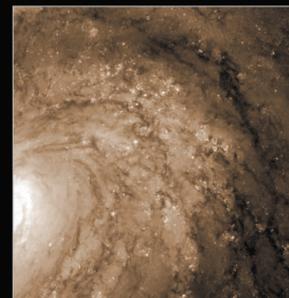


GLI ESERCIZI DI ASTRONOMIA

a cura di

ESA/ESO

Esercizi di astronomia per studenti delle scuole superiori basati su osservazioni effettuate con il telescopio spaziale Hubble NASA/ESA ed i telescopi dell'ESO



Esercizio

2

Determinare la distanza di M100 osservando le stelle variabili cefeidi

Basato su Osservazioni realizzate con il Telescopio Spaziale Hubble NASA/ESA



Indice

Gli esercizi di astronomia a cura di ESA/ESO 2

Prefazione

- Prefazione pagina 2

Introduzione

- La cosmologia e la misura delle distanze pagina 3
- Usare le Cepheidi come indicatori di distanza pagina 5
- M100, una grande spirale pagina 7

Quesiti

- Misure e calcoli pagina 8
- Quesito 1 pagina 8
- Quesito 2 pagina 9
- Quesito 3 pagina 10
- Quesito 4 pagina 10
- Quesito 5 pagina 10
- Quesito 6 pagina 11
- Quesito 7 pagina 11
- Quesito 8 pagina 11

Attre letture

- Articoli scientifici pagina 12

Guida per l'insegnante

- Guida per l'insegnante pagina 14



Gli esercizi di astronomia a cura di ESA/ESO — 2

Determinare la distanza di M100 osservando le stelle variabili cefeidi

L'astronomia è considerata generalmente una scienza visuale ed accessibile, ideale quindi per scopi didattici. Nel corso degli ultimi anni, il telescopio spaziale Hubble della NASA e dell'ESA ed i telescopi dell'ESO a La Silla e Paranal in Cile hanno mostrato panorami dell'Universo sempre più profondi e spettacolari. Hubble ed i telescopi dell'ESO non hanno fornito soltanto immagini sorprendentemente nuove, ma costituiscono soprattutto strumenti preziosi per gli astronomi. I telescopi hanno un'eccellente risoluzione sia spaziale che angolare (nitidezza d'immagine) e permettono di scrutare l'Universo più a fondo di quanto sia mai stato possibile e, dunque, trovare le risposte a questioni da lungo tempo insolute.

Le analisi di tali osservazioni, spesso sofisticate nel dettaglio, sono in alcuni casi sufficientemente semplici, in linea di principio, da offrire agli studenti della scuola secondaria l'opportunità di ripeterle da soli.

Questa serie di esercizi è stata prodotta dall'ESA (European Space Agency), partner europeo del progetto Hubble che ha accesso al 15% del tempo di osservazione, in collaborazione con l'ESO (European Southern Observatory).



Figura 1: Il Telescopio Spaziale Hubble NASA/ESA

Il Telescopio Spaziale Hubble NASA/ESA, durante le sue orbite attorno alla Terra, ha presentato spettacolari visioni dell'Universo



Introduzione

La cosmologia e la misura delle distanze

Quanti anni ha l'Universo? L'Universo continuerà ad espandersi, oppure un giorno inizierà a collassare? Queste fondamentali domande di cosmologia sono da tanto tempo in attesa di risposte soddisfacenti.

Il destino dell'Universo è strettamente legato al futuro comportamento e all'evoluzione della sua velocità di recessione. Se l'espansione diminuirà abbastanza, l'Universo potrà contrarsi.

Attualmente le osservazioni suggeriscono che è più probabile, in futuro, una continua espansione dell'Universo.

L'espansione fa allontanare tutte le galassie da un osservatore (posto, ad esempio, sulla Terra) e si allontanano più velocemente quanto più sono lontane. L'equazione nota come legge di Hubble (formulata da Edwin Hubble nel 1929) descrive la relazione tra la distanza di un dato oggetto e la sua velocità di recessione, v . La legge di Hubble è:

$$v = H_0 \cdot D$$

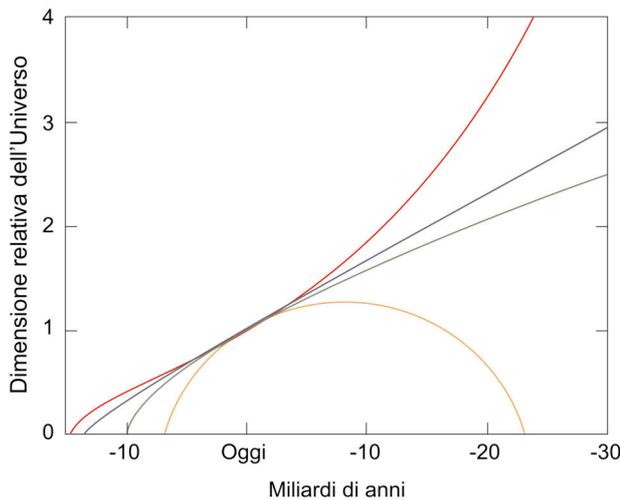


Figura 2: Il destino dell'Universo
Questo grafico mostra la dimensione dell'Universo rispetto al tempo – ovvero mostra come potrebbe espandersi o contrarsi al passare del tempo. Le differenti linee “nel futuro” (a destra del diagramma) mostrano differenti modelli per il destino dell'Universo — un Universo che si espande per sempre o che finisce per collassare su se stesso.

