$\theta = 1^\circ$ air
 42° eau



Effet Cerenkov

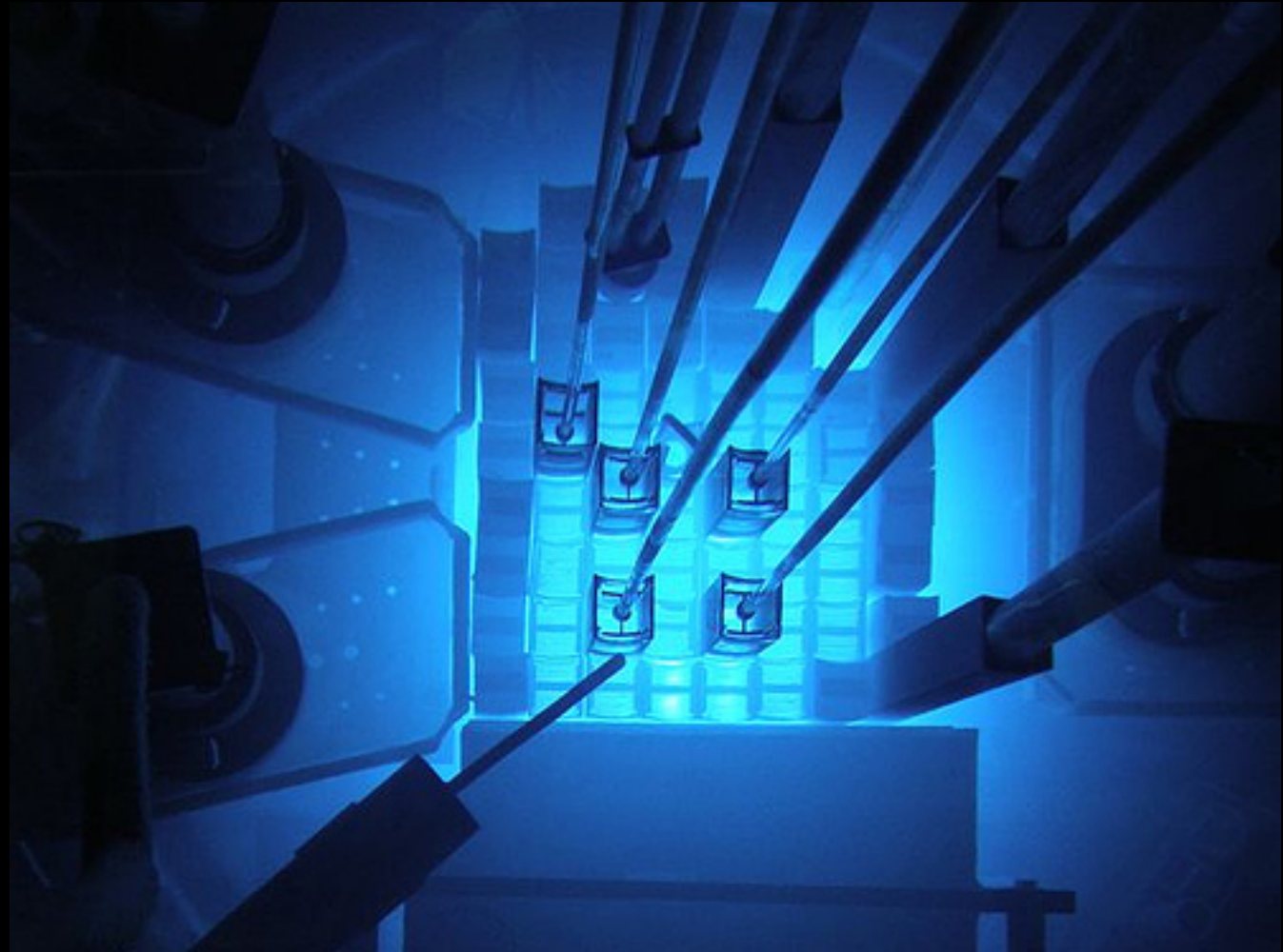
analogie sonore

Mur du son
Bang supersonique

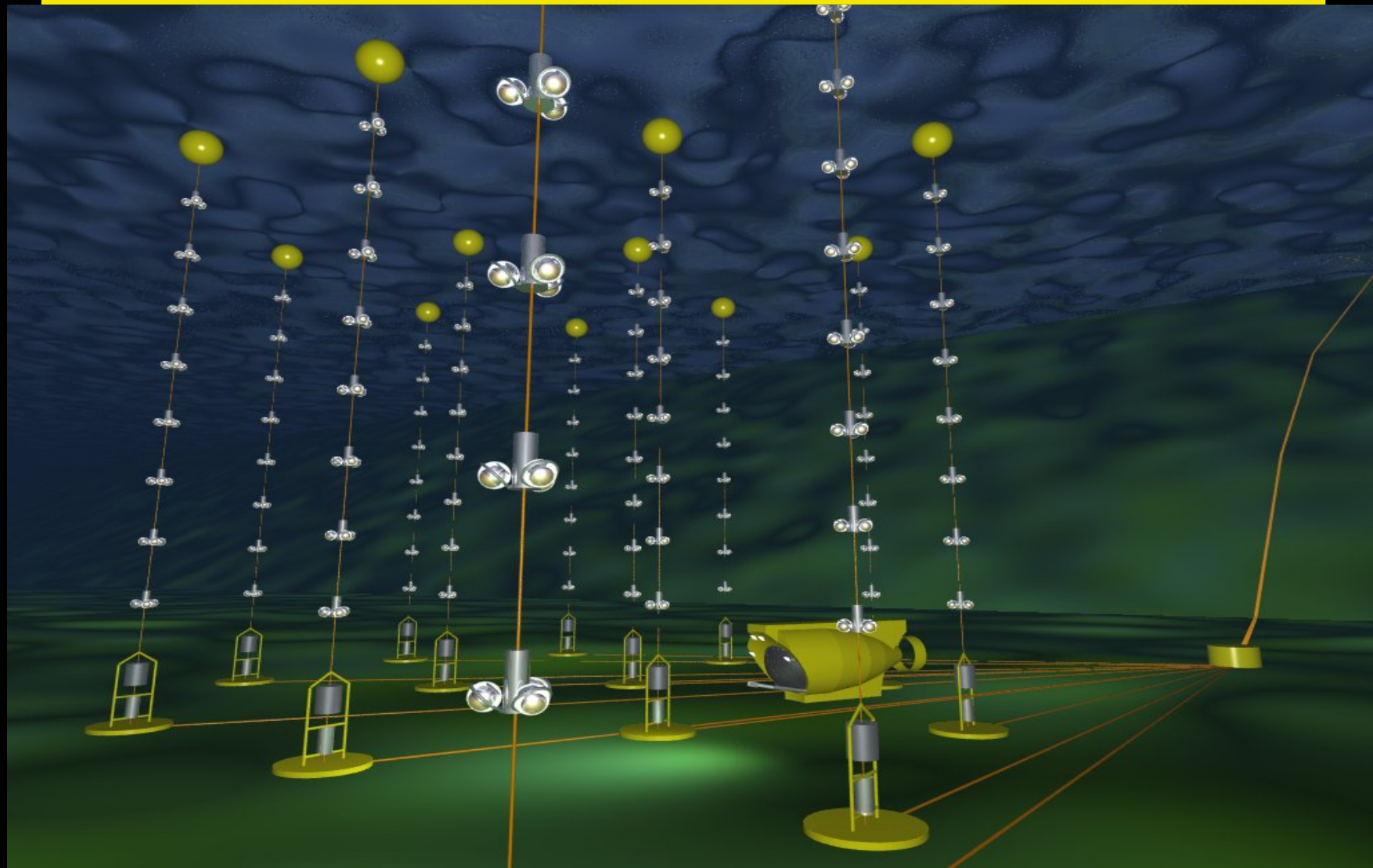


Effet Cerenkov

Lumière bleue

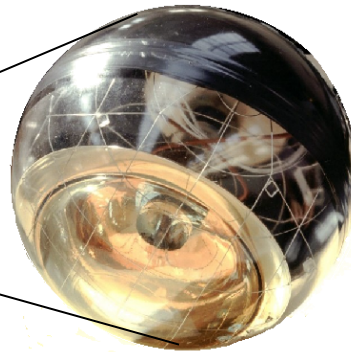
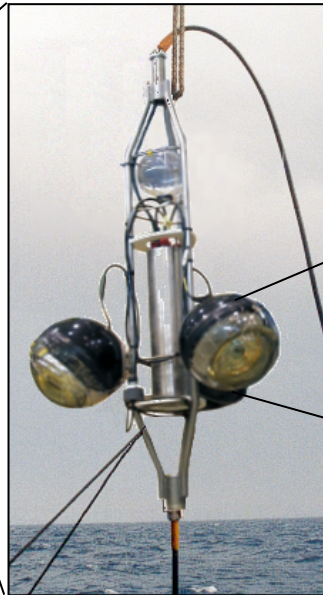
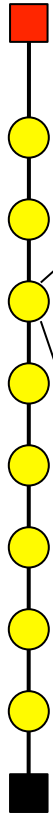


« Télescope » à neutrinos



Detecteurs

Lignes équipées de modules optiques (PMT)



- d_{OM-OM} : Seuil en E
- # de OM: Résolution en E
- $d_{inter\ ligne}$: Volume effective (E max)

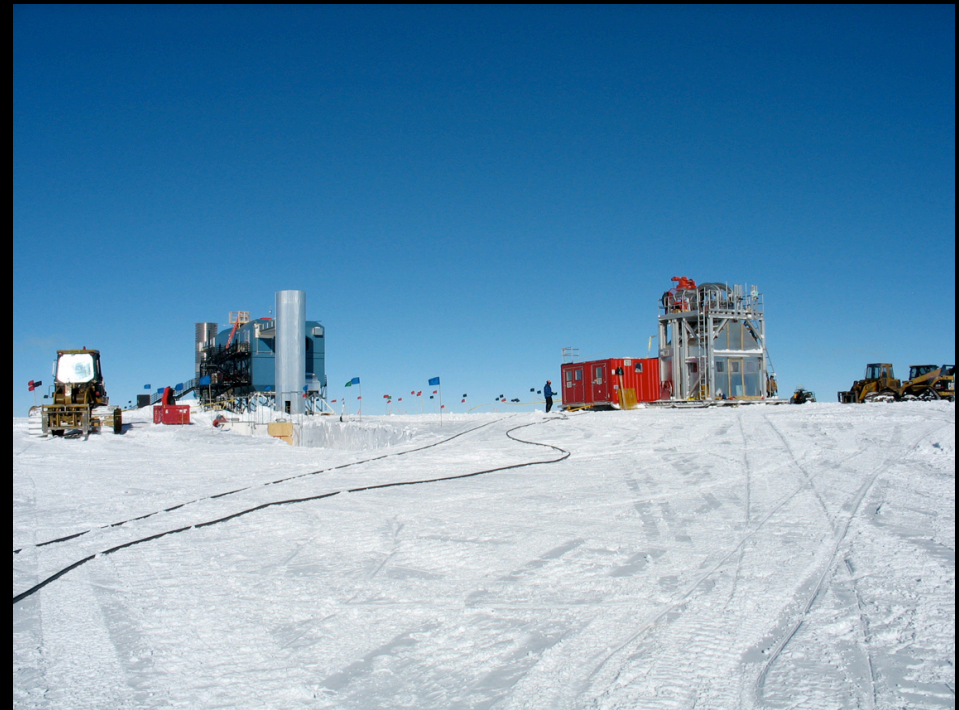


« Téléscopes » à neutrinos



Antares
0.1 km² x 400m
meilleure résolution angulaire
(0.2°)

Ice Cube
1 km² x 1 km
meilleure sensibilité
(moins d'absorption)



New South Pole Station

First IceCube string

IceCube Laboratory

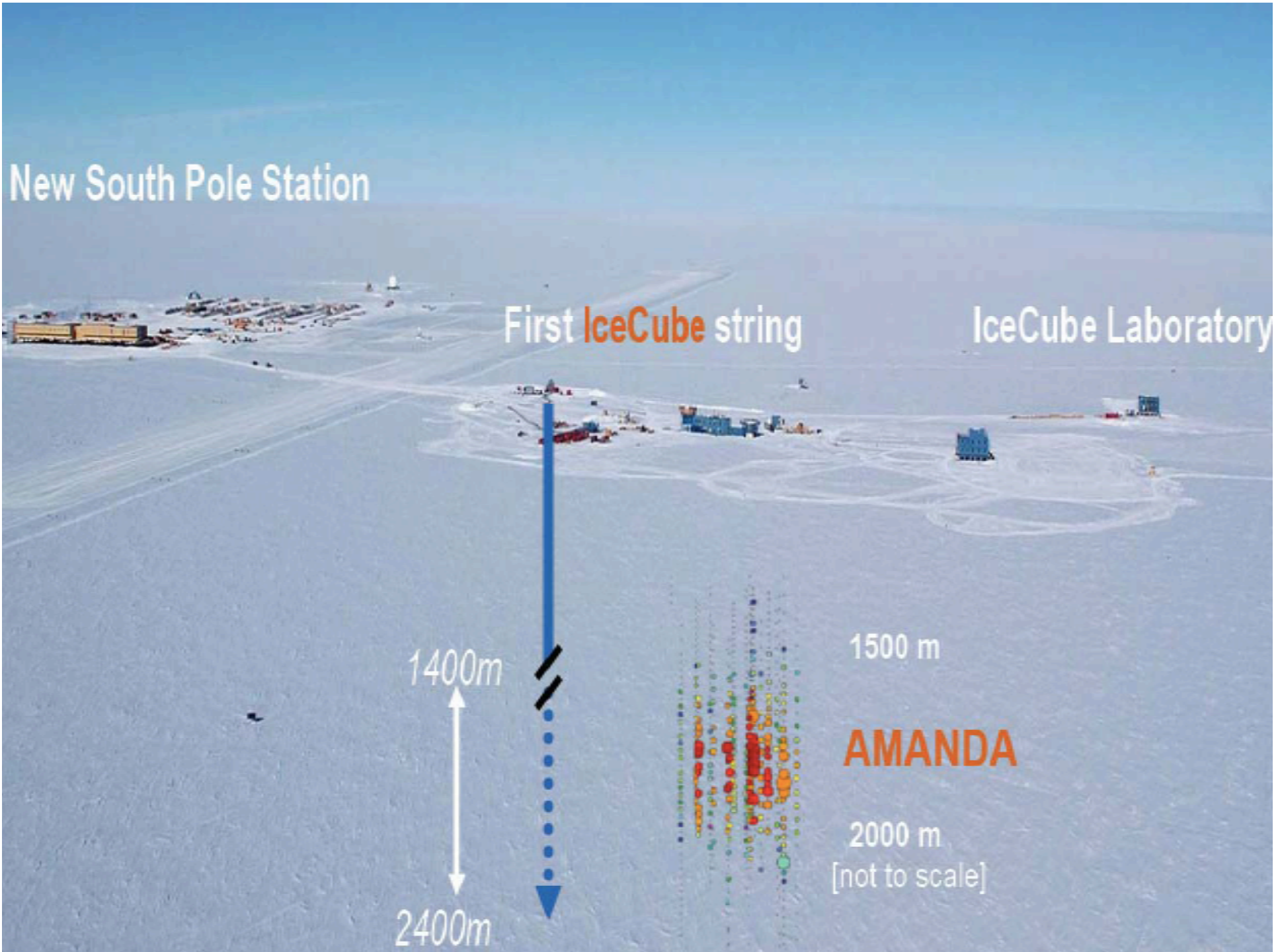
1400m

2400m

1500 m

AMANDA

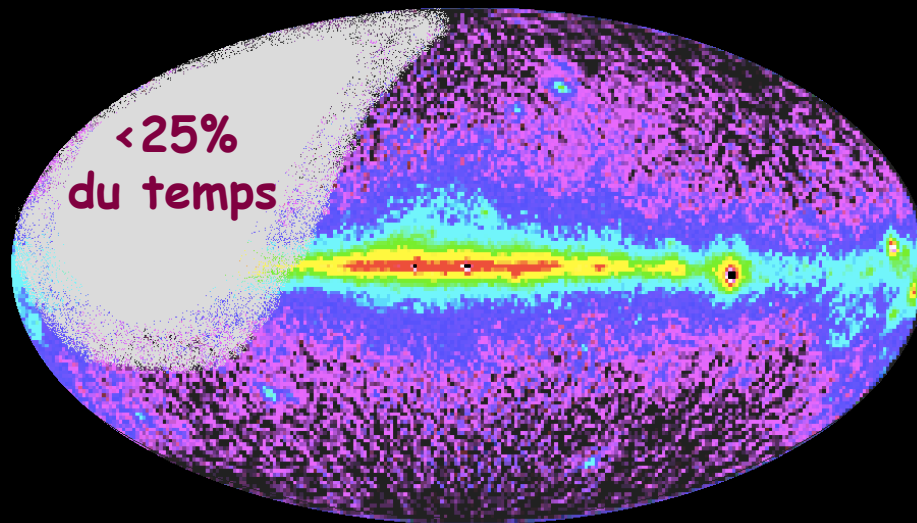
2000 m
[not to scale]



