

Des particules pour explorer l'Univers

P. Binétruy
APC Paris 7

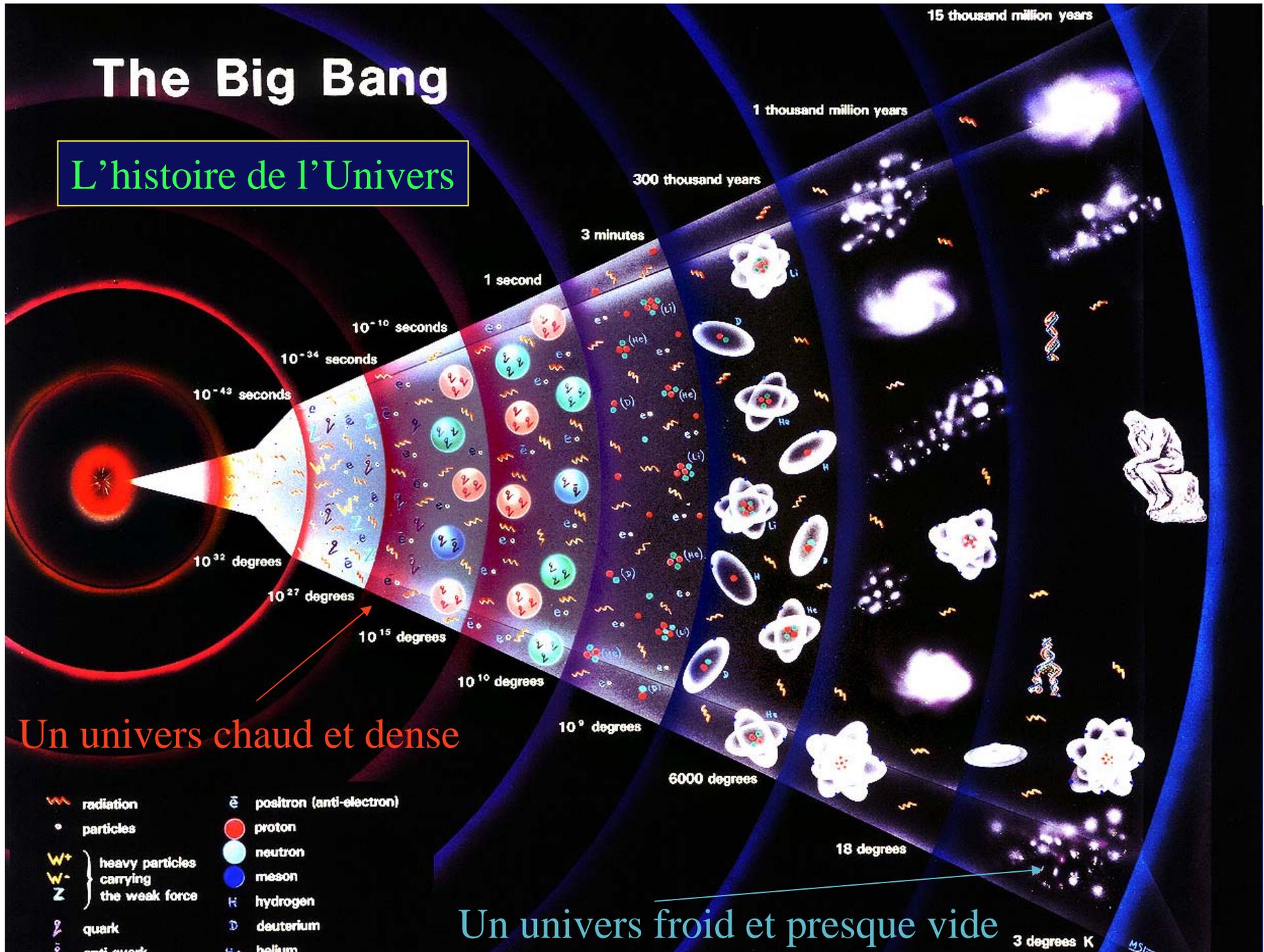


$e^2\varphi$

24 août 2005

The Big Bang

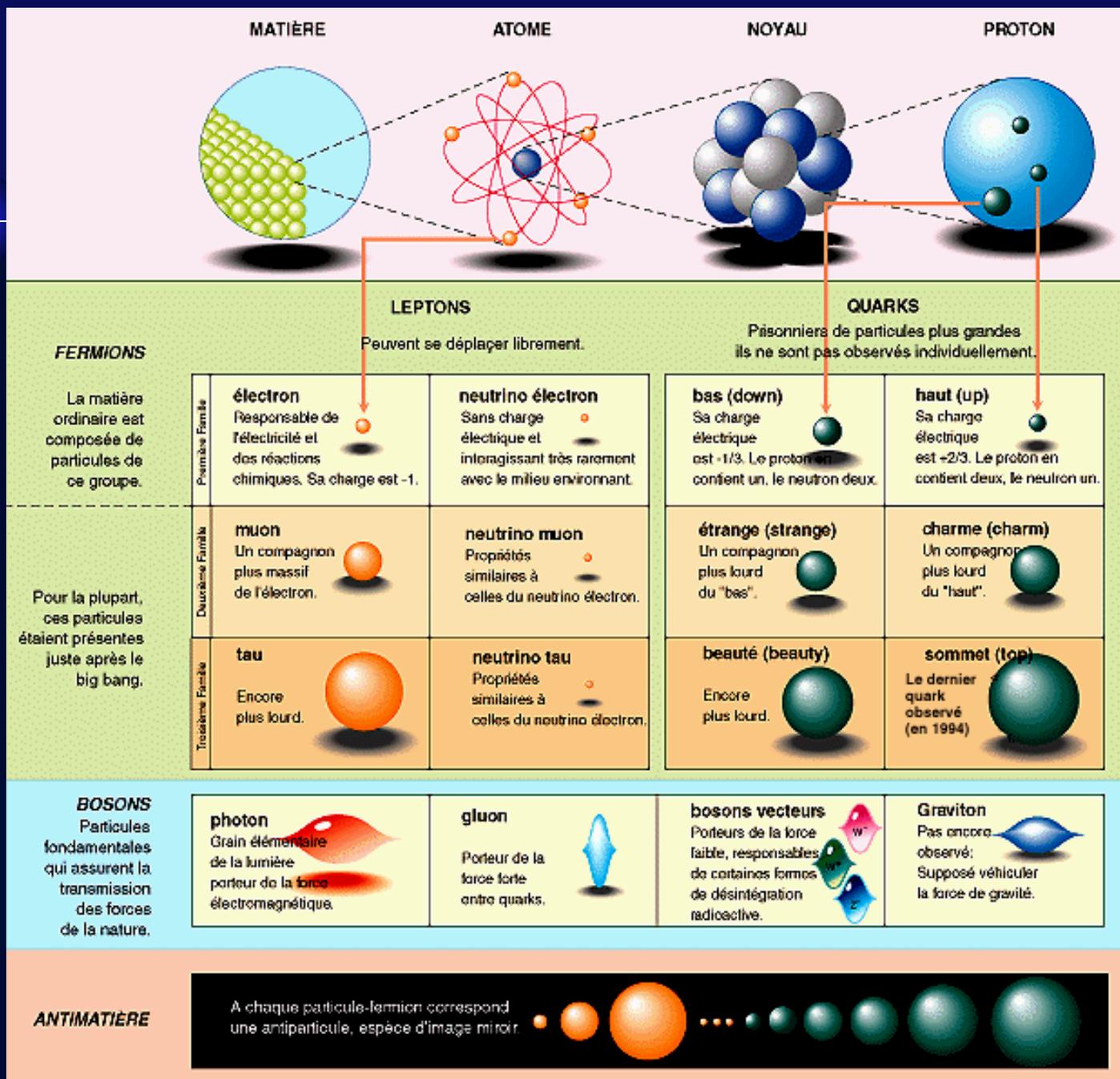
L'histoire de l'Univers

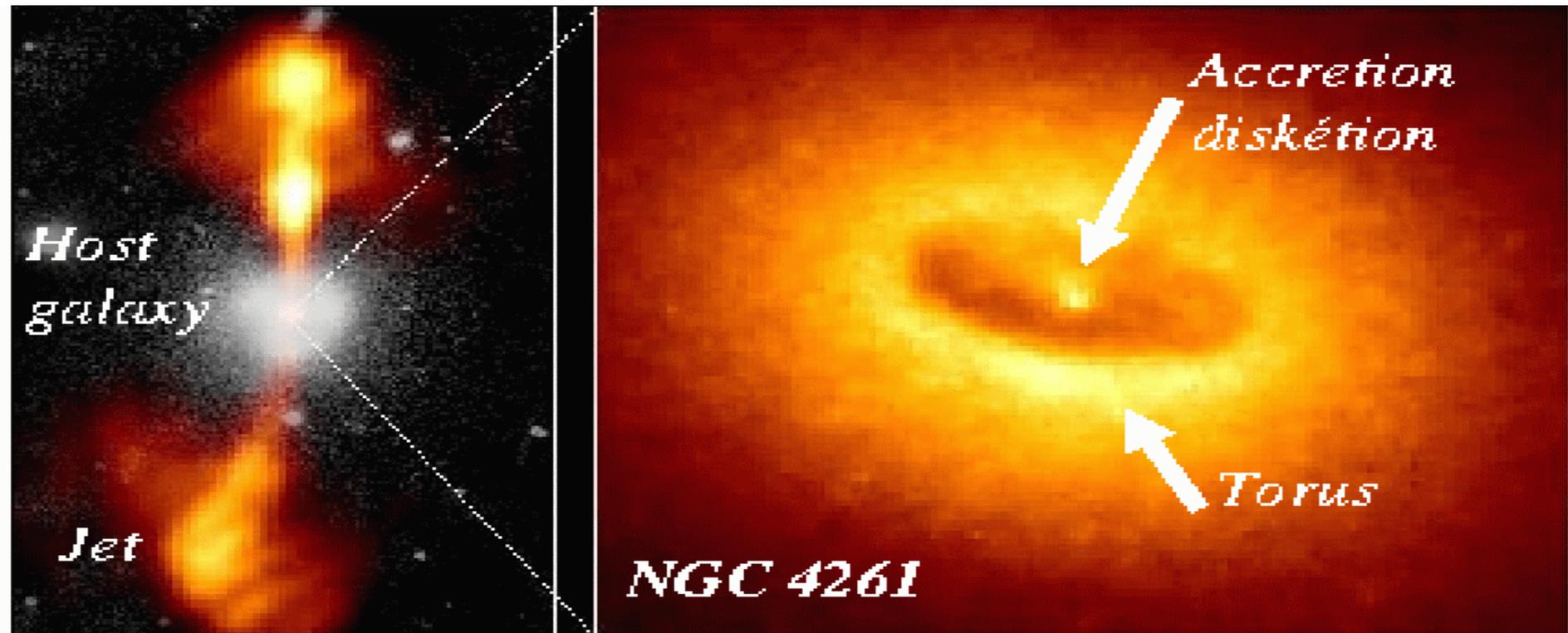


Un univers chaud et dense

Un univers froid et presque vide

- | | |
|---|--------------------------|
| radiation | positron (anti-electron) |
| particles | proton |
| heavy particles carrying the weak force | neutron |
| heavy particles carrying the weak force | meson |
| quark | hydrogen |
| anti-quark | deuterium |
| | helium |





L'Univers est le lieu de phénomènes violents qui sont des sources de particules de haute énergie.

Accélérateurs cosmiques

CERN vs Univers

Accélérateurs de particules:

- Pour : les expériences peuvent être préparées et répétées
- Contre : l'énergie est limitée par la technologie et les finances

L'Univers :

- Pour : l'énergie disponible est énorme
(la température augmente quand on se rapproche du big bang)
- Contre : l'expérience n'a été faite qu'une fois et sans nous
(enfin presque...)

Comment étudier l'histoire de l'Univers?

