

Résultats récents de SNLS

V.Ruhlmann-Kleider
CEA/Irfu/SPP - Saclay



1. SNLS au CFHT
2. Cosmologie avec les SNe Ia
3. Les SNe Ia, chandelles standard ?
4. Sélection photométrique de SNe



CFHT

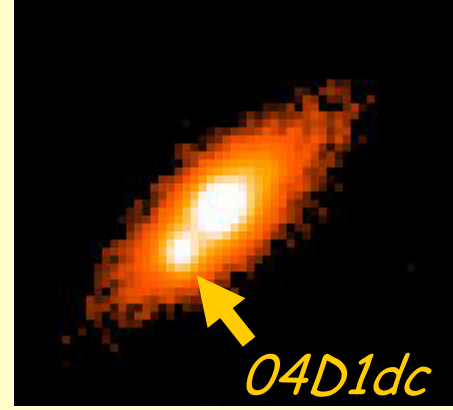
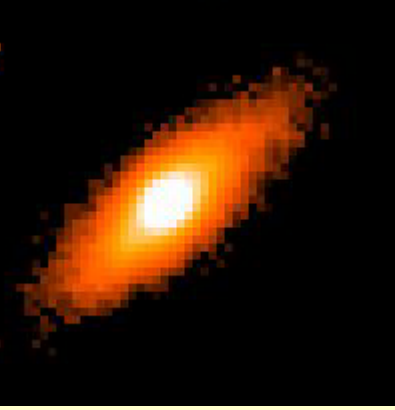
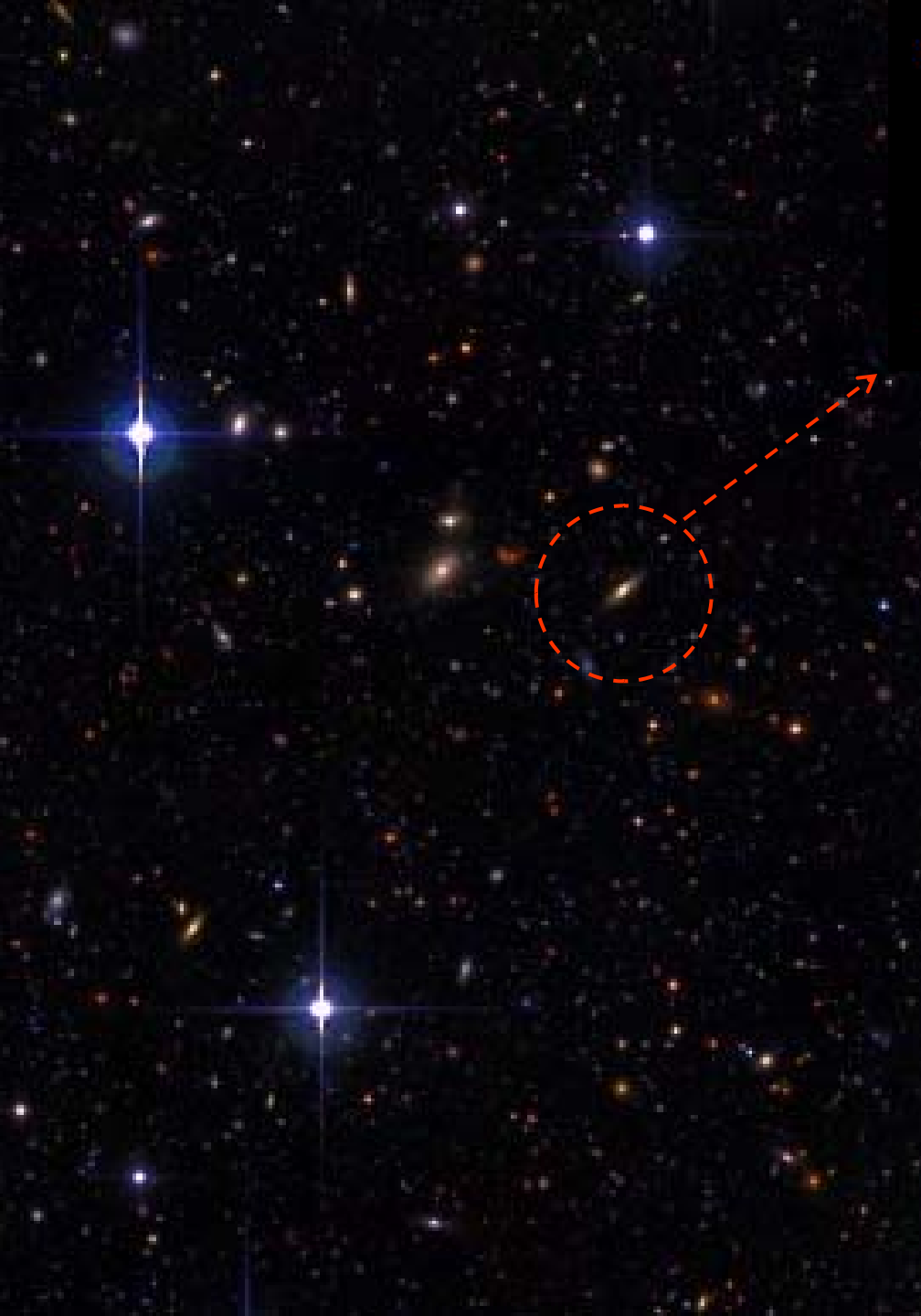


SNLS au CFHT (2003-2008)

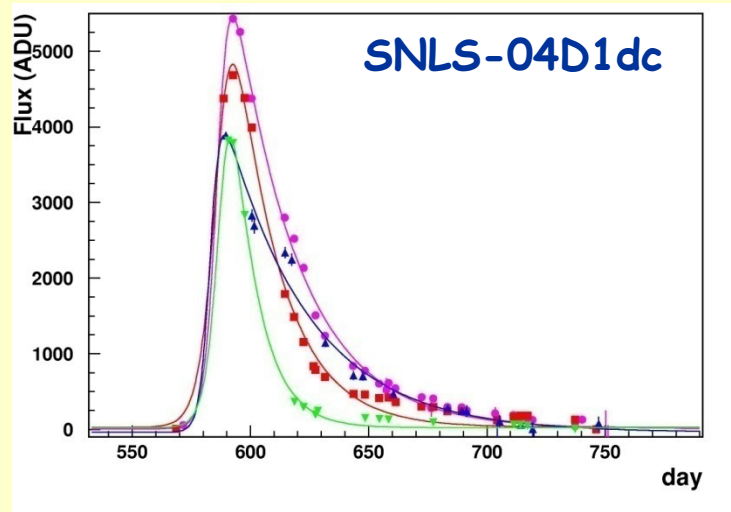


- Le relevé CFHTLS profond :
 - 4 champs de $1^\circ \times 1^\circ$
 - observations ttes les 3-4 nuits (6 mois/champ)

- MegaCam :
 - imageur CCD $1^\circ \times 1^\circ$
 - 340 millions de pixels
 - résolution: $0.18''$
 - 4 filtres (400-1000nm)

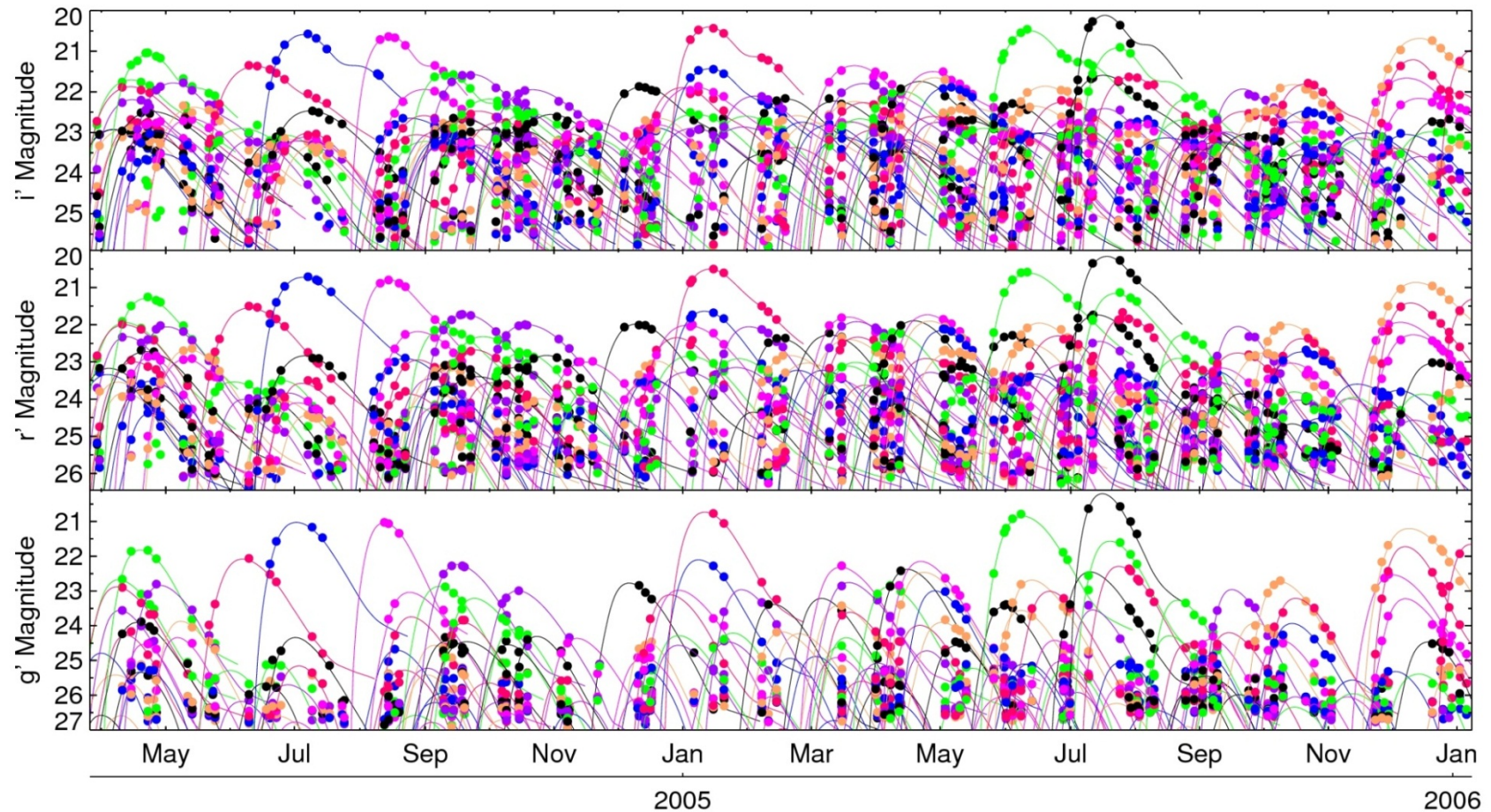


Courbe de lumière



- Spectroscopie: temps alloué sur télescopes de 8-10 m (VLT, Gemini, Keck)

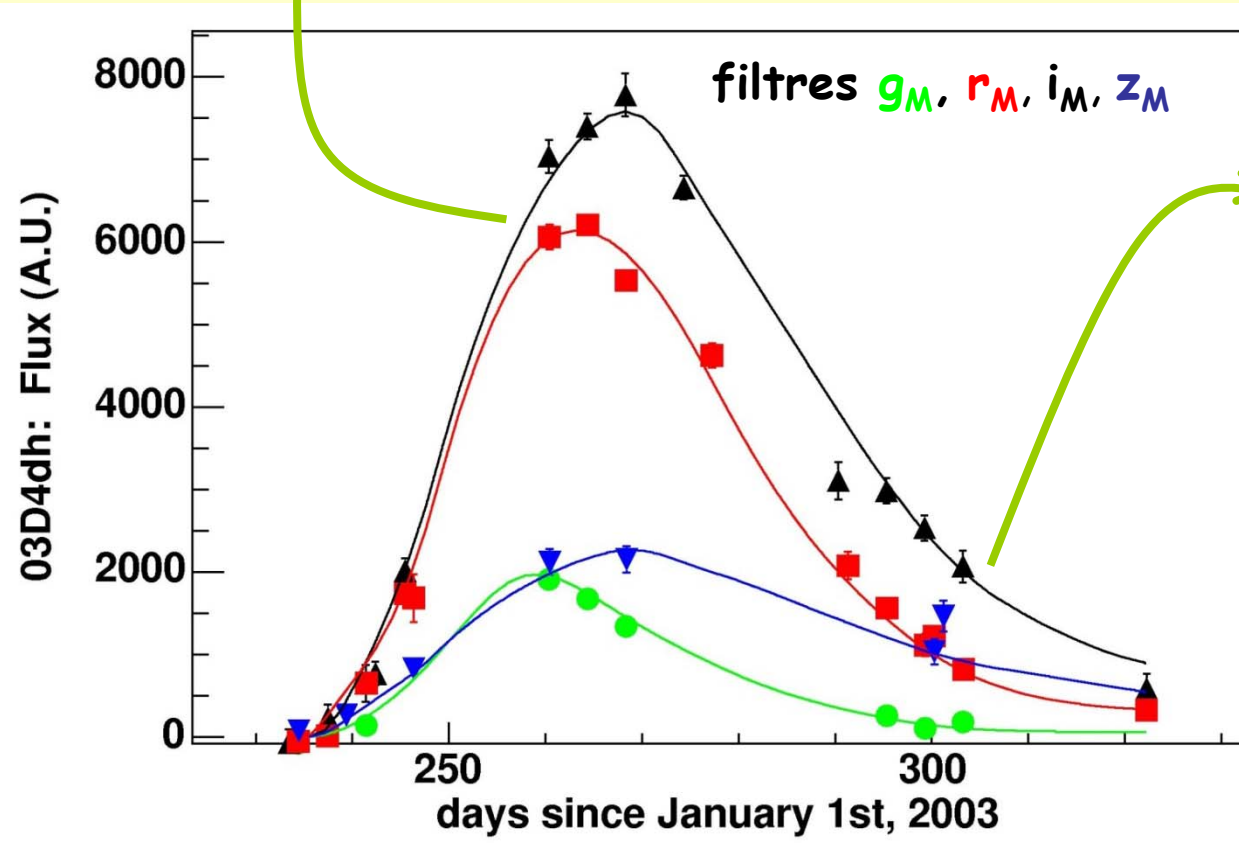
Stratégie "rolling search"



SNLS: 1000 SNe Ia ($0.1 < z < 1.2$), **500 confirmées** par spectres, échantillon **large et homogène**, haute précision photométrique

Cosmologie avec les SNe Ia

Spectroscopie déclenchée \Rightarrow type Ia confirmé, $z=0.627$



4 courbes
de lumière

test de compatibilité
avec modèle de SNIa
(entraîné sur courbes
et spectres de Ia)

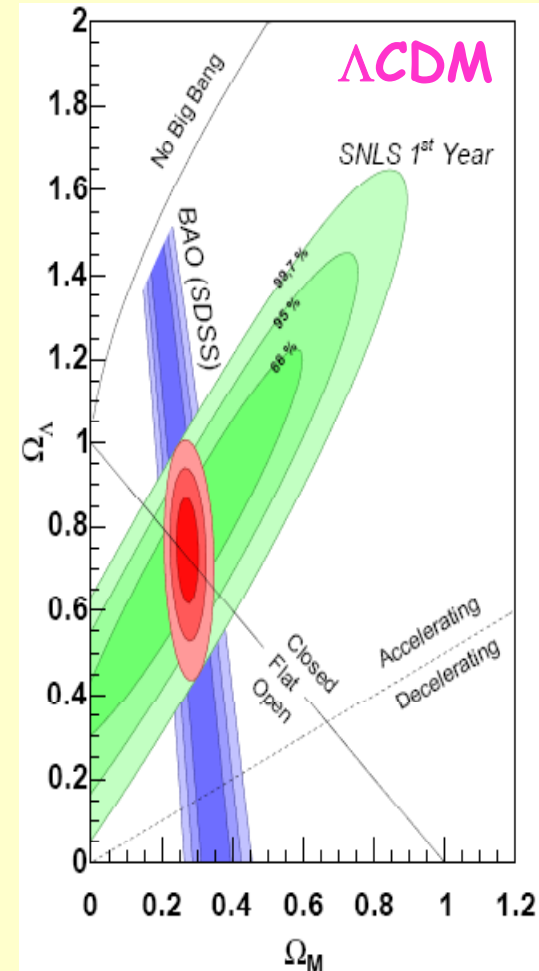
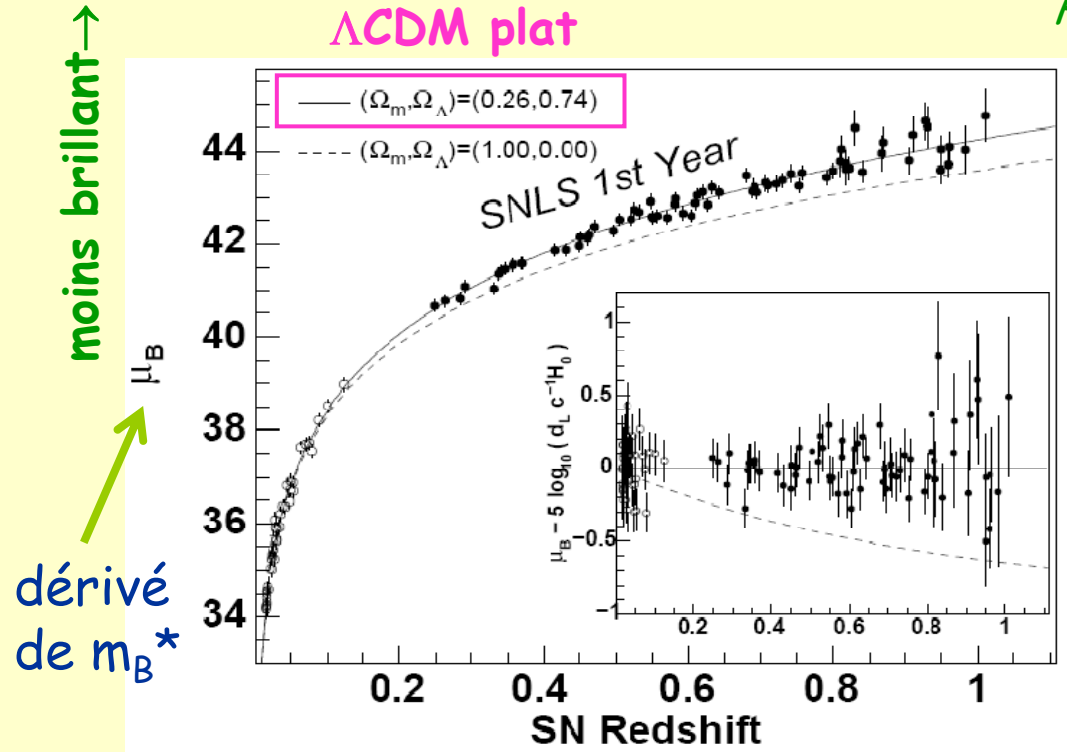
magnitude B apparente m_B^* , couleur (B-V) C et stretch s ou $X1$
 $\sim -2.5 \log_{10}(\mathcal{L} / 4\pi d_L^2)$

J. Guy et al., 2007, A&A, 466, 11

Résultats SNLS 1 an

P. Astier et al., 2006, A&A, 447, 31

Λ CDM plat



- 71 SNe SNLS + 44 SNe proches : expansion accélérée confirmée
- Résidus en μ_B : RMS = 0.19
- Λ CDM plat: $\Omega_M = 0.263 \pm 0.042 \pm 0.032$
système dominante: calibration photométrique

SNLS : de 1 à 3 ans

- **Calibration photométrique** revue:

- Contrôle de la réponse instrumentale
- Intercalibration Landolt/MegaCam
- Nouvelle étoile de référence

N.Regnault et al., 2009, A&A, 506, 999

- **Modélisation des SNe Ia** améliorée (méthode, données d'entraînement, loi de couleur, propagation des erreurs):

J.Guy et al., 2007, A&A, 466, 11 et A.Conley, 2008, ApJ, 681, 482

- Analyse fine et poussée des **systematiques** de SNLS (effets réévalués ou supplémentaires)

J.Guy et al., 2010, A&A, 523, A7 et K.Perrett, 2010, AJ, 140, 518

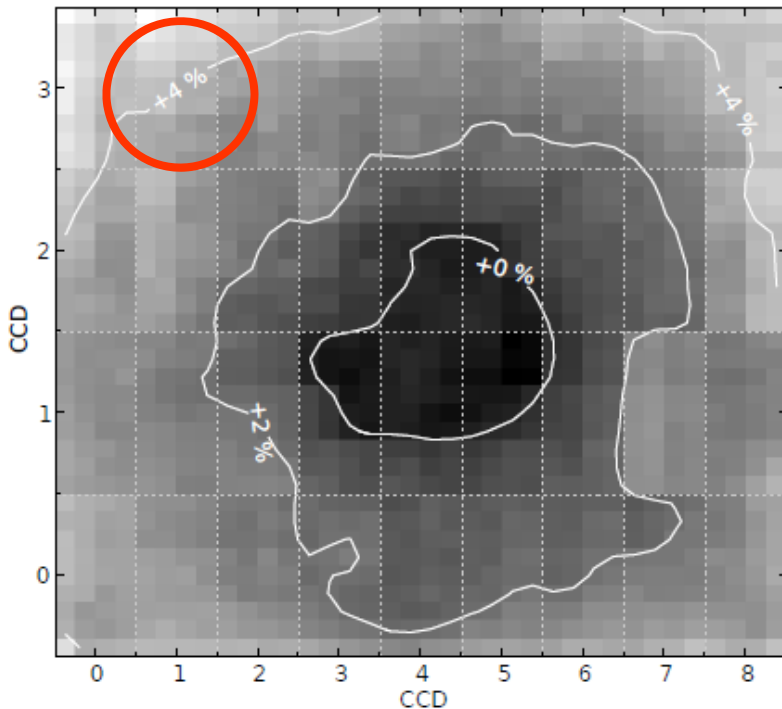
- **Autres lots de SNe Ia** revus et complétés (coupures de qualité, calibration relative, systematiques)

A.Conley et al., accepté pour publication dans ApJ

SNLS 3 ans: calibration

N.Regnault et al., 2009, A&A, 506, 999

- Corrections d'uniformisation de la réponse photométrique fournies par le CFHT : **non-uniformités résiduelles (4%)**
 - corrections réévaluées par SNLS



- Points zéro dérivés des étoiles de Landolt (cf. SNe proches):
 - intercalibration des systèmes Landolt / MegaCam ajustée **exclusivement** sur les données
- Etalon: Vega → **BD +17 4708**
 - $\text{mag}_{\text{Landolt}}$ et SED connus,
 $(B-V) \sim (B-V)_{\text{Landolt}} * (\sim 0.77)$

Magnitudes des étoiles tertiaires:

