

نخستین درس در ستاره شناسی - بخش سوم

درس پنجم: کوتوله های قهوه ای

دکتر حسین شناور



پژوهش سرای دانش آموزی امام جعفر صادق (ع) گیلان



مدیریت آموزش و پرورش شهرستان گلبهار

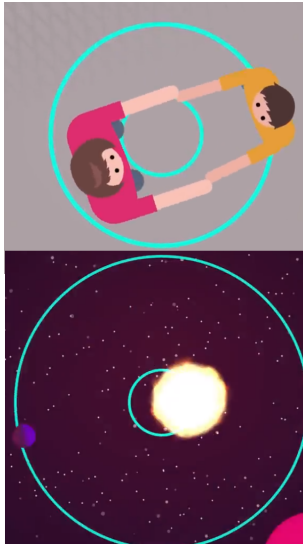
- این مجموعه درس برای آشنایی مقدماتی دانش آموزان و علاقمندان فارسی زبان با مباحث نجوم، اختر فیزیک و کیهان شناسی طراحی شده است. هدف اصلی این مجموعه درس، افزایش دانش علاقمندان به ستاره شناسی است؛ هرچند، به برخی مهارت های مربوطه نیز پرداخته خواهد شد.
- خواهشمندم هرگونه اشتباه نوشتاری، مفهومی و یا محاسباتی را به آدرس ایمیل من ارسال کنید تا در ویرایش های بعدی تصحیحات لازم اعمال شوند:
h.shenavar@gmail.com
- از همکاران محترم در گلبهار و گلکان، برای همفکری ها و حمایت هایشان از فعالیت های پژوهش سرای دانش آموزی گلکان، کمال سپاسگزاری را دارم.
- برای ضبط این درس ها از نرم افزار Zoom استفاده شده است.

۱ درس پنجم: کوتوله های قهوه ای

- کوتوله قهوه ای
- فیزیک کوتوله های قهوه ای

- کوتوله قهوه ای
- فیزیک کوتوله های قهوه ای

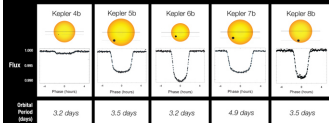
آنچه گذشت: سیارات فراخورشیدی



در جلسه پیش مفاهیم اصلی مربوط به
سیارات فراخورشیدی را فرا گرفتیم:

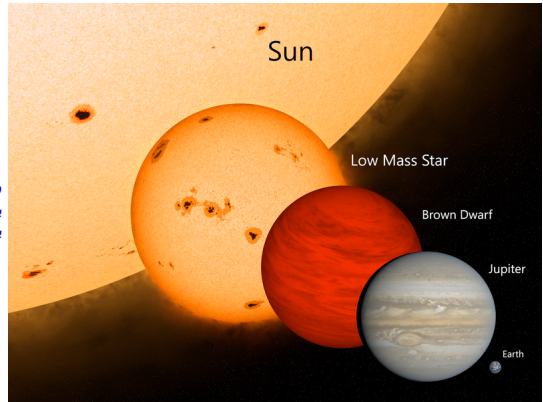
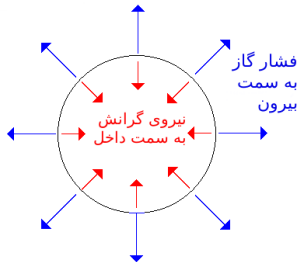
- ۱ حرکت بازتابی
- ۲ گذر سیارات فراخورشیدی
- ۳ عکسبرداری از سیارات فراخورشیدی
- ۴ تلسکوپ کپلر
- ۵ جرم و اندازه سیارات فراخورشیدی
- ۶ مشتری داغ - ابر زمین

Transit Light Curves



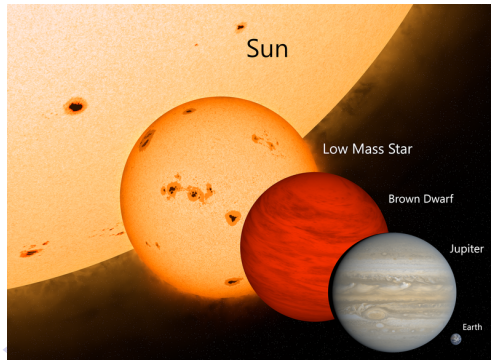
ستارگان، سیارات و چیزهای دیگر!

- تا اینجا دریافته ایم که آسمان شب پر از ستارگان و سیارات است.
- ستارگان آنقدر پرجرم هستند که می توانند باعث همجوشی هیدروژن، و تبدیل آن به هلیوم، در هسته ستاره شوند. نتیجه این فرایند تولید انرژی است. گرمای تولید شده باعث افزایش فشار ستاره شده و می خواهد ستاره را منبسط کند. ولی گرانش ستاره که به سمت داخل است، نیروی رو به بیرون را خنثی کرده و ستاره در یک حالت تعادل باقی خواهد ماند.



