

## در جستجوی ستارگان کم فلز نوربرت کریس لیب - هانس گونتر برگردان: امید برومند

### تکامل شیمیایی جهان چگونه رخ داد؟

هیدروژن، هلیوم و کمی لیتیم مواد تشکیل دهنده جهان جوان بودند. ستاره‌شناسان با تحقیق بر روی اولین نسل از ستارگان خواهان درک چگونگی پیدایش تنوع عناصر شیمیایی در این ستارگان هستند. برای این کار الگوبرداری از آسمان و مدل‌هایی از جو ستارگان ضروری هستند.



نوربرت کریست لیب از سال 2008 پروفیسور در مرکز ستاره‌شناسی دانشگاه هایدلبرگ (ZAH) است. تحقیقات او متمرکز بر روی ستارگان کم فلز و همچنین تکامل شیمیایی کهکشانشان است.

هانس گونتر لودویک از سال 2009 تاکنون کارمند علمی مرکز ستاره‌شناسی دانشگاه هایدلبرگ (ZAH) است و عمدتاً بر روی هیدرودینامیک تابش ستاره‌گان کار می‌کند.



#### خلاصه

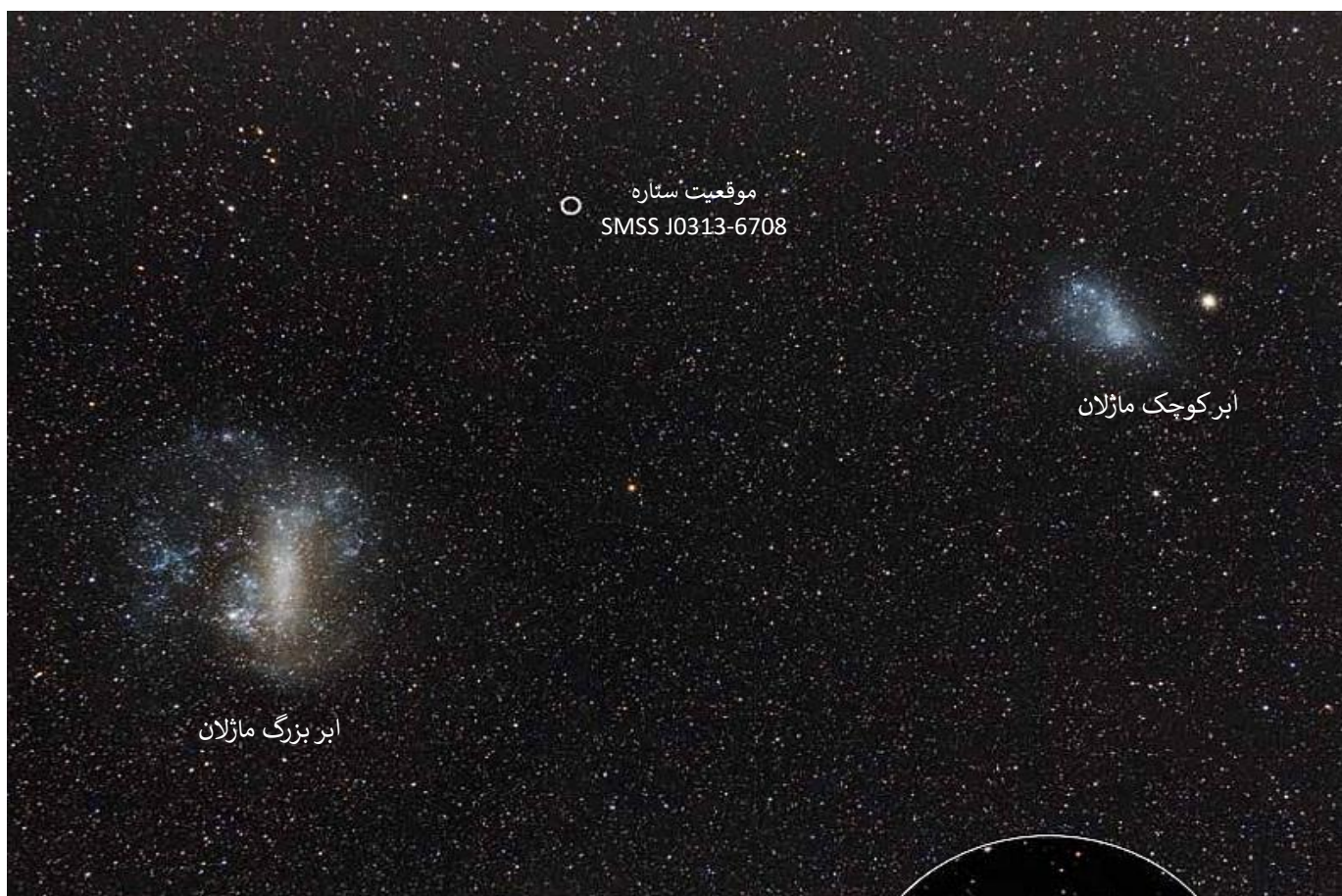
- ستاره‌شناسان برپایه تجزیه و تحلیل طیف نور ستارگان، سعی در درک غنی شدن جهان توسط عناصر سنگین را دارند، چرا که این طیف‌های نور، نشان‌دهنده ترکیبات شیمیایی ستارگان هستند. ستاره‌گان قدیمی و کم فلز در این زمینه نقش کلیدی بازی می‌کنند.
- از آنجا که این ستارگان بسیار نادرند، برای ردیابی آنها به الگوبرداری گسترده-ای از آسمان با LAMOST در چین و یا با تلسکوپ SkyMapper در استرالیا نیاز است.
- دانشمندان برای درک فراوانی عناصر، نیازمند مدل‌های پیچیده‌ای از جو ستارگان هستند: شبیه‌سازی‌های سه بعدی باید نه تنها فرآیندهای تابشی بلکه جریان‌های همرفتی (Convection) (1) را نیز در نظر بگیرند.

در زندگی روزمره، ما با انواع مختلفی از عناصر شیمیایی سر و کار داریم: ما دندان‌هایمان را با خمیر دندانی تمیز می‌کنیم که حاوی فلورین است. آینه‌ی حمام ما روکشی از آلومینیوم دارد. جواهرات ساخته شده از طلا، نقره و پلاتین با خود حمل می‌کنیم. دستگاه‌های الکترونیکی که مورد استفاده قرار می‌دهیم، عناصری با نام‌های عجیبی مانند نئودیمیم، ساماریوم و یا دیسپروزیوم در خود دارند. سلول‌های بدن ما از انواع مختلف ترکیبات کربن ساخته شده‌اند و اکسیژنی که با هر دم به ریه‌هایمان وارد می‌شود با یک پروتئین پیچیده حاوی آهن در اندام‌های حیاتی بدن توزیع می‌شود.

از نقطه نظر شیمیایی، جهان همیشه چنین متنوع نبوده است. چرا که طی اولین دقایق بعد از مه‌بانگ، هنگامی که اولین اتم‌ها با انباشت و تراکم کوچک‌ترین ذرات بنیادین به وجود آمدند، تنها سه عنصر از نوع سبک‌ترین عنصرها (از جدول تناوبی عناصر) ایجاد شدند: هیدروژن، هلیوم و مقدار کمی لیتیم. همه‌ی عنصرهای سنگین‌تر با هسته‌های اتم بزرگ‌تر و به خصوص کربن، عنصری که برای کل زندگی بر روی زمین بسیار مهم است، بعداً اضافه شدند.

حداکثر جهان امروز هنوز هم 98 درصد از هیدروژن و هلیوم تشکیل یافته است. تمام عنصرهای سنگین‌تر دیگر، توسط ستاره‌شناسان تحت اصطلاح کلی «فلزات» جمع‌بندی می‌شوند (نگاه شود به واژه نامه در صفحه 4). اکنون این سوال مطرح می‌شود که این فلزات - با این که تنها بخش کوچکی از جهان را دربر می‌گیرند و برای موجودیت ما اهمیت حیاتی دارند - چه زمانی، کجا و چگونه به وجود آمدند.

پاسخ شاعرانه‌ی تلویحی به پرسش مطرح شده در بالا این است که ما واقعاً از خاکستر ستاره‌گان پدید آمده‌ایم. در فضای بسیار پر حرارت درونی ستارگان شرایطی



در هنگام الگو برداری از آسمان با تلسکوپ SkyMapper در استرالیا، ستاره کم رنگ و کم اهمیتی با تنها 14.8 قدر ظاهری (mag) (2) جلب توجه کرد که تقریباً خالی از عنصرهای سنگین بود. این ستاره که عنوان SMSS J0313-6708 دارد جزو قدیمی ترین ستارگان کهکشان راه شیری است.



موجودند که تحت آنها هسته سبک اتمها به تدریج به هسته های بزرگ تر با ذرات هسته ای تشکیل دهنده بیشتر- **نوکلئونها (3)**، تبدیل می شوند. دانشمندان در دهه 1950 میلادی، رفته رفته این **هسته زایی (4) (Nukleosynthese)** ستاره ای را کشف کردند. بر این پایه، در مراحل دیرین تکامل ستارگان، بعد از اتمام هیدروژن بعنوان منبع سوخت موجود در هسته ای آنها، عنصرهای سنگین تر تا آهن، به وجود می آیند. قاعده کلی در این زمینه این است که هر چه ستاره ای کلان جرم تر باشد، از طریق روندهای **همجوشی هسته ای (Kernfusion)** به علت فشار بیشتر و درجه ای حرارت بالاتر، عنصرهای سنگین تری در درون آن تولید می شوند.

### ساختار عنصرها در ستارگان

اولین و به لحاظ تاریخی مهم ترین گواه **هسته زایی** ستاره ای توسط ستاره شناس آمریکایی **پل و مریل (1887-1961)** در سال 1952 ارائه شد. مریل در رصدخانه کوه ویلسون در کالیفرنیا در زمینه **سنجش طیف (5)** ستارگان در مرحله ای پیشرفته ای تکامل شان، به مدت چندین دهه تجربه کسب کرده بود. او در طیف نور چنین ستارگانی به **خطوط جذبی (6) (Absorptionslinie)** ای برخورد کرد که حکایت از وجود عنصر **تکنسیوم (7)** در لایه های بیرونی ستارگان داشت. اما، **تکنسیوم** رادیو اکتیو بوده و هیچ یک از ایزوتوپ های

آن پایدار نیستند. ایزوتوپ دارای طولانی‌ترین عمر، یعنی **تکنسیوم 98** با 43 پروتون و 55 نوترون در هسته‌اش، نیمه عمری (Half-life) به اندازه 4.2 میلیون سال دارد. طبق مشاهدات **مریل**، این زمان در مقایسه با سن ستارگان با جرم متوسط کوتاه است، چرا که آنها سنی بین صدها میلیون تا چند میلیارد سال دارند. بنابراین **تکنسیوم** مشاهده شده در ستارگان نمی‌توانسته در ابرگازی که ستارگان از آن تشکیل شده‌اند حضور داشته باشد؛ چرا که هسته‌های **تکنسیوم** مدت‌ها قبل از زمان مشاهده، می‌بایستی از هم پاشیده شده باشند. تنها نتیجه‌گیری ممکن این است که ستارگان باید **تکنسیوم** را در درون خود تولید کرده و از طریق روندهای **همرفتی (1)** آن را به سطح‌شان منتقل کرده باشند.

