# زندگی ستاره ای

**Alexandre Costa, Beatriz García, Ricardo Moreno, Rosa M. Ros**
International Astronomical Union, Escola Secundária de Loulé (Portugal), Universidad Tecnológica Nacional-Regional Mendoza (Argentina), Colegio Retamar (Madrid, Spain), Technical University of Catalonia (Barcelona, Spain).

## خلاصه

برای درک و شناخت چرخه زندگی ستارگان ابتدا باید بدانیم انها چه هستند، چگونه میتوان فهمید که انها چقدر از ما دور هستند، چطور تکامل میابند و تفاوت های میان انها چیست. بوسیله انجام چند ازمایش ساده و مدل سازی میتوان فعالیت هایی که دانشمندان برای مطالعه ترکیب و تکامل ستارگان انجام داده اند را برای دانشجویان و دانش اموزان توضیح داد.

## اهداف

این ورکشاپ مکمل ورکشاپ تکامل ستاره ای NASE است که فعالیت ها و ازمایش های بیشتری با محوریت درک و شناخت تکامل ستاره ها در اختیار شما قرار میدهد. اهداف اصلی این فعالیت عبارت اند از:

- درک تفاوت میان قدر ظاهری و قدر مطلق
- درک نمودار هرتسپرونگ راسل بوسیله ساخت یک نمودار رنگی
- شناخت مفاهیم ابرنواختر، ستاره نوترونی، ستاره پالسار یا تپنده و سیاه چاله

## فعالیت 1: مفهوم اختلاف منظر

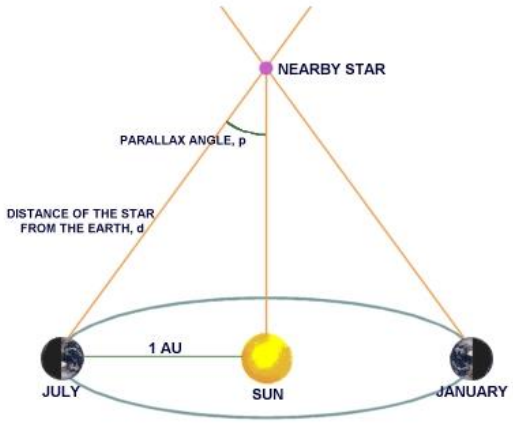
اختلاف منظر مفهومی است که برای محاسبه فواصل در ستاره شناسی استفاده می شود.
ما یک فعالیت ساده را انجام می دهیم که به ما کمک خواهد کرد که مفهوم دقیق اختلاف منظر را بهتر درک کنیم.
برای انجام این ازمایش یک دیوار مشخص را انتخاب کنید که وسیله ای مانند تابلوی عکس یا میز درکنار ان یا بر روی ان قرار داشته باشد. سپس با فاصله ثابت و مشخصی از دیوار بایستید.
ابتدا چشم راست خود را ببندید سپس انگشتتان را مقابل خودتان گرفته و دقیقا در وسط جسم تنظیم کنید. بدون حرکت دادن انگشت چشم راست خود را ببندید و چشم چپتان را باز کنید. خواهید دید که انگشت در زمینه ی دیوار و تابلو حرکت کرده است و دیگر دقیقا در وسط تابلو نیست و به لبه های ان یا خارج از ان رسیده است.

شکل1: ابتدا چشم چپ خود را ببندید و به محل انگشت شصت در زمینه قاب عکس نگاه کنید سپس چشم راست را بسته و همین کار را برای چشم چپ انجام میدهیم.

به همین دلیل است که وقتی از دو شهر با فاصله زیاد بر روی زمین در زمان یکسان به ماه که یک جرم نزدیک است نگاه میکنیم ان را در زمینه ستارگان که بسیار از ما دور هستند با کمی تفاوت مکان میبینیم.
هرچه فاصله بین دو مکان مشاهده بیشتر باشد این اختلاف بیشتر است.

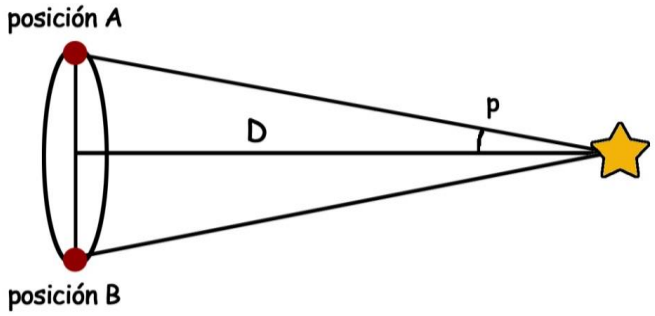
## محاسبه فاصله ستارگان با اختلاف منظر

اختلاف منظر تغییر ظاهری یک شی است هنگامی که از مکان های مختلفی مشاهده میشود. به طوری که به نظر میرسد وقتی که از دو مکان به یک منطقه از اسمان نگاه میکنیم ستاره ی نزدیک تر در زمینه ی ستاره های دورتر جابه جایی ظاهری بیشتری داشته است. بنابراین میتوان فصله تا ستارگان مجاور را تعیین و محاسبه کرد اگر که فاصله دو مکان ناظر بیشینه ترین حالت باشد که در این حالت اختلاف به بیشترین حد خود میرسد، یعنی یک قطر مدار زمین به دور خورشید.




.

زاویه اختلاف منظر p یک تغییر زاویه ای است که هنگام مشاهده یک ستاره از دو مکان که یک فاصله زمین تا خورشید از یکدیگر فاصله دارند ، می بینند.




position B شکل 3: با اندازه گیری زاویه اختلاف منظرp ، می توان ف را محاسبه کرد.

به عنوان مثال اگر یک ستاره نزدیک را با توجه به محل ان در ستاره های پس زمینه که دورتر هستند از موقعیت های A و B از مدار زمین که شش ماه از هم فاصاه دارند مشاهده کنیم میتوان فاصله ستاره یعنی D را با این روش محاسبه کنیم:

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

از انجایی که P یک زاویه کوچک است میتوان به صورت رادیان محاسبه کرد.

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

قاعده مثلث AB / 2 یک فاصله زمین تا خورشید یعنی 150 میلیون کیلومتر است. اگر زاویه اختلاف منظر یعنی p را داشته باشیم ، فاصله با ستاره ، (در واحد کیلومتر) ، D = 150.000.000 / p خواهد بود (با زاویه Pبرحسب رادیان) .
به عنوان مثال اگر زاویه P یک قوس دوم باشد، قاصله از ستاره برابر است با:

$$D = \frac{150\,000\,000}{2\pi/(360\ 60\ 60)} = 30\,939\,720\,937\,064\ km = 3{,}26\ a.l.$$

این واحد مسافتی است که در نجوم حرفه ای استفاده میشود. اگر ستاره ای را با اختلاف منظر یک ثانیه قوسی( در طی 6 ماه) ببینیم، ان ستاره با فاصله 1 پارسک (پار-ثانیه) معادل pc = 3.261 سال نوری از ما قرار دارد. اختلاف منظر کمتر نشان دهنده ی فاصله ی بیشتر ستاره است. رابطه بین فاصله بر حسب پارسک و و اختلاف منظر بر حسب ثانیه قوسی را میتوان با رابطه زیر نشان داد:

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

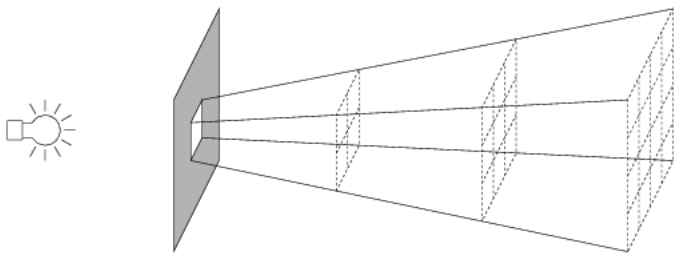
.
دلیل استفاده از این معادله سادگی ان است. به عنوان مثال نزدیک ترین ستاره به ما ستاره ی پروکسیما قنطورس است که اختلاف منظر 0.76 ثانیه قوسی دارد یعنی این ستاره 1.31 پارسک از ما فاصله دارد. یعنی چیزی حدود 4.28 سال نوری. اولین رصد اختلاف منظر یک ستاره (Cygni 61) توسط Besselدر سال 1838 انجام شده است. اگرچه در ان زمان بر روی این مورد که بدلیل فاصله بسیار زیاد ستارگان نمیتوان فواصل انها را با دقت محاسبه کرد شک و تردید بسیاری بود.

