

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, red) 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 dark with vibrant highlights from the celestial objects.

Astronomie
neutrino

Astronomie neutrinos

Début XXI^e siècle:

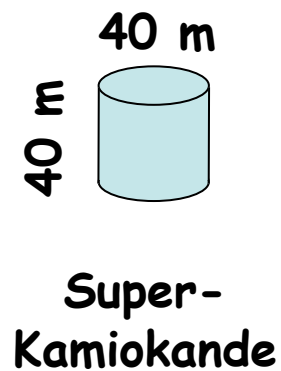
neutrinos solaires

neutrinos atmosphériques

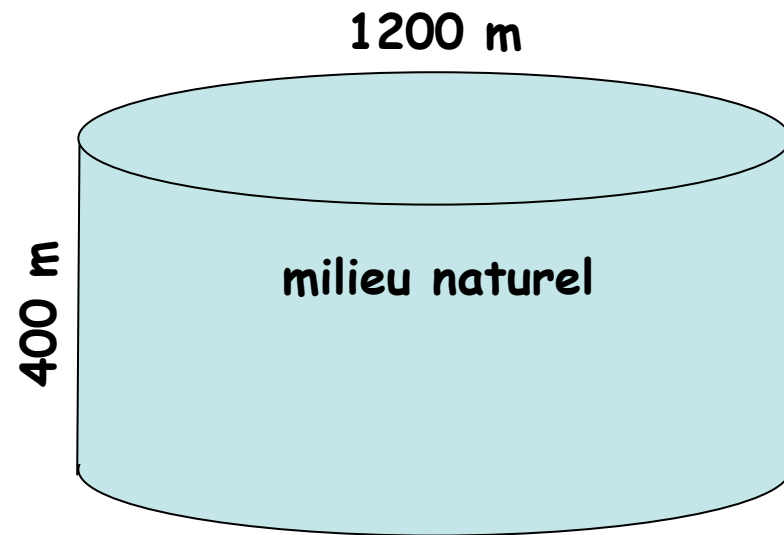
~20 neutrinos de SN1987A

Astronomie des neutrinos

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

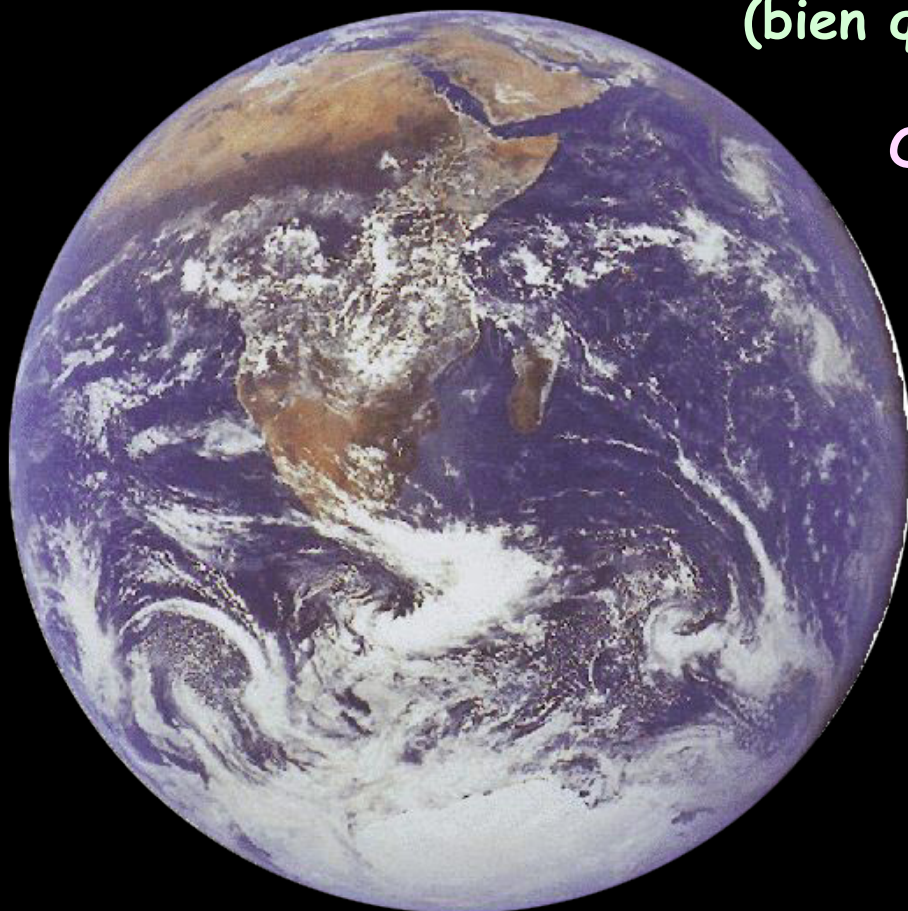


pas à l'échelle



« Telescope » à neutrinos

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

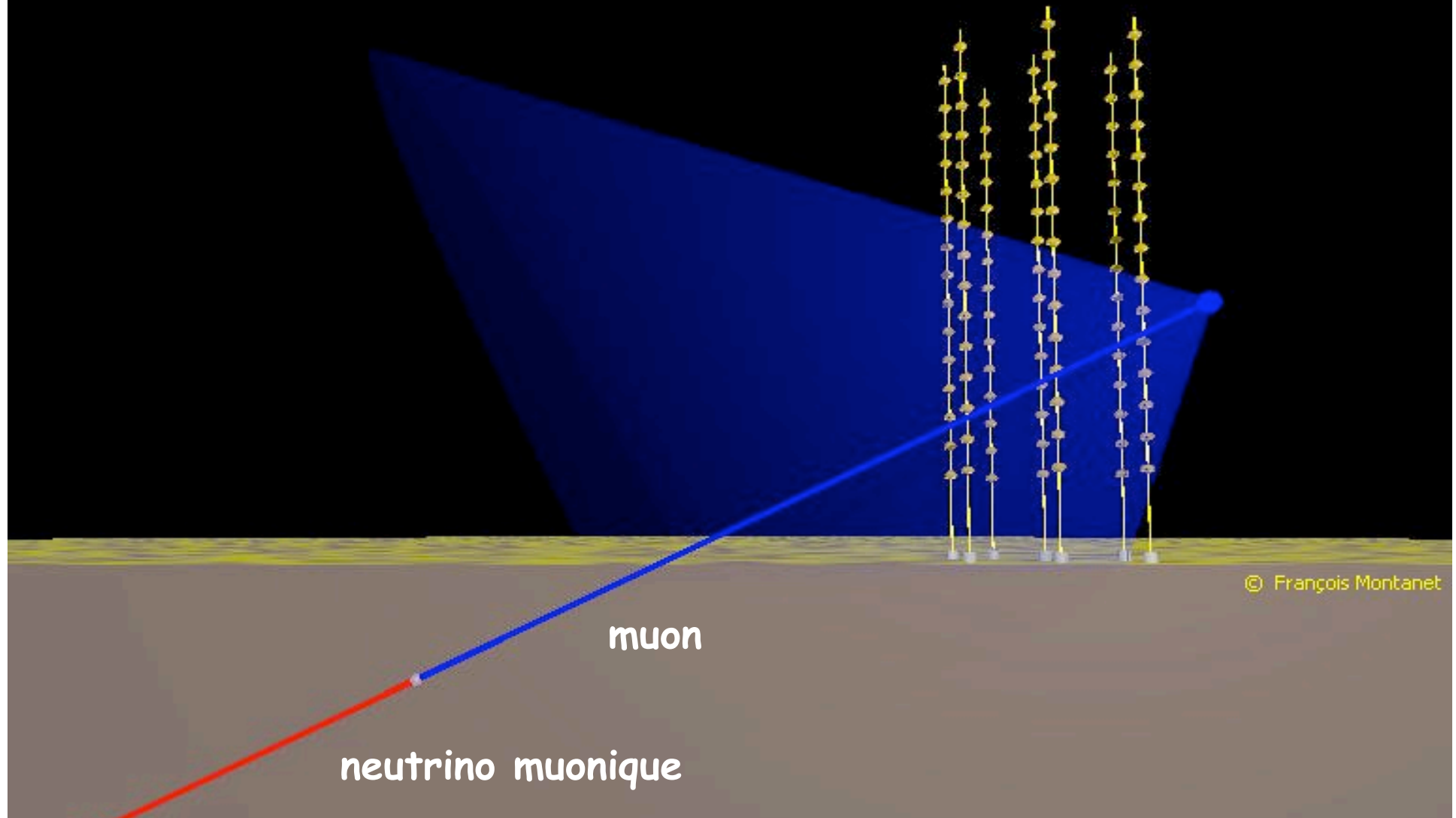


Oscillations donc ν_e , ν_μ et ν_τ
en proportion égale au niveau de
la Terre

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

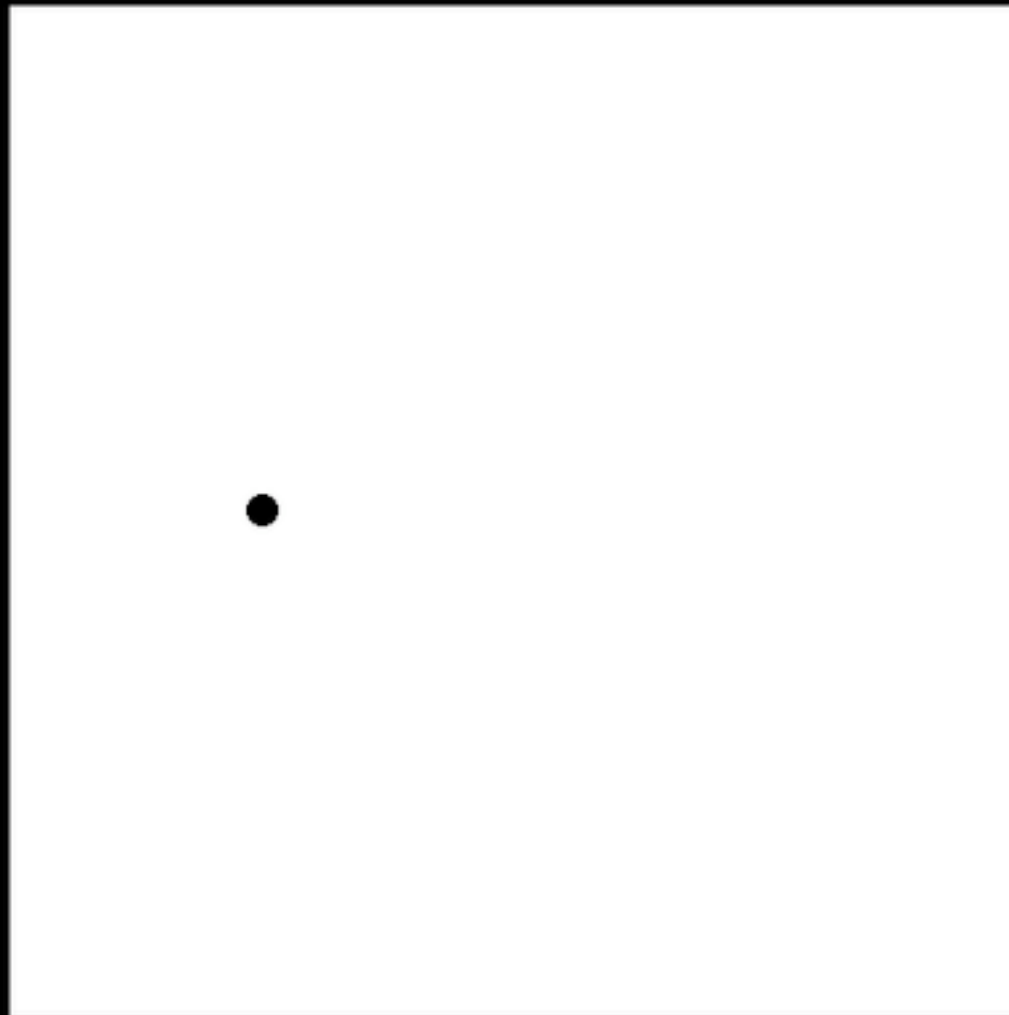
(effet
Doppler)



Effet Cerenkov

progression
rapide

(onde de
choc)

