اخترفیزیک

محمد اخلاقی
makhlaghi@gmail.com

کلاس‌های تخصصی مجله نجوم
بهمن و اسفند ۱۳۸۸

جلسه اول: مقدمه

محمد اخلاقی
http://astr.tohoku.ac.jp/~akhlaghi/

مروری بر مطالب

- تعریف اخترفیزیک
- دانسته‌ها و ندانسته‌ها
- نگاهی تاریخی و فلسفی به اخترفیزیک
- روش تدریس این دوره

تعریف اخترفیزیک

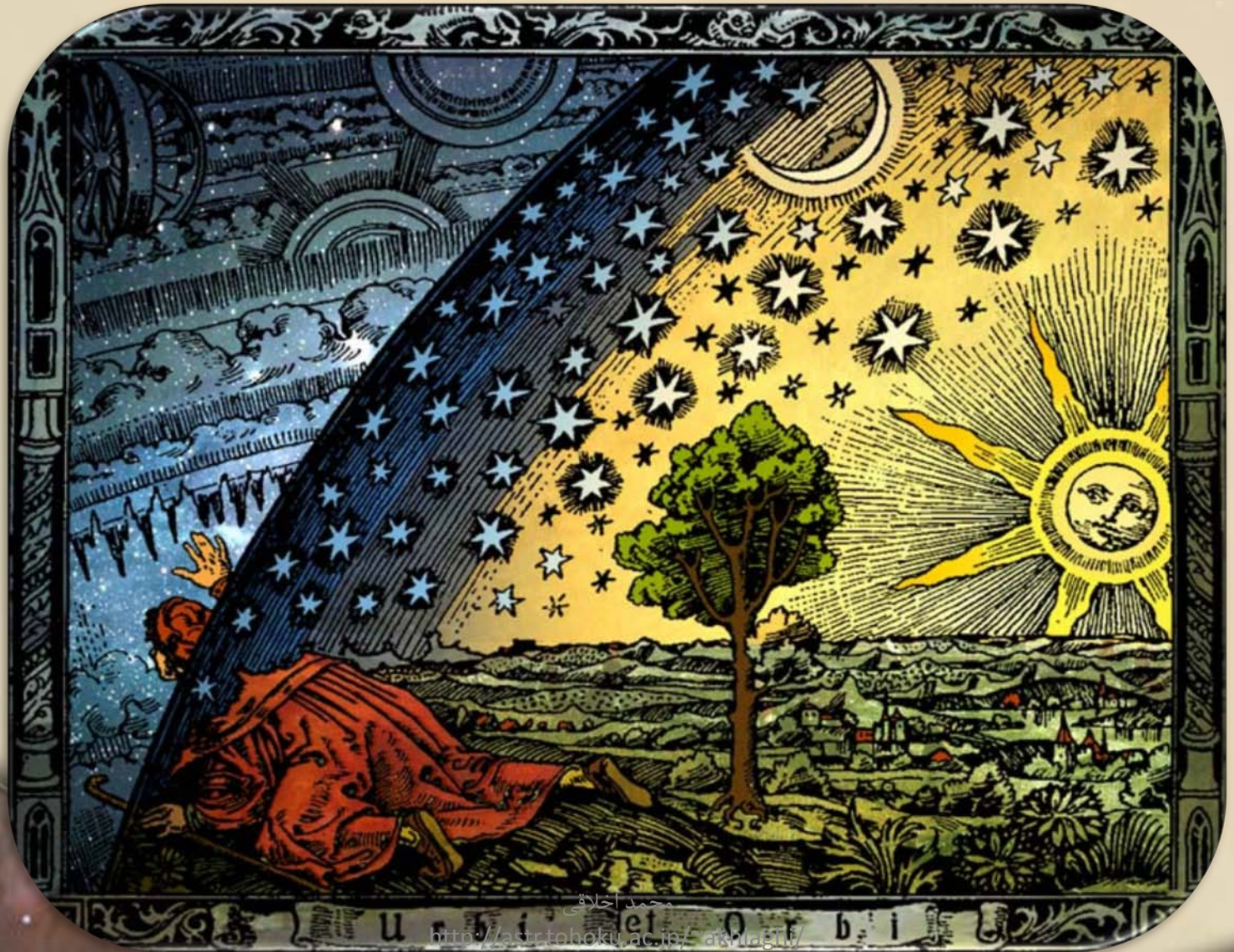
- اخترفیزیک شاخه‌ای از اخترشناسی است که با فیزیک کیهان سر و کار دارد. از جمله خصوصیات فیزیکی (شدت نور، چگالی، دما و ساختار شیمیایی) اجرام سماوی از جمله کهکشان‌ها، ستاره‌ها، سیارات و فضای میان‌ستاره‌ای و ارتباط‌های آنها با هم است.
- تا اواخر قرن ۱۹ام میلادی، اینکه نجوم و فیزیک ارتباطی با هم دارند اصلا شفاف نبود
- اخترشناسی را می‌توان به جرات اولین علوم تجربی دانست

فیزیک چیست؟

- اولین کسی که واژه فیزیک را تعریف کرد، ارسطو (۳۸۴ تا ۳۲۲ پیش از میلاد) بود. او بر خلاف استادش افلاطون (۴۲۸ تا ۳۲۷ پیش از میلاد) اعتقاد داشت که شناخت طبیعت از طریق مطالعه اجزاء آن امکان‌پذیر است.
- حتی ارسطو نیز فیزیک را فقط مربوط به دنیای زیرین می‌دانست و آن را حاکم بر دنیای خارج از زمین نمی‌دانست.
- بعد از ارسطو تا نیوتون (۱۶۴۲ – ۱۷۲۷ پس از میلاد)، فیزیک و فلسفه طبیعی یکسان گرفته می‌شدند، به عنوان مثال نیوتون کتاب اصلی خود را *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* نامگذاری کرد که می‌توان آن را اصول ریاضی فلسفه طبیعی دانست. نیوتون با این کار ریاضی را وارد فیزیک کرد.
- امروزه فیزیک به زمینه‌های بسیار زیادی وارد شده است به عنوان مثال: فیزیک ماده چگال، هسته‌ای، اتمی، ملکولی، نوری، ذرات بنیادین، اخترفیزیک و غیره.
- زمینه‌های میان رشته‌ای زیادی هم درست شده‌اند مانند ژئوفیزیک یا بیوفیزیک.

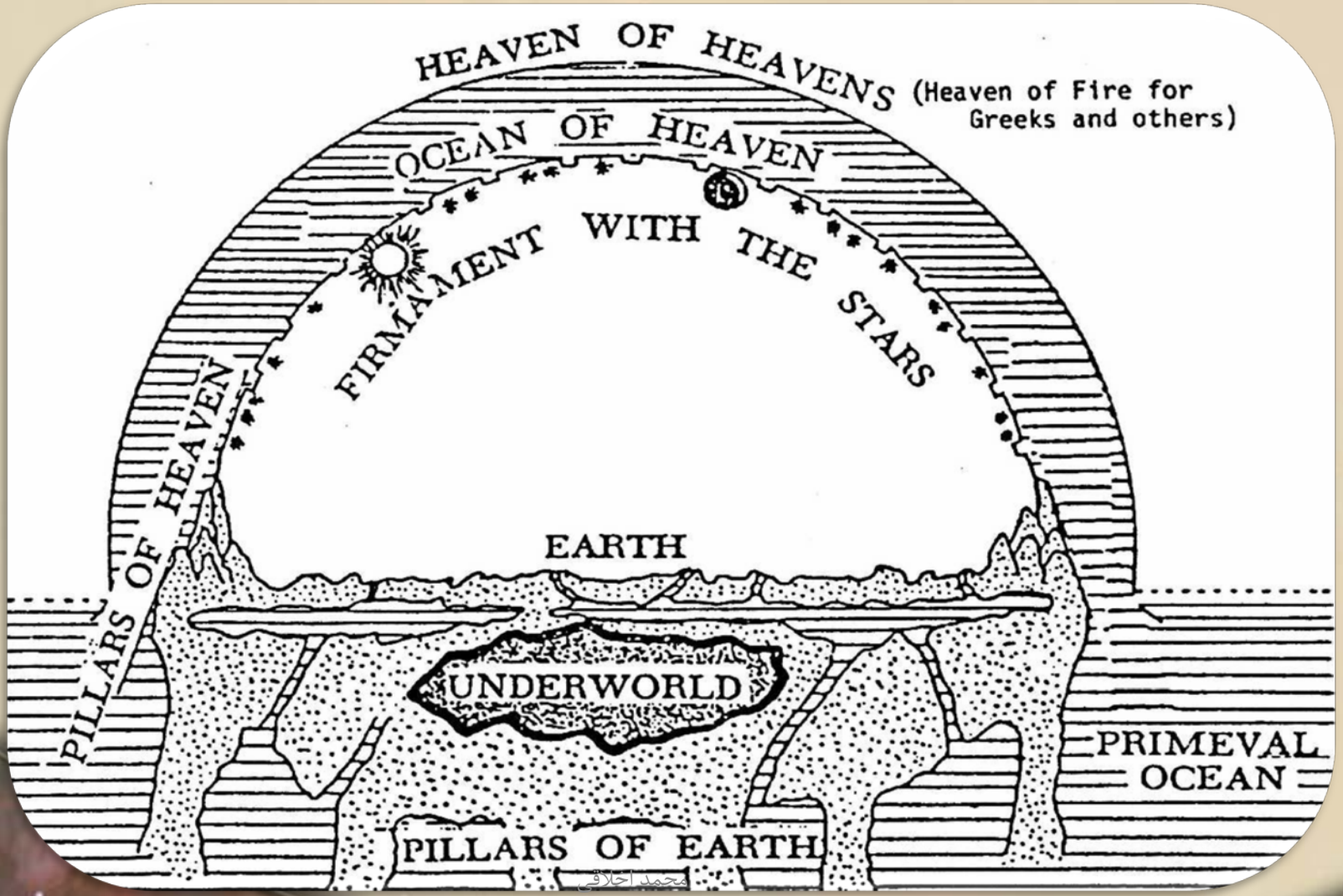
محمد اخلاقی
http://astr.tohoku.ac.jp/~akhlaghi/

فیزیک دنیای زمینی و آسمانی متفاوت بود



محمد اخلاقی
http://astr.tohoku.ac.jp/~akhlaghi/

فیزیک دنیای زمینی و آسمانی متفاوت بود

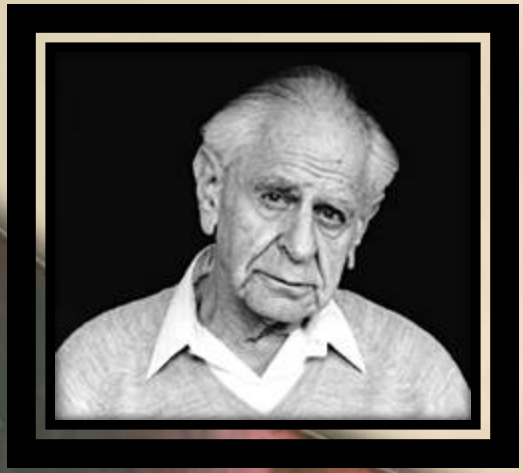


محمد اخلاقی

نگاهی تاریخی به فیزیک و علم به طور کلی

- رساله «گفتار در روش درست راه بردن عقل و جستجوی حقیقت در علوم» توسط رنه دکارت (۱۵۹۶ تا ۱۶۵۰ میلادی) بیان زیبایی از دیدگاه نواندیشان رنسانس نسبت به علوم دارد. دکارت را می‌توان پدر فلسفه‌ی مدرن و یکی از پدران علم مدرن دانست.
- دکارت را یک فیلسوف شکاک می‌دانند که در این کتاب خود برای شناخت حقیقت واقعی به هر چیزی که می‌توان شک کرد، شکی می‌کند و آن را غیر قابل قبول می‌داند: روش زندگی، ادبیات، هنر، دین، ریاضیات، فلسفه، منطق، حتی بدن خود، زنده بودن خود و وجود خود.

در نهایت به این نتیجه می‌رسد که: ***فکر می‌کنم پس هستم***



- با این نتیجه، دکارت فلسفه مدرن را شروع کرد که علم مدرن نیز به آهستگی از درون آن (فلسفه طبیعی) بیرون آمد.
- یکی از ساده‌ترین نتایج شکیات دکارت این بود که بشر دید که هیچ وقت نباید دانسته را بدون شناخت ندانسته (یا خطا در زبان امروزی) شناخت.
- تا جایی که کارل پوپر (۱۹۰۲ تا ۱۹۹۴ میلادی)، پدر فلسفه علم، یکی از اصلی‌ترین خصوصیات علم را ابطال‌پذیری دانست. او نظریه پرداز «روش علمی» بود.

وضعیت علم امروز کدام است؟

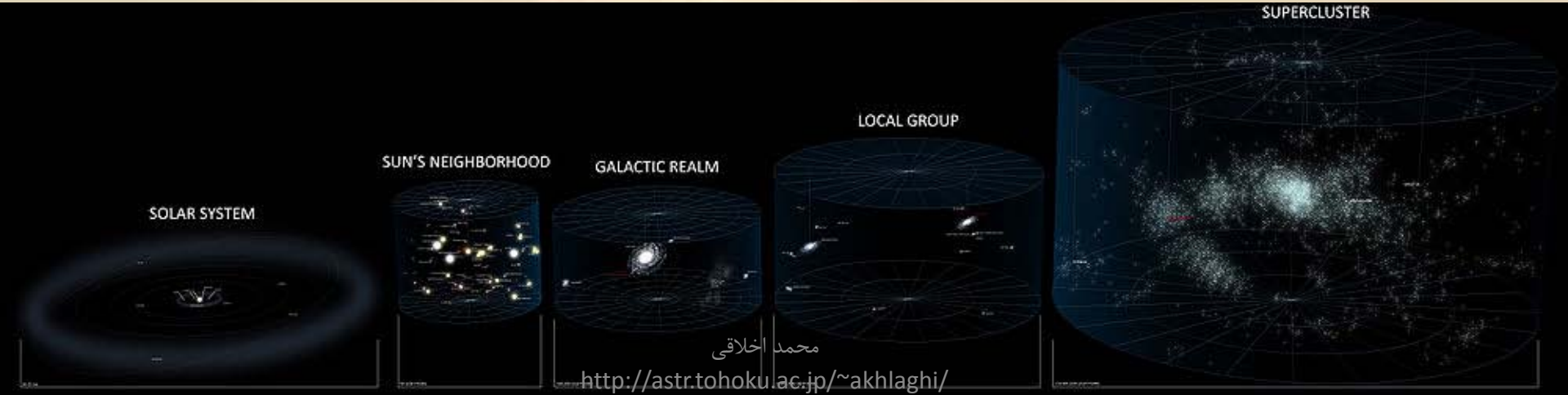
آن کس که بداند و بداند که بداند/ اسب شرف از گنبد گردون برهاند

آن کس که نداند و بداند که نداند / لنگان خرک خویش به منزل برساند

آن کس که نداند و نداند که نداند/ در جهل مرکب ابدالدهر بماند

چند موضوعی که می‌دانیم که نمی‌دانیم (۱)

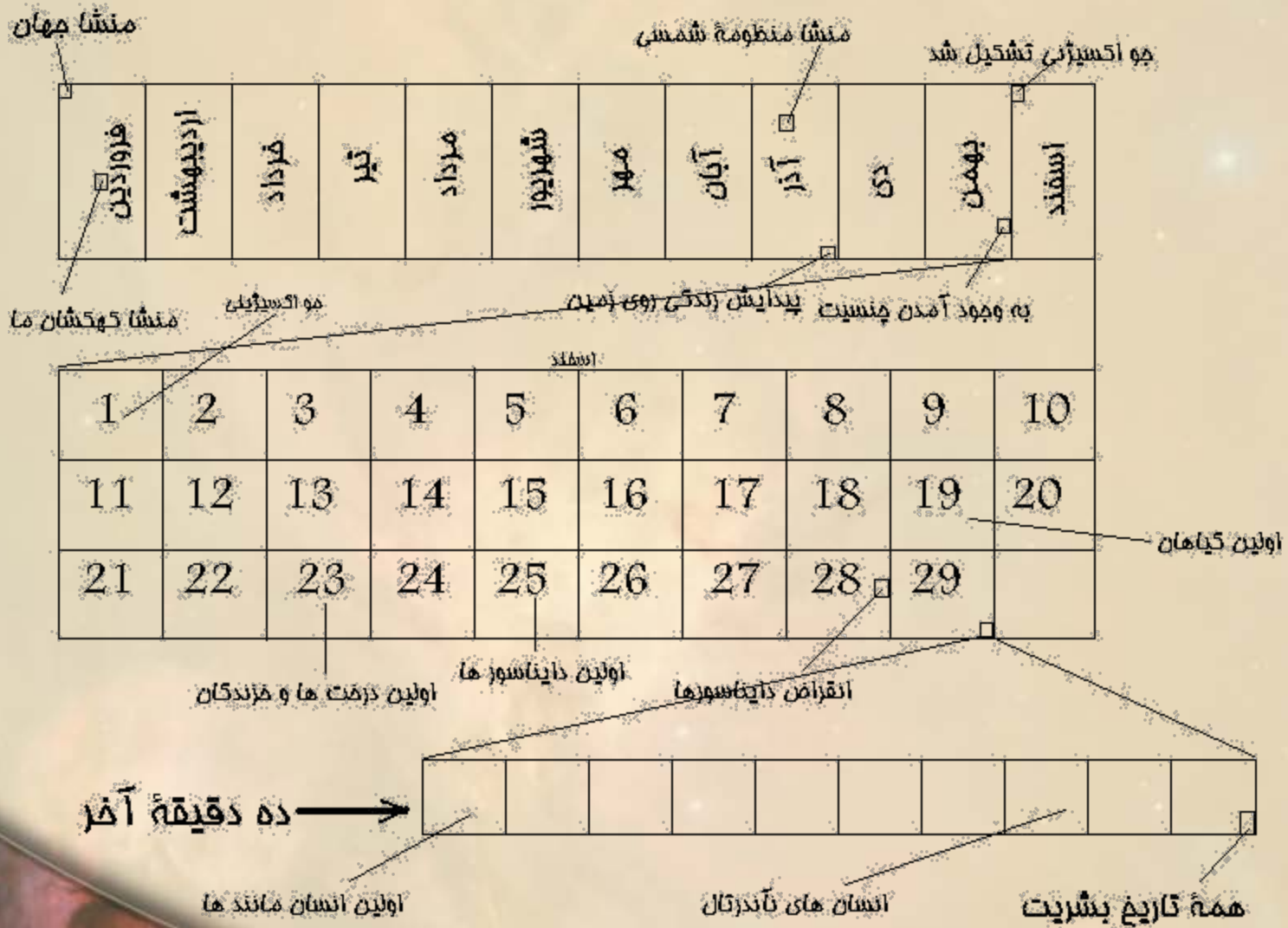
- اکثر قوانین فیزیکی که ما می‌شناسیم از آزمایش‌های روی زمین نتیجه شده‌اند؛ به عنوان مثال، بزرگترین مقیاسی که ما سرعت نور و قوانین دینامیک را اندازه‌گیری کردیم درون منظومه شمسی بوده است؛ حدود $۱۰^{۱۱}$ متر.
- وقتی به دنیای خیلی کوچک نگاه می‌کنیم (کوچکتر از $۱۰^{-۸}$ متر)، می‌بینیم که قوانین طبیعت خیلی با قوانین دنیای عادی (۱ متر) متفاوت است (فیزیک کوانتم)، از کجا می‌دانیم که قوانین در دنیای خیلی بزرگ ($۱۰^{۲۵}$متر) همان قوانین دنیای عادی ماست؟



چند موضوعی که می‌دانیم که نمی‌دانیم (۲)

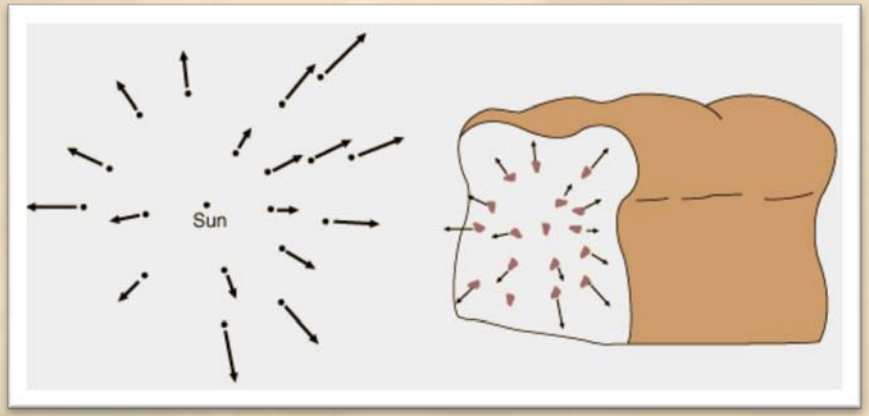
- ثابت بودن قوانین طبیعت در مقیاس عمر کیهان نیز یکی دیگر از مسائلی است که نمی‌دانیم.
- عمر جهان تا به امروز بر مبنای آخرین مشاهدات حدود ۱۳.۶ میلیارد سال است. با دید خوش‌بینانه بشر فقط ۱۰۰ سال و بد بینانه فقط ۵۰ سال است که دارد به کیهان نگاه می‌کند.
- به عنوان مثال: اگر ما هر ۴۵۷ سال را در جهان واقعی معادل یک ثانیه در یک تقویم فرضی فرض کنیم، این تقویم دقیقاُ معادل یک سال خواهد شد(همانطور که در شکل می بینید). حال به وقایع در این یک سال توجهی کنید!

چند موضوع که می‌دانیم که نمی‌دانیم (۲)



چند موضوع که می‌دانیم که نمی‌دانیم (۳)

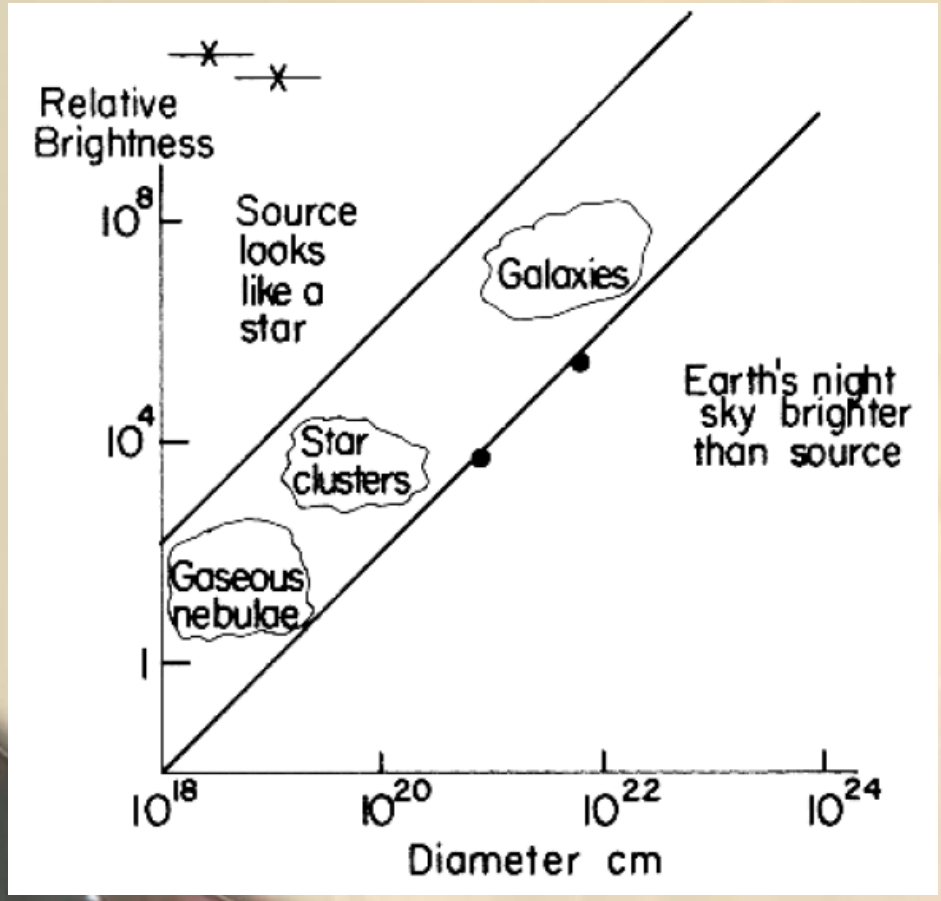
- یکی از اولین اصول کیهان‌شناسی قانون هابل است؛ که هر چه فاصله اجرام سماوی (کهکشان‌ها و خوشه‌های کهکشانی) دورتر می‌شود سرعت آنها بیشتر می‌شود.
- بر همین اساس، در بیشتر مدل‌های کیهان‌شناسی، قسمت‌های دوری از کیهان ما، در حال دور شدن از ما با سرعتی بسیار بیشتر از سرعت نور هستند!!! پس ماه هیچ‌وقت نباید و نمی‌توانیم امیدوار باشیم آنها را مشاهده و بررسی کنیم.



چند موضوع که می‌دانیم که نمی‌دانیم (۴)

- متاسفانه ما هیچ نشانه‌ای از وجود یک دنیای دیگر نداریم تا دنیای خودمان را با آن مقایسه کنیم.
- همانطور که می‌دانید، یکی از اصلی‌ترین روش‌های استدلال علمی قیاس است و ما بیشتر اطلاعاتمان را با قیاس میان دو چیز می‌دانیم. اما در نهایت فقط از وجود یک کیهان خبر داریم که در آن به سر می‌بریم!

چند موضوع که می‌دانیم که نمی‌دانیم (۵)

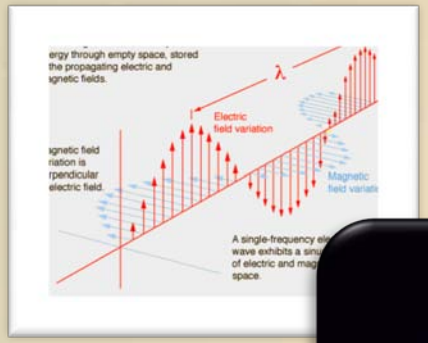


- یکی از نتایج عجیبی که دانشمندان در نیم قرن گذشته متوجه آن شده‌اند این است که:
- در نهایت تمام اجرام فضایی که ما مشاهده کرده‌ایم در محدوده شکل پایین قرار می‌گیرند و ما با ابزار و علم امروزی نمی‌توانیم خارج از این محدوده ببینیم:

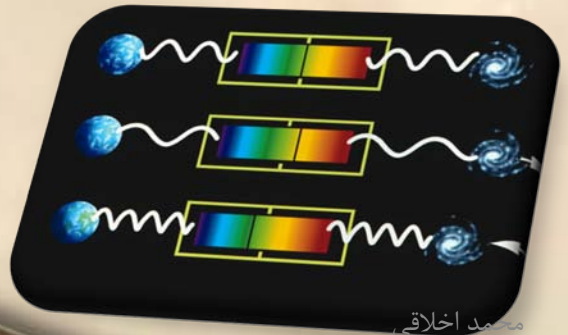
ابزارهای ما بر شناخت کیهان

- **امواج الکترومغناطیس:** امواج رادیویی، مادون قرمز، مرئی، ماوراء بنفش، امواج ایکس، امواج گاما.
- **ذرات کیهانی:** شامل الکترونها، پروتونها، هسته‌های سنگین‌تر و غیره که با سرعتی بسیار زیاد در کیهان حرکت می‌کنند.
- **نوترینوها و پاد نوترینوها:** سه نوع نوترینو شناخته شده است
- **امواج گرانشی:** که هنوز وجودشان دقیقا ثابت نشده است اما اگر اثبات شوند در مورد دینامیک اجرام عظیم و چگال منبع خیلی خوبی هستند.

جلسه دوم: امواج الکترومغناطیس



- تاریخ شناخت امواج الکترومغناطیس (نور)
- خاصیت موجی نور
- سرعت نور
- طیف الکترومغناطیس
- تابش جسم سیاه
- خطوط طیفی و طیف‌سنجی
- اثر دوپلر در طیف‌سنجی
- گونه‌های طیفی ستارگان



تاریخ شناخت امواج الکترومغناطیس

- به زبانی می‌توان پدر علم نورشناسی که بعدا امواج الکترومغناطیس آن را تحت پوشش قرار داد ابن‌هیثم (۹۶۵ تا ۱۰۴۰ میلادی). کتاب‌های او از طریق شمال آفریقا به ایتالیا و بعدا در عصر روشنگری (قرن ۱۵ میلادی) به اروپا منتقل و ترجمه شد.
- بحثی که او مطرح کرد این بود که نور از تمام نقاط سطوح منور و در تمام جهات تابش می‌شود. برای شناسایی تفاوت دیدگاه در آن زمان می‌توان گفت که آنها اعتقاد داشتند نور خورشید با نوری که ما با آن اشیاء را می‌بینیم متفاوت بود!!!

- رابرت هوک (۱۶۳۵ تا ۱۷۰۳ میلادی) اولین نظریه موجی بودن نور را مطرح کرد و کریستین هایگنز (۱۶۲۹ تا ۱۶۹۵ میلادی)، دانشمند هلندی آن را بسط و کامل کرد. در حالی که اکثر دانشمندان، از جمله نیوتون (۱۶۴۲ تا ۱۷۲۷ میلادی) اعتقاد به نظریه ذره‌ای بودن نور داشتند.

نور و الکترومغناطیس

- تا قبل از مایکل فارادی (۱۷۹۱ تا ۱۸۶۷ میلادی) در سال ۱۸۴۵، هیچ‌کس به یکسان بودن نور و خصوصیات الکترومغناطیس اعتقاد نداشت. او بعد از آن، در سال ۱۸۴۸ ایده اینکه نور اختلالاتی اکترومغناطیسی است را مطرح کرد، اما فارادی توانایی اثبات ریاضی آن را نداشت.
- جیمز کلارک ماکسول (۱۸۳۱ تا ۱۸۷۹ میلادی) با اثبات‌هایی کاملا ریاضی نشان داد که دیدگاه فارادی درست است. هاینریش هرتز (۱۸۵۷ تا ۱۸۴۹ میلادی) توانست با اثباتی آزمایشگاهی آن را تثبیت کند.
- کارهای ماکسول بعد از او اثرات زیادی در فیزیک داشت؛ نسبیت خاص، معادلات کوانتم، نظریه میدان‌ها و تمام گرایش‌های مهدنسی برق.

سرعت نور

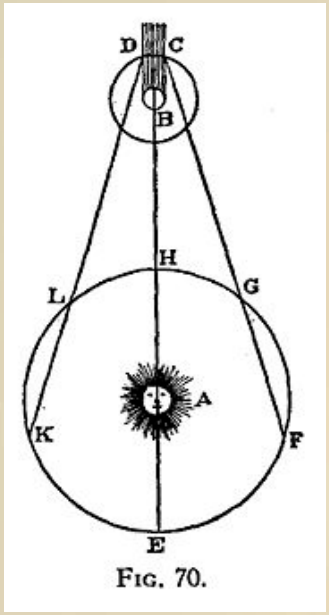
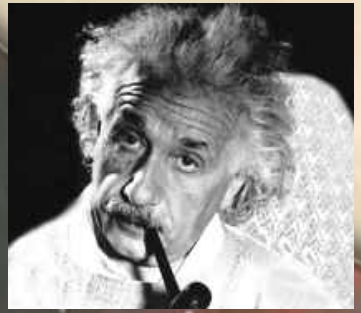
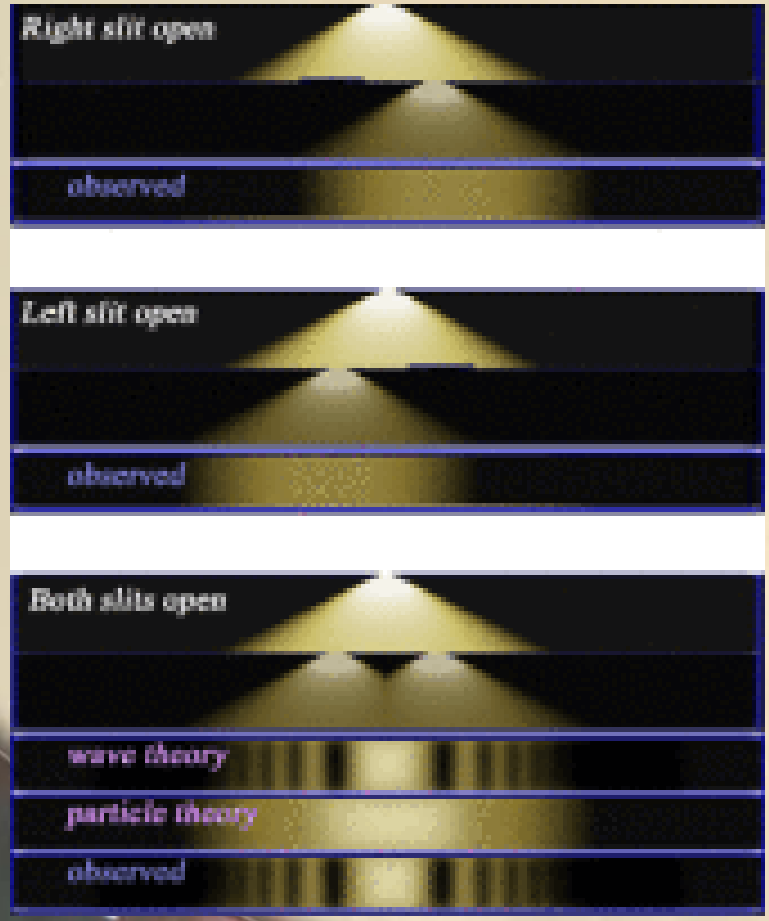


Fig. 70.



- اولین بار سرعت نور توسط منجم رصدخانه پاریس رومر (۱۶۴۴ تا ۱۷۱۰)، هنگامی که روی مدار آیو به دور مشتری کار می‌کرد، اندازه‌گیری شد: ۲.۲×۱۰^{۸} متر بر ثانیه (شکل مقابل).
- جمیز کلارک ماکسول (۱۸۳۱ تا ۱۸۷۹) در محاسبات نظری خود در مورد امواج الکترومغناطیس نشان داد که سرعت نور ثابت و فقط وابسطه به ثابت‌های الکتریکی و مغناطیسی محیط است.
- مایکلسون و مورلی در دهه‌ی ۱۸۸۰ هنگام اندازه‌گیری سرعت حرکت زمین در اتر، مشاهده کردند که سرعت نور در هر دو حالت یکسان است.
- انشتاین (۱۸۷۹ تا ۱۹۵۵)، بر مبنای معادلات ماکسول و مشاهدات مایکلسون و مورلی مکانیکی جدید پایه گذاری کرد که به نسبیت خاص (در سال ۱۹۰۵) و نسبیت عام (در سال ۱۹۱۶) منجر شد
- بعد از آن مشاهدات دیگر انجام شد تا اینکه در سال ۱۹۸۳ سرعت نور به عنوان یک ثابت طبیعت تعریف و متر بر مبنای آن تعریف شد: یک متر فاصله‌ای است که نور در ۱/۲۹۹۷۹۲۴۵۸ ثانیه طی می‌کند.

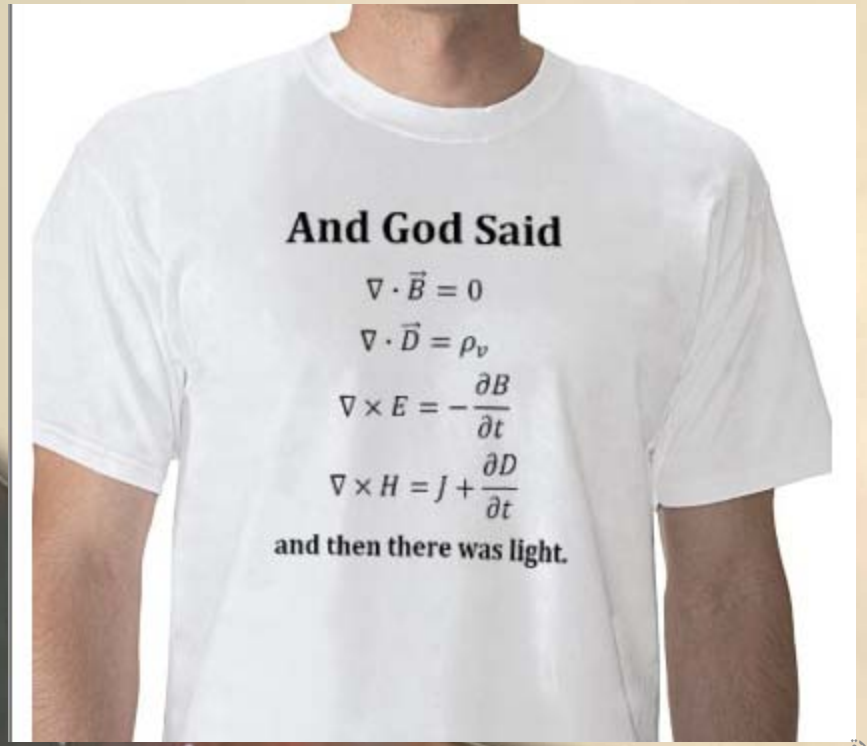
خاصیت موجی نور

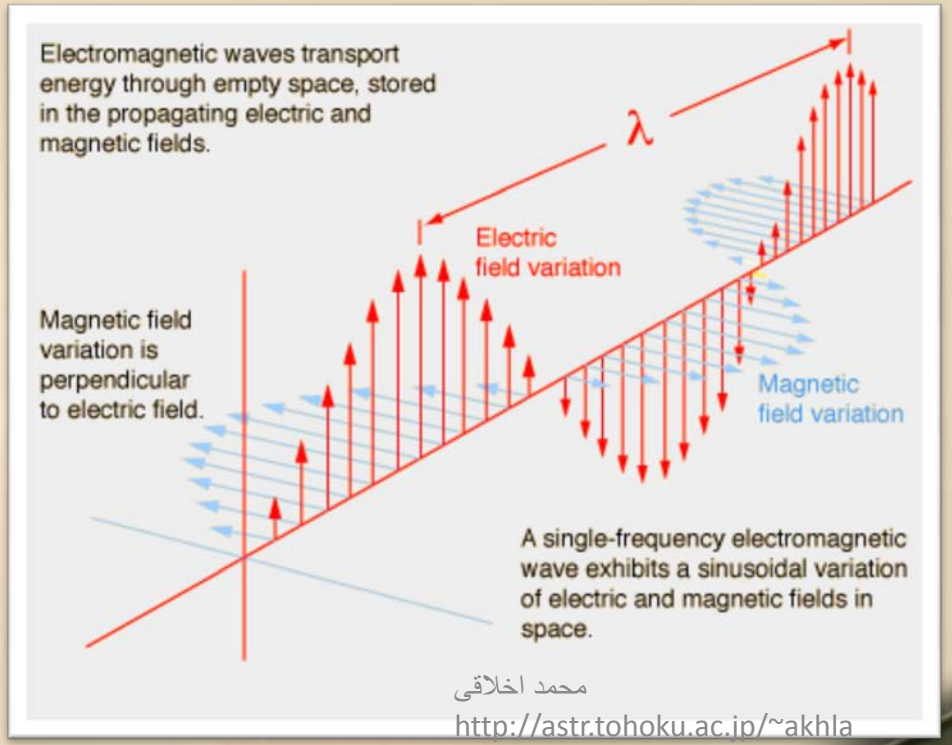


- ابن‌هیثم (۹۶۵ تا ۱۰۴۰ میلادی)، ابن‌سینا (۹۸۰ تا ۱۰۳۷ میلادی) و نیوتون (۱۶۴۲ تا ۱۷۲۷میلادی) از جمله افرادی بودند که اعتقاد به ذره‌ای بودن نور داشتند، ذره‌ای بودن نور شکست نور را توجیه نمی‌کرد.
- در ۱۶۶۰ رابرت هوک کتاب خاصیت موجی نور را چاپ کرد و هویگنز بحث موجی بودن نور را تکمیل کرد و در سال ۱۶۹۰ کتابش را به چاپ رساند.
- آخرین اثبات دقیق برای موجی بودن نور توسط توماس یانگ در سال ۱۸۰۰ میلادی توسط آزمایش دو شکافی انجام شد.
- تا آن زمان عقیده بر این بود که موج حتما به محیطی برای انتقال نیاز دارد (مانند موج‌های صدا یا موج‌های روی آب)، پس نور هم در اتر حرکت می‌کرد.
- در نهایت ماکسول با معادلات خود نشان داد که نور برای انتشار باید به صورت موجی حرکت کند.

امواج الکترومغناطیس (نور)

- معادلات ماکسول تمام رفتارهای نور را در محیط پیش‌بینی می‌کنند.
- طبق این معادلات نور از دو قسمت الکتریکی و مغناطیسی تشکیل شده است که عمود بر هم حرکت می‌کنند.





