

ESCALA DE DISTANCIAS CON SUPERNOVAS

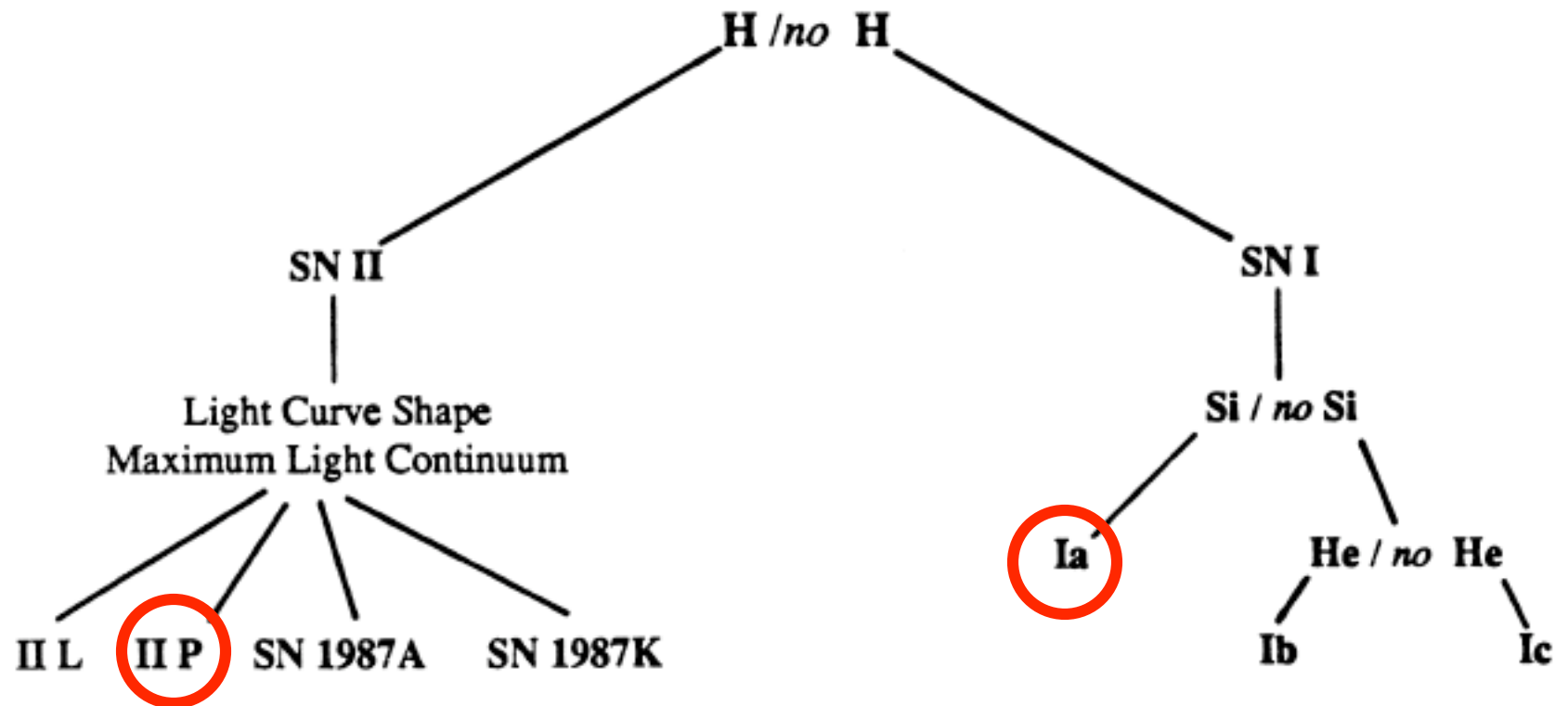
Por Roger Leiton

A photograph of a spiral galaxy, likely the Whirlpool Galaxy (M51), viewed at an angle. The galaxy's bright central bulge and swirling arms are visible against a dark background. In the lower-left foreground, there is a bright, out-of-focus star with a four-pointed diffraction pattern. A white arrow points from this star towards the right.

Supernova!

SUPERNOVA CLASSIFICATION

MAXIMUM LIGHT SPECTRA



1ra PARTE:

SUPERNOVAS TIPO 1a

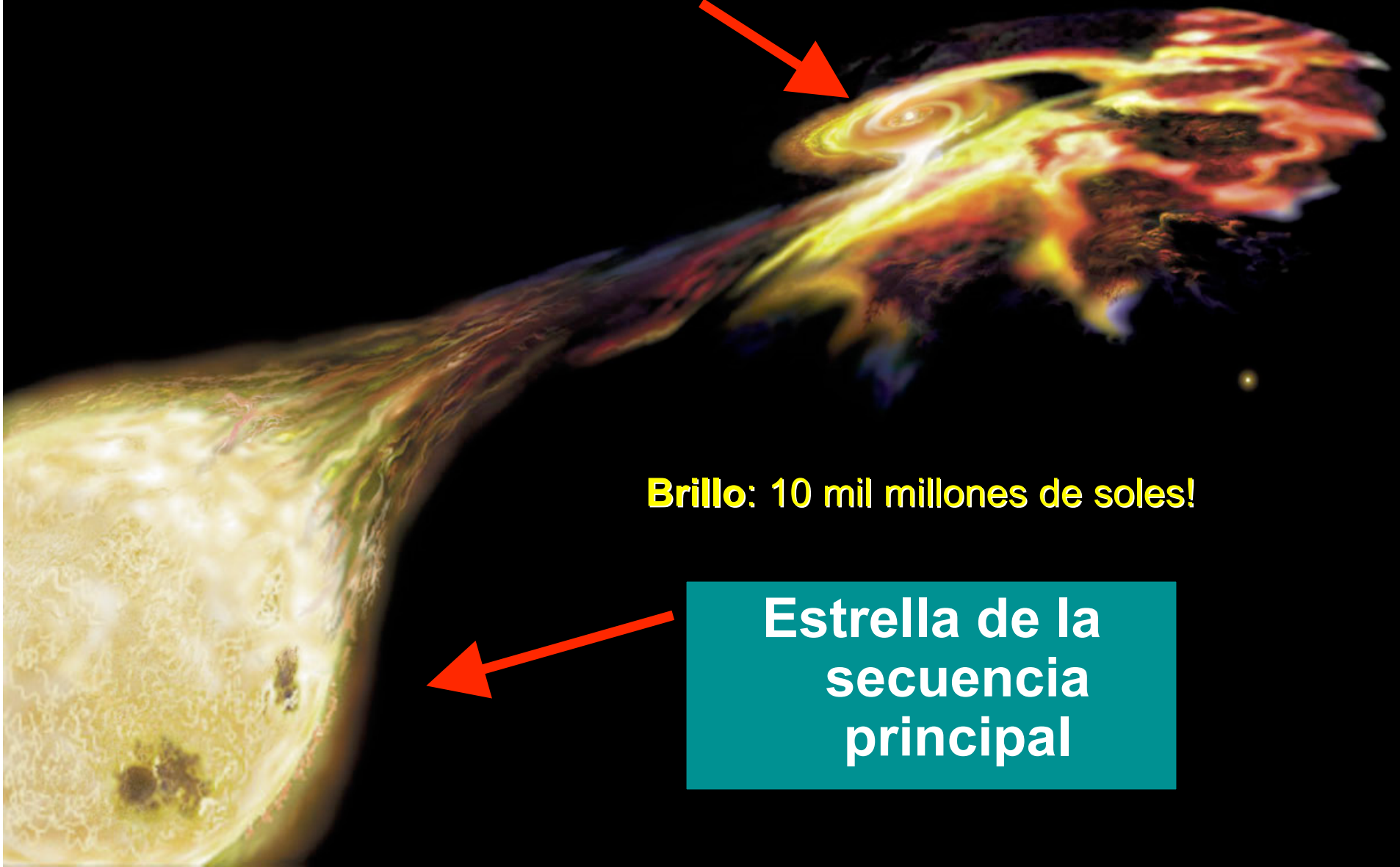
Supernovas tipo Ia

- Escenarios más probables:
 - a) Ignición de un núcleo degenerado de C-O de una enana blanca perteneciente a un sistema binario con una estrella de la secuencia principal transfiriéndole material: límite de Chandrasekhar: $M_{WD} \sim 1.4 M_{\odot}$
 - b) la colisión de un sistema binario de enanas blancas
- No queda remanente

Enana Blanca

Brillo: 10 mil millones de soles!

**Estrella de la
secuencia
principal**



SN Ia (cont.)

- Generalmente en galaxias con formacion estelar, elípticas y otras con poblaciones estelares viejas.
- Límite de Chandrasekhar: $M \sim 1.4 M_{\odot} \Rightarrow$ en teoría hay un límite físico para que ocurra la explosión
- SN Ia serían “**standard candles**” como consecuencia de este límite de masa para las enanas blancas (Tamman & Leibundgut, 1990, Sandage & Tamman 1993)

Tammann & Leibundgut, 1990

Primeros intentos
de usar la uniformidad
de las SN-Ia para
calcular H_0

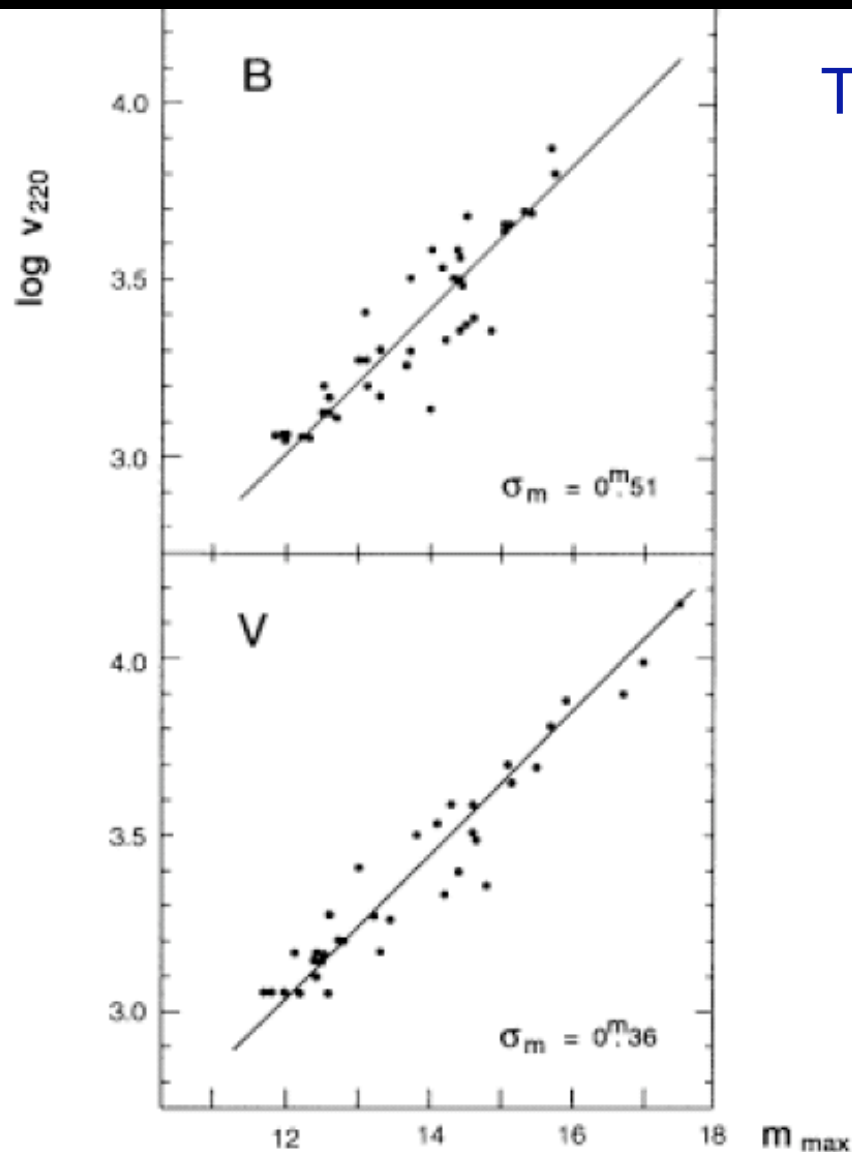
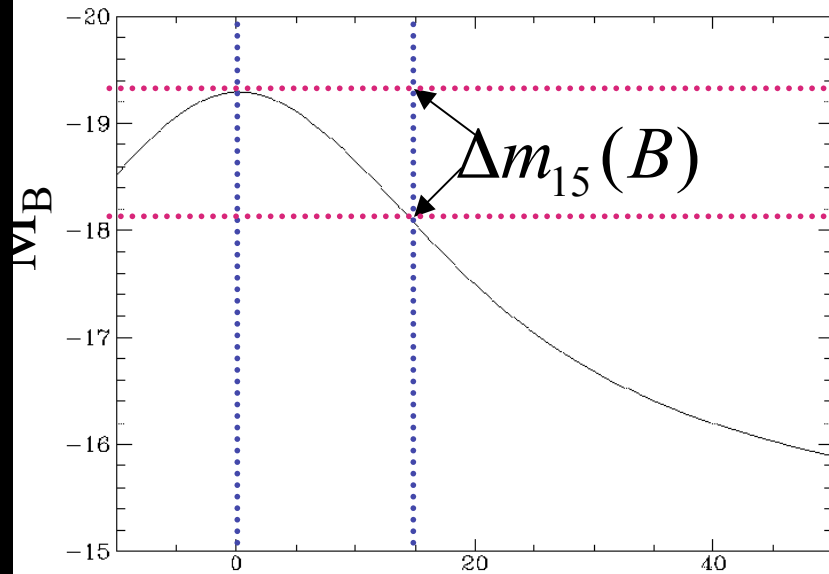


FIG. 1.—The Hubble diagrams in m_{pg} , B , and V . The data for the diagrams in m_{pg} and in B are from Tammann & Leibundgut (1990). The data of the diagram in V are from Table 1 here. The lines through the data have an assigned slope of $d \log v/dm = 0.2$, required if the redshift-distance relation is linear.

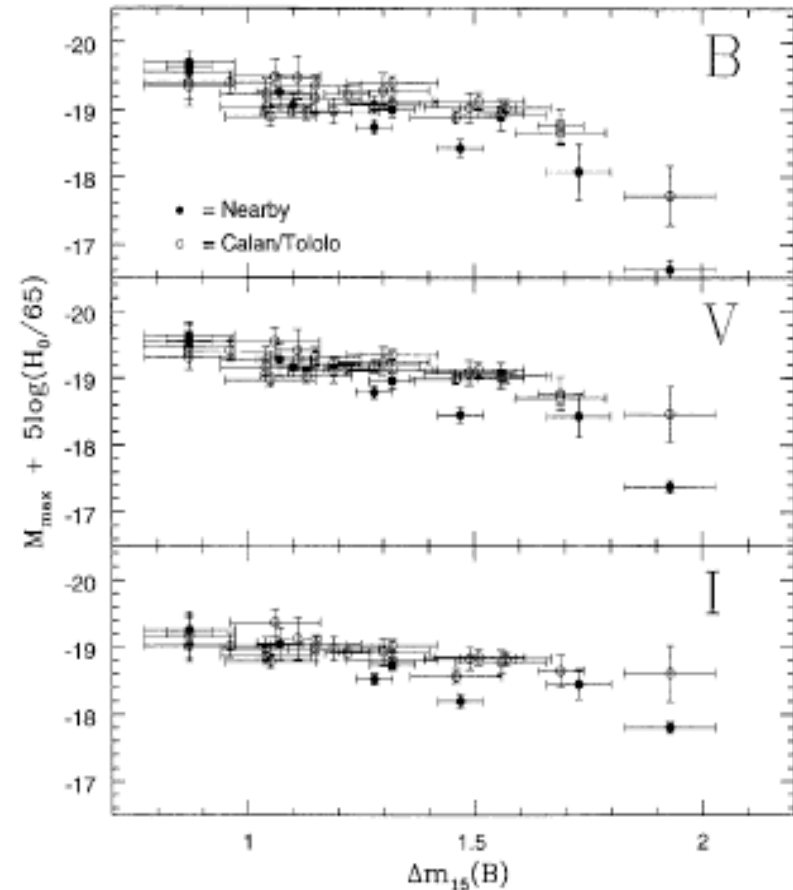
CCD data ==> data de precision ==> Diferencias sistematicas en la población de SN-Ia ==> Parametrización de las SNe Ia por la forma de su curva de luz.

