

Le vide, de l'infiniment petit à l'infiniment grand : un point de vue expérimental.

Habilitation à diriger des recherches

présentée par

Dominique Fouchez

CPPM / Université de la méditerranée , 27 mars 2009

Introduction

Un parcours de la physique des particules à la cosmologie

- ❑ Le vide
- ❑ Le modèle standard de la physique des particules
 - La supersymétrie (RPV) avec ALEPH
 - La calorimétrie électromagnétique d'ATLAS
- ❑ Le modèle standard de la cosmologie
 - Définition du modèle
 - Cosmologie avec les supernovae
- ❑ Perspective et convergence

Le Vide

- ☐ Vide quantique
- ☐ Vide brisant une symétrie
- ☐ Vide de la relativité générale
- ☐ Problème ? de la constante cosmologique

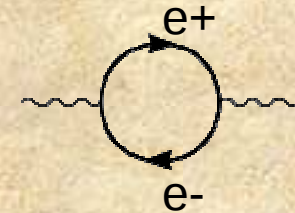
Le vide quantique I

❑ Fluctuation du vide et incertitude de Heisenberg

- Fluctuation possible si temps très court : $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$

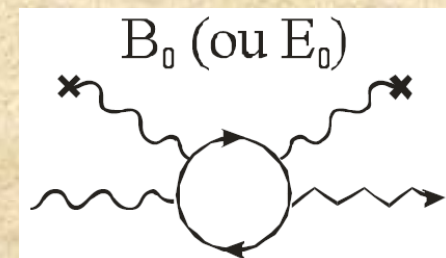
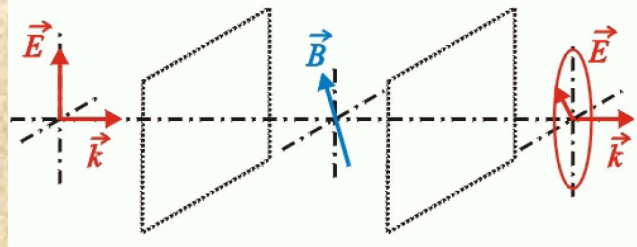
❑ Les corrections radiatives ([Lamb shift](#))

- Présence de boucles particule-antiparticule
- Emission-absorption de particules virtuelles



❑ La biréfringence du vide (pas encore mesurée !)

- Polarisation de la lumière par champs magnétique
- Interaction des photons avec paire e^+e^- polarisée par champ magnétique



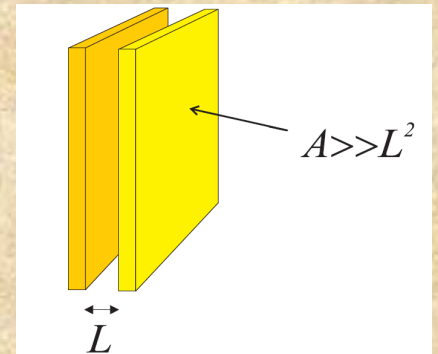
Le vide quantique II

□ L'effet Casimir

- Le point zéro du vide quantique $H_{vide} = \sum_k \frac{1}{2} w_k$
- Deux miroir définissent deux régions avec des points zéro différents
- Leur différence est finie ! -> pression sur les miroirs

$$F_{\text{Cas}} = -\frac{\hbar c \pi^2}{240 L^4} A$$

- Mesure en accord avec prédictions !



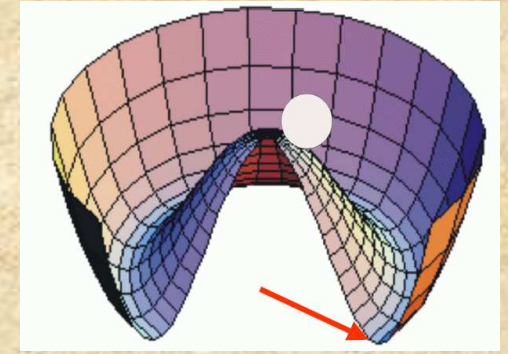
□ Effets astrophysiques : trous noir, étoile à neutron ...

Le vide brisant une symétrie

□ Brisure de symétrie par un champ scalaire

- Le potentiel

$$V(\phi) = \lambda \left((\phi^+ \phi) - \frac{v^2}{2} \right)^2$$



- a un minimum (vide) pour une valeur du champ non nulle

$$(\phi^+ \phi)_{vide} = \frac{v^2}{2}$$

- Introduction d'une valeur non nulle du champ dans le vide

Le vide en relativité générale

□ Equation d'Einstein

$$R^{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg^{\mu\nu} + \Lambda g^{\mu\nu} = 8\pi GT^{\mu\nu}$$

□ Champ scalaire

$$T_{\mu\nu} = \frac{1}{2}\partial\phi\partial\phi^+ + \frac{1}{2}(g^{\rho\sigma}\partial\phi\partial\phi^+)g_{\mu\nu} - V(\phi)g_{\mu\nu}$$

□ Energie du vide

$$T_{\mu\nu}^{vac} = -V(\phi_0)g_{\mu\nu}$$

➤ 'Equivalence' énergie du vide - constante cosmologique

Le problème de la constante cosmologique

- Energie due au point zéro (ZP):

➤ coupure a $k_{max} = k_{planck}$

$$\rho_{vide} = \frac{1}{2} \hbar \int_0^{k_{max}} \frac{d^3 k}{(2\pi)^3} k = \hbar \frac{k_{max}^4}{16\pi^2}$$

$$\rho_{vide} = 10^{110} \text{erg cm}^{-3}$$

- vide avec potentiel : échelle électrofaible = 200 GeV

$$\rho_{vide}^{EW} \approx (200 \text{GeV})^4 \approx 3 \times 10^{47} \text{erg cm}^{-3}$$

- Vide cosmo = univers plat -> densité proche de ρ_c

$$\rho_c = 2.10^{-20} \text{erg cm}^{-3}$$

- $\rho_{vide} + \rho_{vide_ew} = 120$ ordre de grandeur d'écart avec ρ_c ?

Les deux modèles standard

□ Modèle Standard de la Physique des Particules (MSPP)

➤ Higgs ? (-> susy ?)

□ Modèle Standard de la Cosmologie (MSC)

➤ Energie Noire ? Matière Noire ?

Le MSSP

- ☐ Quark (Baryon)
- ☐ Lepton
- ☐ Boson vecteur de forces
- ☐ Higgs

Three Generations
of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name →	u up	c charm	t top	γ photon
Quarks	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 g gluon
	$\ll 2.2$ eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e electron neutrino	$\ll 0.17$ MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ muon neutrino	$\ll 15.5$ MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ tau neutrino	91.2 GeV 0 1 Z weak force
	0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e electron	105.7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ muon	1.777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ tau	80.4 GeV ± 1 1 W [±] weak force
Leptons				Bosons (Forces)

H

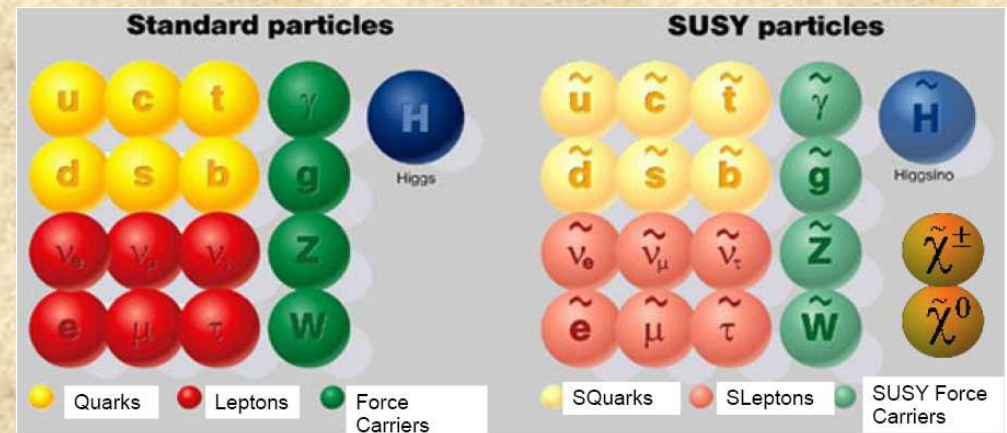
- ☐ Higgs : scalaire, $v_{ev} \rightarrow$ masse boson + lepton (yukawa)
 - 1 particule de higgs
 - 5 particules (si doublet de champ, voir MSSM)

B(eyond) MSPP

□ SuperSYmetry (SUSY)

- Pourquoi : corrige divergence du secteur de Higgs, unification des couplages, ...

- Symétrie boson-fermion
- N particule X2
- Brisure de la susy



- Modèle minimal :MSSM
- La particule supersymétrique la plus légère = LSP

Deux axes de recherche au limites du MSPP

❑ 1 – Recherche SUSY @ LEP : RPV

- Recherche de nouvelles particules par analyse multicanaux

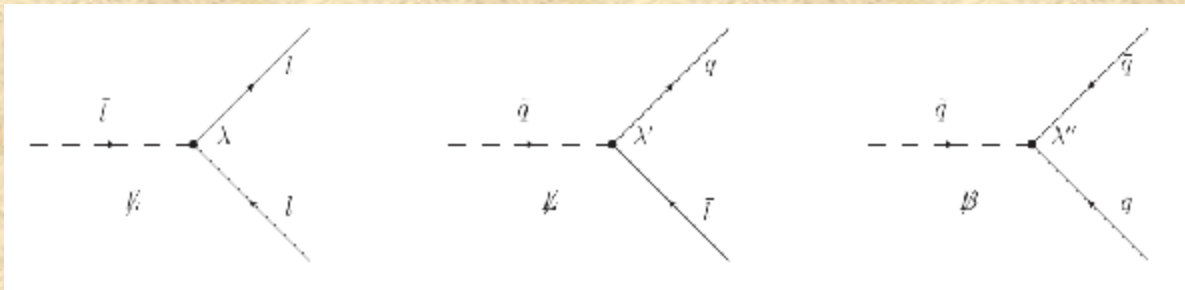
❑ 2 – Recherche Higgs et SUSY @LHC : Calorimètre Larg

- Construction/mise au point d'un détecteur

Susy MSSM R-Parite Violée

- Dans le MSSM, une symétrie est nécessaire, la R-parité

$$W_{\mathcal{R}_p} = \mu_i H_U L_i + \frac{1}{2} \lambda_{ijk} L_i L_j \overline{E_k} + \lambda'_{ijk} L_i Q_j \overline{D_k} + \frac{1}{2} \lambda''_{ijk} \overline{U_i D_j D_k}$$



- Elle impose $\lambda=\lambda'=\lambda''$, sinon le proton se désintègre (rapidement)

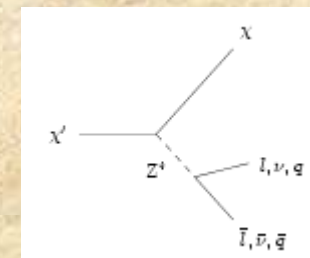
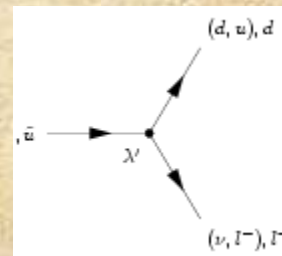
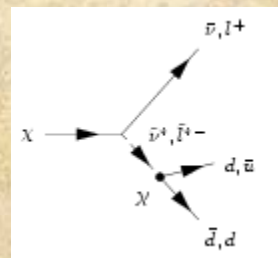
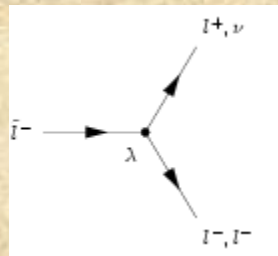
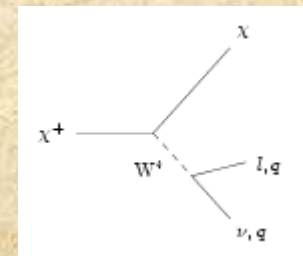
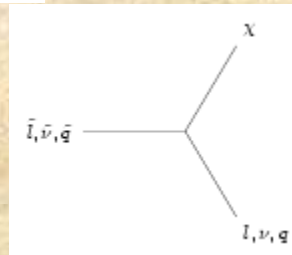
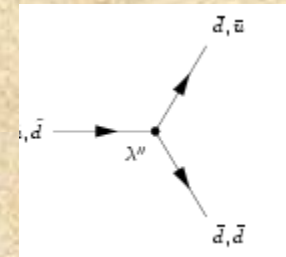
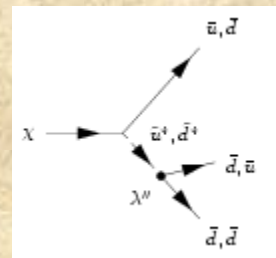
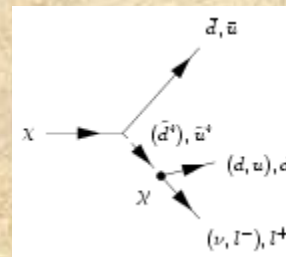
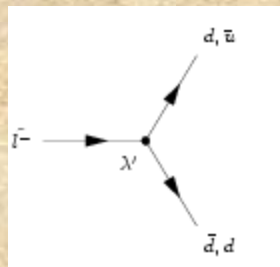
- Elle peut être légèrement violée (ex proton $\rightarrow \lambda\lambda'' < 10^{-27}$)

- Violation de B et L
- 45 nouveaux couplages !

Susy RPV @ ALEPH

□ Conséquence phénoménologique :

➤ La LSP se désintègre



Susy RPV @ ALEPH

□ Conséquence phénoménologique :

LLE

Beaucoup de leptons

LQD

Jets et leptons

UDD

Beaucoup de jets



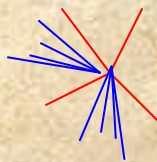
6 leptons



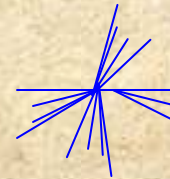
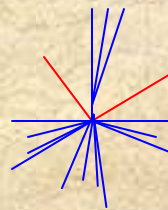
4 leptons



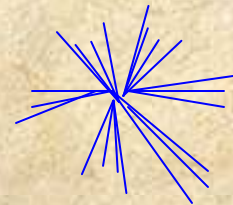
2 leptons



leptons et jets



4 jets



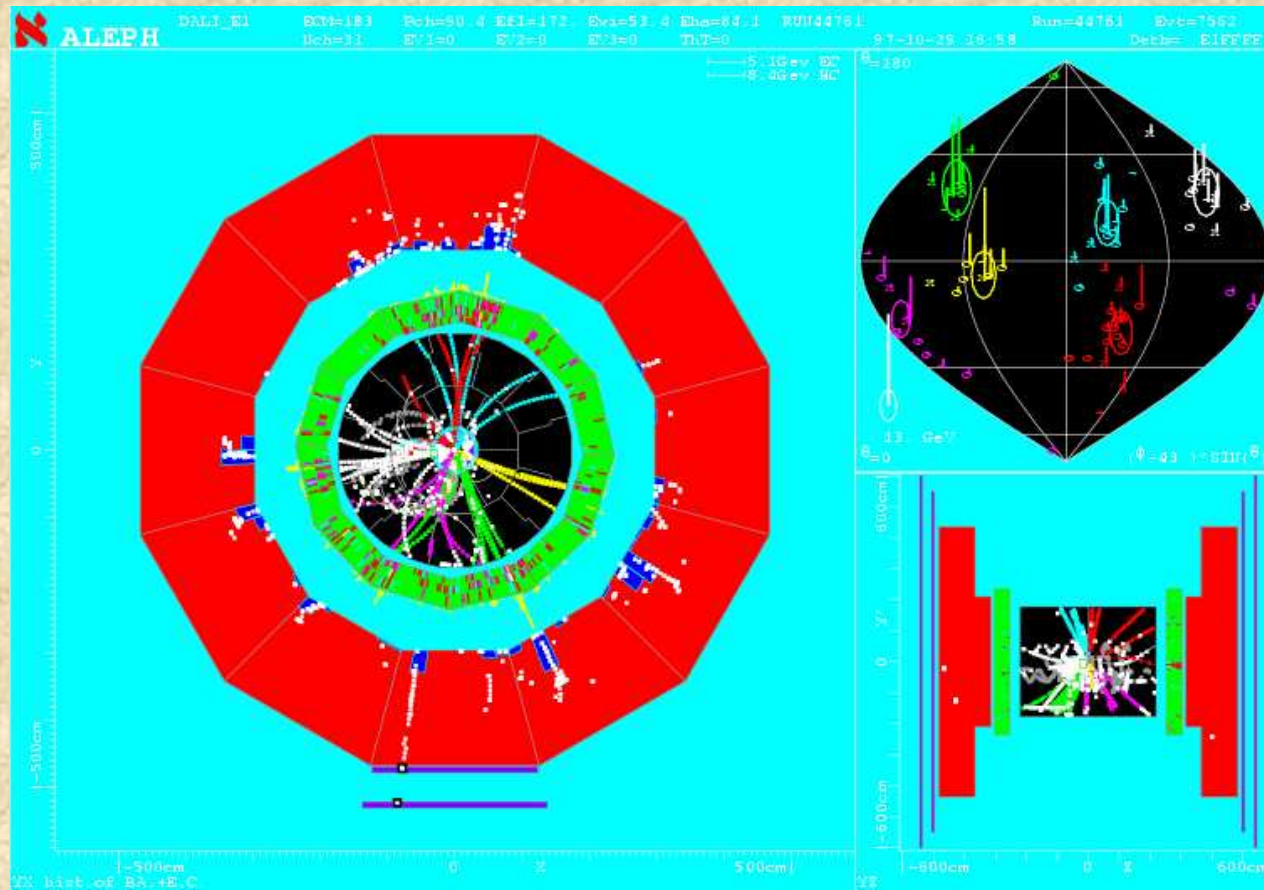
6 jets ou plus

RPV @ ALEPH: Les selections

	LLE Selection		205 GeV		207 GeV	
			Data	Background	Data	Background
6 Leptons + $\cancel{E}$	0	0.5	0	0.8		
24 selections differentes						
Optimisées pour la recherche des sparticules pour toutes les combinaisons de couplages λ	$llll$	1	3.8	3	3.5	
	$ll\tau\tau$	0	1.1	1	1.4	
	$\tau\tau\tau\tau$	1	2.4	5	2.6	
	Acoplanar Leptons	71	89	139	138	
	LQD Selection		205 GeV		207 GeV	
			Data	Background	Data	Background
	MultiJets + Leptons	5	5.2	14	8.6	
	Jets-HM	3	2.2	7	3.3	
	4 Jets + 2τ	9	5.0	6	8.0	
	Four-Jets	341	348	541	561	
	2 Jets + 2τ	7	4.9	7	7.9	
	AJ-H	12	10.7	19	18.5	
	4JH	4	3.7	4	5.9	
	5 Jets + 1 Iso. ℓ	1	2.1	2	3.7	
	4 Jets + 2 Iso. ℓ	0	1.3	1	2.0	
Pas d'excès significatif	UDD Selection		205 GeV		207 GeV	
			Data	Background	Data	Background
Many Jets	6	3.8	6	6.2		
	Four Jets + 2 Leptons	2	2.1	4	3.6	
	Many Jets + 2 Leptons	3	2.9	1	4.9	
	Four Jets + $\cancel{E}$	32	33.3	48	51.4	
	Many Jets + $\cancel{E}$	30	33.3	48	51.4	
	Four Jets + Taus	78	76.1	144	125.5	
	Many Jets + Taus	8	9.7	17	15.0	