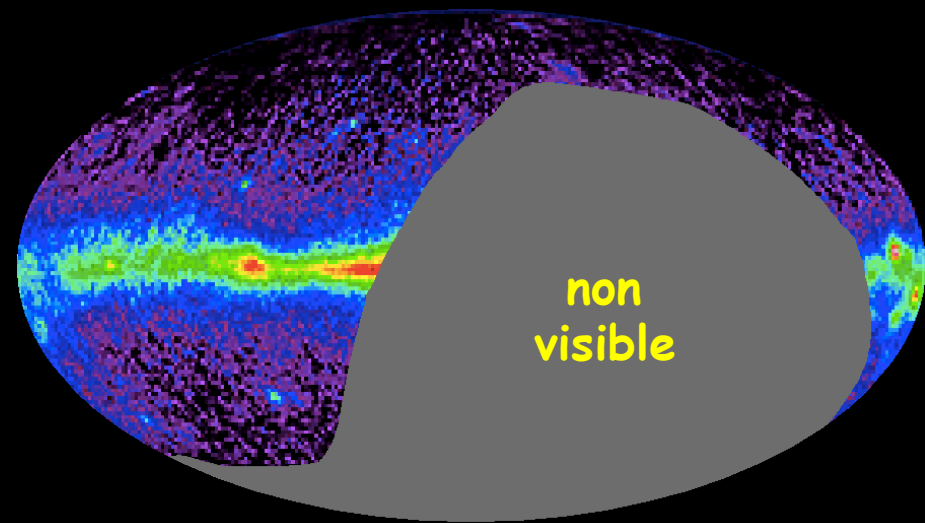


« Téléscopes » à neutrinos

Antares
(43° North)

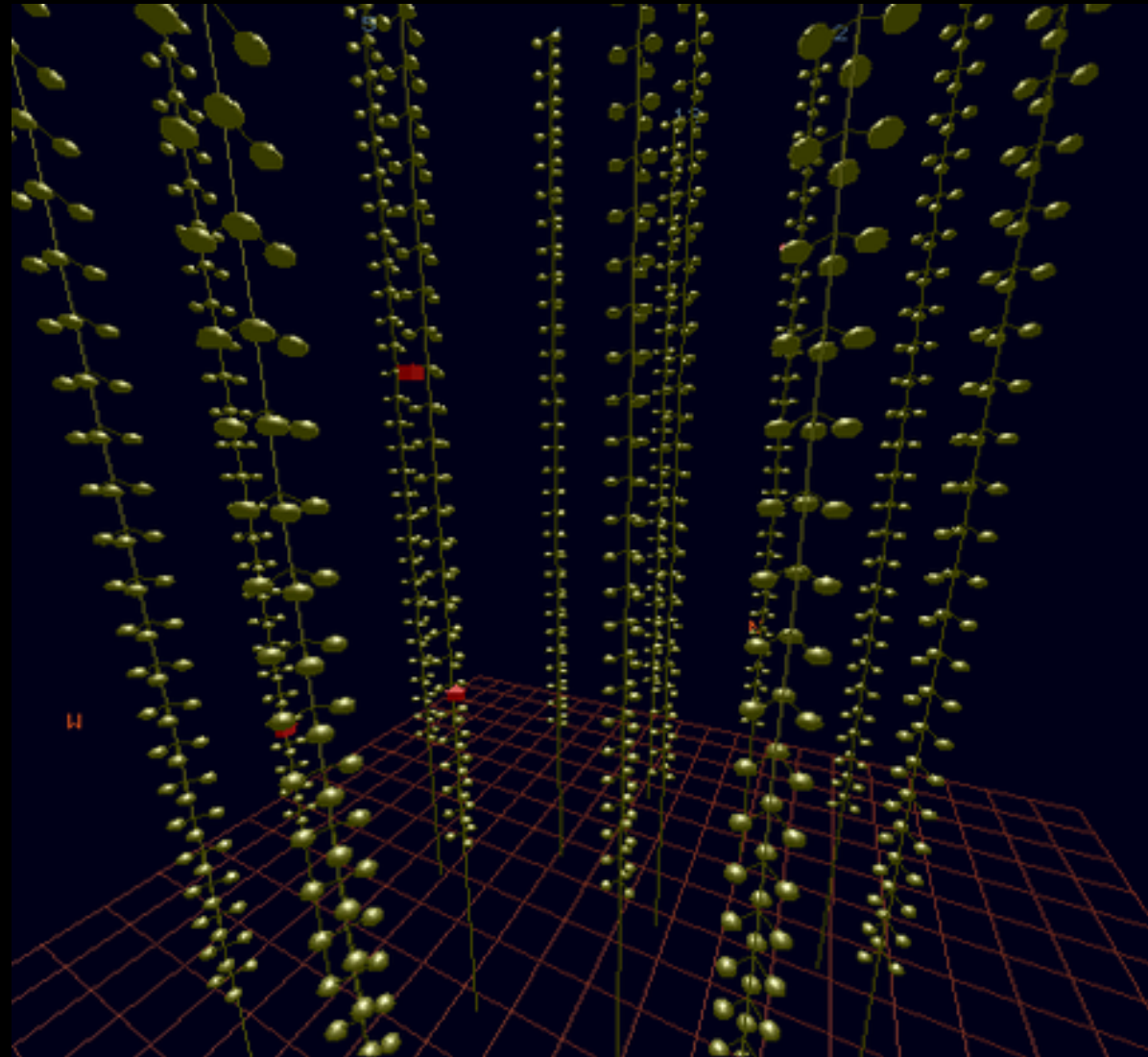


Ice Cube
(pôle Sud)



Intercalibration possible sur 0.6π steradians

« Téléscopes » à neutrinos



« Téléscopes » à neutrinos

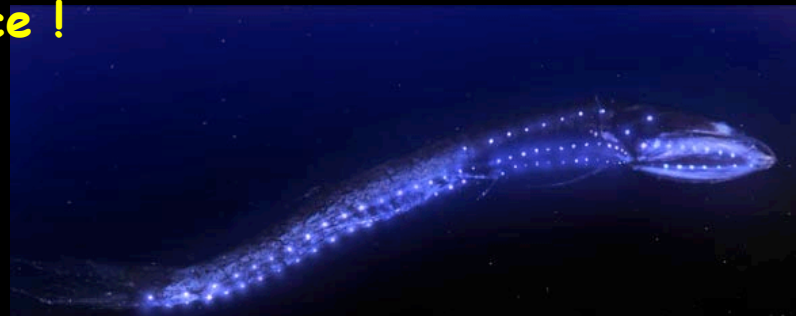
Scintillement du télescope :

radioactivité naturelle



© DeepSeaPhotography.Com

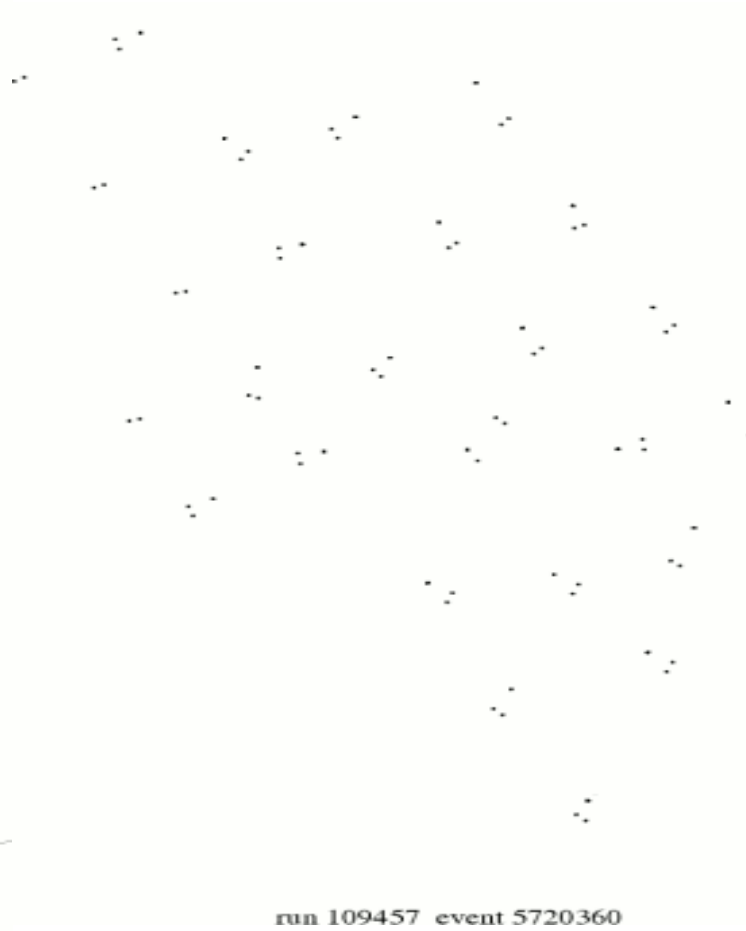
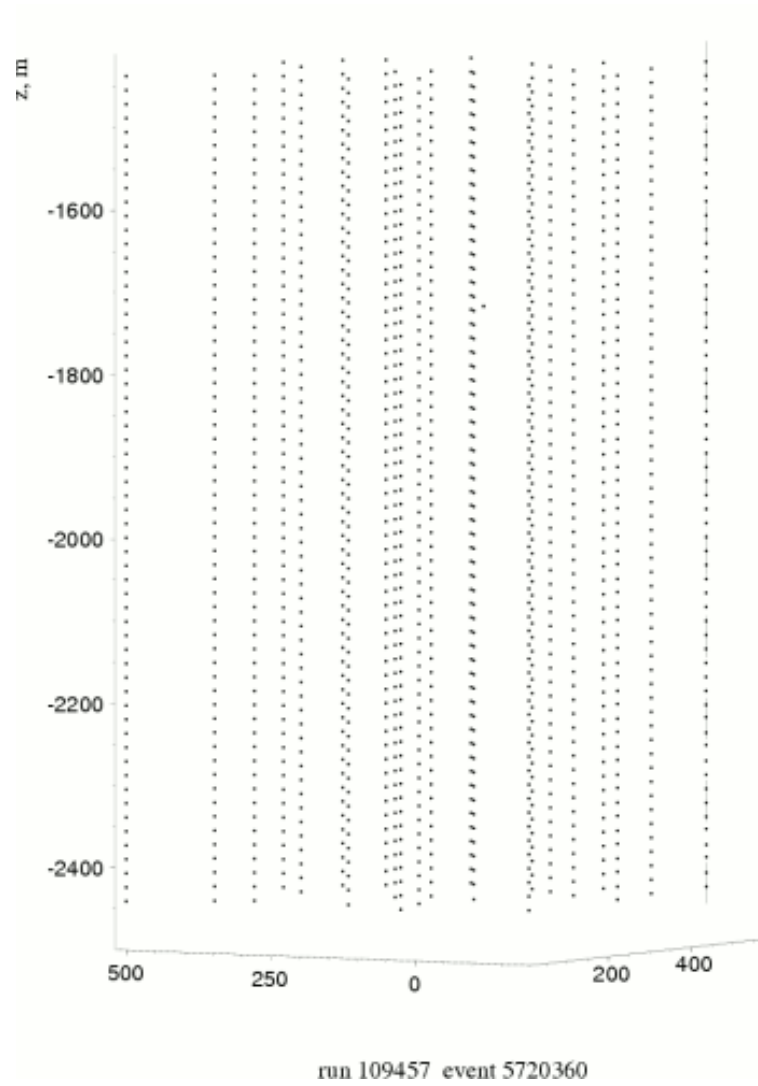
bioluminescence !



© DeepSeaPhotography.Com

Muon montant : signature d'un ν_μ

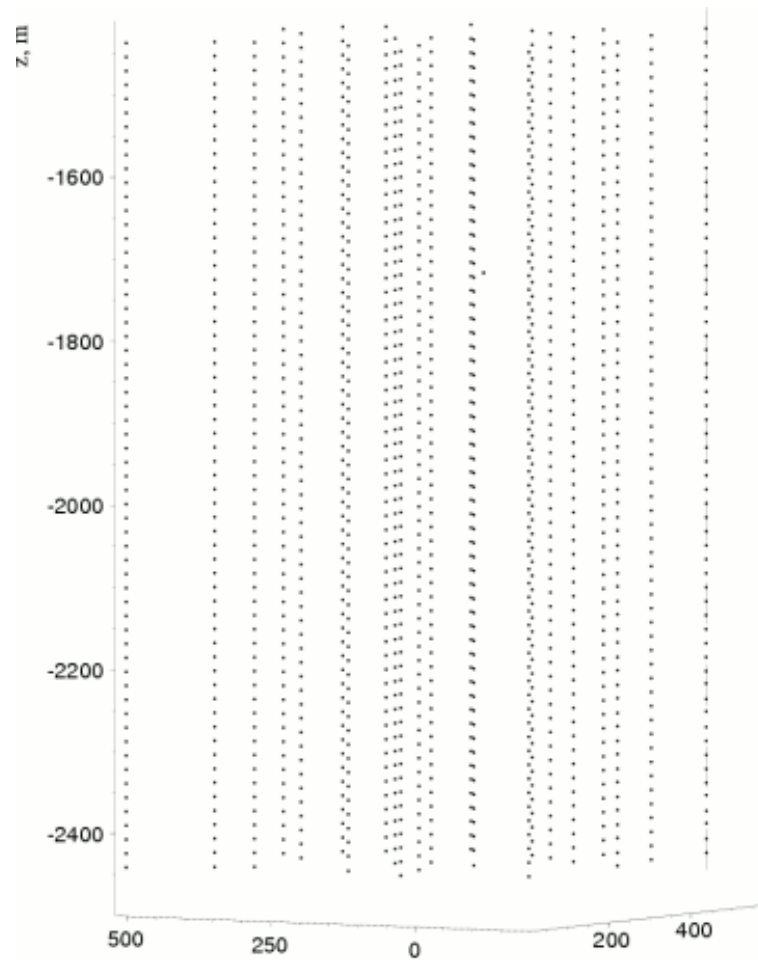
(IC22)



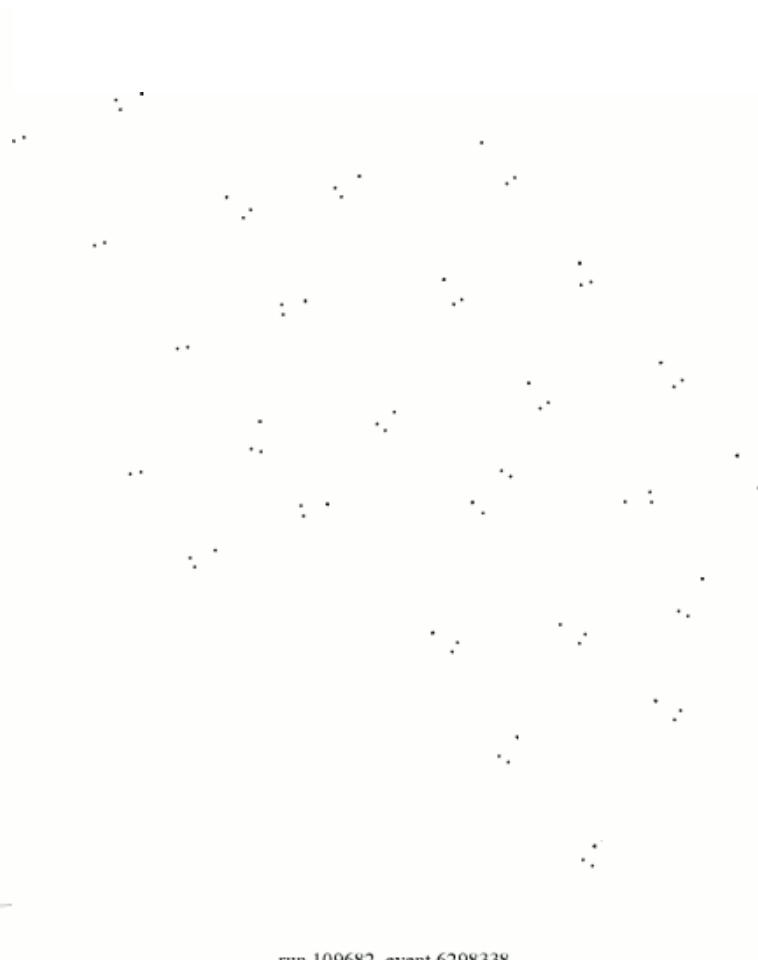
Cascade : signature d'un ν_e

(IC22)

