دانشکده علوم –گروه فیزیک

پایان نامه کار شناسی ارشد

گرایش فیزیک نجومی

عنوان:

محاسبه ساختار ستاره کوارکی در دمای معین با استفاده از پتانسیل حبس خطی

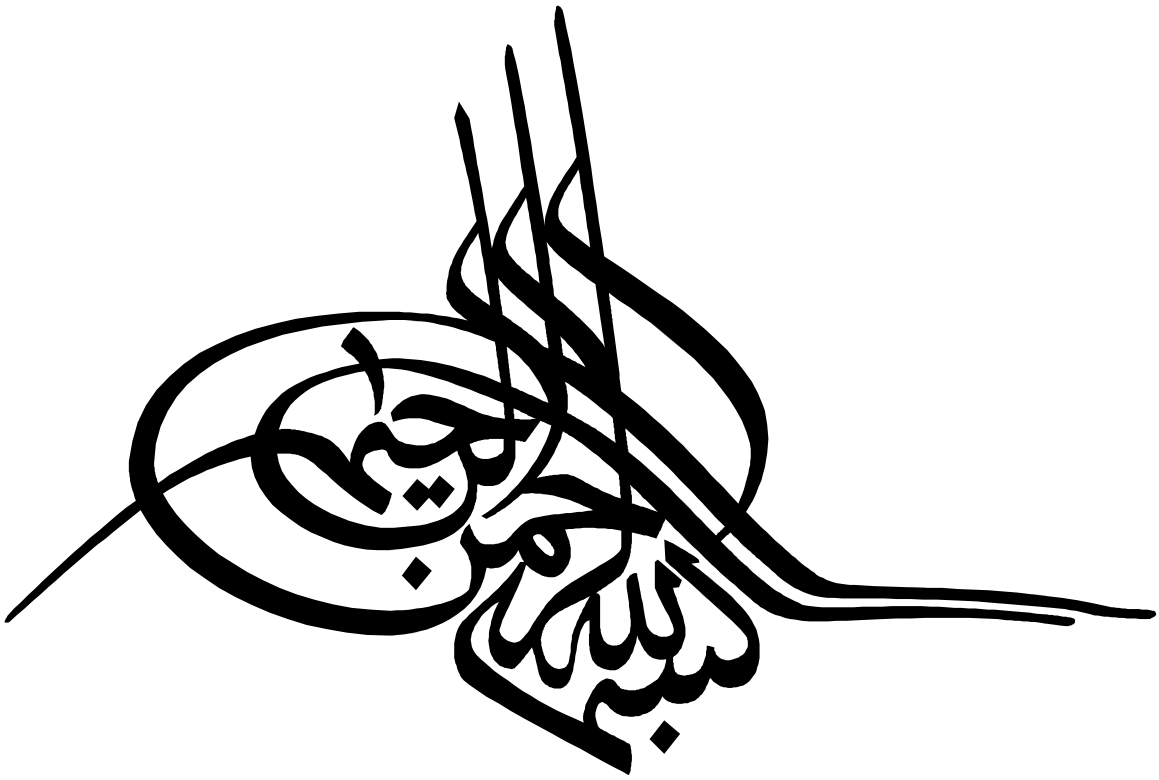
مجید حسنی

اساتید راهنما:

دکترمحسن بیگدلی

دکتر غلامحسین بردبار

بهمن ماه ۱۳۸۹



تقدیم به

روان پاک پدر و مادر عزیزم

همسر مهربان و صبورم

و

نوگلم حنانه

تشکر و قدردانی

خداوند را شاکرم که زندگی-ام را در مسیری قرار داد تا بتوانم با آموختن، قدمی در جهت تکامل خویش بردارم.

در اینجا لازم است از اساتید محترم راهنمایم آقایان دکتر محسن بیگدلی و دکتر غلامحسین بردبارکه در انجام این پروژه مرا یاری کردند و در تمام طول تحقیق با همراهی و هدایت دلسوزانه، مشوق و راهنمای اینجانب بودند، تشکر و قدردانی داشته باشم.

همچنین از همسر مهربانم که مشوق اصلی و همراه همیشگی من بوده‌اند و همواره مرا مورد لطف خود قرار داده‌اند بسیار سپاسگزارم.

از دوستان و همکلاسی‌هایم بخصوص آقای فرهاد داعی و تمام کسانی که مرا در اتمام این پایان‌نامه یاری نمودند کمال تشکر را دارم.

در پایان امیدوارم که توانسته باشم گوشه‌ای از زحمات پدر و مادر و همسرم و اساتیدی که در دوران تحصیل زحمت راهنمایی و آموزش من را بر عهده داشته‌اند، جبران نمایم.