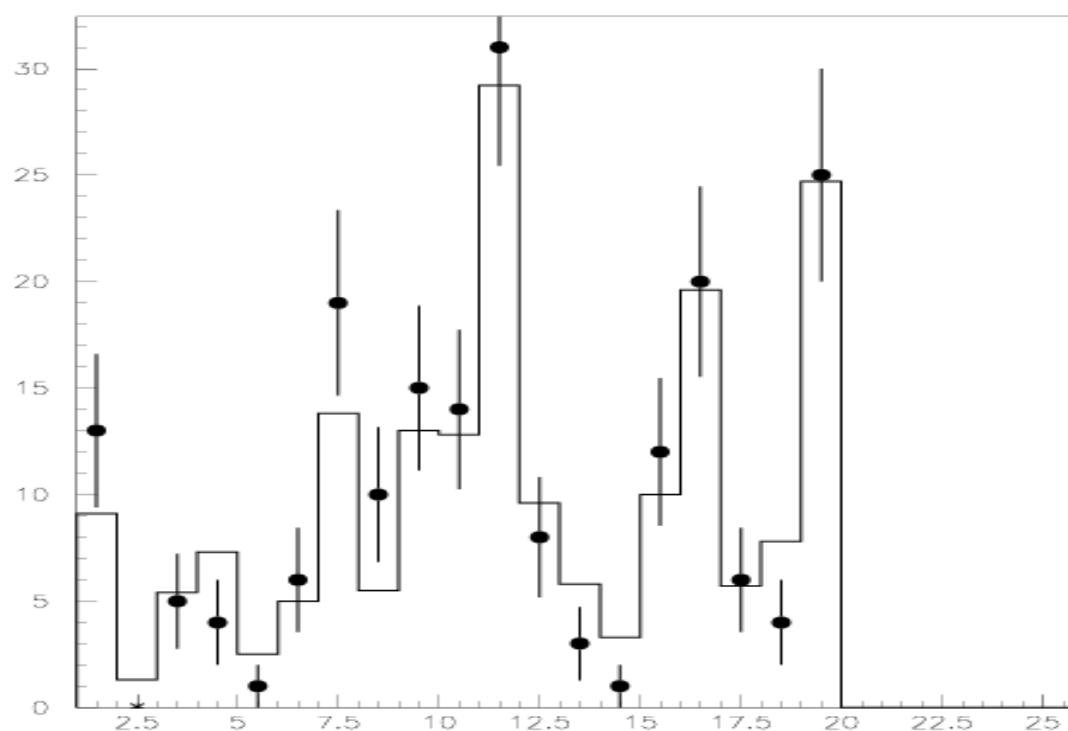
RPV : candidat ALEPH

□ Candidat 6 jets



Test du MSPP

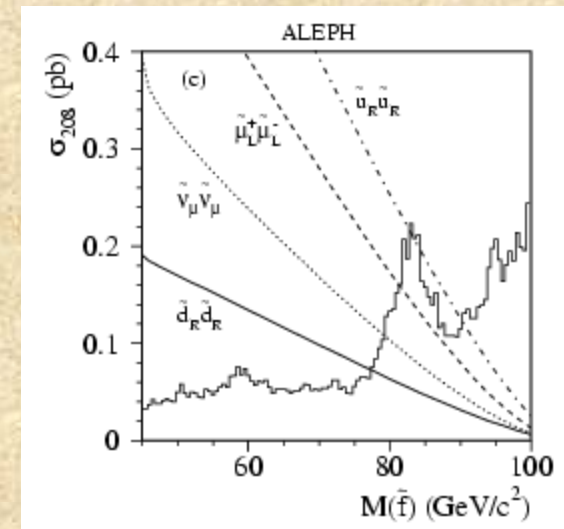
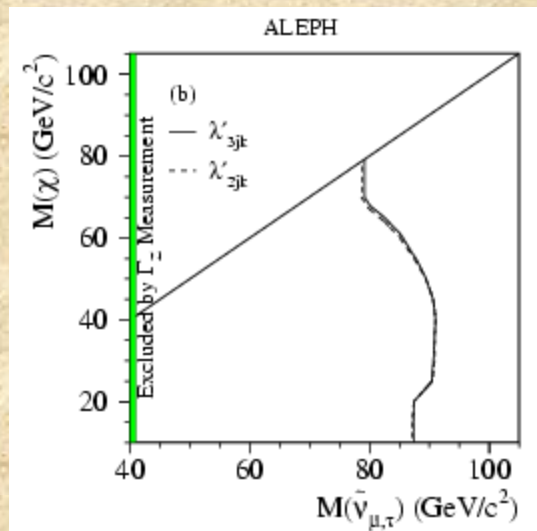
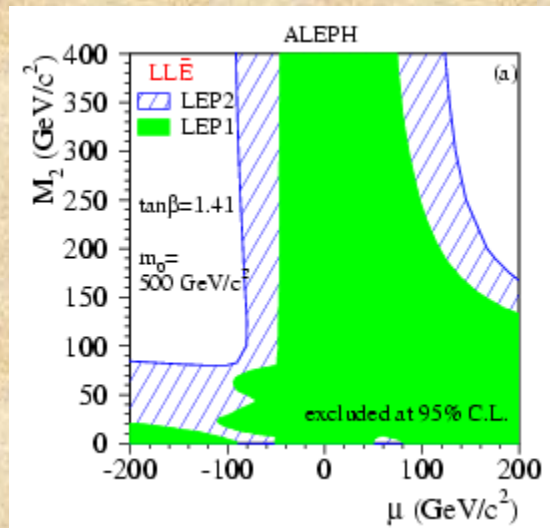
- ❑ Les 20 sélections (bas bruit) : MSPP / mesure



Selections Multilepton ^B -> Mixtes -> Multijets

RPV @ ALEPH : limites dans le MSSM

☐ Limites dans l'espace des paramètres

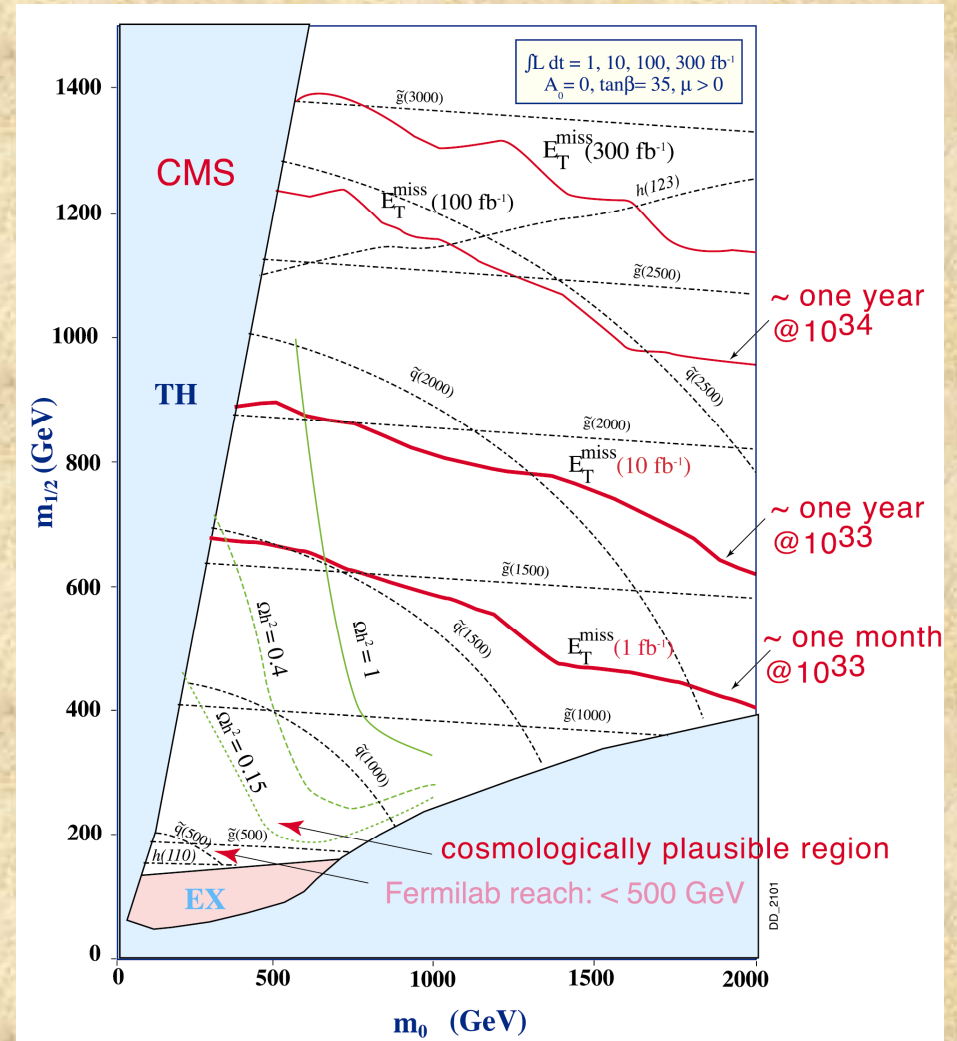
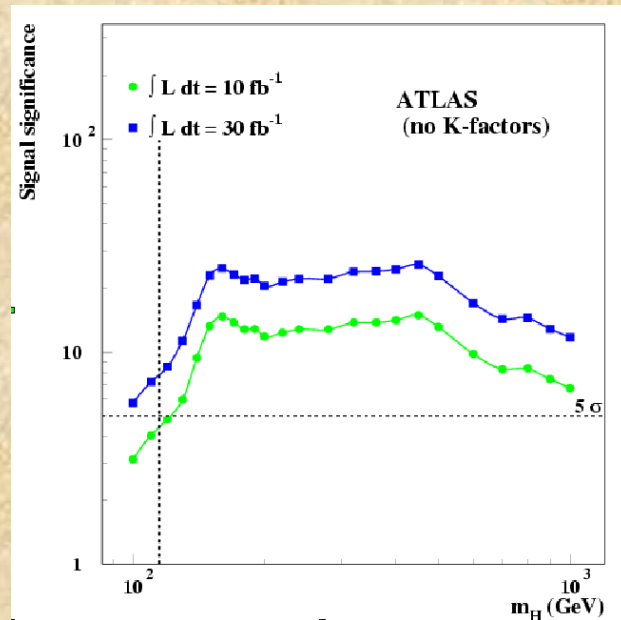
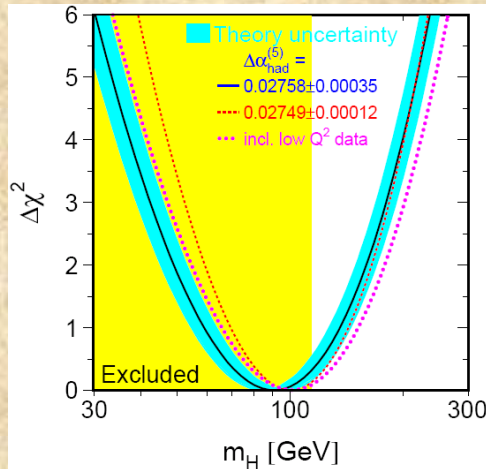


RPV @ ALEPH : limites en masses

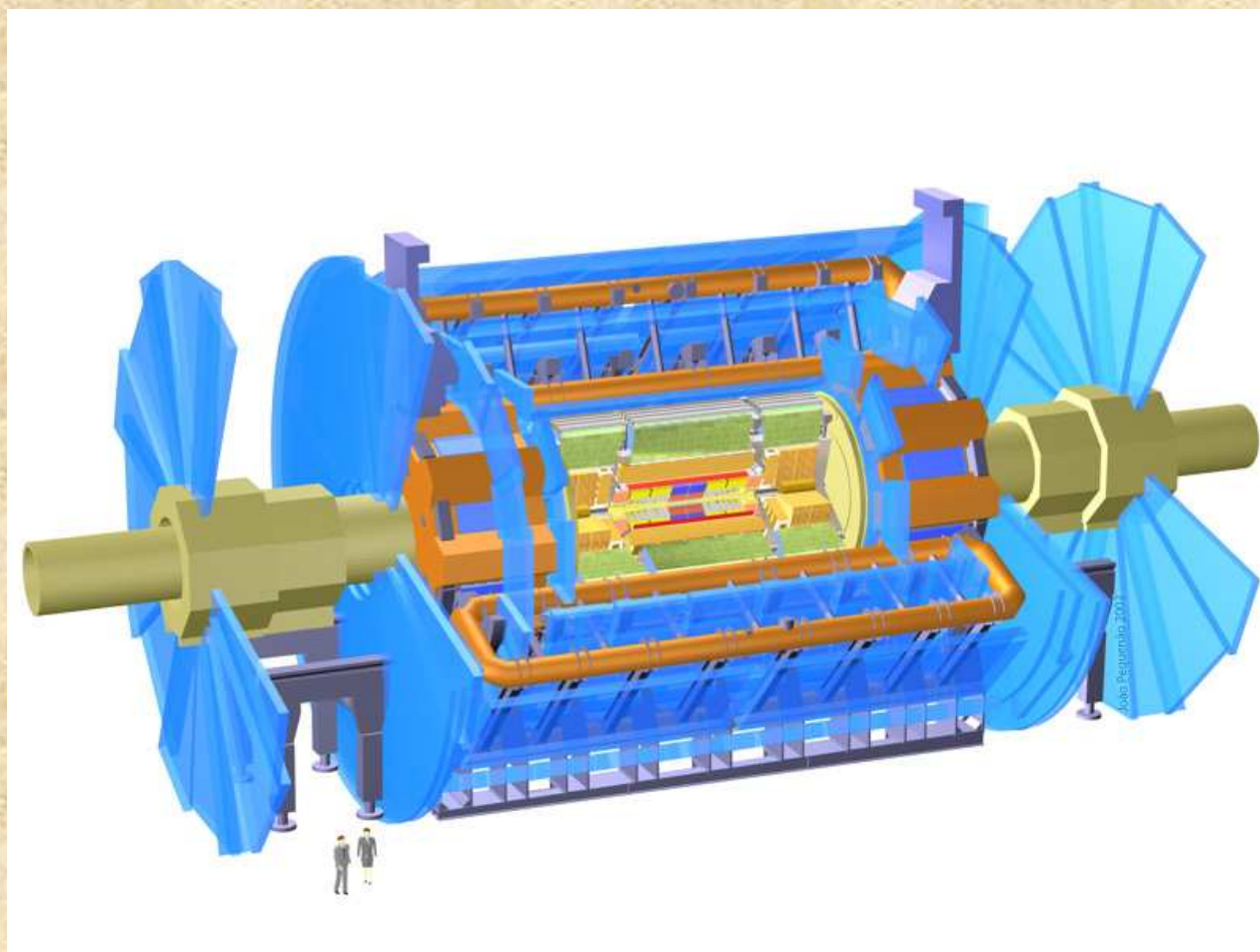
□ Limites absolues en masse

Sparticle	Lower mass limit (GeV/ c^2)		
	$LL\bar{E}$	$LQ\bar{D}$	$\bar{U}\bar{D}\bar{D}$
$\tilde{t}_L$	91	85	71.5
$\tilde{b}_L$	90	80	71.5
$\tilde{e}_R$	96	93	94
$\tilde{\mu}_R$	96	90	85
$\tilde{\tau}_R$	95	76	70
$\tilde{\nu}_e$	98	91	88
$\tilde{\nu}_{\mu,\tau}$	89	78	65

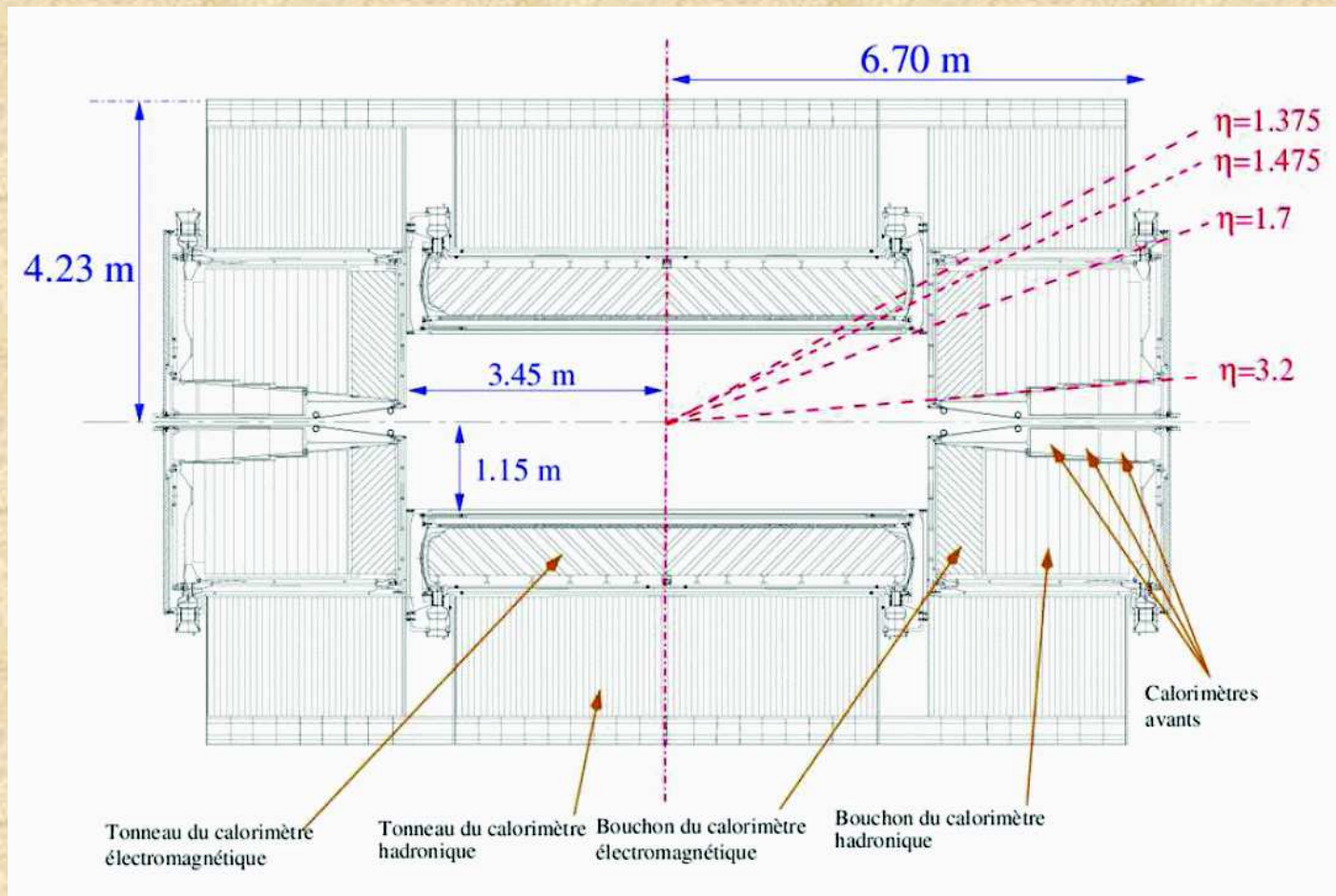
Higgs et SuSy @ ATLAS



ATLAS

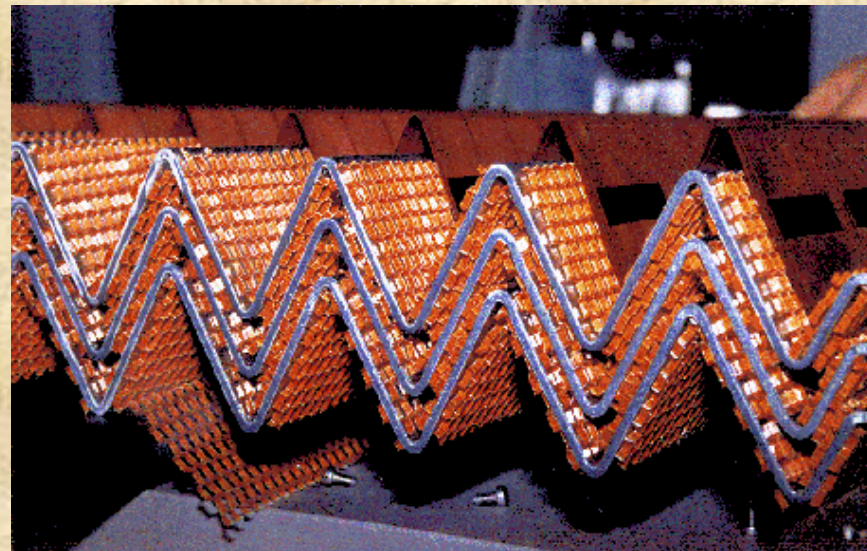
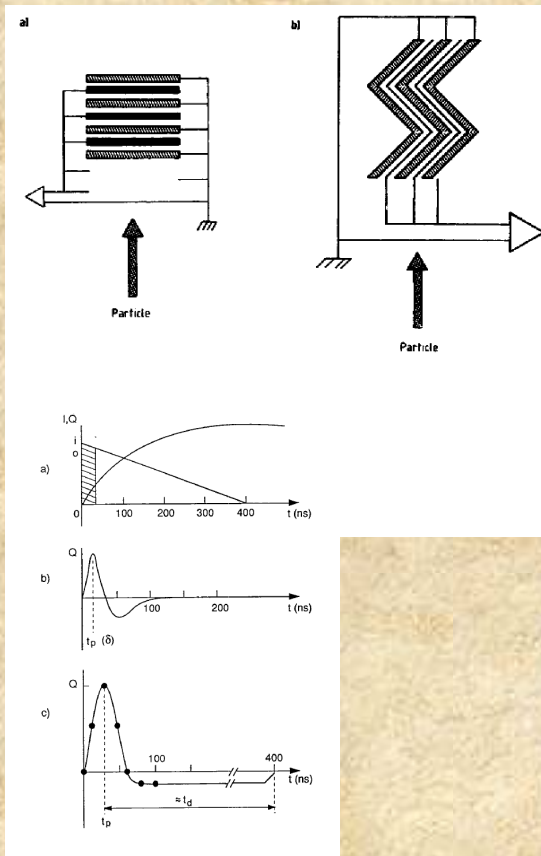