En recherchant les traces d'époques passées dans l'évolution de l'Univers

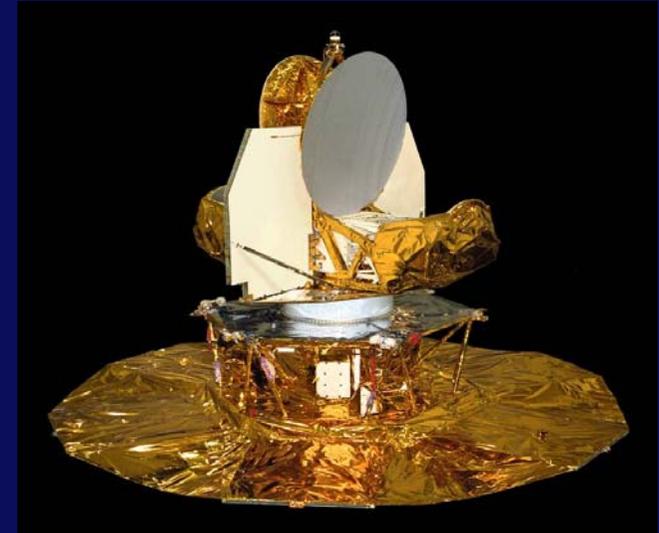
fond cosmologique micro-onde

En identifiant et en comprenant le contenu actuel de l'Univers à grande échelle

géométrie, topologie, bilan énergétique

Satellite WMAP

2002



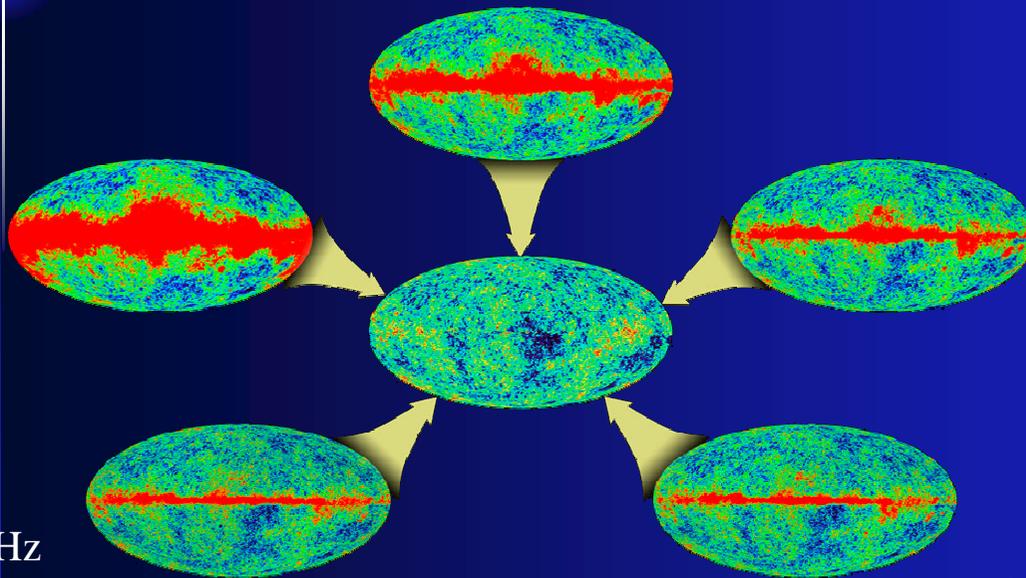
33 GHz

23 GHz

41 GHz

94 GHz

61 GHz



$$\Omega_{\text{tot}} = 1.02^{+0.02}_{-0.02}$$

$$w < -0.78 \text{ (95\% CL)}$$

$$\Omega_{\Lambda} = 0.73^{+0.04}_{-0.04}$$

$$\Omega_b h^2 = 0.0224^{+0.0009}_{-0.0009}$$

$$\Omega_b = 0.044^{+0.004}_{-0.004}$$

$$n_b = 2.5 \times 10^{-7} {}^{+0.1 \times 10^{-7}}_{-0.1 \times 10^{-7}} \text{ cm}^{-3}$$

$$\Omega_m h^2 = 0.135^{+0.008}_{-0.009}$$

$$\Omega_m = 0.27^{+0.04}_{-0.04}$$

$$\Omega_\nu h^2 < 0.0076 \text{ (95\% CL)}$$

$$m_\nu < 0.23 \text{ eV (95\% CL)}$$

$$T_{\text{cmb}} = 2.725^{+0.002}_{-0.002} \text{ K}$$

$$n_\gamma = 410.4^{+0.9}_{-0.9} \text{ cm}^{-3}$$

$$\eta = 6.1 \times 10^{-10} {}^{+0.3 \times 10^{-10}}_{-0.2 \times 10^{-10}}$$

$$\Omega_b \Omega_m^{-1} = 0.17^{+0.01}_{-0.01}$$

$$\sigma_8 = 0.84^{+0.04}_{-0.04} \text{ Mpc}$$

$$\sigma_8 \Omega_m^{0.5} = 0.44^{+0.04}_{-0.05}$$

$$A = 0.833^{+0.086}_{-0.083}$$

$$n_s = 0.93^{+0.03}_{-0.03}$$

$$dn_s/d \ln k = -0.031^{+0.016}_{-0.018}$$

$$r < 0.71 \text{ (95\% CL)}$$

$$z_{\text{dec}} = 1089^{+1}_{-1}$$

$$\Delta z_{\text{dec}} = 195^{+2}_{-2}$$

$$h = 0.71^{+0.04}_{-0.03}$$

$$t_0 = 13.7^{+0.2}_{-0.2} \text{ Gyr}$$

$$t_{\text{dec}} = 379^{+8}_{-7} \text{ kyr}$$

$$t_r = 180^{+220}_{-80} \text{ Myr (95\% CL)}$$

$$\Delta t_{\text{dec}} = 118^{+3}_{-2} \text{ kyr}$$

$$z_{\text{eq}} = 3233^{+194}_{-210}$$

$$\tau = 0.17^{+0.04}_{-0.04}$$

$$z_r = 20^{+10}_{-9} \text{ (95\% CL)}$$

$$\theta_A = 0.598^{+0.002}_{-0.002}$$

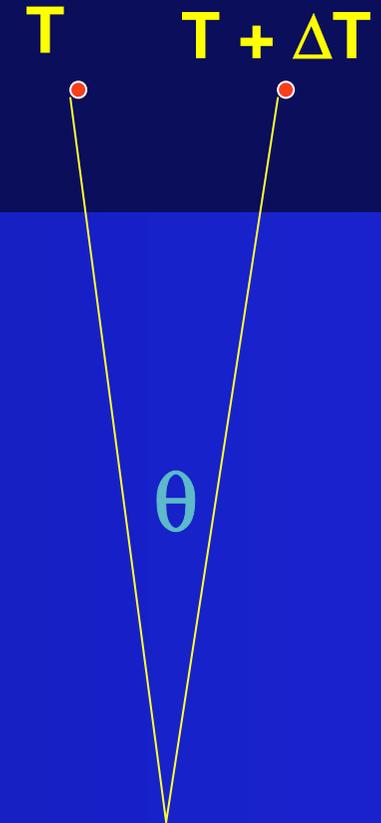
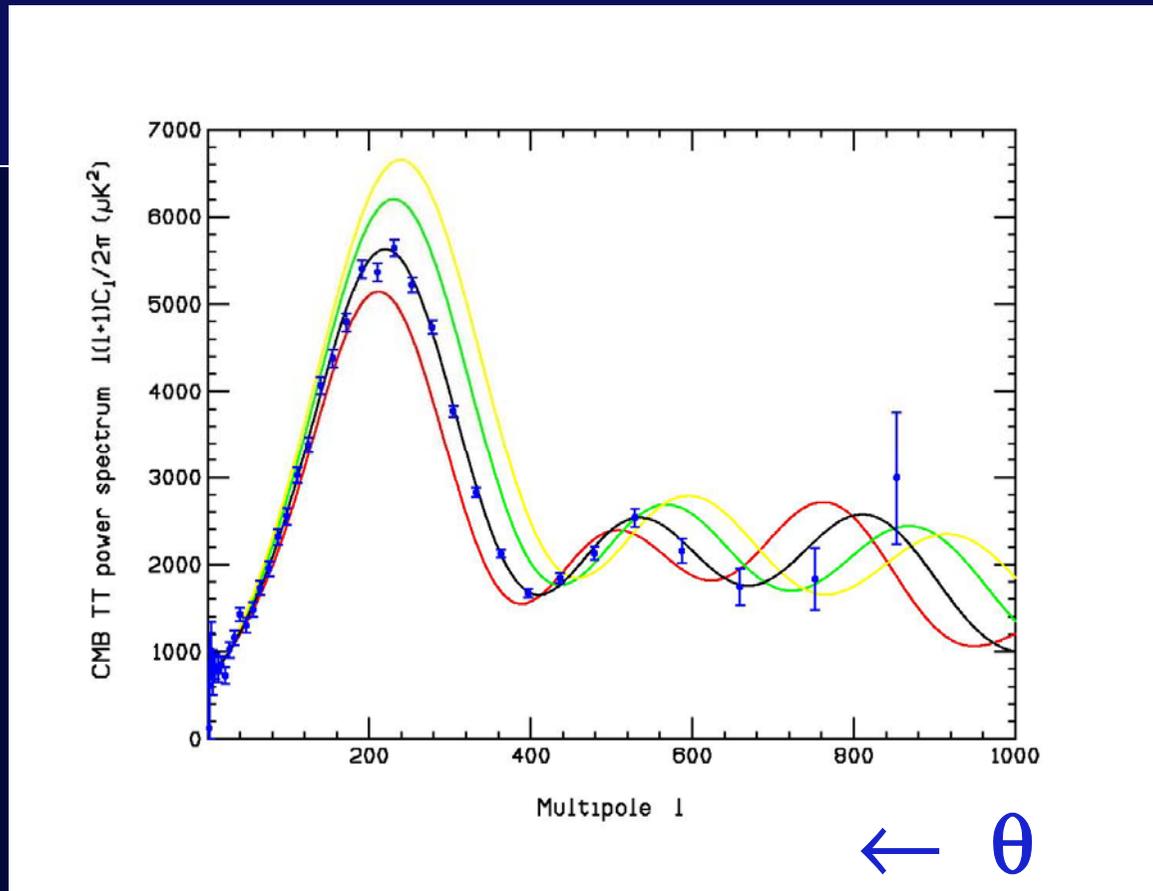
$$d_A = 14.0^{+0.2}_{-0.3} \text{ Gpc}$$