Energie = 134 TeV



run 109682 event 6298338

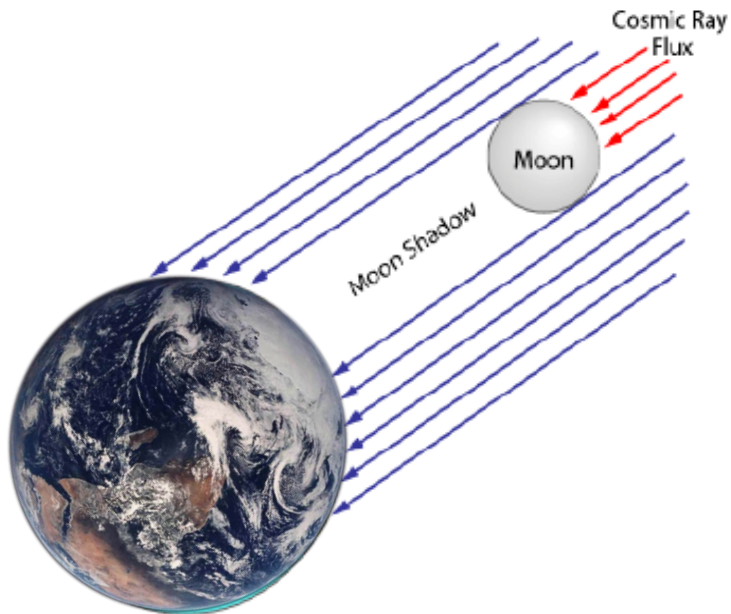


run 109682 event 6298338

A l'ombre de la lune

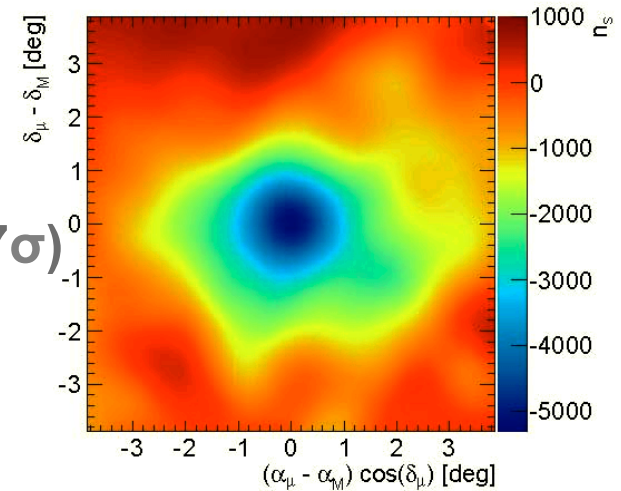
(IC40+IC59)

Rayons cosmiques bloqués par la lune
=> déficit de muons descendants

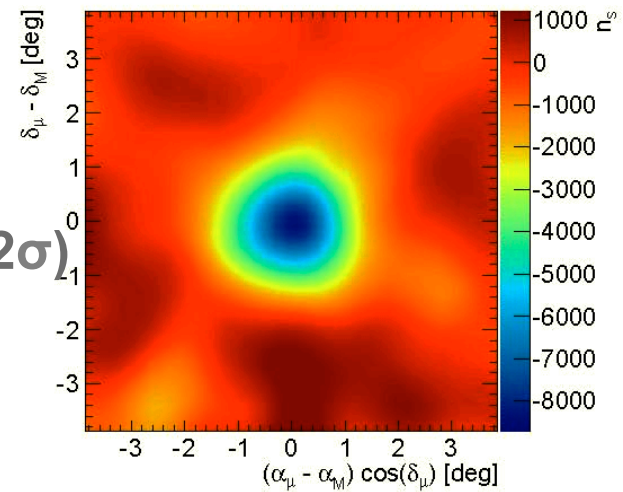


Ombre de la lune détectée $>10\sigma$
Erreur de pointage $< 0.1^\circ$
Vérification de la PSF pour
reconstruction des traces

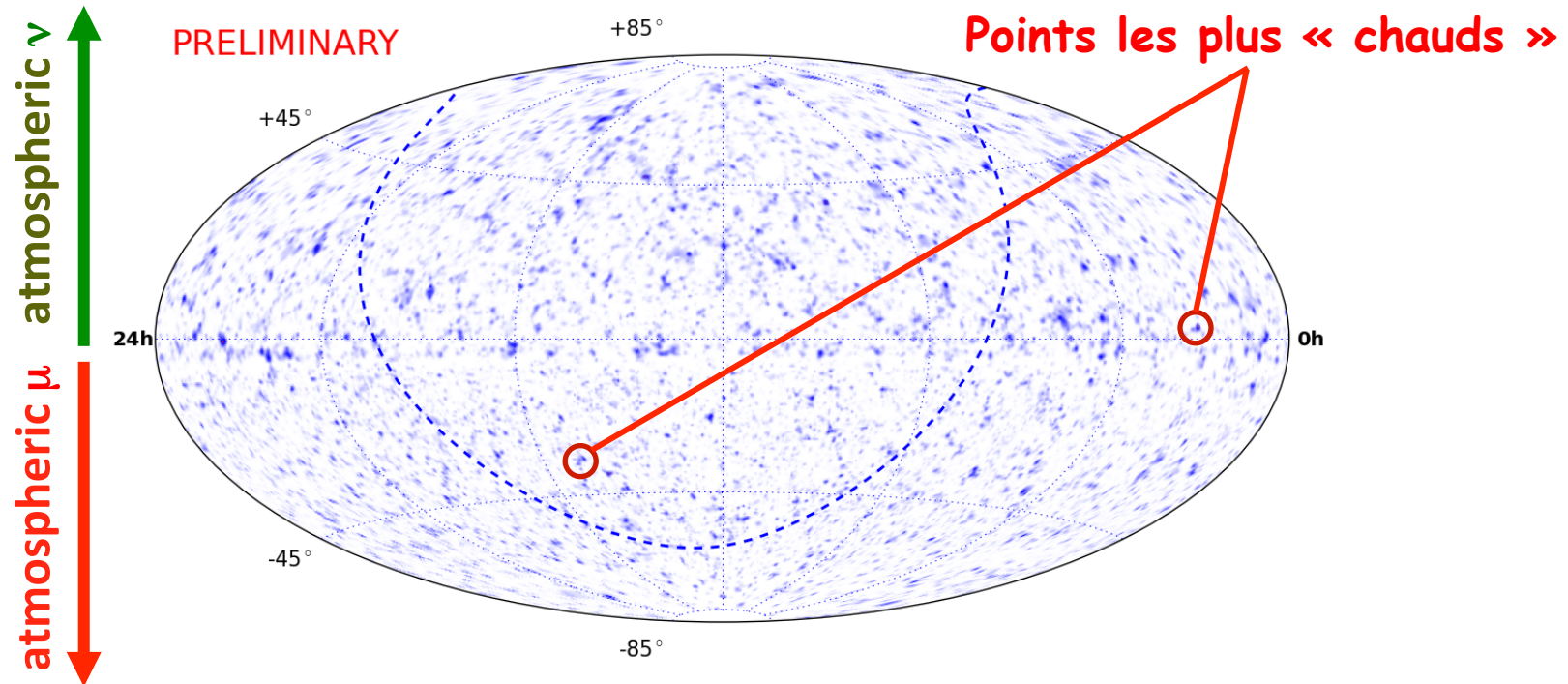
IC40 (7σ)



IC59 (12σ)



Recherche de sources ponctuelles (IC40 + IC59 + IC79)

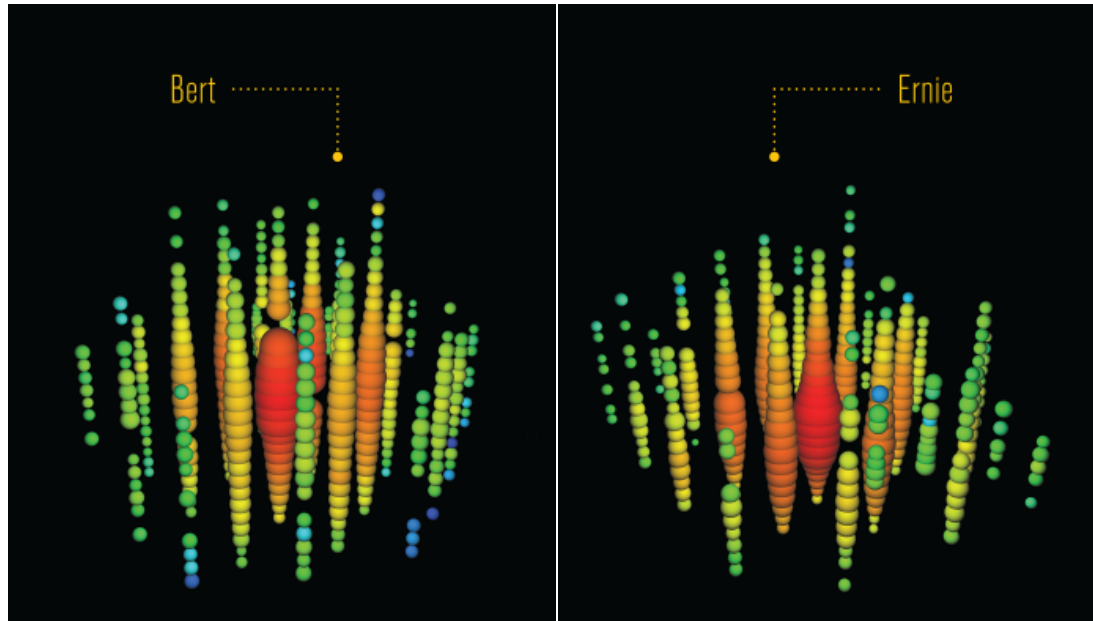


Nord: 57% des aléatoires sont au moins aussi significatifs
Sud: 98% des aléatoires sont au moins aussi significatifs
→ compatibles avec ν / μ atmosphériques

Astro ν (sources ponctuelles) requiert $>1 \text{ km}^3$

Recherche de ν GZK (très haute énergie)

2 premiers événements à $E \sim 1\text{PeV}$ (IceCube)



PRL 111, 021103 (2013)

E trop basse pour ν GZK

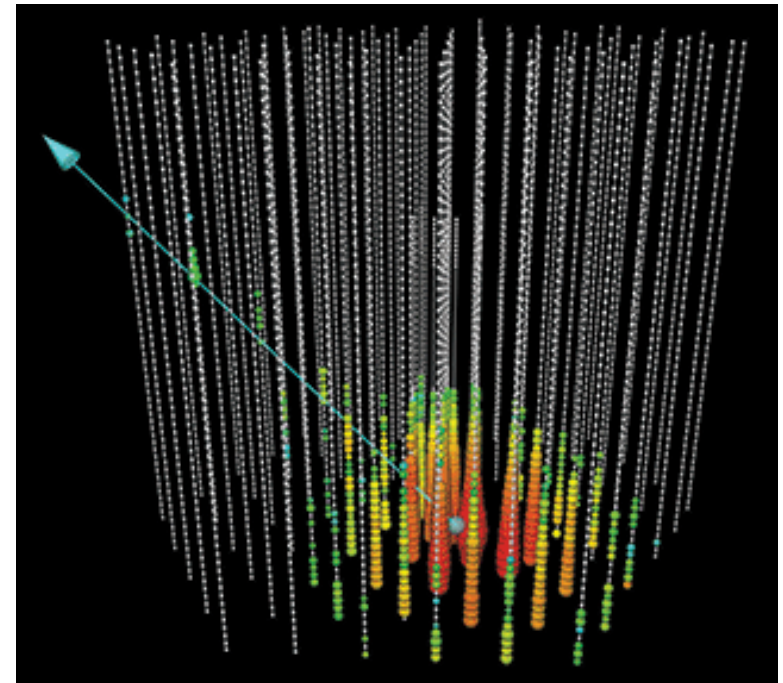
E trop haute pour ν atm

\Rightarrow **Origine astrophysique?**

+26 autres ...

$E \sim 250\text{ TeV}$

Bonne directionalité



Science 342, 1242856 (2013)

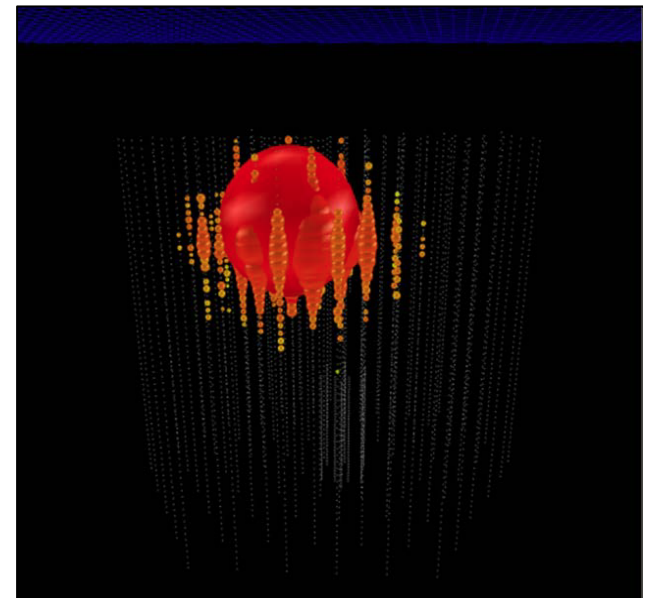
*1 neutrino - c'est un résultat intrigant,
2 neutrinos - c'est une découverte,
3 neutrinos - c'est un spectre !*

Ice CUBE 2014:

- 37 ν (E de 20 TeV à 2 PeV)
- Incompatible avec fond atmosphérique ($>5\sigma$)
- Spectre en $\sim E^{-2}$

- Pas d'indication de direction privilégiée

Prise de données encore >10 ans



The background of the slide is a deep space image featuring a prominent spiral galaxy with a bright core and glowing arms, set against a dark field filled with numerous stars of varying brightness and colors. The text is overlaid on this cosmic scene.

Sources cosmiques haute énergie

Trous noirs

Approche en mécanique classique du trou noir

Rien (pas même la lumière) ne peut s'échapper

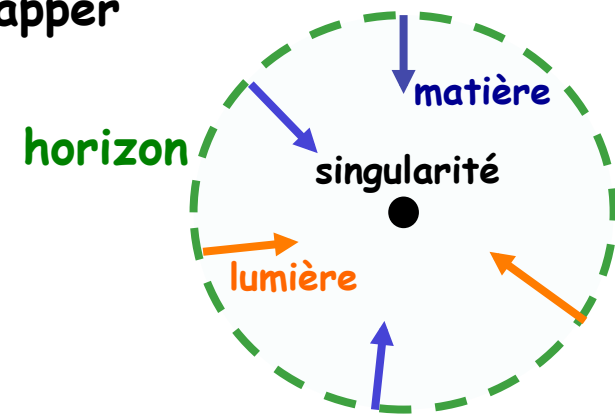
$$E_T = E_G + K < 0$$

$$-\frac{GMm}{r} + \frac{1}{2}mv^2 < 0$$

$$-\frac{2GM}{r} + c^2 < 0$$

$$r < \frac{2GM}{c^2}$$

rayon de Schwarzschild R_S

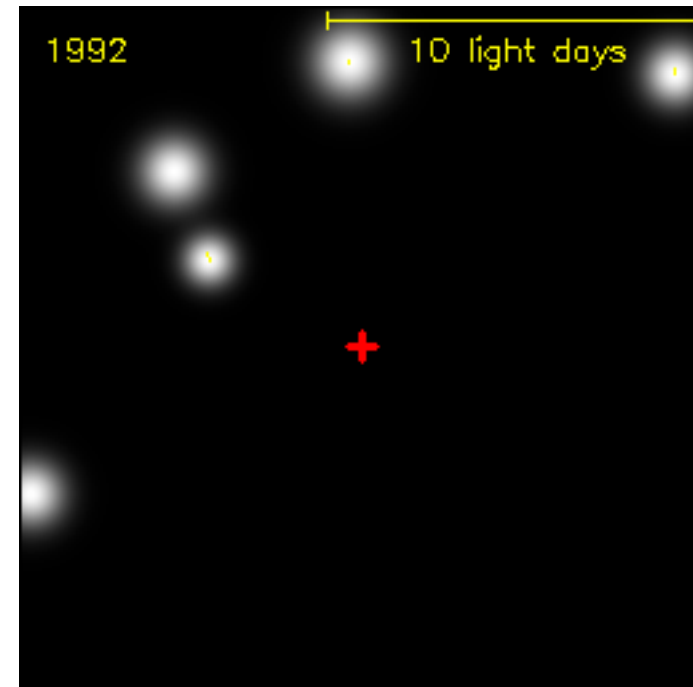
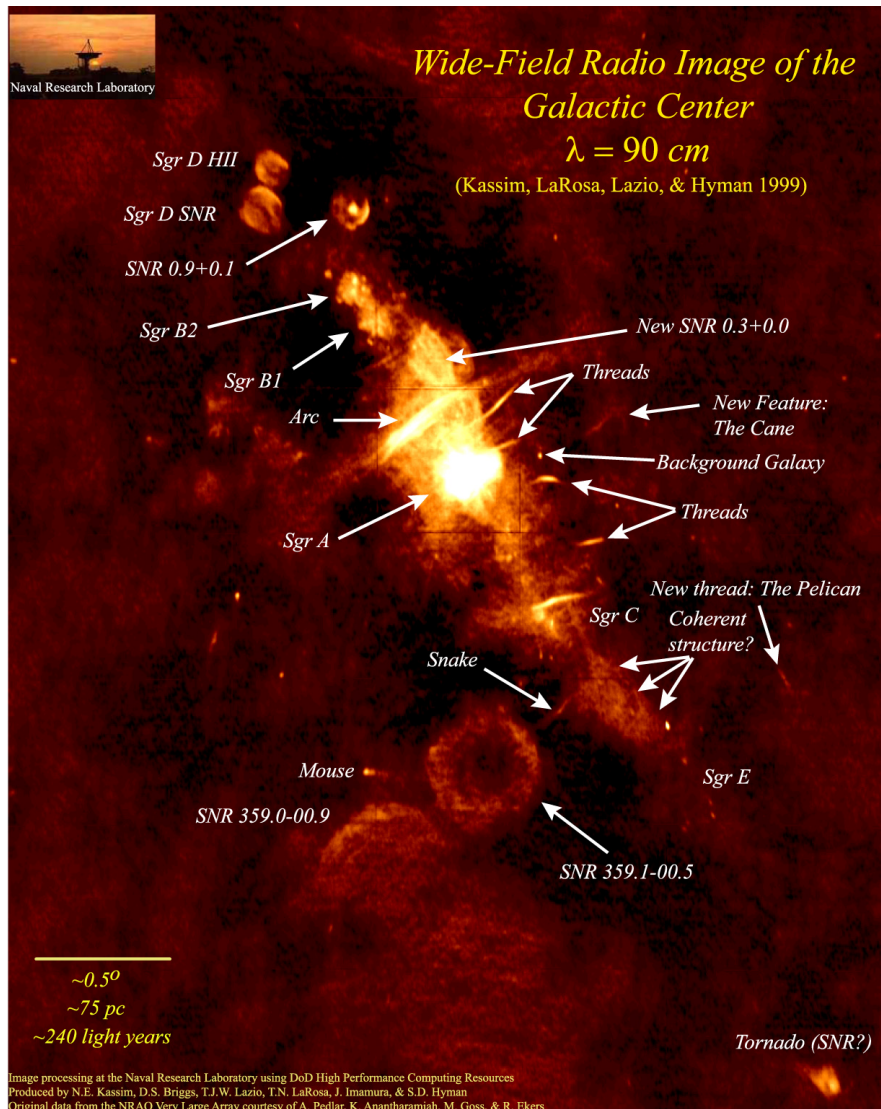