2395 HAMUY ET AL.: CALAN TOLOLO Ia SNe



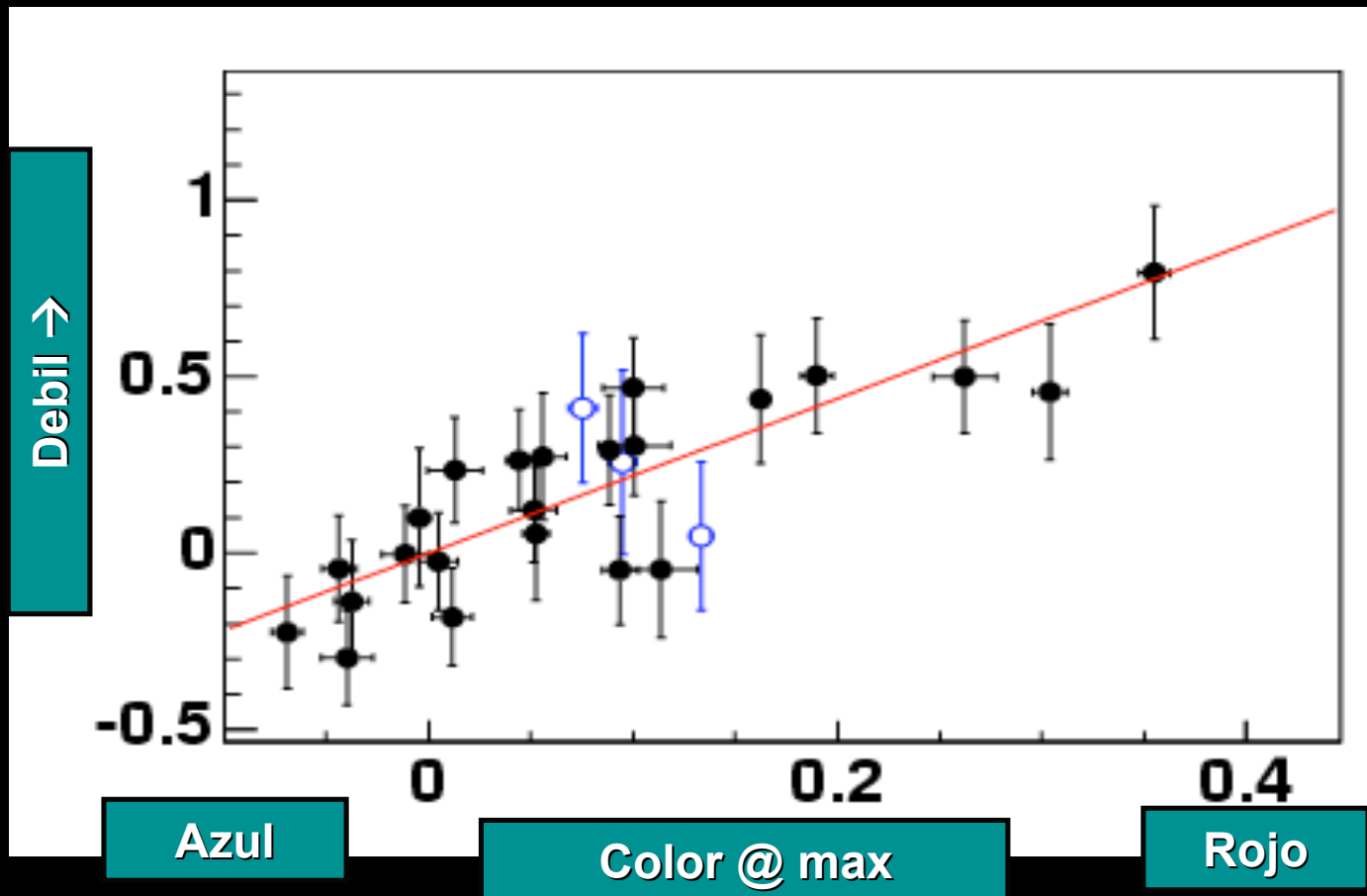
$$M_{MAX} = a + b[\Delta m_{15}(B) - 1.1]$$

Phillips (1993)

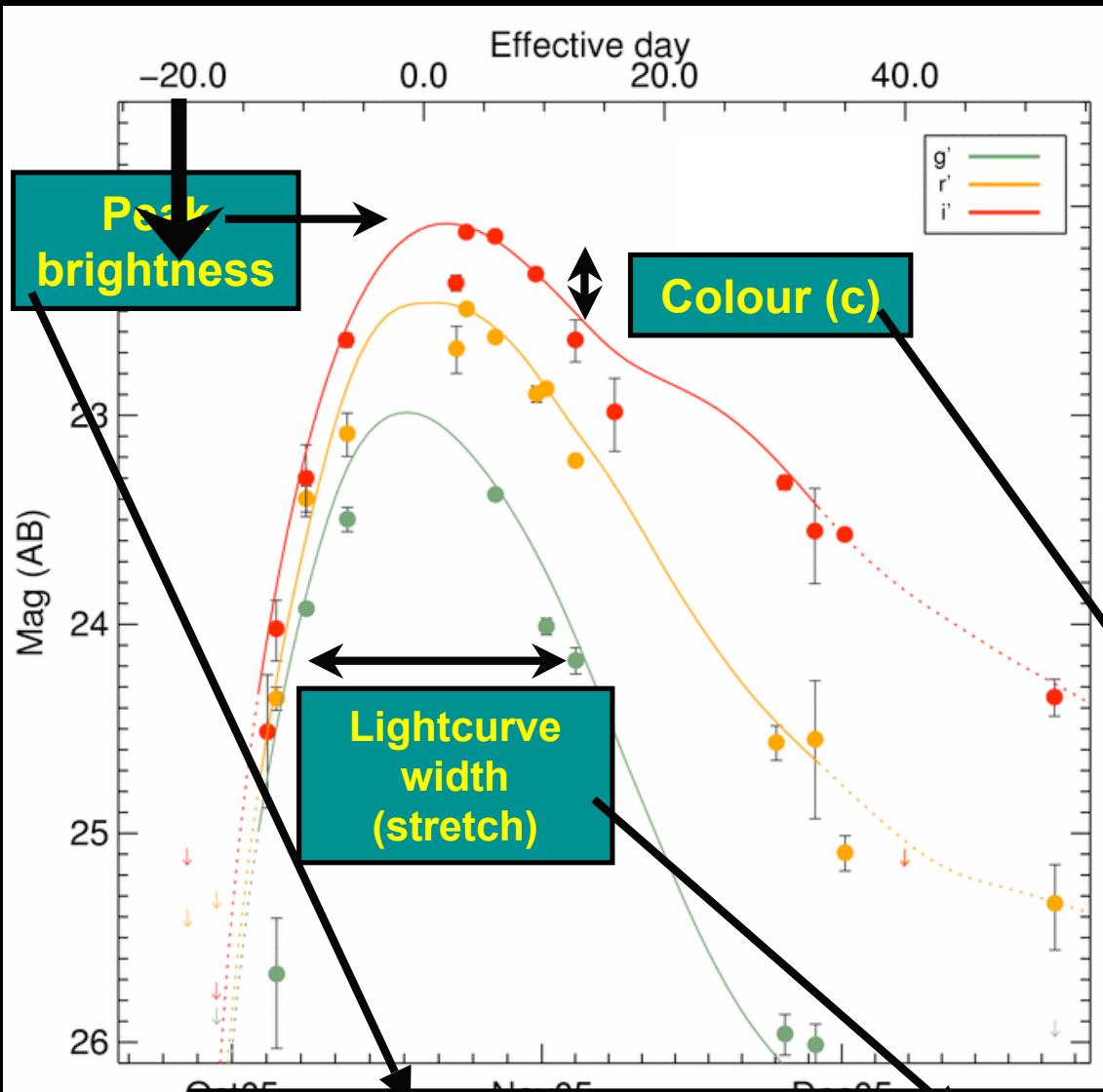


CALAN/TOLOLO Hamuy et al. (1996)

Color de la SN (*Branch et al. 1993*)



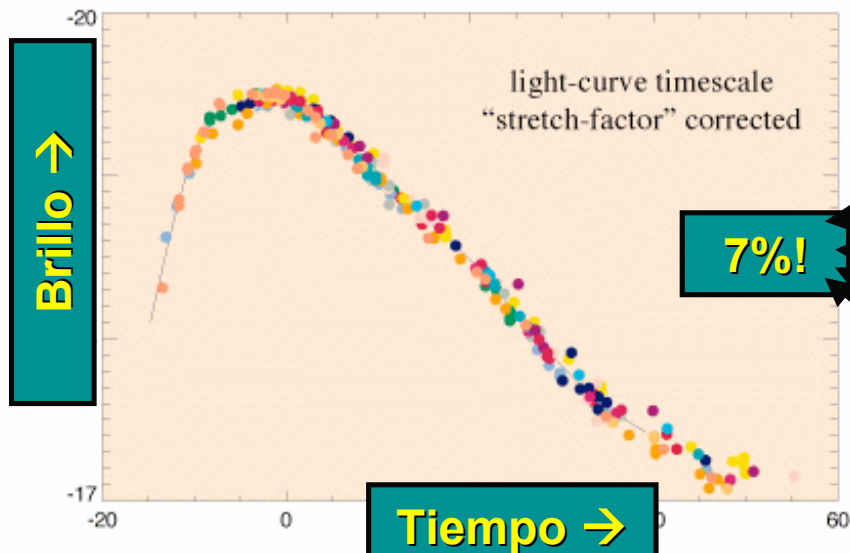
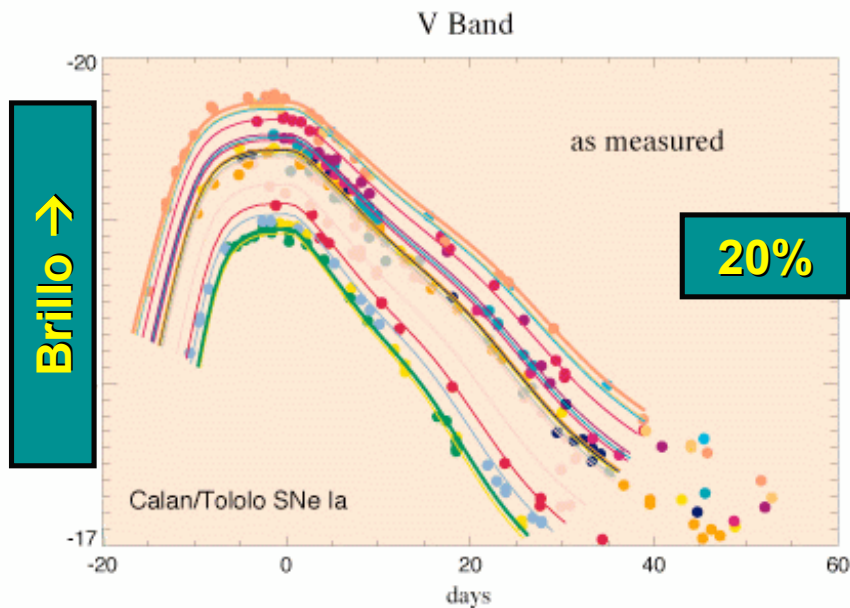
Una corrección para luminosidad de la SN basada en su color



Lo que típicamente se mide en una SN

$$\mu_B = m_B - M_B + \alpha(s - 1) - \beta \times c$$

Haciendo un standard candle



1. “relacion de Phillips”: corrección para curvas de luz de SN Ia basada en la forma que tiene la curva de luz cambia drásticamente la calidad del standard candle

2. Color de la SN: corrección para la luminosidad de la SN basada en su color

Muchos metodos:

- Stretch – Perlmutter 97, 99
- (M)LCS(2k2) – Riess, 95,96, Jha 07
- SALT(2) – Guy 05, 07
- SiFTO – Sullivan 07
- CMAGIC – Wang et al.; Conley 06
- Δm_{15} – Phillips 93; Hamuy 95; Prieto 06

Dilatación del tiempo (Leibundgut et al. 1996)

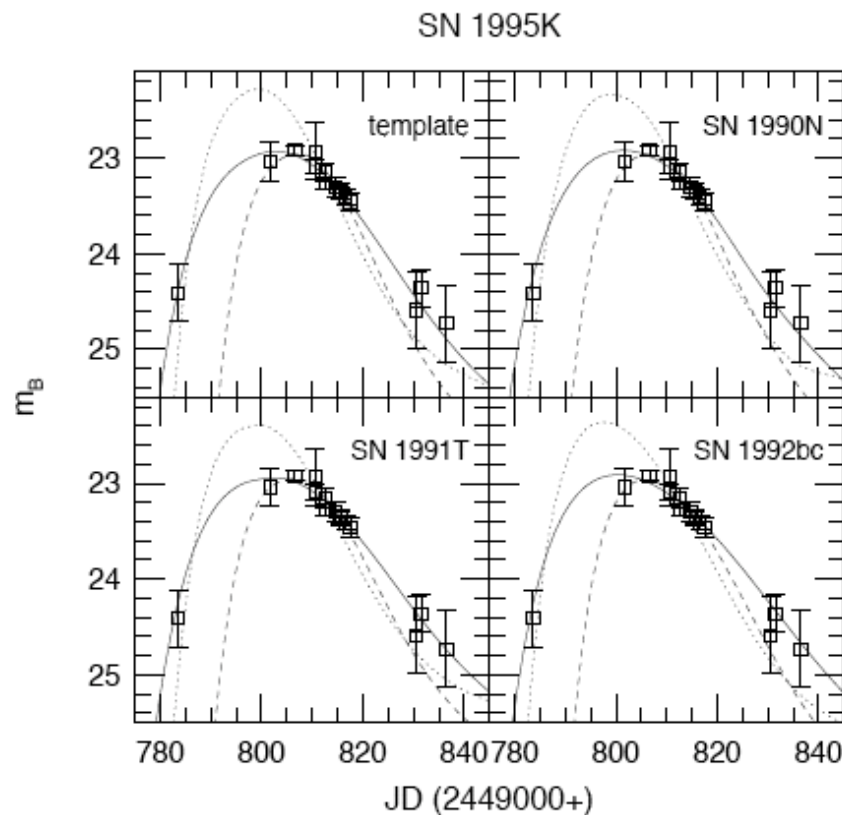
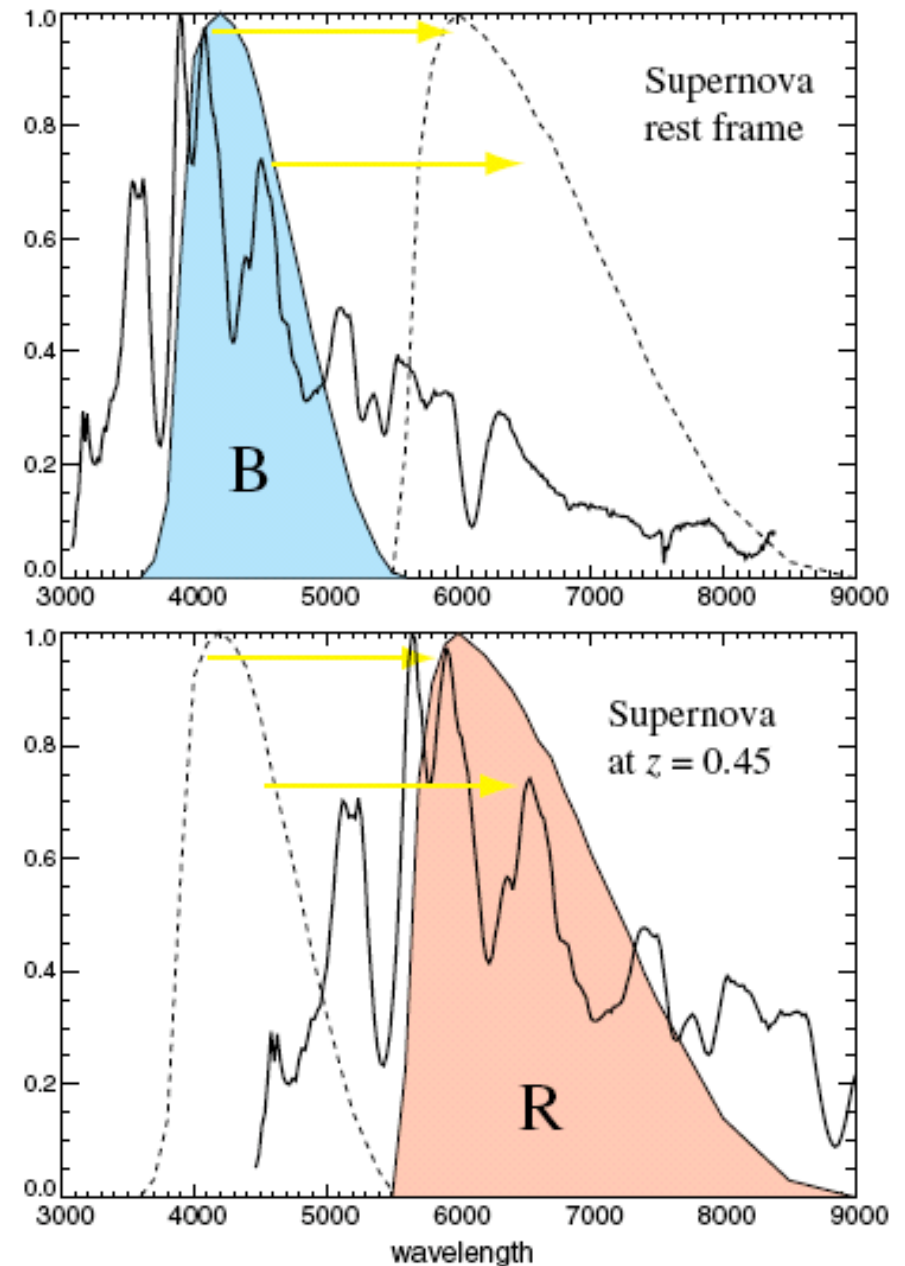


Figure 2: Comparison of the SN 1995K photometry with B light curves of local supernovae. The lines correspond to the best fits assuming a $(1+z)$ stretching as expected from universal expansion. Short dashes represent the best fit of non-dilated light curves to the data and long dashes are the best fits excluding the pre-maximum observation of SN 1995K.