$$l_A = 301^{+1}_{-1}$$

$$r_s = 147^{+2}_{-2} \text{ Mpc}$$

Spectre des anisotropies de température

$\Delta T \uparrow$

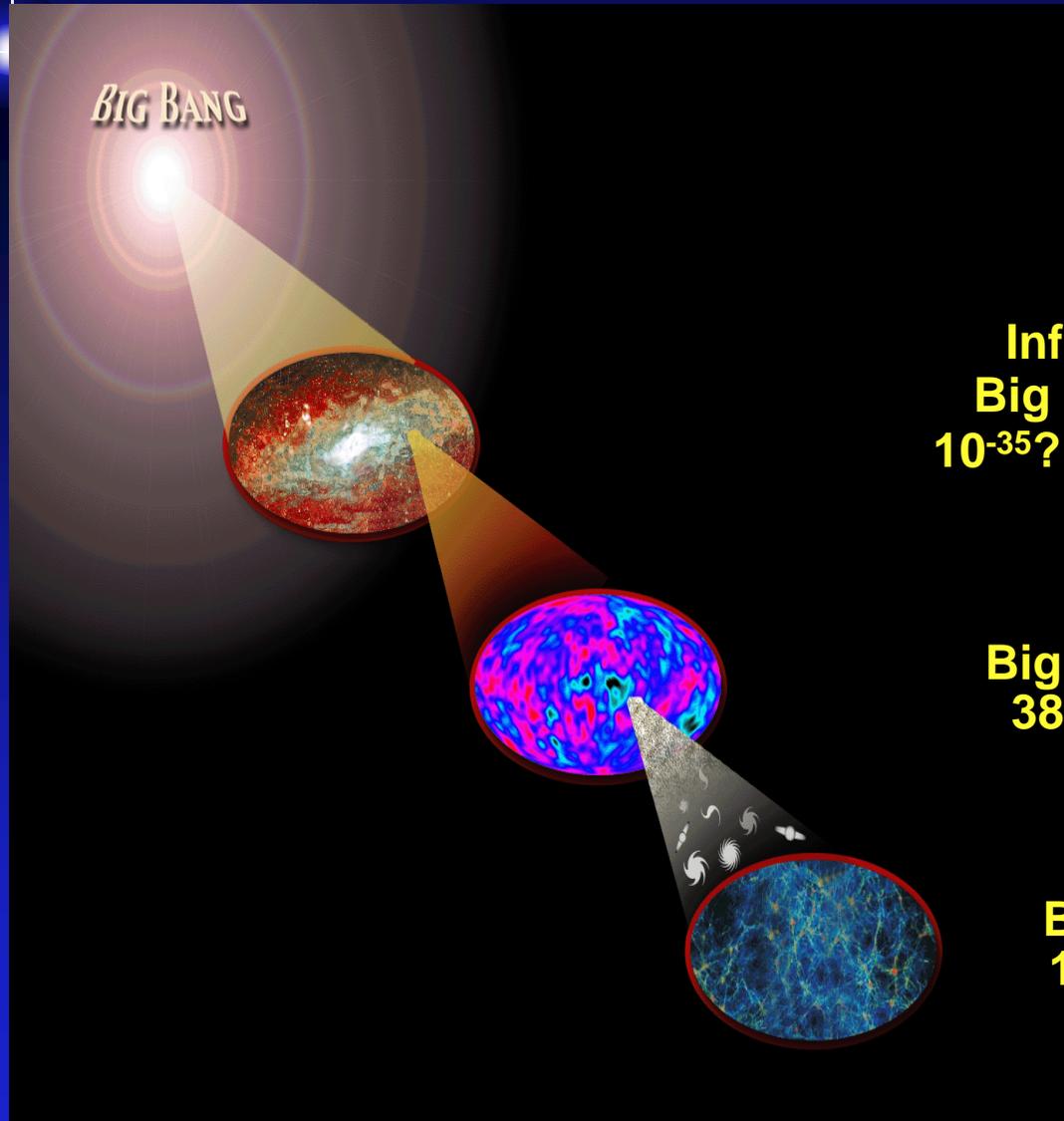


La position du premier pic donne des indications sur la densité totale d'énergie dans l'Univers et sur sa géométrie : il est spatialement plat.

Densité d'énergie $\rho \approx \rho_c = 10^{-29} \text{ g/cm}^3$

$$\Omega = \rho / \rho_c \approx 1$$

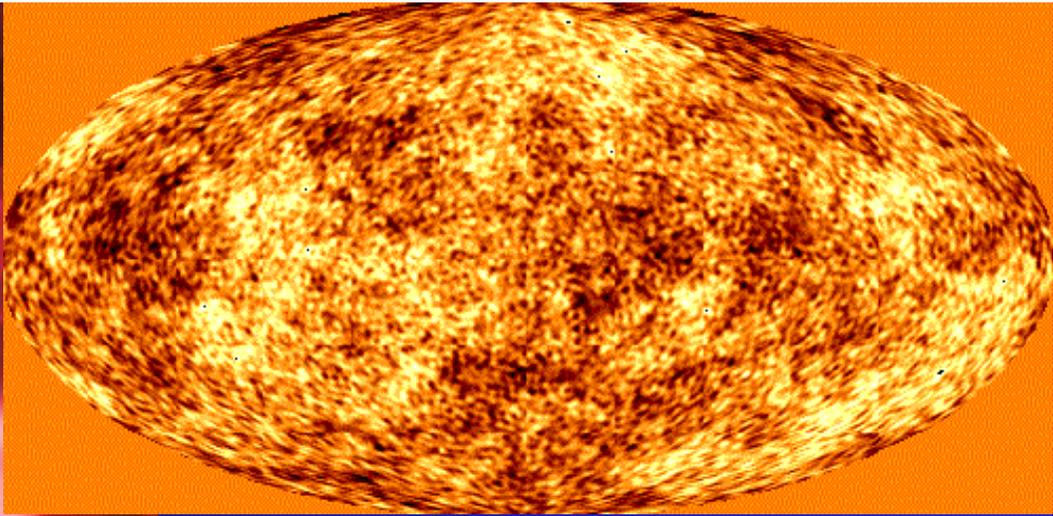
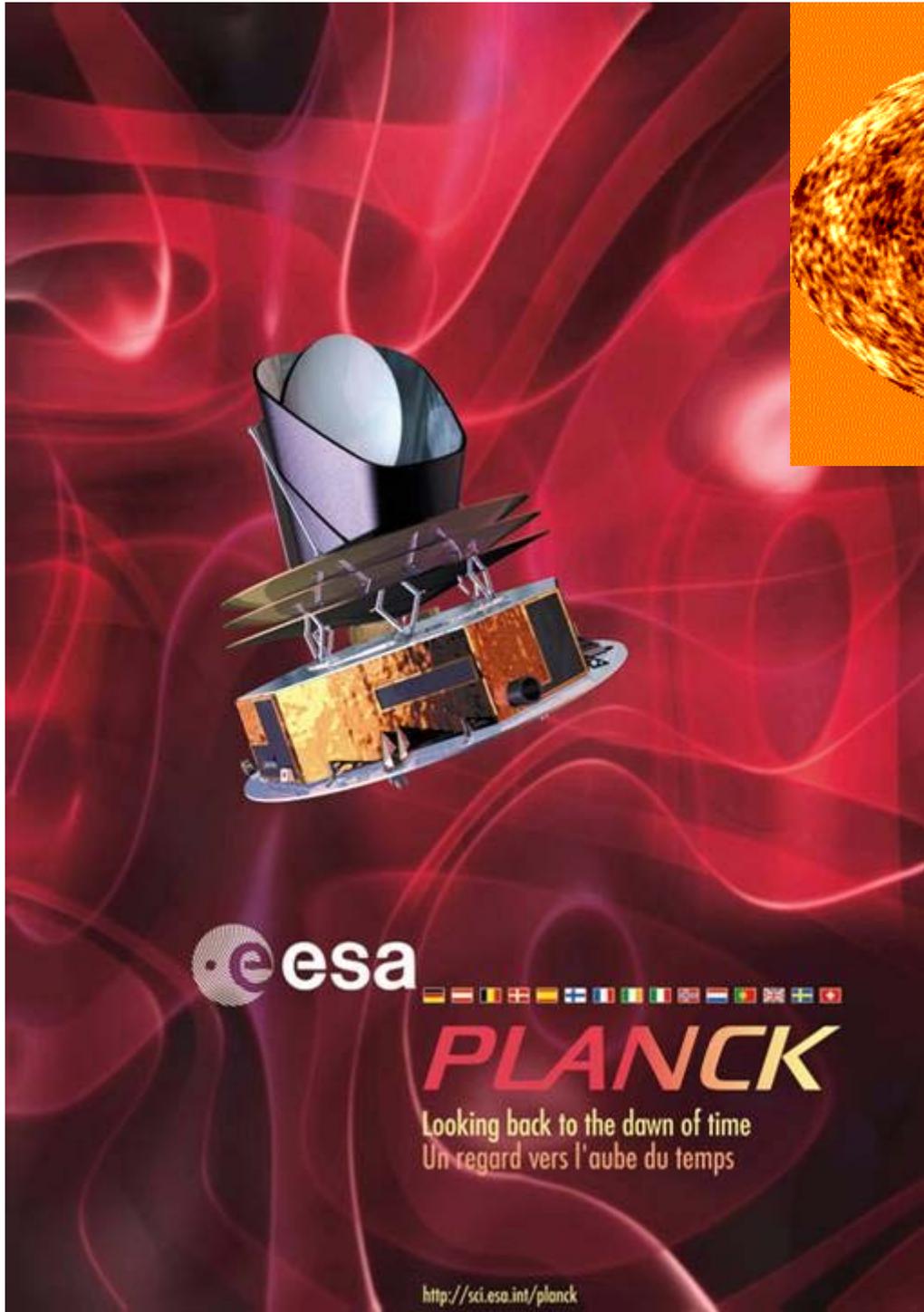
Pourquoi l'Univers serait-il spatialement plat? Scénario d'inflation



Inflation
Big Bang plus
 10^{-35} ? secondes

Big Bang plus
380,000 ans

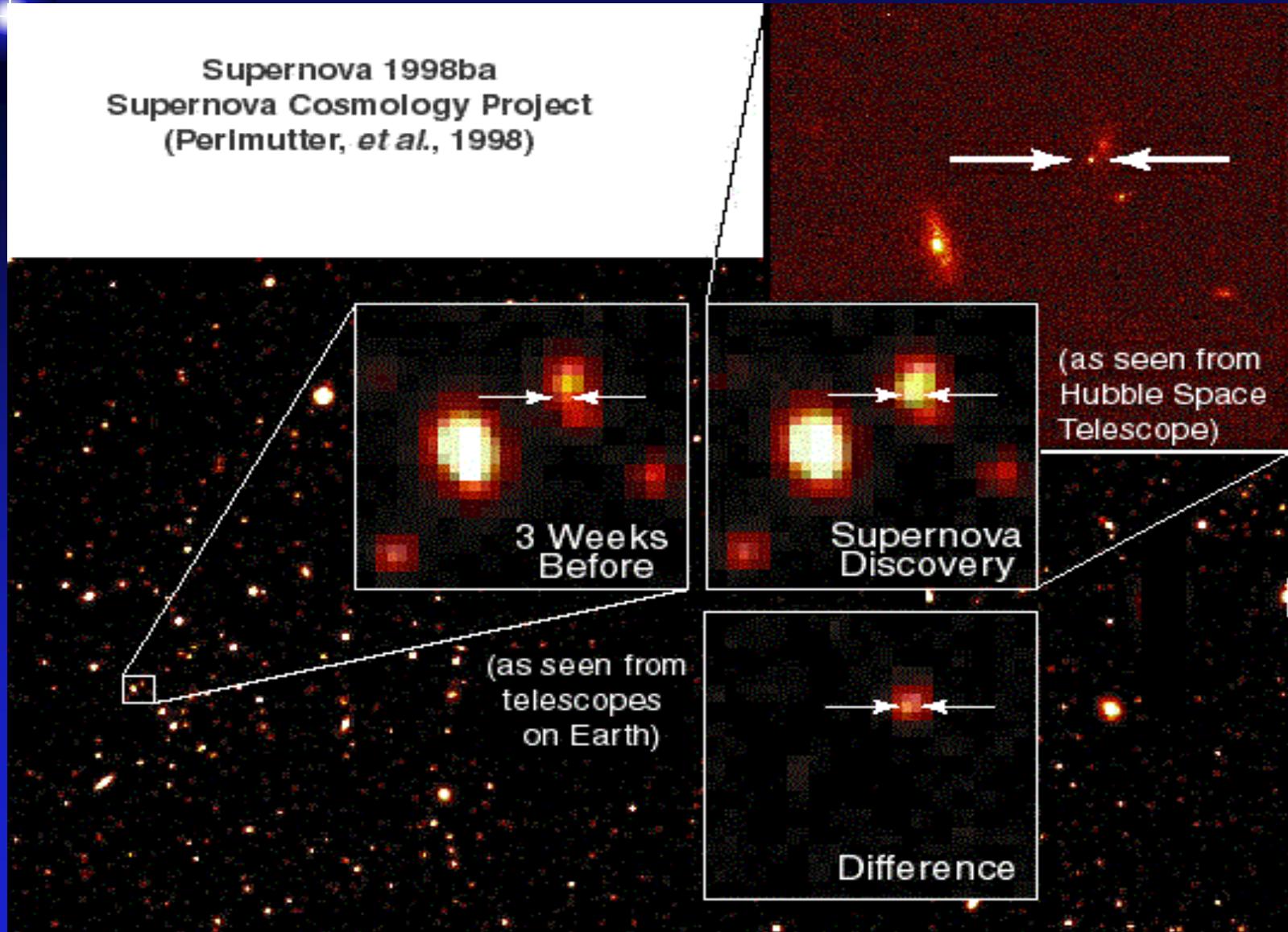
Big Bang plus
14 Billion ans



Lancement du satellite
Planck en 2007

L'étude des explosions de supernovae nous a aidé à identifier une nouvelle composante de l'Univers