امروزه مطلع‌ایم که **تکنسیوم** و همچنین حدود نیمی از عنصرهایی که سنگین‌تر از آهن‌اند در ستارگان **غول پیکر قرمز** از طریق جذب نوترون‌ها به وجود می‌آیند. این غول‌های قرمز که همچنین به نام ستارگان **ا. جی. بی (AGB)** نامیده می‌شوند، تا هشت برابر خورشید جرم دارند ( **AGB** "مخفف asymptotic giant branch، شاخه‌ی عظیم مجانب در نمودار هرتزسپرونگ - راسل (8) است، که در آن توابع حالت (state function) (9) این ستارگان تکامل یافته نشان داده و بررسی می‌شوند، لطفاً به واژه‌نامه رجوع شود). در غول‌های سرخ، هسته یک اتم توانایی جذب یک نوترون در دماهای نسبتاً پایین و ایجاد ایزوتوپ جدیدی را دارد. اگر این ایزوتوپ جدید ناپایدار باشد از طریق **واپاشی بتا (10)**، یک نوترون به یک پروتون تبدیل می‌شود که به معنای ایجاد یک عنصر شیمیایی با عدد اتمی بالاتر بعدی (از جدول تناوبی) است. از آنجا که تحت شرایط موجود، مقیاس زمانی برای غنی‌سازی با نوترونی دیگر، طولانی‌تر از مقیاس زمانی برای **واپاشی بتا** است، قبل از جذب نوترون جدید، هسته‌ی اتم زمان کافی برای تجزیه شدن به یک حالت باثبات را دارد. به این علت، این فرآیند جذب نوترون، **فرآیند-S** نامیده می‌شود. "S" به انگلیسی به معنای "slow"، یعنی آهسته است.

فرآیند دوم **هسته‌زایی** که برای عنصرهای سنگین‌تر از آهن نقش مهمی ایفا می‌کند، **فرآیند-r** است. "r" به انگلیسی به معنای "rapid"، یعنی سریع است، به این معنی که مقیاس زمانی برای غنی‌سازی با نوترون‌ها، کوتاه‌تر از مقیاس زمانی برای **واپاشی بتای** محصولات بینابینی است. در **فرآیند-r** عنصرهایی مانند طلا و نقره و همچنین بخش بزرگی از **عناصر خاکی کمیاب (11)** تولید می‌شوند.

آشکار است که **فرآیند-r** نسبت به **فرآیند-S** به تراکم بالای نوترونی و حرارت‌های بالاتر نیازمند است، اما مکان رویداد آن، هنوز نامشخص است. **فروپاشی‌های هسته‌ای - ابرنواختر**، دو شرط لازم برای **فرآیند-r** را برآورده می‌کنند و از این رو نامزدهای خوبی‌اند. اما ستارگان نوترونی در یکدیگر ادغام شونده هم می‌توانند حداقل سهمی در غنی‌سازی جهان با این عنصرها (طلا، نقره و **عناصرهای خاکی کمیاب**) را داشته باشند.

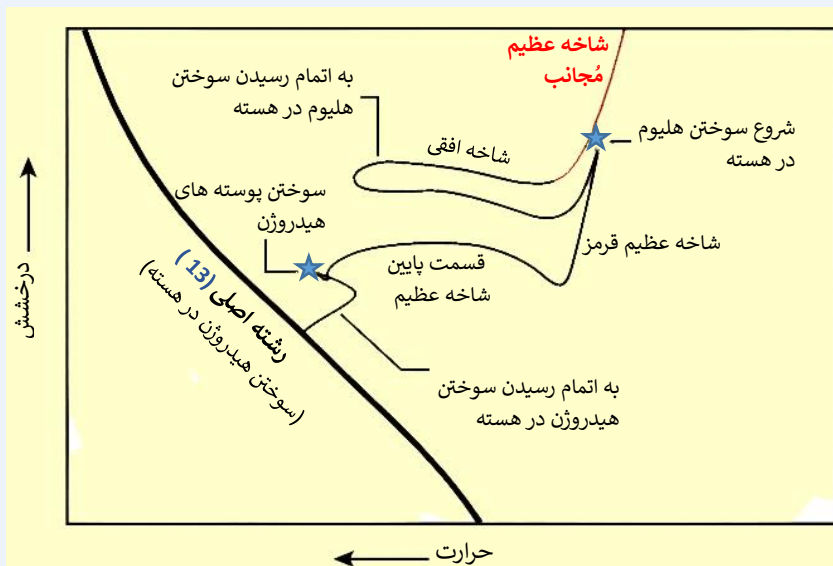
بازسازی دقیق زمانی روند غنی‌سازی جهان با تمام این فلزات یک چالش علمی است. دوره زمانی مورد نظر بیش از 13 میلیارد سال است. در این زمان طولانی، نسل‌های پی در پی از ستارگانی با جرم‌های متفاوت، عنصرهای مختلفی تولید کرده و در پایان تکامل‌شان آن‌ها را به **محیط میان ستاره‌ای (12)** منتقل و پخش کردند. این امر تا حدودی هم از طریق انفجارات ابرنواختر انجام پذیرفت که مواد لازم برای ستارگان جدید را فراهم کردند. به این ترتیب، تعداد عنصرهای شیمیایی در جهان، از 3 عدد در ابتدا به 92 عنصر که در حال حاضر به صورت طبیعی یافت می‌شوند، افزایش یافت.

## ستارگان کم آهن

ستارگانی که جرم‌شان کم‌تر از یک جرم خورشیدی است، نقش کلیدی در بازسازی تکامل شیمیایی جهان ایفا کرده‌اند. جرم یک ستاره، معین‌کننده‌ی طول عمر آن است و این طول عمر حدوداً با توان 3 آن جرم کاهش می‌یابد. بنابراین هنگامی که یک ستاره‌ی کلان جرم ذخیره‌ی سوخت هیدروژن خود را به علت فشارها و دماهای بالاتر در طی چند میلیون سال به مصرف می‌رساند، ستاره‌ی دیگری با داشتن جرمی به اندازه‌ی 0.9 جرم خورشید، طول عمری نزدیک به 14 میلیارد سال در **رشته‌ی اصلی (13)** دارد. **رشته‌ی اصلی** به عنوان بخشی از نمودار هرتزسپرونگ - راسل نامیده می‌شود که مراحل مختلف تکامل ستارگان را به نمایش می‌گذارد (بنگرید به واژه‌نامه). بر روی **رشته‌ی اصلی** در درون ستارگان، **همجوشی هسته‌ای** رخ می‌دهد که از طریق آن هیدروژن به هلیوم تبدیل می‌شود.

واژه‌نامه

**ستارگان AGB:** ستارگان غول پیکر قرمزی‌اند که در مرحله‌ی پایانی تکامل‌شان قرار دارند. درخشش و دمای سطح آن‌ها در نمودار هرتزسپرونگ - راسل، به صورت **مُجانبی (asymptotic)** به شاخه‌ی عظیم نزدیک می‌شود. (به انگلیسی: asymptotic giant branch = AGB)



سیر تکامل: ستارگان AGB به علت درخشش زیاد و دمای پایین، در نمودار هرتزسپرونگ - راسل بر روی شاخه‌ی عظیم مُجانب (قرمز رنگ) قرار می‌گیرند.

**واپاشی بتا (Betazerfall) (10):** تبدیل یک نوترون به یک پروتون، الکترون و یک

الکترون - آنتی نوترینو. هسته‌ی اتم ناپایدار شده از طریق جذب نوترون، با **واپاشی بتا** به هسته‌ی اتم عنصر بالاتر بعدی تبدیل می‌شود. در این روند پروتون ایجاد شده در هسته باقی می‌ماند، در حالی که الکترون و الکترون-آنتی‌نوترینوی همزمان ایجاد شده، از هسته دفع می‌شوند.

**ایزوتوپ:** هسته‌های اتم یک عنصر شیمیایی همیشه دارای تعداد یکسانی پروتون هستند، اما تعداد نوترون‌هایشان می‌توانند متفاوت باشند. این ایزوتوپ‌های مختلف یک عنصر به صورت شیمیایی رفتار یکسانی دارند، اما با دارا بودن تعداد مختلف نوترون‌ها، جرم‌های متفاوتی دارند.

**فلزات:** به معنای نجومی یعنی تمام عنصرهای شیمیایی‌ای که سنگین‌تر از هلیوم‌اند. این عنصرها با داشتن بیش از دو پروتون در هسته، در مهبانگ بوجود نیامده‌اند، بلکه در فرآیندهای **همجوشی هسته‌ای** در ستارگان ایجاد شده‌اند. (این توضیح با تعریف رایج که بر طبق آن فلزات، عناصر شیمیایی هستند که به علت پیوند ویژه‌ی اتم‌های آن‌ها، حرارت و برق را به خوبی هدایت می‌کند، تفاوت دارد.)

**هسته‌زایی (Nucleosynthesis):** به معنای شکل‌گیری و پیدایش عنصرهای شیمیایی و یا دقیق‌تر، ایجاد هسته‌های اتمی است. مدت کوتاهی پس از مهبانگ، در **هسته‌زایی اولیه** تنها هسته‌ی عنصرهای سبک، **هیدروژن** (با یک پروتون)، **هلیوم** (با دو پروتون) و **لیتیوم** (با سه پروتون) از ذرات بنیادین یعنی کوارک‌ها به‌وجود آمدند. در **هسته‌زایی ستاره‌ای** از طریق **همجوشی هسته‌ای**، از پروتون‌ها و نوترون‌ها، عنصرهای سنگین‌تر (تا آهن) در داخل ستارگان ایجاد می‌شوند. عنصرهای سنگین‌تر از آهن از طرفی در درون ستارگان AGB در **فرآیند S** و از طرف دیگر در انفجارهای **ابرنواختر** در **فرآیند r** ساخته می‌شوند. هسته‌های اتم‌های سنگین و ناپایدار، از طریق تجزیه‌ی رادیوآکتیوی به هسته‌های سبک‌تر فرومی‌پاشند.

**فرآیند r:** این یک فرآیند جذب نوترون است که در شرایط چگالی نوترونی بالا و درجه‌ی حرارت بالا، همانند آنچه که معمولاً در ابرنواختر اتفاق می‌افتد (r به انگلیسی به معنای "rapid" است)، جریان می‌یابد. در این فرآیند در طی مدت زمان بسیار کوتاه از طریق انباشت نوترون‌ها، از هسته‌ی اتم‌ها محصولات بینابینی ناپایدار و سنگینی به‌وجود آمده که از طریق تجزیه‌ی رادیوآکتیوی به هسته‌ی اتم‌های باثبات و غنی از نوترون، تجزیه می‌شوند.

**فرآیند s:** یک فرآیند جذب نوترون است که بر خلاف فرآیند r تحت شرایط چگالی پایین‌تر نوترون‌ها و دمای پایین‌تر رخ می‌دهد، همانند آنچه که در ستارگان AGB اتفاق می‌افتد (s به انگلیسی به معنای "slow" است). با اضافه شدن یک نوترون به هسته اتم عنصری، از عنصر شیمیایی مورد نظر ایزوتوپ سنگین‌تر ایجاد می‌شود. اگر این ایزوتوپ ناپایدار باشد، از طریق **واپاشی بتا** به هسته‌ی اتم عنصر بالاتر بعدی تبدیل می‌شود.

## فراوانی عنصرها در طیف سنجی

فراوانی به شکل طیف سنجی اندازه‌گیری شده عنصرها یعنی  $\epsilon$  معمولن در رابطه با فراوانی هیدروژن به عنوان عنصر مرجع بیان می‌شود، که از آن لگاریتمی به پایه 10 تشکیل می‌شود ( $\log_{10} = \lg$ ). مثلن فراوانی آهن (با نماد شیمیایی Fe) در

$$\lg \epsilon(\text{Fe}) = \lg \left\{ \frac{N(\text{Fe})}{N(\text{H})} \right\} + 12$$

چنین نشان داده می‌شود:

در این فرمول،  $N(\text{Fe})$  چگالی تعداد (14) اتم‌های آهن در جو ستاره و  $N(\text{H})$  چگالی تعداد اتم‌های هیدروژن است. با اضافه شدن عدد 12 که بصورت دلبخواه تعیین می‌شود برای هیدروژن  $\epsilon(\text{H}) = 10^{12}$  یعنی  $\lg \epsilon(\text{H}) = 12$  به دست می‌آید.