K-correction

Kim, Goobar, & S.P. (1995)



Historia del High-Z SN Ia

- ✓ Zwicky busca SN entre 1930s-1960s. Kowal las usa para su Diagrama de Hubble de 1968
- ✓ ~1984: Se detecta contaminación por SN Ib/Ic
- ✓ 1990: Leibundgut, Tammann: uniformidad del Tipo-Ia útil para propósitos cosmológicos
- ✓ 1ra SN distante descubierta en 1988 por un equipo danés ($z=0.3$)

 7 SNe descubiertas en 1994 por Perlmutter et al. a $z = 0.4$

 Calan/Tololo Survey con 29 SNe Ia cercanas se completa en 1994

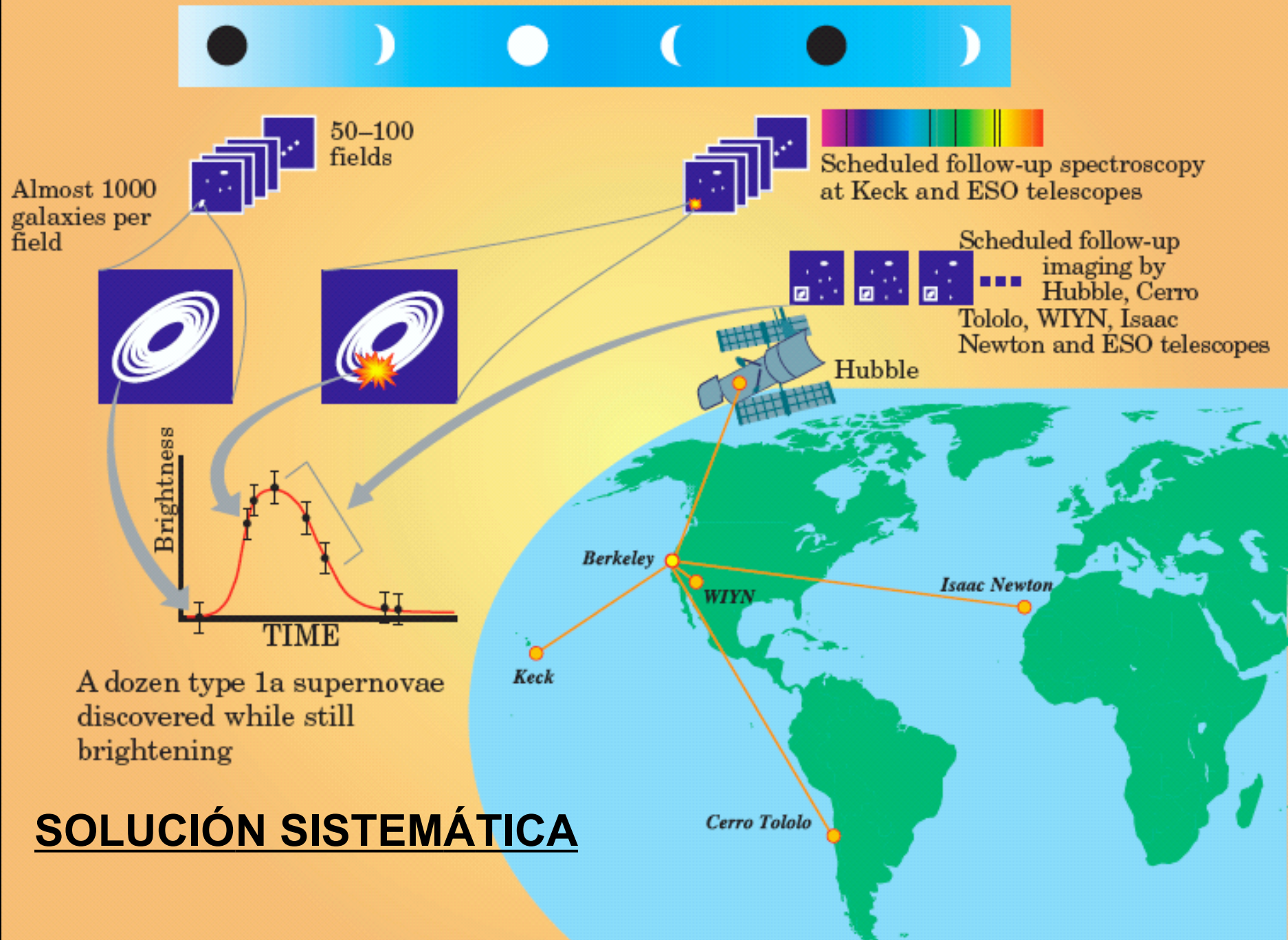
Por un lado:

- SNe son:
 - *impredecibles*
 - *aleatorias*
 - *escasas*: ocurren 1 cada 500-1000 años/galaxia
 - *efímeras*: después de explotar deben ser descubiertas rápidamente y medidas muchas veces en una ventana de tiempo de unas pocas semanas antes y después del máximo.

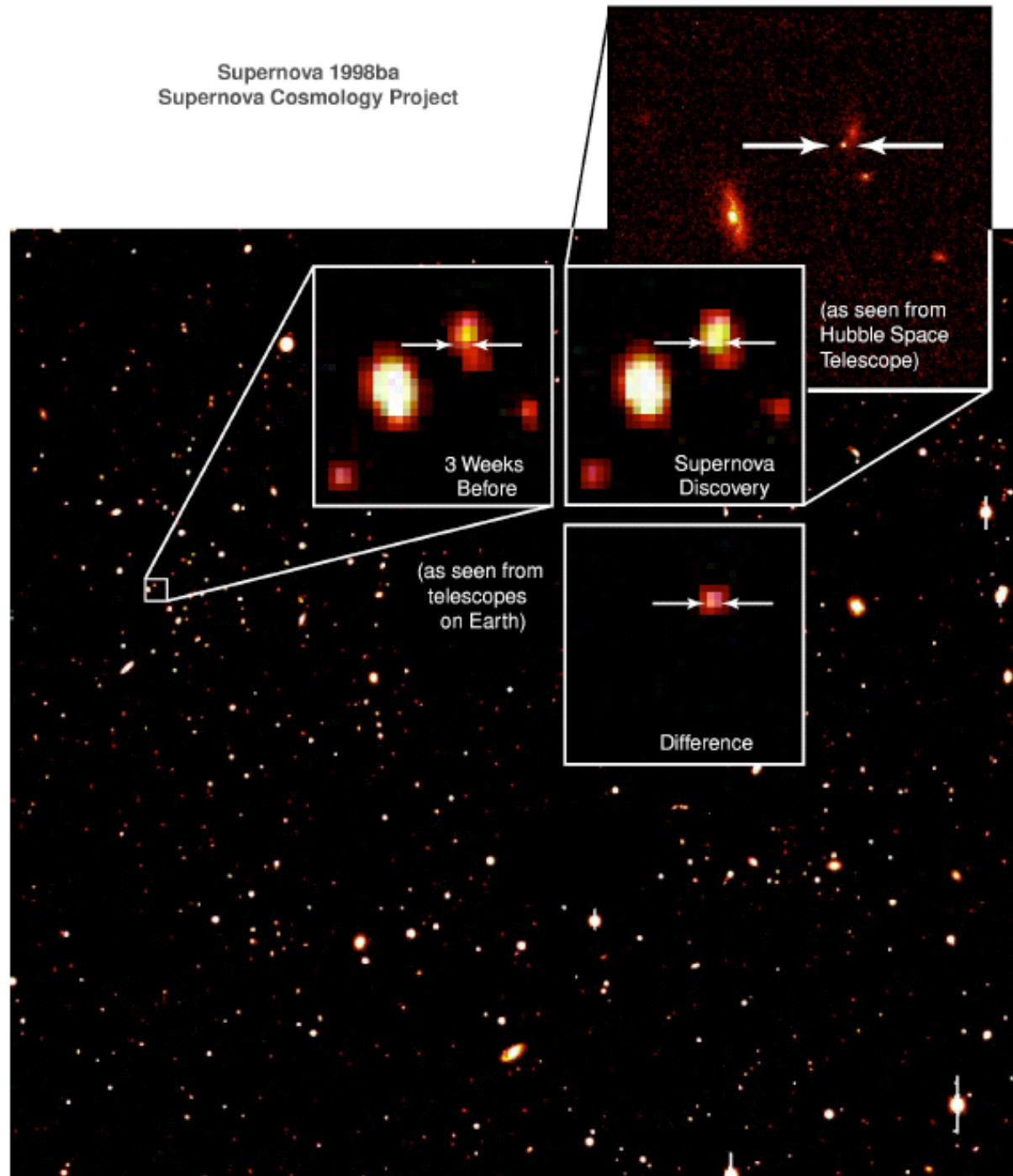
Por otro lado:

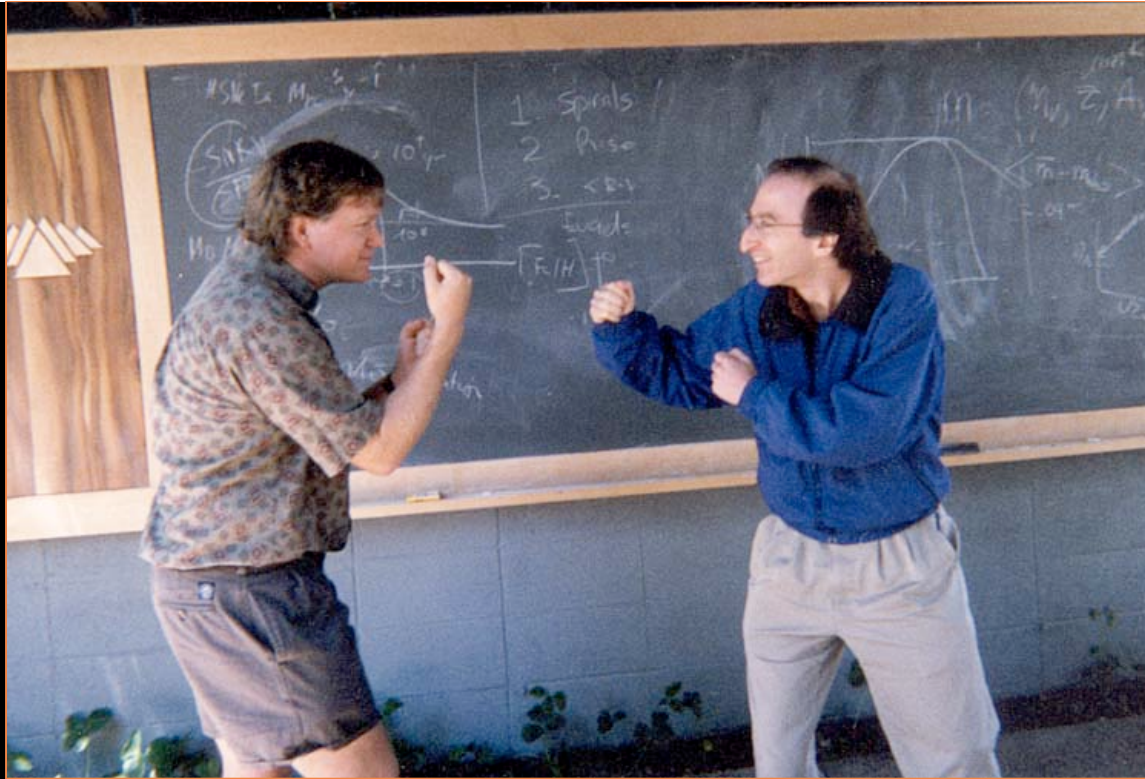
el **tiempo de telescopio es precioso** y hay que justificarlo con al menos 6 meses de anticipación.

Cómo encontrar SNe? ↔ CIRCULO VICIOSO



Supernova 1998ba
Supernova Cosmology Project





The High-Z Team

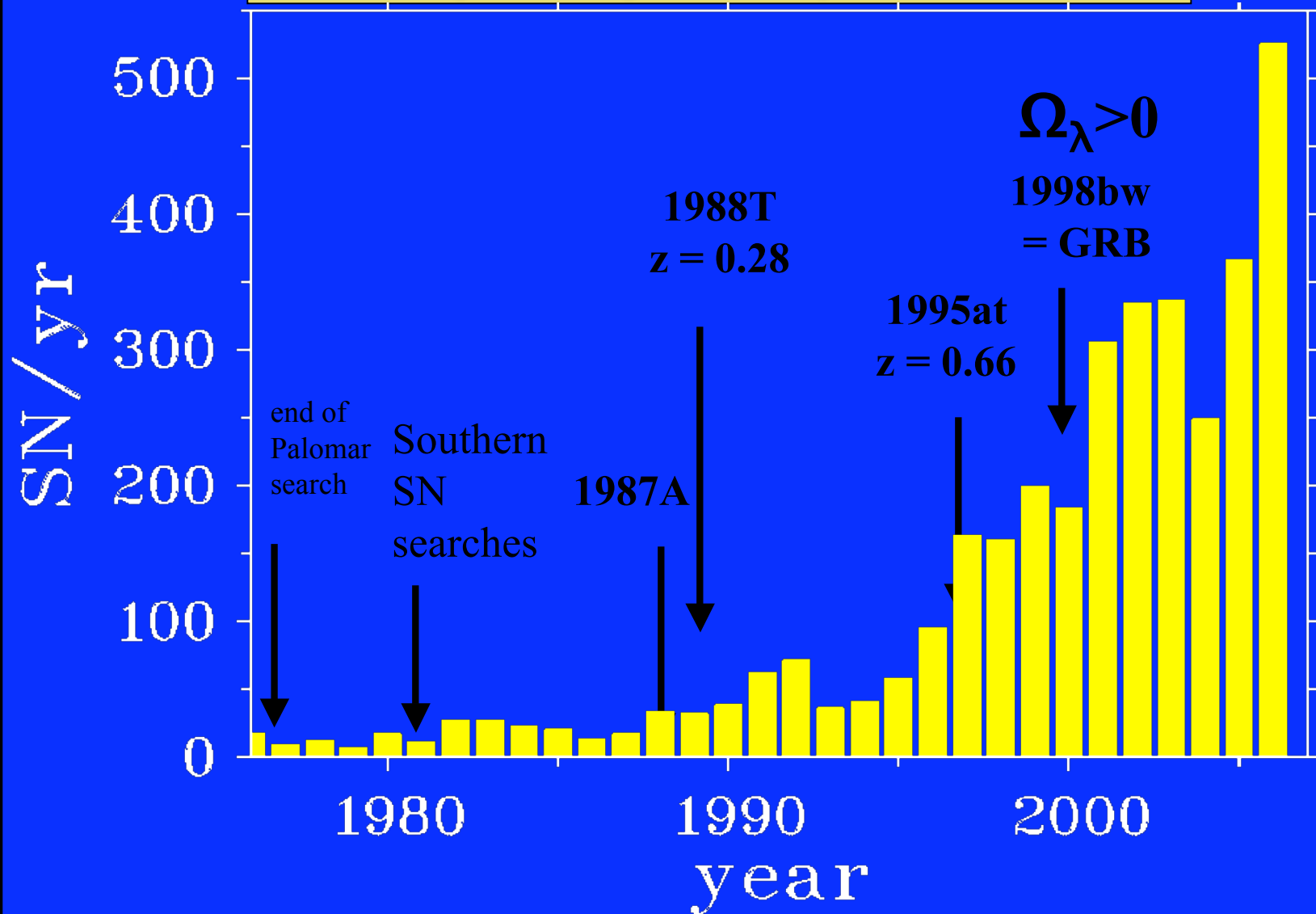
- **Brian Schmidt (ANU)**
- **Nick Suntzeff, Bob Schommer, Chris Smith (CTIO)**
- **Mark Phillips (Carnegie)**
- **Bruno Leibundgut and Jason Spyromilio (ESO)**
- **Bob Kirshner, Peter Challis, Tom Matheson (Harvard)**
- **Alex Filippenko, Weidong Li, Saurabh Jha (Berkeley)**
- **Peter Garnavich, Stephen Holland (Notre Dame)**
- **Chris Stubbs (UW)**
- **John Tonry, Brian Barris (University of Hawaii)**
- **Adam Reiss (Space Telescope)**
- **Alejandro Clocchiatti (Catolica Chile)**
- **Jesper Sollerman (Stockholm)**