Supernova 1998ba
Supernova Cosmology Project
(Perlmutter, *et al.*, 1998)

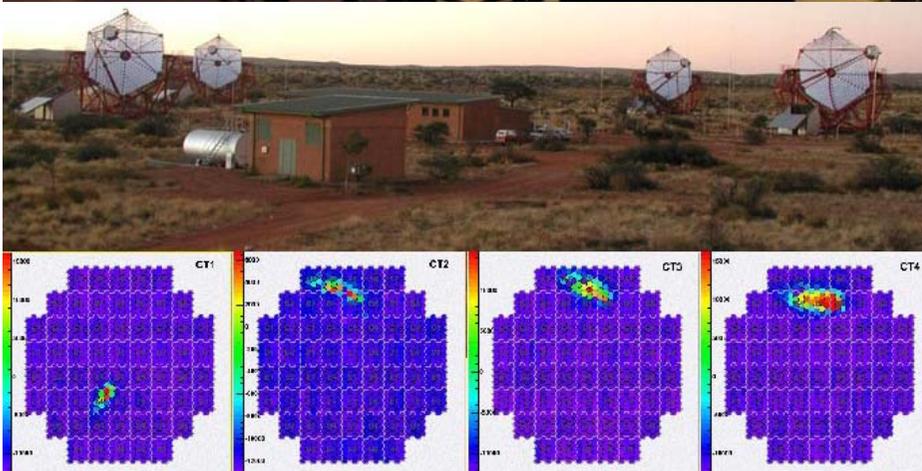
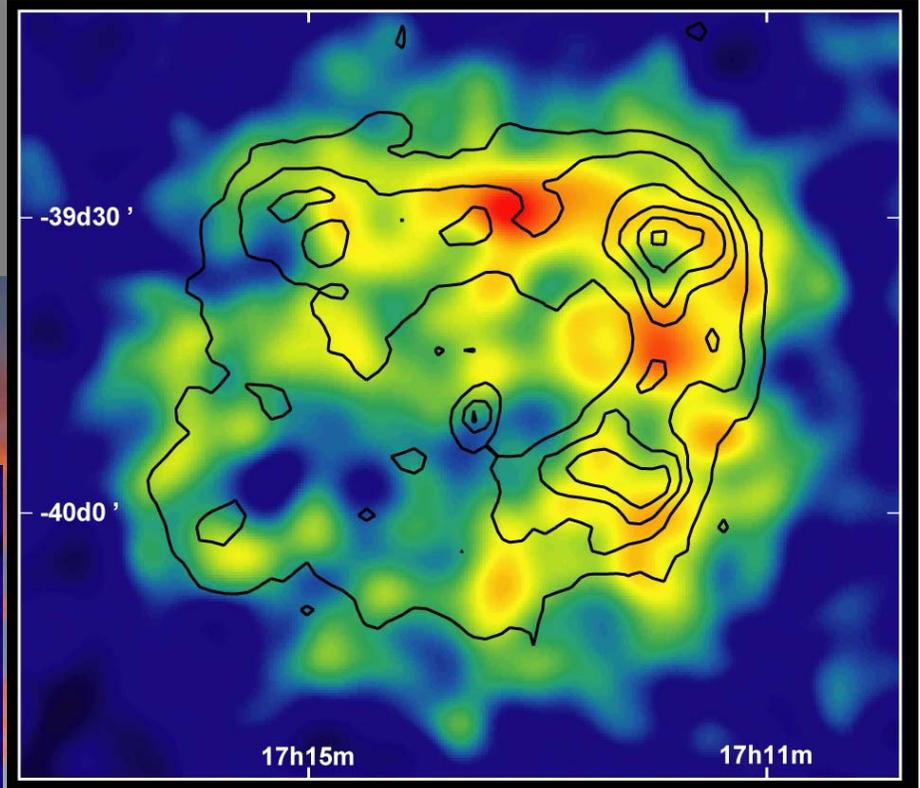
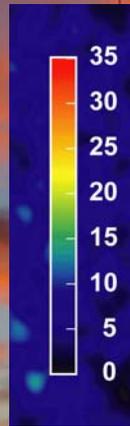




QuickTime™ et un
décompresseur Codec YUV420
sont requis pour visionner cette image.

E2PHY
24/08/05

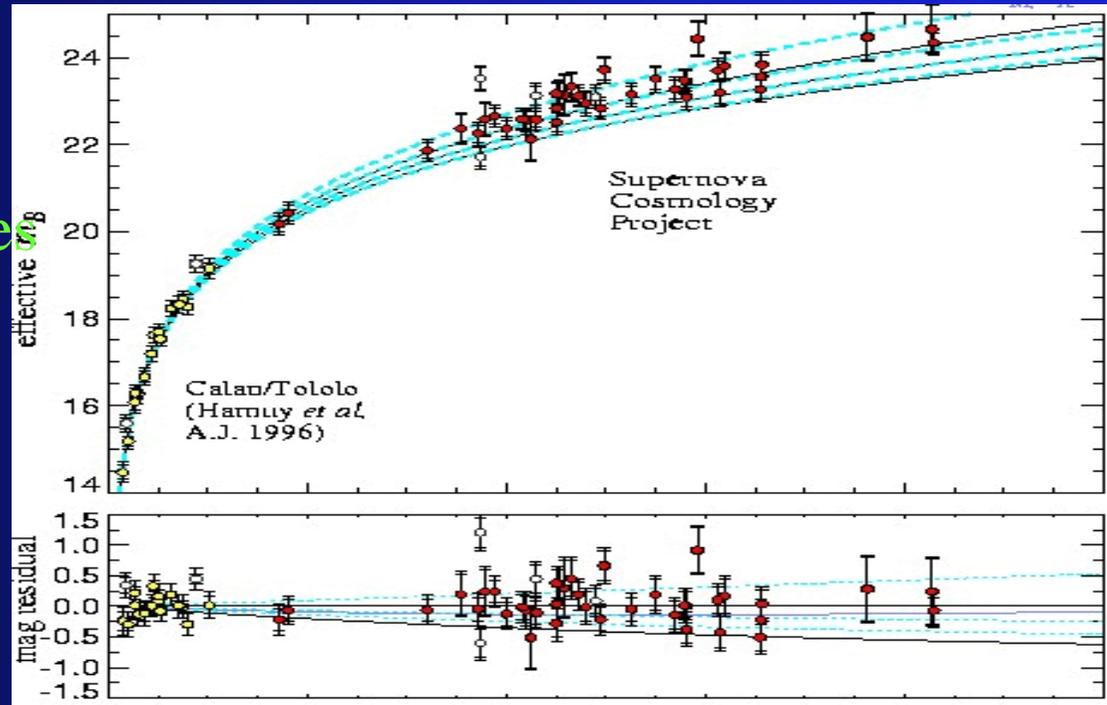
Observation par le télescope HESS en Namibie (gammas de 100 GeV à 10 TeV) de la structure en coquille d'un **reste de supernova**



Les supernovae de type Ia sont utilisées comme bougies standards pour tester la géométrie de l'espace-temps

Les supernovae distantes apparaissent moins brillantes que dans un univers en expansion standard

↪ expansion accélérée

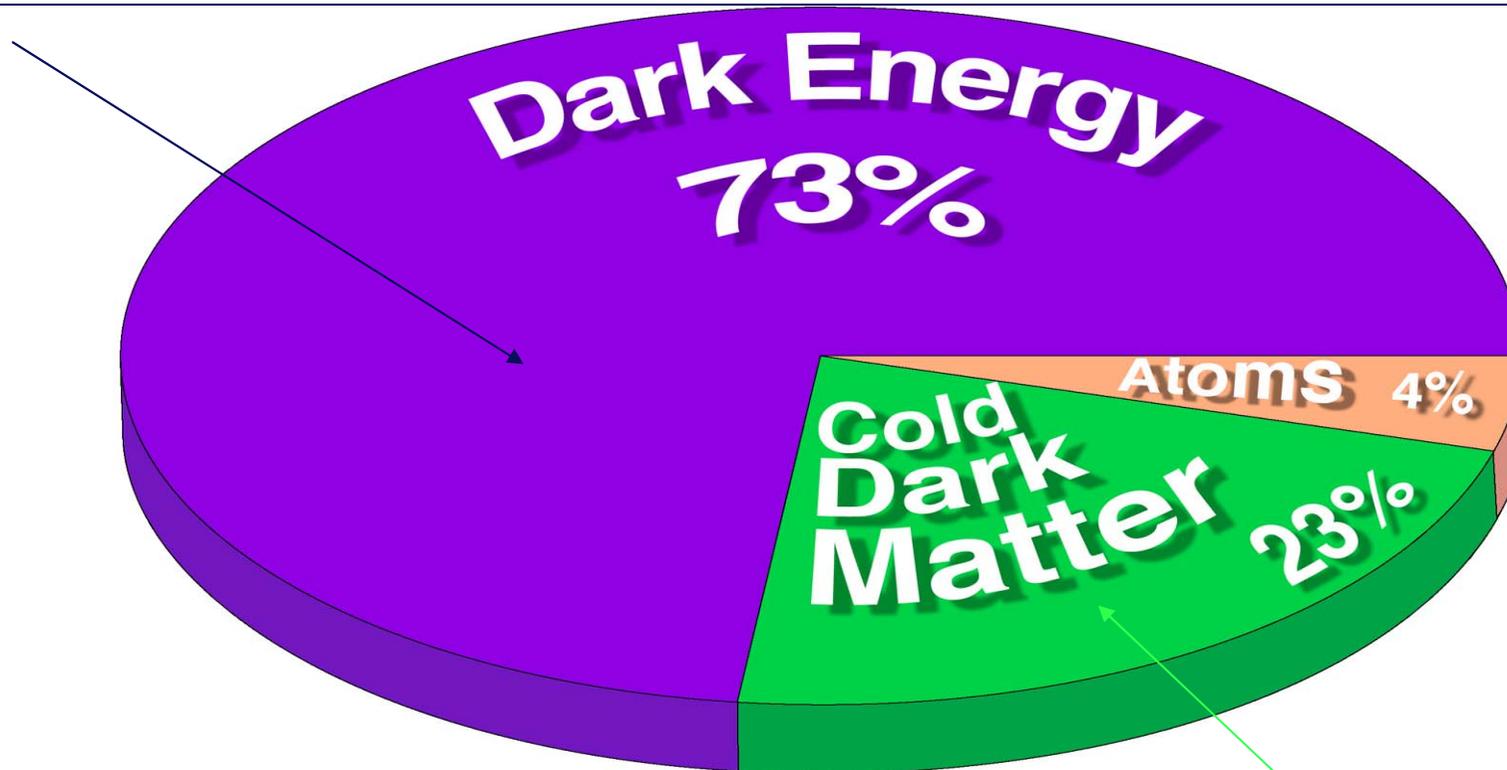


La matière tend à décélérer l'expansion

→ une nouvelle forme d'énergie est responsable de cette accélération

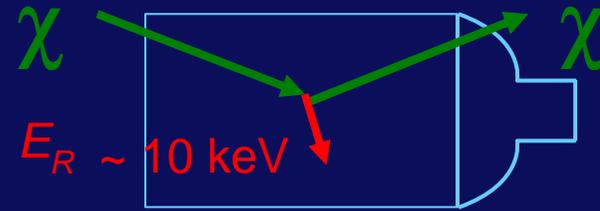
Le bilan énergétique de l'Univers

Lié au problème fondamental de physique des hautes énergies pour réconcilier la gravité avec la théorie quantique



complémentaire des recherches expérimentales dans les accélérateurs de particules