$R_S = 3$ km pour le Soleil

$R < R_S$: étoile s'effondre en un état de densité d'énergie infinie

(Oppenheimer et Snyder, 1939)

Trou noir dans la Voie lactée



orbites planétaires → 4 millions Mo
 dans rayon < 0.3 u.a. = 44 10⁶ km

→ trou noir supermassif !

Trous noirs



Ground



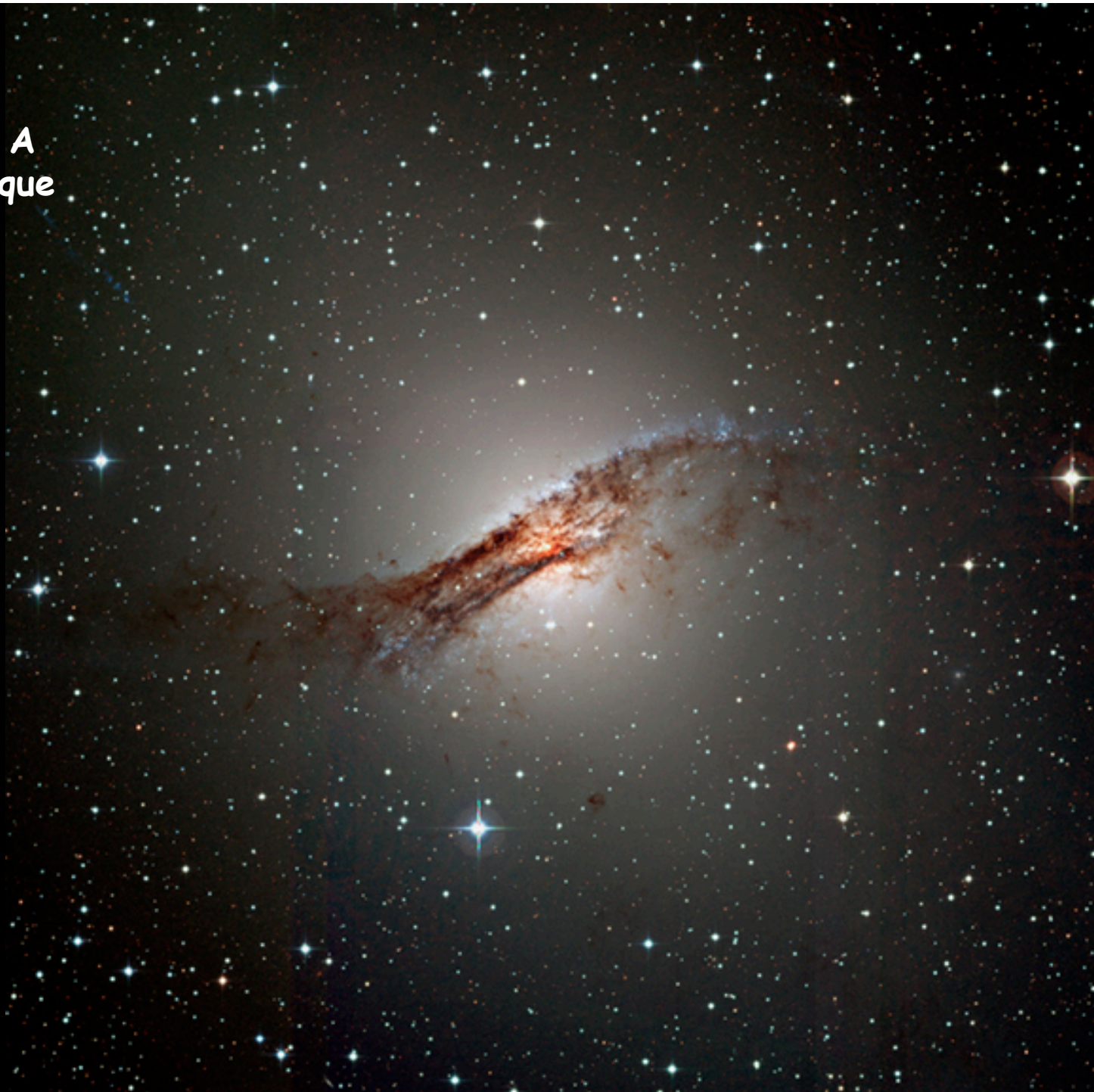
HST • WFPC2

Trous noirs

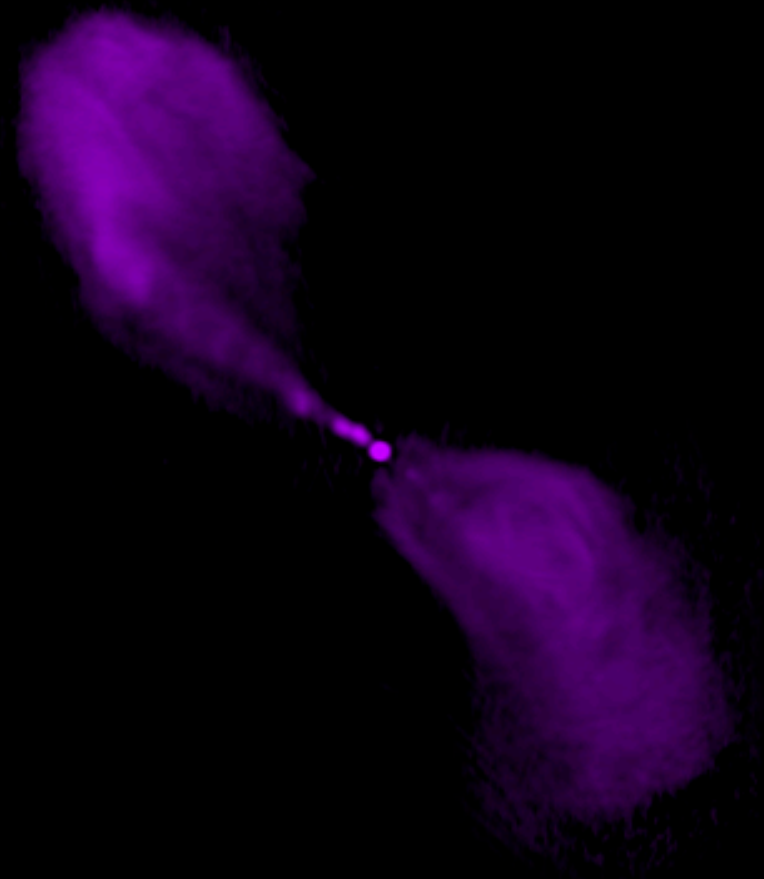


M87 :
des jets de matière

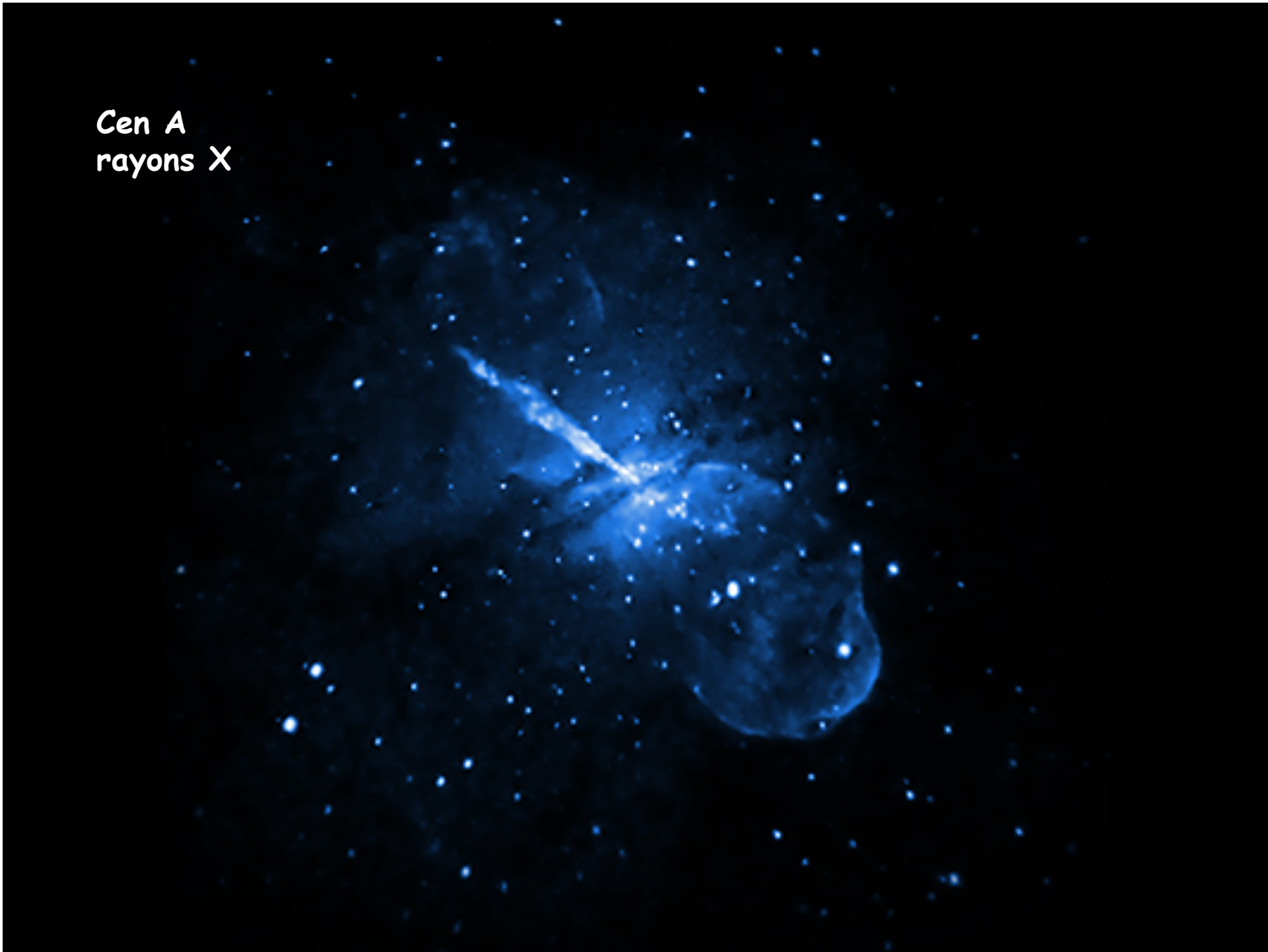
Cen A
optique



Cen A
radio



Cen A
rayons X

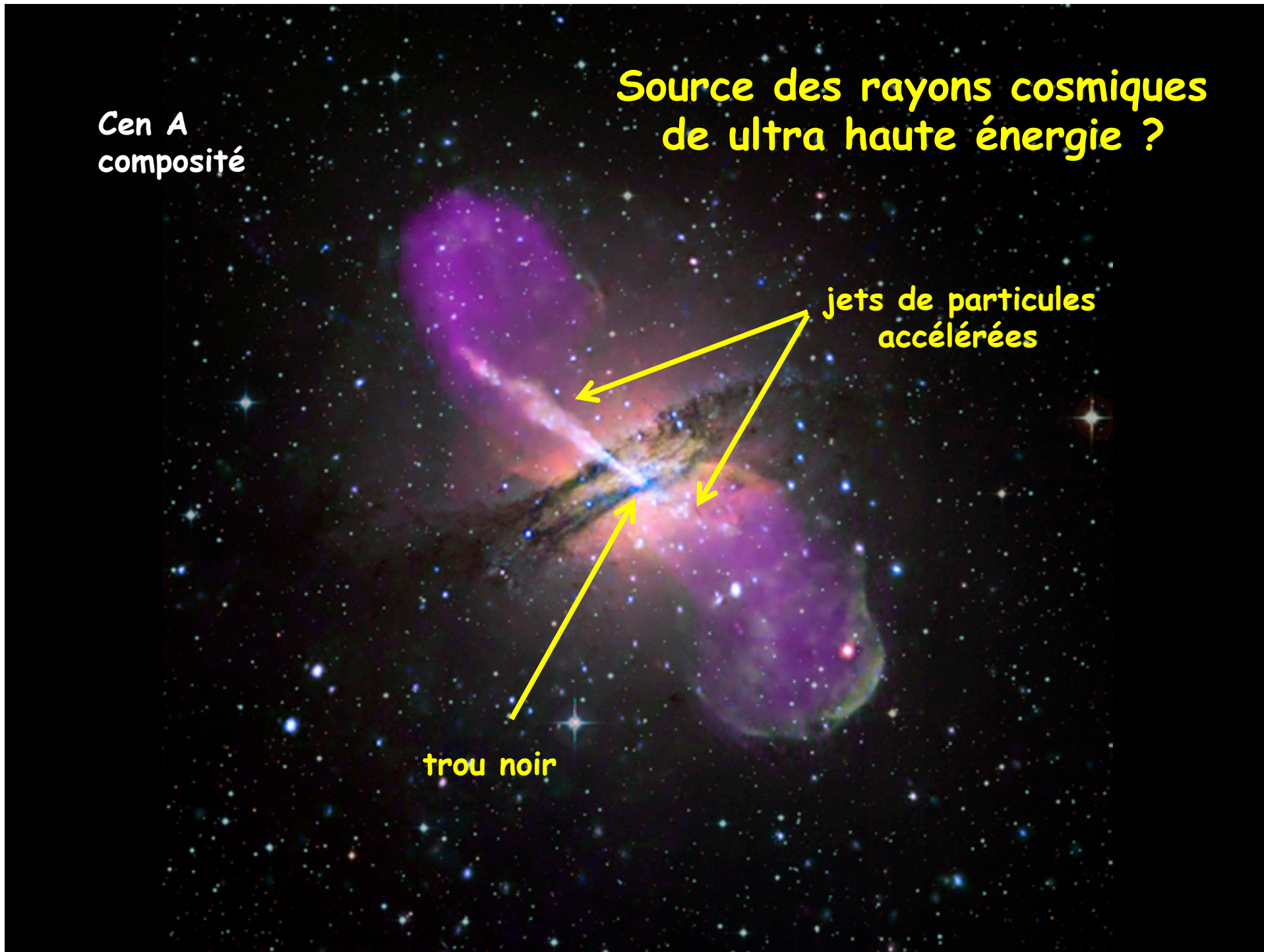


Cen A
composité

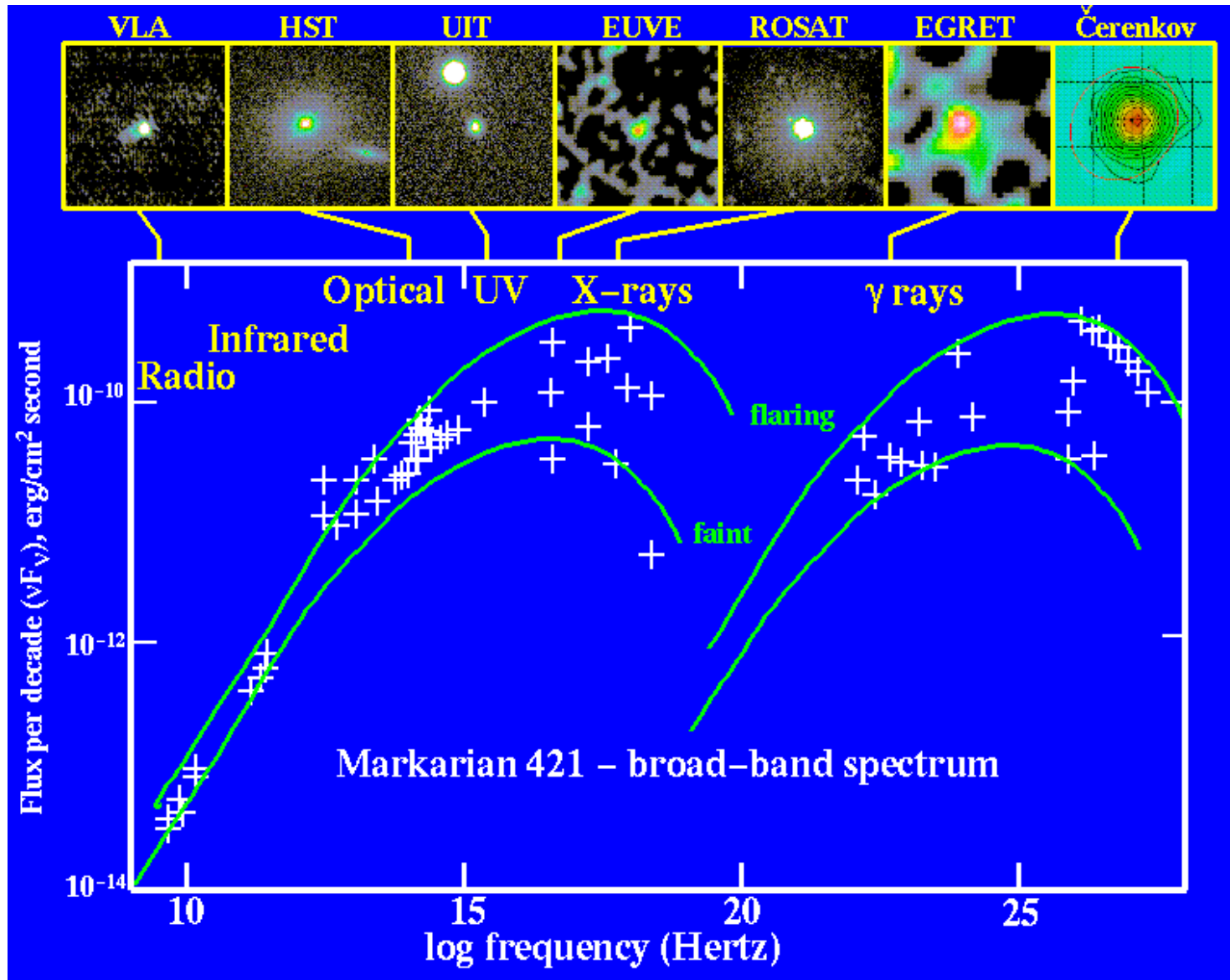
Source des rayons cosmiques
de ultra haute énergie ?

jets de particules
accélérées

trou noir

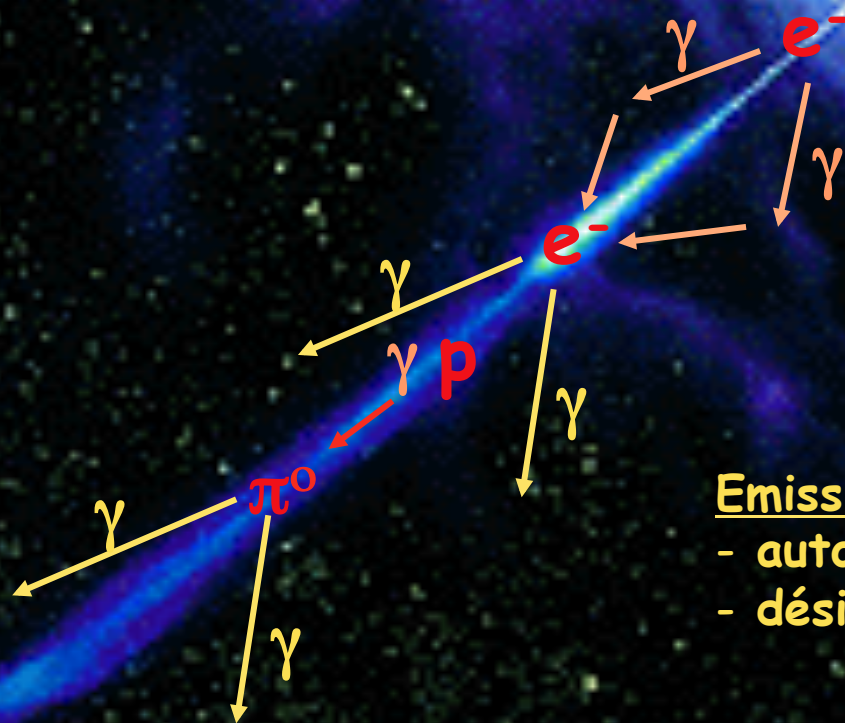


Markarian 421 : blazar « voisin »



Blazars

Emission basse énergie (rayons X) :
