

Qu'est ce que la masse ?

Par André Tilquin
(tilquin@cppm.in2p3.fr)



<http://marwww.in2p3.fr>



Université de la Méditerranée-Faculté des Sciences de Luminy
Case 907, 163 Avenue de Luminy-13288 Marseille cedex 09

De l'énergie du vide à l'énergie noire

- Rappel historique: De Galilée à Einstein
- Pourquoi la masse est nécessaire ?
- La masse et l'infiniment petit.
- La masse et notre Univers.

NAISSANCE DE L'UNIVERS

UNIVERS ACTUEL

10^{-29} cm

10^{28} cm



CONTENU

CONTENANT

MATIÈRE

MILIEU

10^{-28} cm
PARTICULES

10^{29} cm
GALAXIES

10^{-28} cm
VIDE QUANTIQUE

10^{28} cm
ESPACE TEMOS

MASSE 

La masse est à la physique
ce que l'oxygène est à la vie

ENERGIE

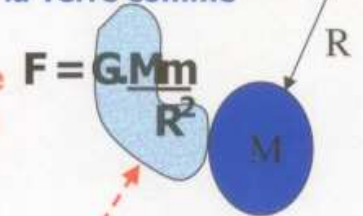
Un peu d'histoire

Avant Newton. Galilée:

- La notion de masse n'existe pas.
- Les objets tombent à la même vitesse.
- Plus les objets tombent de haut plus ils vont vite.
- La lune est poussée par des anges !!!!

Newton: La lune tombe sur la Terre

- La Lune est attirée par la Terre comme la pomme.
- L'attraction dépend de la quantité de matière:
La masse « grave »



Les objets lourds résistent au mouvement:

- La masse « inertielle »

L'accélération

$$F = m\gamma$$

$$P = mg$$

$$m = m$$

La masse et Einstein

- Masse = Énergie (Relativité restreinte)

→ $E = mc^2$

- La masse déforme l'espace-temps (Relativité générale)

→ La lumière est aussi déviée.



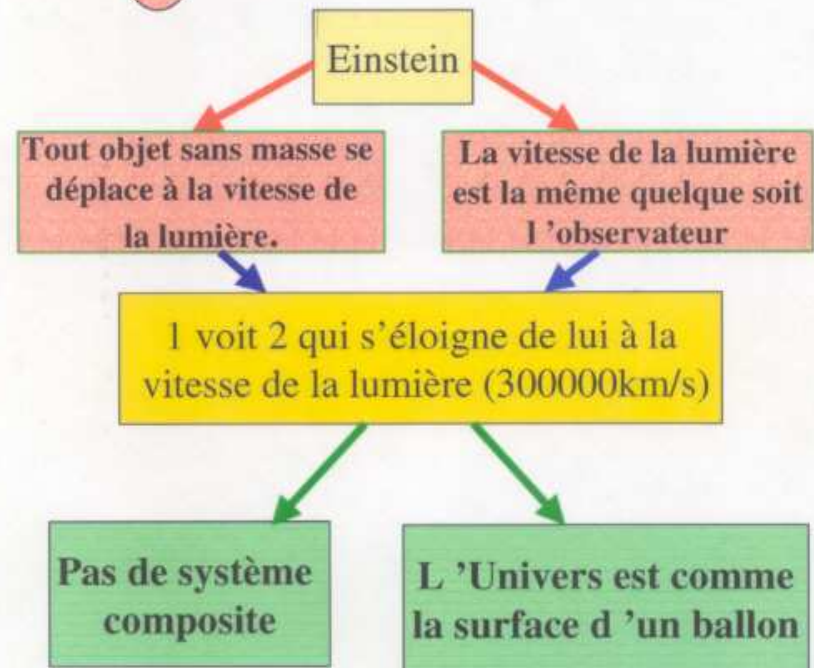
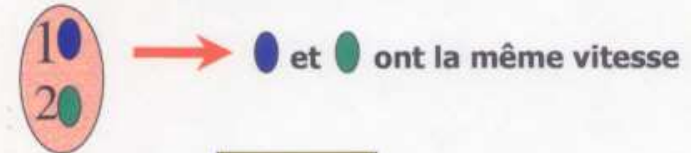
- Il y a équivalence entre l'attraction et l'accélération

→ $m = m$

La masse est une bulle d'énergie de l'espace temps !

Pourquoi la masse ?

- Objet composite:



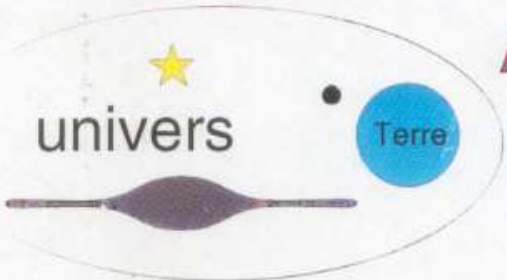


BIG - BANG

15 milliards d'années



Millions de milliards de degrés



Aujourd'hui



- 270 °c

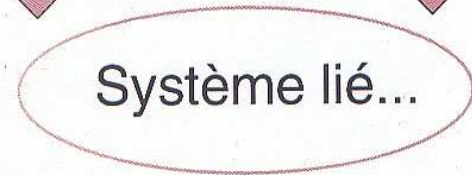
Univers

Espace

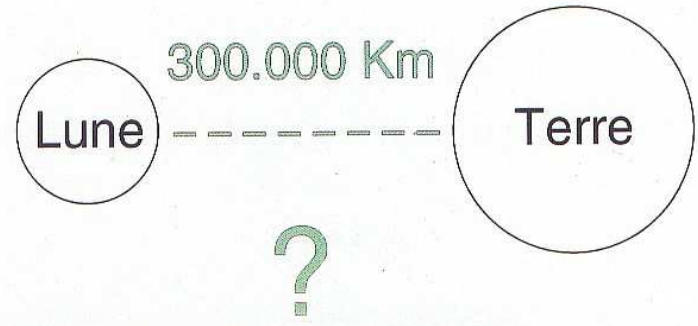
Matière visible

Vide ??

Étoiles Planètes



Interactions



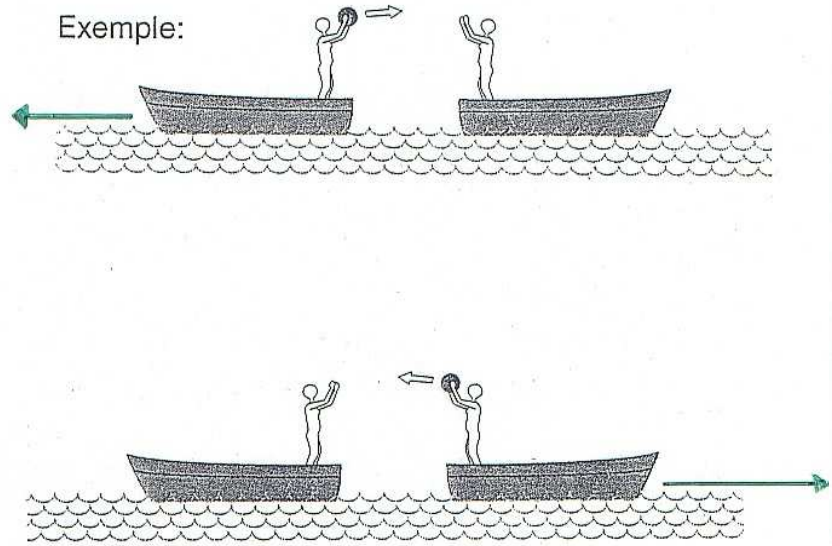
300.000 Km

Lune

Terre

?

PRINCIPE D'UNE INTERACTION
ELEMENTAIRE.

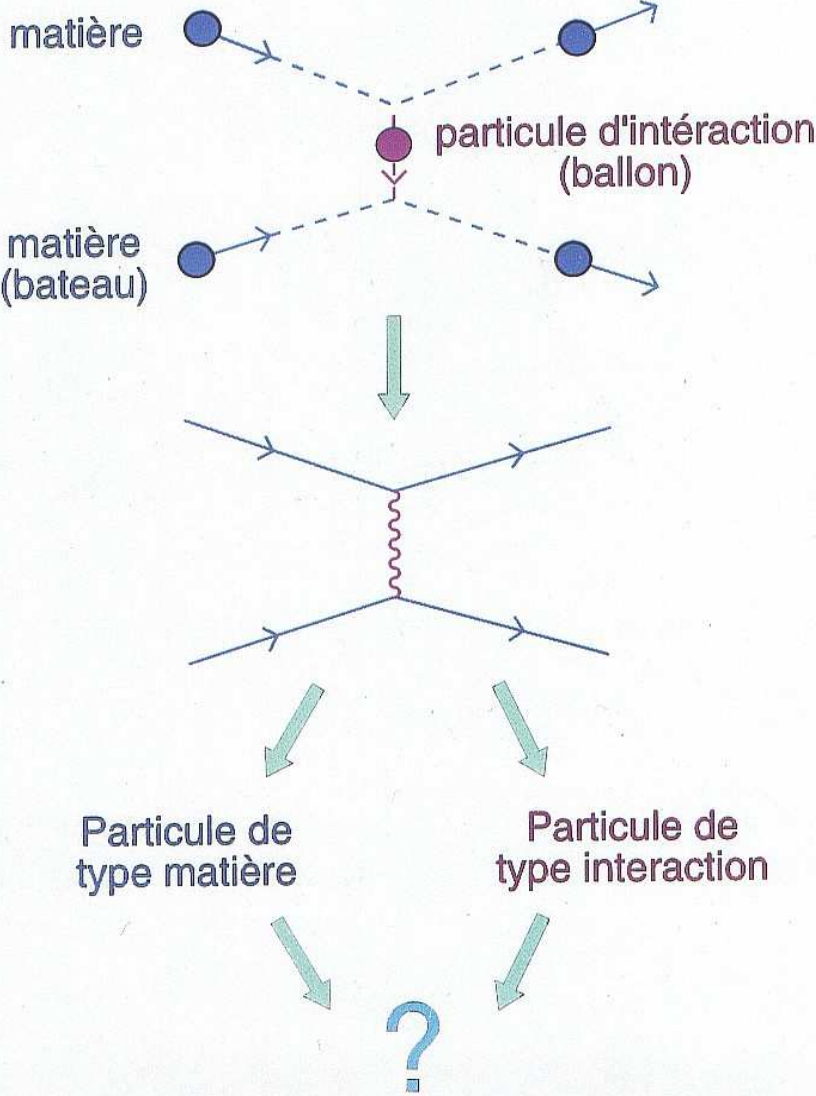


UN BALLON A ÉTÉ ÉCHANGÉ

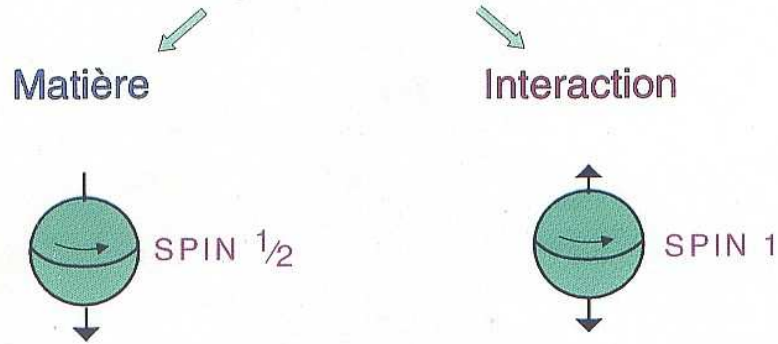


LES BATEAUX SONT EN
MOUVEMENT

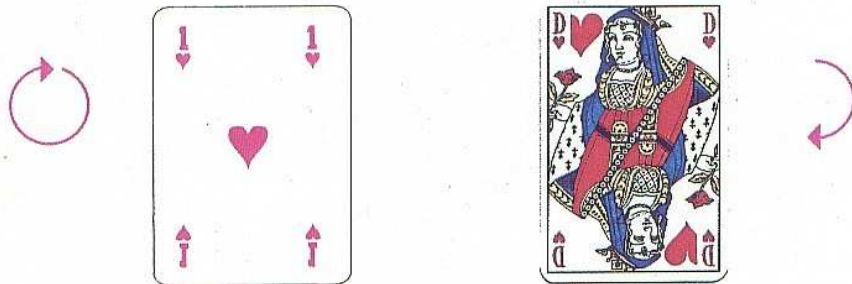
Interaction Élémentaire



Le spin



Symétrie interne différente
($\varphi \rightarrow 2\varphi$)



1 tour complet

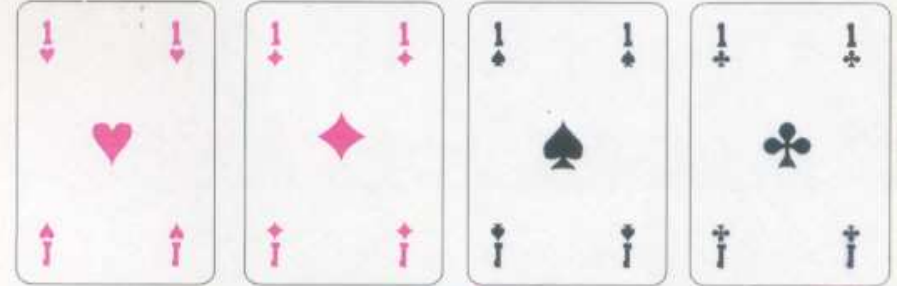
un demi tour



Comportement différent

La partie de carte cosmique

FERMI



DIRAC

Fermi / Dirac ne peuvent pas jouer ensemble

1 joueur_{1/2} → spin 1/2 → Fermion

BOSE



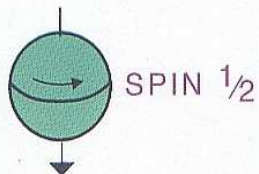
EINSTEIN

Bose / Einstein peuvent jouer ensemble

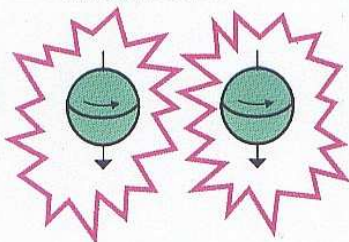
2 joueurs_{1/2} → spin 1 → Boson

VIDE

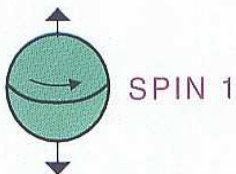
Particules de matière



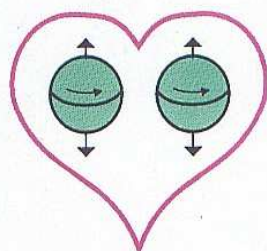
Comportement individuel



Particules d'interaction



Comportement sociable



Conséquences

La matière ne s'effondre pas

T
e
r
r
e



Les forces s'ajoutent

- fortes
- cohésion de la matière
- cohésion du système solaire

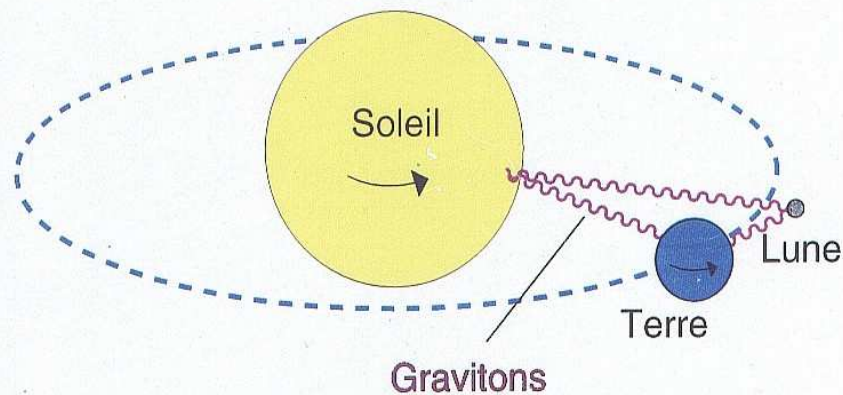


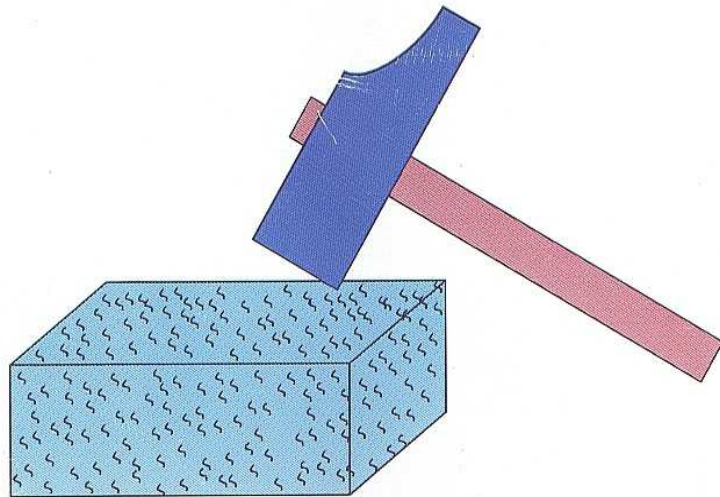
Cohésion du système solaire

Échange de particules d'interaction :

