

Astroparticules et Neutrinos

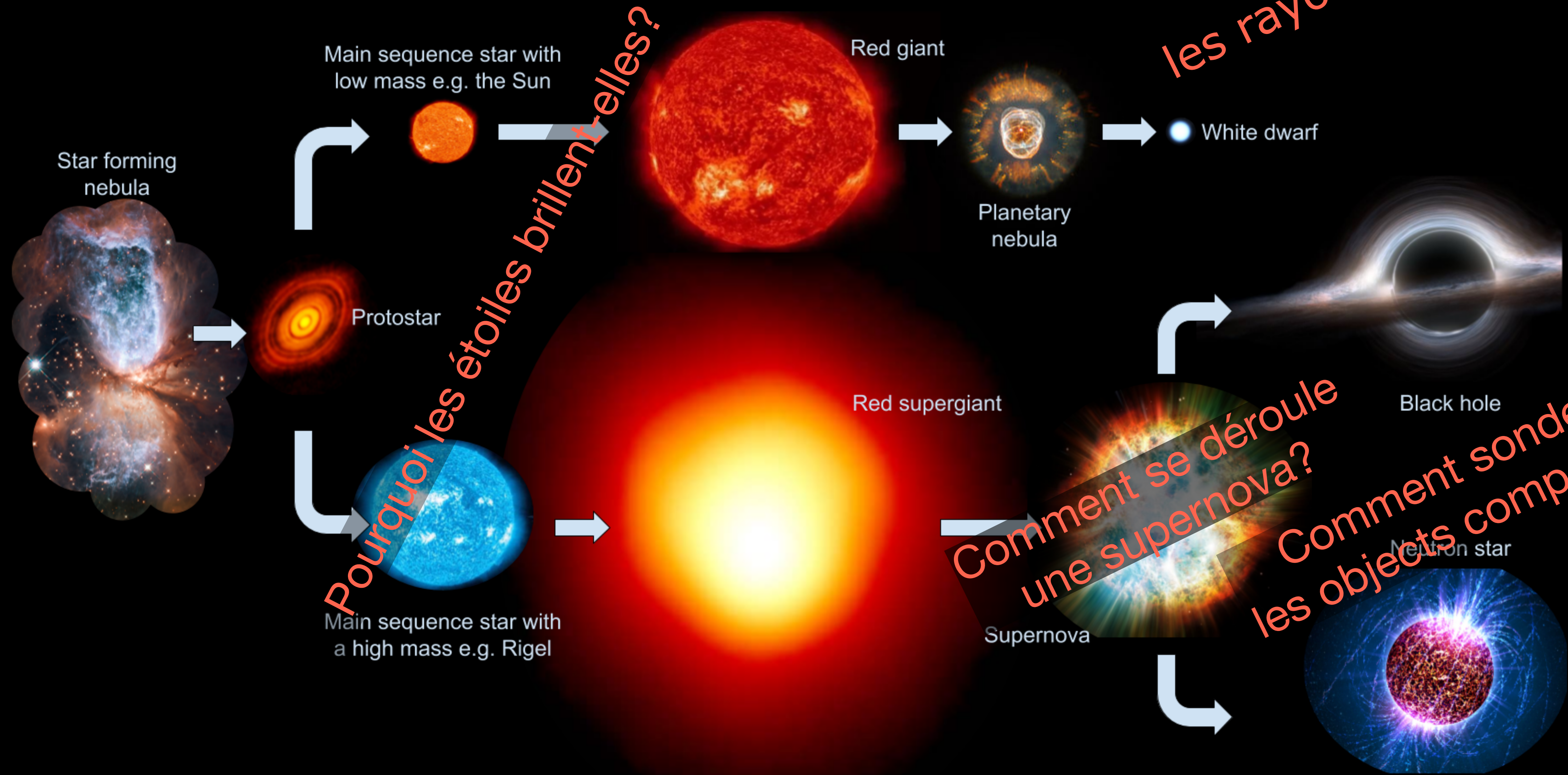
Les messager invisibles — Ondes gravitationnelles et neutrinos

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?



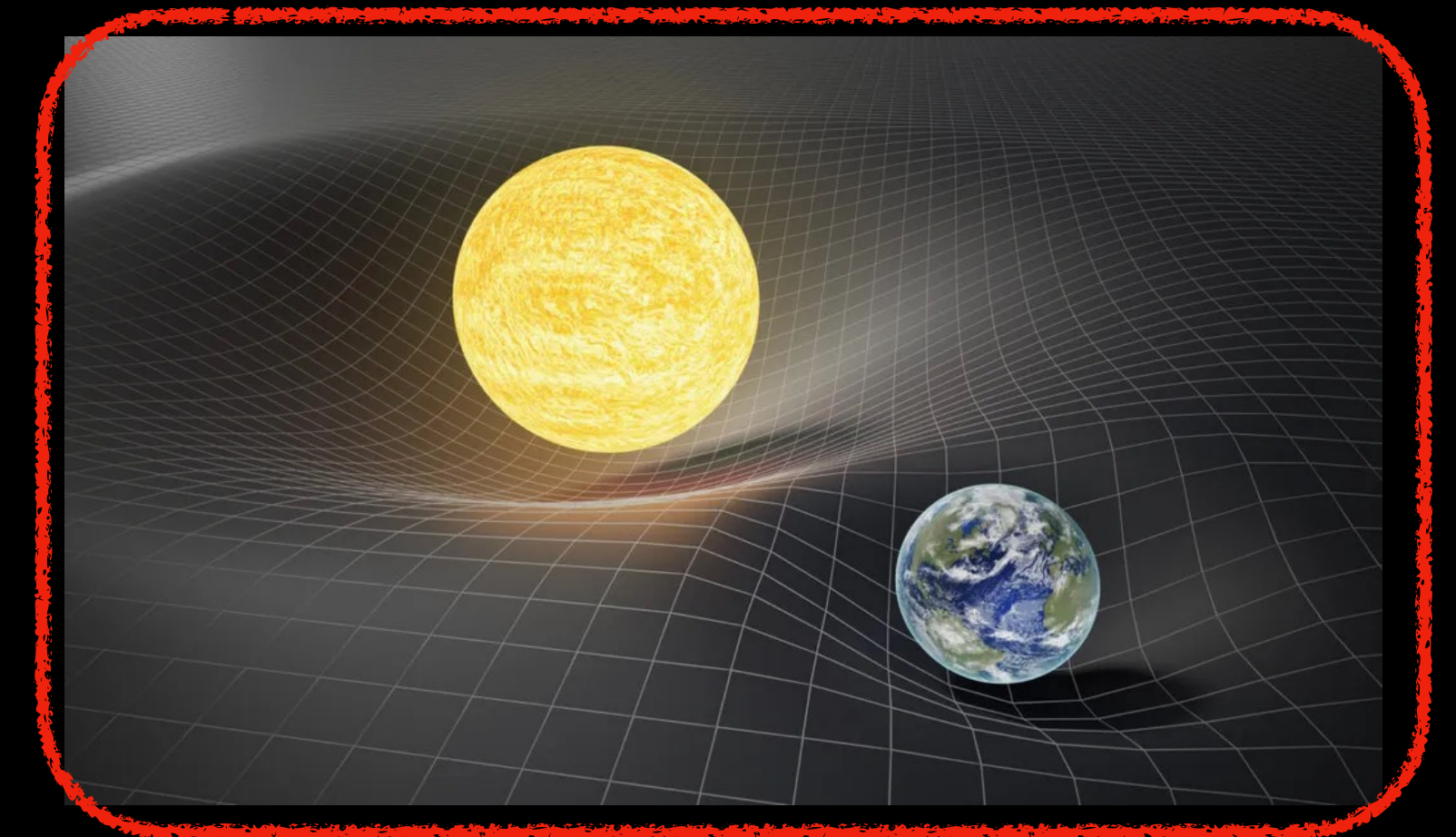
Un nouveau messager

Au-delà des particules

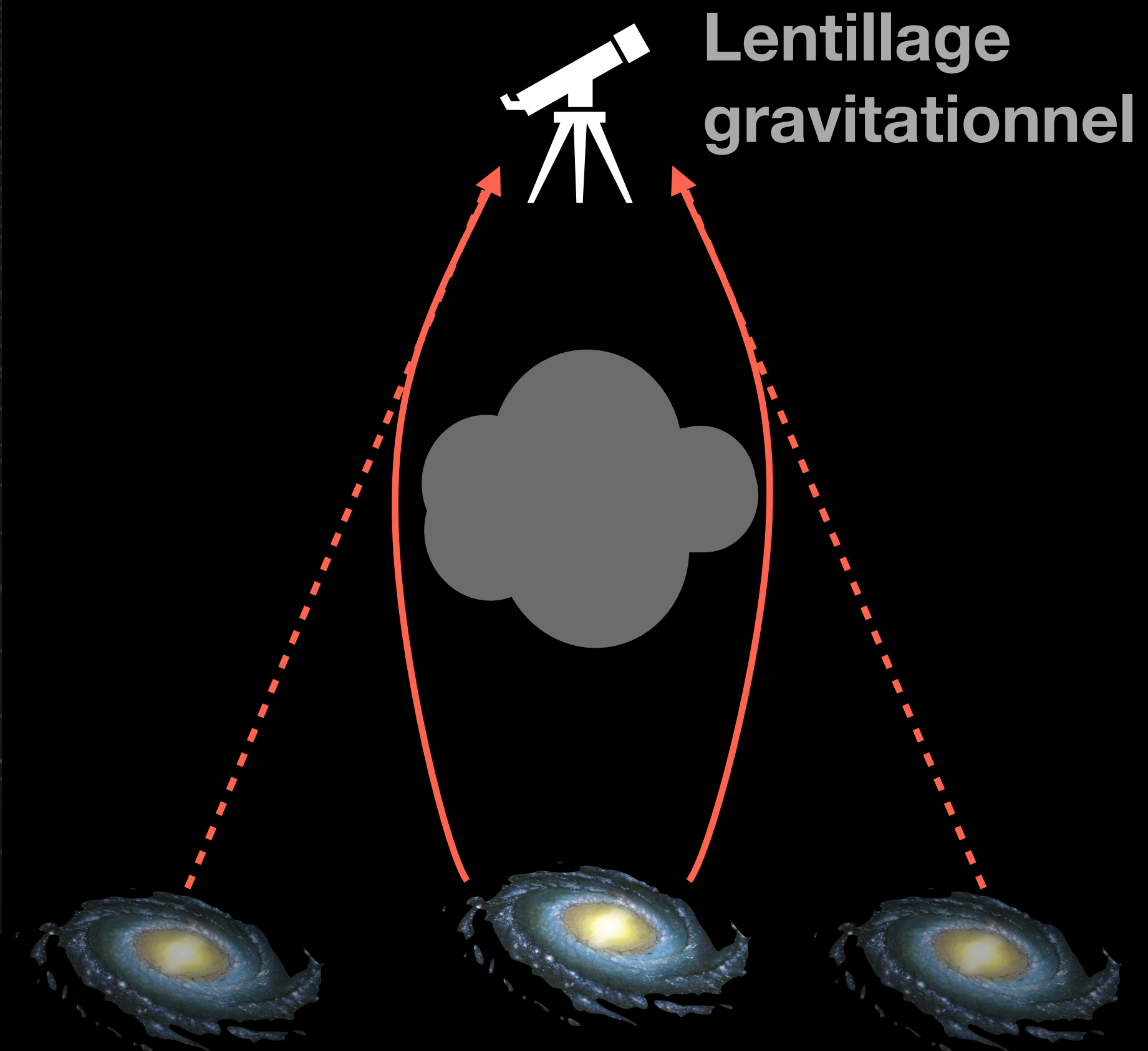
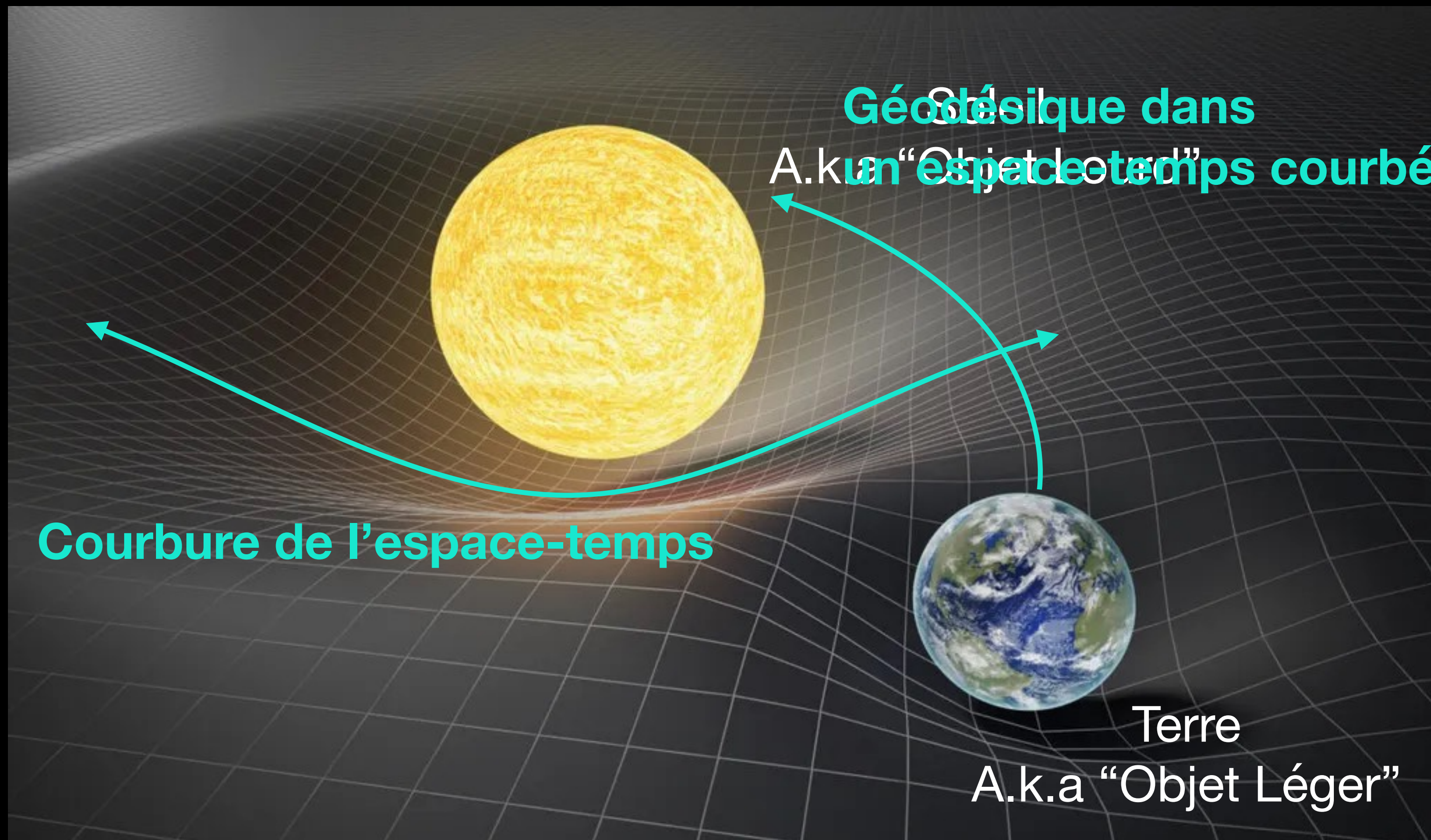
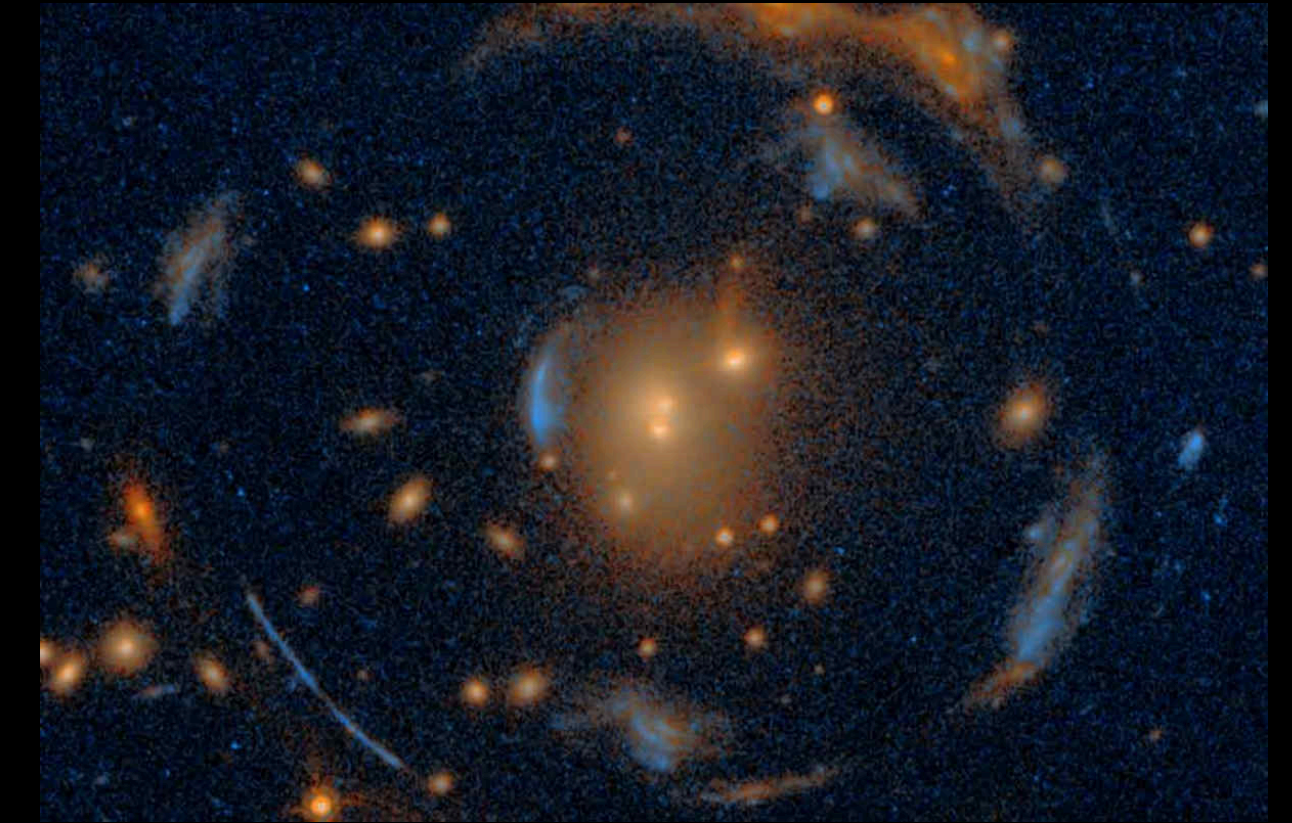
LEPTONS	$=0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ e electron	$=105.66 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ μ muon	$=1.7768 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ τ tau	$=91.19 \text{ GeV}/c^2$ 0 1 Z Z boson
	$<2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_e electron neutrino	$<0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ muon neutrino	$<18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ tau neutrino	$=80.39 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1 W W boson
	$=4.7 \text{ MeV}/c^2$ $-1/2$ $\frac{1}{2}$ d down	$=96 \text{ MeV}/c^2$ $-1/2$ $\frac{1}{2}$ s strange	$=4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-1/2$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 γ photon
QUARKS	$=2.2 \text{ MeV}/c^2$ $2/3$ $\frac{1}{2}$ u up	$=1.28 \text{ GeV}/c^2$ $2/3$ $\frac{1}{2}$ c charm	$=173.1 \text{ GeV}/c^2$ $2/3$ $\frac{1}{2}$ t top	0 0 1 g gluon
				$=124.97 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 0 H higgs

GAUGE BOSONS
VECTOR BOSONS

SCALAR BOSONS

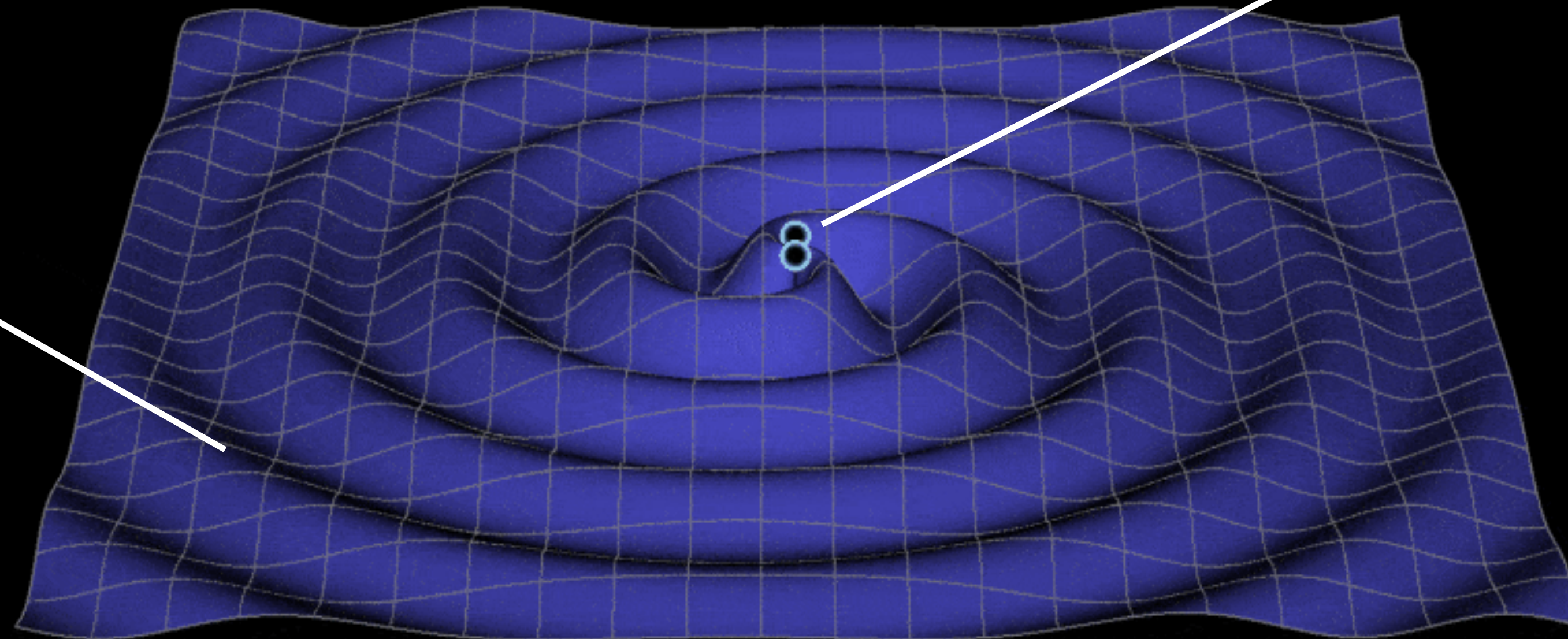


Les ondes gravitationnelles



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

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

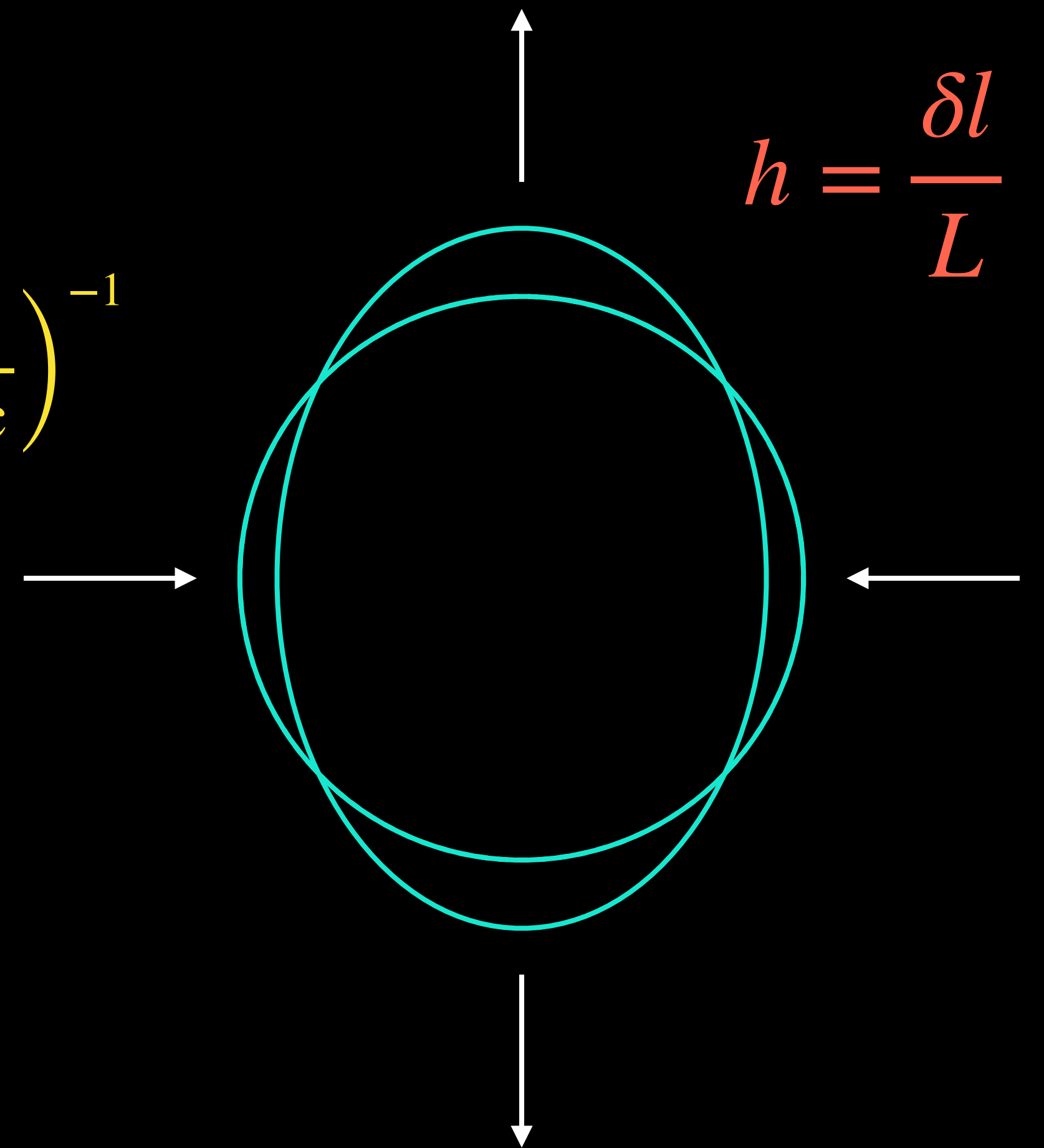
Supernova, amas de la Vierge (15 Mpc)

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

Fusion de 2 trous noirs (150 Mpc)

