

Животът на звездите

Александър Коста, Беатрис Гарциа, Рикардо Морено, Роса М.Рос

Международен астрономически съюз, Средно училище, Лоре (Португалия),
Национален технологичен университет – клон в Мендоса (Аржентина),
Колеж „Ретамар“ (Мадрид, Испания),
Технически университет, Каталония (Барселона, Испания).

Резюме

За да се разбере как протича животът на звездите, необходимо е да се разбере какво представляват те, как можем да измерим разстоянието до тях, как се превъплъщават и какви са различията между тях. Чрез прости експерименти, които можем да обясним на учениците, можем да разкажем как учените достигат до структурата на звездите и как правят звездни модели.

Цели

Този уъркшоп (работилница, семинар) допълва темата за звездната еволюция от курса на NASE, предлага различна активност и демонстрации, способстващи разбирането на звездната еволюция. Основните цели са:

- Да се разбере разликата между видимата и абсолютна звездна величина.
- Да се интерпретира диаграмата Хершпрунг-Ръсел като диаграма цвят-абсолютна звездна величина
- Да се добие представа за свръхновите, нетронните звезди, пулсарите и черните дупки.

Активност 1: Метод на паралакса

Явлението паралакс дава възможност да се определят разстоянията в астрономията. Ще илюстрираме по елементарен начин, какво представлява паралаксът. Изберете от по-далечната стена предмет като гардероб, маса, врата и др. Изпънете ръката си на равнището на очите и вдигнете палец примерно към окачена картина (фигура 1a и 1b). Първо затворете дясното си око и закрийте едната половина на картината. Без да местите ръката си, погледнете с дясното око. Сега палецът се проектира към края на картината, ограден с рамка.

По същия начин можем да си обясним защо проекцията на по-близки обекти като Луната, гледана от наблюдатели от два отдалечени града е различна на фона на далечните звезди. Ефектът е толкова по-голям, колкото по-отдалечени са наблюдателите. Разстоянието между тях се нарича база.

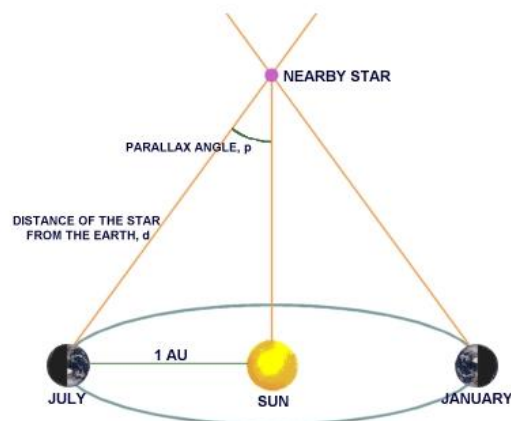


Фиг. 1а: С помощта на изпъната си ръка забележете промяната в проекцията на изпънатия палец върху отдалечен предмет, поглеждайки първо с лявото око (при затворено дясно око) и после, Фиг. 1b, поглеждайки с дясното око (при затворено ляво око).

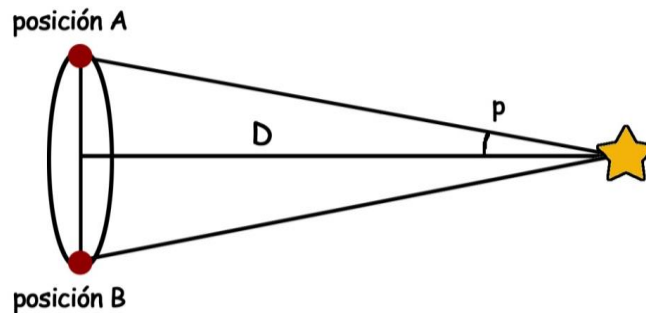
Изчисляване разстоянието между звезди чрез паралакса

Паралакс е видимата промяна в положението на обект, гледан от различни места. Проекцията на положението на близките звезди на фона на далечните е различна от различно положение на наблюдателя. Това ни дава възможност да определим разстоянието до близките звезди.

Паралактичният ъгъл е най-голям при максимална база. В случая на земен наблюдател, тази база е диаметърът на земната орбита (фигура 2).



Фиг. 2: Паралактичният ъгъл p е ъгълът, под който земният наблюдател вижда промяната в проекцията на звезда при база, равна на разстоянието Земя-Слънце.



position B

Фиг. 3: Чрез измерване на паралактичния ъгъл p , може да се определи разстоянието D до обекта.

Примерно, ако наблюдаваме близка звезда върху звездния фон от диаметрално противоположните позиции А и В, през които преминава Земята през 6 месеца по своята орбита (фигура 3), можем да изчислим разстоянието D до звездата чрез съотношението:

$$\tan p = \frac{AB / 2}{D}$$

Тъй като p е много малък ъгъл, може да се приеме, че тангенсът му е приблизително равен на самия ъгъл и тогава за разстоянието до звездата получаваме:

$$D = \frac{AB / 2}{p}$$

Половината от основата на триъгълника е $AB / 2$ е разстоянието Земя-Слънце и е 150 милиона km. Ако сме измерили парактичния ъгъл p , тогава разстоянието до звездата в km е $D = 150,000,000 / p$, ако ъгълът p е в радианти. Примерно, ако ъгълът p е arc second, то разстоянието до звездата е:

$$D = \frac{150\,000\,000}{2\pi / (360\,60\,60)} = 30939\,720\,937\,064\,km = 3,26\,a.l.$$

Това е една от единиците за измерване на разстоянията в астрономията. Ако звезда има паралакс, равен на 1 arc second, тогава разстоянието до нея е 1 парсек (par-ses идва от първите срички на паралакс и секунда). И така, 1 парсек е равен на 3,26 светлинни години: $1\text{pc} = 3.26\,ly$. Малките парактични ъгли означават по-далечни разстояния. Съотношението между разстоянието (в парсеци, pc) и паралакса (в arcseconds) е:

$$d = \frac{1}{p}$$

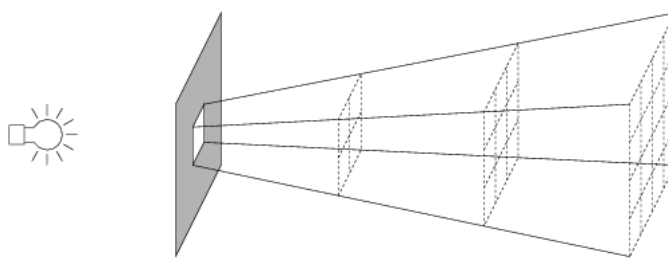
Простотата на това съотношение е причината, поради която то се използва като метод за определяне на разстоянията в астрономията. Например, най-близката звезда Проксима Центавър, има паралакс $0,76''$, което означава, че разстоянието до нея е 1,31 pc или $4.28\,ly$. Първият определен от наблюдения паракс е на звездата 61 Лебед

(61 Cygni), установен от Бесел през 1838 година. Оттогава станало ясно, че звездите са толкова далече, че е трудно да бъдат измерени с точност разстоянията до тях.

