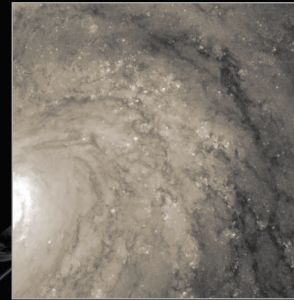


ESA/ESO ÖVNINGSSERIE I ASTRONOMI

Övningar i astronomi
som använder observationer från
NASA/ESA Hubble Space Telescope
och ESOs teleskop



Övning 2

Bestämning av avståndet till M100 med hjälp av variabla Cepheidstjärnor
Baserat på observationer med NASA/ESA Hubble Space Telescope



Innehåll

ESA/ESO's Övningsserie i Astronomi 2

Förord

- Förord sidan 2

Introduktion

- Kosmologi och avståndsmätningar sidan 3
- Att använda Cepheider för att uppskatta avstånd sidan 5
- M100 en stor spiral sidan 7

Uppgifter

- Mätningar och beräkningar sidan 8
- Uppgift 1 sidan 8
- Uppgift 2 sidan 9
- Uppgift 3 sidan 10
- Uppgift 4 sidan 10
- Uppgift 5 sidan 10
- Uppgift 6 sidan 11
- Uppgift 7 sidan 11
- Uppgift 8 sidan 11

Ytterligare läsning

- Vetenskapliga artiklar sidan 12

Lärarens Guide

- Lärarens Guide sidan 15

Förord

ESA/ESOs Övningsserie i Astronomi 2

Bestämning av avståndet till M100 med hjälp av variabla Cepheidstjärnor

Astronomi är en lättillgänglig och visuell vetenskap, vilket gör den idealisk i undervisningssyfte. De senaste åren har NASA¹, ESA², Hubble Space Telescope och ESOs³ teleskop på La Silla- och Paranal-observatorierna i Chile presenterat allt djupare och mer spektakulära bilder av universum. Hubble och ESOs teleskop har inte bara gett fantastiska bilder, de är även ovärderliga instrument för astronomer. Teleskopen har en mycket bra rums/vinkel-upplösning (bildskärpa), vilket ger astronomer möjlighet att blicka längre ut i universum än någonsin tidigare och låter dem svara på gamla, hittills obesvarade frågor. Att analysera sådana observationer, vilket ofta är ett sofistikerat och detaljerat arbete, är ibland tillräckligt enkelt för att gymnasiestudenter själva ska kunna utföra det.

Denna serie av uppgifter är framtagen av den europeiska partnern i Hubbleprojektet, ESA (European Space Agency), som har 15% av observationstiden med Hubble, tillsammans med ESO (the European Southern Observatory).



Figur 1: NASA/ESAs Hubble Space Telescope
NASA/ESAs Hubble Space Telescope har presenterat spektakulära vyer av universum från sin bana runt jorden.



Introduktion

Kosmologi och avståndsmätningar

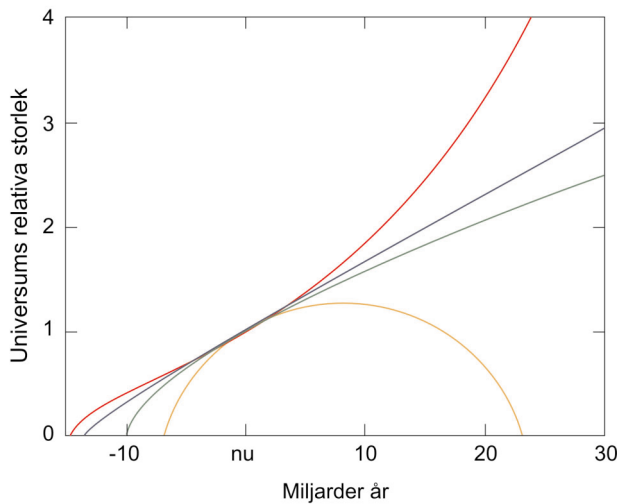
Hur gammalt är Universum? Hur snabbt expanderar det? Kommer det att en dag börja kontrahera? Dessa frågor är fundamentala inom kosmologin och har länge väntat på tillfredställande svar.

Universums öde är tätt förbundet med den framtida expansionstaktens uppförande/evolution. Om expansionen saktar ner tillräckligt mycket, kommer kanske Universum att börja kontrahera en dag. För tillfället så tyder observationerna på

att det troligaste är att Universum fortsätter att expandera i all evighet.

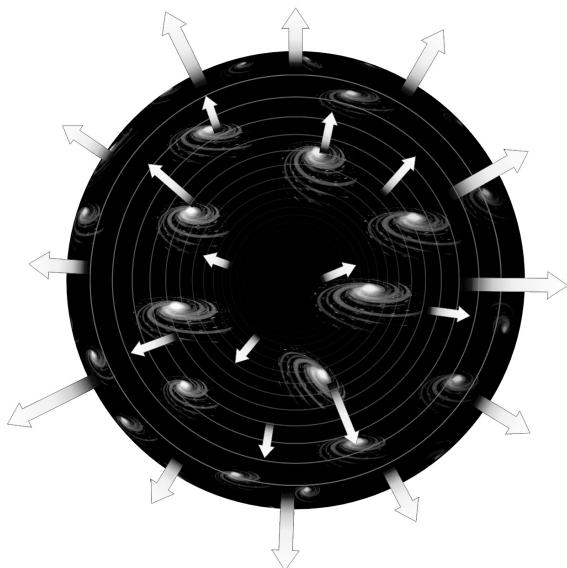
Expansionen gör att alla galaxer avlägsnar sig från observatören (på jorden till exempel) och ju längre bort de är, desto snabbare avlägsnar de sig. Uttrycket som är känt som Hubbles lag (formulerad av Edwin Hubble 1929), beskriver relationen mellan avståndet, D , till ett givet objekt och dess hastighet, v , med vilken det avlägsnar sig. Hubbles lag är:

$$v = H_0 \cdot D$$



Figur 2: Universums öde

Detta diagram relaterar Universums storlek med tiden - med andra ord visar det hur Universum expanderar och/eller kontraherar med tiden. De olika linjerna "i framtiden" (till höger i diagrammet) visar olika modeller över Universums öde - ett för alltid expanderande Universum eller ett kontraherande Universum.

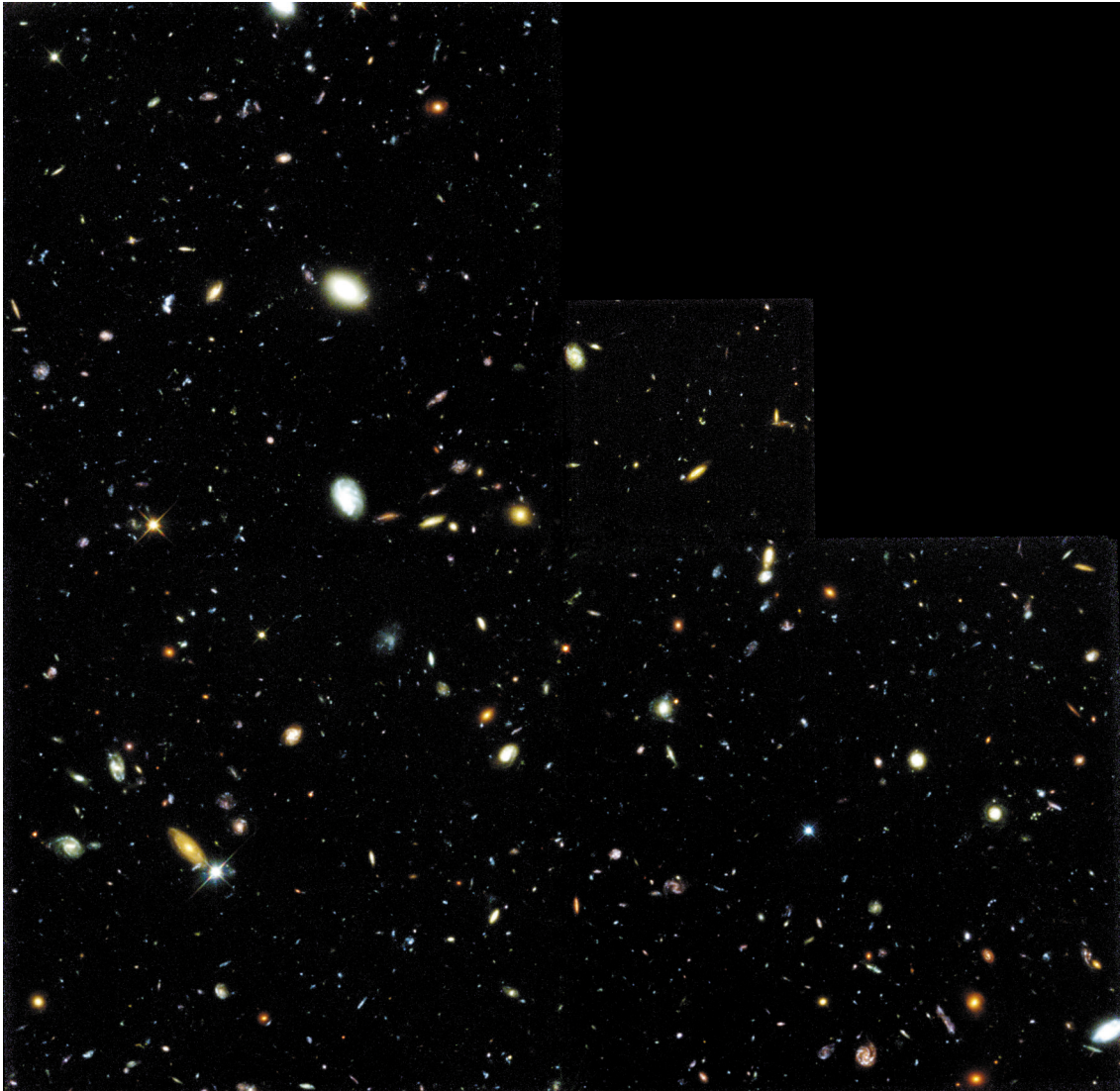


Figur 3: Galaxer som avlägsnar sig

Diagrammet illustrerar hur galaxer avlägsnar sig från varandra på grund av universums expansion.



