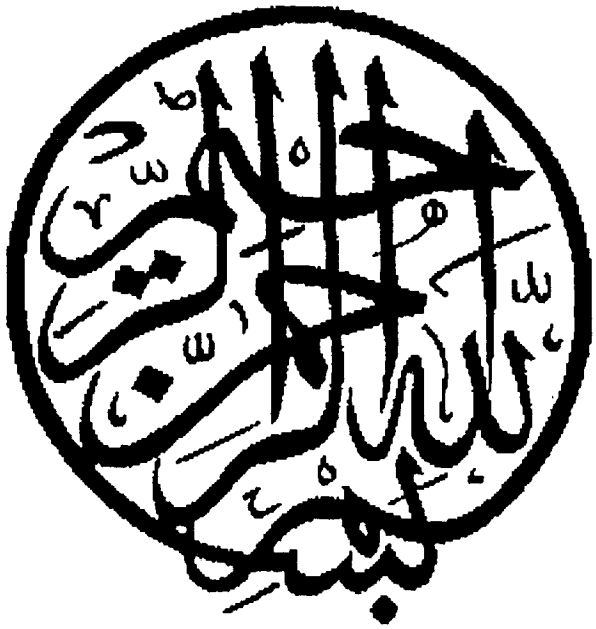

٣١٦٧٢

۱۳۷۹ /۶/ ۱۰

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
تحویل مدارک

دانشگاه تهران

دانشکده علوم - گروه فیزیک

عنوان پایان نامه:

نوسان نوترینو در ماده خورشیدی
و
گشتاور مغناطیسی نوترینو

استاد راهنما:

دکتر مسعود علیمحمدی

8229

دانشجو:

رضا رمضانی آرانی

۳۱۶۷۲

« بسمه تعالی »

اداره تحصیلات تکمیلی دانشگاه

احتراماً باطلاع می‌رساند که جلسه دفاع از پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد آقای xxxx رضا رمضانی آرانی

تحت عنوان :

" نوسان نوترنیو در ماده خورشیدی و گشتاور مغناطیسی نوترنیو "

در تاریخ ۷۸/۱۱/۳۰ در محل دانشکده علوم دانشگاه تهران برگزار گردید.

هیأت داوران براساس کیفیت پایان‌نامه، استماع دفاعیه و نحوهٔ پاسخ به سؤالات، پایان‌نامه ایشان را برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته فیزیک معادل با شش واحد با نمرهٔ ۱۸٫۵ (هیجده و پنج دهم) بادرجهٔ مورد تأیید قرار دارد.

هیأت داوران

سمت	نام و نام خانوادگی	مرتبهٔ دانشگاهی - دانشگاه	امضاء
۱ - استاد راهنما	دکتر مسعود علیمحمدی	دانشیار - دانشگاه تهران	
۲ - استاد مشاور	دکتر مجید مدرس	استاد - دانشگاه تهران	
۳ - استاد مدعو	دکتر احمد شریعتی	استادیار - مرکز تحصیلات تکمیلی زنجان	احمد شریعتی
۴ - استاد مدعو			
۵ - نمایندهٔ تحصیلات تکمیلی گروه	دکتر محمدتقی توسلی	دانشیار - دانشگاه تهران	

سرپرست تحصیلات تکمیلی گروه

دکتر محمدتقی توسلی

مدیر گروه

دکتر هوشنگ روحانی نژاد

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده

دکتر رسول اخروی

تقدیر و تشکر

از زحمات بی شائبه و عالمانهٔ استادنستوه **دکتر مسعود علیمحمدی** که در تهیه و تدوین این پایان نامه، این شاگرد حقیر را یاری نموده اند، تقدیر و تشکر می نمایم.

جادارد که در این موضع، از زحمات اساتید گرانقدر، **دکتر مسعود علیمحمدی، دکتر محمد خرّمی، دکتر محمد تقی توسلی، دکتر علی پذیرنده** و دیگر عزیزان که در این دورهٔ تحصیلی توفیق کسب علم از آنها را داشته ام، خالصانه تشکر نمایم. امیدوارم که منش و فضائل آنها سرمشق من در راه علم و عمل باشد.