The Supernova Cosmology Project

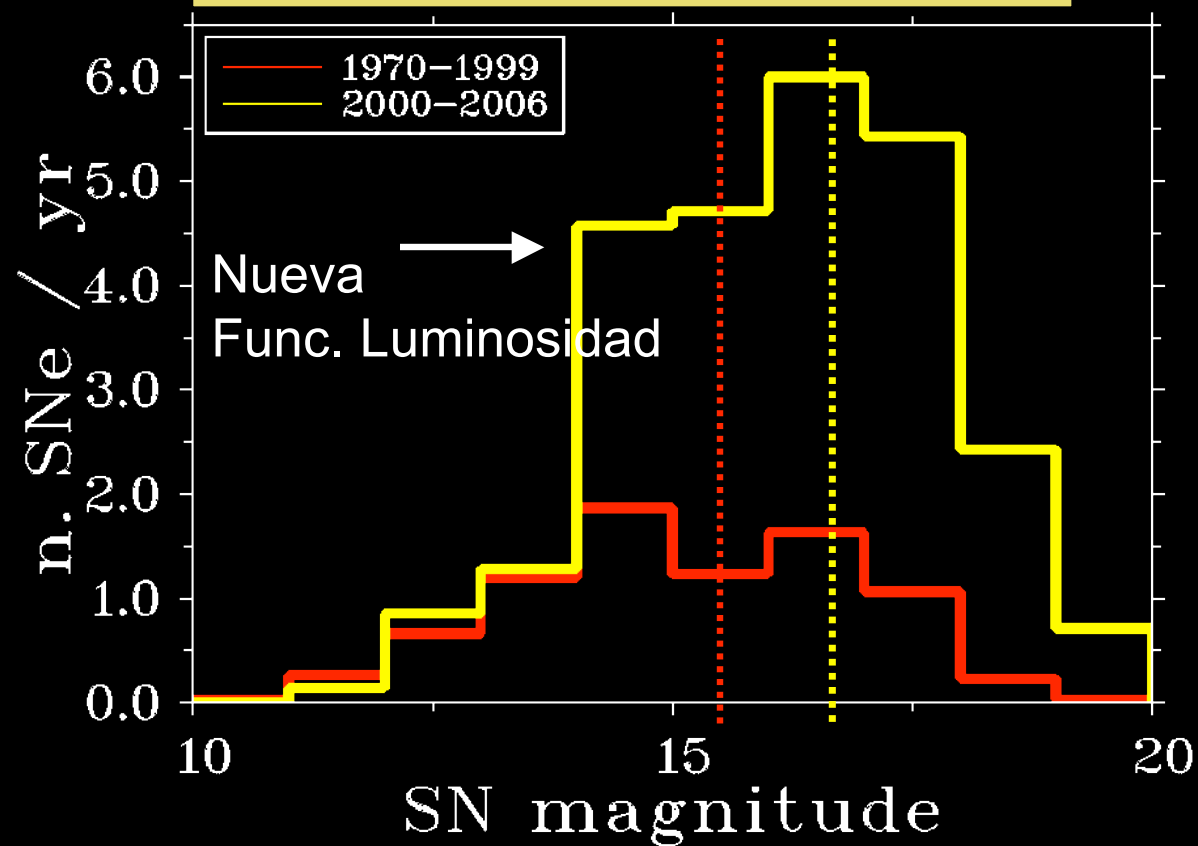
S. Perlmutter, G. Aldering, S. Deustua, S. Fabbro, G. Goldhaber, D. Groom, A. Kim, M. Kim, R. Knop, P. Nugent, (LBL & CfPA)
 N. Walton (Isaac Newton Group)
 A. Fruchter, N. Panagia (STSci)
 A. Goobar (Univ of Stockholm)
 R. Pain (IN2P3, Paris)
 I. Hook, C. Lidman (ESO)
 M. DellaValle (Univ of Padova)
 R. Ellis (CalTech)
 R. McMahon (IofA, Cambridge)
 B. Schaefer (Yale)
 P. Ruiz-Lapuente (Univ of Barcelona)
 H. Newberg (Fermilab)
 C. Pennypacker

SN discovery record

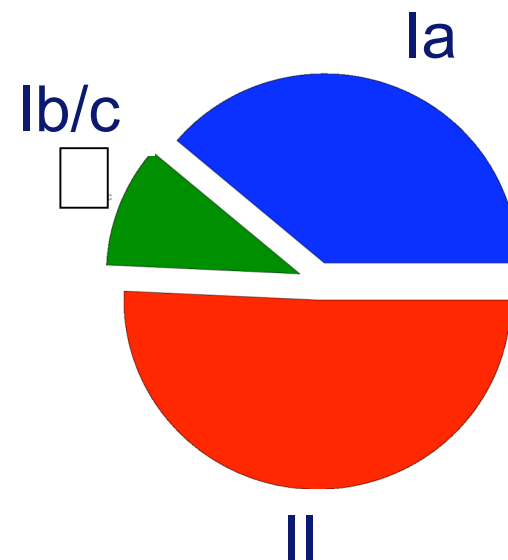
<http://web.oapd.inaf.it/supern/snean.txt>



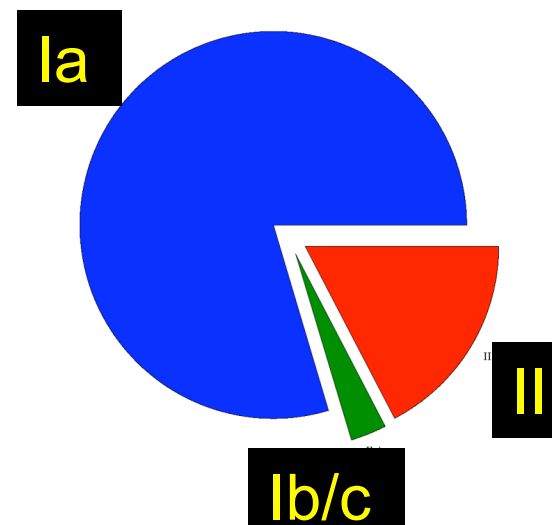
Apparent magnitude distribution of nearby ($z < 0.01$) SNe



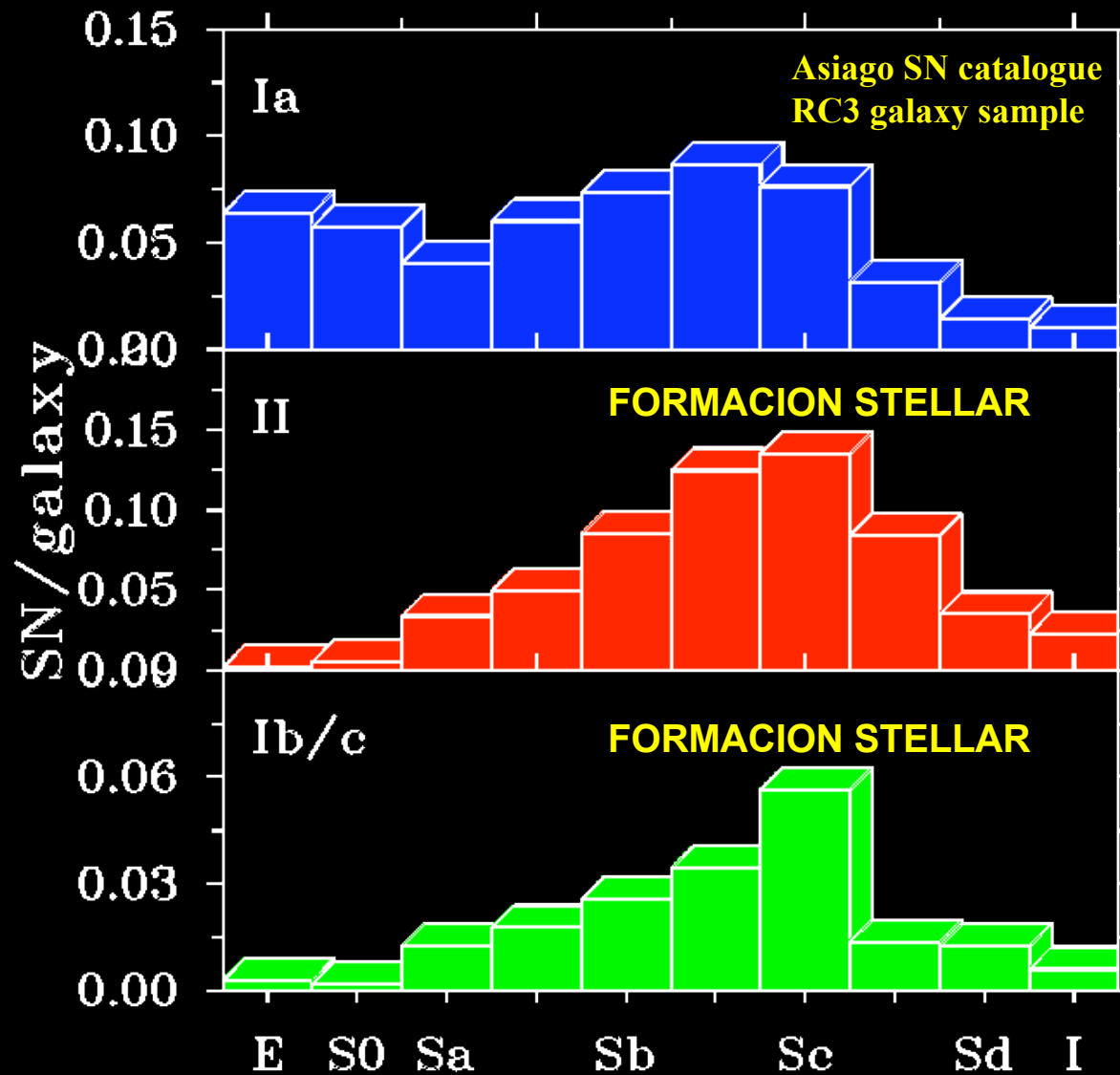
$z < 0.01$ yr ≤ 2000



$z > 0.03$



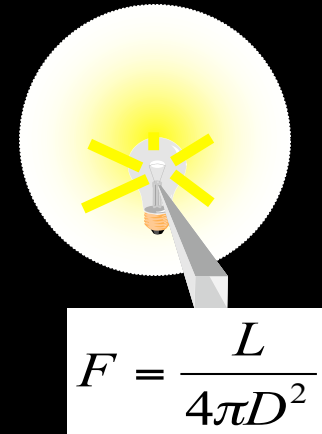
SNe y tipos de galaxias



Distancia de Luminosidad:

**Para una fuente monocromática:
Ley del Cuadrado Inverso**

$$D_L = \sqrt{\frac{L}{4\pi F}}$$



*El flujo que un observador detecta de un objeto
ubicado a un redshift z:*

$$D_L = \frac{c}{H_0} (1+z) |\kappa_0|^{-1/2} S \left\{ |\kappa_0|^{1/2} \int_0^z dz' \left[\sum_i \Omega_i (1+z')^{3+3w_i} - \kappa_0 (1+z')^2 \right]^{-1/2} \right\}$$

$$\kappa_0 = \left(\Omega_{tot} = \sum_i \Omega_i \right) - 1$$

$$S(x) = \begin{cases} \sin(x) & k = 1 \\ x & k = 0 \\ \sinh(x) & k = -1 \end{cases}$$

Para distancias cosmológicas la geometría del espacio comienza
A ser importante en su determinación.

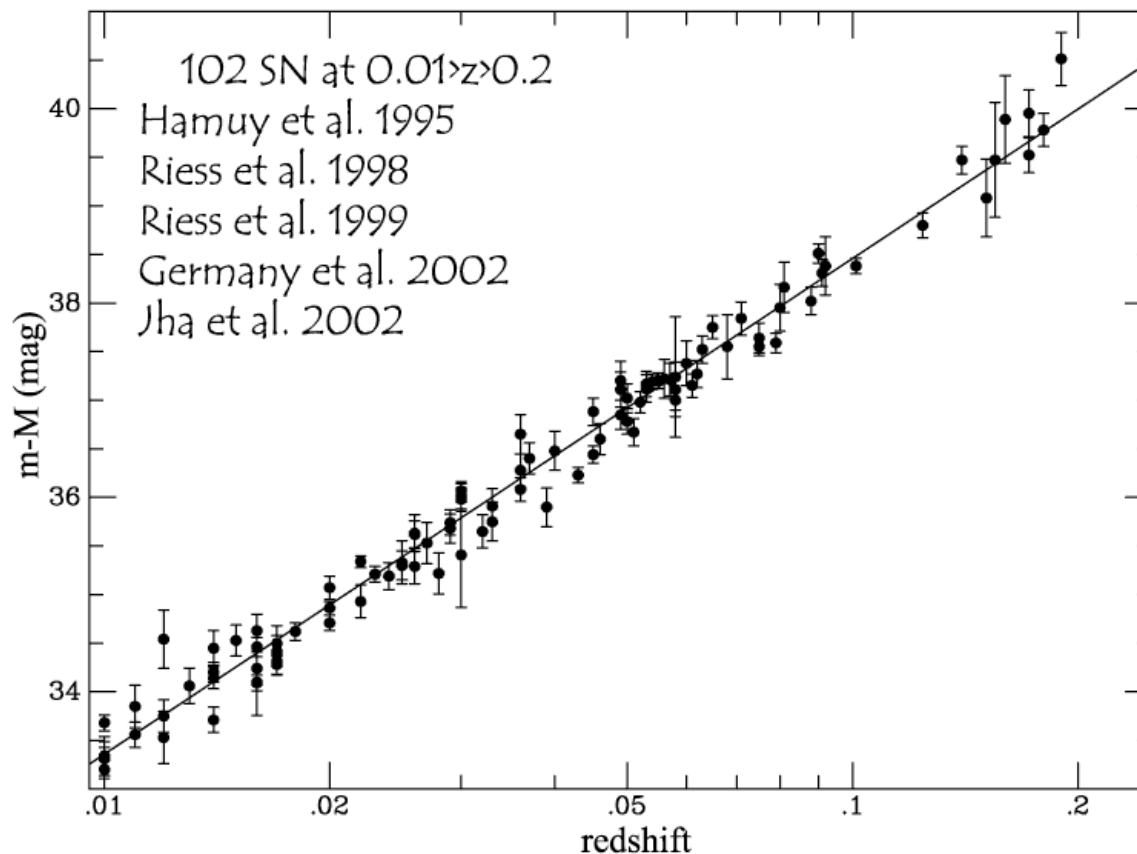
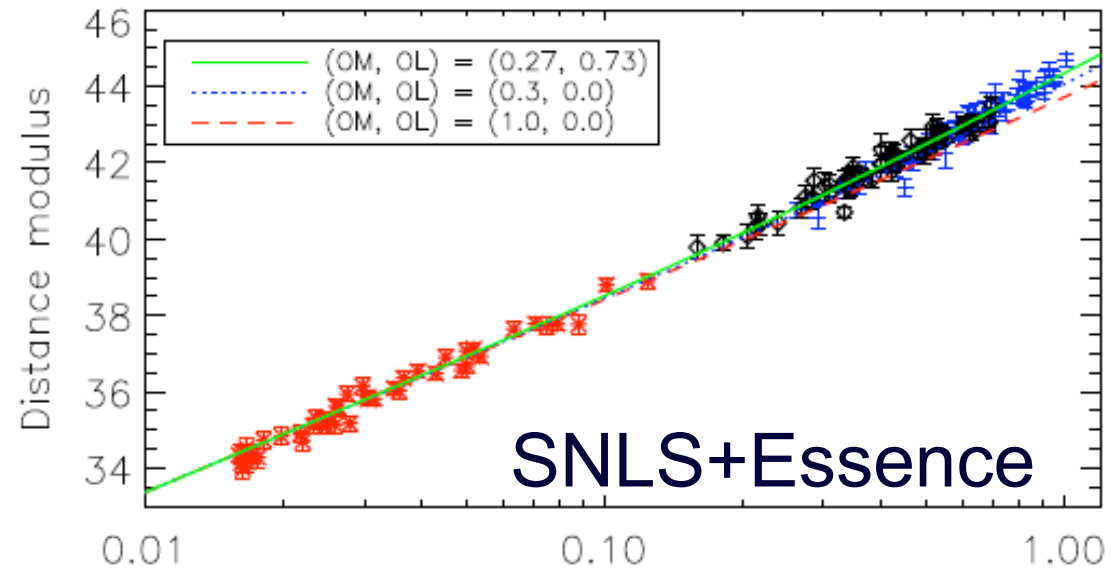
Problemas con SNe Ia Distantes

- SN Ia distantes parecen más débiles intrínsecamente que las SN Ia cercanas
- High-z SN Team & Supernova Cosmology Project intentar atacar ese el problema y sus posibles causas:
 - ✓ Evolucion?
 - ✓ Polvo?
 - ✓ Cosmología? Λ ?

Chequeos:

- **Polvo**
 - observaciones en muchos filtros
- **Evolucion**
 - espectroscopia
- **Cosmología**
 - SN Ia más distantes

Diferentes métodos que estandarizan SN Ia:



dm15, MLCS, stretch,
BATM, SALT,...