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

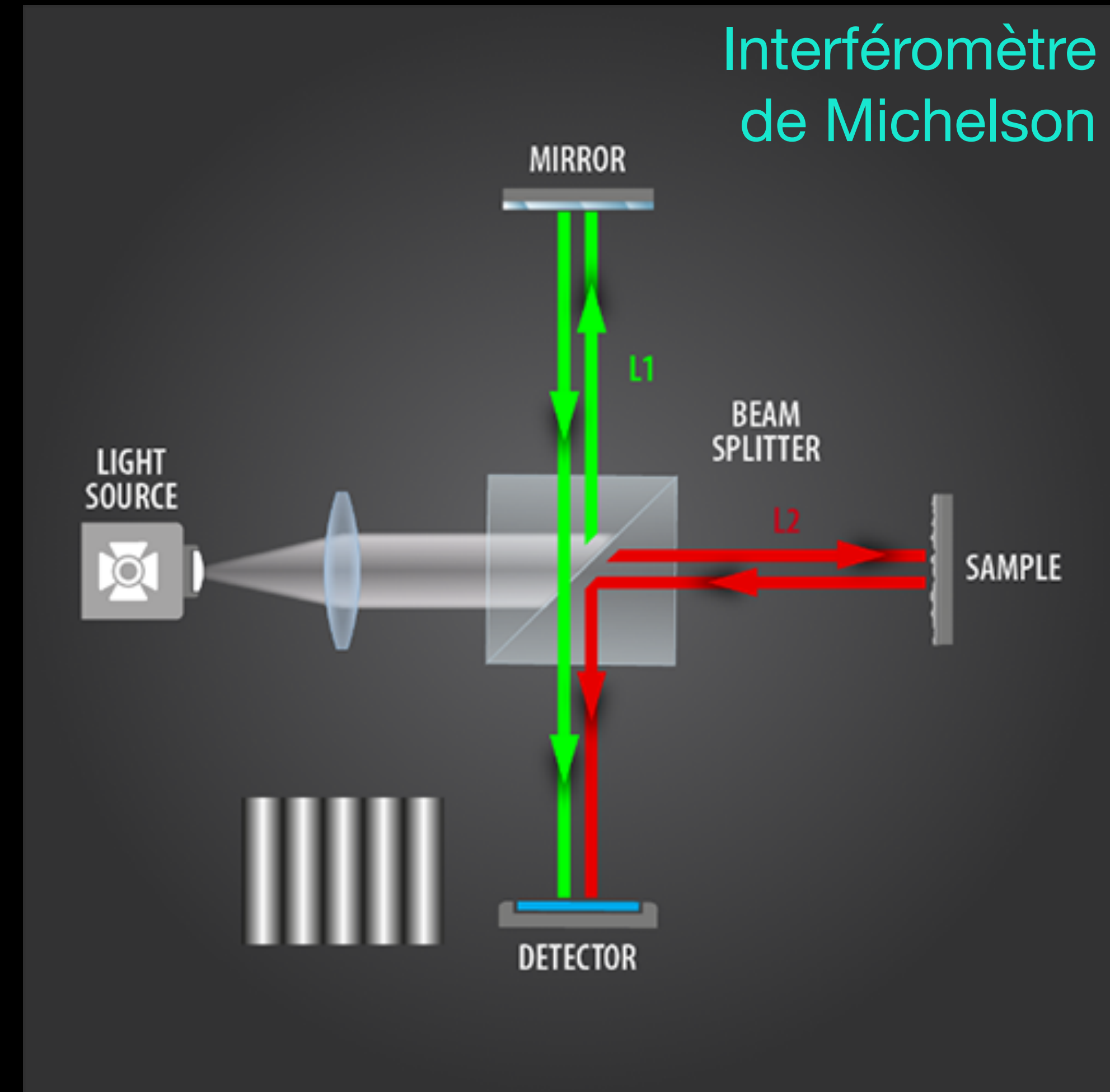
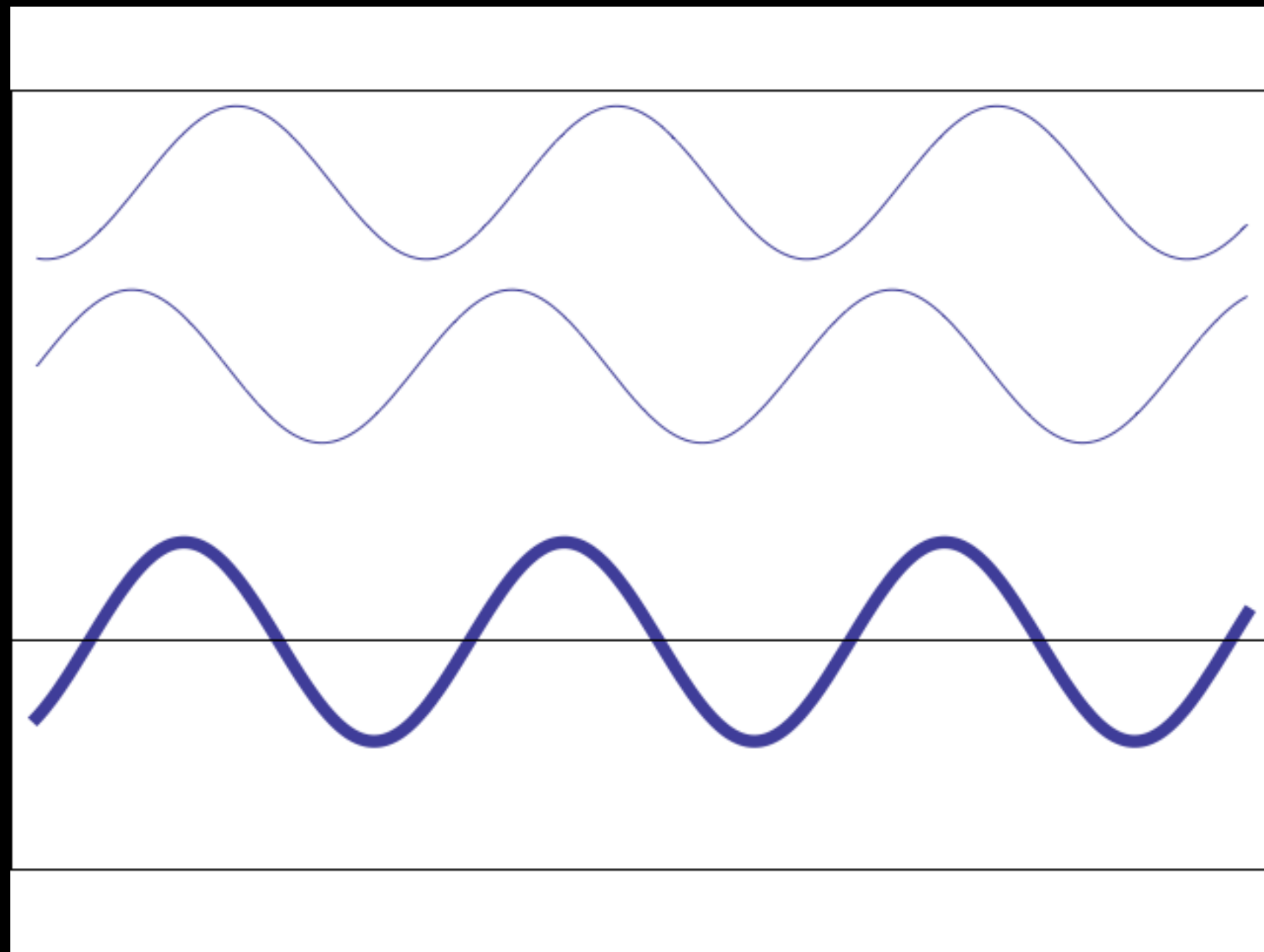
Si $L = 1000 \text{ km}$, $\delta l \sim 1 \text{ fm}$
(taille d'un noyau d'atome)



Détection par interférométrie

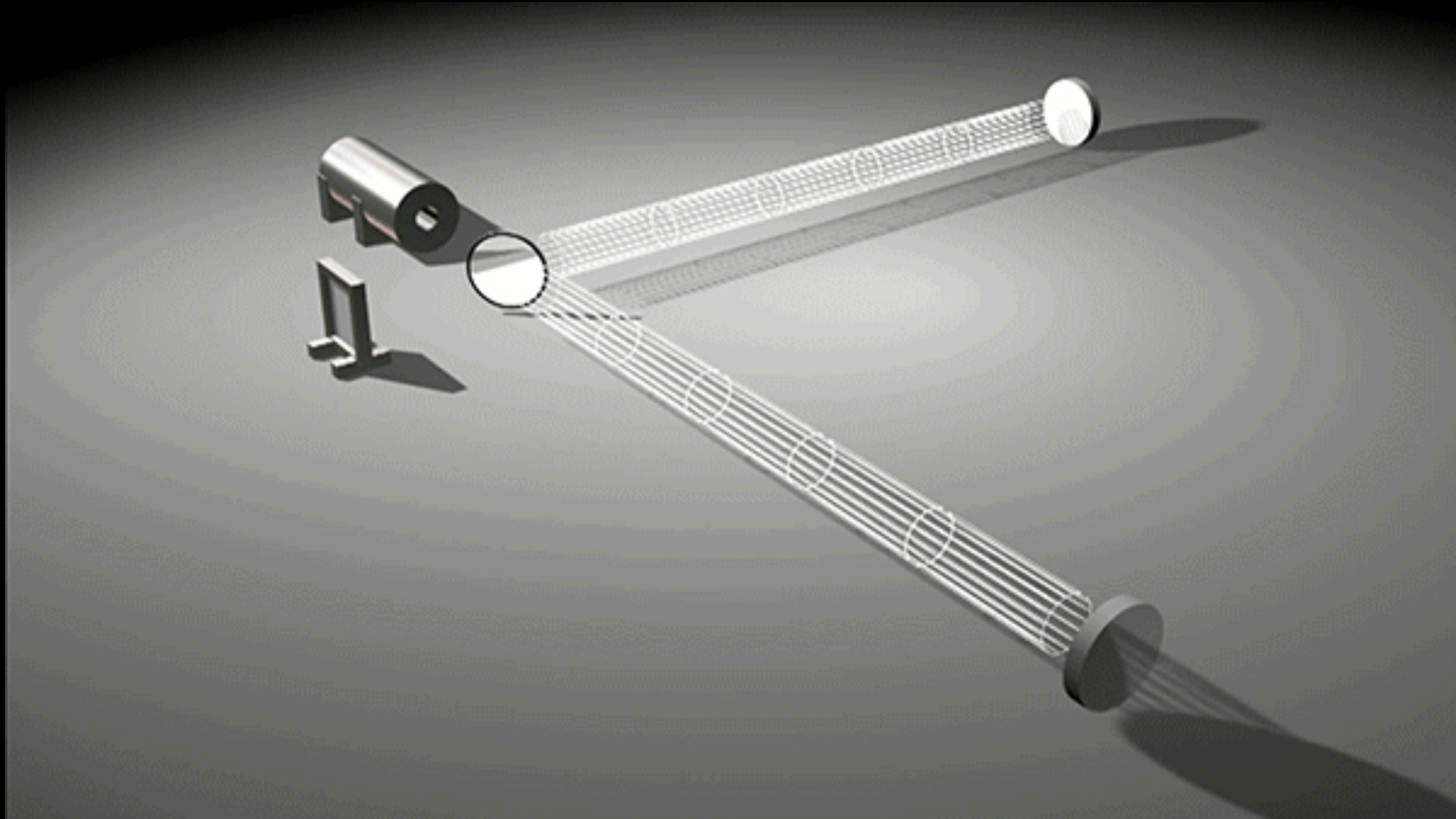
Mesure de distance à haute précision

Addition des amplitudes
de faisceaux lumineux cohérents

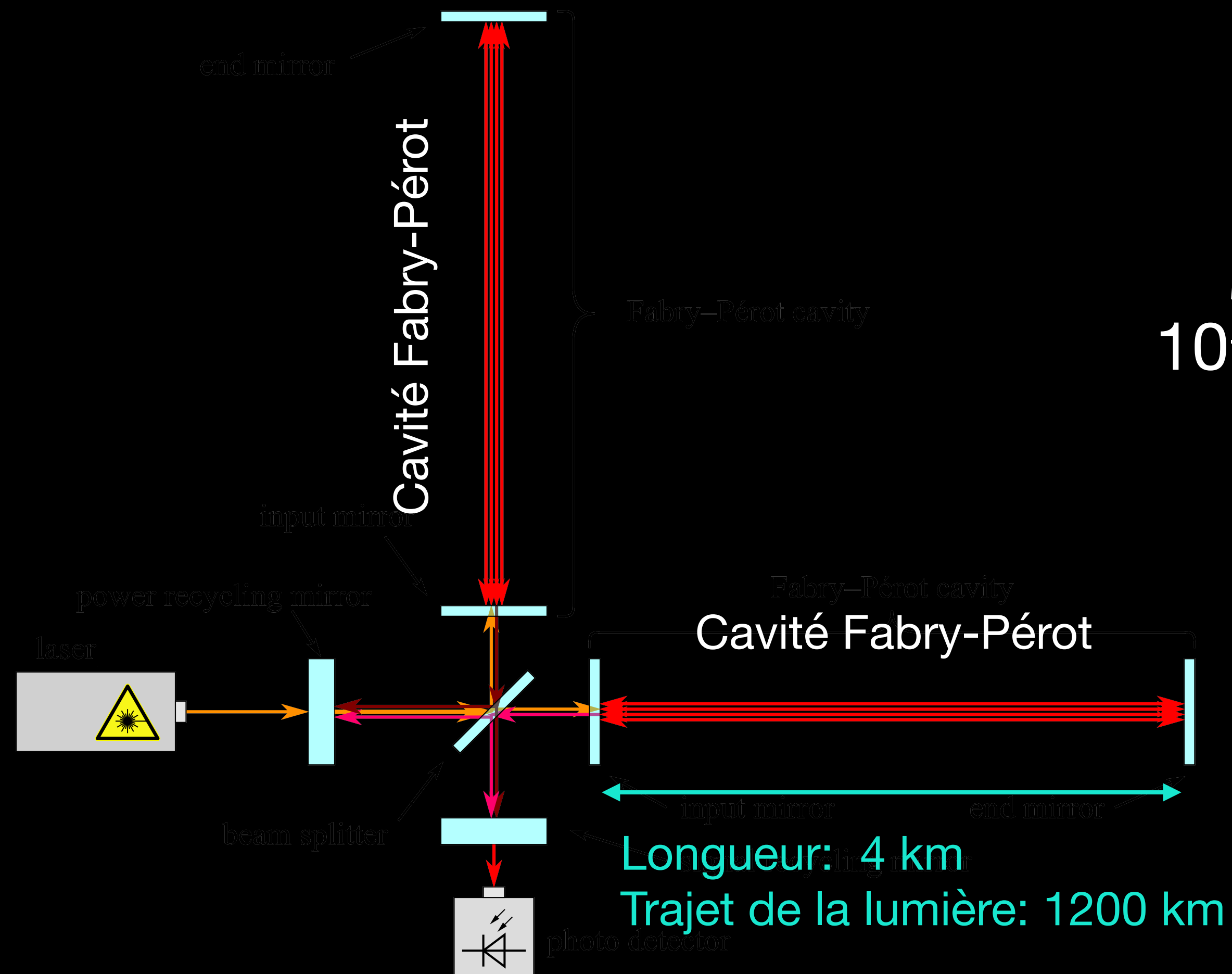


Ondes gravitationnelles et interférométrie

Mesure de déformations infinitésimales



Les derniers attomètres...



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

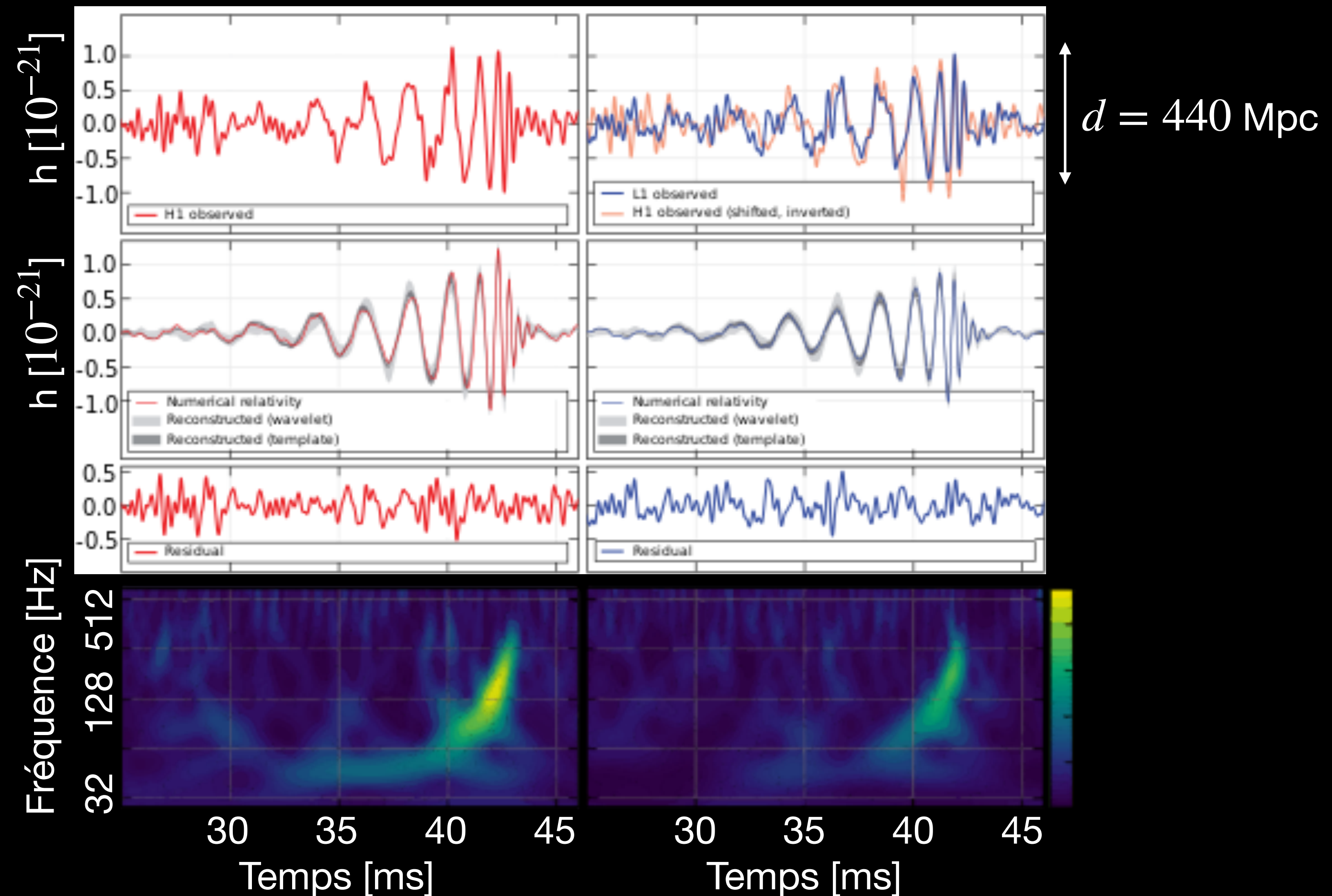
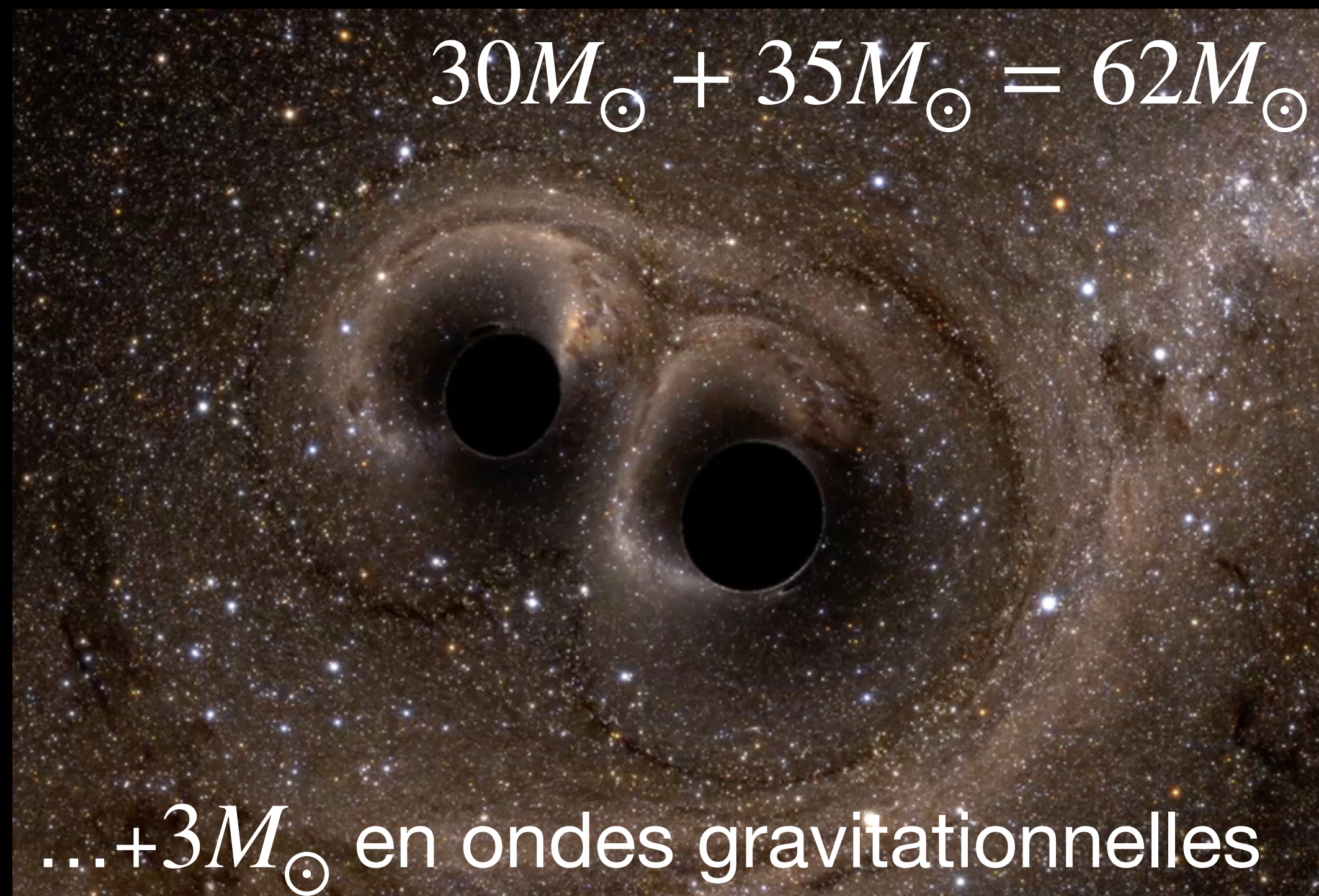
10^{-21} (pointing to h) 10^{-15} m (pointing to δl)
 1000 km! (pointing to L)

LIGO et VIRGO



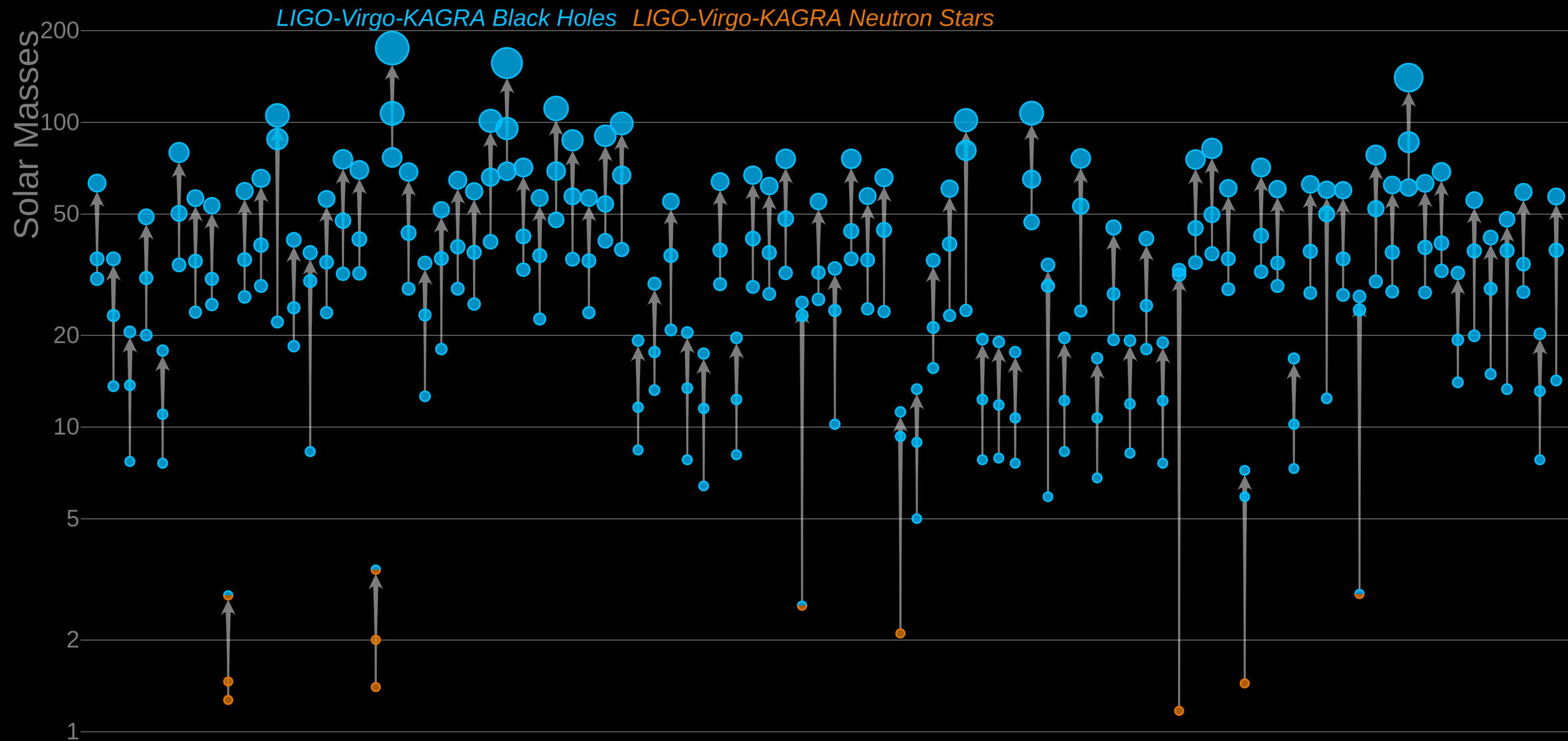
Première observation: fusion de deux trous noirs