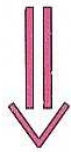


⇒ Interaction gravitationnelle

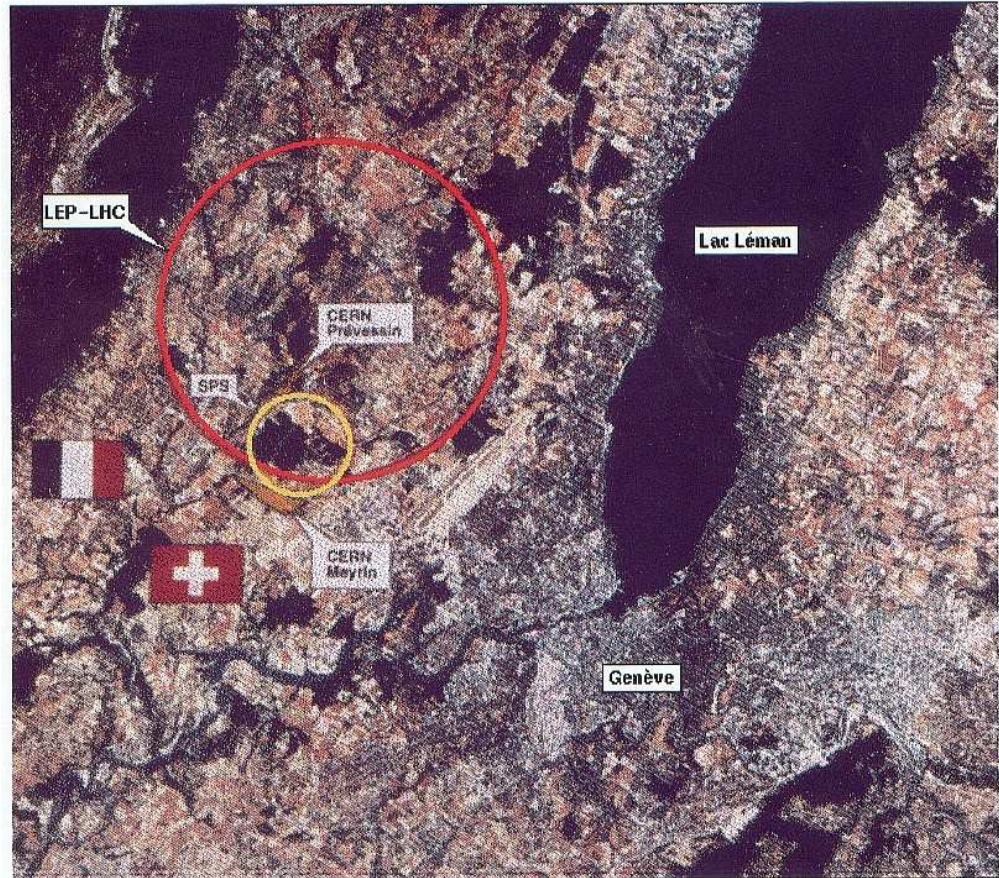




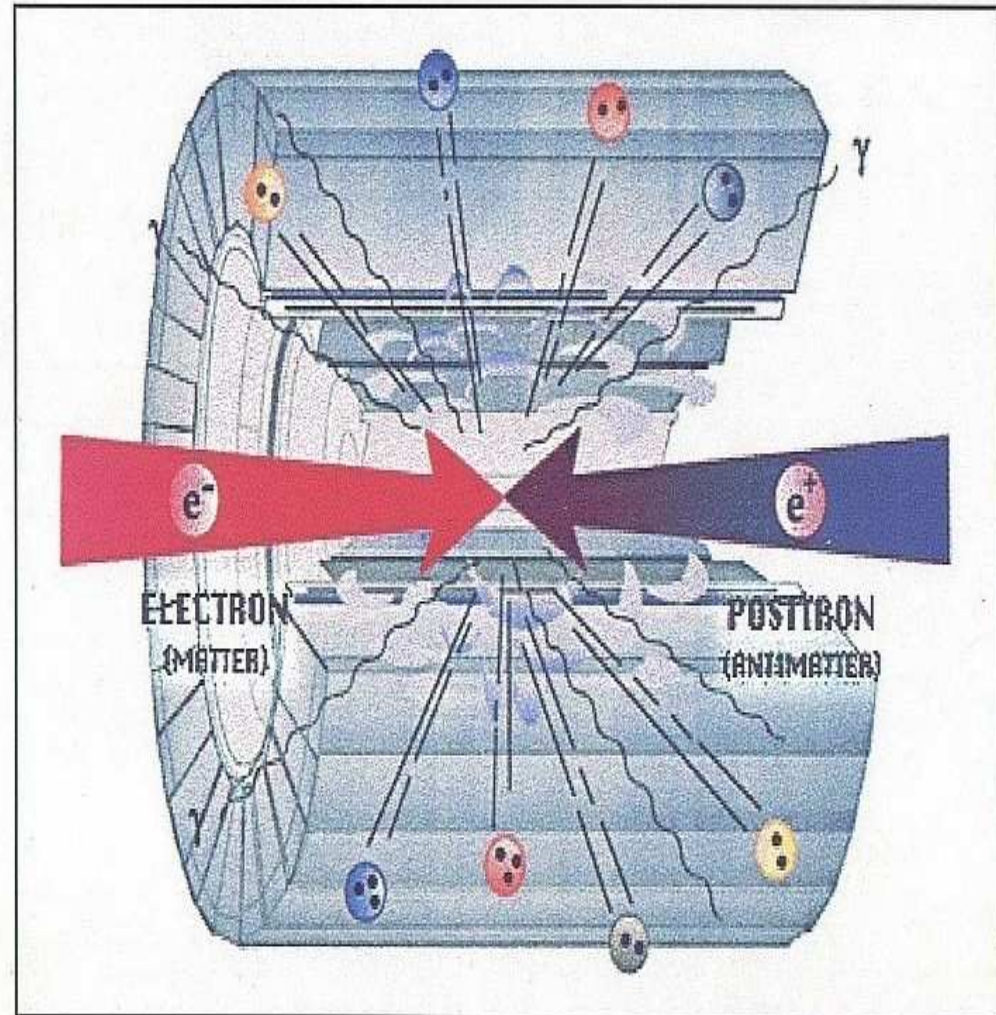
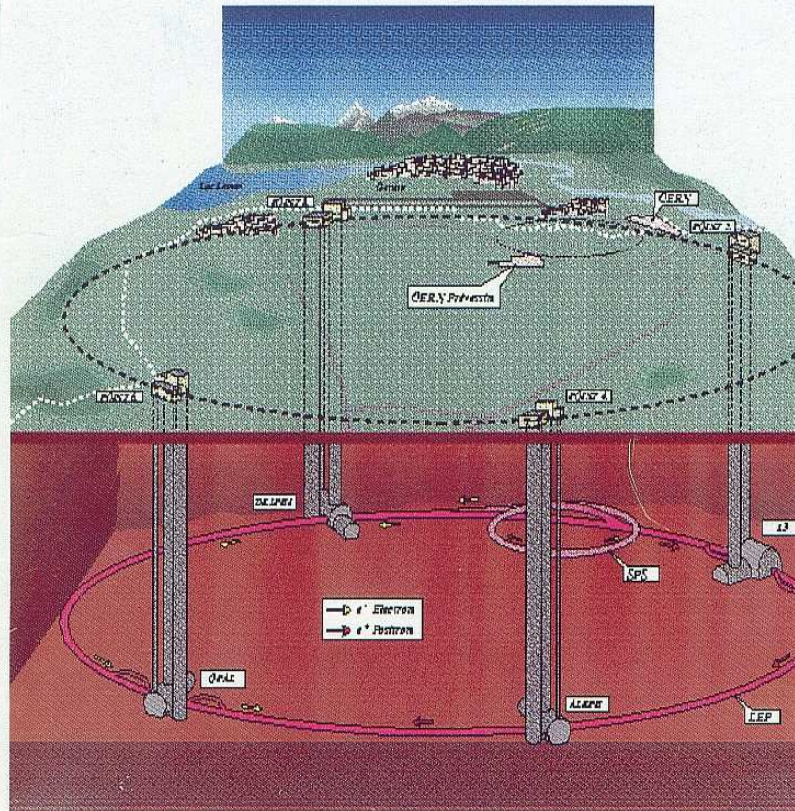
sucrè

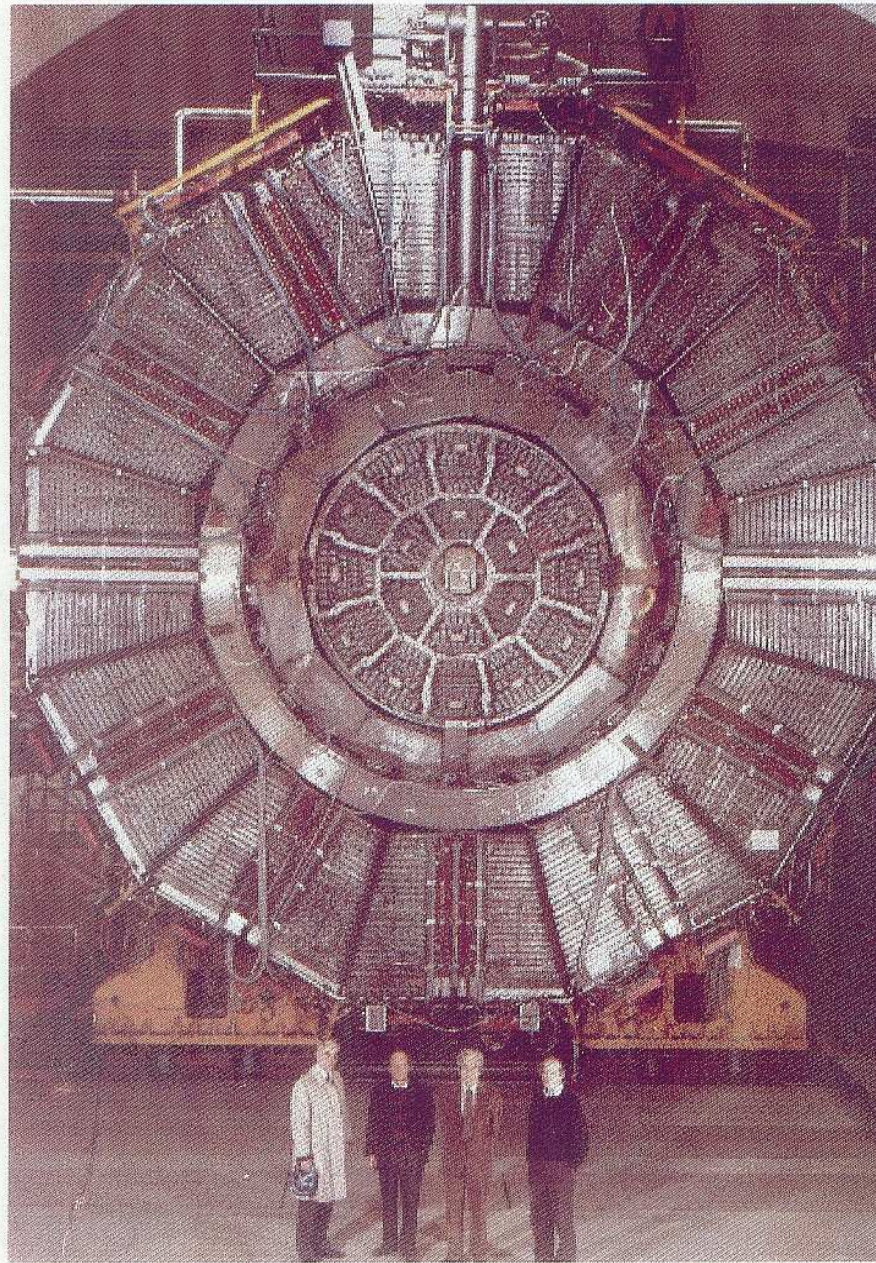


Microscope
X
1000

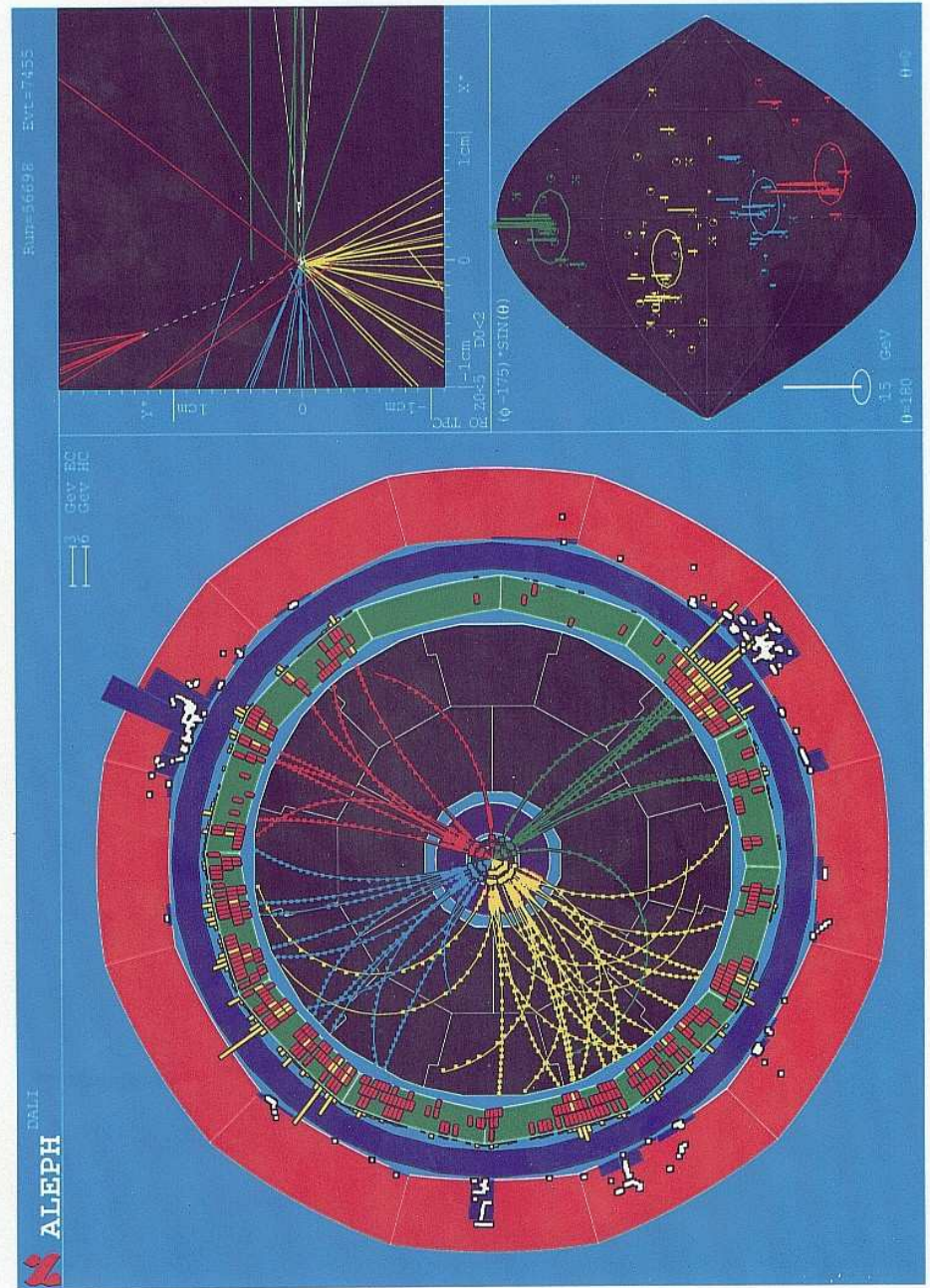


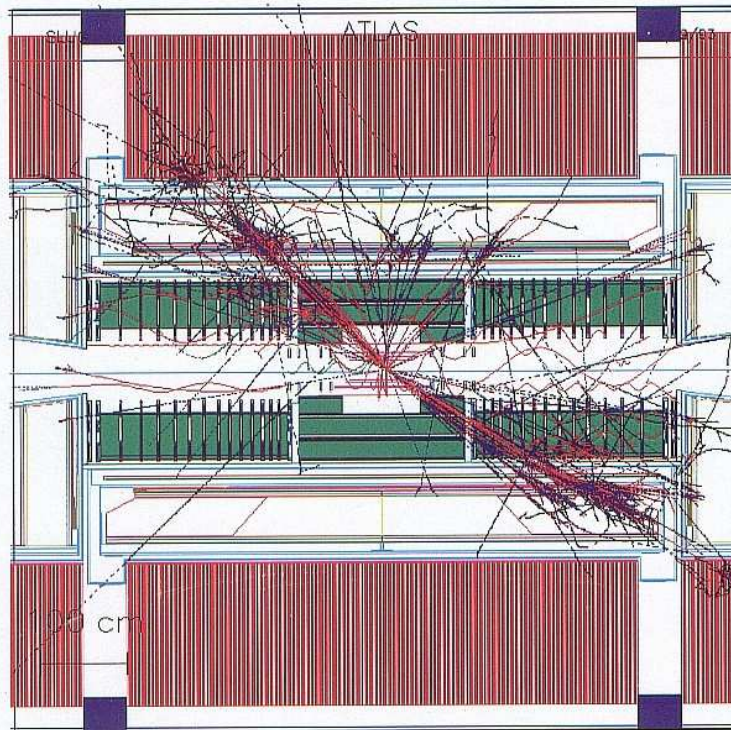
UN mini BIG BANG pour étudier l'univers





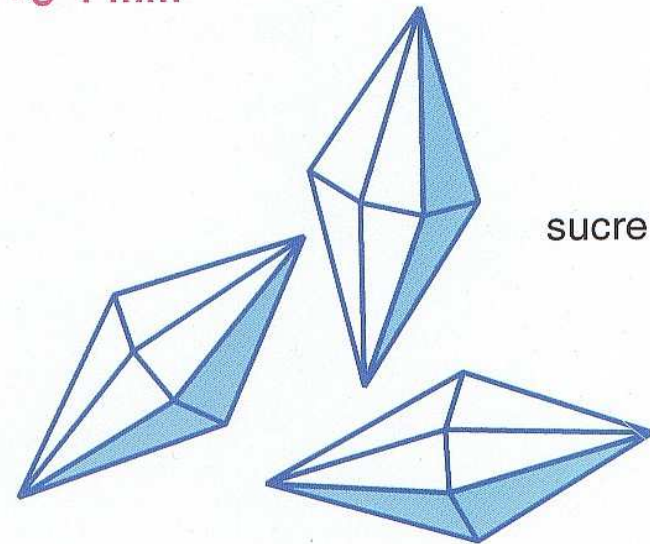
Made on 30-Aug-2000 17:24:02 by konstant with DALI_F1.
 Filename: DC056698_007455_000830_1723.PS





CRISTAUX + MOLECULES

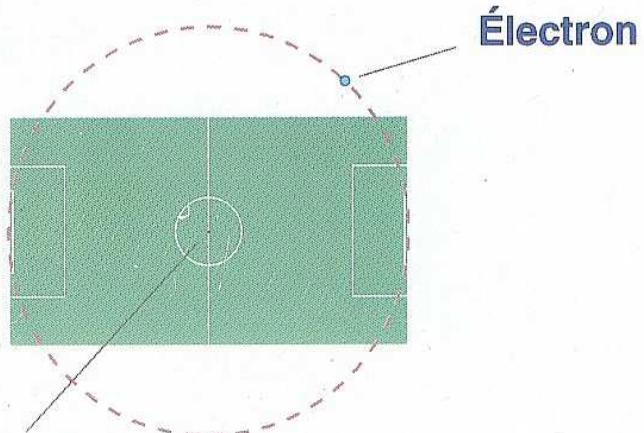
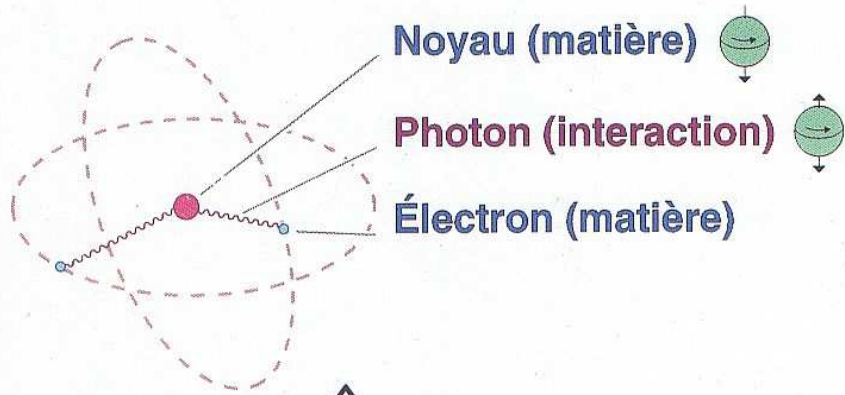
~ 1 mm



Microscope
x
10.000.000

ATOME

~ 0,00000001 mm

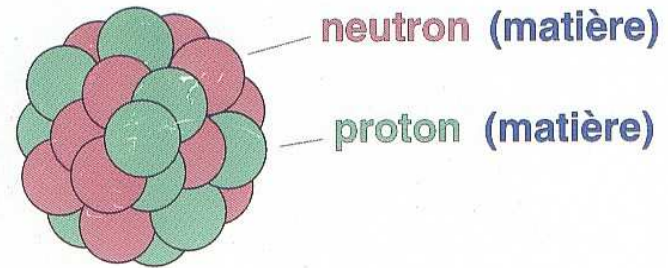


Noyau (ballon)

Noyau x 10.000

NOYAU

~ 0,000000000001 mm



Protons et neutrons ne sont pas des particules élémentaires

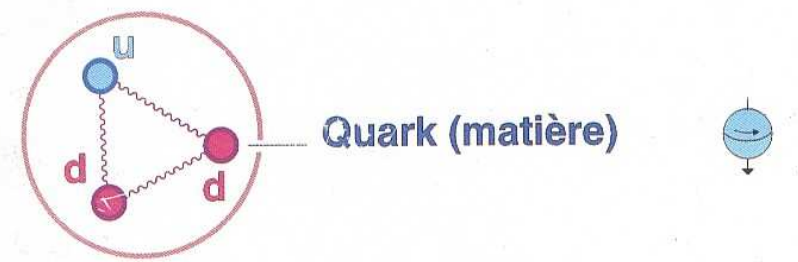
→ x 100

Proton ou Neutron

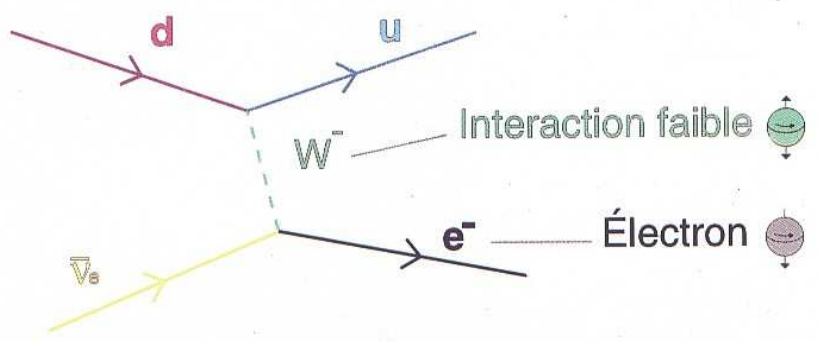
proton



neutron



Si on attend :



Grossissement total: un million de milliards

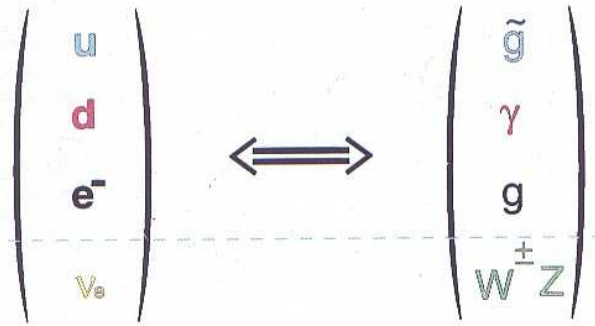
En résumé

De nos jours → univers froid

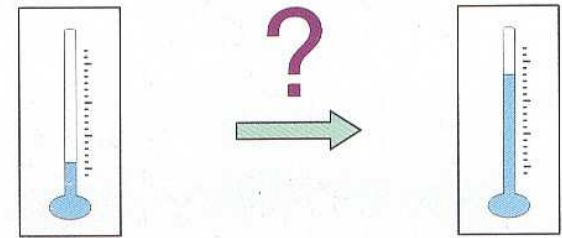
Pour décrire l'univers

Particules de matière

Particules d'interaction

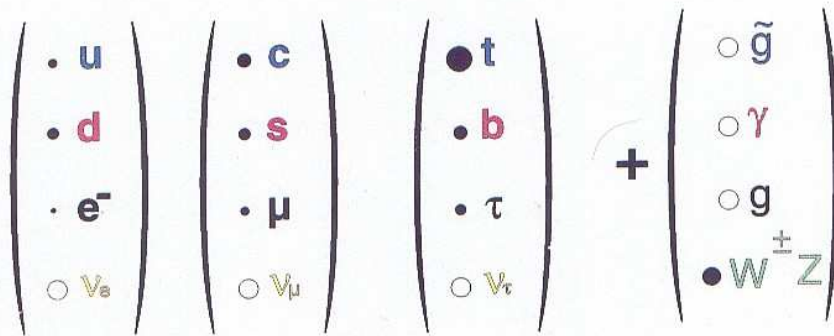


Mais l'univers n'a pas toujours été froid



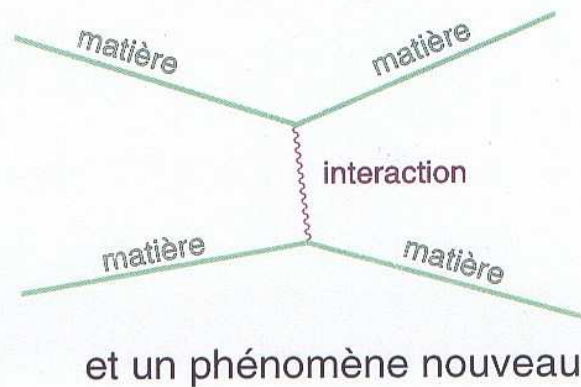
3 familles de particules de matière

De nos jours → univers froid



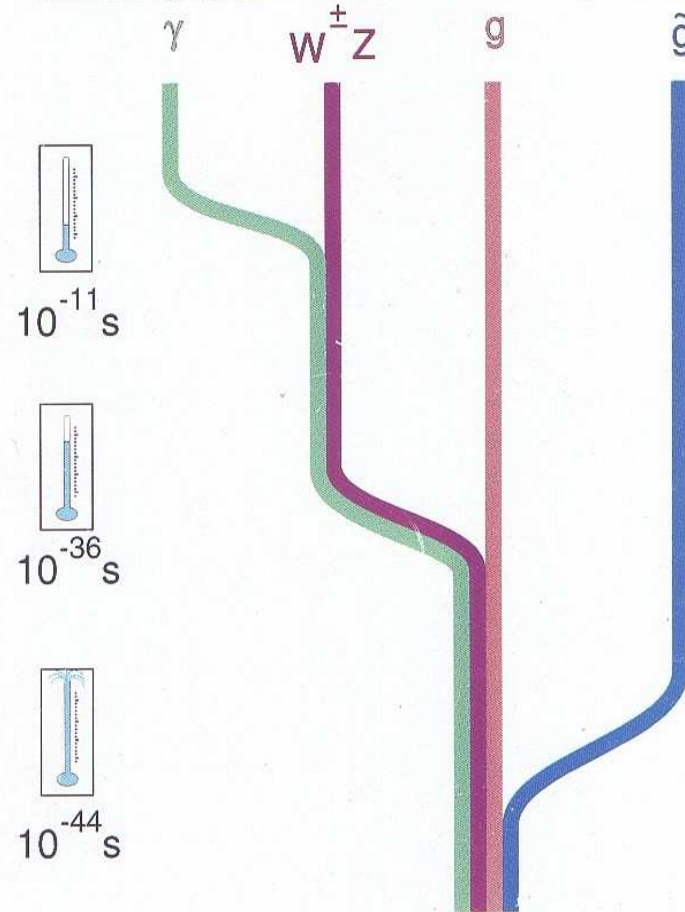
- sans masse
- faible masse
- grande masse