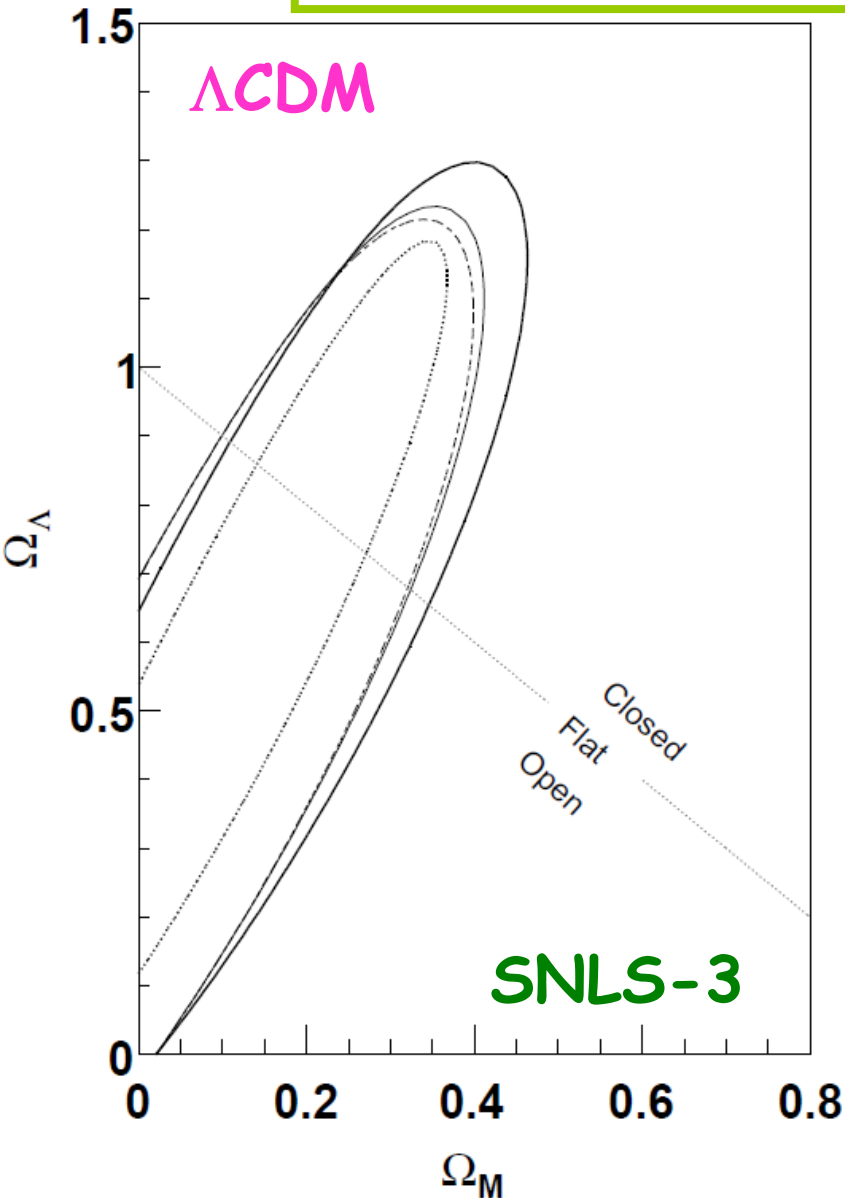
$$\delta_{\text{stat}} < 0.006 \text{ mag et } \delta_{\text{syst}} < 0.007 \text{ mag en } g_M, r_M, i_M \text{ et } \sim 0.019 z_M$$

Table 12. Summary of the systematic uncertainties affecting the calibrated magnitudes and fluxes.

	g_M	r_M	i_M	z_M
Aperture corrections	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Background subtraction	< 0.001	< 0.001	± 0.005	< 0.001
Shutter precision	± 0.0015	± 0.0015	± 0.0015	± 0.0015
Linearity	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Second order airmass corrections	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Grid Reference Colors	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Grid Color Corrections	< 0.001	< 0.001	± 0.002	< 0.001
Landolt catalog	± 0.001	± 0.001	± 0.001	± 0.002
Magnitudes of BD +17 4708	± 0.002	± 0.004	± 0.003	± 0.018
Total	± 0.003	± 0.004	± 0.006	± 0.018
SED of BD +17 4708	± 0.001	± 0.002	± 0.004	± 0.007
Total	± 0.003	± 0.005	± 0.007	± 0.019

- **Futur:** programme de calibration absolue de MegaCam (MAPC): observations des champs SNLS, d'étoiles étalon et des champs stellaires de SDSS
 \Rightarrow calibration MegaCam/SDSS, indépendante du système Landolt

SNLS 3 ans : données SNLS seules



- SNLS 3 ans: 285 SNe Ia, 242 après coupures de qualité

- Λ CDM plat:

$$\Omega_m = 0.211 \pm 0.034 \pm 0.069$$

- Systématiques:

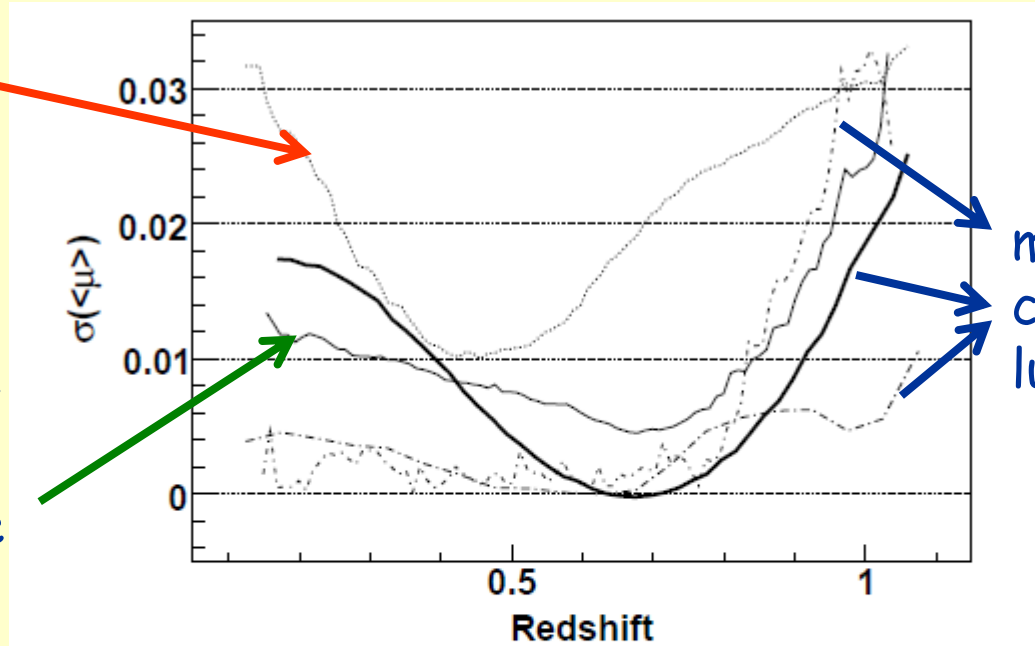
- modélisation LC	δ_{Ω_m}	0.026
- δ_{stat} lot d'entraînement		0.034
- calibration photométrique		0.048
- évolution potentielle en β		0.022
- dispersion résiduelle		0.010
- corr. biais de Malmquist		0.004
- corrélation SN-hôte		0.003

δ_{syst} sur module de distance μ dans les données SNLS 3ans

$\sigma(\mu)=0.04$ 0.02 0.06

calibration
photométrique

δ_{stat} entraînement
du modèle de
courbe de lumière

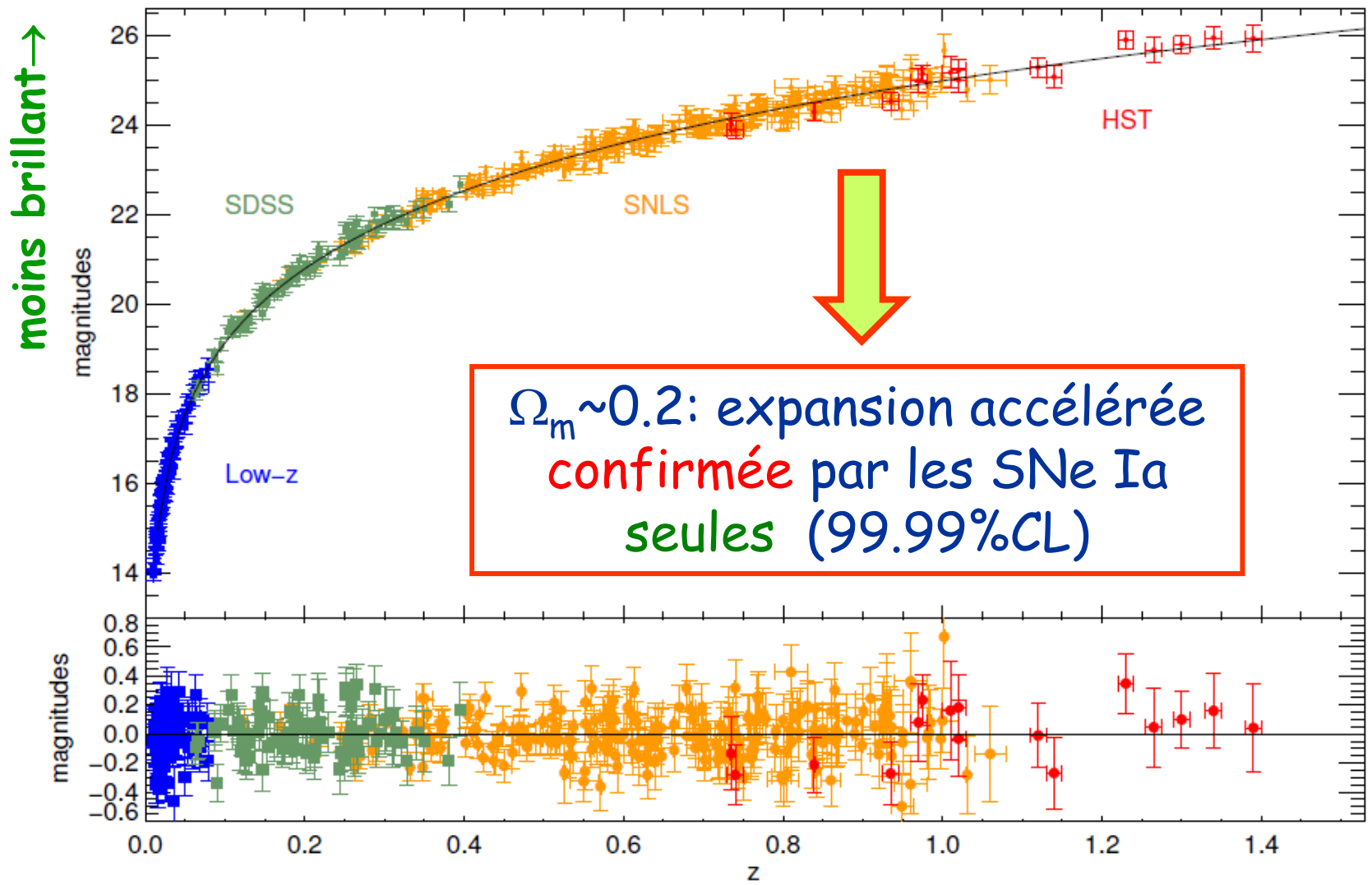


modélisation des
courbes de
lumière

Fig. 16 Uncertainties on the average distance modulus μ in redshift bins of 0.2: impact of the statistical uncertainty of the training (for SALT2, thin solid curve), calibration uncertainties (dotted curve), residual scatter model (dotted short dashed curve), systematic uncertainty due to SALT2 regularisation (dotted long dashed curve) and differences between results obtained with the two light curve fitters (thick solid curve). Values of α and β that minimise residuals from the Hubble diagram were used.

J. Guy et al., 2010, A&A, 523, A7

SNLS 3 ans : toutes données SNe Ia



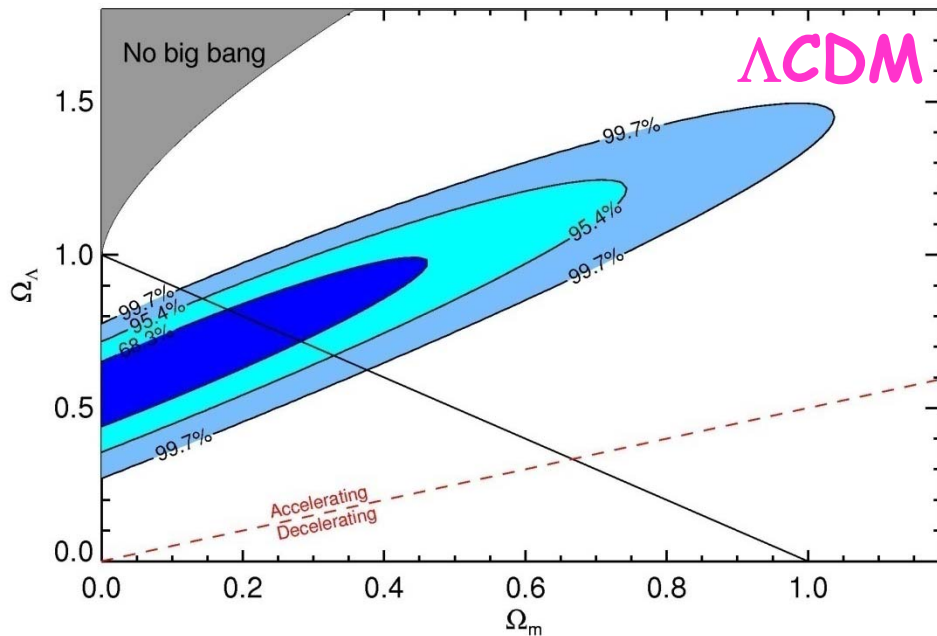
A. Conley et al., accepté par ApJ

472 SNe Ia de haute qualité, résidus SNLS: $RMS=0.16$

Ajustements cosmologiques : données SNe Ia

A. Conley et al., accepté par ApJ

- δ_{stat} et δ_{syst} combinés (avec **corrélations**)
- meilleur contrôle des **systematiques** (calibration photométrique, modélisation des courbes des SNIa)

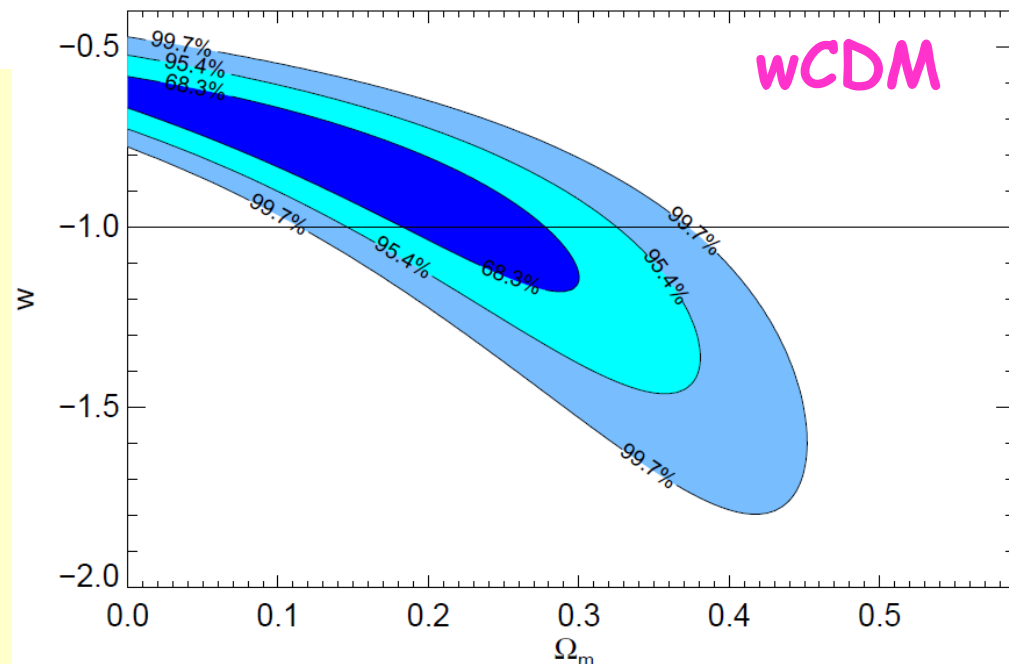


$$\Omega_m = 0.183^{+0.096}_{-0.102}$$

$$w = -0.91^{+0.17}_{-0.24}$$



NB: SNLS 1 an, SNe Ia seules : $w < -0.5$ (95% CL)



Systematiques

Description	Ω_m	w	Rel. Area ^a	w for $\Omega_m=0.27$	Section
Stat only	$0.19^{+0.08}_{-0.10}$	$-0.90^{+0.16}_{-0.20}$	1	-1.031 ± 0.058	
All systematics	0.18 ± 0.10	$-0.91^{+0.17}_{-0.24}$	1.85	$-1.08^{+0.10}_{-0.11}$	§4.4
Calibration	$0.191^{+0.095}_{-0.104}$	$-0.92^{+0.17}_{-0.23}$	1.79	-1.06 ± 0.10	§5.1
SN model	$0.195^{+0.086}_{-0.101}$	$-0.90^{+0.16}_{-0.20}$	1.02	-1.027 ± 0.059	§5.2
Peculiar velocities	$0.197^{+0.084}_{-0.100}$	$-0.91^{+0.16}_{-0.20}$	1.03	-1.034 ± 0.059	§5.3
Malmquist bias	$0.198^{+0.084}_{-0.100}$	$-0.91^{+0.16}_{-0.20}$	1.07	-1.037 ± 0.060	§5.4
non-Ia contamination	$0.19^{+0.08}_{-0.10}$	$-0.90^{+0.16}_{-0.20}$	1	-1.031 ± 0.058	§5.5
MW extinction correction	$0.196^{+0.084}_{-0.100}$	$-0.90^{+0.16}_{-0.20}$	1.05	-1.032 ± 0.060	§5.6
SN evolution	$0.185^{+0.088}_{-0.099}$	$-0.88^{+0.15}_{-0.20}$	1.02	-1.028 ± 0.059	§5.7
Host relation	$0.198^{+0.085}_{-0.102}$	$-0.91^{+0.16}_{-0.21}$	1.08	-1.034 ± 0.061	§5.8

^aArea relative to statistical only fit of the contour enclosing 68.3% of the total probability.

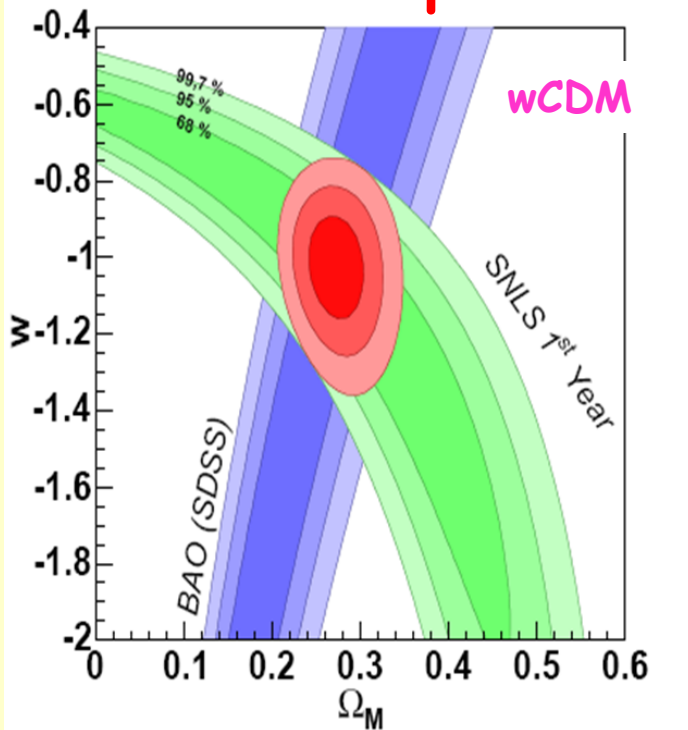
Note. — Results including statistical and identified systematic uncertainties broken down into categories. In each case the constraints are given including the statistical uncertainties and only the stated systematic contribution. The importance of each class of systematic uncertainties can be judged by the relative area compared with the statistical-only fit.

A.Conley et al., accepté par ApJ

SNLS 3 ans: ajustements combinés

M. Sullivan et al., en préparation

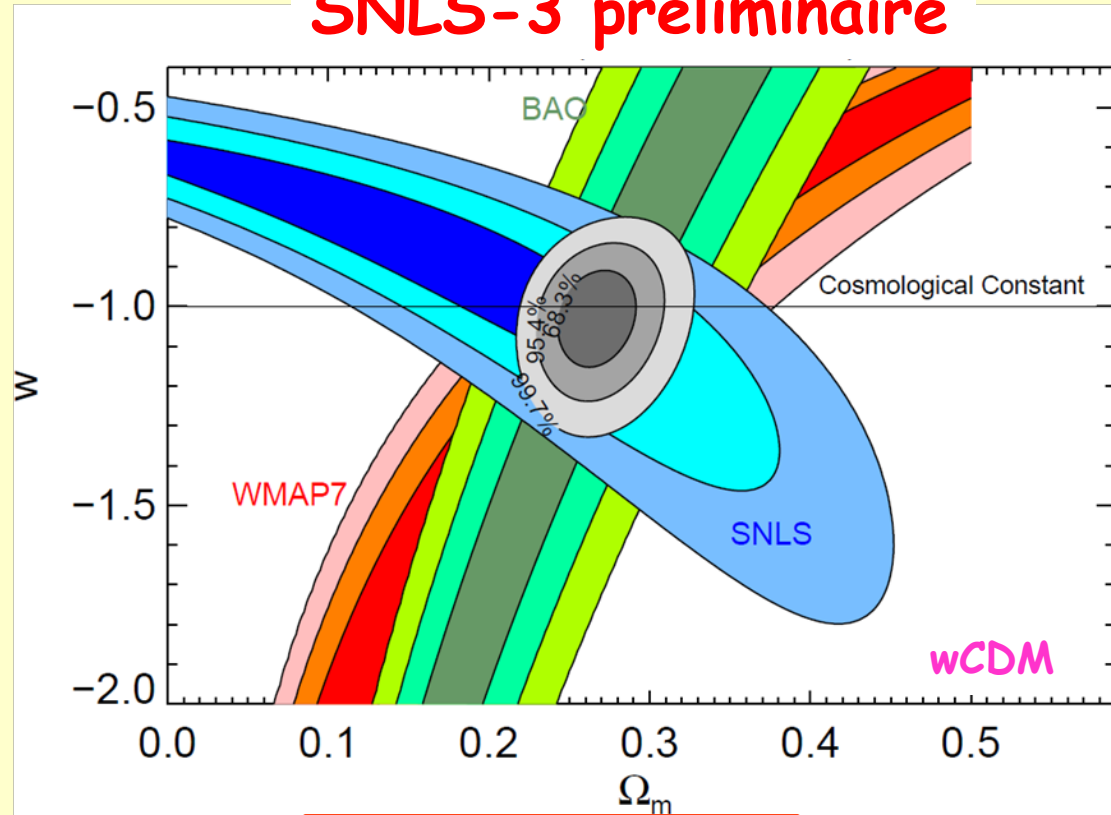
SNLS-1 publié



$$\Omega_m = 0.271 \pm 0.042 \pm 0.032$$

$$w = -1.023 \pm 0.090 \pm 0.054$$

SNLS-3 préliminaire



$$\Omega_m = 0.268^{+0.018}_{-0.015}$$

$$w = -1.032^{+0.078}_{-0.081}$$

$(\delta_{\text{stat}} \oplus \delta_{\text{syst}})$

Les SNe Ia, chandelles standard ?