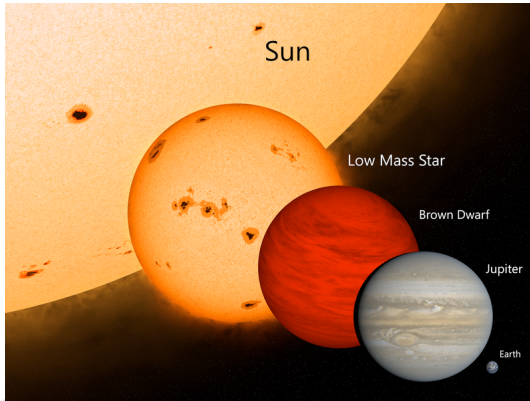
ستارگان، سیارات و چیزهای دیگر!

- سیارات گازی، حتی سیاراتی به بزرگی مشتری، آنقدر جرم ندارند که باعث همجوشی هیدروژن شوند. در اینجا نیز نیروی ناشی از فشار گاز به سمت بیرون جرم و نیروی جاذبه به سمت داخل جسم است. این دو نیرو با هم برابرند و در نتیجه سیاره در حال تعادل است.
- بنا به محاسبات فیزیکی، جرم کافی برای شروع فعالیت همجوشی حداقل ۷۵ برابر جرم مشتری است. یعنی اگر جرم مشتری ده برابر و حتی پنجاه برابر افزایش پیدا کند، باز هم فعالیت هسته ای تبدیل هیدروژن به هلیوم شروع نخواهد شد.



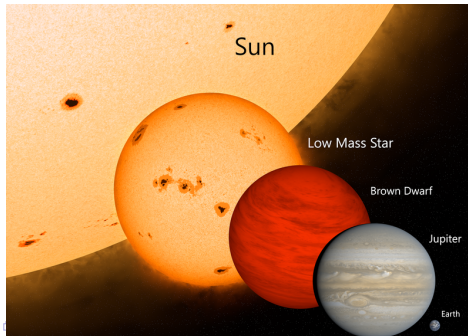
ستارگان، سیارات و چیزهای دیگر!

- اگر جرم مشتری را ۷۵ برابر اضافه کنیم، مشتری تبدیل به یک ستاره خواهد شد. ولی چه اتفاقی می افتد اگر این جرم کمی کمتر از ۷۵ برابر باشد؟ پاسخ: مشتری تبدیل به کوتوله قهوه ای می شود.
- بنابراین کوتوله قهوه ای از سیاراتی مانند مشتری بسیار پر جرم تر است؛ هرچند جرم آن به اندازه ای نیست که همجوشی هیدروژن را باعث شود.



ستاره ای با کمترین جرم ممکن

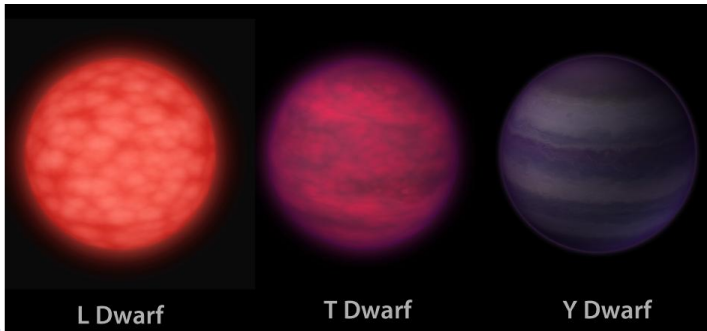
- تا اواخر دهه ۱۹۵۰ میلادی، منجمین و فیزیکدانان فرایندهای درون ستاره ها را تا حد خوبی فهمیده بودند. در این هنگام، جزییات ریاضیاتی معادلات فیزیکی حاکم بر فیزیک همجوشی درک شده بود. نتایج نیز با مشاهدات رصدی و آزمایش های زمینی در توافق بود.
- در دهه بعد، ایده "کمترین جرم ممکن برای یک ستاره" کم کم در بین منجمین مقبولیت می یافت. بنا به محاسبات، این جرم تقریبا برابر ۷۵% برابر جرم خورشید، و یا تقریبا ۷۵ برابر جرم مشتری است. اگر جرم کمتر از این مقدار باشد، فشار در مرکز به حدی نخواهد بود که باعث شروع همجوشی هیدروژن شود. در نتیجه یک کوتوله قهوه ای خواهیم داشت.



