



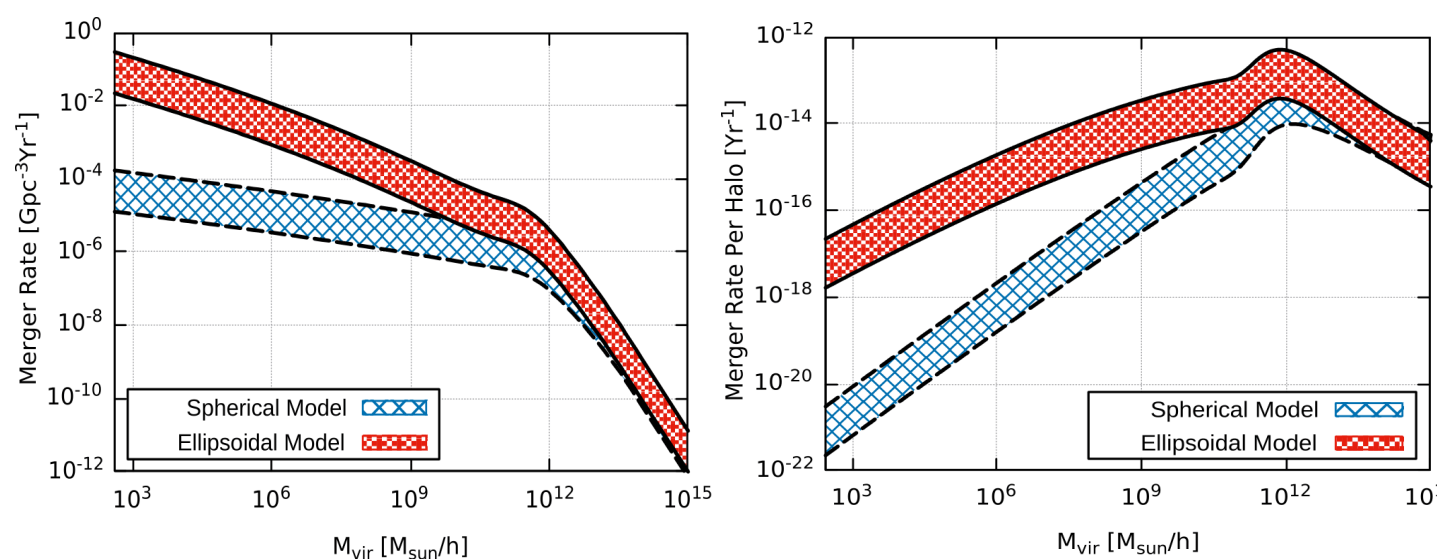
نرخ ادغام دوتایی‌های سیاهچاله اولیه-ستاره نوترونی در مدل‌های هاله‌ای ماده تاریک با رمبش بیضوی

فخری، سعید¹ 2؛ شیرمحمدی، آذین³ 2؛ صالح‌نیا، زهرا³ 2؛ تقی‌زاده فیروزجایی، جواد³ 2و4¹دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید بهشتی تهران²آزمایشگاه داده‌های فیزیک و فناوری‌های نجومی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی تهران³دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی تهران⁴پژوهشکده فیزیک، پژوهشگاه دانشهای بنیادی تهران

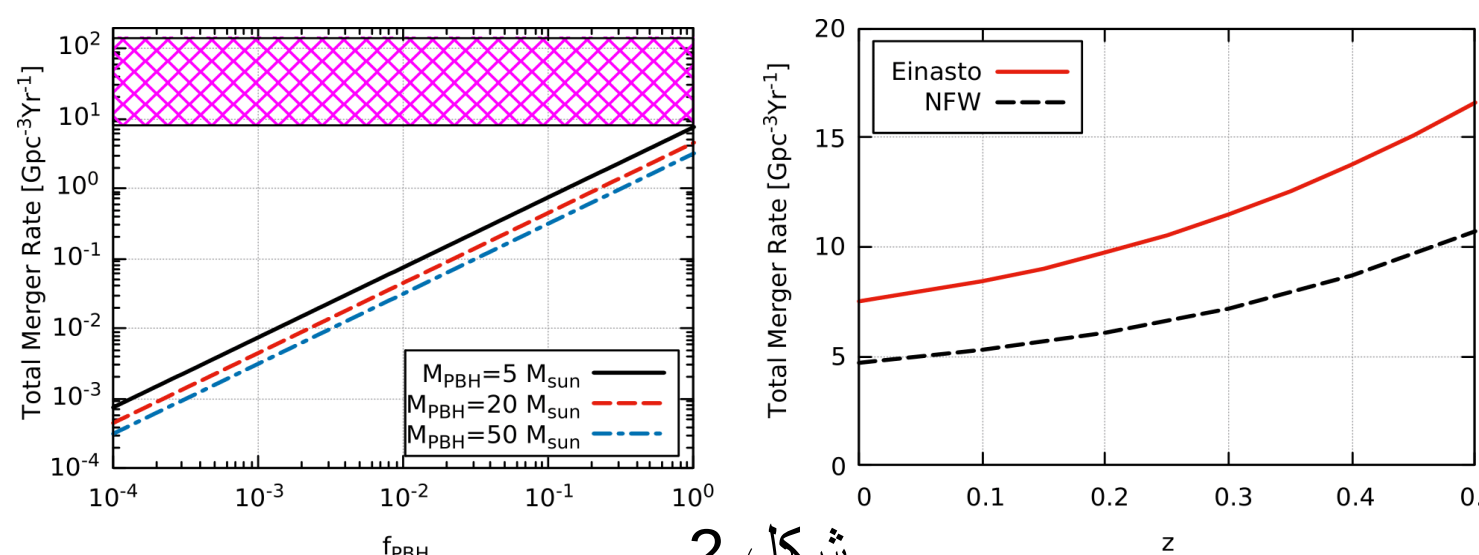
بحث و بررسی

ما همچنین در شکل 2 تحول نرخ ادغام کل دوتایی‌هایی‌های سیاهچاله اولیه-ستاره نوترونی را بر حسب انتقال به‌سرخ نمایش داده‌ایم. همانطور که از نتایج برمی‌آید، نرخ ادغام کل رویدادهای دوتایی سیاهچاله اولیه-ستاره نوترونی برای مدل‌های هاله‌ای با رمبش بیضوی، همواره بیشتر از نرخ ادغام کل به دست آمده از مدل‌های هاله‌ای ماده تاریک با رمبش کروی خواهد بود. این یعنی در تمام دوران متأخر کیهانی، این تقویت نرخ ادغام حفظ خواهد شد. علاوه بر این، ما نرخ ادغام کل رویدادهای دوتایی سیاهچاله اولیه-ستاره نوترونی را بر حسب جرم و فراوانی سیاهچاله‌های اولیه و در مدل‌های هاله‌ای ماده تاریک با رمبش بیضوی رسم کرده و آنها را با ادغام‌های تخمین زده شده توسط آشکارسازهای امواج گرانشی مقایسه کرده‌ایم. نتایج نشان می‌دهند که اگر بیشترین سهم ماده تاریک را سیاهچاله‌های اولیه تشکیل داده باشند، پیش‌بینی‌های سناریو سیاهچاله‌های اولیه از انرخ ادغام دوتایی‌های سیاهچاله-ستاره نوترونی با ادغام‌های تخمین زده شده توسط آشکارسازهای امواج گرانشی همخوانی دارند. همچنین می‌توان استنباط کرد که نرخ ادغام دوتایی‌های سیاهچاله اولیه-ستاره نوترونی با جرم سیاهچاله‌های اولیه ها به‌طور معکوس تغییر می‌کند که منطقی به نظر می‌رسد؛ زیرا چگالی عدد سیاهچاله‌های اولیه با افزایش جرم آن‌ها کاهش یافته و در نتیجه انتظار می‌رود که بیشترین ادغام‌ها مرتبط با کمترین جرم‌های سیاهچاله‌ای باشد.

ما در شکل 1 نرخ ادغام دوتایی‌های سیاهچاله اولیه ستاره نوترونی را برای مدل‌های هاله‌ای ماده تاریک با رمبش بیضوی نمایش داده و نتایج آن را با یافته‌های متناظر و مستخرج از مدل‌های هاله‌ای ماده تاریک با رمبش کروی مقایسه کرده‌ایم. مشخصاً می‌توان مشاهده کرد که نرخ ادغام در هر هاله و نرخ ادغام بر واحد حجم و زمان در مدل‌های هاله‌ای با رمبش بیضوی در جرم‌های هاله‌ای کوچکتر، به میزان قابل توجهی از نتایج متناظر و مستخرج از مدل‌های هاله‌ای با رمبش کروی بیشتر هستند. این را می‌توان به‌عنوان یک برتری نسبی برای مدل‌های هاله‌ای با رمبش بیضوی در نظر گرفت؛ چرا که در این مدل‌ها، آستانه مقادیر فراچگالی با جرم کمتر، بیشترین مقدار اختلاف را با نتایج حاصل از مدل‌های هاله‌ای با رمبش کروی را دارد. ضمن اینکه مدل‌های هاله‌ای با رمبش بیضوی با شبیه‌سازی‌ها و داده‌های رصدی سازگاری بیشتری دارند.



شکل 1



شکل 2

نتیجه‌گیری

در این کار، ما نرخ ادغام دوتایی‌های سیاهچاله اولیه-ستاره نوترونی را در چارچوب مدل‌های هاله‌ای ماده تاریک با رمبش بیضوی محاسبه کرده و نتایج آن را با یافته‌های متناظر و مستخرج از مدل‌های هاله‌ای ماده تاریک با رمبش کروی مقایسه کرده‌ایم. بر این اساس، ما نشان داده‌ایم که مدل‌های هاله‌ای با رمبش بیضوی چارچوب مناسبی برای محاسبه نرخ ادغام دوتایی‌های سیاهچاله اولیه-ستاره نوترونی بوده و به خوبی داده‌های ادغام دوتایی‌های سیاهچاله-ستاره نوترونی مستخرج از آشکارسازهای امواج گرانشی را توصیف می‌کنند. این در حالی است که چنین نتایجی در مدل‌های هاله‌ای با رمبش کروی محقق نمی‌شود.

مراجع

- [1] Abbott, R., et al., *Phy. Rev. X*, 11.2 (2021): 021053.
- [2] Abbott, R., et al., *arXiv preprint arXiv:2111.03606* (2021).
- [3] D’Orazio, D. J., et al., *Astrophys. J.*, 927.1 (2022): 56.
- [4] Sasaki, M., et al., *Astrophys. J.* 931.1 (2022): 2.
- [5] Fakhry, S., et al., *Phys. Rev. D*, 103.12 (2021): 123014.
- [6] Fakhry, S., et al., *Phys. Rev. D* 105.4 (2022): 043525.
- [7] Fakhry, S., et al., *Astrophys. J.*, 941.1 (2022): 36.
- [8] Navarro, J. F., et al., *Astrophys. J.*, 462.1 (1996): 563.
- [9] Einasto, J., *Trudy Astrofizicheskogo Instituta Alma-Ata*, 5 (1965): 87.
- [10] Ludlow, A. D., et al., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 460.2 (2016): 1214.
- [11] Okoli, C., and Afshordi, N., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 456.3 (2016): 3068.
- [12] Press, W. H., and Schechter, P., *Astrophys. J.*, 187 (1974): 425.
- [13] Sheth, R. K., and Tormen, G., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc*, 308 (1999): 119.

مقدمه

امواج گرانشی یکی از موضوعات مورد توجه دانشمندان در چند دهه اخیر بوده و به همین علت زمینه بسیاری از تحقیقات اخیر را فراهم کرده است. یکی از این مسائل مورد توجه، بررسی نرخ ادغام دوتایی‌های فشرده است؛ چرا که همیشه به عنوان یکی از منابع بالقوه امواج گرانشی شناخته می‌شوند. بالاینحال همچنان مشخص نیست که منشأ مؤلفه‌های سیاهچاله‌ای به کیهان اولیه باز می‌گردد و یا آن‌ها از رمبش اخترفیزیکی ایجاد شده‌اند. با توجه به داده‌های ادغام دوتایی‌های فشرده که توسط آشکارسازهای امواج گرانشی ثبت و پردازش می‌شوند، به احتمال زیاد این سیاهچاله‌ها از نوع اولیه هستند [2, 1]. سیاهچاله‌های اولیه به دسته‌ای از سیاهچاله‌ها گفته می‌شود که در ابتدایی‌ترین مراحل تحول کیهان و از طریق رمبش گرانشی افت‌وخیزهای چگالی ایجاد می‌شوند. این سیاهچاله‌ها می‌توانند بازه جرمی گسترده‌ای داشته باشند که باعث تفاوت آن‌ها با سیاهچاله‌های اخترفیزیکی می‌شود. یکی احتمالات برای تشکیل دوتایی‌ها مرتبط با مواجهه سیاهچاله‌ها با ستاره‌های نوترونی هستند. این دوتایی‌ها می‌توانند همراه امواج گرانشی، امواج الکترومغناطیسی ساطع کنند [3]. معمولاً چنین رویدادهایی شامل یک فاز پس از ادغام هستند که ماده باقیمانده از ستاره نوترونی به سیاهچاله می‌پیوندد و این رخداد منجر به گسیل امواج الکترومغناطیسی می‌شود. نکته‌ای که حائز اهمیت است این است که دوتایی سیاهچاله‌های اولیه-ستاره‌های نوترونی صرفاً در جهان متأخر وجود دارند؛ چرا که ستاره‌های نوترونی پس از تشکیل ساختارها و در کیهان متأخر ایجاد شده اند. اخیراً دو رویداد توسط آشکارسازهای امواج گرانشی ثبت شده‌اند که گمان می‌رود ناشی از ادغام دوتایی‌های سیاهچاله-ستاره نوترونی باشند. با اینحال می‌توان انتظار داشت که مؤلفه سیاهچاله‌ای این رویدادها مبدأ اولیه داشته باشد. از این رو در مرجع [4]، نرخ ادغام دوتایی‌های سیاهچاله اولیه-ستاره نوترونی در مدل‌های هاله‌ای با رمبش کروی محاسبه شده است و نتیجه‌گیری شده است که مبدأ سیاهچاله‌های مشارکت کننده در چنین رویدادهایی نمی‌تواند اولیه باشد. اما مسئله اینجاست که احتمالاً با در نظر گرفتن مدل‌های هاله‌ای ماده تاریک واقعی‌تر (مثلاً با رمبش بیضوی) باید منتظر تغییر در نتایج بود [7-5]. بر این اساس در این کار، به محاسبه نرخ ادغام دوتایی‌های سیاهچاله اولیه-ستاره نوترونی پرداخته شده و نتایج آن با ادغام‌های تخمین زده شده توسط آشکارسازهای امواج گرانشی مقایسه می‌شود.

روند تحقیق

یکی از مناسبترین نمایه‌های چگالی، به نمایه NFW موسوم بوده و به‌شکل زیر تعریف می‌شود [8]

$$\rho(r) = \frac{\rho_s}{r/r_s (1 + r/r_s)^2} \quad (1)$$

که در آن ρ_s چگالی مشخصه و r_s شعاع مقیاس هاله هستند. همچنین یک نمایه چگالی دیگر به نام Einasto نیز وجود دارد که با داده‌های مربوط به منحنی چرخش کهکشان‌ها سازگاری مناسبی داشته و به‌شکل زیر توصیف می‌شود [9]

$$\rho(r) = \rho_s \exp \left\{ -\frac{2}{\alpha} \left[\left(\frac{r}{r_s} \right)^\alpha - 1 \right] \right\} \quad (2)$$

که در آن α پارامتر شکل نام دارد. یکی از پارامترهای اساسی دیگر در توصیف هاله‌های ماده تاریک، پارامتر تمرکز هاله‌ای است که با C نشان داده شده و به‌صورت نسبت شعاع ویریال به شعاع مشخصه هاله تعریف می‌شود [10, 11]. یکی دیگر از موارد مهم، تابع جرم هاله‌ای است که به‌صورت زیر تعریف می‌شود

$$\frac{dn}{dM} = h_{(\sigma)} \frac{\rho_M}{M} \frac{d \ln \sigma^{-1}}{dM} \quad (3)$$

که در آن σ به ریشه میانگین مربع افت‌وخیزهای چگالی موسوم است و $h_{(\sigma)}$ تابعی است که با شرایط هندسی افت‌وخیزهای چگالی در زمان رمبش ارتباط دارد. این تابع برای مدل‌های هاله‌ای ماده تاریک با رمبش کروی و بیضوی به ترتیب برابر است با [12, 13]

$$h_{ps(\sigma)} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\delta_{sc}}{\sigma} \exp \left(-\frac{\delta_{sc}^2}{2\sigma^2} \right), \quad h_{st(\sigma)} = A \sqrt{\frac{2a}{\pi}} \frac{\delta_{sc}}{\sigma} \exp \left(-\frac{\delta_{sc}^2}{2\sigma^2} \right) \left[1 + \left(\frac{\sigma^2}{a\delta_{sc}^2} \right)^q \right] \quad (4)$$

که در آن $\delta_{sc} = 1/686$ ، $A = 0/332$ ، $a = 0/707$ و $q = 0/3$. در نهایت نرخ ادغام دوتایی‌های سیاهچاله اولیه-ستاره نوترونی در هر هاله به‌شکل زیر تعریف می‌شود

$$\Gamma = 4\pi \int_0^{r_{vir}} \left(\frac{f_{PBH} \rho_{halo}}{m_1} \right) \left(\frac{\rho_{NS}}{m_2} \right) \langle \xi v_{rel} \rangle r^2 dr \quad (5)$$

در این رابطه، $0 < f_{PBH} \leq 1$ ، $\rho_{NS} \propto \exp(-r)$ نمایه چگالی ستاره نوترونی است و ρ_{halo} نمایه چگالی هاله ماده تاریک است. همچنین $\langle \xi v_{rel} \rangle$ بیانگر میانگین پاشندگی سرعت سیاهچاله‌های اولیه در هاله‌های ماده تاریک است [5]. نهایتاً نرخ ادغام دوتایی‌های سیاهچاله اولیه-ستاره نوترونی بر واحد حجم و زمان برابر است با

$$\mathcal{R} = 4\pi \int_{M_{min}} \frac{dn}{dM_{vir}} \Gamma(M_{vir}) dM_{vir} \quad (6)$$