

# **Astroparticules et Neutrinos**

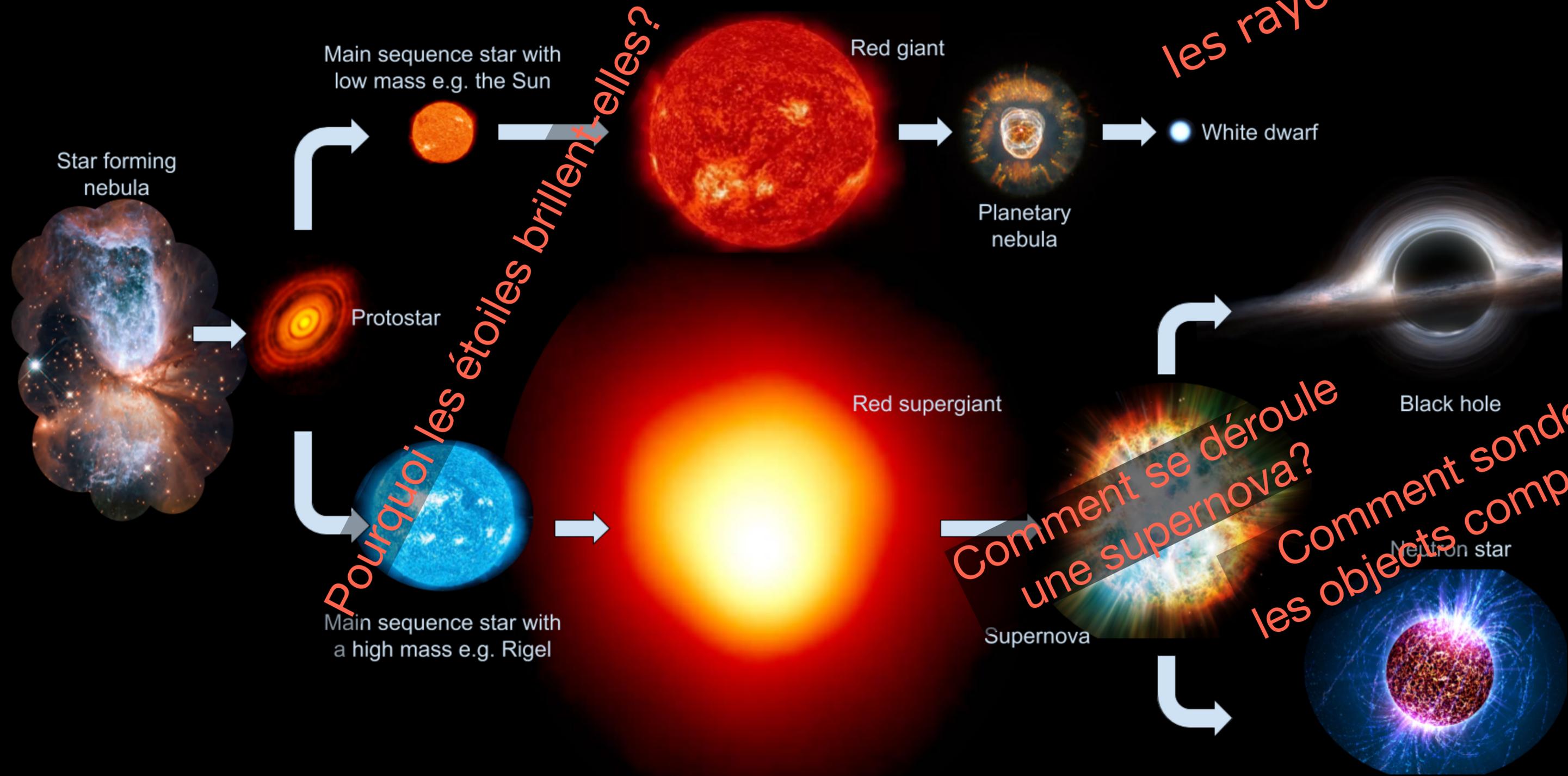
**Les messager invisibles — Ondes gravitationnelles et neutrinos**

**Sonia El Hedri — De la Physique au Détecteur 2024**

# Episode 1: Les accélérateurs de particules cosmiques



# Nos questions...



*Pourquoi les étoiles brillent-elles?*

*D'où viennent les rayons cosmiques?*

*Comment se déroule une supernova?*

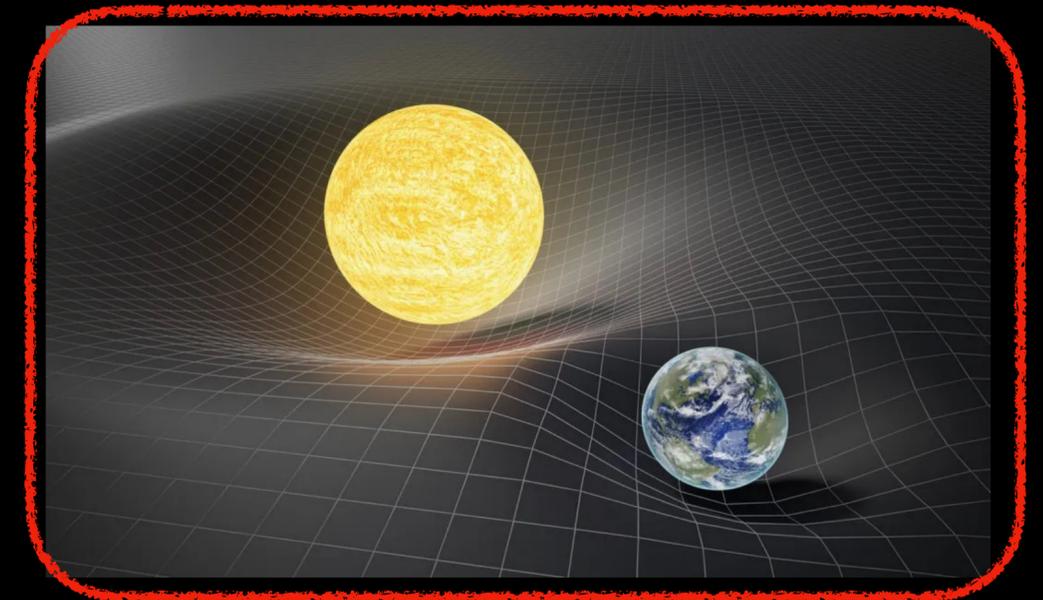
*Comment sonder les objets compacts?*



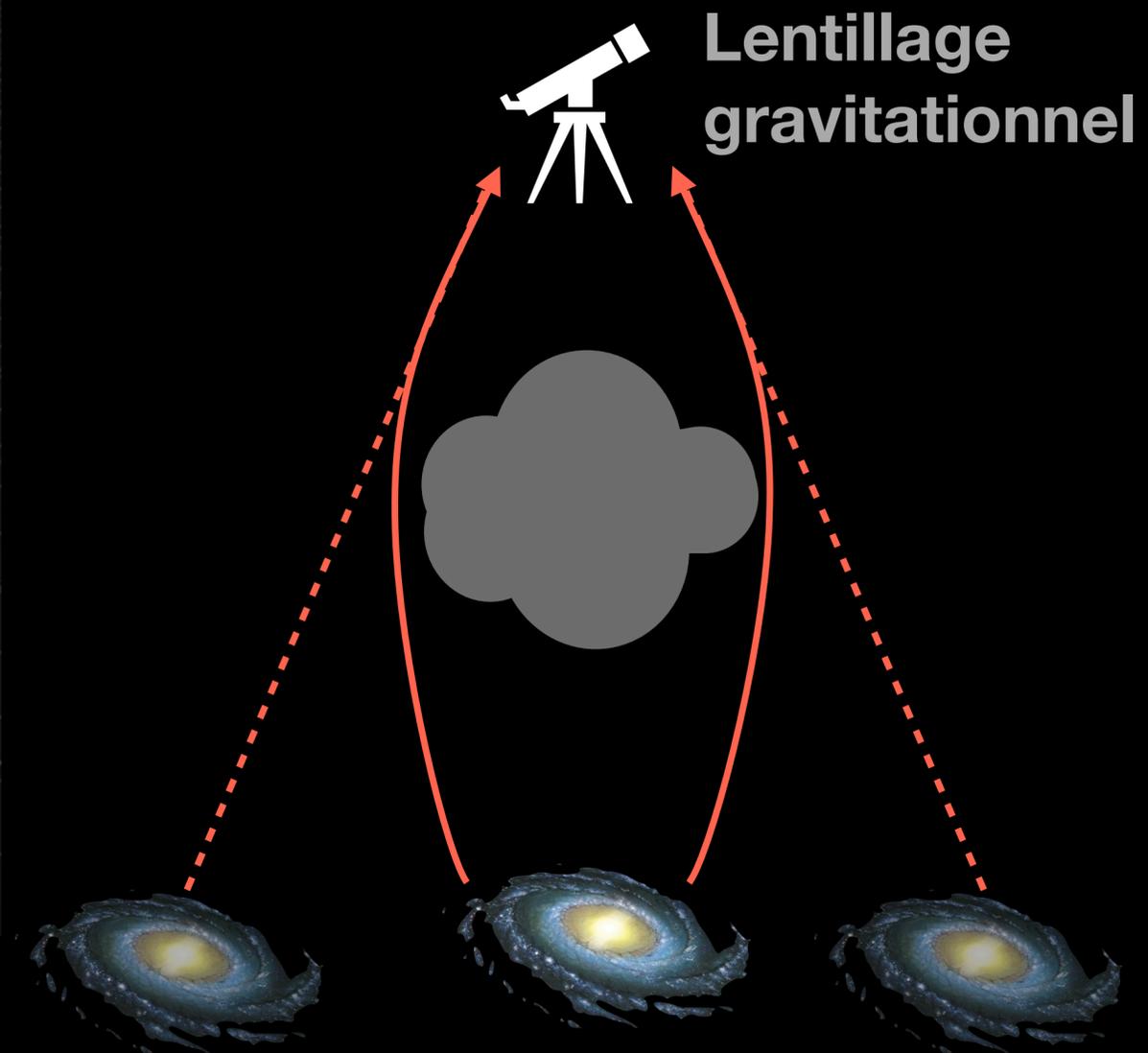
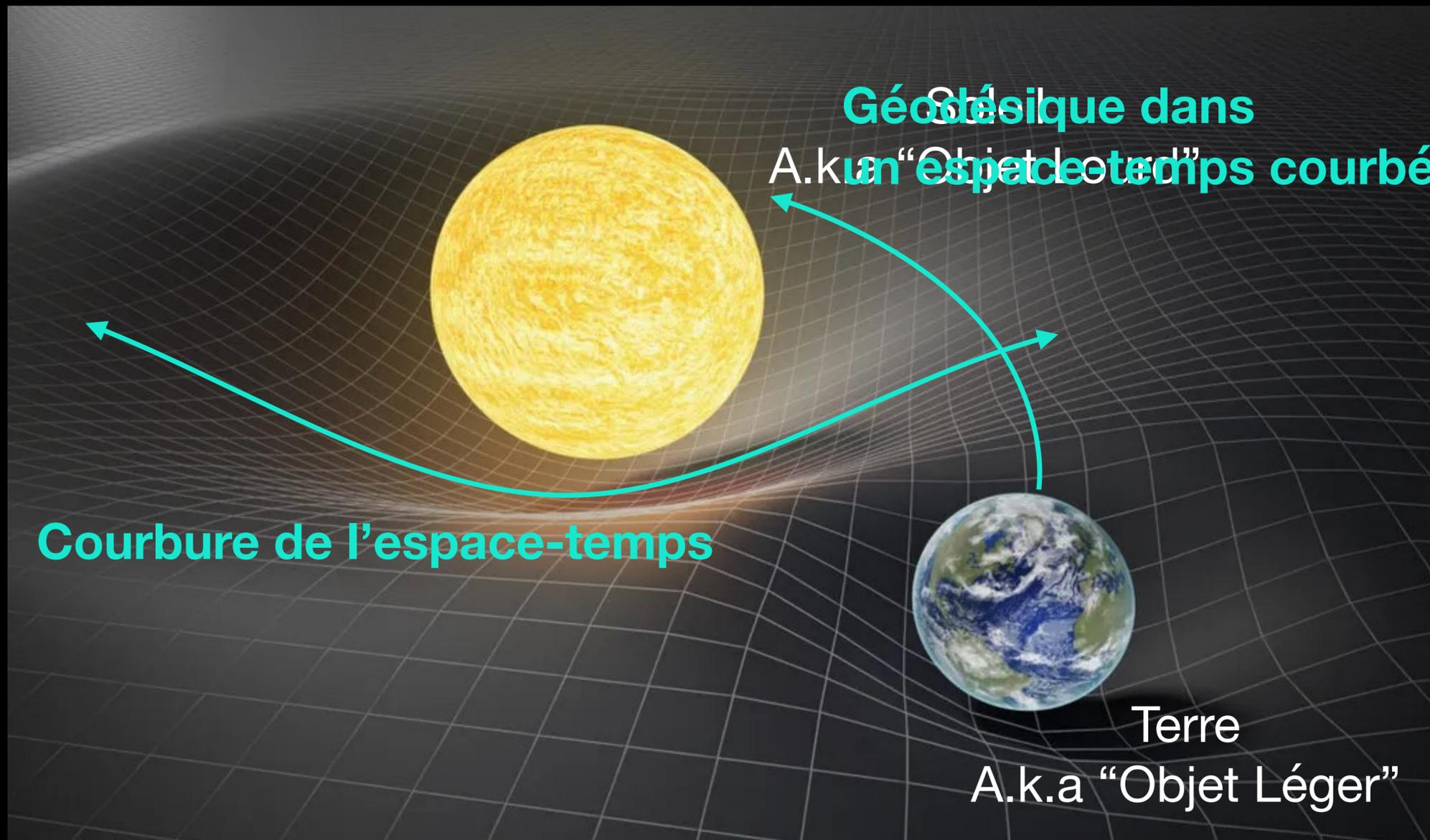
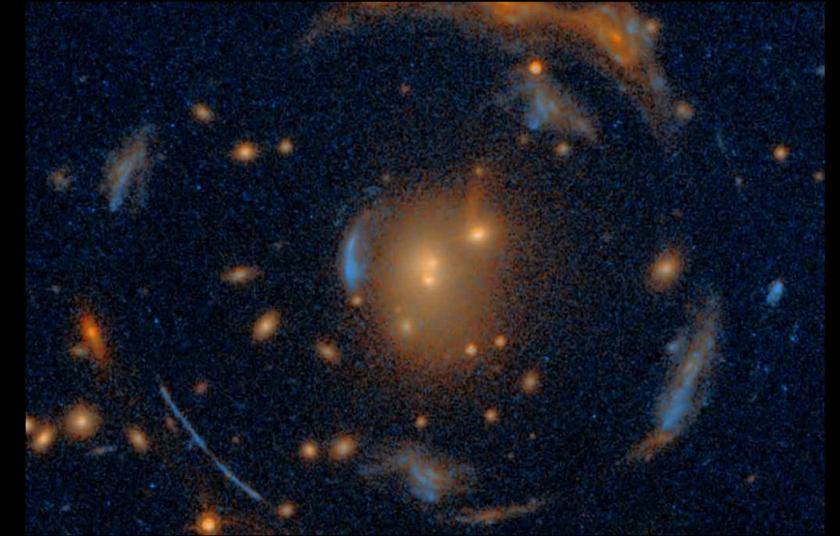
# Un nouveau messager

## Au-delà des particules

LEPTONS	$=0.511 \text{ MeV}/c^2$ $-1$ $\frac{1}{2}$ <b>e</b> electron	$=105.66 \text{ MeV}/c^2$ $-1$ $\frac{1}{2}$ <b><math>\mu</math></b> muon	$=1.7768 \text{ GeV}/c^2$ $-1$ $\frac{1}{2}$ <b><math>\tau</math></b> tau	$=91.19 \text{ GeV}/c^2$ 0 1 <b>Z</b> Z boson
	$<2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	$<0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	$<18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	$=80.39 \text{ GeV}/c^2$ $\pm 1$ 1 <b>W</b> W boson
	$=4.7 \text{ MeV}/c^2$ $-1/2$ $\frac{1}{2}$ <b>d</b> down	$=96 \text{ MeV}/c^2$ $-1/2$ $\frac{1}{2}$ <b>s</b> strange	$=4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-1/2$ $\frac{1}{2}$ <b>b</b> bottom	0 0 1 <b><math>\gamma</math></b> photon
QUARKS	$=2.2 \text{ MeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$ <b>u</b> up	$=1.28 \text{ GeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$ <b>c</b> charm	$=173.1 \text{ GeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$ <b>t</b> top	0 0 1 <b>g</b> gluon
				$=124.97 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 0 <b>H</b> higgs
				SCALAR BOSONS
				Gauge bosons Vector bosons

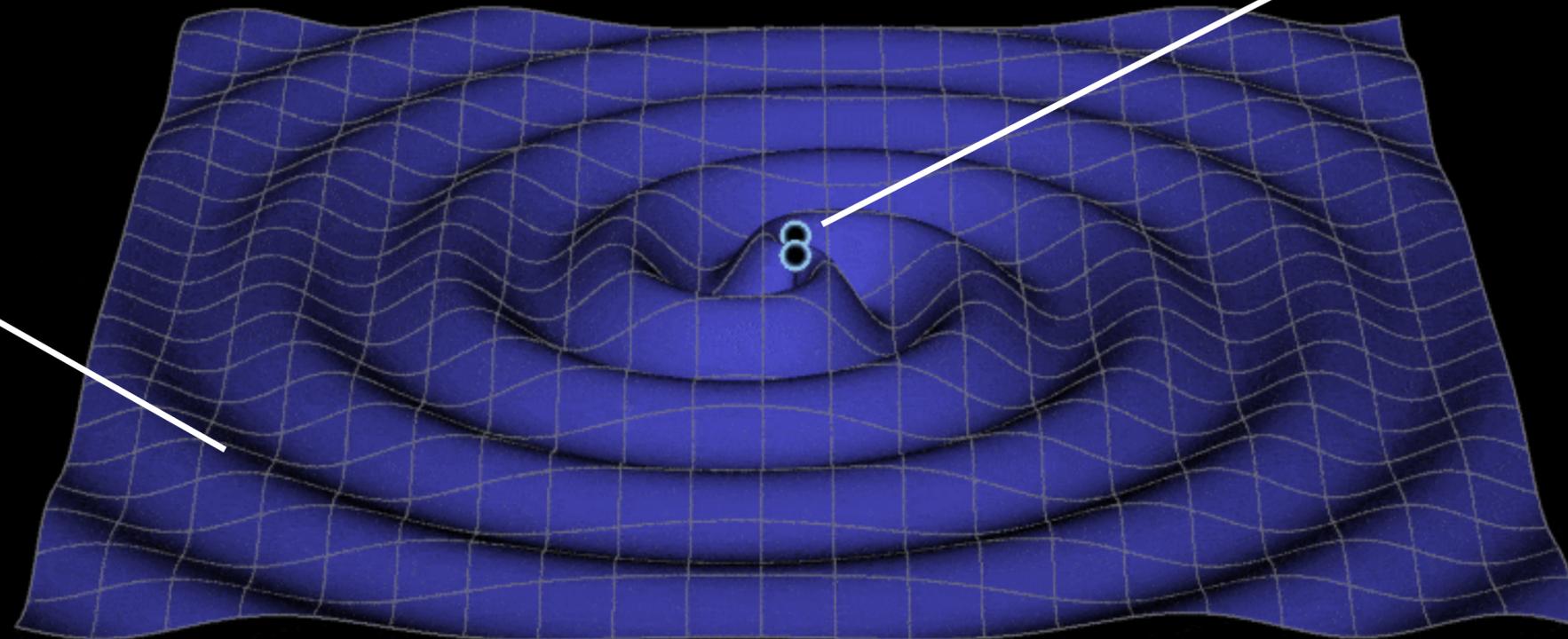


# Les ondes gravitationnelles



# Les ondes gravitationnelles

**Propagation**  
d'une déformation de  
l'espace-temps



Mouvement asymétrique  
d'objets compacts  
(étoiles à neutrons, trous noirs)

# Effet d'une onde gravitationnelle

- Déformation de l'espace-temps  
→ contraction/dilatation des objets
- Facteur de déformation  $h$

$$h \approx 10^{-22} \left( \frac{E_{\text{GW}}}{10^{-4} M_{\odot}} \right)^{1/2} \times \left( \frac{f}{1 \text{ kHz}} \right)^{-1} \times \left( \frac{\tau}{1 \text{ ms}} \right)^{-1/2} \times \left( \frac{r}{15 \text{ Mpc}} \right)^{-1}$$

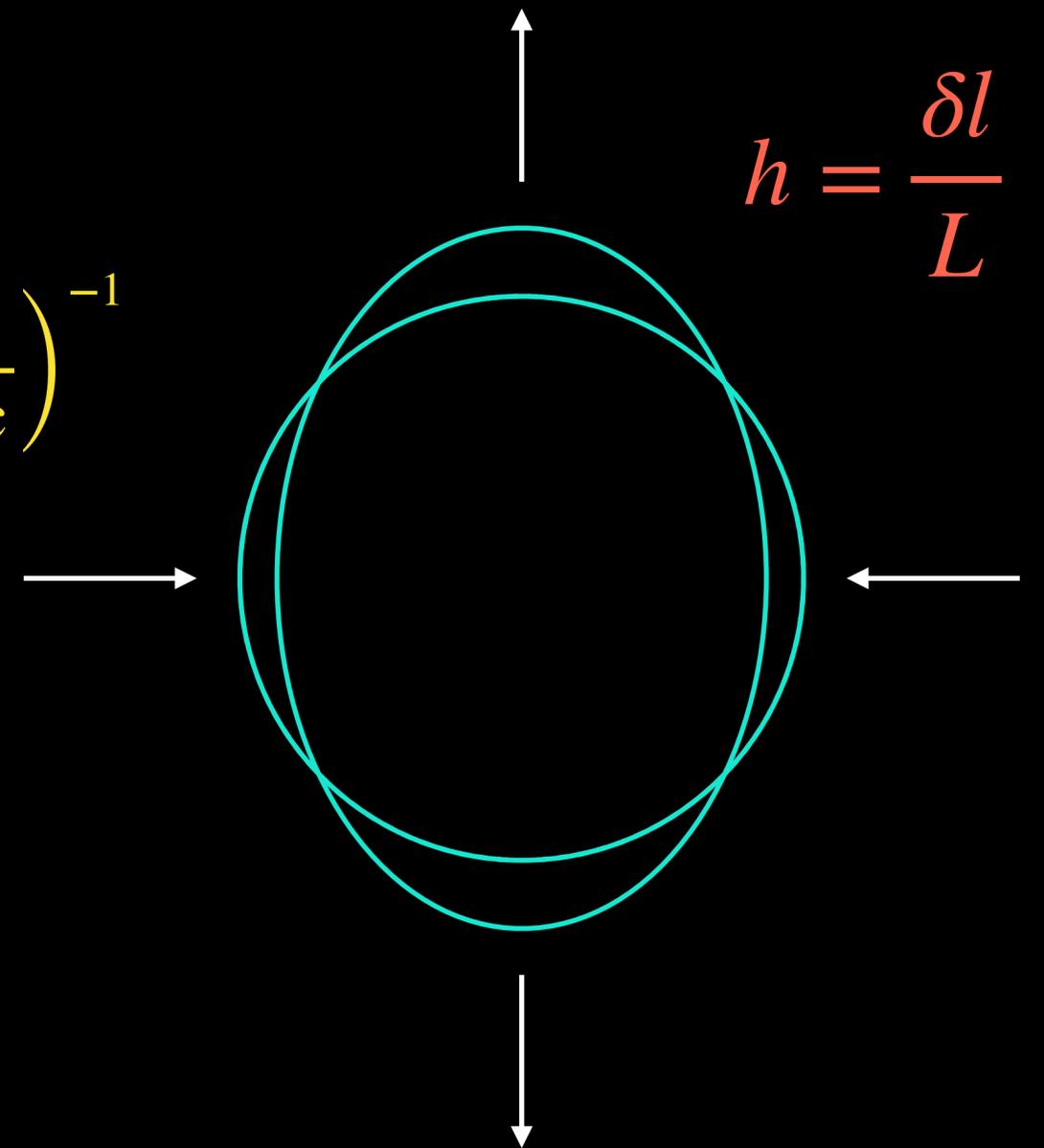
Supernova, amas de la Vierge (15 Mpc)