- وقتی بحث وجود اینگونه اجرام (کوتوله های قهوه ای) جدی شد؛ دانشمندان سعی کردند اسم مناسبی برای آن انتخاب کنند.
- این ها اجرامی کوچک و سیاه (نور مرئی بسیار کمی دارند) هستند؛ ولی نام ”کوتوله سیاه” قبلا برای جرم دیگری انتخاب شده بود. برخی افراد این اجرام را ”اجسام زیرستاره ای” نامیدند؛ ولی این نامگذاری چندان جذاب نبود (هرچند هنوز هم مورد استفاده است.).
- ستارگان بسیار کم جرم قرمز هستند. از طرفی اجرامی که مورد نظر ما هستند فقط نور فرو سرخ تابش می کنند و نور مرئی بسیار کمی دارند. بنابراین، تصور می شد که رنگ آنها چیزی بین قرمز و سیاه است (قرمز تیره).
- در انتها، جیل تارتر (یکی از پیشگامان حیات فرازمینی) نام کوتوله قهوه ای را برای این اجرام انتخاب کرد. این اجرام واقعا قهوه ای نیستند؛ ولی این نامگذاری همچنان استفاده می شود.

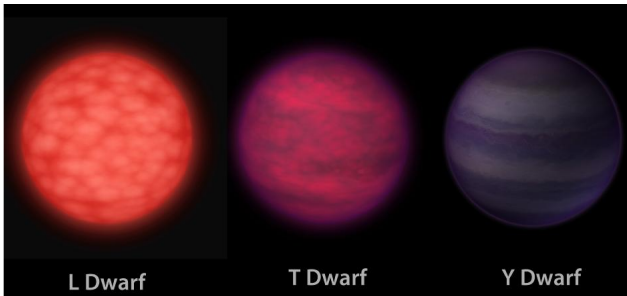
چی هست این کوتوله قهوه ای؟!

- بررسی نظری کوتوله های قهوه ای به نتایج بسیار خوبی رسید؛ هرچند، تا سال ها هیچ کوتوله قهوه ای کشف نشد!
- همانطور که در درس های قبل بحث کردیم، منجمین ستارگان را بنا به دمای آنها تقسیم بندی می کنند. این گروه بندی به صورت O, B, A, F, G, K, M می باشد. در اینجا گروه O داغ ترین و گروه M سردترین ستارگان را نشان می داد. در سال ۱۹۸۸ منجمین ستاره ای را یافتند که حتی از ستارگان گروه M نیز سردتر بود. این ستارگان را با حرف L نشان می دهند و آنها را کوتوله های L می نامند.



چی هست این کوتوله قهوه ای؟!

- در سال های بعد تعداد زیادی از ستارگان دسته L کشف شدند؛ هرچند این اجرام به معنی واقعی کلمه کوتوله قهوه ای محسوب نمی شوند. این ستارگان به اندازه ای جرم دارند که می توانند در هسته خود فرایند همجوشی را انجام دهند (هرچند به صورت بسیار کم).
- یک مشکل: وقتی کوتوله های قهوه ای به وجود می آیند، بسیار داغ هستند. بنابراین می توانند تا مدتی شبیه به یک ستاره L رفتار کنند (از لحاظ رصدی).
- بررسی های بعدی نشان داد که کوتوله های قهوه ای کم جرم شامل لیتیوم هستند، در حالی که ستارگان عادی مقدار بسیار ناچیزی از این عنصری دارند.



لیتیوم

- عنصر لیتیوم سومین عنصر جدول تناوبی است. عنصر لیتیوم می تواند، مانند عنصر هیدروژن، باعث همجوشی هسته ای شود. بنابراین، ستارگان عادی این عنصر را نیز در فرایند همجوشی خود استفاده می کنند.
- کوتوله های قهوه ای با جرمی کمتر از ۶۵ برابر جرم مشتری اصلا نمی توانند لیتیوم خود را مصرف کنند. از طرفی، مشاهدات بسیار دقیق طیف سنجی می تواند تشخیص دهد که آیا جرم شامل لیتیوم می باشد و یا نه. از اینجا می توان کوتوله قهوه ای را از ستارگان دیگر تشخیص داد.
- البته آزمون لیتیوم کاملاً دقیق نیست و منجمین از راه های دیگر نیز استفاده می کنند.

