دانشکده علوم-گروه فیزیک

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

گرایش ذرات بنیادی

مطالعه انتشار نوترینو از ماده ستاره نوترونی

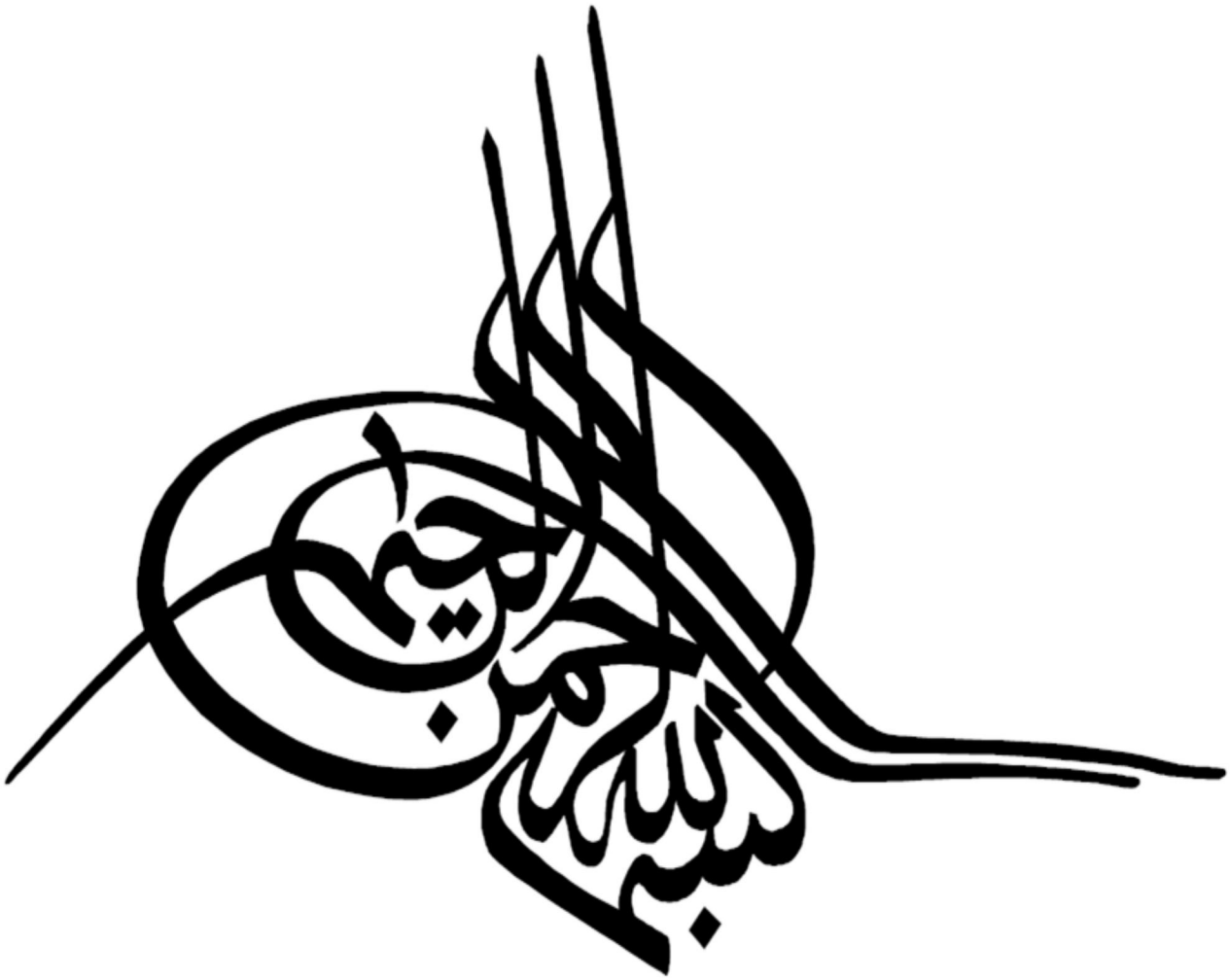
فاطمه رابط

اساتید راهنما:

دکتر محسن بیگدلی

دکتر غلامحسین بردبار

بهمن ۱۳۸۹


بسم الله الرحمن الرحيم

سپاسگزاری

استاد گرانقدر جناب آقای دکتر بیگدلی و جناب آقای دکتر بردبار، از راهنمایی ها و زحمات شما از صمیم قلب تشکر و قدردانی میکنم.

از خانواده عزیزم به خاطر حمایت های بی دریغشان بینهایت ممنونم.

چکیده

ستاره های نوترونی تجلی برخی از چگالترین اجرام بزرگ در جهان می باشند. آن ها آزمایشگاه های اخترفیزیکی ایده آل برای تست تئوری های فیزیک ماده چگال و ایجاد ارتباط بین فیزیک هسته ای، فیزیک ذرات بنیادی و اخترفیزیک به شمار می آیند. ستاره های نوترونی می توانند شرایط و پدیده هایی را که در هر جا یافت نمی شوند از جمله ماده هایپرونی، ابرشارگی، ابررسانایی و میدان های مغناطیسی متجاوز از $۱۰^{۱۳}$ گوس را فراهم کنند. بنابراین ستاره های نوترونی سیستم های ارزشمندی برای مطالعه به شمار می روند. در این رساله به مطالعه شرایطی می پردازیم که تحت آن فرآیند اورکای مستقیم در سرمایش ستاره نوترونی اتفاق می افتد. حضور فرآیند اورکای مستقیم را برای ماده ی بدون برهمکنش و همچنین با در نظر گرفتن برهمکنش بین ذرات ماده ی ستاره نوترونی با فرض پتانسیل های $AV_{۱٤}$ ، $AV_{۱۸}$ و $Reid۹۳$ بررسی کرده ایم. کسر پروتون ها و چگالی بحرانی را برای پتانسیل های ذکر شده برای ماده npe و همچنین برای ماده ی $npe\mu$ محاسبه کرده ایم.