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

Fusion de 2 trous noirs (150 Mpc)

$$h \sim 10^{-21}$$

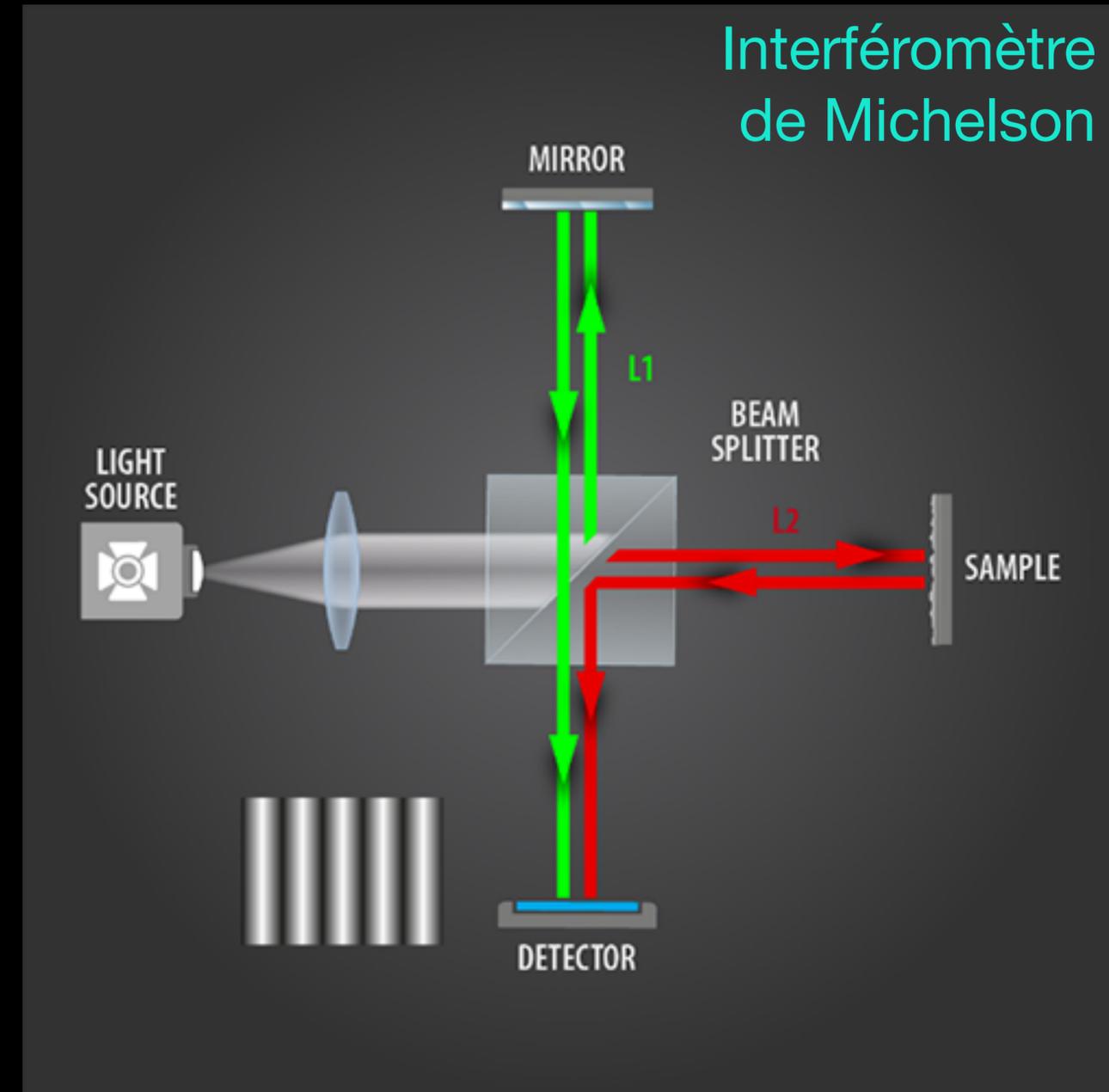
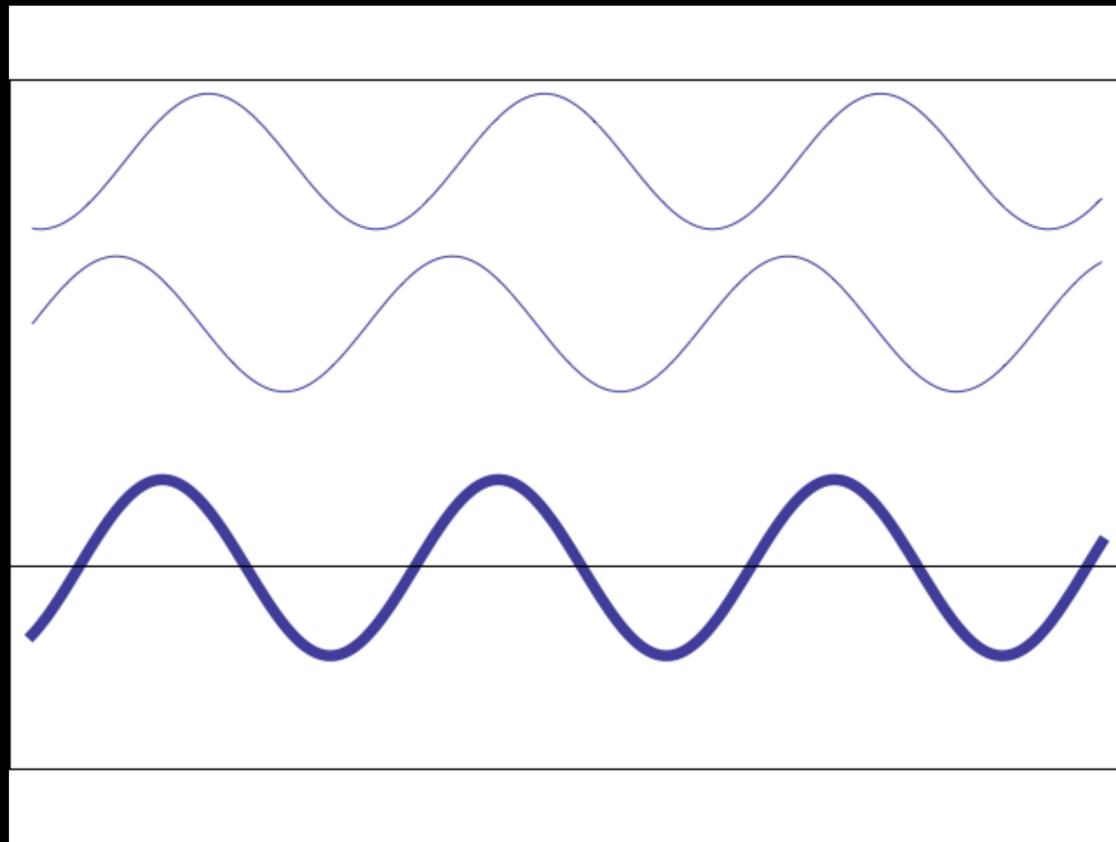
Si  $L = 1000 \text{ km}$ ,  $\delta l \sim 1 \text{ fm}$   
(taille d'un noyau d'atome)



# Détection par interférométrie

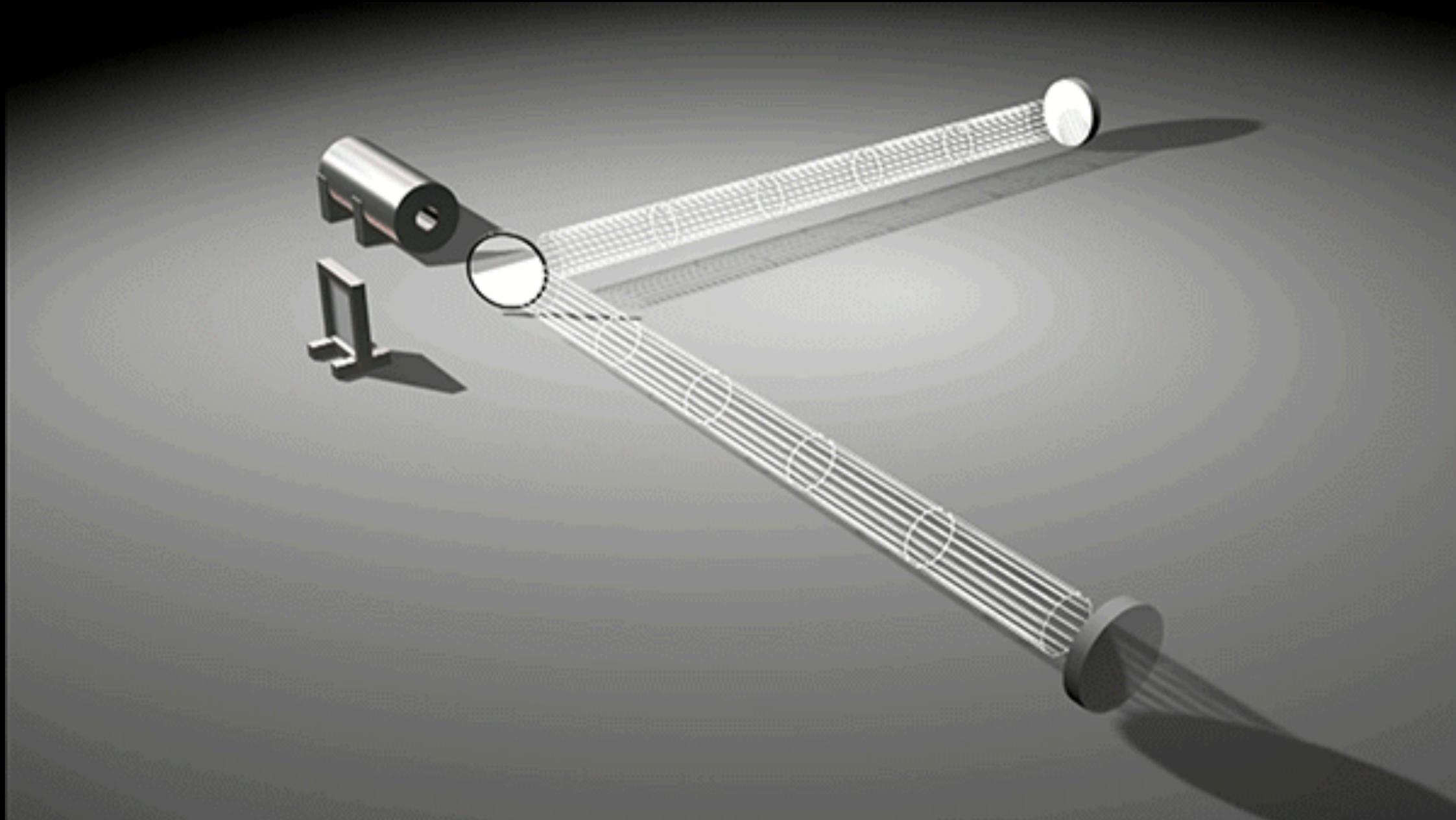
## Mesure de distance à haute précision

Addition des amplitudes  
de faisceaux lumineux cohérents

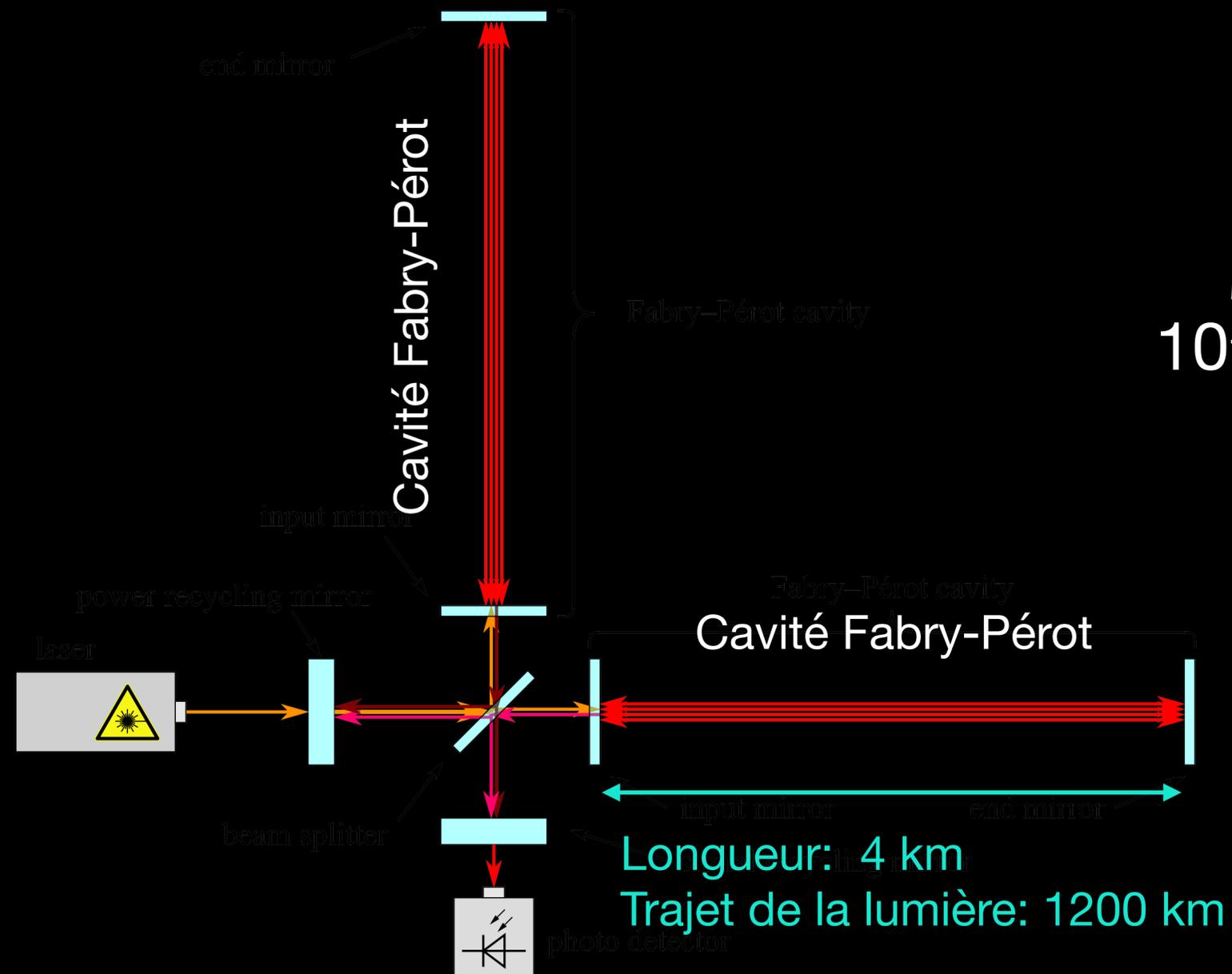


# Ondes gravitationnelles et interférométrie

## Mesure de déformations infinitésimales



# Les derniers attomètres...



$$h = \frac{\delta l}{L}$$

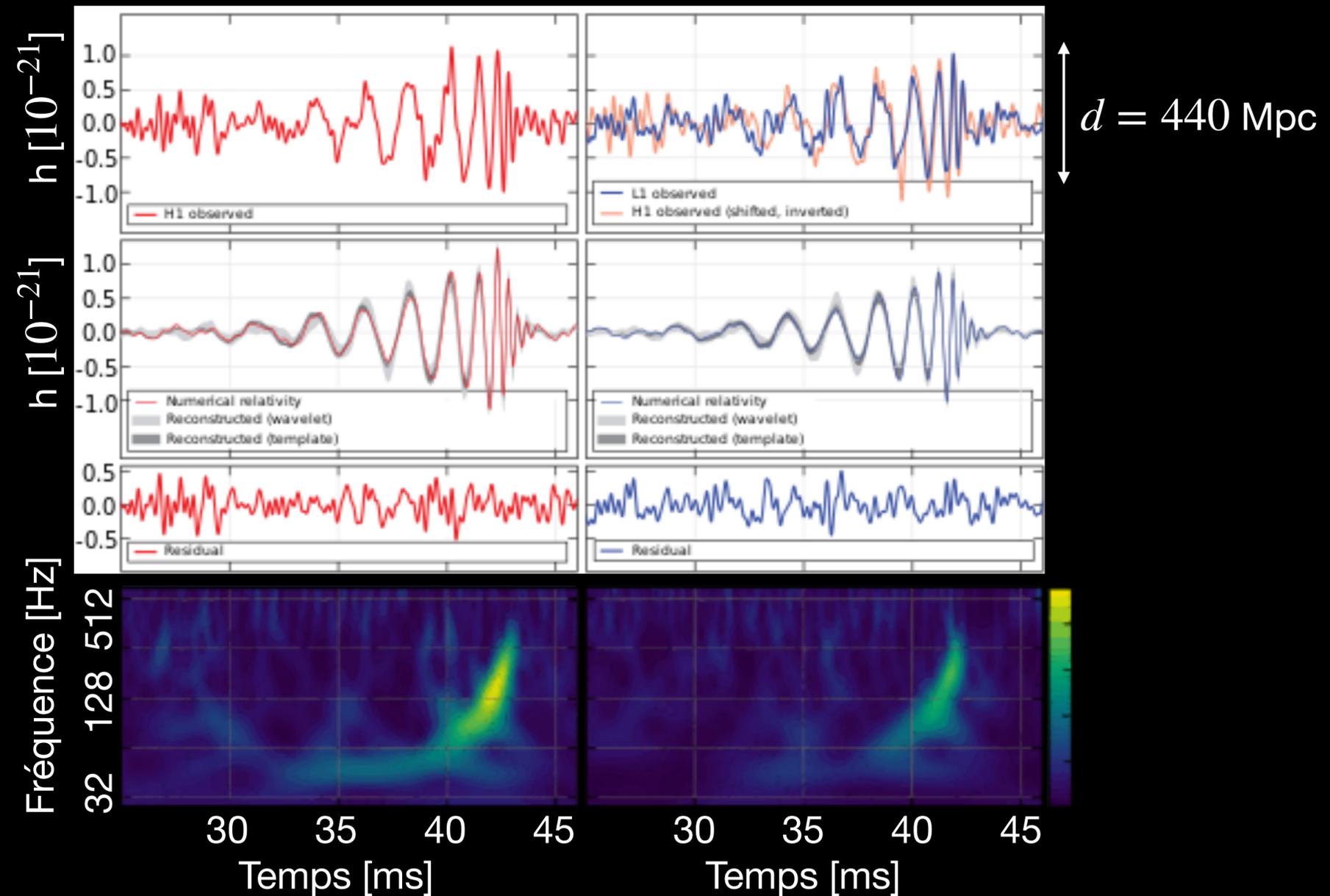
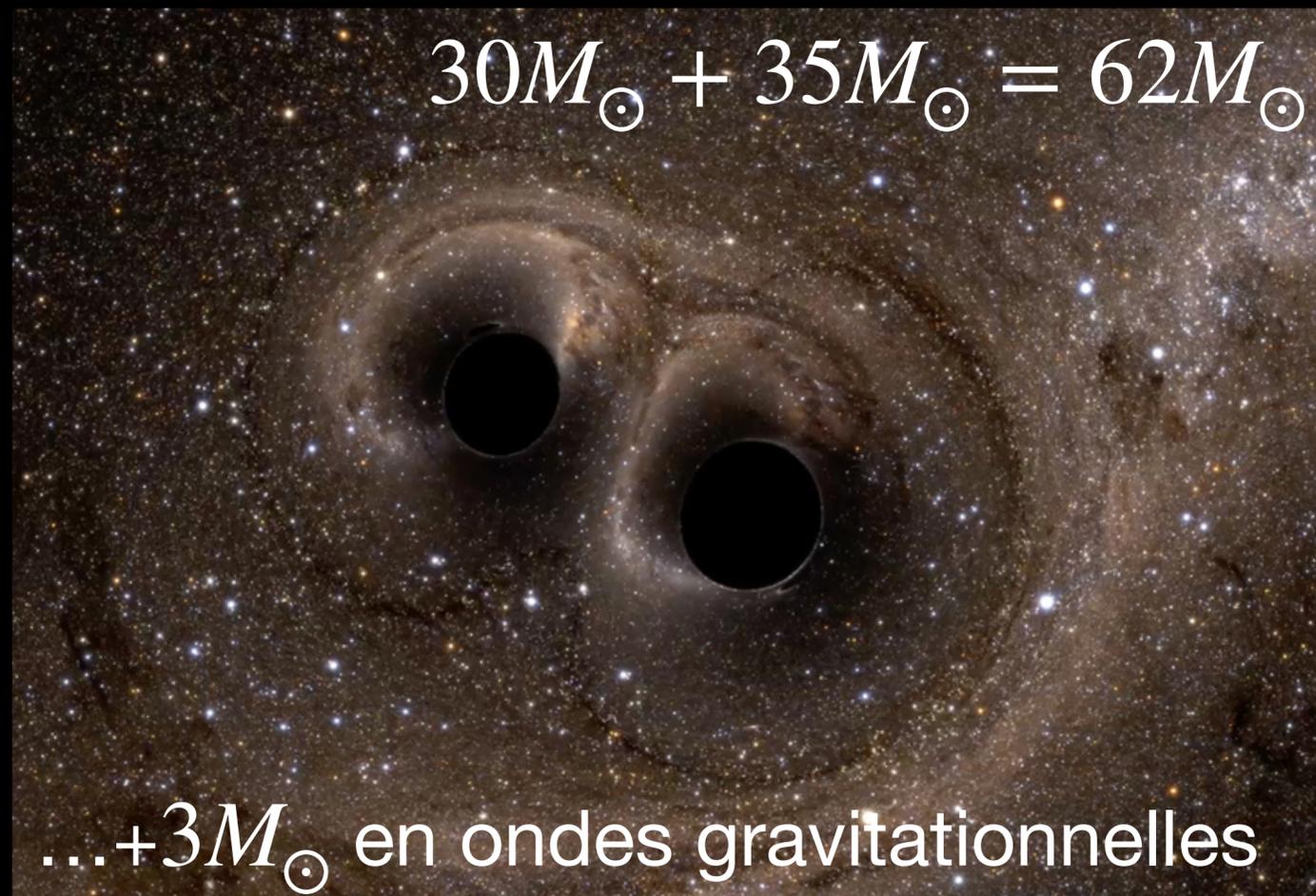
$10^{-21}$  (pointing to  $h$ )       $10^{-15}$  m (pointing to  $\delta l$ )  
 $1000$  km! (pointing to  $L$ )

# LIGO et VIRGO



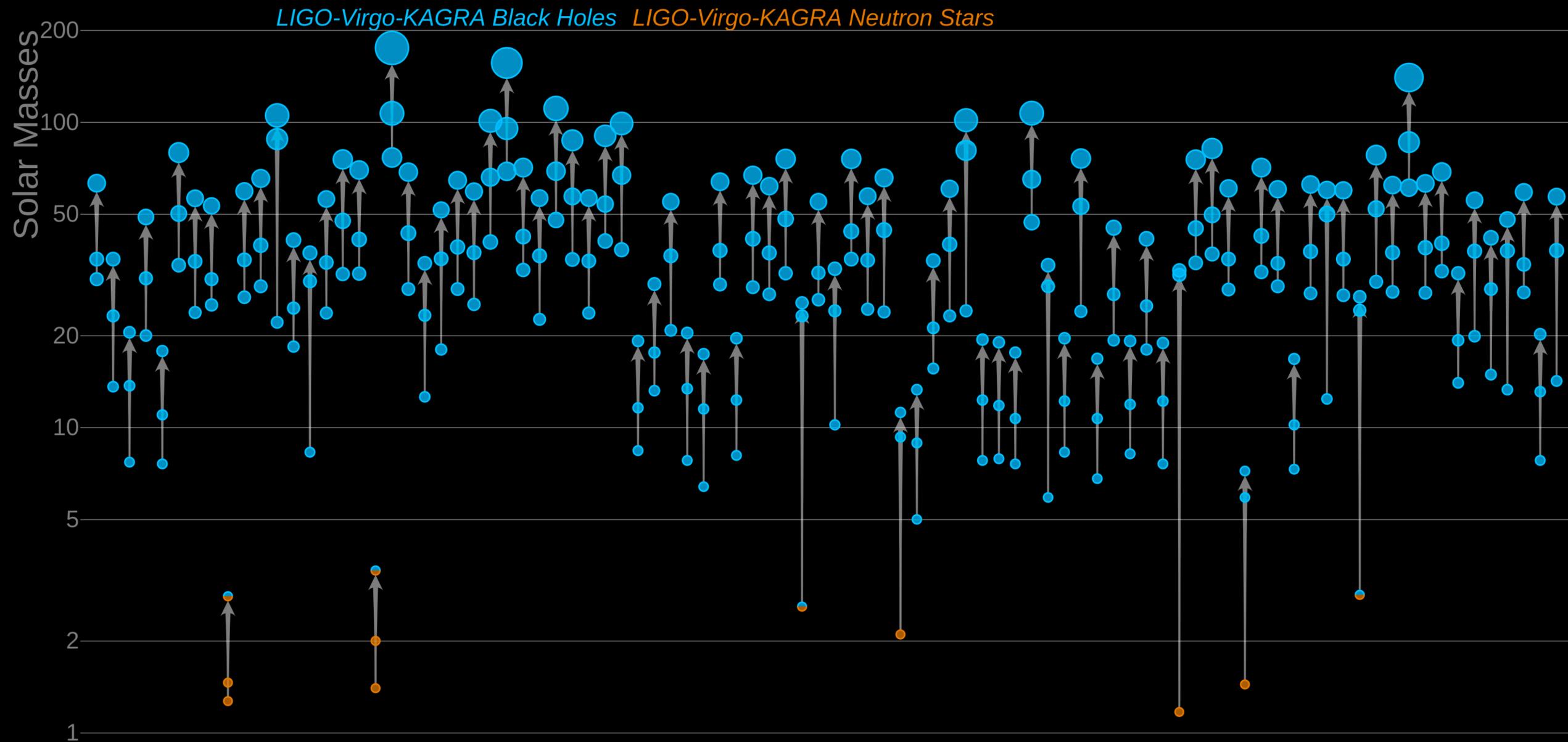
# Première observation: fusion de deux trous noirs

