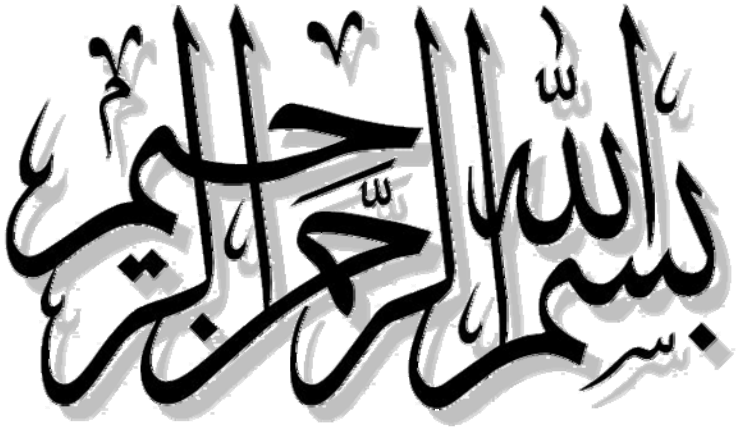
بسم الله الرحمن الرحيم

جمهوری اسلامی ایران
دانشگاه تهران

شماره _____
تاریخ _____
پیوست _____

اداره کل تحصیلات تکمیلی

باسمه تعالی

تعهد نامه اصالت اثر

اینجانب الهام عامی متعهد می شوم که مطالب مندرج در این پایان نامه / رساله حاصل کار پژوهشی اینجانب است وبه دستاوردهایپژوهشی دیگران که در این پژوهش از آنها استفاده شده است ، مطابق مقررات ارجاع ودر فهرست منابع ومآخذ ذکر گردیده است. این پایان نامه / رساله قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارائه نشده است . در صورت اثبات تخلف (در هرزمان) مدرک تحصیلی صادر شده توسط دانشگاه از اعتبار ساقط خواهد شد .
کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به پردیس / دانشکده / مرکز دانشگاه تهران می باشد .

نام ونام خانوادگی دانشجو الهام عامی

امضاء

آدرس : خیابان انقلاب اول خیابان فخر رازی – پلاک ۵ کدپستی : ۱۳۰۴۵/۵۶۸
فاکس : ۶۴۹۷۳۱۴

دانشگاه تهران

دانشکده علوم - گروه فیزیک

عنوان

محاسبه ساختار ستاره نوترونی

نگارش

الهام مافی

استاد راهنما

دکترحمیدرضا مشفق

پایان نامه برای اخذ درجهٔ کارشناسی ارشد در رشتهٔ فیزیک

گرایش فیزیک هسته ای

مهر ماه۱۳۸۷

به نام خدا
دانشگاه تهران

پرديس علوم
دانشكده فيزيک

گواهي دفاع از پايان نامه كارشناسي ارشد

هيات داوران پايان نامه كارشناسی ارشد **خانم الهام مافی**

در رشته: فيزيک گرايش: هسته ای

با عنوان : **" محاسبه ساختار ستاره نوترونی "**

را در تاريخ : ۸۷/۷/۱۵

.

به عدد	به حروف
۱۹	نوزده

با نمره نهايي

و درجه : عالی

ارزيابي نمود.

ردیف	مشخصات هيات داوران	نام و نام خانوادگي	مرتبه دانشگاهي	دانشگاه	امضاء
۱	استاد راهنما:	دكتر حميدرضا مشفق	دانشيار	تهران	
۳	استاد داور خارجی:	دكتر اميرعلی مسعودی	استاديار	دانشگاه الزهرا	
٤	استاد داور داخلي:	دكترمجيد مدرس	استاد	تهران	
٥	نماينده كميته تحصيلات تكميلي دانشكده:	دكتر محمدرضا محمدی زاده	دانشيار	تهران	

تذكر: اين برگه پس از تكميل توسط هيات داوران در نخستين صفحه پايان نامه درج مي گردد.

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

چکیده

ستاره های نوترونی تجلی برخی از چگالترین اشیای بزرگ در جهان هستند.آنها آزمایشگاههای اختر فیزیکی ایده آل برای تست تئوری های فیزیک ماده چگال و ایجاد ارتباط میان فیزیک هسته ای،فیزیک ذرات ،و اختر فیزیک می باشند.ستاره های نوترونی می توانند شرایط و پدیده هایی را که در هر جا یافت نمی شوند از جمله ماده هایپرونی ،ابر شارگی ،ابررسانایی و میدان های مغناطیسی افزون بر$10^{13}G$ را فراهم کنند.بنابراین ستاره های نوترونی سیستمهای ارزشمندی برای مطالعه می باشند.