Le système de calorimètres d'ATLAS

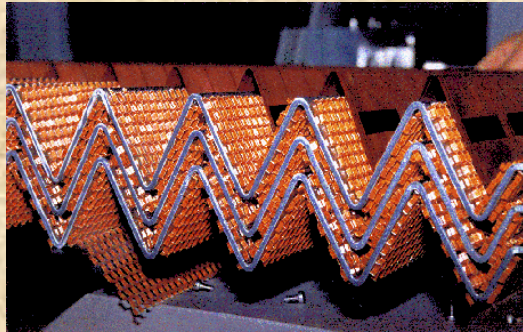


Le principe de la calorimétrie a argon liquide en accordéon

□ Herméticité/ rapidité / uniformité



Un prototype de bouchon en éventail



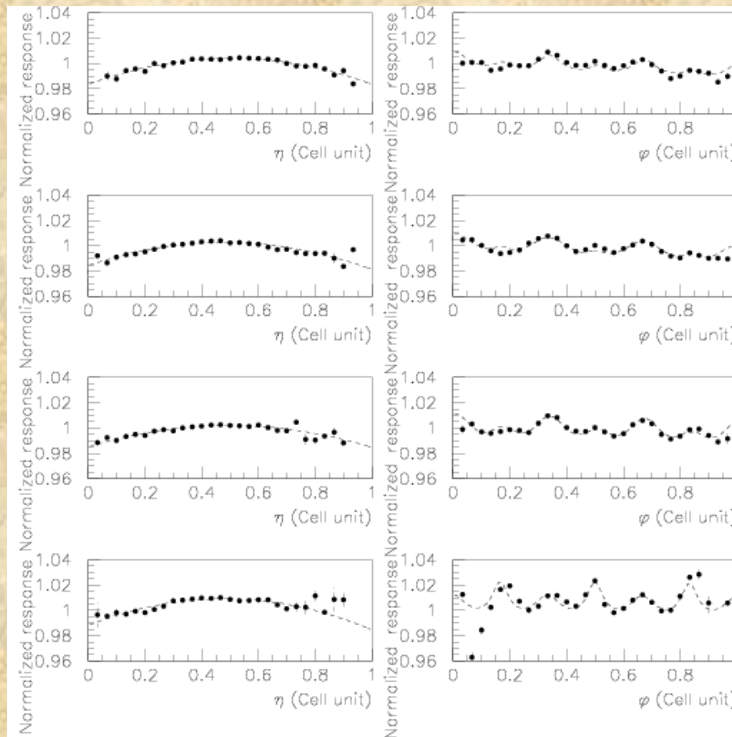
De l'accordéon ..
à l'éventail !



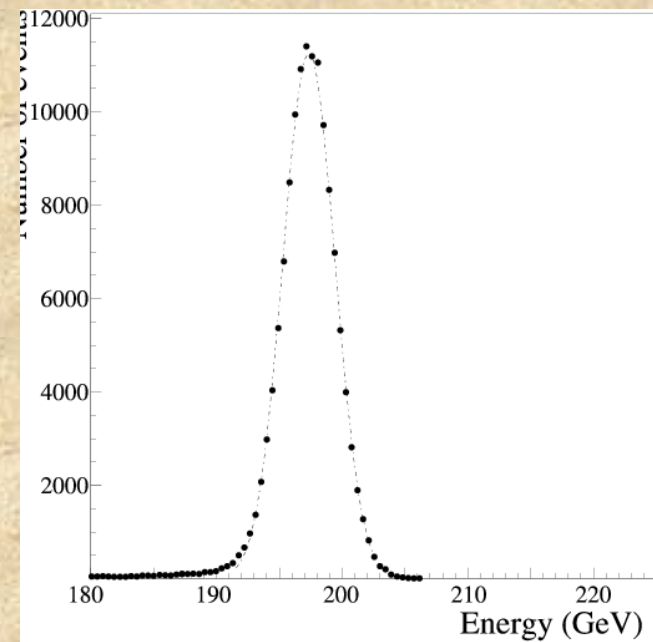
Un prototype de bouchon en éventail

□ Contrôle de l'uniformité

corrections

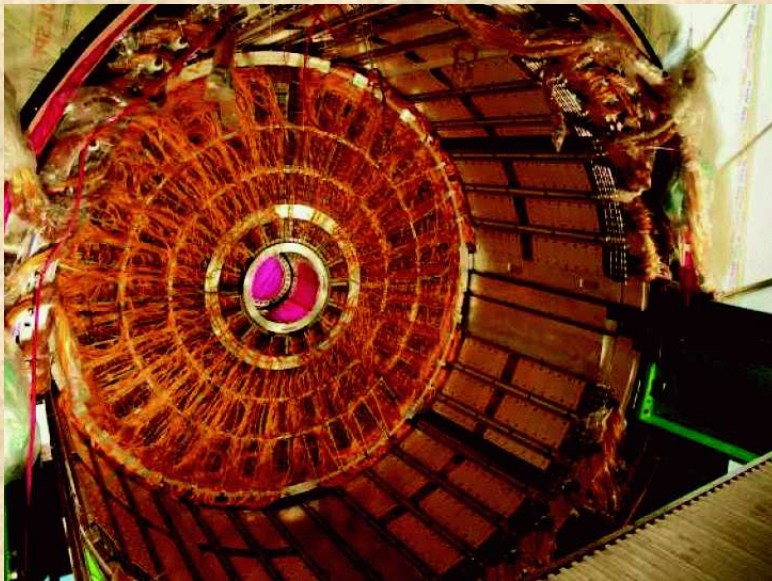


mieux que 1% !

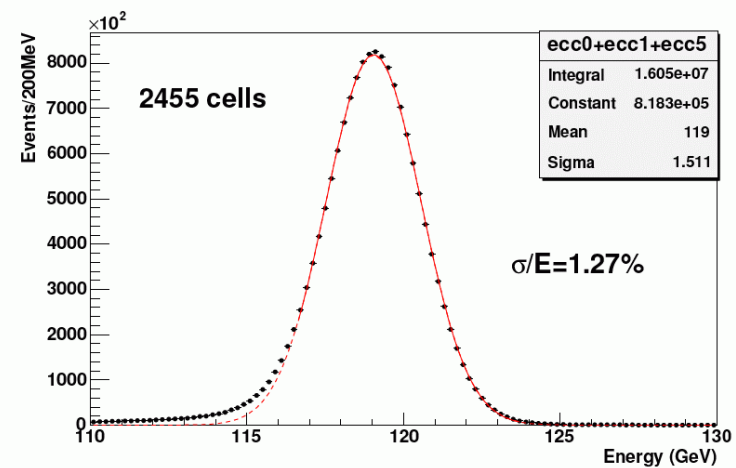


Le calorimètre argon liquide d'ATLAS

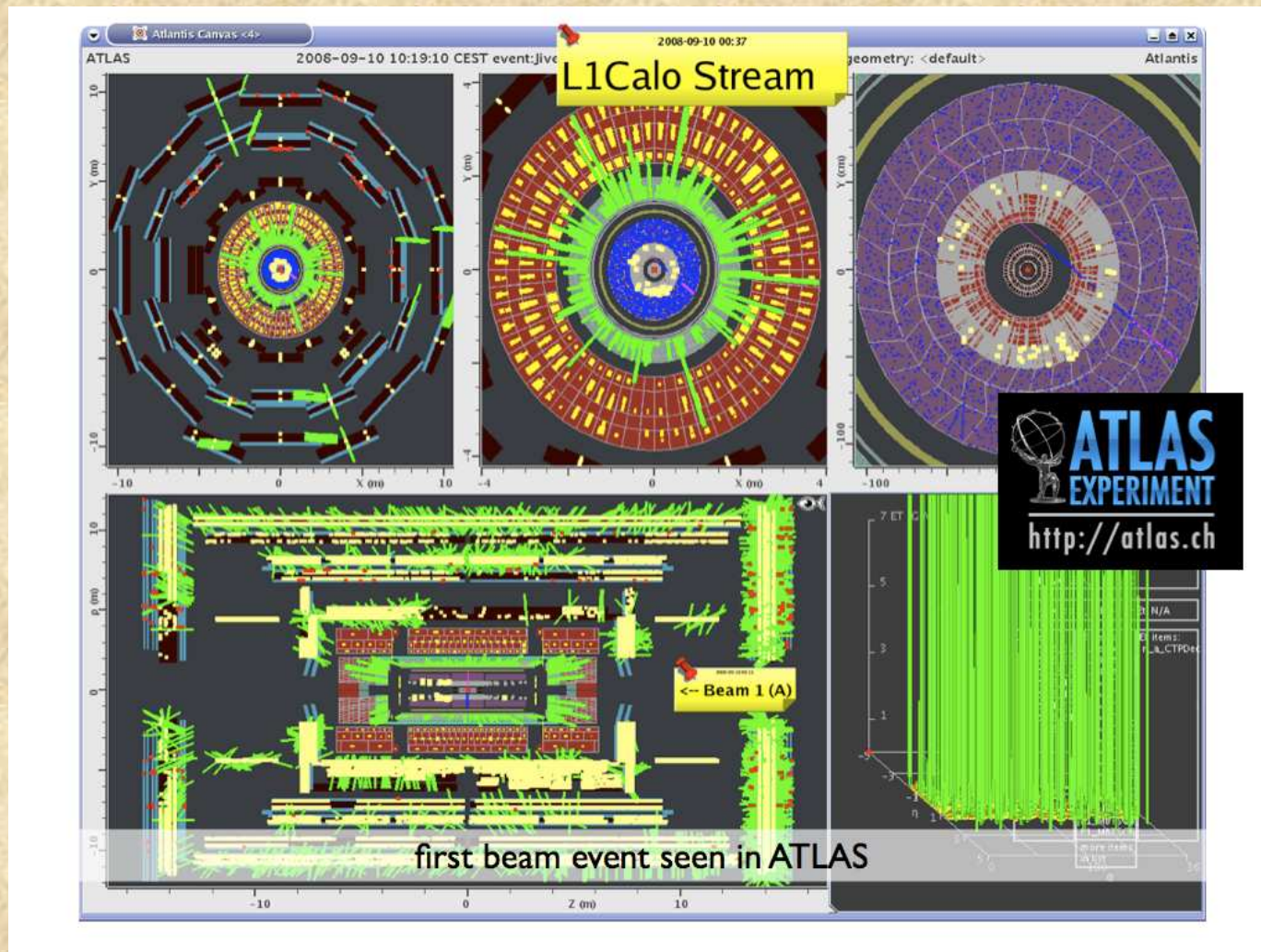
En place !



Uniformité < 1% !



Premier événement en provenance du faisceau du LHC dans ATLAS



Le modèle standard de la cosmologie

□ Description générale

- Le cadre : la relativité
- Les constituants : MSPP et au delà
- L'évolution homogène et inhomogène
- Les paramètres cosmologiques
- Les mesures

□ La mesure avec les SNIa

Relativité générale et cosmologie

□ Equation d'Einstein

$$R^{\mu\nu} - \frac{1}{2}R + g^{\mu\nu}\Lambda = 8\pi GT^{\mu\nu}$$

□ + principe cosmologique

□ Fluide parfait

$$T_{\mu\nu} = (\rho + P)V_\mu V_\nu + P g_{\mu\nu}$$

$$P = w\rho$$

□ Friedmann Lemaitre

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{k}{a^2} + \frac{\Lambda}{3}$$

Expansion !

$$\frac{\ddot{a}}{a} = \frac{-4\pi G}{3}(\rho + 3P) + \frac{\Lambda}{3}$$

Accélération/Décélération
De l'expansion

Parametre cosmologiques (homogène)

□ Parametres comologiques (reduits)

$$\rho_c = 3H^2/8\pi G$$

Avec $H = \dot{a}/a$

$$\rho = \sum \rho_i$$

$$P = w\rho$$

$$\Omega_i = \rho_i/\rho_c$$

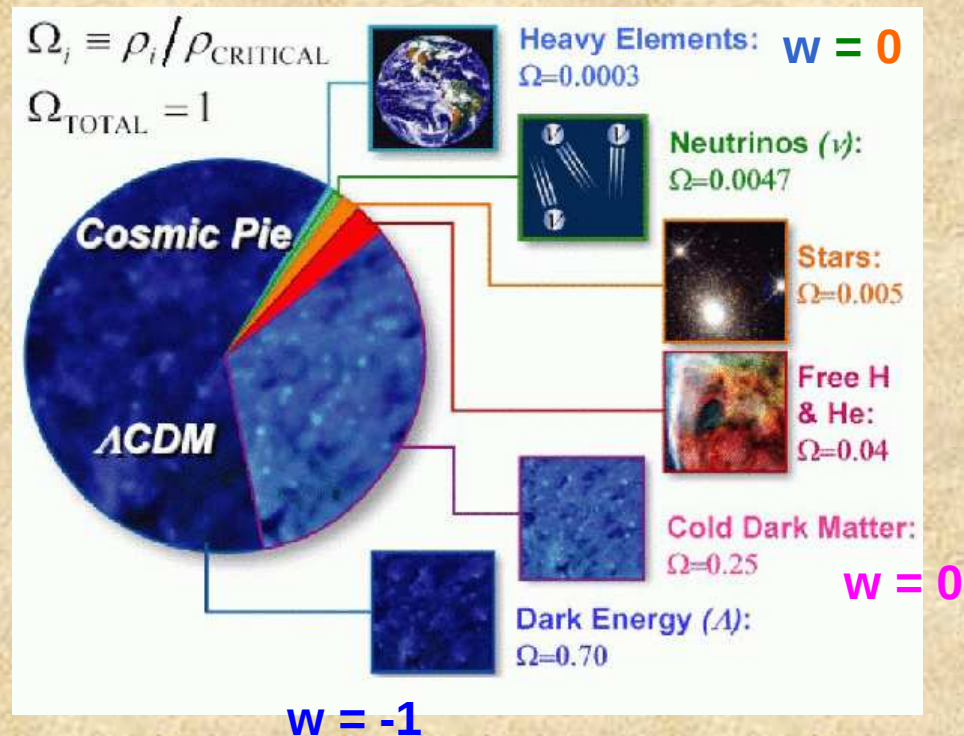
$$1 - \Omega_k = \sum \Omega_i + \Omega_\Lambda$$

Equation de Friedmann

MSC : constituants

- ❑ Matière baryonique + photons + neutrinos : MSSP
- ❑ Matière noire : LSP ? Wimps ?
- ❑ Énergie noire : constante cosmologique ?