1 principe d'interaction



4 interactions distinctes

Interaction électromagnétique Interaction faible Interaction forte Interaction gravitationnelle



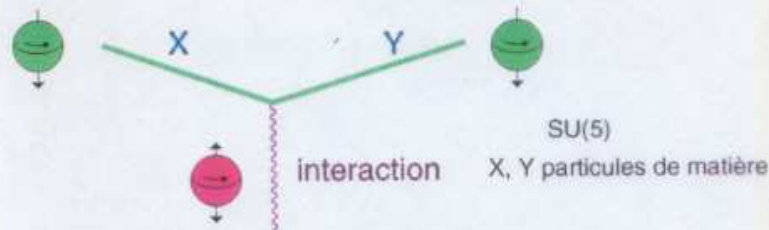
Unification des théories



Conséquences

Toutes les interactions ont la même amplitude

Toutes les particules d'une même famille se transforment en n'importe quelle autre



Représentation unifiée des interactions et des particules

RESTE 2 QUESTIONS

2 types de particules

Pourquoi toutes les particules ne sont pas sans masse

Matière

Interaction



(As de pic)

(Dame de cœur)

SPIN $\frac{1}{2}$

SPIN 1

$$\begin{cases} m_{\tilde{g}} = m_{\tilde{\gamma}} = m_{\tilde{Z}} = 0 \\ m_{W^+} = m_{W^-} = m_Z = 100 m_p \end{cases}$$

Les super cordes

Particule élémentaire : élément de matière

- pas de structure interne
- pas de forme
- pas de dimension décelable
- indivisible



Quel est l'élément de matière le plus simple qui ne soit pas un point ?



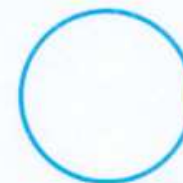
Le trait



La corde ou la super corde

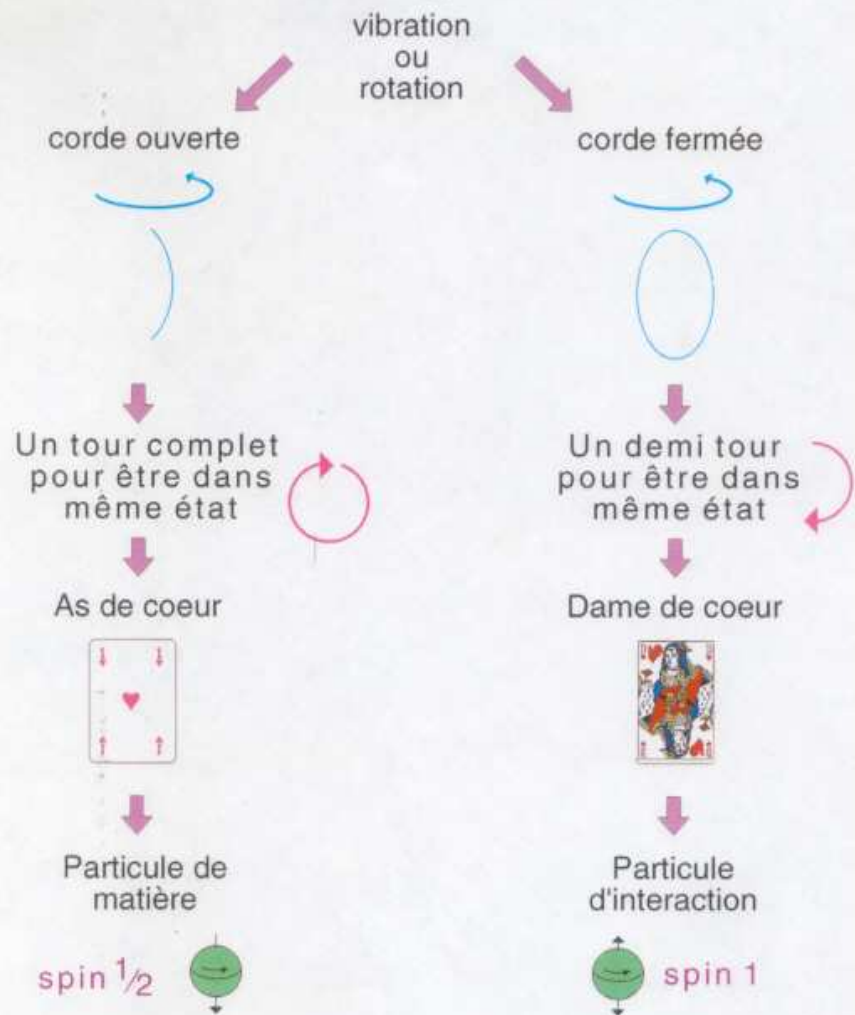


corde ouverte



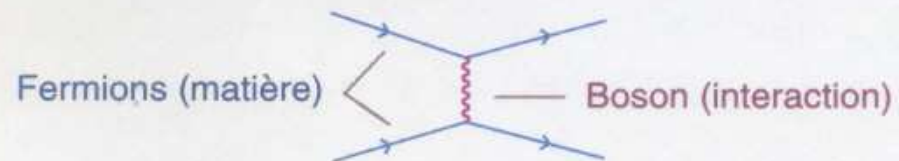
corde fermée

et le spin ?

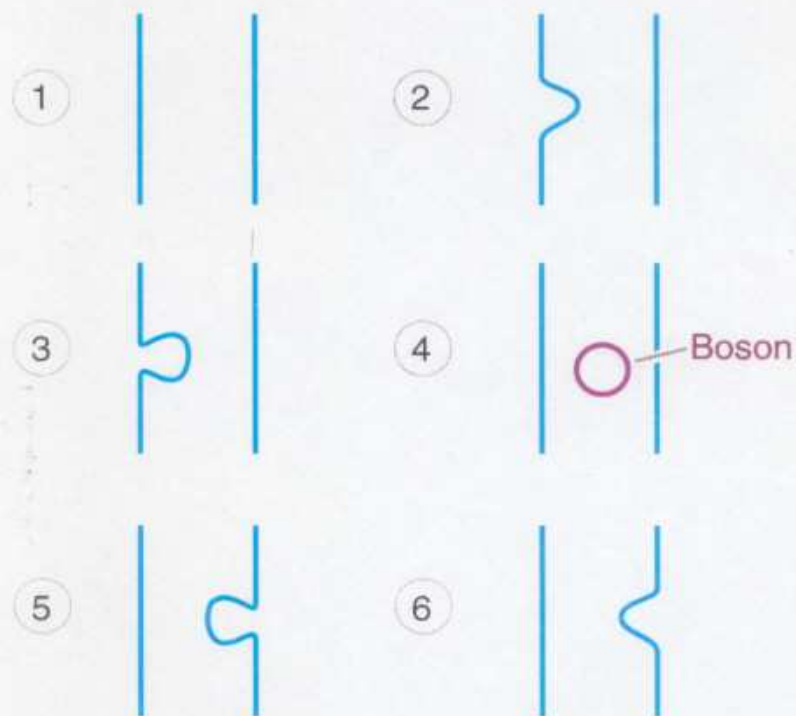


Comment fonctionne une interaction ?

Interaction élémentaire

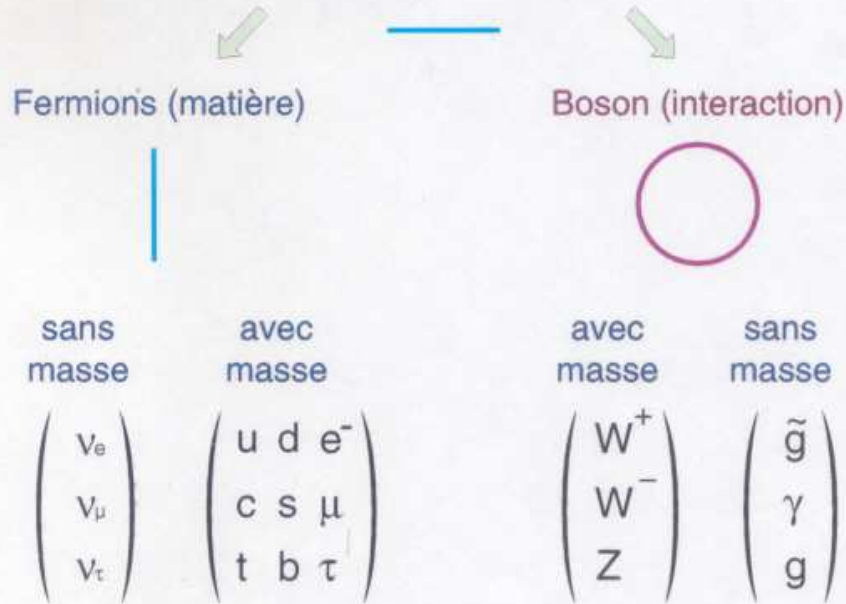


Cordes



Échange d'une corde fermée entre 2 cordes ouvertes

Des cordes



D'où vient la masse ?



Le Higgs

ou

Le vide est-il vraiment vide ?

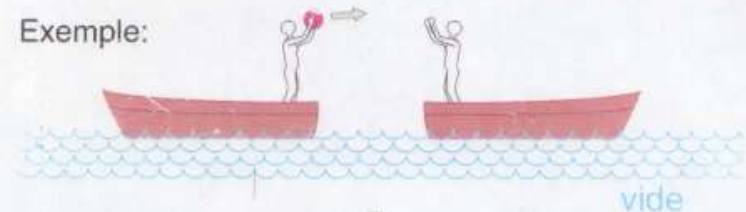
Qu'est-ce que le vide ?

Comment faire le vide ?

Enlever toutes les particules de matière de l'univers

→ Plus d'interaction

Exemple:



On enlève les bateaux



Au bout d'un certain temps, je ne sais plus où étaient les bateaux, mais il reste les vagues !

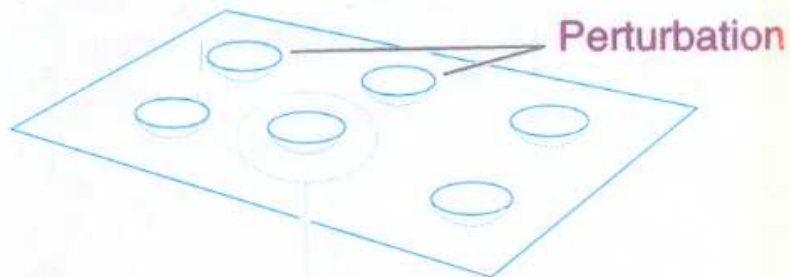
Perturbation du vide



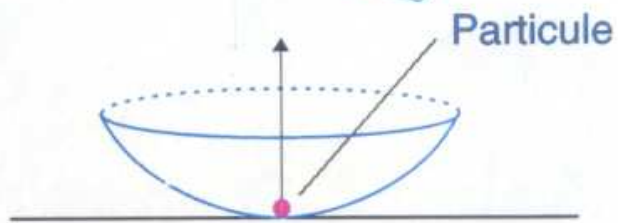
BIG - BANG



Représentation du vide



Perturbation



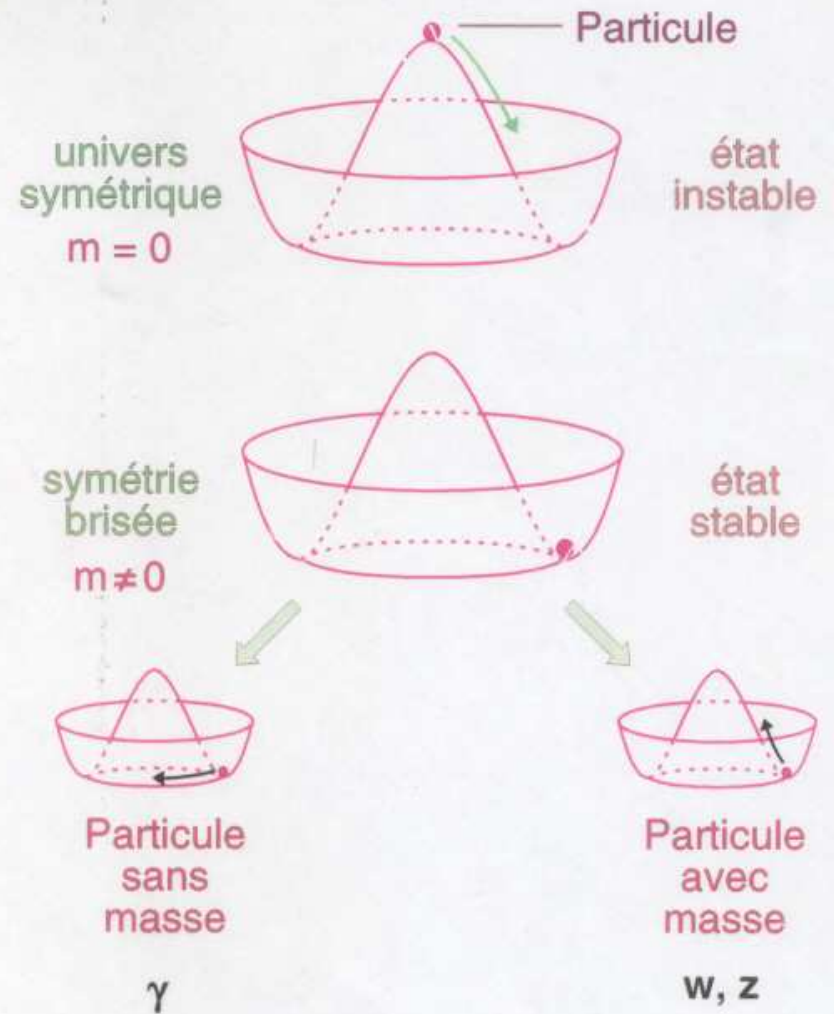
Particule

Symétrie parfaite



Les particules n'ont pas de masse !

Structure du vide plus complexe
à cause de 4 particules Higgs



CONCLUSION



Le vide a une structure

Toute particule est une corde



Matière

Interaction

4 Higgs

H^0

3 fantômes

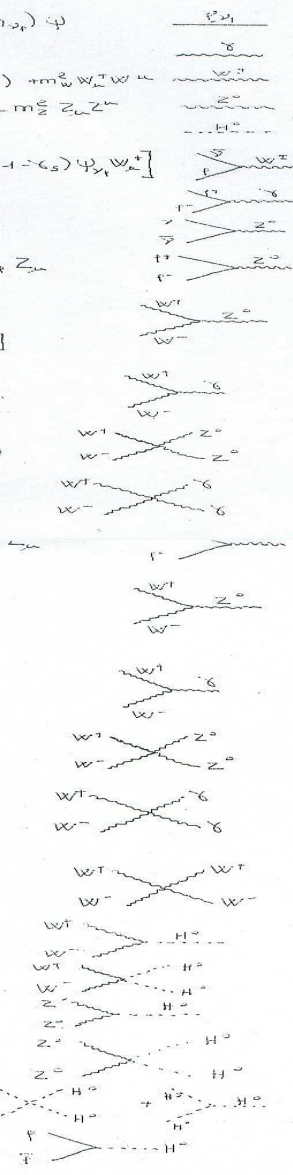
$\begin{pmatrix} u \\ d \\ e \\ \nu_e \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} c \\ s \\ \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} t \\ b \\ \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \tilde{g} \\ \gamma \\ g \\ W Z \end{pmatrix}$
--	--	--	---

Description unifiée de tout l'univers

Même conclusion mais en formule.

$$\begin{pmatrix} \psi_L \\ \psi_R \end{pmatrix}; e, \nu \quad \begin{cases} \gamma_L = -1 \\ \gamma_R = -2 \\ Q = \frac{1}{6} + \frac{1}{2} \end{cases} \quad H_u : \gamma = 1 \quad I \tilde{W} = -\gamma_2$$

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & \bar{\Psi}_F (i \not{\partial} \not{e}^{\mu\nu} \partial_\mu - m_F) \Psi_F + \bar{\Psi}_{F'} (i \not{\partial} \not{e}^{\mu\nu} \partial_\nu - m_{F'}) \Psi_{F'} \\ & - \frac{1}{4} (\partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu) (\partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu) \\ & - \frac{1}{2} (\partial_\mu W_\nu^\dagger - \partial_\nu W_\mu^\dagger) (\partial^\mu W^\nu - \partial^\nu W^\mu) + m_W^2 W_\mu^\dagger W^\mu \\ & - \frac{1}{4} (\partial_\mu Z_\nu - \partial_\nu Z_\mu) (\partial^\mu Z^\nu - \partial^\nu Z^\mu) + \frac{1}{2} m_Z^2 Z_\mu Z^\mu \\ & + \frac{1}{2} \partial_\mu H^\dagger \partial^\mu H - \frac{1}{2} m_H^2 H^2 \\ & - \frac{3}{8 \sin^2 \theta_W} [\bar{\Psi}_F \gamma^\mu (1 - \gamma_5) \Psi_{F'} W_\mu + \bar{\Psi}_{F'} \gamma^\mu (1 - \gamma_5) \Psi_F W_\mu^\dagger] \\ & + e \bar{\Psi}_F \gamma^\mu \Psi_{F'} A_\mu \\ & - \frac{3}{4 \cos \theta_W} \bar{\Psi}_F \gamma^\mu (1 - \gamma_5) \Psi_{F'} Z_\mu \\ & + \frac{3}{4 \cos \theta_W} \bar{\Psi}_F \gamma^\mu [(1 - 4 \sin^2 \theta_W) - \gamma_5] \Psi_{F'} Z_\mu \\ & + i g \cos \theta_W [(W_\mu^\dagger W_\nu - W_\nu^\dagger W_\mu) \partial^\mu Z^\nu \\ & \quad + (\partial_\mu W_\nu - \partial_\nu W_\mu) W^{\mu\nu} Z^\mu \\ & \quad - (\partial_\mu W_\nu^\dagger - \partial_\nu W_\mu^\dagger) W^{\mu\nu} Z^\mu] \\ & + i e [(W_\mu^\dagger W_\nu - W_\nu^\dagger W_\mu) \partial^\mu A^\nu \\ & \quad + (\partial_\mu W_\nu - \partial_\nu W_\mu) W^{\mu\nu} A^\mu \\ & \quad - (\partial_\mu W_\nu^\dagger - \partial_\nu W_\mu^\dagger) W^{\mu\nu} A^\mu] \\ & + g^2 \cos^2 \theta_W (W_\mu W_\nu^\dagger Z^\mu Z^\nu - W_\nu W^{\nu\dagger} Z_\mu Z^\mu) \\ & + e^2 (W_\mu W_\nu^\dagger A^\mu A^\nu - W_\nu W^{\nu\dagger} A_\mu A^\mu) \\ & + \frac{1}{4 \cos^2 \theta_W} \Psi_F^\dagger [(1 - 4 \sin^2 \theta_W) - \gamma_5] \Psi_{F'} \\ & + i g \cos \theta_W [(W_\mu^\dagger W_\nu - W_\nu^\dagger W_\mu) \partial^\mu Z^\nu \\ & \quad + (\partial_\mu W_\nu - \partial_\nu W_\mu) W^{\mu\nu} Z^\mu \\ & \quad - (\partial_\mu W_\nu^\dagger - \partial_\nu W_\mu^\dagger) W^{\mu\nu} Z^\mu] \\ & + i e [(W_\mu^\dagger W_\nu - W_\nu^\dagger W_\mu) \partial^\mu A^\nu \\ & \quad + (\partial_\mu W_\nu - \partial_\nu W_\mu) W^{\mu\nu} A^\mu \\ & \quad - (\partial_\mu W_\nu^\dagger - \partial_\nu W_\mu^\dagger) W^{\mu\nu} A^\mu] \\ & + g^2 \cos^2 \theta_W (W_\mu W_\nu^\dagger Z^\mu Z^\nu - W_\nu W^{\nu\dagger} Z_\mu Z^\mu) \\ & + e^2 (W_\mu W_\nu^\dagger A^\mu A^\nu - W_\nu W^{\nu\dagger} A_\mu A^\mu) \\ & + \frac{1}{2} g^2 W_\mu^\dagger W_\nu (W^{\mu\nu} + W^{\nu\mu} - W^{\mu\nu} - W^{\nu\mu}) \\ & + \frac{1}{2} g^2 W_\mu^\dagger W^\mu H_0 \\ & + \frac{1}{4} g^2 W_\mu^\dagger W^\mu H_0^2 \\ & + \frac{3}{4 \cos^2 \theta_W} Z_\mu Z^\mu H_0 \\ & + \frac{3}{8 \cos^2 \theta_W} Z_\mu Z^\mu H_0^2 \\ & - \frac{1}{4} \lambda H_0^4 - \lambda \sigma H_0^3 \\ & - \frac{1}{6} m_F \bar{\Psi}_F \Psi_F H_0 - \frac{1}{6} m_{F'} \bar{\Psi}_{F'} \Psi_{F'} H_0 \end{aligned}$$



$$m_Z^2 = \frac{m_W^2}{\cos^2 \theta_W} \quad g \sin \theta_W = e \quad m_W = \frac{1}{2} g v \quad g^2 = -\mu^2 / \lambda e$$

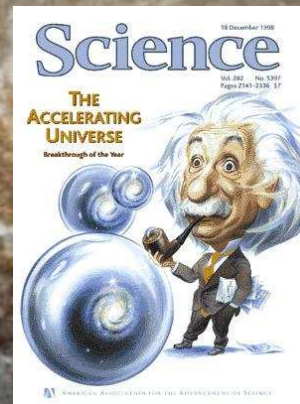
Cosmologie et SuperNovae

De l'énergie du vide

à l'énergie noire

La Cosmologie ??