émission synchrotron des e^- du jet

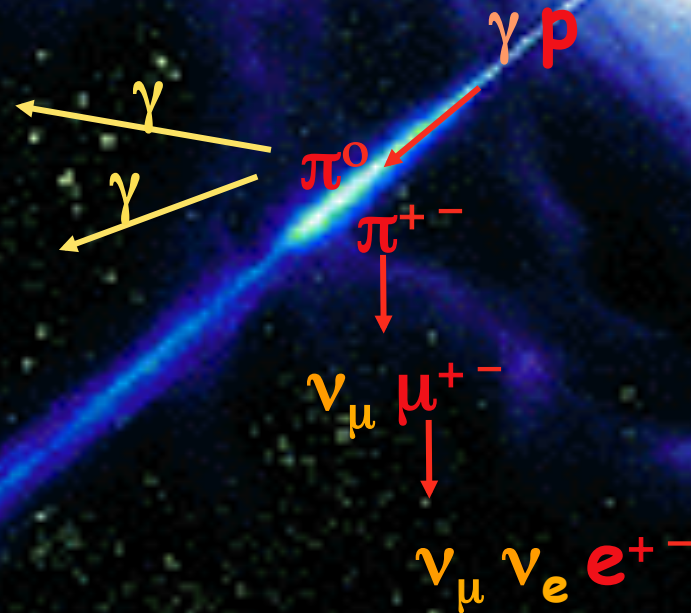


Emission haute énergie (rayons γ):
- auto-compton (electromagnétique) ?
- désintégration π^0 (hadronique) ?

Blazars

Emission haute énergie (rayons γ):

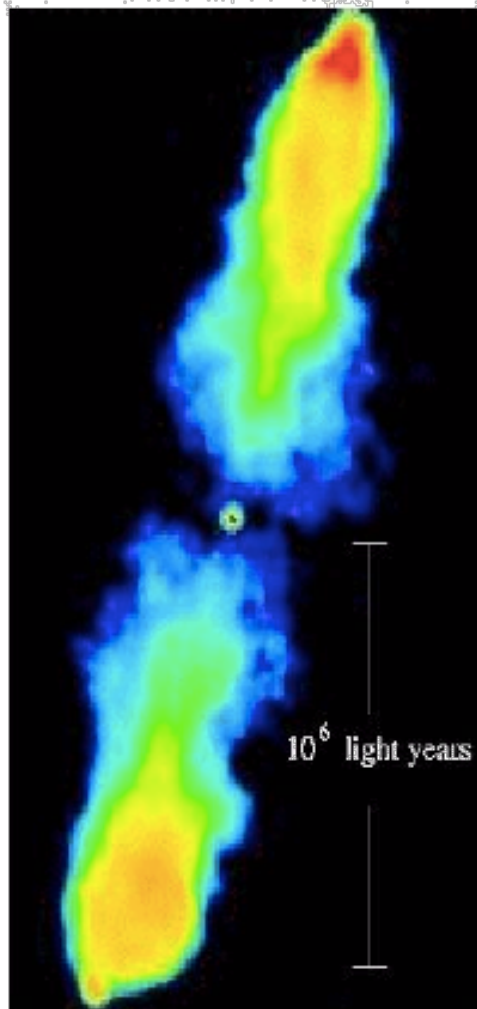
- ~~auto-compton (électromagnétique) ?~~
- désintégration π^0 (hadronique) ?



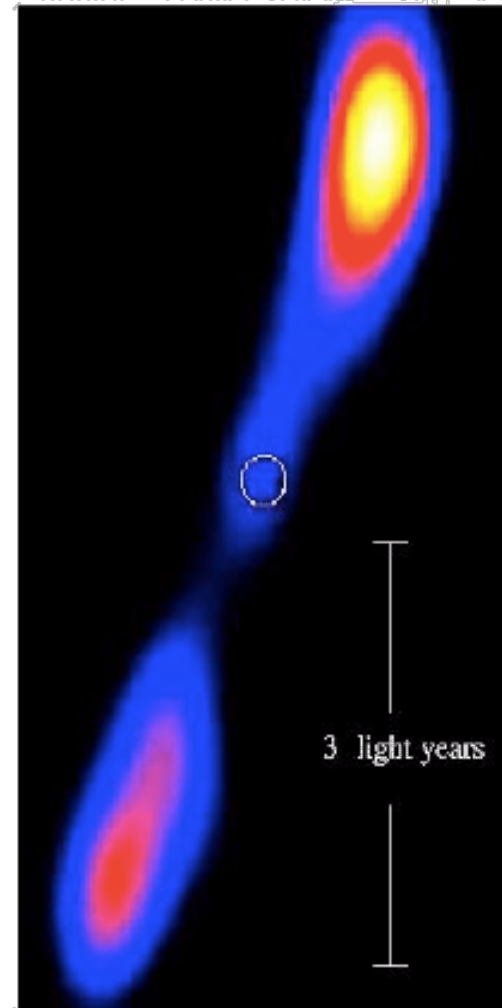
Sources de ν
de haute énergie !

Quasars et Microquasars

QUASAR 3C 223

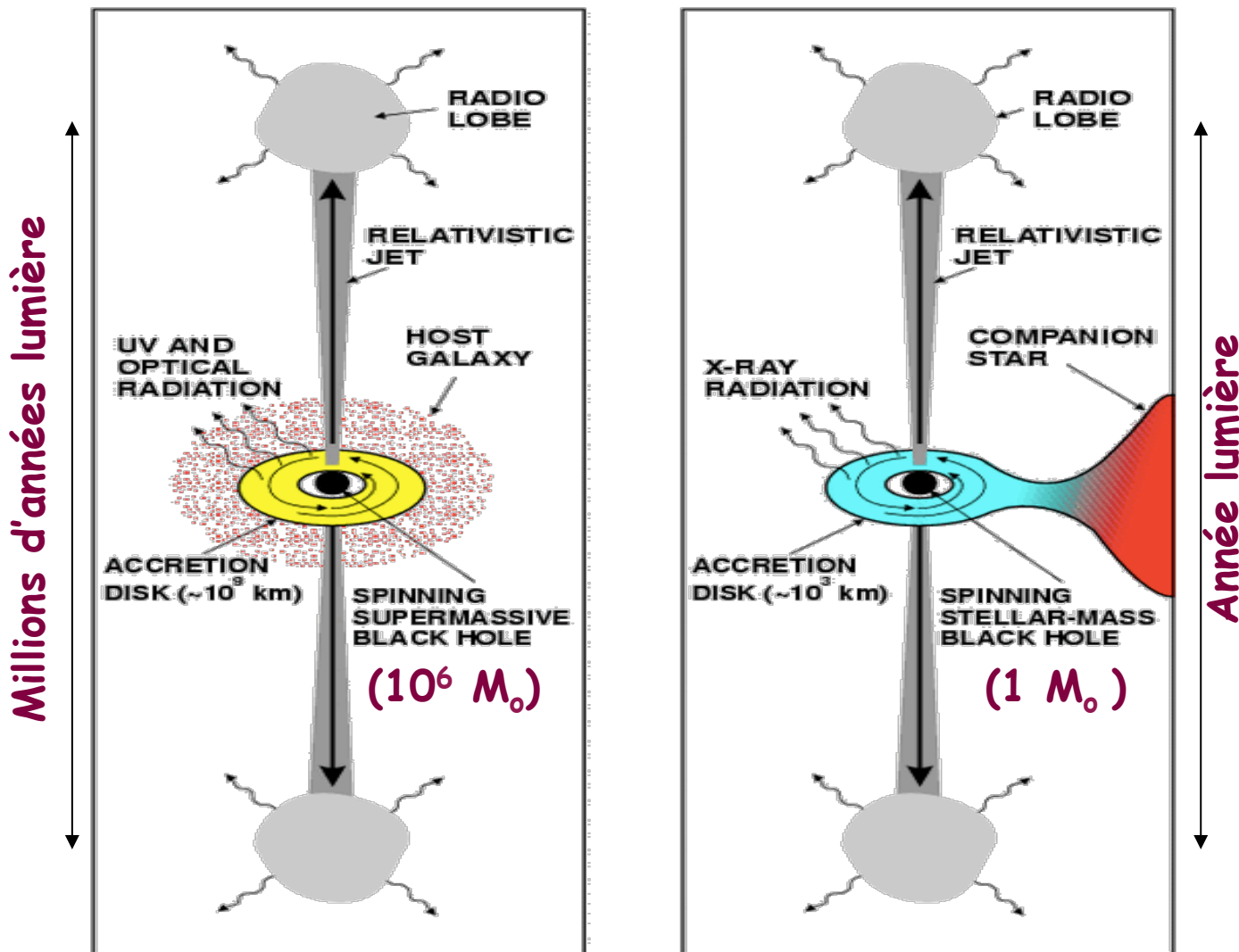


MICROQUASAR 1E1740.7-2942



QUASAR

MICROQUASAR

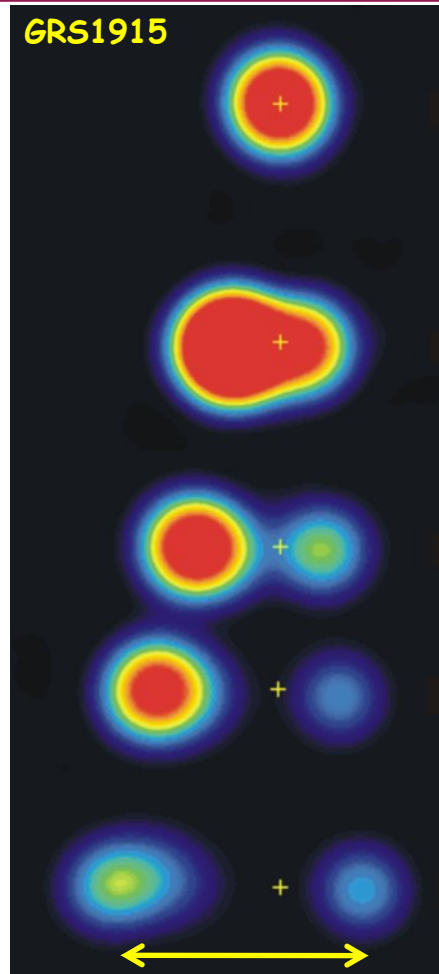


$$R \propto M_{BH}$$

$$T \propto M_{BH}^{-1/4}$$

Mirabel & Rodriguez

Déplacements supraluminiques !?



18 mars
1994

27 mars

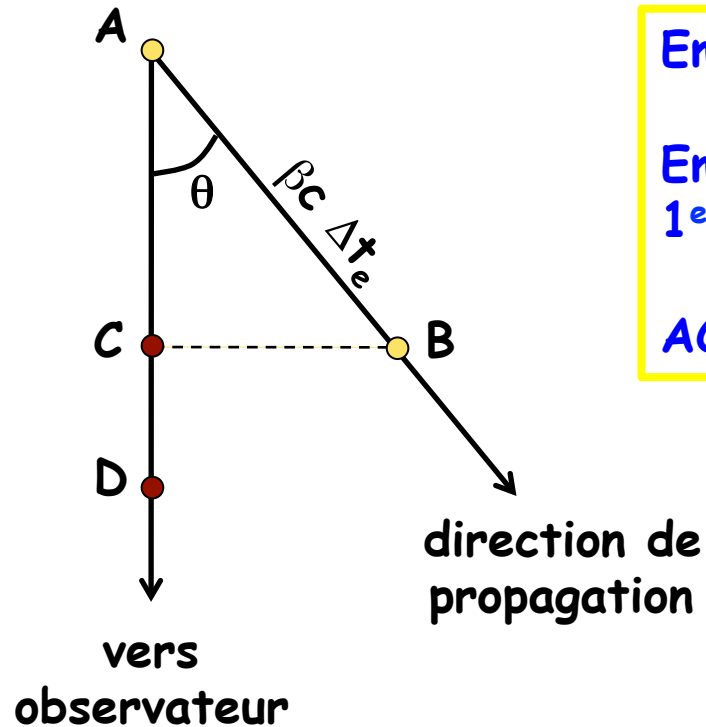
3 avril

9 avril

16 avril

1 mois

Déplacements supraluminiques !?