اغلب فراوانی یک عنصر را نسبت به فراوانی همان عنصر موجود در خورشید مقایسه می‌کنند. برای این کار نحوه‌ی نوشتاری زیر برای یک عنصر دلبخواه شیمیایی X استفاده می‌شود:

$$[X/H] = \lg \left\{ \frac{N(X)}{N(H)} \right\} - \lg \left\{ \frac{N(X)}{N(H)} \right\}_{\text{خورشید}} = \lg \epsilon(X) - \lg \epsilon(X)_{\text{ستاره}}$$

فراوانی آهن در خورشید برابر با  $\lg \epsilon(\text{Fe}) = 7.45$  بوده، در حالی که مقدار آن در ستاره HE 0107-5240  $\lg \epsilon(\text{Fe}) = 2.25$  می‌باشد. بنابراین بر طبق نحوه‌ی نوشتار بالا، فراوانی آهن برای این ستاره‌ی غول پیکر خنک معادل  $[Fe/H] = -5.2$  است.

در عین حال این اعداد حساسیت روش طیف سنجی ستارگان را نشان می‌دهد. در واقع اگر مقدار  $\lg \epsilon(\text{Fe}) = 2.25$  اندازه‌گیری شده باشد، با تغییر معادله‌ی تعریف شده در بالا، مقدار  $\lg \left\{ \frac{N(H)}{N(Fe)} \right\} = 12 - 2.25 \approx 10$  به دست می‌آید. این به معنای آن است که یک اتم یگانه آهن در میان 10 میلیارد اتم هیدروژن شناسایی شده است!

اما در لایه‌های بیرونی ستارگان هرگز فرآیند همجوشی هسته‌ای اتفاق نمی‌افتد. بنابراین ترکیب شیمیایی لایه‌های بیرونی ستارگان، اساسن منعکس کننده‌ی ترکیب شیمیایی ابرگازی است که ستاره از آن به وجود آمده است. ستاره‌شناسان با تجزیه و تحلیل طیف نور ستارگان کهن، توزیع عنصرها در پوسته‌ی آن‌ها را معین کرده و بدین طریق تکامل شیمیایی کهکشان راه شیری و جهان را بازسازی می‌کنند.

اولین ستارگان جهان احتمالن چند صد میلیون سال پس از مه‌بانگ به وجود آمده‌اند. این ستارگان نسل اول، ستارگان گونه III نامیده می‌شوند (Population-III-Sterne)، در حالی که خورشید ستاره‌ای از گونه I است - نحوه‌ی شمارش در این‌جا در جهت عکس ترتیب زمانی وقایع انجام می‌شود. اگر در بین ستارگان گونه III نمایندگانی با 0.9 جرم خورشید و یا کم‌تر از آن وجود داشته باشند، در آن‌صورت این ستارگان امروزه هنوز در مرحله سوزاندن هیدروژن بوده و در نمودار هرتزسپرونگ-راسل، بر روی رشته‌ی اصلی خواهند بود. بدین ترتیب آن‌ها امکان مشاهده‌ی مستقیم ترکیب شیمیایی جهان در زمان کوتاهی بعد از مه‌بانگ را می‌دهند. اتمسفر چنین ستاره‌ای که 13.5 میلیارد سال عمر دارد باید فقط از هیدروژن، هلیوم و مقدار کمی لیتیم تشکیل شده باشد.

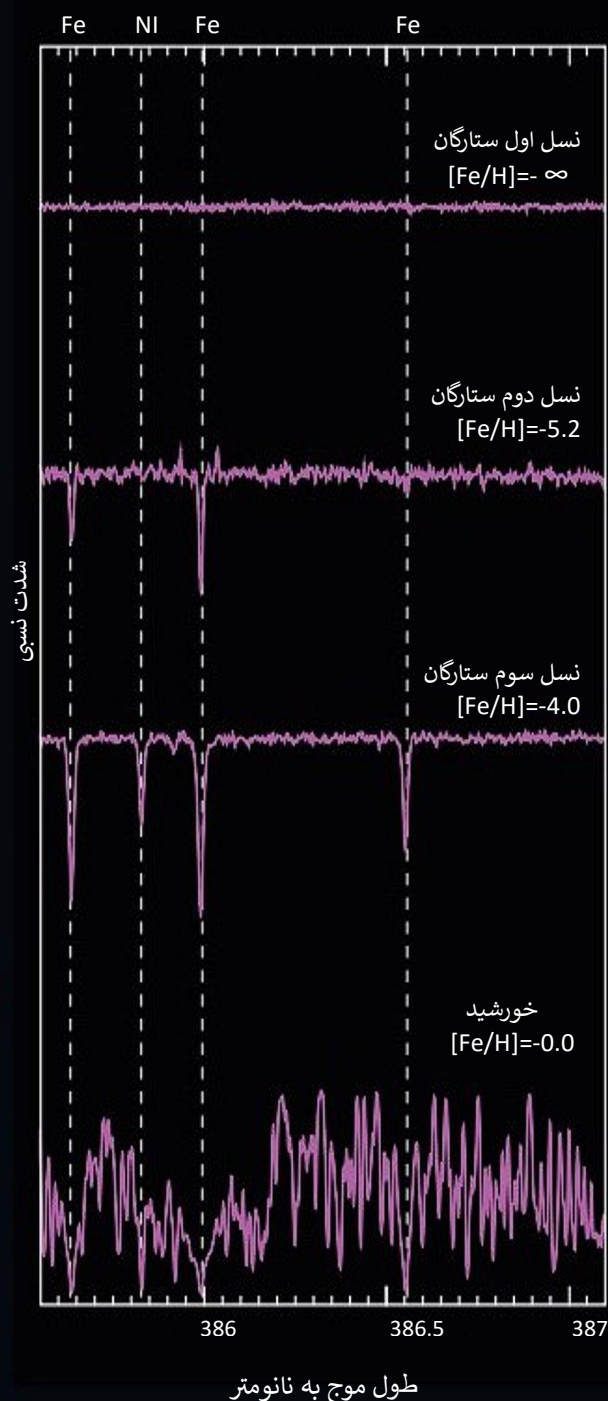
در حال حاضر این مسئله که آیا نسل اول ستارگان واقعن چنین اجسام کم جرمی را دارا بوده‌اند یا نه، با جدیت در دست تحقیق است. از یک سو شبیه‌سازی‌های پیچیده و با آنالیز عددی پیدایش ستارگان روشن می‌کنند که آیا چنین ستارگانی در دوران اولیه‌ی جهان می‌توانند به وجود آمده باشند و این که چگونه و از سوی دیگر ستاره‌شناسان با الگوبرداری گسترده از آسمان چنین ستارگانی را در کهکشان ما ردیابی می‌کنند.

با این حال روشن است که در جوانی جهان، ستارگان کلان‌جرم بیشتری نسبت به جهان امروز می‌توانستند ایجاد شده باشند. پس از مه‌بانگ، آغاز غنی‌سازی با فلزات تنها چند صد میلیون سال طول کشید، زیرا که این ستارگان کلان‌جرم در پایان تکامل کوتاه مدت‌شان به مثابه‌ی ابر نواختر منفجر شده و در فضای بین ستاره‌ای به‌ویژه آهن پخش کردند. مقدار دقیق آهن

## تکامل شیمیایی جهان

از زمان پیدایش جهان، چندین نسل از ستارگان به وجود آمده و رفته رفته به فرگشت شیمیایی ماده کمک کرده‌اند. سهم ستارگان کلان چرم که بعد از چند ده یا چند صد میلیون سال به مثابه‌ی ابرنواختر منفجر شده‌اند، در این جا به صورت نموداری نشان داده شده است (نمودار سمت راست). هر مرحله الگوی مشابه‌ای را دنبال می‌کند: در ابر عظیمی از گاز، که برخی قسمت‌های آن به صورت زیرمجموعه‌های فشرده‌ای فرو می‌ریزند، ستارگان پدید می‌آیند. این ستارگان از طریق همجوشی هسته‌ای درون‌شان، عنصرهایی را پدید می‌آورند که سنگین‌تر از ماده‌ی اولیه‌اند. هنگامی که ستارگان کلان چرم در پایان تکامل‌شان به ابر نواختر منفجر می‌شوند، عنصرهای پدید آمده از طریق هسته‌زایی (4) را در محیط میان‌ستاره‌ای پخش می‌کنند. این محیط میان‌ستاره‌ای به تدریج با عنصرهای سنگین‌تر از لیتیوم غنی شد. با هر نسل بعدی از ستارگان، سهم عنصرهای سنگین موجود برای فرآیند همجوشی هسته‌ای افزایش یافت. خورشید ما از ابری از گاز، دارای بخش قابل توجهی از عنصرهای سنگین، پدید آمد.

ترکیب شیمیایی تغییر یافته هر نسلی از ستارگان در طیف نور آن‌ها انعکاس می‌یابد (نمودار سمت راست). در این جا به طور نمونه، طیف‌های ستارگان خنک (با دمای مؤثر (19) حدود 5000 کلوین) نشان داده شده‌اند. ستاره‌ای از نسل اول، تنها شامل هیدروژن، هلیوم و رگه‌هایی از لیتیوم است. خطوط جذب هلیوم در ستارگان سرد مشاهده نمی‌شوند، و در محدوده‌ی طول موج نمایش داده شده، خطوط جذب هیدروژن و لیتیوم یافت نمی‌شوند (طیف شبیه‌سازی شده در بالا). ستارگان نسل دوم خطوط ضعیف جذب آهن (Fe) از خود نشان می‌دهند. در نسل بعدی خط ضعیفی از نیکل (Ni) قابل تشخیص است. در طیف نور خورشید خطوط برجسته‌ی زیادی از عنصرهای مختلف نقش بسته‌اند، که جدول زیر سهم مشتق شده چرم این عنصرها را نشان می‌دهد.



ترکیب شیمیایی بخش مرئی (15) خورشید\*

عنصر	سهم در درصد جرمی	عنصر	سهم در درصد جرمی
هیدروژن (H)	73.81	نیتروژن (N)	0.07
هلیوم (He)	24.66	سیلیکون (Si)	0.07
اکسیژن (O)	0.67	منیزیم (Mg)	0.06
کربن (C)	0.28	گوگرد (S)	0.03
آهن (Fe)	0.13	آرگون (Ar)	0.01
نتون (Ne)	0.17	بقیه عناصر	0.17

\* محاسبه شده از داده‌های Caffau et al., فیزیک خورشیدی 268، ص 255 (2011)