فهرست مطالب

عنوان .....صفحه

چکیده.....۸

فصل اول:مقدمه.....۹

۱-۱چگونگی تشکیل ستارگان چگال.....۱۰

۱-۲ ستارگان نوترونی.....۱۵

فصل دوم: ستارگان کوارکی.....۲۳

۲-۱نحوه تشکیل .ماده کوارکی.....۲۴

۲-۲ساختار و ویژگیهای ستارگان کوارکی.....۲۶

۲-۳ مدلها وکارهای انجام شده.....۳۰

۲-۳-۱ مدل String-flip like.....۳۱

فصل سوم: معادله حالت ماده کوارکی با استفاده از پتانسیل حبس خطی..... ۳۴

۳-۱معادله حالت در دمای صفر.....۳۵

۳-۱-۱ تابع موج و حل معادله شرودینگر.....۳۵

۳-۱-۲ نظریه اختلال ۴۰

۳-۱-۳ معادلات بتا-گلدستون ۴۱

۳-۱-۴ انرژی سیستم کوارکی غیر نسبیتی.....۴۵

۳-۱-۵ ماده کوارکی نسبیتی..... ۴۷
۳-۱-۶ چگالی انرژی..... ۵۲
۳-۱-۷ معادله حالت..... ۵۳
۳-۲ معادله حالت در دمای معین..... ۵۵
۳-۲-۱ انرژی پتانسیل..... ۵۵
۳-۲-۲ انرژی کل ماده کوارکی نسبیتی در دمای معین..... ۵۷
۳-۲-۳ تعیین چگالی کوارکها در دمای معین..... ۵۸
۳-۲-۴ انرژی در ذره و چگالی انرژی کل ماده کوارکی..... ۵۸
۳-۲-۵ انرژی آزاد هلموهلتز و آنتروپی..... ۶۰
۳-۲-۶ چگالی انرژی آزاد هلموهلتز..... ۶۲
۳-۲-۷ معادله حالت..... ۶۳
فصل چهارم: محاسبه ساختار ستاره کوارکی..... ۶۵
۴-۱ معادلات تعادل هیدروستاتیکی..... ۶۶
۴-۲ رابطه جرم-شعاع..... ۷۰
خلاصه و نتیجه گیری..... ۷۸
کتاب‌نامه..... ۷۹