Introduktion



Figur 4: Avlägsna galaxer med stor rödförskjutning

Denna bild tagen med Hubble Space Telescopes vidfält och planetära kamera (Wide-Field and Planetary Camera (WFPC2)) visar många galaxer som ligger flera miljarder ljusår bort. De flesta suddiga fläckarna är galaxer som innehåller miljardtals stjärnor. Galaxerna i denna bild avlägsnar sig från oss med mycket hög hastighet.

Den säger att galaxer i vårt universum flyger bort från varandra med en hastighet, v , proportionell mot avståndet, D , mellan dem. H_0 är en fundamental egenskap hos Universum — Hubbles konstant — som är viktig för många kosmologiska frågor och som är ett mått på hur fort Universum expanderar idag.

Universums ålder, t , kan approximeras med hjälp av inversen av Hubbles konstant H_0 :

$$t = 1/H_0$$

Värdet på H_0 har en enorm betydelse för uppskattningar av Universums ålder. Men hur mäter vi den? För att bestämma H_0 behöver vi helt enkelt mäta både hastigheten bort från oss, v , och avståndet, D , för en galax, eller ännu bättre, för många galaxer och finna medelvärdet.

Hastigheten bort från oss är relativt enkel att bestämma: vi kan mäta den så kallade rödförskjutningen på ljuset från galaxen. Rödförskjutning är en direkt konsekvens av ett objekts rörelse bort från oss. Det är ett Dopplerskift av



Introduktion



Figur 5: Henrietta Leavitt

Förståelsen för relativa ljusstyrkor och variabilitet hos stjärnor revolutionerades av Henrietta Swan Leavitts (1868-1921) arbete. Leavitt arbetade på Harvard College Observatory med att kalibrera fotografiska magnituder på 47 stjärnor för att de skulle

vara referenser eller standardstjärnor för magnitudmätningar av andra stjärnor. Leavitt upptäckte och katalogiserade över 1500 variabla stjärnor i de närliggande Magellanska molnen. Från denna katalog upptäckte hon att ljusstarka variabler så kallade Cepheidstjärnor har en längre period, ett faktum som i dag används för att kalibrera avståndsskalan i vårt universum. (Med tillstånd av AAVSO).

Ljuset från den individuella galaxen som resulterar i ett skift av ljusets våglängd mot den röda delen av spektret. Eftersom våglängden på rött ljus är längre än hos blått ljus har våglängden på ljuset från galaxerna ökat under sin resa mot jorden. Den relativa ändringen i våglängd på grund av Dopplerskift kallas rödförskjutning och galaxer med stor rödförskjutning har höga hastigheter bort från oss.

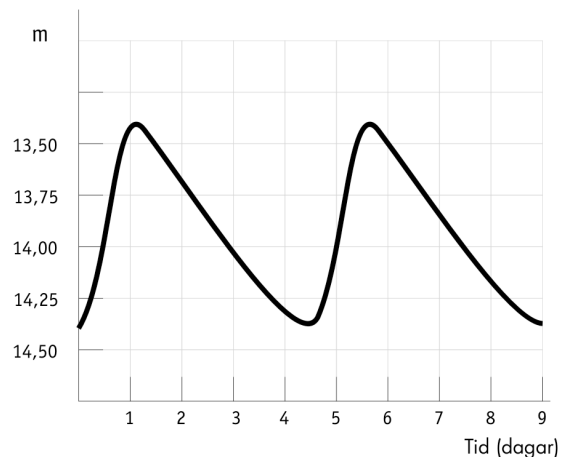
Att använda Cepheider för att uppskatta avstånd

Att mäta *avståndet* till ett astronomiskt objekt är mycket svårt och en av de tuffaste utmaningarna för astronomer. Under åren har ett antal olika sätt upptäckts att uppskatta avstånd på. Ett av dessa sätt använder en klass av stjärnor som kallas Cepheidvariabler.

Cepheider är ovanliga och väldigt ljusstarka stjärnor som har en regelbundet varierande luminositet. De har fått namnet efter stjärnan δ -Cephei i stjärnbilden Cepheus vilket var det första kända exemplet på denna typ av stjärnor och vilket är ett objekt som är lätt att se med blotta ögat.

1912 observerade astronomen Henrietta Leavitt (se fig. 5) 20 Cepheidvariabler i det Lilla Magellanska Molnet (Small Magellanic Cloud (SMC)). De små variationerna i avstånd till de individuella Cepheidvariablerna inom molnet är obetyd-

liga jämfört med avståndet till SMC. De ljusare stjärnorna i gruppen är verkligen ljusare och inte bara skenbart ljusare därför att de är närmare. Henrietta Leavitt upptäckte en relation mellan den verkliga ljusstyrkan och pulsationsperioden hos Cepheidvariablerna och visade att verkligt ljusstarkare Cepheider har längre perioder. Genom att observera perioden hos någon Cepheid kan man härleda dess verkliga ljusstyrka och, genom att mäta dess apparenta ljusstyrka, beräkna avståndet. På detta sätt kan Cepheidvariabler användas som standardstjärnor i Universum som antingen fungerar direkt som avståndindikatorer eller för att kalibrera andra avståndindikatorer (eller fastställa nollpunkten för dessa). Cepheidvariabler kan särskiljas från



Figur 6: Typisk ljuskurva för en Cepheid

Ljuskurvan för en variabel Cepheidstjärna har en karaktäristisk form med först en snabb ökning i ljusstyrka och sedan ett långsammare avtagande. Amplituden på variationen är typiskt 1-2 magnituder.

andra variabla stjärnor genom deras karaktäristiska ljuskurva (se fig. 6).

