

# Scala delle distanze

Enrico Maria Corsini  
Dipartimento di Fisica e Astronomia  
Università di Padova

Lezioni del corso di Astrofisica I  
A.A. 2013-2014

# Sommario

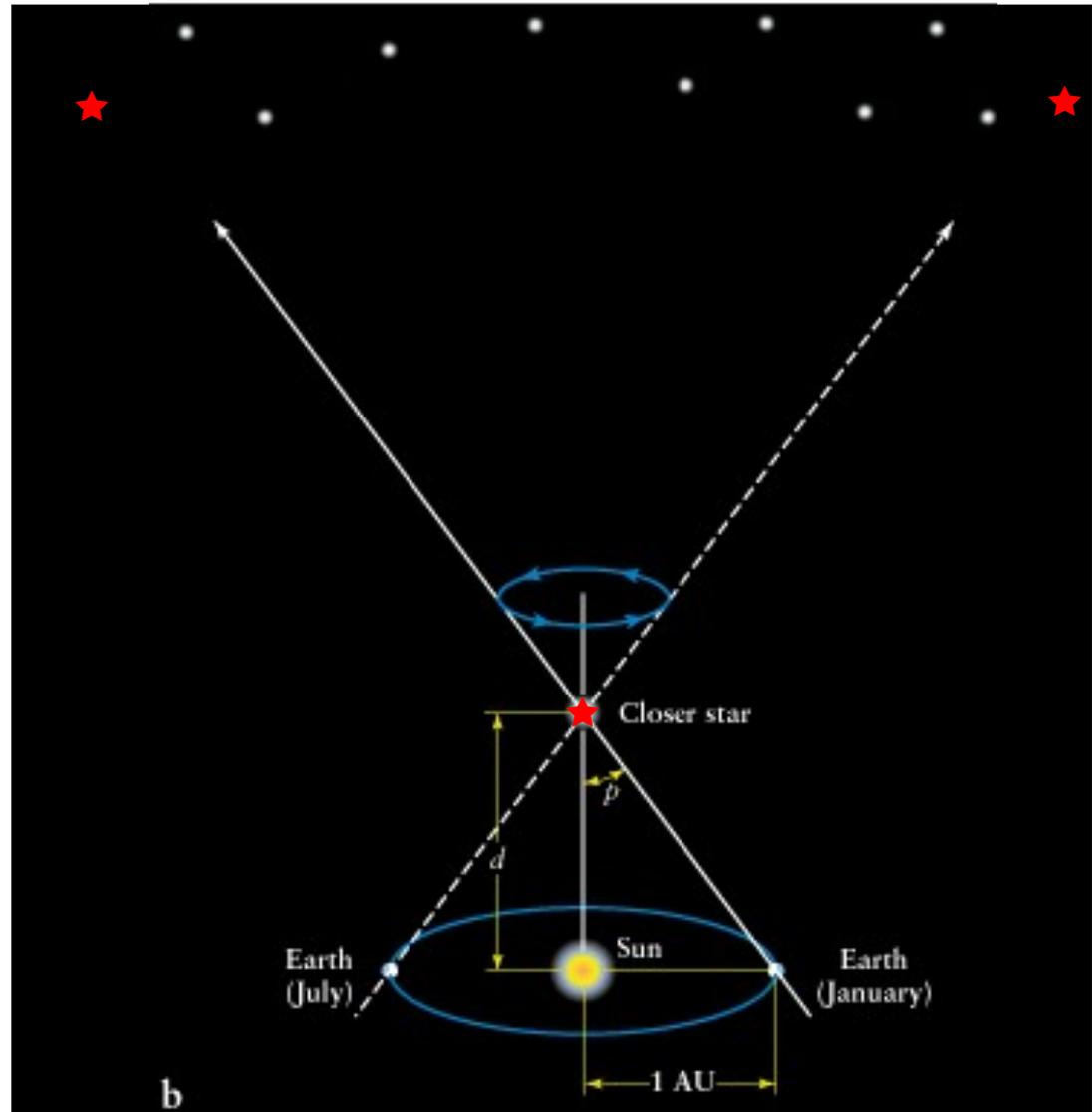
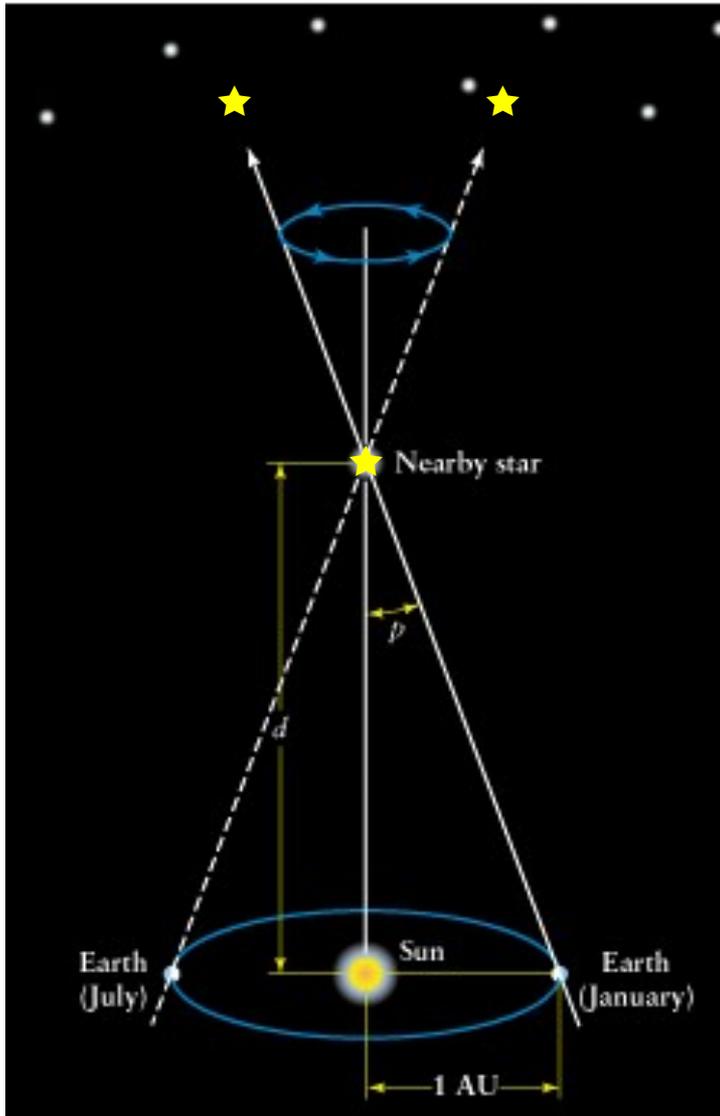
- Indicatori geometrici
- Indicatori fotometrici
  
- Indicatori primari
- Indicatori secondari
- (Altri indicatori)
  
- Legge di Hubble

# Indicatori geometrici

Derivano la distanza dal confronto del raggio apparente e lineare di un sistema

- ☛ Parallasse trigonometrica
- ☛ Parallasse di gruppo
- ☛ (Parallasse secolare)
- ☛ (Parallasse statistica)
- ☛ Parallasse d'espansione

# Parallasse trigonometrica



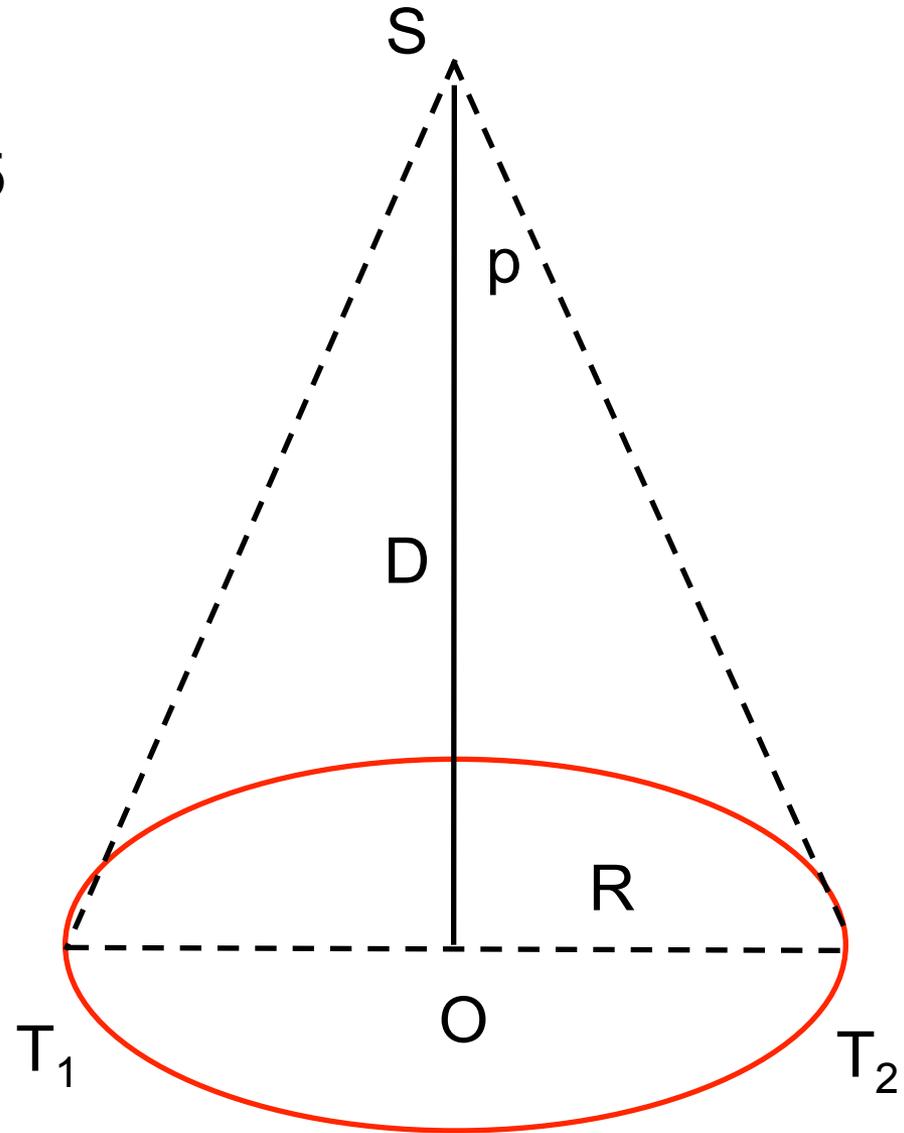
$$R = D \operatorname{tg} p \approx D p \text{ (rad)} = D \frac{p (")}{206265}$$

$$R = 1 \text{ UA} \quad D = \frac{206265}{p (")} \text{ UA}$$

$$D = 1 \text{ pc} \quad 1 \text{ pc} = \frac{206265}{1"} \text{ UA}$$

$$D = \frac{1}{p (")} \text{ pc}$$

$D$  = distanza della stella  $S$   
 $R$  = raggio dell'orbita terrestre  
 $p$  = angolo di parallasse



- ☛ **parallasse trigonometrica**: misura distanze fino a 200 pc ( $p = 5$  mas)
- ☛ **parallasse secolare**: sfrutta il moto del sole ( $s_{\odot} \approx 30$  km/s) per avere una base maggiore del diametro dell'orbita terrestre (2 UA). Misura distanze fino a 500 pc ( $p = 2$  mas)
- ☛ **parallasse statistica**: considera i moti propri di un insieme di stelle nelle ipotesi che tutte siano alla stessa distanza e che sia nota la distribuzione delle loro velocità rispetto al loro LSR (e.g. ammasso). Misura distanze fino a 500 pc ( $p = 2$  mas)
- ☛ **parallasse di gruppo**: sfrutta il moto d'insieme di un gruppo di stelle misurando la variazione delle sue dimensioni con osservazioni a diverse epoche (200 pc,  $p = 5$  mas)
- ☛ **parallasse d'espansione**: vedi Novae

# Parallasse di gruppo

$$R = D \sin \theta_1 \approx D \theta_1 \text{ a } t_1$$

$$R = (D + V \Delta t) \sin \theta_2 \approx (D + V \Delta t) \theta_2 \text{ a } t_2$$

$$D \theta_1 = (D + V \Delta t) \theta_2$$

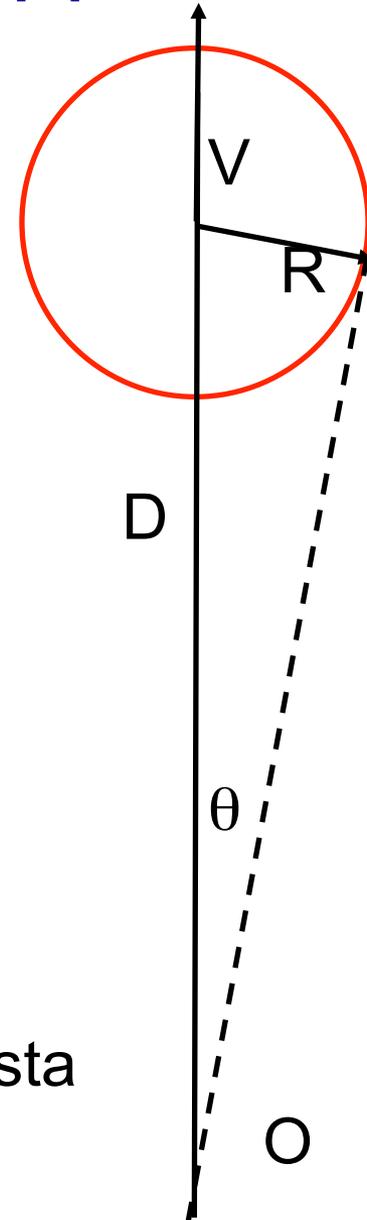
$$D = \frac{V \Delta t \theta_2}{\Delta \theta}$$

$D$  = distanza del gruppo di stelle

$R$  = raggio del gruppo di stelle

$V$  = velocità del gruppo lungo la linea di vista

$\theta$  = dimensione angolare del gruppo a  $t$



# Indicatori fotometrici

Derivano la distanza dal confronto della magnitudine apparente e assoluta di un sistema

☛ Metodo di Baade-Wesselink

# Metodo di Baade-Wesselink

• Noti il raggio  $R$  ( $\Rightarrow$  misure interferometriche) e la temperatura effettiva  $T_{\text{eff}}$  ( $\Rightarrow$  colore e/o spettro), la **luminosità** di una stella risulta

$$L = 4\pi\sigma R^2 T_{\text{eff}}^4$$

• da cui la **magnitudine assoluta**

$$\begin{aligned} M &= -2.5 \log L + \text{cost} = \\ &= -10 \log T_{\text{eff}} - 5 \log R - 2.5 \log(4\pi\sigma) + \text{cost} \end{aligned}$$

• il **modulo di distanza**

$$m - M = 5 \log d \text{ (pc)} - 5$$

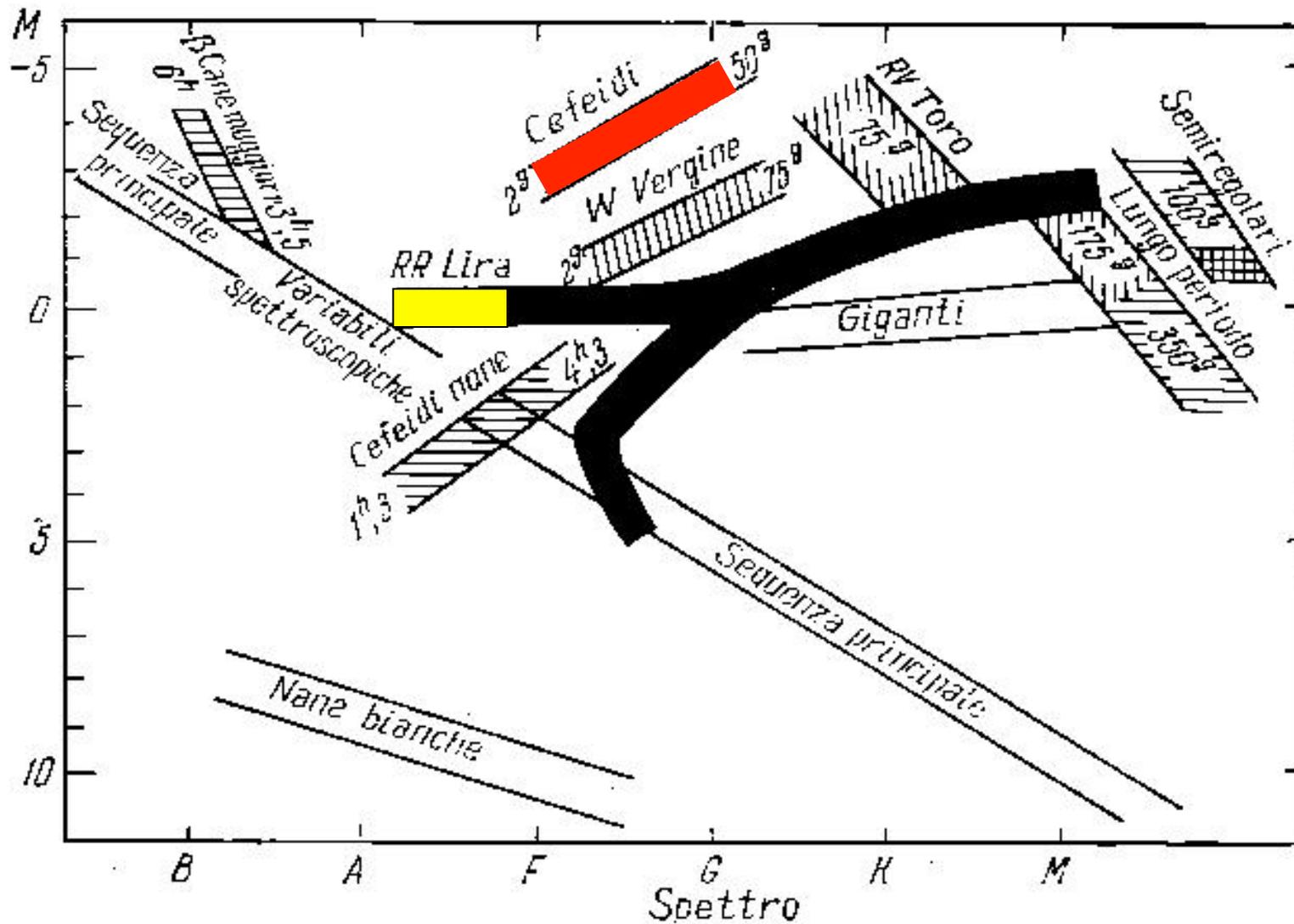
• la **distanza**

$$d = 10^{0.2(m-M+5)}$$

# Indicatori primari

Derivano la distanza da relazioni calibrate con gli indicatori geometrici o fotometrici

- ☛ Cefeidi
- ☛ RR Lyrae
- ☛ Novae



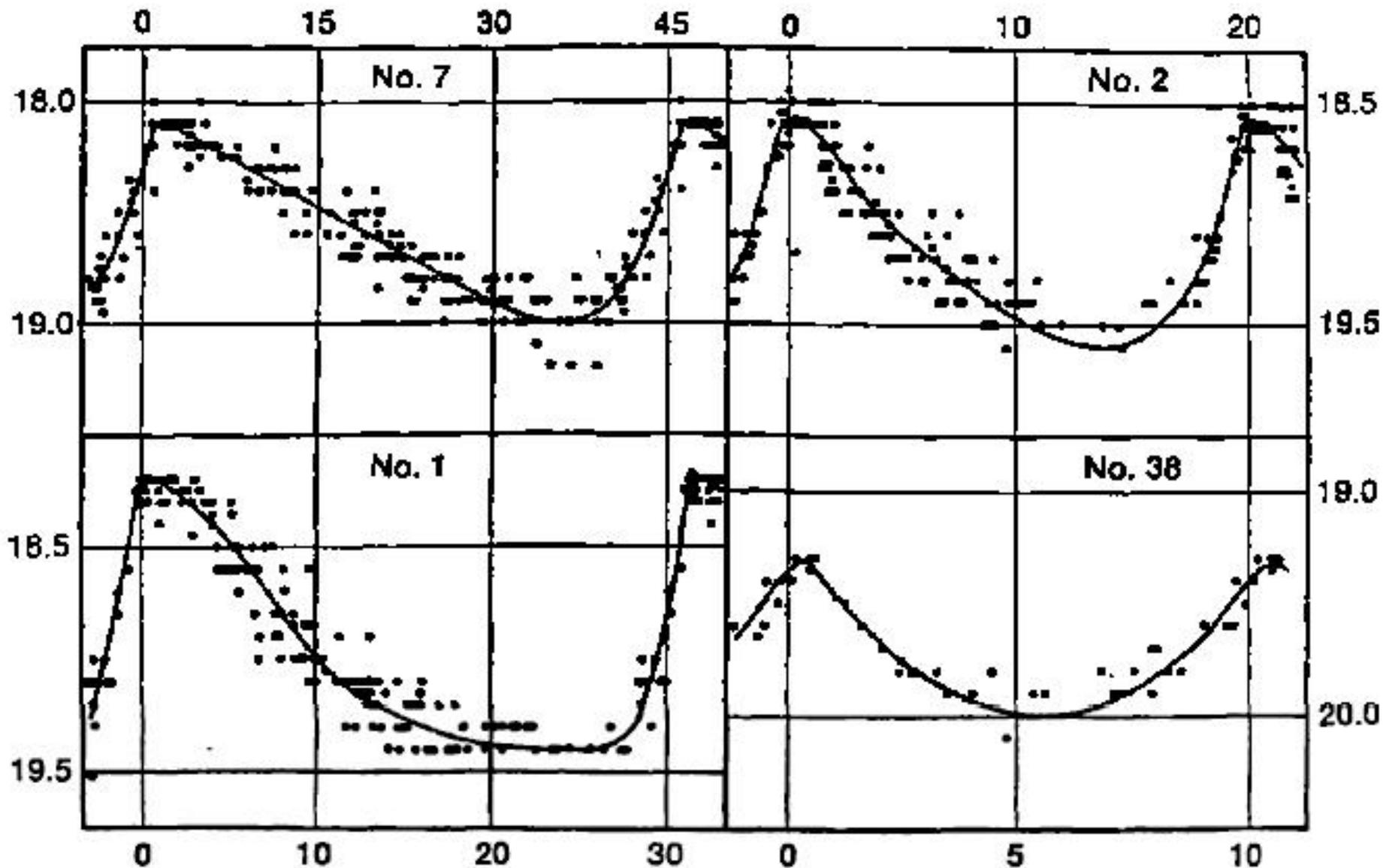
• Posizione delle **cefeidi** e **RR Lyrae** sul diagramma HR