رضا رمضانی آرانی

- چکیده ۱
- مقدمه ۲
فصل اول: پیرامون خورشید ۶
۱-۱ مدل استاندارد خورشیدی ۷
۱-۲-۱ دوران خورشید ۱۰
۱-۲-۲ لکه‌های خورشیدی ۱۰
۱-۳ چگالی ذرات در داخل خورشید ۱۱
۱-۴ فعل و انفعالات هسته‌ای خورشید ۱۲
۱-۵ آزمایش‌های نوترینوهای خورشیدی ۱۵
فصل دوم: نوسانات خلأ ۱۸
۲-۱ معادله انتشار نوترینو در خلأ ۱۹
۲-۲ نوسانات نوترینو در خلأ ۲۰
۲-۳ نوسانات نوترینو بین دو طعم ۲۳
۲-۴ نوسانات نوترینو در خلأ، حالت سه طعمی ۲۵
فصل سوم: نوسانات ماده ۲۷
۳-۱ معادله انتشار نوترینو در ماده ۲۸
۳-۲ جواب معادله انتشار نوترینو در حالت دو طعمی ۳۰
۳-۳ انتشار نوترینو در ماده با چگالی متغیر ۳۴
فصل چهارم: نوسانات خلأ و ماده در خورشید ۳۷
۴-۱ انتشار نوترینو از طریق ماده خورشیدی ۳۸
۴-۲ هامیلتونی نوسانات خلأ و ماده ۴۰
فصل پنجم: اثر میدان مغناطیسی خورشید بر روی نوترینو ۴۳
۵-۱ گشتاور مغناطیسی نوترینو ۴۴
۵-۲ نوترینوهای دیراک و مایورانا ۴۵
۵-۳ ماتریس گذار مربوط به گشتاور مغناطیسی ۴۶
۵-۳-۱ هامیلتونی نوترینوهای مایورانا ۴۷
۵-۳-۲ هامیلتونی نوترینوهای دیراک ۴۸

۵-۴ محاسبه ویژه مقادیر هامیلتونی‌ها ۵۰
۵-۵ آمیزش بیشینه ۵۱
۵-۶ ویژه مقادیر H_{Maj} ۵۴
۵-۷ زاویه آمیزش H_{Maj} ۵۸
۵-۸ ویژه مقادیر نوترینوهای دیراک ۶۰
۵-۹ زاویه آمیزش نوترینوهای دیراک ۶۴
فصل ششم: تقریب آدیاباتیک و حدود آن ۶۵
۶-۱ محاسبه احتمال تبدیل ۶۶
۶-۲ انواع تشدید ۷۴
۶-۲-۱ تشدید نوترینوهای مایورانا ۷۴
۶-۲-۲ تشدید نوترینوهای دیراک ۷۸
۶-۳ حدود شرط آدیاباتیکی ۸۲
۶-۴ تصحیحاتی بر تقریب آدیاباتیک ۸۳
۶-۵ محاسبه احتمال کل تبدیل ۸۹
۶-۶ نمودارهای احتمال تبدیل آدیاباتیک و غیر آدیاباتیک ۹۱
ـ فرهنگ لغات ۹۷
ـ منابع ۹۹

چکیده

در این پایان نامه، بعضی از برهم کنش‌هایی را که یک نوترینو می‌تواند تجربه کند بررسی خواهیم کرد. به طور مشخص تجارب یک نوترینوی خورشیدی از لحاظ تولید تا رسیدن به آشکار ساز زمینی را بررسی خواهیم کرد. این تجارب شامل نوسانات خلا، نوسانات ماده و برهم کنش با میدان مغناطیسی خورشید است. انواع پدیده‌های تشدیدی ممکن بررسی خواهد شد. حالتهای تبدیل آدیاباتیک و تصحیحات آن مطالعه می‌شود. با بدست آوردن احتمال تبدیلات، خواهیم دید که یک اختلاف مربع جرمی $\Delta m^2_{21} \sim 10^{-8} eV^2$ و گشتاور مغناطیسی $\mu \sim 10^{-12} \mu_B$ می‌تواند ما را در پاسخ به «معمای نوترینوهای خورشیدی» کمک کند.

مقدمه:

جهانی که ما درآن زندگی می‌کنیم ،سراسر پرسش و پاسخ است. اما همیشه پاسخ‌ها به گونه‌ای رفتار می‌کنند که خود زایندهٔ سوالات دیگری هستند که این سوالات همیشه چندین برابر تعداد پاسخ‌ها است. به عبارتی میزان پرسش‌ها و ابهاماتی را که به کوله بار ما می‌افزاید، چندین برابر معلوماتی است که کسب می‌کنیم. این خاصیت طبیعت ما را برآن می‌دارد که برای پیدا کردن جواب سوالات، تلاش افزاینده‌ای از خود نشان دهیم تا شاید بتوانیم به جایی برسیم که کفهٔ ترازوی معلومات سنگین‌تر از مجهولات شود که امیدواریم چنین نشود. زیرا که اگر چنین شد، حرص و طمع انسان برای درک حقایق کاهش می‌یابد.

در پیرامون ما بسیاری از مخلوقات وجود دارند که آنقدر اطلاعات ما از آنها کم است که گویا اصلاً ازآنها بی خبریم. یکی از این موجودات، نوترینو می‌باشد. برای اولین بار در سال ۱۹۳۳، وجود نوترینوها توسط پاولی پیش بینی شد و در سال ۱۹۵۳ توسط راینس برای اولین بار آشکار سازی شدند.

در مدل استاندارد فیزیک ذرات بنیادی، نوترینوها بدون جرم فرض می‌شوند. ذره‌ای که دارای جرم نباشد ، انرژی آن با عملگر هلیسیتی $\vec{\sigma}.\hat{p}$ جابجا می‌شود. به عبارت دیگر هلیستی که نشانده چپ دستی و یا راست دستی ذره است یک کمیت پایسته است. از دیدگاه مدل استاندارد، نوترینوها دارای هلیستی منفی هستند (چپ دست هستند).

اگر نوترینو دارای جرم باشد، میزان عدم پایستگی هلیستی از مرتبه m/E است که m جرم سکون نوترینو و E انرژی آن است. از آن جا که نوترینوها ذرات فوق نسبیتی هستند، این کسر بسیار کوچک است.

جرمدار بودن این ذرات می‌تواند باب یک بحث نظری بسیار جالبی به نام نوسان نوترینو را باز کند. اگر نوترینوها دارای جرم باشند، دراین صورت مشابه قسمت هادرونی، یک ماتریس

آمیزش وجود خواهد داشت که قسمتهای مختلف لپتونی را در هم خواهد آمیخت و بدین ترتیب یک نظریه به تقارن‌های طبیعت افزوده خواهد شد و شباهت هادرونی - لپتونی کامل خواهد شد. البته نباید فراموش کنیم که طبیعت همیشه آن طور که دلخواه ما باشد، متقارن نیست و ممکن است این ساخته‌های نظری توافقی با عمل نداشته باشد.

اگر مشابه قسمت هادرونی، در قسمت لپتونی هم یک ماتریس آمیزش شبیه U_{KM} وجود داشته باشد، در این صورت ما قادر خواهیم بود که ویژه حالتهای طعم لپتونی را به صورت برهم نهی خطی از ویژه حالتهای جرمی بنویسیم. بنابراین ویژه حالت‌های طعم و جرم همزمان قطری نمی‌شوند. دراین صورت نوترینویی که حرکت خود را در خلأ با یک طعم معین مثلا الکترونی شروع می‌کند، در طول مسیر حرکت خود به طور متناوب تغییر طعم می‌دهد. به این تغییرات تناوبی ،نوسانات خلأ می‌گوییم. از طرف دیگر اگر نوترینو از یک محیط مادی عبور کند، می‌تواند در اثر برهم کنش باذرات محیط شامل الکترون، پروتون، نوترون و... پراکنده شود.

نوسانات ماده موقعی ایجاد می‌شود که نوترینوهای با طعم مختلف بر هم کنش‌های متفاوتی انجام دهند. به عنوان مثال اگر محیط شامل ذرات μ,τ نباشد، نوترینوهای الکترون در بر هم کنش‌های ضعیف باردارو خنثی باالکترون شرکت می‌کنند، در حالیکه به جهت پایستگی عدد لپتونی، نوترینوهای دیگر فقط در بر هم کنش‌های با جریان خنثی شرکت می‌کنند. این اختلاف پتانسیل ناشی از جریان ضعیف باردار، باعث متفاوت شدن نحوه انتشار ν_e نسبت به ν_τ,ν_μ خواهد شد. اگر چگالی الکترونی محیط مادی ثابت فرض شود، خواهیم دید که نوسانات ماده چیزی شبیه نوسانات خلأ می‌شود. اما اگر چگالی تعداد الکترونها متغیر باشد ،در این صورت تحت شرایط خاصی، میزان تبدیلات طعمی میتواند قابل ملاحظه باشد. به این حالت، حالت تشدید MSW می‌گوییم.

خاصیت دیگر نوترینو، داشتن گشتاور دو قطبی الکتریکی و یا مغناطیسی است. ازدیدگاه مدل استاندارد، نوترینوها دارای گشتاور مغناطیسی و یا الکتریکی نیستند. اما آزمایشات زیادی که

انجام شده است مؤید این مطلب است که نوترینوها دارای گشتاور مغناطیسی هستند. اینکه میزان آن چقدر است ،آزمایشهای مختلف حدود مختلفی را برای آن برآورد کرده‌اند که تعدادی از آنها در قسمتهای بعد به طور خلاصه ذکر خواهند شد. اگر برای نوترینو، گشتاور مغناطیسی در نظر بگیریم، در این صورت می‌تواند با میدان مغناطیسی برهم‌کنش انجام دهد. این بر هم کنش‌ها می‌تواند باعث اعمال یک نیرو به ذره شود که باعث تغییر جهت اسپین می‌شود که در نتیجه باعث تغییر کایرالیتی ذره شود. این وارونی اسپین می‌تواند همراه باتغییرات طعم هم باشد. حتما توجه داریم که به دلیل وجود جمله برهم کنش مغناطیسی در هامیلتونی، دیگر هلیسیتی پایسته نیست و تغییرات کایرالیتی نوترینوها مجاز می‌باشد.

هدف ما از طرح تمام این خصوصیات نوترینو، ارائه یک پاسخ پیشنهادی به «معمای نوترینوهای خورشیدی» می‌باشد. مدل استاندارد خورشیدی براساس مطالعه انواع فرایندهای داخل خورشید و محاسبات رایانه‌ای دقیق برای انواع نوترینوهای ایجاد شده در فعل وانفعالات هسته‌ای در داخل خورشید، شارهایی را پیش بینی می‌نماید [۵]. محاسبات این مدل دارای دقت قابل قبولی است از طرفی آزمایش‌های متعددی که انجام شده است و چند مورد از آنها در متن به طور خلاصه آمده است، بیانگر اختلاف فاحشی بین مقادیر تجربی و مقادیر نظری است. اختلاف‌ها به قدری است که نمی‌تواند ناشی از خطاهای مدل استاندارد خورشیدی باشد. بنابراین ما سعی می‌کنیم که تصحیحاتی را بر روی مراحل انتشار نوترینو انجام دهیم.

اگر چه نوسانات ماده و اثر تشدیدی MSW می‌تواند پاسخگوی «معمای نوترینوهای خورشیدی» باشد، ولی رویداد دیگری ما را تحریک می‌کند که اثر گشتاور مغناطیسی را مطالعه کنیم. بعضی از آزمایش‌ها مانند آزمایش دیویس، نشان می‌دهد که میزان شار اندازه‌گیری شده رابطه معکوس (پادبستگی) با فعالیتهای خورشیدی دارد، یعنی در هنگامیکه خورشید فعال‌تر است و دارای میدان مغناطیسی قوی‌تر، شار اندازه‌گیری شده کاهش می‌یابد و برعکس. این عامل محرکی برای بررسی اثر میدان مغناطیسی بر روی انتشار نوترینو می‌شود. با توجه به مطالب گفته شده، روند کاری ما به صورت زیر خواهد بود.

ابتدا خلاصه‌ای از مدل استاندارد خورشیدی و مفاهیم موجود درآن را بیان خواهیم کرد. سپس درفصل دوم نوسانات نوترینو در خلأ را مورد بررسی قرار خواهیم داد. در فصل سوم اثرات ماده را بر انتشار نوترینو بررسی کرده و خواهیم دید که نوسانات ماده در صورتی روی میدهد که یک زاویه آمیزش خلأ هر چند کوچک وجود داشته باشد. در فصل چهارم به روش متفاوتی با دو فصل قبل هامیلتونی مربوط به اثر نوسانات خلأ و ماده را در پایهٔ ویژه حالتهای طعم بدست خواهیم آورد و به طور مشخص برای انتشار نوترینو در ماده خورشیدی بدست خواهیم آورد. در فصل پنجم، ابتدا چند آزمایش را که حدودی برای گشتاور مغناطیسی نوترینو بدست آورده‌اند، ذکر می‌کنیم و سپس با معرفی کردن نوترینوهای دیراک و مایورانا، هامیلتونی‌های مربوط به برهم کنش مغناطیسی را نوشته و در مجموع هامیلتونی کل شامل نوسانات خلأ و اثر ماده و اثر میدان مغناطیسی را در یک جا جمع آوری می‌کنیم. در این فصل همچنین اثرات میدان را مورد مطالعه قرار می‌دهیم و می‌بینیم که تحت شرایطی می‌تواند تبدیلات قابل ملاحظه‌ای صورت بگیرد که این مسئله ناشی از متغیر بودن چگالی الکترونی خورشید است.

در فصل ششم، تقریب آدیاباتیک و میزان اعتبار آن در ناحیه‌ای که تشدید صورت می‌گیرد، مورد بحث قرار خواهد گرفت. سپس انواع تبدیلات تشدیدی را که می‌تواند در داخل خورشید روی دهد، مورد بررسی قرار خواهیم داد. در این فصل خواهیم دید که در ناحیه تشدید امکان از کار افتادن تقریب آدیاباتیک وجود دارد. در آن صورت نحوه اصلاح تبدیلات را بررسی نموده و احتمال کل تبدیل رابدست خواهیم آورد. سپس با استفاده از نمودارهای احتمال ثابت، میان سازگاری بحث نظری خود با داده‌های آزمایش‌های مختلف را بررسی خواهیم کرد.

فصل اول:

پیرامون خورشید

۱-۱ مدل استاندارد خورشیدی

نور ساطع شونده از خورشید که نور سپهر نامیده می‌شود ،همچون حجابی، خورشید را از چشم‌ها پوشیده نگه می‌دارد. از این رو ما هیچگاه نمی‌توانیم لایه‌های درونی خورشید را ببینیم. اما براساس مشاهدات این سطح و یافته های فیزیکی بدست آمده، اختر فیزیکدان‌ها مدلی برای ساختار درونی خورشید ارائه کرده‌اند. این مدل همانند مدل‌های سایر ستاره‌ها و تحولات آنها ،براساس قوانین فیزکی و روابط ریاضی بیان کننده این قوانین، به صورت مدل‌ها و شبیه‌سازی‌های رایانه ایست. از بین مدل‌های متفاوت قابل قبول‌ترین آنها مدلی است که با تجربیات تطابق بهتری داشته باشد و پاسخگوی پرسش‌های گوناگون باشد.

مدل متعارفی که برای خورشید ارئه شده است، « مدل استاندارد خورشیدی » است.

براساس مدل استاندارد ،درون خورشید به سه ناحیه تقسیم میشود:

الف) ناحیه مرکزی یا هسته خورشید:

هسته خورشید، در واقع کوره خورشید است. در این ناحیه ،انرژی اصلی خورشید که میلیاردها سال دوام دارد، تولید می‌شود.

منشأ این انرژی تبدیلات هسته‌ای است. خورشید اکنون در مرحله هیدروژن سوزی است ؛ یعنی چهار هسته هیدروژن (پروتون) طی مراحل مختلف با هم ترکیب می‌شوند. و هسته اتم هلیم ^{4}He رامی سازند. در طی این فرایند مقداری جرم به انرژی تبدیل می‌شود. محاسبات رایانه‌ای نشان داده‌اند که دمای مرکز خورشید حدد ۱۵ میلیون کلوین است. هر چقدر که به سمت لبه ناحیه مرکزی نزدیک می‌شویم، از این دما کاسته می‌شود.

ب) ناحیه تابشی:

بعد از هسته مرکزی ناحیه تابشی قرار دارد. این ناحیه در در فاصله $۰/۰۴R_s<r<۰/۷R_s$ قرار

دارد [۱]. در مرکز خوشید، دمای زیاد عامل سرعت زیاد اتمها می‌باشد. به علت زیاد بودن چگالی (حدود صد و پنجاه هزار کیلوگرم بر متر مکعب)، اتمها بشدت به هم برخورد می‌کنند. طی این برخوردها اتمها یونیزه شده و الکترون از دست می‌دهند. این الکترون‌ها، فوتون‌ها را جذب و سپس گسیل می‌کنند به عبارت دیگر هسته مرکزی که محل همجوشی هسته‌ها می‌باشد، نسبت به نور شفاف است. هنگام دور شدن از هسته خورشید، دما و چگالی ماده کاهش پیدا می‌کند، در نتیجه الکترون‌ها فرصت ترکیب با هسته‌ها را پیدا می‌کنند. هر چقدر که تعداد هسته‌های دارای الکترون اضافه می‌شود، احتمال جذب فوتون زیاد می‌شود به طوریکه وقتی به فاصله دویست- هزار کیلومتری از سطح خورشید می‌رسیم، تقریبا تمام فوتون‌ها جذب می‌شوند. این جذب‌ها باعث حرکت بسیار کند فوتون‌ها در داخل خورشید می‌شود. به طوریکه مدت زمان بسیار زیادی طول می‌کشد تا انرژی یک فوتون گسیلی از مرکز خورشید به سطح خورشید برسد.

اکنون این سوال مطرح است که انرژی فوتون‌ها کجا می‌رود؟ چرا که اگر فوتون‌ها در خورشید جمع شوند، تراکم انرژی باعث انفجار خورشید می‌شود .

این واقعیت که ما نور مرئی خورشید- آفتاب- را می‌بینیم، گویای این واقعیت است که این انرژی از خورشید خارج می‌شود.

ج) ناحیه همرفت

پاسخ به سوال بالا، انتقال همرفتی گرما است. این پدیده برای ما آشناست. این پدیده باعث انتقال گرمای بخاری به تمام نقاط اتاق است. هوای داغ اطراف بخاری منبسط شده و به سمت بالا حرکت می‌کند و هوای سرد جای آن را می‌گیرد. این عمل در نهایت باعث تعادل گرمایی در تمام نقاط اتاق می‌شد .

در خورشید انرژی‌های درونی به طریق همرفتی به سطح خورشید می‌رسند و در آنجا عمدتاً به صورت نور و دیگر پرتوهای الکترومغناطیسی مانند اشعه ایکس و فرابنفش به خارج گسیل

می‌شوند. این انتقال گرما شبیه اتفاقی است که در یک کتری آب در حال جوشیدن روی میدهد. در کتری انرژی به صورت حبابی از بخار آب به سطح آمده ،در سطح پس از گسیل مولکول‌های داغ به بیرون، آب سرد شده دوباره به درون کتری بر می‌گردد. در خورشید هم مواد داغ به سمت سطح خورشید حرکت می‌کنند و در سطح خورشید انرژی از دست می‌دهند و دوباره به داخل خورشید برمی‌گردند. البته فرایند همرفتی در خورشید، پیچیده‌تر از توصیف بالا است. در واقع ناحیه همرفت از سلول هایی تشکیل شده که به صورت سلسله مراتب روی هم قرار دارند. اندازه این سلولها باعمق خورشید تغییر می‌کند. سلولهای داخلی دارای ابعادی از مرتبه چند ده هزار کیلومتر هستند. با حرکت به طرف سطح خورشید، اندازه سلول‌ها کاهش می‌یابد، به طوریکه سلولهای خارجی دارای اندازه‌ای از مرتبه هزار کیلومتر هستند. این سلول‌های خارجی را ما روی سطح خورشید می‌بینیم. بعضی ازآنها نقاط روشن هستند که بیانگر اینست که در اینجا مواد داغ بیرون می‌آیند و بعضی ازآنها تاریک هستند که نشان دهنده این واقعیت است که مواد گرما از دست داده و سرد شده‌اند. ناحیه همرفت دربازه $۰/۷R_s < r < R_s$ قراردارد.

د) ناحیه نور سپهر:

در فاصله‌های بسیار دور از مرکز خورشید، گازها بسیار رقیق می‌شوند به طوریکه ماده لازم برای عمل همرفت وجود ندارد. این ناحیه از خورشید، لایه نور سپهر نامیده می‌شود. هنگامیکه به وسیله یک تلسکوپ مجهز به صافی‌های مخصوص به خورشید نگاه کنیم، آن را به صورت قرصی با سطح مشخص خواهیم دید اما خورشید یک جسم گازی است و سطح جامدی ندارد. این سطح مشاهده شده را سطح نور سپهر می‌نامند .نور سپهر چهارصد کیلومتر ضخامت دارد و چگالی آن یک ده هزارم چگالی جو زمین است و دمای آن ۵۸۰۰ کلوین است. نور مرئی خورشید از این قسمت گسیل می‌شود. فوتون هایی که به این ناحیه می‌رسند، به علت چگالی بسیار کم ماده، تقریبا آزادانه حرکت می‌کنند و گرما به صورت تابش ازآن گسیل می‌شود.

مرکز اطلاعات و منابع علمی ایران
تهیه مدارک