De noggrannaste mätningarna av både hastigheten och avståndet kan naturligtvis erhållas för objekt som ligger relativt nära vår vintergata. Innan NASA/ESAs Hubble Space Telescope var tillgängligt hade markbaserade observatorier detekterat Cepheidvariabler i galaxer på avstånd upp till 3,5 megaparsec (se definitionen på megaparsec i "Matematiska Verktyg") från vår sol. På dessa stora avstånd spelar emellertid ytterligare en hastighetseffekt en roll. Galaxer attraherar varandra gravitationellt och detta intro-



Introduktion

ducerar en icke likformig komponent i rörelserna och det påverkar våra mätningar av den likformiga delen av hastigheten som beror på Universums expansion. Denna icke likformiga del av hastigheten är känd som den pekuljära hastigheten och dess påverkan är jämförbar med expansionshastigheten i vår lokala del av Universum. För att kunna studera den övergripande expansionen av Universum är det nödvändigt att göra tillförlitliga avståndsmätningar av mer avlägsna galaxer, där expansionshastigheten är betydligt högre än den pekuljära hastigheten. Hubble har mätt Cepheidvariabler i galaxer med avstånd upp till ~20 megaparsec.

Innan Hubble gjorde dessa mätningar tvistade astronomer om universum var 10 eller 20 miljarder år gammalt. Nu är överensstämmelsen allmänt mycket bättre och universum tros vara mellan 12 och 14 miljarder år gammalt.

Ett av Hubbles nyckelprojekt hade som långsiktigt mål att finna ett noggrannare värde på Hubblekonstanten och Universums ålder. 18 galaxer på olika avstånd har observerats för att avslöja några Cepheidvariabler. En av dessa är M100.



Figur 7: Spiralgalaxen M100

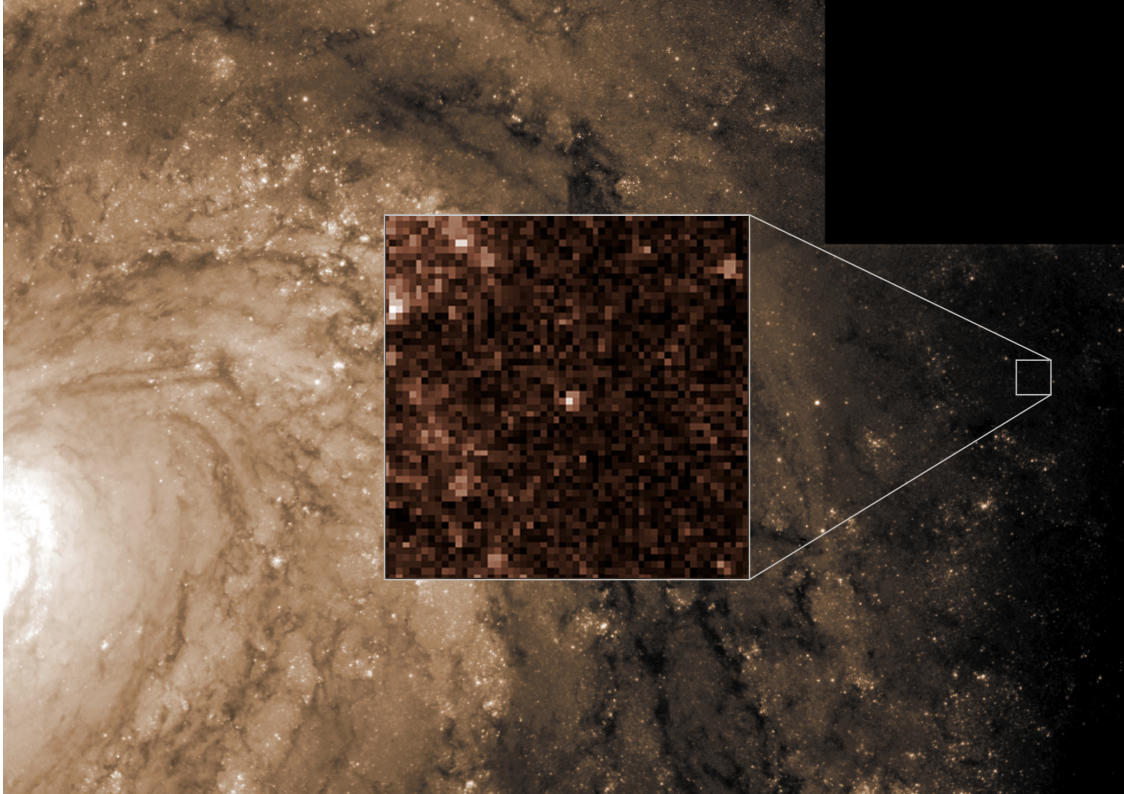
Om vi kunde observera vår galax Vintergatan uppifrån från en extragalaktisk rymdfarkost skulle dess form likna spiralgalaxen M100.

Spiralgalaxer består av mycket stoft och gas. Stoftet syns på denna bild som mörka områden mellan de majestätiska spiralarmarna.