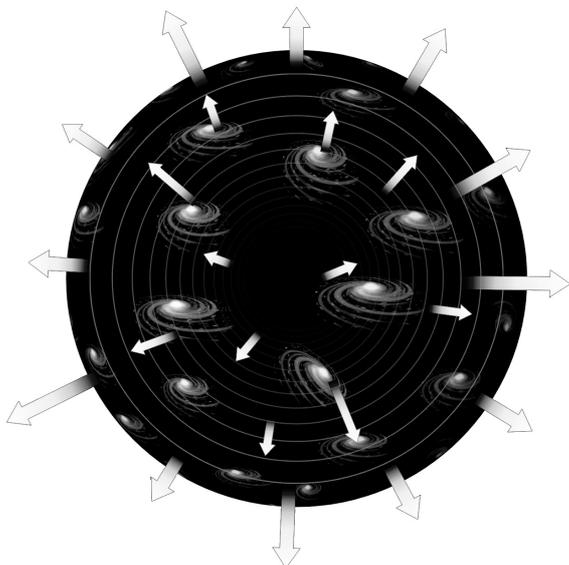


Figura 3: La recessione delle Galassie
Questo diagramma illustra come ogni galassia si allontani dalle altre a causa dell'espansione dell'Universo.



Introduzione



Figura 4: Galassie lontane con elevato Redshift

Questa immagine, raccolta dalla camera fotografica planetaria ad ampio campo (WFPC2) del telescopio spaziale Hubble, mostra molte galassie distanti da noi miliardi di anni luce. La maggior parte delle macchie confuse che vedete sono galassie contenenti miliardi di stelle. Le galassie in questa immagine si stanno allontanando da noi ad altissima velocità.

Essa indica che le galassie nel nostro universo si allontanano l'una dall'altra con una velocità v proporzionale alla distanza, D .

H_0 — costante di Hubble — indica una fondamentale proprietà dell'Universo. È importante in molti problemi cosmologici ed è una misura di quanto sia rapida l'espansione dell'Universo. L'età dell'Universo, t , può essere approssimata dall'inverso (o reciproco) della costante di Hubble:

$$t = 1/H_0$$

Il valore di H_0 ha dunque un'importanza enorme per stimare l'età del nostro Universo. Ma come facciamo a misurarla? Per determinare H_0 abbiamo bisogno "semplicemente" di misurare sia la velocità di recessione, v , sia la distanza, D , di un oggetto, di solito una galassia, o meglio, di molte galassie e trovarne la misura media.

La *velocità di recessione* è relativamente facile da misurare: noi possiamo misurare il cosiddetto redshift della luce della galassia. Il redshift (spostamento verso il rosso) è una diretta con-



Introduzione



Figura 5: Henrietta Leavitt

La comprensione del rapporto tra luminosità e variabilità delle stelle è stata rivoluzionata dal lavoro di Henrietta Leavitt (1868-1921).

Lavorando all'Osservatorio dell'Harvard College, Leavitt calibrò la magnitudine fotografica di 47 stelle tanto precisamente da essere assunte come

riferimenti standard o "candele" per le magnitudini di tutte le altre stelle. Leavitt scoprì e catalogò più di 1500 stelle variabili nelle vicine Nubi di Magellano. Da questa catalogazione, scoprì che le variabili Cefeidi più luminose impiegano più tempo per variare, un fatto usato oggi per tarare le misure di distanza del nostro Universo (Cortesia di AAVSO).

sequenza del moto di allontanamento dell'oggetto da noi. È un effetto Doppler della luce delle singole galassie, derivante dallo spostamento dello spettro verso l'estremità rossa. La lunghezza d'onda della luce proveniente dalle galassie aumenta durante il viaggio verso la Terra, spostandosi quindi verso la parte rossa dello spettro. L'esigua variazione di lunghezza d'onda dovuta all'effetto Doppler viene chiamata redshift e galassie con un elevato redshift hanno anche elevate velocità di recessione.

Usare le cefeidi come indicatori della distanza

Misurare la *distanza* di un oggetto astronomico è assai più difficile che misurarne la velocità ed è una delle più grandi sfide che affrontano gli astronomi. Nel tempo sono stati individuati diversi indicatori di distanza. Uno di questi è una classe di stelle note come variabili Cefeidi.

Le Cefeidi sono stelle rare e molto luminose; inoltre la loro luminosità varia regolarmente. Il loro nome deriva dalla stella δ -Cephei nella costellazione di Cefeo, che è stata il primo esempio noto di questo tipo di stelle variabili ed è un oggetto visibile facilmente anche ad occhio nudo.

