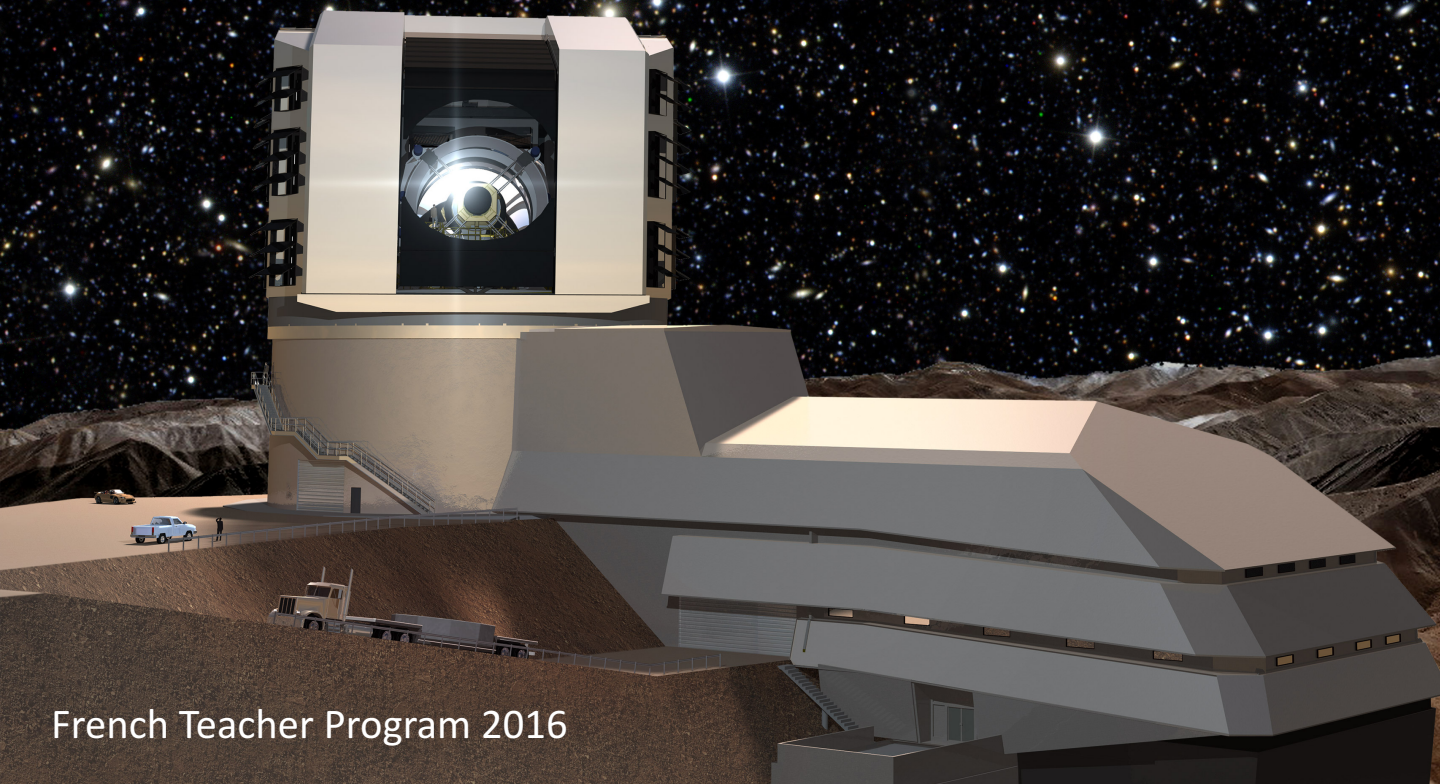


Introduction à la cosmologie

Le futur télescope LSST



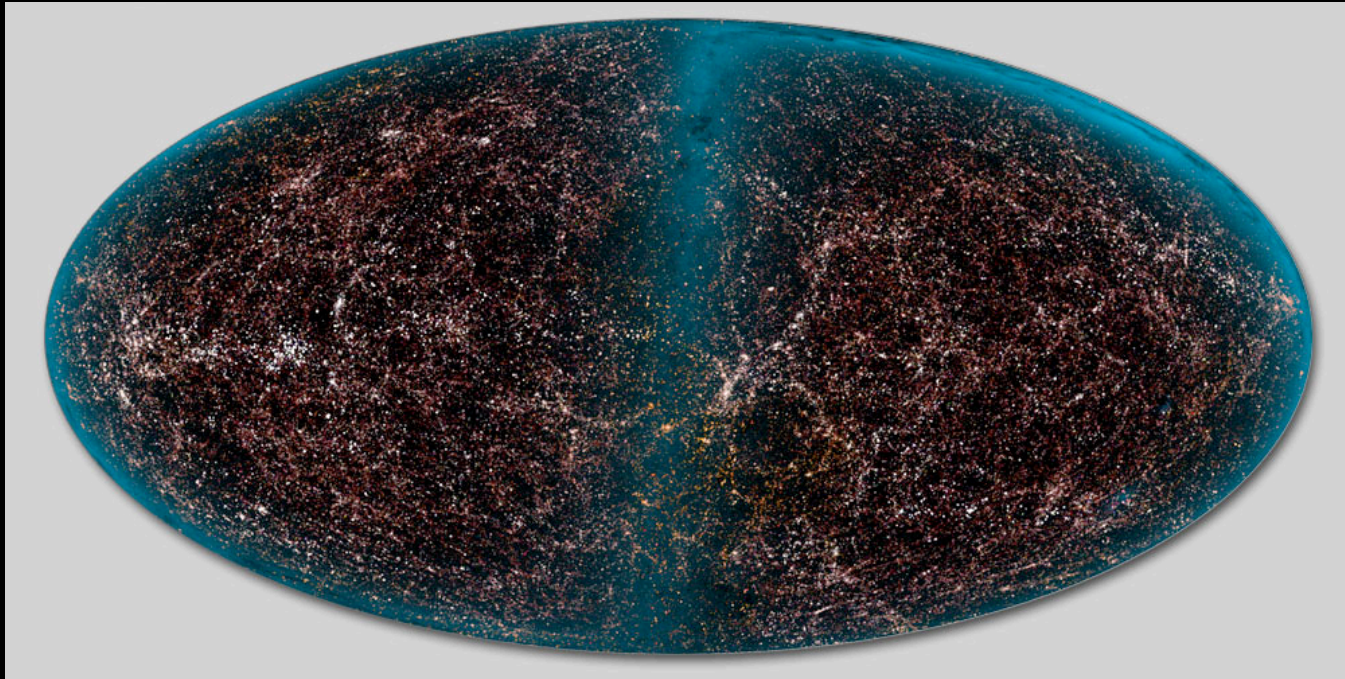
Jean-stephane Ricol
LPSC-IN2P3-CNRS-UGA

Qu'est-ce que la cosmologie ?

Cosmologie : du grec cosmo- (monde) et logos- (parole, étude)

La cosmologie est l'étude de l'Univers DANS SON ENSEMBLE

Il ne s'agit pas de comprendre le contenu mais le contenant et les lois qui régissent la formation, la dynamique et l'évolution de l'Univers

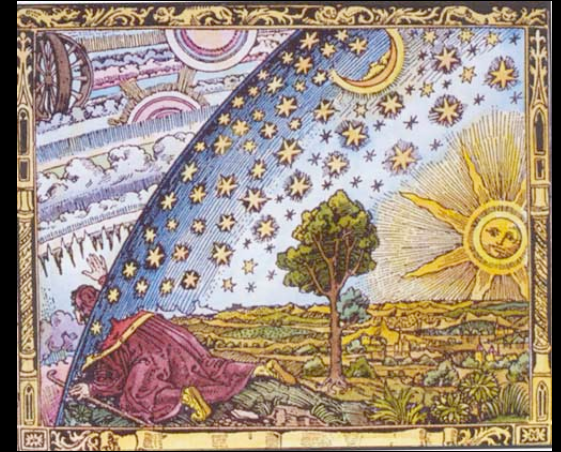


Peut-t-on comprendre l'Univers?

L'univers n'est pas un système comme les autres

1) Nous faisons partie du système décrit

2) L'expérience n'est pas reproductible

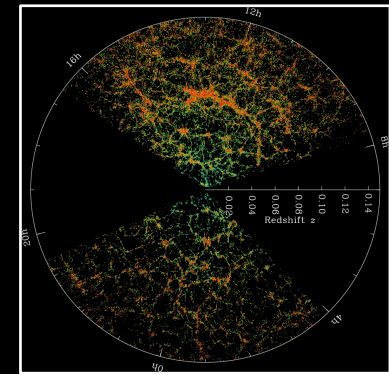
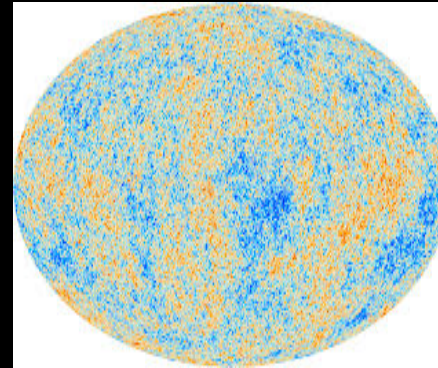
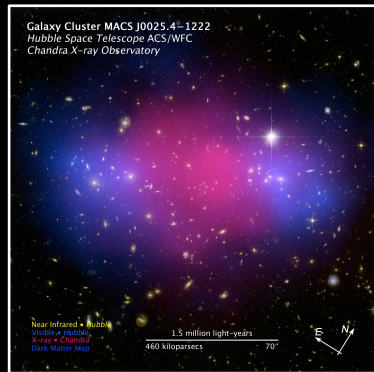
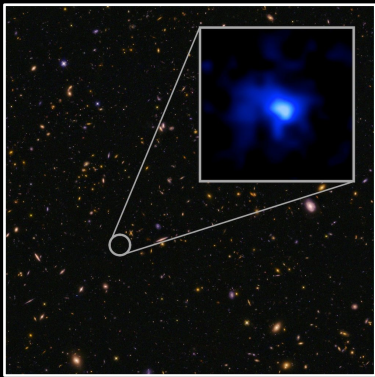


3) C'est l'état actuel qui est connu et l'état primordial qui est recherché



Modèle cosmologique Λ CDM

en accords avec de nombreuses observations



→ cosmologie de précision

$$H_0 = (67.8 \pm 0.9) \text{ km/s/Mpc}$$
$$\Omega_m = 0.308 \pm 0.012$$

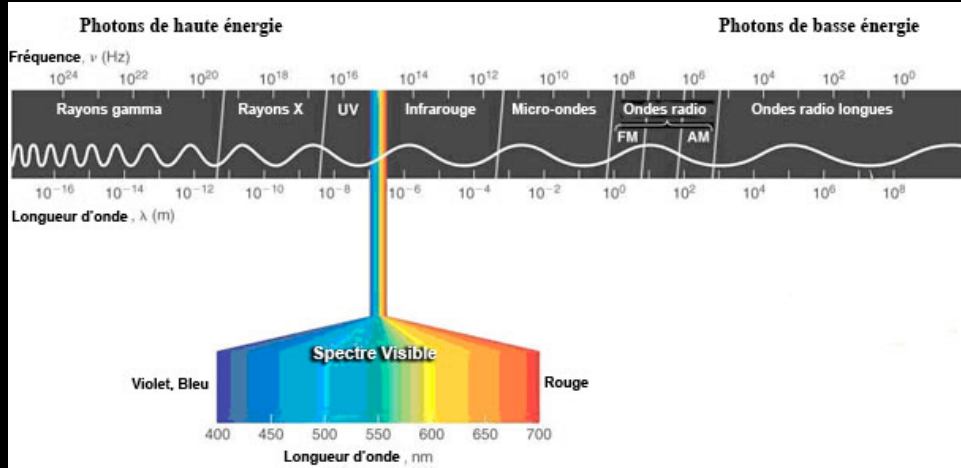
Planck 2015

Relativité générale
Physique des particules

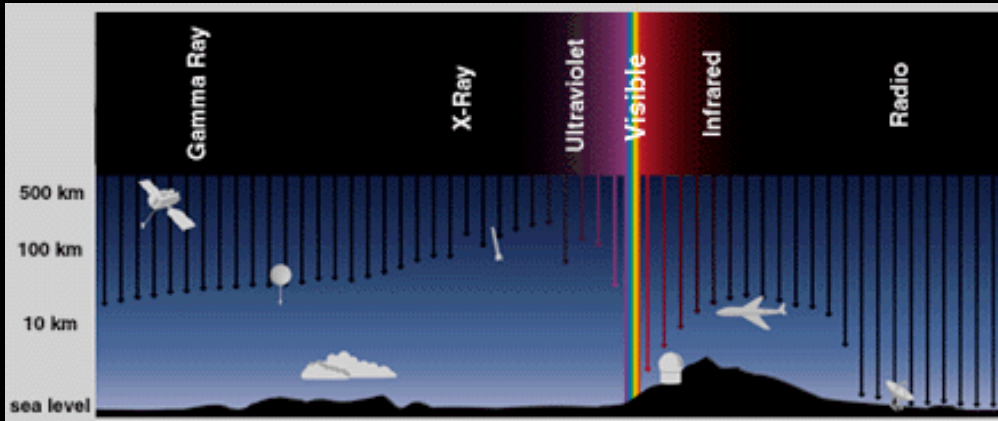
Observer l'Univers :