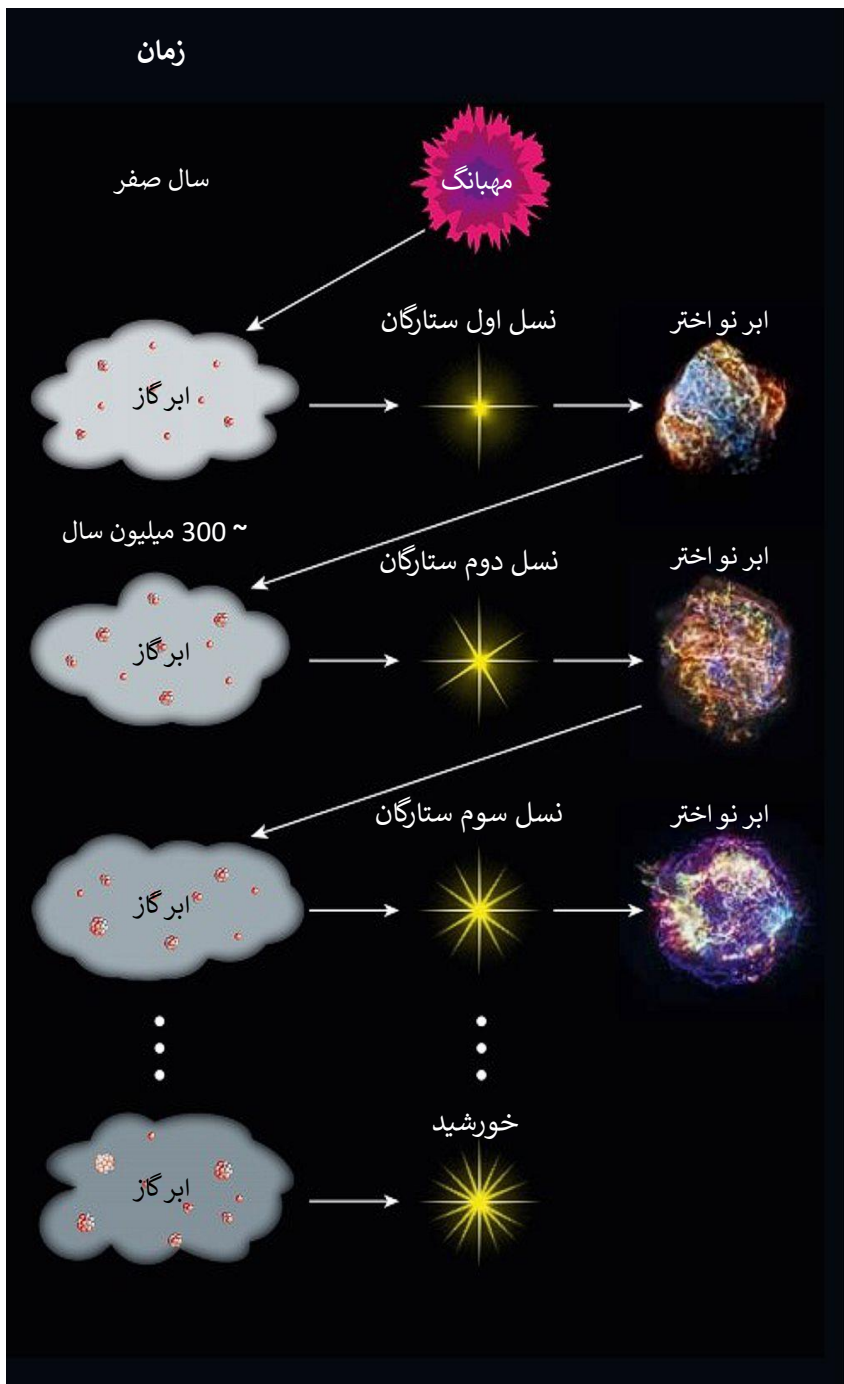
طول موج به نانومتر

وابسته به جرم اولیه ستاره است. بنابراین، بیشتر ستارگان نسل دوم که از مواد غنی شده با آهن ایجاد شدند، باید خطوط ضعیف جذب آهن را نشان دهند.

در چارچوب الگوبرداری شبکه‌ی اطلاع‌رسانی علمی (ESO) - هامبورگ از ستارگان آسمان جنوبی که در سال‌های 1990 با تلسکوپ اشمیت (15) یک متری در رصدخانه La Silla در شیلی انجام شد، ستاره‌شناسان دو ستاره را یافتند که احتمالاً متعلق به نسل دوم-اند: ستاره HE0107-5240 در صورت فلکی فینیکس که 36000 سال نوری از زمین فاصله دارد، محتوای آهن آن 160000 بار کمتر از خورشید ماست. ستاره‌ی کربنی-HE 1327 در صورت فلکی مار آبی، 2326 برابر نسبت به خورشید آهن کمتری دارد.

از نقطه نظر کمبود فلز این ستاره بعنوان رکورد دار در این زمینه به حساب می‌آید تا این که در سال 2014 میلادی استفان کیر از دانشگاه ملی استرالیا و همکارانش کشف SMSS J0313-6708 را اعلام کردند. این ستاره‌ی واقع شده در صورت فلکی مار آبی جنوبی، 6000 سال نوری از زمین فاصله دارد و محتوای آهن‌اش یک ده میلیونیم محتوای آهن خورشید است. بدین جهت این ستاره می‌بایست متعلق به قدیمی‌ترین ستارگان گونه II باشد که کهکشان ما عرضه می‌کند (شکل صفحه 2).

از آنجا که مقدار آهن در جهان به-تدریج از طریق انفجارهای ابر نواختر نسل‌های پی در پی ستارگان غنی‌تر می‌شود، فراوانی آهن در یک ستاره تقریباً با سن آن در ارتباط است. با این وجود، حداقل مراحل اولیه‌ی تکامل شیمیایی کهکشان راه شیری در همه جا یکسان انجام نگرفت؛ به همین جهت محیط میان



ستاره‌ای بطور کامل مخلوط نشد. بطور مثال اگر در منطقه‌ای از حاله‌ی کهکشان ما یک ستاره‌ی به‌ویژه کلان جرم نسل اول، بمتاب‌ه‌ی ابر نواختر منفجر شد و در این فرآیند مقدار آهن زیادی ایجاد کرد، نسل دوم ستارگان در این محیط ویژه، متناسب‌ن کثرت بالاتری از آهن را نشان می‌دهند تا ستارگانی که هم‌زمان در نزدیکی ابر نواختر دیگری پدید آمده‌اند که مقدار کمتری آهن تولید و به اطراف پخش کرده است.



ستاره شناسان با «تلسکوپ طیف سنج فیبری و چند منظوره برای پوشش وسیع آسمان» (LAMOST) در چین با طیف سنجی، آسمان را الگوبرداری می کنند؛ بدینوسیله آنها می خواهند که ستارگان کم فلز در هاله ی کهکشان راه شیری را ردیابی کنند.



کارزار الگوبرداری توسط تلسکوپ SkyMapper در استرالیا تمام آسمان جنوبی را پوشش می دهد، کم فلزترین ستاره ی تا به حال شناخته شده، SMSS J0313-6708 در صورت فلکی مار آبی جنوبی توسط این تلسکوپ کشف شد.

به این ترتیب اتمسفرهای ستارگان کم فلز، نوعی اثر انگشت شیمیایی را حفظ می کنند، که به ناظران، اطلاعات حتی بیشتری در مورد خواص ابرنواخترها و ستاره ی پیشین آنها می دهند. به عنوان مثال، انرژی انفجار یک ستاره نقش عمده ای در فراوانی عنصر روی دارد. نه تنها مقدار آهن، بلکه مقدار منیزیم و کلسیم شدیداً به جرم ستاره ی پیشین وابسته اند.

مخصوصاً بسیاری از عناصر سبک مانند کربن، نیتروژن و اکسیژن در چنین **فروپاشی هسته ای-ابرنواخترها** ایجاد می شوند که انرژی انفجار آنها، برای دفع لایه های درونی حاوی عناصر سنگین تر ستارگان کافی نیست. به جای آن، این لایه های درونی در سیاه چاله ی در حال ظهور فروکش می کنند. بدین طریق، همانند آنچه که ستاره شناسان در ستاره های مانند HE 0107-5240 و HE 1327-2326 مشاهده کرده اند، یک **الگوی فراوانی عنصرهای ویژه** با نسبت بالایی از کربن، نیتروژن و اکسیژن در مقایسه با آهن ایجاد می شود. کربن که برای کل زندگی بر روی زمین اهمیت بسیار دارد، شاید مدت کوتاهی پس از مهبانگ در چنین ابرنواخترهایی تولید شد.

### جستجوی سوزنی در میان کوهی از گاه

پیدا کردن ستارگان کم فلز غالباً یک چالش فنی بزرگی است. در همسایگی کیهانی ما از هر هزار ستاره فقط یکی کم فلز است و هر چه کم فلزتر، به همان اندازه به ندرت تر. با هر 10 بار کاهش مقدار فلز که دانشمندان **فلزینگی (16)** می نامند و برای بیان آن معمولاً از فراوانی آهن  $[Fe/H]$  استفاده می کنند، تعداد نسبی این ستارگان نیز 10 بار کاهش می یابد (نگاه شود به «فراوانی عناصر در طیف سنجی» در صفحه 5).

در یک نمونه برداری تصادفی از صد ستاره با  $[Fe/H]$  کمتر از 1.0- تنها 10 ستاره به طور متوسط با  $[Fe/H]$  کمتر از 2.0- و حتی تنها یک ستاره با فراوانی آهن  $[Fe/H]$  کمتر از 3.0- مشاهده شده اند. بنابراین تعجب آور نیست که اخترشناسان در **شبکه ی اطلاع رسانی علمی (ESO) - هامبورگ**، قبل از کشف HE 0107-5240 و HE 1327-2326 احتیاج به الگوبرداری از میلیون ها ستاره داشته اند!

به این دلیل ستاره شناسان برای پیدا کردن چنین ستارگانی و شناسایی اجسام بسیار دور، مجبور به الگوبرداری از آسمان در سطحی وسیع و تا کمترین روشنایی ممکن اند. این امر دقیقاً هدف دو پروژه ی بزرگ مشاهده گری است: آنها حجم الگوبرداری از

ستارگان کم فلز را حداقل 10 تا 20 برابر افزایش می‌دهند.

پروژه‌ی اول با «تلسکوپ طیف‌سنج فیبری و چندمنظوره برای پوشش وسیع آسمان» (LAMOST) در چین انجام خواهد شد. این تلسکوپ در رصدخانه ایستگاه سینگنگ در 130 کیلومتری شمال پکن واقع شده است (به عکس صفحه 8 نگاه شود). LAMOST قادر است از لحاظ طیف سنجی بطور هم‌زمان چهار هزار شیء را در یک میدان دید با قطر حدود پنج درجه دربر بگیرد. برای این منظور، در سطح تصویری، موتورهای کوچک تنظیم‌کننده، فیبرهای نوری را متناسب طوری جهت می‌دهند که نور هر ستاره‌ای را دریافت کنند. هر تصویربرداری 90 دقیقه‌ای، محدوده‌ی طول موجی از 370 تا 900 نانومتر را که شامل تمام طیف قابل رویت می‌شود، پوشش می‌دهد. آینه‌ی اصلی با قطر موثر حدود چهار متر، امکان دریافت طیف ستارگانی با روشنایی آبی رنگ (Blau-Helligkeit) تا 18.5 قدر ظاهری (mag) (2) را داشته، آن هم با کیفیتی کافی برای شناسایی ستارگان کم فلز.

ستاره‌شناسان در چارچوب الگوبرداری، برای تعیین تقریبی فراوانی فلزات، از یک خط از عنصر یونیزه شده کلسیم (Ca) با 393.4 نانومتر استفاده می‌کنند. این به اصطلاح خط  $\text{Ca II K}$  بطور واضح قوی‌ترین خط جذب فلز در محدوده‌ی طیف نوری است. این خط جذب به قدری قوی است که توجه جوزف فون فرانیهوفر را به خود جلب کرد. او در اوائل قرن 19 میلادی خطوط تیره جذب در طیف نور خورشید را کشف کرد. فرانیهوفر به قوی‌ترین خطوط، در ترتیب کاهش یابنده‌ی طول موجها حروف بزرگ الفبا را نسبت داد، بدین جهت عنوان "K" به خط کلسیم، از این جا سرچشمه می‌گیرد.

ضخامت خط  $\text{Ca II K}$  نه تنها وابسته به فراوانی کلسیم در یک ستاره بوده، بلکه به دمای مؤثر ستاره نیز بستگی دارد. با افزایش درجه‌ی حرارت، مقدار کم‌تری اتم‌های یونیزه شده کلسیم در حالت پایه (17)، حالتی که پایین‌ترین سطح انرژی در گذار اتمی (23) و ایجاد کننده‌ی این خطوط جذبی است، وجود خواهند داشت. بدین جهت لازم است که علاوه بر فراوانی کلسیم، همچنین دمای مؤثر ستاره معین شود، که به‌طور مثال از طریق خطوط هیدروژن امکان‌پذیر است. دانشمندان از روی فراوانی کلسیم  $[\text{Ca}/\text{H}]$ ، فراوانی فلزات را نتیجه‌گیری می‌کنند.

در دومین پروژه‌ی الگوبرداری با تلسکوپ 1.35 متری SkyMapper در رصدخانه سایدینگ اسپرینگ در استرالیا نیز خط  $\text{Ca II K}$  برای جستجوی ستارگان کم فلز مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما SkyMapper طیفی را ضبط نمی‌کند، بلکه روشنایی ستارگان را در یک میدان دید از 2.4 درجه به 2.4 درجه در محدوده‌های مختلف طول موج‌های کوتاه اندازه می‌گیرد. بخشی از سیستم فوتومتریک که برای این پروژه طراحی شده، فیلتر نوار مانند باریکی است که بر روی خط  $\text{Ca II K}$  به صورت محوری قرار دارد. اگر ستاره‌ای در این پهنا روشن‌تر از اغلب ستارگان دیگر با درجه‌ی حرارت مؤثر یکسان باشد، آنگاه خط  $\text{Ca II K}$  ضعیف‌تر خواهد بود، چرا که در آن ستاره برای جذب تابش در آن طول موج، کلسیم کم‌تری موجود است. به این ترتیب ستاره کاندیدای خوبی برای یک ستاره بسیار کم فلز است.