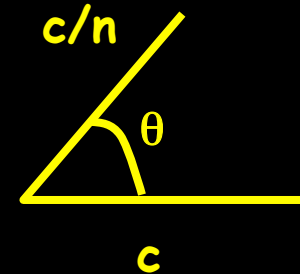


v lumière = c/n

v particule $\sim c$

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

$\theta = 1^\circ$ air
 42° eau



Effet Cerenkov

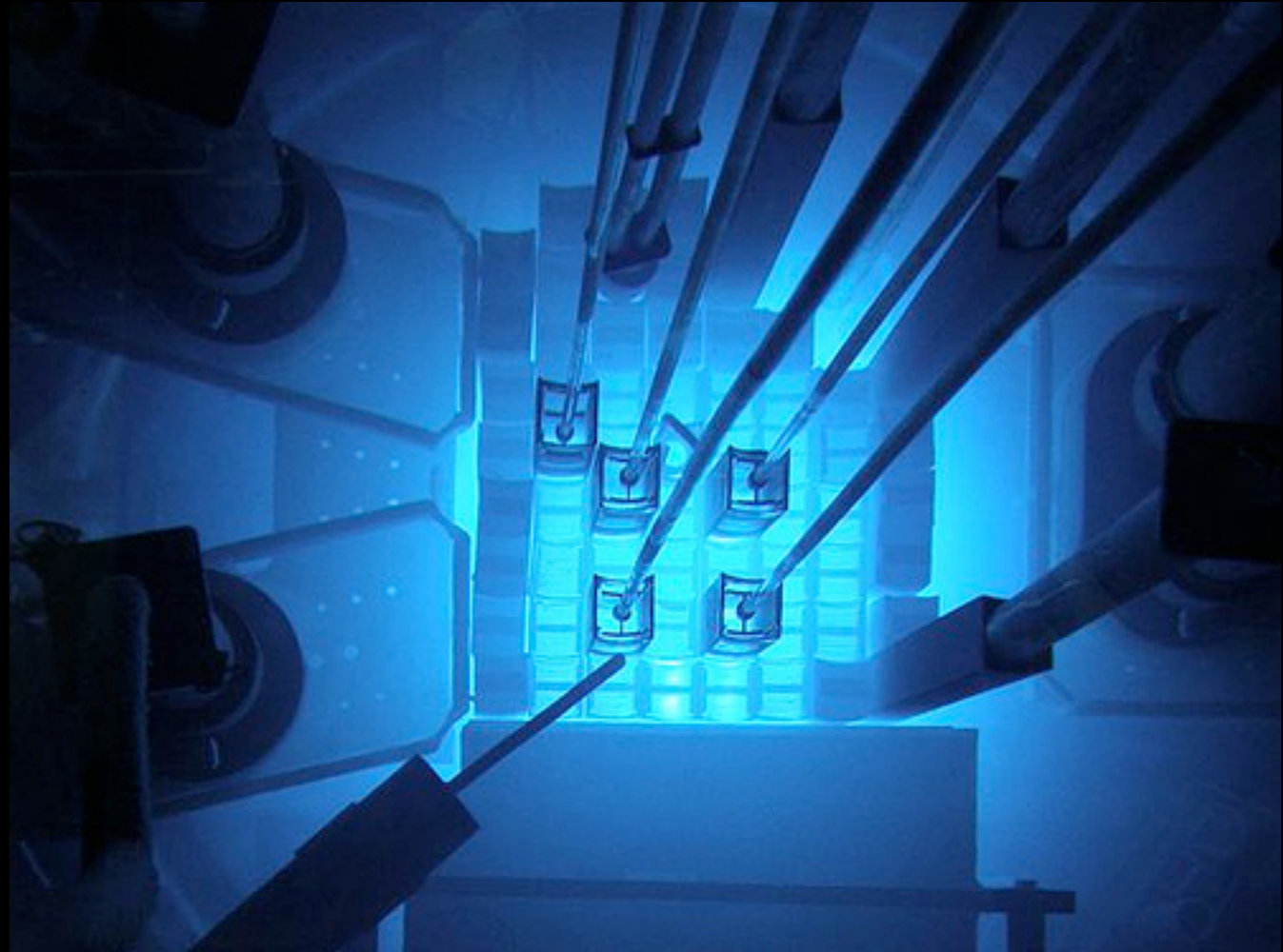
analogie sonore

Mur du son
Bang supersonique

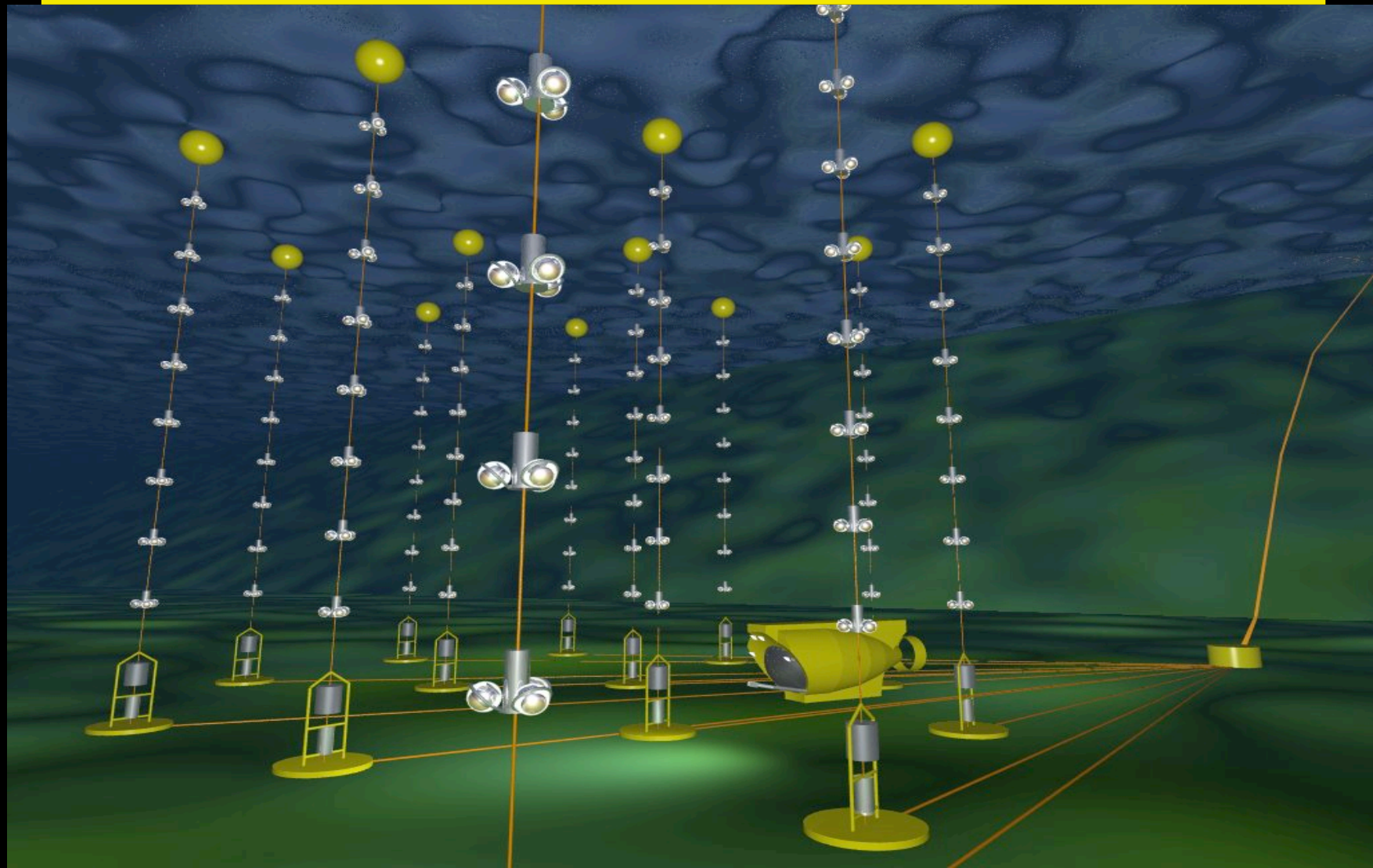


Effet Cerenkov

Lumière bleue

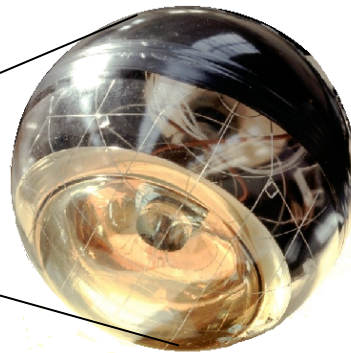
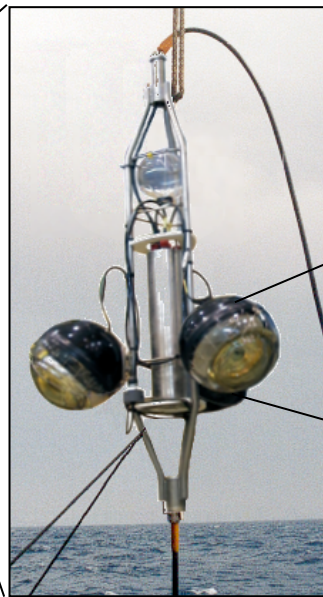
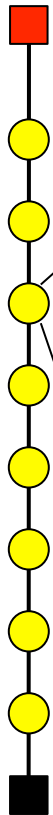


« Télescope » à neutrinos



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)

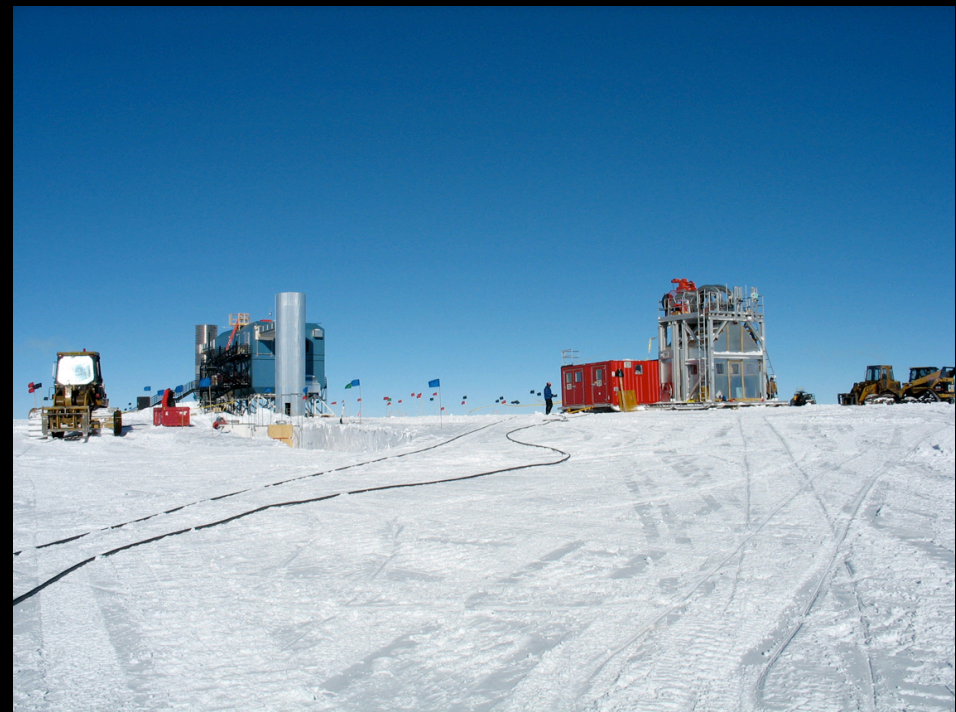


« Téléscopes » à neutrinos



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

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

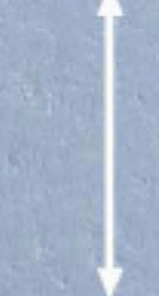


New South Pole Station

First IceCube string

IceCube Laboratory

1400m



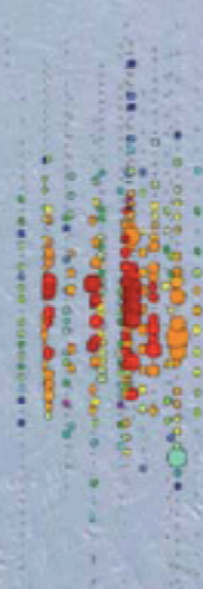
2400m



1500 m

AMANDA

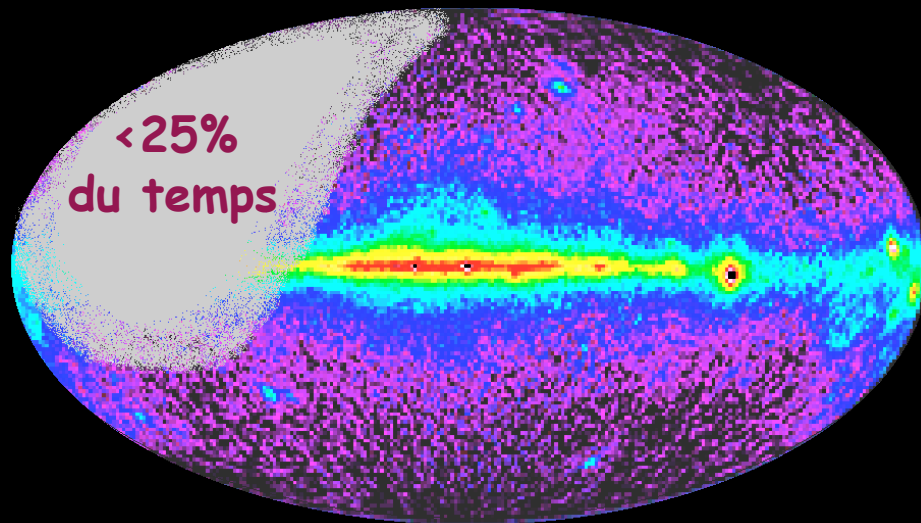
2000 m
[not to scale]



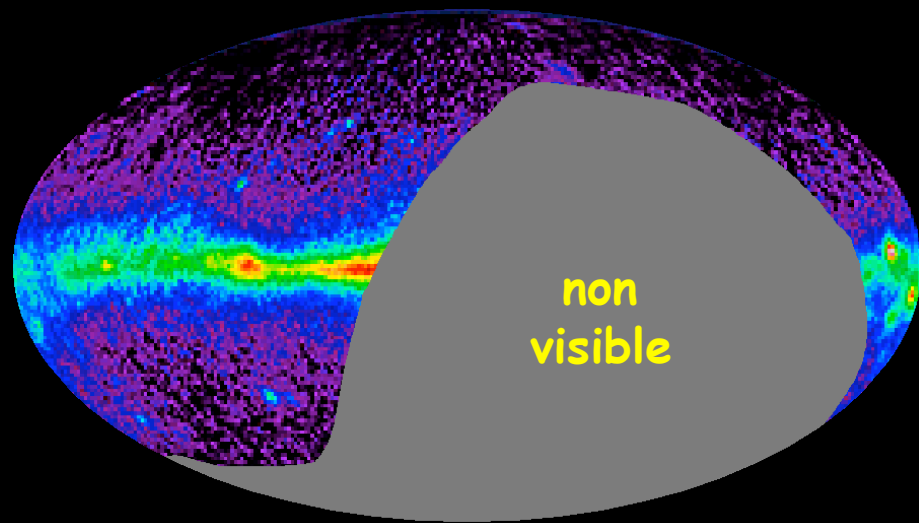


« Téléscopes » à neutrinos

Antares
(43° North)

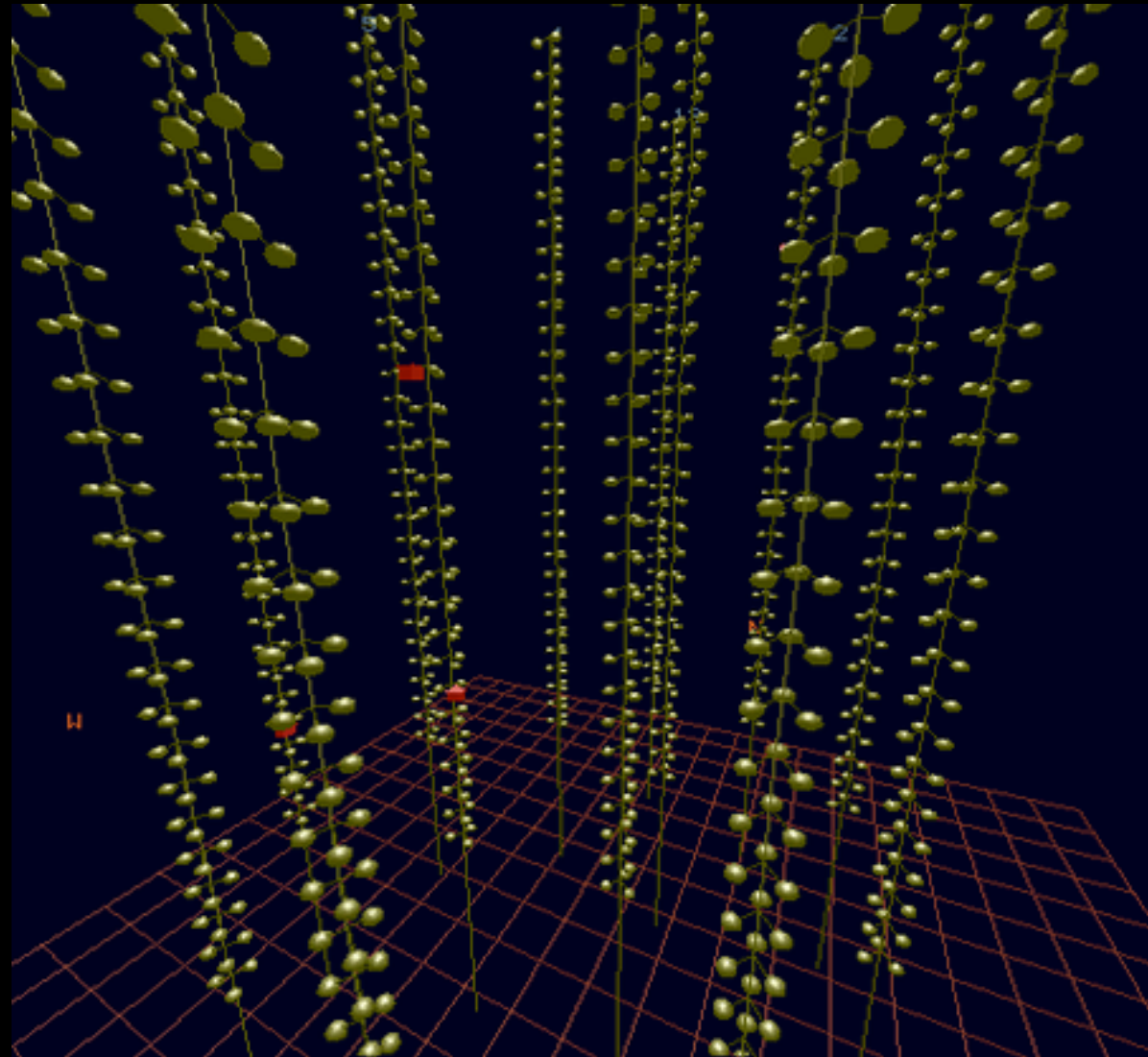


Ice Cube
(pôle Sud)