.
در حال حاضر ما برای اندازه گیری فواصل ستاره هایی که تا 300 سال نوری ما قرار دارند از اختلاف منظر استفاده میکنیم. برای فاصله های بیشتر اختلاف منظر بسیار ناچیز میشود بنابر این برای محاسبه فاصله باید از روش های دیگری استفاده کنیم. با این حال روش های دیگر هم بر اساس مقایسه با ستارگان دیگر است که فاصله انها بوسیله اختلاف منظر محاسبه شده است. به طور کلی اختلاف منظر بیس و زمینه محاسبه فواصل کیهانیست.

## فعالیت 2: قانون مربع معکوس

با یک ازمایش ساده میتوان رابطه میان درخشندگی(لومینوسیتی)، روشنایی و فاصله را بررسی کرد. این فعالیت نشان خواهد داد که قدر ظاهری تابعی از فاصله است. همانطور که در شکل 11 نشان داده شده است در این ازمایش از یک لامپ و یک کارت (یا یک جعبه) یا یک سوراخ مربعی کوچک در ان استفاده میکنیم. کارت سوراخ را در یک طرف لامپ قرار میدهیم. لامپ به همه جهات تابش میکند. مقدار مشخصی از نور از درون سوراخ عبور میکند و یک صفحه که به موازات با کارت سوراخ قرار دارد را روشن میکند. صفحه روشن شده دارای نقاط نورانی به اندازه سوراخ مربع روی کارت است. مقدار کل نور عبور کرده از سوراخ به فاصله ی ما از صفحه نمایش ندارد ولی با دور کردن کارت از صفحه ای که روی ان نمایش میدهیم میبینیم که با همان مقدار نور ورودی از سوراخ، منطقه بیشتری روی صفحه نمایش روشن شده که روشنایی ان به تبع کاهش یافته است.

برای شبیه سازی منبع نور نقطه ای و کاهش سایه ها میتوانید از یک کارت دیگر با سوراخ کوچکتر نزدیک لامپ استفاده کرد ولی توجه کنید که کارت را به لامپ خیلی نردیک نکنید چون ممکن است اتش بگیرد.



تصویر 4: ازمایش بالا

مشاهده می کنیم وقتی فاصله بین صفحه نمایش و لامپ کم می شود ، ناحیه ای که نور روشن می کند چهار برابر بیشتر می شود. این یعنی شدت نور (نوری که به واحد سطح می رسد) یک چهارم مقدار اصلی می شود.

اگر فاصله سه برابر شود ، ناحیه روی صفحه نمایش که نور در آن پخش می شود 9 برابر بزرگتر می شود ، بنابراین شدت نور یک نهم از مقدار شدت اصلی روی دیوار خواهد بود. بنابراین ، می توان گفت که معکوس شدت متناسب است با مربع مسافت تا منبع نور. به عبارت دیگر ، معکوس شدت متناسب است با مساحتی که تابش نور بر روی دیوار روشن میکند. مساحت کره روشنایی منتشر شده از ستاره $4\pi D^2$ است.

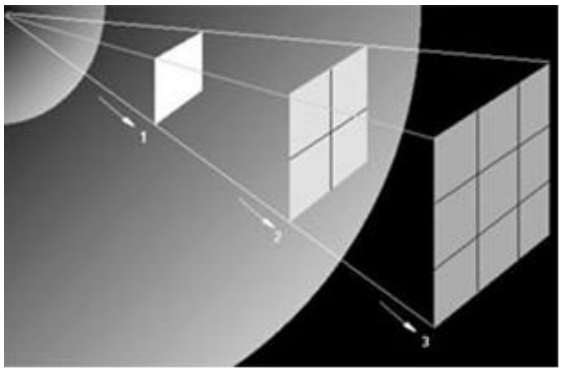
## سیستم قدر

تصور کنید یک ستاره مانند لامپ است. میزان روشنایی به قدرت ستاره یا همان لامپ و فاصله ای که از ان داریم بستگی دارد. با قرار دادن یک برگه کاغذ در مقابل یک لامپ میتوان این موضوع را مشاهده و تایید کرد که میزان نوری که به صفحه کاغذ میرسد به میزان قدرت روشتایی لامپ و فاصله بین ورق،لامپ و دیوار بستگی دارد. نور منتشر شده از لامپ به صورت مساوری روی سطح یک کرده به مرکزیت لامپ در فضا منتشر میشود که مساحت ان $4\pi D^2$ است. بنابر این اگر فاضله بین لامپ و کاغذ یعنی R را دو برابر کنیم، شدت نوری که به کاعد میرسد نصف نیست بلکه یک چهارم است (منطقه ای که نور در ان پخش میشود چهار برابر است) و اگر سه برابر شود شدن نور یک نهم است یعنی مساحت کره ای که نور در ان توضیع میشود نه برابر بیشتر است.

روشنایی ستاره را میتوان به عنوان اینتنسیتی یا شدت یا مقدار انرژی از ان که به واحد یک متر مربع در زمین میرسد تعریف کرد.شکل 5

اگر درخشندگی یا قدرت ستاره را L در نظر بگیریم پس:

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



از انجایی که میزان درخشندگی به شدت و فاصله ستاره بستگی دارد، میتوان مشاهده کرد که یک ستاره که ذاتا کم نور است ولی در فاصله نزدیک از ما قرار دارد به اندازه یک ستاره بسیار درخشان تر ولی دورتر میدرخشد.

هیپارکوس در قرن دوم پیش از میلاد اولین کاتالوگ ستاره ای جهان را ساخت. او درخشان ترین ستاره هارا به عنوان ستاره هایی با قدر 1 و کم نور ترین انها را ستاره هایی با قدر 6 طبقه بندی کرد. او سیسامی برای طبقه بندی روشتایی ستاره ها ابداع کرد که امروزه نیز از ان استفاده میشود. اگرچه با مرور زمان در این تقسیم بندی نسبت به ان زمان که با چشم غیر مسلح انجام شده بود تکامل و پیشرفت هایی اعمال شده است.
یک ستاره با قدر 2 از یک ستاره با قدر 3 درخشان تر است. ستاره هایی با قدر 0 وجود دارند و حتی برخی ستارگان قدرهای منفی نیز دارند مانند ستاره شباهنگ که قدری حدود -1.5 دارد. با تعمیم دادن این تقسیم بندی به اجرام پرنور تر زهرا قدر 4- ، ماه کامل قدر 13- و خورشید قدری در حدود 26.8- دارد.

