

SCALA DELLE DISTANZE → per determinare la distanza di una galassia

si utilizzano diversi indicatori:

- geometrici
- parametrici
- primari
- secondari

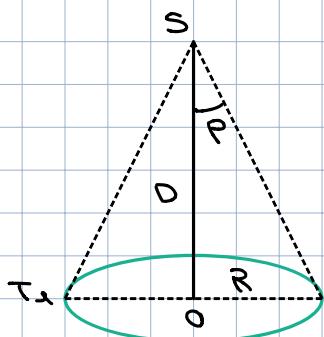
INDICATORI GEOMETRICI → derivano la distanza dal confronto del rosso

apparente e lineare del sistema

- parallasse trigonometrica
- parallasse di gruppo
- [parallasse secolare e statistica]
- parallasse d'espansione

PARALLASSE TRIGONOMETRICA

→ osserva una stella in momenti diversi e calcola il suo spostamento rispetto alle stelle fisse



$$D = \text{distanza stella}$$

$$R = \text{rosso orbita Terrestre}$$

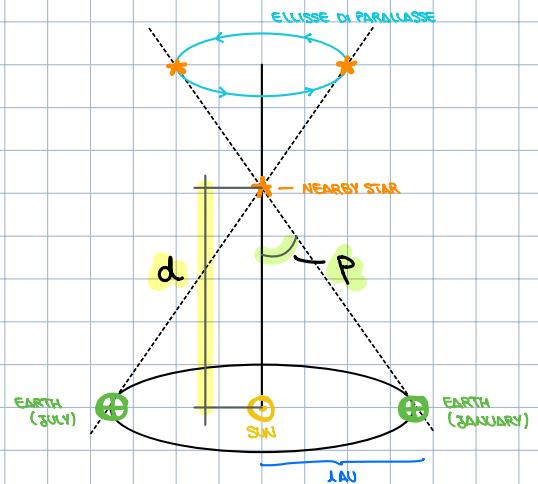
$$p = \text{angolo di parallasse}$$

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

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

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

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



La parallasse trigonometrica misura distanze fino a:

- HIPPARCOS → misurò 120 mila stelle
parallasse limite: 10^{-3} arcsec
distanza massima: $1 \text{ kpc} = 3 \cdot 10^2 \text{ a.l.}$

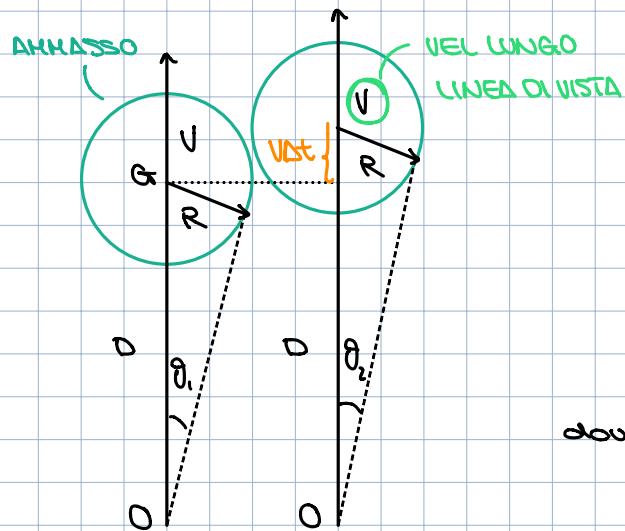
- GAIA → misurò 1 mld di stelle
parallasse limite: $24 \cdot 10^{-6}$ arcsec
distanza massima: $12 \text{ kpc} = 1.3 \cdot 10^4 \text{ a.l.}$

PARALLASSE SECOLARE = sfrutta il moto del Sole ($S_0 \approx 30 \text{ km s}^{-1}$) per avere una base maggiore del diametro dell'orbita terrestre (2AU). Misura distanze fino a 500 pc ($p = 2 \text{ mas}$)