différents instruments, différentes longueurs d'onde

Le spectre électromagnétique



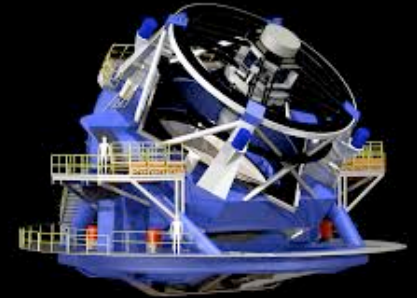
L'atmosphère terrestre



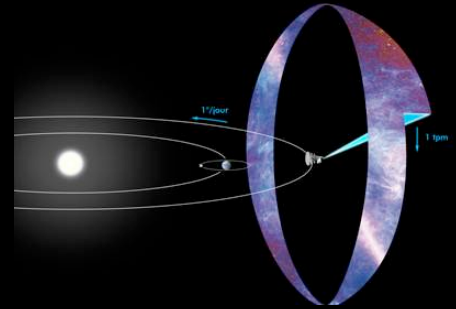
Fermi : gammas



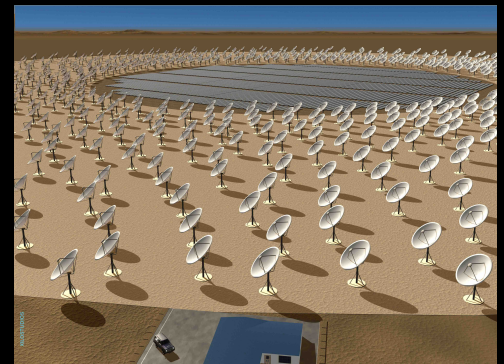
LSST : visible



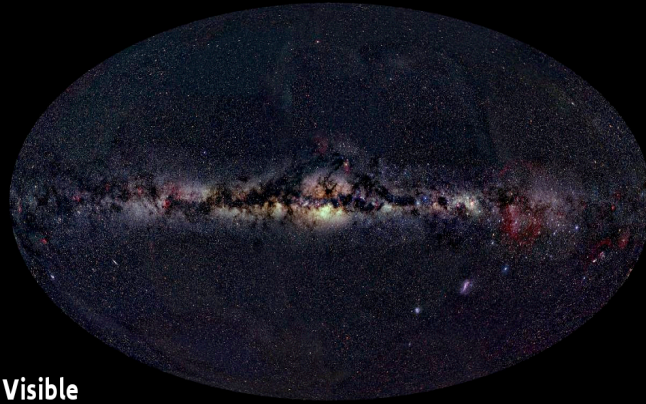
Planck : micro-ondes



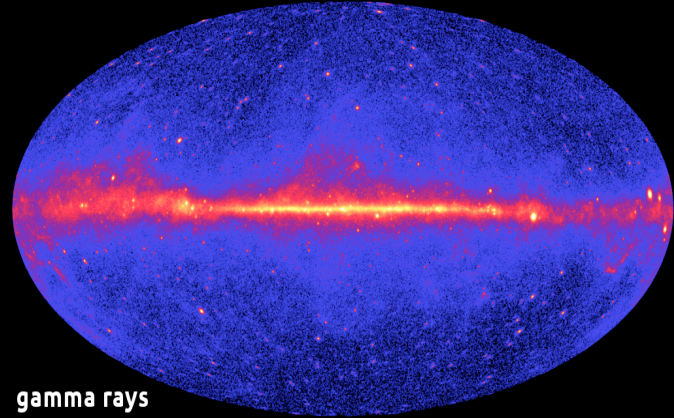
SKA : radio



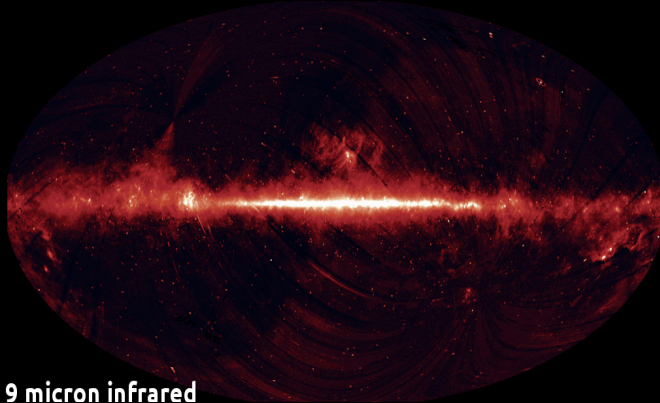
→ différentes images de l'Univers



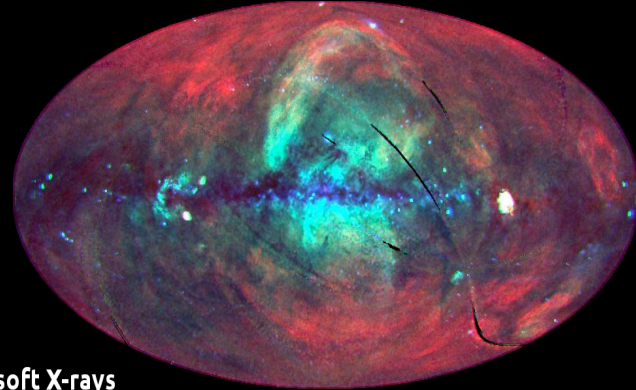
Visible



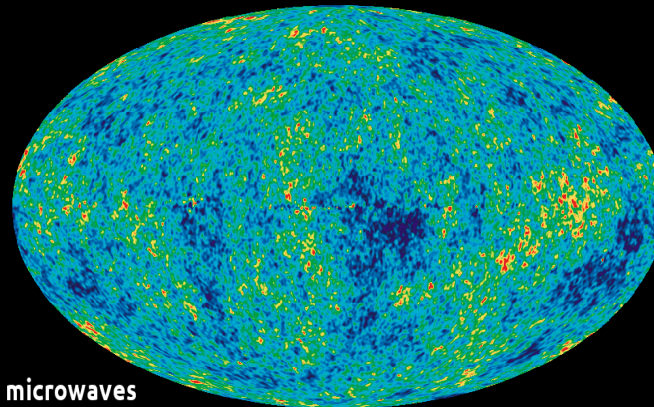
gamma rays



9 micron infrared



soft X-rays



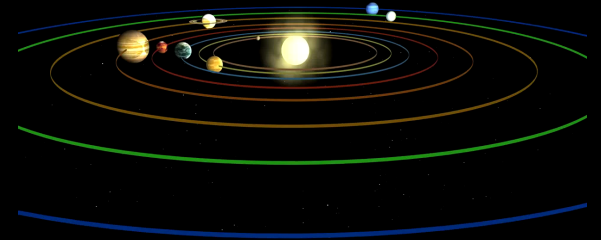
microwaves

La relativité générale

La loi universelle de la gravitation de Newton ...

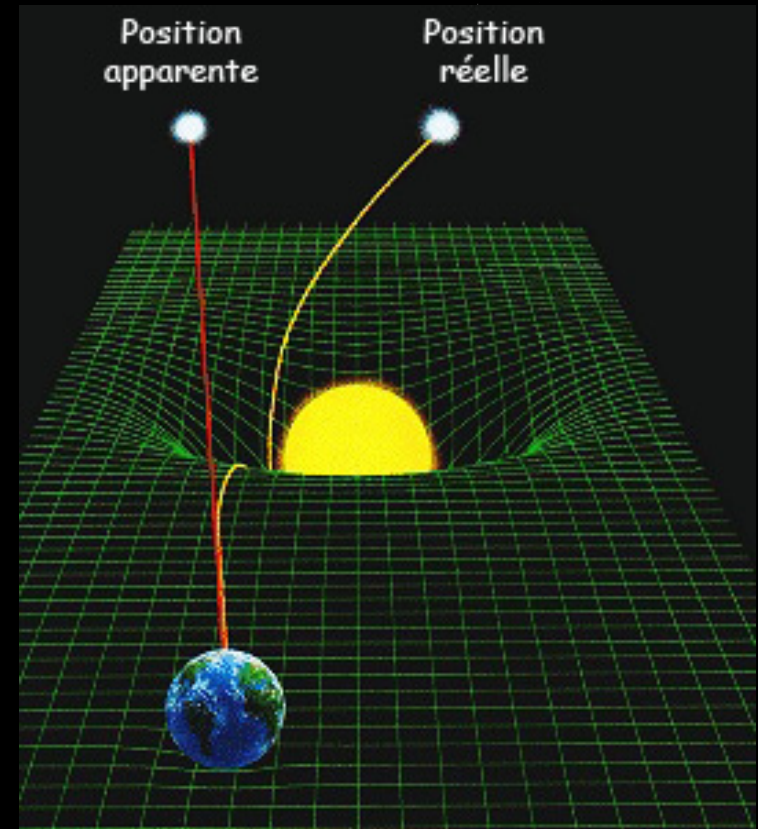
$$F_{A/B} = F_{B/A} = G \frac{M_A M_B}{d^2}$$

... ne marche plus en présence d'objets massifs



Le contenu de l'univers change sa géométrie

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$



Ce qu'on sait de l'Univers

- C'est grand
- C'est noir et froid
- C'est vide
- On sait pas bien de quoi c'est fait
- C'est dynamique et bien rangé



L'univers en quelques points clés

- C'est grand

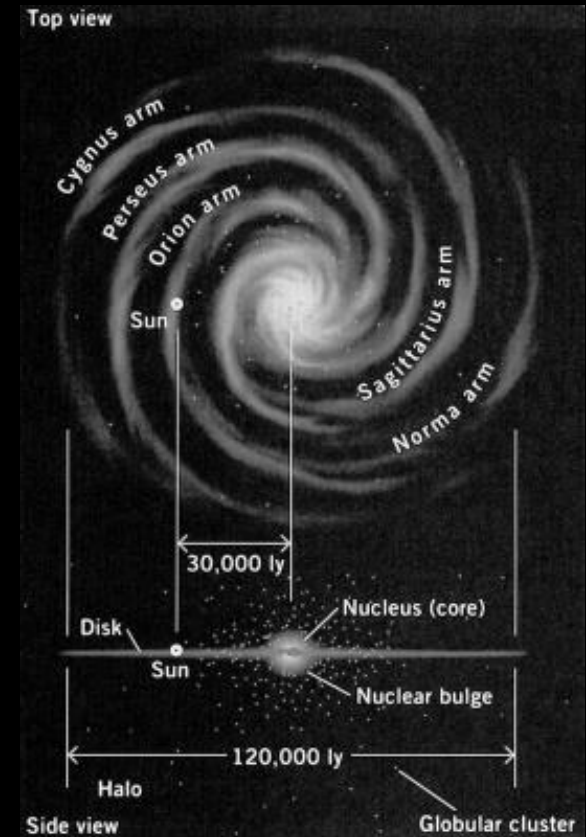
- Distance terre soleil : 8 min-lumière = 150 millions km = 1 u.a

- Distance étoile la + proche (alpha-centauri)
4.5 années lumières

- Taille de la galaxie : 120,000 années lumières

- Distance galaxie la + proche (Andromède)
2.5 millions années lumière

1 AL = 9461 milliards km



Passage vitesse lumière

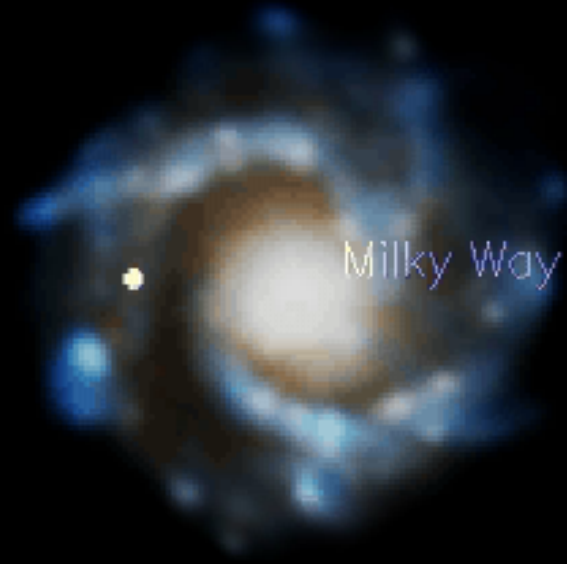


L'univers en quelques points clés

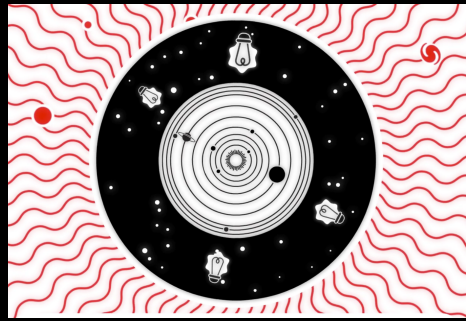
- C'est noir, froid et vide

- Température de l'univers = $2.7 \text{ °K} = -270\text{°C}$
- Densité de l'univers = $0.25 \text{ nucléon / m}^3$

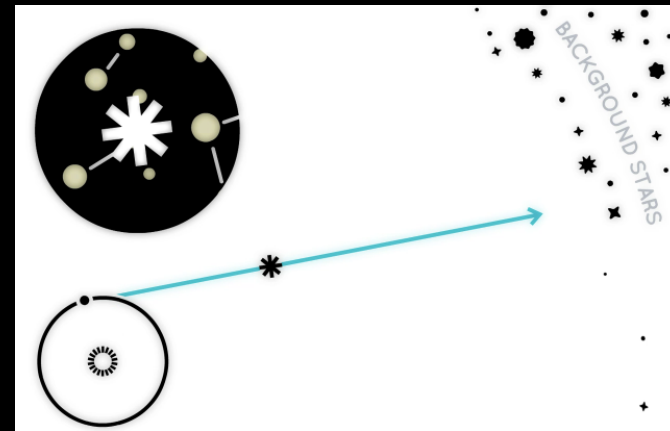
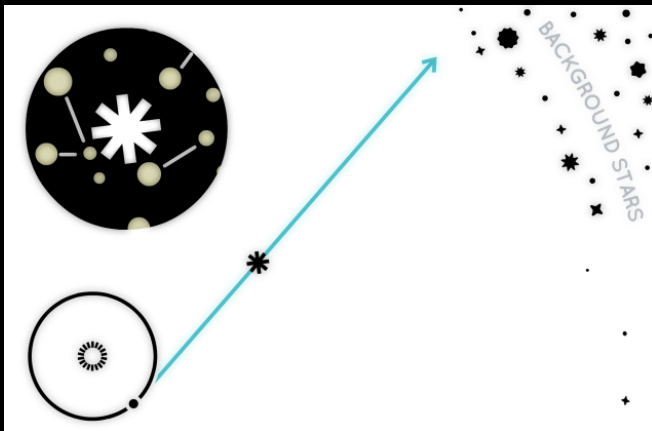
Relevé SDSS DR4 (2005) 565,715 Galaxies



Mesure des distances dans l'Univers



Distance des étoiles proches : parallaxe

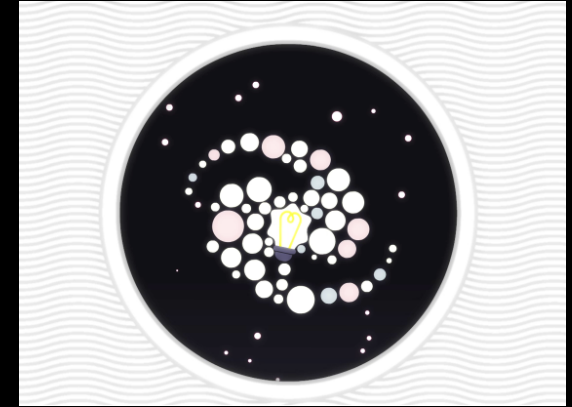
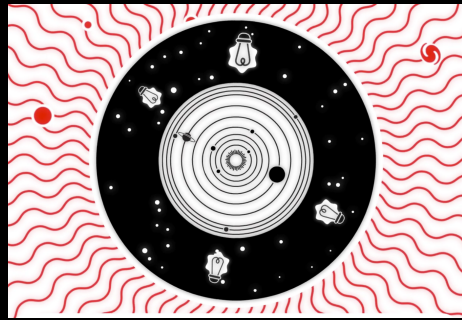


Céphéides : étoiles variables, période $T(I_0)$
En mesurant T et $I_{\text{terre}} \rightarrow$ distance



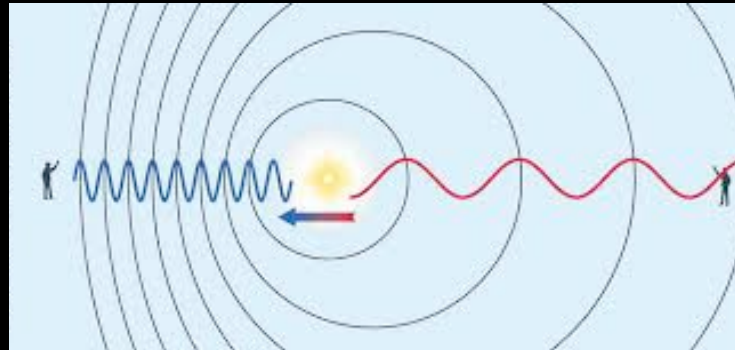
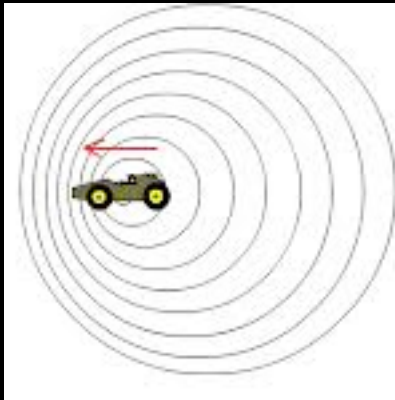
Chandelle standard

Mesure des distances dans l'Univers



Distances des galaxies : céphéides, SN

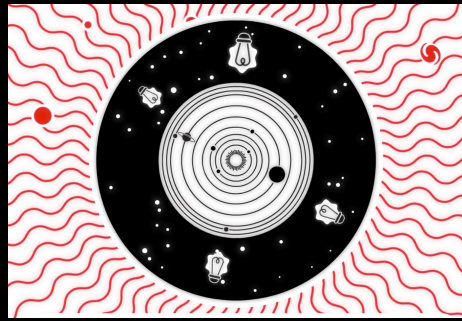
Vitesse des galaxies = changement de longueur d'onde



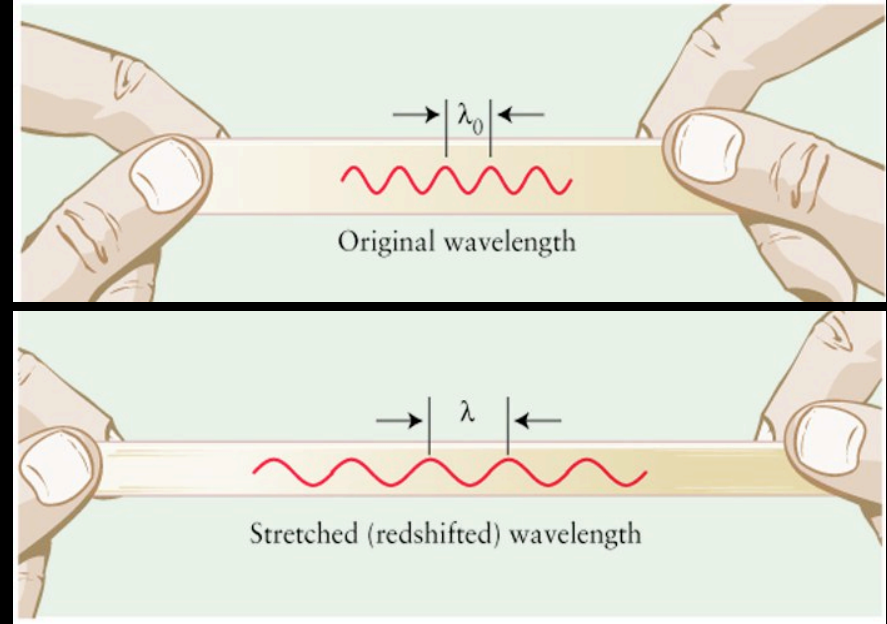
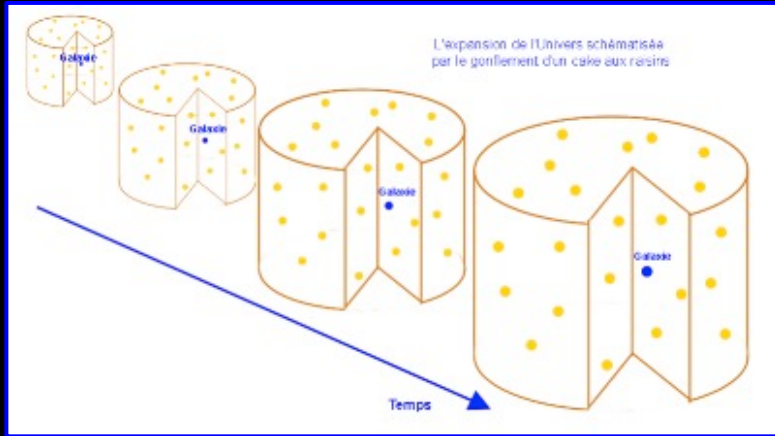
Le redshift
 $\lambda = \lambda_0 (1+z)$

Toutes les galaxies s'éloignent de nous !!
Plus elles sont loin plus elles s'éloignent vite

Mesure des distances dans l'Univers



L'espace est en expansion



Plus les galaxies sont lointaines plus il y a d'espace à étirer

Distances des galaxies lointaines (ou sans céphéides) : redshift z

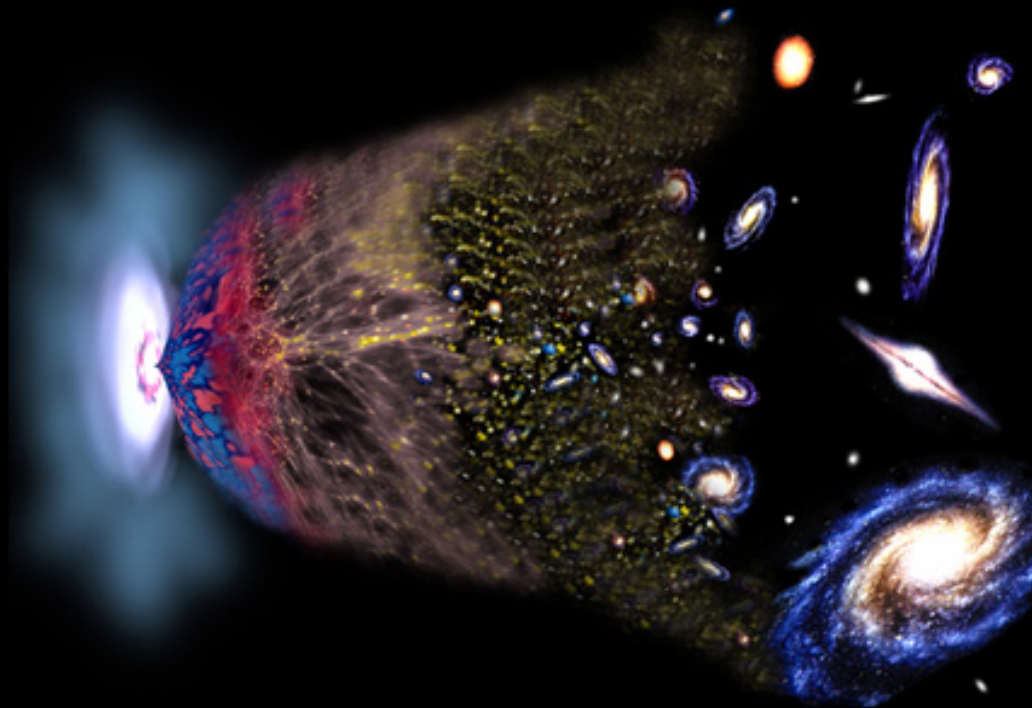
Dynamique et histoire de l'Univers

- C'est grand, c'est noir, c'est froid, c'est vide ... et ça s'arrange pas

L'espace-temps est **dynamique**, comme prédit par la relativité générale

L'Univers a une histoire :

Il y a eu un instant t_0 où il était arbitrairement petit et dense → le Big Bang



Dynamique et histoire de l'Univers

- C'est dynamique et bien rangé

Le Big-Bang est une révolution

Il a fallu de nombreux arguments pour convaincre la communauté scientifique

- L'expansion de l'univers :

Toutes les galaxies s'éloignent de nous

- L'âge de l'univers :

Les plus vieux objets observés ont un âge du même ordre que l'âge de l'Univers mais légèrement inférieur

- Evolution des galaxies : voir loin c'est voir dans le passé

- Nucléosynthèse primordiale : la quantité de noyaux légers produits dans les premiers instants de l'univers est en accord avec les prédictions

- Le fond diffus cosmologique (CMB)

Le fond diffus cosmologique (CMB)

3 minutes

Électrons libres du plasma et photons en interaction permanente :
Univers opaque et brûlant

Température > millions de degrés

pas d'image

Les électrons se lient aux protons pour former les premiers atomes d'hydrogène :
Univers → transparent

Température de milliers de degrés

380 000 ans

image dans le visible

L'énergie des photons diminue dans l'univers en expansion :
Univers refroidit

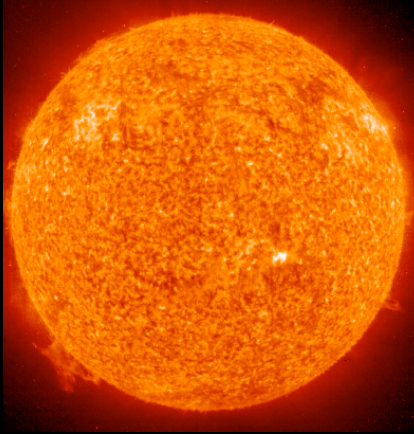
Température de quelques degrés au-dessus du zéro absolu (2.725 K aujourd'hui ~ -270°C)

image dans le submillimétrique

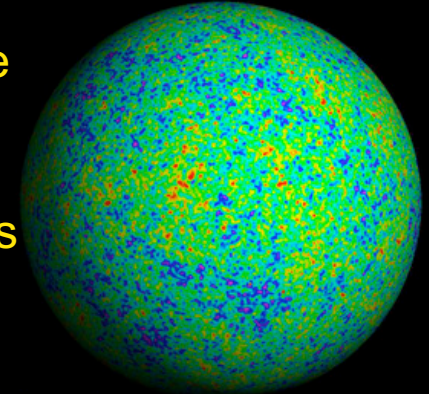
13,77 milliards d'années

La mesure du CMB

Rayonnement fossile = LA plus vieille image du cosmos qui soit accessible



De même que la surface du Soleil révèle se qui se passe au cœur de l'étoile, le rayonnement fossile garde l'empreinte du contenu et de l'évolution de l'Univers depuis le Big-Bang.



Tegmark

L'étude détaillée de ces inhomogénéités

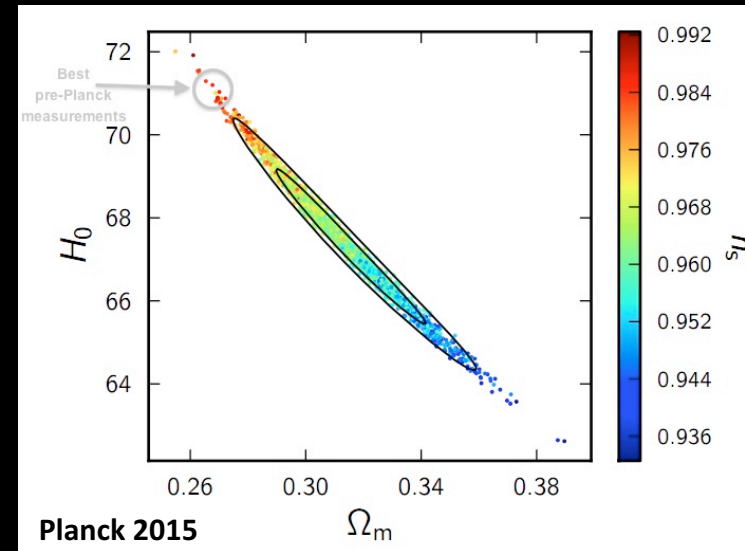
→ « paramètres cosmologiques »

Géométrie de l'espace-temps, vitesse d'expansion, quantité de matière ordinaire et de matière noire, âge de l'Univers ...

La cosmologie est devenue une science de précision

$$\Omega_m = 0.308 \pm 0.012$$

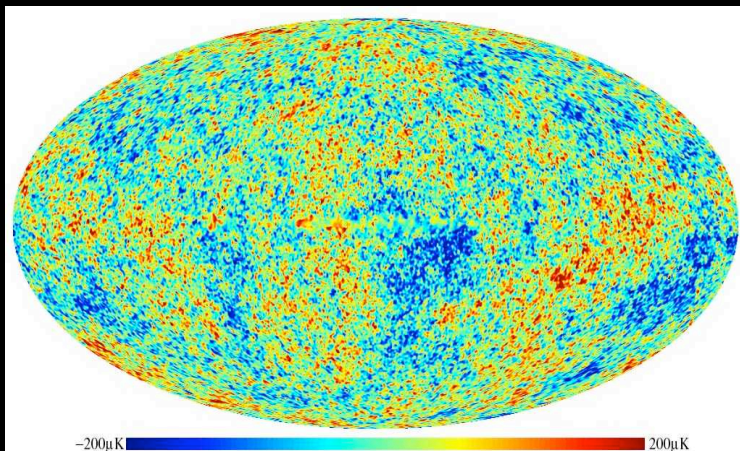
$$H_0 = (67.8 \pm 0.9) \text{ km/s/Mpc} \rightarrow d > 4425 \text{ Mpc} \Rightarrow V > c$$



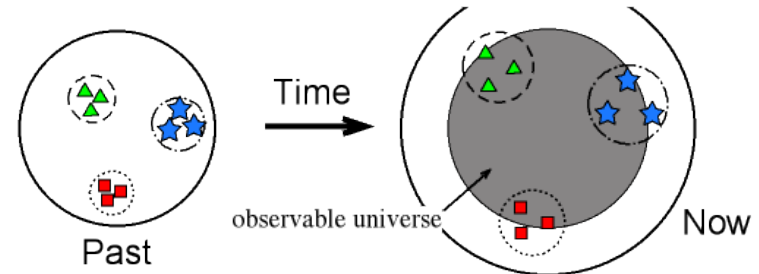
L'inflation

Atout essentiel : 1 solution unique pour 3 problèmes

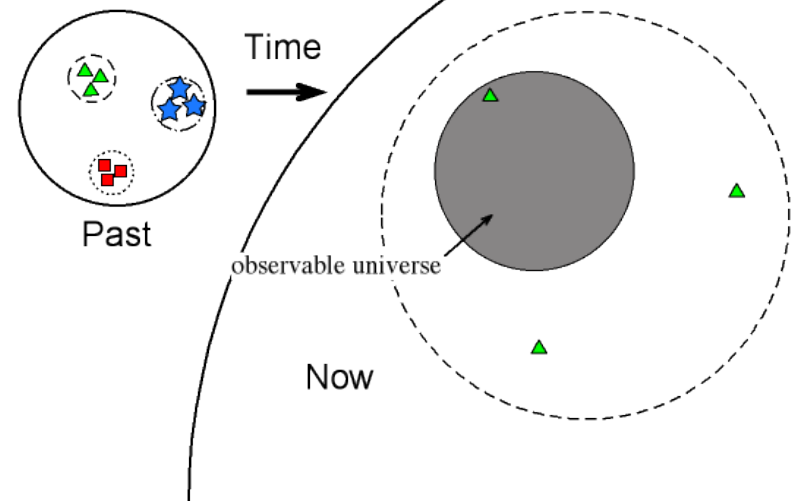
- Rend macroscopiques les fluctuations quantiques primordiales
- Explique l'homogénéité quasi parfaite sur tout le ciel
 $\sigma(T)/T \sim 10^{-5}$ problème de l'horizon



NO inflation: observable universe (shaded) includes parts that are different from each other

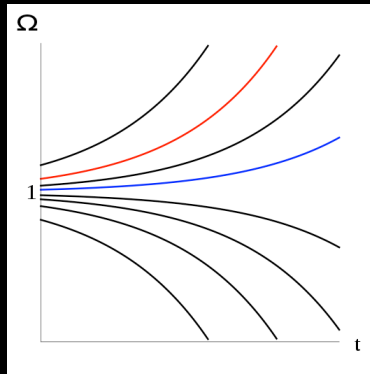
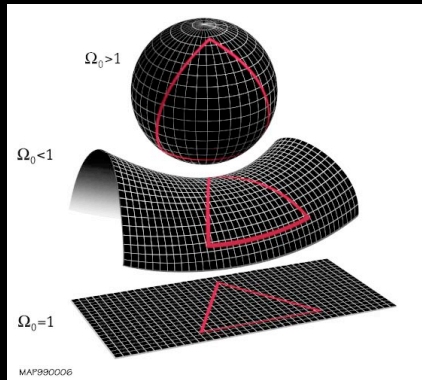


Inflation: observable universe (shaded) includes only one part that is the same throughout



L'inflation

- Conduit « naturellement » à un espace-temps plat (ou presque plat)



$$|\Omega_0 - 1| < 0.01$$

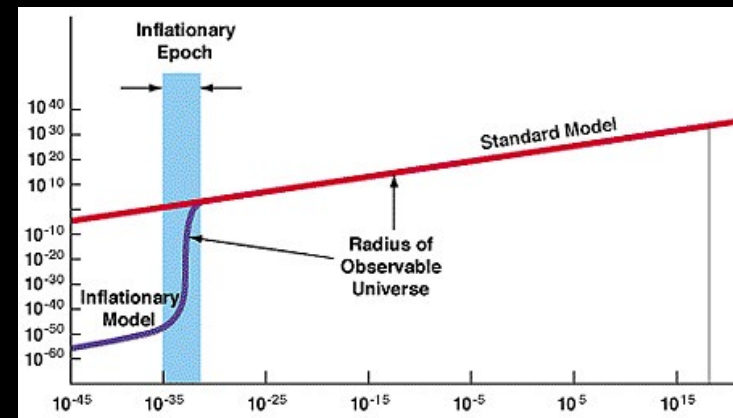
Densité univers = densité critique
Seul moyen d'avoir une expansion
raisonnable et une durée de vie de l'univers
compatible avec l'apparition de la vie

$$\rightarrow |\Omega_{\text{BB}} - 1| < 10^{-62}$$

Défaut majeur : basé sur un type de particule
encore jamais observé

Actuellement, on n'a pas mieux ...

Mais il existe des dizaines de familles de
modèles d'inflation



Big-Bang = modèle effectif potentiellement valable jusqu'à 10^{-44} seconde après $t=0$
Inflation = nom générique d'une foule de modèles pour un phénomène très bref qui a
eu lieu $\sim 10^{-32}$ seconde après $t=0$

Histoire de l'Univers



10^{-32} sec.

*inflation
primordiale*

1 seconde

*lumière et
matière sont
formées*

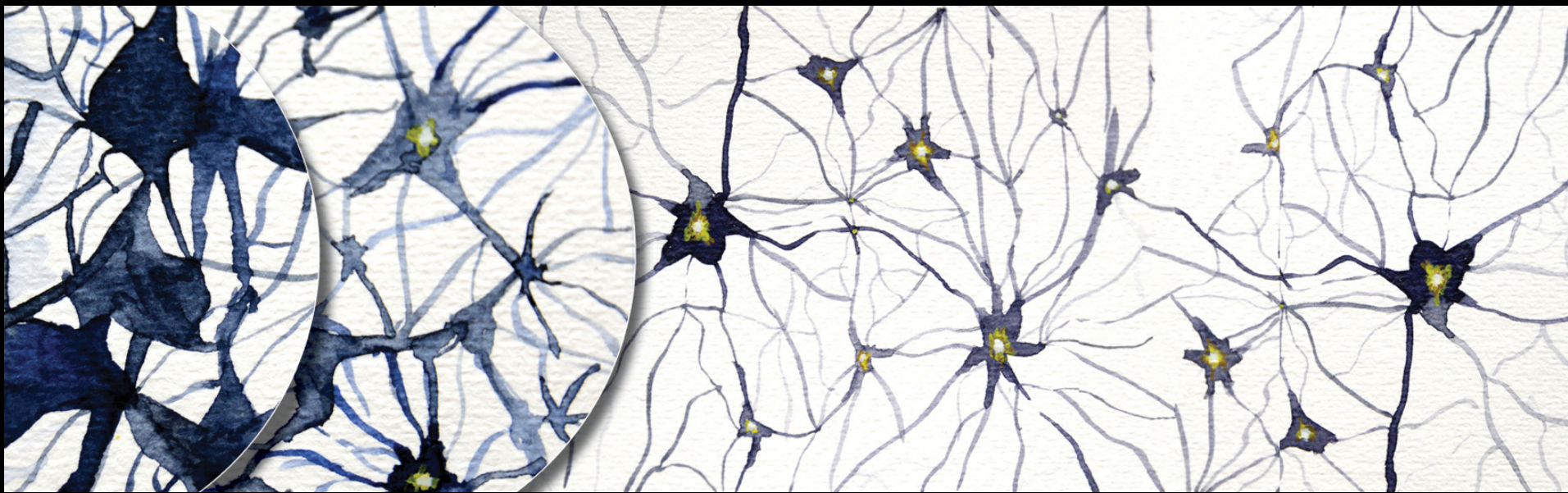
100 secondes

*lumière et matière sont
couplées
premiers noyaux*

380 000 ans

*lumière et
matière se
séparent*

Histoire de l'Univers



300-600 millions d'années

*âges
sombres*

*formation des
premières étoiles*

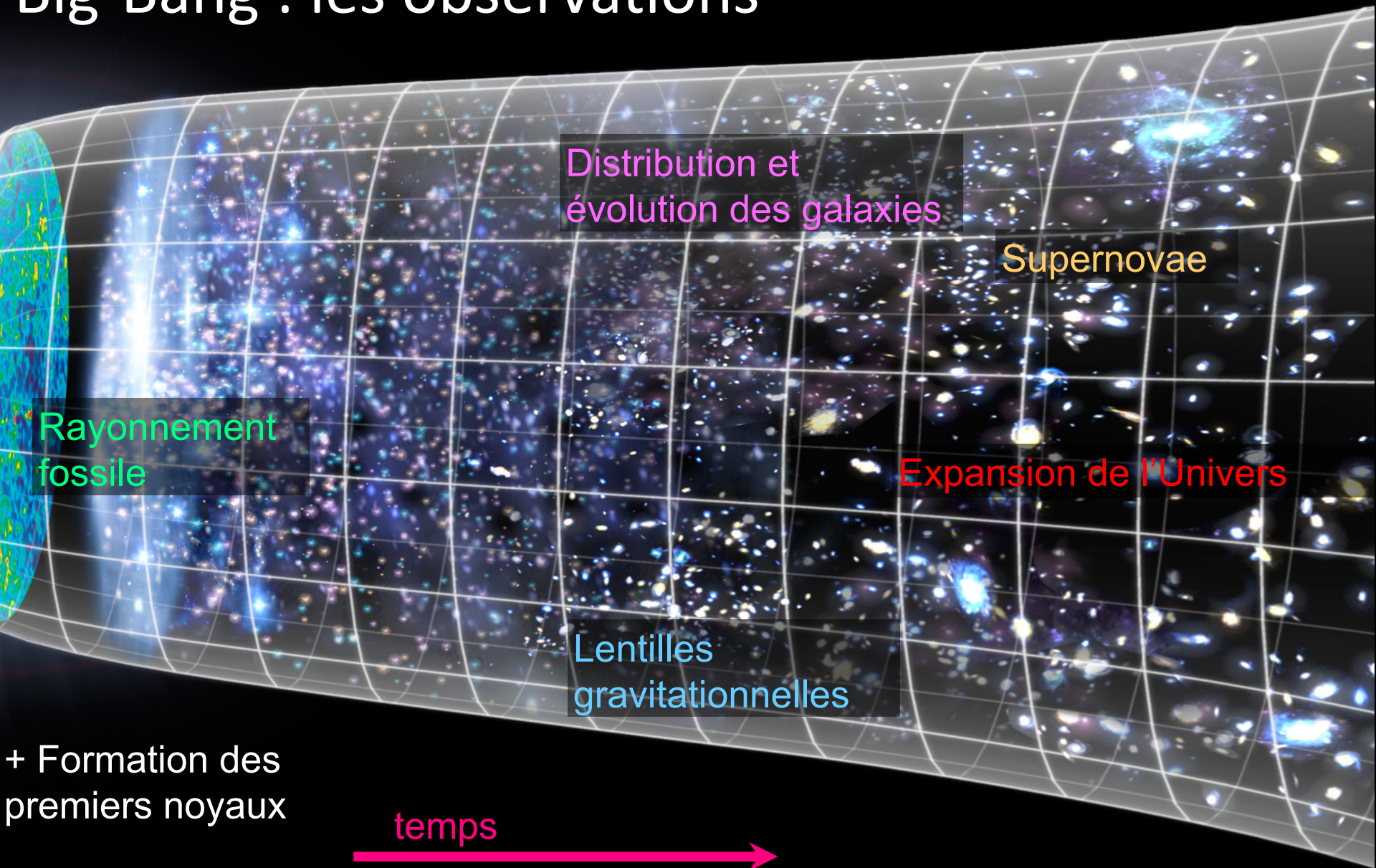
quelques milliards d'années

évolution des galaxies

13,77 milliards
d'années

à présent

Big-Bang : les observations

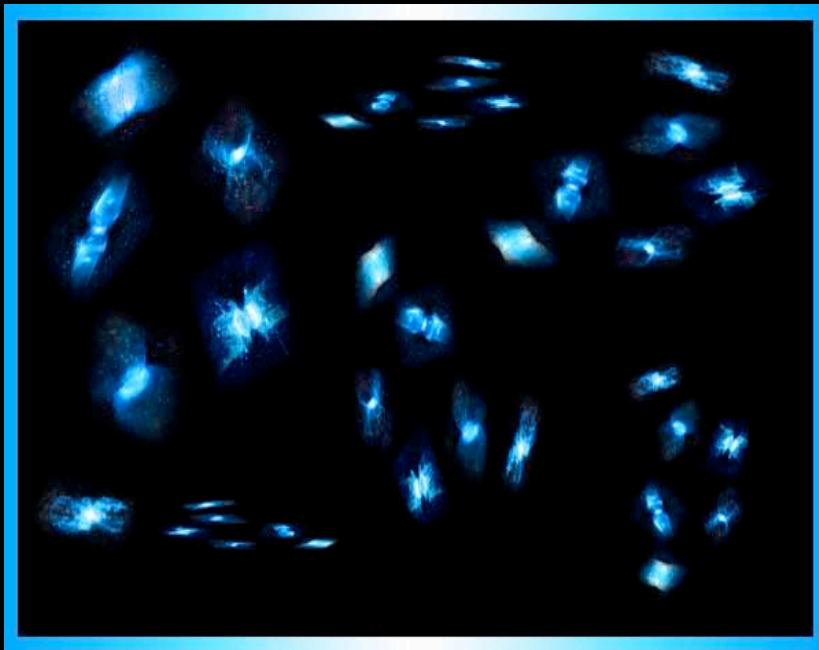


Le modèle du Big-Bang est en accord toutes ces observations

Les deux grandes inconnues

Malgré l'incroyable cohérence de la relativité générale pour décrire l'expansion de l'Univers et de la physique des particules pour comprendre ce qu'a été et ce qu'est le contenu de l'Univers, il reste deux ombres au tableau :

La matière noire et l'énergie noire



$$\Omega_m = 0.308 \pm 0.012$$

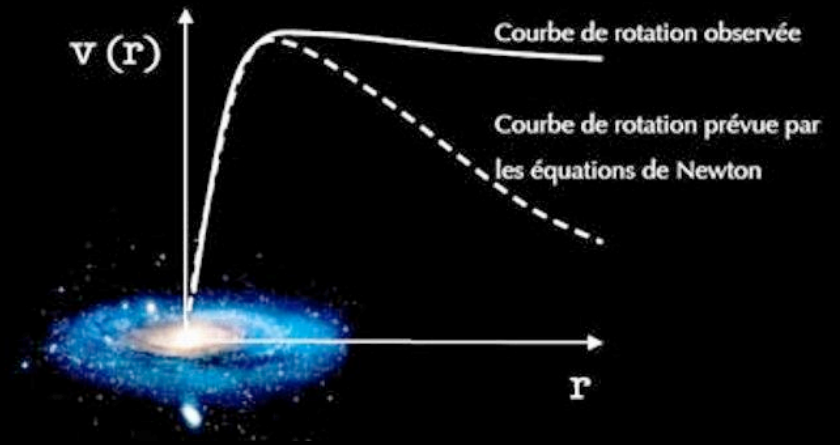
$$\Omega_{\text{étoiles+nuages H}_2} \sim 0.05$$

$\Omega_m < 1 \rightarrow$ il y a quelque chose en plus de la matière

La matière noire

Les courbes de rotations des galaxies

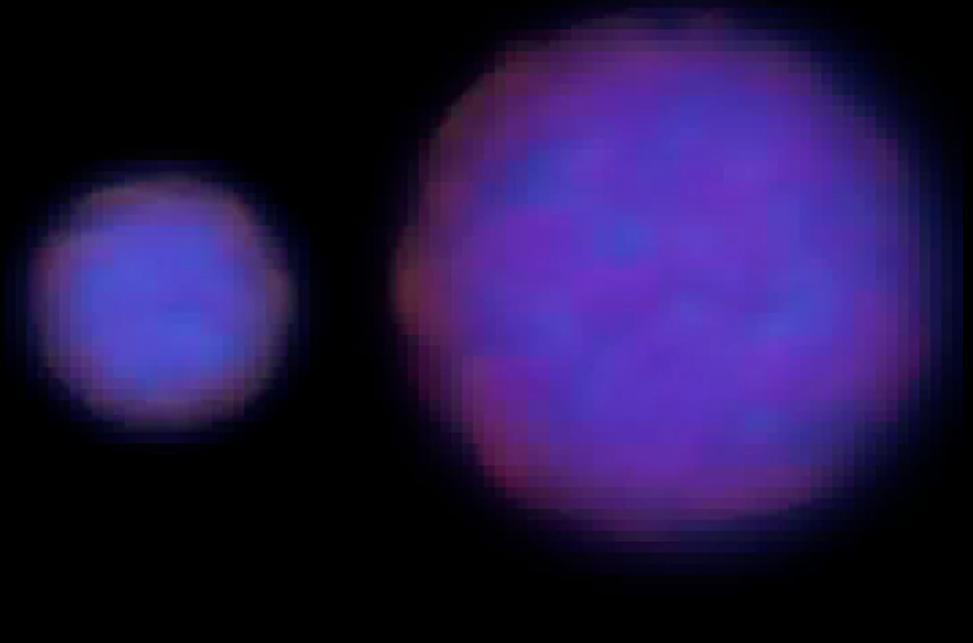
$$V(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}$$



Collision amas de galaxies : matière noire (lensing) vs matière baryonique (Xrays)



Amas de la balle



La matière noire

On sait qu'elle est là

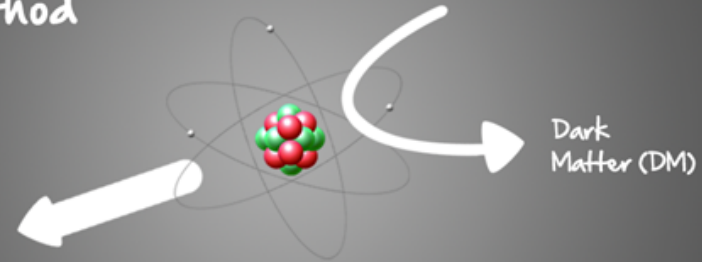
On sait combien on en a
(galaxies, amas, univers)

On n'a pas la moindre
information sur sa nature

Aucune découverte faite en
laboratoire

Dark Matter search strategies

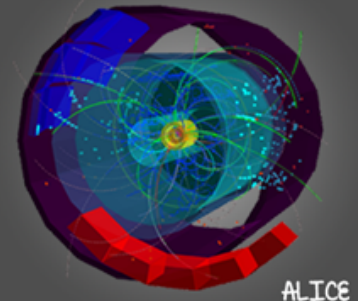
Direct Method



Indirect Method



Production
at the Large Hadron Collider



Un univers en expansion accéléré



La mesure des vitesses (z) des SN Ia à différentes distances (chandelles standards) \rightarrow facteur d'expansion
En comparant les valeurs à différentes époques on peut ainsi mesurer la décélération de l'Univers \rightarrow valeur négative
L'Univers est en expansion accélérée !

Nouvelle force répulsive à grande distance :
l'énergie noire.

Ajout de nouveaux champs (ou gravité modifiée)

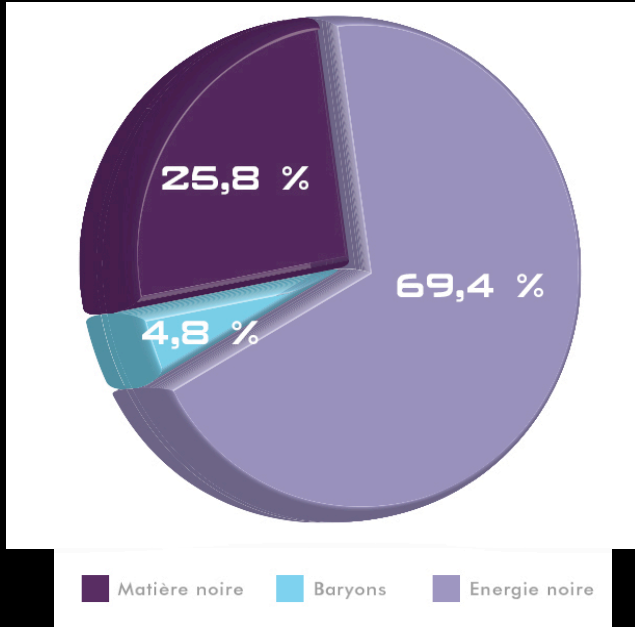
On peut paramétrer l'énergie noire à travers son équation d'état : $P = w\rho$

$$w = w_0 + w_a a(t)$$

Modèle le + simple Λ CDM : $w = w_0 = -1$

Contenu énergétique de l'univers

Mesures Planck 2015



Le pouvoir du côté obscur :

5% de matière ordinaire

26% de matière noire

69% d'énergie noire



Comprendre l'énergie noire est l'un des enjeux majeurs des prochaines décennies

Mesurer l'énergie noire

Sonder la **géométrie** et la **dynamique** de l'Univers à différentes époques

Le CMB : **taux d'expansion de l'Univers**, **taux de formation des structures**

Les SNe Ia : **chandelles standards** = $d \rightarrow v$ vs $d = H$

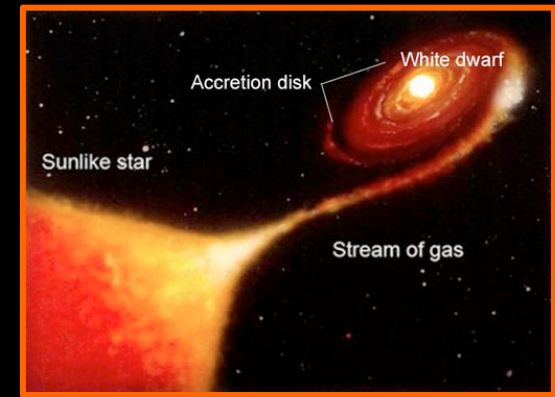
Les BAO : **règle standard**

Les amas de galaxies : **taux de formation des structures**

Les lentilles gravitationnelles : **masse des amas**, **taux de formation des structures**

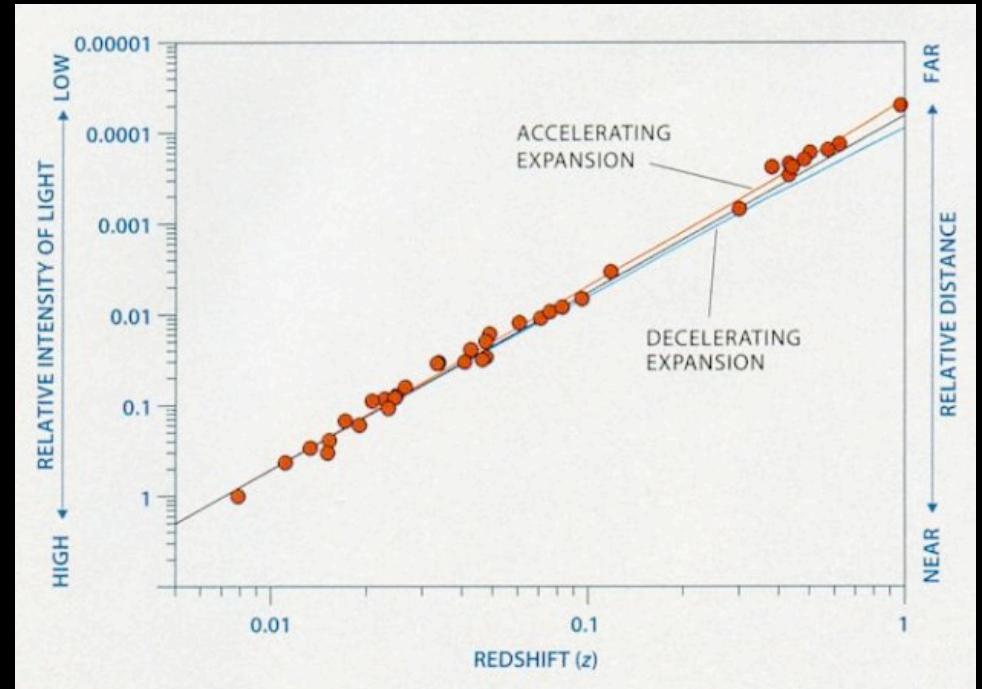
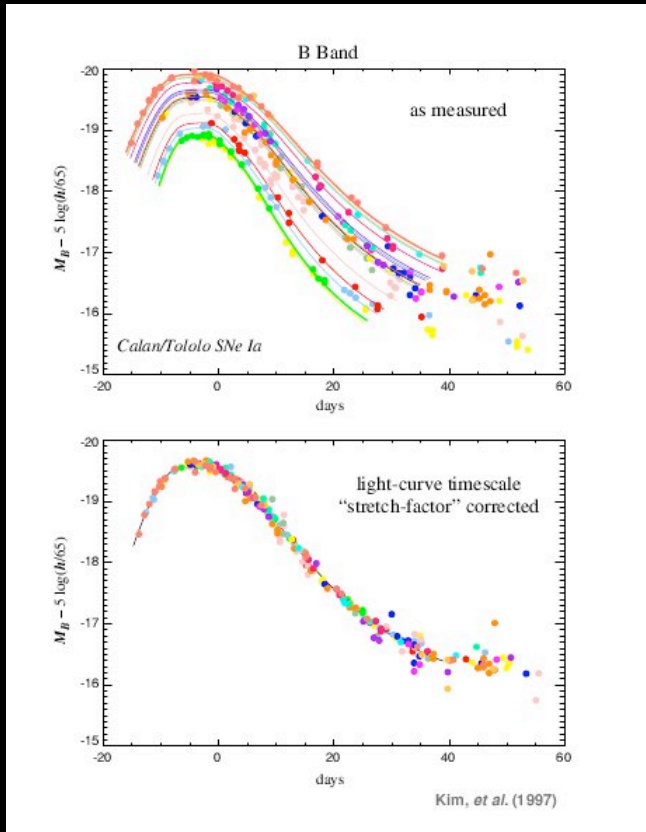
Les sondes sont complémentaires

Les SNIa : mort spectaculaire d'une étoile



www.eso.org

Les SNIa : chandelles standards



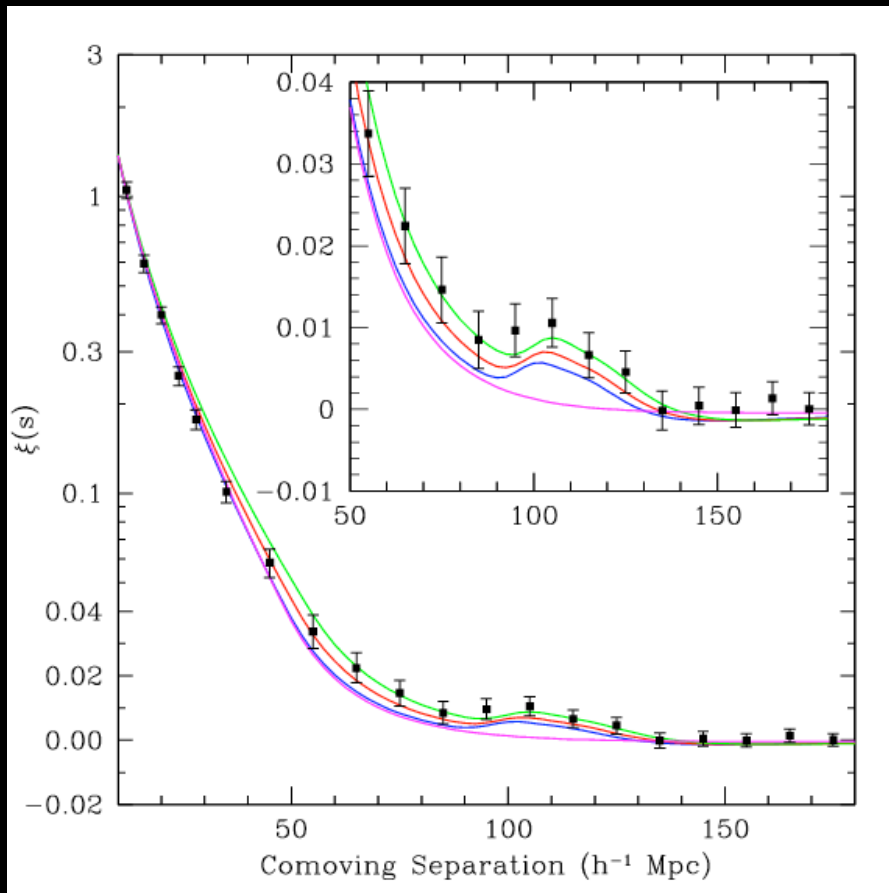
Prix Nobel 2011

La durée d'émission dépend
de l'intensité → distance

Les oscillations acoustiques de baryons (BAO)

Règle standard

Les fluctuations de densité dans le plasma primordial ont été figées au moment du découplage → **une empreinte dans la distribution de matière**



Il existe une distance privilégiée à environ **150 Mpc**
Prédite en 1970, observée en 1999

On peut mesurer la valeur de cette règle pour tester la géométrie de l'univers à différentes époques (z) et **contraindre l'évolution de $w(t)$**

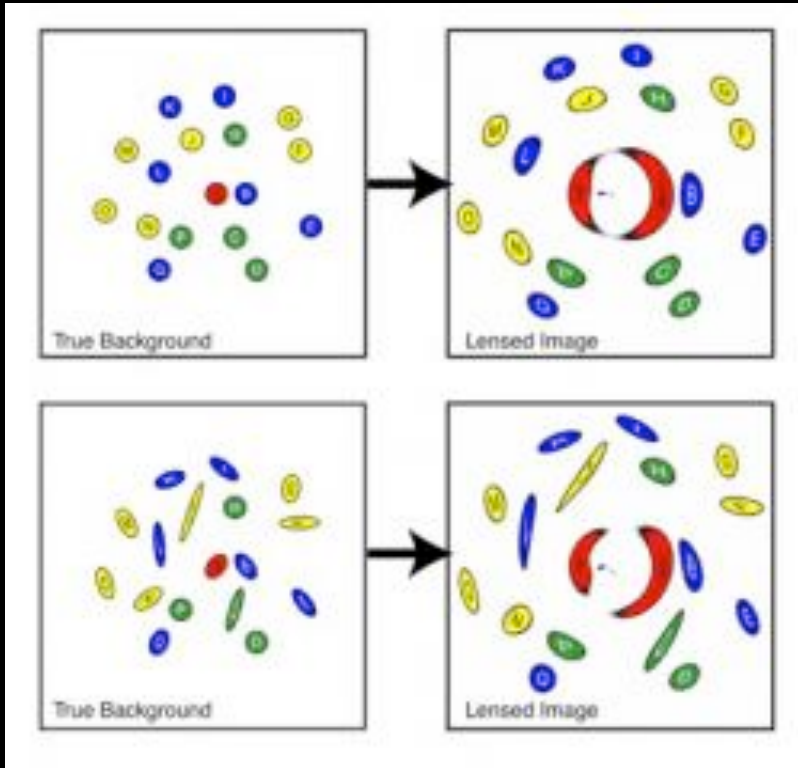
Les lentilles gravitationnelles



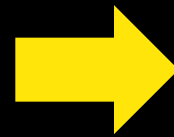
www.spacetelescope.org

Permet de mesurer la **masse totale de l'amas** lentille
Sensible à la **géométrie** et à la **croissance des structures**

Les lentilles gravitationnelles



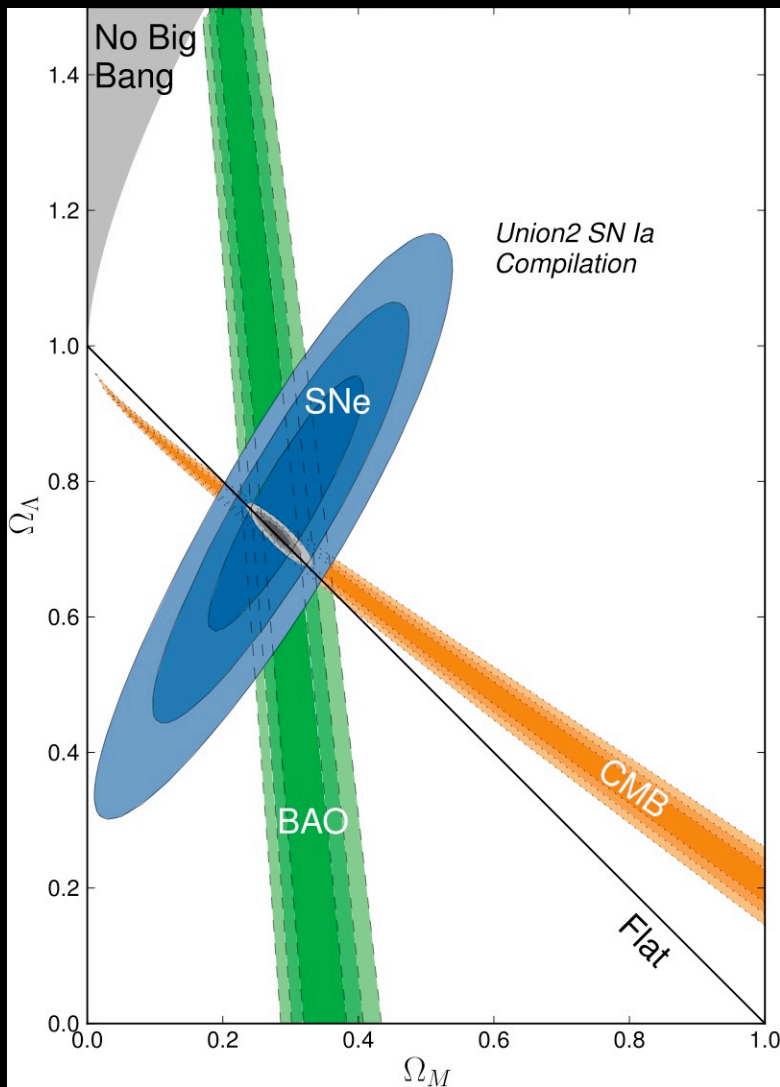
Lentille faible (Weak Lensing)



Corréler les ellipticités

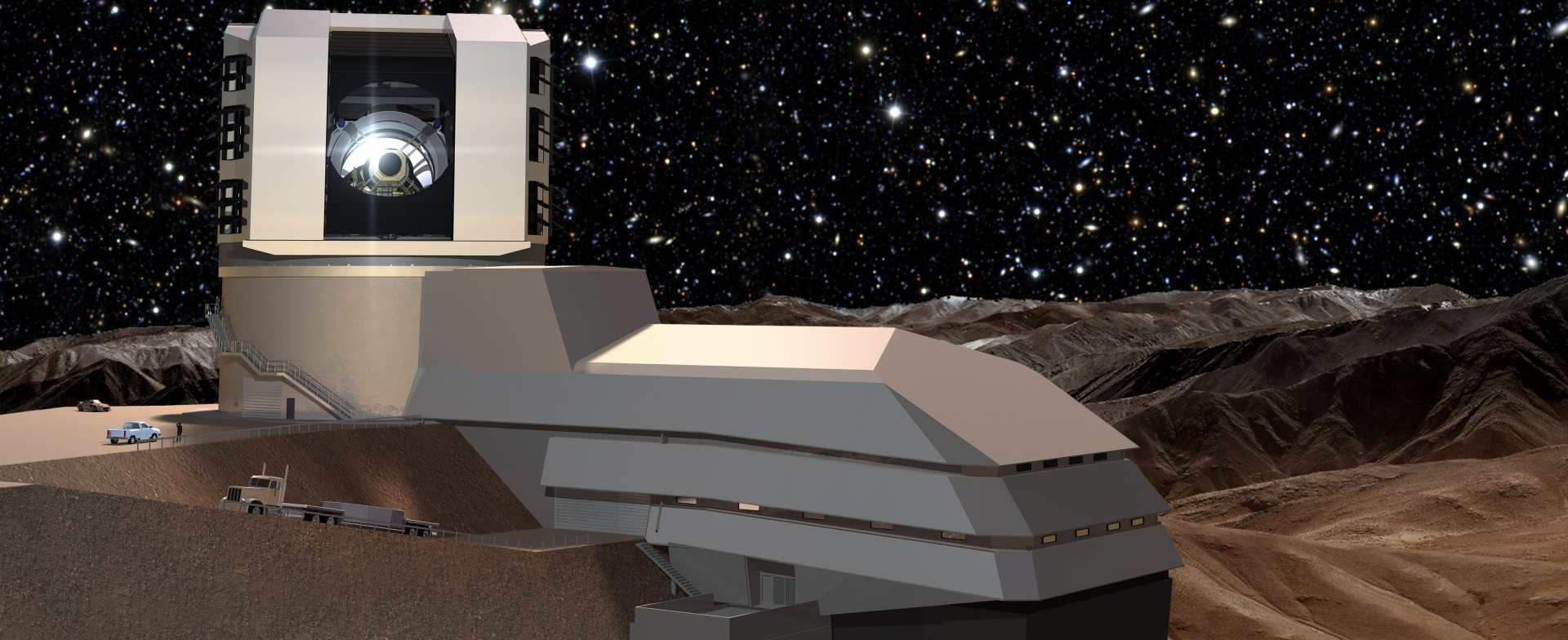
Nécessite un très grand échantillon de galaxies et une excellente calibration des instruments

Combiner les différentes sondes



→ Réduire les incertitudes

LSST : faire un film 3D de l'univers



Large Synoptic Survey Telescope

Synoptic = qui donne une vue générale d'un ensemble qu'on peut ainsi embrasser d'un seul coup d'œil

Les enjeux techniques du LSST : **voir en grand et loin**

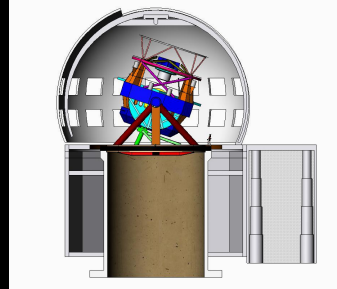
- **Un grand champ de vue**
Observer beaucoup d'objets sur une seule image
Repasser fréquemment sur les mêmes zones = film
- **Une grande surface de collection**
Détecter les objets faibles / lointains



Hubble

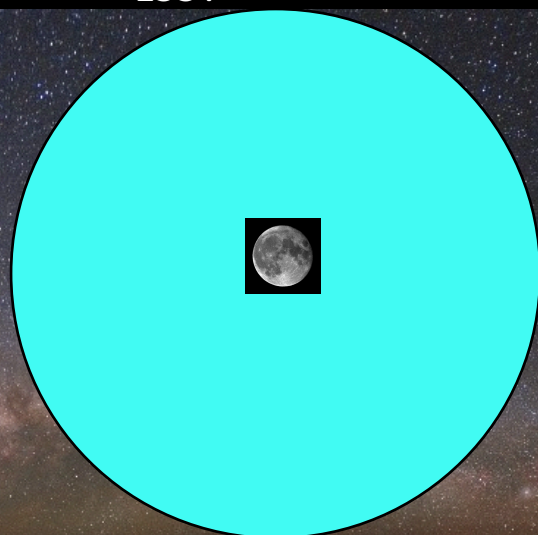


Keck



LSST

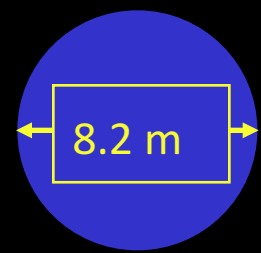
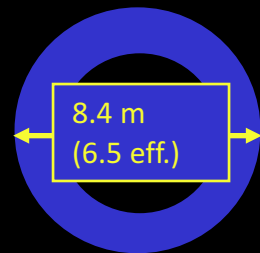
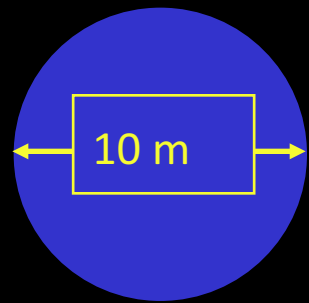
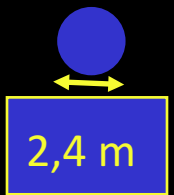
VLT



