

La cosmologie observationnelle dans l'IN2P3 (et l'IRFU, et ailleurs)

O. Perdereau



Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire
IN2P3-CNRS et Université de Paris-Sud 11

Ecole IN2P3 "De la physique au détecteur" - Bénodet 2014

LE DIFFICILE COMBAT DE JOHANNES KEPLER



Plan

1 Introduction

2 Le "modèle standard"

- Les "trois piliers" du Big-Bang
- Univers et Relativité
- Histoire(s) de l'univers
- Inflation ?

3 Recherche(s) de matière(s) noire(s)

- Motivations
- Lentilles gravitationnelles (EUCLID)
- Recherches de WIMPS (Edelweiss, Antares,...)
- Microlentilles gravitationnelles (EROS)

4 Supernovæ de type Ia

- Introduction
- Intérêt cosmologique
- Energie noire
- Projets :SN factory, CFHLS, SNAP/JDEM/ WFIRST

5 Le rayonnement de fond cosmologique (ou CMB) et les grandes structures

- Pourquoi des anisotropies?
- Planck (HFI)
- Etude(s) des grandes structures (BAO)

6 Conclusions

7 Sources

8 Annexes

- Autour de la métrique
- Naine blanche
- polarisation du CMB
- Divers

Qu'est-ce que la cosmologie ?

La cosmologie

d'après www.francophonie.hachette-livre.fr

n. f. Partie de l'astronomie qui étudie la structure et l'évolution de l'Univers considéré comme un tout.

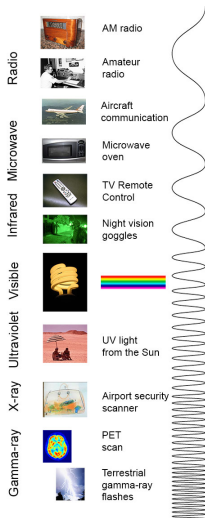
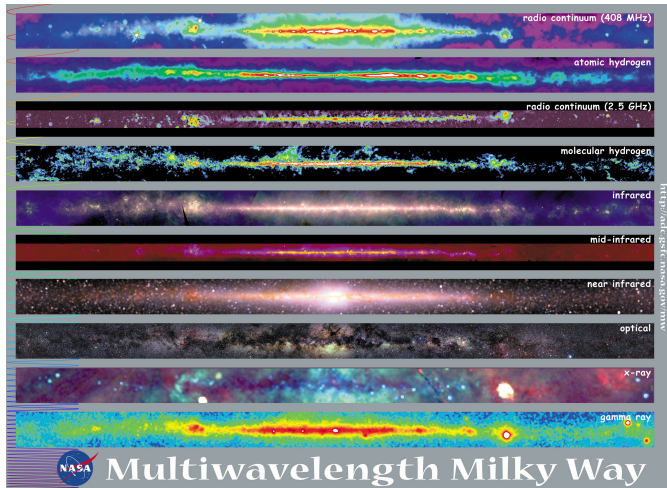
“ Les concepts relativistes et les progrès de la physique des particules font évoluer la cosmologie.”



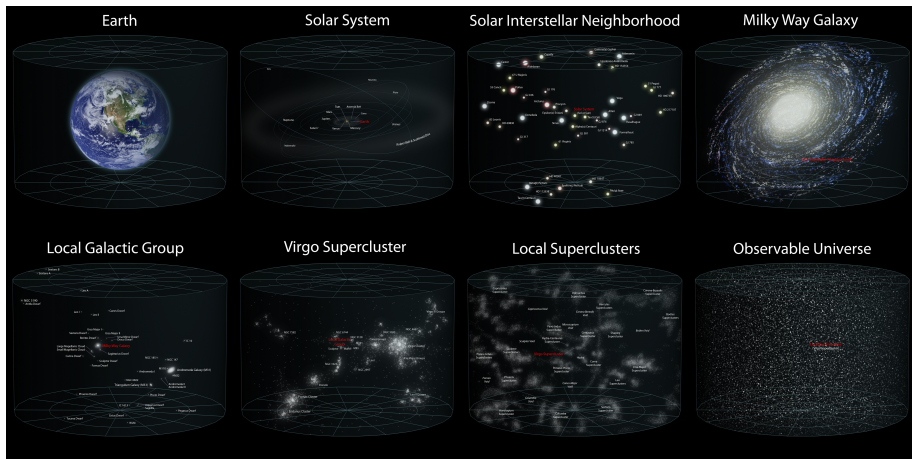
Remarques

- Messenger = lumière (photons)
- Différentes longueurs d'onde \Rightarrow différentes sources (à des distances différentes)
- c (vitesse de la lumière) est finie
 \Rightarrow en général "loin" \Leftrightarrow "vieux"
- Distance \rightarrow année-lumière (1 al = 9500 Milliards de km)
Distances "cosmologiques" en Giga-a.l. i.e. en 10^9 a.l.
- Luminosité apparente $\propto 1/(\text{distance})^2$
 \Rightarrow faible luminosité \simeq loin
- si luminosité intrinsèque (absolue) connue :
luminosité apparente \Leftrightarrow distance

Différents visages de l'Univers

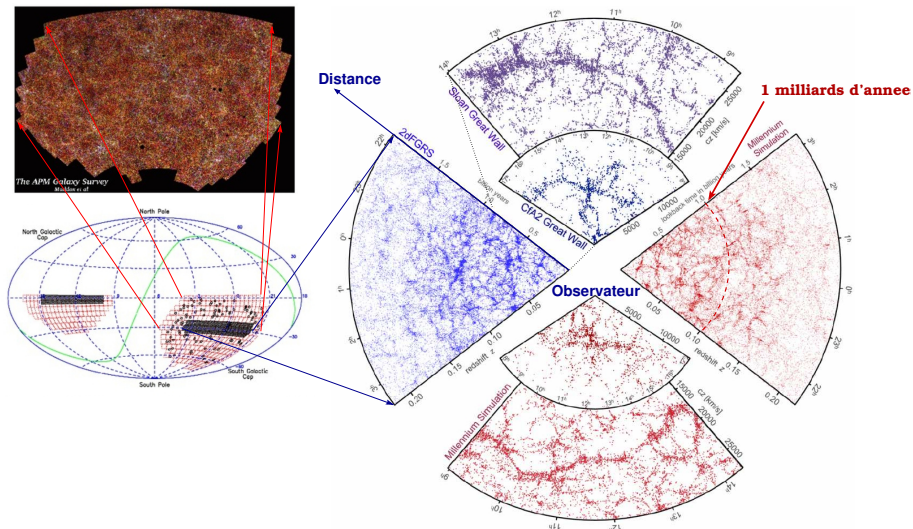


l'Univers à grande échelle



⇒ à grande échelle, l'uniformité et l'homogénéité semblent apparaître

Cartes de l'univers (observation vs simulation) : point de vue d'un observateur non privilégié



Si l'univers avait un an

Selon la théorie du Big Bang, notre Univers a environ quinze milliards d'années. Une échelle de temps difficile à appréhender sauf si l'on imagine que l'Univers n'a qu'un an....

1er janvier à 0h 00'



Big Bang

9 septembre



Naissance du système solaire

29 septembre



Premières cellules vivantes

19 décembre



Apparition des plantes

20 décembre



Apparition des poissons

21 décembre



Apparition des insectes

24 décembre



Apparition des dinosaures

26 décembre



Apparition des mammifères

27 décembre



Apparition des oiseaux

28 décembre



Extinction des dinosaures

Quant à l'homme, toute son histoire se déroulerait dans la seule soirée du 31 décembre

22h 30'



Premiers hommes

23h 59'



Lascaux

23h 59' 50"



Début de la civilisation égyptienne

23h 59' 56"



Naissance du Christ

minuit



Début du XX^{ème} siècle

Le modèle du Big-Bang

- Les trois piliers du big-bang
- Relativité Générale
- Histoire de l'Univers
- Inflation

Les “trois piliers” du Big-Bang

Trois observations :

- 1 “Récession” des galaxies lointaines (Univers en expansion)
 - ▶ **Les galaxies lointaines s’’éloignent’’ de nous**
 - ▶ Plus elles sont loin, plus elles s’’éloignent’’ vite
 - ▶ ⇒ *dilatation globale de l’Univers*

Les “trois piliers” du Big-Bang

Trois observations :

- 1 “Récession” des galaxies lointaines (Univers en expansion)
 - ▶ Les galaxies lointaines s’“éloignent” de nous
 - ▶ Plus elles sont loin, plus elles s’“éloignent” vite
 - ▶ ⇒ dilatation *globale* de l’Univers
- 2 Abondances primordiales des éléments légers
 - ▶ Helium, Deuterium (. . .) présents dans les objets les plus vieux ($\approx 20\text{-}25\%$ d’Helium)
 - ▶ comment se sont-ils formés ?
 - ▶ ⇒ fusion thermonucléaire de l’Hydrogène dans une phase primordiale dense et chaude

Les “trois piliers” du Big-Bang

Trois observations :

- 1 “Récession” des galaxies lointaines (Univers en expansion)
 - ▶ Les galaxies lointaines s’“éloignent” de nous
 - ▶ Plus elles sont loin, plus elles s’“éloignent” vite
 - ▶ ⇒ dilatation *globale* de l’Univers
- 2 Abondances primordiales des éléments légers
 - ▶ Helium, Deuterium (...) présents dans les objets les plus vieux ($\approx 20-25\%$ d’Helium)
 - ▶ comment se sont-ils formés ?
 - ▶ ⇒ fusion thermonucléaire de l’Hydrogène dans une phase primordiale dense et chaude
- 3 Rayonnement de fond (Fond Diffus Cosmologique, CMB...)
 - ▶ Rayonnement isotrope (micro-onde radio / IR lointain) de “corps noir”
 - ▶ image de l’univers “jeune” (300000 ans)
 - ▶ signature d’un état dense, chaud et homogène

Les “trois piliers” du Big-Bang

Trois observations :

- 1 “Récession” des galaxies lointaines (Univers en expansion)
 - ▶ Les galaxies lointaines s’“éloignent” de nous
 - ▶ Plus elles sont loin, plus elles s’“éloignent” vite
 - ▶ ⇒ dilatation *globale* de l’Univers
- 2 Abondances primordiales des éléments légers
 - ▶ Helium, Deuterium (...) présents dans les objets les plus vieux ($\approx 20-25\%$ d’Helium)
 - ▶ comment se sont-ils formés ?
 - ▶ ⇒ fusion thermonucléaire de l’Hydrogène dans une phase primordiale dense et chaude
- 3 Rayonnement de fond (Fond Diffus Cosmologique, CMB...)
 - ▶ Rayonnement isotrope (micro-onde radio / IR lointain) de “corps noir”
 - ▶ image de l’univers “jeune” (300000 ans)
 - ▶ signature d’un état dense, chaud et homogène

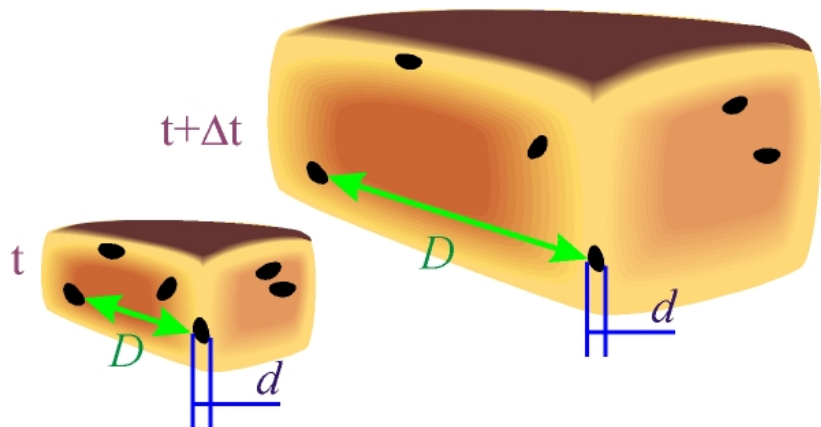
⇒ Il y a eu une “explosion” ? ...

Le Big Bang

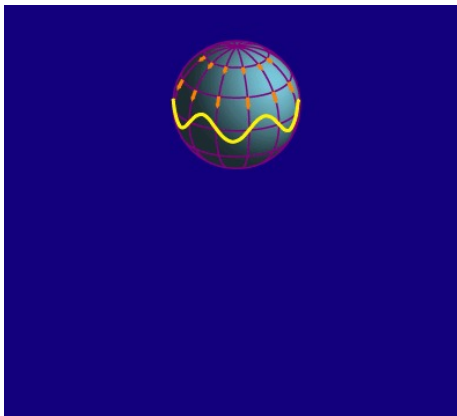


Quoi, c'est ça le Big-Bang? (S. Harris)

Une dilatation d'échelle

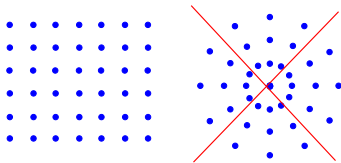


Une dilatation d'échelle (2D)



Principes de base

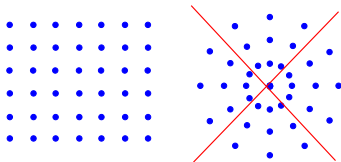
1 L'univers est homogène



Même “aspect” en n’importe quel point.
Ex. : distribution spatiale des galaxies

Principes de base

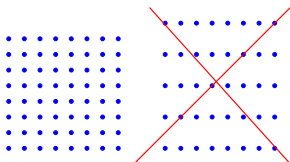
1 L'univers est homogène



Même "aspect" en n'importe quel point.

Ex. : distribution spatiale des galaxies

2 L'univers est isotrope

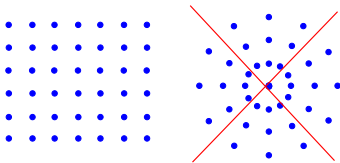


Même "aspect" dans toutes les directions

Ex.: sources distantes, température du CMB

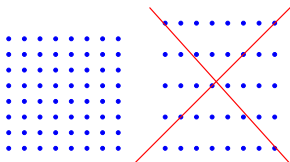
Principes de base

1 L'univers est homogène



Même “aspect” en n'importe quel point.
Ex. : distribution spatiale des galaxies

2 L'univers est isotrope



Même “aspect” dans toutes les directions
Ex.: sources distantes, température du CMB

3 L'univers est en expansion

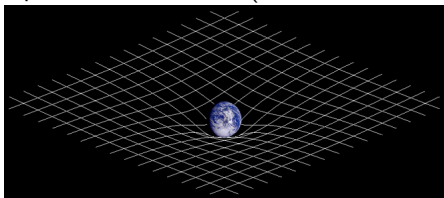
4 (nous sommes là \Rightarrow “principe” anthropique)

1+2 = “Principe cosmologique” - Einstein

Cadre général

Recette pour un bon univers :

- 1 **Relativité générale** (Einstein \sim 1917) :
 - ▶ description **géométrique** de l'univers ("métrique")
 - ▶ équations d'évolution (dites "d'Einstein")

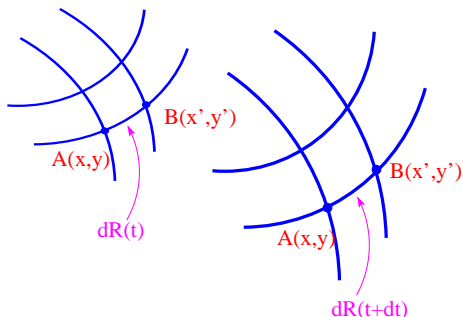


- 2 **Thermodynamique & Mécanique quantique** (+Physique Nucléaire et des Particules) \rightarrow comportement des composants ("équation d'état")
- 3 ... cuire au four (le temps de résoudre les équations ?)

Géométrie & facteur d'échelle

métrique = système de coordonnées lié à l'expansion

(\Rightarrow "recette" pour calculer les distances : longueurs de vol des photons)



$R(t) :=$ Facteur d'échelle

$d :=$ distance comobile (conservée ds l'expansion)

$dR(t) :=$ distance propre ("usuelle" i.e. vue par la lumière)

Variations de $R(t) \leftrightarrow$ expansion

Conséquence (1) : loi de Hubble

Localement : géométrie euclidienne (habituelle)

distance propre entre deux "observateurs" $D = dR(t)$

Expansion : $t \rightarrow t + \Delta t \Rightarrow R(t) \rightarrow R(t + \Delta t)$

$\Rightarrow \Delta D = d(R(t + \Delta t) - R(t))$

$$\frac{\Delta D}{\Delta t} = \frac{R(t + \Delta t) - R(t)}{\Delta t} d$$

Si Δt est (infiniment) petit ($\Delta t = dt \rightarrow 0$)

$$v = \frac{dD}{dt} = d\dot{R} = \frac{\dot{R}}{R} D = HD$$

"constante" de Hubble locale : $H(t) = \frac{\dot{R}}{R}(t) = \dot{a}(t)$

Où a = facteur d'échelle relatif / maintenant : $a = R(t)/R_0$

NB : $H(t)$ = "constante" de Hubble mais fonction du temps

on mesure H_0 i.e. valeur actuelle

Conséquence(2) : “redshift” cosmologique

La distance comobile (d) reste constante \Rightarrow

$$d = \frac{D(t_1)}{R(t_1)} = \frac{D(t_2)}{R(t_2)} = \text{cste}$$

Conséquence :

une source à $t = t_1$ émet des photons à une longueur d'onde $\lambda(t_1)$
 \rightarrow ils sont observés à $t = t_2$ avec

$$\lambda(t_2) = \lambda(t_1) \frac{R(t_2)}{R(t_1)}$$

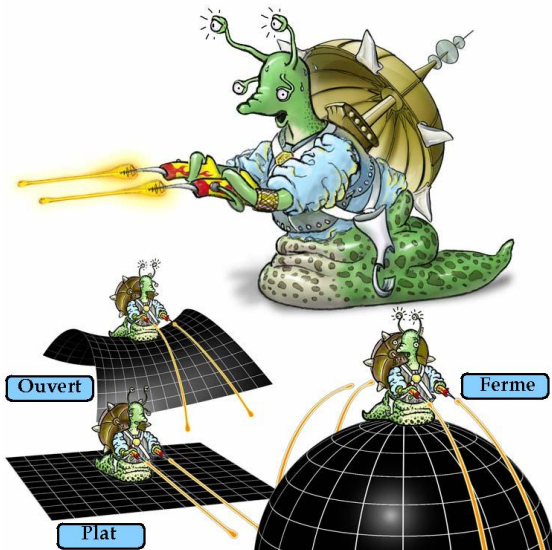
On appelle **redshit** (décalage vers le rouge) cosmologique :

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{R(t_2)}{R(t_1)} - 1$$

z mesure la taille relative de l'univers

$z = 1$: univers deux fois plus petit !

