

Exercise "Determination of the distance to the galaxy *M100* by photometry of cepheids using *SalsaJ* software"

Diana Kjurkchieva
Shumen University, 9700 Shumen, Bulgaria
d.kjurkchieva@shu-bg.net
(Conference poster)

Abstract. The space telescope Hubble provides a large number of astronomical images. They are accessible via Internet and can be used in the education of astronomy. This paper presents an exercise based on photometric measurements of cepheids on Hubble images of the galaxy *M100* by the software *SalsaJ*. The data are used for determination of the distance to *M100* and for calculation of the Hubble constant.

Key words: astronomy, didactics, cepheids, software

Семинарно упражнение "Определяне на разстоянието до галактиката *M100* чрез фотометрия на цефеиди, използвайки софтуера *SalsaJ* "

Диана Кюркчиева

Космическият телескоп Хъбл осигурява огромно количество астрономически изображения, които чрез Интернет са достъпни и могат да се използват и за обучение по астрономия. В тази работа е представено упражнение по астрономия, което се базира на фотометрични измервания на цефеиди от изображения на галактиката *M100*, получени от Хъбл, използвайки програмата *SalsaJ*. Получените резултати се използват за определяне на разстоянието до *M100* и за изчисляване на константата на Хъбл.

Увод

Космическият телескоп Хъбл предоставя огромно количество изображения на астрономически обекти, които са достъпни чрез Интернет и могат да се използват в учебния процес като база за създаване на практически упражнения по астрономия. Така учащите се получават възможност да повтарят стъпките на астрономите, т.е. да анализират наблюдателните данни с цел извличане на информация за обектите, което ги прави съпричастни към последните достижения на науката.

Едно от последните упражнения, разработено от астрономи от Образователния офис на Европейската космическа агенция на базата на изображения от космическия телескоп Хъбл, е "Определяне на разстоянието до галактиката *M100* чрез фотометрия на цефеиди" (Nielsen et al. 2008). То е много полезно за обучение по астрономия, тъй като дава възможност не само за практическо използване на един основен метод за определяне на разстояния във Вселената, но позволява и усвояване на софтуерни продукти за измерване на астрономически изображения, както и за обработка и графично представяне на данни. Поради това адаптирахме това упражнение и го предоставяме за използване в обучението на студенти и ученици в извънкласни форми.

1 Методи за определяне на разстояния

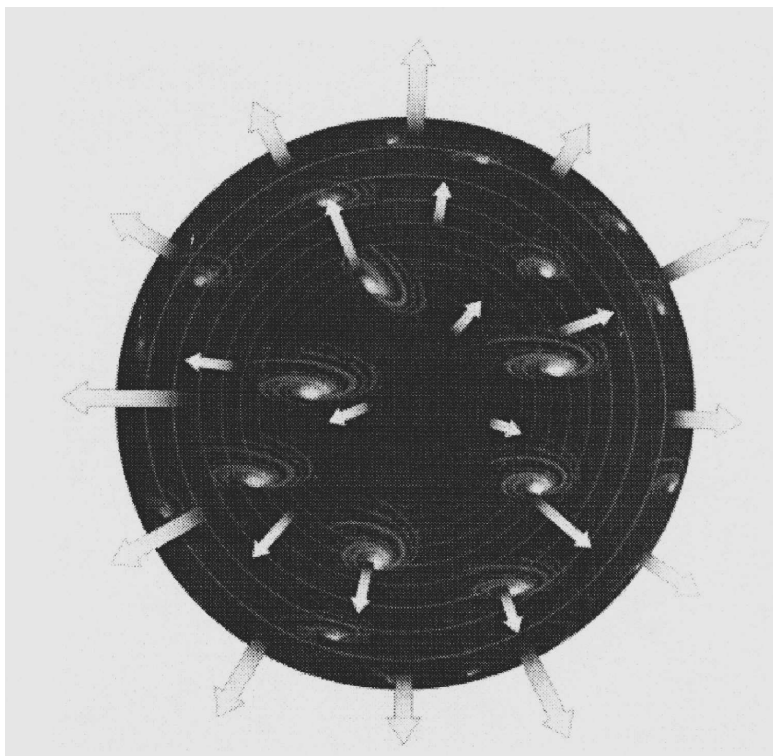


Fig. 1. Илюстрация на взаимното отдалечаване на галактиките поради разширението на Вселената

