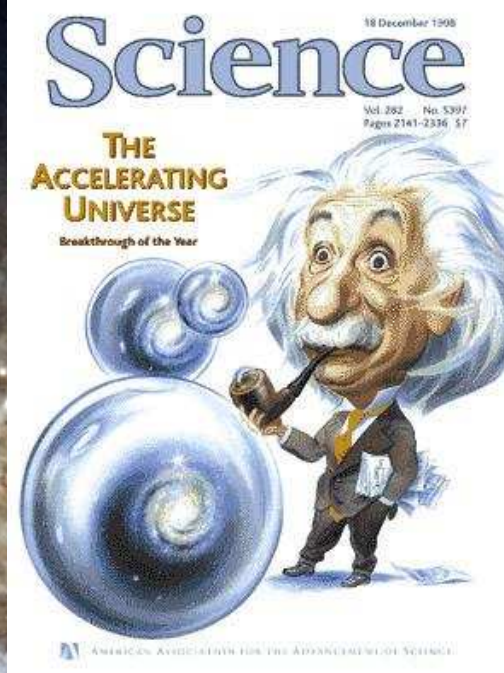


Cosmologie et SuperNovae

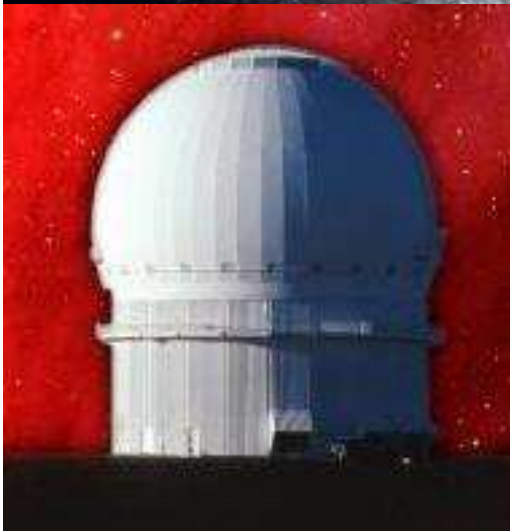
La Cosmologie ??

1. Géométrie
2. Contenu



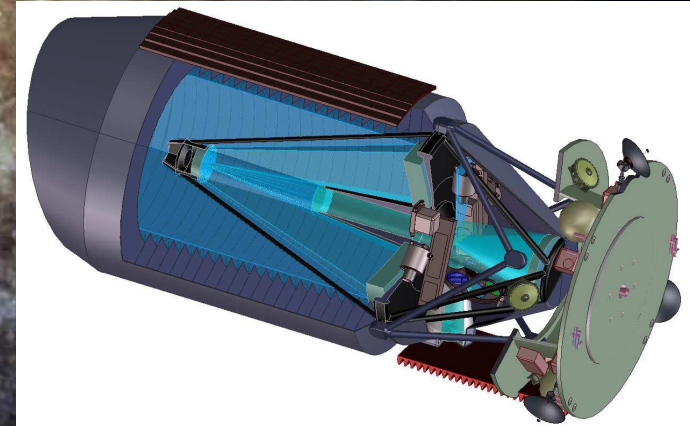
Utilisation des Supernovae

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



Notre Univers

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



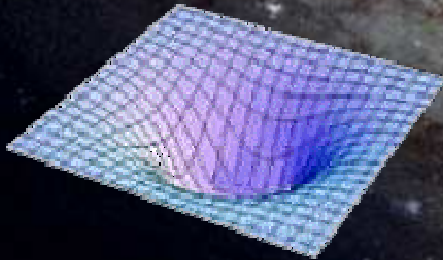
Introduction à la cosmologie

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

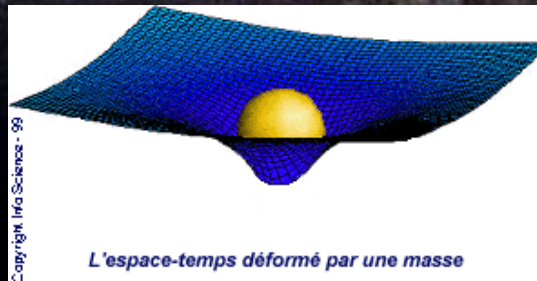
Le cadre conceptuel est la relativité générale d'Einstein

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

Géometrie



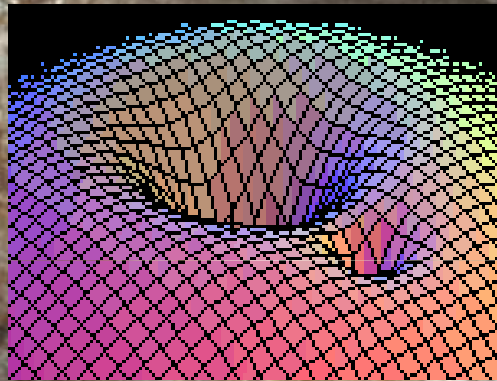
Énergie (masse) $E=mc^2$



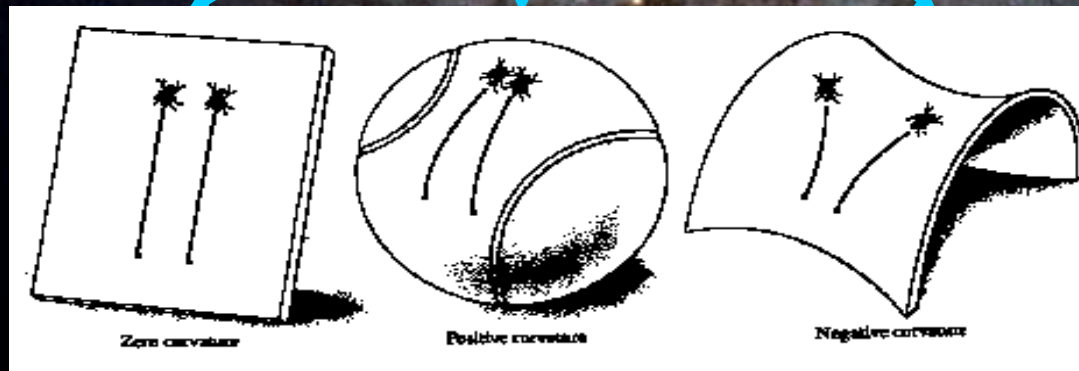
Quelle géométrie pour notre Univers ? (topologie)

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



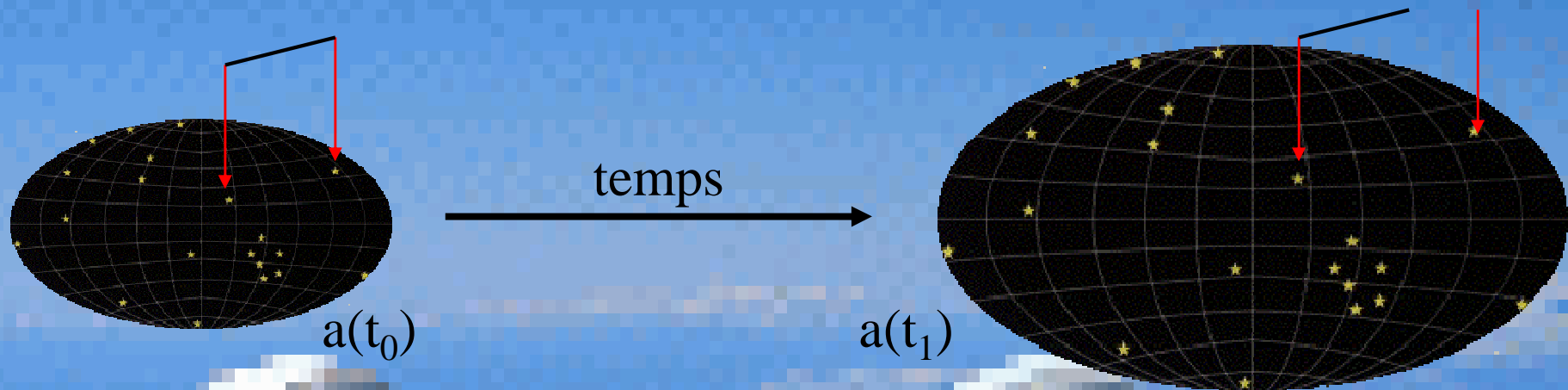
Évolution temporelle de notre Univers

$$\text{Loi de Hubble : } v = H_0 d = zc$$

- 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



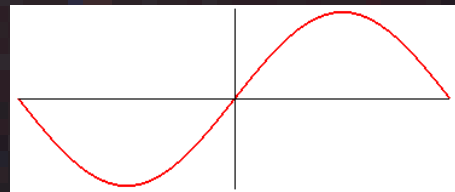
Notre Univers est en expansion ?



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)

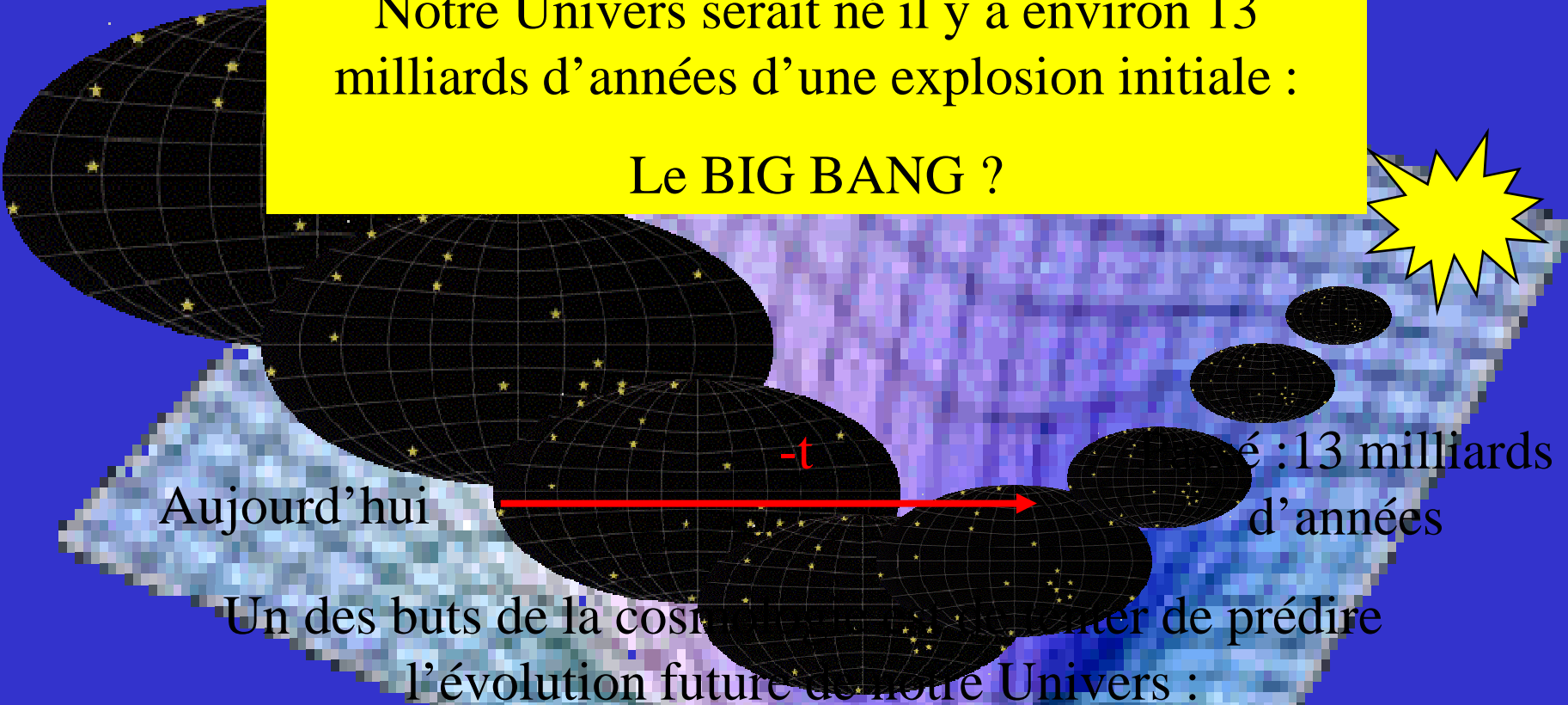
Longueur d'onde (rouge)