فهرست جداول

عنوان .....صفحه

جدول ۴-۱ جرم ماکزیمم ،شعاع ،چگالی انرژی مرکزی و فشار مرکزی.....۷۷

فهرست شکل‌ها

عنوان .....صفحه

شکل ۱-۱ تعادل هیدروستاتیکی ستارگان.....۱۰

شکل ۱-۲ انفجار ابرنواختری.....۱۲

شکل ۱-۳ سرنوشت ستارگان.....۱۳

شکل ۱-۴ سیاهچاله.....۱۴

شکل ۱-۵ ساختار یک ستاره نوترونی.....۱۶

شکل ۱-۶ نمایی شماتیک از ساختار ومواد تشکیل دهنده ستاره نوترونی.....۱۹

شکل ۱-۷ مراحل تبدیل پیش ستاره به ستاره نوترونی.....۲۱

شکل ۱-۸ تولد ستاره نوترونی.....۲۲

شکل ۲-۱ستاره کوارکی عجیب و ستاره نوترونی.....۲۷

شکل ۲-۲ نمودار جرم-شعاع برای ستارگان نوترونی و کوارکی.....۲۹

شکل ۳-۱ انرژی درهر ذره (غیر نسبیتی) بر حسب چگالی.....۴۶

شکل ۳-۲ نمودار انرژی نیمه نسبیتی در ذره نسبت به چگالی.....۴۹

شکل۳-۳ نمودار انرژی پتانسیل در ذره بر حسب چگالی..... ۵۰

شکل۳-۴ نمودار چگالی انرژی نسبیتی بر حسب چکالی..... ۵۲

شکل۳-۵ نمودار فشار بر حسب چگالی در حالت نیمه نسبیتی ماده کوارکی..... ۵۳

شکل۳-۶ نمودار چگالی انرژی در مقابل فشار..... ۵۴

شکل۳-۷ نمودار انرژی پتانسیل در ذره برحسب چگالی در دماهای T=۱۰, ۲۰,۴۰,۷۰..... ۵۶

شکل۳-۸ نمودار انرژی در ذره برحسب چگالی..... ۵۹

شکل۳-۹ نمودار چگالی انرژی برحسب چگالی..... ۶۰

شکل۳-۱۰نمودار انرژی آزاد در ذره در مقابل چگالی برای دماهای مختلف..... ۶۱

شکل۳-۱۱ نمودار آنتروپی در ذره در مقابل چگالی..... ۶۲

شکل۳-۱۲ نمودار چگالی انرژی آزاد در مقابل چگالی برای دماهای مختلف..... ۶۳

شکل۳-۱۳نمودار فشار در مقابل چگالی..... ۶۴

شکل۴-۱نمودار معادله حالت برای دما های مختلف..... ۷۲

شکل۴-۲ نمودار جرم بر حسب جرم خورشیدی در مقابل فشار مرکزی..... ۷۳

شکل۴-۳ نمودار جرم بر حسب جرم خورشیدی در مقابل شعاع بر حسب کیلومتر..... ۷۴

شکل۴-۴ نمودار چگالی انرژی مرکزی در مقابل فشار مرکزی..... ۷۵

شکل۴-۵ نمودار شعاع در مقابل چگالی انرژی مرکزی..... ۷۶

چکیده

ستارگان نوترونی شامل ستارگان نرمال و ستارگان کوارکی هستند. در این پایان‌نامه ما روی خصوصیات و ساختار ستارگان کوارکی در دمای معین تحقیق و بررسی انجام دادیم. در این کار ما از مدل سه بعدی String-flip like استفاده کردیم. این مدل یک پتانسیل وابسته به چگالی را برای برهم کنش های بین دو کوارک در نظر می‌گیرد ضمن اینکه این پتانسیل شامل یک پتانسیل حبس خطی نیز است. ما ابتدا در قالب تخمین جفت های مستقل واز طریق حل معادلات بتا-گلدستون و معادله شرودینگر برای حرکت نسبی جفت کوارک وسپس با رهیافت سیستم بس‌ذره‌ای انرژی و معادله حالت ماده کوارکی را بدست آوردیم و نتایج را در قالب نمودار هایی نشان دادیم. وبا استفاده از معادله حالت های بدست آمده در دماهای صفر و معین توانستیم معادلات TOV را به طور عددی حل کرده و ساختار ستاره کوارکی را بدست آوریم. ماکزیمم جرم و شعاع ستاره کوارکی به همراه چگالی انرژی مرکزی و فشار مرکزی را ارائه کردیم.

ستاره کوارکی از ماده کوارکی خالص بصورت مخلوطی از کوارکهای u، d و s تشکیل شده است. پتانسیل حبس بصورت حاصلضرب یک تابع درجه یک از فاصله و تابع نمایی از چگالی و فاصله است.

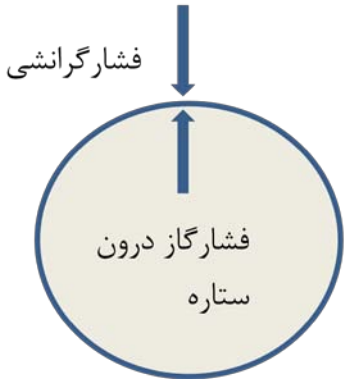
واژگان کلیدی: ستاره نوترونی، ماده کوارکی، پتانسیل حبس خطی، انرژی و معادله حالت ماده کوارکی، ساختار ستاره کوارکی

فصل اول

مقدمه

۱-۱ چگونگی تشکیل ستارگان چگال

ستارگان چه ستارگان معمولی یعنی آنهایی که در رشته اصلی به سر می برند و در مرحله هیدروژن سوزی و یا چرخه C-N-O قرار دارند و چه ستارگان دیگر مثل ستارگان نوترونی در حالت عادی در حال تعادل هیدروستاتیکی هستند. یعنی اینکه بین فشار ناشی از گاز درون ستاره که به طرف بیرون ستاره وارد می شود و فشار گرانشی ناشی از جرم بسیار بزرگ ستاره که به طرف مرکز ستاره وارد می شود تعادل برقرار است[۳۵] ،



شکل۱-۱ : تعادل هیدروستاتیکی ستارگان

اگر یک ستاره که در رشته اصلی یعنی در مرحله هیدروژن‌سوزی قرار دارد سوخت هسته‌ای آن که در این مرحله هیدروژن است تمام شود، آن ستاره از درون هسته خود در اثر فشار گرانشی بسیار زیادش دچار رمبش می‌شود. این عمل باعث افزایش دمای درون ستاره می‌شود. این دما در حدی است که می-تواند مرحله هلیوم‌سوزی درون ستاره‌ای را آغاز کند. سوختن هلیوم، یک هسته کربن و اکسیژن تولید