Champ de vision
X 15



Miroir Primaire

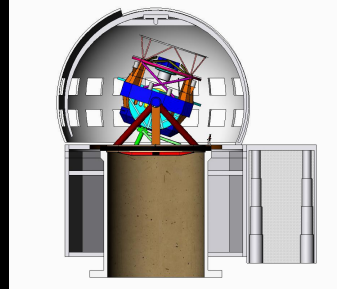




Hubble



Keck



LSST

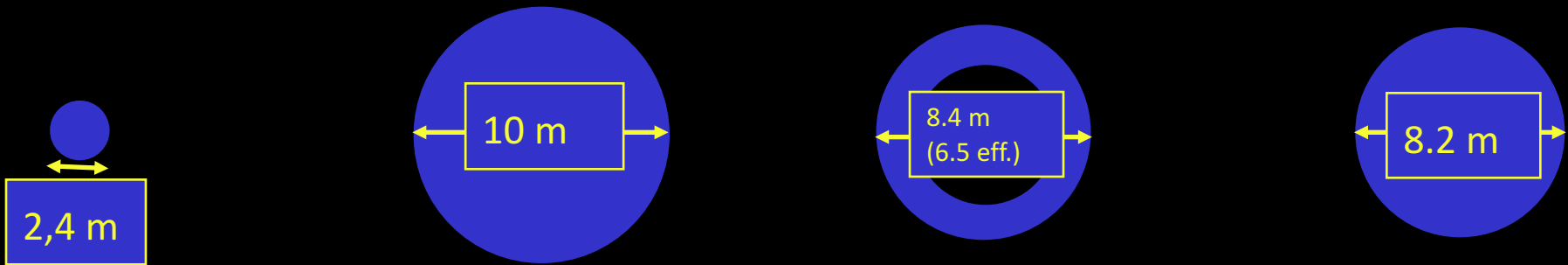
VLT



Champ de vision
Taille réelle

YURI
BELETSKY

Miroir Primaire



2,4 m

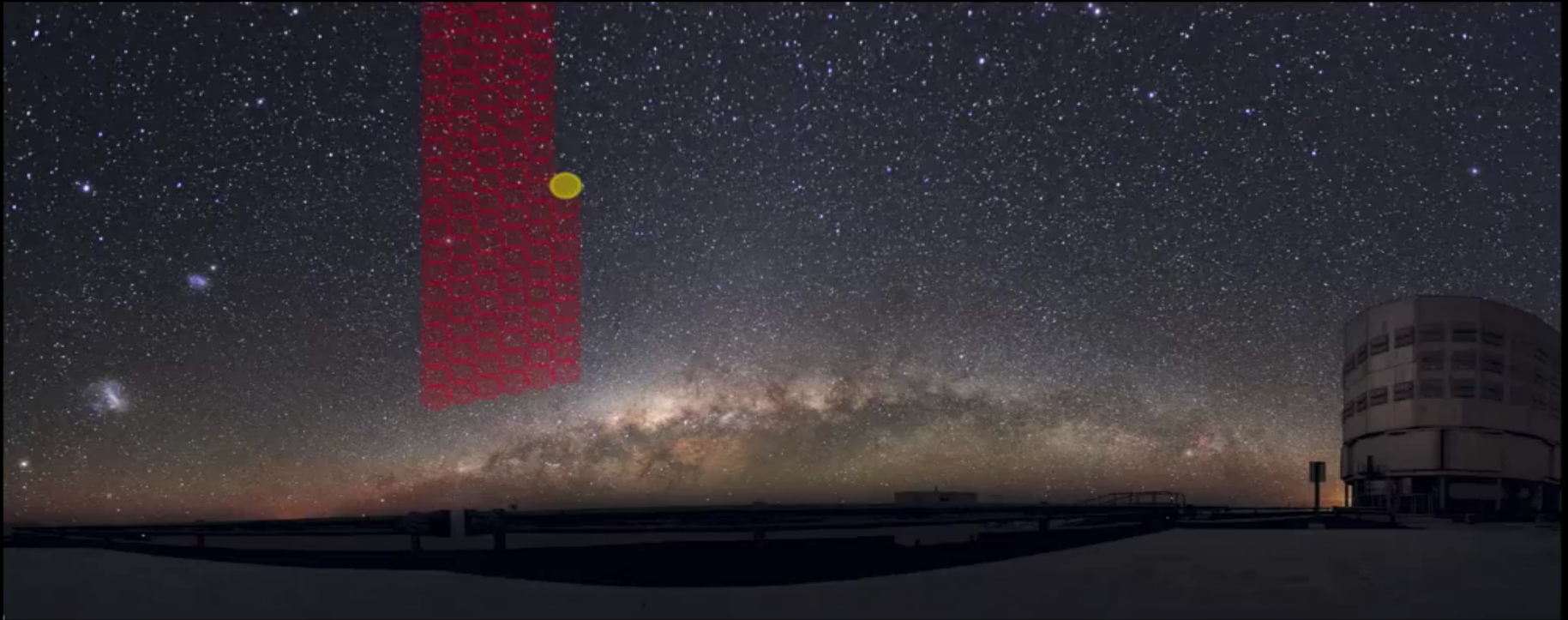
10 m

8.4 m
(6.5 eff.)

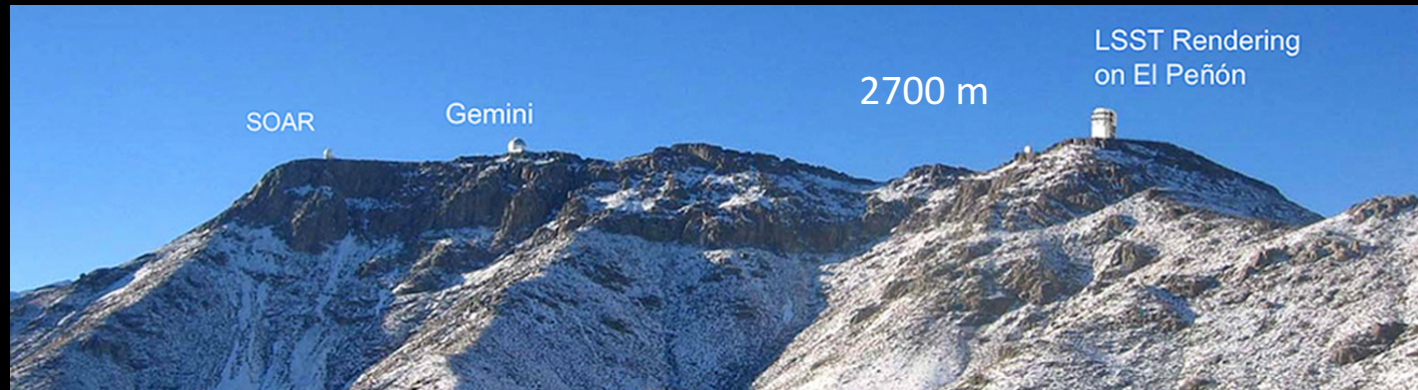
8.2 m

LSST :

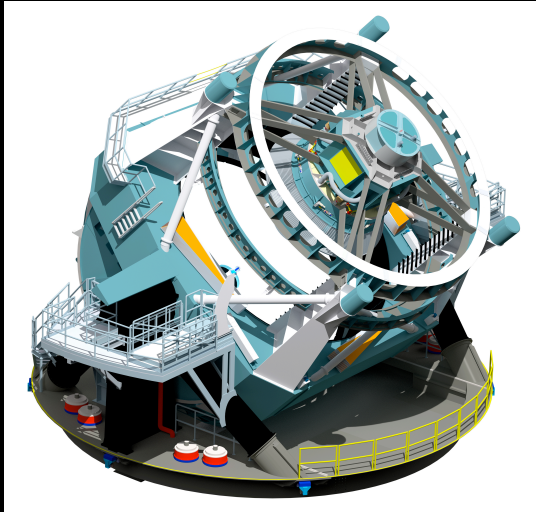
- Un nouveau pointé toutes les 38 s
- La totalité du ciel couvert en 3 nuits
- La majeure partie du ciel visible de l'hémisphère sud visitée + de 80 fois/an
- Un pointé = 10 millions de galaxies



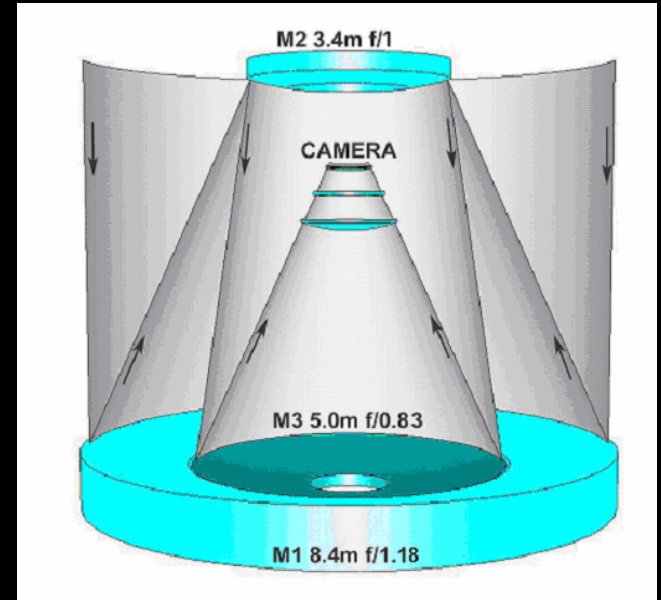
Emplacement du LSST



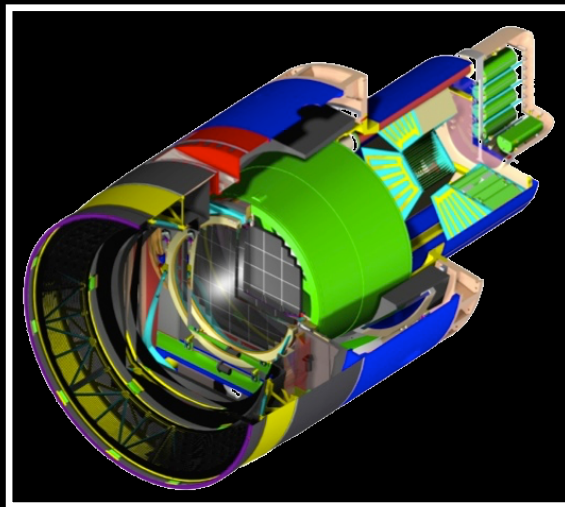
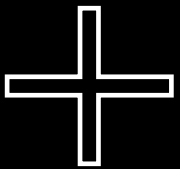
Le corps du LSST



Télescope au sol
8.4 m



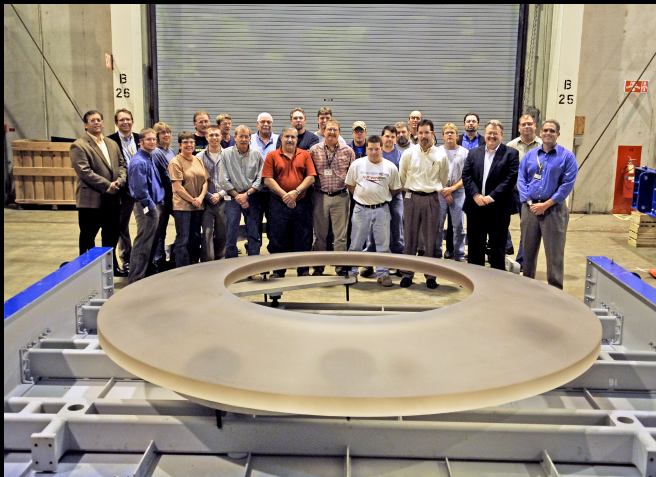
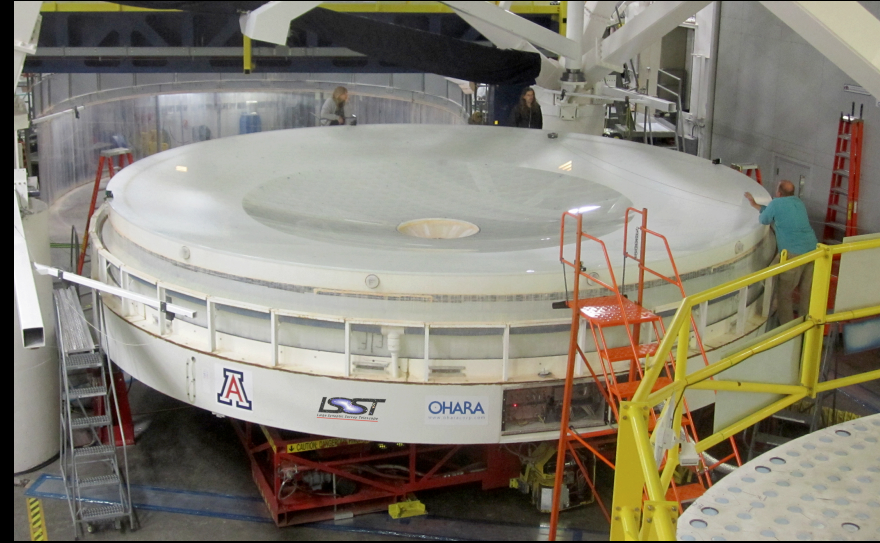
- Pour avoir un grand champ de vue
- télescope compact
 - 3 miroirs - Paul Baker modifié



Caméra CCD

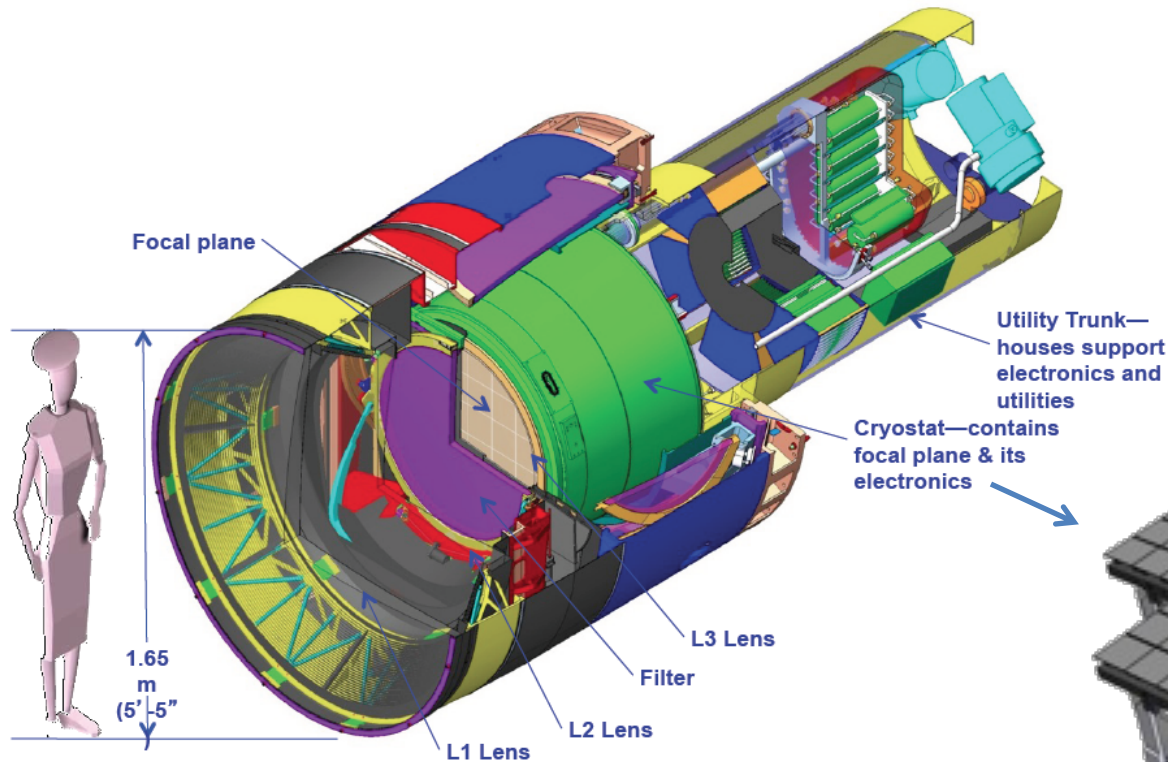
Les miroirs

- M1 et M3 fabriqués à partir du même substrat.
- 23.5 tonnes de verre borosilicate (silice + trioxyde de boer): grande résistance aux chocs thermiques
- Structure en nid d'abeilles