- Hypothèse: SNe Ia = chandelles standard

luminosité reproductible

m_{B^*} tiré de $\Phi_B^* \cong \mathcal{L}(c,s)/4\pi d_L^2$ et $d_L(z, H_0, \Omega_M, \Omega_\Lambda, w, \dots)$

- Estimateur de distance: modèle empirique

$$\mu_B = m_{B^*} - M_B + \alpha(s-1) - \beta c$$

magnitude au pic
apparente au repos
dans le B

magnitude
absolue dans le B

variabilité de la forme
de la courbe de lumière

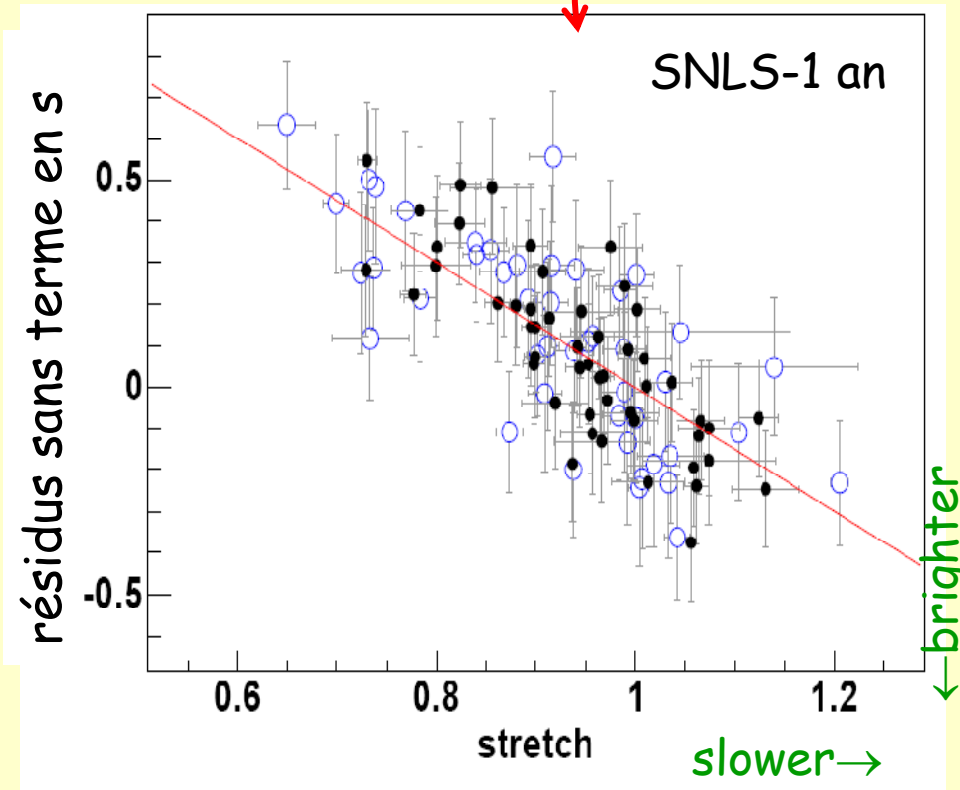
variabilité en couleur
(B-V) (variation
intrinsèque et extinction)

Relations luminosité - stretch - couleur

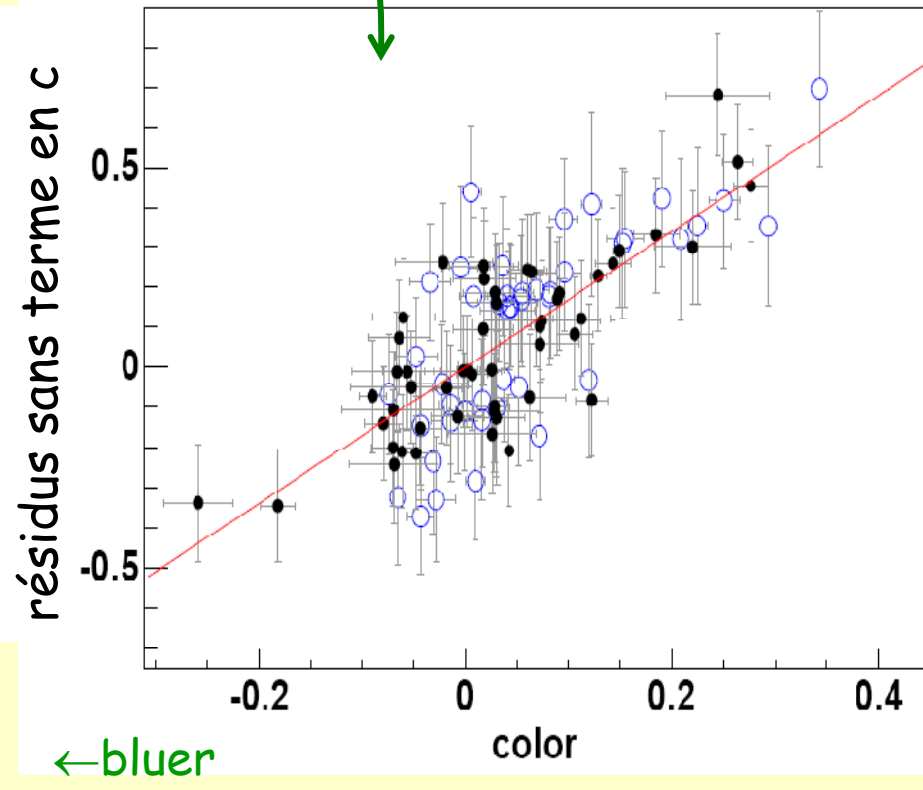
$$m_B^* - M_B + \alpha(s-1) - \beta c - 5 \log_{10}(d_L^{\text{fit}} H_0 c^{-1})$$

○ : $z < 0.15$

● : $z > 0.15$



relation "brighter-slower"



relation "brighter-bluer"

- Hypothèses sur la dérivation du module de distance:

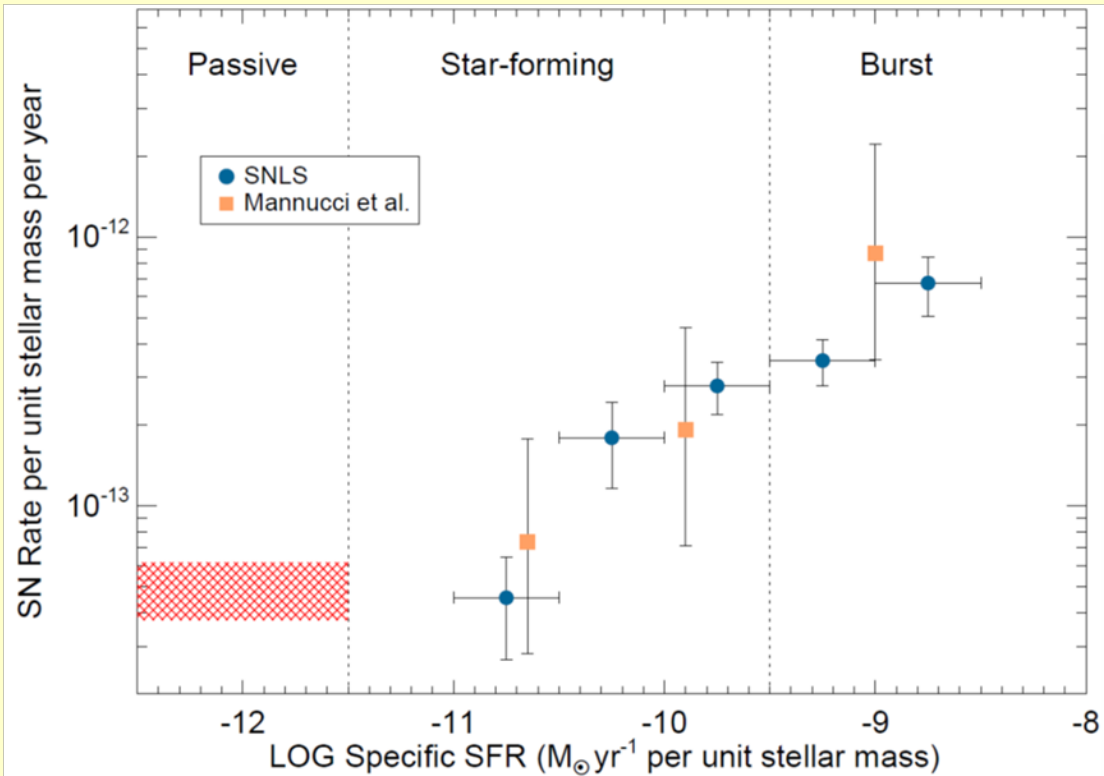
$$\mu_B = m_B^* - \underbrace{M_B + \alpha(s-1) - \beta c}$$

M_B, α, β supposés indépendants de z et suffisants

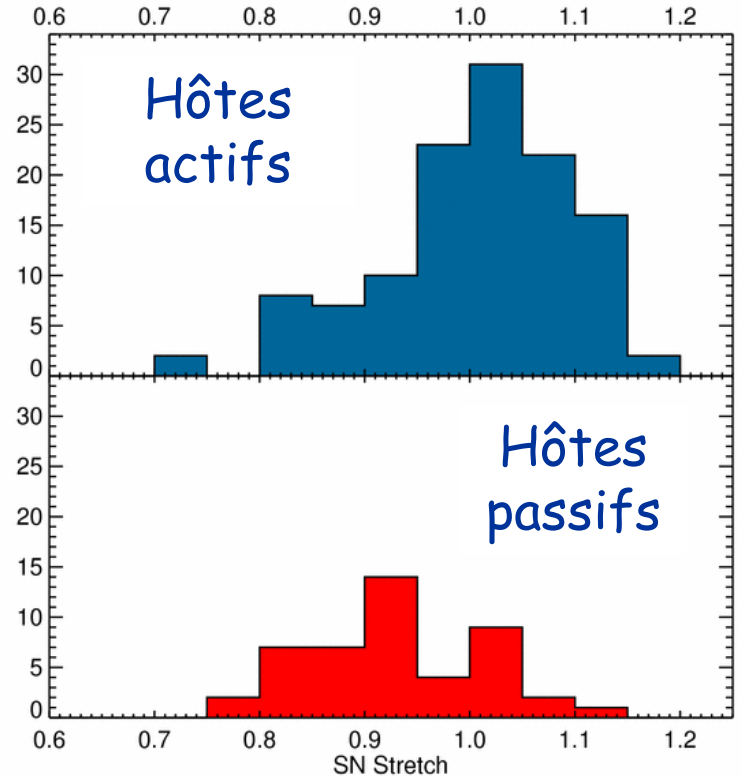


- Tests de cohérence: comparaison des propriétés des SNe Ia en fonction du décalage spectral et des propriétés de la galaxie-hôte

SNe Ia et galaxies-hôtes



Relation stretch des SNe vs activité de l'hôte



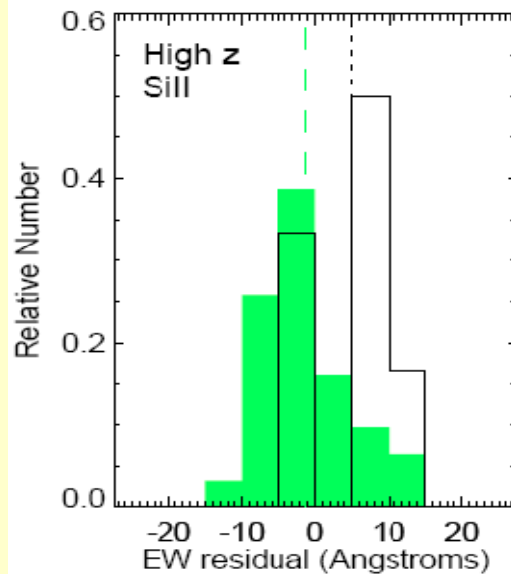
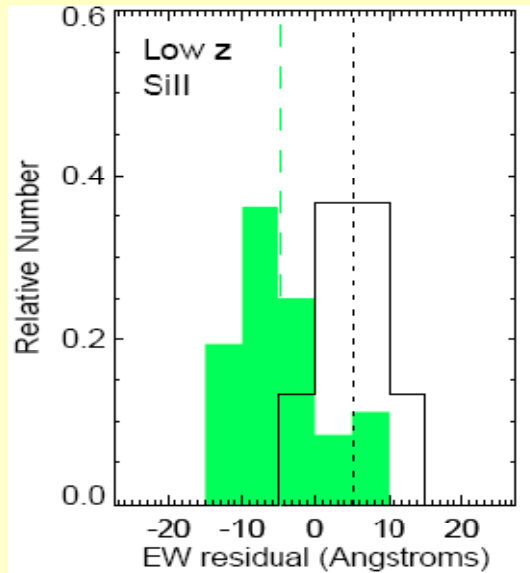
M. Sullivan et al., ApJ 648 (2006) 868

(SNLS-2ans)

Les SNe Ia les **plus longues** (donc les **plus brillantes**), apparaissent surtout dans les galaxies à **fort taux de formation stellaire**.

NB: **pas** d'effet significatif observé pour la couleur des SNe

Corollaires spectroscopiques



Distribution de la largeur équivalente en
SiII (résidus / bas z)
□ E/S0 ■ Spirales

Largeurs équivalentes **moins élevées** dans
les galaxies de type **tardif** (∇z) i.e. à **fort**
taux de formation stellaire.

Dans ces galaxies, les SNe Ia sont **plus**
brillantes \Rightarrow milieu plus chaud donc **plus**
ionisé \Rightarrow **moins** d'éléments de masse
intermédiaire (Ca, Si).

Modèle de taux de SNe Ia à deux composantes ¹

$$\text{SNR}_{\text{Ia}}(t) = A \underbrace{M_{\text{tot}}}_{\text{masse stellaire galactique}} + B \underbrace{dM/dt(t)}_{\text{SFR}}$$

masse stellaire galactique

étoiles âgées

galaxies évoluées

SFR

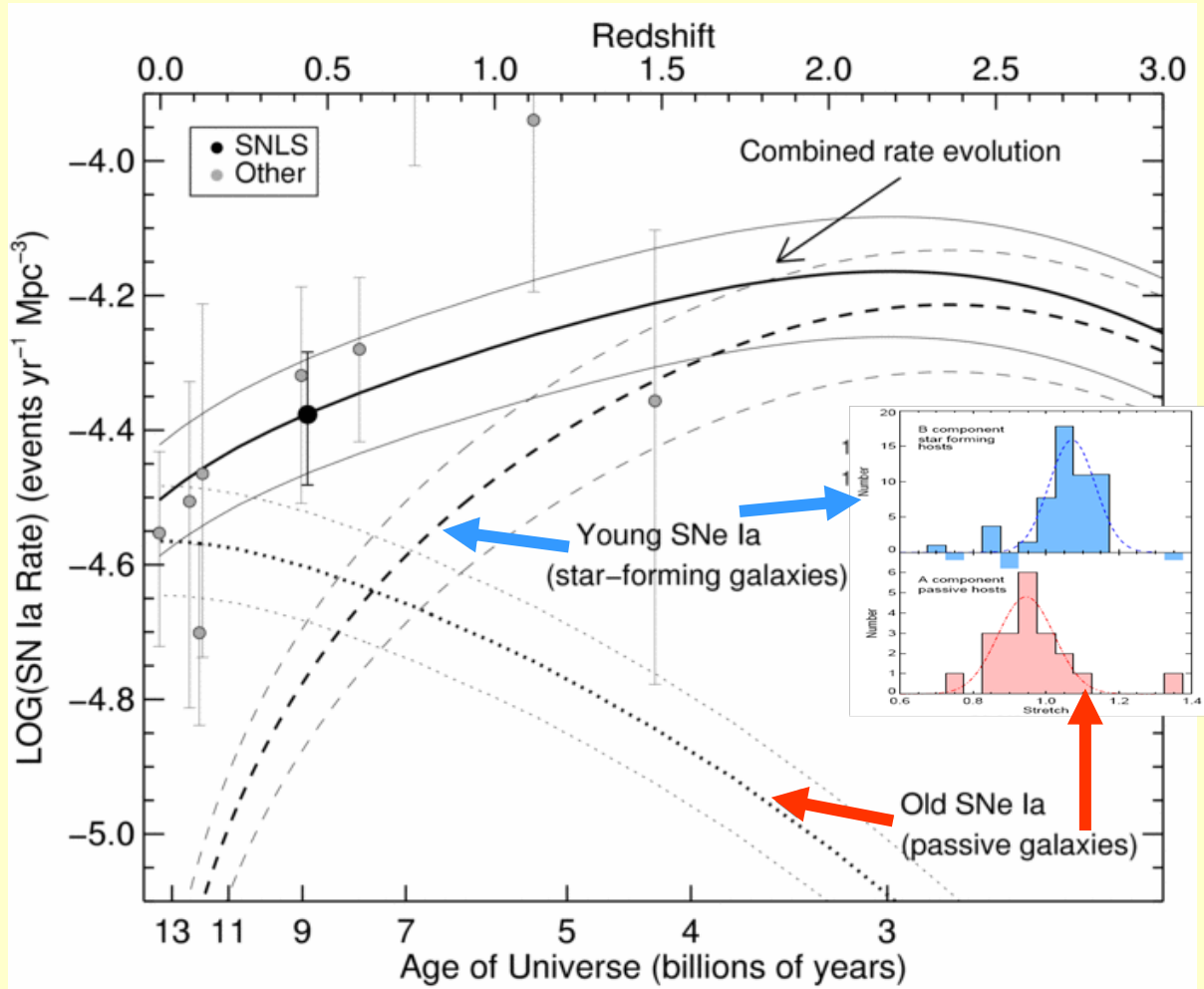
SNe rapides

galaxies formant des
étoiles

1. A et B ajustés sur les données SNLS
2. Valeurs de A, B ajustées et modèle de SFR(z) ² pour prédire le taux en fonction du redshift
3. Comparaison taux prédit avec mesures

¹Scannapieco, Bildsten (2005) ² Cosmic SFH from Hopkins & Beacom (2006)

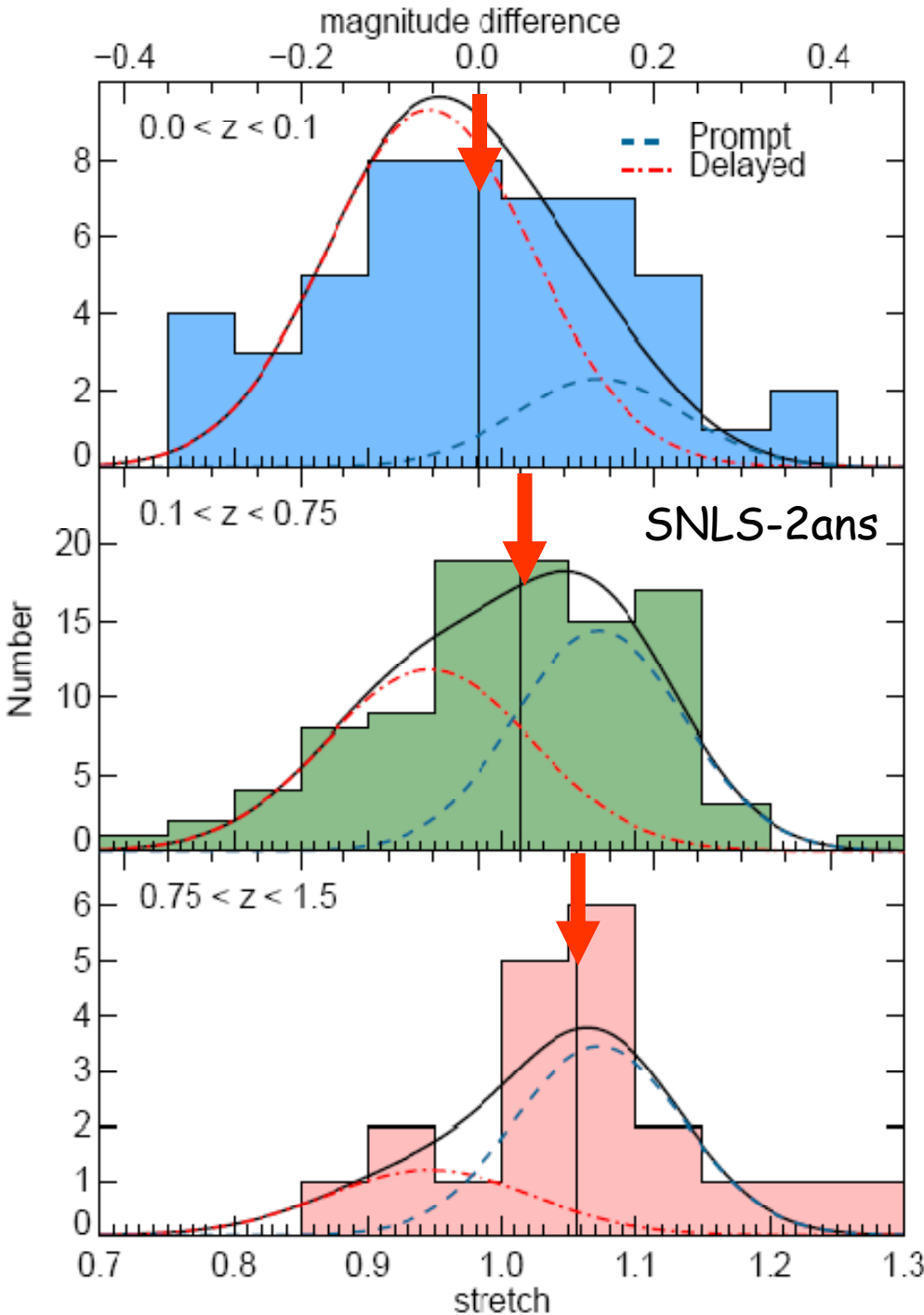
Taux de SNe Ia à deux composantes



Proportions
relatives des deux
populations de SNe
Ia évoluent avec z
(évolution
démographique)