M100 är ett populärt objekt för amatör-astronomer och befinner sig på vår himlen i riktning mot stjärnbilden Coma Berenices (Berenikes hår). Bilden är tagen med Hubbles WFPC2 kamera. Blå färger motsvarar områden med heta unga stjärnor.



Introduktion



Figur 8: Hubble spårar Cepheidvariabler i M100

Hubbles högupplösningskamera detekterade och valde ut en av de Cepheidvariablerna som används i denna övning. Stjärnan befinner sig i ett område med stjärnfödslar i en av galaxens spiralarmar (stjärnan är i mitten av rutan).

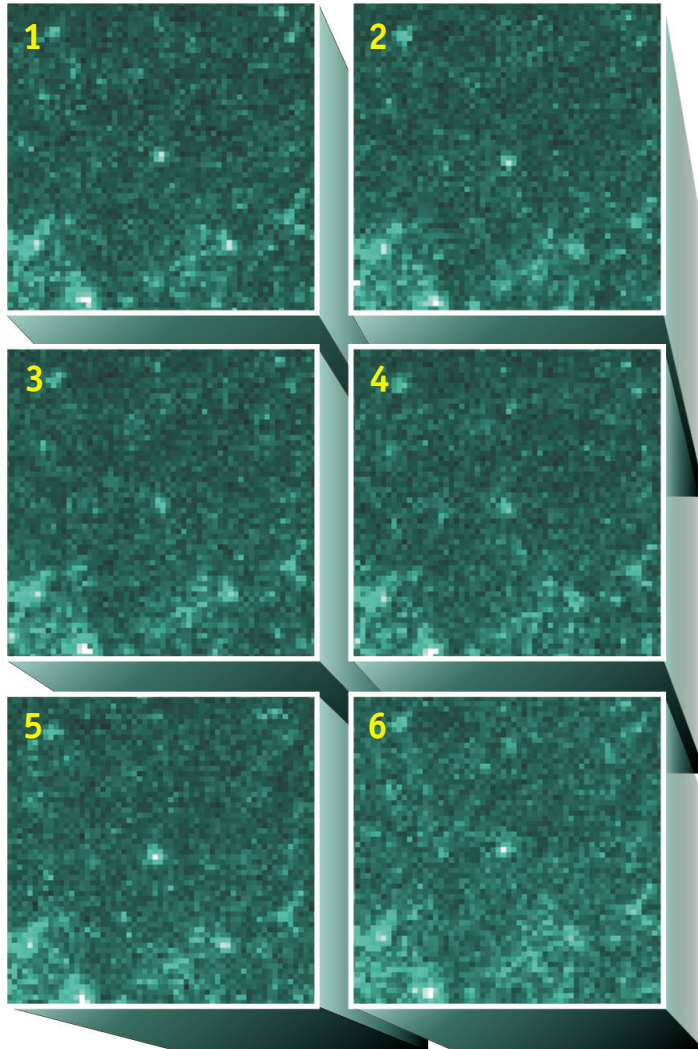
M100 en stor spiral

Galaxen M100 är en magnifik spiralgalax i den stora galaxhopen Virgo. Virgohopen innehåller 2500 galaxer. M100 är ett roterande system av stoft, gas och stjärnor, som är likt Vintergatan sedd uppifrån. Namnet M100 kommer från det faktum att den är nummer 100 i Messierkatalogen, som innehåller ickeställära objekt.

M100 är en av de mer avlägsna galaxer där noggranna mätningar av Cepheidvariabler har gjorts. Denna övning är baserad på Hubbles bilder och data från denna galax.



Uppgifter



Figur 9: En Cepheidvariabel i M100
Sex bilder tagna på olika tidpunkter avbildade en av Cepheidvariablerna i galaxen M100. Cepheiden är i mitten av varje bild. Det är tydligt att Cepheiden varierar i ljusstyrka med tiden.

Mätningar och beräkningar

Period-luminositetsrelationen för Cepheidvariabler har blivit reviderad många gånger sedan Henrietta Leavitts första mätningar. Idag är den bästa uppskattningen av relationen:

$$M = -2,78 \log (P) - 1,35$$

där M är stjärnans absoluta magnitud och P är perioden mätt i dagar.

Ljuskurvor för de 12 Cepheider i M100 som har blivit uppmätta med Hubble visas på sidorna 9 och 10.

Uppgift 1

- ?
- Använd informationen i dessa kurvor för att beräkna den absoluta magnituden, M , för de 12 stjärnorna.

Vårt mål är att beräkna avståndet till M100. Om du minns avståndsekvationen så vet du att den absoluta magnituden inte är tillräcklig för att beräkna avståndet — du behöver även den apparenta magnituden.