Nel 1912 l'astronoma Henrietta Leavitt (vedi figura 5) osservò 20 stelle variabili Cefeidi nella Piccola Nube di Magellano (SMC). La piccola va-

riazione di distanza tra le singole variabili Cefeidi nella Nube è trascurabile in confronto alla maggior distanza della SMC. Quindi le stelle più luminose di questo gruppo sono intrinsecamente più luminose (e non solo apparentemente poiché più vicine). Henrietta Leavitt scoprì una relazione tra la luminosità intrinseca ed il periodo di pulsazione delle stelle variabili Cefeidi e mostrò che le Cefeidi intrinsecamente più luminose hanno periodi di variazione più lunghi. Osservando il periodo di ogni Cefeide, si può dedurre la sua luminosità intrinseca e così, osservando la luminosità apparente, calcolarne la distanza. In questo modo le stelle variabili Cefeidi possono essere usate come "candele standard" nell'Universo, utilizzabili sia come indicatori di distanza sia per calibrare indicatori di distanza di altro tipo. Le variabili Cefeidi pos-

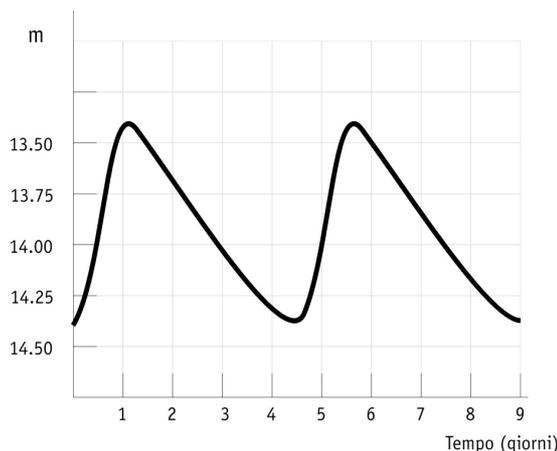


Figura 6: La curva di luce di una tipica Cefeide
La curva di luce di una stella variabile Cefeide ha una forma caratteristica, con l'intensità che sale rapidamente e poi scende più dolcemente. L'ampiezza delle variazioni è tipicamente di 1-2 magnitudini.

sono essere distinte dalle altre stelle variabili dalle loro curve di luce caratteristiche (vedi figura 6).

Le migliori misurazioni della velocità e della distanza si ottengono naturalmente per oggetti che sono relativamente vicini alla Via Lattea. Prima che il telescopio spaziale Hubble della NASA e dell'ESA fosse collocato in orbita, gli osservatori sulla Terra hanno scoperto delle variabili Cefeidi in galassie con distanze fino a 3,5 Mpc dal nostro Sole (vedi la definizione di Megaparsec negli Strumenti matematici). Comunque, a queste distanze, relativamente pic-



Introduzione

cole entra in gioco un altro effetto. Le galassie si attraggono l'un l'altra gravitazionalmente e questo introduce una componente non uniforme al moto, che influisce sulle nostre misure della componente uniforme della velocità derivante dall'espansione dell'universo. Questa componente non uniforme della velocità è nota come velocità peculiare ed il suo effetto è paragonabile alla velocità di espansione nella parte di Universo relativamente vicina a noi ("Universo locale").

Per studiare l'espansione globale dell'Universo, è necessario eseguire misure di distanza precise di galassie più distanti, per le quali la velocità di espansione è significativamente più alta della

velocità peculiare. Hubble ha misurato variabili Cefeidi in galassie con distanze fino a 20 Mpc.

Prima che Hubble compisse queste misurazioni gli astronomi discutevano se l'Universo fosse vecchio di 10 o di 20 miliardi di anni. Dopo queste misurazioni gli astronomi si trovano d'accordo nell'attribuire all'Universo un'età compresa tra 12 e 14 miliardi di anni.

Uno dei progetti a lungo termine per Hubble ha lo scopo di ottenere un valore più preciso della costante di Hubble e dell'età dell'Universo. Per questo sono state monitorate diciotto galassie



Figura 3: La galassia a spirale M100

La galassia a spirale M100 somiglia sotto molti aspetti alla nostra Via Lattea se fosse osservata frontalmente a distanza.

Le galassie a spirale sono ricche di polveri e gas, visibili in quest'immagine come canali che attraversano gli imponenti bracci della spirale.

M100 è un oggetto conosciuto dagli astrofili ed è situato nel cielo primaverile in direzione della costellazione della Chioma di Berenice. L'immagine è stata scattata con la camera fotografica planetaria ad ampio campo di Hubble. I colori blu corrispondono a regioni con stelle calde giovani.