Emission du 1^{er} photon en A

Emission du 2nd photon en B ($AB = \beta c \Delta t_e$)
1^{er} photon est alors en D ($AD = c \Delta t_e$)

$$AC = \beta c \Delta t_e \cos \theta$$

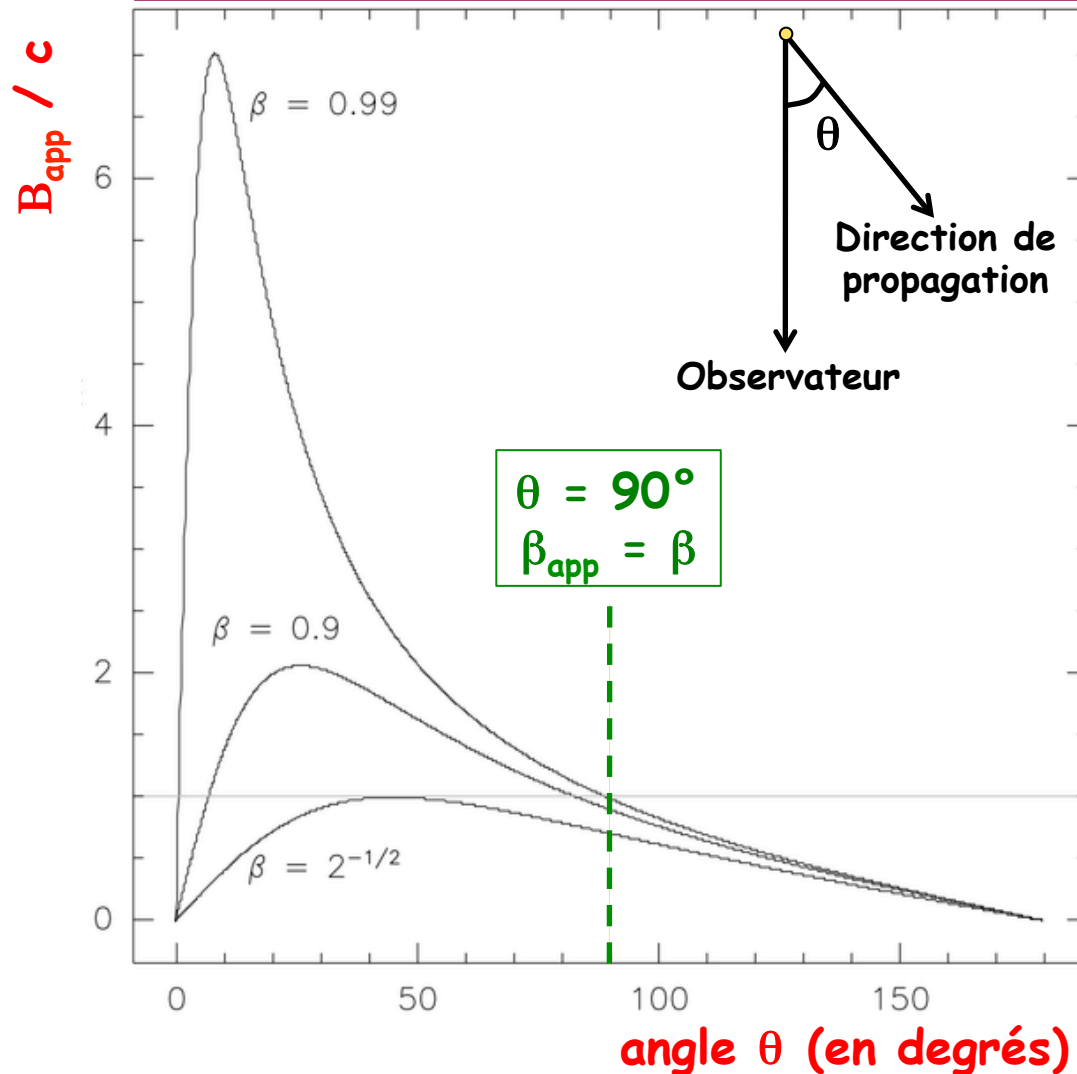
Séparation en projection sur le ciel:
 $CB = AB \sin \theta = \beta c \Delta t_e \sin \theta$

Différence entre les temps d'arrivée:
 $t_2 - t_1 = DC/c = (AD - AC)/c$
 $= \Delta t_e (1 - \beta \cos \theta)$

Vitesse apparente

$$\beta_{app} = CB / (t_2 - t_1) = \beta \sin \theta / (1 - \beta \cos \theta)$$

Déplacements supraluminiques !?



Déplacement supraluminique
APPARENT

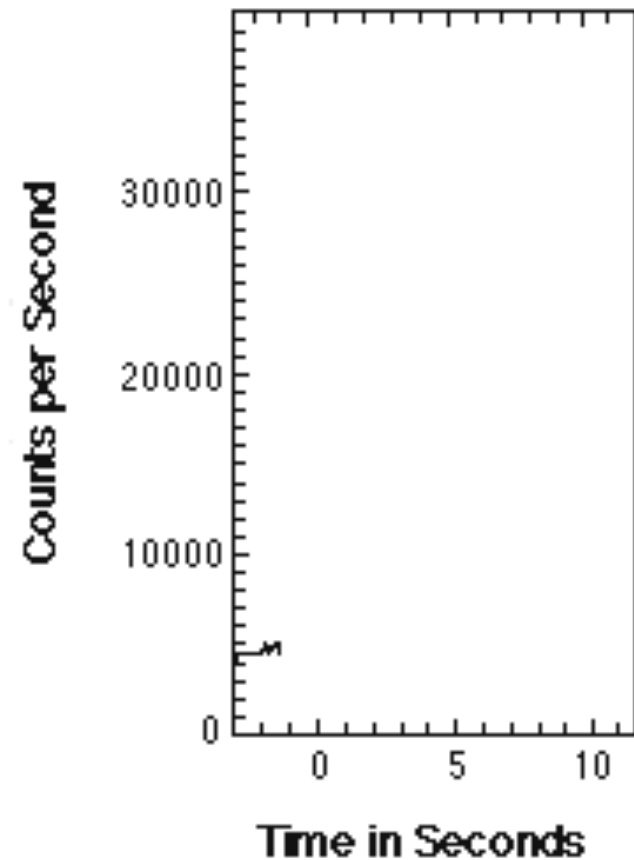
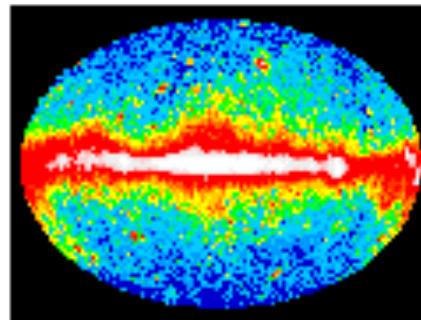
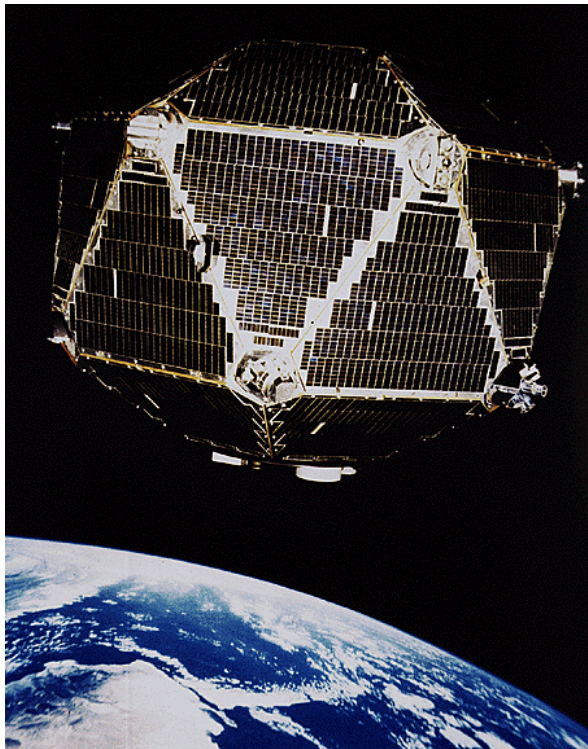
dans certaines
configurations
(θ petit, β grand)

The background of the slide is a dark, starry space. In the upper left, there is a bright, glowing star with a soft orange and yellow halo. A diagonal streak of purple and blue light, resembling a nebula or a comet tail, extends from the star towards the center. The right side of the image is a solid black vertical band.

**D'autres
sources cosmiques?**

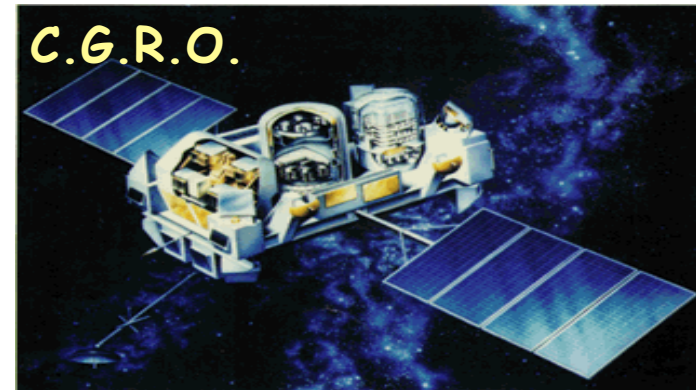
Sursauts Gamma (GRB)

1967 Découverte fortuite par les satellites VELA
d'émission spontanée de rayons gamma (16 events),
Publication en **1973**



Gamma ray bursts (GRB)

1991 Observation avec les satellites
C.G.R.O (EGRET, BATSE...)
& BeppoSAX



objets les plus brillants de l'univers, émettant surtout à haute E
 10^{44} à 10^{47} J $\sim 1 M_{\odot}c^2$

→ émission collimatée ?

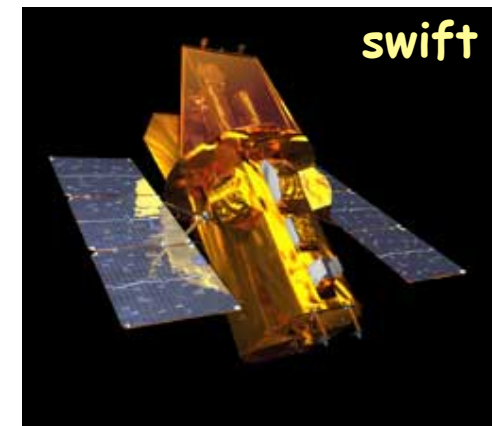
Δt de 10ms à quelques secondes

ΔL (en 10ms) = $c\Delta t = 30\,000$ km $\ll R_{\text{soleil}}$

→ région compacte

→ trous noirs, étoiles à neutrons

aujourd'hui >3000 sursauts toujours mal compris...



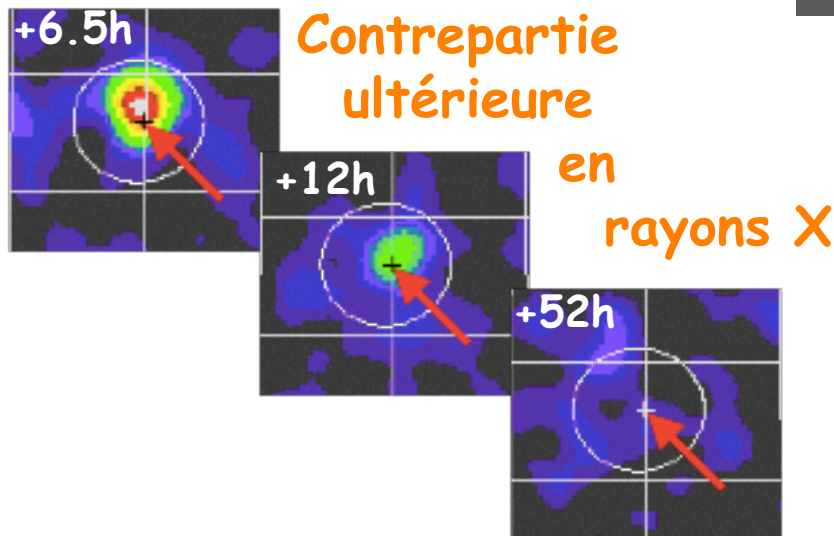
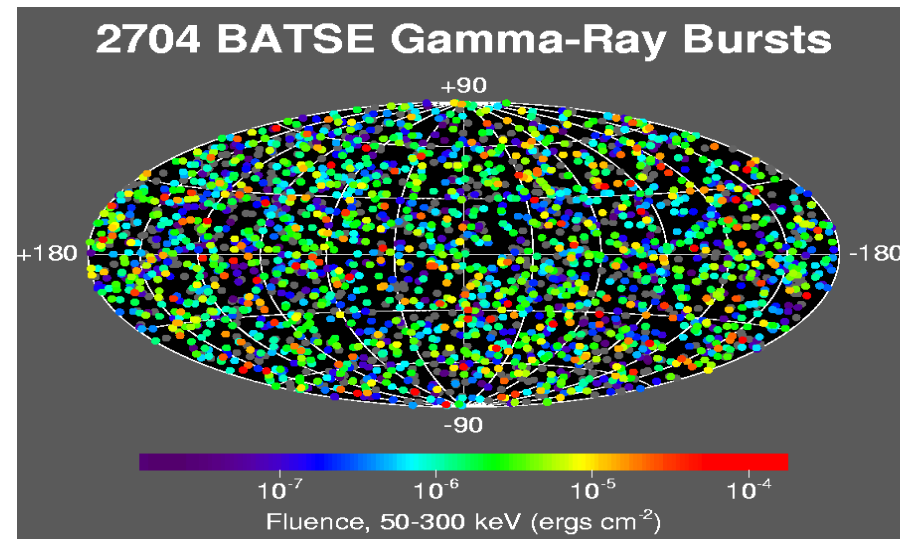
Localisation des sursauts

Long débat, mais

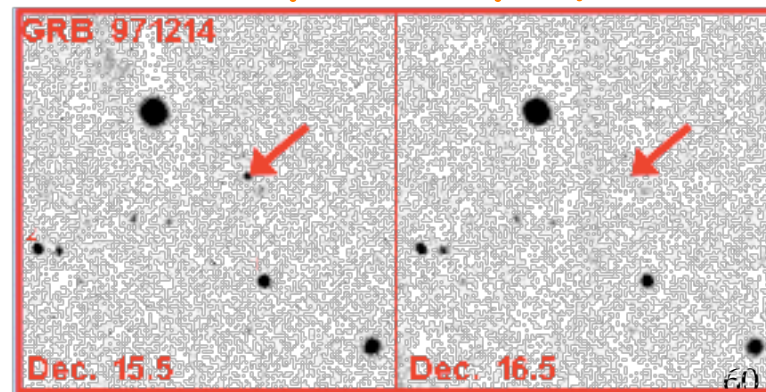
Isotropie
+
Contreparties optiques



Phénomènes cosmologiques
($z = 0.43$ à 6.3)



Contrepartie optique



Astroparticule

1) Approche **multi-messenger**
Rayons cosmiques

2) Approche **multi-messagers**
Astronomie neutrino
Ondes gravitationnelles

ou l'Univers violent...