1. Géométrie
2. Contenu

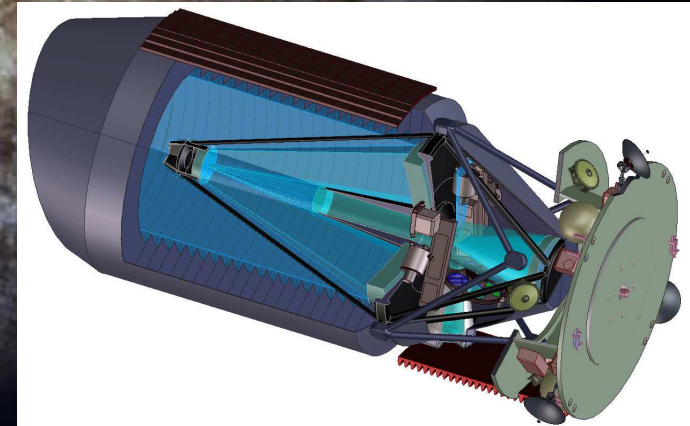
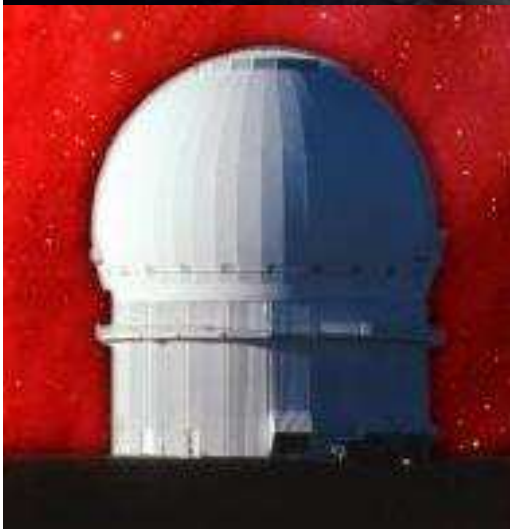


Utilisation des Supernovae

1. Mesure des distances
2. Mesure de l'expansion

Notre Univers

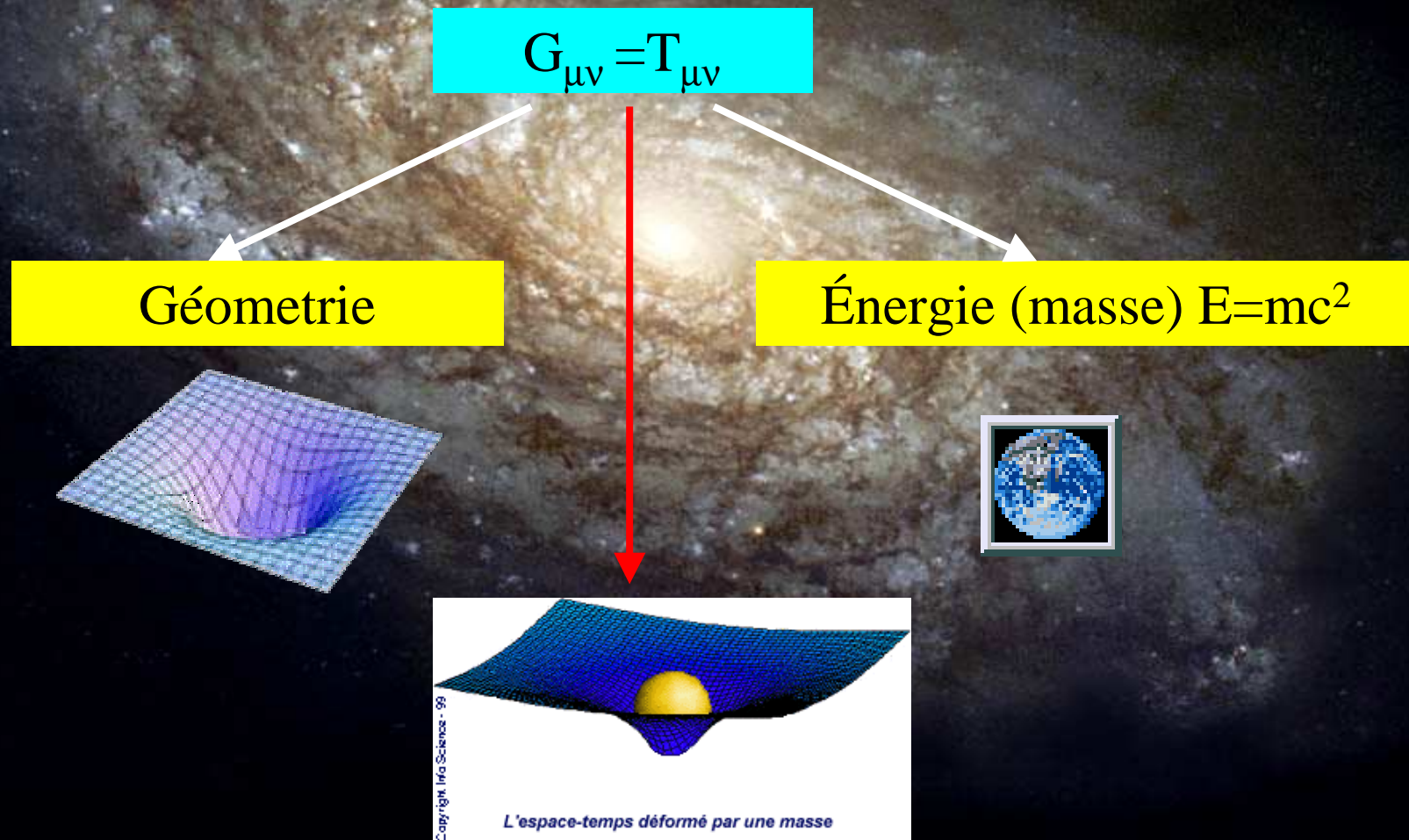
1. Son contenu
2. Son histoire
3. Son avenir



Introduction à la cosmologie

La cosmologie est l'étude de notre Univers dans sa globalité tant spatiale que temporelle.

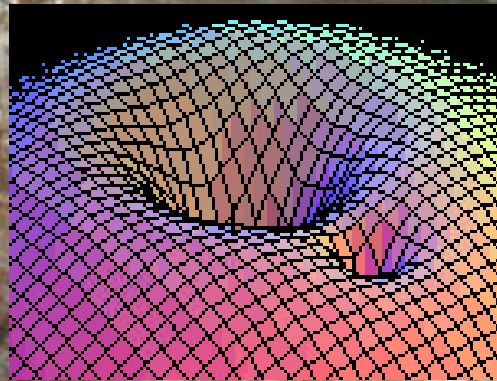
Le cadre conceptuel est la relativité générale d'Einstein



Quelle géométrie pour notre Univers ? (topologie)

Nous vivons dans un espace à 4 dimensions:

- 3 dimensions spatiales (x,y,z) \Leftrightarrow Surface d'une sphère
- 1 dimension temporelle (t) \Leftrightarrow rayon de la sphère



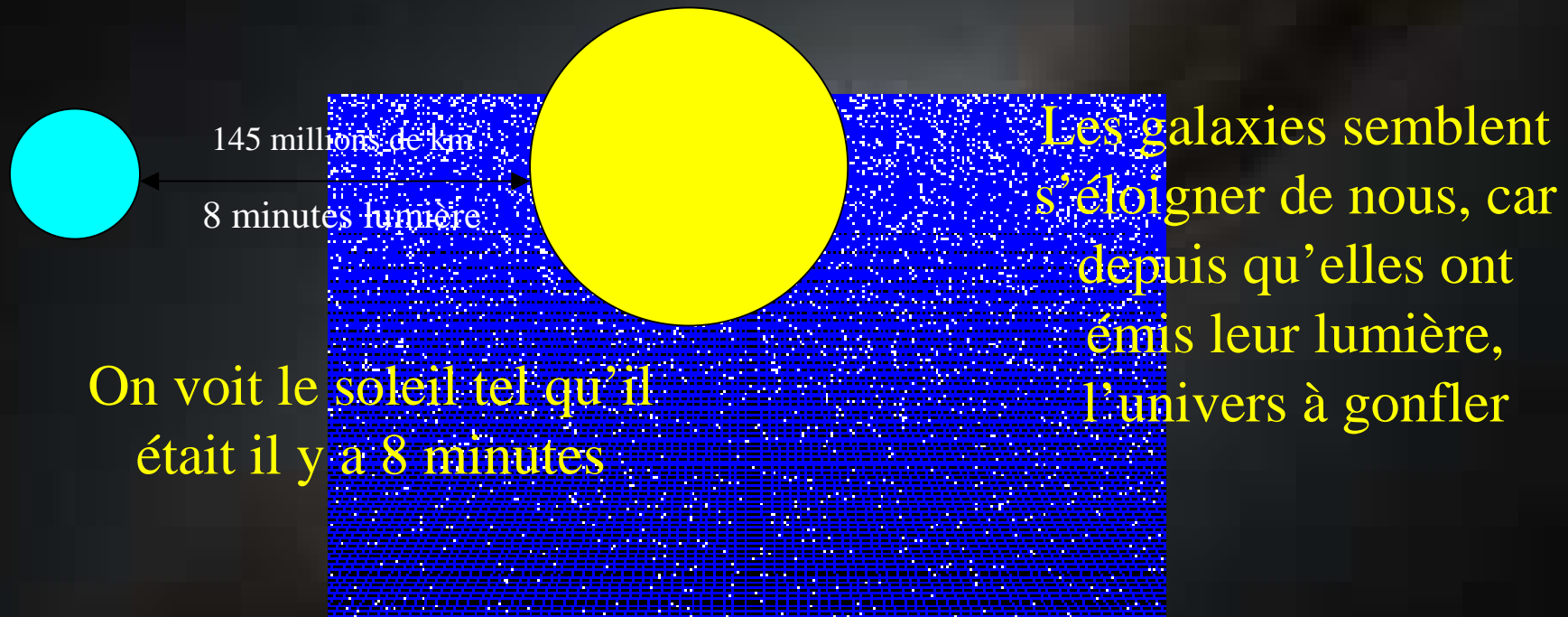
Trois courbures spatiales possibles



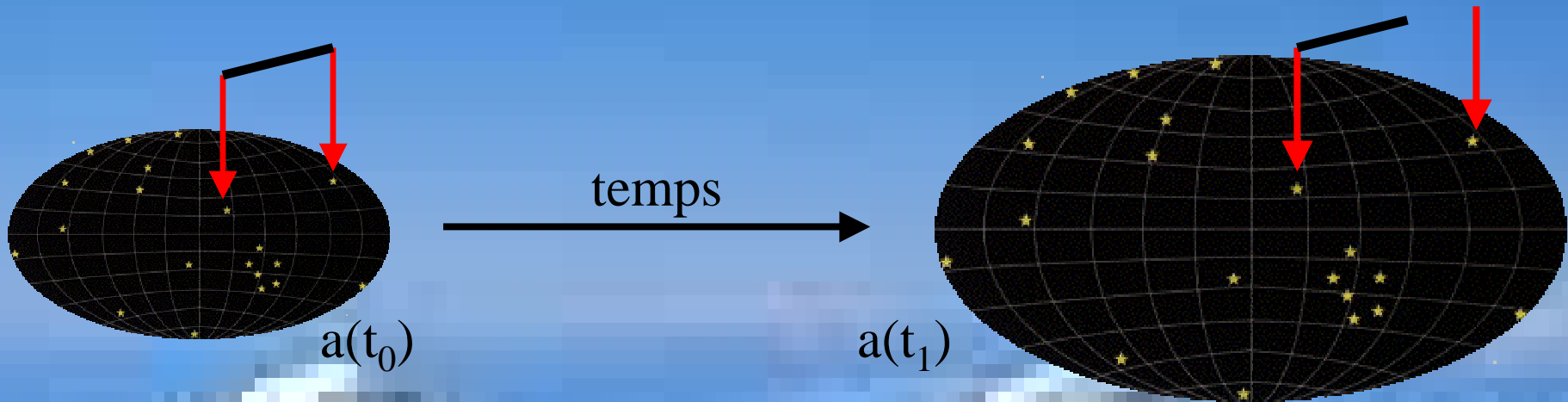
Évolution temporelle de notre Univers

Loi de Hubble : $v = H_0 d = zc$

- Plus une galaxie est loin de nous, plus elle s'éloigne rapidement de nous (vitesse de récession)
- Plus une galaxie est loin et plus elle est nous apparaît dans le passé. Vitesse finie de la lumière



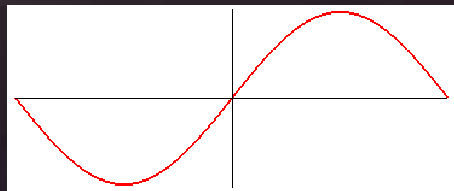
Notre Univers est en expansion ?



La distance entre 2 points immobiles augmente avec le temps :
=> Vitesse apparente des galaxies (loi de Hubble)
=> Toute les échelles spatio-temporelles ont été dilatées

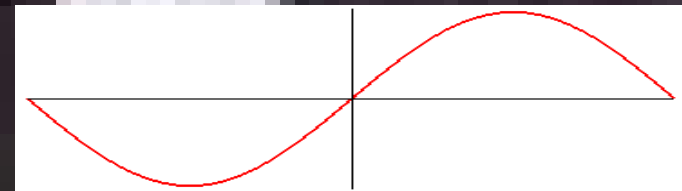
La lumière rougit

Longueur d'onde (bleue)



temps
Redshift(z)

Longueur d'onde (rouge)



Conséquence de l'expansion

Notre Univers serait né il y a environ 13 milliards d'années d'une explosion initiale :

Le BIG BANG ?

Aujourd'hui

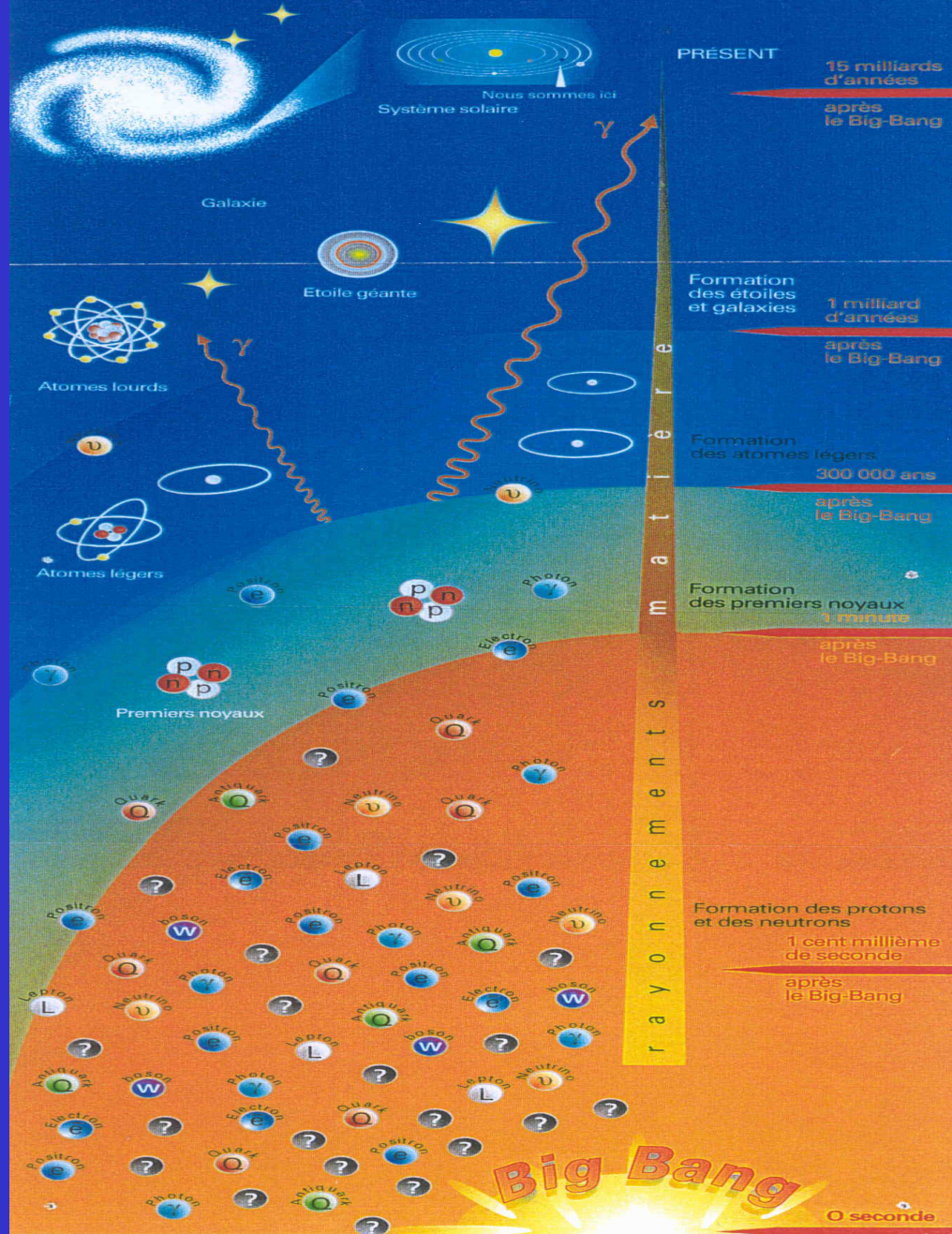
-t

Passé : 13 milliards
d'années

Un des buts de la cosmologie est de tenter de prédire l'évolution future de notre Univers :

- Expansion éternelle : Univers infini
- Expansion stoppée dans un temps infini : Univers fini
- Expansion inversée : fin de l'Univers, Big crunch

Histoire de l'Univers



$10^{10}/2,7^{\circ} \text{ K}$: Energie noire ??

$10^9 \text{ ans}/10^{\circ} \text{ K}$: Etoiles et galaxies

$300.000 \text{ ans}/4000^{\circ} \text{ K}$: 1^{er} atomes

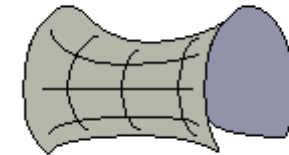
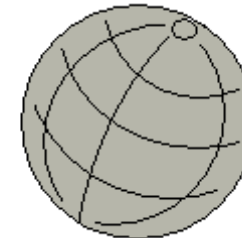
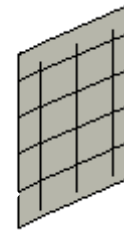
$1 \text{ mn}/10^9 \text{ K}$: premiers noyaux

$10^{-10} \text{ s}/10^{15} \text{ K}$: Energie du vide ??

$10^{-43} \text{ s}/10^{32} \text{ K}$: temps de Planck ??