# Cefeidi

- ☛ stelle **variabili** ( $\Delta m \sim 1$ ) di massa  $M > 5M_{\odot}$
- ☛ **periodo**  $P = 1-50$  giorni
  - in ammassi  $P < 15$  giorni
  - in associazioni (e.g.  $h+\chi$  Per)  $P > 15$  giorni
- ☛ stelle giovani di **popolazione I estrema** quindi si osservano nei bracci di spirale (polveri  $\Rightarrow$  estinzione)
- ☛ nel 1912 H. Leavitt studiando  $\sim 2000$  cefeidi nella SMC scopre la **relazione periodo-luminosità**

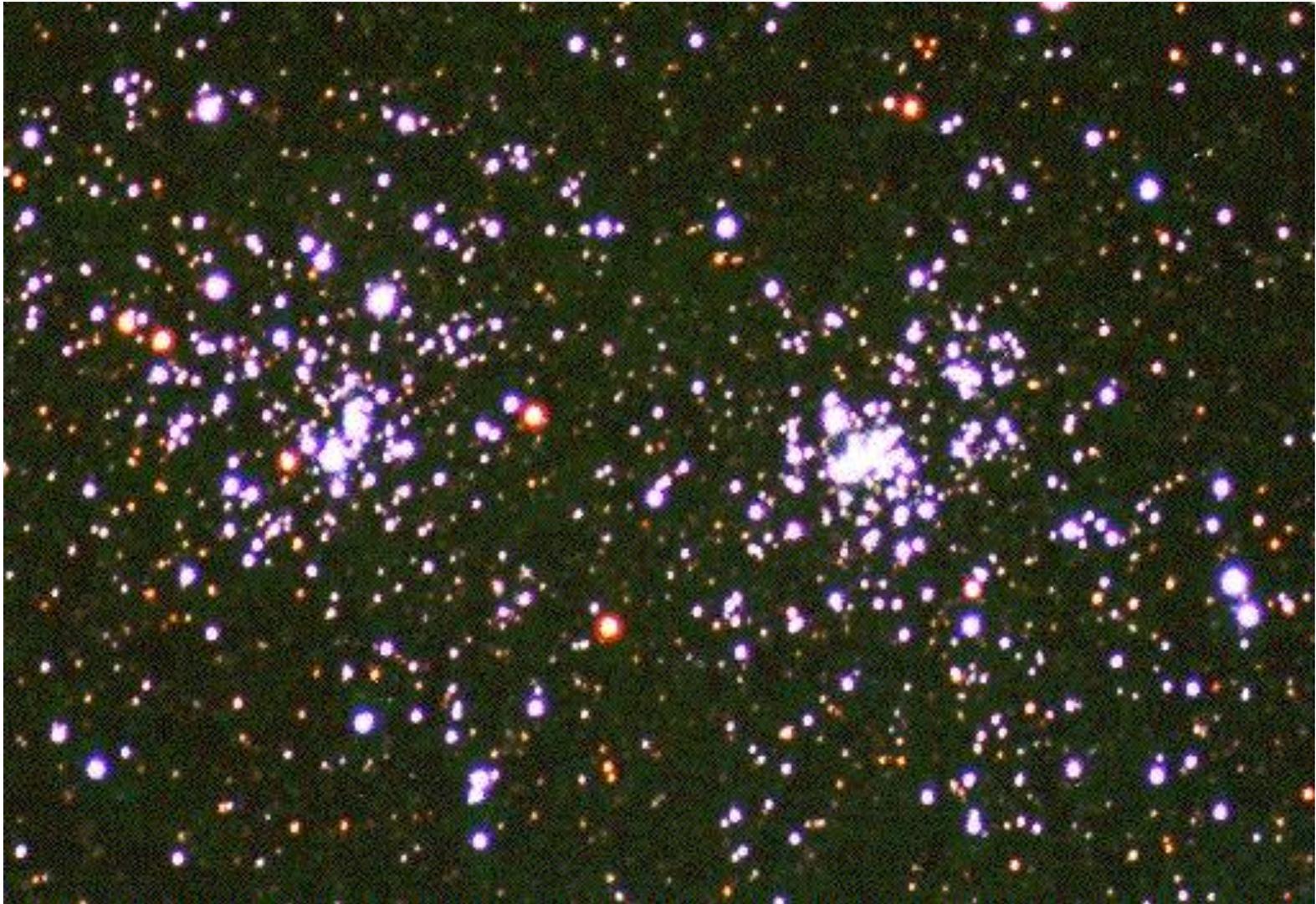
$$P \propto L$$

(i.e. le più luminose hanno periodi lunghi)



• curve di luce di alcune cefeidi

☛ Doppio ammasso  $h+\chi$  Persei



# Cepheid Variable Star V1 in M31

Hubble Space Telescope ■ WFC3/UVIS



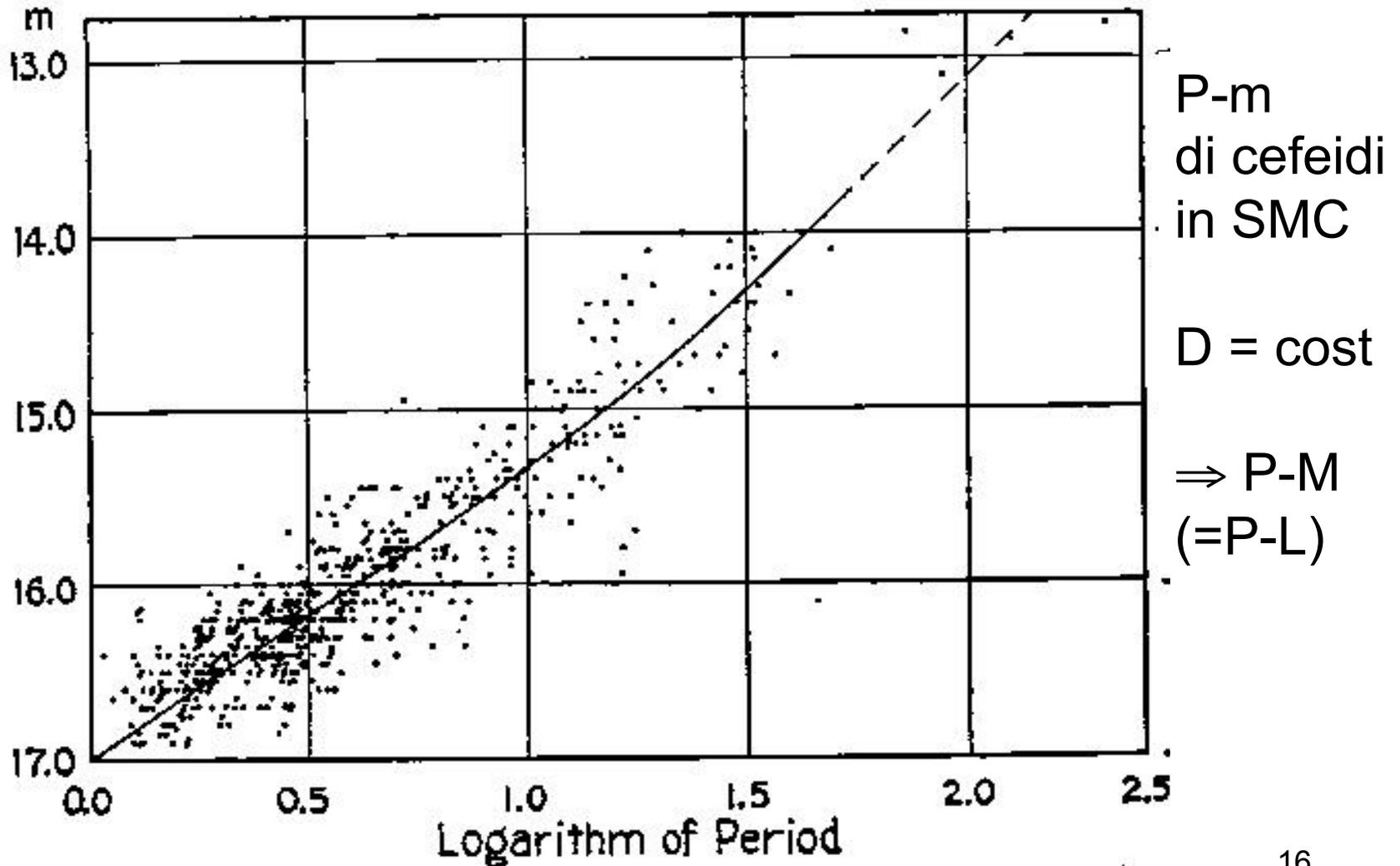
Dec. 17, 2010

Dec. 21, 2010

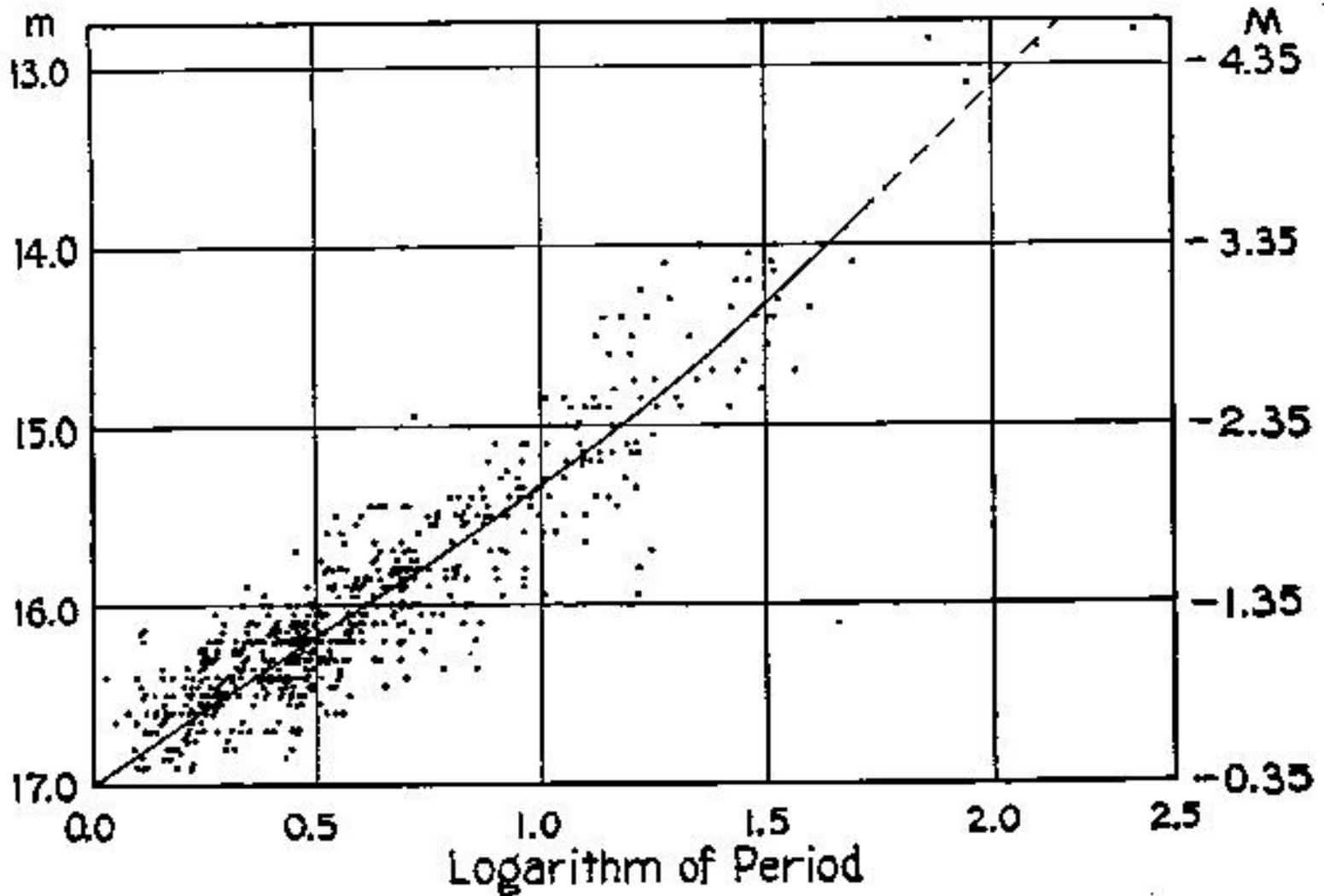
Dec. 30, 2010

Jan. 26, 2011

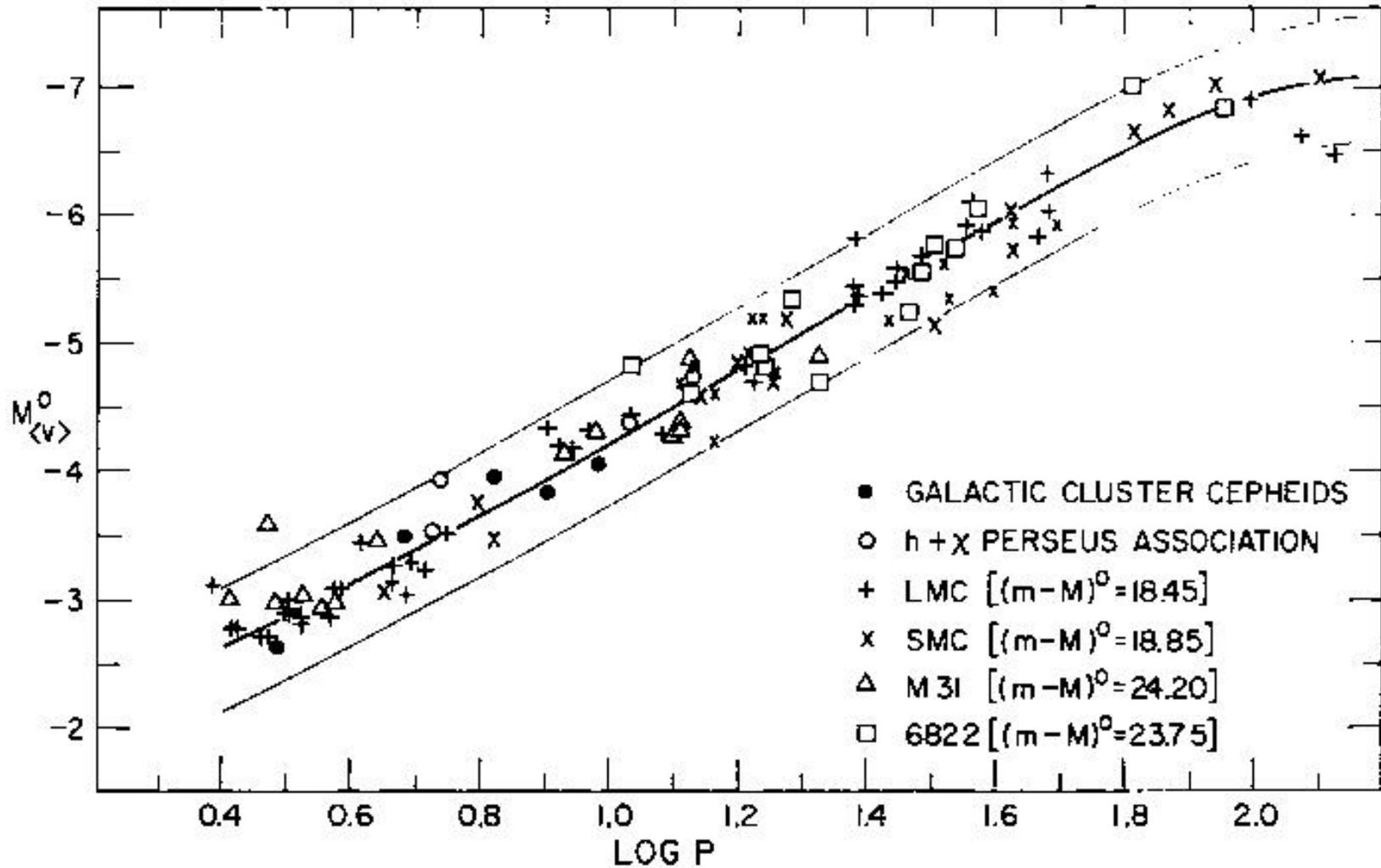
# Relazione periodo-luminosità



$$\langle M_V \rangle = a \log P \text{ (giorni)} + b$$



$$\langle M_{V,0} \rangle = -2.80 \log P \text{ (giorni)} - 1.43$$



☛ dalla **relazione P-L** e dal **modulo di distanza m-M** si ricava la distanza

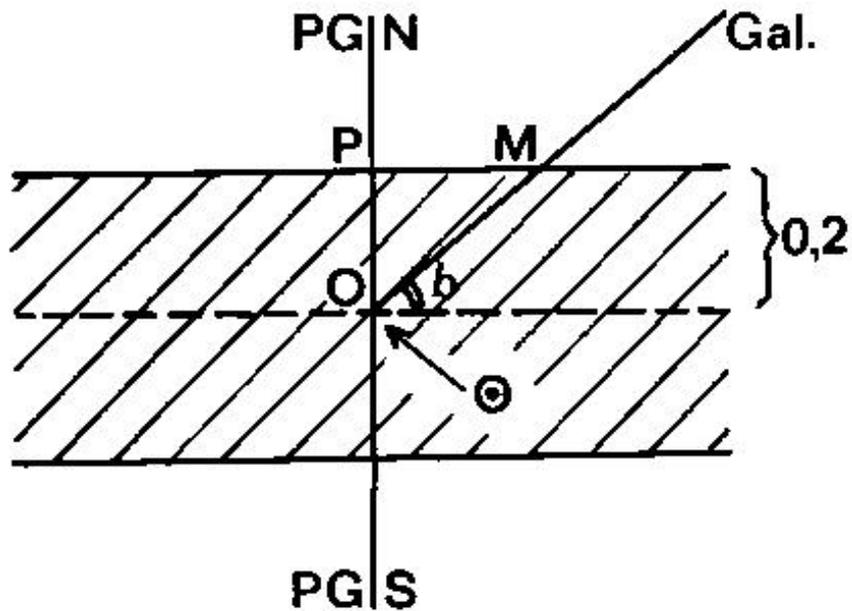
$$\langle M_{V,0} \rangle = -2.80 \log P \text{ (giorni)} - 1.43$$

$$m_{V,0} - M_{V,0} = 5 \log d \text{ (pc)} - 5$$

☛ è possibile tenere conto della dipendenza dal **colore** e dall' **assorbimento galattico**

$$\langle M_{V,0} \rangle = -3.53 \log P \text{ (giorni)} + 2.13 (m_B - m_V)_0 - 2.13$$

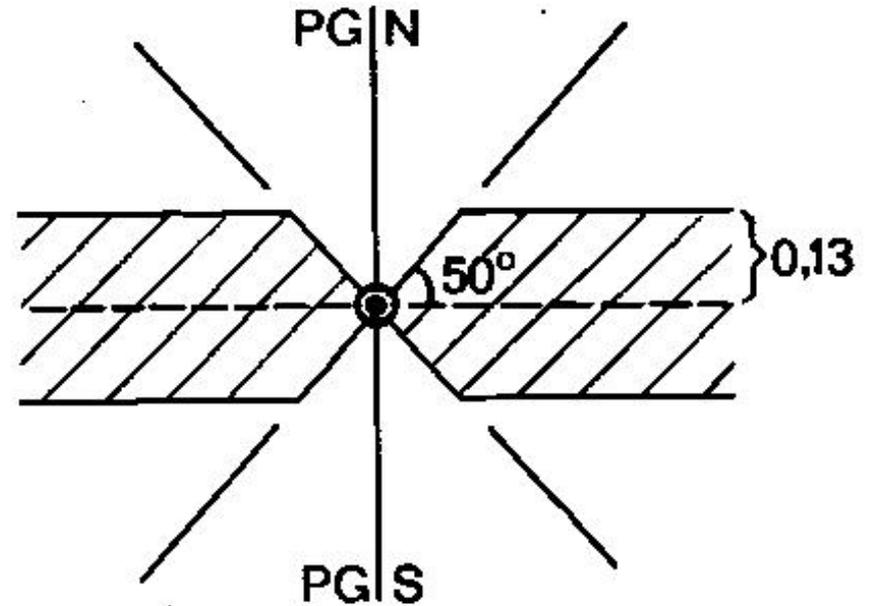
$$m_V - M_{V,0} = 5 \log d \text{ (pc)} - 5 + A_V$$



