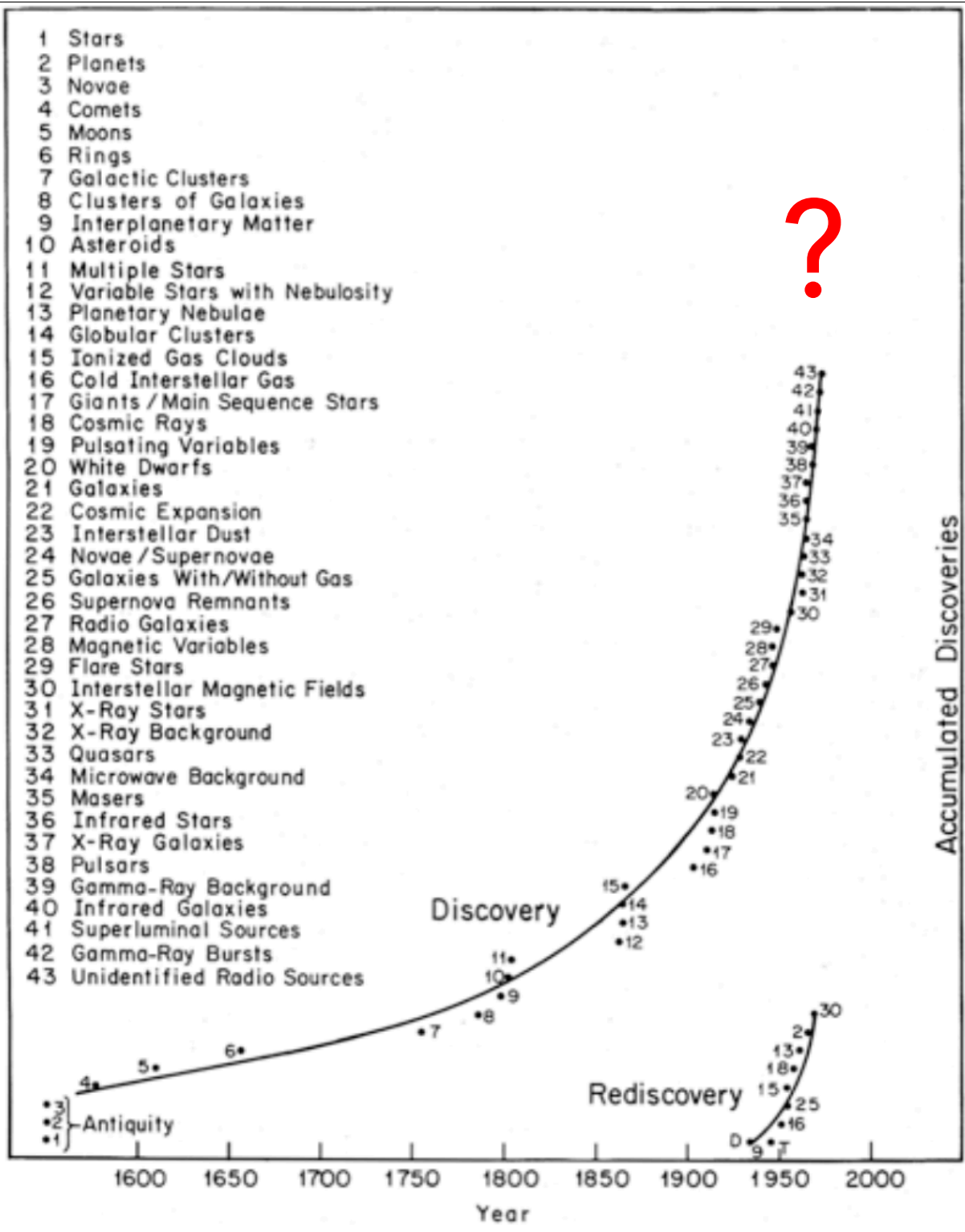


les nouvelles Astronomies

Peter von Ballmoos, IRAP Toulouse

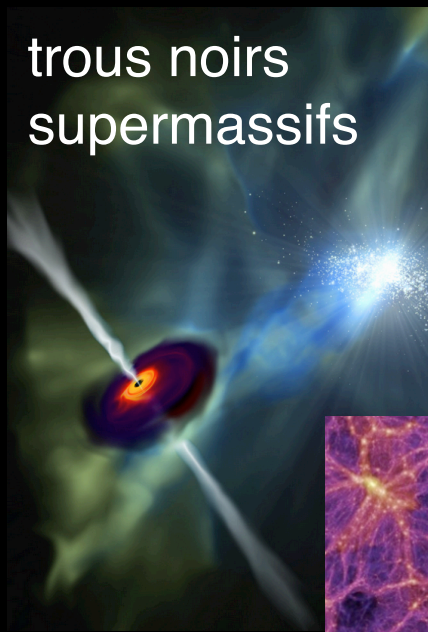
Découvertes cosmiques

Harwit 1984





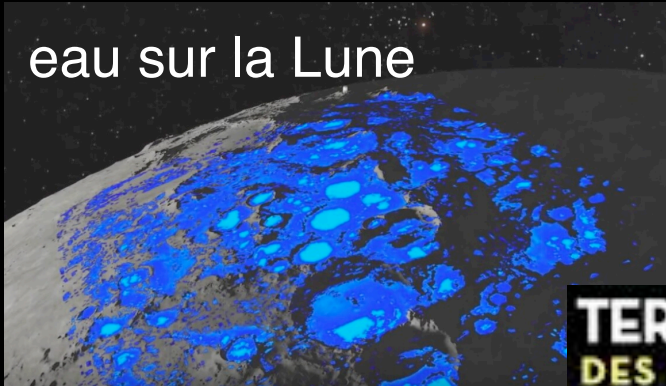
volans sur Io



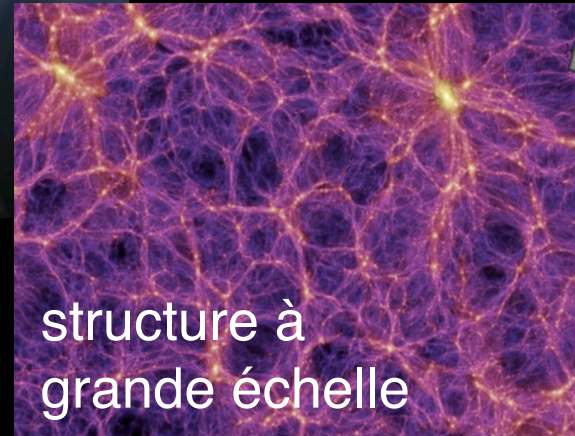
trous noirs
supermassifs



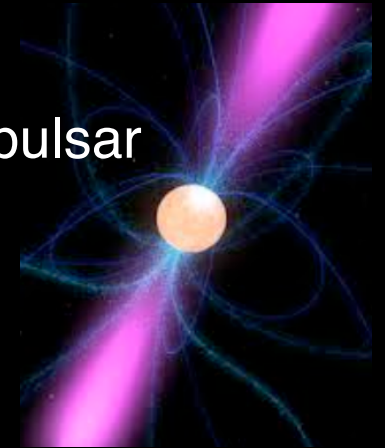
sursaut gamma



eau sur la Lune

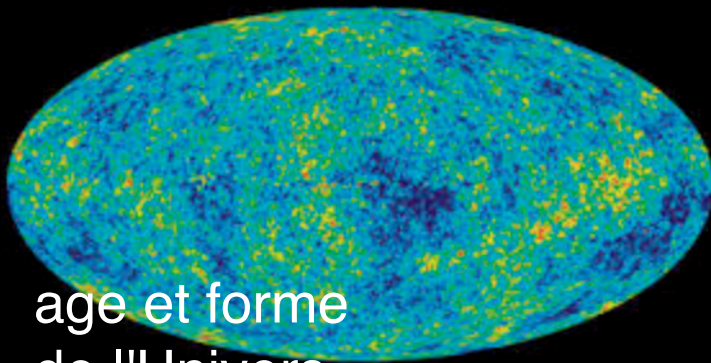


structure à
grande échelle



pulsar

**TERRES HABITABLES
DES MONDES INATTENDUS**



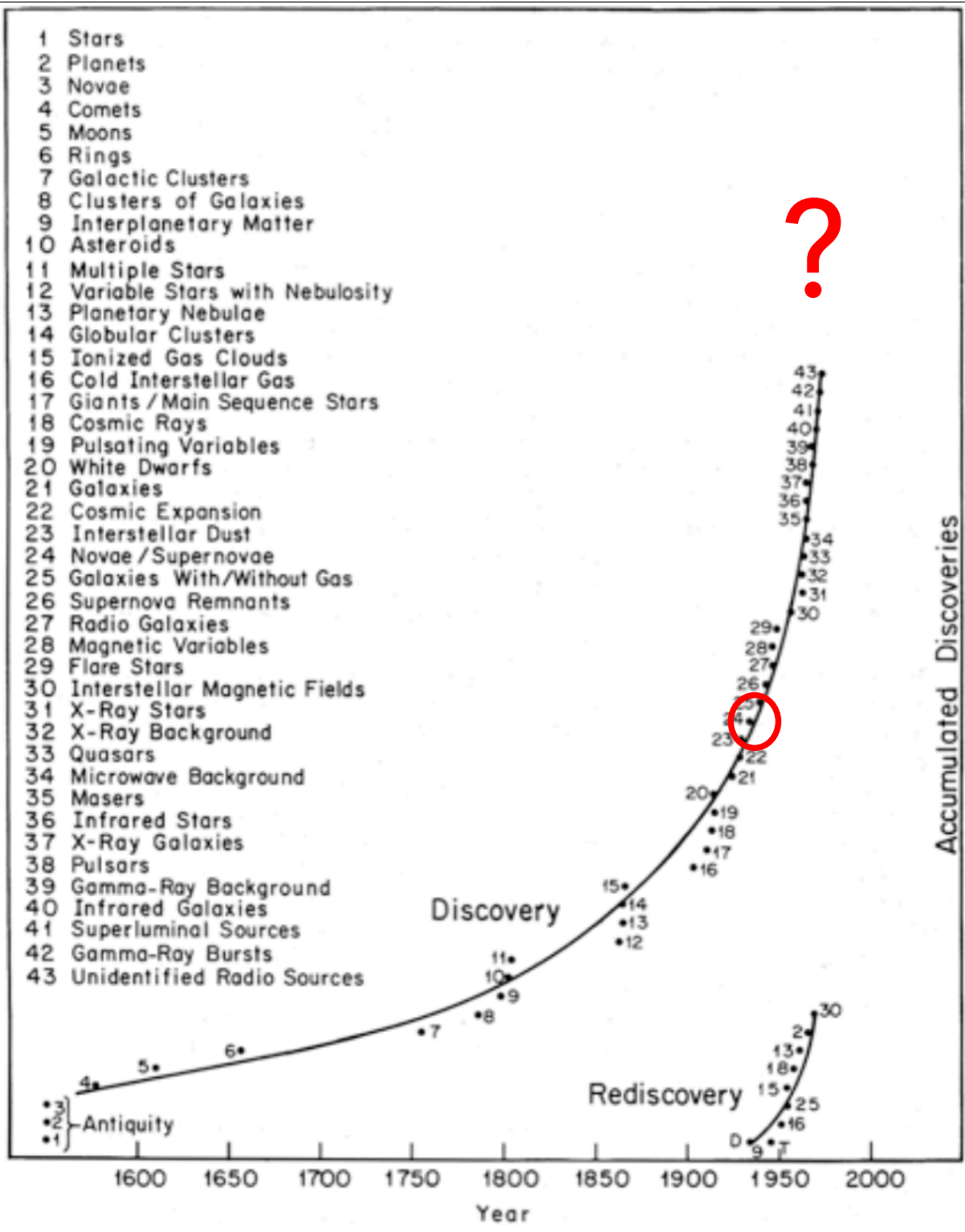
age et forme
de l'Univers

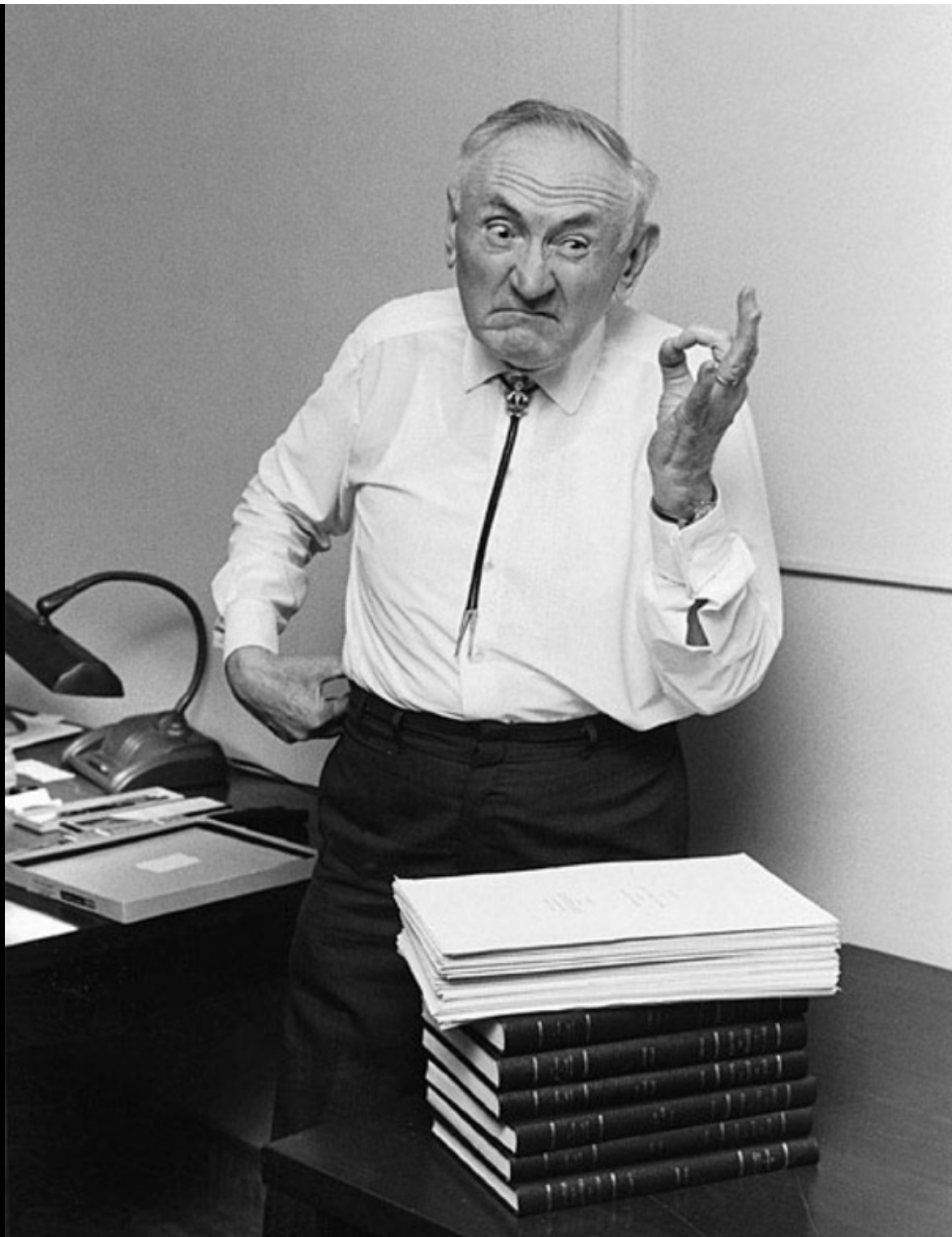


oscillation des neutrinos

Découvertes cosmiques

Harwit 1984





Fritz Zwicky
(1898-1974)

Qu'est ce que la matière noire ?



l'amas de Galaxies Coma

Zwicky étudie la distribution des vitesses des Galaxies
sa conclusion : il faut $M_{\text{gravitation}} \gg M_{\text{visible}}$
sinon les galaxies seraient éparpillées par leur vitesse.

Le redshift des nébuleuses extragalactiques*

Scheinbare Geschwindigkeiten im Comahaufen.

$v = 8500$ km/sek	6900 km/sek
7900	6700
7600	6600
7000	5100 (?)

$\Delta v > 1000$ km/s

$$M \sim 800 \times 10^9 \times 2 \times 10^{33} = 1.6 \times 10^{45} \text{ gr.} \quad (5)$$

masse
lumineuse

Daraus folgt für die totale potentielle Energie Ω :

$$\Omega = -\frac{3}{5} \Gamma \frac{M^2}{R} \quad (6)$$

$\Gamma =$ Gravitationskonstante

oder

$$\bar{\varepsilon}_p = \Omega/M \sim -64 \times 10^{12} \text{ cm}^2 \text{ sek}^{-2} \quad (7)$$

und weiter

$$\bar{\varepsilon}_k = \bar{v}^2/2 = -\varepsilon_p/2 = 32 \times 10^{12} \text{ cm}^2 \text{ sek}^{-2} \quad (8)$$

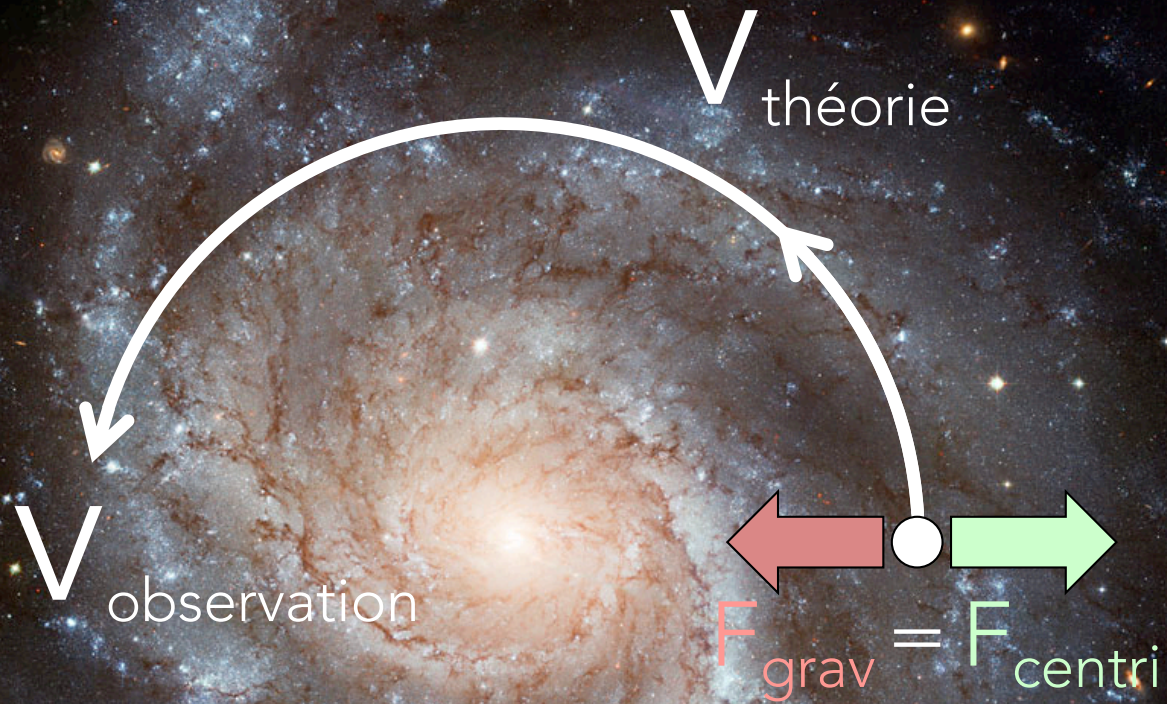
$$(\bar{v}^2)^{1/2} = 80 \text{ km/sek.}$$

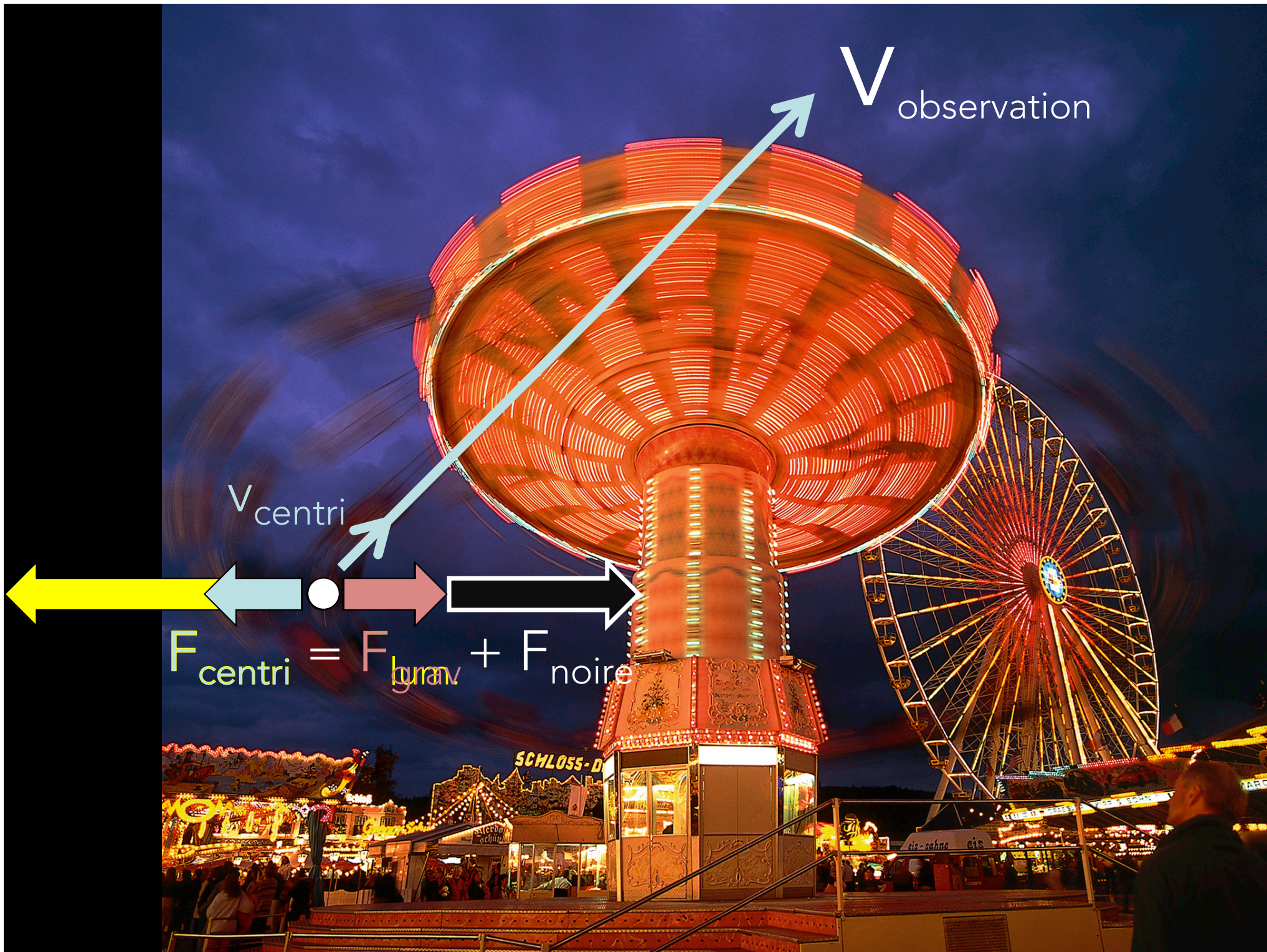
viriel
vitesse
moyenne

Um, wie beobachtet, einen mittleren Dopplereffekt von 1000 km/sek oder mehr zu erhalten, müsste also die mittlere Dichte im Comasystem mindestens 400 mal grösser sein als die auf Grund von Beobachtungen an leuchtender Materie abgeleitete¹⁾. Falls sich dies bewahrheiten sollte, würde sich also das überraschende Resultat ergeben, dass dunkle Materie in sehr viel grösserer Dichte vorhanden ist als leuchtende Materie.

- * Fritz Zwicky
- Helvetica Physica Acta,
- Vol. 6, p. 110-127 (1933)

ça tourne ... trop vite





$V_{observation}$

V_{centri}

$$F_{centri} = F_{grav} + F_{noire}$$

Quelle est la nature de la matière noire?

De la matière « normale » mais obscure?

- ~~poussières?~~
- ~~planètes, astéroïdes?~~
- ~~étoiles noires, brunes, blanches?~~
- ~~trous noirs stellaires?~~
- ~~trous noirs géants?~~

Machos

~~Neutrinos?~~

Axions

Un nouveau type de particule élémentaire stable?