Едни от най-фундаменталните космологични въпроси са: каква е възрастта на Вселената, каква е скоростта на нейното разширение, ще започне ли някога да се свива. Някои космологични модели предполагат, че след Големия взрив Вселената се разширява с постоянна скорост. Такова разширение е възможно ако Вселената съдържа много малко вещество, тъй като всичката материя (видима и тъмна) взаимодейства гравитационно, което води до забавяне на разширението. Според съвременните космологични модели Вселената е претърпяла фаза на забавено разширение поради гравитационните ефекти на тъмната и видимата материя в течение на около 5 млрд. години след Големия взрив. Оттогава изглежда тя е влязла във фаза на ускоряване на разширението поради т.нар. "гравитация на отблъскване" ("тъмна енергия" или "петият елемент").

Измерването на разстояния до астрономически обекти във Вселената е трудна задача и едно от най-големите предизвикателства пред астроно-

мите, тъй като позволява да се отговори на поставените фундаментални космологични въпроси.

Един от най-важните методи за определяне на разстояния във Вселената се базира на фундаменталния емпиричен закон на Хъбл $V = Hr$, според който галактиките се отдалечават със скорост V , пропорционална на разстоянието r до тях (фиг. 1).

Константата на Хъбл е мярка за скоростта на разширение на Вселената и за нейната възраст. Тя има важно космологично значение и за да я определим е необходимо да измерим скоростта на отдалечаване на галактиките V и разстоянието r до тях.

Скоростта на отдалечаване V става по метода на червеното преместване, тъй като при отдалечаване на излъчващ обект от наблюдателя спектралните му линии се преместват към червения край на спектъра. За целта по спектрите на галактиките се измерва отместването на спектралните им линии и по формулата на Доплер $\Delta\lambda/\lambda = V/c$ се изчислява V .

Друг метод за определяне на разстояние е използването на емпиричната зависимост между абсолютната звездна величина M и периода на пулсациите P за цефеидите, установена през 1912 г. от Хенриета Ливит. Тъй като цефеидите са пулсиращи звезди-гиганти (с голяма светимост) те могат да се използват като индикатори на разстояния, както и за калибриране на други индикатори на разстояния.

С наземни телескопи са наблюдавани цефеиди в галактики, отдалечени до 3.5 Мрс от нас. Но на такива разстояния играе роля гравитационното привличане на галактиките, което внася нехомогенна (пекулярна) компонента на скоростта, наслагваща се върху хомогенната компонента на скоростта, възникваща от разширението на Вселената. Двете компоненти са съизмерими в нашето място във Вселената.

За да изследваме разширението на Вселената е необходимо да измерваме разстояния до далечни галактики, за които скоростта на разширение е много по-голяма от пекулярната скорост. Това стана възможно с космическия телескоп Хъбл, с който могат да се наблюдават цефеиди в галактики, отдалечени на разстояния до 20 Мрс. Наблюдавани са 19 такива галактики, една от които е спиралната галактика *M100*, принадлежаща на големия куп от галактики *Дева* (фиг. 2).

Настоящото упражнение се базира на 12 изображения на *M100*, получени от космическия телескоп Хъбл в продължение на 2 месеца. На тези изображения са идентифицирани 70 цефеиди, но в упражнението се използват само 3 от тях, означени с *C22*, *C25* и *C31* (фиг. 3).

Крайната цел на упражнението е да се оцени възрастта на Вселената. Дидактическите цели на упражнението са: да се усвои практически основен метод за определяне на разстояния до астрономически обекти; да се усвоят софтуерни продукти за измерване на астрономически изображения, за обработка и графично представяне на данни.