Intercalibration possible sur 0.6π steradians

« Téléscopes » à neutrinos



« Téléscopes » à neutrinos

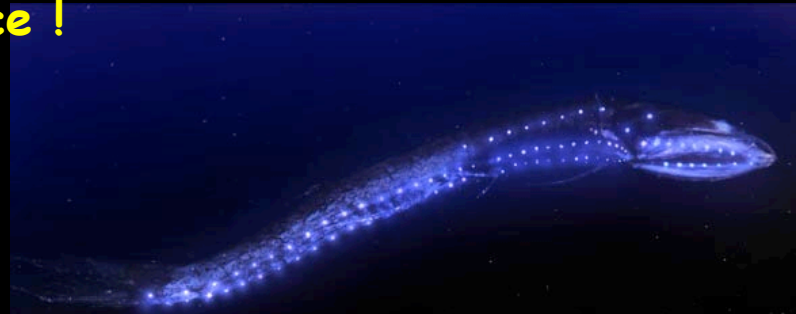
Scintillement du télescope :

radioactivité naturelle



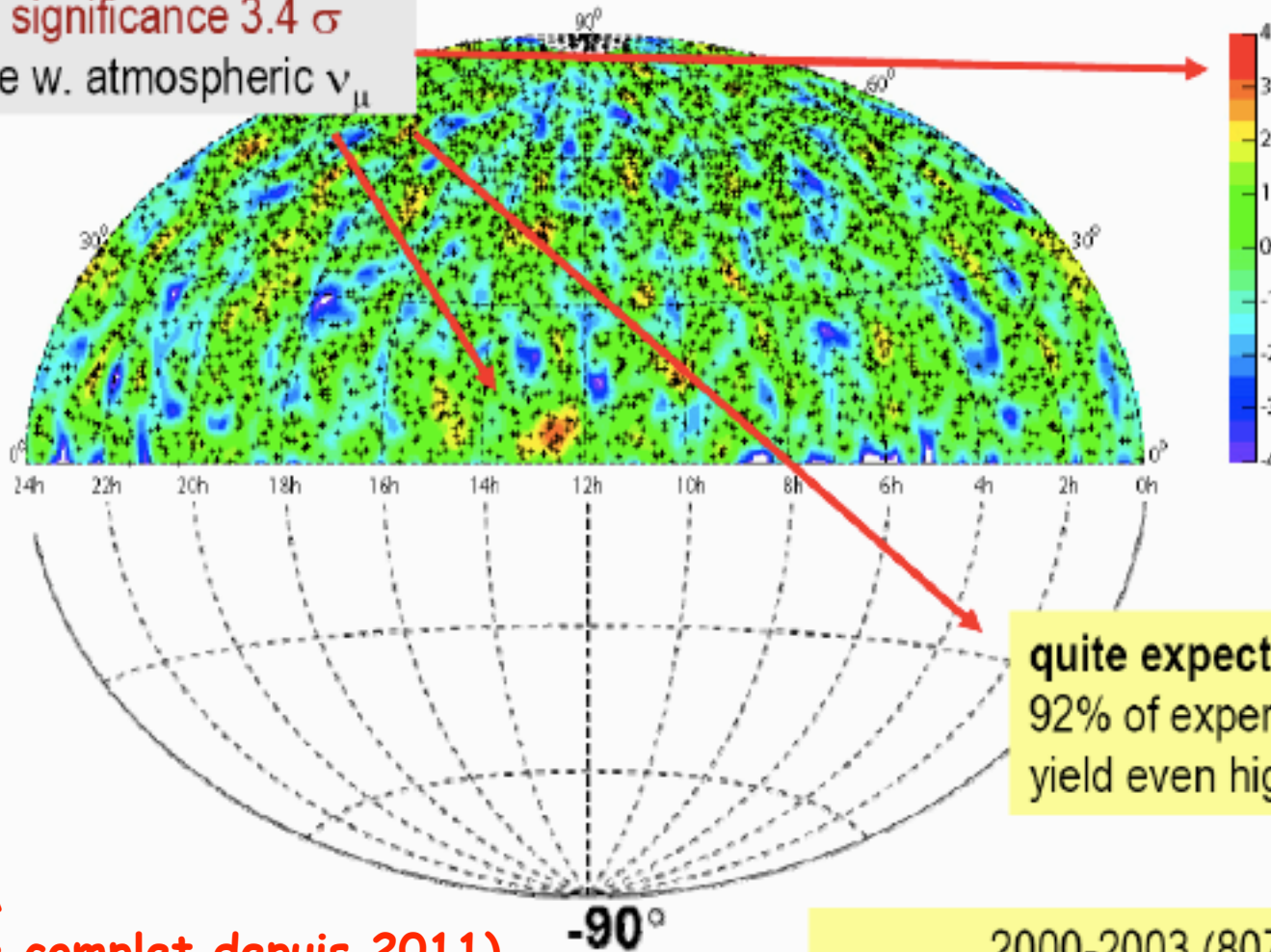
© DeepSeaPhotography.Com

bioluminescence !



© DeepSeaPhotography.Com

Maximum significance 3.4σ
compatible w. atmospheric ν_{μ}



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

AMANDA
(Ice cube complet depuis 2011)

2000-2003 (807 days)
3329 μ from northern hemisphere
3438 μ expected from atmospheric ν_{μ}

Astro ν (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 field with several bright, multi-pointed stars scattered throughout. The overall scene is rich in detail and color, typical of astronomical observations.

Sources cosmiques haute énergie

Trous noirs

Approche en mécanique classique du trou noir

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

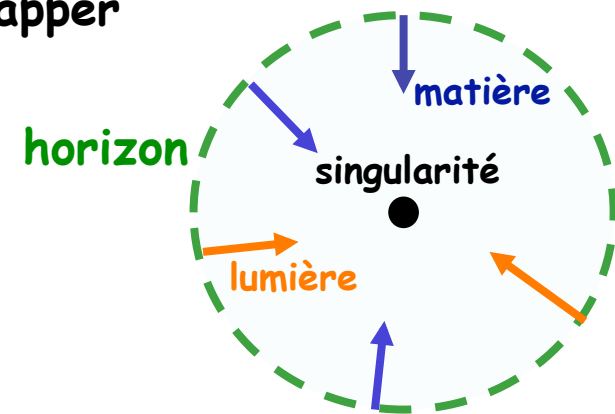
$$E_T = E_G + K < 0$$

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

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

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

rayon de Schwarzschild R_S

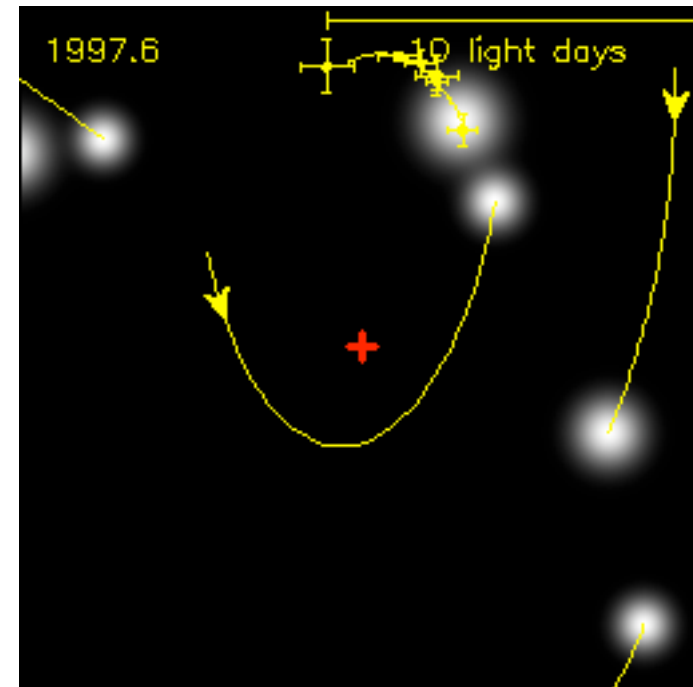
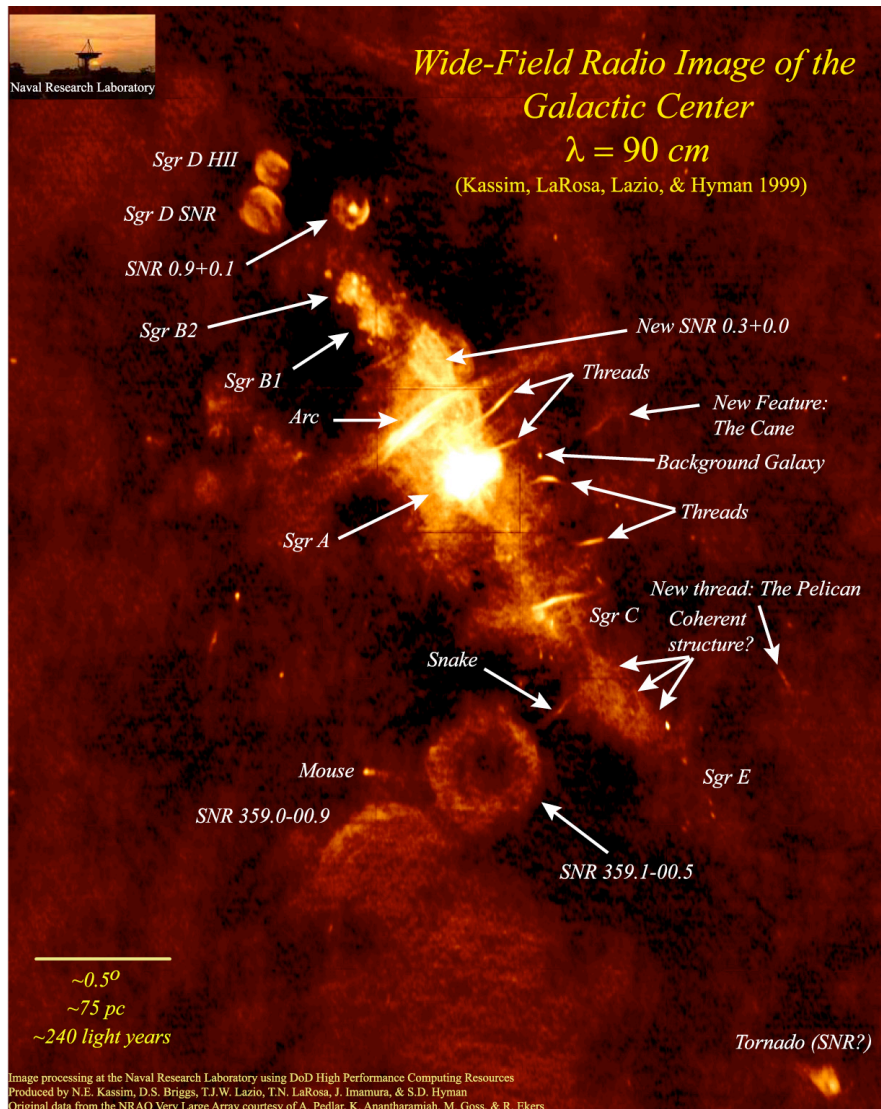