هدف این رساله محاسبه خواص ستاره نوترونی ،از جمله محاسبه جرم و شعاع بر اساس روش وردشی پایین ترین مرتبه مقید (Lowest Order Constrained Variation)LOCV و THOMAS FERMI(TF)بوده است.

از آنجاییکه قسمت اعظم ستاره نوترونی را نوترونها تشکیل می دهند،و این نوترونها هستند که ستاره را در مقابل فروریزش گرانشی محافظت می کنند ،از فرمالیزم LOCV و THOMAS FERMI(TF)به منظور محاسبه معادله حالت ماده نوکلئونی ستاره نوترونی استفاده شده است.برای بدست آوردن جرم وشعاع ستاره نوترونی باید معادلات تعادلی هیدرواستاتیکی حل شوند که برای حل این معادلات به معادله حالت$P=P(\varepsilon)$ ، نیازمندیم.که P نشان دهنده فشار و ε چگالی است.

در این رساله ،ابتدا معادله حالت نوکلئونهای موجود در ستاره نوترونی ، معادله حالت گاز ایده آل فرمی در نظر گرفته شده،یعنی بدین وسیله از برهمکنش هسته ای بین نوترونها صرفنظر کرده ایم و جرم و شعاع ستاره نوترونی را با حل دو معادله هیدرواستاتیکی نسبیتی و غیر نسبیتی بدست آورده ایم.

در مراحل بعد با وارد کردن برهمکنش بین نوکلئونها(با محاسبه انرژی خوشه ای دو ذره ای بر واحد ذره بازای چگالی خاص ،به وسیله فرمالیزم LOCVبرای پتانسیل های $Reid68, UV14, AV18$ وبه وسیله فرمالیزم TFبرای پتانسیل وابسته به چگالی Myerو در نهایت محاسبه فشار) و حل معادلات هیدرواستاتیکی با تصحیح نسبیتی (TOV) جرم و شعاع ستاره نوترونی را محاسبه نمودیم.

در ضمن برهمکنش بین نوکلئونها از نوع دو جسمی در نظر گرفته شده و از برهمکنشهای مراتب بالاتر صرفنظر کرده ایم.در نهایت به مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج ناشی از فرمالیزم های دیگر پرداختیم.

کلید واژه:جرم و شعاع ستاره نوترونی،معادله حالت ماده نوترونی ،روش LOCV ،روش THOMAS FERMI(TF).

سپاسگزاری

در آغاز، بر خود لازم می دانم، از استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر مشفق، که همواره مشوق اینجانب در انجام وظایف و حامی دلسوز و سختکوشم بوده، از صمیم قلب سپاسگزاری نموده و طول عمر پربرکت برای ایشان از خداوند متعال مسالت دارم.