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

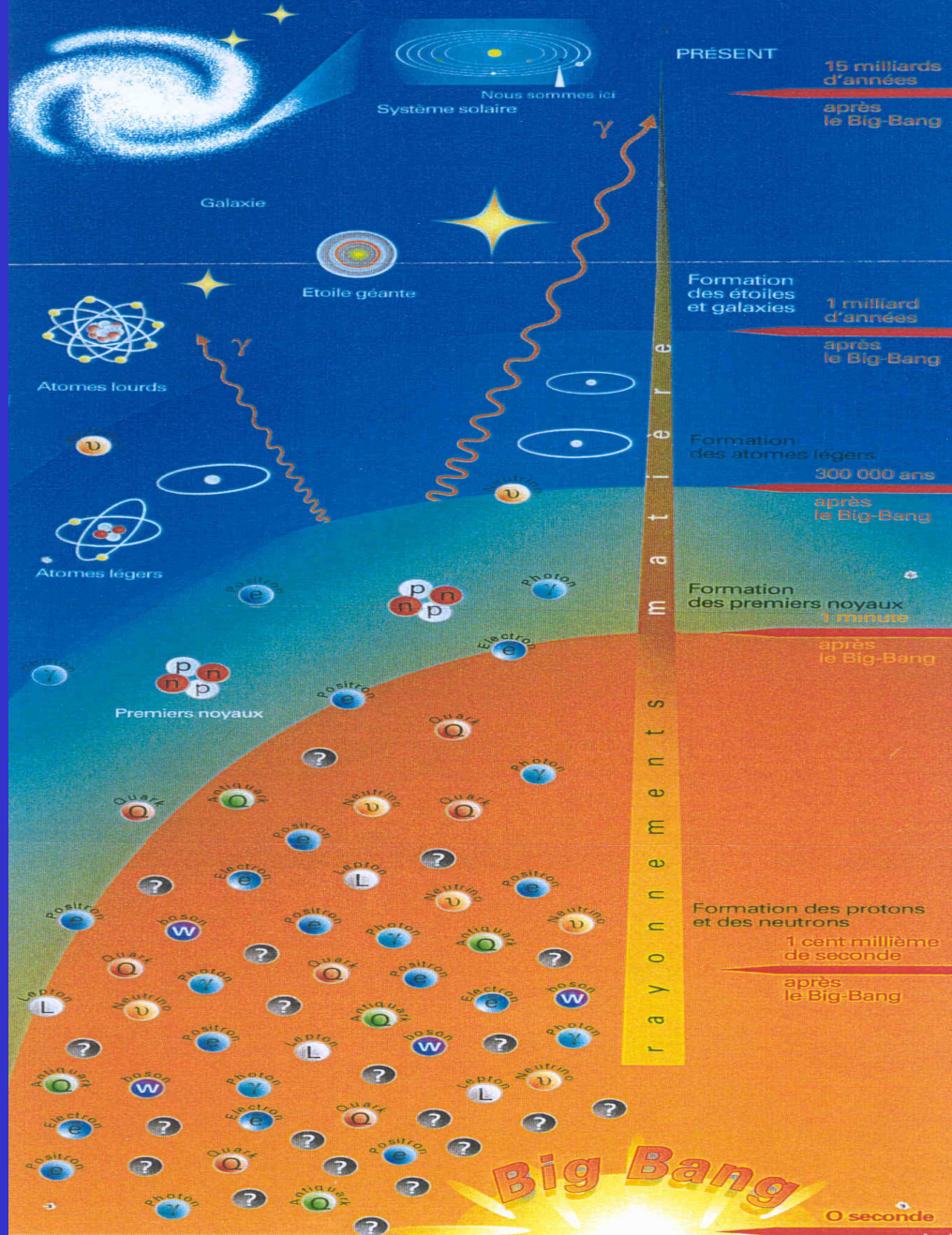
-t

13 milliards
d'années

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

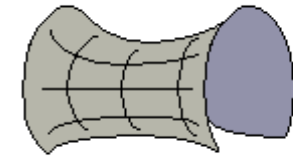
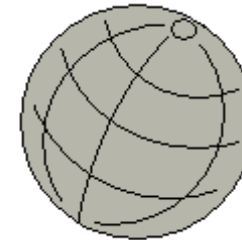
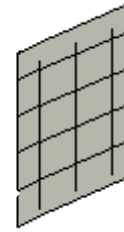
- Expansion éternelle : Univers infini
- Expansion stoppée dans un temps infini : Univers fini
- Expansion inversée : fin de l'Univers, Big crunch

Histoire de l'Univers



Contenu en énergie de notre Univers

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



$$\Omega_T = 1$$

$$\Omega_T > 1$$

$$\Omega_T < 1$$

Densité critique \Rightarrow énergie totale critique/cm³ = ρ_c

Il existe a priori 2 formes d'énergie

La matière, $E=mc^2$

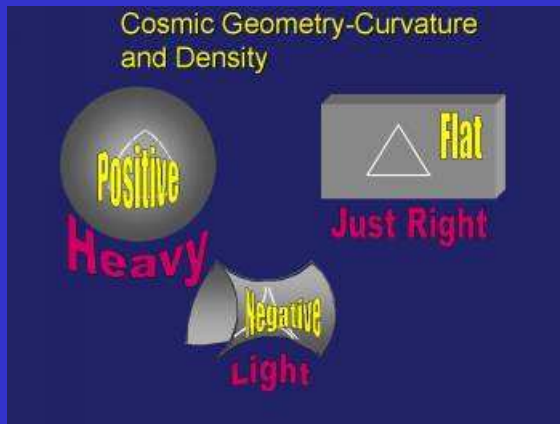
$$\Omega_m = \rho_m / \rho_c$$

La lumière, $E=hc/\lambda$

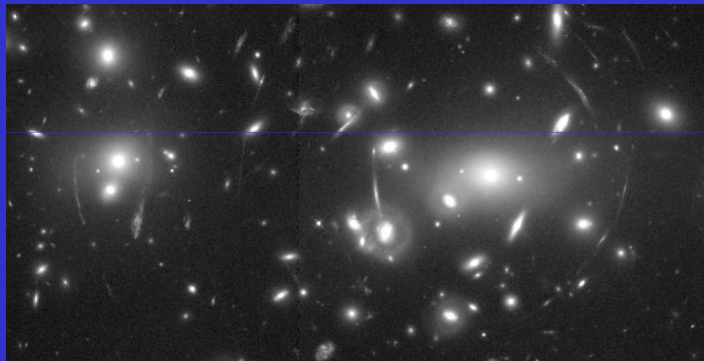
$$\Omega_r = \rho_r / \rho_c$$

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

Méthodes en cosmologie



Mesurer directement la courbure (triangle, CMB)



Compter les galaxies et estimer leur masse :

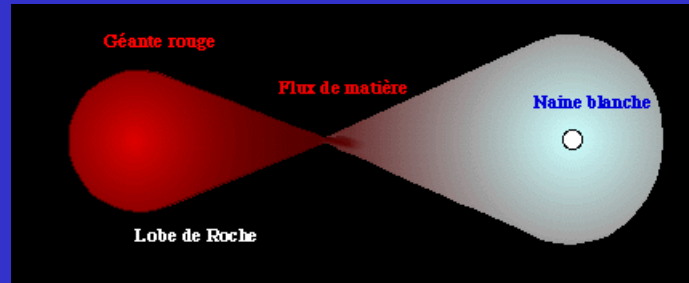
Matière sombre ?



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

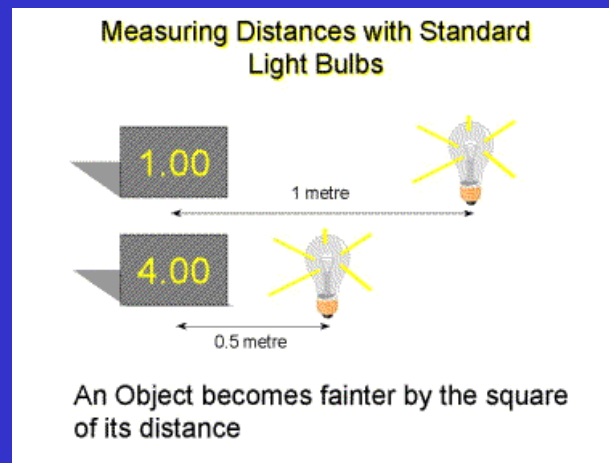
L'utilisation des Supernovae : principe

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 !!

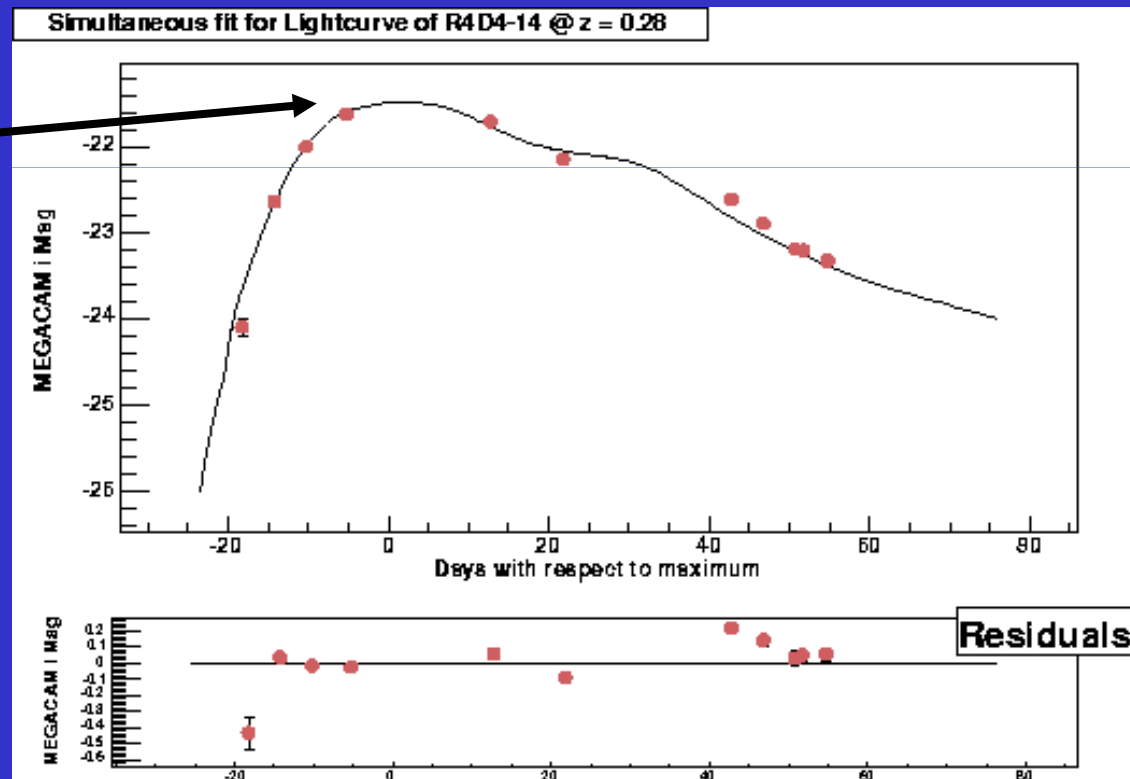
Mesure de la luminosité

L'explosion d'une SuperNovae dure plusieurs mois.