Modello di de Vaucouleurs

$$A_B(90^\circ) = 0.2 \text{ mag}$$

$$A_B(b) = 0.2 / |\sin b| = 0.2 |\operatorname{cosec} b|$$



Modello di Sandage & Tammann

$$A_B(90^\circ) = 0.13 \text{ mag}$$

$$A_B(b) = 0.13 |\operatorname{cosec} b| \quad |b| < 50^\circ$$

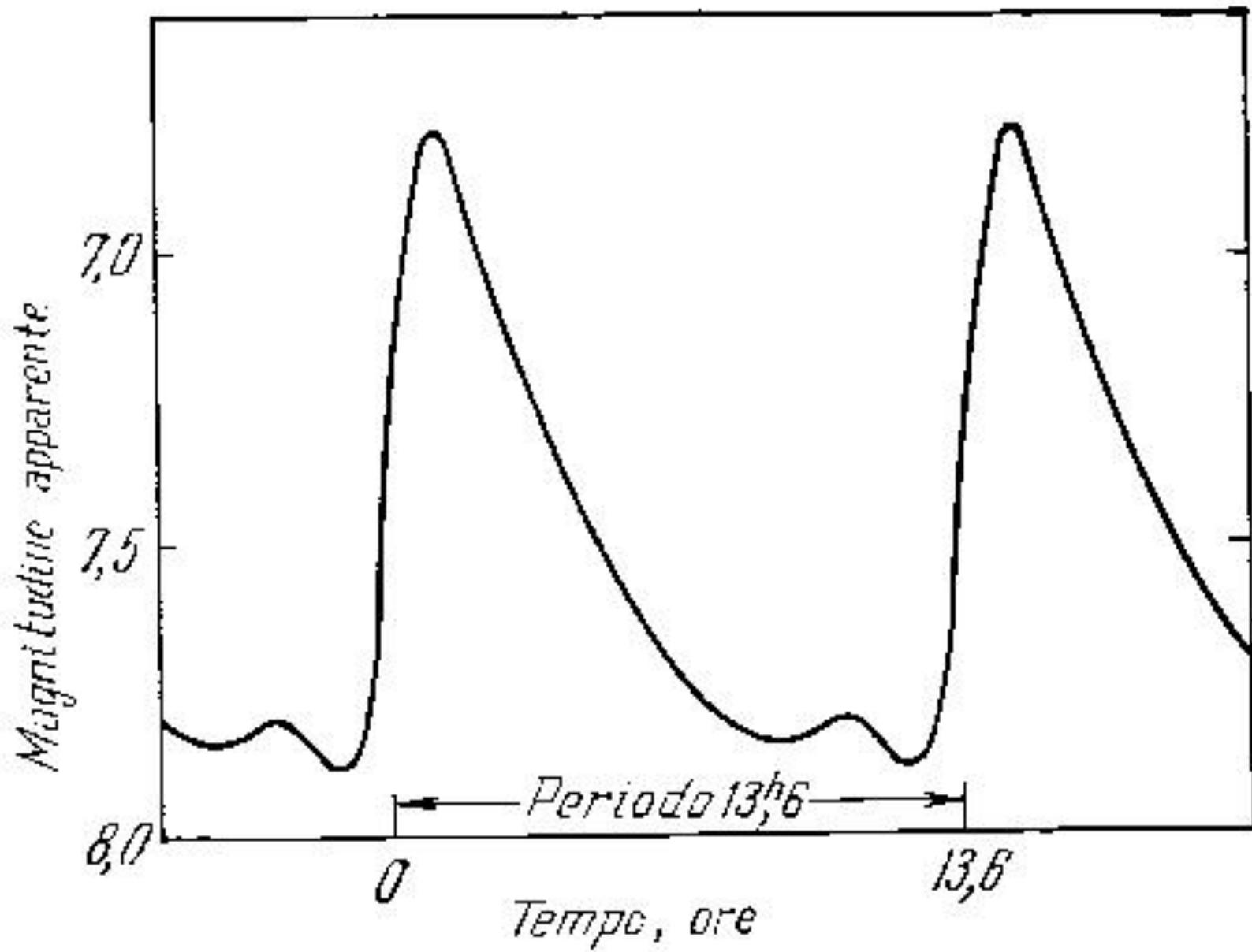
$$A_B(b) = 0 \quad |b| > 50^\circ$$

☛ Due leggi proposte per descrivere l' **assorbimento galattico**

- le cefeidi più vicine sono a  $D > 200$  pc (e.g. Polare)
- la **calibrazione della relazione P-L** delle cefeidi viene fatta con i metodi della parallasse trigonometrica (Feast & Catchpole 1997) e secolare e statistica (cf. Hertzsprung 1913 e LMC) su cefeidi di  $P$  noto
- le cefeidi hanno magnitudini assolute  $M_V \sim -3$  mag e possono essere studiate con HST fino  $(m-M) \sim 31$  mag ( $D=17$  Mpc, **Ammasso della Vergine**)

# RR Lyrae

- ☛ stelle **variabili** ( $0.5 < \Delta m < 1.5$ ) di massa  $M \sim 1M_{\odot}$
- ☛ con un **periodo**  $P = 1.5$  ore - 1 giorni
  - stelle vecchie di **popolazione II di alone** con  
 $P > 0.4$  giorni
  - stelle vecchie di **popolazione di disco** con  
 $P < 0.4$  giorni
- ☛ esiste una **relazione P-L**



• Curva di luce di una RR Lyrae

☛ dalla **relazione P-L** e dal **modulo di distanza m-M** si ricava la distanza

$$\langle M_{K,0} \rangle = -2.3 \log P \text{ (giorni)} - 0.88$$

☛ è possibile tenere conto della dipendenza dalla **metallicità**

$$\langle M_{K,0} \rangle = -2.0 \log P \text{ (giorni)} + 0.06 [\text{Fe}/\text{H}] \text{ (dex)} - 0.7$$

☛ la **calibrazione della relazione P-L** delle RR Lyrae viene fatta con

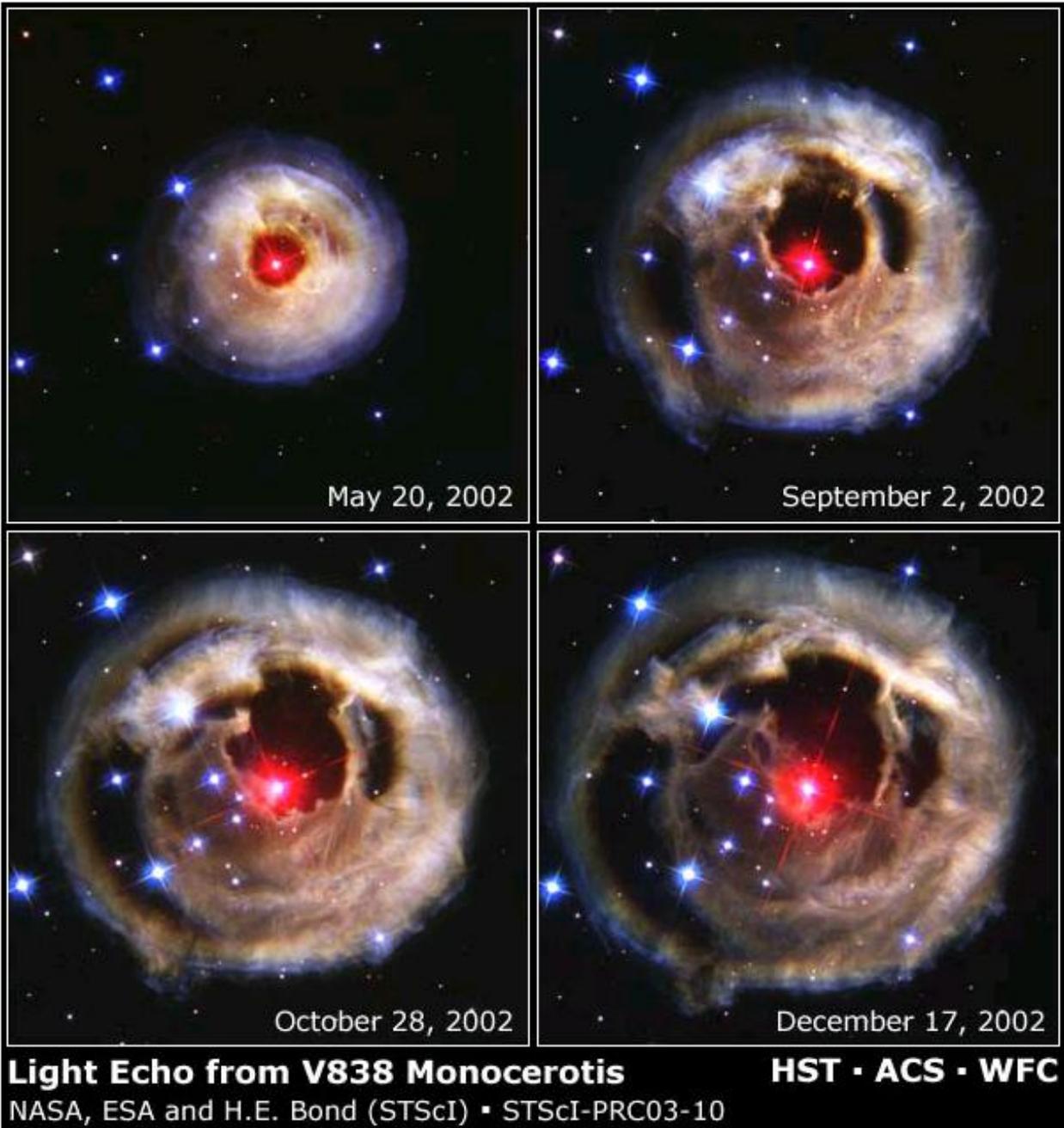
- i metodi della parallasse secolare e statistica
- studiando RR Lyrae delle LMC e SMC
- con il metodo di Baade-Wesselink

☛ le RR Lyrae hanno magnitudini assolute  $M_V \sim 0.6$  mag e possono essere studiate con HST fino  $(m-M) \sim 27$  mag ( $D=3$  Mpc, **Gruppo Locale**)

# Novae

- ☛ dovute al bruciamento esplosivo di materiale accresciuto sulla superficie di una **nana bianca in un sistema binario**
- ☛ stelle vecchie di **popolazione II**
- ☛ si osservano nelle ellittiche e negli sferoidi delle galassie a disco
- ☛ la distanza delle novae galattiche si può calcolare con il metodo della **parallasse d'espansione**
- ☛ la distanza delle novae extragalattiche si calcola con la **relazione luminosità - tasso di declino**





# Parallasse d'espansione

$$R = D \operatorname{tg} \theta \approx D \theta$$

$$R = V_{\text{exp}} \Delta t$$

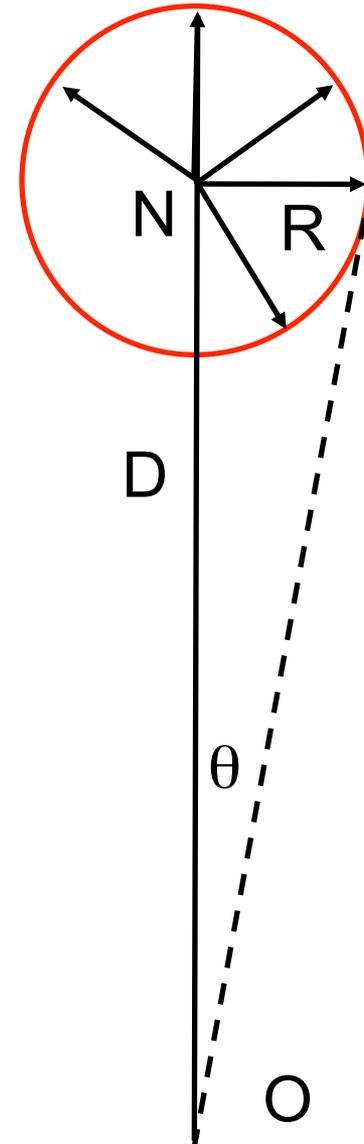
$$D = \frac{V_{\text{exp}} \Delta t}{\theta}$$

$D$  = distanza della nova  $N$

$R$  = raggio del guscio di gas

$V_{\text{exp}}$  = velocità di espansione del guscio  
( $\approx 1000$  km/s)

$\theta$  = dimensione angolare del guscio  
dopo  $\Delta t$



# Relazione luminosità - tasso di declino

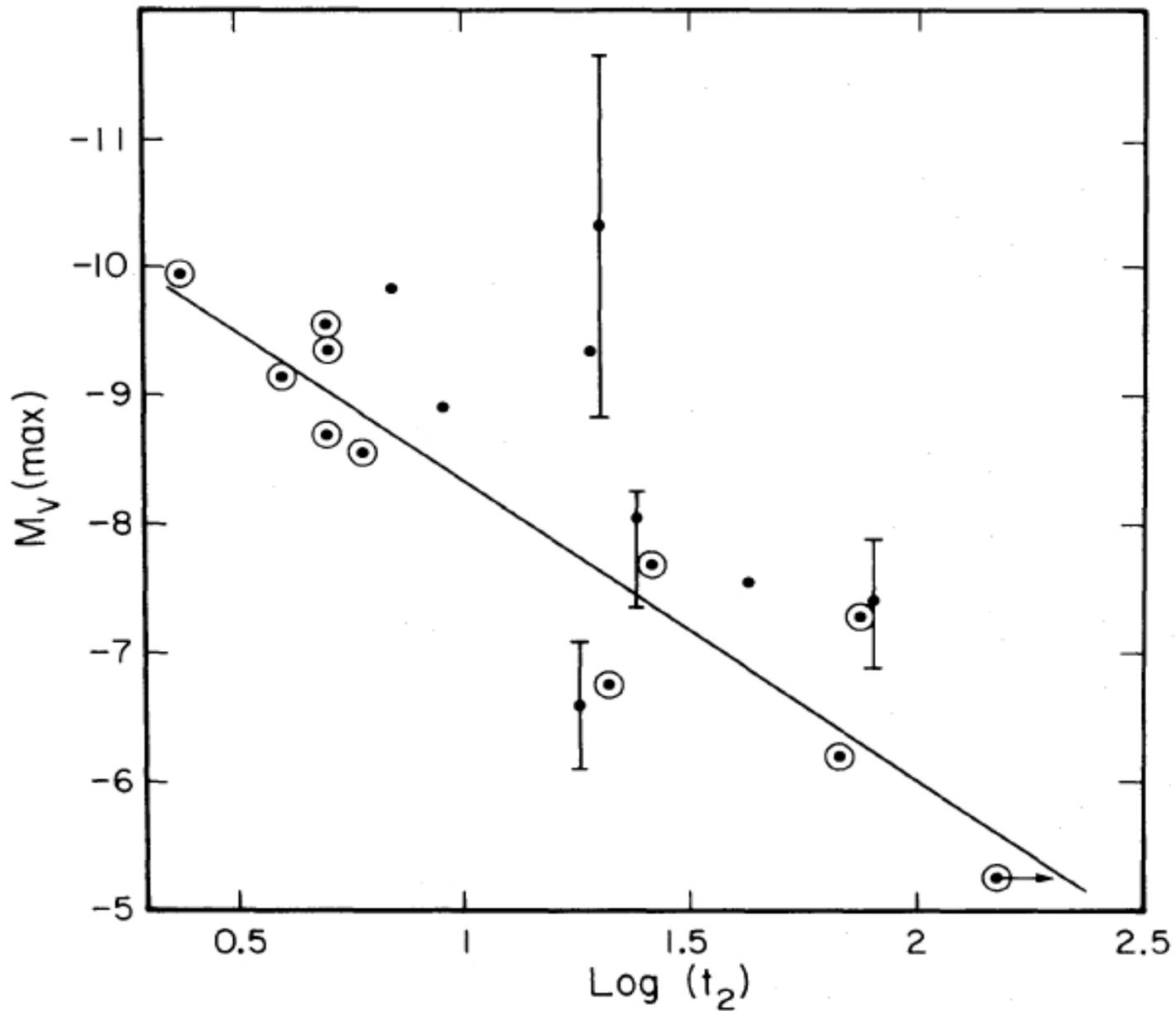
- le novae più brillanti decadono più rapidamente
- per novae di distanza nota possiamo calibrare la relazione tra la **magnitudine assoluta al massimo**  $M_V^{\max}$  e il **tempo**  $t_2$  in cui la magnitudine diventa  $M_V^{\max}+2$

$$M_V^{\max} = -10.7 + 2.3 \log t_2 \text{ (giorni)} \quad \text{per MW}$$

- la media della **magnitudine assoluta delle novae a 15 giorni dal massimo** risulta

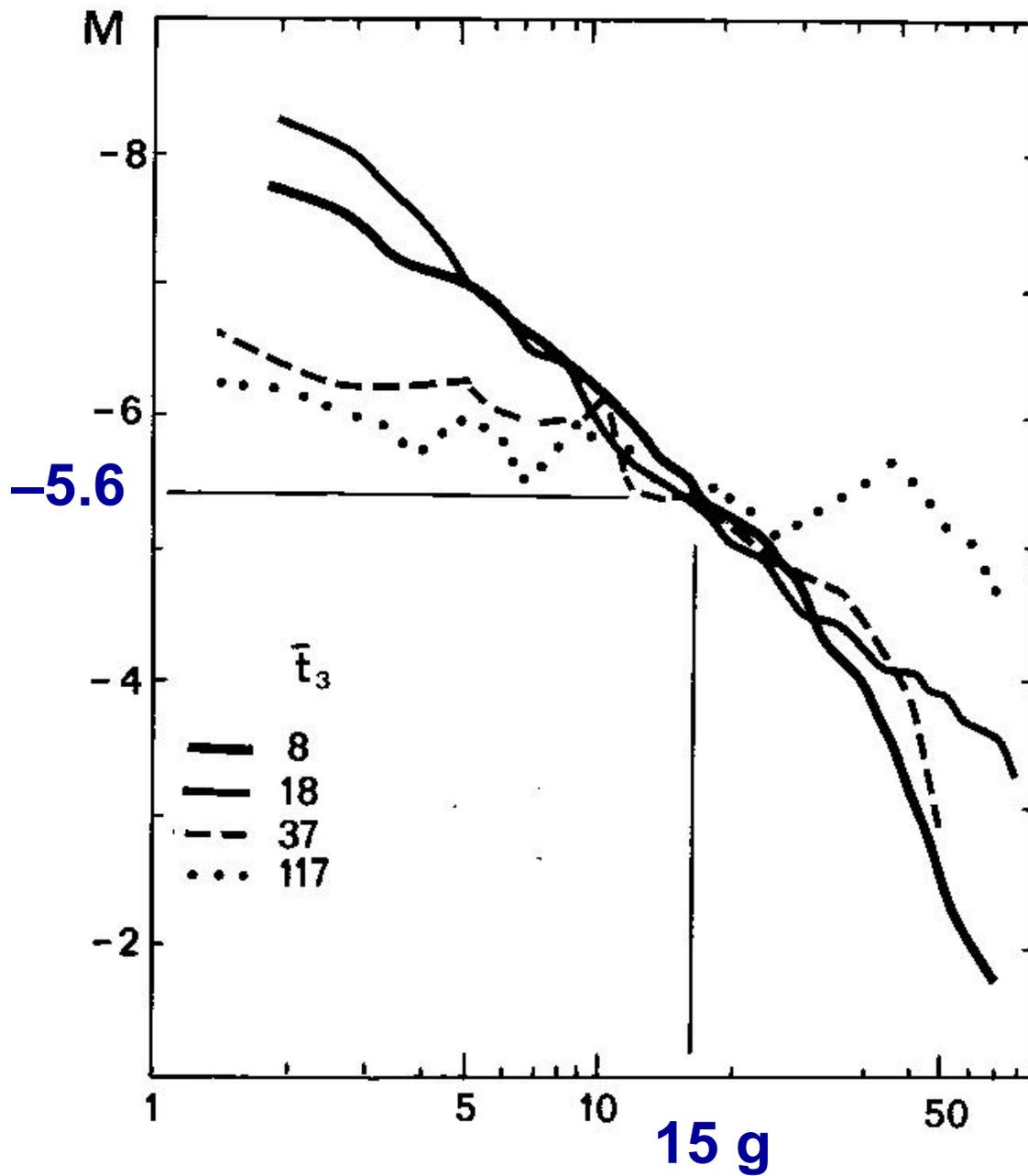
$$\langle M_{15} \rangle = -5.6 \pm 0.1$$

$$M_V^{\max} = -10.7 + 2.3 \log t_2 \text{ (giorni) per MW}$$



a 15 giorni dal  
massimo:

$$\langle M_{15} \rangle = -5.6 \pm 0.1$$



# Indicatori secondari

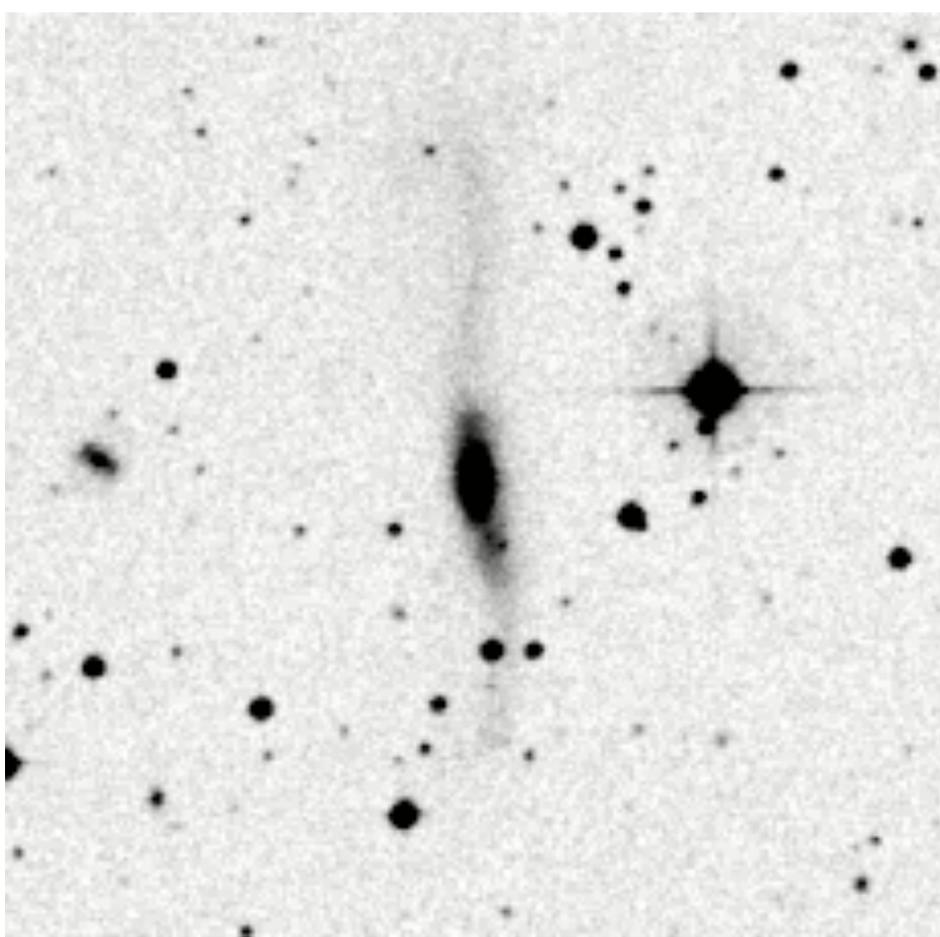
Derivano la distanza da relazioni calibrate con gli indicatori primari

- ☛ Supernovae di tipo Ia
- ☛ Funzione di luminosità degli ammassi globulari
- ☛ Funzione di luminosità delle nebulose planetarie
- ☛ Relazione di Tully-Fisher
- ☛ Relazione di Faber-Jackson
- ☛ Relazione  $D_n$ - $\sigma$