جدول دوره های عناصر

جدول دوره‌های عنصرها

۱	۲											۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸				
۱ H هیدروژن ۱.۰۰۸																										۲ He هلیوم ۴.۰۰۲					
۳ Li لیتیم ۶.۹۴	۴ Be بهریم ۹.۰۱											۵ B بور ۱۰.۸۰	۶ C کربن ۱۲.۰۱	۷ N نیتروژن ۱۴.۰۱	۸ O اکسیژن ۱۶.۰۰	۹ F فلورین ۱۹.۰۰	۱۰ Ne نئون ۲۰.۱۸														
۱۱ Na سدیم ۲۲.۹۹	۱۲ Mg مگنزیوم ۲۴.۳۱											۱۳ Al آلومینیم ۲۶.۹۸	۱۴ Si سیلیسیم ۲۸.۰۹	۱۵ P فسفر ۳۰.۹۷	۱۶ S گوگرد ۳۲.۰۷	۱۷ Cl کلر ۳۵.۴۵	۱۸ Ar آرگون ۳۹.۹۵														
۱۹ K پتاسیم ۳۹.۱۰	۲۰ Ca کلسیم ۴۰.۰۸	۲۱ Sc اسکاندیم ۴۴.۹۶	۲۲ Ti تیتانیوم ۴۷.۸۷	۲۳ V وانادیوم ۵۰.۹۴	۲۴ Cr کروم ۵۲.۰۰	۲۵ Mn منگنز ۵۴.۹۴	۲۶ Fe آهن ۵۵.۸۵	۲۷ Co کوبالت ۵۸.۹۳	۲۸ Ni نیکل ۵۸.۶۹	۲۹ Cu مس ۶۳.۵۵	۳۰ Zn روی ۶۵.۳۹	۳۱ Ga گالیم ۶۹.۷۲	۳۲ Ge ژرمانیم ۷۲.۶۴	۳۳ As آرسنیک ۷۴.۹۲	۳۴ Se سلنیوم ۷۸.۹۶	۳۵ Br برم ۷۹.۹۰	۳۶ Kr کریپتون ۸۳.۹۰														
۳۷ Rb روبیوم ۸۵.۴۷	۳۸ Sr استرونسیم ۸۷.۶۲	۳۹ Y ایتریم ۸۸.۹۱	۴۰ Zr زیرکونیوم ۹۱.۲۲	۴۱ Nb نیوبیم ۹۲.۹۱	۴۲ Mo مولیبدن ۹۵.۹۴	۴۳ Tc تکنسیم -	۴۴ Ru روتنیم ۹۱.۰۲	۴۵ Rh روتنیم ۱۰۱.۰۷	۴۶ Pd پالادیم ۱۰۶.۴۰	۴۷ Ag نقره ۱۰۷.۸۶	۴۸ Cd کادمیوم ۱۱۲.۴۰	۴۹ In ایندیم ۱۱۴.۸۰	۵۰ Sn لئوریم ۱۱۸.۷۰	۵۱ Sb آنتیمون ۱۲۱.۷۵	۵۲ Te تلوریم ۱۲۷.۶۰	۵۳ I ید ۱۲۶.۹۰	۵۴ Xe زنون ۱۳۱.۳۰														
۵۵ Cs سزیم ۱۳۲.۹۱	۵۶ Ba باریم ۱۳۷.۳۲	۵۷ Lu لوئیسیم ۱۷۵.۰۰	۵۸ Hf هافنیم ۱۷۸.۵	۵۹ Ta تانتال ۱۸۰.۹۰	۶۰ W تنگستن ۱۸۳.۸۰	۶۱ Re رهنیم ۱۸۶.۲۰	۶۲ Os اوسم ۱۹۰.۲۰	۶۳ Ir ایریدیوم ۱۹۲.۲۲	۶۴ Pt پلاتین ۱۹۵.۰۸	۶۵ Au طلا ۱۹۷.۰۰	۶۶ Hg جیوه ۲۰۰.۵۹	۶۷ Tl تالیوم ۲۰۴.۳۸	۶۸ Pb سرب ۲۰۷.۲۰	۶۹ Bi بسموت ۲۰۸.۰۰	۷۰ Po پولونیوم [۲۰۹]	۷۱ At آستاتین [۲۱۰]	۷۲ Rn رادیون [۲۲۲]														
۸۷	۸۸	۸۹	۹۰	۹۱	۹۲	۹۳	۹۴	۹۵	۹۶	۹۷	۹۸	۹۹	۱۰۰	۱۰۱	۱۰۲	۱۰۳	۱۰۴	۱۰۵	۱۰۶	۱۰۷	۱۰۸	۱۰۹	۱۱۰	۱۱۱	۱۱۲	۱۱۳	۱۱۴	۱۱۵	۱۱۶	۱۱۷	۱۱۸

عدد اتمی

۱

نماد شیمیایی

H

نام

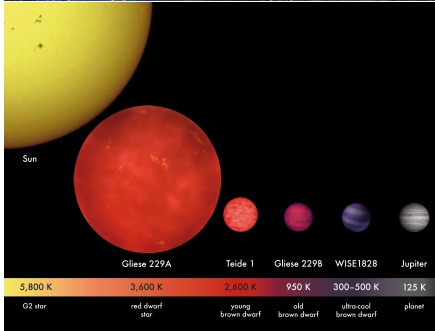
هیدروژن

جرم اتمی میانگین

۱/۰۰۸

عدد اتمی — H
نماد شیمیایی — H
نام — هیدروژن
جرم اتمی میانگین — ۱/۰۰۸

و بالاخره کوتوله ما پیدا شد!