Сега ние приемаме за достоверни определените по параксите им разстояния на звезди до 300 светлинни години. Паралактичните ъгли на по-далечните звезди са нищожно малки и затова трябва да се използват други начини да се определя разстоянието до тях. Всъщност, тези методи се основават на сравнението със звезди, чието разстояние е определено по метода на паракса. Методът на паралакса се явява основен инструмент в астрономията. Паралаксът по същество е в основата на скалата на космическите разстояния.

Активност 2: Закон за обратната квадратична зависимост

Това е прост експеримент за установяване на съотношението между светимостта, яркостта и разстоянието до звездите. Той цели да покаже, че видимата звездна величина е функция от разстоянието. За целта ще използваме електрическа крушка и изрязана квадратна дупчица в лист хартия (или кутия), както е показано на фигура 4. Поставяме листа перпендикулярно на крушката, така че светлината ѝ да преминава през дупчицата. Крушката излъчва светлина радиално във всички посоки. Част от светлината преминава през отвора и осветява подвижен екран, поставен успоредно на листа с квадратната дупчица. Екранът е разграфен на квадратчета с големината на изрязаното в хартията. Светлината, преминала през дупчицата е една и съща, независимо колко далеч поставяме екрана. Колкото по-далеч е екранът, толкова по-голяма е площта, заемана от преминалата през дупчицата светлина. За да наподобим точков източник, може да направим още един лист хартия с дупка и да го поставяме поблизо до крушката. Разбира се, трябва да внимаваме да не я поставим твърде близо и да я държим дълго пред крушката, защото може да се запали.



Фиг. 4: Експериментална установка

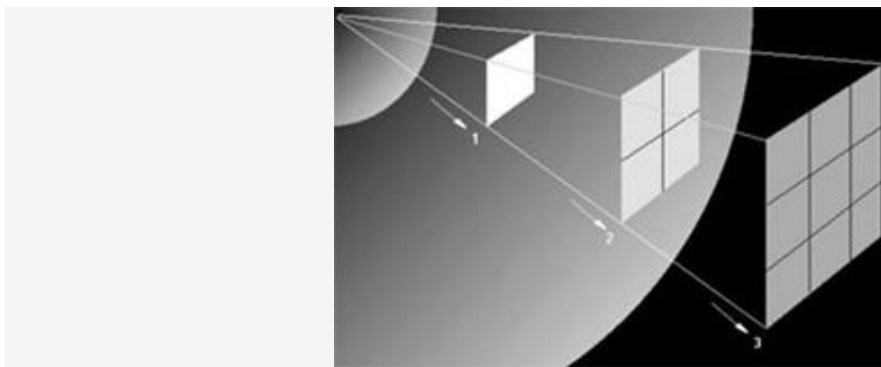
Наблюдаваме, че когато разстоянието между екрана и светлинния източник се увеличи 2 пъти, то осветената площ на подвижния екран нараства 4 пъти. В същото време интензивността на светлинния поток, яркостта (или светлината, попадаща на единица площ) намалява с $\frac{1}{4}$. Ако разстоянието се увеличи 3 пъти, площта на светлинното петно върху подвижния екран става 9 пъти по-голяма, докато интензивността на светлината намалява 9 пъти или е $\frac{1}{9}$ от началната. И така, всеки може да се убеди че яркостта е обратно пропорционална на квадрата от разстоянието до източника. С други думи, интензивността е обратно пропорционална на пълната площ на излъчване, която е сферична и е $4\pi D^2$.

Скала на звездните величини

Представете си, че звездата е електрическа крушка. Светлината ѝ зависи от мощността на излъчване на звездата или крушката и разстоянието, на което са те от нас. Това може да се провери чрез поставяне на хартиен лист на различни разстояния от лампата: количеството светлина, попаднало върху листа зависи от интензитета на крушката и разстоянието на което е листа от нея. Светлината от крушката се разпространява равномерно във всички направления и на определено разстояние R описва сфера с площ $4\pi R^2$, където R е разстоянието между лампата и хартията. Следователно, ако увеличим двойно разстоянието (R) между хартията и лампата (фигура 5), светлинният поток, достигнал хартията няма е наполовина по-малко, а четвърт (тъй като площта, до която достига потокът ще е 4 пъти повече). Ако увеличим разстоянието 3 пъти, светлинният поток, достигнал хартията е $1/9$ (площта на светлинна сфера на това разстояние е 9 пъти по-голяма).

Яркостта на звездата може да се формулира като тази част от енергията (или светлинния поток), попаднала на един квадратен метър от земната повърхност (Фиг. 5) (това е физичната величина осветеност F . Осветеността, създавана от източник на светлина е обратно пропорционална на квадрата от разстоянието до него). Ако светимостта (или пълната излъчената енергия за единица време) на звездата е L , то

$$B = F = \frac{L}{4\pi D^2}$$



Фиг. 5: Светлината намалява интензитета си с увеличаване на разстоянието

Доколкото яркостта зависи от интензитета или разстоянието до звездата, то може да се съобрази, че една неинтензивно излъчваща, но близка звезда ще има същата яркост като интензивно излъчваща, но далечна звезда.

Хипарх от Самос, живял през II век пр. н.е., направил първите каталози на звездите. Той ги класифицирал според яркостта им, като на най-ярките приписал 1-ва звездна величина, а на най-слабите, видими с просто око звезди – 6-та звездна величина. Той

въвежда скала на звездните величини според яркостта на звездите, която се използва досега, но с по-точни, отколкото позволява окото ни, инструментални измервания.