Géométrie(s) de l'univers



Géométries possibles de l'univers

3 familles d'espaces homogènes & isotropes (indexées par k)

A 2 dimensions spatiales (+ le temps) :

- **Plan** ($k = 0$)
- **Sphère** ($k = 1$) : courbure positive i.e.
 $\sum(\text{angles d'un triangle}) \geq 180^\circ$
- **Plan hyperbolique** ($k = -1$) "selle de cheval", courbure négative

géométrie locale sur ces surfaces \leftrightarrow **structure globale**

Mêmes catégories à 3 dimensions spatiales

Densité critique

Relativité Générale

⇔ Description *géométrique* de la Gravitation

Lien (quantitatif) entre

- **géométrie (et son évolution)**
(**macroscopique**)
- **densité(s) d'énergie(s)** (**microscopique**)

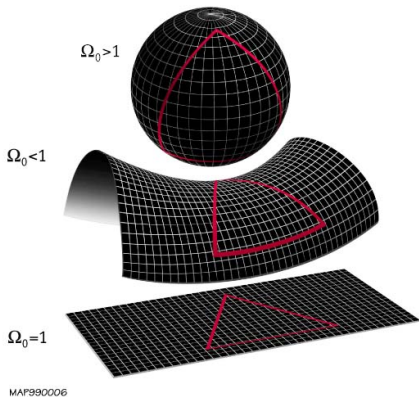
Un paramètre cosmo important (parmi ~ 10):

densité totale d'énergie $\Omega_0 = \frac{\rho_0}{\rho_{critique}}$

$\Omega_0 = 1$ ⇔ Univers "plat" (euclidien)

⇔ $\rho_0 = \rho_{critique} \sim 10^{-29} \text{ g.cm}^{-3}$

$\sim 1 - 5 m_{proton} m^{-3}$



L'équation fondamentale de la RG

ou équation d'Einstein :

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

Diagram illustrating the components of the Einstein field equation:

- $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}\mathcal{R}g_{\mu\nu}$ (Einstein tensor) is linked to "tenseur d'Einstein" (Einstein tensor).
- $8\pi G T_{\mu\nu}$ (Energy-momentum tensor) is linked to "Impulsion-énergie" (Energy-momentum).
- $\Lambda g_{\mu\nu}$ (Cosmological constant term) is linked to "Constante cosmologique" (Cosmological constant).

tenseur d'Einstein

fonction de la métrique $g_{\mu\nu}$

distance : $ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$

généralisation de $d^2 = x^2 + y^2 + z^2$

L'équation de Friedman

Dans le cas d'un univers homogène et isotrope (et avec la métrique FLRW) \Rightarrow **équation d'évolution de $R(t)$ (non linéaire)**

$$H^2(t) + \frac{kc^2}{R_0^2} \frac{1}{a^2(t)} = 8\pi G \frac{\rho(t)}{3} + \frac{\Lambda}{3}$$

$$a(t) = \frac{R(t)}{R(t_0)}$$

$$H(t) = \frac{da/dt(t)}{a(t)}$$

En posant :

$$\Omega(t) = \frac{8\pi G\rho(t)}{3H^2(t)} = \frac{\rho(t)}{\rho_{critique}} ; \quad \Omega_\Lambda(t) = \frac{\Lambda}{3H^2(t)} ; \quad \Omega_k(t) = \frac{-kc^2}{R_0^2 H^2(t) a^2(t)}$$

$$\Omega(t) + \Omega_\Lambda(t) + \Omega_k(t) = 1$$

Equation d'état

- **Matière “normale”** (non relativiste - basses énergies & température)
: “dilution” par l'expansion

$$\rho_m \propto R^{-3}$$

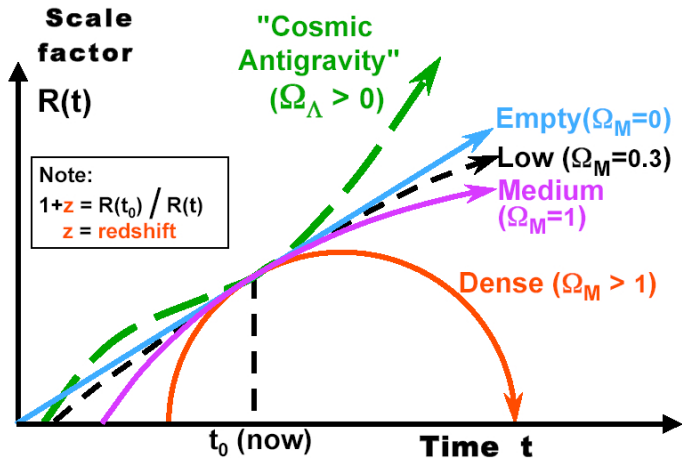
- **“Rayonnement”** (photons, particules de haute énergie / température) : “dilution” par l'expansion + **redshift**

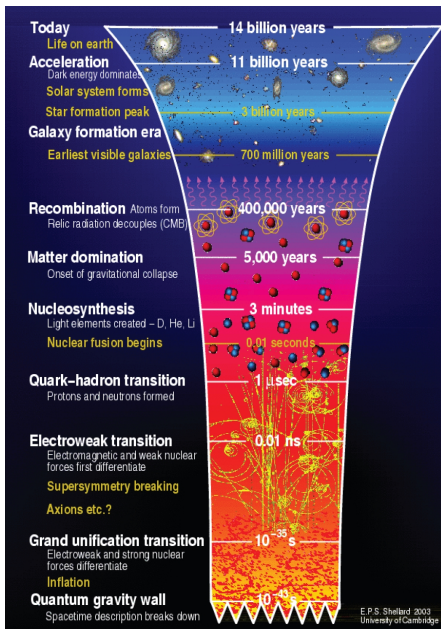
$$\rho_r \propto R^{-4}$$

- Densité d'énergie du “vide” (!) i.e. Λ ou **“énergie noire”** : pas affecté par l'expansion (si Λ seul : expansion exponentielle)

$$\rho_{vac} = cste$$

Evolution(s) du facteur d'échelle





- (5) formation des structures (galaxies, étoiles, ...) par la gravitation
- (4) "Libération" des photons = **découplage** (à ~3-400000 ans) → **émission du CMB**
- (3) Nucléosynthèse (BBN, de 3 à 30 mn) → éléments légers
- (2) expansion "lente" : apparition de quarks, leptons (electrons) puis nucléons (p,n)
- (1) inflation
- (0) état initial (??)

Problèmes du modèle du Big-Bang “classique”

- **Platitude** : eq. de Friedman quand $R \rightarrow 0$: le terme en ρ (radiation) domine $\Rightarrow \Omega \rightarrow 1$
 $\Omega_{tot} \sim .01 - 1$ “maintenant” $\Rightarrow \Omega_{tot} \sim 1 \pm 10^{-16}$ **pendant la BBN**
- **Horizon** : CMB **très uniforme** sur des régions spatiales *non causales*
- **Formation des structures** : Quelle est leur origine (cf le dernier cours) ?
- **Scories** : Les extensions au MS de la physique des particules \Rightarrow existences de monopoles mgn, gravitinos (particules *très exotiques*)
pas observées
- **Antimatière?** : Pas d'antimatière observée ...

Une (des) réponse à (presque) toutes ces questions : **l'inflation**

L'inflation

Période (brève) d'expansion **exponentielle** de l'univers primordial

Origine : une "constante cosmologique" domine - brièvement - l'évolution de l'univers \Rightarrow expansion exponentielle

en $\sim 10^{-32}$ s, le facteur d'échelle augmente de $\sim 10^{80}$

- "dilution" des scories
- Expansion de l'horizon \rightarrow plus de pb
- $\Rightarrow \Omega$ exponentiellement proche de 1 \Rightarrow platitude OK
- fluctuations quantiques \Rightarrow anisotropies spatiales == "graines" des (grandes) structures

"cste(s) cosmologique(s)" "naturelle(s)" peuvent être générées par une **transition de phase d'un champ scalaire** associée aux GUT / supercordes / ??

Quelques signatures possibles (grandes structures, CMB)

Bilan d'étape

- Avec la R.G. + hypothèse d'isotropie & homogénéité
- + hypothèse de l'inflation
- → construction d'un modèle dit Λ CDM qui rend compte de manière **concordante** de \sim toutes les observations à grande échelle
- version minimale (géom. euclidienne): **6 paramètres** : H_0 (taux d'expansion) ; Ω_m (densité totale de matière) ; Ω_b (densité de matière relativiste) ; A_s, n_s (paramètres du spectre des anisotropies primordiales - voir partie CMB)
- + extensions possibles : neutrinos massifs, "famille" supplémentaire, courbure, **ondes gravitationnelles primordiales**, ...
- \Rightarrow **mesurer ces paramètres**
- Mais aussi :
 - ▶ **qu'est-ce qui se cache dans les paramètres (matière noire, Λ ,...)** ?
 - ▶ **le modèle minimal suffit-il ?**
 - ▶ **a-t-on des indications d'une extension (ou +)** ?
 - ▶ **y a-t-il des failles ?!**

Matière(s) noire(s)

- Motivations
- Lentilles gravitationnelles
- Matière noire non-baryonique
 - ▶ Recherche(s) directe(s) (WIMPS)
 - ▶ Recherche(s) indirecte(s)
- Matière noire baryonique

Motivations

- Amas de galaxies (dynamique, émission X, effet S-Z sur le CMB, **lentilles gravitationnelles**)
- Anisotropies du CMB

⇒ $\Omega_m \sim 0.25$ (densité de la matière)

- **Nucléosynthèse primordiale**
- Anisotropies du CMB
- ...

⇒ $\Omega_b \sim 0.05$ (densité baryonique cad p, n)

Pour la matière "visible" (rayonnements) : $\Omega_\star \sim 0.001$

Deux problèmes de "masse cachée" !?

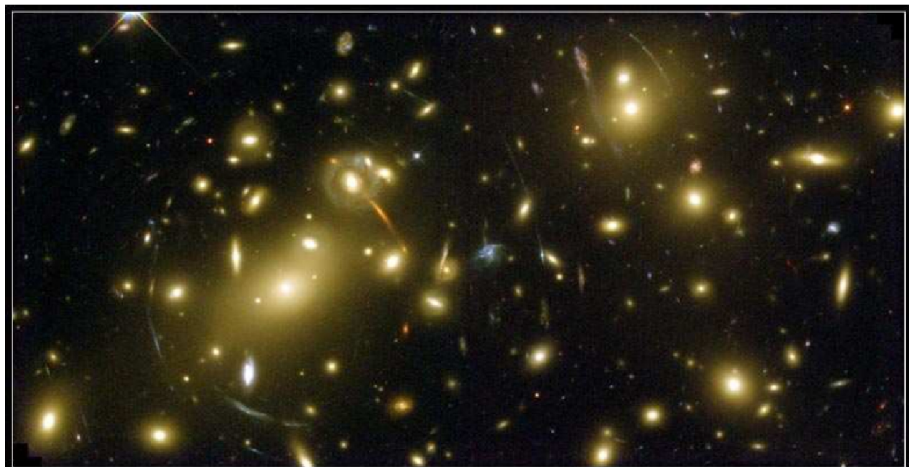
$$\Omega_\star \leftarrow ? \rightarrow \Omega_b \leftarrow ? \rightarrow \Omega_m$$

F. Zwicky



- un physicien chez les astronomes !
- obtient la construction d'un instrument "grand champ" (tel. de Schmidt)
- → pour chercher des phénomènes rares !
- avec W. Baade 1934 : "hypothèse triple" :
 - ① SN = explosions d'étoiles, utiles pour mesurer les distances
 - ② transitions vers des étoiles à neutrons
 - ③ sources de rayons cosmiques
- vitesses des galaxies de l'amas de Coma : inexplicables sans **matière "noire"**
- ~ 1937 discussions autour de l'effet de lentille gravitationnelle entre étoiles → **+ facile à détecter entre galaxies/amas de galaxies** (... première détection en 1974)

Lentilles gravitationnelles (1)



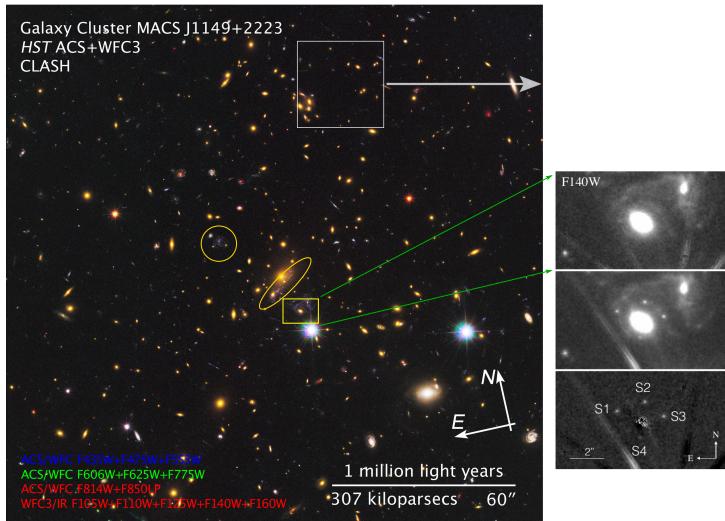
Galaxy Cluster Abell 2218

HST • WFPC2

NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI) • STScI-PRC00-08

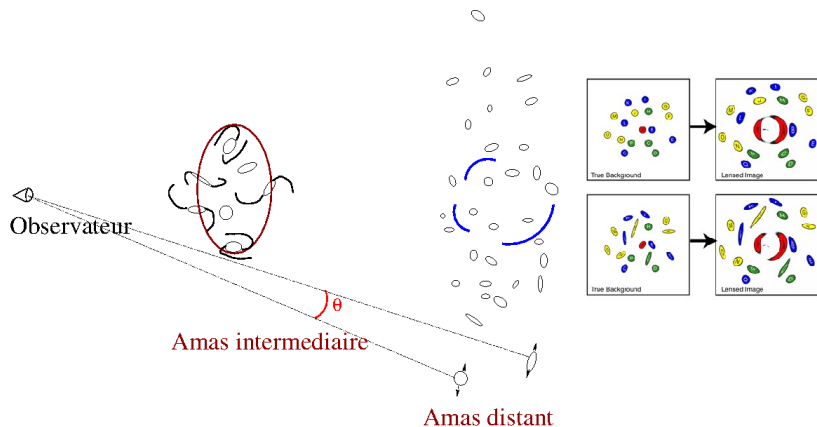
Analyse des déformations (arcs) \Rightarrow distribution de masse en avant-plan

Lentilles gravitationnelles (2)



3-10 Nov. 2014 : 4 "images" d'une SN dans une des 3 images d'une galaxie d'arrière plan

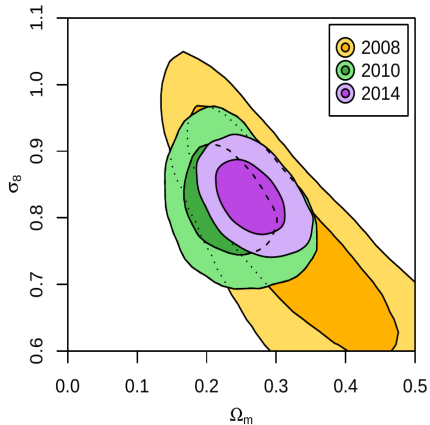
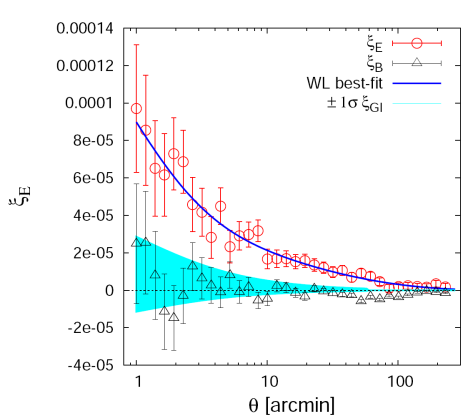
Weak lensing



Statistique des allongements (formes) \leftrightarrow répartition de masse \Rightarrow contrainte sur σ_8, Ω_m

Etudes des arcs \rightarrow masse totale $\rightarrow \Omega_m$

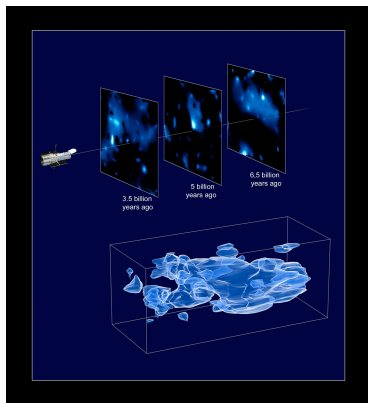
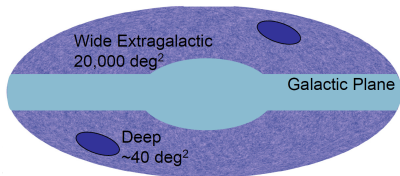
Contraintes extraites du WL



Y. Mellier astro-ph/0206245 ; Heymans et al astro-ph/0411324
Fu et al (CFHLS) arXiv:0712.0884 ; Mantz et al arXiv1407:4516

σ_8 : paramètre de la distribution de la matière (rms de $\delta\rho/\rho$ ds cube de 8Mpc)

(un) futur pour le WL : EUCLID



Mission ESA (+NASA) de classe M du pgme 'Cosmic Vision' (2015-2025)

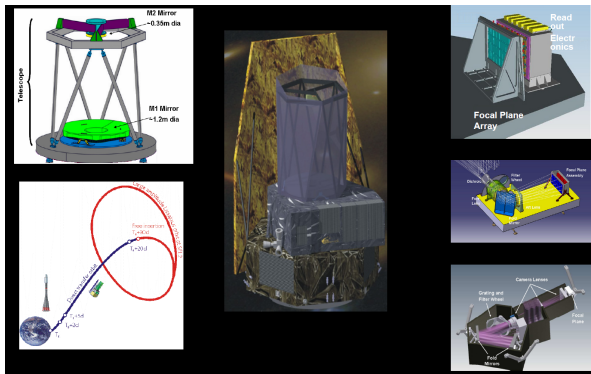
- lancement 2020

Telescope (1.2m) + imageurs visible+IR ($\sim 0.5\text{deg}^2$ chacun) + spectro IR

+ observatoires au sol

(600Mpix visible, 100Mpix IR , 850 Gb / j)

(un) futur pour le WL : EUCLID

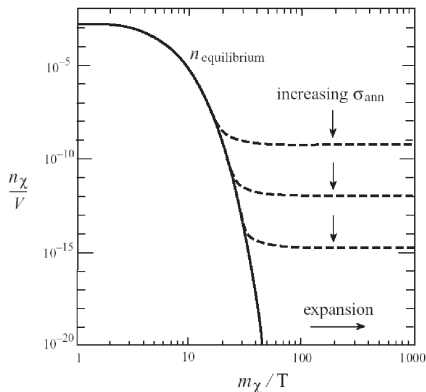


Mission ESA (+NASA) de classe M du pgme 'Cosmic Vision' (2015-2025)
- lancement 2020

Telescope (1.2m) + imageurs visible+IR ($\sim 0.5\text{deg}^2$ chacun) + spectro IR
+ observatoires au sol
(600Mpix visible, 100Mpix IR, 850 Gb / j)

Le miracle des WIMPS

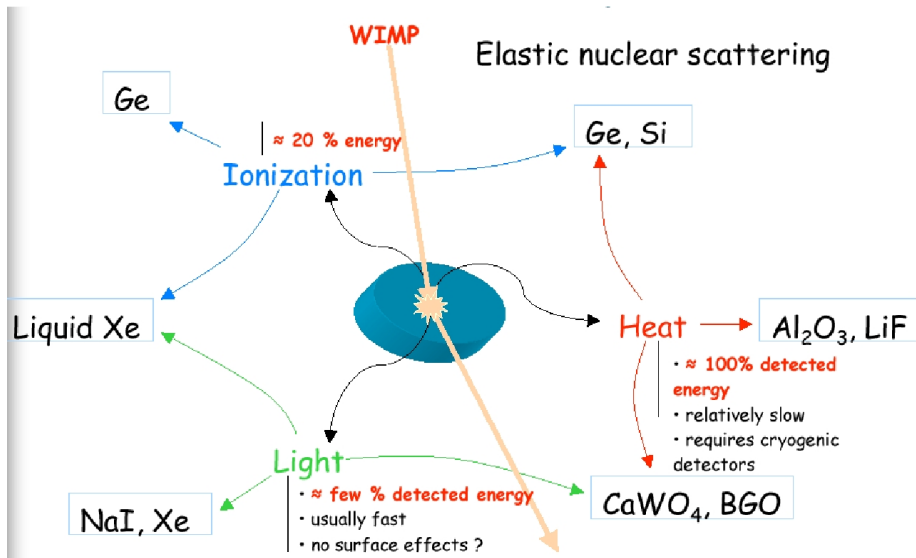
- univers primordial : équilibre thermique
 $\chi\bar{\chi} \leftrightarrow \gamma\gamma$
- nombre de particules : solution eq. Boltzman
- lors de l'expansion : $T \searrow \Rightarrow$ libre
parcours moyen \nearrow
- quand libre $\text{parcours moyen} \geq \text{taille de l'univers} \Rightarrow$ "gel" : **abondance figée**
- pour masses et cstes de couplages \sim int. faible : $\Omega_\chi = .01 - 1$!
- bcp de candidats pour χ (e.g. neutralino SUSY) : **recherche complémentaire de LHC/ILC**



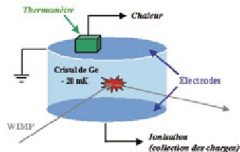
Detections?