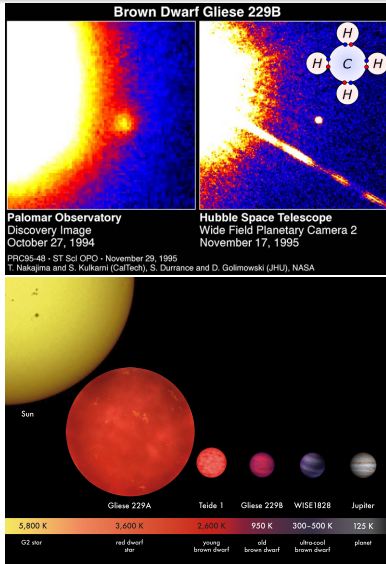


پس از جستجوهای بسیار، بالاخره کوتوله قهوه ای پیدا شد. در سال ۱۹۹۵ منجمین در حال مشاهده خوشه پروین بودند. این یک خوشه ستاره ای بسیار نزدیک است که با چشم دیده می شود. آنها تلاش کردند کم نور ترین ستاره این گروه را بیابند، به این امید که به این روش همه ستارگان موجود را شناسایی کنند.

چرا خوشه پروین انتخاب شد؟ پاسخ: به این دلیل که فاصله ما تا خوشه پروین به روش های مختلف و با دقت زیاد اندازه گیری شده بود. بنابراین، یک ستاره کم نور در این خوشه واقعا باید کم جرم باشد.

منجمین ستاره بسیار کم نوری را یافتند و آن را ۱ *Teide* نامیدند. این جرم بسیار قرمز رنگ و سرد بود؛ ولی مهم ترین نکته این بود که در طیف آن لیتیوم کشف شد. این جرم در دسته *L* قرار می گیرد.

و حتی یک کوتوله دیگر!

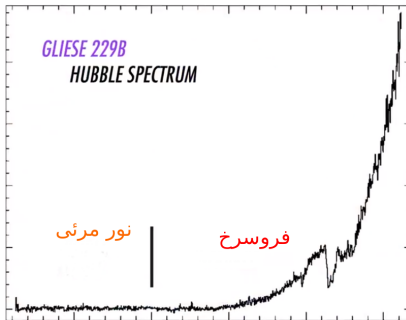


بنا به مدل های تعیین جرم ستاره ای، جرم این کوتوله قهوه ای (*Teide 1*) تقریباً ۵۰ برابر جرم مشتری و یا حدوداً ۵٪ برابر جرم خورشید است. این جرم آشکارا زیرستاره ای محسوب می شود و بنابراین یک کوتوله قهوه ای است.

تقریباً همزمان با این کشف، گروه دیگری از منجمین فهمیدند که یک ستاره نزدیک دیگر (*Gliese ۲۲۹*) یک همراه بسیار کم نور دارد. طیف سنجی این جرم نشان داد که حتی از *Teide 1* هم عجیب تر است: طیف این جسم نشان دهنده وجود لیتیم است؛ هرچند، وجود متان هم در آن تایید شده است.

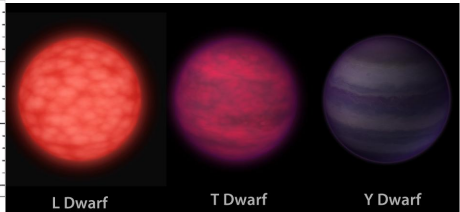
متان نسبت به دما مولکول بسیار حساسی است و به راحتی تجزیه می شود (مثلاً در دمای جو *Teide 1* به راحتی تجزیه می شود). بنابراین وجود متان در این جرم نشان داده که باید دمای آن از *Teide 1* هم کمتر باشد. منجمین این جرم را *Gliese ۲۲۹B* نامیدند.