Errores Sistemáticos en SN Ia

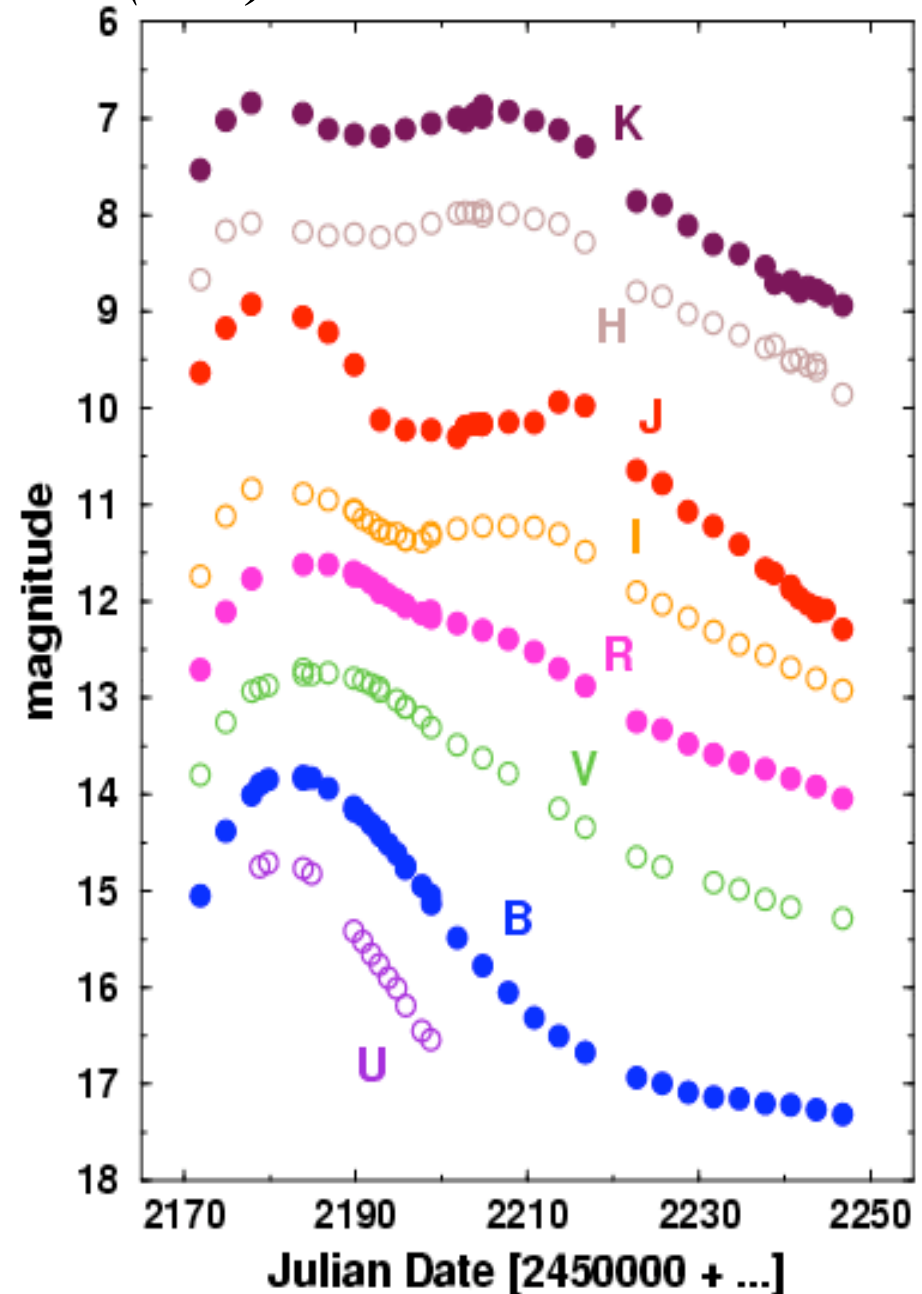
Source	dw/dx	Δx	Δ_w
Phot. errors from astrometric uncertainties of faint objects	1 / mag	0.005 mag	0.005
Bias in diff im photometry	0.5 / mag	0.002 mag	0.001
CCD linearity	1 / mag	0.005 mag	0.005
Photometric zeropoint diff in R,I	2 / mag	0.02 mag	0.04
Zpt. offset between low and high z	1 / mag	0.02 mag	0.02
K-corrections	0.5 / mag	0.005 mag	0.0025
Filter passbands	0 / mag	0.001 mag	0
Galactic extinction	1 / mag	0.01 mag	0.01
Host galaxy R_V	0.02 / R_V	0.5	0.01
Host galaxy extinction+color treatment	0.08	prior choice	0.08
Malmquist bias/selection effects	0.7 / mag	0.03 mag	0.02
SN Ia evolution	1 / mag	0.02 mag	0.02
Hubble bubble	$3/\delta H_{\text{effective}}$	0.02	0.06
Gravitational lensing	$1/\sqrt{N}$ / mag	0.01 mag	< 0.001
Grey dust	1 / mag	0.01 mag	0.01
Subtotal w/o extinction+color	...	...	0.084
Total	...	...	0.11
Joint ESSENCE+SNLS comparison	...	...	0.02
Joint ESSENCE + SNLS Total	...	...	0.12

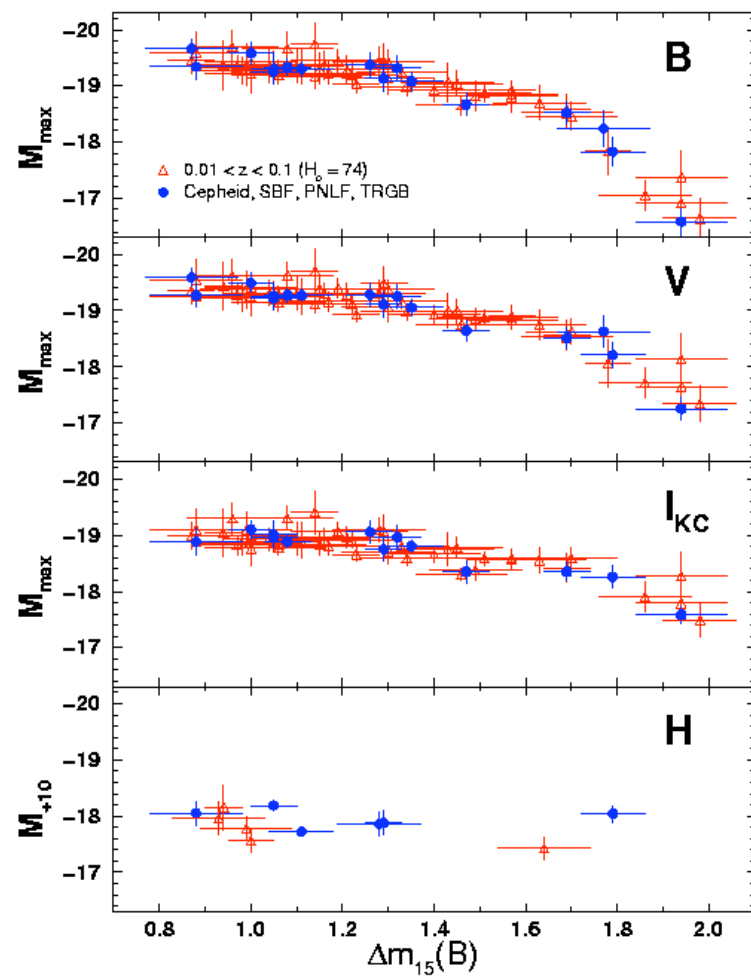
SN Ia en múltiples bandas:

- ✓ mejora problema de extinción.
- ✓ permite mejor comparación entre diferentes SNe
- ✓ permite encontrar nuevas correlaciones

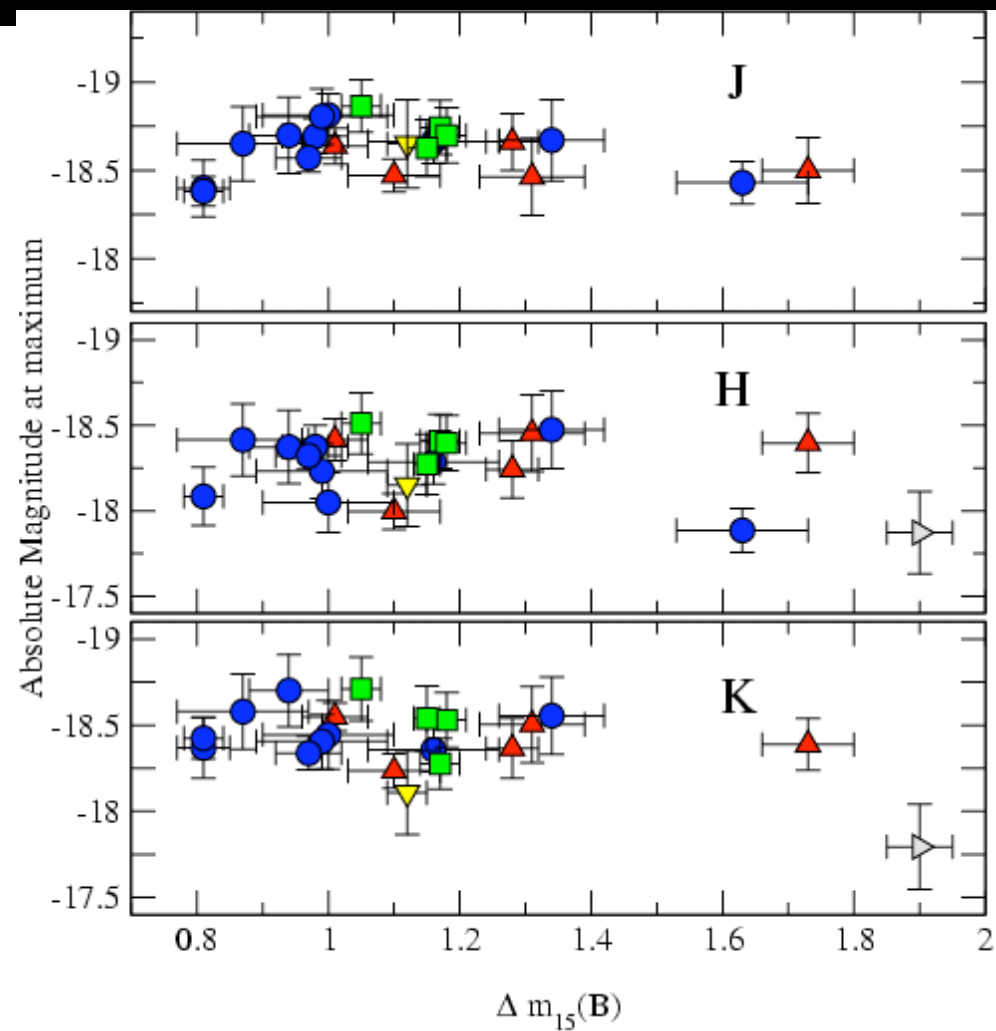
*Krisciunas
et al. (2003)*

SN 2001el
CTIO & LCO Photometry

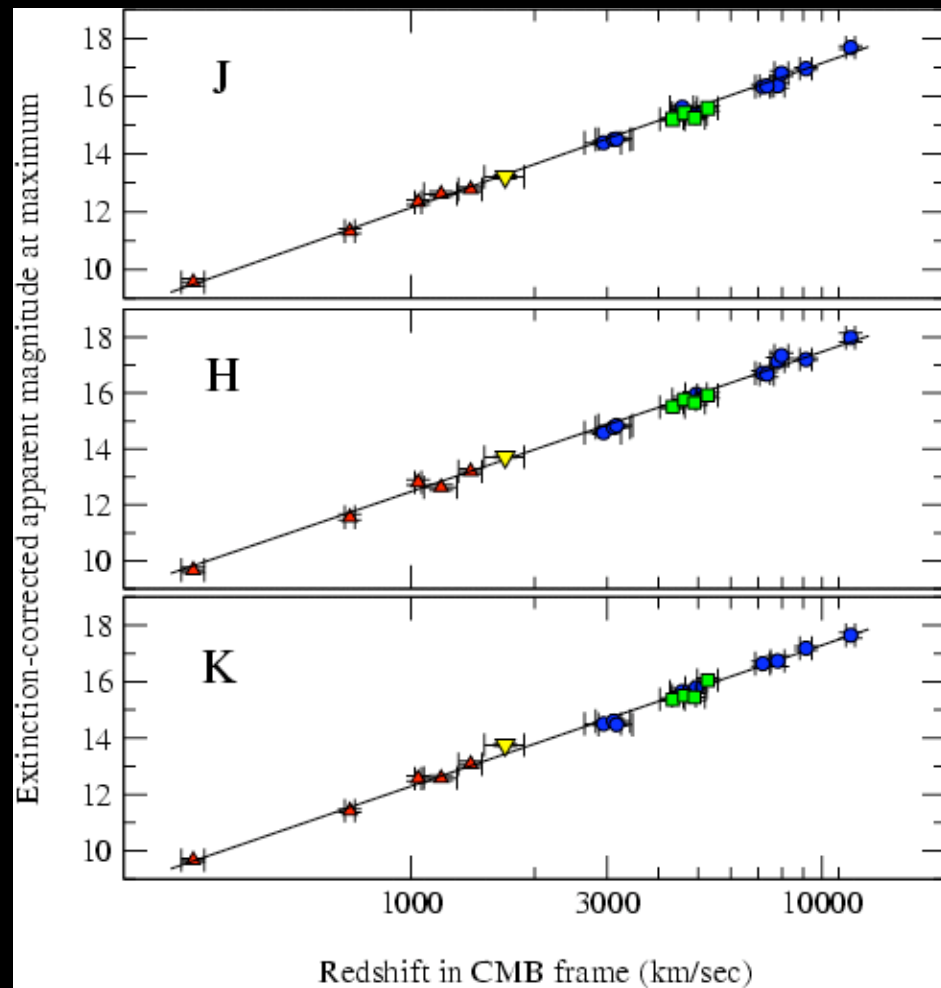




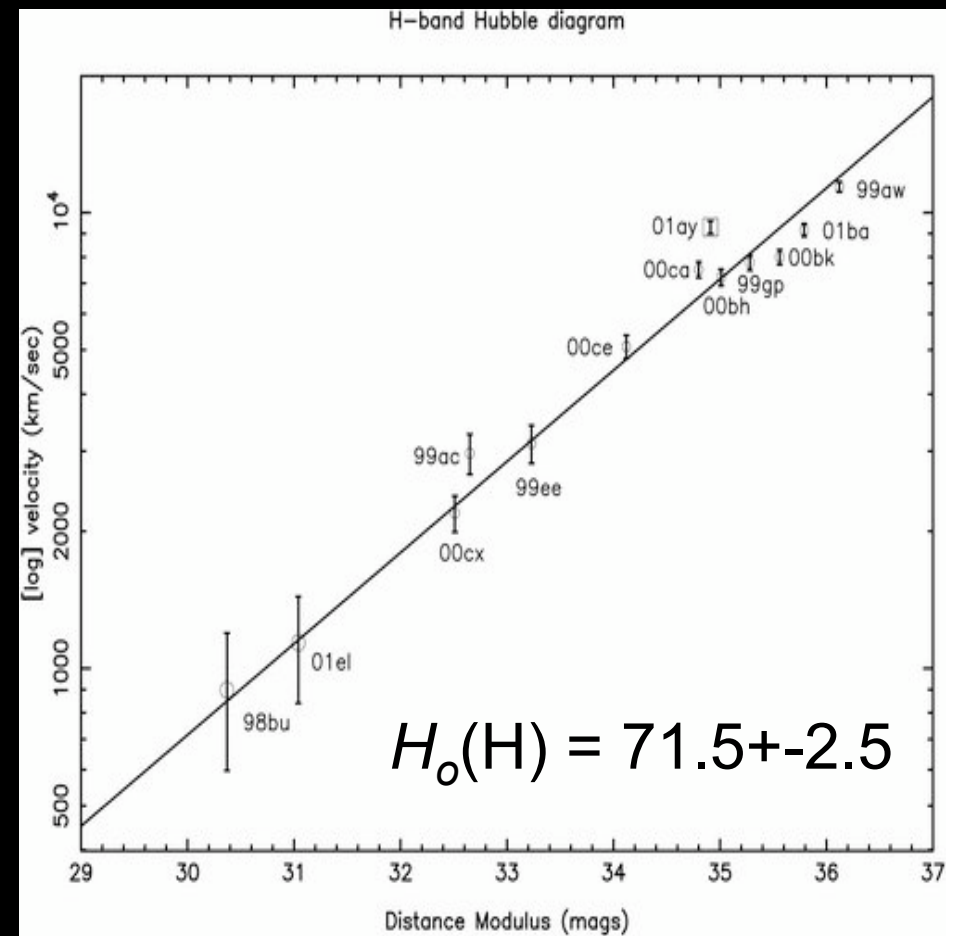
Phillips et al. 2002



Krisciunas et al. 2004

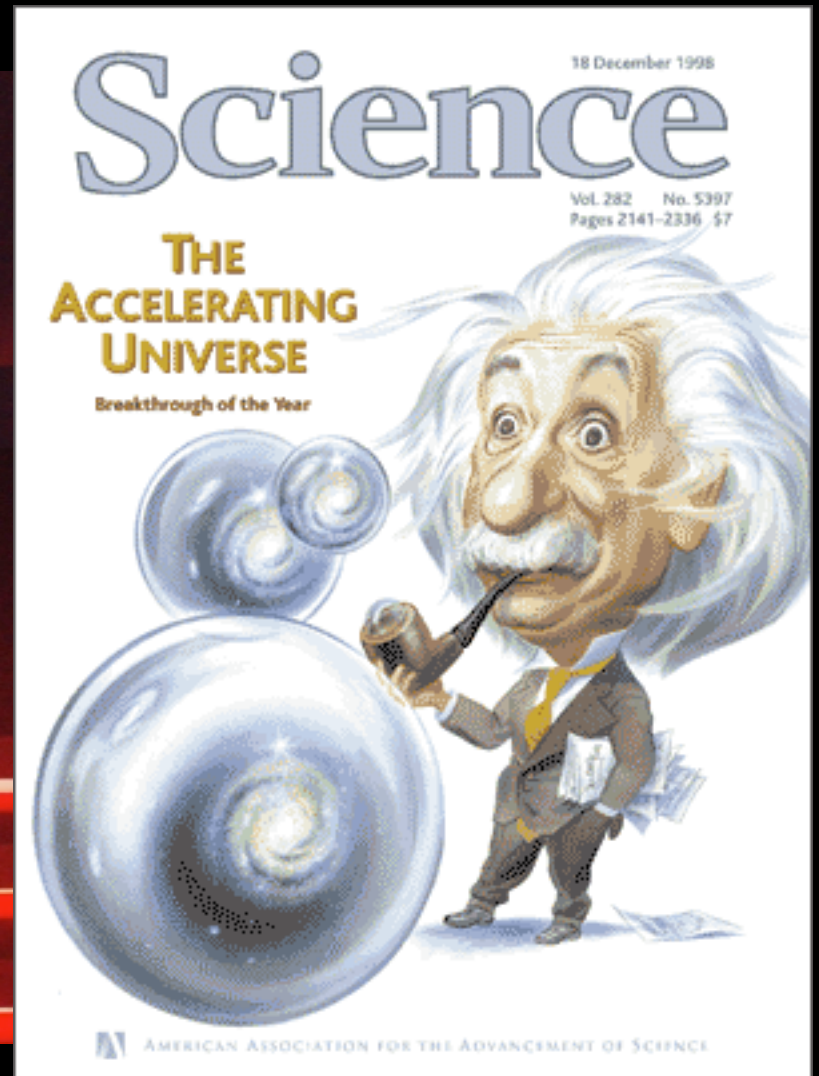


Krisciunas et al. 2004



Verdugo et al. 2002

- Mientras las SN Ia son “*standardizable candles*” en bandas ópticas, aparentemente son *standard candles* en el NIR a un nivel de ± 0.20 mag o mejor ($\pm 9\%$ en distancia)
- La desventaja del NIR es que las SN Ia son ≥ 1 mag. menos luminosas en JHK que en la banda V.