$R_S = 3$ km pour le Soleil

$R < R_S$: 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



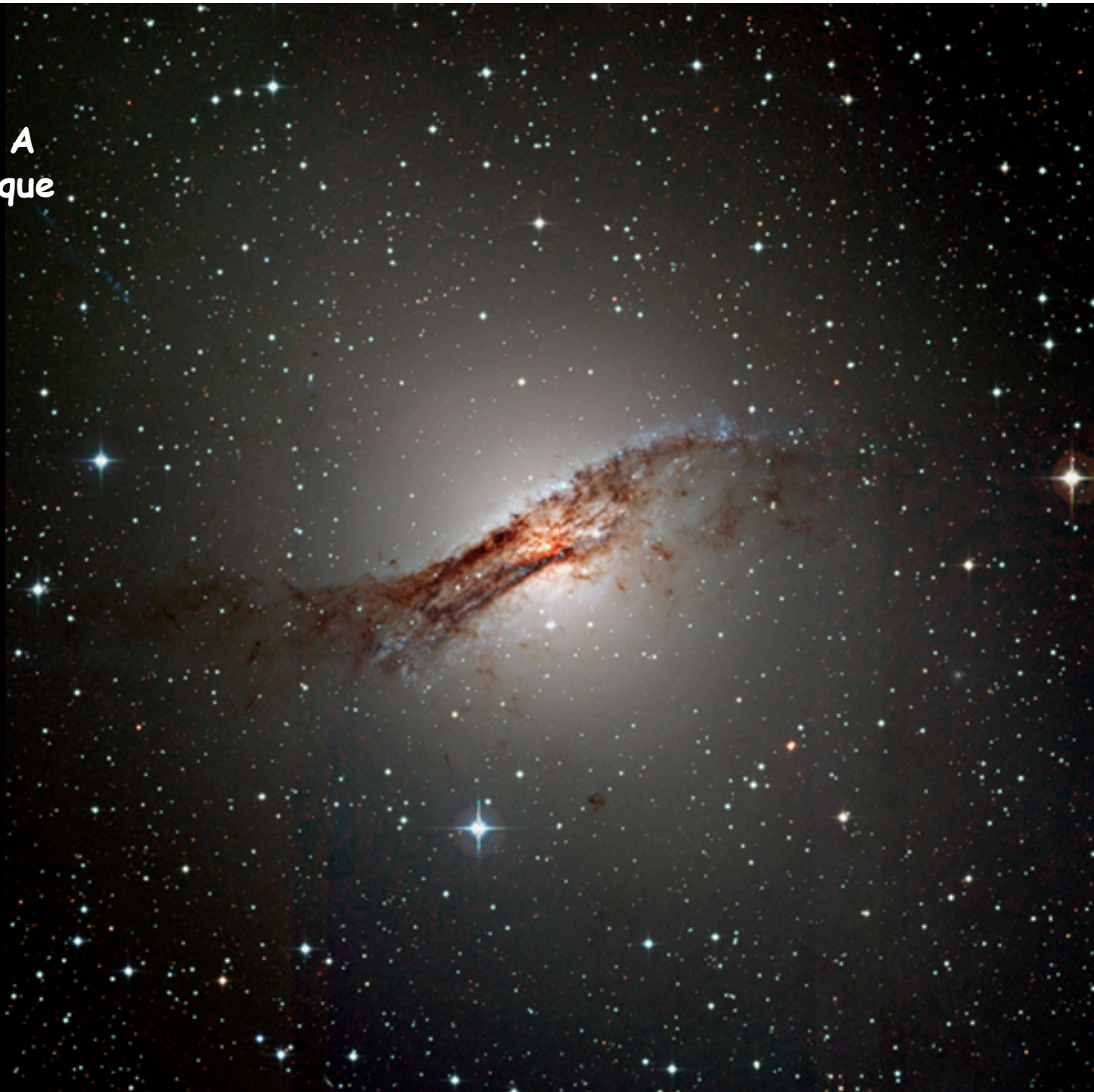
HST • WFPC2

Trous noirs

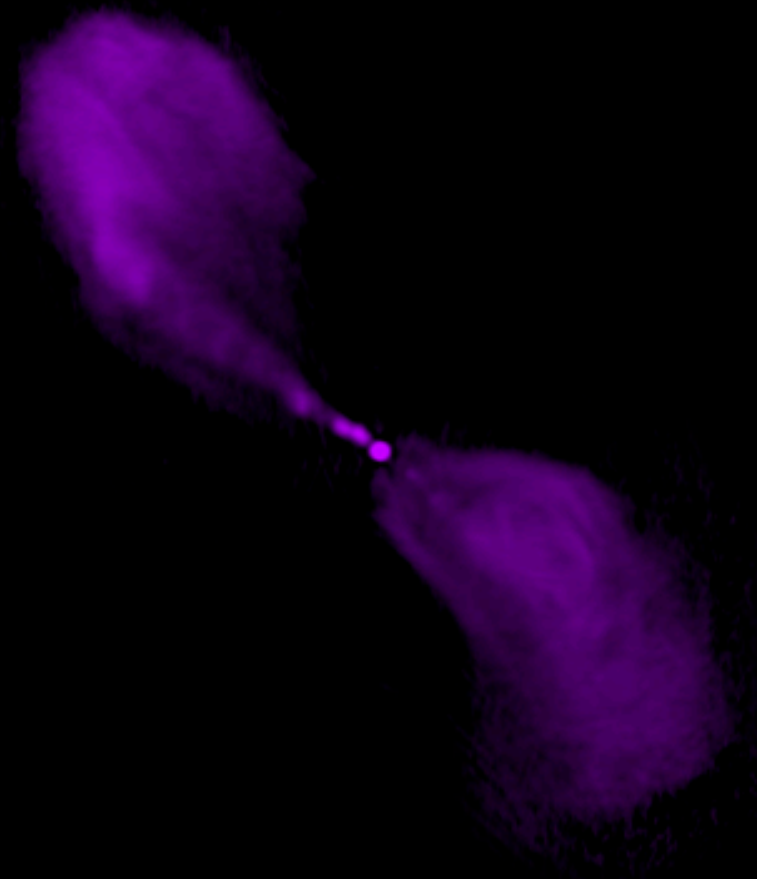


M87 :
des jets de matière

Cen A
optique



Cen A
radio



Cen A
rayons X

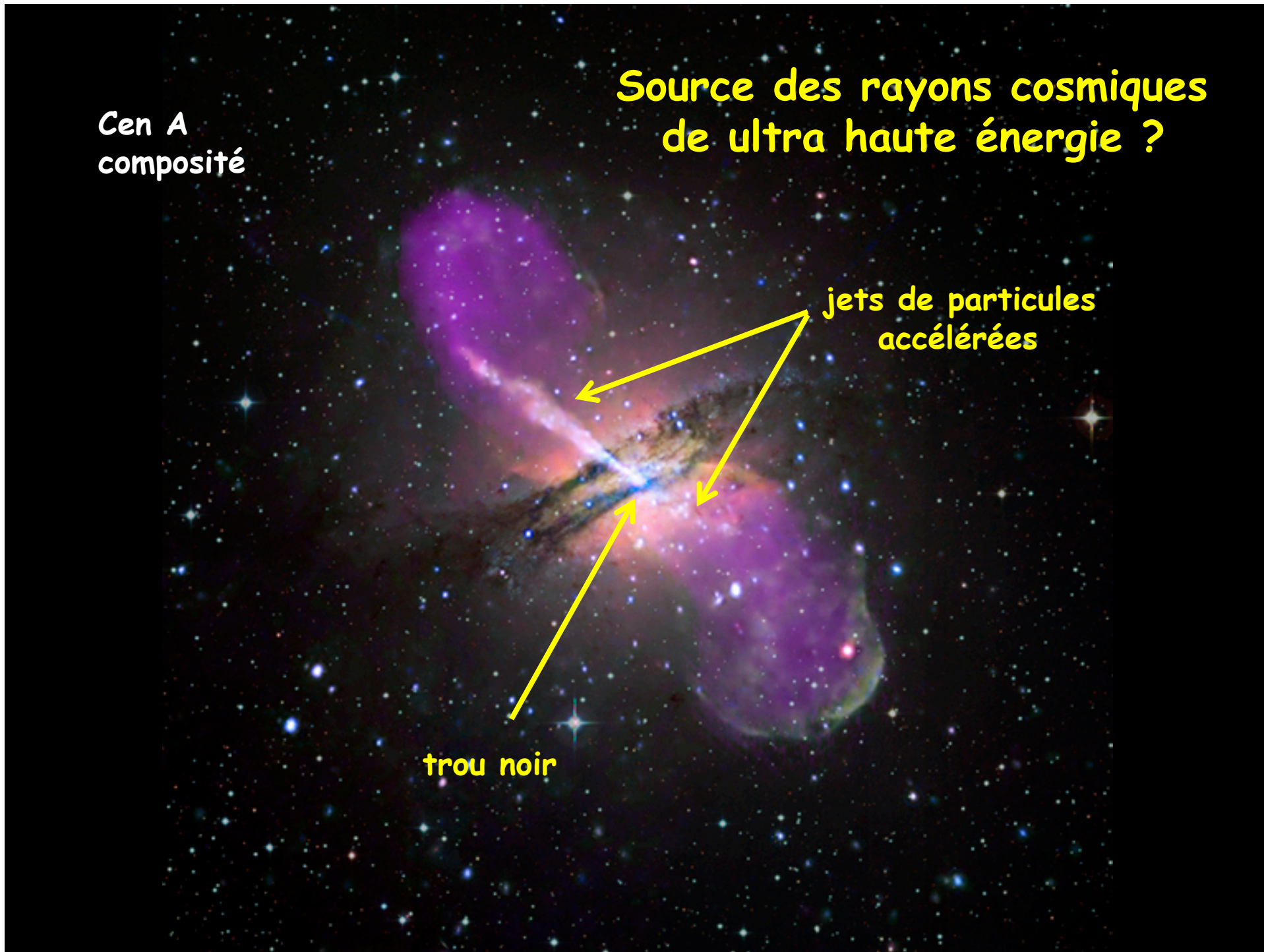


Cen A
composité

Source des rayons cosmiques
de ultra haute énergie ?

jets de particules
accélérées

trou noir



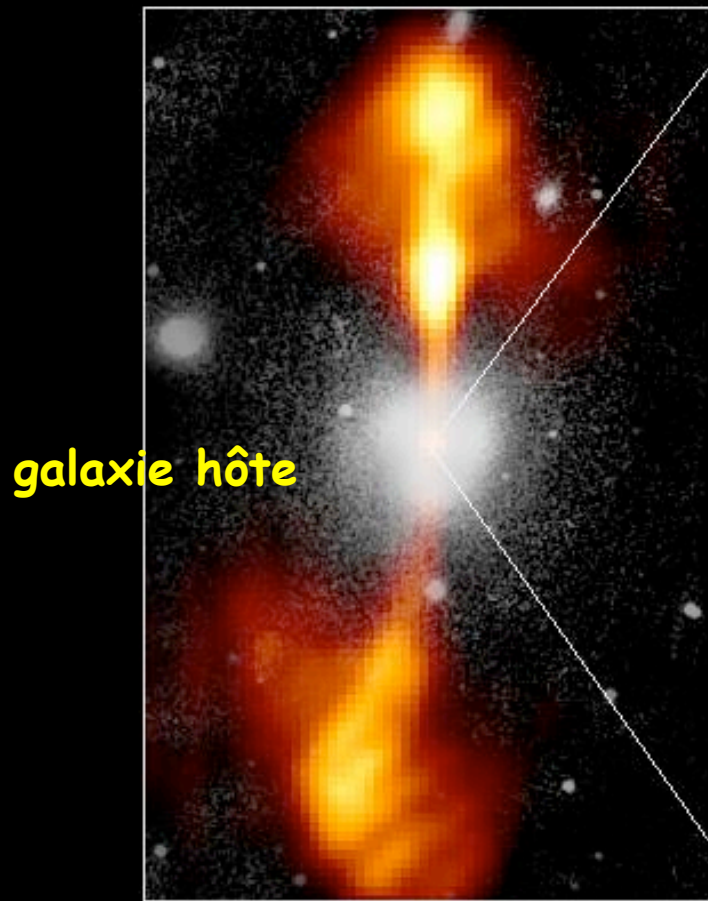
Core of Galaxy NGC 4261

Hubble Space Telescope

Wide Field / Planetary Camera

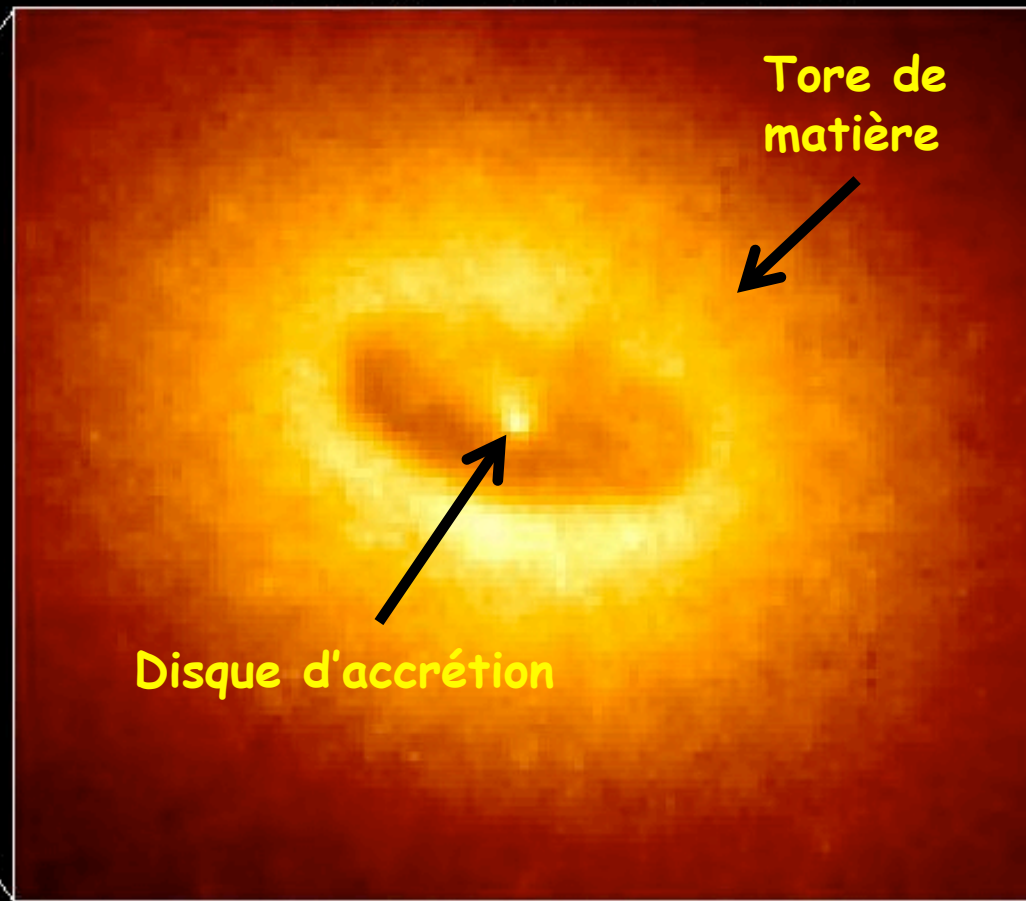
Ground-Based Optical/Radio Image

HST Image of a Gas and Dust Disk



galaxie hôte

380 Arc Seconds
88,000 LIGHTYEARS

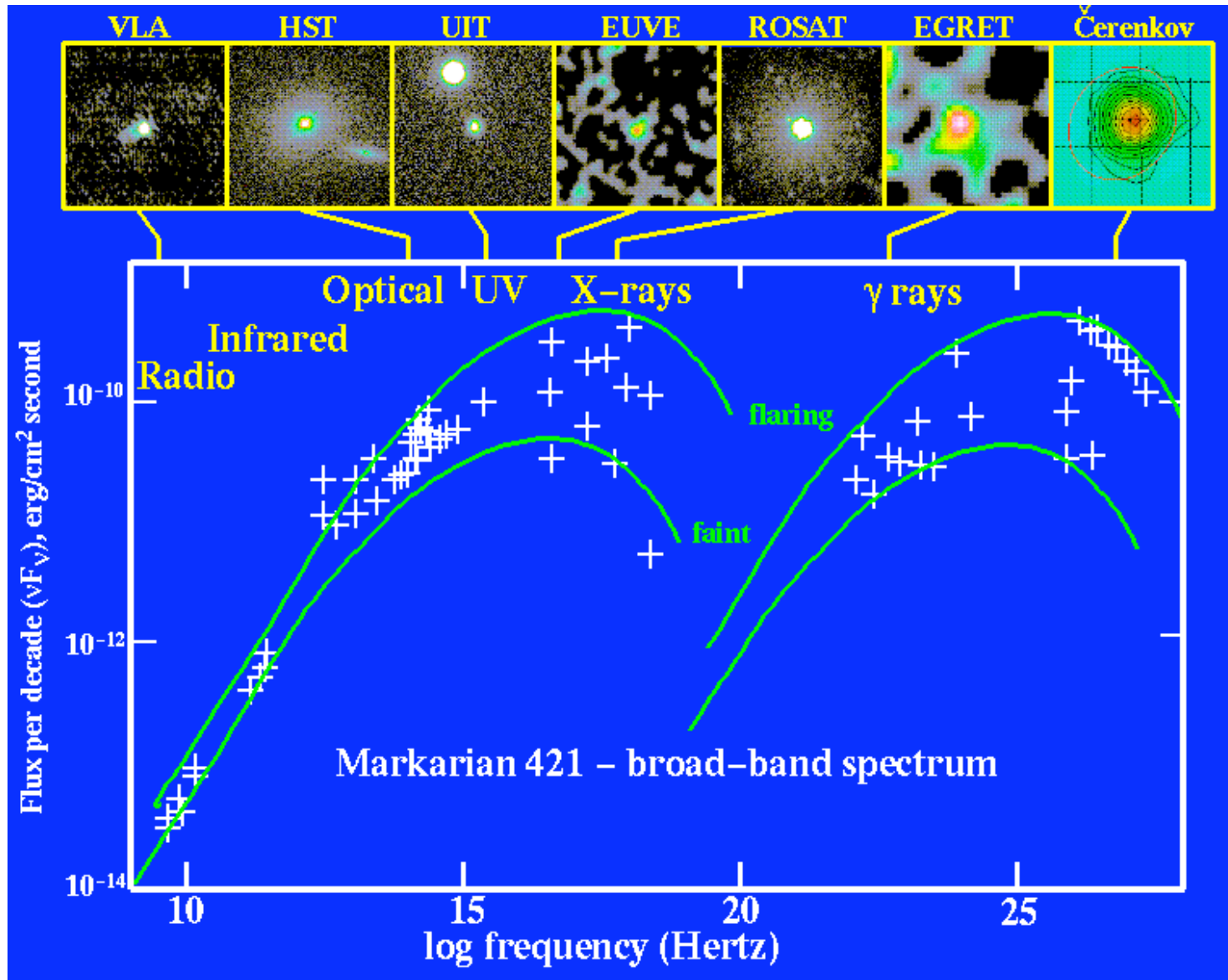


Tore de
matière

Disque d'accrétion

17 Arc Seconds
400 LIGHTYEARS

Markarian 421 : blazar « voisin »