این مقادیر قدر ظاهری را یعنی درخششی از که روی زمین از ستاره ها به ما رسیده است را با m نشان میدهیم. در این مقیاس قاعده تقسیم بندی این است که ستاره ای با قدر 1 ، 2.51 برابر درخشان تر از ستاره ای با قدر 2 است و این ستاره 2.51 برابر درخشان تر از ستاره ای با قدر 3 است. این معادله نشان میدهد که اگر بین دو ستاره 5 قدر اختلاف وجود داشته اشد درخشش ان ها 2.51 به توان پنج یعنی ستاره ای با قدر کمتر در حدود 100 برابر درخشش بیشتری نسبت به ستاره با قدر بیشتر است:

or

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

در معادله زیر روش محاسبه قدر ستاره m بوسیله شار وارد شده از ان به تلسکوپ است. در واقع m از شار f و یک ثابت c وابسته به ویژگی های رصد محاسبه میشود.

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

این معادله به ما میگوید که هرچه شار بیشتر باشد قدر ستاره نیز منفی تر خواهد بود.
قدر مطلق M همان قدر ظاهریست وقتی که پارامتر فاصله از ان حذف شده باشد یعنی همه ستاره ها در قاصله ثابت 10 پارسک از ما قرار گرفته باشند.

برای تبدیل قدر طاهری به قدر مطلق باید فاصله دقیق از ستاره را بدانیم. این یک کار مشکل است بدلیل اینکه تعیین دقیق فاصله در ستاره شناسی معمولا کار دشواریست. اما اگر فاصله بر حسب پارسک

مشخص باشد، میتوان قدر مطلق ستاره را با استفاده از معادله زیر بدست اورد.

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

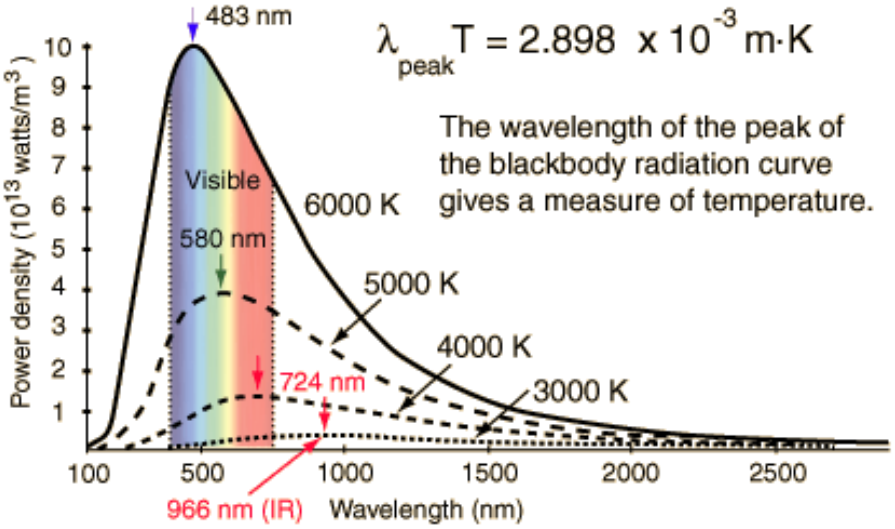
## رنگ ستاره ها

میدانیم که ستارگان رنگ های متفاوتی دارند. حتی در نگاه اول و با چشم غیر مسلح نیز میتوان تفاوت هایی بین رنگ ستارگان قائل شد. اما این اختلاف رنگ زمانی که با دوربین های دوچشمی یا بزار رصدی دیده میشوند اشکار در است. ستاره ها با توجه به رنگ

ان ها طبقه بندی میشوند. این طبقه بندی رده طیفی ستاره نامیده شده و به این ترتیب طبقه بندی میشوند: O, B, A, F, G,K,M (شکل 6).

رده طیفی ستاره ها با استفاده از رنگ انها (شکل 6)

طبق قانون وین (شکل 7) ، یک ستاره با حداکثر شدت خود و دمای بالا دارای رنگ ابیست، درحالی که اگر نور ستاره به رنگ قرمز باشد نشان دهنده این است که ستاره ی خنک تری است. به بیان دیگر رنگ ستاره نشان دهنده دمای سطح ستاره است.

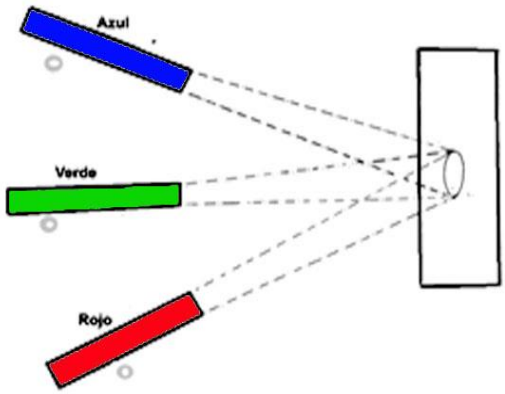


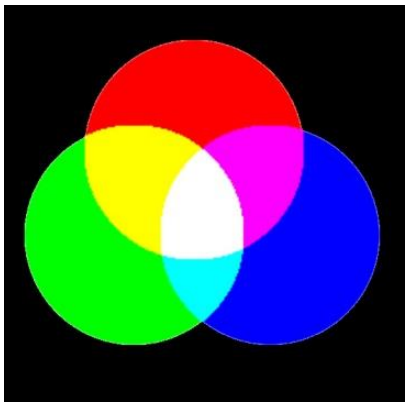

تصویر 7: نمودار درخشش و رنگ و رمای ستاره

## فعالیت 3: رنگ ستاره ها

ابتدا از یک لامپ رشته ای با مقاومت متغییر برای نشان دادن تابش سیاه استفاده میکنیم. دانش اموزان با قرار دادن فیلترهای رنگی بین لامپ و طیف سنج میتوانند طول موج نور منتقل شده از فیلتر ها را بررسی کنند. با مقایسه نتیجه ی ان با طیف کامل لامپ، دانش اموزان میتوانند مشاهده و درک کنند که فیلتر ها طول موج های خاصی را جذب میکنند. دانش اموزان میتوانند از دستگاهی شبیه به شکل 3 که دارای چراغ های دارای رنگ قرمز، ابی، سبز و مجهز به پتانسیومتر است برای درک رنگ ستارگان است استفاده کنند.
این وسیله با استفاده از لامپ های ساده نیز قابل ساخت است. قسمت بیشتر لامپ را با کاغذ تیره یا کاغذ ساختمانی بپوشانید به طوری که نوری از ان عبور نکند. بخشی از لامپ که کاغذ مات نچسباندید و نور از ان عبور میکند را با سلفون های شفاف رنگی بپوشانید. با استفاده از این دستگاه میتوانید شکل 2 را انالیز و شبیه سازی کنید و تلاش کنید که اثر افزایش دمای ستاره را در تغییر رنگ ان بازسازی کنید.
در دمای پایین ستاره فقط مقدار قابل توجهی نور قرمز تابش میکند.

اگر دما افزایش یابد، طول موج هایی به وجود خواهند امد که از فیلتر سبز نیز عبور کنند. با اقزایش این روند رنگ ستاره از نارنجی به زرد تغییر رنگ میدهد. با اقزایش دما میزان طول موج هایی که از فیلتر ابی عبور میکنند بیشتر شده و اهمیت بیشتری در تعیین رنگ ستاره پیدا میکنند. نور این رنگ ستاره ابتدا رو به ابی و نهایتا به رنگ سفید میل میکند.
اگر شدت طول موج های ابی به رشد خود ادامه بدهند و از شدت طول موج های عبوری از قرمز و سبز به میزان قابل توجهی بیشتر بشود ستاره ابی میشود. برای نشان دادن این مرحله اخر اگر از حداکثر توان لامپ ها برای تولید رنگ سفید استفاده میکنید باید شدت لامپ قرمز و سبز را کاهش دهید.