↓
stretch moyen
des SNe Ia
évolue avec z

M. Sullivan et al., ApJ 648 (2006) 868



Evolution du stretch avec z :
prédictions = data

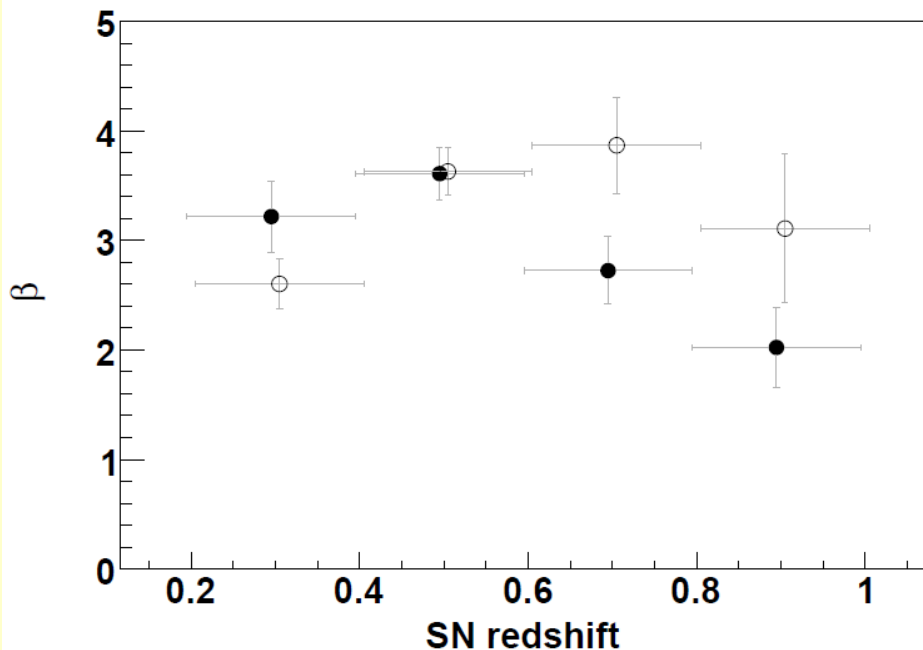
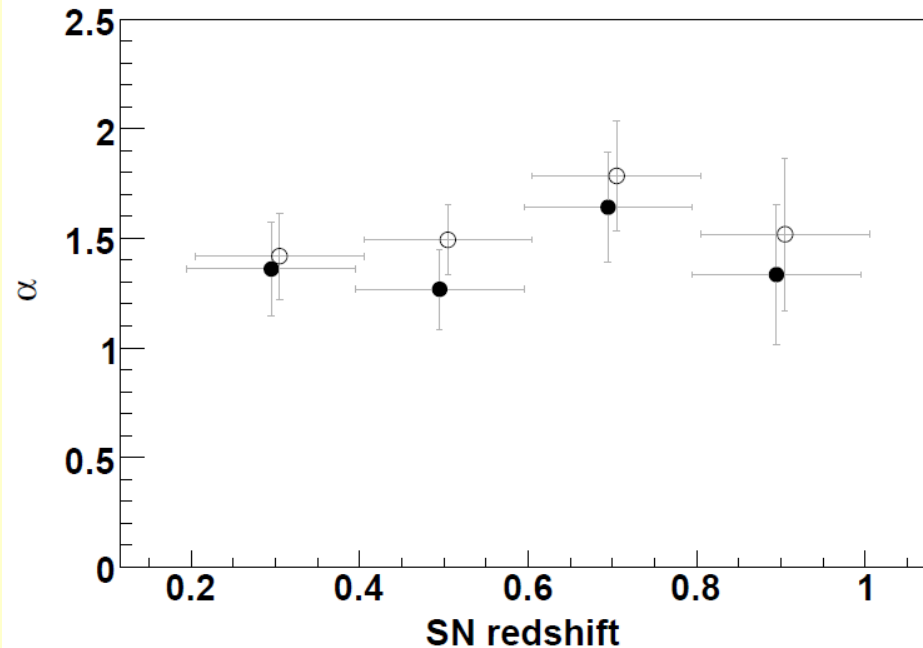
$\langle \text{stretch} \rangle + 8\%$ pour $z=0.03-1.12$
 $\langle \text{brillance intrinsèque} \rangle + 12\%$

Si α est le même pour les
deux populations de SNe
Ia, pas d'effet sur la
cosmologie

Rappel:

α = correction de luminosité due à la
forme de la courbe de lumière

Résultats SNLS 3 ans



J. Guy et al., 2010, A&A, 523, A7

■ Pas d'évolution de α

■ Possible évolution de β

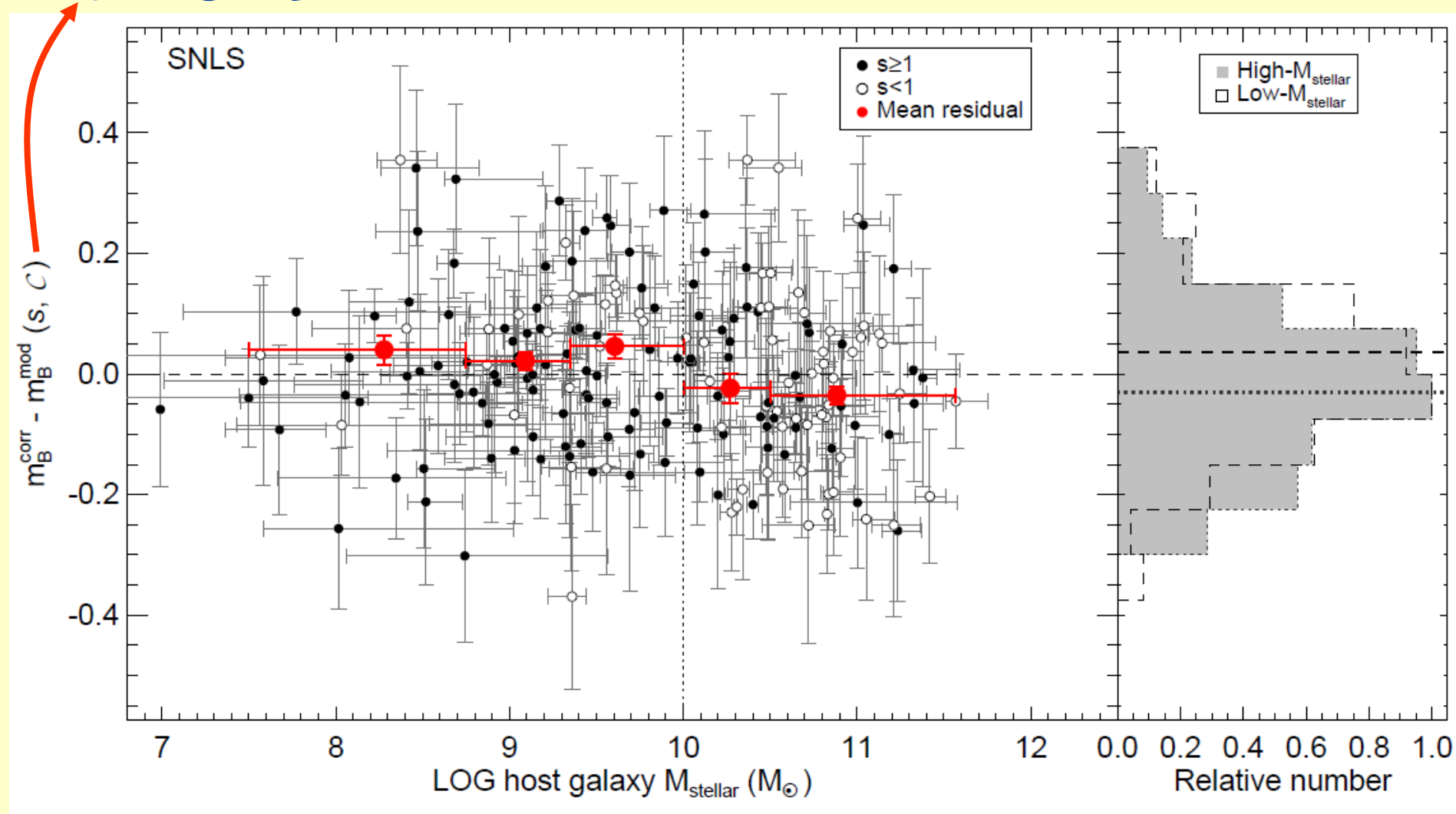
→ incluse dans les systématiques

→ cause probable: incertitude sur la modélisation des couleurs des SNe Ia

● SALT2 LC fitter

○ SiFTO LC fitter

$$\mu_B - 5 \log_{10} d_L$$



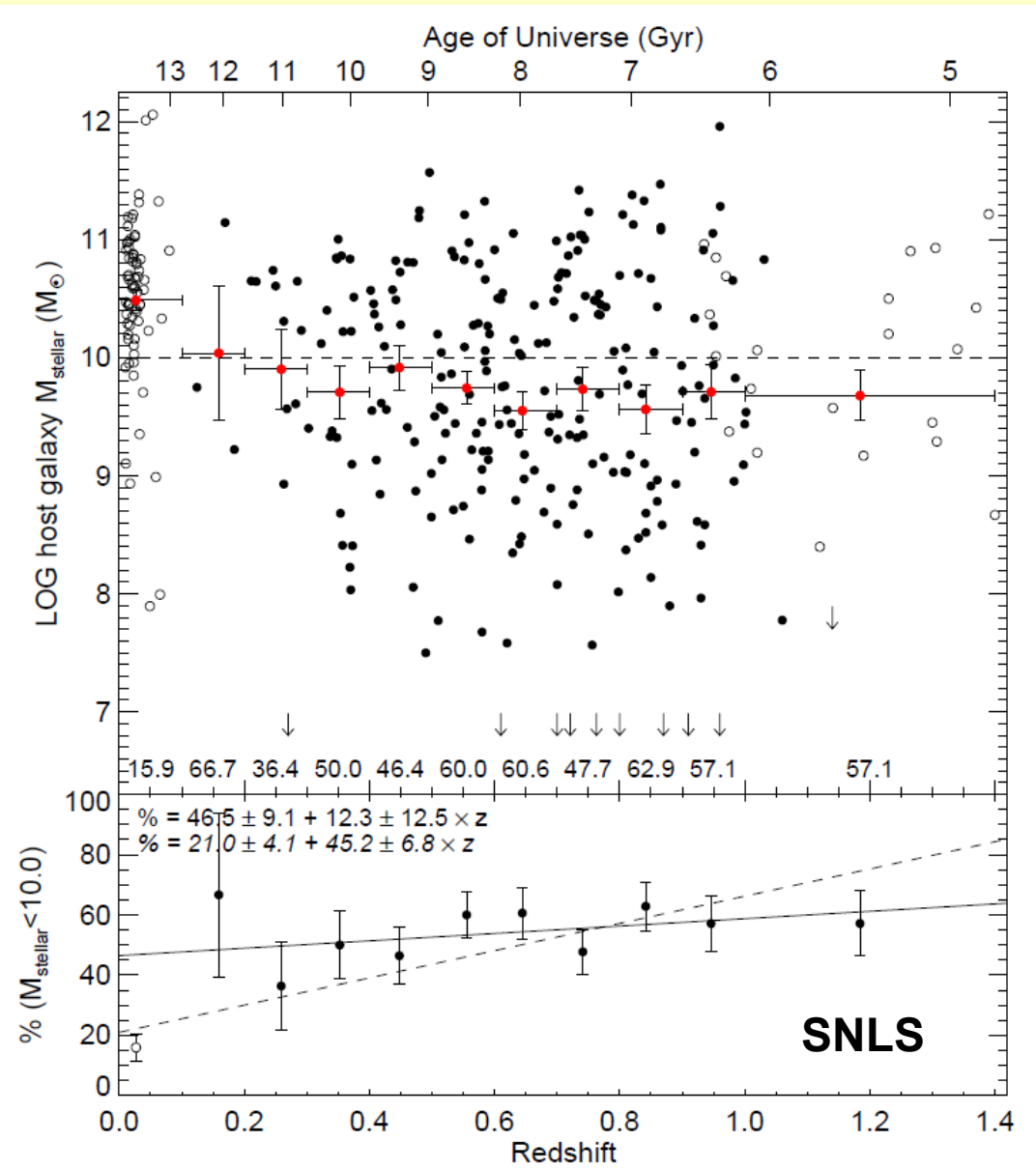
La luminosité des SNe Ia corrigée en s, c dépend de la masse de la galaxie-hôte: les SNe Ia dans les galaxies massives (à métallicité plus élevée) sont plus brillantes ($>3\sigma$)

Population de SNe Ia
d'hôtes différents
évolue avec z
(effet démographique)



Pour éviter de biaiser les
analyses cosmologiques:
terme correctif
supplémentaire dans μ_B
 $M_B(\text{hôte})$

NB: sans correction: $\Delta_w \sim 1\sigma$

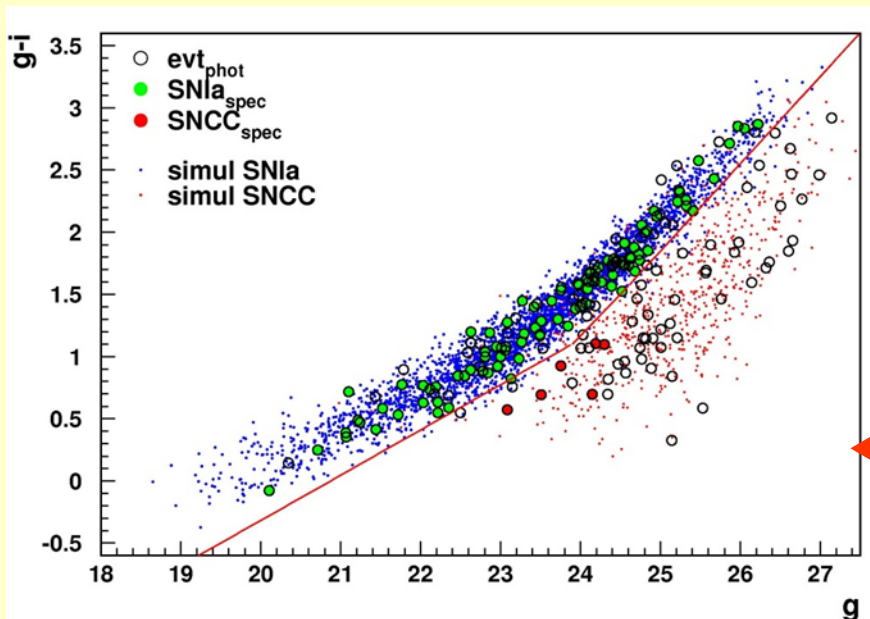
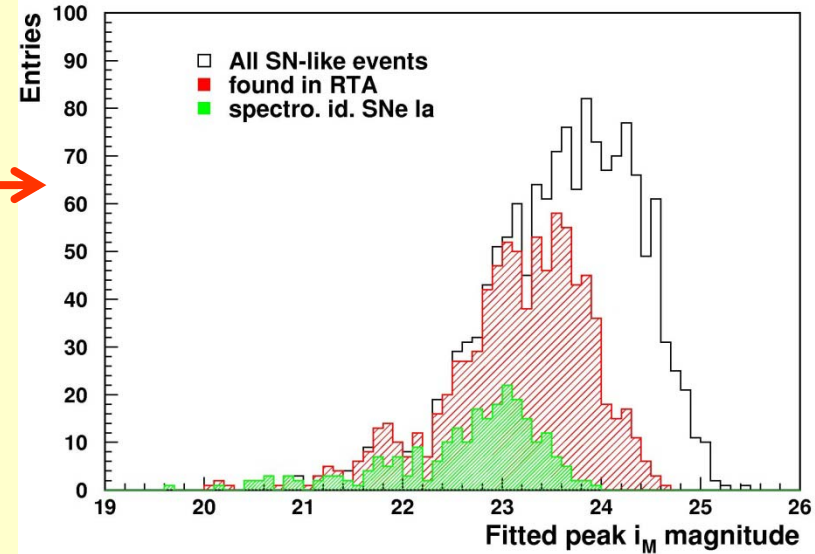


M. Sullivan et al., 2010, MNRAS 406, 782

Sélection photométrique de SNe

- Analyse différée des données de SNLS-3ans:

Détections en i ($0.1 < z < 1.1$)	300 000
Rejet bruit, étoiles, AGNs	1483
Association avec galaxie hôte de z connu	1233

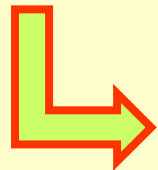


- Ajustement par modèle de SNIa au z_{gal} et coupures sur χ^2 , stretch, couleur, couleur-magnitude

Sélection SNIa photométrique à z connu (galaxie-hôte):

- efficacité : 80%
- contamination SNe CC : 4%
- **485** SNe Ia (SNLS-3ans)

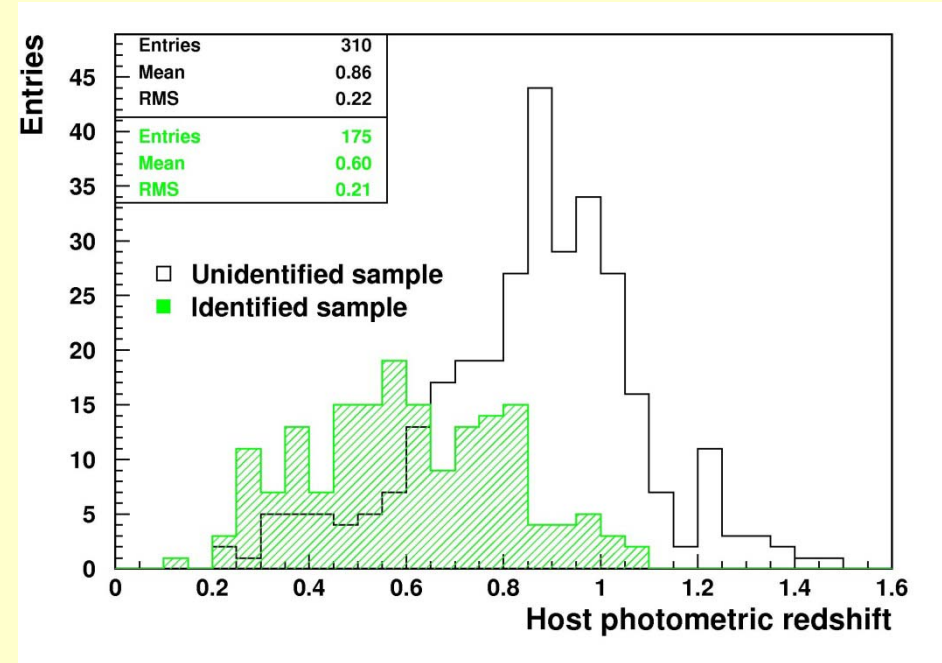
Application:



biais de la sélection spectroscopique ($0.8 < z < 1.05$):

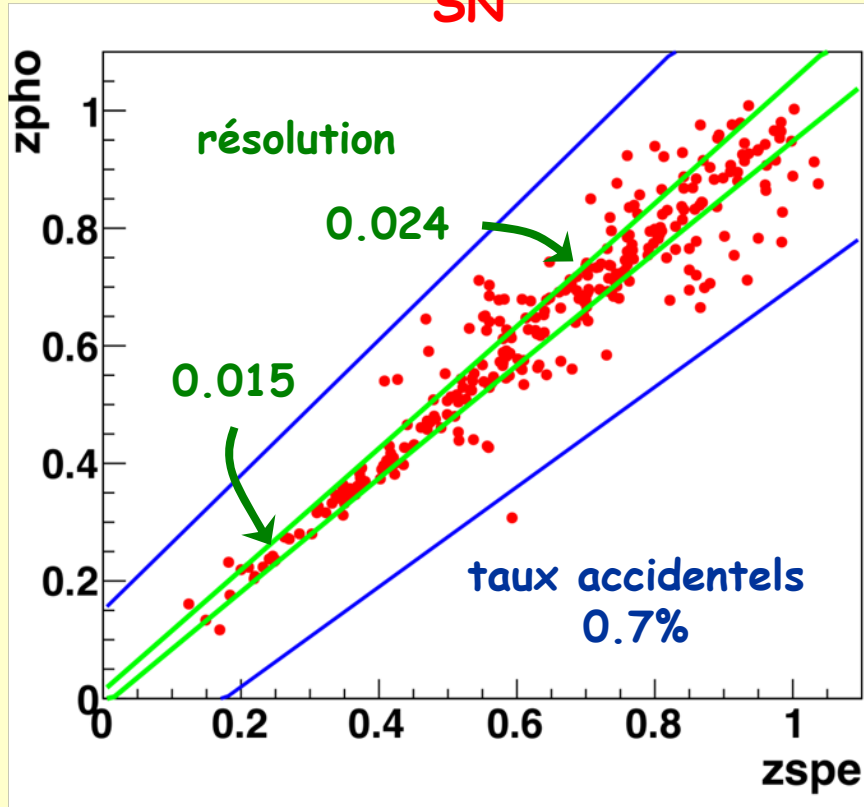
$$\Delta\mu_B = -0.044 \pm 0.036(\text{stat})$$

Confirme **avec les données** l'estimation (plus précise) de SNLS issue des simulations et utilisée pour les résultats cosmologiques 3 ans