Звезда от 2-ра звездна величина е по-ярка от звезда от 3-та звездна величина. Има и звезди от 0-ва звездна величина и няколко като Сириус от -1,5 звездна величина са с отрицателна звездна величина. Скалата на звездните величини е продължена и за много ярките обекти като планетата Венера - от 4-та звездна величина, Луната в пълнолуние – от -13-та звездна величина и Слънцето – от -26,8 звездна величина.

Тези звездни величини се наричат видими и се бележат с буквата m , тъй като те отчитат яркостта на обектите, видими от разстоянието, на което е Земята от тях. Тази скала е изградена върху правилото, че звезда от 1-ва звездна величина е 2.51 пъти по-ярка от звезда от 2-ра звездна величина, която е също толкова 2.51 пъти по-ярка от звезда от 3-та звездна величина и т.н. Това означава, че разликата в яркостта на звезди, различаващи се с 5 звездни величини е $2.51^5 = 100$. Това може да се разпише така:

$$\frac{B_1}{B_2} = (\sqrt[5]{100})^{m_2 - m_1} \quad \text{или} \quad m_2 - m_1 = 2.5 \log \left(\frac{B_1}{B_2} \right)$$

Видимата звездна величина m отразява този светлинен поток на звездата, преминал през окото или телескопа ни. Всъщност, m се изчислява от осветеността F и константата C (която зависи от единиците за изчисление на светлинния поток и количеството натрупани данни от наблюдения) чрез съотношението:

$$m = -2.5 \log F + C$$

Това уравнение показва, че колкото повече е осветеността, толкова е по-голяма звездната величина или тя ще клони към отрицателните стойности на скалата на звездните величини. Абсолютната звездна величина M се дефинира като видимата звездна величина m на обекта, ако той е на разстояние 10 парсека.

Съотношението за превръщане на видимата в абсолютна звездна величина съдържа разстоянието до звездата. Понякога това е проблем, защото разстоянията в астрономията са трудни за определяне. В случаите, когато е известно разстоянието, абсолютната звездна величина на звездата M може да се намери от уравнението:

$$M = m - 5 \log d + 5$$

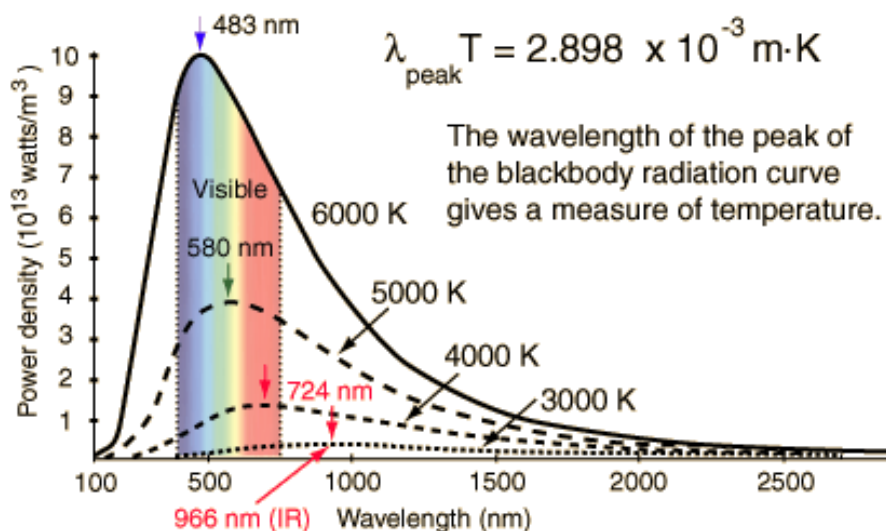
Цвят на звездите

Известно е, че звездите имат различни цветове. С просто око това е трудно доловимо, но цветовете на звездите изпъкват при наблюдение с увеличителна техника или при фотографски им изображения. Звездите може да се класифицират съобразно цвета им; тази класификация е спектрална, а спектралните класове на звездите са O, B, A, F, G, K, M. (фигура 6).



Фиг. 6: Спектралните класове на звездите асоциират с техният цвят

Според закона на Вин (фигура 7), звездите, излъчващи най-силно, с най-висока температура на повърхността си, са сини на цвят, а тези с най-ниска температура на излъчващата си повърхност са червени. С други думи, цветът на звездите подсказва каква е температурата на излъчващата им повърхност.



Фиг. 7: С нарастване на температурата на излъчване, максимумът на кривата на излъчване на звездата се премества от червените към сините цветове.

Активност 3: Цвят на звездите

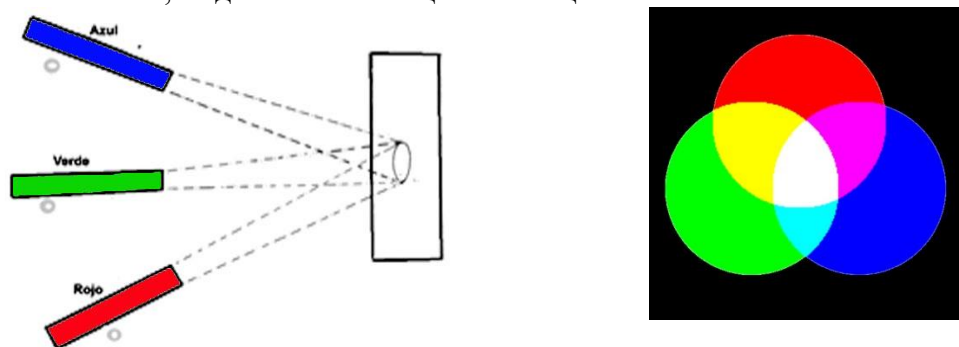
First, you will use a simple incandescent lamp with a variable resistor to illustrate blackbody radiation. By placing colored filters between the lamp and the spectroscope, students can examine the wavelength of light transmitted through the filters. By comparing this to the spectrum of the lamp, students can demonstrate that the filters absorb certain wavelengths. Then, students can use a device similar to that in figure 3, which has blue, red, and green lights, and is equipped with potentiometers, to understand the colors of stars. This device can be constructed by using lamps, where the tubes of the lamps are made with black construction paper, and the opening opposite the bulb is covered with sheets of colored cellophane. Using this device, we can analyze figure 2 and try to reproduce the effect of stellar temperature rise. At low temperatures the star only emits red light in significant amounts.