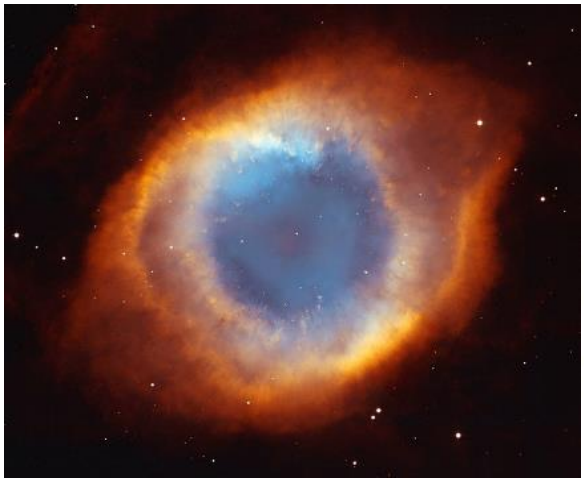



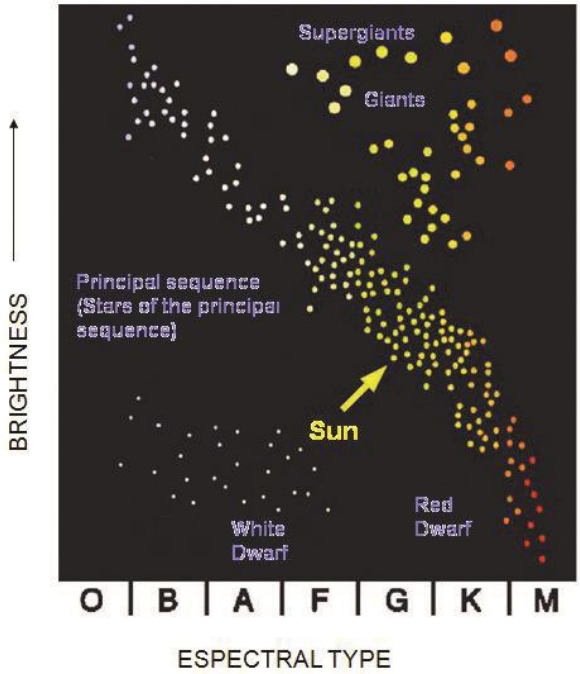
دستگاهی برای تولید رنگ ها بوسیله نور ها برای درک بهتر رنگ ستارگان

# چطور درمیابیم که ستارگان تکامل دارند؟

ستارگان را میتوان در نموداری به نام هرتسپرونگ راسل طبقه بندی کرد که نموداری است بر حسب شدت ستاره ( درخشندگی یا قدر مطلق) و درجه حرارت و رنگ ستاره.
ستارگان خنک درخشندگی کمتری دارند ( پایین سمت راست نقشه) و ستاره های داغ روشن تر هستند و از درخشندگی بیشتری برخوردارند (بالا سمت چپ تقشه).
این روند از ستاره ها که از درخشندگی کم و دمای خنک تا درخشندگی زیاد و دمای زیاد را در بر میگیرد رشته اصلی نام دارد. برخی از ستارگان که به تکامل بیشتری رسیده اند از رشته اصلی خارج میشوند. ستارگانی که بسیار داغ هستند اما درخشنذگی کمی دارند کوتوله های سفید هستند.ستاره هایی که درجه حرارت پایینی دارند اما بسیار درخشان هستند اصطلاحا ابرغول هستند.

با گدشت زمان یک ستاره میتواند در نمودار HR تکامل یافته و حرکت کند. به عنوان مثال خورشید در پایان عمر خود متورم شده و به یک غول سرخ تبدیل میشود، سپس با دور کردن لایه های بیرونی خود سرانجام مانند شکل 9b تبدیل به یک کوتوله سفید میشود.

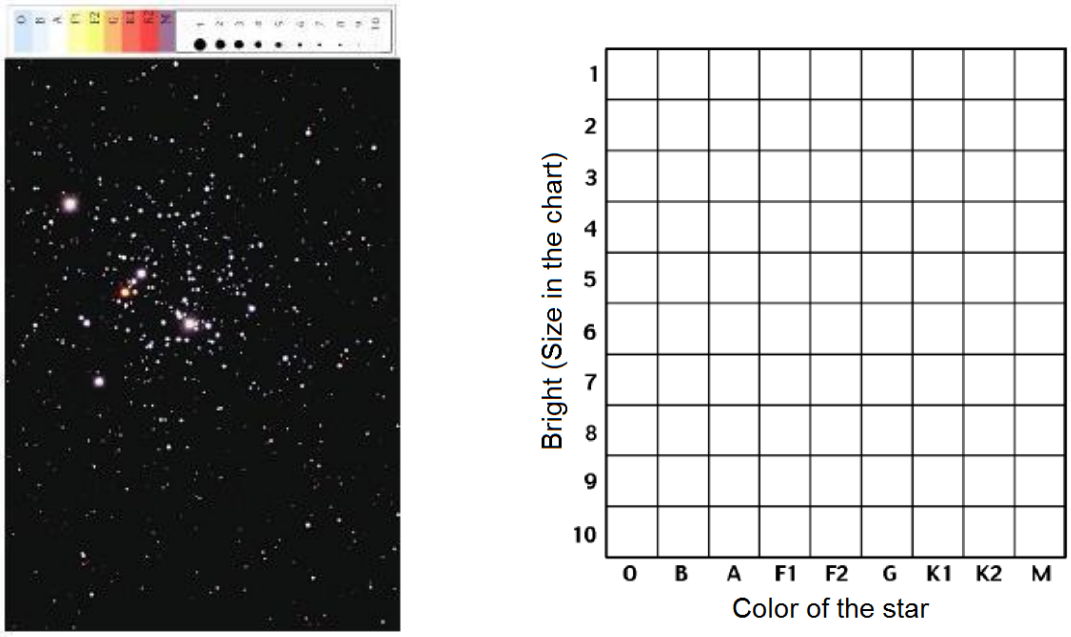





شکل 9a نمودار HR و شکل 9b نشان میدهد که خورشید جو بیرونی خود را از دست داده و تبدیل به یک کوتوله سعید میشود مانند انچه در مرکز این سحابی سیاره نما وجود دارد.

# فعالیت 4: سن خوشه های باز

تصویر شکل 10 (تعدادی از ستارگان) از خوشه جعبه جواهرات را در صورت فلکی صلیب جنوبی در نمودار زیر انالیز کنید.




شکل 10 خوشه جعبه جواهر

بدیهی است که رنگ همه ستارگان یکسان نیستند. بسیار مشکل است که بگوییم یک خوشه ستاره ای کجا به پایان میرسد. در شکل 10 جایی که فکر میکنید لبه خوشه است را مشخص کنید.