- ❑ Défini par
 - leur équation d'état
 - Leurs interactions



Evolution homogène

La période inflationnaire

□ inflation

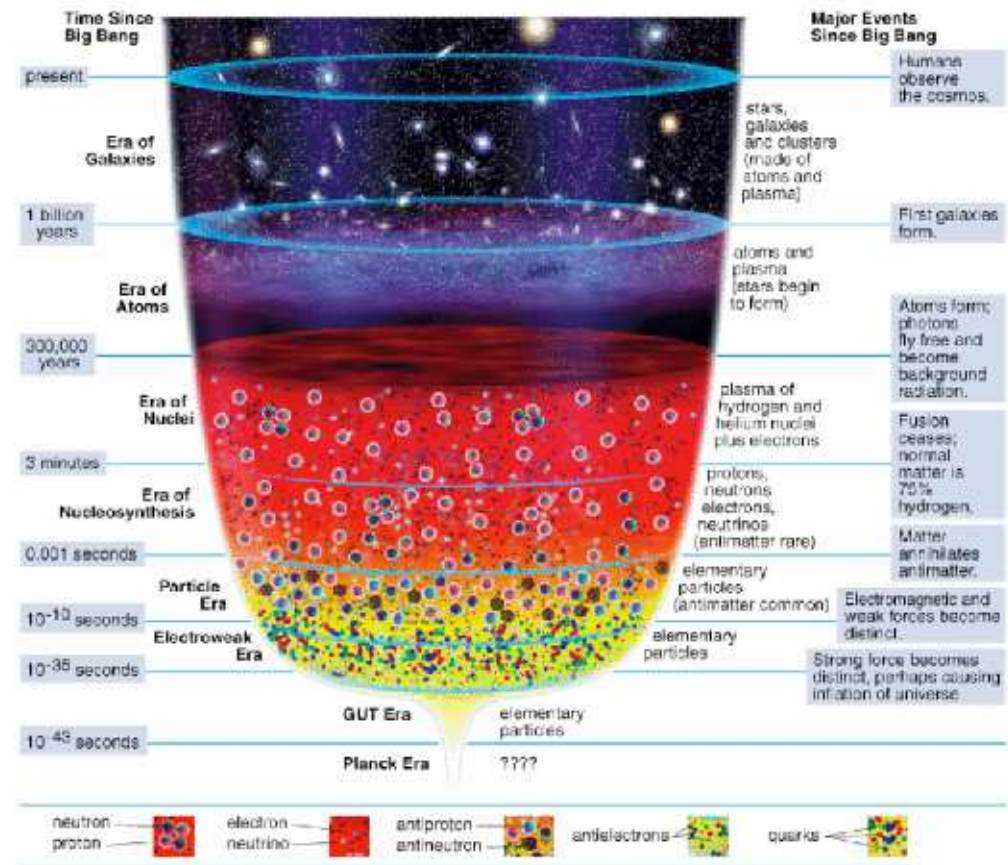
$$\rho = \dot{\Phi}^2 + V(\Phi)$$

$$P = \dot{\Phi}^2 - V(\Phi)$$

$$P \simeq -\rho$$

$$\dot{\Phi} \ll V$$

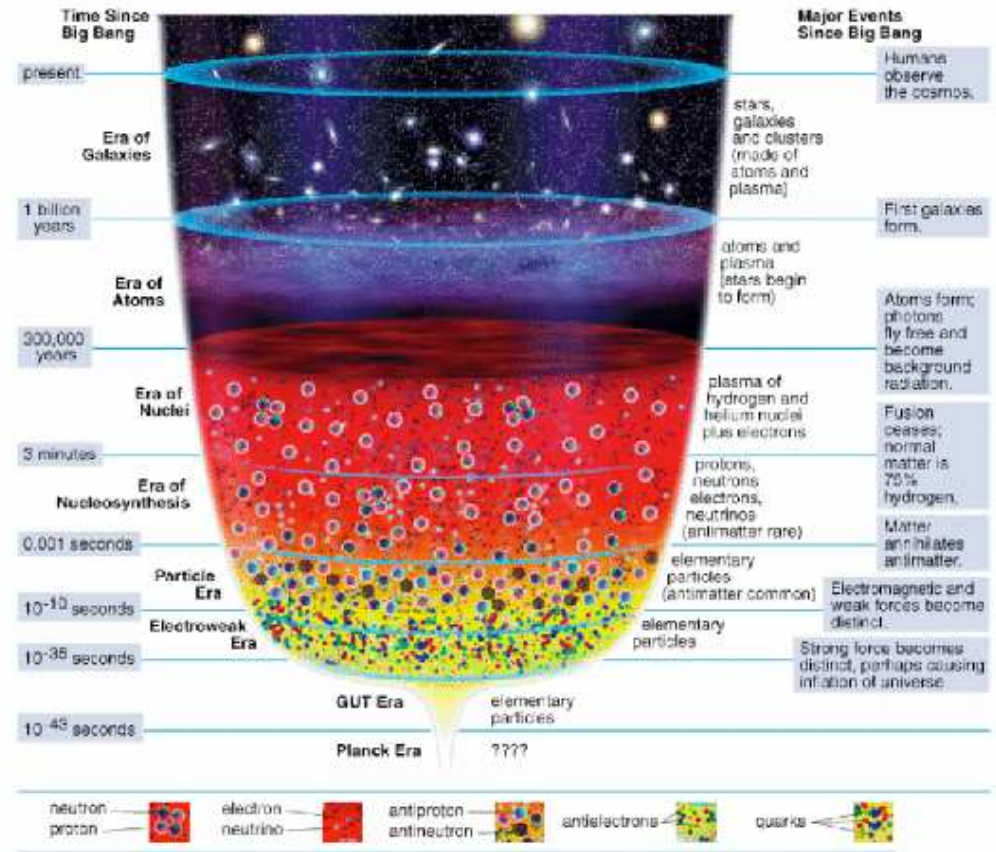
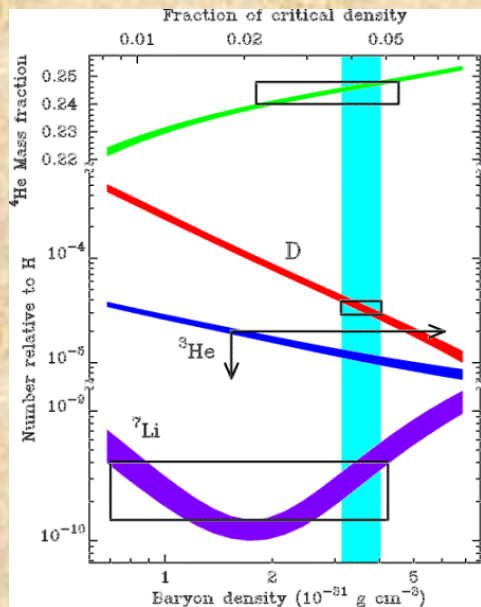
$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{\Lambda}{3} \Rightarrow a(t) \propto e^{Ht}$$



Evolution homogène période de rayonnement

$$\begin{cases} p = \frac{1}{3}\rho \\ \rho \propto a^{-4} \\ a(t) \propto t^{1/2} \end{cases}$$

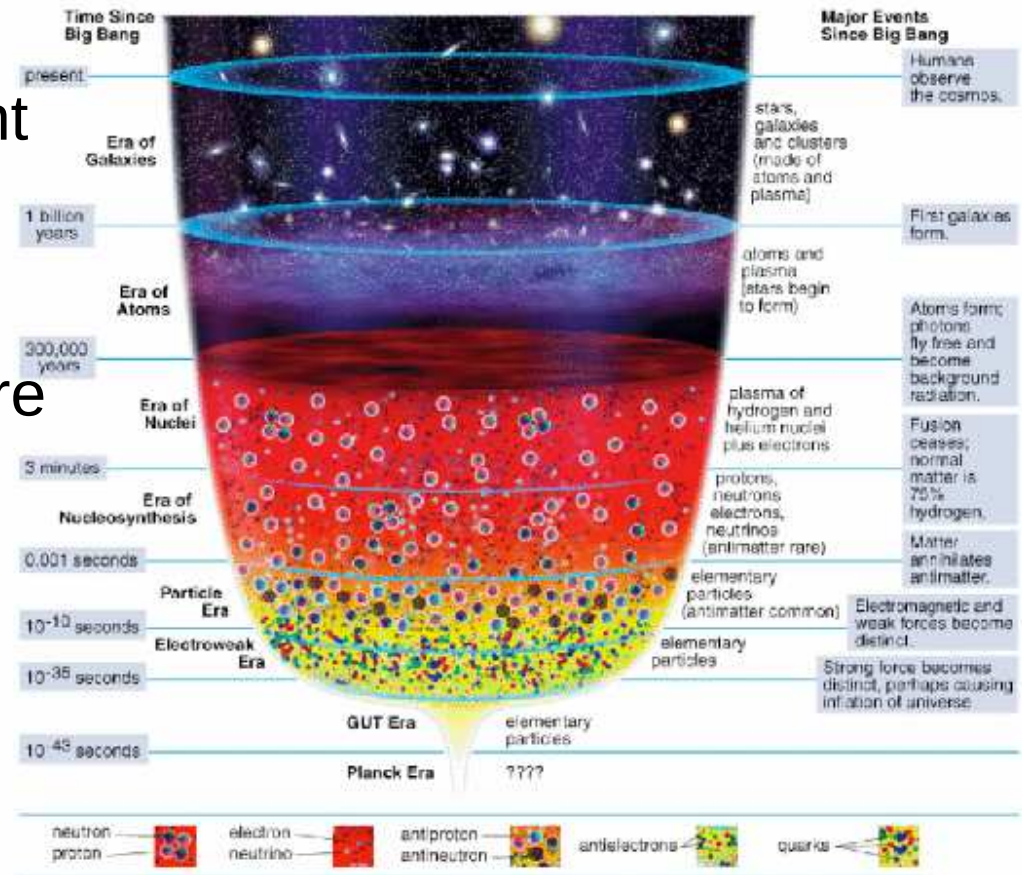
- ☐ Brisure symétrie (?)
- ☐ Baryogenèse
- ☐ Nucléosynthèse



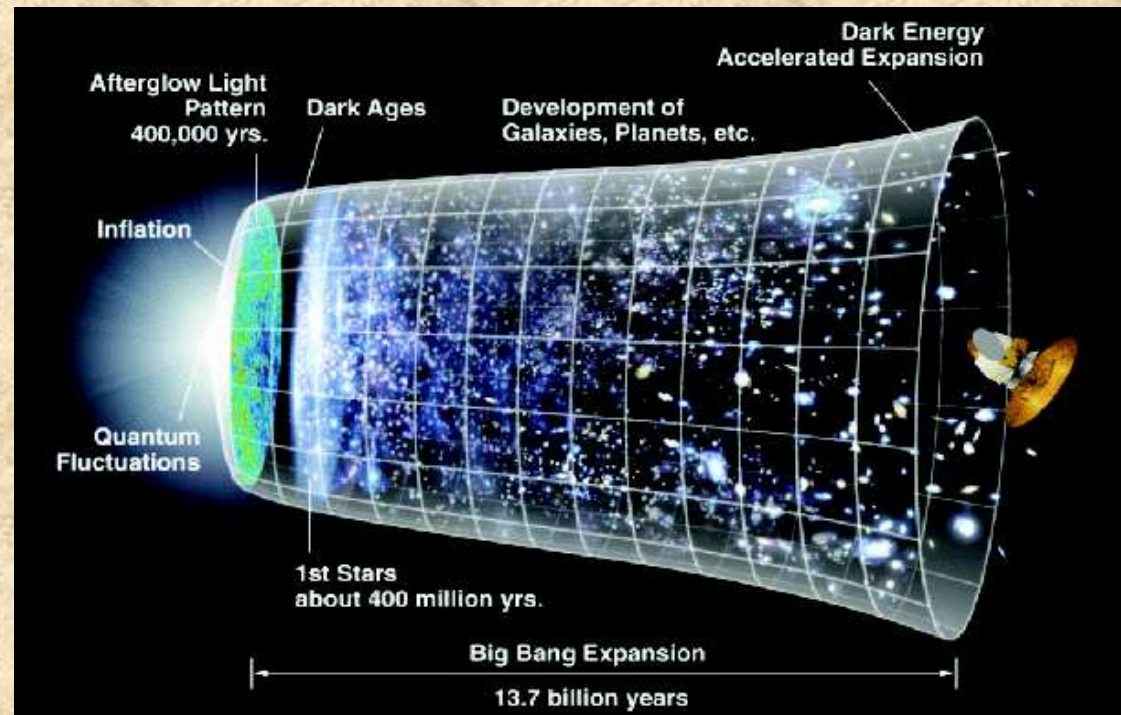
Evolution homogène période de matière

$$\begin{cases} p = 0 \\ \rho \propto a^{-3} \\ a(t) \propto t^{2/3} \end{cases}$$

- Equilibre
matière – rayonnement
- Recombinaison
- Equilibre
matière – énergie noire



Evolution des perturbations



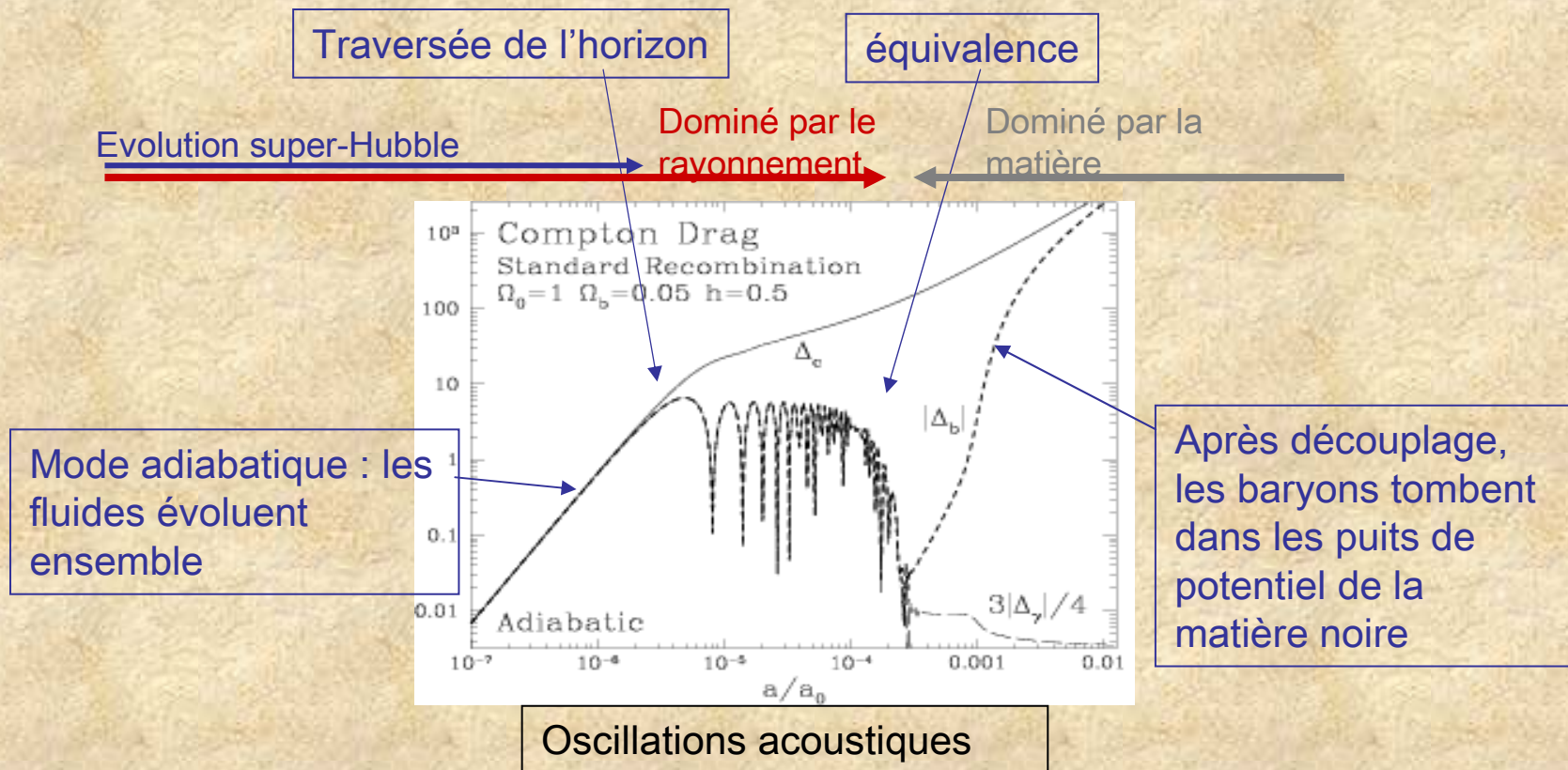
- ❑ Origine des inhomogénéité = perturbation du vide quantique $\rightarrow$ inflation $\rightarrow$ perturbation de densité
- ❑ Le spectre initial des fluctuations (après l'inflation) décrit par 4 paramètres $A, n, n', r=T/S$

Evolution des perturbations

Equations couplées (linéaires)

$$\ddot{\delta} + 2H\dot{\delta} - 4\pi G\rho_M\delta = 0$$

- Effondrement gravitationnel, limite par pression et expansion

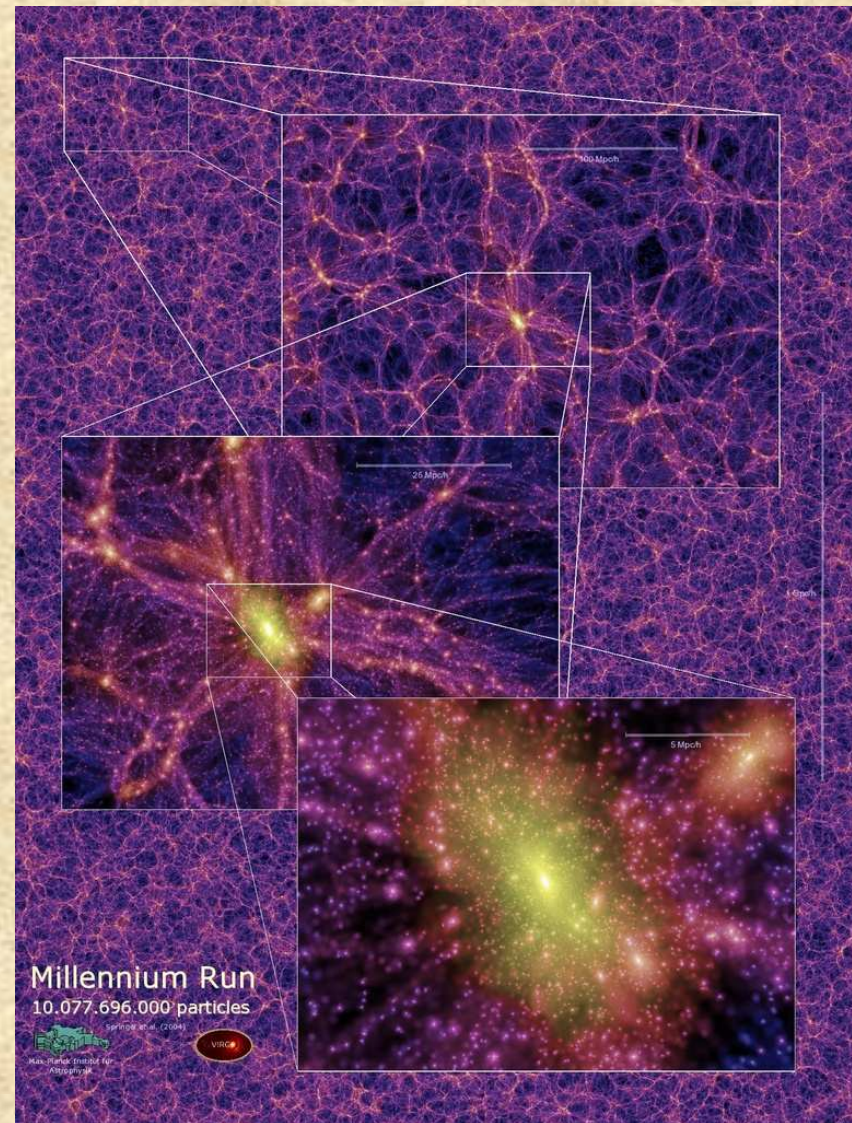
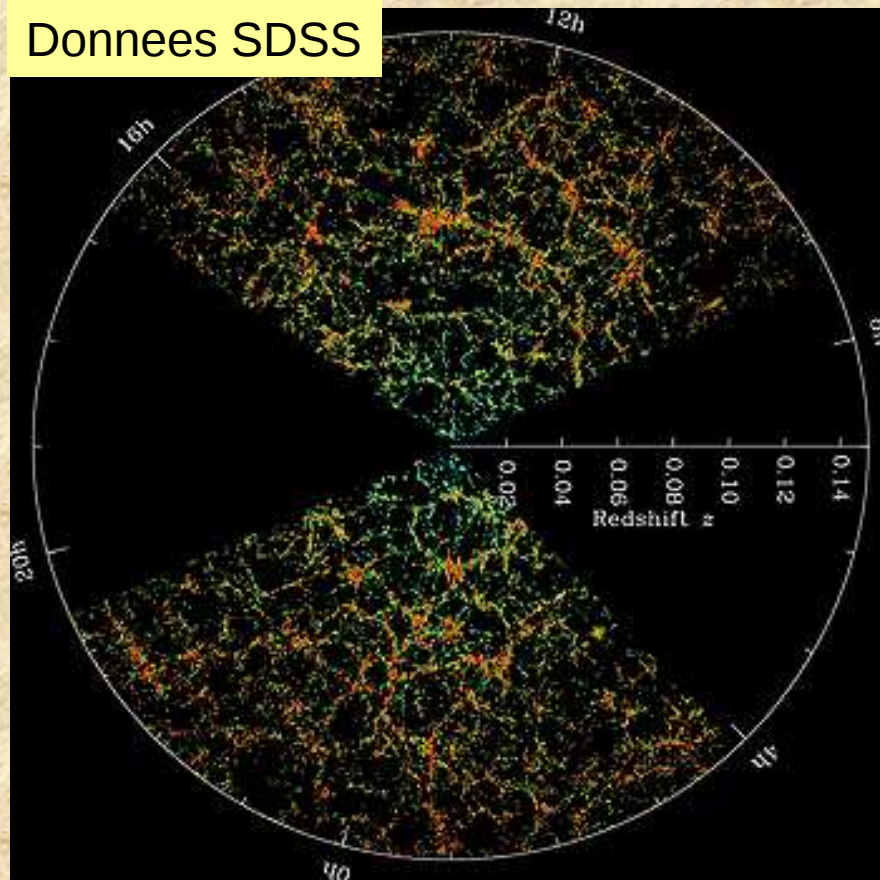