فهرست مطالب

فصل اول

۱-۱مقدمه ۱

فصل دوم:اشیای متراکم در اخترفیزیک

۲-۱ مقدمه ۴

۲-۲ اشیای متراکم در اخترفیزیک ۴

۲-۳ چگونگی تشکیل ستاره های نوترونی ۷

۲-۴ ساختار داخلی و ترکیبات ۹

۲-۵ مشاهدات جرم ستاره نوترونی ۱۰

۲-۵-۱ دو تایی های پرتو ایکس ۱۰

۲-۵-۲ تپنده های دو تایی ۱۲

۲-۶ خنک شدن ستاره نوترونی ۱۴

فصل سوم:برهمکنشهای هسته ای

۳-۱ مقدمه ۱۸

۳-۲ دوترون ۱۸

۳-۳ خواص نیروی نوکلئون-نوکلئون ۱۹

۳-۴ نظریه های کوانتمی میدان در برهمکنش هسته ای ۲۳

۳-۵ پتانسیل دو نوکلئونی ۲۵

۳-۵-۱ پتانسیل V8 ۲۷

۳-۵-۲ پتانسیل V14 ۲۷

۳-۵-۳ پتانسیل V18 ۲۸

۳-۶ پتانسیل های اسکرم گونه ۳۰

۳-۶-۱ پتانسیل مایر ۳۰

فصل چهارم:محاسبه معادله حالت ماده نوترونی

۴-۱ مقدمه ۳۲

۴-۲ گاز ایده آل فرمی ۳۳

۴-۳ توصیف فرمالیزم LOCV ۳۸

۴-۴توصیف فرمالیزم توماس فرمی ۴۱

۴-۵ محاسبه فشار ۴۲

فصل پنجم:محاسبه ساختار ستاره نوترونی

۵-۱ مقدمه ۵۰

۵-۲ معادلات ساختار ۵۰

۵-۳ تصحیحات نسبیتی ۵۲

۵-۴ ستاره های نوترونی خالص ۵۳

۵-۵ محاسبه خواص ستاره نوترونی با در نظر گرفتن برهمکنش بین نوکلئونها ۵۷

خلاصه ، نتیجه گیری و پیشنهادات ۷۱

مراجع ۷۳

پیوست۱ ۷۶

فهرست جدول ها

جدول ۲-۱: جرم اندازه گیری شده تعدادی از ستاره های نوترونی ۱۳

جدول ۳-۱: طول و برد موثر پراکندگی نوکلئون-نوکلئون ۲۹

جدول ۵-۱:نتایج بدست آمده ۶۸

جدول۵-۲:نتایج بدست آمده در این رساله ۶۹

فهرست شکل ها

شکل ۲-۱: مراحل اصلی تکامل یک ستاره نوترونی ۱۶

شکل ۲-۲: نواحی اصلی و ترکیبات محتمل ماده ستاره نوترونی معمولی ۱۷

شکل ۳-۱:سطح مقطع پراکندگی نوترون-پروتون ۲۱

شکل ۳-۲: نیروی تانسوری آن گونه که در دوترون عمل می کند. ۲۲

شکل ۴-۱: انرژی ماده هسته ای بدست آمده برای سه پتانسیلAV18,UV14,Reid68 بـه روش LOCV ٤٥

شکل ۴-۲: انرژی ماده نوترونی بدست آمده برای سه پتانسیلAV18,UV14,Reid68 به روشLOCV وپتانسیلMyer به روش توماس فرمی ٤٦

شکل ۴-۳: معادله حالت گاز ایده آل فرمی ٤٧

شکل ۴-۴: معادله حالت ماده نوترونی با پتانسیل هایAV18,UV14,Reid68 ٤٨

شکل ۴-۵: معادله حالت ماده نوترونی با پتانسیل هایMyer,Sly4 ٤٩

شکل ۵-۱:نمودارشعاع بر حسب چگالی مرکزی با مدل گاز فرمی ٥٤

شکل ۵-۲: نمودارجرم بر حسب چگالی مرکزی با مدل گاز فرمی ٥٥

شکل ۵-۳: نمودارجرم بر حسب شعاع با مدل گاز فرمی ٥٦

شکل ۵-۴: نمودارجرم وشعاع بر حسب چگالی مرکزی برای پتانسیلReid68 ٥٩

شکل ۵-۵: نمودارجرم وشعاع بر حسب چگالی مرکزی برای پتانسیلUV14 ٦٠

شکل ۵-۶: نمودارجرم وشعاع بر حسب چگالی مرکزی برای پتانسیلAV18 ٦١

شکل ۵-۷: نمودارجرم بر حسب شعاع برای سه پتانسیلAV18,UV14,Reid68 ٦٢

شکل ۵-۸: نمودارجرم بر حسب چگالی مرکزی برای پتانسیل هایMyer,Sly4 ٦٣

شکل ۵-۹: نمودارجرم بر حسب شعاع برای پتانسیل هایMyer,Sly4 ٦٤

شکل ۵-۱۰: نمودارشعاع بر حسب چگالی مرکزی برای پتانسیل هایMyer,Sly4 ٦٥

شکل ۵-۱۱: نمودارجرم بر حسب شعاع برای سه پتانسیلAV18,UV14,Reid68 با دسته معادلات نیوتنی ٦٦

شکل ۵-۱۲: مقایسه نمودارهای جرم بر حسب شعاع در کارهای مختلف ۷۰

فصل اول

۱-۱ مقدمه

ستاره های نوترونی تجلی برخی از چگالترین اشیای بزرگ در جهان اند.آنها آزمایشگاههای اختر فیزیکی ایده آل برای آزمودن نظریه های فیزیک ماده چگال و ایجاد ارتباط میان فیزیک هسته ای، فیزیک ذرات و اختر فیزیک هستند.ستاره های نوترونی می توانند شرایط و پدیده هایی را که در هر جا یافت نمی شوند از جمله ماده هایپرونی ،ابر شارگی ،ابررسانایی،و میدان های مغناطیسی افزون بر $۱۰^{۱۳}$G را فراهم کنند.

اصولا عبارت ستاره نوترونی به ستاره ای اطلاق می شود که دارای جرمی از مرتبه $\mathbf{1.5}\,\mathrm{M}\odot$ و شعاعی از مرتبه ۱۲کیلومتر و چگالی مرکزی از مرتبه ۵ تا۱۰ برابر چگالی تعادلی هسته ای($n_0 = \mathbf{0.16}\,fm^{-3}$)هستند. بنابراین ستاره های نوترونی یکی از متراکم ترین اشکال ماده در جهان مشاهده پذیر وسیستمهای ارزشمندی برای مطالعه می باشند.اگر چه از بین اجزای نوکلئونی ماده ستاره نوترونی، نوترونها غالب اند ولی در ساختار آن مقداری پروتون وبه همان اندازه الکترون وجود دارد،که ما در طی محاسبات خود از آنها صرفنظر کرده و ماده ستاره نوترونی را نوترون خالص در نظر می گیریم به همین دلیل توصیف ماده نوترونی در اخترفیزیک از اهمیت خاصی برخوردار است، چرا که در مطالعه ستاره های نوترونی و ابر نواخترها نقش مهمی ایفا می کند.