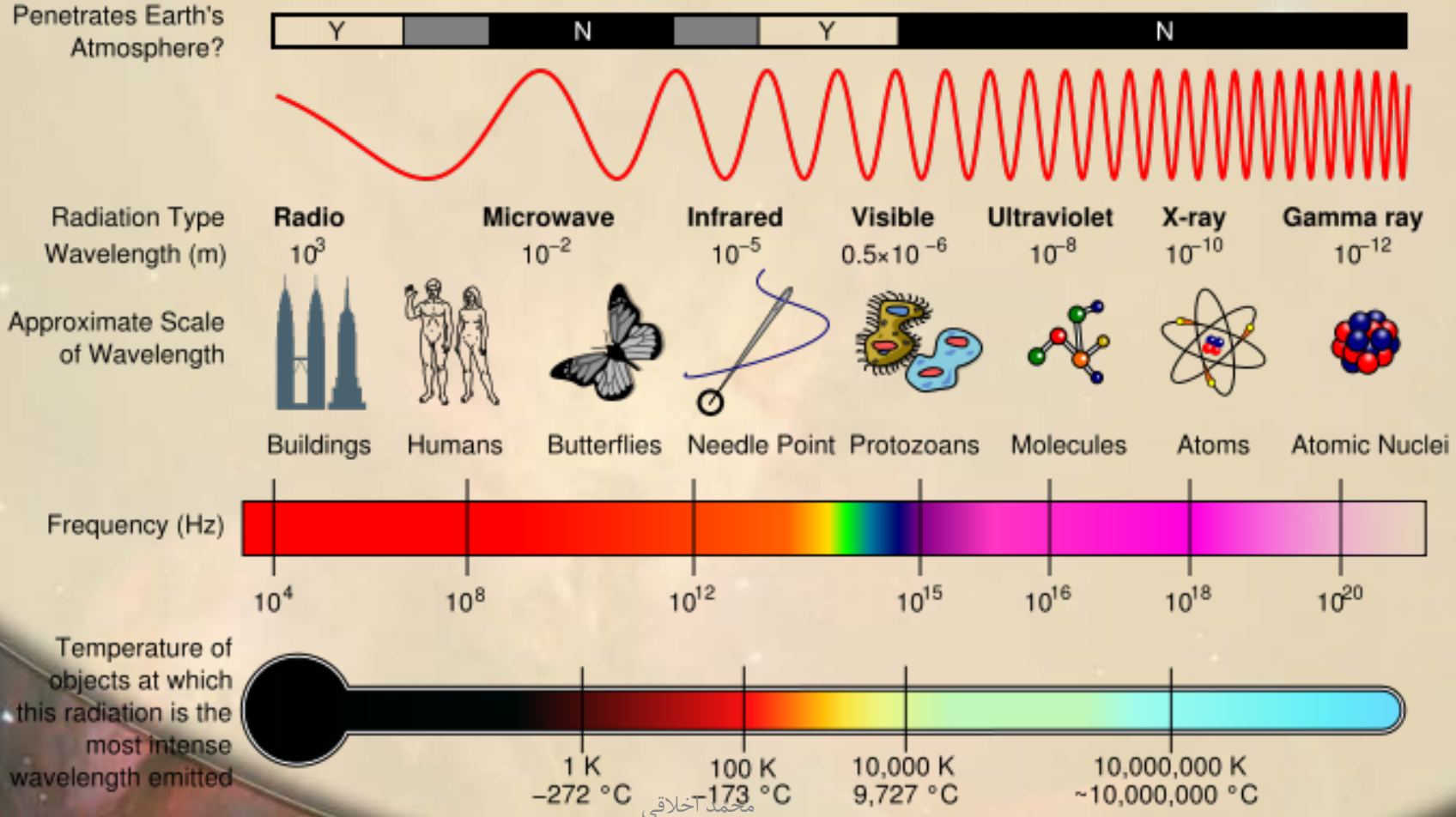
محمد اخلاقی
http://astr.tohoku.ac.jp/~akhlaghi/

اجزاء معادلات ماکسول

- قانون گوس: این قانون که اولین بار توسط کارل فردریش گوس (۱۷۷۷ تا ۱۸۵۵ میلادی) پیشنهاد شد می‌گوید که میدان مغناطیسی توسط بار مغناطیسی ایجاد می‌شود و جهت آن از بار مثبت به بار منفی است.
- قانون گاوس برای مغناطیس: این قانون می‌گوید که ذره‌ای با تک بار مغناطیسی نداریم، بلکه تمام میدان‌های مغناطیسی به صورت دوقطبی تابش می‌شوند.
- قانون فارادی: این قانون می‌گوید که تغییرات میدان مغناطیسی میدان الکتریکی ایجاد می‌کند. این قانون یکی از کاربردی‌ترین اجزاء این معادلات هستند.
- قانون آمپر: که اولین بار توسط (۱۷۷۵ تا ۱۸۳۶ میلادی) پیشنهاد شد و توسط ماکسول کامل‌تر شد می‌گوید که تغییرات میدان اکتریکی نیز میدان مغناطیسی تولید می‌کند.
- جالب‌ترین نتیجه این معادلات در تاریخ فیزیک این بود که سرعت آن دقیقا برابر سرعت پیش‌بینی شده برای نور بود.

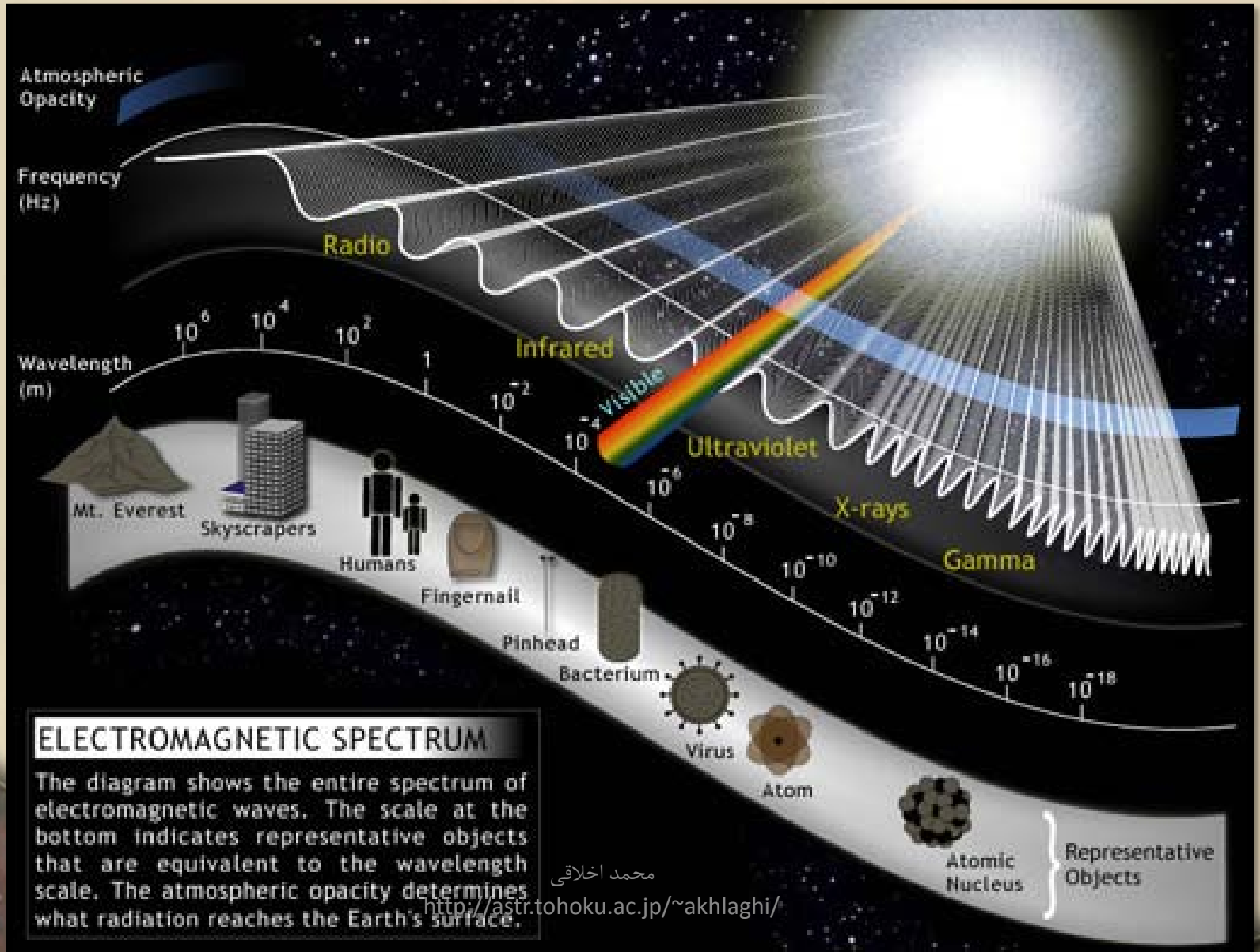
طیف اکترومغناطیس

- طیف الکترومغناطیس بازهٔ تمام فرکانس‌های ممکن برای امواج الکترومغناطیسی است.
- انرژی امواج الکترومغناطیس عموما با سه کمیت فرکانس، طول موج و انرژی فوتونی بیان می‌شود.

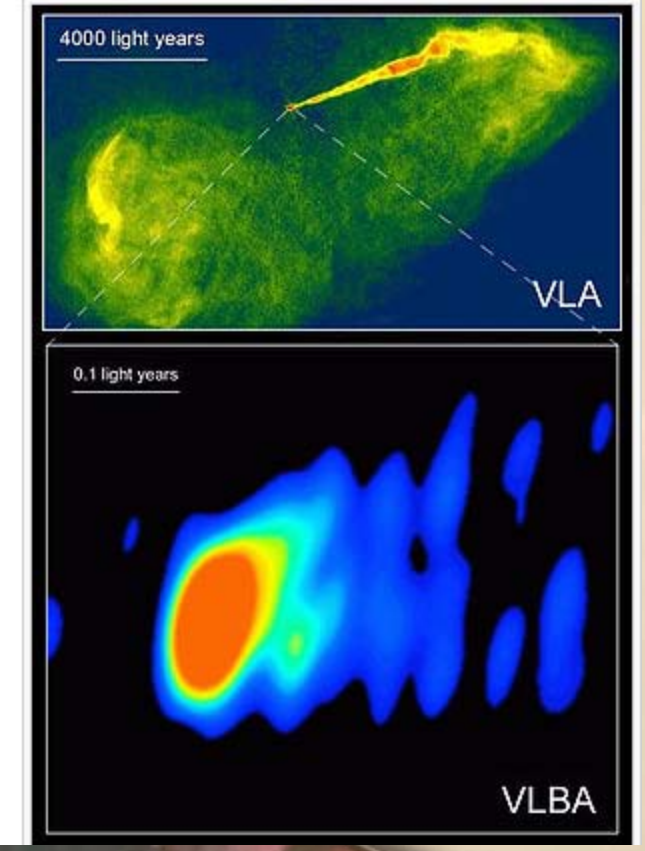


محمد آخلاقی
http://astr.tohoku.ac.jp/~akhlaghi/

طیف الکترومغناطیس

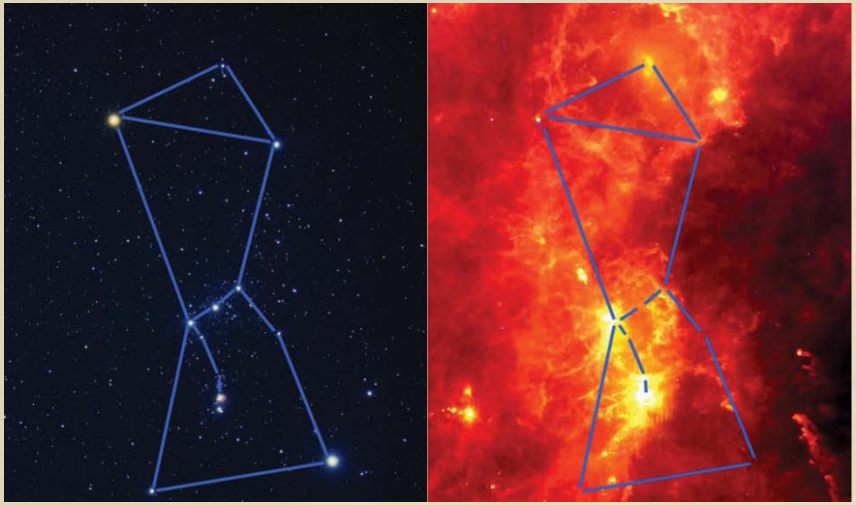


محمد اخلاقی
http://astr.tohoku.ac.jp/~akhlaghi/



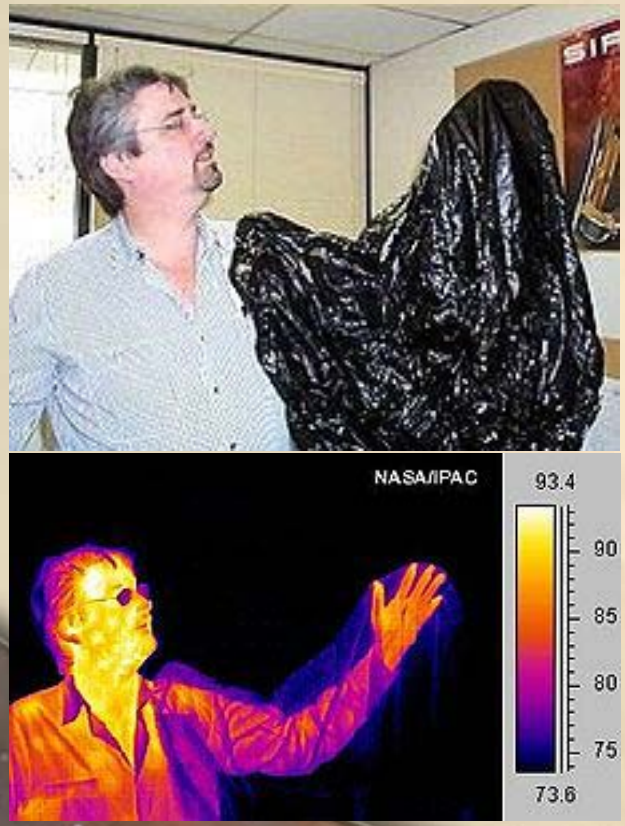
نجوم رادیویی

- در محدودهٔ طول موجی بیشتر از چند میلیمتر کار می‌کند.
- این امواج بیشتر توسط اجسام سرد تابش می‌شوند مانند فضای میان‌ستاره‌ای یا تابش زمینهٔ کیهانی.
- مطالعه گیتی با این امواج اجسام جدیدی را هم به ما معرفی کرده است، مانند: کهکشان‌های رادیویی و میزورها.



نجوم مادون قرمز

- به طور کلی امواج کوتاه‌تر از طول موج‌های رادیویی تا طول‌موج‌های مرئی را مادون قرمز می‌نامند.
- امواج مادون قرمز از اشیاء گرم در کیهان ولی سردتر از ستاره‌ها تابش می‌شوند مانند سیاره‌ها، پیش‌ستاره‌ها یا کهکشان‌های دور؛ این زمینه امروز کاربردهای زیادی دارد.
- به دلیل شباهت بسیار زیاد اپتیک امواج مادون قرمز با امواج مرئی، تلسکوپ‌های مرئی در شرایط خاص، می‌توانند تلسکوپ‌های مادون قرمز نیز باشند.



نجوم مرئی

- محدودهٔ فرکانس‌های مرئی از ۳۸۰نانومتر (بنفش) تا حدود ۷۵۰ نانومتر (قرمز) است.
- بیشتر داده‌های ما از کیهان در این محدودهٔ فرکانسی است.
- تلسکوپها معمولا با CCDها یا طیف‌سنج‌ها در این محدوده امواج را بررسی می‌کنند.
- نجوم آماتوری را هم می‌توان شاخه‌ای از این زمینه در نظر گرفت.

نجوم ماوراء بنفش

- محدودهٔ ماوراء بنفش محدوده بین ۱۰نانومتر تا ۳۲۰ نانومتر است.
- در این محدوده نور توسط اتمسفر جذب می‌شود و به همین دلیل تمام مشاهدات ما در این محدوده باید توسط تلسکوپهای فضایی گرفته شود.
- این محدوده برای مطالعه ابرهای داغ میان ستاره‌ای و ستاره‌های اولیه کاربرد زیادی دارد.
- بیشتر ستاره‌ها در محدوده مرئی تابش می‌کنند، به همین دلیل دنیای موراء بنفش دنیای خیلی متفاوتی است که فقط اشیاء گرم‌تر را نشان می‌دهد؛ ستاره‌های نوپا یا ستاره‌های در حال مرگ

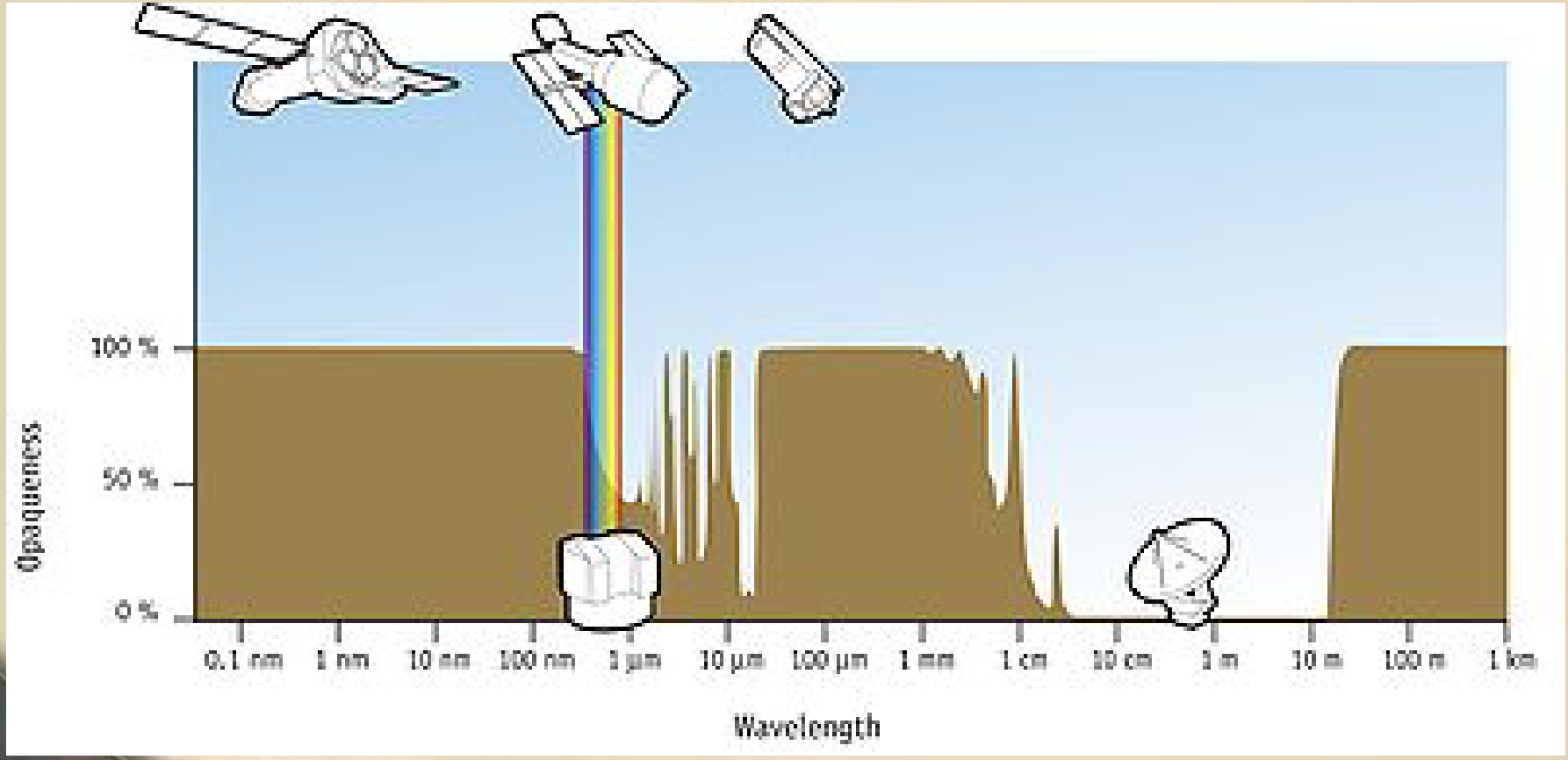
نجوم اشعه X

- امواج اشعه X اواجی بسیار پرانرژی هستند که فقط از منطقه‌هایی از فضا تابش می‌شوند که دمایی بین چند میلیون تا چندصد میلیون درجهٔ کلوین دارند.
- به این دلیل که این امواج از جو رد نمی‌شوند، دانشمندان مجبورند برای مطالعه از تلسکوپ‌های فضایی، راکت یا بالون استفاده کنند.
- کاشف اولین کاندید سیاه‌چاله که توسط این امواج آن را کشف کرده بود، یکی از برندگان جایزه نوبل فیزیک بود.
- بر مبنای نظریات، فضای میان‌کهکشانی از ذرات بسیار پر انرژی (با تابش در محدودهٔ امواج ایکس) تشکیل شده است.

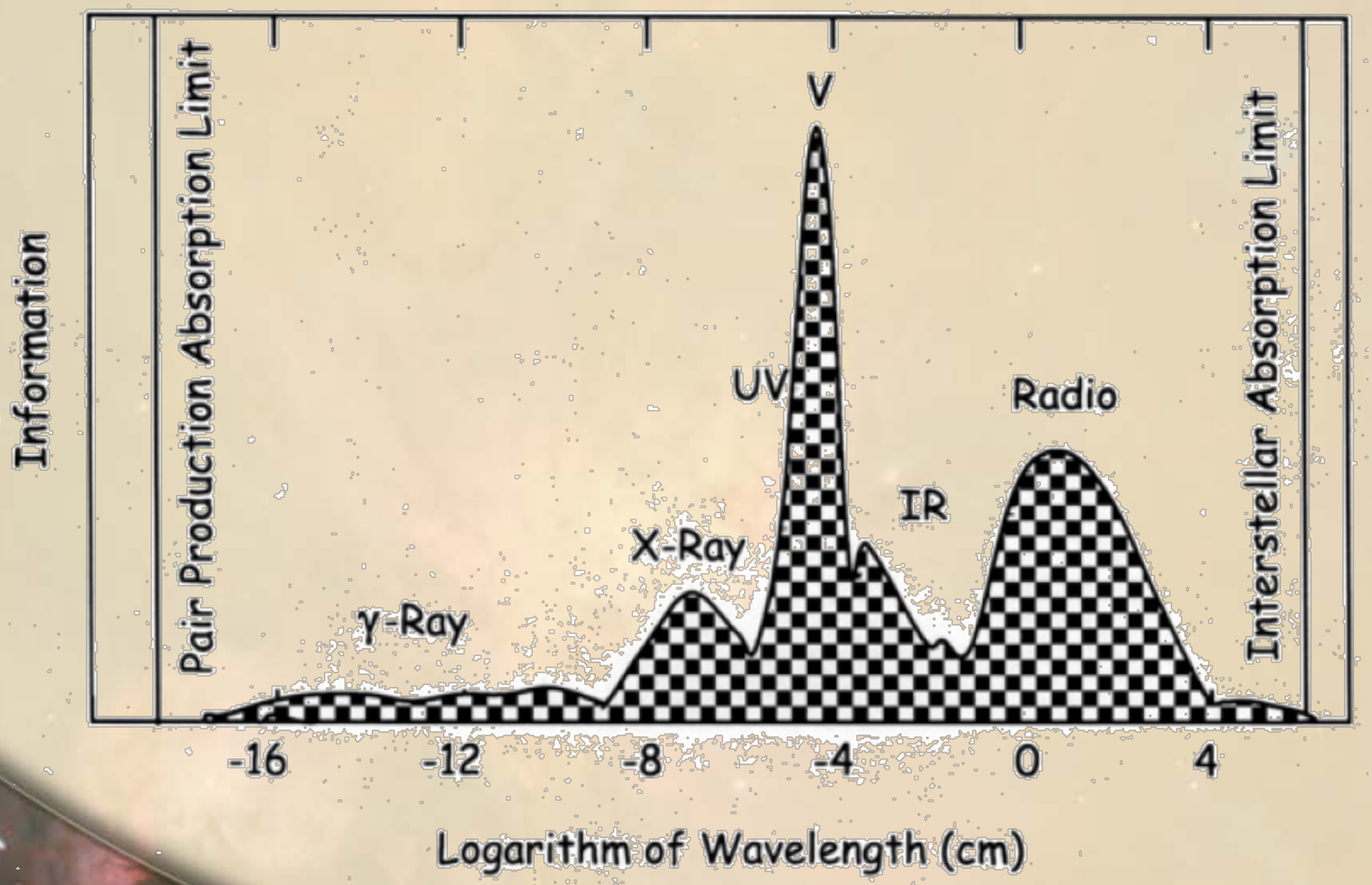
نجوم اشعه گاما

- اشعه گاما پرانرژی‌ترین بخش امواج الکترومغناطیس هستند.
- اولین تابش کننده امواج گامای مشاهده شده، انفجارهای سطح خورشید در تاج خورشیدی بودند.
- انفجارهای امواج گاما یکی از اصلی‌ترین و عجیب‌ترین بخش‌های نجوم هستند، ماهیت ذاتی این انفجارها هنوز دقیقا معلوم نیست. منبع این امواج میلیاردها سال نوری از ما دور هستند. به این معنی که انرژی تابش شدهٔ آنها در یک ثانیه از کل انرژی تابش شدهٔ خورشید در کل حیاتش (۱۰ میلیاد سال) بیشتر است.

گذردهی این محدوده‌ها توسط جو

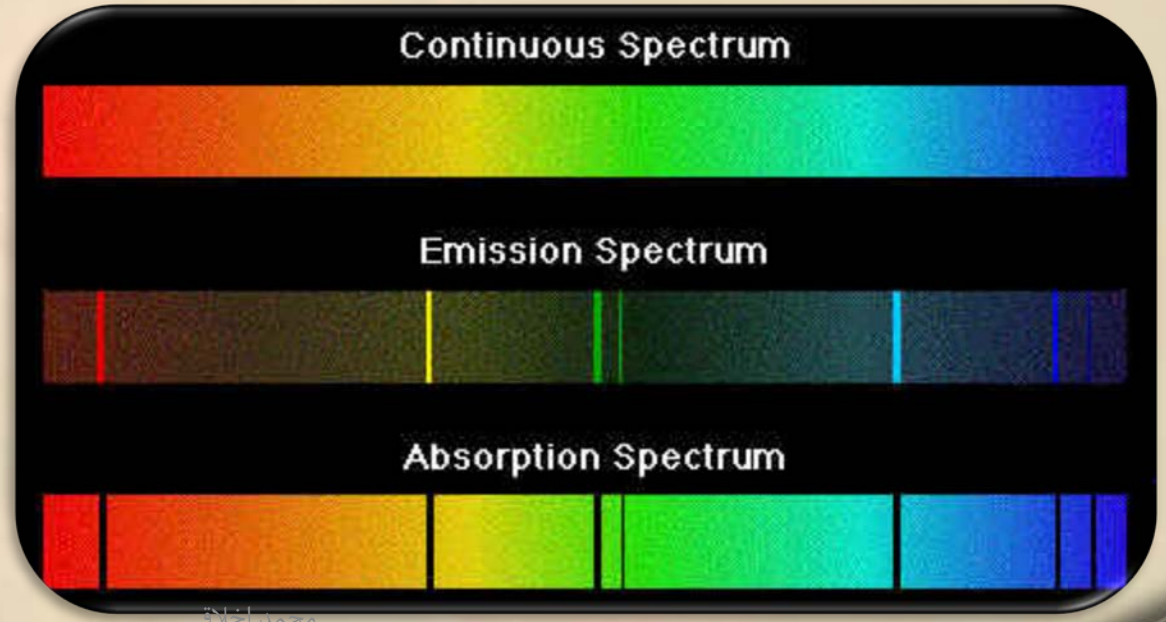


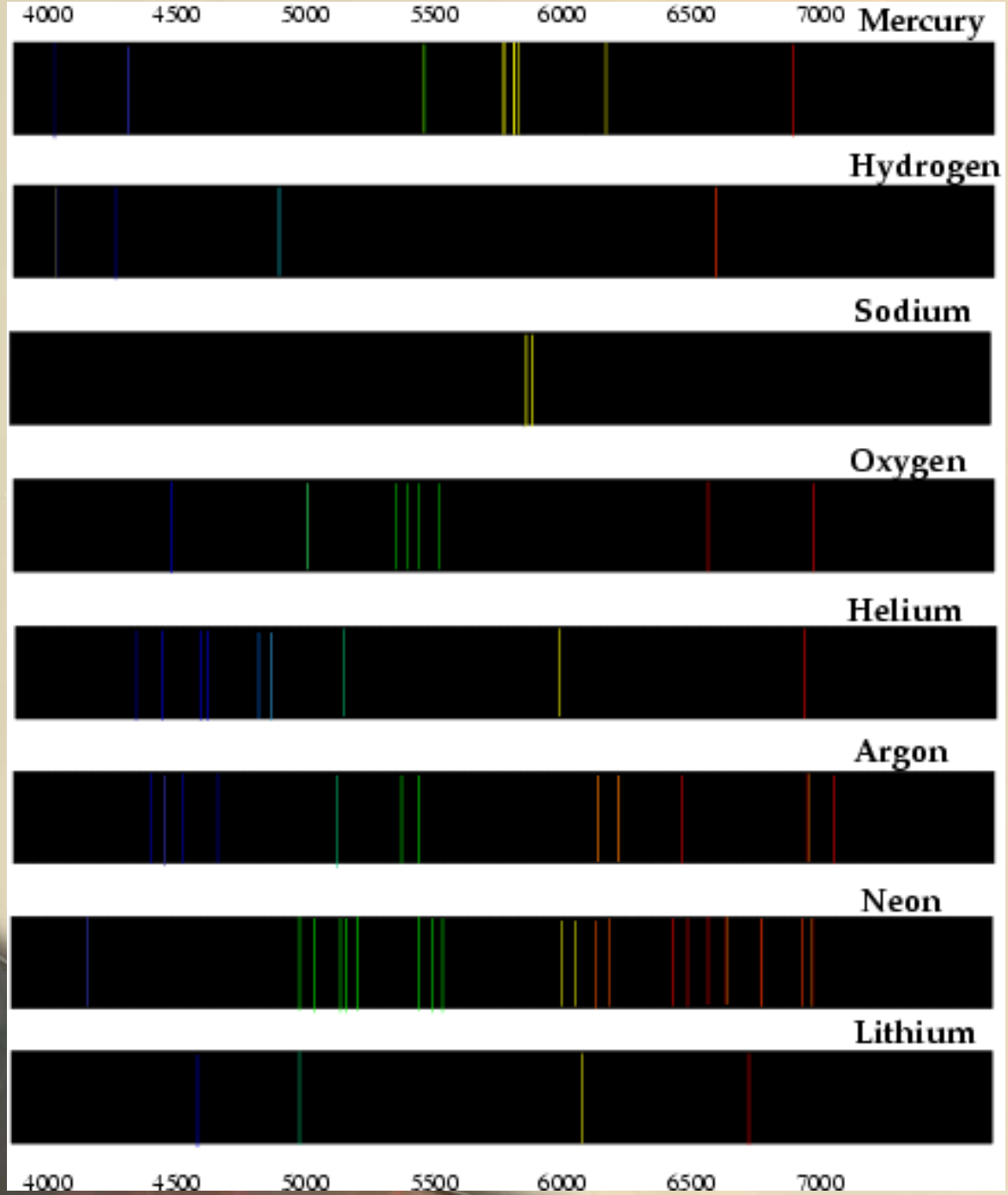
محدودهٔ دانش ما در هر محدوده



خطوط طیفی (علم طیف‌سنجی)

- نیوتون اولین بار در قرن هفدهم با قراردادن یک منشور در راه نور خورشید آن را به اجزاء رنگی (طیف) تقسیم کرد. William Wollaston (1766-1828) در سال ۱۸۰۵ با بررسی دقیق‌تر این طیف‌ها دید که خطوطی تاریک در طیف خورشید قرار دارد.
- تا ۱۸۱۴ Joseph Fraunhofer (1787 – 1826) ۴۷۵ خط تیره در طیف خورشید ثبت کرده بود. هنگام ثبت طول موج آنها، فرانهوفر مشاهده کرد که طول موج چند خط سیاه دقیقا طول موج خطوط روشنی است که از نمک هنگامی که در آتش ریخته می‌شود تابش می‌شود.
- با شناخت همین خط تابشی سدیم و اینکه این خطوط همان خطوط سیاه طیف خورشید هستند، علم طیف‌سنجی کشف شد.

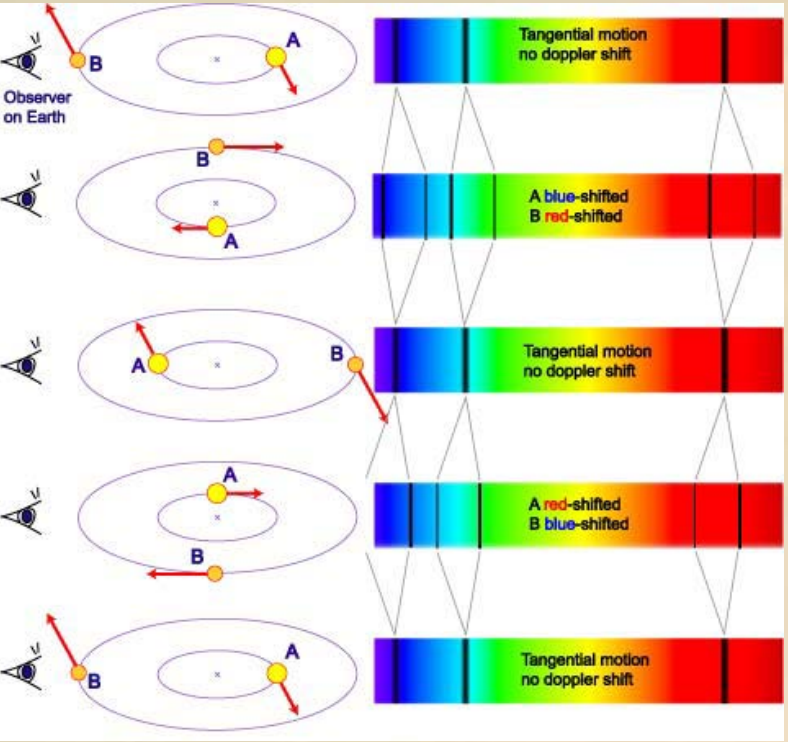




طیف نشری

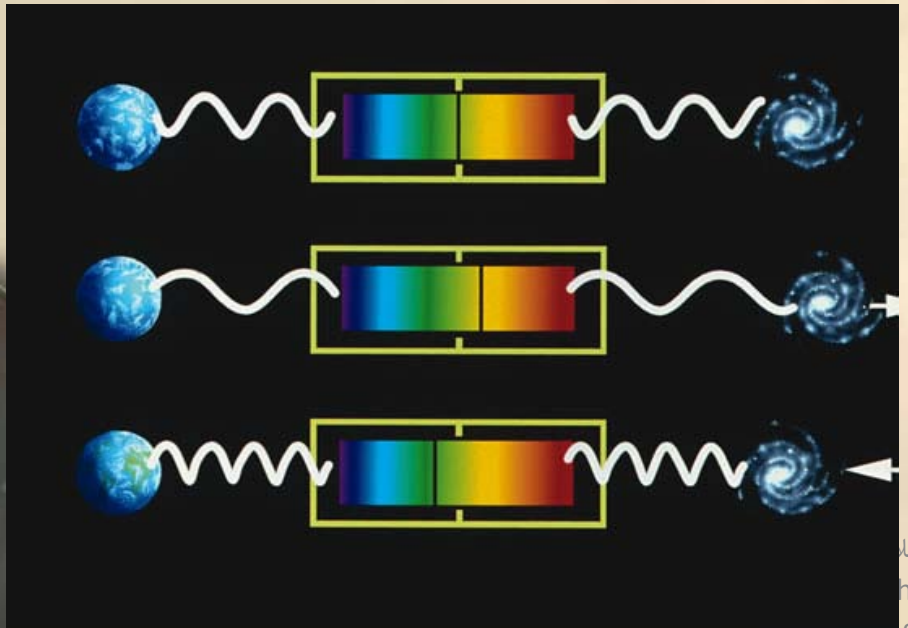
محمد اخلاقی
http://astr.tohoku.ac.jp/~akhlaghi/

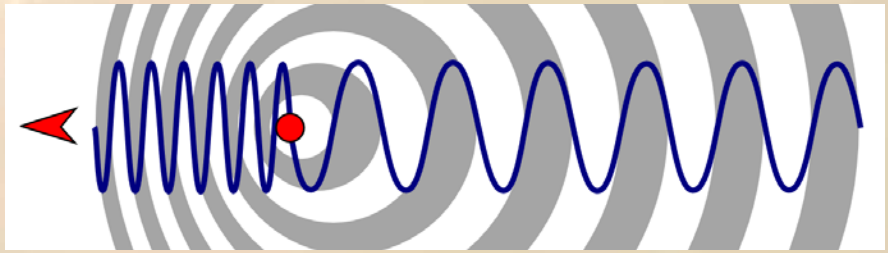
اثر دوپلر در طیف ستارگان

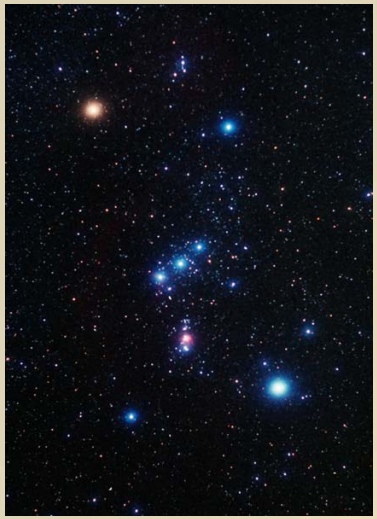


- یکی از کاربردهای دیگر طیف جذبی ستارگان بدست آوردن سرعت دورشدن یا نزدیک‌شدن آنان نسبت به زمین بدست آورد:

$$f = \left(\frac{v + v_r}{v + v_s}\right) f_0$$

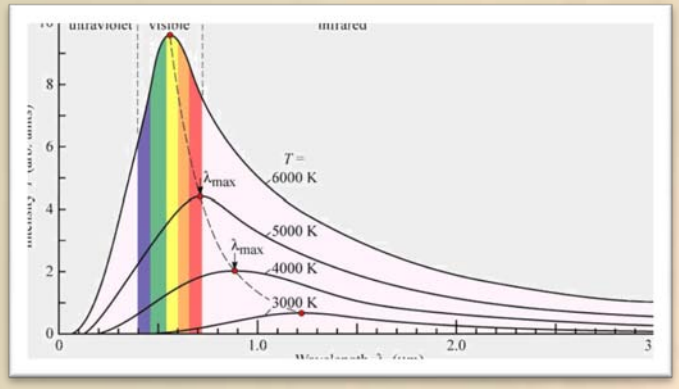






تابش جسم سیاه

- اگر به صورت‌فلکی جبار نگاه کنید، می‌بینید که اختلاف رنگی شدیدی میان ابطالجوزا و رجل‌الجبار وجود دارد. این تفاوت رنگ به دلیل تفاوت در دمای سطحی این دو ستاره است؛ ابطالجوزا ۳۴۰۰ کلوین و رجل‌الجبار بیشتر از ۱۰هزار درجه کلوین است.
- ارتباط میان رنگ تابش شده و دمای آن اولین بار توسط Thomas Wedgeworth در سال ۱۷۹۲ کشف شد.



- با مشاهدات دقیق بعد از آن توسط دانشمدان دیگر دیده شد که هر جسمی که دمای بیشتر از ۰درجه کلوین دارد، تابشی دارد که می‌توان آن را با نمودار زیر نشان داد.
- ویلهلم وین (۱۸۶۴ تا ۱۹۲۸)، توانست نشان بدهد که طول موج تابش شده و دمایی که در آن موج تابش می‌شود رابطه زیر را با هم دارند:

$$\lambda_{max} T = 0.290\ cm \times K$$

- در نهایت آقای مکس پلانک (۱۸۵۸ تا ۱۹۴۷ میلادی) توانست با فرض تابش گسسته به معادله‌ای برای منحنی وین برسد:

$$\lambda_i = \frac{2L}{n_i}, \Rightarrow E_{n_1,n_2,n_3}(r) = \left(r + \frac{1}{2}\right)\frac{hc}{2L}\sqrt{n_1^2 + n_2^2 + n_3^2}.$$

تابش جسم سیاه

$$\langle E\rangle = -\frac{d\log(Z)}{d\beta} = \frac{\varepsilon}{\exp(\beta\varepsilon)-1}. \Longrightarrow u(\nu,T) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3}\frac{1}{e^{h\nu/kT}-1}.$$

- نکته جالب در مورد این تابش این است که اصلا به جنس، مقدار، حجم یا هیچ خاصیت شیئ ندارد، کافی است که یک شیئ دمایی بالای صفر مطلق داشته باشد تا این تابش را داشته باشد.
- با توجه به اینکه دمای سطح خورشید ۵۸۰۰درجه کلوین و بیشترین طول موج تابش شده از آن ۵۰۰۰ آنگستروم است، می‌توان رابطهٔ وین را به این صورت نوشت:

$$\lambda_{max}T=(5000\text{Å})(5800\text{K})$$

- تابش جسم سیاه را می‌توان یکی از اصلی‌ترین دلایل پیدایش نظریه کوانتم دانست که در جلسه بعد مطرح خواهد شد.

