

# Astroparticule

## 3/3

Nathalie PALANQUE-DELABROUILLE  
CEA-Saclay

# Astroparticule

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

2) **Neutrinos (cosmiques ou pas)**  
- Saga solaire  
- Des neutrinos dans l'atmosphère  
- Neutrinos et supernovae



3) Approche **multi-messenger**  
**Astronomie neutrino**  
**Ondes gravitationnelles**  
*ou l'Univers violent...*

# Astronomie multi-messagers

## Photons

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



## Rayons cosmiques (p)

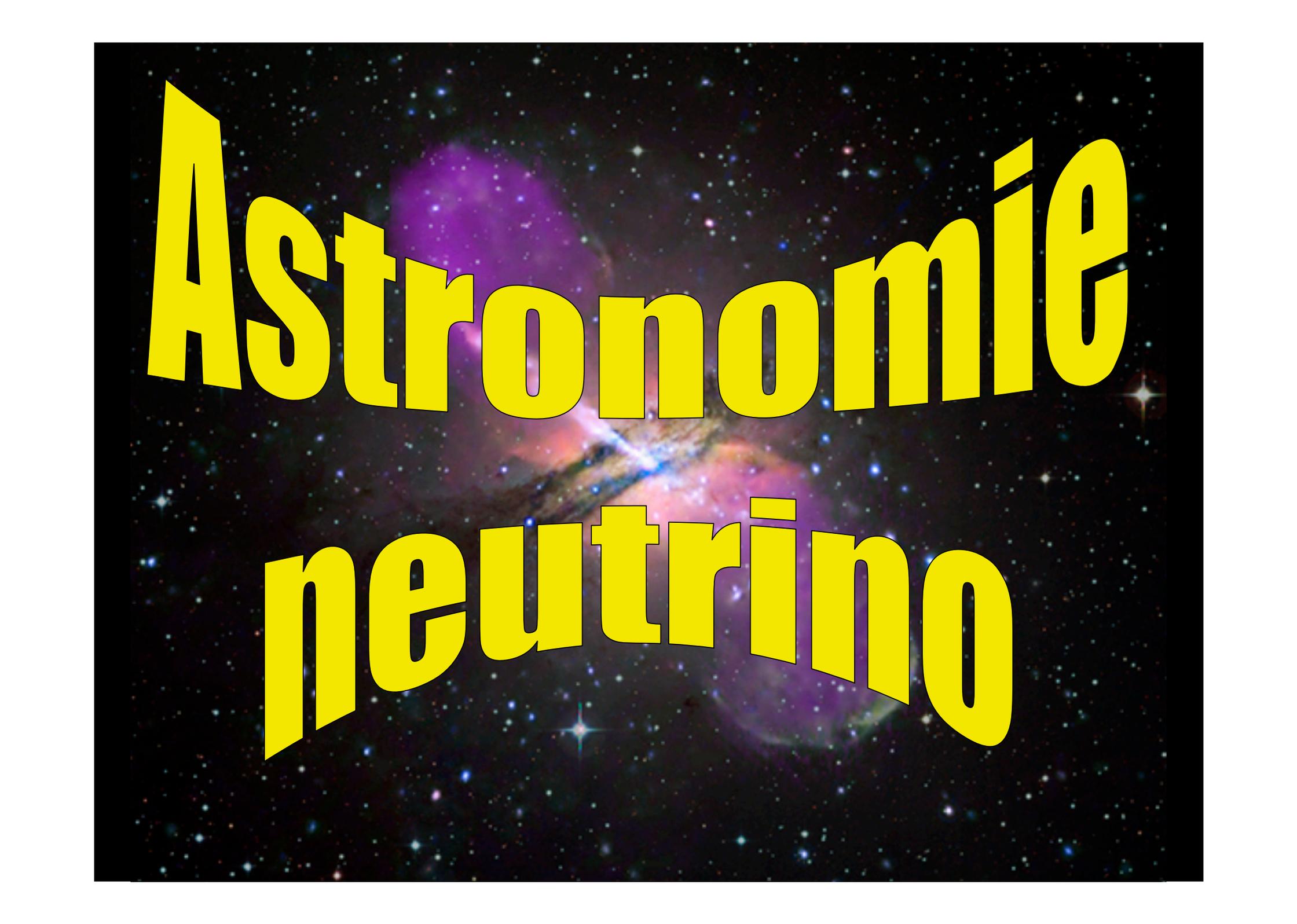
Propagation **chaotique** (B)  
mais **ultra haute**  
**énergie**

## 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

The background of the image is a deep space scene filled with numerous stars of various colors (blue, white, yellow) and several prominent galaxies. One galaxy in the center features a bright blue jet of light extending from its core. The overall color palette is dominated by dark blues and blacks, punctuated by the vibrant colors of the celestial objects.

**Astronomie**  
**neutrino**

# Astronomie neutrinos

Début XXI<sup>e</sup> siècle:

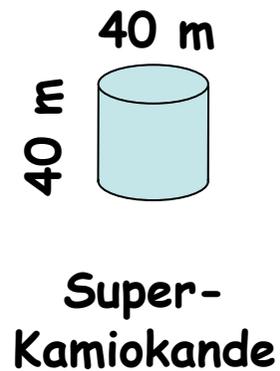
neutrinos solaires

neutrinos atmosphériques

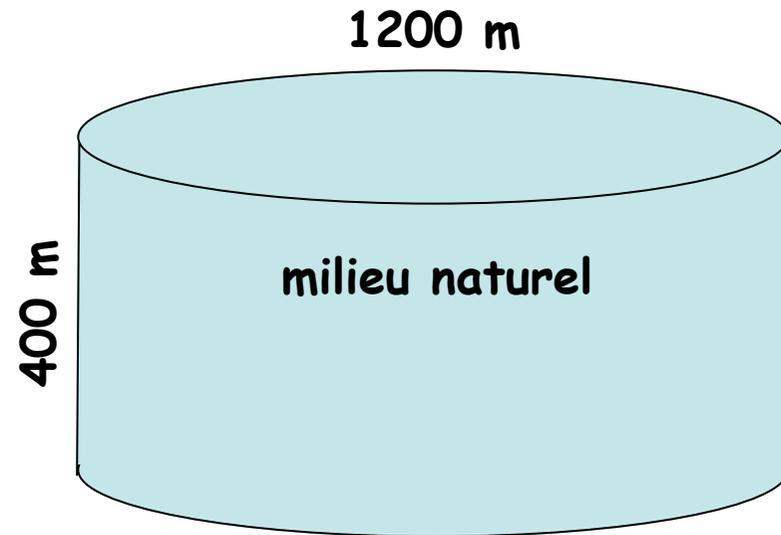
~20 neutrinos de SN1987A

# Astronomie des neutrinos

pour aller plus loin: détecteurs 10.000 fois plus massifs que SK !

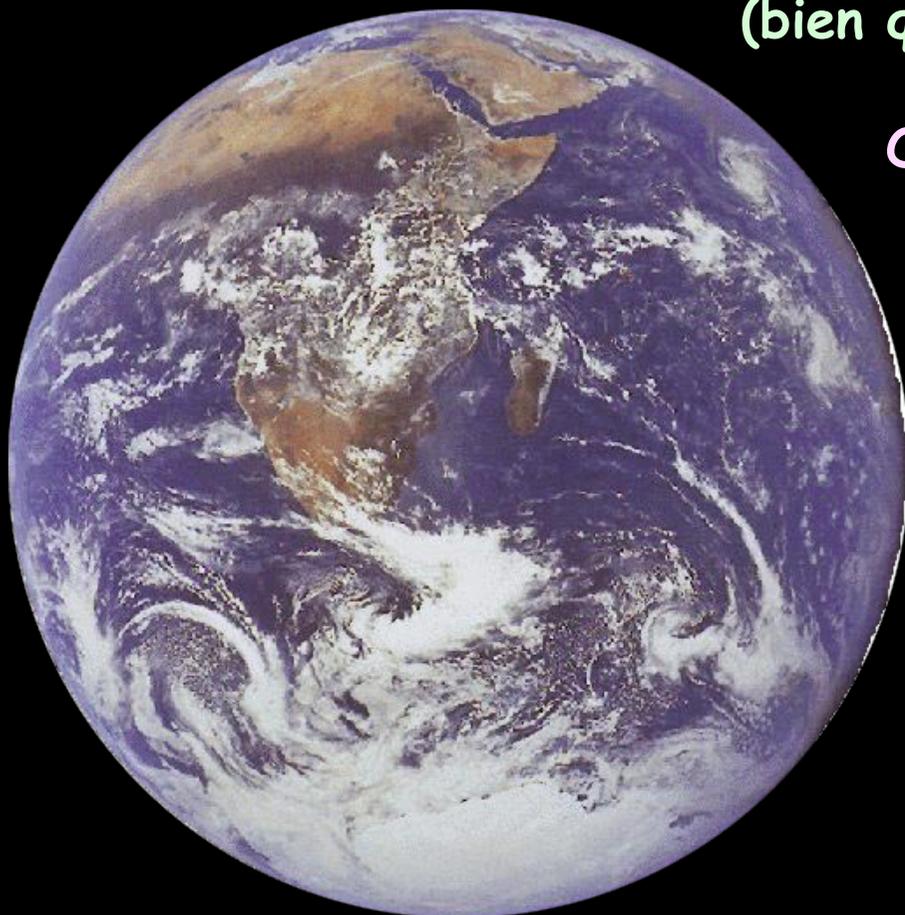


*pas à l'échelle*



# « Telescope » à neutrinos

Très faible section efficace d'interaction des  $\nu$   
(bien que croissante avec l'énergie)

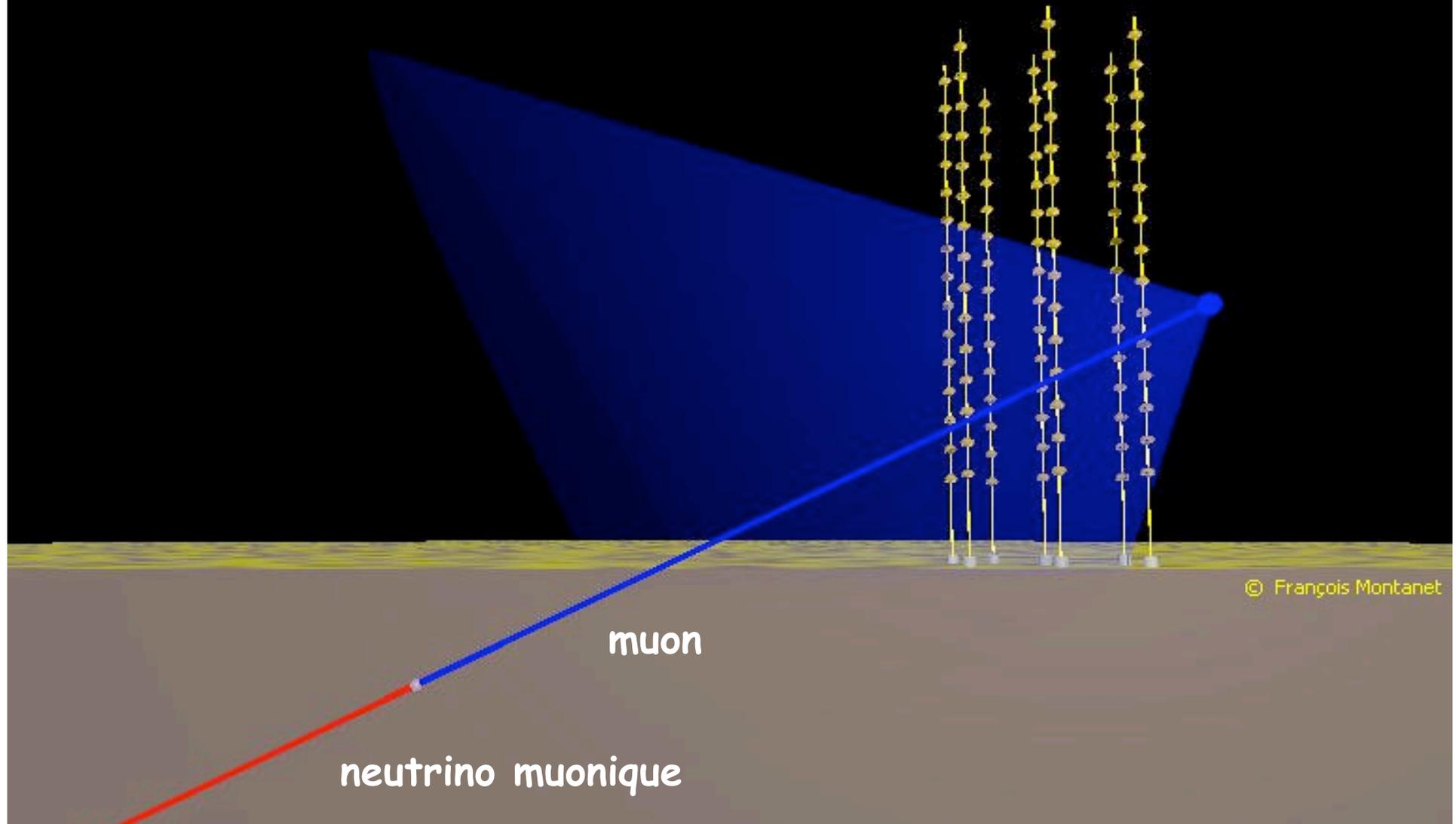


Oscillations donc  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$  et  $\nu_\tau$   
en proportion égale au niveau de  
la Terre

Les  $\mu$  et  $\tau$  produits peuvent  
traverser une grande quantité  
de matière (plusieurs km)

⇒ La Terre comme détecteur

# « Telescope » à neutrinos



# Effet Cerenkov

progression  
lente

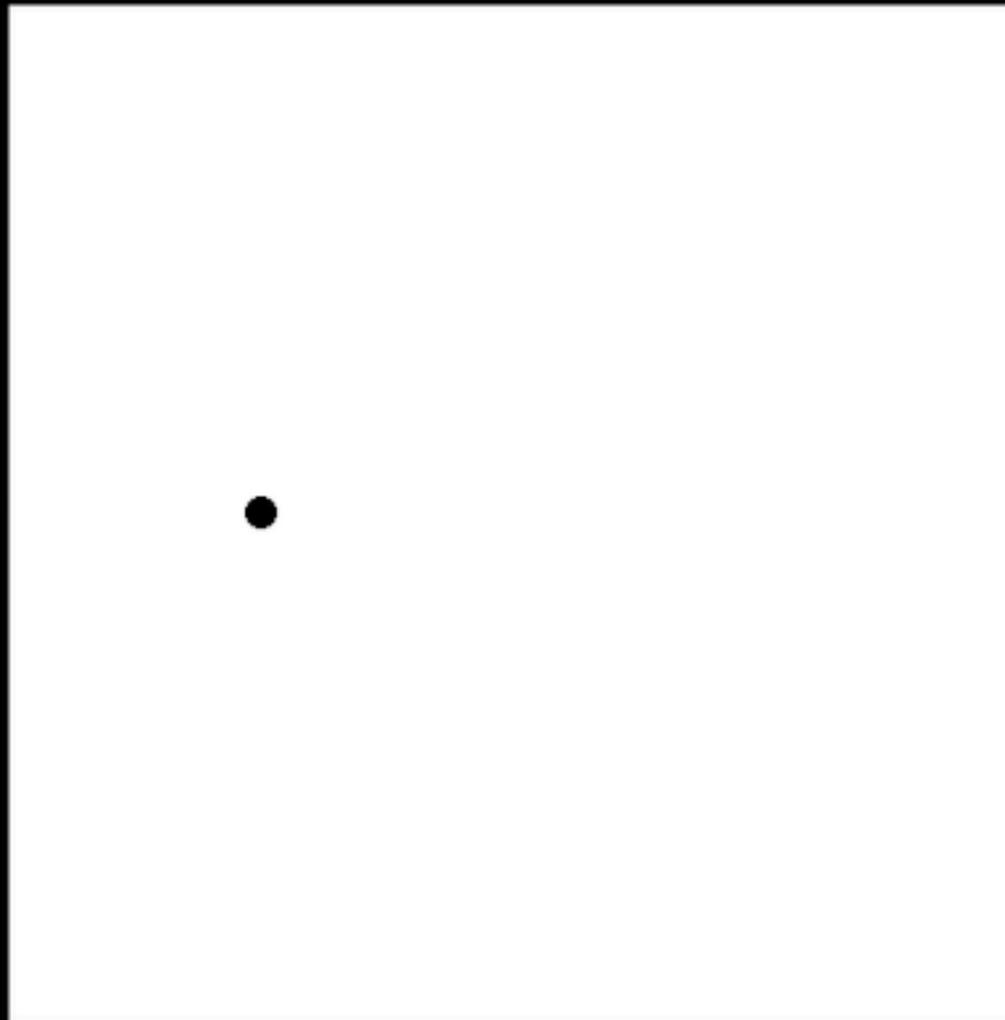
(effet  
Doppler)



# Effet Cerenkov

progression  
rapide

(onde de  
choc)