3) **Neutrinos (cosmiques ou pas)**

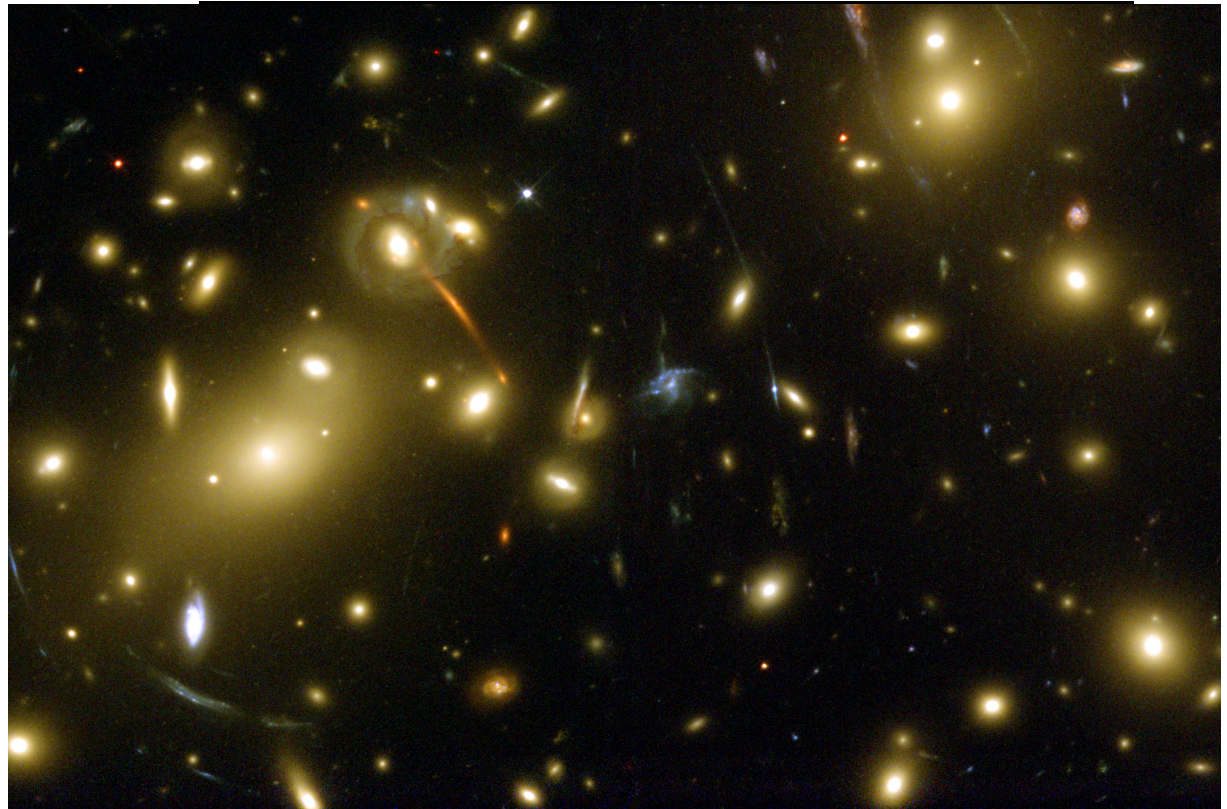
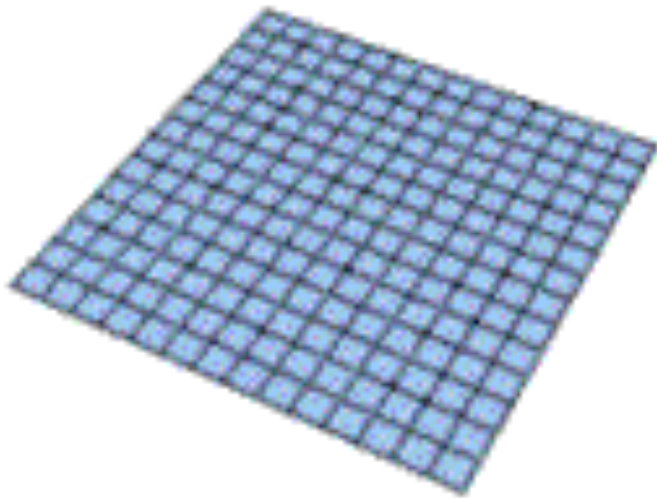
- Saga solaire
- Des neutrinos dans l'atmosphère
- Neutrinos et supernovae



Gravitation et espace-temps

Un espace-temps courbe (\neq relat. restreinte)

Force de gravitation
→ courbure de l'espace



Ondes gravitationnelles

relativité générale → ondes gravitationnelles

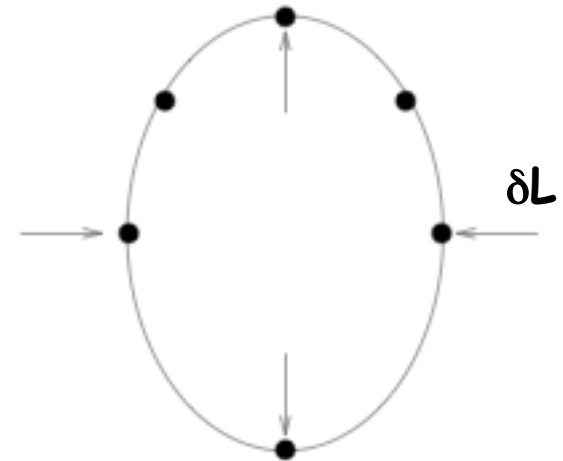
- prédiction dès 1918
- 2014 : pas une seule détection (*pourquoi ?*)

Ondes gravitationnelles

$$h = \delta L / L$$

Variation de longueur due à onde gravitationnelle

Longueur totale



Explosion SN dans amas de la Vierge (15 Mpc):

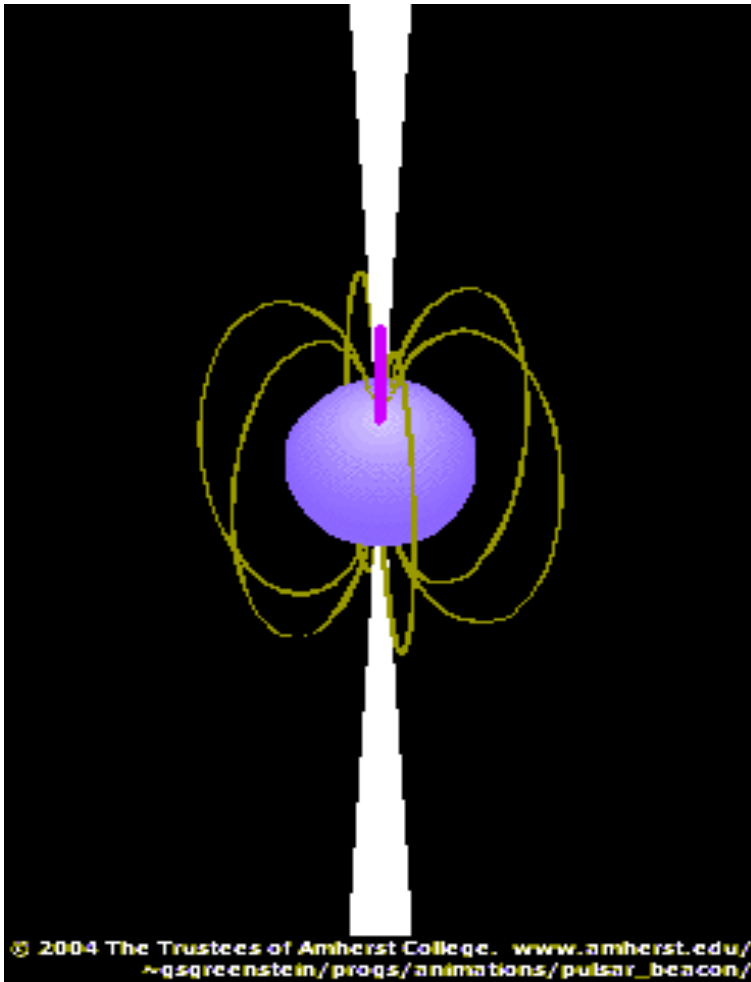
$$h \sim 10^{-21} \text{ à } 10^{-24}$$

Système de deux trous noirs:

$$h \sim 10^{-22} \text{ à } 10^{-23}$$

$$\text{Pour } L_{\text{terre-soleil}} = 150.10^6 \text{ km} \rightarrow \delta L \sim 0,15 \text{ nm} - 0,00015 \text{ nm}$$

Hulse et Taylor



Pulsar 1913+16 découvert en 1974

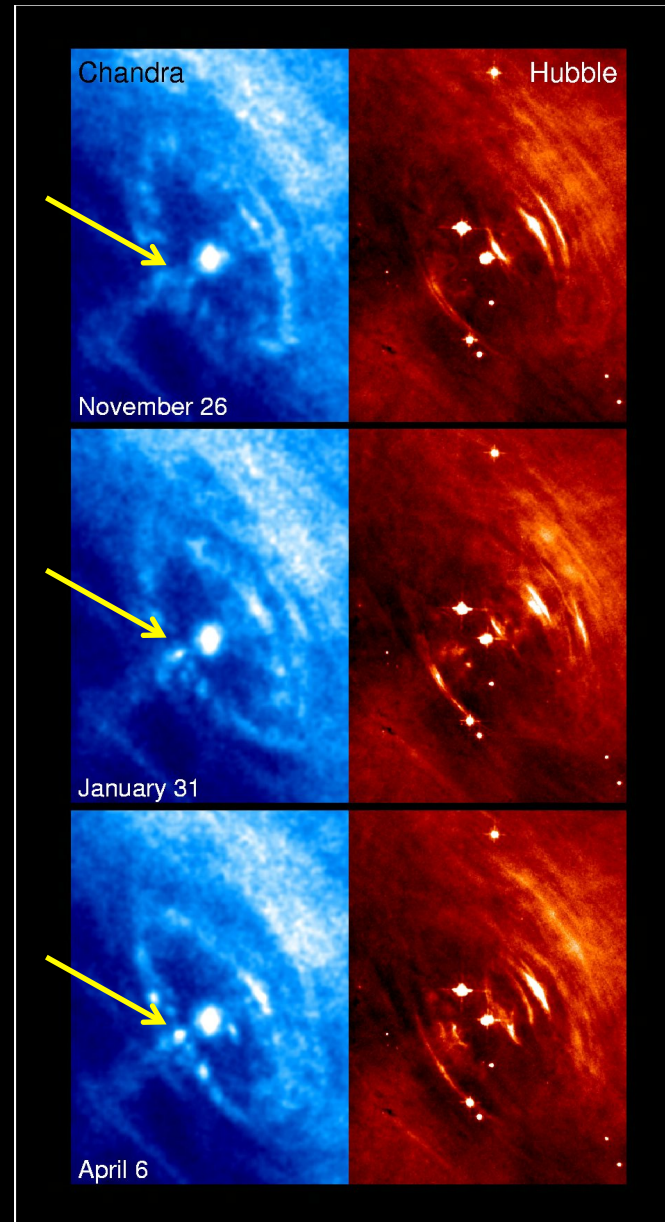
$T = 59 \text{ ms}$

précision meilleure que horloges atomiques!

Pulsar du Crabe

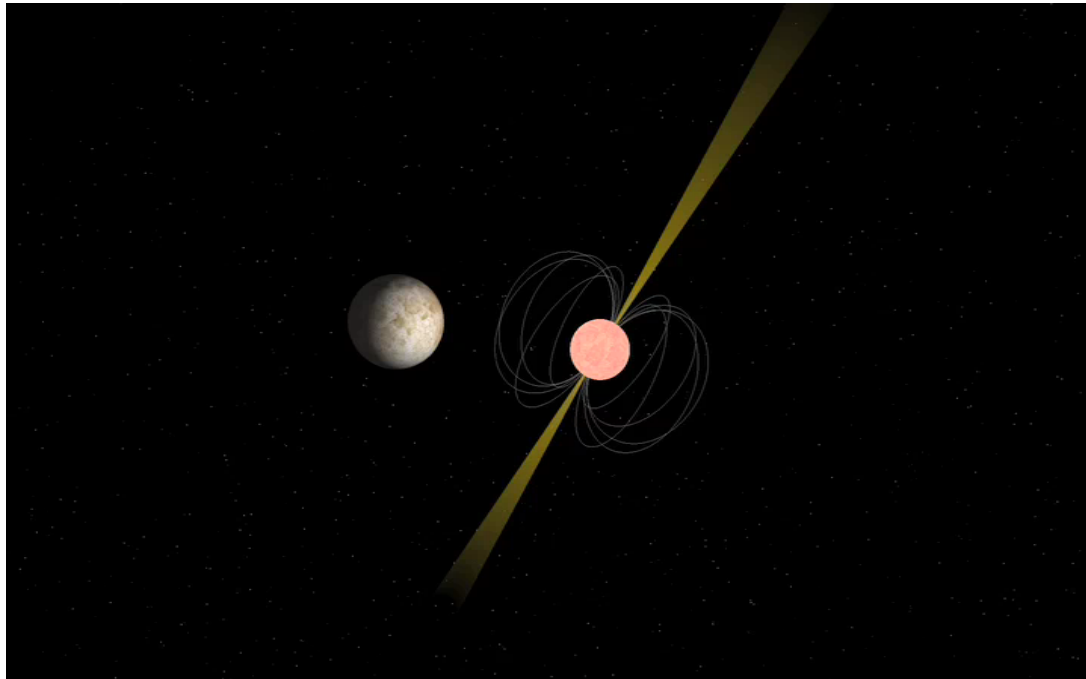


Hubble - optique (rouge)
Chandra - rayons X (bleu)

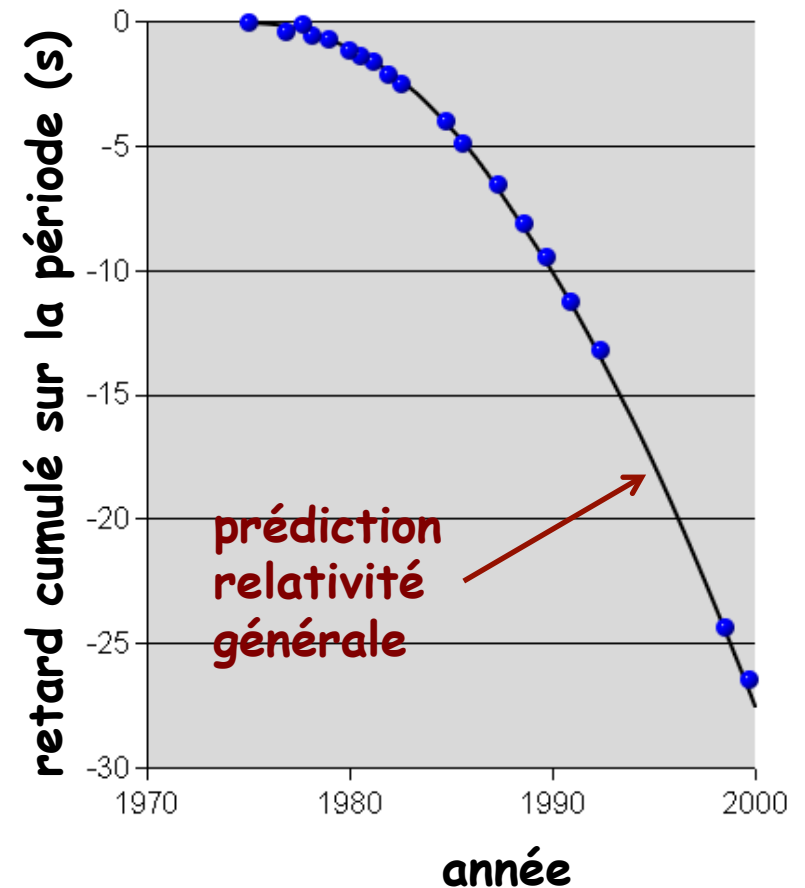


Hulse et Taylor

Pulsar 1913+16 :
perturbation périodique $T \sim 8$ h
→ compagnon



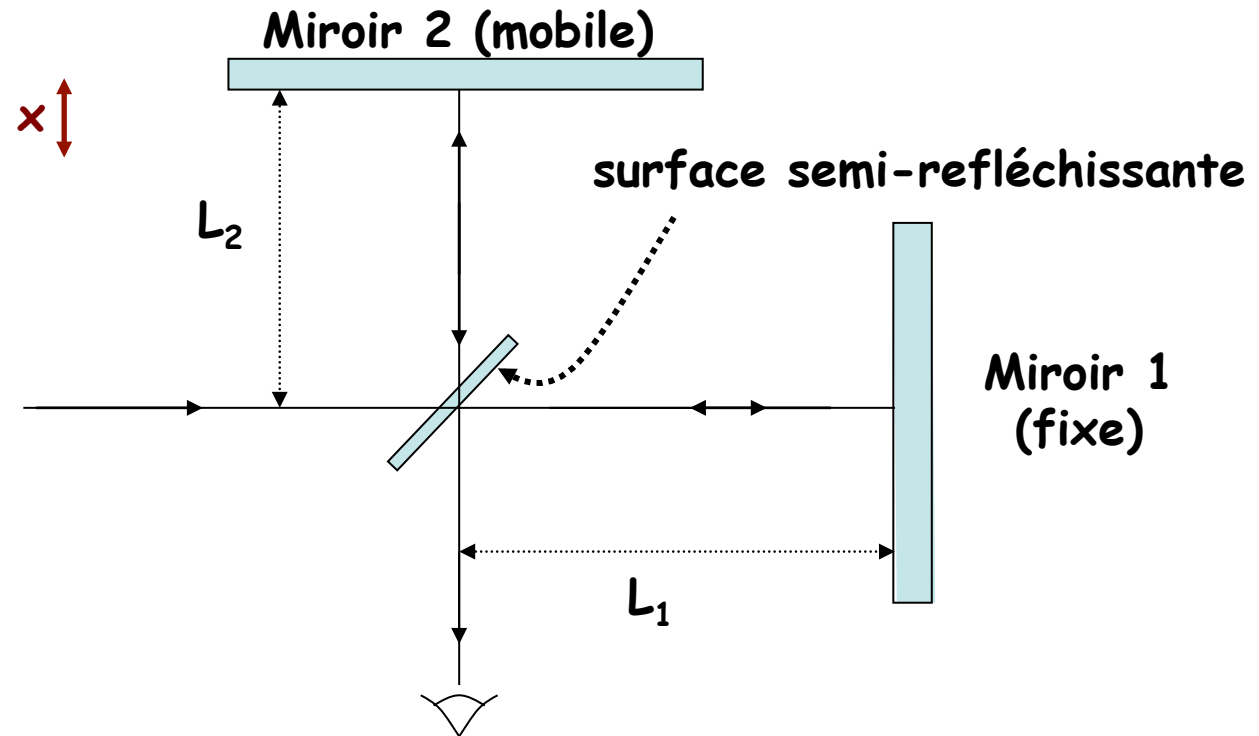
→ Prix Nobel 1993



$\Delta T = 76 \cdot 10^{-6}$ s/an, $\Delta a = 3,5$ m/an
coalescence dans 300.000.000 ans