## LIGO — 14 septembre 2015

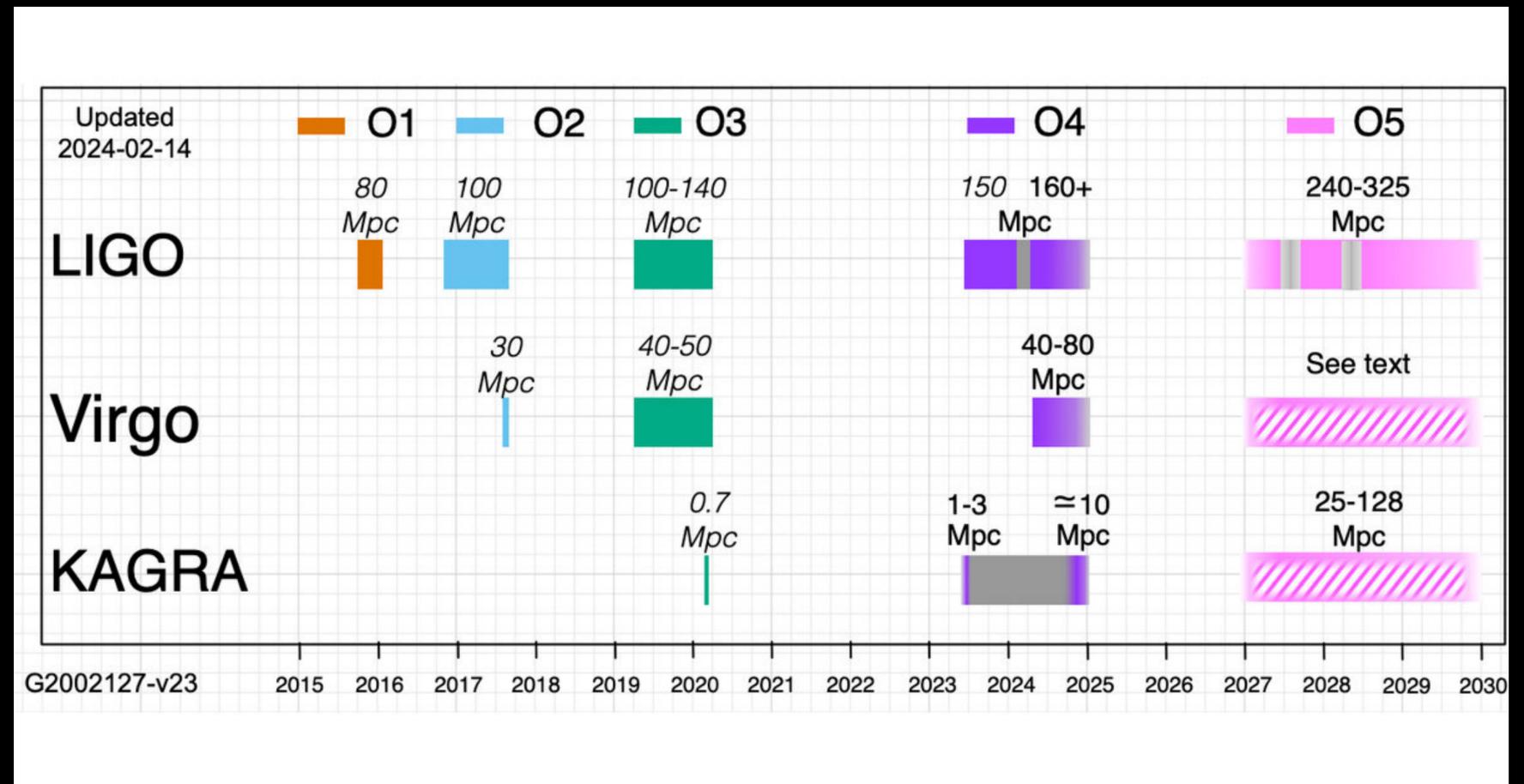


# Les populations de trous noirs

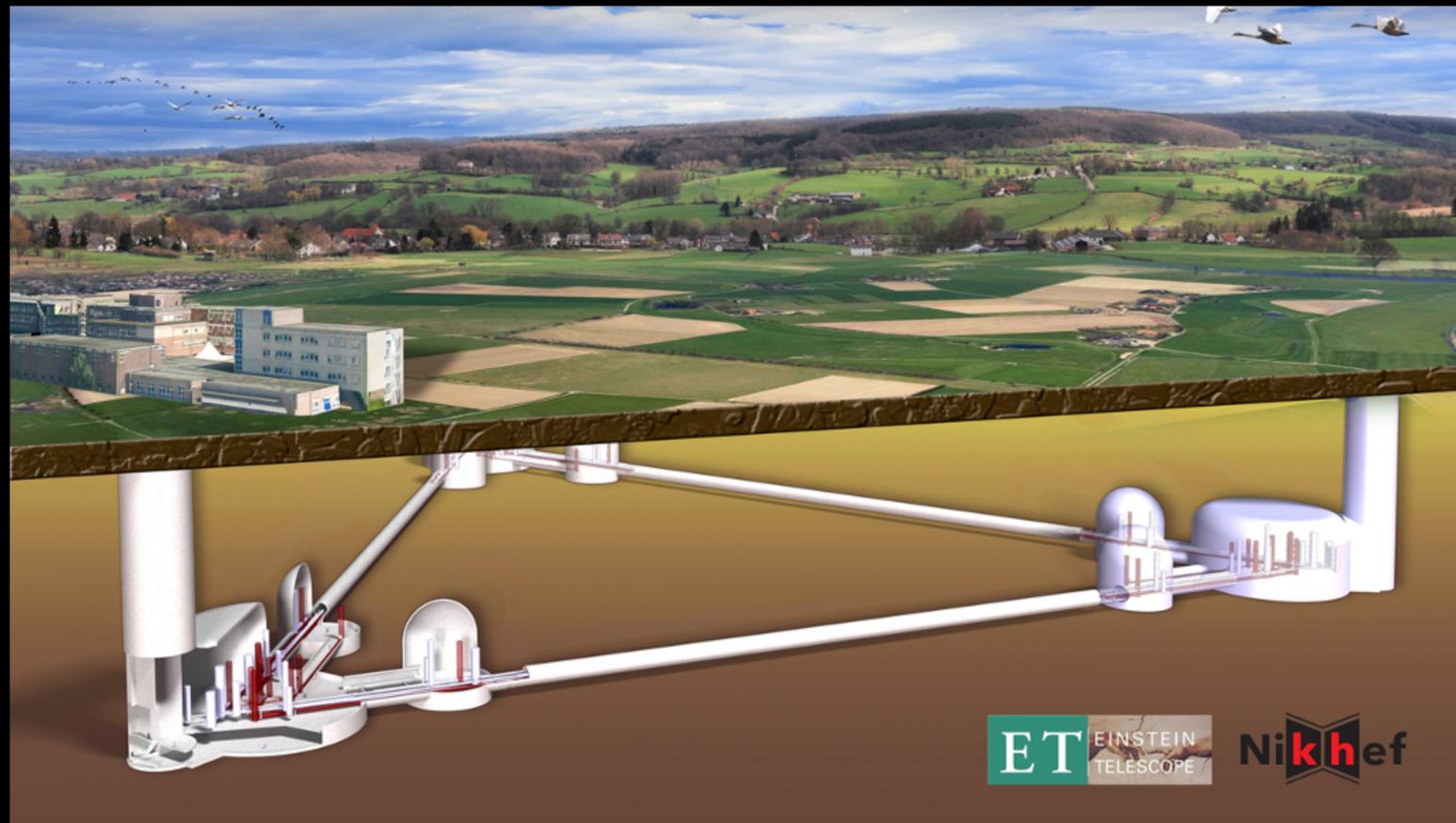
## Masses in the Stellar Graveyard



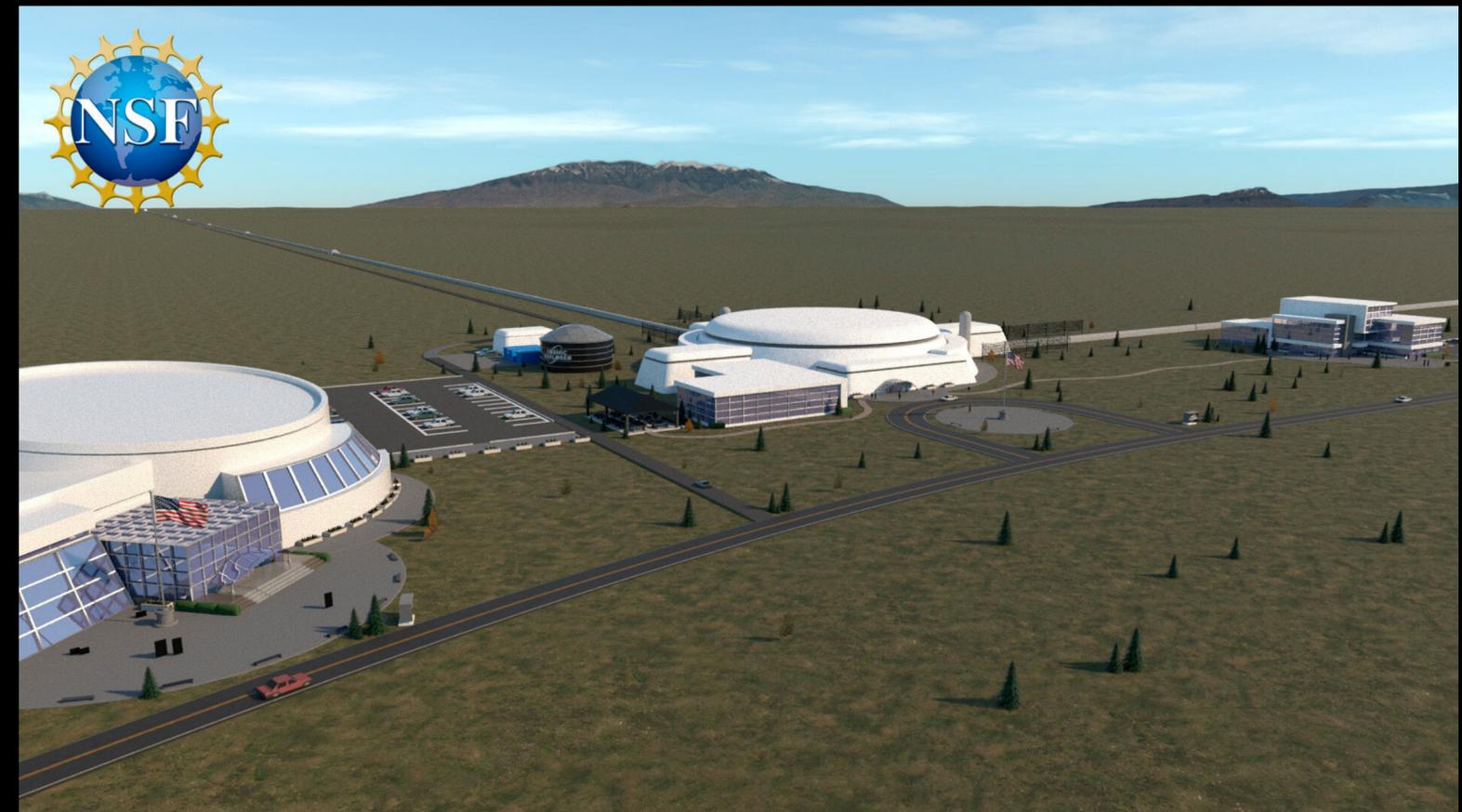
# Futur proche: LIGO-VIRGO-KAGRA



# Détecteurs terrestres: prochaine génération

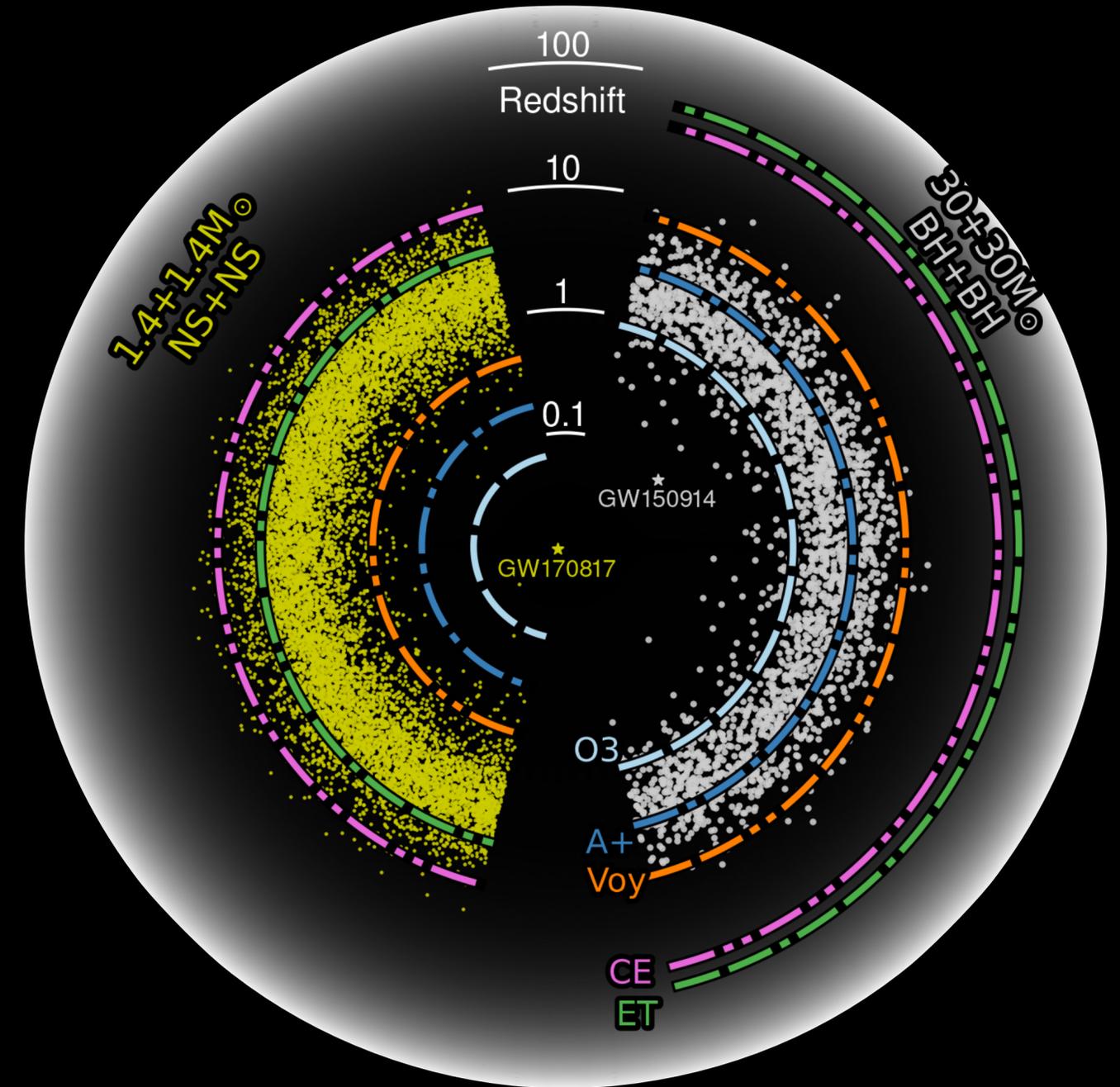
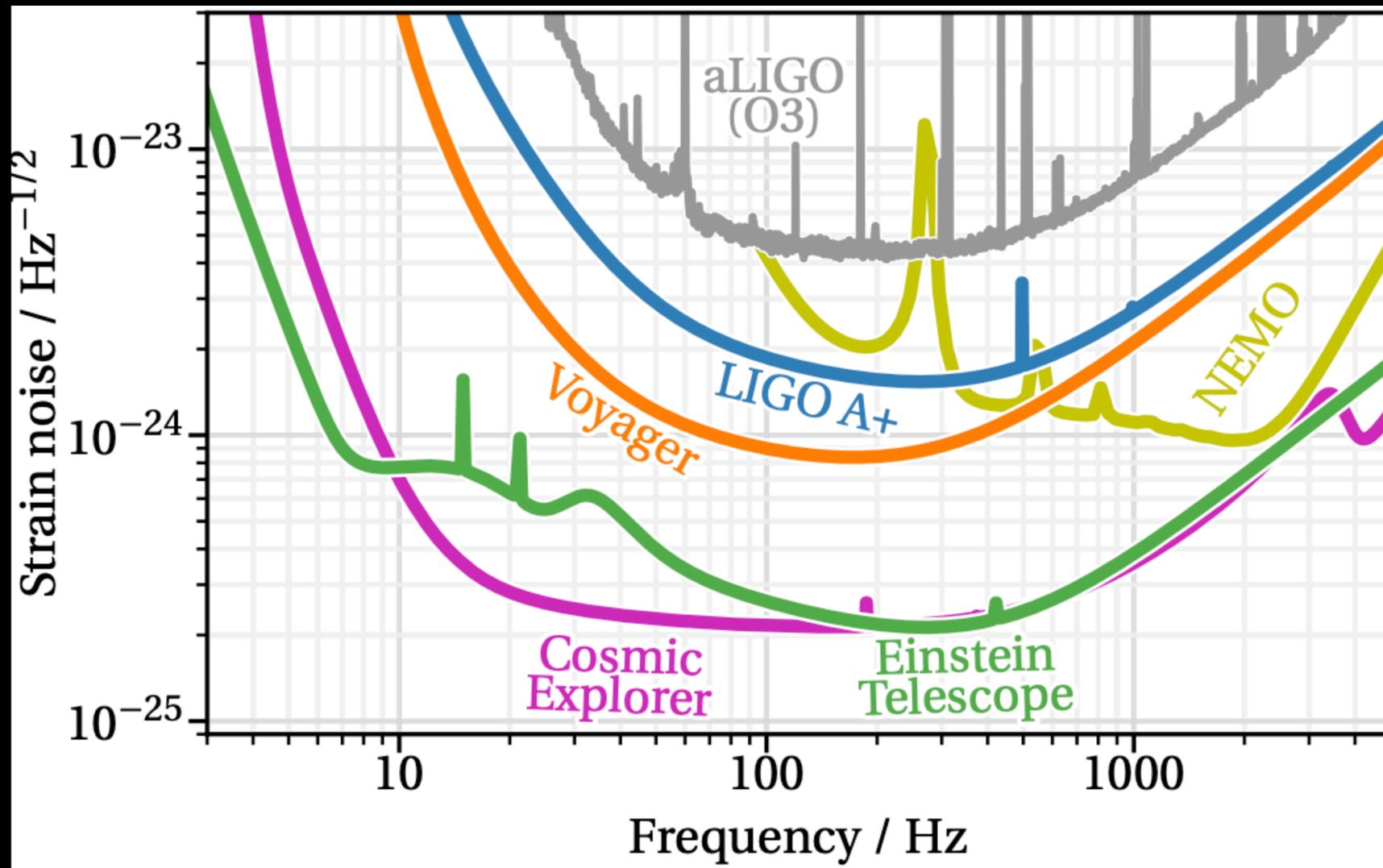