LIGO — 14 septembre 2015

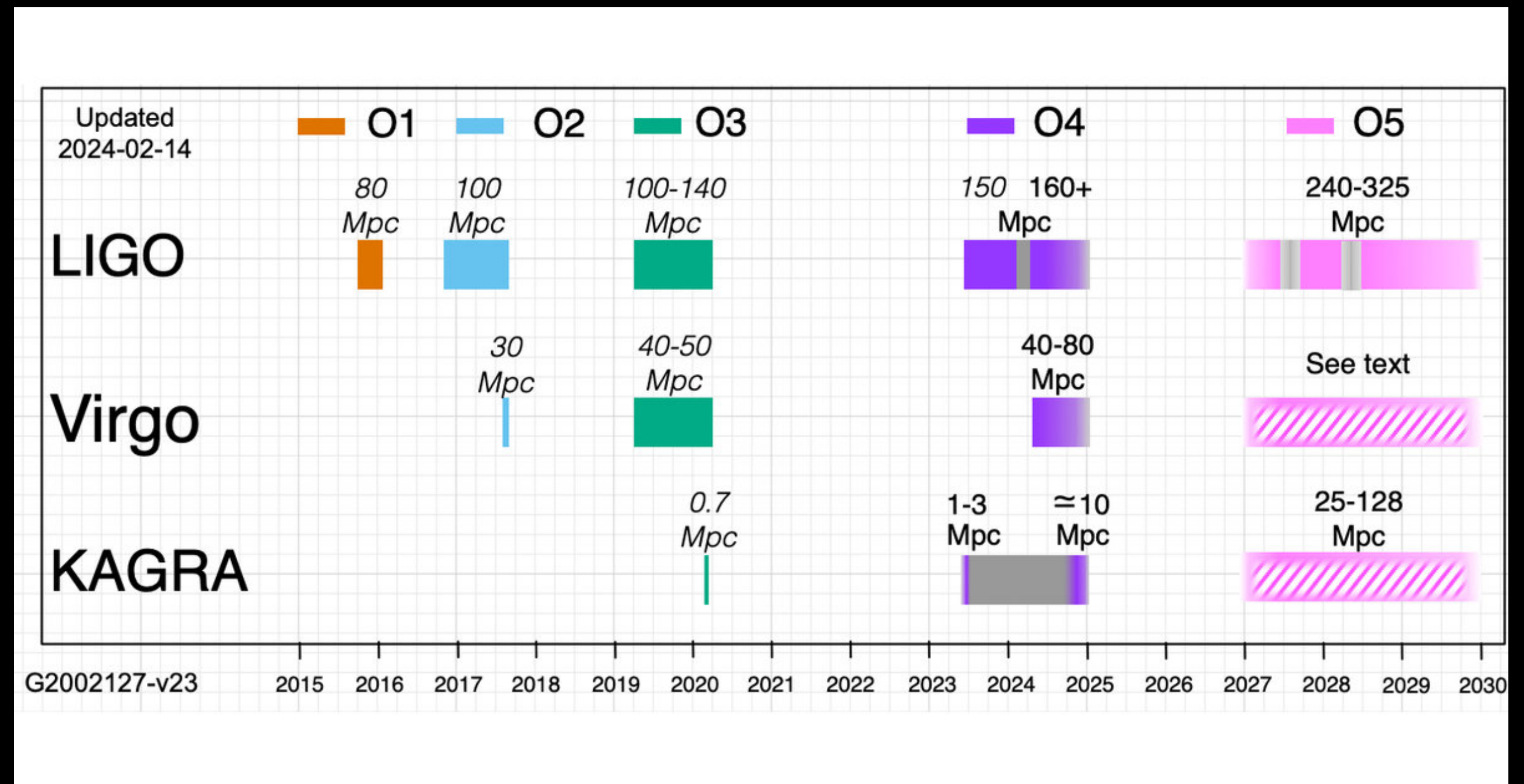


Les populations de trous noirs

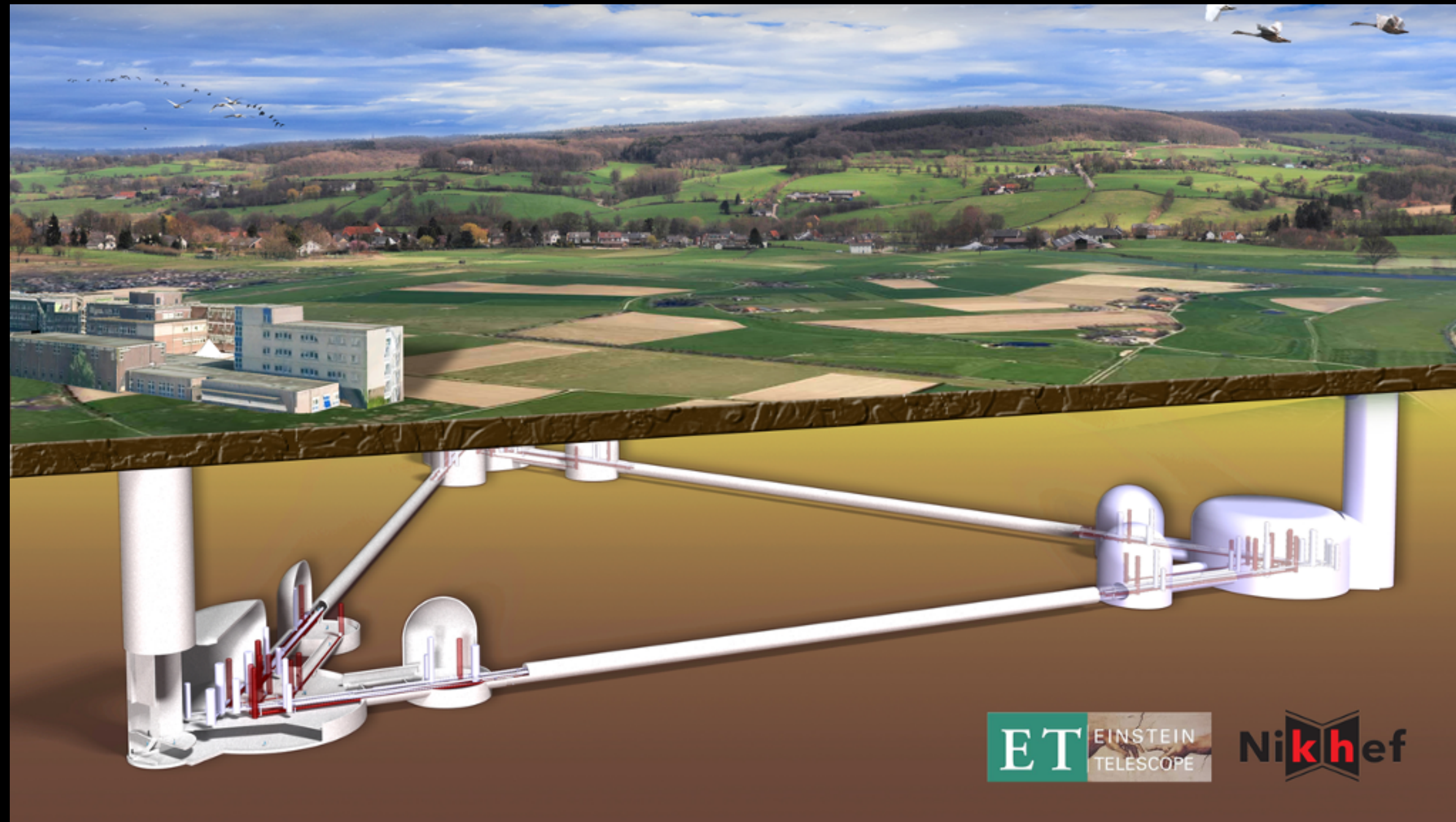
Masses in the Stellar Graveyard



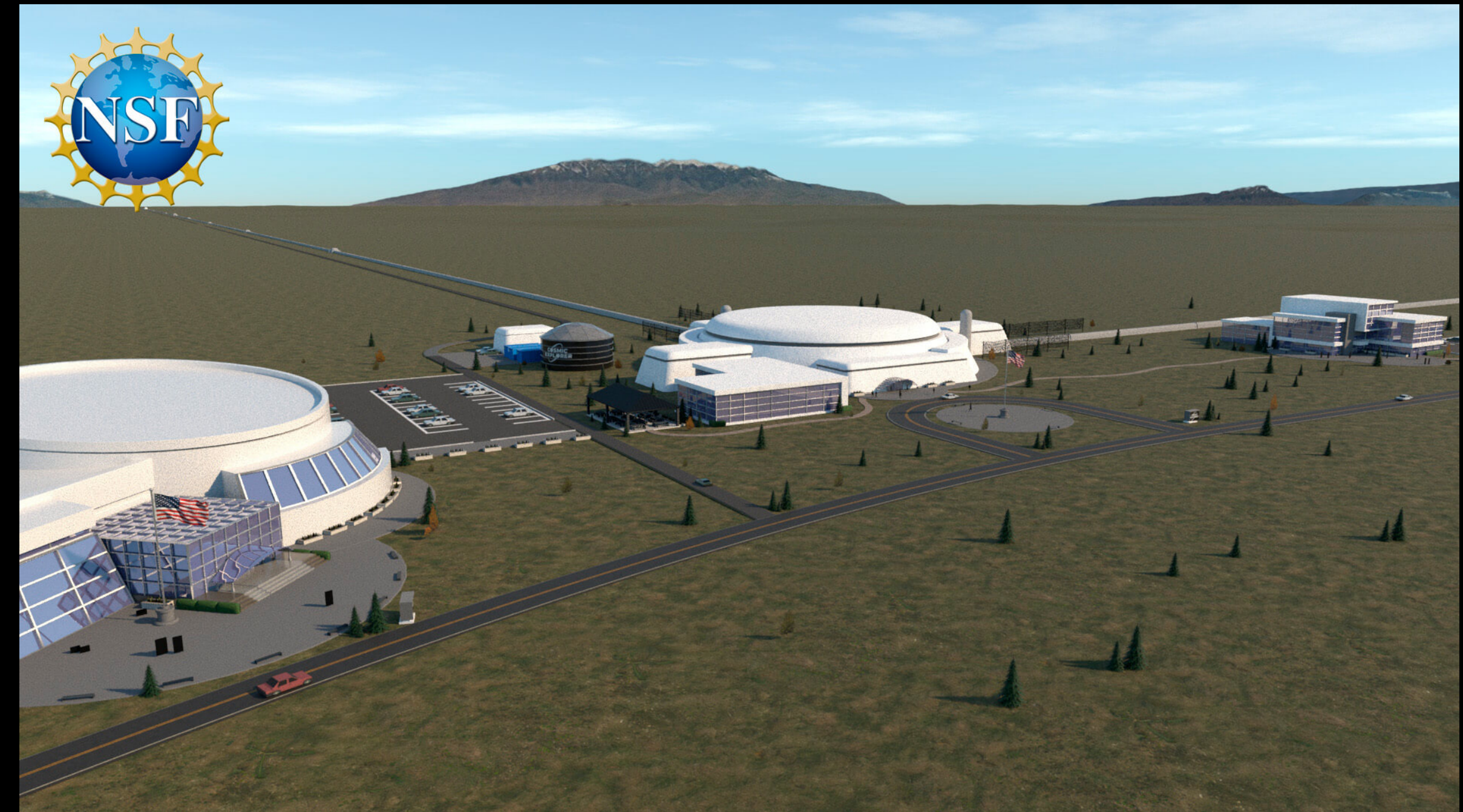
Futur proche: LIGO-VIRGO-KAGRA



Détecteurs terrestres: prochaine génération

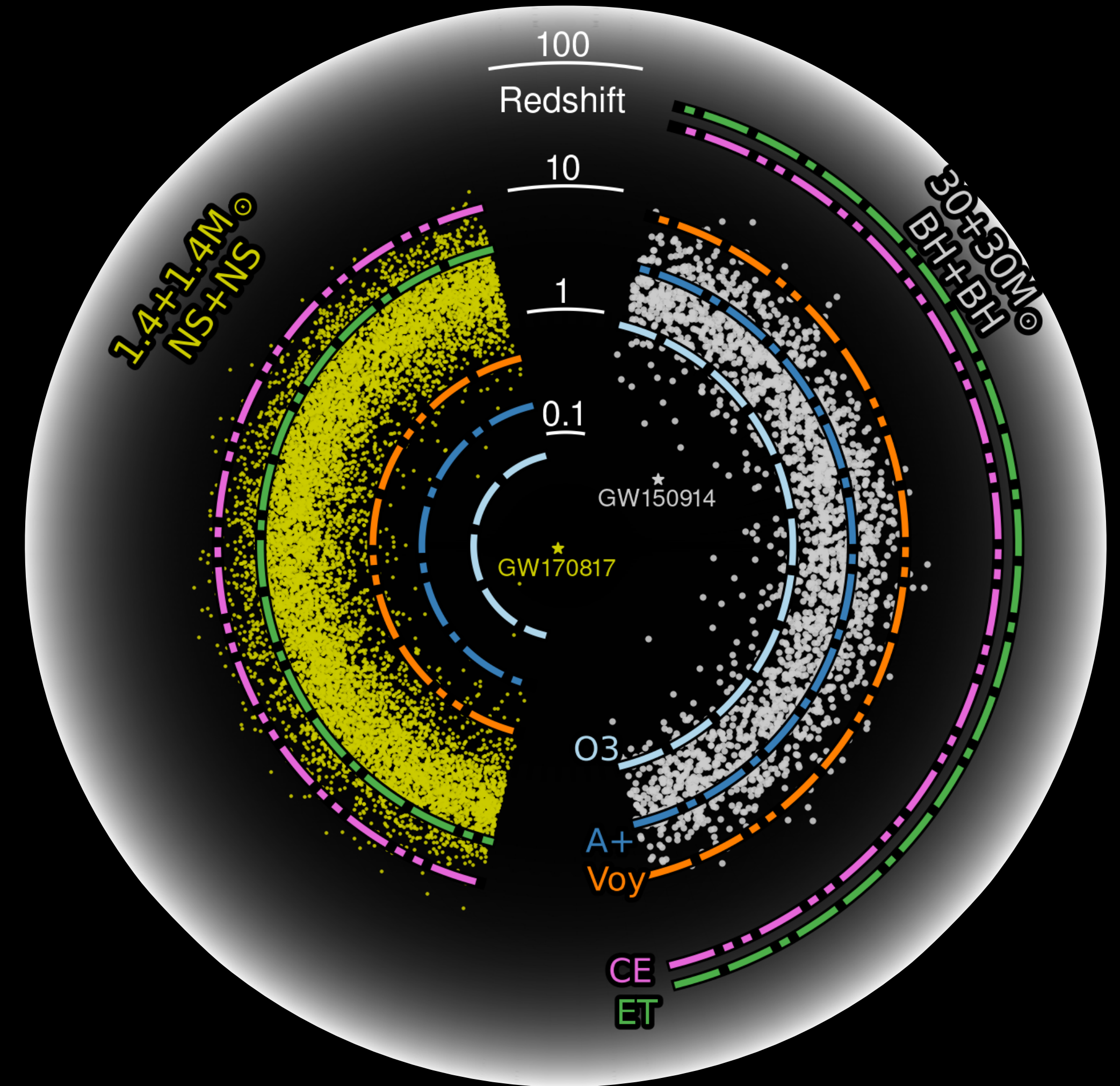
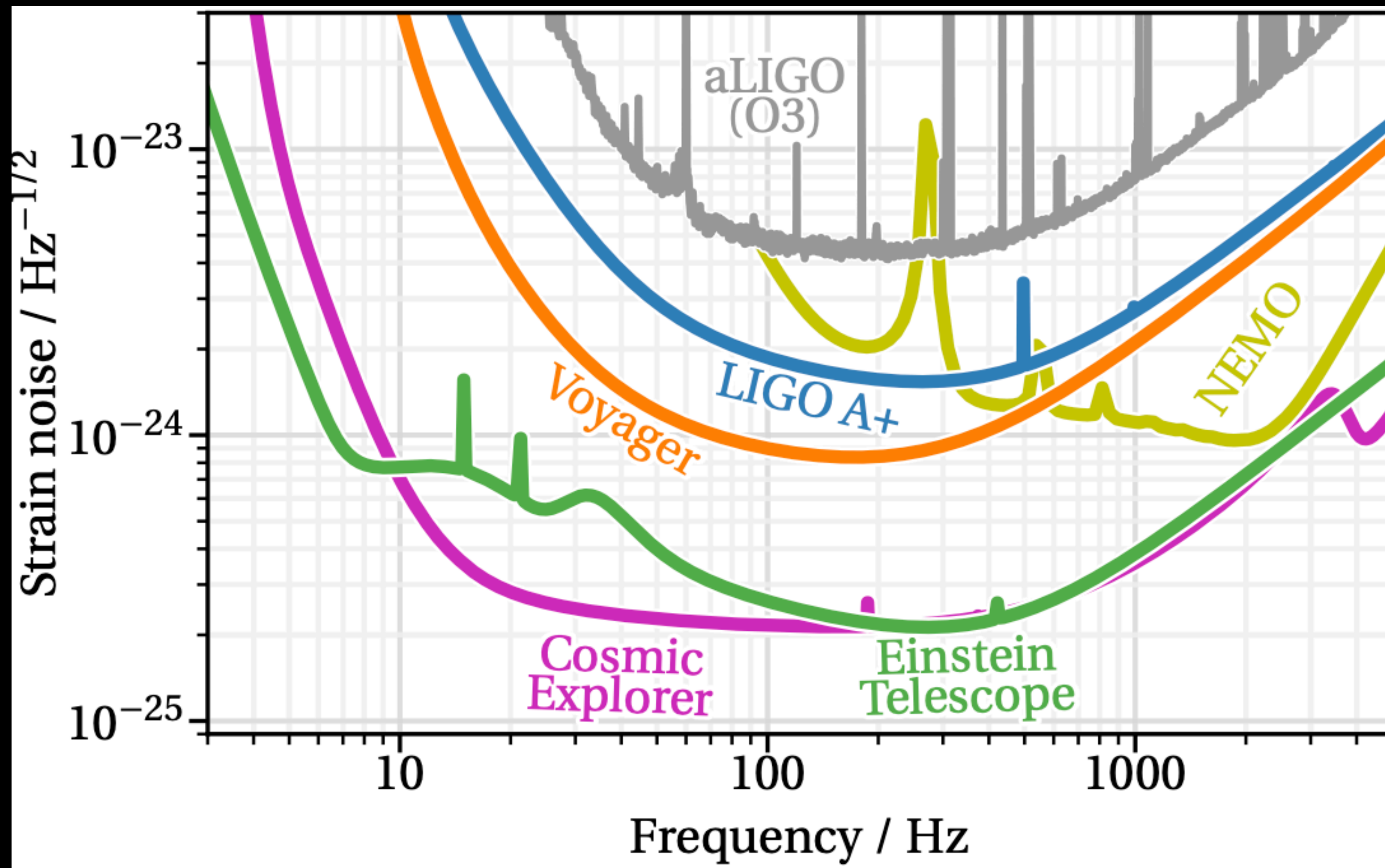


Einstein Telescope
Europe, 10 km de côté

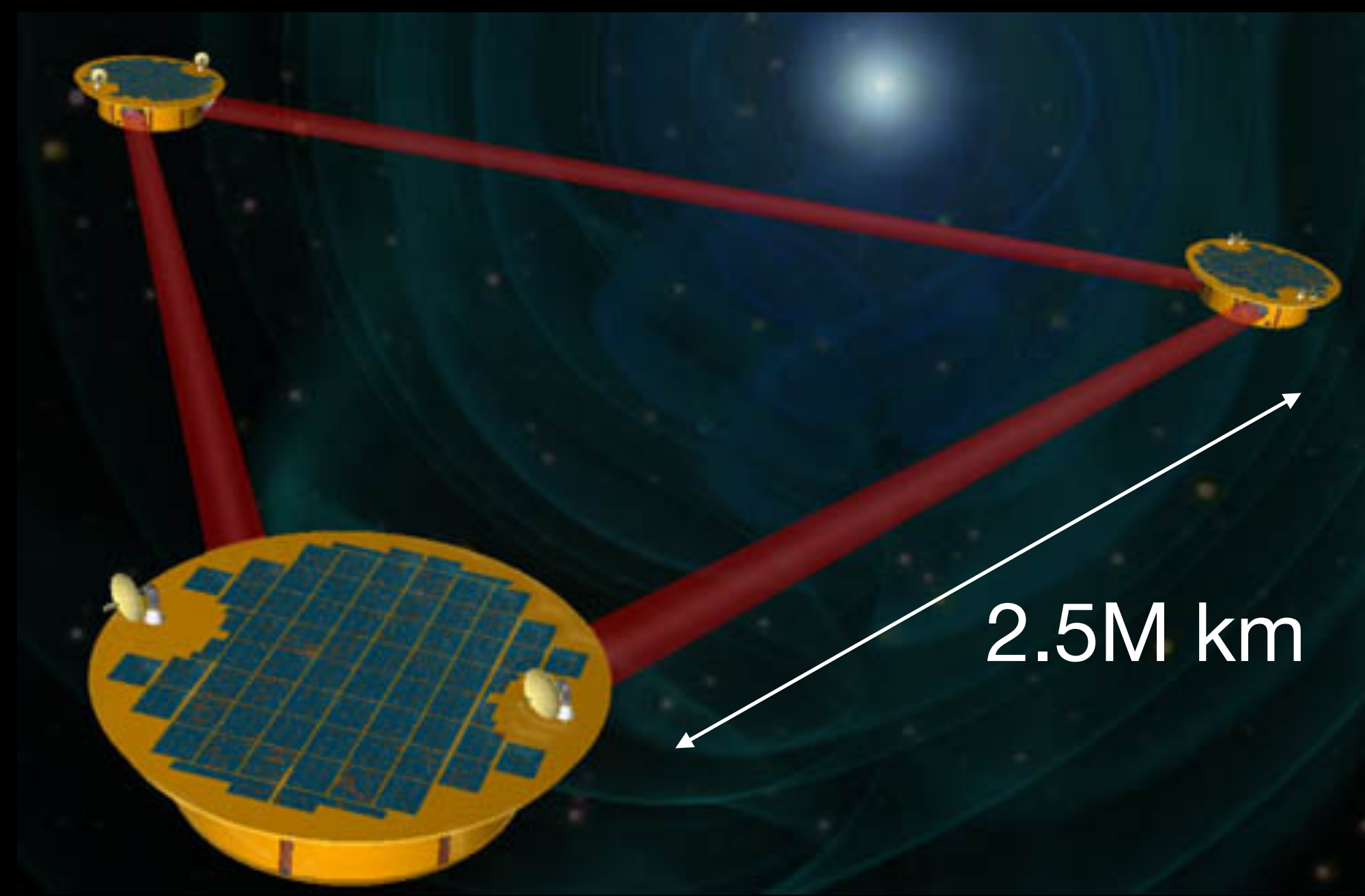


Cosmic Explorer
Etats-Unis, 2 sites, bras de 40 km & 20 km

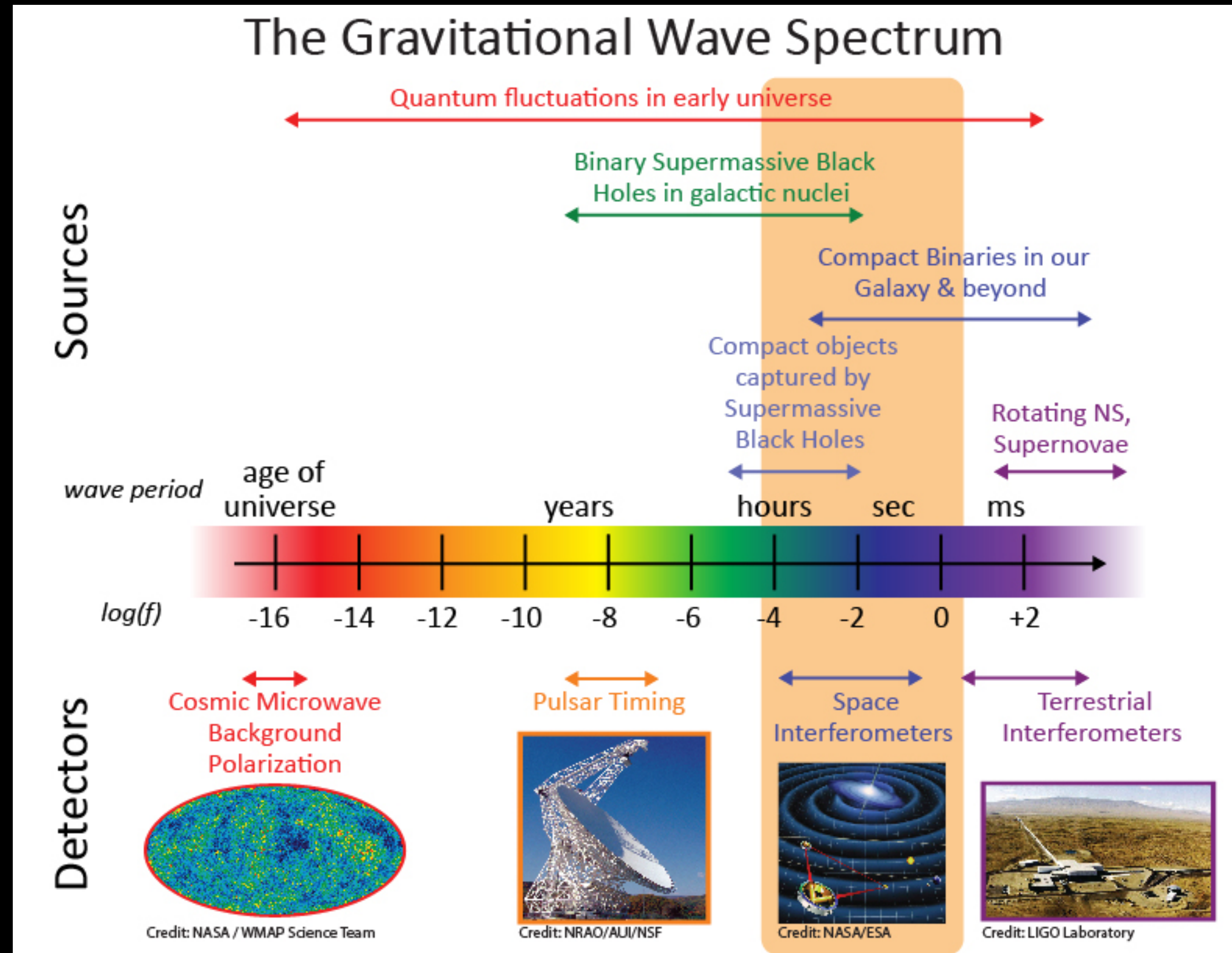
Einstein Telescope et Cosmic Explorer



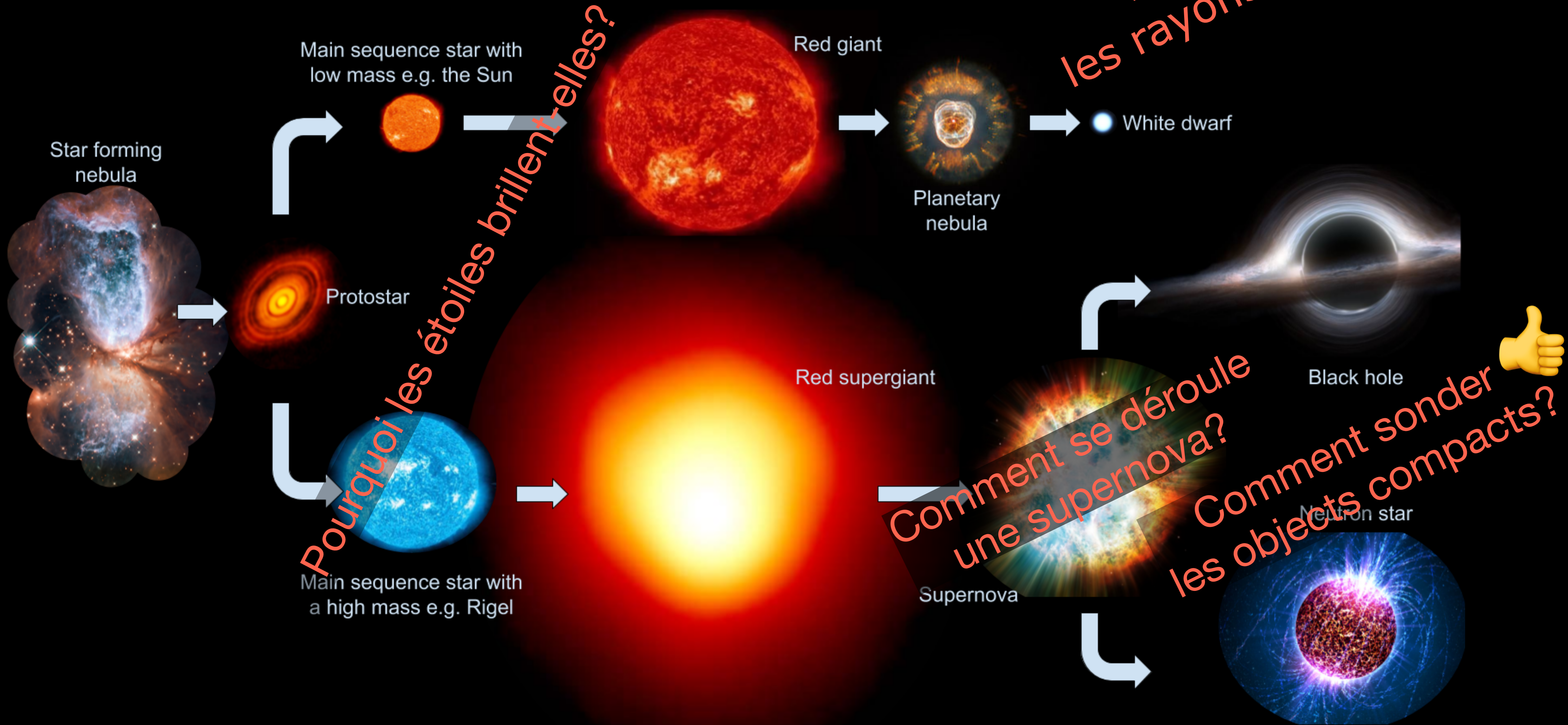
Laser Interferometer Space Antenna



Détection d'ondes gravitationnelles: le paysage

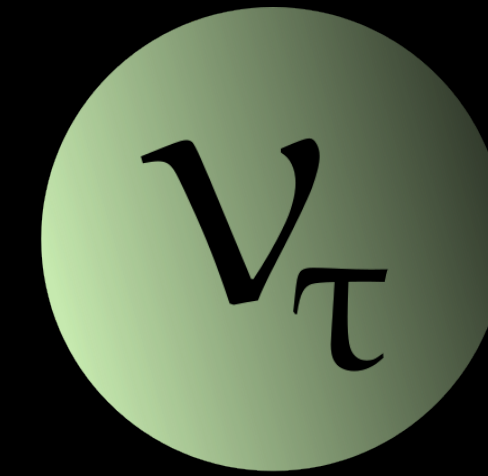


Les questions restantes...