Matière noire : détection directe

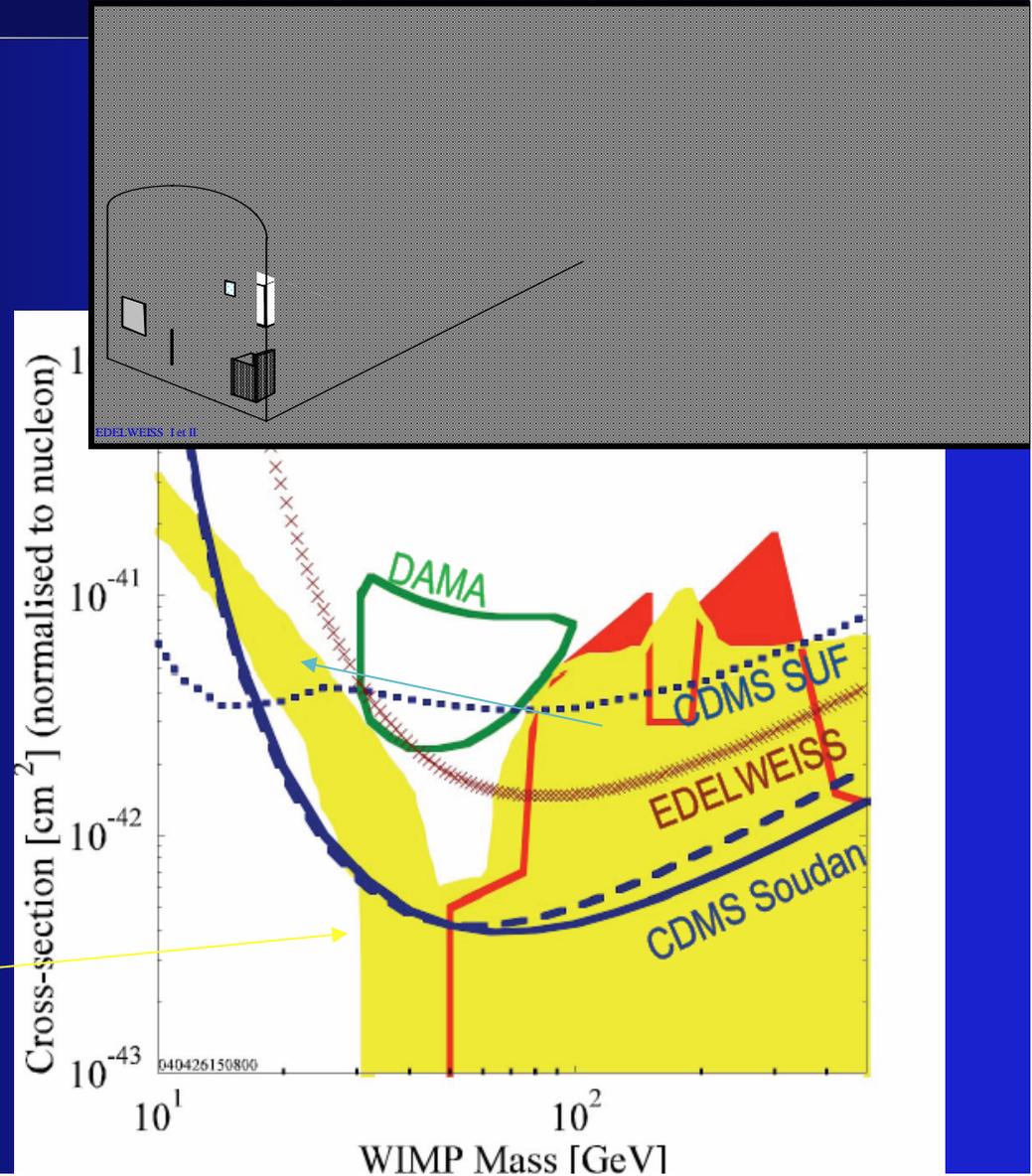


Sites souterrains
(mines, tunnels...)



favorisé par les théories
supersymétriques

E2PHY
24/08/05



Les principales questions du domaine

Y a-t-il eu un big bang?

S'il y a eu inflation, quelle en était la dynamique?

Quelle est l'origine de l'asymétrie matière-antimatière?

Quels ont été les premiers objets lumineux, et quand sont-ils apparus?

Comment détecter et identifier la matière noire?

Quels sont la géométrie et le contenu de l'Univers à grande échelle?

Comment confirmer ou infirmer la récente accélération de l'expansion?

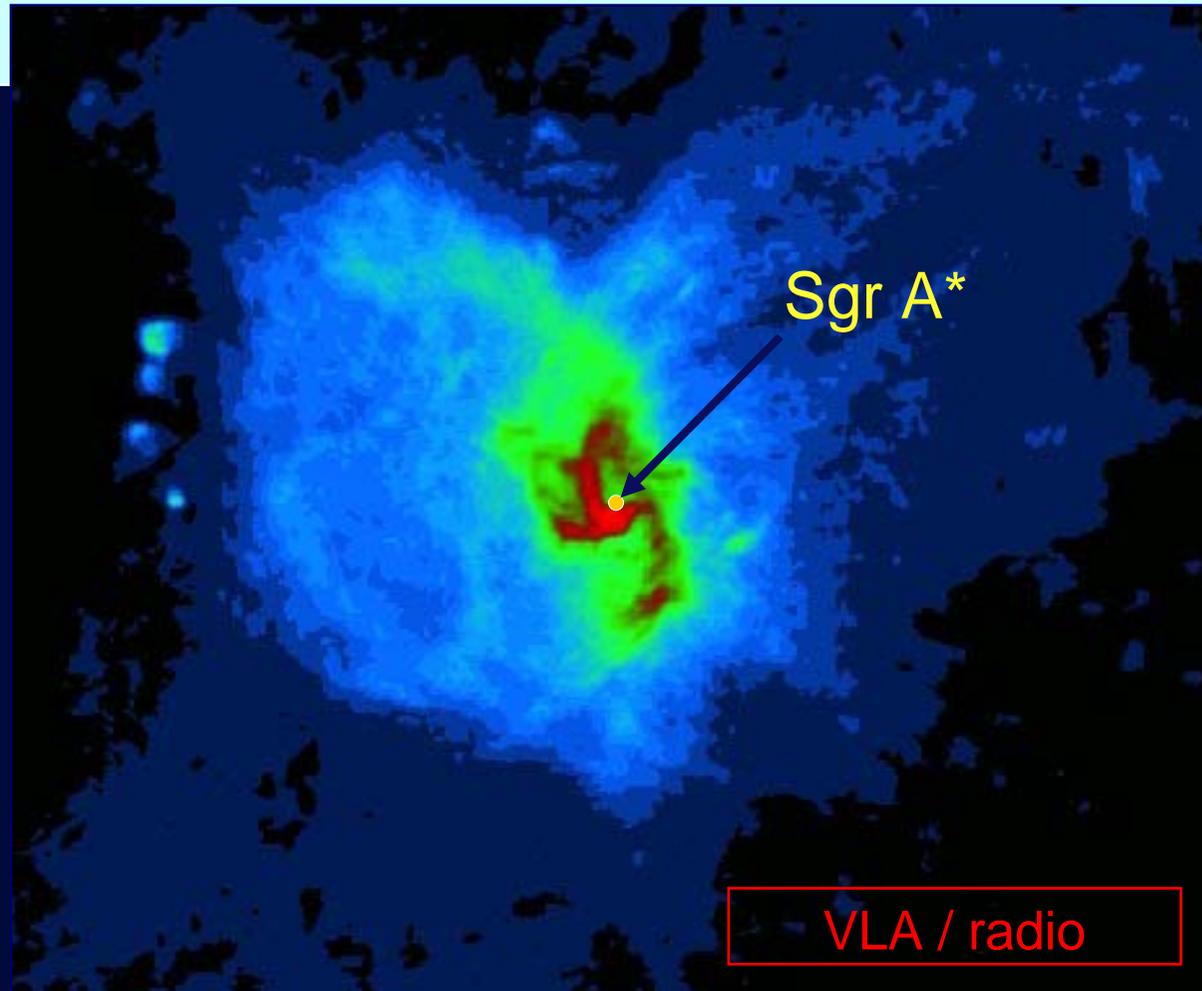
Y a-t-il une énergie noire? Pourquoi l'énergie du vide est-elle si faible?

Quelles sont les limites de validité de la relativité générale ?

Trous noirs, sources de particules de haute énergie



Un trou noir dans le voisinage ?

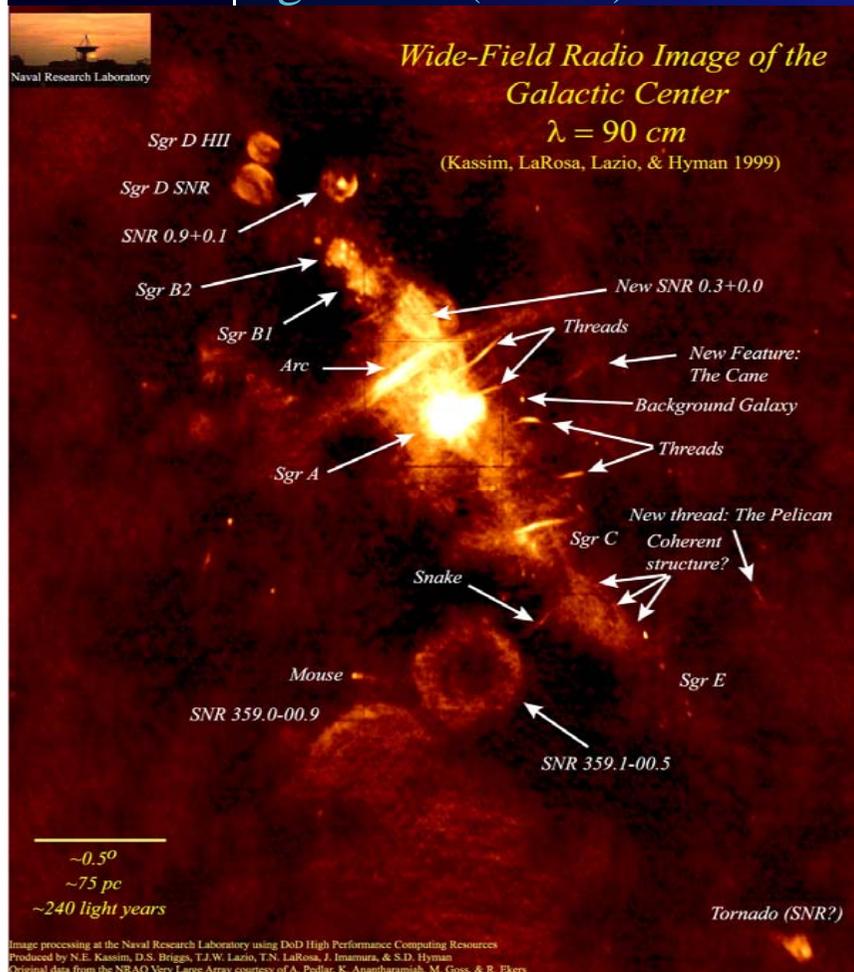


Au voisinage du centre galactique...