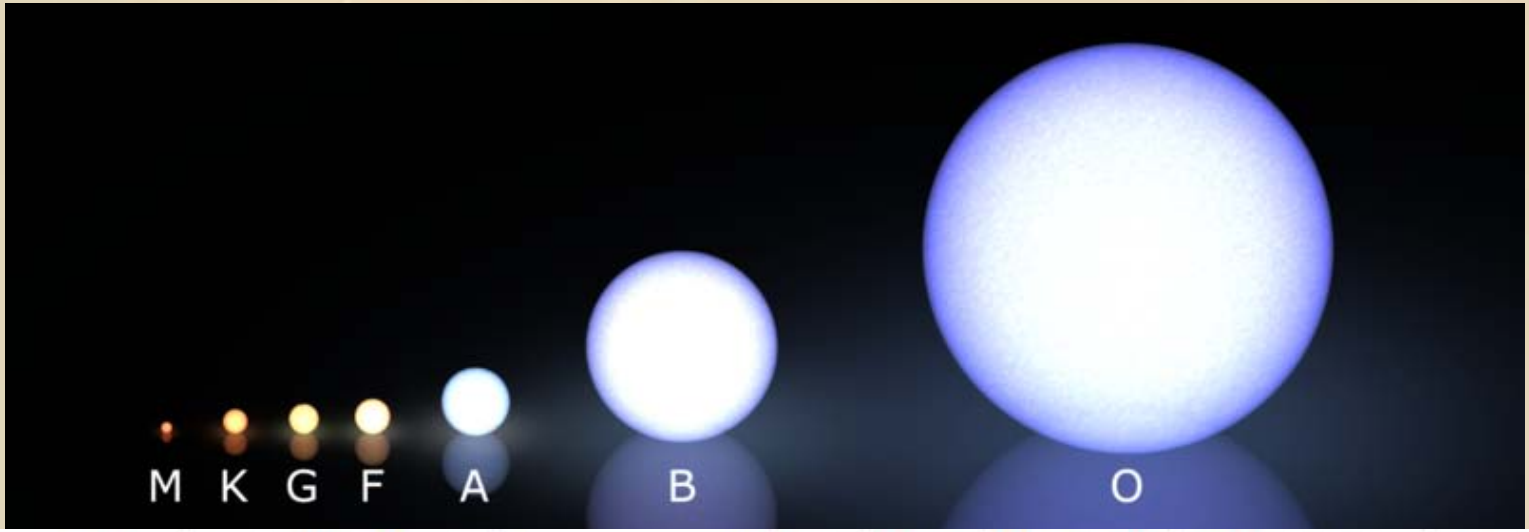
گونه‌های طیفی ستارگان

- همانطور که از اسم آن برمی‌آید ما ستارگان را بر اساس خصوصیات طیفیشان به دسته‌های جداگانه تقسیم می‌کنیم.
- از طریق بررسی طیف و شناخت خطوط طیفی ستارگان، می‌توانیم ببینیم که چه عناصری در ستاره برانگیخته یا یونیزه شده‌اند.
- از آنجایی که انرژی لازم برای برانگیختگی یا یونیزه کردن عناصر مختلف معلوم است، می‌توان به دمای سطحی ستاره پی برد.
- روش فعلی تقسیم‌بندی گونه‌های طیفی روش مورگان-کینان است، که بعد از تقسیم تمام ستاره‌ها به هفت گروه اصلی O، B، A، F، G، K، M، بر مبنای دما که در آن O گرم‌ترین و M سردترین است، هر کدام از این گروه‌ها را به ده قسمت تقسیم می‌کند.
- در نهایت با قرار دادن اعداد رومی، روشنایی و اندازه ستاره مشخص می‌شود، این اعداد نشان‌دهنده‌ی پهن‌شدگی خطوط طیفی هستند. I نشاندهندهٔ ابرغول‌ها، III نشاندهندهٔ غول‌ها و V نشاندهندهٔ کوتوله‌ها و ستارگان رشته اصلی است.

خورشید ما از گونه‌ی G2V است.

گونه های طیفی ستارگان

- ستاره‌ها بر مبنای دمای سطحی خود، در طول‌موج‌های خاصی شدت بیشتری خواهند داشت (تابش جسم سیاه). بر همین مبنا ستاره‌ها به گونه‌های طیفی زیر تقسیم می‌شوند:



Class	Temperature	Conventional color	Apparent color[3]	Mass	Radius	Luminosity	Hydrogen lines	% of all MSSs[4]
O	30,000–60,000 K	blue	blue	60	15	1,400,000	Weak	~0.00003%
B	10,000–30,000 K	blue white	blue white to white	18	7	20,000	Medium	0.13%
A	7,500–10,000 K	white	white	3.1	2.1	80	Strong	0.6%
F	6,000–7,500 K	yellowish white	white	1.7	1.3	6	Medium	3%
G	5,000–6,000 K	yellow	yellow	1.1	1.1	1.2	Weak	8%
K	3,500–5,000 K	orange	yellow orange	0.8	0.9	0.4	Very weak	13%
M	2,000–3,500 K	red	orange red	0.3	0.4	0.04	Very weak	>78%

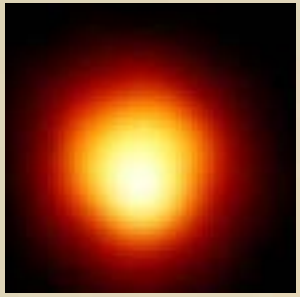
محمد اخلاقی

گونه‌های طیفی ستارگان

- **گونهٔ O:** بیشتر تابش این گونه در ماوراء بنفش است و در محدودهٔ مرئی در آبی خیلی روشن تابش می‌کنند. کمیاب‌ترین نوع ستاره هستند؛ از هر سه میلیون ستاره، یکی از گونه O است. توان انرژی خروجی از آنها بیشتر از یک میلیون برابر خورشید است و سنگین‌ترین گونه‌ی ستاره هستند. طیف این ستارگان از Si IV، O III، N III، C III تشکیل شده‌است. ستاره‌های زتا و دلتا جبار از این دسته هستند.
- **گونهٔ B:** این گونه نیز بسیار روشن است و بیشتر در طول موج‌های آبی تابش می‌کند. بیشتر نوع دیده شده از این گونه نوع B2 است. خطوط Mg II و Si II در آنها زیاد دیده می‌شود. به دلیل عمر کوتاه گونه‌های O و B، این ستارگان عموما زیاد در کهکشان پراکنده نمی‌شوند و عموما به صورت دسته‌هایی از ستاره‌های O و B می‌مانند به نام گروه‌های OB که عموما با ابرهای ملکولی عظیمی که آنها را تشکیل داده‌اند می‌مانند. رجل‌الجبار و ستاره‌های روشن خوشه پروین از این دسته هستند. از هر ۸۰۰ ستاره اطراح خورشید یکی از گونه B است.

گونه‌های طیفی ستارگان

- **گونه A:** بیشتر ستاره‌هایی که ما با چشم غیر مسلح می‌بینیم، از این گونه هستند. خطوط Fe II، Mg II، Si II در آنها به وفور دیده می‌شود. بیشتر جمعیت دیده شده از این گونه A5 هستند. از هر ۱۶۰ ستاره اطراف خورشید یکی از گونه A است. ستاره‌های وگا و شعرای‌یمانی (شباهنگ) از این گونه به حساب می‌آیند.
- **گونه F:** در این دسته عموما خطوط طیفی Fe I و Cr I دیده می‌شود. رنگ آنها زرد روشن است و از بین هر ۳۳ ستاره در نزدیکی خورشید یکی از نوع F است. شعرای شامی (در کلب اصغر) از این گونه است.
- **گونه G:** به دلیل اینکه خورشید در این گونه قرار دارد، ما این گونه را از همه بهتر می‌شناسیم. خطوط Ca II در اینها زیاد دیده می‌شود. آلفا قنطورس نیز در این گروه قرار دارد. از هر ۱۳ ستاره اطراف خورشید یکی از گونه G است. غول‌ها و ابرغولها در آخرین مراحل عمر خود از این گونه می‌گذرند اما به دلیل اینکه مدت زمان زیادی در آن نمی‌مانند، غول‌های زیادی در این گونه دیده نشده است.



گونه‌های طیفی ستارگان

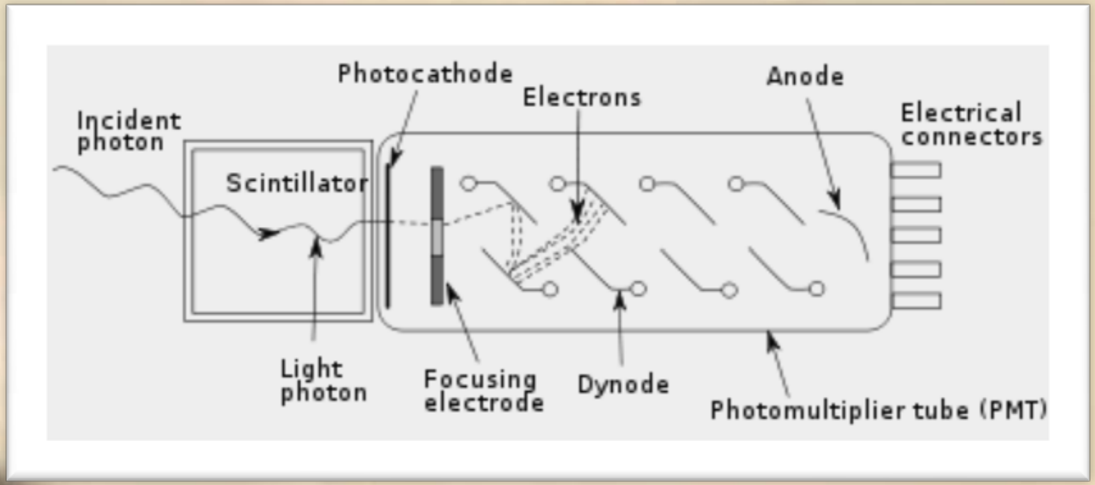
- **گونه K:** این ستاره‌ها رنگ نارنجی روشنی دارند که خنک‌تر از خورشید هستند. بعضی از ستارگان این گونه ابرغول‌ها و غول‌ها هستند. فلزات عموما به صورت غیر یونیزه شده در آنها وجود دارند. در گونه‌های آخر K، طیف دی‌اکسید تیتانیوم دیده می‌شود. از هر هشت ستاره اطراف خورشید یکی از گونه K است. اعتقاد بر این است که پیدا کردن حیات اطراف این ستارگان بیشترین احتمال را دارد. الدبران از این گونه است.
- گونه M: این گونه با اختلاف زیاد بیشترین گونه‌ای است که دیده شده است: حدود ۷۶درصد ستارگان اطراف خورشید از این نوع هستند. غول‌های زیادی مانند ابطالجوزا نیز از این گونه به حساب می‌آیند. ملکول‌های زیادی در طیف این گونه از ستارگان دیده می‌شود.

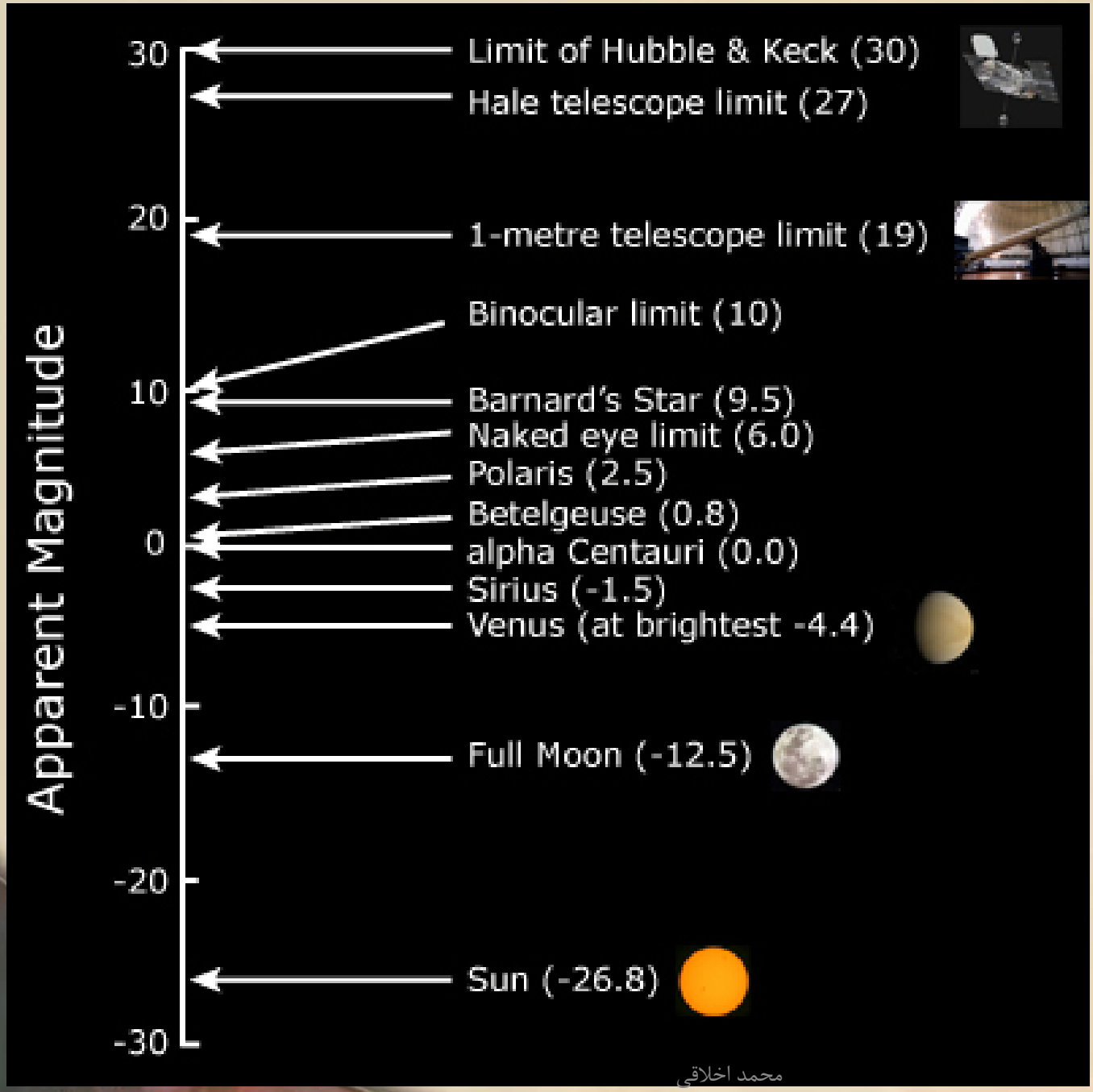
مقیاس قدر

- تقریبا تمام اطلاعات ما از ستارگان، کهکشان‌ها و ابرهای میان‌ستاره‌ای به نور آنها بستگی دارد.
- تمام دانشمان از جهان را مدیون مطالعه کمی نور اجرام سماوی هستیم
- هیپارکوس یونانی (۱۹۰ تا ۱۲۰ قبل از میلاد) اولین کسی بود که ستاره‌ها را بر اساس قدرشان جدول‌بندی کرد
- او پرنورترین جرم سماوی را قدر ۱ دانست و کم‌نورترین آنها را ۶
- از زمان هیپارکوس ملاک او تکامل پیدا کرد طوری که امروزه اختلاف قدر بر اساس نسبت میان درخشندگی دو ستاره تعریف می‌شود:
- درخشندگی ستاره‌ای که ۵ قدر از ستاره دیگر کمتر باشد ۱۰۰ برابر است:
- اختلاف یک قدر معادل $100^{1/5}$ یا ۲.۵۱۲ اختلاف درخشندگی است

مقیاس قدر

- با کمک دستگاه‌های فوتومتر منجمان امروزه می‌توانند قدر یک ستاره را تا دقت ۰.۰۱ قدر پیدا کنند.
- از زمان هیپارکوس مقیاس قدر خیلی گسترش پیدا کرده است: خورشید ۲۶.۸۱- و کم‌نورترین کهکشان دور: ۲۹.
- روشنایی (Brightness) ستاره بر اساس درخشندگی (Luminosity) (در تمام طول‌موج‌ها) که از صفحه‌ای عمود بر نور می‌گذرد تعریف می‌شود

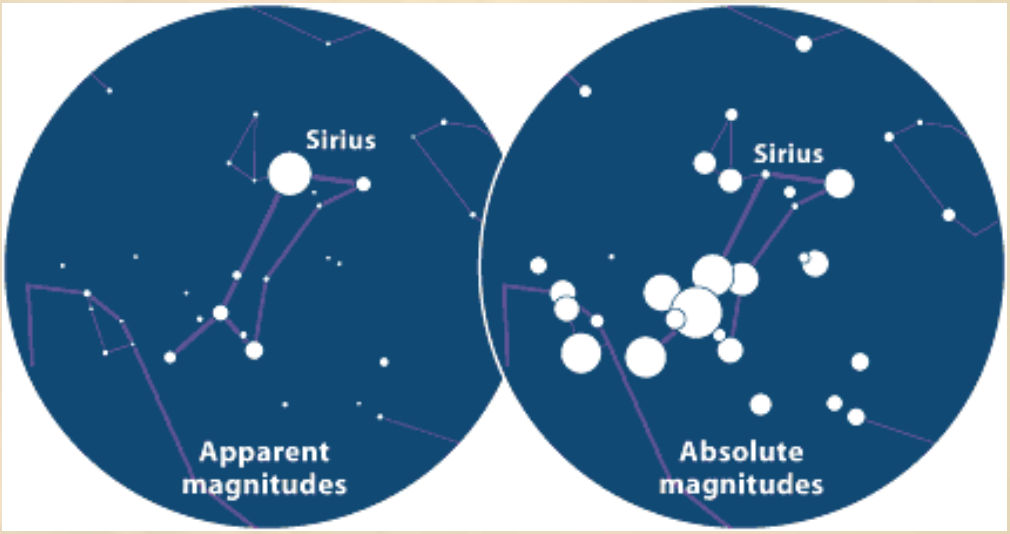



Apparent Magnitude
30
20
10
0
-10
-20
-30
Limit of Hubble & Keck (30)
Hale telescope limit (27)
1-metre telescope limit (19)
Binocular limit (10)
Barnard's Star (9.5)
Naked eye limit (6.0)
Polaris (2.5)
Betelgeuse (0.8)
alpha Centauri (0.0)
Sirius (-1.5)
Venus (at brightest -4.4)
Full Moon (-12.5)
Sun (-26.8)

قدر ظاهری

قدر مطلق

- همانطور که دیدیم قدر ظاهری که تا به حال در موردش صحبت کردیم، وابستگی شدیدی به فاصله ستاره از ما دارد، پس نمی‌تواند به عنوان ملاکی برای روشنایی ستاره باشد
- بر همین اساس، قدر مطلق را قدر هر ستاره در فاصله ۱۰پارسکی تعریف می‌کنیم. در رابطه زیر مقیاس فاصله را چنین تعریف می‌کنیم:



قدر ستارگان

- اگر درخشندگی (انرژی بر واحد زمان) ستاره را L بنامیم، آنگاه شار (انرژی بر واحد سطح بر واحد زمان) نوری که از آن ستاره به ما می‌رسد برابر می‌شود با: (که در آن r فاصله ستاره است.)

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

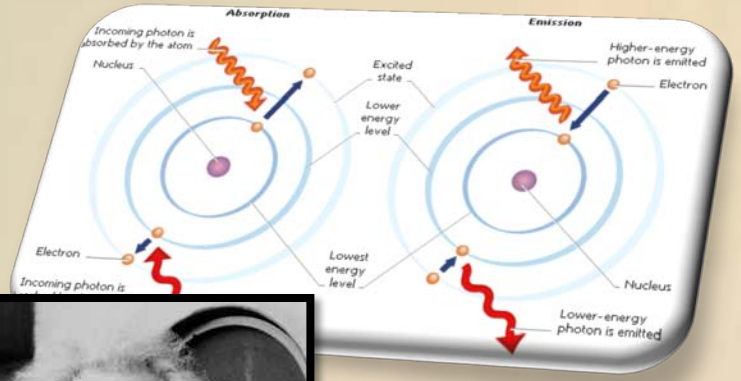
- بنابر تعریف، ۵ درجه اختلاف قدر برابر است با ۱۰۰ برابر شدن شار ستاره، یعنی:

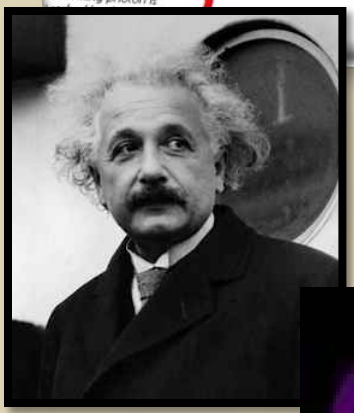
$$\frac{F_2}{F_1} = 100^{(m_1 - m_2)/5} \Rightarrow m_1 - m_2 = -2.5 log_{10}\left(\frac{F_1}{F_2}\right)$$

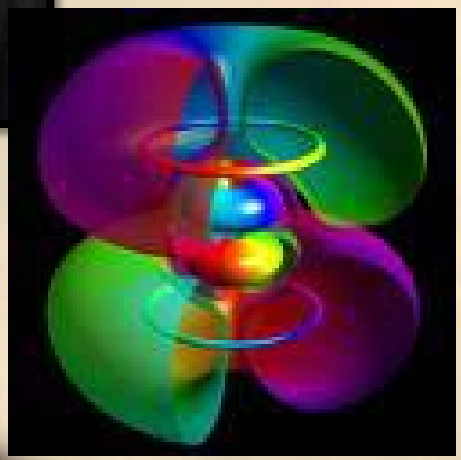
- با تعریف قدر مطلق به عنوان قدر ستاره اگر در فاصله ۱۰پارسک از خورشید قرار داشت می‌توانیم به این رابطه میان قدر ظاهری، قدر مطلق و فاصله برسیم:

$$\frac{F_1}{F_2} = \left(\frac{L_1/4\pi r_1^2}{L_2/4\pi r_2^2}\right) \Rightarrow \frac{F_M}{F} = \left(\frac{r}{10pc}\right)^2 \Rightarrow m - M = 5 log_{10}\left(\frac{r}{10pc}\right)$$

جلسه چهارم: فیزیک کوانتم و ساختار اتم



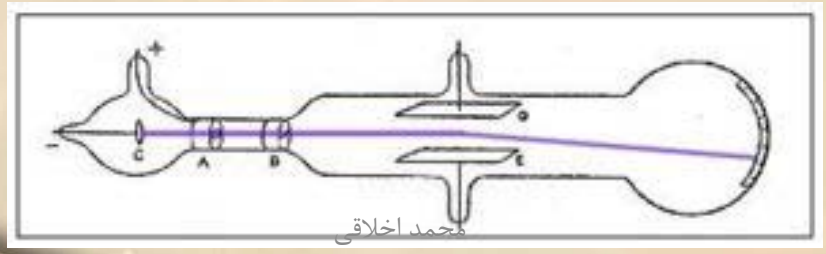




- تاریخ شناخت اتم
- تابش جسم سیاه، طیف گسسته و انشتاین
- مکانیک کوانتم
- طیف جذبی و نشری
- اطلاعات درون طیف

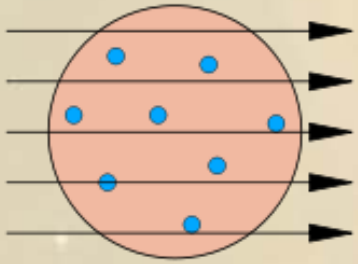
تاریخ شناخت اتم

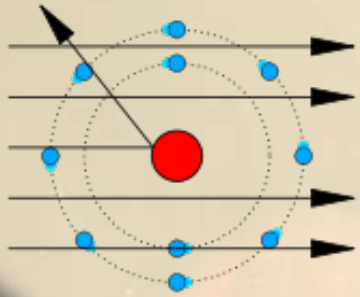
- واژهٔ اتم به اتمیست‌های یونان باستان و مخصوصا دموکریتوس (۴۶۰ تا ۳۷۰ پیش از میلاد) باز می‌گردد. که البته در آن زمان مفهومی کاملا فلسفی بود.
- در اواخر قرن هجدهم لاوازیه (۱۷۴۳ تا ۱۷۹۴ میلادی) و پروست (۱۷۵۴ تا ۱۸۲۶ میلادی) با ارائه نظریهٔ بقاء جرم و برابری نسبت‌ها در شیمی راه را برای جان دالتون (۱۷۶۶ تا ۱۸۴۴ میلادی) باز کرد تا ادعا کند که ماده از اتم‌های متفاوت تشکیل شده است که اتم‌ها در واکنش شیمیایی تغییر نمی‌کنند ولی با پیوندهایشان مواد مختلف را می‌سازند.
- تا سال ۱۸۹۷ که تامسون (۱۸۵۶ تا ۱۹۴۰ میلادی) الکترون‌ها را شناخت، اتم به عنوان بنیادی‌ترین ساختار ماده شناخته می‌شد. او با فرستان الکترون‌ها در میدان الکتریکی دید که بار دارند.



تاریخ شناخت اتم

- تامسون به این نتیجه رسید که اتم تقسیم‌پذیر است و الکترون‌ها به همراه بارهای مثبت در اتم پخش هستند.
- ارنست راترفورد (۱۸۷۱ تا ۱۹۳۷ میلادی) که از دانشجویان تامسون بود توانست در سال ۱۹۰۹ ثابت کند که اتم از یک هسته مثبت سنگین با بارهای منفی سبک اطراف تشکیل شده است.





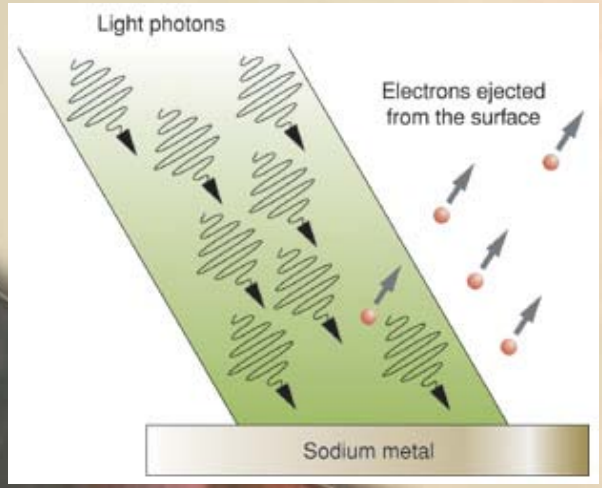
- اما بر مبنای یکی از نتایج معادلات ماکسول؛ معادلهٔ لارمور ذره‌ای باردار که شتاب بگیرد (حرکت چرخان) لزوما باید تابش الکترومغناطیسی داشته باشد و این اتم را ناپایدار می‌کند.

$$P = \frac{e^2 a^2}{6\pi\varepsilon_0 c^3} \ (\text{SI units})$$

- در اینجا بود که بوهر (۱۸۸۵ تا ۱۹۶۲ میلادی) در ۱۹۱۳، یکی از اولین قدم‌ها را در مکانیک کوانتم برداشت و این مشکل را حل کرد.

تابش جسم سیاه، بسته‌ها انرژی و اثر فوتوالکتریک

- مهم‌ترین فرضیه‌ای که توانست تابش جسم سیاه را توضیح دهد این بود که انرژی تابشی جسم سیاه باید به صورت گسسته تابش شود. پلانک (۱۸۵۸ تا ۱۹۴۷ میلادی) که این فرض خود را در سال ۱۹۰۰ میلادی ارائه داد، آن را کاملا انتزاعی در نظر گرفت و بسته‌های گسسته انرژی را قبول نمی‌کرد.
- انشتاین (۱۸۷۹ تا ۱۹۵۵ میلادی) توانست در سال ۱۹۰۵ با توضیح پدیدهٔ فوتوالکتریک توسط این بسته‌های انرژی که او آنها را فوتون نامید، توجیه تجربی این بسته‌ها را ارائه دهد.



- اثبات وجود این بسته‌های انرژی یکی از اصلی‌ترین مشوق‌های بوهر در ارائه مدل خود بود.
- اما به این دلیل که مکانیک کوانتم هنوز فرمول‌بندی نشده بود، مدل اولیهٔ او قادر به توضیح خیلی مسائل نبود.

مکانیک کوانتم

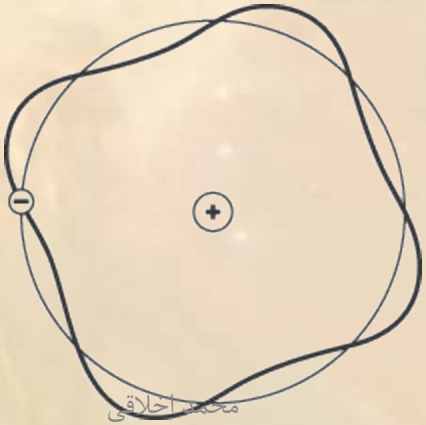
- کشف اشعه‌های کاتودی (جریانی از الکترون) توسط ماکیل فارادی (۱۷۹۱ تا ۱۸۵۷ میلادی)، اولین بیان تابش جسم سیاه توسط کریشهوف (۱۸۲۴ تا ۱۸۸۷ میلادی)، کارهای نظری بولتزمن (۱۸۴۴ تا ۱۹۰۶ میلادی) در اثبات امکان وجود گسسته انرژی و در نهایت اثبات پلانک را می‌توان اولین قدم‌های بشر در راستای مکانیک کوانتم دانست. پلانک در نهایت به این نتیجه رسید که:

$$E = h\nu = \hbar\omega$$

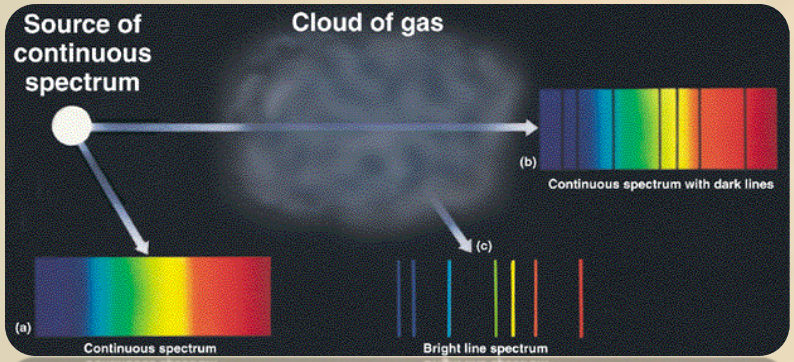
- که در آن h را ثابت پلانک می‌نامند و مقدار آن برابر است با ۶.۶۲۶×۱۰^{-۳۴} ژول در ثانیه.
- در سال ۱۹۲۴ دوبروی (۱۸۹۲ تا ۱۹۸۷ میلادی) این نظریه را مطرح کرد که ذرات هم می‌توانند رفتارهای موجی از خود نشان دهند. با این تقارنی که دوبروی ایجاد کرد، هایزنبرگ (۱۹۰۱ تا ۱۹۷۶ میلادی) و برن (۱۸۸۲ تا ۱۹۷۰ میلادی) اولین مدل ریاضی ماتریسی مکانیک کوانتم را نوشتند و اروین شرودینگر (۱۸۸۷ تا ۱۹۶۱ میلادی) توانست مکانیک موجی را فرمول‌بندی کند.

مکانیک کوانتم امواج دوبروی

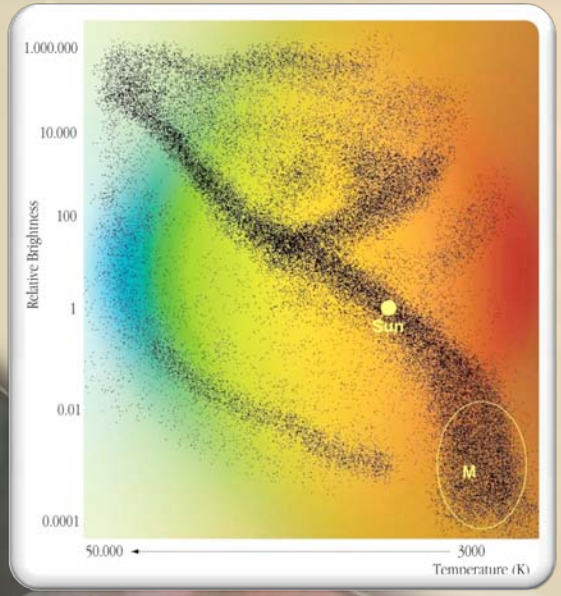
- دوبروی برای تمام اجسام جرم‌دار و بی‌جرم طول موج تعریف کرد: $\lambda=h/p$ که در آن λ طول موج، h ثابت پلانک و p اندازه حرکت جسم است.
- اما بیایید نگاهی به طول موج یک الکترون که در حال حرکت با یک صدم سرعت نور است و یک مرد (یا زن!) هفتاد کیلویی که در حال دویدن با سرعت سه کیلومتر در ساعت است:
- برای الکترون: $\lambda_e = h/(m_e v) = 2.42 \times 10^{-10} m$
- و برای آن فرد: $\lambda_m = h/(m_m v) = 3.16 \times 10^{-36} m$

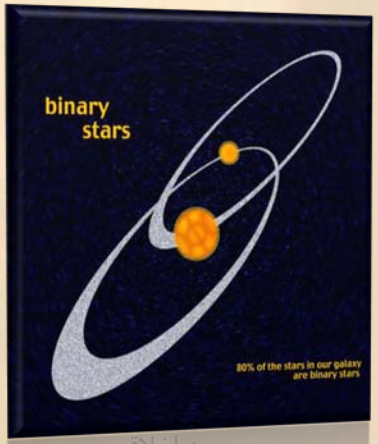


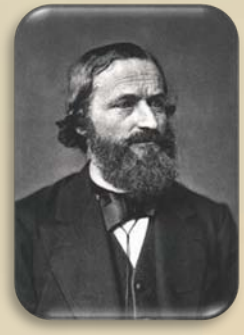
جلسهٔ پنجم: مقدمات اخترفیزیک



- طیف‌سنجی
- ایندکس رنگی
- نمودار هرتزبرانگ-راسل
- روش‌های تعیین فاصله
- ستاره‌های دوتایی



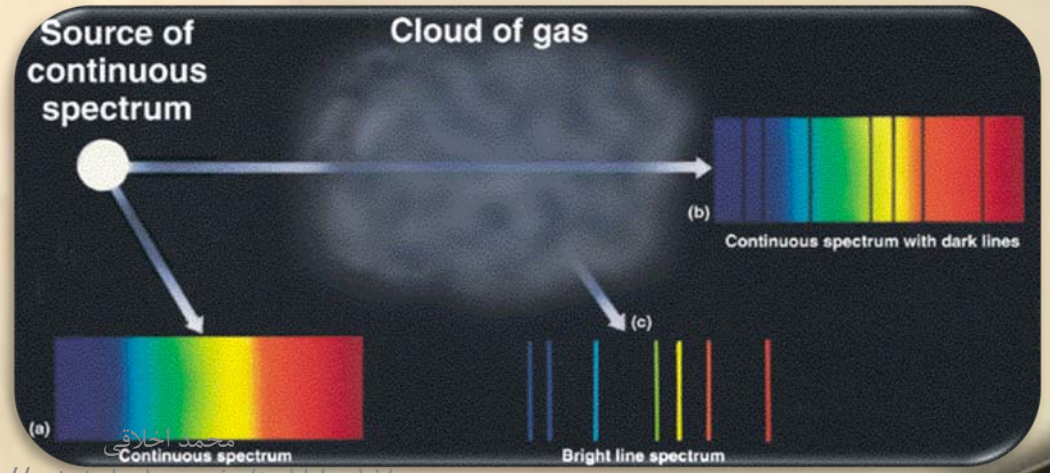




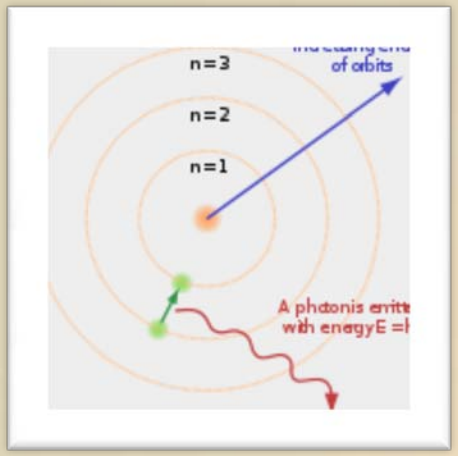
طیف‌سنجی

- کریشهوف (۱۸۲۴ تا ۱۸۸۷ میلادی) در ۱۸۶۰ قوانین زیر را برای طیف نوشتند:
  1. گازی چگال و یا اجسام جامد طیفی پیوسته بدون خط تیره تولید می‌کنند
  2. گاز پخش شدهٔ گرم تابشی با خطوط خاص رنگی تولید می‌کنند.
  3. گازی خنک و پخش جلوی یک منبع پویسته تولید خطوط سیاهی در آن طیف پیوسته می‌کند.

- عنصر هلیوم در سال ۱۸۶۸ توسط همین قوانین در خورشید پیدا شد و بعدا در سال ۱۸۹۵ در زمین کشف شد!



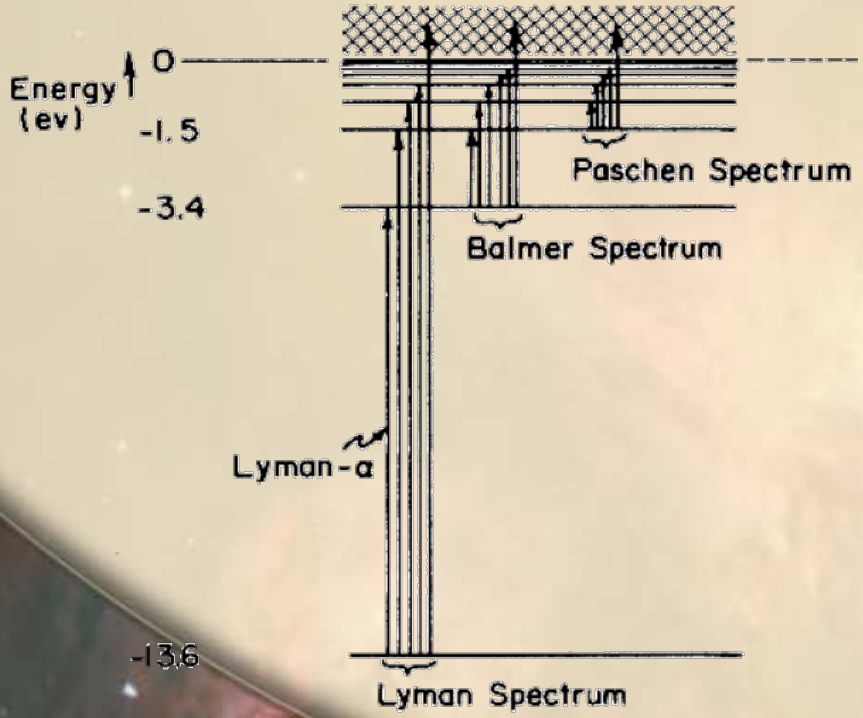
محمد اخلاقی
http://astr.tohoku.ac.jp/~akhlaghi/



طیف جذبی و نشری

- بر مبنای مدل بوهر، الکترون‌ها فقط می‌توانند در لایه‌های خاصری که اندازهٔ حرکت زاویه‌ای آنها ضریب خاصی از ثابت پلانک باشد پایدار بمانند.

- برای رفتن از یک لایه به یک لایهٔ دیگر الکترون باید دقیقا همان مقدار انرژی که نیاز دارد را جذب کند تا به لایه‌ای با انرژی بیشتر برود یا همان مقدار را تابش کند تا به لایه‌ی انرژی پایین‌ترین بیاید.



ایندکس‌های رنگی

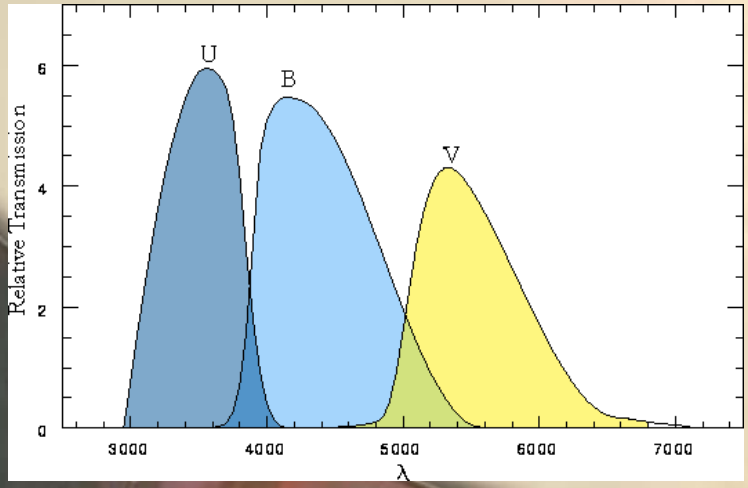
- قدرهای ظاهری و مطلق بر مبنای شار امواج الکترومغناطیس در طیف مرئی آن است.
- اگر می‌توانستیم قدر ستاره را در تمام طول‌موج‌ها با هم اندازه‌گیری می‌کردیم، به قدر حاصله قدر بولومتریک می‌گفتیم که با m_{bol} (قدر ظاهری بولومتریک) یا M_{bol} (قدر مطلق بولومتریک) نمایش داده می‌شود.
- اما طیف‌سنج‌ها یا فوتومترها فقط می‌توانند در محدودهٔ خاصی بازدهی داشته باشند. به همین دلیل محدوده‌های خاصی را برای نور ورودی از ستاره‌ها تعریف می‌کنیم:

Symbol	Effective Wavelength	Symbol	Effective Wavelength
U	0.36 μm	K	2.2 μm
B	0.44	L	3.4
V	0.55	M	5.0
R	0.70	N	10.2
I	0.90	Q	21
J	1.25		

ایندکس‌های رنگی

سه فیلتر معروف دراین زمینه (که به فیلترهای جانسون معروف هستند):

- **فیلترهای U** (در محدوده ماوراء بنفش)، نور را با طول‌موجهای حول ۳۶۵۰ آنگستروم با وسعت ۶۸۰آنگستروم از خود رد می‌کند.
- **فیلترهای B** (در محدودهٔ آبی)، نور را با طول موج‌های حول ۴۴۰۰آنگستروم و وسعت ۹۸۰آنگستروم از خود رد می‌کند.
- **فیلترهای V** (در محدودهٔ مرئی)، نور را با طول موج‌های حول ۵۵۰۰آنگستروم با وسعت ۸۹۰آنگستروم از خود رد می‌کند.