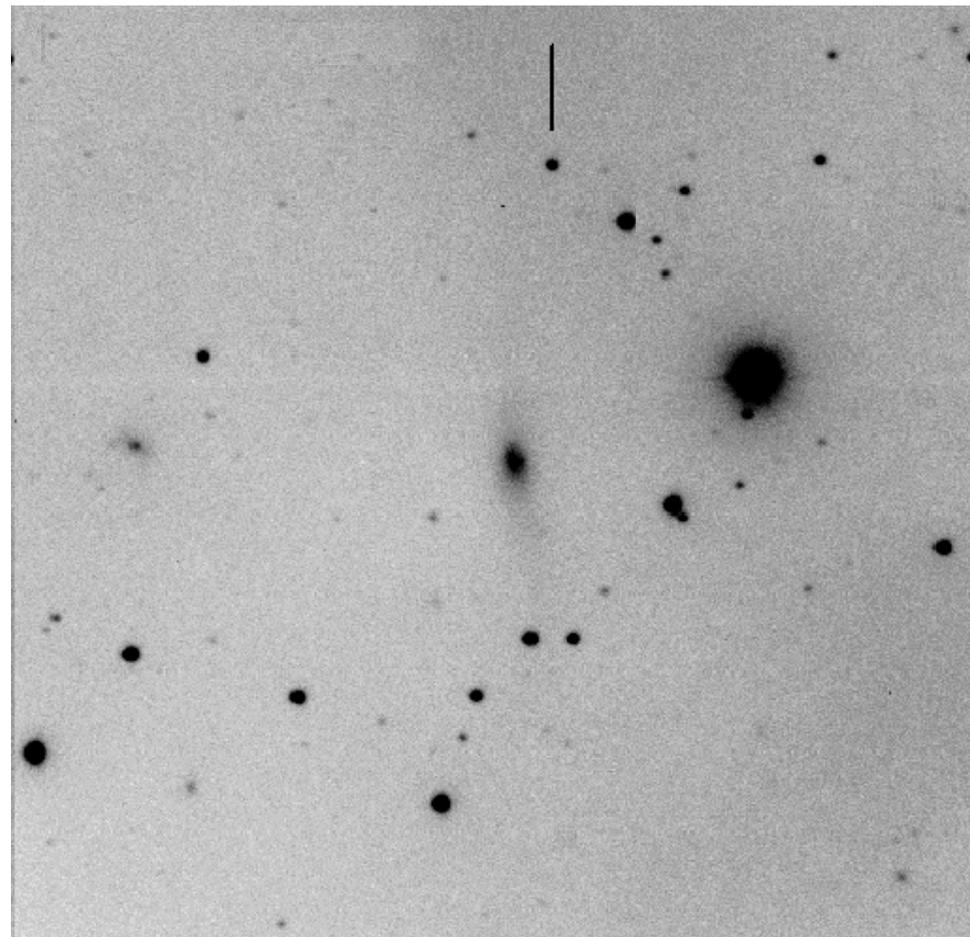
# Supernovae Ia

- ☛ dovute all' **esplosione di una nana bianca** di C/O che ha raggiunto il limite della massa di Chandrasekar avendo accresciuto materiale dal compagno
- ☛ spettro **senza righe di H** ma con righe Si II
- ☛ si osservano sia nelle ellittiche che nelle spirali
- ☛ hanno una **curva di luce caratteristica**:
  - picco
  - decrescita rapida (0.065 mag/giorno a 20 giorni)
  - decrescita lenta (0.015 mag/giorno a 50 giorni)

# SN Ia 2005cf in MGC 1-39-3



DSS



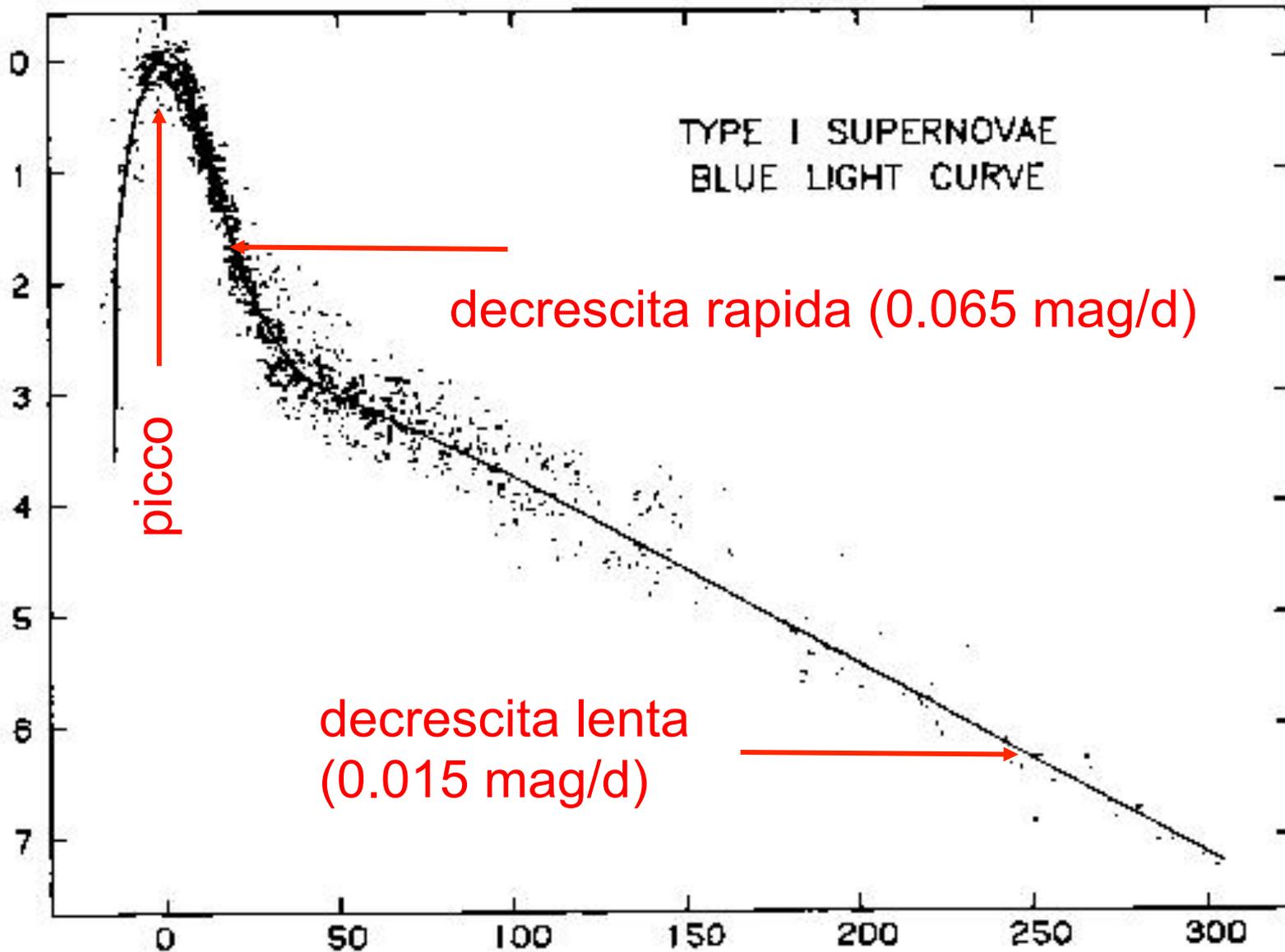
25.05.2005

*supernova 1998ay at redshift 0.64*

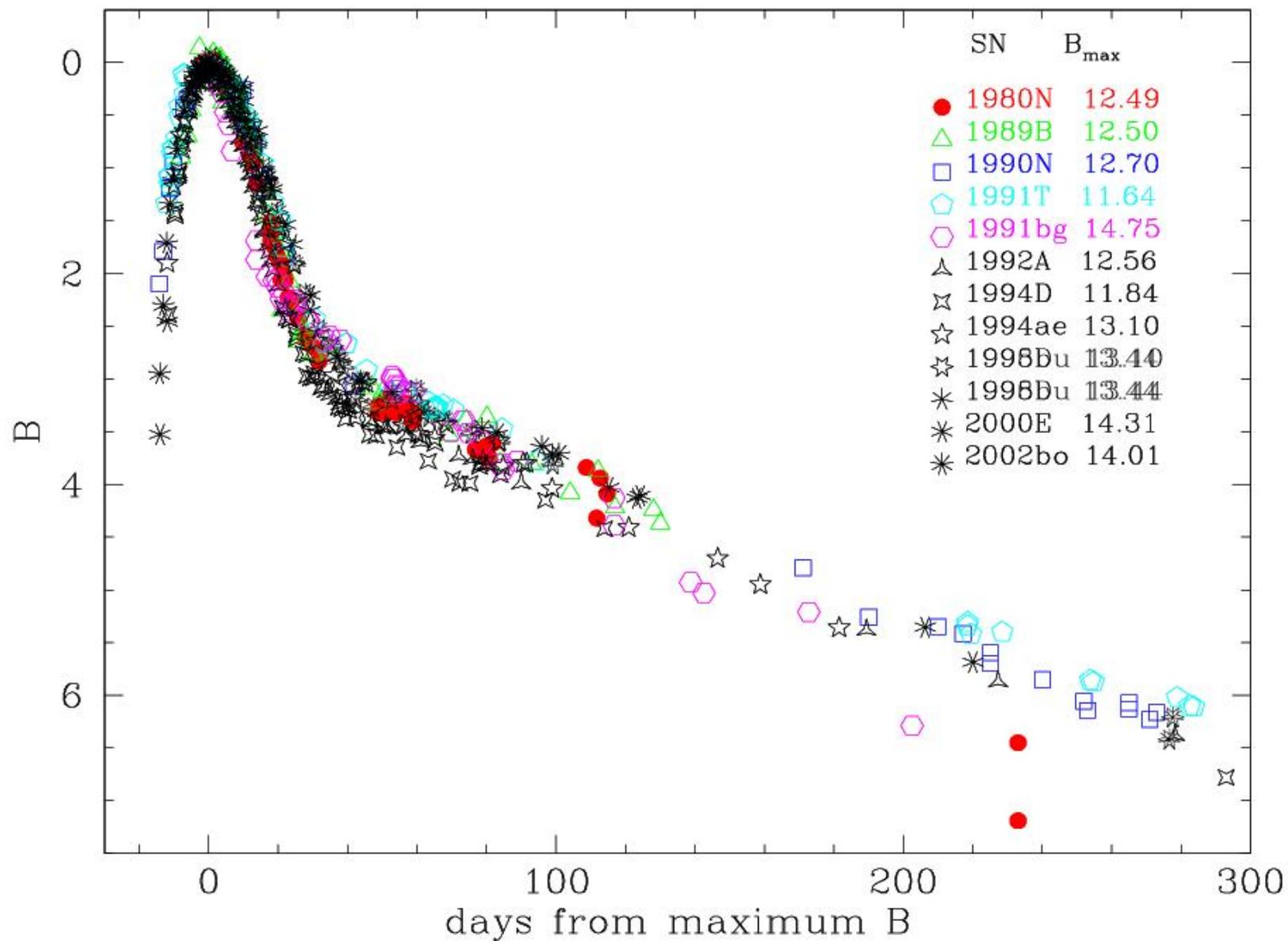
*Feb 28      April 1      April 8      April 20      May 1      May 15      June 3*  
*(before explosion,*



$m_B$  BELOW MAXIMUM LIGHT



DAYS AFTER MAXIMUM LIGHT



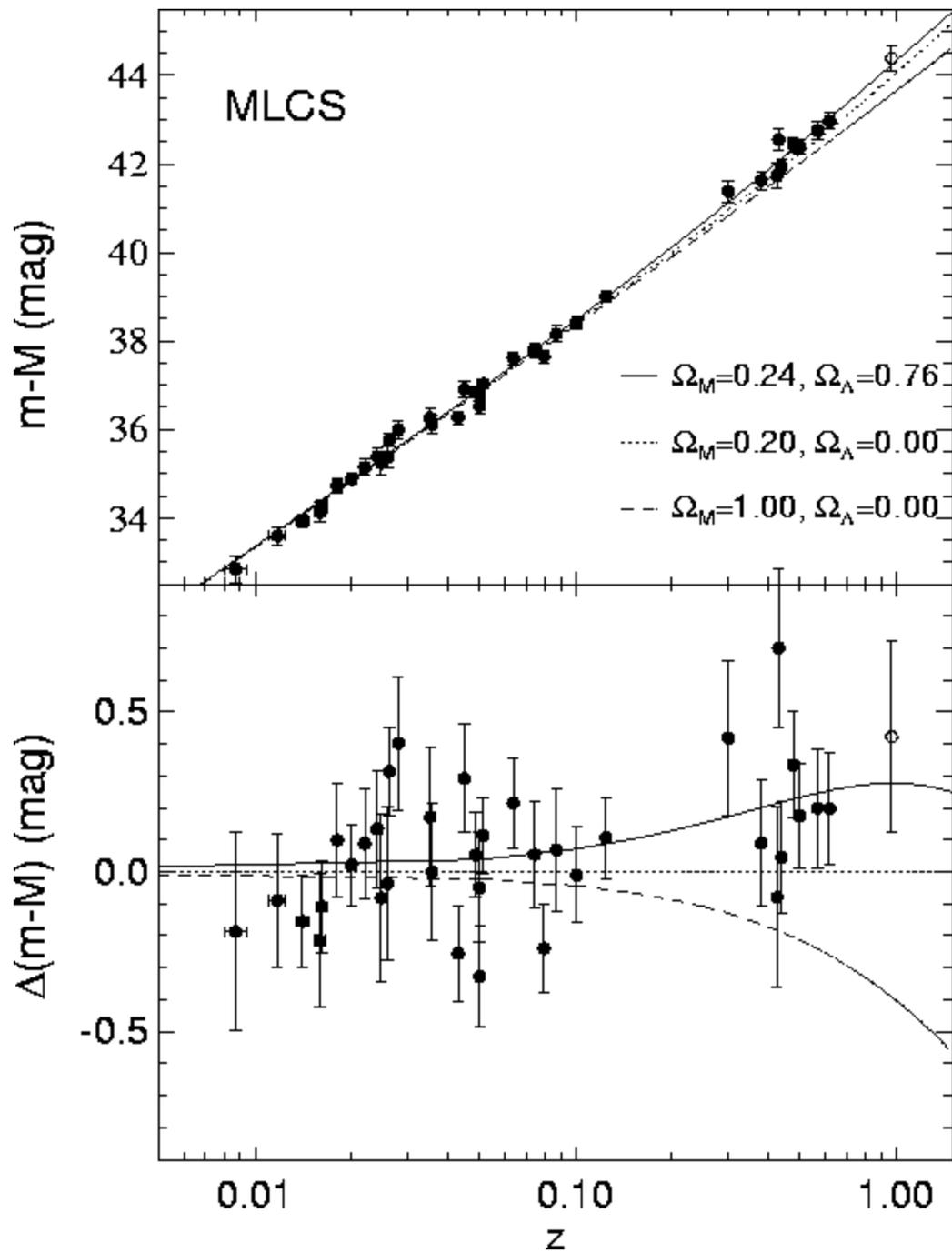
- ☛ la **calibrazione del picco** della curva di luce delle SN Ia

$$M_B = -19.5 \pm 0.1$$

viene fatta con

- cefeidi della galassia a cui appartiene la SN Ia
- modelli stellari di esplosione
- il metodo di Baade-Wesselink

- ☛ le SN Ia possono essere studiate con HST (fotometria) e i telescopi della classe 8 m (spettroscopia) fino  $m-M \sim 44$  ( $z \sim 1$ ,  $t \sim 8$  Gyr)



# Ammassi globulari

- ammassi globulari (GC) contengono  $\sim 10^4$  stelle
- sono sistemi vecchi di **popolazione II** di alone
- $\sim 130$  nella MW con  $\omega$ Cen il più luminoso ( $M_V = -10.9$ )
- si osservano ( $\sim 100$ ) attorno a ellittiche e a spirale

47 Tucanae



M22





M87 © Anglo-Australian Observatory  
Photo by David Malin

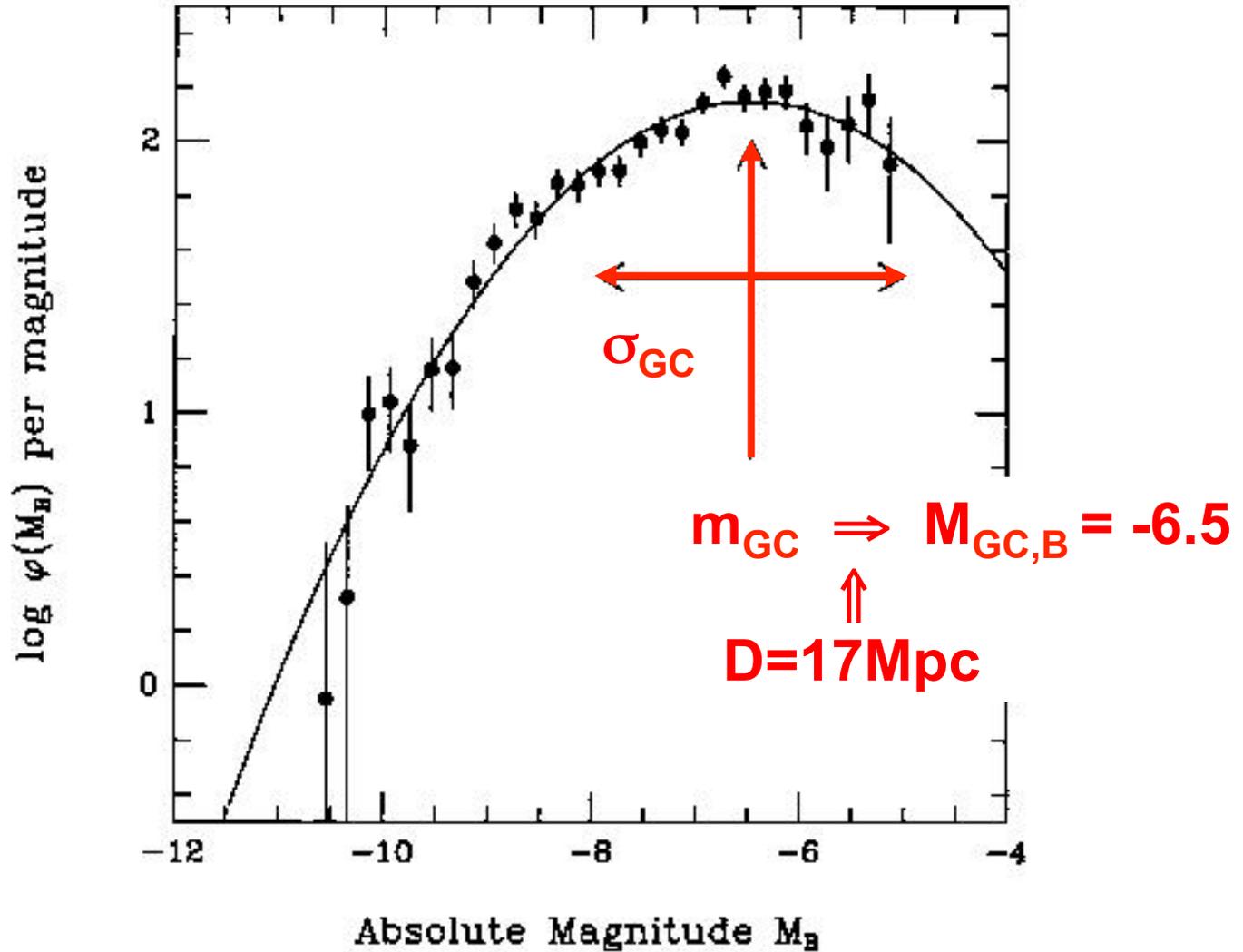
# Funzione di luminosità dei GC

- ☛ la **funzione di luminosità**  $\Phi(m)$  dei GC di una galassia è tale che  $\Phi(m)dm =$  numero di GC in  $(m, m+dm)$
- ☛ la funzione di luminosità  $\Phi(m)$  dei GC di una galassia è una **gaussiana** di centro  $m_{GC}$  e dispersione  $\sigma_{GC}$

$$\Phi(m) = K e^{-(m-m_{GC})^2 / 2 \sigma_{GC}^2}$$

- ☛  $m_{GC}$  viene calibrato in  $M_{GC}$  su galassie di distanza nota

$$M_{GC,v} = -7.4 \pm 0.1$$



•  $\Phi(m)$  di  $\sim 2000$  GC per 4 ellittiche dell' Ammasso della Vergine

☛ la funzione di luminosità dei GC di una galassia viene fatta con

- una sola osservazione
- oltre 1000 GC nelle ellittiche giganti
- sfruttando il poco arrossamento

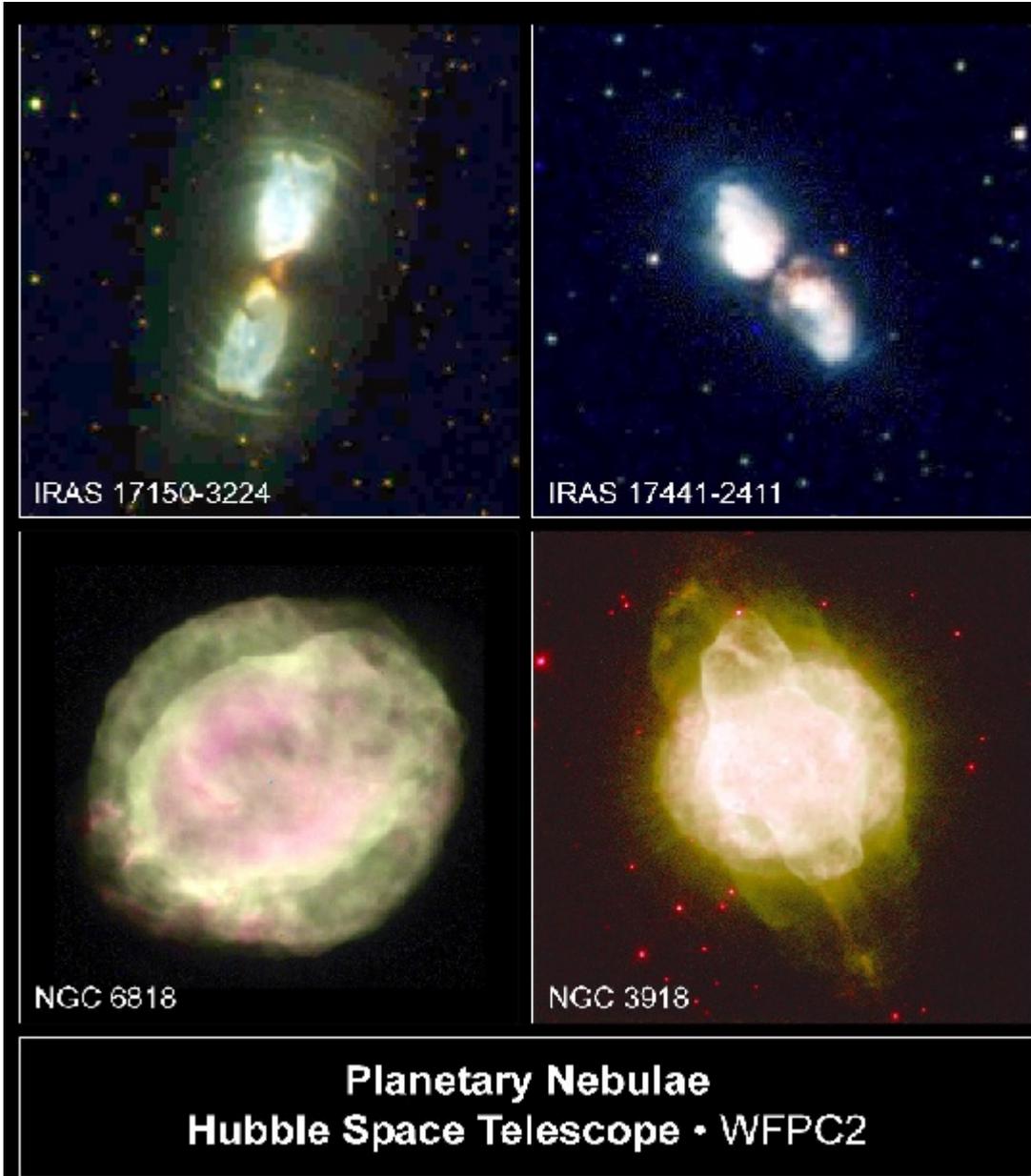
☛ le funzione di luminosità dei GC possono essere studiate con HST fino  $m-M \sim 35$  ( $D = 100$  Mpc)

