

محاسبه اثر نوترینو در محاسبه ساختار ستاره نوترونی تازه متولد شده

غلامحسین بردبار^۱ و بهروز خسروپور^۲

۱ بخش فیزیک، دانشگاه شیراز

۲ گروه فیزیک، دانشگاه اراک

(دریافت مقاله: ۸۶/۶/۲۲ ؛ دریافت نسخه نهایی: ۸۷/۴/۲)

چکیده

در این مقاله ما مرحله ابتدایی شکل گیری ستاره نوترونی تازه متولد شده که Protoneutron Star نامیده می شود و با آنتروپی ثابت به ازای هر نوکلئون، در مرتبه ۱-۲ ثابت بولتزمن و همچنین کسر لپتونی $0/3-0/4$ ، مشخص می گردد، را در نظر گرفته و با محاسبه میانگین انرژی نوترینوها در این مرحله از شکل گیری ستاره، به محاسبه انرژی، معادله حالت ماده، جرم و شعاع ستاره پرداخته ایم. در اینجا به ازای هر آنتروپی و کسر لپتونی، حالتی را که در آن اثر نوترینو در نظر گرفته شده است نسبت به حالتی که از آن صرف نظر شده با هم مقایسه کرده ایم.

واژه های کلیدی: ستاره نوترونی تازه متولد شده، نوترینو، ساختار

۱. مقدمه

ذرات بنیادی و اختز فیزیک ارتباط برقرار می کنند. آنها شامل ماده ای بیش از یک جرم خورشیدی، درون شعاع تقریباً 10 km می باشند. بنابراین ستاره های نوترونی دارای چگالی های بالا از مرتبه 10^{15} gr/cm^3 می باشند. به دلیل چگال بودن ستاره های نوترونی، گرانش آنها فوق العاده زیاد است.

اندکی پس از فروپاشی گرانشی هسته یک ستاره سنگین، یک ستاره نوترونی بسیار جوان شکل می گیرد. در این مرحله آنتروپی به ازای هر نوکلئون ثابت و در مرتبه ۱-۲ ثابت بولتزمن است. به علاوه کسر لپتونی ماده تشکیل دهنده ستاره نیز بالا و در مرتبه $0/3-0/4$ می باشد. این در حالی است که در حقیقت نوترینوها در ماده درونی ستاره به دام افتاده اند.

با مقایسه میان دو زمان، انتشار نوترینوها (10 s) و زمان فروپاشی ستاره ($0/01 \text{ s}$) مشاهده می کنیم که نوترینوها به طور عملی به دام می افتند. می توان درک کرد که چگونه ماده ستاره ای

ستاره های نوترونی در انفجار ابرنواخترها شکل می گیرند. می دانیم که ستاره نوترونی از هسته باقیمانده انفجار یک ابرنواختر به وجود می آید. در ابتدا فرض خنثی بودن الکتریکی ستاره به ما می گوید که به طور میانگین $\bar{n}_e = \bar{n}_p$ (تعداد الکترونها در واحد حجم ستاره برابر تعداد پروتونها در واحد حجم ستاره است). می توان فرض کرد که در همان ابتدای تشکیل ستاره نوترونی خیلی جوان (Protoneutron Star) داریم $0/4\bar{n}_n - 0/3\bar{n}_e = \bar{n}_p$ ؛ ولی در هر حال در دوران میان سالی ستاره نوترونی، مثلاً در حدود 10^5 تا 50^5 سال بعد که تحول نوترونی شدن کامل (total neutronization) در ستاره روی می دهد، نهایتاً $\bar{n}_p = \bar{n}_e \approx 0/005\bar{n}_n$ می شود (یعنی تلاشی بتا $p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$ و وارونه آن به تعادل می رسند). آنها آزمایشگاههای اختر فیزیکی بسیار خوبی برای آزمودن نظریه های فیزیک ماده چگال هستند و بین فیزیک هسته ای، فیزیک

ستاره نوترونی اولیه پرداخته‌ایم.

۲. روش انجام محاسبات

ماده ستاره نوترونی از دو گروه ذرات تشکیل شده است. گروه اول نوکلئونها هستند که توسط نیروی هسته‌ای قوی با یکدیگر برهم‌کنش دارند (ماده نوکلئونی) و گروه دوم لپتونها که شامل الکترونها و میونها می‌باشند (ماده لپتونی). ذرات این گروه نسبت به برهم‌کنش قوی خنثی هستند و از آنجا که نوترینوها هم جزء لپتونهای بدون جرم هستند، بنابراین برای ماده ستاره نوترونی اولیه انرژی کل را به صورت زیر می‌نویسیم:

$$E = E_{Lepton} + E_{Nucl} + u_{\nu e} \quad (1)$$

که در آن E_{Lepton} سهم انرژی ماده لپتونی، E_{Nucl} سهم انرژی ماده نوکلئونی و $u_{\nu e}$ میانگین انرژی نوترینوهای الکترون می‌باشند.