می‌کند. در ستارگان پرجرمتر، این فرآیند با سوختن هلیوم متوقف نمی‌شود، زیرا اگر دما کافی باشد، سوختن کربن و اکسیژن باز هم عناصر سنگین‌تری مانند نئون و منیزیم ایجاد خواهد کرد. به نظر می‌رسد در پرجرمترین ستارگان این فرآیند تا ایجاد یک هسته آهنی ادامه یابد. آهن نمایانگر پایدارترین شکل وجودی پروتونها و نوترونهاست، و هر گونه تلاش بیشتر برای استخراج انرژی از طریق فرآیند همجوشی از این عنصر، بیهوده است. در این نقطه از تکامل ستارگان پرجرم، هیجان‌انگیزترین نمایش در حال وقوع است. همانطوریکه در بالا نیز به آن اشاره شد، با پایان تولید انرژی درون ستاره، فشار گاز داخل ستاره نیز دچار افت شده ونیروی گرانشی بر نیروی فشار روبه بیرون ستاره غالب می‌شود. در این حال ظرف یک ثانیه هسته آهنی با چنان نیرویی می‌رمبد که فضای درون ساختار خود اتم چلانده می‌شود. وقتی هسته اتمهای جداگانه به سوی هم رانده و تا حد ممکن به هم نزدیک می‌شوند. هسته ستاره بسیار سخت می-شود و در برابر انقباض بیشتر مقاومت می‌کند. در این حال رمبش به‌سوی درون ماده معکوس می‌شود و انفجار عظیمی صورت می‌گیرد که مقدار زیادی از ماده ستاره را بیرون می‌راند. در مورد ستاره‌ای با ۱۰ برابر جرم خورشیدی در حدود ۸۵ درصد از جرم آن از دست می‌رود. در اینصورت می‌گوییم ستاره ابرنواختر شده است[۳۵].

ابرنواخترها بر پایهٔ نحوهٔ تشکیل به دو دستهٔ کلی تقسیم می‌شوند، گونهٔ اول ابرنواختر ها، از یک ستاره دوتایی به وجود می‌آیند. **د**ر این نوع ابرنواخترها یکی از ستارگان که کوتوله سفید است و بسیار چگال می‌باشد، بر اثر جذب مواد ستارهٔ دیگر به افزایش جرم دچار می‌شود، این افزایش تا جایی ادامه پیدا می‌کند که جرم کوتوله سفید از حد چاندراسخار[۱] بگذرد.

[۱] chandraskhar

گونه دوم ابرنواخترها، مربوط به ستارگانی با جرم بیشتر است. همانگونه که در بالا نیز گفته شد به شکل طبیعی اتفاق می‌افتد. اساس کار در هر دو نوع ابر نواختر یکسان است و در مراحل تحول و انفجار تفاوتی نمی‌کنند.