PARALLASSE STATISTICA = considera i moti propri di un insieme di stelle nell'hp che tutte sono alla stessa distanza e che sia nota la distribuzione delle loro velocità rispetto al loro LSR. Fino a 500 pc

PARALLASSE D'ESPANSIONE = vedi Nave

PARALLASSE DI GRUPPO = spostato il moto a' insieme di un gruppo di stelle misurando la variazione delle sue dimensioni con osservazioni a diverse epoche. Fino a 200 pc ($\rho = 5$ mas)



Dopo un certo Δt la distanza apparente e' θ diminuisce ($\theta_2 < \theta_1$)

$$R = D \sin \theta_2 \approx D \theta_2 \text{ a.t.}$$

$$R = (D + Vst t) \sin \theta_2 \approx (D + Vst t) \theta_2 \text{ a.t.}$$

$$D \theta_2 = (D + Vst t) \theta_2$$

$$D = \frac{Vst t \theta_2}{\theta_2 - \theta_1}$$

dove D = distanza del gruppo di stelle

R = raggio del gruppo di stelle

V = velocità del gruppo lungo la linea di vista

θ_i = dimensione angolare del gruppo a t_i

INDICATORI FOTOMETRICI → derivano la distanza dal confronto della magnitudine assoluta e apparente di un sistema



METODO DI BAUDE - WESSELINK → noti il raggio R (misure interferometriche) e la temperatura effettiva $Teff$ (colore / spettro) la luminosità di una stella risulta

$$L = 4\pi \sigma R^2 Teff^4$$

⇒ magnitudine assoluta

$$M = -2.5 \log L + \text{cost} = -2.5 \log Teff - 5 \log R - 2.5 \log (4\pi \sigma) + \text{cost}$$

⇒ modulo di distanza

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

⇒ distanza

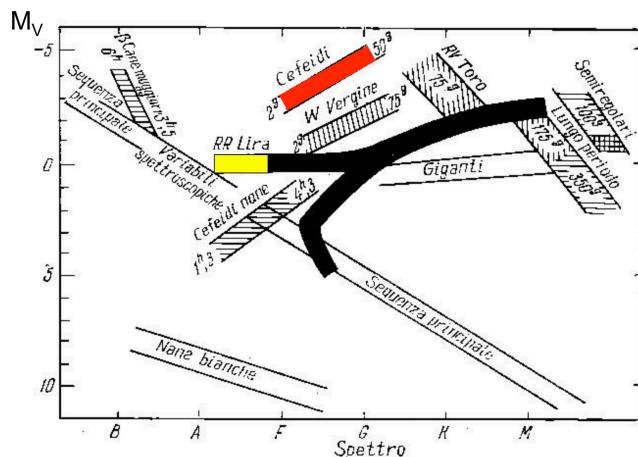
$$d = 10^{(m-M+5)/5}$$

INDICATORI PRIMARI → derivano le distanze da relazioni calibrate con gli indicatori fotometrici o geometrici



- Cefeoиди
- RR Lyrae
- Nanе

Posizione di Cefeoиди e RR Lyrae ← in diagramma HR



CEFEIDI → stelle variabili ($\Delta m \approx 1$)

di massa $M > 5M_\odot$ e periodo $P \leq 1-50$ d

[in massimi $P < 15$ giorni, in assiezione
(es h+X Persei) $P > 15$ giorni.]

sono stelle giovani di popolazione

I estremi quindi si osservano nei
bracci di spirale (polveri \Rightarrow estinzione)