در ضمن ماده ستاره نوترونی بدون خاصیت ابرشارگی و مخلوطی از نوترون ها ، پروتون ها و لپتون ها در نظر گرفته شده است.

کلید واژه: سرمایش ستاره نوترونی، انتشار نوترینو، فرآیند اورکای مستقیم

فهرست مطالب

۱ مقدمه **۹**

۱.۱ ستاره ی نوترونی و تحول آن ۱۰

۲.۱ ساختار ستاره ی نوترونی ۱٤

۳.۱ ماده ی ستاره ی نوترونی ۱۸

٤.۱ رصد ستاره نوترونی ۲۰

۲ سرمایش ستاره نوترونی **۲٤**

۱.۲ انتشار نوترینو از پوسته ۲٤

۲.۲ انتشار نوترینو از هسته ۲۷

۱.۲.۲ فرآیند اورکای مستقیم ۲۹

۲.۲.۲ شرایط وقوع فرآیند اورکای مستقیم الکترونی ۲۹

۳.۲.۲ شرایط وقوع فرآیند اورکای مستقیم میوئونی ۳۱

٤.۲.۲ قابلیت انتشار ۳۳

۳.۲ زمان سرمایشی فرآیند اورکای مستقیم ۳٦

۱.۳.۲ انرژی سیستم ۳٦

۲.۳.۲ ذرات کل سیستم ۳۷

۳.۳.۲ زمان سرمایشی ۳۸

۳ آستانه وقوع فرآیند اورکای مستقیم **٤٠**

۱.۳ ماده ی هسته ای نامتقارن بدون برهمکنش ٤٠

۲.۳ ماده هسته ای نامتقارن برهمکنشی ٤٤

۱.۲.۳ انرژی تقارن ٤٤

۲.۲.۳ کسر پروتونی ٥١

۳.۲.۳ ماده ستاره نوترونی و چگالی مرکزی ٥٥

٤.۲.۳ میوئون های فوق نسبیتی ٥٧

٤ بحث و نتیجه گیری **٥٨**

لیست تصاویر

۱.۱ مراحل تحول ستاره نوترونی[۸]. ۱۱

۲.۱ ساختار ستاره نوترونی [۱]. ۱۵

۳.۱ ساختار ستاره ی نوترونی[۲۰]. ۱۷

٤.۱ لیست مشاهدات انجام شده در لیپاری ایتالیا[۱]. ۲۱

۵.۱ تلسکوب رادیویی [۱]. ۲۳

٦.۱ آشکارساز نوترینویی ستاره [۱]. ۲۳

۱.۲ منحنی قابلیت انتشار نوترینو از پوسته ستاره ای در دمای $۱۰^۸K$ [۳]. ۲٦

۲.۲ منحنی قابلیت انتشار نوترینو از پوسته ستاره ای در دمای ۳×۱۰^۸K [۳]. ۲۷

۳.۲ مهمترین فرآیندهای نوترینویی در ماده $npe\mu\Lambda\Sigma$ [۳]. ۲۸

٤.۲ سرمایش ستاره نوترونی با در نظر گرفتن اورکای مستقیم [٤]. ۳۲

۱.۳ انرژی تقارن سیستم نامتقارن بدون برهمکنش. ٤۲

۲.۳ کسر پروتونی سیستم نامتقارن بدون برهمکنش. ٤۳

۳.۳ انرژی تقارن به عنوان تابعی از چگالی برای چند معادله حالت. ٤۵

٤.۳ منحنی کسر پروتونی برای چند معادله حالت. ٤۵

۵.۳ انرژی تقارن سیستم نامتقارن برهمکنشی به طور تقریبی ٤۹

٦.۳ انرژی تقارن سیستم نامتقارن برهمکنشی به طور دقیق ۵۰

۷.۳ منحنی تقریبی کسر پروتونی سیستم نامتقارن برهمکنشی npe. ۵۲

۸.۳ منحنی دقیق کسر پروتونی سیستم نامتقارن برهمکنشی npe. ۵۳
۹.۳ منحنی تقریبی کسر پروتونی سیستم نامتقارن برهمکنشی$npe\mu$. ٥٤
۱۰.۳ منحنی دقیق کسر پروتونی سیستم نامتقارن برهمکنشی $npe\mu$. ۵۵
۱۱.۳ تغییرات چگالی کسر پروتونی برای ماده ی $npe\mu$ (منحنی بالایی) و npe (منحنی خط چین). ۵۷

فصل ۱

مقدمه

ستاره پهنه ی وسیعی از گردوغبار و گاز می باشد که نیروی گرانشی باعث جذب این گردوغبار و در نهایت به فروریزش[۱] ستاره به درون خود منجر می شود. انقباض ستاره تا جایی پیش می رود که نیرویی از داخل با فشار گرانشی مخالفت کند و ستاره را به تعادل برساند، که در عموم ستاره ها این فشار داخلی از انفجارات هسته ای و واکنش های همجوشی ایجاد می شود و از فروریزش ستاره به درون خود جلوگیری می کند. اگر سوخت یک ستاره که بیشتر هیدروژن می باشد به اتمام برسد، ستاره مقاومت خود در مقابل فشار گرانشی را از دست می دهد و به یکی از سه حالت کوتوله ی سفید، ستاره ی نوترونی و سیاه چاله تبدیل می شود، این که ستاره به کدام حالت تبدیل شود بستگی به جرم ستاره ای دارد .