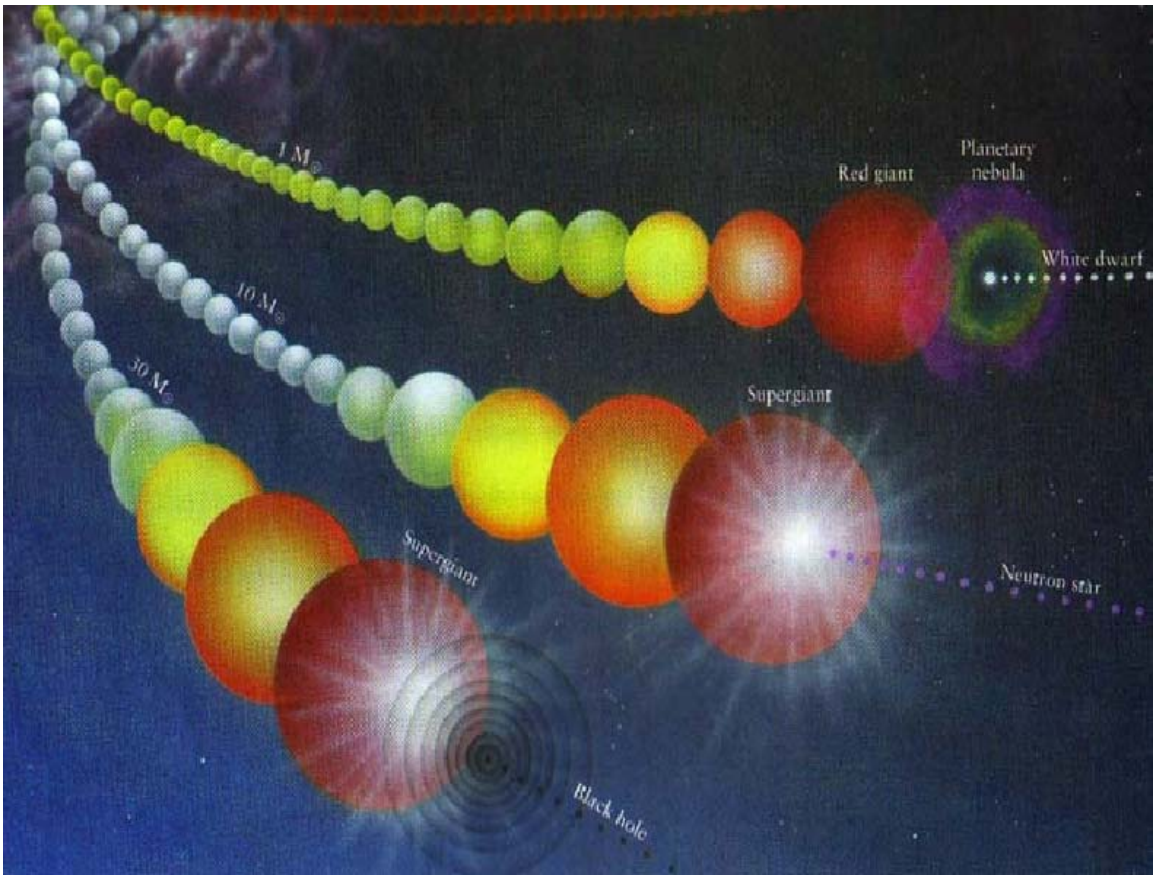
حد چاندرا سخار: جرم یک ستاره کوتوله سفید نمی‌تواند **از** ۱.۴۴جرم خورشیدی، که اکنون با نام حد چاندراسخار شناخته می‌شود، بیشتر باشد. ستاره‌هایی که جرمشان از این حد بیشتر باشد در انتها به ستاره نوترونی و یا سیاهچاله تبدیل می‌شوند. واگر کمتر باشد در نهایت به کوتوله سفید تبدیل می‌شوند.

انفجار ابرنواختری: ستارگانی که جرم بالایی دارند و به اصطلاح بسیار پرجرم‌تر از دیگر ستارگان هستند از غول سرخ تبدیل به ابرغول سرخ می‌شوند. ابرغول ده‌ها بار بزرگ‌تر از غول سرخ است. ابرغول طی یک رشته واکنش‌هایی که طی میلیون‌ها سال رخ می‌دهد، پس از آن که به بزرگ‌ترین حالت خود رسید به صورت یک اَبَرنواَختر[۲] منفجر می‌شود[۳۵].

شکل۱-۲ : انفجار ابرنواختری، اقتباس از مرجع[۳۲]

[۲] Super Nova

ستارگان از نظر بزرگی جرم و سرنوشت آنها پس از پایان عمرشان و البته پس از انفجار ابرنواختری به سه دسته تقسیم می‌شوند،



شکل۱-۳ :سرنوشت ستارگان، اقتباس از مرجع [۲۲]

۱- ستارگانی که جرمشان تقریبا به اندازه جرم خورشید است ۲- ستارگانی که جرمشان در حدود ۱۰ برابر جرم خورشیدی است ۳- ستارگانی که بیش از ۳۰ برابر جرم خورشید جرم دارند .

همانطورکه در شکل۱-۳ نشان داده شده است، دسته اول پس از تبدیل به غول قرمز[۳] در نهایت به کوتوله سفید[۴] تبدیل می‌شوند . دسته دوم پس از تبدیل به ابرغول قرمز[۵] در نهایت به ستاره نوترونی تبدیل می-

[۳] Red giant
[۴] White dwarf

شوند و دسته سوم که در نهایت می‌توانند به سیاه چاله تبدیل شوند. البته در دسته دوم نیز احتمال تبدیل به سیاهچاله وجود دارد [۳۵] .

سیاه چاله : پس از انفجار ابرنواختری، اگر جرم هسته‌ای که از ستاره باقی می‌ماند بیش از ۳ الی ۱۵ برابر جرم خورشید باشد، ستاره تبدیل به سیاهچاله می‌شود،

شکل۱-۴: عکس یک سیاهچاله، اقتباس از مرجع[۳۳].

بر طبق نظریات موجود، اگر شعاع یک پیش ستاره نوترونی از شعاع شوارتزشیلد[۶] کوچکتر شود تبدیل به سیاهچاله خواهد شد[۳۵].