Introduzione

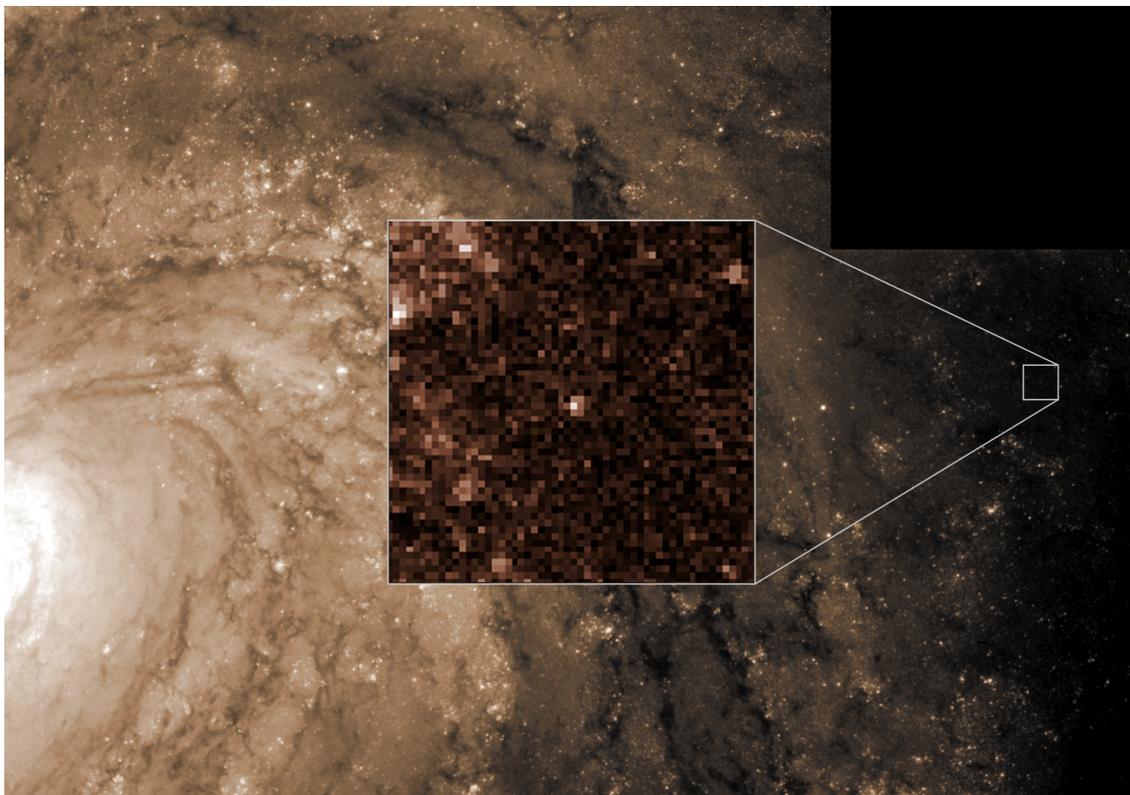


Figure 8: Hubble individua le stelle variabili Cefeidi in M100

La camera fotografica ad alta risoluzione di Hubble individua ed esamina una delle variabili Cefeidi usate in questi esercizi. La stella è localizzata in una regione di stelle in formazione in uno dei bracci a spirale della galassia (la stella è al centro del riquadro)

situate a distanze differenti in modo da rivelare le loro variabili Cefeidi. Una di queste galassie è M100.

M100 una grande spirale

M100 è una splendida galassia a spirale del grande ammasso della Vergine. L'ammasso della Vergine contiene circa 2500 galassie. M100 è un sistema in rotazione di gas, polveri e stelle simile alla Via Lattea e si vede frontalmente. Il nome M100 deriva dal fatto che è la numero 100 del catalogo degli oggetti non stellari di Messier.

M100 è una delle galassie più distanti della quale siano state effettuate delle misurazioni accurate delle variabili Cefeidi. Questo esercizio si basa sulle immagini ed i dati di Hubble di questa galassia.