در همان شکل 10 جایی که فکر میکنید مرکز خوشه است را علامت بزنید. سپس با استفاده از خط کش مربعی به ضلع 4 سانتی متر با مرکزیت X رسم کنید. میزان روشنایی ستاره ای مه نزدیک گوشه بالا سمت چپ مربع شما قرار دارد را اندازه گیری کنید (بر اساس اندازه ان در مقایسه با اندازه های مقایسه ای که در راهنمای حاشیه شکل 4 امده). سپس رنگ ستاره را تخمین بزنید (راهنمای رنگ ستاره در سمت چپ شکل 10 امده است). با یک نقطه رنگ و قدر (اندازه) ستاره اول خود را روش برگه 11 علامت بزنید.

توجه داشته باشید که محور X مربوط به رنگ و محور Y مربوط به درخشش (اندازه یا قدر) ستاره است.

به نظر میرسد که ستاره های خوشه ی جعبه جواهرات که ان را انالیز کردیم از الگوی خاصی پیروی میکنند. ستاره شناسان انها را Field star مینامند. اگر وقت دارید سعی کنید چند ستاره از زمینه ان نیز برای خود تخمین بزنید. برای اینکار مانند فعالیت ثبل عمل کنید و این

بار به جای نقطه از x استفاده کنید. میبینید که بنظر نمیرسد که ستاره های زمینه از الگوی خاصی پیروی کنند.

بیشتر ستارگان در بخش خاص رشته مانندی از نمودار قرار دارند که از بالا سمت چپ نمودار به پایین سمت راست نمودار کشیده شده است. ستاره هایی با جرم کمتر ستاره هایی هستند که دمای کمتری داشته و قرمز به نظر میرسند. بزرگترین ستاره ها گرم ترین و درخشان ترین انها هستند که به رنگ ابی دیده میشوند. این رشته در نمودار HR رشته اصلی نامیده میشود. این ستارگان در رشته اصلی در دسته بندی هایی از کلاس O (پر جرم ترین، روشن ترین و داغ ترین در حدود 40000 درجه کلوین) تا کلاس M (کم جرم ترین، کم نور ترین و دمای سطحی کمتر درحدود 3500 درجه کلوین) قرار میگیرند.

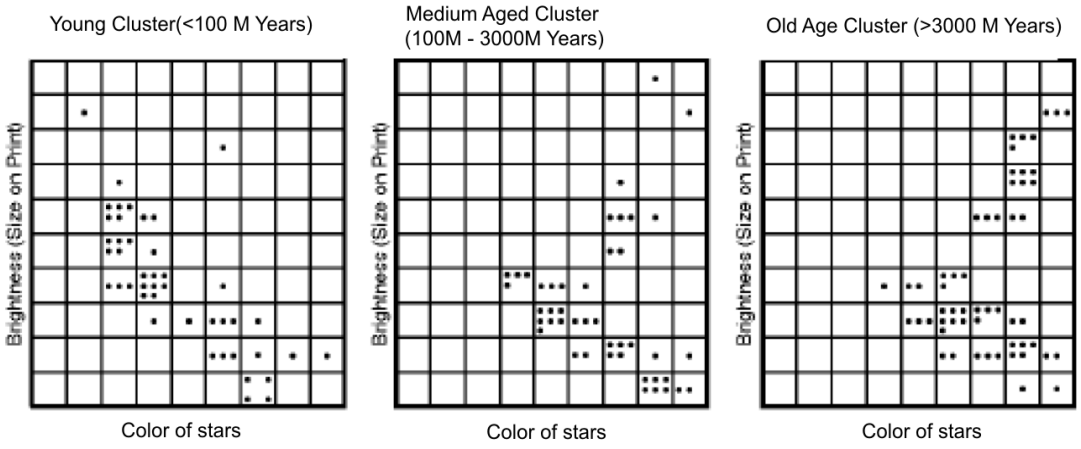
در بیشتر طول عمر یک ستاره انرژی تولید شده در داخل ستاره که یک انرژی از داخل رو به بیرون ستاره است با گرانش ستاره که یک نیروی از بیرونرو به داخل است برابری میکند ئ همین برابری باعث تعادل و عدم فروپاشی ستاره میشود.

ولی هنگامی که ستاره از فرایند سوختن متوازن خود خارج میشود، ای تعادل شکسته میشود و گرانش عظیم ستاره باعث فروپاشی ستاره میشود و ستاره در نهیات میمیرد.

انتقال ستاره از مرحله اخر رشته اصلی به فروپاشی بخشی از زندگی ستاره است که مرحله غول سرخ نامیده میشود. ستاره های غول سرخ ستاره های بسیار روشنی هستند زیرا قطر های انها میتواند بین 10 تا 300 برابر بزرگ تر از خورشید باشد.
غول های قرمز نیز به رنگ سرخ هستند زیرا دمای کمی دارند. در نمودار انها در دسته K یا M قرار میگیرند ولی بسیار روشن هستند. سنگین ترین و عظیم ترین ستارگان سوخت خود را زودتر از ستارگان دیگر تمام میکنند و اولین کسانی هستند که رشته اصلی را ترک میکنند و به غول های سرخ تبدیل میشوند. بدلیل اندازه های بزرگ انها که میتواند حتی 1000 برابر قطر خورشید باشند، غول های سرخی با جرم بین 10 تا 50 برابر جرم خورشید ابرغول سرخ نامیده میشوند. غول های سرخ گسترش یافته و خنک شده و به مرور زمان قرمز و روشن تر میشوند به همن دلیل در سمت راست بالای نمودار قرار میگیرند. با بالا رقتن سن خوشه تغداد ستاره هایی که رشته اصلی را طب کرده و به سمت غول سرخ شدن میروند رفته رفته بیشتر میشود. بنابر این سن یک خوشه ستاره ای را میتوان با رنگ بزرگترین و درخشان ترین ستاره که هنوز در رشته اصلی باقی مانده است مشخص کرد.

بسیاری از ستارگان در خوشه های قدیمی تر از مرحله غول های گازی فراتر رفته و وارد مرحله دیگری از تمانل میشوند: انها تبدیل به کوتوله سفید میشوند. کوتوله های سفید ستارگان بسیار کوچکی هستند که اندازه ای در حدود زمین دارند.درخشش انها بسیار ضعیف است به همین دلیل در تصویر خوشه جعبه جواهرات قابل مشاهده نیستند. ایا میتوانید با مقایسه نمودارهای خوشه های ستاره ای در سنین مختلف

که در شکل های 12a , 12b , 12c نشان داده شده است، سن خوشه جعبه جواهرات را از نمودار خود در شکل 11 تخمین بزنید؟