دلیل تاکید بیشتر این سیستم معروف روی طول موج‌های کوتاه‌تر، یا آبی‌تر، این است که فیلم‌های عکاسی در این محدوده خطاهای زیادی را از خود نشان می‌دهند و نمی‌توان نتایج دقیق از آنها گرفت.

ایندکس‌های رنگی

- بر مبنای این طول‌موج‌ها، قدرهای ظاهری و مطلق m_U، m_B، m_V و M_U، M_B و M_V را تعریف می‌کنیم.
- با تعریف این قدرها، ایندس‌های رنگی (U-B) یا (B-V) را تعریف می‌کنیم:

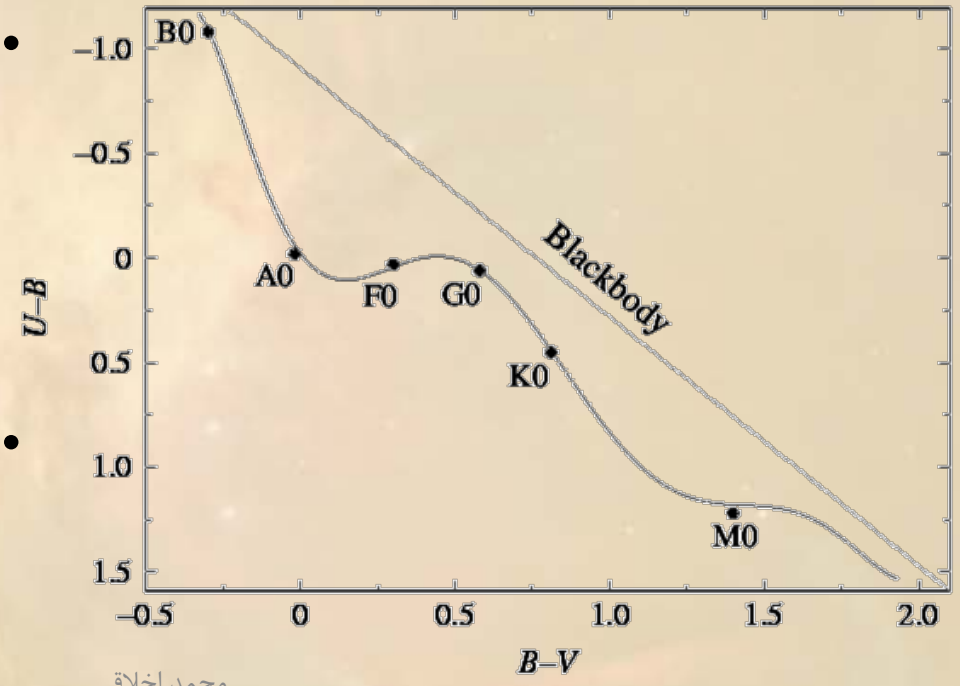
$$U - B = m_U - m_V = M_U - M_V$$

$$B - V = m_B - m_V = M_B - M_V$$

- همانطور که از رابطه قدر معلوم است، این ایندکس‌ها ارتباطی با فاصله و اندازهٔ ستاره ندارند و فقط مقیاسی از دمای ستاره هستند.
- از آنجا که قدر در جهت معکوس افزایش می‌یابد، هر چه ایندکس B-V کوچکتر باشد ستاره آبی‌تر و هرچه U-B کوچکتر باشد، ماوراء بنفش آن بیشتر است.

ایندکس‌های رنگی و تابش جسم سیاه

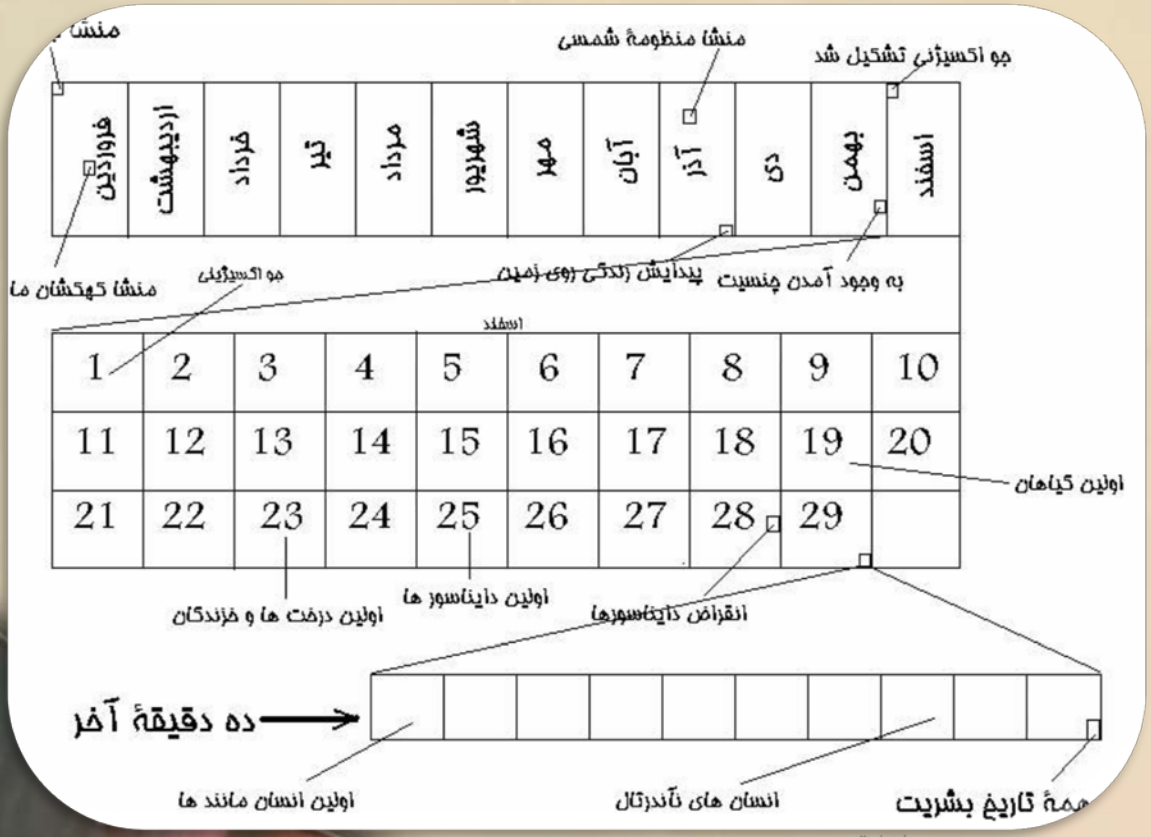
- از آنجایی که ایندکس‌های رنگی و تابش جسم سیاه هر دو فقط مقیاسی از دما هستند، پس باید رابطه مستقیمی با هم داشته باشند.
- اما طبق جدول زیر، وقتی که تابش جسم سیاه را همراه با ستاره‌ها در یک نمودار U-B بر حسب B-V رسم کنیم، می‌بینیم که این دو اصلا رابطهٔ ساده‌ای با هم ندارند.



- اگر ستاره یک جسم سیاه ایده‌آل بود، باید خط صافی را تولید می‌کردند اما به دلیل اینکه مقداری از نور ستاره در جوّش جذب می‌شود و عوامل دیگر، ستاره‌ها دقیقا رفتاری مانند جسم سیاه نشان نمی‌دهند.
- بر مبنای تعریف، ستاره‌های گونهٔ A0، ایندکس رنگی صفر دارند.

نمودار هرتزبرانگ راسل:
گذری بر مقیاس زمانی جهان

اگر ما هر ۴۵۷ سال را در جهان واقعی معادل یک ثانیه در یک تقویم فرضی فرض کنیم، این تقویم دقیقاً معادل یک سال خواهد شد(همانطور که در شکل می بینید). حال به وقایع در این یک سال توجهی کنید!



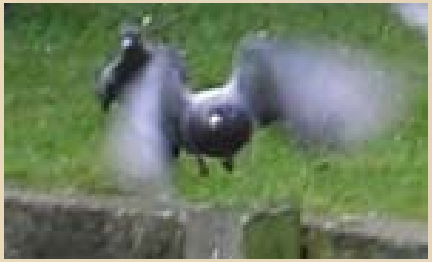
- از ده ثانیهٔ آخری که ما از این تقویم دیده‌ایم، فقط توانستیم حدود یک پنجم از یک ثانیه از این تقویم یک ساله را ثبت و ضبط کنیم.
- پس موقعیت ما در مورد شناخت جهان بیشتر شبیه به یک موجود فضایی است که فقط با عکس مقابل می‌خواهد موجودات زندهٔ درون این عکس را بشناسد:

محمد اخلاقی

محمد اخلاقی
http://ast.tohoku.ac.jp/~akhlaghi/

محمد اخلاقی

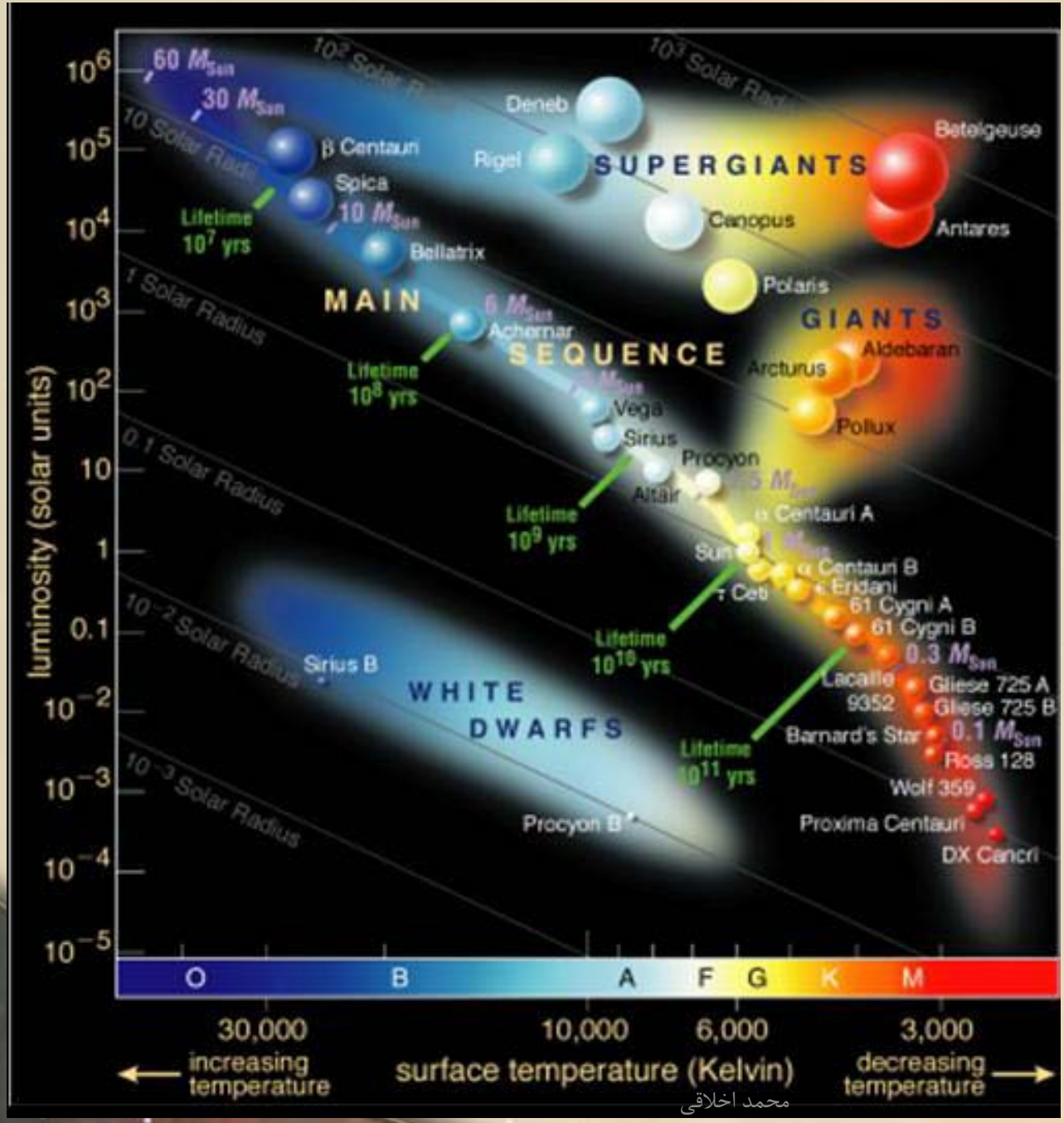
شناخت پرواز کبوتران از عکس قبل



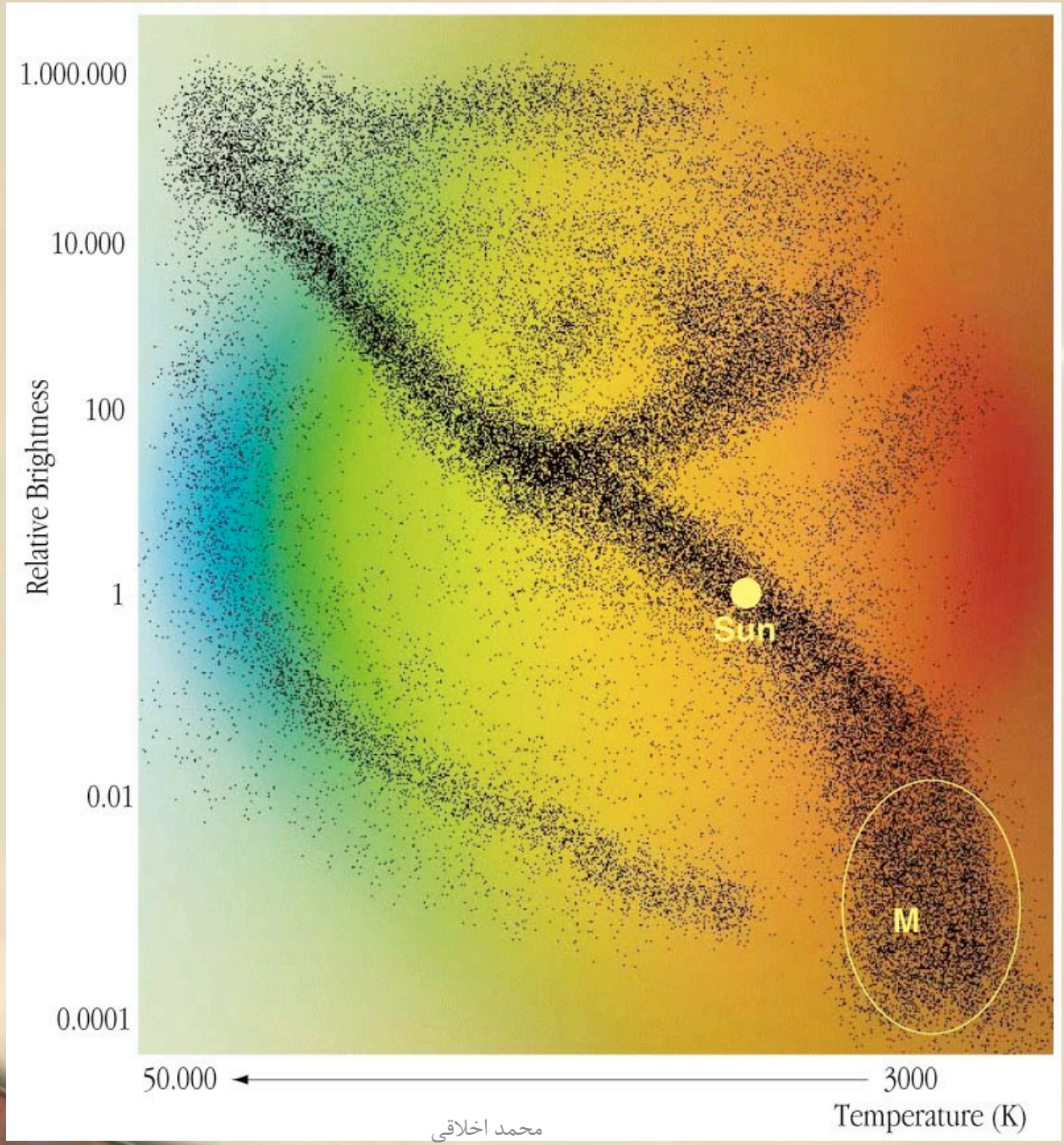
محمد اخلاقی

نمودار هرتزبرانگ–راسل (HR)

- با اتمام قرن نوزدهم، منجمان داده‌های خوبی از قدر ظاهری، گونه طیفی، فاصله، سرعت زاویه‌ای و ... داشتند، اما تفسیر فیزیکی این جداول عظیم هنوز کار سختی بود.
- اجنار هرتزبرانگ (منجم و شیمی‌دان دانمارکی) و هنری راسل (منجم آمریکایی) با بدست آوردن قدر مطلق (یا درخشندگی) ستارگان و مقایسه‌ی آن را گونه طیفی (یا دمای سطحی) آنها، اولین تحلیل فیزیکی-توصیفی از تکامل این نقاط درخشان را در سال ۱۹۱۰ ارائه دادند.
- آنها دیدند که اکثر ستاره‌های آبی رنگ (که دمای بیشتری دارند) قدر مطلق بیشتری نیز دارند و ستاره‌های قرمز رنگ قدر مطلق کمتری دارند. بیشتر ستاره‌ها روی همین رشته اصلی قرار می‌گرفتند.
- اما تعدادی از ستاره‌ها خیلی جدا بودند و در ضلع‌های مخالف نمودار قرار داشتند.
- این نمودار به منجمان ابزاری برای سنجش و شناخت فیزیکی‌تر ستاره‌ها داد.


luminosity (solar units)
10^6
10^5
10^4
10^3
10^2
10
1
0.1
10^{-2}
10^{-3}
10^{-4}
10^{-5}
60 M_{Sun}
30 M_{Sun}
10 M_{Sun}
6 M_{Sun}
5 M_{Sun}
1 M_{Sun}
0.3 M_{Sun}
0.1 M_{Sun}
10 Solar Radii
1 Solar Radius
0.1 Solar Radius
10^{-2} Solar Radius
10^{-3} Solar Radius
10^2 Solar Radii
10^3 Solar Radii
Deneb
Rigel
β Centauri
Spica
Bellatrix
Canopus
Betelgeuse
Antares
Polaris
Achernar
Arcturus
Aldebaran
Pollux
Vega
Sirius
Procyon
Altair
α Centauri A
Sun
α Centauri B
ε Eridani
τ Ceti
61 Cygni A
61 Cygni B
Lacaille 9352
Gliese 725 A
Gliese 725 B
Barnard's Star
Ross 128
Wolf 359
Proxima Centauri
DX Cancri
Sirius B
Procyon B
SUPERGIANTS
MAIN SEQUENCE
GIANTS
WHITE DWARFS
Lifetime 10^7 yrs
Lifetime 10^8 yrs
Lifetime 10^9 yrs
Lifetime 10^{10} yrs
Lifetime 10^{11} yrs
O
B
A
F
G
K
M
30,000
increasing temperature
10,000
6,000
surface temperature (Kelvin)
3,000
decreasing temperature

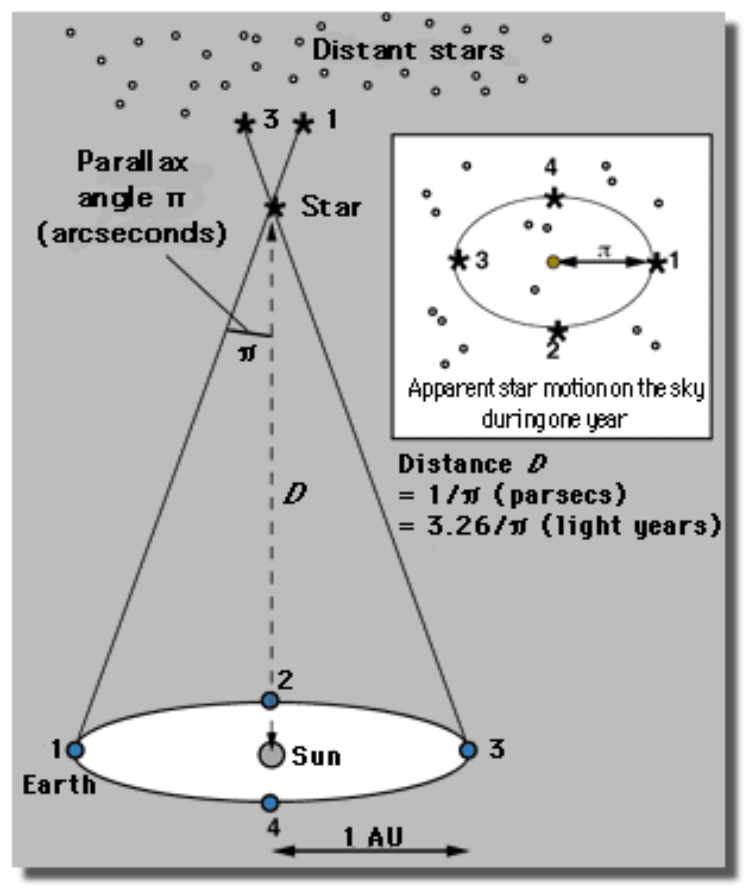
نمودار HR

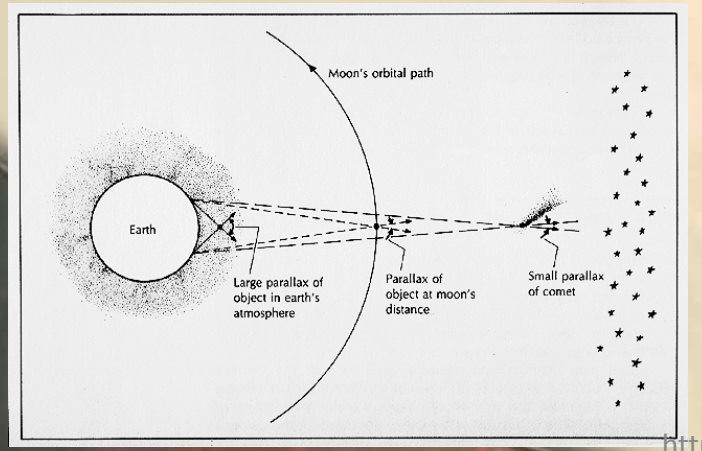

1.000.000
10.000
100
1
0.01
0.0001
Relative Brightness
Sun
M
50.000
3000
Temperature (K)

روش های فاصله‌سنجی

- **لیزر؛** اجسام خیلی نزدیک، به عنوان مثال: ماه
- **پارالاکس؛** تا ۱۰۰۰ پارسک یا ۳۱×۱۰^{۱۵} کیلومتر
- **نمودار HR؛** تا جایی که بتوان گونهٔ طیفی ستاره را تعیین کرد، اما خطا بالا است
- **متغیر های قیفاووسی؛** تا جایی که متغیر بودن آنها معلوم باشد با دقت خیلی بالا: ۵ تا ۶ میلیون پارسک
- **روشنایی سطحی؛** تا ۷۰ میلیون پارسک
- **روش تولی–فیشر؛** تا ۱۵۰ میلیون پارسک
- **ابر نو اخترهای نوع یک؛** تا ۵۰۰ مگا پارسک دقت خیلی بالا

پارالاکس





- در سال ۱۷۶۱ اولین بار در گذر زهره توسط پارالاکس فاصله زهره از زمین تعیین شد
- در شکل زیر: $D = (1AU) / (\tan\pi) = (1/\pi)AU$ (البته در این رابطه π بر حسب رادیان است)
- از آنجایی که ۱رادیان برابر ۵۷.۳درجه و $۲.۰۶۳x۱۰^{۵}$ ثانیه قوس است، پس رابطه بالا را می‌توان بهتر و کاربردی‌تر نوشت:

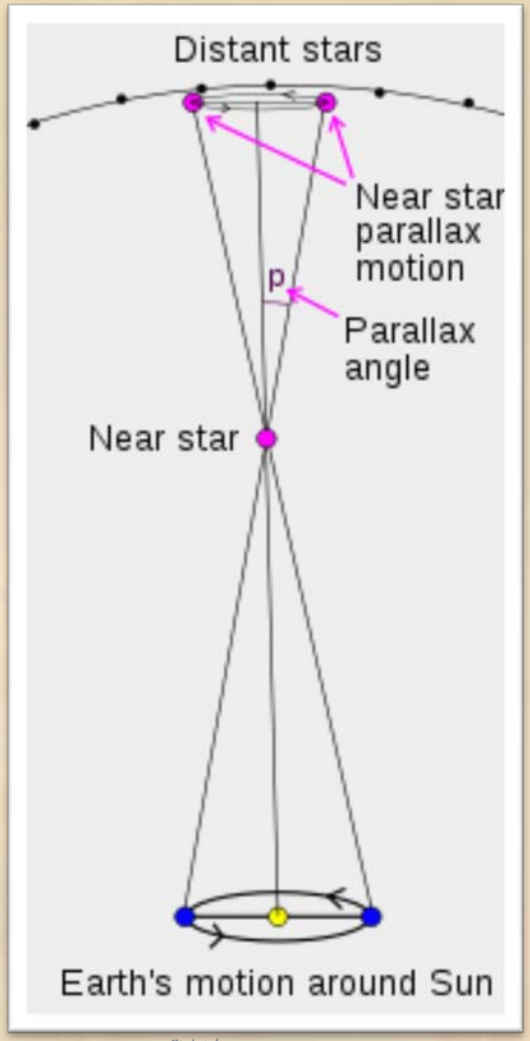
$$D = (2.063 \times 10^5 / \pi)\ AU$$

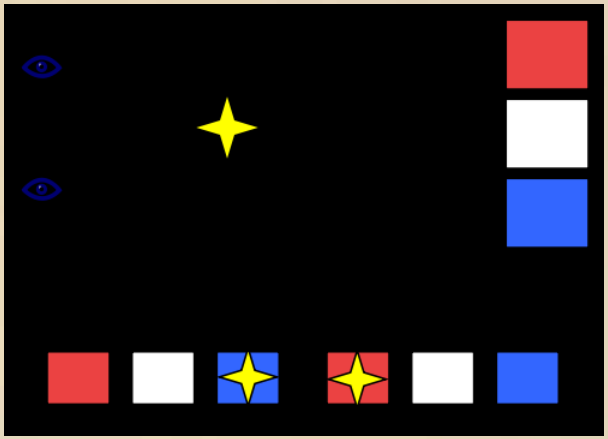
- اگر $۲.۰۶۳x۱۰^{۵}$ واحد نجومی را یک پارسک تعریف کنیم:

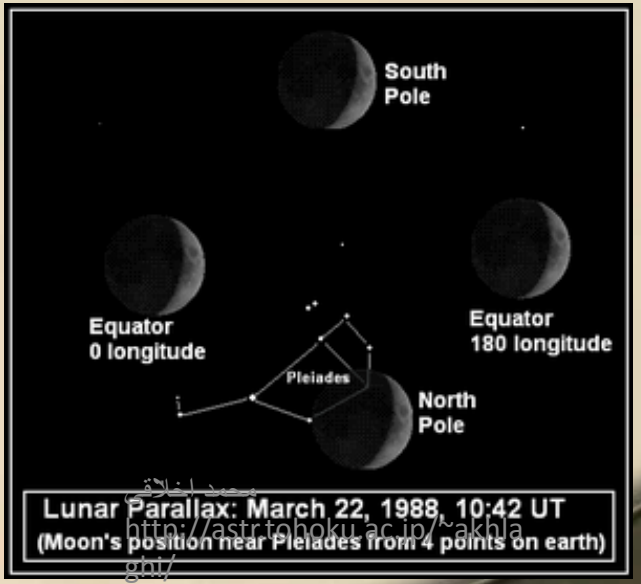
$$D = (1 / \pi)\ pc$$

- که در آن π بر حسب ثانیه قوس است

چند نمونه از پارالاکس







محمد اخلاقی
http://astr.tohoku.ac.jp/~akhlaghi/

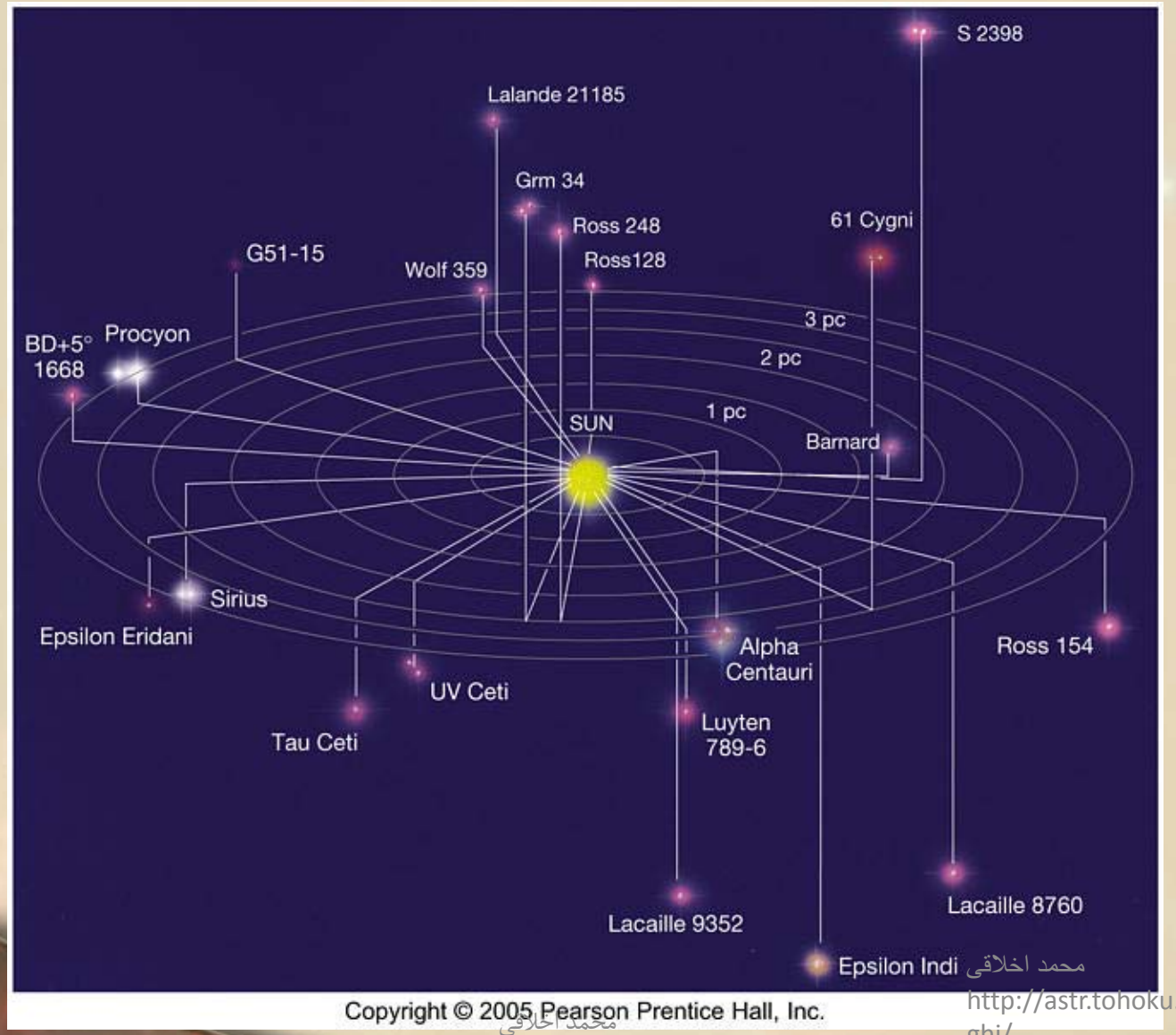
پارالاکس

- واحد نجومی پر کاربرد دیگر سال نوری می‌باشد طوری که:

$$1pc = 3.262\ ly$$

- حتی پارالاکس آلفا قنطورس (نزدیک‌ترین ستاره) کمتر از یک ثانیه قوس است: ۰.۷۷ ثانیه قوس
- اندازه‌گیری این زوایای کوچک به قدری سخت است که فردیرش ویلیام بسل در ۱۸۳۸ اولین بار آن را مشاهده کرد
- با استفاده از ماهواره‌ها، زوایایی به کوچکی ۰.۰۰۱ثانیه قوس قابل مشاهده هستند (یعنی فاصله ۱۰۰۰ پارسکی)
- فاصله تا مرکز کهکشان ما ۸هزار پارسک است، پس این روش فقط برای نقشه‌برداری ستاره‌های نزدیک مفید است

فاصله تعدادی از ستاره‌های نزدیک



محمد اخلاقی
http://astr.tohoku.ac.jp/~akhlaghi/

روش های فاصله‌سنجی

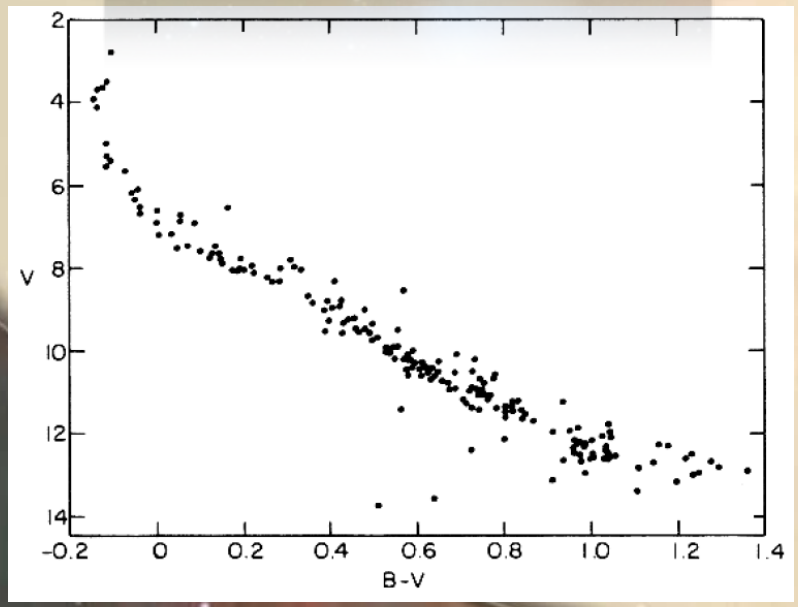
- **لیزر؛** اجسام خیلی نزدیک، به عنوان مثال: ماه
- **پارالاکس؛** تا ۱۰۰۰ پارسک یا ۳۱×۱۰^{۱۵} کیلومتر
- **نمودار HR؛** تا جایی که بتوان گونهٔ طیفی ستاره را تعیین کرد، اما خطا بالا است
- **متغیر های قیفاووسی؛** تا جایی که متغیر بودن آنها معلوم باشد با دقت خیلی بالا: ۵ تا ۶ میلیون پارسک
- **روشنایی سطحی؛** تا ۷۰ میلیون پارسک
- **روش تولی–فیشر؛** تا ۱۵۰ میلیون پارسک
- **ابر نو اخترهای نوع یک؛** تا ۵۰۰ مگا پارسک دقت خیلی بالا

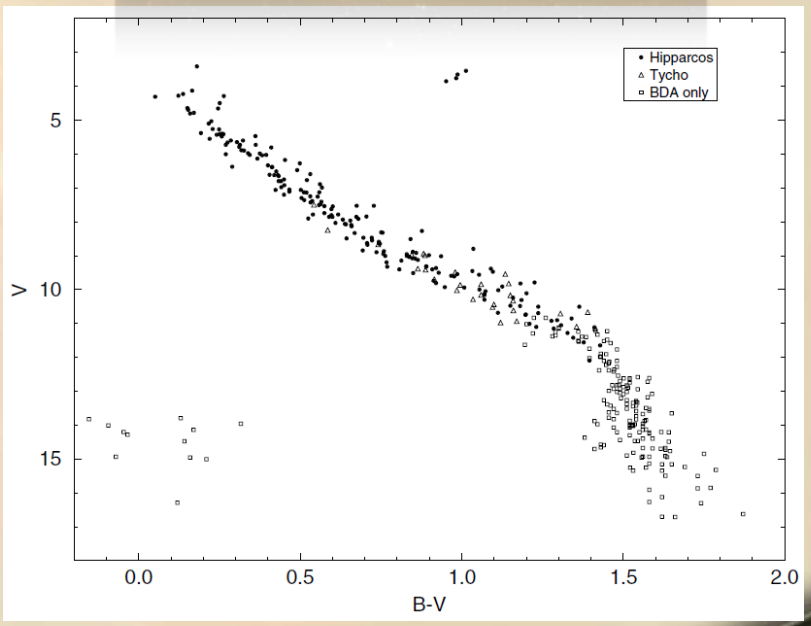
تعیین فاصله توسط نمودار هرتزبرانگ–راسل

- در این روش، که بیشتر برای تعیین فاصلهٔ خوشه‌های ستاره‌ای استفاده می‌شود، فرض بر این است که رشتهٔ اصلی ستارگان باید در یک محدودهٔ خاص قدری-دمایی قرار داشته باشد. اگر خوشهٔ ستاره‌ای خیلی نزدیک باشد، کل ستاره‌های خوشه (تمام رشتهٔ اصلی) روشن‌تر، و اگر دورتر باشد کل ستارگان تیره‌تر خواهند بود.
- در صفحه بعد:
- شکل سمت راست، نمودار دما-قدر خوشهٔ باز پروین (Pleiades) یا M45 در صورت فلکی ثور و فاصلهٔ ۴۴۰ سال نوری از زمین است.
- شکل سمت چپ نمودار دما-قدر خوشهٔ باز هایدیز (Hyades) در ثور و فاصله ۱۵۱ سال نوری از زمین است.

$$m_1 - m_2 = -2.5 log_{10}\left(\frac{F_1}{F_2}\right)$$

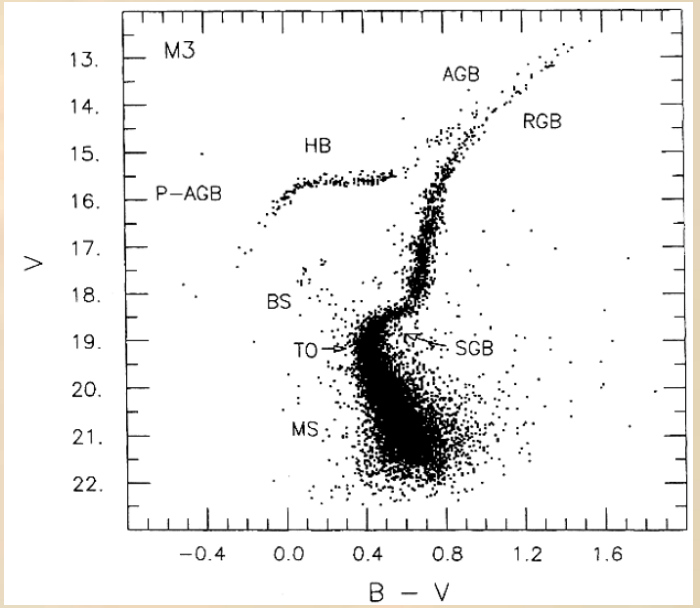
تعیین فاصله توسط نمودار هرتزبرانگ–راسل





یک خوشهٔ متفاوت

- البته همهٔ خوشه‌های ستاره‌ای یک رشتهٔ اصلی و مرتب مانند دو خوشهٔ باز قبلی ندارند! در شکل زیر نمودار رنگ–دمای خوشهٔ بستهٔ M3 را می‌بینید، که مانند تمام خوشه‌های کروی سن خیلی بالایی دارند:
- این خوشه از حدود ۵۰۰هزار ستاره تشکیل شده و در فاصله ۳۳۹۰۰سال نوری از زمین قرار دارد.