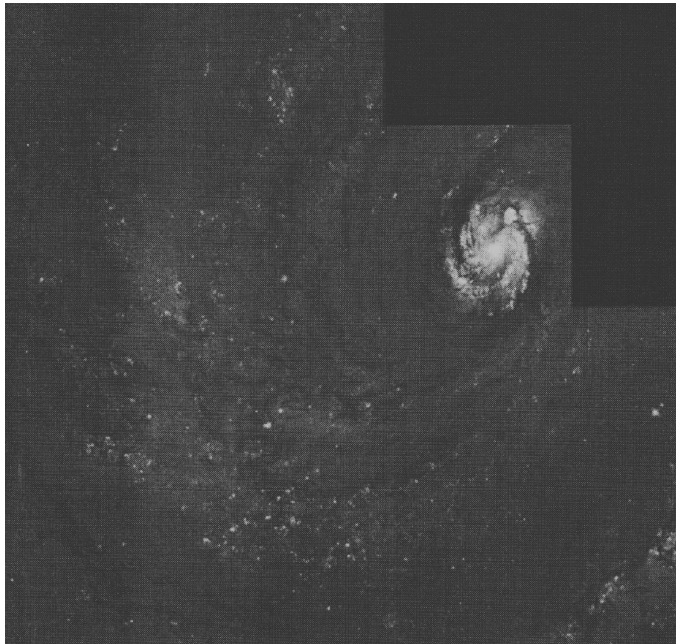


Fig. 2. Спиралната галактика *M100*

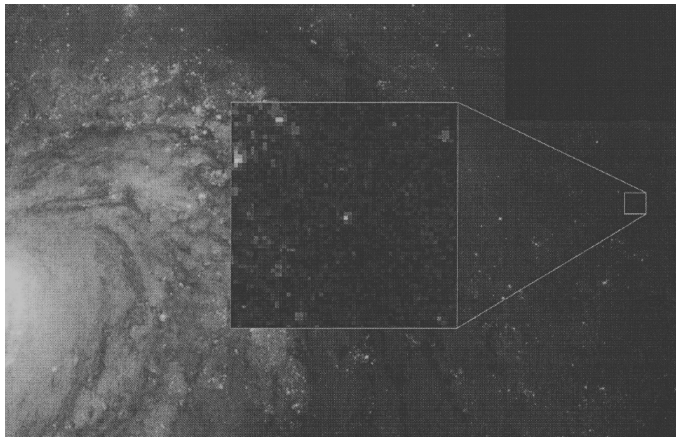


Fig. 3. Изображение на една от цефеидите, намираща се в област на звездообразуване в един от спиралните ръкави на галактиката *M100*

2 Фотометриране на изображения с програмата *SalsaJ*

Измерването на блясъка на трите цефеиди от 12-те им изображения става с помощта на програмата *SalsaJ*. Тя може да се изтегли от адрес <http://www.euhou.net>.

За инсталирането на тази програма е необходимо след разпакетирането да се кликне върху .bat файла. Програмата изисква Java Run Time Environment (JRE, version 1.5) и Java Media Framework (JMF).

Зареждането на изображенията става от <http://www.astroex.org.data>. Те са получени с инструмента WFPC2 на Хъбл, съдържащ 4 CCD детектора, всеки от които се състои от 800 x 800 пиксела. Изображенията 201 x 201 пиксела, използвани в разглежданото упражнение, са изрязани от оригиналните изображения и предварително обработени за отстраняване на космичното лъчение, горещите и мъртвите пиксели, тока на тъмно.

Стартирането на програмата става с командата *Open SalsaJ*. Извикването на изображенията в прозореца в хронологичен ред *01_230494...*, *12_190694* става чрез последователността от команди *File Import Image Sequence*. Това позволява да се проследи дори визуално изменението на блясъка на цефеидите и да се получи визуален критерий за идентификацията им.

Преминаването от едно изображение към следващо става с хоризонталния плъзгач, при което се запазва същото положение върху всяко изображение. Измерването на блясъка на звездата започва с последователността от команди *File Adjust Brightness/Contrast*. След сигнал се натиска *Set button* в долния ляв ъгъл и се записват следните стойности: Minimum Displayed Value: 0, Maximum Displayed Value: 40.