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

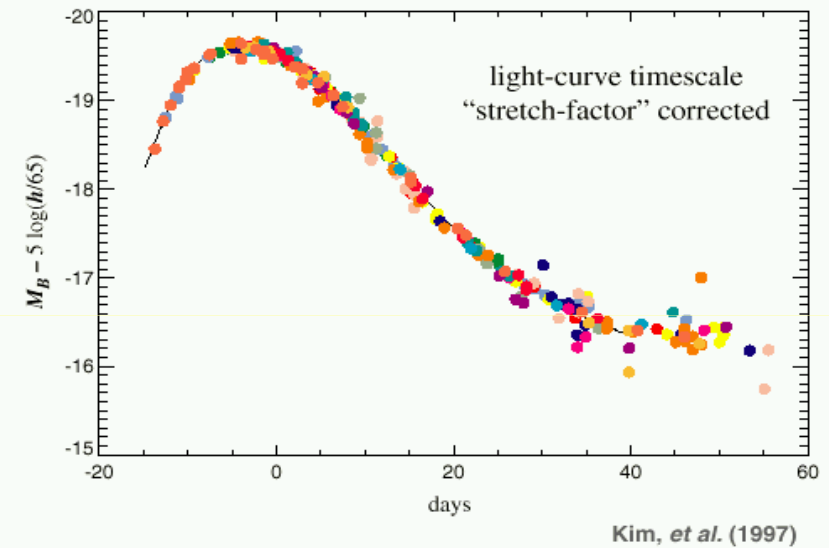
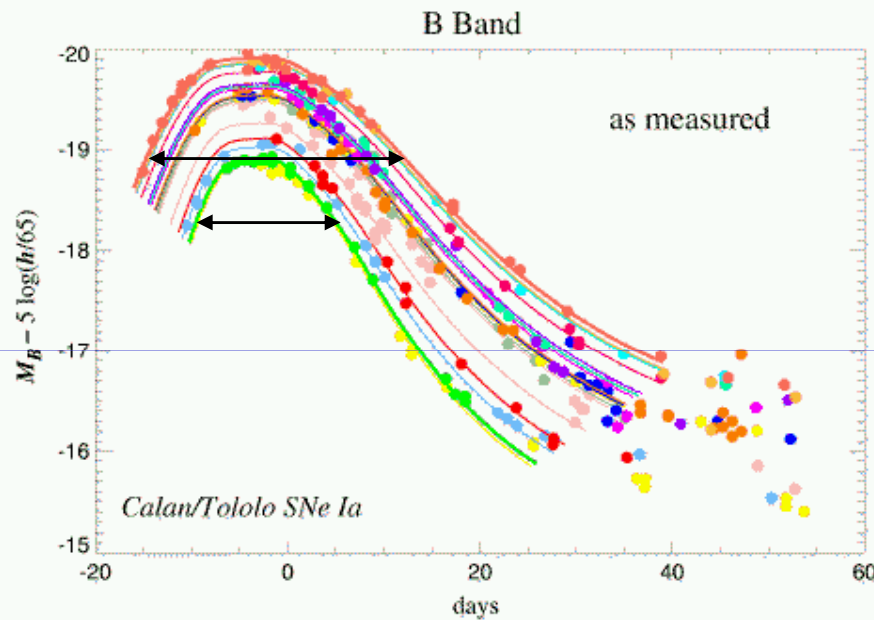
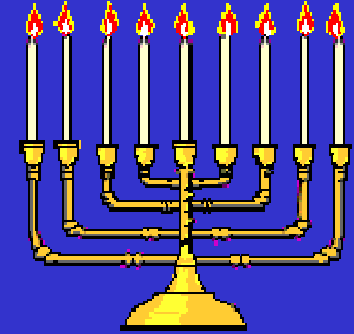
Le maximum de luminosité est la référence standard

Mais les SN Ia ne sont pas totalement des chandelles standard





Standardisation des SN Ia



Avant correction, les maximums ne sont pas identiques

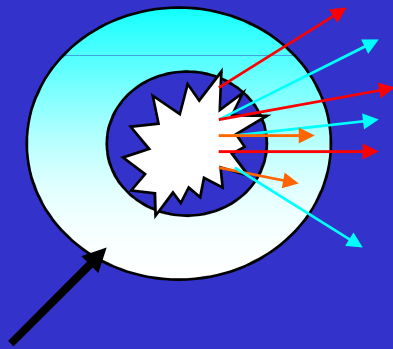
Si on corrige avec la largeur, on standardise les SN

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

Identification des SN Ia

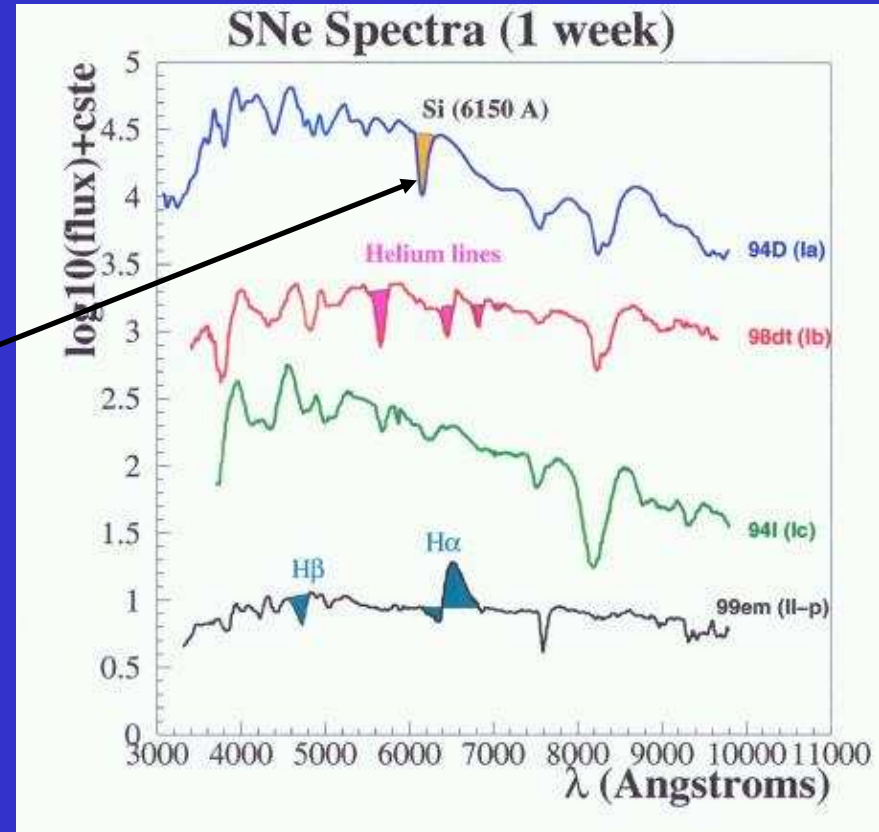
Pour utiliser toujours les mêmes objets, il est nécessaire de les identifier correctement

La lumière émise par une SuperNovae est une signature



Enveloppe de silicium

La couleur orange est absorbée

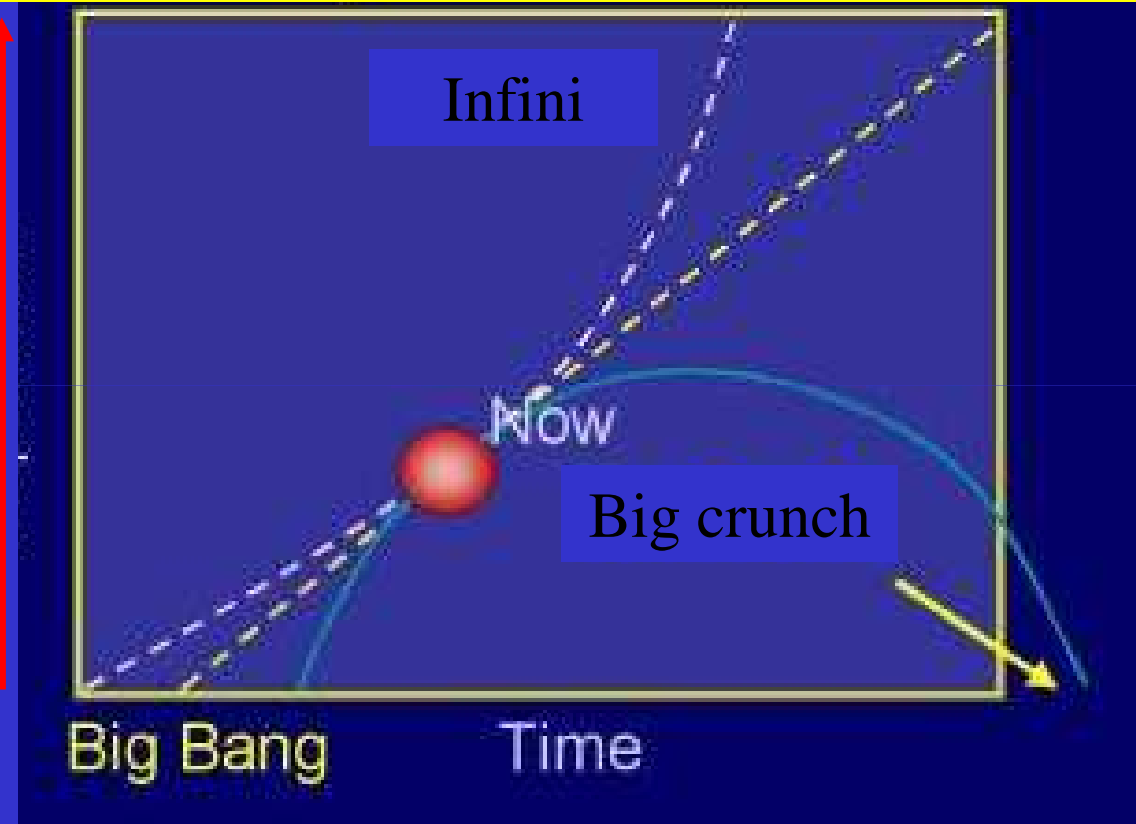


Bleue

Rouge

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

Luminosité, distance lumineuse

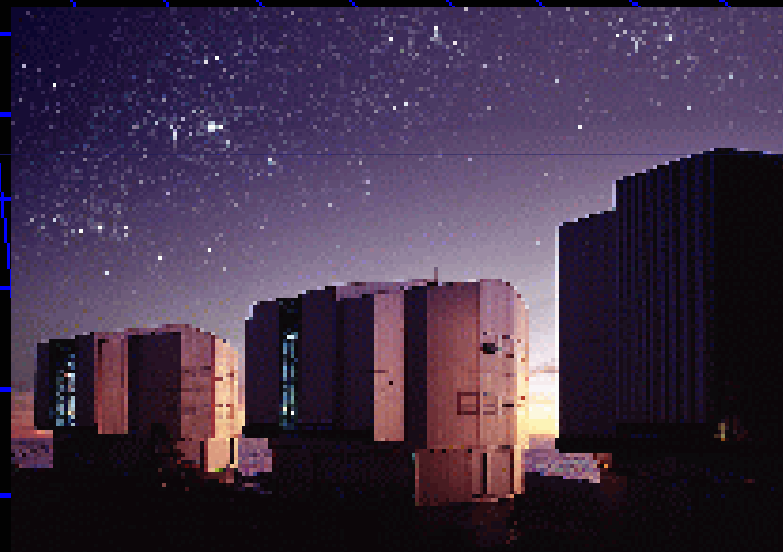


Temps, expansion, redshift(z)