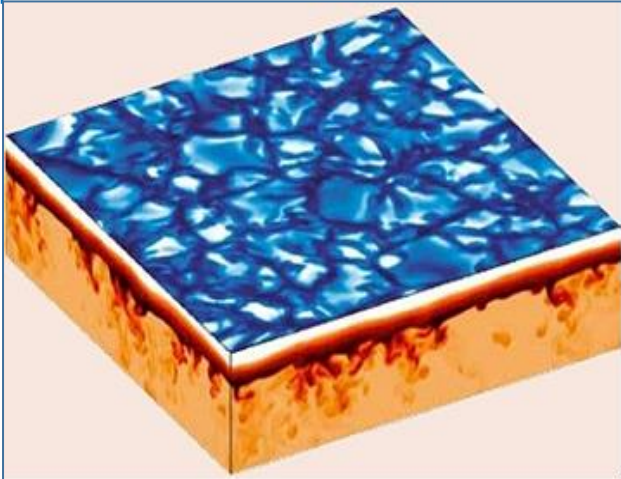
ستاره‌ای که در حال حاضر رکورد دار کم‌ترین مقدار شناخته شده وجود آهن یعنی SMSS J0313-6708 است، ابتدا از طریق الگوبرداری SkyMapper پیدا شد (مخفف SMSS به معنای SkyMapper Sky Survey است). تجزیه و تحلیل دقیق طیفی با استفاده از تلسکوپ 6.5 متری ماژلان در شیلی نتوانست هیچ خط آهنی را به اثبات برساند، به همین دلیل فراوانی آهن  $[\text{Fe}/\text{H}]$  باید کمتر از -7.1 باشد. دانشمندان از روی الگوی فراوانی عناصر، توانایی برآورد چرم ستاره‌ای از نسل اول را دارند، که به عنوان یک ابرنواختر، ابری از گاز را به لحاظ شیمیایی غنی کرد، که بعداً در آن SMSS J0313-6708 بوجود آمد. بر این اساس چرم این ستاره حدود 60 برابر چرم خورشید بوده است. بر خلاف آن در مورد ستارگان HE 0107-5240 و HE 1327-2326 این چرم در محدوده‌ای بین 20 تا 30 برابر چرم خورشید بوده است.

### ترکیبی از مشاهدات و شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای

نتیجه‌گیری موثق و قابل اعتماد برای فراوانی عنصرها از روی ضخامت خطوط جذبی، کار دشواری است. علاوه

### الگوهای جریانات در سطح یک ستاره

تنها با مدل‌های دقیق برای جو ستارگان، می‌توان فراوانی عنصرها را به‌طور مطمئن پیدا کرد. در این مدل‌ها، پویایی لایه‌های بیرونی یک ستاره با شبیه‌سازی سه بُعدی رایانه‌ای، بازسازی می‌شود. تصویر پایین، چنین مدل رایانه‌ای را نشان می‌دهد که در آن بُرش سه بُعدی از لایه‌ی نزدیک به سطح بیرونی یک ستاره، برای روشن‌سازی الگوهای جریانات با رنگ‌های ناهمخوان با واقعیت رنگ آمیزی شده‌اند. بر روی سطح ستاره، یک نقش-بندی دانه‌وار در طیفی آبی‌رنگ قابل مشاهده است. این نقش-بندی ناشی از جریان‌های همرفتی صعودی و نزولی در لایه‌های بیرونی یک ستاره است. سطوح رنگ نشان‌دهنده‌ی منطقه‌هایی با دمای بیشتر و کم‌ترند. در زیر سطح بیرونی ستاره، جریانات متمایل به سمت پایین تمرکز شدیدتری دارند (ساختارهای به رنگ قرمز تیره)، در که حالی جریان‌های رو به بالا گسترده‌تر بوده و ساختار ضعیف‌تری را نشان می‌دهند (مناطق که به رنگ قرمز روشن هستند). مرز بین بخش مرئی خورشید (20) و بخش درونی غیرقابل رویت بر روی گذار مشخص و واضح بین بخش‌های قرمز و تقریباً سیاه واقع است. انبساط هندسی و سرعت توسعه و تغییرات زمانی ساختارها، بسته به نوع ستاره، تفاوت زیادی نشان می‌دهند.



بر داده‌های مربوط به خود عنصر، مانند احتمال گذار بین سطوح مختلف انرژی تولیدکننده‌ی خطوط جذب، ستاره‌شناسان به‌ویژه احتیاج به شبیه‌سازی رایانه‌ای لایه‌های بیرونی ستاره دارند. این مدل‌ها بطور مثال نشان‌دهنده‌ی چگونگی تغییرات دما و فشار درون ستاره با تغییر عمق هستند. جو ستاره، منطقه‌های قابل رویت بیرونی یک ستاره را تشکیل می‌دهند.

محققان در چنین مدل‌هایی از جو یک ستاره، در ابتدا فرآیند تابش در درون ستاره را مد نظر دارند. فیزیک‌دان آلمانی کارل شوارتز شیلد (1916-1973)، در اوایل سال 1906 نشان داد که چگونه می‌توان برای لایه‌هایی از سطح خورشید که در آنها طیف نور قابل مشاهده ایجاد می‌شود، دمای قابل قبولی را نتیجه گرفت. برای این منظور شوارتز شیلد یک تعادل تابشی برای این لایه‌ها را فرض قرار داد، به این معنی که آن‌ها همان اندازه که جذب می‌کنند به همان مقدار نیز تابش دارند.

برای درک این موضوع، ابتدا حجم‌های کوچکی از گاز را در سطح خورشید مد نظر می‌گیریم. این توده‌های گاز مدام تابش جذب کرده و گرم می‌شوند و همچنین از راه پرتوزایی تابش جذب شده خنک می‌شوند. مقدار تابش جذب شونده توسط یک توده‌ی گاز، وابسته به منابع تشعشعی است که توده‌ی گاز در معرض آن قرار دارد. بر روی زمین این نکته آشنایی است: تابش خورشیدی وارد شونده به اتمسفر سیاره ما، تعیین‌کننده‌ی حداکثر مقدار انرژی قابل جذب خواهد بود. در مورد سطح یک ستاره، این لایه‌های عمیق‌تر و داغ‌ترند که مواد فوقانی را در واقع برافروخته و روشن می‌کنند. اما مقدار تابش یک توده‌ی گاز وابسته به لایه‌های زیرین آن نبوده بلکه وابسته به خواص محلی توده‌ی گاز، مثلن دمای آن است، هر چه این دما بالاتر باشد مقدار تابش بیشتر است.

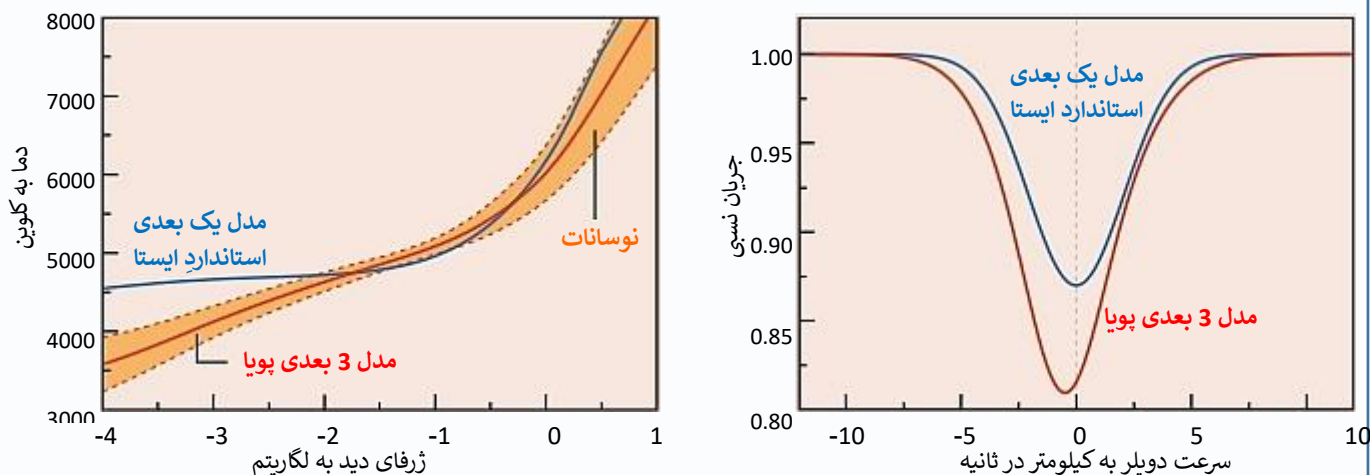
دمای تعادل تابشی معرفی شده توسط شوارتز شیلد دمایی است که تحت آن کل انرژی تابشی جذب شده و تشعشع یافته یک توده‌ی گاز در حالت تعادل‌اند. اگر تنها تابش تعیین‌کننده‌ی کل انرژی یک توده‌ی گاز باشد، با گذشت زمان دمای توده‌ی گاز ناگزیر با دمای تعادل تابشی تنظیم خواهد شد. این اندیشه به محققان امکان الگوسازی

موفقیت آمیز ستارگان مشابه خورشید را داد. آن‌ها امروز هم این کار را برای محاسبه‌ی دماهای جو ستارگان الگوسازی شده ادامه می‌دهند.

البته جو ستارگانی با چرمی کمتر از 1.5 برابر چرم خورشید کُن ساختار ساده‌ای ندارند. زیرا که در لایه‌های بیرونی آن‌ها، انرژی نه توسط تابش بلکه به‌وسیله‌ی جریان‌های ماده‌ی تشکیل دهنده‌ی ستاره انتقال می‌یابد. گاز گرم شده در درون ستاره، انبساط یافته و چگالی‌اش در مقایسه با محیط پیرامون کاهش می‌یابد و بدین طریق تا سطح ستاره صعود می‌کند. در آن‌جا گاز از این طریق انرژی را تابانده، و بدینوسیله متراکم‌تر و خنک‌تر می‌شود و دوباره در درون ستاره نشست می‌کند. این فرآیند همرفتی برای هر شخصی که تا به حال در ظرفی آب جوشانده است آشناست. همرفتی بر روی اجاق گاز خانگی می‌تواند گاهی شدید باشد و تحت شرایطی جوشیدن بیش از حد آب را موجب شود.

مدل‌ها: به اندازه‌ی ممکن ساده و به اندازه‌ی لازم بغرنج و پیچیده

برای محاسبه نمایه‌ی (profil) دما در نزدیکی سطح یک ستاره، برخی از ساده‌سازی‌ها در مدل مورد استفاده مورد نیاز هستند، که باید به دقت انتخاب شوند (به نمودار سمت چپ نگاه شود).



مدل استاندارد یک بعدی ایستا، نمایه‌ی دمایی (خط پر و ممتد آبی رنگ) دیگری را در مقایسه با یک مدل سه بعدی پویا (خط قرمز پر و ممتد قرمز رنگ) عرضه می‌کند. در حالت مدل پویا، توزیع سه بعدی دمای ستاره‌ی کم‌فلز به طور افقی و بصورت میانگین تعیین می‌شود و خطوط مقطع و بریده نشان دهنده اندازه و میزان نوسانات در اطراف نمایه‌ی میانگین هستند. در نمودار، عمق لایه به مثابه ژرفای نمایان که معیاری برای ژرفای دید (Einblicktiefe) است، نشان داده شده است. قلمروی مشاهده بصری جو یک ستاره در محدوده‌ی ژرفای نمایان کم‌تر از 1 امتداد می‌یابد (به لگاریتم، کوچک‌تر از صفر می‌شود). نمودار سمت راست نشان‌دهنده‌ی مقایسه‌ی مشخصه‌ی خط طیفی نوری برای آهن خنثی در مدل ایستای ساده (رنگ آبی) و در یک مدل پویای پیچیده‌تر (خط قرمز) برای همان ستاره است. طول موج، معادل با جابجایی دوپلر (Dopplerverschiebung) (21) نسبت به طول موج خطی که در آزمایشگاه اندازه‌گیری شده می‌باشد. برای مدل پویا، خط نمایش دهنده، از میانگین افقی و زمانی طیف‌های یگانه‌ی زیادی محاسبه شده است. در مثال بالا در سمت راست تفاوت در ضخامت خط 60 درصد است. علاوه بر آن مدل سه بعدی، در سرعت‌های پایین‌تر، یک جابجایی واضح مرکز خط از طول موج آزمایشگاهی را نشان می‌دهد، که با انتقال به آبی (22) مطابقت دارد. این جابجایی از سرعت‌های توده‌های گاز حاصل می‌شود.