Първо, използвайте жичка на обикновена електрическа крушка с резистор за промяна на интензивността ѝ на светене, за да илюстрирате излъчване на абсолютно черно тяло

с различна температура. Чрез поставяне на цветни филтри между лампата и спектроскоп, учениците могат да демонстрират как филтрите поглъщат определени дължини на вълните. След това, учениците може да използват устройство като на фигура 3 ?, (8a) което има синя, червена и зелена светлина и да измерят с потенциометър разликата в излъчването през филтрите, за да разберат връзката му с цвета на звездите. Това устройство може да се изработи с лампа, чиято тръба е оцветена в черно или е обвита с черна хартия, а срещу жичката се остави част, покрита с различни цветни целофани. Използвайки това устройство, можем да анализираме фигура 2 ? (8b) и да възпроизведем ефектите, наблюдавани при покачване на температурата на звездите. При ниска температура звездите излъчват червена светлина с голяма дължина на вълната.

If the temperature rises there will also be emission of wavelengths that pass through the green filter. As this contribution becomes more important the star's color will go through orange to yellow. As temperature rises the wavelengths that pass the blue filter become important and therefore the star's colors become white. If the intensity of the blue wavelengths continues to grow and becomes significantly greater than the intensities of the wavelengths that pass through the red and green filters, the star becomes blue. To show this last step, it is necessary to reduce the red and green lamp intensity if you used the maximum power of the lamps to produce white.

Ако температурата се покачва, започват да се излъчват вълни с по-малка дължина на вълната, отговарящи на зеления филтър. След това започват да се появяват дължини на вълните, отговарящи на оранжев и жълт цвят. Ако температурата нарасне до излъчване на дължините на синия цвят на звездите започват да изглеждат бели. Ако интензивността на сините вълни продължава да нараства още повече при преминаването през червения и зеления филтър, звездата става синя. За да се стигне до тази последна степен, необходимо е да се намали интензивността на червената и зелената лампа, за да се използва цялата мощ на светене на жичката в бяла светлина.



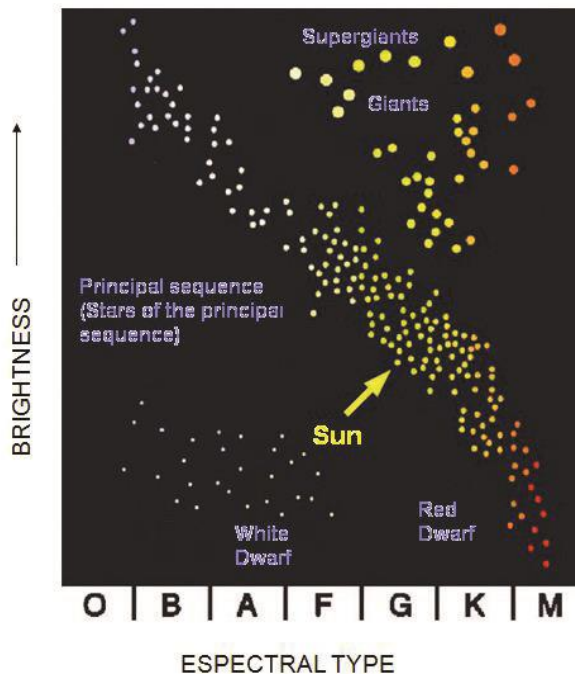
Фиг. 8a: Способ да се обясни цвета на звездите, Фиг. 8b: Проекцията обяснява цветовете на звездите и появата на белия цвят.

Как разбираме, че звездите еволюират?

Звездите може да заемат определено място върху диаграмата на Хершпрунг-Ръсел (фигура 9a), според излъчването им (светимостта или абсолютната звездна величина) и температурата на излъчващата си повърхност или цвета си. Студените звезди са с по-малко излъчвана енергия (долната дясна част на диаграмата); горещите звезди са по-

ярки и излъчват интензивно енергия (те са горе вляво на диаграмата). Тази ивица от звезди, която се простира от представителите с ниска температура/ниска светимост до тези с висока температура/висока светимост, се нарича Главна последователност. Някои звезди, които не са в нормален стадий на развитие са извън Главната последователност. Много горещите звезди, но с ниска светимост, са белите джуджета. Звезди, които са с ниска температура но са с висока светимост, се наричат червени гиганти и свръхгиганти.

С течение на времето, звездите еволюират и се „преместват“ върху диграмата на Хершпрунг-Ръсел. Слънцето например, което сега е в центъра на Главната последователност, в края на живота си ще се раздуе и ще се превърне в червен гигант, премествайки се горе вдясно на диаграмата. Постепенно ще загуби външната си обвивка като на фигура 9b и ще се превърне в бяло джудже (долу под Главната последователност).



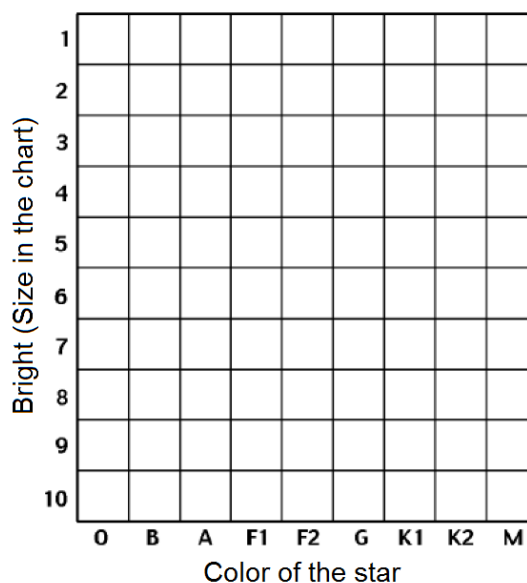
Фиг. 9а: Диаграмата Хершпрунг-Ръсел, Фиг. 9b: Слънцето ще изхвърли външната си атмосфера и ще се превърне в бяло джудже като това, което е в центъра на тази планетарна мъглявина.