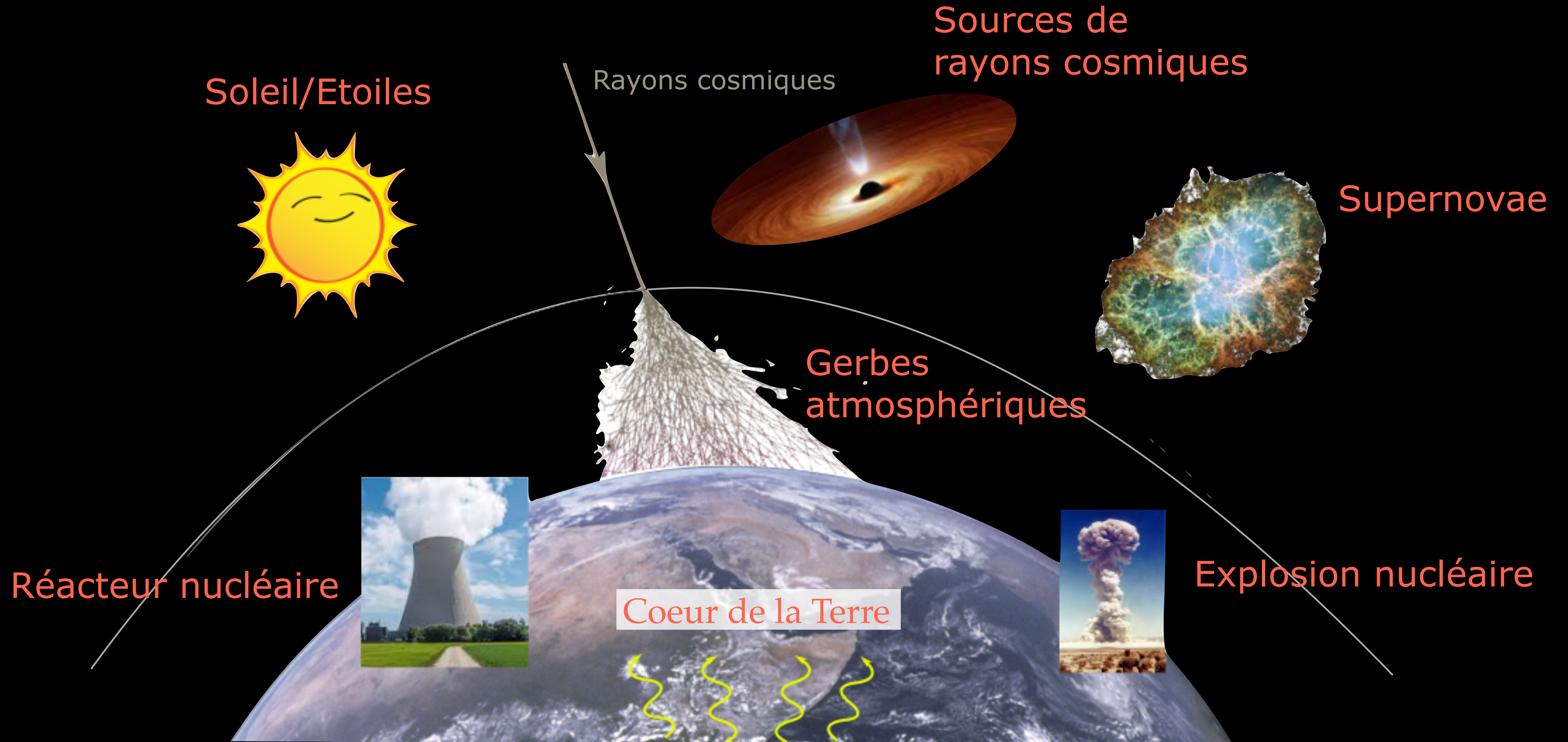


Les neutrinos

- 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

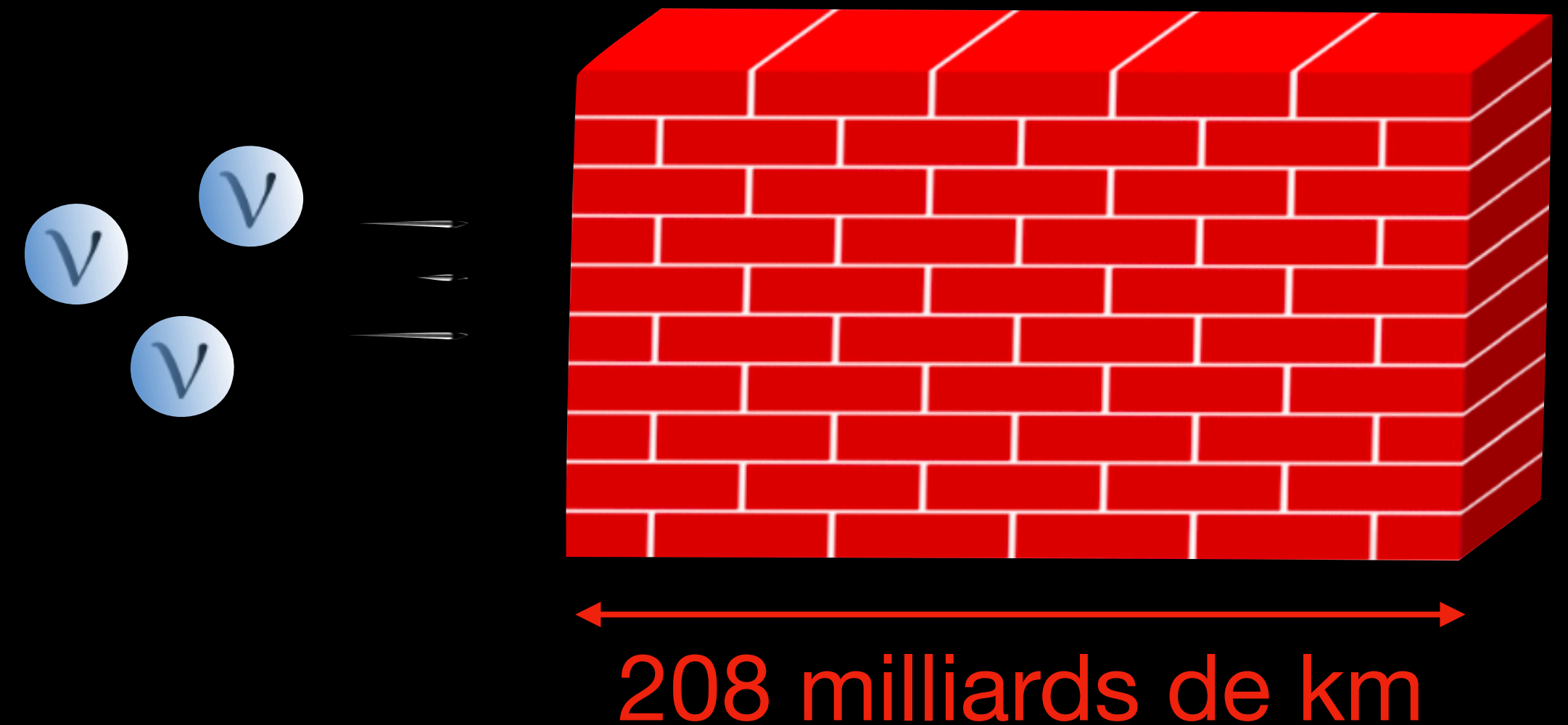
- Section efficace d'interaction

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

- 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:



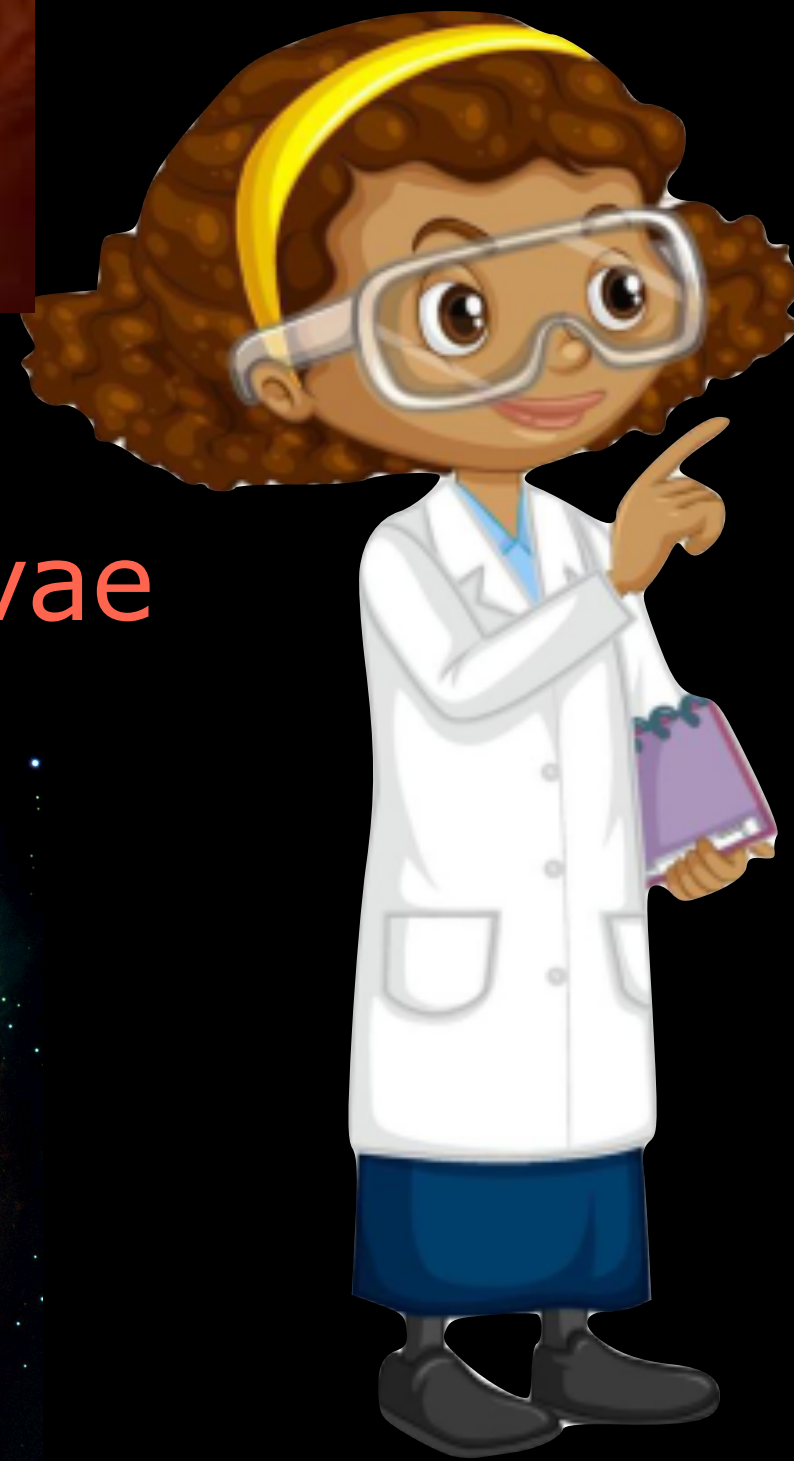
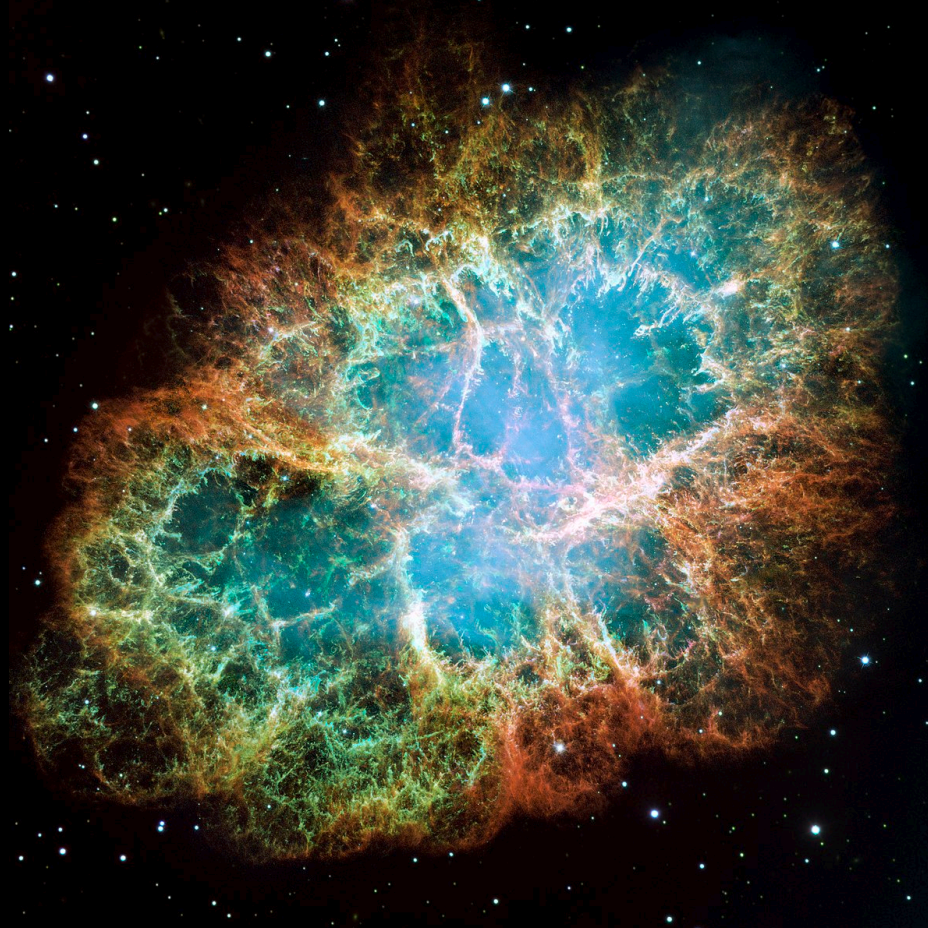
$$d = \frac{1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}}{(7 \times 10^{-42} \text{ cm}^2) \times (11400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3})}$$

Un scanner pour l'Univers

Trouver les sources
de rayons cosmiques



Sonder les supernovae



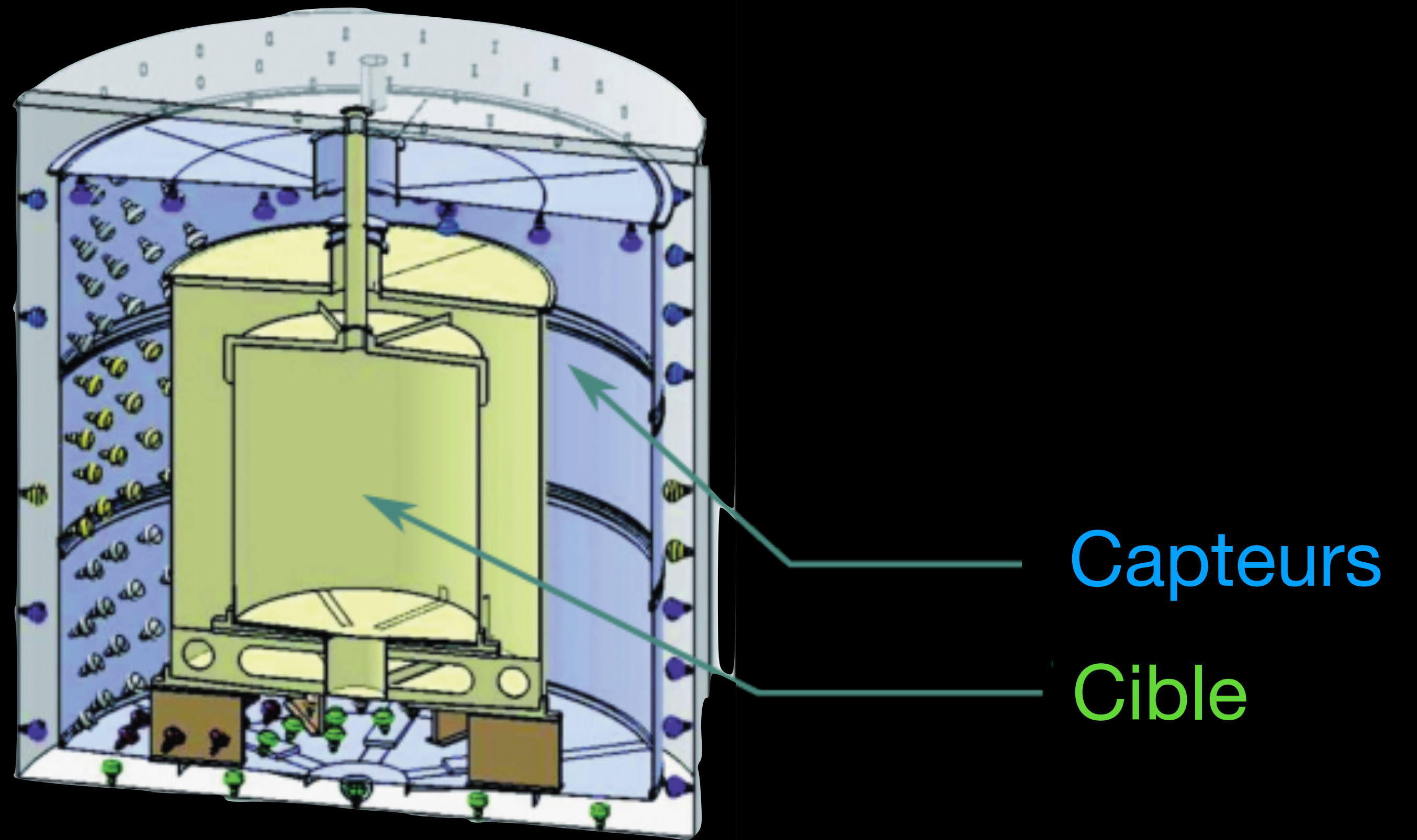
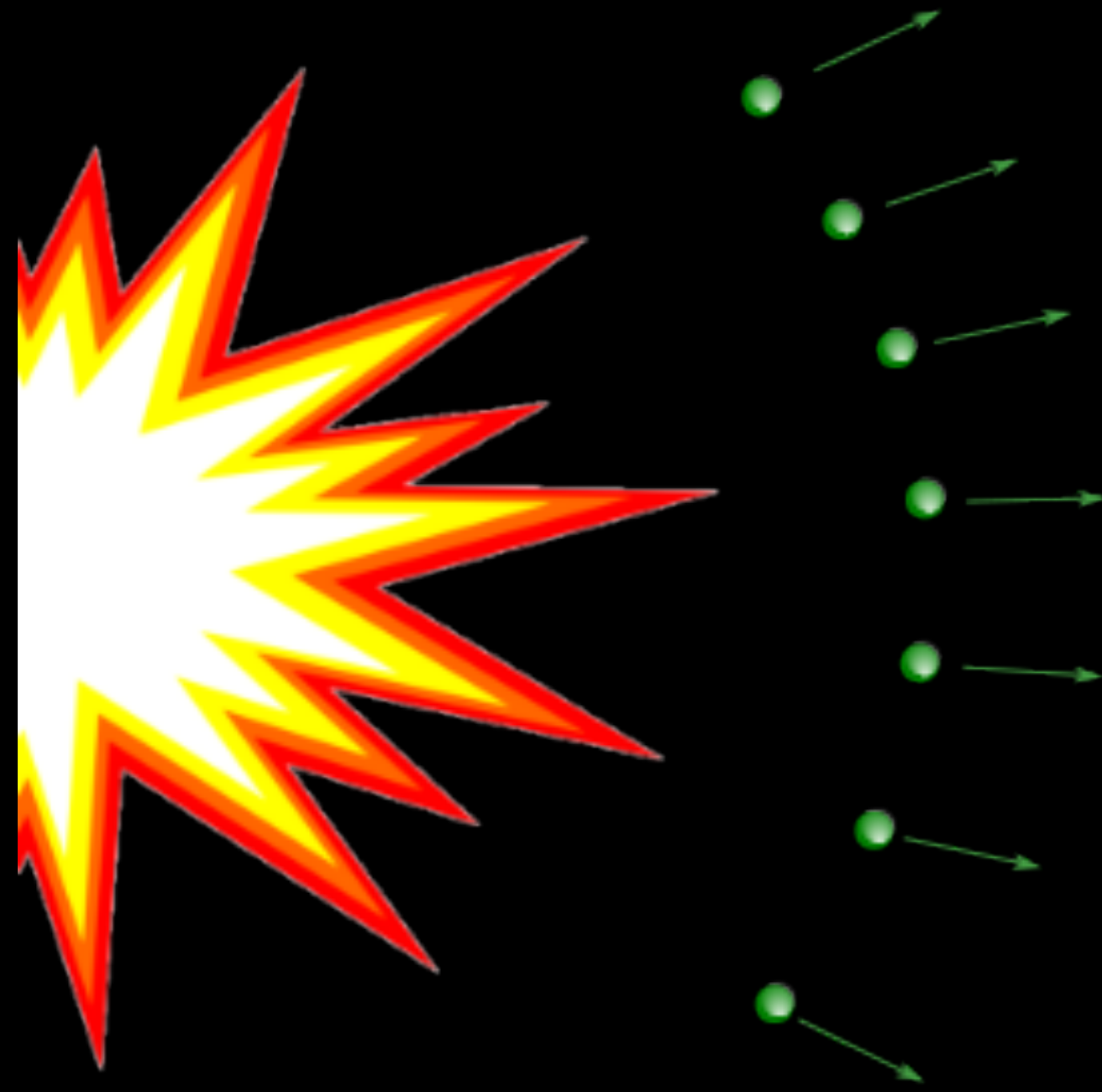
Explorer le coeur
des étoiles



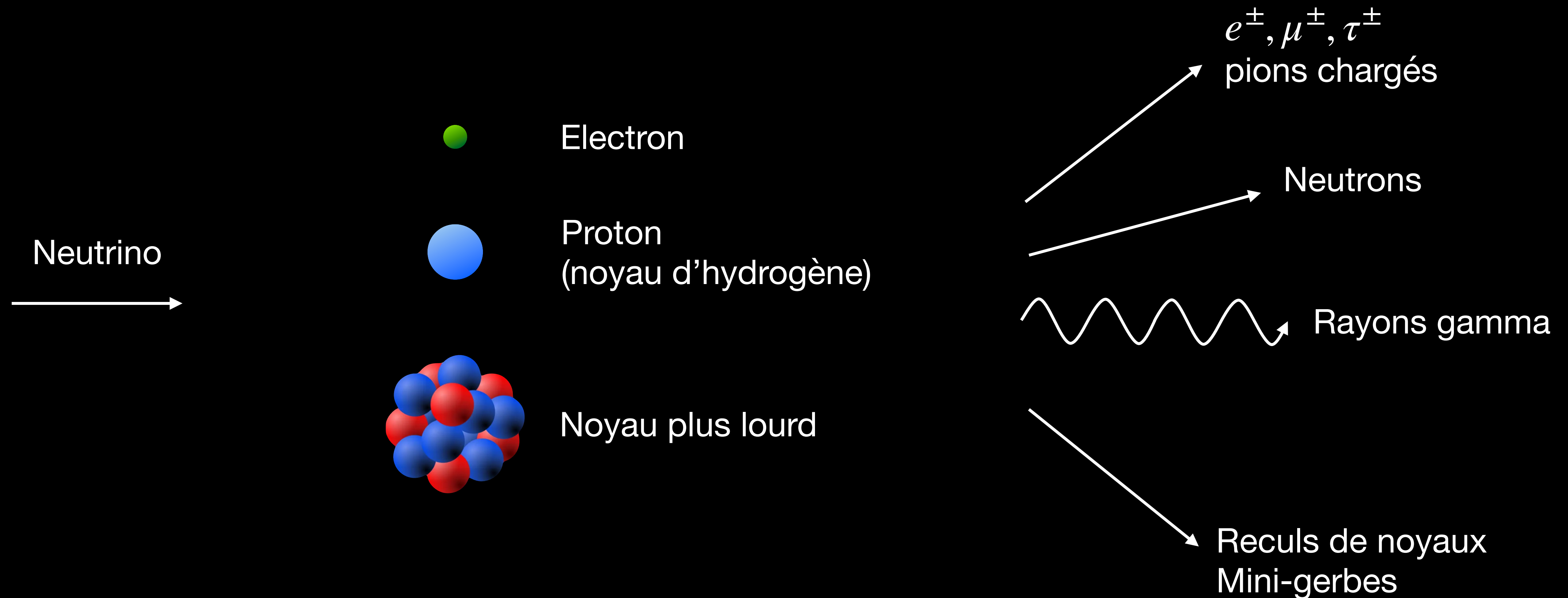
Détection de particules (quasi-)indétectables

Tutoriel

Source

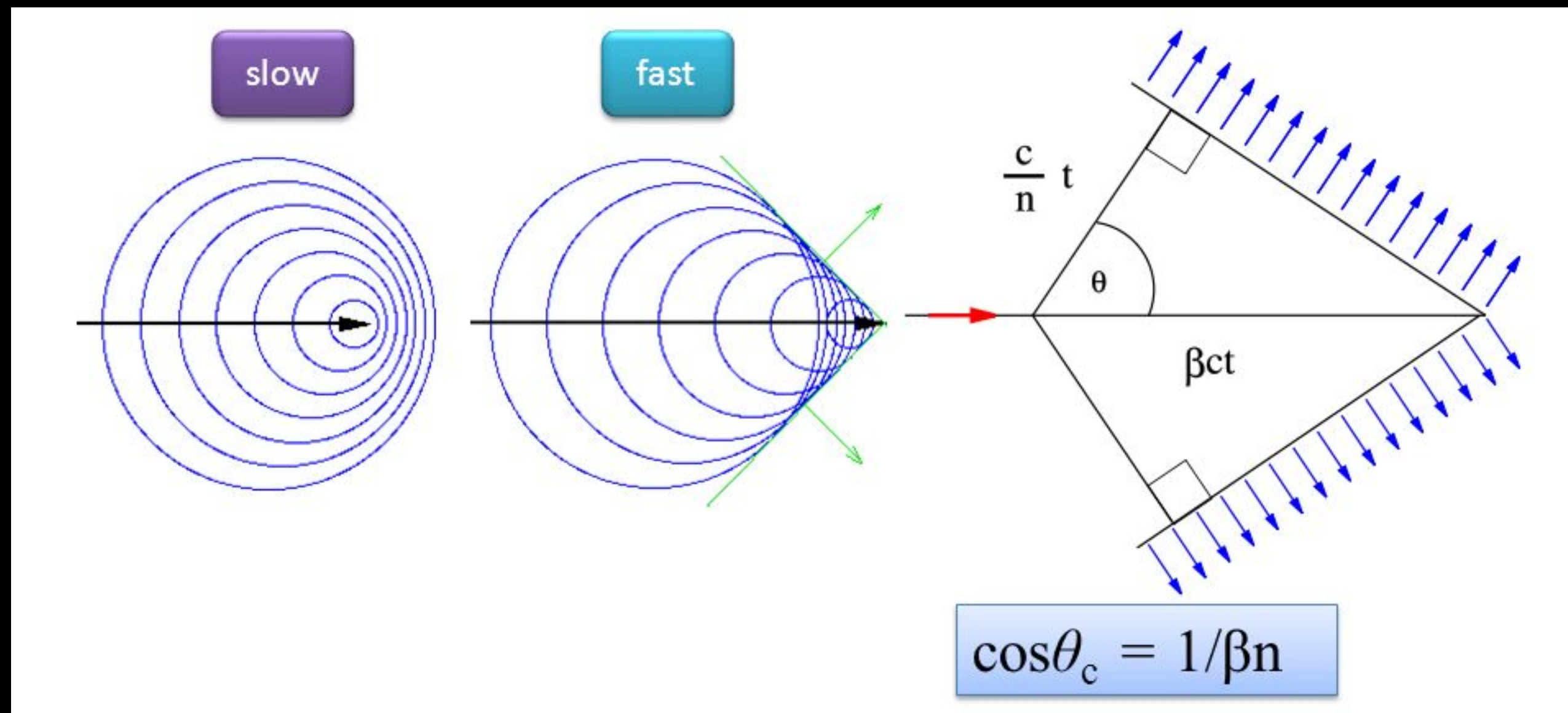
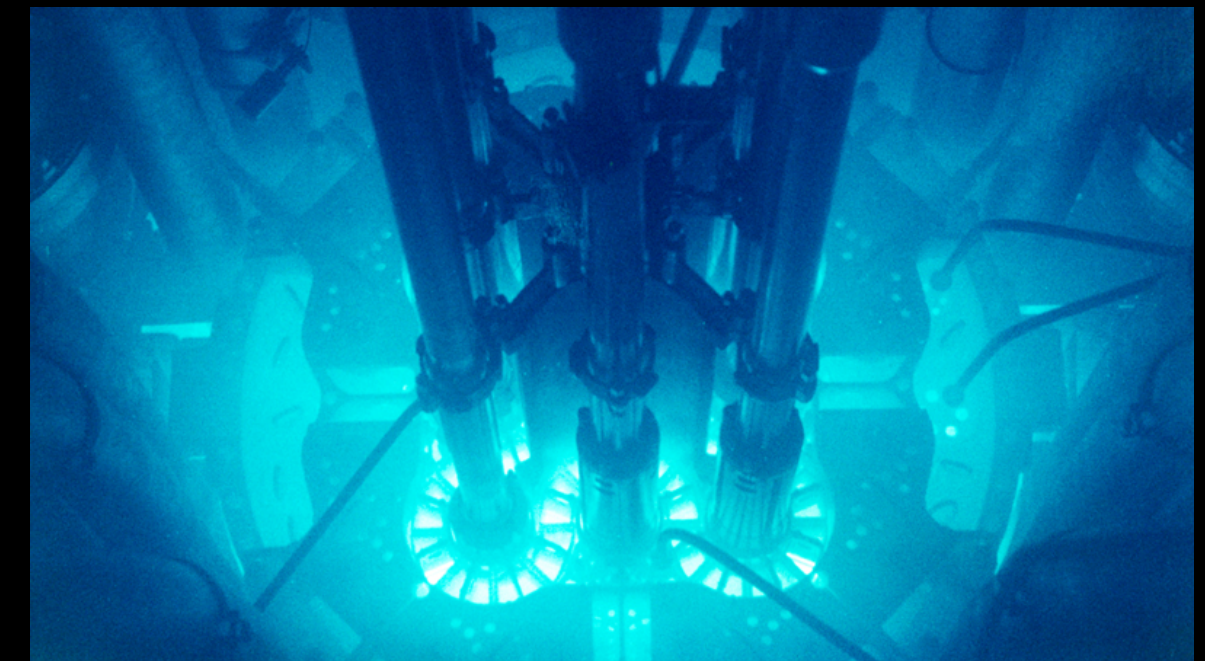
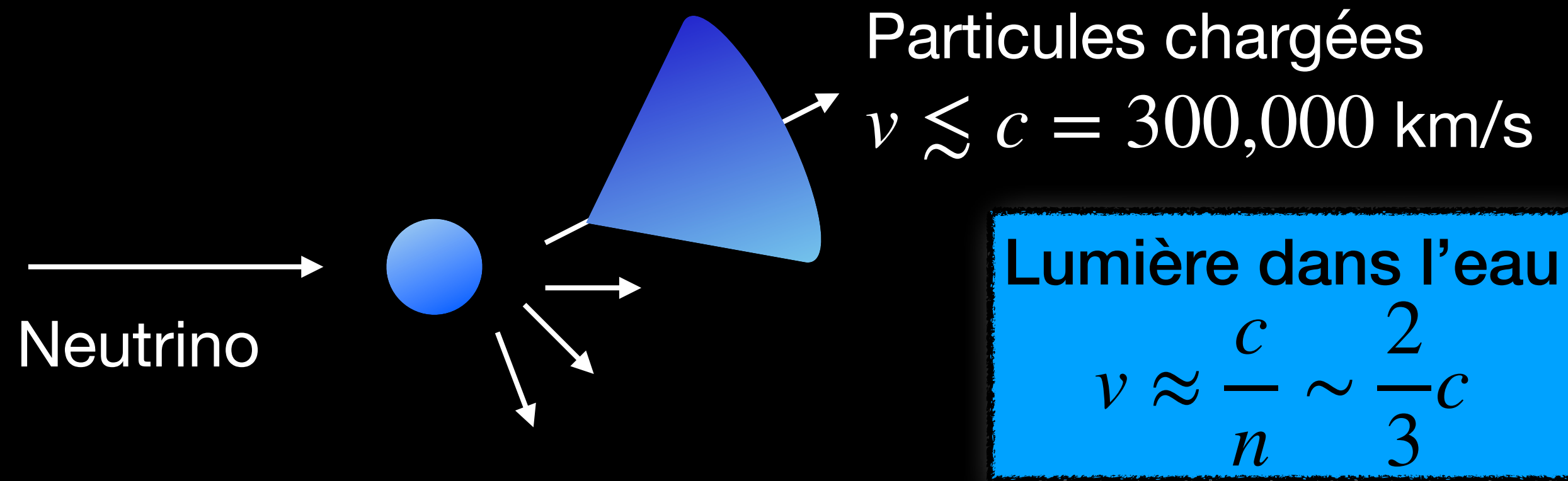