# Nebulose planetarie

- ☛ gusci di gas in espansione attorno a nane bianche
- ☛ sono sistemi giovani di popolazione di disco con spettri dominati dalla riga del [OIII]5007Å (~15% del flusso)
- ☛ si individuano con spettri o immagini grazie ad un filtro interferenziale con banda passante centrata su 5007 Å

$$m_{5007} = -2.5 \log f_{5007} - 21.24$$

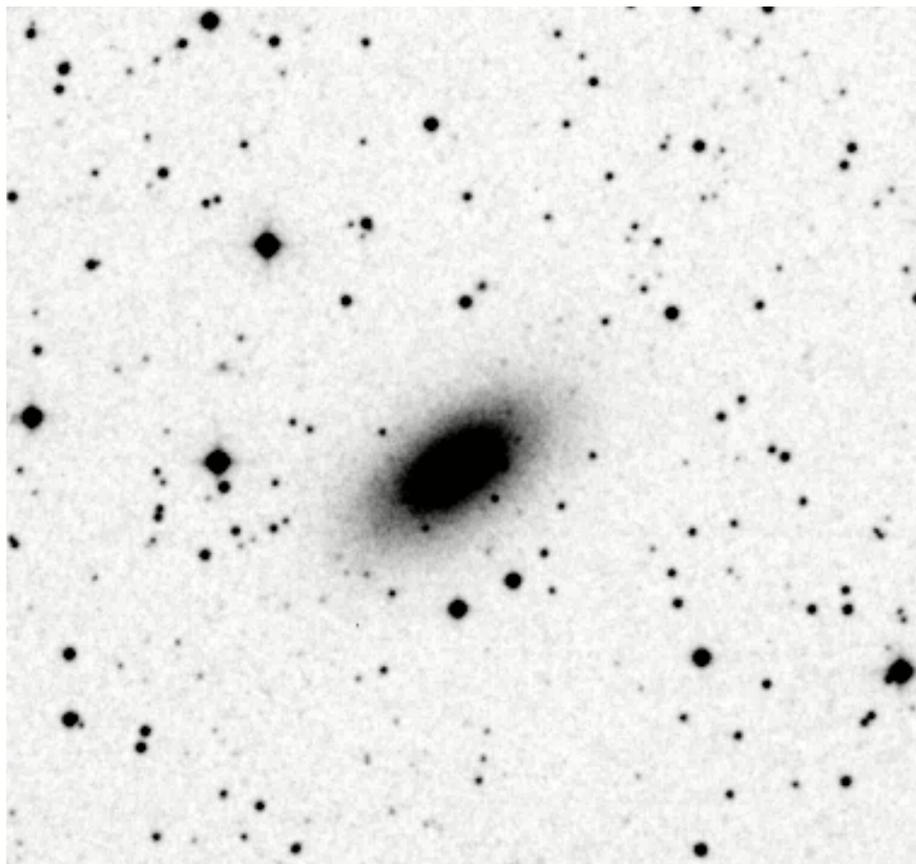
☛ PNe in MW



☞ PNe in M33

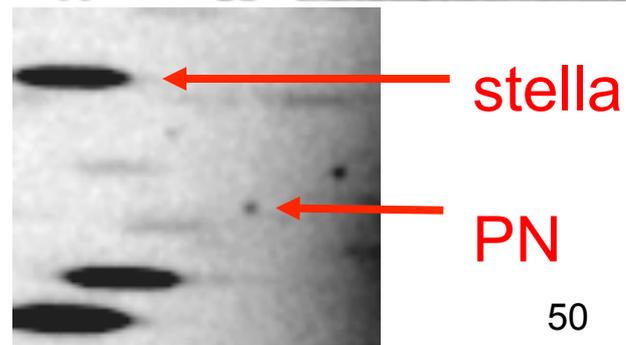
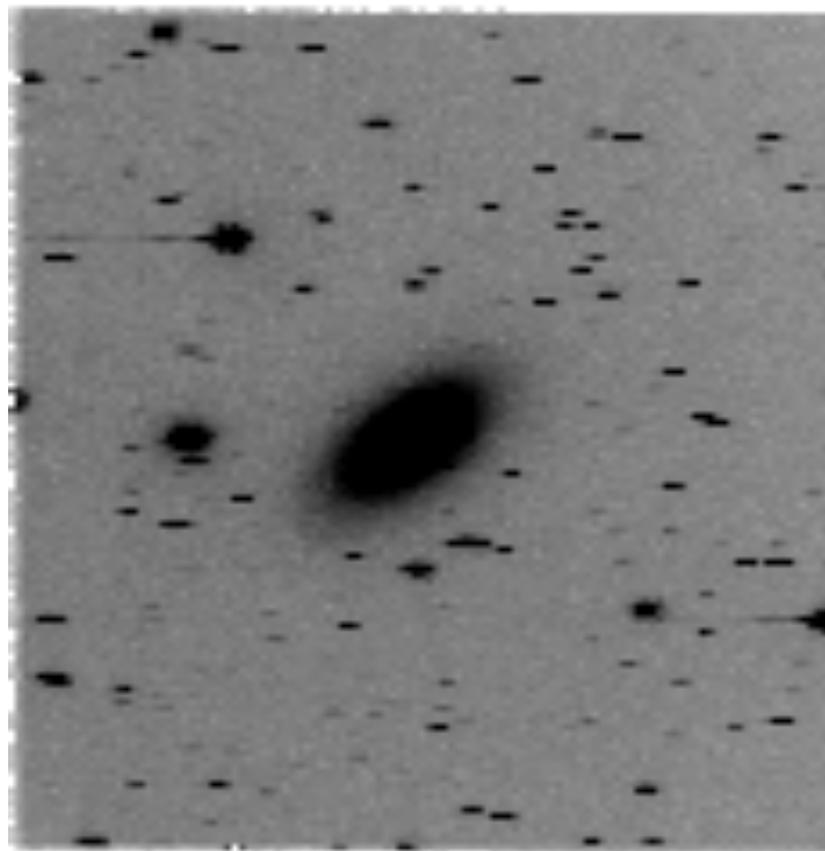


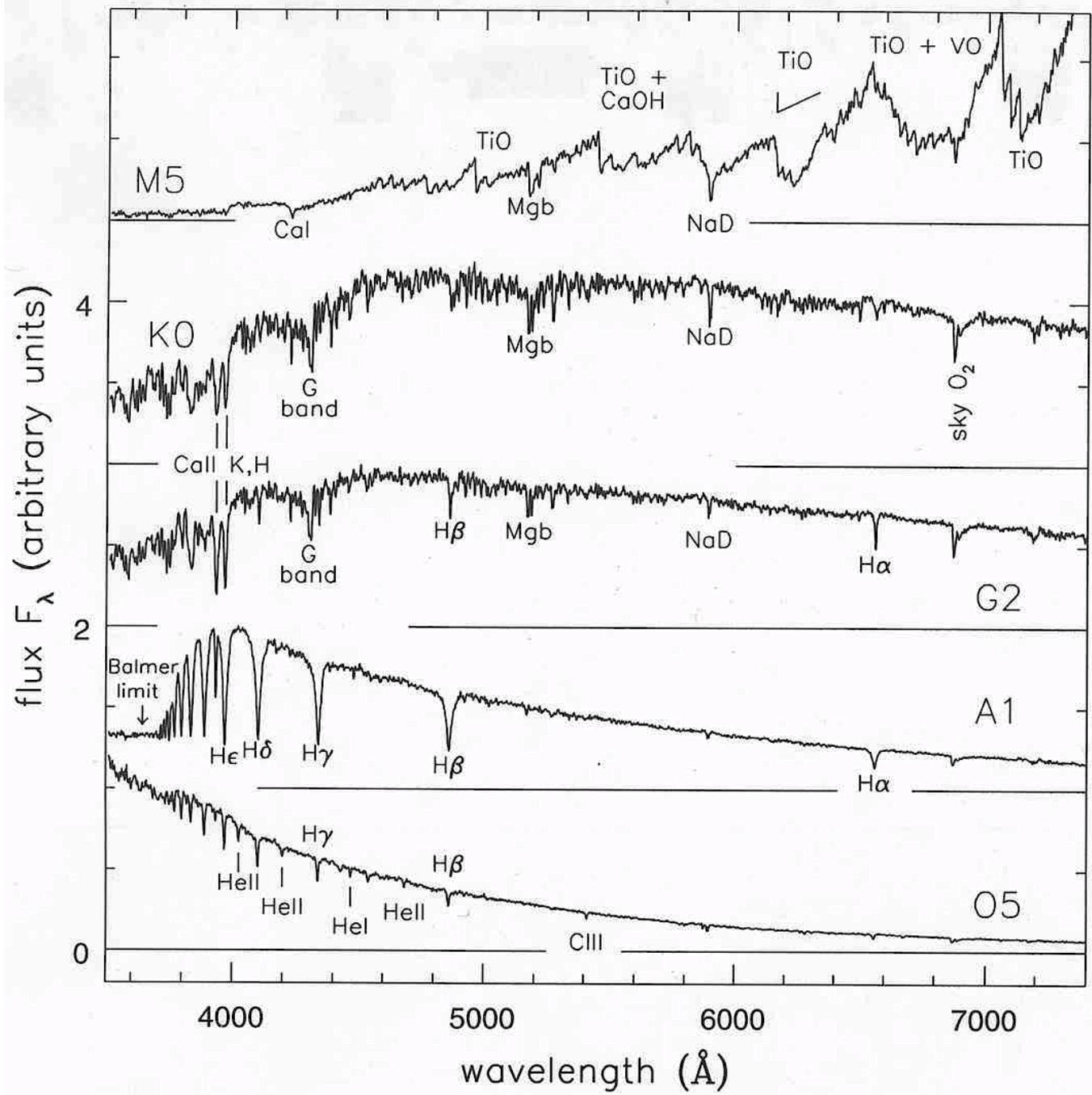
NGC 7457 DSS



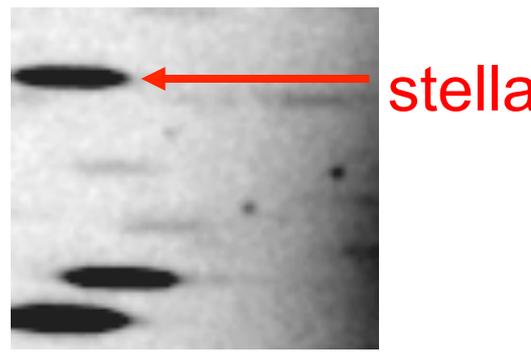
☛ PNe in NGC 7457

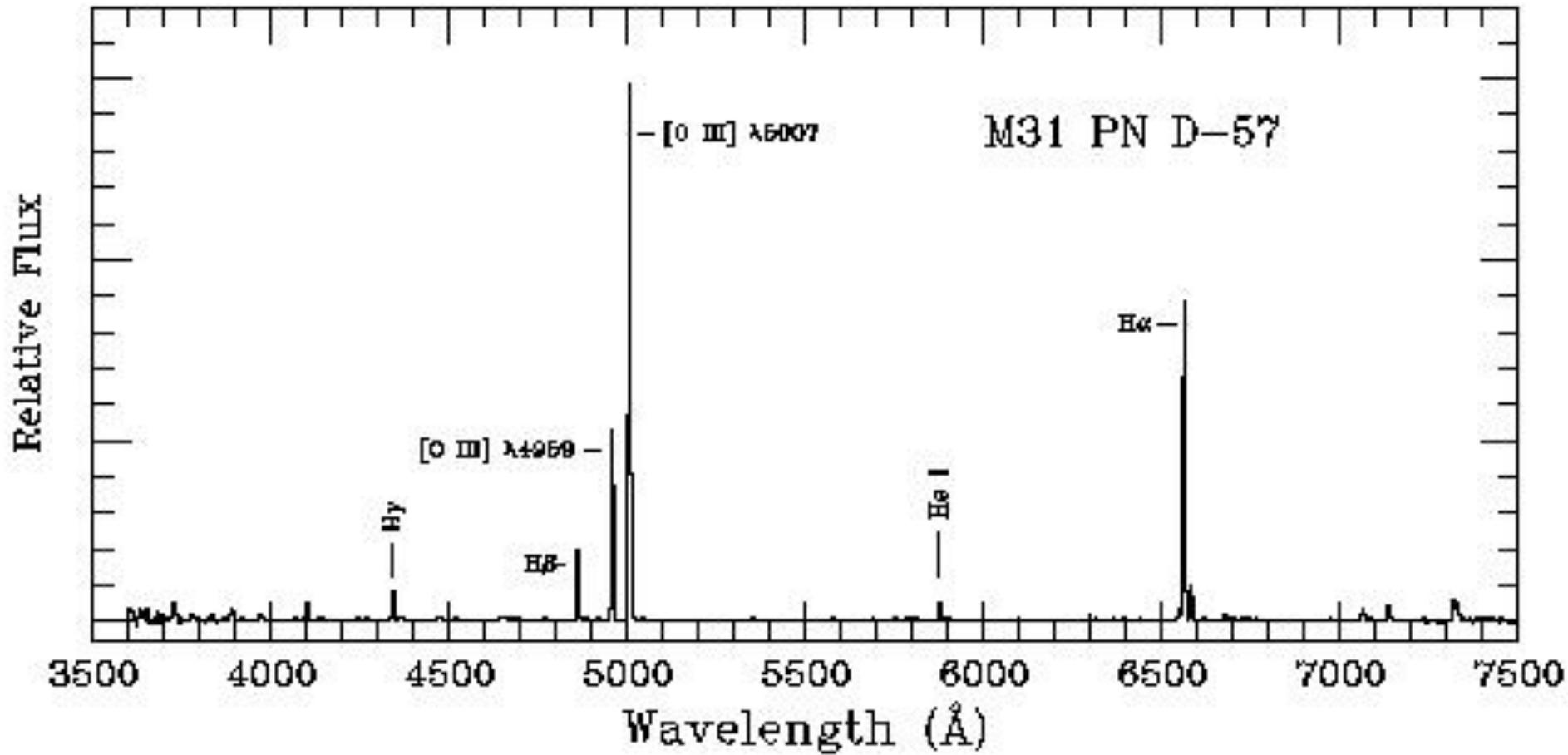
NGC 7457 spettro senza fenditura



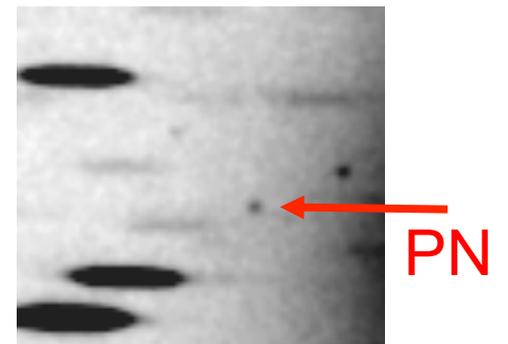


☛ spettri di stelle  
(continuo)





☛ spettro di PN  
 ([OIII] 5007  $\text{\AA}$ )



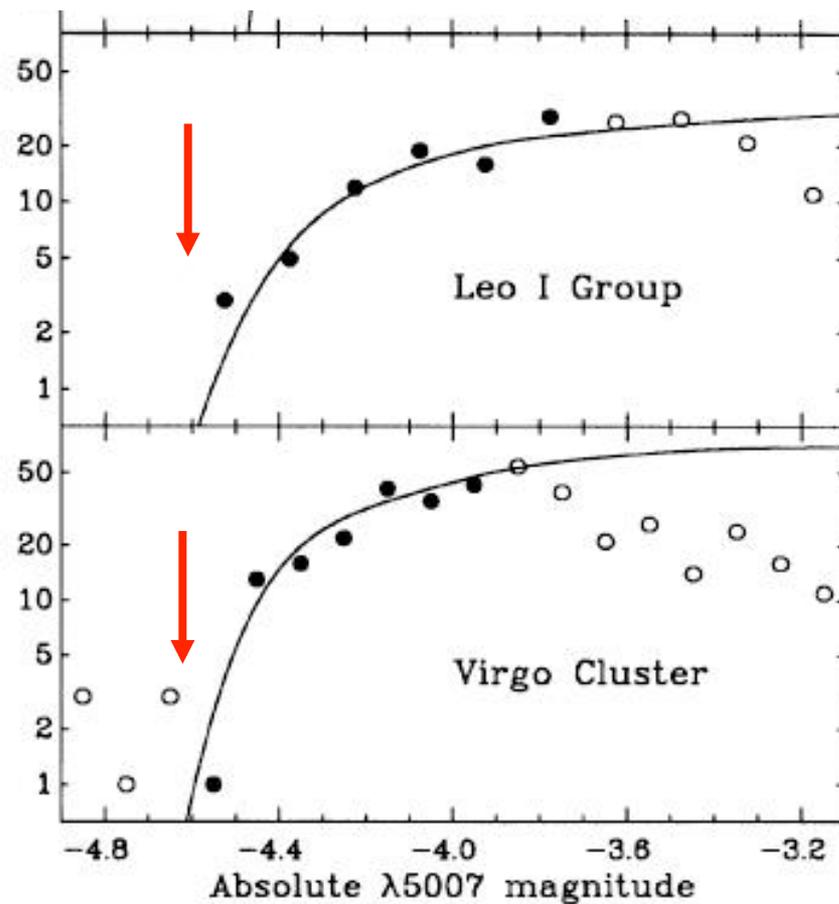
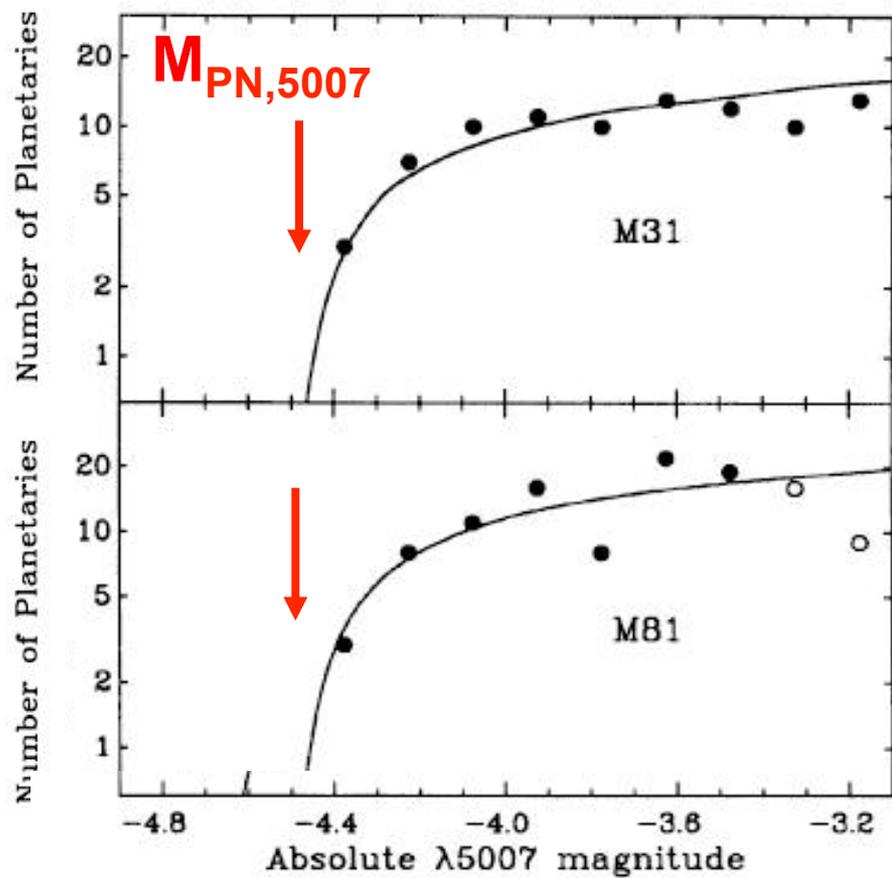
# Funzione di luminosità delle PNe