Evolution des perturbations

□ Régime Non lineaire

➤ simulation N corps

Donnees SDSS



Le MSC

□ Les 14 paramètres

- H_0
- Ω_m Ω_b Ω_c
- Ω_Λ w_0
- σ_8

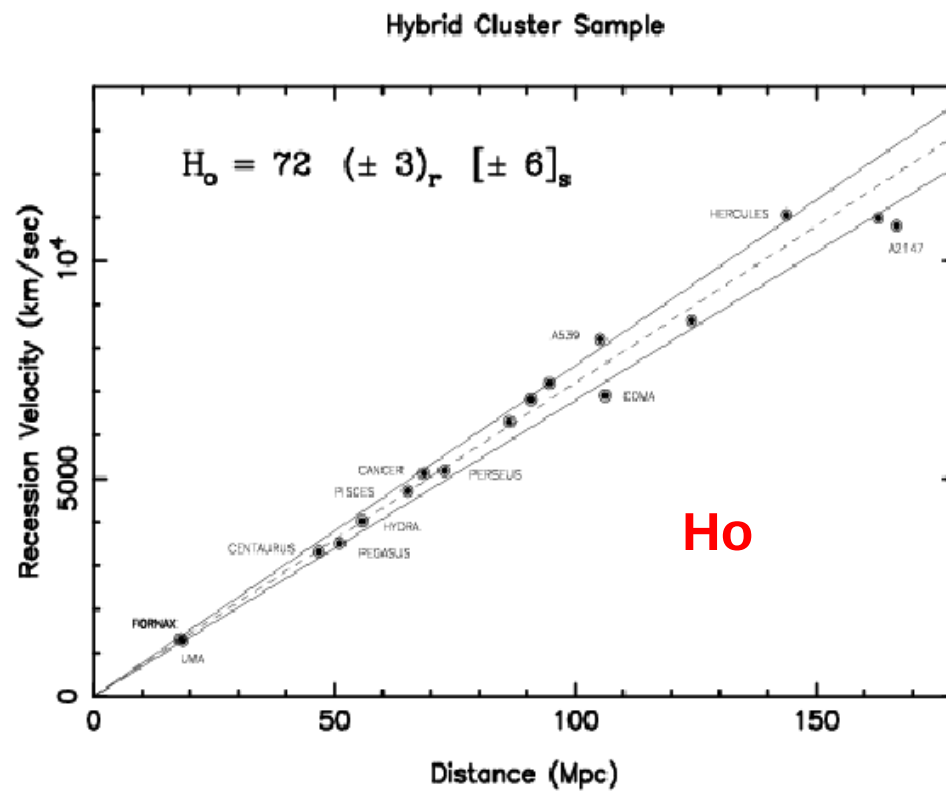
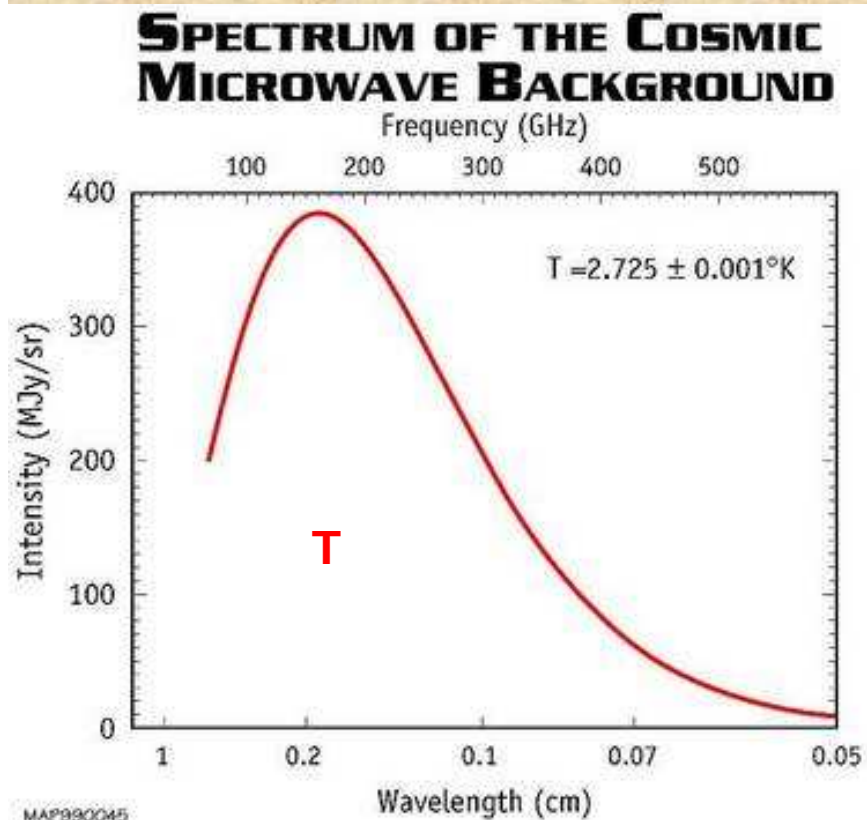
Univers homogène

- A n n' r

inhomogénéités

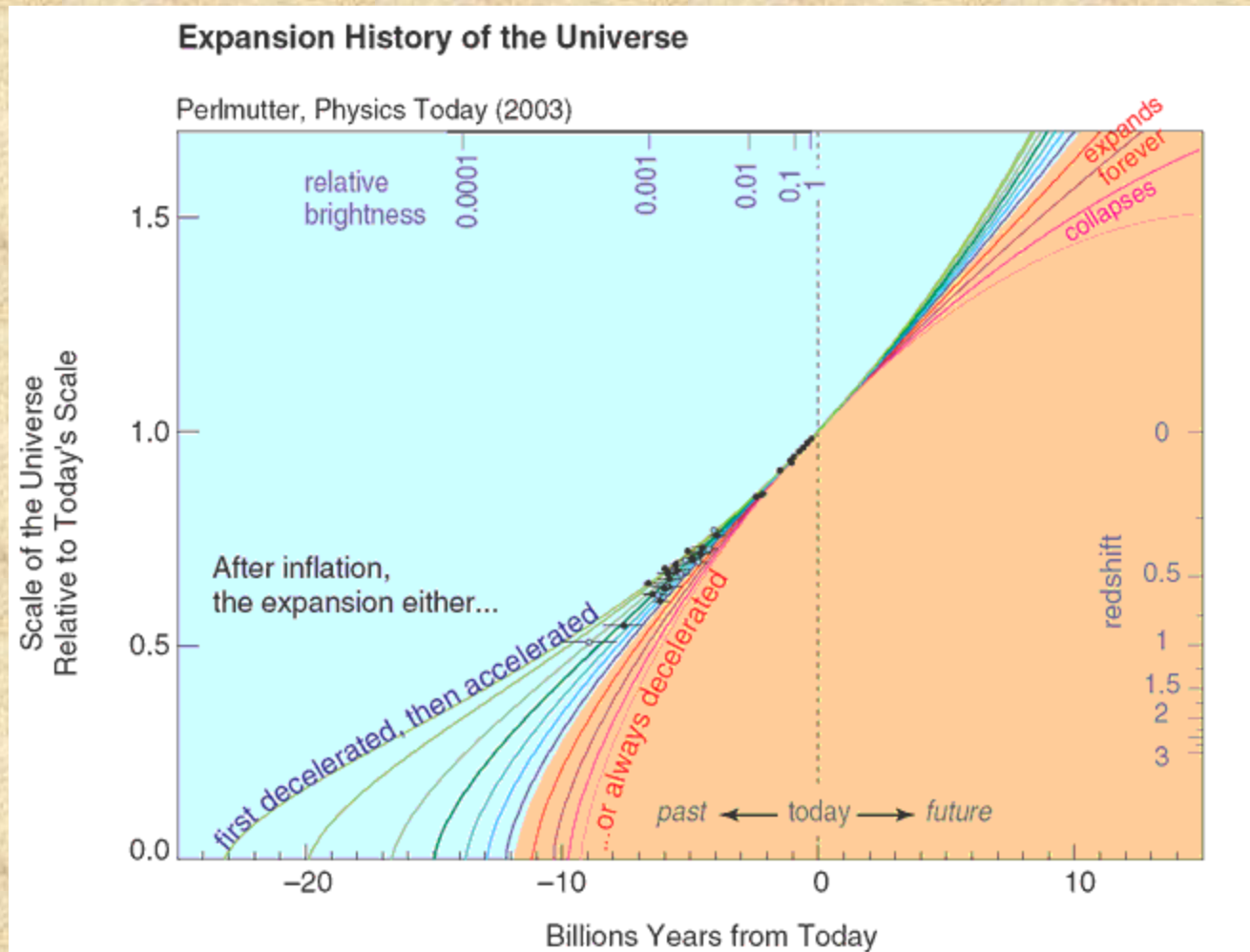
- T_0
- τ_{reion}

Mesurer MSC (I)



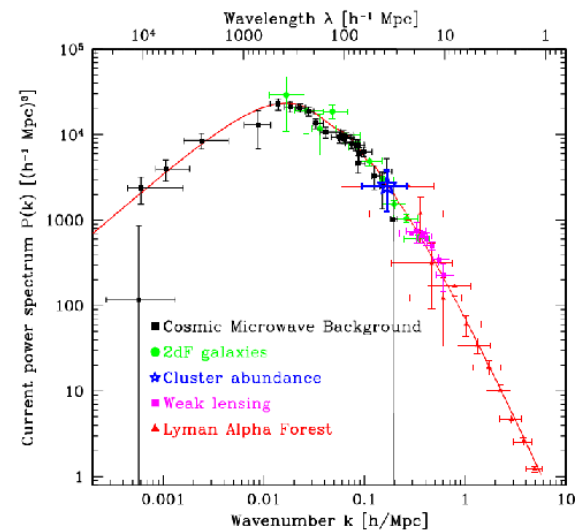
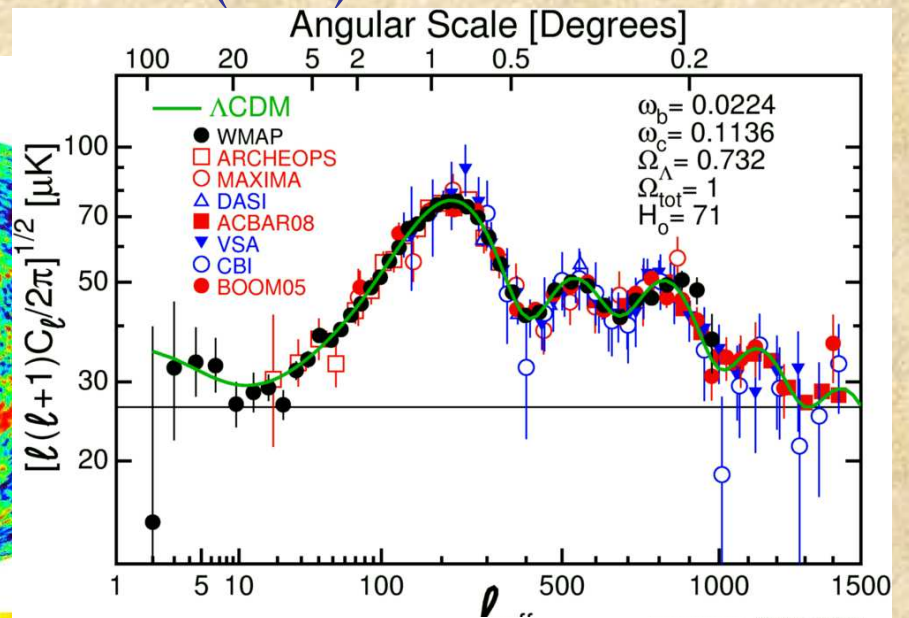
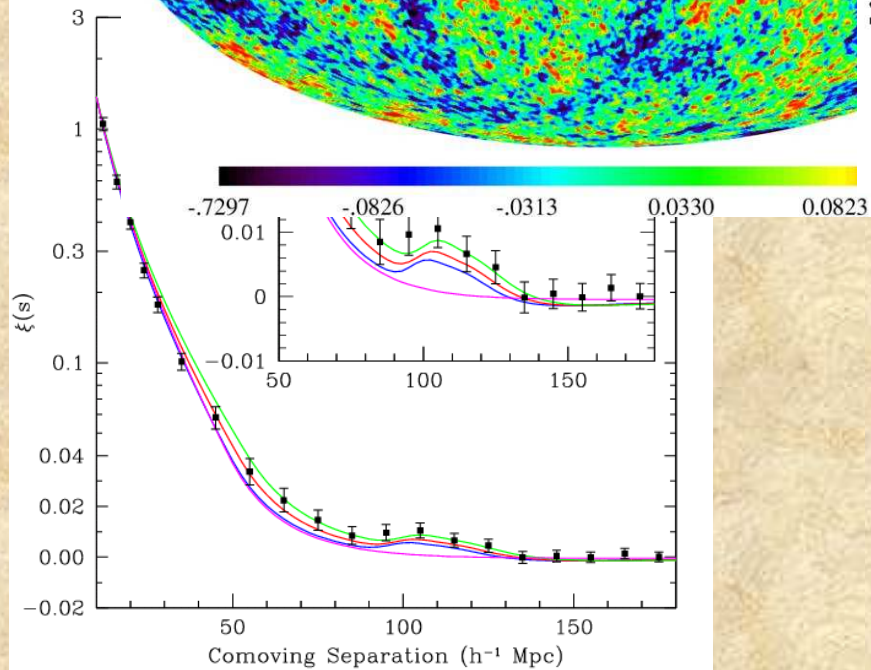
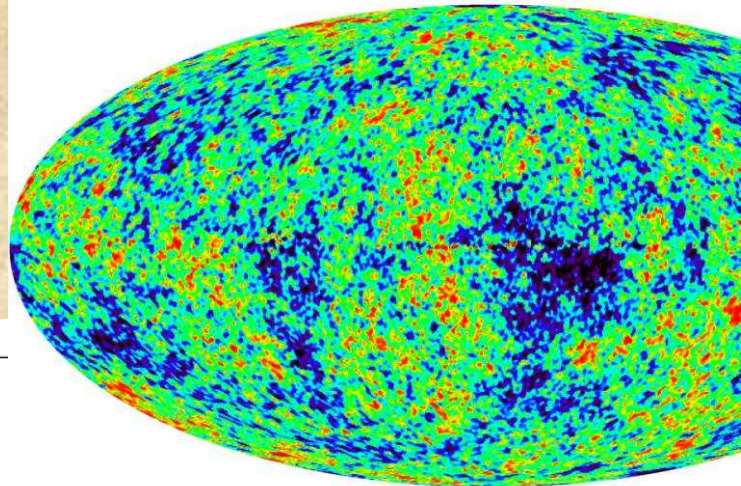
Mesurer MSC (II)

□ Accélération de l'expansion



Mesurer MSC (III)

WMAP 5 year ILC

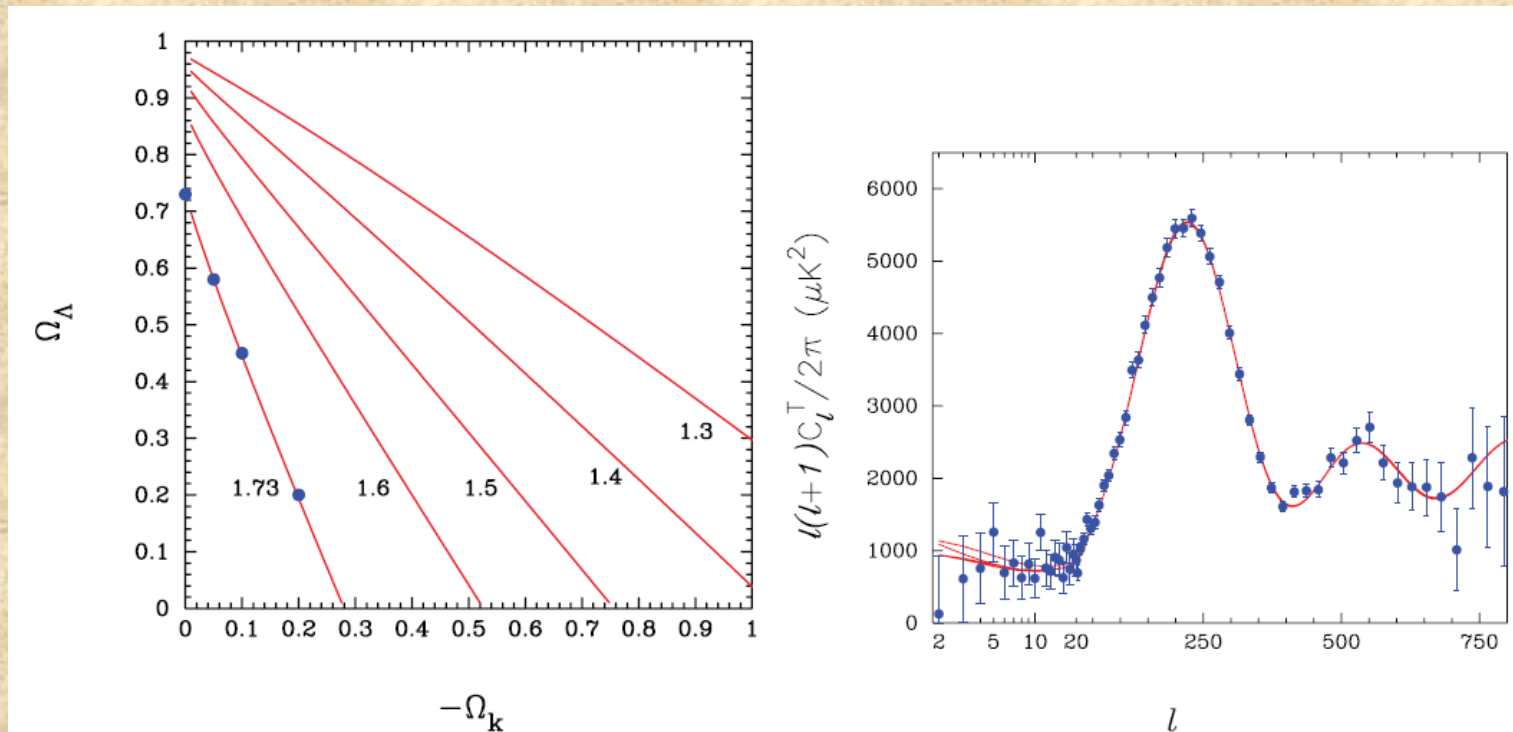


- 03 Mar 2008

Les dégénérescences pour une mesure

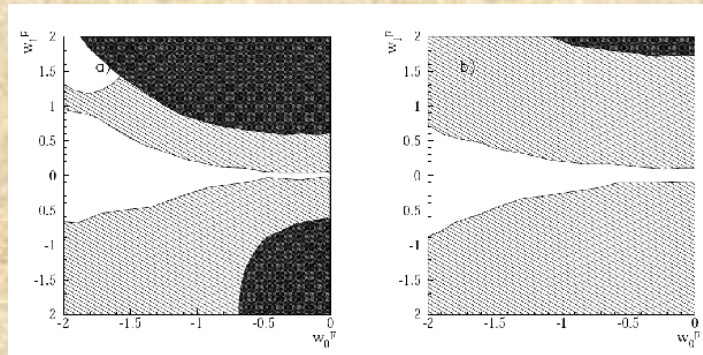
❑ Dégénérescences entre les paramètres cosmologiques pour la mesure par une seule sonde