Une vue rapprochée du centre galactique

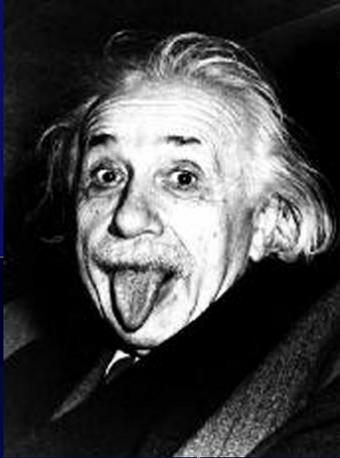
Image radio (90 cm)

Infrarouge ($1.6 \mu\text{m} < \lambda < 3.5 \mu\text{m}$)
NAOS/CONICA

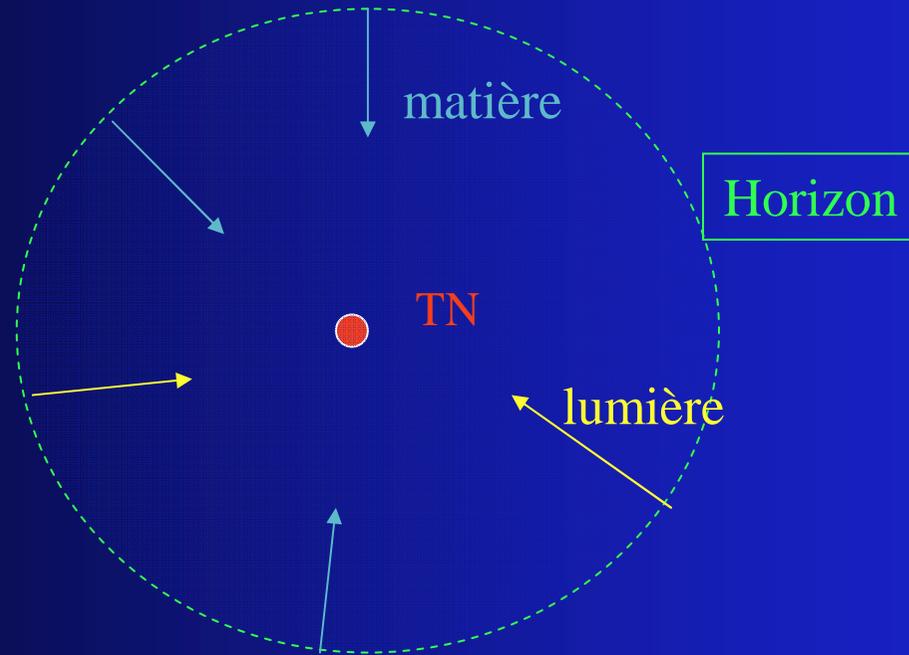


QuickTime™ et un décompresseur GIF sont requis pour visionner cette image.

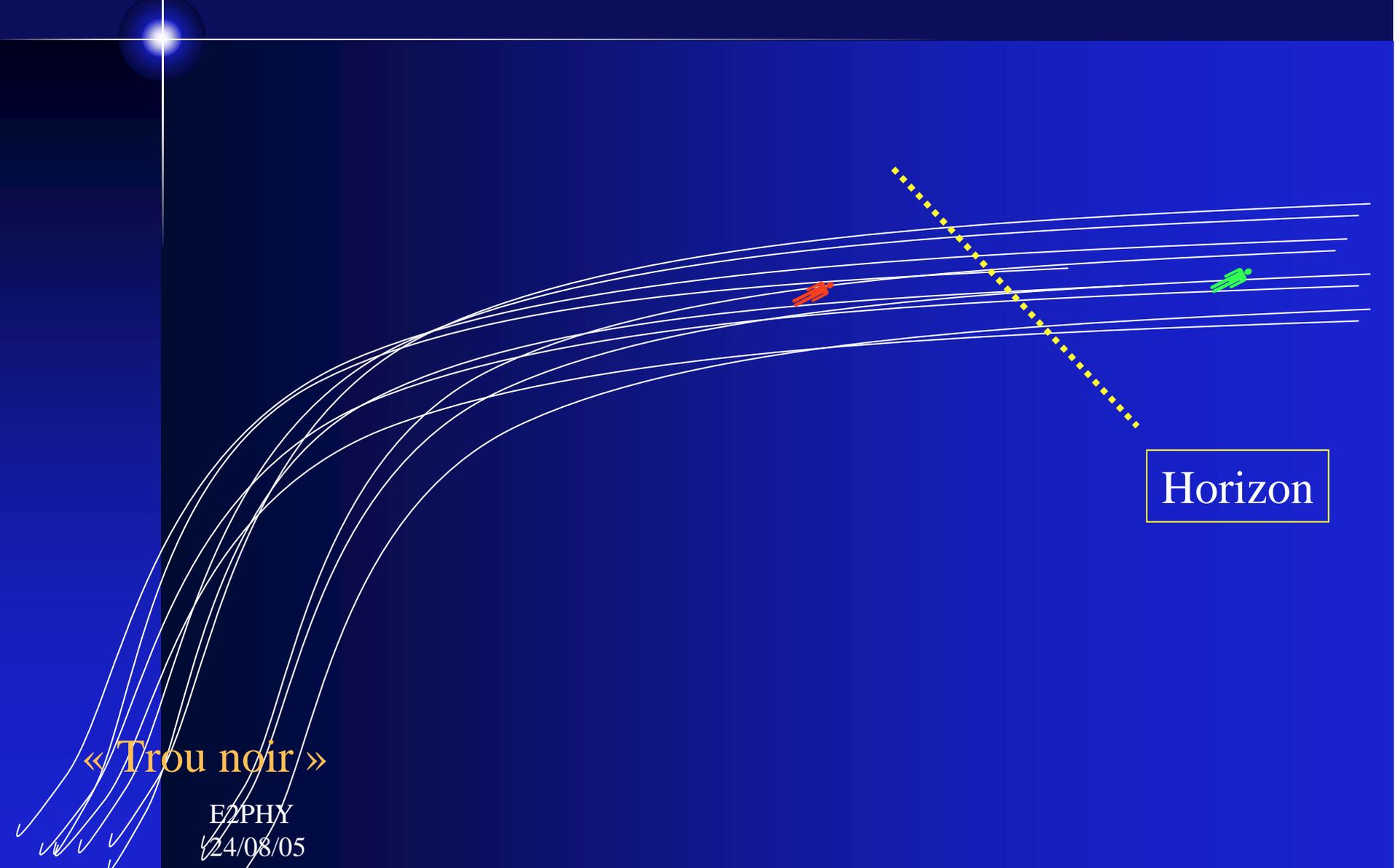
Trou noir d'une masse de l'ordre
3 million de masse solaire



Les trous noirs sont des singularités de l'espace-temps prédites par la théorie de la relativité générale :



Une comparaison pour comprendre la notion d'horizon : la chute d'eau



« Trou noir »

E2PHY
24/08/05

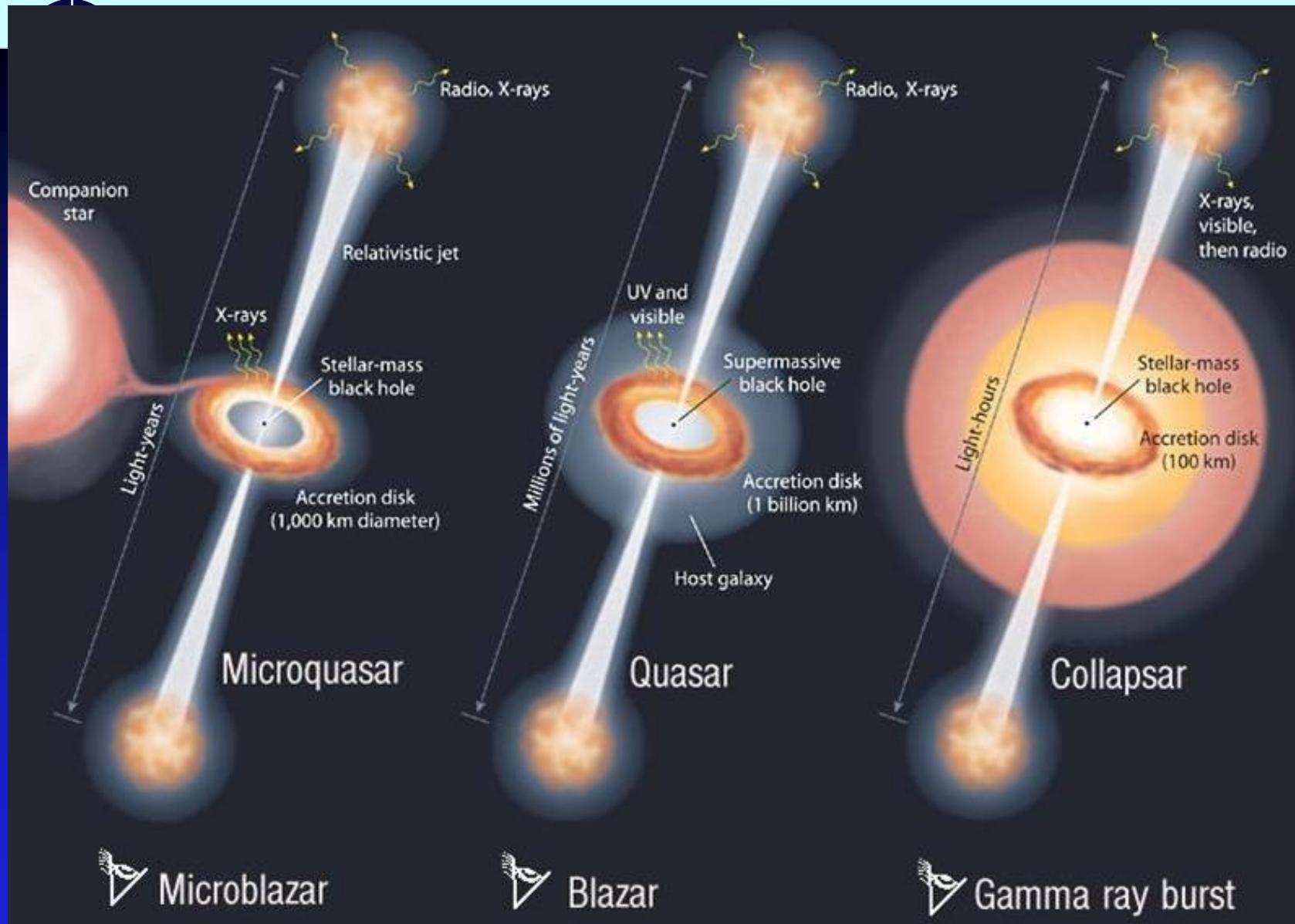
Horizon

En fait, un trou noir est entouré par une région d'intense activité

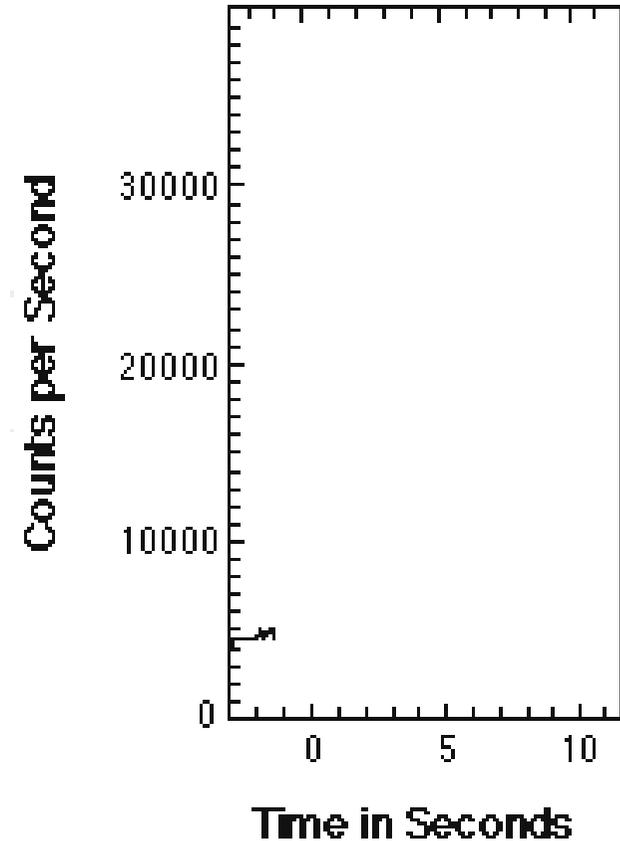
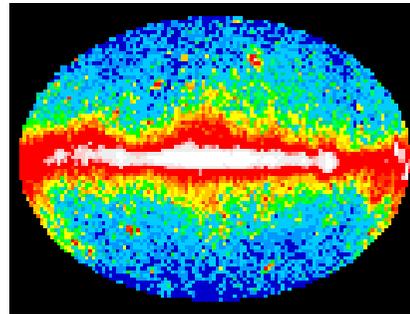


QuickTime™ et un
décompresseur Codec YUV420
sont requis pour visionner cette image.