Contenu en énergie de notre Univers

$$G_{\mu\nu} = T_{\mu\nu}$$



$$\Omega_T = 1$$

$$\Omega_T > 1$$

$$\Omega_T < 1$$

Densité critique => énergie totale critique/cm³ = ρ_c

Il existe a priori 2 formes d'énergie

La matière, $E=mc^2$

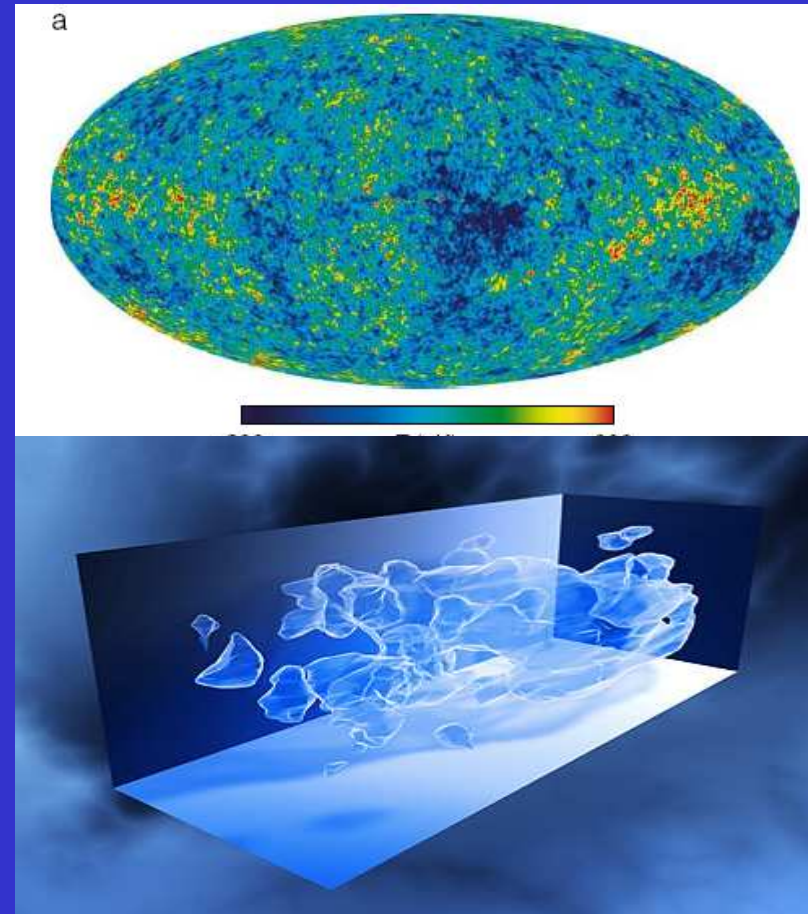
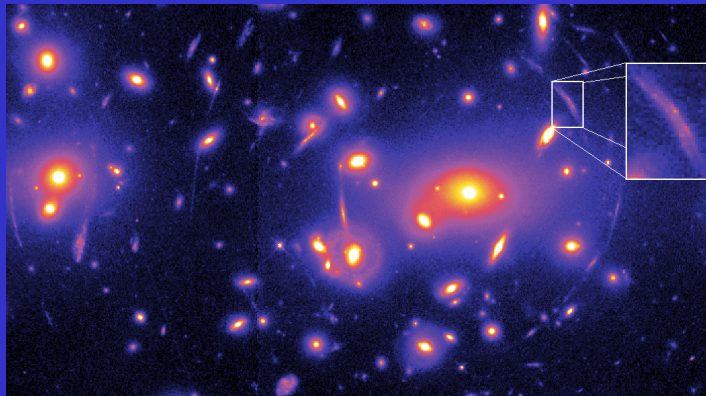
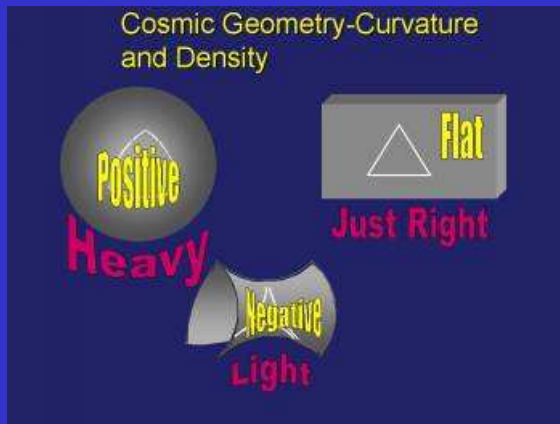
$$\Omega_m = \rho_m / \rho_c$$

La lumière, $E=hc/\lambda$

$$\Omega_r = \rho_r / \rho_c$$

Densité totale est : $\Omega_T = \Omega_m + \Omega_r + \Omega_?$

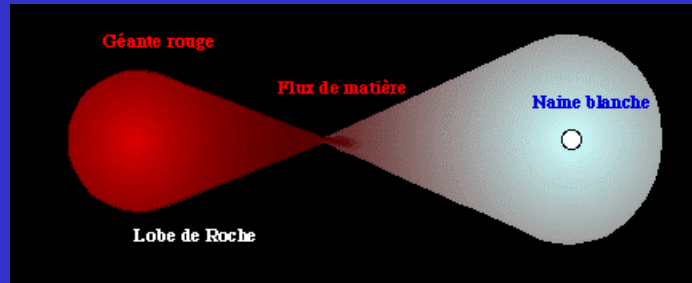
Méthodes en cosmologie



Utiliser les SuperNovae pour remonter dans le temps et mesurer directement l'expansion de notre Univers

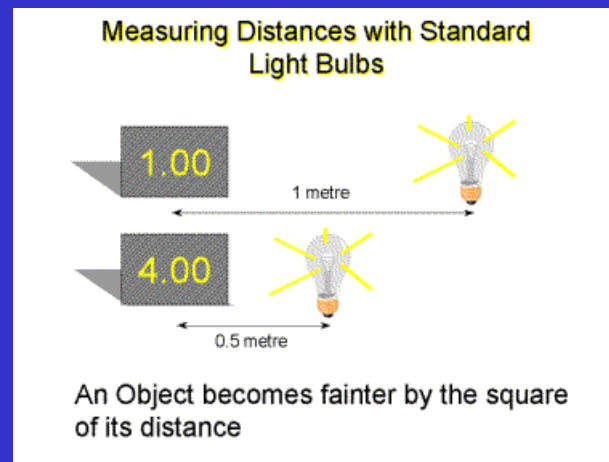
L'utilisation des Supernovae : principe

Il existe plusieurs types de Supernovae. Le type Ia serait une chandelle standard...



Lorsque la masse totale de la naine blanche est 1,4 masse solaire => explosion => toujours la même quantité de lumière émise

Plus un objet est loin, moins il est lumineux.



La mesure de la luminosité est donc une mesure directe de la distance

À condition que l'ampoule ait toujours la même puissance !!

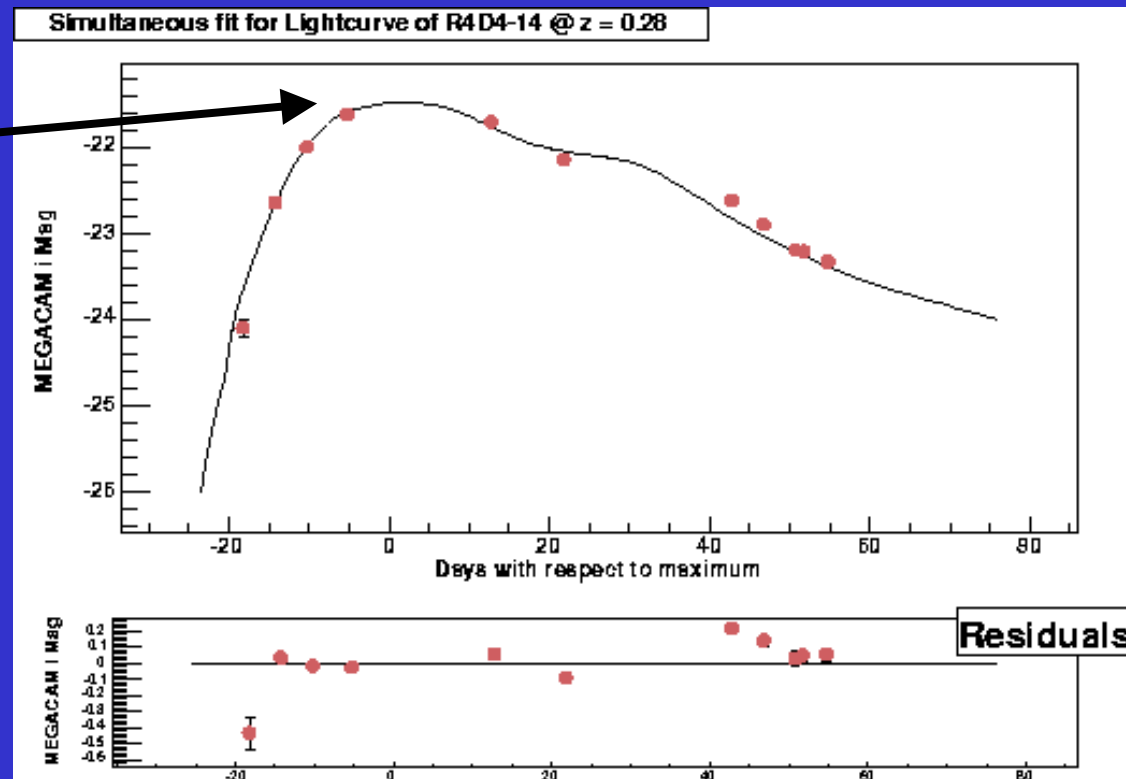
Mesure de la luminosité

L'explosion d'une SuperNovae dure plusieurs mois.

Avec des télescopes puissants on suit l'évolution de sa luminosité dans le temps.

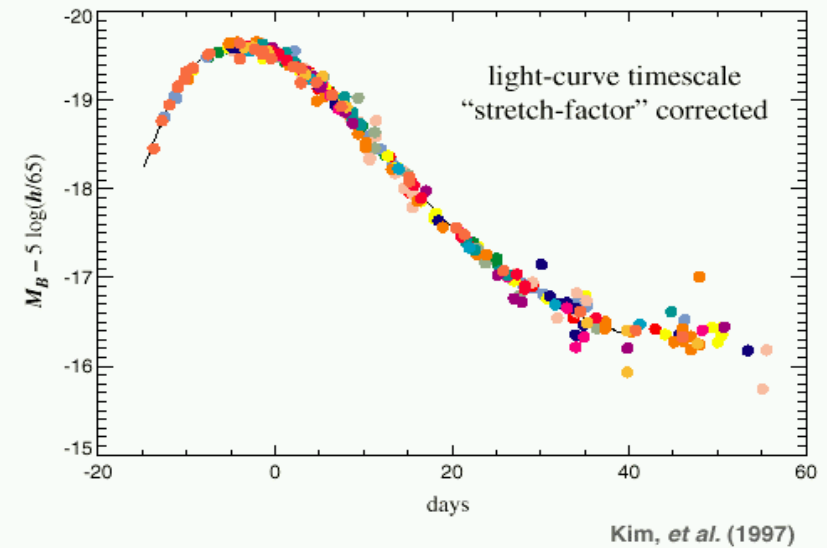
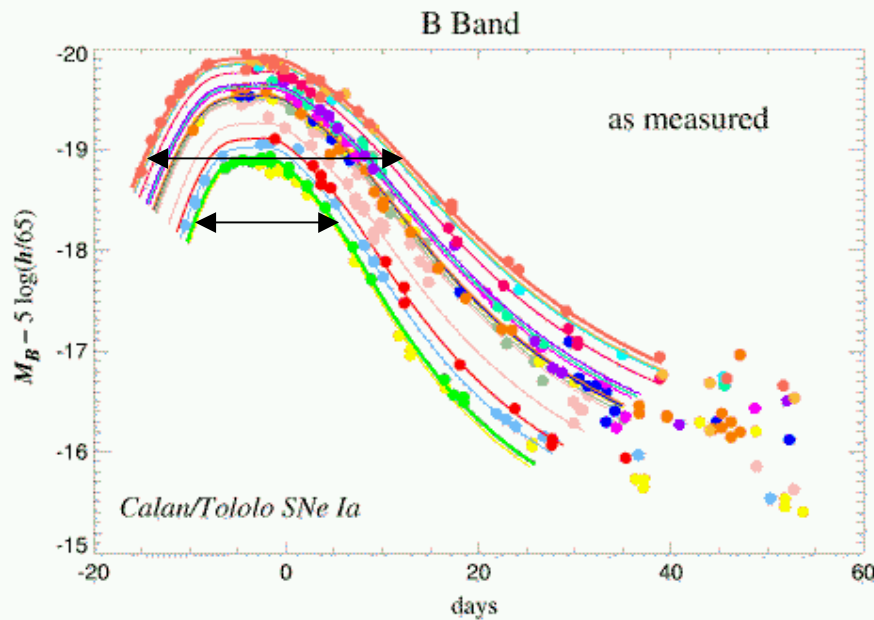
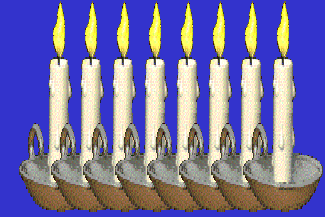
Le maximum de luminosité est la référence standard

Mais les SN Ia ne sont pas totalement des chandelles standard





Standardisation des SN Ia



Avant correction, les maximums ne sont pas identiques

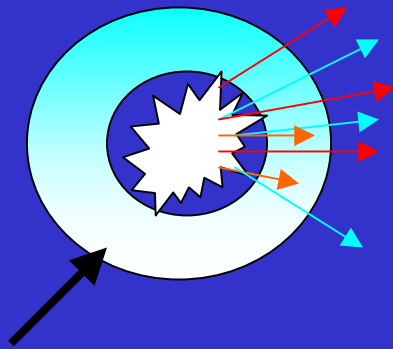
Si on corrige avec la largeur, on standardise les SN

Il est donc indispensable de suivre les SN sur une longue période

Identification des SN Ia

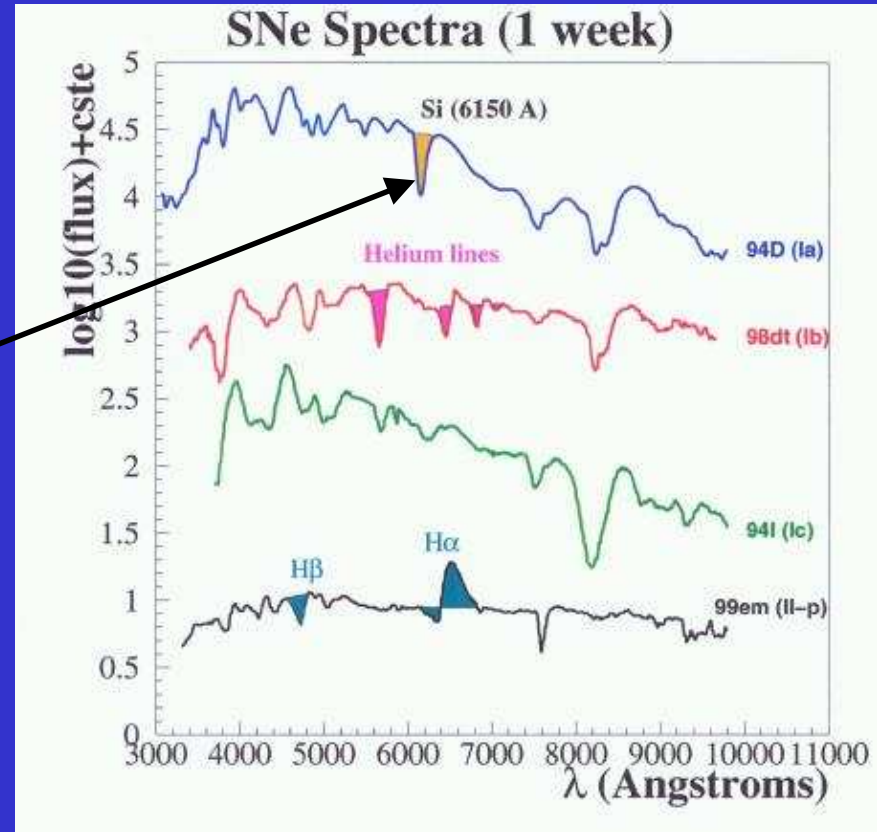
Pour utiliser toujours les mêmes objets, il est nécessaire de les identifier correctement

La lumière émise par une SuperNovae est une signature



Enveloppe de silicium

La couleur orange est absorbée

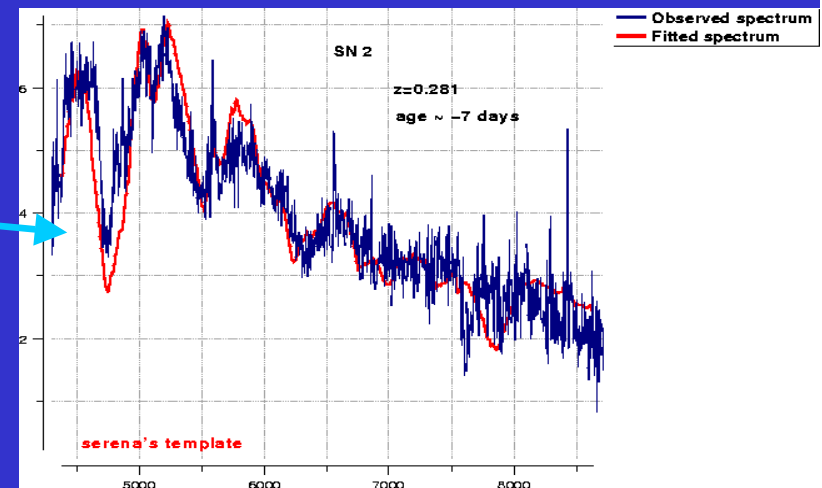
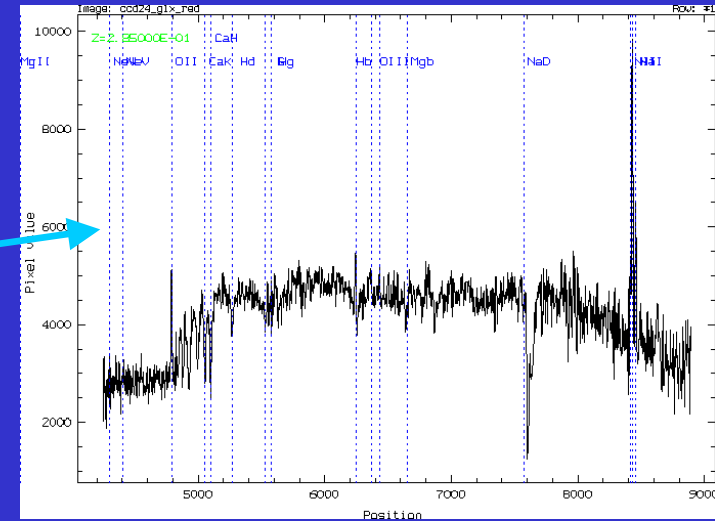
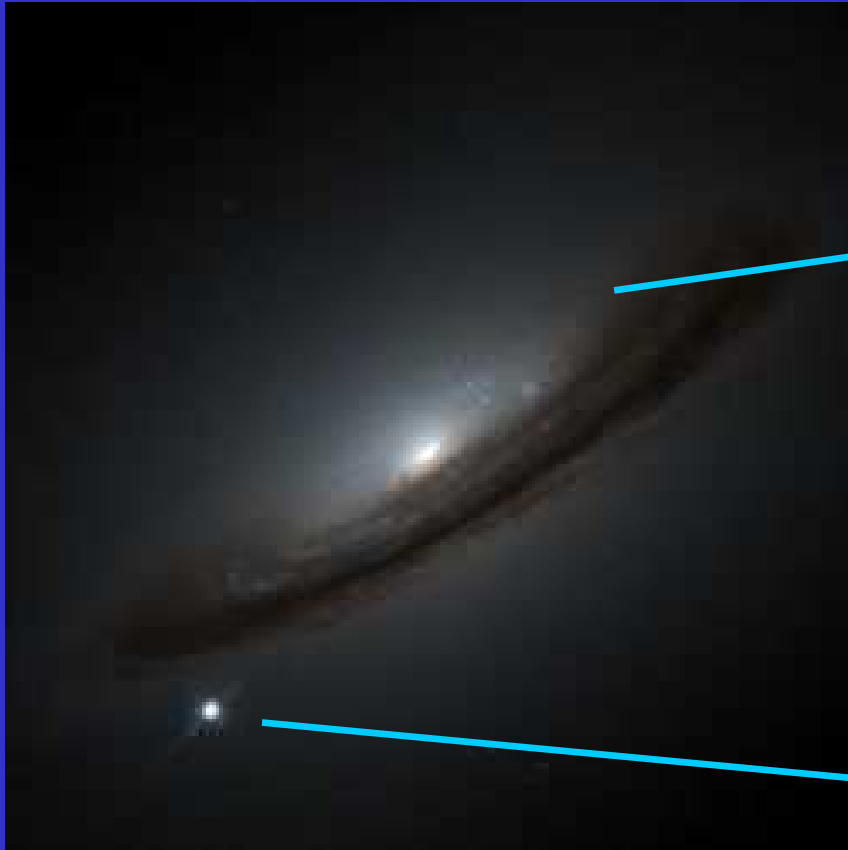


Bleue

Rouge

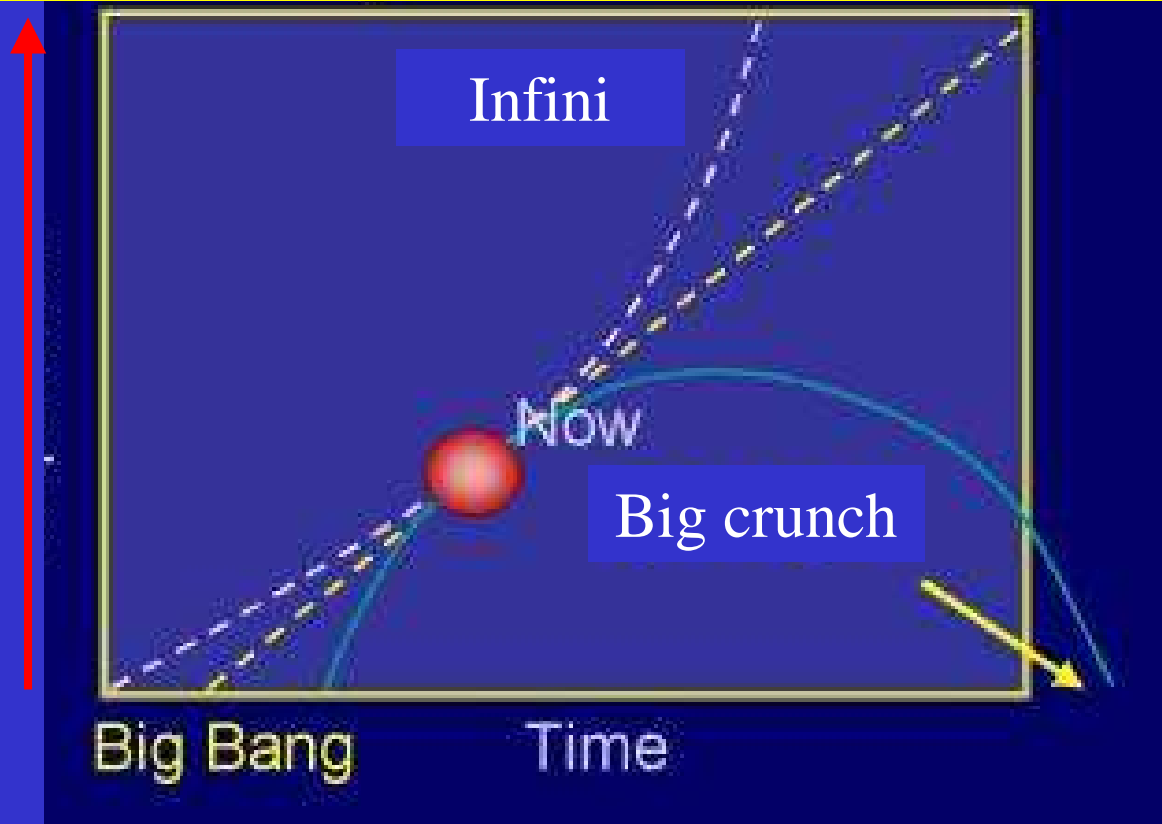
Mesure de l'expansion, du temps ou de la distance (z) Décalage vers le rouge (redshift)