Quesiti

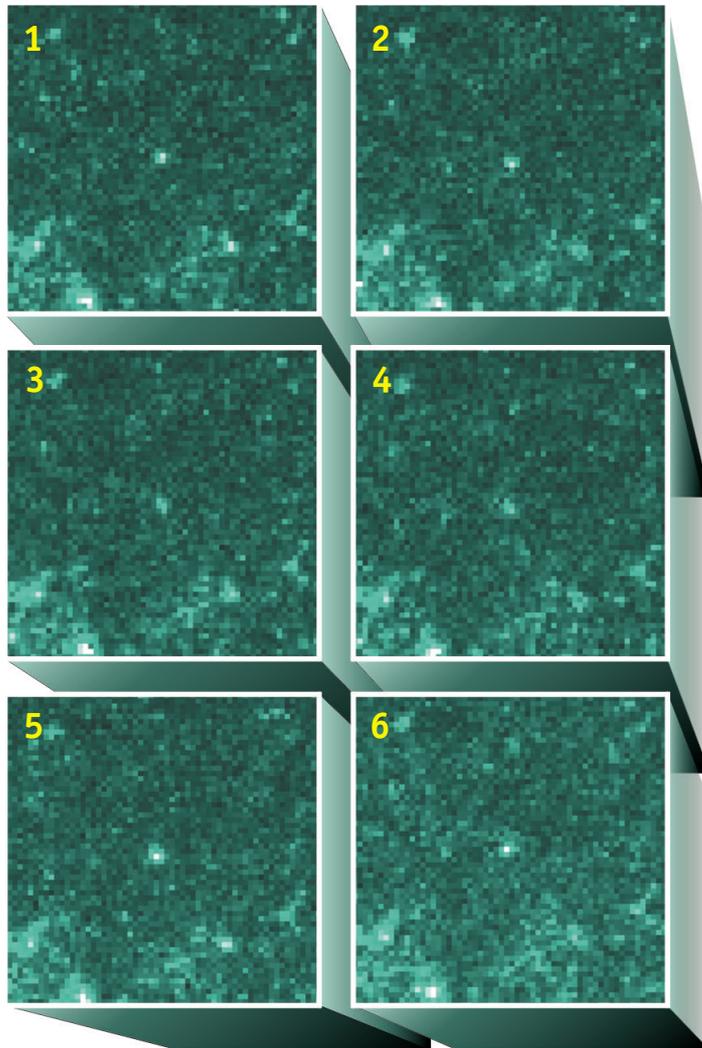


Figura 9: Una variabile Cefeide in M100

Sei immagini prese in momenti differenti mostrano una delle variabili Cefeidi nella galassia M100. La Cefeide è al centro di ogni immagine. In questa sequenza è evidente come la sua luminosità vari nel tempo.

Misure e calcoli

La relazione periodo-luminosità delle variabili Cefeidi è stata modificata diverse volte dalle prime misure di Henrietta Leavitt. Oggi la miglior stima della relazione è:

$$M = -2.78 \log (P) - 1.35$$

dove M è la magnitudine assoluta della stella e P il periodo misurato in giorni.

Le curve di luce di dodici Cefeidi in M100 sono state misurate con Hubble e vengono mostrate nelle pagine 9 e 10.

Quesito 1

- ?
- Utilizzando le informazioni date da queste curve, calcolare le magnitudini assolute M delle dodici stelle.

Il nostro scopo è quello di determinare la distanza di M100. Se ricordate l'equazione della distanza, sapete che la magnitudine assoluta da sola non basta per calcolare la distanza, vi occorre pure la magnitudine apparente.

Oltre ai problemi insiti nel misurare accuratamente la quantità di luce ricevuta e di calibrare le magnitudini misurate, per circa



Quesiti

cent'anni gli astronomi hanno discusso su quale magnitudine apparente m usare nell'equazione della distanza di una Cefeide che varia nel tempo.

Quesito 2

- ? Pensate ad un metodo per stimare la magnitudine apparente, m , usando le curve.
-

All'inizio del XX secolo gli astronomi misurarono la magnitudine apparente minima (m_{\min}) e la magnitudine apparente massima (m_{\max}) e poi trovarono la media ($\langle m \rangle$) delle due.

Se farete così — oppure userete un altro metodo — avrete tutte le informazioni necessarie per calcolare la distanza di M100.