۲.۱. محاسبه انرژی ماده لپتونی

با توجه به اینکه ستاره نوترونی اولیه از نظر بار الکتریکی خنثی است، ما می‌توانیم از برهم‌کنش الکترومغناطیس صرف نظر کنیم. به دلیل چگالی بالا در ماده ستاره نوترونی، برای محاسبه سهم انرژی لپتونها، انرژی تک ذره‌ای به صورت نسبی در نظر گرفته می‌شود، چون لپتونها عمدتاً الکترونهای بسیار نسبیتی‌اند لذا $m = m_e$ جرم سکون الکترون است. بنابراین انرژی واگنی الکترونها برابر است با:

$$E_{lepton} = \sum_j \int \sqrt{(p_j c)^2 + (m_e c)^2} f_{FD}(p_j) \\ = \frac{V}{(\pi^2 \hbar^3)} \int_0^\infty p^2 dp \sqrt{(pc)^2 + (m_e c)^2} \\ \times \frac{1}{1 + e^{\beta[\sqrt{(pc)^2 + (m_e c)^2} - \mu]}} \quad (2)$$

که در آن μ انرژی شیمیایی الکترون است و $\beta = \frac{1}{k_B T}$

$$p = \hbar k \text{ و}$$

$$E_e = \frac{V}{\pi^2} \int_0^\infty k^2 dk \frac{\sqrt{(\hbar k c)^2 + (m_e c)^2}}{1 + e^{\beta[\sqrt{(\hbar k c)^2 + (m_e c)^2} - \mu]}} = N_e \overline{E_e},$$

در این مرحله با شرایط معمولی، یا در شرایط کسر لپتونی پایین، متفاوت است [۱].

یک ستاره نوترونی معمولی به طور کلی دارای ویژگیهای زیر می‌باشد:

$$\begin{aligned} \text{جرم} & 1/44 \leq \frac{M_N}{M_{\text{sun}}} \leq 5/8 \\ \text{شعاع} & 12 \text{ km} \leq R \leq 17 \text{ km} \\ \text{چگالی} & 10^{+18} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \leq \rho \leq 10^{+19} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \end{aligned}$$

معادله حالت ماده ستاره نوترونی به طور عمده به برهم‌کنش نوکلئون-نوکلئون وابسته است. در این مقاله ما از معادله حالتی که با روش وردشی مقید (LOCV)، که یک روش بس ذره‌ای مناسب است، استفاده کرده‌ایم و اثر نوترینو را در انرژی و معادله حالت ماده ستاره، حساب کرده‌ایم. محاسبات برای پتانسیل AV_{18} انجام شده است [۲]. متأسفانه مدل‌های پتانسیل که فقط روی داده‌های نوترون-پروتون برآزش داده می‌شوند، اغلب شرح نسبتاً ضعیفی از داده‌های پروتون-پروتون ارائه می‌دهند. همچنین پتانسیلهایی که روی داده‌های پروتون-پروتون در حالت‌های $T=1$ ، T (آیزواسپین است) فیت می‌شوند، فقط یک توصیف خیلی معمولی از داده‌های نوترون-پروتون ارائه می‌دهند. اخیراً مدل پتانسیل AV_{18} ارائه شده است که این حسن را دارد که هم روی داده‌های پروتون-پروتون و هم روی داده‌های نوترون-پروتون برآزش می‌شود. فرم عملگری این پتانسیل به مقادیر عملگرهای T ، S و T_z ، هر دو نوکلئون بستگی دارد. این پتانسیل از سه قسمت تشکیل شده است. قسمت اول، مستقل از بار که چهارده مولفه عملگری دارد و قسمت دوم که استقلال بار شکسته می‌شود و شامل سه عملگر وابسته به بار است و قسمت آخر که شامل یک عملگر عدم تقارن بار است.

برای ستاره نوترونی اولیه، حالت تعادل هیدروستاتیکی را وقتی در نظر می‌گیریم که فشار تبهگنی برابر فشار گرانشی شود، و از فشارهای ناشی از انرژیهای دورانی و هسته‌ای و مغناطیسی ستاره به علت نا چیز بودن صرف نظر می‌کنیم. در ادامه از حل عددی معادله تعادل هیدروستاتیکی تولمن-اپنهایمر-ولکوف (TOV)، به محاسبه اثر نوترینو در ساختار

$V(12)$ به صورت زیر است:

$$V(12) = \sum_{p=1}^{\Lambda} V^p(r_{12}) O_{12}^p \quad (10)$$

برای محاسبه E_p با در نظر گرفتن قید بهنجارش توابع موج دو نوکلئونی معادله E_p را کمینه می‌کنیم، تا معادلات کوپل شده و کوپل نشده به دست آوریم [۳، ۵]. از حل این معادلات توابع همبستگی معین و سپس E_p قابل محاسبه است.

۳.۲. محاسبه میانگین انرژی نوترینوهای الکترون

برای میانگین انرژی نوترینوهای الکترون، با کمک رابطه (۱) مربوط به تابع توزیع انرژی لپتونها و با در نظر گرفتن جرم صفر برای نوترینوها داریم:

$$u_{ve} = \frac{c}{\pi^2 n_{ve} \hbar^3} \int_0^{\infty} \frac{p^2 dp}{1 + \exp[\beta(pc - \mu_{ve})]}, \quad (11)$$

که در آن $\beta = \frac{1}{k_B T}$ و n_{ve} چگالی عددی نوترینوهای الکترون می‌باشد که توسط رابطه زیر به دست می‌آید.

$$n_{ve} = \frac{1}{\pi^2 \hbar^3} \int_0^{\infty} \frac{p^2 dp}{1 + \exp(pc - \mu_{ve})}, \quad (12)$$

که در روابط (۱۱) و (۱۲)، μ_{ve} پتانسیل شیمیایی نوترینوهای الکترون می‌باشد، که مقدار آن در هنگام به دام افتادن نوترینوها برای محاسبه میانگین انرژی نوترینوهای الکترون مهم است.