Les observations

Hawaï: 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

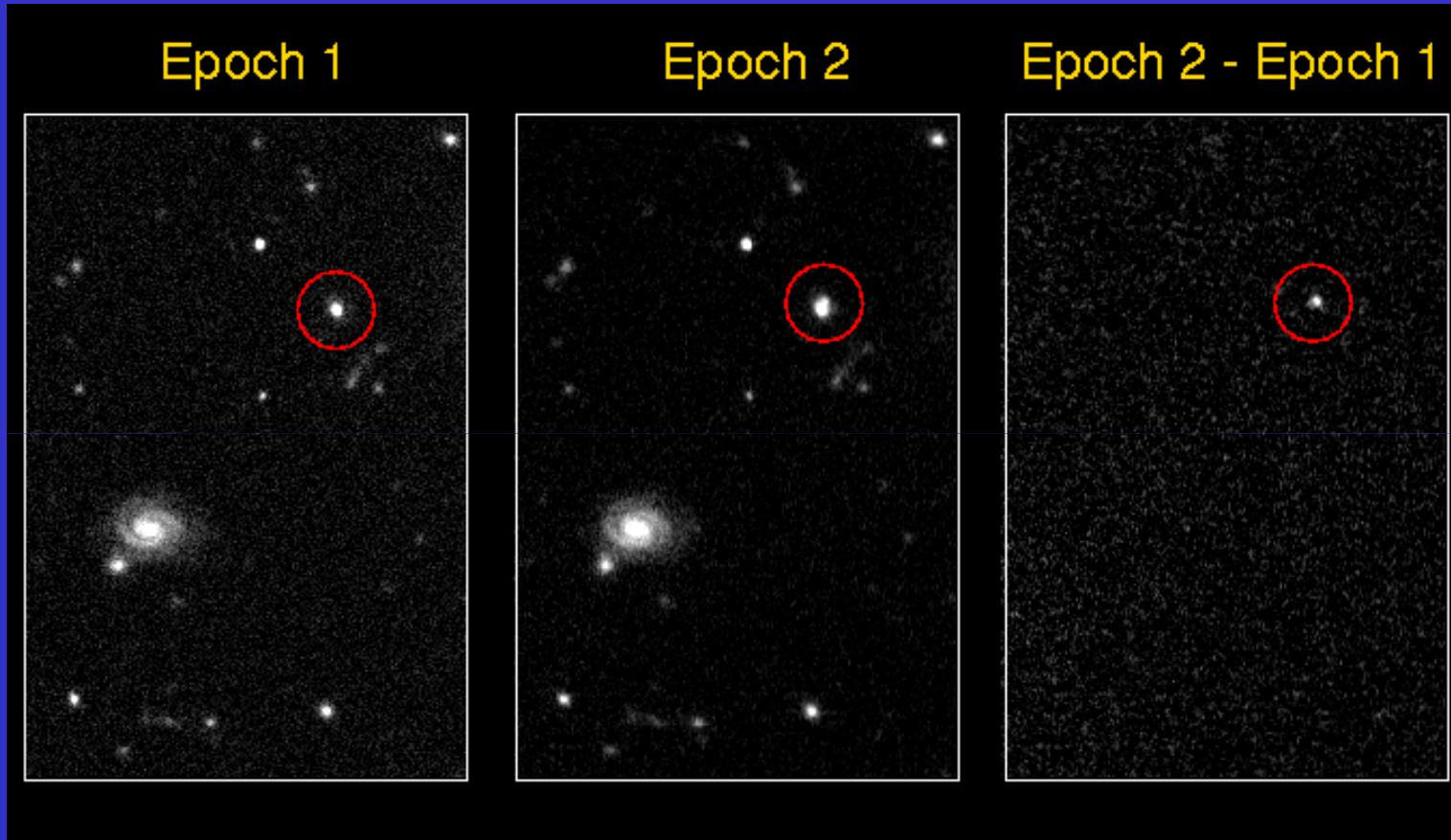


Image du HST →

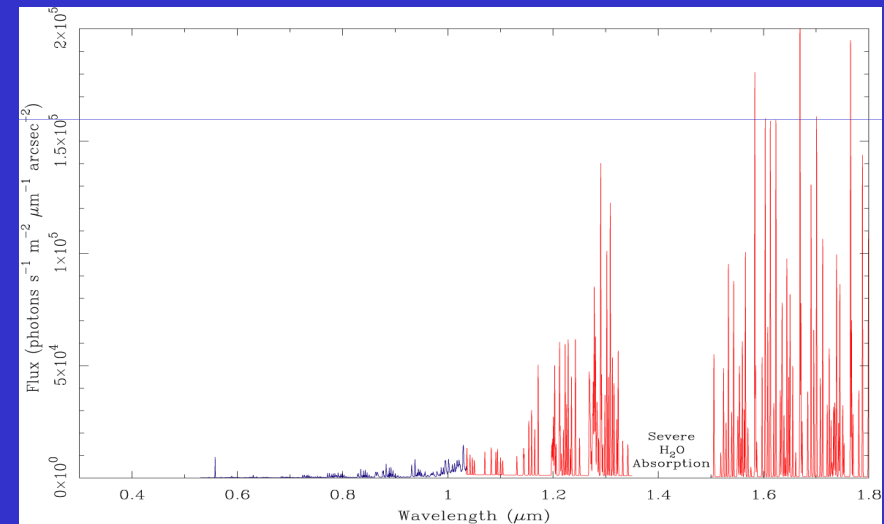
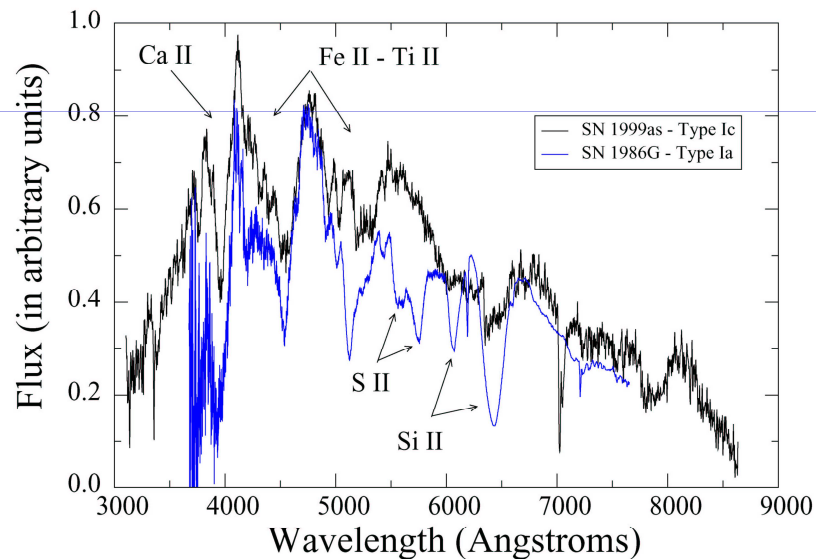


Soustraction informatique :
Epoch2-Epoch1

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

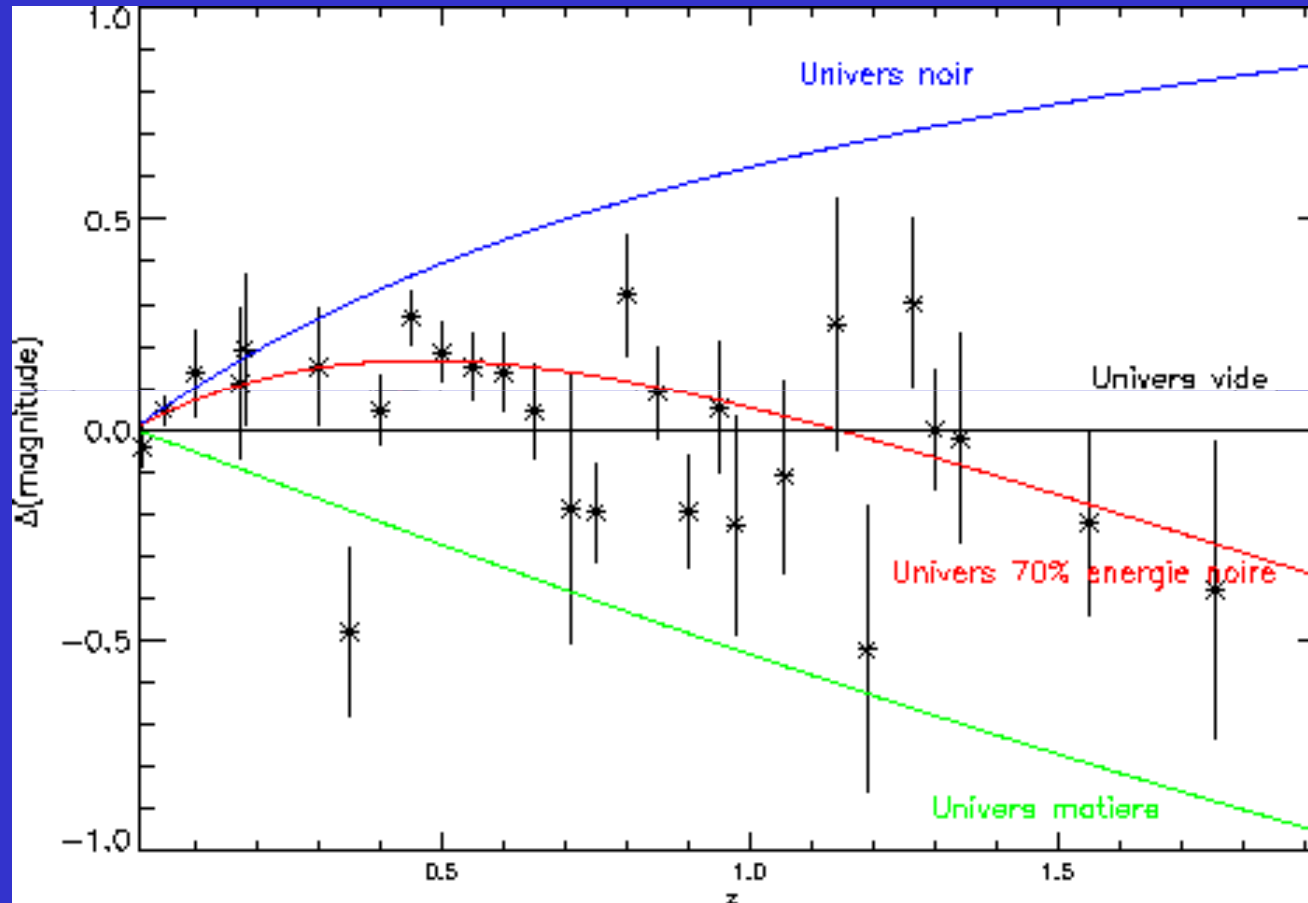


Difficulté au sol :
atmosphère, lune, mauvais temps....

Construction du diagramme de Hubble

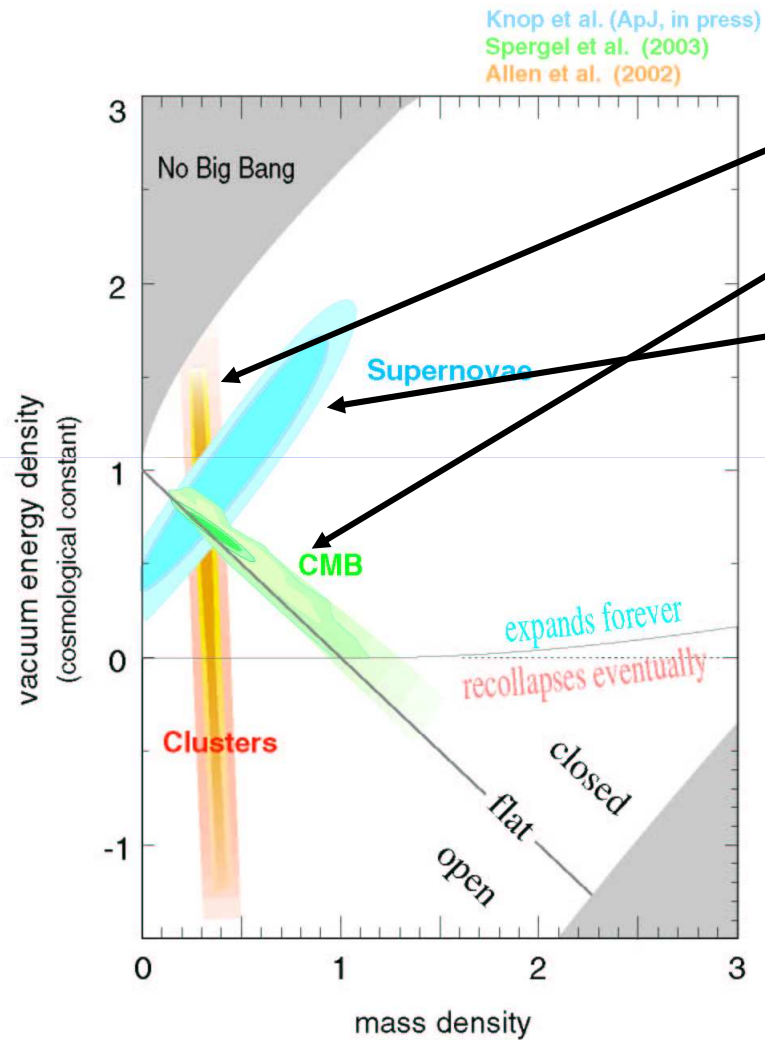
Chaque point représente une SN

Distance lumineuse



Redshift ou expansion

Un résultat inattendu



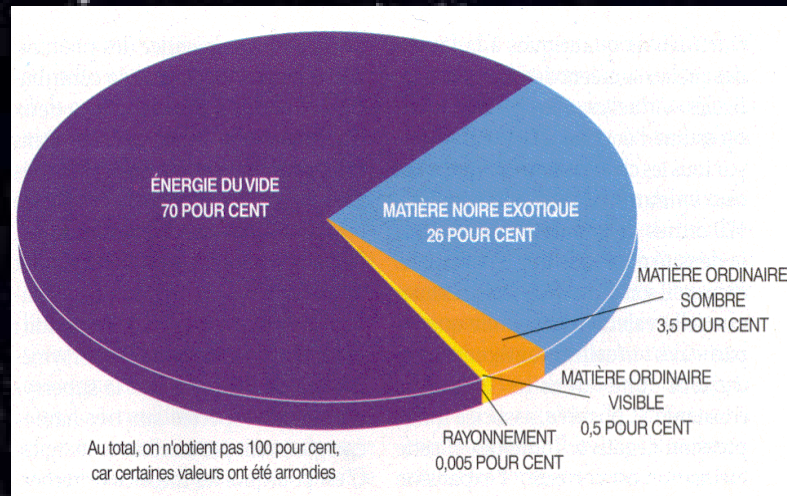
1999: SCP/ High z

2002: clusters

2003: WMAP

2003 :SCP+ 11 SNIa HST

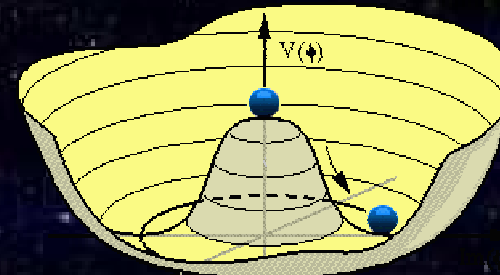
Qu'elle est cette nouvelle forme d'énergie ?



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

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

Une nouvelle forme d'énergie:
l'énergie du vide



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

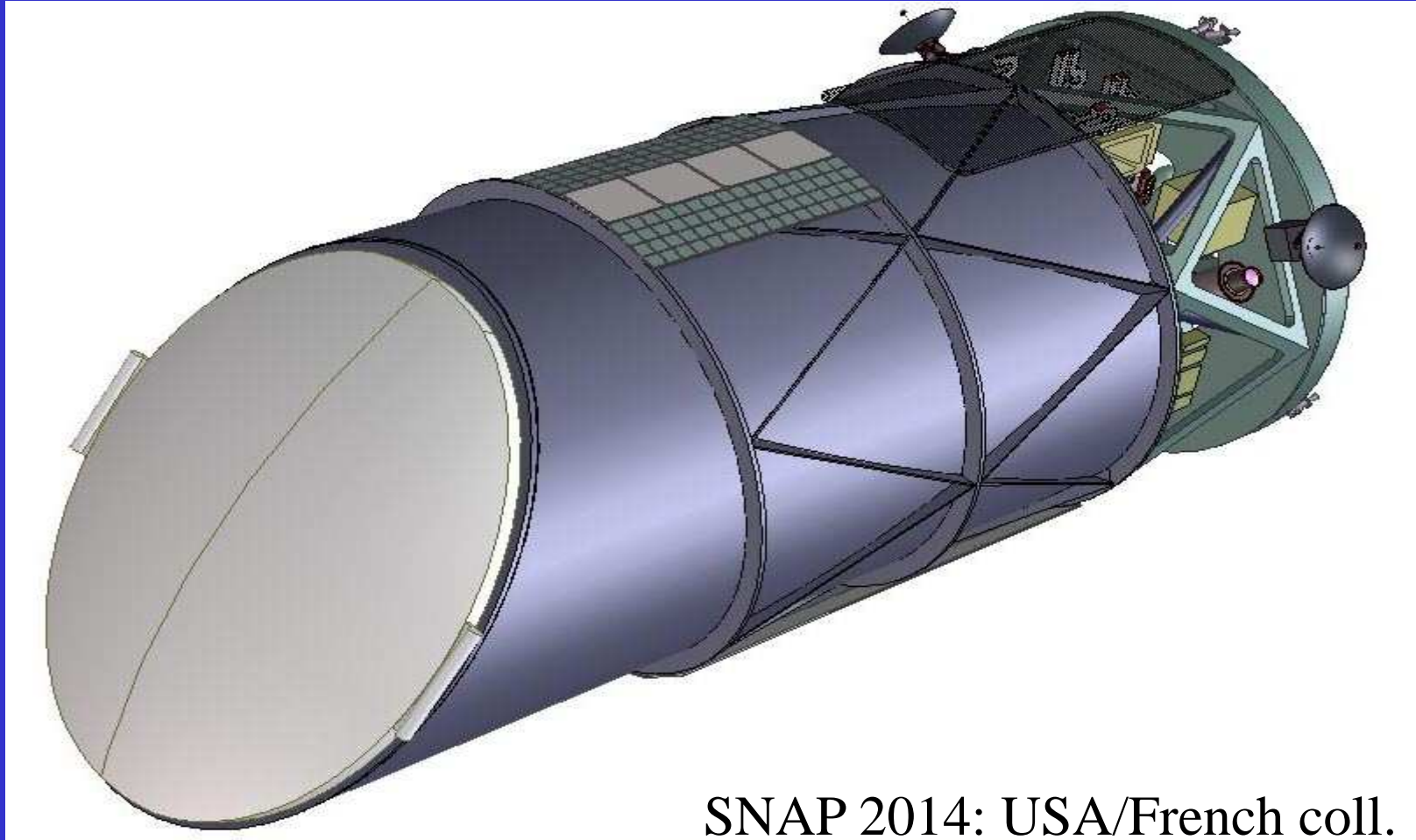
S/N = 25.0
INC = 60.0%
i = 22.17 (0.04)
i HOST = 18.22
DHOST = 0.91''
X = 252.36
Y = 4539.50

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

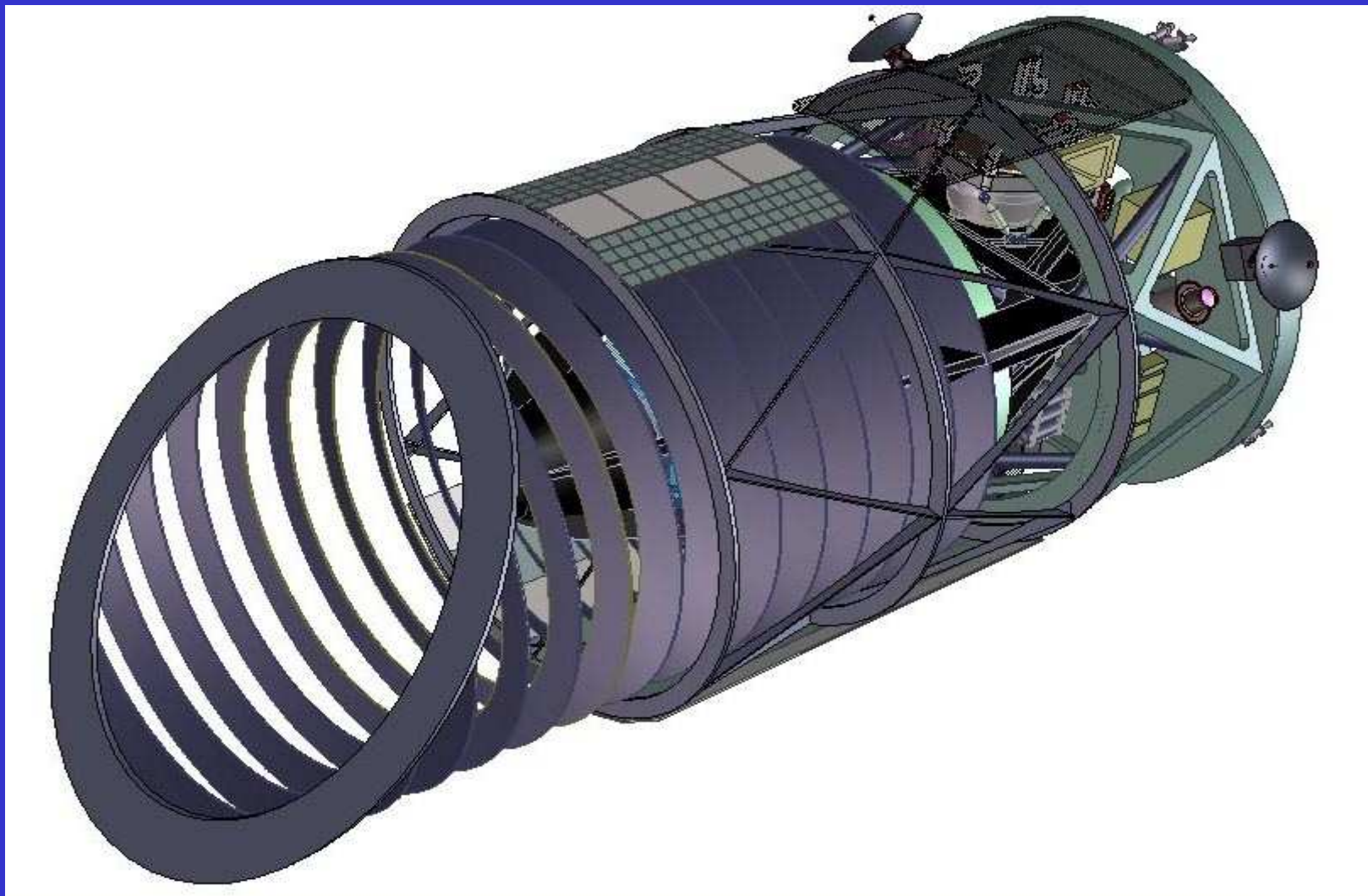
S/N = 45.2
INC = 99.1%
i = 21.64 (0.02)
i HOST = 18.22
DHOST = 0.92''
X = 275.50
Y = 4521.53

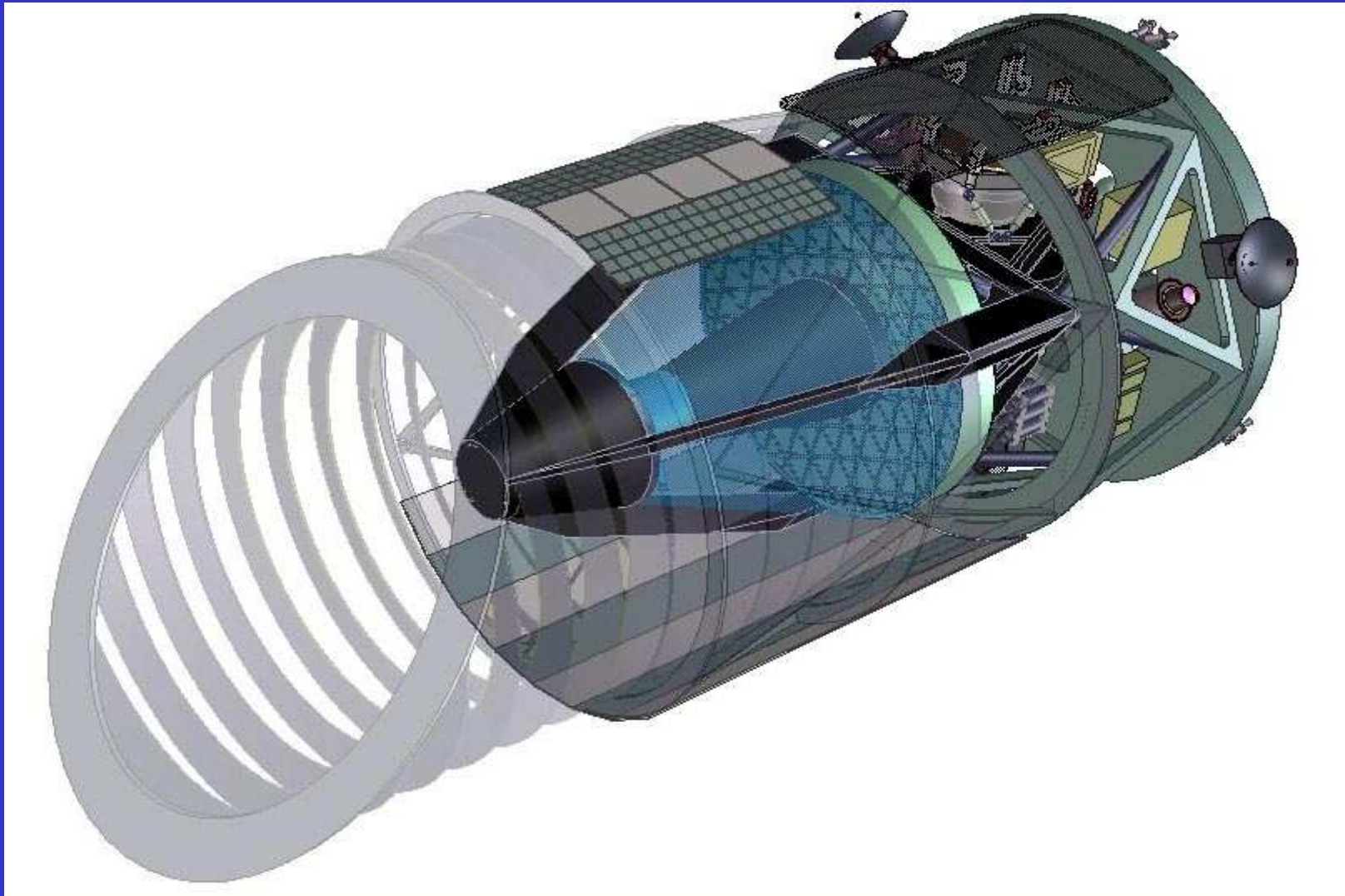
S/N = 44.0
INC = 113.1%
i = 21.36 (0.02)
i HOST = 18.22
DHOST = 0.91''
X = 253.56
Y = 4533.65