بنابر مطالب بیان شده، ستارگان نوترونی لاشه ی ستاره ای می باشند که عمر خود را به علت غلبه ی نیروی گرانشی بر فشار داخلی از دست داده است. چنین نیرویی باعث می شود که طی واکنش های ضعیف تبدیل الکترون و پروتون به نوترون انجام شود و گاز تبهگن نوترونی ایجاد شود. به دلیل تراکم زیاد ماده شدیدا متراکم و فشرده می شود به طوریکه ستارگان نوترونی را به یکی از شگفت انگیزترین اجرام شناخته شده در طبیعت تبدیل می کند. جرم و شعاع به دست آمده برای چنین ستارگانی به ترتیب $M \simeq ۱/٤M_{\odot}$ و $R \simeq ۱۰km$ می باشد. بنابر جرم و شعاع ذکر شده چنین ستارگانی دارای

[۱] collapse

چگالی $\rho \simeq \frac{3M}{4\pi R^3} \simeq 7 \times 10^{14} grcm^{-3}$ می باشند که $\rho_0 = 2/8 \times 10^{14} grcm^{-3}$ چگالی اشباع هسته ای می باشد [۱، ۲]. محققان بر این عقیده اند که اگر یک قاشق چایخوری از پوسته ی درونی ستاره ی نوترونی گرفته شود، در حدود یک میلیارد تن وزن خواهد داشت، و اگر همین مقدار از قسمت های داخلی تر که فشرده تر می باشند و جرم بیشتری دارند تهیه شود، در حدود ۱۰ میلیارد تن وزن خواهد داشت.
یک ستاره ی نوترونی چرخنده دارای میدان مغناطیسی می باشد و با توجه به مباحث گرانشی و الکترومغناطیسی از دو طرف تابش می کند و تپ اختر گسیل می کند و به همین دلیل فانوس دریایی ستاره ای هم نامیده می شود.

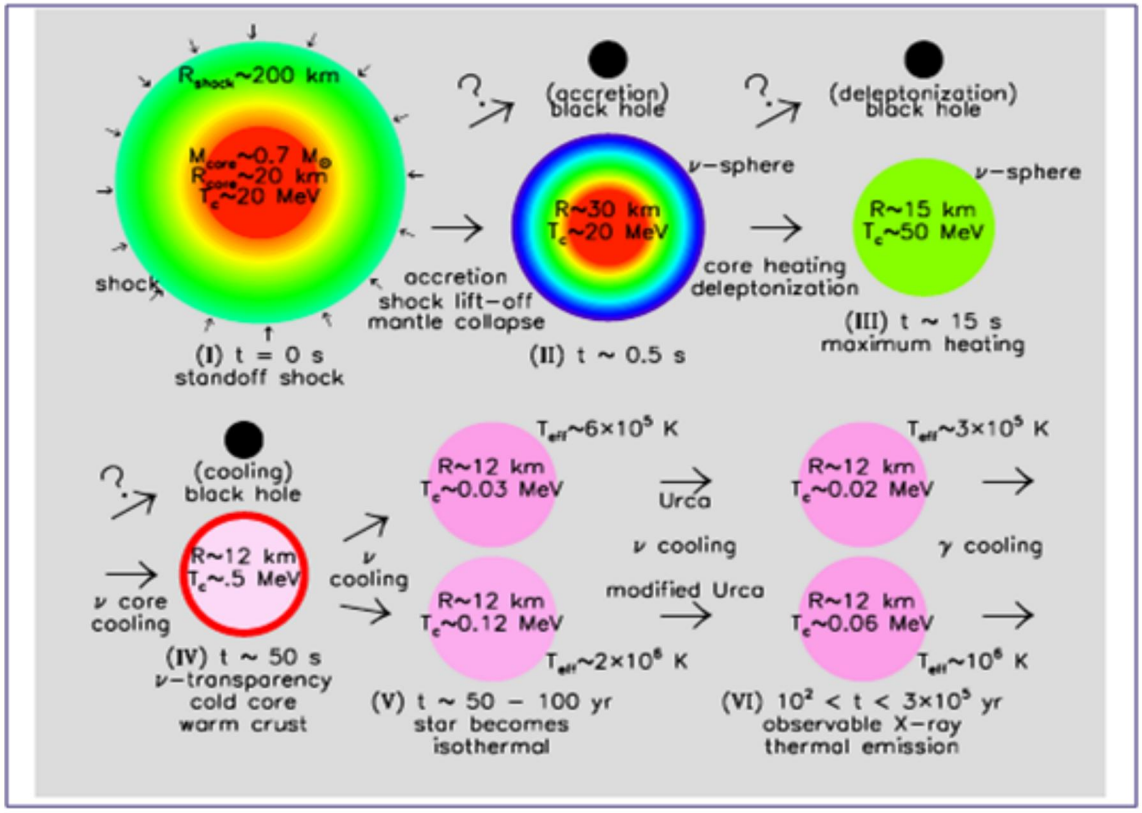
۱.۱ ستاره ی نوترونی و تحول آن

همانطور که اشاره شد ستاره های نوترونی در پس آیند انفجارهای موفقیت آمیز ابرنواختری به عنوان پیش ستاره های نوترونی متولد می شوند و انتشار نوترینوها بر تحولات بعدی ستاره تاثیرگذار می باشد. مشاهده انتشار گرمایی نظیر انتشار نوترینوها از اهمیت بسزایی برخوردار است، چرا که با مطالعه آن ها می توان به ساختار درونی و ترکیب ماده ی ستاره نوترونی پی برد. همانطور که اشاره خواهد شد، در گذر ستاره از یک منبع گرمایی و غنی لپتونی به یک منبع سرد احتمال فروپاشی ستاره و وقوع سیاهچاله وجود دارد که با توقف ناگهانی انتشار نوترینوها همراه خواهد بود. پس از تحول آن به یک ستاره نوترونی تقریبا همدما، که در حدود صد سال یا بیشتر به طول می انجامد ستاره بواسطه انتشار گرمایی، از طریق پرتوهای X قابل مشاهده خواهد بود. لازم به ذکر است که دمای سطح ستاره نوترونی به سرعت انتشار فرآیندهای نوترینویی در هسته آن و همچنین به ماده چگال و حضور ابرشاره یا ابررسانا بستگی خواهد داشت.