Cible de détection et signatures d'interaction



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

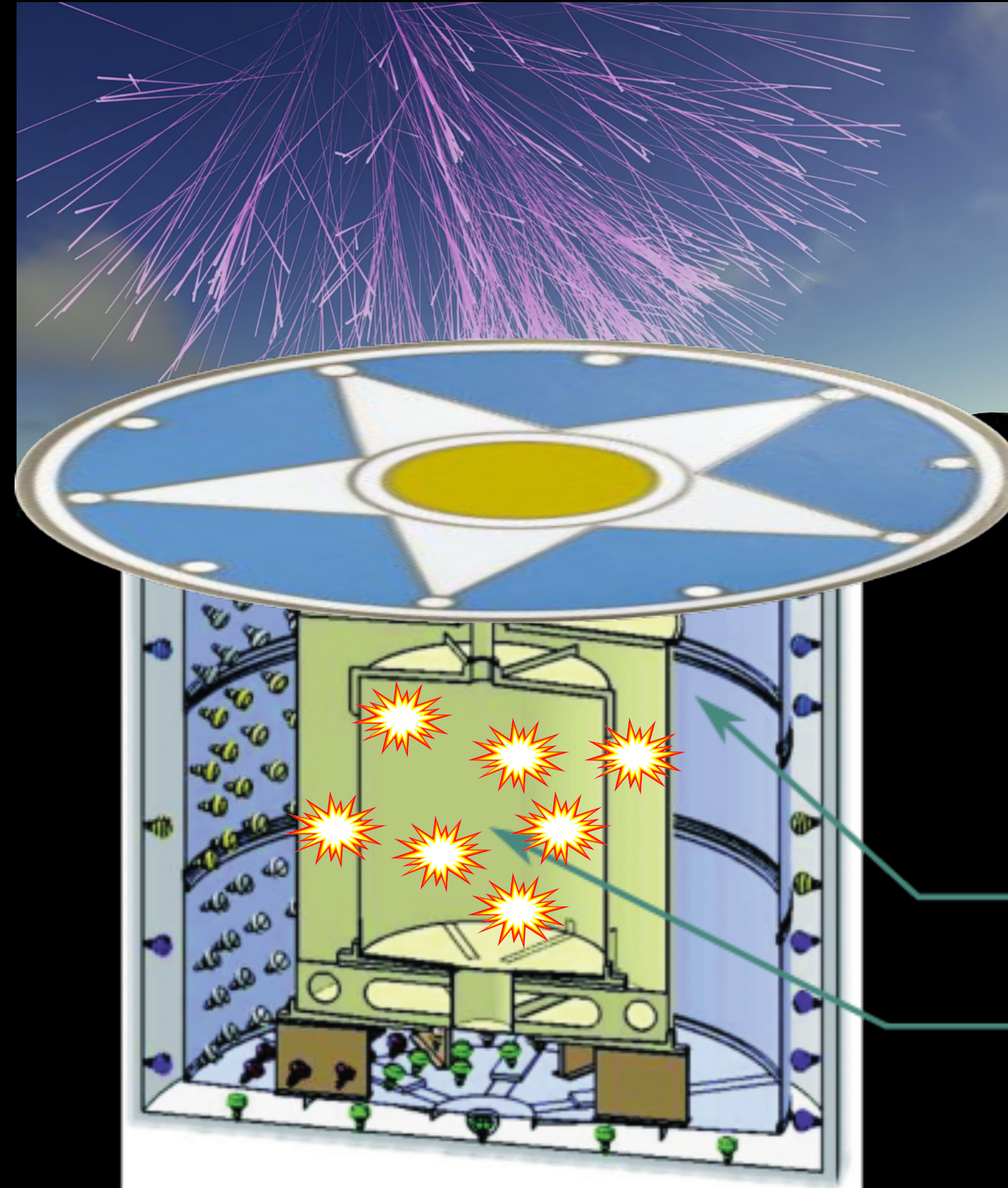
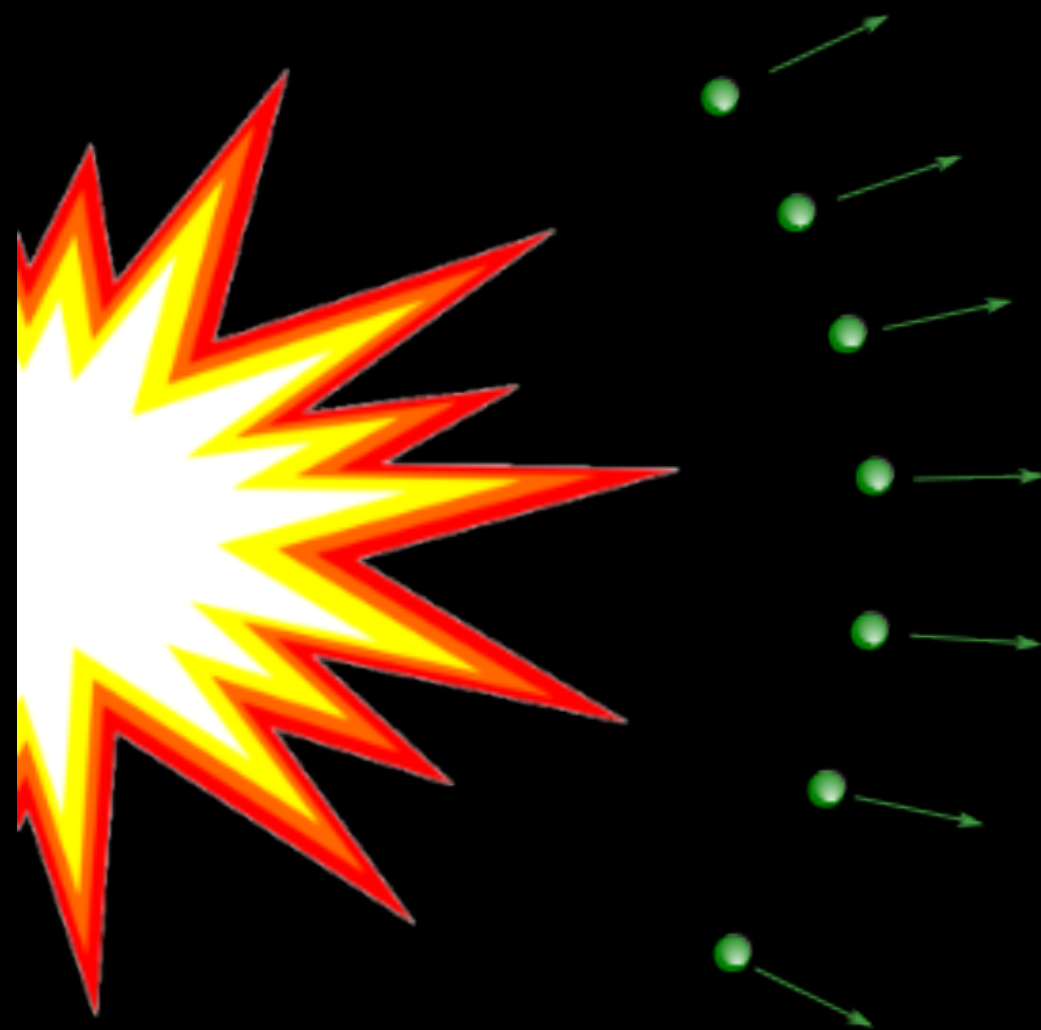


Photomultiplicateurs

La pièce manquante: bloquer les rayons cosmiques

Enterrer le detector pour que seuls les neutrinos l'atteignent

Source

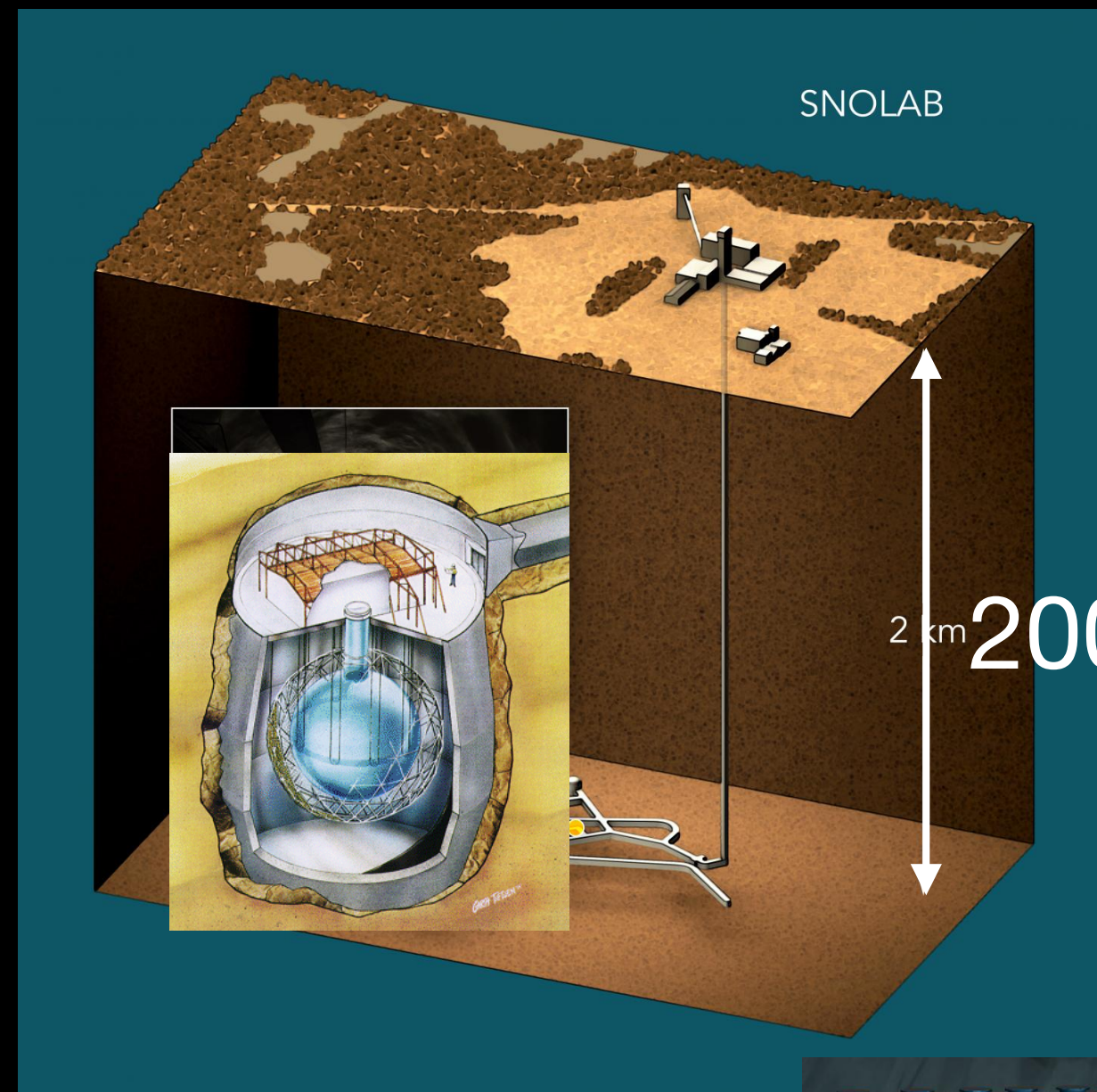


Gerbes atmosphériques

Capteurs

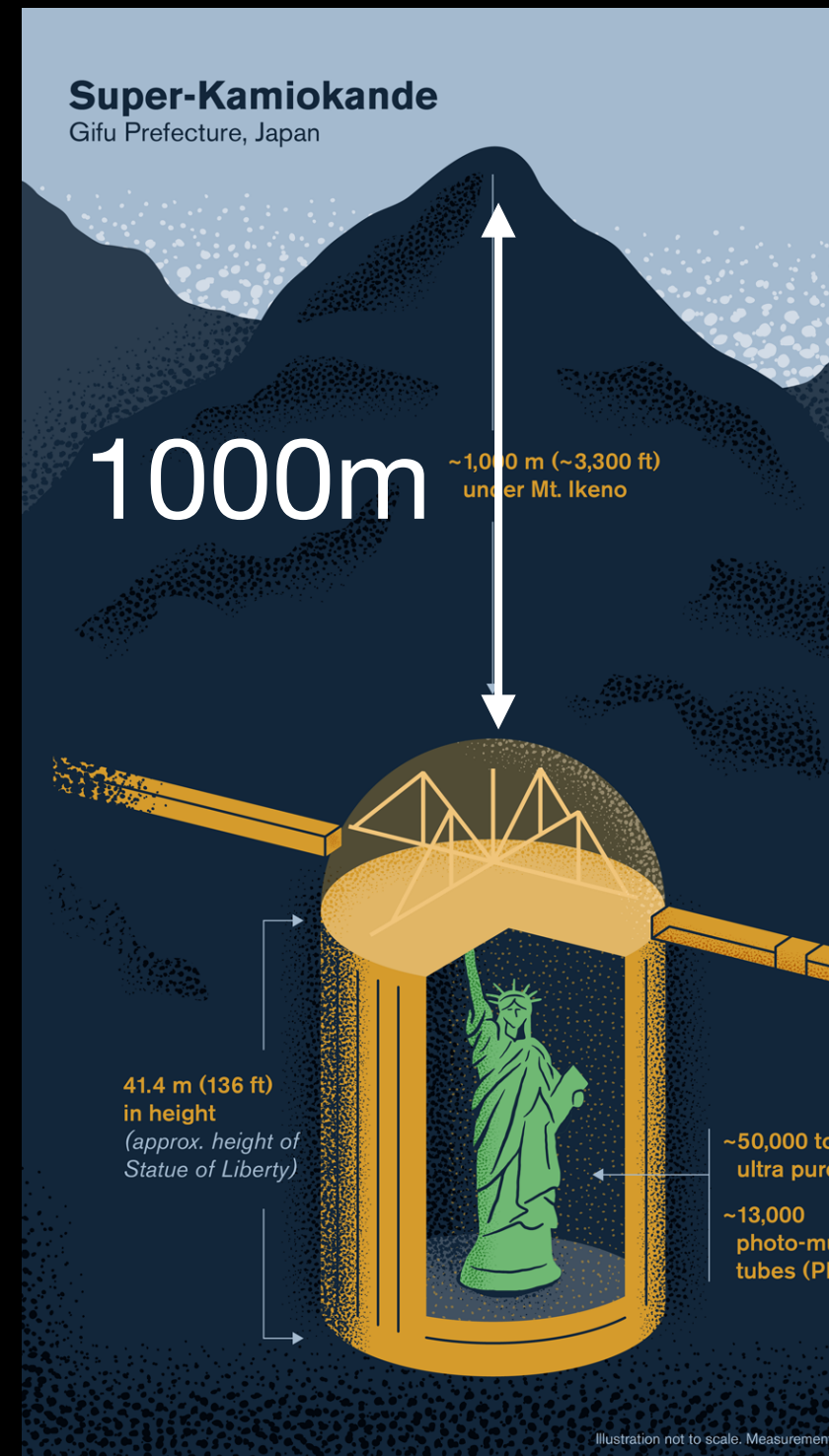
Cible

Exemples de détecteurs de neutrinos

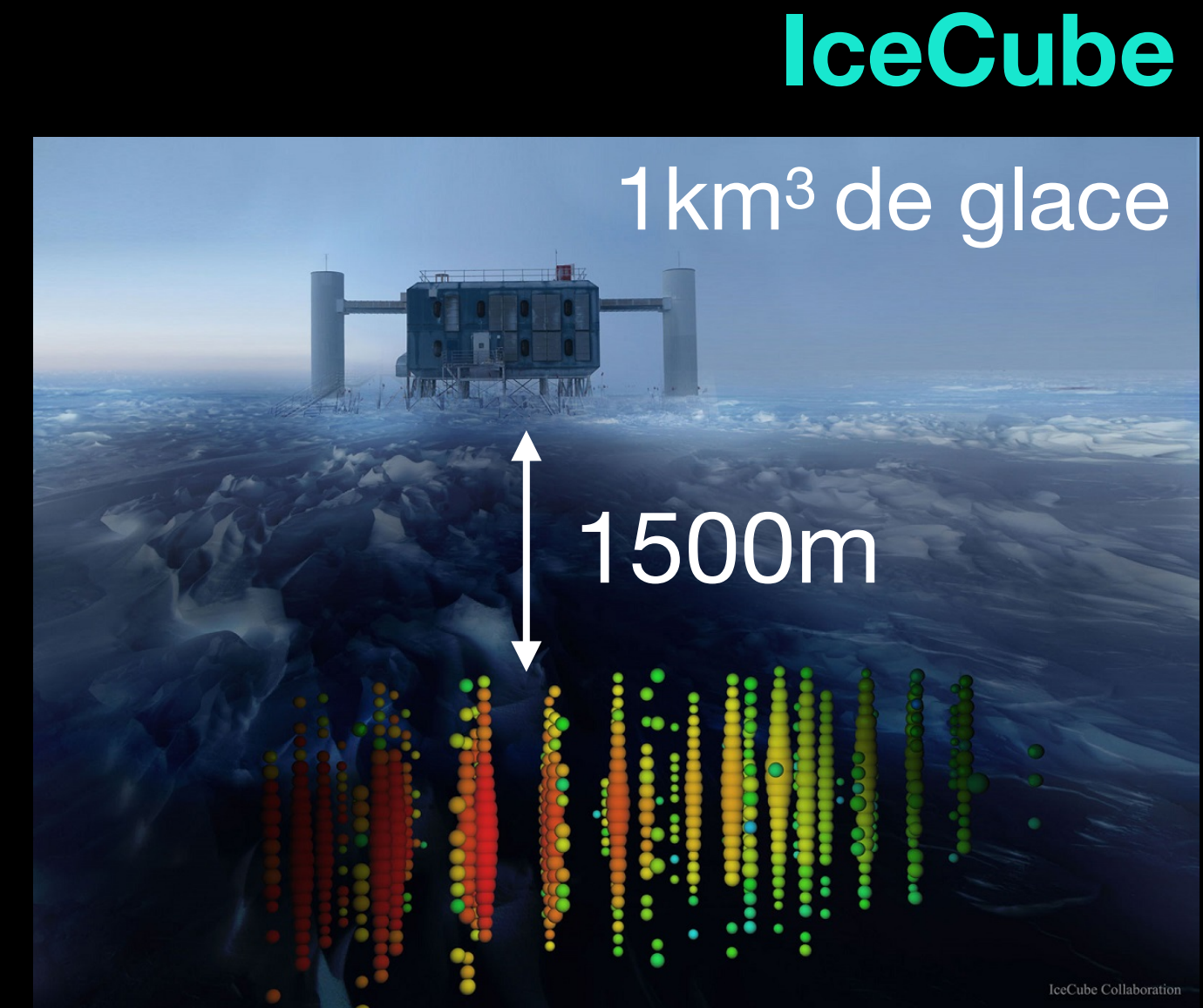


SNO
1000T
Eau lourde

2 km 2000m



Super-Kamiokande
50,000T d'eau



KM3NeT



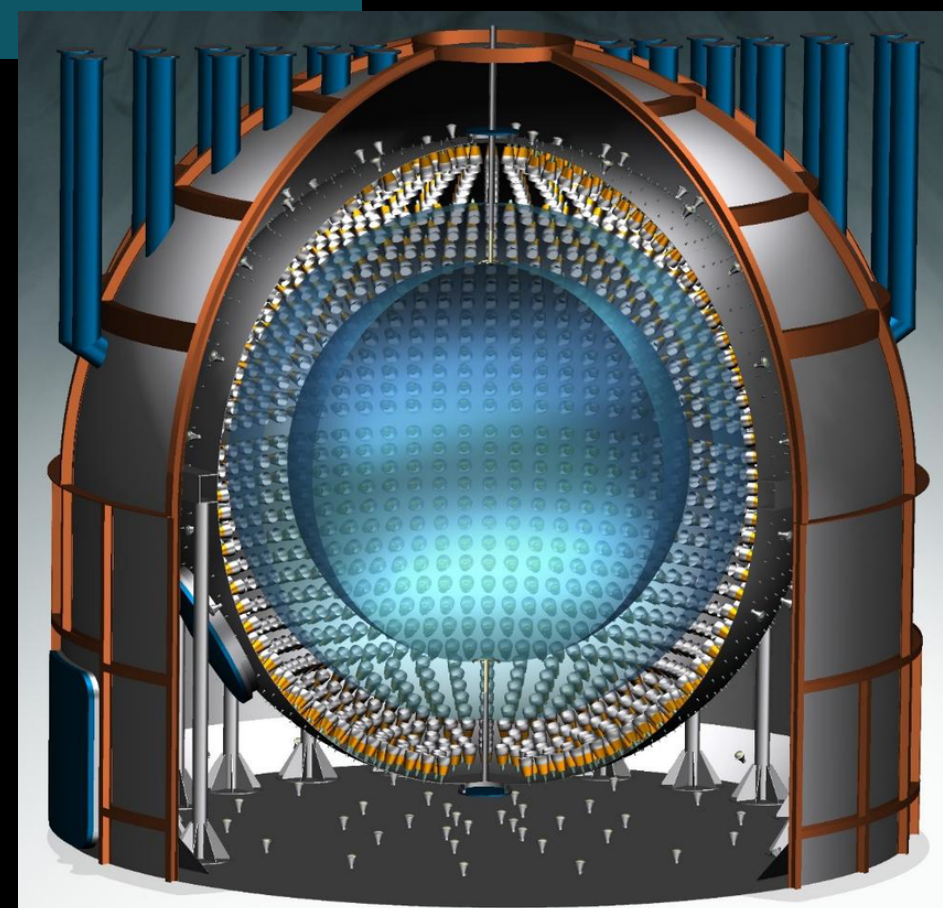
2500-3500m de profondeur

Borexino

278T

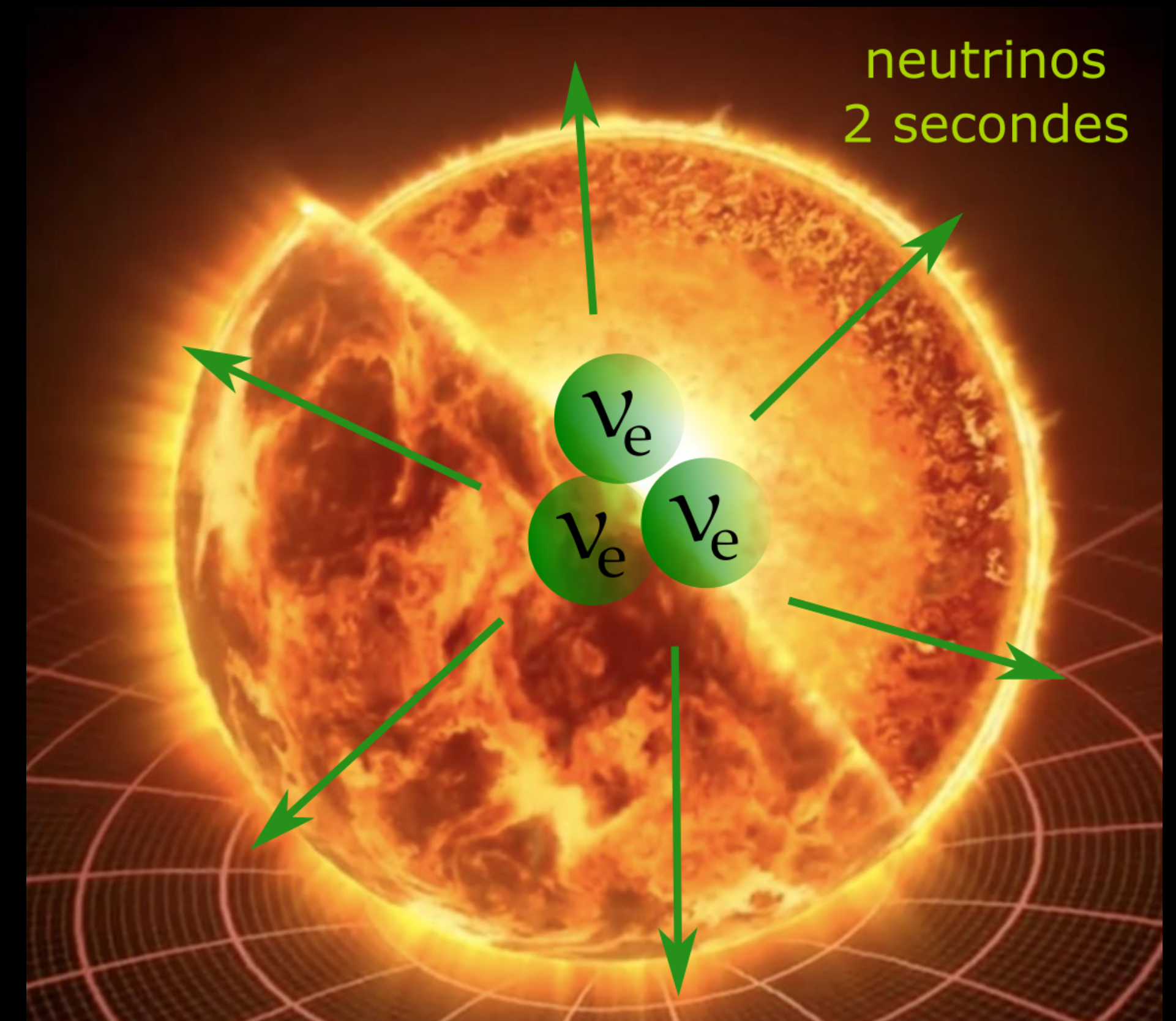
2007-2021

Profondeur: 1400 m



Astrophysique des neutrinos: le Soleil

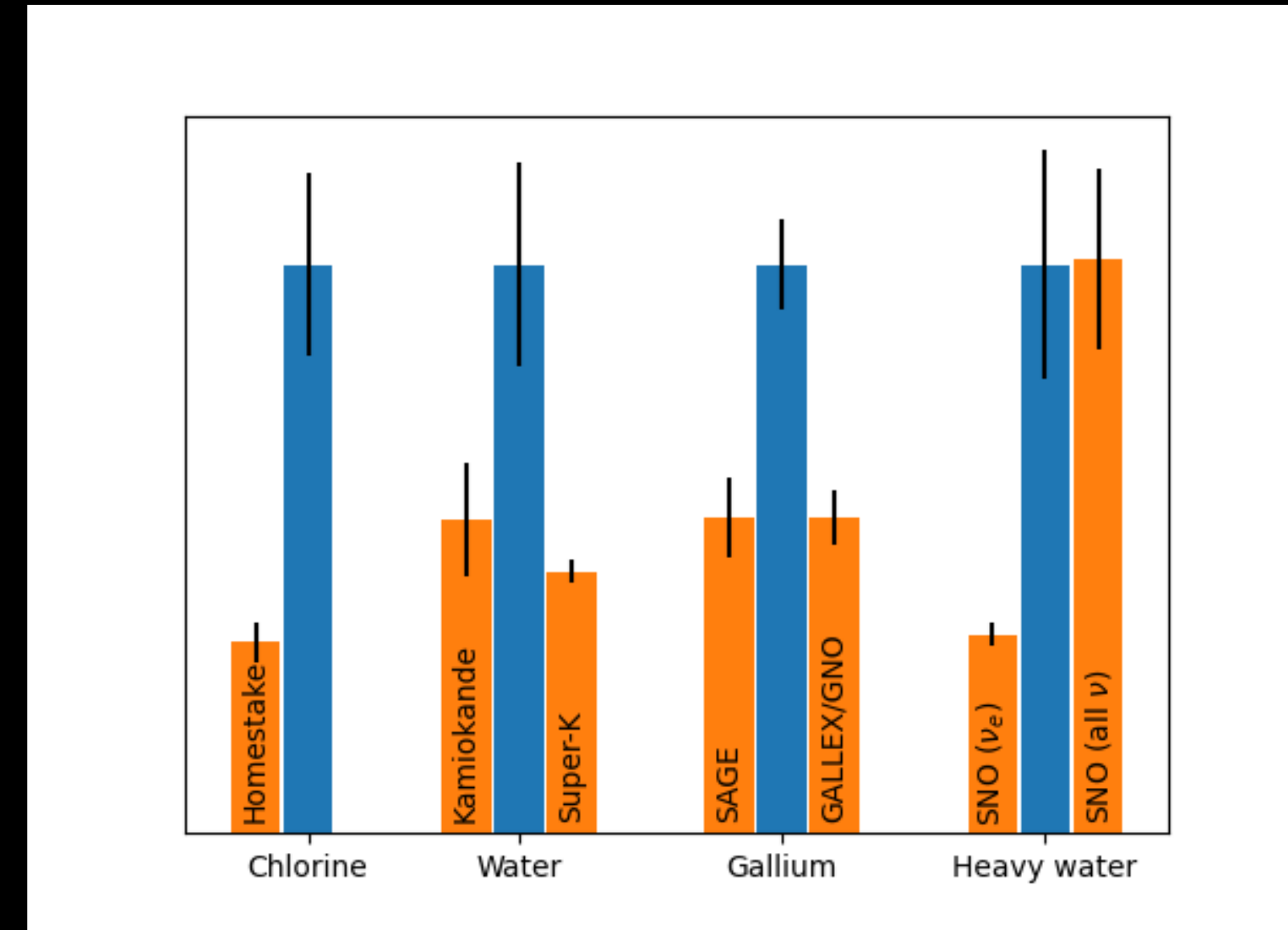
- Pourquoi les étoiles brillent-elles?
Hypothèse: fusion nucléaire dans leur coeur
- Identifier les produits de fusion?
Rayons gamma → 100,000 ans pour sortir
Neutrinos → 2s, en ligne droite
- Les spectres de neutrinos (1-20 MeV) permettront d'identifier tous les processus de fusion!



