ساختار درونی خورشید

محمد اخلاقی

خورشید نزدیک ترین ستاره به ما و در واقع اصلی ترین ستاره برای ما موجودات زنده روی زمین می باشد. از دیرباز در رابطه با این سوال که خورشید چیست، تمدن های مختلف جواب های مختلفی داده اند، همانند یونانیان و رومیان که آن را نتیجهٔ آتشی در پشت درشکهٔ یکی از خدایان می دانستند که صبح ها از سمت شرق حرکت خود را در آسمان شروع می کند و عصر ها در راستای غرب کار خود را، که گذشتن از آسمان و نور دادن به دنیای خدایان و انسان ها است، را به خوبی انجام می دهد. به اعتقاد آنها آتشی که ما روی زمین از آن استفاده می کنیم، اولین بار توسط یکی از تیتان ها از این درشکه دزدیده شد!

دانشمندان دنیای مدرن هم به عنوان قسمتی از یک تمدن که حدودا ۴۰۰ سال از عمرش می گذرد، در این رابطه جوابی برای خود دارند، که بررسی و توضیح این جواب موضوع این مقاله می باشد. به طور کلی خورشید ستاره ای است با جرم $۱/۹۸۹ \times ۱۰^{۳۰}$ کیلوگرم که حدودا یک میلیون برابر جرم زمین می باشد، فاصلهٔ متوسط خورشید از ما حدودا ۱۵۰ میلیون کیلومتر و شعاع آن $۶/۹۵۹۹ \times ۱۰^{۸}$ متر است. درخشندگی (مقدار انرژی تابشی در واحد زمان) خورشید برابر $۳/۸۲۶ \times ۱۰^{۲۶}$ ژول بر ثانیه می باشد؛ به این معنی که در یک ثانیه انرژی مورد نیاز کشور ایران در ۵۰۰ هزار سال را تولید می کند! دمای موثر خورشید (دمای قسمتی از خورشید که ما می بینیم) حدودا ۵۷۷۰ درجهٔ سانتیگراد است. سن خورشید حدودا ۴/۵ میلیارد سال تخمین زده شده است (که در ادامه بیشتر در رابطه با آن بحث خواهیم کرد) و از لحاظ تقسیم بندی طیفی ستاره ها، خورشید ما از گونهٔ طیفی G2 می باشد.

در تحلیل های امروزی از خورشید، این ستاره را به دو قسمت عمده تقسیم می کنند؛ درون و جو. مرز جدا کنندهٔ این دو تقسیم بندی بالای قسمت همرفتی خورشید (جزوی از درون) و پایین لایهٔ فوتوسفر(جزوی از جو) می باشد. در این مقاله درون خورشید را مورد بررسی قرار خواهیم داد. جو خورشید (که داستانی کاملا متفاوت دارد) را در شمارهٔ پیشین این نشریه به چاپ رسید.

بر خلاف جو خورشید که به قدری داده های رصدی از آن وجود دارد که دانشمندان خورشید شناس برای تحلیل تمام آن داده ها به کمک احتیاج دارند! داده های ما از درون خورشید بسیار کم می باشد؛ تنها راه ما برای "دیدن" درون خورشید نوسانات با دامنهٔ بسیار کم سطح آن و نوترینو های تولید شده در مرکز خورشید می باشد.

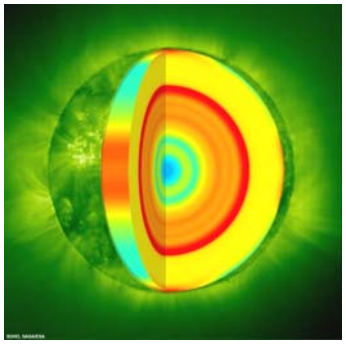
به طور کلی هنگامی که علم دست به تحلیل یک سیستم می زند، مجبور است یک سری مسائل مربوط به آن را به عنوان فرض (بدون اثبات) بپذیرد، آنگاه با استفاده از آنها و قانون های منطقی به نتایجی در رابطه با آن سیستم می رسد. نظریه ای از لحاظ علمی قوی تر است که از فرضیات کمتری استفاده کرده باشد. فرضیات علومی مانند فیزیک، شیمی و سایر علوم رایج، به قدری واضح هستند که ما هیچ وقت به آنها فکر نمی کنیم. اما در رابطه با تحلیل سیستم های خاص مانند خورشید، وجود آنها کمی واضح تر می شود. فرضیات ما در رابطه با خورشید به این شکل می باشد؛