اتفاق مشابهی در روی سطح بیرونی ستارگان اتفاق می‌افتد: توده‌های گازی که از طریق جریان همرفتی به سمت بالا در جریانند به سرعت‌هایی دست خواهند یافت، که باعث فوران این توده‌ها به داخل لایه‌های غیر همرفتی اتمسفر ستارگان می‌شوند (فوران ناشی از جریان‌های همرفتی م). توده‌های گاز خنک‌تر و متراکم‌تر شده نسبت به گاز محیط پیرامونشان، تحت شرایطی امکان کاهش واضح دمای این منطقه را دارند - که در حقیقت از طریق جریانات همرفتی تعیین شده است.

پیش‌بینی اینکه چه دمایی در رقابت بین فرآیندهای حریف، یعنی تابش و همرفت تنظیم خواهد شد، دشوار است. در مورد خورشید، حداقل تابش دست بالا را دارد: علی‌رغم فوران ناشی از جریان‌های همرفتی، دمای خورشید در حدود دمای تعادل تابشی باقی می‌ماند.

با این حال خورشید در مقابل ستارگان کم‌فلز دارای یک مزیت است: با دارا بودن مقدار بیشتری از عنصرهای سنگین، خطوط طیفی به مراتب بیشتری در طیف نورش قابل مشاهده‌اند. این عنصرها، انتشار و جذب تابش را آسان کرده و به این ترتیب باعث عمل مؤثر مکانیسم تنظیم‌کننده‌ی تعادل تابشی می‌شوند. در ستارگان دارای محتوای فلزی بالا مانند خورشید، انحرافات از تعادل تابشی بخاطر فوران ناشی از جریان‌های همرفتی، در حد پایینی هستند.

## مدل ستارگان کم فلز

گرچه ستارگان کم فلز به خاطر چرم‌های مشابه‌شان، ساختار مشابه‌ای همانند خورشید دارند، اما به علت عدم وجود فلزات سنگین و خطوط طیفی حاصل از آن‌ها، مکانیسم تنظیم‌گر بر آن‌ها تاثیری ندارد و به این علت انحرافات از تعادل تابشی به مراتب بزرگ‌ترند. دانشمندان برای تعیین دقیق ترکیب شیمیایی ستارگان، باید این انحرافات را در مدل‌های خود مورد توجه قرار دهند.

بنابراین مشکل اصلی این‌جاست که فرض گرفتن تعادل در تابش برای محاسبه نمایه دما در سطح یک ستاره، می‌تواند گمراه‌کننده باشد. علاوه بر این، باید فرآیند هیدرودینامیکی فوران ناشی از جریان‌های همرفتی نیز در نظر گرفته شود. یک مدل برای ارزیابی صحیح سرعت توده‌های گاز در نزدیکی سطح یک ستاره، حداقل بخشی از مسیر خود را باید از داخل ستاره دنبال کند، زیرا که مکانیسم محرکه (پیش ران م.) در آن‌جا است. در نظرگیری پویایی گاز در جزئیاتش، محاسبه‌ی مدل اتمسفر در مقایسه با مدل‌های ایستا را به مراتب سخت‌تر می‌کند. با این وجود دانشمندان در طی بیست سال گذشته در این زمینه پیشرفت‌های خوبی داشته‌اند و بطور فزاینده‌ای مدل‌های هیدرودینامیکی تابشی دقیق‌تر و جامع‌تر از جو ستارگان را طراحی کرده‌اند. این پیشرفت به میزان قابل توجهی به علت افزایش قدرت رایانه‌ها امکان‌پذیر شده است.

در حالی که برای مدل‌های متداول تعادل تابشی تنها یک بُعد عمودی کافی است، واقعیت بسیار پیچیده‌ی جریان‌های گاز، تنها با یک هندسه سه بُعدی قابل شبیه‌سازی است. با این وجود مدل‌های سه بُعدی، یک ستاره را در کلیت آن بررسی نمی‌کنند، بلکه آن‌ها بر روی لایه‌های انتخابی و نمونه از سطح ستاره تمرکز کرده که از یک سو در آنها نور انتشار یافته و از سوی دیگر توده‌های گاز به بالاترین شتاب دست می‌یابند. (نگاه شود به «الگوهای جریان‌ات در سطح بیرونی یک ستاره» صفحه 10).

ساده‌سازی دیگر در مدل سه بُعدی پویا، محاسبه نکردن تکامل زمانی دقیق الگوی جریان (گاز) می‌باشد، زیرا که این الگو بی‌نظم و آشفته است. در عوض این مدل، خواص آماری طولانی مدت را توصیف می‌کند. با این حال این کافی است، زیرا که تکامل مشروح در مکان خاصی در سطح ستاره مورد نظر نبوده بلکه خصوصیات کلی که واقعاً قابل مشاهده‌اند، مد نظرند. این خواص کلی، از طریق خصوصیات معمولی جریان گاز، بررسی و مطالعه می‌شوند.

در مورد مشخص ستارگان کم فلز، مقایسه‌ای بین یک مدل ساده و ایستای اتمسفر یک ستاره با یک مدل پیچیده‌تر پویا، تفاوت‌های بزرگی را در نمایه دمای پیش‌بینی شده آشکار می‌سازد (نگاه شود به مدل‌ها: به اندازه ممکن ساده و به اندازه لازم بغرنج و پیچیده، صفحه 11).

مدل ایستا به جهت ساختارش به طور عمده از دمای تعادل تابشی پیروی می‌کند، در حالی که مدل پویا به علت اثرات فوران ناشی از جریان‌های همرفتی، انحرافات قابل توجهی (از دمای تعادل تابشی م.) را نشان می‌دهد. در این حالت گاز در نزدیکی سطح خارجی به میزان قابل توجهی خنک می‌شود. علاوه بر این، مدل پویا همچنین تفاوت‌های افقی دما را نیز در نظر می‌گیرد که در مدل‌های استاندارد ایستا نادیده گرفته می‌شوند.

تعیین ترکیب شیمیایی یک ستاره توسط ستاره‌شناسان با استفاده از طیف‌سنجی چه معنایی دارد؟ مقایسه یک نمایه خطی محاسبه شده توسط مدل سه بُعدی پویا و همچنین توسط مدل یک بُعدی ایستا، تفاوت‌های واضحی را آشکار می‌سازد (نگاه شود به مدل‌ها: به اندازه ممکن ساده و به اندازه لازم بغرنج و پیچیده، در صفحه 11). در مثال خط آهن خنثی در محدوده‌ی طیف آبی‌رنگ، انحراف در ضخامت خط 60% است. این بدان معنی است که فراوانی آهن حاصل از آن نیز حدود 60 درصد تفاوت خواهد داشت!

بنابراین، واضح است که مدل‌های ساده یک بُعدی، در تجزیه و تحلیل فراوانی عنصرها، تحت شرایطی اشتباهات سیستماتیک زیادی ایجاد می‌کنند. خوشبختانه ستاره‌شناسان در اکثر مواقع با در دسترس بودن چندین خط طیفی از یک عنصر - که به اثرهای سه بُعدی به درجات متفاوتی واکنش نشان می‌دهند- در این مورد راه حلی دارند. به این ترتیب خط‌های پدید آئیده در لایه‌های بالای ستاره، نسبت به خط‌های ایجاد شونده توسط عنصرهای عمیق‌تر درون ستاره، معمولن شدیدتر تحت تاثیر فوران ناشی از جریان‌های همرفتی قرار می‌گیرند. مسلمن حذف کامل منبع خطا با استفاده از مدل‌های سه بُعدی خوشایند محققان است، اما به دلیل حجم محاسباتی زیاد، همیشه امکان پذیر نیست.

### هدف، بازسازی پیدایش کهکشان راه شیری است

در طی پنج تا ده سال آینده، بررسی دقیق‌تر خواص ستارگان نسل اول بر اساس نمونه‌برداری‌های بزرگ‌تر از ستارگان کم‌فلز، امکان‌پذیر خواهد شد. در این رابطه دانشمندان علاقه‌مندی ویژه‌ای به جرم این ستارگان نشان می‌دهند: آیا در آن زمان ستارگان کلان جرم بسیار زیادتری شکل گرفتند - ستارگان غول‌پیکری که در جهان امروز یا توانای پدیدآبی نداشته و یا این که خیلی به ندرت بوجود می‌آیند؟ یا این که در میان آن‌ها همچنین تعداد زیادی نمونه‌های کوچک‌تر با جرم‌هایی مشابه جرم خورشید ما وجود داشته‌اند؟

هدف بازسازی دقیق‌تر پیدایش کهکشان راه شیری است. برای این هدف تجزیه و تحلیل فراوانی عنصرهای ستارگان مورد احتیاج است. برای این کار دانشمندان در حال حاضر شبکه‌ی بزرگی از مدل‌های پیچیده و سه بُعدی جو ستارگان را مثلن در رابطه با دمای موثر و یا فلزینگی (16) محاسبه می‌کنند که در حد امکان طیف گسترده‌ای از ستارگان را پوشش دهد.

رویای اخترشناسان برای ستارگان کم‌فلز به هنگام الگوبرداری از آسمان، یعنی کشف ستاره‌ای از نسل اول که به غیر از آثاری از لیتیوم اصلن فلزی دیگری را دربر نداشته باشد، تا کنون هنوز تحقق نیافته است. با این حال پروژه‌های رصدگری همانند آن‌هایی که با LAMOST و یا تلسکوپ SkyMapper انجام می‌گیرند، در حال حاضر حجم الگوبرداری را به 10 برابر افزایش می‌دهند. از این طریق احتمال پیدا کردن چنین ستاره‌هایی - در صورتی که از دوران جوانی جهان باقی مانده باشند-، به همان اندازه افزایش می‌یابد. حتی اگر جستجو در درازمدت ناموفق باشد، نتیجه‌ی منفي قابل اندازه‌گیری آن بسیار جالب خواهد بود. در این حالت ستاره‌شناسان این نکته را که ستارگان نسل اول کلن حاوی نمونه‌هایی با جرمی کم‌تر از 0.9 جرم خورشید بوده‌اند را رد خواهند کرد.

منبع: ستارگان و کیهان، آگوست 2017

### پی‌نوشت‌ها:

#### 1- همرفت (از ویکی پدیا)

همرفت یا کنوکسیون (Convection) یکی از روش‌های انتقال گرما است. همرفت نه تنها در داخل یک سیال، بلکه بین دو جسم که یکی از آنها سیال باشد نیز اتفاق می‌افتد. فرآیند رسانش بین یک سطح جامد و یک سیال در حال حرکت، همرفت نامیده می‌شود. حرکت سیال می‌تواند طبیعی یا با اعمال نیروی خارجی باشد. برای مثال وقتی آب می‌جوشد حباب‌ها که در ته ظرف تشکیل می‌شود به بالا رفته و آب سرد پایین می‌رود.

#### 2- قدر ظاهری (از ویکی پدیا)

قدر ظاهری (apparent magnitud)، مقیاسی عددی از روشنایی ستارگان از دید ناظر در زمین است. هرچه مقدار آن کمتر باشد ستاره نورانی تر است. قدر ظاهری را با  $m$  نشان می‌دهند.