Активност 4: Определяне възрастта на разсеян звезден куп

Анализирайте изображението (фигура 10) на разсеяния звезден куп, известен като Кутията със скъпоценности или Капа от Южен кръст в съзвездие Южен кръст.



Фиг. 10: Изображение на разсеяния куп Кутия със съпоценности



Фиг. 11: Работен лист

Очевидно звездите в купа са с различни цветове. Трудно е да се прецени кои звезди оформят края на купа и кои са от звезди от фона. Очертайте върху фигура 10 краищата на купа така, както вие прецените.

На същата фигура 10 отбележете с „X“ центъра на купа. След това, използвайте линейка и очертайте квадрат със страни 4 cm около центъра. Определете яркостта на звездите от горния ляв ъгъл на квадрата, използвайки легендата от скалата на звездните величини в горната част на изображението и припомняйки си обясненията, свързани с Фигура 4. Определете цвета на звездата с помощта на скалата на цветовете горе вляво над изображението от Фигура 10. Отбележете с точка положението на звездата върху работния лист (фигура 11) според цвета и звездната величина.

Забележете, че цветът се нанася върху оста x, а яркостта (звездната величина) е нанесена върху оста y. Започвайки с определяне на звездната величина и цвета на по-ярките звезди и нанасяйки ги върху работния лист, продължете по същия начин с всички останали в очертания квадрат със страни 4 cm.

Звездите от Кутията със съпоценности, нанесени върху работния лист ще се подредят на определени места и готовата графика ще може да се сравни с някоя от графиките на фигура 11. На фигура 10 има и доста звезди, които са или пред, или зад купа, но не спадат към купа. Астрономите ги наричат „звезди от полето“, от звездния фон. Ако имате време, опитайте се да определите колко звезди от фона попадат в квадрата със страни 4 cm, определяйки тяхната звездна величина и цвят. Нанесете ги върху работния лист и ги отбележете с „x“ вместо с точка. Забележете, че звездите от полето имат случайно местоположение на графиката и не бележат никаква определена тенденция за подредба.

Много от звездите попадат в ивицата от горния ляв до долния десен край на графиката. Не толкова масивните звезди са по-студени и изглеждат червени. По-масивните звезди са горещи и ярки, затова са сини. Тази ивица на диаграмата цвят-звездна величина е именно т.н. Главна последователност. Звездите от Главната последователност са от

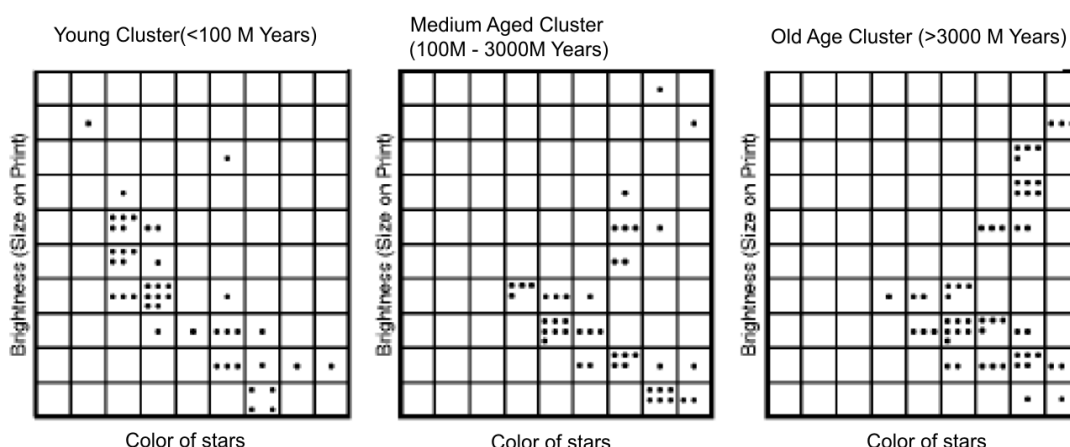
спектрални класове О (най-ярките, масивни и горещи звезди с температура на излъчващата повърхност от 40 000 K) до звезди от спектрален клас М (с най-ниска светимост, малка маса и температура на излъчващата повърхност от 3 500 K).

При стадия на „нормалност“ в живота на звездите, силата, създавана от излъчването отвътре навън и силата на гравитация отвън навътре са в равновесие. Когато звездата наближи крайните си стадии, това равновесие се нарушава и гравитацията надделява, принуждавайки звездата да се свива, да колапсира, умирайки.

Превъплъщението на звездите от такива на Главната последователност към колапса им в цикъла на звездния живот, се нарича стадий на червените гиганти. Червените гиганти са ярки, защото размерите им са огромни – от 10 до 300 пъти повече от тези на Слънцето. Но са червени, защото температурата на повърхността им е ниска. Те са от спектрални класове К или М, въпреки яркостта си. Най-масивните изразходват енергийния си източник по-бързо от немасивните звезди, отделят се от Главната последователност и стават червени гиганти. Тъй като има гиганти 1000 пъти по-големи от Слънцето, то червените гиганти с маси между 10 и 50 маси на Слънцето се наричат червени свръхгиганти (или червени хипергиганти, ако са от спектрален клас О). Червените гиганти се разширяват и охлаждат, оставайки червени и ярки, затова са в горната дясна част на диаграмата цвят-звездна величина. Ако звездният куп е по-стар, нараства броят на звездите, напуснали Главната последователност и превърнали се в червени гиганти. Ето защо възрастта на звездния куп може да се определи от цвета и яркостта на звездите в него, напуснали Главната последователност.

Много звезди от старите звездни купове са еволюирали след стадия на червен гигант, превръщайки се в бели джуджета. Белите джудже са много малки звезди, сравними с размера на Земята. Те обикновено са много слаби и едва ли може да се открият на това изображение на Кутията за скъпоценности.

Можете ли да дадете приблизителна оценка на възрастта на звездния куп Кутийка за скъпоценности, сравнявайки вашата графика от фигура 11 с графиките от фигурите 12a, 12b и 12c с определена възраст на куповете?



Фиг. 12a, 12b и 12c: Диаграма Хершпрунг-Ръсел на звездни купове с определена възраст.