حال مطابق شکل ۱.۱ به مطالعه شکل گیری این ستاره ها از انفجاری که در ابرنواختر رخ می دهد و منجر به تشکیل ستاره پروتونوترونی می شود تا تشکیل ستاره نوترونی و سرد شدن آن می پردازیم.

ستاره های نوترونی از آخرین محصولات تحولات ستاره ای می باشند. آن ها در انفجارات ابرنواختری وقتی که سوخت هسته ای در هسته آن ها به اتمام می رسد متولد می شوند. بسیاری از آن ها در طول این شکل گیری، سرعت بسیار زیادی را می توانند به دست آورند و خیلی سریع بقایای ابرنواختری را ترک می کنند و برخی از آن ها در پس غشا در حال رشد ابرنواختر پنهان می

شوند که مانع از مشاهده ستاره های نوترونی خیلی جوان می شوند. بقایای ابرنواختری تقریبا ۱۰۵ سال پس از انفجار از بین می روند.



شکل ۱.۱: مراحل تحول ستاره نوترونی[۸].

انفجاری که در هسته ابرنواختری اتفاق می افتد منجر به انتشار یک موج شوکی [۲] به سمت بیرون می شود. حدود چندین ساعت طول می کشد تا موج شوکی سرتاسر لایه های بیرونی را بپیماید و به سطح برسد، در این مرحله تابشی در همه طیف های الکترومغناطیسی انتشار می یابد که به عنوان رویداد ابرنواختری مشاهده می شود [۱]. فروریزش هسته ابرنواختری، با انتشار نیرومندی از نوترینوها و احتمالا با تابش های گرانشی همراه می باشد. در آشکارسازی چنین رویدادهایی رصدخانه های نوترینویی و گرانشی از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشند.

انفجارهای ابرنواختری با آزادسازی مقدار قابل توجهی انرژی همراه می باشند که بیشتر انرژی انتشار

[۲] shock wave

یافته توسط نوترینوها حمل می شود. حدود ۱ درصد از انرژی کل به انرژی جنبشی مواد زایدی که دفع می شود تغییر شکل می یابد. قسمت جزئی از آن به صورت تابش الکترومغناطیسی و کسر کوچکی از آن به صورت امواج گرانشی منتشر می شود.

فروریزش گرانشی هسته ستاره ای تقریبا $۰/۱s$ به طول می انجامد. اگر موج شوکی در دفع لایه های بیرونی تر موفق باشد، پیش ستاره ی نوترونی با دمای درونی $T \sim ۱۰^{۱۱}\ K$ شکل خواهد گرفت. چنین ستاره ای داغ، کدر برای نوترینوها و بزرگتر از یک ستاره نوترونی معمولی می باشد و همچنین حدود یک دقیقه عمر می کند. همانطور که شکل ۱.۱ نشان می دهد هسته این ستاره دارای آنتروپی پایین و جرم $M_c \simeq ۰/۷M_\odot$ می باشدو توسط غشا با آنتروپی بالا $۵ < S < ۱۰$ احاطه شده است. همانطور که شکل نشان می دهد موج شوکی به طور کامل ستاره را ترک نمی کند.

پس از چند ثانیه،(مرحله (۲)) اگر انفجار ابرنواختری موفق باشد و موج شوکی پوشش ستاره ای را ترک کند، رشد پوسته و هسته متوقف می شود و با از دست دادن نوترینو ها و لپتون ها، فشار لپتونی کاهش یافته که منجر به فروریزش پوسته خواهد شد. حال اگر رشد پوسته به اندازه ای باشد که جرم ستاره ای بیشتر از جرم ماکزیمم شود، البته در این مورد ماده داغ و غنی لپتونی نیز تاثیرگذار هستند، ستاره به شکل سیاه چاله فروریزش می کند و انشار نوترینوها به سرعت متوقف می شود.

حدود $۱۵s - ۱۰$ پس از تولد، انتشار نوترینوها منجر به از دست دادن لپتون های هسته خواهد شد (مرحله (۳)). انتشار نوترینوها با انرژی بسیار بالایی از هسته در حدود $۳۰۰MeV - ۲۰۰$ تا سطح که در آنجا به صورت نوترینوهای کم انرژی در حدود $۲۰MeV - ۱۰$ فرار می کنند به تولید مقدار زیادی گرما در حدود $۶۰MeV - ۳۰$ درون ستاره منجر می شود و آنتروپی هسته تقریبا دو برابر می شود. در طول این بازه زمانی نوترینوها به طور شگفت انگیزی به فرار از سطح ستاره ای ادامه می دهند، به طوریکه این سطح به عنوان کره نوترینویی [۳] شناخته شده است. در پایان از دست دادن لپتون ها ممکن است ماده شگفت در فرم های هایپرونی، توزیع بوزونی یا ماده کوارکی به وجود آید، حضور ماده شگفت منجر به کاهش ماکزیمم جرم تئوری خواهد شد. جرم پیش ستاره نوترونی که بایستی از ماکزیمم جرم ماده داغ و غنی لپتونی کمتر باشد بیشتر از ماکزیمم جرم ماده داغ و بدون لپتونی می شود که احتمال دیگری برای شکل گیری سیاه چاله می باشد.

[۳] Neutrino Sphere

اینک پیش ستاره نوترونی بدون لپتون و داغ می باشد. به طور گرمایی جفت نوترینوها در همه فلورها به تعداد زیادی تولید می شوند و انتشار می یابند که تا سرد شدن ستاره ادامه می یابد. در این مرحله از تحول، میانگین انرژی نوترینویی کاهش یافته و میانگین مسیر آزاد نوترینویی افزایش می یابد که با گذشت تقریبا $۵۰s$ میانگین مسیر آزاد با شعاع ستاره ای قابل مقایسه است که منجر به فرار نوترینوها از ستاره می شود و در اصطلاح ستاره برای نوترینوها شفاف است. از آنجایی که چگالی آستانه برای حضور ماده شگفت، با کاهش دما کاهش یافته است ولی هنوز احتمال یک فروریزش به تاخیر افتاده که منجر به شکل گیری سیاه چاله می شود در طول این بازه زمانی وجود داد.