- $\Omega_{DM} \sim 0.2 \Rightarrow \rho_{local} \sim 0.3 - 0.5 \text{ GeV}/\text{cm}^3$
- **Directe** : interaction élastique $\chi + N \rightarrow \chi + N$
 $\sigma \approx \sigma_{faible} \Rightarrow$ rare (**1 evt/t/an**)!
bdf: radioactivité, rayonnements cosmiques
croisement de signatures
Nombreuses expériences & techniques (cibles)
- **Indirecte** : annihilations de WIMP dans Terre/Soleil/Galaxie(s) \rightarrow
signatures possibles dans les détecteurs de rayons cosmiques (Antares, Fermi, AMS, HESS, ...)
bdf : sources astro !

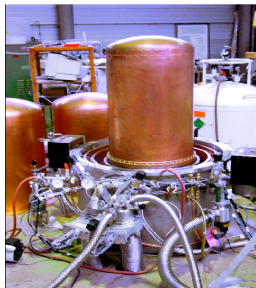
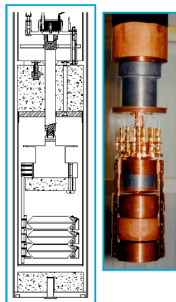
Signaux des WIMPs



Edelweiss I et II



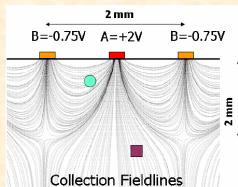
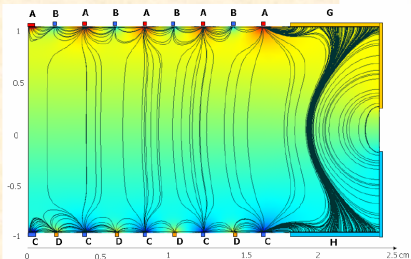
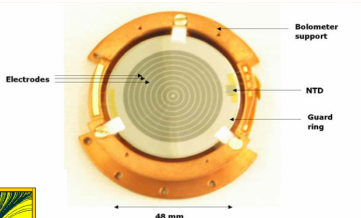
- n entrants (\Rightarrow blindage(s))
- ^{210}Pb (radioactif)
- \Rightarrow evts "de surface" (0.3 evt/kg/j)



Nouveaux détecteurs (Edelweiss 2)

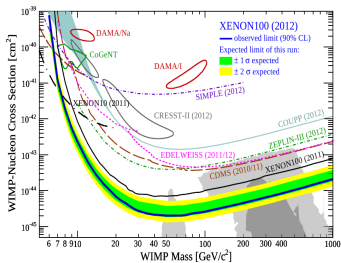
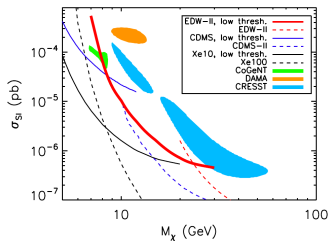
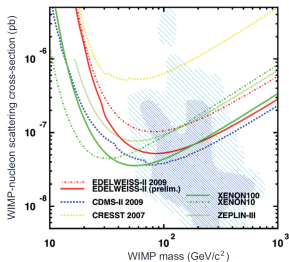
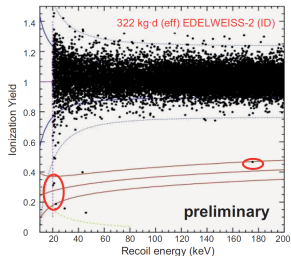
1^{er} Proto ID201 (juin 2007):

- 193g crystal
- Germanium amorphous underlayer
- 6 ionisation channels
- 1 heat channel (NTD thermometer)



- Identification des événements de surface par utilisation des voies ionisation
- Application de champs électriques verticaux dans le volume et horizontaux en surface
- **Toute collecte sur B ou D signe un evt de surface**

Résultats (petite sélection)

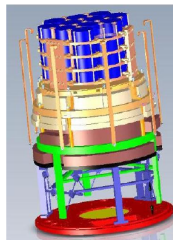
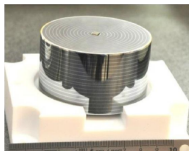
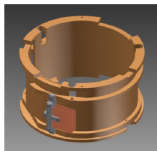
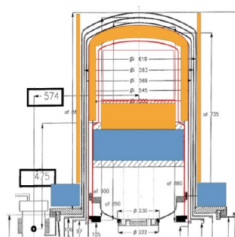


Domaine très concurrentiel ; futur \rightarrow programme d'extension du LSSM (EUREKA)

EDELWEISS III

Increase detector mass
Decrease background

- Search for dark matter to 5×10^{-9} pb
- 40 FID-800 detectors installed 2012
- New Kapton cabling, connectors
- New cold electronics
- New cryostat design
- New internal PE shield
- New copper thermal shield



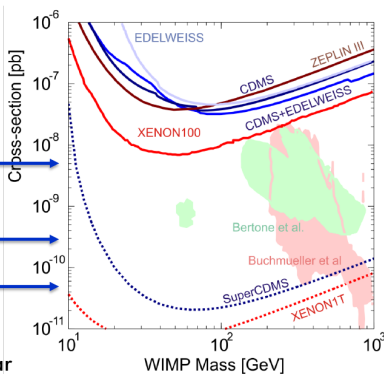
EURECA

European Underground
Rare Event Calorimeter
Array

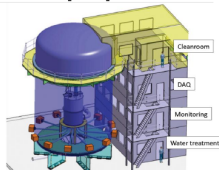
EDELWEISS III

EURECA phase I

EURECA phase II



- 10^{-10} pb - 1 event/tonne/year
- EURECA: 1-tonne dark matter search with cryogenic detectors
- EDELWEISS, CRESST, ROSEBUD collaborations + new members
- New LSM extension



Detection indirecte

Par collisions élastiques \rightarrow WIMPS freinés

\Rightarrow accumulation aux centres de la Terre, du Soleil, des galaxies

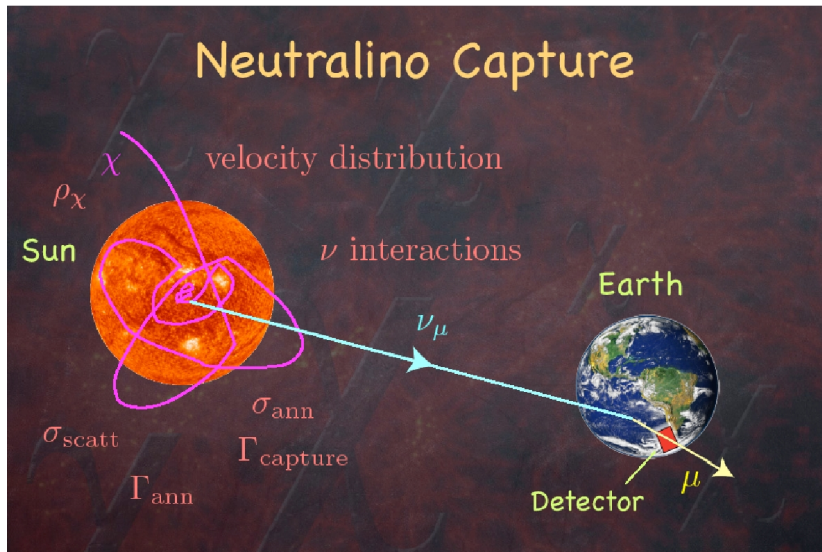
WIMP Majorana \Rightarrow annihilations $\chi\chi \rightarrow p\bar{p}/q\bar{q}/e\bar{e}/\gamma\gamma/\dots$

Signatures :

- ν_μ : (Terre, Soleil, galaxie?) \rightarrow Antares, IceCube
- γ : raie ou flux en excès / sources (compliqué!) \rightarrow HESS (CTA), Fermi, ...
- antiparticules ds rayons cosmiques : (distinction primaire/secondaire ?) \rightarrow AMS

approche complémentaire (et nécessaire) de la détection directe

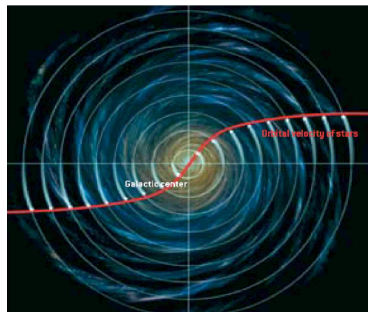
quelques annonces de signaux ... mais "contamination" astrophysique !



Matière (noire) baryonique

Existence : BBN, CMB, ...

courbes de rotation des galaxies spirale (e.g. la notre!) \Rightarrow existence de halos *galactiques* sombres



$$\text{Gravitation} \rightarrow v_{rot}^2(r) = \frac{GM(\leq r)}{r}$$

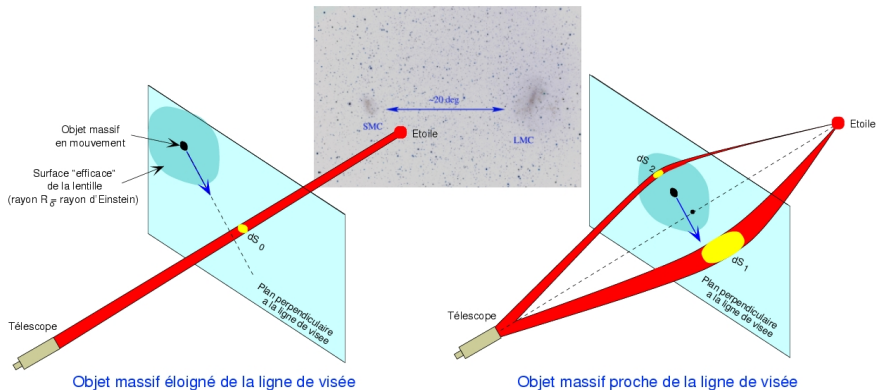
$$v(r) = cste \Rightarrow M(\leq r) = \frac{rv^2}{G} \propto r$$

$\rightarrow \exists$ matière cachée (baryonique?)

Peu de formes possibles :

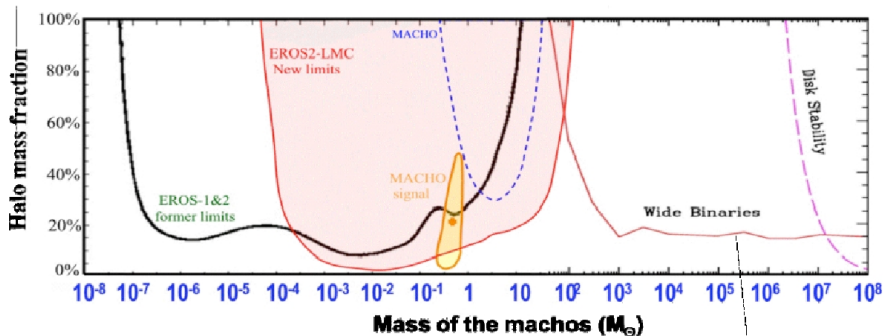
- nuages moléculaires (froids)
- objets compacts sombres (MACHOs)

L'effet de microlentille



image(s) non résolue (séparation $\lesssim 3 \cdot 10^{-6} \text{ deg}$) mais lentille mobile
 \Rightarrow variation temporelle de flux
* dans le LMC ; lentille ds halo : Proba $\sim 10^{-6} \text{ an}^{-1}$

Contraintes d'EROS-II (IN2P3/IRFU/INSU)



Yoo, Chaname and Gould [ApJ 601 (2004) 311]

P. Tisserand Hanoi 2004

⇒ Plus beaucoup de place pour les MACHOs !

- modèle cosmologique basé sur la RG
- géométrie “non triviale” ...
- univers en expansion
- phase primordiale dense et chaude (inflation ?)
- paramètres importants : H_0 (taux d'expansion) , Ω_X (densité d'énergie réduite de l'espèce X)
- $\Omega_{tot} = 1 \Leftrightarrow$ univers euclidien (“plat”)
- Beaucoup de matières noires : WIMPS, MACHOs ...

Supernovæ de type Ia

- Intérêt cosmologique
- Modèle d'explosion
- Projets : SNLS, SNIFS, WFIRST (ex SNAP/JDEM)



Cosmologie “classique”

Si on mesure H_0 , Ω_0 et $\Omega_\Lambda \Rightarrow$ géométrie (courbure) et dynamique de l'univers “déterminés”

\rightarrow tests cosmologiques “classiques” :

- **luminosité apparente de “chandelles standard”** :

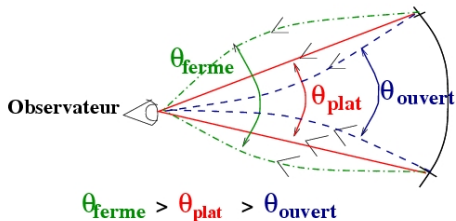
luminosité absolue (intrinsèque) \mathcal{L} connue \Rightarrow flux apparent $\Phi \propto 1/R^2$

$$\text{Distance de luminosité } d_L^2 = \frac{\mathcal{L}}{4\pi\Phi}$$

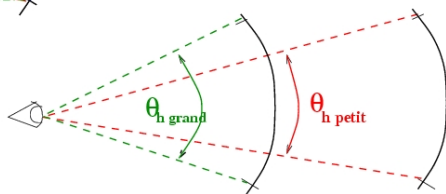
- Taille apparente de “règles standard” ...
- Comptage de galaxies (variation de l'élément de volume)
- ...

Age, taille de l'univers \Rightarrow cohérence du modèle

Geometrie de l'Univers et taille angulaire

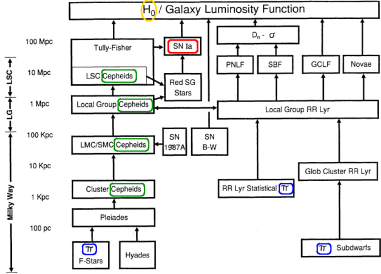


Effet de l'expansion

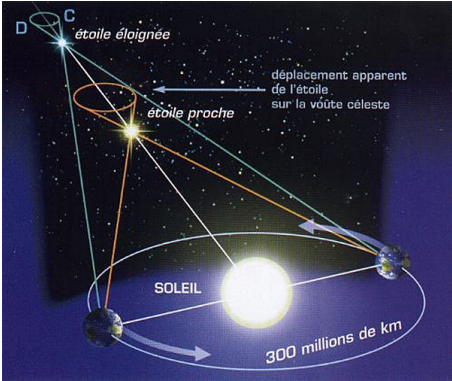


D'après C. Lineweaver

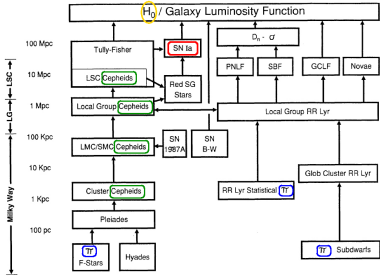
Mesures de distance astronomiques



(π == parallaxe)



Mesures de distance astronomiques



(π == parallaxe)

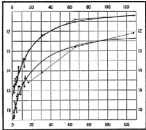


Fig. 1.

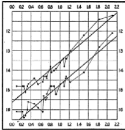
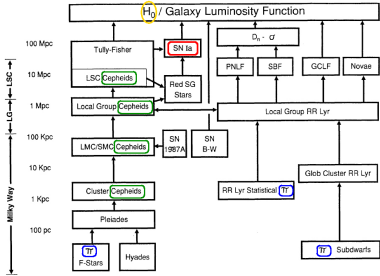
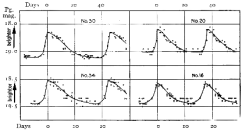


Fig. 2.