Plus précise avec la galaxie hôte



Le principe de la mesure :
voir dans le passé pour prédire l'avenir

Luminosité, distance lumineuse



Temps, expansion, redshift(z)

Les observations

Hawai: un télescope de 4m pour
découvrir et suivre les SN

Un télescope plus grand (8m,
VLT au Chili) pour mesurer
la couleur des SN et de la
galaxie



La découverte d'une SN

Comparer deux images prises à deux époques différentes

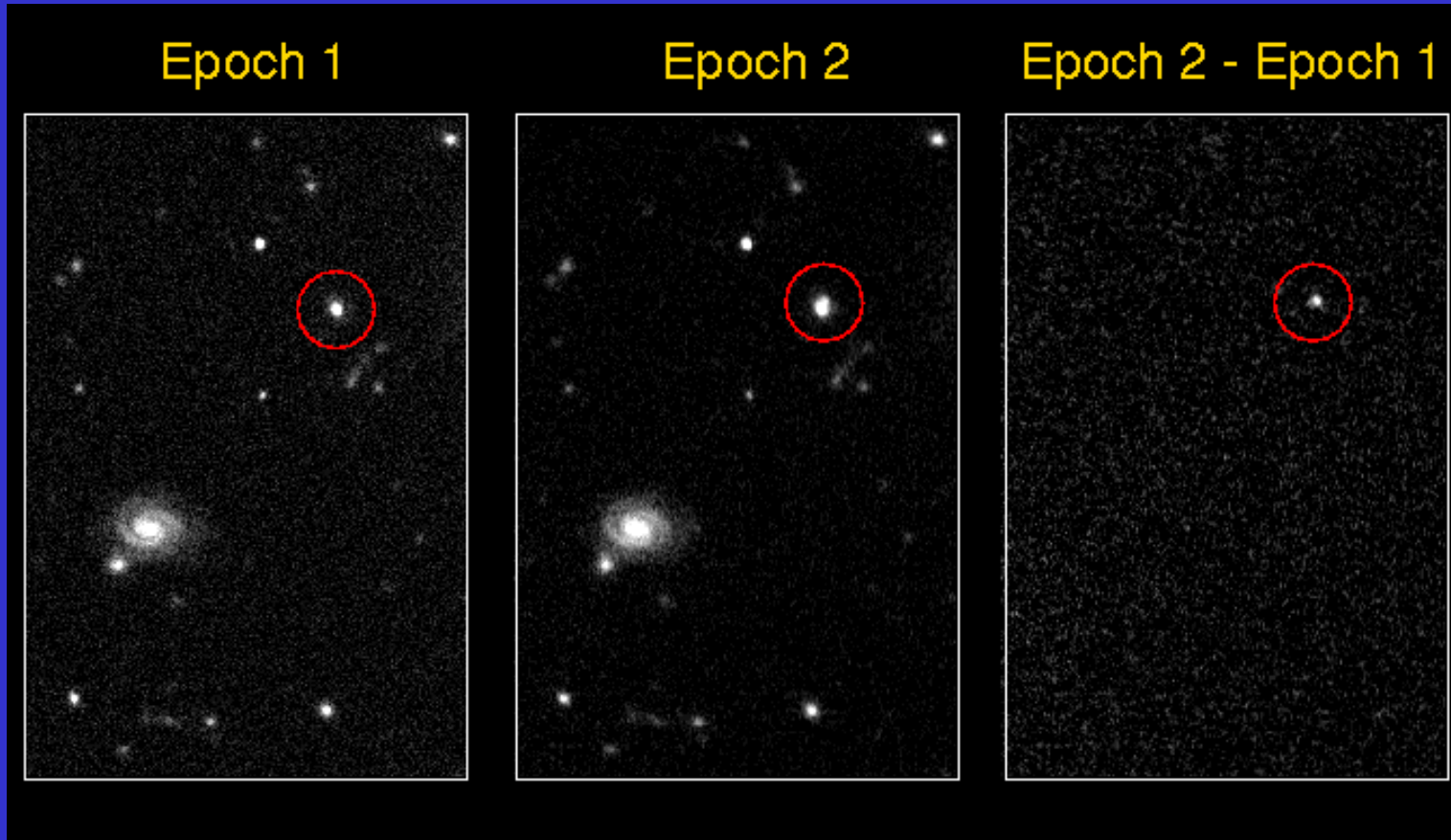


Image du HST →



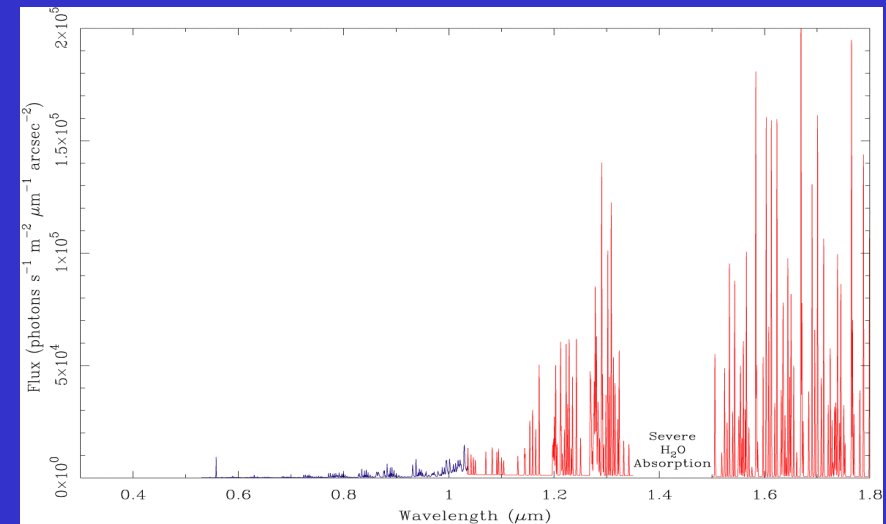
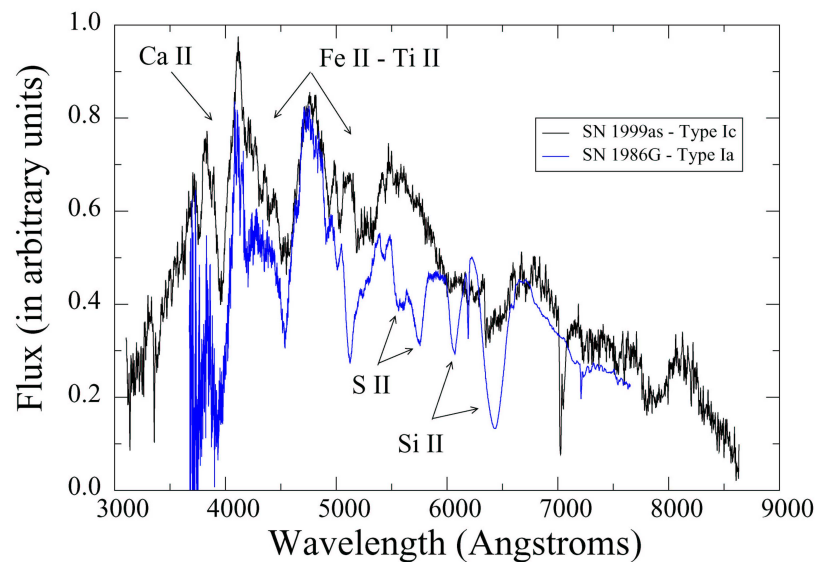
Soustraction informatique :

Epoch2-Epoch1

Une fois la SN découverte on attend son maximum de luminosité pour l'identifier

Il est donc nécessaire de la découvrir le plus tôt possible

=>Suivi régulier

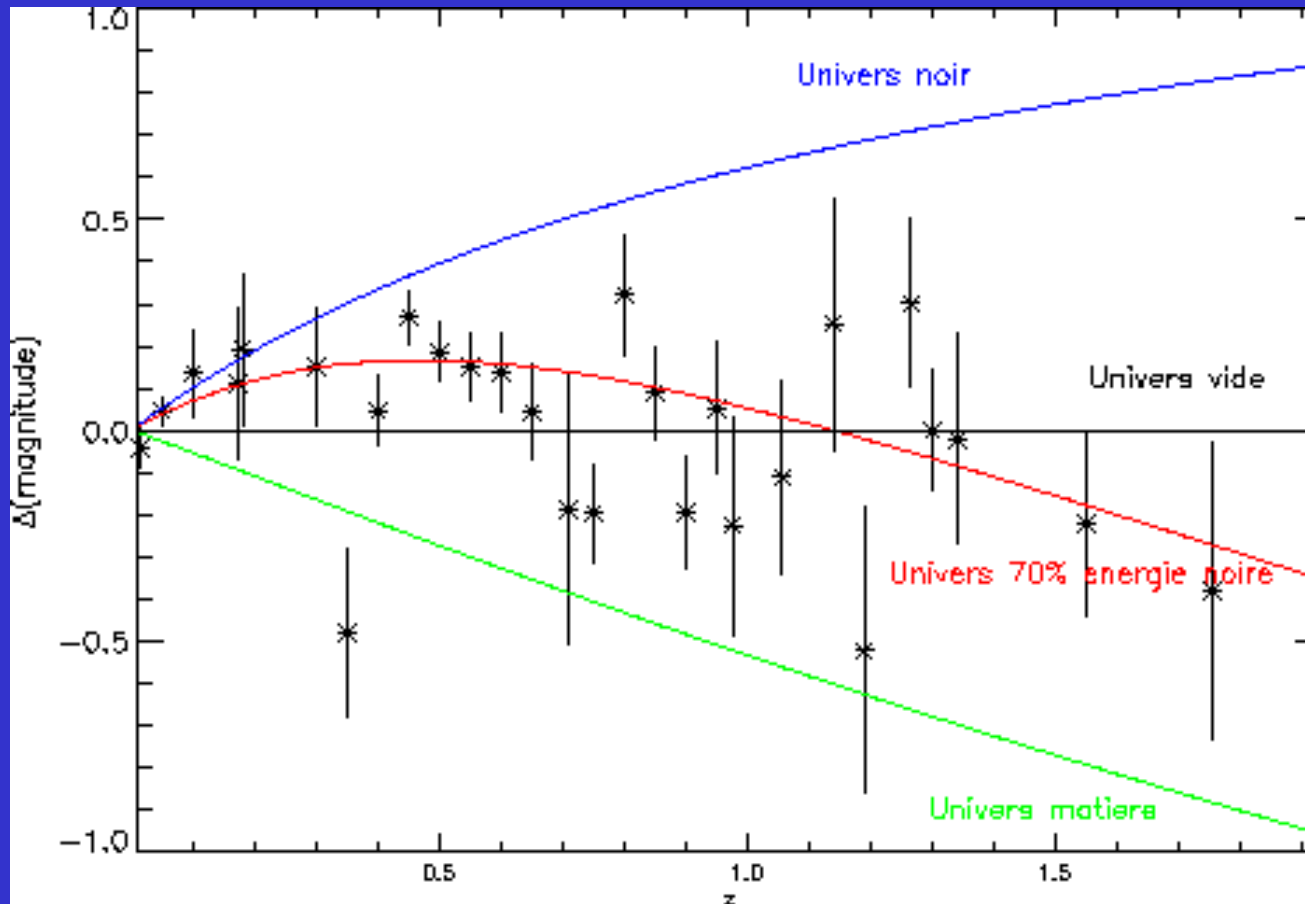


Difficulté au sol :
atmosphère, lune, mauvais temps....

Construction du diagramme de Hubble

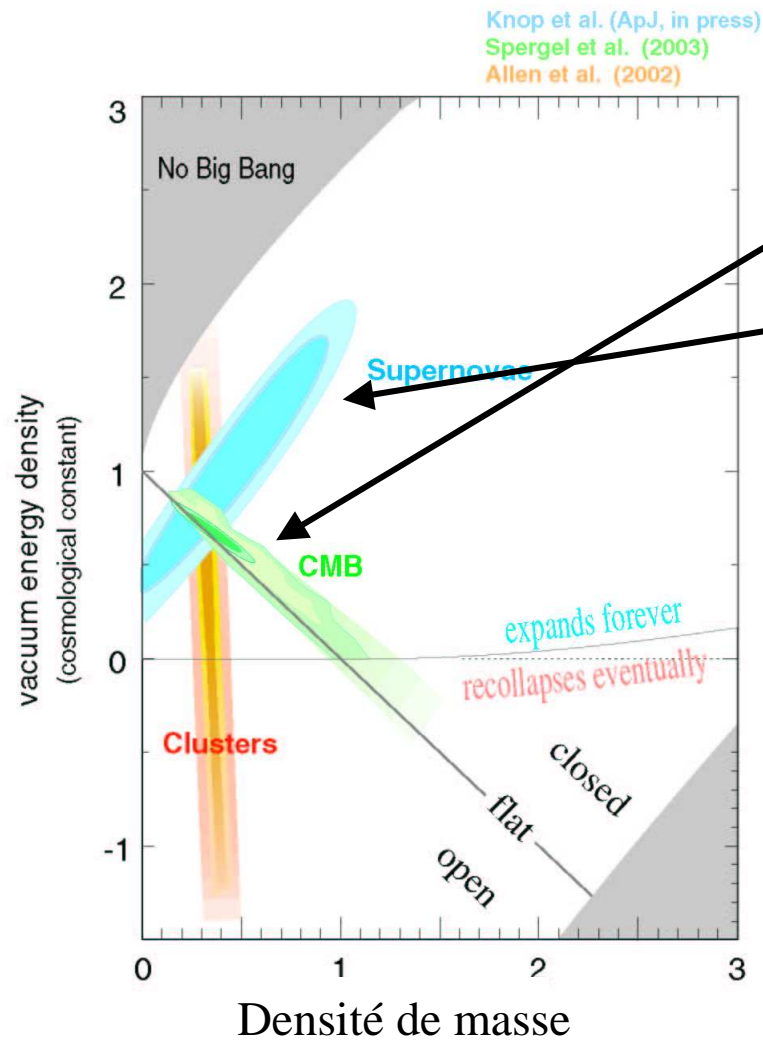
Chaque point représente une SN

Distance lumineuse



Redshift ou expansion

Un résultat inattendu



Knop et al. (ApJ, in press)
Spergel et al. (2003)
Allen et al. (2002)

1999: SCP/ High z

2002: clusters

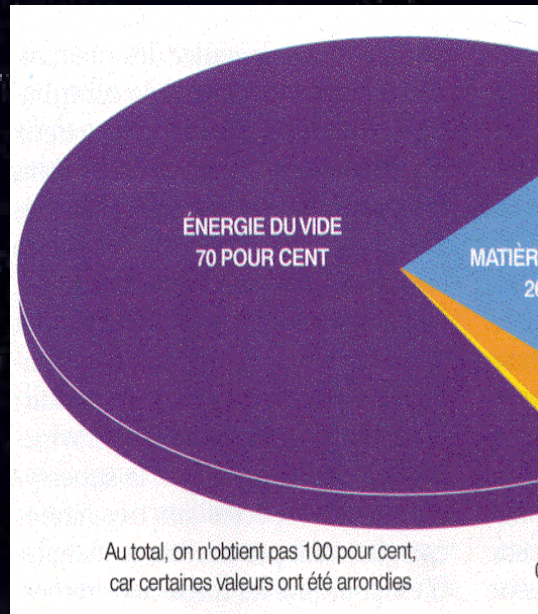
2003: WMAP

2003: SCP+ 11 SNIa HST

Qu'elle est cette nouvelle forme d'énergie ?

Les accélérateurs

Le LHC au CERN (Geneve)



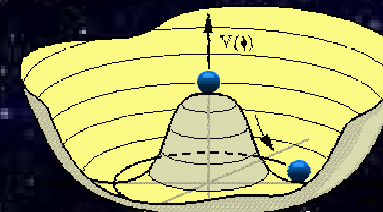
14 TeV



l'énergie du vide

$$G_{\mu\nu} = T_{\mu\nu}$$

La constante cosmologique :
La structure de l'espace-temps
résiste à l'effondrement
gravitationnel



Perspectives futures

Pour caractériser cette nouvelle forme d'énergie, il est nécessaire d'avoir des mesures plus précises : plus de SN, mieux mesurées, et plus lointaines. (CPPM,LAM)

- Recherche de SN au sol avec un télescope de 4m (HAWAI). Environ 700 SN, jusqu'à des distances d'environ 6 milliards d'années dans le passé.
- Recherche dans l'espace avec un satellite franco-américain de 2m de diamètre (SNAP) pouvant observer très précisément 2000 SN jusqu'à des distances d'environ 10 milliards d'années dans le passé. Prévu pour 2014.

CCD_24

22 14 45.806 -17 44 22.95

2003-06-05

0

2003-06-05

2003-06-06

2003-06-05

2003-06-05

2003-06-22

2003-06-24

2003-06-26

2003-06-28

2003-06-30

2003-07-04

S/N = 6.2
INC = 12.8%
i = 22.91 (0.17)
i HOST = 18.23
DHOST = 0.99''
X = 262.05
Y = 4527.58

S/N = 58.1
INC = 79.6%
r = 22.26 (0.02)
r HOST = 18.49
DHOST = 0.86''
X = 312.35
Y = 4501.02

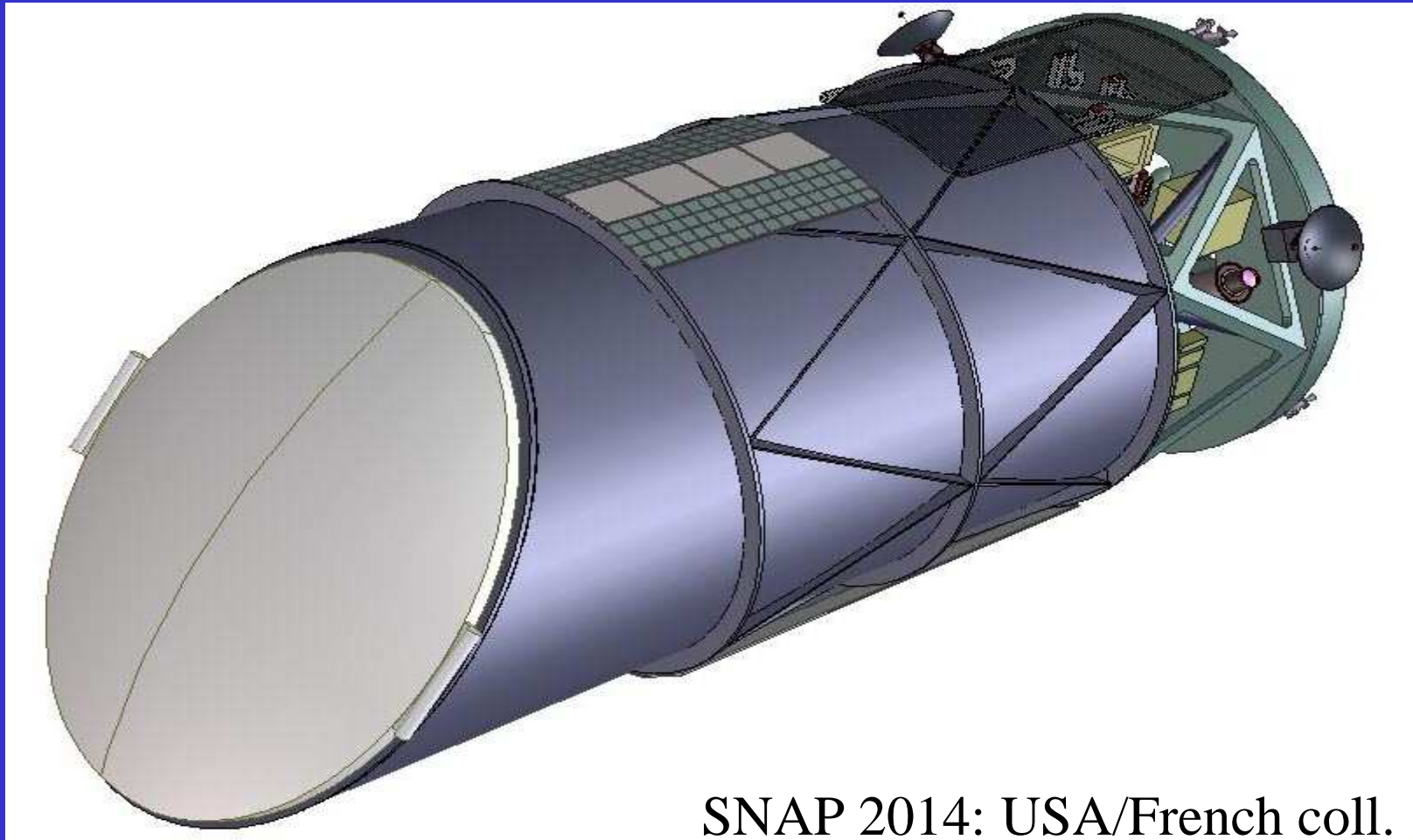
S/N = 25.0
INC = 60.0%
i = 22.17 (0.04)
i HOST = 18.22
DHOST = 0.91''
X = 252.36
Y = 4539.50