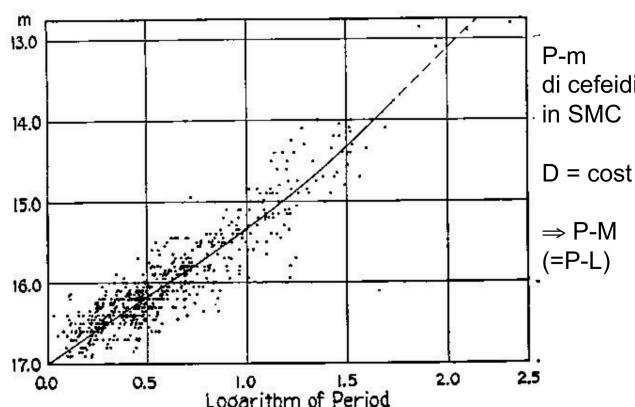
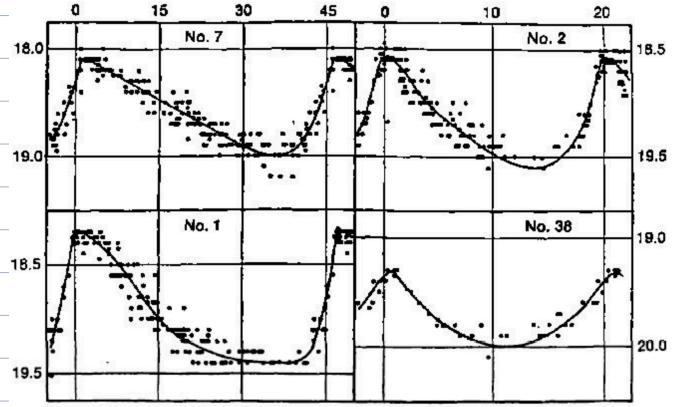
Leenti scopre una relazione (in SMC)

periodo - luminosità $P \propto L$

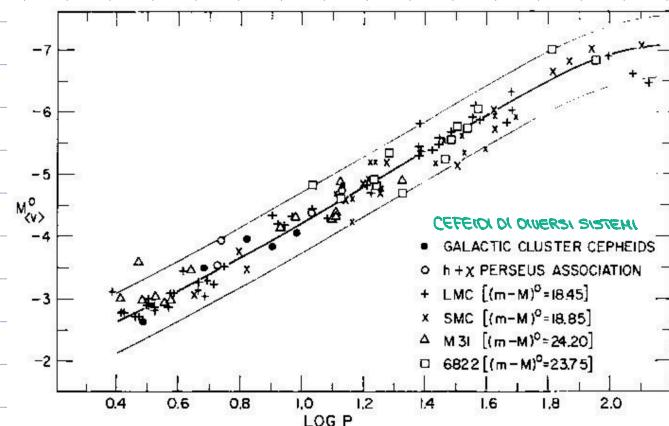
(le più luminose hanno periodi più lunghi.)

[sono traccianti di struttura a spirale]

CURVE DI LUCE DI ALCUNE CEFEDI



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



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

→ dalla relazione P-L e dal modulo di distanza $m - M$ si ricava la distanza

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

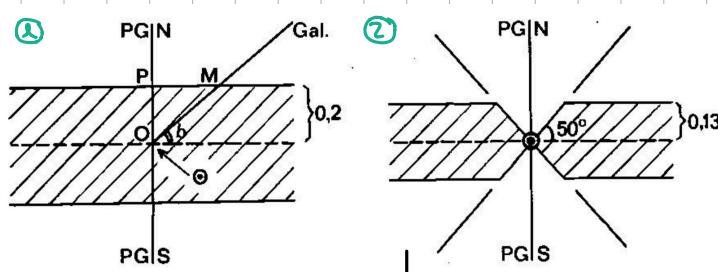
$$m_V - M_{V,0} = 5 \log d(\text{pc}) - 5$$

Tenendo conto della dipendenza del colore e dell'assorbimento galattico

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

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

↳ vi sono delle leggi empiriche per calcolare l'assorbimento galattico



b = LATITUDINE GALATTICA

In corrispondenza del Sole
vi è un buco nella polvere

MODELLO DE VANCOUVER

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

$$A_B(b) = 0.2 / |\sin b| = 0.2 / \cos ec b$$

(strato di polveri uniforme)