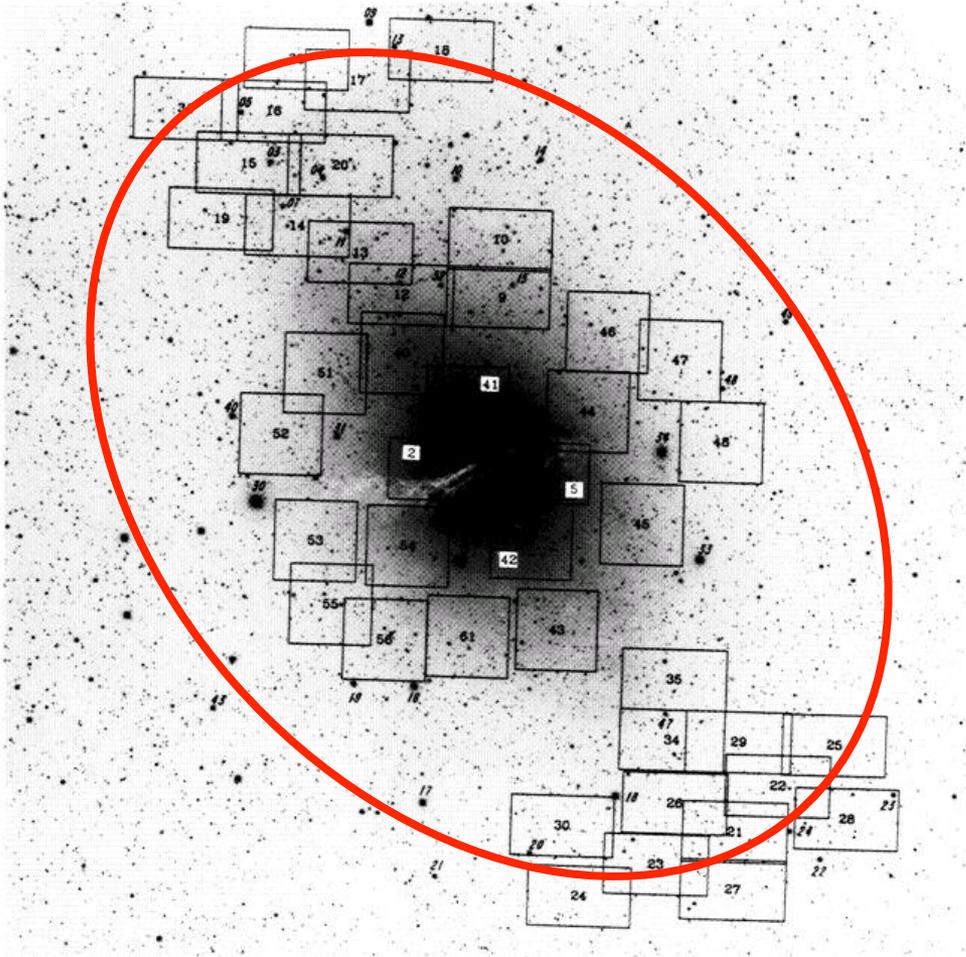
- ☛ la funzione di luminosità  $\Phi(m)$  delle PNe di una galassia è tale che  $\Phi(m)dm = \text{numero di PNe in } (m, m+dm)$
- ☛ la funzione di luminosità  $\Phi(m)$  delle PNe è troncata a  $m_{\text{PN}}$

$$\Phi(m) = K e^{-0.307m} [1 - e^{-3(m_{\text{PN}}-m)}]$$

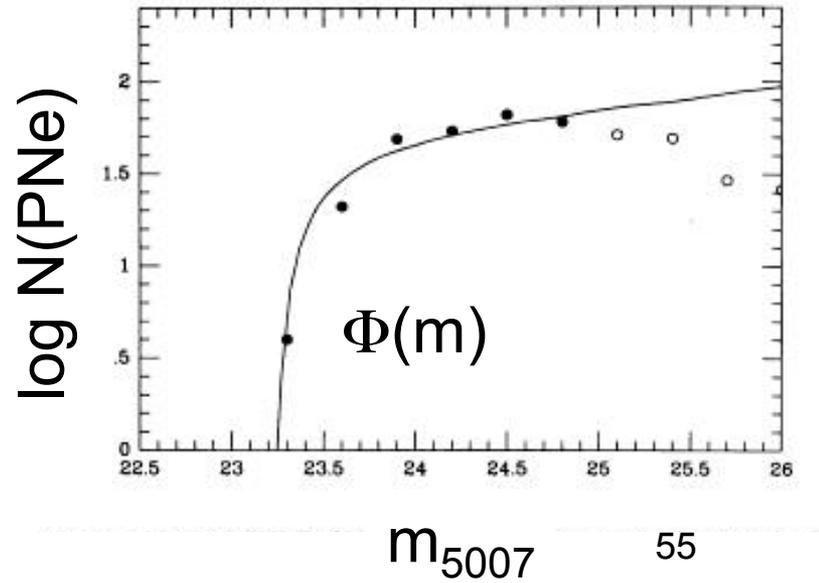
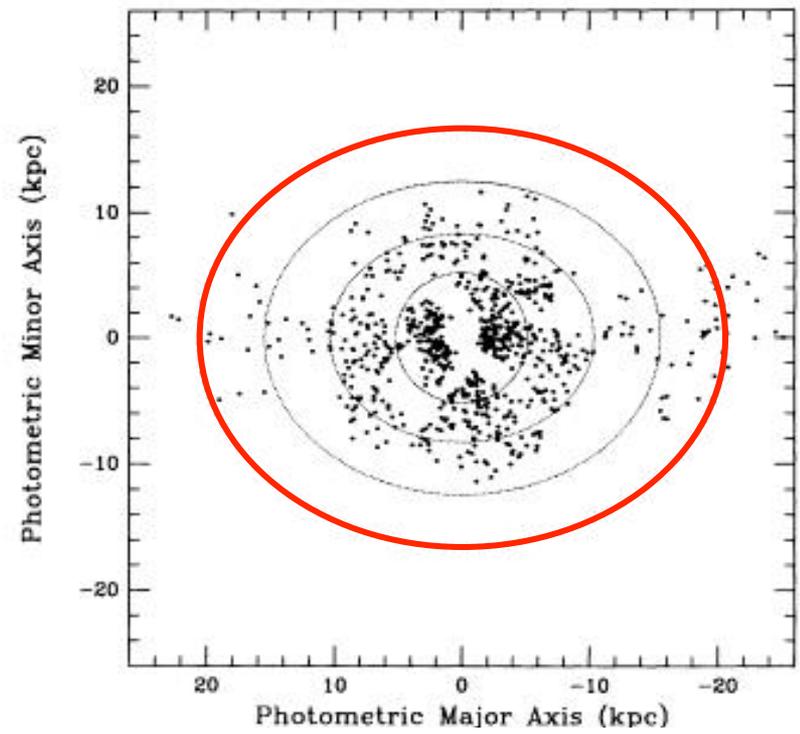
- ☛  $m_{\text{PN}}$  viene calibrato in  $M_{\text{PN}}$  su galassie di distanza nota

$$M_{\text{PN},5007} = -4.7 \pm 0.1$$





☛ PNe in NGC 5128



$m_{5007}$  55

# La relazione di Tully-Fisher

- ☛ vale per le galassie a spirale (cinematica gas)
- ☛ trovata da R. B. Tully e J. R. Fisher (1977)
- ☛ le galassie a spirale più luminose hanno velocità di rotazione maggiori (=  $\Delta V$  maggiore)

$$L_T \propto \Delta V^4$$

$$M_T = -10 \log \Delta V + \text{cost}$$

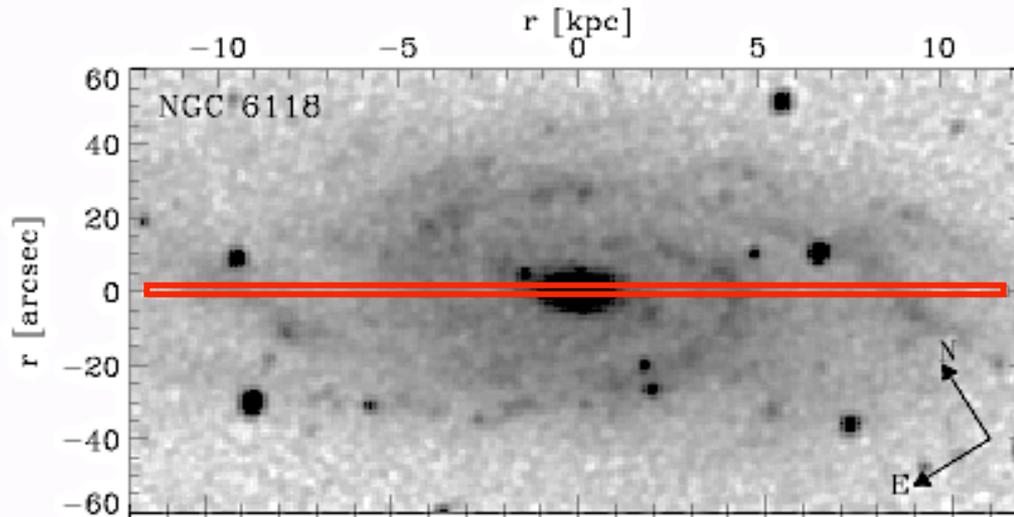
$$\log \Delta V = -0.1 M_T + \text{cost}$$

- ☛ questo significa che le galassie a spirale più luminose sono le più massicce
- ☛ calibrata la relazione ottengo la distanza della galassia dal modulo di distanza m-M

# ☛ Cinematica di HII della galassia a spirale NGC 6118

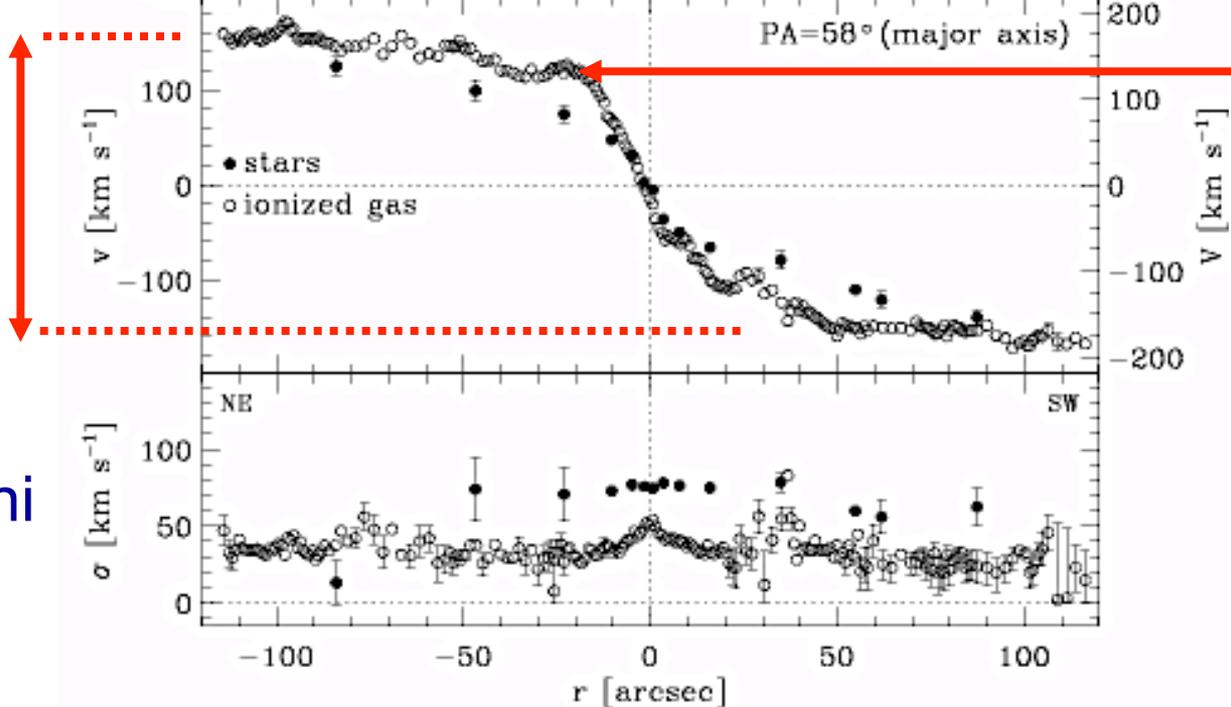
fotometria:

$m_T, i$



cinematica:

$\Delta v$

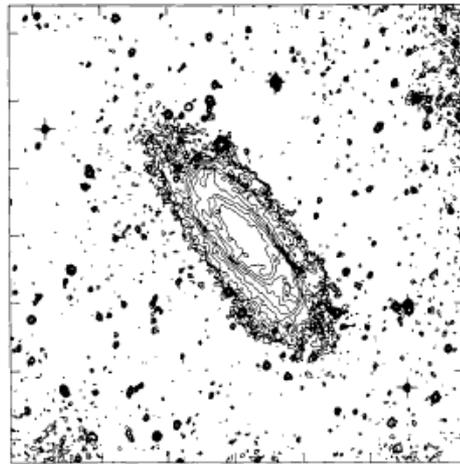


gas (=  $V_c$ )

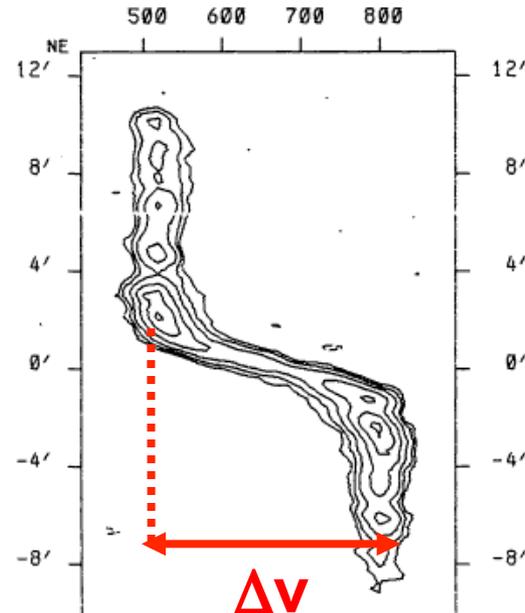
$\Delta V = \Delta v / \sin i$

# ☛ Cinematica di HI della galassia a spirale NGC 3198

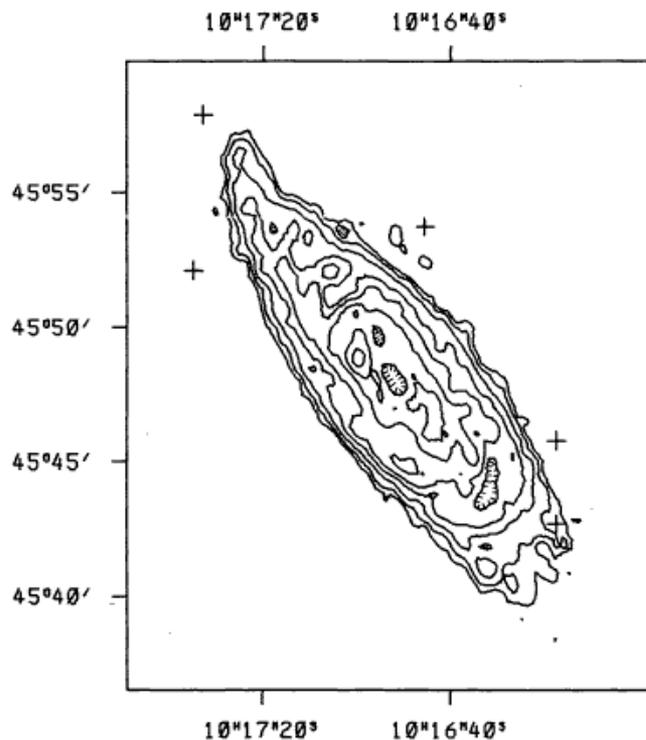
Ottico  
isofote



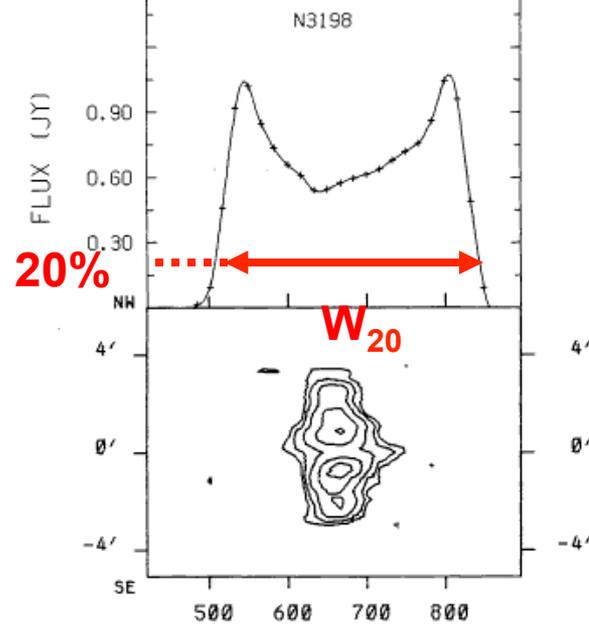
Curva di  
rotazione  
su asse  
maggiore

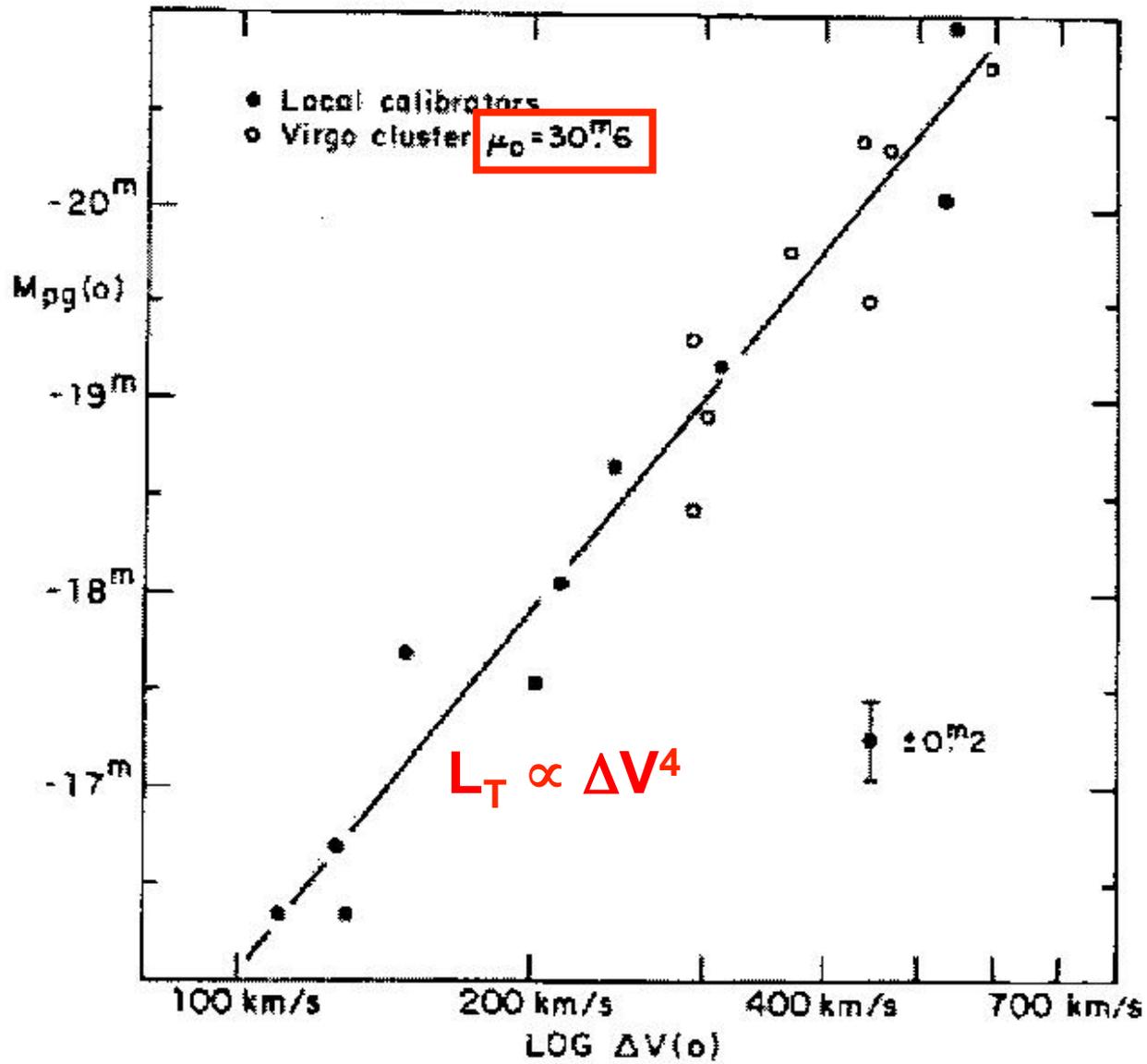


Radio  
mappa HI



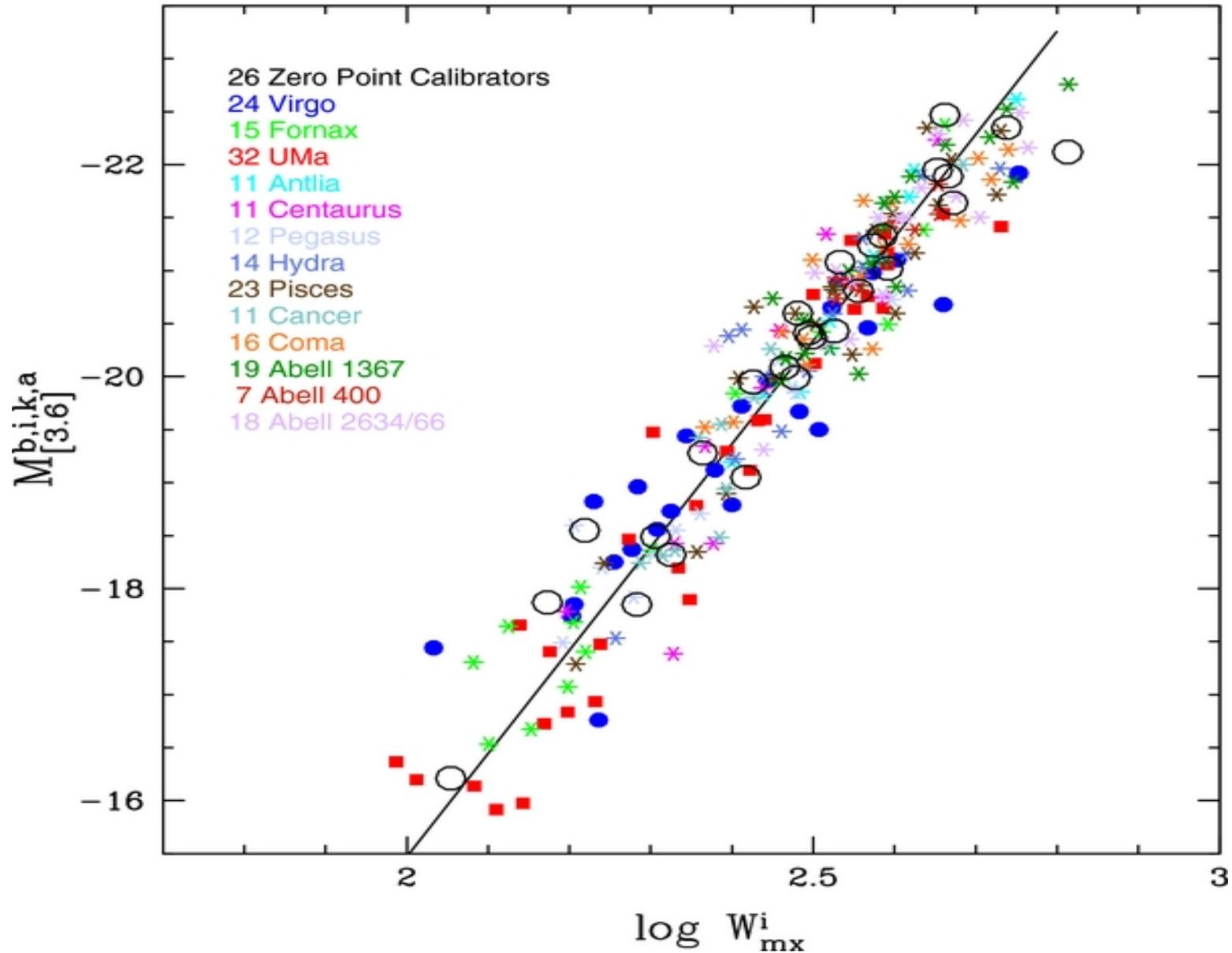
Profilo  
riga HI





Tully & Fisher (1977)

$$M_{3.6} = -9.13 (\log W_{\max}^i - 2.5) - 20.34$$



- Originariamente è stata trovata nel radio (HI) ma vale anche in ottico (HII)
- Diverse **definizioni di  $\Delta V$** :  $W_{20}$ ,  $W_{50}$ ,  $W_{\max}$ ,  $W_R$ ,  $2V_{\max}$ ,  $2V_{\text{flat}}$
- La TF calibrata su galassie di distanza nota

$$M_B^i = -7.48(\log W_R^i - 2.50) - 19.55 + \Delta_B \pm 0.14,$$

$$M_R^i = -8.23(\log W_R^i - 2.50) - 20.46 + \Delta_R \pm 0.10,$$

$$M_I^i = -8.72(\log W_R^i - 2.50) - 20.94 \pm 0.10,$$

$$M_H^i = -9.50(\log W_R^i - 2.50) - 21.67 \pm 0.08.$$

con  $\Delta_B=0.25$  e  $\Delta_R=0.06$  **correzioni di colore empiriche** (e arbitrarie) per tener conto del fatto che le galassie di ammasso (usate per calibrare TF) sono sistematicamente più rosse di quelle di campo