Trous noirs (et étoiles à neutrons) sont les briques élémentaires de l'Univers violent

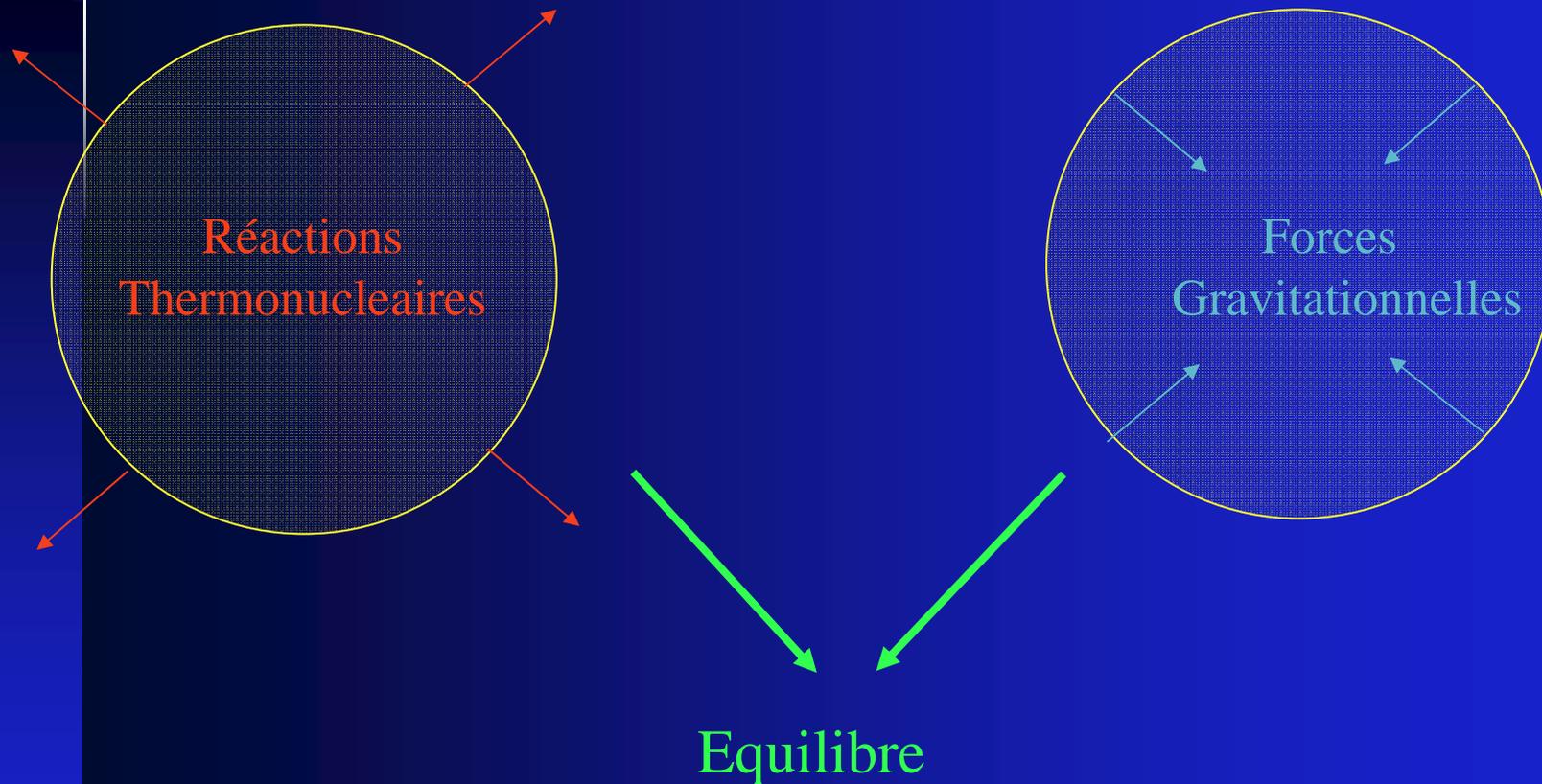


L'exemple des sursauts gamma : les événements les plus lumineux connus → les sondes les plus distantes!



Satellite militaire US Vela détectant l'émission gamma des explosions nucléaires soviétiques

Quelques notions sur les étoiles (comme le Soleil)

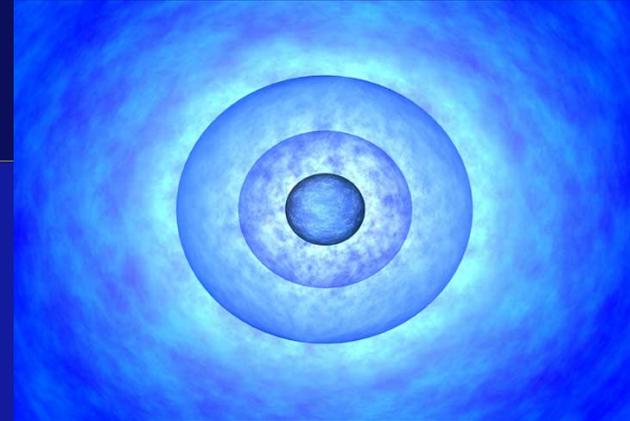


Mais quand le fuel nucléaire disparaît, il y a effondrement dû à la gravité

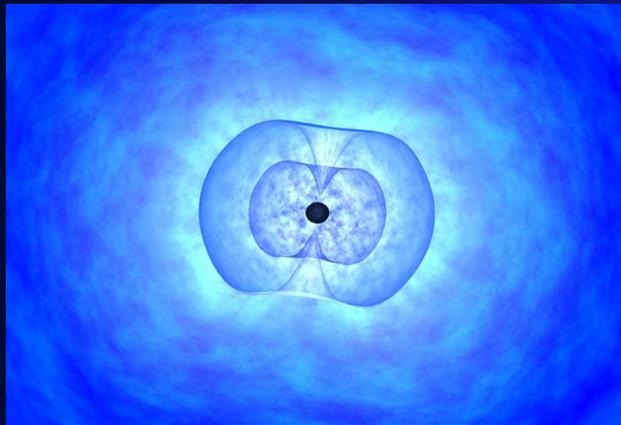
Un modèle pour les sursauts gamma : la boule de feu.



Une étoile très massive finit son existence par une explosion



Son cœur intérieur s'effondre en un trou noir



L'effondrement n'est pas uniforme. Il y a création de jets de particules

E2PHY
24/08/05



Ces jets interagissent avec les couches superficielles; ceci accélère leurs particules.

un accélérateur cosmique



Les principales questions du domaine

Comment fonctionnent les accélérateurs cosmiques?

Qu'est-ce que l'étude des sources énergétiques nous apprend sur les lois de la physique?

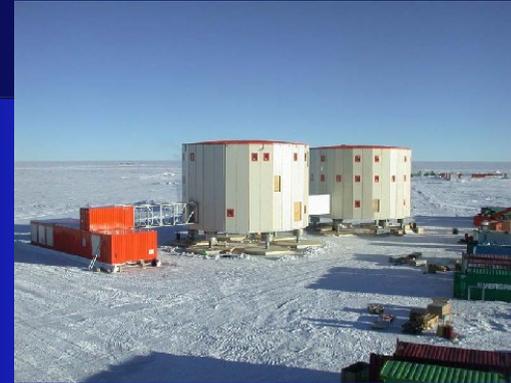
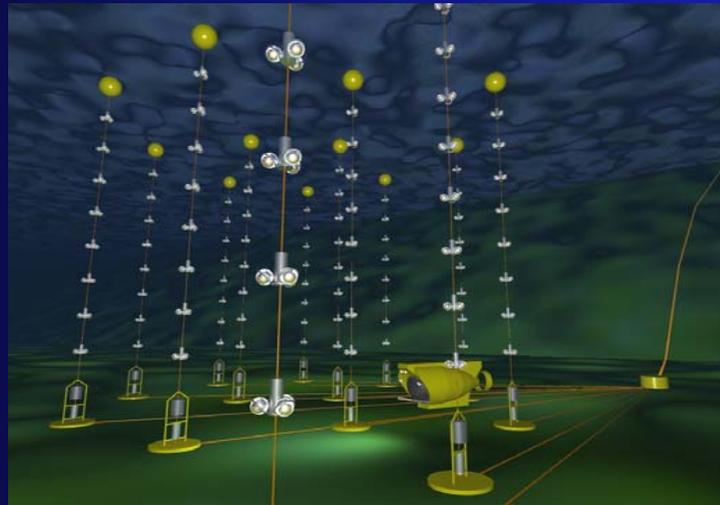
Comment se sont formés les trous noirs?

Y a-t-il de nouveaux états de la matière aux énergies ou densités extrêmes?

Comment les supernovae explosent-elles?

Comment sont formés les éléments lourds?

Comment détecter les particules cosmiques de haute énergie ?

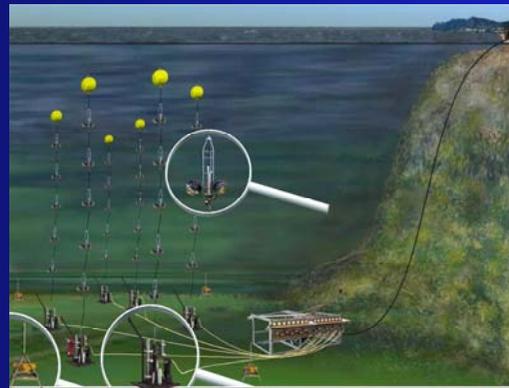


Une nouvelle « frontière »

Trois domaines au cœur de l'astrophysique des particules représentent une nouvelle fenêtre ouverte sur le ciel:

- Rayons cosmiques de ultra-haute énergie
- Neutrinos de haute énergie
- ondes gravitationnelles