**Einstein Telescope**  
Europe, 10 km de côté

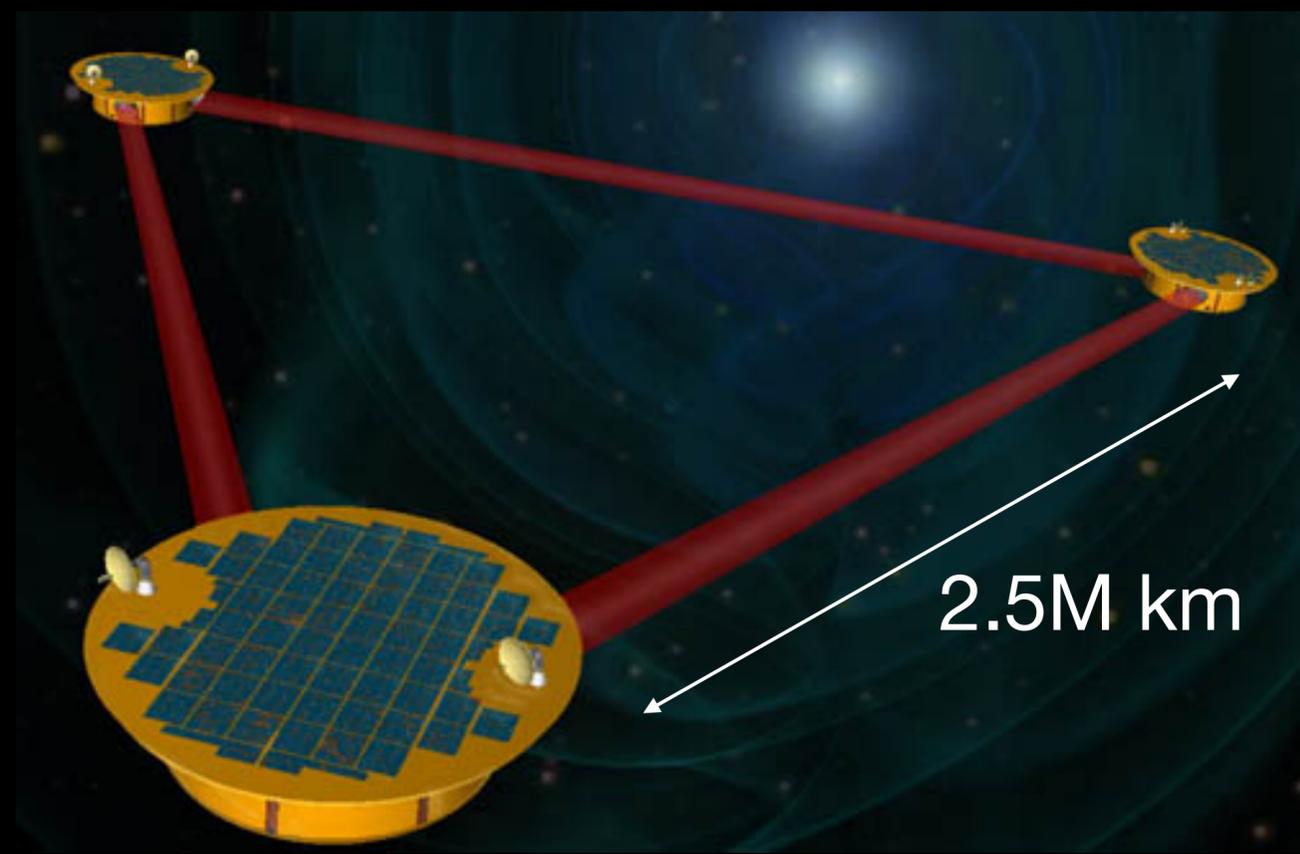


**Cosmic Explorer**  
Etats-Unis, 2 sites, bras de 40 km & 20 km

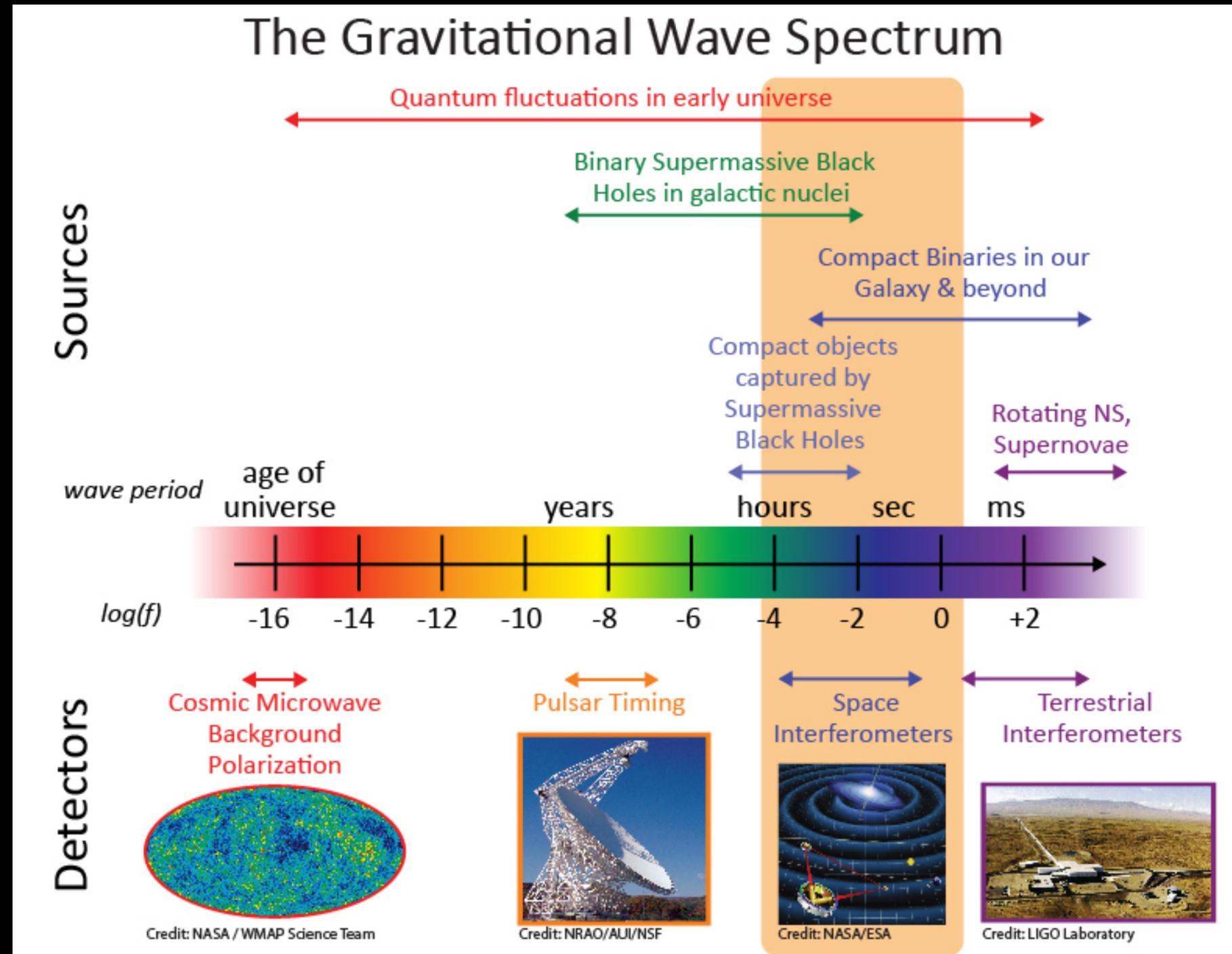
# Einstein Telescope et Cosmic Explorer



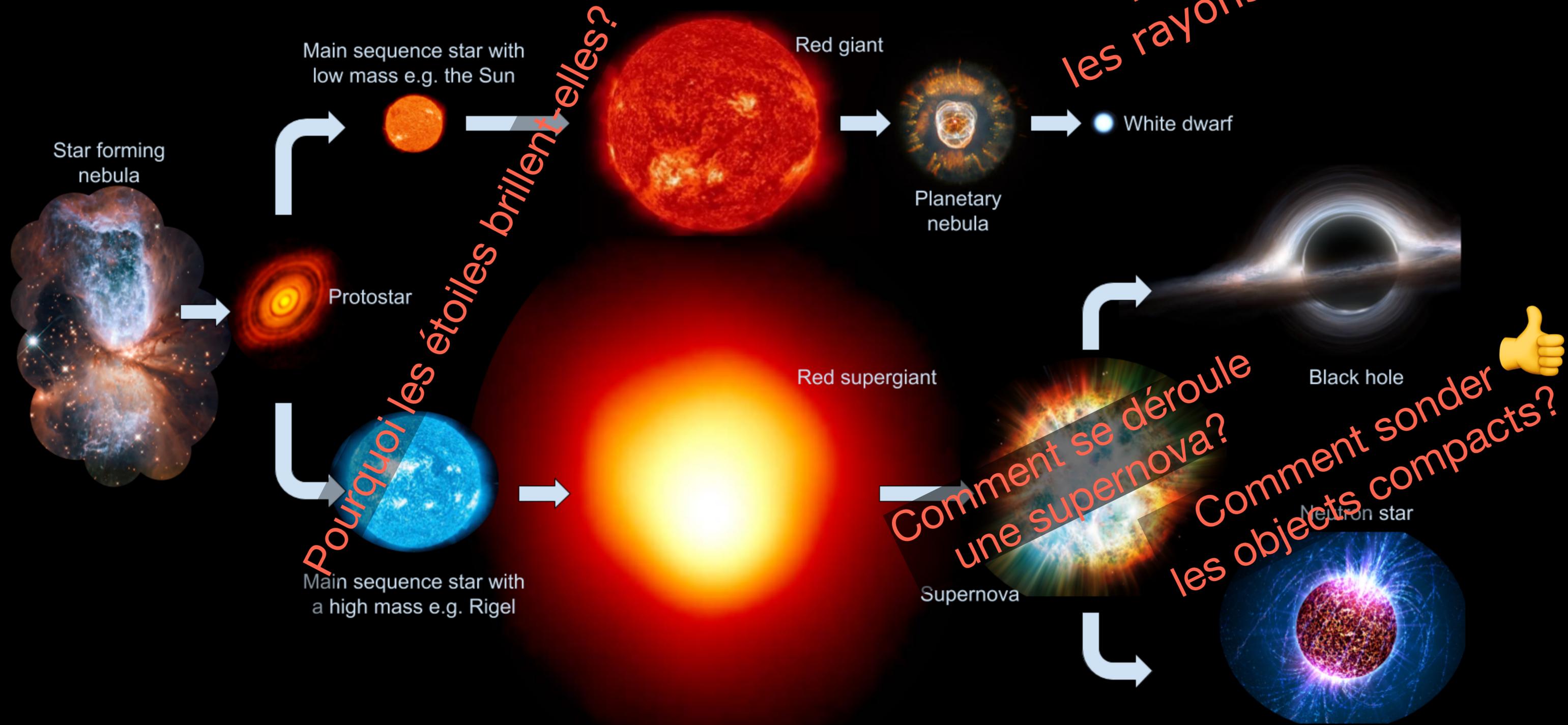
# Laser Interferometer Space Antenna



# Détection d'ondes gravitationnelles: le paysage

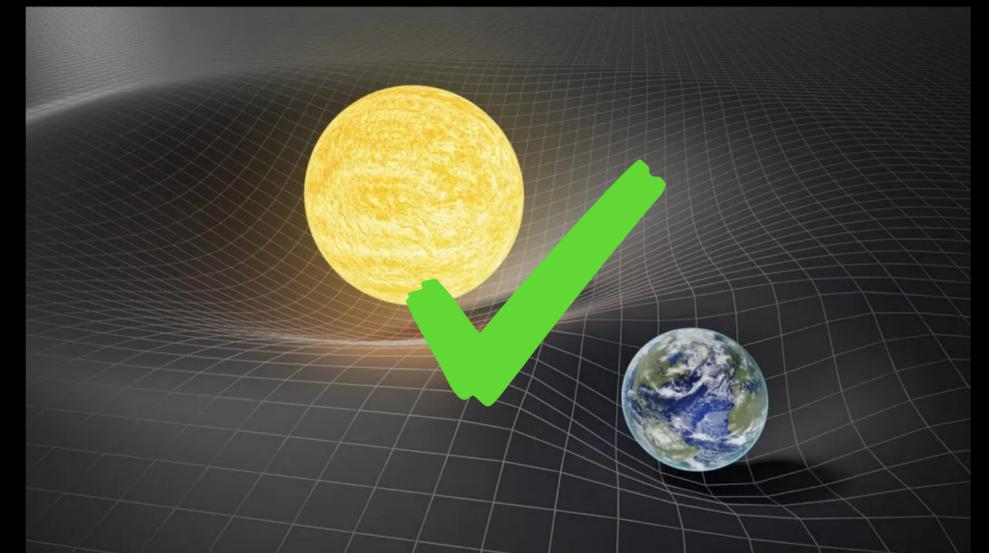


# Les questions restantes...



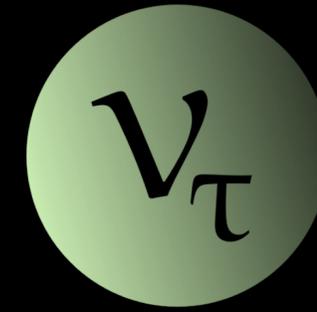
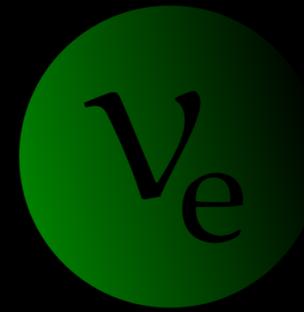
# Le dernier messenger

	mass	charge	spin					
QUARKS	$=2.2 \text{ MeV}c^2$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$	<b>u</b> up	$=1.28 \text{ GeV}c^2$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$	<b>c</b> charm
	$=173.1 \text{ GeV}c^2$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$	<b>t</b> top	$=4.7 \text{ MeV}c^2$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	<b>d</b> down
	$=96 \text{ MeV}c^2$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	<b>s</b> strange	$=4.18 \text{ GeV}c^2$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	<b>b</b> bottom
	$=124.97 \text{ GeV}c^2$	0	0	<b>H</b> higgs	$=0.511 \text{ MeV}c^2$	-1	$\frac{1}{2}$	<b>e</b> electron
					$=105.66 \text{ MeV}c^2$	-1	$\frac{1}{2}$	$\mu$ muon
					$=1.7768 \text{ GeV}c^2$	-1	$\frac{1}{2}$	$\tau$ tau
LEPTONS	$<2.2 \text{ eV}c^2$	0	$\frac{1}{2}$	$\nu_e$ electron neutrino	$=91.19 \text{ GeV}c^2$	0	1	<b>Z</b> Z boson
	$<0.17 \text{ MeV}c^2$	0	$\frac{1}{2}$	$\nu_\mu$ muon neutrino	$=80.39 \text{ GeV}c^2$	$\pm 1$	1	<b>W</b> W boson
	$<18.2 \text{ MeV}c^2$	0	$\frac{1}{2}$	$\nu_\tau$ tau neutrino				
								SCALAR BOSONS
								GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS

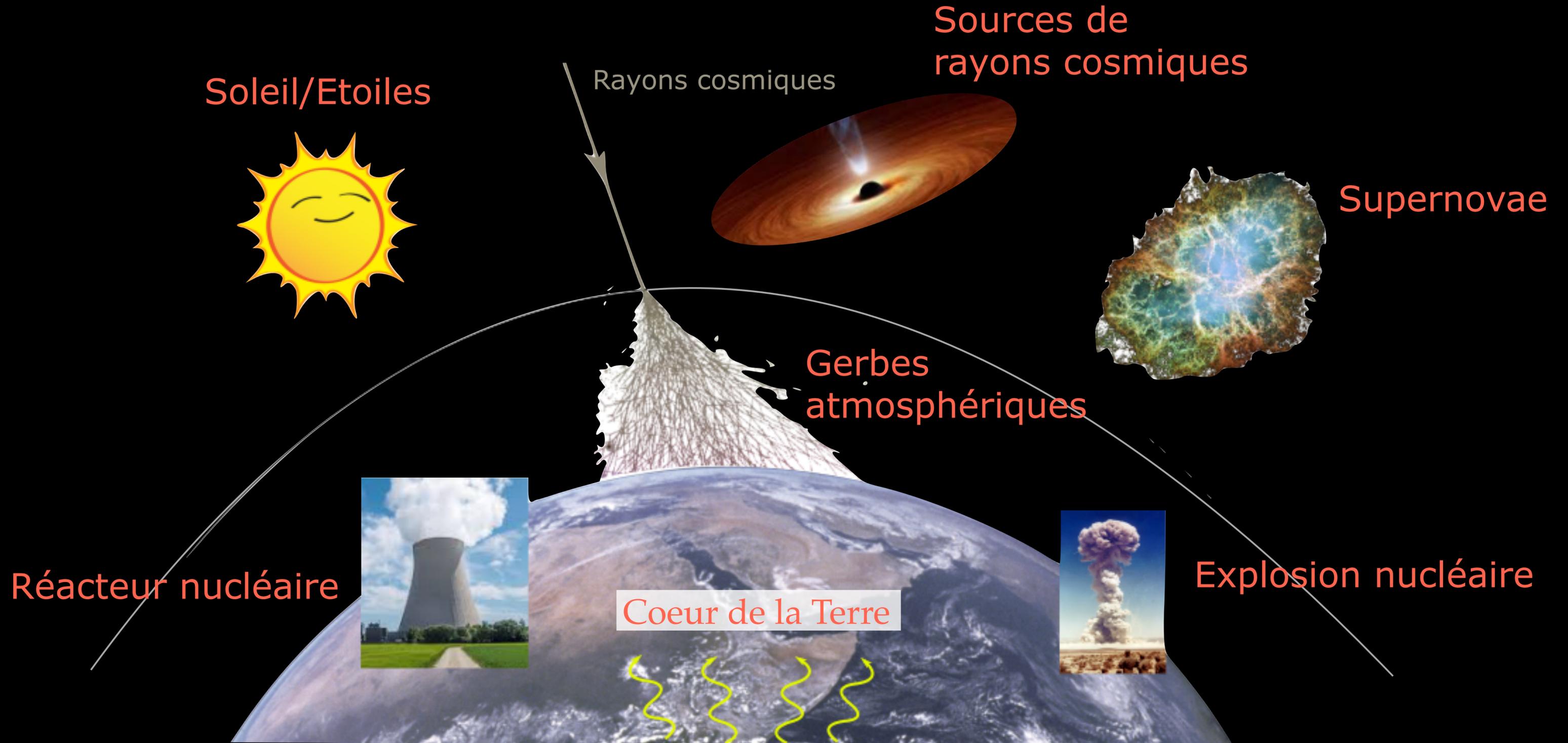


# Les neutrinos

- Particules partenaires des électrons, muons et tau → 3 “saveurs”
- Interagissent via la force nucléaire faible
- Particules produites dans la plupart des interactions nucléaires



# Les sources de neutrinos



# Une particule (quasi-)invisible

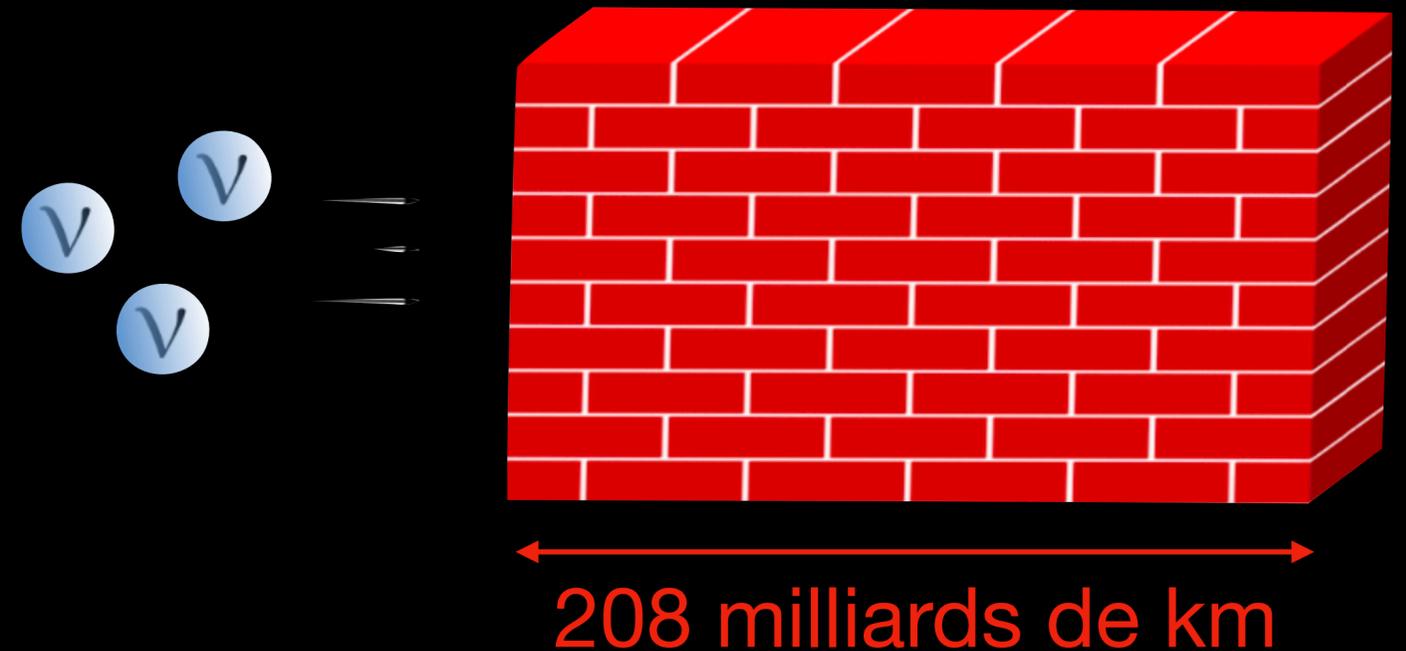
- Section efficace d'interaction

$$\sigma = 0.7 \times 10^{-38} E \text{ (GeV) cm}^2$$

- Libre parcours moyen

$$d = \frac{1}{\text{Nombre d'interactions/m}}$$
$$= \frac{\text{masse d'un nucléon}}{\sigma \times \rho}$$

Neutrinos de 1 MeV dans du plomb:



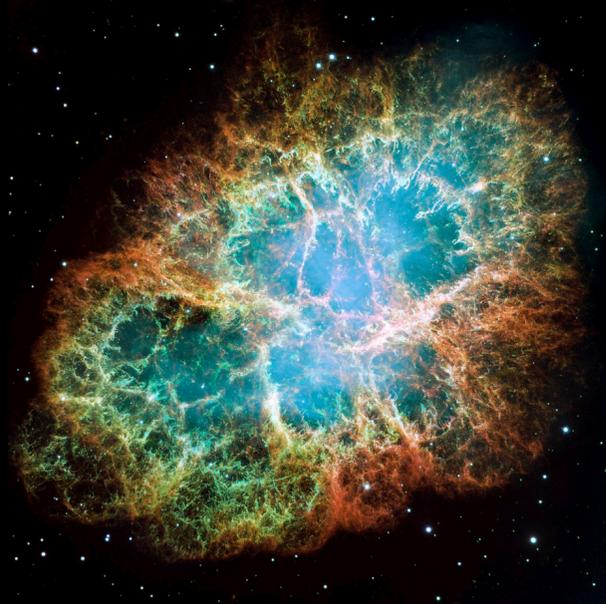
$$d = \frac{1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}}{(7 \times 10^{-42} \text{ cm}^2) \times (11400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3})}$$

# Un scanner pour l'Univers

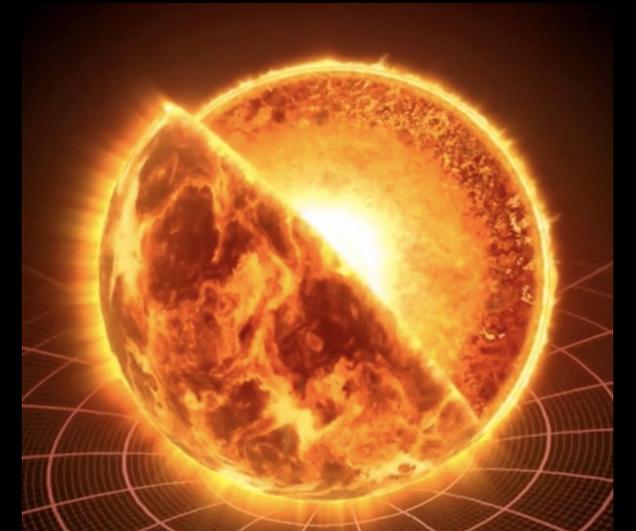
Trouver les sources  
de rayons cosmiques



Sonder les supernovae



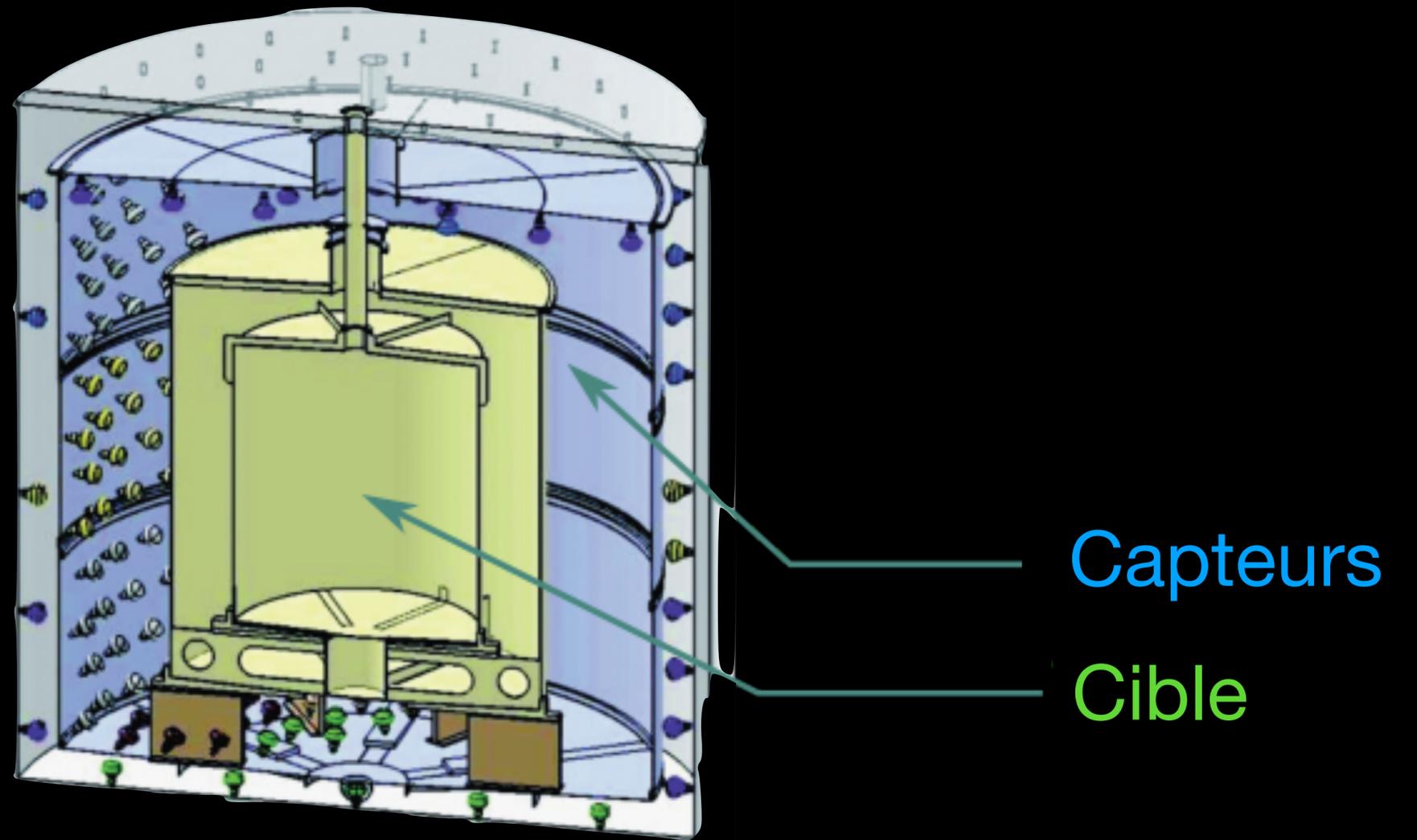
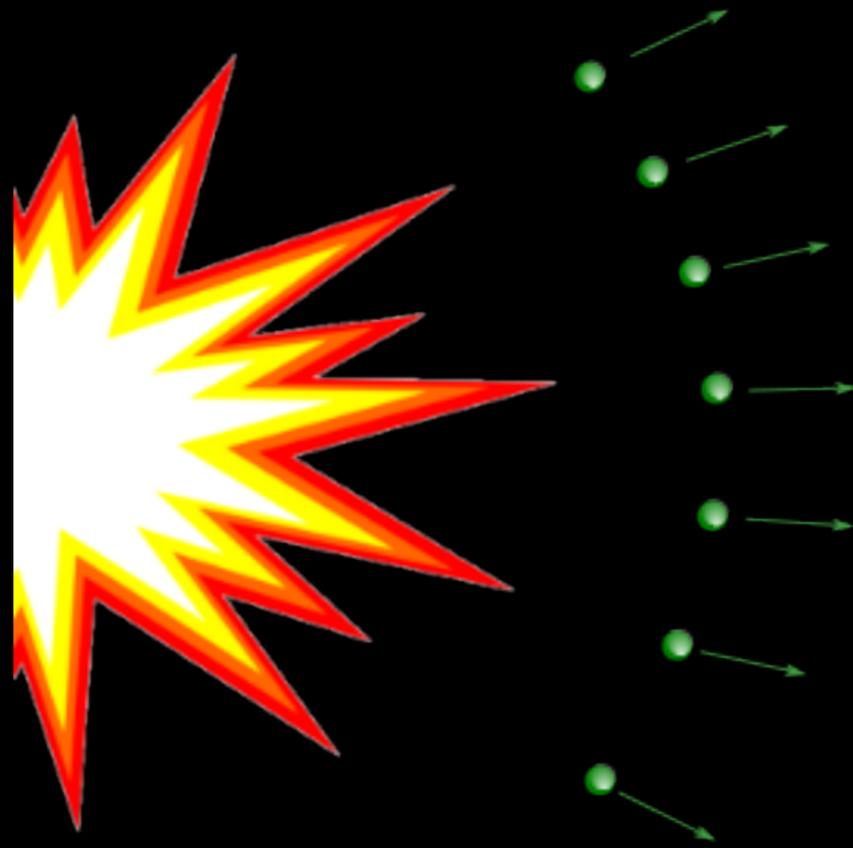
Explorer le coeur  
des étoiles