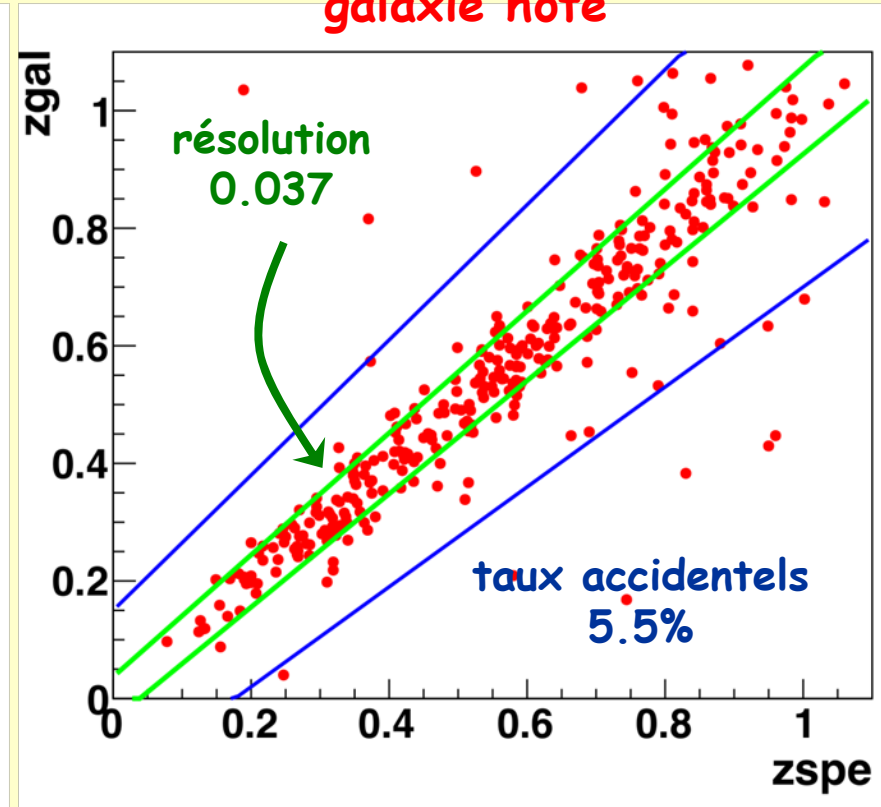
Redshift photométrique de SNIa

redshift photométrique de
SN



résolution: $\text{rms}(z_{pho} - z_{spe}) / (1 + z_{spe})$

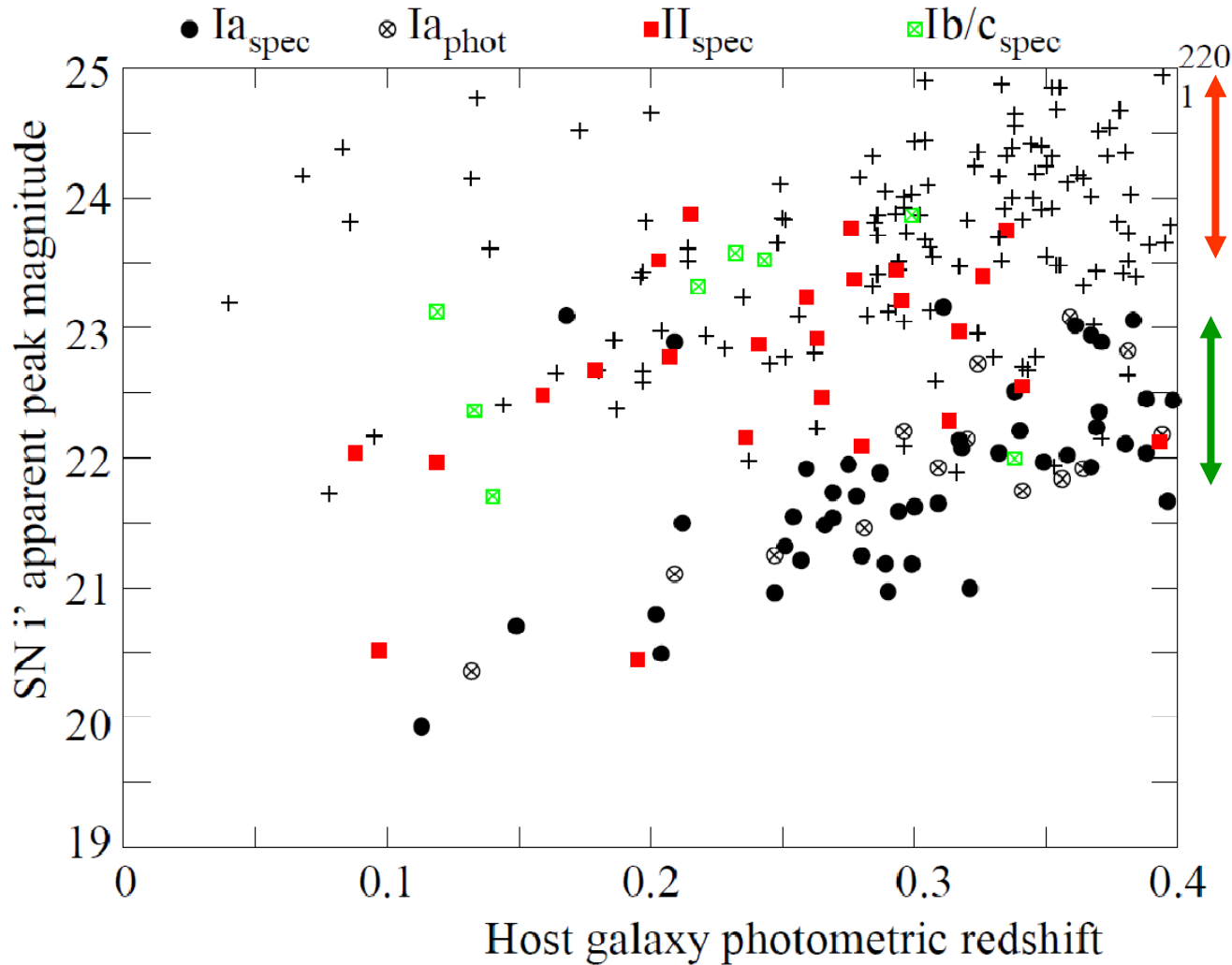
redshift photométrique de
galaxie hôte



accidentels: résolution > 0.15

Sélection de SNe CC

moins brillant \uparrow

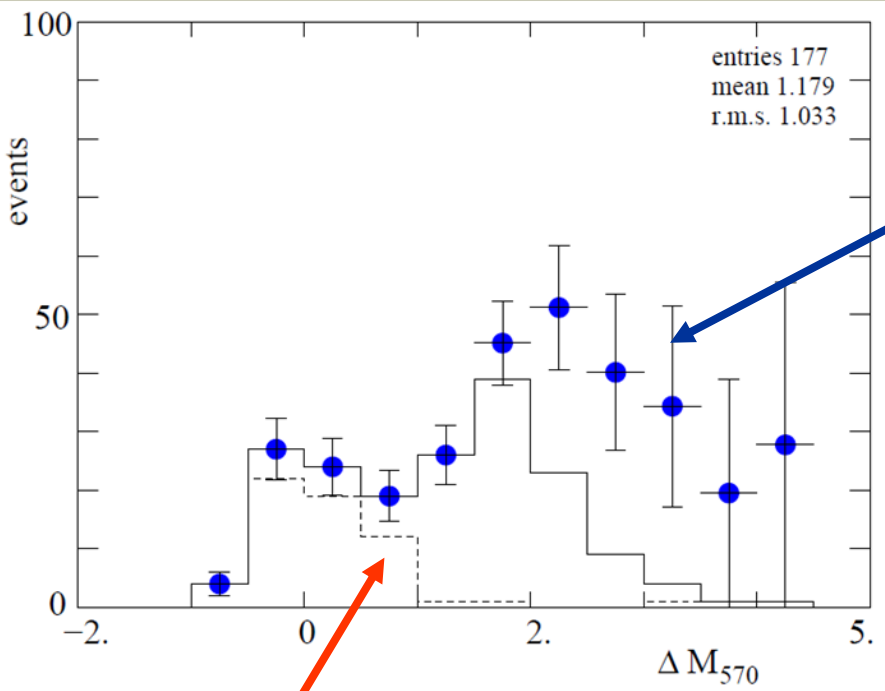


$z < 0.4$: échantillon SNe CC = evt CC spectré et tout evt non Ia (spec ou phot) : 117 evts (SNLS-3ans)

G. Bazin et al., A&A, 499 (2009) 653

après correction
d'efficacité et d'acceptance

$$\frac{R_{cc}(\Delta M_{570} < 4.5)}{R_{Ia}} = 4.5 \pm 0.8(stat.)_{-0.7}^{+0.9}(syst.)$$

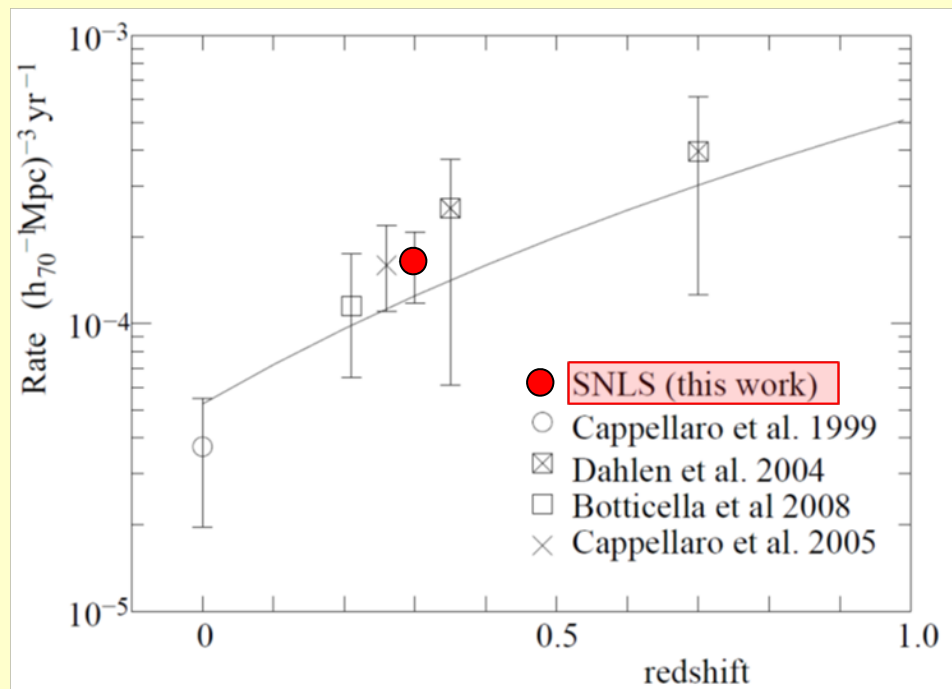


SN Ia

taux de SNCC

\propto taux de formation stellaire

$\propto (1+z)^{3.6}$



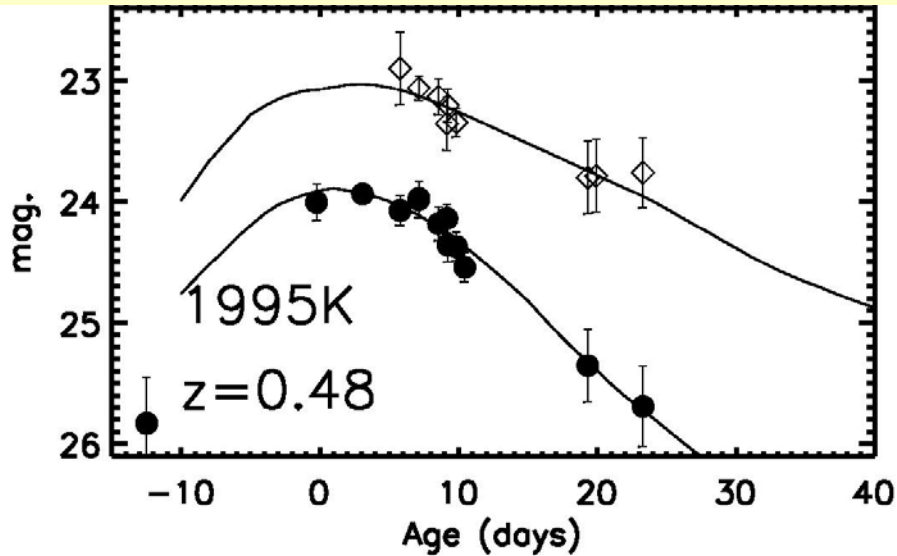
Conclusions

- **SNLS (2003-2008)**: imageur grand champ de haute résolution, stratégie d'observation optimisée, suivi spectroscopique conséquent, photométrie étalonnée au %
- **Résultats 3 ans**: **472** SNe Ia de **haute qualité** $\forall z$ (SNLS: 242), contrôle poussé des **sysématiques**: accélération de l'Univers confirmée à plus de 99,99%CL par les **seules** SNe
- **Hypothèse de chandelle standard**: relations (**empiriques**) luminosité-stretch & couleur **valables** $\forall z$, relation luminosité-galaxie hôte à inclure (effet **démographique**)

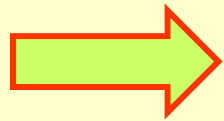
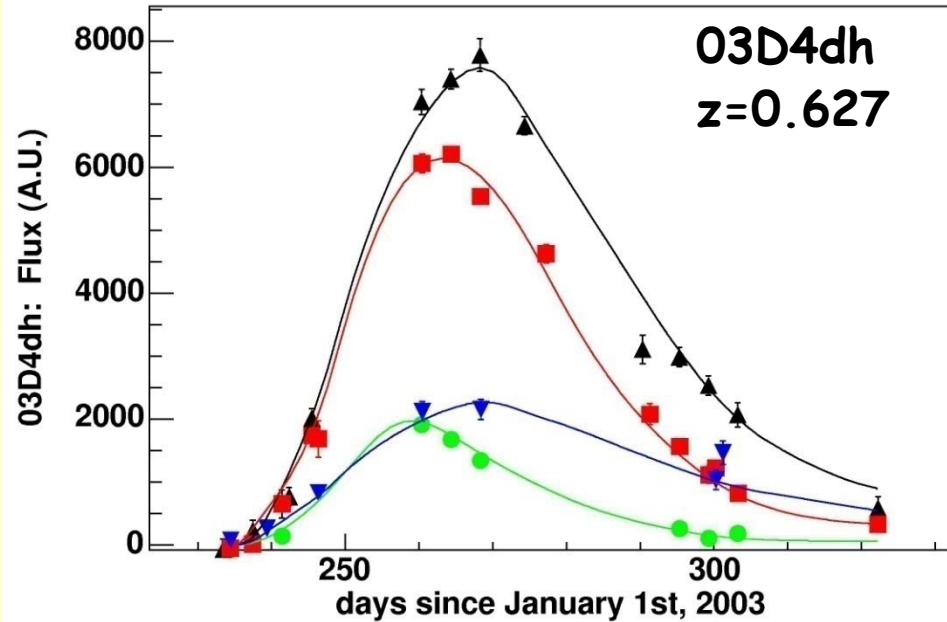
Compléments

From 1st to 2nd generation SN experiments

High-z SN search team



SNLS



early detection
better temporal sampling
more filters
more precise photometry
larger data sample

Generic cosmology models

- Λ CDM: dark matter, curved Universe, cosmological constant
 $\rightarrow \Omega_m, \Omega_\Lambda$ (or Ω_k)

- w CDM: dark matter, flat Universe, dark energy with constant equation of state $\rightarrow \Omega_m, w$

$$w = \frac{p_{de}}{\rho_{de}} \quad \frac{1}{\rho_{de}} \frac{d\rho_{de}}{dt} = -3H(1+w) \quad w=-1 \Leftrightarrow \Lambda$$

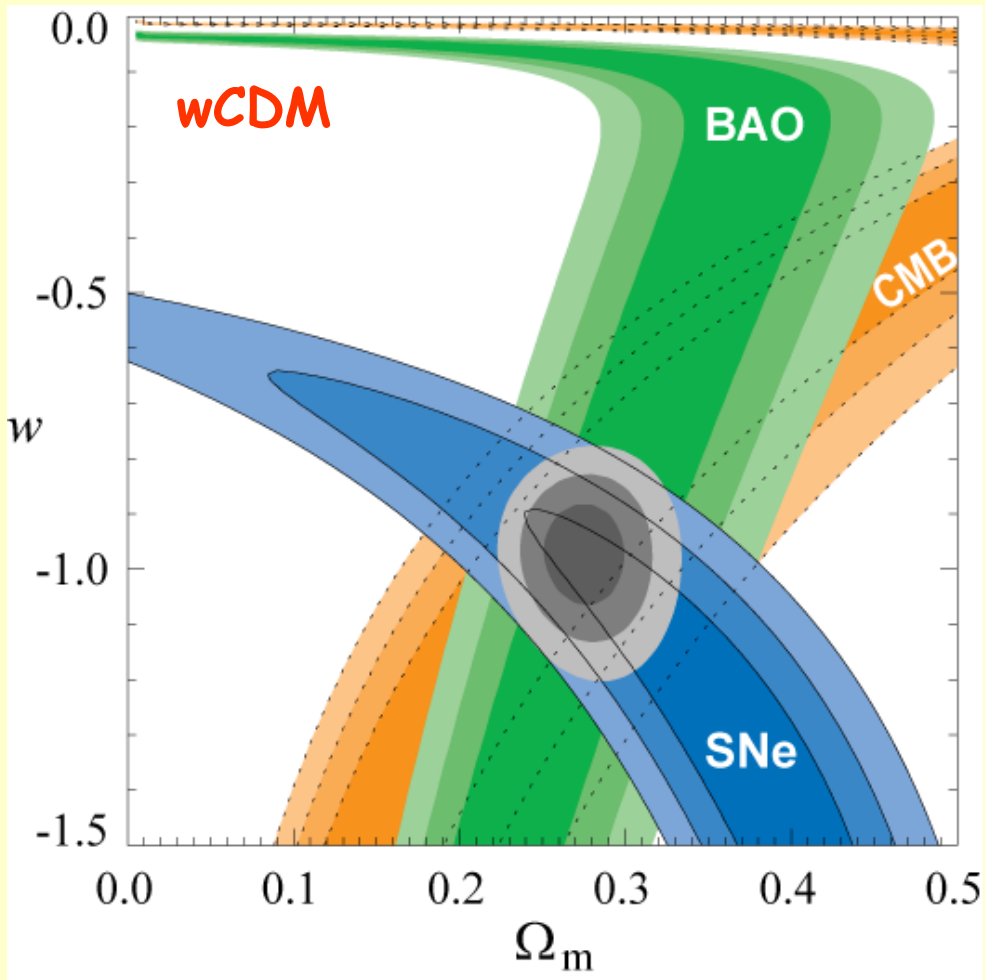
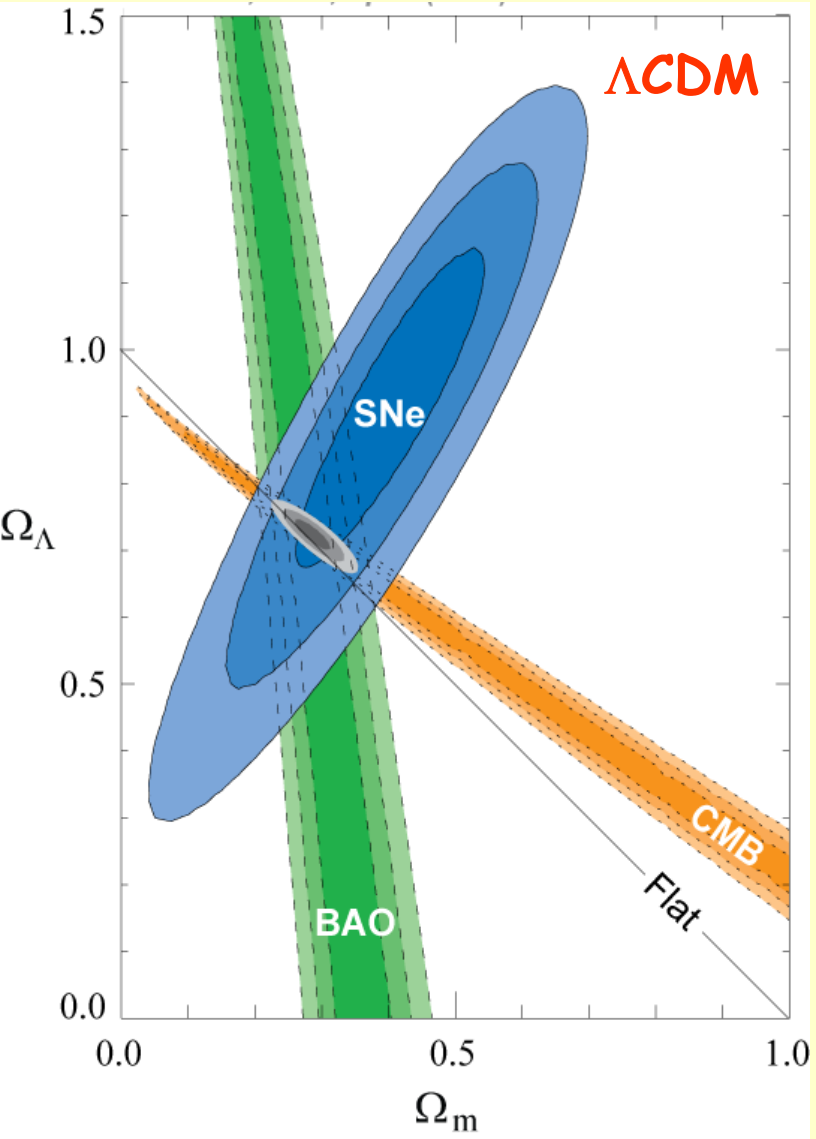
- ow CDM: similar to w CDM with curvature allowed $\rightarrow \Omega_m, \Omega_k, w$

- $w(z)$ CDM or $ow(z)$ CDM: similar to w CDM/ ow CDM but with time-dependent dark energy equation of state, e.g.

$$w(z) = w_0 + w_a \frac{z}{1+z} \quad \text{excellent approximation to a wide variety of dark energy models (scalar fields...)}$$

Constraints from Union '08 SN set

M. Kowalski et al., 2008, ApJ, 686, 749

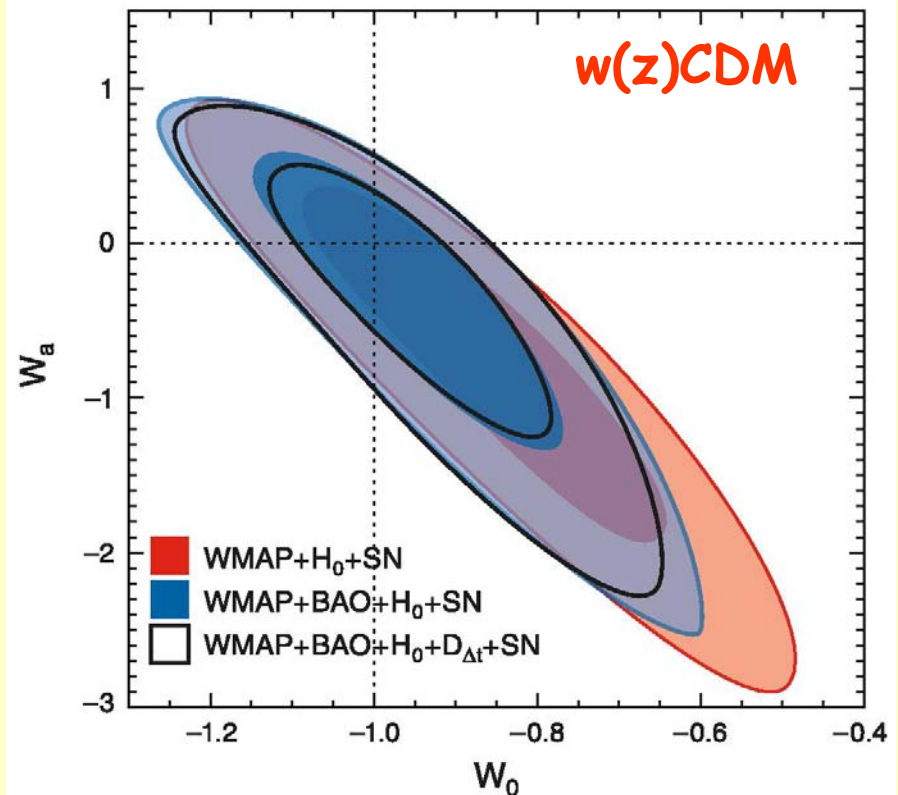
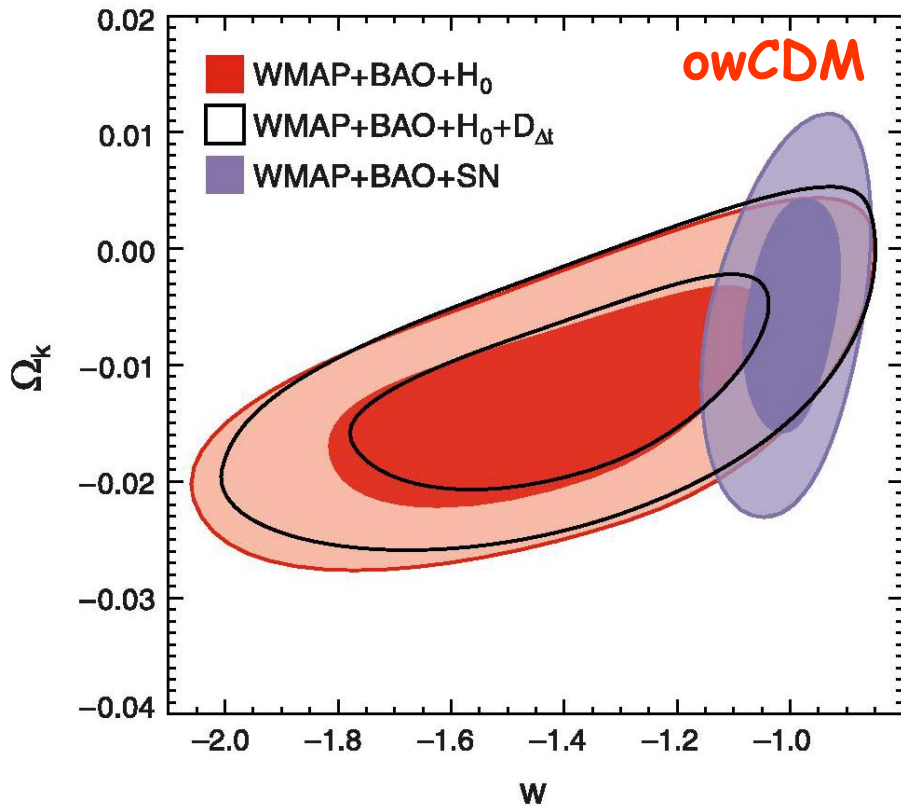


$$w = -0.969^{+0.059+0.063}_{-0.063-0.066}$$

SN=Union set '08, CMB=WMAP-5, BAO=SDSS'05

Constraints from WMAP-7

E. Komatsu et al., arXiv:1001.4538, submitted to ApJS



$wCDM$: $w = -0.980 \pm 0.053$ (stat)