Ако сте разбрали диаграмата Хершпрунг-Ръсел и съотношението между цвят (температура на излъчващата повърхност), звездна величина (светимост), възраст на

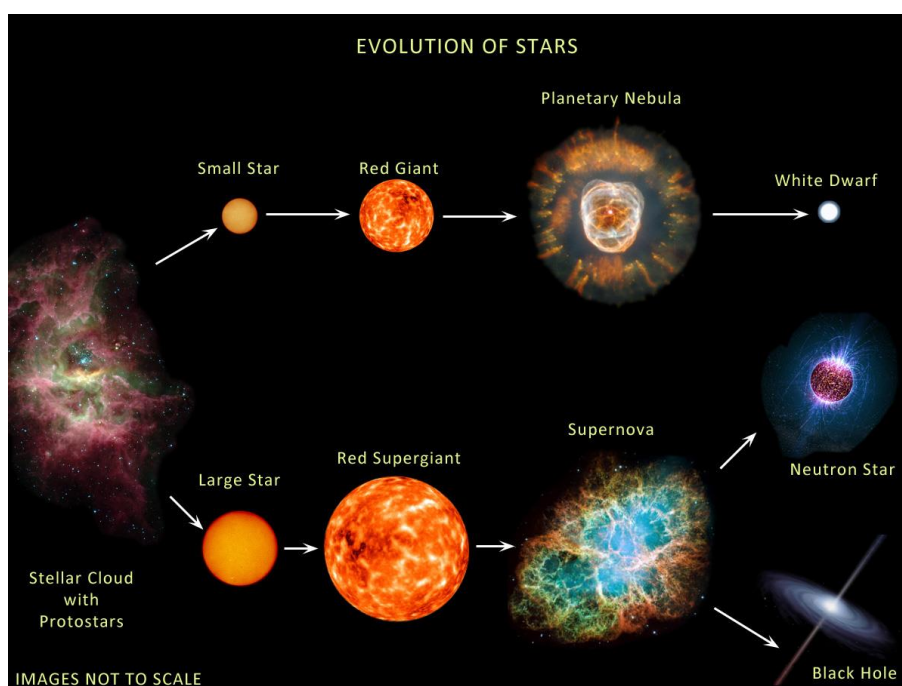
звездите, възможно е да обясните как звездите и звездните купове еволюират. Вие ще можете да свържете живота на звезди от O/B спектрални класове с тези на A/F/G и K/M звезди. Ще забележите, че звезди с една и съща маса еволюират по един и същи начин, дори да са в различни звездни купове. Имайки предвид това, ще забележите разликите във възрастта на звездните купове от диаграмите на Хершпрунг-Ръсел. Това дава основание да се каже, че фигура 12a принадлежи на млад звезден куп (той има O и B звезди върху Главната последователност и ние знаем, че тези звезди бързо се превръщат в червени гиганти), а фигура 12c ни показва стар звезден куп (в който преобладават K/M звезди върху Главната последователност и много звезди във фаза на червен гигант).

Ще можем да си отговорим и на въпроса: „Какво е мястото на Слънцето върху диаграмата на Хершпрунг-Ръсел?“ Слънцето е звезда с температура на излъчващата си повърхност от 5 870 K и затова изглежда жълто. То е звезда от спектрален клас G2 (по оста x) и е в нормалния си стадий на развитие, при който водородът се превръща в хелий в слънчевото ядро. Класът му на светимост е V като на много други звезди от средната част на Главната последователност.

Смъртта на звездите

Крайният стадий от живота на звездите зависи от масата на първоначалната звезда, както е показано на фигура 13.

В определен момент от еволюцията на звездните купове масивните звезди изчезват от диаграмата на Хершпрунг-Ръсел. Докато не толкова масивните звезди еволюират до бели джуджета, тези масивни звезди завършват живота си чрез един от най-бурните процеси във Вселената: свръхнова. Остатъкът от звездата след избухването ѝ като свръхнова е обект, който вече не излъчва (пулсар или черна дупка) и затова те не са върху диаграмата Хершпрунг-Ръсел.



Фиг. 13: Еволюция на звездите в зависимост от тяхната маса.

Какво е свръхнова?

В края на звездната еволюция водородът почти изцяло се е превърнал в хелий, след това започва „горене на хелия“ и се появява въглеродът, а после - все по-тежки химични елементи. Последният продукт от ядреното горене е желязото. При по-нататъшни ядрени реакции след желязото вече не се освобождава енергия, а обратно, за да се осъществят, нужно да се добави енергия.

Ядреният синтез на различните елементи продължава докато се изчерпят всички възможности. Тези реакции се осъществяват извън звездното ядро и след време вътрешният състав на звездата се разслюява в зависимост от изобилието на един или друг химичен елемент, подобно на луковица [\(фигура 14b липсва\)](#) ?, като колкото по-близо са слоевете до ядрото, толкова по-тежки елементи изобилстват в тях.

А 20 Звездите с 20 пъти по-голяма маса от тази на Слънцето преминават през следните етапи:

10 милиона години гори водородът в ядрото (звездата е на Главната последователност)

1 милион години гори хелият

300 години гори въглеродът

200 дни гори кислородът

За 2 дни „изгаря“ силицийт: предстои експлозия на свръхнова.

Когато звездата се сдобие със желязно ядро, вече не са възможни по-нататъшни ядрени реакции. След като няма как радиацията да противодейства на гравитацията, звездата неудържимо колапсира. Докато се свива, атомните ядра и електроните се сблъскват и образуват неутрони, а централната част на ядрото се превръща в неутронна звезда.

Неутронните звезди са толкова плътни, че чаена лъжичка от тяхното вещество би тежала колкото всички сгради в голям град. Тъй като неутроните са толкова притиснати един до друг, то по-нататъшно свиване повече не е възможно. Частиците от външните слоеве на звездата падат върху ядрото със скорост от порядъка на $\frac{1}{4}$ от тази на светлината и в един момент този процес спира. По-нататъшното им отскачане от ядрото предизвиква появата на ударна вълна, проявяваща се като един от най-енергийните процеси във Вселената ([Фиг. 14a също липсва](#)): една такава експлоадирала звезда отделя енергия колкото милиардите звезди в една галактика.