---

[۵] Super giant
[۶] Schwarzschild

۱-۲ ستارگان نوترونی

ستارگان نوترونی[۷] تجلی برخی از چگال ترین مواد سنگین در این عا لم هستند اصطلاح ستاره نوترونی عموماً برای یک ستاره با جرم M از مرتبه تقریبا ۱.۵ برابر جرم خورشید و شعاع در حدود ۱۲ کیلومتر و چگالی عددی در حدود ۵ الی ۱۰ برابر چگالی تعادل هسته ای[۸] بکار می رود. ستارگان نوترونی شرایط و پدیده هایی را بروز می‌دهند که در هیچ جایی مشاهده نشده‌اند، از قبیل: ماده کوارکی آزاد[۹]، ابرشارگی و ابررسانایی[۱۰] با دماهای بحرانی نزدیک $۱۰^{۱۰}$ کلوین، عدم شفافیت[۱۱] نسبت به نوترینوها[۱۲] و میدان‌های مغناطیسی بالای $۱۰^{۱۳}$ گوس[۱] .

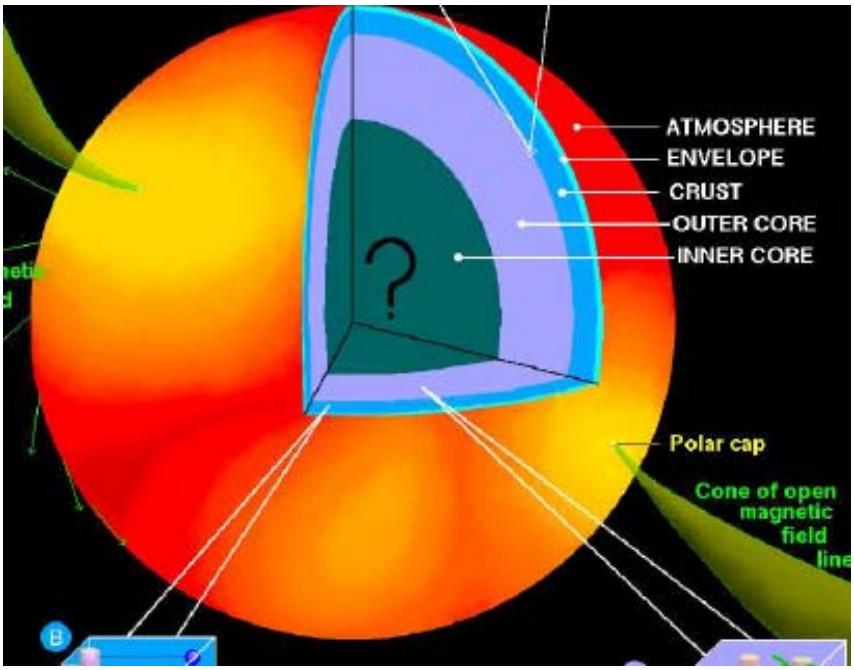
برخی خصوصیات و ویژگی‌های کلی یک ستاره نوترونی به صورت زیر خلاصه می‌شود[۲] ،

- چگالی جرمی متوسط، $\rho = ۷ \times ۱۰^{۱۴} g.cm^{-۳}$،
- شتاب گرانشی سطح ستاره، $g = ۷ \times ۱۰^{۱۴} cm.s^{-۲}$ ،
- سرعت فرار از سطح ستاره، $v_s = ۱۰^{۵} \frac{km}{s}$.

یک ستاره نوترونی دارای پنج ناحیهء اصلی است، ۱- اتمسفر، ۲- پوشش[۱۳]، ۳-پوسته، ۴-هسته بیرونی، ۵- هسته درونی.

---

[۷] Neutron stars
[۸] $\rho_o \sim .۱۷\ \mathrm{fm}^{-۳}$
[۹] deconfined quark matter
[۱۰] superfluidity and superconductivity
[۱۱] opaqueness to neutrinos
[۱۲] Neutrino
[۱۳] envelope



شکل۱-۵ : ساختار یک ستاره نوترونی، اقتباس از مرجع [۱]