#### 3- ذرات هسته‌ای (از ویکی پدیا)

به پروتون یا نوترون، ذرات هسته‌ای یا **نوکلئون** می‌گویند. پروتونها و نوترونها اسپین و پاریته  $1/2$  مثبت دارند. تعداد این ذرات هر کدام به ترتیب با نماد  $Z$  و  $N$  در کنار نام عنصر ذکر می‌شود که مجموع آنها به نام عدد جرمی با نماد  $A$  مشخص می‌شود و این ذرات از سه کوارک تشکیل شده‌اند و جزو خانواده فرمیون‌ها هستند.

### 4- هسته‌زایی (از ویکی پدیا)

تولید هسته‌های اتمی بر اثر واکنش‌های هسته‌ای در دما و فشار بالا را **هسته‌زایی (Nucleosynthesis)** می‌گویند. در این فرآیند هسته یک اتم از هسته‌های موجود دیگر و ذرات بنیادی پروتون و نوترون ایجاد می‌شود.

### 5- طیف‌بینی (Spectroscopy) (از ویکی پدیا)

طیف‌سنجی (بیناب نمایی): به عنوان مطالعه برهمکنش بین نور و ماده نیز تعریف می‌شود. از لحاظ تاریخی طیف‌سنجی به شاخه‌ای از علم برمی‌گردد که نور مرئی برای مطالعات نظری در ساختار ماده و آنالیزهای کیفی و کمی استفاده می‌شد. اگرچه اخیراً به عنوان یک تکنیک جدید نه فقط برای نور مرئی بلکه بسیاری از اشکال تابش‌های الکترومغناطیسی و غیرالکترومغناطیسی مانند میکروموجها، امواج رادیویی، اشعه ایکس، الکترونها، فوتونها (امواج صوتی) و غیره بکاربرده می‌شود. از انواع روش‌های مهم و پرکاربرد در شیمی آلی می‌توان به روش‌های طیف‌سنجی مادون قرمز، جرمی، ماوراء بنفش و رزنانس مغناطیسی هسته اشاره کرد. طیف‌سنجی اغلب در شیمی فیزیک (بطور مثال در نوعی تصویربرداری ام‌آرآی) و شیمی تجزیه برای شناسایی ماده از طریق طیف گسیلی یا جذبی از آنها یکار برده می‌شود. وسیله‌ای که طیف هر ماده را ثبت می‌کند طیف‌سنج یا اسپکترومتر نام دارد. طیف‌سنجی همچنین به طور زیاد در اخترشناسی و مشاهدات از راه دور استفاده می‌شود. اکثر تلسکوپ‌های بزرگ طیف‌نگار دارند که برای اندازه‌گیری ترکیبات شیمیایی و خواص فیزیکی اجسام نجومی یا اندازه‌گیری سرعت‌شان از طریق جابجایی دوپلری خطوط طیفی‌شان استفاده می‌شود. این نوع کاربرد در مبحث طیف‌سنجی نجومی به تفصیل آمده‌است.

### 6- خط طیف نوری (از ویکی پدیا)



طیف پیوسته



طیف گسیلی



طیف جذبی

خط طیف نوری خط تیره یا روشن در یک طیف پیوسته است و هنگامی که در یک فرکانس محدود نور نشر یا جذب می‌شود به وجود می‌آید. بیشتر از مشخصه‌های خط طیف نوری اتم‌ها و مولکول‌ها برای تشخیص آنها به کار می‌رود. انواع خط‌های طیف نوری

خط‌های طیف نوری نتیجه اثر متقابل بین یک سیستم کوانتومی (بیشتر اتم‌ها، اما گاهی مولکول‌ها یا هسته اتم) و یک فوتون است. هنگامی که فوتون انرژی لازم برای تغییر سطح انرژی سیستم را دارد (در اتم بیشتر با تغییر اربیتال الکترون است)، فوتون جذب می‌شود؛ و سپس خود به خودی دوباره ساطع می‌شود، در جایی که مجموع انرژی منتشر شده فوتون برابر خواهد شد با انرژی جذب شده، (با فرض این که سیستم به حالت اصلی برگردد)

خط‌های طیف نوری ممکن است به دو صورت **خط گسیلی** یا **خط جذبی** مشاهده بشوند، که خط جذبی هنگامی ساخته می‌شود که فوتون‌ها از یک طیف داغ و پهن به یک ماده سرد بروند.

### 7- تکنسیوم (از ویکی پدیا)

**تکنسیوم** سبک‌ترین عنصر شیمیایی است که در طبیعت ایزوتوپ پایدار ندارد. عدد اتمی آن ۴۳ و نشانه آن Tc است. جرم اتمی میانگین این عنصر به دلیل نیم عمر کم و تنوع ایزوتوپ‌ها دقیق محاسبه نشده است. تکنسیوم پرتوزا است و ترکیبات آن که پرتوگاما می‌پراکند در پزشکی هسته‌ای

بکار می‌رود. این عنصر برای اولین بار در آزمایشگاه دانشگاه کالیفرنیا و به مدیریت ارنست لارنس در ۱۹۳۶ میلادی و به واسطه یک سیکوترون ۳۷ اینچی تولید شد. همچنین این عنصر نخستین عنصر مصنوعی ساخت بشر بوده است.

### 8- نمودار هرتسپرونگ-راسل (از ویکی پدیا)

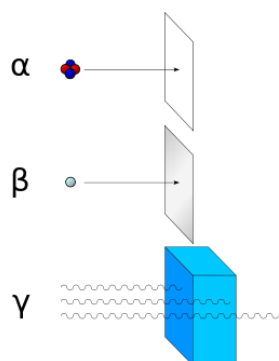
نمودار هرتسپرونگ راسل (Hertzprung-Russell diagram) یا نمودار (H-R) نموداری است که رابطه‌ای بین قدر مطلق، درخشندگی، رده‌بندی، و دمای مؤثر ستارگان به دست می‌دهد. این نمودار در سال ۱۹۱۰ و توسط اینار هرتس اسپرونگ و هنری نوریس راسل ایجاد شده است. در آغاز قرن بیستم، اینار هرتسپرونگ و هنری نوریس راسل، به یک طریق، با حذف کردن فاصله در نورانیت، یعنی بر مبنای قدر مطلق، نموداری از یک گروه از ستارگان تهیه کردند. آن‌ها با تعیین کردن یک محور به عنوان دما و محور دیگر به عنوان قدر مطلق، دریافتند که نقاط نشانگر ستارگان در این نمودار، در یک نوار باریک جای می‌گیرند. این نوار، رشته اصلی خوانده می‌شود. در این نمودار دیده می‌شود که اکثر، ستارگان نورانی تر، داغ ترند و ستارگان کم نورتر، سردتر. تعدادی از ستارگان، نورانی تر از آن ستارگان رشته اصلی هستند که همان دما را دارند. از این رو، این ستارگان استثنایی را غول می‌نامند و ستارگان باز هم نورانی تر از آن‌ها به ابرغول مشهورند. برخی از ستارگان نیز کم نورتر از آن ستارگان رشته اصلی هستند که همان دما را دارند. این ستارگان، کوتوله‌های سفید هستند. آن‌ها بسیار کوچکند و اندازه سیارات را دارند.

### 9- تابع حالت (از ویکی پدیا)

**تابع حالت** (به انگلیسی: State function) یا **تابع نقطه‌ای**، در ترمودینامیک، تابعی است که مسیر فرایند موجب تغییری در مقدار نهایی آن نشده و فقط به نقاط ابتدایی و انتهایی مسیر وابسته باشد. توابع حالت با حروف بزرگ انگلیسی نوشته می‌شوند. توابع حالت، توابع مستقل از مسیر نیز نامیده می‌شوند. توابع حالت در ترمودینامیک:

دما (T)، فشار (P)، حجم (V)، انرژی درونی (E)، آنتالپی (H)، آنتروپی (S)، انرژی آزادگیبس (G)، تعداد مول (n) چگالی (ρ)

### 10- ذرات بتا (از ویکی پدیا)



ذره‌های آلفا از جنس هسته هلیوم هستند و به راحتی توسط برگ کاغذ متوقف می‌شوند. پرتوهای بتا از جنس الکترون و پوزیترون هستند و توسط ورقه آلومینیوم متوقف می‌گردند. اما پرتوهای گاما به صفحه سربی نفوذ کرده و در نهایت از آن می‌گذرند. ذرات بتا گونه‌ای از الکترون یا پوزیترون‌های پرانرژی و پرسرعت هستند که توسط برخی هسته‌های واپاشی شونده مانند پتاسیم ۴۰ انتشار می‌یابند. ذرات بتا گونه‌ای از پرتوهای تابش یونی هستند که همچنین پرتوهای بتا هم خوانده می‌شوند. فرایند تولید ذرات بتا واپاشی بتا نامیده می‌شود. این ذرات با حرف β در الفبای یونانی نامیده شده‌اند. دو گونه واپاشی برای بتا وجود دارد: β<sup>-</sup> و β<sup>+</sup> که به ترتیب مربوط به الکترون و پوزیترون می‌شوند.

### 11- عنصرهای خاکی کمیاب (از ویکی پدیا)

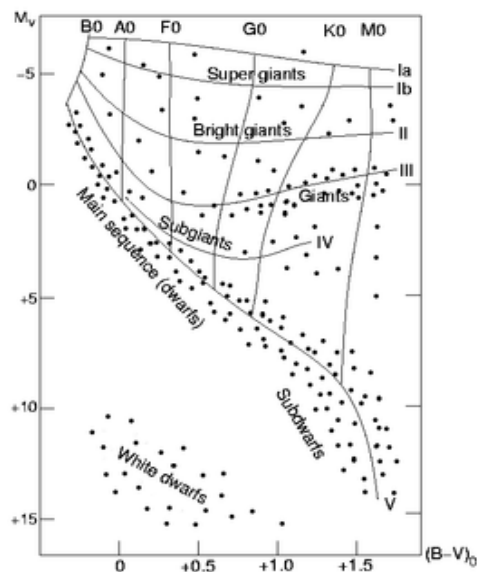
این اکسیدهای خاک کمیاب به عنوان ردیاب برای تشخیص اینکه کجاها حوضه آبریز در حال فرسایش است، بکار می‌رود. در این نگاه از بالا به مرکز به صورت ساعتگرد این اکسیدها عبارتند از: پرازئودیمیم، سریم، لانتان، نئودیمیم، سامریم و گادولینیم. بر پایه نامگذاری آیوپاک، عنصرهای خاکی کمیاب با نشانه اختصاری "REES" یا فلزهای خاکی کمیاب، مجموعه ۱۷ عنصر شیمیایی جدول تناوبی است. این دسته از عنصرها عبارتند از پانزده عنصر لانتانیدها و دو عنصر اسکاندیم و ایتریم. به این دلیل اسکاندیم و ایتریم کمیاب شناخته شده‌اند که بیشتر در همان سنگ معدن‌هایی پیدا می‌شوند که لانتانیدها پیدا می‌شوند و ویژگی‌های شیمیایی همانندی را از خود نشان می‌دهند. این عنصرها برخلاف نامشان در زمین بسیار فراوان اند (به جز پروتیم و عنصرهای پرتوزا) برای نمونه سریم ۲۵-امین عنصر فراوان است که غلظت آن ۶۸ ppm است (همانند مس). این عنصرها به دلیل ویژگی‌های زمین‌شیمی در زمین بسیار پراکنده‌اند و در یک جا به اندازه کافی متمرکز نیستند. در نتیجه جستجو و بهره برداری از آن‌ها بسیار هزینه بر است. رسوب‌هایی از آن‌ها که بهره برداری از آن اقتصادی باشد را کانی خاک کمیاب می‌نامند. نخستین کانی شناسایی شده از این عنصرها گادولینیت نام دارد. یک ترکیب شیمیایی از سریم، ایتریم، آهن، سیلیسیم و دیگر عنصرها. این کانی از یک معدن در روستای ایتربی در سوئد بدست آمد. چندین عنصر خاکی کمیاب نامشان را از این منطقه وام گرفته‌اند.