➤ Exemple : CMB : dégénérescence entre courbure constante cosmologique

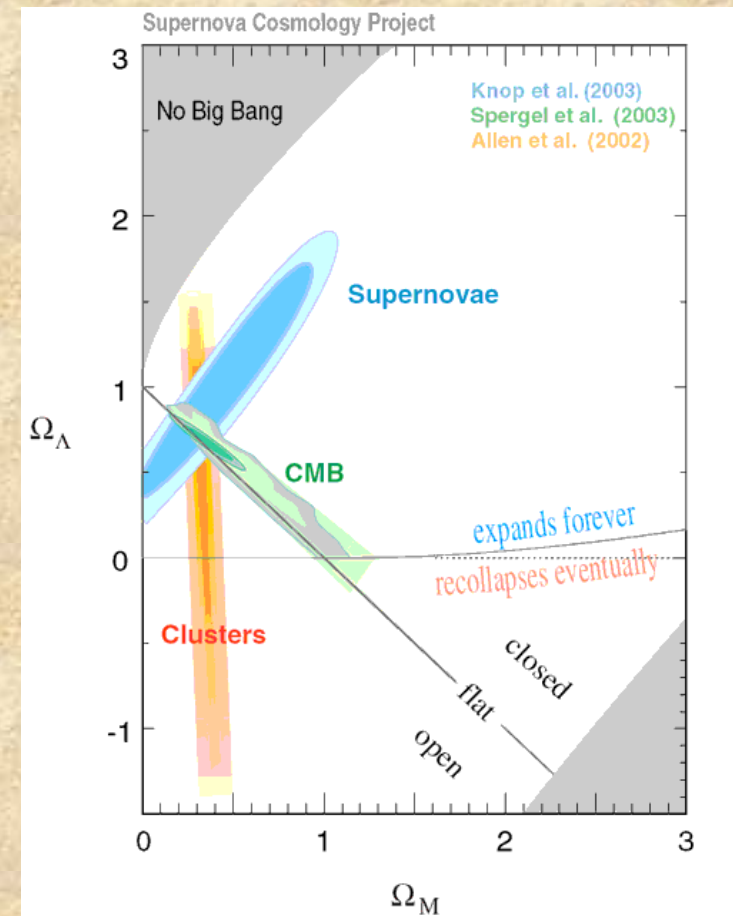


Combiner les mesures

□ Attention aux priors



□ Il faut combiner les mesures de sondes différentes



Combiner les mesures : perspectives

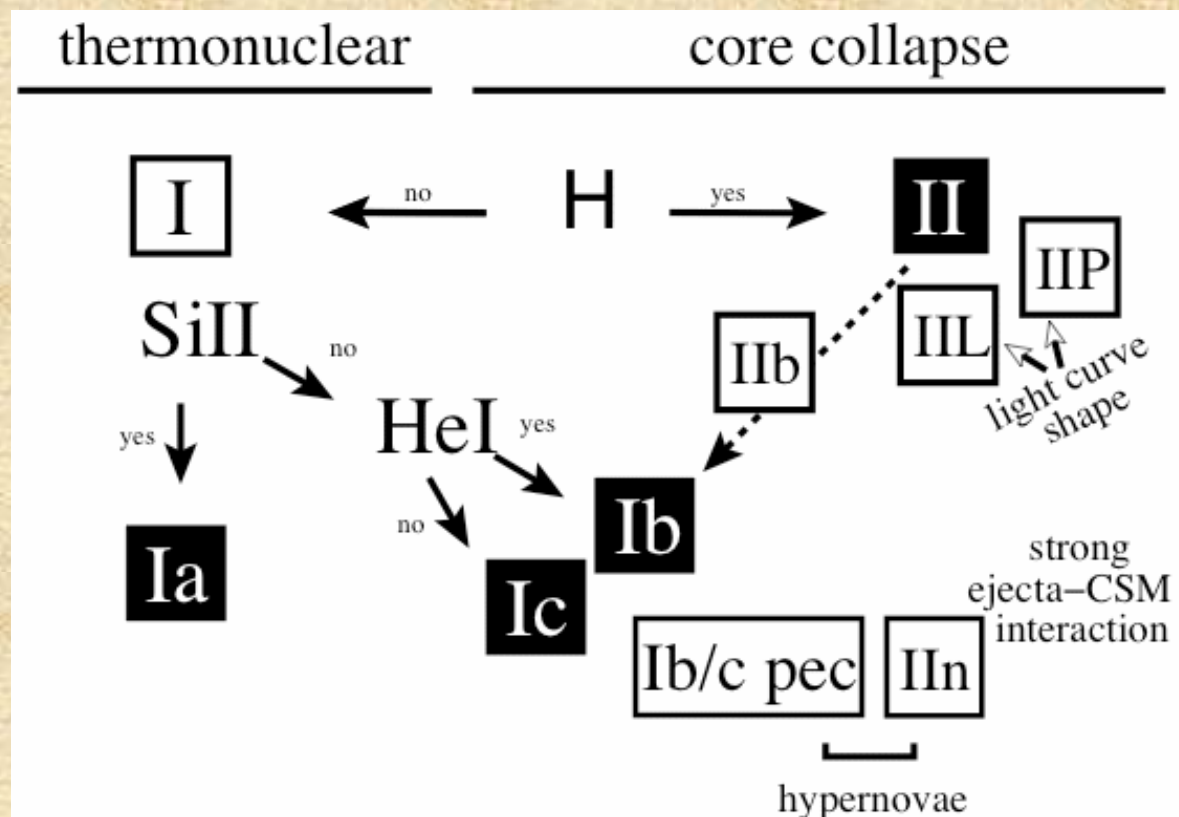
- ❑ Déterminer la nature de l'énergie noire
 - DETF + FoM : jauger resolution sur la mesure
- ❑ .. Tester la relativité G
- ❑
- ❑ Mesurer/Tester le modèle standard de de la cosmologie

Les supernovae comme sonde cosmologique

- ❑ Les supernovae de type Ia (SNIa)
- ❑ La cosmologie avec les SNIa
- ❑ Le SuperNova Legacy Survey (SNLS)
 - Le temps réel et détection automatique
 - Monte-Carlo et sélection photométrique
 - Taux d'explosion
 - Cosmologie

Les types de SN

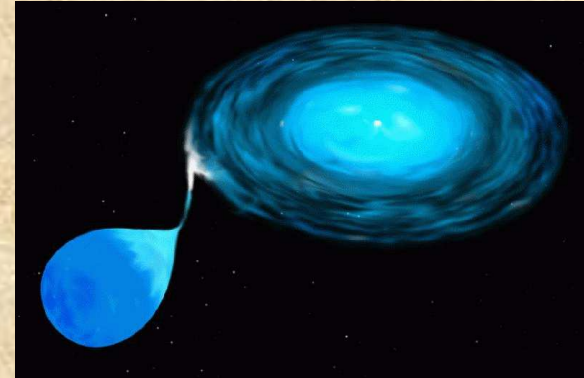
- Deux grandes classes de supernovae



Classification/Identification grâce aux spectres

Les SN Ia

- ❑ Explosion d'un système binaire au seuil de Chandrasekhar



- ❑ Variabilité

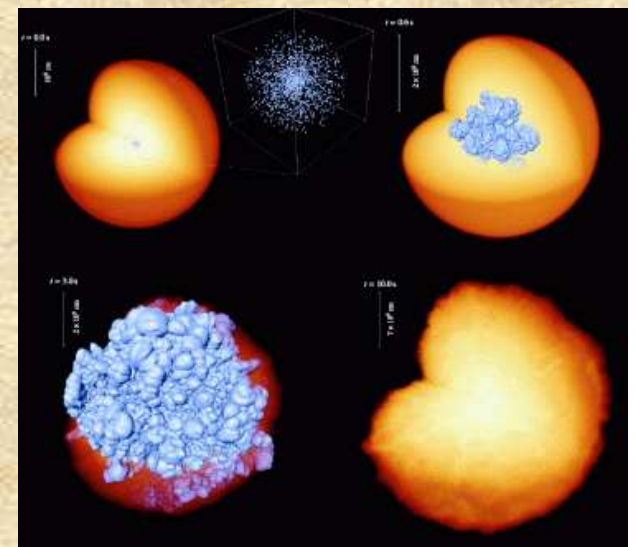
- Chandelle standard : 30%

- ❑ Standardisation

- Caractéristiques des courbes de lumieres
- Variabilité 30% -> 15%

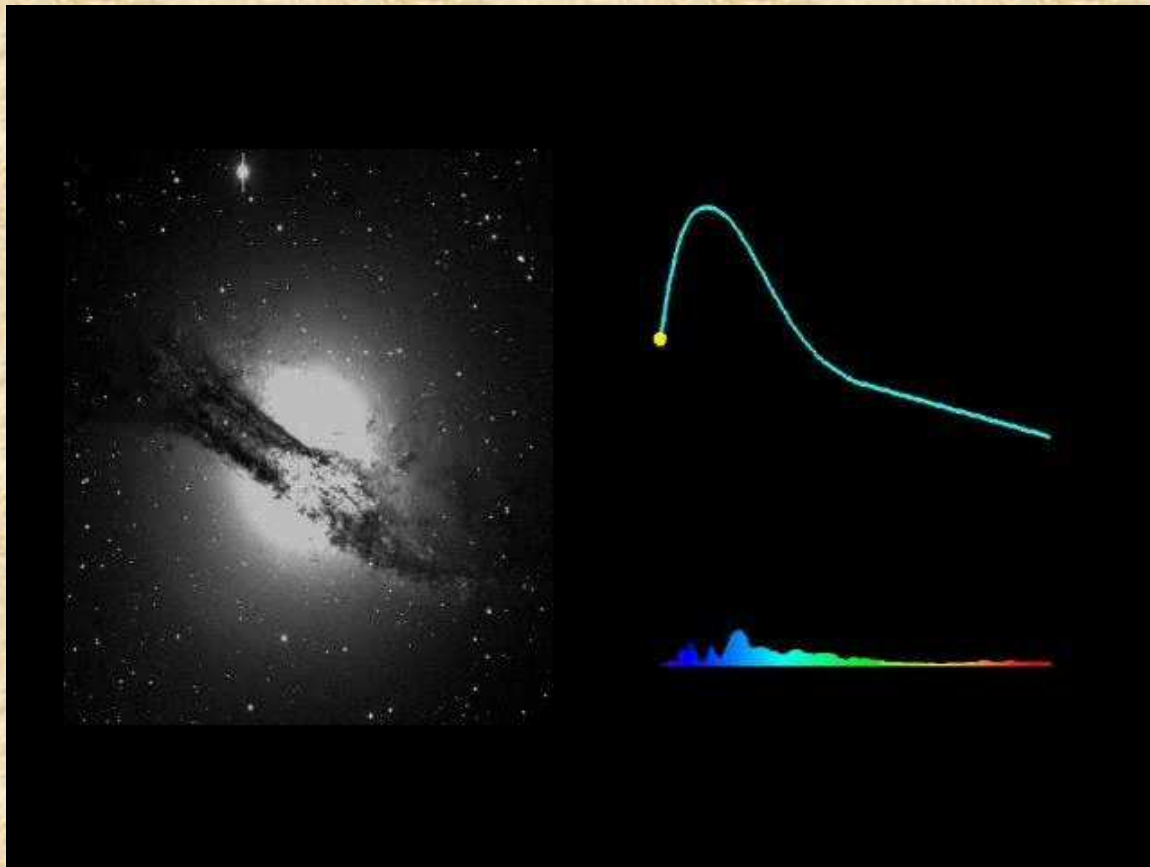
- ❑ Modélisation

- Modèle quantitatif pas encore disponible
 - Travaux en cours



Les SN Ia

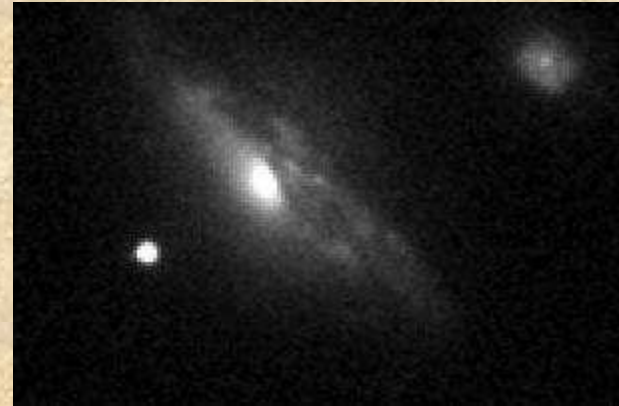
- Courbe de lumière et spectres



Progéniteur de SNIa

□ Galaxie hôte

- Environnement (métallicité)
- Population d'étoiles



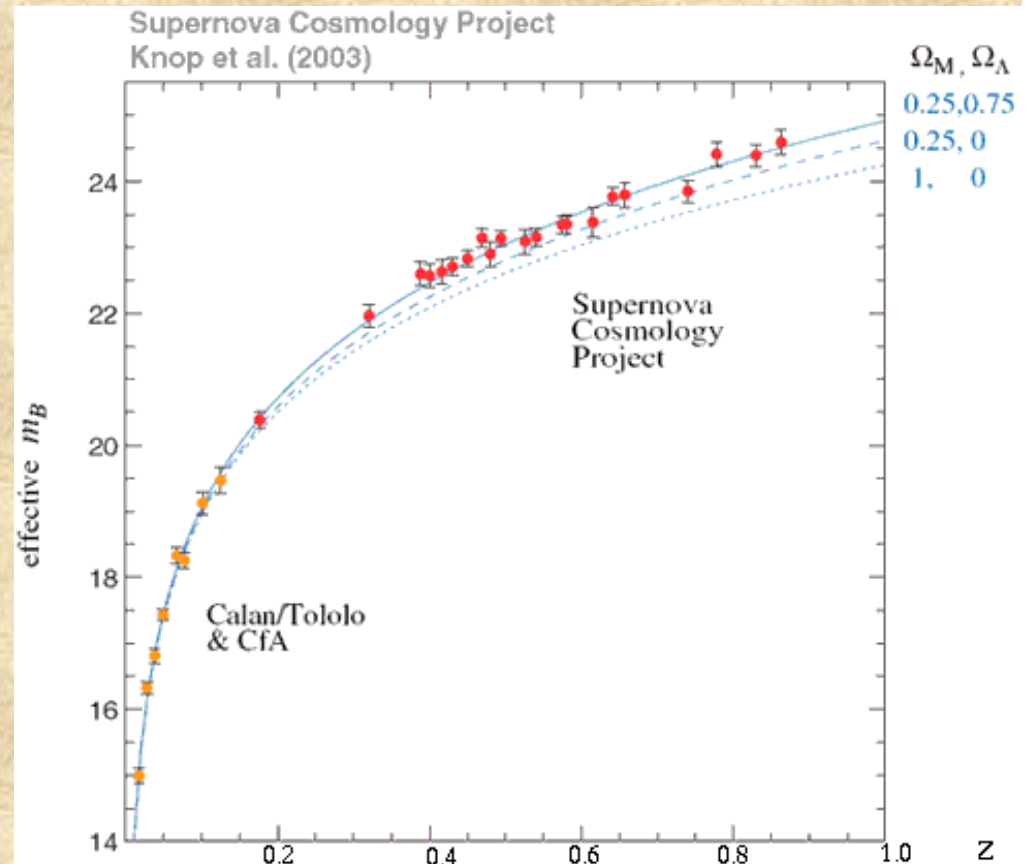
□ Taux d'explosion

- Population d'étoiles
- Délai entre création de l'étoile et explosion

Cosmologie avec les SNIa

□ Diagramme de Hubble

$$\phi_{obs} = \frac{L_{source}}{4\pi a_0 d_L^2}$$

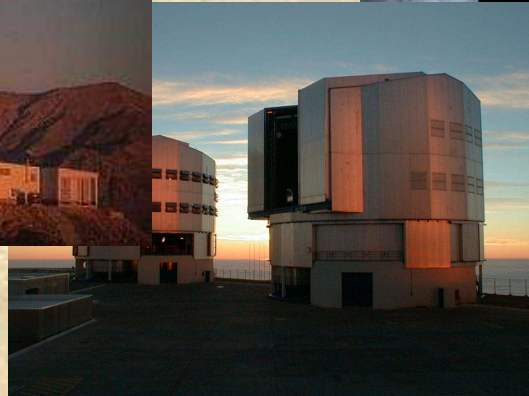
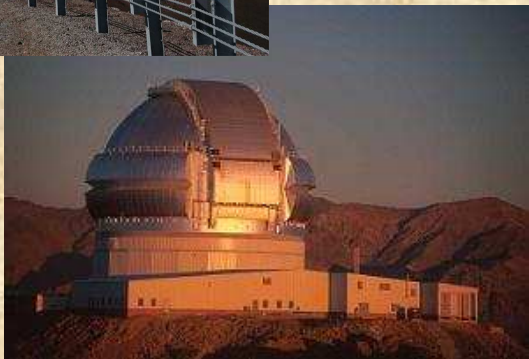
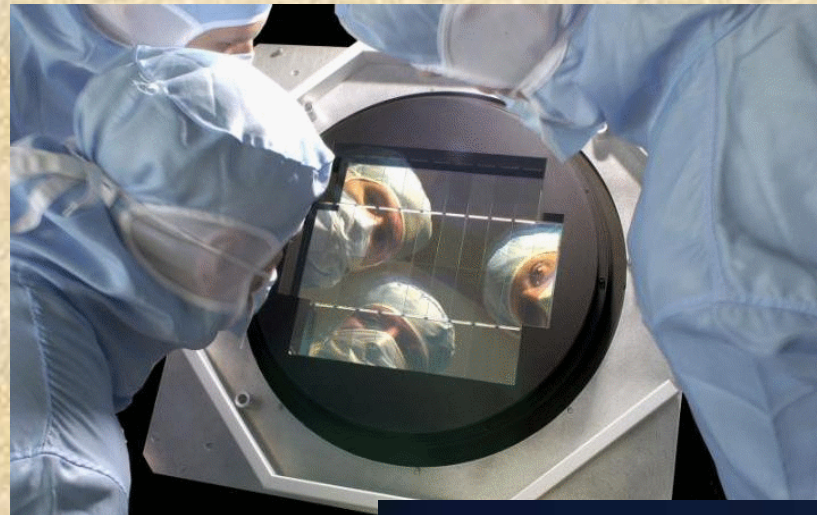


$$d_L = \frac{c}{H_0} \frac{(1+z)}{\sqrt{|\Omega_k|}} S_k(\sqrt{|\Omega_k|} \int_0^z dz' [\sum_i \Omega_i (1+z')^{3+3w_i} + \Omega_k (1+z')^2]^{-1/2})$$