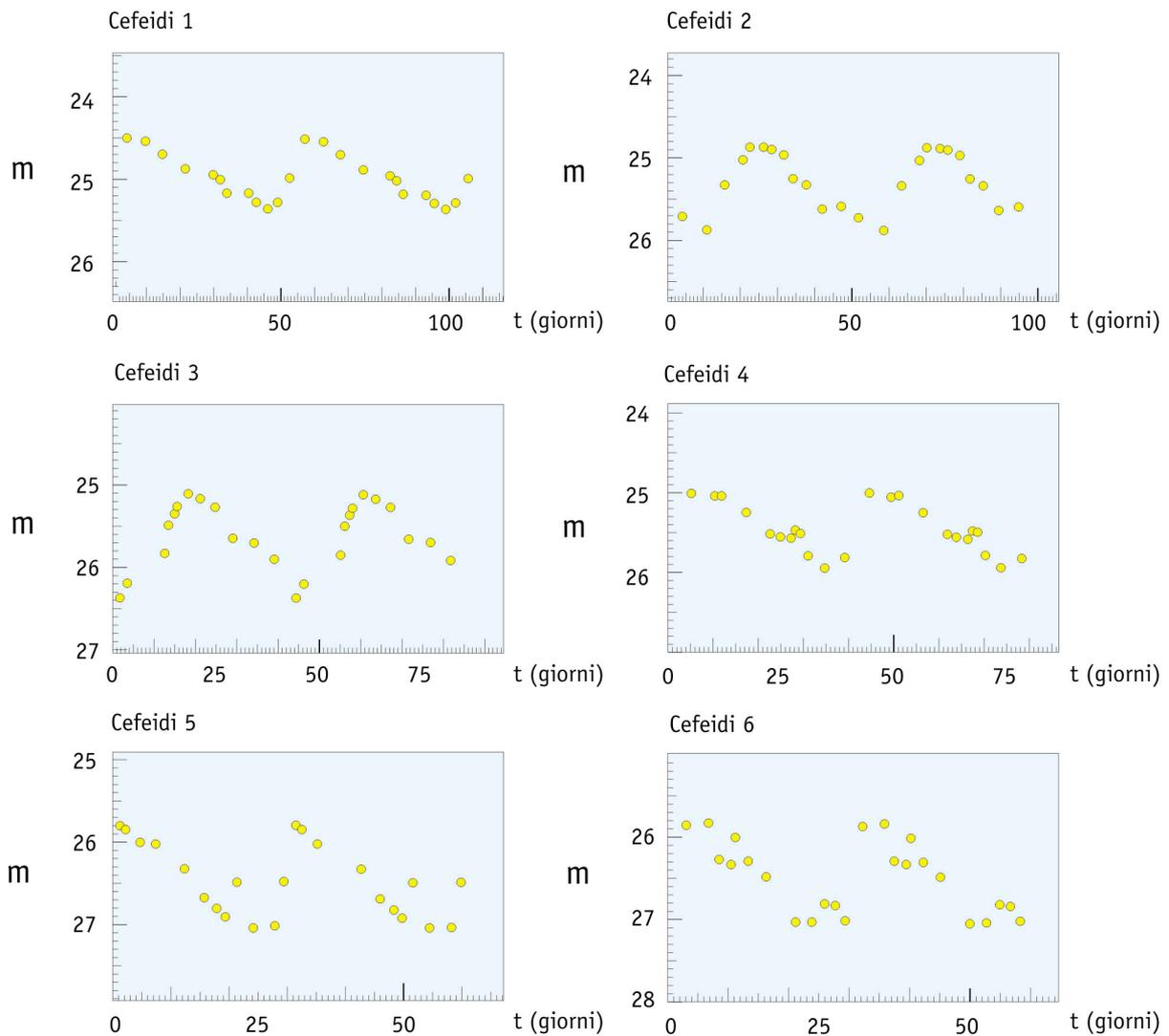


Figura 10: Curve di luce di Cefeidi

La curva di luce di dodici variabili Cefeidi in M100 è stata osservata con Hubble. La magnitudine assoluta, M , è determinata dal periodo. Vedi Freeman (1994).



Quesiti

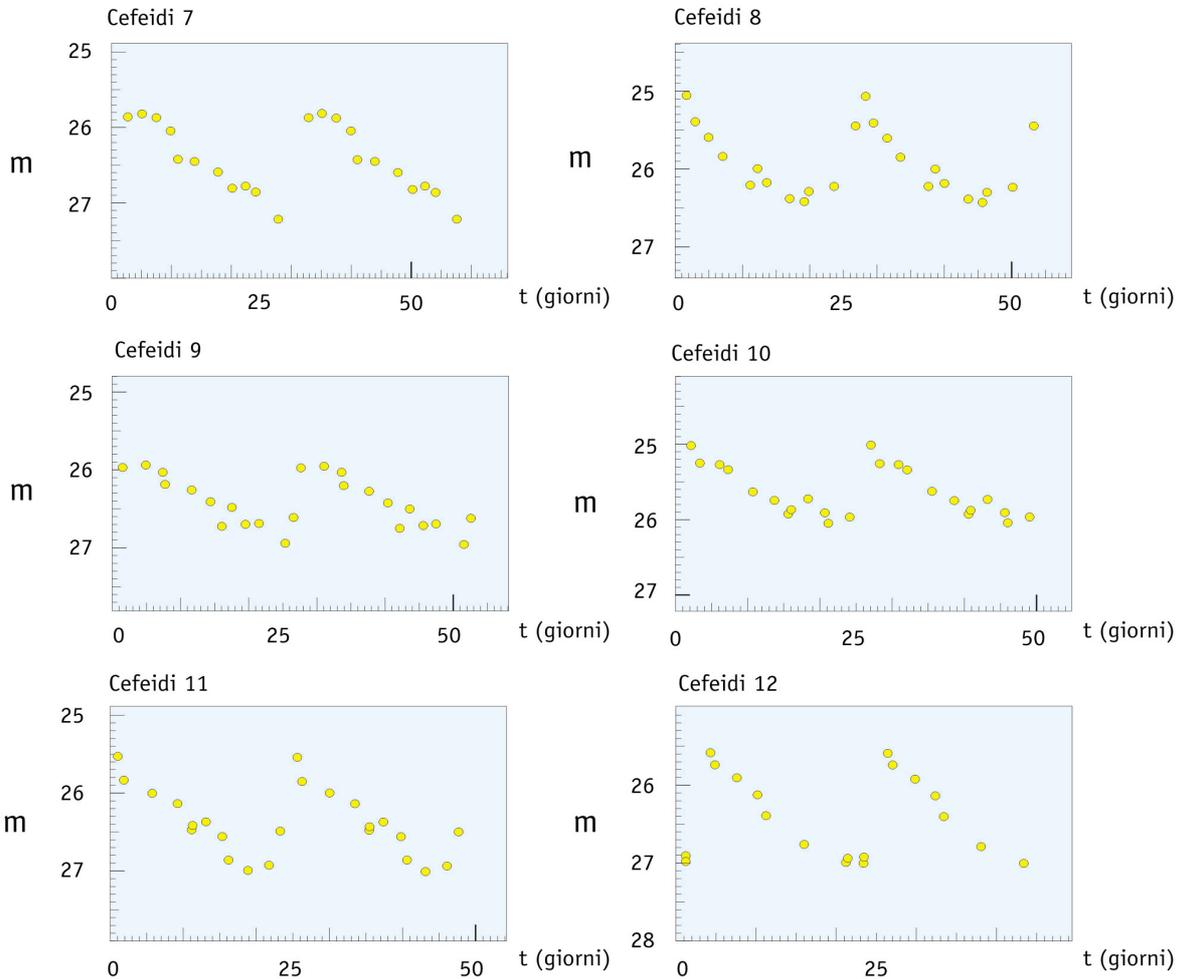


Figure 10 (continua): Curve di luce di Cefeidi

Quesito 3

- ?
- Calcolate $\langle m \rangle$ e D (in Mpc) per ogni Cefeide.