Удобно е измерените стойности за всяка цефеида N (N=1,2,3) да се записват в Таблици 1.N (Worksheet) от *Excell* или *Origin*. На първото изображение всяка цефеида е маркирана със стрелка. Това дава възможност за намирането ѝ на останалите 11 изображения. Фиксирането на звездата става с командата *Zoom-tool*, при което в долния ляв ъгъл се появяват нейните координати x , y . Те се записват в Таблици 1.N.

Тъй като положенията на звездите в различните изображения са близки, но не еднакви, се пресмята параметъра фотометрична ордината $y = 201 - y$. Той е необходим, тъй като понякога *SalsaJ* отчита ординатата от долната част на образа нагоре, а понякога - обратно. Фотометричното измерване става чрез последователността от команди *Analyse Photometry menu*. Появява се нов празен прозорец, който остава празен докато се прави измерването. Измерването се стартира с *Analyse Photometry Settings*. Появява се нов команден прозорец. В сивото поле *Forced Co-ordinates* се записват координатите x и фотометричната ордината y .

За постигане на по-висока точност се препоръчва измерването да стане при увеличено изображение (например 400 %).

Параметърът *Sky settings* трябва да бъде фиксиран на *Auto radius* (FWHM). Когато цефеидата е локализирана точно за получаване на интензитета се използва *Auto radius* (FWHM). Тогава *SalsaJ* поставя малка окръжност около обекта (с малко фон). Но когато обектът е толкова слаб, че дори най-малкият *Auto radius* включва доста площ от фона, се налага ръчно избиране на звездния, използвайки *Forced radius*. Измерването става чрез кликуване върху образа, при което се появява жълта окръжност около звездата с радиус 2 или 3. Проверката за центрирането на звездата става чрез преместване на x , y с 1 пиксел. Правилният избор съответства на минимална FWHM окръжност.

Прозорецът *Photometry* се запълва с координатите, радиуса на измерената окръжност и интензитет на избраната площ. Последният параметър се въвежда в Таблица 1.N. Ако цефеидата е слаба, опцията *Auto* на *Settings* няма да намери обекта и е необходимо програмата да използва намерените преди това координати на цефеидата.

3 Задачи на упражнението

Задача 1: С помощта на програмата *SalsaJ* измерете интензитета на изображенията на всяка от 3-те цефеиди и попълнете Таблица 1.N.

Table 1. Таблица 1.N

Епоха	Дата	x	y	Фотометрична ордината y	Интензитет I	m
00.0	Apr 23					
10.8	May 4					
13.1	May 6					
16.5	May 9					
19.3	May 12					
23.1	May 16					
27.6	May 20					
32.9	May 26					
37.9	May 31					
44.9	June 7					
55.0	June 17					
57.0	June 19					

Тази задача е най-времеемка. За нейното добро изпълнение е необходимо да се следи за точността при локализиране на центъра на звездите и правилен избор на окръжността за фотометриране.

Задача 2: Изчислете видимата звездна величина m за всяка от 3-те звезди от 12-те изображения по формулата

$$m = 30.61 - 2.5 \log I \quad (1)$$

(параметърът 30.61 е резултат от измерване на стандартна звезда) и запишете резултата в последната колона на Таблица 1.N.

Задача 3: Да се построят кривите на блясъка за всяка цефеида (например с продукта *Origin*, използвайки първата и последната колона на Таблица 1.N) и да се определят периодите им на пулсации (чрез измерване времето между минимумите или максимумите на построените криви на блясъка от вида, показан на фиг. 4).

Задача 4: Изчислете абсолютната звездна величина M на всяка от цефеидите чрез релацията "период/абсолютна звездна величина"

$$M = -2.78 \log P - 1.35 \quad (2)$$

където P е определеният период на пулсации, изразен в денонощия.