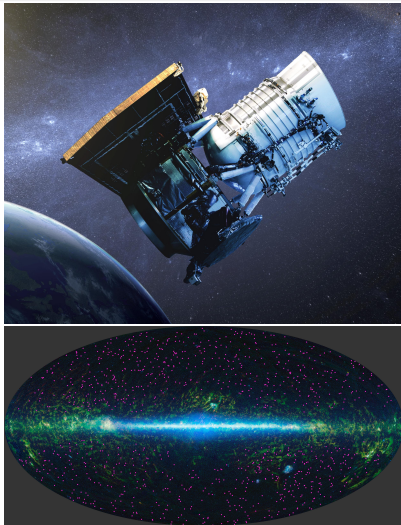
دسته بندی کوتوله ها



با پیدا شدن این سه جرم، نیاز به گسترش دسته بندی ستارگان احساس شد. بنابراین کوتوله قهوه ای *Gliese ۲۲۹B* در دسته *T* قرار گرفت.

کوتوله *Gliese ۲۲۹B* یکی از اجرامی است که به وسیله تلسکوپ فضایی هابل مشاهده شده است. همانطور که در شکل مقابل می بینید، این جرم تقریباً هیچ نوری در ناحیه مرئی ندارد، ولی در ناحیه فروسرخ تابش شدیدی دارد.



تلسکوپ *WISE*

در سال ۲۰۰۹ ناسا تلسکوپ فروسرخ *WISE* را به فضا فرستاد. این تلسکوپ طوری طراحی شده بود که همه کره آسمان را در طول موج فروسرخ مشاهده کند.

تصویر فروسرخ تلسکوپ *WISE* را در شکل مقابل مشاهده می کنید.

تلسکوپ *WISE* صدها کوتوله قهوه ای را پیدا کرد. گزارش های منجمین نشان می دهد که تا سال ۲۰۱۵ حداقل ۲۰۰۰ کوتوله قهوه ای پیدا شده است.

در نتیجه فعالیت تلسکوپ *WISE* حالا می دانیم که کوتوله های قهوه ای سردتری نیز وجود دارند که آنها را در گروه *Y* دسته بندی می کنند.

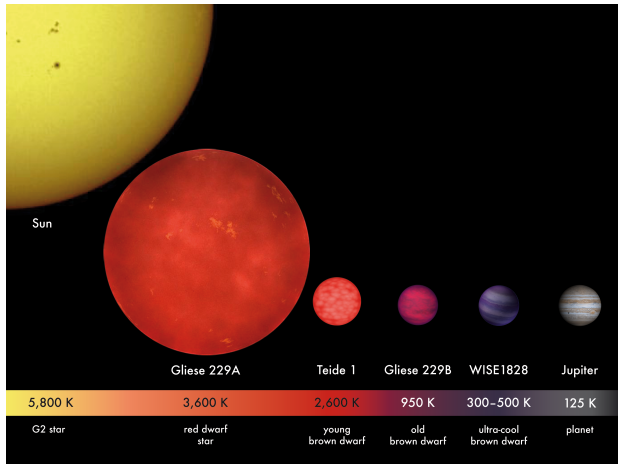
به خاطر سپردن طبقه بندی ستارگان

• طبقه بندی جدید ستارگان را با استفاده از جمله زیر به خاطر بسپارید.



مقایسه کنید!

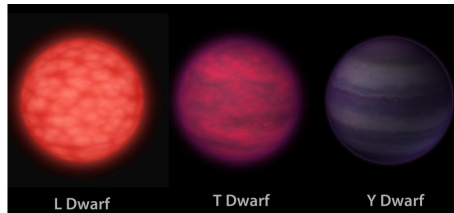
• دماها و ابعاد این چند جرم را با هم مقایسه کنید.



• حالا فیزیک کوتوله های قهوه ای را به صورت مفصل تر بررسی خواهیم کرد.

رنگ واقعی کوتوله های قهوه ای

- اگر کوتوله های قهوه ای واقعا قهوه ای نیستند، پس چه رنگی هستند؟
- پاسخ: برخی از این کوتوله ها آنقدر سرد هستند که اصلا نور مرئی تابش نمی کنند. بنابراین سیاه هستند. در نتیجه ممکن است شما در نزدیکی این اجرام باشید، ولی اصلا آنها را نبینید.
- هرچند، برخی کوتوله های قهوه ای هنوز گرم هستند؛ بنابراین کمی نور مرئی تابش می کنند (خیلی کم). این اجرام چه رنگی هستند؟ پاسخ: این اجرام احتمالا ارغوانی رنگ هستند.
- ممکن است فکر کنیم که با توجه به دمای خیلی کم شان، این اجرام باید قرمز باشند. ولی ماجرا کمی پیچیده است. در جو این اجرام مولکول هایی وجود دارد (مثل متان و بخار آب) که قسمتی از طیف نور را جذب می کند. این مولکول ها نور قرمز را بیشتر از نور آبی جذب می کنند. بنابراین، نتیجه رنگ ارغوانی خواهد بود.