در سالهای اخیر ،دامنه گسترده ای از اطلاعات در مورد ستاره های نوترونی از تپنده های پرتو ایکس و رادیویی بدست آمده است.به همین دلیل مطالعه ساختار ستاره نوترونی بر اساس معادله حالت ماده چگال مورد توجه اختر فیزیک است.از طرفی تحقیقات نظری ساختار آنها نیز با اهمیت است،چون نتایج مشاهده شده منجر به ایجاد قیودی بر روی معادله حالت ماده چگال می شود.

هدف اصلی ما از این رساله، محاسبه برخی از خواص ستاره نوترونی از جمله جرم و شعاع است .

در فصل دوم تاریخچه کشف ستاره های نوترونی را بیان کرده و به اختصار به مطالعه خصوصیات کلی و ویژگیهایی که اینگونه اشیا آسمانی را از ستاره های معمولی متمایز می سازندو ساختار داخلی ستاره نوترونی،یعنی تعداد لایه های تشکیل دهنده و ترکیبات درونی این لایه ها وهمچنین چگونگی ایجاد آن از لحظه انفجار ابرنواختری و همچنین مراحل خنک شدن آن و دو فرایند غالب گسیل نوترینو و گسیل فوتون که در خنک شدن ستاره نوترونی نقش بسزایی دارند، می پردازیم وجرم اندازه گیری شده تعدادی از ستاره های نوترونی را برای مقایسه در این فصل می آوریم.

همانگونه که اشاره شد، ماده ستاره نوترونی، نوترونها هستند و نوترونها نوعی از نوکلئونها می باشند و بر هم کنش میان نوکلئون ها ازطریق نیروهای هسته ای صورت می پذیرد.و در واقع این نیروی هسته ای بین نوکلئونها است که ستاره را در مقابل فروریزش گرانشی پایدار نگه می دارد.بنابراین نیروی هسته ای نقش بسیار مهمی را در تعادل ستاره های نوترونی بازی می کند.

در فصل سوم به مطالعه خواص نیروی هسته ای و برخی پتانسیل های دو نوکلئونی می پردازیم. خواهیم دید که خواص نیروی هسته- ای از مطالعه ی ترازهای انرژی سیستم های دو نوکلئونی و اندازه گیری پراکندگی های نوکلئون-نوکلئون تعیین می شود.تنها سیستم دو نوکلئونی مقید دوترون است که شامل یک پروتون و یک نوترون است و هیچ تراز برانگیخته ای ندارد و عدم وجود ترازهای برانگیخته درک ما را درمورد نیروی هسته ای محدودتر می کند. به طور کلی پتانسیل دو نوکلئونی از روی برازش داده های پراکندگی نوکلئون ـ نوکلئون ساخته می شود. در این راه از سال ها پیش تلاش های فراوانی انجام شده است تا یک پتانسیل واقعی ارائه گردد. یک پتانسیل واقعی باید یک کمیت نرده ای باشد، نسبت به تعویض ذرات ناوردا باشد، نسبت به وارونی زمان ناوردا باشد، به پاریته بستگی داشته باشد. از این میان پتانسیل هایی مناسبترند که داده های پراکندگی نوکلئون ـ نوکلئون را به خوبی برازش کرده و انرژی پیوندی و ممان چهارقطبی

الکتریکی دوترون را صحیحتر به دست دهند.از میان پتانسیل های دو نوکلئونی به مطالعه پتانسیل های $AV18, UV14, \mathrm{Re}id68$ و پتانسیل وابسته به چگالی و تکانه مایر[1] پرداختیم.

در محاسبه خواص ستاره نوترونی معادله حالت از اهمیت بسیاری برخوردار است .معادله حالت رابطه ای است که ارتباط میان فشار و چگالی را مشخص می سازد .

در فصل چهارم به محاسبه معادله حالت ماده نوترونی با برهمکنش های دو جسمی مختلف پرداخته ایم. برای بدست آوردن معادله حالت ماده نوترونی (یعنی ماده ای که نسبت پروتون به نوترون آن ناچیز است) از سه روش استفاده کرده ایم .اولین روش استفاده از مدل گاز فرمی است که در آن از برهمکنش بین نوکلئونها صرفنظر کرده ایم و ساختار داخلی ستاره نوترونی را گاز نوترونی تبهگن در نظر گرفتیم. سپس از روش $LOCV$ برای پتانسیلهای $\mathrm{AV18, UV14, Re id68}$ و از روش توماس فرمی[2] که یک روش آماری است ،برای پتانسیل مایر استفاده کردیم . به این ترتیب که با کمک این دو روش انرژی بر واحد ذره برای ماده نوترونی را بدست آورده و از روی آن فشار یا همان معادله حالت را محاسبه می نماییم.