پتانسیل شیمیایی انواع نوترینوها در هنگام به دام افتادن در ستاره از معادله زیر پیروی می‌کند [۶].

$$\mu_i = b_i \mu_n - q_i (\mu_L - \mu_{VL}), \quad (13)$$

که در آن b_i عدد باریونی ذره i ام و q_i بار الکتریکی آن است، بنابراین برای پتانسیل شیمیایی نوترینوهای الکترون داریم:

$$\mu_{ve} = \mu_p - \mu_n + \mu_e. \quad (14)$$

همچنان که ستاره نوترونی اولیه لپتون زدایی می‌شود و پتانسیل شیمیایی الکترون (μ_e) و کسر الکترون کاهش می‌یابد؛ پتانسیل شیمیایی نوترینوهای الکترون تقریباً برابر صفر می‌شود [۷].

$$\mu_{ve} = \mu_e + \mu_p - \mu_n \rightarrow 0, \quad (15)$$

در نتیجه با در نظر گرفتن مقدار صفر برای پتانسیل شیمیایی نوترینوهای الکترون، میانگین انرژی نوترینوهای الکترون از حل

که انرژی میانگین هر الکترون برابر است با

$$\bar{E}_e = \frac{V}{N_e \pi^2} \int_0^{\infty} \left(\frac{m_e c}{\hbar} \right)^3 x^2 dx \frac{m_e c^2 \sqrt{1+x^2}}{\beta [m_e c^2 \sqrt{1+x^2} - \mu]_{1+e}}. \quad (3)$$

با تغییر متغیر $x = \frac{\hbar k}{m_e c}$ و چگالی عددی الکترونها $n_e = \frac{N_e}{V}$ در خاتمه انرژی میانگین هر الکترون بدین صورت به دست می‌آید:

$$\bar{E}_e = \frac{m_e^4 c^5}{n_e \pi^2 \hbar^3} \int_0^{\infty} \frac{x^2 dx \sqrt{1+x^2}}{\beta [m_e c^2 \sqrt{1+x^2} - \mu]_{1+e}}, \quad (4)$$

و نهایتاً انرژی کل الکترونها $E_e = N_e \bar{E}_e$ خواهد بود.

۲.۲. محاسبه انرژی ماده نوکلئونی

ما توزیع انرژی نوکلئونها را با استفاده از روش وردشی مقید (LOCV) محاسبه کرده‌ایم [۳، ۴ و ۵]. ما فقط دو جمله اول در بسط خوشه‌ای را در تابع انرژی در نظر می‌گیریم، زیرا بقیه جملات عملاً به علت کوتاه برد بودن برهم‌کنش بین ذرات سهم خیلی کوچکی در انرژی دارند [۴].

$$E_{Nucl} = E_1 + E_p, \quad (5)$$

که در آن E_1 انرژی تک جسمی برای ماده‌ای که شامل Z پروتون و N نوترون عبارت است از:

$$E_1 = \sum_{i=n,p} \frac{\hbar^3}{2m_i \rho \pi^2} \int_0^{\infty} \frac{1}{\beta \left[\frac{\hbar^2 k^2}{2m_i} - \mu_i \right]_{1+e}} k^2 dk, \quad (6)$$

که در آن m_i جرم سکون نوکلئونی است و ρ از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\rho = \sum_{i=n,p} \frac{1}{\pi^2} \int_0^{\infty} \frac{1}{\beta \left[\frac{\hbar^2 k^2}{2m_i} - \mu_i \right]_{1+e}} k^2 dk, \quad (7)$$

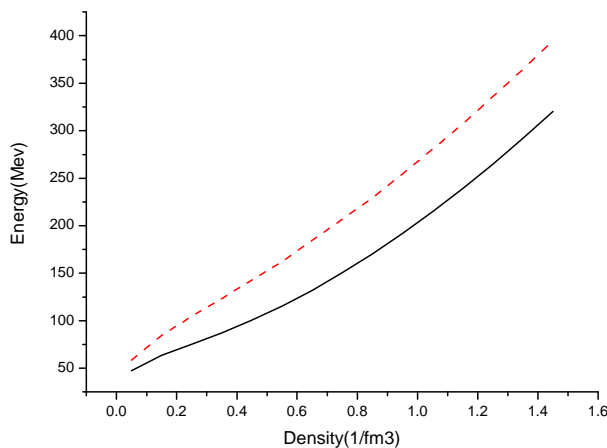
انرژی دو جسمی E_p برابر است با:

$$E_p = \frac{1}{V} \sum_{ij} \langle ij | v(12) | ij - ji \rangle, \quad (8)$$

که در آن

$$v(12) = \left[\left(-\frac{\hbar^2}{2m} \right) \left[f(12), \left[\nabla_{12}^2, f(12) \right] \right] + f(12) V(12) f(12) \right], \quad (9)$$

که در رابطه بالا $f(12)$ و $V(12)$ به ترتیب تابع همبستگی دو جسمی و پتانسیل نوکلئون - نوکلئون می‌باشند. شکل عمومی



شکل ۲. نمودارهای انرژی بر حسب چگالی عددی برای حالتی که آنتروپی به ازای هر نوکلئون برابر $1 k_B$ و کسر لپتونی $0/4$ می‌باشند. نمودار ممتد، محاسبات با صرف نظر کردن از اثر نوترینو و نمودار خط چین محاسبات با در نظر گرفتن اثر نوترینو می‌باشد.

نوترینو را در ساختار ستاره نوترونی اولیه، در حال تکامل را محاسبه کرده‌ایم. توجه شود که برای حل معادله TOV، ابتدا یک مقدار برای چگالی مرکز ستاره نوترونی در نظر گرفته و سپس از معادله TOV تا جایی که فشار صفر شود انتگرال‌گیری می‌کنیم. در این حالت r همان شعاع ستاره (R) و جرم متناظر با آن یعنی $M=m(R)$ همان جرم ستاره خواهد بود.

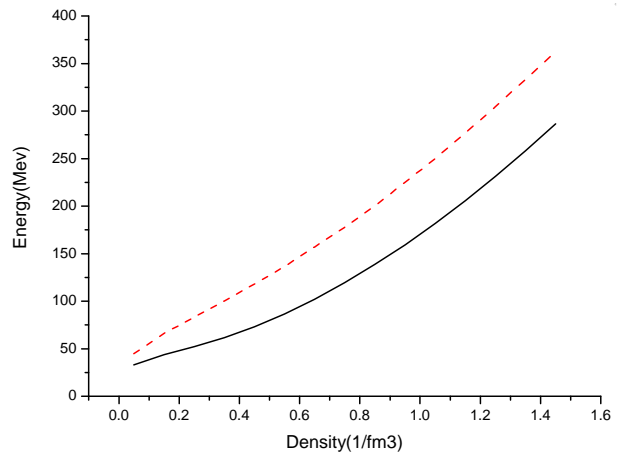
۳. نتایج

در زیر نمودارهای انرژی و معادله حالت ستاره را بر حسب چگالی عددی و جرم و شعاع ستاره را بر حسب چگالی جرمی، با مقایسه با نتایج حالتی که از اثر نوترینو صرف نظر شده است را رسم نموده‌ایم با توجه به دو مقدار آنتروپی ثابت به ازای هر نوکلئون ($s = 1 - 2 k_B$) و دو مقدار برای کسر لپتونی ($Y_L = 0/3 - 0/4$)، برای هر کدام از موارد بالا چهار نمودار مستقل رسم شده است.

۳.۱. انرژی ستاره نوترونی اولیه

شکل‌های ۱ تا ۴، تغییرات انرژی ستاره نوترونی اولیه را بر حسب چگالی عددی ستاره نشان می‌دهند.

از نمودارهای مذکور مشاهده می‌شود، که برای هر کسر لپتونی



شکل ۱. نمودارهای انرژی بر حسب چگالی عددی برای حالتی که آنتروپی به ازای هر نوکلئون برابر $1 k_B$ و کسر لپتونی $0/3$ می‌باشند. نمودار ممتد، محاسبات با صرف نظر کردن از اثر نوترینو و نمودار خط چین محاسبات با در نظر گرفتن اثر نوترینو می‌باشد.

انتگرال معادله (۱۱) برابر است با:

$$\mu_{Ve} = 3/15 T \quad (16)$$

که در آن T دمای ستاره نوترونی اولیه می‌باشد.

۴.۲. محاسبه ساختار ستاره نوترونی اولیه

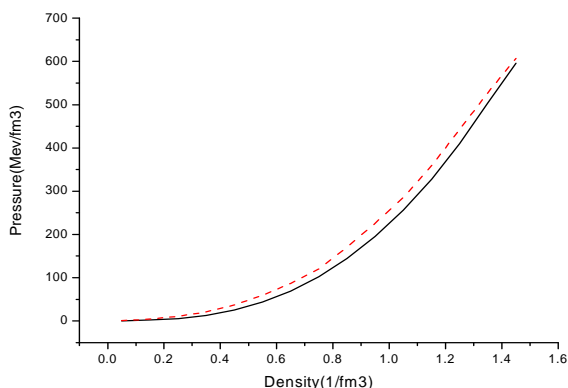
ستاره‌های نوترونی اجرامی نسبیتی هستند. لذا برای مطالعه ساختار و تحولات آنها، باید از نظریه نسبیت عام استفاده کرد. با فرض اینکه ماده درون ستاره سیال کامل باشد و همچنین این فرض که ستاره دارای ترکیبات شیمیایی است که در دسترس ستاره ثابت است، به معادله تعادل هیدروستاتیکی تولمن-اپنهایمر-ولکوف (TOV) می‌رسیم، که این معادله به شکل زیر است [۸].

$$\frac{dp}{dr} = -\frac{Gm(r)\epsilon(r)}{r^2} \left[1 + \frac{p(r)}{\epsilon(r)} \right] \left[1 + \frac{4\pi r^3 p(r)}{m(r)} \right] \left[1 - \frac{2Gm(r)}{r} \right]^{-1}, \quad (17)$$

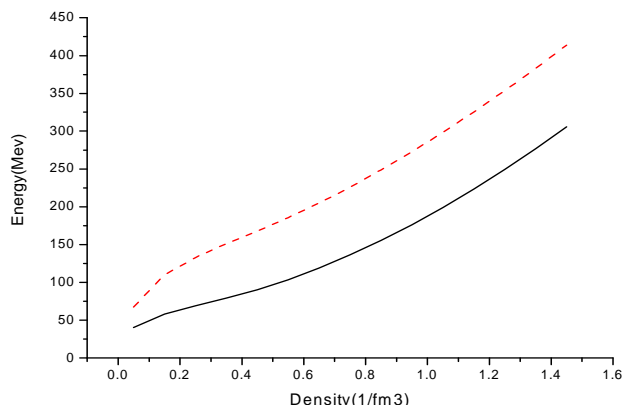
که در آن کمیت $m(r)$ جرمی است که داخل کره‌ای به شعاع r قرار می‌گیرد و توسط رابطه زیر به دست می‌آید:

$$m(r) = \int_0^r 4\pi r'^2 \epsilon(r') dr'. \quad (18)$$

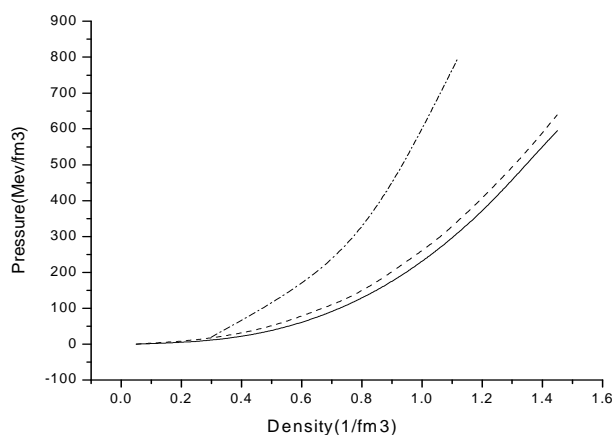
ما با کمک معادله حالت به حل عددی این معادله پرداخته و اثر



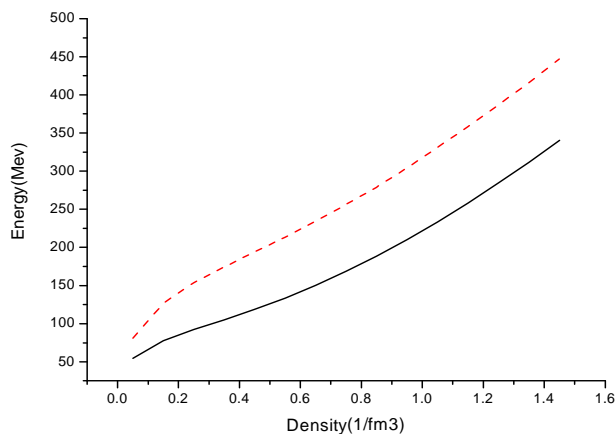
شکل ۵. نمودارهای فشار بر حسب چگالی عددی برای حالتی که آنتروپی به ازای هر نوکلئون برابر 1 k_B و کسر لپتونی $0/3$ می باشند. نمودار ممتد، محاسبات با صرف نظر کردن از اثر نوترینو و نمودار خط چین محاسبات با در نظر گرفتن اثر نوترینو می باشد.



شکل ۳. نمودارهای انرژی بر حسب چگالی عددی برای حالتی که آنتروپی به ازای هر نوکلئون برابر 2 k_B و کسر لپتونی $0/3$ می باشند. نمودار ممتد، محاسبات با صرف نظر کردن از اثر نوترینو و نمودار خط چین محاسبات با در نظر گرفتن اثر نوترینو می باشد.



شکل ۶. نمودارهای فشار بر حسب چگالی عددی برای حالتی که آنتروپی به ازای هر نوکلئون برابر 1 k_B و کسر لپتونی $0/4$ می باشند. نمودار ممتد، محاسبات با صرف نظر کردن از اثر نوترینو و نمودار خط چین محاسبات با در نظر گرفتن اثر نوترینو می باشد. نتایج SSW [۹] (خط نقطه) نیز برای مقایسه آورده شده‌اند.



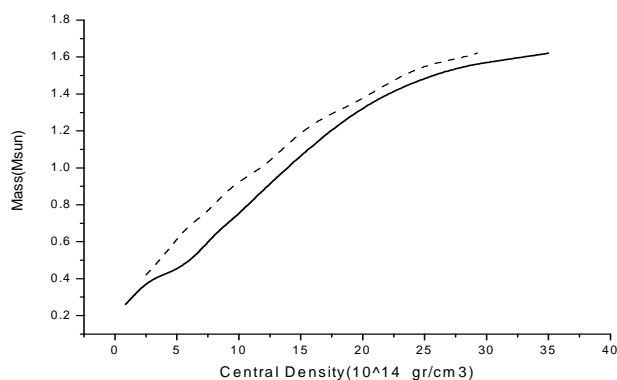
شکل ۴. نمودارهای انرژی بر حسب چگالی عددی برای حالتی که آنتروپی به ازای هر نوکلئون برابر 2 k_B و کسر لپتونی $0/4$ می باشند. نمودار ممتد، محاسبات با صرف نظر کردن از اثر نوترینو و نمودار خط چین محاسبات با در نظر گرفتن اثر نوترینو می باشد.

۳.۲. معادله حالت ستاره نوترونی اولیه

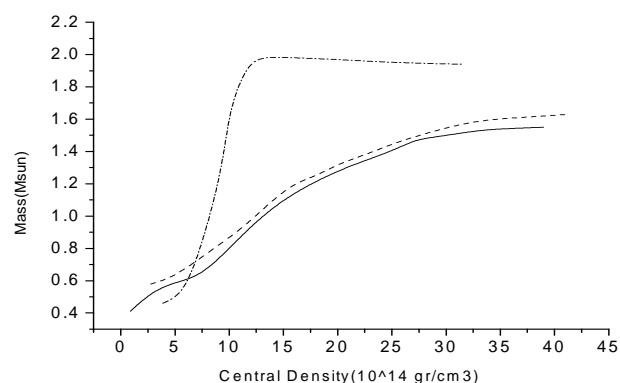
شکل‌های ۵ تا ۸، تغییر معادله حالت ستاره نوترونی اولیه را بر حسب چگالی عددی ستاره نشان می‌دهند.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در هر نمودار به ازای یک مقدار معین کسر لپتونی و آنتروپی، اختلاف میان فشار در دو حالت با در نظر گرفتن نوترینو، در چگالی‌های پایین ناچیز اما در

و مقدار آنتروپی معین، اثر نوترینو موجب افزایش انرژی ستاره نوترونی اولیه نسبت به حالتی که از اثر نوترینو صرف نظر شده، گردیده است. مقدار این اختلاف برای کسرهای لپتونی یکسان، با افزایش آنتروپی به ازای هر نوکلئون افزایش می‌یابد. این اختلاف برای آنتروپی‌های یکسان با افزایش کسر لپتونی کاهش می‌یابد.



شکل ۹. نمودارهای جرم بر حسب چگالی جرمی مرکز ستاره برای حالتی که آنتروپی به ازای هر نوکلئون برابر $1k_B$ و کسر لیتونی $0/3$ می‌باشند. نمودار ممتد، محاسبات با صرف نظر کردن از اثر نوترینو و نمودار خط چین محاسبات با در نظر گرفتن اثر نوترینو می‌باشد.

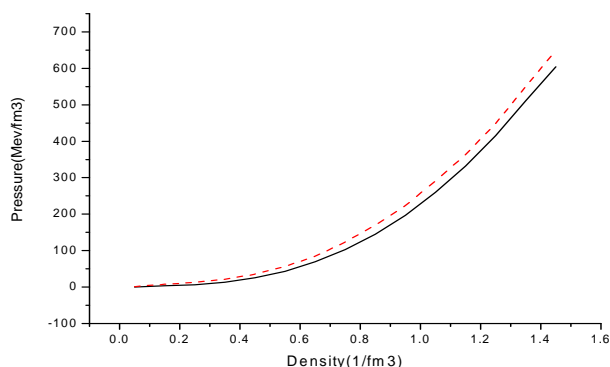


شکل ۱۰. نمودارهای جرم بر حسب چگالی جرمی مرکز ستاره برای حالتی که آنتروپی به ازای هر نوکلئون برابر $1k_B$ و کسر لیتونی $0/4$ می‌باشند. نمودار ممتد، محاسبات با صرف نظر کردن از اثر نوترینو و نمودار خط چین محاسبات با در نظر گرفتن اثر نوترینو می‌باشد. نتایج SSW [۹] (خط نقطه) نیز برای مقایسه آورده شده‌اند.

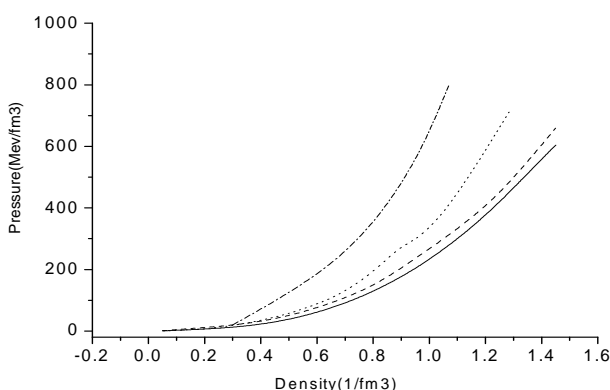
شکلها مشخص است، نتایج GHZ به نتایج ما نزدیکتر از نتایج SSW می‌باشد. همین‌طور دیده می‌شود که معادله حالت به دست آمده توسط SSW سختتر از معادله حالت محاسبه شده توسط ما می‌باشد.

۳.۳. ساختار ستاره نوترونی اولیه

شکلهای ۹ تا ۱۲، تغییرات جرم ستاره نوترونی اولیه را بر حسب چگالی جرمی مرکز ستاره نشان می‌دهند. از نمودارهای بالا مشاهده می‌شود که اثر نوترینو موجب

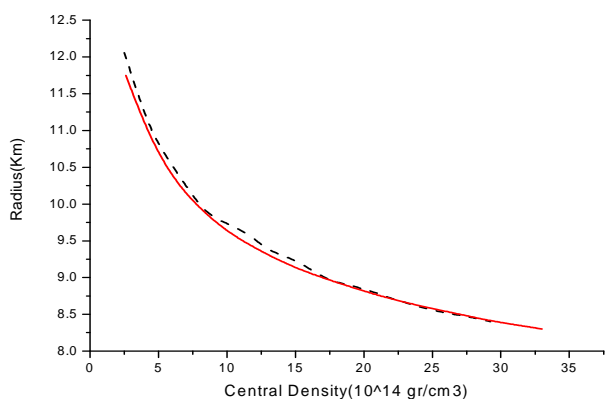


شکل ۷. نمودارهای فشار بر حسب چگالی عددی برای حالتی که آنتروپی به ازای هر نوکلئون برابر $2k_B$ و کسر لیتونی $0/3$ می‌باشند. نمودار ممتد، محاسبات با صرف نظر کردن از اثر نوترینو و نمودار خط چین محاسبات با در نظر گرفتن اثر نوترینو می‌باشد.

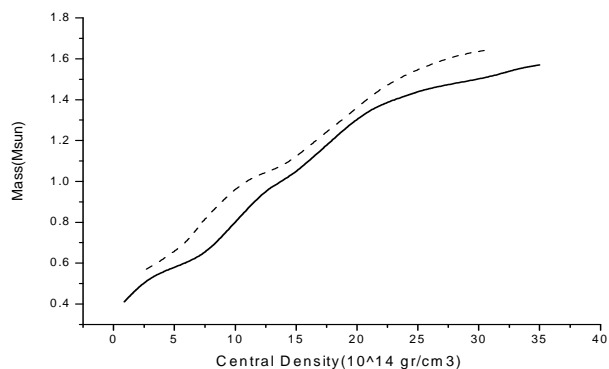


شکل ۸. نمودارهای فشار بر حسب چگالی عددی برای حالتی که آنتروپی به ازای هر نوکلئون برابر $2k_B$ و کسر لیتونی $0/4$ می‌باشند. نمودار ممتد، محاسبات با صرف نظر کردن از اثر نوترینو و نمودار خط چین محاسبات با در نظر گرفتن اثر نوترینو می‌باشد. نتایج SSW [۹] (خط نقطه) و GHZ [۱۰] (خط چین) نیز برای مقایسه آورده شده‌اند.

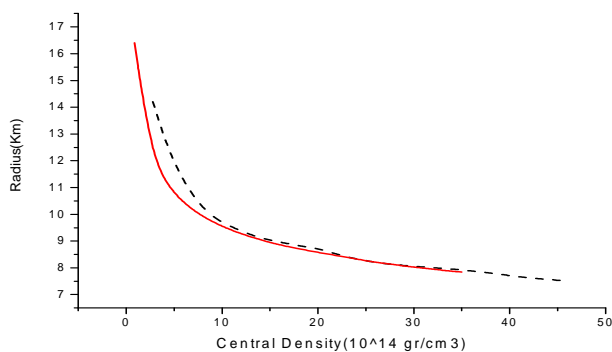
چگالیهای بالا این اختلاف قابل ملاحظه می‌باشد. از نمودارهای بالا مشاهده می‌شود که اثر نوترینو موجب افزایش فشار ستاره نوترونی اولیه نسبت به حالتی که از اثر نوترینو صرف نظر شده، گردیده است. که مقدار این اختلاف برای کسرهای لیتونی یکسان، با افزایش آنتروپی به ازای هر نوکلئون به صورت ناچیز افزایش می‌یابد و این اختلاف در آنتروپیهای یکسان با افزایش کسر لیتونی به صورت ناچیز کاهش می‌یابد. در شکلهای ۶ و ۸ نتایج کارهای SSW [۹] و GHZ [۱۰] نیز برای مقایسه با نتایج ما آورده شده‌اند. همان‌طور که از این



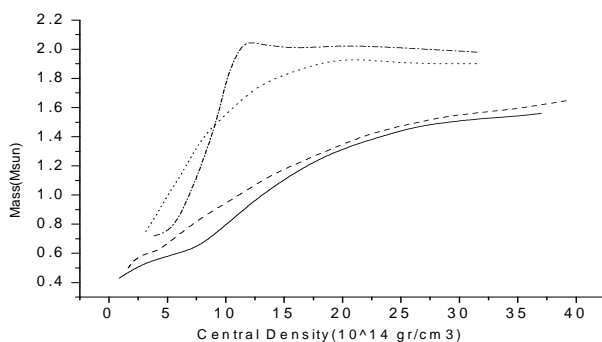
شکل ۱۱. نمودارهای جرم بر حسب چگالی جرمی مرکز ستاره برای حالتی که آنتروپی به ازای هر نوکلئون برابر $2k_B$ و کسر لپتونی $0/3$ می‌باشند. نمودار ممتد، محاسبات با صرف نظر کردن از اثر نوترینو و نمودار خط چین محاسبات با در نظر گرفتن اثر نوترینو می‌باشد.



شکل ۱۲. نمودارهای جرم بر حسب چگالی جرمی مرکز ستاره برای حالتی که آنتروپی به ازای هر نوکلئون برابر $2k_B$ و کسر لپتونی $0/3$ می‌باشند. نمودار ممتد، محاسبات با صرف نظر کردن از اثر نوترینو و نمودار خط چین محاسبات با در نظر گرفتن اثر نوترینو می‌باشد.



شکل ۱۳. نمودارهای شعاع بر حسب چگالی جرمی مرکز ستاره برای حالتی که آنتروپی به ازای هر نوکلئون برابر k_B و کسر لپتونی $0/4$ می‌باشند. نمودار ممتد، محاسبات با صرف نظر کردن از اثر نوترینو و نمودار خط چین محاسبات با در نظر گرفتن اثر نوترینو می‌باشد.

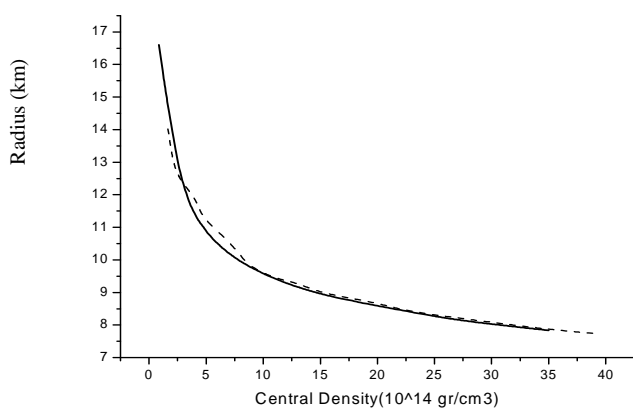


شکل ۱۴. نمودارهای جرم بر حسب چگالی جرمی مرکز ستاره برای حالتی که آنتروپی به ازای هر نوکلئون برابر $2k_B$ و کسر لپتونی $0/4$ می‌باشند. نمودار ممتد، محاسبات با صرف نظر کردن از اثر نوترینو و نمودار خط چین محاسبات با در نظر گرفتن اثر نوترینو می‌باشد. نتایج SSW [۹] (خط نقطه) و 10^9 GHZ [۱۰] (نقطه چین) نیز برای مقایسه آورده شده‌اند.

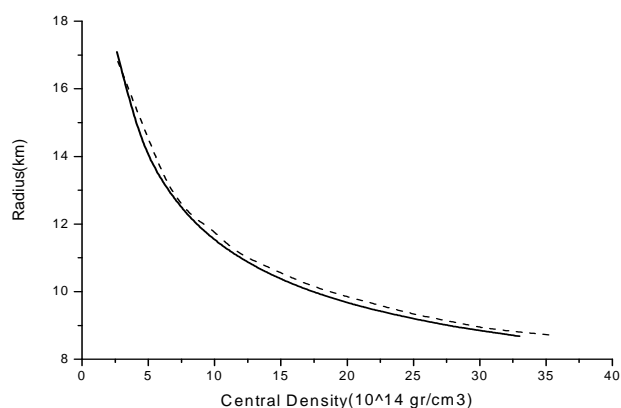
اختلاف قابل ملاحظه را نشان می‌دهد.

شکل‌های ۱۳ تا ۱۶، تغییرات شعاع ستاره نوترونی اولیه را بر حسب چگالی جرمی مرکز ستاره نشان می‌دهند. از نمودارهای بالا مشاهده می‌شود که اثر نوترینو موجب افزایش شعاع ستاره نوترونی اولیه، نسبت به حالتی که از اثر نوترینو صرف نظر شده، گردیده است. با مقایسه نمودارهای ۱۳ تا ۱۶ می‌توان دید که مقدار این اختلاف برای کسر لپتونی یکسان، با افزایش آنتروپی به ازای هر نوکلئون کاهش می‌یابد و همچنین این اختلاف برای حالت آنتروپهای یکسان با افزایش

افزایش جرم ستاره نوترونی اولیه، نسبت به حالتی که از اثر نوترینو صرف نظر شده، گردیده است. از مقایسه این نمودارها دیده می‌شود که مقدار این اختلاف برای کسر لپتونی یکسان، با افزایش آنتروپی به ازای هر نوکلئون افزایش می‌یابد و این اختلاف برای حالت آنتروپهای یکسان با افزایش کسر لپتونی کاهش می‌یابد. در شکل‌های ۱۰ و ۱۲ یک مقایسه بین نتایج ما و نتایج SSW [۹] و 10^9 GHZ نیز انجام شده است که این یک



شکل ۱۶. نمودارهای شعاع بر حسب چگالی جرمی مرکز ستاره برای حالتی که آنتروپی به ازای هر نوکلئون برابر $2k_B$ و کسر لپتونی $0/4$ می‌باشند. نمودار ممتد، محاسبات با صرف نظر کردن از اثر نوترینو و نمودار خط چین محاسبات با در نظر گرفتن اثر نوترینو می‌باشد.



شکل ۱۵. نمودارهای شعاع بر حسب چگالی جرمی مرکز ستاره برای حالتی که آنتروپی به ازای هر نوکلئون برابر $2k_B$ و کسر لپتونی $0/3$ می‌باشند. نمودار ممتد، محاسبات با صرف نظر کردن از اثر نوترینو و نمودار خط چین محاسبات با در نظر گرفتن اثر نوترینو می‌باشد.

جدول ۱. مقایسه حد جرمی ستاره نوترونی تازه متولد شده، برای دو حالت با اثر نوترینو و حالتی که از نوترینو صرف نظر شده است. نتایج [۹] SSW و [۱۰] GHZ نیز برای مقایسه آورده شده‌اند.

	نتایج ما (با اثر نوترینو)	نتایج ما (بدون اثر نوترینو)	SSW	GHZ
$S=1, Y_L=0/3$	$1/69 Msun$	$1/57 Msun$		
$S=1, Y_L=0/4$	$1/63 Msun$	$1/52 Msun$	$2/01 Msun$	
$S=2, Y_L=0/3$	$1/71 Msun$	$1/62 Msun$		
$S=2, Y_L=0/4$	$1/65 Msun$	$1/53 Msun$	$2/03 Msun$	$1/91 Msun$

برای ستاره نوترونی اولیه می‌گردد.

در جدول ۱ نتایج ما با نتایج SSW [۹] و GHZ [۱۰] نیز مقایسه شده‌اند. در اینجا یک اختلاف بین این نتایج دیده می‌شود. اما همان‌طور که مشخص است، اضافه کردن اثر نوترینو نتایج ما را به نتایج SSW و GHZ نزدیکتر کرده است.

کسر لپتونی نیز کاهش می‌یابد.

در جدول ۱ به مقایسه حد جرمی ستاره نوترونی اولیه، با توجه به اثر نوترینو و حالتی که از اثر نوترینو صرف نظر شده، پرداخته‌ایم. از این مقایسه دیده می‌شود که در نظر گرفتن اثر نوترینوها در محاسبات باعث افزایش حد جرمی محاسبه شده

مراجع

1. H A Bethe, G E Brown, J Applegate and J M Lattimer, *Nucl. Phys. A* **324** (1979) 487.
2. G H Bordbar, *Int. J. Theor. Phys.* **41** (2002) 309.
3. G H Bordbar and M Modarres, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **23** (1997) 1631.
۴. غ. ح. بردبار، فیزیک دستگاههای چند ذره‌ای، درس‌نامه، دانشگاه شیراز (۱۳۸۰).
5. G H Bordbar and M Modarres, *Phys. Rev. C* **57** (1998) 714.
6. J A Pons, S Reddy, M Prakash, J M Lattimer and J A Miralles, *Astrophys. J.* **513** (1999) 780.
7. H Thomas Janka, *Astropart. Phys.* **3** (1995) 377.
8. S Shapiro and S Teukolsky, *Black Holes, White Dwarfs and Neutron Stars*, Wiley, New Yourk (1983).
9. K Strobel, Ch Schaab and M K Weigel, *Astron. Astrophys.* **350** (1999) 497.
10. D Gondek, P Haensel and J L Zdunik, *Astron. Astrophys.* **325** (1995) 217.