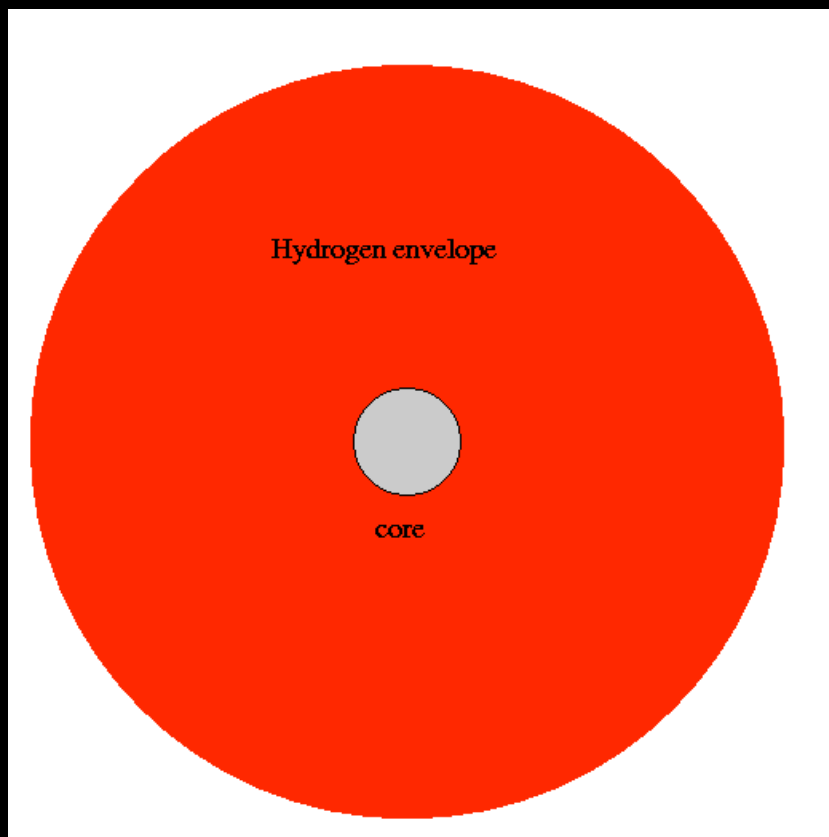
Shaw Prize 2005 para Perlmutter, Riess y Schmidt

2da PARTE:

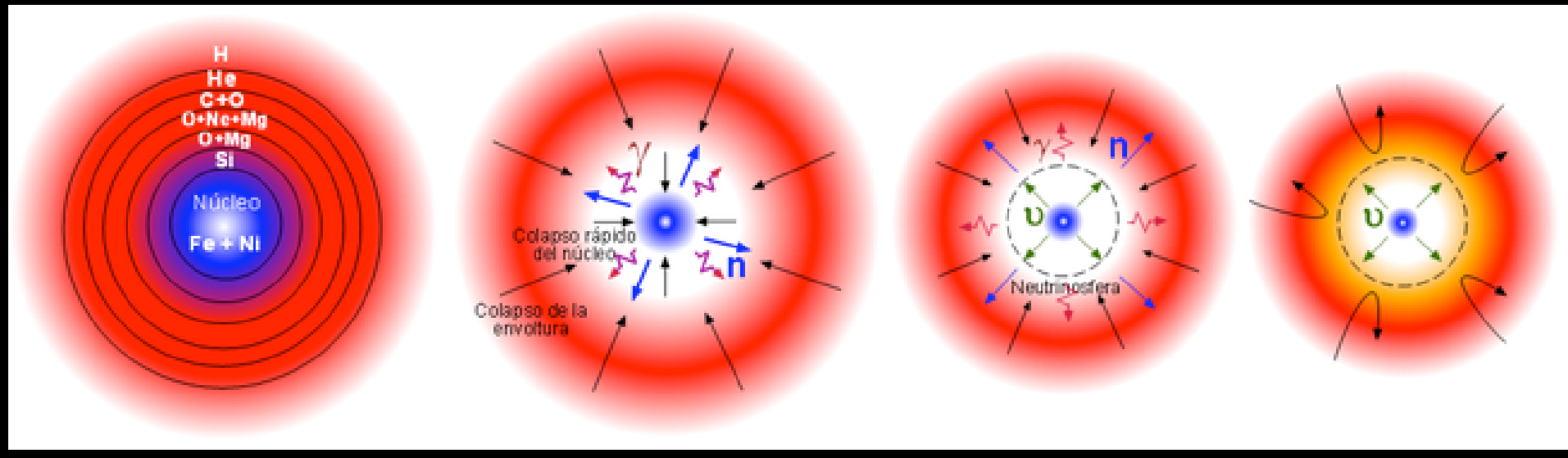
SUPERNOVAS TIPO II

SN tipo II

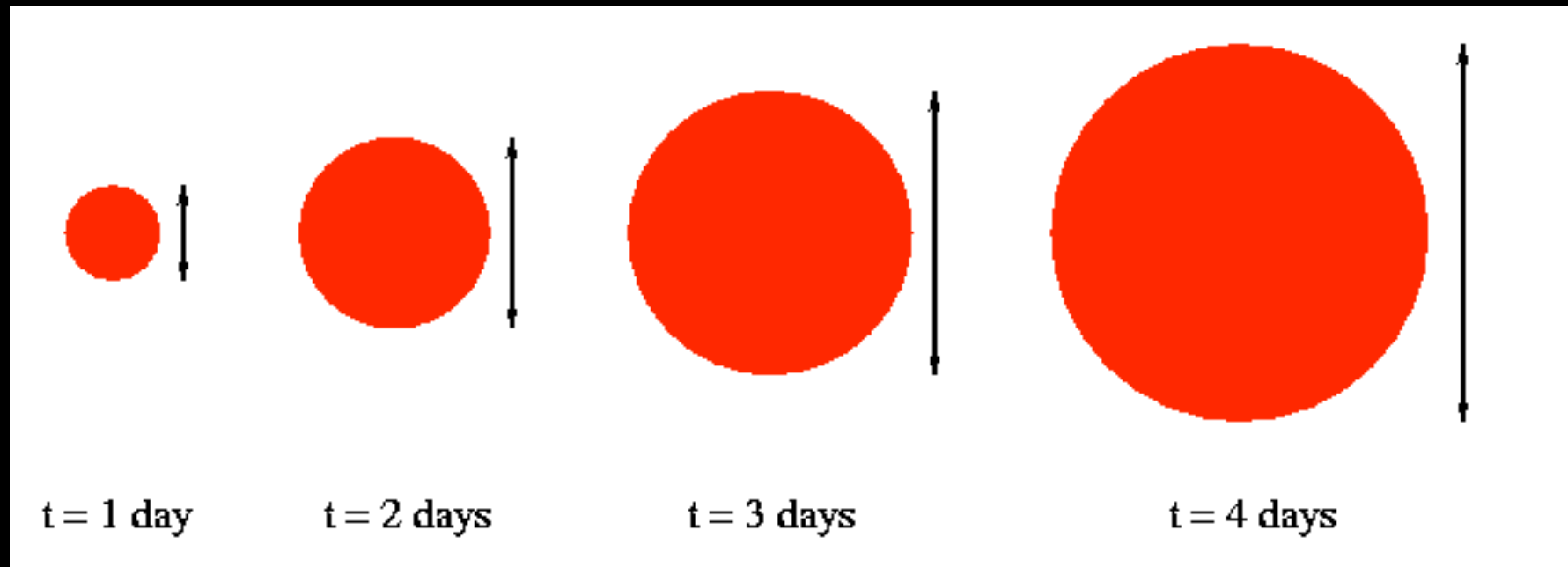
- ✓ Muestran gran variación en sus espectros y curvas de luz.
- ✓ Son intrínsecamente mas débiles que las SN Ia.
- ✓ Se encuentran en zonas de polvo interestelar (discos)

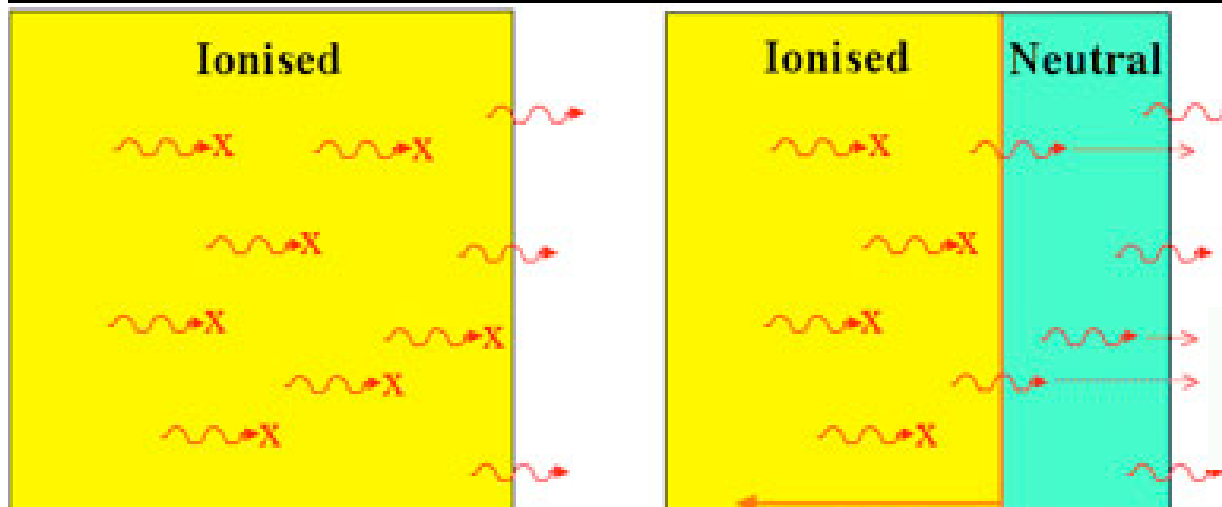
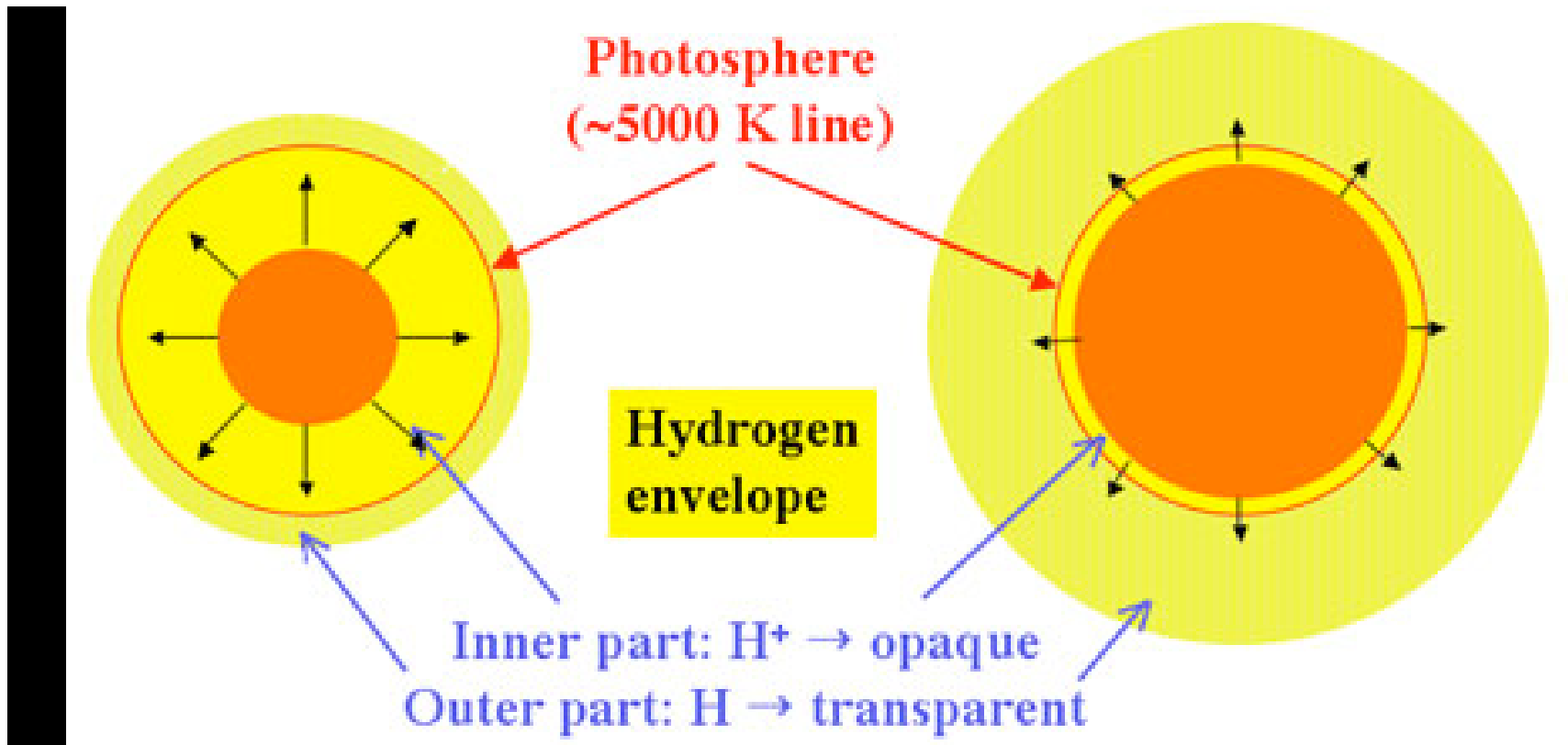


SN tipo II: Líneas Balmer de hidrógeno.