S/N = 101.3
INC = 101.5%
r = 21.52 (0.01)
r HOST = 18.48
DHOST = 0.83''
X = 263.15
Y = 4518.07

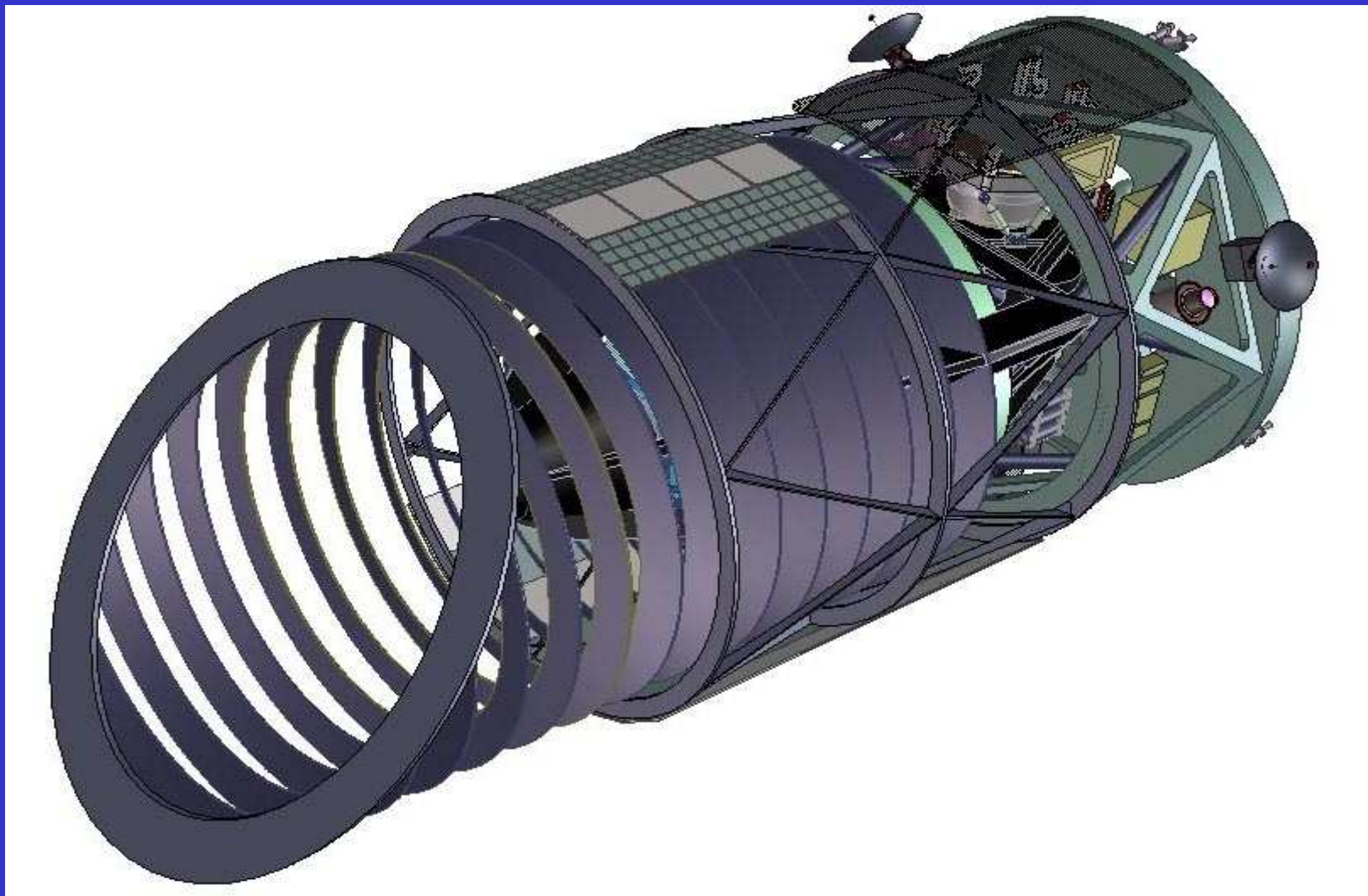
S/N = 45.2
INC = 99.1%
i = 21.64 (0.02)
i HOST = 18.22
DHOST = 0.92''
X = 275.50
Y = 4521.53

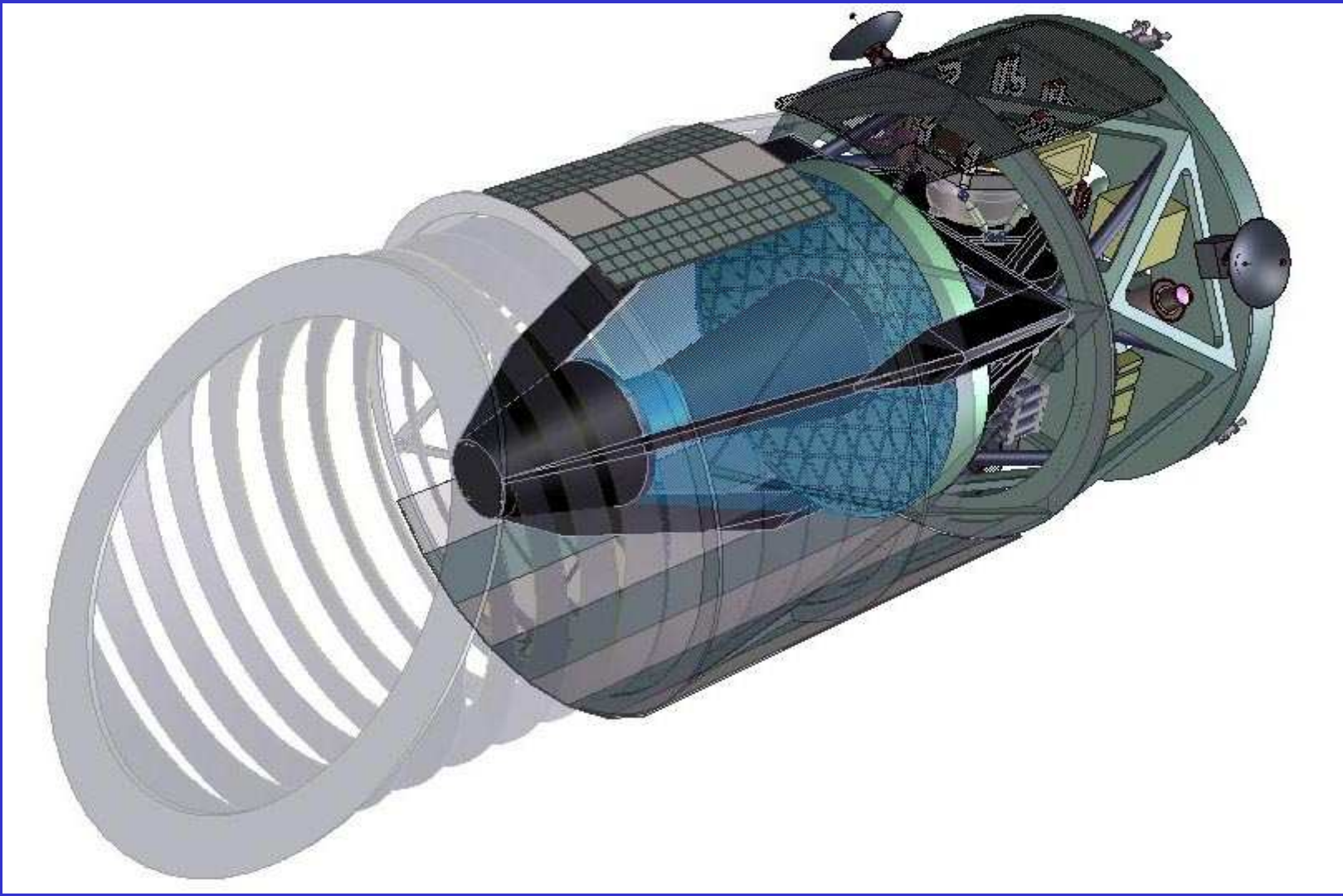
S/N = 44.0
INC = 113.1%
i = 21.36 (0.02)
i HOST = 18.22
DHOST = 0.91''
X = 253.56
Y = 4533.65

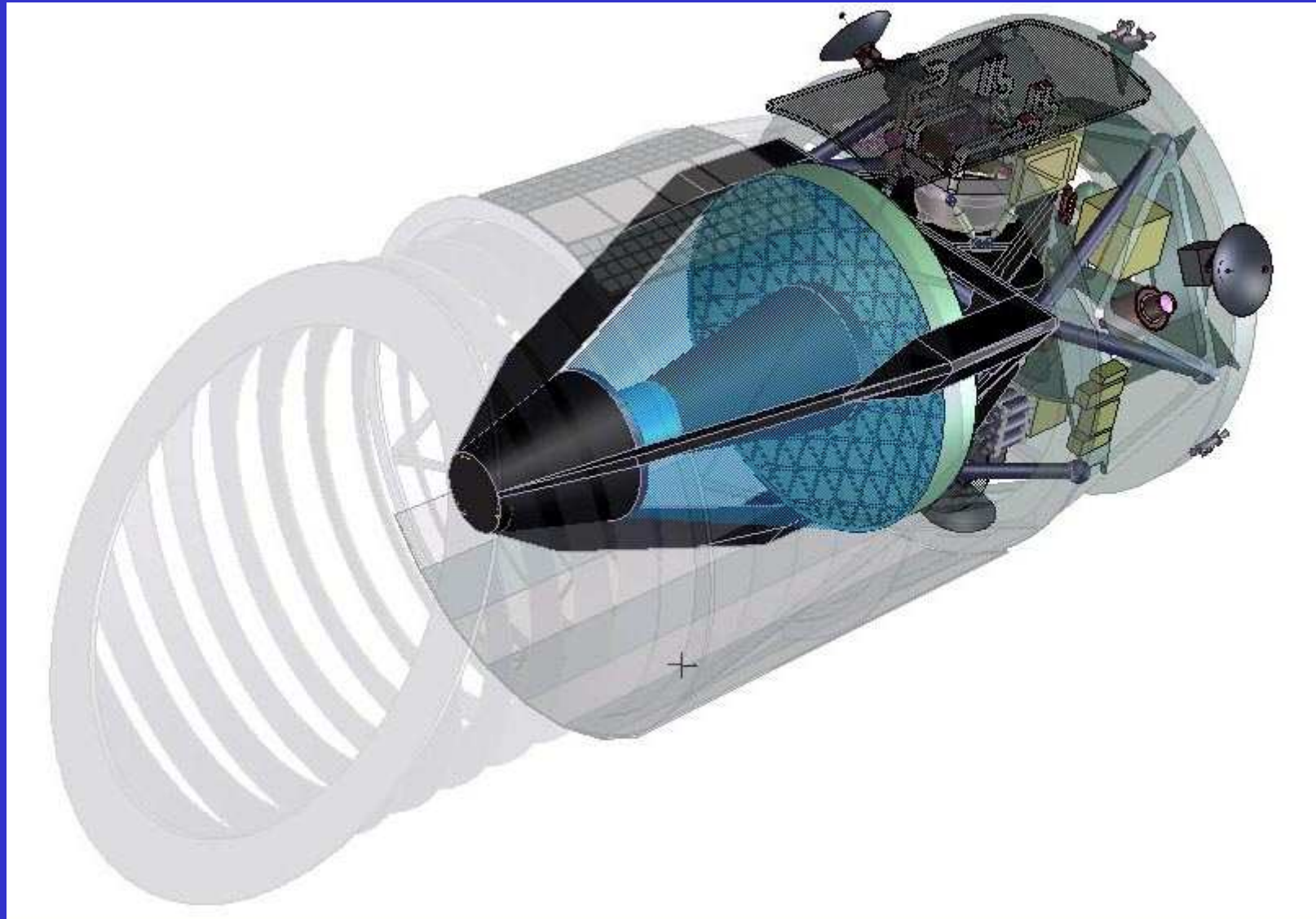
Avec quel instrument ?

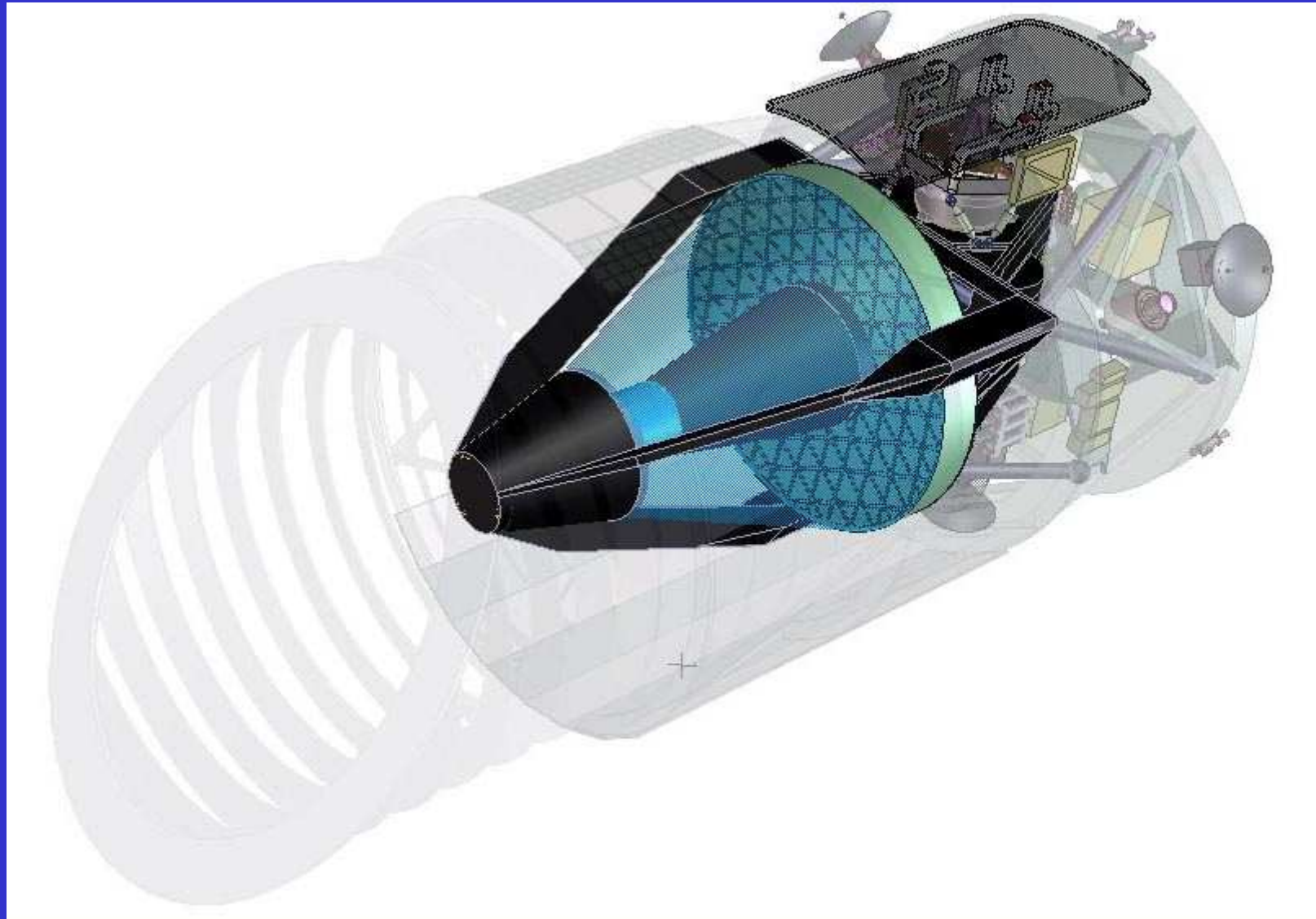


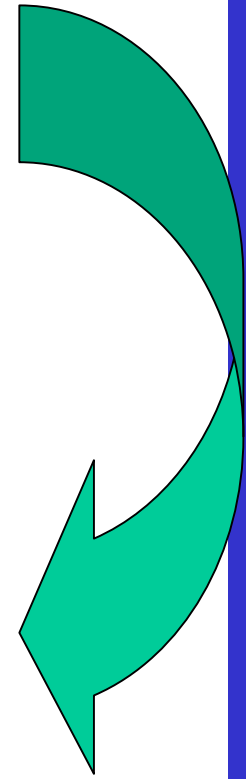
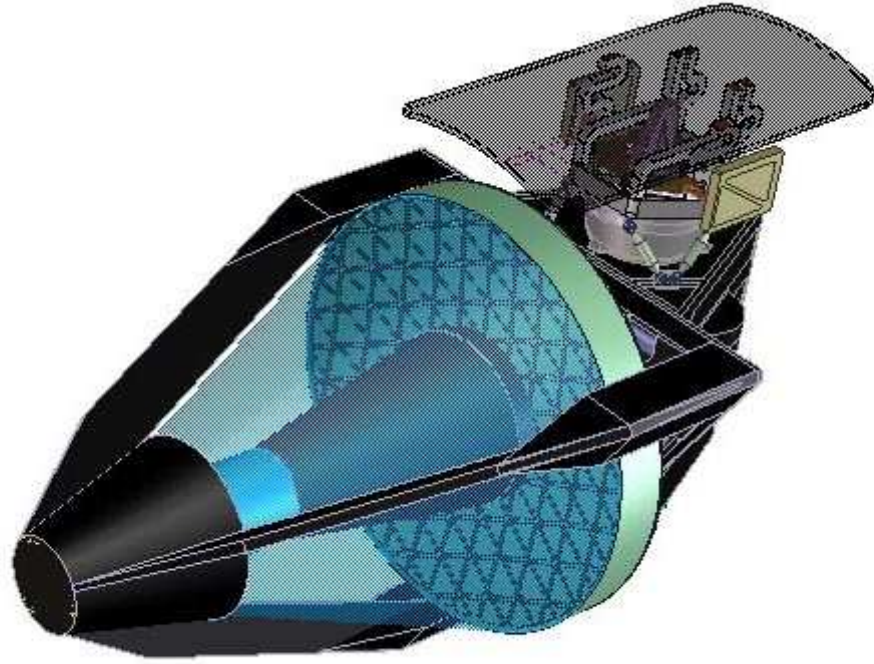
SNAP 2014: USA/French coll.