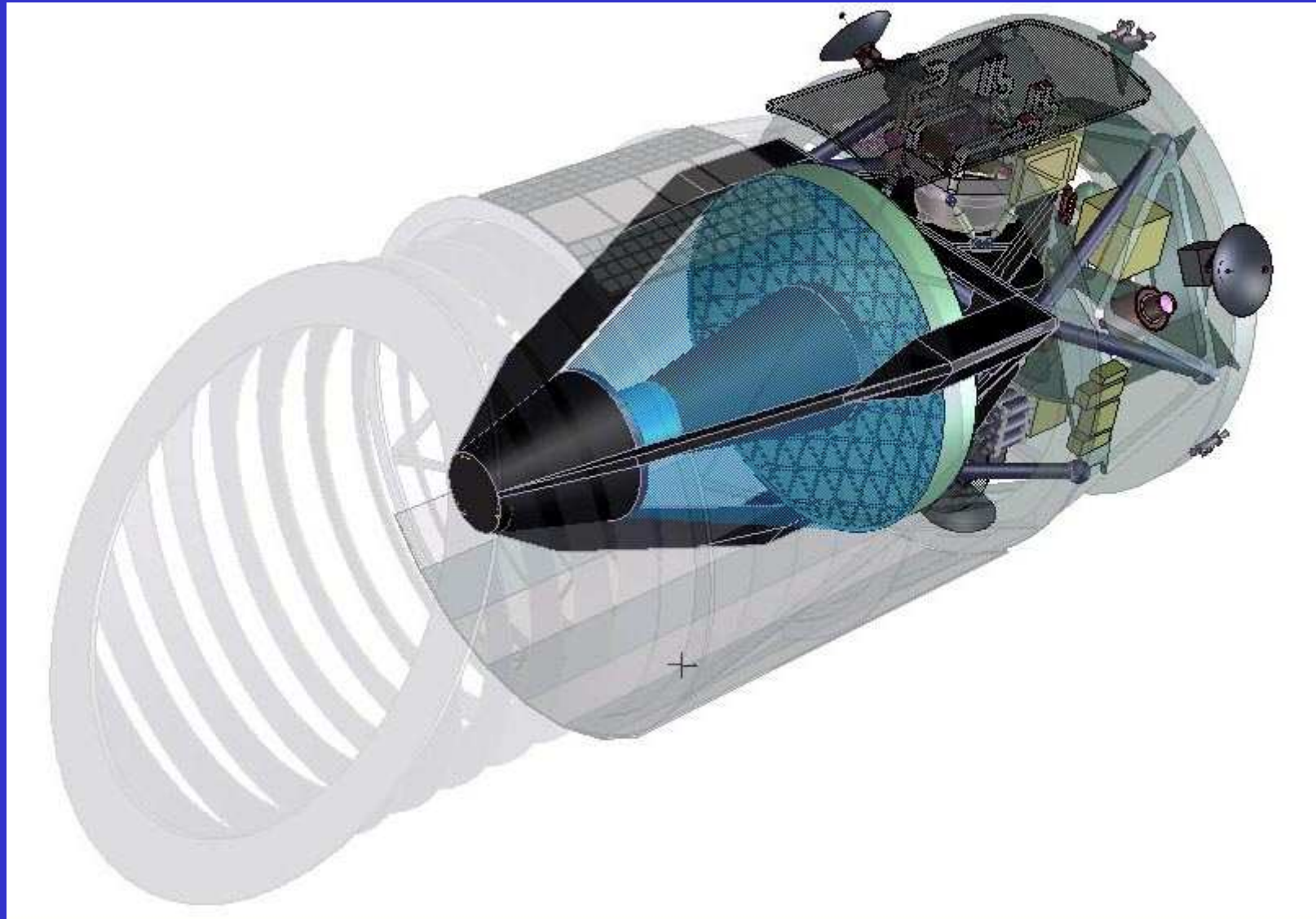
Avec quel instrument ?

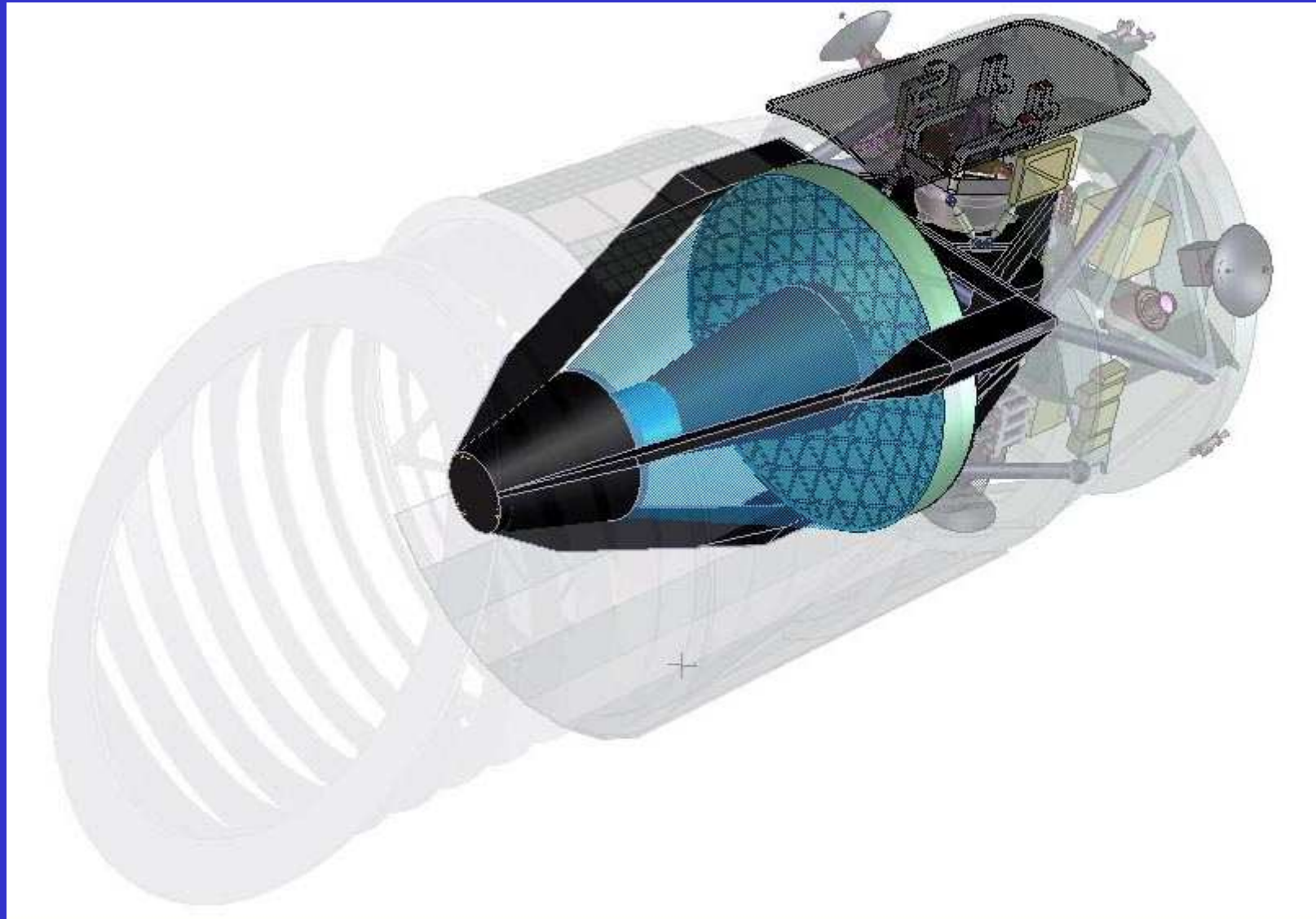


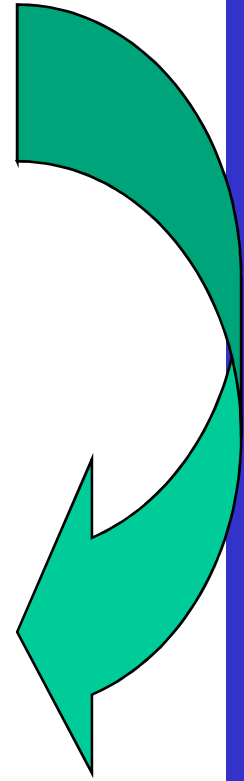
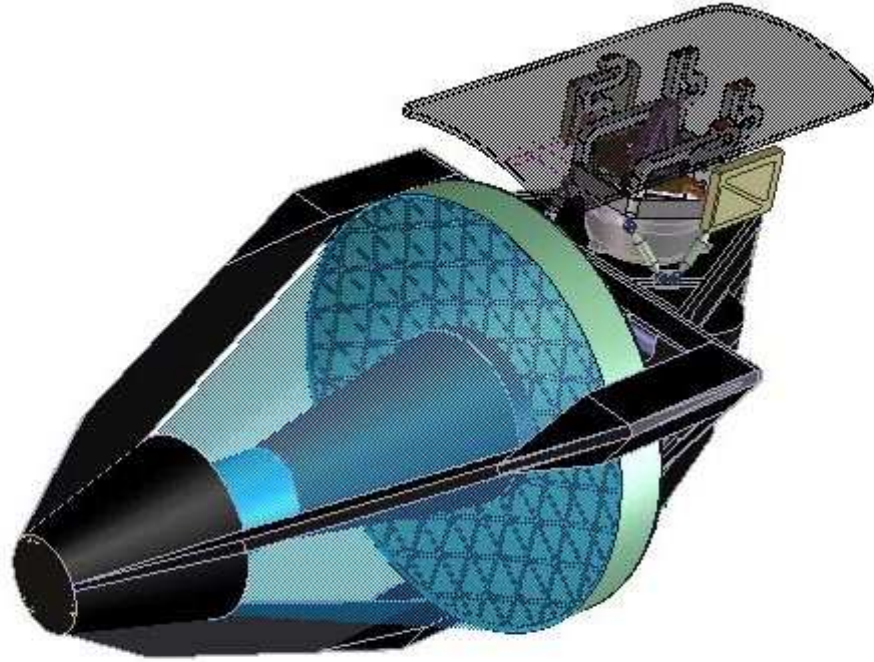
SNAP 2014: USA/French coll.