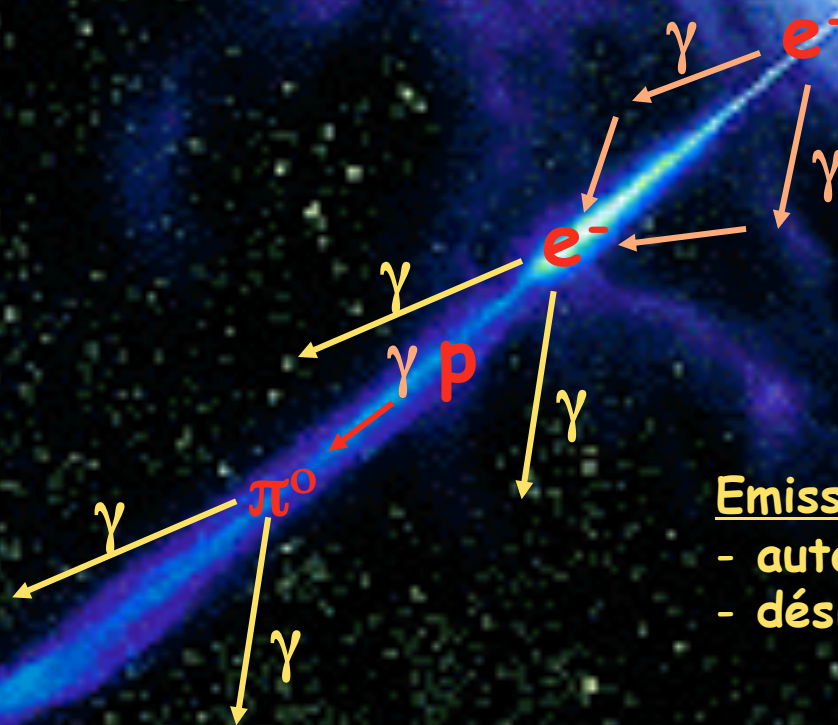
Blazars

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

VARIABILITÉ !



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

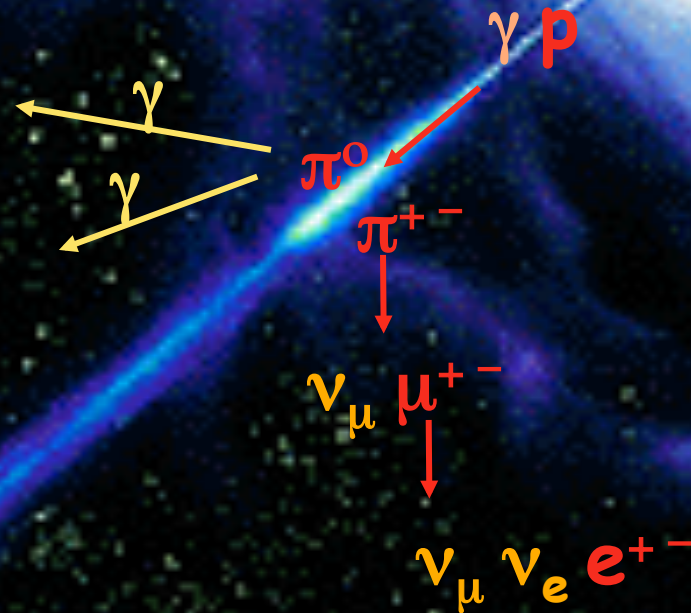


Emission haute énergie (rayons γ):
- auto-compton (electromagnétique) ?
- désintégration π^0 (hadronique) ?

Blazars

Emission haute énergie (rayons γ):

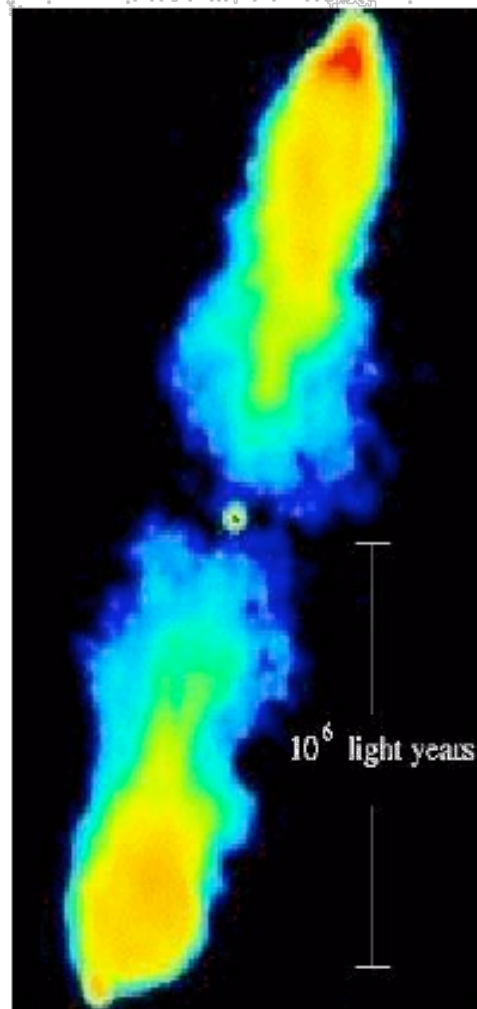
- ~~auto-compton (electromagnétique) ?~~
- désintégration π^0 (hadronique) ?



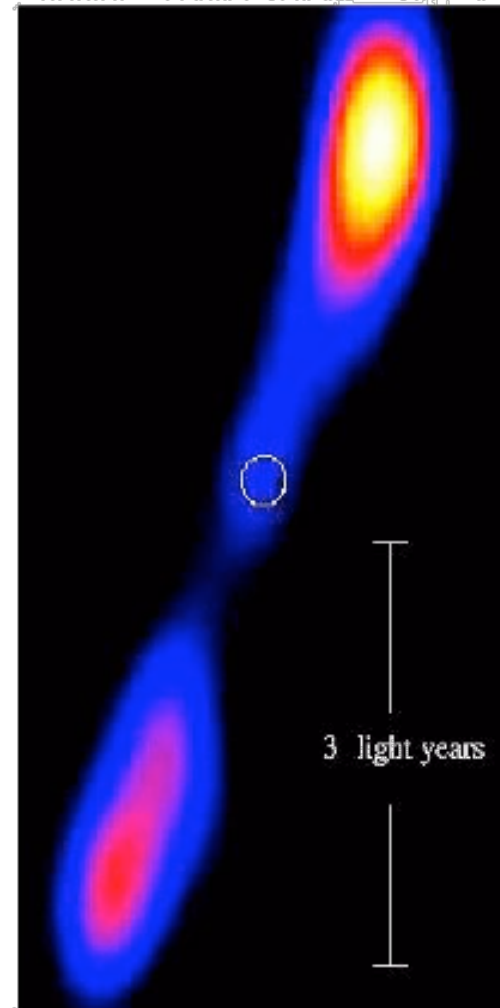
Sources de ν
de haute énergie !

Quasars et Microquasars

QUASAR 3C 223

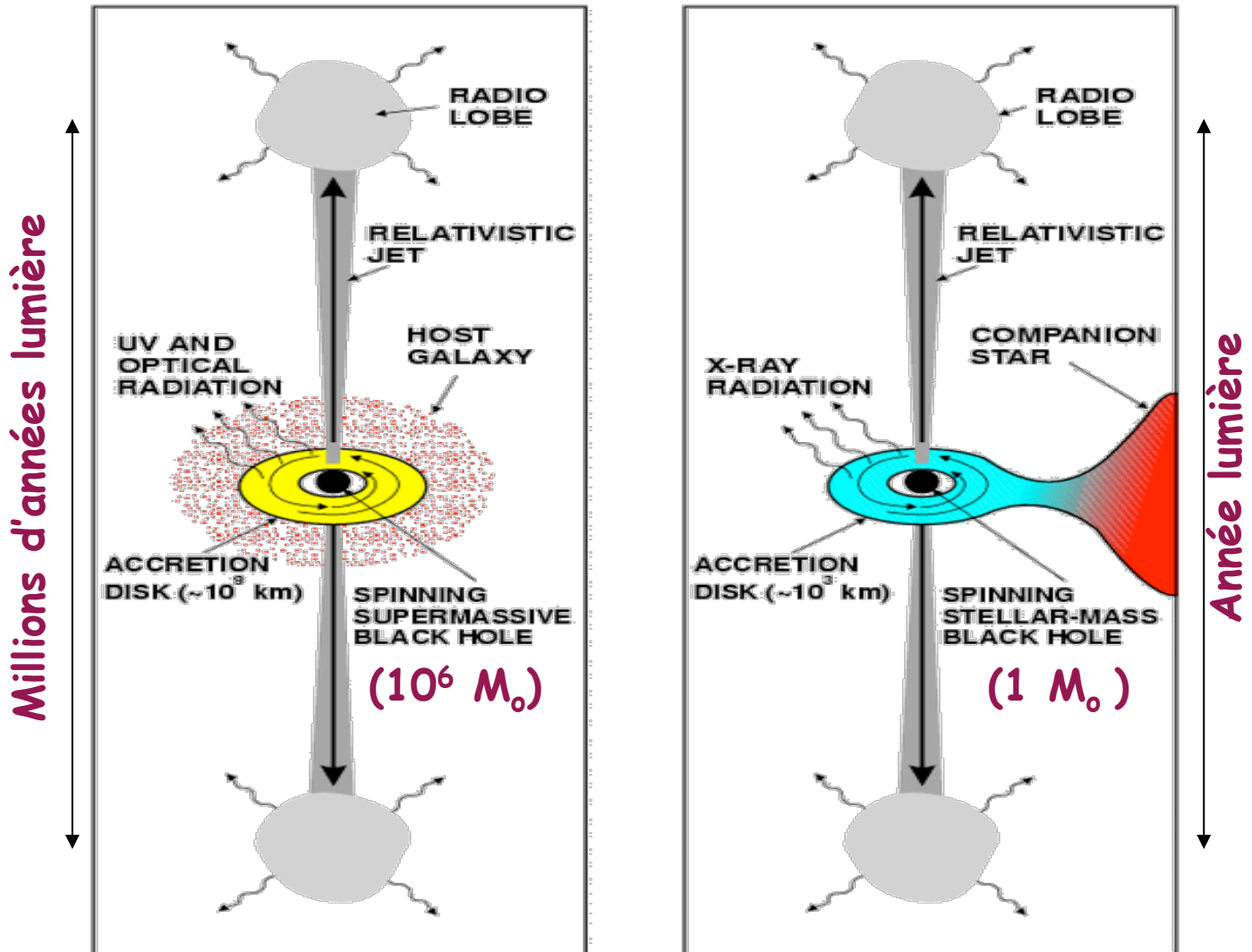


MICROQUASAR 1E1740.7-2942



QUASAR

MICROQUASAR

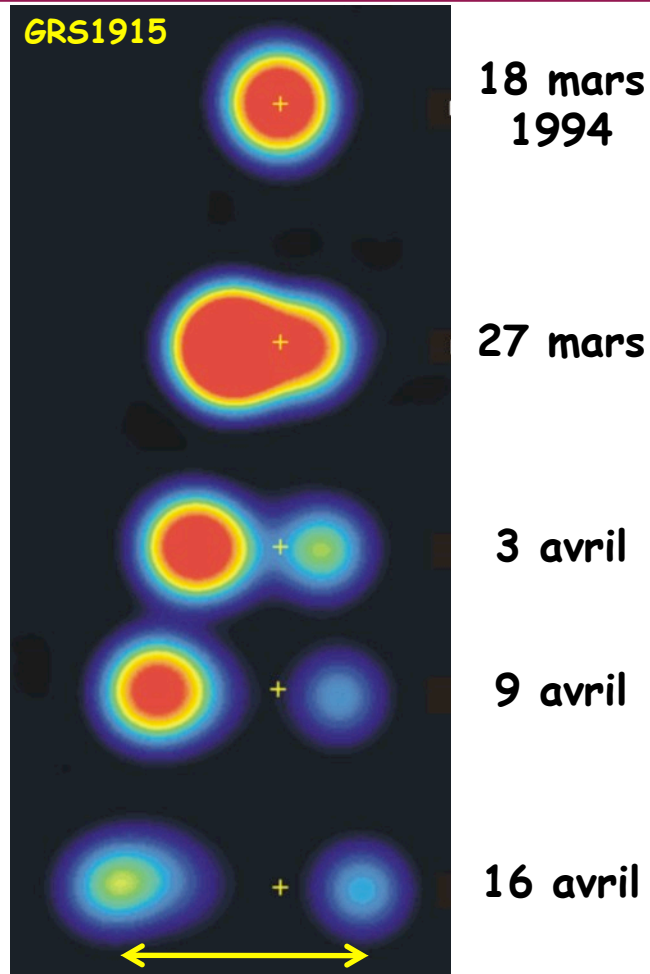


$$R \propto M_{BH}$$

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

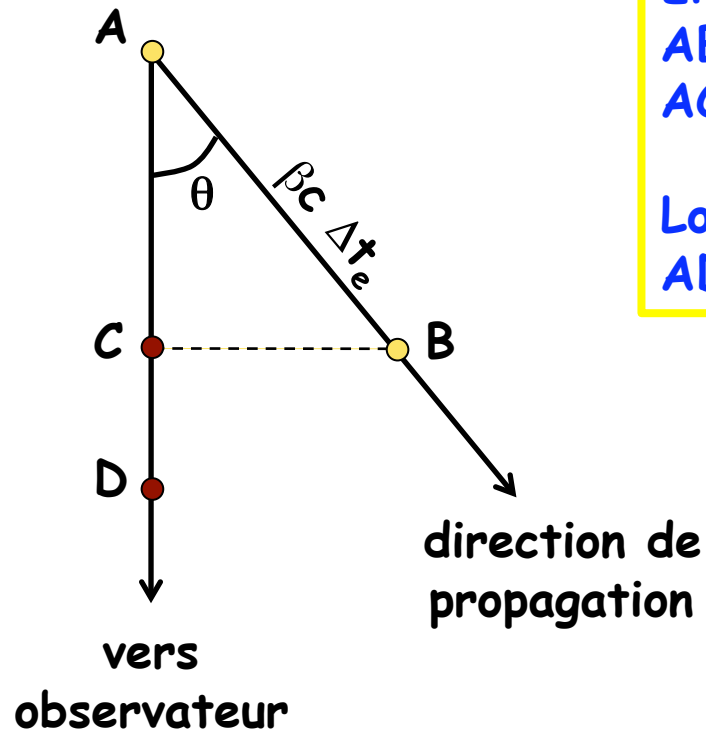
Mirabel & Rodriguez

Déplacements supraluminiques !?