اتمسفر و پوشش ستاره نوترونی شامل مقداری ناچیز از جرم ستاره می‌شوند، اما اتمسفر ستاره، نقش بسیار مهمی در تشکیل طیف فوتونهای بیرون آینده از سطح ستاره نوترونی دارد و پوشش ستاره، تاثیر قطعی بر انتقال و آزاد کردن انرژی گرمایی از سطح ستاره می‌گذارد. اتمسفر یک لایه‌ی پلاسمای نازک است که طیف گرمایی تابش الکترومغناطیسی ستاره‌ی نوترونی را شکل می‌دهد. گستره‌ی گرمایی، تابش و قطبش پدیدار شده به طور نظری می‌تواند با حل مسئله‌ی گذار گرمایی در لایه‌های اتمسفر تعیین شود. تابش مشاهده شده از اتمسفر شامل اطلاعات ارزشمندی در تعیین پارامترهای لایه‌های سطحی (دمای موثر سطحی، گرانش سطحی، ترکیبات شیمیایی، شدت و هندسه‌ی میدان مغناطیسی سطحی) و همچنین جرم و شعاع ستاره‌ی نوترونی می‌باشد. ضخامت اتمسفر می تواند از چندین ده سانتی متر در یک ستاره‌ی نوترونی گرم (با دمای موثر سطحی $T_s \sim ۳ \times ۱۰^۶ \mathrm{k}$) تا کمتر از چند میلی متر در یک

ستاره‌ی نوترونی سرد (با دمای موثر سطحی $T_s \sim 3 \times 10^5 k$)تغییر کند. ستاره‌های نوترونی خیلی سرد یا شدیداً مغناطیس شده ممکن است سطح مایع یا جامد داشته باشند.

پوسته، اصولاً هسته را در بر می‌گیرد و در حدود ۱ الی ۲ کیلومتر زیر سطح ستاره امتداد می‌یابد. و شامل پوسته بیرونی و پوسته درونی است. پوسته بیرونی، از لایه‌ی زیرین اتمسفر تا لایه‌ای با چگالی $\rho \sim 4 \times 10^{11} grcm^{-3}$ گسترده می‌شود. ضخامت پوسته بیرونی در حدود چند صد متر می‌باشد و این پوسته از یون‌ها و الکترون‌ها تشکیل شده است و همچنین یک لایه‌ی سطحی خیلی نازکی از این پوسته حدود چند متر در ستاره‌ی نوترونی داغ شامل گاز الکترونی تبهگن می‌باشد. در لایه‌های عمیق‌تر، گاز تقریباً ایده‌آل و شدیداً تبهگن را تشکیل می‌دهند که در چگالی $\rho \gg 10^6 grcm^{-3}$ فوق‌نسبیتی می‌شود. فشار در این ناحیه اساساً توسط الکترون‌ها فراهم می‌شود و در $\rho \geq 10^{14} grcm^{-3}$ اتم ها توسط این فشار الکترونی کاملاً یونیزه می‌شوند. کسری از غشا به طور کلی جامد می‌باشد و به همین علت غشا، اغلب پوسته هم نامیده می‌شود. انرژی فرمی الکترونی با افزایش چگالی افزایش می‌یابد که باعث فرآیند گیراندازی بتا در هسته‌های اتمی می‌شود و سیستم را غنی از نوترون‌ها می‌کند این در حالی است که در قسمت انتهایی غشا، نوترون‌ها شروع به نشت از ساختار هسته‌ای به گاز نوترونی خالص می‌کنند. پوسته‌ی درونی در حدود یک کیلومتر ضخامت دارد. چگالی در پوسته‌ی درونی از $\rho \sim 4 \times 10^{11} grcm^{-3}$ در ناحیه ی مرزی بالایی تا تقریبا $0.5\rho_0$. در قسمت انتهایی پوسته تغییر می‌کند.$\rho_0 \sim .17\ fm^{-3}$ چگالی تعادل هسته‌ای است. این پوسته شامل الکترون‌ها، نوترون‌های آزاد و هسته‌های اتمی نوترون غنی می‌باشد . مقدار نوترون‌های آزاد با افزایش ρ افزایش می‌یابد. نوترون‌های آزاد در پوسته درونی و نوکلئون‌هایی که در هسته‌ی اتمی محدود شده‌اند می‌توانند در حالت ابرشاره باشند