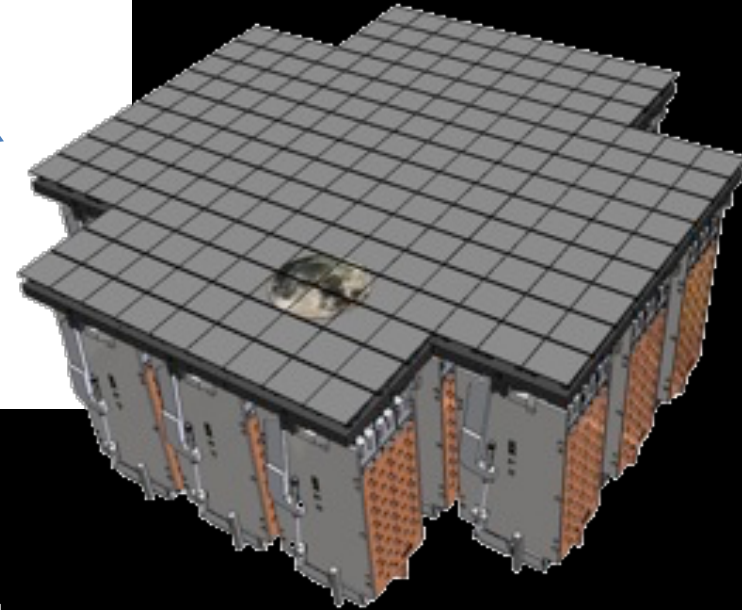


- Miroir secondaire M2 : le plus grand miroir convexe jamais construit
- Masse : ~ 680 kg
- Système de positionnement (axe optique) intégré

Caméra LSST : 3.2 milliards de pixels



1.65 m x 3 m
2,8 tonnes



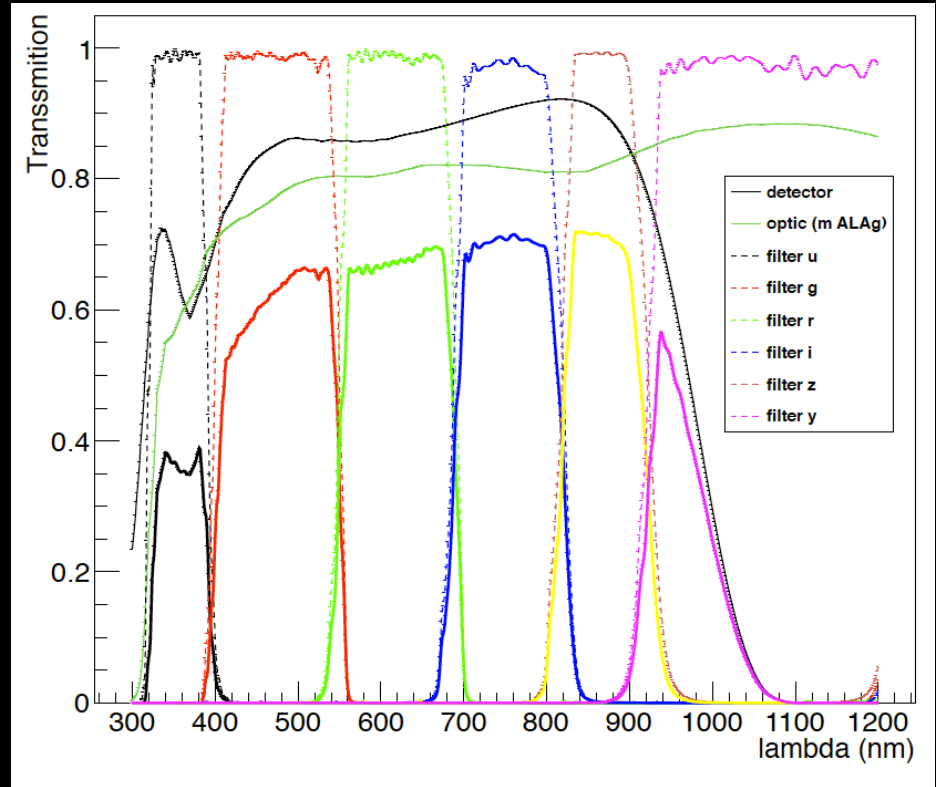
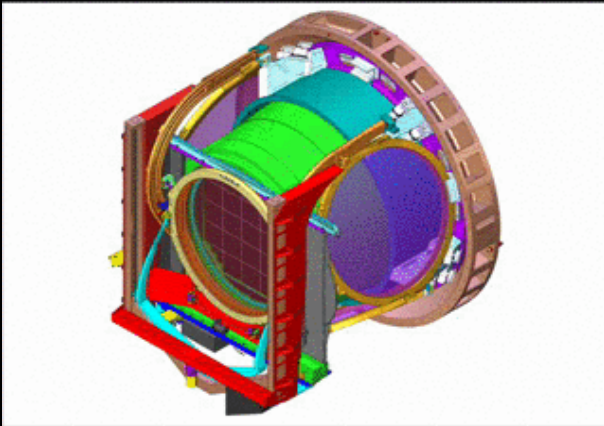
Champ de vue : 3.5 deg (9.6 deg²)

189 CCD (21 rafts) 4k x 4k → 3.2 milliards pixels

Readout : 2s

Photométrie 6 bandes

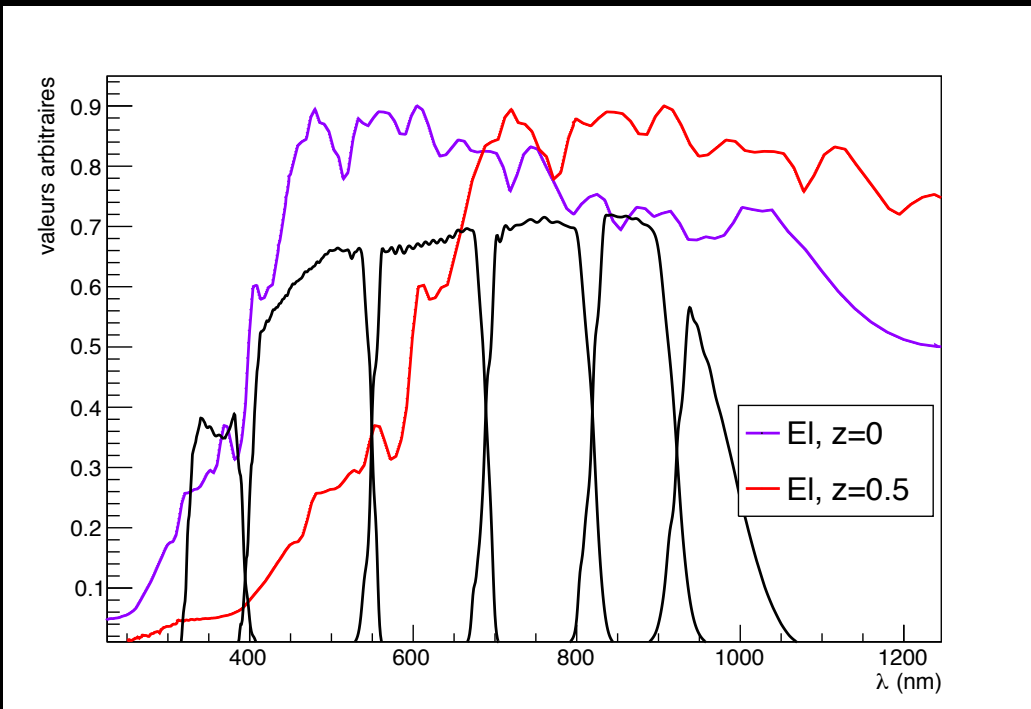
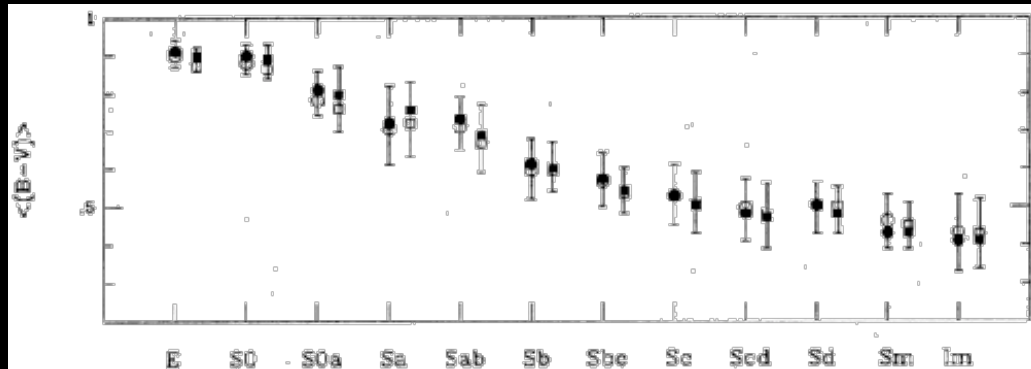
6 filtres ugrizy 320–1070 nm



Visites par filtre et mag limites

	u	g	r	i	z	y
Nb Vis.	70	100	230	230	200	200
1 visite	23.9	25.0	24.7	24.0	23.3	22.1
10 year	26.1	27.4	27.5	26.8	26.1	24.9

Le jeu des couleurs



On compare les couleurs
 $U-G = m_U - m_G = -2.5 \log(F_G/F_U)$

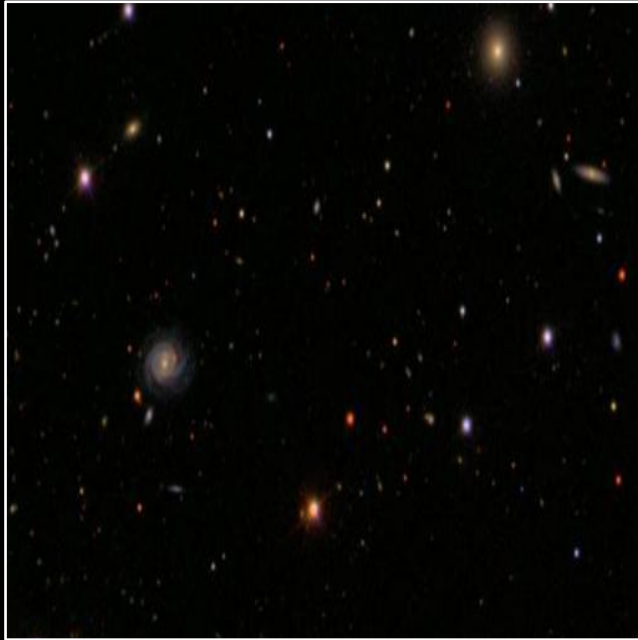
entre données et modèle

→ Caractéristiques de la galaxie

→ Type, **redshift = distance**

Profondeur d'image

S
D
S
S



L
S
S
T

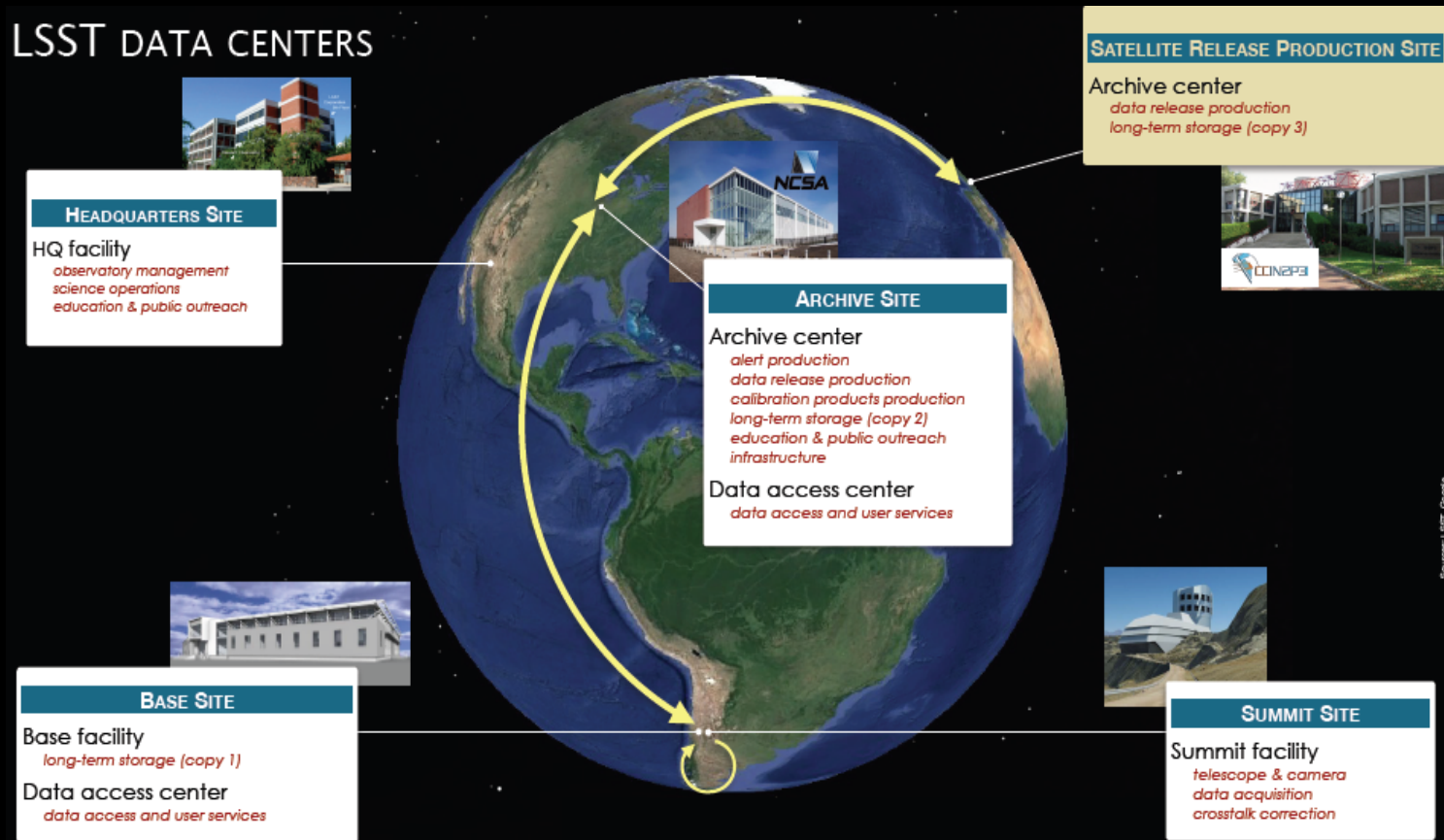
En une seule visite, LSST détectera des objets 10 millions de fois moins lumineux que ne peut en percevoir l'œil humain.

Big Data

Pendant 10 ans, LSST va produire 15 TB (1 image = 7.2 Gb) de données (images) par nuit, 60 PB de données et 15 PB de catalogues après 10 années

-> stockage, accès aux données, traitement des données ?

LSST DATA CENTERS





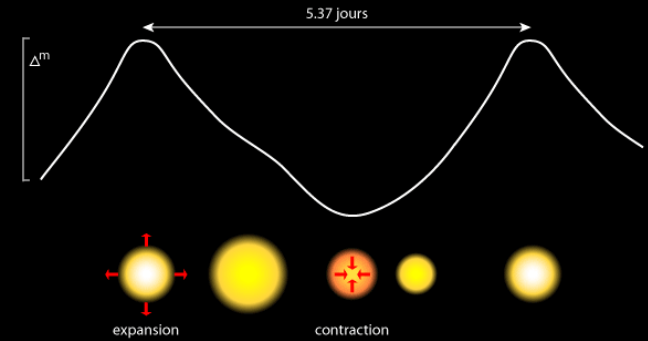
Les enjeux scientifiques du LSST

Matière noire, énergie noire, cosmologie

Phénomènes temporels (explosions cosmiques, étoiles variables ...)