### 12- محیط میان‌ستاره‌ای (از ویکی پدیا)

محیط میان‌ستاره‌ای یا فضای میان‌ستاره‌ای انگلیسی (Interstellar medium): در اخترشناسی به موادی گفته می‌شود که در فضای بیرونی، فاصله میان سامانه‌های ستاره‌ای را پر می‌کند و معمولاً متشکل از گاز با شکل‌های یونی، مولکولی یا اتمی به همراه غبارها و پرتوهای کیهانی است. فضای میان‌ستاره‌ای، به نحو غیرقابل امتزاجی در فضای میان‌کهکشانی نیز فرو می‌رود. انرژی که همان حجم محیط میان‌ستاره‌ای را به صورت الکترومغناطیسی اشغال کند، میدان پرتویی میان‌ستاره‌ای نامیده می‌شود.

### 13- رشته اصلی (از ویکی پدیا) Hauptreihe

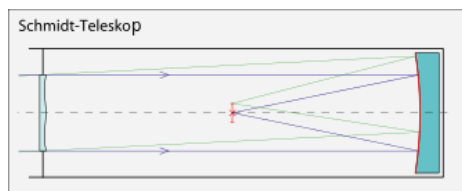
در ستاره‌شناسی به منحنی‌ای در نمودار هرتسپرونگ راسل که بیشتر ستارگان در آن قرار دارند رشته اصلی می‌گویند. رشته اصلی طبقه‌ای از ستارگان را شامل می‌شود که بین درخشندگی، اندازه و دمای آنها رابطه پایداری وجود دارد و یک ستاره در میانسالی به این حالت می‌رسد. سن کنونی خورشید ما سن میانسالی است. به ستارگانی که در این نمودار بر روی این رشته و منحنی قرار گرفته اند ستارگان رشته اصلی یا ستارگان کوتوله گفته می‌شود.



### 14- چگالی تعداد (از ویکی پدیا)

چگالی تعداد به انگلیسی (Number density): کمیتی شدتی است که به صورت تعداد اجسام (مولکول، فوتون، اتم، کهکشان‌ها) در واحد حجم، تعریف می‌شود. این کمیت در علوم چون شیمی، فیزیک و کیهانشناسی کاربرد دارد و به صورت زیر تعریف می‌شود

### 15 - تلسکوپ اشمیت (ترجمه شده از ویکی پدیا)



تلسکوپ اشمیت که به آن دوربین یا آینه‌ی اشمیت نیز می‌گویند، یک تلسکوپ بازتابی است که برای هدف ویژه عکاسی نجومی درست شده و ترکیبی از لنزها و آینه‌ها است.

مسیر نور در یک تلسکوپ اشمیت

### 16- فلزینگی (از ویکی پدیا)

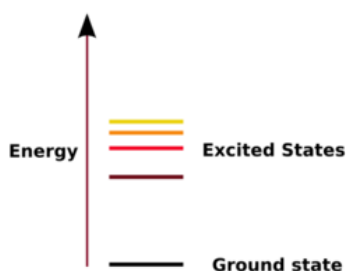
در اخترشناسی و کیهانشناسی، فلزینگی (به انگلیسی Metallicity): نشان‌دهنده نسبتی از جرم یک جسم نجومی است که از عنصرهایی به جز هیدروژن و هلیوم ساخته شده است. از آنجا که ستاره‌ها، که بیشتر جرم مرئی جهان را ساخته‌اند، بیش از هر چیز از هیدروژن و هلیوم ساخته شده‌اند، اخترشناسان برای سادگی، همه عنصرهای سنگین‌تر از این دو عنصر را فلز می‌نامند. از این رو سحابی‌ای که دارای مقدار زیادی کربن، نیتروژن، اکسیژن و نئون باشد، پرفلز) به انگلیسی (metal rich): دانسته می‌شود، هرچند که این عنصرها را در علم شیمی فلز نمی‌دانند.

فلزیگی یک جسم می‌تواند نشان‌دهندهٔ عمر آن هم باشد. بر اساس نظریهٔ مهبانگ، در عالم آغازین تنها هیدروژن (و مقدار ناچیزی هلیوم، لیتیوم و بریلیوم به خاطر هسته‌زایی مهبانگ) وجود داشت. از این رو ستاره‌هایی که فلزیگی پایینی دارند، در عالم آغازین شکل گرفته‌اند و بنابراین عمر بیشتری دارند.

### 17- حالت پایه (از ویکی پدیا)

حالت پایه به انگلیسی (Ground state): در فیزیک کوانتوم حالتی است که سیستم کمترین انرژی خود را دارد. حالت برانگیخته هر حالتی است که انرژی‌ای بیشتر از حالت پایه دارد. حالت پایه در نظریه میدان‌های کوانتومی حالت خلاء خوانده می‌شود.

اگر بیش از یک حالت پایه وجود داشته باشد آن را چندگانه می‌خوانند. بسیاری از سامانه‌ها حالت پایهٔ چندگانه دارند.



ترازهای انرژی یک الکترون در یک اتم شامل حالت پایه (Ground state) و حالت‌های برانگیخته (Excited states) الکترون در حالت پایه با دریافت انرژی می‌تواند به حالت برانگیخته جهش کند.

طبق قانون سوم ترمودینامیک، هر سامانه در دمای صفر مطلق در حالت پایهٔ خود قرار دارد. در نتیجه انتروپی آن با چندگانگی حالت پایه تعیین می‌شود. بسیاری از سامانه‌ها، مانند شبکه بلوری ایده‌آل، حالت پایهٔ واحدی دارند و در نتیجه انتروپی آنها در دمای صفر مطلق صفر است. بسیاری از مواد مانند مواد بلوری ایده‌آل دارای حالت آیه منحصر به فرد هستند.

### 18- دمای موثر (Effective temperature) (از ویکی پدیا)

دمای موثر یک ستاره بعنوان دمای یک جسم سیاهی (19) بوده، که با دارا بودن سطح یکسان با ستاره، همان مقدار تابش ستاره را از خود منتشر می‌کند. هر چه طیف نوری شی‌ای، مطابقت کمتری با طیف یک جسم سیاه نشان دهد به همان اندازه دمای موثر شی از دمای تعریف شده جنبشی (kinetic) انحراف بیشتری نشان می‌دهد.

### 19- جسم سیاه (از ویکی پدیا)

در فیزیک، جسم سیاه جسم ایده‌آلی است که همهٔ نوری را که در همهٔ بسامدها و از همهٔ زوایه‌ها، از هر کجا و با هر شدتی که به آن می‌تابد جذب می‌کند؛ هیچ تابش الکترومغناطیسی از جسم سیاه باز نمی‌تابد یا نمی‌گذرد، و به همین دلیل چنین جسمی هنگامی که سرد است سیاه دیده می‌شود. یک جسم سیاه در تعادل گرمایی (دمای ثابت)، پرتوهای الکترومغناطیسی تابش می‌کند که به آن تابش جسم سیاه گویند. طیف حاصل از تابش مستقل از جنس و شکل جسم است و تنها به دمای آن بستگی دارد.

طیف جسم سیاه. هرکدام از خط‌های رنگی (که نمایندهٔ دماهای گوناگون هستند) نشان می‌دهند که در طول موج‌های گوناگون شدت تابش چه قدر است. با کم شدن دما، قلهٔ تابش جسم سیاه به سمت شدت‌های کمتر و طول موج‌های بیشتر می‌رود.

یک جسم توخالی، یا یک چارادیواری تاریکی که تنها سوراخ کوچکی برای ورود یا خروج تابش نور دارد (کاواک) شبیه‌سازی تقریبی خوبی برای تجسم یک جسم سیاه ایده‌آل است. هر تابشی که از راه این سوراخ وارد حفره شود، بی‌نهایت بار به همه سو بازتاب می‌یابد.

### 20- نورسپهر (از ویکی پدیا)

شیدسپهر یا فوتوسفر (Photosphere) همان بخش مرئی خورشید است. دمای شیدسپهر حدود ۶۰۰۰ درجهٔ کلوین است. در اطراف شیدسپهر فامسپهر و تاج خورشیدی قرار دارند.

### 21- اثر دوپلر (از ویکی پدیا)

اثر دوپلر (Doppler effect) در فیزیک امواج می‌گوید که بسامد ظاهری یک موج بر اثر حرکت فرستنده یا گیرنده آن تغییر می‌کند. این پدیده را کریستیان یوهان دوپلر (۱۸۰۳-۱۸۵۳ میلادی) فیزیکدان اتریشی در مقاله‌ای در سال ۱۸۴۲ بیان کرد. اثر دوپلر در همه امواج مانند امواج صوتی و امواج الکترومغناطیسی نور دیده می‌شود.

هرگاه گیرنده‌ای به سمت یک منبع ساکن که از خود موج صوتی می‌فرستد برود، بسامد صوتی که می‌گیرد بیشتر از وقتی است که نسبت به منبع ساکن باشد (شنونده صدا را زیرتر می‌شنود). و اگر از منبع صوت دور شود، موجی را با بسامد کمتر می‌گیرد (شنونده صدا را بم‌تر می‌شنود). اگر منبع موج نیز از گیرنده دور یا به او نزدیک شود، بسامد صوتی که شنونده می‌شنود نیز به

مثال متداولی که برای توضیح اثر دوپلر به کار می‌رود، شنیدن صدای ماشینی است که از دور با آژیر نزدیک می‌شود و عبور می‌کند و سپس دور می‌شود. در هنگام نزدیک شدن، فرکانس دریافتی (در مقایسه با فرکانس گسیل شده از منبع) افزایش می‌یابد. در لحظه عبور این فرکانس با فرکانس گسیل شده از منبع برابر می‌شود، و در هنگام دور شدن فرکانس دریافتی با دور شدن ماشین کاهش می‌یابد. به بیان ساده‌تر آمبولانسی که به فرد ساکن نزدیک می‌شود ظاهراً دارای آژیر تندتری است و وقتی از وی دور می‌شود دارای آژیر کندتر به نظر می‌رسد. علت تغییر فرکانس ظاهری آن است که وقتی منبع موج به دریافت کننده نزدیکتر می‌شود، هر جبهه موج نسبت به دریافت کننده فاصله کمتری نسبت به جبهه موج قبلی دارد، بنابراین این طول موج کم و فرکانس ظاهری موج افزایش می‌یابد و برای دور شدن برعکس این پدیده روی می‌دهد.

### 22- انتقال به سرخ (از ویکی پدیا)

انتقال به سرخ، سرخ‌کیب یا سرخگرایی (Redshift)، پدیده‌ای است که در آن نور گسیل شده از یک جرم (امواج مرئی، فرابنفش، اشعه ایکس، اشعه گاما و...) به سمت طول موج قرمز در انتهای طیف می‌رود.

یعنی نوری که توسط طیف‌سنج ثبت می‌شود طول موجی بلندتر و بسامدی کمتر از نور گسیل شده از منبع دارد. به طور مثال این پدیده هنگامی رخ می‌دهد که منبع تولید نور در حال دور شدن از بیننده باشد. مانند اثر دوپلر که در بسامد امواج صوتی تغییر ایجاد می‌کند.

### 23- گذار اتمی (از ویکی پدیا)

بطور مثال الکترونها با جذب انرژی الکترومغناطیس به سطح بالاتری از انرژی می‌رسند. میدان الکترومغناطیس خود یک جسم کوانتومی است (به همین جهت میدان کوانتومی). روند تحریک اتم‌ها بصورت از بین رفتن (جذب) یک ذره نور (فوتون) و تغییر شکل انرژی آن به انرژی تحریک کننده (مطابق ساختار الکترونی دیگری از اتم) قابل تصور است. این فرایند بمثابة گذار اتمی نامیده می‌شود، یعنی ساختار الکترونی تغییر کرده و در اینجا به ساختاری با انرژی بیشتر گذار می‌کند. اما این حالت است ناپایدار است و الکترون‌ها تلاش دوباره در گذار به یک حالت دارای سطح انرژی پایین‌تر دارند. از آنجا که میدان الکترومغناطیس یک میدان کوانتومی است، نوسانات کوانتومی احتمال گذار اتم به حالتی با انرژی کم‌تر را می‌دهند. تفاوت انرژی در اینجا بصورت فوتون آزاد خواهد شد.

<http://de.sci.physik.narkive.com/TIW1wJZQ/atomarer-ubergang>