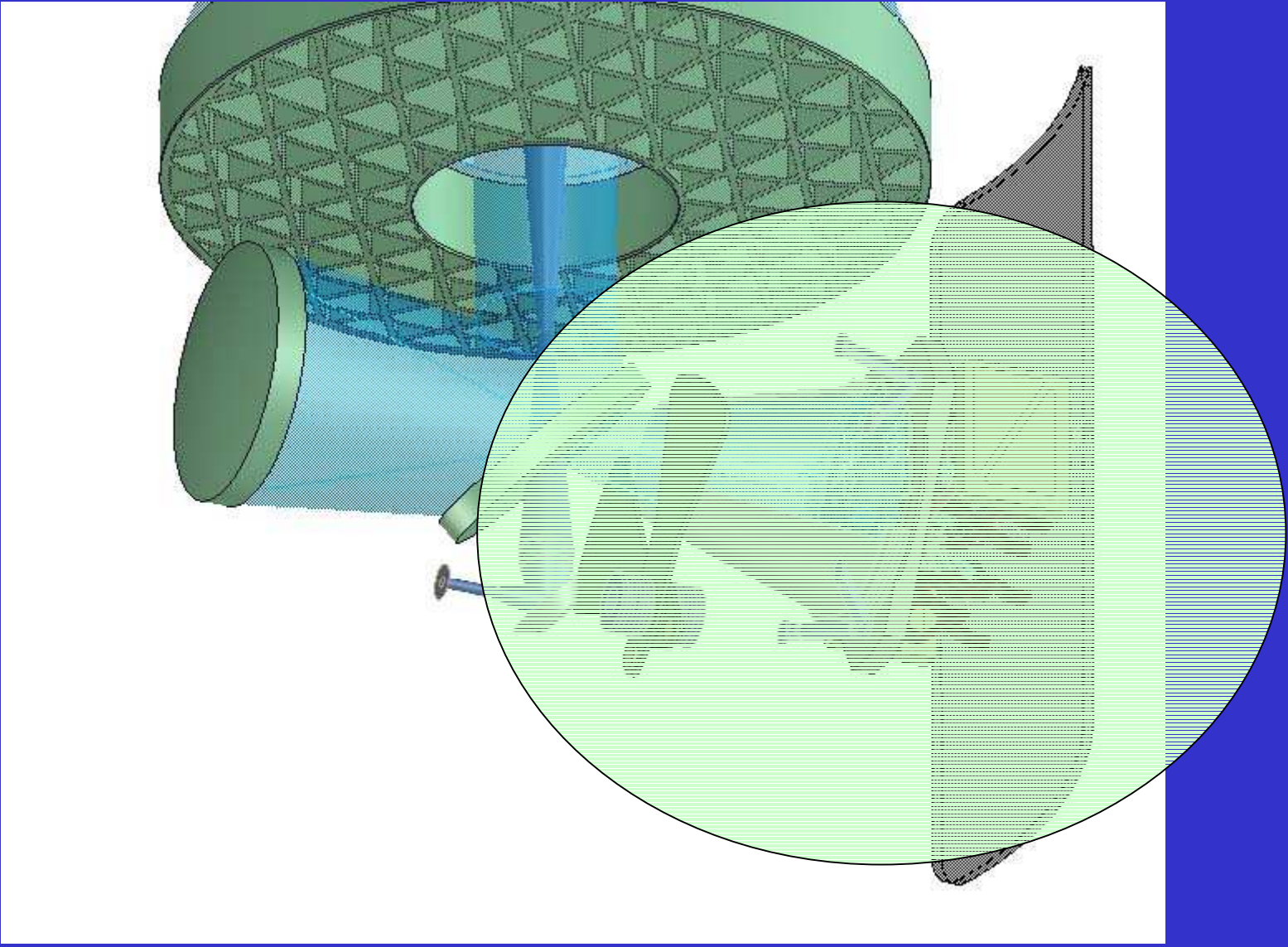


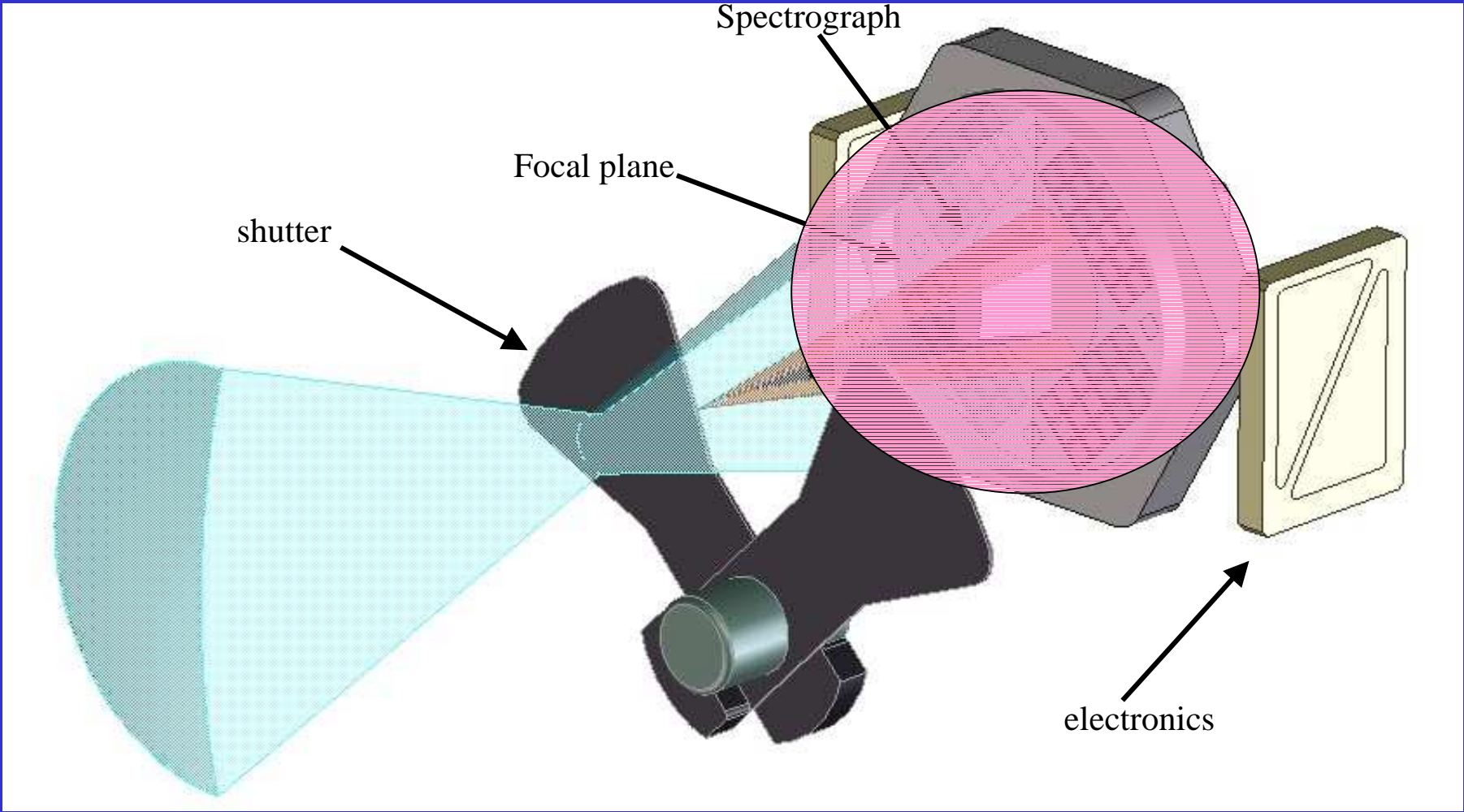




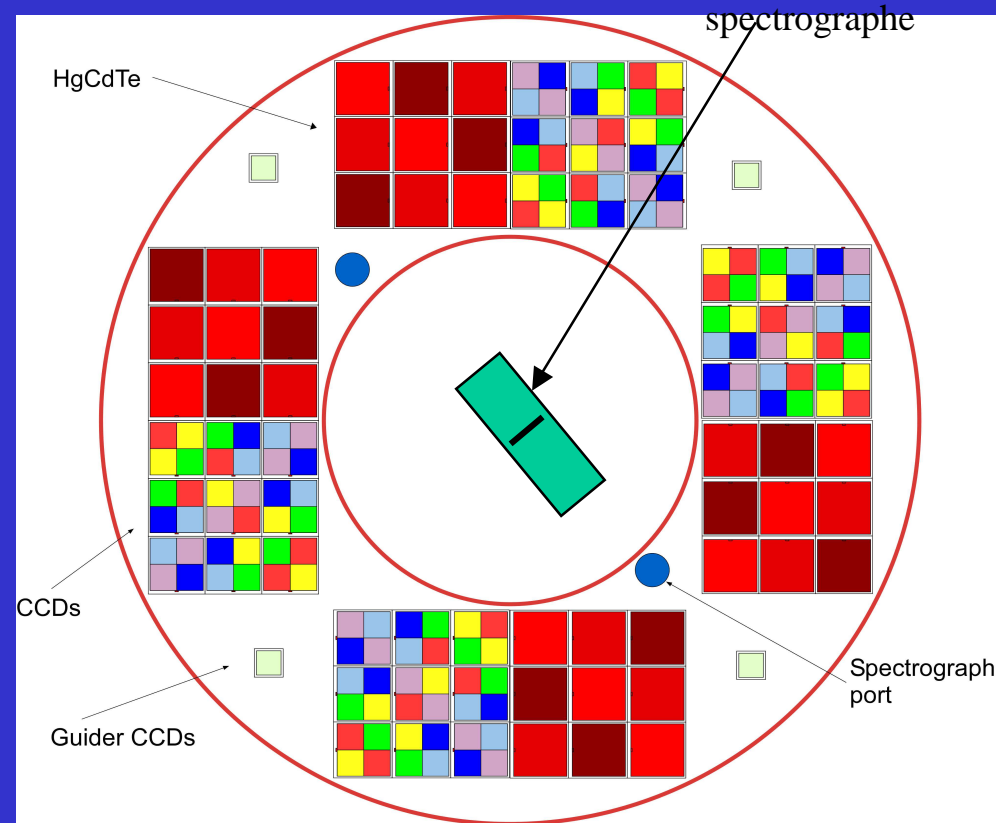








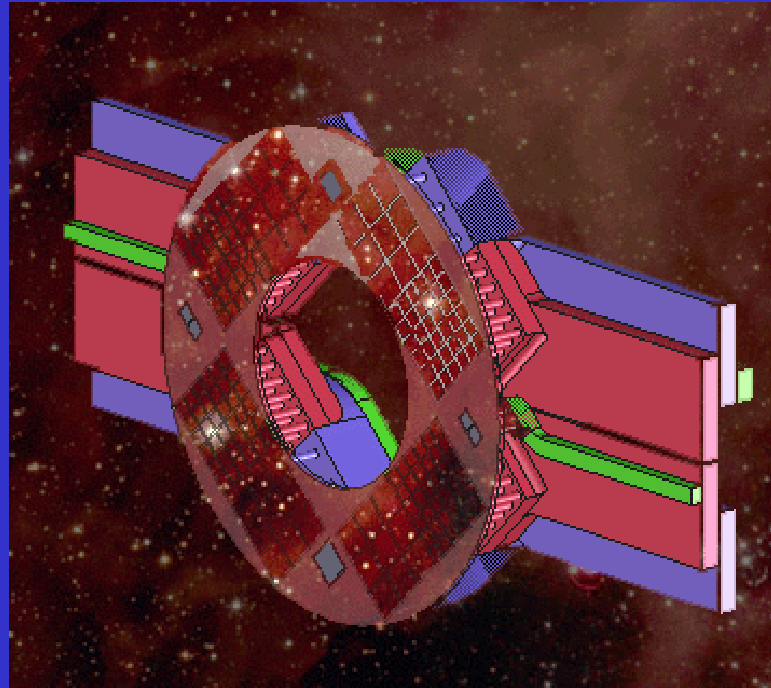
Plan focal: courbe de lumière



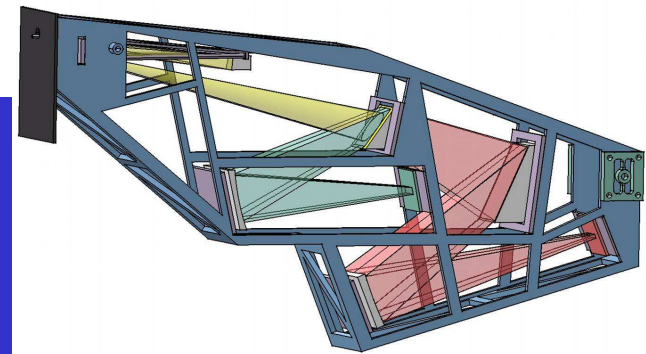
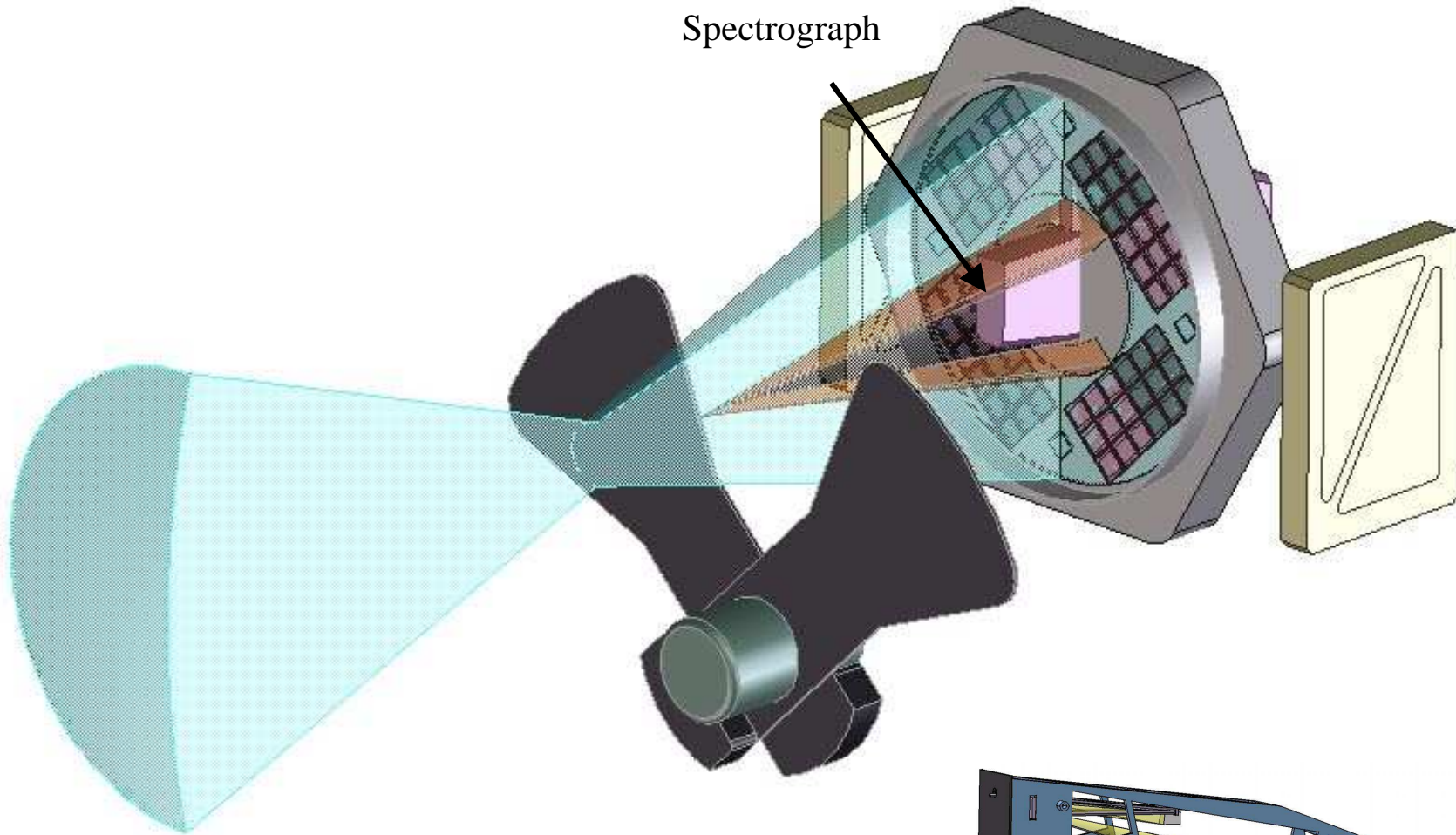
0.61 Gigapixel

- 36 CCD's $10.5 \mu\text{m}$ $3.5 \times 3.5\text{k}$ (0.34 sq. deg.)
- 36 HgCdTe's $18 \mu\text{m}$ $1.2\text{k} \times 2\text{k}$ (0.34 sq. deg.)

Sky scan

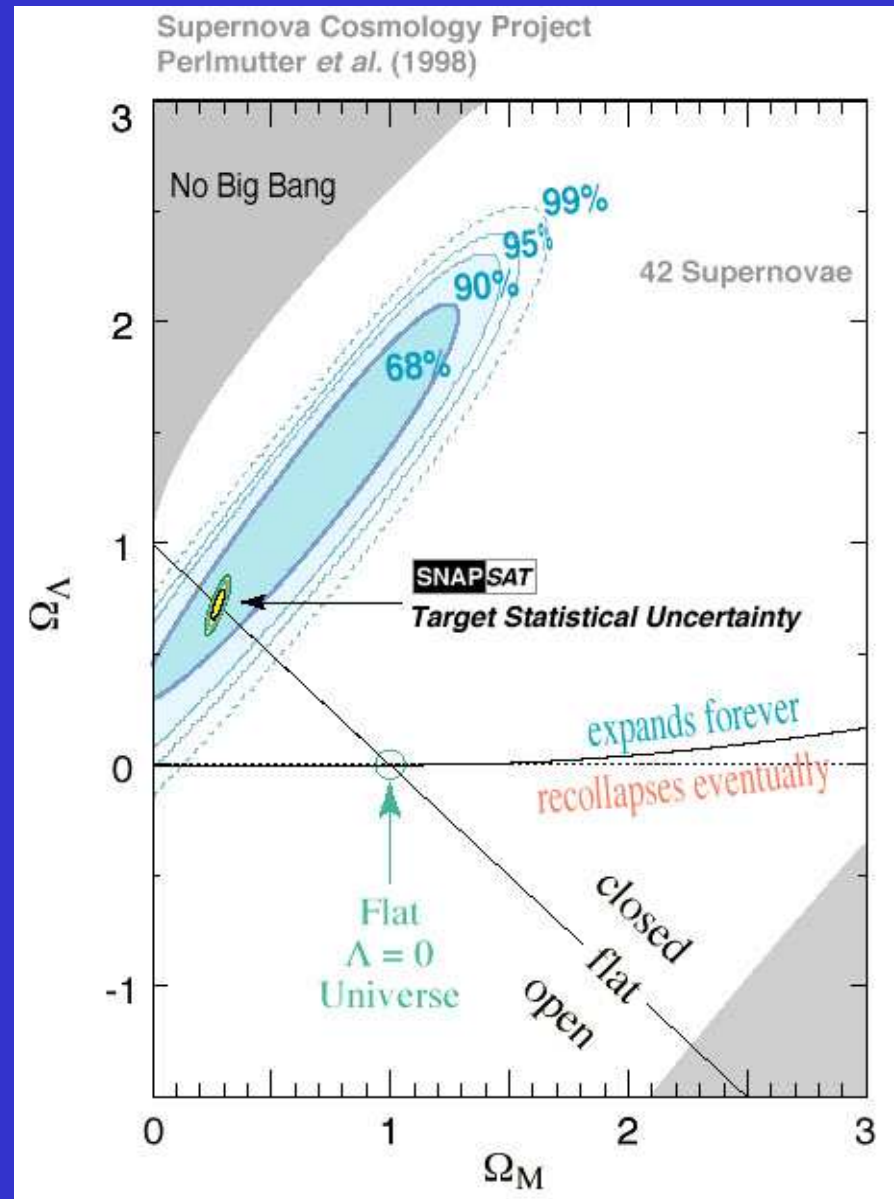


Spectrograph



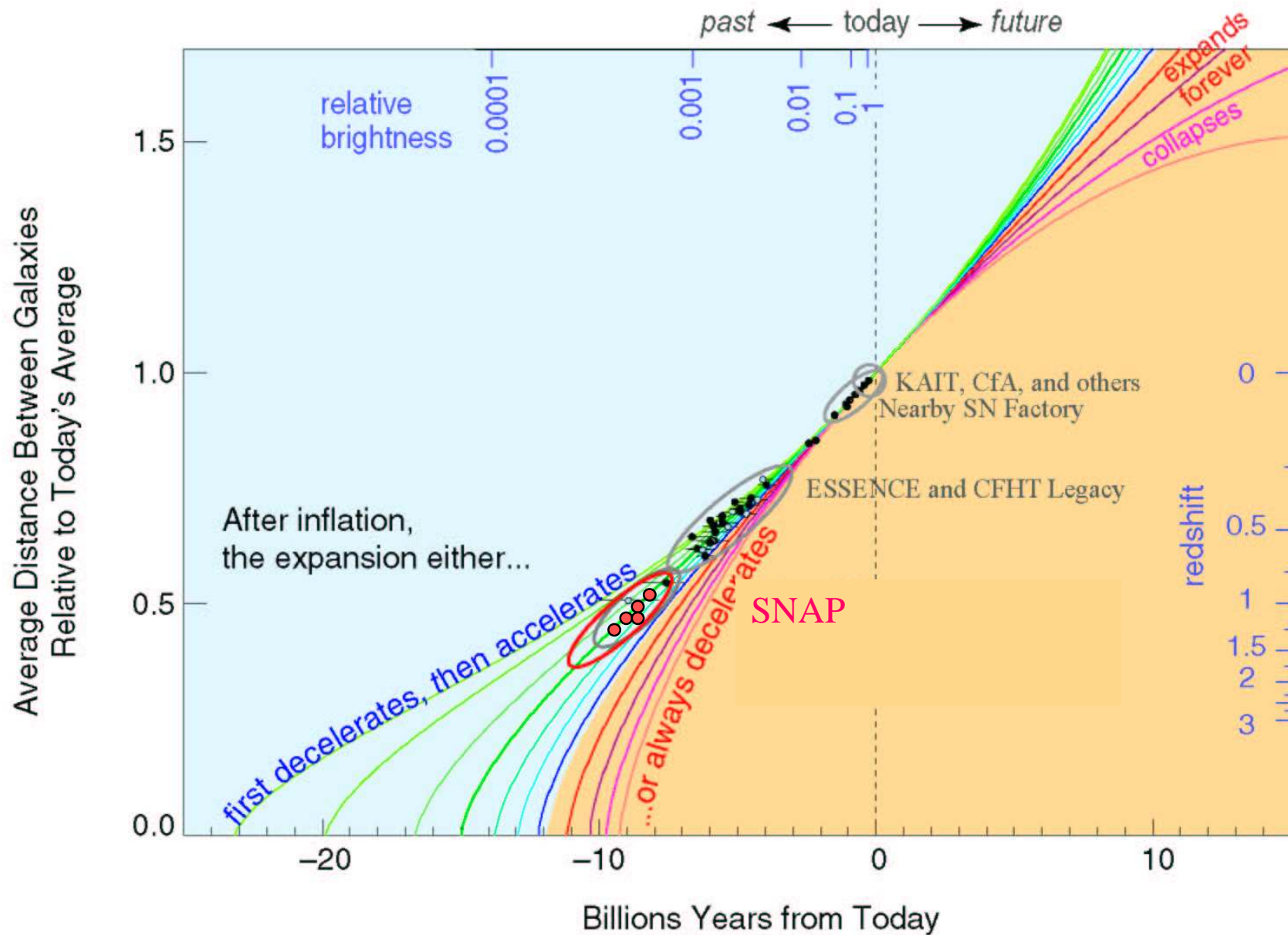
Made in LAM

Résultats attendus avec SNAP



But : Retracer l'histoire de notre Univers

Expansion History of the Universe



Conclusions

- La masse trouve son origine dans la structure du vide et/ou de l'espace temps.
 - La particule de Higgs responsable de la structure du vide n'a jamais été observée mais est activement recherchée.
 - Cette structure du vide est probablement à l'origine de l'énergie noire qui agit comme une force anti gravitationnelle.
 - Les projets futures dans l'espace devraient préciser cette énergie particulière qui domine dans notre Univers.
 - Mais tout n'est pas dit:
 - Si on calcul l'énergie totale du vide quantique on trouve une énergie totale de notre univers 10^{100} fois trop grande:
10.000000000.000000000.000000000.000000000.000000000.000000000.000000000.000000000.000000000.000000000.000000000
 - Un tel désaccord est probablement le précurseur d'une grande révolution conceptuelle.
 - Nouvelle symétrie, nouvelle particule, nouvelle interaction ?
 - Relativité générale incomplète ou fausse ?
 - Nombre de dimensions de l'espace temps supérieur à 4 ?
- Probablement des réponses dans une dizaine d'années....