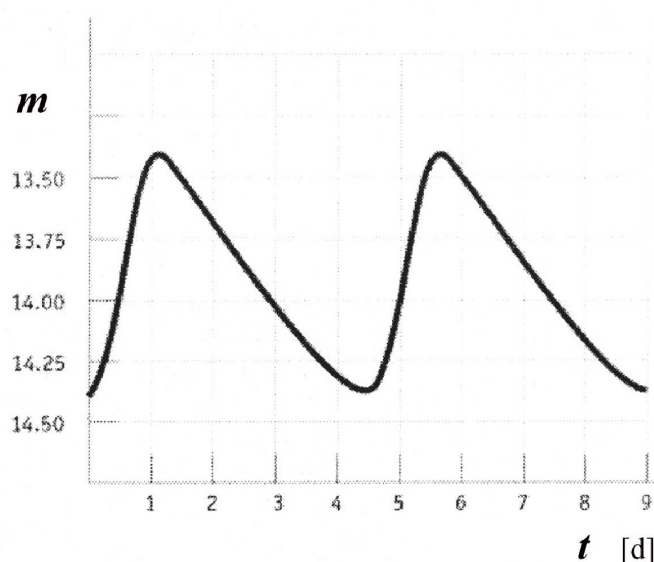


Fig. 4. Типична крива на блясъка на цефеида

Задача 5: Определете разстоянието r до всяка цефеида по формулата за модула на разстоянието

$$M - m = -5lgr + 5 \quad (3)$$

където m е видимата звездна величина, а r - разстоянието в [pc] и нанесете резултата в Таблица 2.

Забележки: 1) За видима звездна величина m вземете средната стойност от минималната видима звездна величина m_{min} и максималната видима звездна величина m_{max} на съответните криви на блясъка; 2) За сравнение разстоянието до $M100$ е оценено на 17.1 ± 1.8 Мpc, отчитайки междузвездния прах (Ferrarese et al. 1996, Hill et al. 1996).

Table 2.

Цефеида	Период M в дни	m_{min}	m_{max}	Ср. видима зв. величина m	Разстояние в Мpc
C22					
C25					
C31					

Задача 6: Изчислете стойността на константата на Хъбл H на базата на закона на Хъбл $V = Hr$, където r е полученото средно разстояние до

M100 (Таблица 2), а $V=1400$ km/s е определената по спектрални данни скорост на отдалечаване на тази галактика (Freedman et al. 1994). Сравнете получената стойност със съвременната стойност на константата на Хъбл $H=70$ km/s/Mpc.

Задача 7: Намерете аналитично връзката между константата на Хъбл H и възрастта на Вселената t . Изчислете възрастта на Вселената t като използвате стойността на H , получена в Задача 6 и сравнете получената стойност с възрастта на Земята (около 5 млрд. год.). Приемете, че скоростта на разширението е била постоянна до настоящия момент.

Методическо указание: Използвайте интерпретацията на закона на Хъбл с разширението на наблюдаемата Вселена от начално свръхплътно състояние при следните допълнителни съображения: а) сегашното разстояние r до някакъв обект в началото на Големия взрив е било 0; б) изминало е време t (възрастта на Вселената) от началото на Големия взрив; в) скоростта на разширението V е била постоянна до настоящия момент, т.е. $r=Vt$; г) сравнението със закона на Хъбл $V=Hr$ води до търсената формула $t=1/H$.

Заклучение

Определянето на разстоянието до далечни галактики е важно за уточняване на параметрите и избор на адекватен модел на Вселената, което е един от най-съществените проблеми за астрономията. Представеното упражнение демонстрира един от методите за решаване на тази задача. То е провеждано със студенти от специалностите на Шуменския университет, които изучават дисциплината астрономия. Упражнението им дава възможност и за усвояване на няколко софтуерни продукта.

References

- Ferrarese L. et al., 1996, ApJ 464, 568 "The extragalactic distance scale key project. IV. The discovery of Cepheids and a new distance to M100 using the Hubble Space Telescope"
 Freedman W. et al., 1994, Nature 371, p. 757 (), "Distance to the Virgo Cluster Galaxy M100 from Hubble Space Telescope Observations of Cepheids"
 Hill J. et al., 1996, ApJ 464, 568 "The extragalactic distance key project. V. Photometry to the brightest stars in M100 and the calibration of WFPC2"
 Nielsen K., Kleijn G., Olesen A., The ESA/ESO Astronomy Exercise Series, Exercise 7, <http://www.astroex.org>