زمان انتشار نوترینویی با رابطه $R^۲(c\lambda)^{-۱}$ متناسب می باشد که R شعاع ستاره و λ میانگین مسیرآزاد نوترینوها می باشد. این رابطه کلی بیان می کند که معادله حالت و ساختار ماده ستاره نوترونی که R ، λ را تعیین می کند بر بازه زمانی تحولی تاثیر می گذارد. با مطالعه آشکار سازی هزاران هزار نوترینو که توسط رصدخانه های نوترینویی SNO ، $Super-Kamiokande$ انجام می گیرد می توان کمیت هایی مثل انرژی بستگی کل که تابعی از جرم و شعاع ستاره ای می باشد را محاسبه کرد.

در ادامه شفافیت ستاره برای نوترینو، هسته به سرد شدن توسط انتشار نوترینوها ادامه می دهد، اما پوسته همچنان گرم می ماند و به آرامی سرد می شود. پوسته مثل یک لایه پوششی عایق عمل می کند که مانع از تعادل گرمایی پوسته می شود، به موجب این، سطح به مدت بیش از صد سال $K(۳\times۱۰^۶\approx T)$ گرم نگه داشته می شود (مرحله ۵). لازم به یادآوری می باشد که این بازه زمانی به شعاع ستاره و رسانایی گرمایی غشا بسیار حساس می باشد و به طور تقریبی از رابطه $\tau\propto\frac{\Delta R^۲}{\lambda}$ به دست می آید که ΔR ضخامت پوسته می باشد. با رسیدن ستاره به تعادل گرمایی، کاهش سریع در دمای سطحی ستاره اتفاق می افتد. دمای سطحی که در پی دمای درون ستاره ای با آن همدما شده است(مرحله ٦) توسط آهنگ انتشار نوترینویی در هسته ستاره تعیین می شود.

شدت آهنگ انتشار نوترینو توسط فرآیندهای اورکای مستقیم [٤] و اورکای تعمیم یافته [٥] تعیین می شود که به طور خلاصه به بیان این دو فرآیند می پردازیم.

فرآیند اورکای مستقیم نوکلئونی که به عنوان ساده ترین فرآیندها در نظر گرفته می شود و انتشار قدرتمندی از نوترینوها را داخل ستاره نوترونی تولید می کند که در ماده npe شامل فرآیندهای بتا و

[٤] Direct Urca

[٥] Modified Urca

گیراندازی الکترونی می باشد:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$
$$p + e^- \rightarrow n + \nu_e. \qquad (۱.۱)$$

آهنگ این فرآیند با T^4 متناسب می باشد که T دمای سطحی ستاره است و تقریبا از مرتبه $۱۰^۵K$ می باشد.
اگر فرآیند اورکای مستقیم به طور غیرمستقیم و با شرکت کردن یک نوکلئون ناظر انجام شود فرآیند اورکای تعمیم یافته نامیده می شود که برای ماده npe به صورت زیر بیان می شود:

$$n + N \rightarrow p + e^- + N + \bar{\nu}_e$$
$$p + e^- + N \rightarrow n + N + \nu_e. \qquad (۲.۱)$$

ونسبت به فرآیند قبلی از سرعت کمتری برخوردار است. این مرحله از تحول حدود ۱۰۵ سال به طول می انجامد. این بازه زمانی از مشاهدات پرتو X و همچنین از انتشار گرمایی نوترینوها قابل محاسبه می باشد. پس از طی این مرحله انتشار فوتونی صورت می گیرد که تا سرد شدن کامل ستاره ادامه می یابد[۱، ۳، ۸] .

۲.۱ ساختار ستاره ی نوترونی

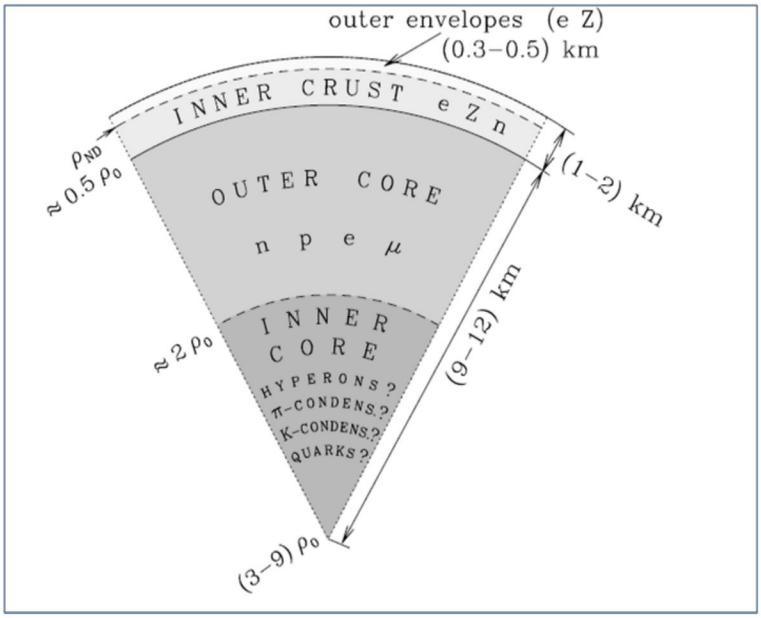
بر طبق نظریه های موجود، ستاره ی نوترونی به اتمسفر و چهار ناحیه ی اصلی می تواند تقسیم شود (شکل ۲.۱،۳.۱) [۱]:

۱. پوسته ی بیرونی

۲. پوسته ی درونی

۳. هسته ی بیرونی

٤. هسته ی درونی



شکل ۲.۱: ساختار ستاره نوترونی [۱].