10^4 u.a. = 2 mois lumière

Déplacements supraluminiques !?



Emission du 1^{er} photon en A, puis du 2nd en B

$$AB = \beta c \Delta t_e$$

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

Lors de émission du 2nd photon, le 1^{er} est en D

$$AD = c \Delta t_e$$

Différence entre les temps d'arrivée:

$$t_2 - t_1 = DC / c = \Delta t_e (1 - \beta \cos \theta)$$

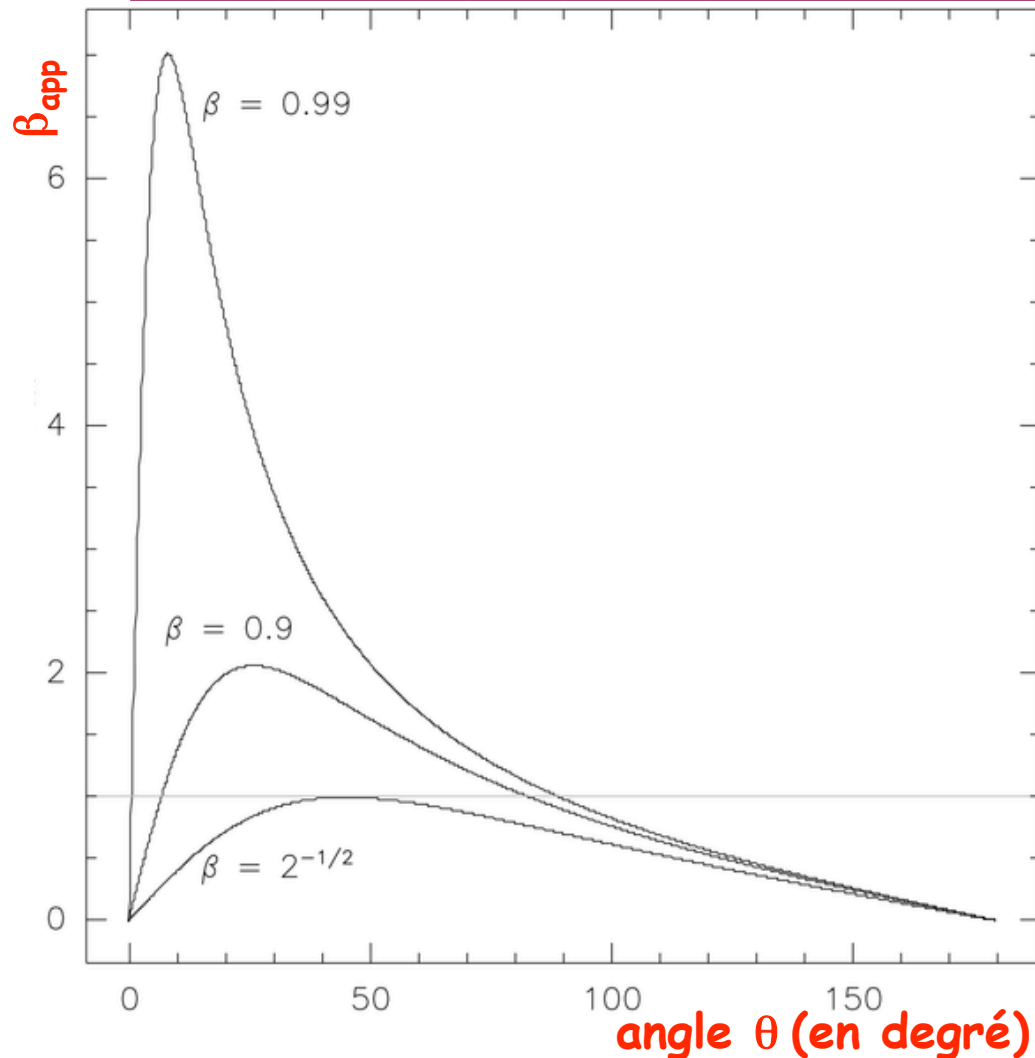
Séparation en projection sur le ciel:

$$CB = \beta c \Delta t_e \sin \theta$$

Vitesse apparente

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

Déplacements supraluminiques !?



**Déplacement supraluminique
APPARENT**

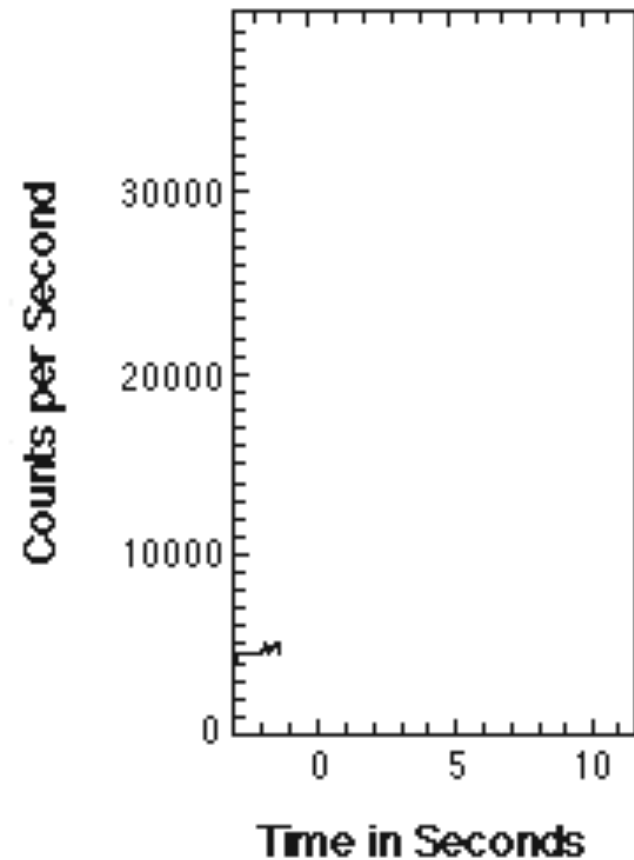
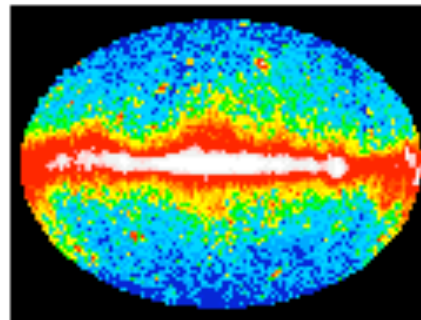
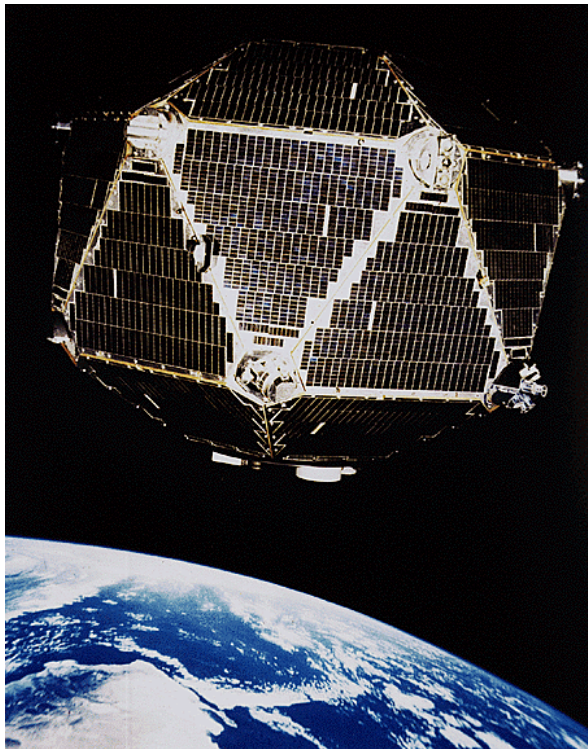
**Uniquement dans certaines
configurations
(θ petit, β grand)**

The background of the slide is a dark, starry space. In the upper left, there is a bright, glowing star with a lens flare effect. A faint, blue, nebula-like structure stretches diagonally across the center. The text is overlaid on this background.

**D'autres
sources cosmiques?**

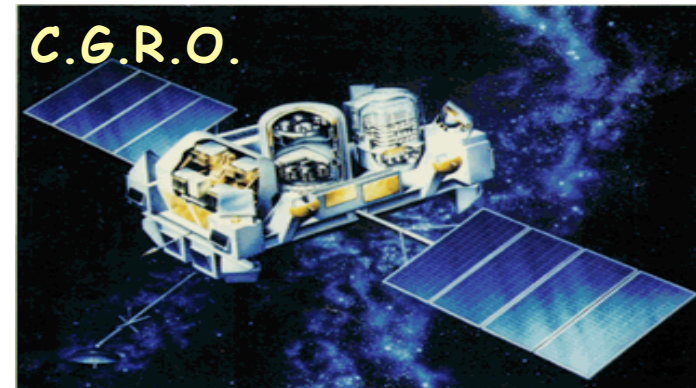
Sursauts Gamma (GRB)

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 ?

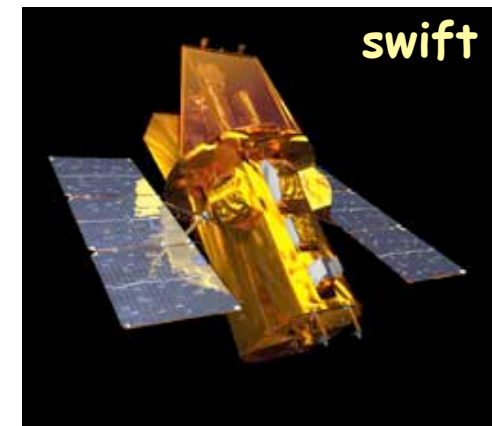
Δt de 10ms à quelques secondes

ΔL (en 5s) = 1.500.000 km = 0.01 u.a.

→ région compacte

→ trous noirs, étoiles à neutrons

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



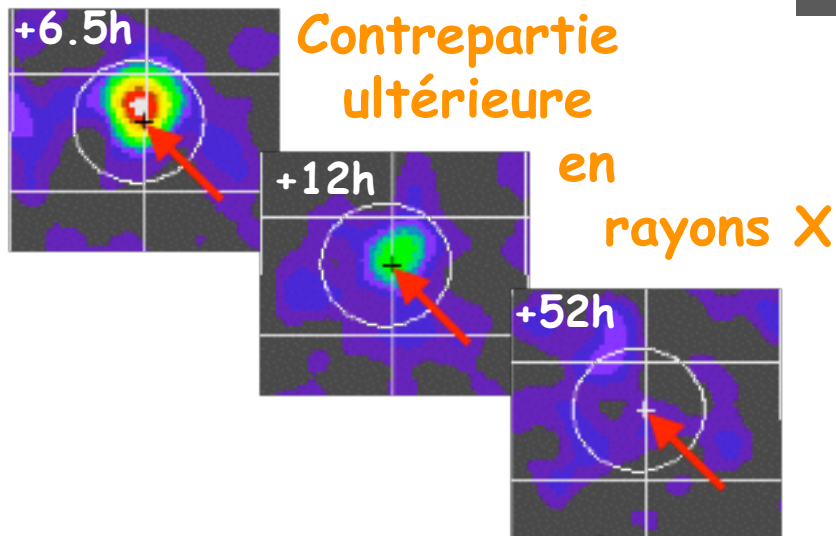
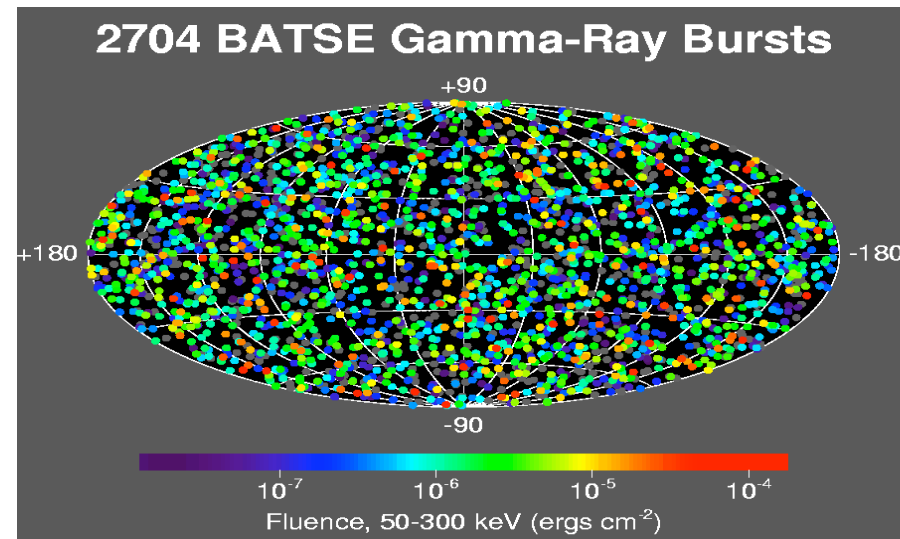
Localisation des sursauts

Long débat, mais

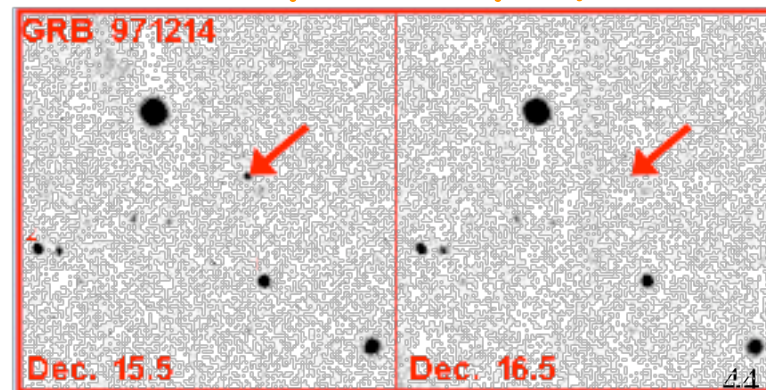
Isotropie
+
Contreparties optiques



Phénomènes cosmologiques
($z = 0.43$ à 6.3)