MODELLO PARADGE / TAKHANIAN

$$A_B(90^\circ) = 0 \text{ mas}$$

$$A_B(b) = 0.13 / \cos ec b \quad |b| < 50^\circ$$

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

Le cefedi più vicine sono a $D > 200$ pc

La calibrazione della relazione P-L viene fatta con i metodi della parallasse

Dopo il lancio di Gaia

Trigonometrica, secolare e statistica su ceppi di RR Lyr

Hanno magnitudini assolute $M_V \approx 3.5$ mag e possono essere studiate con HST fino ($m - M \approx 31$ mag ($D = 17$ Kpc, ammasso della Vergine))

RR LYRAE → stelle variabili

($0.5 < \Delta m < 1.5$) di massa $M \approx 1M_\odot$

e periodo $P = 1.5$ h - 1 d [stelle vecchie]

di popolazione II di classe $P > 0.4$ d, stelle

vecchie di popolazione di disco $P < 0.4$ d]

Esiste una relazione $P - L$

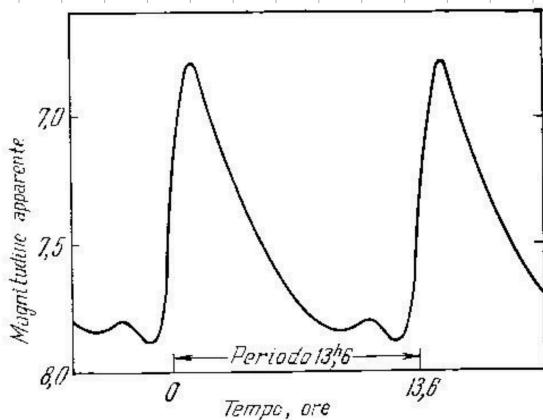
↓ [osservabili in ellittiche
e spirali, in aioni]

dalla relazione $P - L$ e dal modulo di

distanza $m - M$ si ricava la distanza

$$\langle M_{F,0} \rangle = -2.3 \log_2(g_{\text{diam}}) - 0.88$$

CURVA DI LUCE DELLE RR-LYRAE



È possibile tener conto della dipendenza della metallicità

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

La calibrazione viene fatta con:

- parallasse secolare e statistica
- studiando RR Lyrae delle LMC e SMC
- metodo Baade - Wesselink

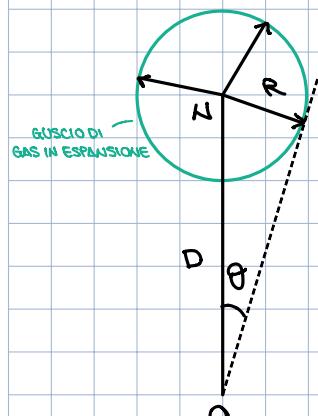
→ hanno magnitudini assolute $M_V \approx 0.6$ mag e possono essere studiate con HST fino ($m - M \approx 27$ mag ($D = 3$ Kpc, Gruppo Locale))

NOADE → dovute al bruciamento esplosivo di materiale accrescendo

sulla superficie di una nana bianca in un sistema binario sono stelle vecchie di popolazione II, si osservano nelle ellittiche e negli sferoidi delle galassie a disco

la distanza delle nuove galattiche si può calcolare con il metodo delle parallasse di espansione, mentre quella delle nuove extragal. con la relazione luminosità - tasso di declino.