El ejecta se mueve a velocidad $\sim$ constante.
La estrella crece de una forma lineal

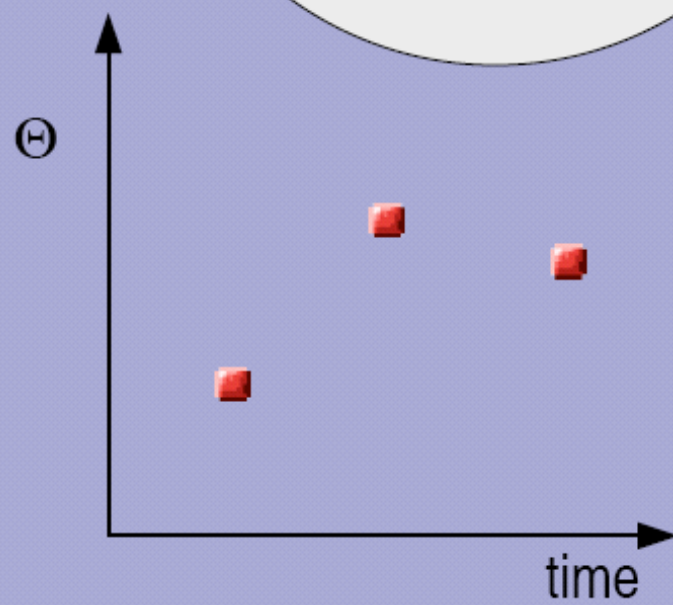
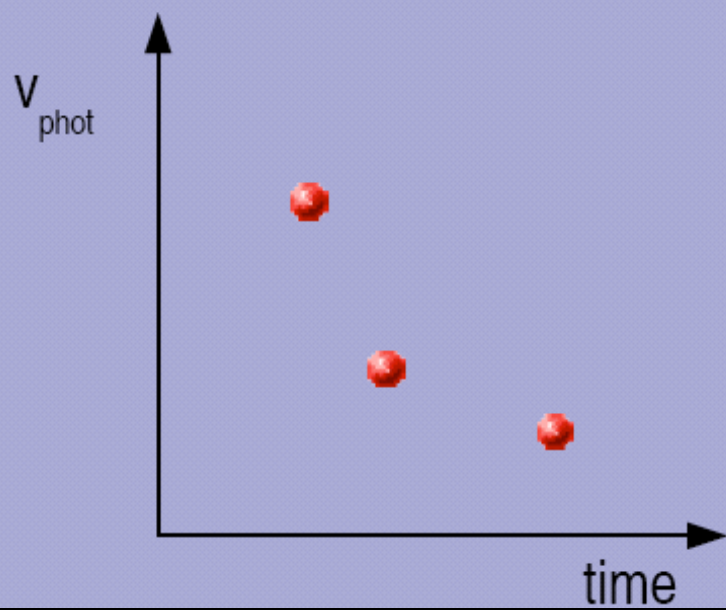
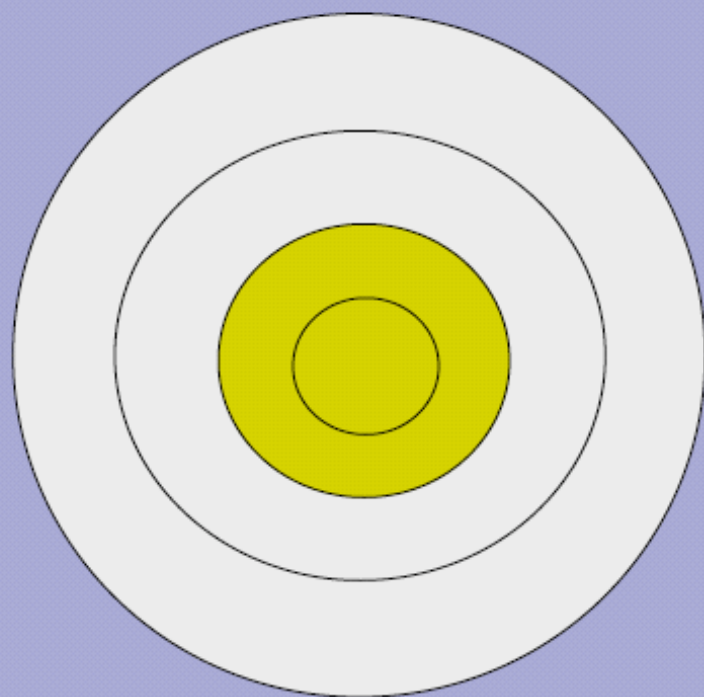
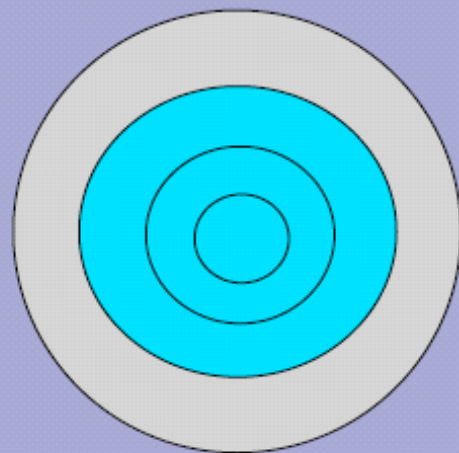




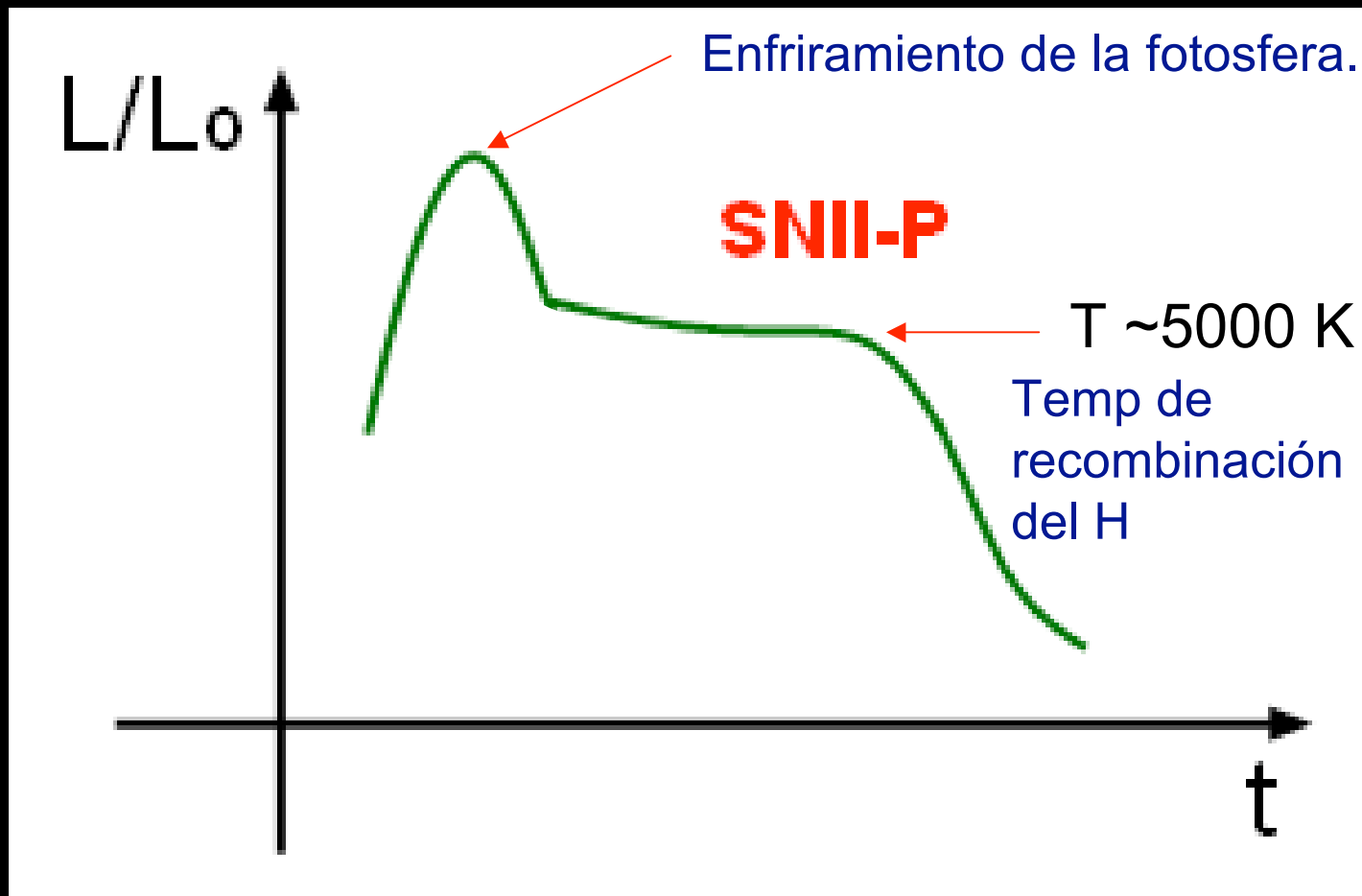
**Photosphere
at ~5000K**

(Eastman et al. 1996)

$$\frac{N_{II}}{N_I} = \frac{2Z_{II}}{n_e Z_I} \left(\frac{2\pi m_e kT}{h^2} \right)^{3/2} e^{-\chi/kT}$$



SN tipo II “PLATEAU”



Observables: v , $(B-V \Rightarrow T)$

$$\pi \int B_{\lambda}(T) d\lambda = \sigma T^4$$

ENERGIA DE UN CUERPO NEGRO

$$L = (4\pi R^2) (\sigma T^4) \quad \text{LUMINOSIDAD}$$

$$\Rightarrow R^2 = L / (4\pi) (\sigma T^4) = R^2 = L / (4\pi) (\pi B_{\lambda}(T))$$

$$F = L / 4\pi D^2 \Rightarrow D^2 = L / 4\pi F$$

FLUJO

$$R_i = v_i (t_i - t_0)$$

EXPANSION LINEAL

$$\Theta = \left(\frac{R}{D} \right) = \sqrt{\frac{\frac{L}{(4\pi)(\xi^2 \pi B_{\lambda}(T))}}{\frac{L}{(4\pi)F}}} = \sqrt{\frac{F}{\xi^2 \pi B_{\lambda}(T)}}$$

(Schmidt et al. 1992)

ξ = factor de corrección
Aproximación a un cuerpo negro

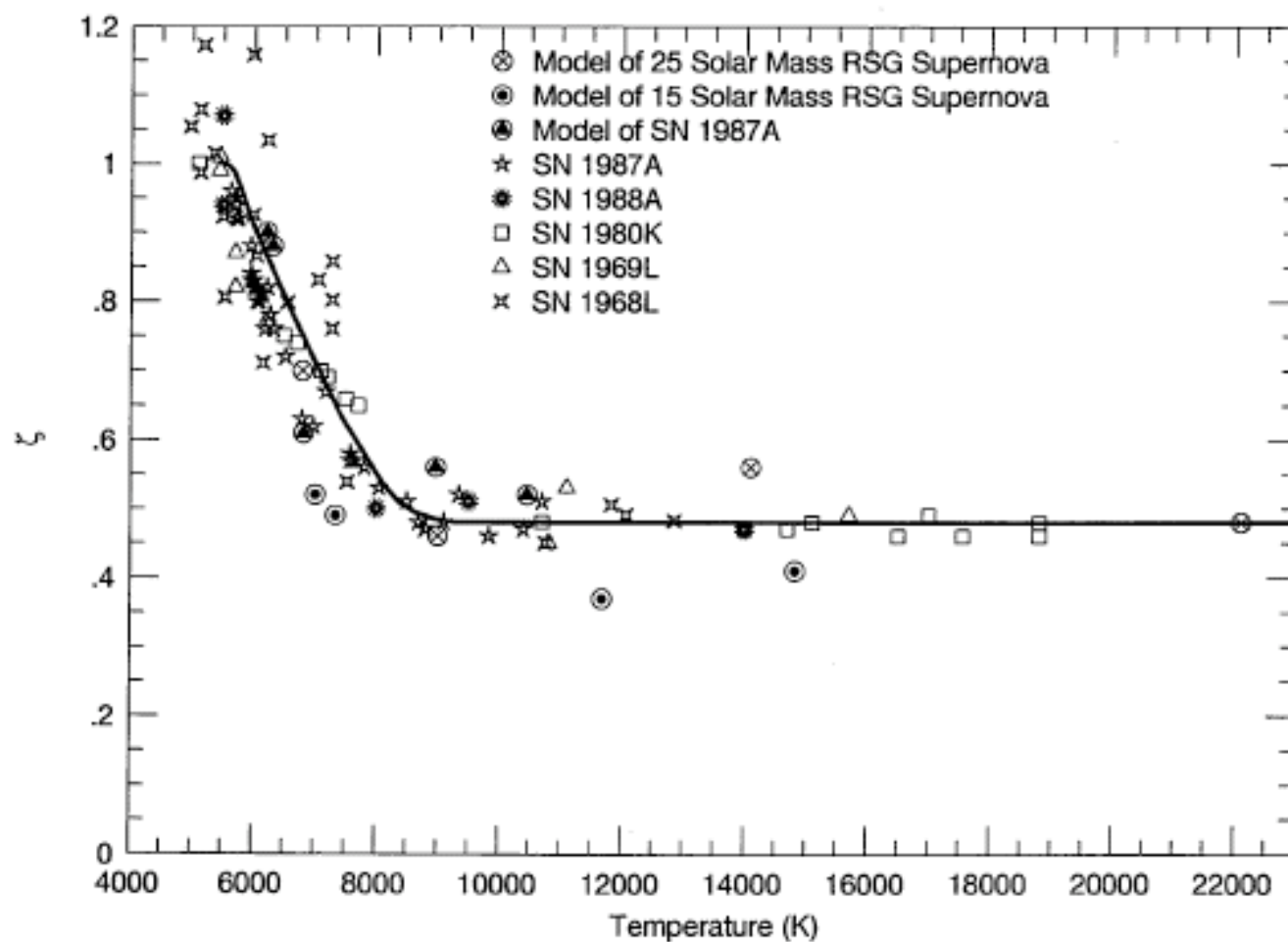


FIG. 4.—Optical distance correction factors plotted as a function of color temperature derived empirically, and from models of SN 1987A, and $15 M_{\odot}$ and $25 M_{\odot}$ red supergiant supernovae. The line of best fit is also plotted.

TABLE 4B
DERIVED QUANTITIES FOR SN 1970G

t^a (days)	v_{used} (km sec ⁻¹)	θ^b (10 ¹⁵ cm Mpc ⁻¹)	R (10 ¹⁵ cm)	Temp ^b (K)	D (Mpc)	Corr	D_{corr} (Mpc)	t^a (days)	B	V
35	6400	0.144	1.99	9500	13.8	0.48	6.5	35	...	...
36	6400	0.125	2.05	10800	16.3	0.48	7.6	36	11.94	11.65
37	6400	0.125	2.10	10800	16.9	0.48	7.9	37	11.95	11.66
38	6300	0.136	2.12	10100	15.6	0.48	7.3	38	12.00	11.67
39	6300	0.128	2.18	10300	17.0	0.48	8.0	39	12.08	11.76
40	6200	0.172	2.20	8600	12.7	0.50	6.2	40	12.14	11.67
41	6200	0.162	2.25	8700	13.9	0.49	6.7	41	12.21	11.78
42	6200	0.180	2.30	8200	12.8	0.52	6.5	42	12.22	11.75
52	5307	0.247	2.43	6300	9.8	0.85	8.2	52	12.86	12.15
53	5218	0.250	2.43	6200	9.7	0.86	8.2	53	12.89	12.17
54	5129	0.227	2.44	6500	10.7	0.80	8.4	54	12.83	12.16
55	5039	0.304	2.44	5800	8.0	0.97	7.6	55	12.95	12.14
59	4682	0.231	2.43	6400	10.5	0.84	8.7	59	12.96	12.26
61	4504	0.283	2.41	5900	8.5	0.94	7.8	61	12.96	12.18
63	4414	0.341	2.40	5440	7.1	1.00	6.9	62	13.05	12.18
70	3700	0.285	2.27	5000	8.0	1.00	7.9	70	...	...