Contrepartie optique



Astroparticule

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

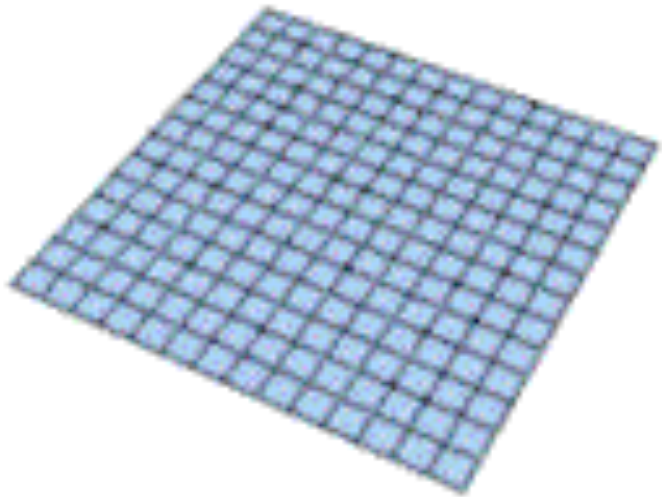
2) **Neutrinos cosmiques**
- Saga solaire
- Des neutrinos dans l'atmosphère
- Astronomie neutrinos

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



Gravitation et espace-temps

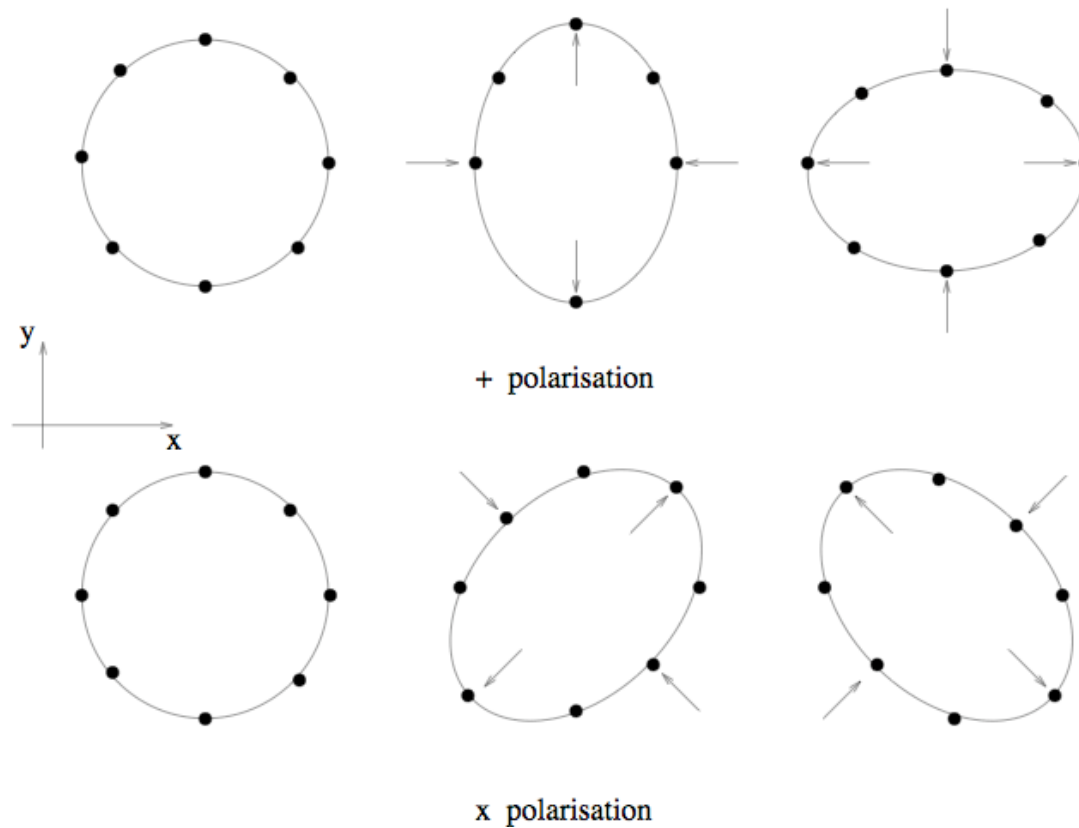
Un espace-temps courbe (\neq relat. restreinte)



Ondes gravitationnelles

relativité générale → ondes gravitationnelles

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

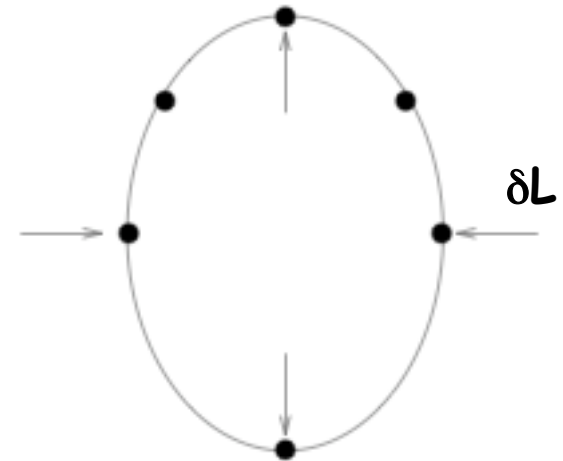


Ondes gravitationnelles

$$h = \delta L / L$$

Variation de longueur due à onde gravitationnelle

Longueur totale

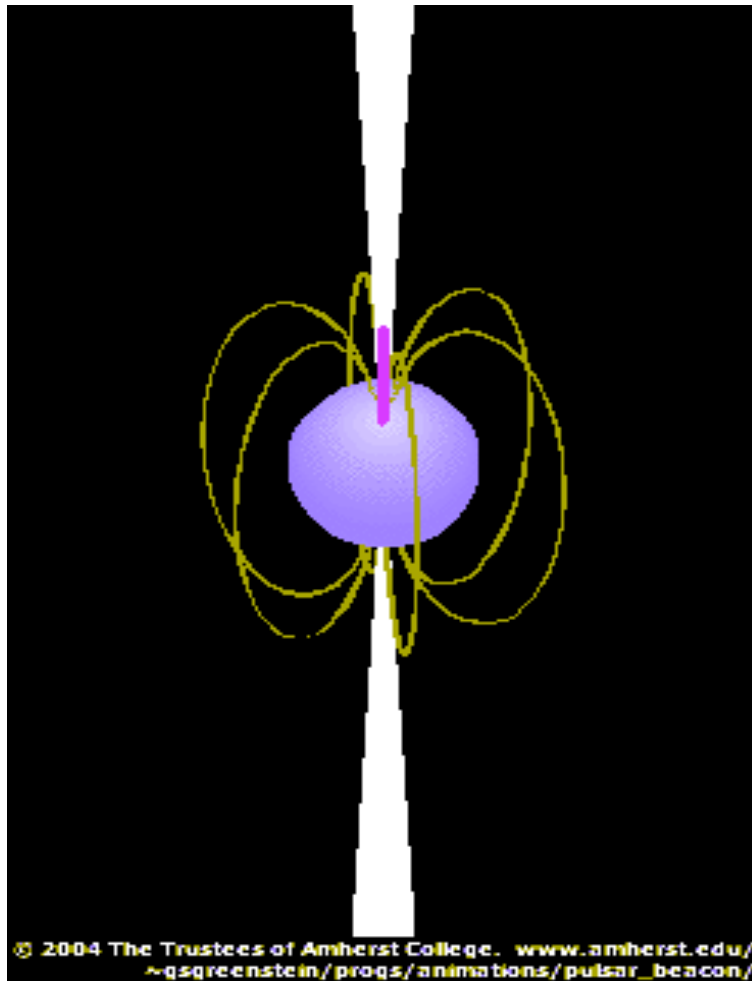


Explosion SN dans amas de la Vierge (15 Mpc):
 $h \sim 10^{-21}$ à 10^{-24}

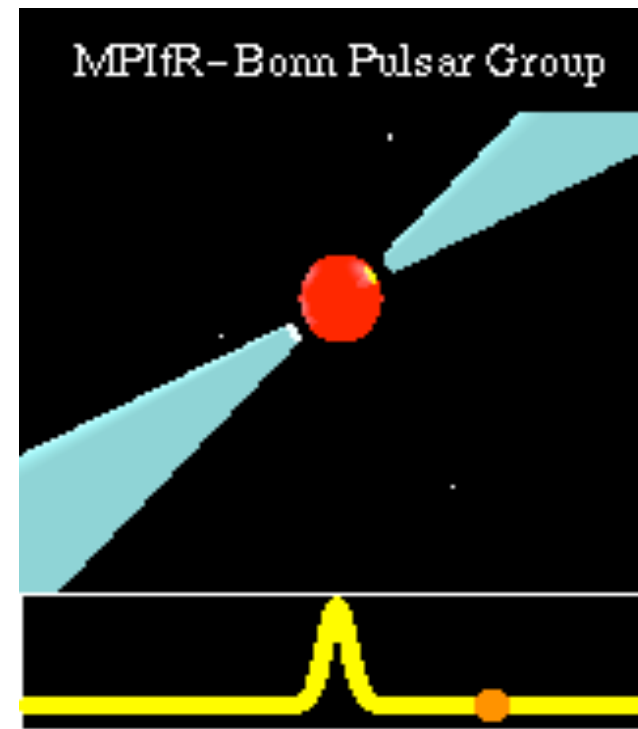
Système de deux trous noirs (10 Mpc):
 $h \sim 10^{-22}$ à 10^{-23}

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

Hulse et Taylor



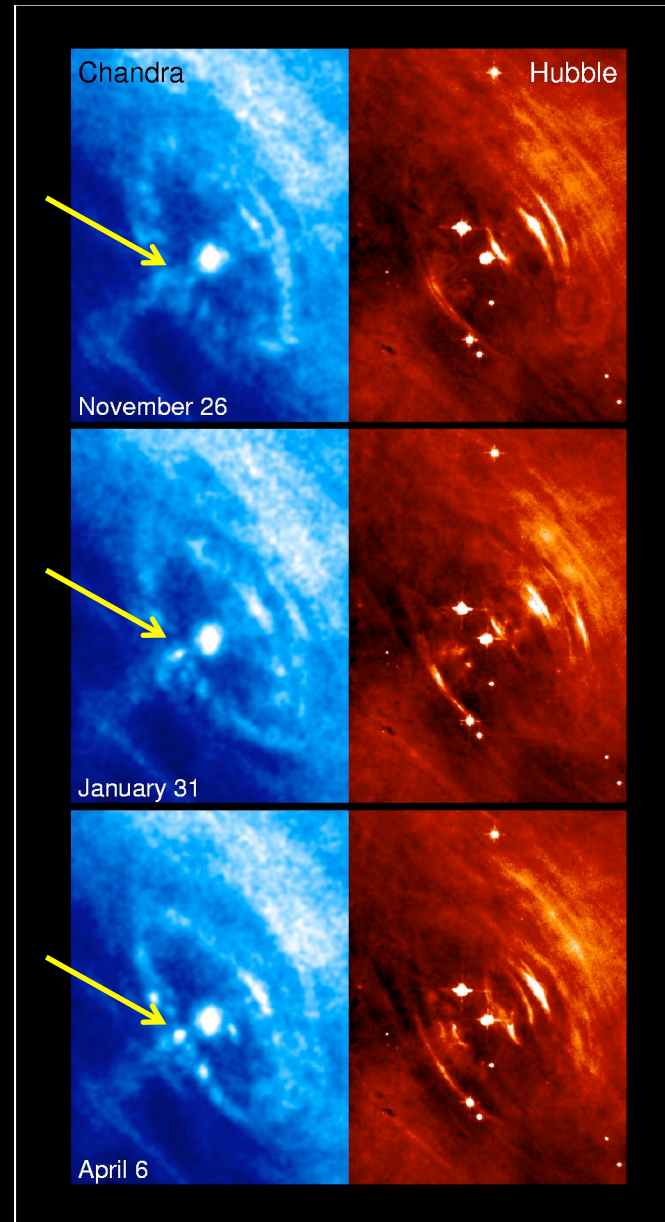
Pulsar 1913+16 découvert en 1974
 $T = 59 \text{ ms}$
précision meilleure que horloges atomiques!



Pulsar du Crabe

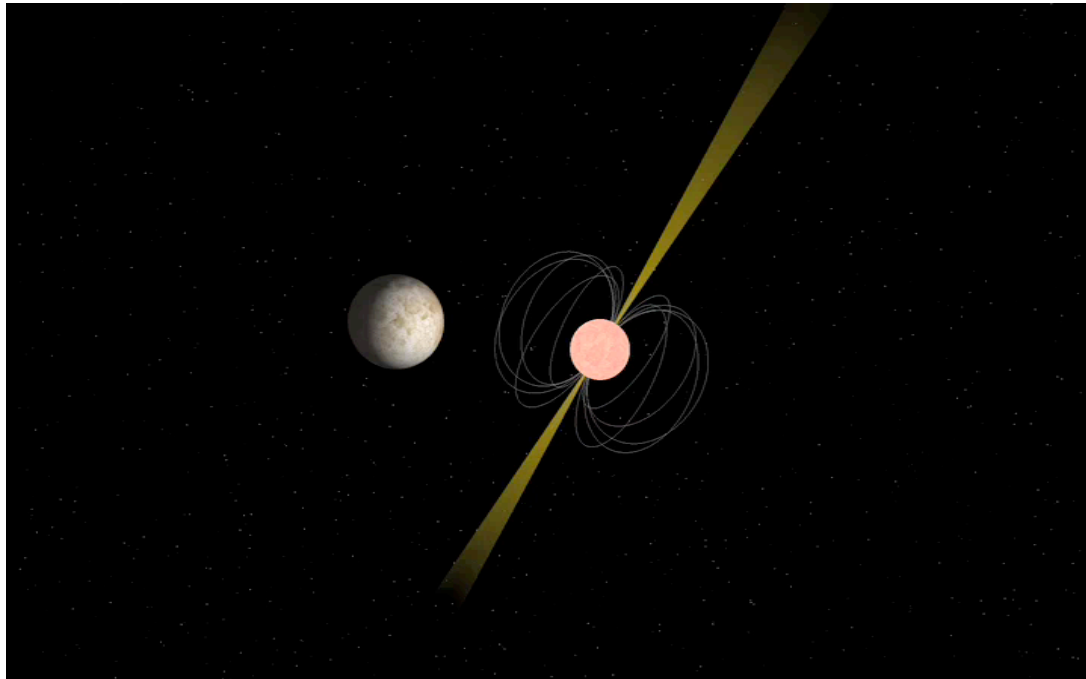


Hubble - optique (rouge)
Chandra - rayons X (bleu)