PARALLASSE DI ESPANSIONE → guscio di polveri illuminati dalla luce via via che si espande



$$R = D \sin \theta \approx D \theta$$

$R = V_{\text{exp}} \Delta t \rightarrow$ possiamo stimare R con la velocità di espansione (spettro della nana)

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

con $D =$ distanza della nana N

$R =$ raggio del guscio di gas

$V_{\text{exp}} =$ velocità di espansione del guscio ($\approx 1000 \text{ km s}^{-1}$)

$\theta =$ dimensione angolare del guscio dopo Δt

RELAZIONE LUMINOSITÀ - TASSO DI DECALCO (per nuove extragalattiche)

Le nuove più brillanti decadono più rapidamente

Per nuove di distanza non possiamo calibrare

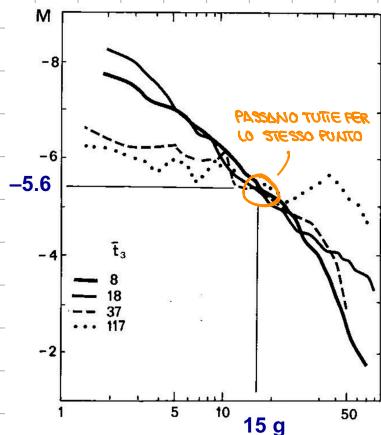
la relazione tra magnitudine assoluta

al massimo H_V, max e il tempo t_2 in cui

la magnitudine diventa $H_V, \text{max} + 2$

$$H_V, \text{max} = -10.7 + 2.3 \log t_2 \text{ (giorni)} \text{ per } H_V$$

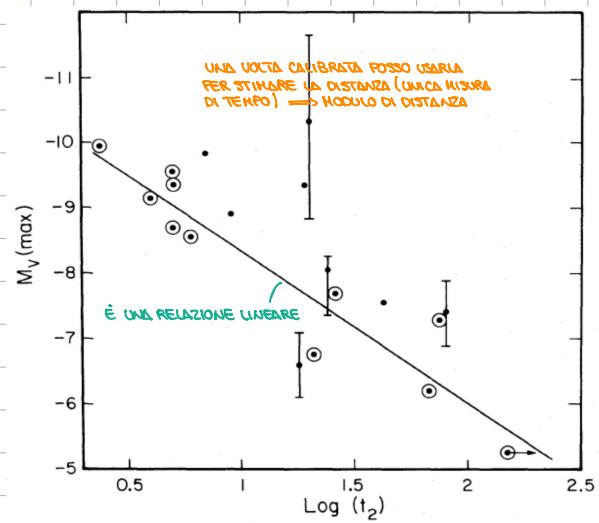
(dipinto sta misurando un gradiente)



La media della magnitudine assoluta a 15 giorni dal massimo risulta (in banda V)

$$\langle H_{V,5} \rangle = -5.6 \pm 0.1$$

→ per ogni banda si ha una magnitudine caratteristica

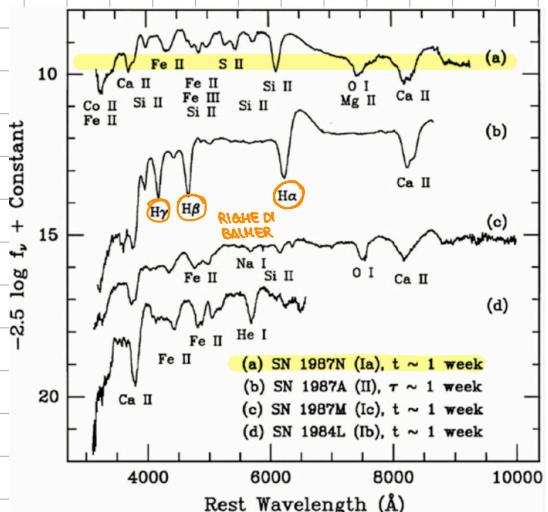


INDICATORI SECONDARI

→ derivano la distanza da relazioni calibrate con gli indicatori primari (ad es. con cependi che a loro volta sono calibrate con indicatori geometrici: supernova esplosa in una galassia di cui si conosce la distanza attraverso le cependi.)

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

SUPERNOVE Ia



→ dovute all'esplosione di una nana bianca di C/O che ha raggiunto il limite della massa di Chandrasekar avendo accresciuto materiale del compagno.