# La relazione di Faber-Jackson

- ☛ vale per le galassie ellittiche (cinematica stelle)
- ☛ trovata da S. M. Faber e R. E. Jackson (1976)
- ☛ le galassie ellittiche più luminose hanno dispersioni di velocità maggiori

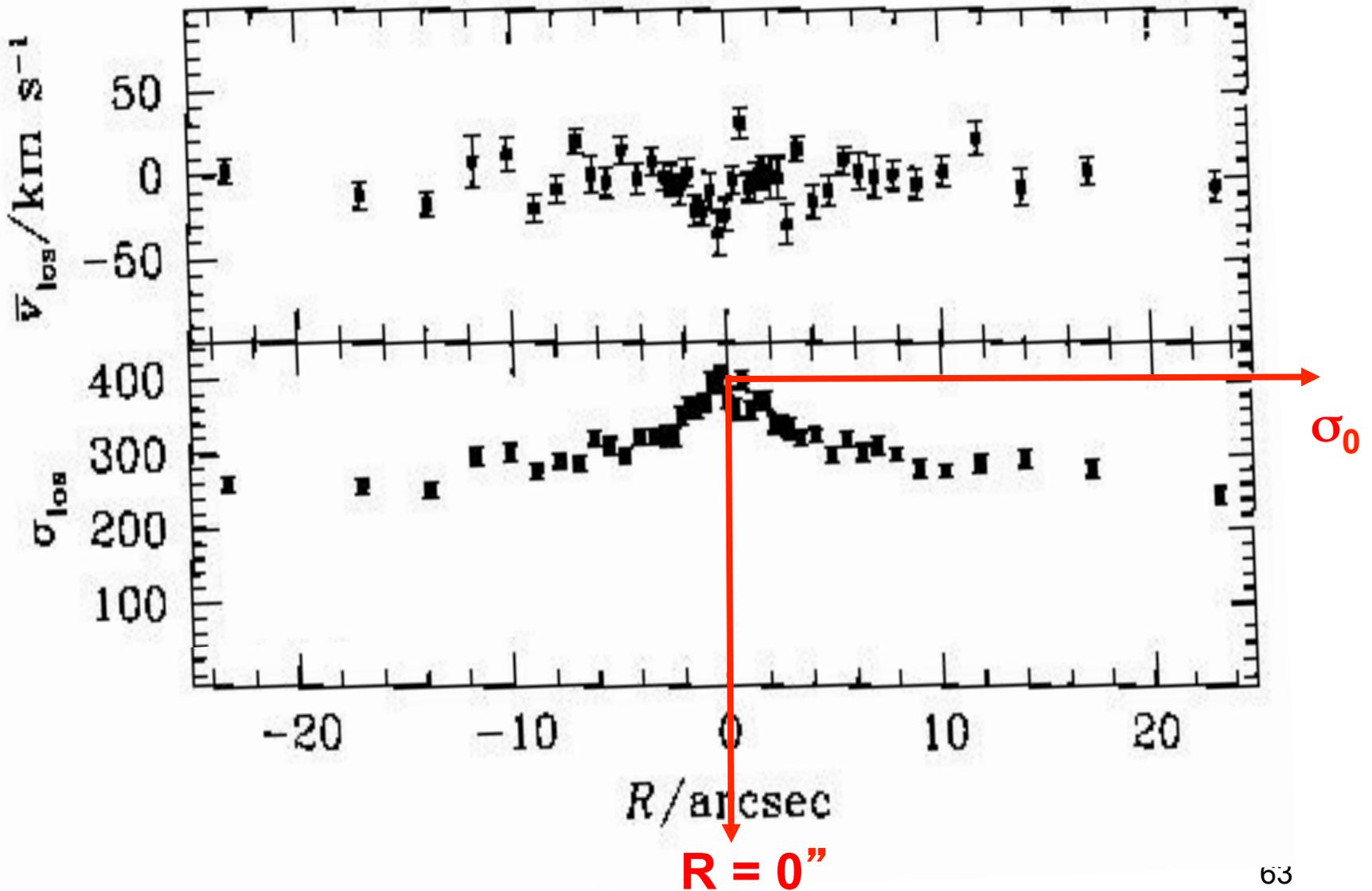
$$L_T \propto \sigma^4$$

$$M_T = -10 \log \sigma + \text{cost}$$

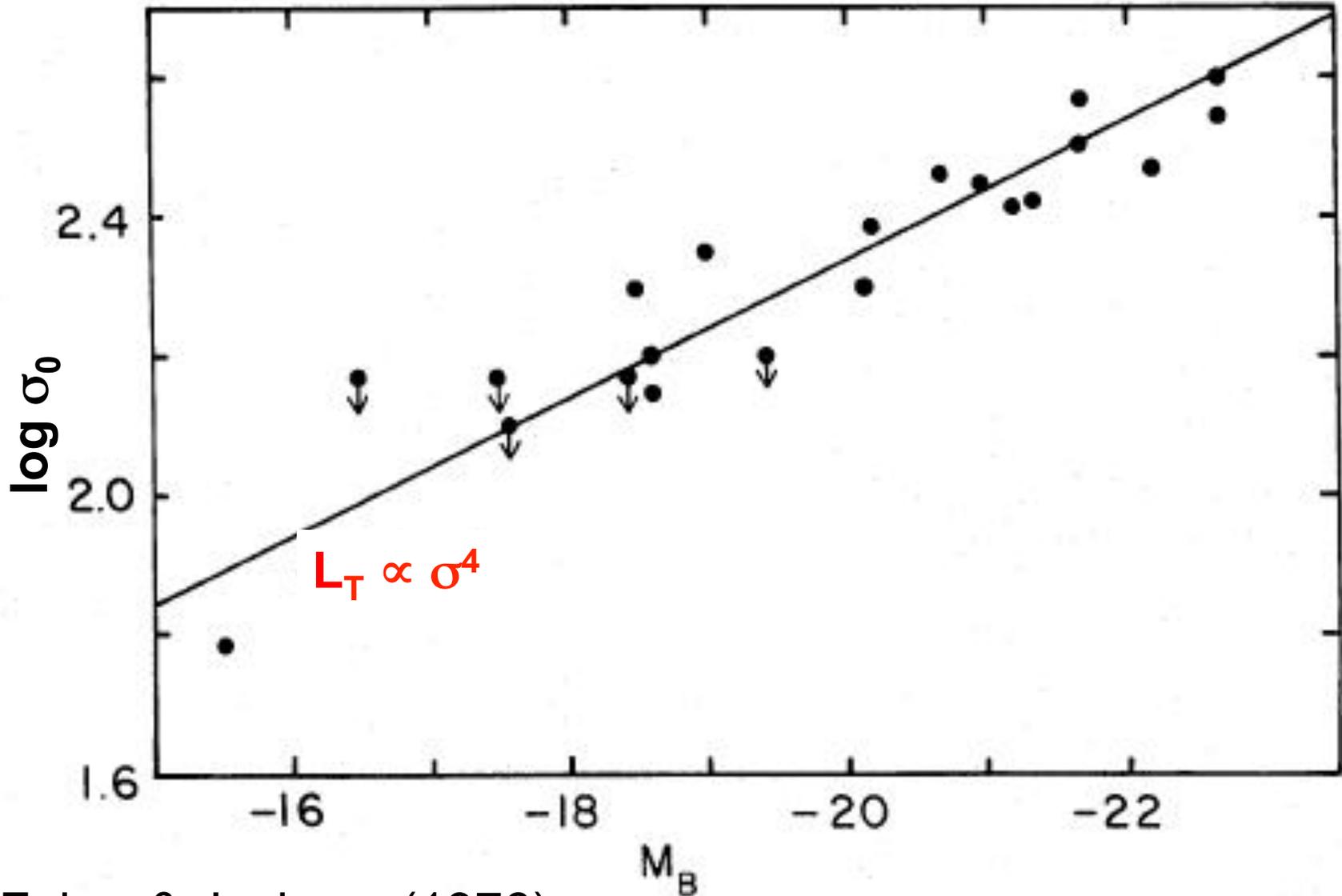
$$\log \sigma = -0.1 M_T + \text{cost}$$

- ☛ questo significa che le galassie ellittiche più luminose sono le più massicce
- ☛ calibrata la relazione ottengo la distanza della galassia dal modulo di distanza  $m-M$

• Cinematica stellare della galassia ellittica M87

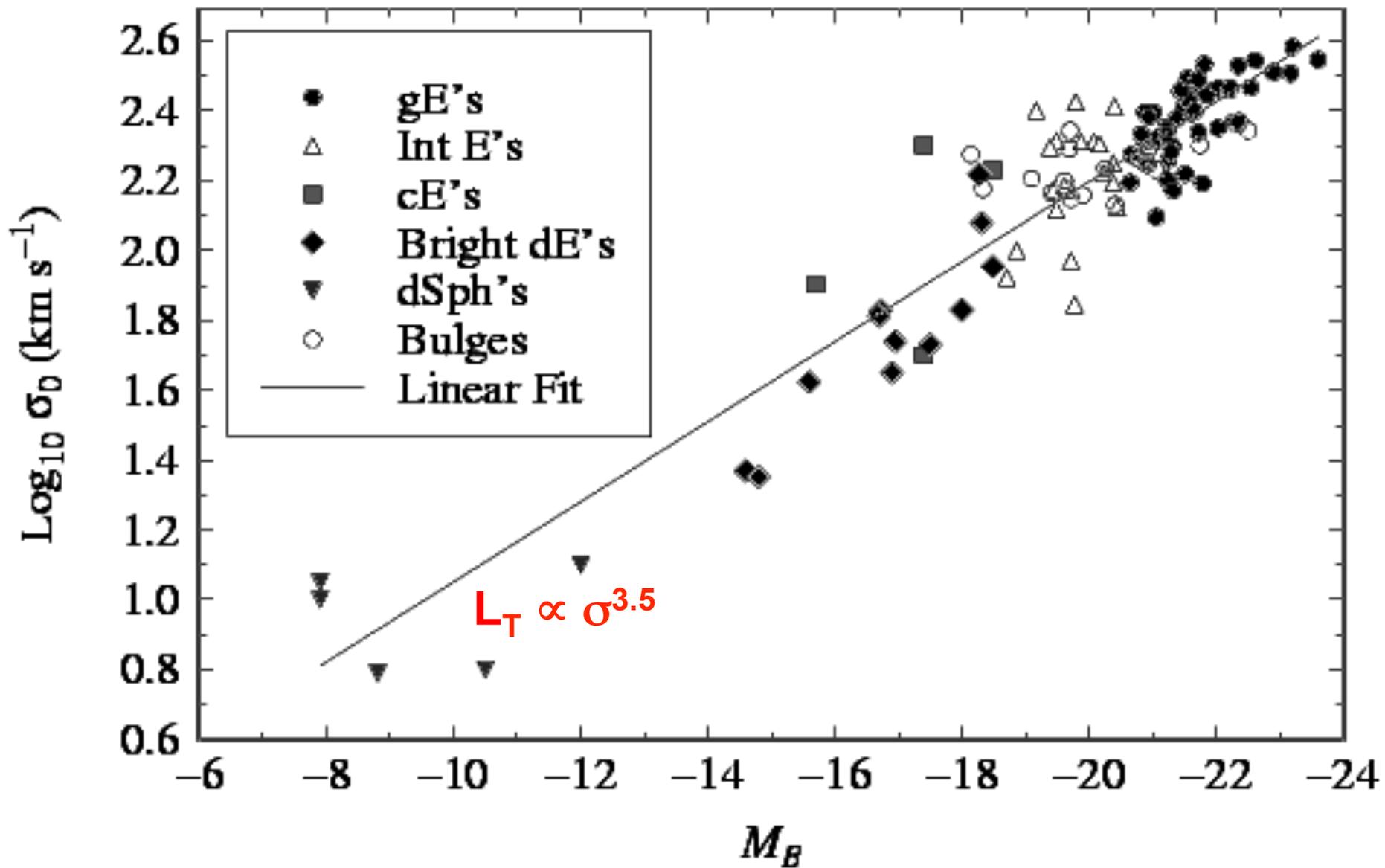


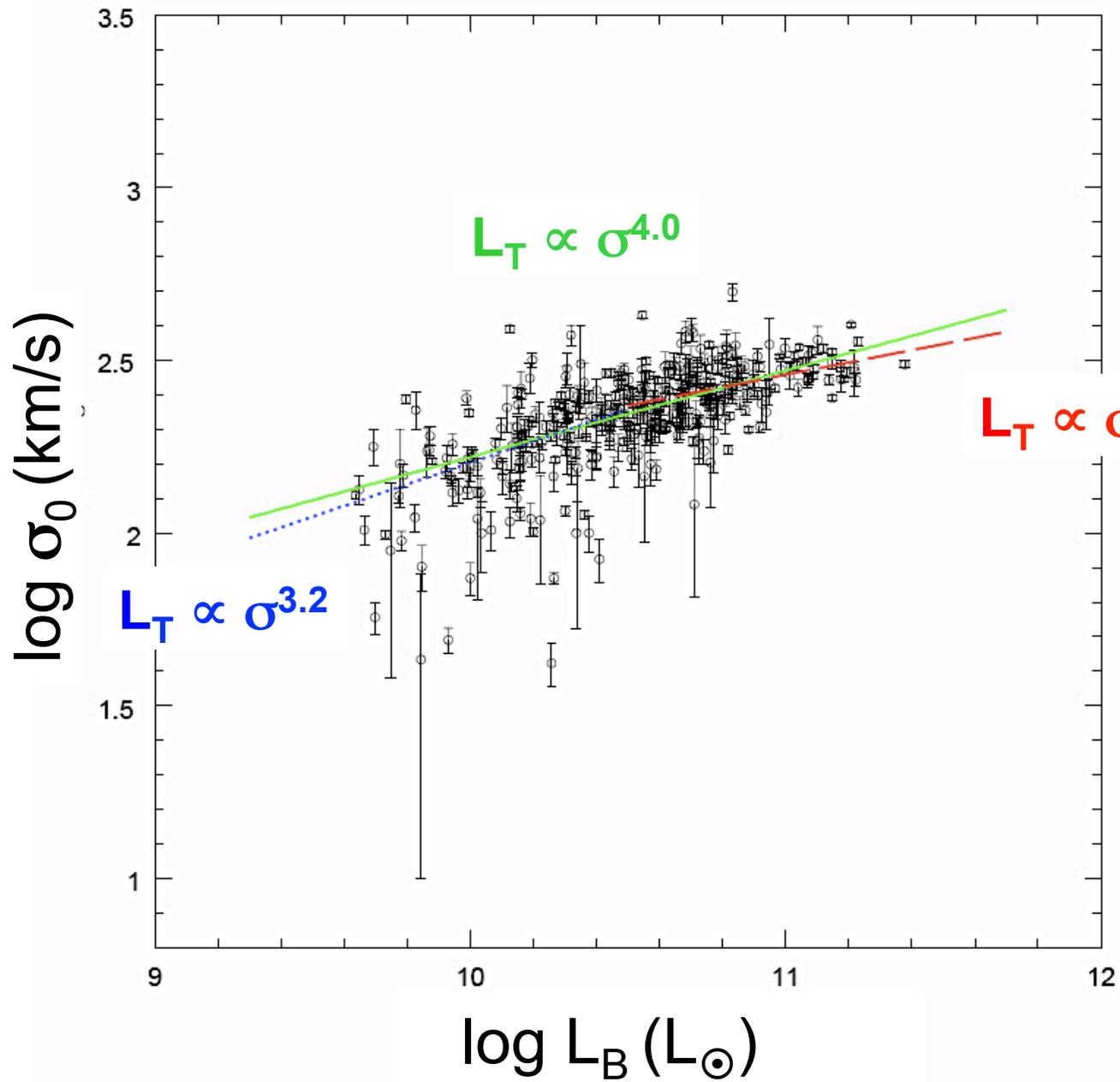
$$M_B = -10 \log \sigma - 0.43$$



Faber & Jackson (1976)

$$M_B = -8.75 \log \sigma - 1$$





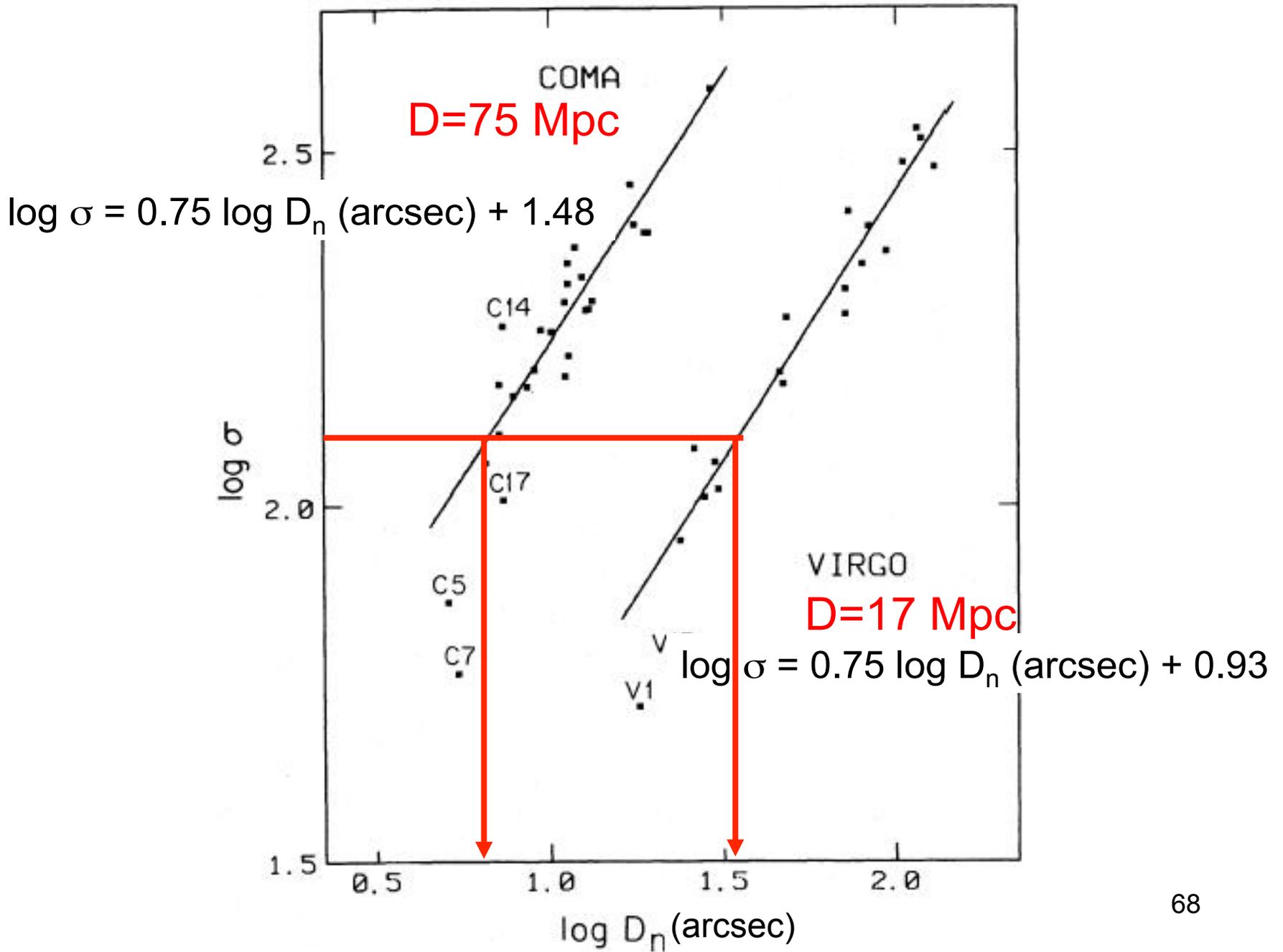
# La relazione $D_n$ - $\sigma$

- ☛ vale per le galassie ellittiche (cinematica stelle)
- ☛  $D_n$  è il diametro dell'isofota entro cui  $\langle \mu \rangle_B = 20.75$
- ☛ trovata da A. Dressler et al. (1987)
- ☛ le galassie ellittiche più estese hanno dispersioni di velocità maggiori