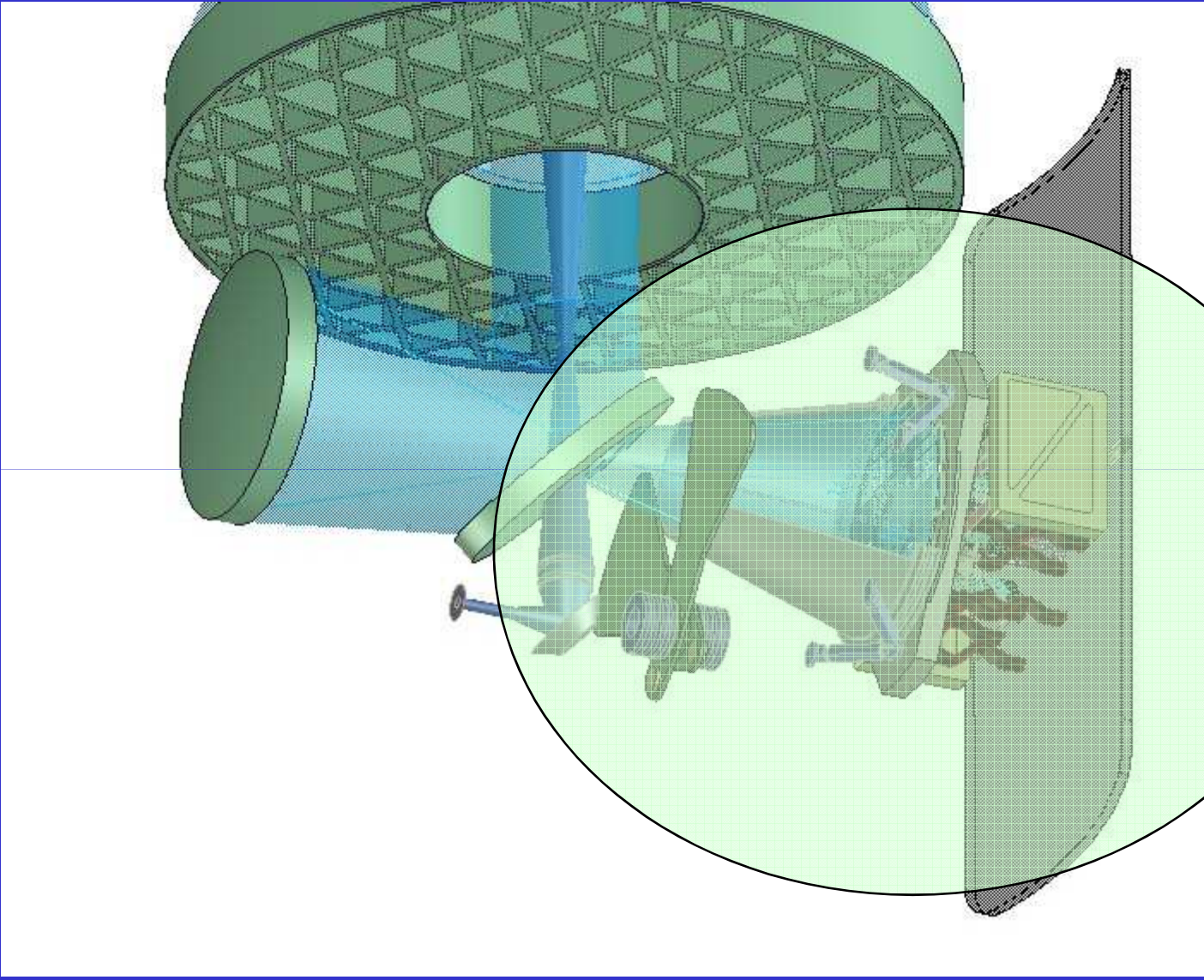


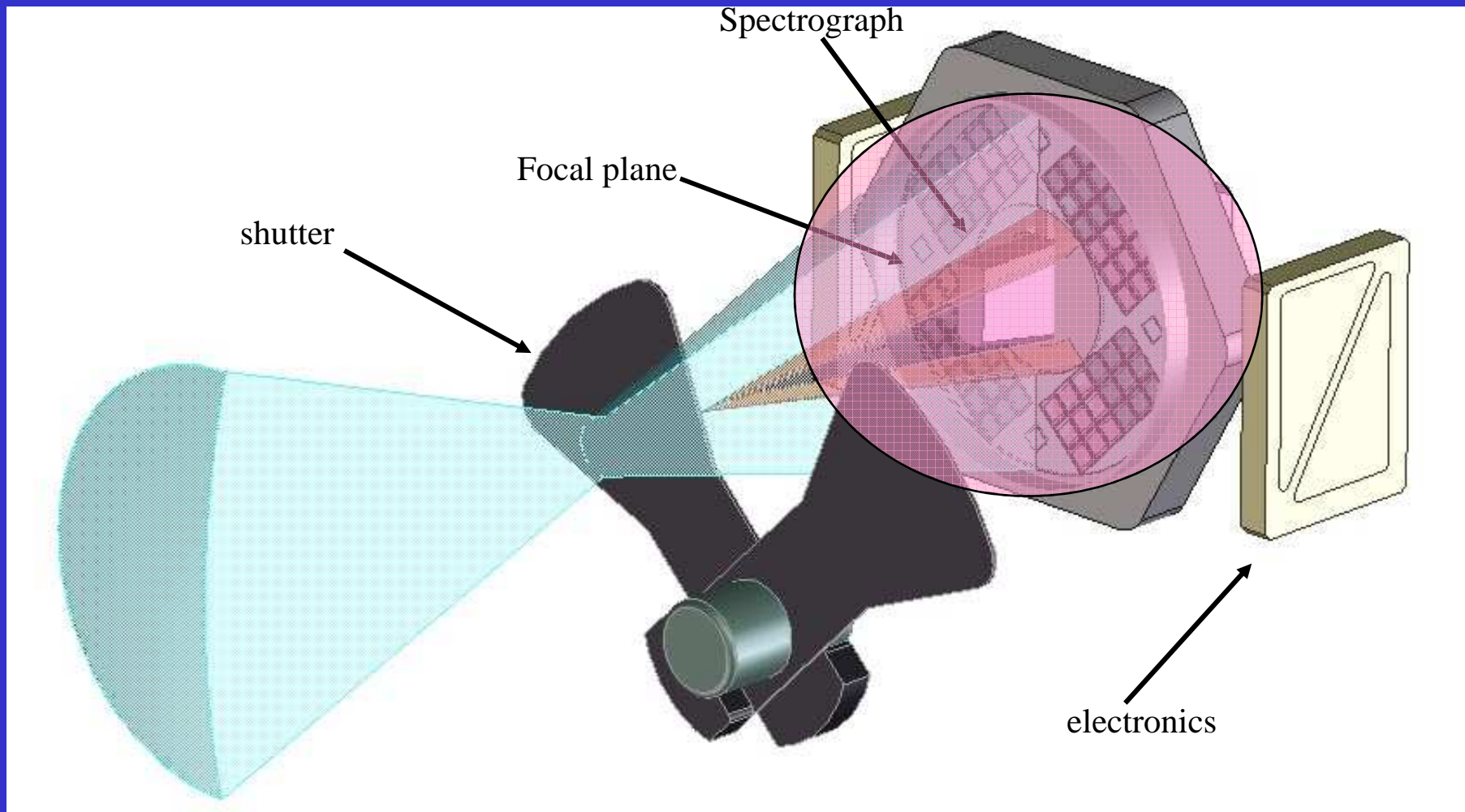




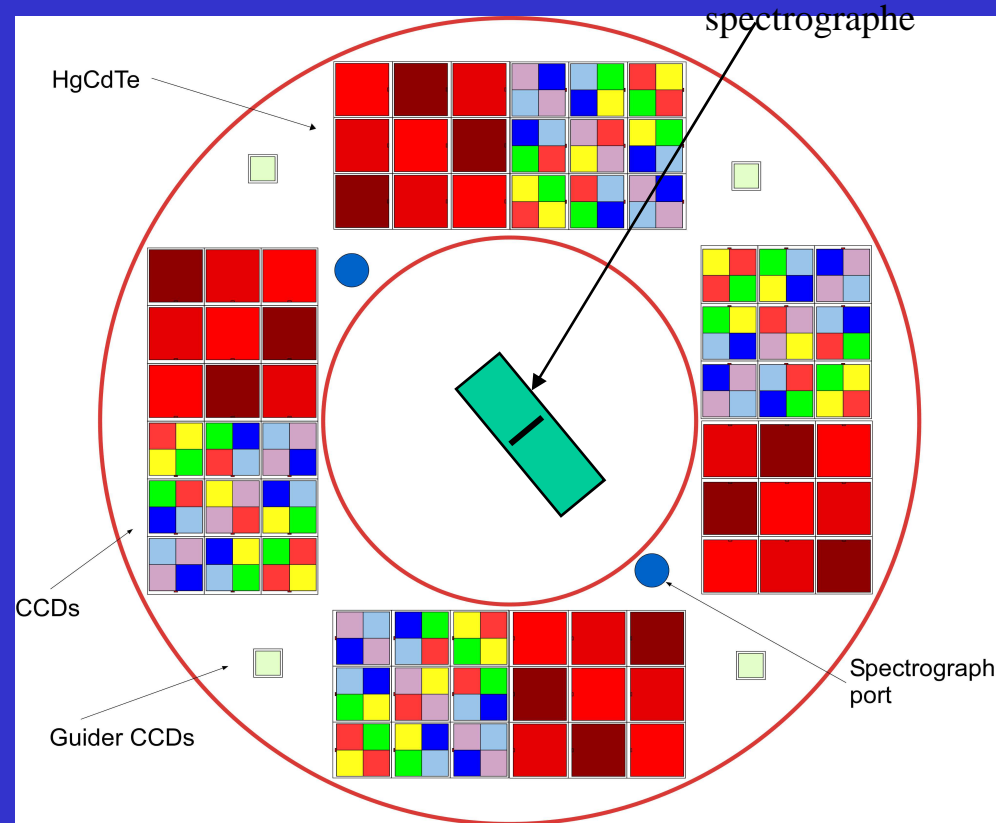






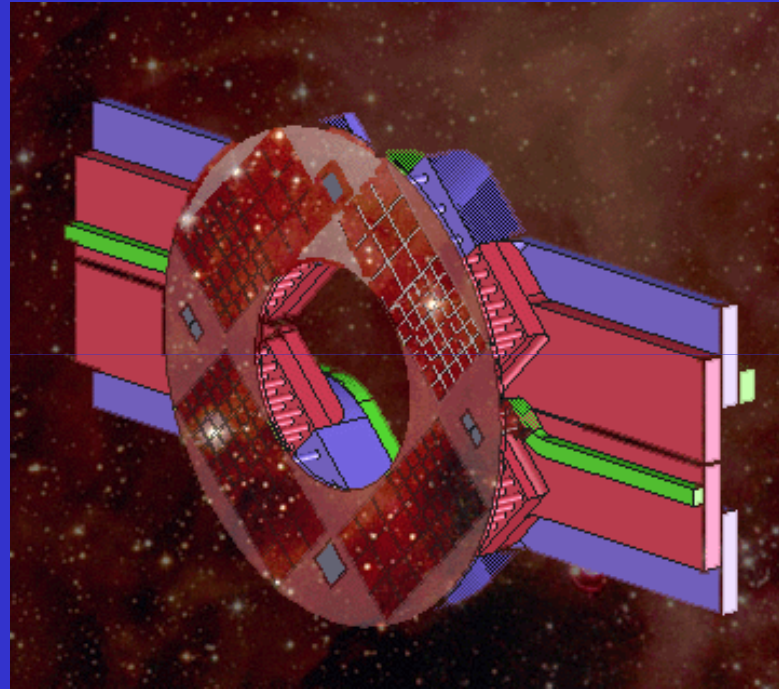


Focal plane: Light curve

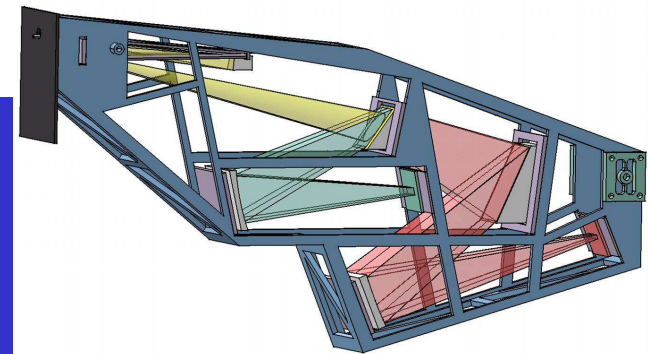
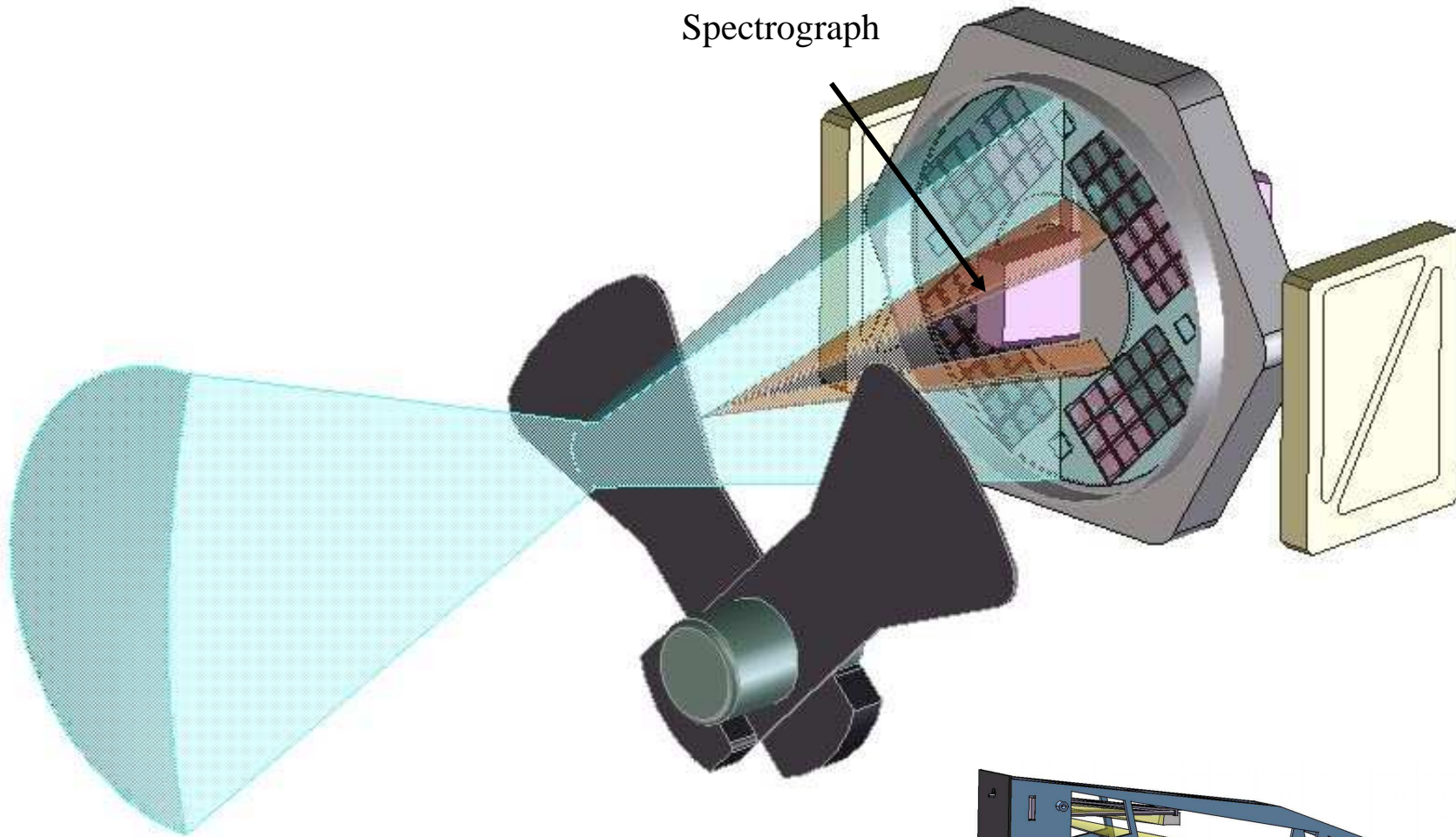


0.61 Gigapixel

- 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.)

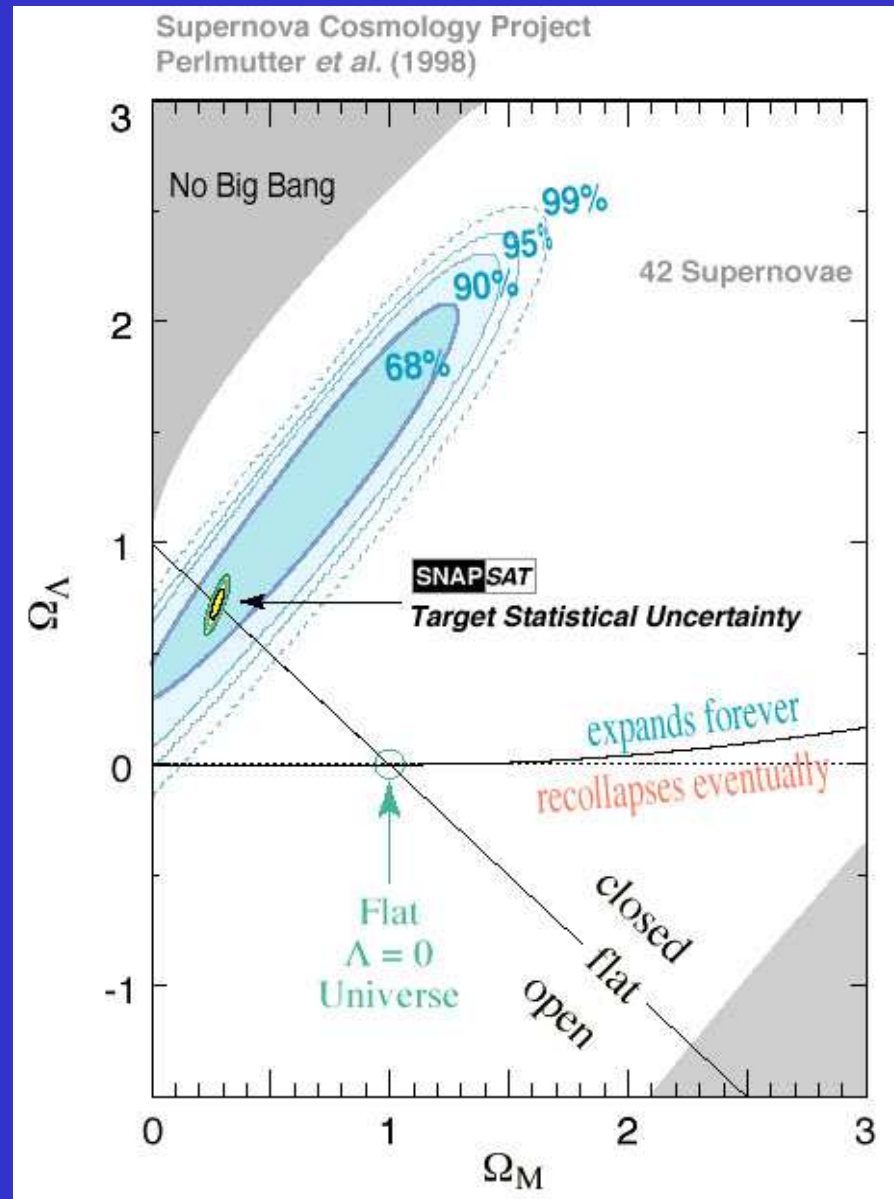


Spectrograph



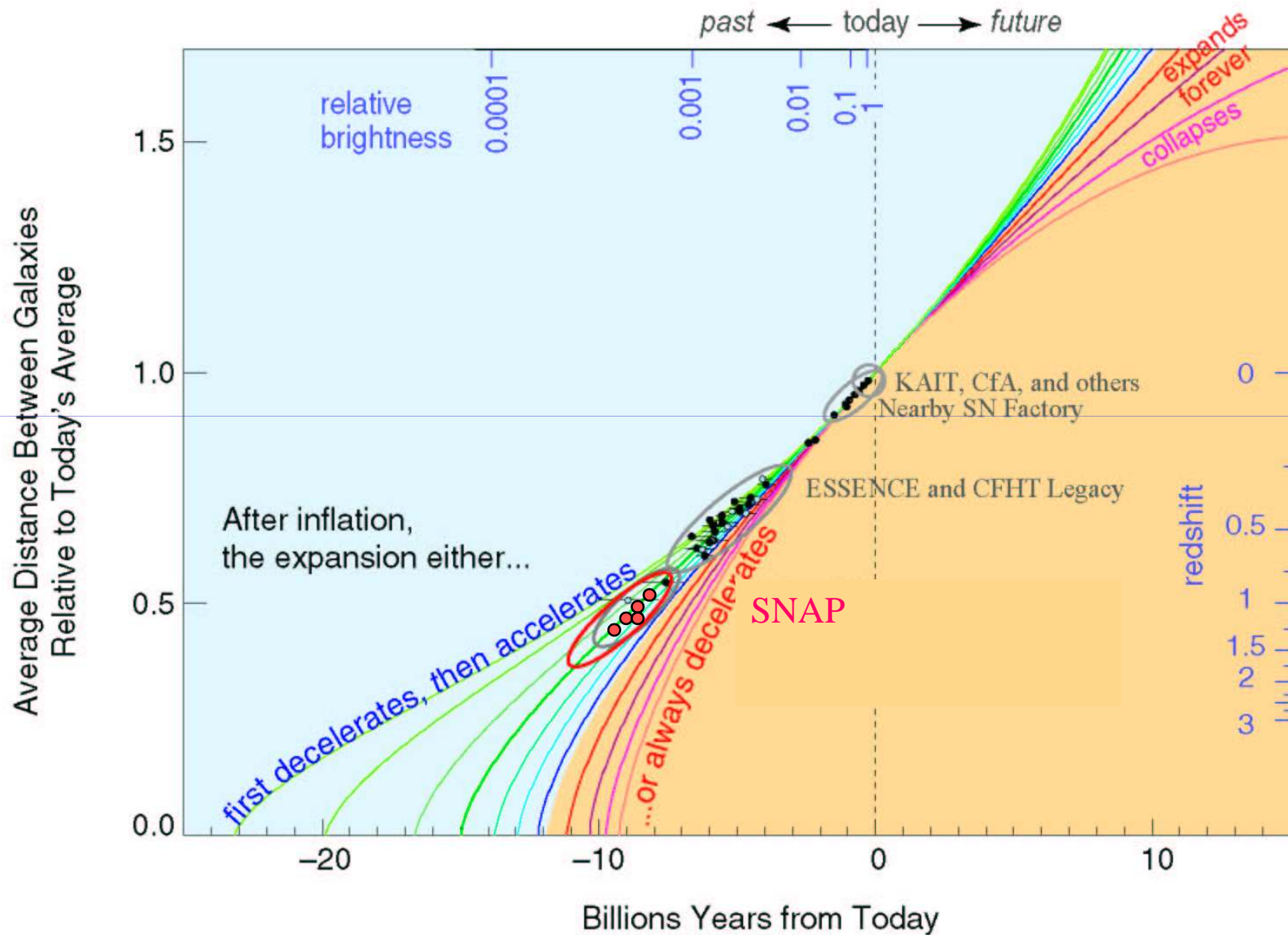
Made in LAM

Résultats attendus avec SNAP



But : Retracer l'histoire de notre Univers

Expansion History of the Universe



Conclusions

- Depuis la nuit des temps, les SuperNovae ont toujours intrigué les hommes.
- **Même si aujourd'hui les mécanismes d'explosion d'étoiles sont mal connus, les SN de type Ia sont devenus un outil indispensable en cosmologie.**
- En 1999, les SN nous ont donné une indication sérieuse que notre Univers est en expansion accélérée.
- **Cette nouvelle forme d'énergie qui compose 70% de notre Univers reste très mystérieuse.**
- Dans les 10 ans à venir, avec les projets au sol ou dans l'espace, notre compréhension de la structure globale de notre Univers devrait s'affiner.
- **Un bouleversement dans notre compréhension des lois fondamentales est hautement probable : modification de la gravité, nouvelle interaction, dimensions supplémentaires...**