Докато тази отделена енергия се разпространява в околното пространство, поражда се по-тежките от желязото елементи (като олово, злато, уран и др.). Тези отделени елементи по време на експлозията обогатяват междувъзвездната среда с тежки елементи, които влизат в състава на звездите от следващите поколения. В центъра на изхвърления материал остава неутронна звезда или черна дупка в случая на най-масивните звезди.

Активност 5: Симулация на избухване на свръхнова

Когато звездата експлодира като свръхнова, свръхбързите атоми от външните слоеве падат върху тежките елементи и в крайна сметка се сблъскват с непробиваемото централно ядро. Този процес може да се онагледява чрез топка за тенис и футболна топка, пуснати едновременно към пода (фигура 15). Подът тук играе ролята на твърдото неутронно ядро, баскетболната топка имитира тежкия атом, който отскача при удар с ядрото и отделя свръхбърз атом от себе си, чиято роля изпълнява топката за тенис.



Фиг. 15: Пускаме към пода едновременно топка за тенис и футболна топка.

За да демонстрирате процеса, вдигнете баскетболната топка на равнището на очите си и поставете топката за тенис отгоре ѝ. Пуснете ги едновременно. Можете да се досетите, че топките ще се стремят да отскочат на същата височина, от която са пуснати да паднат, но няма да могат, поради триенето с пода и загубата на енергия. Въпреки това, резултатът е твърде изненадващ.

Когато пуснете двете топки, те тупват едновременно на пода. Голямата топка подскача еластично обратно със същата скорост, каквато е имала при падането на пода. В същия момент тя се сблъсква с малката топка за тенис, която е паднала на пода със същата скорост, каквато е имала баскетболната топка. Топката за тенис отскача от баскетболната с по-висока скорост и достига по-голяма височина от тази, от която са пуснати топките. Ако същият експеримент се повтори многократно с голям брой леки топки, тяхната рикошираща скорост ще нарастне изключително много.

В представения модел, топката за тенис отскача на два пъти по-голяма височина от тази, от която са пуснати топките. Затова внимавайте да не повредите нещо, ако експериментът се прави в закрито помещение.

Този експеримент може да направите в класната стая или в друго затворено помещение, но е за предпочитане да се направи на открито. Топките може да се пуснат от прозорец, но в този случай не може да сте сигурни, че траекторията им ще бъде вертикална, а рикошетът им може да е във всякакви посоки.

Някои магазини за детски играчки или научни музеи предлагат така наречените „Астропушка“ ("Astro Blaster"), които се основават на същия принцип. Те се състоят от 4 малки гумени топки с различни размери, навързани една за друга. Малките топки издават пукот, когато системата се удари в земята.

Какво е неутронна звезда?

Неутронната звезда е остатък от много масивна звезда след нейния колапс и избухването ѝ като свръхнова. Неутронните звезди обикновено не надвишават няколко десетки километра. Както подсказва името им, те се състоят от сближени неутрони, което им придава неимоверна плътност: напръстник от веществото им тежи милиони тонове на Земята.

Неутронните звезди се формират, ако остатъкът от свръхновата е между 1.44 и 8 слънчеви маси.

Какво е пулсар?

Пулсарът е неутронна звезда, въртяща се с огромна скорост (фигура 16). Когато масивната звезда колапсира, външните слоеве падат върху ядрото и въртенето се забързва, съгласно закона за запазване на момента на импулса. Това е аналогично на ускореното въртене на кълкьорка, когато тя прибере ръцете си към тялото.

Звездното магнитно поле генерира тесен сноп синхротронно електромагнитно излъчване по оста в две противоположни посоки. Тъй като обикновено магнитната ос не съвпада с оста на въртене (както е при Земята), въртящата се неутронна звезда излъчва като огромен космически маяк. Ако Земята попада в обхвата на излъчване на маяка, ние можем да детектираме импулси на определени интервали.

През 1967 г. Бел и Хевиш откриват първия пулсар. Радиосигналът му идвал от такова място на небето, където нямало нищо излъчващо в бяла светлина. Бързите импулси се повтаряли през поразително точни и кратки интервали няколко пъти в секунда.



Фиг. 16: Пулсарът е бързо въртяща се неутронна звезда.

Отначало откривателите помислили, че пулсарите са сигнали от извънземна цивилизация. Скоро последвали нови открития в радиодиапазона на подобни пулсации, включително и такива, идващи от центъра на Раковидната мъглявина. Учените знаели, че тази мъглявина е остатък от свръхнова и така успели да обяснят същността на

пулсарите. Пулсарът PSR B1937+21 е един от най-бързите, чиито импулси се повтарят 600 пъти в секунда. Диаметърът му е само 5 km и ако неговото въртене бе с 10% повече, той би се разпаднал поради огромната центробежна сила. Хевиш печели Нобелова награда през 1974 г.

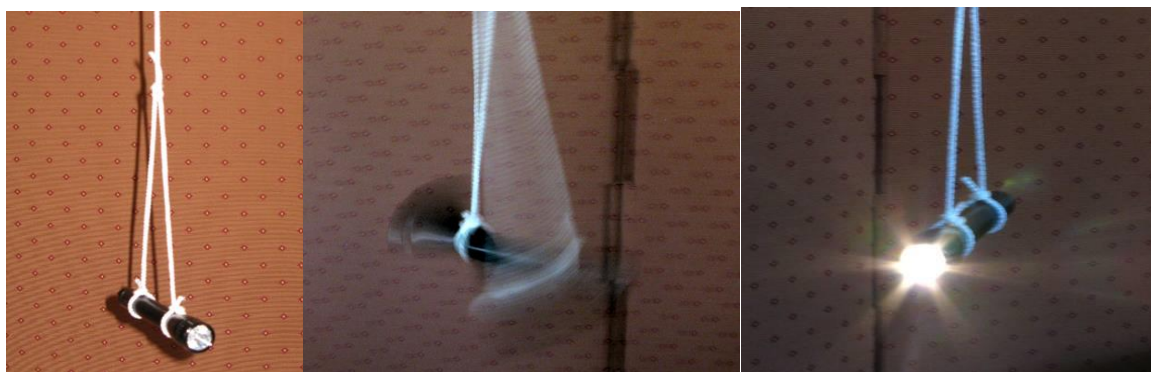
Друг много интересен пулсар PSR 1913+16 е в двойна система в съзвездие Орел. Орбиталната скорост на системата звезди в твърде силното гравитационно поле забавя емисиите, които стигат до нас. Ръсел Хилс (Russell Hulse) и Джоузеф Тейлър (Joseph Taylor), изучаващи тази система я разглеждат от гледна точка на Теорията на относителността, включваща разпространението на гравитационни вълни. На тези двама американци е присъдена Нобелова награда през 1993 г. за откритието на гравитационните вълни.