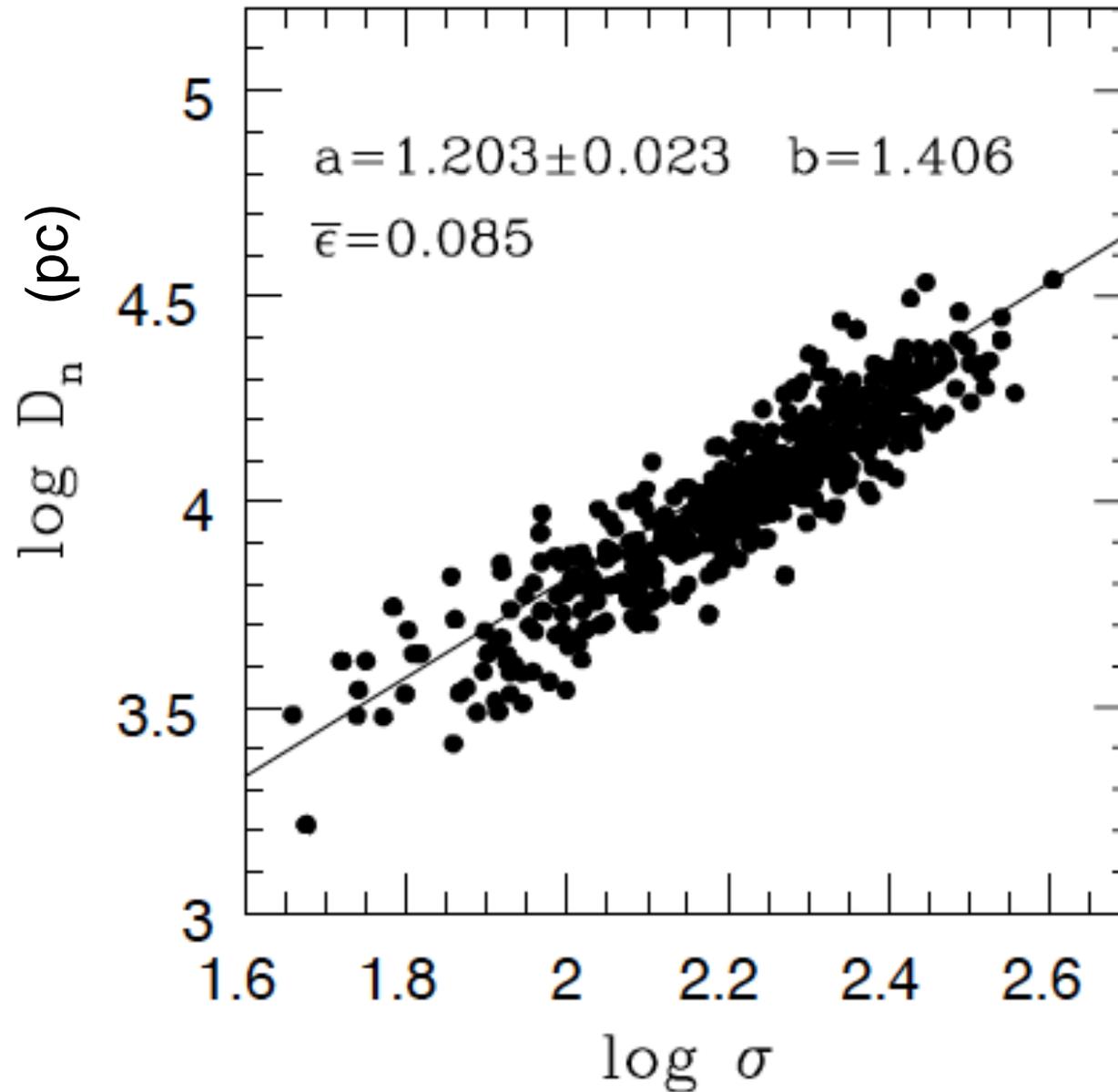
$$\sigma \propto D_n^{0.75}$$

$$\log \sigma = 0.75 \log D_n + \text{cost}$$

- ☛ questo significa che le galassie ellittiche più luminose sono le più massicce
- ☛ calibrata la relazione ottengo la distanza della galassia confrontando  $D$  (arcsec) e  $D$  (kpc)



$$\log D_n (\text{pc}) = 1.2 \log \sigma + 1.4$$



# Altri indicatori

- ☛ Stelle di sequenza principale
- ☛ Funzione di luminosità delle galassie
- ☛ Ritardi temporali
- ☛ Fluttuazioni di brillantezza superficiale
- ☛ Effetto Sunyaev-Zel' dovich
- ☛ Lenti gravitazionali
- ☛ ...

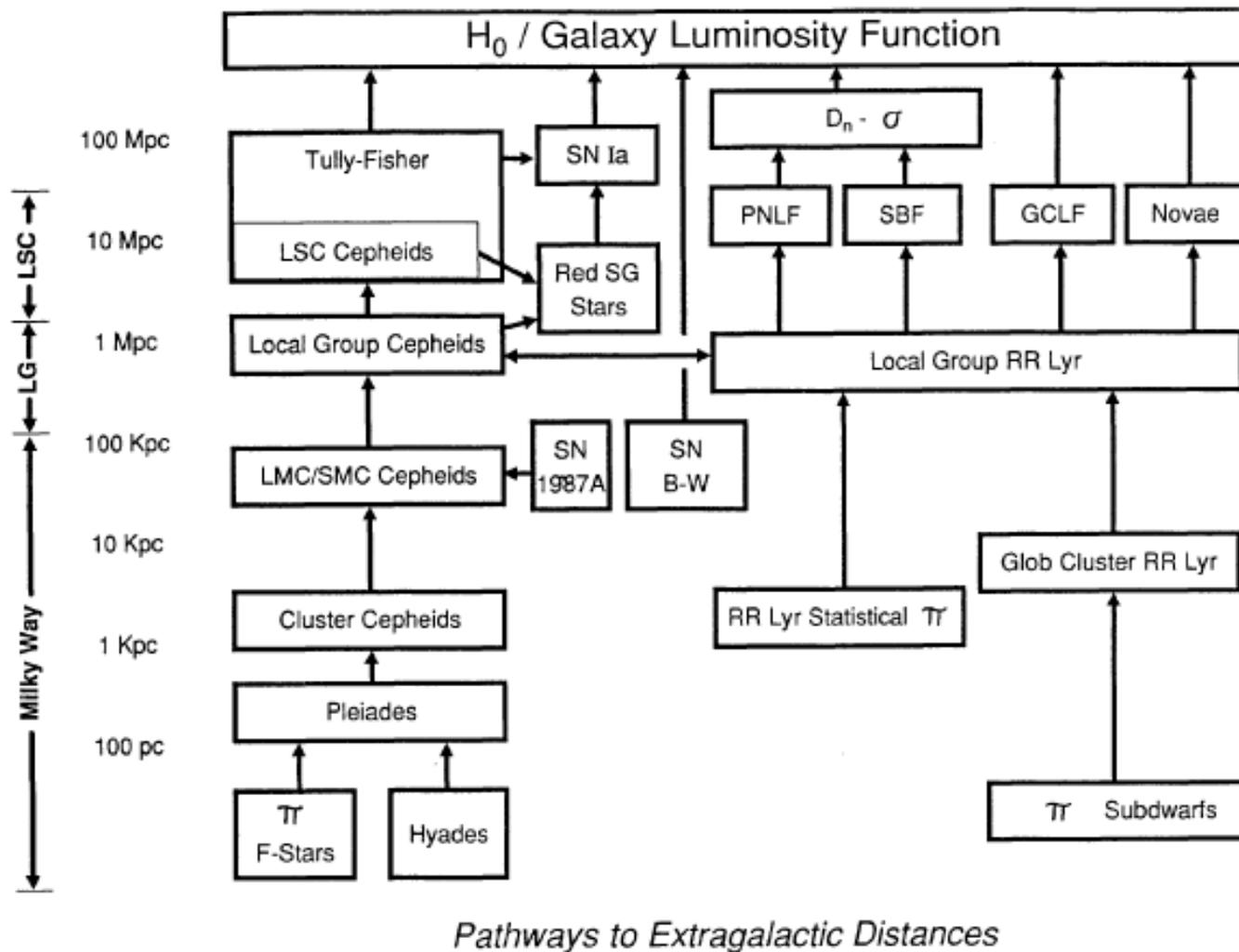


FIG. 1—In this diagram we illustrate the various modern routes which may be taken to arrive at  $H_0$  and the genealogy and approximate distance range for each of the indicators involved. Population I indicators appear on the left-hand side and Population II on the right-hand side. The distance increases logarithmically toward the top of the diagram. The following abbreviations have been used to conserve space: LSC—Local Super Cluster; SG—Supergiant; SN—Supernovae; B-W—Baade-Wesselink; PNLF—Planetary-Nebula Luminosity Function; SBF—Surface-Brightness Fluctuations; GCLF—Globular-Cluster Luminosity Function;  $\pi$ —parallax.

# Distanze da ricordare

- ☛ Centro galattico
- ☛ LMC
- ☛ M31
- ☛ Ammasso della Vergine

## ☛ Centro galattico (8 kpc)

Method	Distance/kpc
H <sub>2</sub> O masers	$7.2 \pm 0.7$
RR Lyrae stars	$7.8 \pm 0.4$
Globular clusters	$8.0 \pm 0.8$
Cepheids	$8.0 \pm 0.5$
Red clump stars	$8.4 \pm 0.4$

## ☛ LMC (50 kpc)

Method	Distance/kpc
Main Sequence Fitting	$50 \pm 5$
Cepheids	$50 \pm 2$
RR Lyrae	$44 \pm 2$
SN1987a time delay	$52 \pm 3$
SN1987a Baade Wessclink method	$55 \pm 5$

## ☛ M31 (750 kpc)

Method	Distance/kpc
Cepheids	$760 \pm 50$
RR Lyrae	$750 \pm 50$
Planetary Nebula Luminosity Function	$750 \pm 50$
Globular Cluster Luminosity Function	$700 \pm 60$
Novae	$710 \pm 80$

## ☛ Ammasso della Vergine (17 Mpc)

Method	Distance/Mpc
Surface Brightness Fluctuations	$16 \pm 1$
Planetary Nebula Luminosity Function	$15 \pm 1$
Cepheids	$16 \pm 1$
Tully-Fisher Relation	$16 \pm 2$
$D_n$ - $\sigma$ Relation	$17 \pm 2$
Type Ia Supernovae	$23 \pm 2$
Globular Cluster Luminosity Function	$19 \pm 4$
Novae	$21 \pm 4$

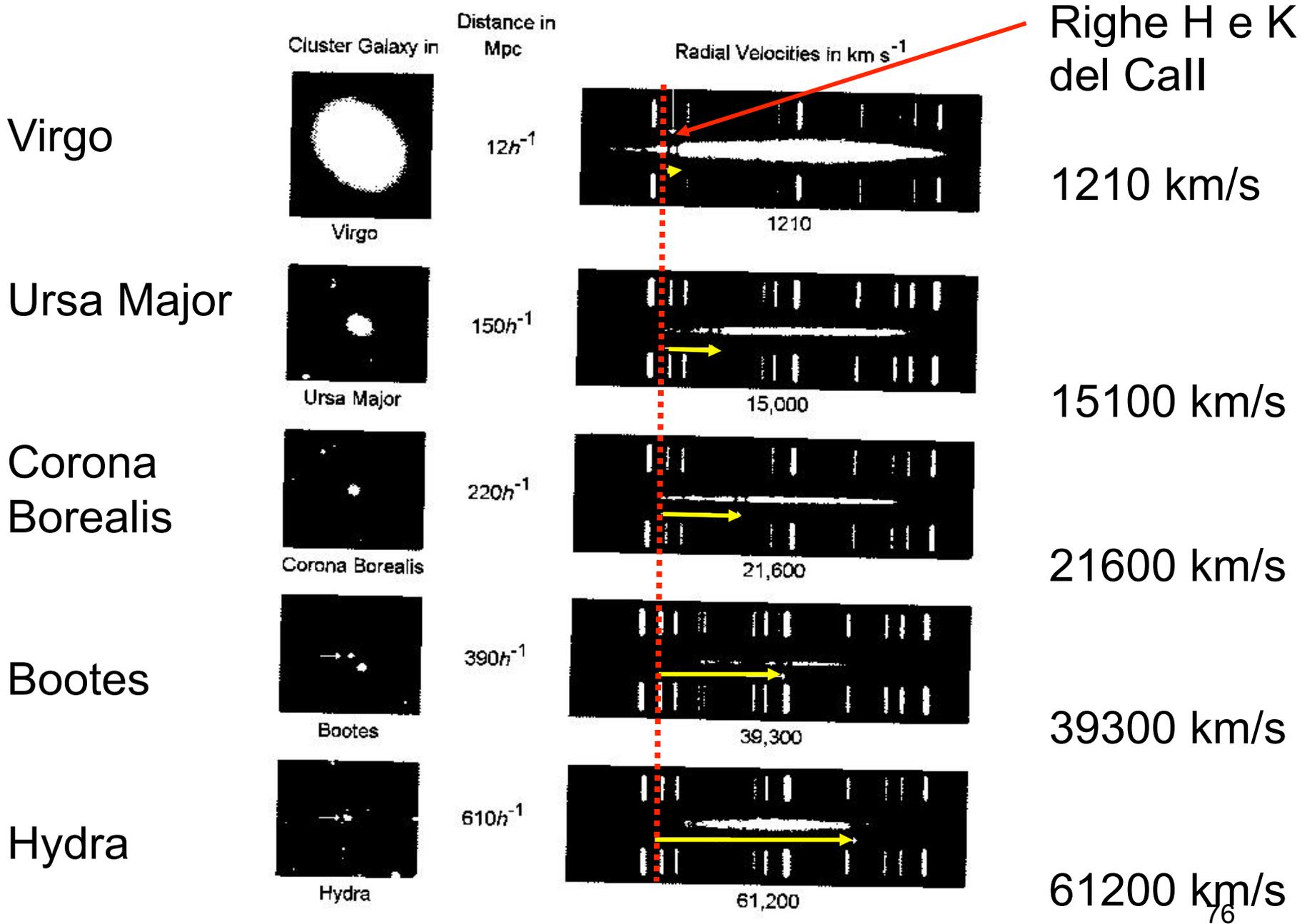
# Legge di Hubble

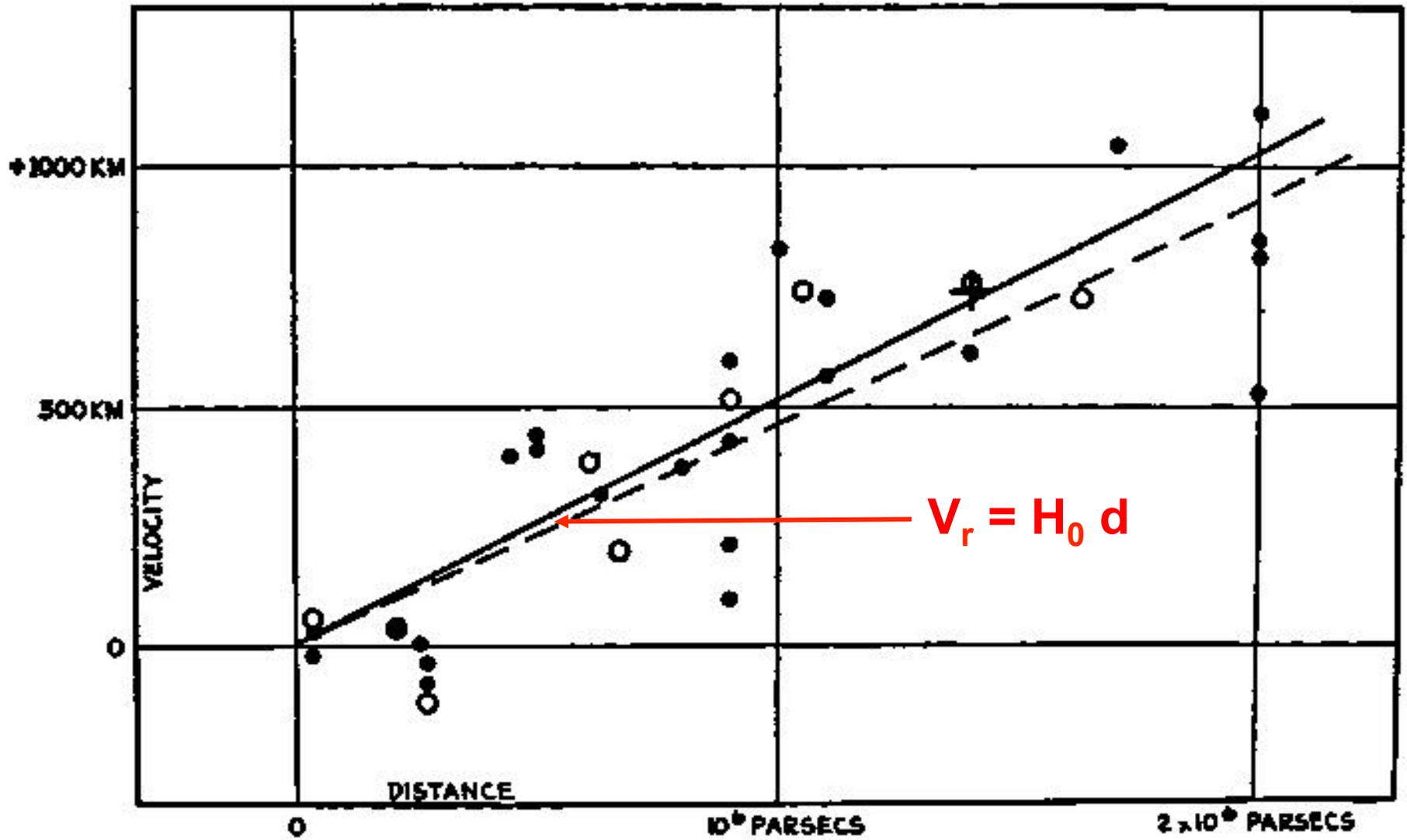
- ☛ E. P. Hubble combinando le  $V_r$  (km/s) di V. Slipher (1914-24) con le proprie  $d$  (Mpc) trova nel 1929

$$V_r = H_0 d$$

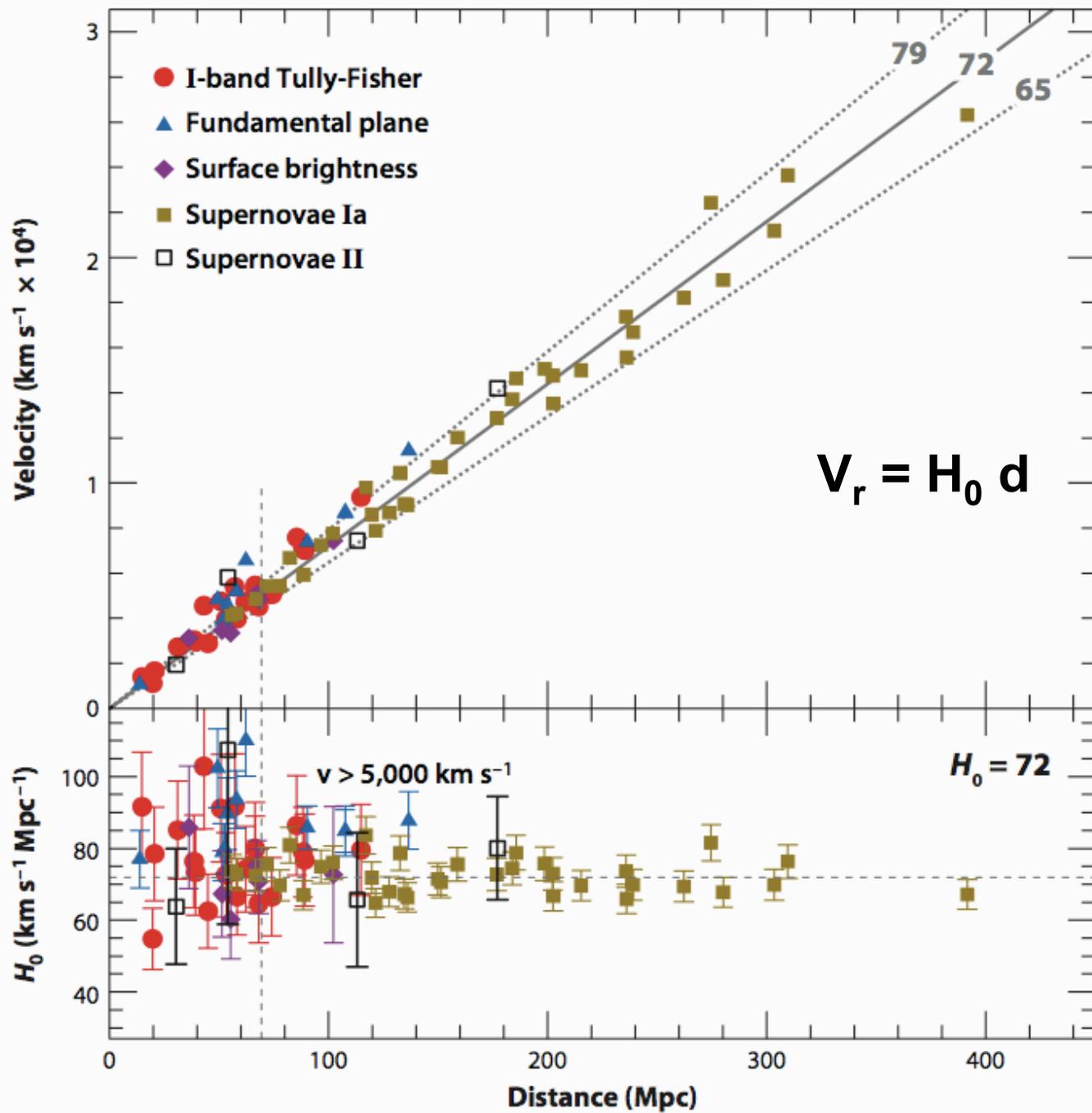
che oggi chiamiamo **legge di Hubble**

- ☛  $H_0 = 50-100$  km/s/Mpc **costante di Hubble**
- ☛  $V_r$  si misura dallo **spostamento delle righe spettrali**
- ☛  $d$  si misura con gli **indicatori di distanza**





☛ Legge di Hubble (1936)



# Costante di Hubble

☛ vale

$$H_0 = 75 \pm 10 \text{ km/s/Mpc}$$

☛ possiamo anche usare la notazione

$$H_0 = 100 h \text{ km/s/Mpc}$$

con  $h=0.5-1$  grandezza adimensionale che parametrizza l'incertezza su  $H_0$

☛ dipendenza dei parametri fisici da  $h$  (cioè  $H_0$ )

$$d \sim h^{-1} \quad M \sim h^{-1}$$

$$R \sim h^{-1} \quad L \sim h^{-2}$$

# Approfondimenti

- E. P. Hubble, *Cepheids in spiral nebulae*, 1925, *Obs*, 48, 139
- E. P. Hubble, *A Relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae*, 1929, *PNAS*, 84, 270
- R. B. Tully, J. R. Fisher, *A new method of determining distances to galaxies*, 1976, *A&A*, 54, 661
- S. M. Faber, R. E. Jackson, *Velocity dispersions and mass-to-light ratios for elliptical galaxies*, 1977, *ApJ*, 204, 668
- N. Panagia et al. *Properties of the SN 1987A circumstellar ring and the distance to the Large Magellanic Cloud*, 1991, *ApJ*, 380, L23