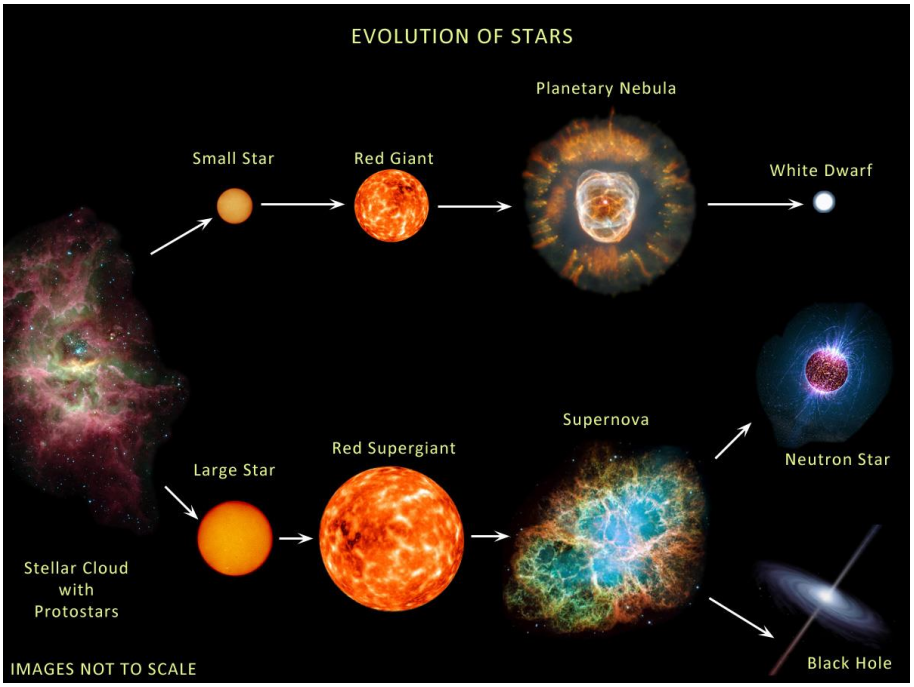



اگر نمودار HR و رابطه بین رنگ(دمای سطح)، روشنایی و سن ستاره هارا درک کنید، میتوانید نحوه تکامل ستاره ها و خوشه های ستاره ای را نیز به طور کامل درک کنید. میتوانید زندگی ستاره های کلاس O و B را با زندگی ستاره های A، F، G، K و M مقایسه کنید. میتوانید ببینید که ستارگان با همان جرم حتی در خوشه های ستاره ای دیگر نیز به همین صورت تکامل میابند. با همین روش میتوانید اختلاف سن بین خوشه های مختلف ستاره ای را با استفاده از نمودار HR با یکدیگر مقایسه کنید.
به همین روش است که میتوانید بگویید شکل 12a یک خوشه جوان را نشان میدهد(دارای ستاره های O و B در رشته اصلیست و میدانیم که این ستاره ها به سرعت به ابر غول های سرخ تکامل پیدامیکنند.) و شکل 12c یک خوشه قدیمی را نشان میدهد ( تقریبا فقط ستاره هایی در کلاس M و K در رشته اصلی دارد و بسیاری از انها در مرحله غول قرمز هستند).
اکنون میتوانیم از خودمان بپرسیم پس موقعیت خورشید در نمودار هرتسپرونگ راسل چه خواهد بود؟
خورشید ستاره ای است با دمای سطحی 5870 درجه کلوین و به همین دلیل زرد به نظر میرسد. این ویژگی با کلاس G2 در محور x های نمودار مطابقت دارد. خورشید در مرحله ایست که در هسته ی ان هیدروژن به هلیم تبدیل میشود . مانند بسیاری از ستاره های دیگر همچنان در رشته اصلی و در کلاس 5 لومینوسیتی یا درخشش قرار دارد.

## مرگ ستاره ای

پایان عمر یک ستاره کاملا به جرم ان بستگی دارد، به شکل 13 توجه کنید.

در یک نقطه خاص در روند تکامل زندگی ستارگان ، ستارگان بسیار پر جرم تر از نمودار HR ناپدید میشوند. در حالی که ستارگان کم جرم به کوتوله سفید تبدیل میشوند، این ستارگان عظیم زندگی خود را به عنوان یکی از خشن ترین و مهیب ترین پدیده های جهان به پایان میرسانند: ابرنواخترها.
بقایای این نوع پدیده ها اجرامی خواهند بود که هیچگونه حرارتی از خود نشر نمیکنند( ستاره های پالسار یا سیاه چاله ها) بنابر این در نمودار HR قابل دیدن نیستند.




تکامل ستاره ها وابسته به جرم انهاست

## ابرنواختر چیست؟

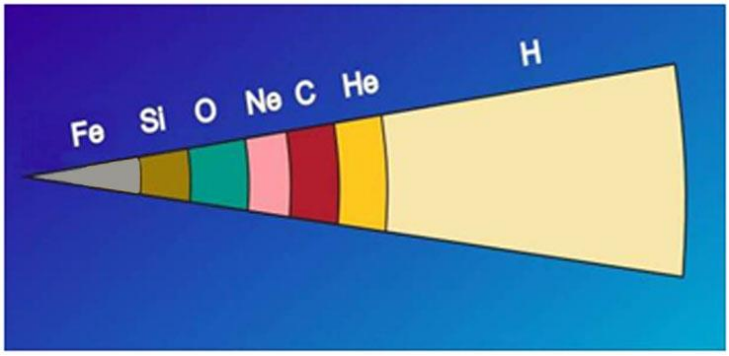
مرگ یک ستاره بسیار عظیم است که در رشته اصلی هیدروژن هارا تبدیل به هلیم کرده و سپس به سمت تولید کربن و به ترتیب عناصر سنگین در را در پیش گرفته و نهایتا به اهن رسیده. ادامه فرایند از اهن به بعد ممکن نیست زیرا در تمام فرایند مواد های قبلی انرژی ازاد میشد ولی برای سوختن اهن باید انرژی به جای ازاد شدن، مصرف بشود.

همجوشی عناصر مختلف تا زمان پایان یافتن منبع ان عنصر ادامه میابد. این همجوشی به بیرون از هسته پیش میرود و به مرور زمان ستاره مانند یک پیاز با عناصر مختلف لایه بندی میشود.(به شکل 14b نگاه کنید) . هرچه به هسته نزدیک بشویم عناسر سنگین و سنگین تر میشوند.

یک ستاره با 20 برابر جرم خورشید مراحل زیر را در زندگی خود دارد:

10 ملیون سال هیدروژن در هسته خود میسوزاند
300 سال کربن میسوزاند
2 روز هم زمان برای مصرف سیلیکوت دارد که در این زمان احتمال انفجار ابرنواختر بسیار زیاد است

وقتی ستاره سرانجام به هسته ی اهنی میرسد، فعالیت های هسته ای متوقف میشود و ادامه واکنش های هسته ای امکان پذیر نیست. بدون وجود فشار انرژی رو به بیرون ناشی از فرایند های هسته ای، فروپاشی ستاره اجتناب ناپذیر است، بدون اینکه احتمال فعالیت هسته ای دیگری باشد.
هسته های اتم ها و الکترون ها در این فرایند بسیار به هم فشار اورده و نوترون ها را تشکیل میدهند و قسمت مرکزی هسته به یک ستاره نوترونی تبدیل میشود.




شکل 14b بایه های یک ستاره قبل از وقوع شکل 14a باقیمانده ابرنواختر ابرنواختر

ستارگان نوترونی به قدری متراکم هستند که یک قاشق چایخوری از ان به اندازه تمام ساختمان های یک شهر بزرگ وزن دارد.
زمانی که نوترون ها به هم فشرده میشوند دیگر هیچ حایی برای انقباض بیشتر وجود ندارد. ذراتی از لایه های بیرونی ستاره که با سرعت حدود یک چهارم سرعت نور به سمت هسته میایند ناگهان با همان سرعت به ستاره نوترونی تشمیل شده در مرکز برخورد میکنند و ناگهان همان جا متوقف میشوند. این امر باعث میشود که انها مانند یک موج شوک مانند به عقب برگردند و درنتیجه یکی از پر انرژی ترین فرایندهای شناخته شده در جهان یعنی انفجار یک ستاره (شکل 14a ) را تشکیل بدهند.

در طی این بازگشت انرژی ها به حدی زیاد هستند که عناصر سنگین تر از اهن در ان زمان ایجاد میشود ( مانند طلا و سرب و اورانیوم و ...)
این عناصر که با شدت در انفجار بوجود امده اند به همراه تمام مواد دیگر به بیرون از ستاره میایند. در مرکز این مواد رها شده یک ستاره نوترونی با سرعت زیاد در حال چرخش است.
و یا اگر ستاره اصلی به اندازه کافی بزرگ باشد اکنون یک سیاهچاله تشکیل شده است.