در فصل پنجم ابتدا به معرفی معادلات ساختاری و شرایط تعادل هیدرواستاتیکی می پردازیم.سپس در مورد تصحیحاتی که تولمن،اوپنهایمر و ولکف در این معادلات ساختاری به وجود آوردند(TOV) صحبت می کنیم . به کمک معادله حالتهایی که قبلا بدست آورده بودیم و این معادلات ساختاری (چهTOV و چه Newton) ابتدا جرم و شعاع مربوط به ستاره نوترونی را که ناشی از گاز نوترونی تبهگن است محاسبه می کنیم.اولاخواهیم دید که مقدار جرم بدست آمده با مقادیری که بطور تجربی اندازه گیری شده همخوانی ندارد. ثانیا با افزایش جرم ستاره،اختلاف در نتایج TOV و Newton بیشتر می شود. در مرحله بعد برهمکنش بین ذرات را نیز وارد می کنیم و معادلاتTOV را حل می کنیم.برهمکنش بین ذرات را از نوع دو جسمی در نظر می گیریم.

مینیمم مقدار جرم ستاره نوترونی نزدیک به $\mathbf{0.1}\,\mathrm{M}\odot$ پیش بینی می شود که تقریبا برای معادله حالات مختلف یکسان است.جرم ماکزیمم ستاره نوترونی بین $\mathbf{2.14}\,\mathrm{M}\odot$ و $\mathbf{1.3}\,\mathrm{M}\odot$بدست آمد.که در توافق نسبتا خوبی با بقیه محاسبات،و همین طور با مقادیر اندازه گیری شده در جدول موجود در فصل دوم است.

---

[1] .Myer

[2] .Thomas fermi

فصل دوم

۲-۱ مقدمه

ستاره های نوترونی تجلی برخی از چگالترین اشیای بزرگ در جهان اند.آنها آزمایشگاههای اختر فیزیکی ایده آل برای آزمودن نظریه های فیزیک ماده چگال و ایجاد ارتباط میان فیزیک هسته ای، فیزیک ذرات و اختر فیزیک هستند.ستاره های نوترونی می توانند شرایط و پدیده هایی را که در هر جا یافت نمی شوند از جمله ماده هایپرونی ،ابر شارگی ،ابررسانایی،و میدان های مغناطیسی افزون بر$G^{۱۳}۱۰$ را فراهم کنند.بنابراین ستاره های نوترونی سیستمهای ارزشمندی برای مطالعه می باشند.در این فصل به مطالعه ساختار داخلی ستاره نوترونی و مراحل خنک شدن آن وهمچنین چگونگی ایجاد آن از لحظه انفجار ابرنواختری به اختصار پرداخته ایم .

۲-۲ اشیاء متراکم در اختر فیزیک

این اشیاء شامل کوتوله های سفید ، ستاره های نوترونی و سیاهچاله ها هستند . همزمان بامراحل پایانی تکامل ستاره ای آن ها به عنوان اجزای سازنده کهکشان ها شکل می گیرند. مطالعه ستاره های متراکم با