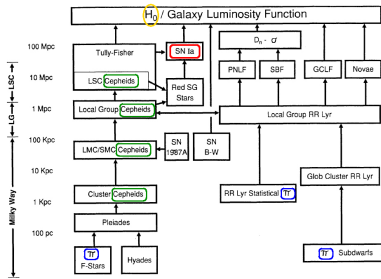
Mesures de distance astronomiques



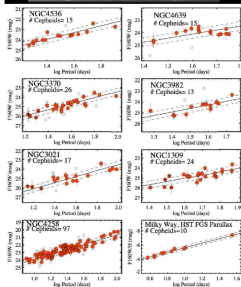
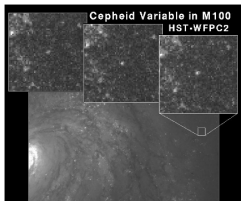
(π == parallaxe)



Mesures de distance astronomiques

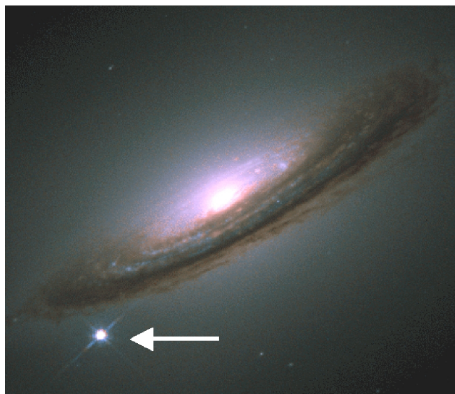


(π == parallaxe)

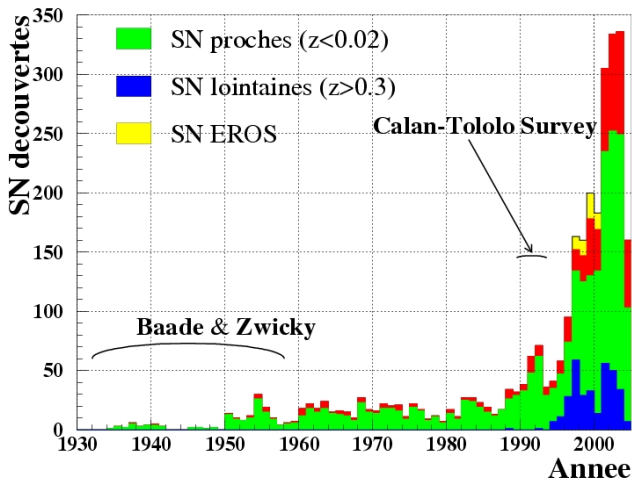


Supernovæ

- Explosion d'étoiles
- $\mathcal{L} \sim 10^{10} - 10^{11} L_{\odot}$ (SNIa)
(détectables jusqu'à des redshift ≈ 1)
- fréquence : 1 SN/GAL/siècle
- 2 espèces :
 - ▶ SNIa
 - ★ SNe **thermonucléaires**
 - ★ caractéristiques **homogènes**
 - ▶ SNIa, Ib, c
 - ★ SNe **gravitationnelles**
 - ★ grande diversité, continuité entre classes?

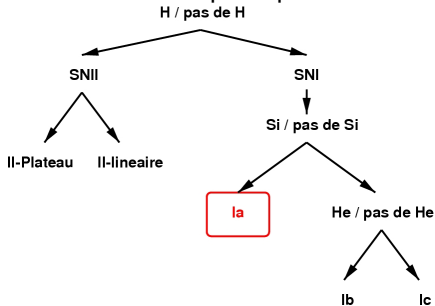


Taux de découvertes

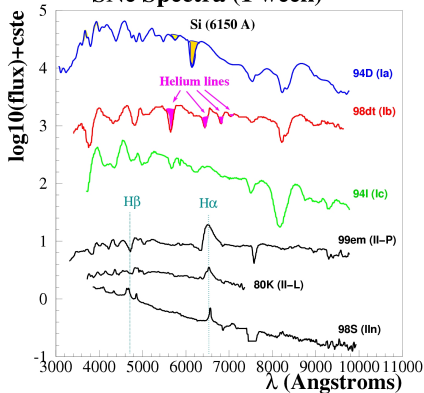


Classification des SN

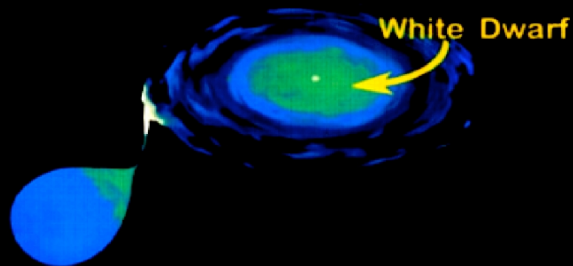
Caractéristiques spectrales



SNe Spectra (1 week)



Type Ia Supernova



An explosion resulting from the thermonuclear detonation of a White Dwarf Star.

Naine Blanche

“vie” d'une étoile “ordinaire” ($\sim 2M_{\odot}$)

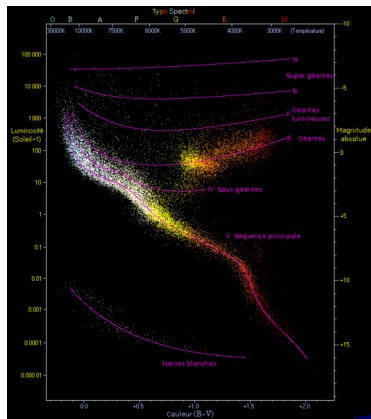
- Fusion thermonucléaire $H \rightarrow He \rightarrow C, O$
 - Quand plus de combustible \rightarrow plus de fusion
- \rightarrow contraction \rightarrow ionisation
- \Rightarrow objet compact, “blanc”, peu lumineux
- \Rightarrow “**naine blanche**”

premier cas observé mi- 19^{ème} siècle

identification vers 1910

$\sim 1920 - 30$ étudiées pour tester la Relativité Générale (A. Eddington) : champ gravitationnel “fort”

Ex: Sirius B



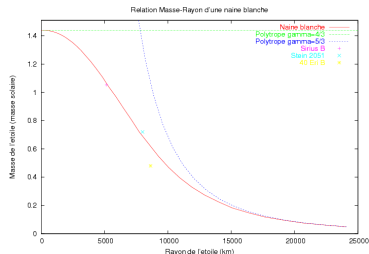
Stabilité des naines blanches

résultat de la compétition

gravitation $\leftrightarrow P_{Fermi}$

matière dégénérée (electrons)

Chandrasekhar (1930) : masse limite!



$$M_{\star} \leq M_{Chandrasekhar} = \left(\frac{hc}{3G} \right)^{3/2} \left(\frac{1}{\mu m_p} \right)^2 (\sim 1.44 M_{\odot})$$



'One is left speculating on other possibilities.' S. Chandrasekhar
'I think there should be a law of nature to prevent a star from behaving in this absurd way'
sir A. Eddington



Mécanisme d'explosion (SNIa)

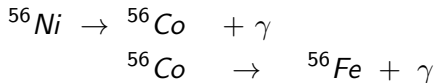
Système progéniteur = naine blanche (C/O) + géante rouge

accretion vers la NB (+ compacte) $\Rightarrow M_{\star} \nearrow$

Quand $M_{\star} \sim M_{Chandrasekhar}(1.4M_{\odot})$: **explosion thermonucléaire**

Combustion totale (**masse cste de combustible !**)

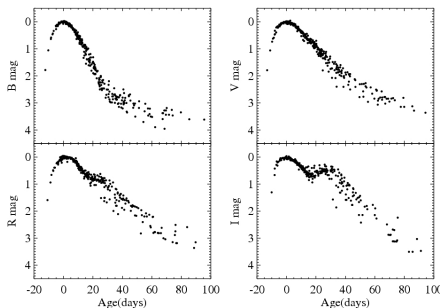
C/O \rightarrow éléments plus lourds dont $\approx 0.5M_{\odot}$ de ^{56}Ni



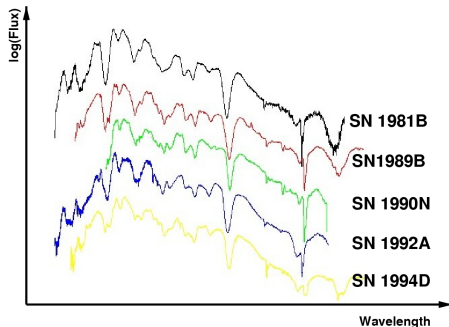
\rightarrow forme de la “courbe de lumière”

Homogénéité des SNIa

SNIa du survey CfA (Riess *et al.*)



Spectres @ max (P. Nugent)

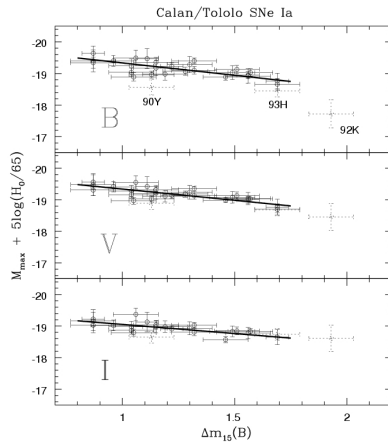
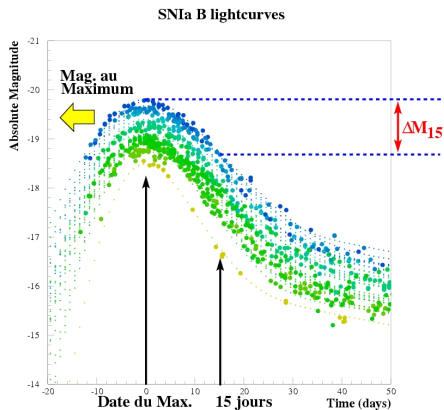


$$\sigma_{M(B)} \sim 0.4 \text{ mag} \quad (\text{mag} = -2.5 * \log(\text{flux}) + \text{cste})$$

$$m_2 - m_1 = 1 \Leftrightarrow \Phi_1 / \Phi_2 = 2.5$$

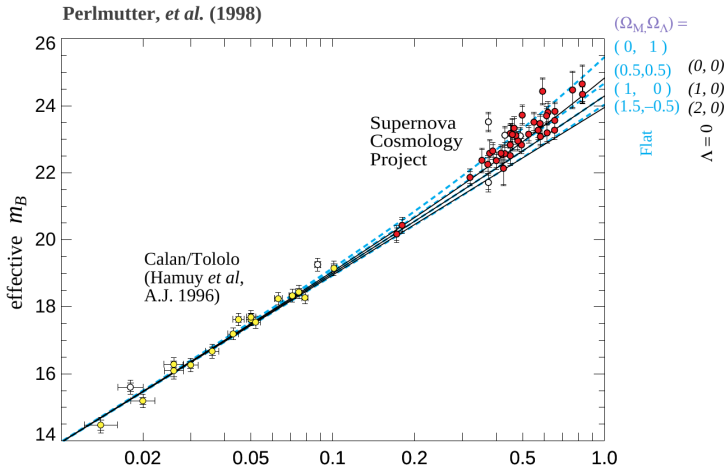
Mais qq SNIa : bleues & "sur-lumineuses" (91T, 99ac)
rouges & sous-lumineuses (86G, 91bg)

Standardisation des SNIa



Hamuy et al 1996

Relation magnitude \leftrightarrow redshift



$$m \sim M - 5 \log_{10}(H_0) + 5 \log_{10}(cz)^{\text{redshift}} + 1.086 (1 - q_0)z + O(z^2)$$

loi en $1/R^2$ + loi de Hubble
(+ grande distance)

$$q_0 = \Omega_0/2 - \Omega_\Lambda$$

“Energie noire”?



Constante cosmologique ou “énergie noire” ?

MQ : niveaux d'énergie de l'oscillateur harmonique $E_n = (n + 1/2)\hbar\omega$

⇒ énergie du vide $E_0 = 1/2\hbar\omega$

Du point de vue thermodynamique : ρ_{vac} est constant ⇒ $P = -\rho c^2$ (csq du 1er principe)

$$\Lambda \equiv 8\pi G\rho_{vac}$$

MAIS Σ (énergies du vide des champs) pour modèle std → 10^{120} odg trop grand ...

→ autre origine (nveau champ) = “quintessence”

Equation d'état paramétrée : $\rho \sim V^{-(1+w)}$

- Λ : $w = -1$
- matière $w = 0$,
- cordes cosmiques $w = -1/3$
- ...

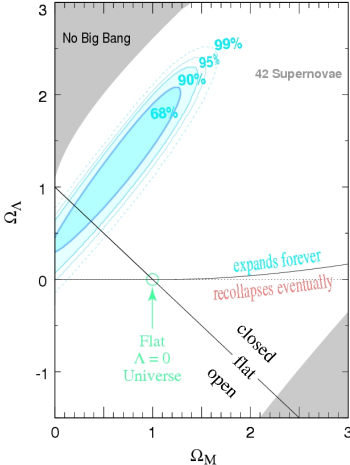
“Signature” de w : évolution avec z ($m(z)$)

Dégénérescences

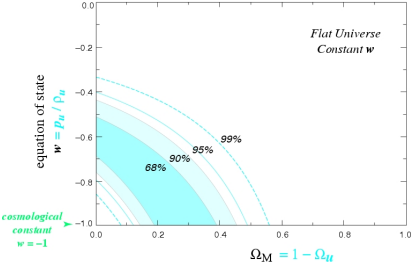
$$(\Omega_m, \Omega_\Lambda)$$

$$(\Omega_x, w_x)$$

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



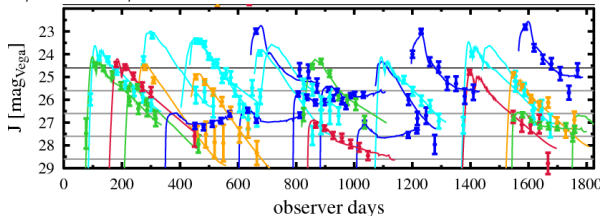
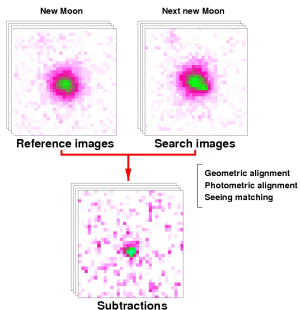
Supernova Cosmology Project
Perlmutter *et al.* (1998)



⇒ Plus de statistique + contrôle des systematiques

Découvertes et suivi

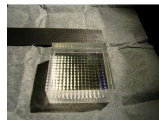
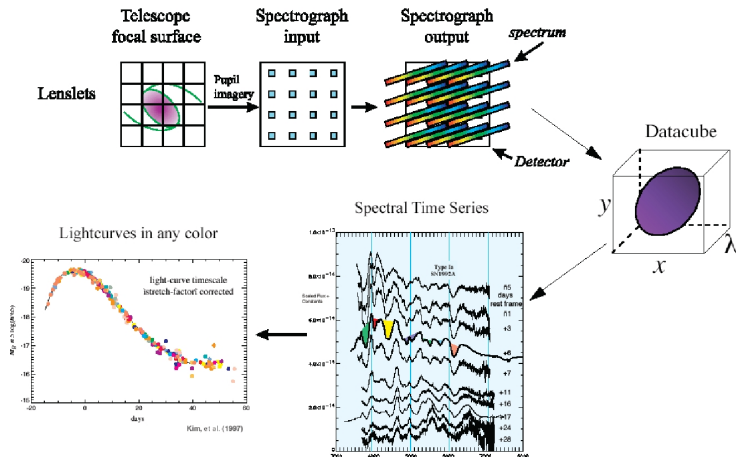
- Découvertes “automatiques”
 - ⇒ programmables
 - télescope grand champ
 - quelques nuits
 - ex. EROS-II : 1 SNIa / 2h
- Suivi plus demandeur : plusieurs télescopes ou tel. dédié
 - ⇒ instrument SNIFS
 - ⇒ mode “suivi” (découverte et suivi simultanés) → SNLS, ESSENCE, SDSS



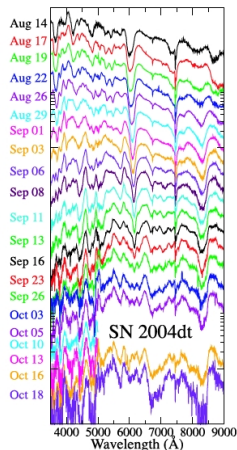
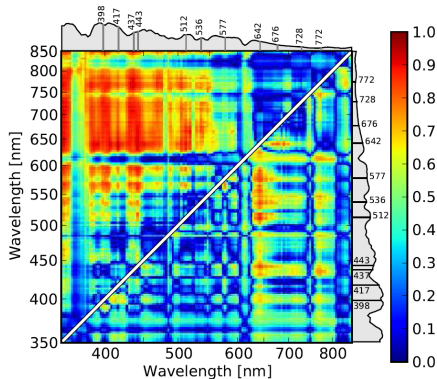
SN Factory (“usine à SN”)

- But : $\sim 100 - 200$ SNIa proches ($z \leq 0.1$)
- Découvertes faites en “parasite” avec les images de NEAT (recherche automatique d’astéroïdes, 2 télescopes @ Palomar et Hawaï) - traitement à Berkeley
- Identification et suivi : temps garanti sur tel. de 2.2m de l’U. de Hawaï équipé du SNIFS ([made in France](#): CRAL, IPNL, LPNHE)
- ~ 20 SNe découvertes en 2003 ; SNIF livré mi-2004; tests sur le ciel en cours
- Fonctionnement “routinier” depuis 2005
- ~ 600 SN (tous types) découvertes (2008)

Principe du SNIFS



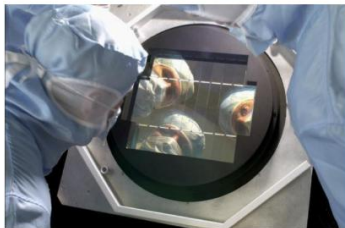
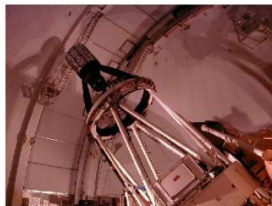
Produits SN Factory



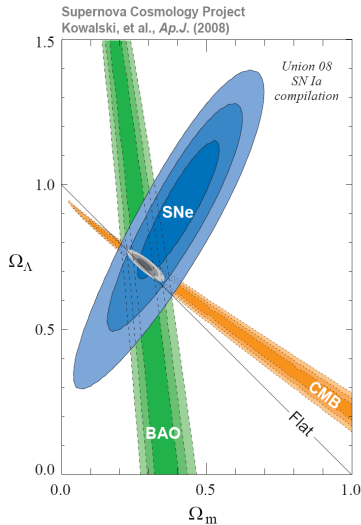
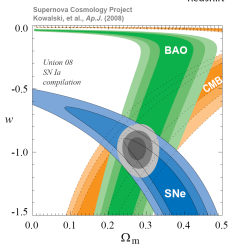
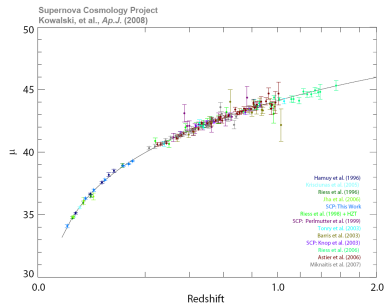
Vers une meilleure standardisation des SNIa : $\Delta m_{15} \rightarrow$ rapports d'intensités spectrales ?

- Cadre : Legacy Survey au CFHT
- ... avant fermeture définitive du CFHT (tel. 4m Mauna Kea Hawaii)
- Observations "régulières" (mode survey) découvertes et suivi photométrique combinés
- temps complémentaire au CFH et sur des tel. de 10m (spectro)
- ~ 40 nuits / an (recherche) pendant 5 ans (2003-2008)
- ~ 450 SNIa "bien suivies" - cosmo avec ~ 250

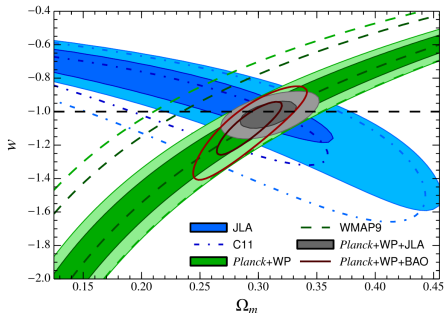
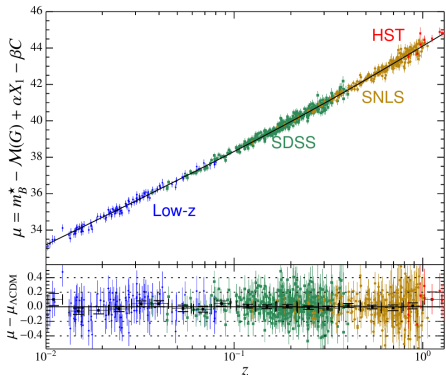
Megacam



Resultats de SNLS



Resultats de SNLS(2)

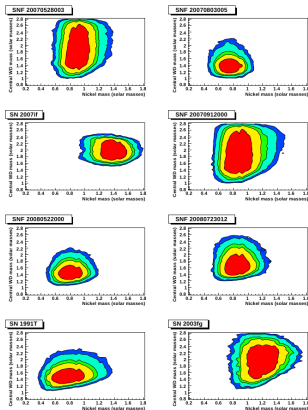


+ de statistique, travail sur les systématiques ...