# فعالیت 5: شبیه سازی یک انفجار ابرنواختر

هنگامی که یک ستاره درحالت ابرنواختر منفجر میشود، اتم های نوری در لایه های بیرونی ستاره به سمت عناصر سنگین تر در قسمت مرکزی ستاره قرومیروند و در نهایت پس از رسیدن به هسته ی مرکزی جامد ستاره، با جهشی بسیار بزرگ از ستاره دور میشوند.

شکل 15:.
توپ تنیس و بسکتبال را همزمان رها کنید.

یک مدل بسیار ساده از این فرایند را میتوان با استفاده از یک توپ بسکتبال و یک توپ تنیس مشاهده کرد. با انداختن انها روی یک کف سخت مانند کف اتاق میتوان این فرایند را شبیه سازی کرد(مانند شکل 15 توپ تنیس را روی توپ بسکتبال بگیرید و همزمان رها کنید)
در این ازمایش کف زمین هسته ی ستاره، توپ بسکتبال اتمی که از هسته به عقب رانده میشود و توپ تنیس یک اتم نور است.

برای ارائه این ازمایش دو توپ را روی هم قرار بدهید و در بالاترین ارتفاع ممکن در دستتان بگیرید و هم زمان رها کنید.
ممکن از فکر کنید که توپ ها با همان ارتفاع پرتاب به بالا برمیگردند یا به دلیل اصطکاک سطح از انرژی انها کم میشود ولی میبینید که نتیجه این ازمایش بسیار تعجب اور است.

وقتی دو توپ را رها می کنید ، تقریباً همزمان به زمین می رسند. توپ بزرگ تقریباً با همان سرعتی که هنگام رسیدن به کف داشت ، به عقب برمیگردد. در آن لحظه با توپ تنیس کوچکی که با همان سرعت توپ بسکتبال در حال سقوط است برخورد می کند. توپ تنیس بسکتبال ان را با سرعت بالایی پرتاب می کند و بسیار بالاتر از ارتفاعی که توپ ها از آن رها شده اند ، می رسد. اگر این آزمایش را با استفاده از تعداد زیادی توپ حتی سبک ترتکرار کنید، سرعت بازگشت آنها فوق العاده خواهد بود

در هنگام ازمایش توپ تنیس به دو برابر ارتفاعی که توپ ها از ان رها شده اند میرسد، مراقب باشید اگر در خانه این ازمایش را انجام میدهید چیزی را نشکنید.

این ازمایش را میتوان در کلاس یا محیط های دیگر نیز انجام داد اما ترجیحا باید در بیرون از منزل انجام بشود. میتوان توپ ها را از یک پنجره نیز رها کرد ولی در این صورت مطمئن نخواهیم بود که توپ ها دقیقا عمودی خواهند افتاد و توپ ها میتوانند با سرعت بسیار زیاد در جهت غیر قابل پیش بینی بجهند.

در بعضی اسباب بازی فروشی ها یا موزه های علمی نوعی وسیله وجود دارد که بر مبنای همین قائده کار میکند. این وسیله از چهار توپ پلاستیکی کوچه با اندازه های مختلف تشکیا شده است که توسط یک محور به هم متصل اند. توپ های کوچکتر شلیک میشوند و پس از برخورد با زمین دوباره به حالت اول خود برمیگردند.

## ستاره نوترونی چیست؟

یک ستاره نوترونی بقایای ستاره ای بسیار عظیم است که در هم فروریخته و لایه های بیرونی آن را در اثر انفجار ابرنواختر دور شده است. ستارگان نوترونی معمولاً از چند ده کیلومتر بزرگتر نیستند. همانطور که از نام انها پیداست ،از نوترون هایی تشکیل شده اند که با یک چگالی باورنکردنی در کنار هم جمع شده اند به طوری که یک انگشت کوچک از این ماده میلیون ها تن وزن دارد.
اگر بقایای ابرنواختری بین 1.44 تا 8 برابر خورشید باشد یک ستاره نوترونی شکل میگیرد

## ستاره تپنده یا پالسار چیست؟

ستاره پالسار یک ستاره نوترونیست که با سرعت بسیار زیاد درحال چرخش است(شکل 16).
هنگامی که یک ستاره عظیم متلاشی میشود، لایه های بیرونی به سمت هسته سقوط میکنند و به دلیل حفظ حرکت زاویه ای، شروع به چرخش با سرعت بیشتر میکند. این حرکت شبیه حرکت یک اسکیت باز است هنگامی که بازوهای خود را به سمت خود جمع کرده و با سرعت بسیار زیاد به دور خودش میچرخد.

میدان مغناطیسی ستاره در راستای محور خود، تابش سینکروترون الکترومغناطیسی قوی ایجاد میکند. اما از انجایی که محور میدان مغناطیسی معمولا با محور چرخش مطابقت ندارد(مانند زمین)، ستاره نوترونی در حال چرخش مانند یک فاموس دریایی غول پیکر عمل میکند.
اگر زمین در جایی از مسیر انتشار ستاره پالسار ثرار بگیرد ما پالس ان را با یک تناوب منظم میبینیم.
در سال 1967 ، bell و hewish اولین ستاره پالسار را کشف کردند. سیگنال پالس از نقطه‌ای از فضا به وجود آمد و دریافت شد که در نور

مرئی هیچ چیزی در ان مشاهده نشده است. تکرار سریع پالس بسیار چشمگیر بود : چندین بار در ثانیه با دقت شگفت انگیز.

شکل 16: یک ستاره نوترونی در حال چرخش

.
در ابتدا تصور میشد که این پالس ها سیگنال هایی هستند که از طرف فرازمینی ها برای ما ارسال شده اند.سپس منابع رادیویی بسیار تکان دهنده دیگری مانند مرکز سحابی خرچنگ کشف شد. دانشمندان میدانستند که این سحابی توسط یک ابرنواختر بوجود امده است پس سرانجام توانستند منبع همه این پالس ها را توجیه کنند.

پالسار PSR B1937 + 21 یکی از سریعترین پالسار های شناخته شده است که حدودا بیش از 600 بار در ثانیه به دور خودش می چرخد. قطری حدود 5 کیلومتر دارد و اگر 10 درصد سریعتر بچرخد ، توسط نیروی گریز از مرکز درهم شکسته میشود.
هویش در سال 1974 به این خاطر برنده ی جایزه نوبل شد.