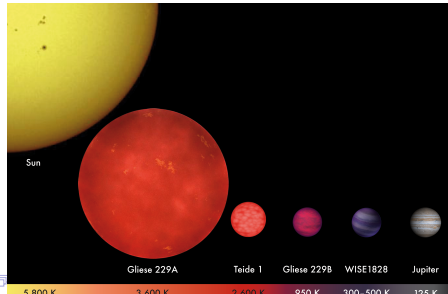
رنگ کوتوله های قهوه ای در تصاویر *WISE*

- تلسکوپ *WISE* تصاویر فروسرخ تهیه می کند که البته چشم ما قادر به دیدن این قسمت طیف نیست. حال برای اینکه ما درکی از نتایج تلسکوپ های فروسرخ داشته باشیم، منجمین بخش های مختلف طول موج فروسرخ را به رنگ های عادی نگاشت می کنند. مثلاً، طول موج های فروسرخ کوتاه را با رنگ آبی، طول موج های متوسط را با سبز و طول موج های بلند فروسرخ را با رنگ قرمز نشان می دهند.
- بیشتر تابش فروسرخ کوتوله های قهوه ای با طول موج متوسط فروسرخ ارسال می شود؛ در نتیجه، بیشتر کوتوله های قهوه ای در تصاویر *WISE* سبزرنگ هستند.



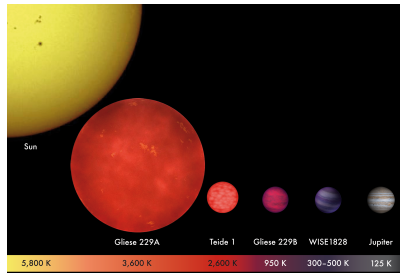
فیزیک کوتوله های قهوه ای عجیب است.

- کوتوله های قهوه ای فیزیک عجیبی دارند. مثلاً، با افزایش جرم کوتوله های قهوه ای، اندازه آنها چندان تغییری نمی کند! اگر دو تکه خمیر را به هم بچسبانیم، نتیجه یک خمیر بزرگتر خواهد بود. ولی این نکته درباره کوتوله های قهوه ای درست نیست. این رفتار به دلیل فرایندهای فیزیکی خاصی است که در هسته این اجرام اتفاق می افتد.
- توضیح این پدیده بدون ریاضیات قابل توجه چندان ممکن نیست؛ هرچند، به صورت خلاصه می توان گفت که با افزایش جرم، هسته کوتوله چگال تر می شود و نه بزرگتر.
- این اثر برای اجرامی به بزرگی مشتری (و با جرم بیشتر) مهم می شود؛ در نتیجه کوتوله قهوه ای که دو برابر مشتری جرم دارد، چندان بزرگتر از مشتری نخواهد بود.

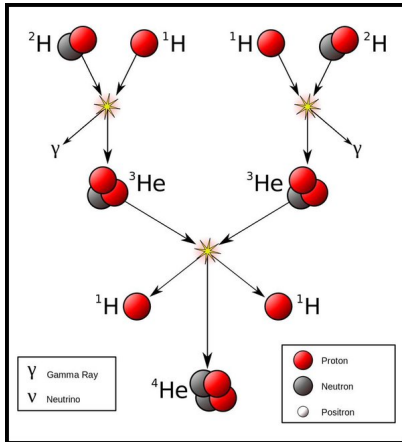


تشخیص کوتوله های قهوه ای از سیارات بزرگ

- پس تفاوت بین یک کوتوله قهوه ای کوچک و سیارات بزرگ در چیست؟ پاسخ همچنان تا حدی مبهم است.
- بنا به اعتقاد برخی منجمین، تفاوت این دو نوع جرم را می توان اینگونه بیان کرد: سیارات در فرایند تشکیل و تولد ستارگان و به دور آنها تشکیل می شوند در حالی که کوتوله های قهوه ای در مرکز قرص به وجود می آیند.
- هرچند، بنا به این عقیده، اگر دو جسم هم جرم و دقیقا هم شکل داشته باشیم، با توجه به فرایند تشکیل آنها یکی می تواند سیاره و دیگری کوتوله قهوه ای باشد.
- منجمین همچنان برای تشخیص سیارات بزرگ از کوتوله های قهوه ای کوچک بحث می کنند.



کوتوله های قهوه ای: سیاره و یا ستاره؟!