SuperNova Legacy Survey (SNLS)

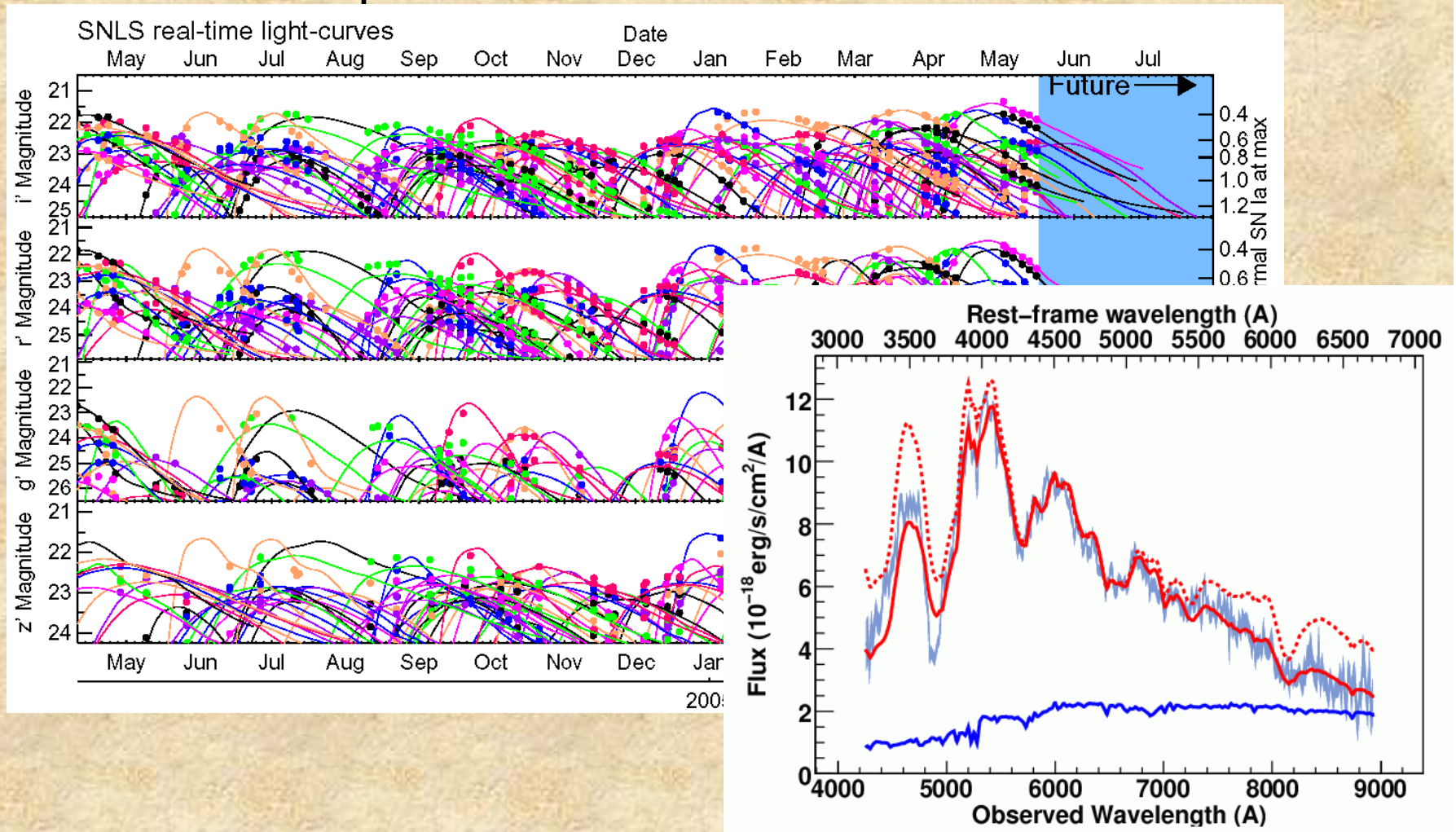
- ❑ Photometrie : CFHT (4m) / Megacam (300 mega pixels)/1d2
- ❑ Spectroscopie : VLT/Gemini/Keck (8/10m)

250+250H / an X 5 !



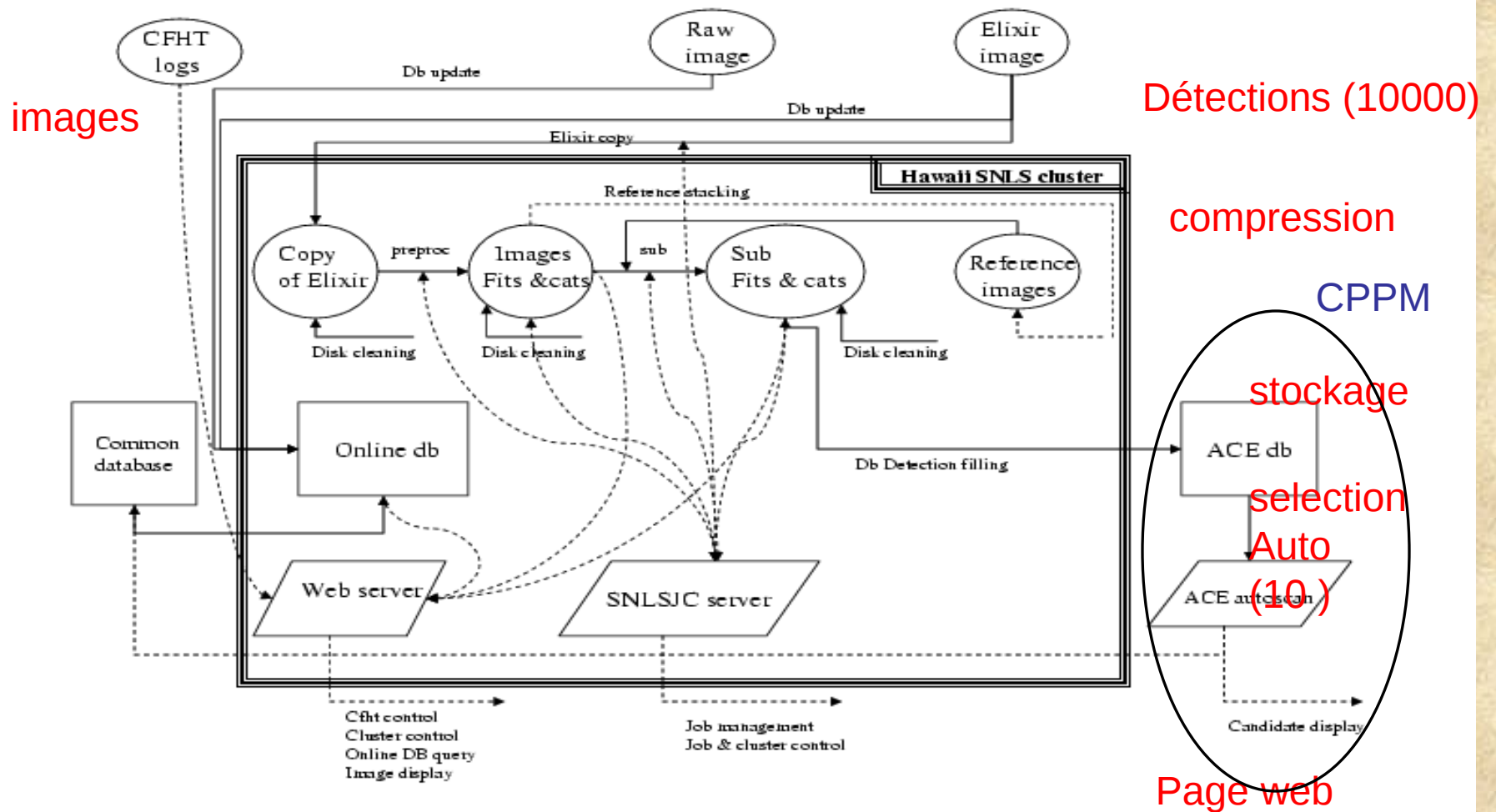
SNLS : Recherche en temps réel (RT)

- Mode de recherche glissante + « Trigger » pour observer un spectre au maximum de luminosité

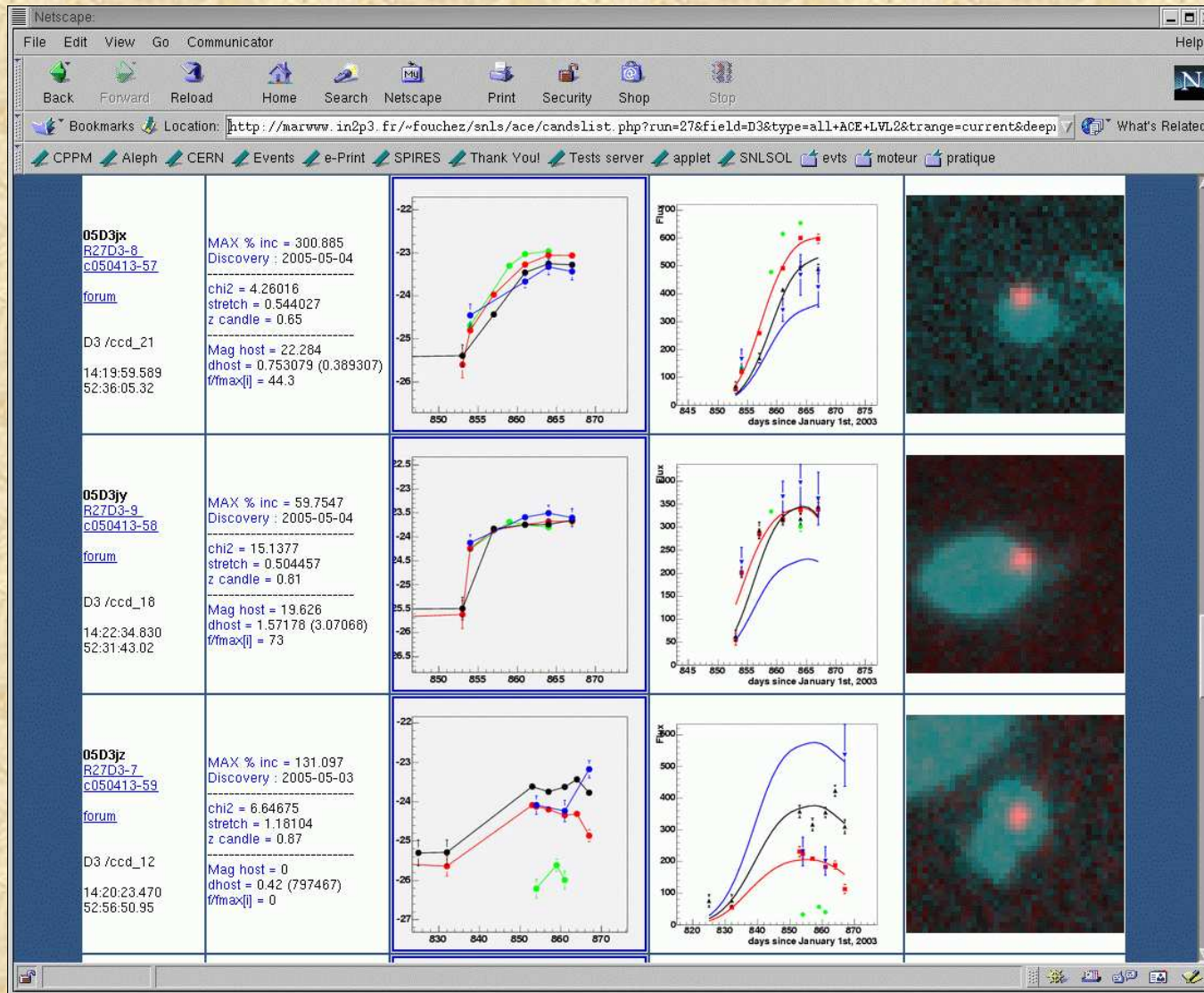


SNLS RT

❑ Le système de détection en temps réel

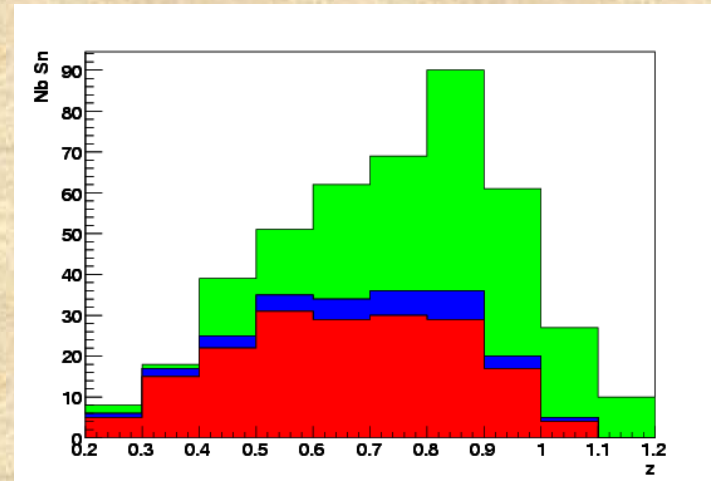


SNLS: Trigger pour la spectroscopie



Monte-Carlo et re-détection (offline)

- ❑ Supernovae artificielles ajoutées aux vrais images (700000 SNIa)
- ❑ Détection automatiques, en parallèles des images MC et images réelles
- ❑ Redécouverte de tous les candidats identifiés (spectres) + 100% de candidats

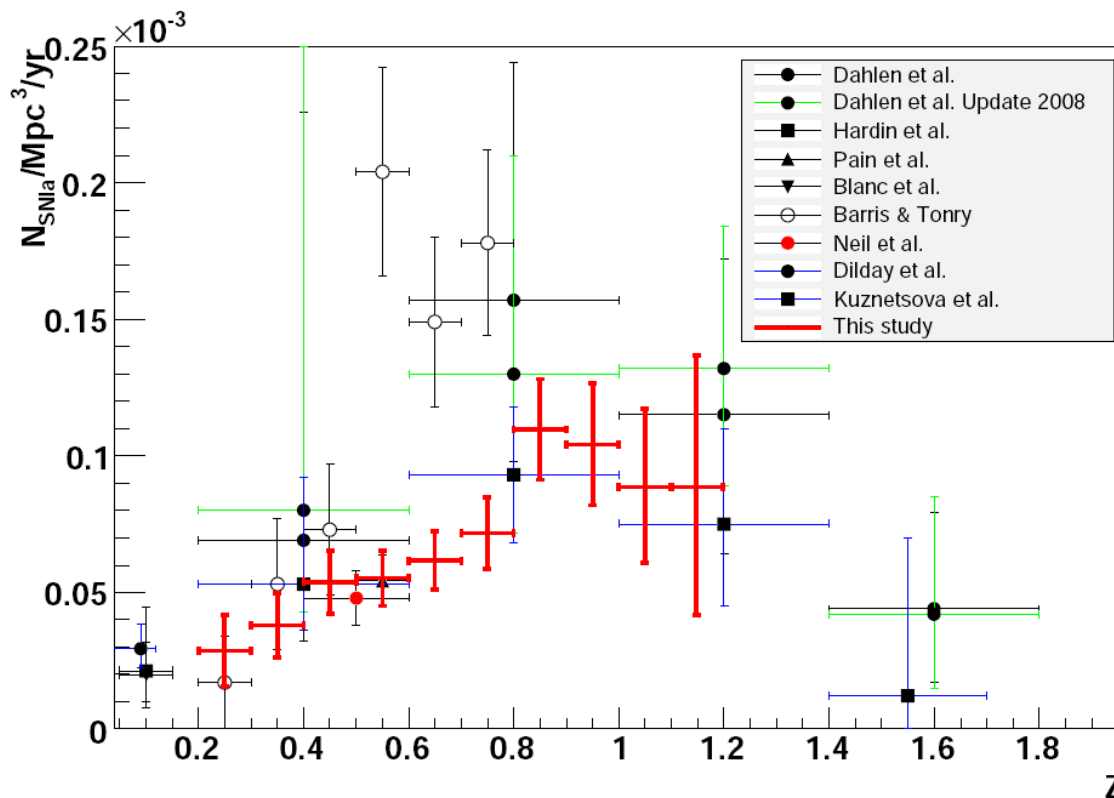
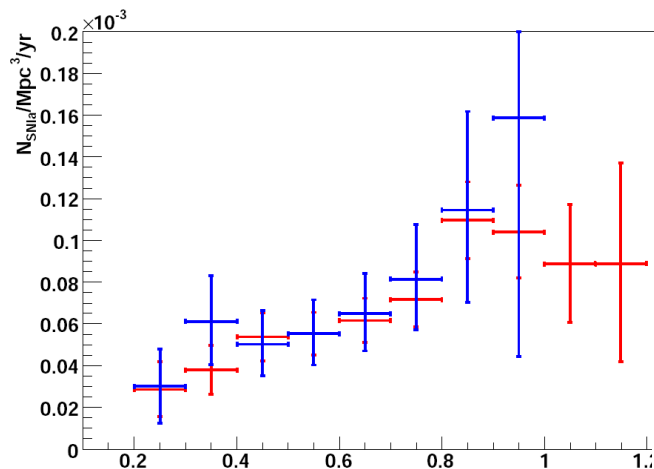


- ❑ Calcul de de l'efficacité de détection

SNLS - Taux d'explosion

□ Mesure du taux d'explosion en fonction du redshift

Identification photometrique
Redshift photometrique

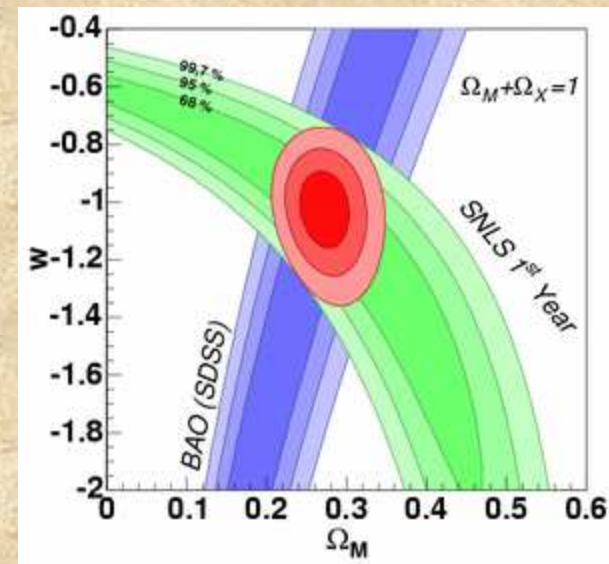
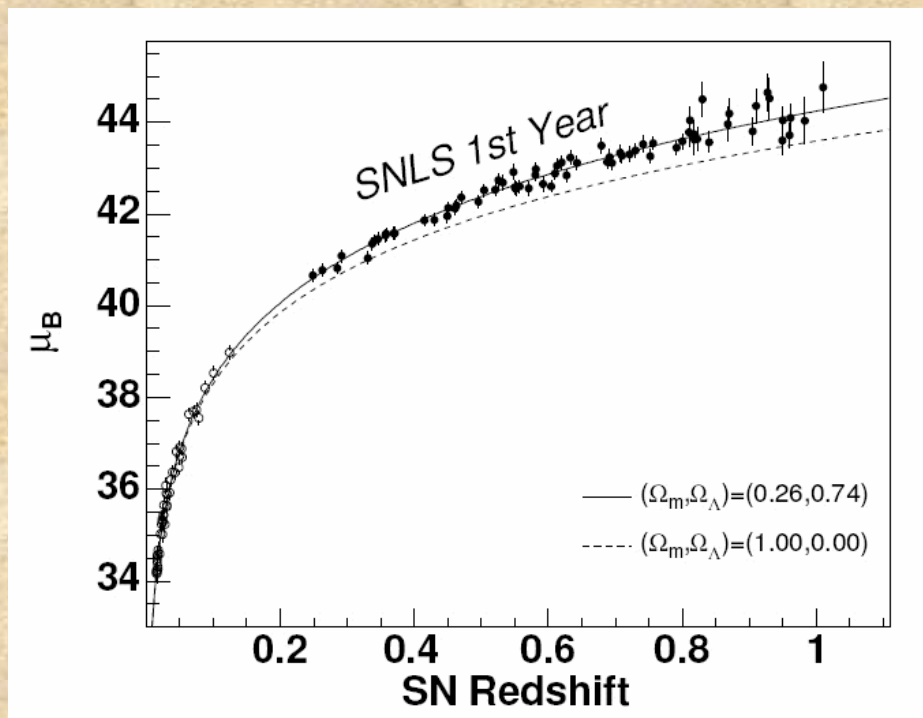


$$N_{\text{SN}}(z, dz) = \frac{N_{\text{SNobs}}(z, dz)}{\epsilon(z)}$$

$$R(z) = \frac{N_{\text{SN}}(z, dz)}{\Delta_T V(z, dz)}$$

SNLS cosmologie 1ere année d'observation

- Photometrie differentielle + calibration + standardisation
- Diagramme de Hubble : 72 SNLS + 44 proches ($z < 0.15$)



Univers plat + $w = \text{constant}$

$w = -1$ à 10% !