کشف کوتوله های سفید آغاز شد و توصیف دقیق خواصشان با آمار فرمی _دیراک، یعنی بافرض اینکه فشارگازالکترونی تبهگن آنهارادرمقابل فروریزش گرانشی پایدار نگه می دارد، ایده ای بودکه اولین بارتوسط فولر[1] در [1]سال ۱۹۲۶ پیشنهاد شد جرم بیشینه کوتوله های سفید در سال ۱۹۳۰باکارچاندراسکار[2] [2] بدست آمد .در سال ۱۹۳۲چادویک[3] نوترون را کشف کرد. بلافاصله ایده فولرکه درمورد الکترون فرمول بندی شده بود برای نوترون ها تعمیم یافت . یعنی وجود ستاره ای متراکم با هسته بزرگی از نوترون های تبهگن پیش بینی شد(ستاره های نوترونی). برخی دریافتند که در چگالی های بسیار بالا الکترون ها و پرتون ها با هم ترکیب شده و نوترون ها ایجاد می شوند وبالعکس،(وا پاشی β) [3] .اولین مدل محاسباتی ستاره نوترونی توسط اوپنهایمر و ولکف [4] و تولمن[4] در سال ۱۹۳۹انجام شد. آن ها ماده چنین ستاره ای را گاز نوترونی تبهگن ایده آل فرض کرده بودند.محاسبات آنها نیز مانند محاسبات چاندرا سکار جرم ماکزیممی را برای ستاره نوترونی پیش بینی می کرد که فرای آن جرم، ستاره پایداری خود را از دست داده و فرو ریخته و به سیاه چاله تبدیل می شود.آن ها جرم پایدار بیشینه را $0.75\ M_{\odot}$ بدست آوردند. تقریبا حدود ۳۰ سال بعد در سال ۱۹۶۷ اولین ستاره نوترونی مشاهده شد. در حقیقت شئ عجیبی که تابشی در حیطه امواج رادیویی ، داشت (تپنده رادیویی)[5] و خیلی زود مشخص شد که یک ستاره نوترونی چرخان است . در سال ۱۹۷۴ تپنده $PSR\mathbf{1913+16}$ برای اولین بار در یک سیستم دو تایی[6] و توسط هالس و تیلور[7] کشف شد[5]. به دلیل وجود این تپنده در یک سیستم دو تایی، اندازه گیری دقیق جرم آن امکان پذیر بود ،که حدود $1.44M_{\odot}$ بدست آمد. از این رو این اندازه گیری سبب شد که خط بطلانی بر روی تصویر ساده گاز ایده آل نوترونی برای داخل این ستاره کشیده شود. این اندازه گیری نشان داد که باید برهم کنش بین نوکلئون ها نیز به حساب بیاید .

---

1 .Fowler

2 .Chandrasekhar

3 .Chadwick

4 .Oppenheimer , Volkof and Toleman

5 .Radio pulsar

6 .Binary system

7 .Hulse and Taylor

مطالعه اشیاء متراکم کوتوله های سفید ،ستاره های نوترونی ،سیاه چاله زمانی شروع می شود که تکامل ستاره معمولی پایان پذیرد تمام این اشیا با ستاره های معمولی از جنبه های زیر متفاوت اند :

- آن ها سوخت هسته ای نمی سوزانند و نمی توانند در مقابل فرو ریزش گرانشی به وسیله فشار گرمایی خود را حفظ کنند. در عوض کوتوله های سفید به وسیله فشار الکترون های تبهگن و ستاره های نوترونی عمدتا توسط فشار نوترون و کوارک های تبهگن حمایت می شوند.
- دومین ویژگی ستاره های متراکم، اندازه آنها است. آنها بسیار کوچکتر از ستاره های معمولی هستند و بنابر این میدان های گرانشی سطحی بسیار قوی تری هم دارند.
- اغلب اشیا متراکم، میدان های مغاطیسی قوی تری نسبت به ستاره های معمولی دارند. **[3]**

ستاره های نوترونی قطری در حدود $\mathbf{20}km$ و جرمی حدود $\mathbf{1.4}$برابر جرم خورشید ما دارند .این بدان معنی است که ستاره نوترونی آن قدر چگال است که روی زمین یک قاشق از آن وزنی معادل یک بیلیون تن دارد . به دلیل اندازه کوچک و چگالی بالای یک ستاره نوترونی، سطح آن میدان گرانشی در حدود $\mathbf{2\times10^{11}}$برابر میدان گرانشی زمین دارد و همچنین میدان مغناطیسی به اندازه یک میلیون برابر قویتر از میدان مغناطیسی زمین را ایجاد می کنند . ستاره های نوترونی یکی از مراحل پایانی ممکن برای یک ستاره بزرگ هستند. آنها از ستاره های بسیار بزرگ که جرمی بیش از $\mathbf{6-8}$ برابر جرم خورشید ما را دارند بدست می آیند . بعد از این که سوخت هسته ای این ستاره ها به اتمام رسید آنها دستخوش انفجار ابرنواختری می شوند. ناحیه مرکزی ستاره تحت گرانش فرو می ریزد وآن قدر به این فرایند ادامه می دهد که پروتون ها و الکترون ها با یک دیگر ترکیب شده تا نوترون ها را به وجود آورند.

ستاره های نوترونی که در بقایای ابر نو اختر ی هستند ممکن است یا به صورت ستاره های منزوی یافت شوند یا در یک سیستم دو تایی . وقتی یک ستاره نوترونی در یک سیستم دو تایی باشد اختر شناسان قادر به اندازه گیری جرم آن می شوند. از مشاهده چنان سیستم های دوتایی توسط تلسکوپ های رادیویی یا پرتو ایکس[1] ،جرم ستاره نوترونی نزدیک به **1.4** برابر جرم خورشید بدست آمده است .