Ejemplo: *SN1970G @ M101*

D (Schmidt) = 7.6±1.5 Mpc

D (HST Key Project; Cepheids) = 7.4 ±0.6 Mpc

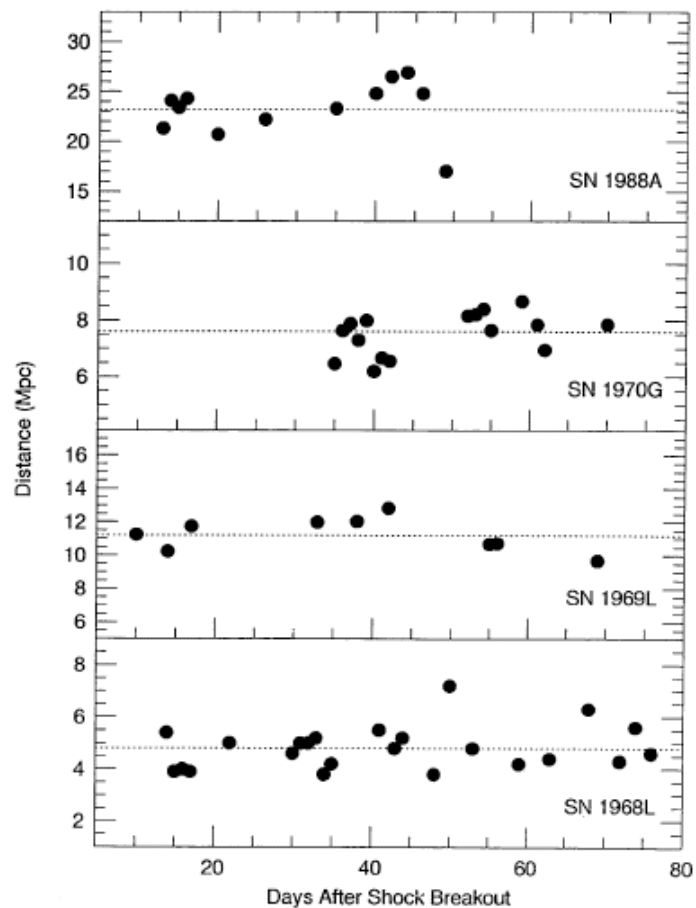


FIG. 8a

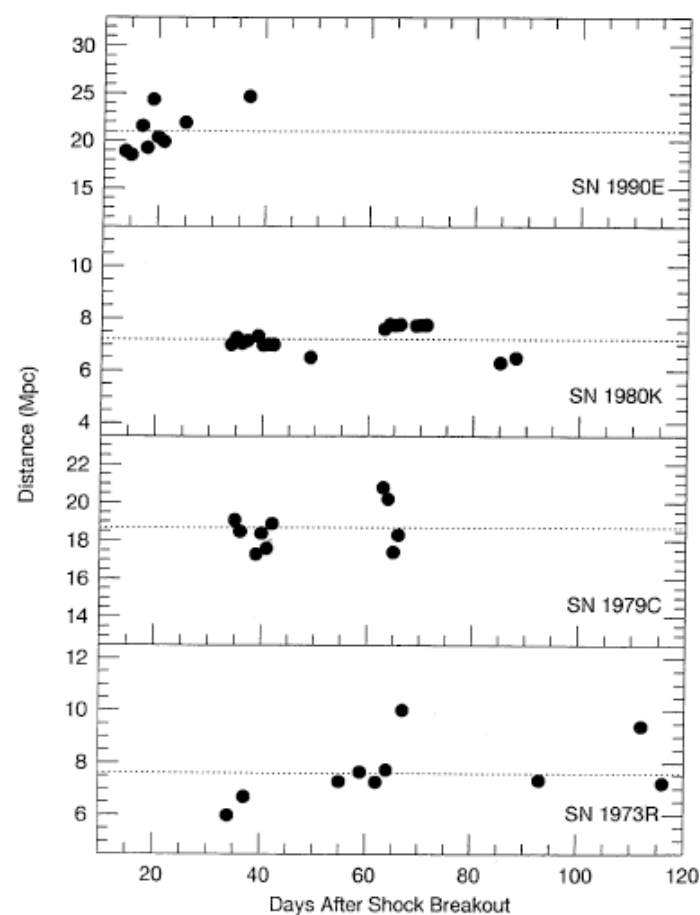
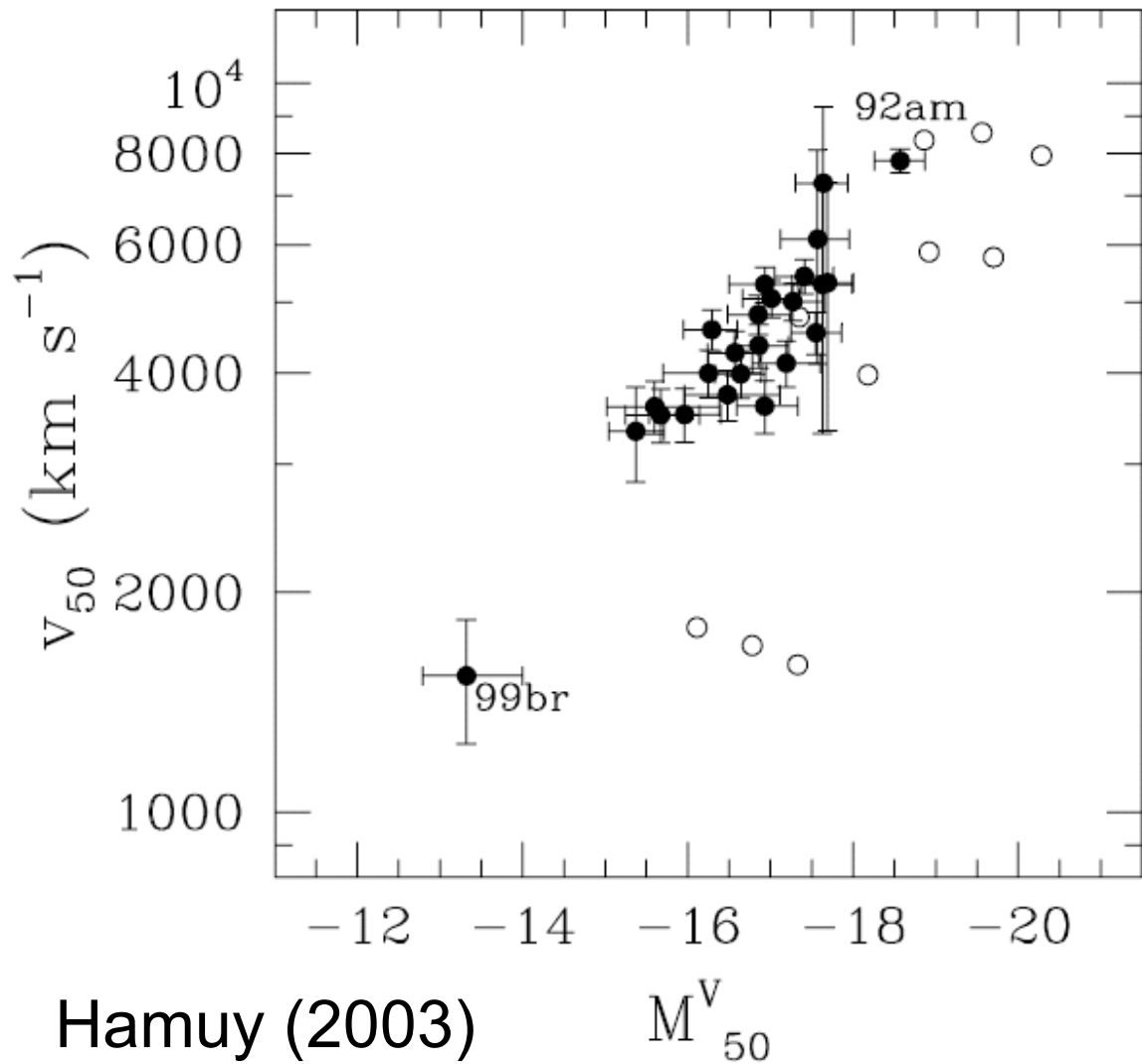


FIG. 8b

FIG. 8.—(a) Distance as a function of time for SN 1968L, SN 1969L, SN 1970G, and SN 1988A. (b) Distance as a function of time for SN 1973R, SN 1979C, SN 1980K, and SN 1990E.

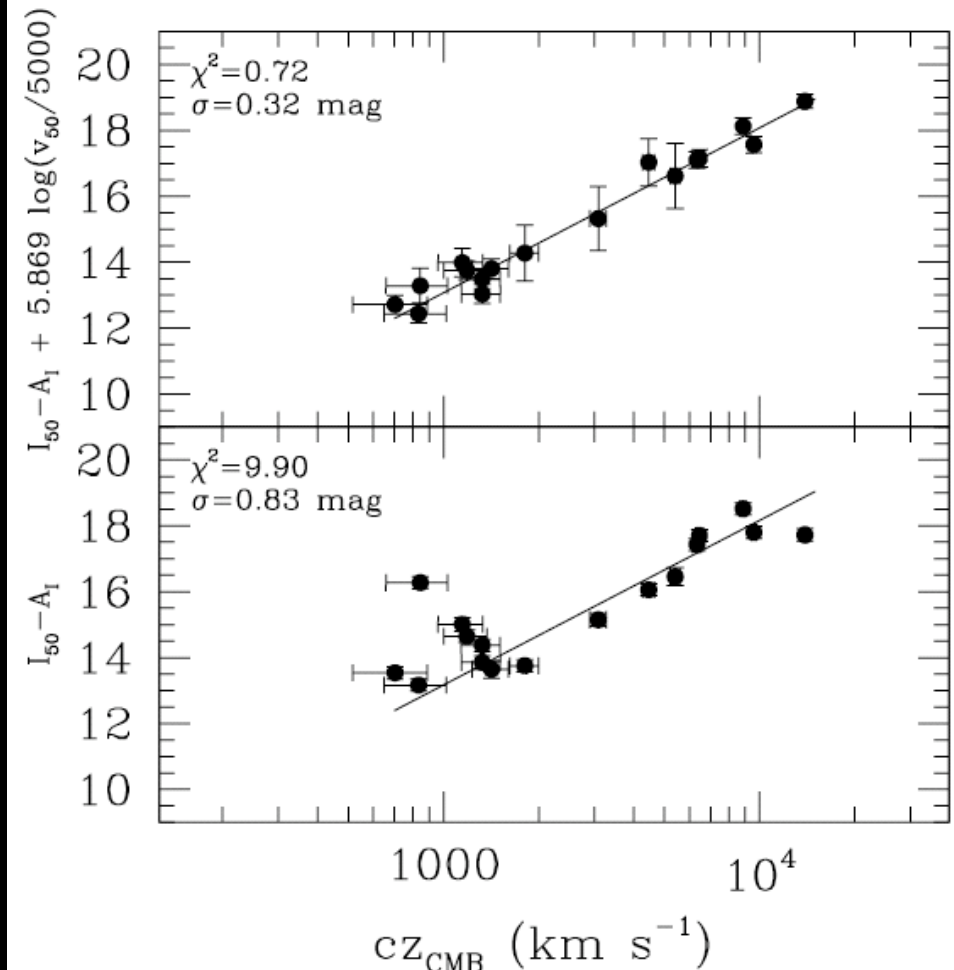
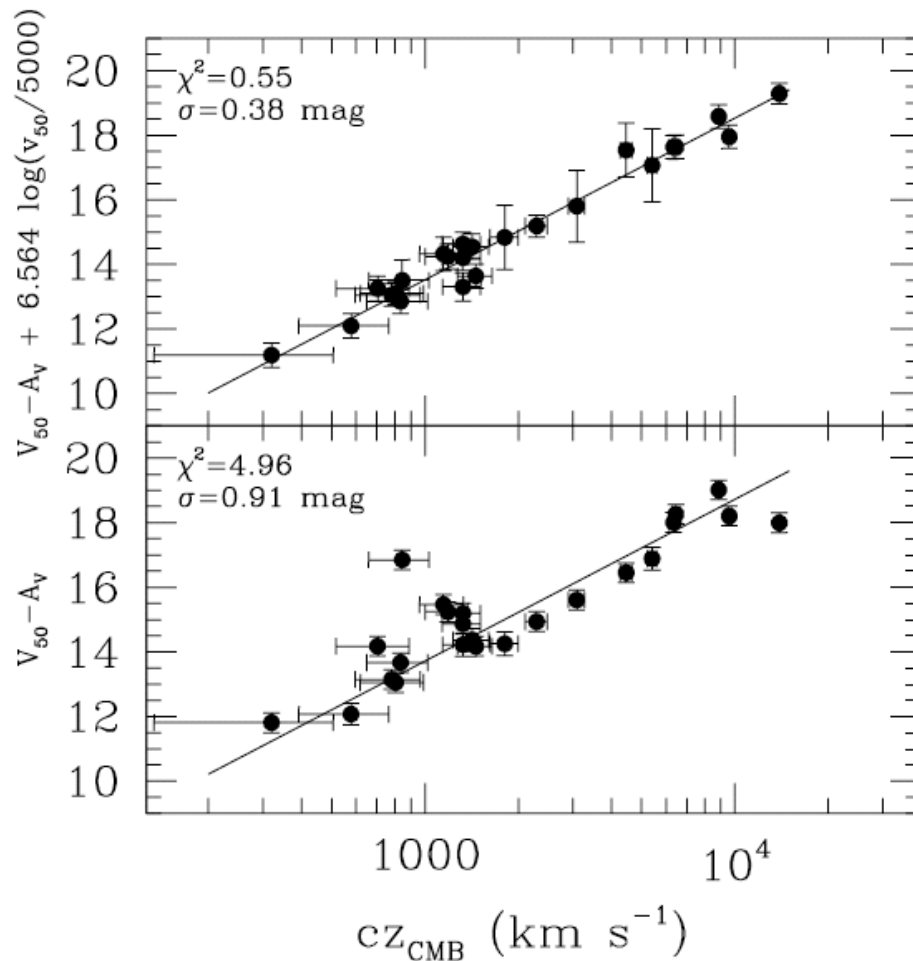
Standard Candle Method (SCM)

usando la
velocidad de
expansión a
50 días de la
Explosión de
una Supernova
Tipo II



RAW HUBBLE DIAGRAM (*Hamuy 2003*)

Corregida por veloc. de expansión Corregida por veloc. de expansión

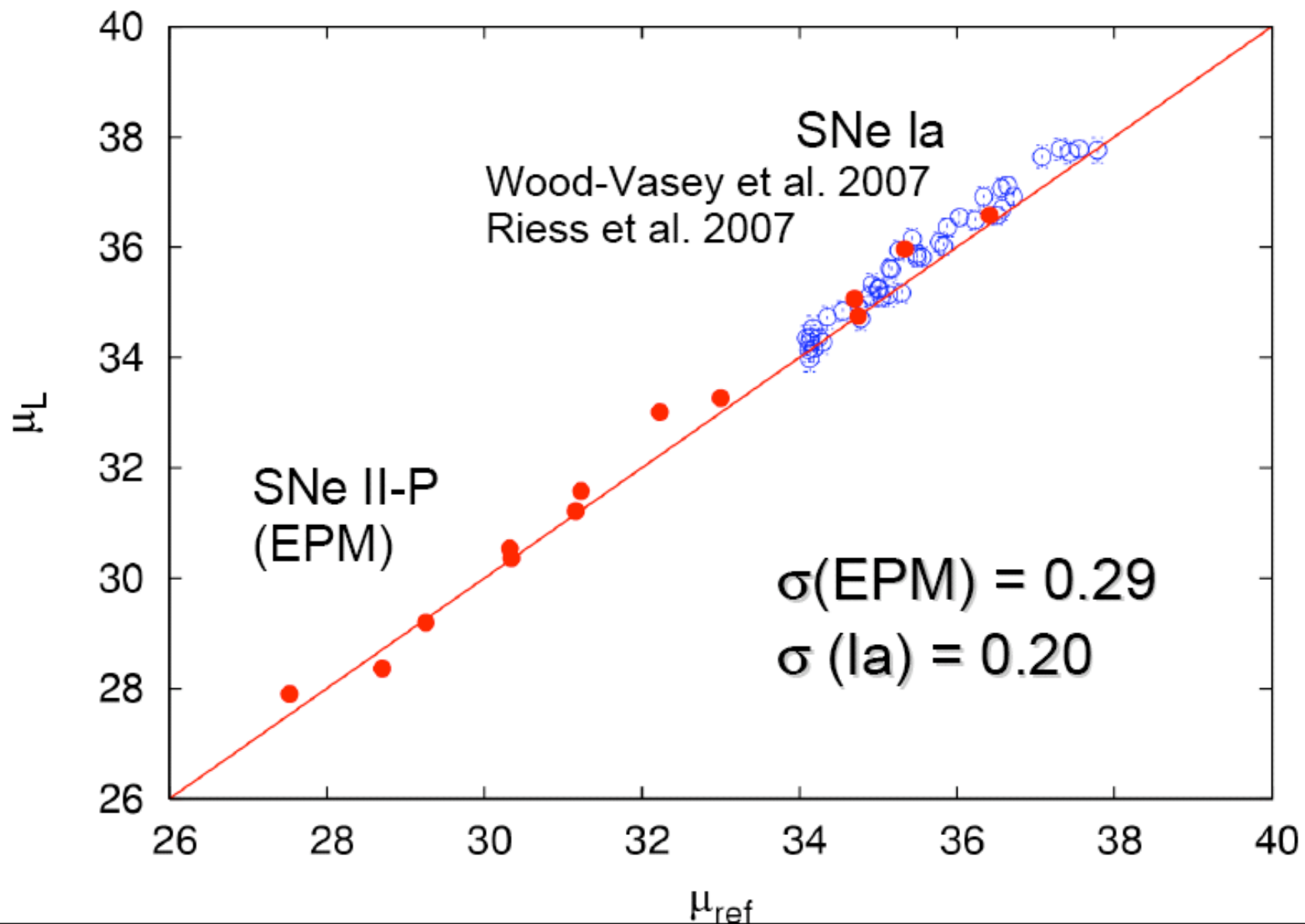


No corregida

No corregida

$$V_{50} - A_V + 6.564(\pm 0.88) \log(v_{50}/5000) = 5 \log(cz) - 1.478(\pm 0.11).$$

Comparación de los metodos usando ambos tipos de SN



CONCLUSIONES COMPARATIVAS

- ✓ SCM es la mitad de preciso que usar SN Ia (precisión de SCM en distancia $\sim 15\%$, ~ 0.3 mag.)
- ✓ SN II-P chequeo independiente para SN Ia
- ✓ SNII-P son más débiles que SN Ia (~ 4 a 6 mag.)
- ✓ Galaxias elípticas muestran menos SNII-P que SNIa.
- ✓ SN II $\longrightarrow$ Pop. I , asociadas con regiones de polvo $\longrightarrow$ mucha extinción.
solucion: fase plateau ocurre a ~ 5000 K $\longleftrightarrow$ $(B-V) \sim 0.75$. Un objeto más rojo que esto en esta fase se asume que es por extinción y, por lo tanto, corregible.

Referencias Consultadas

- Eastman et al., 1996, ApJ, 466, 911.
- Hamuy, 2003, astro-ph/0301281.
- Kirshner & Kwan, 1974, 193, 27.
- Leibundgundt, Tammann, 1990, A&A, 230, 81.
- Perlmutter, 2003, Physics Today, April.
- Phillips, 1992, ApJL, 413, 105.
- Phillips et al. 2003, *From Twilight to Highlight: The Physics of Supernovae*: Proc. ESO Astroph. Symp.. Ed. Hillebrandt & Leibundgut. Springer-Verlag, 2003, p. 193.
- Riess et al, 2007, ApJ, 659, 98.
- Schmidt et al, 2002, ApJ, 393, 366.
- Verdugo et al., 2002, AAS Proc. More information at:
http://www.ctio.noao.edu/REU/ctioreu_2002/Projects2002/mverdugo/CTIOpostermiguel.ppt
- Wood-Vasey et al., 2007, ApJ, 666, 694.