- ~~très légère et très abondante?~~
- ~~très lourde et très rare?~~

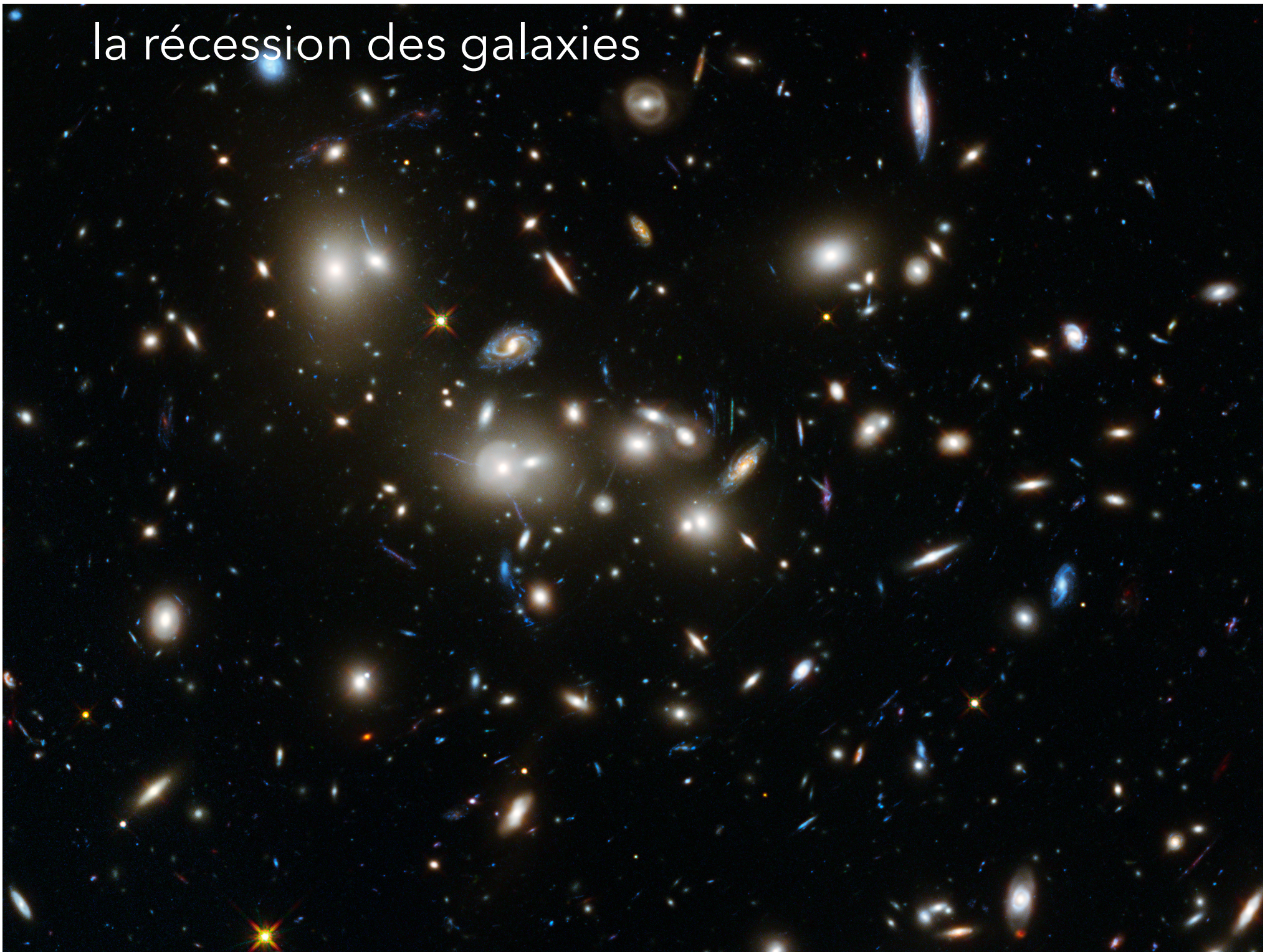
Wimps

~~Gravitation modifiée~~

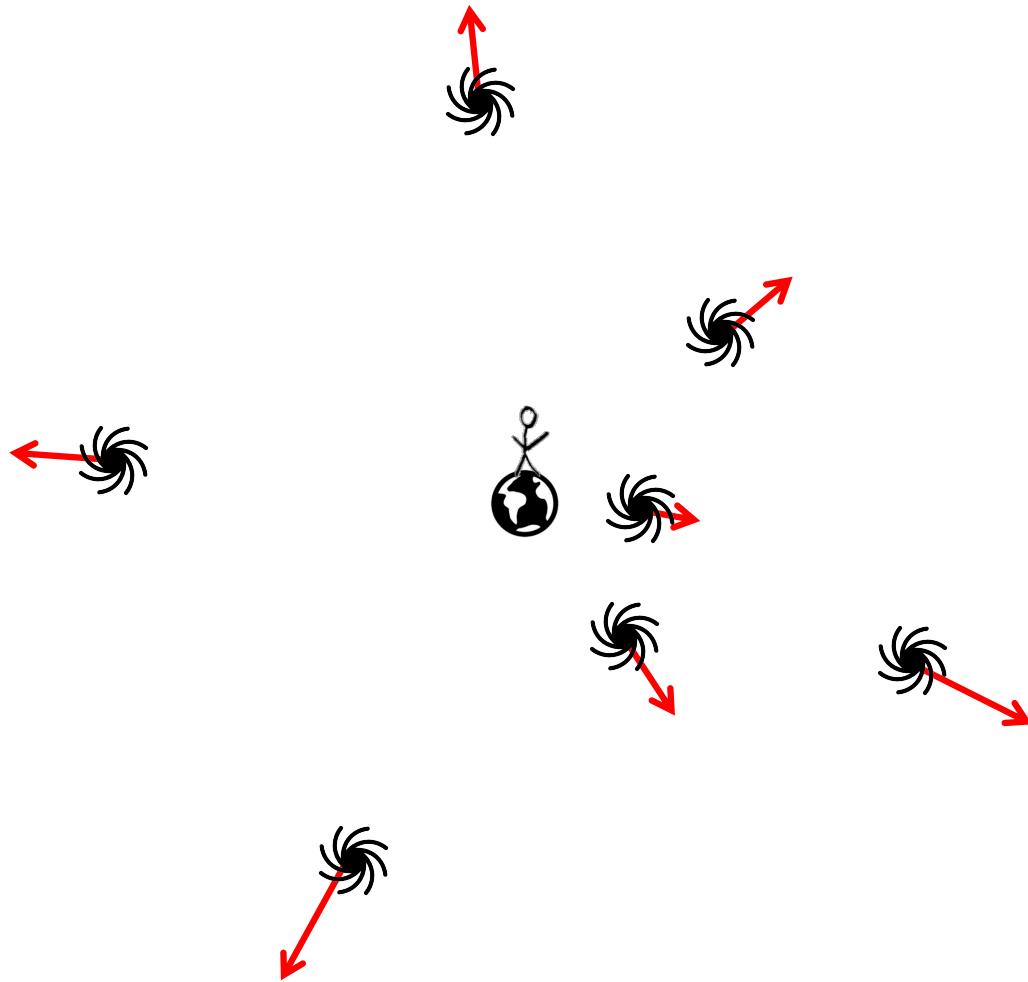
Qu'est ce que l'énergie noire ?



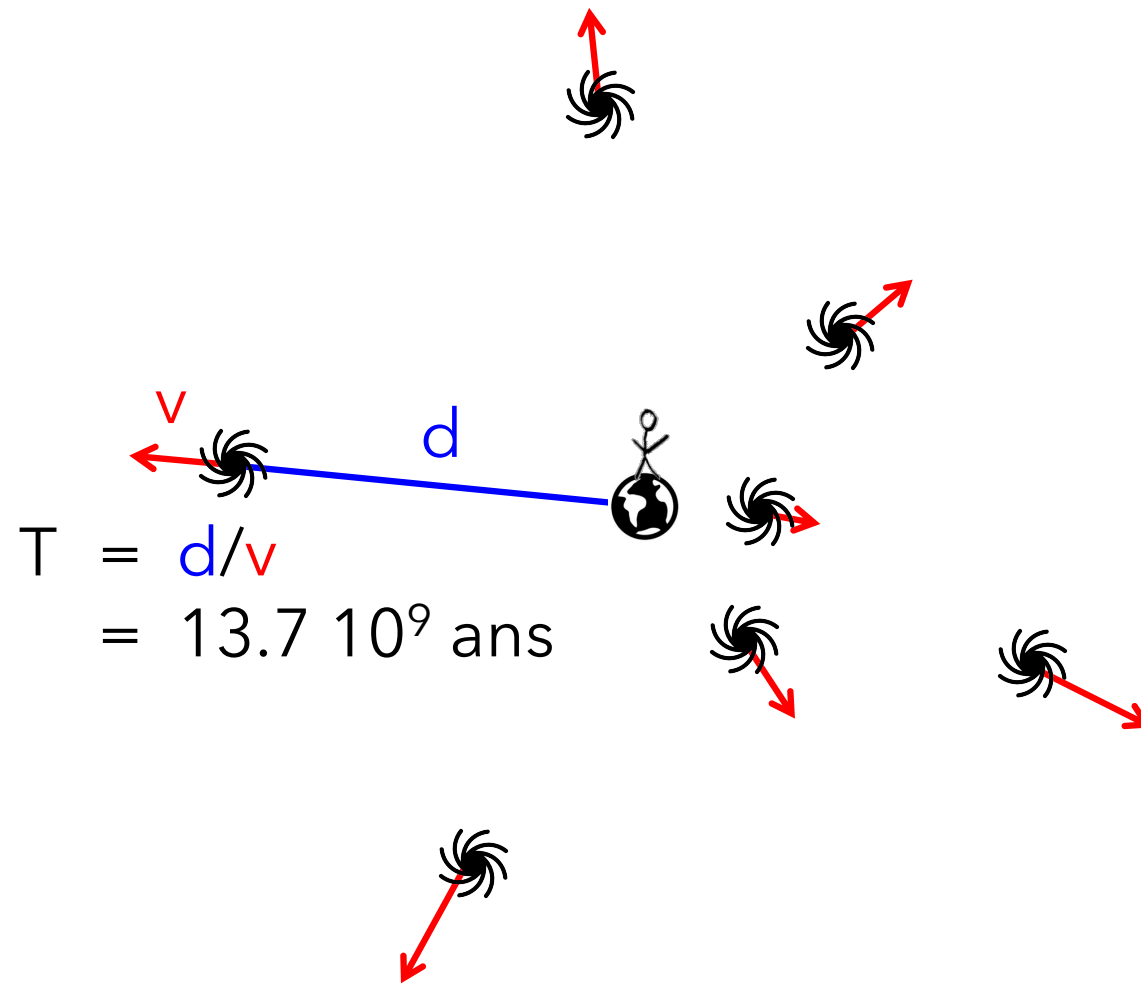
la récession des galaxies



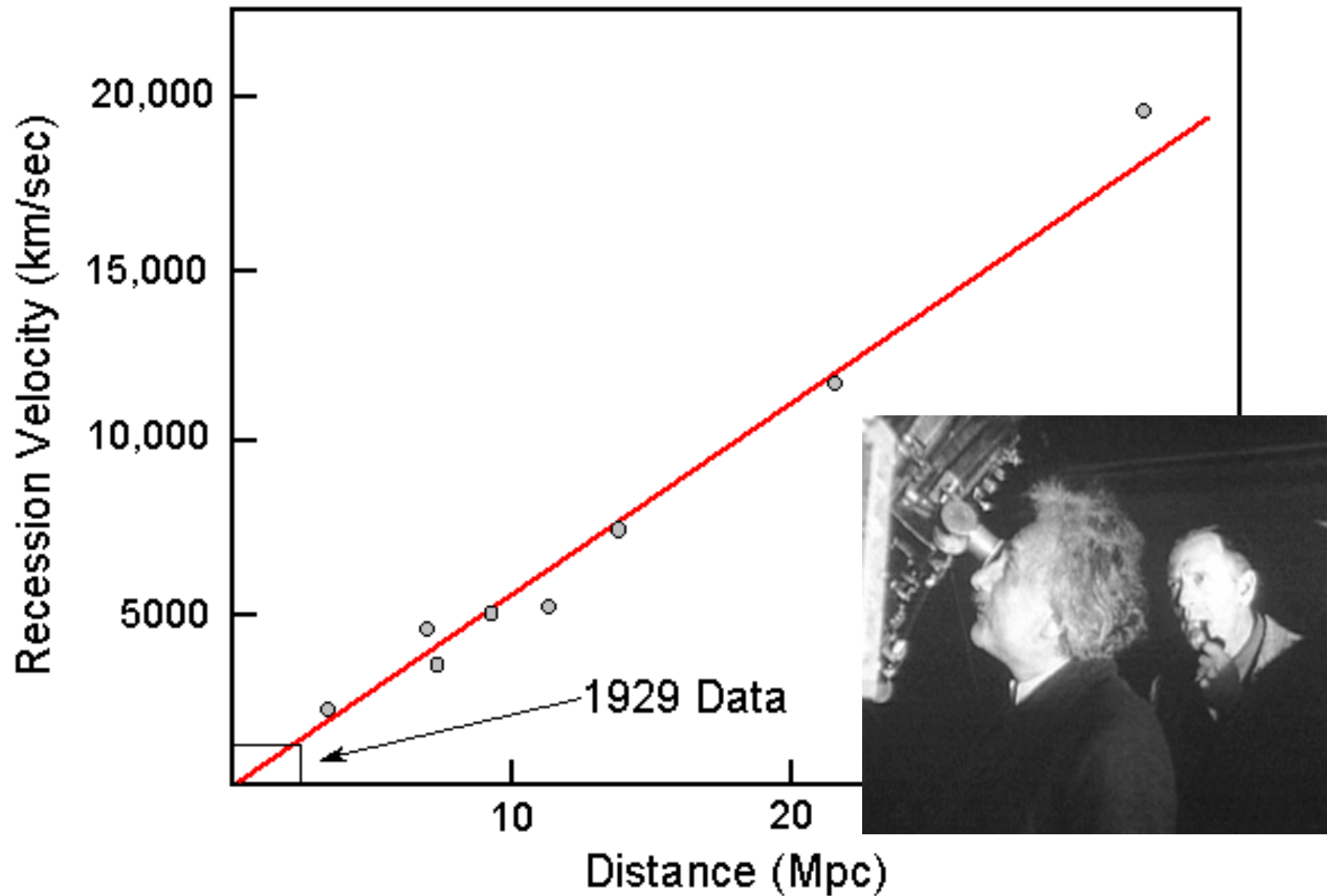
la récession des galaxies



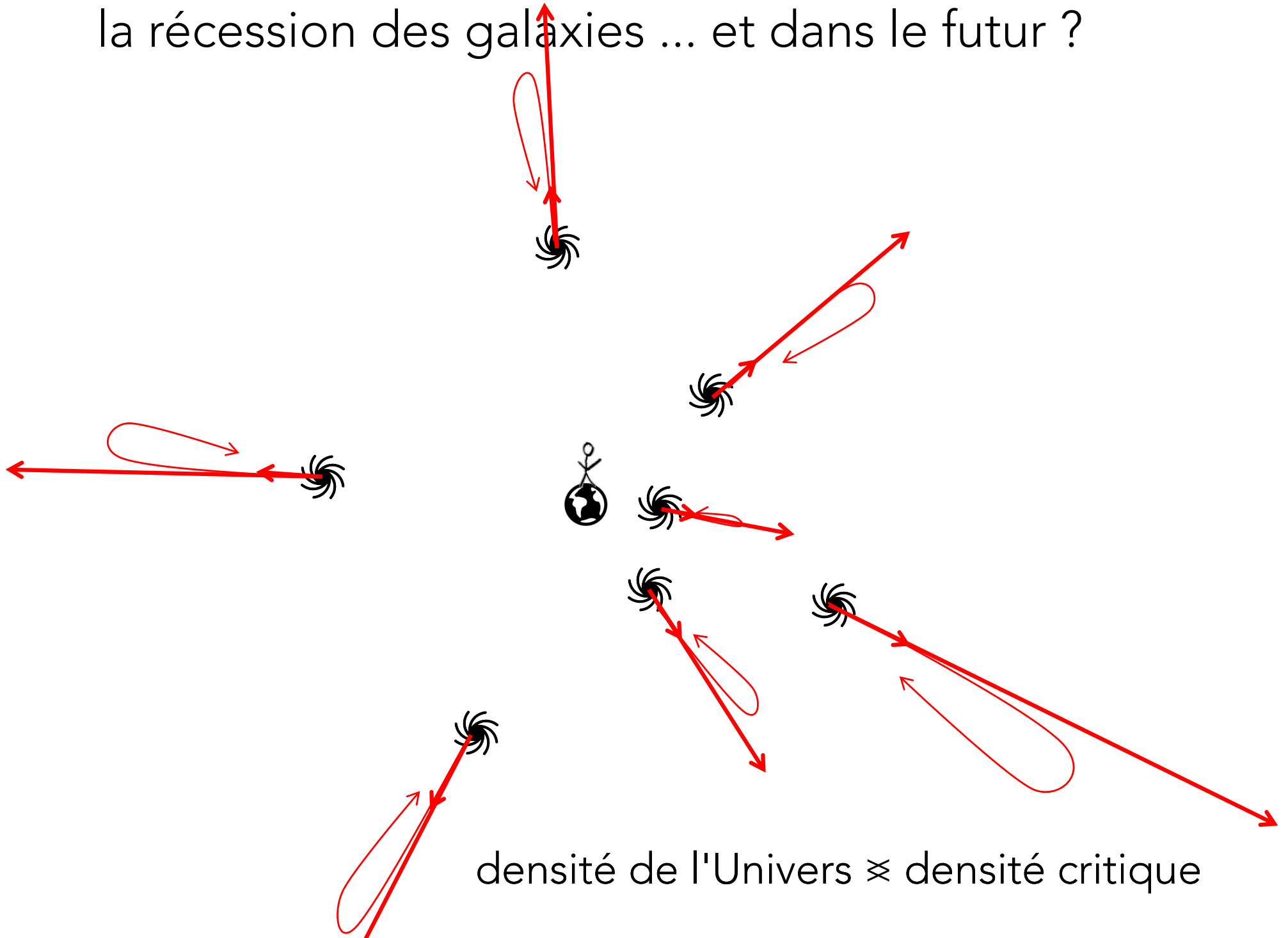
l'expansion de l'Univers



L'expansion de l'Univers : diagramme de Hubble




la récession des galaxies ... et dans le futur ?

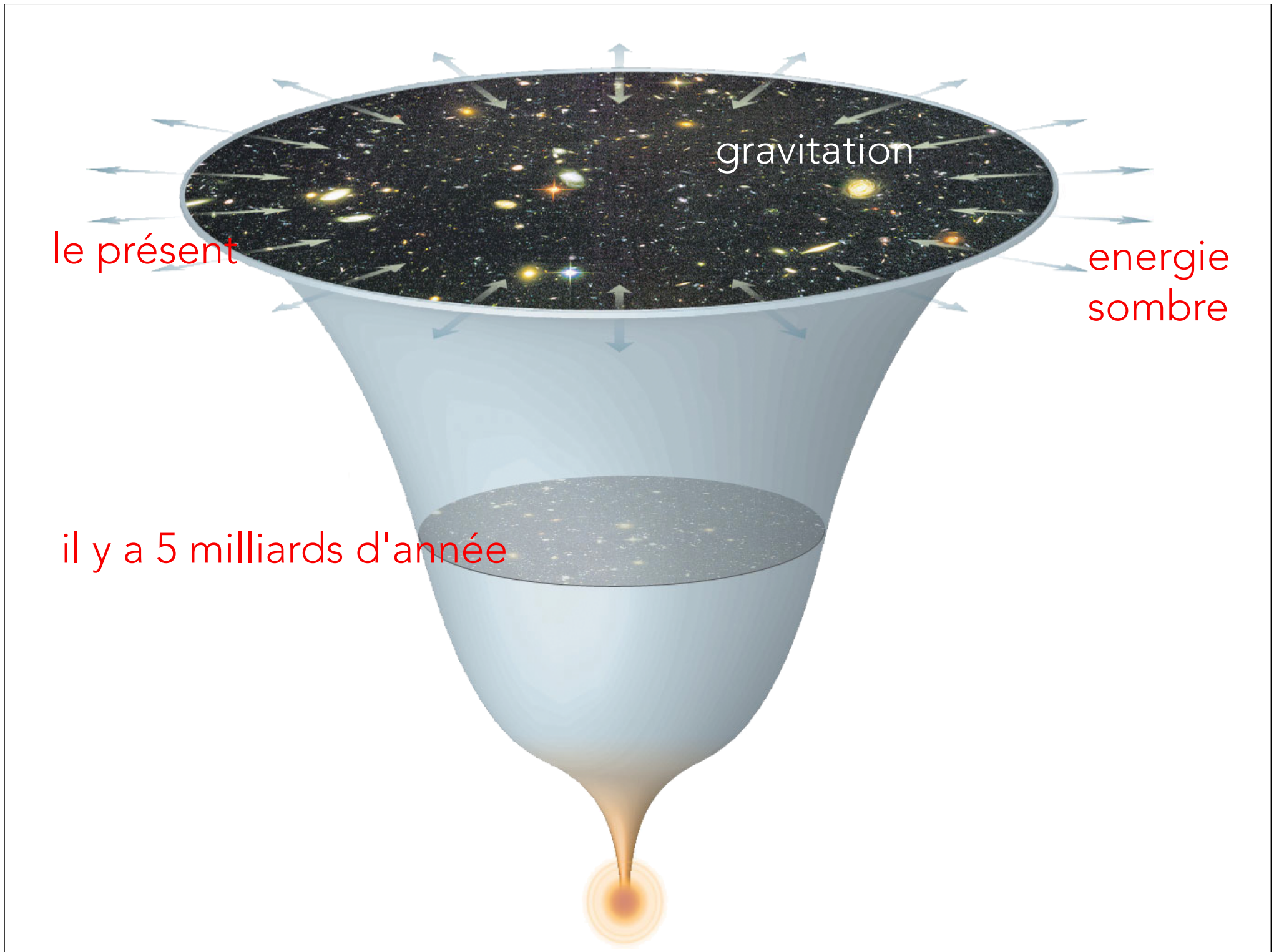


densité de l'Univers \approx densité critique

Qu'est ce que l'énergie noire ?

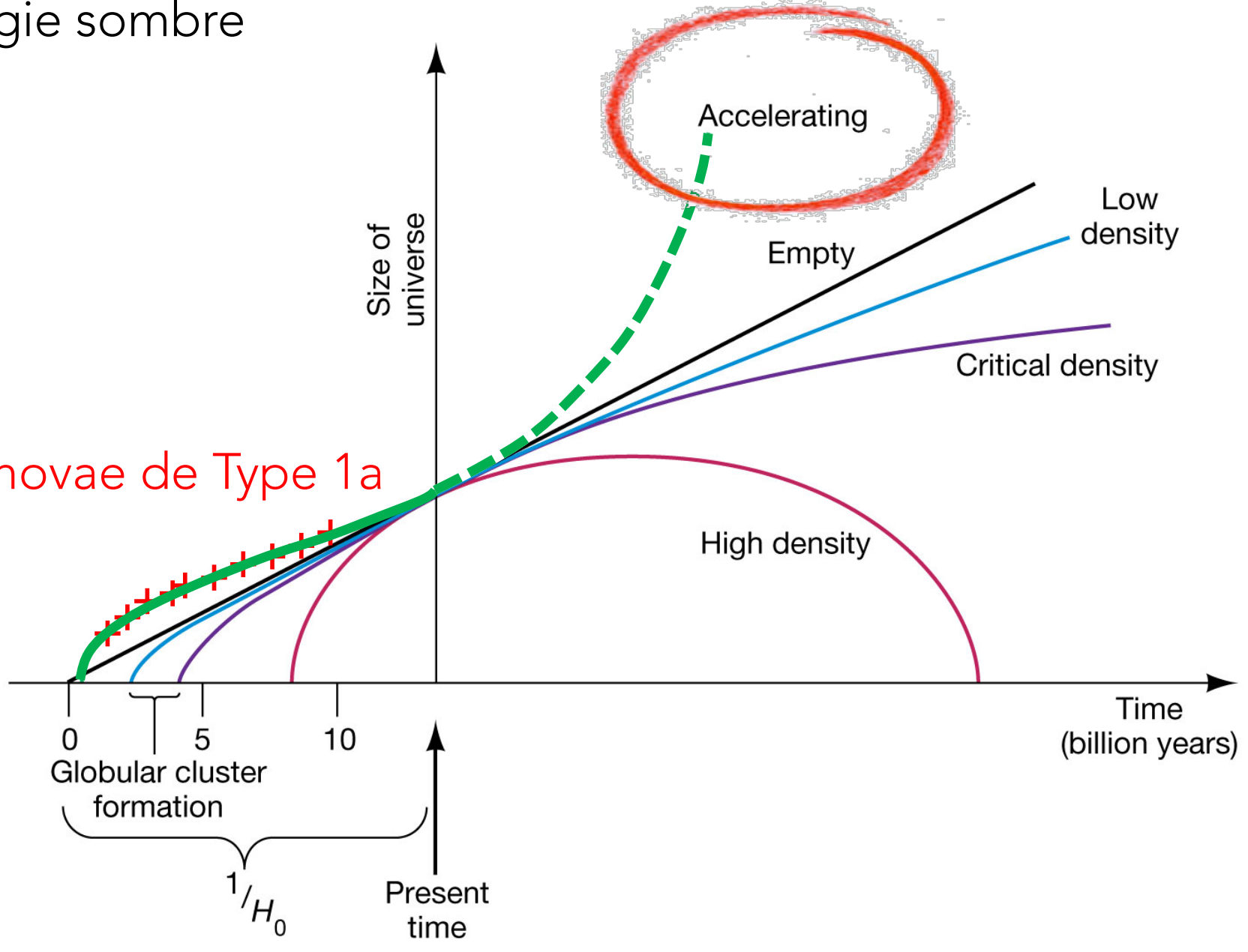
A photograph of a galaxy, likely a spiral galaxy, viewed from an angle. The galaxy is tilted and shows a bright central core. In the foreground, there is a very bright, point-like star with a four-pointed diffraction pattern. The background is dark with some faint stars.