Cartographie détaillée de la Voie Lactée

Etude du système solaire (astéroïdes)



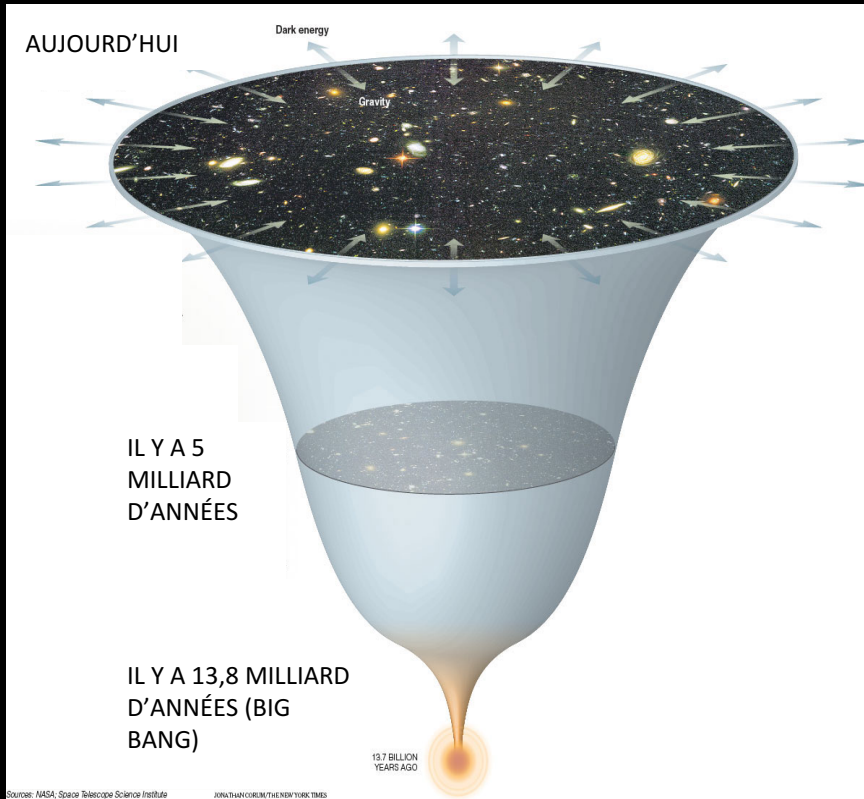
Observations avec un instrument unique
Cadence universelle : sondage uniforme 90% du temps

1980 9146

	Currently Known*	LSST Discoveries**
Near Earth Objects (NEOs)	12,832	100,000
Main Belt Asteroids (MBAs)	636,499	5,500,000

Energie noire avec LSST

Sonder la **géométrie** et la **dynamique** de l'Univers à différentes époques



4 des 5 sondes cosmiques sont accessibles avec LSST

→ Améliorer d'un facteur 10 la précision sur les paramètres d'énergie noire

→ Tester l'homogénéité des paramètres sur tout le ciel

Les SNe Ia = chandelles standards :
Mesurer l'expansion en fonction de la distance

10-20 milliards de galaxies : WL, BAO, Amas

Analyser la distribution des galaxies, le taux de formation des structures, peser l'univers au moyen des lentilles gravitationnelles

Dans l'univers ~ 10 SN / sec

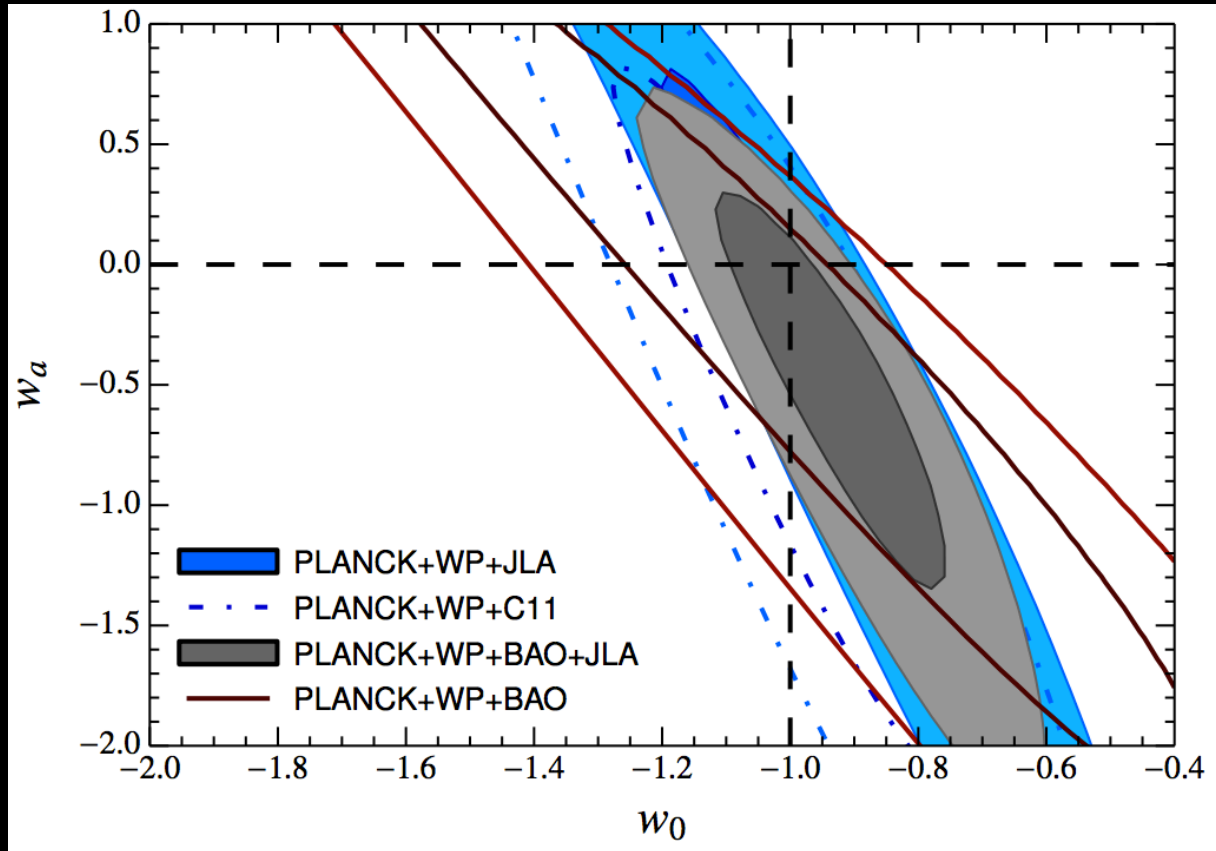
SN actuellement = 1000

LSST va détecter 100 000 SN par an pendant 10 ans

Day 000

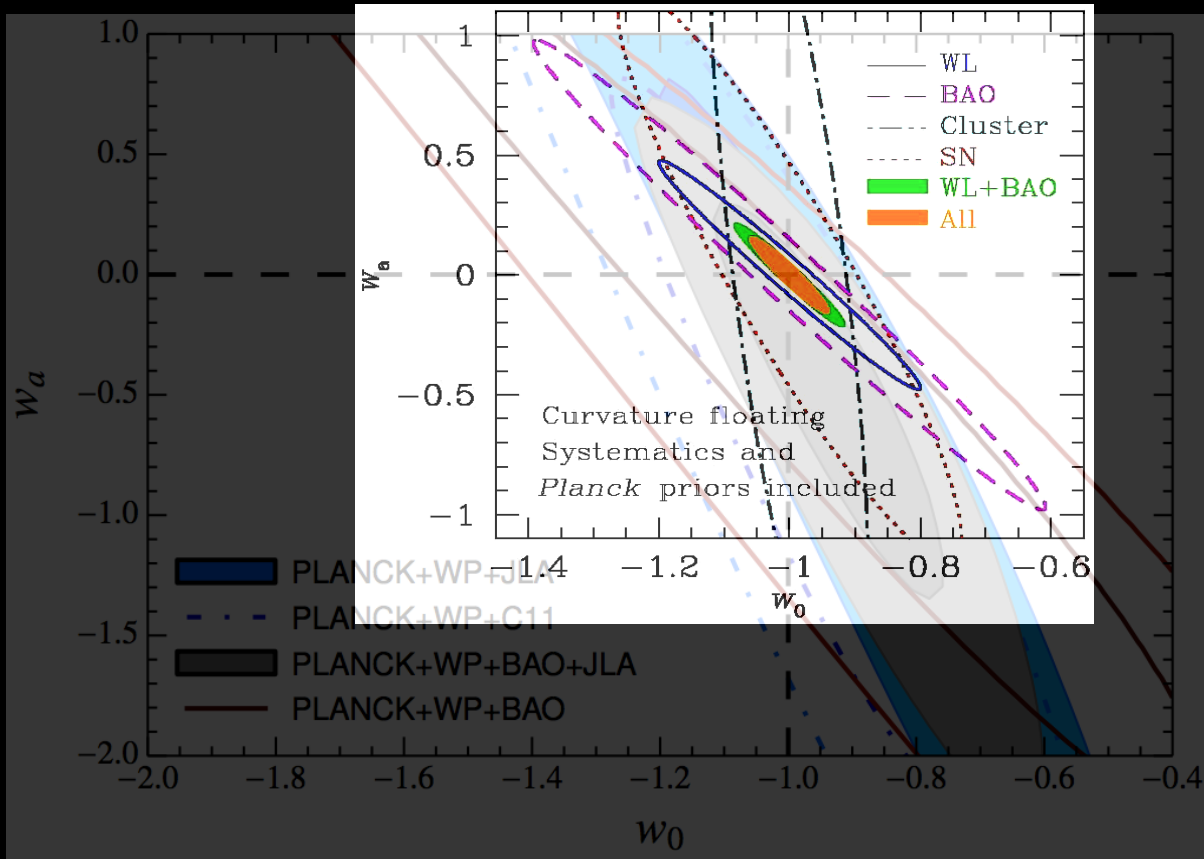


La combinaison des sondes



La combinaison des sondes

Est encore plus puissante avec LSST car un seul et même instrument



LSST

- Photographie de l'ensemble du ciel visible toute les 3-4 nuits

Au bout de 10 ans : 1000 images du ciel dans les 6 filtres

Film digital et technicolor du ciel !

- Nombreuses observations dans des domaines très variés
- Améliorer d'un ordre de grandeur la précision sur les paramètres d'énergie noire

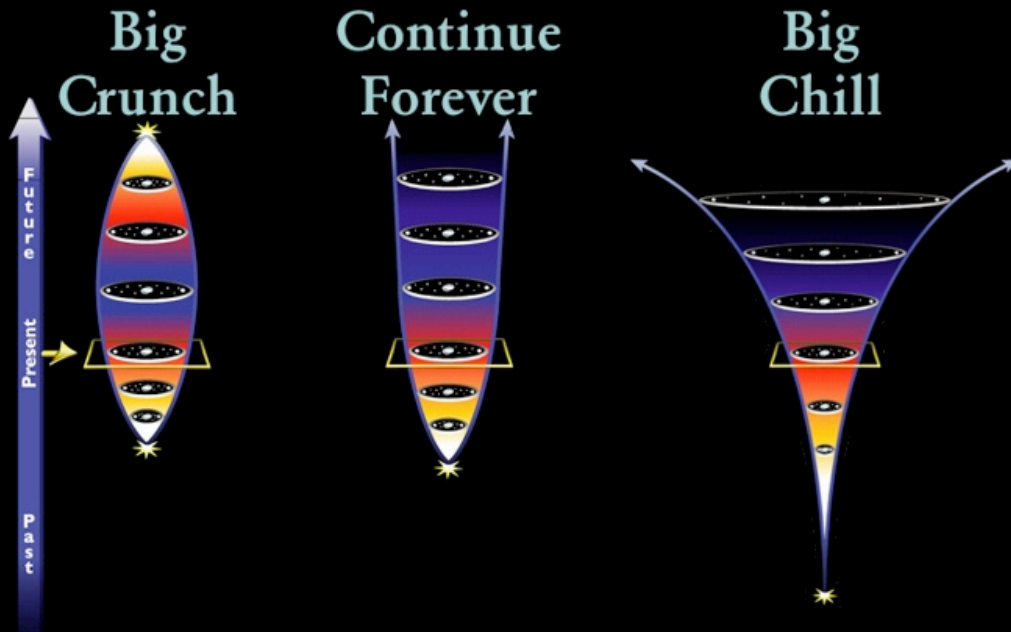
Déterminer si $w = \text{constante}$ ou $w_a \neq 0$

Et après ?

Notre Univers (espace-temps, incluant le contenu) est né avec le Big-Bang à $t=0$ par définition.

Quel est son futur ?

Les 2 composantes noires déterminent le destin de notre Univers



Une constante cosmologique favorise le Big-Chill

Et avant ?

Les théories (très spéculatives, en construction) les plus avancées apportent des réponses au problème de singularité du Big-Bang

La gravité quantique

Idée de départ : combiner RG + MQ

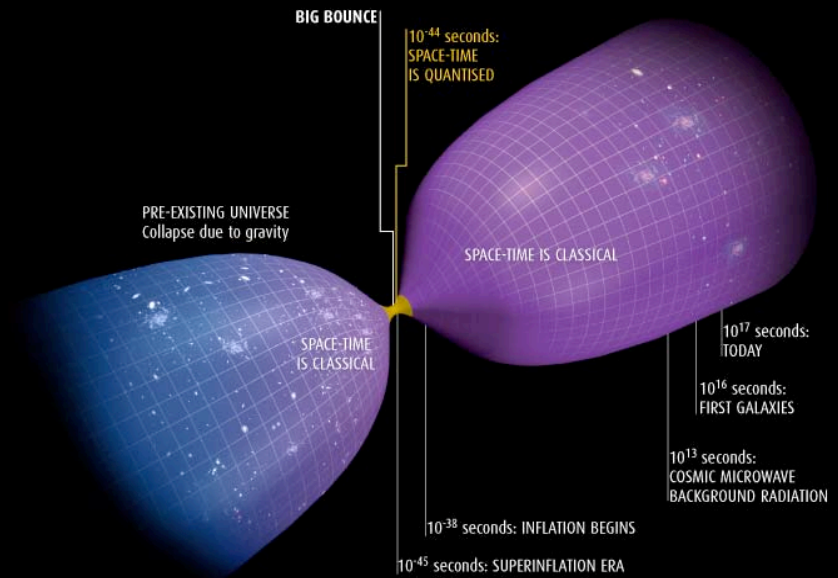
→ Inflation apparaît naturellement

→ Rebond (Big Bounce)

La théorie des cordes

Unification : chaque constituant élémentaire est interprété comme un mode de vibration d'une unique classe de corde

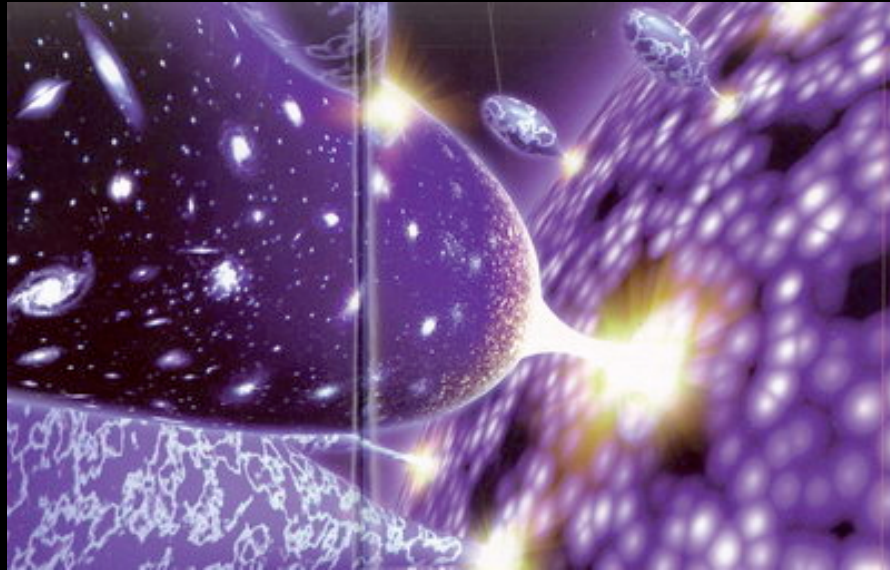
Un espace à 9-10 dimensions (compactifiées)



Extrêmement difficiles à tester

Et ailleurs ?

Sur les 3 géométries possibles de l'Univers, 2 conduisent à un espace infini
Espace infini → une infinité d'Univers → tout l'ensemble des possibles doit donc se produire et se produire une infinité de fois



Il doit donc exister un autre Univers dans lequel une copie de moi même est actuellement en train d'expliquer à une copie de vous mêmes qu'il doit exister un autre Univers dans lequel une copie d'elle même ...

« D'après une théorie, le jour où quelqu'un découvrira exactement à quoi sert l'Univers et pourquoi il est là, ledit Univers disparaîtra sur-le-champ pour se voir remplacé par quelque chose de considérablement plus bizarre et inexplicable.

Selon une autre théorie, la chose se serait en fait déjà produite. »

Douglas Adams

