

تأثیر معادله حالت ماده نوترونی بر توزیع ماده تاریک در ستاره نوترونی

زیب رضایی*

گروه فیزیک و رصدخانه ابوریحان بیرونی، دانشگاه شیراز، شیراز

دریافت: 1396/01/06 ویرایش نهایی: 1396/11/29 پذیرش: 1396/12/13

چکیده

در این مقاله با به‌کارگیری روش دو-مایعی نسبیتی در ستاره نوترونی مرکب با ماده تاریک به تحقیق پیرامون تأثیر معادله حالت ماده نوترونی بر ساختار هاله تاریک ستاره نوترونی و توزیع ماده تاریک در این ستاره می‌پردازیم. با استفاده از معادله حالت گاز فرمیونی آزاد به‌عنوان معادله حالت ماده تاریک، ساختار ستاره نوترونی مرکب با ماده تاریک را در مدل‌های مختلف برهم‌کنشی ماده نوترونی اسکایرم، SLy230a، SLy230b و SkM* محاسبه می‌نماییم. نتایج حاصل نشان می‌دهد که رابطه جرم-شعاع وابسته به مدل برهم‌کنشی است. همچنین محاسبات حاضر تأیید می‌نمایند که معادله حالت ماده نوترونی بر اندازه کره‌های ماده تاریک و ماده نوترونی تأثیر دارد. نتایج بیانگر آن است که انتقال به سرخ گرانشی در سطح ستاره وابسته به معادله حالت ماده نوترونی است.

کلیدواژگان: ستاره نوترونی، ماده تاریک، معادله حالت ماده نوترونی

مقدمه

می‌تواند در تمام مراحل تحولی، ماده تاریک را دریافت نموده باشد. از سوی دیگر می‌توان فرضی متضاد نمود که اجرامی تاریک، ماده نوترونی را به سمت خود جذب نموده‌اند [5]. در هر حالت ذکر شده، ساختار ستاره نوترونی تحت تأثیر وجود ماده تاریک قرار می‌گیرد. در برخی از مطالعات انجام شده، ساختار ستاره نوترونی مرکب با ماده تاریک مورد بررسی قرار گرفته است. با تعمیم معادلات هیدروستاتیکی نسبیتی برای اجرام کروی با چند شاره که تنها از طریق گرانش با هم برهم‌کنش می‌کنند، تأثیر ماده تاریک آینه‌ای بر ساختار ستاره نوترونی بررسی شده است [4]. نتایج حاصل نشان می‌دهد که ساختار ستاره به مقدار نسبت تعداد باریون‌های آینه‌ای به باریون‌های معمولی وابسته است. با فرض حالتی پایدار برای ماده تاریک نشان داده شده

برخی از نتایج مشاهداتی اختزفیزیکی که می‌توان مهمترین آنها را منحنی چرخشی کهکشانشان دانست نشان‌دهنده وجود نوعی ماده نامرئی، مصطلح به ماده تاریک، در کیهان می‌باشد. تأثیر ماده تاریک بر منحنی چرخشی کهکشانی، به‌خاطر برهم‌کنش گرانشی آن با ماده معمولی کهکشانشان است. از این ماده نوری دریافت نمی‌شود و وجود آن را تنها می‌توان از اثرات گرانشی آن با ماده معمولی فهمید. به‌عبارت دیگر، برهم‌کنش بین ماده معمولی و ماده تاریک تنها از نوع گرانشی است. برطبق برخی از مشاهدات حاصل از ستاره‌های نوترونی [1-3]، می‌توان وجود ماده تاریک در ستاره نوترونی را محتمل دانست [4-10]. در حقیقت ستاره نوترونی به‌دلیل چگالی بالا می‌تواند ماده تاریک را به خود جذب نماید [11-13]. این درحالی است که ستاره

*نویسنده مسئول: zrezaei@shirazu.ac.ir

معادله حالت ماده نوترونی

برای بررسی ستاره نوترونی مرکب با ماده تاریک می‌بایست معادله حالت ماده مرئی در ستاره را به کار ببریم. با توجه به آنکه بیشتر محتویات ستاره نوترونی، ماده نوترونی است، از معادله حالت ماده نوترونی بهره می‌بریم. یکی از مدل‌های مفید در توصیف سیستم‌های بس‌ذره‌ای هسته‌ای، مدل اسکایرم می‌باشد [15]. نیروی اسکایرم توسط شخصی به نام اسکایرم به عنوان نیرویی مؤثر برای محاسبات هارتری-فوک ماده هسته‌ای ارائه گردید [16 و 17]. در تقریب هارتری-فوک، انرژی کل سیستمی متشکل از N نوترون عبارت است از

$$E = \langle \psi | H | \psi \rangle \quad 1$$

که در آن

$$H = \sum_{i=1}^N T_i + \sum_{i<j} V_{ij} \quad 2$$

و ψ تابع موج بدون برهم‌کنش سیستم است. در مدل اسکایرم، پتانسیل برهم‌کنشی بین ذرات به صورت زیر است [18]

$$\begin{aligned} V(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = & t_0(1 + x_0 \vec{P}_\sigma) \delta(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) \quad 3 \\ & + \frac{1}{2} t_1(1 + x_1 \vec{P}_\sigma) \left[\vec{P}^{\prime 2} \delta(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) + \delta(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) \vec{P}^2 \right] \\ & + t_2(1 + x_2 \vec{P}_\sigma) \vec{P}' \cdot \delta(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) \vec{P} \\ & + \frac{1}{6} t_3(1 + x_3 \vec{P}_\sigma) \left[\rho \left(\frac{\vec{r}_1 + \vec{r}_2}{2} \right) \right]^\alpha \delta(\vec{r}_1 - \vec{r}_2). \end{aligned}$$

در رابطه فوق

$$\begin{aligned} \vec{P} &= \frac{1}{2i} (\nabla_1 - \nabla_2), \\ \vec{\sigma} &= \vec{\sigma}_1 + \vec{\sigma}_2, \\ \vec{P}_\sigma &= (1 + \vec{\sigma}_1 \cdot \vec{\sigma}_2) / 2, \end{aligned}$$

است که تمامی نتایج مشاهداتی مربوط به جرم و شعاع ستاره‌های نوترونی با استفاده از یک معادله حالت هسته‌ای و یک کره تاریک با اندازه دلخواه قابل توجیه است [5]. با فرض ماده تاریک به صورت ذراتی غیر-خود-نابود کننده به جرم $m=1 \text{ GeV}$ و به کارگیری روش دو-مایعی نسبیتی تأیید گردید که می‌توان وجود ستارگان فشرده‌ای با هسته‌ای کوچک متشکل از ماده مرئی در حدود چند کیلومتر که با هاله‌ای تاریک با شعاعی در حدود 10 km احاطه شده است را پیش‌بینی نمود. با بهره‌گیری از روش دو-مایعی نسبیتی، ترکیب ماده تاریک تبهگن با ماده معمولی در ستاره نوترونی مورد مطالعه قرار گرفته است [7]. نتایج حاصل نشان می‌دهد که ستاره نوترونی می‌تواند به اصطلاح ستاره‌ای غالب با ماده تاریک باشد. با فرض ماده تاریک به صورت ذراتی شبیه به فرمیون با برهم‌کنشی به شکل دافعه، تأیید گردید که ماده تاریک منجر به نرم شدن معادله حالت و کاهش جرم بیشینه می‌شود [8]. علاوه بر این در مدل فرمیونی ماده تاریک، جرم ذرات، مقدار ماده تاریک و برهم‌کنش ذرات ماده تاریک، رابطه جرم-شعاع ستاره را تحت تأثیر قرار می‌دهد [9]. در تحقیقی که اخیراً انجام داده‌ایم [10] نشان داده شد که می‌توان ستاره نوترونی مرکب با ماده تاریک را با استفاده از معادله حالت ماده تاریک کهکشانی [14] نیز بررسی نمود. در آن کار، سیستم ستاره نوترونی با در نظر گرفتن یک معادله حالت خاص برای ماده نوترونی توصیف شده است. اما معادله حالت ماده نوترونی موجود در ستاره نیز می‌تواند بر ویژگی‌های ساختاری ستاره مرکب با ماده تاریک مؤثر باشد. در تحقیق حاضر با استفاده از روش دو-مایعی نسبیتی و معادله حالت ماده تاریک فرمیونی، با در نظر گرفتن معادله‌های حالت ماده نوترونی مختلف به بررسی تأثیر معادله حالت ماده نوترونی بر ساختار ستاره نوترونی مرکب با ماده تاریک و نحوه توزیع ماده تاریک در این ستاره می‌پردازیم.

تمامی موارد ذکر شده مدل SkM^* در مطالعه سدهای شکافت یک مدل پیشرفته است [15]. دو مدل SLy230a و SLy230b، با در نظر گرفتن درجه آزادی ایزواسپینی به دست آمده‌اند [18]. به منظور دستیابی به خواص هسته‌ای، فرض می‌شود که این دو مدل، معادله ماده نوترونی مدل تئوری UV14+UVII را برآزش می‌کنند. تفاوت دو مدل SLy230a و SLy230b در ضریب انرژی سطح آنها می‌باشد. مدل SLy230a، شرایط رخ دادن فرآیند مستقیم URCA را برآورده می‌کند. اما مدل SLy230b، شرایط رخ دادن این فرآیند را برآورده نمی‌کند.

جدول 1. مشخصات سه مدل اسکایرم [15 و 18]

	SLy230a	SLy230b	SkM*
$a_{surf}(MeV)$	169	167	160
$n_0 (fm^{-3})$	0,160	0,160	0,160
$a_s(MeV)$	31,97	32,01	30,01
$M_{max}(M_{\odot})$	2,10	2,05	1,62
$R^*(km)$	10,25	9,99	8,94

دو مدل SLy230a و SLy230b، در همه مدل‌های ستاره نوترونی پایدار، علی هستند. مقادیر پارامترهای آزاد مربوط به مدل‌ها در جدول 2 آمده است [15 و 18].

جدول 2. مقادیر پارامترهای آزاد در سه مدل اسکایرم [15 و 18]

	SLy230a	SLy230b	SkM*
$t_0 (MeVfm^3)$	-2490,23	-2488,91	-2645,00
x_0	1,1318	0,8340	0,090
$t_1 (MeVfm^5)$	489,53	486,82	410,00
x_1	-0,8426	-0,3438	0,00
$t_2 (MeVfm^5)$	-566,58	-546,39	-135,00
x_2	-1,0	-1,0	0,00
$t_3 (MeVfm^{3+3\alpha})$	13803,0	13777,0	15595,00
x_3	1,9219	1,3539	0,000
α	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{6}$

و \vec{P}' همیوگ مختلط \vec{P} ، $\vec{\sigma}$ ماتریس پائولی، و ρ چگالی سیستم است. همچنین $t_0, x_0, t_1, x_1, t_2, x_2, t_3, x_3$ و α پارامترهای آزاد برهم‌کنش می‌باشند و با نتایج تجربی مشخص می‌گردند. با انجام محاسبات، انرژی بر واحد ذره به صورت زیر به دست می‌آید [18]

$$\begin{aligned} \frac{E}{N} = & \frac{3}{5} \frac{\hbar^2}{2m} (3\pi^2 \rho)^{2/3} + \frac{1}{4} \rho t_0 (1 - x_0) \\ & + \frac{1}{24} \rho^{\alpha+1} t_3 (1 - x_3) \\ & + \frac{3}{40} (3\pi^2)^{2/3} \rho^{5/3} [t_1 (1 - x_1) + 3t_2 (1 + x_2)] \end{aligned} \quad (4)$$

با بهره‌گیری از قانون اول ترمودینامیک، فشار سیستم نیز با استفاده از انرژی سیستم، به صورت زیر به دست می‌آید [18]

$$\begin{aligned} P = - \left(\frac{\partial E}{\partial V} \right)_N = & \frac{\hbar^2}{5m} \left(\frac{3\pi^2}{2} \right)^{2/3} \rho^{5/3} + \frac{3}{8} t_0 \rho^2 + \frac{1}{16} t_3 (\alpha + 1) \rho^{\alpha+2} \\ & + \frac{1}{16} \left(\frac{3\pi^2}{2} \right)^{2/3} [3t_1 + (5 + 4x_2)t_2] \rho^{8/3} \end{aligned} \quad (5)$$

در این مقاله از سه مدل SLy230a، SLy230b و SkM^* بهره می‌بریم [15 و 18]. جدول 1 خواص این سه مدل را نشان می‌دهد. مدل SkM^* از نسل دوم نیروهای اسکایرم است که توصیفی با دقت بالا از حالت‌های پایه هسته‌ای را به دست می‌دهد. این مدل با مطالعه انرژی سطح و سدهای شکافت در تقریب نیمه کلاسیک حاصل شده است [15]. مدل مذکور جمله اسپین-مدار ایزوبرداری و تانسور اسپین-مدار را شامل نمی‌شود، اما جمله تبادل کولنی در تقریب اسلیتر را در بردارد [15]. مقدار جرم بیشینه در این مدل کمتر از نتایج مشاهداتی است. این امر می‌تواند به خاطر خوب جواب ندادن این مدل در چگالی‌های بالا برای ماده ستاره نوترونی باشد. از طرفی این مدل شرایط رخ دادن فرآیند مستقیم URCA را برآورده نمی‌کند. با وجود

معادله حالت ماده تاریک

جهت توصیف بخش تاریک ستاره، سیستمی از یک گاز فرمیونی آزاد با جرم ذرات m را در نظر می‌گیریم. باتوجه به آنکه چگالی ماده تاریک در ستاره نوترونی هم‌مرتبه با چگالی ماده ستاره نوترونی است [4]، سیستم گاز فرمیونی دارای چگالی بالایی است. سیستمی فرمیونی با چگالی بالا، دارای انرژی فرمی (\mathcal{E}_F) زیادی نیز می‌باشد. بنابراین برای ماده تاریک در یک ستاره نوترونی با دمای T که مدتی از تولد آن گذشته باشد، نسبت $\frac{kT}{\mathcal{E}_F}$ مقدار کوچکی است و می‌توان برای توصیف ستاره از گاز فرمیونی سرد به‌عنوان ماده تاریک سرد بهره برد. معادله حالت گاز فرمیونی آزاد در دمای صفر با روابط زیر به‌دست می‌آید [19]

$$P = \frac{1}{3\pi^2} \int_0^{k_F} dk \frac{k^4}{\sqrt{m^2 + k^2}} \quad 6$$

$$= \frac{m^4}{24\pi^2} \left[(2z^3 - 3z)(1 + z^2)^{1/2} + 3 \sinh^{-1}(z) \right]$$

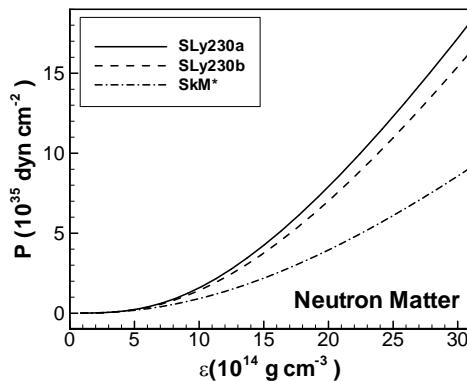
$$\rho = \frac{1}{\pi^2} \int_0^{k_F} dk k^2 \sqrt{m^2 + k^2} \quad 7$$

$$= \frac{m^4}{8\pi^2} \left[(2z^3 + z)(1 + z^2)^{1/2} - \sinh^{-1}(z) \right]$$

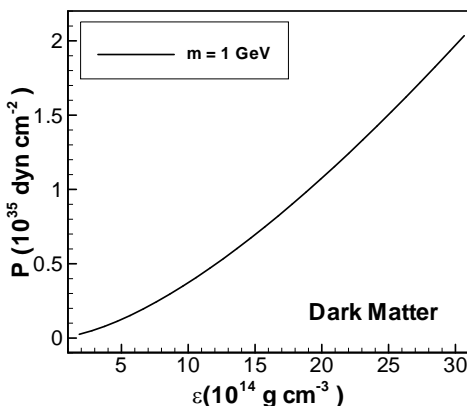
در روابط بالا $k_F = (3\pi^2 n)^{1/3}$ تکانه فرمی و n چگالی تعداد فرمیون‌ها می‌باشد. علاوه‌براین $z = k_F / m$. شکل 1ب، معادله حالت گاز فرمیونی آزاد در دمای صفر با جرم ذرات $m=1\text{GeV}$ که به‌عنوان معادله حالت ماده تاریک سیستم در نظر گرفته می‌شود را نشان می‌دهد.

روش دو-مایعی نسبیتی

در این بررسی جهت توصیف ستاره نوترونی مرکب با ماده تاریک، سیستمی متشکل از دو کره هم‌مرکز که به‌ترتیب شامل ماده نوترونی و ماده تاریک هستند را در نظر می‌گیریم. با توجه به‌اینکه تنها برهم‌کنش تأیید شده



الف



ب

شکل 1. الف: معادله حالت ماده نوترونی در سه مدل مختلف اسکایرم، ب: معادله حالت گاز فرمیونی آزاد در دمای صفر با جرم ذرات $m=1\text{GeV}$ به‌عنوان معادله حالت ماده تاریک.

شکل 1الف، معادله حالت ماده نوترونی در سه مدل مختلف اسکایرم، SLy230a، SLy230b و SkM* را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود معادله حالت SLy230a نسبت به SLy230b و نیز SLy230b نسبت به SkM* سخت‌تر می‌باشد. علاوه‌براین، تفاوت این معادلات در چگالی‌های بالا بیشتر است. با توجه به‌ویژگی‌های ذکر شده از سه مدل می‌توان نتیجه گرفت که ترتیب اهمیت فیزیکی مدل‌ها برای بررسی ستاره نوترونی مرکب با ماده تاریک به‌صورت SLy230a، SLy230b و SkM* می‌باشد.

کل ستاره از حاصل جمع جرم کره ماده نوترونی و ماده تاریک به دست می‌آیند.

نتایج و بحث

شکل 2 تأثیر معادله حالت ماده نوترونی بر ساختار ستاره نوترونی معمولی و نیز ستاره نوترونی مرکب با ماده تاریک را نشان می‌دهد. در این شکل منحنی‌هایی

که منطقه غیرمجاز از جنبه نسبیته عام $M > \frac{c^2 R}{2G}$ (GR)، فشار محدود $M > \frac{4 c^2 R}{9 G}$ (Finite P)، علیت

$M > \frac{10 c^2 R}{29 G}$ (Causality) و چرخش 716 Hz تپ

اختر J1748-2446ad (Rotation) را مشخص می‌کند

نشان داده شده است [20]. ستارگانی پایدار و مورد

قبول می‌باشند که در منطقه مجاز واقع شوند. واضح

است که برای هر معادله حالت، رفتار جرم کل-شعاع

کره نوترونی در ستاره نوترونی مرکب با ماده تاریک

کاملاً با رفتار جرم کل-شعاع کره نوترونی در ستاره

نوترونی معمولی متفاوت است. این تفاوت نشانگر

تغییر شیب منحنی ستاره نوترونی مرکب با ماده تاریک

نسبت به ستاره معمولی است. اگر رفتار جرم برحسب

شعاع به گونه‌ای باشد که برای ستارگان کم جرم تر شعاع

بزرگتر و برای ستارگان پر جرم تر شعاع کوچکتر باشد

اصطلاحاً آن را ستاره مقید گرانشی می‌نامند. بنابراین

طبق شکل 2 الف، ستاره نوترونی معمولی، ستاره مقید

گرانشی است. از سوی دیگر اگر رفتار جرم برحسب

شعاع به صورتی باشد که با افزایش شعاع ستاره، جرم

آن بیشتر باشد اصطلاحاً ستاره را خودمقید می‌خوانند.

شکل 2 ب تأیید می‌نماید که ستاره نوترونی مرکب با

ماده تاریک، ستاره‌ای خودمقید است. خودمقید شدن

ستاره به خاطر وجود ماده تاریک، در تحقیقات پیشین

نیز گزارش شده است [10 و 9، 7]. این خاصیت

خودمقید شدن، نتیجه تأثیر گرانشی ماده تاریک بر ماده

نوترونی است. همان‌طور که دیده می‌شود شعاع ستاره

ماده تاریک با ماده معمولی، برهم‌کنش گرانشی است

فرض می‌شود که این دو کره تنها از طریق نیروی

گرانشی با هم برهم‌کنش دارند. برای چنین سیستمی از

مدل دو-مایعی نسبیتی استفاده می‌نماییم [4 و 5]. شکل

کلی فضا-زمان متقارن کروی استاتیک به صورت زیر

است ($G=c=1$),

8

$$ds^2 = e^{2\nu(r)} dt^2 - e^{2\lambda(r)} dr^2 - r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2).$$

همچنین تانسور انرژی-تکانه مایع کامل با رابطه زیر

داده می‌شود

$$T^{\mu\nu} = -p g^{\mu\nu} + (p + \varepsilon) u^\mu u^\nu. \quad 9$$

باید توجه نمود که فشار کل p و چگالی انرژی کل

ε ، ناشی از ماده نوترونی و ماده تاریک می‌باشند

$$p(r) = p_N(r) + p_D(r), \quad 10$$

$$\varepsilon(r) = \varepsilon_N(r) + \varepsilon_D(r). \quad 11$$

در روابط فوق N و D به ترتیب معرف کمیات مربوط

به ماده نوترونی و ماده تاریک هستند. با تعاریف فوق،

معادلات میدان اینشتین روابط زیر را که معادلات دو-

مایعی تولمن اوپنهایمر ولکف نامیده می‌شود نتیجه

می‌دهند

$$e^{-2\lambda(r)} = 1 - \frac{2M(r)}{r}, \quad 12$$

$$\frac{dv}{dr} = \frac{M(r) + 4\pi r^3 p(r)}{r(r - 2M(r))}, \quad 13$$

$$\frac{dp_N}{dr} = -[p_N(r) + \varepsilon_N(r)] \frac{dv}{dr}, \quad 14$$

$$\frac{dp_D}{dr} = -[p_D(r) + \varepsilon_D(r)] \frac{dv}{dr}. \quad 15$$

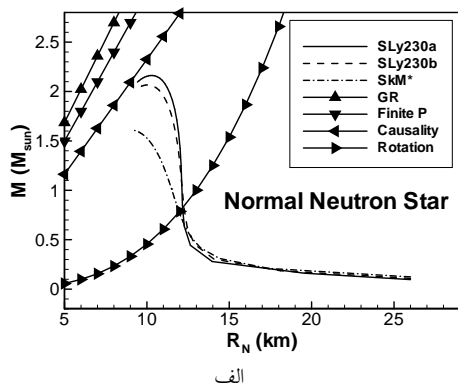
در روابط بالا Γ مختصه شعاعی و $M(r)$ جرم کل

داخل کره‌ای به شعاع Γ است. در این روش، شعاع و

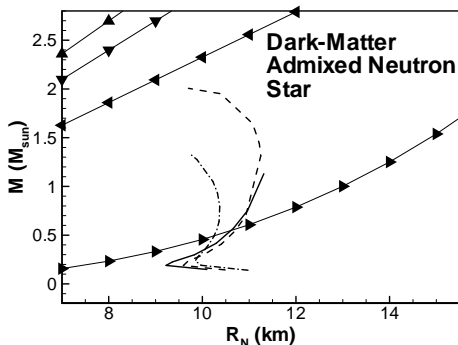
جرم کره ماده نوترونی و ماده تاریک به ترتیب با

شرط‌های $p_N(R_N) = 0$ و $p_D(R_D) = 0$ و جرم

این بررسی، برای معادله‌های حالت SLy230a، SLy230b و SkM^* ، به ترتیب مقادیر بیشینه جرم $1/13 M_{\odot}$ ، $2/01 M_{\odot}$ و $1/34 M_{\odot}$ به دست آمد.



الف



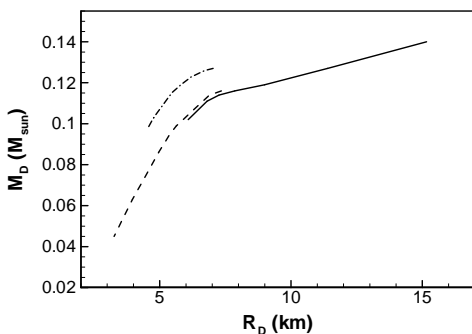
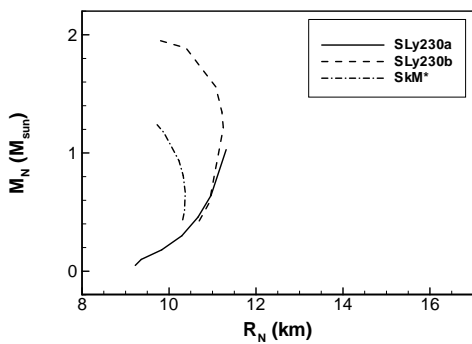
ب

شکل 2. جرم کل-شعاع کره نوترونی ستاره نوترونی معمولی (الف) و ستاره نوترونی مرکب با ماده تاریک (ب). در این شکل همچنین منحنیهایی که منطقه غیرمجاز از جنبه نسبت عام (GR)، فشار محدود (Finite P)، علیت (Causality) و چرخش 716Hz تپ اختر J1748-2446ad (Rotation) را مشخص می‌کند نشان داده شده است [20].

شکل 3 جرم ستاره نوترونی مرکب با ماده تاریک را برحسب شعاع کره ماده تاریک در مدل‌های مختلف ماده نوترونی نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای هر سه معادله حالت، شعاع کره ماده تاریک برای ستارگان پرجرم تر کمتر است. تأثیر معادله حالت بر شعاع کره ماده تاریک در ستاره‌های پرجرم قابل ملاحظه می‌گردد. شکل 3 بیان می‌دارد که برای یک ستاره نوترونی مرکب با ماده تاریک با جرم تقریباً بیش

نوترونی معمولی می‌تواند مقادیری از حدود 9km تا 12km داشته باشد. اما برای ستاره مرکب با ماده تاریک این محدوده بین 9km تا حدود 11km است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که وجود ماده تاریک در ستاره و نیروی گرانشی آن بر ماده معمولی منجر به فشردگی بیشتر آن شده و اندازه آن را کاهش می‌دهد. این نتیجه با نتایج پیشین در تطابق است [5-10]. شکل 2ب، همچنین نشان می‌دهد که برای یک ستاره نوترونی مرکب با ماده تاریک با جرم مشخص، با معادله‌های حالت ماده نوترونی مختلف، نتایج متفاوتی برای شعاع کره نوترونی ستاره به دست می‌آید. این واقعیت برای ستاره نوترونی معمولی نیز وجود دارد (شکل 2الف). از شکل 2 می‌توان فهمید که در مدل SkM^* ، شعاع کره نوترونی ستاره نسبت به دو مدل دیگر کوچکتر است. از طرفی در مدل SLy230a که توصیف بهتری از معادله حالت ماده مرئی را می‌دهد شعاع ستاره‌ها بیشتر است. از سوی دیگر نتایج حاصل نشان‌دهنده آن است که معادله حالت ماده نوترونی بر رفتار جرم کل-شعاع کره نوترونی ستاره نوترونی مرکب با ماده تاریک تأثیر به‌سزایی دارد (شکل 2ب). به بیان دیگر با نرم شدن معادله حالت ماده نوترونی، درجه خودمقید بودن ستاره افزایش می‌یابد. این نتیجه ناشی از تأثیر قوی‌تر ماده تاریک بر خودمقید نمودن ستاره با معادله حالت ماده نوترونی نرمتر است. همچنین از شکل 2ب می‌توان فهمید که بیشینه جرم ستاره نوترونی مرکب با ماده تاریک به معادله حالت ماده نوترونی آن وابسته است. از شکل 2ب واضح است که می‌توان ستاره‌های نوترونی مرکب با ماده تاریکی یافت که دارای شعاع برابر ولی جرم متفاوت هستند. این اثر در تحقیقات گذشته نیز گزارش شده بود [7، 9 و 10]. در ادامه خواهیم دید که در این دو نوع ستاره با اندازه یکسان ولی جرم متفاوت، سهم کره نوترونی در جرم کل ستاره برای دو نوع ستاره یکسان نیست. در

نوترونی و ماده تاریک به دست آمده می‌توان ادعا نمود تجمع پذیری ماده تاریک نسبت به ماده نوترونی کمتر است.

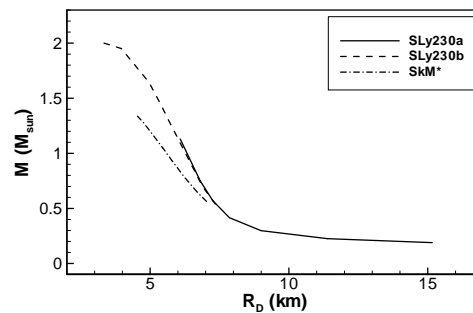


ب

شکل 4. الف: جرم کره نوترونی برحسب شعاع کره ماده نوترونی، ب: جرم کره ماده تاریک برحسب شعاع کره ماده تاریک.

تأثیر معادله حالت ماده نوترونی بر جرم و شعاع کره‌های ماده نوترونی و ماده تاریک نیز حائز اهمیت است. شکل 4 الف، نشان می‌دهد که در مدل SLy230a، اندازه کره ماده نوترونی با افزایش جرم آن رشد پیدا می‌نماید. اما در دو مدل دیگر با افزایش جرم کره ماده نوترونی از حدی خاص، اندازه کره ماده نوترونی کاهش می‌یابد. از شکل 4 الف می‌توان دریافت که در دو مدل SLy230b و SkM* ستاره‌هایی وجود دارند که کره ماده نوترونی آنها دارای اندازه یکسان ولی جرم متفاوت هستند. در حقیقت این امر نتیجه خودمقید بودن

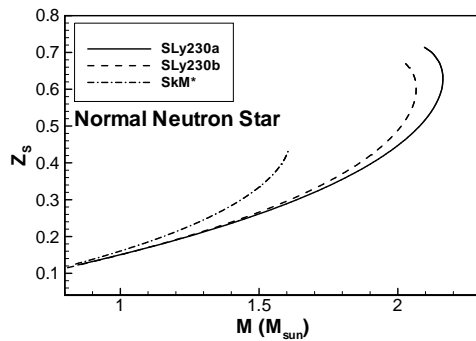
از $0.5 M_{\odot}$ شعاع کره ماده تاریک در مدل SLy230b بیش از مدل SkM* است. مقایسه شکل 2 ب و شکل 3 نشان می‌دهد که برای ستارگان با جرم بیش از M_{\odot} ، کره ماده تاریک به وسیله کره ماده نوترونی احاطه شده است. علاوه بر این در مدل SLy230a که معادله حالت بهتری برای ماده مرئی به حساب می‌آید شعاع کره ماده تاریک تا حدود 15 km می‌تواند باشد.



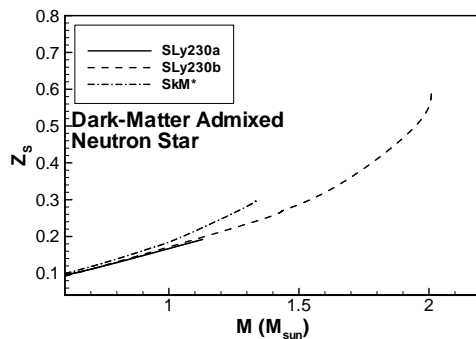
شکل 3. جرم ستاره نوترونی مرکب با ماده تاریک برحسب شعاع کره ماده تاریک.

شکل 4 جرم کره ماده نوترونی و ماده تاریک را به ترتیب برحسب شعاع کره ماده نوترونی و ماده تاریک برای ستاره‌های مختلف ارائه می‌دهد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در تمامی مدل‌ها، شعاع کره نوترونی از حدود 11 km بیشتر نمی‌شود. این در حالی است که در مورد کره ماده تاریک می‌تواند تا حدود 15 km باشد. از شکل 4 درمی‌یابیم که جرم کره ماده نوترونی در مقایسه با کره ماده تاریک می‌تواند مقادیر بسیار بیشتری داشته باشد. بیشترین مقدار برای جرم کره ماده نوترونی در مدل SLy230b و با مقدار $1.96 M_{\odot}$ به دست می‌آید. از سوی دیگر بیشترین جرم کره ماده تاریک در مدل SLy230a با مقدار $0.14 M_{\odot}$ رخ می‌دهد. بنابراین با توجه به جرم و شعاع کره‌های ماده

سرخ از دو مدل دیگر کمتر است. از آنجایی که انتقال به سرخ یکی از کمیت‌های مهم رصدی به‌شمار می‌رود می‌توان از نتایج ذکر شده در مورد انتقال به سرخ، به بررسی ماده نوترونی و ماده تاریک در ستاره نوترونی پرداخت.



الف



ب

شکل 5. انتقال به سرخ گرانشی در سطح ستاره.

بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق ساختار هاله تاریک ستاره نوترونی و توزیع ماده تاریک در ستاره نوترونی را در مدل‌های مختلف برهم‌کنشی ماده نوترونی اسکایرم SLy230a، SLy230b و SkM* بررسی نمودیم. معادله حالت SLy230a نسبت به SLy230b و SkM* توصیف بهتری از ماده مرئی را ارائه می‌دهد. محاسبات نشان می‌دهد که رفتار جرم کل-شعاع کره نوترونی ستاره نوترونی مرکب با ماده تاریک متأثر از معادله حالت ماده نوترونی است. نتایج بیانگر آن است که معادله‌های

ستاره نوترونی مرکب با ماده تاریک است. علاوه بر این از شکل 4، می‌توان فهمید که کره‌های ماده تاریک با جرم بالاتر دارای اندازه‌ای بزرگتر هستند. از طرفی هر کره ماده تاریک با شعاعی خاص دارای جرمی خاص است. از این رو با توجه به آنچه در مورد کره ماده نوترونی ذکر شد ستاره‌های نوترونی مرکب با ماده تاریکی یافت می‌شوند که دارای شعاع برابر ولی جرم کل متفاوت هستند (شکل 2ب را ببینید). احتمال وجود هر دو نوع ستاره وجود دارد، اما می‌توان پیش‌بینی نمود به دلیل قوی‌تر بودن میدان گرانشی ستاره پرجرم‌تر و محتمل‌تر بودن جذب ماده تاریک به وسیله آن، وجود ستاره پرجرم‌تر محتمل‌تر باشد. در مدل واقعی‌تر SLy230a سهم جرم کره ماده نوترونی در مقایسه با دو مدل دیگر کمتر و در مقابل سهم جرم کره ماده تاریک در مقایسه با دو مدل دیگر بیشتر است.

شکل 5 انتقال به سرخ گرانشی در سطح ستاره را برای ستاره نوترونی معمولی و ستاره نوترونی مرکب با ماده تاریک نمایش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که برای ستاره‌ای به جرم خاص، در تمامی معادله‌های حالت ماده نوترونی، انتقال به سرخ در سطح ستاره نوترونی مرکب با ماده تاریک از ستاره نوترونی معمولی بیشتر است. افزایش انتقال به سرخ در اثر وجود ماده تاریک، در مطالعات قبل نیز نشان داده شده بود [10]. این افزایش، در ستارگان پرجرم‌تر قابل ملاحظه‌تر است. شکل 5 تأیید می‌نماید که با نرم شدن معادله حالت ماده نوترونی، انتقال به سرخ در سطح ستاره افزایش می‌یابد. در مدل SLy230a که برای توصیف ماده ستاره نوترونی بهتر می‌باشد به‌ازای هر جرم، مقدار انتقال به

[6] S.C. Leung, M.C. Chu, L.M. Lin, Dark-matter admixed neutron stars, *Physical Review D* 84 (2011) 107301.

[7] S.-C. Leung, M.-C. Chu, L.-M. Lin, Equilibrium structure and radial oscillations of dark matter admixed neutron stars, *Physical Review D* 85 (2012) 103528.

[8] A. Li, F. Huang, R.X. Xu, Too massive neutron stars: The role of dark matter, *Astroparticle Physics* 37 (2012) 70.

[9] Q.F. Xiang, W.Z. Jiang, D.R. Zhang, R.Y. Yang, Effects of fermionic dark matter on properties of neutron stars, *Physical Review C* 89 (2014) 025803.

[10] Z. Rezaei, Study of dark-matter admixed neutron stars using the equation of state from the rotational curves of galaxies, *The Astrophysical Journal* 835 (2017) 13.

[11] G. Bertone, M. Fairbairn, Compact stars as dark matter probes, *Physical Review D* 77 (2008) 043515.

[12] M.A. Perez-Garcia, J. Silk, Dark matter seeding and the kinematics and rotation of neutron stars, *Physics Letters B* 711 (2012) 6.

[13] J. Fuller, C.D. Ott, Dark matter-induced collapse of neutron stars: a possible link between fast radio bursts and the missing pulsar problem, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society Letters* 450 (2015) L71.

[14] J. Barranco, A. Bernal, D. Nunez, Dark matter equation of state from rotational curves of Galaxies, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society Letters* 449 (2015) 403.

[15] J.R. Stone, P.G. Reinhard, The Skyrme Interaction in finite nuclei and nuclear matter, *Progress in Particle and Nuclear Physics* 58 (2007) 587.

[16] T.H.R. Skyrme, The nuclear surface, *Philosophical Magazine* 1 (1956) 1043.

حالت ماده نوترونی مختلف منجر به مقادیر متفاوتی برای شعاع کره نوترونی ستاره با جرم مشخص می‌شود. شعاع کره ماده تاریک در ستاره‌های پرجرم وابسته به معادله حالت ماده نوترونی می‌باشد. محاسبات حاضر نشان می‌دهد که شعاع ستاره نوترونی معمولی می‌تواند مقادیری از حدود 9km تا حدود 12km داشته باشد. اما برای ستاره مرکب با ماده تاریک شعاع کره نوترونی در محدوده‌ای بین 9km تا حدود 11km است. در این بررسی نشان داده شد که ستاره‌های نوترونی مرکب با ماده تاریکی یافت می‌شوند که دارای شعاع برابر ولی جرم کل متفاوت هستند. علاوه بر این در این تحقیق دریافته‌ایم که با معادله‌های ماده نوترونی نرم‌تر، انتقال به سرخ در سطح ستاره افزایش می‌یابد. از آنجایی که در بخش مرئی ستاره‌های نوترونی علاوه بر نوترون‌ها ذرات دیگری مثل پروتون‌ها، الکترون‌ها و میونها نیز وجود دارد، می‌توان بررسی تأثیر معادله حالت این ذرات بر ساختار هاله تاریک ستاره را پیشنهاد نمود.

مرجع‌ها

[1] F. Özel, T. Guver, D. Psaltis, The mass and radius of the neutron star in EXO 1745–248, *The Astrophysical Journal* 693 (2009) 1775.

[2] T. Guver, F. Özel, A. Cabrera-Lavers, P. Wroblewski, The distance, mass, and radius of the neutron star in 4U 1608–52, *The Astrophysical Journal* 712 (2010) 964.

[3] T. Guver, P. Wroblewski, L. Camarota, F. Özel, The mass and radius of the neutron star in 4U 1820–30, *The Astrophysical Journal* 719 (2010) 1807.

[4] F. Sandin, P. Ciarcelluti, Effects of mirror dark matter on neutron stars, *Astroparticle Physics* 32 (2009) 278.

[5] P. Ciarcelluti, F. Sandin, Have neutron stars a dark matter core, *Physics Letters B* 695 (2011) 19.

[17] T.H.R. Skyrme, The effective nuclear potential, *Nuclear Physics* 9 (1959) 615.

[18] E. Chabanat, P. Bonche, P. Hansel, J. Meyer, R. Schaeffer, *Nuclear Physics A* 627 (1997) 710.

[19] G. Narain, J. Schaffner-Bielich, I.N. Mishustin, Compact stars made of fermionic dark matter, *Physical Review D* 74 (2006) 063003.

[20] J.M. Lattimer, M. Prakash, Neutron star observations: Prognosis for equation of state constraints, *Physics Reports*, 442 (2007) 109.

The effect of neutron matter equation of state on the distribution of dark matter in neutron star

Zeinab Rezaei*

Department of Physics, Shiraz University, Shiraz 71454, Iran

Biruni Observatory, Shiraz University, Shiraz 71454, Iran

Received: 26.03.2017 Final revised: 18.02.2018 Accepted: 04.03.2018

Abstract

In this paper, we investigate the effect of neutron matter equation of state on the structure of halo of dark matter and the distribution of dark matter in neutron star using the relativistic two-fluid formalism in the dark-matter admixed neutron star. Applying the equation of state related to the free fermionic gas as dark matter equation of state, we calculate the structure of dark-matter admixed neutron star within different models of Skyrme interaction for the neutron matter, SLy230a, SLy230b, SkM*. Our results indicate that the mass-radius relation depends on the model of interaction. In addition, our calculations confirm that the neutron matter equation of state affects the size of dark matter and neutron matter cores. The results show that the surface gravitational redshift depends on the neutron matter equation of state.

Keywords: Neutron star, Dark matter, Neutron matter equation of state

* Corresponding Author: zrezaei@shirazu.ac.ir