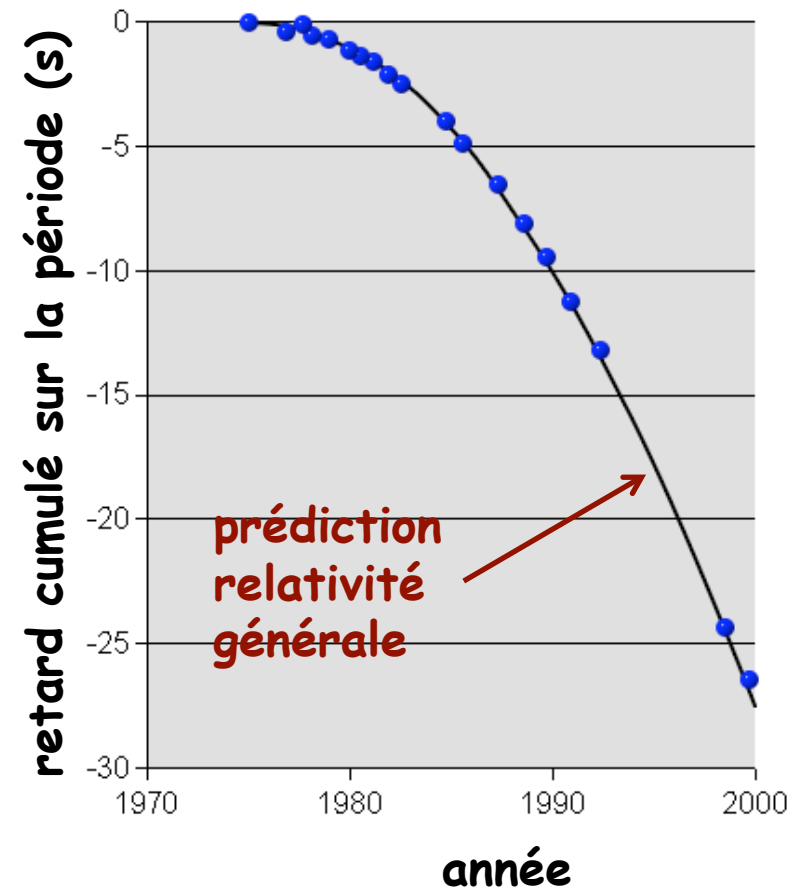


Hulse et Taylor

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



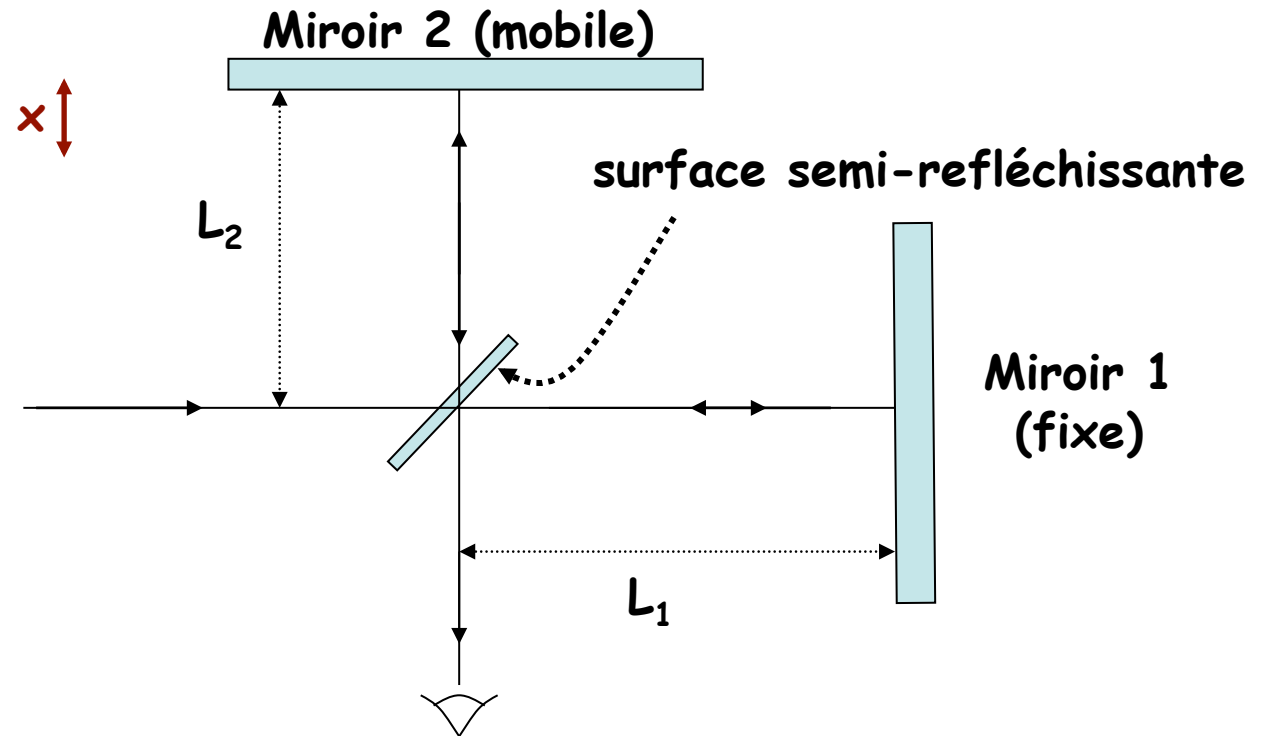
→ Prix Nobel 1993



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

Détection des ondes gravitationnelles

Interférométrie



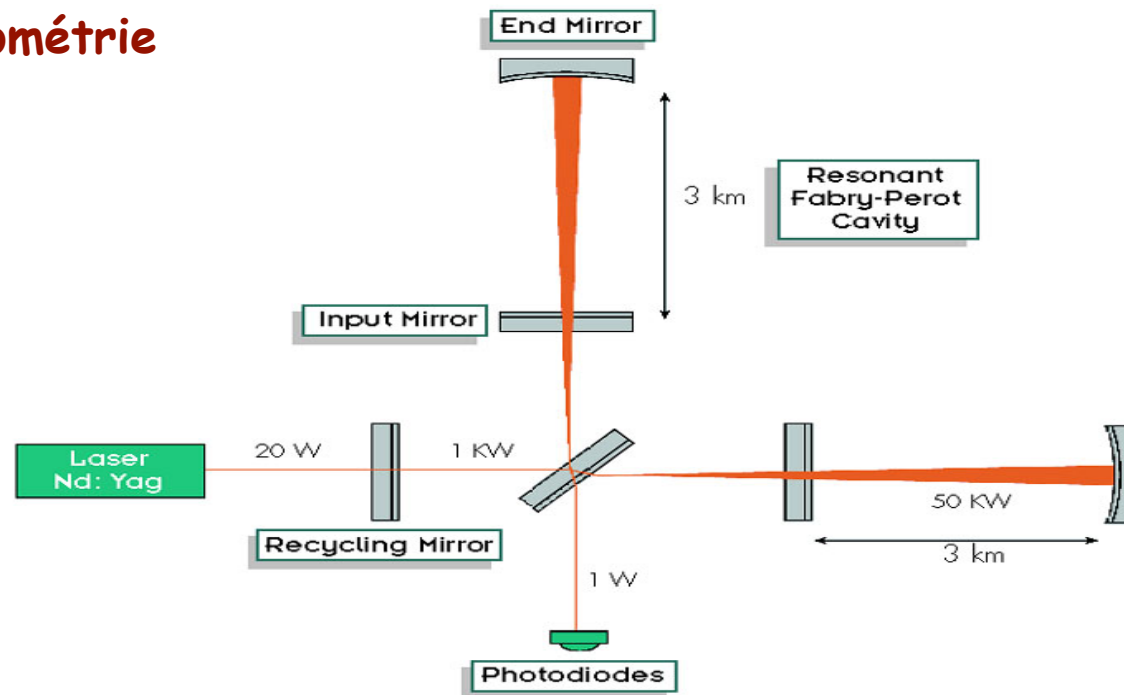
performance actuelle:
 $\delta L \sim 10^{-15} \text{ m}$

$$x = m \lambda / 2$$

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

Détection des ondes gravitationnelles

Interférométrie



Miroir de recyclage:

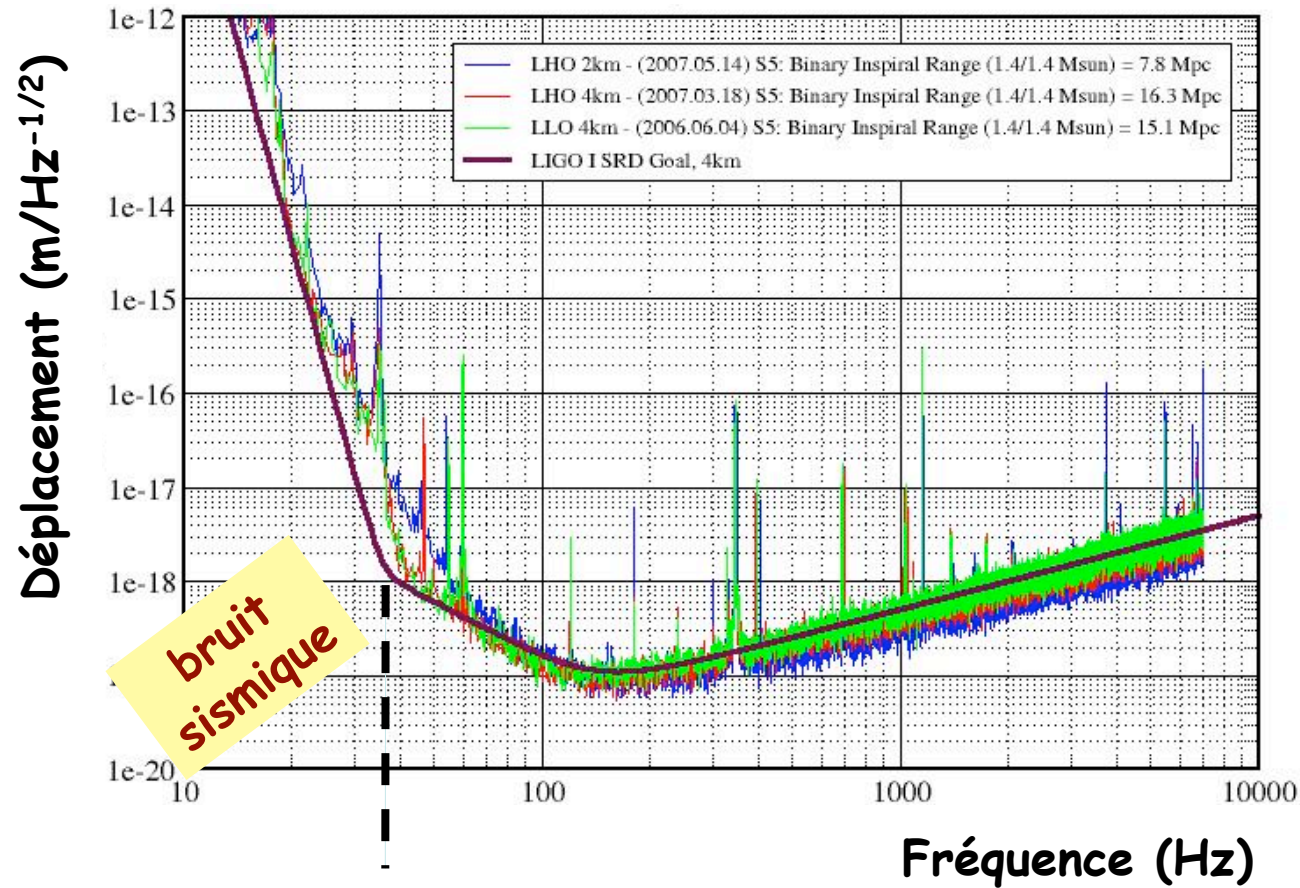
$$L = 3 \text{ km} \rightarrow L \text{ effectif} = 3000 \text{ km}$$

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 neutron ou trou noir

donc limité

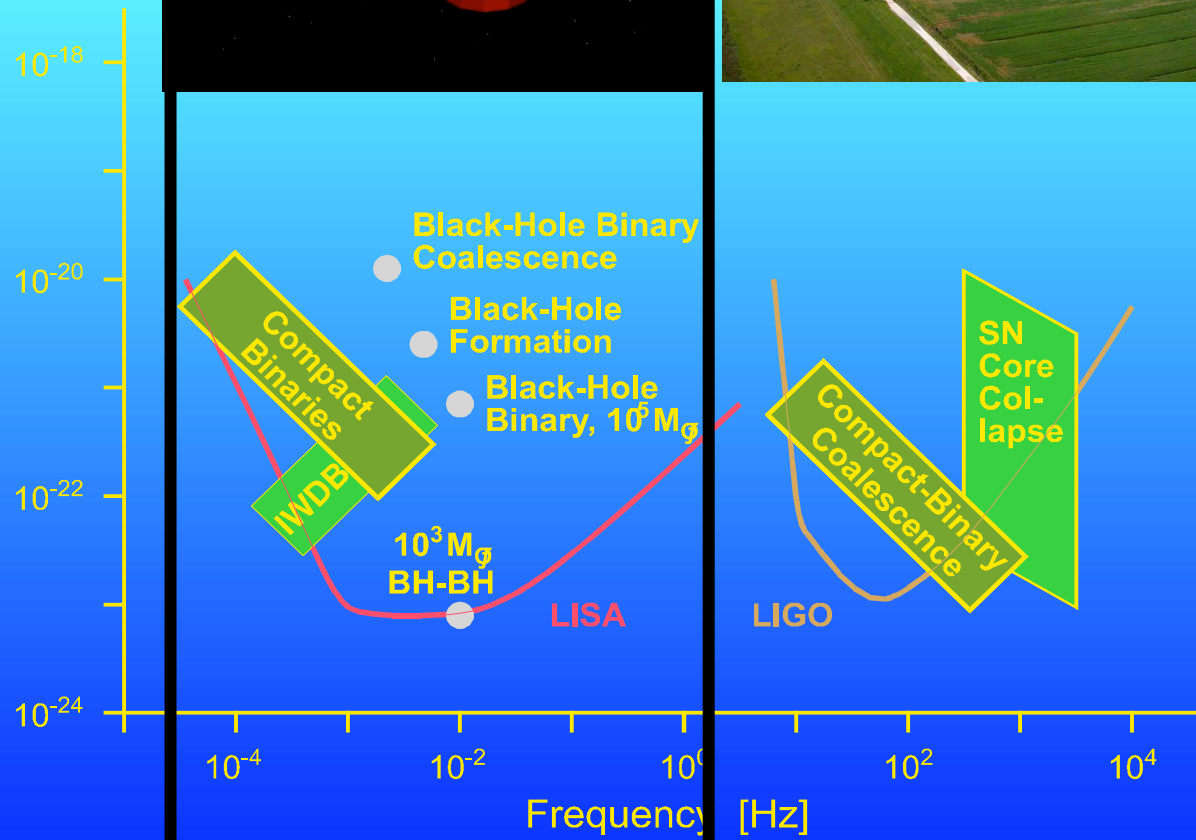
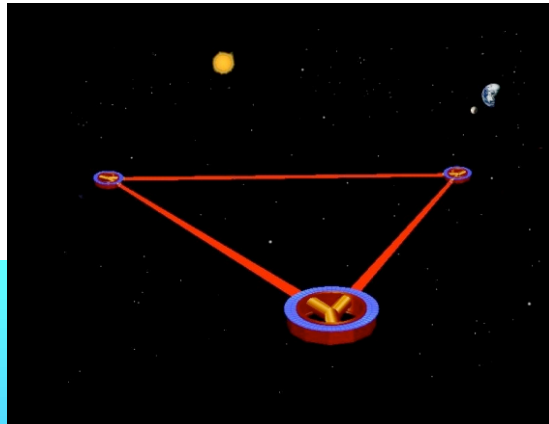
- aux astres les plus compacts
- aux phénomènes peu fréquents

pour couvrir

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

\rightarrow freq. plus basse

\rightarrow dans l'espace !



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