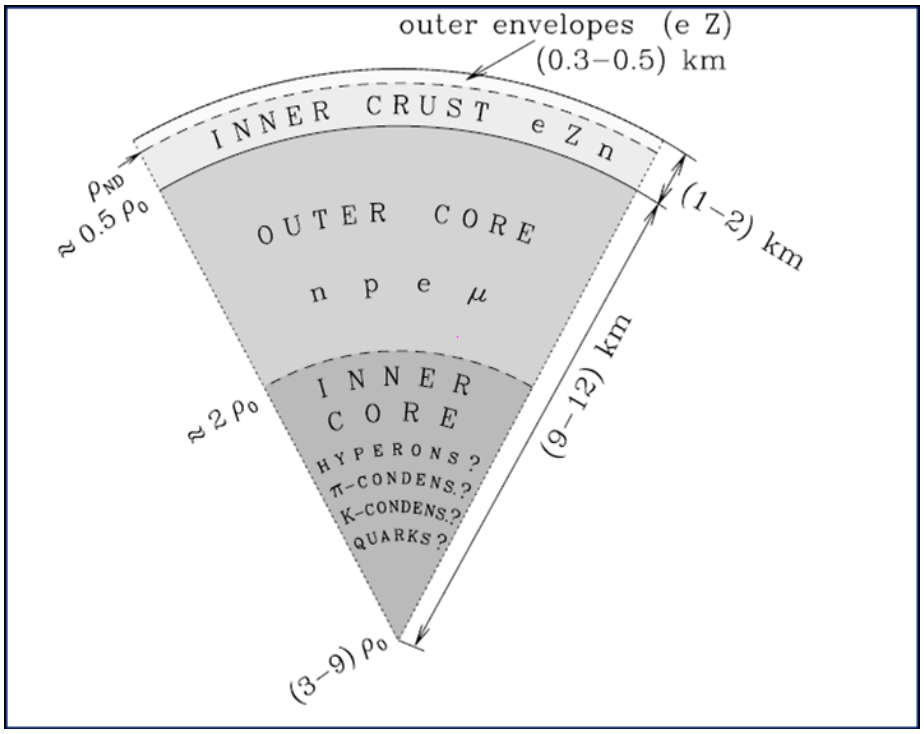
هسته، بالای ۹۹٪ جرم ستاره نوترونی را تشکیل می‌دهد. هسته بیرونی، سوپی از نوکلئونها ،الکترونها ومیونها را دربرمی‌گیرد. هسته بیرونی چگالی $0.5\rho_0 \leq \rho \leq 2\rho_0$ را دربر می‌گیرد و در حدود چندین

کیلومتر ضخامت دارد. از نوترون‌ها به همراه ترکیب چند درصدی از پروتون‌ها، الکترون‌ها و با احتمالی از میون‌ها تشکیل می‌شود. ویژگی‌های چنین ترکیبی با توجه به شرایط خنثایی بار و تعادل بتا و همچنین مدل میکروسکوپی بس‌ذره ای[۱۴] برهمکنشهای هسته‌ای تعیین می‌شود. تعادل بتا، تعادل را با توجه به در نظر گرفتن واپاشی بتای نوترونی و فرآیندهای معکوس آن ایجاب می‌کند. الکترون‌ها و میون‌ها گاز فرمی ایده‌آل را تشکیل می‌دهند و نوترون‌ها و پروتون‌هایی که به واسطه نیروهای هسته‌ای برهم کنش می کنند، مایع فرمی شدیداً برهم‌کنش کننده را شکل می‌دهند و همچنین می‌توانند در حالت ابرشاره نیز باشند.

هسته درونی در چگالی $\rho \geq \rho_0$ ناحیه‌ی مرکزی ماده‌ی ستاره‌ی نوترونی را تشکیل می‌دهد. در ستاره های با جرم پایین، هسته بیرونی تا مرکز ستاره گسترده می‌شود که به فقدان هسته درونی منجر می شود. هسته‌ی درونی در حدود چندین کیلومتر ضخامت دارد و چگالی مرکزی آن در حدود ۱۰ الی ۱۵ برابر ρ_0 می باشد. در هسته داخلی ذراتی چون هایپرونها و یا بوزونهای چگال مثل پایونهایا کائونها ممکن است فراوان باشند[۱,۲].

شکل زیر شمایی کلی از ساختار یک ستاره نوترونی و مواد تشکیل دهنده آنها را به صورت کلی و طرحوار نشان می‌دهد،

[۱۴] many-body



شکل۱-۶ : نمایی شماتیک از ساختار ومواد تشکیل دهنده ستاره نوترونی، اقتباس از مرجع [۲]

همانطوریکه در بخش قبلی نیز توضیح داده شد با پایان عمر یک ستاره در رشته اصلی فشار گاز درون ستاره کم شده و فشار گرانشی باعث رمبش ستاره می‌شود. در اثر فشار گرانشی خیلی زیاد پروتونها والکترونها با هم ترکیب شده و باعث تشکیل نوترونها می‌شوند. بنابراین اطلاق ستاره نوترونی به دلیل وجود نوترونهای تقریباً خالص هسته اتم می‌باشد،

$$p^+ + \mathrm{e}^- \rightarrow \mathrm{n} + \nu_e$$

در پایان عمر ستارگان سنگین که جرمشان تقریبا بزرگتر از هشت برابر جرم خورشیدی است، هسته این ستارگان فرو می‌ریزد که این عمل موسوم به انفجارابرنواختر نوع دوم است، در نتیجه این عمل، ستارگان