Supernovae de type Ia



energie sombre

Supernovae de Type 1a



dans la salle de contrôle de l'Univers

e

α

ε

G

c

h

Λ

la constante cosmologique

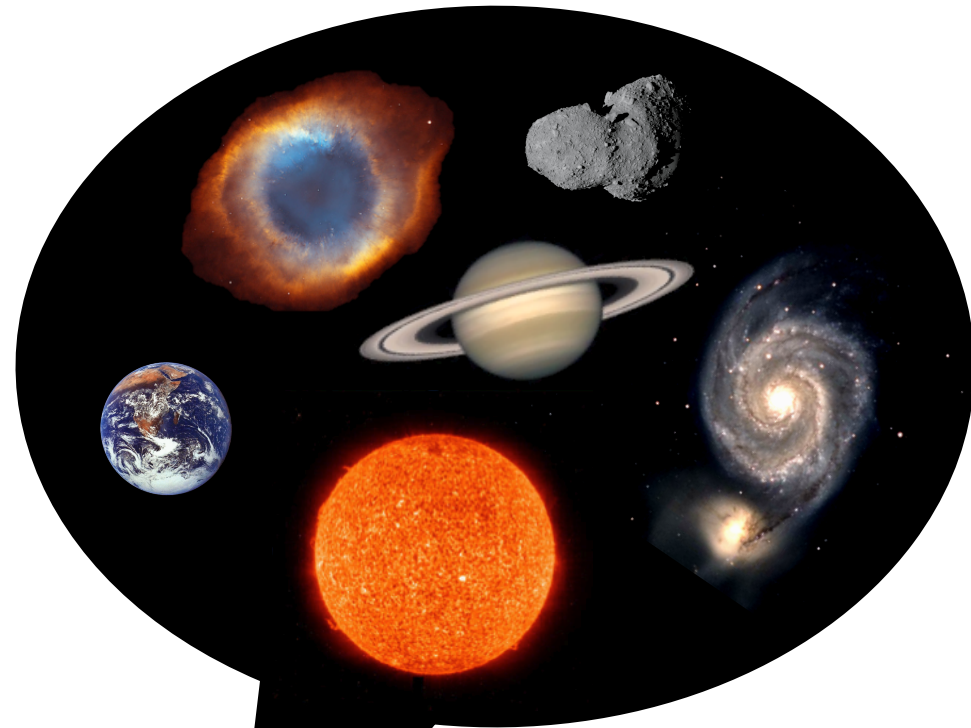
ce que nous "voyons" n'est que la pointe de l'iceberg :

étoiles et planètes

gaz chaud

lumière

neutrinos



ce que nous "voyons" n'est que la pointe de l'iceberg :

matière 4.9 %

matière noire 26.8 %

énergie sombre 68.3 %

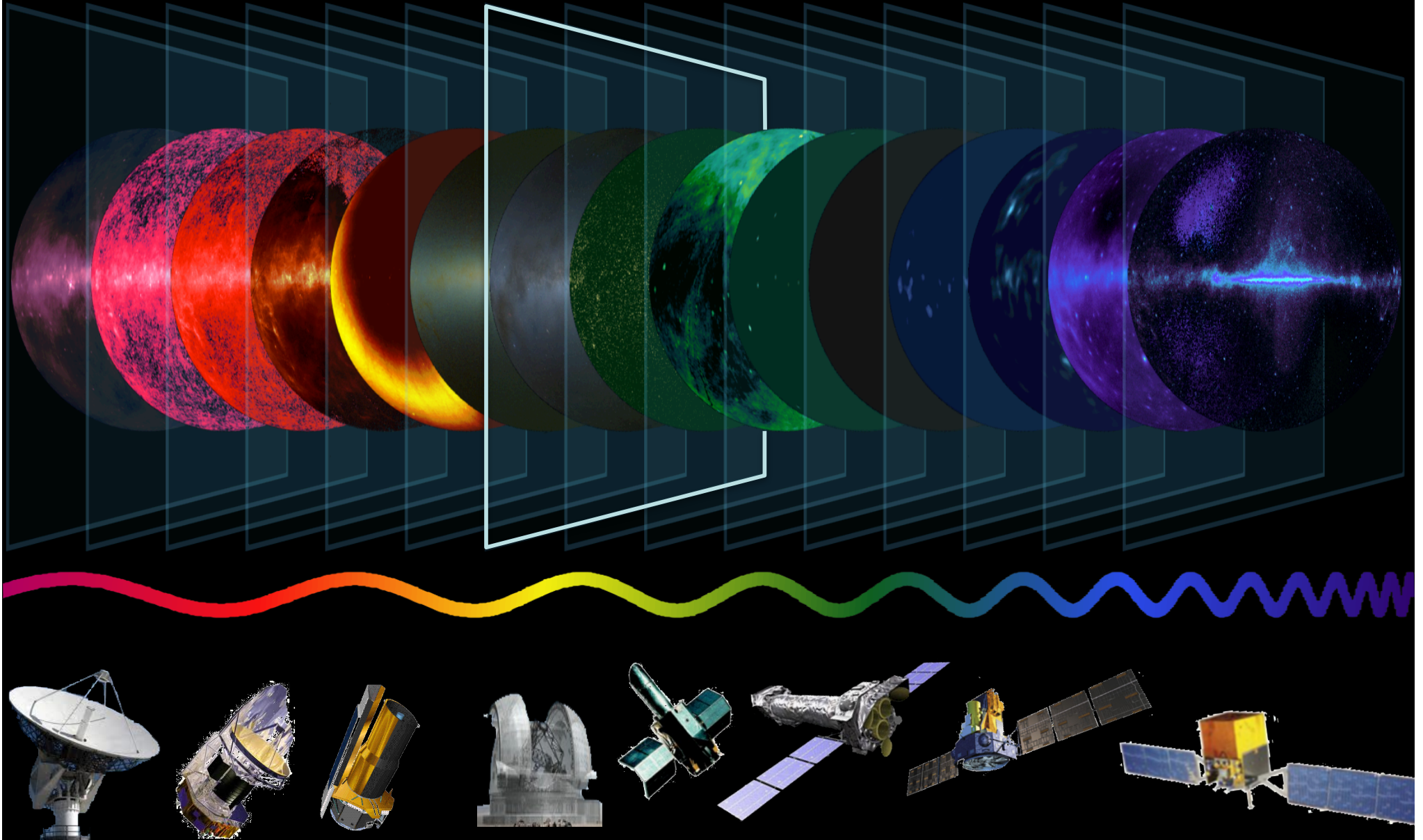


ce que nous voyons ...



L'ASTRONOMIE PHOTONIQUE - Sylvain Chaty, lundi 11h45

radio sub-mm IR visible X gamma



les messagers de l'astronomie

messagers

message, source principale ...

hV1

photons

quasi-totalité de ce que l'on connaît

2

météorites

histoire du système solaire

3

rayons cosmiques

leur origine, accélérateurs cosmiques

4

neutrinos

processus de très haute énergie

5

ondes gravitationnelles

"ballets" et "spirales" de la mort

CANAL+

?

matière noire

?

énergie sombre

les messagers de l'astronomie

messagers

conference

conferencier

hV1

photons

lundi

Sylvain CHATY

2

météorites

mardi

Brigitte ZANDA

3

rayons cosmiques

mercredi

Peter VON BALLMOOS

4

neutrinos

jeudi

Fabian SCHUSSLER

5

ondes gravitationnelles

vendredi

Alexandre LE TIEC

CANAL+

?

matière noire

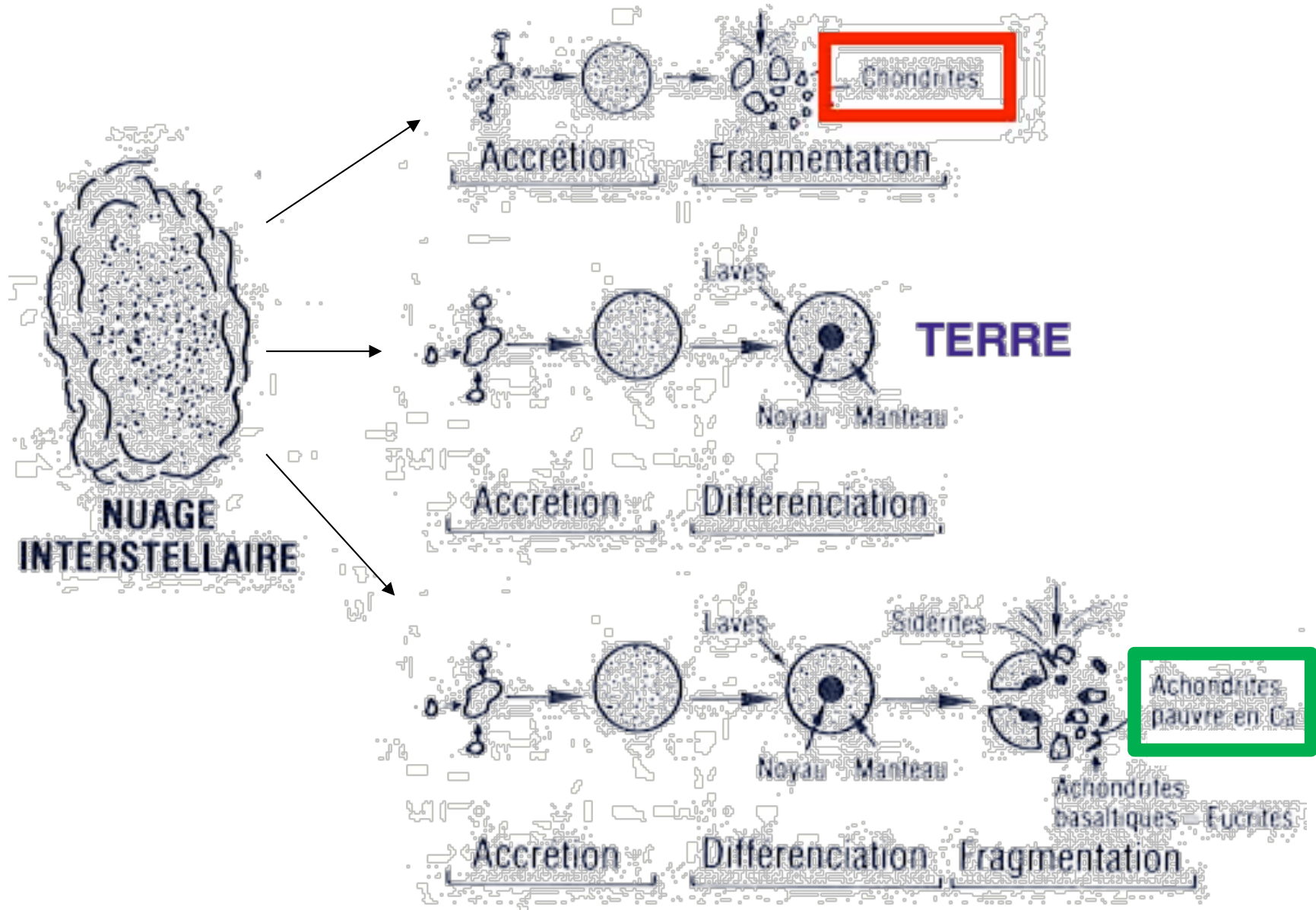
?

énergie sombre

Les météorites



le message : composition et age de la terre



=> Brigitte ZANDA, mardi (same place same time)

les rayons cosmiques

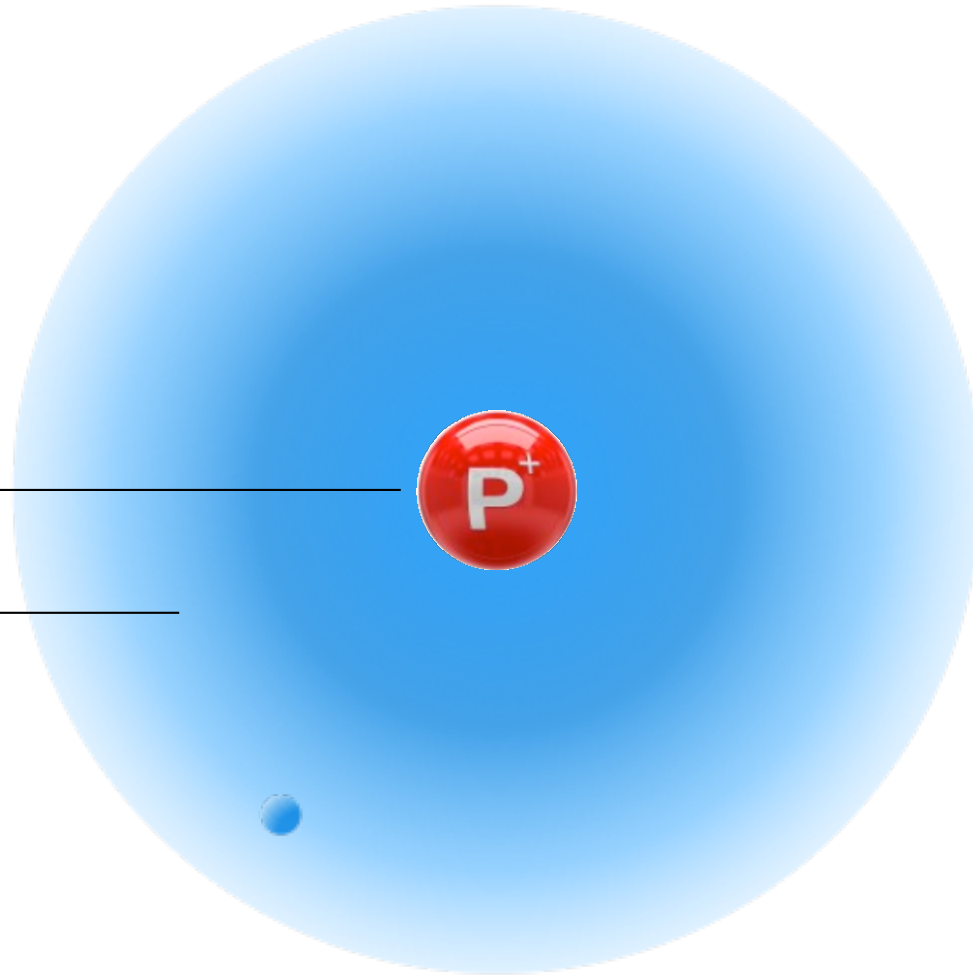


les rayons cosmiques

atome :

noyau

électron

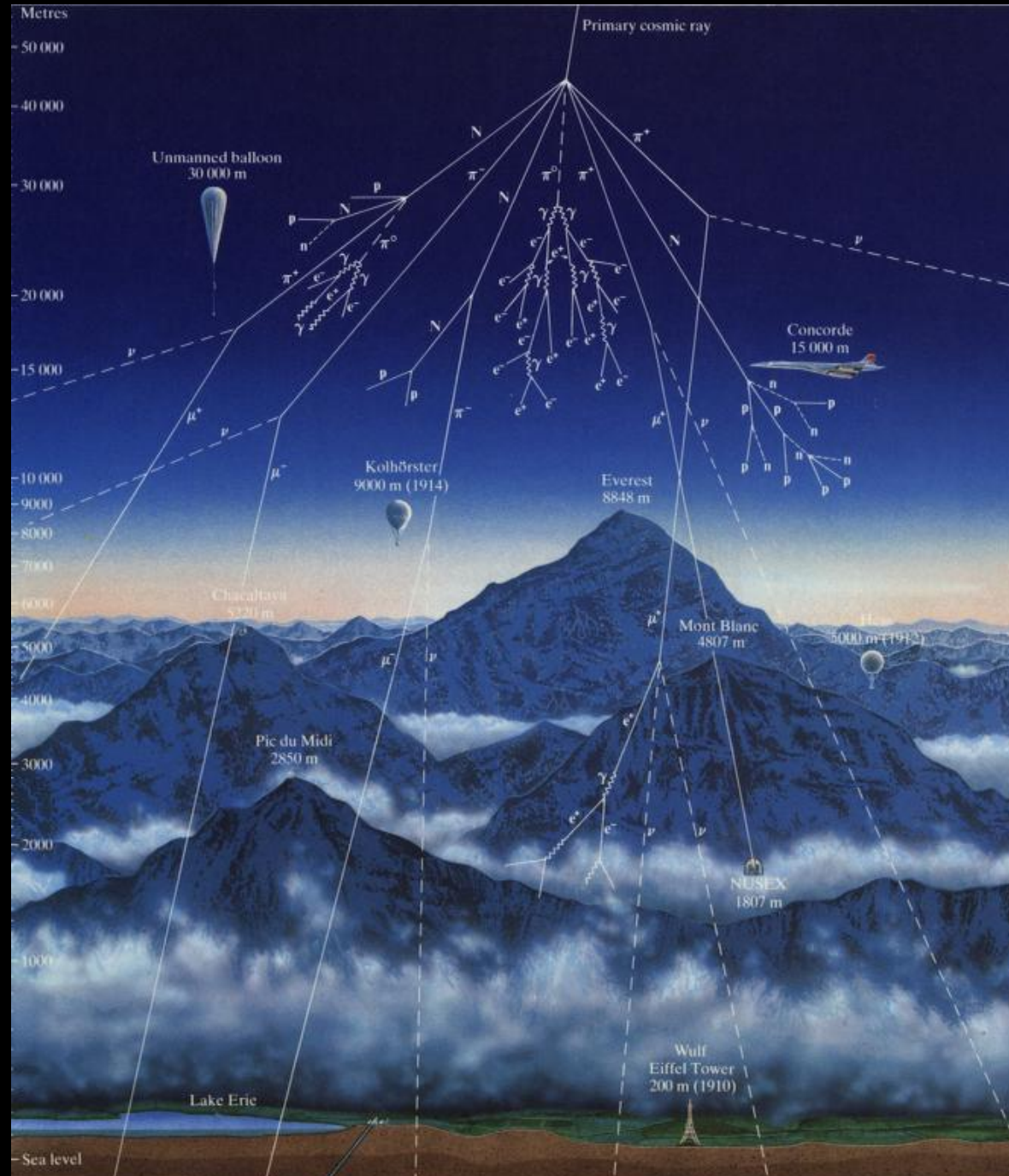




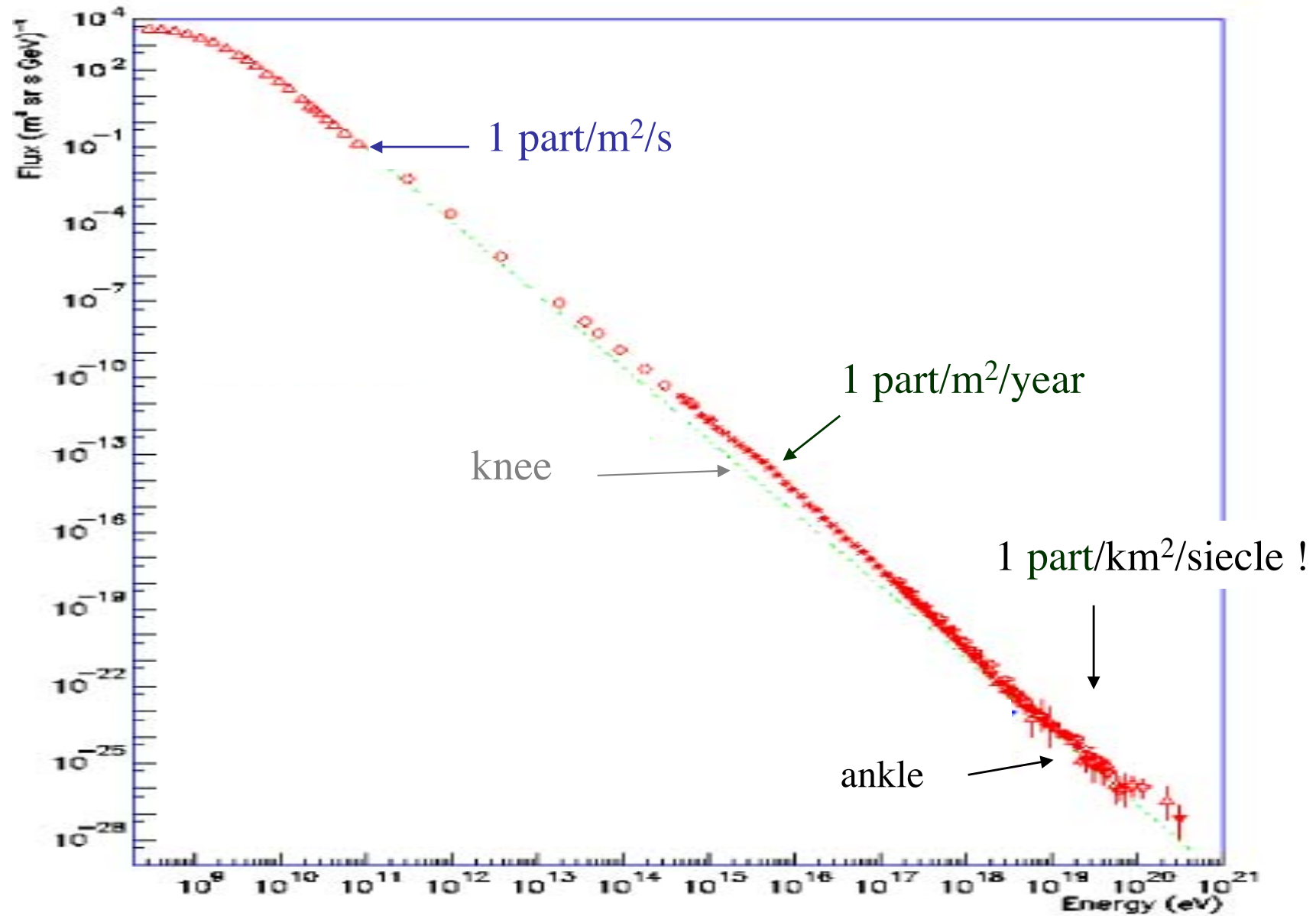
Yellowknife, Canada

KWON O CHUL

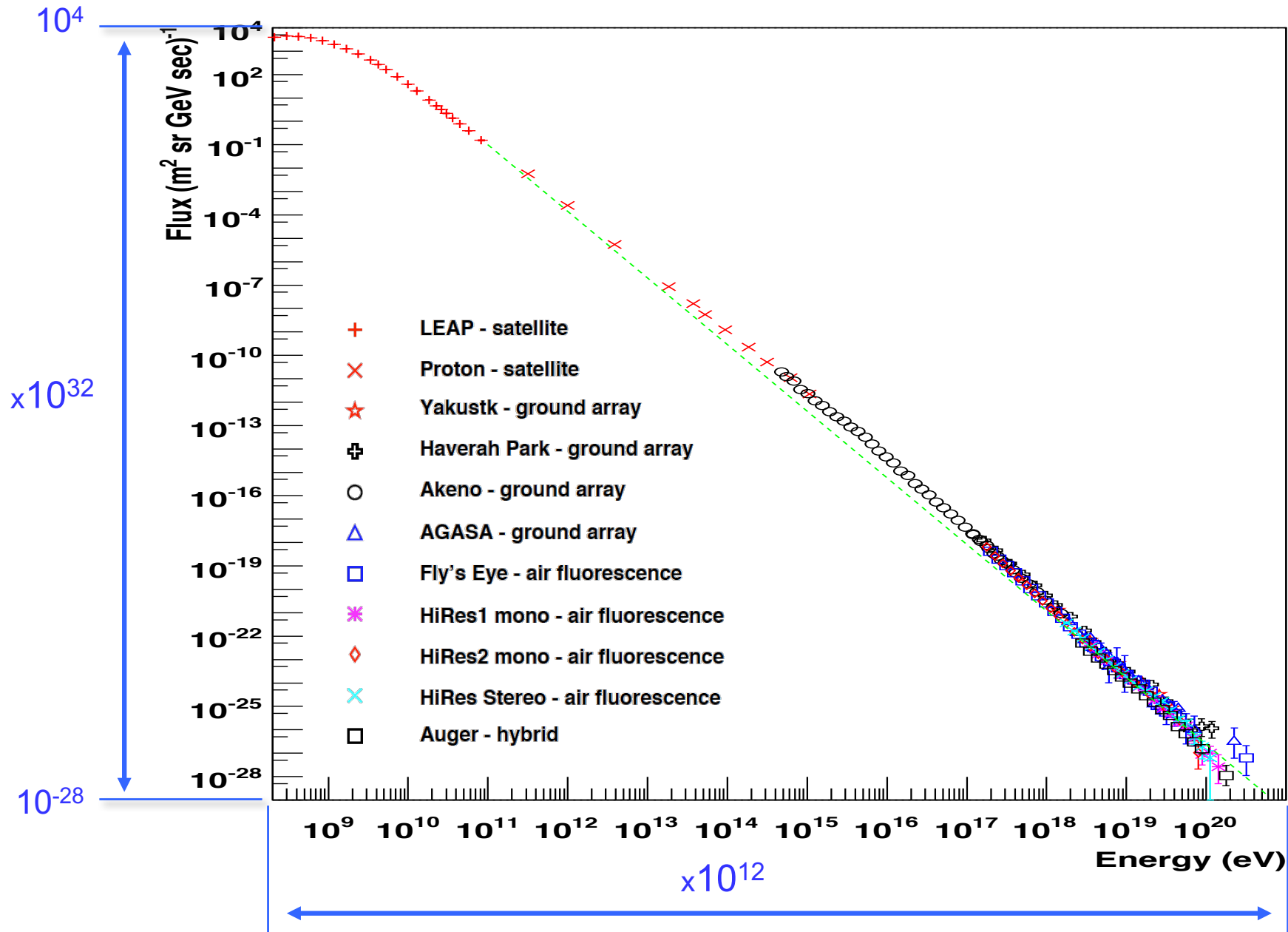
Un Siècle de Rayons Cosmiques

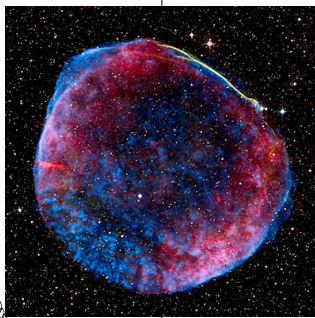
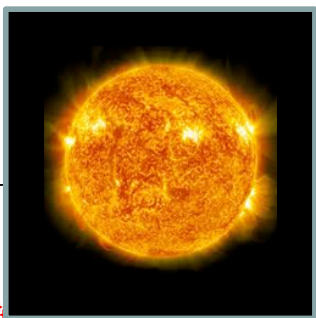
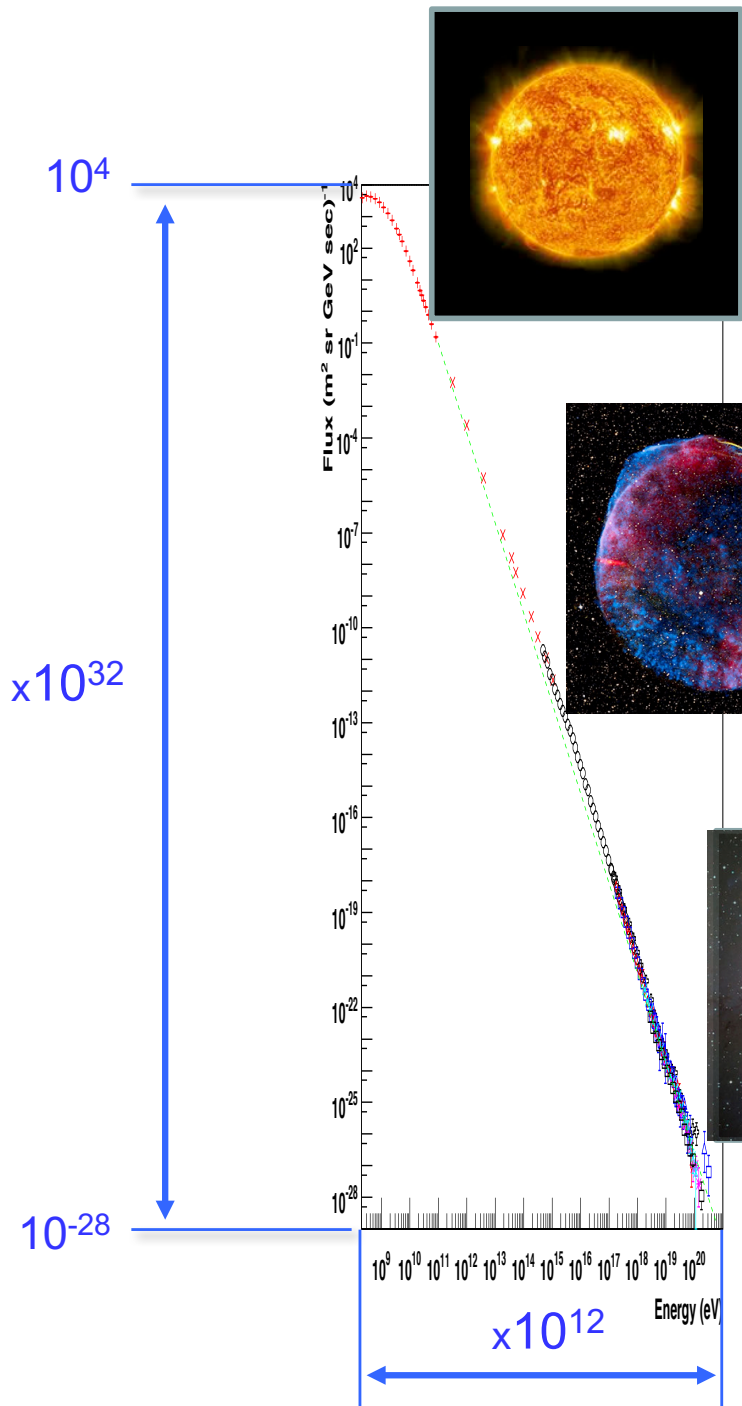