Frånsett problemen med att mäta mängden mottaget ljus och kalibrera de uppmätta magnituderna, har astronomer i hundra år diskuterat



Uppgifter

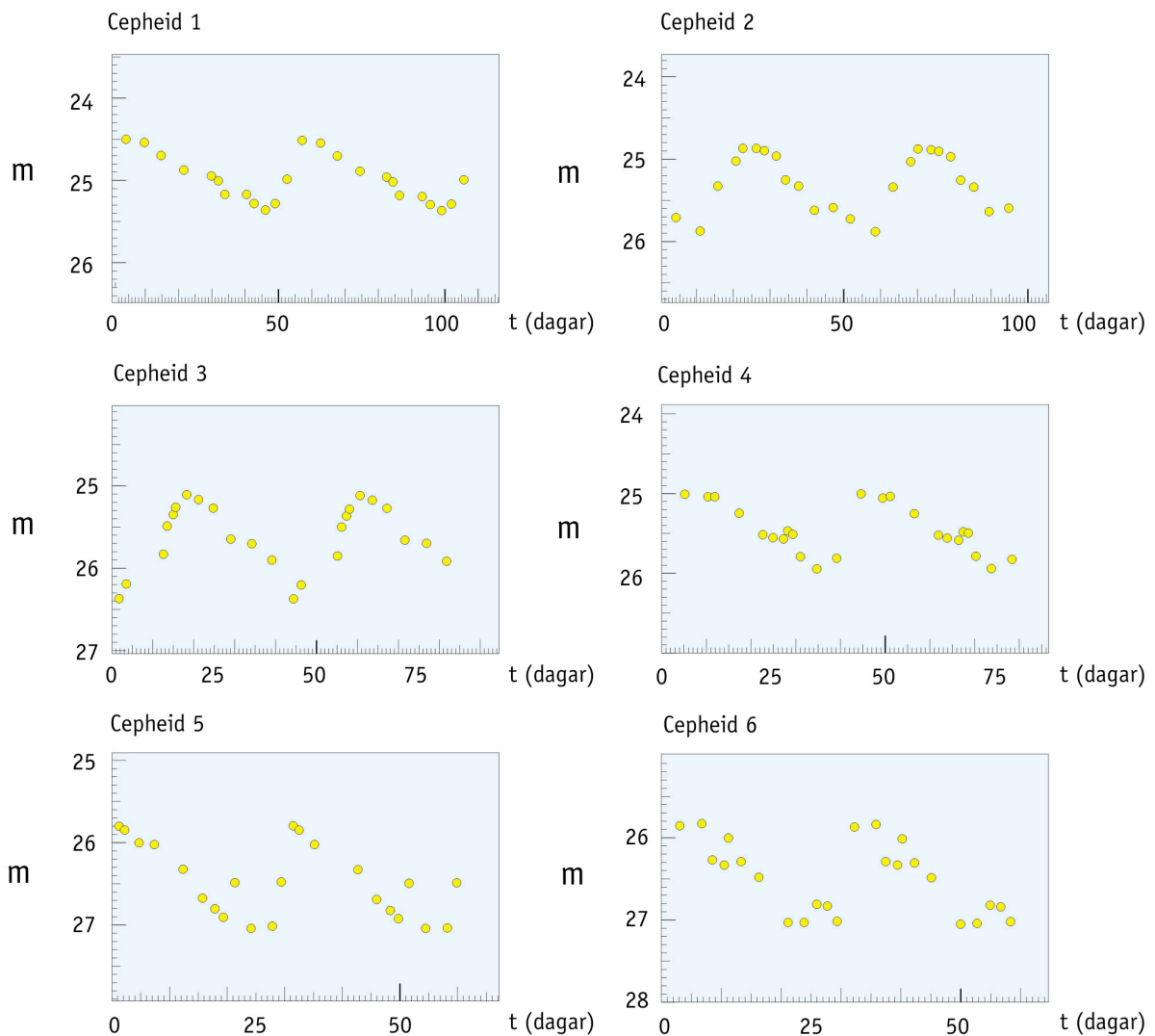
vilken apparenta magnitud, m , som ska användas i avståndsekvationen för Cepheider som faktiskt varierar i magnitud.

Uppgift 2

- ? Fundera på en metod för att kunna uppskatta den apparenta magnituden, m , med hjälp av kurvorna.

I början av 1900-talet mätte astronomer den minimala apparenta magnituden (m_{\min}) och den maximala apparenta magnituden (m_{\max}) och tog sedan ett medelvärde ($\langle m \rangle$) av de två.

Om du gör detta — eller använder din egen metod — så har du nu all information du behöver för att beräkna avståndet till M100.