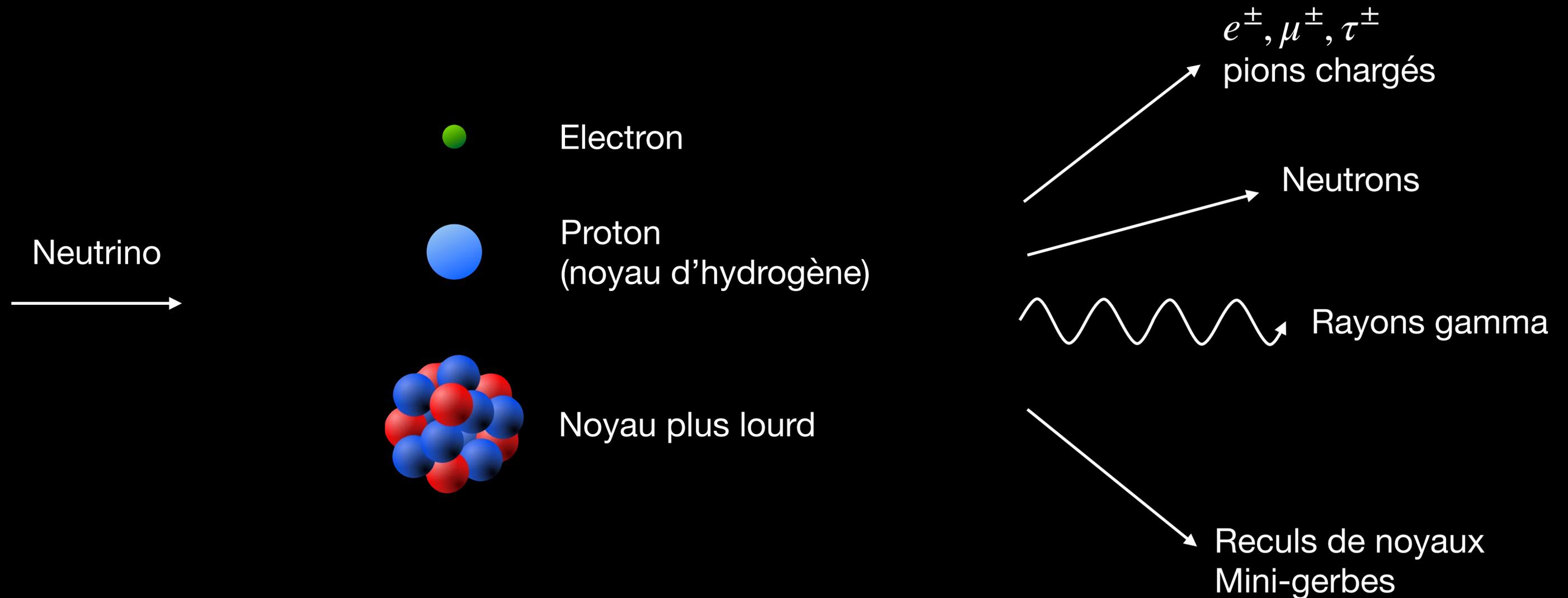
# Détection de particules (quasi-)indétectables

## Tutoriel

Source

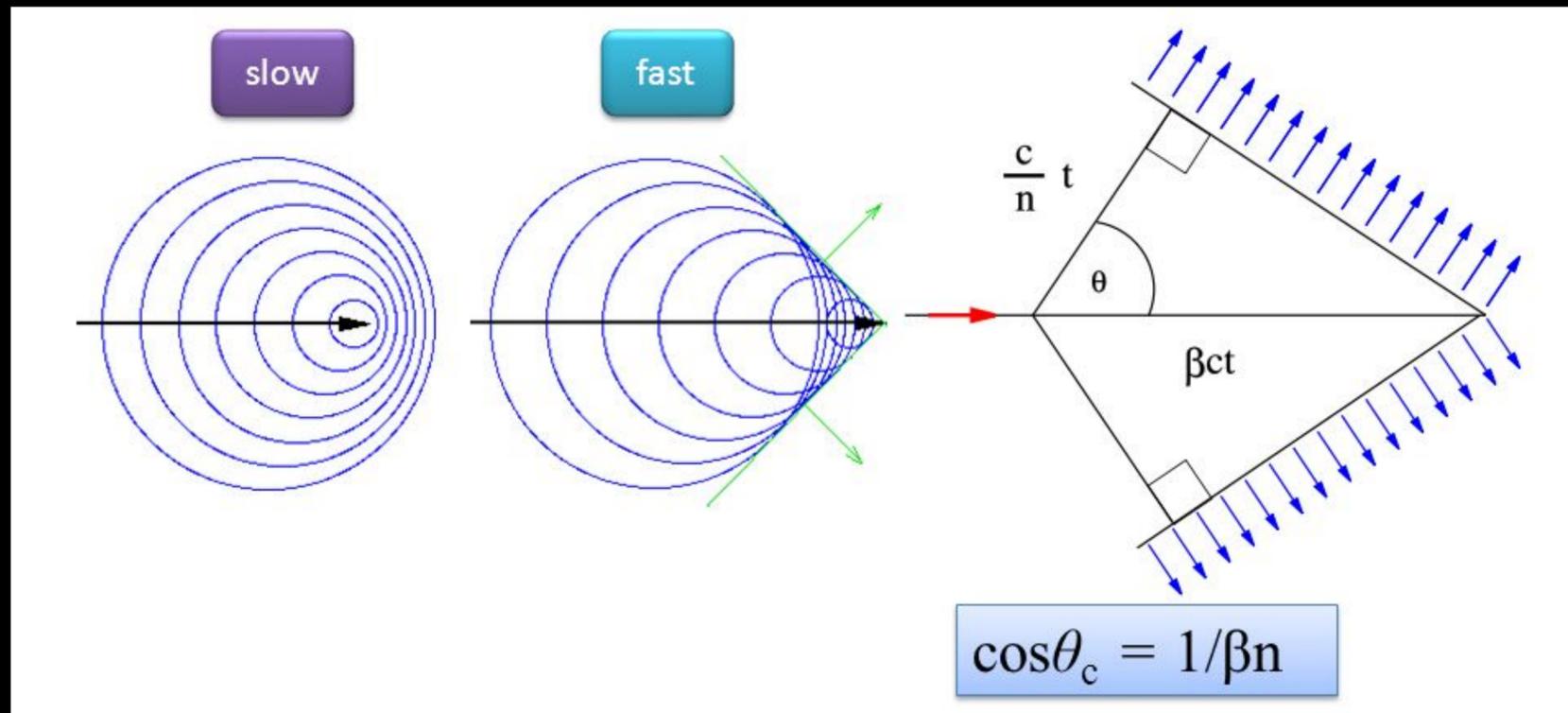
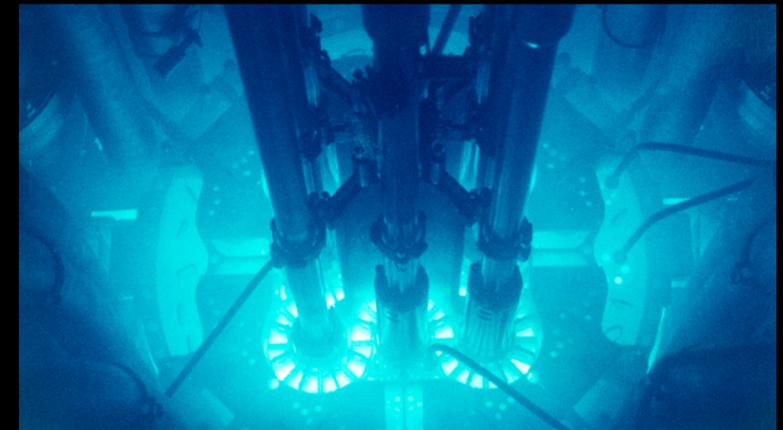
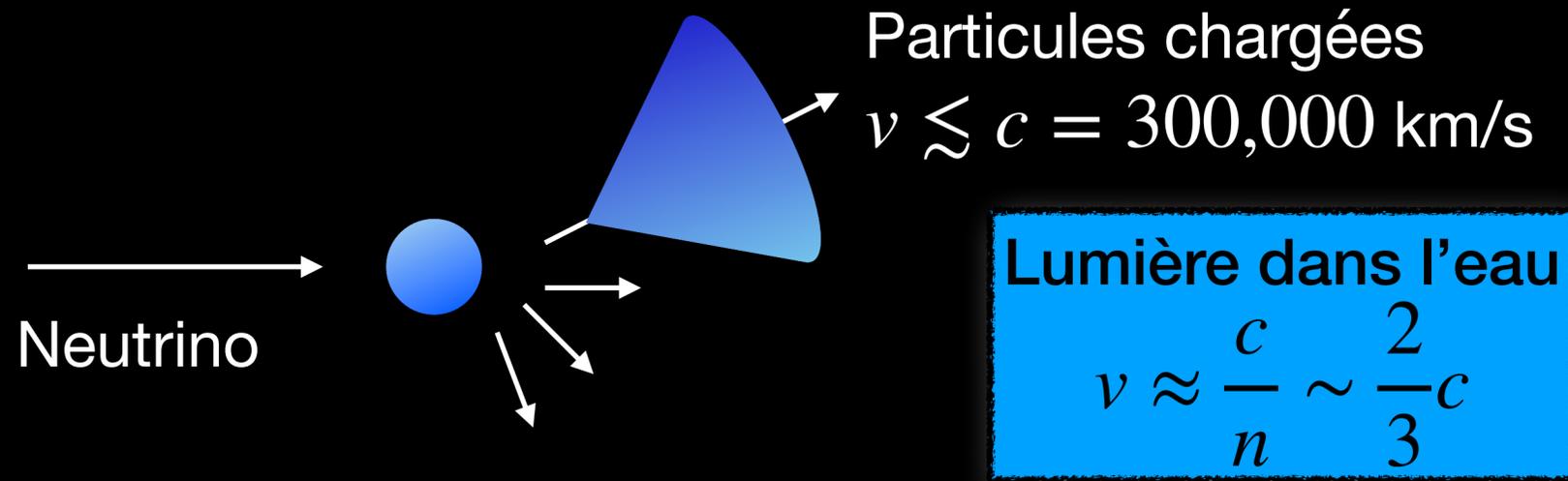


# Cible de détection et signatures d'interaction



Milieu riche en hydrogène, disponible en grande quantité, transparent?

# Voir les interactions: l'effet Cherenkov



# Détecter les neutrinos: dernière étape?

- Cuve d'eau + capteurs de lumière  
→ détecteur de particules!
- Principe des cuves du  
télescope Auger

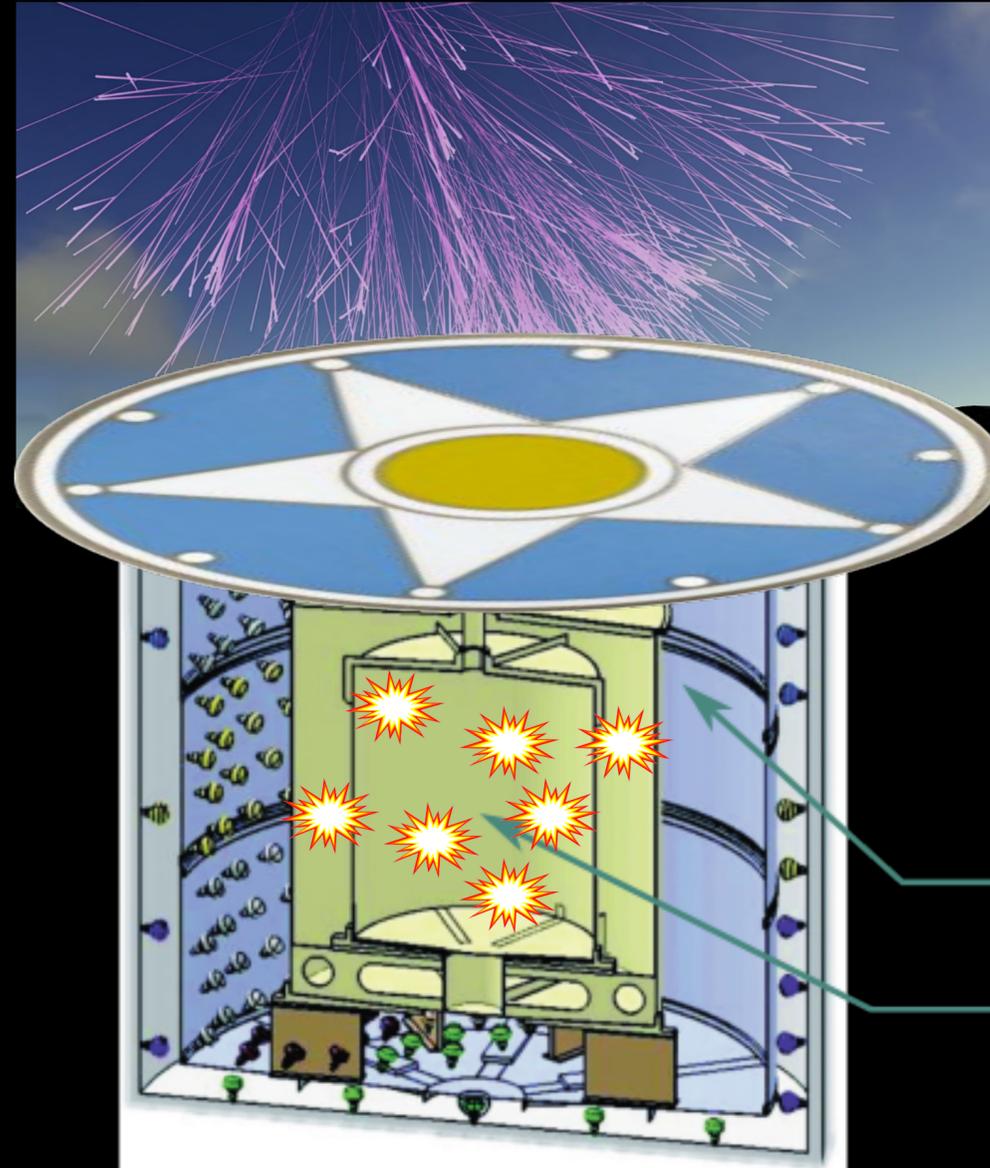
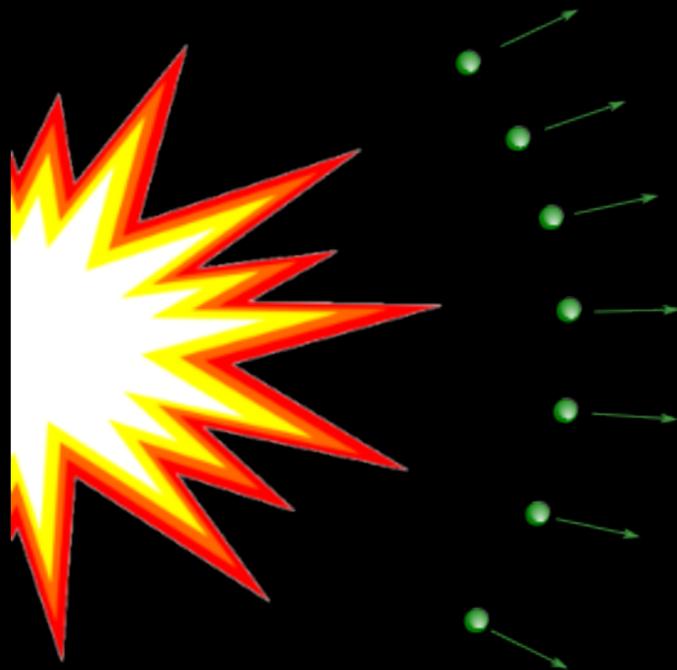