Il suo spettro è privo di risette di H ma ha risette di Si II.

Si osservano sia nelle ellittiche che nelle spirali.

Ciclo di luce caratteristico:

- picco
- decrescita rapida (0.065 mag/55 a 20 ss)
- decrescita lenta (0.015 mag/55 a 20 ss)

Curva di luce Tipico di SN Ia

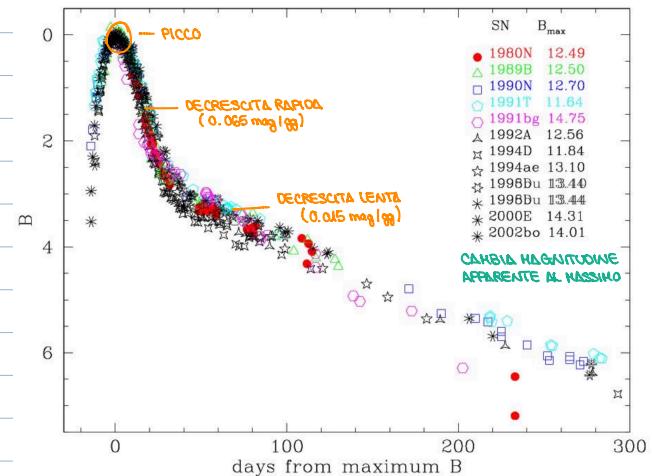
Possiamo ricavare la magnitudine assoluta di SN di distanza nota ($M_B \approx -19.5 \pm 0.1$) e dalla magnitudine apparente applico il modulo di distanza e ricavo d (pc)

La calibrazione del punto della curva di luce delle SN

$$M_B \approx -19.5 \pm 0.1$$

viene fatto con:

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



Le SN possono essere studiate con HST (parametria) e i telescopi della classe 8m (spettroscopia) fino a $m-H \approx 44$ ($z \approx 1, t \approx 8$ Gyr)

→ con SN Ia si può indagare anche l'espansione dell'universo (accelerazione)

■ AMMOSSE GLOBLARI (GC) → contengono $\sim 10^4$ stelle, sono sistemi vecchi di popolazione II di azione. Nella MW sono presenti ~ 130 (più luminoso è ω Centauri, $M_V = -10.9$)
Si osservano ellissi ed ellittiche e spirali

L'indicatore di distanza è la loro FUNZIONE DI LUMINOSITÀ $\Phi(m)$

→ Tale che $\Phi(m) dm = \text{numero di GC in } (m, m+dm)$

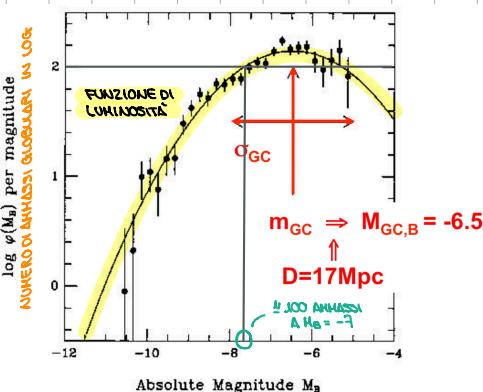
è una gaussiana di centro m_{GC} e dispersione σ_{GC}

$$\Phi(m) = K \exp \left[-\frac{(m - m_{GC})^2}{2\sigma_{GC}^2} \right]$$

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

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

-
- costruisco $\Phi(m)$ in maniera osservativa misurando la magnitudine apparente dei GC in modo tale da avere l'intervalle di magnitudine
 - trovo magnitudine centrale assoluta con interpolazione gaussiana
 - applico modulo di distanza



→ costruita prendendo tutti gli ammassi globulari che circondano le ellittiche nell'ammasso della Vergine (≈ 2000 GC)
[effetto di selezione per cause strutturali]
⇒ ricavo $M_{GC,B}$