Détection des ondes gravitationnelles

Interférométrie



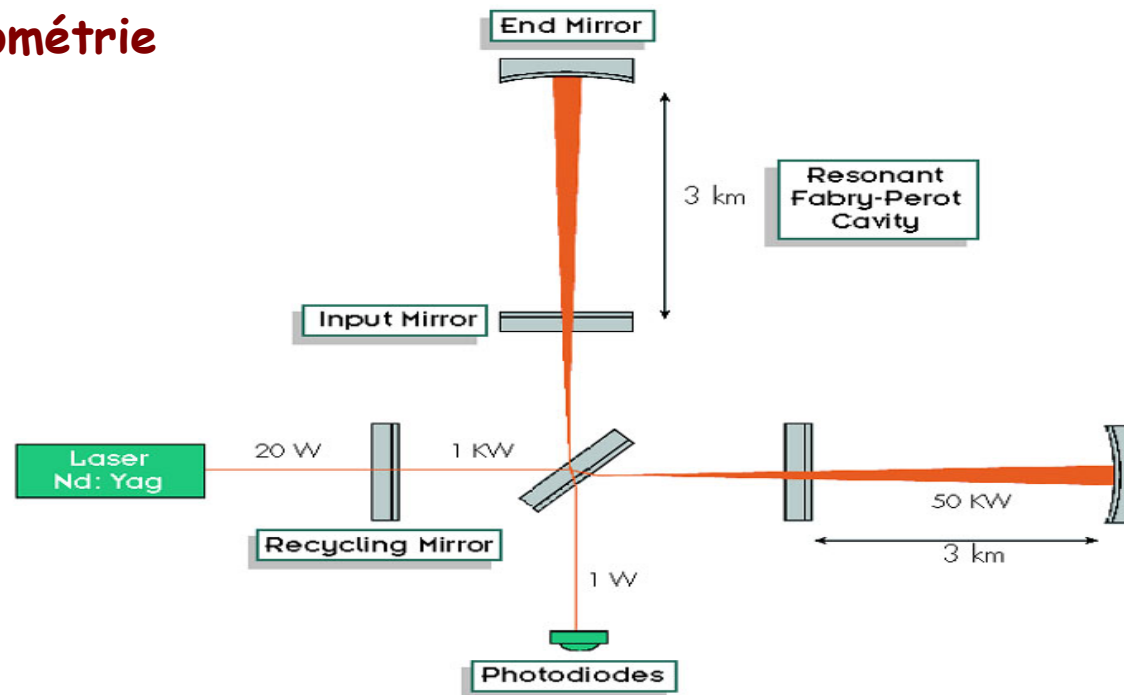
performance actuelle:
 $\delta L \sim 10^{-15} \text{ m}$

$$x = m \lambda / 2$$

Donc pour $h = 10^{-21}$ faut détecteur de $L = \text{milliers de km}$

Détection des ondes gravitationnelles

Interférométrie



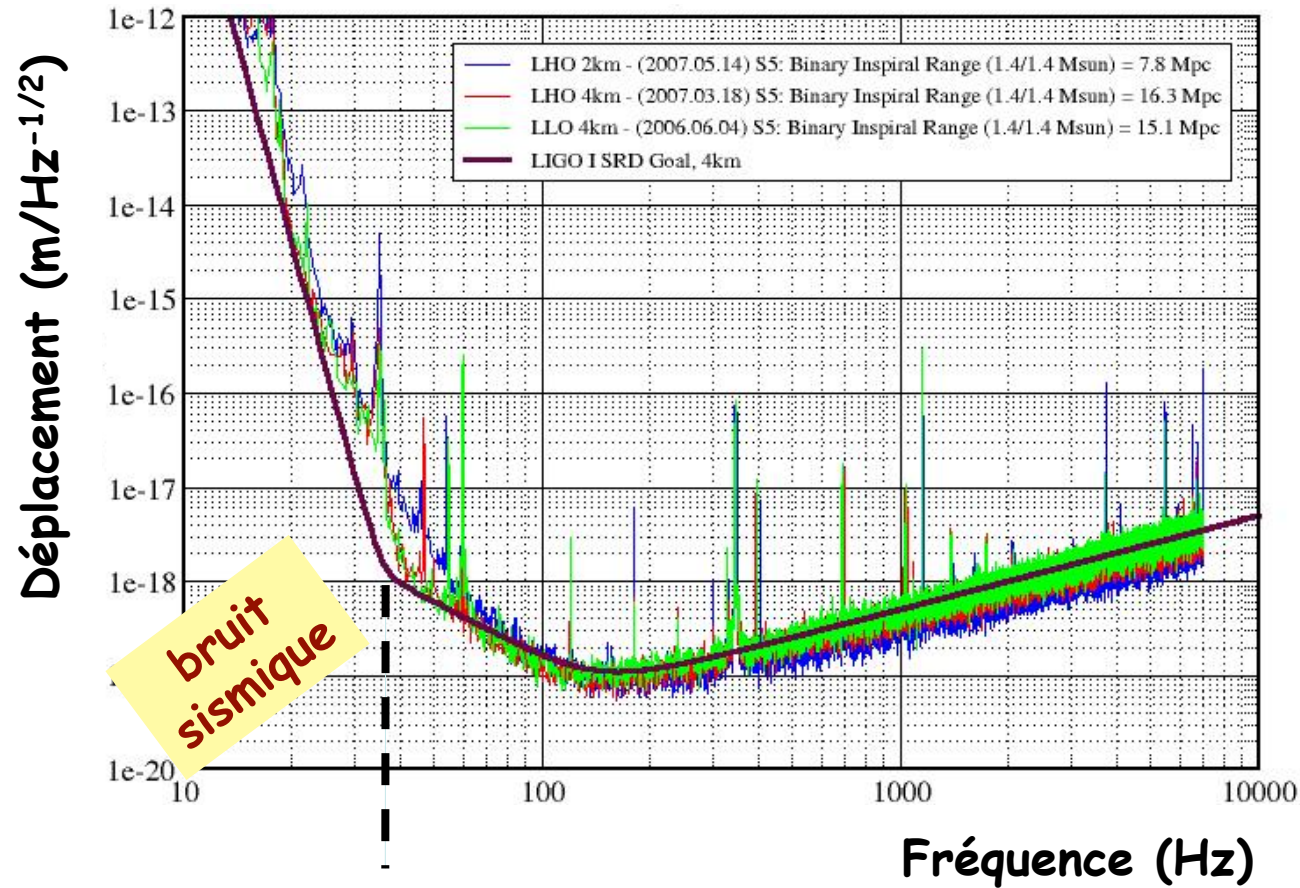
Miroir de recyclage:
 $L = 3 \text{ km} \rightarrow L \text{ effectif} = 3000 \text{ km}$

Virgo (Pise)



Détecteurs terrestres

Sensibilité atteinte par LIGO



Détecteurs terrestres

$\nu > 30 \text{ Hz}$

causalité $\rightarrow L_{\text{MAX}} (\text{source}) = c/\nu < 10^4 \text{ km}$

soit taille $<$ taille min d'une naine blanche
~ étoile à neutrons ou trou noir
donc limité

- aux astres les plus compacts
- aux phénomènes peu fréquents

pour couvrir

- coalescence de trous-noirs massifs ($10^3 M_{\odot}$)
- naines blanches

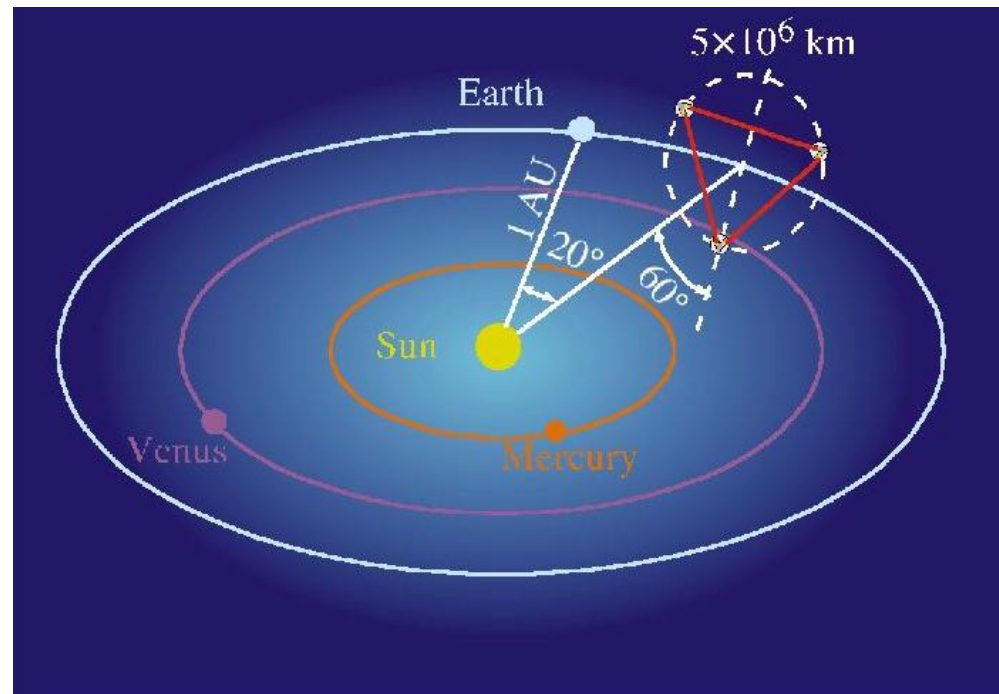
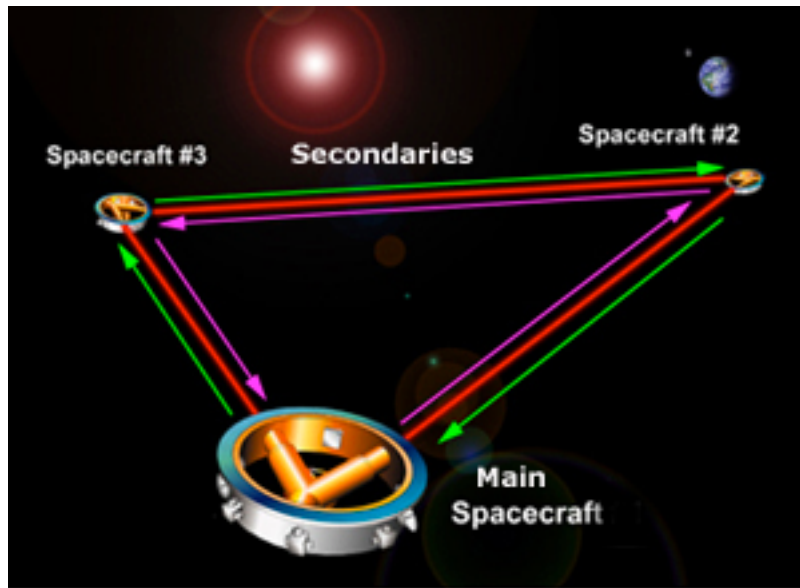
\rightarrow freq. plus basse

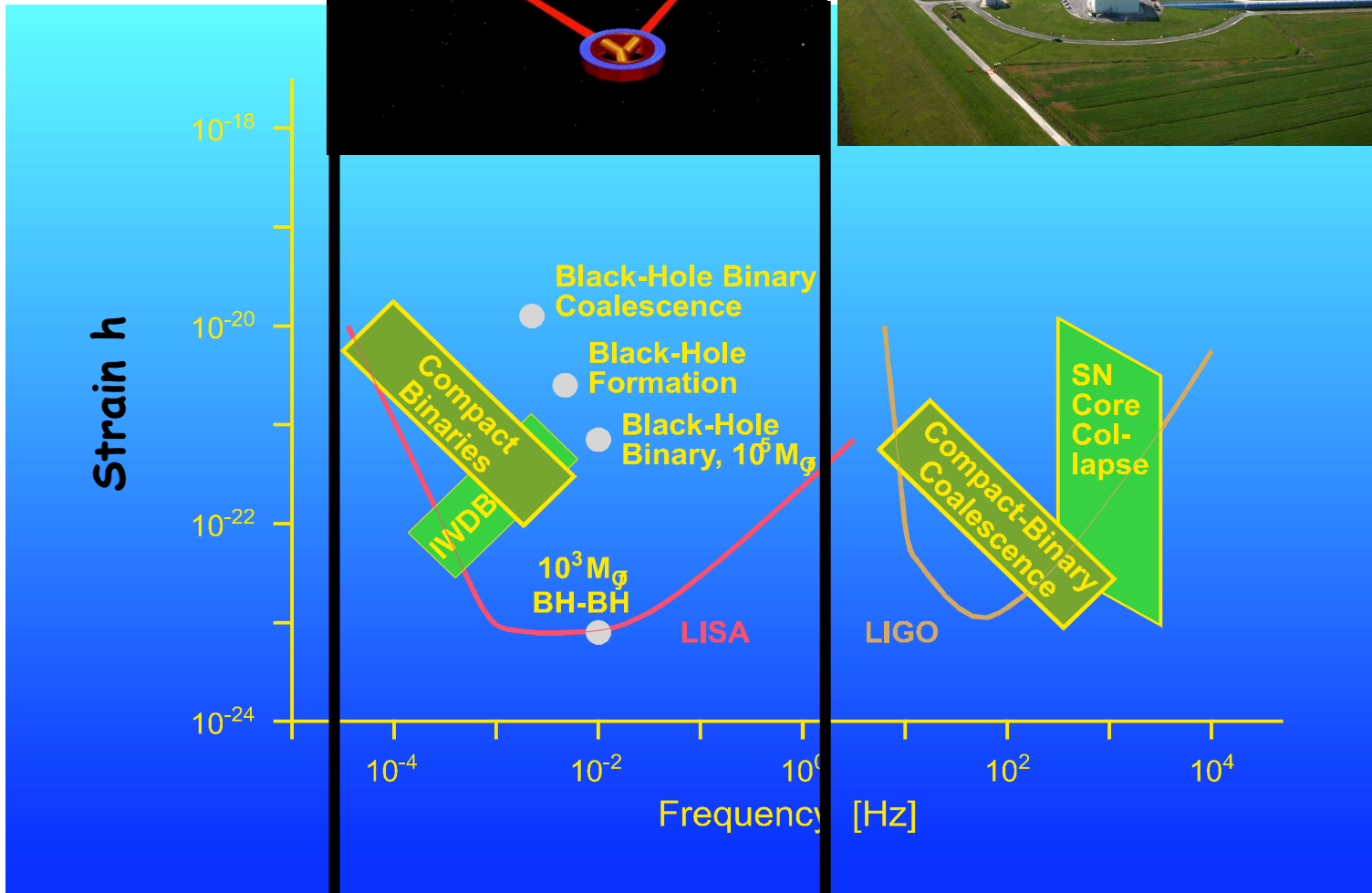
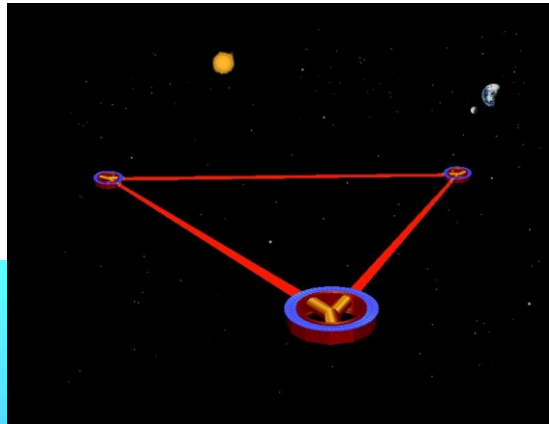
\rightarrow dans l'espace !

NGO (ex-LISA)

New Gravitational wave Observatory

$L = 5$ millions km





Conclusion

Approche **multi longueur d'onde** élargie à **multi messagers**,
particulièrement en **astroparticule**,
pour étude des phénomènes physiques

Photons de haute énergie: position des sources des particules accélérées

Protons: propriétés énergétiques (accélérateurs cosmiques)

Neutrinos: processus (émissions des AGNs, des supernovae...)

Ondes gravitationnelles: mouvement des corps ultra-massifs