**Photomultiplicateurs**

# La pièce manquante: bloquer les rayons cosmiques

Enterrer le detector pour que seuls les neutrinos l'atteignent

Source

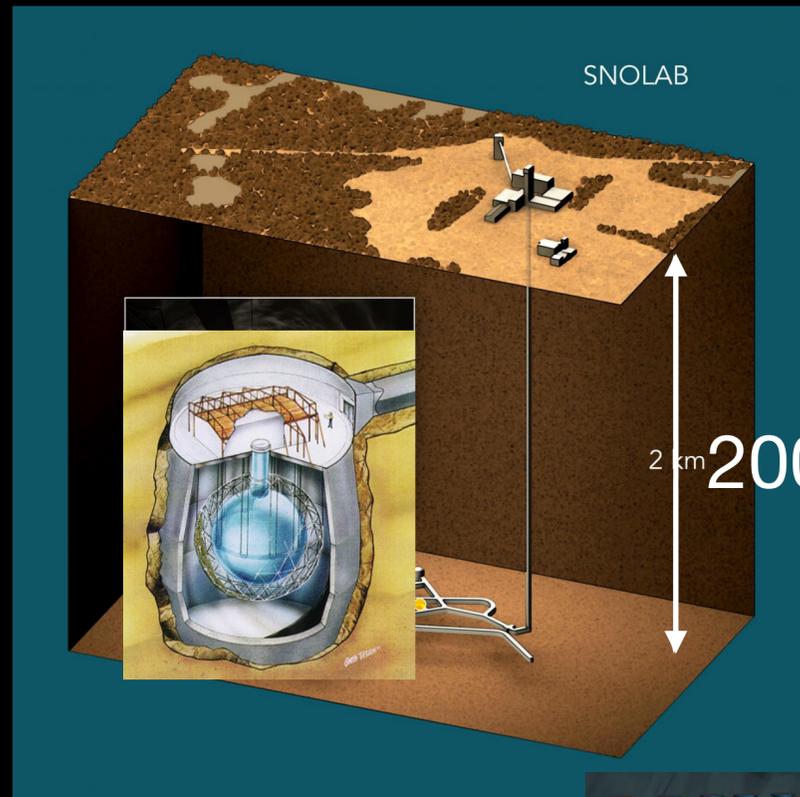


Gerbes atmosphériques

Capteurs

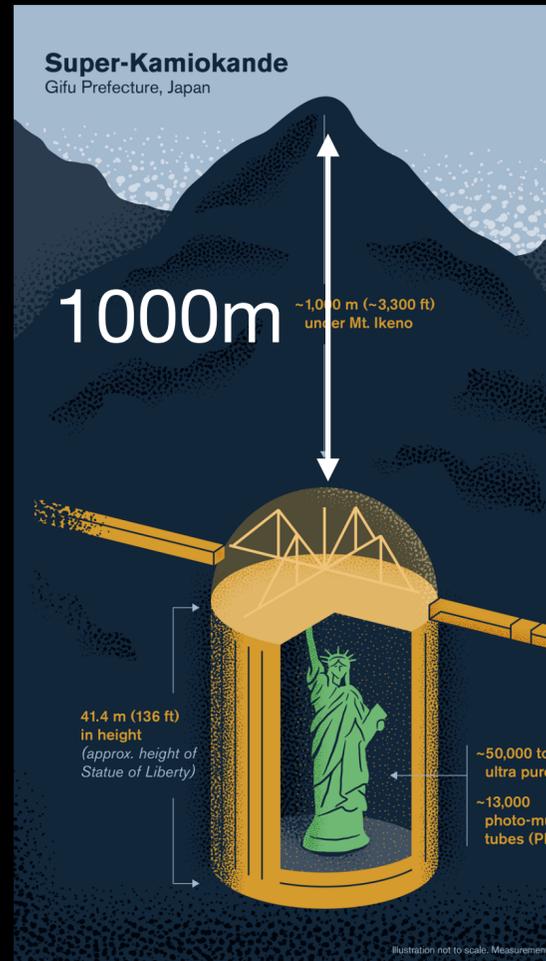
Cible

# Exemples de détecteurs de neutrinos

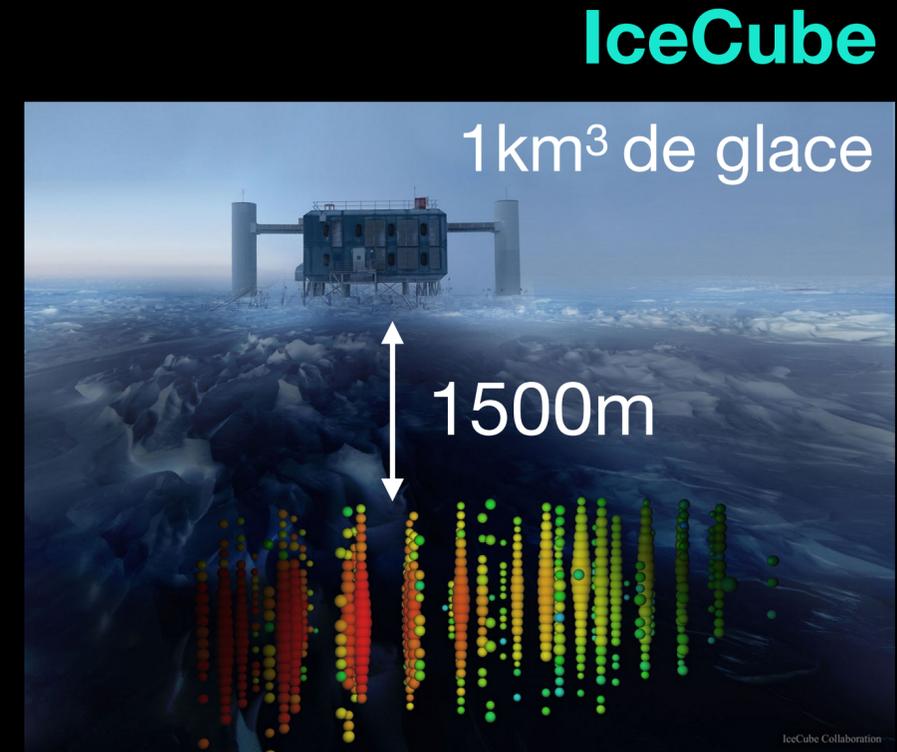


**SNO**  
1000T  
Eau lourde

2 km 2000m



**Super-Kamiokande**  
50,000T d'eau



**KM3NeT**



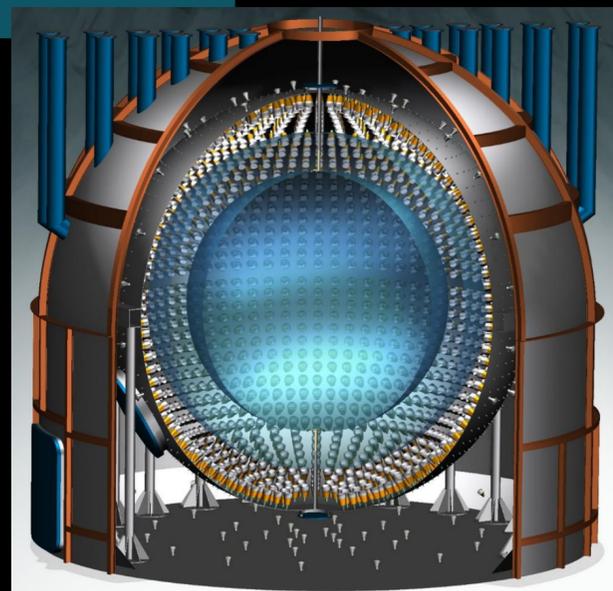
2500-3500m de profondeur

**Borexino**

278T

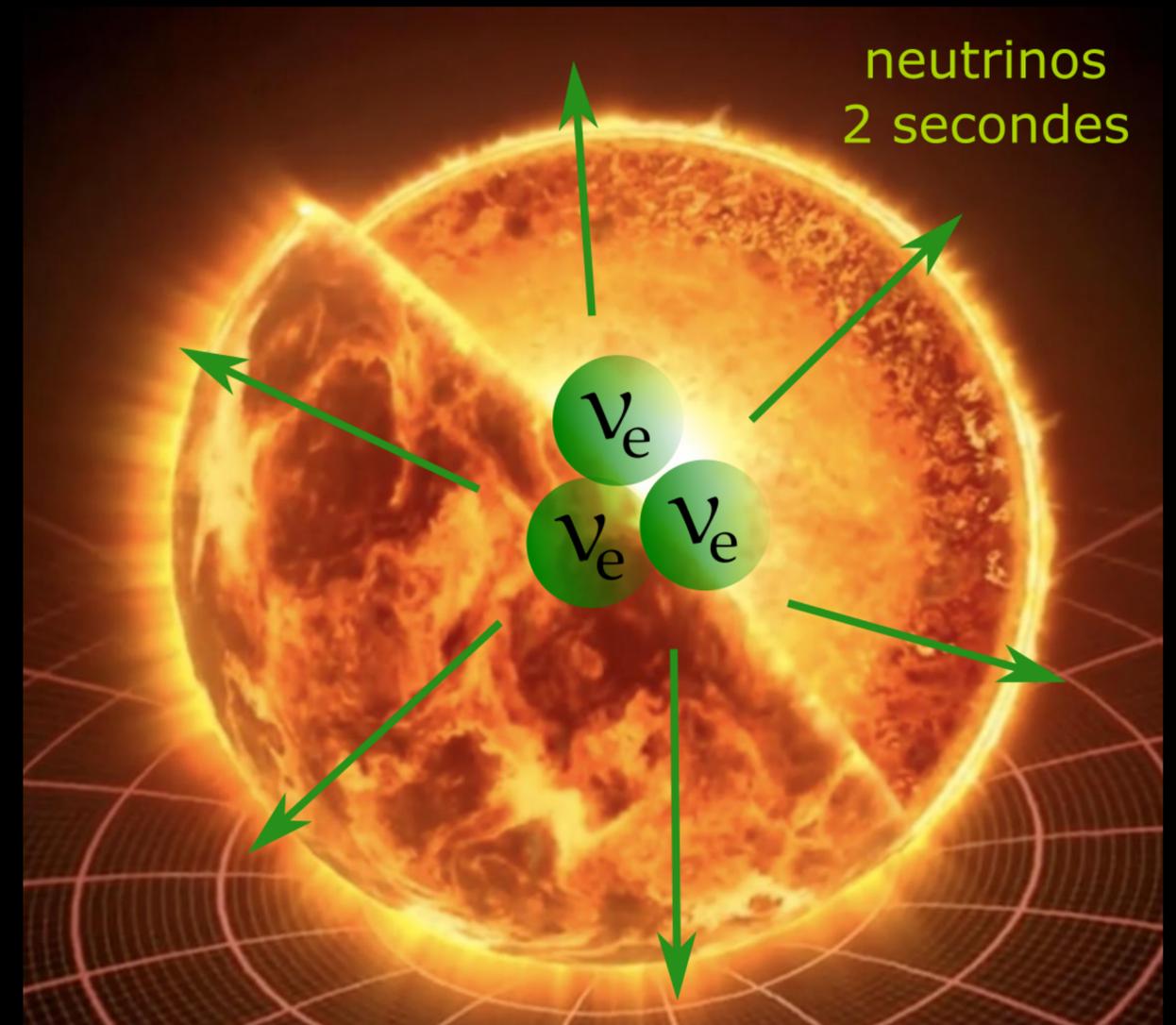
2007-2021

Profondeur: 1400 m



# Astrophysique des neutrinos: le Soleil

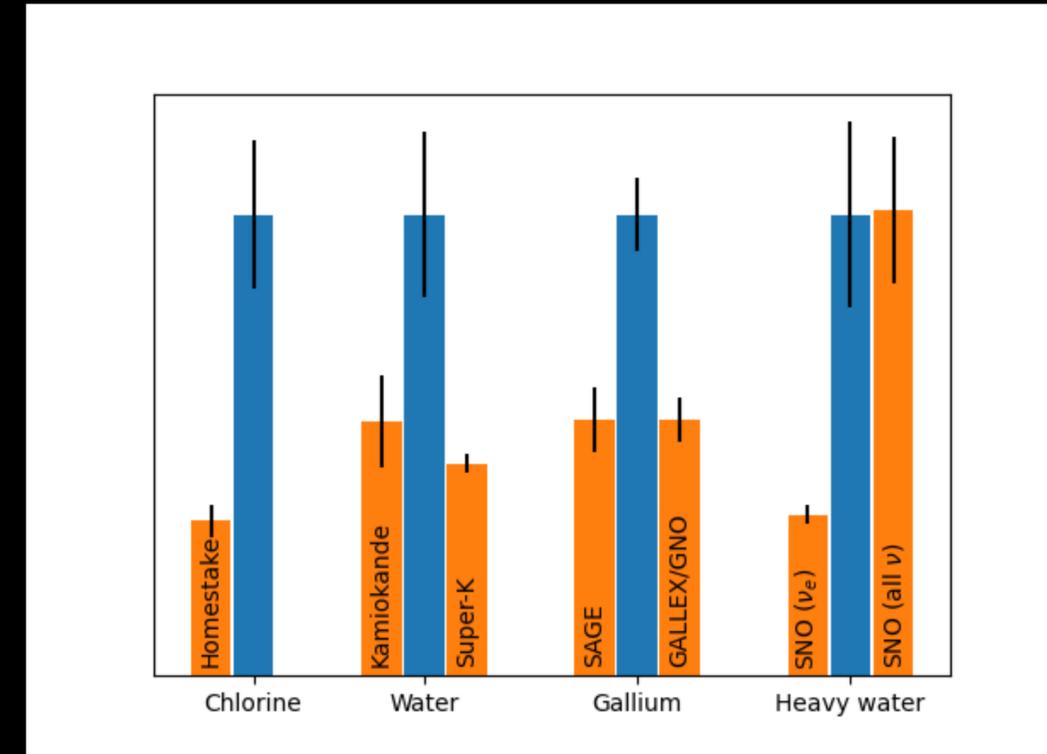
- Pourquoi les étoiles brillent-elles?  
**Hypothèse: fusion nucléaire dans leur coeur**
- Identifier les produits de fusion?  
**Rayons gamma** → 100,000 ans pour sortir  
**Neutrinos** → 2s, en ligne droite
- Les spectres de neutrinos (1-20 MeV) permettront d'identifier tous les processus de fusion!



# L'expérience Homestake (et ses conséquences...)



$\nu_e$



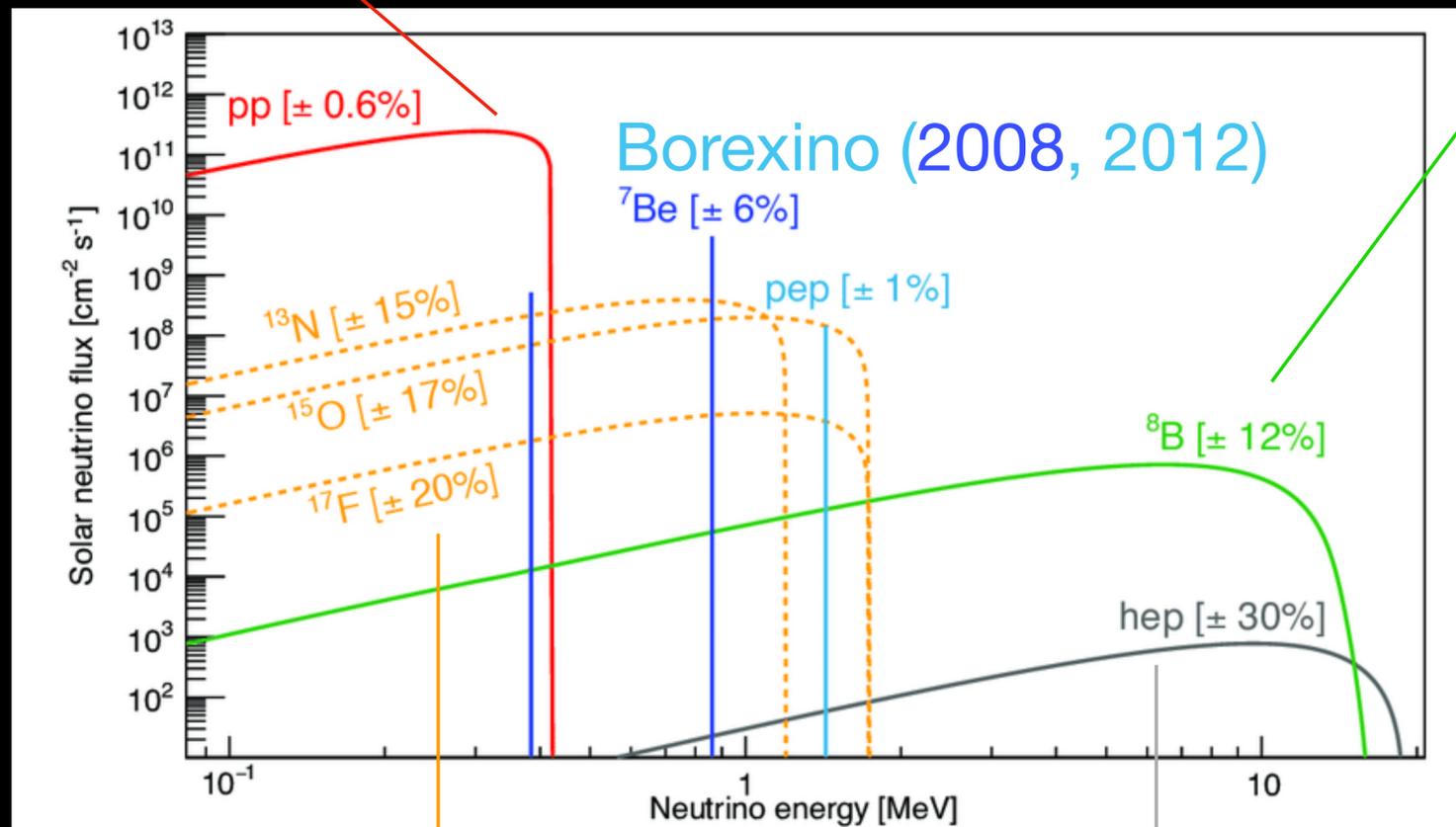
- ❖ R. Davis, mine de Homestake (USA), 1970-1994
- ❖ 380T de tétrachlorure de carbone, 1478m sous terre
- ❖ 2/3 du flux prédit de neutrinos est "perdu"! Que se passe t'il?

# Sonder le coeur du soleil avec les neutrinos

## Quelques émotions fortes et deux prix Nobel plus tard...

Gallex, SAGE (1992-94)

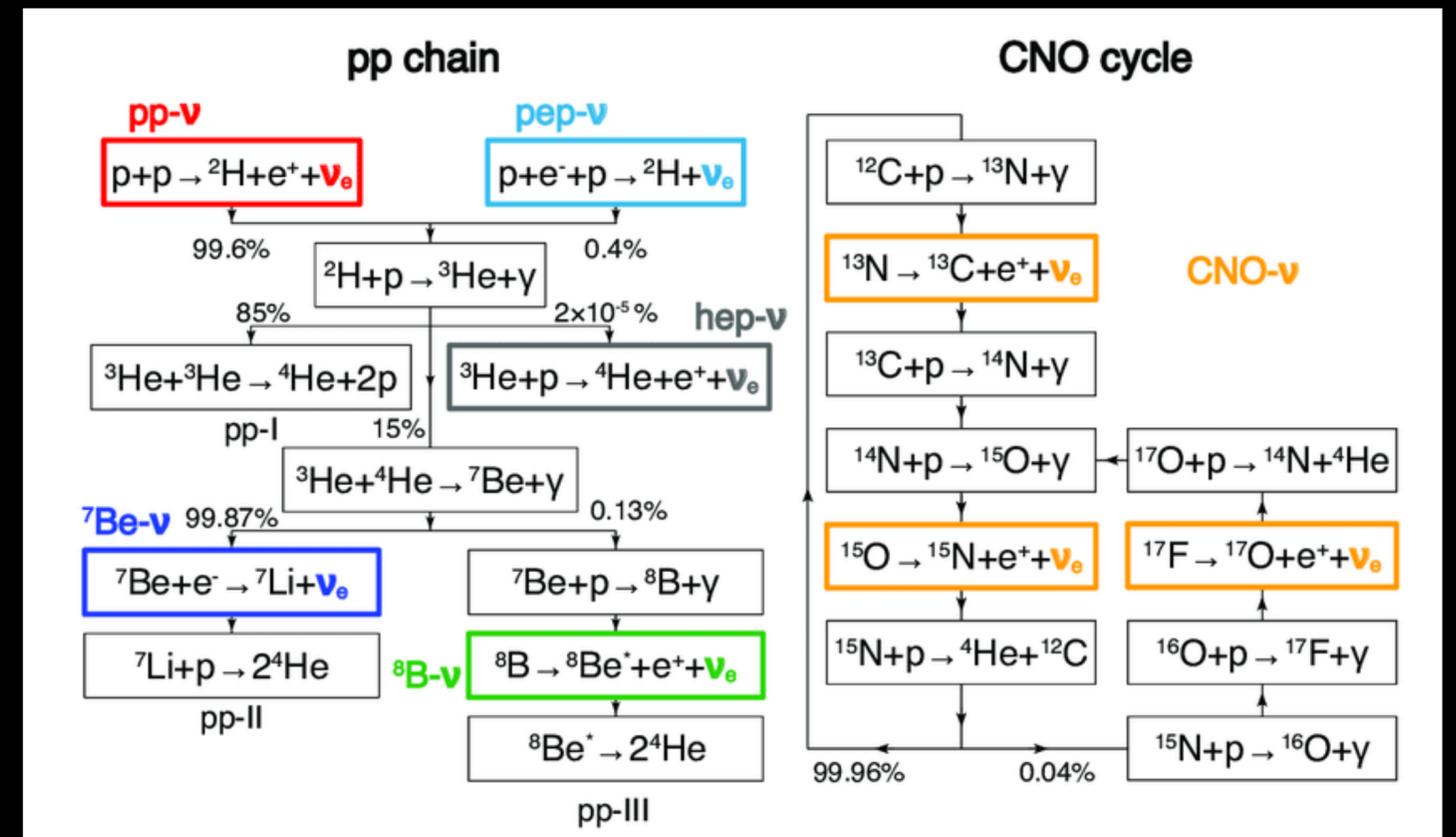
Homestake (R. Davis)



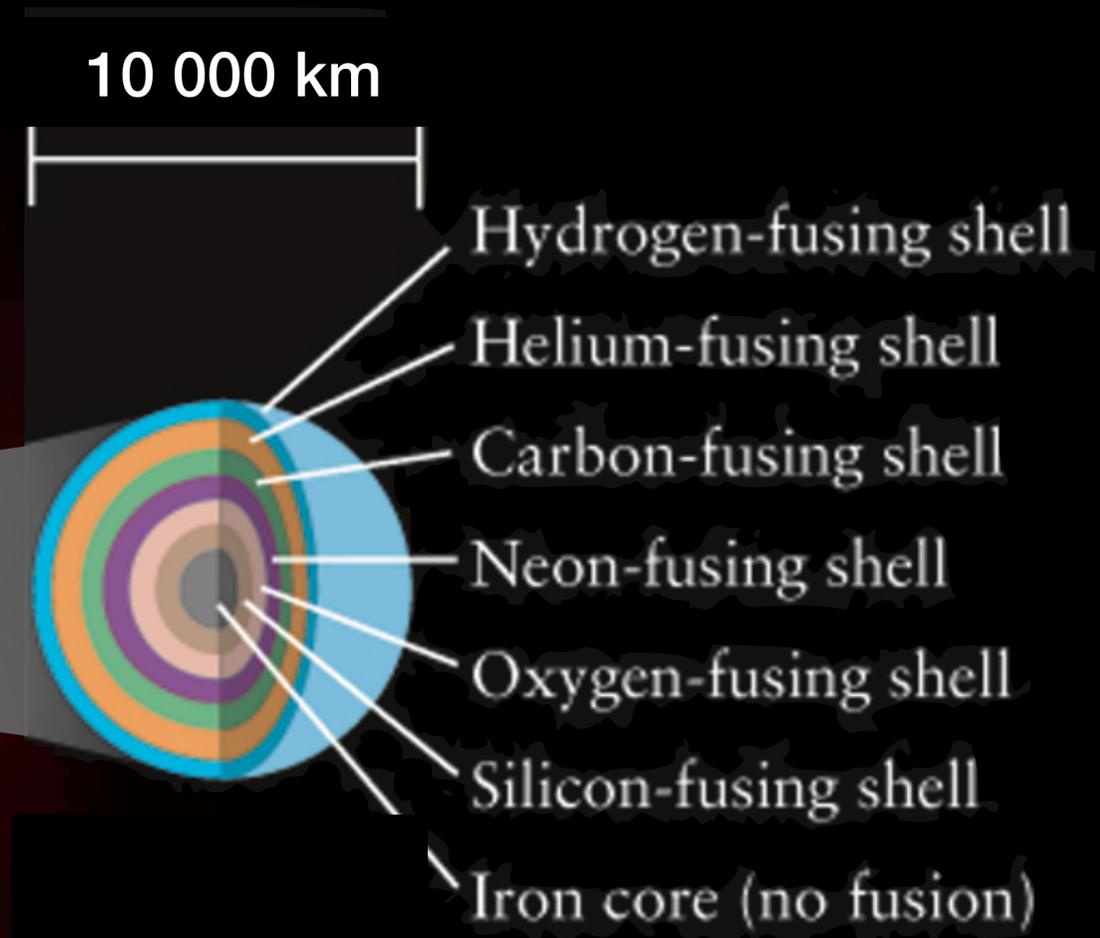
Borexino (2008, 2012)

Borexino (2020)

Encore non détecté!



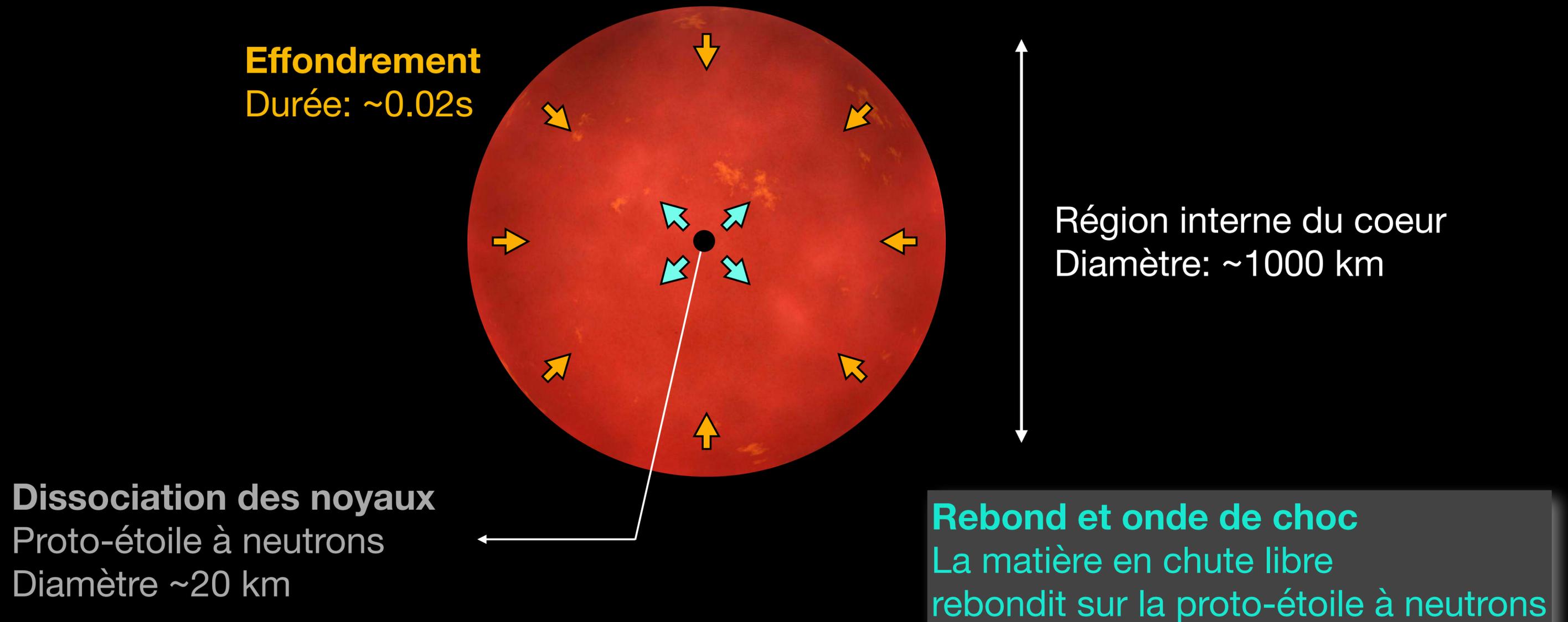
# Etapes de fusion et fin de vie des étoiles



