



# ستاره های نوترونی و رصد های چند پیام رسانی راهی نوین برای شناخت ماده تاریک

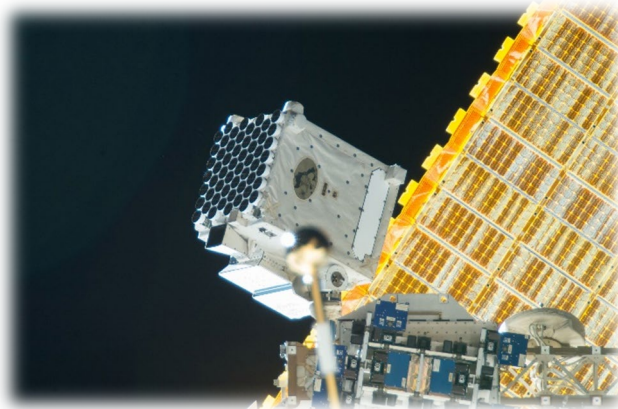


## داوود رفیعی

پژوهشگر مؤسسه ایکرانت-اصفهان  
دانشگاه صنعتی اصفهان

۲۰ دی ماه ۱۴۰۲

دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی اصفهان



## منابع و همکاری ها

**D.R. K**, S. Shakeri, V. Sagun, O. Ivanytskyi,  
Phys. Rev. D 105, 023001 (2022),  
[arXiv:2109.03801v2]

**D.R. K**, S. Shakeri, V. Sagun, O. Ivanytskyi,  
MG16 Proceedings, [arXiv:2112.14231]  
(World Scientific pp. 3713-3731 (2023))

S. Shakeri, **D.R. K**,  
*Bosonic Dark Matter in Light of the NICER Precise Mass-  
Radius Measurements*  
[arXiv:2210.17308v2] (Accepted to be published in PRD)

**D.R. K**, M. ShahrbaF, S. Shakeri, S. Typel  
*Exploring the distribution and impact of bosonic dark  
matter in neutron stars*  
Accepted to be published in Particles (particles-2776285)

*Constraining Dark Matter models using Neutron Star  
Pulse Profile Data*  
S. Shirke, D. Chatterjee, **D.R.K**, S. Shakeri (in preparation)



**Soroush Shakeri**

Isfahan University of Technology  
ICRANet-Isfahan, Iran



**Violetta Sagun**

University of Coimbra, Portugal



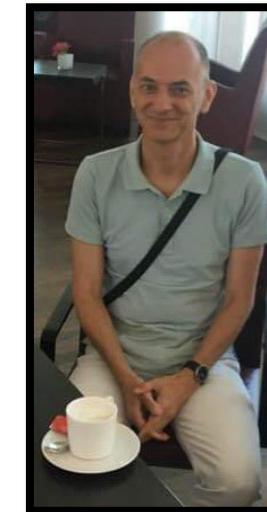
**Oleksii Ivanytskyi**

University of Wroclaw, Poland



**Mahboubeh ShahrbaF**

University of Wroclaw, Poland



**Stefan Typel**

Darmstadt University and GSI institute, Germany



**Debarati Chatterjee**

University Campus, Pune, India

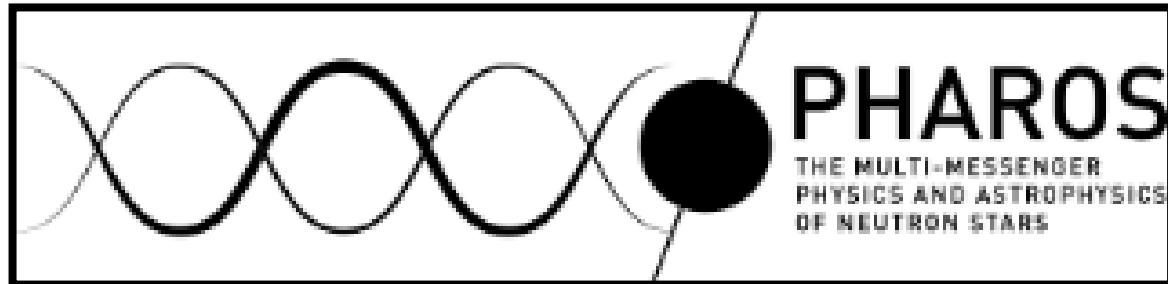
INT PROGRAM INT-22-2B

# Dark Matter in Compact Objects, Stars, and in Low Energy Experiments

August 1, 2022 - September 2, 2022

MG16  5-10 JULY 2021  
SIXTEENTH MARCEL GROSSMANN MEETING

17<sup>TH</sup> ITALIAN-KOREAN  
SYMPOSIUM FOR  
RELATIVISTIC ASTROPHYSICS



TRANSIENT EVENTS AND  
MULTI-MESSENGER ASTROPHYSICS

28 - 29 July 2022 6 - 7 Mordad 1401

5<sup>th</sup> ONLINE  
INO Workshops

*The Modern Physics of Compact Stars  
and Relativistic Gravity 2023*

Yerevan, Armenia, September 12-16, 2023

## DARK MATTER AND STARS

Multi-Messenger Probes of Dark Matter and Modified Gravity

Center for Astrophysics and Gravitation (CENTRA)  
Instituto Superior Técnico (IST) - University of Lisbon, Portugal

3 - 5 May 2023

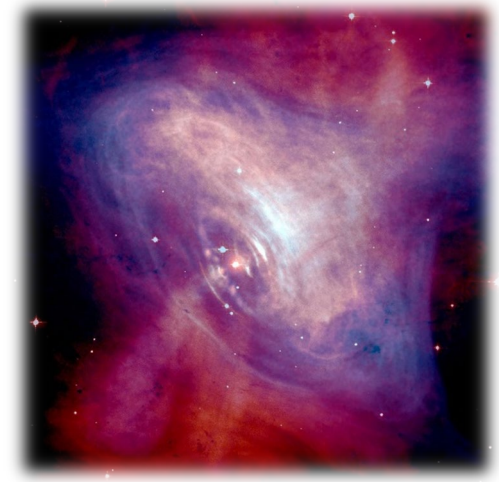
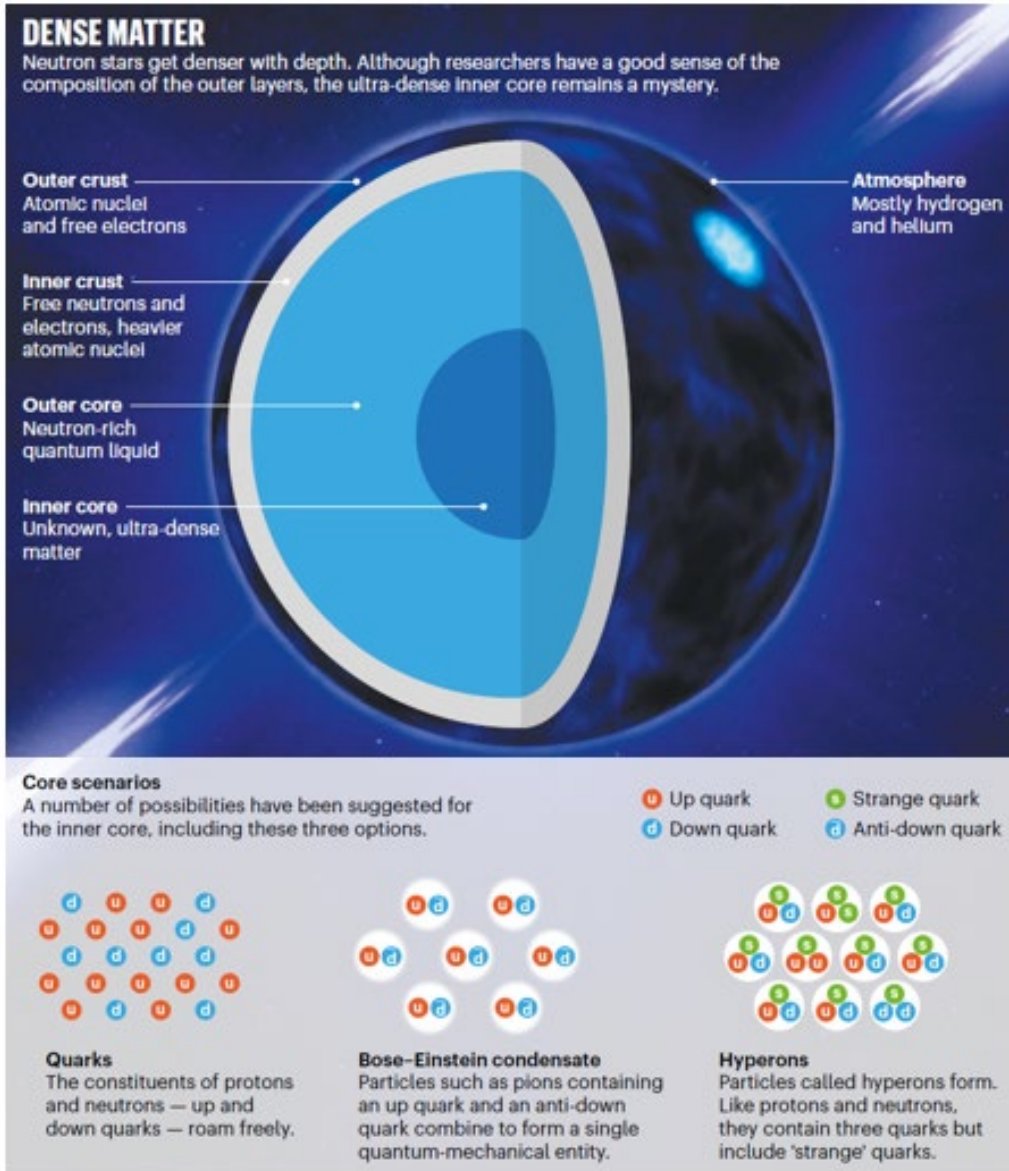


Workshop on

**Bridging the Gaps:  
Interdisciplinary Collaborations in  
Constraining the Physics of Finite Nuclei,  
Neutron Stars and Dark Matter**

03 - 07 July, 2023

# ستاره های نوترونی: آزمایشگاه طبیعی برای بررسی ماده در چگالی فرا هسته ای



جرم: ۱.۴ تا ۲ برابر جرم خورشید

شعاع: حدود ۱۲ کیلومتر

$$\frac{dP(r)}{dr} = -\frac{GM(r)\epsilon(r)}{c^2 r^2} \left[ 1 + \frac{P(r)}{\epsilon(r)} \right] \left[ 1 + \frac{4\pi r^3 P(r)}{M(r)c^2} \right] \left[ 1 - \frac{2GM(r)}{c^2 r} \right]^{-1}$$

**Tolman-Oppenheimer-Volkof (TOV) equations**

$$\frac{dM(r)}{dr} = \frac{4\pi r^2 \epsilon(r)}{c^2}$$

R. C. Tolman, Phys. Rev. 55, 364 (1939).

J. R. Oppenheimer and G. M. Volko, Phys. Rev. 55,374 (1939).

# رویداد چند پیام رسانی GW170817

Selected for a Viewpoint in *Physics*  
PHYSICAL REVIEW LETTERS

PRL 119, 161101 (2017)

week ending  
20 OCTOBER 2017

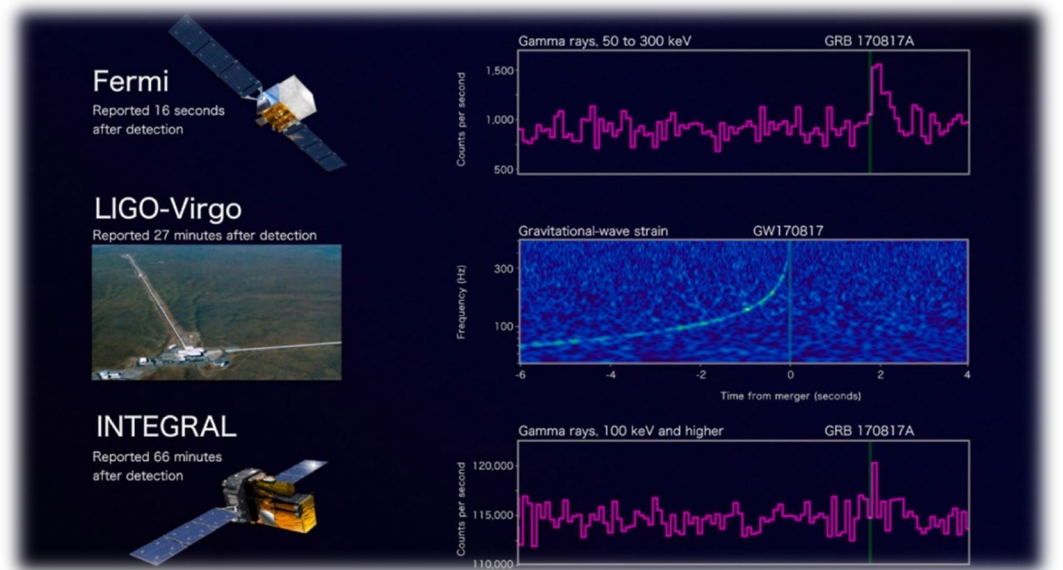


## GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral

B. P. Abbott *et al.*\*

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

(Received 26 September 2017; revised manuscript received 2 October 2017; published 16 October 2017)