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



ν_e



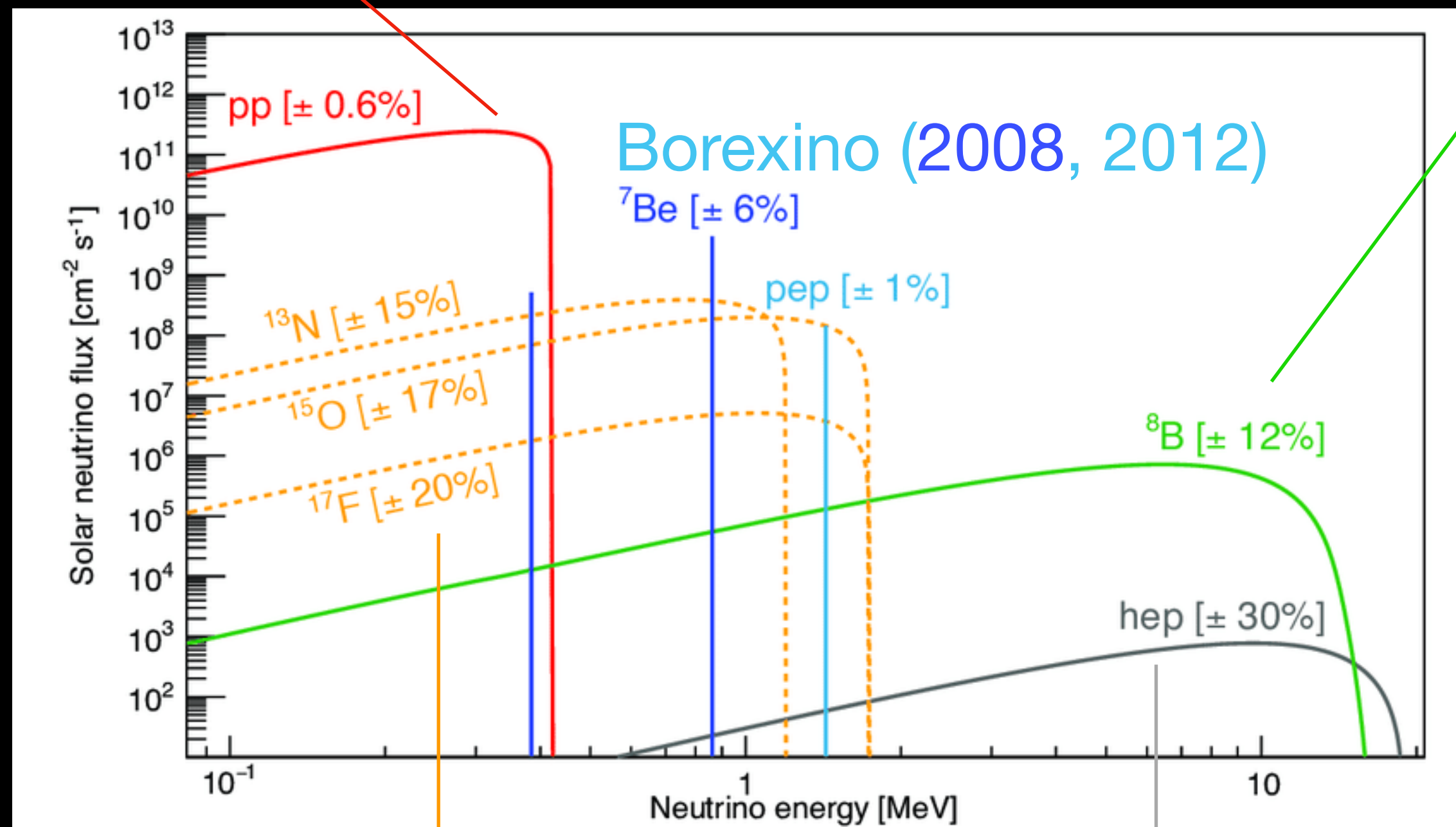
- ❖ R. Davis, mine de Homestake (USA), 1970-1994
- ❖ 380T de tétrachlorure de carbone, 1478m sous terre
- ❖ 2/3 du flux prédit de neutrinos est "perdu"! Que se passe t'il?

Sonder le coeur du soleil avec les neutrinos

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

Galex, SAGE (1992-94)

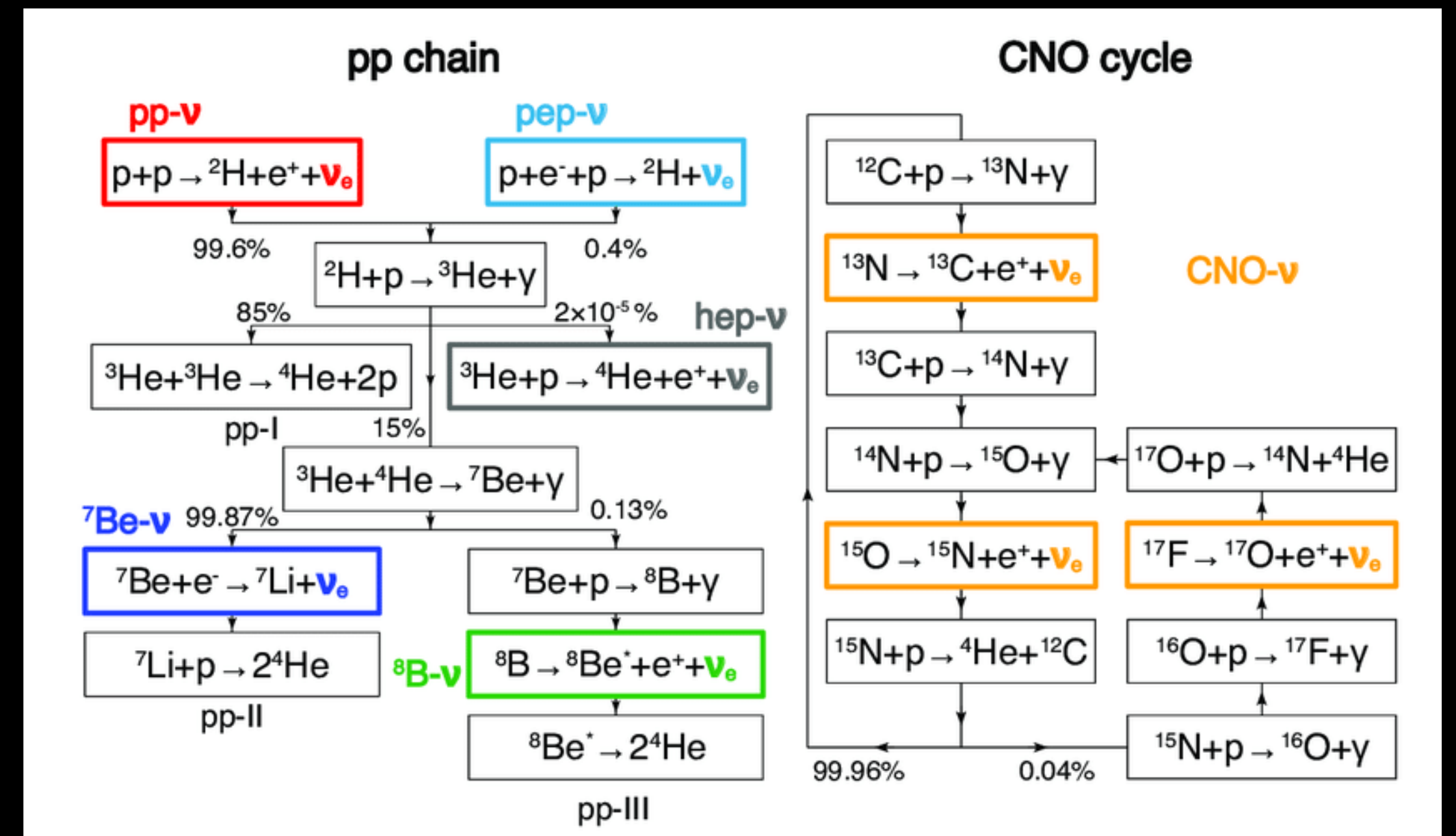
Homestake (R. Davis)



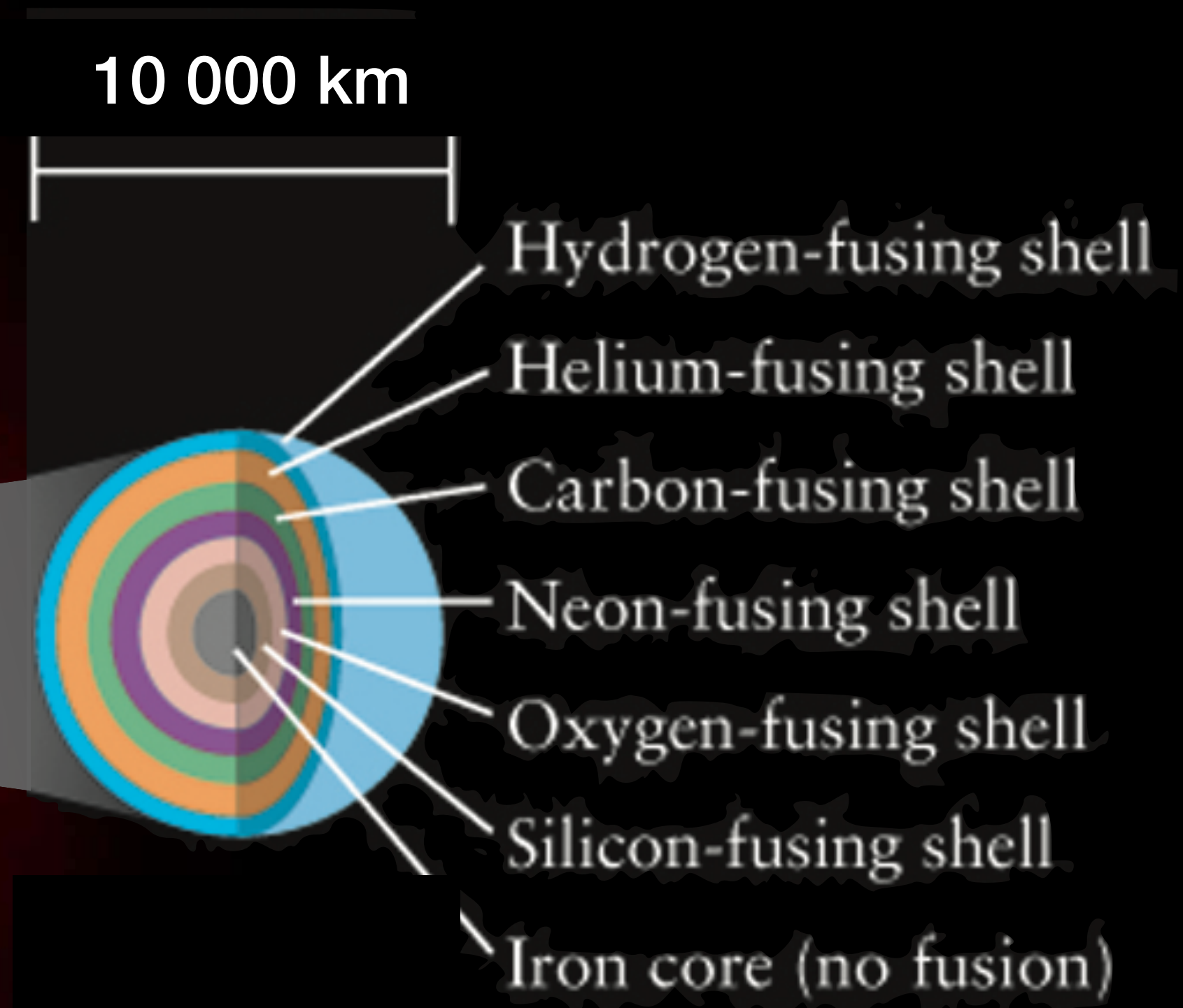
Borexino (2008, 2012)

Borexino (2020)

Encore non détecté!



Etapes de fusion et fin de vie des étoiles

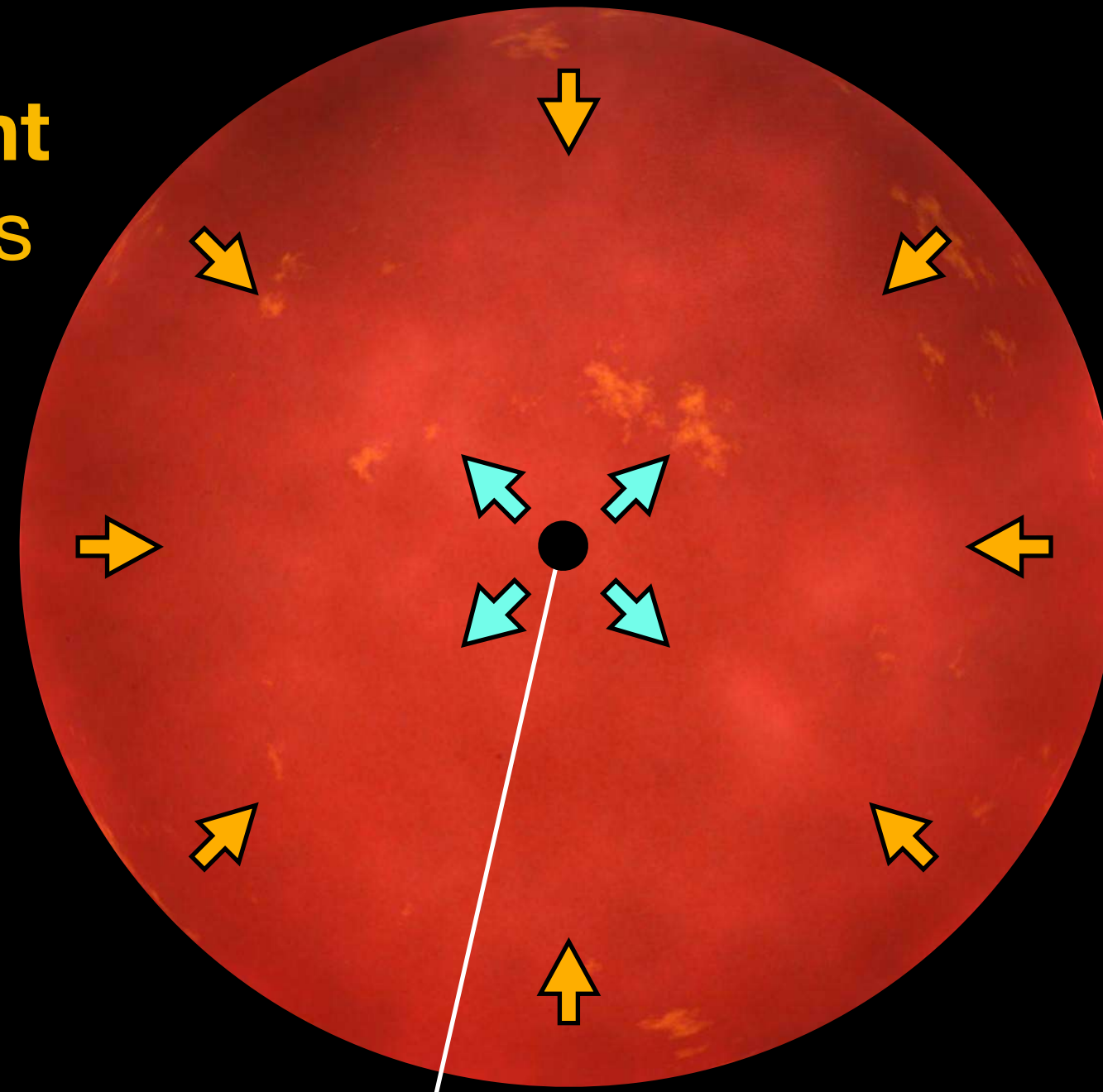


Red giant
> 8 solar masses

Le déroulement d'une supernova

Etape 1: Effondrement du coeur de l'étoile

Effondrement
Durée: ~0.02s



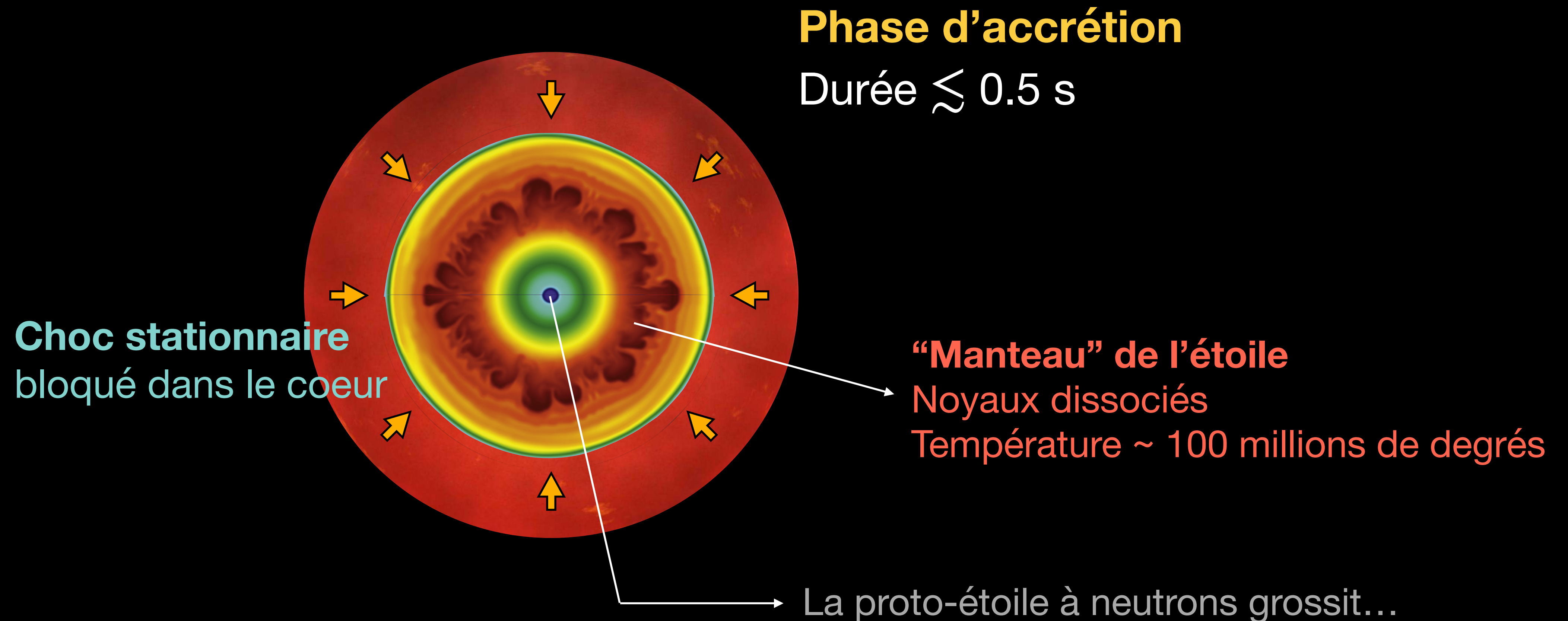
Région interne du coeur
Diamètre: ~1000 km

Dissociation des noyaux
Proto-étoile à neutrons
Diamètre ~20 km

Rebond et onde de choc
La matière en chute libre
rebondit sur la proto-étoile à neutrons