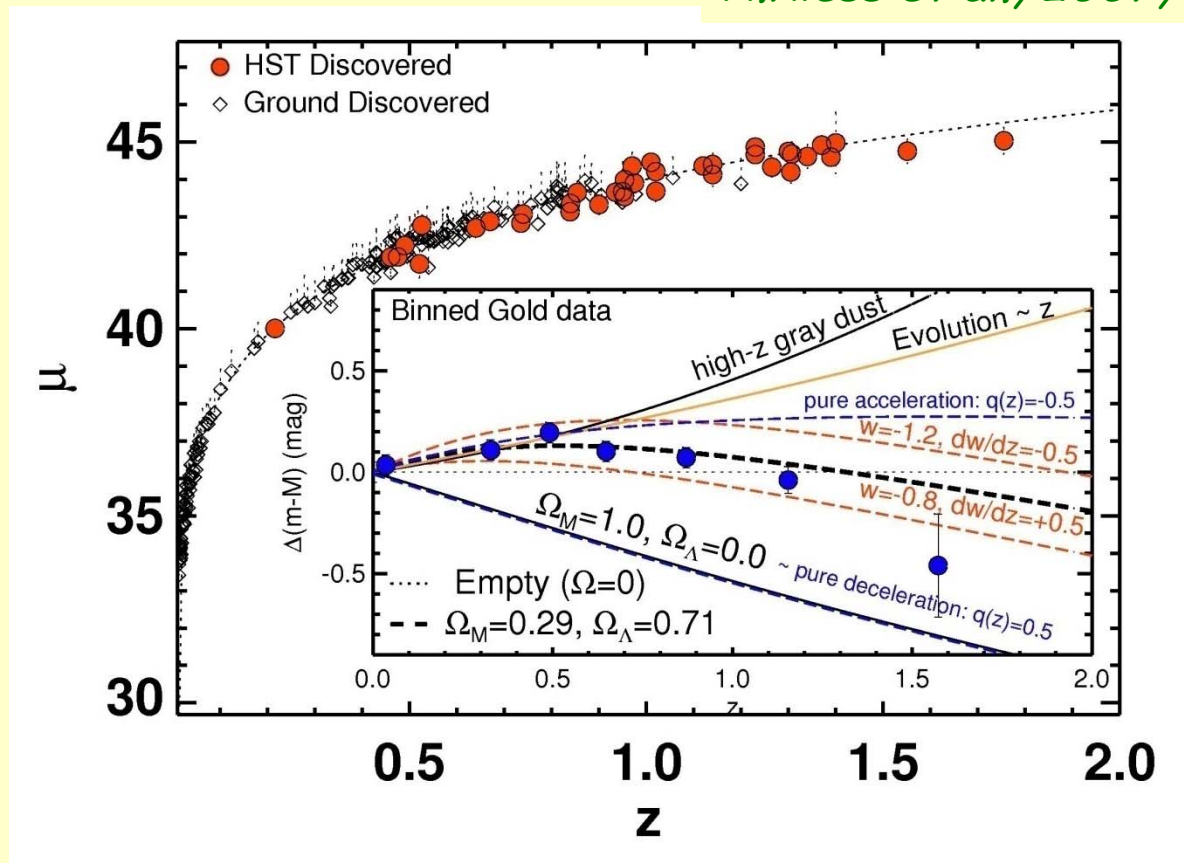
$owCDM$: $w = -0.999^{+0.057}_{-0.056}$ (stat)

$w_0 = -0.93 \pm 0.12$ (stat)

$w_a = -0.38^{+0.66}_{-0.65}$ (stat)

Reliability of SNe Ia as cosmological probes

A. Riess et al., 2007, ApJ, 659, 98

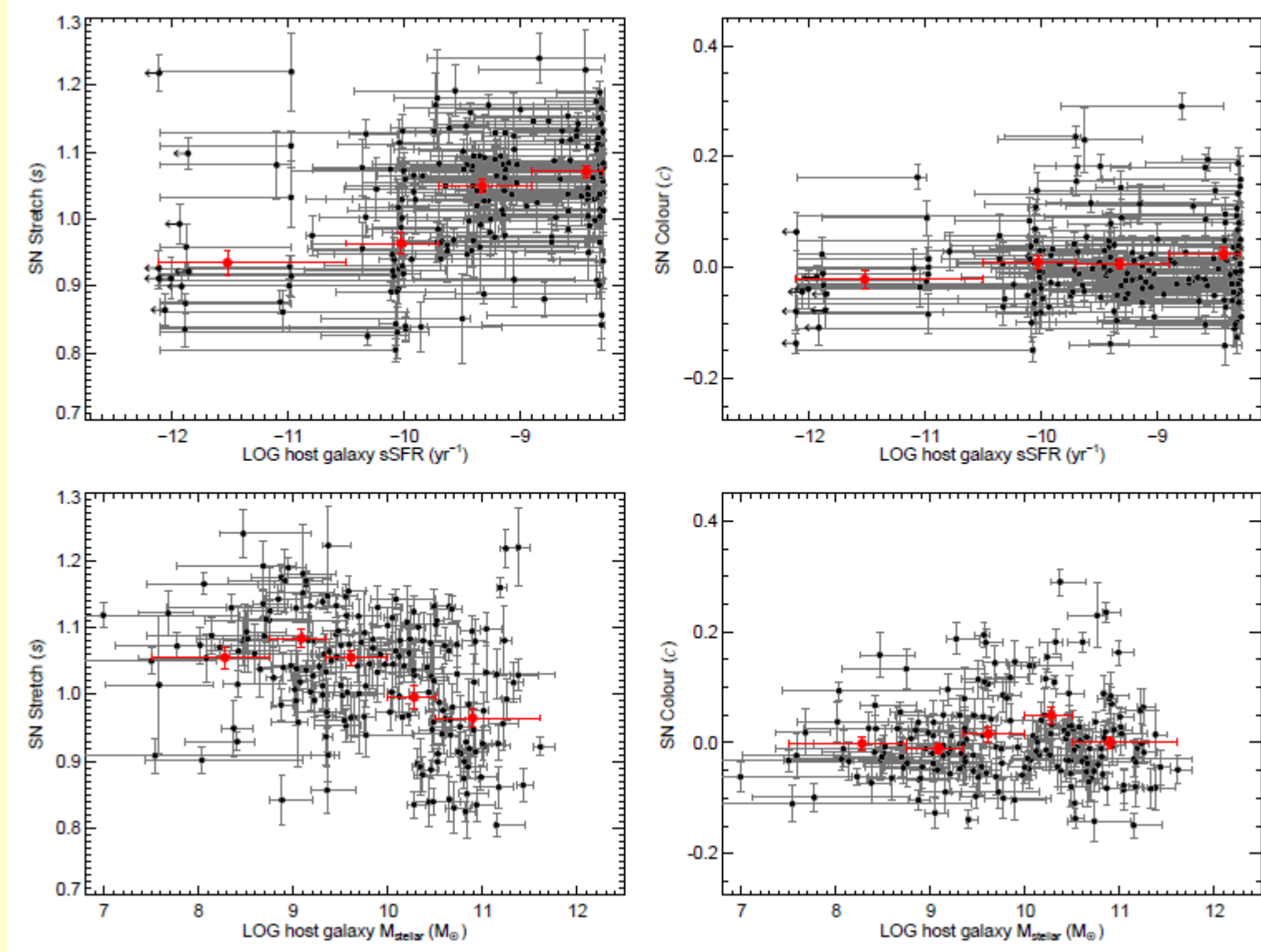


SNIa dimming of astrophysical origin ?

Simplest models of extinction by intergalactic dust or SNIa evolution ruled out by high-z SNIa data.

Dust scenarios also limited by other astrophysical data.

stretch et couleur des SNe en fonction de l'activité de l'hôte



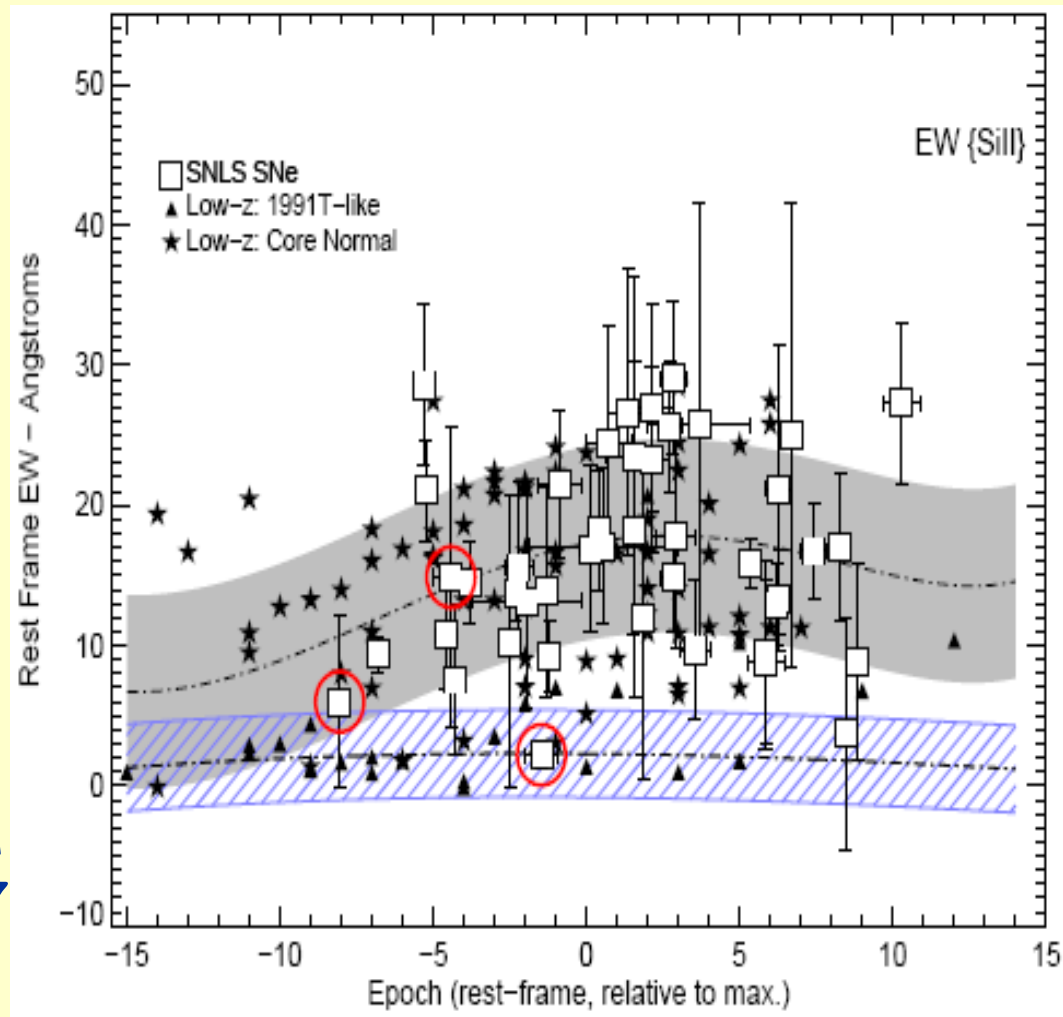
Spectroscopic features

Low-z vs high-z SNIa spectral features :

$EW\{CaII\}$, $EW\{SiIII\}$,
 $EW\{MgII\}$, $CaII v_{ejection}$

The general trend of the low-z sample is followed by the high-z SNe Ia

based on 87 SNLS spectra from Gemini (3 years of data) and 167 published spectra at low z



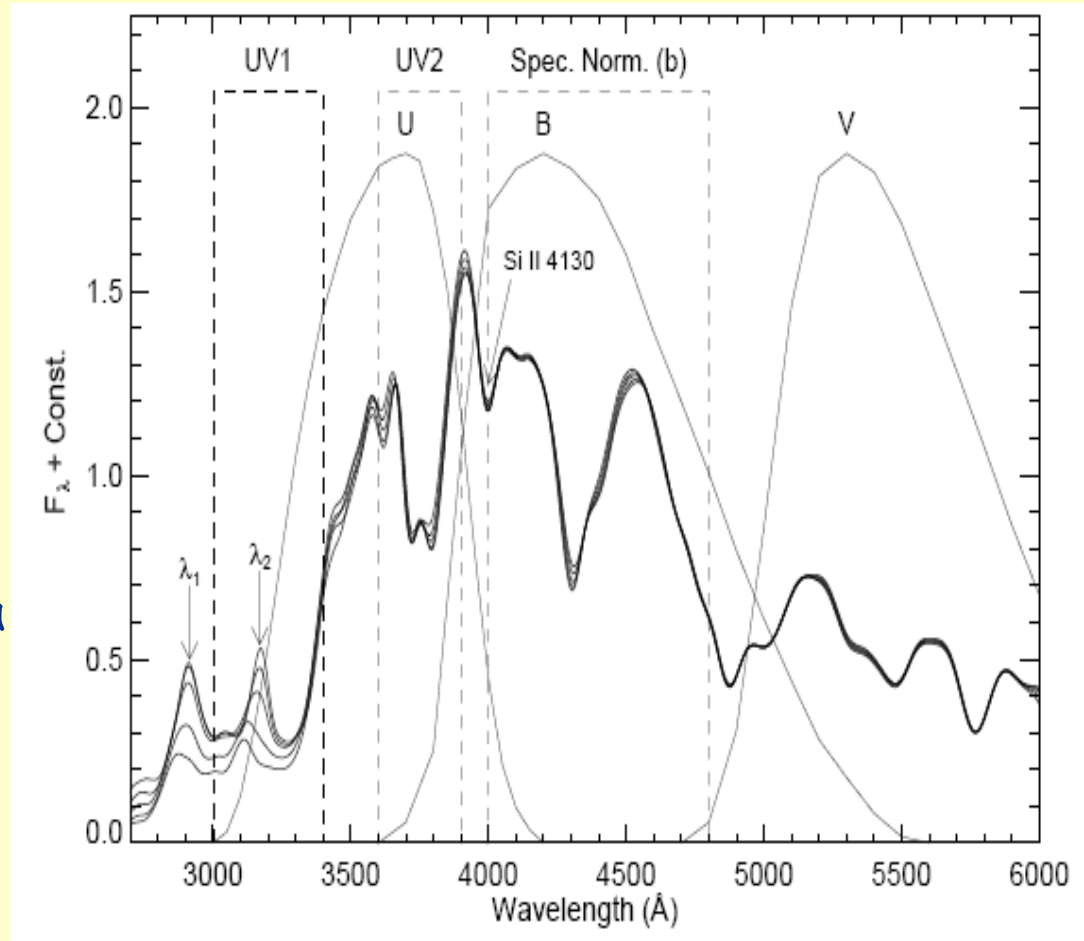
More from spectroscopy

R.S.Ellis et al., ApJ 674 (2008) 51

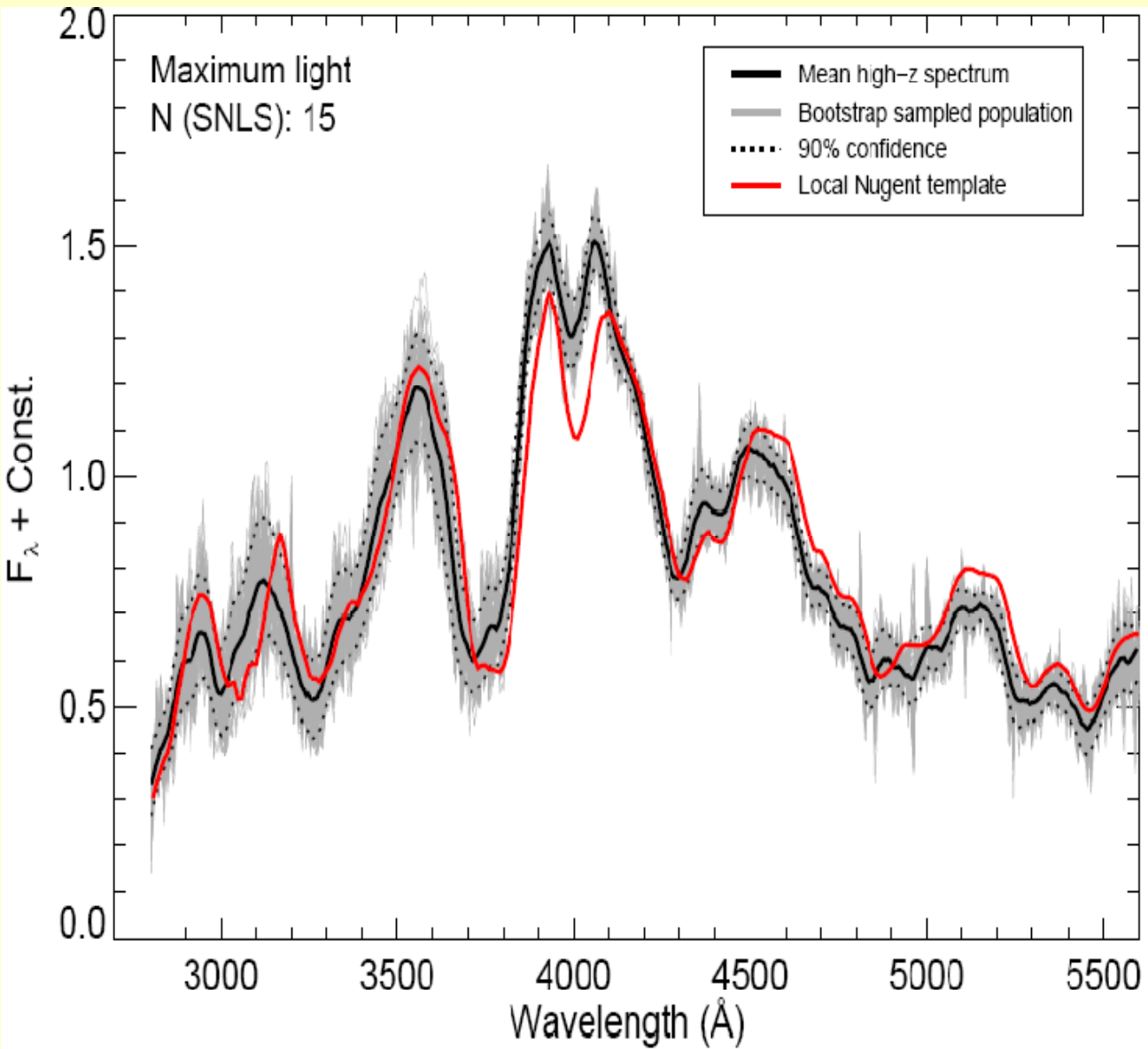
Keck-I: 26 high S/N rest-frame UV spectra of SNLS events at $\langle z \rangle \sim 0.5$

UV spectrum:

- probe of progenitor metallicity ?
- training of SNIa models (lack of data : only 5 spectra from local SNe)



example of theoretical predictions for different progenitor metallicities

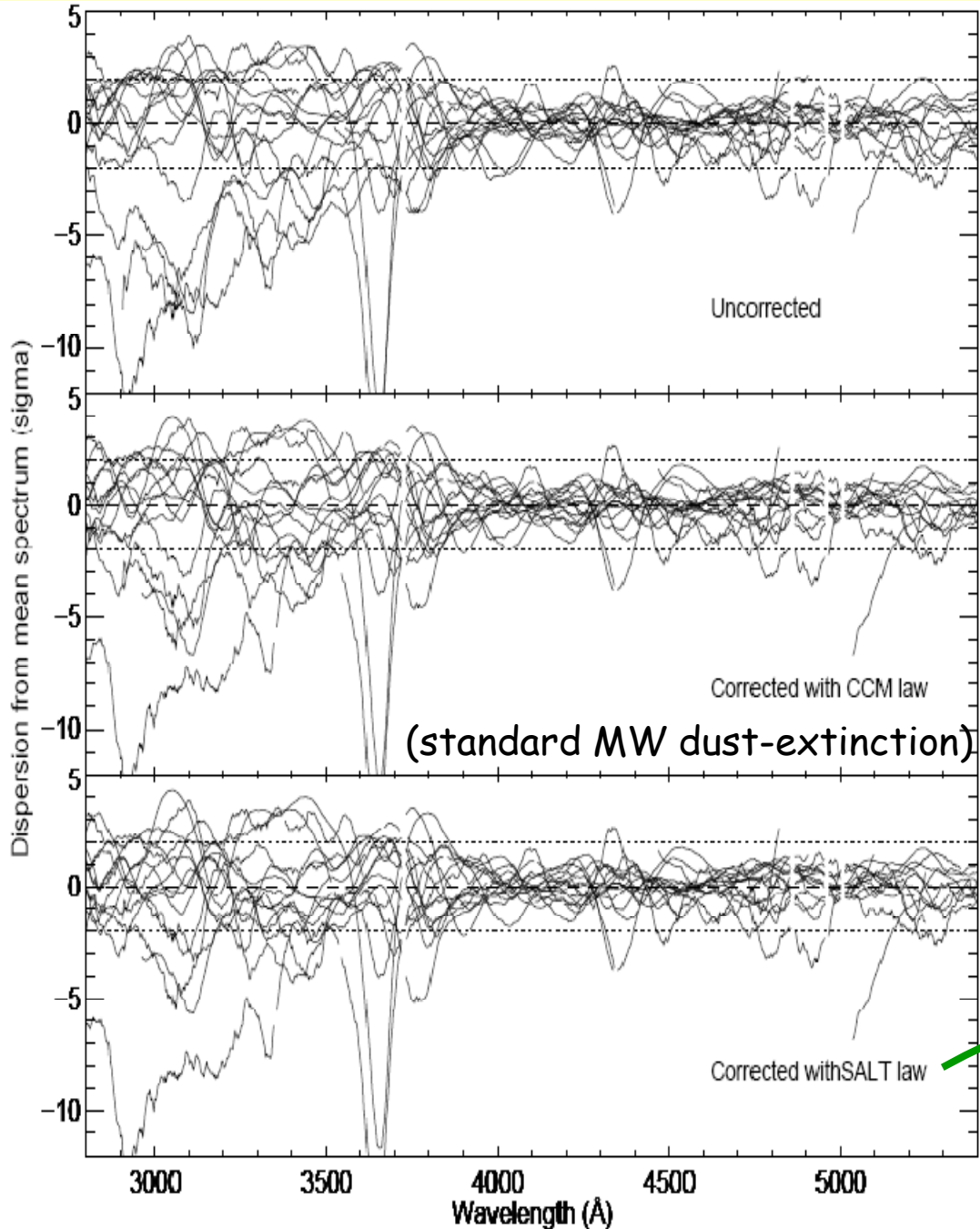


The **average UV**
spectra at high
and low redshifts

agree



Study **UV**
dispersion at high
redshift

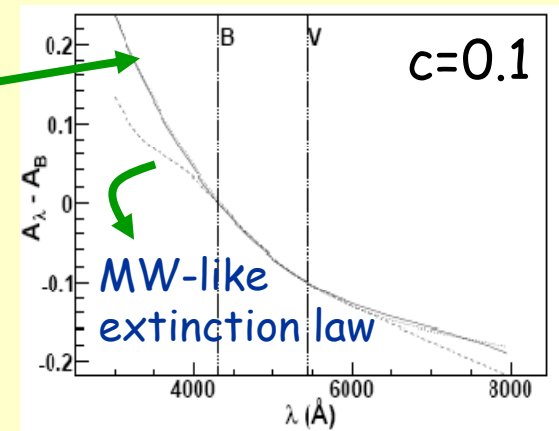


Using 15 colour-corrected maximum-light spectra:

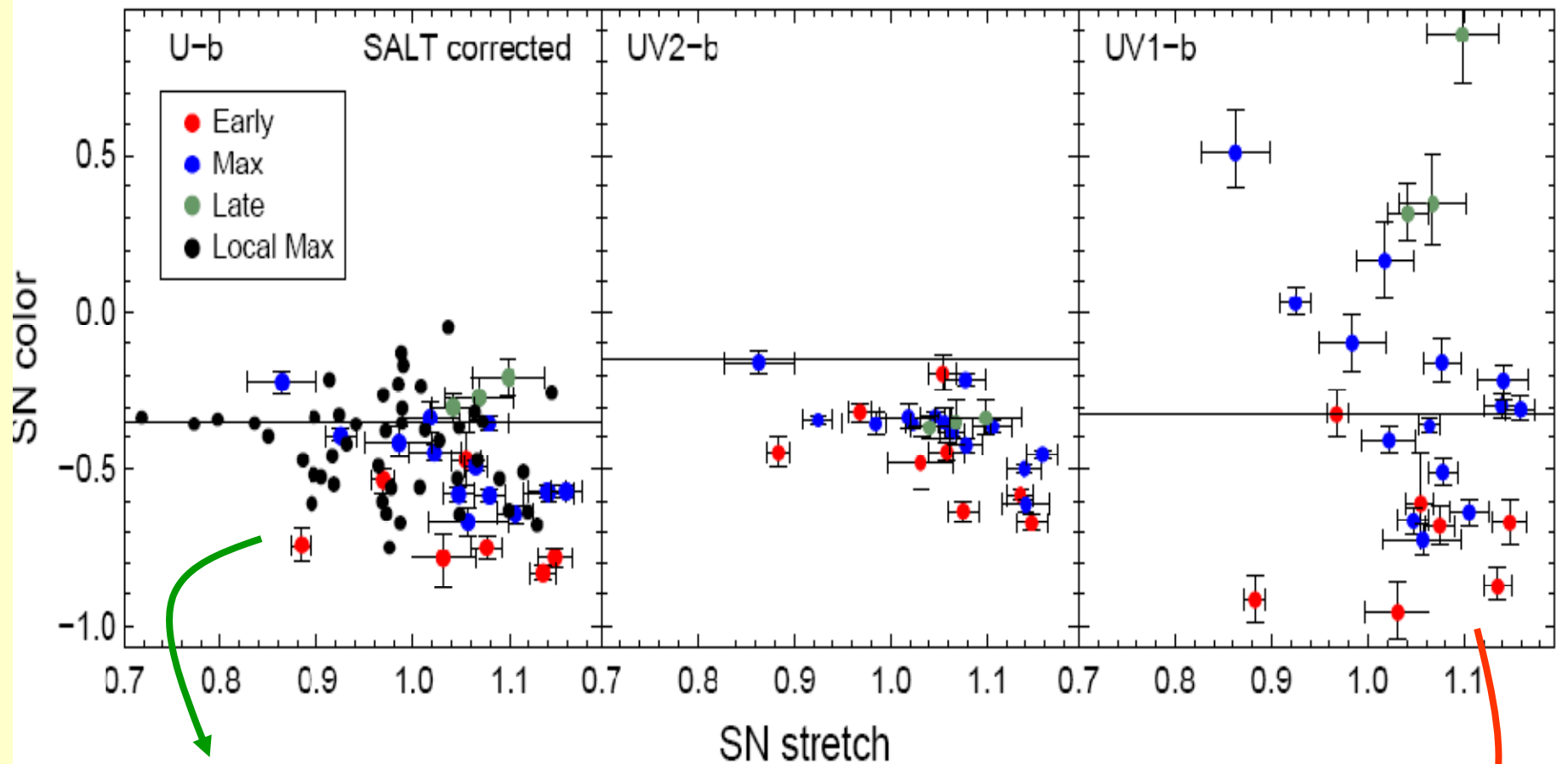


Scatter in the UV larger than at optical λ 's

SNIa models must better account for this scatter to reach $\Delta\mu_B \sim 0.02 \text{ mag}$



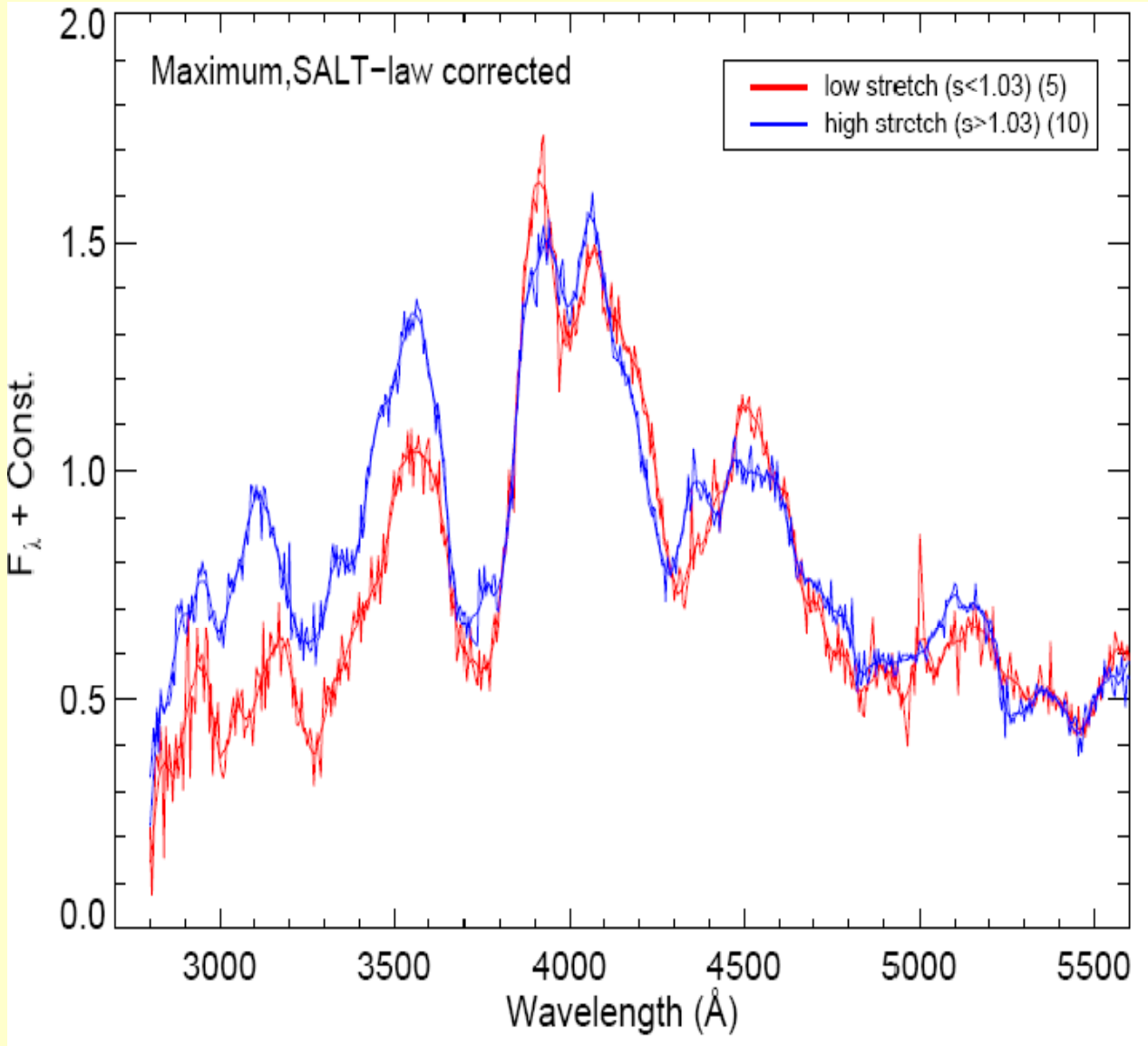
Colours vs stretch for low/high- z spectra and different phases



Close UV: scatter and correlation with stretch are weak, whatever the phase

Far UV: large scatter, strong correlation with stretch and strong phase dependence : metallicity ? Predicted scatters much lower

UV spectra in sub-samples split by stretch (\sim host galaxy SFR)



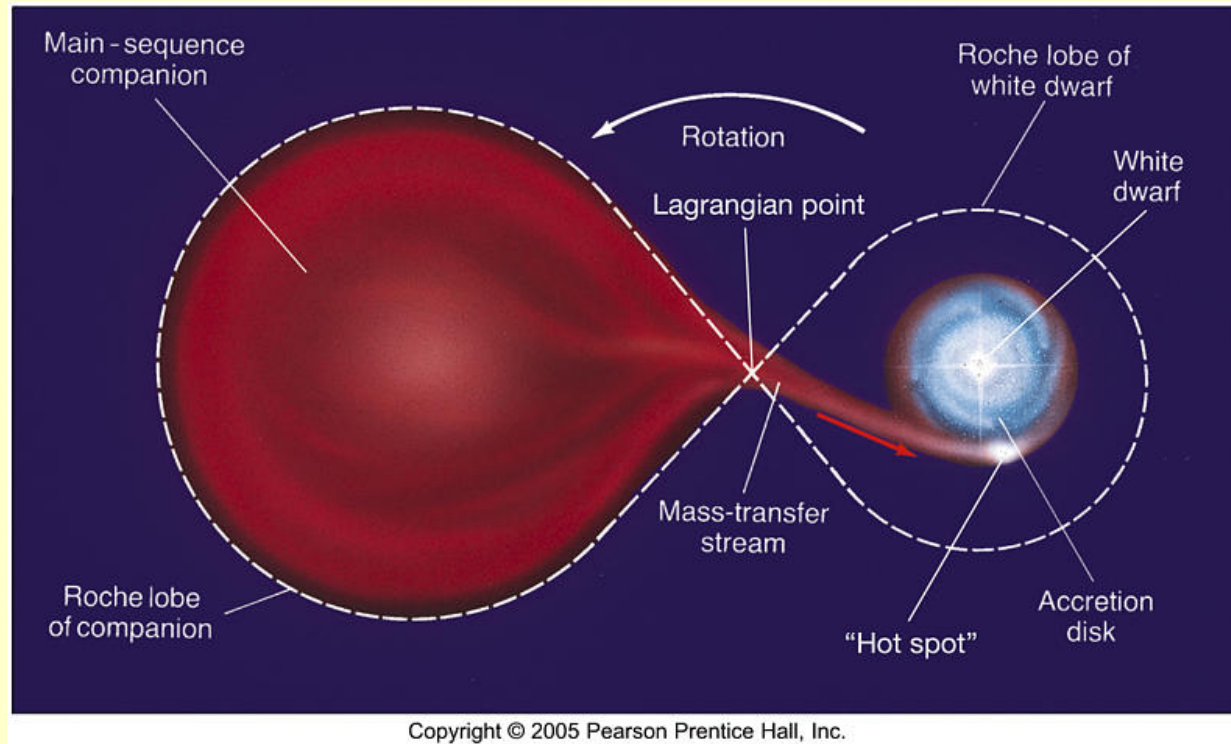
Far UV-continuum
higher in high-
stretch SNe, that
is in star-forming
galaxies



Another spectral
corollary of the
environmental
dependency of
intrinsic properties

SN Ia progenitor models

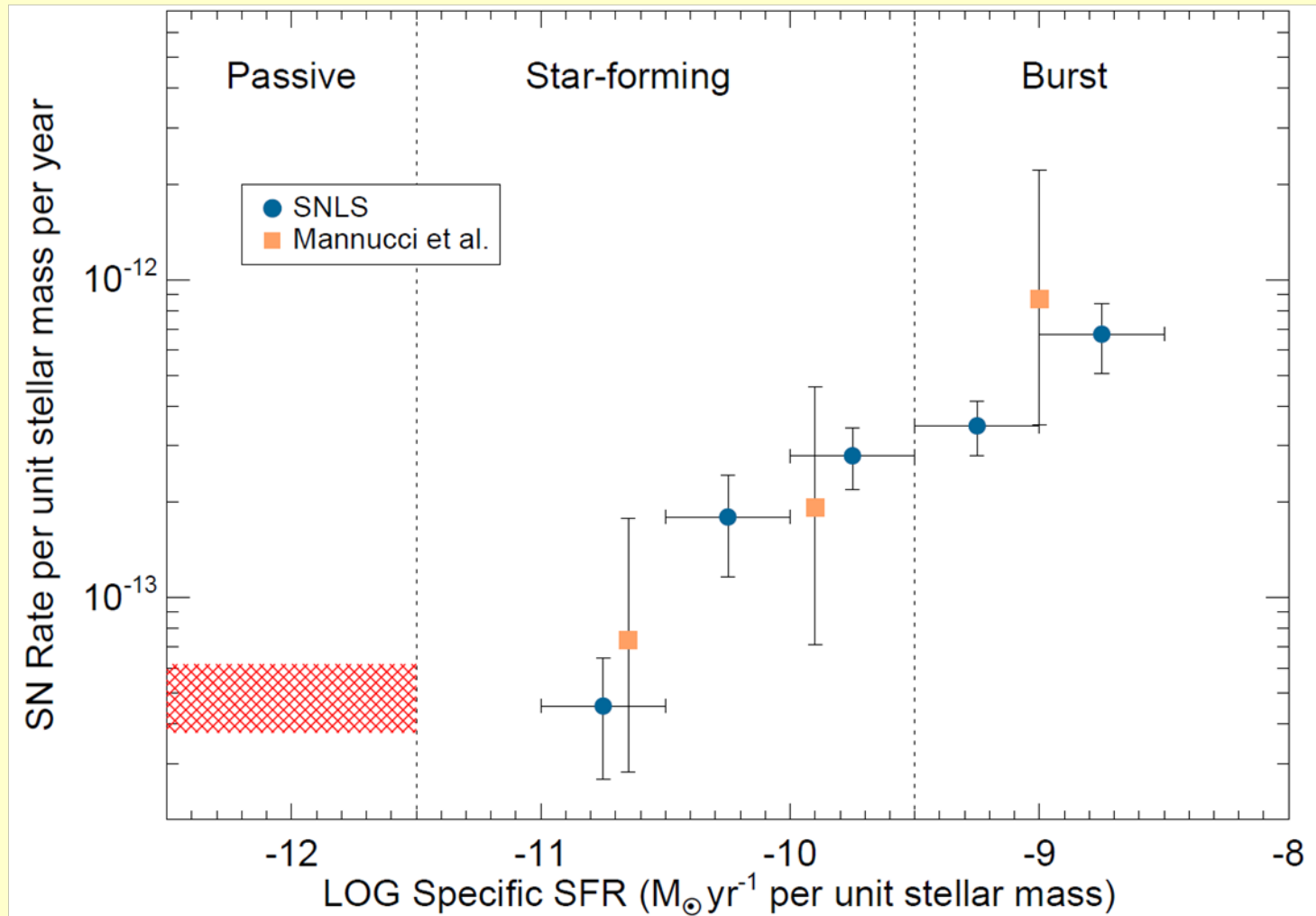
Standard scenario (Single-Degenerate model):



SN Ia luminosity \leftrightarrow radioactive decay of $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$

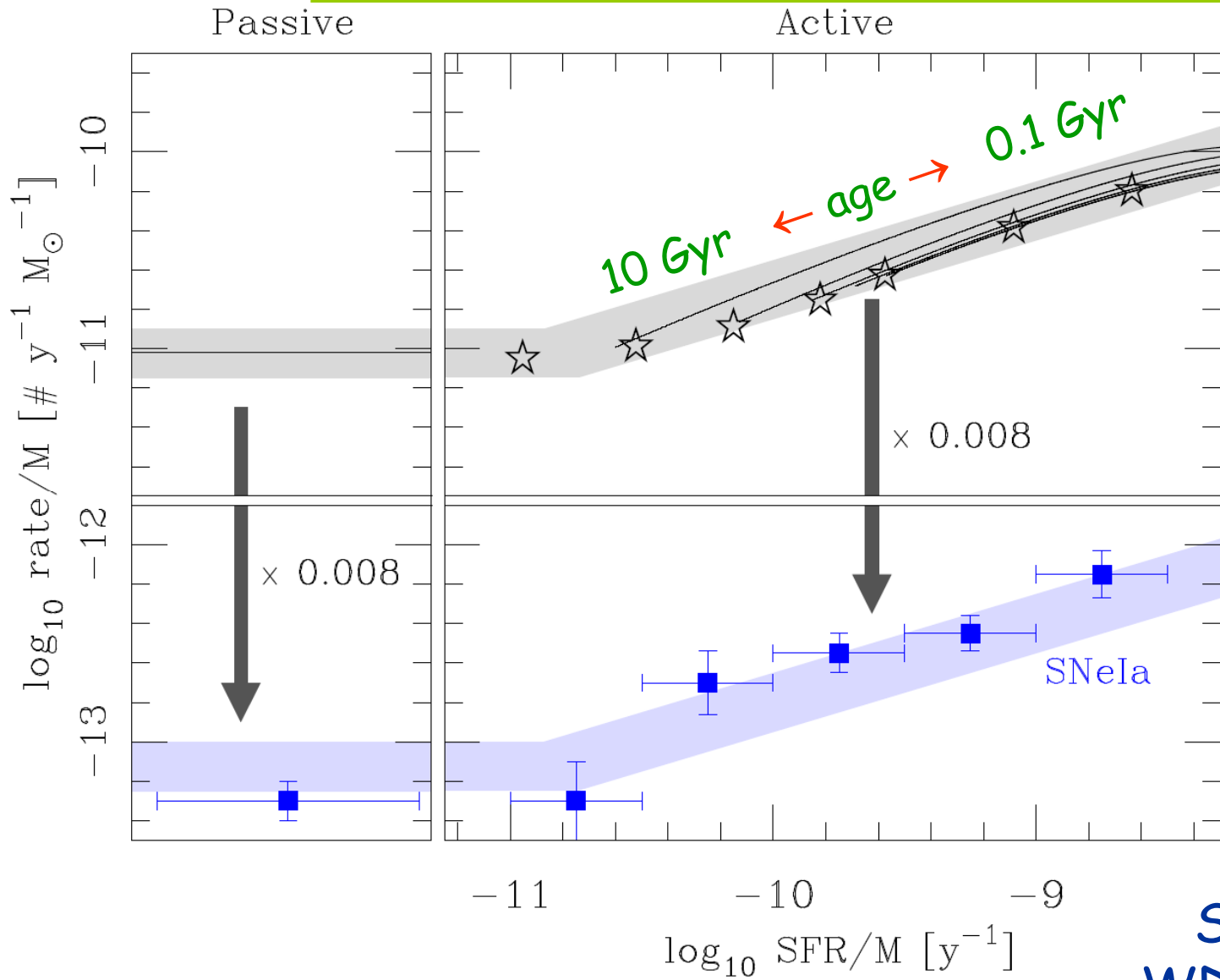
Observational facts: no hydrogen in spectrum, light curve shape, reproducible luminosity, SNIa occurrence in old stellar populations