روش های فاصله‌سنجی

- **لیزر؛** اجسام خیلی نزدیک، به عنوان مثال: ماه
- **پارالاکس؛** تا ۱۰۰۰ پارسک یا ۳۱×۱۰^{۱۵} کیلومتر
- **نمودار HR؛** تا جایی که بتوان گونهٔ طیفی ستاره را تعیین کرد، اما خطا بالا است
- **متغیر های قیفاووسی؛** تا جایی که متغیر بودن آنها معلوم باشد با دقت خیلی بالا: ۵ تا ۶ میلیون پارسک
- **روشنایی سطحی؛** تا ۷۰ میلیون پارسک
- **روش تولی–فیشر؛** تا ۱۵۰ میلیون پارسک
- **ابر نو اخترهای نوع یک؛** تا ۵۰۰ مگا پارسک دقت خیلی بالا

فاصله‌سنجی با ستارگان متغیر قیفاووسی

- این روش اولین بار توسط هنریتا لویت (۱۸۶۸ تا ۱۹۲۱ میلادی) کشف شد.
- در این روش میان فاصلهٔ ستاره متغیر قیفاووسی و فرکانس اصلی آن این رابطه‌ها بر قرار است:

$$5\log_{10} d = V + (3.43)\log_{10} P - (2.58)(V-I) + 7.50\,.$$

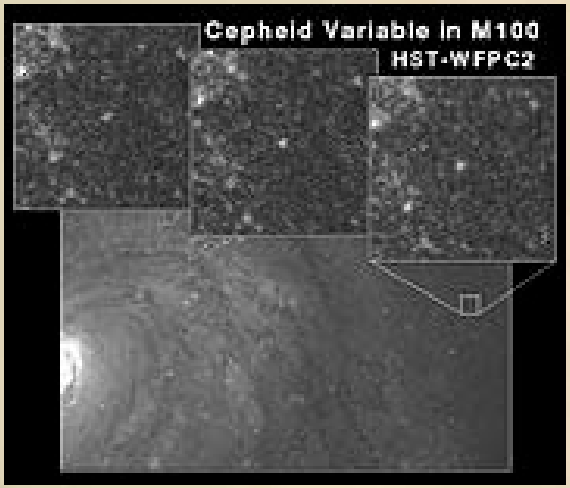
$$5\log_{10} d = V + (3.30)\log_{10} P - (1.48)(V-J) + 7.63\,.$$

$$5\log_{10} d = V + (4.42)\log_{10} P - (3.43)(B-V) + 7.15\,.$$

- در این سه معادله P مدت نوسان ستارهٔ متغیر قیفاووسی است و دیگر حروف نشان‌دهندهٔ قدر ستاره در فیلترهای ذکر شده در اسلایدهای قبل هستند.
- کاربردی بودن هر کدام از این سه بسته به مقدار وجود عناصر آهنی (غیر از هیدروژن و هلیوم) درون ستاره می‌باشند.
- دورترین قیفاووسی‌های مشاهده شده در کهکشان NGC 3370 و در فاصله ۲۹میلیون پارسک قرار داشته‌اند.
- این ستاره‌ها اصلی‌ترین ابزار هابل برای پیدا کردن فاصله کهکشان آندرومدا بودند.

فاصله‌سنجی با ستارگان متغیر

- در این سه معادله P مدت نوسان ستارهٔ متغیر قیفاووسی است و دیگر حروف نشان‌دهندهٔ قدر ستاره در فیلترهای ذکر شده در اسلایدهای قبل هستند.
- کاربردی بودن هر کدام از این سه بسته به مقدار وجود عناصر آهنی (غیر از هیدروژن و هلیوم) درون ستاره می‌باشند.
- دورترین قیفاووسی‌های مشاهده شده در کهکشان NGC 3370 و در فاصله ۲۹میلیون پارسک قرار داشته‌اند.
- این ستاره‌ها اصلی‌ترین ابزار هابل برای پیدا کردن فاصله کهکشان آندرومدا بودند.
- این روش برای ستارگان نزدیک حدود ۷درصد و برای کهکشان‌های دور تا ۱۵درصد می‌رسد. با این حال یکی از مهمترین ابزارهای اندازه‌گیری فاصله‌های نزدیک هستند.



محمد اخلاقی
http://astr.tohoku.ac.jp/~akhlaghi/

روش های فاصله‌سنجی

- **لیزر؛** اجسام خیلی نزدیک، به عنوان مثال: ماه
- **پارالاکس؛** تا ۱۰۰۰ پارسک یا ۳۱×۱۰^{۱۵} کیلومتر
- **نمودار HR؛** تا جایی که بتوان گونهٔ طیفی ستاره را تعیین کرد، اما خطا بالا است
- **متغیر های قیفاووسی؛** تا جایی که متغیر بودن آنها معلوم باشد با دقت خیلی بالا: ۵ تا ۶ میلیون پارسک
- **روشنایی سطحی؛** تا ۷۰ میلیون پارسک
- **روش تولی–فیشر؛** تا ۱۵۰ میلیون پارسک
- **ابر نو اخترهای نوع یک؛** تا ۵۰۰ مگا پارسک دقت خیلی بالا

دو روش اندازه‌گیری فاصله‌های کهکشانی

روشنایی سطحی: این روش بر مبنای دانستن چگالی ستاره‌ها در صفحهٔ کهکشان بدست می‌آید. به این ترتیب که هرچه کهکشان دورتر می‌شود، پیکسل‌های CCD، باید صفحهٔ کهکشان را پیوسته‌تر ببینند. با اندازه‌گیری این پیوستگی می‌توان به فاصله‌ی کهکشان پی‌برد. این روش برای فاصله‌های ۱۰۰مگاپارسک به بعد کار می‌کند.

تولی-فیشر: این روش بر مبنای ارتباط میان سرعت ستاره‌ها در کهکشان‌های مارپیچی با درخشندگی کل کهکشان است. با بدست آوردن سرعت چرخش ستاره‌ها در کهکشان، درخشندگی آن و در نتیجه قدر مطلق آن بدست می‌آید.

روش های فاصله‌سنجی

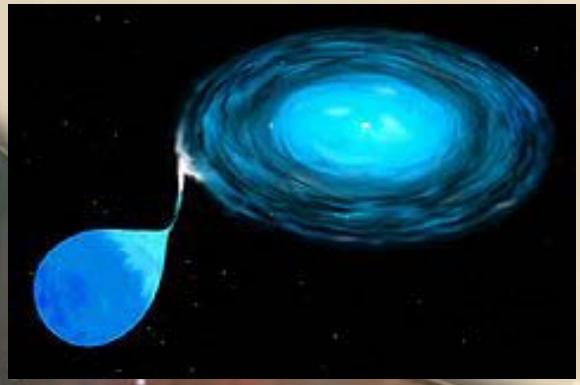
- **لیزر؛** اجسام خیلی نزدیک، به عنوان مثال: ماه
- **پارالاکس؛** تا ۱۰۰۰ پارسک یا ۳۱×۱۰^{۱۵} کیلومتر
- **نمودار HR؛** تا جایی که بتوان گونهٔ طیفی ستاره را تعیین کرد، اما خطا بالا است
- **متغیر های قیفاووسی؛** تا جایی که متغیر بودن آنها معلوم باشد با دقت خیلی بالا: ۵ تا ۶ میلیون پارسک
- **روشنایی سطحی؛** تا ۷۰ میلیون پارسک
- **روش تولی–فیشر؛** تا ۱۵۰ میلیون پارسک
- **ابر نو اخترهای نوع یک؛** تا ۵۰۰ مگا پارسک دقت خیلی بالا

ابرنواخترها

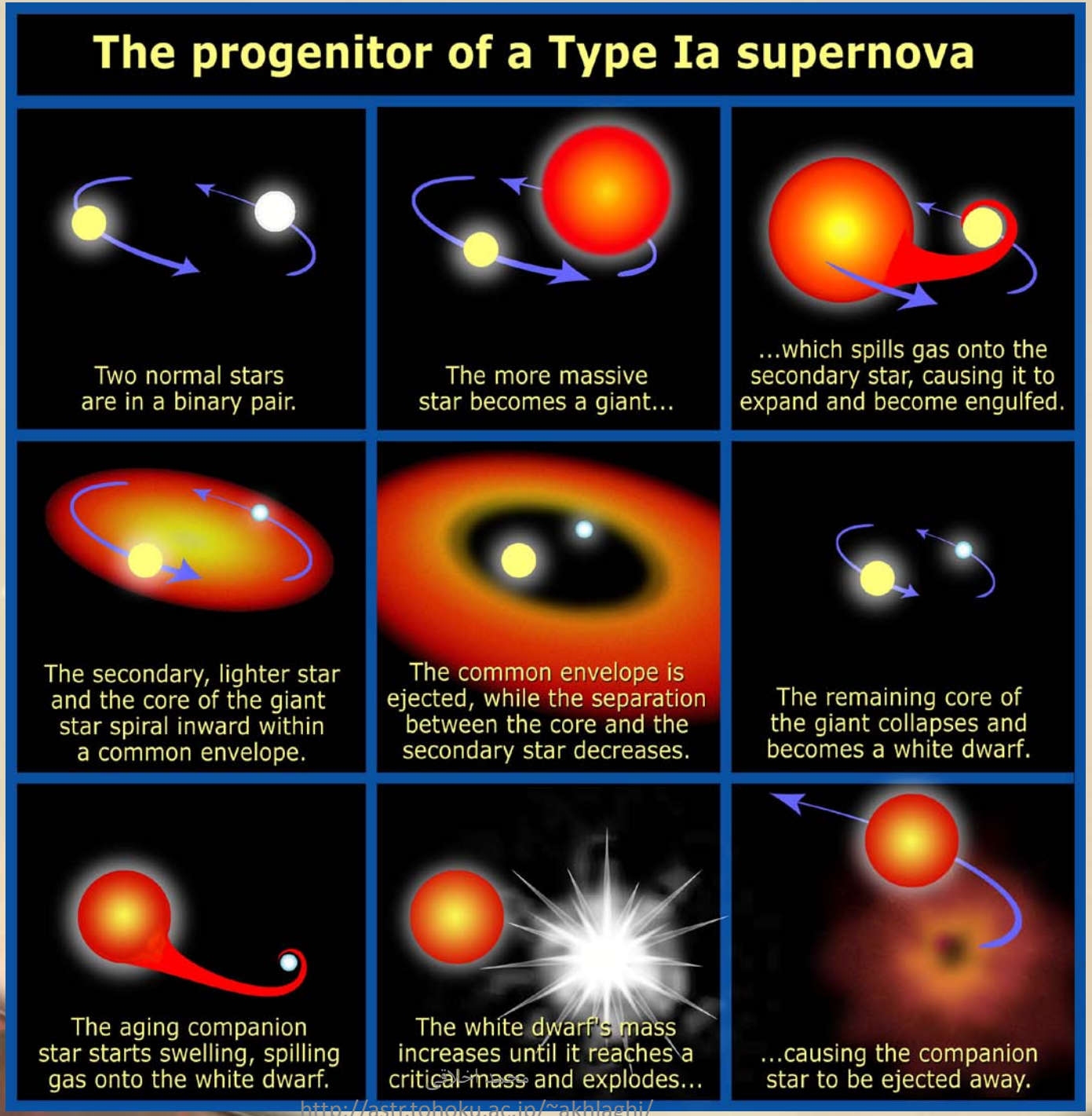
ابرنواخترهای غیر از نوع Ia: این نوع ابرنواخترها که در آنها ستاره شدیدا منبسط شده و بعد منفجر می‌شود فقط در صورتی می‌توانند به عنوان مقیاسی برای فاصله‌سنجی استفاده شوند که بتوان بزرگ شدن زاویه‌ای جو ستاره را دید.

ابرنواخترهای نوع Ia: این ابرنواخترها دقیق‌ترین روش فاصله‌سنجی هستند. اینها هنگامی روی می‌دهند که جرم یک کوتولهٔ سفید با جذب جرم از همدم خود به حد چاندراسخار یا ۱.۴ جرم خورشید برسد. هنگامی که به این حد می‌رسد به دلیل واکنش هسته‌ای تولید نوترون، تمام پروتون‌ها به نوترون تبدیل می‌شوند:

$$P^+ + e^- = n + \nu_e + \gamma$$



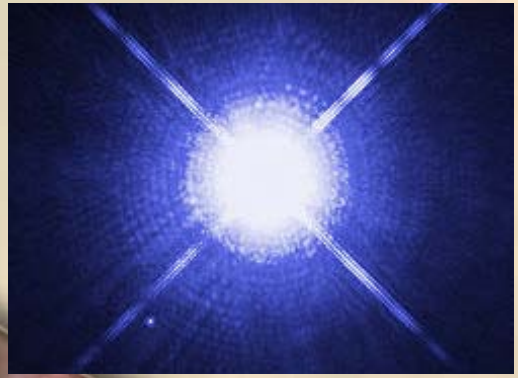
همانطور که از این واکنش معلوم است با تبدیل پروتون و الکترون به نوترون و نوترینو (که در فیزیک هسته‌ای برگشت پذیر است اما در اینجا نه!) مقدار زیادی فوتون (γ) نیز تولید می‌شود که خوشبختانه کاملا قابل پیش‌بینی است.

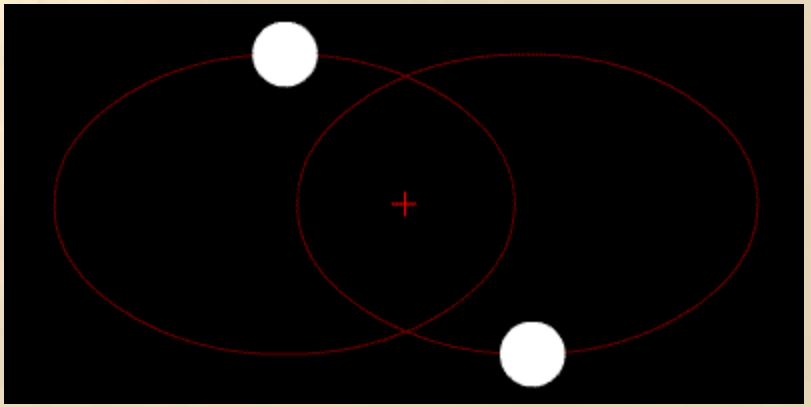

The progenitor of a Type Ia supernova
Two normal stars are in a binary pair.
The more massive star becomes a giant...
...which spills gas onto the secondary star, causing it to expand and become engulfed.
The secondary, lighter star and the core of the giant star spiral inward within a common envelope.
The common envelope is ejected, while the separation between the core and the secondary star decreases.
The remaining core of the giant collapses and becomes a white dwarf.
The aging companion star starts swelling, spilling gas onto the white dwarf.
The white dwarf's mass increases until it reaches a critical mass and explodes...
...causing the companion star to be ejected away.

محمد اخلاقی
http://astr.tohoku.ac.jp/~akhlaghi/

ستاره‌های دوتایی

- تا اینجا دیدیم که چگونه می‌توان دمای سطحی، عناصر یونیزه شده و دیگر خصوصیات مشاهداتی ستارگان را از طیف آنها استخراج کرد. اما جرم ستاره را نمی‌توان از این داده‌ها بدست آورد.
- جرم را فقط می‌توان از طریق برهم‌کنش‌های گرانشی میان ستارگان بدست آورد که نزدیک‌ترین و دقیق‌ترین این برهم‌کنش‌ها ستارگان دوتایی هستند که حول مرکز جرمشان در حال چرخش هستند.
- بیشتر از نصف ستارگان مشاهده شده ستارگان دوتایی هستند.





انواع ستارگان دوتایی

- **دوتایی‌های اپتیکی:** این نوع دوتایی‌های در واقع رابطه گرانشی با هم ندارند و کاملا اتفاقی از نظر ما کنار هم قرار گرفته‌اند در حالی که فاصله‌های زیادی با هم دارند.
- **دوتایی مرئی:** هر دو ستاره را می‌توان با تلسکوپ از هم تفکیک کرد.
- **دوتایی اخترمتری:** اگر یکی از دوتایی‌ها خیلی درخشان‌تر از دیگری باشد، نمی‌توان عضو دوم را دید، اما با مشاهده اثرات گرانشی عضو دوم وجود آن را می‌توان نتیجه گرفت.
- **دوتایی‌های گرفتی:** اگر صفحهٔ ستارگان دوتایی در راستای چشم ناظر باشد، دو ستاره مقابل هم قرار می‌گیرند و نورشان کم می‌شود.
- **دوتایی‌های طیفی:** این نوع دوتایی‌ها با تلسکوپ دیده نمی‌شوند اما با مطاله نوسان خطوط طیفی آنها به دلیل اثر دوپلر می‌توان به دوتایی بودن آنها پی برد.

تعیین جرم توسط ستارگان دوتایی

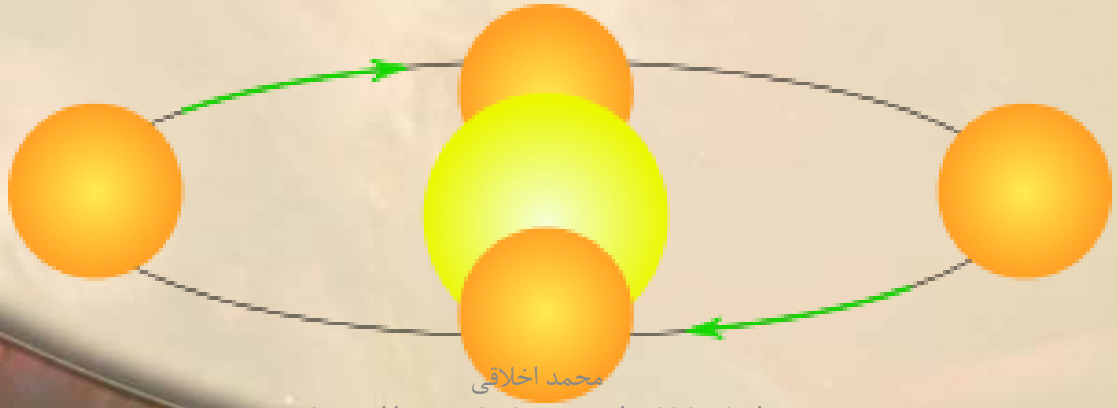
- در صورتی که دو ستاره از هم تفکیک شوند، می‌توان با اندازه‌گیری اختلاف زاویهٔ نیم قطر اطول ستاره‌ها به جرم آنها دست یافت:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{r_2}{r_1} = \frac{a_2}{a_1} \quad + \quad \alpha_1 = \frac{a_1}{d} \;\text{ و }\; \alpha_2 = \frac{a_2}{d}$$

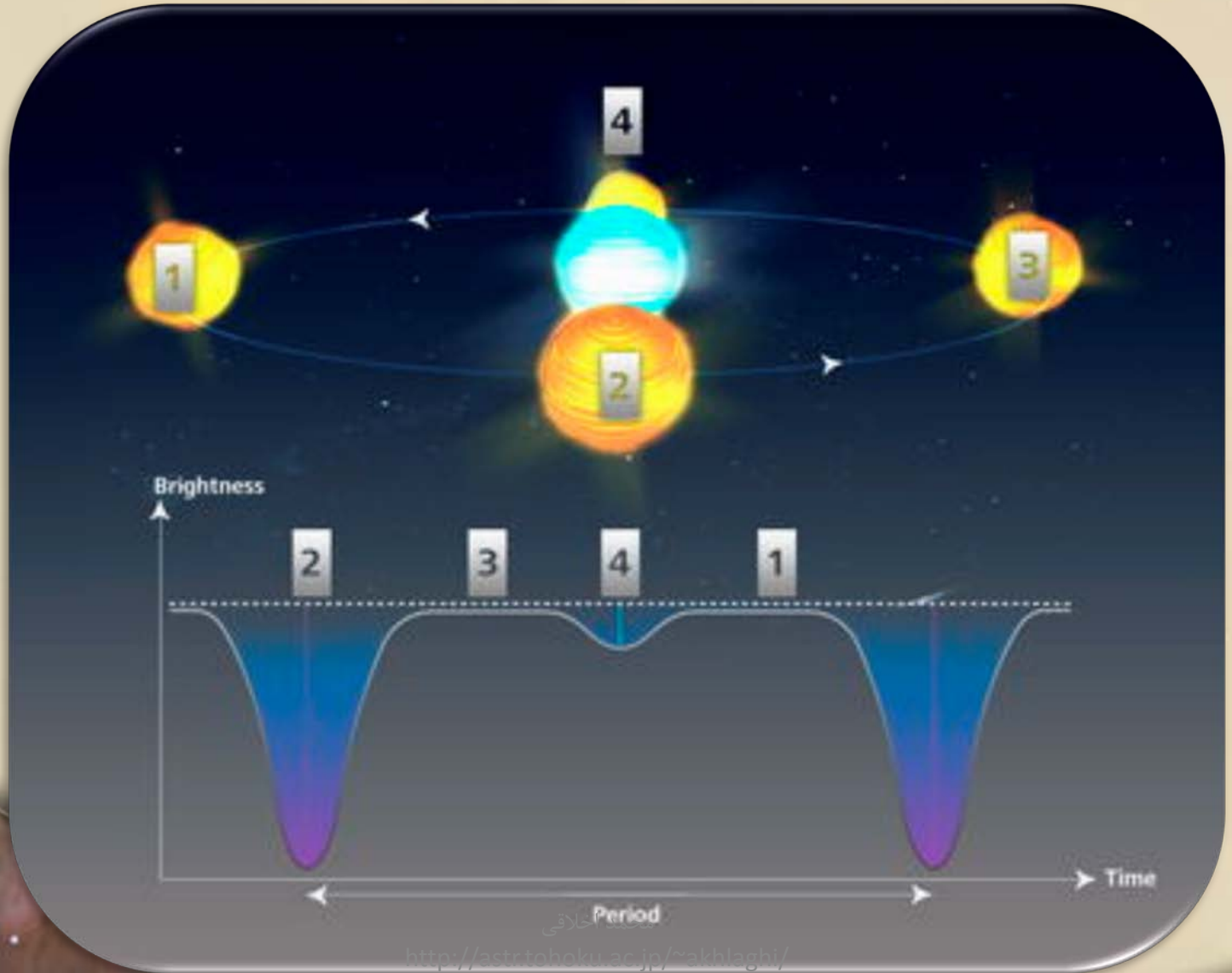
$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2}$$

منحنی نوری ستارگان دوتایی

- همهٔ ستارگان دوتایی قابل تفکیک نیستند، اما این بدان معنی نیست که ما نمی‌توانیم اطلاعات لازم را از آنها استخراج کنیم، از روی منحنی نوری و طیف آنها می‌توان نه تنها جرم، بلکه شعاع، نسبت شار آنها و در نتیجه نسبت دمای موثر آنها را نیز بدست آورد.
- یکی از بهترین دوتایی‌ها برای این کار دوتایی‌های گرفتی است:
- در این نوع دوتایی‌ها یکی از ستارهٔا جلوی دیگری قرار می‌گیرد و باعث گرفت و کاهش نور مجموع دوستاره می‌شود. از روی منحنی نوری این نوع ستاره‌ها می‌توان اطلاعات زیادی در مورد ستاره‌ها بدست آورد.



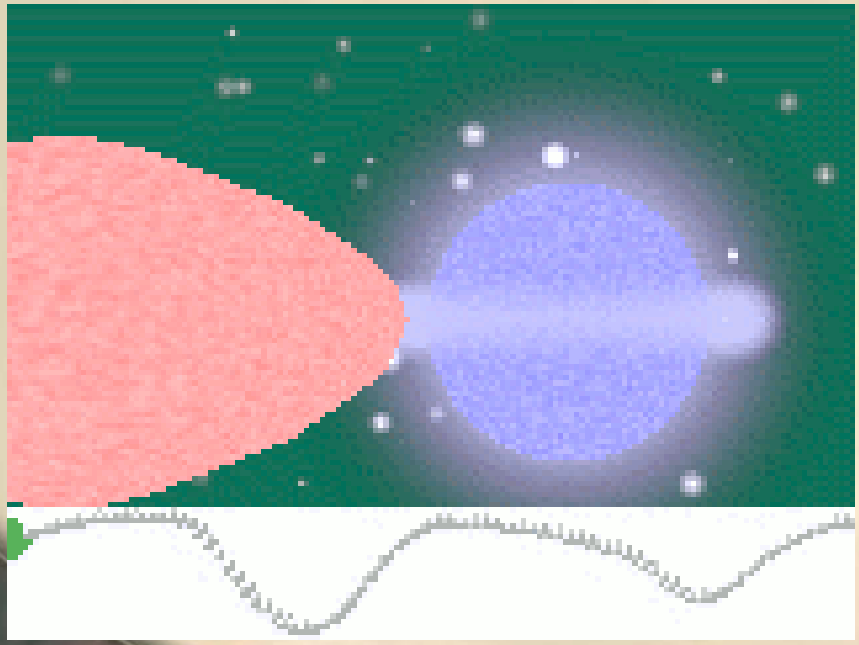
نمونه‌ای از منحنی نوری یک دوتایی گرفتی

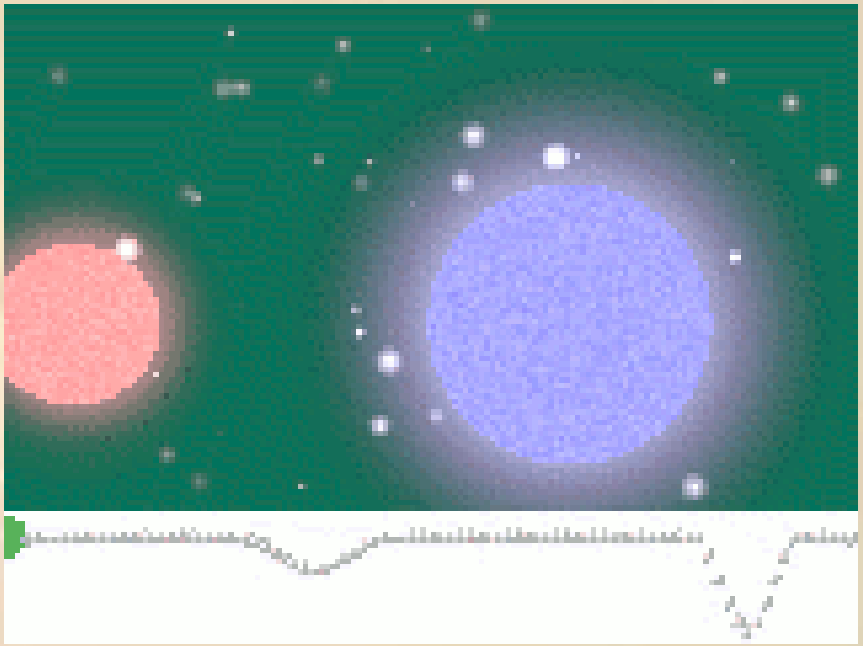


http://astr.tohoku.ac.jp/~akhlaghi/

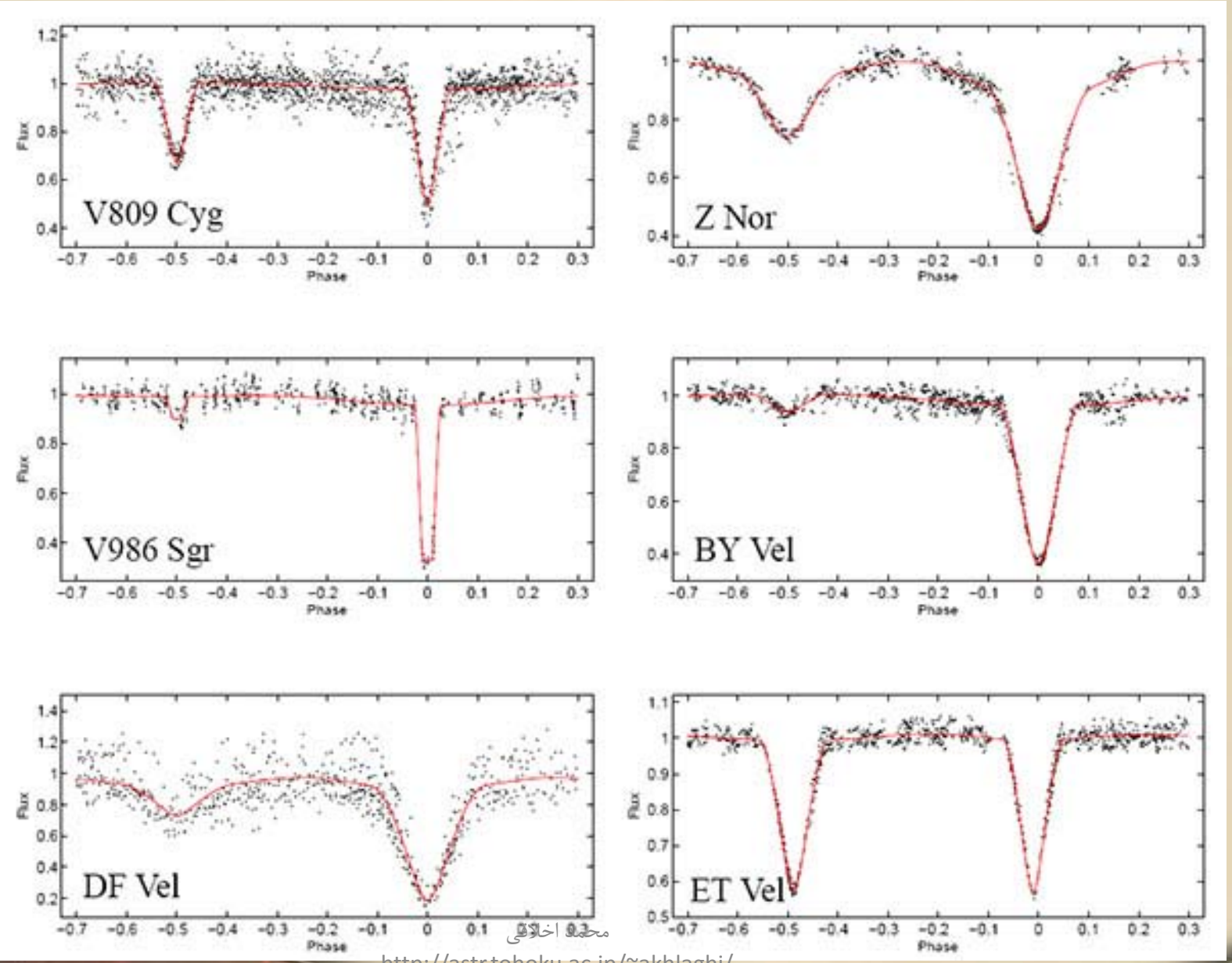
نمونه‌هایی دیگر...

- در دو شکل زیر می‌توانید دو دوتایی گرفتی را ببینید که به چه شکل حجم ستاره روی منحنی نوری ستاره تاثیر می‌گذارد.





چند منجنی نوری دوتایی‌های گرفتی



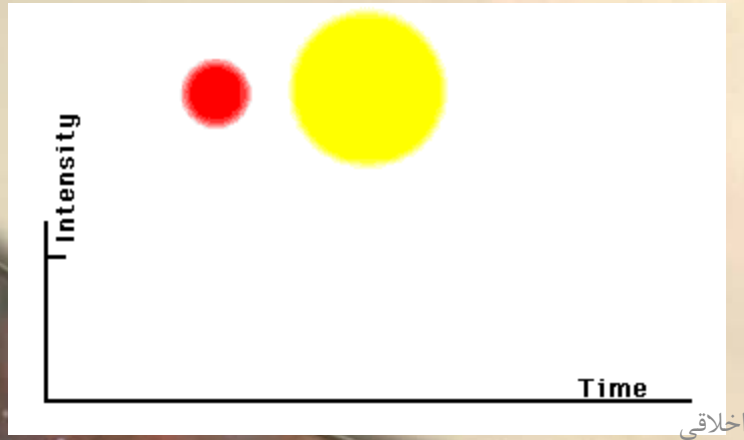
اطلاعاتی که می‌توان از منحنی نوری بدست آورد

- **نسبت جرمی:** هر چه یک ستاره پرجرم‌تر باشد، به مرکز جرم مجموعه نزدیک‌تر خواهد بود:

$$x_{cm} = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2}{m_1 + m_2}$$

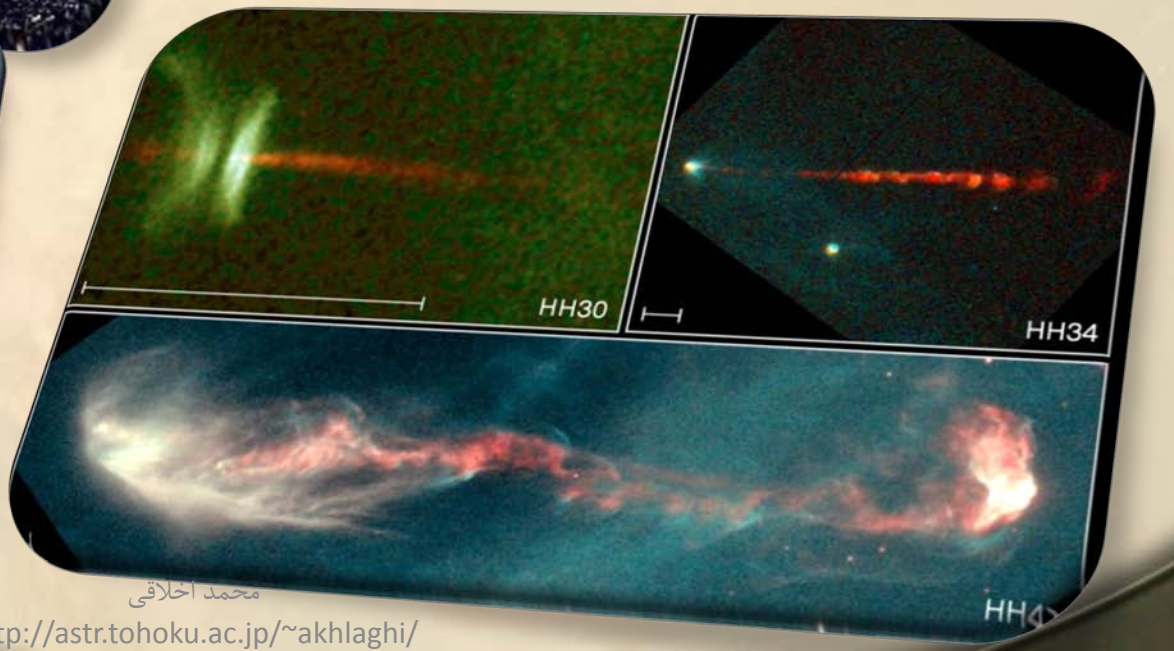
پس ستارهٔ سنگین‌تر به مرکز جرم نزدیک‌تر خواهد بود و در نتیجه حرکت کمتری خواهد داشت. دانستن این حرکت کمتر، می‌توان نسبت جرمی دو ستاره را بدست آورد.

- **نسبت شعاعی:** عمق هر چاله در منحنی نوری ستارگان دوتایی گرفتی نشانی از نسبت شعاعی آنها است.



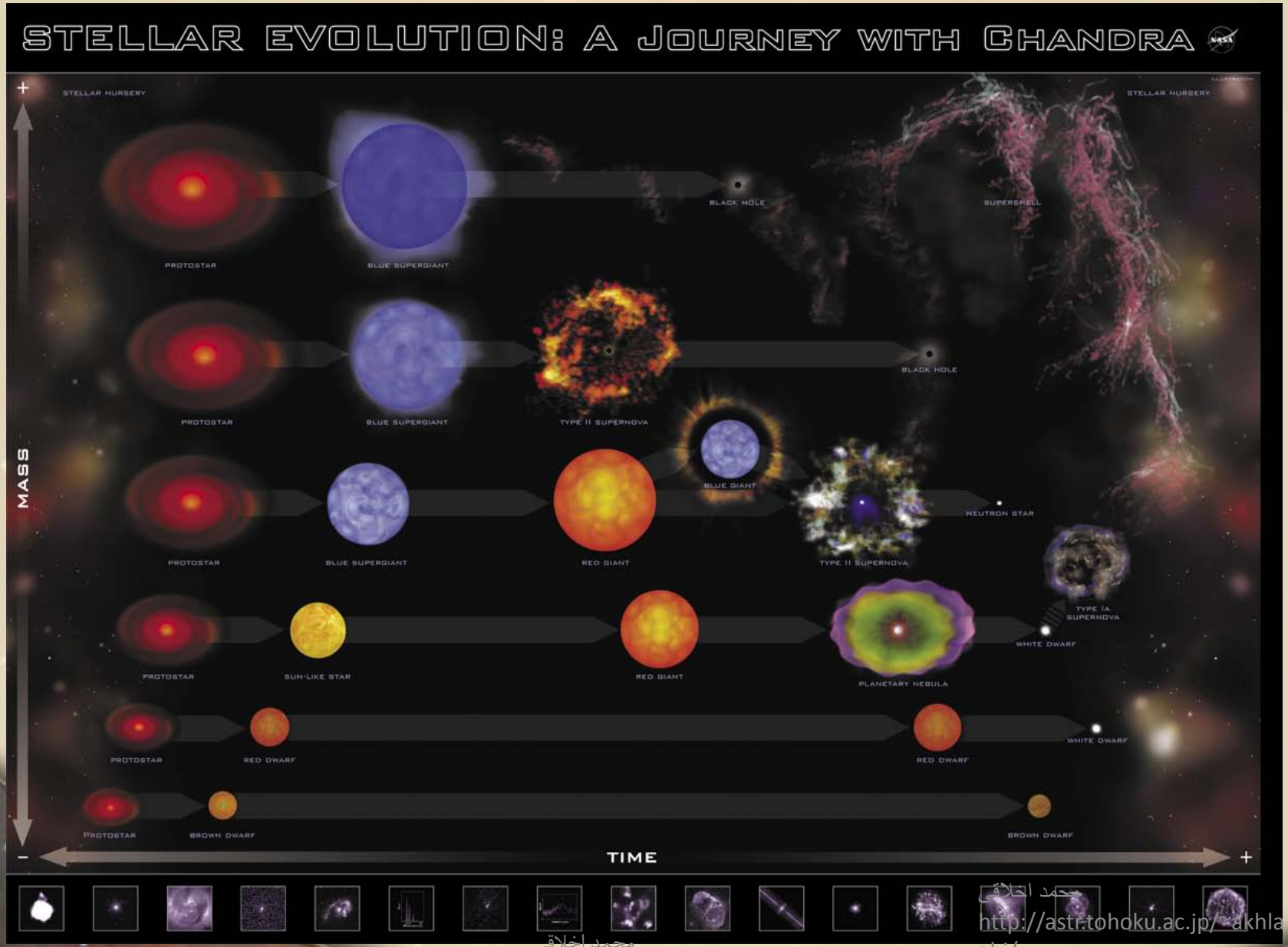
جلسهٔ ششم: مراحل اولیهٔ تکوین ستاره

- فضای میان ستاره‌ای
- تشکیل پیش‌ستاره‌ها
- تکوین ماقبل رشتهٔ اصلی



محمد اخلاقی
http://astr.tohoku.ac.jp/~akhlaghi/

تکامل ستاره ای



محمد اخلاقی
http://astr.tohoku.ac.jp/~akhlaghi/
محمد اخلاقی

شناخت فضای میان‌ستاره‌ای

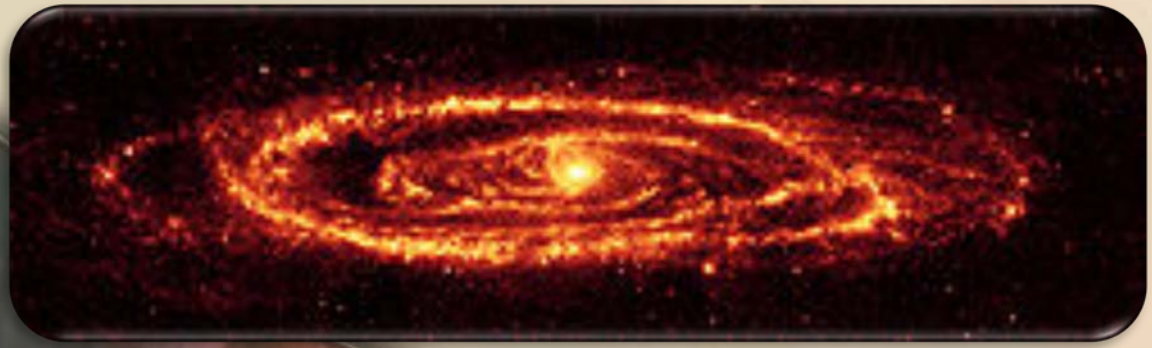
- تا قبل از قرن بیستم اعتقاد همه بر این بود که فضای میان‌ستاره‌ای را حالتی از ماده به نام اتر پوشانده است که نور در آن منتشر می‌شود.
- در ۱۹۰۴ Johannes Hartmann، هنگام مطالعه طیف دلتا جبار مشاهده کرد که قسمتی از طیف ستاره در فاصله‌ی میان ستاره و زمین جذب شده است.
- بعد از هارتمن، دانشمندان زیادی به دنبال چنین خطوط جذب شده گشتند تا اینکه ادوارد پیکرنیگ در ۱۹۱۲ نوشت: با وجودی که این ماده جذب کننده ممکن است اتر باشد، اما خصوصیات جذبی آن بیشتر به گاز می‌ماند و ملکول‌های گازی آزاد حتما در آن وجود دارند.
- در همان سال ویکتور هس (۱۸۸۳ تا ۱۹۶۴ میلادی)، وجود پرتوهای کیهانی را در لایه‌های بالایی جو آشکار کرد و جامعه منجمین قبول کردند که فضای میان‌ستاره‌ای نه خلاء است و نه اتر.

فضای میان ستاره‌ای

- فضای میان‌ستاره‌ای از غبار و گاز تشکیل شده است که میان ستاره‌ها پخش هستند: موادی که میان ستاره‌ها درون کهکشان‌ها پخش هستند.
- ۹۹درصد جرم مواد فضای میان‌ستاره‌ای را گاز تشکیل می‌دهد و فقط یک درصد از آن مربوط به غبار میان‌ستاره‌ای است.
- به طول متوسط در کهکشان راه‌شیری، چگالی این فضا حدود یک میلیون ذره در یک متر مکعب است. در حالی که روی زمین، چگالی هوا ضریبی از $۱۰^{۲۳}$ (یا صد هزار میلیون میلیون میلیون) ذره در متر مکعب است.
- بر مبنای مطالعات نظری در کیهان‌شناسی، گاز فضای میان‌ستاره‌ای، ۸۹درصد هیدروژن است، ۹ درصد هلیوم و بقیه عناصر سنگین‌تر است.
- فضای میان‌ستاره‌ای را می‌توان حلقه‌ی تماس مقیاس‌های کهکشانی و مقیاس‌های ستاره‌ای دانست.