## قید های رصدی چند پیام رسانی برای ستاره های نوترونی

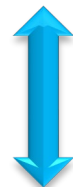
شکل پذیری کشندی



امواج گرانشی

$$\Lambda_{1.4M_{\odot}} \leq 580$$

ماکزیمم جرم



امواج رادیویی و اشعه ایکس

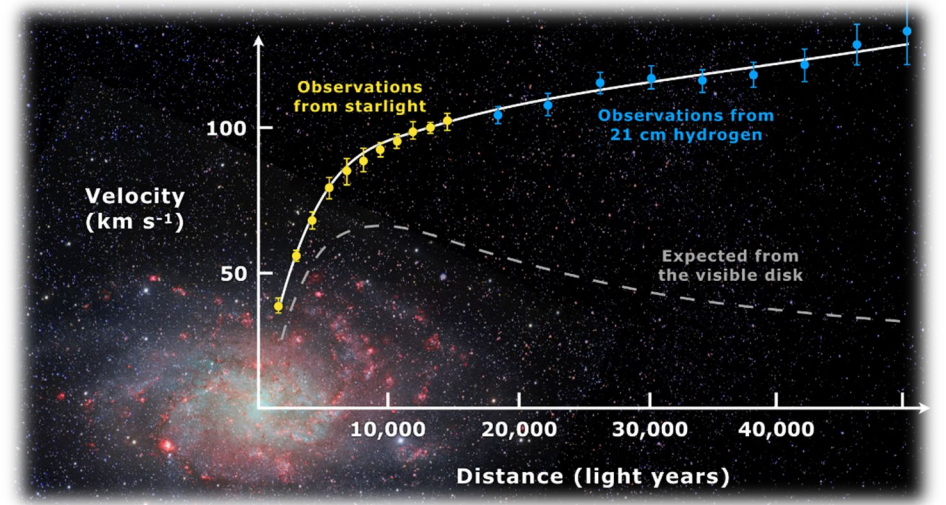
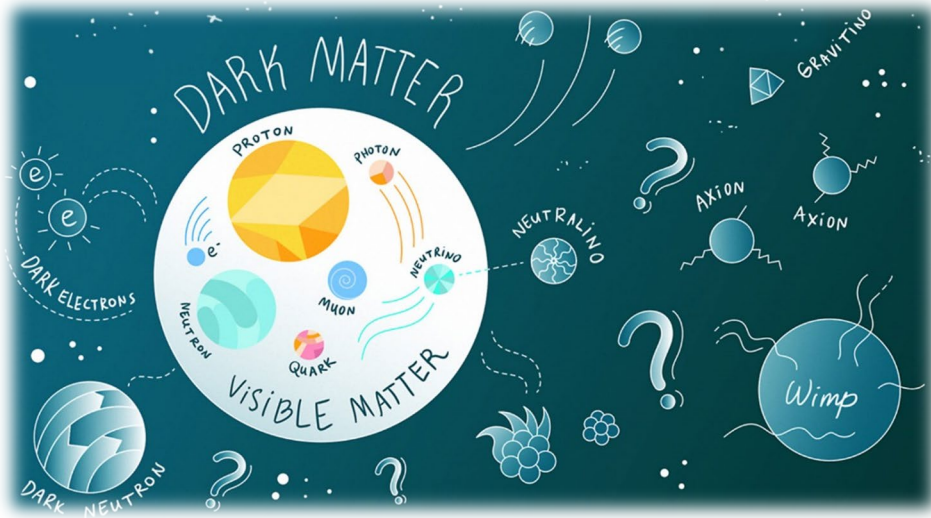
$$M_{max} \simeq 2M_{\odot}$$

شعاع



اشعه ایکس

$$R_{1.4M_{\odot}} \simeq 12 \text{ km}$$



اجرام اختر فیزیکی شامل ماده تاریک و از نظر گرانشی پایدار

ماده تاریک بوزونی یا فرمیونی با خودبرهم کنش دافع یا جاذب

ستاره های تاریک که کاملاً از ماده تاریک ساخته شده اند (ستاره های بوزونی و ستاره های اسیونی)

ستاره های نوترونی یا کوتوله های سفید که شامل کسری از ماده تاریک هستند

Andrea Maselli, et al. [PRD 96, 023005 \(2017\)](#)

Joshua Eby, et al. [JHEP 02 \(2016\) 028](#)

G. Narain, J. Schaffner-Bielich, et al. [PRD 74, 063003 \(2006\)](#)

Chris Kouvaris, et al. [PRD 92 \(2015\) 6, 063526](#)

P.A.Seoane, J.Barranco, A.Bernal, L. Rezzolla, [JCAP 11 \(2010\) 002](#)

A. Nelson, S. Reddy, D. Zhou, [JCAP07\(2019\)012](#)

John Ellis, et al. [PRD 97, 123007 \(2018\)](#)

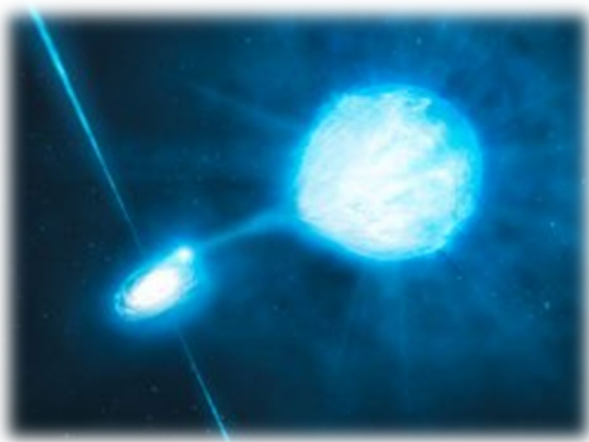
Y.Dengler, J. Schaffner-Bielich, L. Tolos, [PRD 105 \(2022\) 4, 043013](#)

S.-C. Leung, et al. [PRD 87, 123506 \(2013\)](#)

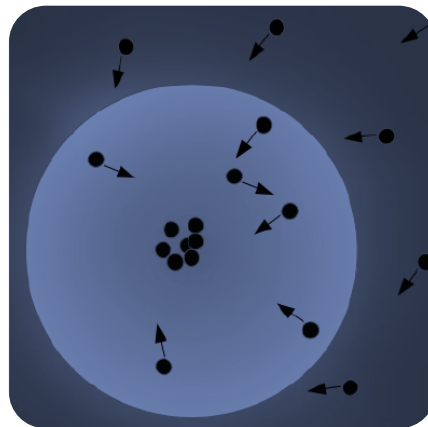
C.J. Horowitz, [PRD 102 \(2020\) 8, 083031](#)

# شکل گیری ستاره های نوترونی آمیخته با ماده تاریک

ستاره های تاریک، مرکز گرانشی  
برای جذب ماده باریونی



جذب ماده تاریک در طول زندگی ستاره  
یا ستاره های نوترونی، با در نظر گرفتن  
میدان گرانشی قوی این اجرام



ادغام ستاره های تاریک و ستاره های  
نوترونی در سیستم های دوتایی

گذار ستاره ی نوترونی از ناحیه  
چگال در هاله ماده تاریک به  
ویژه نزدیک به مرکز کهکشان



تولید ماده تاریک در  
انفجارات ابر نواختری یا  
درون ستاره های نوترونی

ناهنجاری واپاشی نوترون



*D.R. K, S. Shakeri, et al., Phys. Rev. D 105, 023001 (2022)*

*S. Shakeri, D.R. K, arXiv:2210.17308v2*

*O. Ivanytskyi, V. Sagun, I. Lopes. Phys. Rev. D 102, 063028 (2020)*

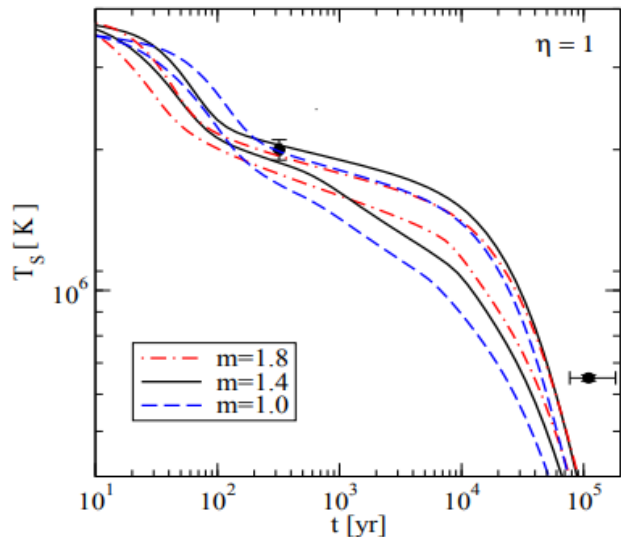
*A. Nelson, S. Reddy, D. Zhou, JCAP07(2019)012*

*John Ellis, et al. Phys. Rev. D 97, 123007 (2018)*

*A. Del Popolo, et al. Universe 6 (2020) 12, 222*

*W. Husain, T. F. Motta, A.W. Thomas, JCAP 10 (2022) 028*

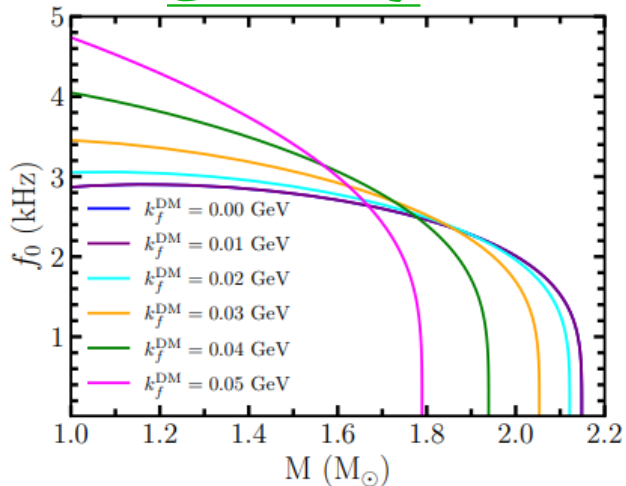
## سرمایش یا گرمایش ستاره های



Armen Sedrakian, *Phys.Rev.D* **93** (2016) **6**, 065044  
*Phys. Rev. D* **99**, 043011 (2019)

Chris Kouvaris, *Phys.Rev.D* **77** (2008) 023006

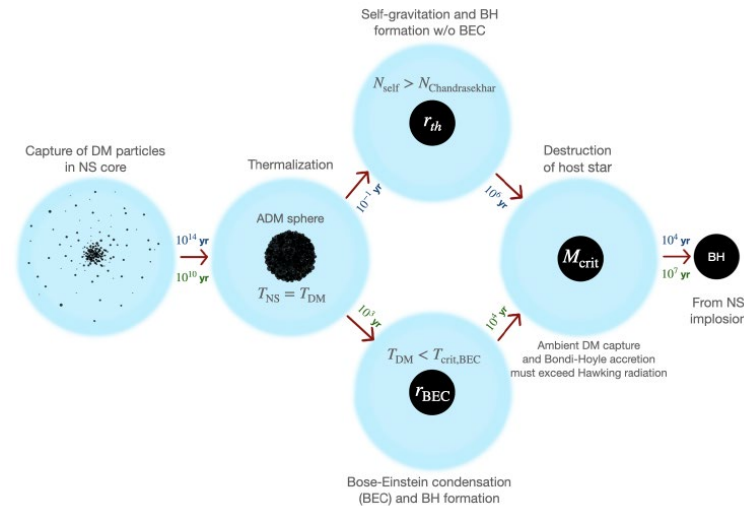
## نوسانات شعاعی



Pinku Routray et al. *Phys. Rev. D* **107**, 103039 (2023)

S. Shirke, S. Ghosh, D. Chatterjee, L. Sagunski, J. Schaffner-Bielich,  
[arXiv:2305.05664](https://arxiv.org/abs/2305.05664)

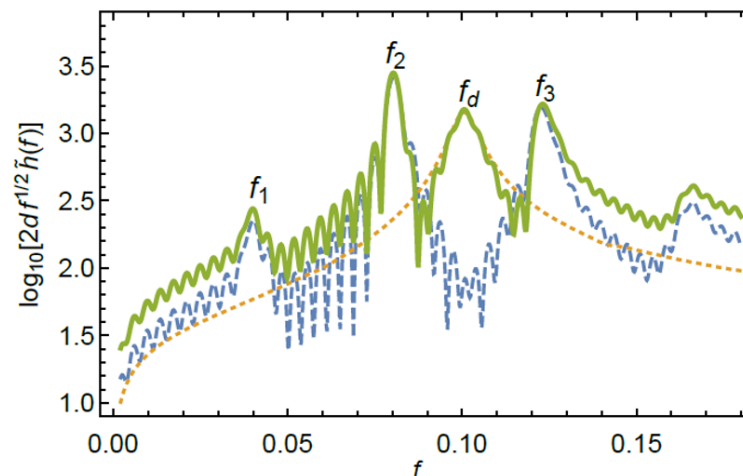
## شکل گیری سیاه چاله درون ستاره های نوترونی



D. Singh, A. Gupta, E. Berti, S. Reddy, B. S. Sathyaprakash,  
*Phys.Rev.D* **107** (2023) **8**, 083037

N. F. Bell, A. Melatos, K. Petraki, *Phys.Rev.D* **87** (2013) **12**, 123507

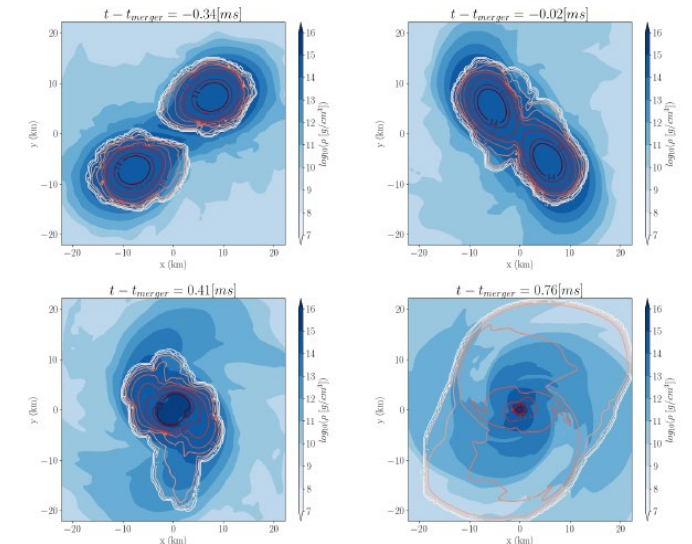
## سیگنال امواج گرانشی



John Ellis, et al. *Phys.Lett.B* **781** (2018) 607-610

H. C. Das, Ankit Kumar, et al. *Mon.Not.Roy.Astron.Soc.* **57** (2021) 4053

## شبیه سازی های عددی نسبت عام سیستم های دوتایی



M. Emma, F. Schianchi, F. Pannarale, V. Sagun,  
 T. Dietrich, *Particles* **5** (2022) **3**, 273-286

Andreas Bauswein, et al. *Phys.Rev.D* **107** (2023) **8**, 083002

جرم، شعاع،  
 شکل پذیری کشندی  
 و ممان لختی

الگوی تابش ایکس

Z. Miao, Y. Zhu, Ang Li, F. Huang, *Ap.J.* **936** (2022) **1**, 69

S. Shakeri, **D.R. K.**, [arXiv:2210.17308v2](https://arxiv.org/abs/2210.17308v2)



# مدل سازی ستاره های نوترونی آمیخته با ماده تاریک

ماده تاریک پایدار یا نامتقارن

تأثیر در جرم، شعاع و شکل پذیری  
کشندی ستاره نوترونی

ماده تاریک ناپایدار

تأثیر در تابندگی، دما و سرمایش  
ستاره نوترونی

Chris Kouvaris, Phys.Rev.D. 77:023006,2008  
M.A. Perez-Garcia and J. Silk, Phys. Lett. B 711, 6 (2012)

مدل تک سیال

مدل دو سیال

مدل در  
نظر گرفته  
شده در این  
تحقیق

استفاده از یک معادله حالت  
برای توصیف سیستم، که در آن  
ماده تاریک و ماده هسته ای  
برهمکنش غیر گرانشی دارند

استفاده از دو معادله حالت  
مجزا برای ماده تاریک و  
ماده هسته ای، که در آن دو  
سیال مورد نظر صرفاً  
برهمکنش گرانشی دارند

استفاده از معادلات  
تولمن-اوپنهایمر-ولکوف  
دو سیال

## ماده تاریک بوزونی با خود برهم کنش دافع

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} \partial_\mu \phi^* \partial^\mu \phi - \frac{m_\chi^2}{2} \phi^* \phi - \frac{\lambda}{4} (\phi^* \phi)^2.$$

میدان اسکالر مختلط

$$V(\phi) = \frac{1}{4} \lambda |\phi|^4$$

جرم بوزون در محدوده Sub-GeV  
جفت شدگی قوی از مرتبه ی عدد 1

$$P = \frac{m_\chi^4}{9\lambda} \left( \sqrt{1 + \frac{3\lambda}{m_\chi^4} \rho} - 1 \right)^2.$$

پارامترهای آزاد مدل  
 $\lambda$  ثابت جفت شدگی  
 $m_\chi$  جرم بوزون

*D.R. Karkevandi, S. Shakeri, et al., Phys. Rev. D 105, 023001 (2022)*

VOLUME 57, NUMBER 20

PHYSICAL REVIEW LETTERS

17 NOVEMBER 1986

### Boson Stars: Gravitational Equilibria of Self-Interacting Scalar Fields

Monica Colpi,<sup>(a)</sup> Stuart L. Shapiro, and Ira Wasserman

توصیف کننده ی ستاره های بوزونی از  
مرتبه جرم و شعاع ستاره های نوترونی

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 871:157 (8pp), 2019 February 1

© 2019. The American Astronomical Society. All rights reserved.

<https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaf805>



CrossMark

### The Induced Surface Tension Contribution for the Equation of State of Neutron Stars

Violetta V. Sagun<sup>1,2</sup>, Ilídio Lopes<sup>1,3</sup>, and Aleksei I. Ivanytskyi<sup>2,4</sup>

ماده هسته ای، ساختار پایدار بتا  
( $n, p, e, \mu$ )

# ستاره نوترونی آمیخته با ماده تاریک در مدل دو سیال

ماده تاریک و ماده هسته ای صرفاً برهم کنش گرانشی دارند

تانسور انرژی - تکانه به صورت مجزا پیوسته است

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = 8\pi(T_{DM}^{\mu\nu} + T_{BM}^{\mu\nu})$$

## معادلات تولمن-اوپنهایمر-ولکوف در مدل دو سیال

F. Sandin & P. Ciarcelluti. *Astropart.Phys.*32:278-284,2009.

P. Ciarcelluti & F. Sandin. *Phys.Lett. B*695:19-21,2011.

$$\frac{dp_B}{dr} = - (p_B + \varepsilon_B) \frac{m + 4\pi r^3 p}{r(r - 2m)}$$

$$\frac{dp_D}{dr} = - (p_D + \varepsilon_D) \frac{m + 4\pi r^3 p}{r(r - 2m)}$$

$$m(r) = \underbrace{\int_0^r 4\pi r^2 \varepsilon_B}_{m_B(r)} + \underbrace{\int_0^r 4\pi r^2 \varepsilon_D}_{m_D(r)}$$

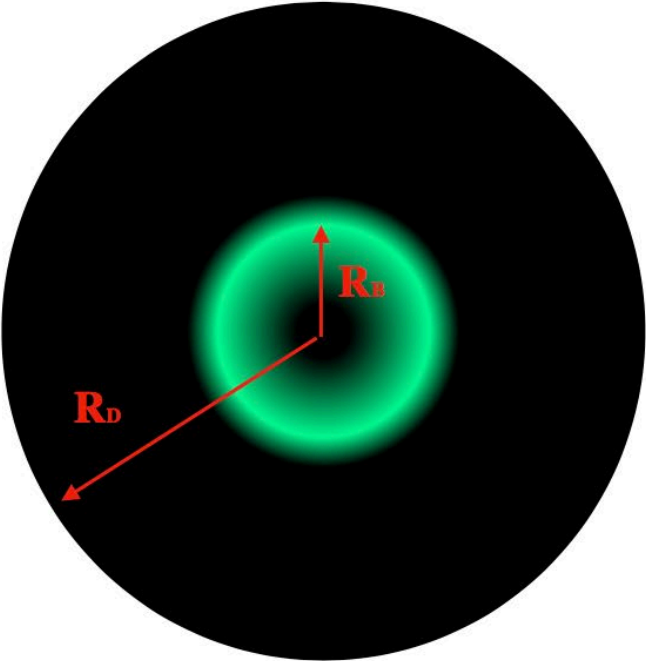
$$p(r) = p_B(r) + p_D(r)$$

معادله حالت های ماده تاریک و هسته ای

دو فشار مرکزی برای دو سیال مورد نظر :  $p_{B_c}(r \simeq 0)$  ;  $p_{D_c}(r \simeq 0)$

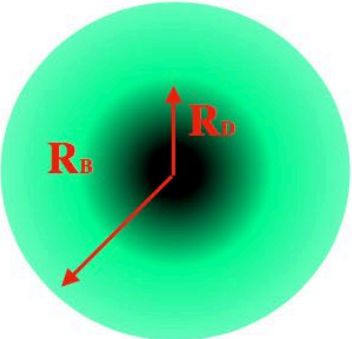
# سه حالت ممکن برای توزیع ماده تاریک در ستاره های نوترونی

هاله ای از ماده تاریک اطراف ستاره نوترونی



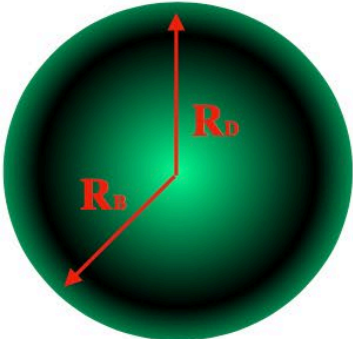
$$R_D > R_B$$

هسته ای از ماده تاریک  
درون ستاره نوترونی



$$R_B > R_D$$

ماده تاریک در کل ستاره  
نوترونی پراکنده است



$$R_B \approx R_D$$

هسته ستاره های نوترونی مرکب  
مخلوطی از هر دو سیال است

ماده هسته ای : سبز  
ماده تاریک : مشکی

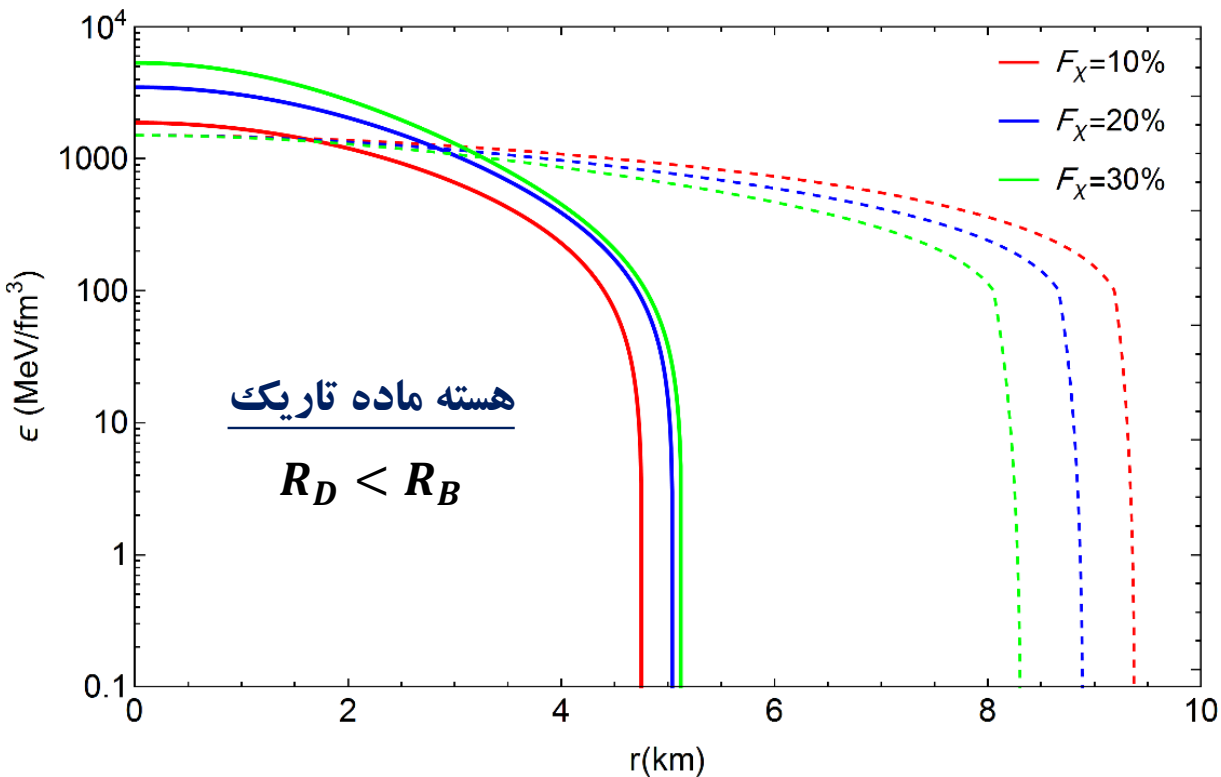
جرم کل  $M_T = M_B(R_B) + M_D(R_D)$

کسر ماده تاریک  $F_\chi = \frac{M_D(R_D)}{M_T}$

شعاع قابل مشاهده  $R_B$

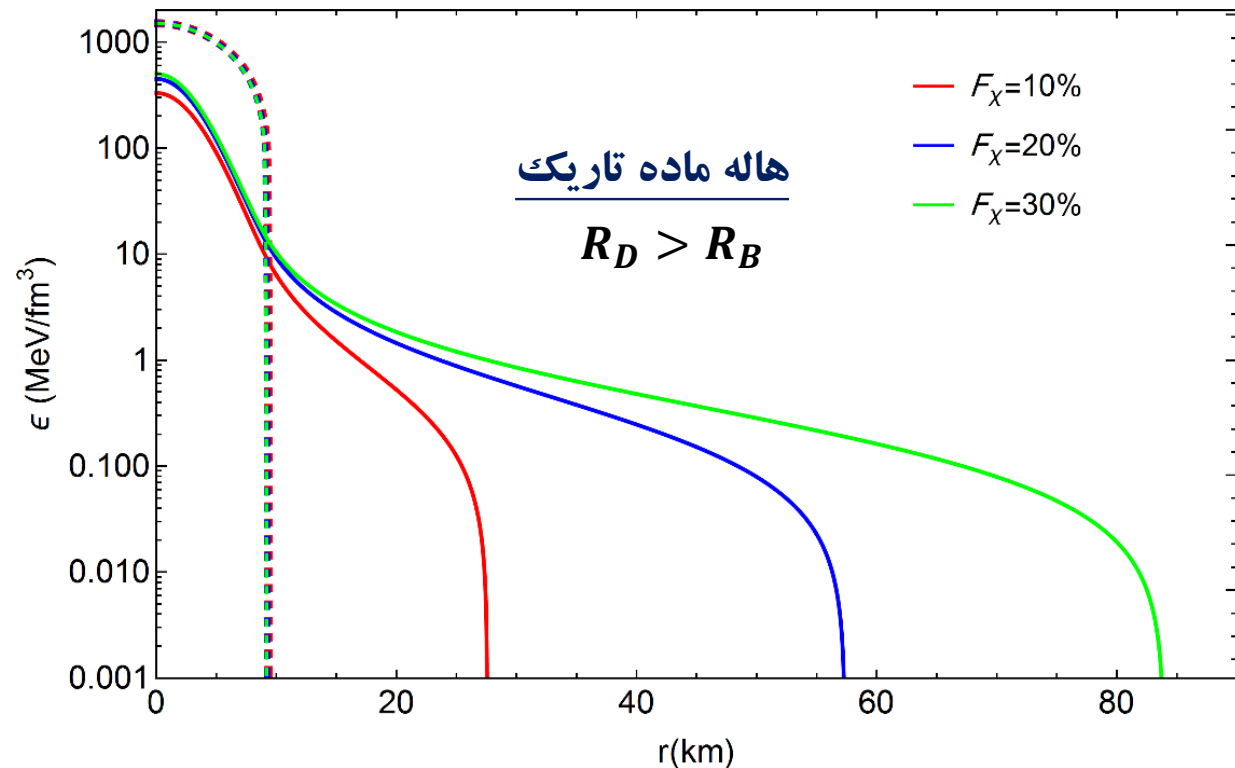
# TOV دو فلوئید ← تغییرات چگالی انرژی بر حسب شعاع ستاره نوترونی آمیخته با ماده تاریک

$(R_B)$  سیال ماده هسته ای: خط چین  $(R_D)$  سیال ماده تاریک: خط پر



$m_\chi = 400 \text{ MeV}$   
 $\lambda = \pi$

ماده تاریک سنگین هسته ای چگال  
درون ستاره نوترونی شکل می دهد

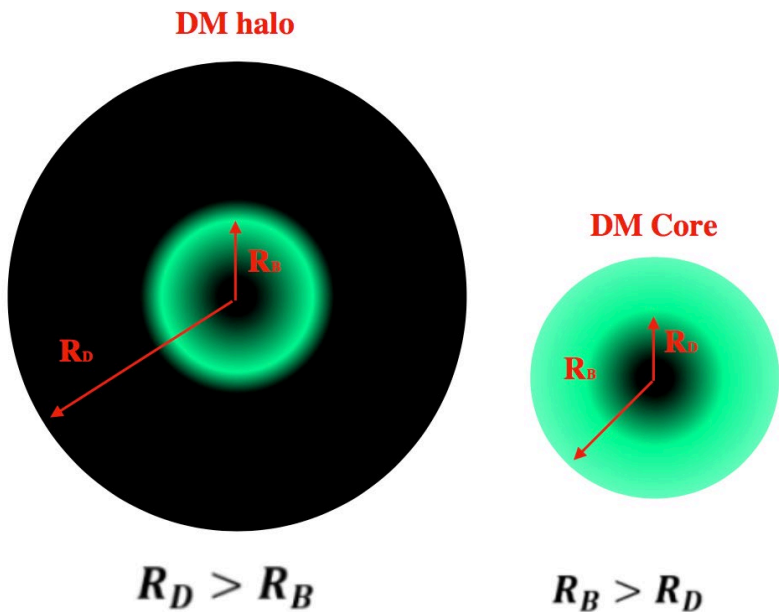


$m_\chi = 100 \text{ MeV}$   
 $\lambda = \pi$

ماده تاریک سبک هاله ای گسترده  
اطراف ستاره نوترونی ایجاد می کند

# پروفایل جرم-شعاع ستاره های نوترونی آمیخته با ماده تاریک

بیرونی ترین شعاع ستاره های نوترونی آمیخته در نظر گرفته شده است



$$F_\chi = \frac{M_D(R_D)}{M_T}$$

خط پر مشکی  
فقط ماده هسته ای (بدون  
ماده تاریک)  
2.08  $M_\odot$  : ماکزیمم جرم

هسته ی ماده  
تاریک

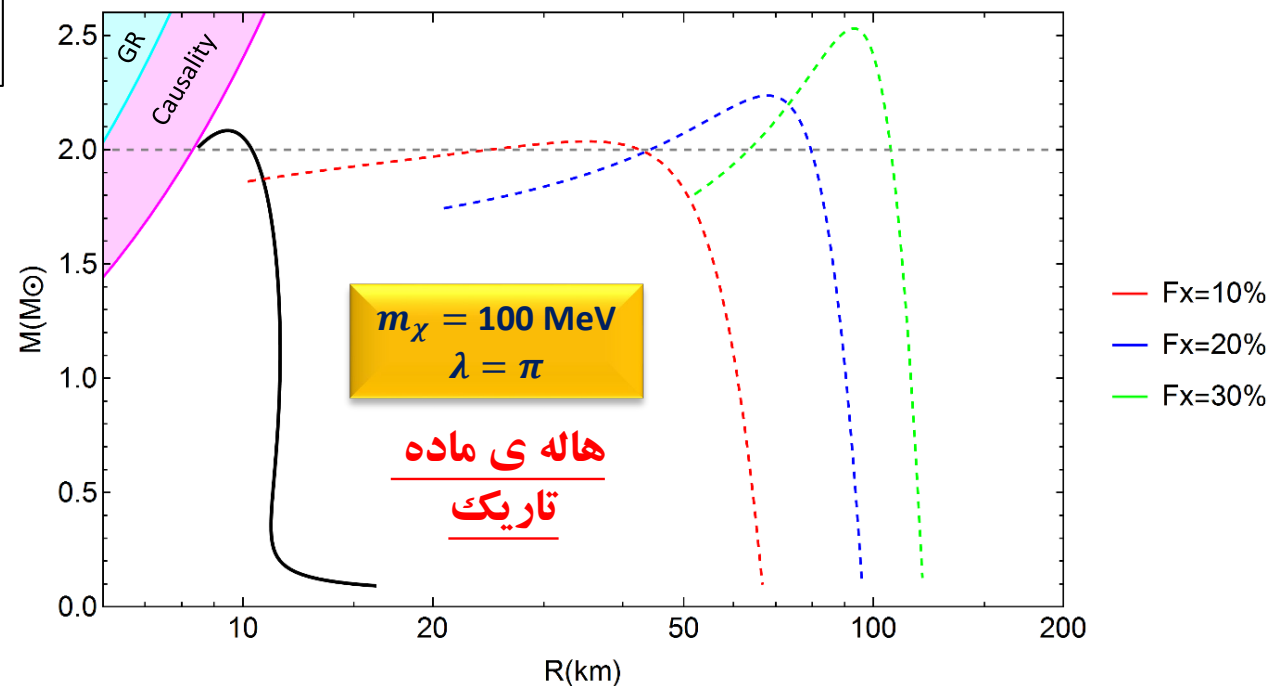
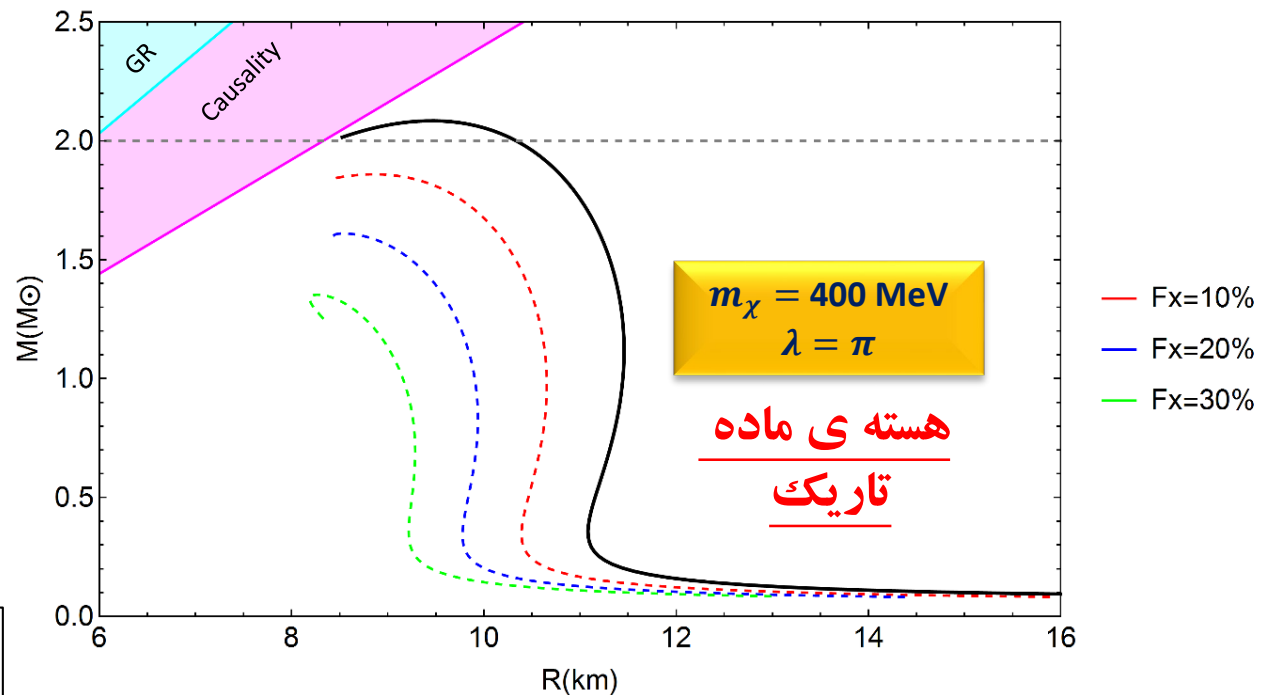


کاهش در ماکزیمم جرم و شعاع

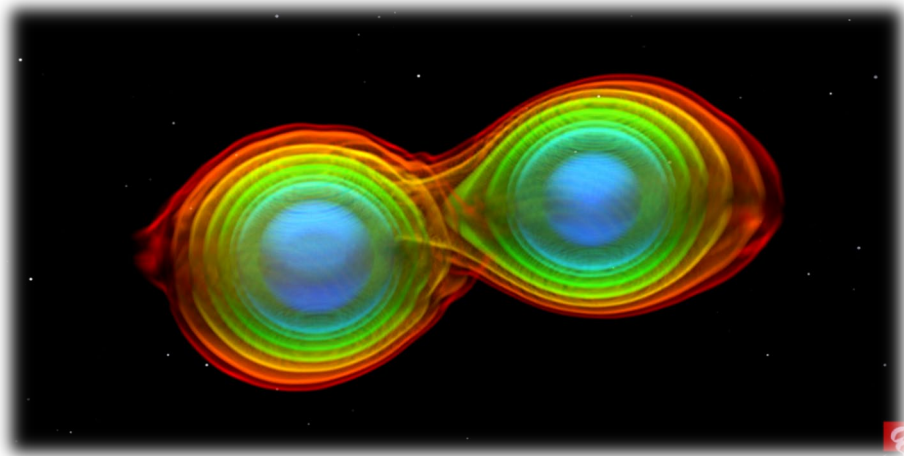
هاله ی ماده  
تاریک



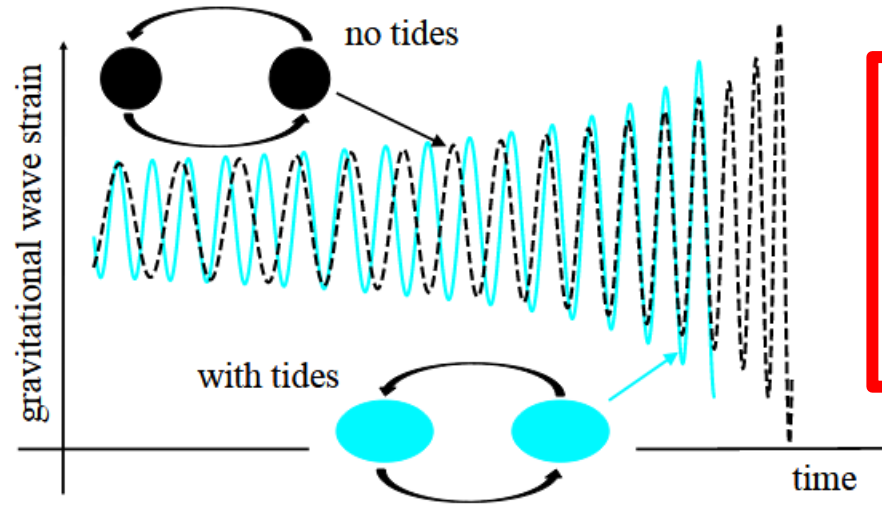
افزایش در ماکزیمم جرم و شعاع



# پارامتر رصدی شکل پذیری کشندی حاصل از سیستم های دوتایی ستاره های نوترونی



Tim Dietrich et al. Max Planck Institute



Nicolas Yunes et al. *Nature Rev.Phys.* 4 (2022) 4, 237-246

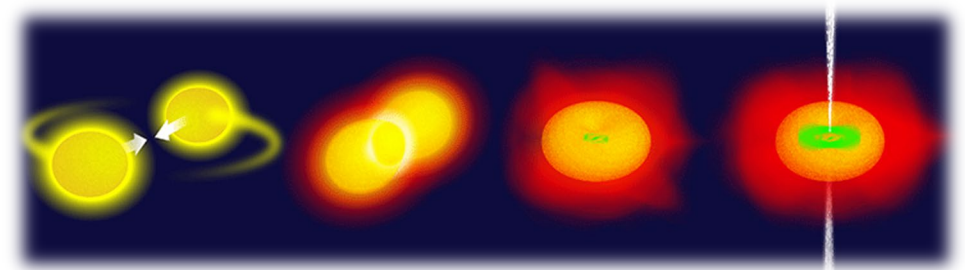
تأثیر تغییر شکل ستاره های نوترونی و پارامتر شکل پذیری کشندی در سیگنال امواج گرانشی

$$Q_{ij} = \lambda_t \varepsilon_{ij}$$

$$\lambda_t = \frac{2}{3} k_2 R^5$$

نیروی کشندی خارجی سبب القای گشتاور چهارقطبی و تغییر شکل ستاره نوترونی همدم میشود

$$\Lambda = \frac{\lambda_t}{M^5} = \frac{2}{3} k_2 \left(\frac{R}{M}\right)^5$$



امواج گرانشی حاصل از ادغام دو ستاره نوترونی در سال ۲۰۱۷

وابسته به معادله حالت ، جرم و شعاع ستاره نوترونی

“Tidal Love Numbers of Neutron Stars” *Astrophys.J.* 677 (2008) 1216-1220

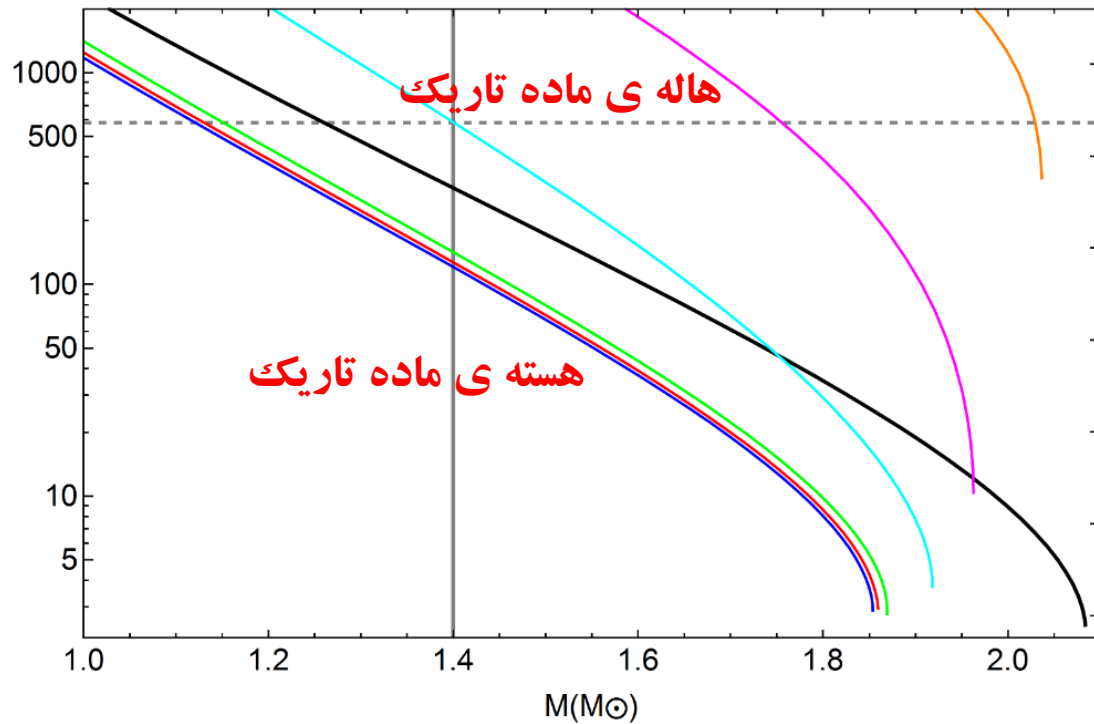
Tanja Hinderer, et al. *Phys.Rev.D*81:123016,2010

قید رصدی  
پارامتر شکل پذیری کشندی  
 $\Lambda \leq 580$  ،  $M = 1.4 M_{\odot}$

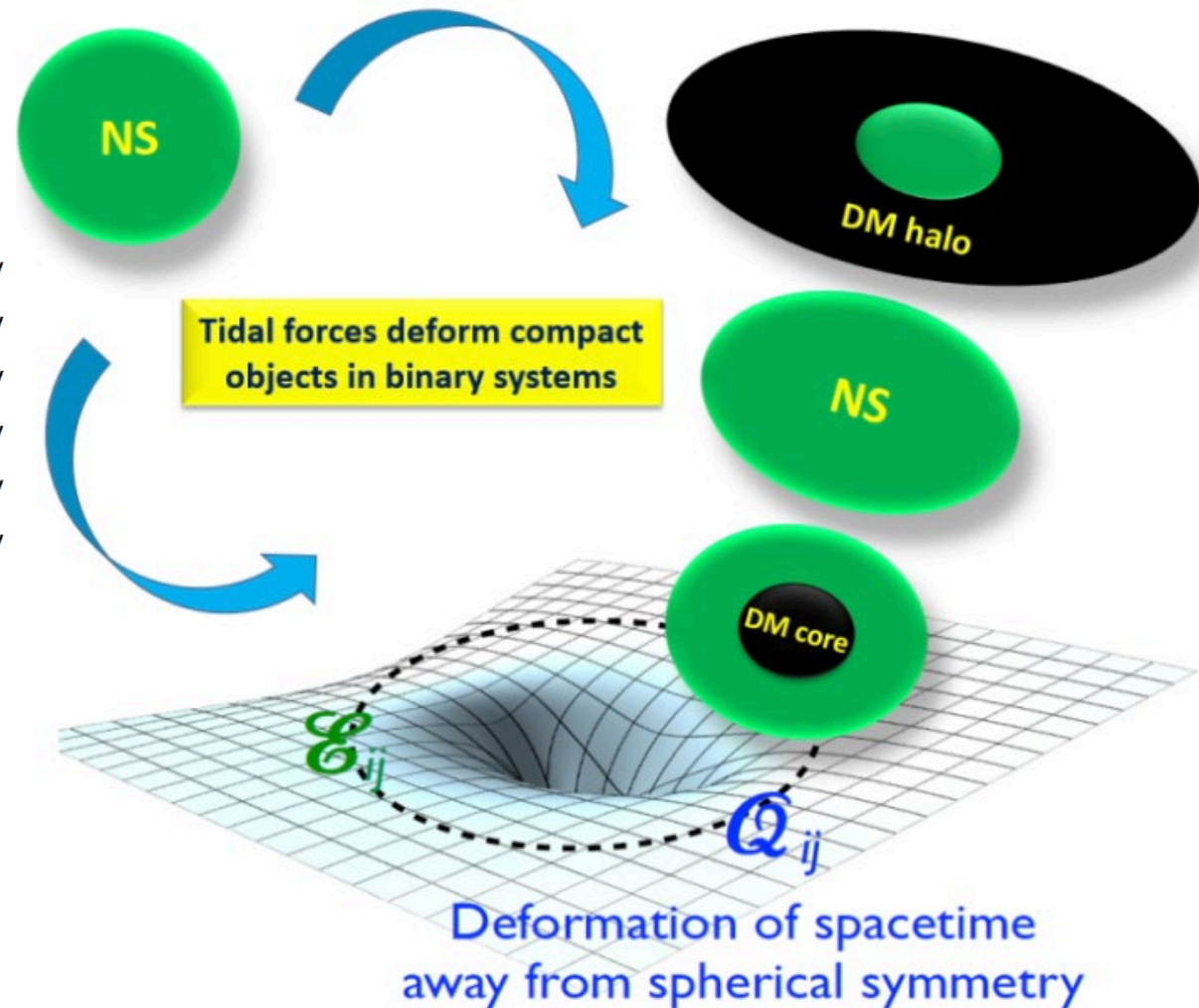
# شکل پذیری کشندی ستاره های نوترونی آمیخته با ماده تاریک

$\Lambda - M$

نمودار مشکی بدون ماده تاریک



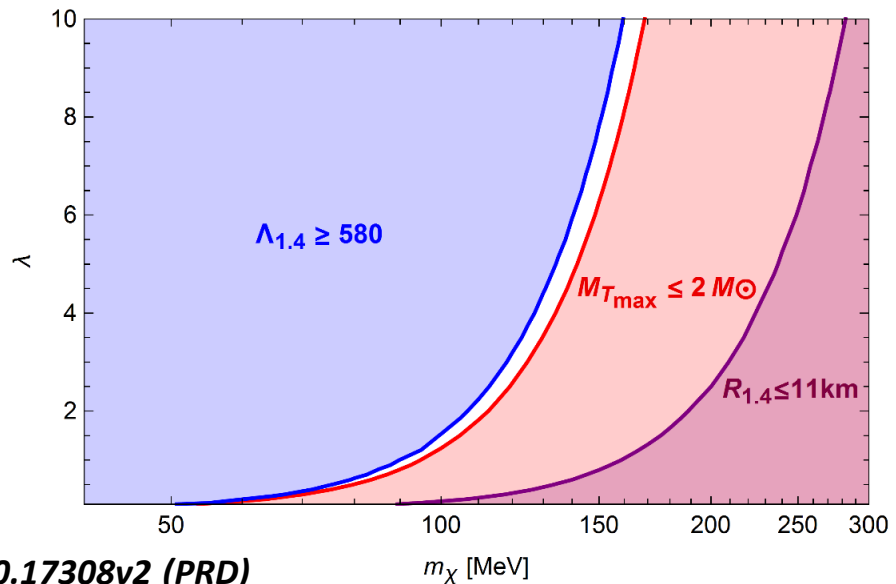
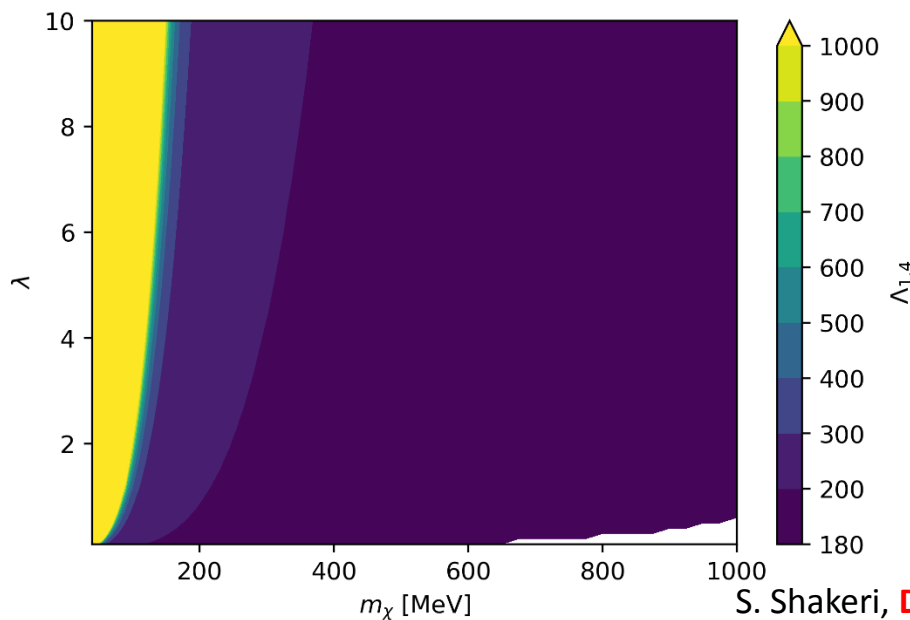
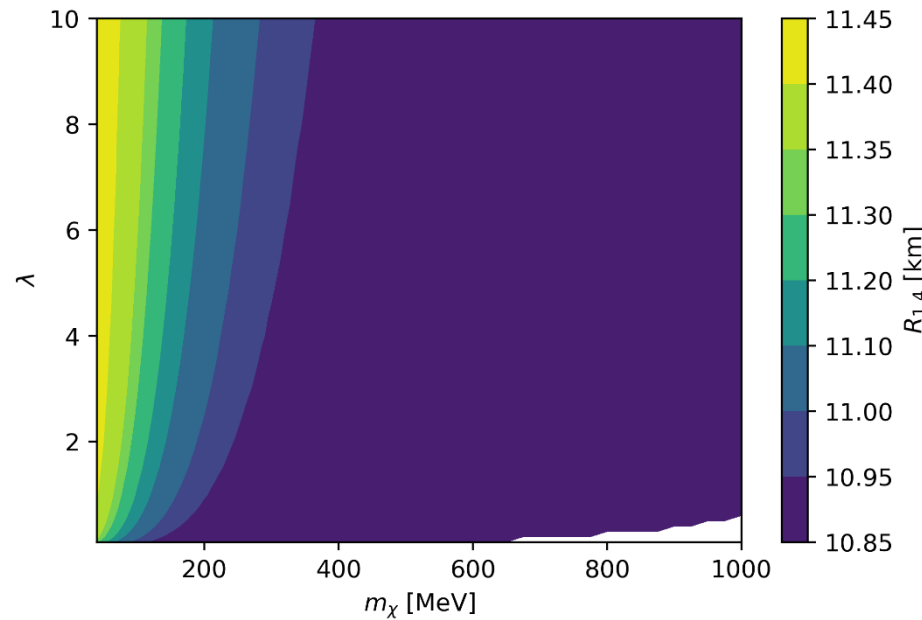
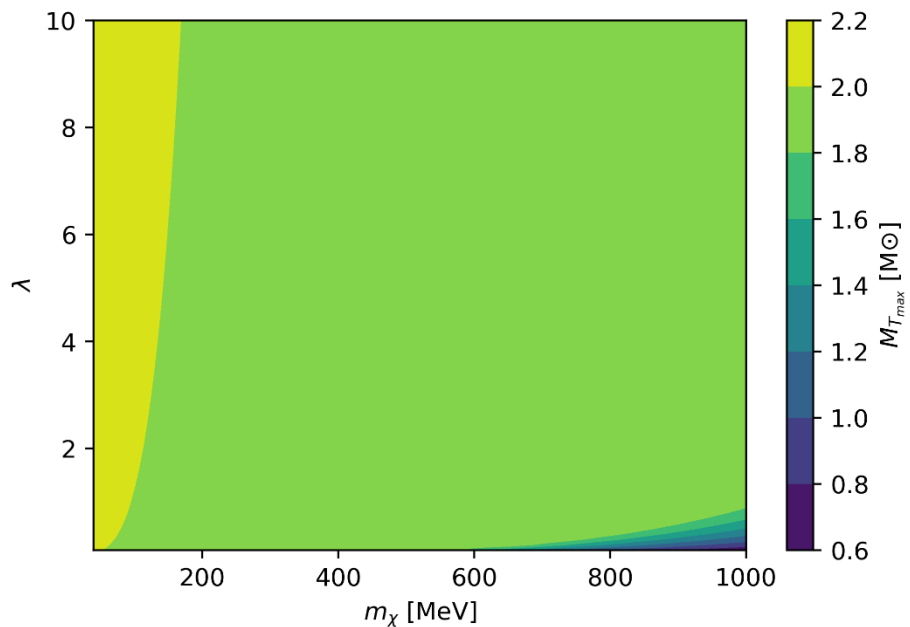
- 100 MeV
- 120 MeV
- 150 MeV
- 300 MeV
- 400 MeV
- 500 MeV



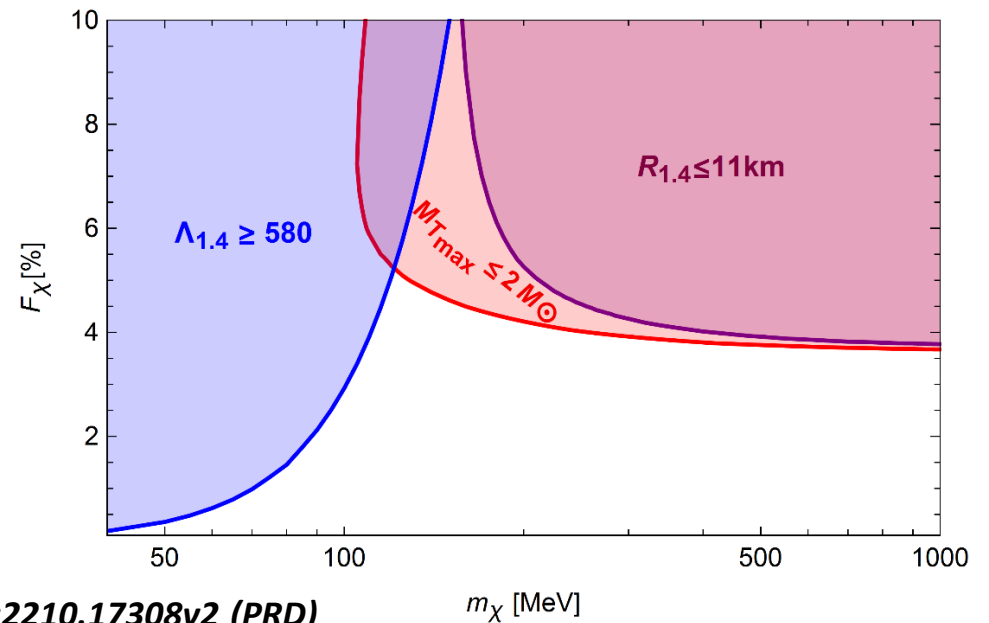
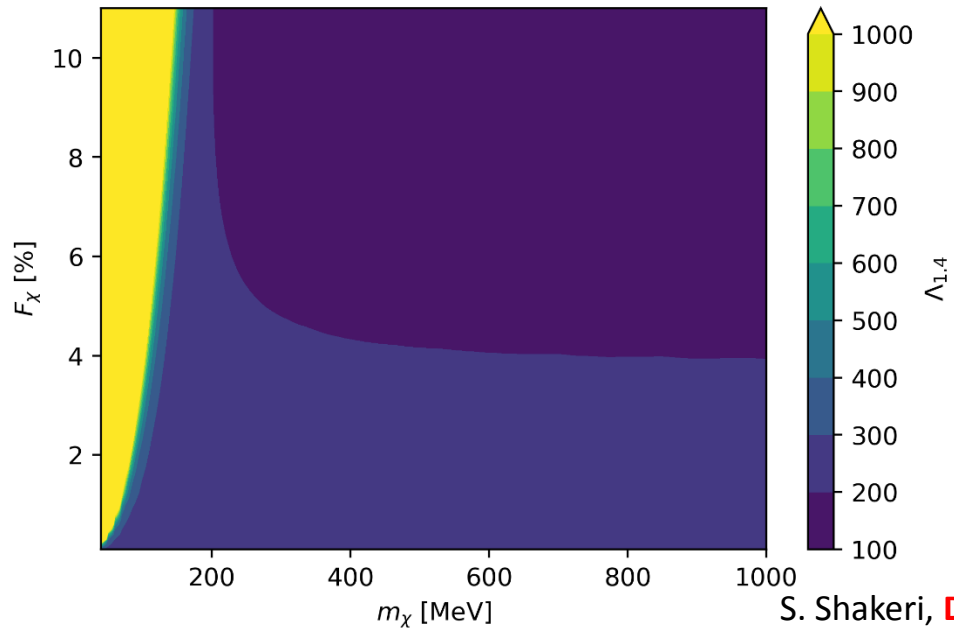
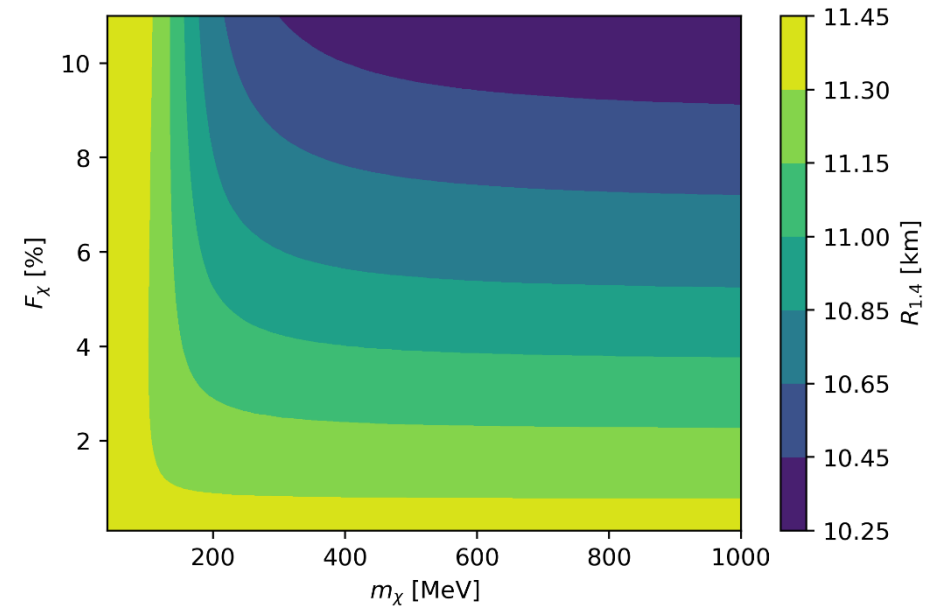
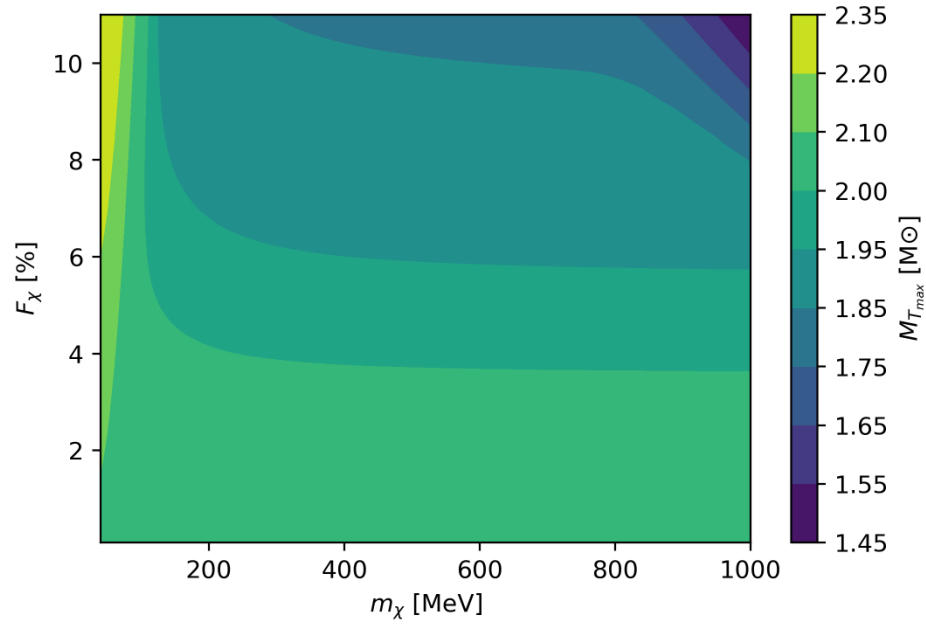
هسته ی ماده تاریک، شکل پذیری کشندی ستاره ی نوترونی را کاهش میدهد اما هاله ماده تاریک سبب افزایش این پارامتر میشود