Le spectre des Rayons Cosmiques



Le spectre des Rayons Cosmiques

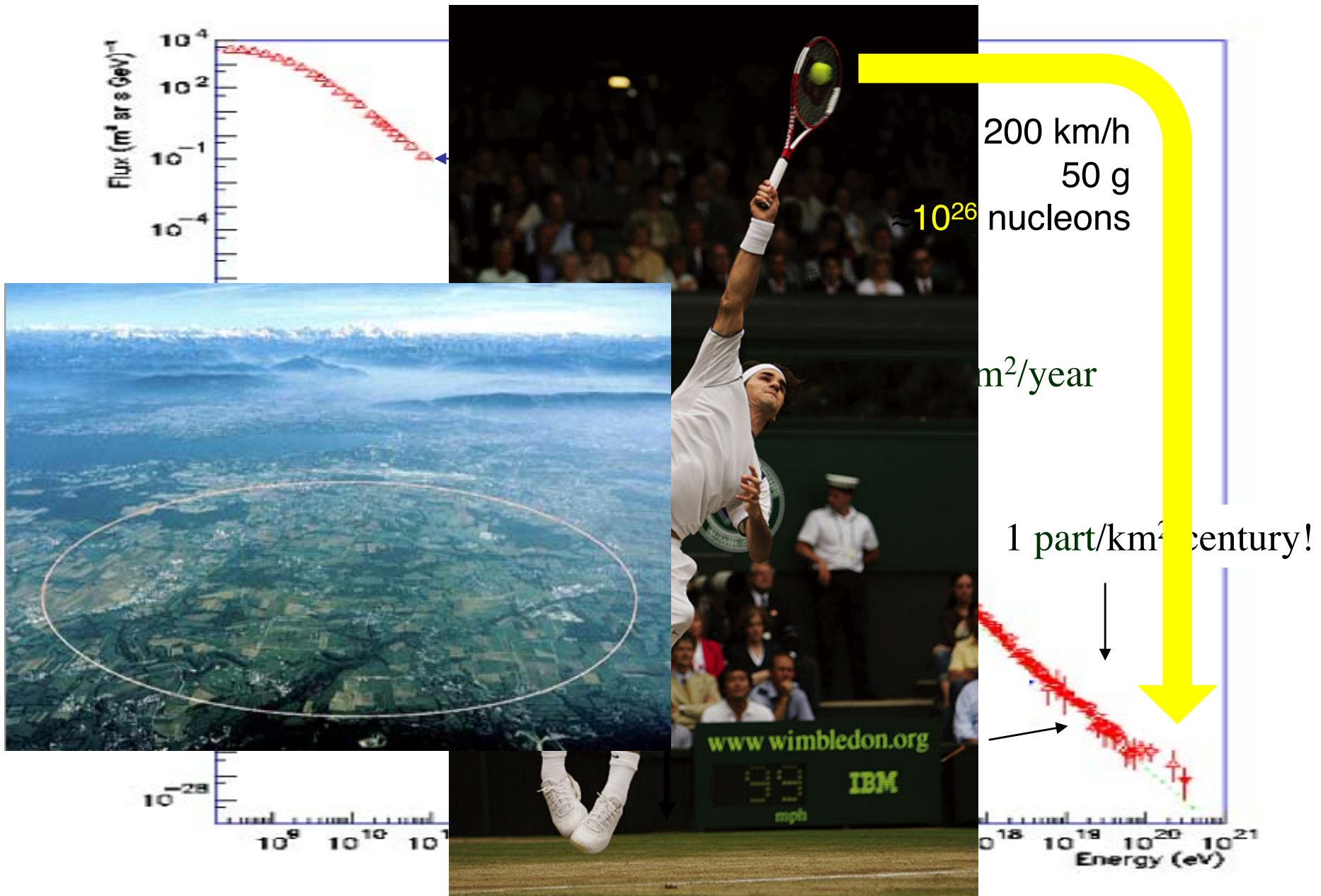




regulier sur
12 ordres de magnitude

dynamique
32 ordres de magnitude

Le spectre des Rayons Cosmiques

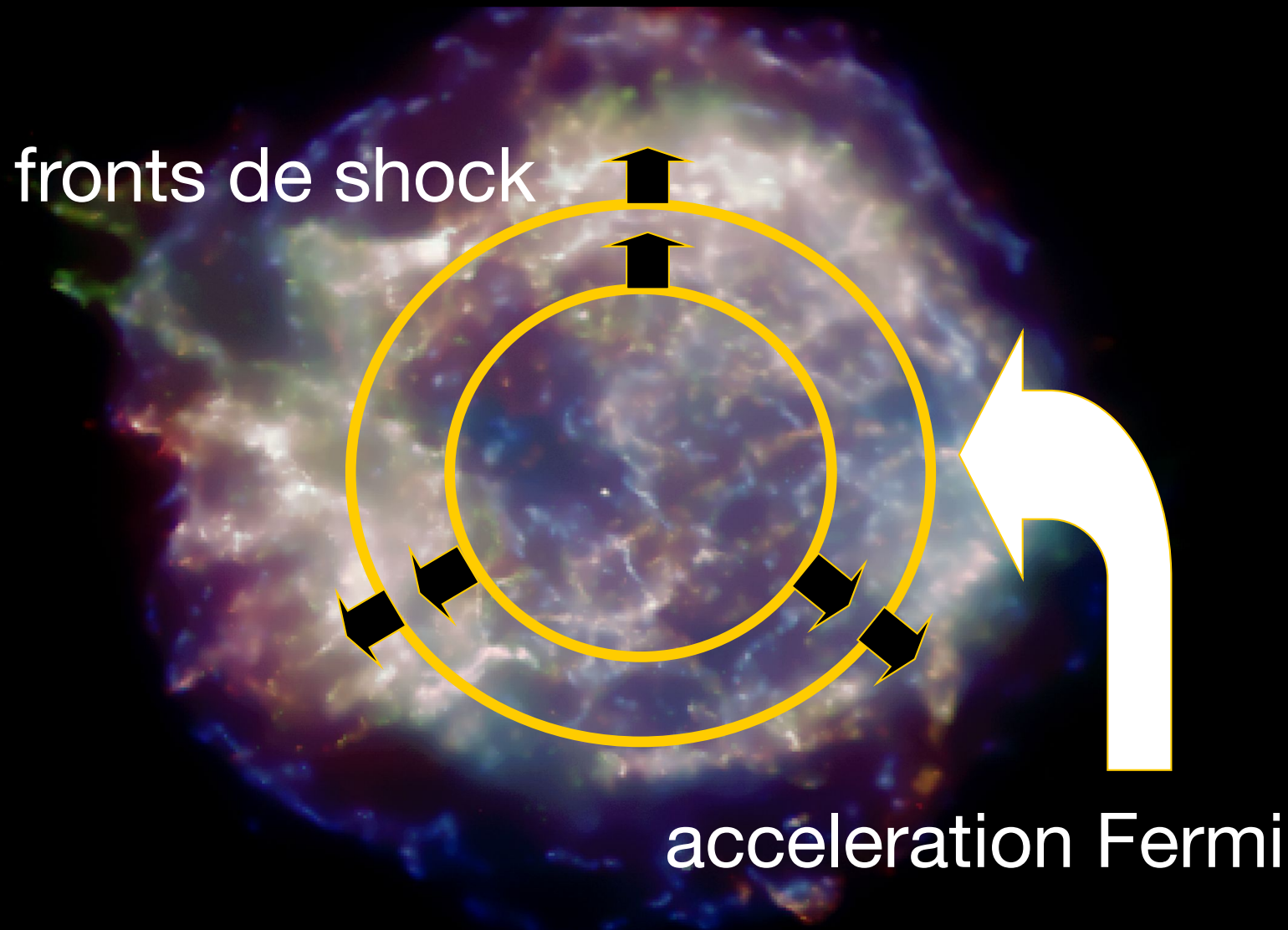


un proton énergétique entre dans l'atmosphère



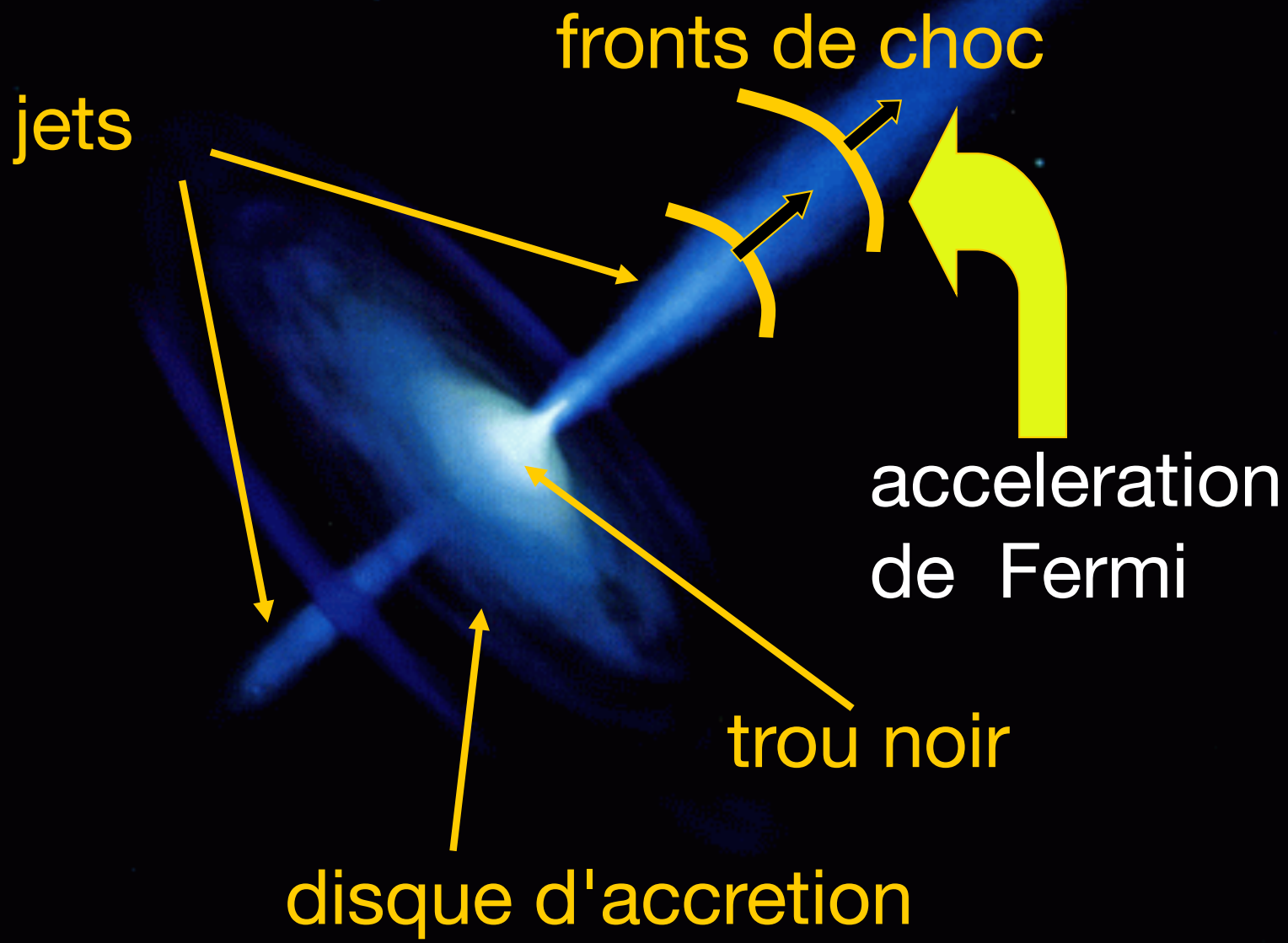
ces "Rayons cosmiques", d'où sortent ils ?

fronts de shock



acceleration Fermi

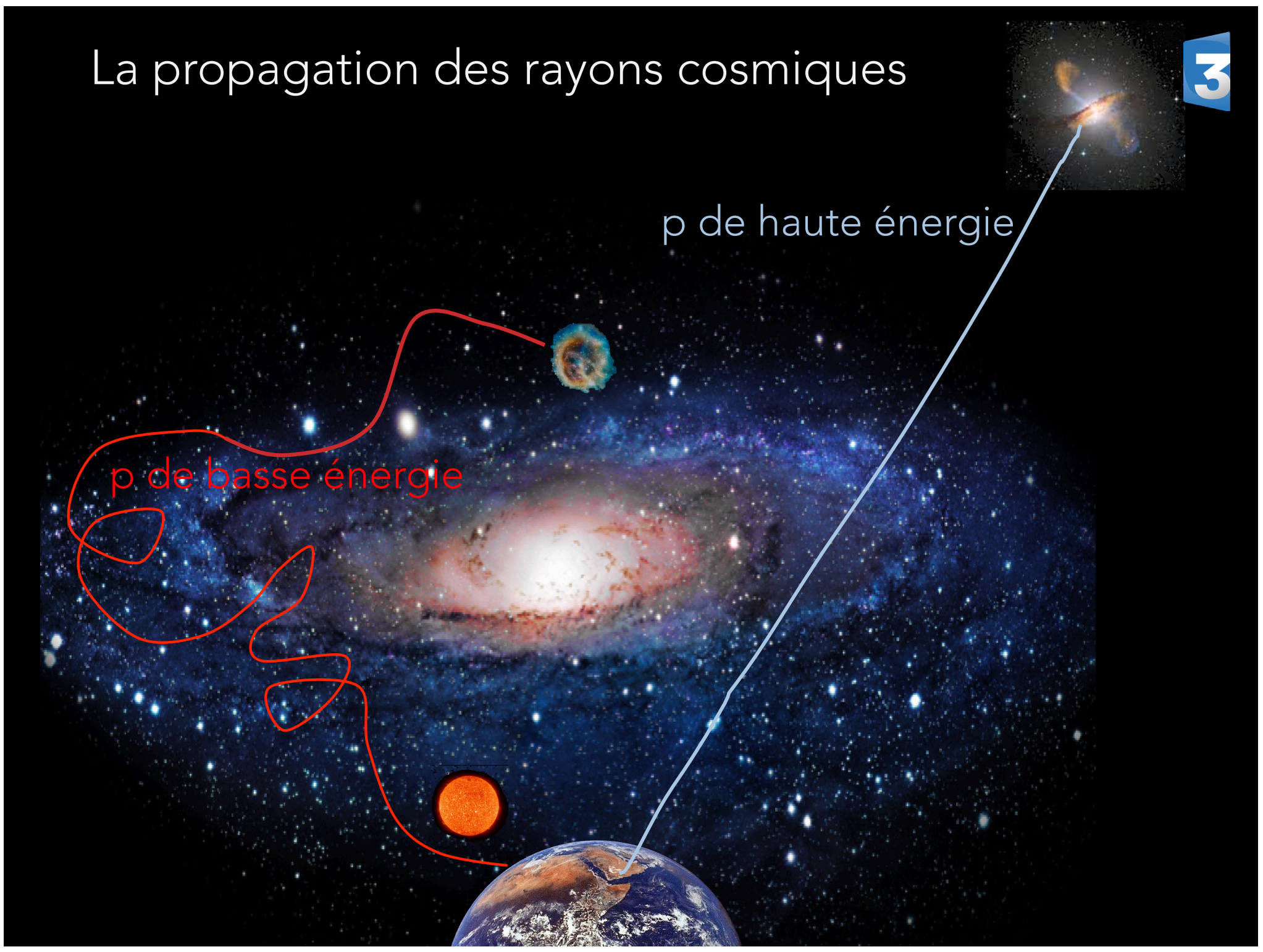
ces "Rayons cosmiques", d'où sortent ils ?



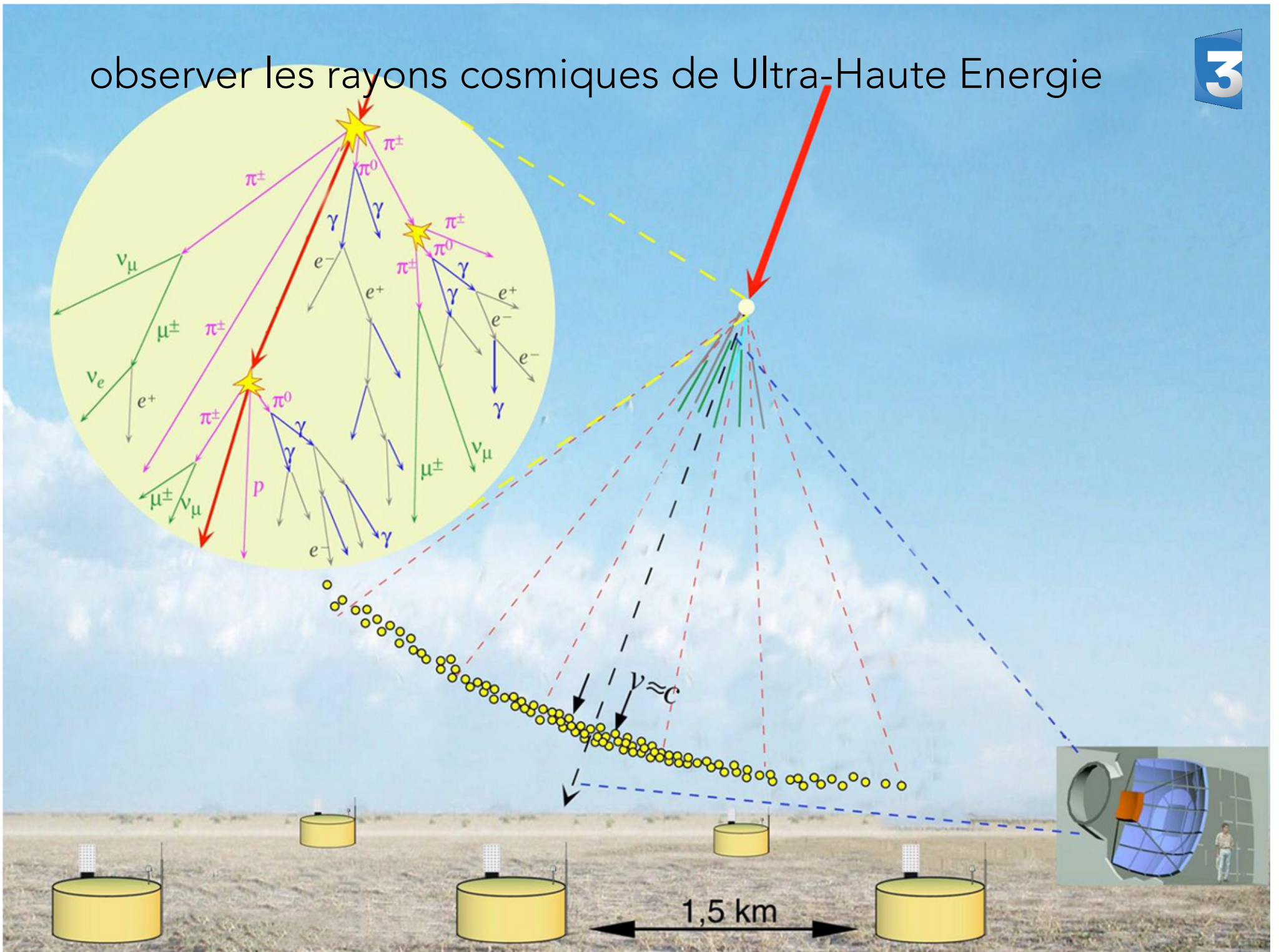
La propagation des rayons cosmiques

p de haute énergie

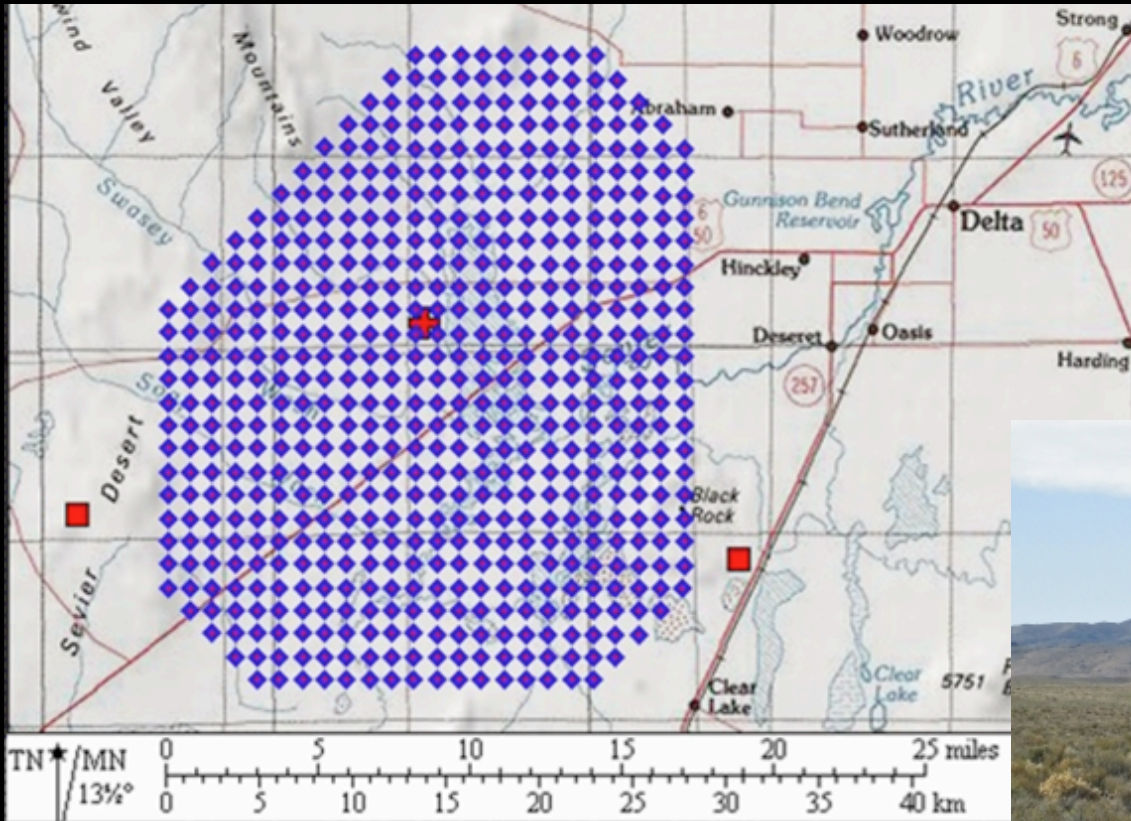
p de basse énergie



observer les rayons cosmiques de Ultra-Haute Energie



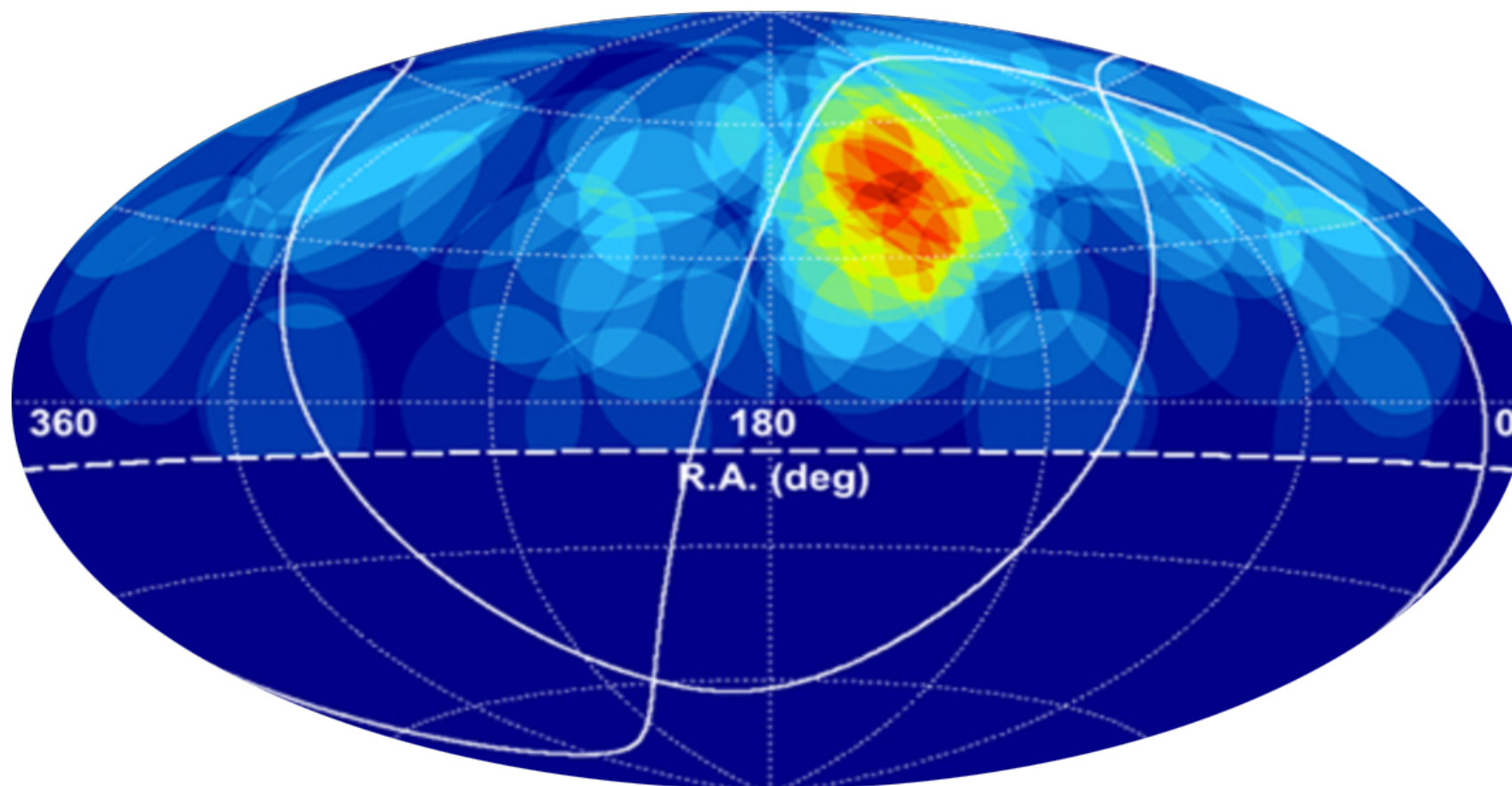
observer les rayons cosmiques de Ultra-Haute Energie



Telescope Array
Utah, USA



Le ciel des rayons cosmiques de Ultra-Haute Energie



carte du ciel du "Telescope Array" : 72 rayons cosmiques d'énergie $E > 57 \text{ EeV}$ ont été détectés entre 2008 et 2013.