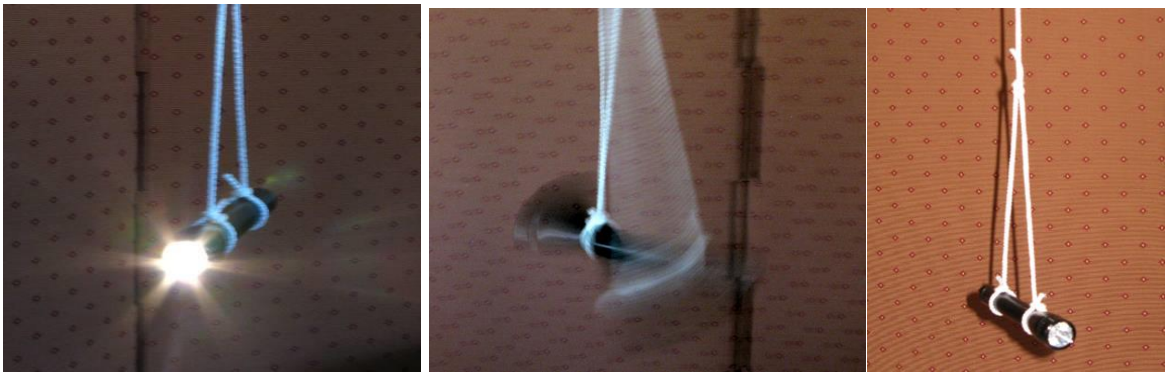
یک ستاره پالسار خیلی جالب دیگر یک سیستم باینری به نام PSR 1913+16 در صورت فلکی عقاب است. حرکت کداری ستارگان در میدان گرانشی بسیار شدید و تغییرات کوچک در انرژی دریافتی باعث دستیابی به این کشف شد. راسل هالس و جوزف تیلور این سیستم را مورد مطالعه قرار داده و پیش بینی های بسیاری از نظریه نسبیت از جمله انتشار امواج گرانشی را تأیید کرده اند. این دو آمریکایی در سال 1993 به دلیل تحقیقات خود موفق به دریافت جایزه نوبل شدند.

## فعالیت 6: شبیه سازی ستاره پالسار

ستاره پالسار یک ستاره نوترونی بسیار سنگین است که با سرعت زیاد به دور خودش میچرخد. میدان مغناطیسی ستاره در راستای محور خود،

تابش الکترومغناطیسی قوی ایجاد میکند. اما از انجایی که محور میدان مغناطیسی معمولا با محور چرخش مطابقت ندارد(مانند زمین)، ستاره نوترونی در حال چرخش مانند یک فاموس دریایی غول پیکر عمل میکند. اگر زمین در جایی از مسیر انتشار ستاره پالسار قرار بگیرد ما پالس ان را با یک تناوب منظم در ثانیه میبینیم

میتوانیم ستاره پالسار را با یک چراغ قوه شبیه سازی کنیم.برای این کار چراغ قوه را روشن کرده و از یک بند اویزان میکنیم. سپس مانند شکل 17 شروع به چرخاندن ان میکنیم.هر زمان که نور چراغ به ما برسد ما ان را مانند یک پالس مشاهده میکنیم.
اگر چراغ قوه را کمی خم کنبد له طوری مه در راستای شما نباشد دیگر نمیتوانید هیچ نوری از ان دریافت کنید. پس برای دریافت پالس های یک ستاره پالسار باید دقیقا در مسیر ان قرار داشته باشیم.



شکل 17

## سیاه چاله چیست؟

اگر یک سنگ را به بالا پرتاب کنیم، جاذبه کم کم سرعت ان را کم میکند تا اینکه دوباره ان را به زمین برگرداند. اگر سنگ را با سرعت اولیه بیشتری پرتاب کنیم سنگ مدت زمان بیشتری را رو به بالا طی میکند و اگر سنگ را با سرعت 11 کیلومتر بر ثانیه یعتی سرعت قرار از زمین به بالا پرتاب کنیم سنگ دیگر به زمین باز نخواهدگشت(با فرض نبود اصطکاک هوا)
اگر زمین با حفظ تمام جرمش در خود فروبریزد و چگال و چگال تر شود، سرعت قرار از ان افزایش پیدا میکند زیرا ما به مرکز زمین نزدیک تر شده ایم. اگر زمین به اندازه شعاع 0.8 سانتی متر در خود فروریخته و فشرده بشود سرعت فرار ان از سرعت نور نیز بیشتر میشود. از انجا که سرعت هیچ چیز نمیتواند از سرعت نور بیشتر بشود، هیچ چیز قادر به فرار از زمین نخواهد بود و زمین به اندازه یک سنگ مرمر ریز شده و تبدیل به یک سیاهچاله میشود.

از لحاظ تئوری ، سیاهچاله ها می توانند جرم های بسیار کمی داشته باشند. در واقع ، تنها یک مکانیزم شناخته شده وجود دارد که می تواند جرم را با تراکم بالا در یک نقطه متمرکز کند: فروپاشی گرانشی.

برای اینکه سقوط گرانشی اتفاق بیفتد ، جرم بسیار زیادی مورد نیاز است. میدانیم که ستاره های نوترونی بقایای ستاره هایی با جرم 1.44 تا حدود 8 برابر جرم خورشیدی هستند.
با این حال ، اگر ستاره عظیم تر و سنگین تر باشد ، جاذبه ان آنقدر قوی است که فضای داخلی آن ممکن است تا زمانی که به یک سیاه چاله تبدیل شود ، به ریزش ادامه دهد.
بنابراین ، این نوع سیاه چاله دارای جرم چندین برابر بزرگتر از خورشید ما خواهد بود. یک سنگ مرمر کوچک از ماده ساخته شده از این ماده تراکم به اندازه کل کره زمین وزن خواهد داشت.

اگرچه ما نمی توانیم مستقیماً آنها را مشاهده کنیم ، اما ما از چندین نامزد بسیار قوی سیاهچاله بودن را از طریق انتشار مواد در اطراف سیاهچاله کشف کرده ایم . به عنوان مثال ، درست در مرکز کهکشان ما چیزی نمی بینیم ، اما می توانیم با سرعتی باورنکردنی حلقه ای از چرخش گاز را که در اطراف مرکز کهکشان قرار دارد ،مشاهده کنیم.
تنها توضیح احتمالی این است که در مرکز این حلقه جرم نامرئی بزرگی وجود دارد که وزن آن به اندازه سه یا چهار میلیون برابر خورشید است.
این جرم تنها می تواند یک سیاه چاله باشد ، با شعاع شوارتزیلد کمی بزرگتر از خورشید ما. این نوع سیاهچاله ها که در مرکز بسیاری از کهکشان ها واقع شده اند ، سیاه چاله های فوق سنگین نامیده می شوند.

## فعالیت 7: شبیه سازی انحنای فضا و سیاه چاله

شبیه سازی انحنای دو بعدی فضا ایجاد شده توسط یک سیاه چاله با استفاده از یک تکه ورق الیاف الاستیک به نام lycraیا یک پارچه یا تور بسیار اسان است. شکل18

شکل 18: مسیر توپ تنیس یک خط مستقیم بود اما منحنی شده است.

ابتدا پارچه را مانند تصویر به کمک هم بگیرید. سپس در قسمتی نزدیک به لبه پارچه یک توپ یا یک سنگ کوچک را روی پارچه سر بدهید. توپ یا سنگ یا تیله مانند یک فوتون نور است. کسیر حرکت ان را در این حالت ببینیدو حالا یک توپ سنگین تر را روی مرکز پارچه بگذارید سپس دوباره توپ کوچک را به همان حالت قبل رها کنید. اکنون به مسبر حرکت منحنی ان دقت کنید. این شبیه سازی مسیر پرتوی نوری در یک فضای خمیده ناشی از وجود یک توده گرانشی است.
میزان منحنی پرتوی نور بستگی به این دارد که پرتوی نور چقدر به منبع گرانش نزدیک می شود و این منبع چقدر سنگین است.
زاویه انحراف رابطه مستقیم با جرم و رابطه معکوس با فاصله دارد.
اگر کشیدگی اطراف پارچه را کمی ازاد و شل تر کنیم ، یک حفره گرانشی عمیق تر شبیه سازی میشود ، و این باعث می شود تا توپ کوچکتر از آن سخت تر خارج شود این یک مدل سیاه چاله است..

# Bibliography


- 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.