[1] .Radio Telescope or X-Ray Telescope

برای سیستم های دو تایی که شامل یک جسم نا شناخته هستند آگاهی از جرم کمک می کند که بتوان تمییز داد که جسم مذکور ستاره نوترونی است یا سیاهچاله ،چون سیاهچاله ها جرم بسیار بیشتری نسبت به ستاره های نوترونی دارند.

تپنده ها[1] ستاره های نوترونی چرخان هستندکه به دلیل دورانشان، تپ گسیل می کنند.تپنده ها برای اولین بار در اواخر سال ۱۹۶۷ به عنوان چشمه های رادیویی که با فرکانس ثابت چشمک می زدند توسط جوسلین بل[2] کشف شدند[**6**]. آنها ،دارای فواره هایی از ذرات اند که با سرعتی در حدودسرعت نور حرکت می کنند و از بالای قطب مغناطیسی شان به سمت بیرون جریان می یابند . این فواره ها پرتو های نوری قدرتمند ی تولید می کنندو از آنجاییکه محورهای چرخشی و مغناطیسی یک تپنده در راستای متفاوتی قرار گرفته اند، پرتوهای نوری از فواره ها همزمان با چرخش تپنده ها به اطراف پراکنده می شوند.این اتفاقی است که دقیقا برای چراغ نور افکن که در یک برج فانوس دریایی حرکت می کند، می افتد.به کمک تلسکوپ پرتوی X، نوع بسیار متفاوتی از تپنده ها، در برخی از سیستم های دو تایی ،دیده شده است . در این مورد یک ستاره نوترونی و یک ستاره معمولی یک سیستم دوتایی را تشکیل می دهند. نیروی گرانشی بسیار قوی ستاره نوترونی ،مواد رااز ستاره معمولی به سمت خود میکشد. به نظر میرسد که این مواد در داخل قیفی به سمت ستاره نوترونی قرار گرفته اند که راس قیف در قطب معناطیسی ستاره نوترونی قرار دارد. در این فرایند ،که نمو [3] نام دارد، مواد بسیار داغ شده و تولید اشعه X می نمایند. این تپ های اشعه X زمانی رویت می شوند که لکه های داغ روی ستاره نوترونی چرخان از میان مسیر دید ما از زمین می چرخند. [**3**]

۲-۳ چگونگی تشکیل ستاره های نوترونی

همانگونه که اشاره شد،ستاره های نوترونی پس از فرو ریزش گرانشی هسته ستاره های سنگین در اواخر عمر شان پدید می آیند که سبب انفجار ابر نواختر می شود. ستاره های نوترونی یا ستاره های پروتو_ نوترونی تازه متولد شده غنی از لپتون های $\bar{e}, \nu_e$ هستند. (مرحله I) .جزئیات مکانیزم انفجار ابر نو اختری هنوز به طور کامل درک نشده است ،ولی احتمالا نوترینوها رل بسیار مهمی را در آن بازی می کنند . یکی از

---

[1] .Pulsar

[2] .Jocelyn Bell

[3]. accretion

جالب توجه ترین نظریه ها این است که نوترینوها به طور موقت در درون ستاره در طی فرو ریزش بدام می افتندعلت این است که سطح مقطع ماده نوترینوی معمولی حدود $\sigma \approx 10^{-40} cm^2$ ومسافت آزاد میانگین آنها $\lambda \approx (\sigma \ \ n)^{-1} \approx 10 cm$است (به طوری که چگالی عدد باریونی $n \approx 3n_0$ و n_0 چگالی ماده هسته ای است). واضح است که این طول بسیار کوچکتر از شعاع ستاره پروتو_نوترونی است. [7]

زمانی که فرو ریزش هسته متوقف می شود یک موج شوک[1] به طرف لبه خارجی هسته حرکت می کند.موج شوک تا حدود ۱۰۰ تا ۲۰۰ کیلومتر منتشر شده و بعد از آن متوقف می شود .(مرحله **1** در شکل(۲-۱)) به نظر می رسد که نوترینوهای هسته شوک را دوباره فعال می کنند به طوریکه شوک در طی چند ثانیه به سمت بیرون شتاب گرفته و جبه ستاره ای عظیم را جدا کرده وبه بیرون پرتاب می کند. به علت گسیل نوترینوها به اطراف،فشار کاهش یافته و ستاره پروتو_ نوترونی باقیمانده، به سرعت شروع به انقباض می کند.(مرحله *II*). فرار نوترینوها از نواحی داخلی در مدت زمان $10s$ اتفاق می افتد . نوترینوها ی مشاهده شده از ابر نو اختر $1987A(SN)$این مقیاس زمانی را تائید می کنند. [8,9,10,11]

اتلاف نوترینو ها (که الکترون ها و پروتون ها را مجبور می سازد تا ترکیب شوند و ماده را غنی تر از نوترون می کند.) در ابتدا نواحی داخلی ستاره ای را گرم می کند .دمای هسته به $50MeV \ \ (6\times10^{11}K)$می رسد .(مرحله *III*)بعد از ۱۰ تا ۲۰ ثانیه گسیل یکنواخت نوترینوها شروع می گردد تا نواحی داخلی را خنک کند .بعد ازآن ستاره نسبت به نوترینوها ،اصطلاحا شفاف می شود .(مرحله *IV*) وآهنگ خنک شدن آن افزایش می یابد.