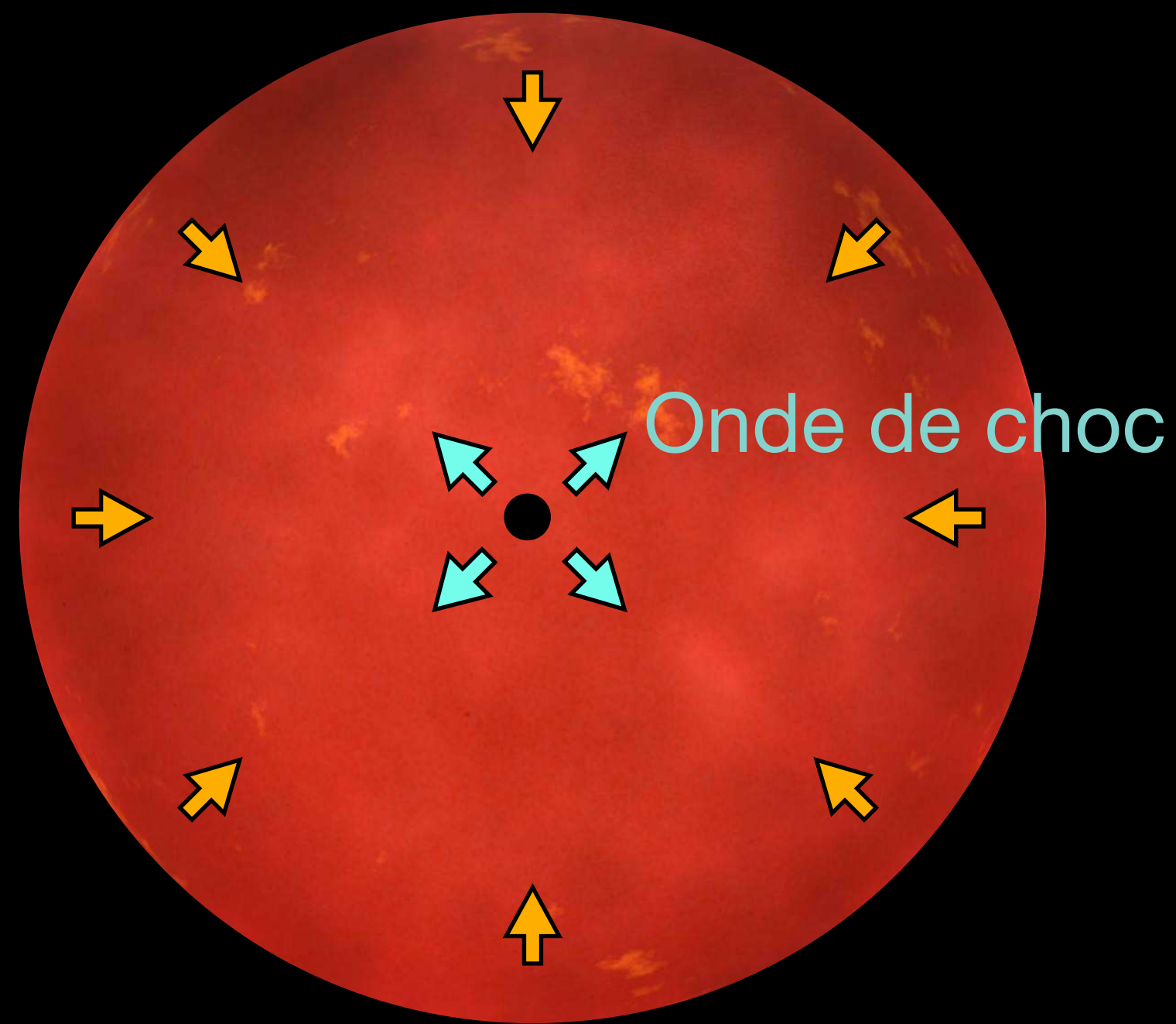
Le déroulement d'une supernova

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



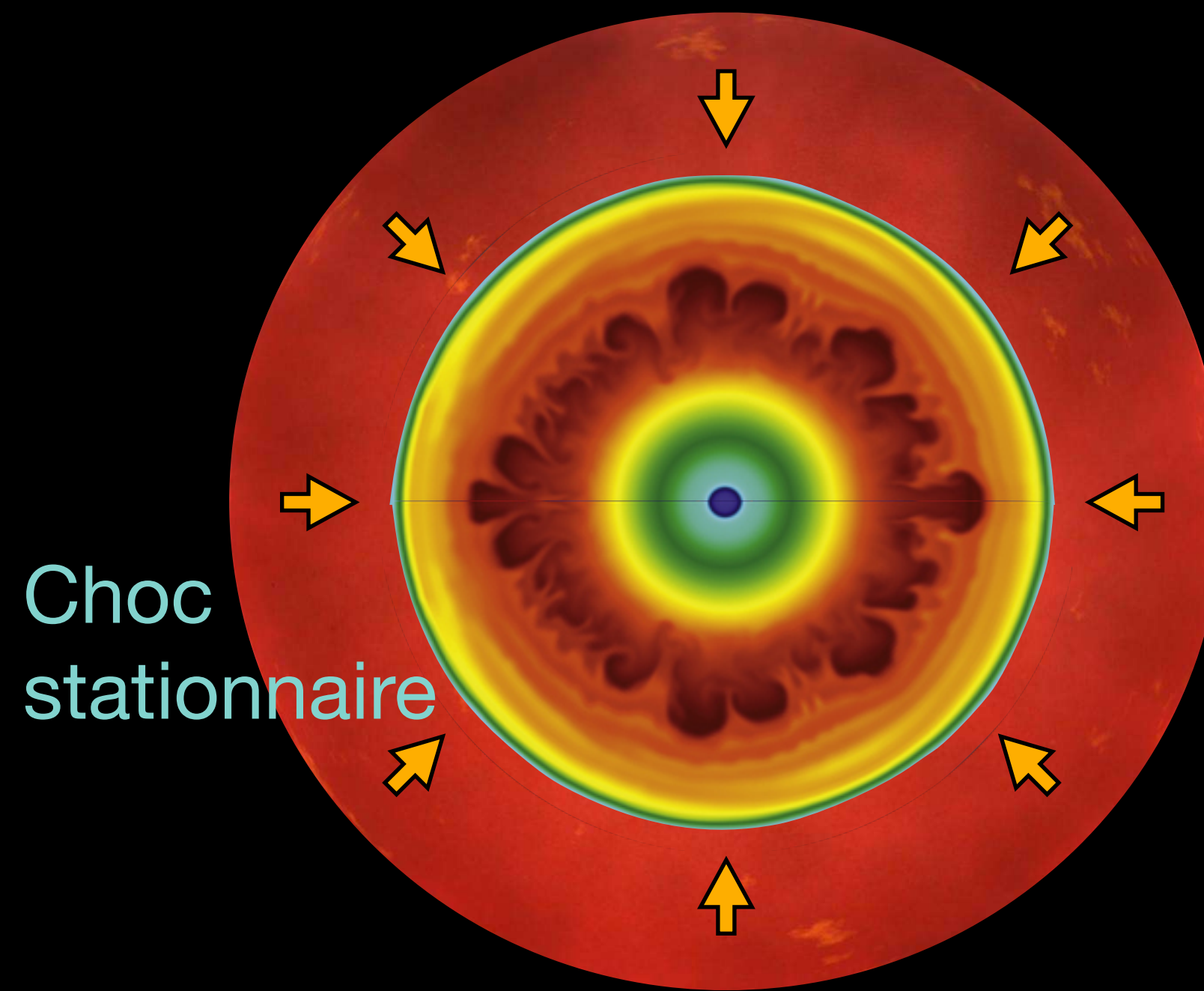
Issue de la supernova

Un chaînon manquant



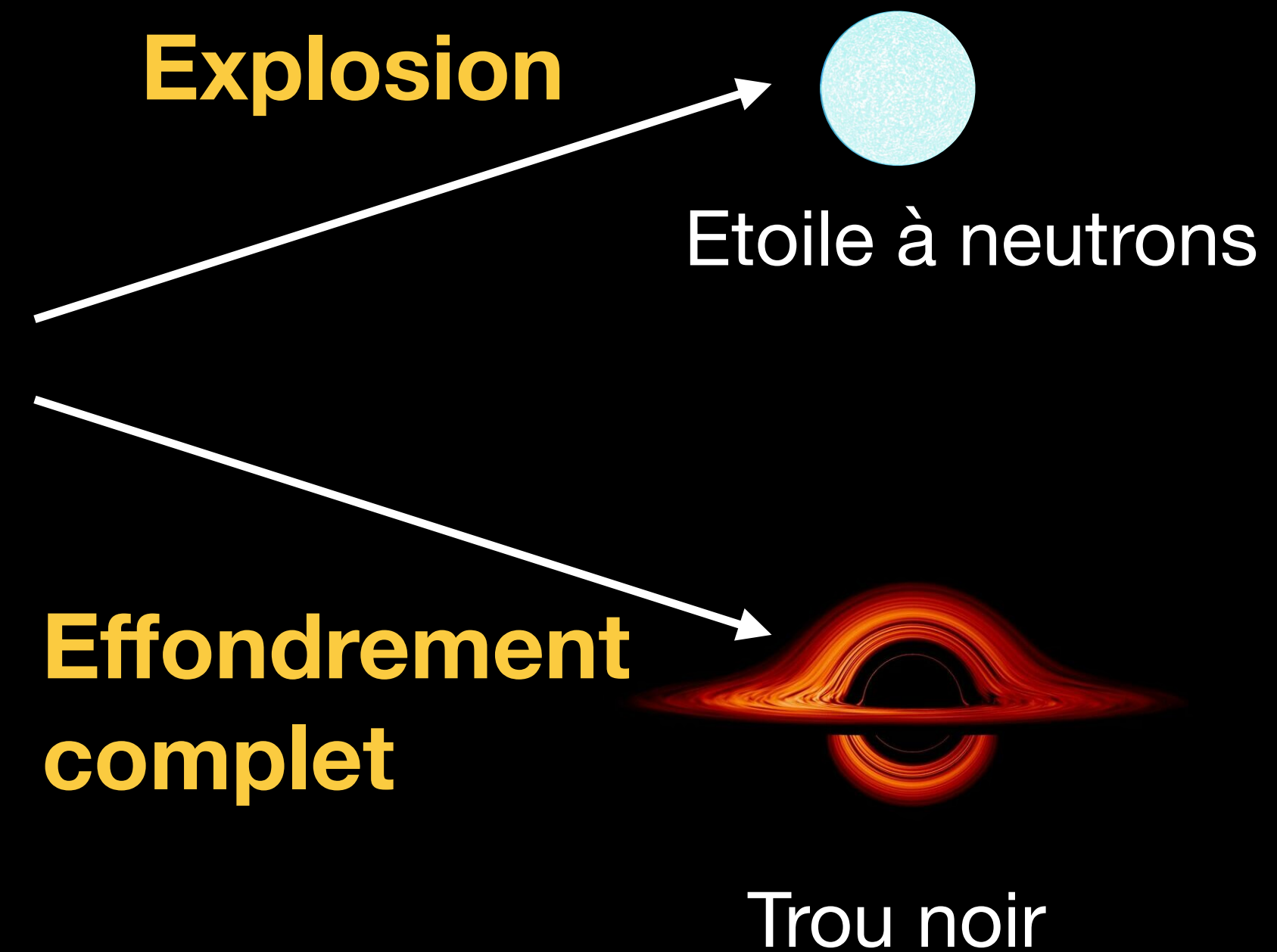
Effondrement et rebond

$\mathcal{O}(10)$ ms



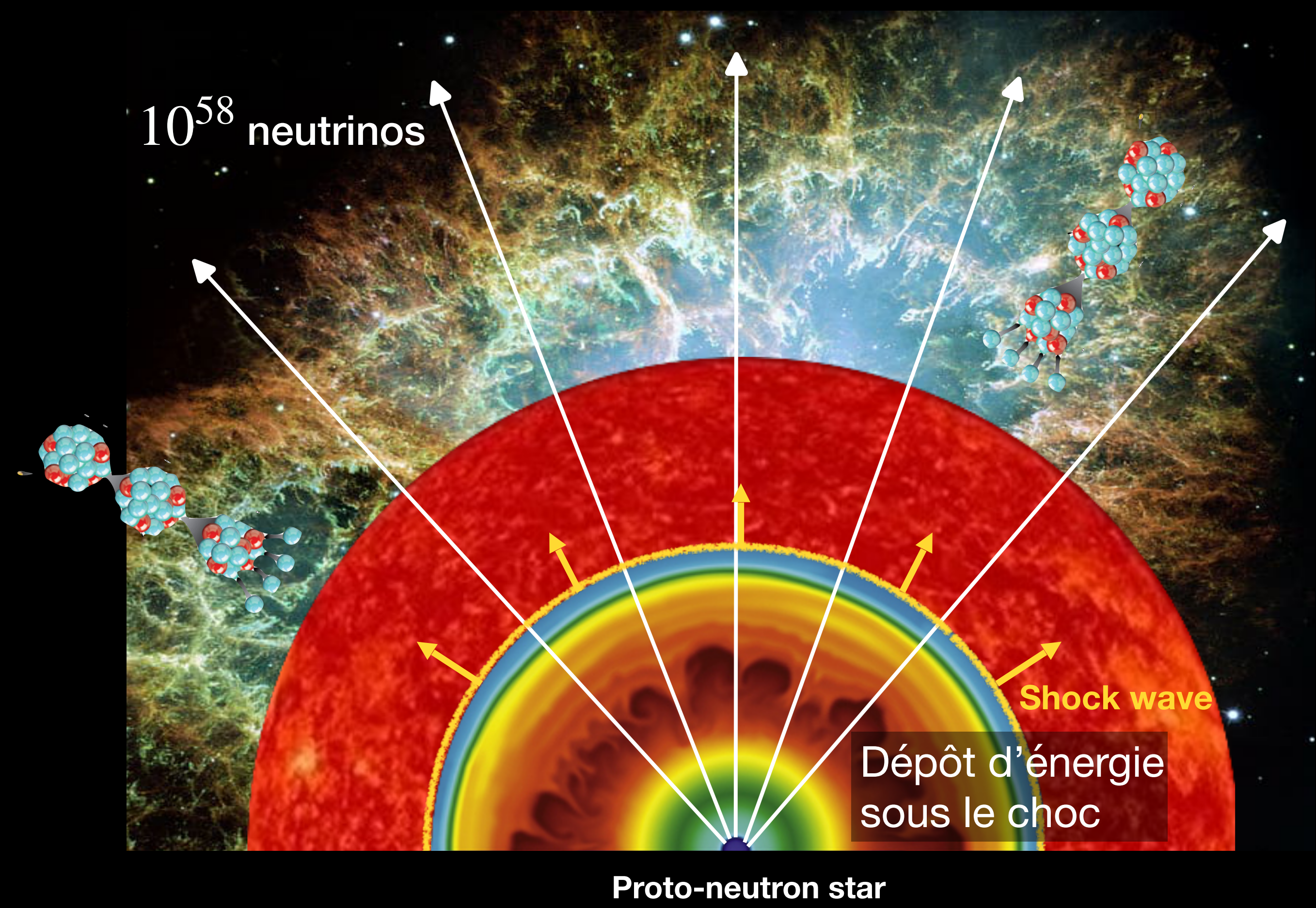
Accrétion

$\mathcal{O}(100)$ ms



Comprendre les explosions de supernovae

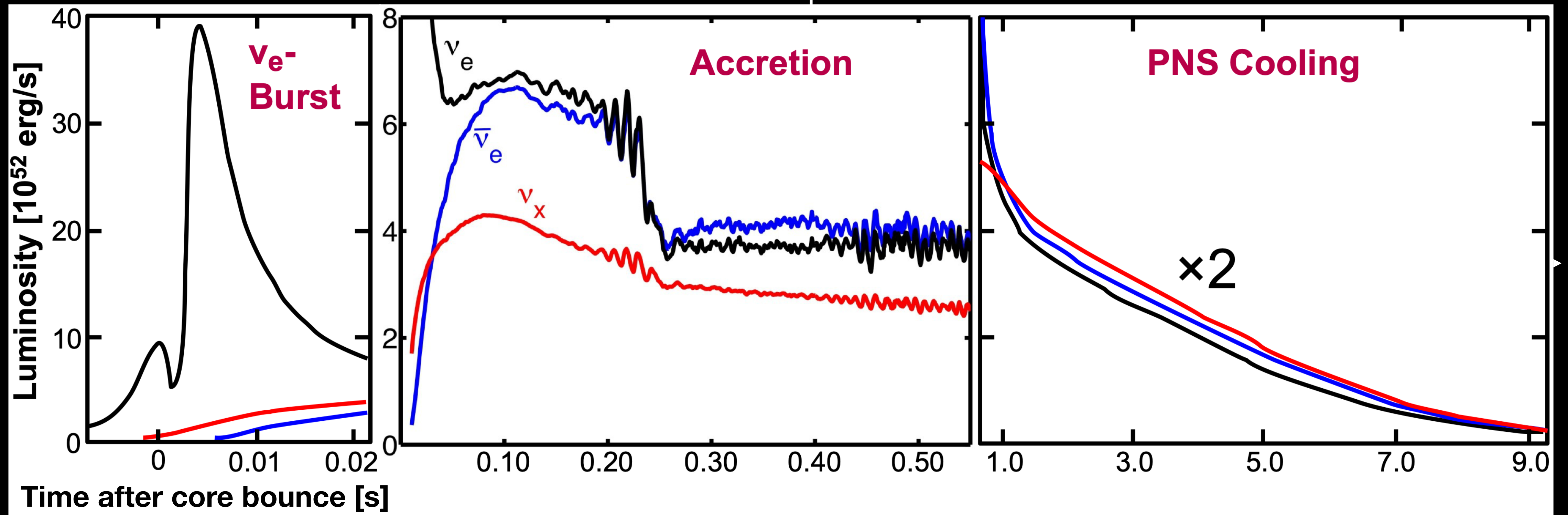
Hypothèse: nouveau départ du choc grâce...aux neutrinos!



Détecter les neutrinos de supernovae

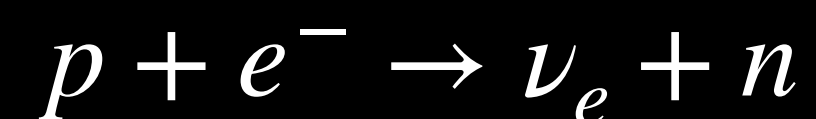
Les neutrinos comme “boîte noire” de l'étoile

H.T. Janka, [arXiv:1702.08713]

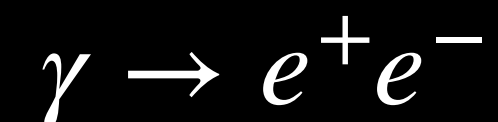


Rebond du choc

Dissociation des noyaux



Accrétion



e^\pm capturés, produit $\nu_e, \bar{\nu}_e$

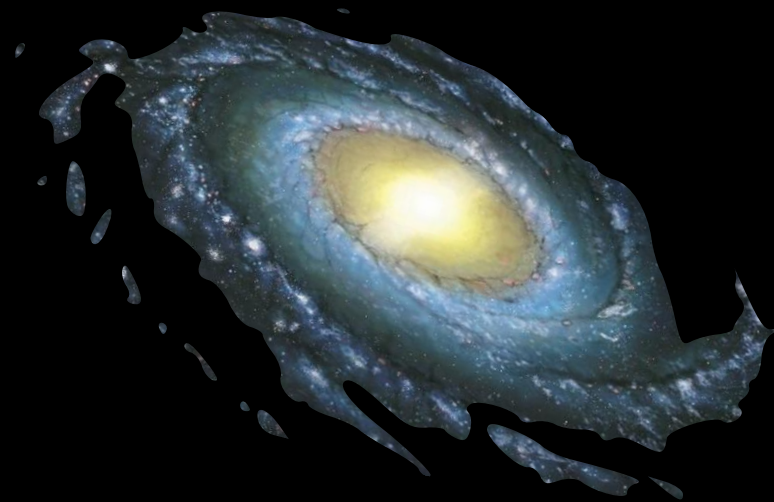
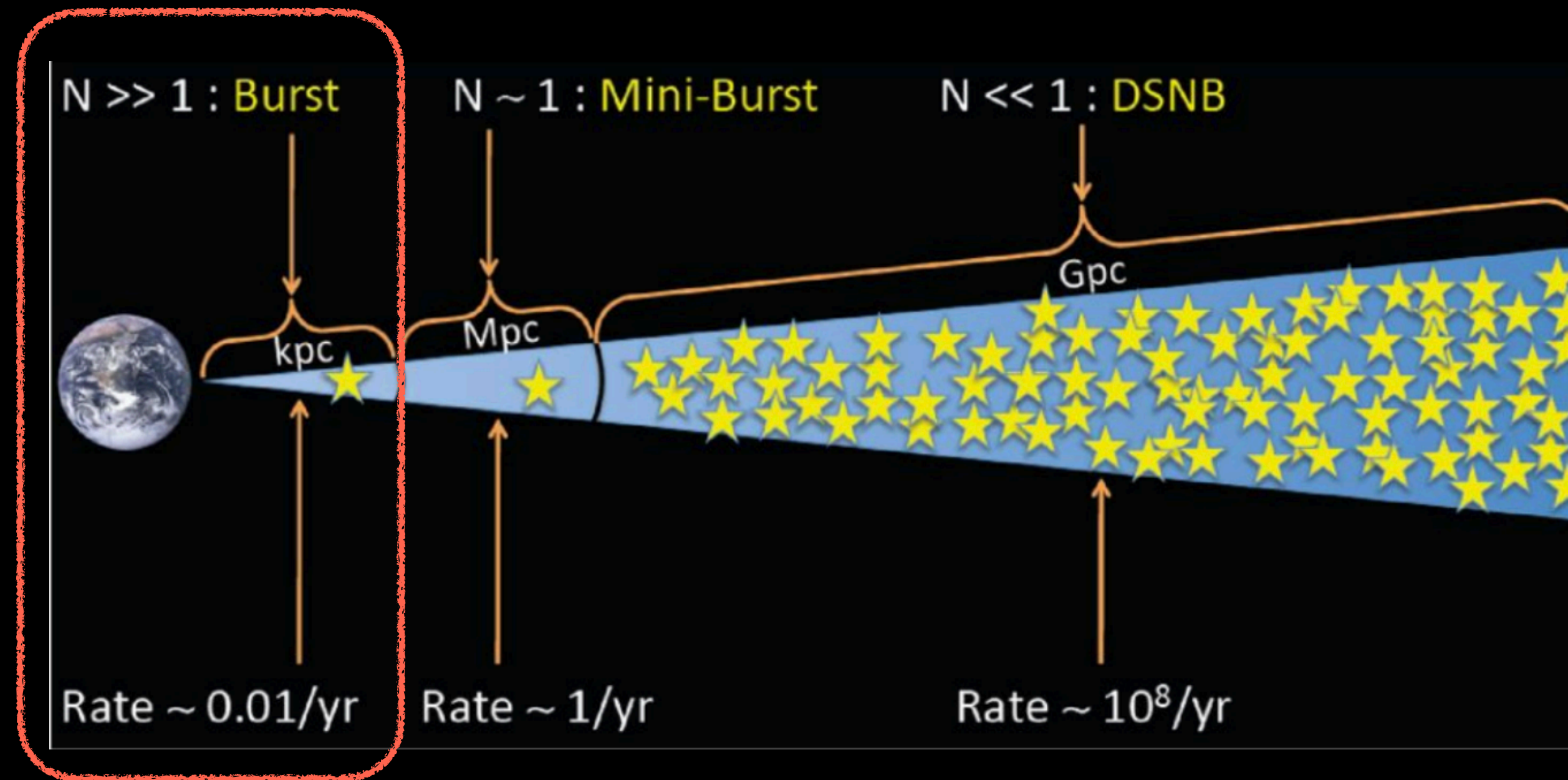
Refroidissement de l'étoile à neutrons

Interactions de courant neutre



Observer les neutrinos de supernovae

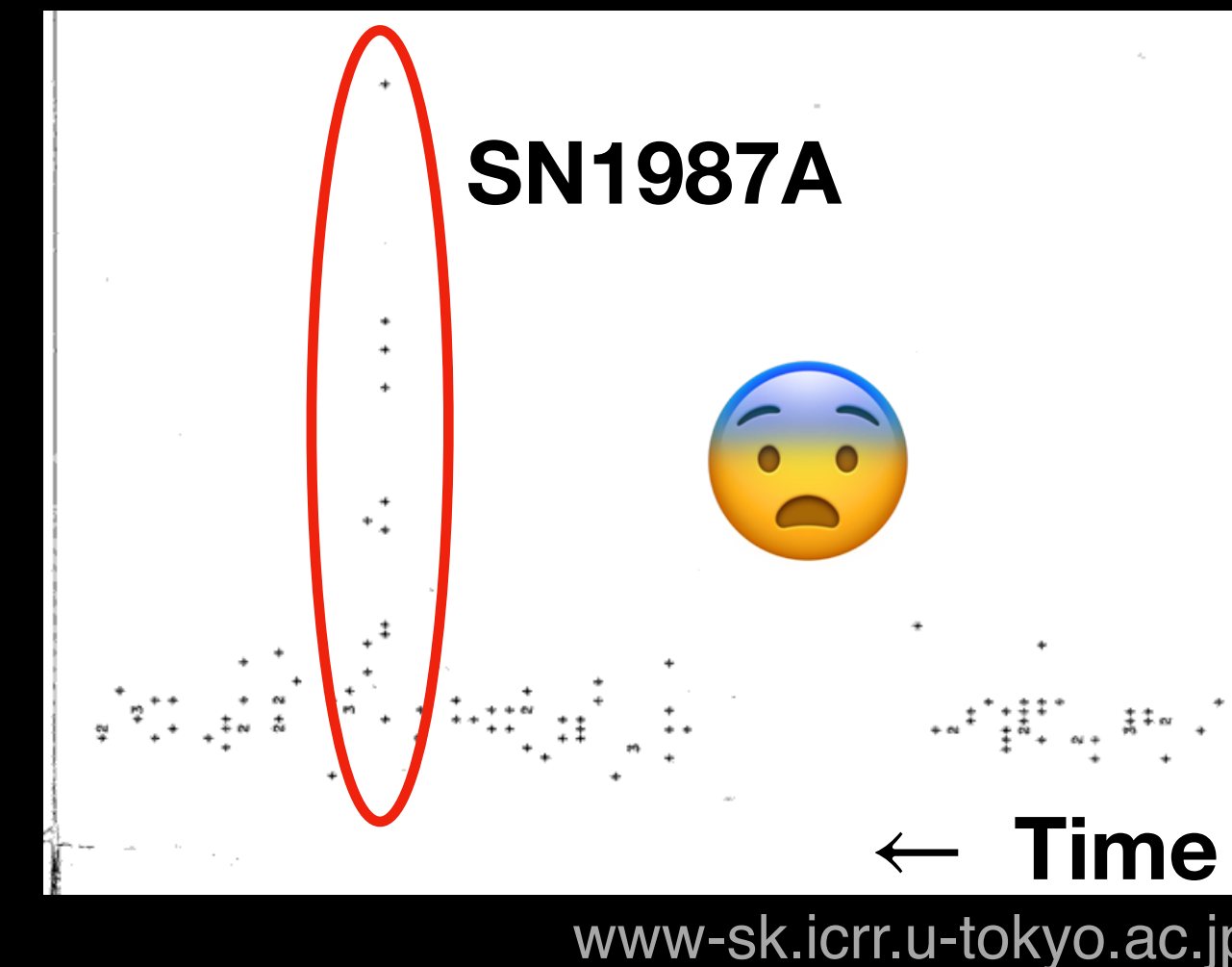
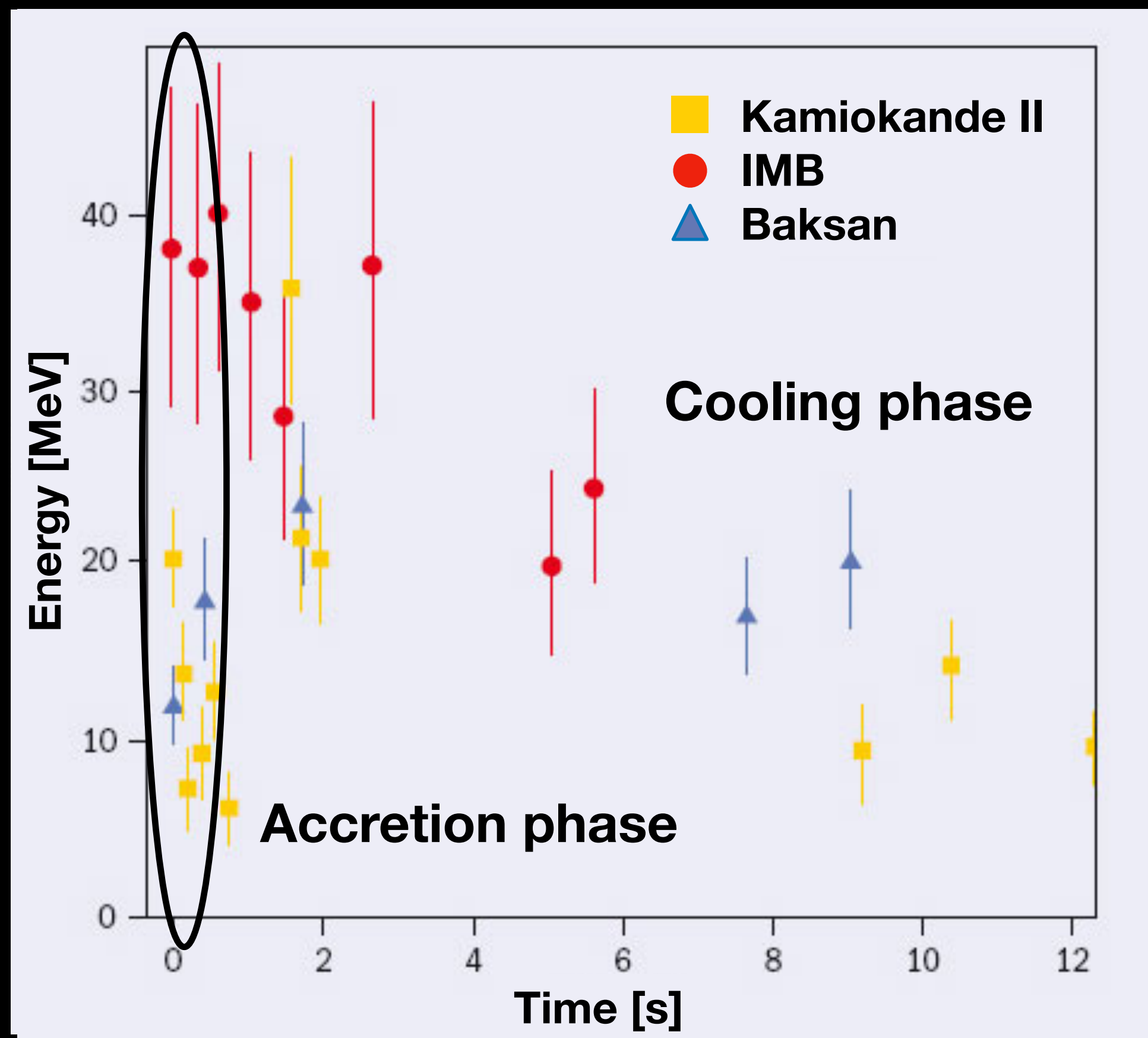
Le principal problème...



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

Le coup de chance: SN1987A

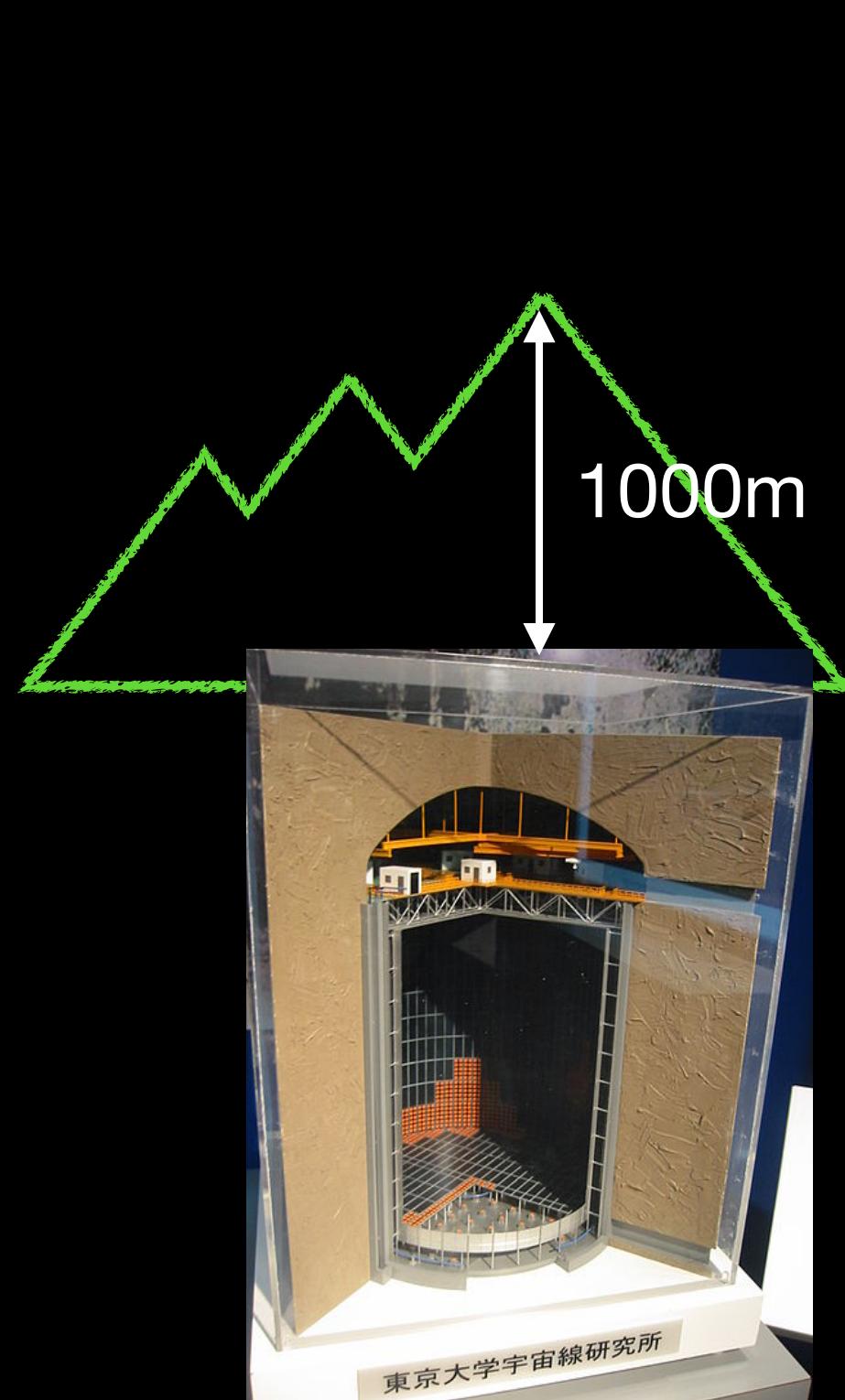
Seule observation de neutrinos de supernovae



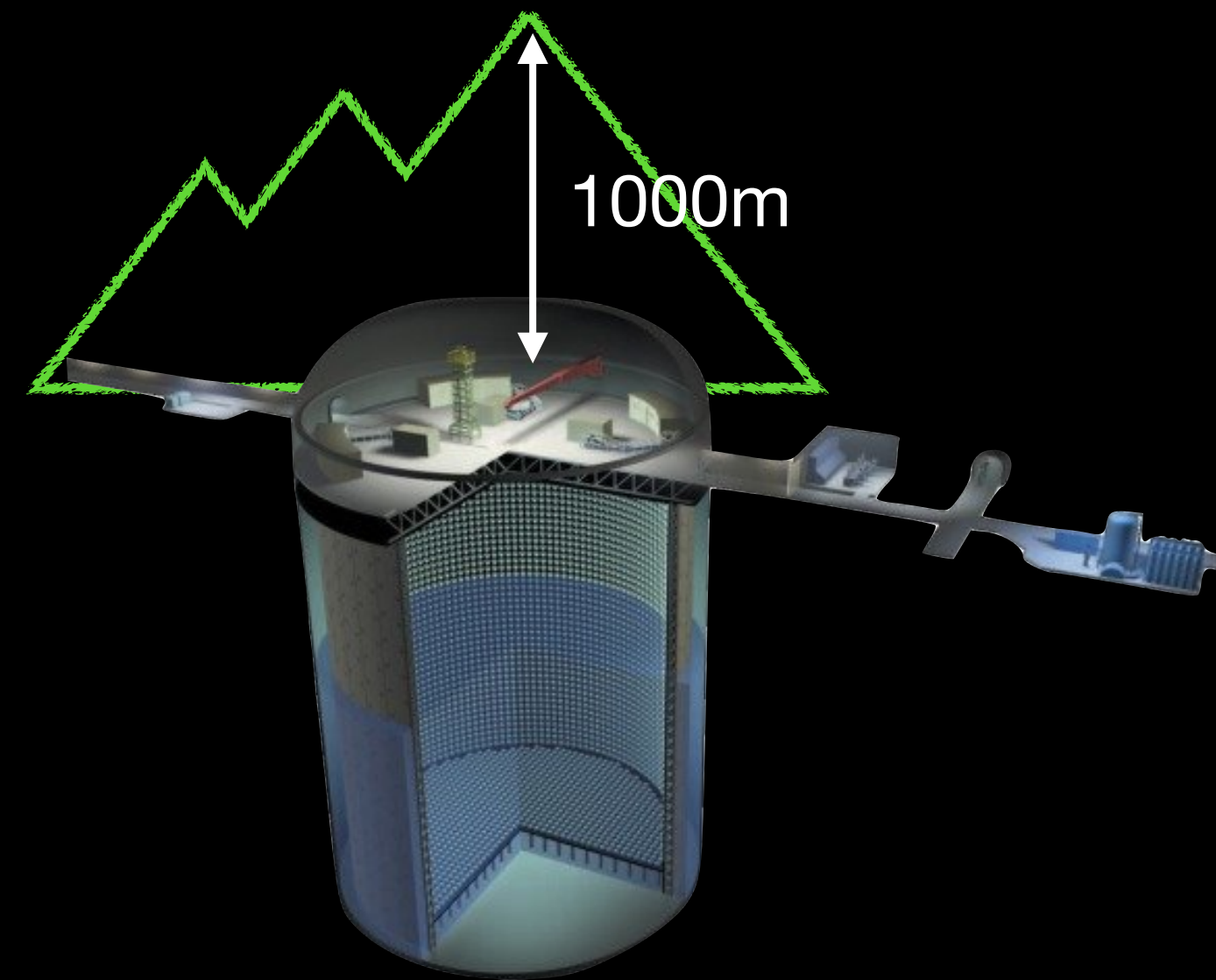
- Production “thermique” $E_\nu = \mathcal{O}(10)$ MeV
- Confirmation du modèle de “choc stationnaire”
- Comment exploiter la prochaine supernova?

Les détecteurs Kamiokande

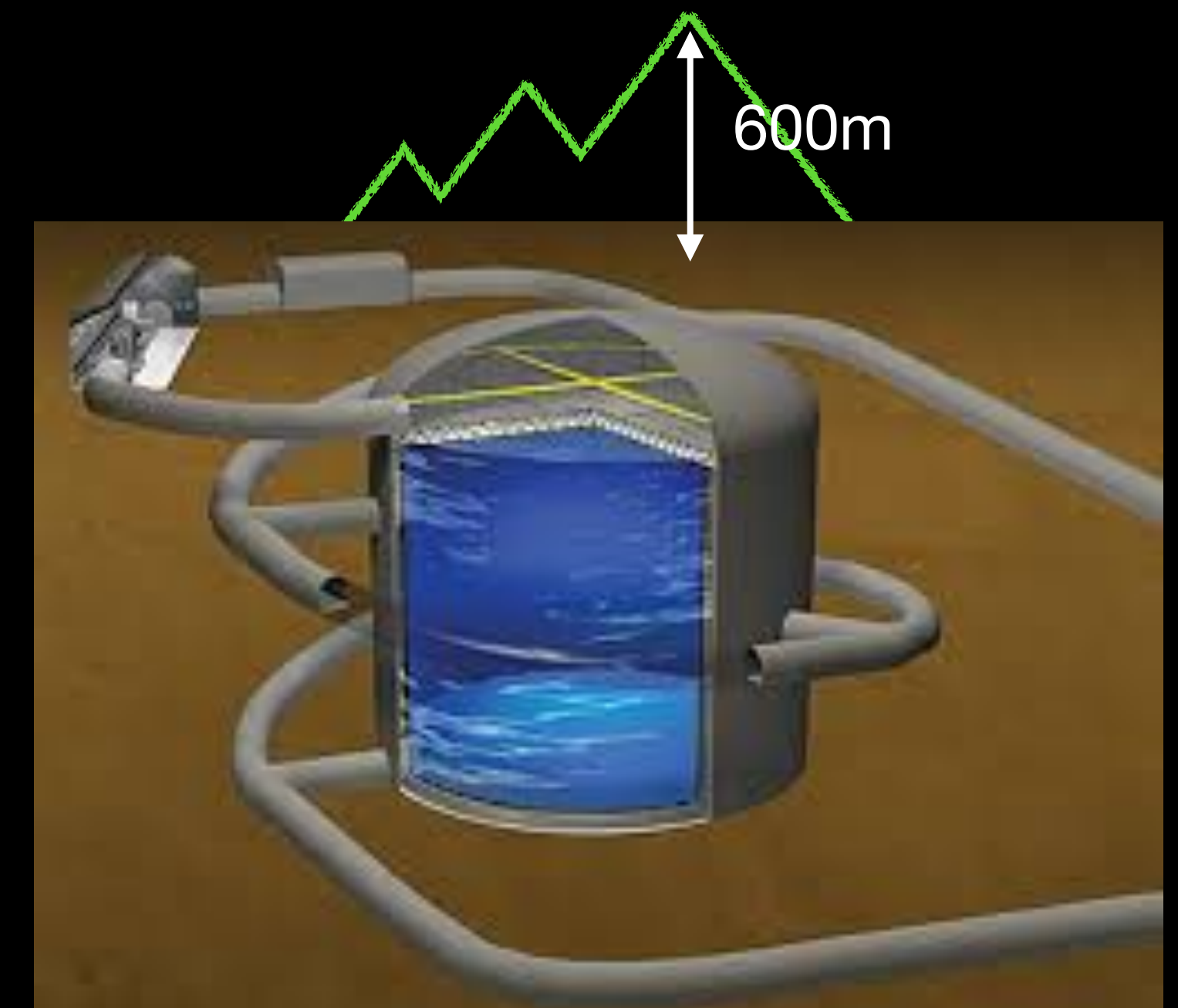
Kamioka Neutrino Detection Experiment (Kam?)



Kamiokande-II
3,000 tonnes

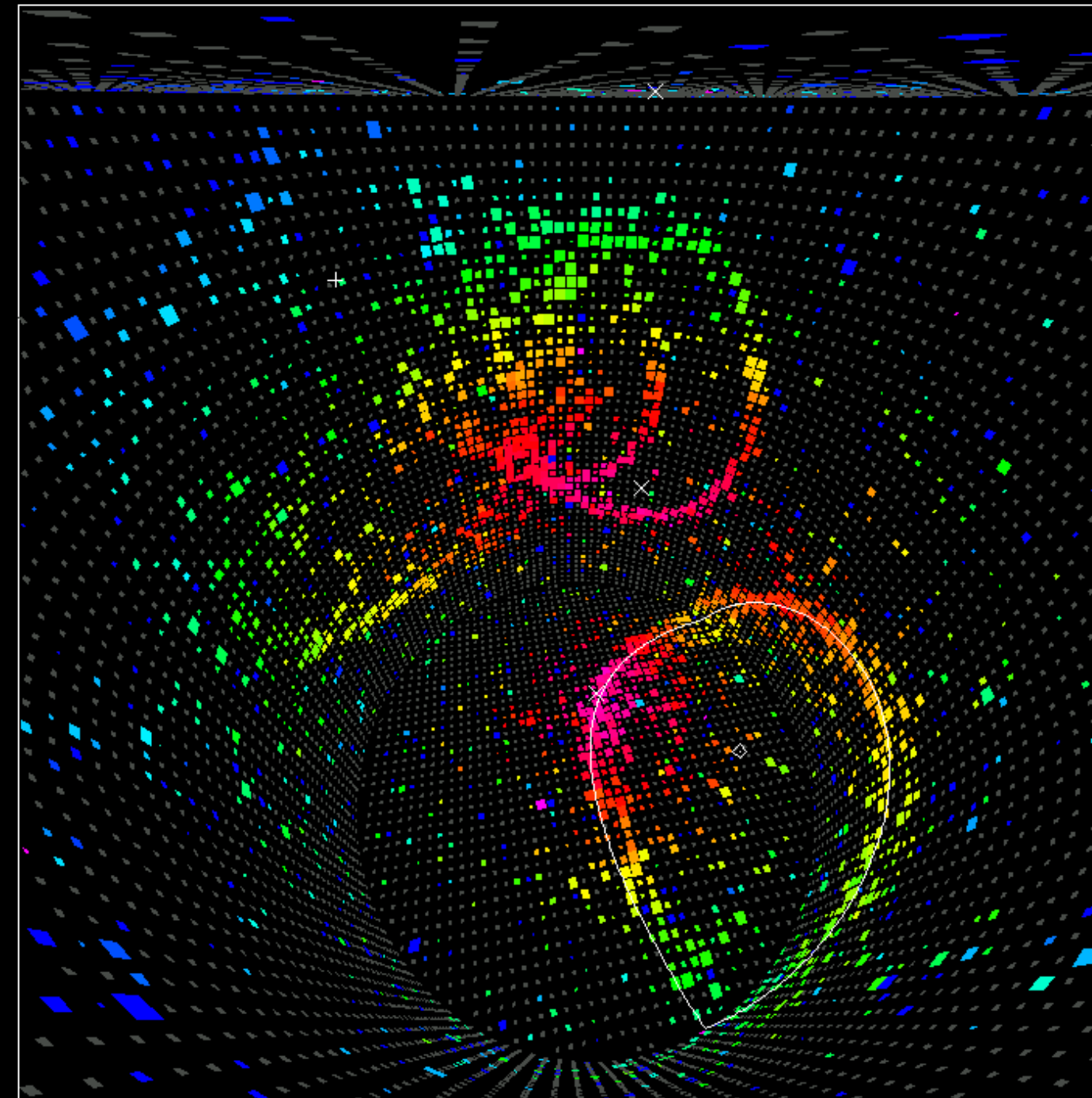
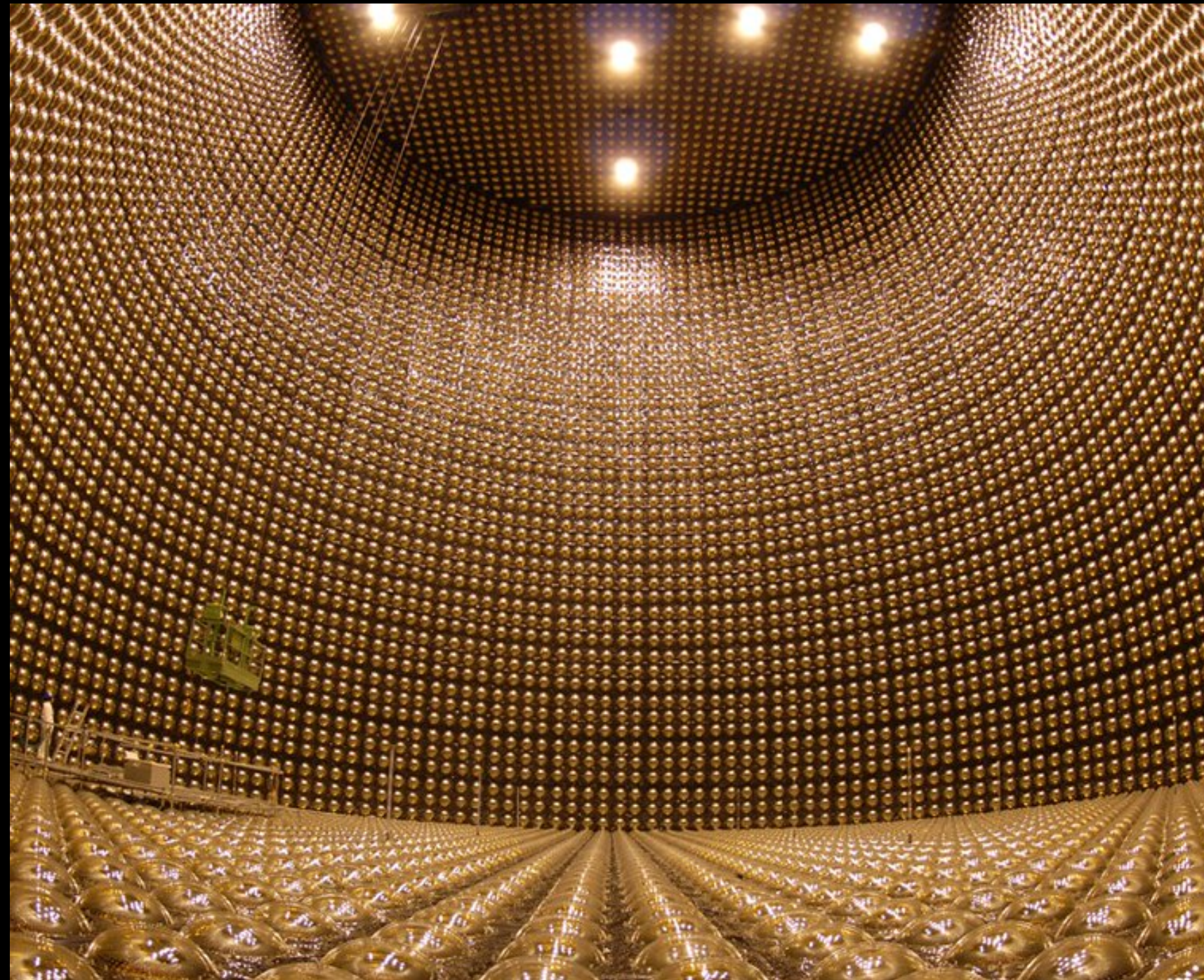


Super-Kamiokande
50,000 tonnes



Hyper-Kamiokande
260,000 tonnes

Super-Kamiokande: un anneau pour les détecter tous

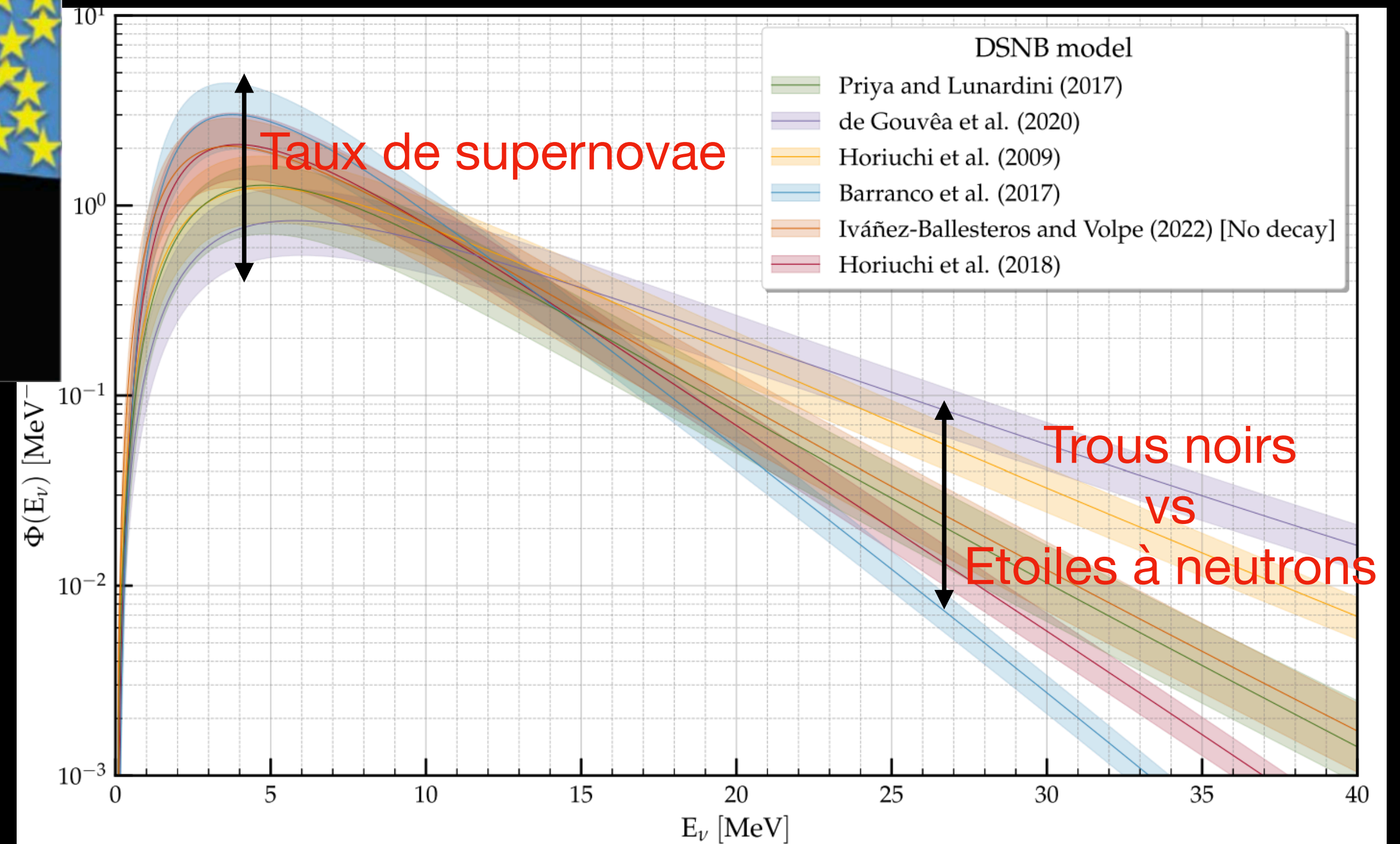
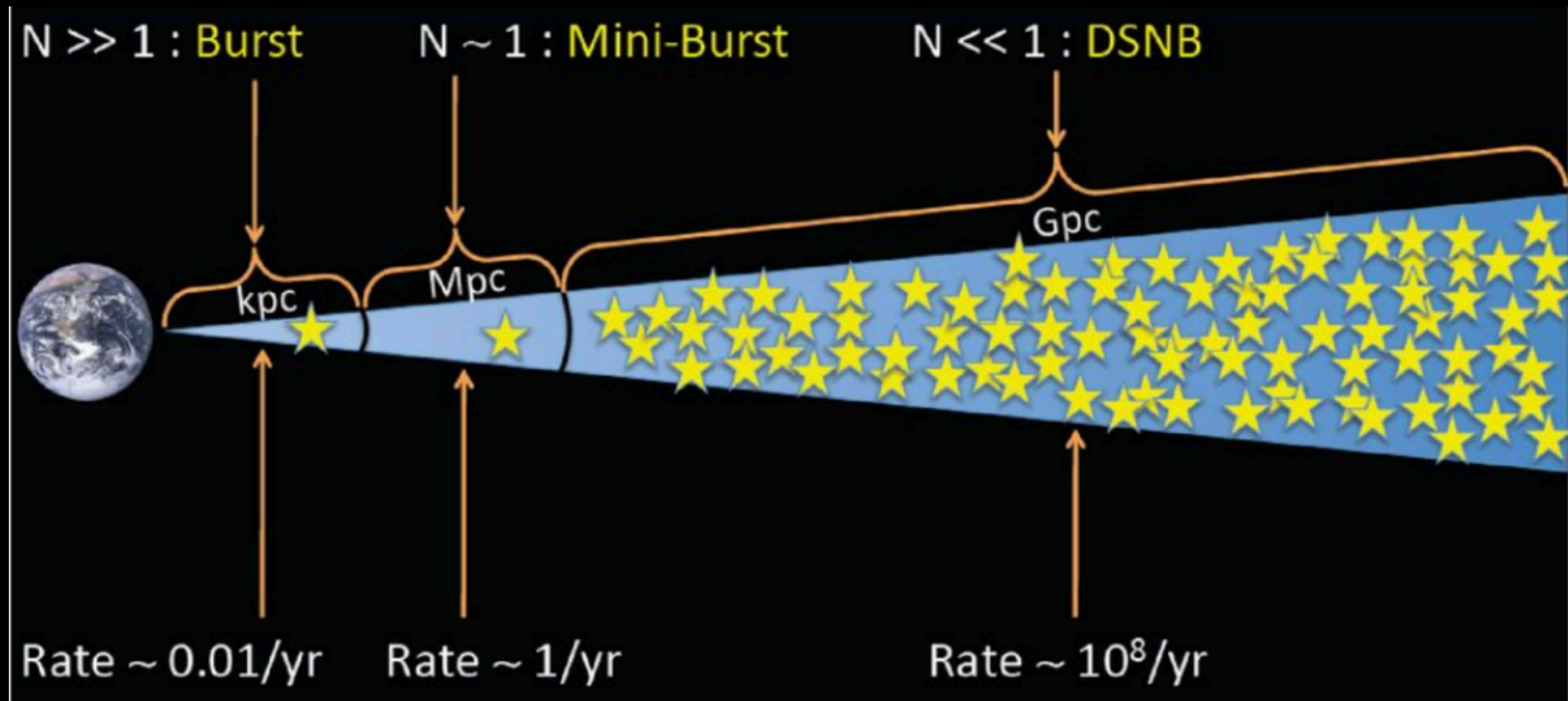


Supernova au centre
de la Voie lactée (8.5 kpc)
10,000 neutrinos

Grand Nuage de Magellan (50 kpc)
100 neutrinos

Le fond diffus de neutrinos de supernovae

La prochaine percée en astrophysique?

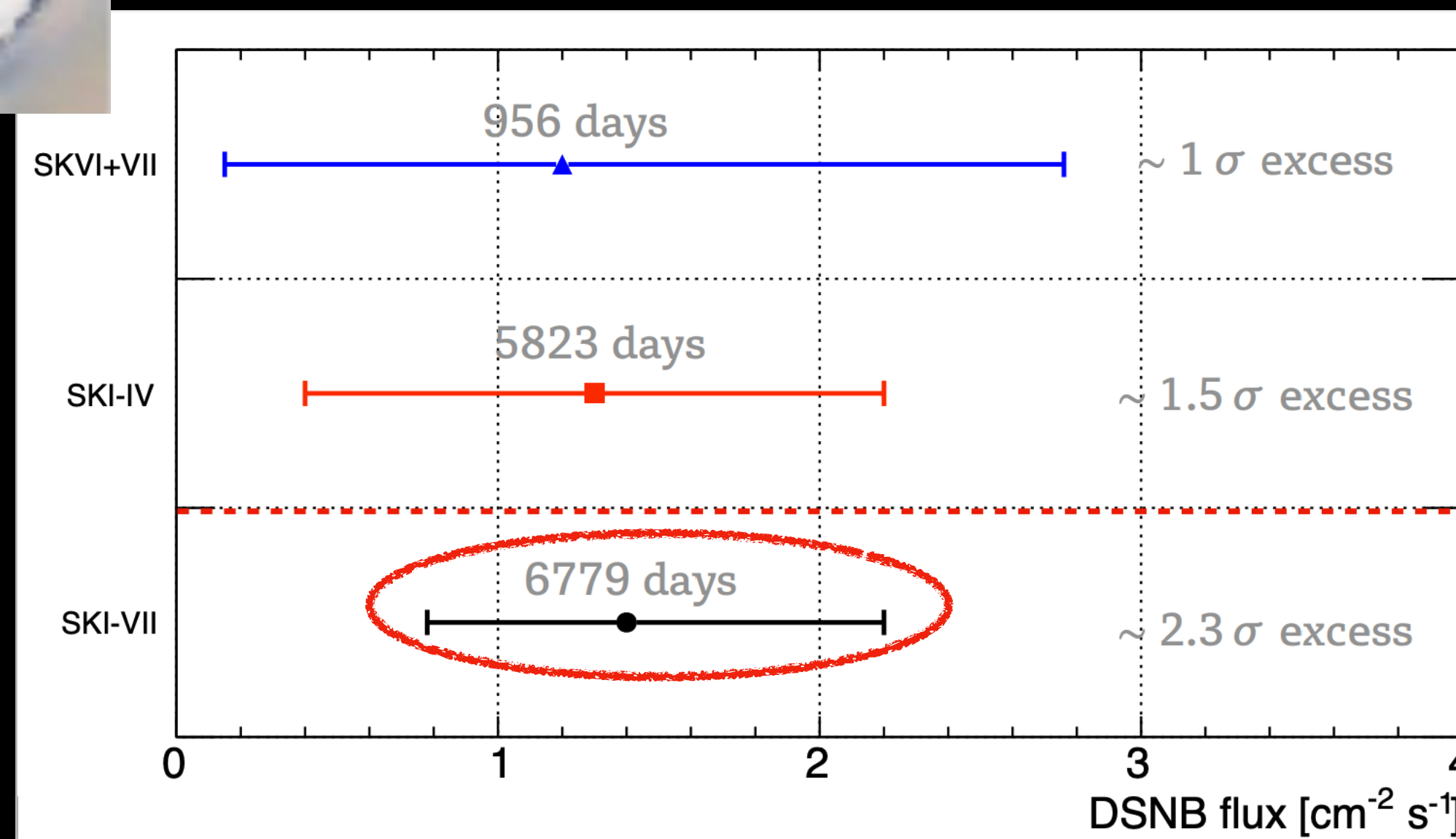
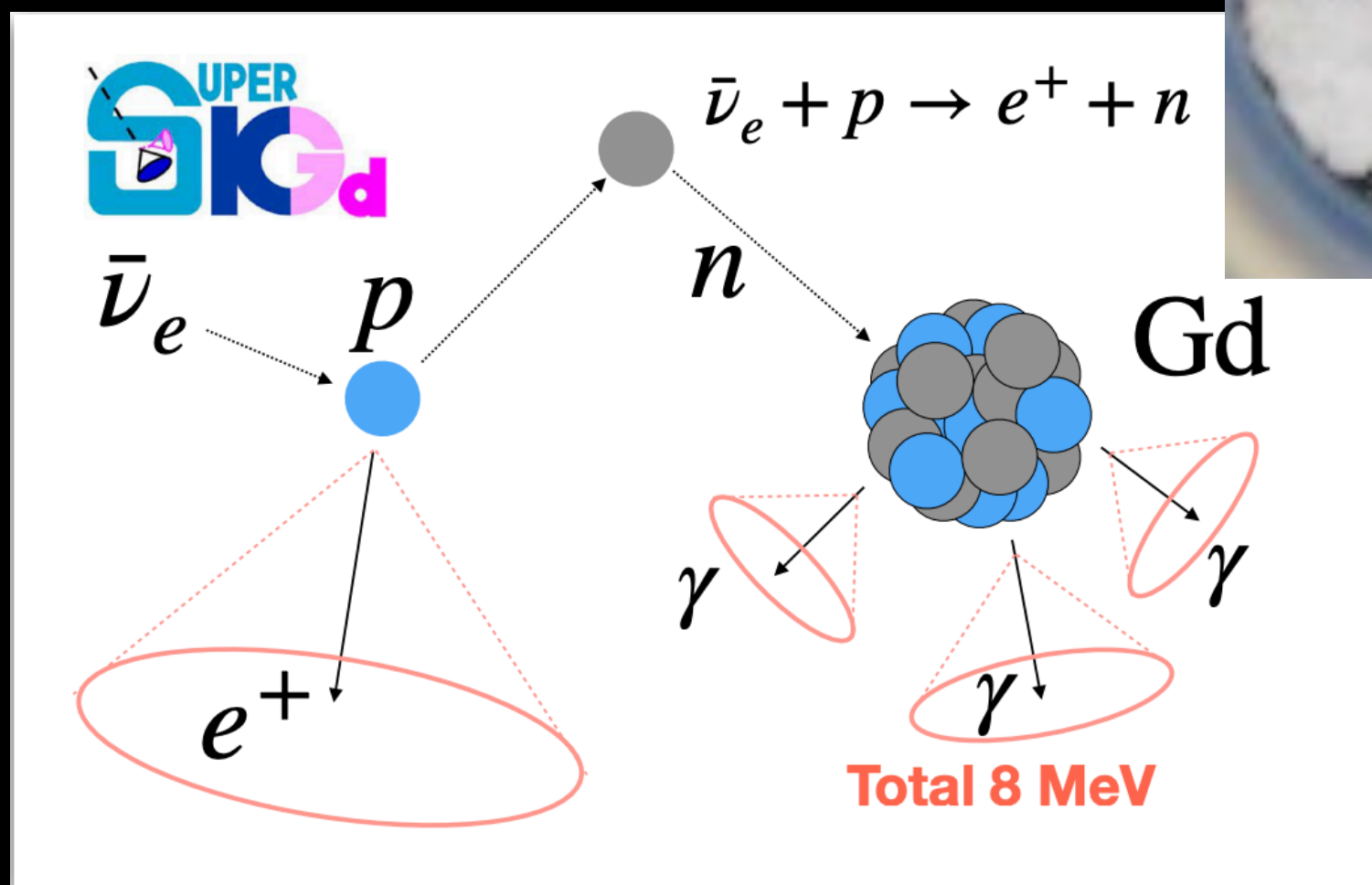
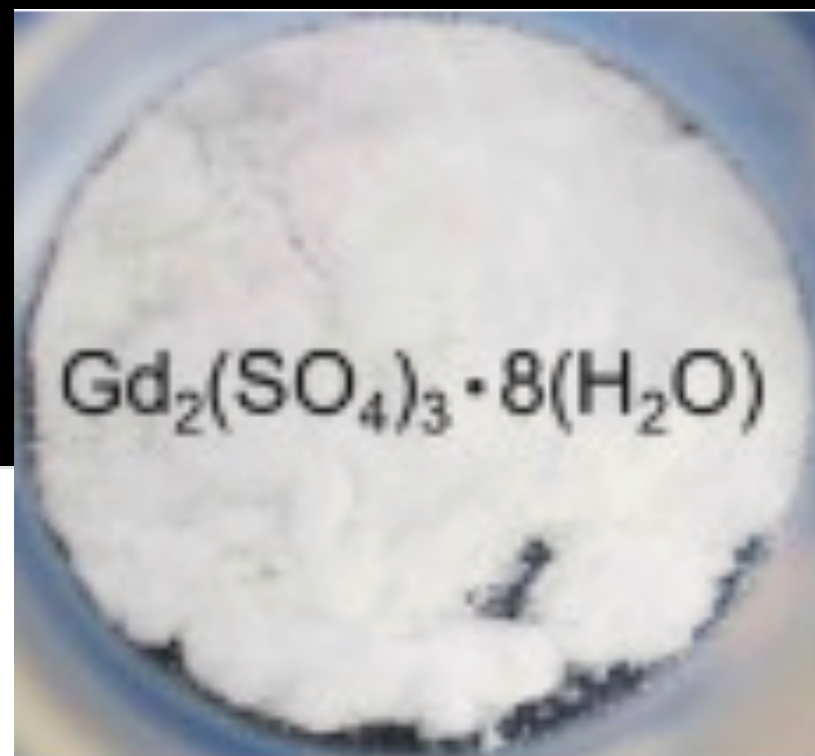


Accumulation de neutrinos de supernovae distantes \rightarrow signal permanent

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...