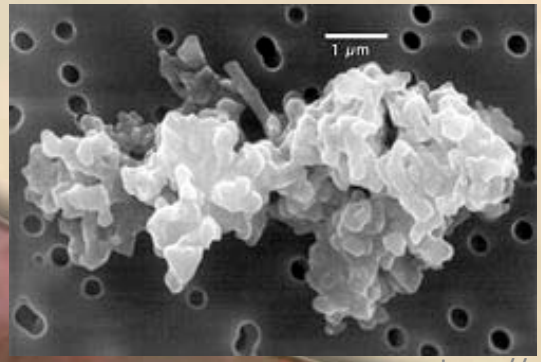
فضای میان‌ستاره‌ای

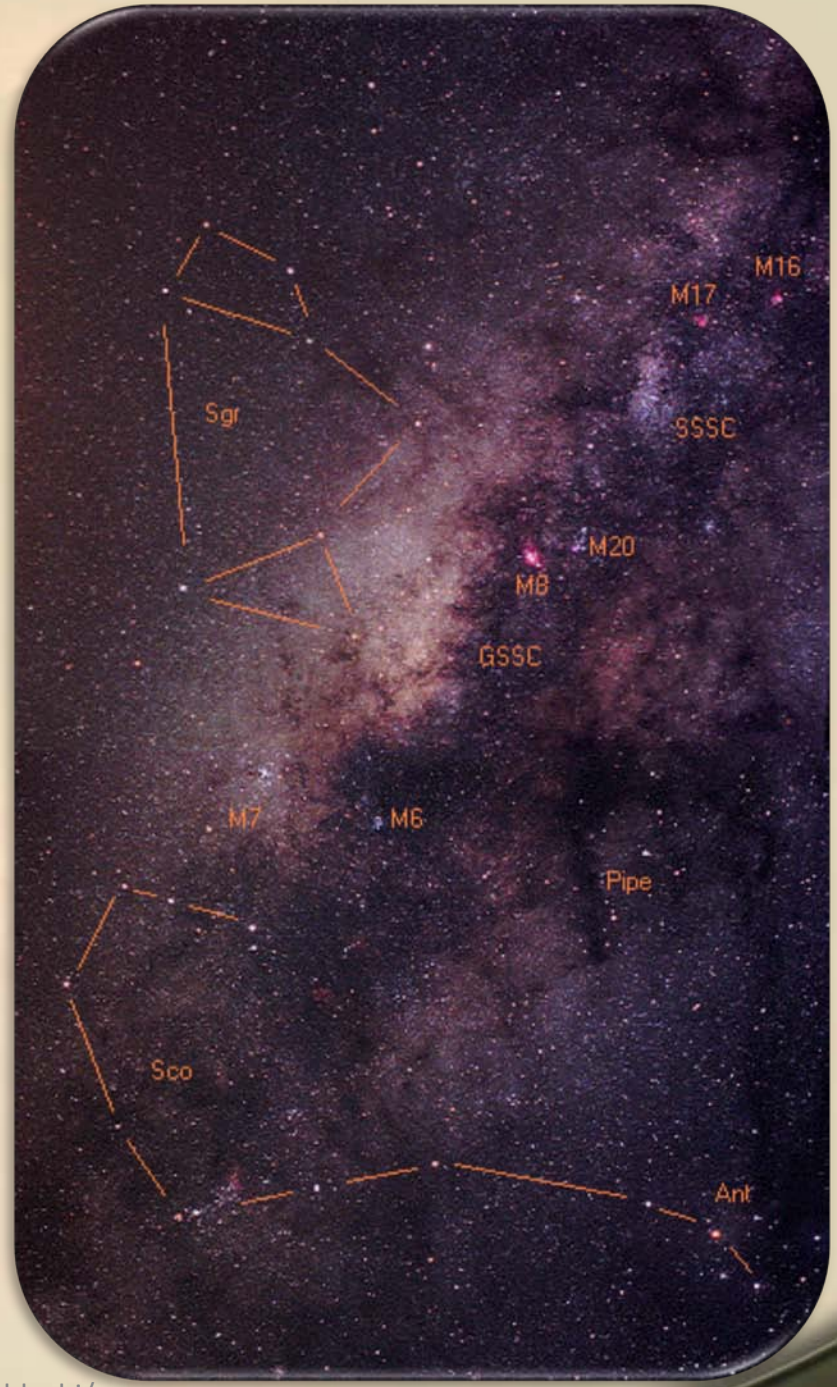
- به شکلی می‌توان تکوین یک ستاره را یک مسیر چرخه‌ای دانست؛ ستاره با تراکم فضای میان‌ستاره‌ای متولد می‌شود و بسته به نوع مرگ خود دوباره این فضا را غنی می‌کند.
- وجود ابرهای میان‌ستاره‌ای را می‌توان علاوه بر طیف، در طول موج‌های مرئی نیز دید، به عنوان مثال در شکل زیر M87 را می‌بینید:
- در شکل پایین نیز می‌توانید کهکشان آندرومدا را در مادون‌قرمز ببینید. مناطق فعال فضای میان‌ستاره‌ای به دلیل دمای کمش، در محدودهٔ مادون قرمز تابش می‌کند.



دو ابر تاریک دیگر

- در شکل پایین نمونه‌ای از غبارهای میان ستاره‌ای را ببینید که عموما در اندازه‌های کمتر از یک صدم میلیمتر هستند.





تیرگی ایجاد شده توسط فضای میان‌ستاره‌ای

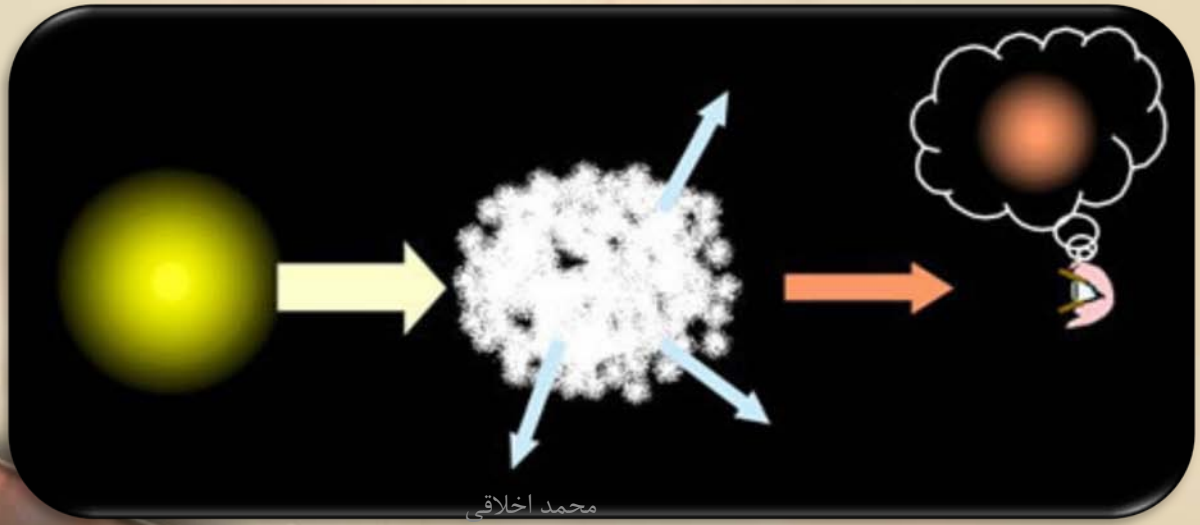
- این تیرگی که مواد فضای میان‌ستاره‌ای ایجاد می‌کنند را برانگیختگی میان‌ستاره‌ای می‌نامند که به دلیل پراکندگی و جذب نور ستارگان پشت آنها توسط این مواد است.
- پس، هنگامی که می‌خواهیم با مقایسهٔ قدر مطلق و قدر ظاهری فاصله‌سنجی کنیم، باید حتما اثر این مواد را در نظر بگیریم:

$$m_\lambda - M_\lambda = 5\log_{10} d - 5 + a_\lambda$$

- در این معادله a_λ پارامتر جذب است که همانطور که از نام آن بر می‌آید وابسطه به طول موج نور مورد نظر است. همانطور که واضح است، هر چه عمق مواد میان‌ستاره‌ای که نور از درون آنها رد می‌شود بیشتر باشد، پارامتر جذب بیشتر، قدر ظاهری یک ستاره بیشتر و در نتیجه ستاره تاریک‌تر می‌شود.

قرمزگرایی میان‌ستاره‌ای

- همانطور که در مورد یک موج آب صادق است؛ پارامتر جذب با معکوس طول موج رابطه دارد: هر چه طول موج بیشتر باشد، پارامتر جذب کمتر می‌شود.
- در نتیجه طول موج‌های بلندتر نور ستارگان (قرمز و مادون قرمز) به راحتی از این ابرها گذر می‌کنند ولی نورهای آبی و ماوراء بنفش پخش می‌شوند.
- این اثر باعث می‌شود که ستاره قرمزتر از رنگ واقعی (بر مبنای تابش جسم سیاه) خود به نظر برسد. که البته با مطالعه دقیق طیف می‌توان این تغییر را یافت.



سحابی‌های انعکاسی

- همانطوری که دیدیم، نورهای با طول موج کوتاه‌تر (آبی‌تر) با برخورد به توده‌های میان‌ستاره‌ای، کاملا رندوم پخش می‌شوند، به همین دلیل، بعضی مواقع امکان دارد که هنگامی که به ستاره‌ای پشت یک ابر که در راستای دیگری قرار دارد نگاه می‌کنیم، یک سحابی آبی انعکاسی می‌بینیم:
- در شکل سمت چپ، سحابی انعکاسی مروبط به ستاره‌ی رجل‌الجبار را می‌بینیم، در شکل میانی سحابی انعکاسی مروپ در صورت فلکی ثور دیده می‌شود و در شکل سمت راست NGC 1999 دیده می‌شود.

ابرهای ملکولی

- در ابرهایی که مقدار غبار در آنها به نسبت زیاد است، پخش شدگی نورهای فرابنفش باعث می‌شود این اشعه حضور زیادی نباشد و اتم‌های هیدروژن بتوانند با مرکزیت غبار، ملکول‌های ساده تشکیل دهند.
- با تشکیل ملکول هیدروژن، انرژی آزاد می‌شود و دمای این ابر ملکولی بالا می‌رود.
- از آنجایی که ملکول هیدروژن به تنهایی تابشی از خود ندارد، از وجود ملکول‌های مونوکسیدکربن برای تشخیص ملکول‌های هیدروژن استفاده می‌شود.

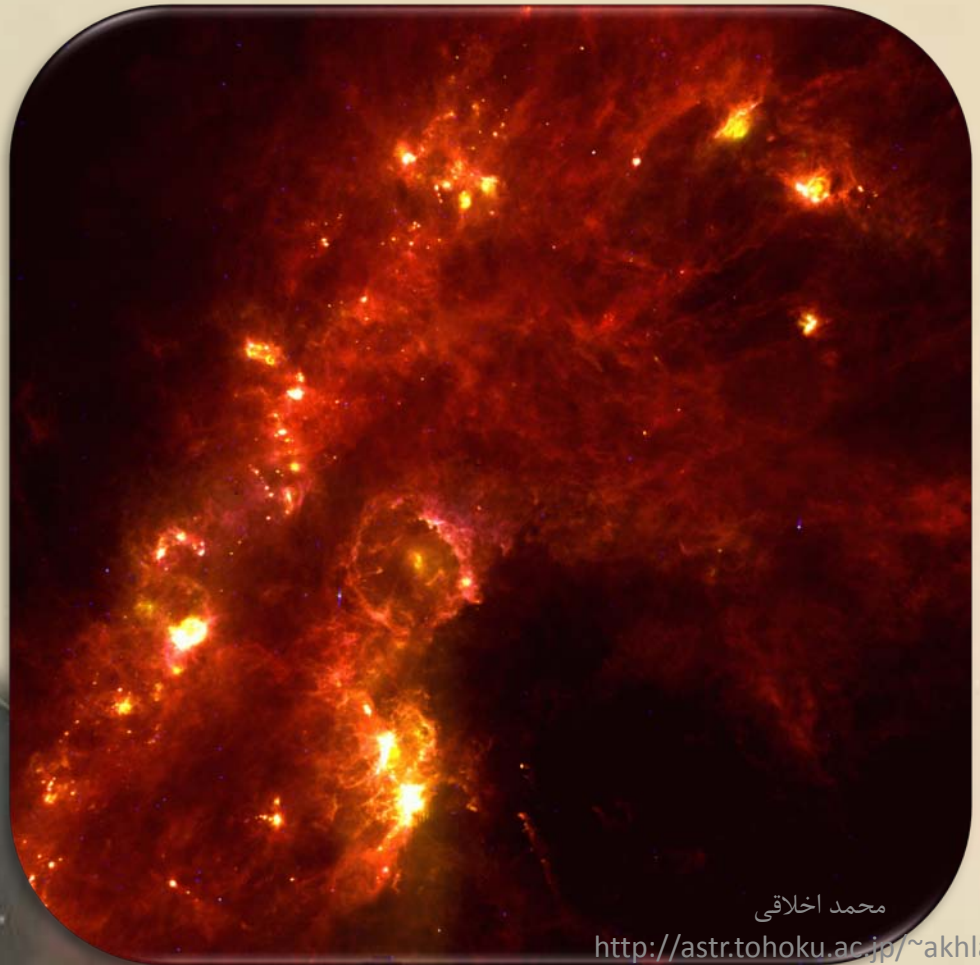
محمد اخلاقی
http://astr.tohoku.ac.jp/~akhlaghi/

ابرهای ملکولی غول‌آسا

- ابرهای ملکولی غول‌آسا (Giant Molecular Coulds)، مجموعه‌های عظیمی از غبار و گاز هستند که دما به طور متوسط در آنها حدود ۲۰کلوین است و در هر سانتیمتر مکعب حدود ۱۰۰ تا ۳۰۰ ذره وجود دارد. جرم آنها به حدود یک میلیون برابر خورشید است و اندازه‌های آنها حدود ۵۰پارسک.
- درون این ابرهای ملکولی غول‌آسا، محدوده‌های متراکمی وجود دارد با اندازه‌های حدود یک صدم پارسک تا یک پارسک که در آنها دما بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ درجه کلوین می‌رسد.
- هزاران ابر ملکولی غول‌آسا در راه شیری وجود دارد و بیشتر آنها در شاخه‌های کهکشان هستند.
- بعضی از این ابرهای ملکولی غول‌آسا به قدری بزرگ هستند که با صورت‌فلکی که در آن قرار دارند نامگذاری می‌شوند: در اسلاید بعد ابر بزرگ جبار و ابر بزرگ ثور را می‌بینید.

دو ابر غول‌آسای ملکولی

- یک مثال از ابرهای غول‌آسای ملکولی، مجموعه ابر ملکولی جبار است که حدود ۱۶۰۰ سال نوری از ما فاصله دارد و چند صد سال نوری قطر آن است، سحابی جبار جزئی از این مجموعه بزرگ و وسیع است.
- سحابی جبار، نزدیک‌ترین مجموعه‌ی ستاره‌ای در حال تشکیل به زمین است (حدود ۱۴۰۰ سال نوری فاصله دارد و ۲۴سال نوری قطر آن است).



محمد اخلاقی
http://astr.tohoku.ac.jp/~akhlaghi/

گلبول‌های بوک

گلبول های بوک: لکه های سیاه تکه گاز های بین پشت زمینه و ما هستند که از محیط های تشکیل ستاره می باشند.

- گلبول‌های بوک عموما بین ۲ تا ۵۰ برابر جرم خورشید جرم دارند و قطر آنها حدود یک سال نوری است.
- بارت بوک در سال ۱۹۴۰ آنها را کشف کرد و اعتقاد داشت که ابرهایی هستند که به دلیل گرانش در حال تبدیل به ستاره هستند، اما این بحث او تا ۱۹۹۰ اثبات نشده ماند.
- گلبول‌های بوک از ناشناخته‌ترین اجزاء محیط میان‌ستاره‌ای هستند.
- بعضی از آنها تا دمای ۸درجه کلوین سرد هستند که می‌توان آنها را سردترین منطقه‌ی کیهان دانست.

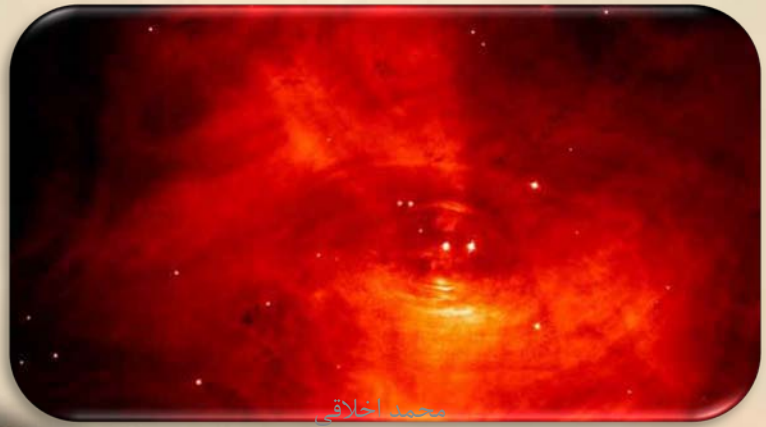
متراکم شدن گاز های بین ستاره‌ای

برای متراکم شدن گرانشی ابرها جرم ابر گازی یا ملکولی باید بیشتر از جرم جیینز باشد: M_j

$$M_j = \frac{9}{4} \times \left(\frac{1}{2\pi n}\right)^{\frac{1}{2}} \times \frac{1}{m^2} \times \left(\frac{kT}{G}\right)^{\frac{3}{2}}$$

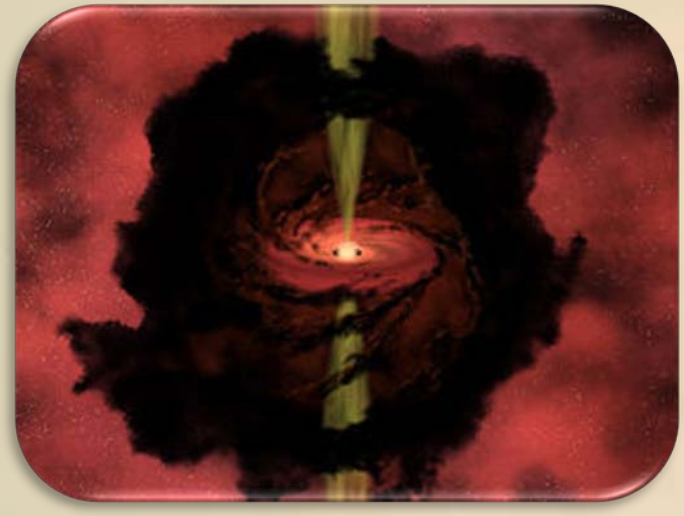
در یک ابر عادی با دمای ۵۰ کلوین، با ۵۰۰ ذره در هر سانتیمتر مکعب، جرم جیینز ۱۵۰۰ برابر جرم خورشید خواهد بود.

بیایید به یک ابر چگال تر نگاه کنیم، با دمای ۱۵۰ کلوین و صد میلیون ذره در هر سانتیمتر مکعب، آنگاه جرم جیینز ۱۷ برابر جرم خورشید خواهد بود.



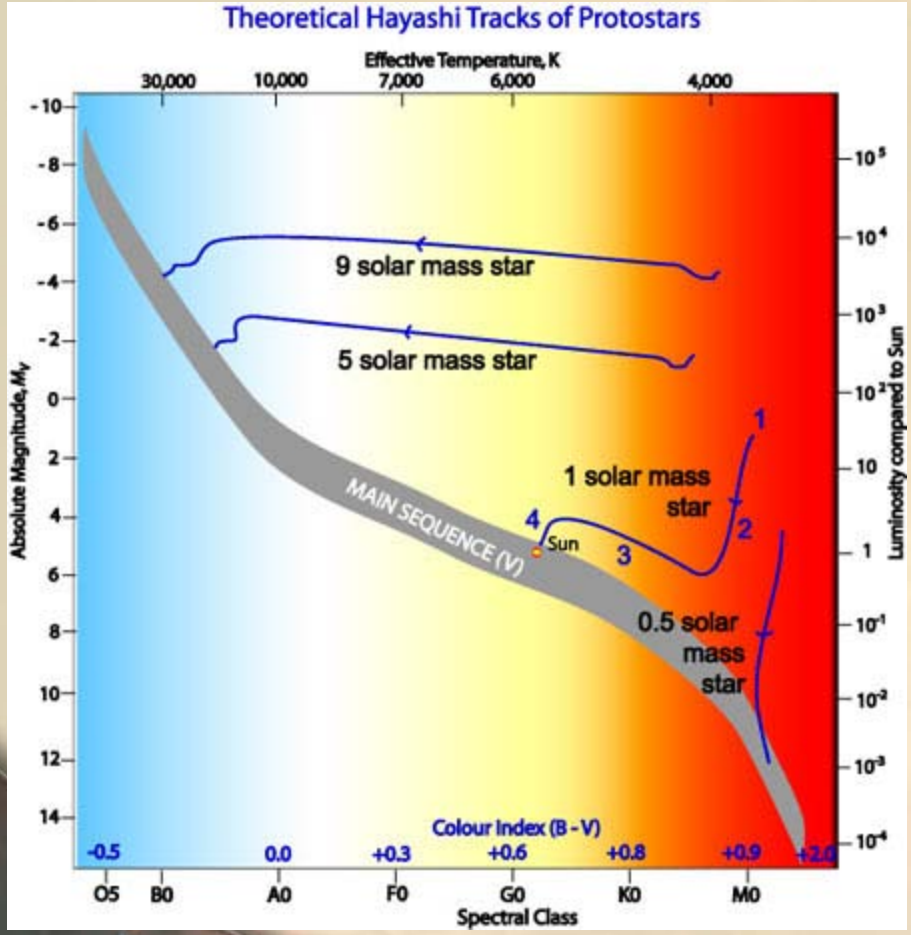
محمد اخلاقی
http://astr.tohoku.ac.jp/~akhlaghi/

پیش‌ستاره (Protostar)



- در حالی که ابر فشرده‌تر می‌شود، دمای آن بالاتر می‌رود.
- هنگامی که دما به ۲۰۰۰درجه کلوین برسد، ملکول‌های هیدروژن شکسته می‌شوند
- هنگامی که چگالی به 10^{-8} گرم بر سانتیمتر مکعب برسد، انرژی تابشی به راحتی با همرفتی به سطح می‌رسد و با تابش از سطح خارج می‌شود.
- این ابر تا زمانی پیش‌ستاره نامیده می‌شود که مواد در حال سقوط، یا چرخش به سمت مرکز آن باشند
- کاهش حجم تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که تعادل ترمودینامیکی میان کشش گرانشی و انرژی حرارتی ایجاد شود.
- در صورتی که با ابر ملکولی غول‌آسا مواجه باشیم، کل ابر یک ستاره تولید نمی‌کند، بلکه یک خوشه‌ی ستاره‌ای در آن منطقه ایجاد می‌شود.
- کمتر از یک میلیون سال طول می‌کشد تا این اتفاقات کامل شوند.

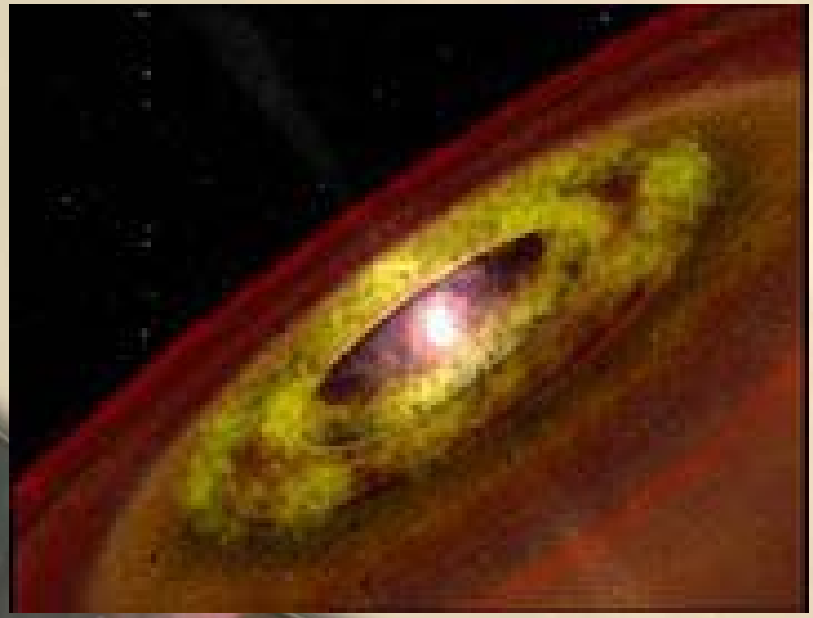
مسیرهای هایاشی و هنیه



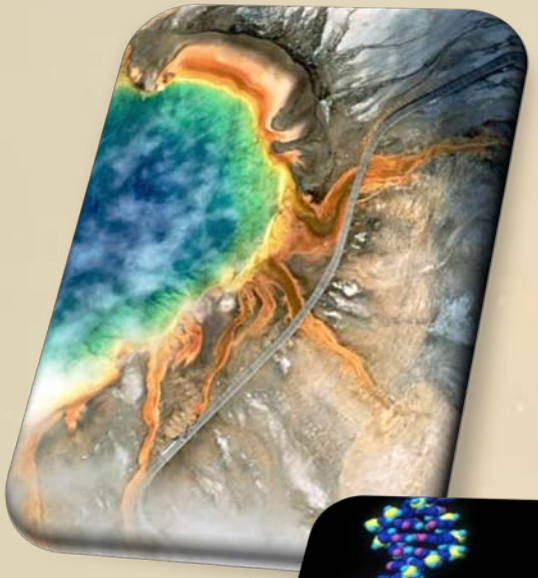
- با افزایش انتقال انرژی به صورت همرفتی، جریان‌های همرفتی تا هستهٔ ستاره ادامه پیدا می‌کنند.
- در اثر این اتفاق، اول در حالی که دمای ستاره افزایش می‌یابد، درخشندگی ستاره کاهش پیدا می‌کند: مسیر عمودی رو به پایین هایاشی.
- بعد از مسیر هایاشی، ستاره وارد مسیر هنیه می‌شود که به صورت افقی ستاره را وارد رشتهٔ اصلی می‌کند.
- ستاره‌های بیشتر از ۸یا ۹برابر جرم خورشید مدت خیلی کمی در این مسیرها می‌مانند به همین دلیل تا به حال دیده نشده‌اند.

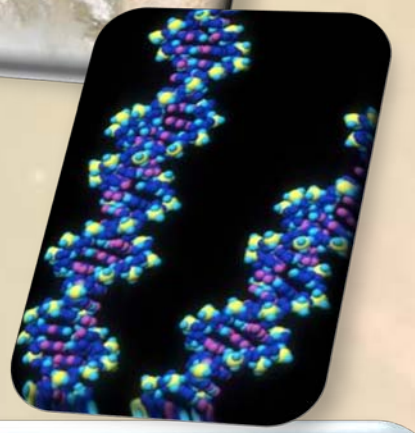
ستارهٔ پیش رشته‌اصلی

- ستاره هنگامی وارد رشتهٔ اصلی می‌شود که واکنش‌های هسته‌ای منبع تولید گرمای ستاره شوند. مرحلهٔ آخری که مانده تا ستاره به واکنش هسته‌ای برسد ستارهٔ پیش رشتهٔ اصلی (Pre-main sequence Star) نامیده می‌شود.
- این نوع ستاره‌ها به سه دستهٔ معروف تقسیم‌بندی می‌شوند: T-Touri و FU Orionis برای ستاره‌های تا دو برابر جرم خورشید و Herbig Ae/Be برای ستاره‌های ۲ تا ۸ برابر جرم خورشیدی.



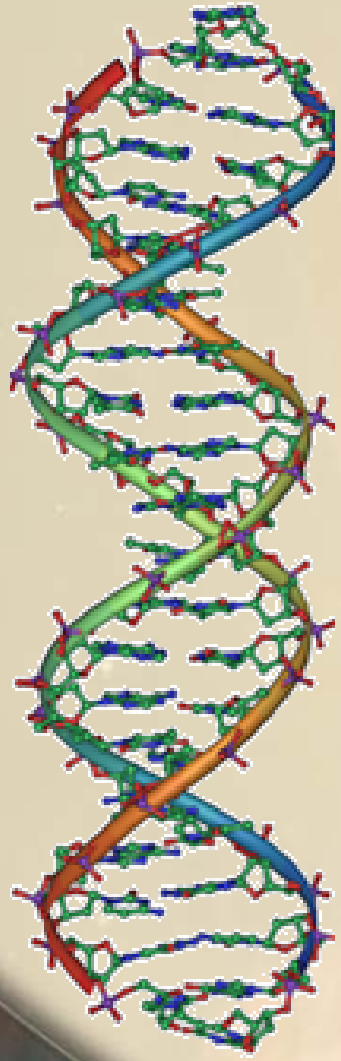
- در شکل مقابل یک ستارهٔ T-Touriرا می‌بینید که مواد هنوز در حال سقوط به سمت مرکز آن هستند و اصلی‌ترین عامل ایجاد کنندهٔ حرارت در آن همین درون‌ریزی گرانشی است.
- کشش تمام مواد اطراف حدود ۱۰میلیون سال طول می‌کشد. به این دلیل که مرحلهٔ پیش رشتهٔ اصلی حدود ۱درصد از عمر یک ستاره را شامل می‌شود!





جلسه هفتم: اخترزیست‌شناسی

- تعریف اخترزیست‌شناسی
- ترکیب شیمیایی فضای میان‌ستاره‌ای و منظومه شمسی
- موقعیت خاص زمین (شرایط زیستی)
- تکامل جو
- نظریه‌های ایجاد حیات (تکوین و تکامل)
- طراحی زیستی
- حیات در سیارات دیگر (جستجو)
- احتمال وجود حیات هوشمند



تعریف اخترزیست‌شناسی

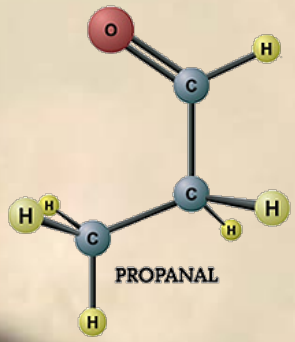
- اخترزیست‌شناسی را می‌توان مطالعه منشاء، تکامل، توزیع و حتی آیندهٔ حیات در کیهان و از جمله زمین دانست.
- مطالعه حیات در کیهان مخلوطی از **زمین‌شناسی**، **نجوم**، **شیمی**، **زیست‌شناسی تکاملی** و **تکوینی**، **فیزیولوژی** و **دیرینه‌شناسی** است.

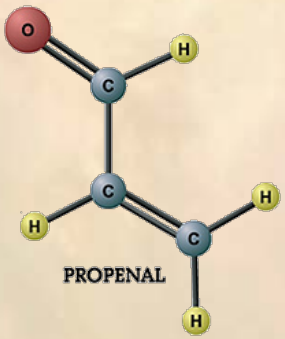
چند سوال مهم برای اخترزیست‌شناسان:

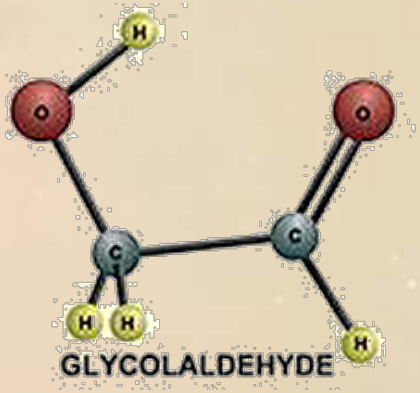
- منشاء و تکامل حیات چگونه بوده است؟
- آیا حیات، غیر از زمین، در مکان دیگری از کیهان وجود دارد؟
- آیندهٔ حیات روی زمین و فرای آن چیست؟

ترکیب شیمیایی فضای میان‌ستاره‌ای و منظومه شمسی: اخترشیمی

- ترکیبات شیمیایی موجود در فضای میان‌ستاره‌ای را بیشتر طریق طیف‌سنجی خطوط طیفی برانگیختگی ملکول‌ها یا طیف‌های چرخشی آنها بدست می‌آورند. این امواج بیشتر در طول موج‌های رادیویی، میکروویو و مادون قرمز دور دیده می‌شوند.
- اولین ملکول پیدا شده در فضای میان‌ستاره‌ای فرمالدهید H_2CO در سال ۱۹۶۹بوده است.
- ملکول‌های زیادی در فضای میان‌ستاره‌ای دیده شده‌اند: از ملکول‌های سادهٔ دو اتمی تا ملکلوهای نسبتا پیچیدهٔ ده اتمی آلی: مانند استون ($(CH_3)_2CO$) و بنزن (C_6H_6).
- دو ملکول پروپانال و پروپنال به همراه گلیکالدهید می‌توانند در یک واکنش ملکول‌های ریبوز را تولید کنند که یکی از سازندگان RNA است.

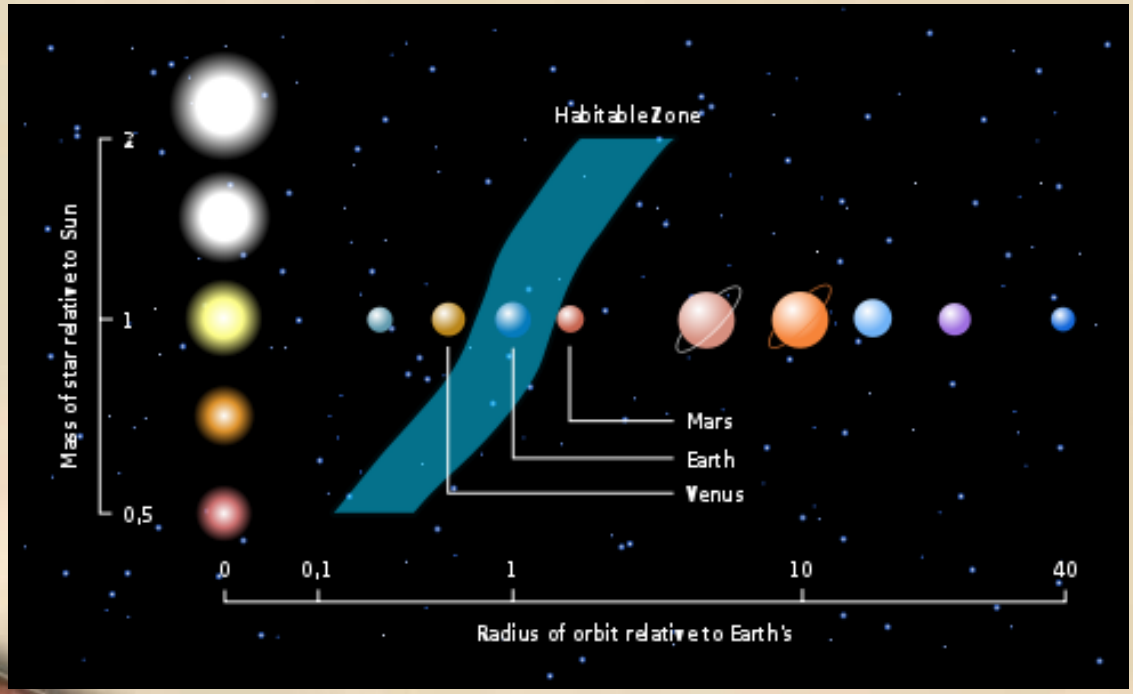






موقعیت خاص زمین (شرایط زیستی)

- ستاره‌های بسیار پرجرم‌تر از خورشید عمر بسیار کوتاهی دارند که نسبت به زمان لازم برای تکامل حیات خیلی کوتاه است. کوتوله‌های قرمز نیز بسیار خنک‌تر از آنند که گرمای لازم را در سیارات برای حیات ایجاد کنند، اما اخیرا (سال ۲۰۰۵) بیان شده است که احتمال دارد در صورت داشتن جوی کلفت می‌توانند حیات را روی خود ایجاد کنند.



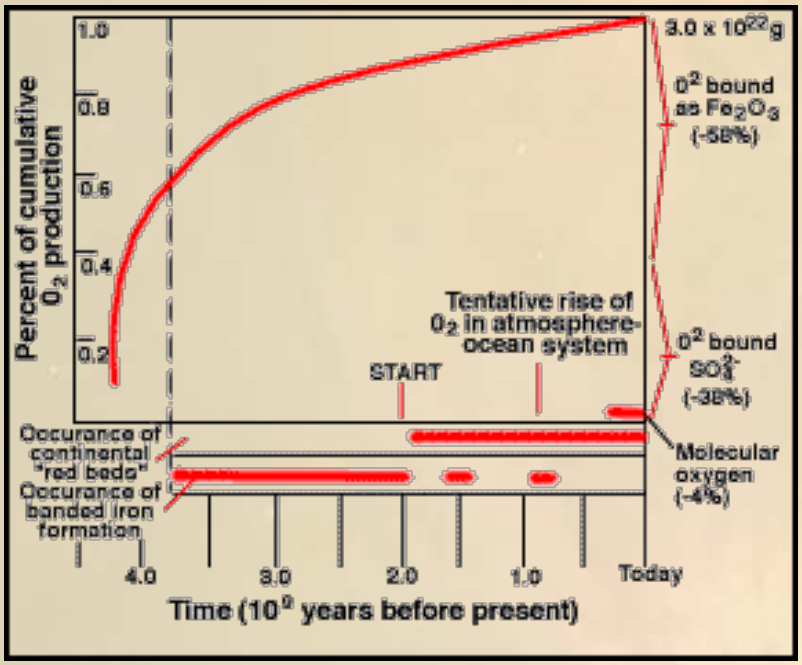
موقعیت خاص زمین (شرایط زیستی)

- بر مبنای آخرین نتایج تحقیقاتی ناسا و ستی ستاره‌هایی از رشتهٔ اصلی که دمای سطحی آنها میان ۴۰۰۰ تا ۷۰۰۰ درجه کلوین (از اوایل گونه طیفی K تا F) باشد می‌توانند منبع انرژی خوبی برای حیات احتمالی روی سیارات خود باشند (عمر، تابش در ماوراء بنفش و وجود آب مایع در این انتخاب بسیار مهم است). حدود ۵ تا ۱۰ درصد ستارگان کهکشان این شرایط دارند.
- بعضی از ستارگان تغییرات نوری بسیار شدیدی دارند که می‌توانند برای حیات خطرناک باشند.
- ستارگانی که می‌توانند حیات را در سیارات خود داشته باشند باید نسبت عناصر فلزی (عناصر سنگین‌تر از هلیوم) زیادی در خود داشته باشند.
- سیارات آنها نیز باید خاکی، نسبتا پرجرم (حدود زمین) و در مداری مناسب باشند.

تکامل جو

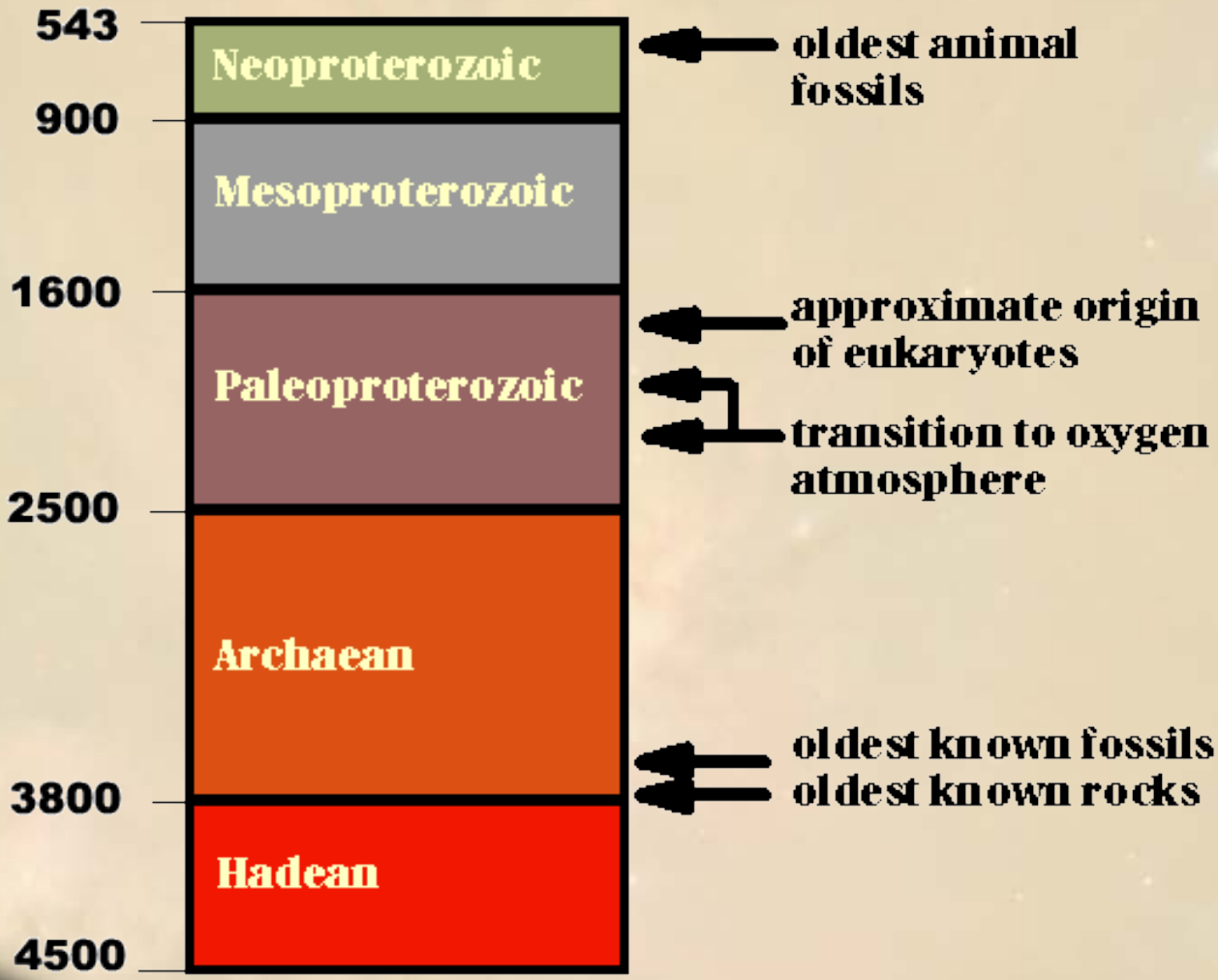
- زمین و سایر سیارات منظومه شمسی حدود ۴.۵۴ میلیارد سال پیش تشکیل شدند.
- شرایط زمین اولیه بسیار متفاوت با شرایط امروزی بوده است: فعل‌وانفعال‌های زمین‌شناسی و هسته‌ای دمای آن را بسیار بالا می‌برد. دما به قدری بالا بوده که آب مایع نمی‌توانسته روی زمین ایجاد شود.
- با خنک شدن زمین از طریق تابش در فضا، آب مایع و در نتیجه باران و دریاها روی زمین ایجاد می‌شوند. در این شرایط دما برای شروع روند تکامل حیات ایجاد می‌شود.
- جو اولیه احتمالا فقط از هیدروژن و هلیوم تشکیل شده بود. اما امروزه حضور این عناصر کمتر شده‌اند.
- به دلیل نبود هسته‌ای قسمت‌بندی شده، ودر نتیجه میدان‌های مغناطیسی، بادهای خورشیدی بیشتر جو را به فضا پرتاب می‌کردند.