Naturalmente si può fare lo stesso calcolo dodici volte, ma si può ridurre il lavoro, per esempio, scrivendo un piccolo programma al computer od usando un foglio elettronico.

Quesito 4

- ?
- Considerate i probabili motivi per cui non trovate esattamente le stesse distanze con diverse variabili Cefeidi.

Quesito 5

- ?
- Adesso avete calcolato la distanza di dodici stelle variabili Cefeidi di M100. Cosa vi dà la distanza di M100?



Quesiti

- ? Il fatto che le dodici stelle abbiano posizione diversa in M100 potrebbe essere la causa della variazione delle distanze delle dodici stelle?
- ? Informatevi su quanto è grande la Via Lattea (potete, per es., prendere un libro di astronomia o cercare in Internet). Supponete che le dimensioni di M100 siano dello stesso ordine. Adesso riflettete nuovamente sulla domanda precedente.

Quesito 6

- ? Calcolate il valore medio delle distanze delle dodici stelle Cefeidi e considerate questo risultato come distanza della M100.
- ? Nella pubblicazione scientifica originale, usando le misurazioni di Hubble, la distanza di M100 risultava di 17.1 ± 1.8 Mpc. Per determinare questo valore è stato tenuto conto della presenza di polveri interstellari. Confrontate i vostri risultati con questa distanza.

Quesito 7

Come ricorderete dall'introduzione (pag.5), la velocità di recessione v di una galassia come M100, insieme alle informazioni sulla sua distanza, possono dare un valore della velocità dell'espansione generale dell'Universo descritta dalla costante di Hubble H_0 . H_0 viene espressa in unità di km/sec/Mpc. La velocità di recessione dell'ammasso della Vergine, del quale M100 è membro, è stata misurata precedentemente e risultava di 1400 km/sec (Freedman ed al., 1994).

- ? Calcolate la costante di Hubble usando questa v e la media delle vostre misure di distanza, D .

Quesito 8

- ? Supponendo che l'età dell'Universo, t , sia data da $t = 1/H_0$, calcolate un valore per l'età dell'Universo. Ricordatevi di convertire le unità in modo corretto. Di quanto è più vecchio l'Universo rispetto all'età della Terra?



Altre letture

Articoli scientifici

- Freedman, W.L., Madore, B.F., Mould, J.R., Ferrarese, L.; Hill, R., Kennicutt, R.C., Jr., Saha, A., Stetson, P.B., Graham, J.A., Ford, H., Hoessel, J.G., Huchra, J., Hughes, S.M., and Illingworth, G.D., 1994, *Nature*, 371, 757-762.: *Distance to the Virgo cluster galaxy M100 from Hubble Space Telescope observations of Cepheids.*

Vedi anche al link:
<http://www.astroex.org/>



Colophon



Gli esercizi di astronomia a cura di ESA/ESO
Esercizio 2: Determinare la distanza di M100
osservando le stelle variabili Cefeidi
1ª edizione (traduzione della 2ª edizione inglese
23.05.2002)

Realizzato da:
the Hubble European Space Agency Information
Centre and the European Southern Observatory:
<http://www.astroex.org>
(Pdf-versions of this material and related weblinks
are available at this address)

Indirizzo Postale:
European Southern Observatory
Karl-Schwarzschild-Str. 2
D-85748 Garching bei München
Germania

Telefono: +49 89 3200 6306 (or 3200 60)
Fax: +49 89 3200 64 80 (or 320 32 62)
E-mail: info@astroex.org

Testi di:
Anne Værnholt Olesen, Lars Lindberg Christensen,
Jean-Marc Brauer, and Artraud Bacher

Grafica e layout:
Martin Kornmesser

Traduzione italiana:
Carmelo Evoli

Revisione:
Eugenio Benvenuti
Piero Benvenuti

Co-ordinatori:
Lars Lindberg Christensen and Richard West

Un ringraziamento particolare è rivolto al Planetario Tycho Brahe, Danimarca, per aver suggerito l'idea, a Wendy Freedman per la raccolta dei dati e a Nina Troelsgaard Jensen, Frederiksberg Seminarium, per i commenti.

Per l'edizione Italiana si ringraziano la Società Astronomica Italiana (SAIt), la sezione Calabria della SAIt e la Professoressa Angela Misiano (Liceo Scientifico "Leonardo da Vinci", Reggio Calabria) per il supporto.