- Vantaggi: → - Tecnica **photometrica** (meno dispendiosa)
 - si lavora con una **sola osservazione** (es: espedi serano mesi)
 - sfrutta il poco abbassamento

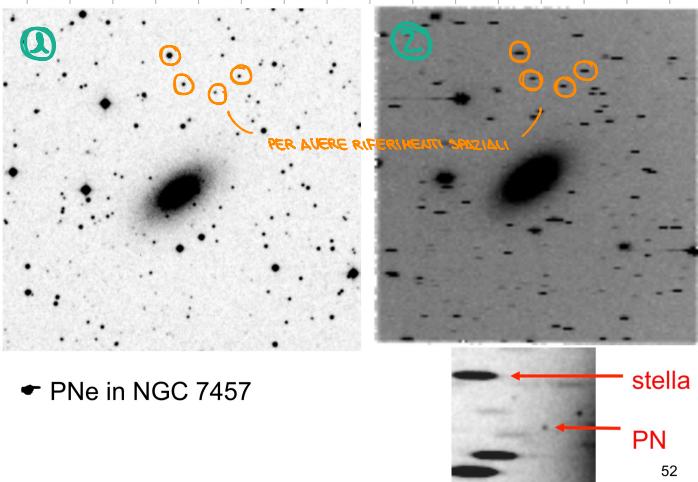
I GC possono essere studiati con HST fino a $m - K = 35$ ($D = 100 \text{ Mpc}$)

NEBBIOSE PLANETARIE (PNe) → nuclei di gas in espansione attorno a nane bianche
 sono **sistemi giovani di popolazione di disco**
 con spettri dominati dalla riga del [OIII] 5007 Å
 $(\approx 15\% \text{ del flusso})$
 si individuano con spettro o immagini grazie
 a un **filtre interperenziale** con banda passante
 centrale su 5007 Å

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

(dal flusso della riga nasce una magnitudine)