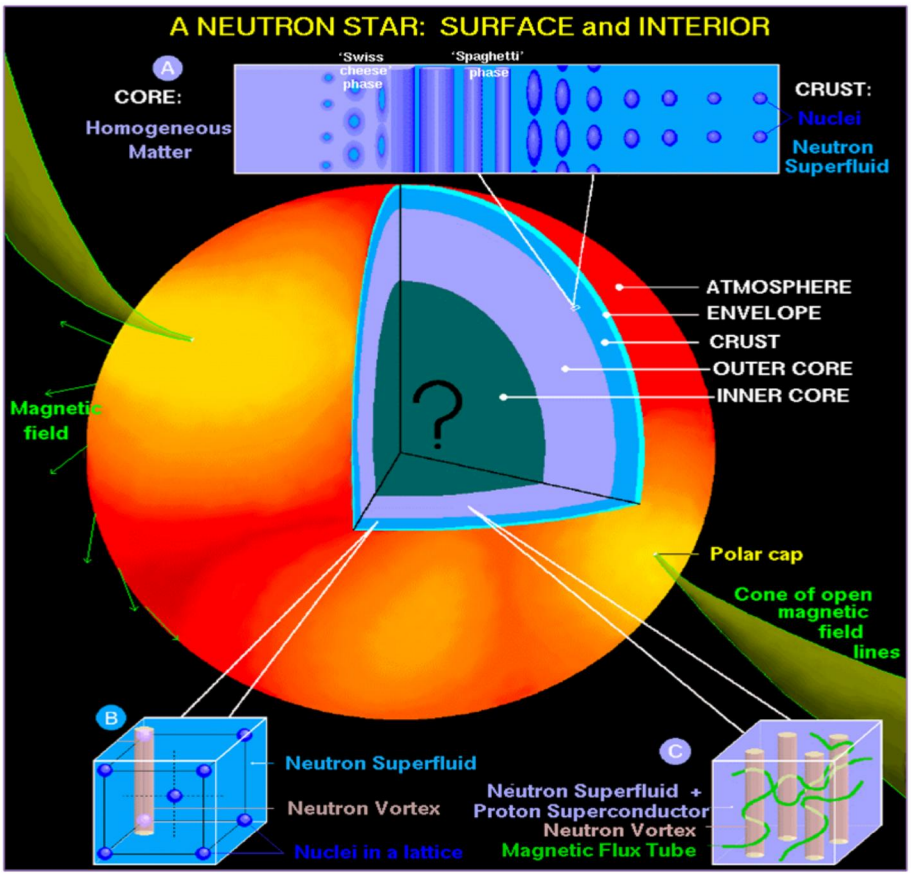
اتمسفر یک لایه ی پلاسمای نازک است که طیف گرمایی تابش الکترومغناطیسی ستاره ی نوترونی را شکل می دهد. گستره ی گرمایی، تابش و قطبش پدیدار شده به طور نظری می تواند با حل مسئله ی گذار گرمایی در لایه های اتمسفر تعیین شود. تابش مشاهده شده از اتمسفر شامل اطلاعات ارزشمندی در تعیین پارامترهای لایه های سطحی،(دمای موثر سطحی، گرانش سطحی، ترکیبات شیمیایی، شدت و هندسه ی میدان مغناطیسی سطحی) و همچنین جرم و شعاع ستاره ی نوترونی می باشد. ضخامت اتمسفر می تواند از چندین ده سانتی متر در یک ستاره ی نوترونی گرم،(با دمای موثر سطحی $T_s \sim ۳ \times ۱۰^{۶} K$) تا کمتر از چند میلی متر در یک ستاره ی نوترونی سرد،($T_s \sim ۳ \times ۱۰^{۵} K$) تغییر کند.ستاره های نوترونی خیلی سرد یا شدیدا مغناطیس شده ممکن است سطح مایع یا جامد داشته باشند.

پوسته ی بیرونی پوسته ی بیرونی از لایه ی زیرین اتمسفر تا لایه ای با چگالی $\rho = ٤ \times ۱۰^{۱۱} gcm^{-۳}$ گسترده می شود. ضخامت پوسته ی بیرونی در حدود چند صد متر می باشد و این پوسته از یون ها و الکترون ها تشکیل شده است و همچنین یک لایه ی سطحی خیلی نازکی از این پوسته (حدود چند متر در ستاره ی نوترونی داغ) شامل گاز الکترونی تبهگن می باشد. در لایه های عمیق تر، گاز تقریبا

ایده آل و شدیدا تبهگن را تشکیل می دهند که در چگالی $\rho \gg ۱۰^{۶} gcm^{-۳}$ فوق نسبیتی می شود. فشار در این ناحیه اساسا توسط الکترون ها فراهم می شود و در چگالی $\rho \geq ۱۰^{٤} gcm^{-۳}$ اتم ها توسط این فشار الکترونی کاملا یونیزه می شوند. کسری از غشا به طور کلی جامد می باشد و به همین علت غشا، اغلب پوسته هم نامیده می شود. انرژی فرمی الکترونی با افزایش چگالی افزایش می یابدکه باعث فرآیند گیراندازی بتا در هسته های اتمی می شود و سیستم را غنی از نوترون ها می کند. این در حالی است که در قسمت انتهایی غشا، نوترون ها شروع به چکه کردن از ساختار هسته ای به گاز نوترونی خالص میکنند.