نواحی داخلی ستاره پروتو_نوترونی با آهنگ سریعی انرژی اش را توسط گسیل نوترینو از دست می دهد.بین ده تا صد سال،یعنی زمان تکامل گرمایی پوسته،گرما توسط رسانش الکترونها به داخل رفته و در آن جا توسط نوترینوها به بیرون تابش می شود وساختاری همدما به وجود می آید.(مرحله *V*).

ستاره بطور پیوسته با دمای موثر T_{eff}(دمای داخل ستاره ۱۰۰مرتبه از این دما کوچکتر است)فوتون(که غالبا از نوع پرتوی ایکس است) گسیل می کند.اتلاف انرژی توسط فوتونها تا زمانیکه ستاره 3×10^5 ساله شود ادامه می یابد .(مرحله *VI*).

---

[1].Shock wave

۲-۴ ساختار داخلی و ترکیبات

یک ستاره نوترونی پنج ناحیه اصلی دارد . هسته داخلی ،هسته خارجی ،پوسته ،پوشش[1] و اتمسفر (شکل (۲-۲)).اتمسفر وپوشش جرم بسیار کمی دارند. ولی با این وجود، اتمسفر نقش مهمی را در شکل دهی طیف ناشی از فوتون ها و پوشش نیز در انتقال و رها سازی انرژی گرمایی از سطح ستاره تاثیر دارد. پوسته که ضخامت آن حدود km ۱تا ۲ است،عمدتا متشکل از هسته ها است.هسته ها ی غالب در پوسته با چگالی تغییر می کند،ودامنه اش از ^{56}Fe برای ماده با چگالی های حدود $\mathbf{10^6}\,gr/cm^3$ تا هسته هایی با $A \cong 200$ در نزدیکی سطح مشترک هسته _ پوسته ($n \approx n_0/3$) گسترده است.درون هسته،در چگالی های بالای چگالی چکه نوترون[2] ($\mathbf{4\times10^{11}}\,gr/cm^3$) یعنی جایی که پتانسیل شیمیایی نوترون (انرژی لازم برای اینکه یک نوترون ،دریای فرمیون های تبهگن را ترک کند) صفر است، نوترون ها از هسته ها به سمت بیرون نشت می کنند . در نواحی چگال تر پوسته ، عمده ماده، در مایع نوترونی قرار دارد تا درهسته ها .در مرز مشترک هسته- پوسته ،هسته ها آن چنان در نزدیکی هم قرار گرفته اند که تقریبا می توان گفت که در تماس با یکدیگر هستند. در چگالی های تا حدی کمتر که مقدار آن مشخص نیست شبکه هسته ای به شبکه ای از خلل وفرج ها تبدیل می شود .در واقع پیش بینی شده است که از پوسته تا هسته یک تغییر پیوسته از مواد با شکل های عجیب وجود داشته باشد . از هسته های سه بعدی ،هسته های دو بعدی (اسپاگتی) ،تا تیغه های یک بعدی از هسته ها که بین تهیگاه های مسطح قرار گرفته اند تا خلل وفرج استوانه ای دو بعد ،خلل وفرج سه بعدی و سپس در هسته ستاره ماده یکنواخت نوکلئونی . این سری از گذارها به نام پاستای هسته ای[3] معروف است. هسته ستاره ۹۹ درصد جرم ستاره را تشکیل می دهد .(شکل(۲-۲)).هسته بیرونی شامل مخلوطی از نوکلئون ها و الکترون هاو موئون هاست. نوترون ها می توانند تشکیل ابر شاره $^3P_2$ و پروتون ها تشکیل ابر رسانای $^1S_0$بدهند. در داخل هسته داخلی ،ذرات نا متعارف مانند هایپرون ها یاچگالش بوز (کائون ها یا پایون ها) ممکن است فراوان باشد. [7]

امروزه ستاره های نوترونی براساس ترکیبات داخل هسته، انواع مختلفی دارنددر اینجا ستاره های نوترونی با دیدگاه سنتی (یا ستاره های هادرونی)را مورد بررسی قرار می دهیم . در این گونه ستاره ها ،هسته عمدتا

---

[1] .Envelope

[2]. neutron drip

[3].Nuclear Pasta