**Red giant**  
**> 8 solar masses**

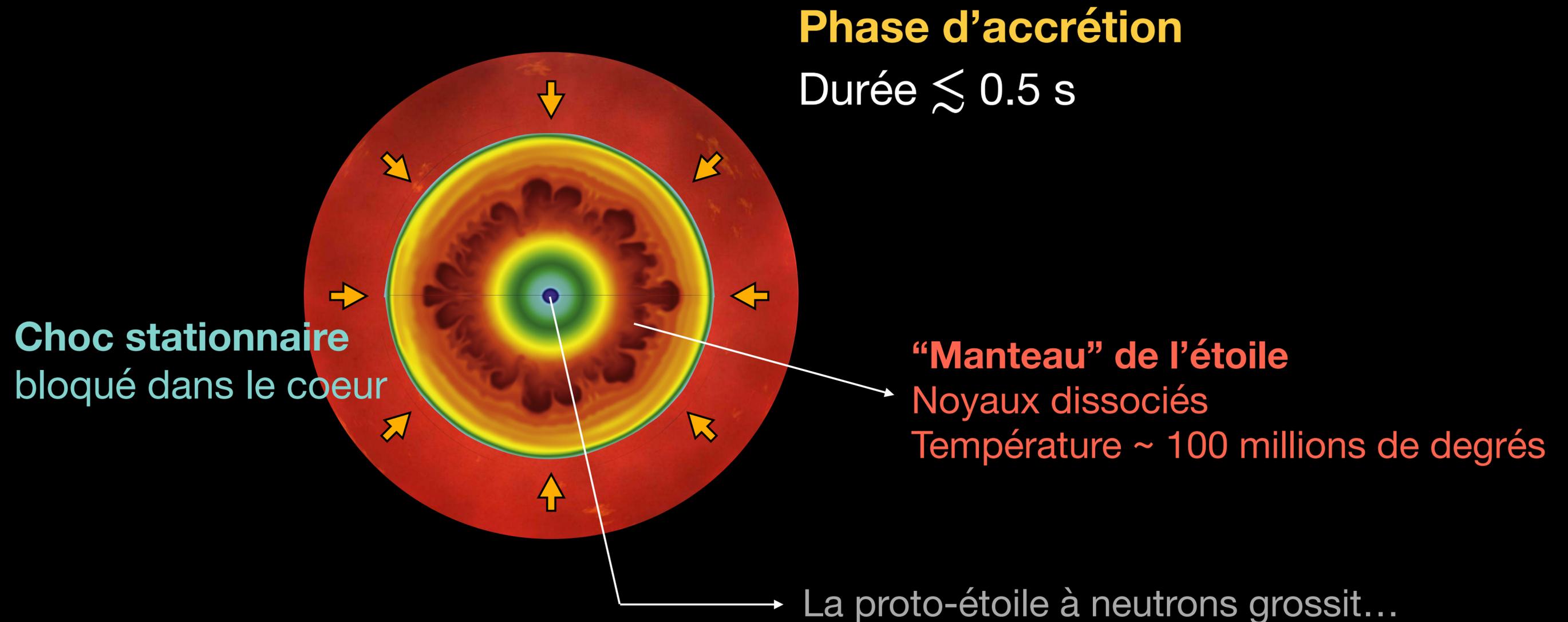
# Le déroulement d'une supernova

## Etape 1: Effondrement du coeur de l'étoile



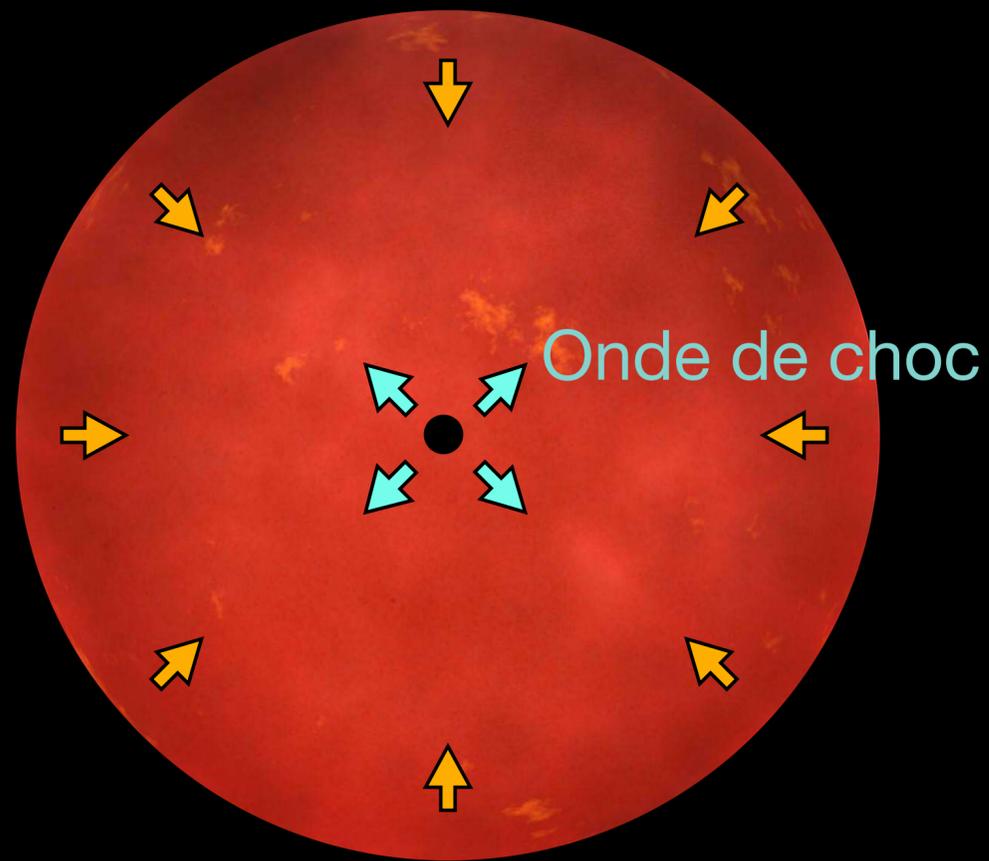
# Le déroulement d'une supernova

## Etape 2: freinage du choc et continuation de l'effondrement



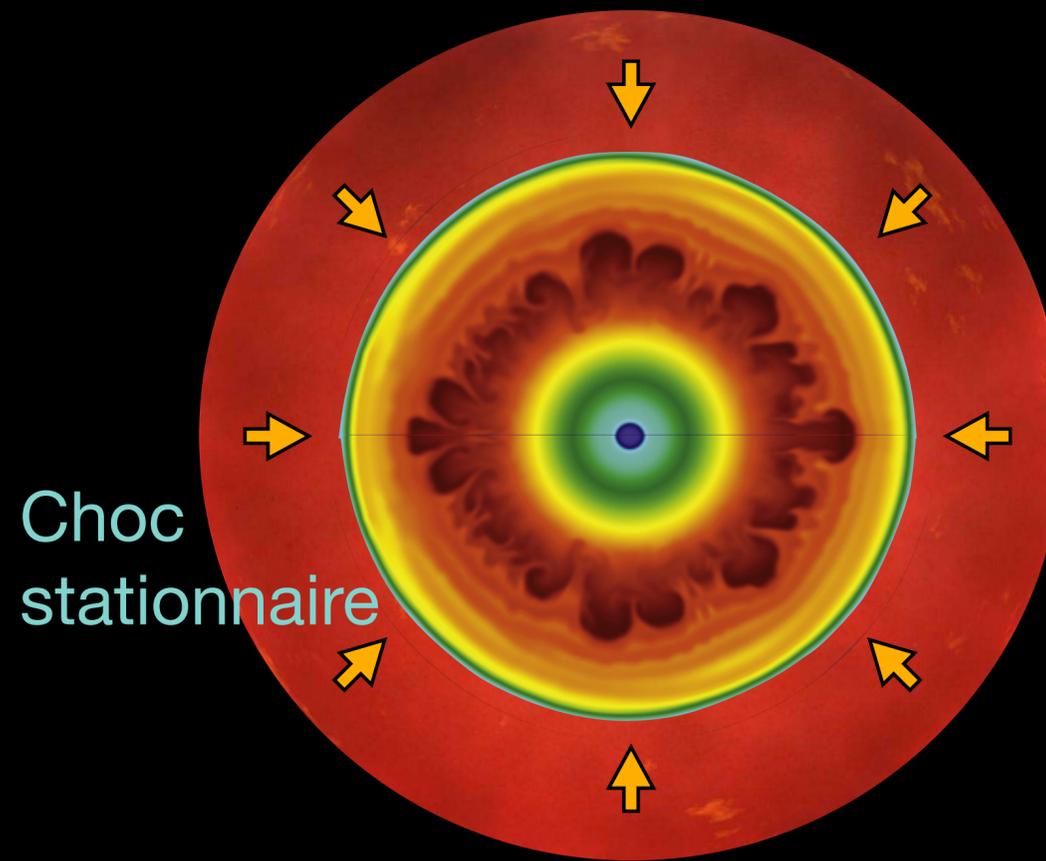
# Issue de la supernova

Un chaînon manquant



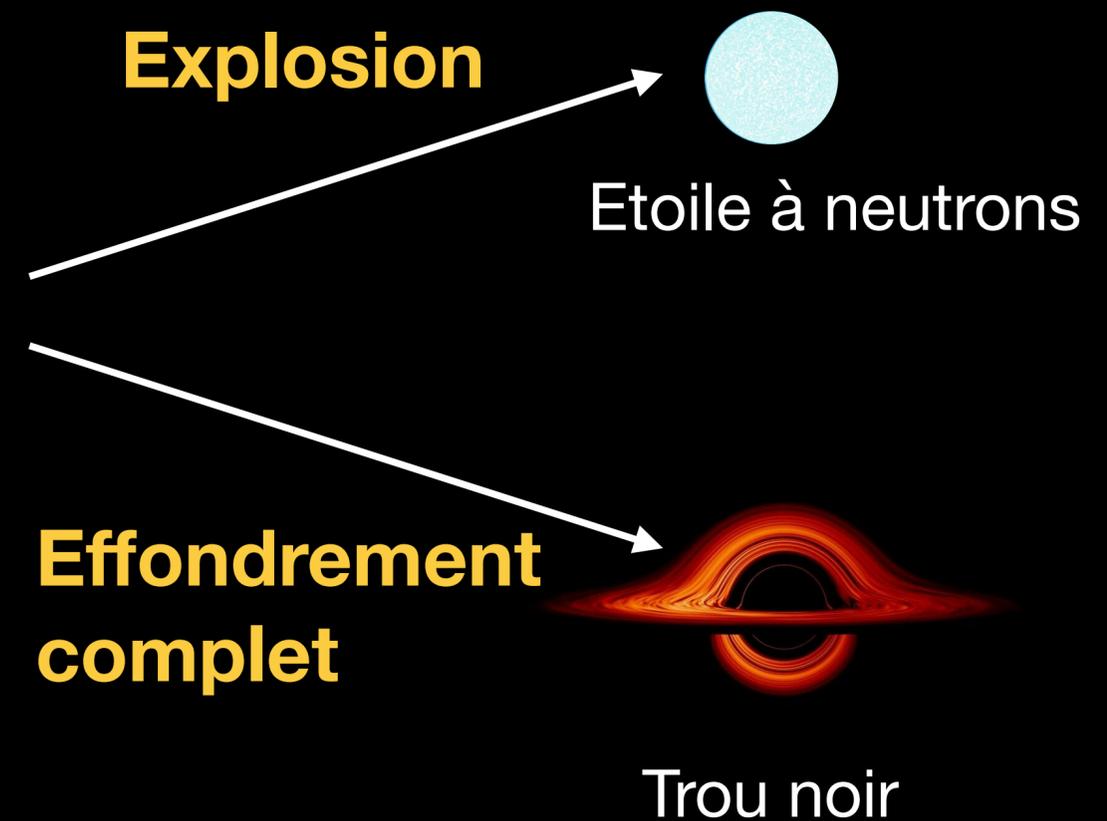
**Effondrement et rebond**

$\mathcal{O}(10)$  ms



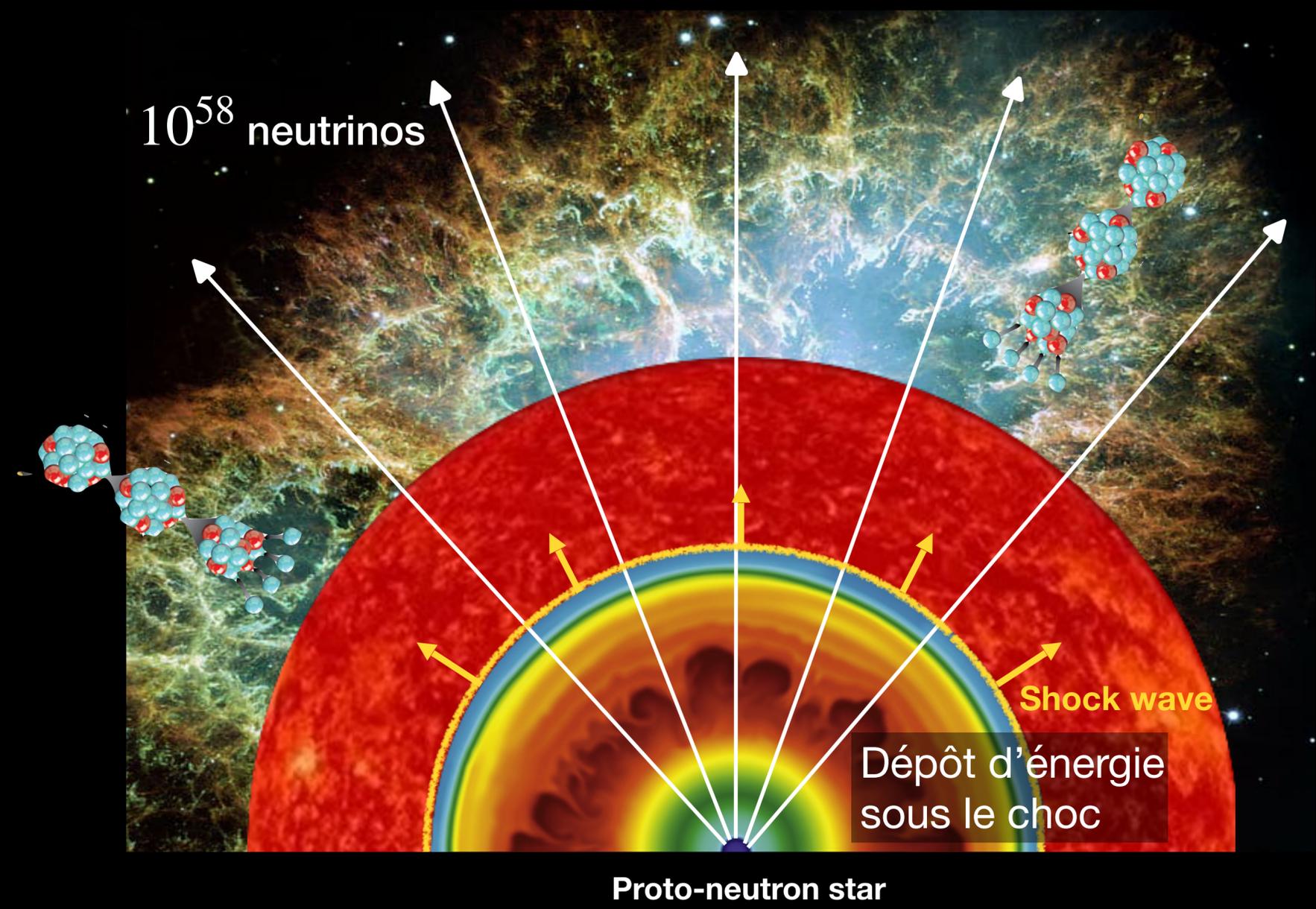
**Accrétion**

$\mathcal{O}(100)$  ms



# Comprendre les explosions de supernovae

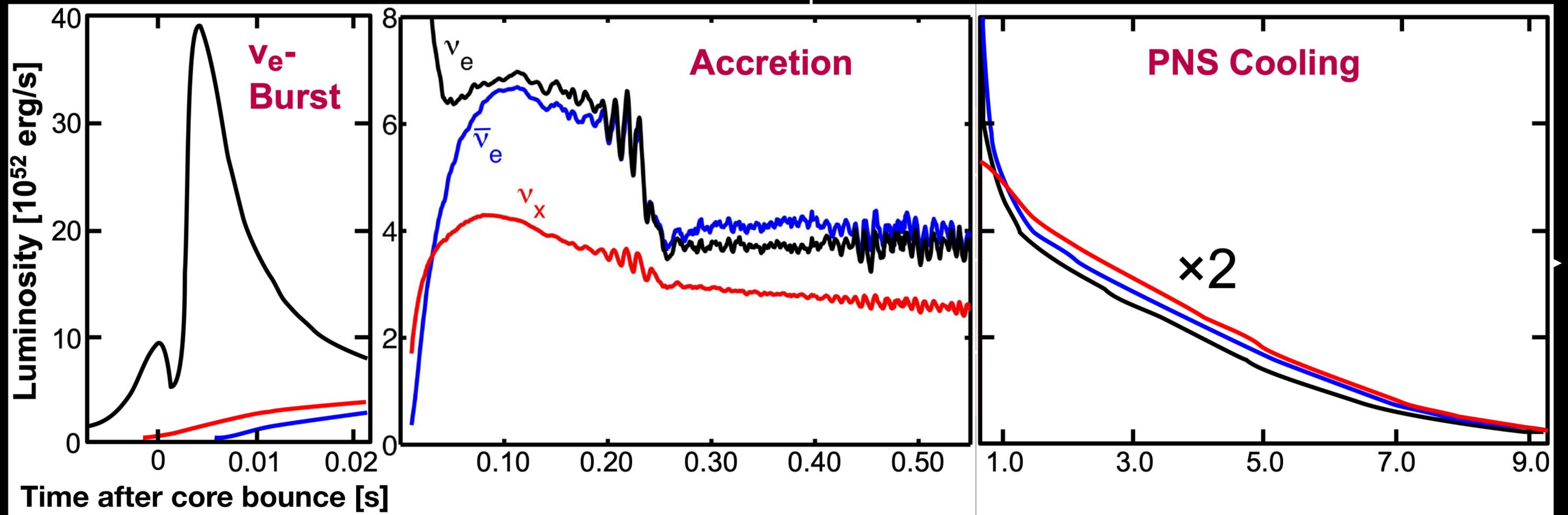
Hypothèse: nouveau départ du choc grâce...aux neutrinos!



# Détecter les neutrinos de supernovae

## Les neutrinos comme “boîte noire” de l'étoile

H.T. Janka, [arXiv:1702.08713]



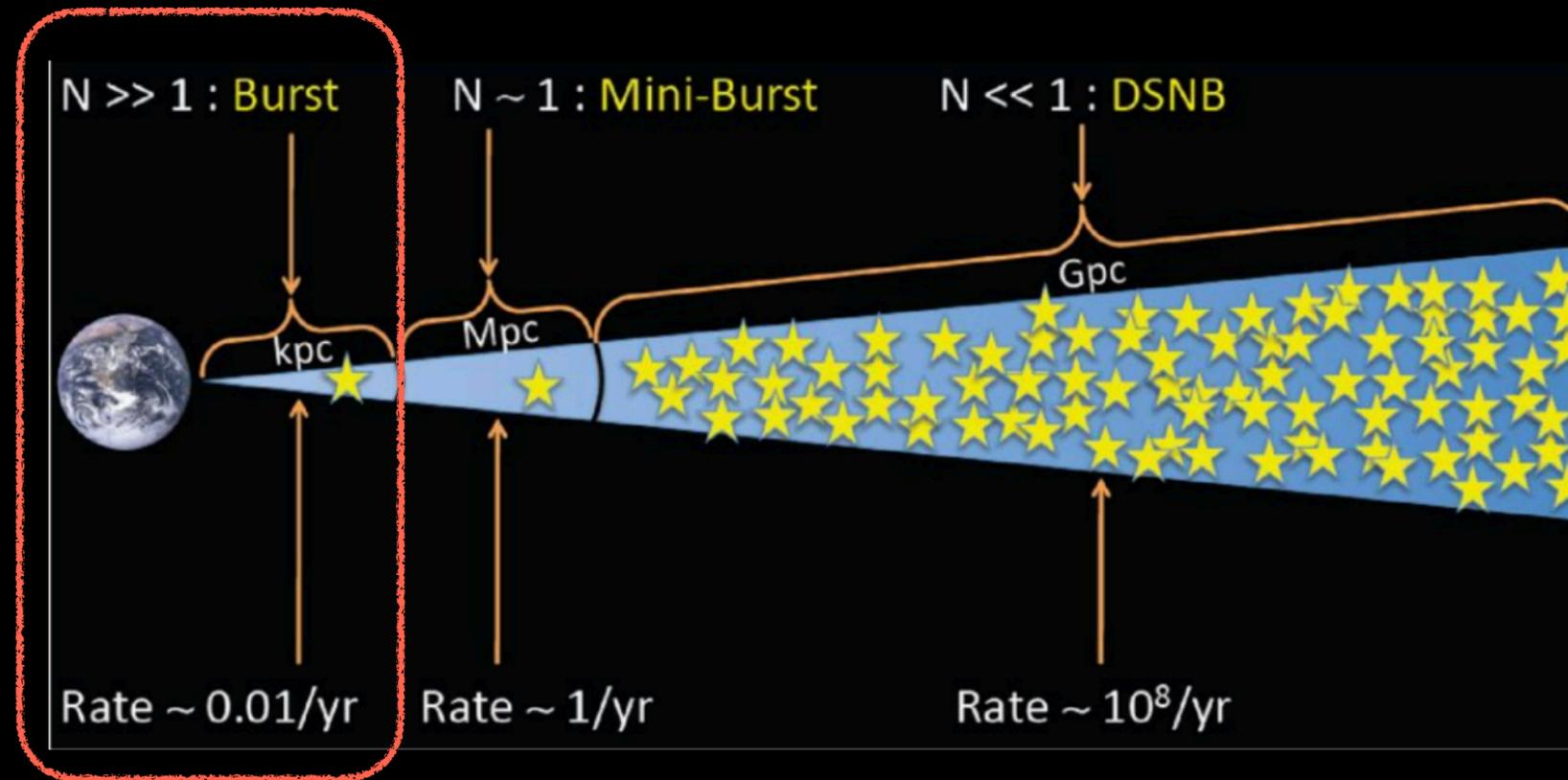
**Rebond du choc**  
Dissociation des noyaux  
 $p + e^- \rightarrow \nu_e + n$

**Accrétion**  
 $\gamma \rightarrow e^+ e^-$   
 $e^\pm$  capturés, produit  $\nu_e, \bar{\nu}_e$

**Refroidissement de l'étoile à neutrons**  
Interactions de courant neutre  
 $n \rightarrow \nu \bar{\nu} + n$

# Observer les neutrinos de supernovae

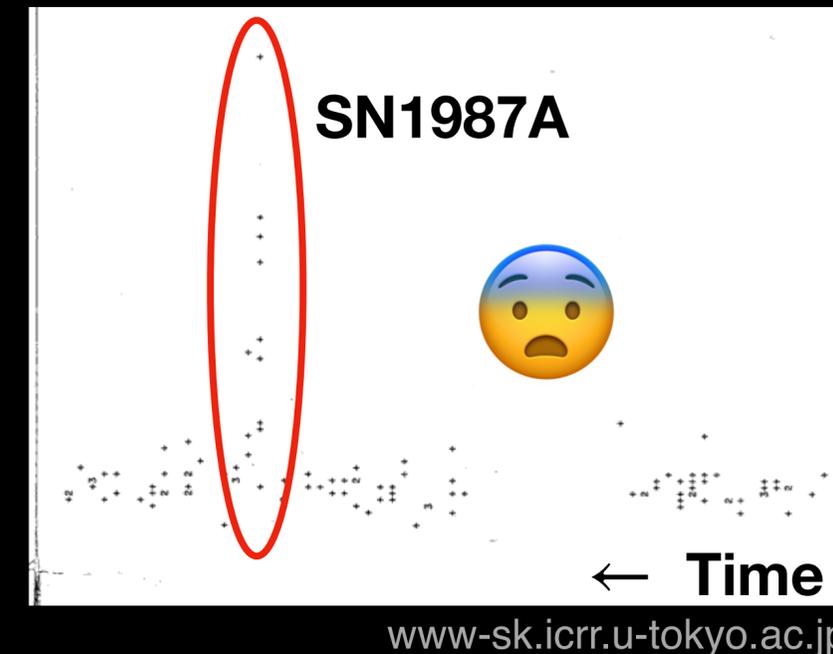
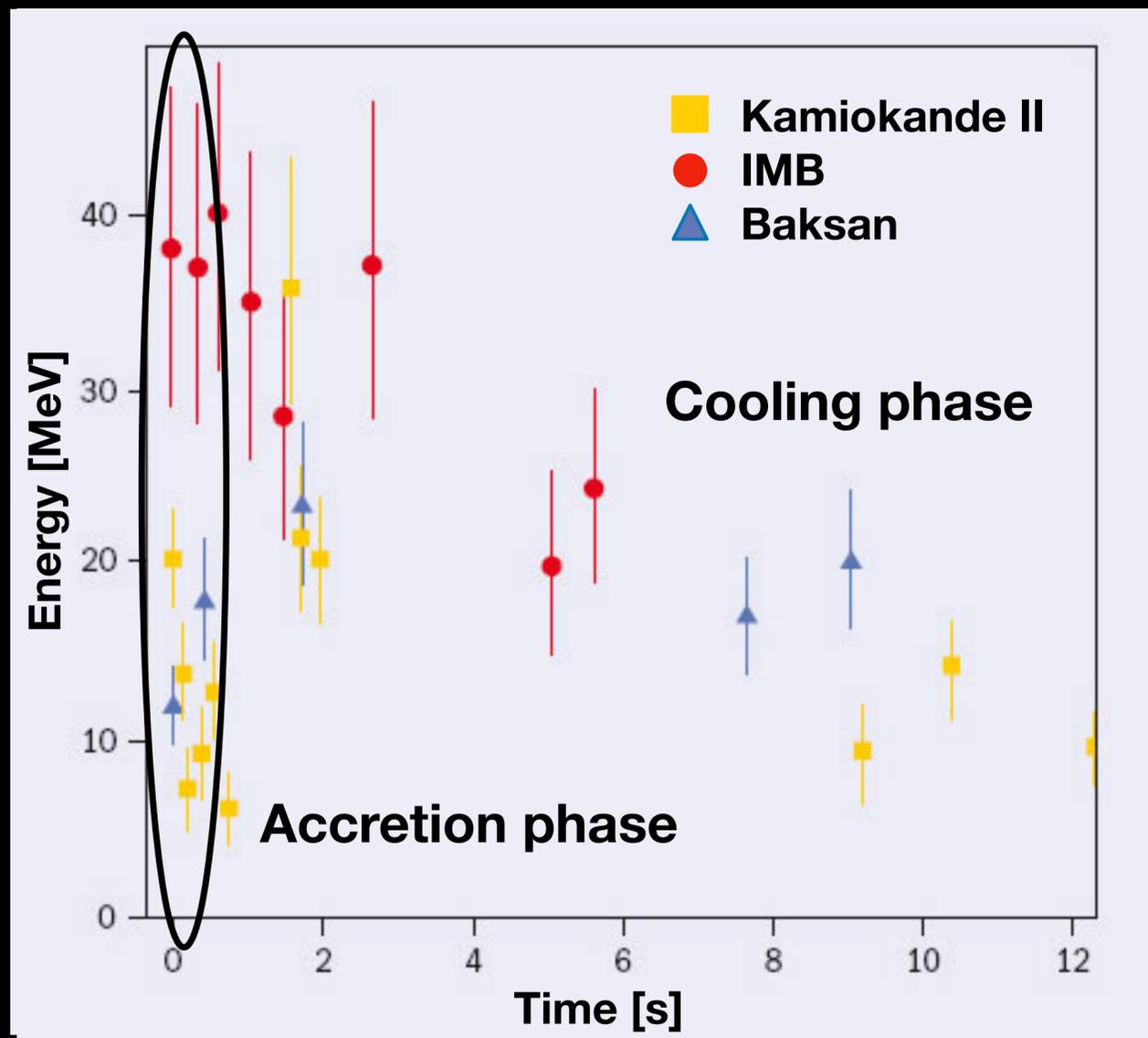
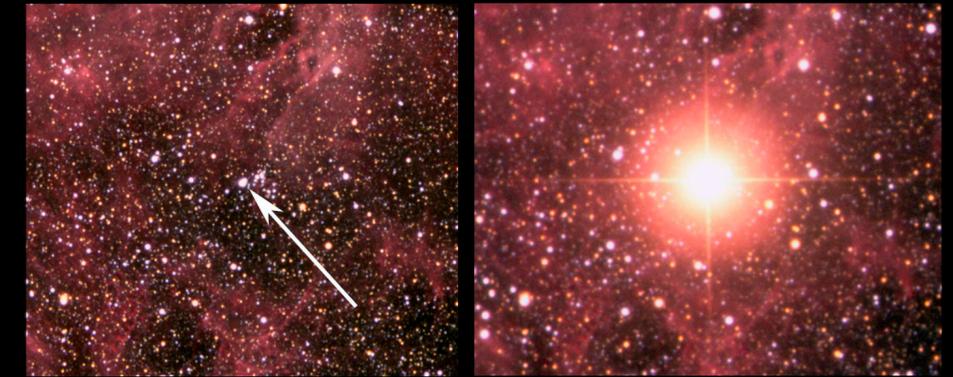
Le principal problème...