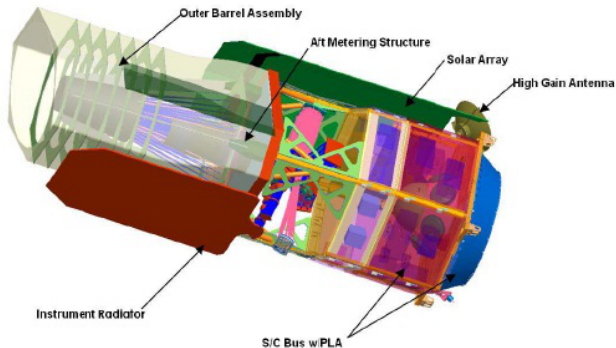
(M. Betoule et al arXiv:1401.4064)

Incertitudes Systématiques

- plusieurs instruments : combiner les mesures demande de connaître le spectre des objets
- environnement des SNIa (rougissement)
- dispersion intrinsèque : corrélation entre couleur et luminosité au max (après correction pour la forme de la courbe de lumière)
- composition exacte / mécanismes d'explosion \Rightarrow dispersion de luminosité ?
- indices d'une corrélation entre luminosité max et type de la galaxie-hôte
- quelques SNIa "super-massives"
- \Rightarrow limitation systématique sur la mesure de distance ?



SNAP/JDEM/W-FIRST



Horizon $\sim 202x$ - Priorité US (Decadal Survey) - 1.6 G\$

Telescope 1.5m - imageur 144 Mpix (IR proche)

programme : de l'énergie noire (SN, WL, BAO,...) aux **exoplanètes**

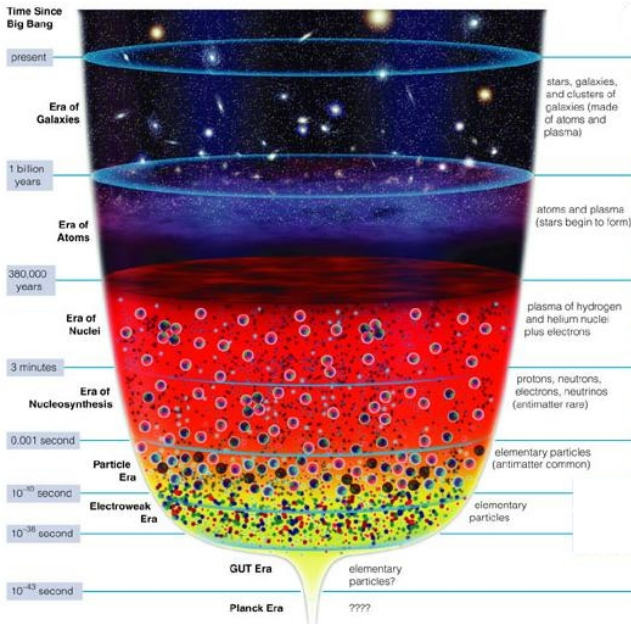
collaboration avec EUCLID ??

Depuis anisotropies du CMB ...

- Emission & caractéristiques du CMB
- Pourquoi des anisotropies ?
- Méthodes d'analyse
- Programme(s) : Planck (+ les autres)
- Développements récents

... vers les grandes structures

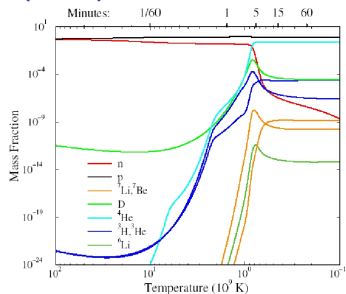
- Oscillations acoustiques de baryons (BAO)
- Futur : LSST



- (5) formation des structures (galaxies, étoiles, ...) par la gravitation
- (4) "Libération" des photons = **découplage** (à 300000 ans) → **émission du CMB**
- (3) Nucléosynthèse (de 3 à 30 mn) (→ éléments légers)
- (2) expansion "lente" : apparition de quarks, leptons (electrons) puis nucléons (p,n)
- (1) inflation
- (0) état initial (??)

Le CMB

- Prédiction : **R. Alpher, G. Gamow (1948)**



- Prédiction : **R. Alpher, G. Gamow (1948)**
- Découverte fortuite en 1965 (**Penzias & Wilson**)
manip “dédiée” en construction !

DISCOVERY OF COSMIC BACKGROUND



Microwave Receiver



MAP980645

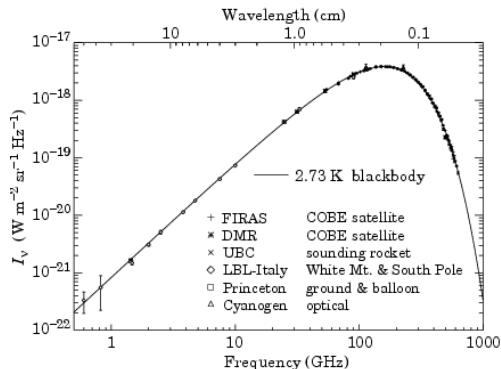
Robert Wilson



Arno Penzias

Le CMB

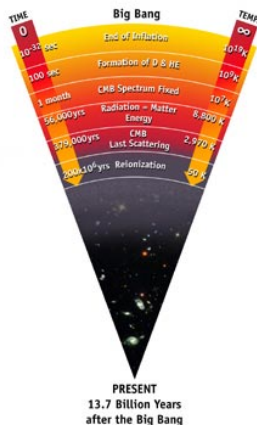
- Prédiction : **R. Alpher, G. Gamow (1948)**
- Découverte fortuite en 1965 (**Penzias & Wilson**)
- Rayonnement quasi-**isotrope**



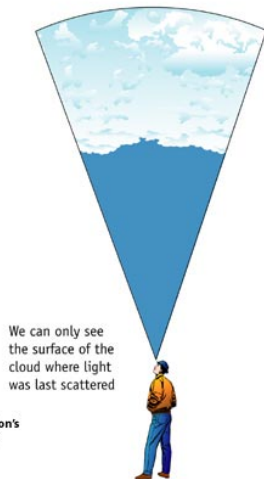
- Spectre = “**corps noir**”
- pic à 100GHz
TV sat ~ 10GHz
portable ~ 2.5GHz
- 400 photons/cm³
- ... qq % du bruit d'une TV

Emission du CMB

- 1 Univers primordial ($t < 300000$ ans, $T > 3000 \text{ }^\circ\text{K}/2700^\circ\text{C}$)
électrons, protons (noyaux) et photons/rayonnement
 - ▶ T élevée \Rightarrow pas d'atomes
 - ▶ photons réfléchis ou absorbés : **Univers opaque**
- 2 Quand $T \approx 3000^\circ\text{K}$ les électrons se lient aux noyaux \Rightarrow **Univers transparent** : émission du CMB
- 3 Expansion de l'univers \Rightarrow Décalage vers le rouge "cosmologique" : T_{CMB} apparente $\rightarrow 2.7^\circ\text{K} \Rightarrow$ CMB dans l'infra-rouge lointain

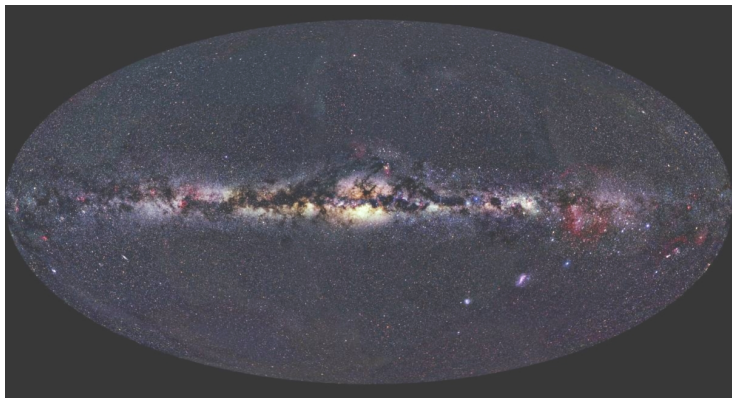


The cosmic microwave background Radiation's "surface of last scatter" is analogous to the light coming through the clouds to our eye on a cloudy day.



Des anisotropies dans le CMB !

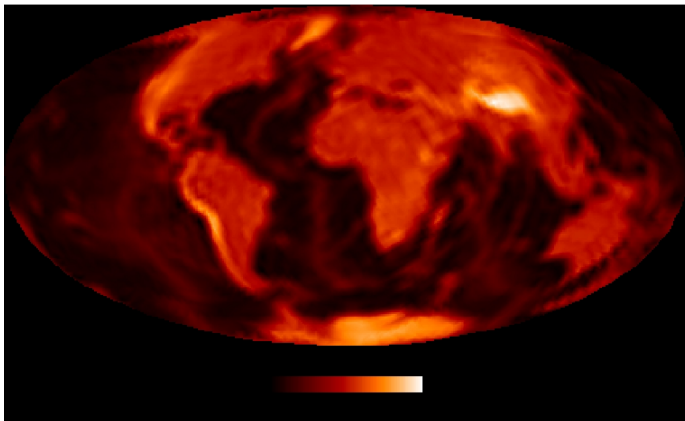
T_{CMB} dans chaque direction \rightarrow carte du "ciel" (couleur \leftrightarrow T)



Le ciel nocturne (visible)

Des anisotropies dans le CMB !

T_{CMB} dans chaque direction \rightarrow carte du "ciel" (couleur \leftrightarrow T)

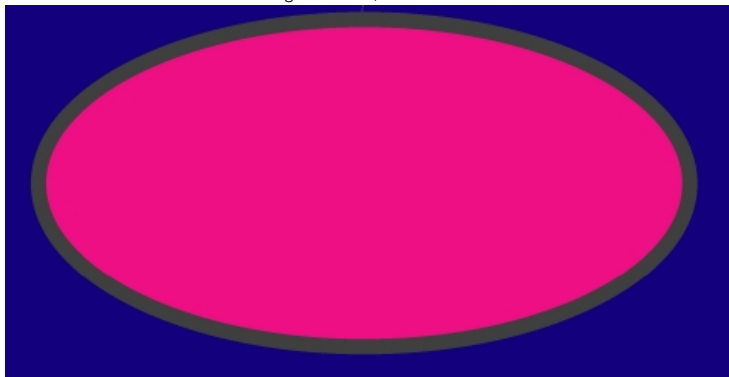


Représentation d'une sphère connue

Des anisotropies dans le CMB !

T_{CMB} dans chaque direction \rightarrow carte du "ciel" (couleur \leftrightarrow T)

rouge \leftrightarrow chaud ; bleu \leftrightarrow froid

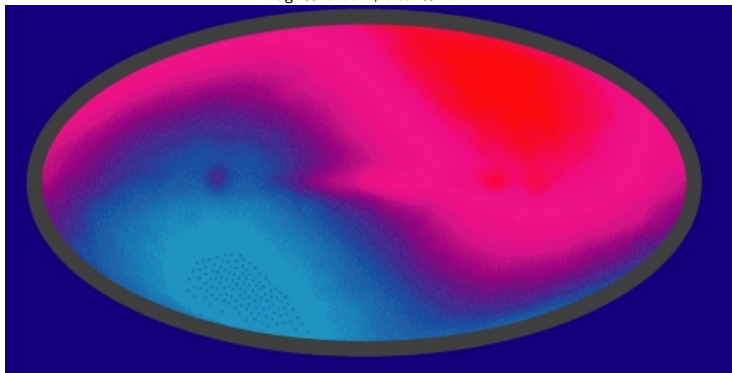


CMB *très* uniforme (à 1/1000 près)

Des anisotropies dans le CMB !

T_{CMB} dans chaque direction \rightarrow carte du "ciel" (couleur \leftrightarrow T)

rouge \leftrightarrow chaud ; bleu \leftrightarrow froid



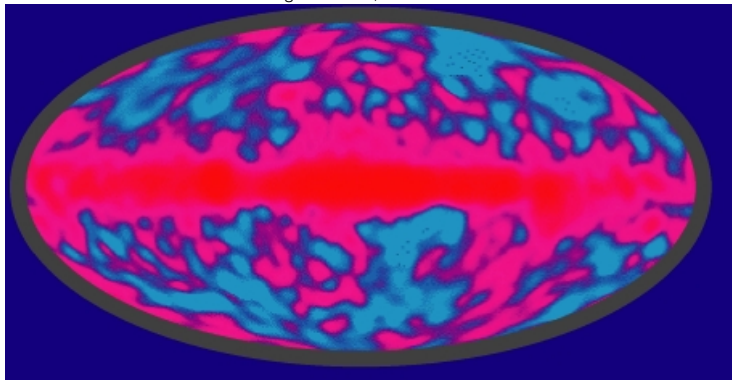
$$(\delta T/T \sim 10^{-3})$$

mvt de la Terre \Rightarrow effet Doppler
 ~ 400 km/s (\sim mvt orbital galactique)

Des anisotropies dans le CMB !

T_{CMB} dans chaque direction \rightarrow carte du "ciel" (couleur \leftrightarrow T)

rouge \leftrightarrow chaud ; bleu \leftrightarrow froid

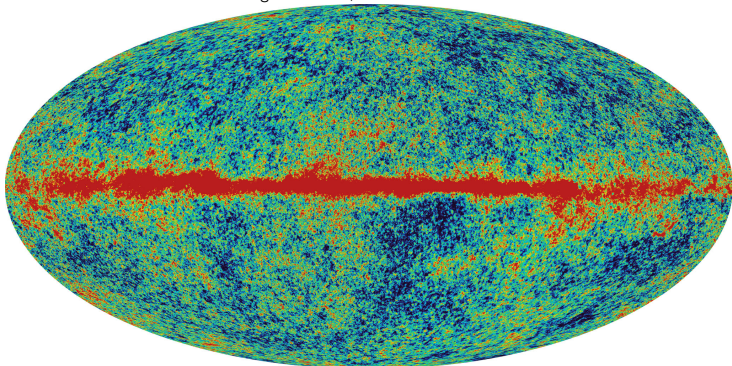


Fluctuations primordiales ($\delta T/T \sim 10^{-5}$) + Galaxie (1/100000 près)
COBE (1992)

Des anisotropies dans le CMB !

T_{CMB} dans chaque direction \rightarrow carte du "ciel" (couleur \leftrightarrow T)

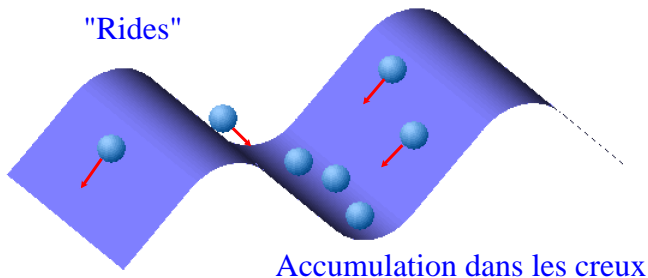
rouge \leftrightarrow chaud ; bleu \leftrightarrow froid



Fluctuations primordiales ($\delta T/T \sim 10^{-5}$) + Galaxie (1/100000 près)
WMAP (2003)

Des fluctuations aux anisotropies

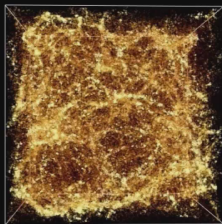
- Dans l'univers "quantique" \Rightarrow fluctuations de densité ($d = f(x, t)$)
 - Inflation \Rightarrow dilatation d'échelle très rapide
- \Rightarrow "gel" des fluctuations (\sim gaussiennes invariantes d'échelle) \rightarrow anisotropies de densité
- graines des grandes structures



Simulations

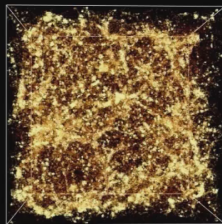
Λ CDM

$z = 0.00$



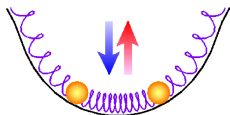
SCDM

$z = 0.00$



Des ondes acoustiques avant le découplage!