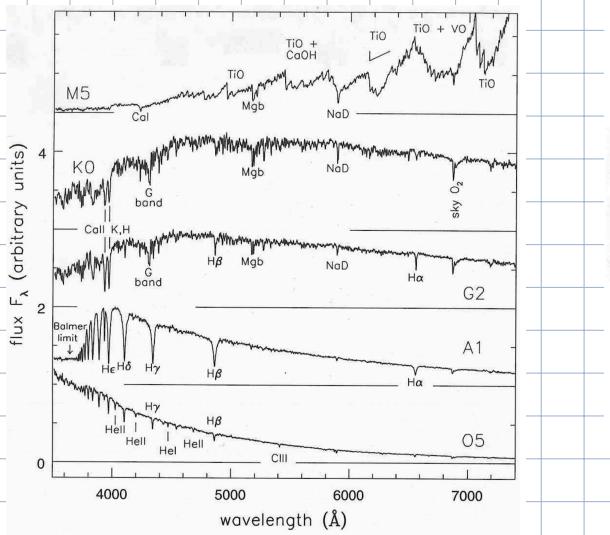
→ PNe in M33



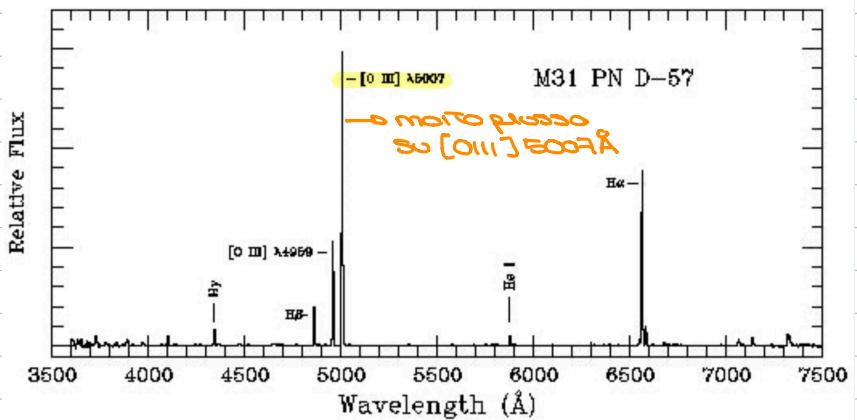
NGC 7457

① in Digital Sky Survey
 ② **spettro senza renditoria**
 → altra modalità spettroscopica
 dove la **stella** vede **strutture allungate** (spettro su tutte λ)
 mentre le **PNe** sono **puntini luminosi** (spettro solamente
 sulle righe di emissione)

Ad oggi lo spettroscopio senza
 renditoria è soprattutto da quello
 a campo integrale



Lo spettro di stelle (continuo)



Lo spettro di PNe

segnde solo in corrispondenza
 delle righe di emissione

FUNZIONE DI LUMINOSITÀ DELLE PNe

→ $\Phi(m)$ tale che $\Phi(m)dm = \text{numero di PNe in } (m, m+dm)$

è troncata a m_{PN} (ha un crollo a luminosità massima)

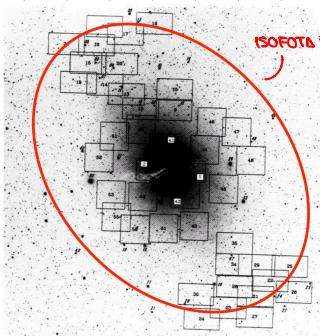
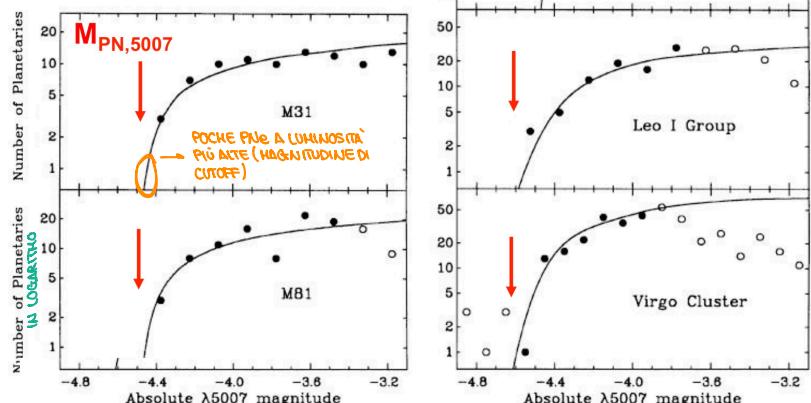
$$\Phi(m) = k e^{-0.307m} [1 - e^{-3(m_{PN}-m)}]$$

m_{PN} viene calibrato in M_{PN} su galassie di distanza nota (con indicatore primario)

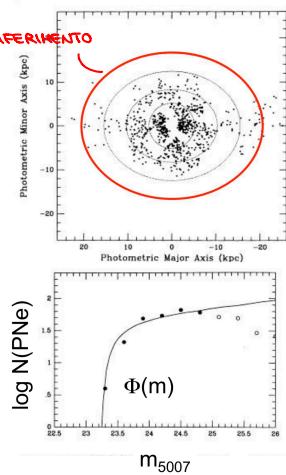
$$M_{PN,5007} = -4.7 \pm 0.1$$

● = usati per costruire $\Phi(m)$

○ = non usati per costruire $\Phi(m)$



● PNe in NGC 5128



→ NGC 5128 [Centaurus A]

galassia peculiare

Una vera troupe le PNe e misurata la loro magnitudine **si costruisce** $\Phi(m)$, si calcola la **magnitudine di troncamento** m_{PN} e lo si confronta con il valore assoluto per trarre la distanza della galassia (**modulo di distanza**)