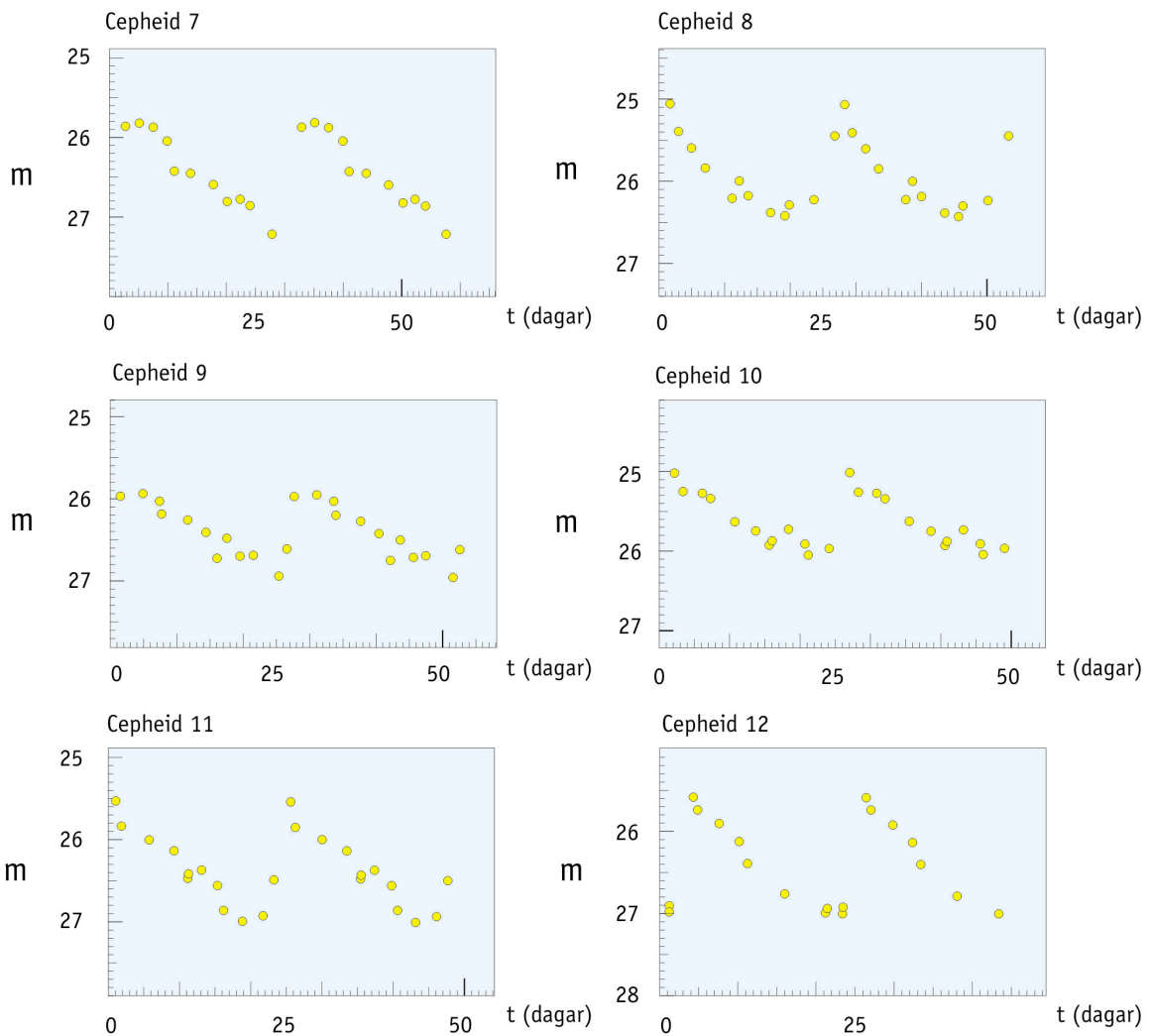


Figur 10: Cepheidens ljuskurvor

Ljuskurvor för de 12 Cepheidvariabler i M100 som observerats med Hubble. Den absoluta magnituden, M , bestäms från Cepheidernas period. Omarbetade från Freedman et al. (1994).



Uppgifter



Figur 10 (fortsättning): Cepheids ljuskurvor

Uppgift 3

- ? Beräkna $\langle m \rangle$ och D (i Mpc) för varje Cepheid.

Du kan givetvis göra samma beräkningar tolv gånger men du kan reducera mängden arbete genom att till exempel skriva ett litet program till en miniräknare.

Uppgift 4

- ? Fundera på en trolig anledning till att du inte får samma avstånd till alla Cepheidvariabler.

Uppgift 5

- ? Du har nu beräknat avståndet till tolv olika Cepheidvariabler i M100. Ger detta dig avståndet till M100?



Uppgifter

- ? Kan det faktum att de tolv stjärnorna har olika positioner i M100 vara anledningen till variationen i avståndet till de tolv stjärnorna?
- ? Ta reda på hur stor Vintergatan är (du kan till exempel titta i en astronomibok eller på Internet). Anta att M100 är ungefär lika stor. Tänk nu på denna förra frågan igen.

Uppgift 6

- ? Beräkna medelvärdet av avståndet till de tolv Cepheidstjärnorna och tänk dig resultatet som avståndet till M100.
- ? I den ursprungliga vetenskapliga artikeln som använder Hubbles mätningar är avståndet till M100 beräknat till $17,1 \pm 1,8$ megaparsec. Närvaron av interstellärt stoft togs med i bestämningen av detta värde. Jämför ditt resultat med det avståndet.

Uppgift 7

Som du kanske minns från introduktionen (sid. 5), så kan hastigheten som en galax som M100 avlägsnar sig med, tillsammans med information om dess avstånd, ge dig ett värde på universums allmänna expansionshastighet beskriven av Hubblekonstanten, H_0 . H_0 uttrycks i enheten km/s/Mpc. Hastigheten som Virgohopen, som M100 är medlem i, avlägsnar sig med har tidigare blivit uppmätt till 1400 km/s (Freedman et al., 1994)

- ? Beräkna Hubbles konstant med hjälp av detta v och medelvärdet av dina avståndsmätningar som D .

Uppgift 8

- ? Antag att universums ålder, t , ges av $t = 1/H_0$ och beräkna ett värde på åldern. Kom ihåg att omvandla till rätt enheter. Hur mycket äldre än jordens ålder är detta?