- Il existe des zones plus denses et moins denses
- milieu composé de protons (+ qq noyaux He,...), d'électrons ("libres") et de photons (**plasma** \Rightarrow **pression "de radiation"**)
- quand la matière "tombe" là où c'est plus dense (gravitation)
- ... mais la pression réagit



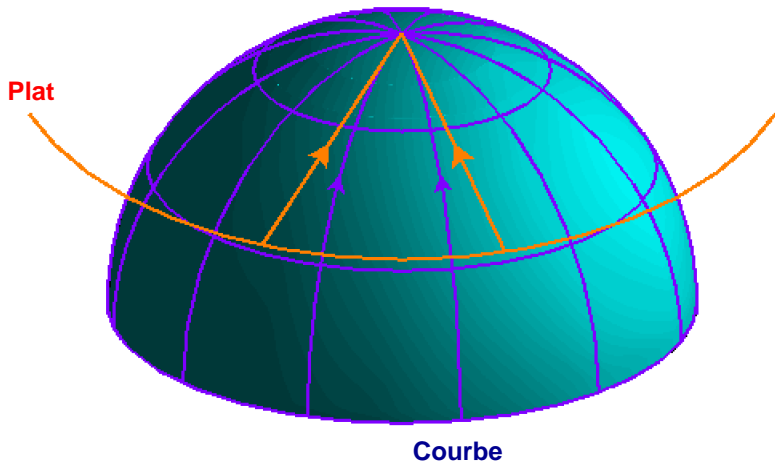
\Rightarrow apparition d'oscillations (**ondes acoustiques**) ds le plasma primordial

Vitesse des ondes \leftrightarrow composition, densité du milieu, ...

anisotropies de densité \Leftrightarrow régions + ou - chaudes

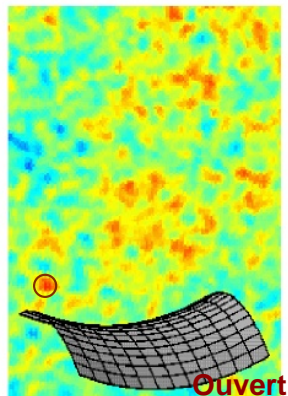
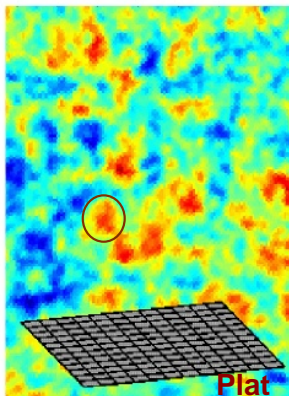
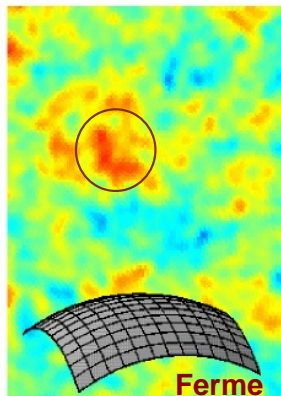
\Rightarrow état final (au découplage) = **anisotropies de température du CMB**

Propagation du CMB



La taille (apparente) angulaire des anisotropies est modulée par la géométrie de l'Univers

Géométries et anisotropies

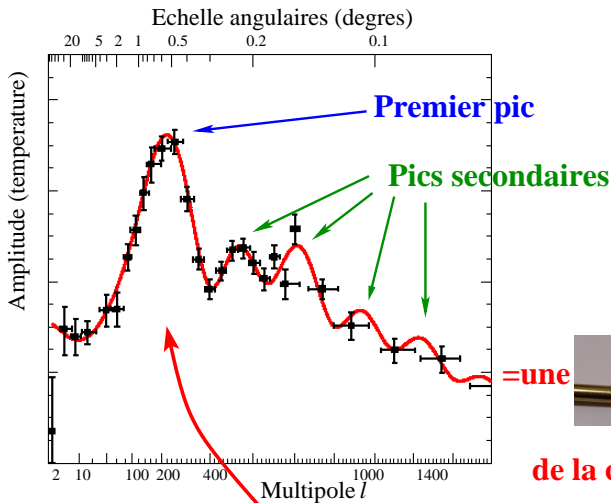


Pb : extraire des infos quantitatives des cartes

Principe : estimer parmi les fluctuations la fréquence de chaque taille

Méthode : décomposition sur les "harmoniques sphériques"

La courbe des C_l



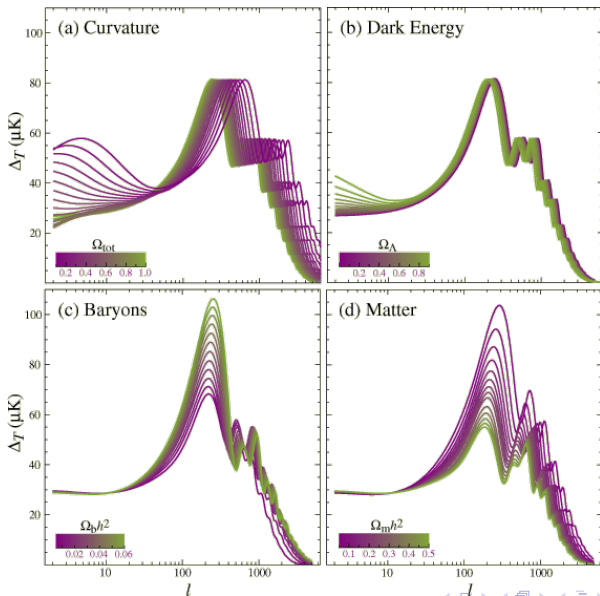
=une



de la cosmologie !

Beaucoup de structures de cette taille

Un outil sensible !



Une mesure de ... tout !?

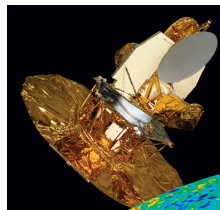
Les anisotropies du CMB combinent :

- 1 des informations “pré-” ou sur l'**inflation** (**spectre initial des anisotropies**)
- 2 des manifestation de la physique (“simple”) du plasma primordial (**ondes acoustiques**) et de ses paramètres
- 3 les effets de la **géométrie** de l'univers

Il s'agit donc d'une mesure clef de la cosmologie (sensible à \sim *tous* les paramètres !)

Aperçu expérimental

- COBE-DMR (1992) anisotropies (radio)
- WMAP 2003(-11) Mesures de $C_\ell \rightarrow \ell = 1000$ - radio
- Planck 2009(-13) $C_\ell \rightarrow \ell = 2000$ COBE $\times 1000$, WMAP $\times 10$
- Boomerang, Maxima (1998) : 1er pic (bolomètres)
- Archéops (2002)
- CBI, VSA, DASI (radio, 2000-2) : grands ℓ
- futur à tous les etages : sol (BRAIN/QUBIC, ACTpol, SPTpol, POLARBEAR,...), ballon (OLYMPO, EBEX, SPIDER, PIPER,...., ...), espace (BPOL/CORE+?, PIXIE ?)



Planck : la mission

Mission de l'ESA

Lancement 15 Mai 2009

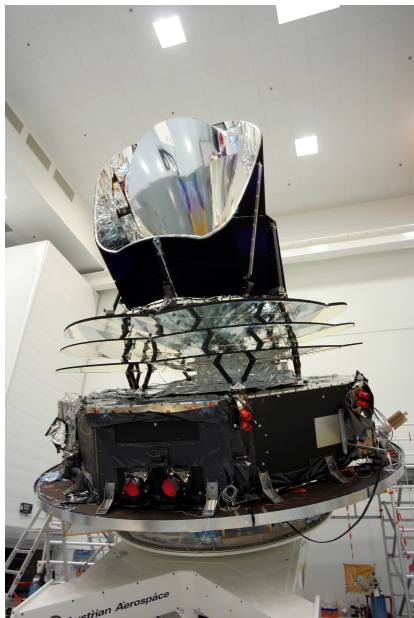
(avec Hershell)

Durée garantie : 14 mois @ L2
(1.5Mkm)

- 1 Telescope (1.5m) - consortium danois
- 2 LFI (radiomètres 10-80GHz) - consortium piloté par U. Bologne
- 3 **HFI : bolomètres (100-800 GHz) - consortium piloté par IAS (Orsay 🇫🇷)**

HFI : ~ 29 mois - fin 14/01/2012

LFI arrêté le 14/08/2013



Planck : la mission

Mission de l'ESA

Lancement 15 Mai 2009

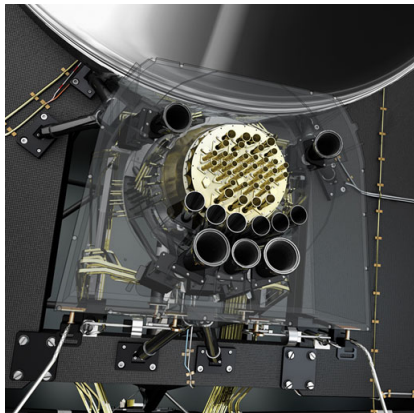
(avec Hershell)

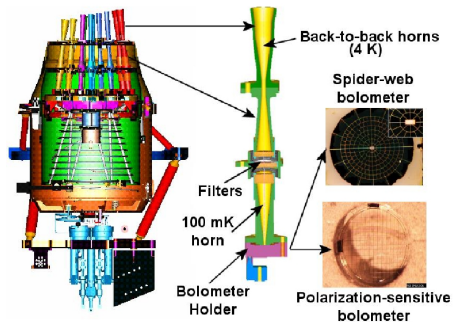
Durée garantie : 14 mois @ L2
(1.5Mkm)

- 1 Telescope (1.5m) - consortium danois
- 2 LFI (radiomètres 10-80GHz) - consortium piloté par U. Bologne
- 3 HFI : bolomètres (100-800 GHz) - consortium piloté par IAS (Orsay 🇫🇷)

HFI : ~ 29 mois - fin 14/01/2012

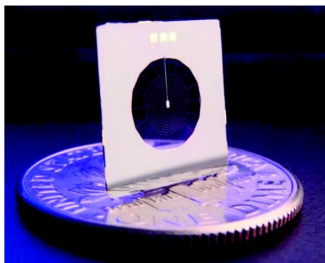
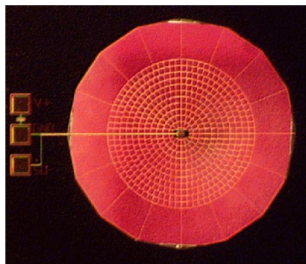
LFI arrêté le 14/08/2013



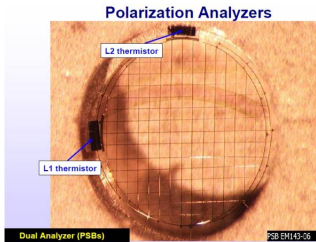


- Au foyer du télescope (“dans LFI”)
- Refroidissement à plusieurs étages
- Dernier étage (dilution $^3\text{He}/^4\text{He}$) $T \sim 0.1$ K
- Détecteurs :
bolomètres (52 voies)
- “prototype” = Archéops

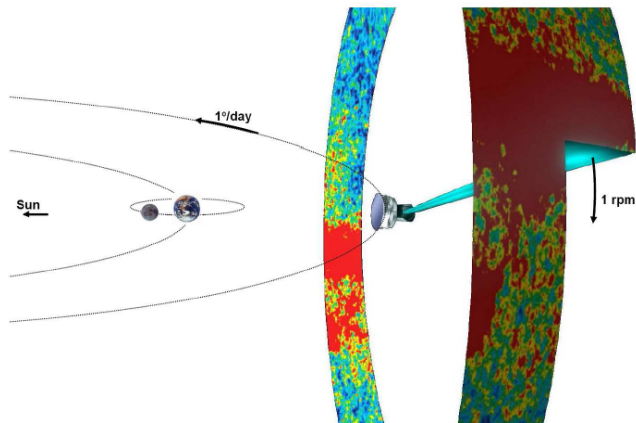
Les bolomètres



- mesurent la chaleur déposée par les γ
- grille \rightarrow cosmiques
- taille 2.6mm
- "fils" $4 \times 1 \mu\text{m}$
- $T \sim 100 \text{mK}$ (sensibilité)

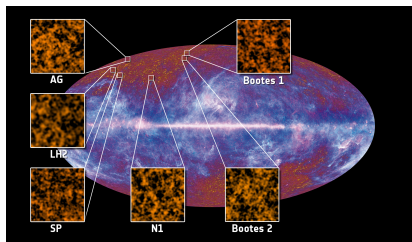
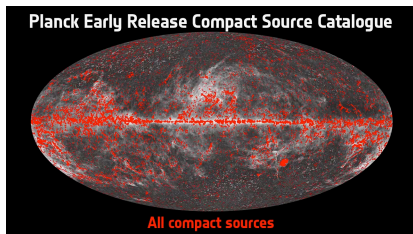


Planck à L2

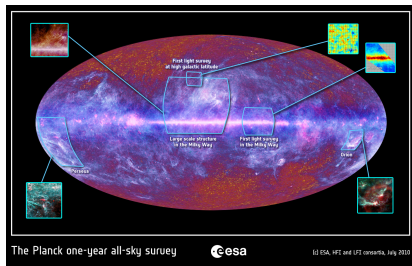
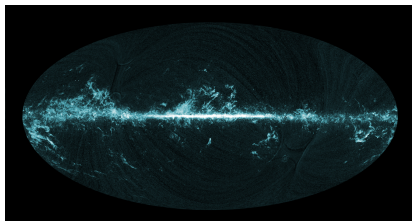


Observations en continu (~ 7 mois \rightarrow tout le ciel)
Redondances des époques différentes (systématiques)

Résultats intermédiaires (2009-2012)



Emission du CO

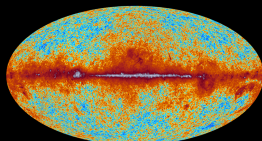


Et enfin (!) ~ 30 articles en 2013 + XX en 2014/15...