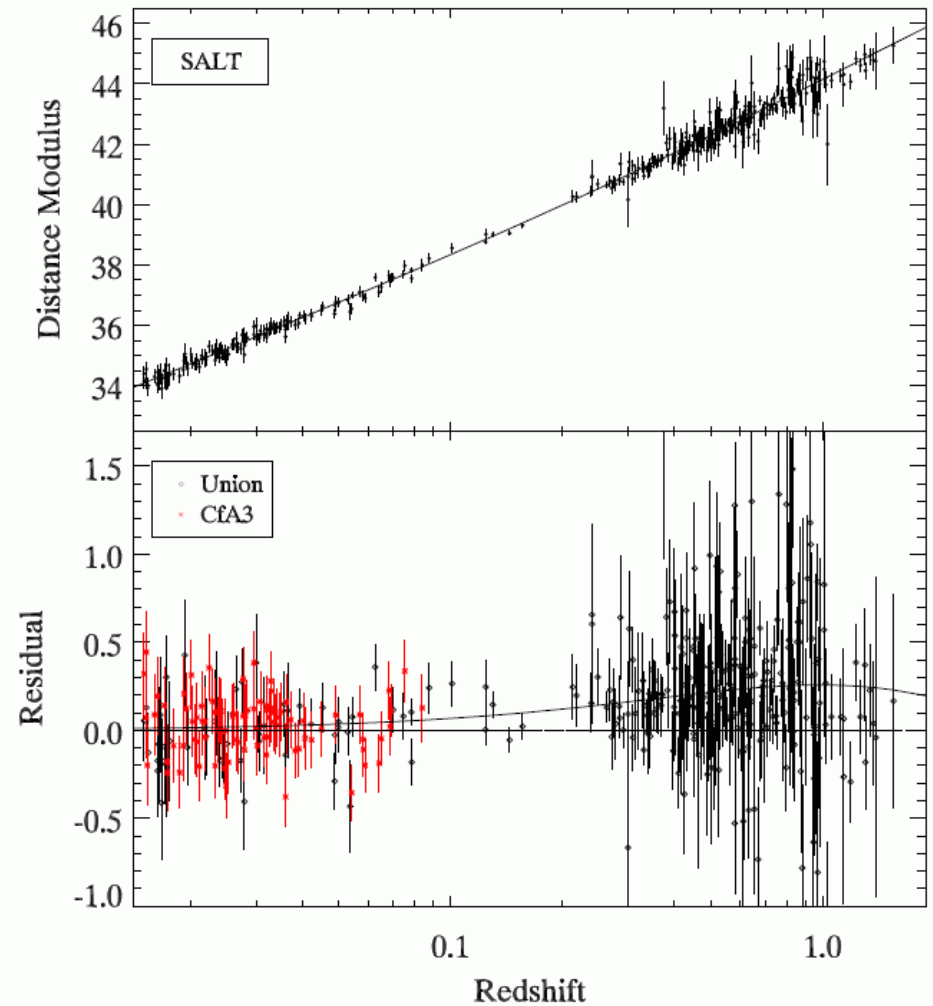
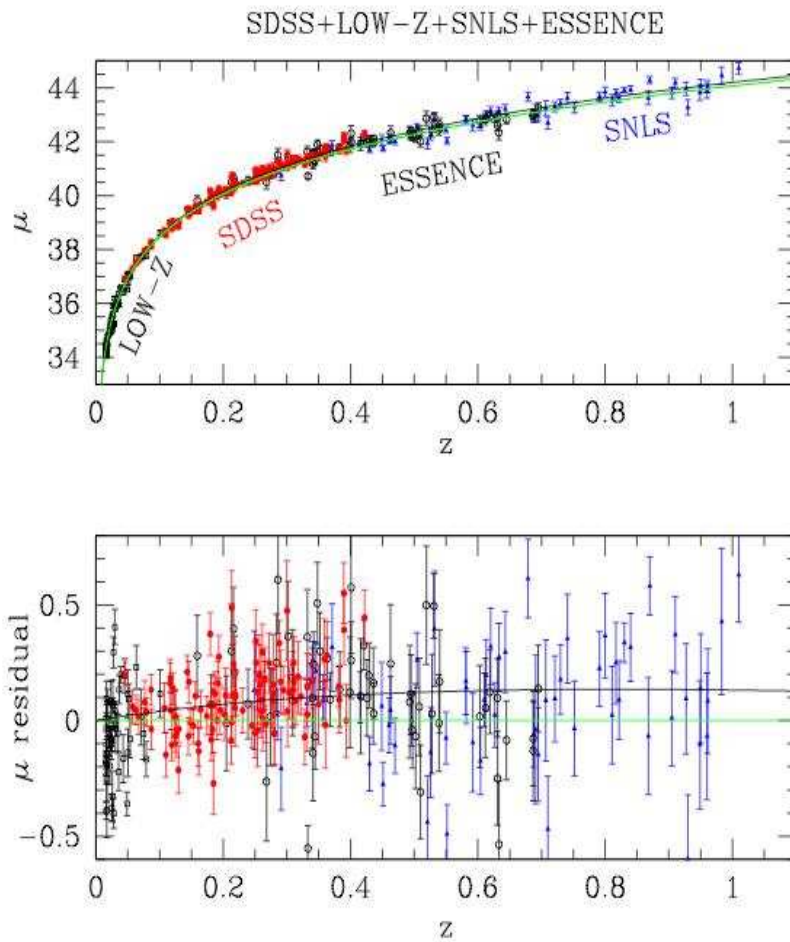
Précision sur les paramètres cosmologiques

- ❑ Erreurs systématiques dominante : la calibration photométrique

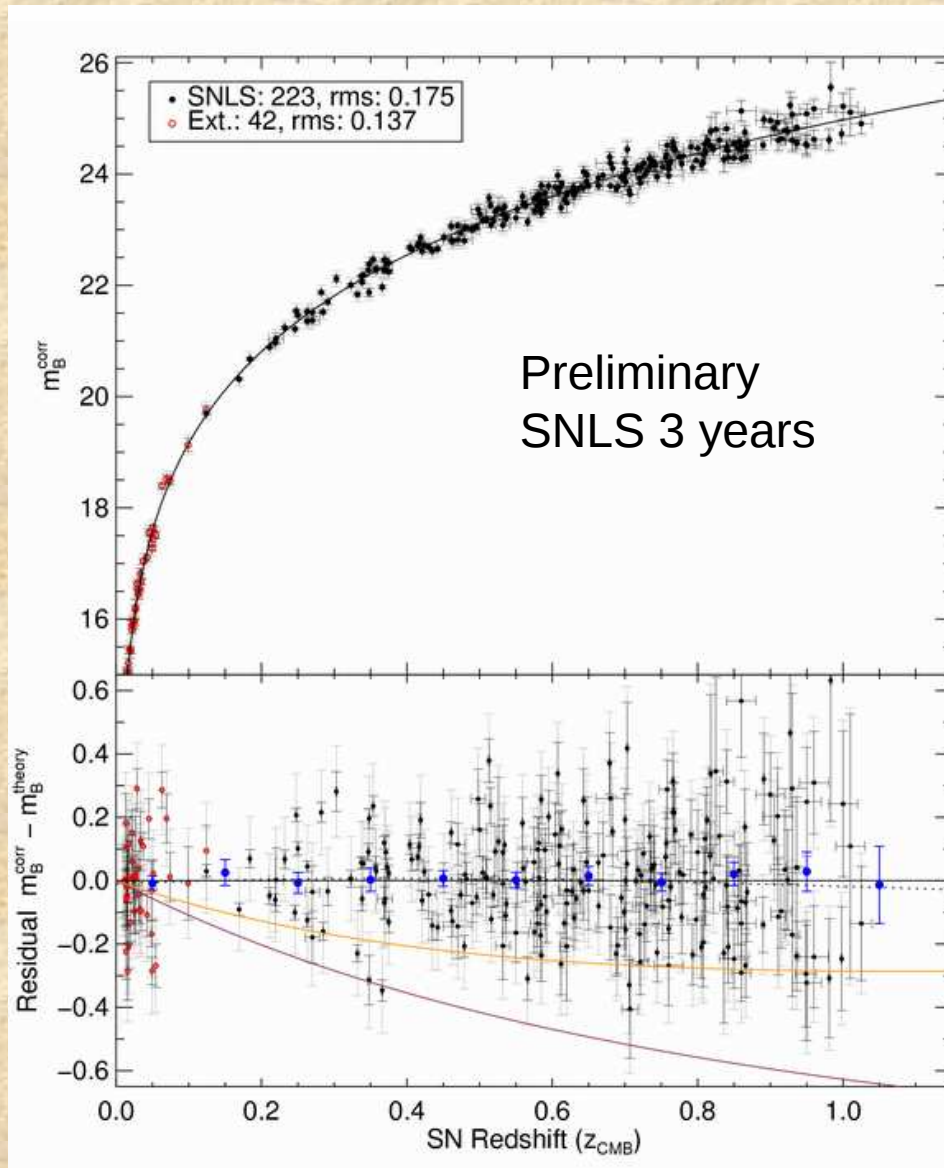
Source	$\sigma(\Omega_M)$ (flat)	$\sigma(\Omega_{tot})$	$\sigma(w)$	$\sigma(\Omega_M)$ (with BAO)	$\sigma(w)$
Zero-points	0.024	0.51	0.05	0.004	0.040
Vega spectrum	0.012	0.02	0.03	0.003	0.024
Filter bandpasses	0.007	0.01	0.02	0.002	0.013
Malmquist bias	0.016	0.22	0.03	0.004	0.025
Sum (sys)	0.032	0.55	0.07	0.007	0.054
Meas. errors	0.037	0.52	0.09	0.020	0.087
U-B color(stat)	0.020	0.10	0.05	0.003	0.021
Sum (stat)	0.042	0.53	0.10	0.021	0.090

Des mesures à tous les redshifts

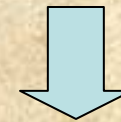
CFA(z=0.1) + SDSS(z=0.3) + essence (z=0.5) + SNLS(z=0.7)



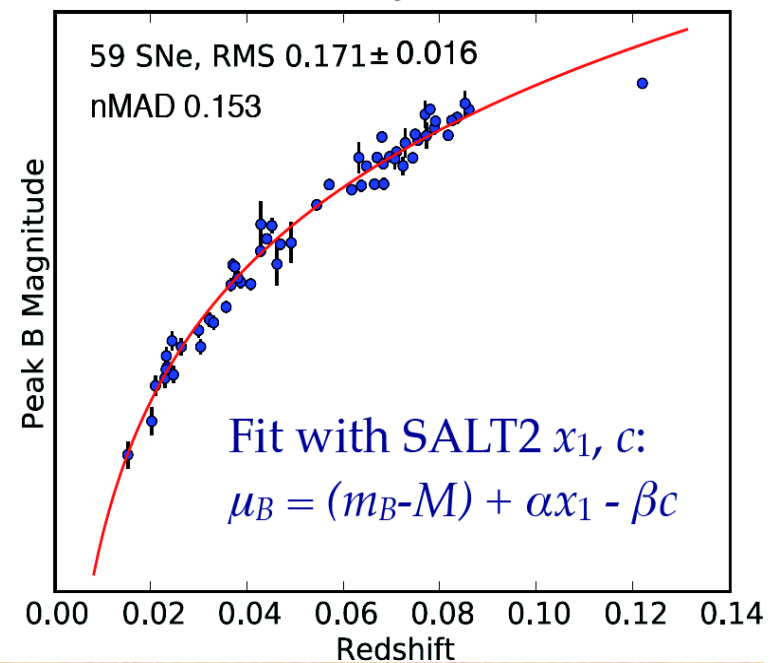
Futur proche : SNLS ! , SN Factory



SN Factory/SNIFS
Observations achevées

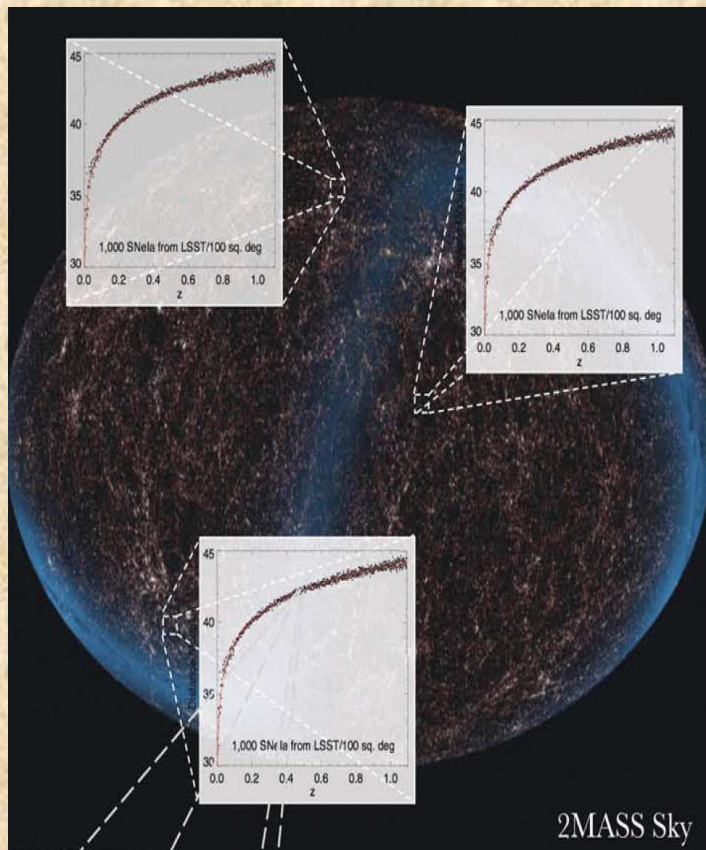


SNF Preliminary (2009-01-02)

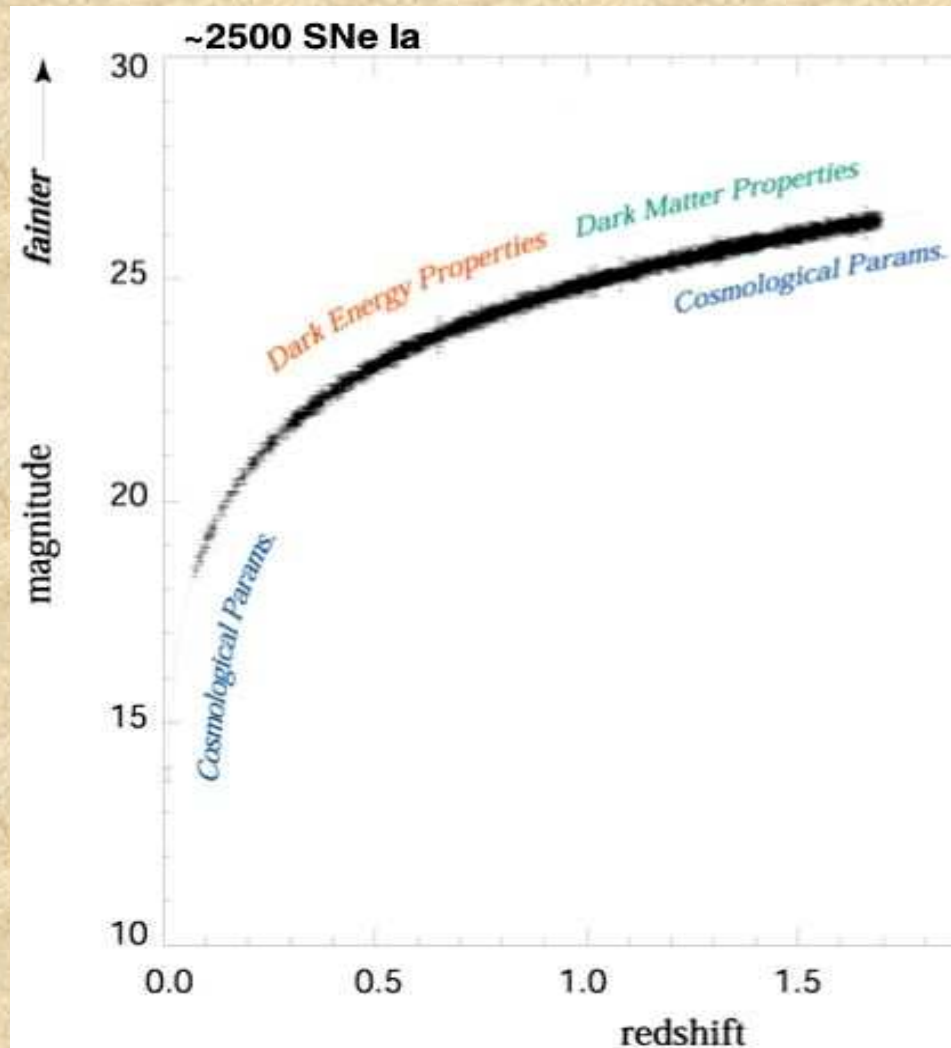


Futur des observations de supernovae

Sol : DES, Pan starr
puis
LSST



Espace : SNAP->JDEM->IDEM->IDECS->



Perspectives PP / C

□ Nouvelles Mesures de Physique des Particules

- Higgs, SUSY
- M, angles ν
- WIMPS
- ...

□ Nouvelles Mesures de Cosmologie

- Matière Noire
- Energie Noire
- M ν
- Gravitation
- ...


$$\sum m_\nu < 0.67 \text{ eV}$$

SN + BAO + WMAP

Convergence des deux modèles standard ?