پوسته ی درونی در حدود یک کیلومتر ضخامت دارد چگالی در پوسته ی درونی از $\rho = ٤ \times ۱۰^{۱۱} gcm^{-۳}$ در ناحیه ی مرزی بالایی تا $\sim ۰/۵\rho_{۰}$ در قسمت انتهایی پوسته تغییر می کند. این پوسته شامل الکترون ها، نوترون های آزاد و هسته های اتمی غنی نوترونی می باشد. مقدار نوترون های آزاد با افزایش ρ افزایش می یابد. در لایه های انتهایی پوسته، در بازه ی چگالی از $\frac{۱}{۳}\rho_{۰} \simeq$ تا $\frac{۱}{۲}\rho_{۰} \simeq$ هسته ها ممکن است غیرکروی شوند و یک پوسته ی هسته ای را شکل دهند، اما این نتیجه ی یک مدل غیرمستقل می باشد. هسته ها در سطح پوسته–هسته ناپدید می شوند. نوترون های آزاد در پوسته ی درونی و نوکلئون هایی که در هسته ی اتمی محدود شده اند می توانند در حالت ابرشاره باشند.

هسته ی بیرونی چگالی $۰/۵\rho_{۰} \leq \rho \leq ۲\rho_{۰}$ را دربر می گیرد و در حدود چندین کیلومتر ضخامت دارد، و از نوترون ها به همراه ترکیب چند درصدی از پروتون ها، الکترون ها و با احتمالی از میوئون ها (که ماده ی $npe\mu$ نامیده می شود) تشکیل می شود. ویژگی های چنین ترکیبی با توجه به شرایط خنثایی بار و تعادل بتا و همچنین مدل میکروسکوپی $many-body$ برهم کنش های هسته ای تعیین می شود. تعادل بتا، تعادل را با توجه به در نظر گرفتن واپاشی بتای نوترونی و فرآیندهای معکوس آن ایجاب می کند. الکترون ها و میوئون ها گاز فرمی ایده آل را تشکیل را می دهند و نوترون ها و پروتون هایی که به واسطه نیروهای هسته ای برهم کنش می کنند مایع فرمی شدیدا برهم کنش کننده را شکل می دهند و همچنین می توانند در حالت ابرشاره نیز باشند.



شکل ۳.۱: ساختار ستاره ی نوترونی[۲۰].

هسته ی درونی در چگالی $\rho \geq \rho_{\circ}$ ناحیه ی مرکزی ماده ی ستاره ی نوترونی را تشکیل می دهد،(در ستاره های با جرم پایین، هسته ی بیرونی تا مرکز ستاره گسترده می شود که به فقدان هسته ی درونی منجر می شود). هسته ی درونی در حدود چندین کیلومتر ضخامت دارد و چگالی مرکزی آن در حدود $(۱۵ - ۱۰)\rho_{\circ}$ می باشد. چندین فرضیه پیشگویی هایی در مورد حضور فرمیون های جدید و یا چگالی بوزونی در هسته ی درونی مطرح کرده اند. چهار نظریه اصلی در مورد ساختار هسته ی درونی به صورت زیر می باشد:

۱. ماده ی هایپرونی

۲. چگالش کائونی

۳. چگالش پیونی

٤. گذار فاز به ماده ی کوارکی که از کوارک های سبک u ، d و کوارک شگفت s با مخلوطی از الکترون ها همراه است.

۳.۱ ماده ی ستاره ی نوترونی

مطالعات نشان می دهد مهمترین ماده تشکیل دهنده ستاره نوترونی، پروتون ها و نوترون ها می باشد و علاوه بر این ماده لپتونی نیز در ستاره نوترونی یافت می شود که باعث خنثایی بار در ساختار چنین ستارگانی می شود. اکثر دانشمندان معتقدند که جاذبه و فشار بسیار زیاد باعث فشرده شدن پروتونها و الکترونها به درون یکدیگر می‌شوند که خود سبب بوجود آمدن توده‌های متراکم نوترونی خواهد شد و همچنین باعث می شود که پروتون ها و نوترون ها به کوارک های بالا و پایین سازنده ی خود تجزیه شوند که در واقع یک گذار فاز از ماده ی هسته ای به ماده ی کوارکی به وجود می آید.

انرژی ماده هسته ای یا به بیان بهتر انرژی بین نوکلئون ها در ماده ستاره نوترونی از فرمول نیمه تجربی جرم به دست می آید که به صورت زیر بیان می شود:

$$B = a_v A - a_s A^{۲/۳} - a_c Z(Z-۱)A^{-۱/۳} + \delta - S(n)\frac{(A-۲Z)^۲}{A} \qquad (۳.۱)$$

بدیهی ترین جمله ای که در عبارت بالا در نظر گرفته شده است، جمله ی حجمی می باشد که به صورت $a_v A$ قابل محاسبه است که مقدار ثابت a_v قابل تعیین است، و نشان می دهد که هر نوکلئون در هسته فقط نزدیک ترین نوکلئون های اطرافش را جذب می کند و همه نوکلئون های دیگر را جذب نمی کند. ولی می دانیم نوکلئونی که در سطح هسته قرار گرفته است از انرژی بستگی کمتری نسبت به نوکلئون های دیگر هسته برخوردار است که در جمله ی حجمی در نظر گرفته نمی شود و مقدار انرژی بستگی را بیش از حد لازم برآورد می کند. بنابراین جمله ای که متناسب با سطح هسته می باشد بایستی از انرژی بستگی کم شود چون شعاع $R \propto A^{۱/۳}$ است و مساحت هسته متناسب با $R^۲$ یا $A^{۲/۳}$ می شود سهم نوکلئون های سطحی هسته را می توان به صورت $a_s A^{۲/۳}$ در نظر گرفت.

جمله ی بعدی دافعه ی پروتون ها است که در جهت تضعیف انرژی بستگی هسته عمل می کند. چون هر پروتون همه ی پروتون های موجود در هسته را دفع می کند، این جمله متناسب با $Z(Z-۱)$ می شود و با فرض هسته به شکل کره ی باردار یکنواخت مقدار دقیق این جمله را می توان به صورت

$\frac{-۳}{۵}(\frac{e^۲}{۴\pi\varepsilon_۰ R_۰})Z(Z-۱)A^{۱/۳}$ محاسبه کرد که با در نظر گرفتن $R_۰ = ۱/۲\, fm$ مقدار این جمله $۰/۷۲\, Mev$ به دست می آید.