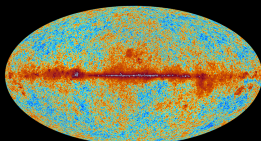


planck

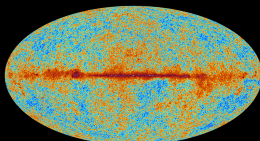
The sky as seen by Planck



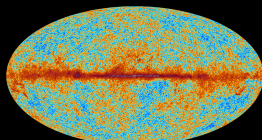
30 GHz



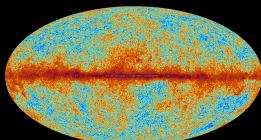
44 GHz



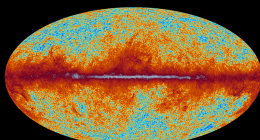
70 GHz



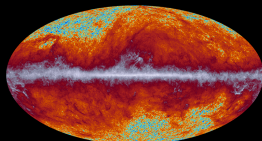
100 GHz



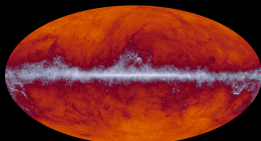
143 GHz



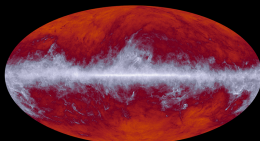
217 GHz



353 GHz



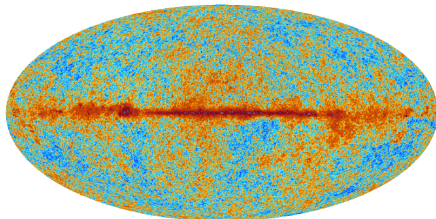
545 GHz



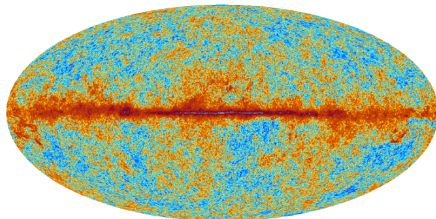
857 GHz

Fréquences centrales

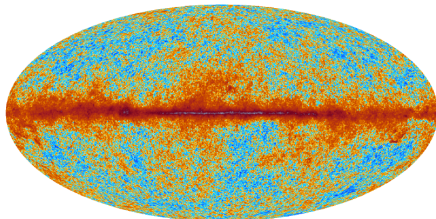
70 GHz



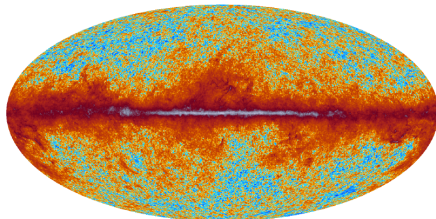
100 GHz



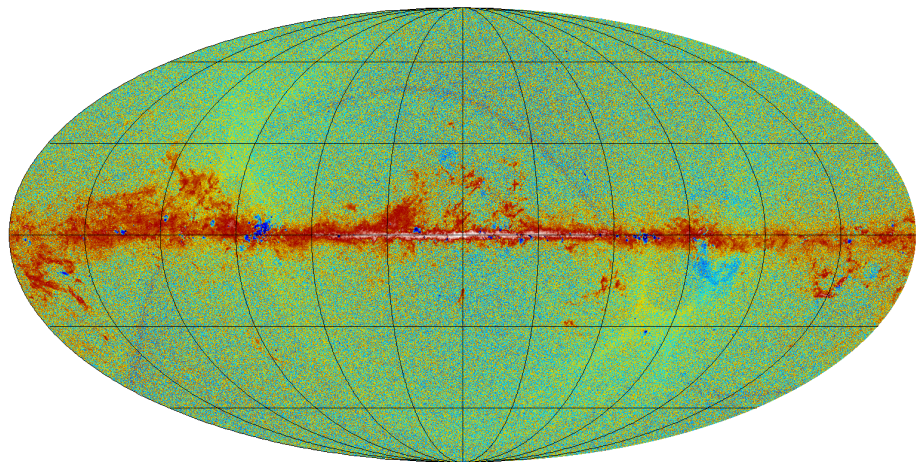
143 GHz



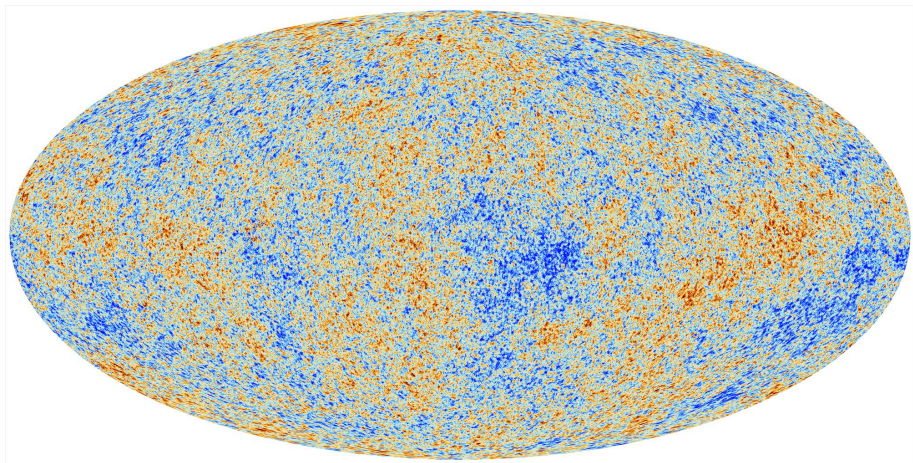
217 GHz



Cohérence : 100-70 GHz

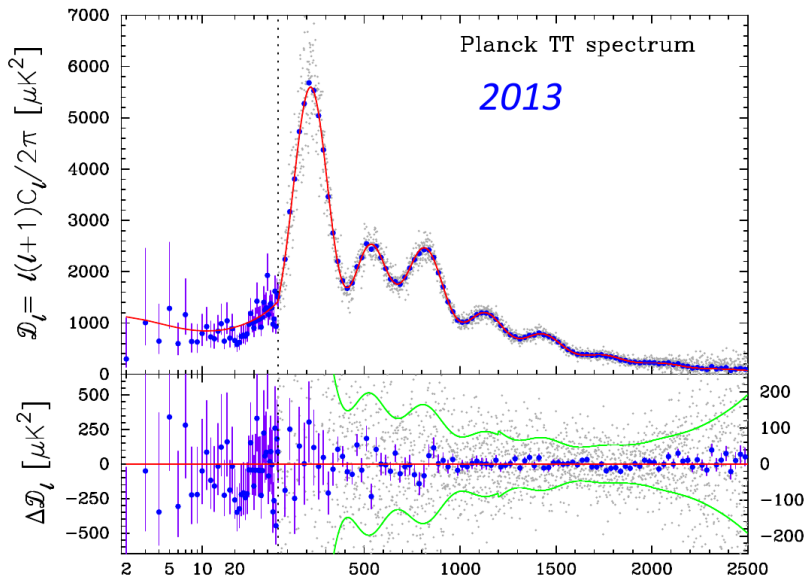


Planck (2013) CMB temperature anisotropies map

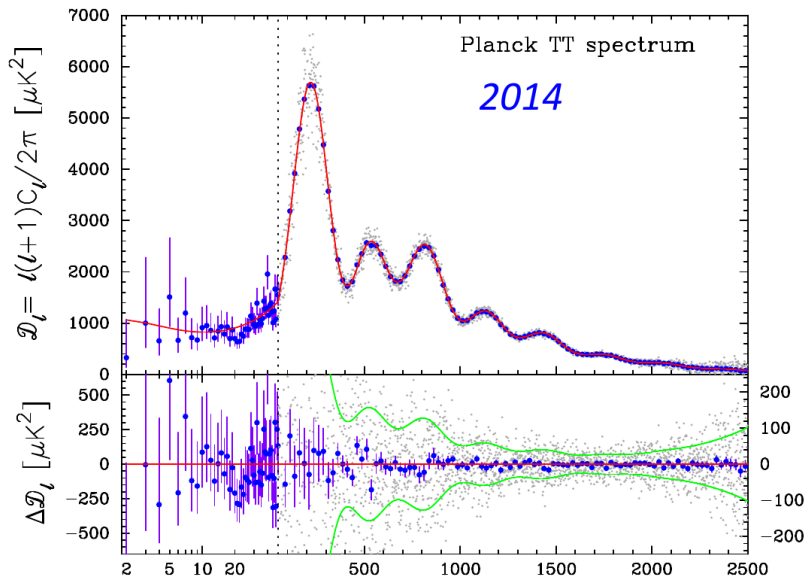


4 methods compared in : Planck 2013 results. XII. Component separation

Spectres de puissance du CMB

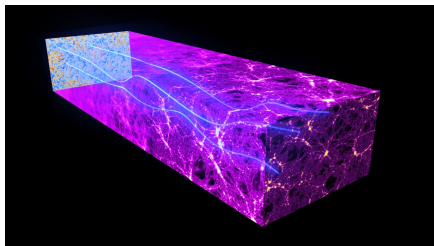


Spectres de puissance du CMB

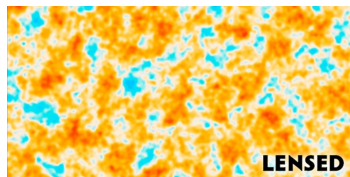


CMB lensing by Large Scale Structures

LSS distortion of the CMB photons' paths

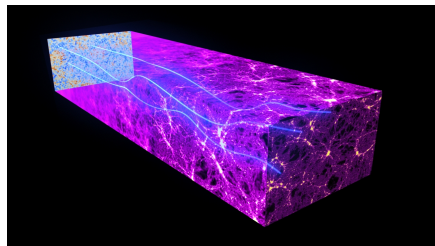


→ small “smearing” of the C_ℓ spectra + distortion of the CMB image

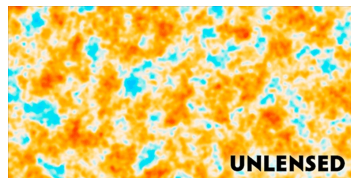


CMB lensing by Large Scale Structures

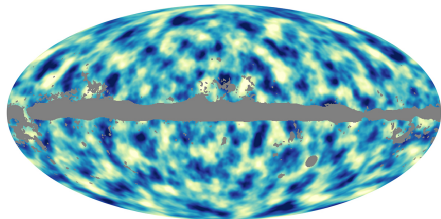
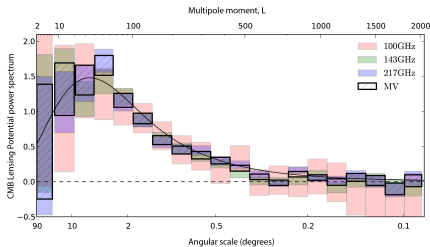
LSS distortion of the CMB photons' paths



→ small “smearing” of the C_ℓ spectra + distortion of the CMB image



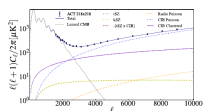
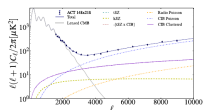
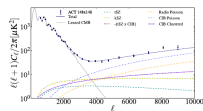
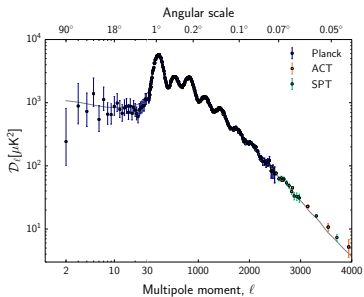
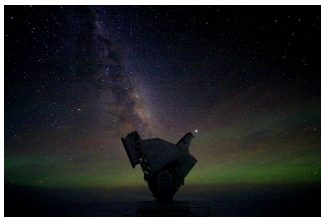
Mapping the lensing structures



Analysis of CMB anisotropies 4 points statistics \Rightarrow Power spectrum of the deflection field (integrated information on LSS @ $z \approx 2.5$)

used in cosmological parameter fits together with C_ℓ

Et à part Planck ?

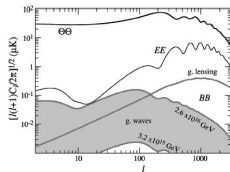
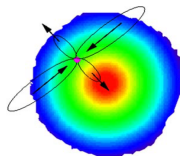
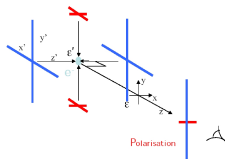


Polarisation et CMB

- onde électromagnétique = propagation de variations du champ (\vec{E}, \vec{B})
- si une direction pour chaque vecteur est (toute ou partie) privilégiée : polarisation (photo, cinéma 3D,..)
- le CMB is (faiblement) polarisé (linéairement)
- polarization sur le ciel = champ de vecteur \Rightarrow **paramètres de Stockes**
 Q, U
- décomposition harmoniques \rightarrow **modes paires (E) et impairs (B)**
- 6 spectres de puissance ; par symétrie $\Rightarrow C_{\ell}^{TB} = C_{\ell}^{EB} = 0$

CMB et polarization

- Mécanisme de base : anisotropie quadrupolaire de température + diffusion Thomson sur un e
- Origines :
 - ▶ onde gravitationnelles primordiales (modes tenseurs) → B modes
 - ▶ dynamique du plasma primordial (corrélation avec anisotropies de temp.) → E modes
 - ▶ ré-ionisation tardive ($z \sim 6 - 10$) → E modes (bas ℓ)
 - ▶ lensing transforme (une partie des modes) E en modes B
- très faibles amplitudes ($\sim 10^{-2} - 10^{-4}$ temperature)
- l'amplitude des modes B primordiaux mesure $r = A_t/A_s$ (\propto échelle d'énergie de l'inflation)



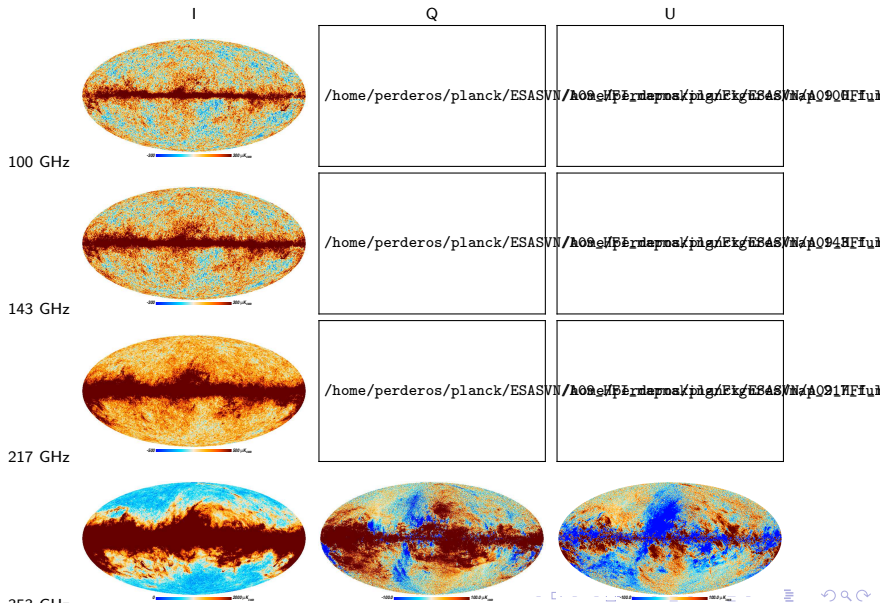
Mesurer la polarisation du CMB

- détecteur idéal (\rightarrow une direction de polar) d'orientation ψ :

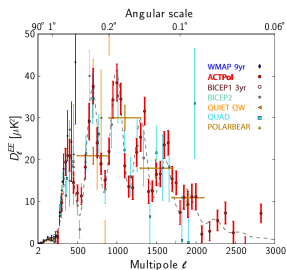
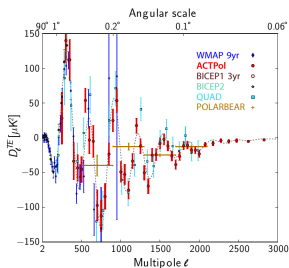
$$m = I + Q \cos 2\psi + U \sin 2\psi$$

- mesurer I,Q,U measurements \Rightarrow combiner plusieurs mesures et/ou détecteurs avec différentes orientations
- + arrangement par paire orthogonales
- exemples d'expériences :
 - ▶ **Planck (1992-2014)** : O(10) détecteurs appariés \sim orthogonaux + balayage du ciel pour changer d'orientation
 - ▶ **Bicep** : phase 1 (2007-2008) O(100) det. (Planck-like) ; phase 2 (2010-2012) O(500) det. ; phase 3 (Keck array, 2011-2016) O(2500) détecteurs appariés, rotation de l'instrument/ciel
 - ▶ **SPTpol** O(780x2) detectors , 90 and 150 GHz (première mesure des modes B lensés 2013)
 - ▶ **Polarbear** O(1200) detectors + lame 1/2 onde rotative pour moduler la polarisation (B modes lensés, 2013-) version 2 avec 2 freq. et O(7000) détecteurs
- attention aux systés \Rightarrow mélange entre I et Q,U (affectent surtout les grandes échelles/bas ℓ ...) **Ex. : Planck HFI polarisation data "on hold" ...**

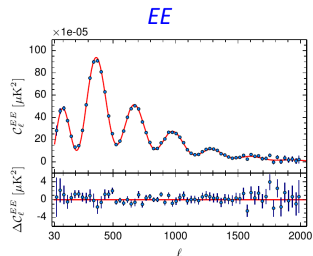
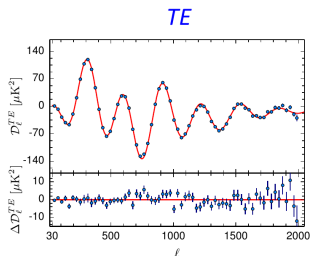
Cartes de polarisation



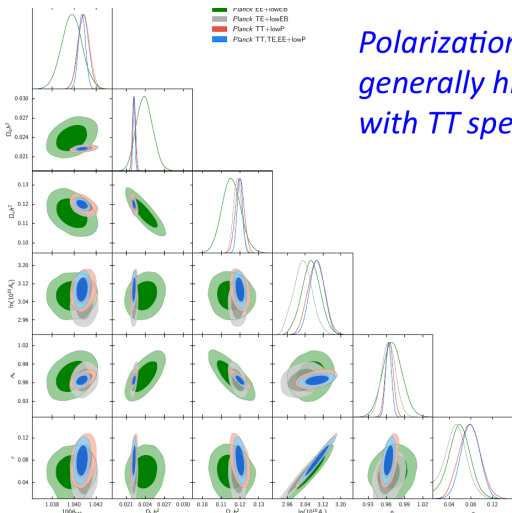
Spectres de puissance en polar



Planck 2014



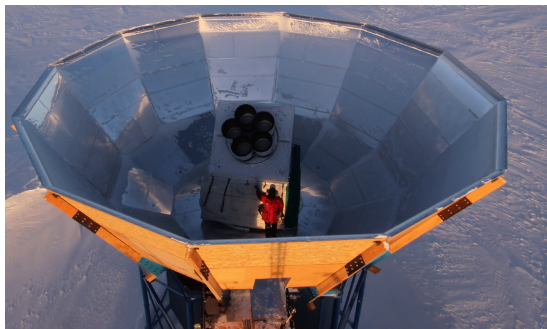
Paramètres cosmologiques



Polarization spectra are generally highly consistent with TT spectra.

+ pas d'indications d'extensions : 3ν , $\sum M_\nu < 0.2 eV$, pas de courbure, Λ
+ H_0 bas / mesures locales

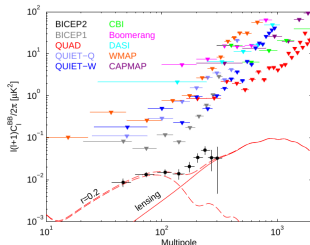
Bicep2/Keck array



NB : réflecteur (optique=lentilles)- observations à 150 GHz seulement ...

Heurs et malheurs des modes B

- mars 2014 : Bicep 2 annonce la découverte des modes B primordiaux ($r = 0.2 @ 4\text{sigmas}$) ('+' visite" à A. Linde sur YouTube...)
- mai-juillet : doutes sur le modèle d'avant plan utilisé (basé sur des slides de Planck 2013 numérisés ...)
- septembre 2014 : Planck publie ses mesures de polarisation des émissions de poussières (à 353 GHz) \Rightarrow composante non négligeable pour Bicep2 (peut expliquer tout le signal à bas ℓ)
- décembre 2014 : analyse croisée BICEP2/Planck + données BICEP3 (Keck) \Rightarrow limite supérieure sur r - plus de signal primordial ...
- \Rightarrow **La chasse continue ... mais attention aux avants-plans !!**



Heurs et malheurs des modes B

- mars 2014 : Bicep 2 annonce la découverte des modes B primordiaux ($r = 0.2 @ 4\sigma$) ("+"visite" à A. Linde sur YouTube...)
- mai-juillet : doutes sur le modèle d'avant plan utilisé (basé sur des slides de Planck 2013 numérisés ...)
- septembre 2014 : Planck publie ses mesures de polarisation des émissions de poussières (à 353 GHz) \Rightarrow composante non négligeable pour Bicep2 (peut expliquer tout le signal à bas ℓ)
- décembre 2014 : analyse croisée BICEP2/Planck + données BICEP3 (Keck) \Rightarrow limite supérieure sur r - plus de signal primordial ...
- \Rightarrow **La chasse continue ... mais attention aux avants-plans !!**

planck_bmodes_lens2014.pdf

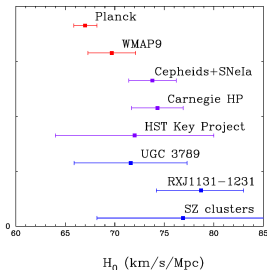
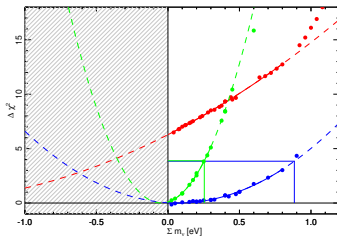
Correlation avec Planck
PRELIMINAIRE

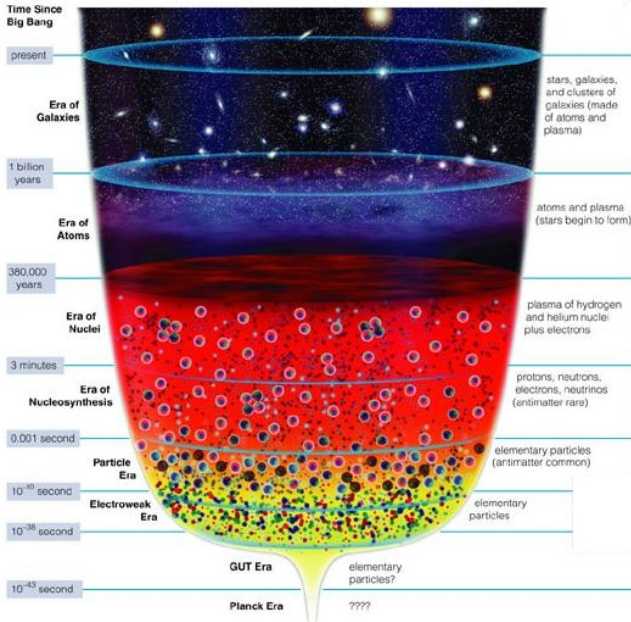
bmodes_xspec.pdf

Quelques conclusions

- le modèle Λ CDM le + simple est renforcé par les mesures CMB (Planck) + BAO (BOSS) (+SNIa)
- limites sur M_ν meilleures qu'en labo : $\sum M_\nu \lesssim 0.20\text{eV}$
- pas d'indication de courbure, d'énergie noire "complexe"
- quelques tensions avec mesures locales (H_0) ou impliquant l'amplitude des anisotropies de densité (σ_8), i.e. (astro)physique non-linéaire
- recherche intensive des modes B primordiaux ("**smocking gun**" de l'inflation)
- incertitudes maintenant dominées par systématiques

CMB / CMB+lensing/CMB+lensing+BAO





(5) formation des structures (galaxies, étoiles, ...) par la gravitation

(4) "Libération" des photons = découplage (à 300000 ans) → émission du CMB

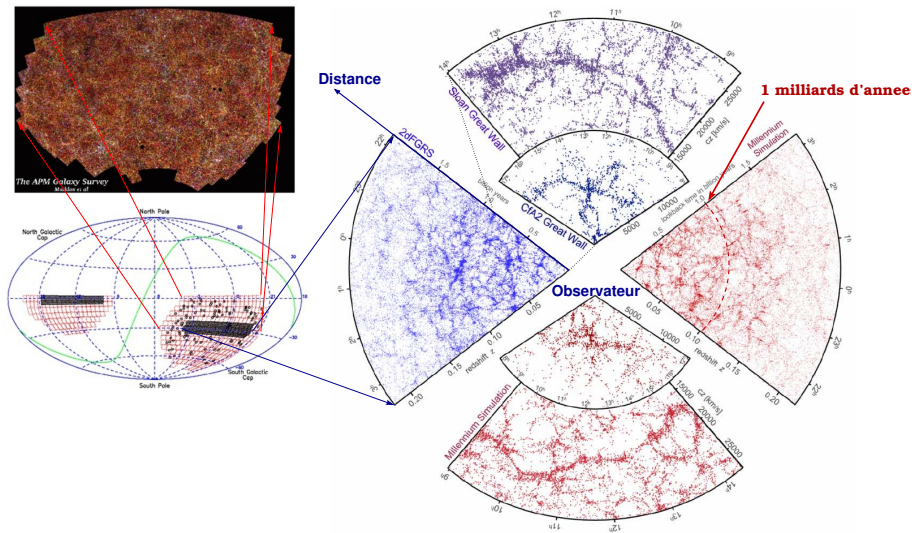
(3) Nucléosynthèse (de 3 à 30 mn) (→ éléments légers)

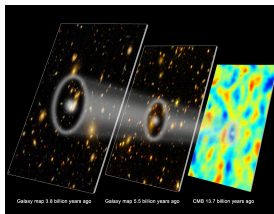
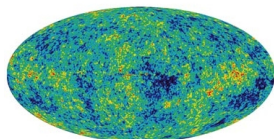
(2) expansion "lente" : apparition de quarks, leptons (electrons) puis nucléons (p,n)

(1) inflation

(0) état initial (??)