تکامل جو



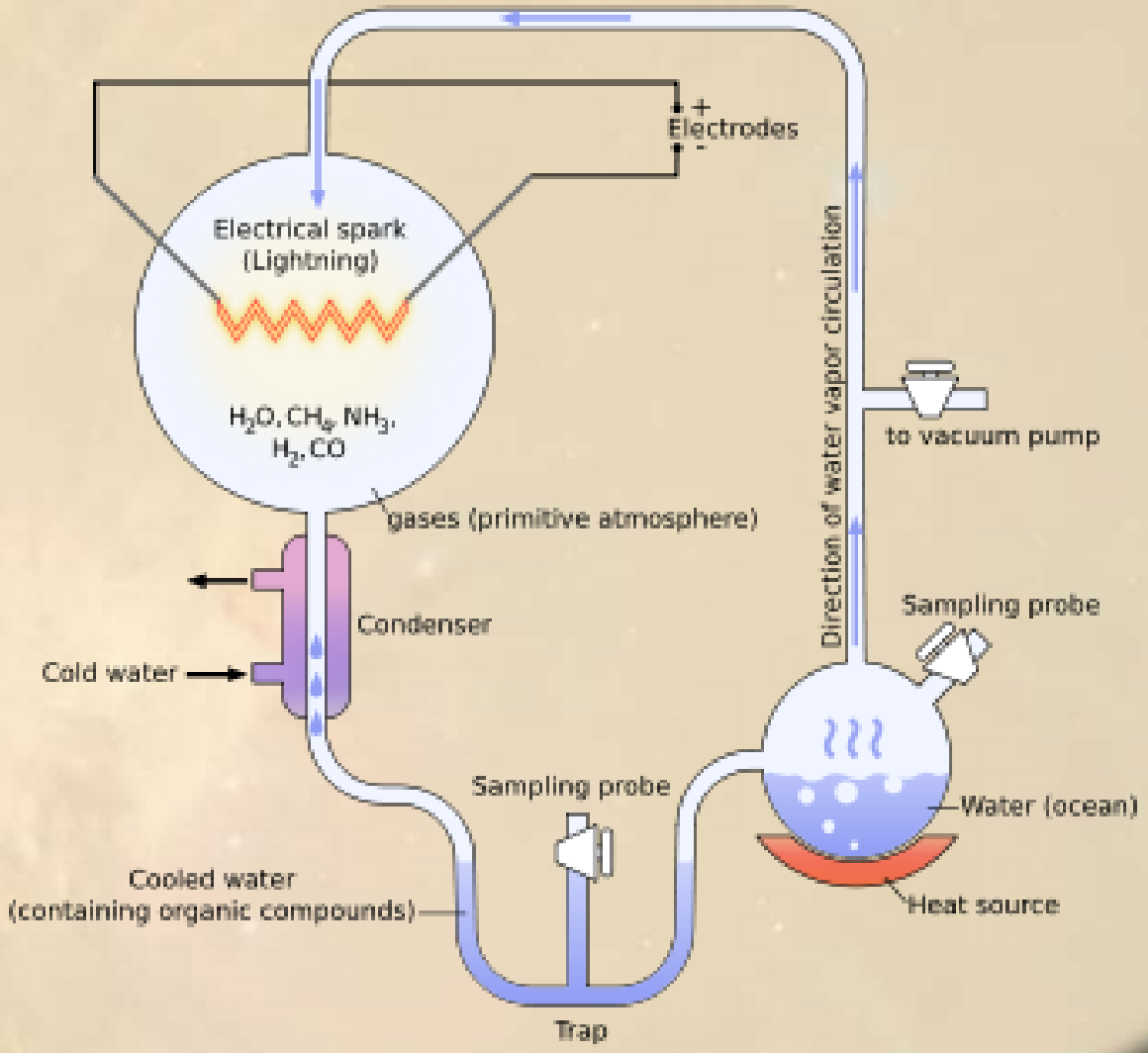
- از طریق گازهای آتشفشانی، گازهایی مانند آب، دی‌اکسیدکربن، دی‌اکسیدگوگرد، آمونیاک و متان در جو زیاد و زیادتر می‌شوند. در این دوره هنوز اکسیژن در جو قابل توجه نیست.
- با خنک شدن زمین، آب در جو زیاد می‌شود و اقیانوس‌ها روی زمین شکل می‌گیرند.
- امروزه حدود ۲۱درصد جو را اکسیژن تشکیل می‌دهد، بهترین ایده‌ها این است که از طریق تابش‌های فرابنفش خورشید ملکول‌های آب شکسته‌اند و این اکسیژن را آزاد کرده‌اند و فرایندهای اولیهٔ گیاهای (فوتوسنتز) موجب فراوانی اکسیژن شده‌اند.
- اکسیژن اولیه که از فوتوسنتز ایجاد شد صرف اکسیدکردن سنگ‌های سطحی زمین شد و مستقیما وارد جو نشد.

نظریه‌های ایجاد حیات

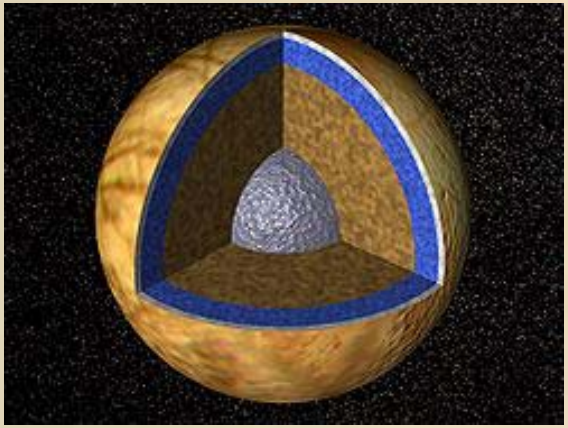


آزمایش میلر–اوری

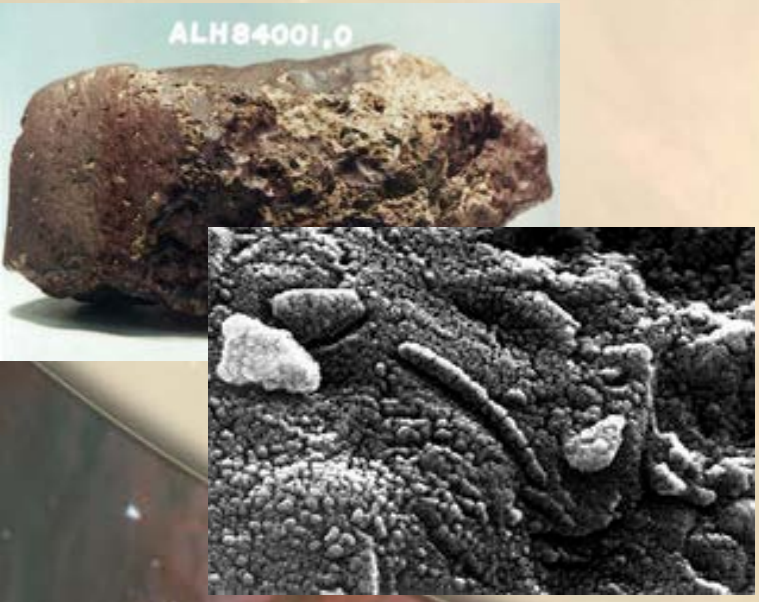
- در سال ۱۹۵۲، دو دانشمند دانشگاه شیکاگو برای اثبات این ادعا که شرایط جو اولیه زمین می‌توانست از ترکیبات غیر آلی ترکیبات آلی ایجاد کند این آزمایش را طراحی کردند.
- بعد از یک هفته ۱۱ اسیدآمینه تشکیل شده بودند و حدود ۱۰ درصد کربن اولیه به ترکیبات آلی تبدیل شده بود.



جستجو مستقیم برای یافتن حیات

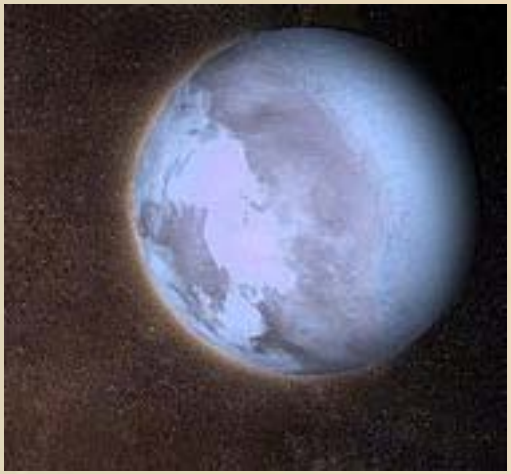


- منظومه شمسی یکی از اصلی‌ترین مکان‌ها برای جستجو به دنبال حیات است. به خصوص مریخ، اروپا (یکی از قمرهای مشتری، شکل مقابل) و سیارک‌ها.



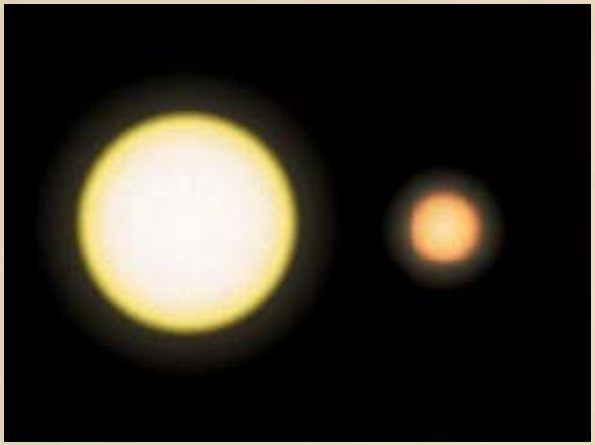
- در سال ۱۹۹۶ روی شهاب‌سنگ ALH84001 (جدا شده از مریخ و پیدا شدن در قطب جنوب) ساختارهایی به نام نانوباکتری دیده شد که هیجان را میان دانشمندان بسیار زیاد کرد.

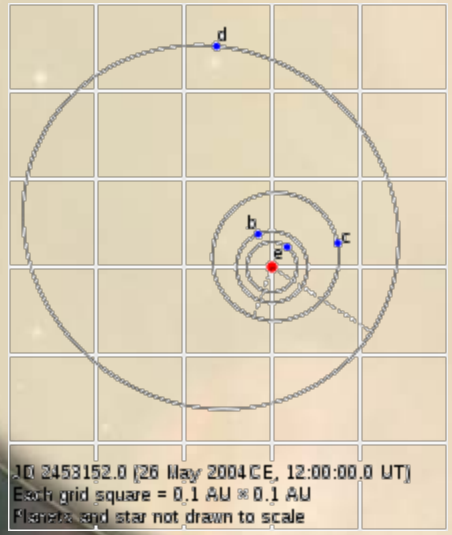
جستجو برای سیارات فرا خورشیدی



- یکی از اصلی‌ترین انگیزه‌های پیدا کردن سیارات فرا خورشیدی دقیق‌تر کردن احتمال پیدا کردن حیات خارج از زمین است. از میان ۴۰۵سیاره فراخورشیدی که تا به حال پیدا شده، سه سیاره به احتمال زیاد می‌توانند میزبان حیات باشند: OGLE-2005-BLG-390Lb، Gliese 581 d، Gliese 581 c. این سه سیاره در فاصله و جرم مناسب برای ایجاد حیات هستند اما مطالعه دقیق‌تر جو آنها هنوز امکان‌پذیر نیست.
- تلسکوپ‌های زیادی مشغول پیداکردن سیارات فرا خورشیدی هستند اما از میان آنها ماموریت کپلر ناسا (که عید ۱۳۸۸ به فضا پرتاب شد) یکی از اصلی‌ترین ماموریت‌هاست:

Gliese 581





- این ستاره کوتوله‌ای قرمز با گونه طیفی M3V در صورت فلکی میزان و با فاصله ۲۰.۳ سال نوری از زمین است.
- در شکل بالا نسبت اندازه این کوتوله قرمز به خورشید را می‌بینید. و در شکل زی آن مدار چهار سیاره‌ای که به دور آن می‌گردند را می‌بینید.
- سیاره c یک سیاره خاکی است با جرمی حدود ۱.۵برابر زمین و در منطقه زیستی سیاره.
- از آنجا که بیشترین احتمال وجود حیات تا به حال حول این ستاره دیده شده است، در مهر ۱۳۸۷ گروهی با رادیوتلسکوپ RT-70 اوکراین پیغام بسیار پرقدرتی را به سمت این سیاره فرستادند. این پیغام در سال ۲۰۲۹میلادی به این سیاره می‌رسد و اگر بخواهند جواب بدهند، جواب آنها در سال ۲۰۴۹ به ما می‌رسد.

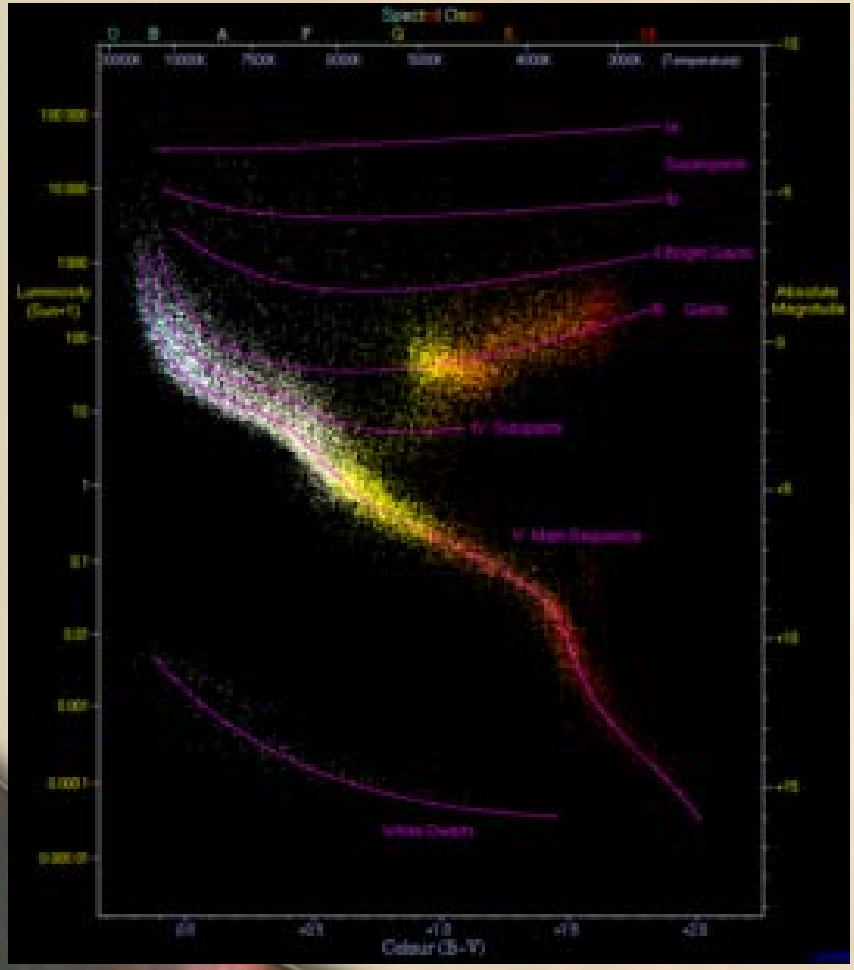
احتمال پیدا کردن حیات هوشمند

- فرنک دریک در سال ۱۹۶۱ برای محاسبه احتمالی تعداد تمدن‌هایی که می‌توان با آنها ارتباط برقرار کرد معادله زیر را نوشت:

$$N = R^* \times f_p \times n_e \times f_\ell \times f_i \times f_c \times L$$

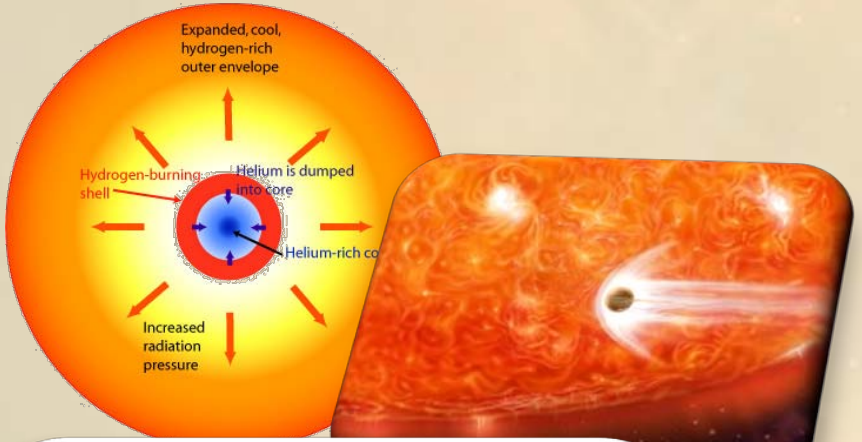
- که در آن N تعداد تمدن‌های موجود در کهکشان راه‌شیری است که احتمال دارد بتوانیم با آنها ارتباط برقرار کنیم. R* نسبت تولید ستاره در یک سال است (۱۰ستاره بر سال)، f_p نسبت تعداد ستاره‌هایی که سیاره دارند (نیم)، n_e نسبت سیاراتی که می‌توانند حیات داشته باشند (۲)، fl احتمال ایجاد حیات روی سیارات قبلی (۱)، f_i احتمال اینکه حیات هوشمند تولید شود (۱درصد)، f_c احتمال اینکه آن حیات هوشمند بتواند تماس برقرار کند (به عنوان مثال امواج الکترومغناطیسی به فضا بفرستد) (۱ درصد)، L مدت زمانی که آن تمدن‌ها این امواج را به فضا می‌فرستند (۱۰هزار سال). در این شرایط تعداد احتمالی تمدن‌های هوشمند در کهکشان حدود ۱۰ می‌شود.

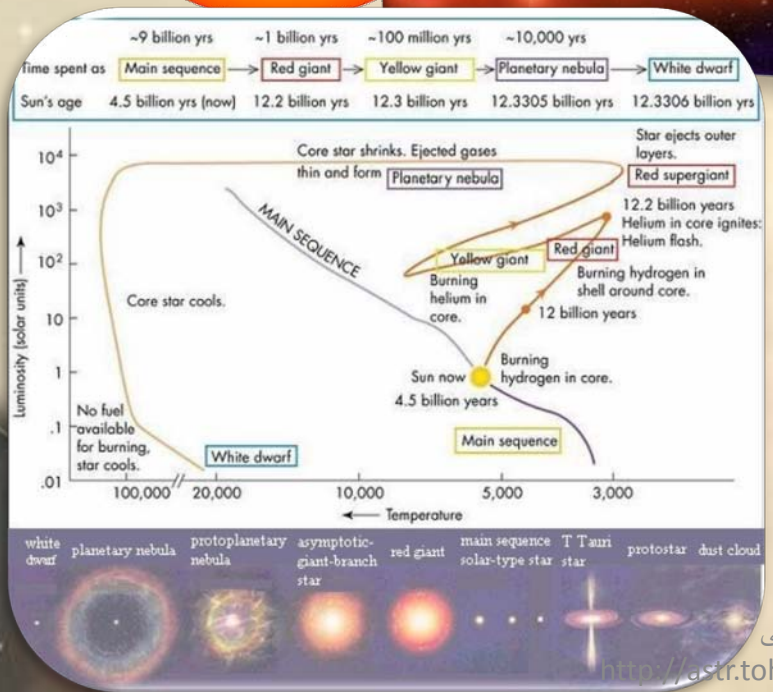
جلسه هشتم؛ ستارگان رشتهٔ اصلی: خورشید



- لحظه‌ای که واکنش‌های هسته‌ای اصلی‌ترین منبع انرژی ستاره می‌شوند و ستاره به تعادل می‌رسد را لحظه‌ای می‌دانند که ستاره وارد رشتهٔ اصلی شده است.
- تمام ستاره‌های رشتهٔ اصلی در تعادل هیدرودینامیکی هستند؛ میان دو نیروی عظیم انبساط به دلیل گرما و انقباض به دلیل گرانش.
- به طور کلی هرچه جرم ستاره رشتهٔ اصلی بیشتر باشد، عمر آن کمتر است.
- در ادامه برای شناخت دقیق‌تر این ستارگان خورشید را به عنوان بهترین نمونه بررسی می‌کنیم.

جلسه دهم: ستارگان پسا–رشته اصلی

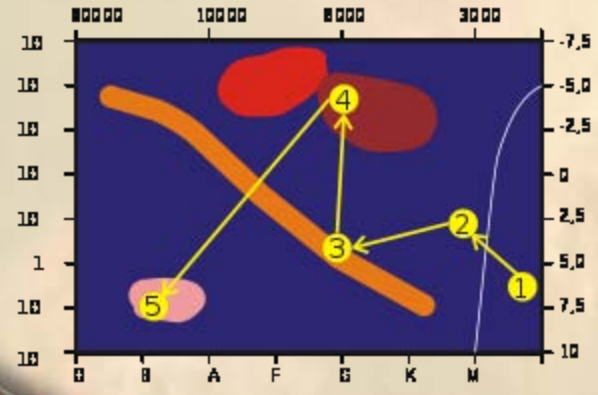


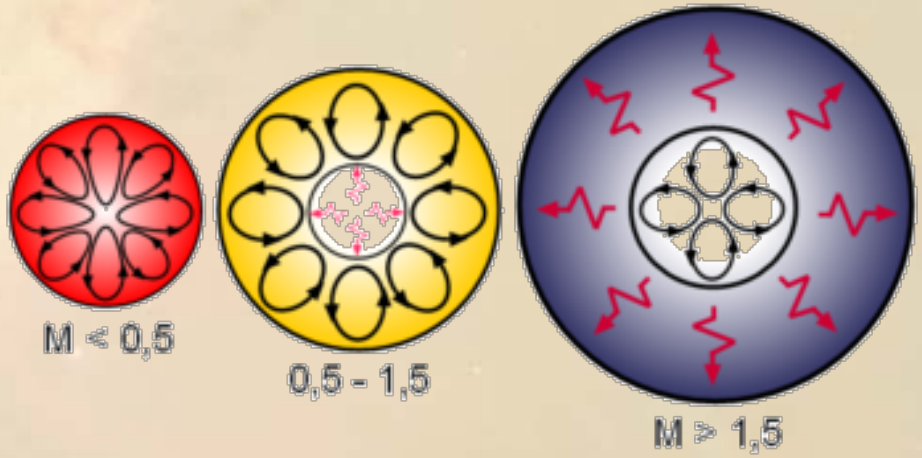


- دوره پسا–رشته اصلی
- خروج از رشته اصلی
- اتمام هیدروژن هسته
- تکامل ستاره‌های همجرم خورشید
- مرگ نهایی ستارگان همجرم خورشید
- مرگ ستارگان بیش از ۸ برابر جرم خورشید

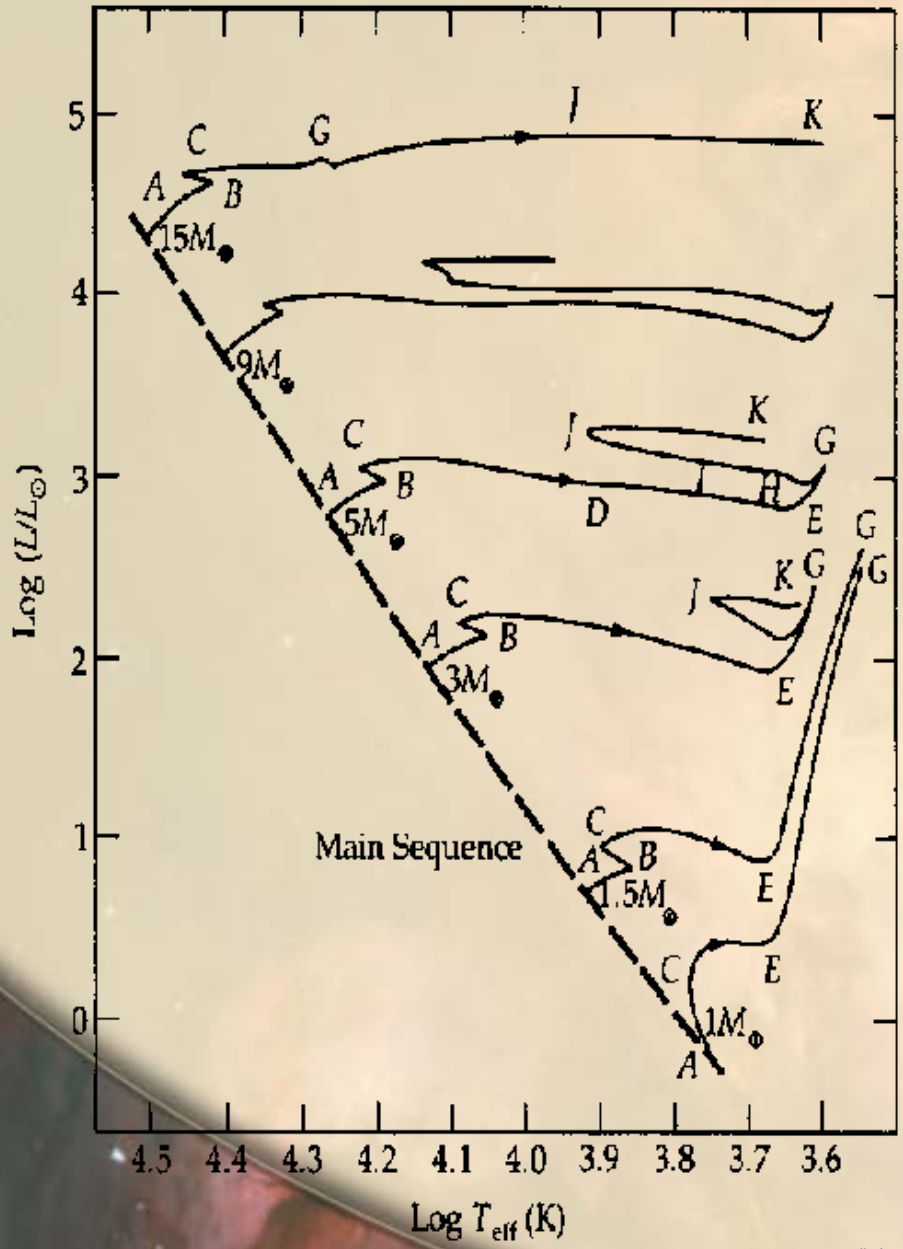
دوره پسا–رشته اصلی

- سوخت هسته‌ای ستاره (به عنوان مثال؛ هیدروژنی در شعاع کمتر از ۰.۲ شعاع خورشید که هسته خورشید به حساب می‌آید) در طول زمان کاهش می‌یابد.
- هنگامی که نسبت جرمی هیدروژن در هسته ستاره از مقدار خاصی کمتر باشد (بسته به نوع هسته)، دیگر فرایندهای پروتون-پروتون نمی‌توانند مولد اصلی انرژی در ستاره باشند و ستاره از این مرحله به بعد، بسته به جرمش از رشتهٔ اصلی خارج می‌شود یا به مدت کمی در آن می‌ماند و بعد خارج می‌شود.



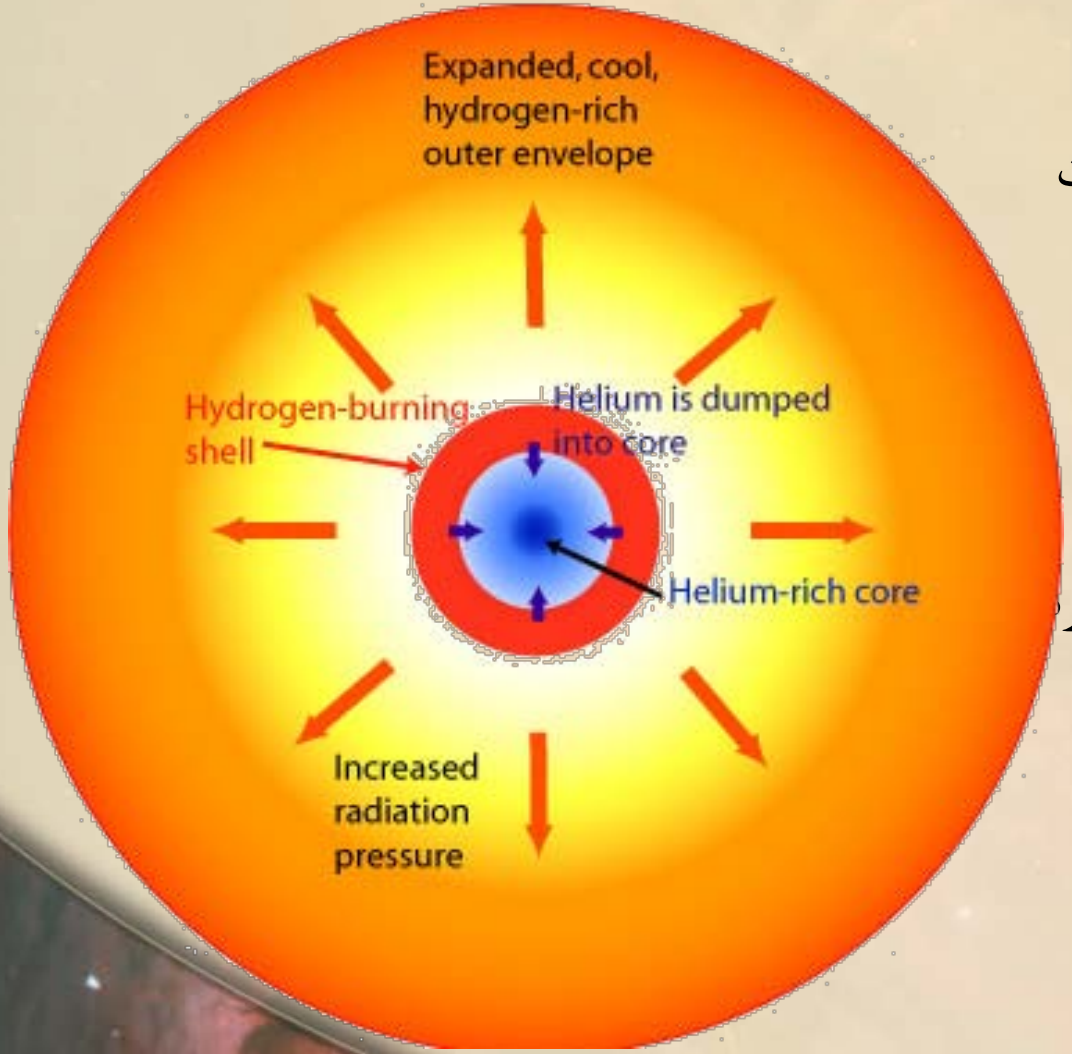


خروج از رشتهٔ اصلی



- همانطور که در مورد خورشید دیدیم، جرم، شدت، شعاع و دمای خورشید از زمان تولد (ZAMS) تا به حال افزایش پیدا کرده‌اند.
- در طول زمان، هسته فشرده، چگالی و گرم‌تر می‌شود (به دلیل افزایش هلیوم و برقراری تعادل هیدرواستاتیک).
- با افزایش چگالی و دمای هسته، چرخهٔ پروتون-پروتون سرعت بیشتری می‌گیرد و هیدروژن سریع‌تر به هلیوم تبدیل می‌شود.

اتمام هیدروژن هسته



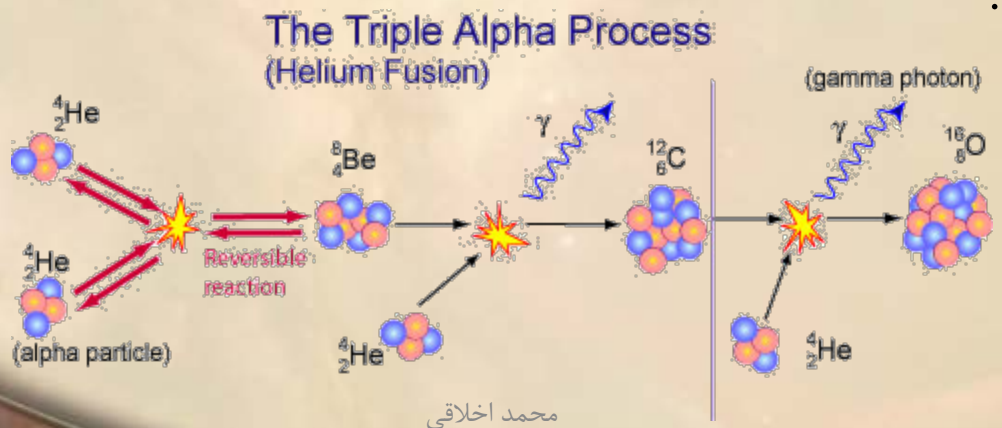
- با کم شدن هیدروژن در هسته، دیگر فرایندهای پروتون-پروتون نمی‌توانند روی دهند ولی به علت افزایش دمای هسته (که در طول زمان گرم‌تر شده است)، فرایندهای پروتون-پروتون در لایه‌هایی اطراف هسته انجام می‌شوند.
- به علت انبساط درخشندگی ستار بیشتر و دمای سطحی کمتر می‌شود؛ نقاط C در شکل صفحه قبل.
- در طول این فرایند، مقدار هلیوم هسته افزایش پیدا می‌کند

تکامل ستاره‌های همجرم خورشید

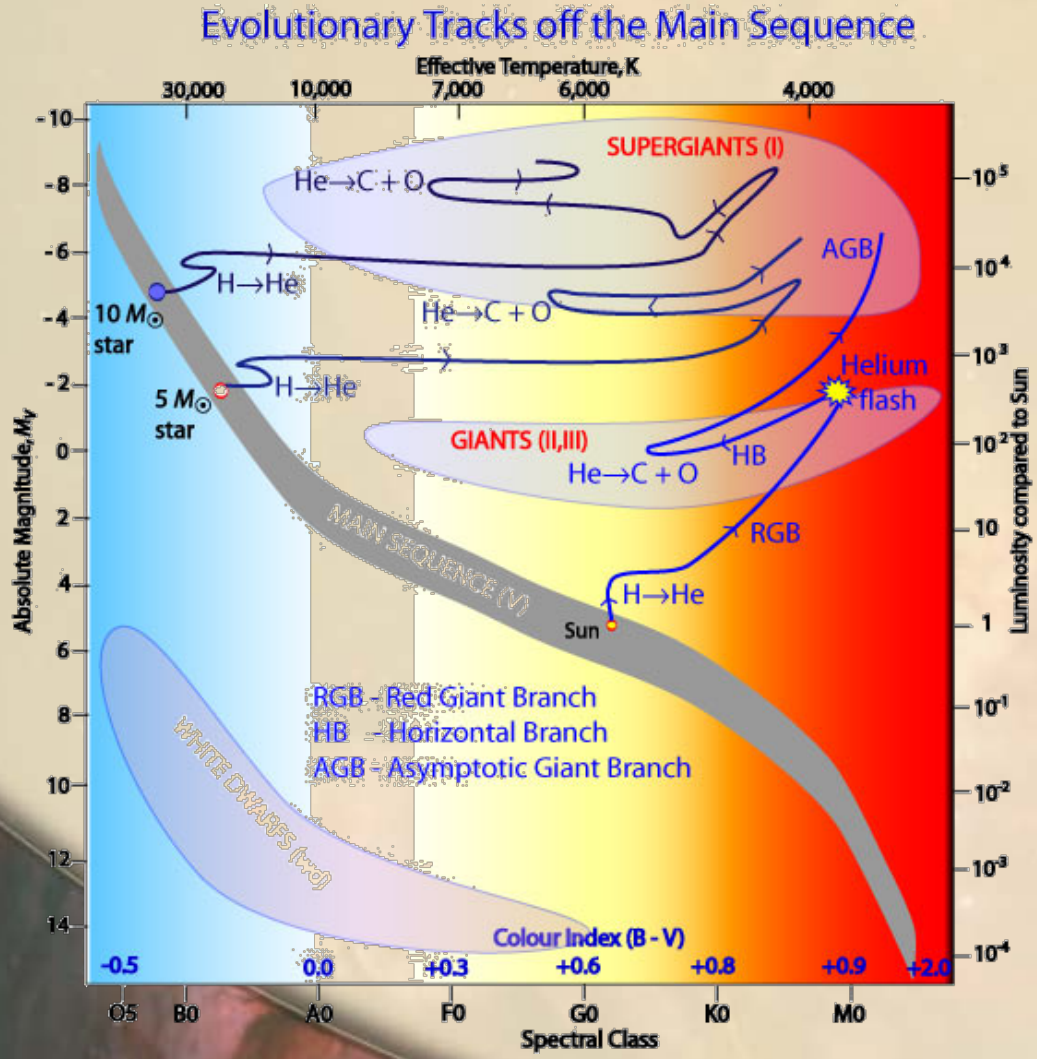
- از زمانی که هیدروژن در هسته تمام شده است، هسته یک جرم همدما مانده است که فقط به دلیل انقباض گرما ایجاد می‌کند.
- به دلیل افزایش دما در هسته و پوسته‌ای که مشغول تولید هلیوم است، دما در کل ستاره بیشتر می‌شود و نتیجه لایه‌های بیرونی انبساط بزرگی از خود نشان می‌دهند.
- با وجودی که ستاره خنک‌تر (قرمزتر) می‌شود، اما افزایش شعاع باعث می‌شود درخشندگی کل تا حدود هزار برابر بیشتر شود.

هستهٔ هلیوم سوز

- لایهٔ بیرونی هسته که از فرایند پروتون-پروتون انرژی تولید می‌کند، هلیوم خود را به درون هسته خالی می‌کند که جرم، فشردگی و در نتیجه دمای هسته را بالا می‌برد.
- هنگامی که دمای درون هسته به صدمیلیون درجه کلوین برسد، طی واکنش سه‌آلفا، هلیوم‌ها با هم همجوشی کرده و طی این واکنش کربن و اکسیژن تولید می‌شوند.
- طبق نظریات، این فرایند، اصلی‌ترین عامل تولید اکسیژن و کربن در کیهان (از جمله بدن ما) است.
- در عرض چند دقیقه یا ساعت، کل هسته فرایند سه‌آلفا را شروع می‌کند و ناگهان درخشندگی هسته برابر 10^{11}درخشندگی خورشید می‌شود! به این رویداد فلش هلیوم می‌گویند.