δ انرژی تزویج می باشد که برای N و Z زوج به صورت $+a_p A^{-۳/۴}$ و برای N و Z فرد به صورت $-a_p A^{-۳/۴}$، و برای A فرد برابر صفر در نظر گرفته می شود.

و سرانجام جمله ای که توصیف واقع بینانه ای از هسته های پایدار به دست می دهد، خاصیت پایداری هسته $Z = A/۲$ را در انرژی بستگی در نظر می گیرد،(در غیر این صورت، بنابر پیش بینی این فرمول، وجود ایزوتوپهای پایدار هیدروژن با صدها نوترون هم امکان پذیر می شود) این جمله برای هسته های سبک که در آن ها رابطه ی $Z = A/۲$ بیشتر رعایت می شود اهمیت زیادی دارد. ولی در هسته های سنگین از اهمیت کمتری برخوردار میباشد، زیرا افزایش سریع دافعه ی کولنی مستلزم نوترون های اضافی است تا به این وسیله پایداری هسته تضمین شود. این جمله به خاطر تاثیرش در متقارن نگه داشتن هسته از لحاظ تعداد پروتون ها و نوترون ها جمله ی تقارن نامیده می شود. انرژی تقارن هسته ای کمیتی مهم در مطالعه ساختار سیستم های هسته های اتمی و ستارگان نوترونی به شمار می آید، بنابراین آگاهی داشتن از مقدار دقیق چنین کمیتی برای تعیین بسیاری از خصوصیات ماده در چگالی های بالاتر از چگالی اشباع هسته ای، در تعیین چگالی قطره های نوترونی در پوسته ی ستاره ی نوترونی، در تعیین کسر پروتون ها در ماده ستاره نوترونی اهمیت بسزایی دارد و همچنین یک پارامتر مهم در سرعت سرمایشی ستاره های نوترونی می باشد.

به علت تاثیر نیروهای کولنی، ماده هسته ای دارای نوترون های اضافی نسبت به پروتون ها می باشد که توسط پارامتر $\beta = \frac{N-Z}{A}$ توصیف می شود. مناسب است که ماده هسته ای نامتقارن به وسیله ی چگالی هسته ای $n = n_n + n_p$ و $\beta = \frac{n_n - n_p}{n}$ توصیف شود. در تقریب $A \to \infty$ اهمیت جمله انرژی تقارن در فرمول نیمه تجربی جرم افزایش می یابد و انرژی به ازای هر نوکلئون ماده هسته ای نامتقارن به صورت زیر تعریف می شود:

$$E_N(n,\beta) = E_۰(n) + S(n)\beta^۲ \qquad (۴.۱)$$

که $E_۰(n)$ انرژی به ازای هر نوکلئون ماده ی هسته ای متقارن و $S(n)$ انرژی تقارن می باشد. انرژی تقارن کمیتی است که به طور مستقیم قابل اندازه گیری نیست و به طور غیر مستقیم از مشاهداتی که

با انرژی تقارن در ارتباط هستند نتیجه می شود. تعیین تجربی انرژی تقارن به معتبر بودن مدل هایی که مشاهدات تجربی را توصیف می کنند بستگی دارد. مطالعات فراوانی برای تعیین انرژی تقارن و وابستگی آن به چگالی و دما انجام شده است، پس واضح است که آزمایش های انجام شده به نتایج مختلفی برای ضرایب تقارن منجر خواهد شد. تعیین تجربی بزرگی انرژی تقارن در چگالی اشباع مقدار آن را $S(n) = ۲۷ - ۳٦Mev$ نتیجه می دهد[٦] .

همچنین محاسبات بس ذره ای ماده نامتقارن هسته ای درستی رابطه (٤.١)را نشان می دهد و با یک تقریب خوبی حتی برای مقادیر β نزدیک به واحد، انرژی به ازای هر نوکلئون ماده نوترونی خالص می تواند با تقریب خوبی با رابطه ی $E_{\circ}(n) + S(n)$ بیان شود.

٤.١ رصد ستاره نوترونی

ستاره های نوترونی انتشار دهنده چندین طول موج می باشند که در نوارهای طیفی رادیویی، مادون قرمز، ماورابنفش، پرتوهای X و اشعه گاما قابل مشاهده هستند. آن ها در همه طیف های الکترومغناطیسی در کهکشان و همچنین از طریق ماهواره های نزدیک کهکشان ها (نظیر ابرهای ماژولانی بزرگ [٦] و ابرهای ماژولانی کوچک [٧]) قابل مشاهده می باشند، ستاره های نوترونی و همچنین ستاره های مشابه آن ها را به روش های مختلفی می توان آشکارسازی کرد. پرتوهای X مشاهده شده در کهکشان $M۱۳$ نمونه ای از چنین مشاهداتی می باشد. جدول ٤.١ آشکار سازی های مشاهده شده را خلاصه می کند. لازم به ذکر می باشد که جدول ذکر شده فقط شامل کنفرانس هایی می باشد که در تاریخ ۳۰ سپتامبر تا ۱۱ اکتبر سال ۱۹۹٦ در لیپاری [٨] ایتالیا عنوان شده اند.

شیوه های مربوط به مشاهده از جذابیت خاصی برخوردار است و ما شاهد پیشرفت روز افزون روش ها و ابزار های مربوطه می باشیم. یکی از بهترین ابزارها برای مشاهدات تلسکوپ می باشد که در ذیل به توضیح روش های مختلف مشاهده با استفاده از چنین ابزاری می پردازیم.

---

[٦] Large Magellanic Cloud

[٧] Small Magellanic Cloud

[٨] Lipari