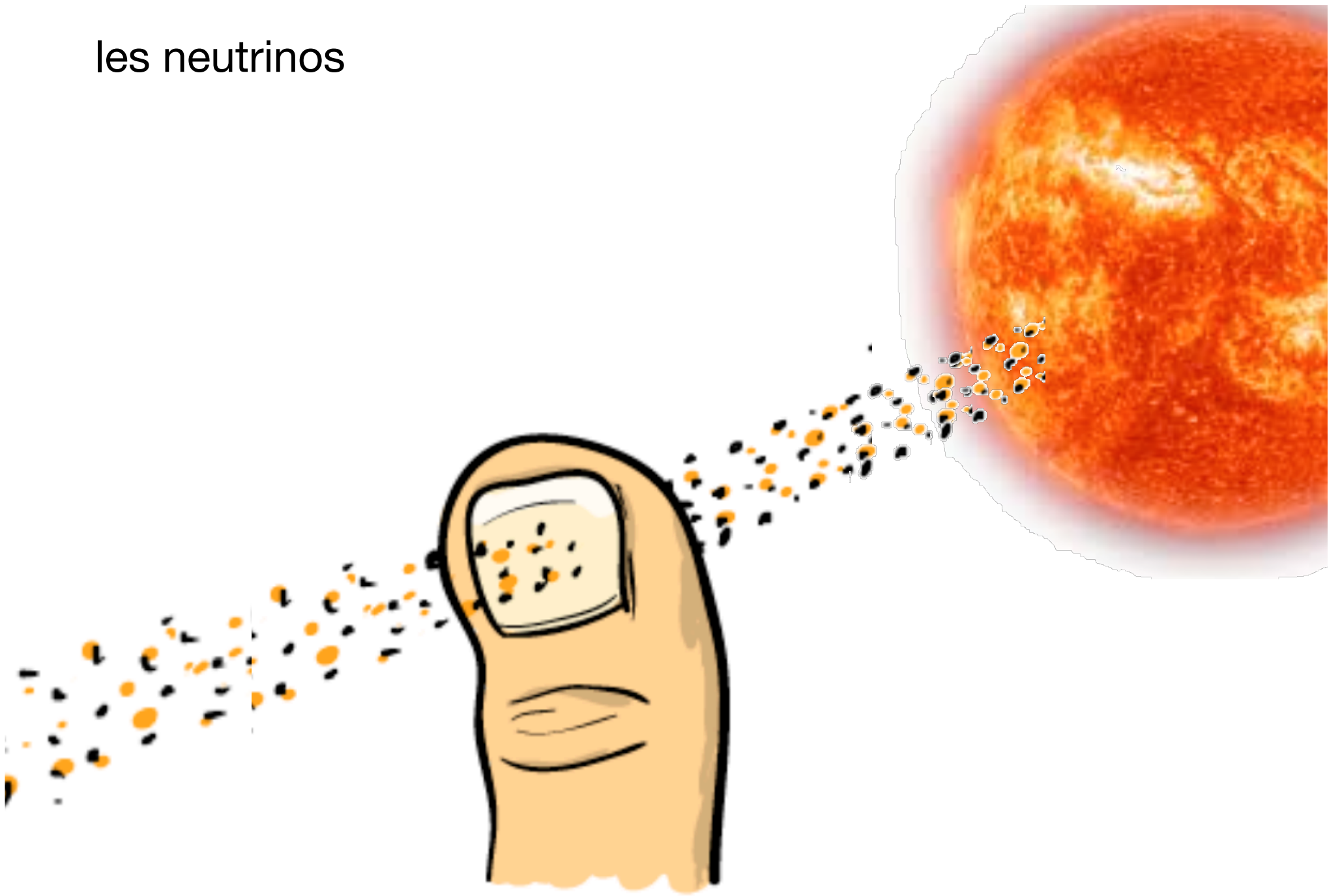
hotspot : un cercle de $\varnothing 40^\circ$ (representant 6% de l'hémisphère nord) contient 25% des événements

=> PvB, mercredi

les neutrinos



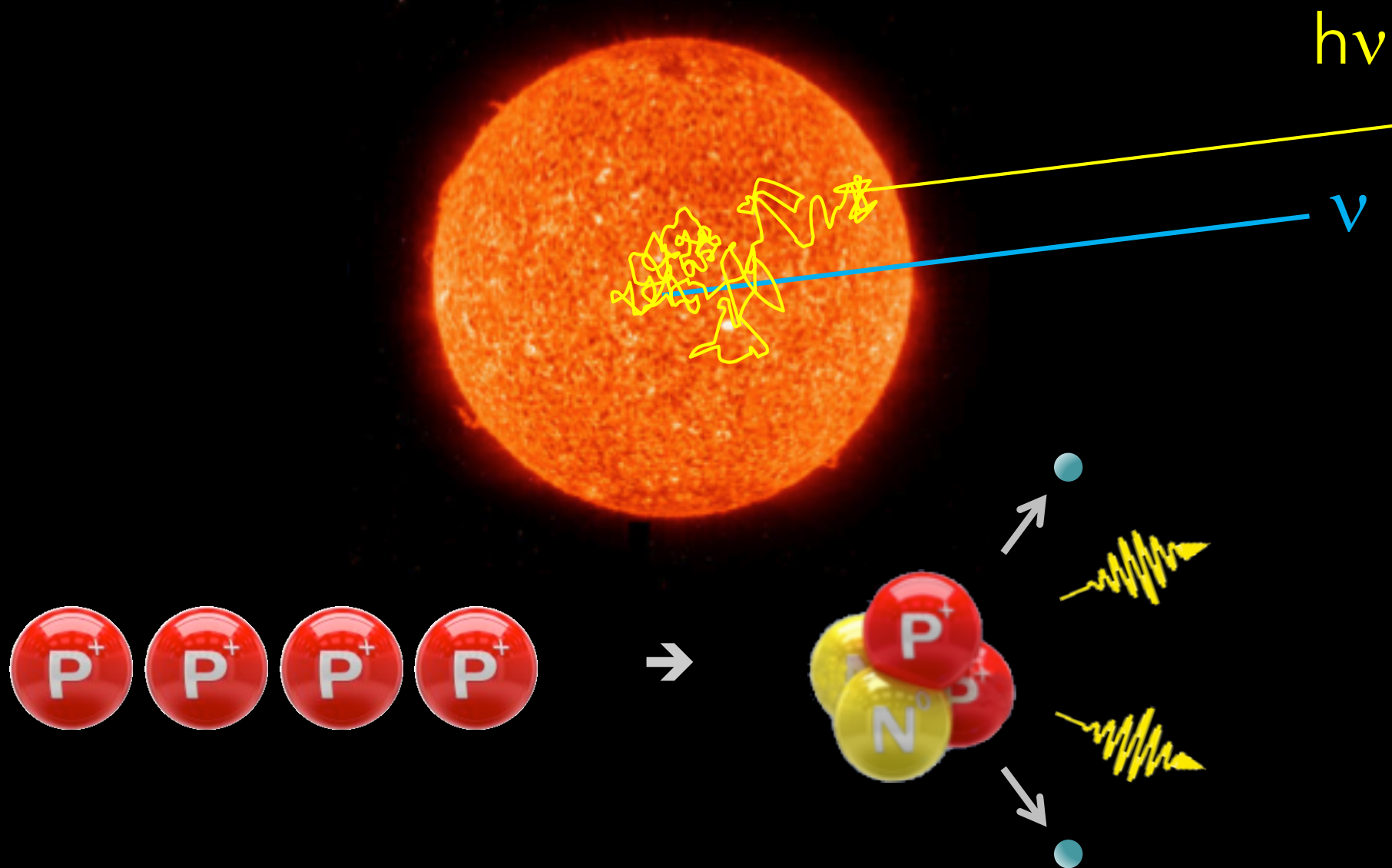
les neutrinos



65 millions par seconde et cm^2

pourquoi observer les neutrinos?

fusion de l'H en He : source d'énergie des étoiles



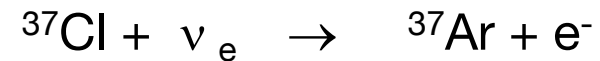
le problème des neutrinos solaires

détection de neutrinos à la Mine d' Homestake, South Dakota



l' expérience du Brookhaven Lab
1500 m sous la surface de la terre

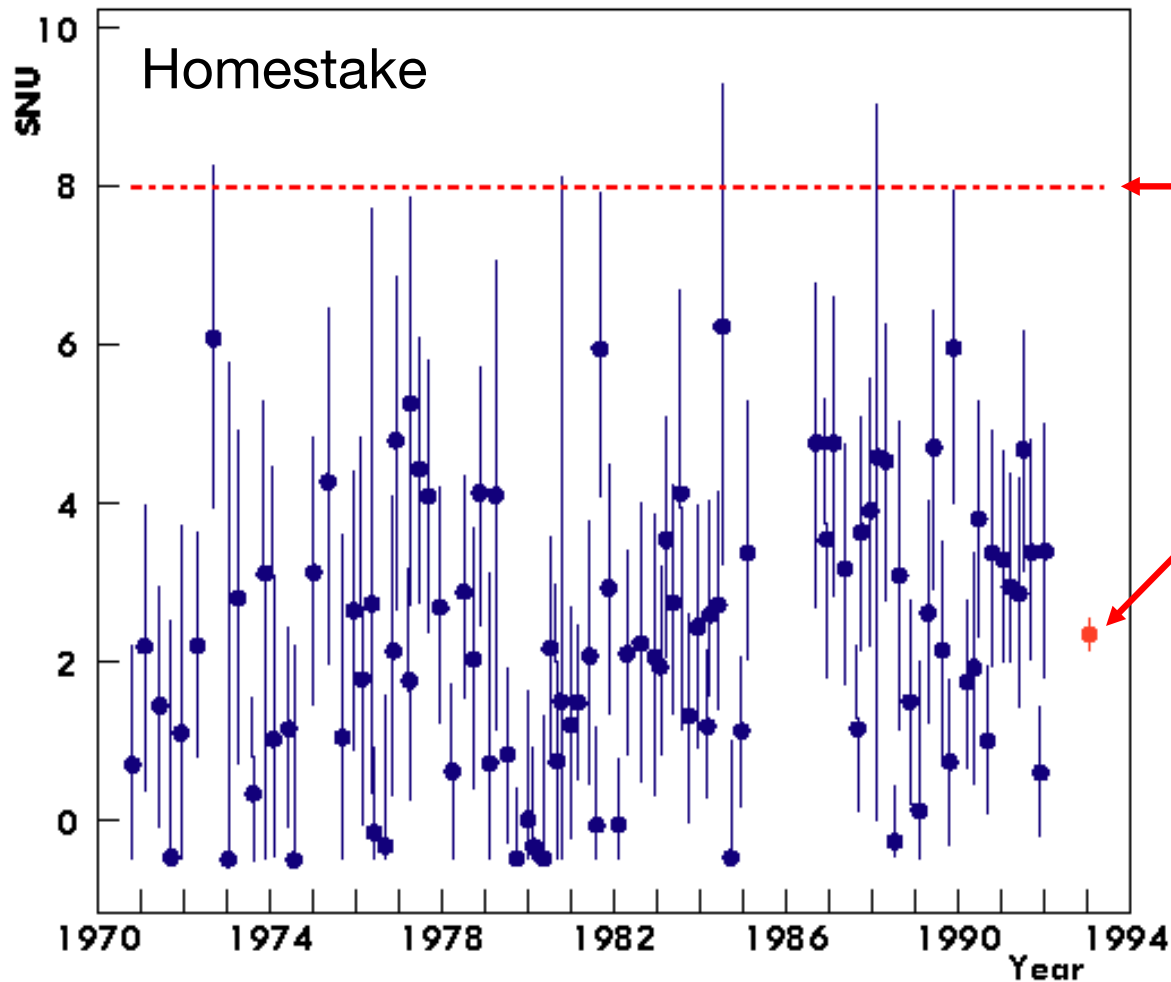
Les neutrinos peuvent être détectés par la réaction



380000 litres de perchloréthylène (C_2Cl_4) sont analysés périodiquement pour mesurer la concentration en atomes d' Argon. Pendant que flux de ν solaires sur terre est $\sim 10^{11}$ $\nu/\text{s cm}^2$, seulement env. une fois par semaine un neutrino interagit avec un atome de Cl.

le problème des neutrinos solaires

les résultats des ν solaires sont presented en SNU (Solar Neutrino Units)
correspondant au taux de capture de 10^{-36} s^{-1} per noyau.

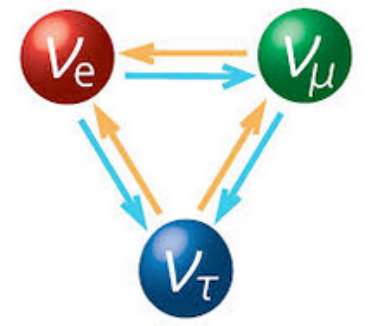
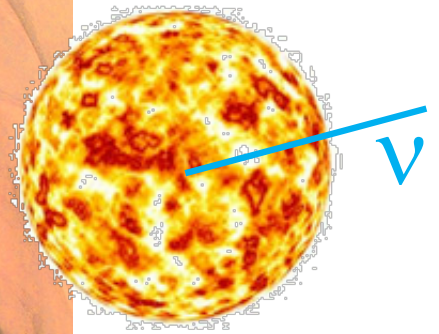
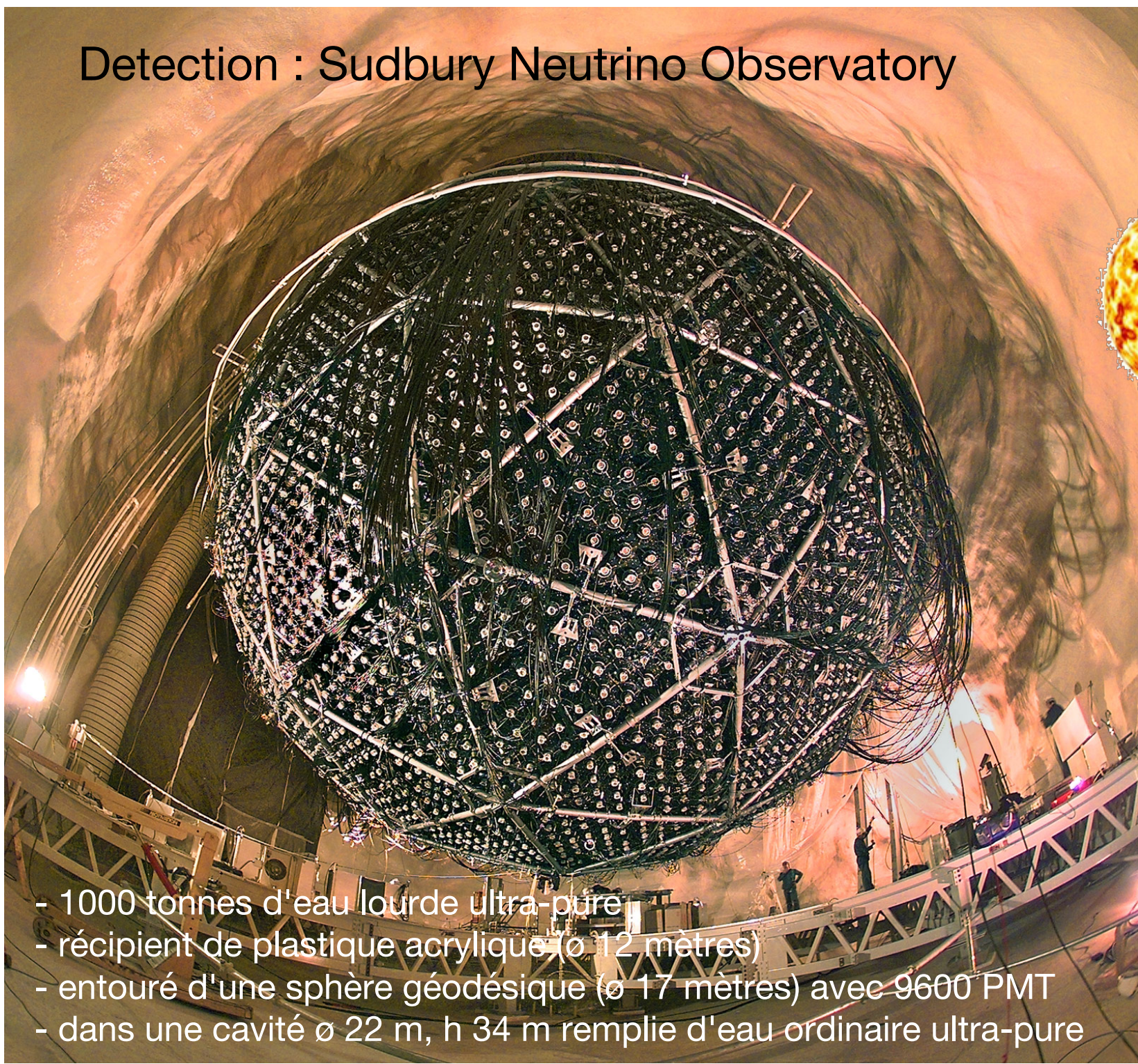


Le “Standard Solar Model”
predit 7.9 SNU.

Davis & Co mesurement
 2.1 ± 0.3 SNU
(=0.27 \pm 0.04 du flux
attendu)

Ray Davis partage le Prix
Nobel de Physique 2002 pour
ce travail

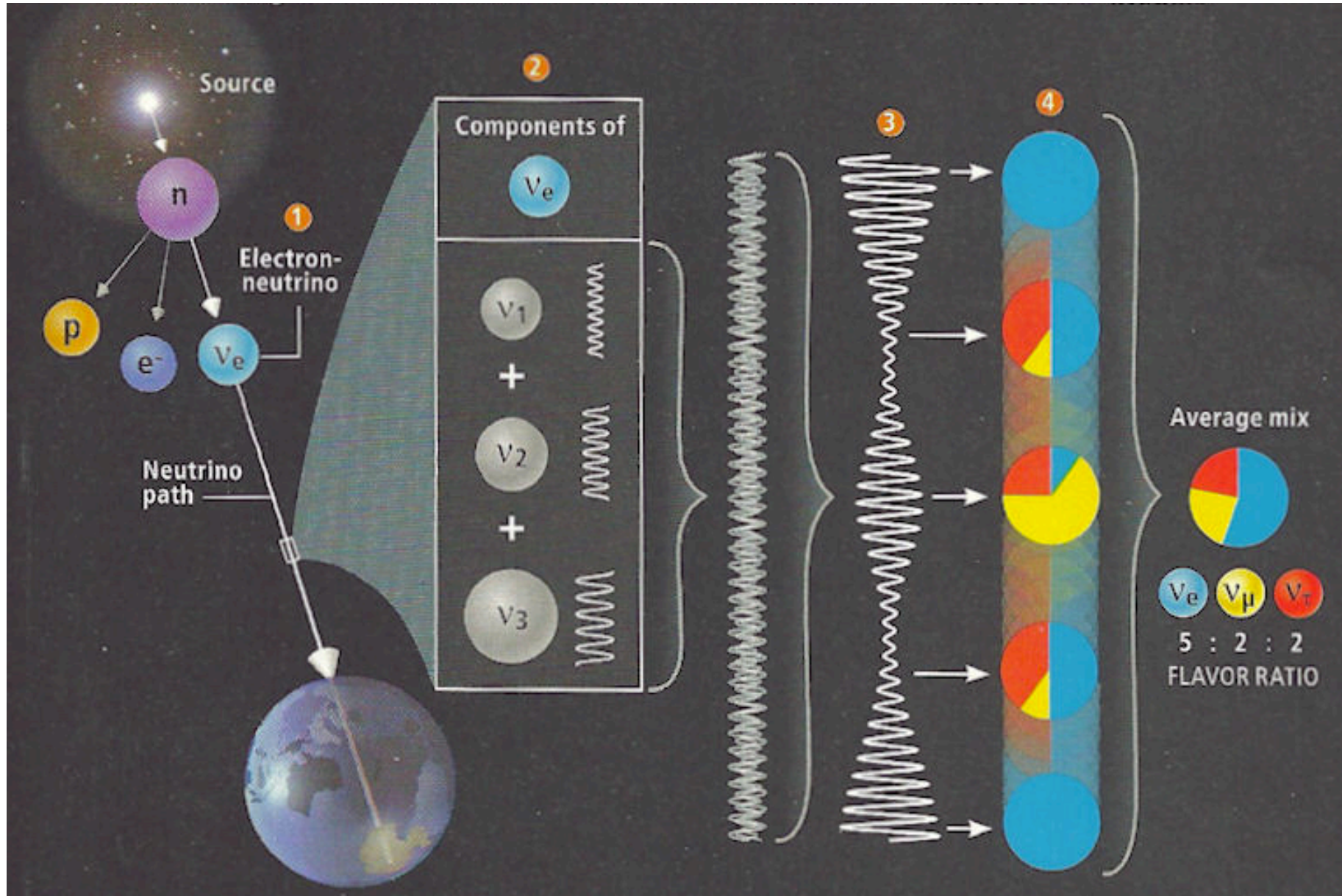
Detection : Sudbury Neutrino Observatory



- 1000 tonnes d'eau lourde ultra-pure
- récipient de plastique acrylique (ø 12 mètres)
- entouré d'une sphère géodésique (ø 17 mètres) avec 9600 PMT
- dans une cavité ø 22 m, h 34 m remplie d'eau ordinaire ultra-pure

solution du problème des neutrinos solaires

le message était "dans le messenger" : l'oscillation neutrino

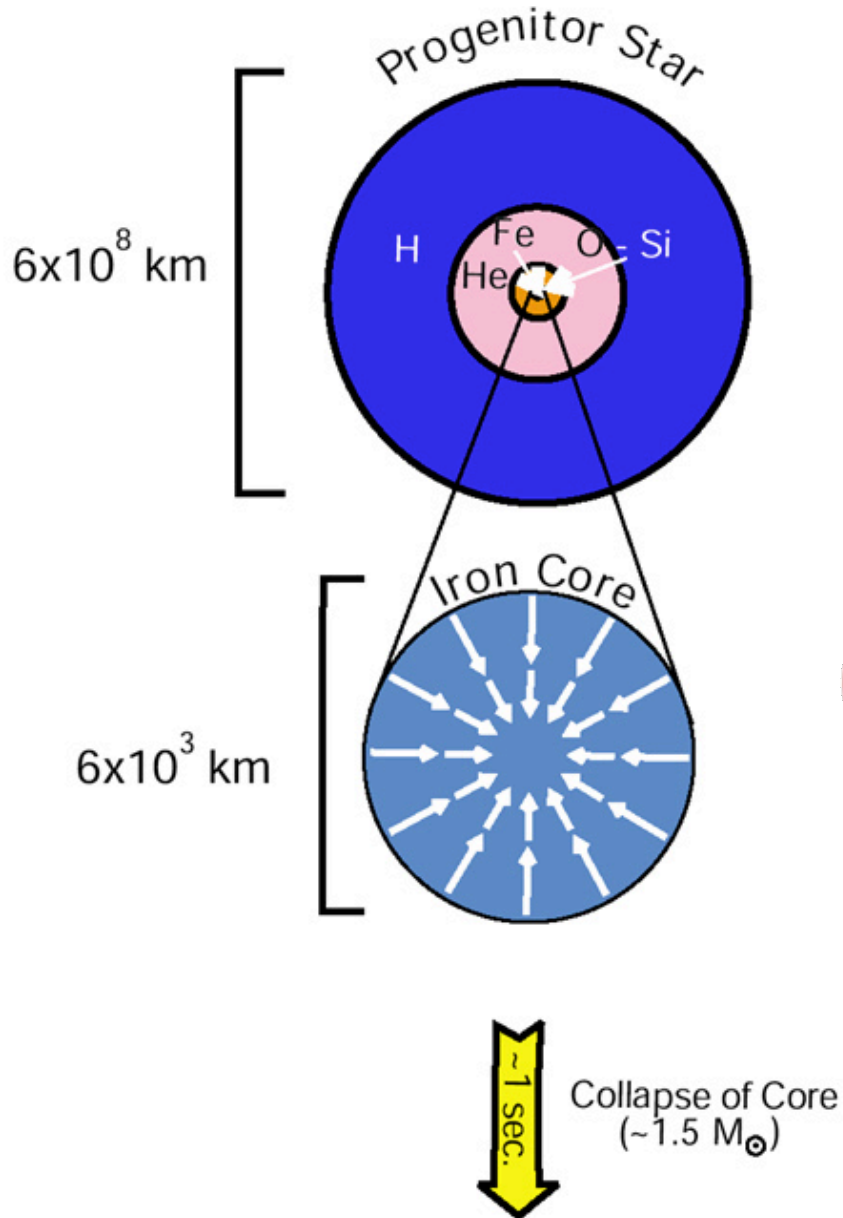


les neutrinos de la SN1987A



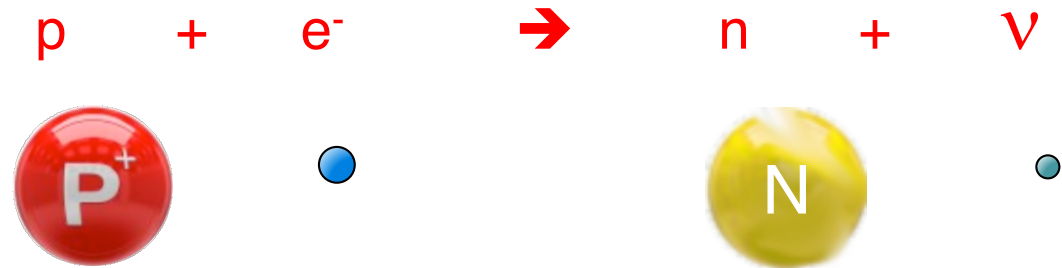
la naissance de la l'astronomie multi-messanger

Supernova !



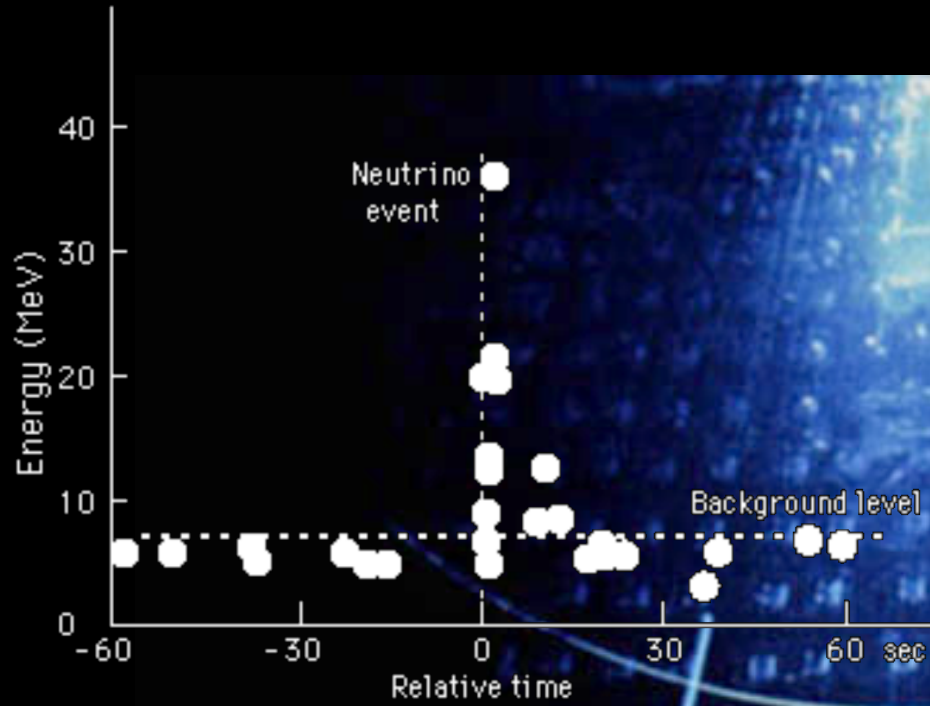
un noyau stellaire de 1 M_o ($\approx 10^{30}$ kg)
en contraction rapide

capture des e⁻ par les protons ($m_p \approx 10^{-27}$ kg)

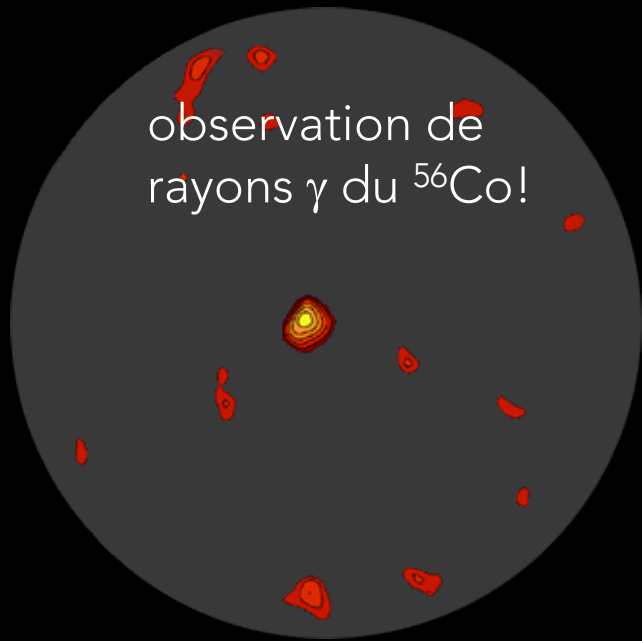


10⁵⁷ ν s'échappent ($10^{-27} \times 10^{30}$)

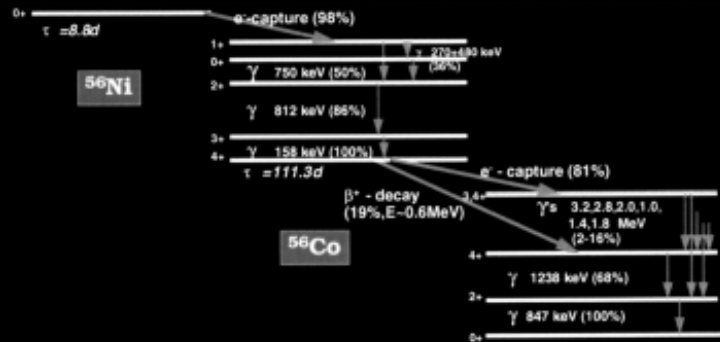
Détection des neutrinos de la SN1987A : IMB



l'observation de radioactivité dans la SN 1987A : les elements chimiques sont produits par des alchimistes stellaires !

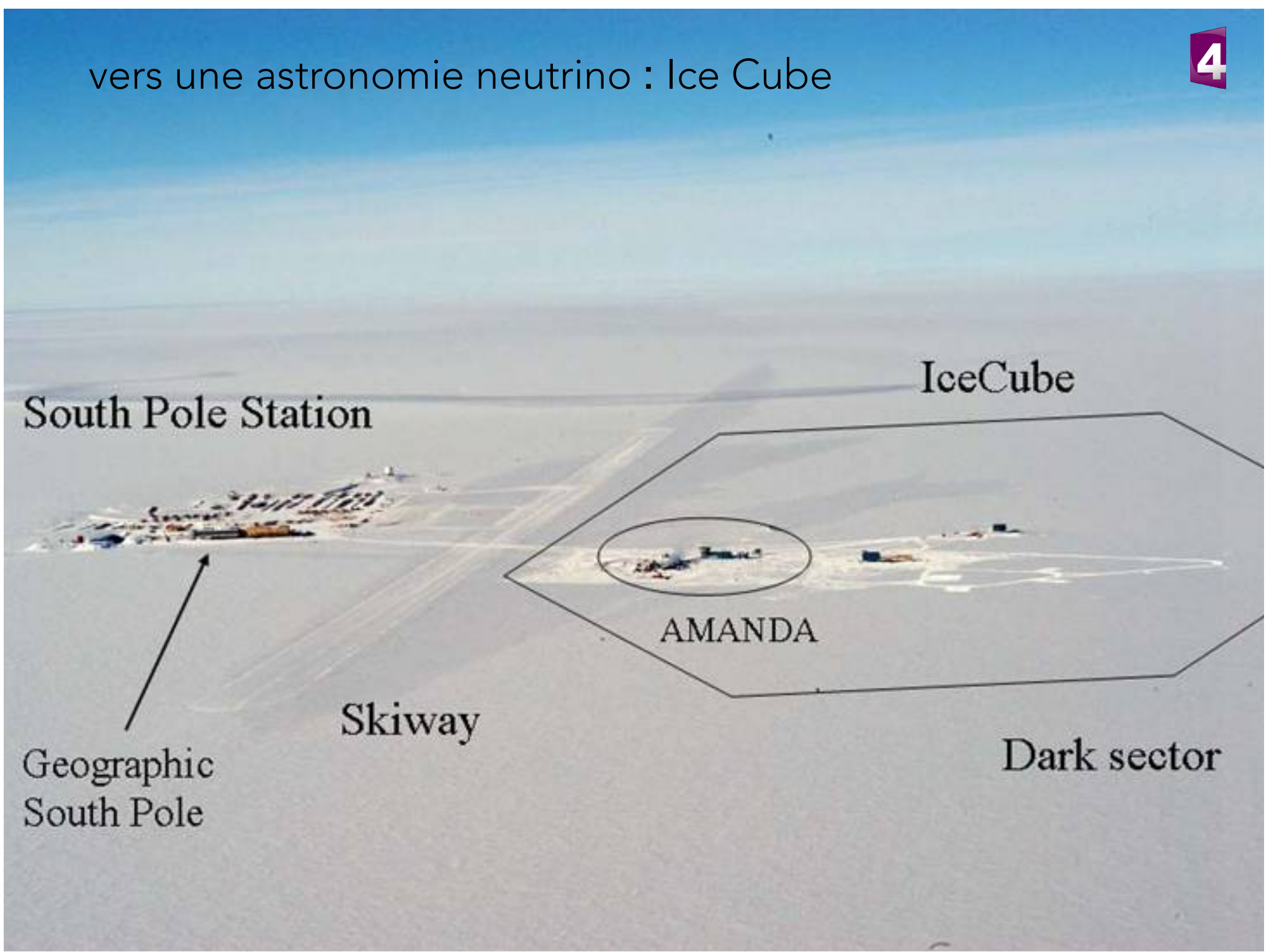


du ^{56}Co "tout frais"
emmet de rayons gamma



ν 's ET γ 's detectés : naissance de la l'astronomie multi-messenger !

vers une astronomie neutrino : Ice Cube



South Pole Station

IceCube

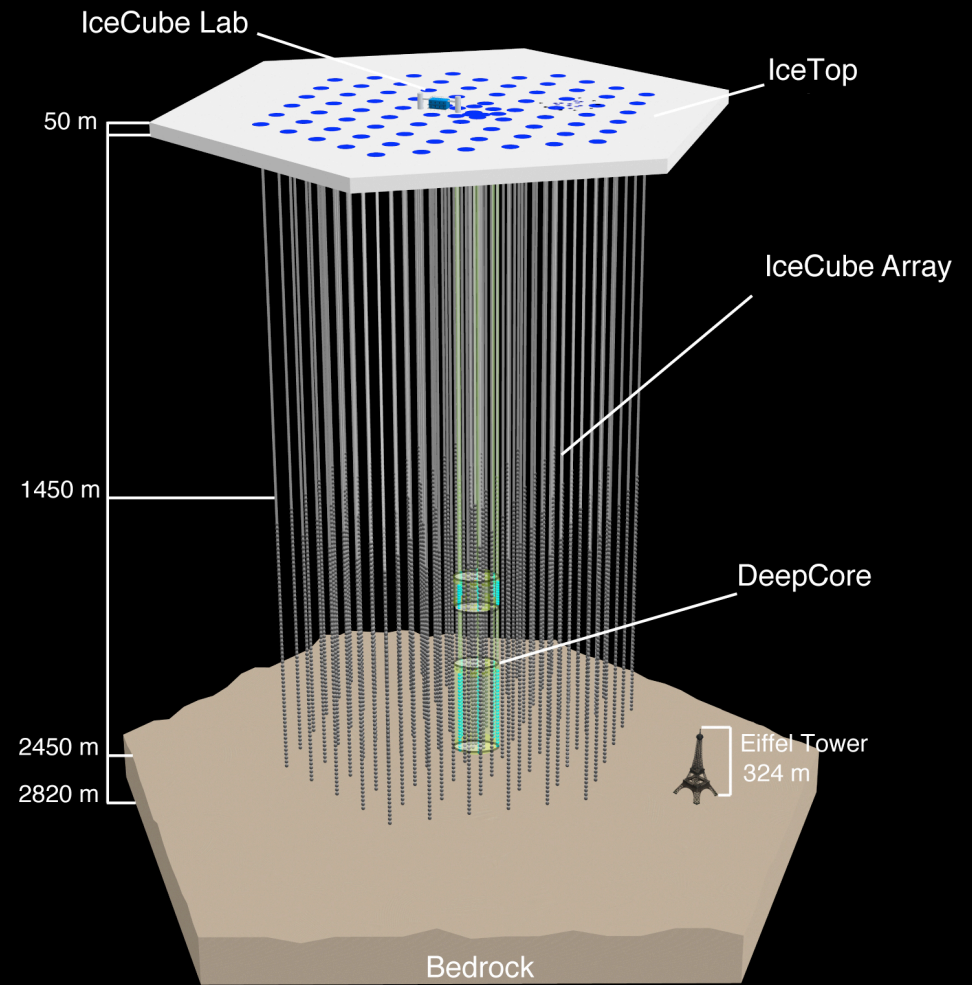
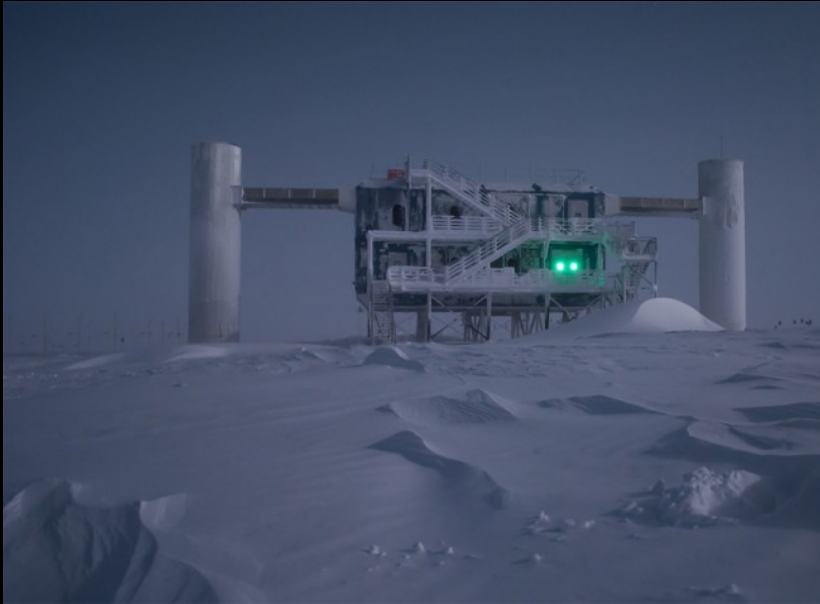
AMANDA

Skiway

Geographic
South Pole

Dark sector

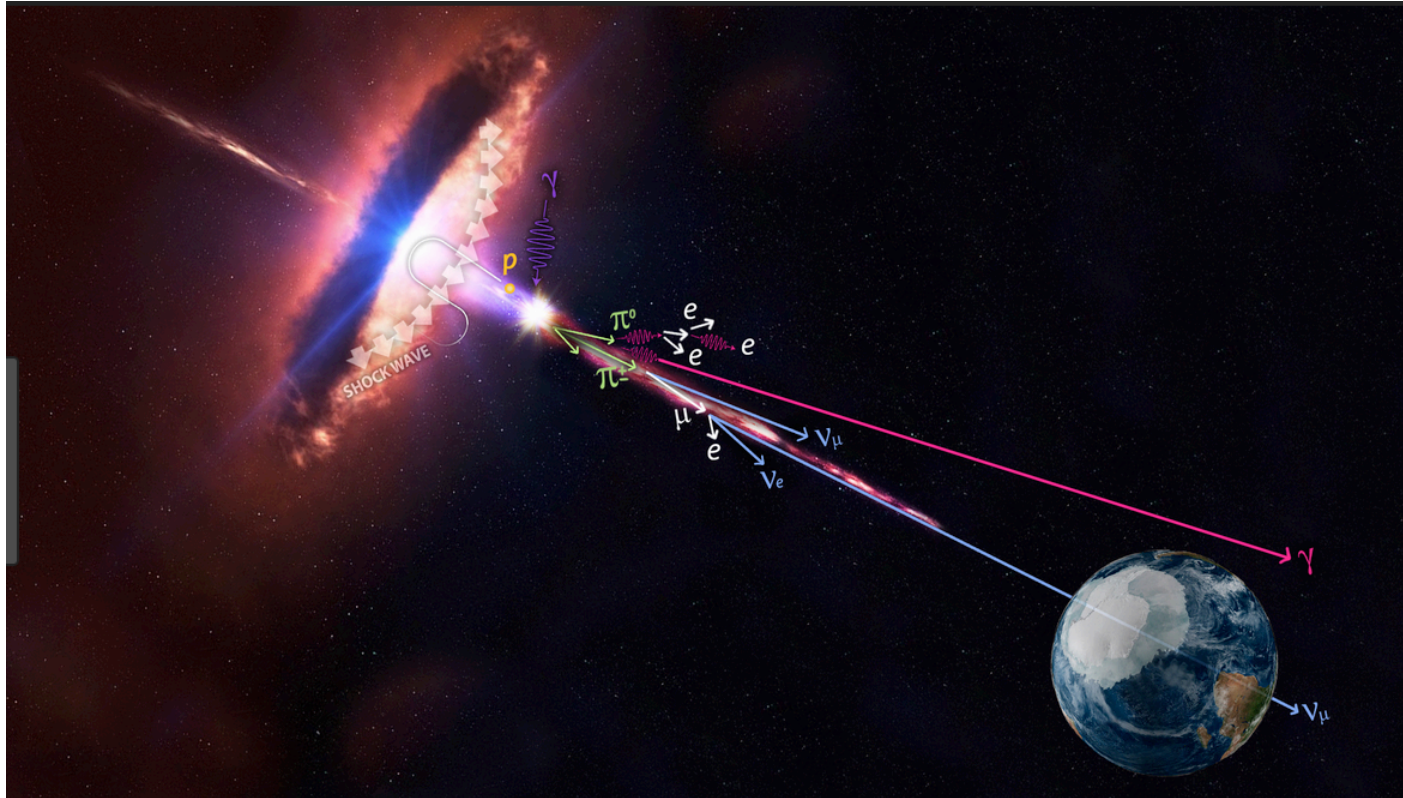
Les neutrinos



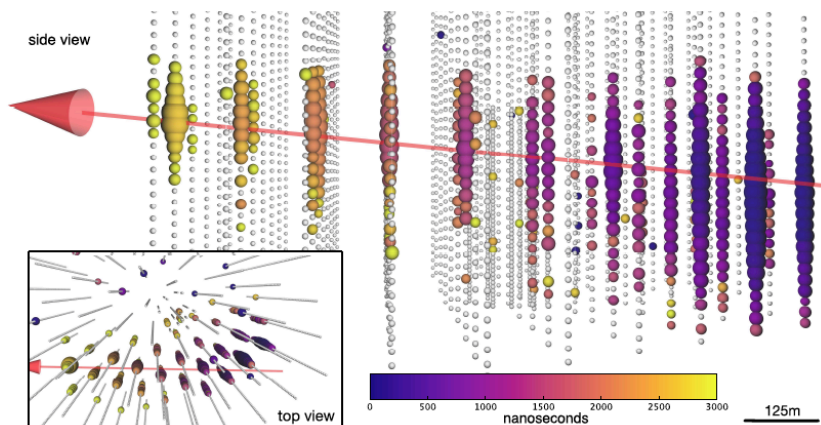
IceCube event
with simulated Cherenkov cone



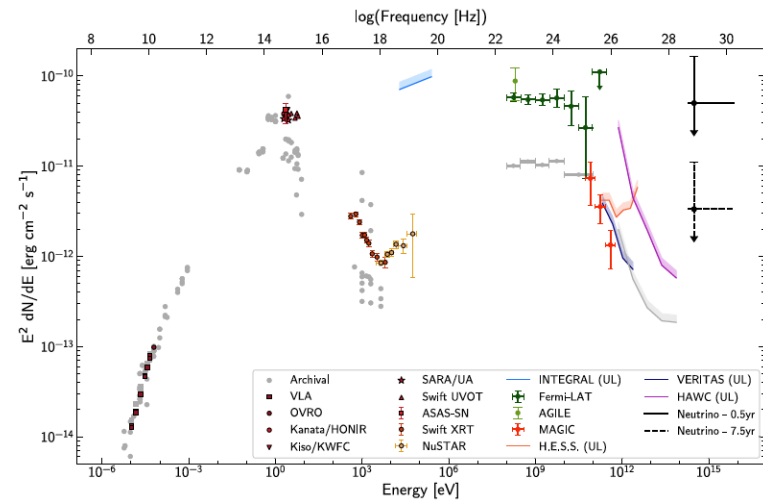
blazar TXS 0506+056



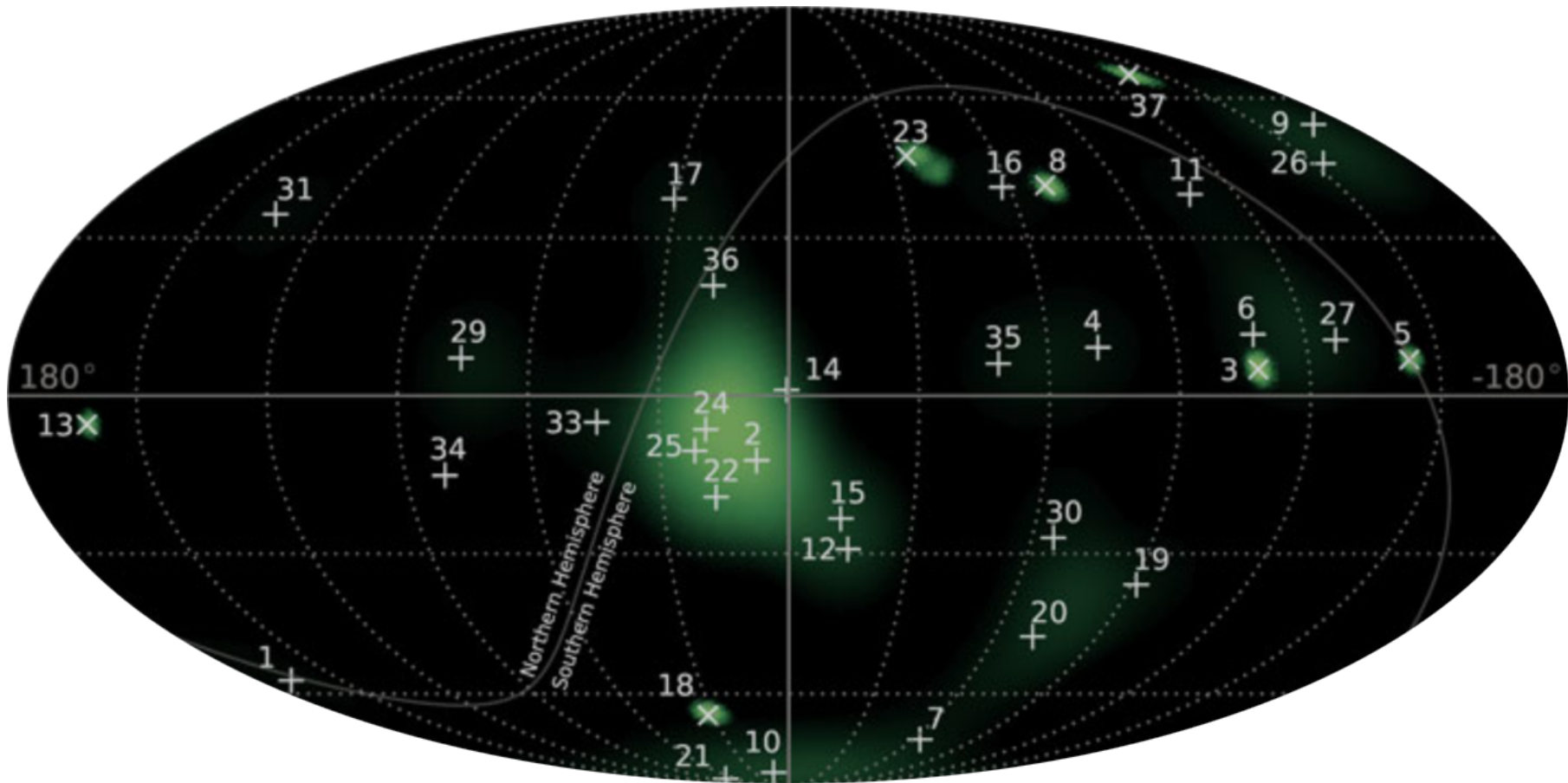
neutrinos du 22 September 2017



observation multi- λ de TXS 0506+056



Le ciel des neutrinos de Ice Cube



=> Fabian SCHUSSLER, jeudi (same place same time)

les ondes gravitonnelles



qu'est qu'une onde gravitationnelle ?

produisez une chez vous !

$M = 2 \times 1000 \text{ kg}$

Distance = 2 m

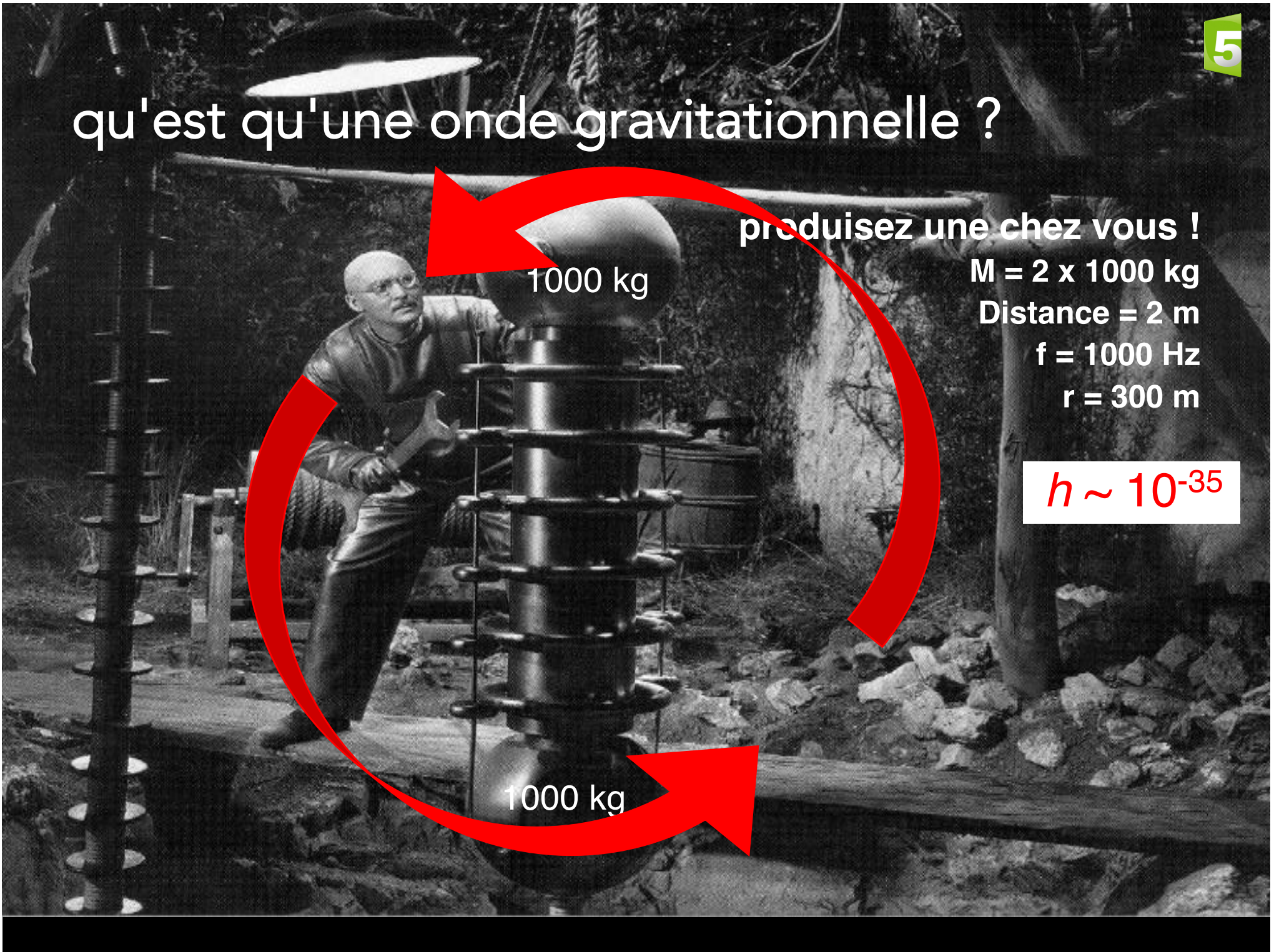
$f = 1000 \text{ Hz}$

$r = 300 \text{ m}$

$h \sim 10^{-35}$

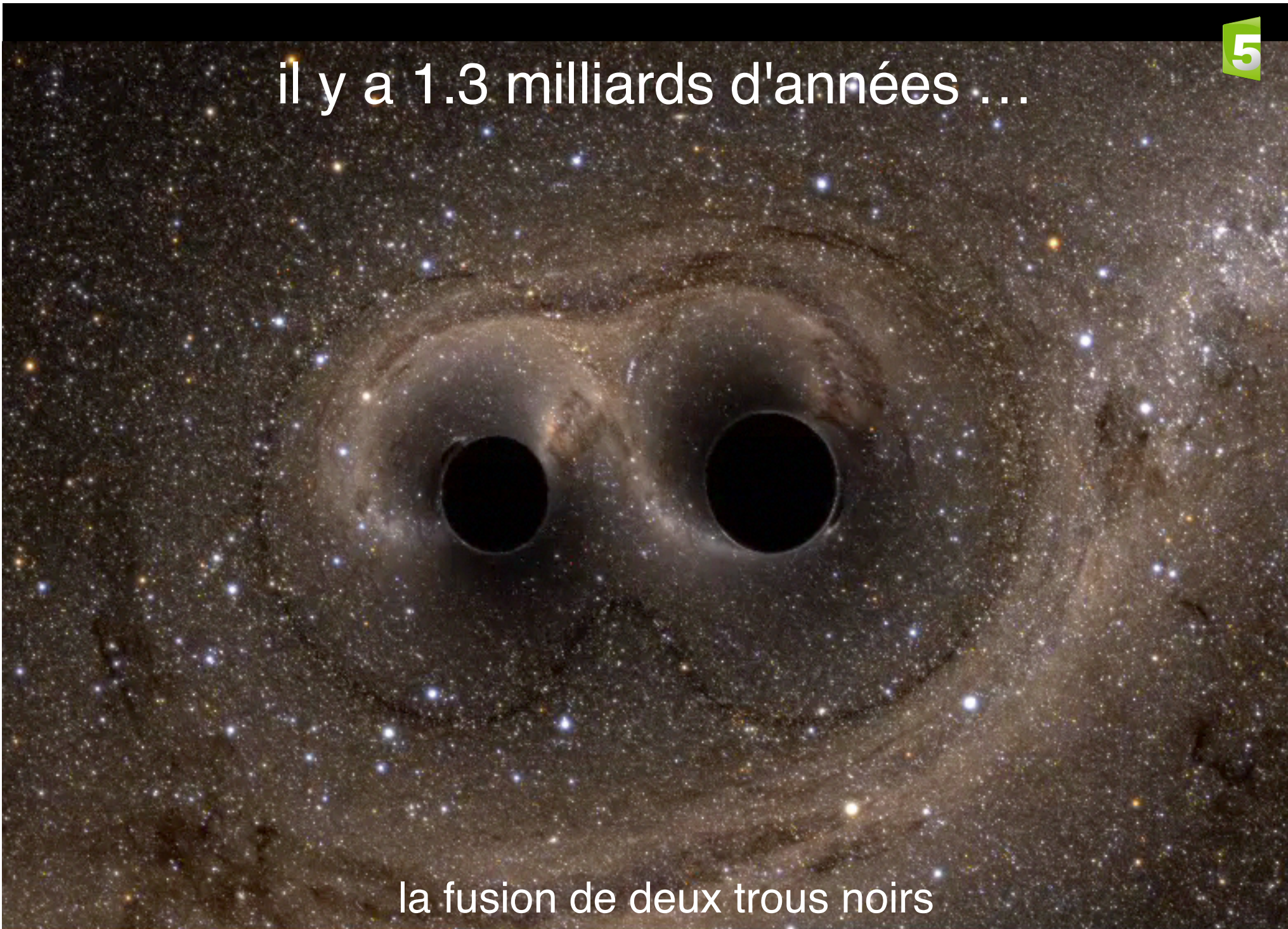
1000 kg

1000 kg



il y a 1.3 milliards d'années ...

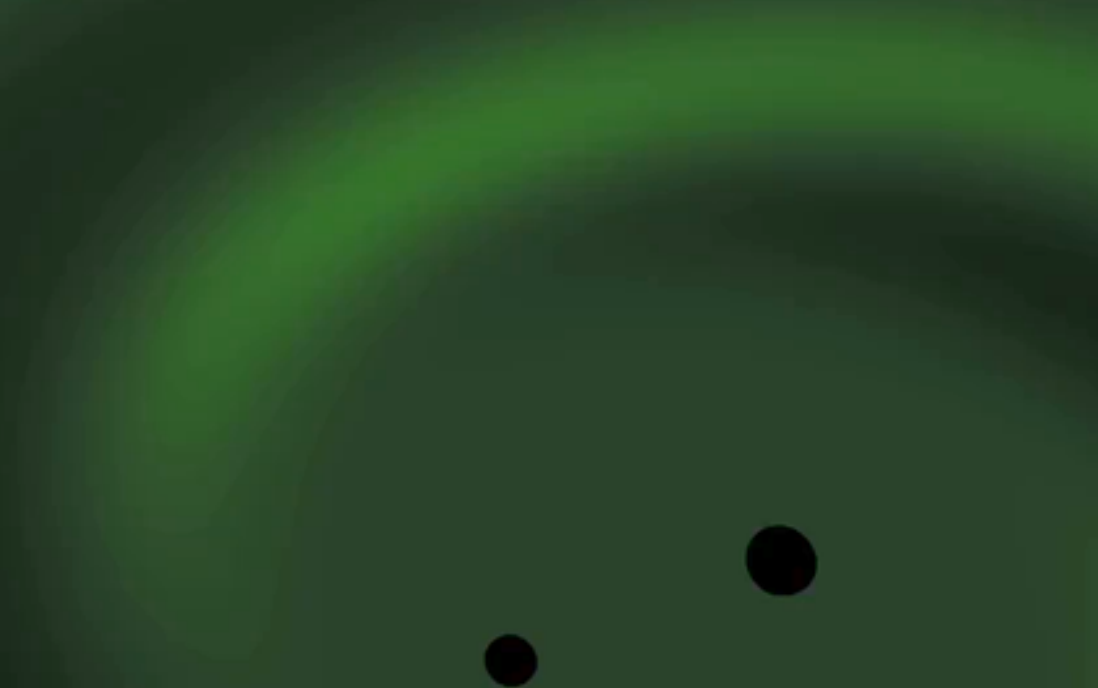
la fusion de deux trous noirs



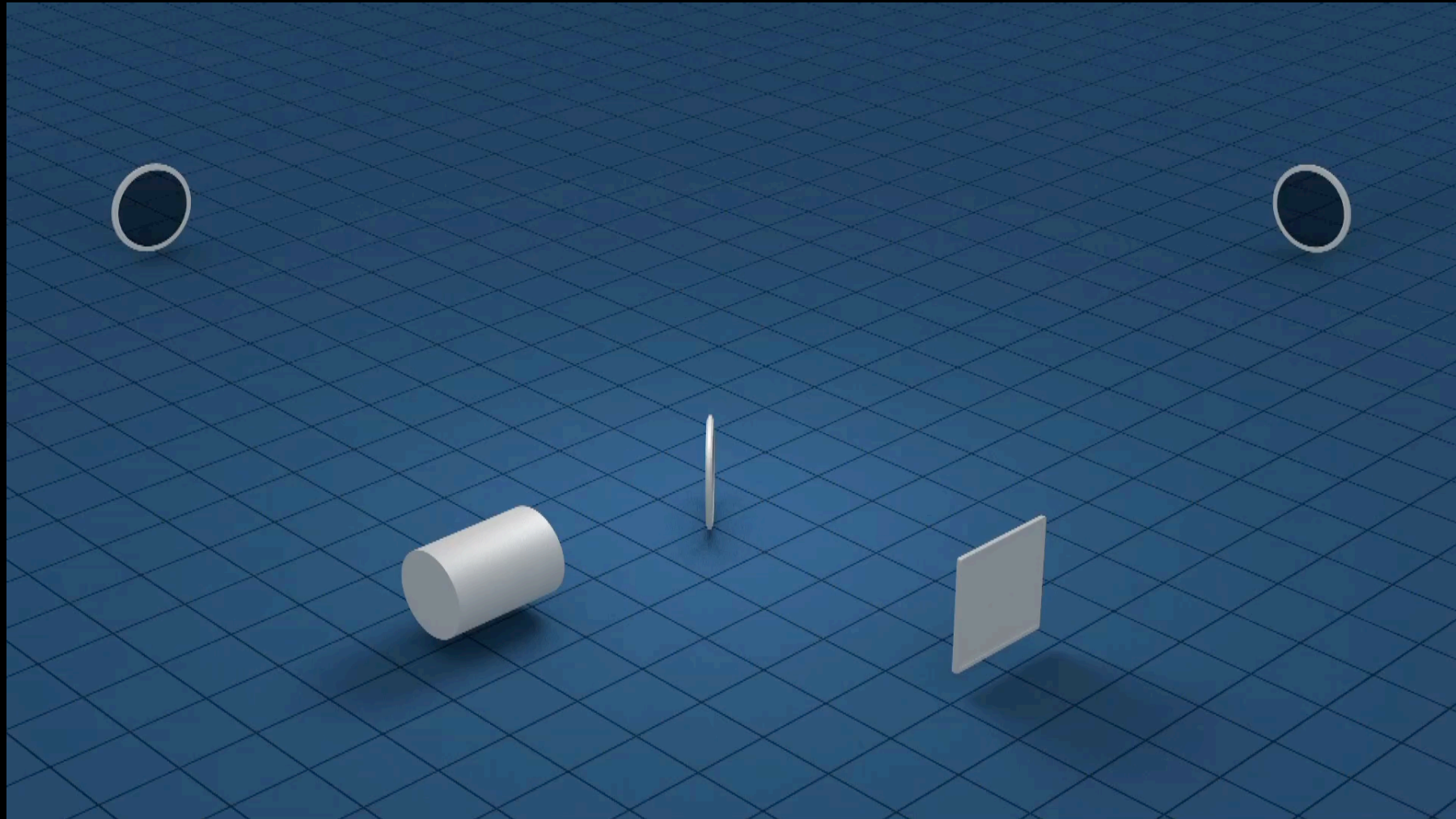
des ondes gravitationnelles voyagent vers la Terre



des ondes gravitationnelles voyagent vers la Terre

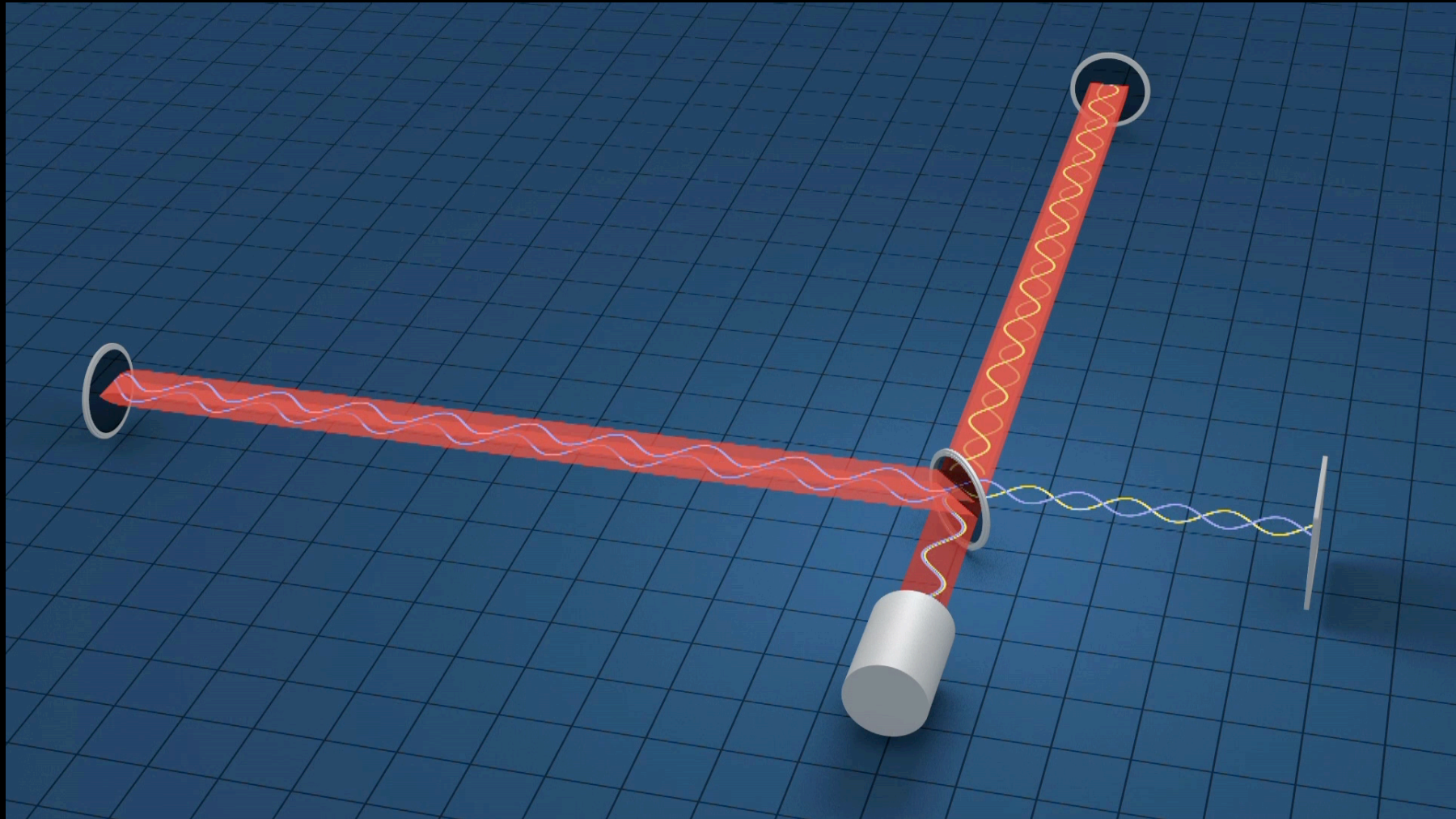


Détection : l'interféromètre de Michelson



instrument idéal pour la mesure des ondes gravitationnelles :
sensible aux variations relatives de longueur entre ses deux bras
trajet optique replié, réflexions multiples entre deux miroirs
=> cavités résonantes du type Fabry-Perot.

Détection : l'interféromètre de Michelson



instrument idéal pour la mesure des ondes gravitationnelles :
sensible aux variations relatives de longueur entre ses deux bras
trajet optique replié, réflexions multiples entre deux miroirs
=> cavités résonantes du type Fabry-Perot.

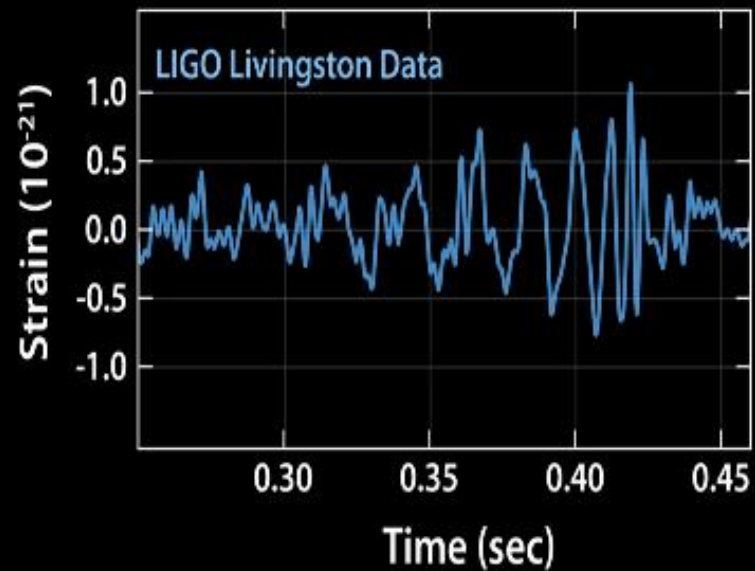
LIGO Sites

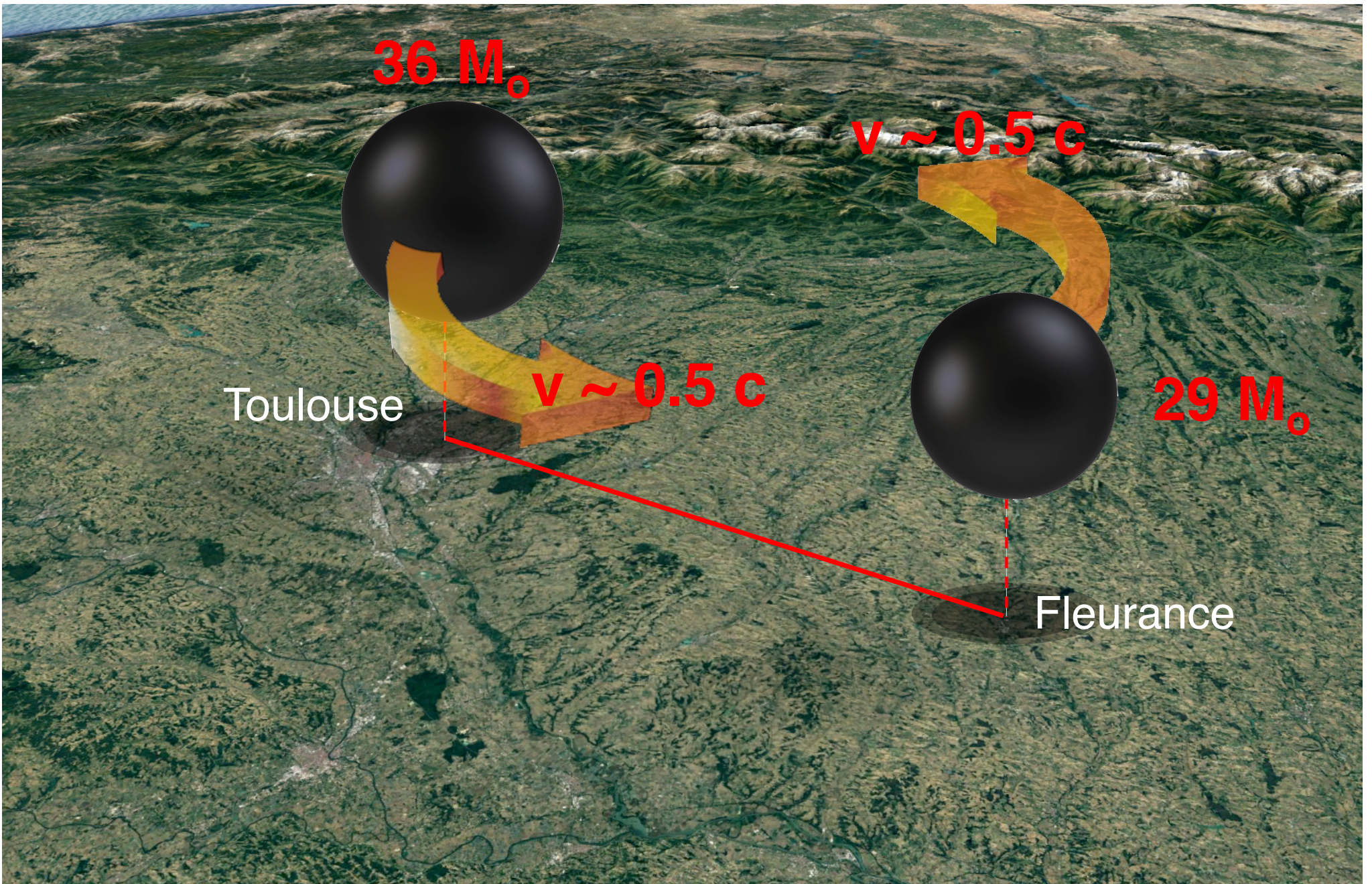


September 14, 2015

5

LIGO Livingston Observatory

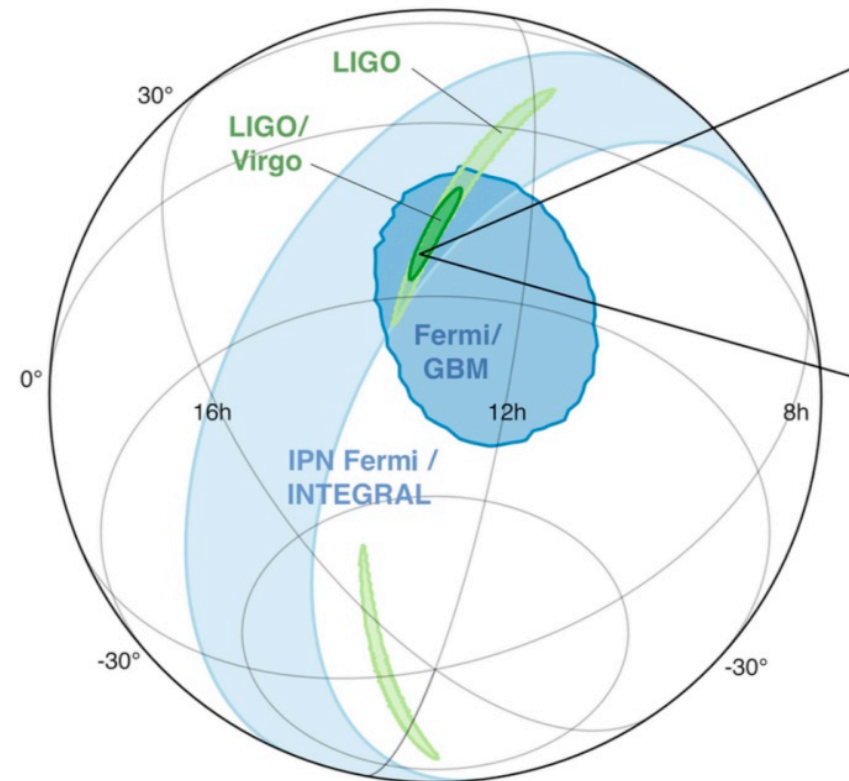
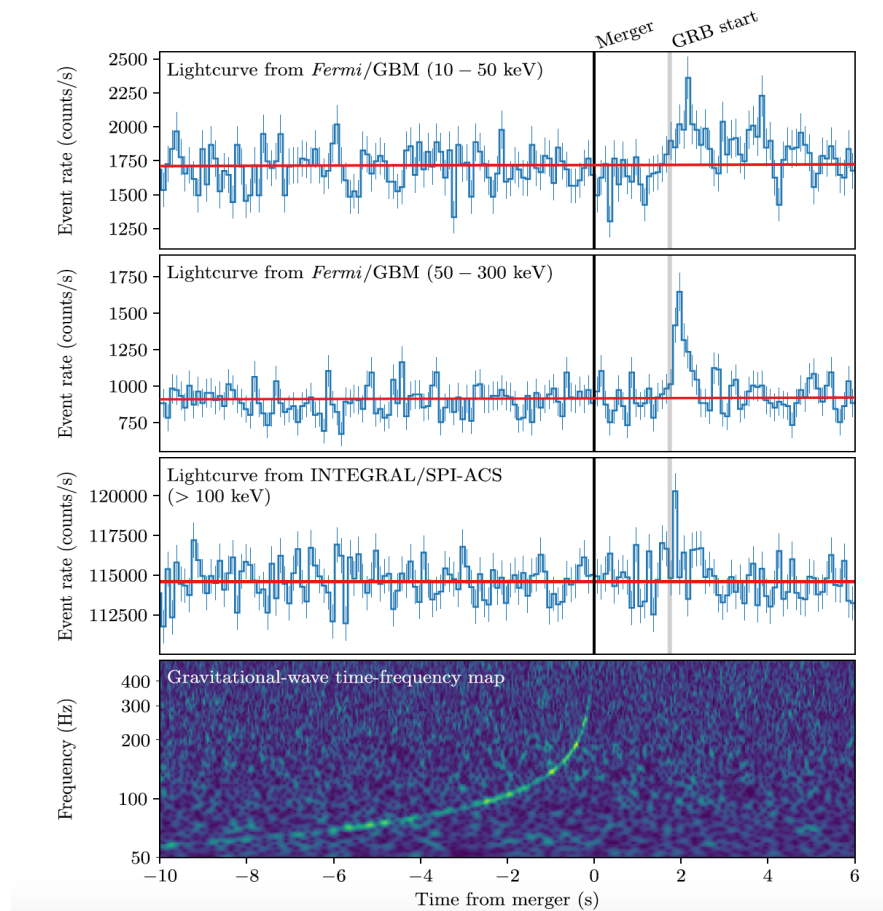




$$36 M_{\odot} + 29 M_{\odot} = \dots 62 M_{\odot}$$

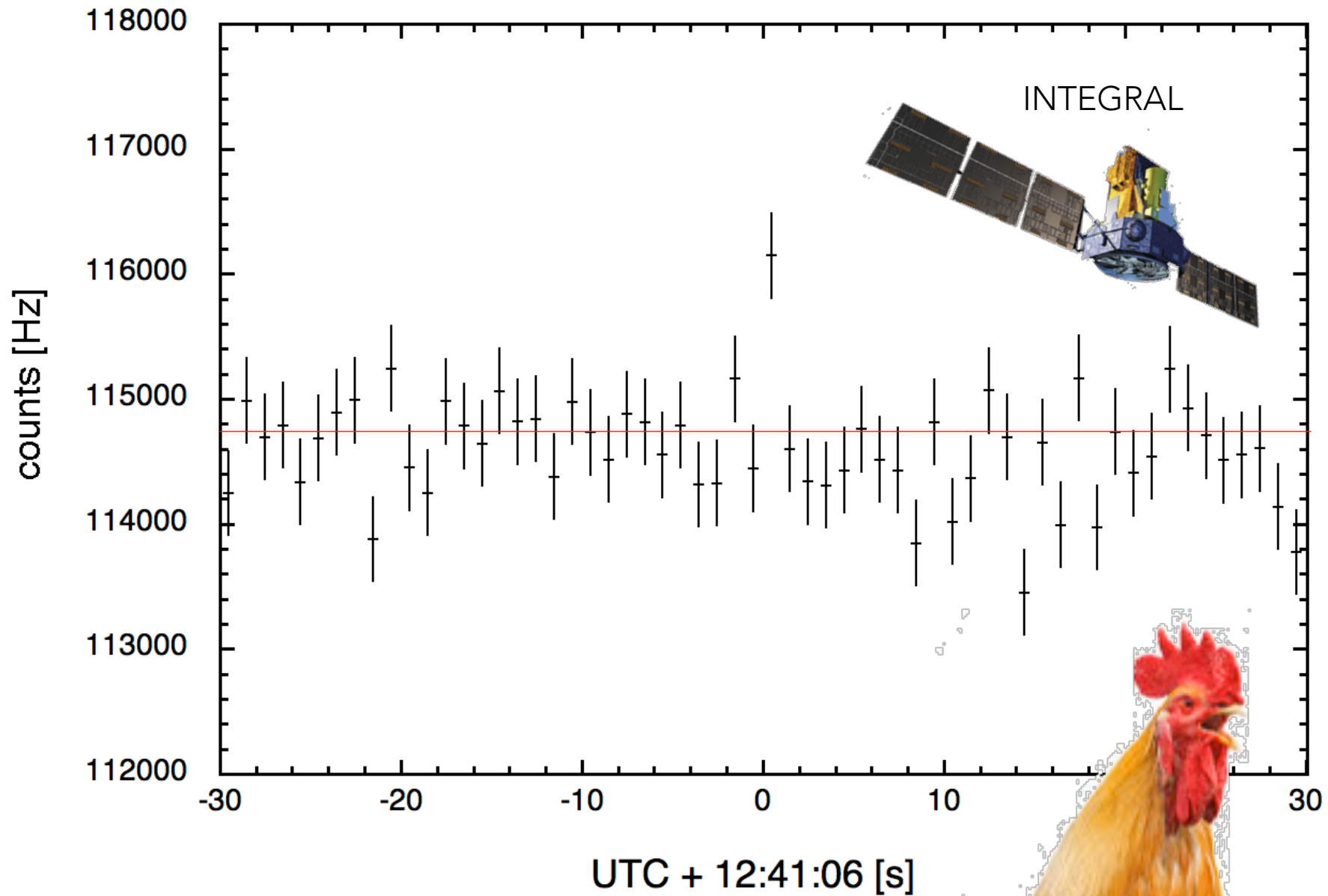
GW170817

FERMI / INTEGRAL detection – 1.7 secondes plus tard



170817A" *Astrophys. J. Lett.*, 848:L13, (2017)

SPI ACS of GRB170817A - 17 August 2017, around 12:41:06 UTC

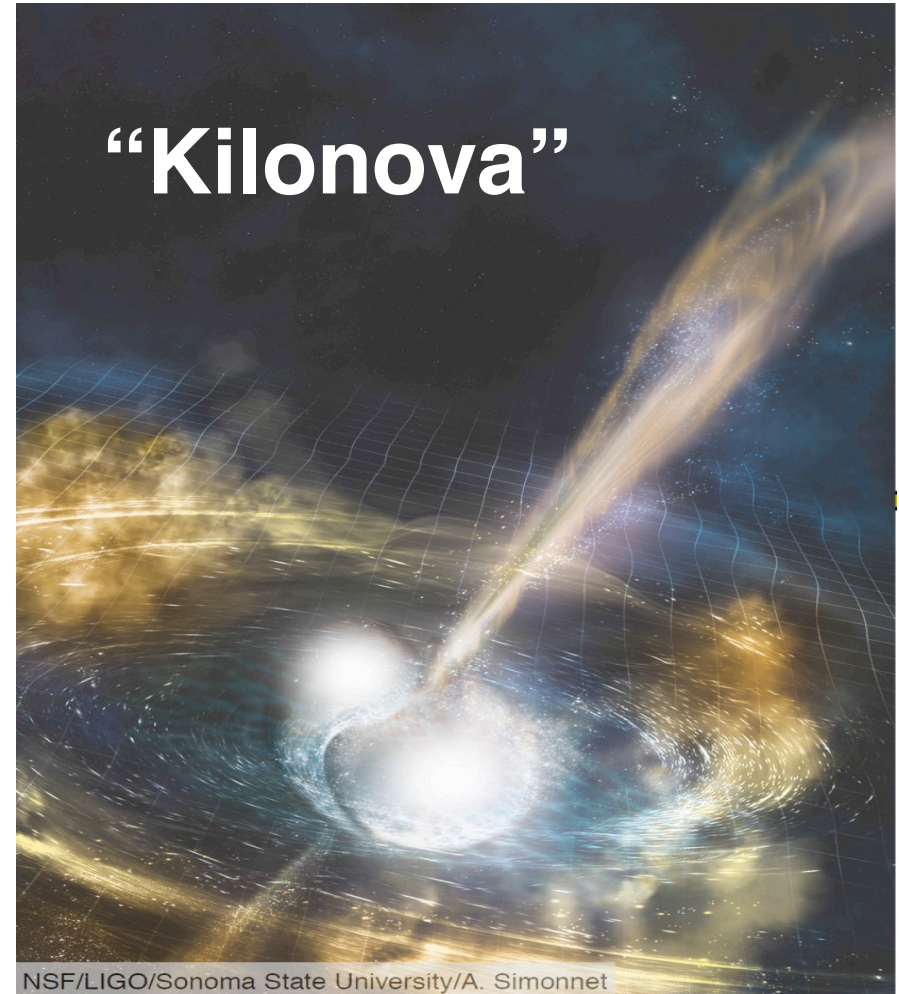
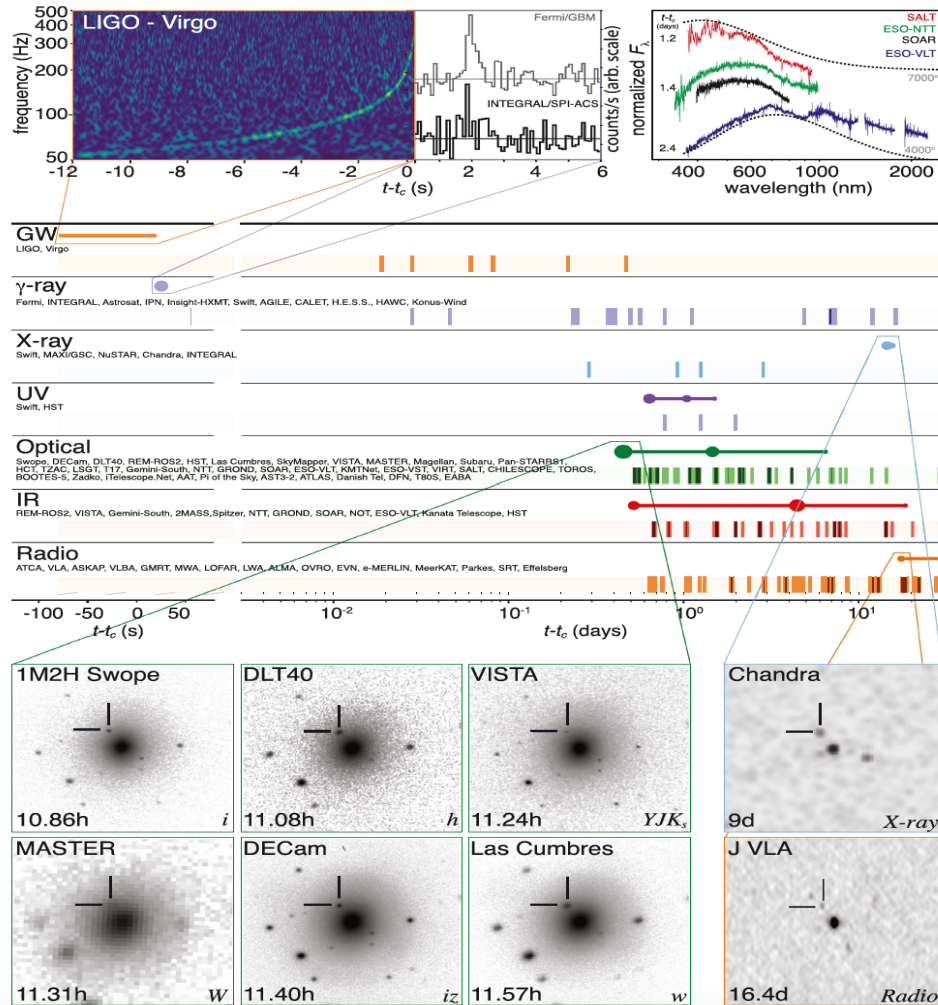


Galaxie NGC 4993 dans la constellation de l'Hydre



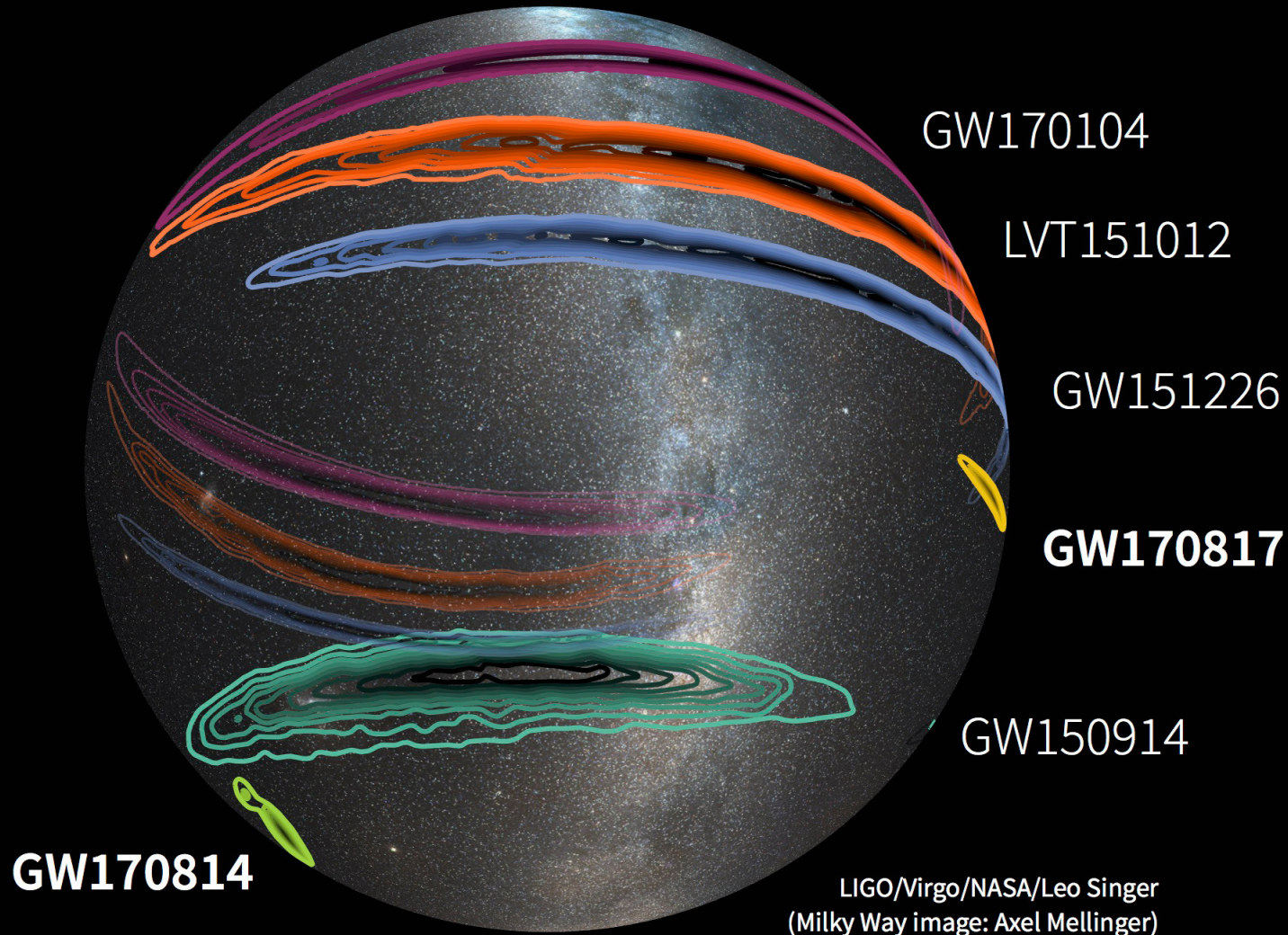
GW170817

observé à travers tout le spectre électromagnétique



naissance de l'astronomie multi-messager !

Le ciel des ondes gravitationnelles LIGO / Virgo



=> Alexandre LE TIEC, vendredi (same place same time)

nombre cumulé de découvertes

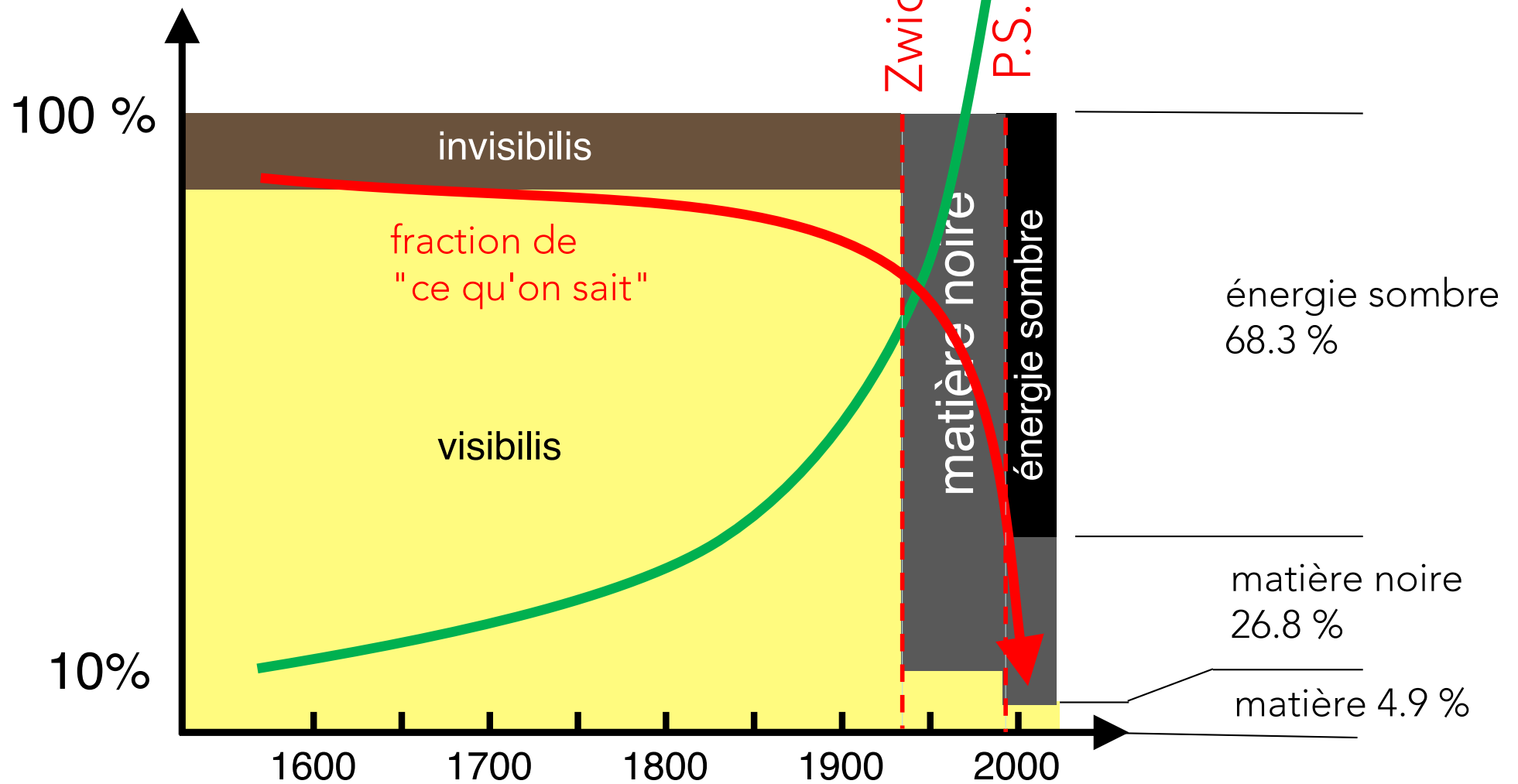


nous avons
doublé
le nombre
de découvertes
dans une seule
génération !

Cosmic
Discoveries
Harwit, 1984
PvB, 2018

l'état de nos connaissances

la fraction de "l'Univers"
qu'on on pense connaitre



les nouvelles astronomies !

nombre
de découvertes

canal

hν

2

3

4

5

lumière

météorites

rayons cosmiques

neutrinos

ondes gravitationnelles

fraction de
"ce qu'on sait"

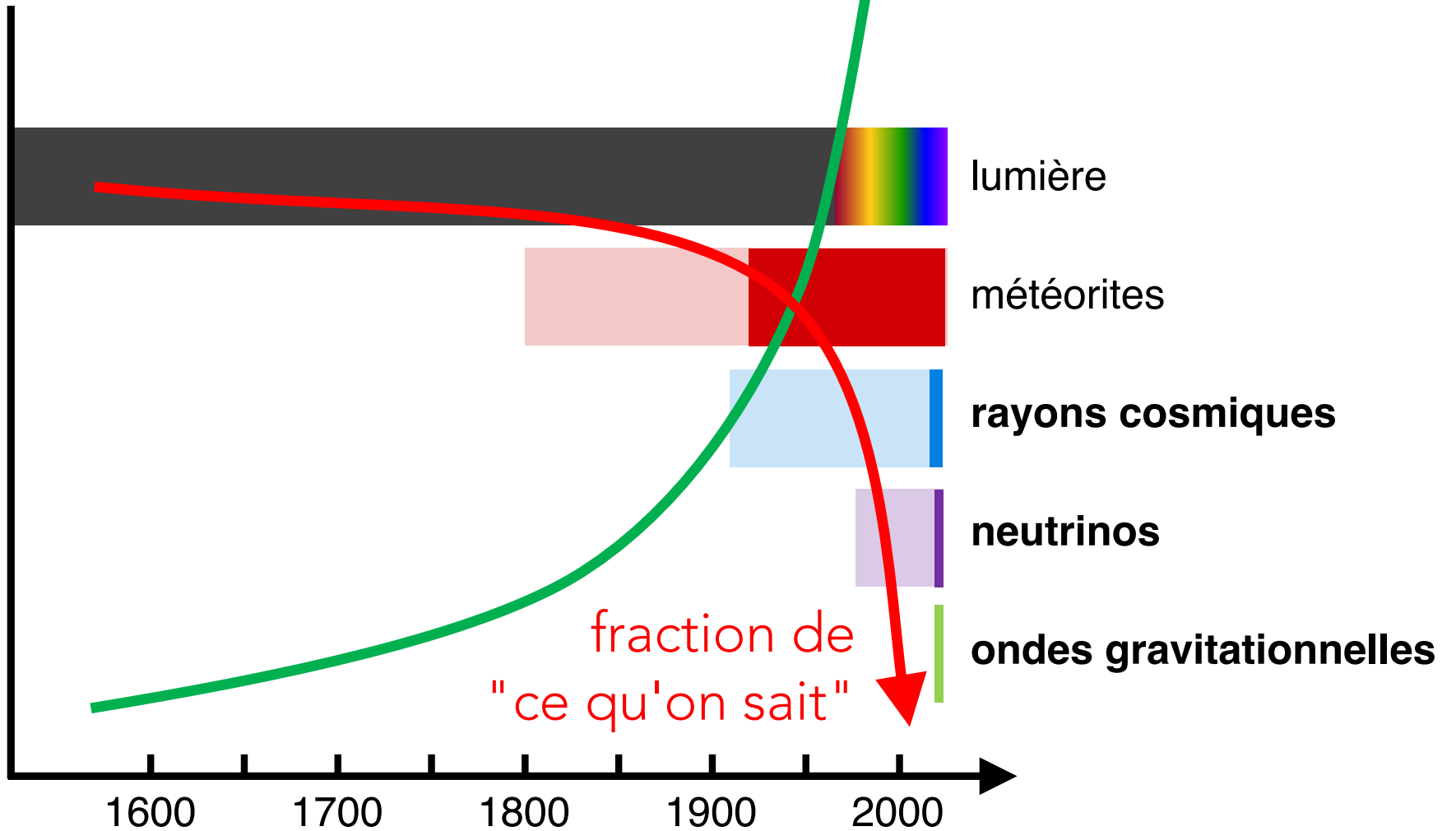
1600

1700

1800

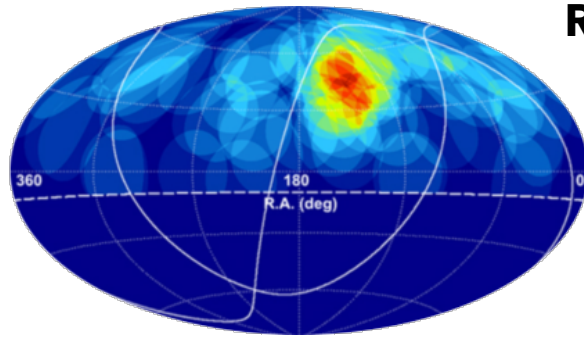
1900

2000



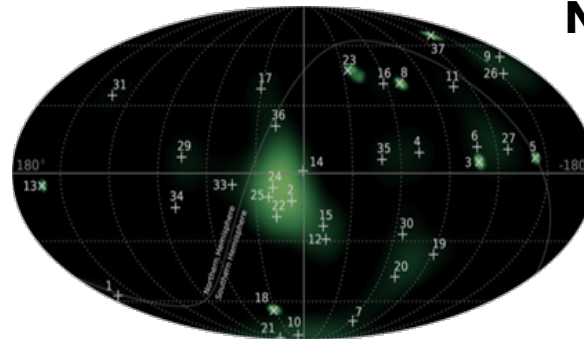
Les nouvelles Astronomies !

3



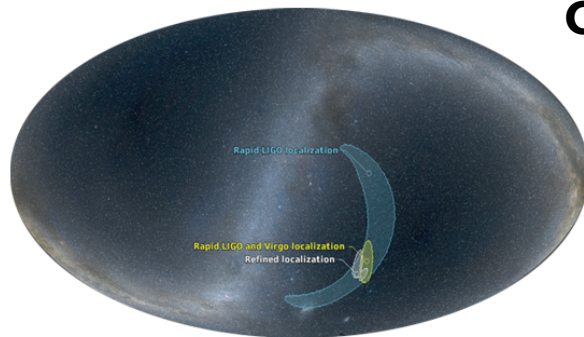
Rayons Cosmiques de Ultra-Haute Energie

4



Neutrinos

5



Ondes Gravitationnelles