- خورشید در تعادل هیدروستاتیک به سر می برد. به این معنی که خورشید ناپایداری خاصی ندارد. نوسانات خورشید دامنه های بسیار کمی دارند، به حدی که می توان از آنها صرف نظر کرد.
- چرخش و میدان های مغناطیسی خورشید قابل اقماض هستند؛ برای اینکه میدان ها و چرخش تاثیر به سزایی در ساختار داخلی خورشید بگذارد، باید مقداری خیلی بیشتر از مقادیر اندازه گیری شده فعلی داشته باشند.

- خورشید در هنگام ورود به مرحلهٔ "ستاره های رشتهٔ اصلی"(ZAMS, Zero Age Main Sequence) از لحاظ شیمیایی همگن بوده است. با توجه به مدل های فعلی برای تشکیل ستاره (اینکه قبل از ورود به ZAMS ستاره ها تماما همرفتی هستند) شاید ساده ترین فرض باشد.
- در طول عمر خود، خورشید در تعادل گرمایی بوده است.
- جرم کلی خورشید در تمام دوران تکامل خود ثابت بوده است؛ ما می دانیم که باد های خورشیدی و CME ها مقداری جرم از خورشید خارج می کنند، اما این مقدار به نسبت جرم خورشید بسیار کم می باشد.
- نسبت جرمی عناصر سنگین (Z) در طول زندگی خورشید بدون تغییر مانده است. همانند فرضیات قبل، می دانیم که تا حد بسیار کمی در هستهٔ خورشید تولید عناصر سنگین داشته ایم و داریم، اما این مقدار کاملا قابل اقماض می باشد.

حال که فرضیات مطرح شد، می توان گفت که روش اصلی ما در طراحی مدلی برای درون خورشید به این شکل است که ما با استفاده از فرضیات مطرح شده و پارامتر هایی که هر طراح برای خود در نظر می گیرد، خورشید نوزادی (خورشیدی که تازه به ZAMS رسیده باشد) را در نظر می گیریم و با در نظر گرفتن زمان گذشته از آن "روز!" (حدودا ۴/۵ میلیارد سال) تغییرات (با توجه به فرضیات) درون خورشید را پیش بینی می کنیم و خورشید امروزی را می سازیم. حال مدلی از نظر دانشمندان خوب می باشد که خورشیدی برای ما بسازد که از لحاظ فیزیکی شبیه به خورشید امروزی ما باشد، به زبانی دیگر هر چه مدل به خورشید امروزی شبیه تر باشد، بهتر است! در ادامه نوسانات خورشید و واکنش های هسته ای درون خورشید که تنها راه های ما برای دسترسی به درون خورشید می باشد را به همراه سن خورشید مورد بررسی قرار می دهیم.

نوسانات خورشید:


شکل ۱

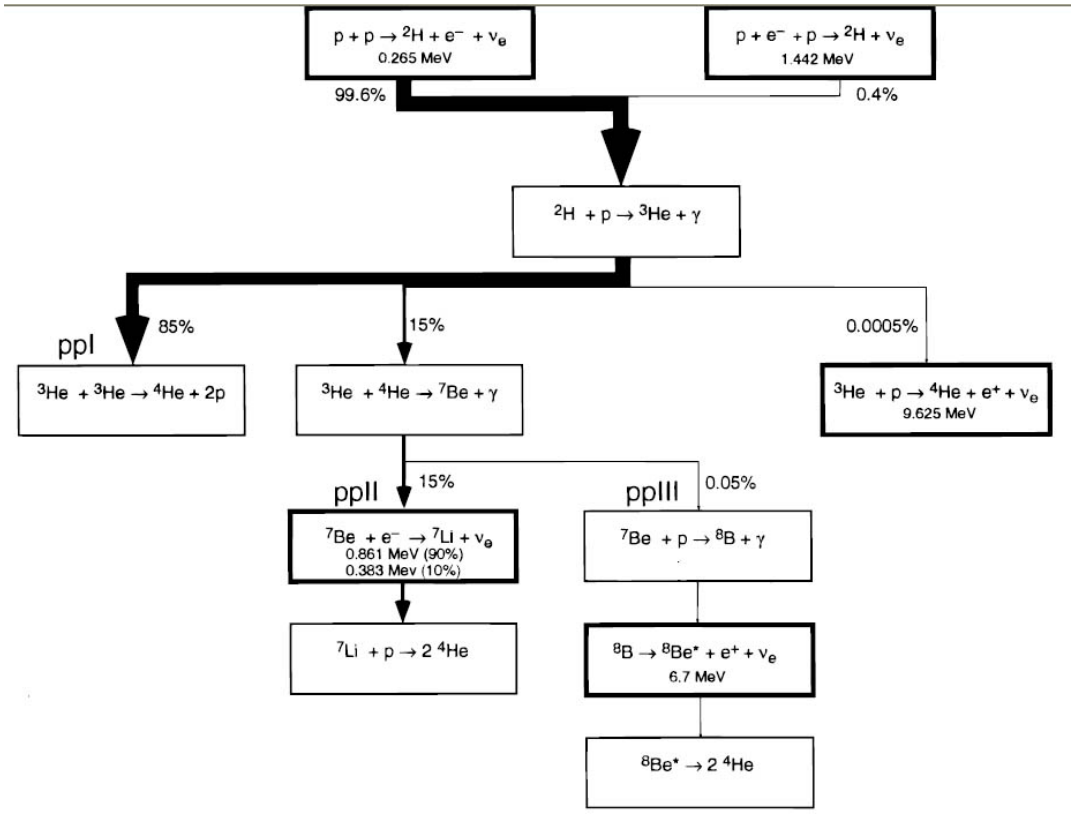
نوسانات خورشید به طور کلی دو نوع می باشند؛ نوسانات p-mode که ناشی از عوامل فشاری می باشند و نوسانات g-mode که در اثر عدم توازن در نیرو های گرانشی وارد بر یک پوستهٔ کروی از خورشید به وجود می آیند. خورشید شناسان تقریبا به همان شکلی که زمین شناسان داخل زمین را با استفاده از زمین لرزه ها می شناسند، از این نوسانات استفاده می کنند و سعی می کنند با استفاده از آنها درون خورشید را بشناسند؛ شاید شما هم شنیده باشید که *زمانی که زلزله می آید، همه ناراحت می شوند به غیر از زمین شناسان که خوشحال می شوند!!!*

واکنش های هسته ای درون خورشید:

همانطور که همگی ما از دوران راهنمایی (امیدوارم اشتباه نکرده باشم!) به یاد داریم، منبع اصلی انرژی خورشید واکنش های هسته ای می باشند که عموما به چند گروه PP I، PP II، PP III، چرخهٔ CNO و فرایند سه آلفا (Triple alpha) تقسیم می شوند، در خورشید اصلی ترین فرایند هسته ای تولید کنندهٔ انرژی (به میزان ۶۳ درصد)، فرایند PP I می باشد که به طور کلی در آن ۴ هستهٔ هیدروژن (پروتون) به یک اتم هلیوم، دو پوزیترون، دو نوترینو و دو تابش گاما تبدیل می شوند. واکنش های PP II و PP III مجموعا ۳۱ درصد و بقیهٔ واکنش ها ۶ درصد باقی مانده را تشکیل می دهند.

نوترینو ها ذرات بسیار کم جرمی هستند که احتمال برخورد آنها با هسته ها بسیار بسیار کم می باشد، طوری که در همین لحظهکه شما مشغول خواندن چیزی در مورد آنها هستید میلیارد ها نوترینو از درون بدن شما در حال گذر می باشد! ولی شما اصلا احساس نمی کنید. در هر کدام از واکنش های بالا نوترینوی حاصل انرژی

خاصی دارند، به عنوان مثال نوترینوهای به وجود آمده طی واکنش PP II، ۹۰ درصد انرژی ۰/۸۶۱ مگاالکترون ولت و ۱۰ درصد انرژی ۰/۳۸۳ مگاالکترون ولت دارند و نوترینوهای واکنش PP III، همگی با انرژی ۶/۷ مگاالکترون ولت آزاد می شوند. از طریق مشاهده کننده های (Detector) خاصی که وجود دارد می توانیم هر کدام از این نوترینو ها را به طور جداگانه تفکیک کرده و پی ببریم که چه مقدار واکنش هسته ای در درون خورشید اتفاق می افتد. جدول زیر (شکل ۲) از منبع شمارهٔ ۳ این مقاله گرفته شده است که تمام این فرایند های PP را به همراه انرژی نوترینو های هر کدام را نشان می دهد. جعبه هایی که پر رنگ شده اند واکنش هایی هستند که نوترینو آزاد می کنند.



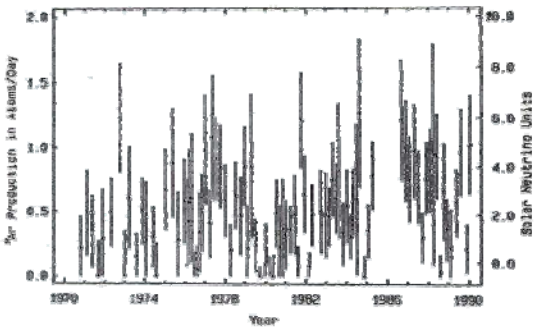
شکل ۲

سن خورشید:

سن خورشید را مدت زمانی تعریف می کنیم که خورشید از حالت ZAMS تحول پیدا کرده و به حالت فعلی خود رسیده است. با وجودی که راحت ترین کار این است که سن خورشید را برابر سن پیر ترین شهابسنگ ها قرار دهیم اما باید دقت شود که سن پیر ترین شهاب سنگ ها از سن خورشید بیشتر می باشد! در واقع ساعت های رادیواکتیو پیر ترین شهابسنگ ها در آخرین رویداد با دمای زیاد منظومهٔ شمسی اولیه صفر شده است، که قبل از این بوده است که خورشید وارد مرحلهٔ ZAMS شود. مطالعاتی که روی ستاره های T Tauri انجام شده است نشان می دهد که دیسک برافزایشی حول ستارهٔ در حال شکل گیری، زود تر از اینکه ستاره وارد ZAMS شود متمرکز می شود.

با توجه به اینکه این اختلاف زمان حدودا برابر ۱۰ ± ۴۰ میلیون سال می باشد می توان با استفاده از سن پیر ترین شهاب سنگ ها با دقت خوبی سن خورشید را ۰/۰۴ ± ۴/۵۳ میلیارد سال تخمین زد.

همانطور که گفته شد دانشمندان از این سه منبع برای "دیدن" درون خورشید استفاده می کنند. نکتهٔ عجیبی که وجود دارد این است که مدل هایی که سعی در توجیه نوسانات خورشید دارند به هیچ وجه نمی توانند تعداد نوترینوهایی که از خورشید در مشاهده گر ها ثبت می شود را توجیه کنند؛ مشکل به این صورت است که به عنوان



شکل ۳

مثـال مشـاهده گـر معـدن Homestake در آمریکـا کـه نوترینوهای فرایند های PP II و PP III را ثبت مـی کنـد، نوترینو ها را مطابق جدول روبـرو (شـکل ۳، گرفتـه شـده از منبع شـمارهٔ ۱) بـه ثبـت مـی رسـاند، کـه متوسـطی برابـر ۰/۲۶SNU ± ۲/۲۳ را نشان می دهد، در حالی که بهتـرین مدل های استاندارد برای این مشاهده گـر، مقـدار ۷/۹SNU را پیش بینی می کنند.

واحد شمارش نوترینو هـا SNU (Solar Neutrino Unit) می باشد، یک SNU، $۱۰^{-۳۶}$ برخورد بر اتم بر ثانیـه تعریـف مـی شـود. طوری که اگر $۲/۲ \times ۱۰^{۳۰}$ ذره کلر در تانک مشاهده گر باشند و روزی یک ذرهٔ آرگن (کـه در اثـــر برخورد نوترینو با یک اتم کلر به وجود می آید) به وجود بیاید، SNU ۵/۳۵ برخورد بر اتم بر ثانیـه صـورت گرفتـه است.

این مساله (که به مسالهٔ نوترینوهای خورشیدی معروف است) از حدود ۳ دههٔ پیش مطرح شـد و تـا بـه حـال جواب دقیق و قطعی برای آن پیدا نشده است. مدل هایی که سعی می کنند این تعداد نوترینـو هـای ثبـت شـده را توجیه کنند به عنوان مدل های غیر استاندارد شناخته می شوند، در حالی که مدل هـایی کـه بـر اسـاس نوسـانات خورشیدی ساخته می شوند به مدل های استاندارد معروف هستند، به این دلیل که مبنای فیزیکی آنها خیلی قـوی تر از مدل های غیر استاندارد است.

تعداد مدل ها (استاندارد و غیر استاندارد) از تعداد افرادی که روی این زمینه کار کرده اند بیشـتر مـی باشـد و بررسی آنها احتیاج به دانش فیزیک نسبتا زیادی دارد، پس در اینجا مورد بررسی قـرار نمـی گیرنـد، امـا مـی تـوان جواب مسالهٔ نوترینو ها را در شاخه ای دیگر از فیزیک نیز جستجو کرد: ذرات بنیادی. جایی که خصوصیات نوترینـو ها و سایر ذرات بنیادی مورد مطالعه قرار می گیرد. به نظر تعداد زیادی از دانشمندان مشکل نوترینو ها ممکن است از بابت دانش کم ما در رابطه این ذرات کم پیدا باشد تا مدل های غلط برای خورشید!

جواب هایی که در این زمینه داده شده است را می توان به این دو گروه تقسیم بندی کرد.

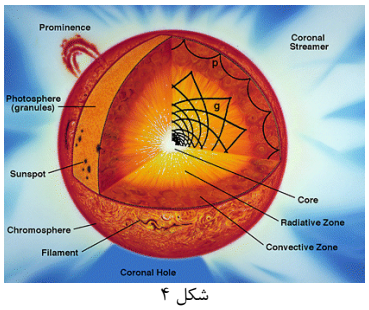
- تولیـد ذرات سـنگین ولـی کـم کـنش (Weakly Interacting Massive Particles, WIMPs)در هستهٔ خورشید؛ این ذرات فرضی در بحث های مربوط به مادهٔ تاریک در کیهانشناسـی نیز مورد بحث قرار می گیرند، ولی هنوز وجودشان به طور قطع ثابـت نشـده اسـت. در صـورتی کـه وجود این ذرات ثابت بشود می توان گفت تمام انرژی درون خورشید را نوترینو ها خارج نمـی کننـد، بلکه WIMP ها هم در انتقال انرژی سهمی دارند و این سهم را می توان برابر اختلاف شمارهٔ تعـداد نوترینوهای مشاهده شده و تعداد نوترینوهای پیشبینی شـده قـرار داد. نتـایج بدسـت آمـده توسـط WIMPها با داده های لرزه نگاری خورشیدی نیز مطابقت بهتری دارند.
- نوسان بین نوترینو ها؛ در این نظریه که به اثر MSW معروف است نوترینوهـا از سـه گونـه تشـکیل شده اند و هر نوترینو تحت شرایطی به صورت نوسانی بین این چند حالت تغییر خاصیت مـی دهـد. نوترینو های تولید شده در فرایند های PP همگی از نوع نوترینوی الکترونی هستند، اما دو نوع دیگر نیز وجود دارد؛ نوترینوی تاو و نوترینوی میو. طبق اثرMSW، این سه نوع نوترینو طی سفر خـود در خورشید به هم تبدیل می شوند. از نتایج جالب این نظریه این است که نوترینو هـا لزومـا بایـد جـرم داشته باشند طوری که $M(\nu_e)<<M(\nu_m)<<M(\nu_t)$.

به هر حال، از شکل جواب هایی که تا به حال بحث شد می توان دید که جواب مسالهٔ نوترینوهـای خورشـیدی هر چیزی که باشد می توان با قطعیت گفت که تاثیر خیلی زیادی روی فیزیک خواهد داشت؛ یا فیزیک خورشید یـا فیزیک ذرات بنیادی. اما بیایید از این مساله بیرون بیاییم و به بهترین مدلی که تمام خصوصیات خورشید را تا حـد

خوبی توجیه می کند (به غیر از مسالهٔ نوترینو ها) بپردازیم، ببینیم که دانشمندان تا به امروز به چه نتیجه ای بـرای ساختار داخلی خورشید رسیده اند...

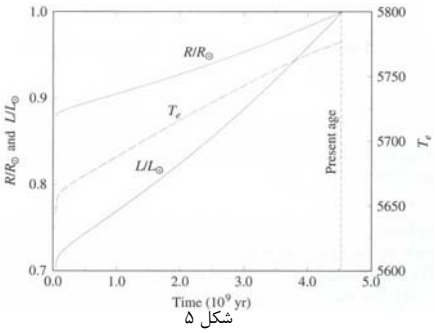
ساختار داخلی خورشید:

بیایید قرار داد کنیم که به بهترین مدل استاندارد، مدل استاندارد بگوییم (از بابت فهـم راحـت تـر). تمـام نمودار هایی که از این به بعد آمده است از منبع شمارهٔ یک گرفته شده اند.



شکل ۴

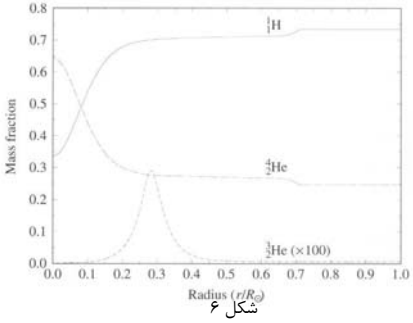
با توجه به مدل استاندارد ساختار کلی خورشـید در شـکل مقابـل (شکل ۴) نمایش داده شده است. در نمودار هایی که در ادامـه آمـده اسـت، جزییات این شکل را بهتر خواهید فهمید. طبق مدل استاندارد درصد وزنـی هیـدروژن (X) و هلیـوم (Y) در خورشـید اولیـه (ZAMS) بـه ترتیـب ۷۱درصد و ۲۷درصد بوده است و امـروزه ایـن فراوانـی در هسـته بـه دلیـل فرایند های هسته ای به میزان X=۳۴ و Y=۶۴ تغییـر پیـدا کـرده اسـت. لازم به ذکر است که چون در دیگر مناطق واکنش هسته ای صورت نگرفته است، فراوانی این عناصر در دیگر مناطق با فراوانی در ZAMS برابر است.



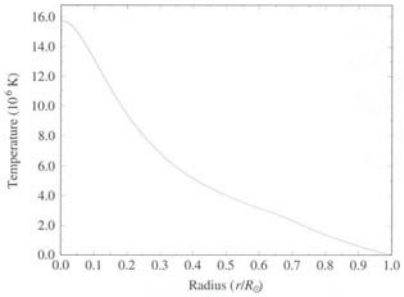
شکل ۵

در شـکل مقابـل (شـکل ۵) مـی توانیـد تغییـرات شـعاع خورشید (R)، دمای موثر خورشـید (T_e) و درخشـندگی خورشـید (L) را در طول زمان ببینید. همانطور که واضح است، در طول زمان هر سهٔ این متغیر ها افزایش نشان داده اند.

در شکل ۶، می توانید فراوانی عناصر هیدروژن، هلیوم و یک ایزوتوپ از هلیوم(^3_2He) که طی فرایند های PP به وجود می آید ببینید. همانطور که در شکل معلوم است، ^3_2He فقط در یک قسمت از شعاع، کمی زیـاد مـی شود. این قسمت حدودا جایی است که دیگر دما به حدی نیست که فرایند های هسته ای بتوانند زنجیر های PP را کامل کنند و فقط به تولید این ایزوتوپ می رسند(در نظر داشته باشید که فراوانی این عنصـر در ۱۰۰ ضـرب شـده است). در شکل ۷ می توانید تغییرات دما در داخل خورشید را از هسته تا پوستهٔ خورشید ببینید؛ در هسـته حـدود ۱۶ میلیون درجهٔ کلوین و در پوسته حدود ۵۷۷۰ درجه.

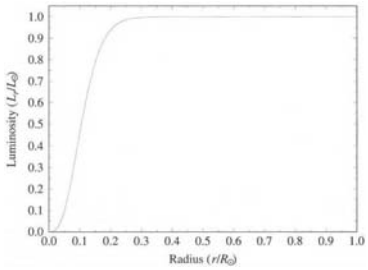


شکل ۶

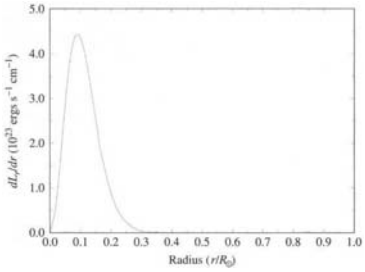


شکل ۷

در دو شکل زیر (اشکال ۸ و ۹) می توانید به ترتیب نمودار درخشندگی بر شعاع و تغییرات درخشندگی بر حسب شعاع (مشتق درخشندگی بر شعاع، که در واقع به معنی تولید انرژی است) بر شعاع را ببینید. همانطور که معلوم است، بیشترین تولید انرژی در حدود شعاع ۰/۱ شعاع خورشید صورت می گیرد.

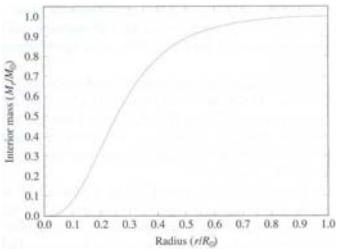


شکل ۸

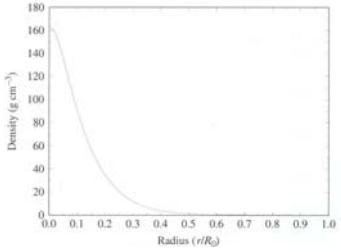


شکل ۹

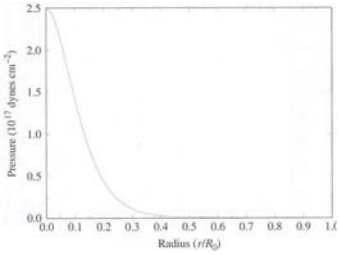
نمودار جرم بر حسب شعاع، چگالی بر حسب شعاع و فشار بر حسب شعاع را نیز می توانید به ترتیب در شکل های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ ببینید. از نمودار جرم معلوم است که بیشتر از ۹۰ درصد جرم خورشید حدودا در ۰/۶ شعاع خورشید می باشد.



شکل ۱۰

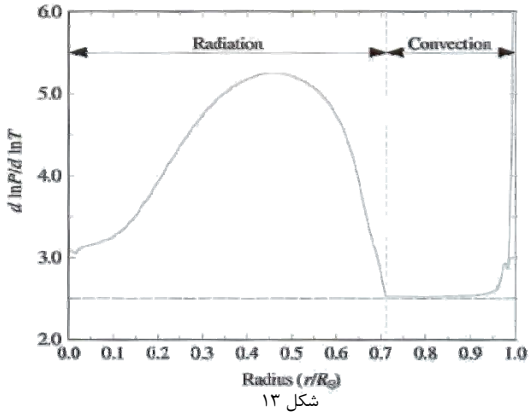


شکل ۱۱



شکل ۱۲

در نهایت بیایید ببینیم که در چه قسمت از خورشید انتقال انرژی از طریق جریان های همرفتی صورت خواهد گرفت و در چه قسمت از طریق تابش. از طریق تحلیل های سادهٔ هیدرودینامیکی معلوم می شود که شرط انتقال حرارت از طریق جریان های همرفتی این است که تغییرات $\ln P$ (لگاریتم بر پایهٔ عدد نپر فشار) بر حسب $\ln T$ (لگاریتم بر پایهٔ عدد نپر دما) باید کمتر از ۲/۵ باشد: $\frac{d\ln P}{d\ln T} \le 2.5$. با در نظر گرفتن مدل استاندارد این شرط فقط در حدود ۰/۷ شعاع خورشید تا حدود سطح صورت می گیرد، همانطور که در شکل ۱۳ می توانید ببینید.



شکل ۱۳

بحث در رابطه با ساختار داخلی خورشید اینجا به پایان می رسد، اما همانطور که در قسمت های قبلی هم گفته شد، همهٔ این نتایجی که در قسمت آخر آورده شد بر پایهٔ مدل استاندارد است. باید منتظر بمانیم تا دانشمندان جوابی برای مسالهٔ نوترینوهای خورشیدی پیدا کنند که خوشبختانه به نظر می آید خیلی به آن نزدیک شده اند. خیلی کار باید انجام شود تا بتوان این مساله را حل کرد، پس همانطور که می بینید هنوز ما راه بلندی جلوی خود داریم تا با اطمینان خاطر بتوانیم بگوییم که نزدیک ترین ستاره به خود را شناخته ایم!

منابع:

- Carroll B. W. & Ostlie D. A. (1996). An introduction to modern stellar astrophysics. Addison-Wesley Publishing Company, Inc. US.
- Gough D.O. (1981). Solar interior structure and luminosity variations. Solar physics 74 (1981)21-34.
- Guenther D. B. & Demarque P. (1997). Seismic tests of the sun's interior structure, composition, and age, and implications for solar neutrinos. The Astrophysical Journal, 484:937-959.
- Priest. E.R. (1984). Solar MagnetoHydroDynamics. Reidel Publishing Company. Dordrecht, Holland.
- Riazi N. Astrophysics. To be published

این فایل از آدرس زیر دریافت شده است:

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