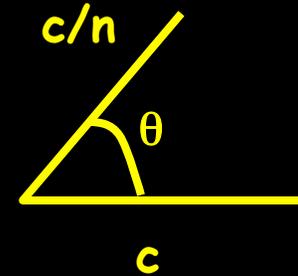


$v$  lumière =  $c/n$

$v$  particule  $\sim c$

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

$\theta = 1^\circ$  air  
 $42^\circ$  eau



# Effet Cerenkov

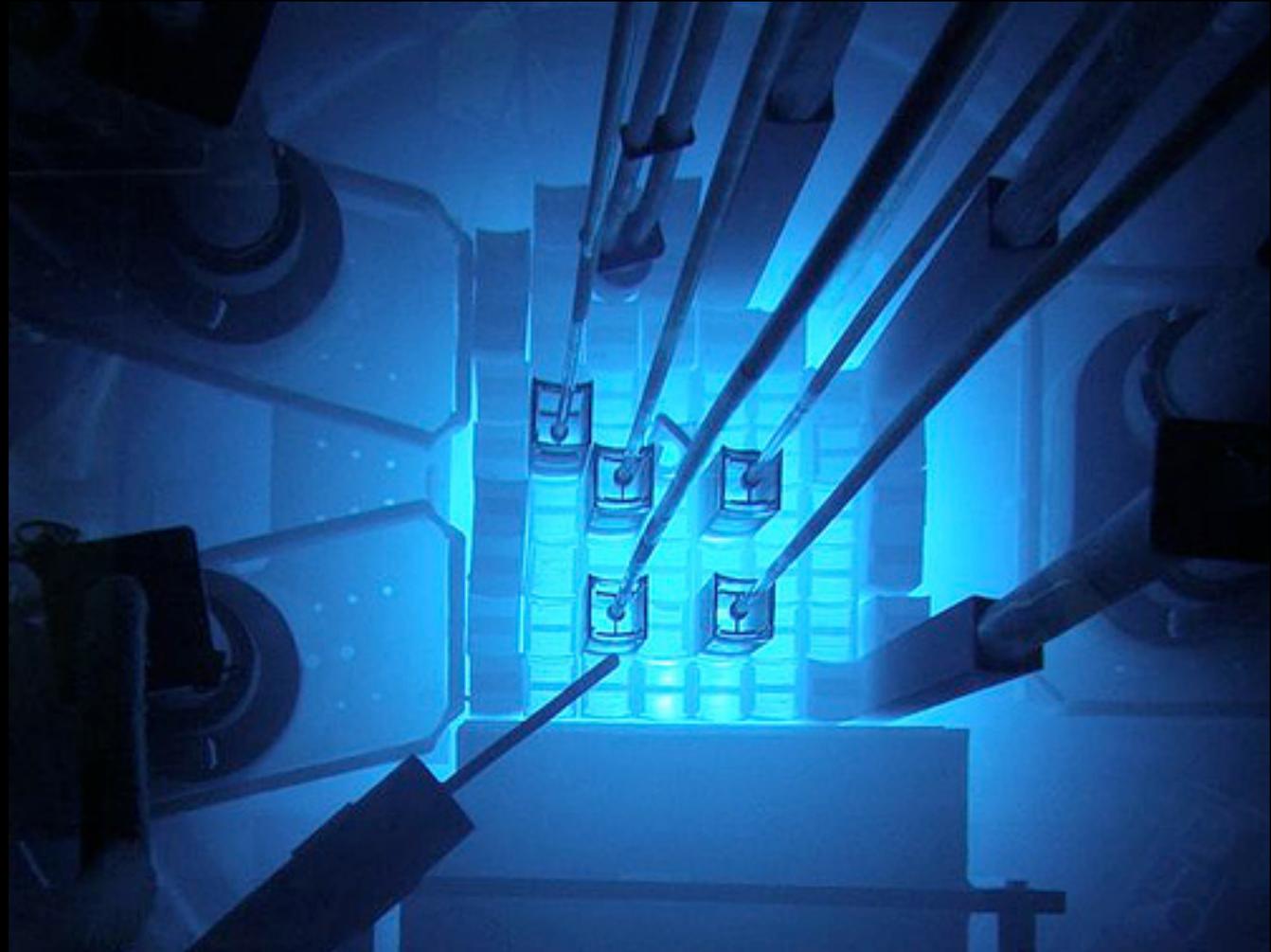
analogie sonore

Mur du son  
Bang supersonique

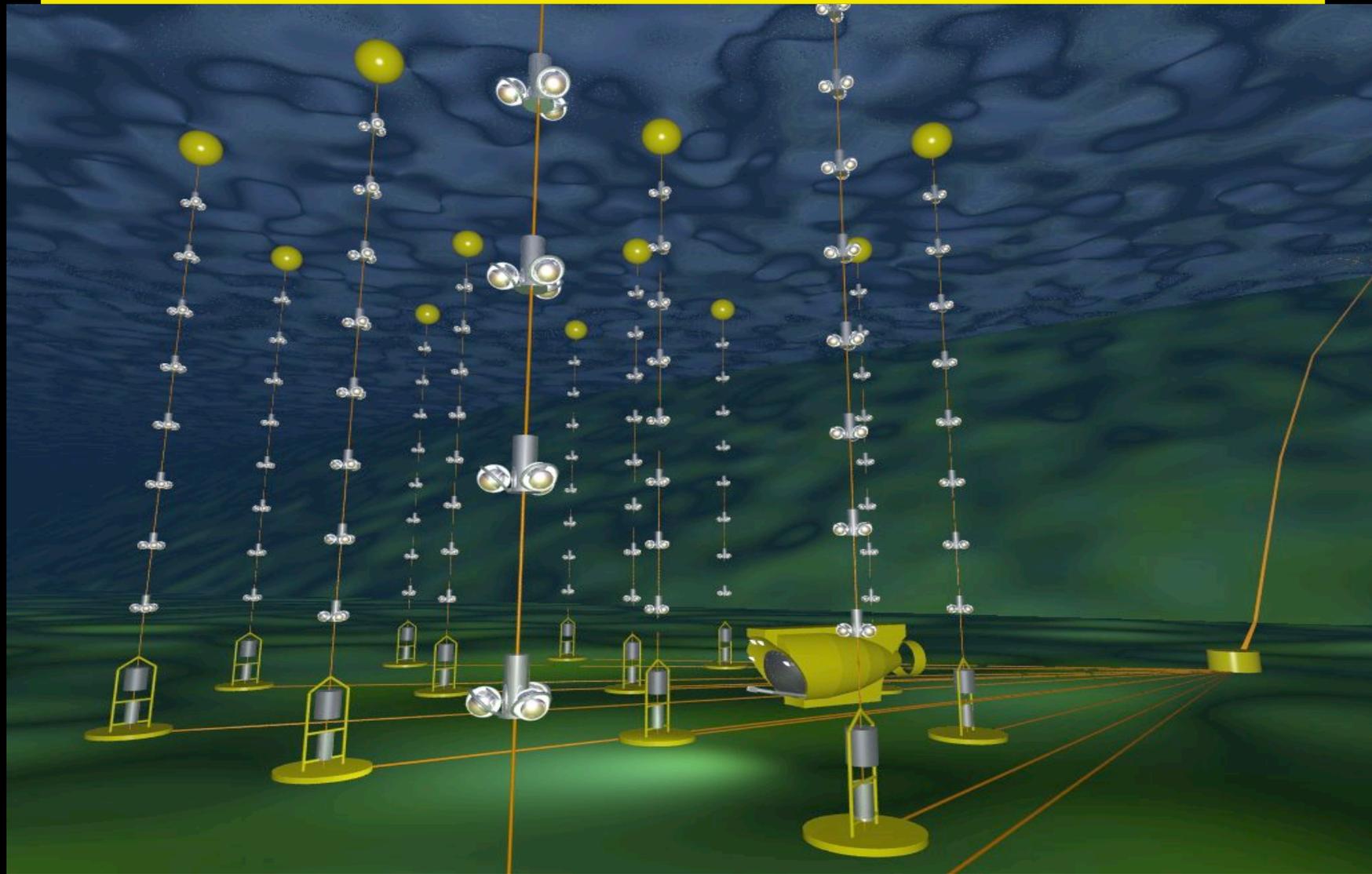


# Effet Cerenkov

Lumière bleue

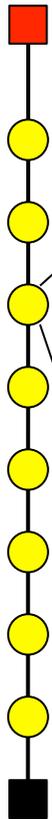


# « Télescope » à neutrinos

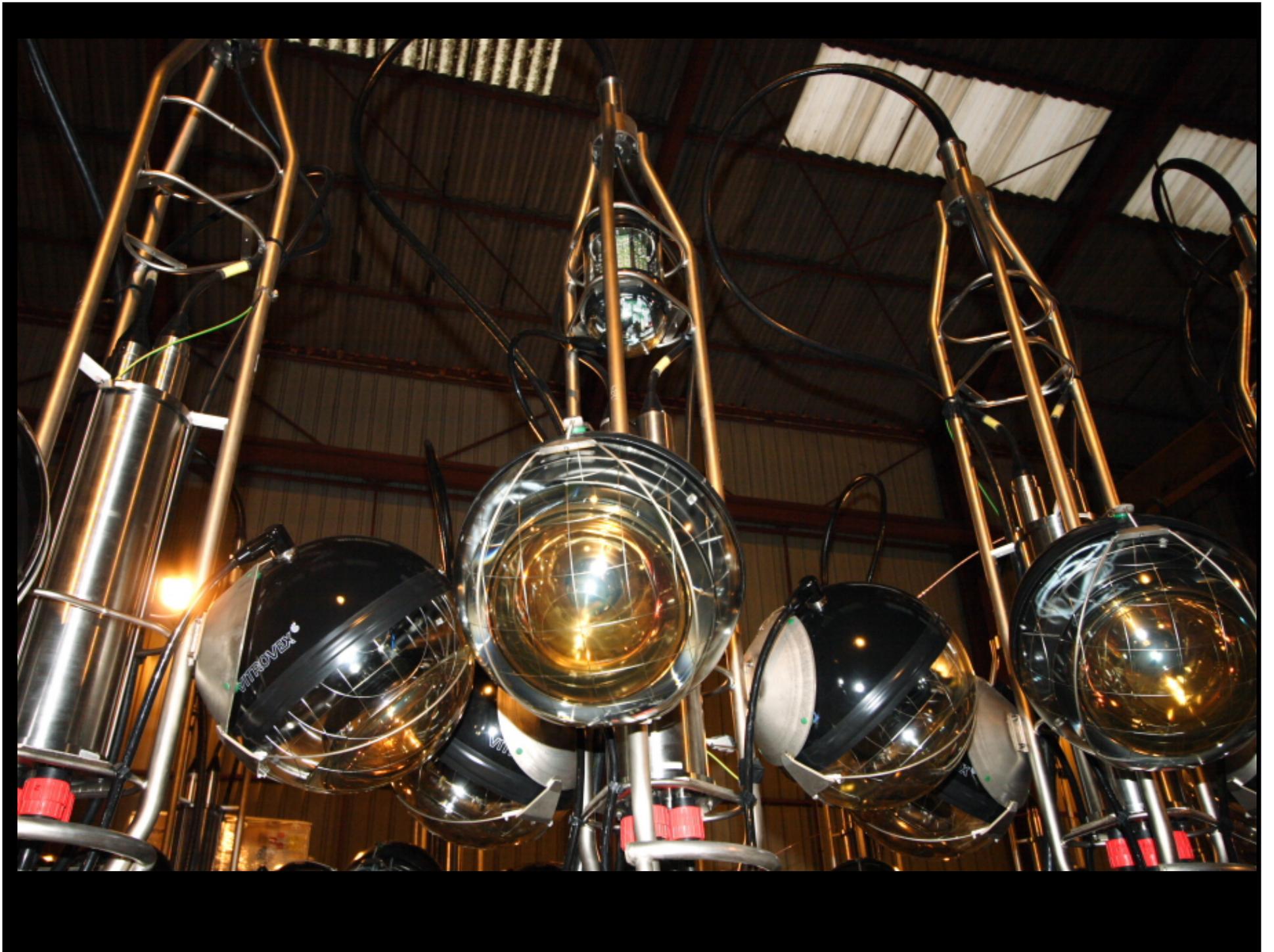


# Detecteurs

## 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 km<sup>2</sup> x 400m  
meilleure résolution angulaire  
(0.2°)

**Ice Cube**  
1 km<sup>2</sup> x 1 km  
meilleure sensibilité  
(moins d'absorption)



New South Pole Station

First IceCube string

IceCube Laboratory

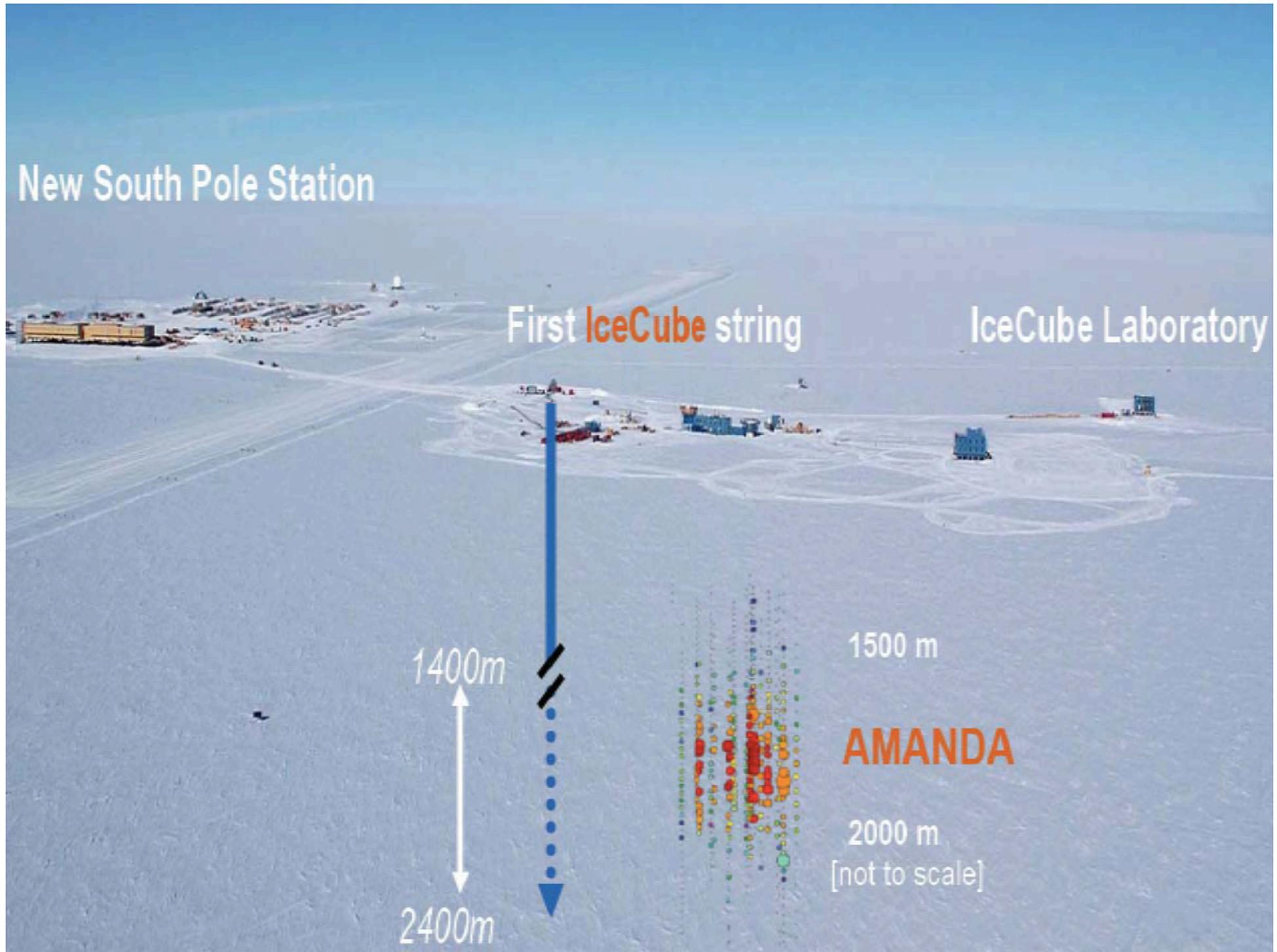
1400m

2400m

1500 m

**AMANDA**

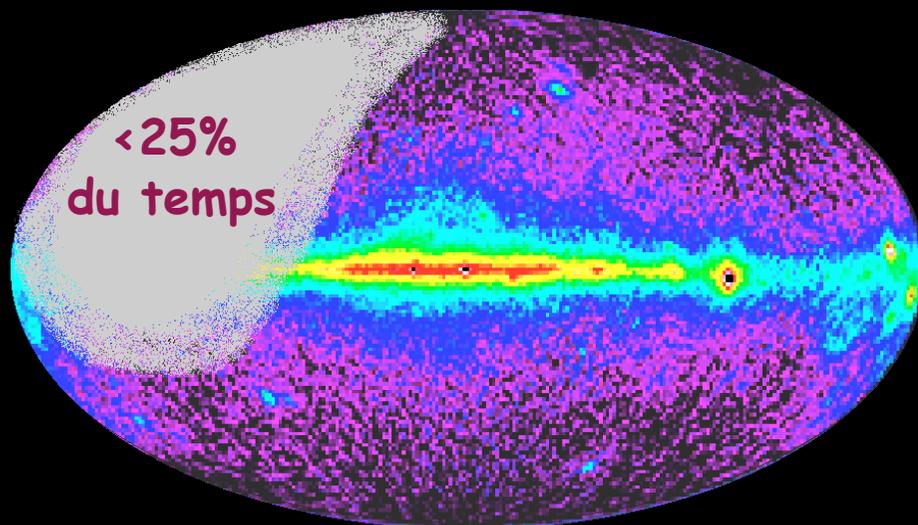
2000 m  
[not to scale]



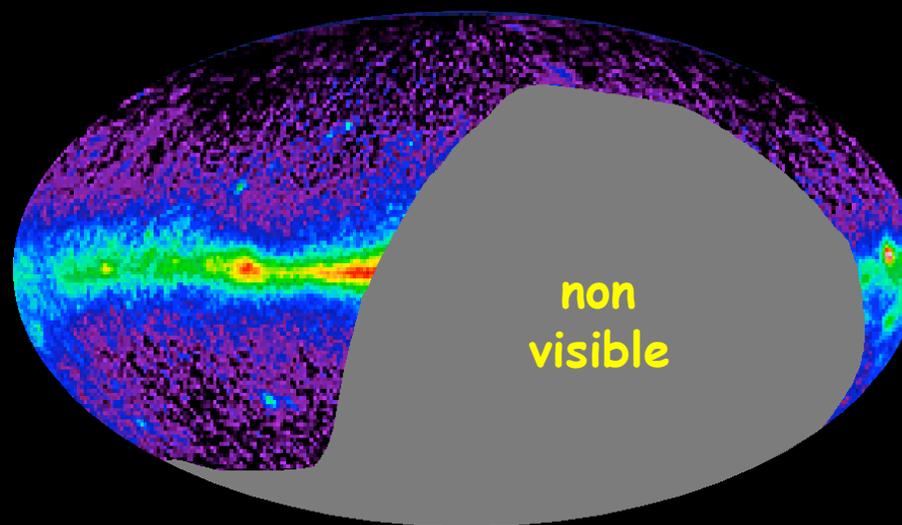


# « Télescopes » à neutrinos

Antares  
(43° North)

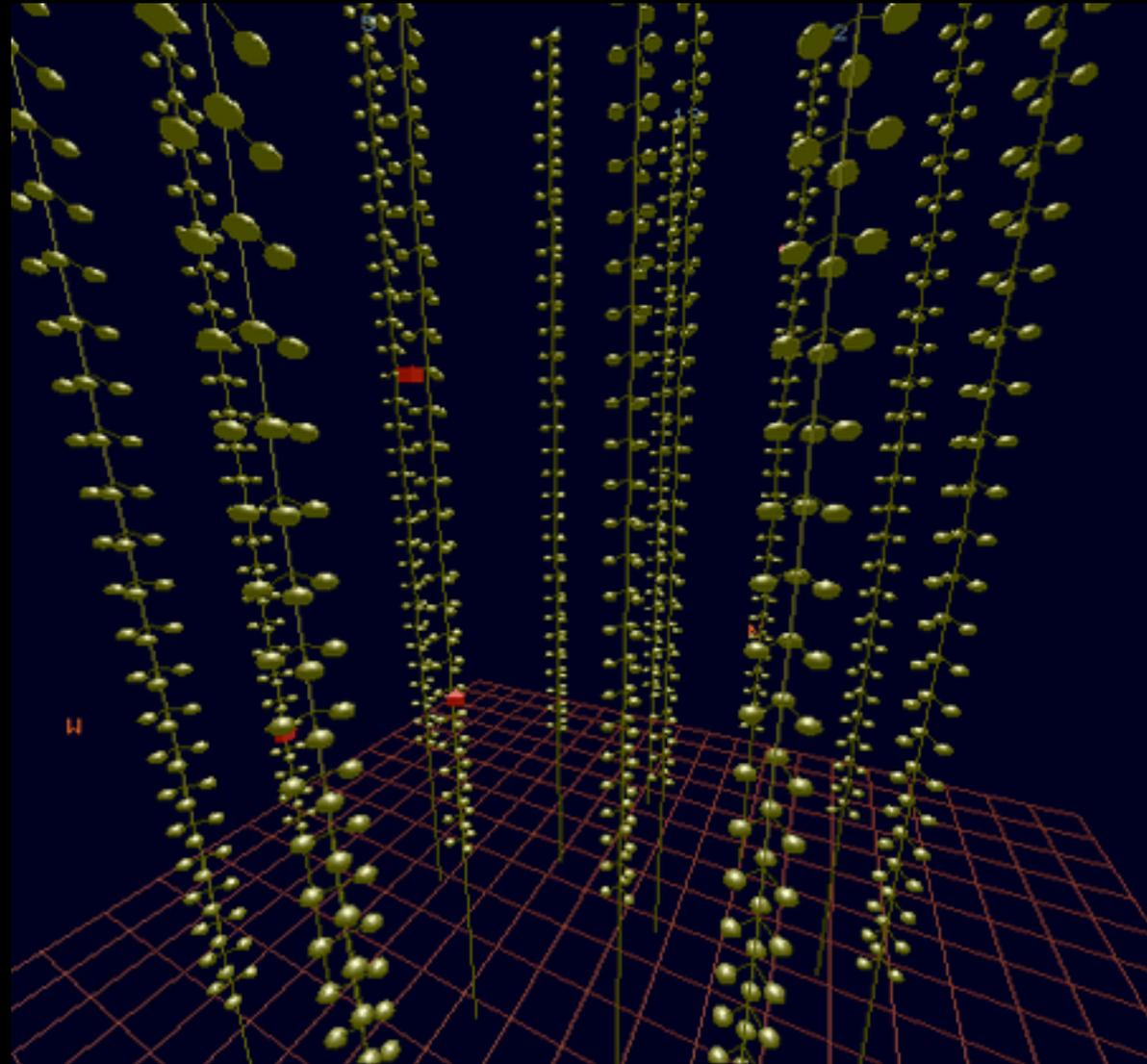


Ice Cube  
(pôle Sud)



Intercalibration possible sur  $0.6\pi$  steradians

# « Téléscopes » à neutrinos



# « Téléscopes » à neutrinos

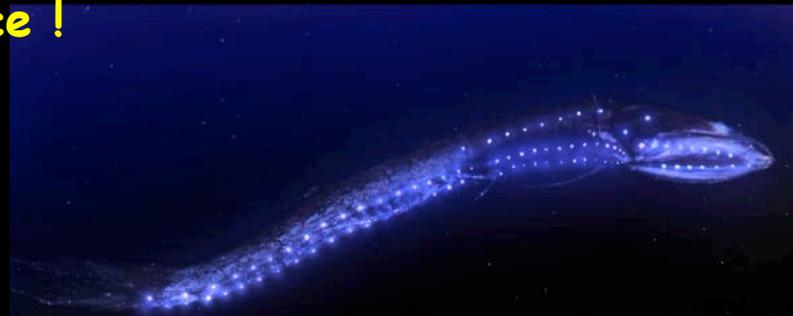
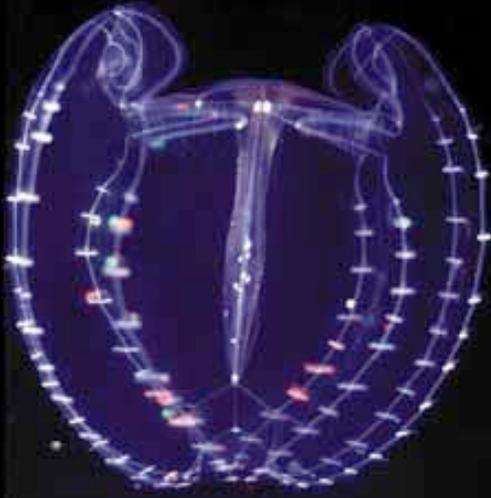
Scintillement du télescope :

radioactivité naturelle



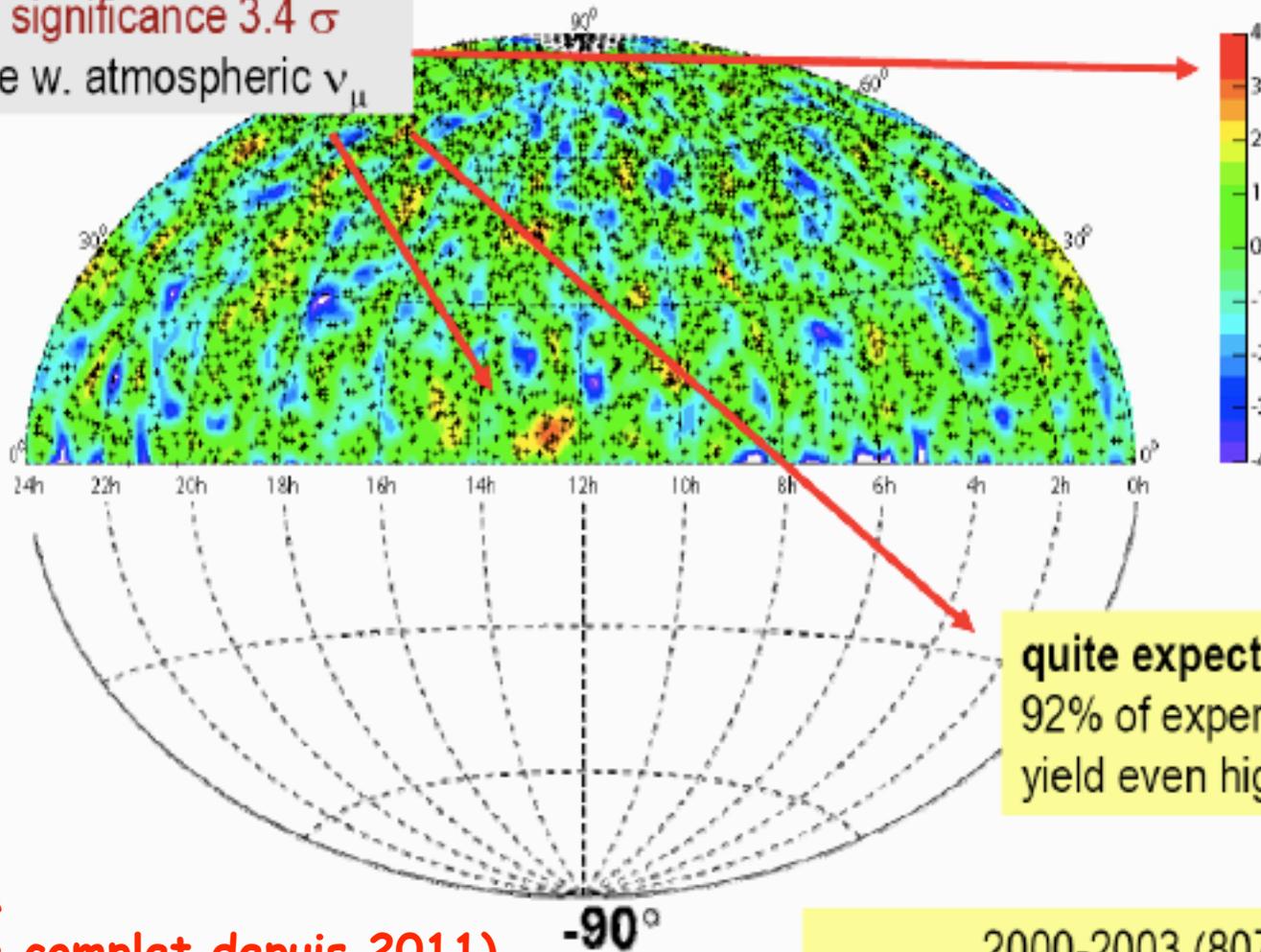
© DeepSeaPhotography.Com

bioluminescence !



© DeepSeaPhotography.Com

Maximum significance  $3.4 \sigma$   
compatible w. atmospheric  $\nu_{\mu}$



quite expected ...  
92% of experiments would  
yield even higher maximum

AMANDA  
(Ice cube complet depuis 2011)

2000-2003 (807 days)  
3329  $\mu$  from northern hemisphere  
3438  $\mu$  expected from atmospheric  $\nu_{\mu}$

Astro  $\nu$  (sources ponctuelles) requière  $> 1 \text{ km}^3$

The background of the slide is a deep space image featuring a prominent galaxy with a bright, glowing core and a complex, multi-colored structure of blue and white filaments. The galaxy is set against a dark, star-filled sky with numerous bright, multi-pointed stars scattered throughout.

# Sources cosmiques haute énergie

# Trous noirs

Approche en mécanique classique du trou noir

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

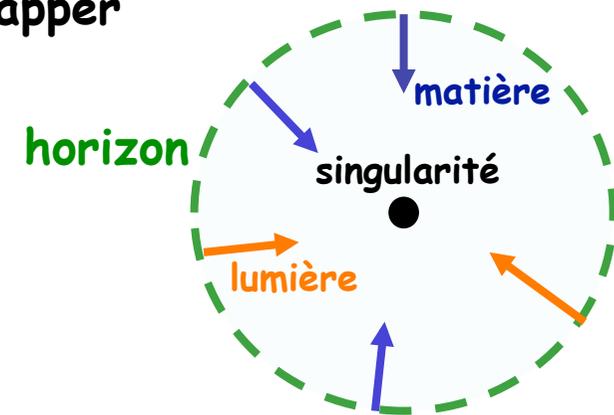
$$E_T = E_G + K < 0$$

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

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

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

rayon de Schwarzschild  $R_S$

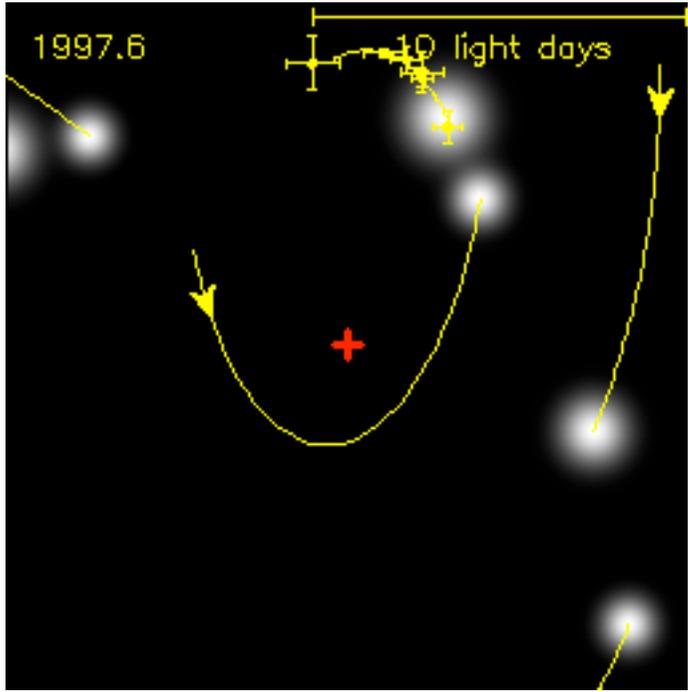
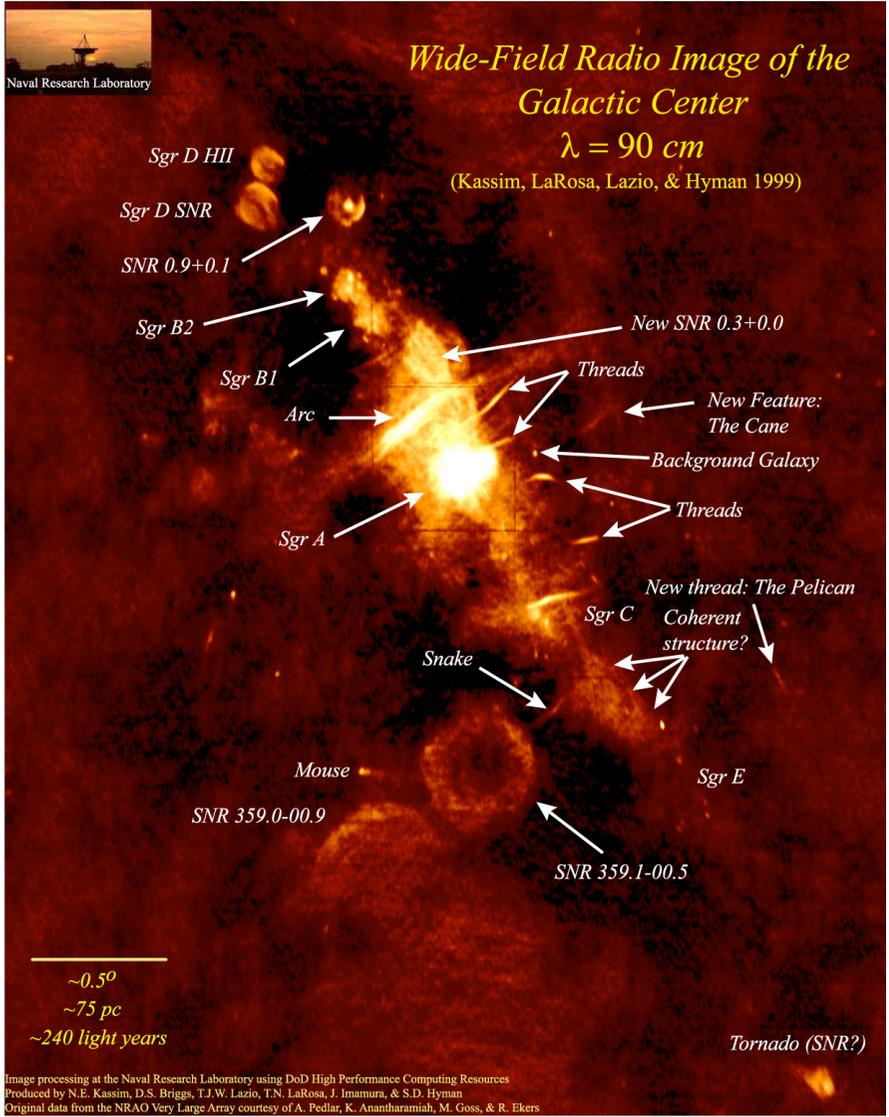


$R_S = 3$  km pour le Soleil

$R < R_S$  : 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  $M_{\odot}$   
 dans rayon  $< 0.3 \text{ u.a.} = 44 \cdot 10^6 \text{ km}$

→ trou noir supermassif !

# Trous noirs

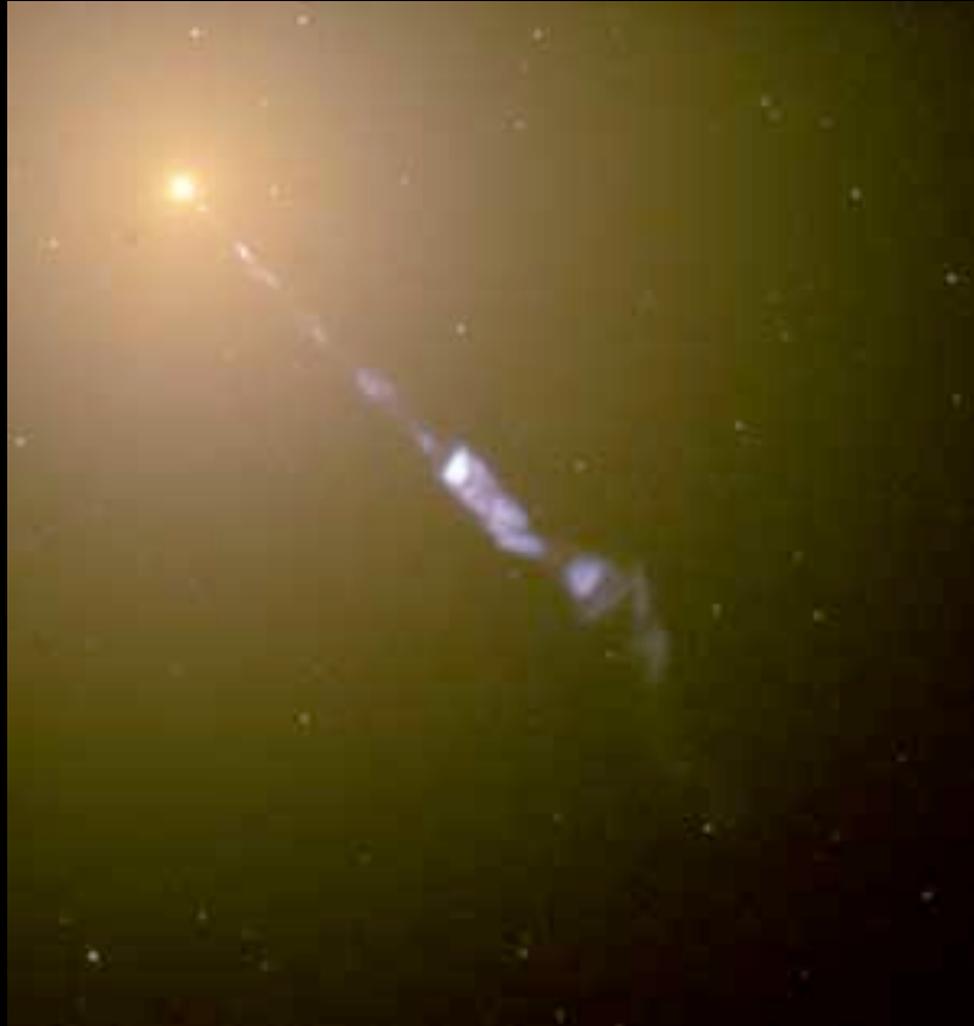


Ground



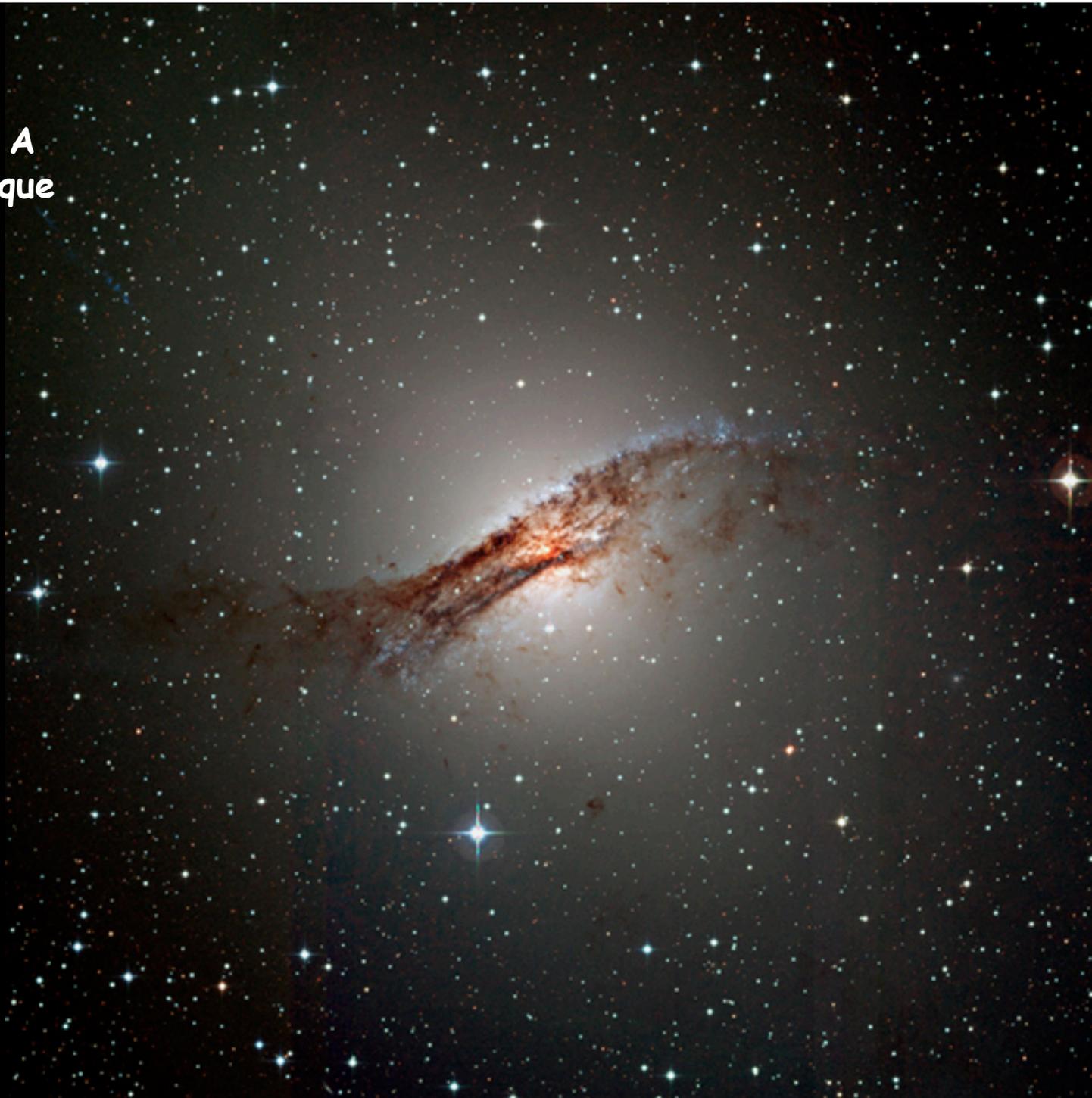
HST • WFPC2

# Trous noirs

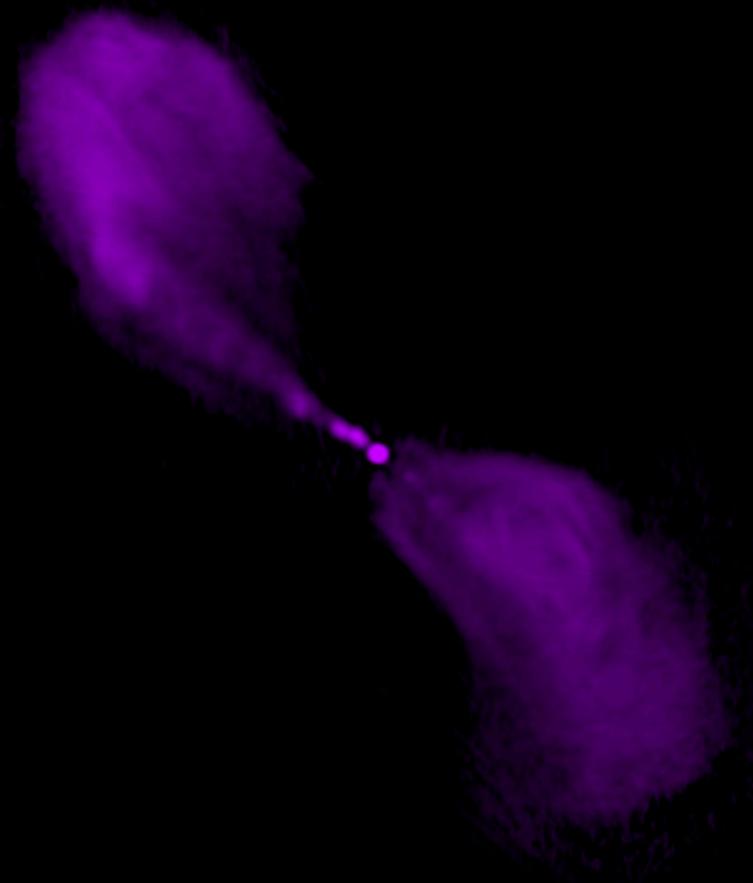


**M87 :**  
**des jets de matière**

Cen A  
optique



**Cen A**  
**radio**



Cen A  
rayons X

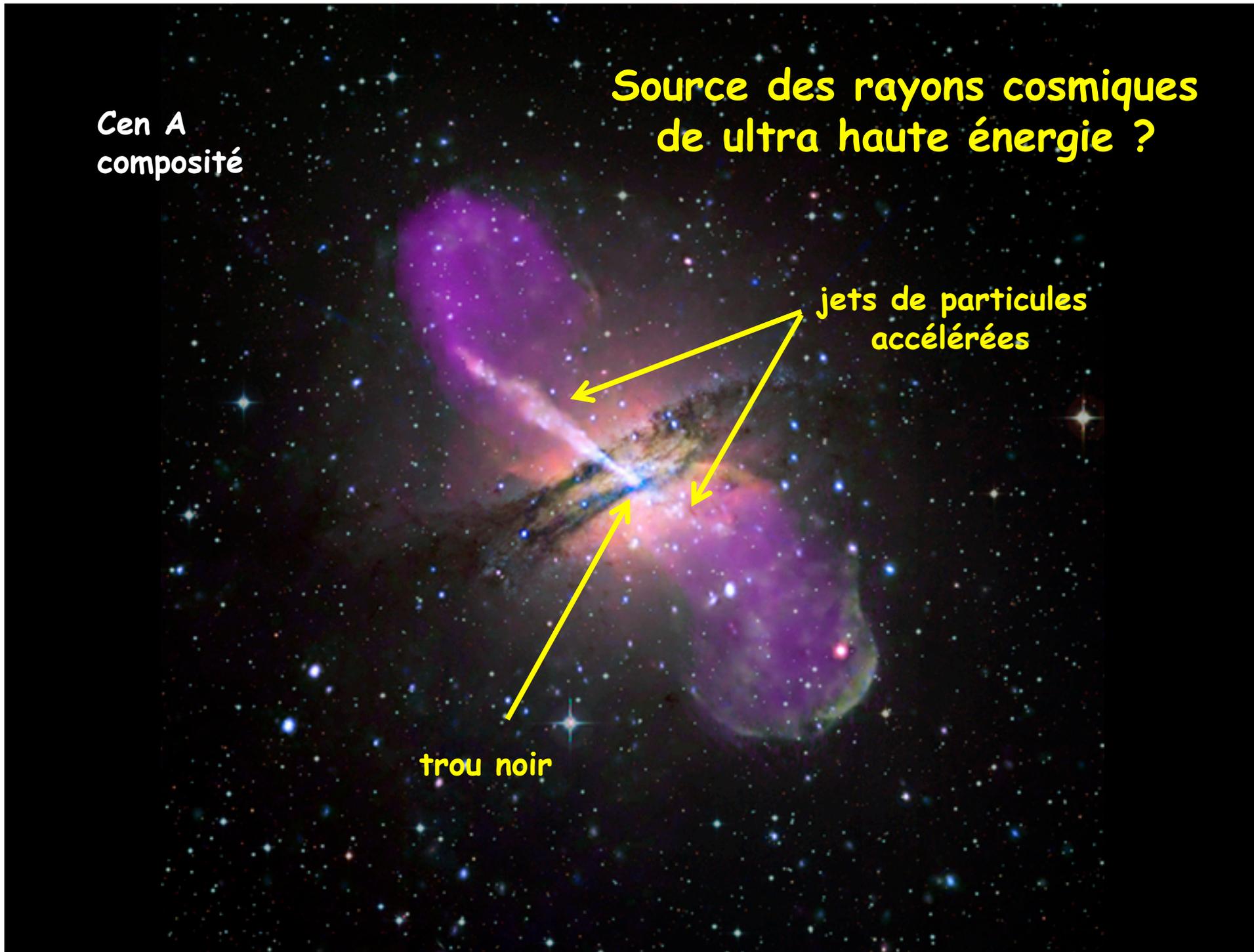


Cen A  
composité

Source des rayons cosmiques  
de ultra haute énergie ?

jets de particules  
accélérées

trou noir



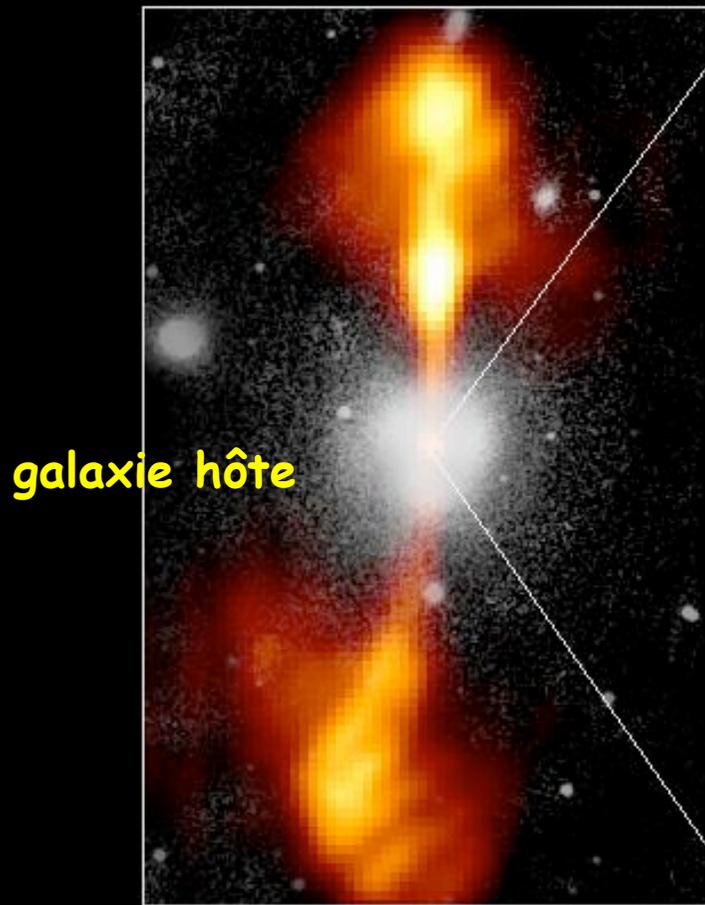
# Core of Galaxy NGC 4261

Hubble Space Telescope

Wide Field / Planetary Camera

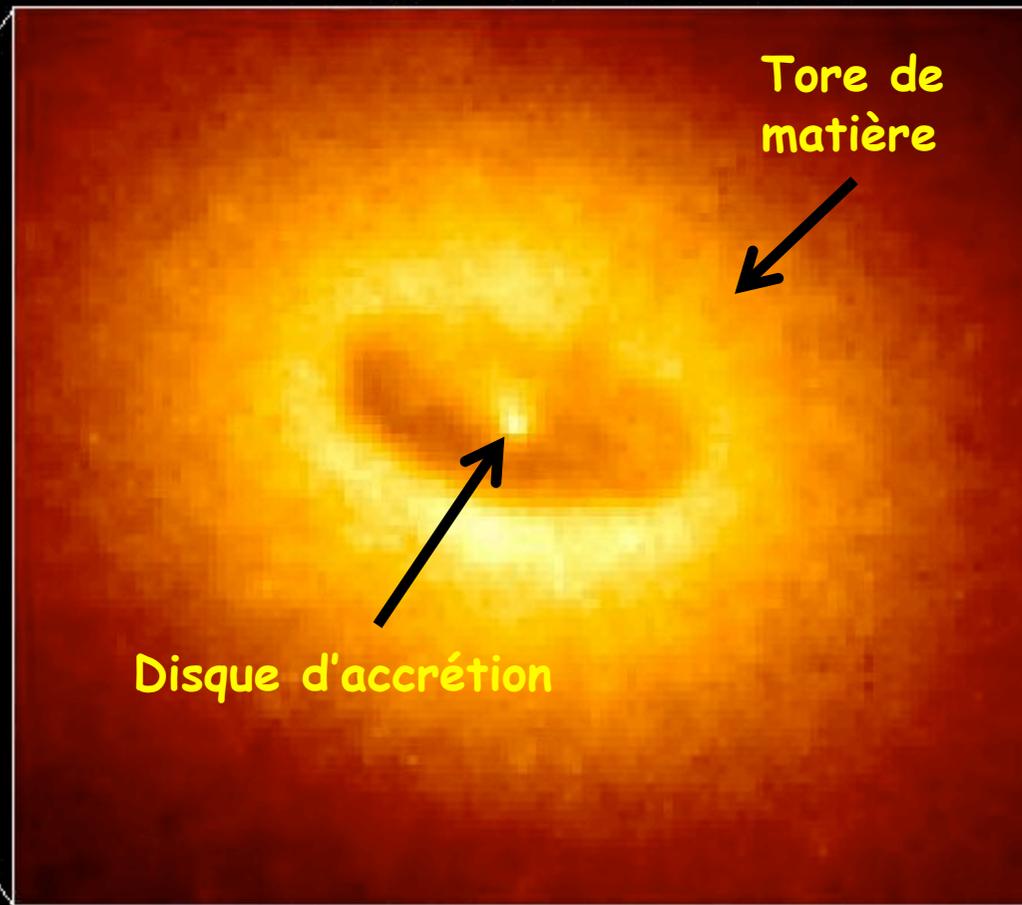
Ground-Based Optical/Radio Image

HST Image of a Gas and Dust Disk



galaxie hôte

380 Arc Seconds  
88,000 LIGHTYEARS

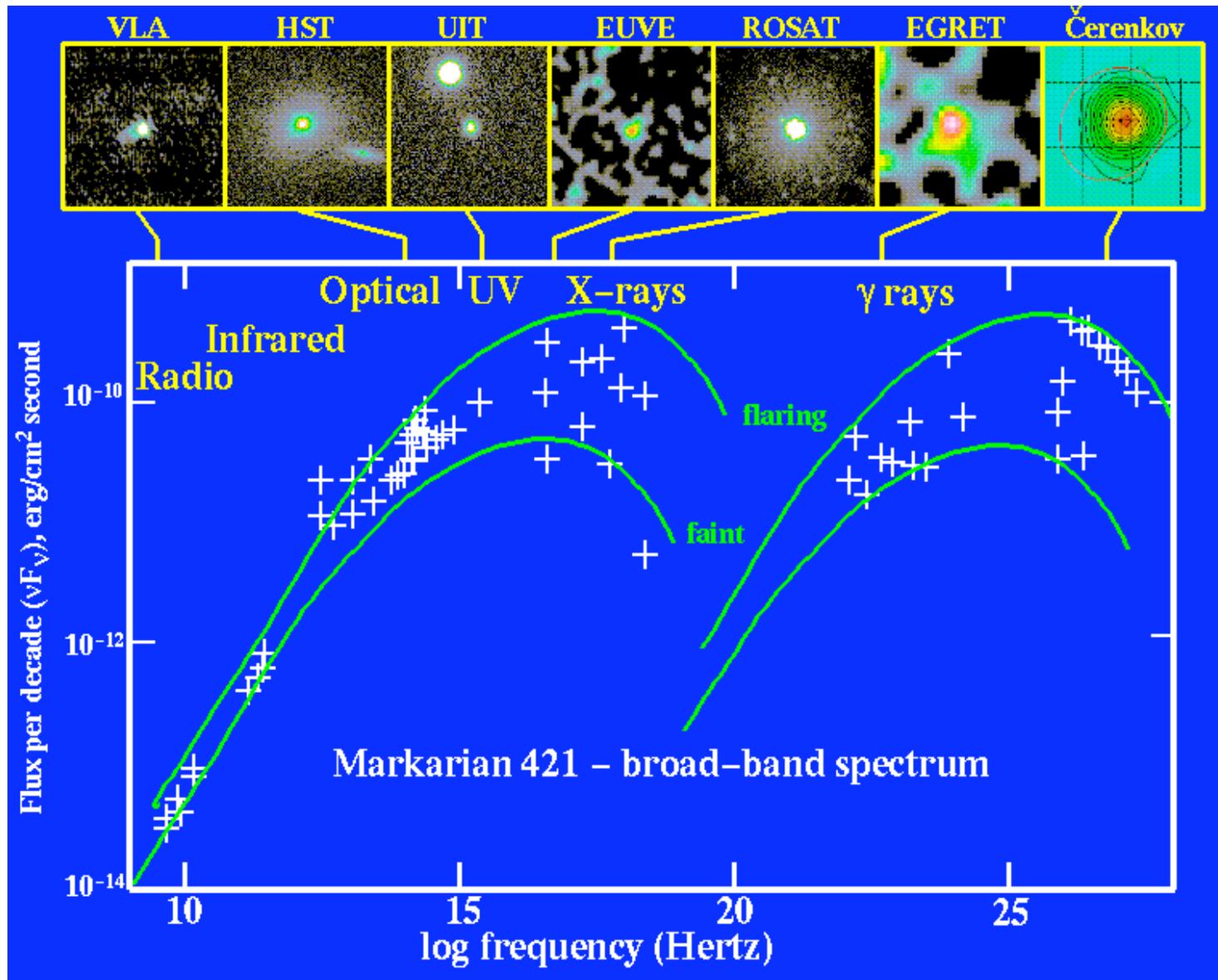


Tore de  
matière

Disque d'accrétion

17 Arc Seconds  
400 LIGHTYEARS

# Markarian 421 : blazar « voisin »



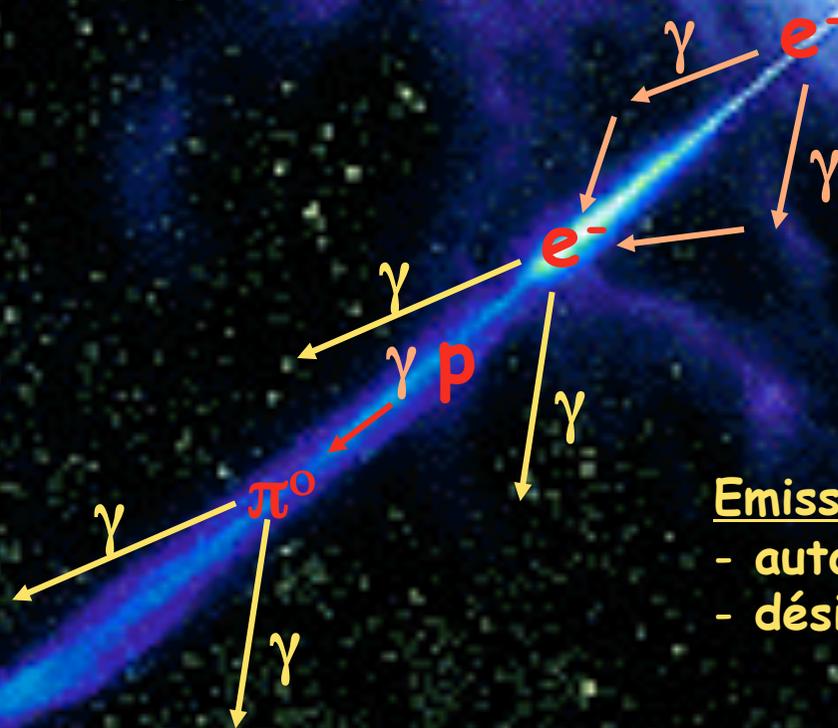
# Blazars

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

**VARIABILITÉ !**



taille  $\sim \Gamma c t_{\text{var}}$   
( $\Gamma > 10$ )



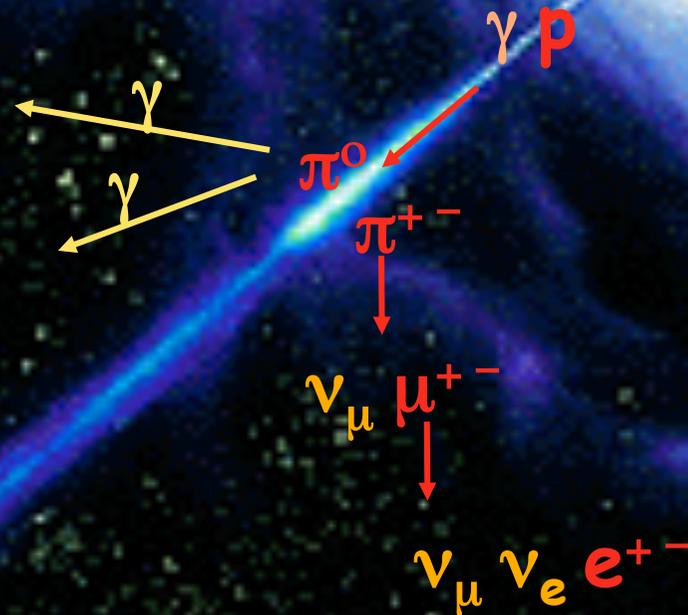
Emission haute énergie (rayons  $\gamma$ ):

- auto-compton (electromagnétique) ?
- désintégration  $\pi^0$  (hadronique) ?

# Blazars

Emission haute énergie (rayons  $\gamma$ ):

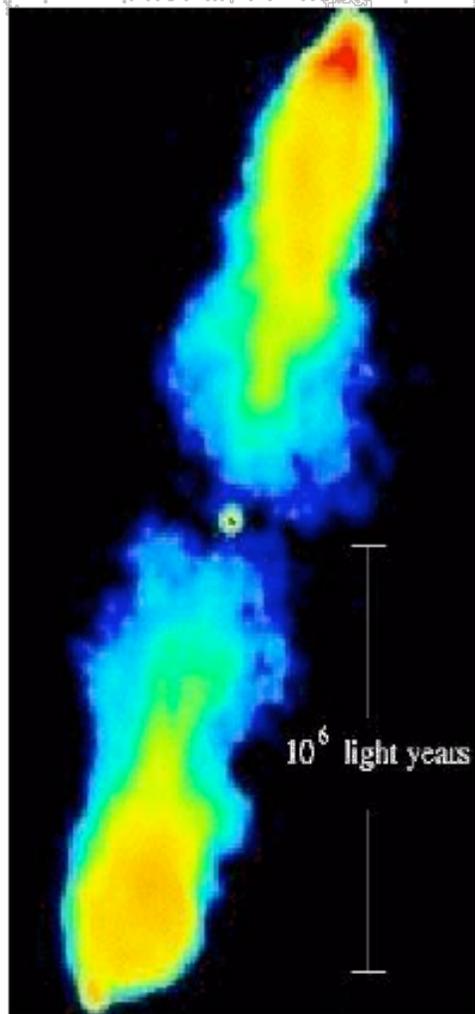
- ~~auto-compton (electromagnétique) ?~~
- désintégration  $\pi^0$  (hadronique) ?



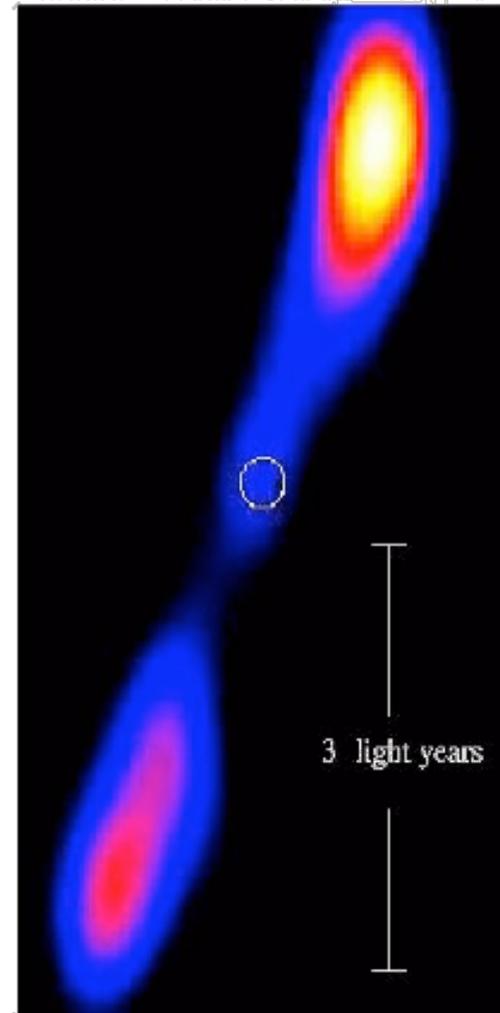
Sources de  $\nu$   
de haute énergie !

# Quasars et Microquasars

QUASAR 3C 223

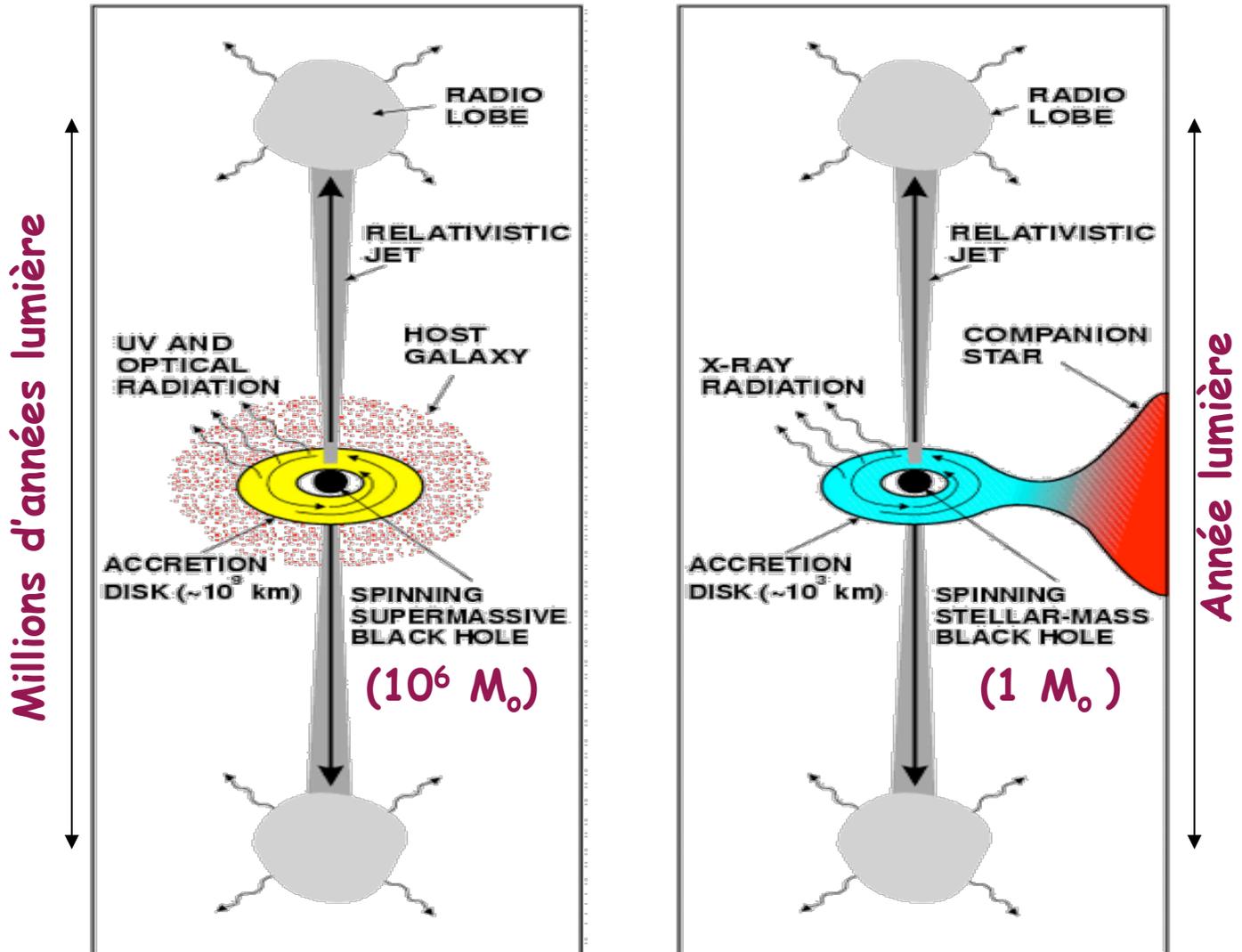


MICROQUASAR 1E1740.7-2942



# QUASAR

# MICROQUASAR

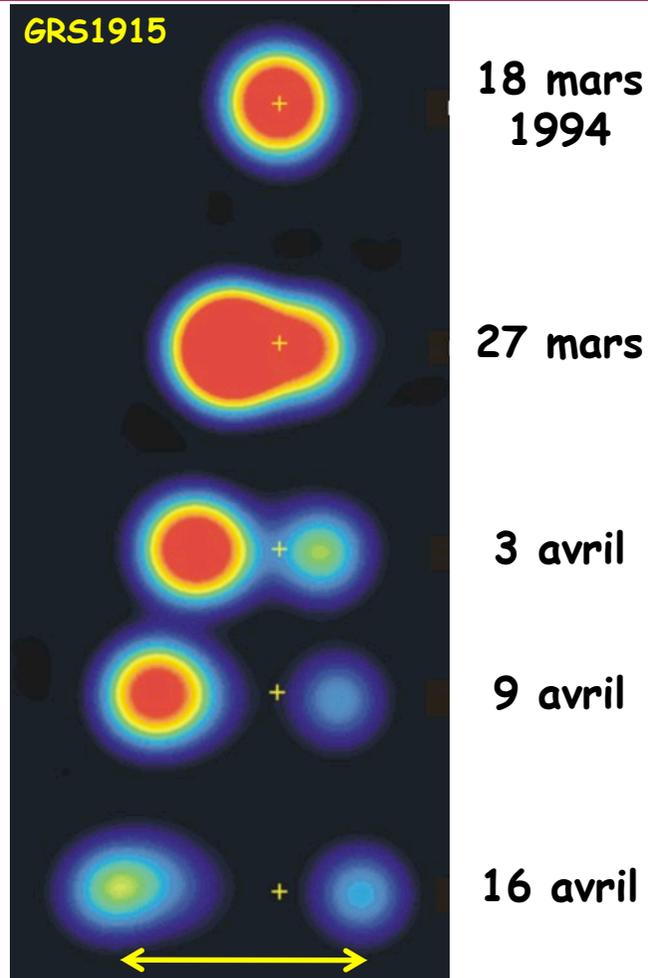


$$R \propto M_{BH}$$

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

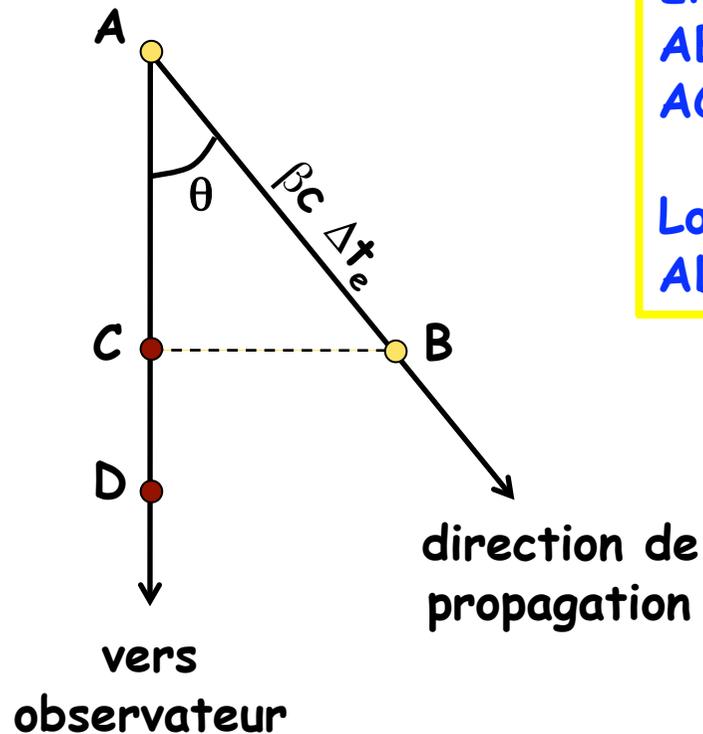
Mirabel & Rodriguez

# Déplacements supraluminiques !?



$10^4$  u.a. = 2 mois lumière

# Déplacements supraluminiques !?



Emission du 1<sup>er</sup> photon en A, puis du 2<sup>nd</sup> en B  
 $AB = \beta c \Delta t_e$   
 $AC = \beta c \Delta t_e \cos \theta$

Lors de émission du 2<sup>nd</sup> photon, le 1<sup>er</sup> est en D  
 $AD = c \Delta t_e$

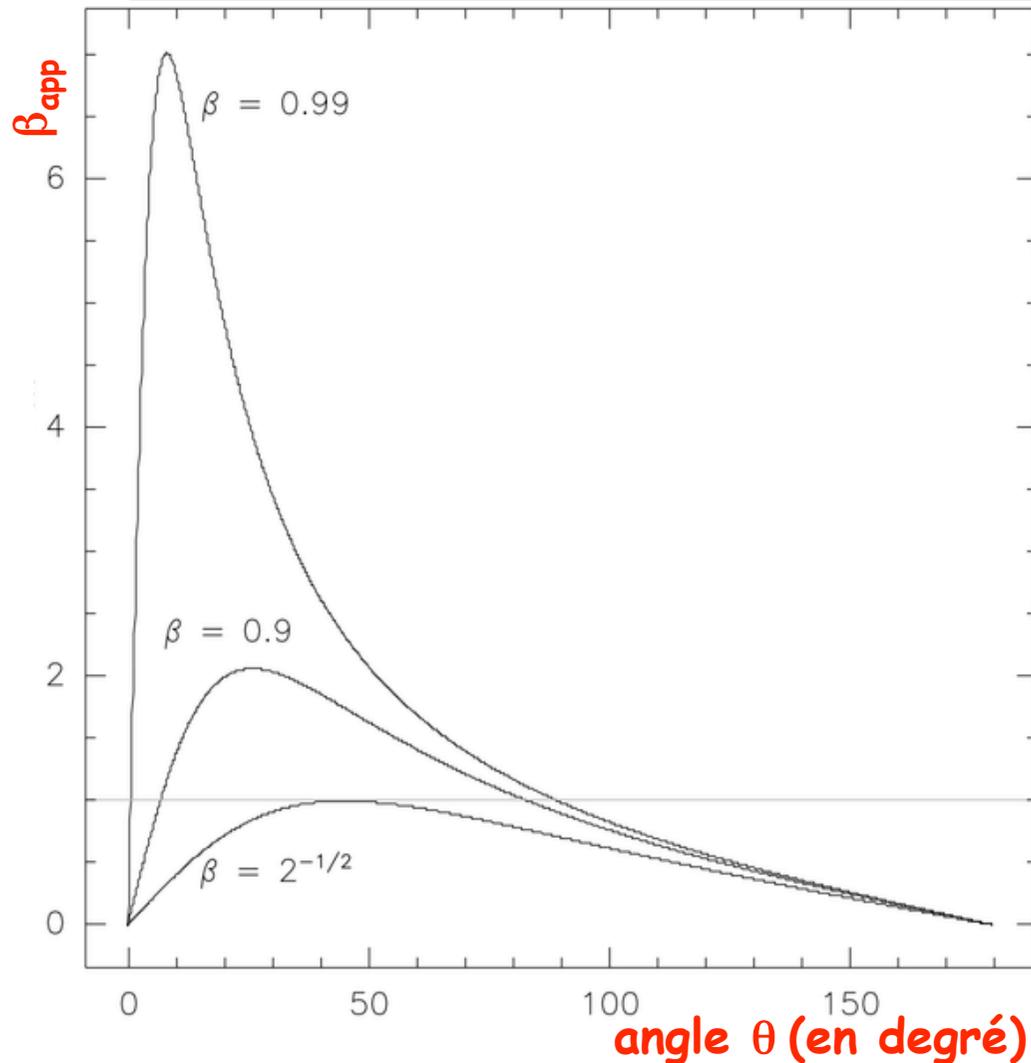
Différence entre les temps d'arrivée:  
 $t_2 - t_1 = DC / c = \Delta t_e (1 - \beta \cos \theta)$

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

**Vitesse apparente**

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

# Déplacements supraluminiques !?



Déplacement supraluminique  
APPARENT

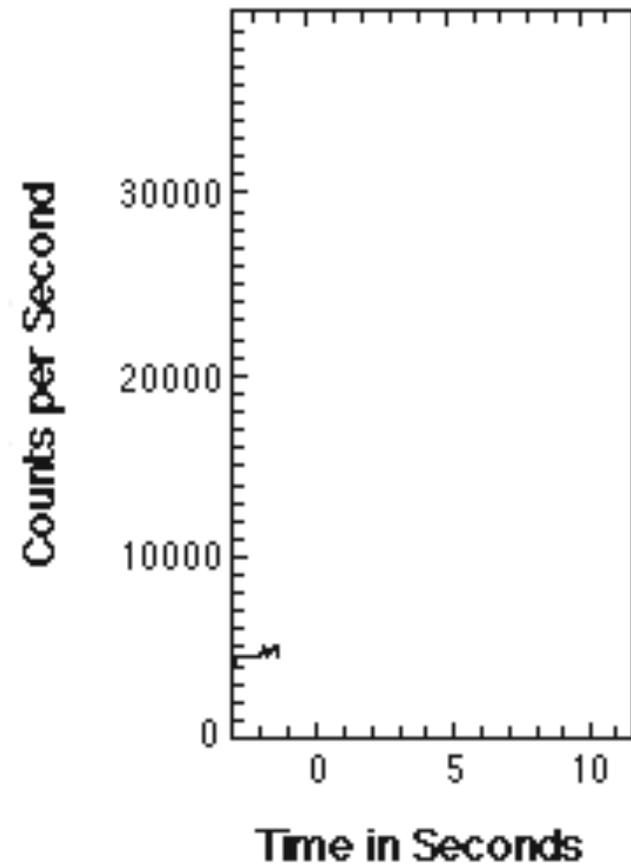
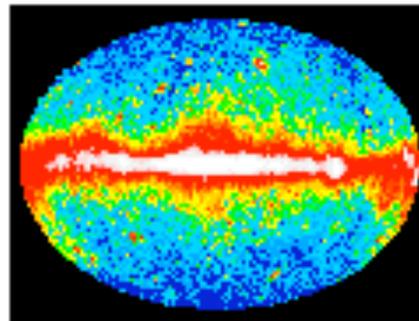
Uniquement dans certaines  
configurations  
( $\theta$  petit,  $\beta$  grand)

The background of the slide is a dark, starry space. In the upper left, there is a bright, glowing star with a lens flare effect. A blue, ethereal nebula or comet-like streak extends from the star towards the center of the frame. The overall color palette is dark with highlights of orange, yellow, and blue.

**D'autres  
sources cosmiques?**

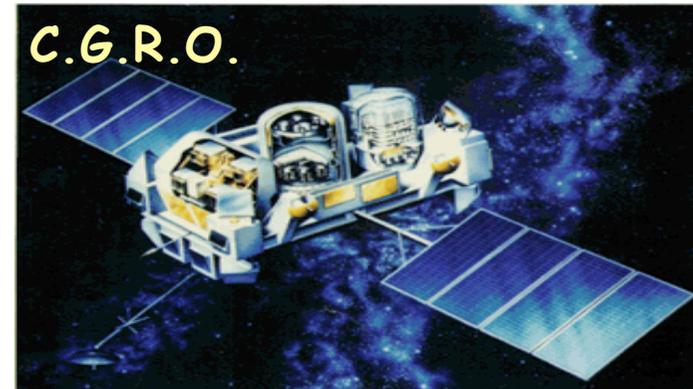
# Sursauts Gamma (GRB)

**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 ?

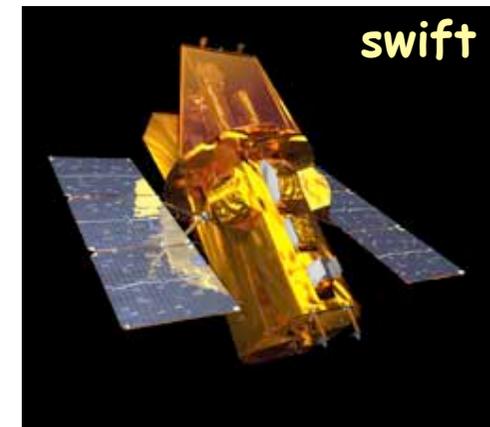
$\Delta t$  de 10ms à quelques secondes

$\Delta L$  (en 5s) = 1.500.000 km = 0.01 u.a.

→ région compacte

→ trous noirs, étoiles à neutrons

2009 (>3000 sursauts) toujours mal compris...



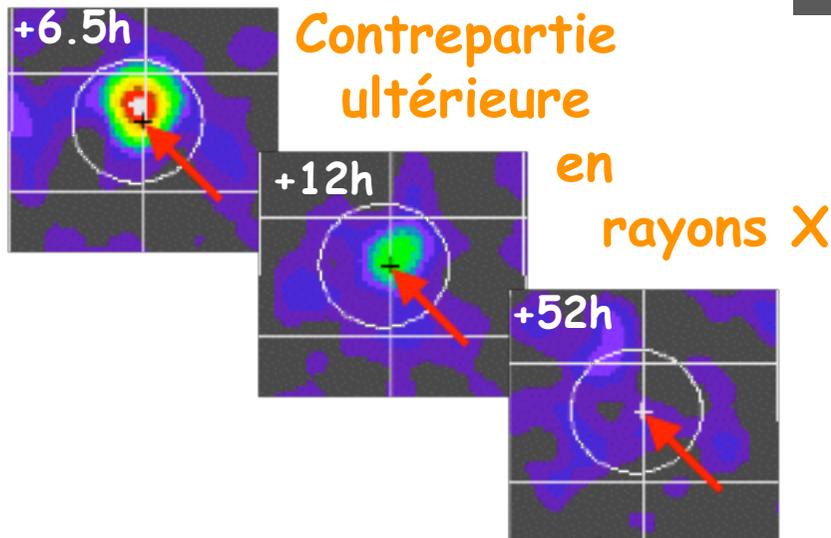
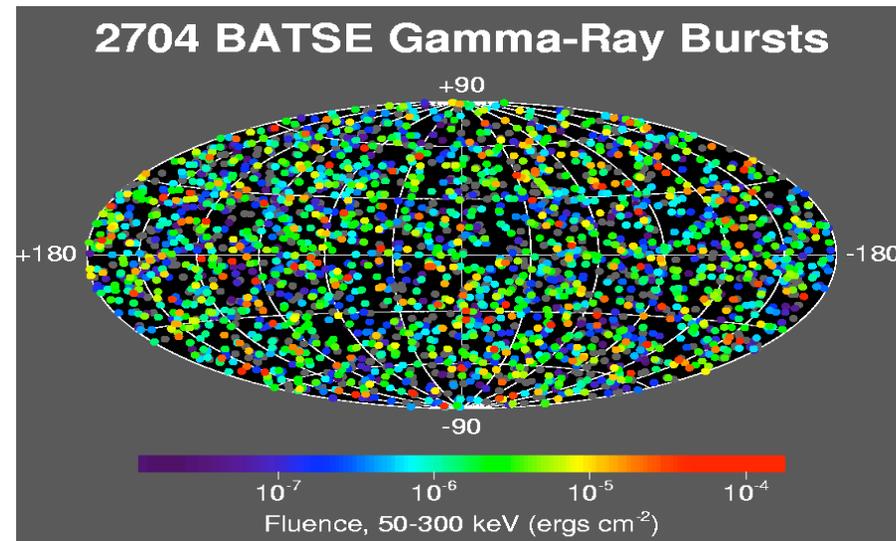
# Localisation des sursauts

Long débat, mais

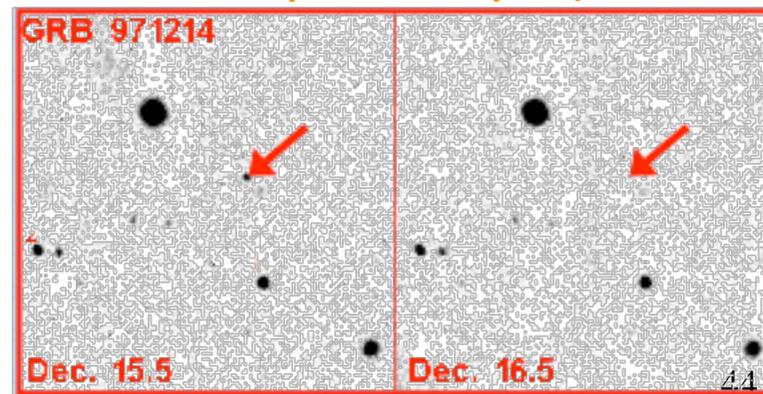
Isotropie  
+  
Contreparties optiques



Phénomènes cosmologiques  
( $z = 0.43$  à  $6.3$ )



Contrepartie optique



# Astroparticule

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

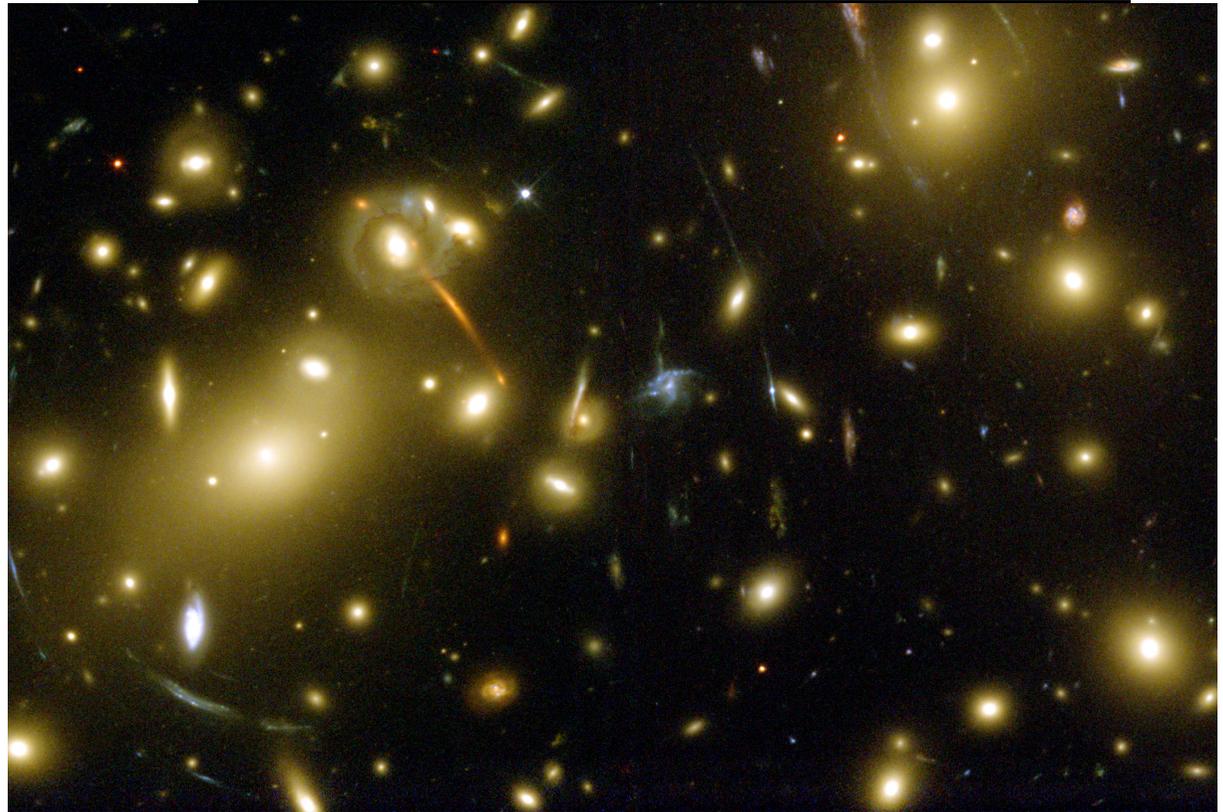
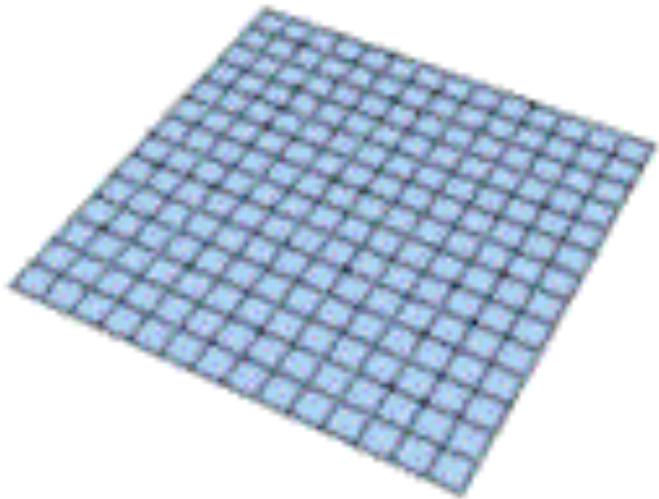
2) **Neutrinos cosmiques**  
- Saga solaire  
- Des neutrinos dans l'atmosphère  
- Astronomie neutrinos

3) **Astronomie gamma**  
**Ondes gravitationnelles**  
*ou l'Univers violent...*



# Gravitation et espace-temps

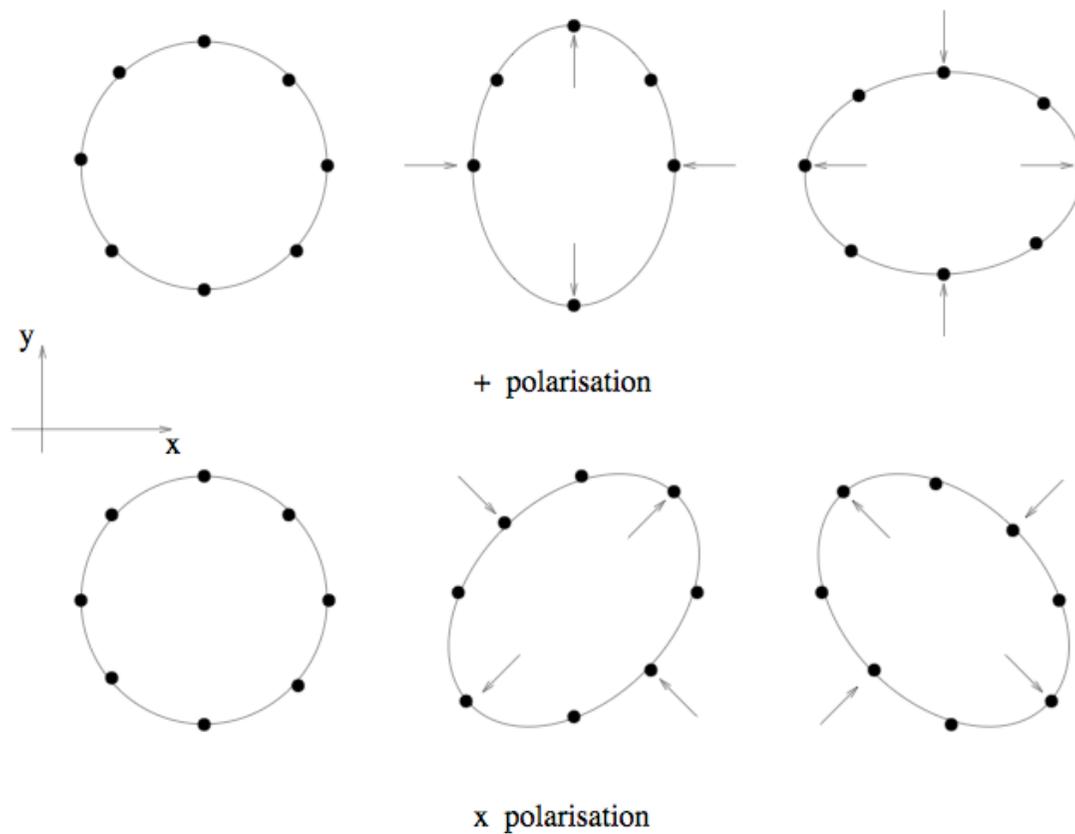
Un espace-temps courbe ( $\neq$  relat. restreinte)



# Ondes gravitationnelles

relativité générale → ondes gravitationnelles

- prédiction dès 1918
- 2010 : pas une seule détection (*pourquoi ?*)

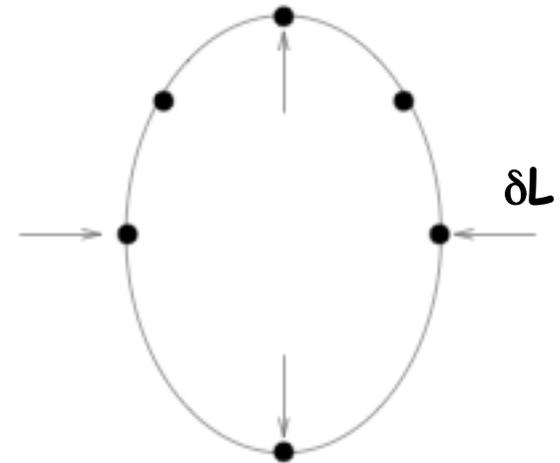


# Ondes gravitationnelles

$$h = \delta L / L$$

Variation de longueur due à onde gravitationnelle

Longueur totale

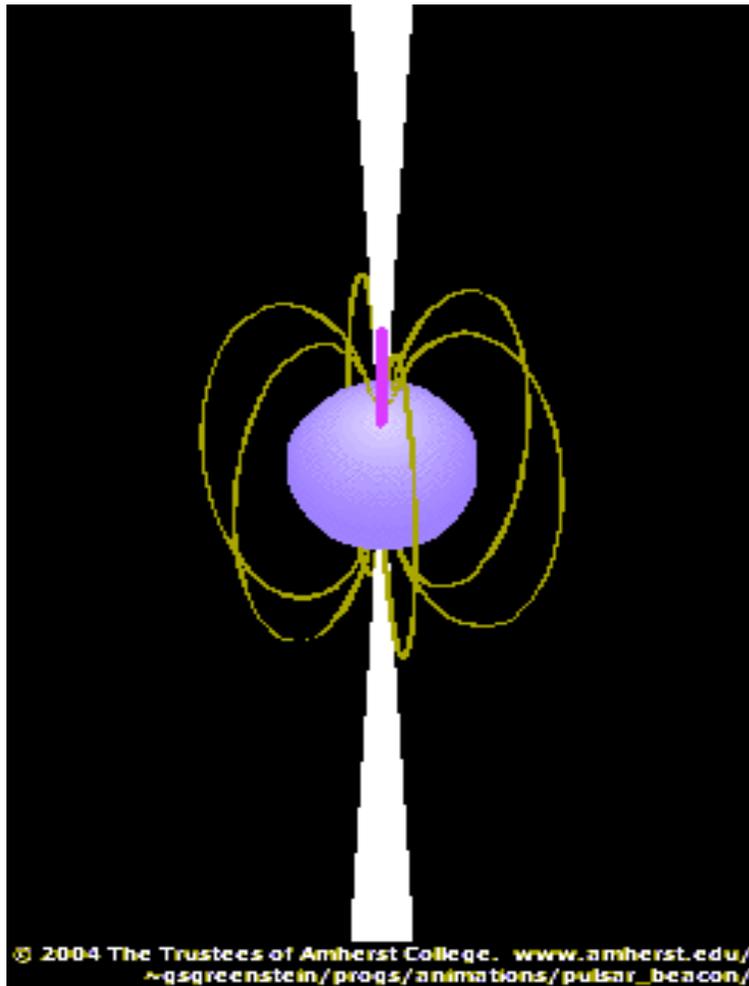


Explosion SN dans amas de la Vierge (15 Mpc):  
 $h \sim 10^{-21}$  à  $10^{-24}$

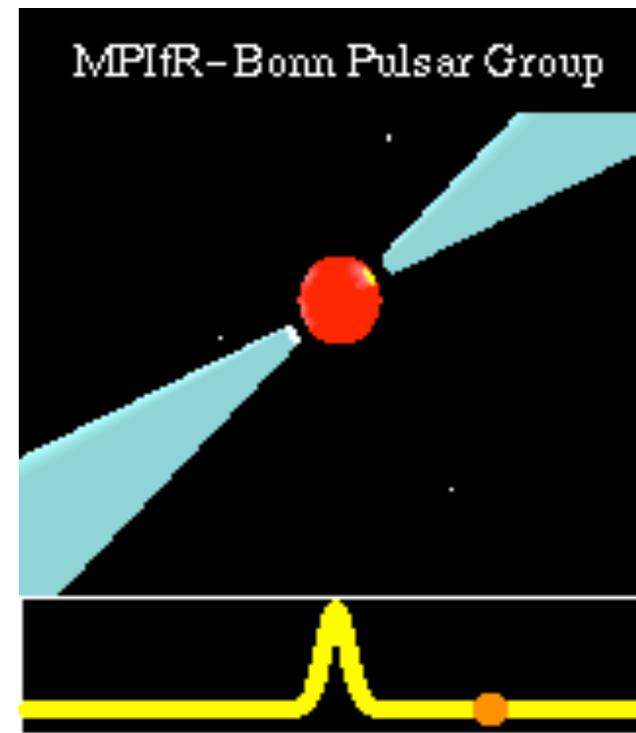
Système de deux trous noirs (10 Mpc):  
 $h \sim 10^{-22}$  à  $10^{-23}$

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

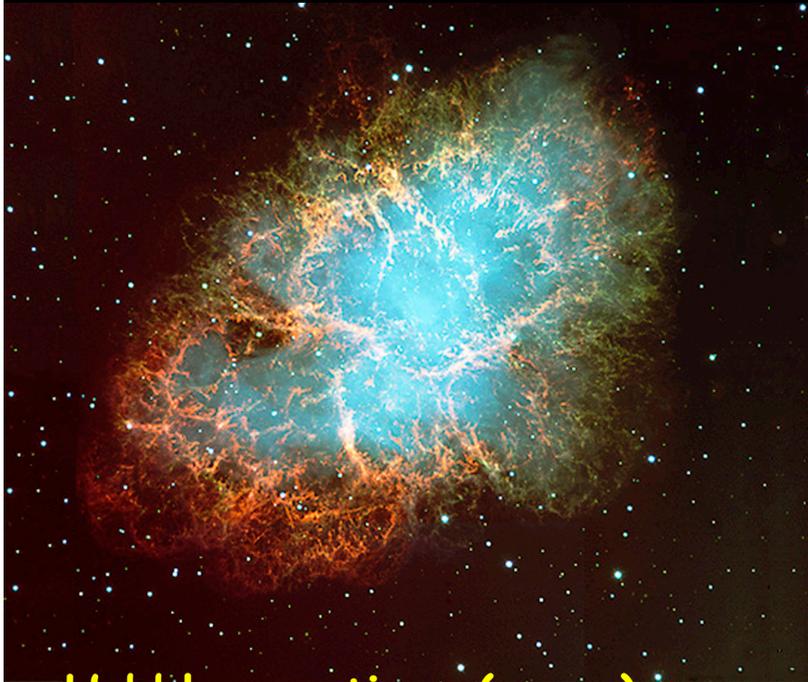
# Hulse et Taylor



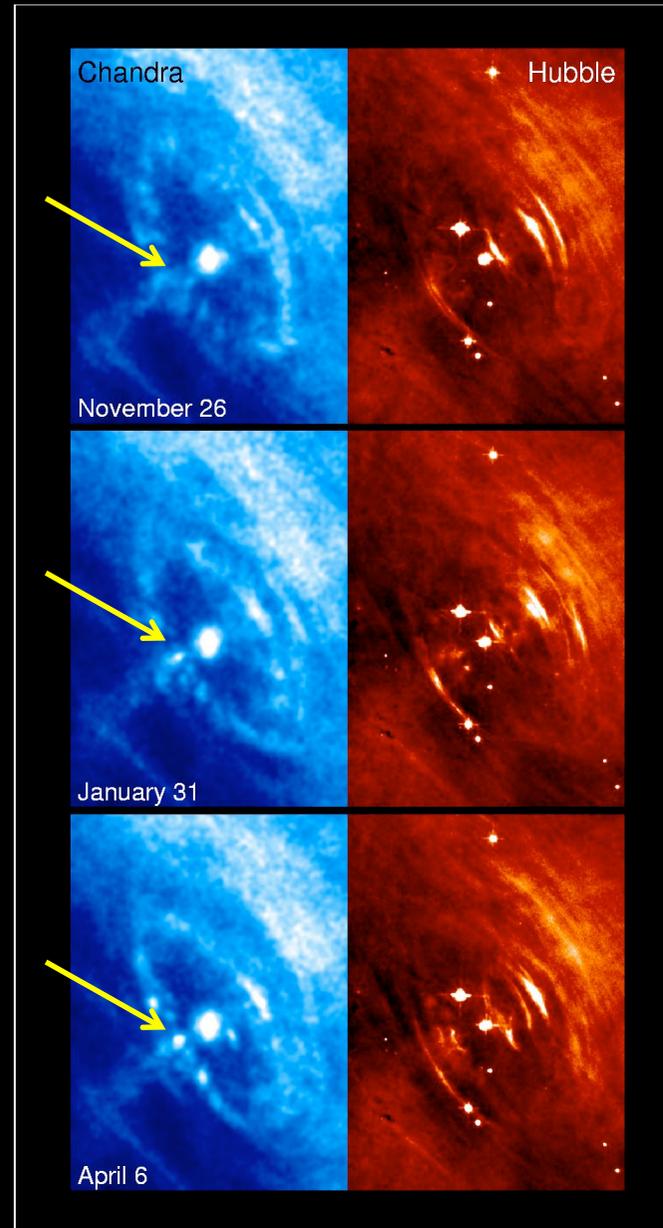
Pulsar 1913+16 découvert en 1974  
 $T = 59$  ms  
précision meilleure que horloges atomiques!



# Pulsar du Crabe

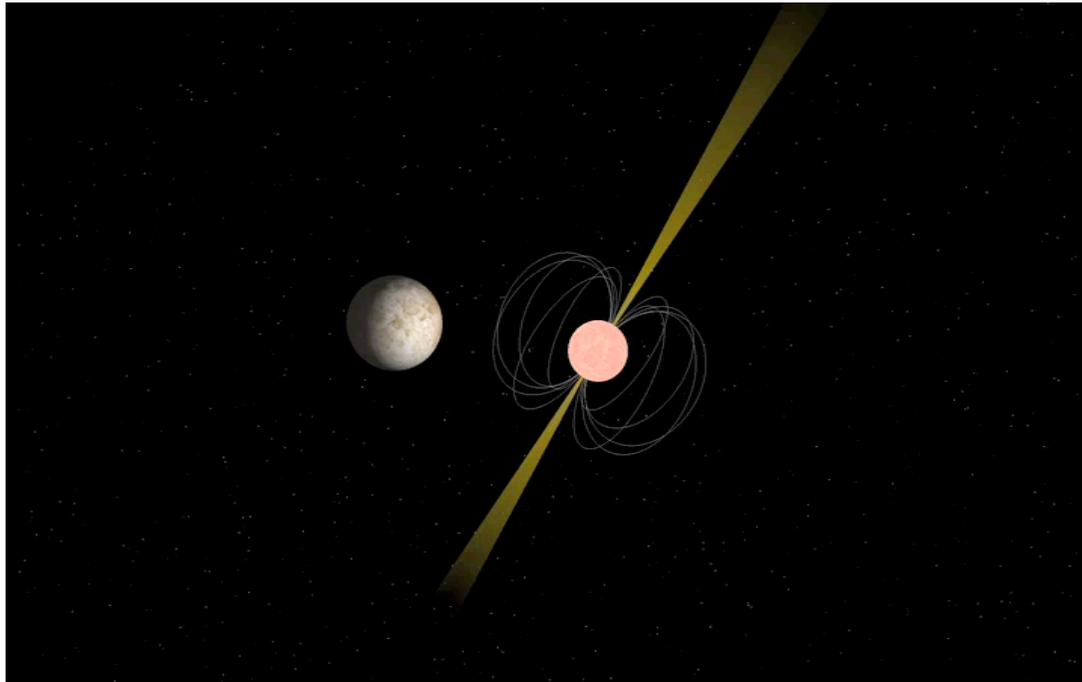


Hubble - optique (rouge)  
Chandra - rayons X (bleu)

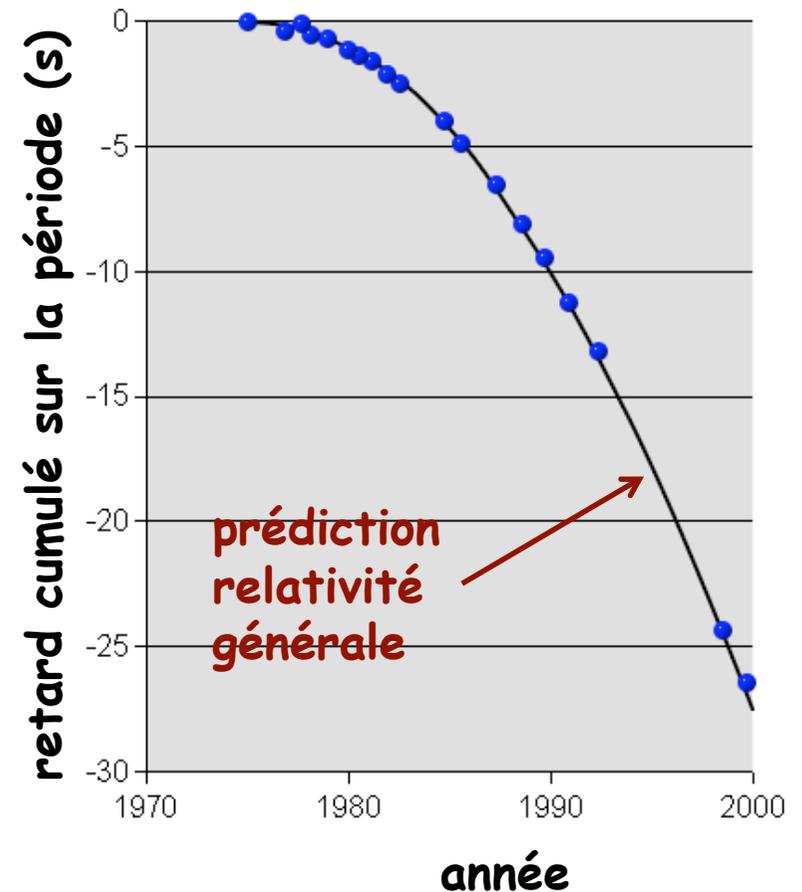


# Hulse et Taylor

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



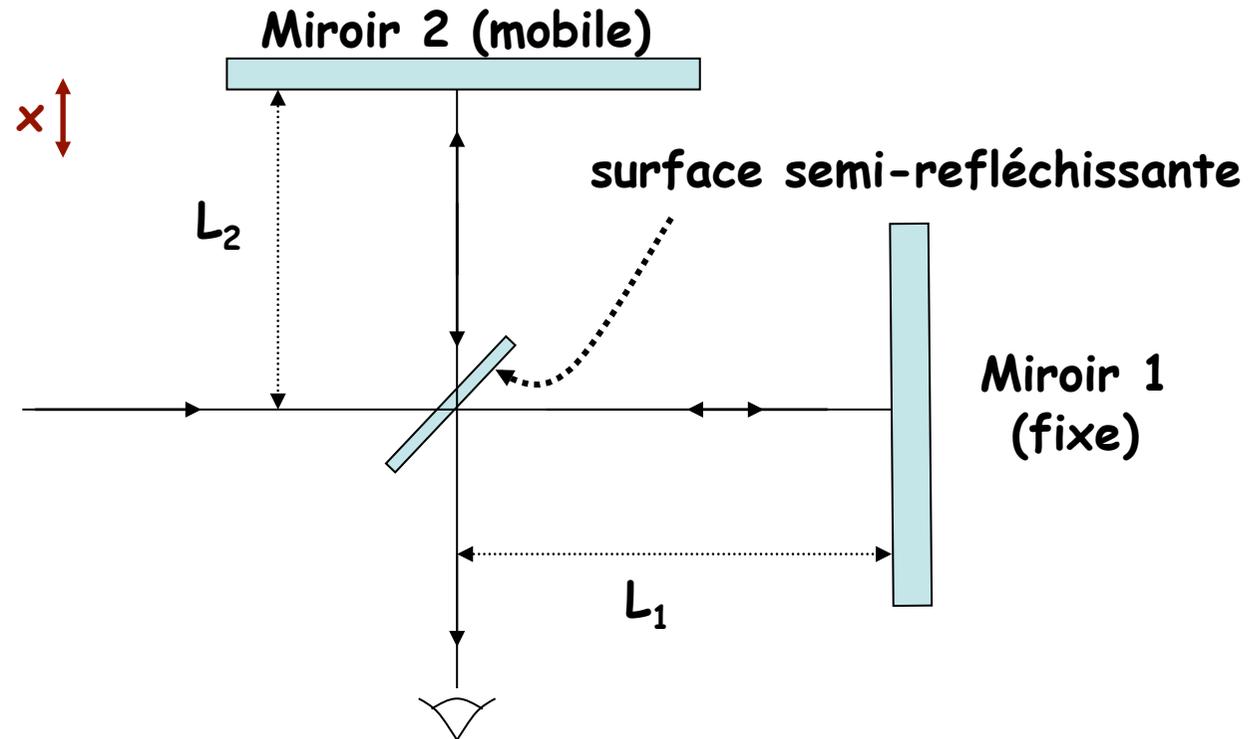
→ Prix Nobel 1993



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

# Détection des ondes gravitationnelles

Interférométrie



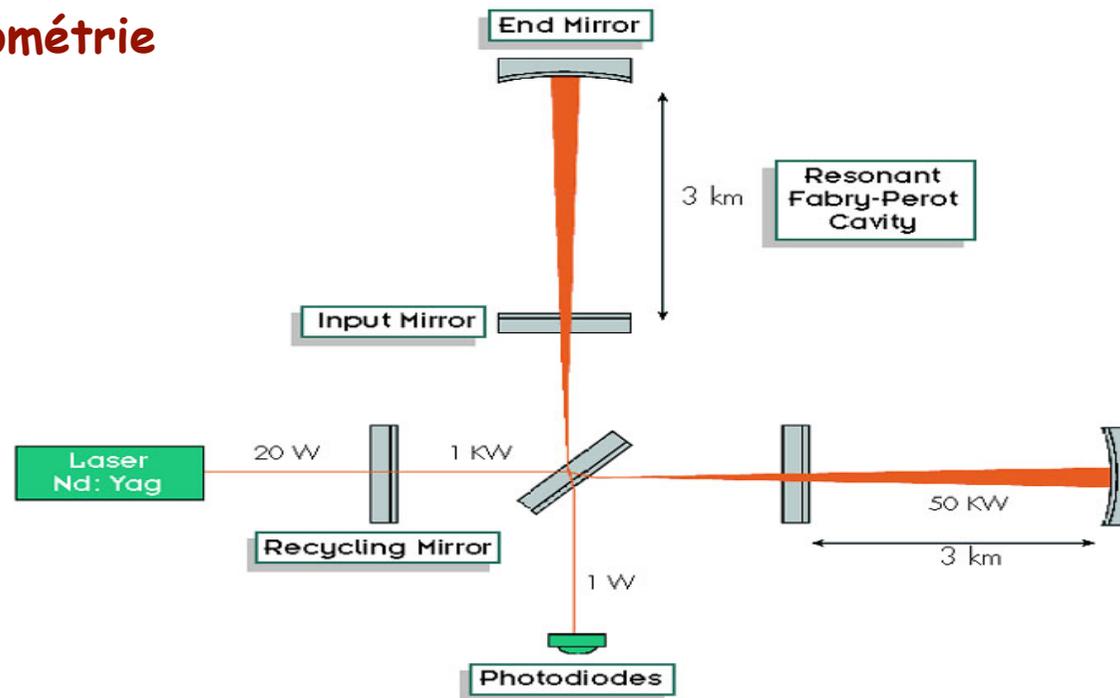
performance actuelle:  
 $\delta L \sim 10^{-15} \text{ m}$

$$x = m \lambda / 2$$

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

# Détection des ondes gravitationnelles

## Interférométrie



Miroir de recyclage:

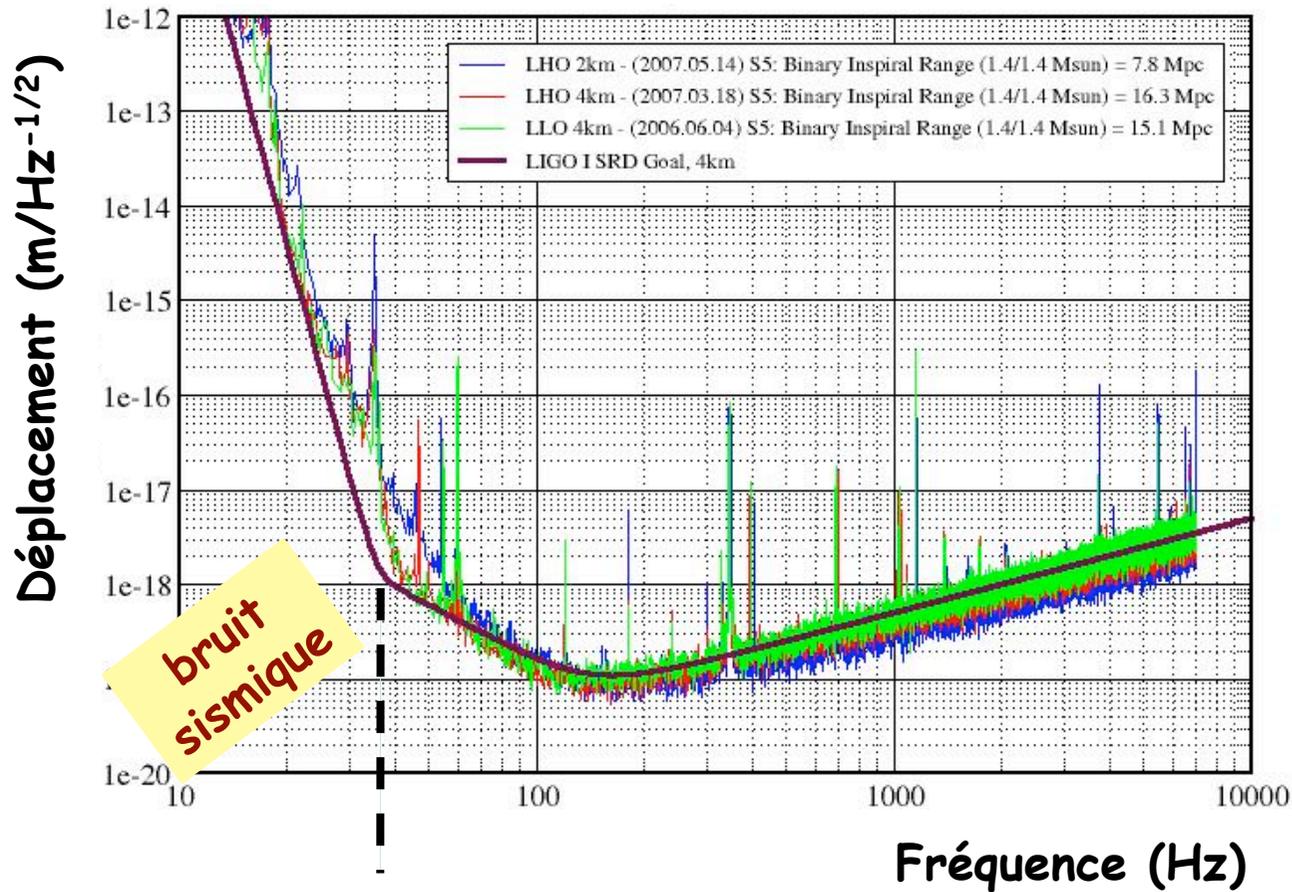
$$L = 3 \text{ km} \rightarrow L \text{ effectif} = 3000 \text{ km}$$

# 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

$\sim$  étoile à neutron ou trou noir

donc limité

- aux astres les plus compacts
- aux phénomènes peu fréquents

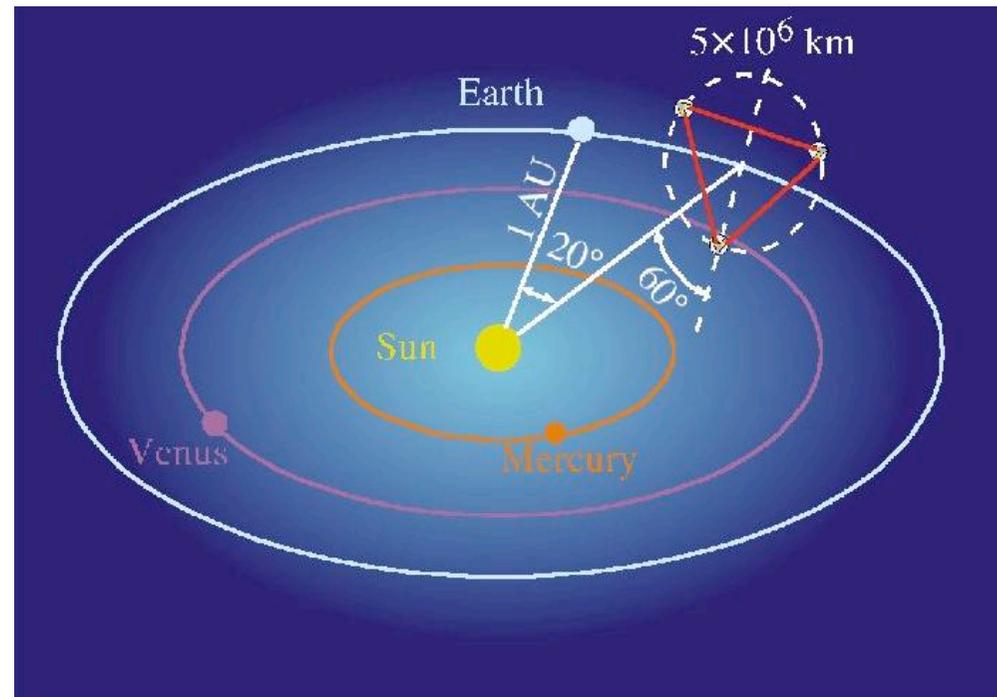
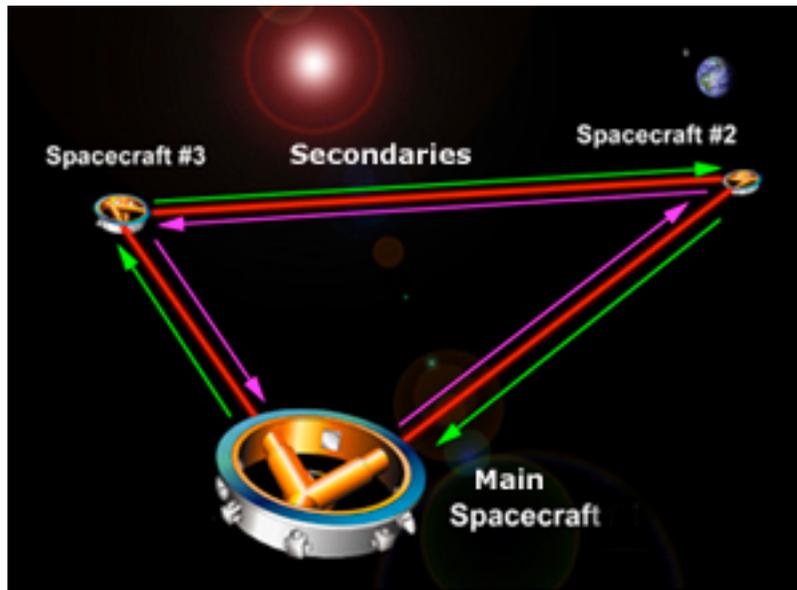
pour couvrir

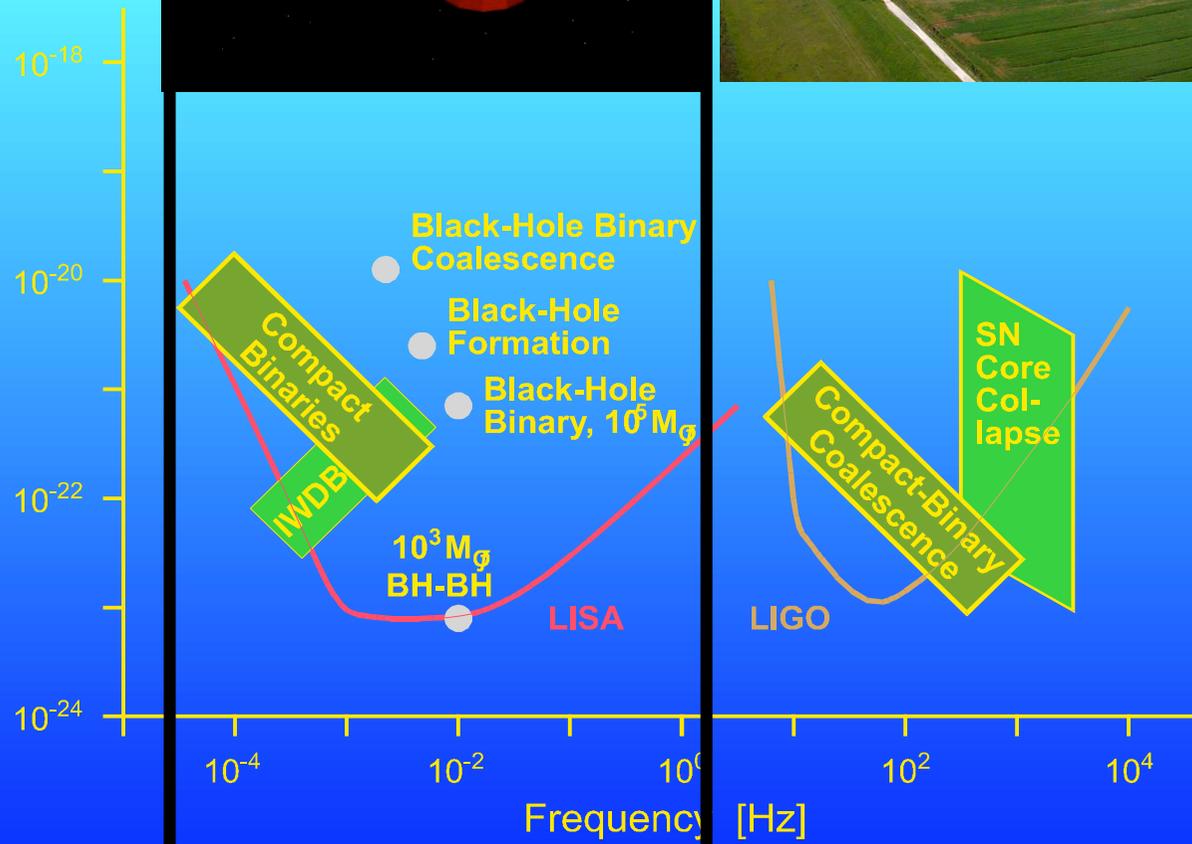
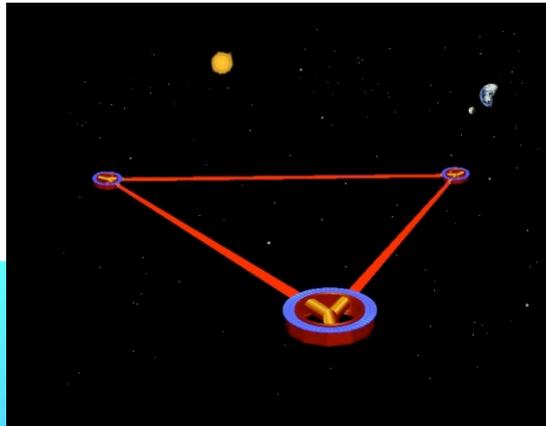
- coalescence de trous-noirs massifs ( $10^3 M_{\odot}$ )
- naines blanches

$\rightarrow$  freq. plus basse

$\rightarrow$  dans l'espace !

# LISA





# Conclusion

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

**Photons** de haute énergie: indiquent les sources des particules accélérées

**Protons**: propriétés énergétiques et info sur accélérateurs cosmiques

**Neutrinos**: processus à l'origine des émissions des AGNs, des supernovae...

**Ondes gravitationnelles**: mouvement des corps massifs