Notre galaxie et ses satellites  
 $\sim 2-3$  supernovae par siècle

# Le coup de chance: SN1987A

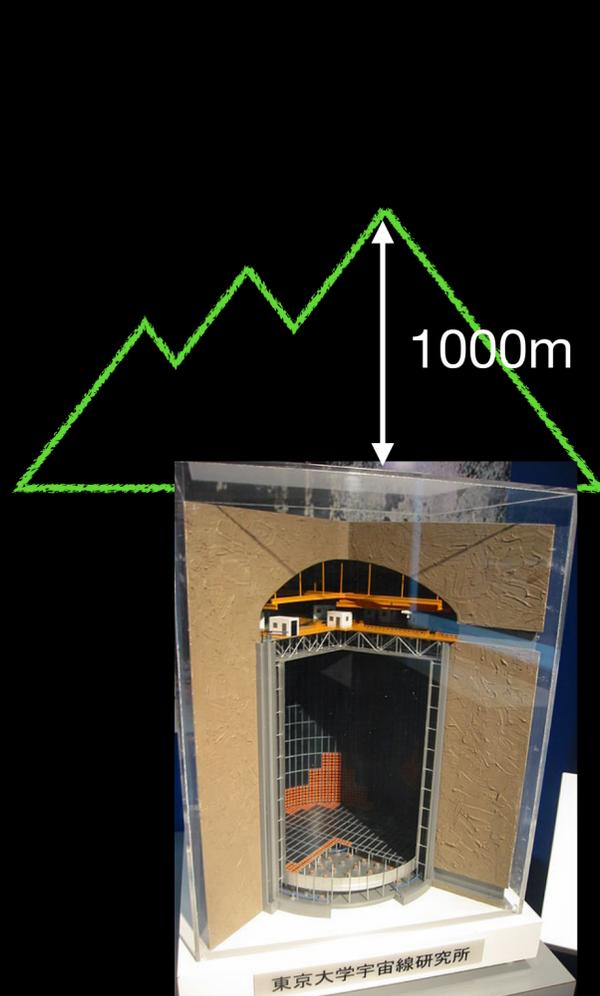
## Seule observation de neutrinos de supernovae



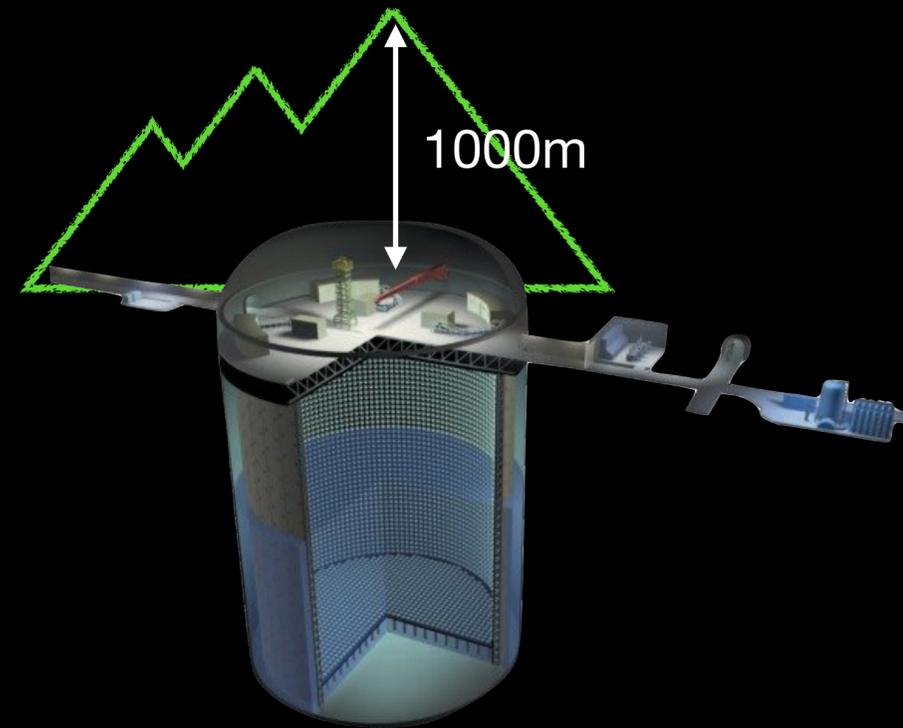
- Production “thermique”  $E_\nu = \mathcal{O}(10)$  MeV
- Confirmation du modèle de “choc stationnaire”
- Comment exploiter la prochaine supernova?

# Les détecteurs Kamiokande

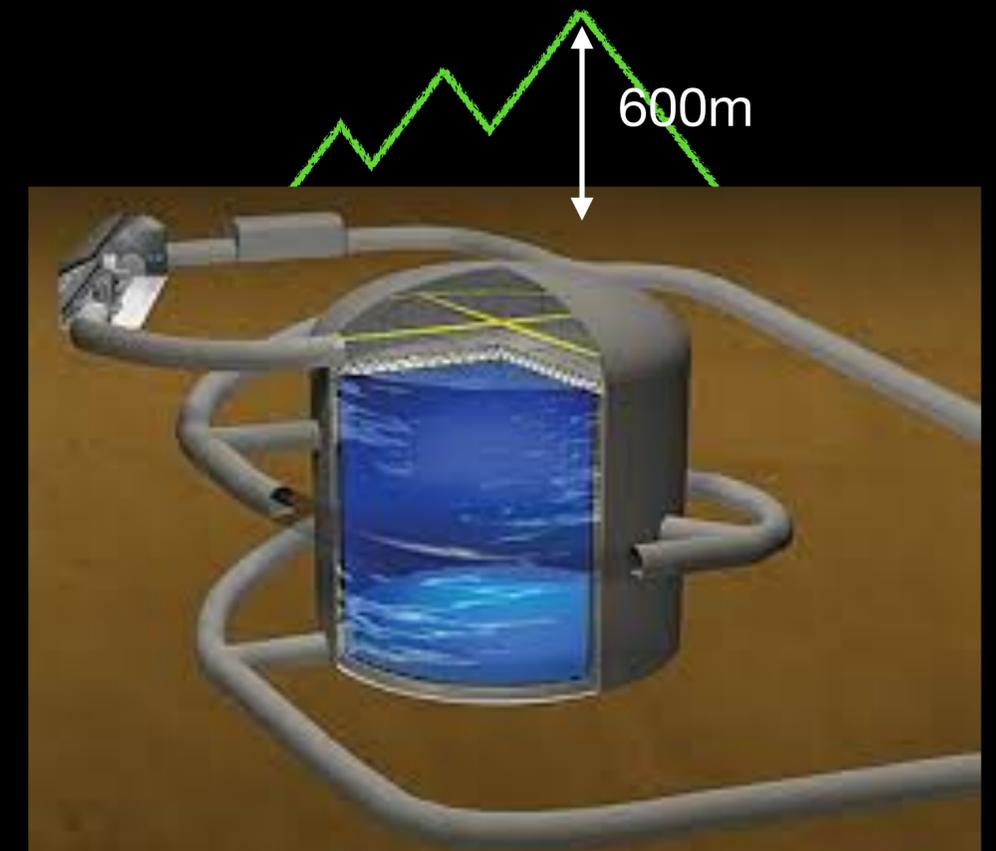
Kamioka Neutrino Detection Experiment (Kam?)



**Kamiokande-II**  
3,000 tonnes

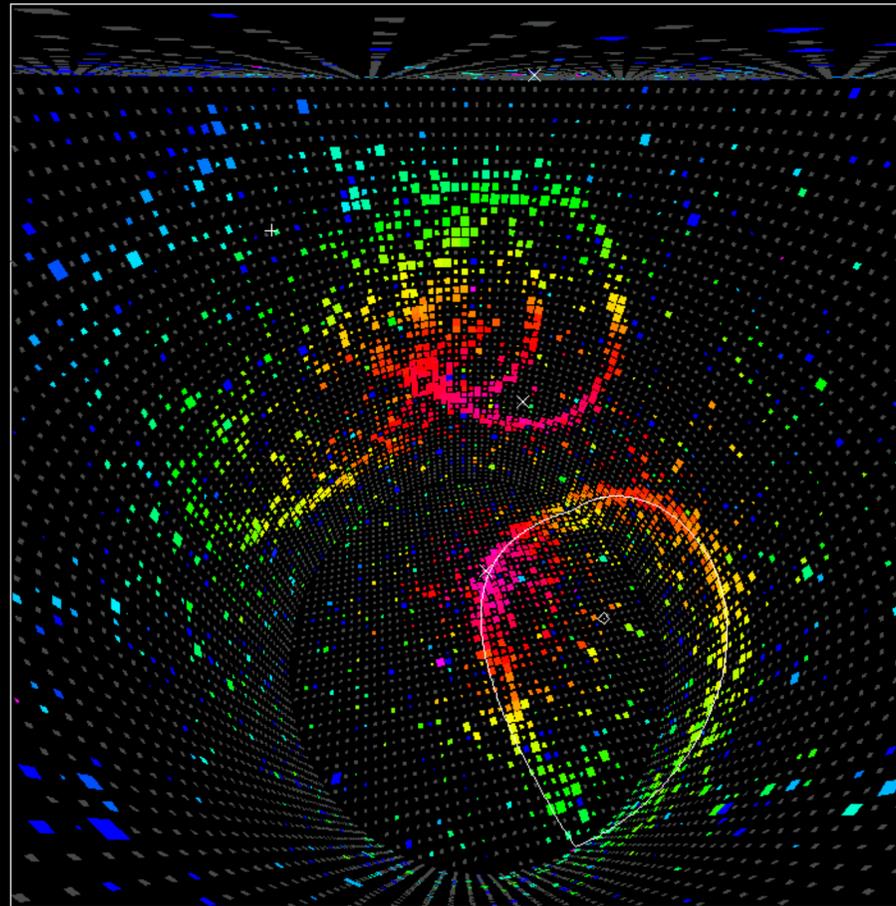
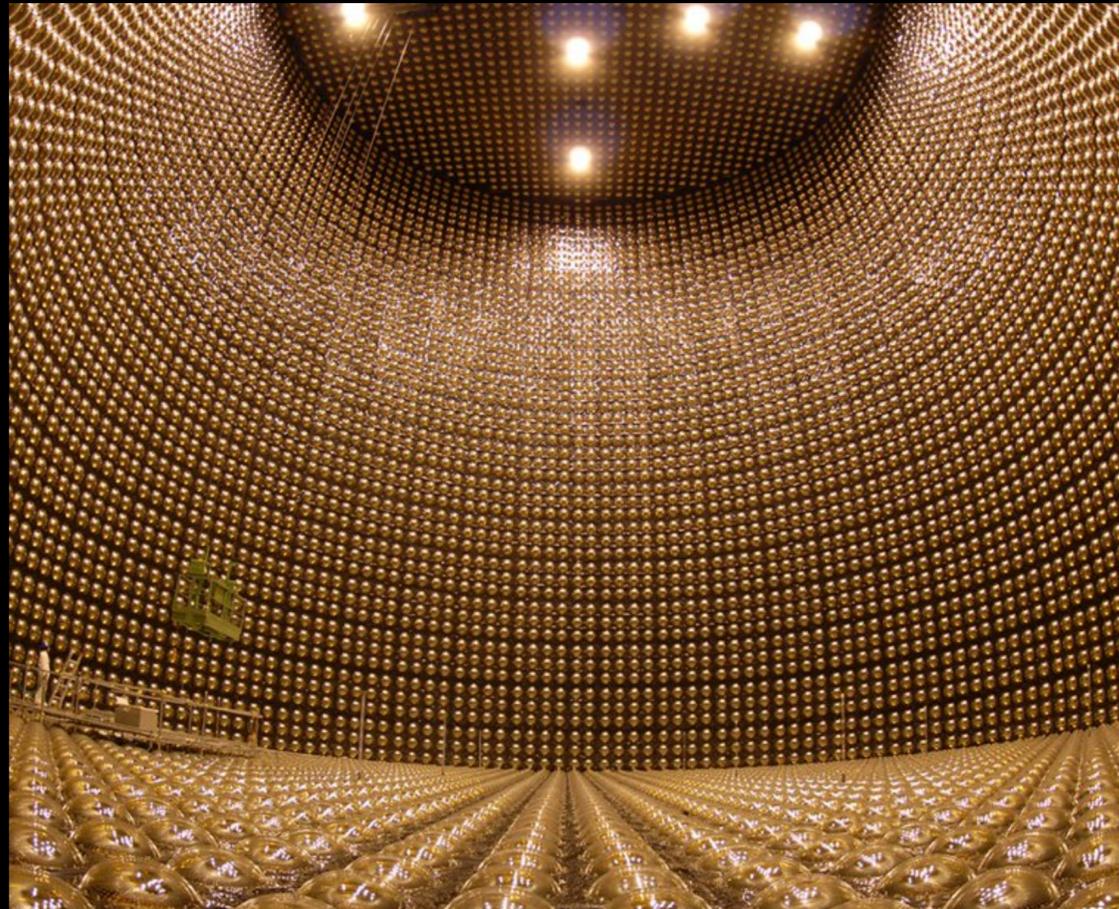


**Super-Kamiokande**  
50,000 tonnes



**Hyper-Kamiokande**  
260,000 tonnes

# Super-Kamiokande: un anneau pour les détecter tous

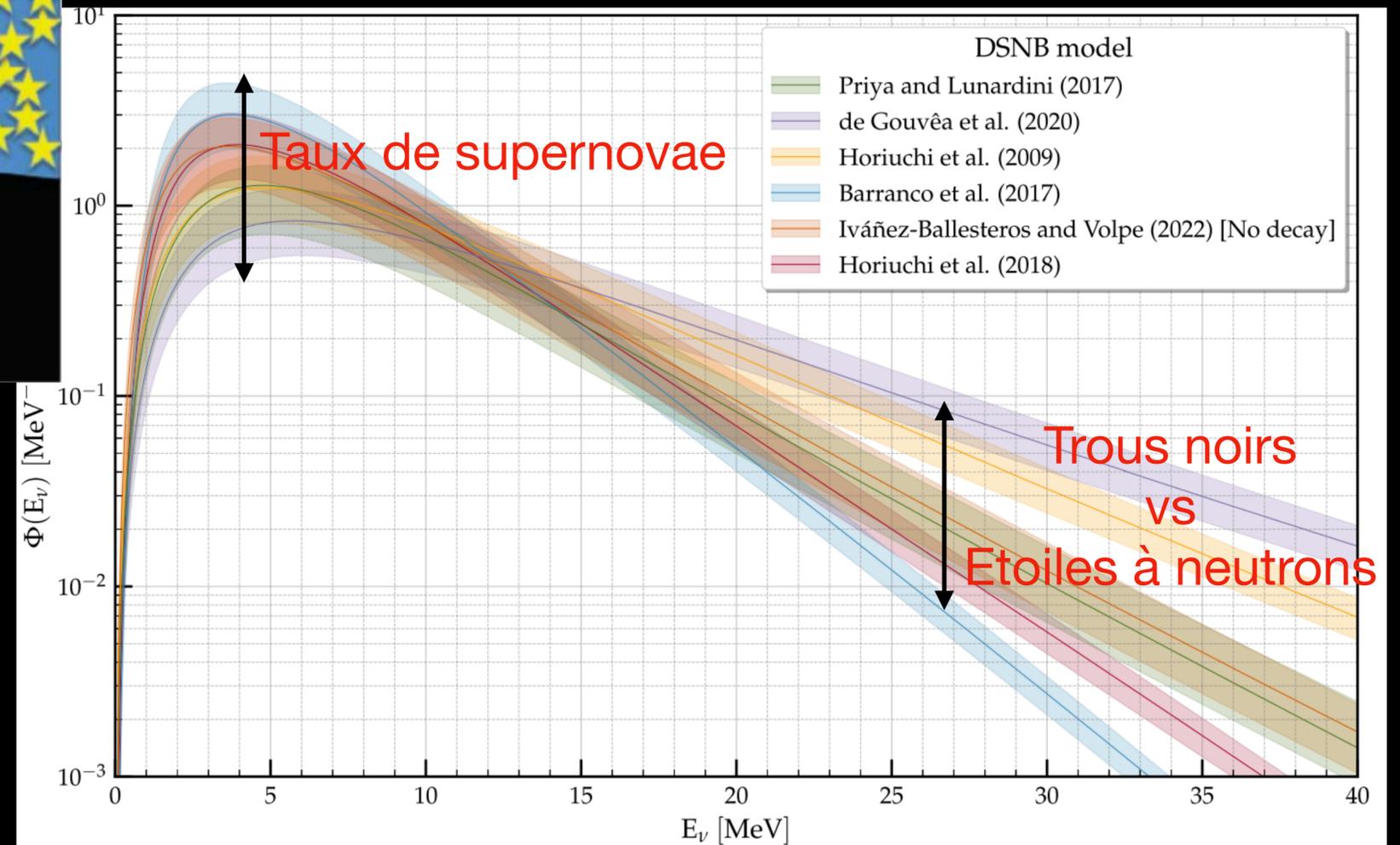
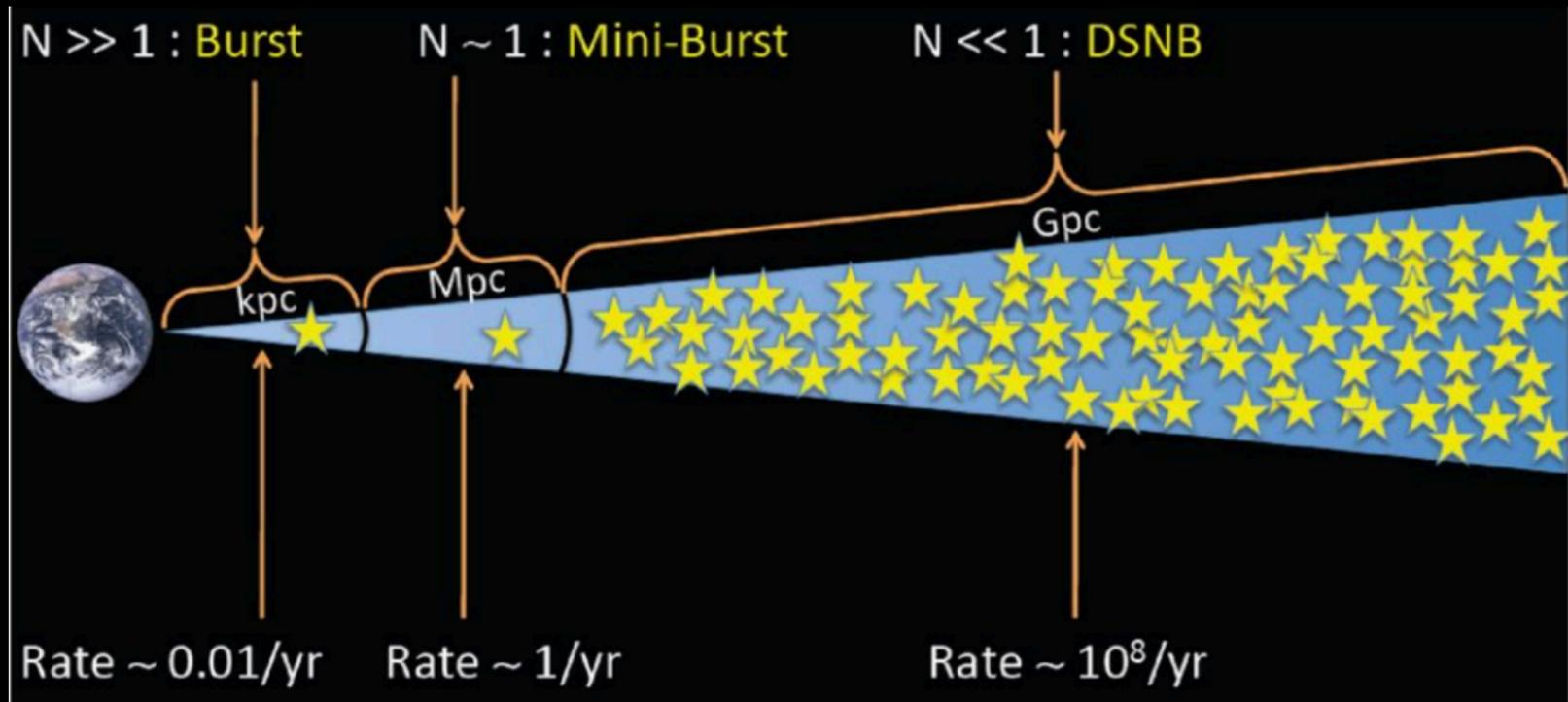


Supernova au centre  
de la Voie lactée (8.5 kpc)  
10,000 neutrinos

Grand Nuage de Magellan (50 kpc)  
100 neutrinos

# Le fond diffus de neutrinos de supernovae

La prochaine percée en astrophysique?

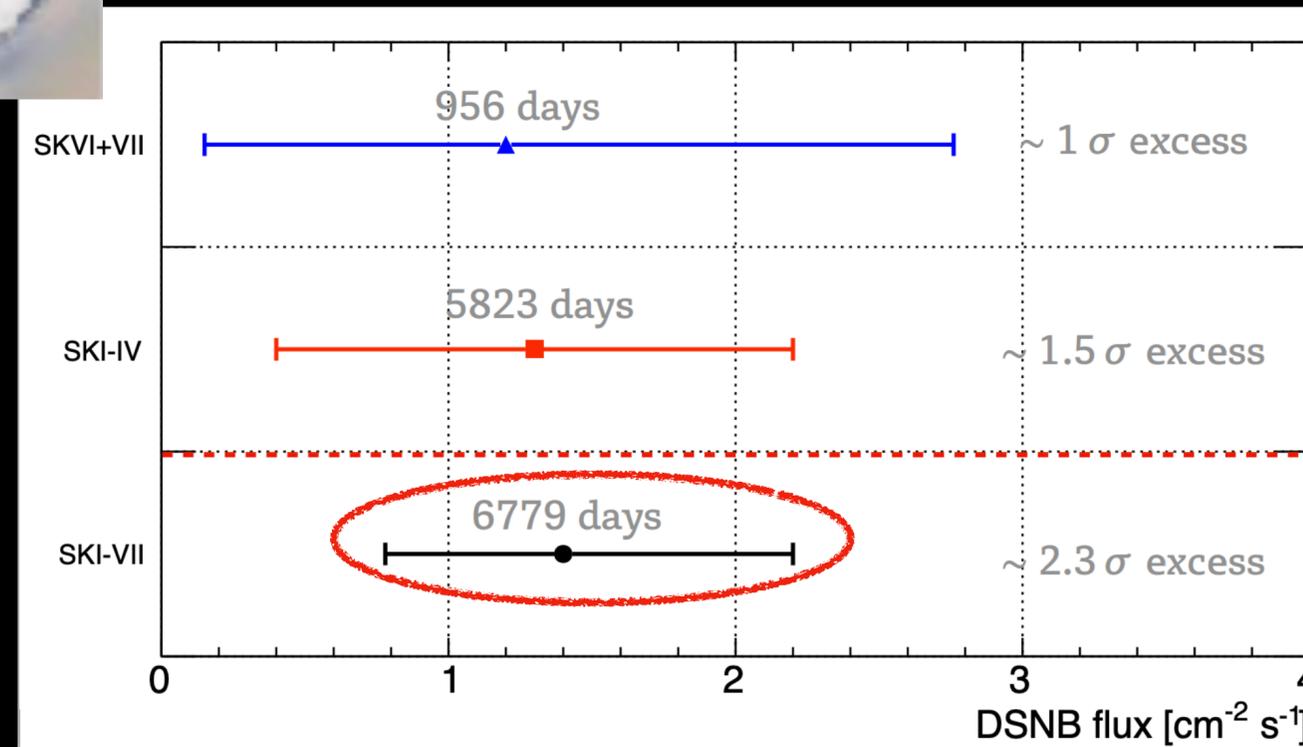
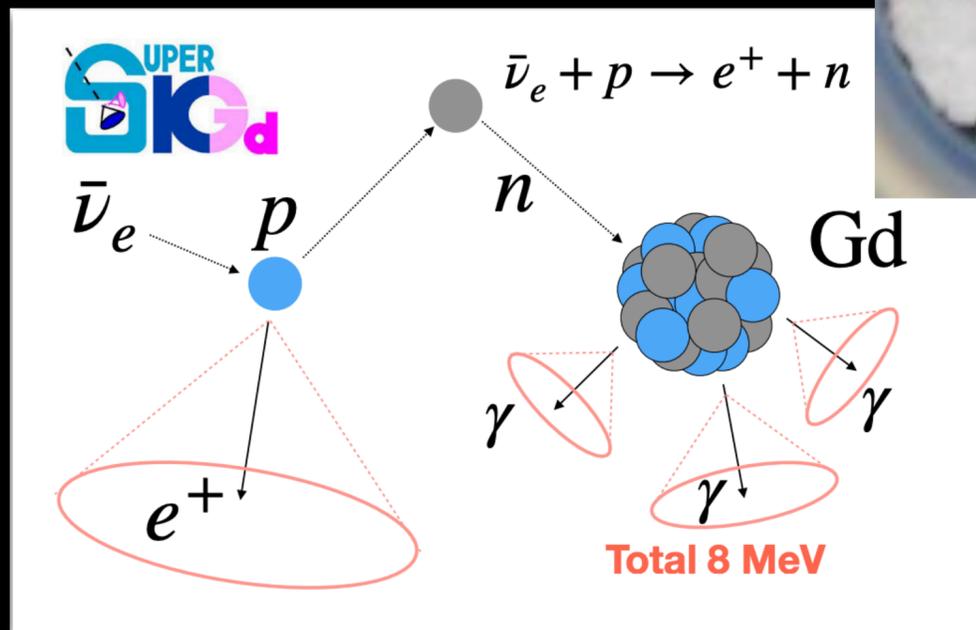
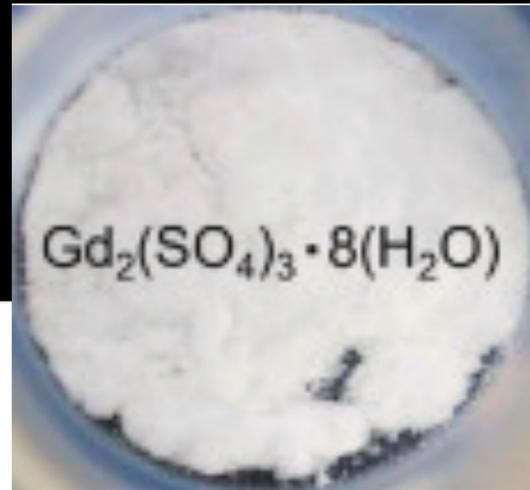


Accumulation de neutrinos de supernovae distantes → signal permanent

Accès aux propriétés globales des supernovae 2-3 événements/an dans SK...

# De Super-Kamiokande à SK-Gd

## Détecter les antineutrinos grâce aux neutrons



0.011% Gd (13 t)

0.033% Gd (39 t)

Premier indice du fond diffus de neutrinos de supernova? A suivre...

# Nos questions...