Ytterligare läsning

Vetenskapliga Artiklar

- 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.*

Se också länkar på:
<http://www.astroex.org/>



Kolofon



**ESA/ESOs övningsserie i astronomi
Övning 2: Bestämning av avståndet till M100
med hjälp av variabla Cepheidstjärnor
2^a upplagan(23.05.2002)**

Producerad av:

Hubble European Space Agency Information Centre
och European Southern Observatory:
<http://www.astroex.org>
(Pdf-versioner av detta material och relaterade
internetlänkar finns på denna adress)

Postadress:

European Southern Observatory
Karl-Schwarzschild-Str. 2
D-85748 Garching bei München
Tyskland

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

Text av:

Anne Værnholt Olesen, Lars Lindberg Christensen,
Jean-Marc Brauer, och Arntraud Bacher

Grafik och layout:

Martin Kornmesser

Översättning:

Martin Lundqvist

Svensk Korrekturläsning:

Britt Sjöberg

Koordination:

Lars Lindberg Christensen och Richard West

Tack till Tycho Brahe Planetarier, Danmark, för
inspiration, till Wendy Freedman för att ha gett oss
datan, och till Nina Troelsgaard Jensen,
Frederiksberg Seminarium, för kommentarer.



Lärarens Guide

Kort Summering

I denna övning mätte vi perioden och den apparenta magnituden hos Cepheidvariabler i galaxen M100. Den absoluta magnituden härleds med hjälp av period-luminositetsrelationen och avståndet till M100 kan bestämmas med hjälp av avståndsekvationen. Slutligen beräknade vi ett värde på Hubblekonstanten (genom att använda ett värde på hastigheten med vilken M100 rör sig bort, vilket bestäms av andra vetenskapsmän) och uppskattade Universums ålder.

Denna lärarguide innehåller lösningar till problemen tillsammans med kommentarer och diskussioner om gjorda approximationer och förenklingar.

Hypotesen att Universum har expanderat med en konstant hastighet sedan Big Bang är i själva verket endast korrekt i vissa kosmologiska modeller. En sådan expansion är faktiskt bara möjlig om universum innehåller väldigt lite materia eftersom all materia, synlig eller mörk, interagerar gravitationellt och saktar ner expansionshastigheten. Nya resultat har inte lett till några säkra resultat vad gäller Universums expansionshastighet så vi kan se uttrycken som använts i dessa uppgifter som en enkel men rimlig approximation.

Notera att enligt nya kosmologiska modeller undergick Universum en fas av insaktande expansion (på grund av den gravitationella effekten av både mörk och normal materia), som varade ungefär 5 miljarder år efter Big Bang. Efter det verkar Universum ha gått in i en fas av accelererande expansion där en mystisk "repulsiv gravitation" har tagit över. Denna kraft är också känd som "mörk energi" eller "quintessence" (det femte elementet).

Uppgift 1, 2 och 3

Genom att använda den föreslagna metoden i uppgift 2 och enkla mätningar med en linjal på en papperskopia fick vi följande resultat:

Eftersom M100 är väldigt avlägsen fungerar andra metoder (som till exempel att plotta $m(P)$) inte bra.

Cepheid nummer	t2	t1	period = t2-t1	M	m max	m min	m medel	D Mpc	D medel Mpc
1	100,0	46,5	53,5	-6,15	24,50	25,30	24,90	16,25	
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	19,85
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	



Lärarens Guide

Vi har valt att ge period-luminositetsrelationen istället för att låta studenterna härleda de två koefficienterna själva. Som ett resultat är övningen tillgänglig för en större grupp av studenter – något som vi ser som en positiv fördel (inom rimliga gränser så klart :-)).

Uppgift 4

Anledningen, som man först kommer att tänka på, till någon avvikelse är helt enkelt den vanliga osäkerheten i mätningarna. Denna sortens mätningar gjorda för hand är inte särskilt precisa. Noggrannheten kan ökas genom att använda mer förfinade mätmetoder. Ett alternativ kan vara två olika klasser av Cepheider som har aningen olika karakteristika.

Uppgift 5

Ja, baserat på det relativt stora urvalet av Cepheider kan vi nu ha en rimlig uppskattning av avståndet till M100.

Nej, galaxens storlek är liten jämfört med avståndet till M100.

Vintergatan är ungefär 25 kpc i diameter. Svaret till den förra frågan är definitivt fortfarande nej.

Uppgift 6

Med de grova metoder som används här är ett värde på 19,8 Mpc ganska rimligt. Frågan är framlagd så att den ska få studenterna att inse att osäkerheter är en del av naturvetenskaperna och utan tvivel även astronomin.

Uppgift 7

$$H_0 = v/D = 1400/19,85 = \mathbf{70,53 \text{ km/s/Mpc}}$$

Detta värde är inom den accepterade marginalen. Generellt tros H_0 ligga mellan 60 och 80 km/s/Mpc.

Uppgift 8

Genom att använda konverteringsfaktorn för Mpc till km får vi $H_0 = 2,286 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1}$.

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

Detta är ungefär 3 gånger jordens ålder (~4,6 miljarder år). Denna fråga är framlagd för att försöka få studenter att relatera Universums ålder till något de kanske känner till innan.

www.astroex.org