Prix Nobel 2002 à
R. Davis et M. Koshiba

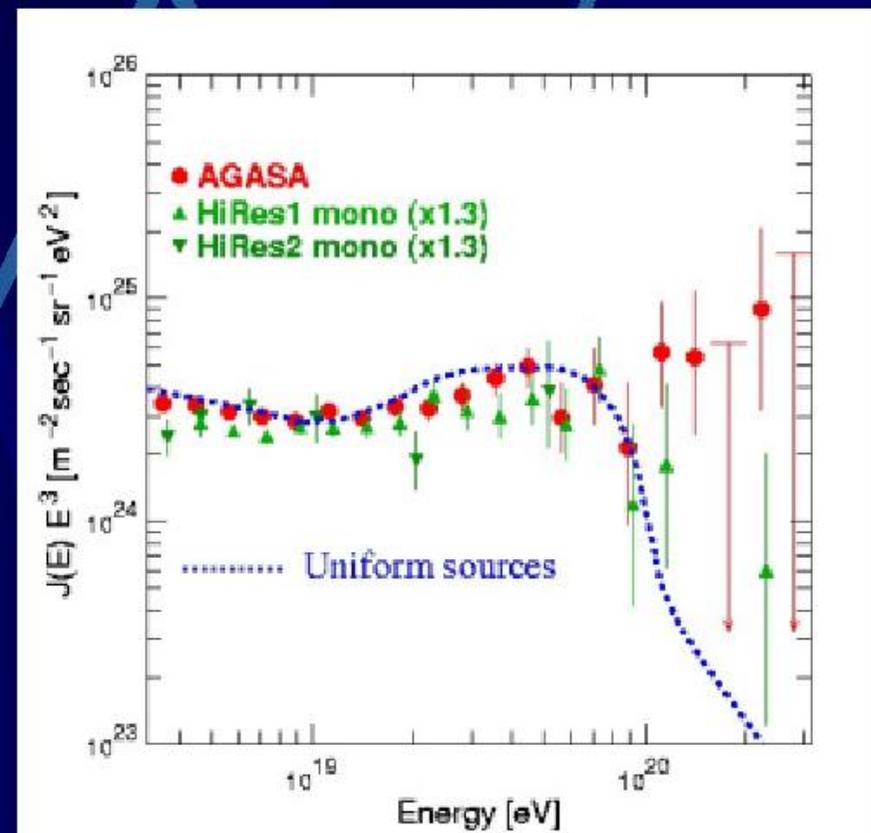
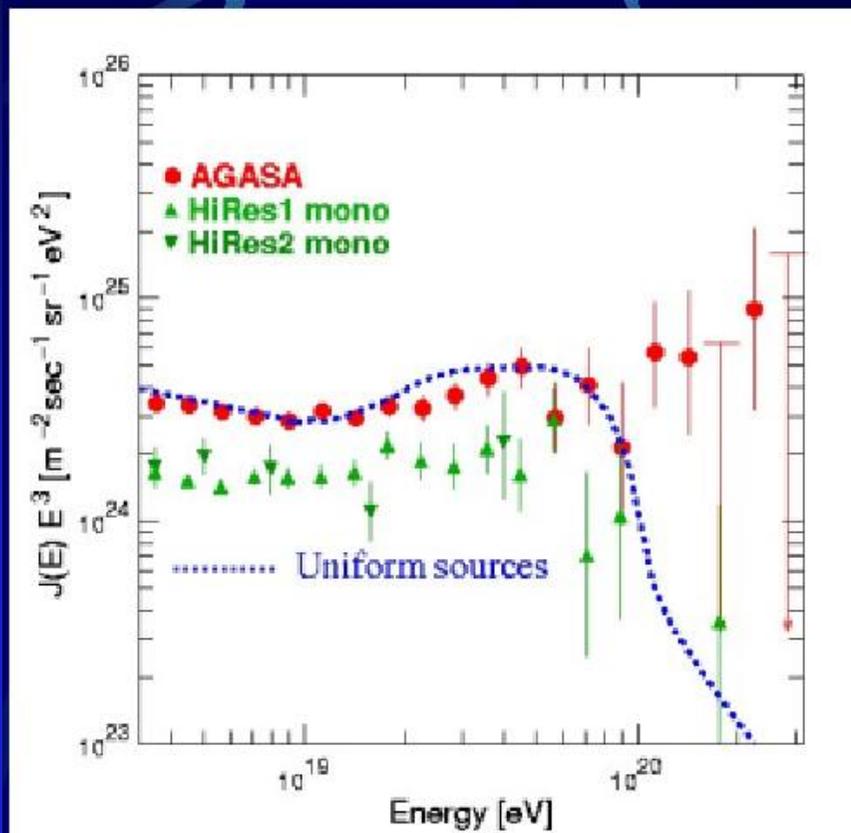


L'énigme des rayons cosmiques d'énergie extrême

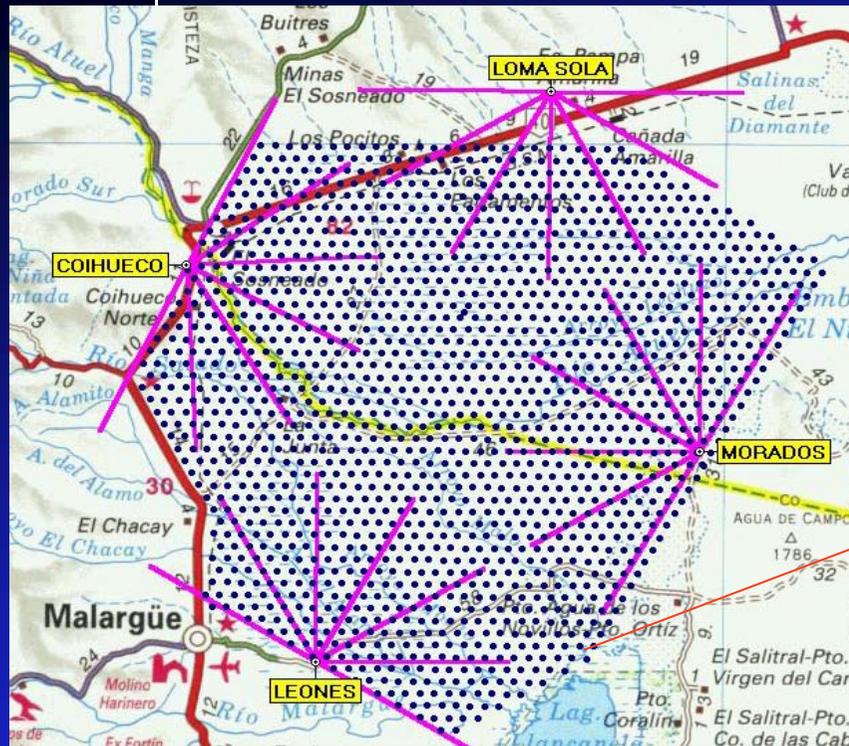
L'effet GZK

Le fond cosmique micro-onde (3K) limite la distance à laquelle peuvent être trouvées des sources de rayons cosmiques de ultra-haute énergie visibles de la terre :

≈ 50 Mpc, pour des protons d'énergie $> 5 \cdot 10^{19}$ eV

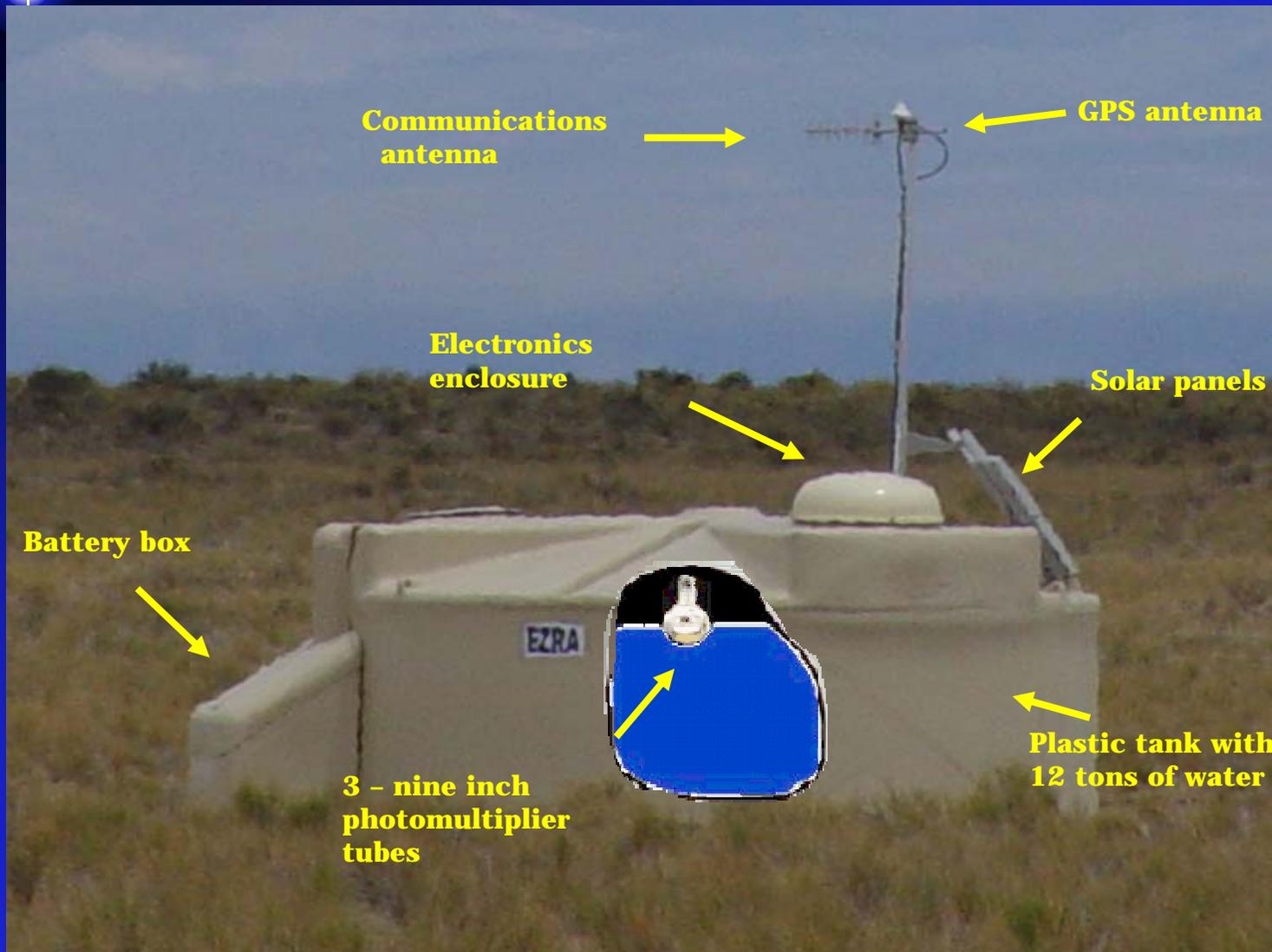


L'observatoire Pierre Auger (Argentine)



Réseau de 1600 détecteurs qui couvrent une surface de 3000 km²

Une cuve de Auger



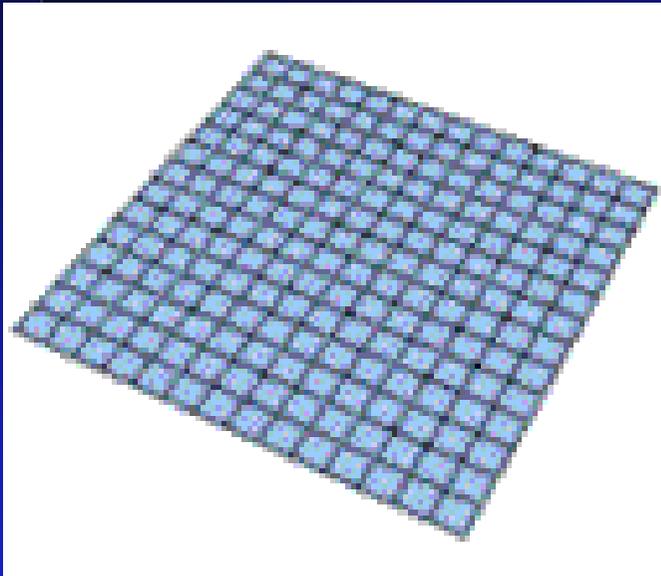
Neutrino: particule très légère, interagissant très faiblement avec la matière, produite dans les réactions nucléaires qui prennent place dans les étoiles (soleil) et les sources astrophysiques.



Detecteur SuperKamioka in Japan;
40 000 tonnes d'eau pour étudier les
neutrinos du soleil ou de l'atmosphère.

Ondes gravitationnelles

L'espace-temps (4D) est « élastique »,
Toute masse ou forme d'énergie localisée le perturbe et le courbe... comme le fait le vent sur la surface de l'eau...



... des ondes peuvent aussi se propager



LISA
lancement en 2012
Mission ESA/NASA



Trois satellites formant un triangle de 5
millions de km de coté

Conclusions

Un nouveau domaine à l'interface entre physique des hautes énergies et astrophysique.

Cosmologie et astrophysique des particules fournissent des outils pour répondre à des questions de physique fondamentale qui sont très complémentaires de ceux de la physique des particules.

Nouvelle fenêtre ouverte sur l'Univers : neutrinos, ondes gravitationnelles, rayons cosmiques de ultra-haute énergie. Peut changer notre compréhension de certaines des questions cruciales.

CERN



Astroparticule
et
Cosmologie



ESA

E2PHY
24/08/05

ESO