Активност 6: Симулация на пулсар

Пулсарите са неутронни звезди, които са много масивни и се въртят много бързо. Те излъчват радиация, която не е точно по оста на въртене и затова се образува конусовиден сноп, подобно на лъч от морски фар. Ако той е ориентиран по посока на Земята, ние можем да наблюдаваме импулси няколко пъти за една секунда.

Можем да наподобим пулсара чрез фенерче (фигура 17a), завързано в хоризонтално положение на свободно висеща връв. Ако усучим връвта, то ще се завърти (фигура 17b) и снопът светлина ще ни осветява периодично, когато е в нашата посока (фигура 17c).

Ако наклоните фенерчето, така че то да не е хоризонтално, неговият лъч вече може да не достига до вас и да ви осветява. По такъв начин се показва, че ние можем да наблюдаваме пулсациите на обекта само ако сме по направление на оста на въртене.



Фиг. 17a: опитна установка, Фиг. 17b: въртящо се хоризонтално фенерче, Фиг. 17c: Когато фенерчето се върти, ние наблюдаваме светлинни импулси, които периодично ни осветяват.

Какво е черна дупка?

Ако хвърлим камък нагоре, гравитацията ще го принуди да падне обратно на земята. Ако придадем на камъка по-голяма първоначална скорост, той ще достигне по-голяма височина преди да падне обратно на земята. Ако началната му скорост стане 11 km/s,

втората космическа скорост за Земята, камъкът няма да падне обратно (в случай, че пренебрегнем триенето).

Ако Земята колапсира, запазвайки масата си, втората космическа скорост, с която завинаги се разделяме със Земята, нараства, тъй като при свиването ѝ, ние се доближаваме все повече към центъра. Ако Земята се свие до кълбо с радиус 0.8 cm, втората космическа скорост ще стане повече от тази на светлината. Тъй като нищо не може да е по-бързо от скоростта на светлината, то нищо не би могло да напусне повърхността на колапсиралата Земя, дори и светлината. Земята ще се е превърнала в черна дупка с размерите на содено топче (топче за игра).

Теоретично е възможно черните дупки да имат всякакви маси. В действителност, обаче, познаваме само един начин да се достигне концентрация на масата до необходимата плътност: гравитационният колапс. За да се осъществи този гравитационен колапс обаче, необходима е голяма маса. Вече знаем, че неутронните звезди са звездни остатъци с 1.44 слънчеви маси, възникнали от звезди с маси поне 8 слънчеви маси. И така, ако звездата отначало е още по-масивна, гравитацията ѝ ще е достатъчна, за да я превърне в крайния ѝ стадий в черна дупка. Следователно, масата на черните дупки ще е няколко пъти повече от масата на Слънцето. Черните дупки имат изключително висока плътност. Напръстник от тяхното вещество би тежало, колкото цялата Земя.

Въпреки че не можем да наблюдаваме директно черните дупки, ние ги разпознаваме чрез излъчването на веществото, въртящо се около черната дупка с огромна скорост. Примерно, близо до центъра на нашата Галактика не виждаме нищо, но долавяме излъчване от въртящ се със субсветлинна скорост газ. Единственото обяснение за това е наличието на невидима черна дупка в центъра на пръстена с маса 3-4 милиона слънчеви маси. Това е черна дупка, чийто Шварцшилдовски радиус е малко повече от големината на нашето Слънце. Този вид черни дупки в центровете на галактиките се наричат свръхмасивни черни дупки.

Активност 7: Симулация на пространствено-времето изкривяване около черна дупка

Лесно може да се демонстрира вдлъбнатина в двумерна повърхност (кривината на пространство-времето), образувана от гравитацията на черна дупка чрез еластична материя като парче плат от ликра (фигура 18), парче марля или тънка метална мрежа.



Фиг. 18: Топките за тенис очертават изкривяването на траекторията на тяло или частица близо до кривината във време-пространството на черна дупка.

Първо, опънете еластичната материя. Сега вземете малка топка (или топче за игра), която ще е в ролята на фотон светлина и търкулната върху еластична материя, нейната траектория ще симулира изкривяване на светлинен лъч в близост до гравитиращо тяло. И така, ако поставите тежка топка в центъра на платното и търкулнете малката топка, то тя ще следва кривината на повърхността. По същия начин се изкривява светлинният лъч, преминавайки покрай масивни космически обекти. Кривината на траекторията му ще зависи от близостта на светлинния лъч до гравитиращата маса и от това колко е голяма тази маса. Ъгълът на отклонението е пропорционален на масата и обратно пропорционален на разстоянието. Колкото по-еластична е материята и по-тежка топката, илюстрираща гравитиращата маса, толкова по-голяма ще е вдлъбнатината, която би изкривила още повече траекторията на малката топка и в крайна сметка ще я накара да падне върху голямата топка. Така се доближаваме до модела на черната дупка.

Библиография

- Broman, L., Estalella, R. Ros. R.M, *Experimentos en Astronomía*. Editorial Alhambra Longman, Madrid, 1993.
- Dale, A.O., Carroll, B.W, *Modern Stellar Astrophysics*, Addison-Wesley Publ. Comp., E.U.A, 1996.
- Moreno, R, *Experimentos para todas las edades*, Ed. Rialp. Madrid, 2008.
- Pasachoff, J.M, *Astronomy: From the Earth to the Universe*, 6th Edition, Cengage, USA, 2002.
- Rybicki, G.B., Lightman, A.P, *Radiative Processes in Astrophysics*, John Wiley & Sons, EUA, 1979.
- Zeilik, M, *Astronomy-The Evolving Universe*, 8th Ed., John Wiley & Sons, USA, 1997.