- همانطور که قبلا گفته شد، کوتوله های قهوه ای با جرم بیشتر از ۶۵ برابر جرم مشتری در هسته خود همجوشی لیتیوم را دارند. همچنین، معلوم شده است که اگر جرم کوتوله قهوه ای به بیشتر از ۱۳ برابر جرم مشتری برسد، می تواند باعث همجوشی دوتریوم شود.
- دوتریوم یکی از ایزوتوپ های اتم هیدروژن است (با یک پروتون و یک نوترون در هسته).
- ولی هیچکدام از این ها نمی توانند باعث همجوشی هیدروژن شوند؛ بنابراین ستاره واقعی نیستند.
- کوتوله های قهوه ای سیاره و یا ستاره نیستند، ولی برخی ویژگی های سیاره و ستاره را از خود نشان می دهند.

اتمافر کوتوله های قهوه ای

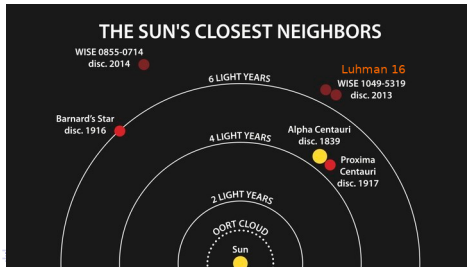
- رفتار اتمافر در کوتوله های قهوه ای به دمای این اجرام بستگی دارد. مثلاً، در جو برخی کوتوله های قهوه ای عنصر آهن تبخیر می شود. ولی در برخی دیگر، دما به حدی است که آهن می تواند در جو سرد شده و مایع شود. به عبارت دیگر در این اجرام باران آهن مذاب می بارد!!!



نزدیکترین ستارگان به ما

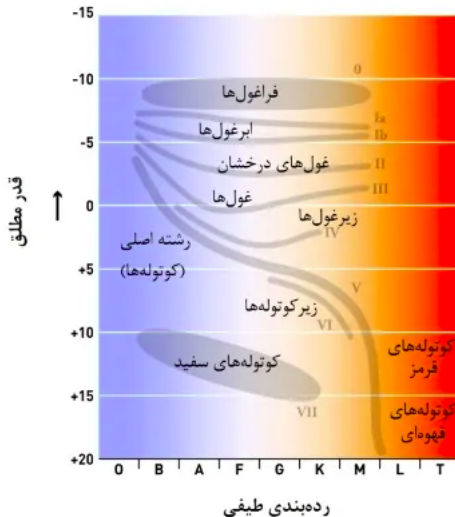
نزدیک ترین ستاره به ما یک کوتوله قرمز است که پروکسیما قنطورس نام دارد. این ستاره به دور ستاره بزرگتر آلفا قنطورس در حال دوران است. این دو ستاره حدوداً ۴۳ سال نوری از زمین فاصله دارند. در سال ۲۰۱۳ منجمین کشف دو کوتوله قهوه ای با نام لومان ۱۶ را اعلام کردند که ۶/۵ سال نوری از زمین فاصله دارند. این سیستم دوتایی، از نظر نزدیکی به زمین سومین سیستم محسوب می شود. در این سال ها منجمین این فرضیه را در نظر گرفته اند که آیا ممکن است یک کوتوله قهوه ای کم نور و سرد از این اجرام به زمین نزدیک تر باشد؟

البته می دانیم که چنین اجرامی در منظومه شمسی ما (حتی تا ابر اورت) موجود نمی باشند؛ در غیر این صورت تاکنون توسط رصدهای متعدد فضا کشف می شدند. ولی ممکن است چنین اجرامی در آینده حتی در فاصله دو سال نوری کشف شوند. در این صورت باید کتاب های نجومی را بازنویسی کرد!



نمودار هرتسپرونگ-راسل

● موقعیت کوتوله های قهوه ای در نمودار هرتسپرونگ-راسل را ببینید.



مبحث بعدی: ستارگان کم جرم

- ستارگان را به دو دسته ستارگان کم جرم (با جرمی کمتر از هشت برابر جرم خورشید) و ستارگان پر جرم تقسیم بندی می کنند؛ البته دسته بندی های دیگر نیز وجود دارند. فیزیک و فرایند تحول این ستارگان بسیار متفاوت است و بنابراین در جلسات مختلفی بحث خواهند شد.



منابع درس

- 1. PBS Crash Course Astronomy by Phil Plait, available on YouTube and PBS website

- 1. نجوم به زبان ساده، مایر دگانی، ویراست سوم، ترجمه محمدرضا خواجه پور، انتشارات گیتاشناسی، ۱۳۹۳
- 2. اساس ستاره شناسی، مایکل سیدز، جلد های ۱ و ۲، ترجمه اشرفی و صالحی، ویراسته خواجهوی، انتشارات دانشگاه امام رضا (ع)، ۱۳۹۰

با سپاس از توجه شما،
لطفاً ما را در شبکه های
اجتماعی دنبال کنید.