Cartes de l'univers - Rappel





A l'époque de la recombinaison (émission du CMB)

→ ∃ **une taille de structure "préférée" (1er pic des C_ℓ) pour les baryons**

Evolution des structures ultérieure : **gravitation (newtonnienne)**

→ "croissance" (linéaire d'abord) des plus grosses

⇒ **échelle préférée** dans la distribution de la matière baryonique (galaxies) ~ 500 M années-lumière - accessible avec la fct de corrélation spatiale (2 ou 3D)

→ suivi de l'évolution de cette taille vs z (+ taille transverse)

SDSS III/BOSS

SDSS

Telescope de 2.5m

imageur (pos. objets)

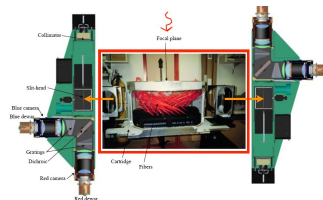
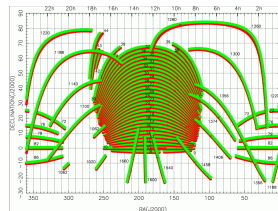
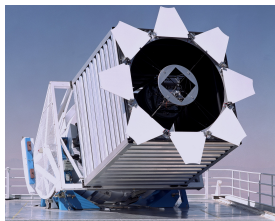
spectro à fibres (BOSS)

(1000 objets par pose)

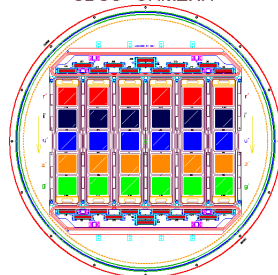
9ème 'data release'
catalogues (galaxies, QSO,
...)

survey fini en 2014

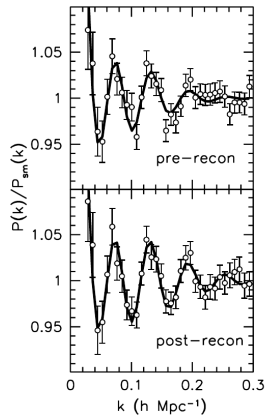
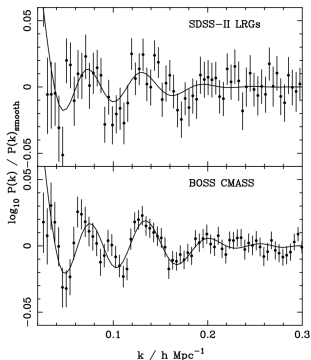
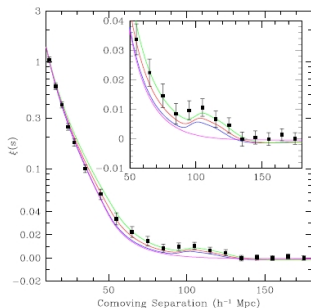
extension en cours + nouvelle
phase en projet



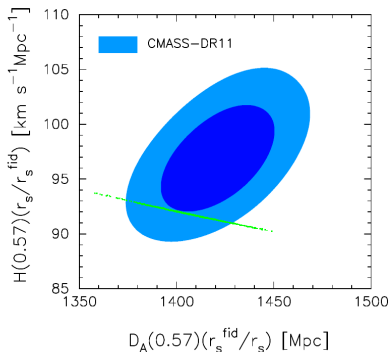
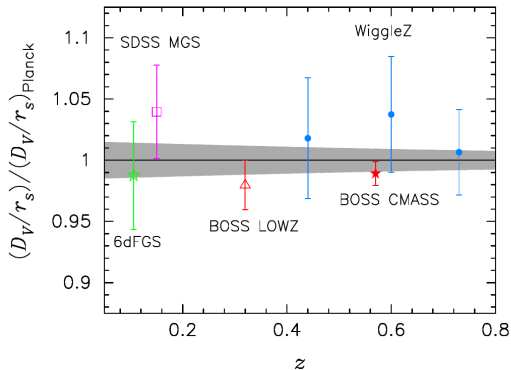
SDSS CAMERA



Pic(s) acoustique(s) ds la distri des galaxies

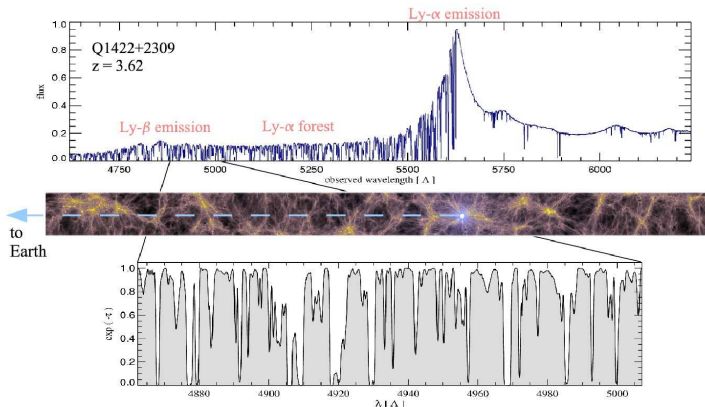


BAO vs Planck (2014)



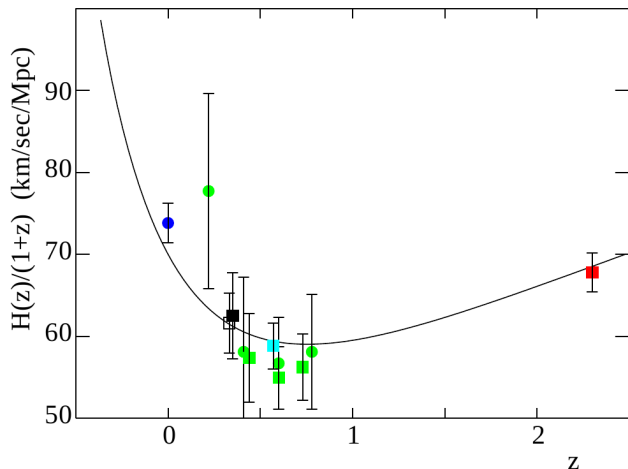
Bon accord !
⇒ résultats combinés plus précis !

sonder plus loin avec les quasars



quasars : objets très brillants + très lointains ($z \sim 3 - 7$) raies d'absorption d'H dans le spectre \rightarrow distribution de la matière

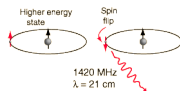
Vers l'histoire de l'expansion



H_0 SN proches BAO galaxies Quasars

Cosmologie à 21cm

- H atomique : emission $\lambda = 21 \text{ cm}$



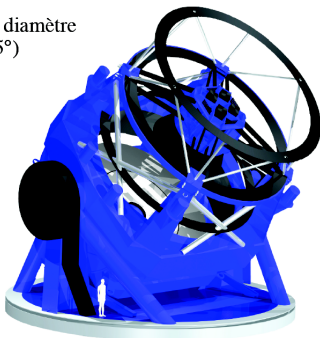
- \Rightarrow “tracer” la matière
- information en direction + distance (z)
- émission diffuse $\rightarrow T(\alpha, \delta, z)$
- survey radio (400-1400 MHz) \rightarrow cosmologie $z \sim 1 - 2$
- avants plans (humains + astro) + sensibilité nécessaire \rightarrow interférométrie + site “calme”
- $\sim 10000m^2 \rightarrow$ “low cost”
- projets en cours de construction : TianLai (Chine/Fr/US), Chime (Canada/US), Bingo (UK/..)





LSST : Large Synoptic Survey Telescope

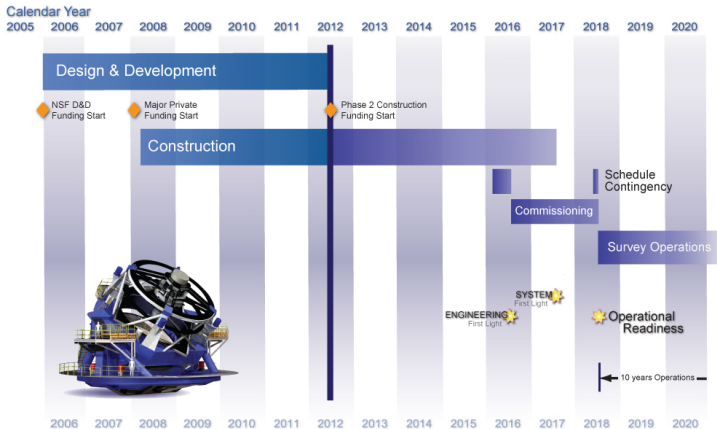
- Télescope optique de 8,4 m de diamètre avec caméra grand champ ($3,5^\circ$)
- Au Chili (Cerro Pachon)
- imaginé fin des années '90
- Caméra de 3.2 Gpixels
- Lecture 2s
- 6 filtres ugrizy
- WL jusqu'à $z \sim 3$
- SNIa jusqu'à $z \sim 1$
- BAO: oscillations acoustiques
- Galaxies et amas de galaxies
- Phénomènes transitoires



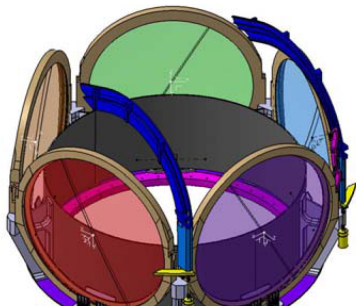
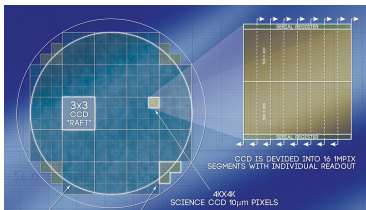
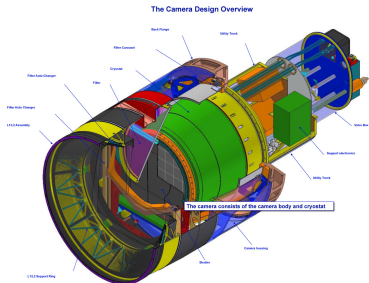
<http://www.lsst.org/>

NB Priorité au sol dans le “decadal survey” US

LSST (2)

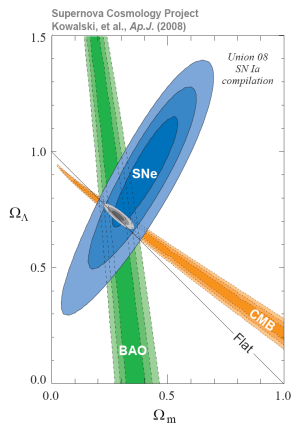


LSST (3)

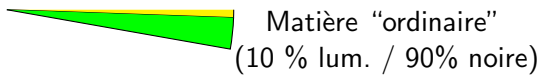


Conclusion(s)

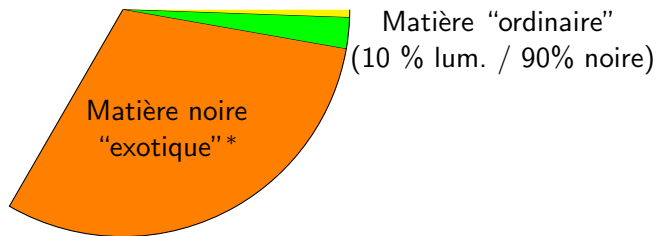
- cosmologie qualitative → quantitative
- anisotropies du CMB → pièce essentielle du puzzle
- d'autres directions :
 - ▶ BAO
 - ▶ Supernovæ lointaines,
 - ▶ Recherches directes et indirectes de matière(s) noire(s)
 - ▶ mais aussi (entre autres) :
 - ★ Lentilles gravitationnelles
 - ★ Etudes des amas de galaxies (X, dynamique, ...)
 - ★ ...
- mesures "concordantes" (~ 6 paramètres)
- mesurent un Univers ~ "plat" ($\Omega_0 \sim 1$) mais au contenu mystérieux (... et noir !)



Composition de l'univers

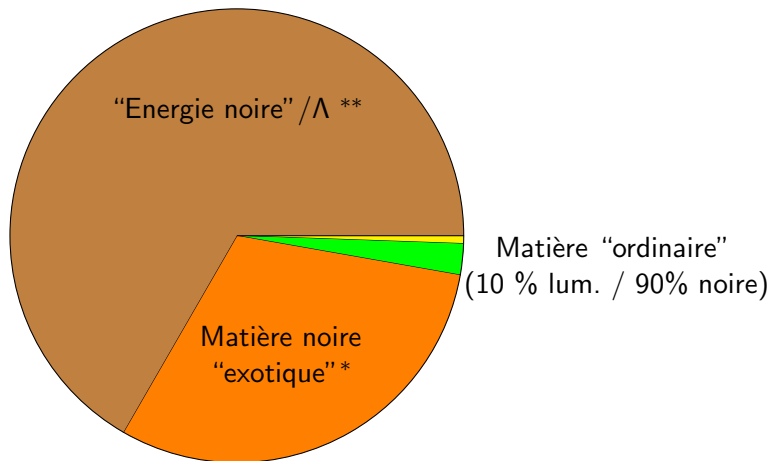


Composition de l'univers



* non identifiée

Composition de l'univers



* non identifiée

** encore plus mystérieuse

Dans la nuit des temps



Sources

- site de Wayne Hu (background.chicago.edu/whu)
- Site de WMAP (map.gsfc.nasa.gov)
- cours de J. Wilms (Univ. Tuebingen astro.uni-tuebingen.de/wilms/teach/index)
- sites de Planck : planck.fr, ESA (www.esa.int/index.php?project=planck)
- Atlas de l'univers (atunivers.free.fr)
- Multiwavelength Milky Way (asc.gsfc.nasa.gov/mw/milkyway.html)
- S. Weinberg : les trois premières minutes de l'univers
- J. Silk : le Big-Bang, l'univers et l'infini, une breve histoire de l'univers (O Jacob)
- J Gribbin : a la poursuite du Blg-Bang (Flammarion)
- G. Smoot : les rides du temps (Flammarion)
- ...

Distances élémentaires

Dans le plan (x, y)

- longueur infinitésimale : $ds^2 = dx^2 + dy^2$:= **métrique**
- en coord. polaires (r, θ) : $ds^2 = dr^2 + r^2 d\theta^2$
- facteur d'échelle R t.q. $r \rightarrow Rr$:

$$ds^2 = R^2(dr^2 + r^2 d\theta^2)$$

Distances élémentaires (II)

Pour la 2D-sphère :

$$x^2 + y^2 + z^2 = R^2 \Rightarrow z = \sqrt{R^2 - x^2 - y^2} \Rightarrow dz = -\frac{xdx + ydy}{\sqrt{R^2 - x^2 - y^2}}$$

- longueur infinitésimale:

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 = dx^2 + dy^2 + \frac{(xdx + ydy)^2}{R^2 - x^2 - y^2}$$

- avec les coordonnées polaires (r, θ) t.q. $x = r \cos \theta, y = r \sin \theta$

$$ds^2 = R^2 \left(\frac{dr^2}{1 - r^2} + r^2 d\theta^2 \right)$$

Distances élémentaires (III)

- “selle de cheval”

$$x^2 + y^2 - z^2 = R^2 \Rightarrow ds^2 = R^2 \left(\frac{dr^2}{1+r^2} + r^2 d\theta^2 \right)$$

- formulation unifiée :

$$ds^2 = \left(\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\theta^2 \right) \quad (k = 0, -1, +1)$$

distance² = facteur d'échelle² longueur propre²

Distances élémentaires (III)

- “selle de cheval”

$$x^2 + y^2 - z^2 = R^2 \Rightarrow ds^2 = R^2 \left(\frac{dr^2}{1+r^2} + r^2 d\theta^2 \right)$$

- formulation unifiée :

$$ds^2 = \left(\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\theta^2 \right) \quad (k = 0, -1, +1)$$

distance² = facteur d'échelle² longueur propre²

Métrie

- Principe d'équivalence (p. cosmologique + expansion) \Rightarrow métrique ($ds^2 = g_{\mu\nu}x^\mu x^\nu$) à 2 termes : **temporel + spatial**
- homogénéité + isotropie \Rightarrow partie spatiale à symétrie sphérique : $d\psi^2 = d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2$
- expansion \Rightarrow facteur d'échelle $R(t)$

\Rightarrow Forme générale pour la métrique

$$ds^2 = c^2 dt^2 - R^2(t) (f^2(r) dr^2 + g^2(r) d\psi^2)$$

$$ds^2 = c^2 dt^2 - R^2 \left(\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\theta^2 \right) \quad (k = 0, -1, +1)$$

$$ds^2 = c^2 dt^2 - R^2(t) \left(\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2) \right)$$

(Friedman (URSS) Lemaître (Belgique) Robertson (US) Walker (US))

Conséquence(3) : dilatation des temps

Soit deux pulses lumineux séparés par Δt (petit \Rightarrow expansion négligeable dans cet intervalle)

séparation spatiale $D = c\Delta t(t_{emis.})$

Intervalle entre leur réception (loin/" plus tard" \Rightarrow expansion entre $t_{emis.}$ et $t_{recep.}$ non négligeable) ?

Séparation spatiale entre les deux impulsions :

$D(t_{recep.}) = c\Delta t(t_{recep.})$ (c est constante)

Et : $D(t_{recep.}) = D(t_{emis.}) \frac{R(t_{recep.})}{R(t_{emis.})}$ (expansion d'échelle)

Donc :

$$\Delta t(t_{recep.}) = \Delta t(t_{emis.}) \frac{R(t_{recep.})}{R(t_{emis.})}$$

la durée d'un phénomène transitoire "distant" semble allongée
observé p.ex. avec les variations lumineuses des SNe!

Masse de Chandrasekhar

N_e e ultra-relativistes ($E \approx pc$) ds volume $V = 4/3\pi R^3$
statistique de Fermi pour les e + principe d'incertitude
élément d'espace de phase $d\nu = 4\pi V p^2 dp / h^3$

$$\text{Nbre de particules dans } V: N = \int_0^{p_{\max}} 2V 4\pi p^2 / h^3 dp$$
$$\Rightarrow p_{\max} \equiv p_{\text{Fermi}} = h \left(\frac{3N}{8\pi V} \right)^{1/3}$$

$$\text{Energie (cinétique) totale : } E = \int_0^{p_F} pc \frac{4\pi p^2 V dp}{h^3} = \frac{3}{4} N_e p_{FC}$$

$$\text{condition de stabilité : } E_{\text{cin}} \geq E_{\text{pot}}^{\text{grav}} = \frac{3}{5} G \frac{M^2}{R} \text{ avec } M = (N_p + N_n) m_p$$

$$\Rightarrow \frac{3}{4} N_e p_{FC} \geq \frac{3}{5} G \frac{M^2}{R} \Rightarrow \frac{3}{4} N_e c h \left(\frac{3N}{8\pi \frac{4}{3}\pi R^3} \right)^{1/3} \geq \frac{3}{5} G \frac{M^2}{R}$$

R s'élimine !!

$$\Rightarrow \text{Limite sur } N_e \rightarrow \text{sur } M_\star (\mu = \frac{N_p}{N_e}):$$

$$M_\star \leq \left(\frac{hc}{3G} \right)^{3/2} \left(\frac{1}{\mu m_p} \right)^2$$

ref L. Valentin 'Champs et particules'