Guida per l'insegnante

Breve Sommario

In questo esercizio misuriamo il periodo e la magnitudine apparente delle variabili Cefeidi nella galassia M100. La magnitudine assoluta si può ricavare usando la relazione Periodo-Luminosità e la distanza di M100 può essere determinata usando la relazione della distanza. Infine possiamo calcolare un valore per la costante di Hubble (usando il valore per la velocità di recessione di M100 osservato da altri scienziati) e stimare l'età dell'Universo.

Questa guida per l'insegnante contiene le soluzioni ai problemi insieme ad una discussione delle approssimazioni e delle semplificazioni fatte negli esercizi.

L'ipotesi che l'Universo si sia espanso dopo il Big Bang ad una velocità costante è, parlando con precisione, corretta solo in alcuni modelli cosmologici. Infatti un'espansione costante è possibile soltanto se l'Universo contiene poca materia, così che tutta la materia, visibile o oscura, interagisca gravitazionalmente per rallentare il tasso di espansione. Alcuni risultati recenti hanno portato a non confermare tale assunzione, possiamo così considerare l'espressione usata in questi esercizi come una semplice, ma ragionevole, approssimazione.

Nota che, in accordo a recenti modelli cosmologici, l'Universo è stato sottoposto ad una fase in cui la velocità di espansione diminuiva (a causa di effetti gravitazionali di materia sia oscura che comune) che è durata circa 5 miliardi di anni dopo il Big Bang. Da allora l'Universo sembra essere entrato in un periodo con un tasso di espansione accelerato dove una misteriosa "forza gravitazionale repulsiva" ha preso il sopravvento. Questa forza è anche conosciuta con il nome di "Energia Oscura" o "Quintessenza".

Quesiti 1, 2 e 3

Usando il metodo suggerito nel quesito 2 e semplici misure con un righello direttamente sul foglio noi abbiamo ottenuto questi risultati:

Numero Cefeide	t2	t1	periodo = t2-t1	M	m max	m min	m media	D Mpc	D media Mpc
1	100,0	46,5	53,5	-6,15	24,50	25,30	24,90	16,25	19,85
2	58,5	11,0	47,5	-6,01	24,90	25,90	25,40	19,15	
3	61,0	18,5	42,5	-5,88	25,10	26,40	25,75	21,15	
4	74,0	35,0	39,0	-5,77	25,00	25,95	25,48	17,77	
5	50,0	19,0	31,0	-5,50	25,80	27,05	26,43	24,22	
6	50,0	21,0	29,0	-5,42	25,80	27,10	26,45	23,61	
7	35,0	4,5	30,5	-5,48	25,80	27,20	26,50	24,85	
8	46,0	19,0	27,0	-5,33	25,05	26,40	25,73	16,25	
9	31,0	5,0	26,0	-5,28	25,90	27,00	26,45	22,22	
10	27,0	2,5	24,5	-5,21	25,00	26,10	25,55	14,20	
11	43,0	19,0	24,0	-5,19	25,55	27,00	26,28	19,61	
12	38,0	16,0	22,0	-5,08	25,60	27,00	26,30	18,90	



Guida per l'insegnante

Poiché M100 è molto distante, altri metodi (come ad es. plottando $m=m(P)$) non funzionano molto bene. Abbiamo scelto di fornire la relazione Luminosità-Periodo invece di permettere agli studenti di derivare da soli i due coefficienti nella equazione. Questo ci ha permesso di rendere tale esercizio accessibile ad un più largo gruppo di studenti — talvolta questo può essere un vantaggio!

Quesito 4

Il motivo per cui sono presenti deviazioni nei risultati è semplicemente dovuto alla normale incertezza nelle misure. Misure di questo tipo, fatte a mano, non sono molto precise. L'accuratezza potrebbe essere migliorata usando metodi di misura più raffinati.

Alternativamente possono essere studiate due differenti classi di Cefeidi che hanno caratteristiche leggermente differenti.

Quesito 5

Sì, basandoci su un insieme relativamente grande di Cefeidi, possiamo ragionevolmente stimare la distanza di M100.

No, la dimensione di una galassia è più piccola se comparata con la distanza di M100.

La Via Lattea ha un diametro di circa 25 kpc. La risposta alla domanda precedente è quindi ancora no.

Quesito 6

Con i metodi approssimati usati qui, un valore di 19,8 Mpc è ragionevole.

La domanda è posta agli studenti affinché essi capiscano che le incertezze sono parte di molte scienze naturali e, ovviamente, anche dell'Astronomia.

Quesito 7

$$H_0 = v/D = 1400/19.85 = \mathbf{70,53 \text{ km/s/Mpc}}$$

Questo valore è entro l'intervallo generalmente accettato. H_0 è considerata oscillare tra 60 e 80 km/s/Mpc.

Quesito 8

Usando il fattore di conversione da Mpc a km, troviamo $H_0 = 2,286 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1}$.

$$t = 1/H_0 = 4,375 \times 10^{17} \text{ s} = \mathbf{13,87 \times 10^9 \text{ years}}$$

Questa è circa tre volte l'età della Terra (~4,6 miliardi di anni). Questa domanda è stata posta per permettere agli studenti di paragonare l'età dell'Universo con qualcosa di cui potrebbero aver avuto precedente conoscenza.

www.astroex.org