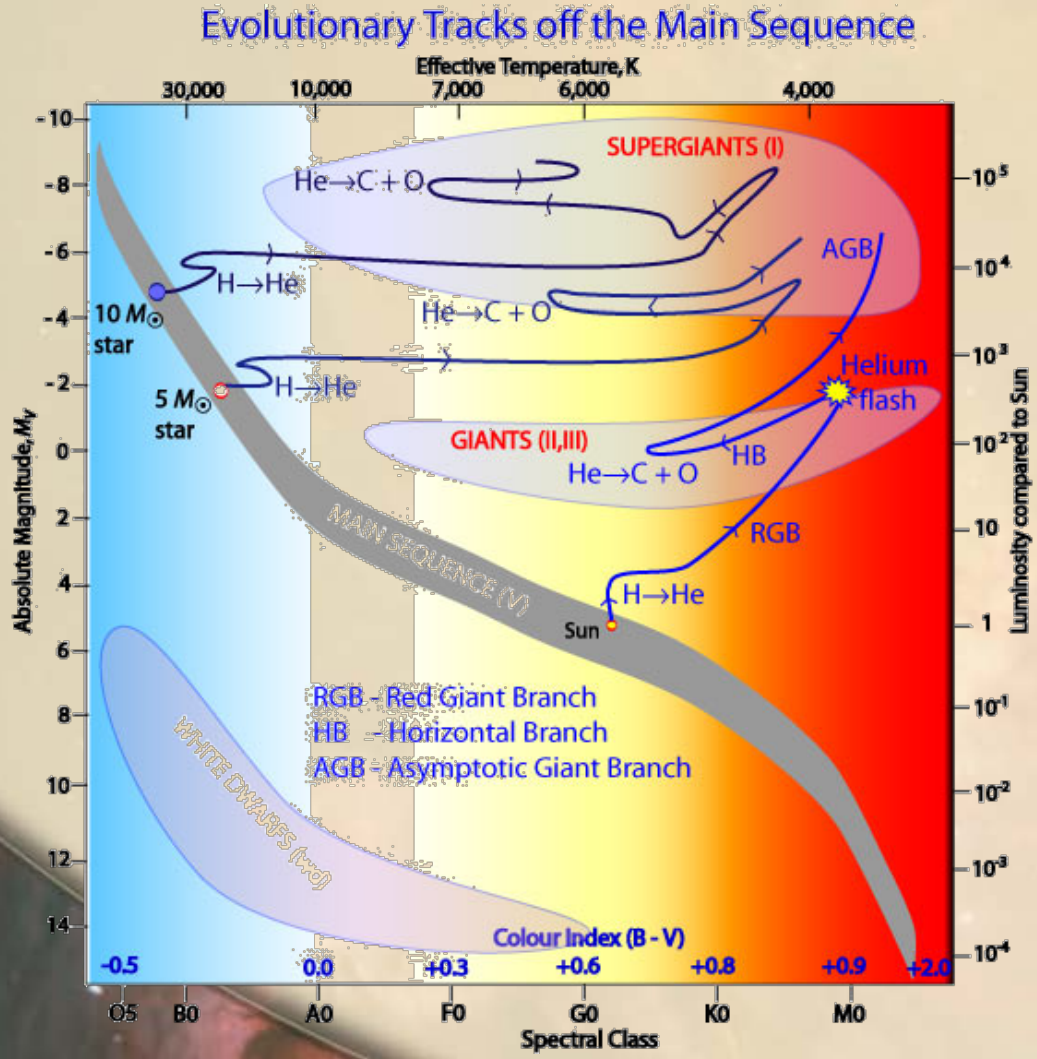


فلش هلیوم و شاخه افقی



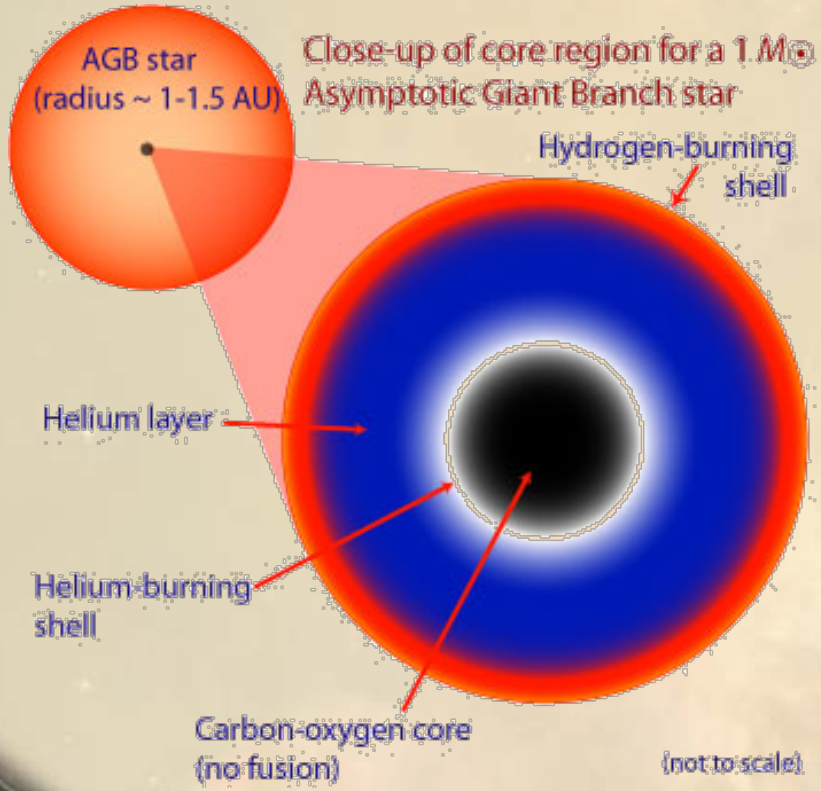
- بیشتر انرژی بسیار زیاد فلش هلیوم، اول از همه صرف این می‌شود که فشردگی بسیار زیاد هسته را از بین ببرد و هسته را به یک گاز ایده‌آل تبدیل کند که می‌تواند منبسط و منقبض شود.
- در نهایت بعد از فلش هلیوم، ستاره گرم‌تر می‌شود اما شعاع آن (به علت اینکه هسته به سیستم ترمودینامیکی ستاره بازگشته است) و در نتیجه روشنایی آن کمتر می‌شود.
- ستاره‌ای با جرم خورشید می‌تواند تا حدود ۱۰۰میلیون سال، کربن و اکسیژن تولید کند.

شاخه مناجبی قولی (AGN)



- خیلی سریع هلیوم هسته تمام می‌شود و هسته دیگر سوختی برای حفظ خود مقابل فشار بسیار زیاد لایه‌های بالایی ندارد.
- پس هسته دوباره فشرده می‌شود و مانند قبل فقط فشار تبهگنی نمی‌گذارد کل هسته فروبپاشد.
- اما این‌دفعه پروتون‌ها بسیار بیشتر هستند و دمایی که نیاز است تا هسته به حالت ترمودینامیکی بازگردد.

شاخه مجانبی غولی (AGB)

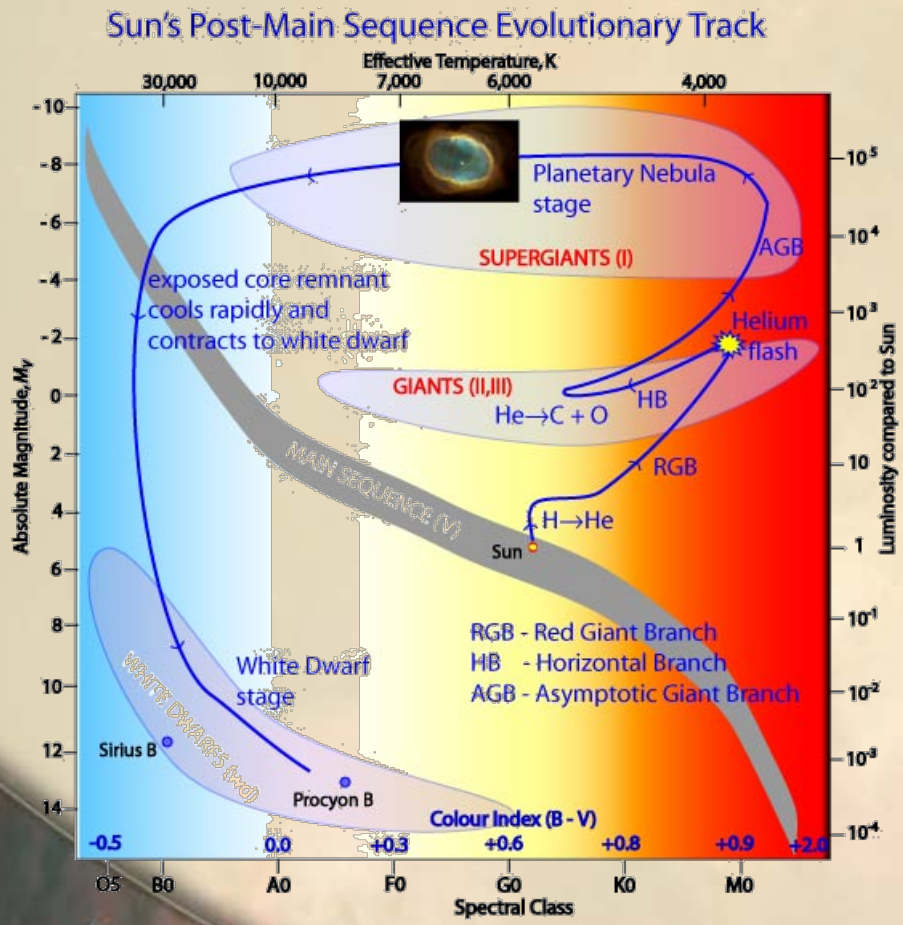


- برای اینکه ستاره بتواند هسته‌های اکسیژن و کربن را بسوزاند، دما باید خیلی بیشتر از ۱۰۰میلیون درجه کلوین باشد و فقط ستاره‌هایی که جرمی بیشتر از ۸برابر جرم خورشید دارند می‌توانند هسته را به این دما برسانند.
- اما به علت انقباض هسته هنوز می‌تواند دمای لازم برای همجوشی هلیوم در لایه‌های بالایی و حتی هیدروژن سوزی را تولید کند.
- ستاره دوباره منبسط می‌شود: در مورد خورشید تا ۱.۵واحد نجومی.
- درخشندگی ستاره تا ده‌هزار برابر بیشتر می‌شود.

شاخه مجانبی غولی (AGB)

- لایهٔ هلیوم سوزی در AGNها، آنقدر چگال نیست که هلیوم‌سوزی را به طور پیوسته انجام دهد، هر چند صد تا هزار سال که هیدروژن سوزی هلیوم را زیاد می‌کند فلش‌های هلیومی درون ستاره ایجاد می‌کند. که در نهایت این قول به یک متغیر بلندمدت تبدیل می‌شود.
- در این میان طی فرایند جذب پروتون (که هنگام فلش‌های هلیوم می‌تواند روی دهد)، هسته‌های سنگین‌تر؛ به عنوان مثال بیسموت با ۸۳ پروتون، ایجاد می‌شوند.
- به دلیل جریان‌های همرفتی، این هسته‌های سنگین به سطح ستاره راه پیدا می‌کنند و در طیف ستاره دیده می‌شوند که تعیین‌کنندهٔ خوبی از جریانات عمق ستاره هستند.
- انفجارهای سطحی تا یک‌ده‌هزارم جرم خورشید در سال از جرم AGNها کم می‌کند.
- ستارهٔ میرا (متغیر قیفاووسی) یکی از AGBهای معروف است که دوره‌هایی از چند ماه تا چند سال دارند.

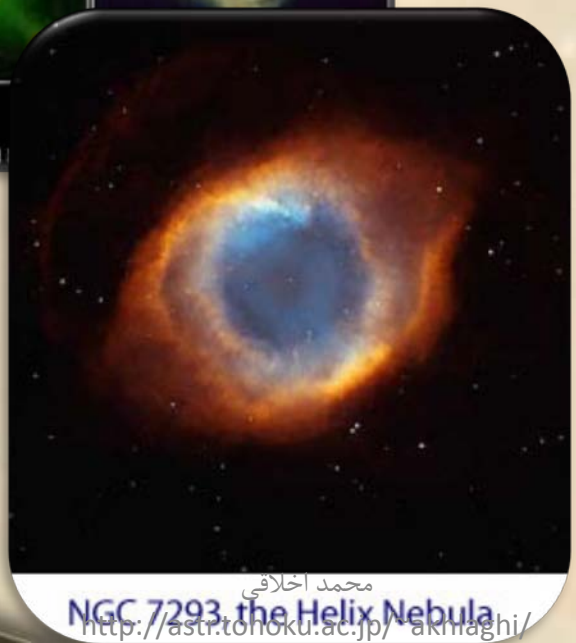
سرنوشت ستارگان با جرم اولیهٔ کمتر از ۸برابر خورشید



- به دلیل نوسانات پرانرژی ناشی از فلش‌های هلیوم مقدار زیادی از جرم پوسته ستاره به فضای اطراف پخش می‌شود؛ این ابر مقدار زیادی سیلیکات و گرافیت در خود دارد.
- با دور شدن پوسته، هسته که هنوز بسیار گرم است تابش ماوراء بنفش بسیار قوی از خود نشان می‌دهد که با یونیزه کردن لایه‌های بیرونی، آنها را مانند یک سحابی تابشی می‌کند. در این مرحله به ستاره (اگر دیگر بتوانیم آن را ستاره بنامیم) یک سحابی سیاره‌نما شده است.
- سحابی‌های سیاره‌نما حداکثر تا ۲۰هزار سال عمر می‌کنند و بعد به فضای میان‌ستاره‌ای می‌پیوندند.

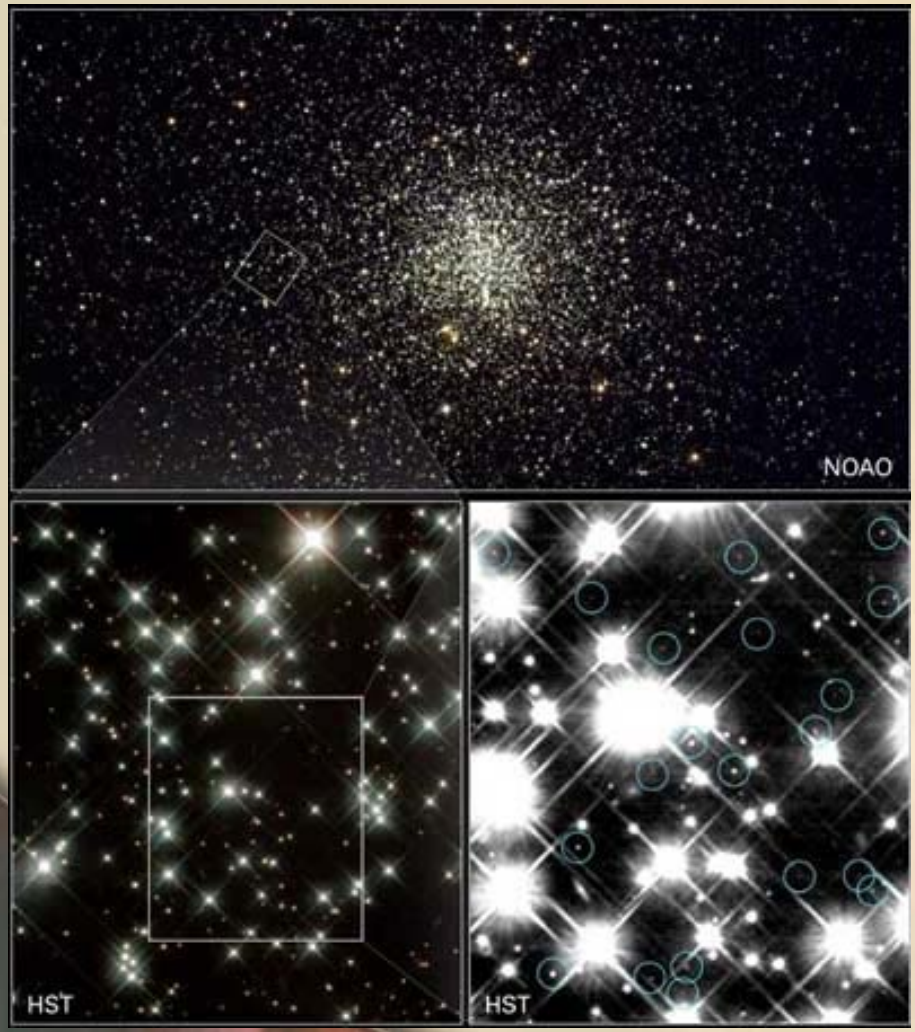
چند صحابی سیاره‌نما

NGC 6543, the Cat's Eye Nebula


NGC 7293, the Helix Nebula

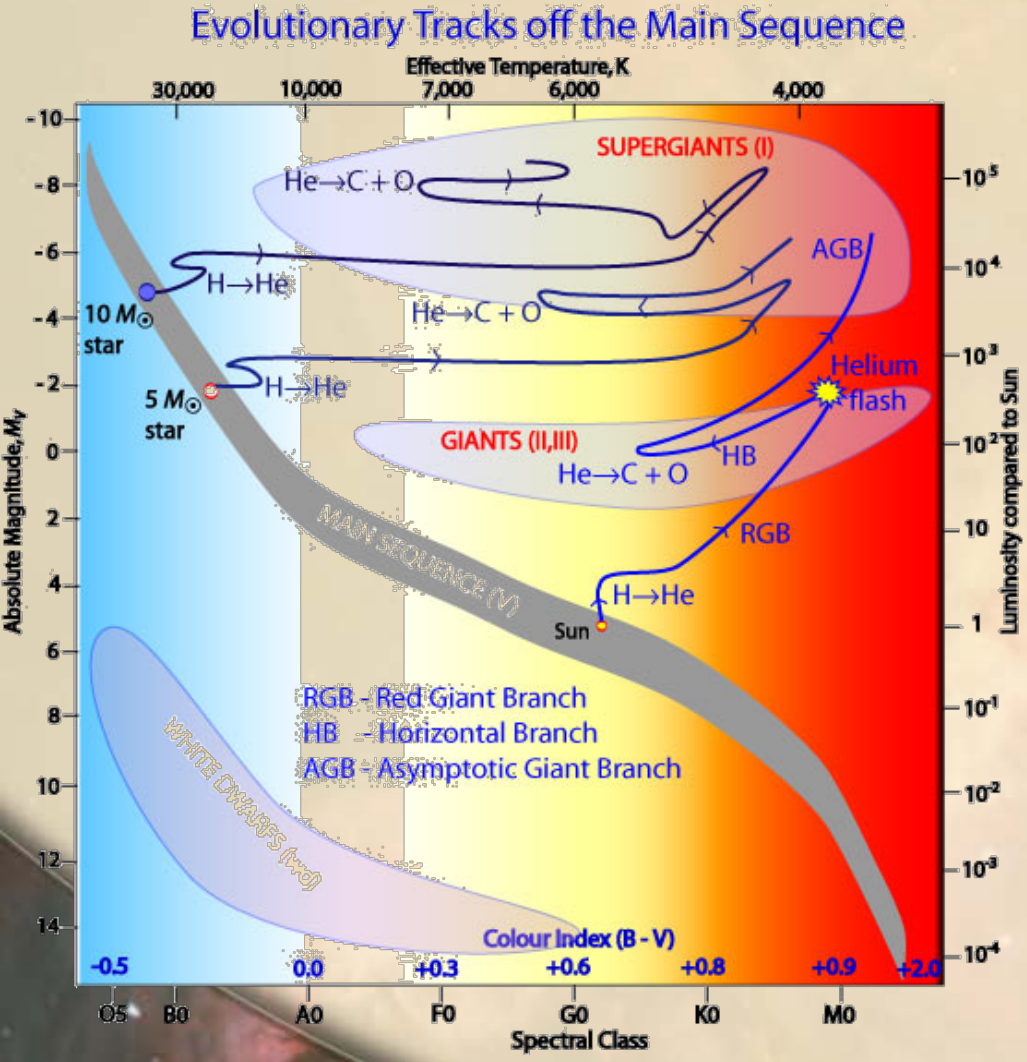
محمد اخلاقی
http://astr.tohoku.ac.jp/~akhlaghi/

کوتوله‌های سفید



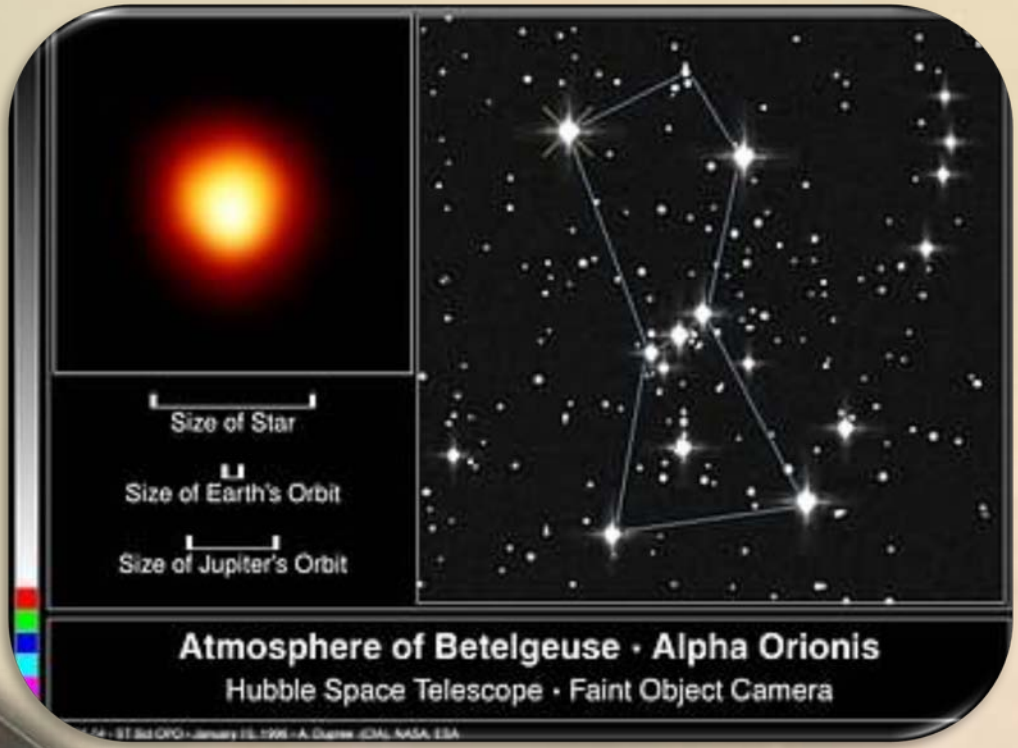
- هسته باقی‌مانده که یک کره از اکسیژن و کربن است، اول با دمای حدود ۳۰هزار درجه کلوین درخشندگی خیلی زیادی (تا هزار برابر خورشید) دارد اما خیلی سریع درخشندگیش به کمتر از خورشید می‌رسد.
- در نهایت باقی‌مانده هسته به یک کوتوله سفید با دمای حدود ده‌هزار کلوین تبدیل می‌شود.
- در شکل مقابل خوشه کروی M4 را می‌بینید که دو کوتوله‌های سفید آن (با سن ۱۲ میلیارد سال) دایره کشیده شده است.
- عمر کوتوله‌های سفید ده‌ها تا صدها میلیارد سال است.

سرنوشت ستارگان با جرم بیشتر از ۸ برابر جرم خورشید



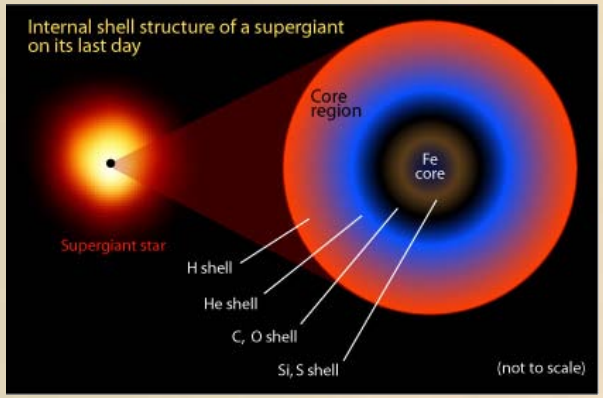
- به این دلیل که این نوع ستارگان عمر بسیار کوتاهی دارند، موردهای زیادی از آنها دیده نشده است که بتوان نظریه‌های دقیقی در مورد سرنوشت آنها داد.
- ابط‌الجوزا، ذنب‌الدجاجه، رجل‌الجبار و نثر طایر معروف‌ترین غول‌های سنگین آسمان هستند.
- در این ستارگان سوزاندن هلیوم به آرامی در هسته شروع می‌شود و مانند ستارگان سبک‌تر فرایند سه‌آلفا یکباره در یک فلش روی نمی‌دهد.

مراحل تکوین ستاره‌های پرجرم‌تر



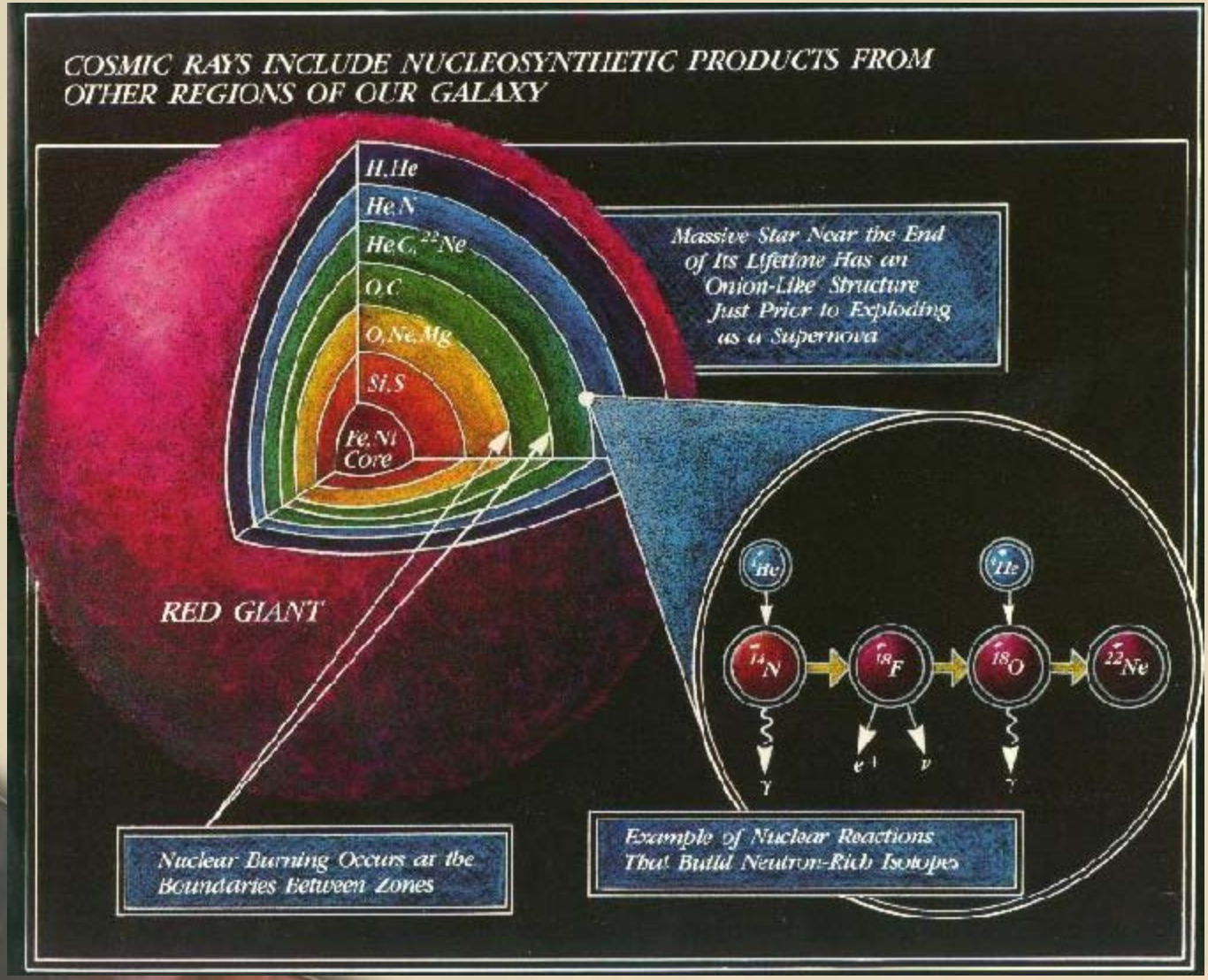
- دمای ستاره با انبساط آن به آهستگی و با حفظ نسبت انجام می‌شود طولی که درخشندگی آن ثابت می‌ماند (مسیر افقی) ولی دمای سطحی آن خیلی کاهش می‌یابد.
- در این مرحله ستاره خیلی بزرگ می‌شود به عنوان مثال ابطالجوزا با جرم ۱۷برابر جرم خورشید، اگر در جای خورشید قرار گیرد شعاع آن از مشتری بیشتر است.

مصرف سوخت هسته ستارگان سنگین



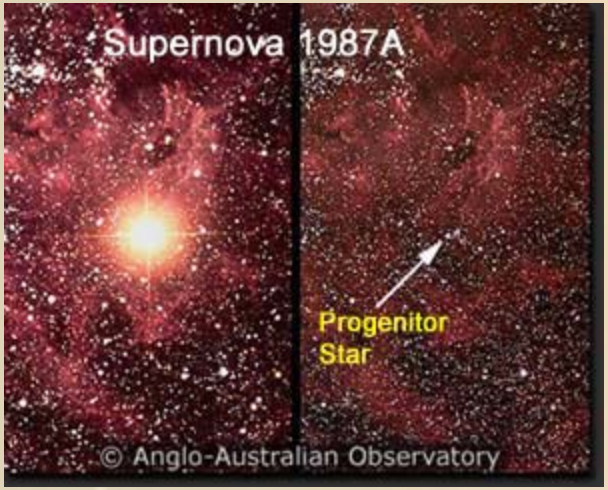
- در ستارگانی که جرمی بیشتر از ۸برابر جرم خورشید، هسته می‌تواند تا دمای ۵۰۰میلیون درجه کلوین برسد و در نتیجه عناصری مانند سدیوم، نئون و منیزیوم تولید کنند.
- با اتمام کربن و انقباض هسته، دما به حدود ۲ میلیارد درجه کلوین می‌رسد.
- در این مرحله سیلیکون و گوگرد تولید می‌شوند. و به زودی تقریبا تمام عناصر تا آن تا زمانی که دما به حدود ۷میلیارد درجه کلوین می‌رسد تولید می‌شوند.
- با زیاد شدن سیلیکون و دمای ۷میلیارد درجه کلوین، طی سوزاندن سیلیکون، آهن تولید می‌شود.
- واکنش‌های هسته‌ای از هلیوم به بالا، دیگر پربازده نیستند و هسته برای حفظ خود واکنش‌ها را خیلی سریع انجام می‌دهد؛ مدت رشته اصلی: چند صد میلیون سال، هیلیوم سوزی: چندصد هزار سال، کربن سوزی چند صد سال، نئون سوزی یک سال، اکسیژن سوزی نصف سال و سیلیکون‌سوزی در یک روز انجام می‌شود.

ستارگان سنگین تر



- در صورتی که ستاره خیلی سنگین باشد، عنصر سوزی را تا مرحلهٔ تولید آهن ادامه می دهد:

انفجار ابرنواختری نوع دوم

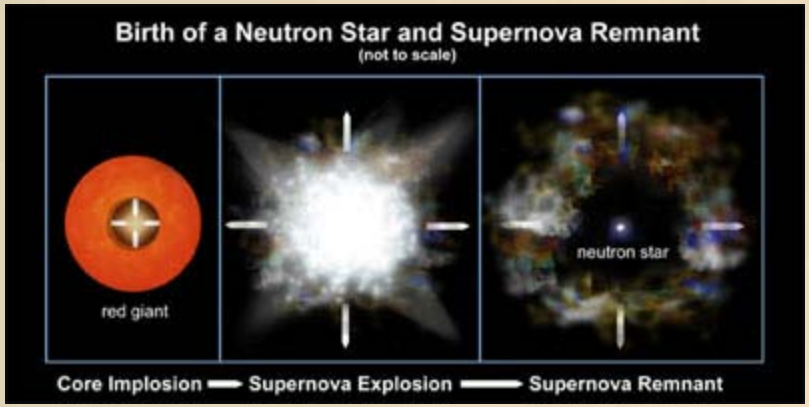


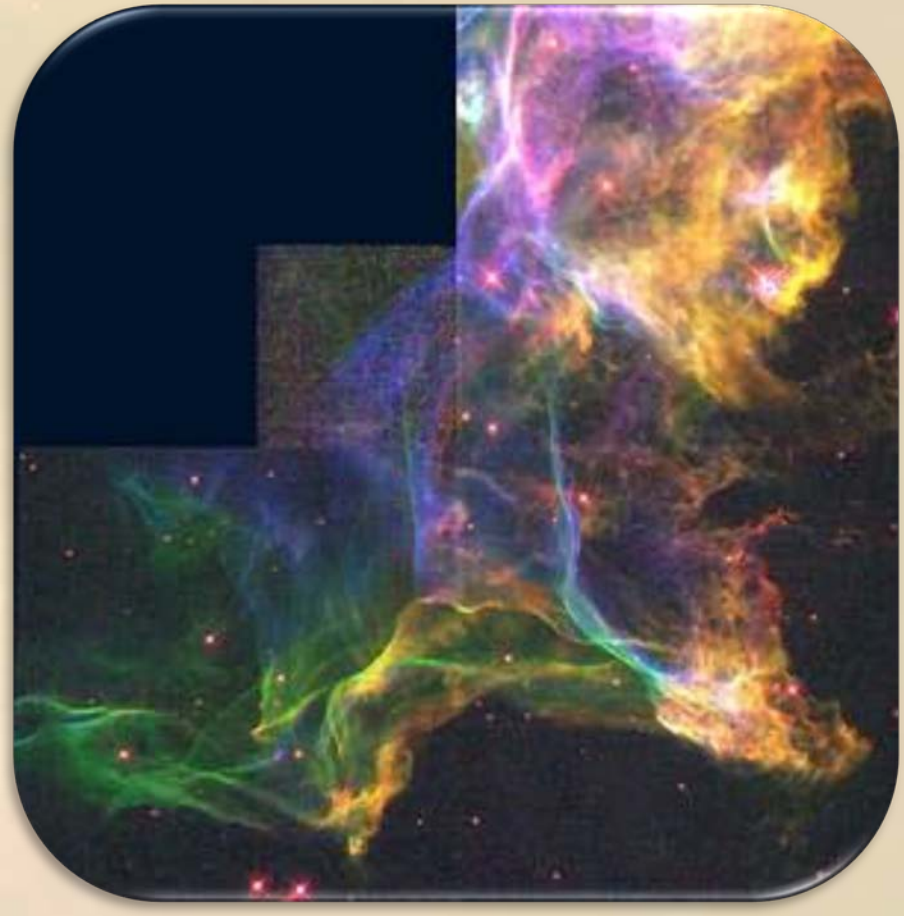
- با رسیدن دما به حدود ۱۰میلیارد درجه سانتیگراد، آهن که دیگر نمی‌تواند عنصر سنگین‌تر تولید کند، تجزیه می‌شود و این جریان به جای تولید انرژی، آن را مصرف می‌کند.
- با نبود الکترون، دیگر فشار تهبگنی آن وجود ندارد و هسته با سرعت چند صد کیلومتر در ثانیه فشرده می‌شود.
- از طریق واکش زیر، ستاره نوترونی تولید می‌شود:

$$P^+ + e^- = n + \nu_e + \gamma$$

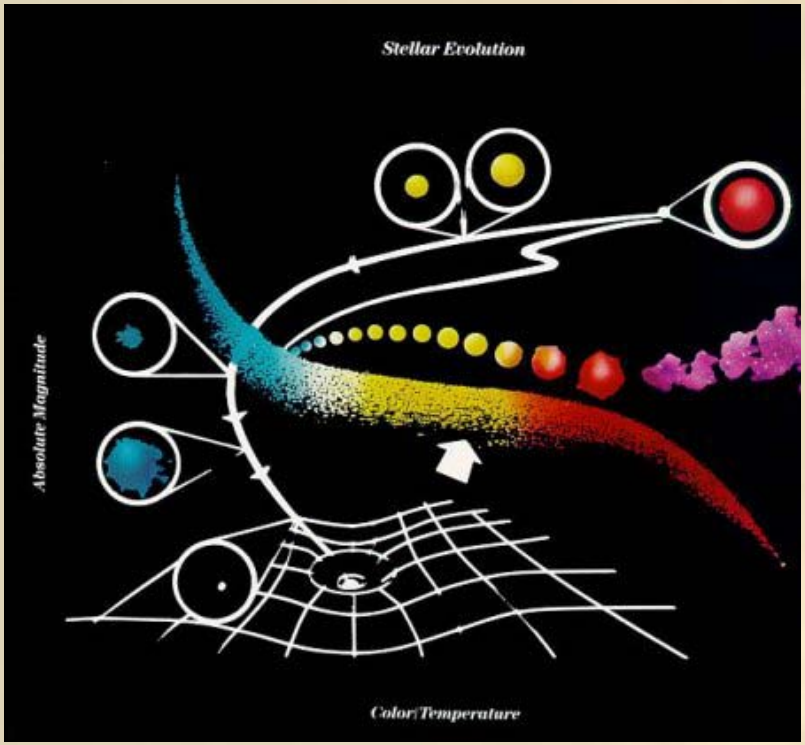
- در صورتی که جرم ستاره اولیه کمتر از ۲۵برابر جرم خورشید باشد، ستاره نوترونی ناگهان تشکیل می‌شود و موج فشار که با سرعت بسیار بالا در حال پایین آمدن است به آن خورده و به صورت یک موج شوک عظیم منعکس می‌شود و تمام گاز ستاره را ناگهان در فضا پخش می‌کند.
- البته بیشتر انرژی در یک انفجار ابرنواختری نوع دوم، از طریق نوترینوها خارج می‌شود، فقط یک درصد با نور منتقل می‌شود.

ابرنواختر نوع دوم





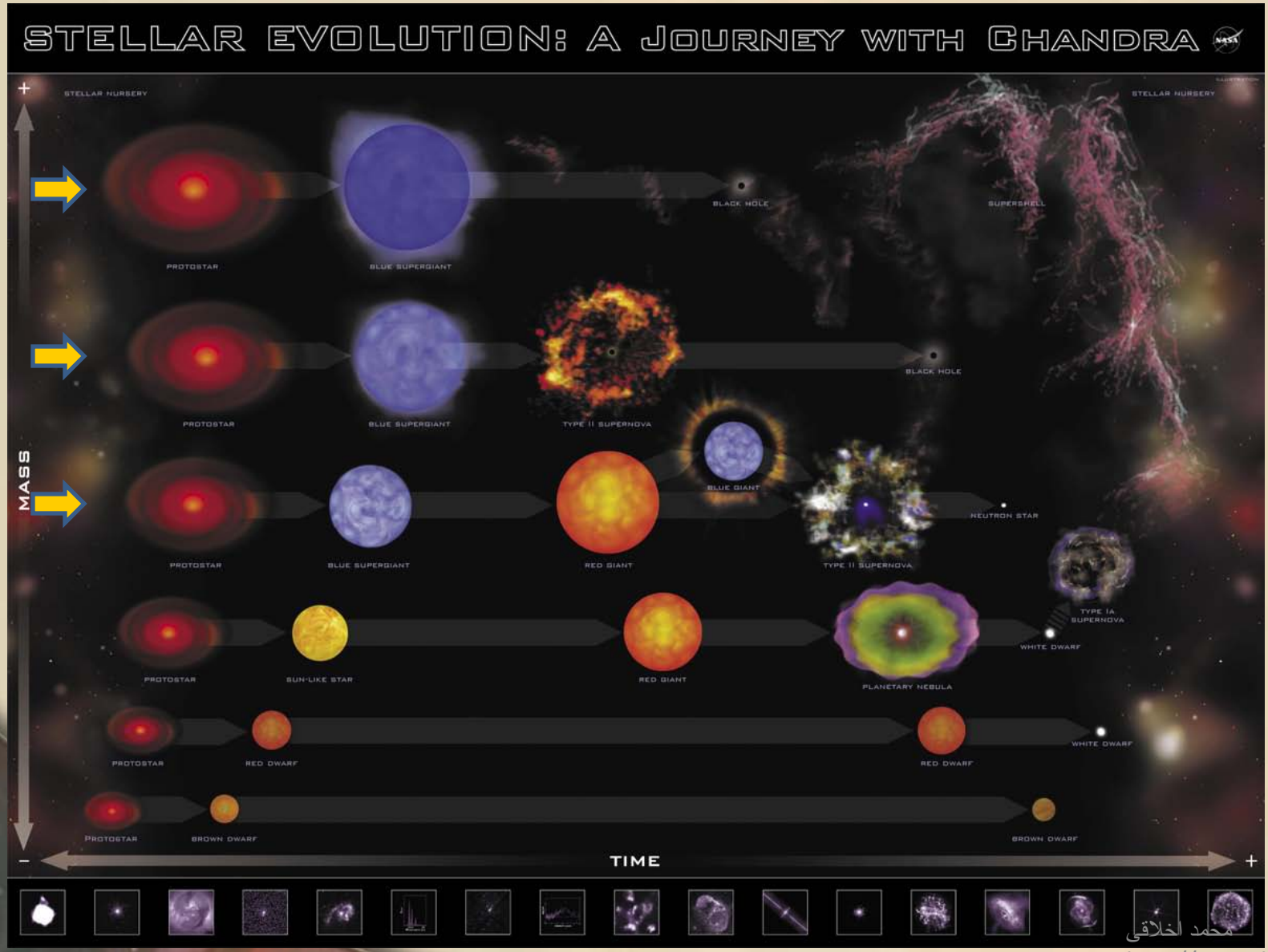
مرگ ستارگان سنگین تر



- ستارگان با جرم اولیهٔ بیشتر از ۸ جرم خورشید
  - جرم اولیه بیشتر از ۲۵ جرم خورشید
    - سیاه چاله
  - جرم اولیه کمتر از ۲۵ جرم خورشید
    - ستارهٔ نوترونی

در هر دو صورت انرژی نوترینو های آزاد شده حدود 10^{46} ژول خواهد بود، بیشتر از کل انرژی تولیدی توسط خورشید در دوران زندگی خود!

مرگ ستارگان



- مانند زندگی آنها، طرز مرگ ستارگان نیز به جرم آنها بستگی دارد:

سیاه چاله ها

- در صورتی که جرم ستارۀ اولیه خیلی بیشتر از ۲۵ برابر جرم خورشید باشد، آنگاه گرانش چنان قوی خواهد بود که اصلا مجالی برای انفجار باقی نمی گذارد و تمام مواد ستاره را جذب خود می کند، از حد خاصی که کوچک تر شد، دیگر حتی نور هم توانایی فرار از آن را ندارد: