مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران، جلد ۸، شمارهٔ ۳، پاییز ۱۳۸۷

محاسبهٔ اثر نوترینو در محاسبهٔ ساختار ستارهٔ 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 نسخهٔ نهایی: ۸۷/۴/۲)

چکیده

در این مقاله ما مرحلهٔ ابتدایی شکل‌گیری ستارهٔ نوترونی تازه متولد شده که Protoneutron Star نامیده می‌شود و با آنتروپی ثابت به ازای هر نوکلئون، در مرتبهٔ ۲-۱ ثابت بولتزمن و همچنین کسر لپتونی ۰/۳–۰/۴، مشخص می‌گردد، را در نظر گرفته و با محاسبهٔ میانگین انرژی نوترینوها در این مرحله از شکل‌گیری ستاره، به محاسبهٔ انرژی، معادلهٔ حالت ماده، جرم و شعاع ستاره پرداخته‌ایم. 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 کرده‌ایم.

واژه‌های کلیدی: ستارهٔنوترونی تازه متولد شده، نوترینو، ساختار

۱. مقدمه

ستاره‌های نوترونی در انفجار ابرنواخترها شکل می‌گیرند. می‌دانیم که ستارهٔ نوترونی از هستهٔ باقیماندهٔ انفجار یک ابرنواختر به وجود می‌آید. در ابتدا فرض خنثی بودن الکتریکی ستاره به ما می‌گوید که به طور میانگین $\overline{n_e} = \overline{n_p}$ (تعداد الکترونها در واحد حجم ستاره برابر تعداد پروتونها در واحد حجم ستاره است). می‌توان فرض کرد که در همان ابتدای تشکیل ستاره نوترونی خیلی جوان (Protoneutron Star) داریم $\overline{n_p} = \overline{n_e} \approx ۰/۳ - ۰/۴\overline{n_n}$؛ ولی در هر حال در دوران میان‌سالی ستارهٔ نوترونی، مثلاً در حدود ۱۰ تا ۵۰ سال بعد که تحول نوترونی شدن کامل (total neutronization) در ستاره روی می‌دهد، نهایتاً $\overline{n_p} = \overline{n_e} \approx ۰/۰۰۵\overline{n_n}$ می‌شود (یعنی تلاشی بتا $n \Leftrightarrow p^+ + e^- + \overline{\gamma_e}$ و وارونهٔ آن به تعادل می‌رسند). آنها آزمایشگاههای اختر فیزیکی بسیارخوبی برای آزمودن نظریه‌های فیزیک ماده چگال هستند و بین فیزیک هسته‌ای، فیزیک ذرات بنیادی و اخترفیزیک ارتباط برقرار می‌کنند. آنها شامل ماده‌ای بیش از یک جرم خورشیدی، درون شعاع تقریبا ۱۰ km می‌باشند. بنابراین ستاره‌های نوترونی دارای چگالیهای بالا از مرتبه $۱۰^{۱۵}\,gr/cm^۳$ می‌باشند. به دلیل چگال بودن ستاره‌های نوترونی، گرانش آنها فوق العاده زیاد است.

اندکی پس از فروپاشی گرانشی هستهٔ یک ستاره سنگین، یک ستاره نوترونی بسیار جوان شکل می‌گیرد. در این مرحله آنتروپی به ازای هر نوکلئون ثابت و در مرتبهٔ ۲-۱ ثابت بولتزمن است. به علاوه کسر لپتونی ماده تشکیل دهندهٔ ستاره نیز بالا و در مرتبهٔ ۰/۳–۰/۴ می‌باشد. این در حالی است که در حقیقت نوترینوها در مادهٔ درونی ستاره به دام افتاده‌اند.

با مقایسه میان دو زمان، انتشار نوترینوها (۱۰s) و زمان فروپاشی ستاره (۰/۰۱s) مشاهده می‌کنیم که نوترینوها به طور عملی به دام می‌افتند. می‌توان درک کرد که چگونه مادهٔ ستاره‌ای

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

یک ستارهٔ نوترونی معمولی به طور کلی دارای ویژگیهای زیر می‌باشد؛

جرم $۱/۴۴ \le \frac{M_N}{M_{sun}} \le ۵/۸$

شعاع $۱۲\text{km} \le R \le ۱۷\text{km}$

چگالی $۱۰^{+۱۸}\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^۳} \le \rho \le ۱۰^{+۱۹}\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^۳}$

معادلهٔ حالت مادهٔ ستارهٔ نوترونی به طور عمده به برهم‌کنش نوکلئون- نوکلئون وابسته است. در این مقاله ما از معادلهٔ حالتی که با روش وردشی مقید (LOCV)، که یک روش بس ذره‌ای مناسب است، استفاده کرده‌ایم و اثر نوترینو را در انرژی و معادلهٔ حالت مادهٔ ستاره، حساب کرده‌ایم. محاسبات برای پتانسیل $AV_{۱۸}$ انجام شده است[۲]. متأسفانه مدلهای پتانسیل که فقط روی داده‌های نوترون- پروتون برازش داده می‌شوند، اغلب شرح نسبتاً ضعیفی از داده‌های پروتون- پروتون ارائه می‌دهند. همچنین پتانسیلهایی که روی داده‌های پروتون-پروتون در حالتهای $T = ۱$، (T آیزواسپین است) فیت می‌شوند، فقط یک توصیف خیلی معمولی از داده‌های نوترون- پروتون ارائه می‌دهند. اخیراً مدل پتانسیل $AV_{۱۸}$، ارائه شده است که این حسن را دارد که هم روی داده های پروتون- پروتون و هم روی داده‌های نوترون-پروتون برازش 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 مولفهٔ 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 ستارهٔ 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 معادلهٔ تعادل هیدروستاتیکی تولمن- اپنهایمر- ولکوف (TOV)، به محاسبهٔ اثر نوترینو در ساختار ستارهٔ نوترونی اولیه پرداخته‌ایم.

۲. روش انجام محاسبات

مادهٔ ستارهٔ نوترونی از دو گروه ذرات تشکیل شده است. گروه اول نوکلئونها هستند که توسط نیروی هسته‌ای قوی با یکدیگر بر هم‌کنش دارند (مادهٔ 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 ستارهٔ نوترونی اولیه انرژی کل را به صورت زیر می‌نویسیم:

$$E = E_{Lepton} + E_{Nucl} + u_{\nu e} \qquad (۱)$$

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

۲. ۱. محاسبهٔ انرژی مادهٔ لپتونی

با توجه به اینکه ستارهٔ نوترونی اولیه از نظر بار الکتریکی خنثی است، ما می‌توانیم از بر هم‌کنش الکترومغناطیس صرف نظر کنیم. به دلیل چگالی بالا در مادهٔ ستارهٔ نوترونی، برای محاسبهٔ سهم انرژی لپتونها، انرژی تک ذره‌ای به صورت نسبیتی 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:

$$E_{lepton} = \sum_j ۲\sqrt{(p_j c)^۲ + (m_e c^۲)^۲}\, f_{FD}(p_j)$$
$$= \frac{V}{(۲\pi h)^۳}\int_۰^\infty ۴p^۲dp۲\sqrt{(pc)^۲ + (m_e c^۲)^۲} \qquad (۲)$$
$$\times \frac{۱}{۱ + e^{\beta[\sqrt{(pc)^۲ + (m_e c^۲)^۲} - \mu]}},$$

که در آن μ انرژی شیمیایی الکترون است و $\beta = \frac{۱}{k_B T}$ و $p = \hbar k$.

$$E_e = \frac{V}{\pi^۲}\int_۰^\infty k^۲dk \frac{\sqrt{(\hbar kc)^۲ + (m_e c^۲)^۲}}{۱ + e^{\beta\left[\sqrt{(\hbar kc)^۲ + (m_e c^۲)^۲} - \mu\right]}} = N_e\overline{E_e},$$

که انرژی میانگین هر الکترون برابر است با

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

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

$$\overline{E_e} = \frac{m_e^4 c^5}{n_e \pi^2 \hbar^3} \int_0^\infty \frac{x^2 dx \sqrt{1+x^2}}{1+e^{\beta\left[m_e c^2\sqrt{1+x^2}-\mu\right]}}, \qquad (4)$$

و نهایتاً انرژی کل الکترونها $E_e = N_e \overline{E_e}$ خواهد بود.

۲. ۲. محاسبهٔ انرژی مادهٔ 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].

$$E_{Nucl} = E_1 + E_2, \qquad (5)$$

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

$$E_1 = \sum_{i=n,p} \frac{\hbar^2}{2 m_i \rho \pi^2} \int_0^\infty \frac{1}{1+e^{\beta\left[\frac{\hbar^2 k^2}{2m_i}-\mu_i\right]}} k^4 dk, \qquad (6)$$

که در آن m_i جرم سکون نوکلئونی است و ρ از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:

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

انرژی دو جسمی E_2 برابر است با:

$$E_2 = \frac{1}{2}\sum_{ij} \langle ij | v(12) | ij - ji \rangle, \qquad (8)$$

که در آن

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

که در رابطهٔ بالا $f(12)$ و $V(12)$ به ترتیب تابع همبستگی دو جسمی و پتانسیل نوکلئون - نوکلئون می‌باشند. شکل عمومی $V(12)$ به صورت زیر است:

$$V(12) = \sum_{p=1}^{18} V^p(r_{12}) O_{12}^p \qquad (10)$$

برای محاسبه E_2 با در نظر گرفتن قید بهنجارش توابع موج دو نوکلئونی معادله E_2 را کمینه می‌کنیم، تا معادلات کوپل شده و کوپل نشده به‌دست آوریم [۳، ۵]. از حل این معادلات توابع همبستگی معین و سپس E_2 قابل محاسبه است.

۲. ۳. محاسبهٔ میانگین انرژی نوترینوهای الکترون

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

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

که در آن $\beta = \frac{1}{k_\beta T}$ و $n_{\nu e}$ چگالی عددی نوترینوهای الکترون می‌باشد که توسط رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید.

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

که در روابط (۱۱) و (۱۲)، $\mu_{\nu e}$ پتانسیل شیمیایی نوترینوهای الکترون می‌باشد، که مقدار آن در هنگام به دام افتادن نوترینوها برای محاسبهٔ میانگین انرژی نوترینوهای الکترون مهم است.

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

$$\mu_i = b_i \mu_n - q_i(\mu_L - \mu_{\nu L}), \qquad (13)$$

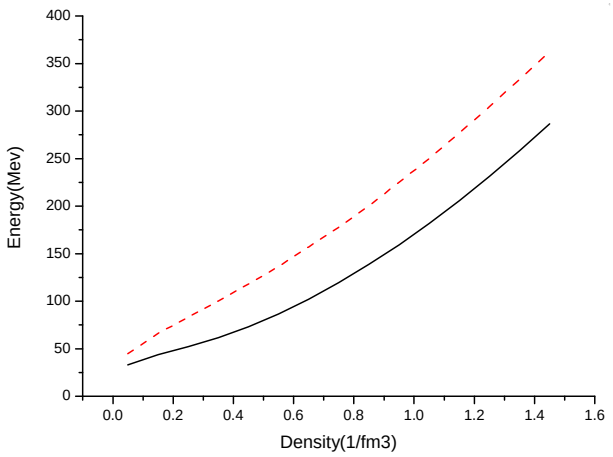
که در آن b_i عدد باریونی ذره i ام و q_i بار الکتریکی آن است، بنابراین برای پتانسیل شیمیایی نوترینوهای الکترون داریم؛

$$\mu_{\nu e} = \mu_p - \mu_n + \mu_e. \qquad (14)$$

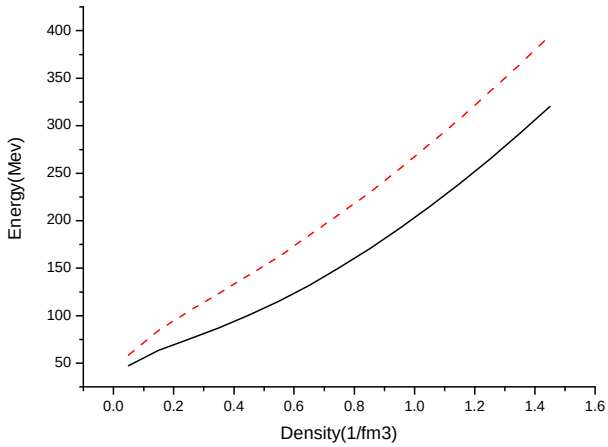
همچنان که ستارهٔ نوترونی اولیه لپتون زدایی می‌شود و پتانسیل شیمیایی الکترون (μ_e) و کسر الکترون کاهش می‌یابند؛ پتانسیل شیمیایی نوترینوهای الکترون تقریبا برابر صفر می‌شود[۷].

$$\mu_{\nu e} = \mu_e + \mu_p - \mu_n \to 0, \qquad (15)$$

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



شکل ۱. نمودارهای انرژی بر حسب چگالی عددی برای حالتی که آنتروپی به ازای هر نوکلئون برابر $1k_B$ و کسر لپتونی ۰/۳ می‌باشند. نمودار ممتد، محاسبات با صرف نظر کردن از اثر نوترینو و نمودار خط چین محاسبات با در نظر گرفتن اثر نوترینو می‌باشد.



شکل ۲. نمودارهای انرژی بر حسب چگالی عددی برای حالتی که آنتروپی به ازای هر نوکلئون برابر $1k_B$ و کسر لپتونی ۰/۴ می‌باشند. نمودار ممتد، محاسبات با صرف نظر کردن از اثر نوترینو و نمودار خط چین محاسبات با در نظر گرفتن اثر نوترینو می‌باشد.

انتگرال معادلهٔ (۱۱) برابر است با:

$$\mu_{\nu e} = ۳/۱۵T \qquad (۱۶)$$

که در آن T دمای ستارهٔ نوترونی اولیه می‌باشد.

۲. ۴. محاسبهٔ ساختار ستارهٔ نوترونی اولیه

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

$$\frac{dp}{dr} = -\frac{Gm(r)\varepsilon(r)}{r^2}\left[1+\frac{p(r)}{\varepsilon(r)}\right]\left[1+\frac{4\pi r^3 p(r)}{m(r)}\right]\left[1-\frac{2Gm(r)}{r}\right]^{-1}, \qquad (۱۷)$$

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

$$m(r) = \int_0^r 4\pi r'^2 \varepsilon(r')dr' . \qquad (۱۸)$$

ما با کمک معادلهٔ حالت به حل عددی این معادله پرداخته و اثر نوترینو را در ساختار ستارهٔ نوترونی اولیه، در حال تکامل را محاسبه کرده‌ایم. توجه شود که برای حل معادلهٔ TOV، ابتدا یک مقدار برای چگالی مرکز ستارهٔ نوترونی در نظر گرفته و سپس از معادلهٔ 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.

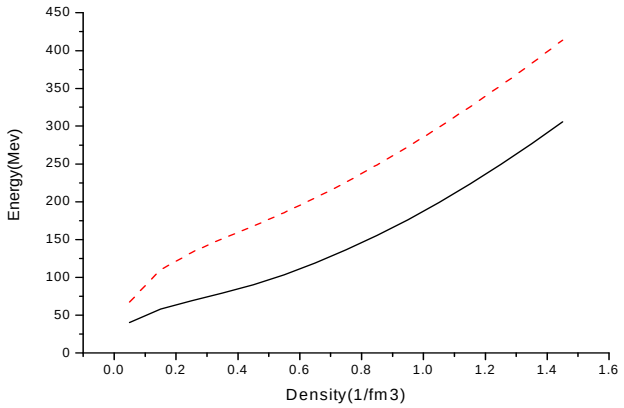
۳. نتایج

در زیر نمودارهای انرژی و معادلهٔ 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 ($s = 1-2k_B$) و دو مقدار برای کسر لپتونی (Y_L=۰/۳-۰/۴)، برای هر کدام از موارد بالا چهار نمودار مستقل رسم شده است.

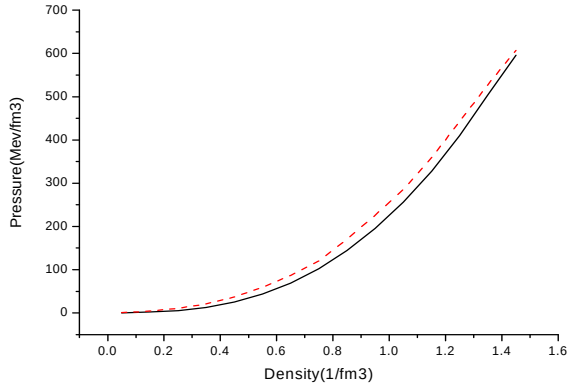
۳. ۱. انرژی ستارهٔ نوترونی اولیه

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

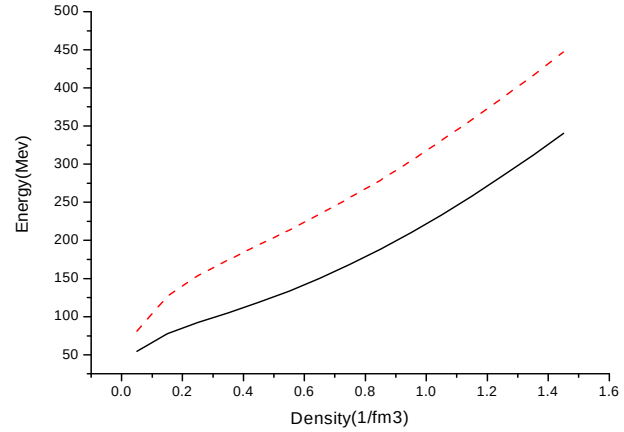
از نمودارهای مذکور مشاهده می‌شود، که برای هر کسر لپتونی



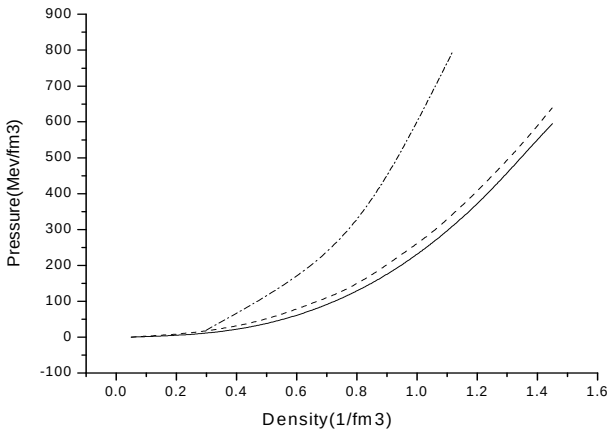
شکل ۳. نمودارهای انرژی بر حسب چگالی عددی برای حالتی که آنتروپی به ازای هر نوکلئون برابر$2k_B$ و کسر لپتونی ۰/۳ می باشند. نمودار ممتد، محاسبات با صرف نظر کردن از اثر نوترینو و نمودار خط چین محاسبات با در نظر گرفتن اثر نوترینو می باشد.



شکل۵. نمودارهای فشار بر حسب چگالی عددی برای حالتی که آنتروپی به ازای هر نوکلئون برابر$1k_B$ و کسر لپتونی ۰/۳ 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 ۴. نمودارهای انرژی بر حسب چگالی عددی برای حالتی که آنتروپی به ازای هر نوکلئون برابر$2k_B$ و کسر لپتونی۰/۴ 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.



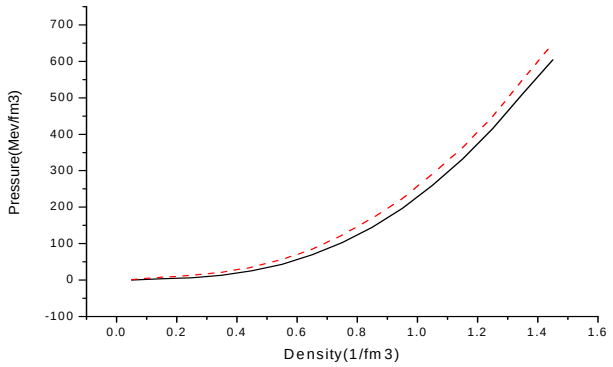
شکل۶. نمودارهای فشار بر حسب چگالی عددی برای حالتی که آنتروپی به ازای هر نوکلئون برابر$1k_B$و کسر لپتونی ۰/۴ می باشند. نمودار ممتد، محاسبات با صرف نظر کردن از اثر نوترینو و نمودار خط چین محاسبات با در نظر گرفتن اثر نوترینو می باشد.. نتایج SSW [۹] (خط نقطه) نیز برای مقایسه آورده شده‌اند.

و مقدار آنتروپی معین، اثر نوترینو موجب افزایش انرژی ستارهٔ 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 آنتروپی های یکسان با افزایش کسر لپتونی کاهش می‌یابد.

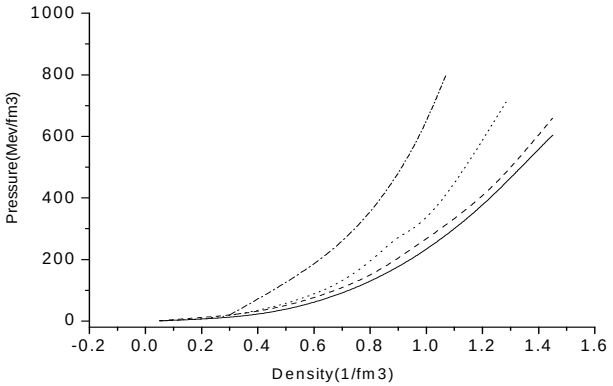
۳. ۲. معادلهٔ حالت ستارهٔ نوترونی اولیه

شکلهای ۵ تا ۸، تغییر معادلهٔ حالت ستارهٔ 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

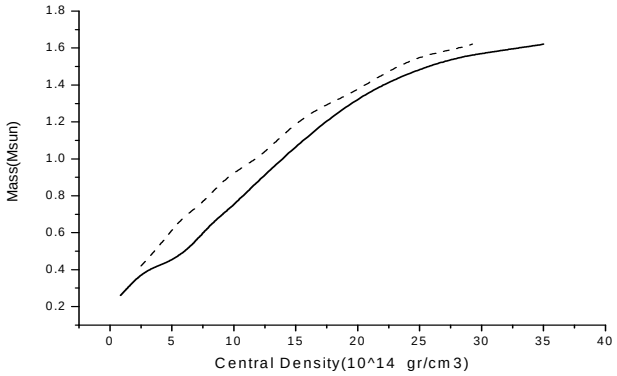


شکل۷. نمودارهای فشار بر حسب چگالی عددی برای حالتی که آنتروپی به ازای هر نوکلئون برابر $۲k_B$ و کسر لپتونی ۰/۳ می‌باشند. نمودار ممتد، محاسبات با صرف نظر کردن از اثر نوترینو و نمودار خط چین محاسبات با در نظر گرفتن اثر نوترینو می‌باشد.

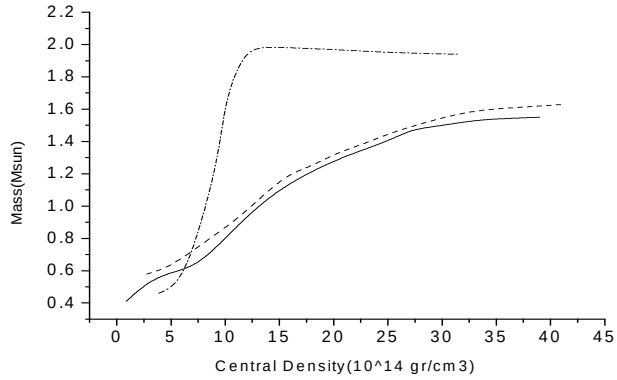


شکل۸. نمودارهای فشار بر حسب چگالی عددی برای حالتی که آنتروپی به ازای هر نوکلئون برابر$۲k_B$و کسر لپتونی ۰/۴ می‌باشند. نمودار ممتد، محاسبات با صرف نظر کردن از اثر نوترینو و نمودار خط چین محاسبات با در نظر گرفتن اثر نوترینو می‌باشد. نتایج SSW [۹] (خط نقطه) و GHZ [۱۰] (نقطه چین) نیز برای مقایسه آورده شده‌اند.

چگالیهای بالا این اختلاف قابل ملاحظه می‌باشد. از نمودارهای بالا مشاهده می‌شود که اثر نوترینو موجب افزایش فشار ستارهٔ نوترونی اولیه نسبت به حالتی که از اثر نوترینو صرف نظر شده، گردیده است. که مقدار این اختلاف برای کسرهای لپتونی یکسان، با افزایش آنتروپی به ازای هر نوکلئون به صورت ناچیز افزایش می‌یابد و این اختلاف در آنتروپیهای یکسان با افزایش کسر لپتونی 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



شکل۹. نمودارهای جرم بر حسب چگالی جرمی مرکز ستاره برای حالتی که آنتروپی به ازای هر نوکلئون برابر $۱k_B$و کسر لپتونی ۰/۳ می‌باشند. نمودار ممتد، محاسبات با صرف نظر کردن از اثر نوترینو و نمودار خط چین محاسبات با در نظر گرفتن اثر نوترینو می‌باشد.



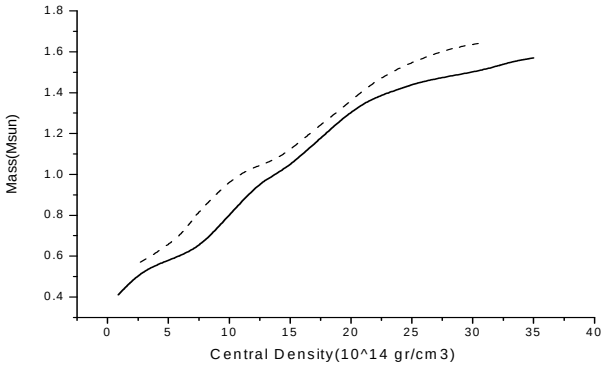
شکل۱۰. نمودارهای جرم بر حسب چگالی جرمی مرکز ستاره برای حالتی که آنتروپی به ازای هر نوکلئون برابر k_B۱و کسر لپتونی ۰/۴ می‌باشند. نمودار ممتد، محاسبات با صرف نظر کردن از اثر نوترینو و نمودار خط چین محاسبات با در نظر گرفتن اثر نوترینو می‌باشد. نتایج SSW [۹] (خط نقطه) نیز برای مقایسه آورده شده‌اند.

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

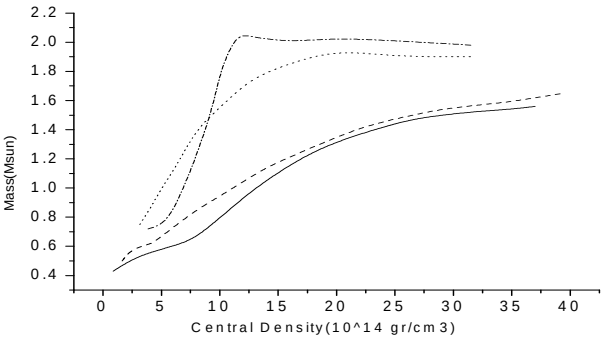
۳. ۳. ساختار ستارهٔ نوترونی اولیه

شکلهای ۹ تا ۱۲، تغییرات جرم ستارهٔ نوترونی اولیه را بر حسب چگالی جرمی مرکز ستاره نشان می‌دهند.

از نمودارهای بالا مشاهده می‌شود که اثر نوترینو موجب

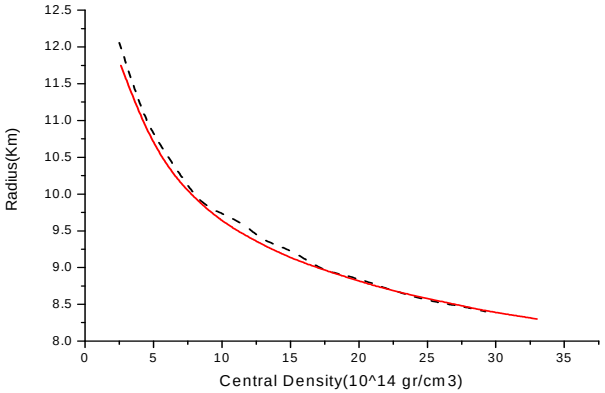


شکل۱۱. نمودارهای جرم بر حسب چگالی جرمی مرکز ستاره برای حالتی که آنتروپی به ازای هر نوکلئون برابر $2k_B$و کسر لپتونی ۰/۳ می‌باشند. نمودار ممتد، محاسبات با صرف نظر کردن از اثر نوترینو و نمودار خط چین محاسبات با در نظر گرفتن اثر نوترینو می‌باشد.

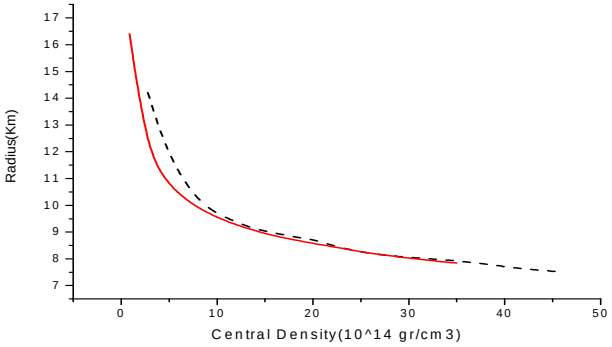


شکل۱۲. نمودارهای جرم بر حسب چگالی جرمی مرکز ستاره برای حالتی که آنتروپی به ازای هر نوکلئون برابر$2k_B$ و کسر لپتونی ۰/۴ می‌باشند. نمودار ممتد، محاسبات با صرف نظر کردن از اثر نوترینو و نمودار خط چین محاسبات با در نظر گرفتن اثر نوترینو می‌باشد. نتایج SSW [۹] (خط نقطه) و GHZ [۱۰] (نقطه چین) نیز برای مقایسه آورده شده‌اند.

افزایش جرم ستارهٔ 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 آنتروپیهای یکسان با افزایش کسر لپتونی کاهش می‌یابد. در شکلهای ۱۰ و ۱۲ یک مقایسه بین نتایج ما و نتایج SSW [۹] و GHZ [۱۰] نیز انجام شده است که این یک



شکل۱۳. نمودارهای شعاع بر حسب چگالی جرمی مرکز ستاره برای حالتی که آنتروپی به ازای هر نوکلئون برابر$1k_B$و کسر لپتونی ۰/۳ می‌باشند. نمودار ممتد، محاسبات با صرف نظر کردن از اثر نوترینو و نمودار خط چین محاسبات با در نظر گرفتن اثر نوترینو می‌باشد.

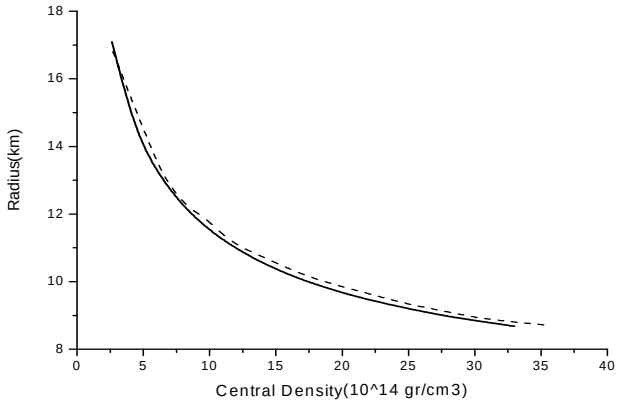


شکل۱۴. نمودارهای شعاع بر حسب چگالی جرمی مرکز ستاره برای حالتی که آنتروپی به ازای هر نوکلئون برابر$1k_B$و کسر لپتونی ۰/۴ می‌باشند. نمودار ممتد، محاسبات با صرف نظر کردن از اثر نوترینو و نمودار خط چین محاسبات با در نظر گرفتن اثر نوترینو می‌باشد.

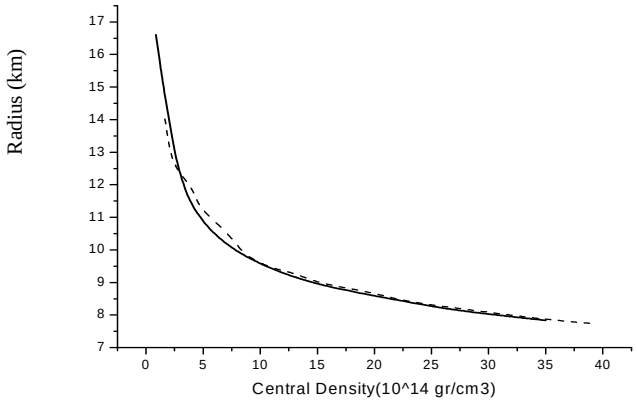
اختلاف قابل ملاحظه را نشان می‌دهد.

شکلهای ۱۳ تا ۱۶، تغییرات شعاع ستارهٔ نوترونی اولیه را بر حسب چگالی جرمی مرکز ستاره نشان می‌دهند.

از نمودارهای بالا مشاهده می‌شود که اثر نوترینو موجب افزایش شعاع ستارهٔ نوترونی اولیه، نسبت به حالتی که از اثر نوترینو صرف نظر شده، گردیده است. با مقایسهٔ 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 آنتروپیهای یکسان با افزایش



شکل۱۵. نمودارهای شعاع بر حسب چگالی جرمی مرکز ستاره برای حالتی که آنتروپی به ازای هر نوکلئون برابر $2k_B$ و کسر لپتونی ۰/۳ می‌باشند. نمودار ممتد، محاسبات با صرف نظر کردن از اثر نوترینو و نمودار خط چین محاسبات با در نظر گرفتن اثر نوترینو می‌باشد.



شکل۱۶. نمودارهای شعاع بر حسب چگالی جرمی مرکز ستاره برای حالتی که آنتروپی به ازای هر نوکلئون برابر $2k_B$و کسر لپتونی ۰/۴ می‌باشند. نمودار ممتد، محاسبات با صرف نظر کردن از اثر نوترینو و نمودار خط چین محاسبات با در نظر گرفتن اثر نوترینو می‌باشد.

جدول۱. مقایسهٔ حد جرمی ستارهٔ نوترونی تازه متولد شده، برای دو حالت با اثر نوترینو و حالتی که از نوترینو صرف نظر شده است. نتایج SSW [۹] و GHZ [۱۰] نیز برای مقایسه آورده شده‌اند.

	نتایج ما (با اثر نوترینو)	نتایج ما (بدون اثر نوترینو)	SSW	GHZ
$S=1, Y_L=0/3$	۱/۶۹Msun	۱/۵۷Msun		
$S=1, Y_L=0/4$	۱/۶۳Msun	۱/۵۲Msun	۲/۰۱Msun	
$S=2, Y_L=0/3$	۱/۷۱Msun	۱/۶۲Msun		
$S=2, Y_L=0/4$	۱/۶۵Msun	۱/۵۳Msun	۲/۰۳Msun	۱/۹۱Msun

کسر لپتونی نیز کاهش می‌یابد.

در جدول ۱ به مقایسهٔ حد جرمی ستارهٔ 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 برای ستارهٔ 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.

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.