SN Ia explosion rate vs sSFR



M. Sullivan et al., ApJ 648 (2006) 868

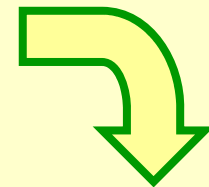
White dwarf formation rate



WD formation models

different SFR, composite stellar populations

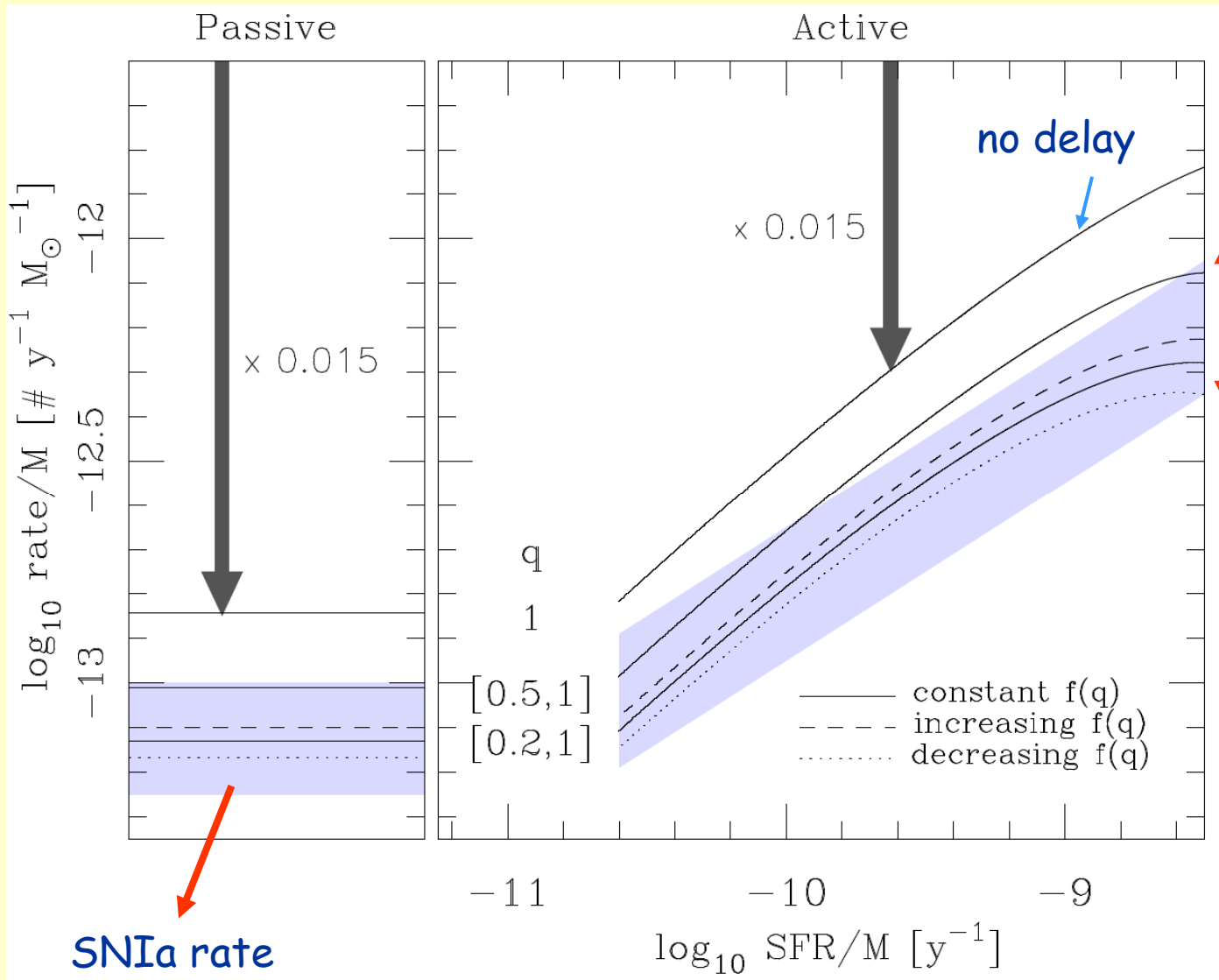
SNIa data compared with models



SN Ia rate =
WD rate \times 0.008

Ch.Pritchett et al., ApJ 683L (2008) 25

White dwarf to SN Ia conversion

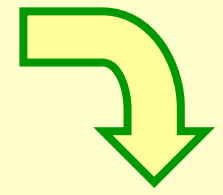


WD rate model \otimes

different WD \rightarrow SN time delay distributions

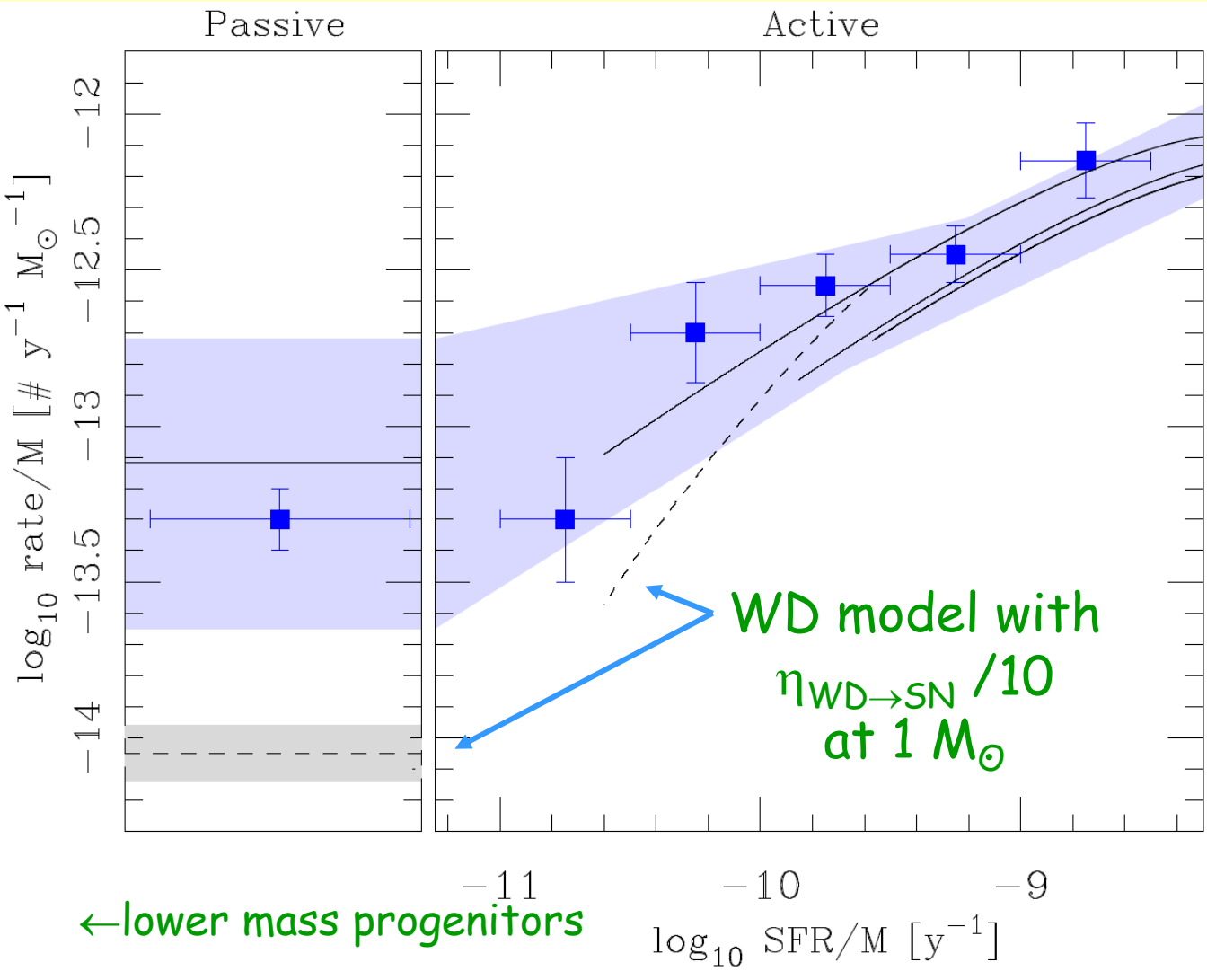
$\times 0.015$

$$q = M_2 / M_1$$



SD scenario:
 $\eta_{\text{WD} \rightarrow \text{SN}} \sim 0.015$
 (within a factor 2)

Mass-dependent conversion efficiency ?

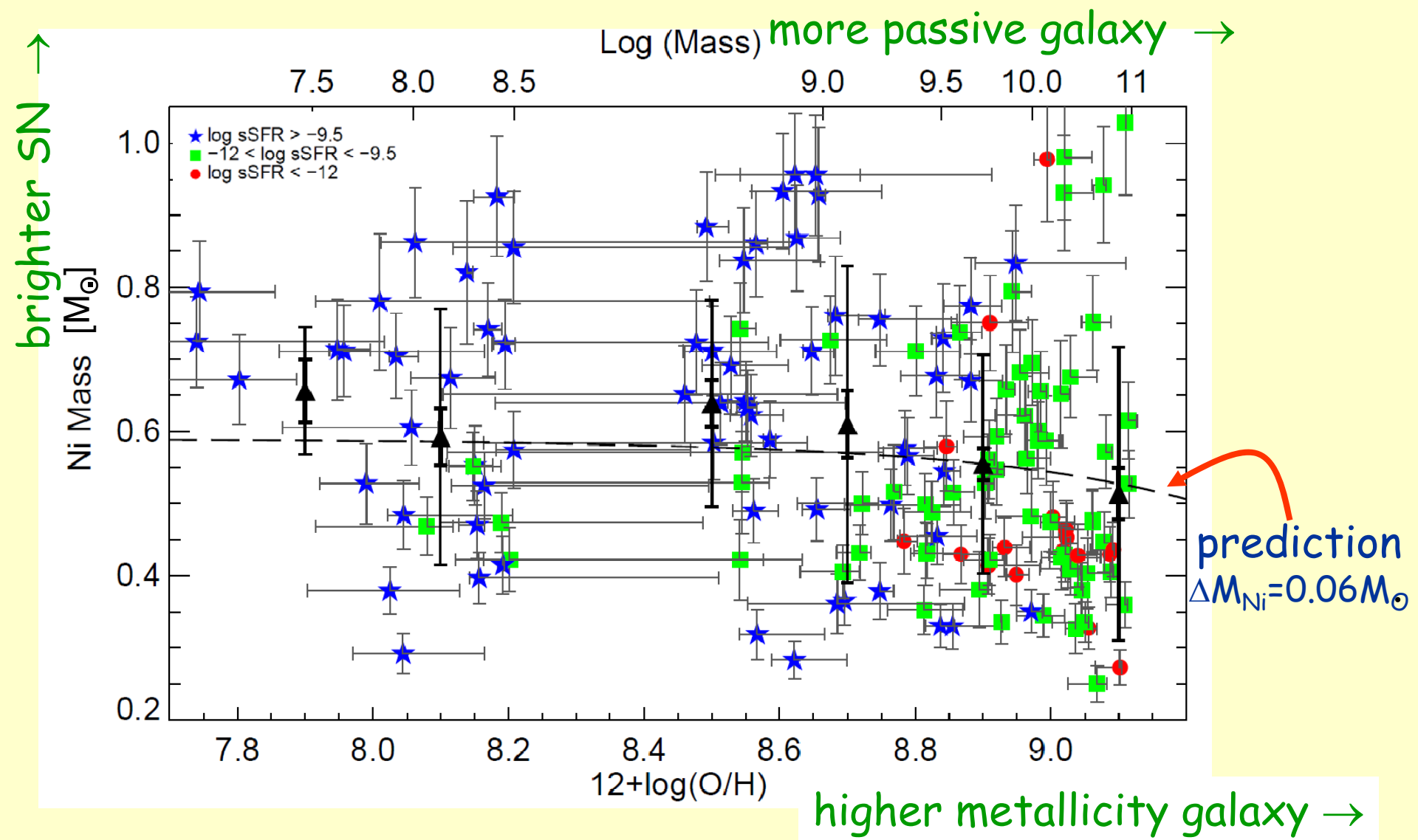


⇒ If $\eta_{\text{WD} \rightarrow \text{SN}}$ is mass-dependent, SD model cannot explain SNe Ia from low mass progenitors

SN Ia luminosities and progenitor properties

- SN Ia luminosities and Ni yield:
 - **Bolometric luminosity**: from *template SN spectra* fitted to SNLS SNIa light curves
 - **^{56}Ni mass**: from the bolometric luminosity, $M_{\text{Ni}} = L_{\text{bol}} / \gamma \dot{S}(t_R)$
- Progenitor properties: estimated from SN host galaxies
 - Galaxy **stellar mass, SFR, age** : from *template spectral energy distributions* (SED) fitted to SNLS host galaxy photometric measurements
 - Galaxy **metallicity**: from the galaxy mass using *correlations observed at low redshift (SDSS)*

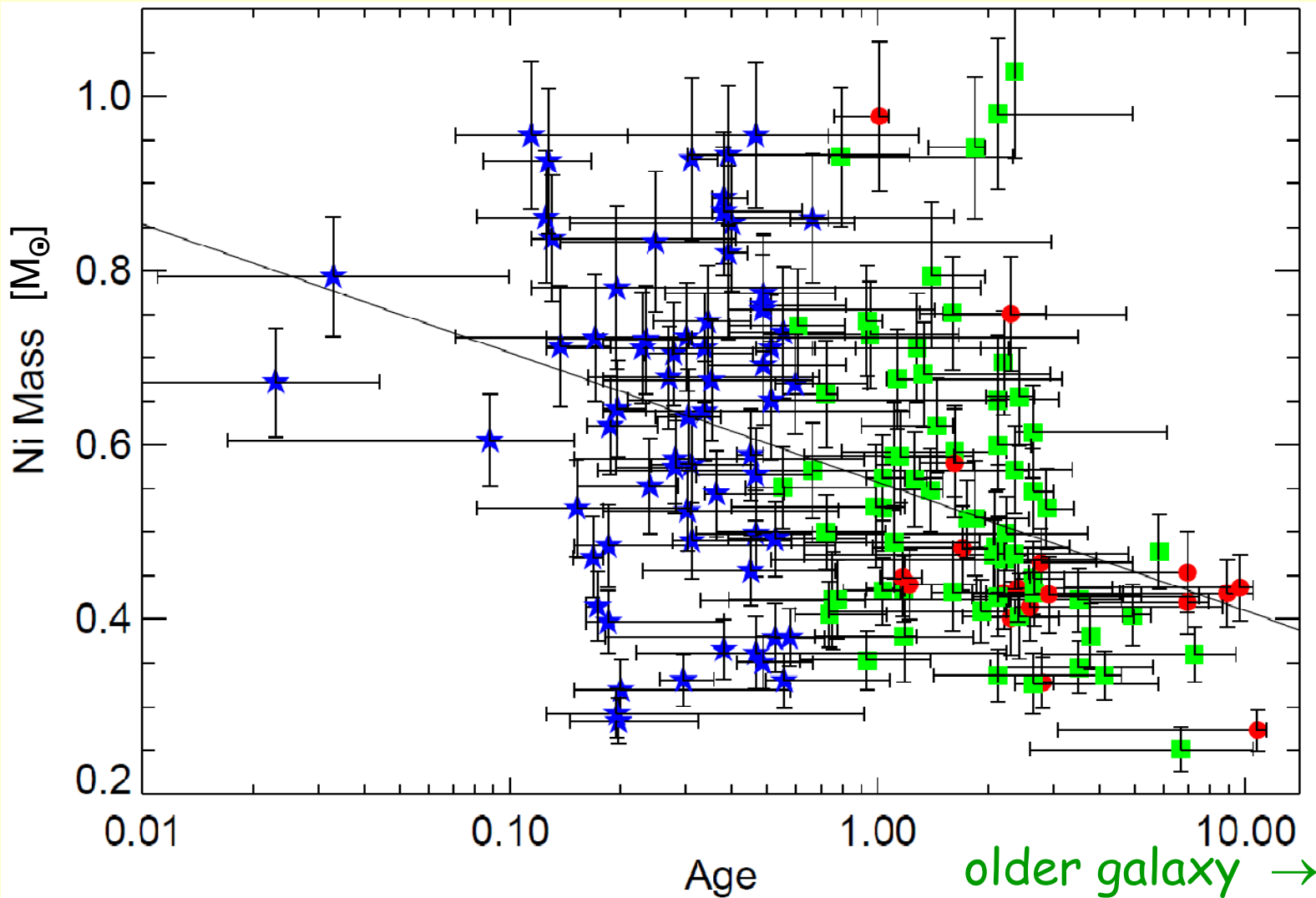
D.A.Howell et al., ApJ 691 (2009) 661



metal-rich galaxies : less ^{56}Ni produced, dimmer SNe Ia
 but this cannot explain the large scatter in ^{56}Ni mass

D.A.Howell et al., ApJ 691 (2009) 661

brighter SN \uparrow

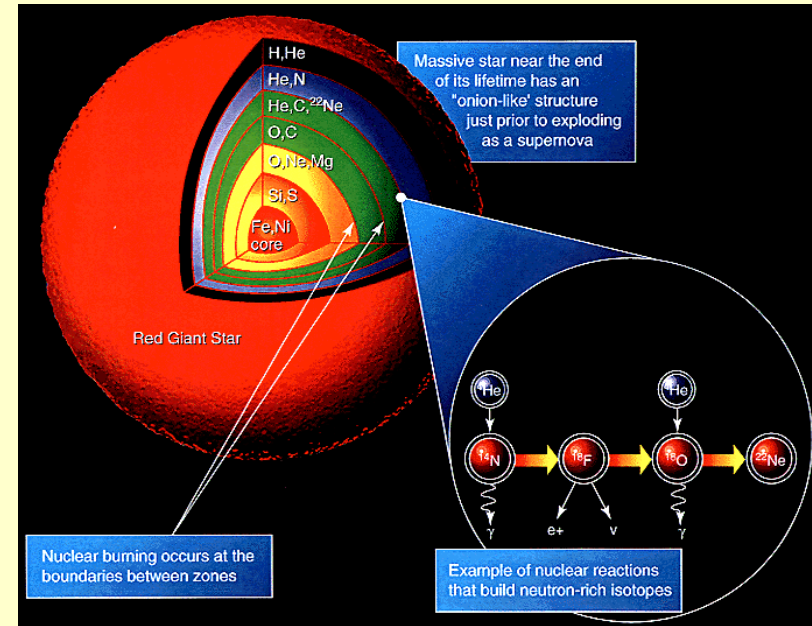


\hookrightarrow ^{56}Ni mass and galaxy age strongly correlated: hint for the influence of the mass of the secondary star ?

D.A.Howell et al., ApJ 691 (2009) 661

Core-collapse (CC) SN rate

- SNLS sensitive to all SN types
- CC SNe: 1.5mag fainter than SNe Ia
- SNLS spectroscopic sample: dominated by SNe Ia

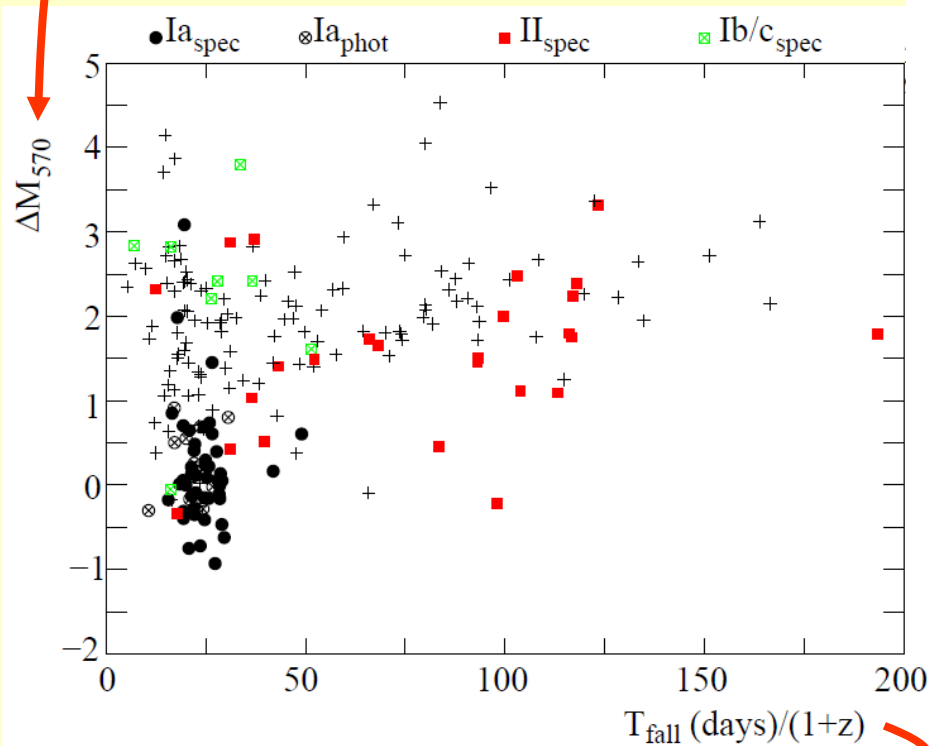


- o Differed photometric analysis of SNLS data:
 - SN events selected against spurious detections, variable stars, AGN's : contamination negligible at $z < 0.4$
 - Spectroscopic + photometric typing of SNe Ia
 - Redshift assignement: photometric host galaxy redshifts

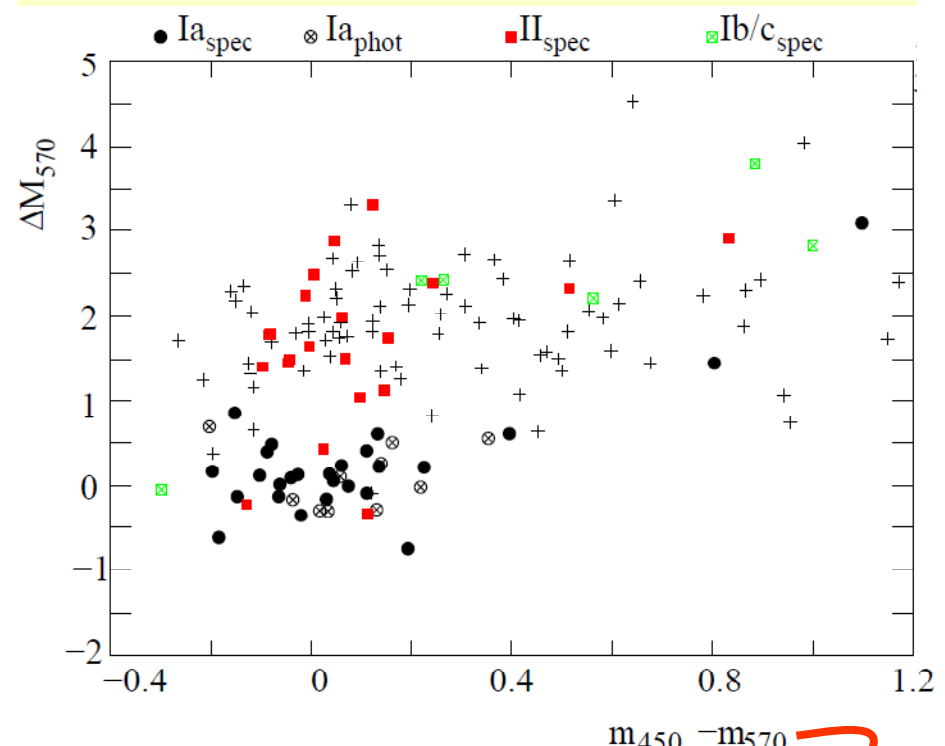
G. Bazin et al., A&A, 499 (2009) 653

Event properties

estimated absolute magnitude



light-curve fall time



estimated B-V colour

Faint events: photometric events have properties similar to those of spectroscopic core-collapse events