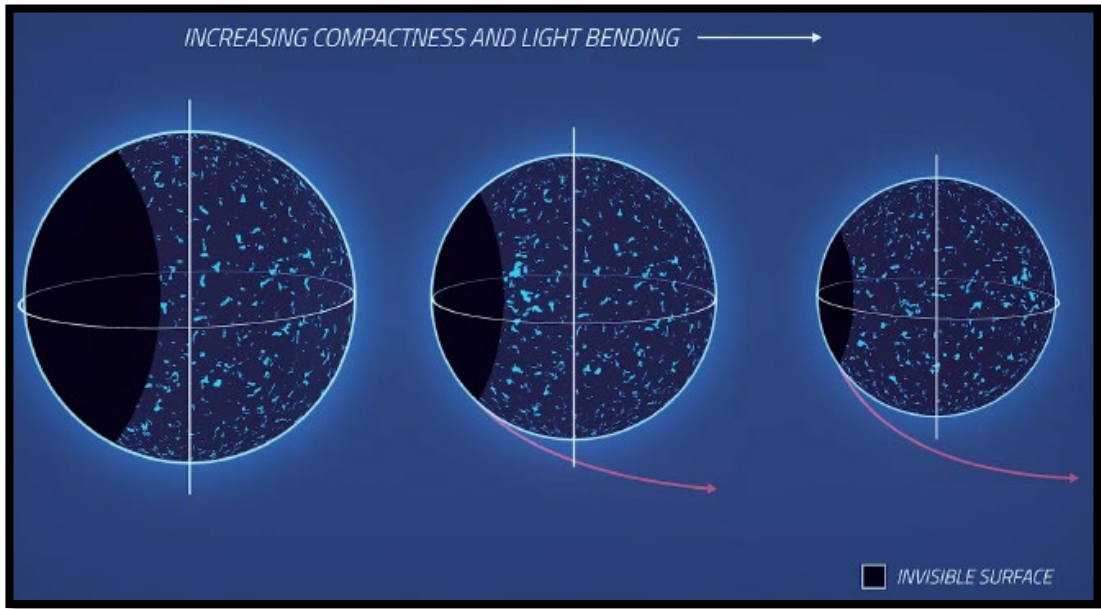


# اسکن روی فضای پارامتر ماده تاریک بر اساس رصد های چند پیام رسانی از ستاره های نوترونی



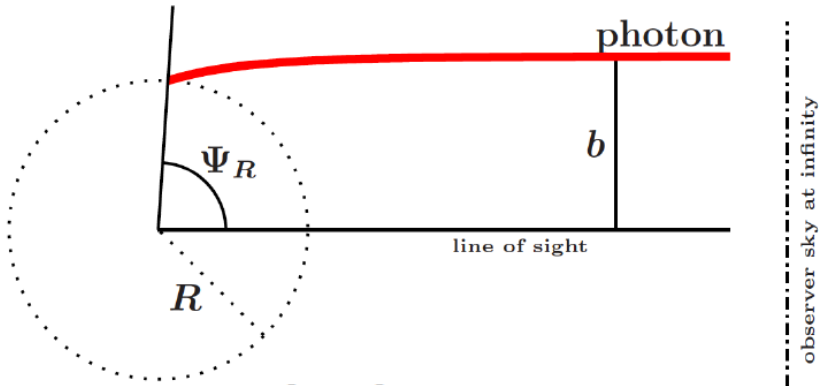
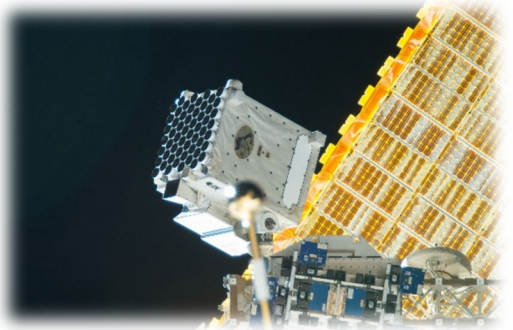
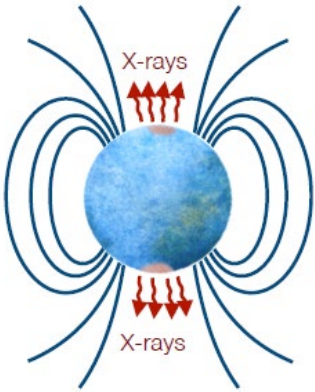
# محدود کردن کسر ماده درون ستاره های نوترونی بر اساس رصد های چند پیام رسانی





خمیدگی نور در  
فضا-زمان  
خمیده و افزایش  
سطح نورانی  
ستاره نوترونی

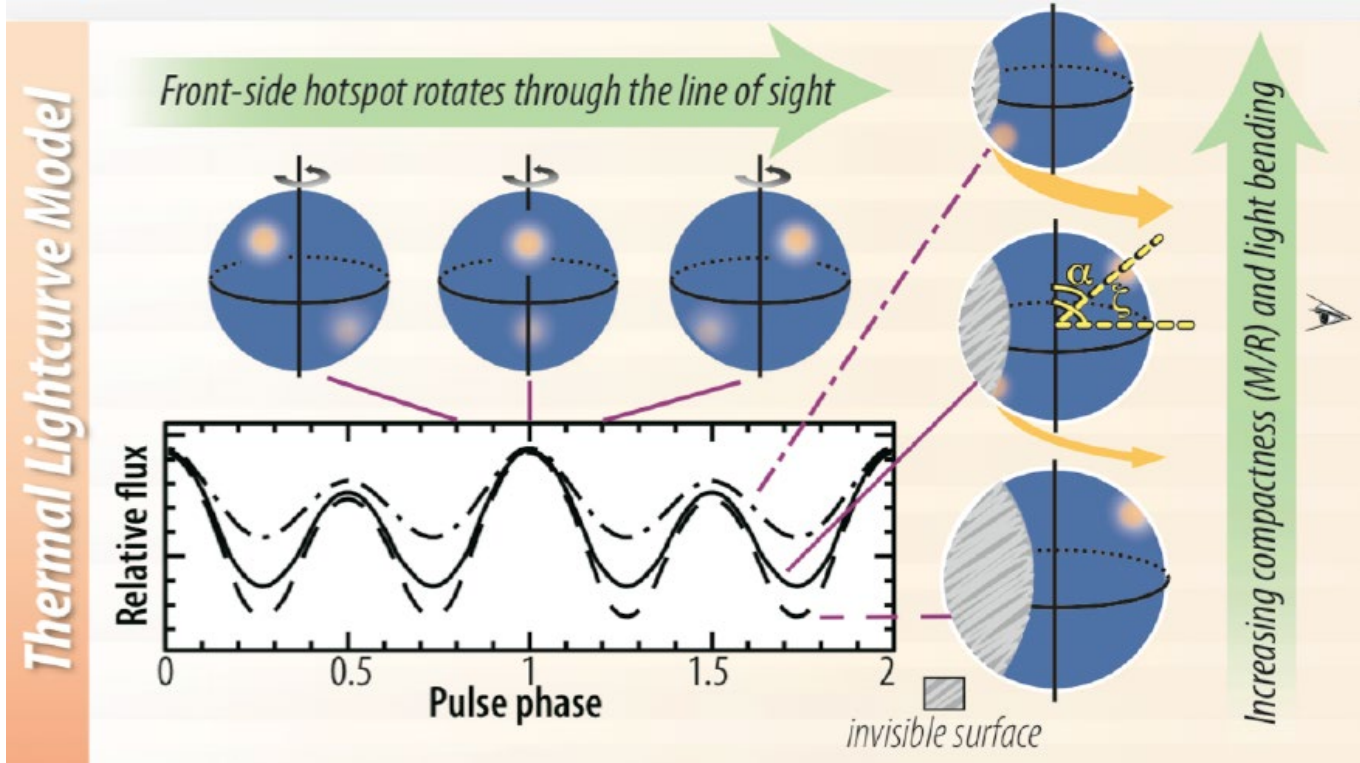
## Neutron star Interior Composition تلسکوپ نایسر (NICER) ExploreR



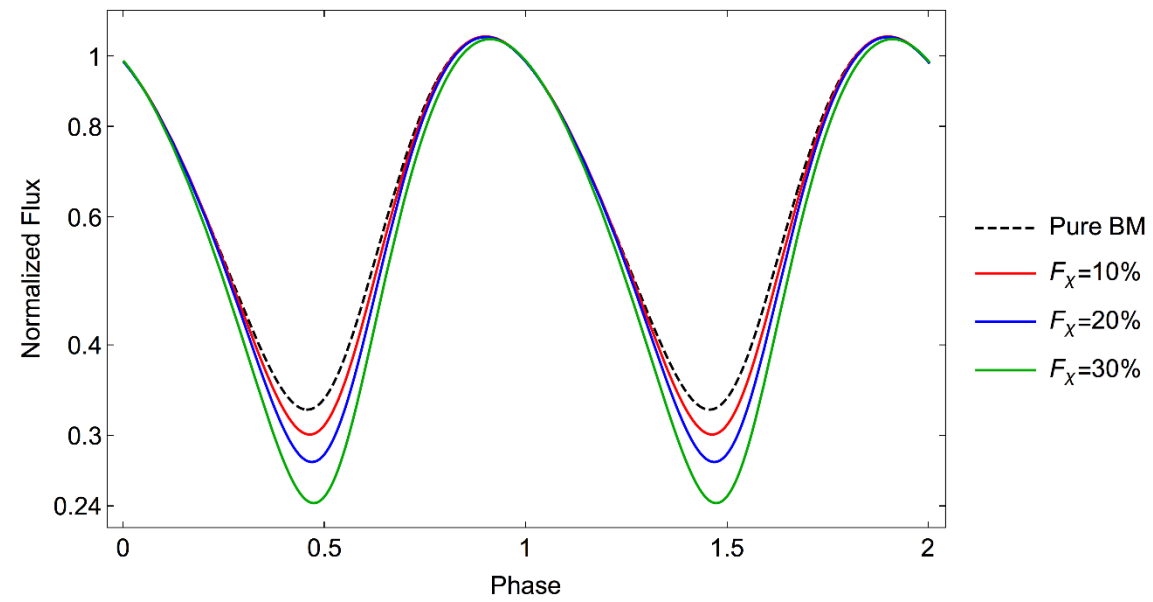
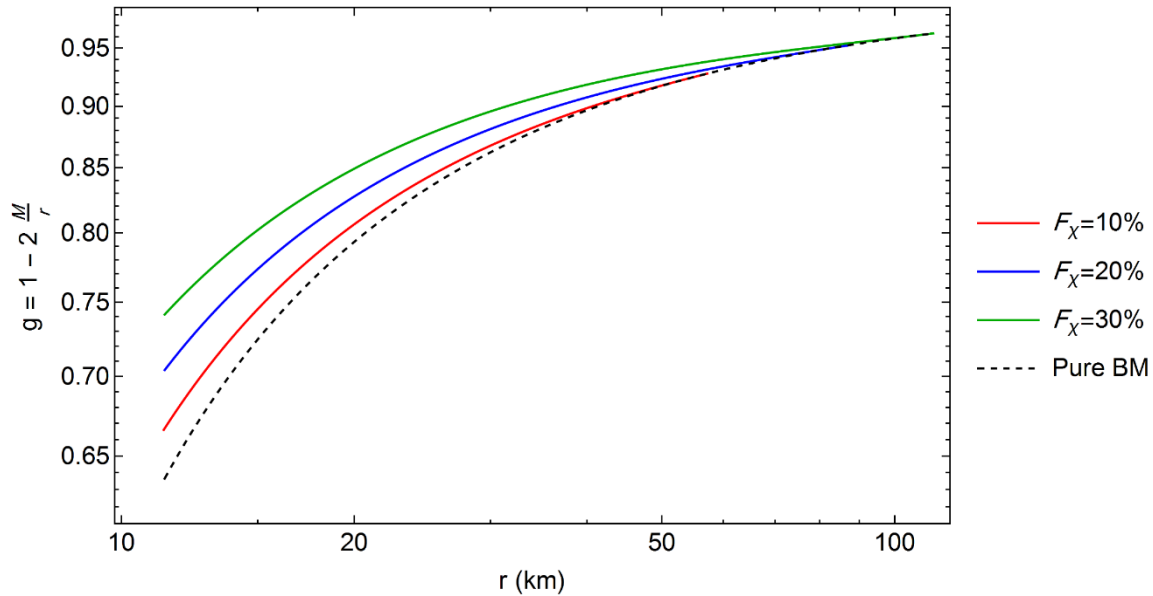
$$\Psi = \int_{R_B}^{\infty} \frac{dr}{r^2} \left[ \frac{1}{b^2} - \frac{g(r)}{r^2} \right]^{-1/2},$$

$$\mathcal{F} = g(R_B) \delta^5 I'(\alpha') \cos \alpha \frac{d \cos \alpha}{d \cos \Psi} \frac{dS'}{D^2},$$

Andrei M. Beloborodov, *Astrophys.J.Lett.* 566 (2002) L85-L88

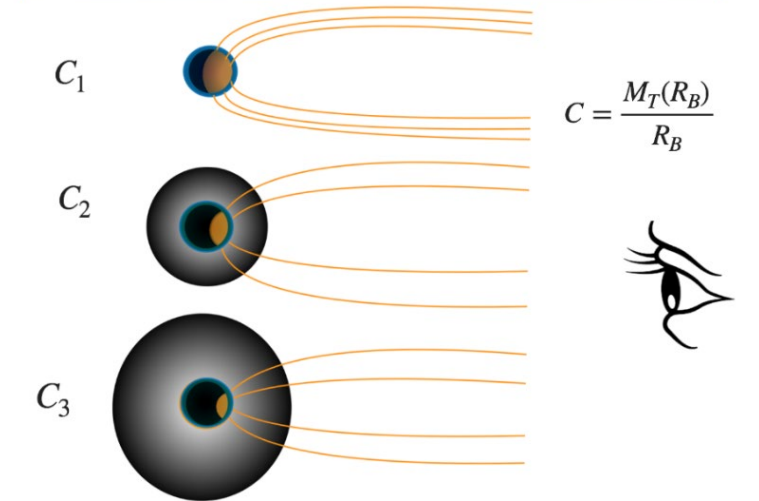


# پروفایل پالس های اشعه ایکس ستاره های نوترونی پذیر پذیر نوین برای بررسی شکل گیری هاله ی ماده تاریک



تغییرات متریک اطراف ستاره نوترونی  
آمیخته با هاله ای از ماده تاریک

Visible surface is increasing with the compactness



$M_T = 1.4M_{\odot}$  For all cases

$C_1 > C_2 > C_3$

تغییرات پروفایل تابش اشعه ایکس ستاره نوترونی  
مربک برای کسر های متفاوت ماده تاریک سبک

S. Shakeri, **D.R. Karkevandi**, *Bosonic Dark Matter in Light of the NICER Precise Mass-Radius Measurements*

[arXiv:2210.17308] PRD

## Constraining bosonic asymmetric dark matter with neutron star mass-radius measurements

Nathan Rutherford,<sup>1,\*</sup> Geert Raaijmakers,<sup>2,†</sup> Chanda Prescod-Weinstein,<sup>1,‡</sup> and Anna Watts<sup>3,§</sup>

<sup>1</sup>*Department of Physics and Astronomy, University of New Hampshire, Durham, New Hampshire 03824*

<sup>2</sup>*GRAPPA, Anton Pannekoek Institute for Astronomy and Institute of High-Energy Physics, University of Amsterdam, Science Park 904, 1098 XH Amsterdam, The Netherlands*

<sup>3</sup>*Anton Pannekoek Institute for Astronomy, University of Amsterdam, Science Park 904, 1090GE Amsterdam, the Netherlands*

Neutron stars can capture asymmetric dark matter (ADM), which affects the neutron star's measurable properties and makes compact objects prime targets to search for ADM. In this work, we use Bayesian inference to explore potential neutron star mass-radius measurements, from current and future X-ray telescopes, to constrain the bosonic ADM parameters for the case where bosonic ADM has accumulated in the neutron star interior. We find that the high bosonic ADM particle mass ( $m_\chi$ ) and low effective self-interaction strength ( $g_\chi/m_\phi$ ) regime is disfavored due to the observationally and theoretically motivated constraint that neutron stars must have at least a mass of  $1 M_\odot$ . However, within the remaining parameter space,  $m_\chi$  and  $g_\chi/m_\phi$  are individually unconstrained. On the other hand, the ADM mass-fraction, i.e., the fraction of ADM mass inside the neutron star, can be constrained by such neutron star measurements. The inclusion of bosonic ADM in neutron star cores also relaxes the constraints on the baryonic equation of state and suggests that ADM should be taken into account when interpreting constraints from mass-radius measurements.

### I. INTRODUCTION

Neutron stars have been of great interest to astronomers because of the rich phenomena they produce, allowing us to probe, for example, strong gravity, cosmology, and heavy element enrichment. For instance, neutron stars can be a source of continuous gravitational waves, which can provide insight into their interiors. Signals from their mergers can also be used in determining the Hubble constant [1, 2]. Neutron stars have additionally been of great interest to nuclear physicists because the microphysical behavior of ultradense neutron-rich matter is poorly understood. Neutron stars may contain exotic states of matter, such as hyperons or deconfined quarks [3–5]. The effects of the hypothetical components that comprise neutron star interiors are pa-

the tidal deformabilities and the total masses of the stars have been shown to increase [7–11]. Thus, if dark matter is present in neutron stars, it must be accounted for in estimates of the measurable properties of neutron stars [6–19]. There have been efforts to constrain the dark matter particle mass, self-interaction strength, and mass-fraction using neutron star and gravitational wave (GW) measurements [9, 12, 14, 17, 20], and these rely on assumptions about the EoS. These efforts include placing mass-fraction constraints on sub-GeV bosonic dark matter particles [9], demonstrating that a stiffer baryonic matter EoS with dark matter can evade constraints that the baryonic matter EoS alone cannot achieve [14, 17], and calculating Bayesian parameter estimations of the dark matter parameter space [12, 20].

To quantify the effects of dark matter on neutron stars,

[6–19]. There have been efforts to constrain the dark matter particle mass, self-interaction strength, and mass-fraction using neutron star and gravitational wave (GW) measurements [9, 12, 14, 17, 20], and these rely on assumptions about the EoS. These efforts include placing mass-fraction constraints on sub-GeV bosonic dark matter particles [9], demonstrating that a stiffer baryonic matter EoS with dark matter can evade constraints that the baryonic matter EoS alone cannot achieve [14, 17], and calculating Bayesian parameter estimations of the dark matter parameter space [12, 20].

Although NICER, STROBE-X, and eXTP will perform PPM on compact objects, **current PPM techniques do not account for a possible dark matter component in neutron stars.** Capturing the impact of dark matter on neutron star structure alters how PPM is executed, and **will certainly necessitate modification of the ray-tracing models currently being used by the NICER collaboration.** For example, the existence of any halo will modify the exterior space-time.

# Bosonic Dark Matter in Light of the NICER Precise Mass-Radius Measurements

#1

Soroush Shakeri (Isfahan Tech. U. and ICRA, Pescara), Davood Rafiei Karkevandi (Isfahan Tech. U.) (Oct 31, 2022)

e-Print: 2210.17308 [astro-ph.HE]

pdf cite claim

reference search 20 citations

شبه سازی ها و حل های  
عددی معادلات دیفرانسیل

مرکز ابررایانش ملی شیخ بهایی  
دانشگاه صنعتی اصفهان



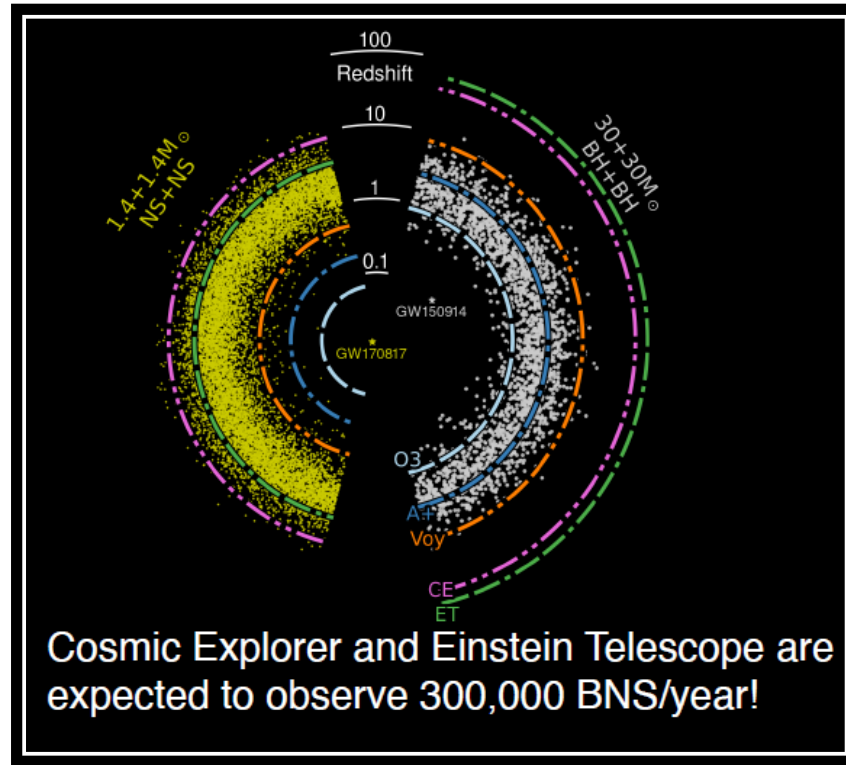
```
def TOVy(Pomold, Pdmold, Momold, Mdmold, yold, Edmold,
Eomold, cdold, coold, r, h):

    Mtotatl = Momold + Mdmold
    Ptotatl = Pomold + Pdmold
    Etotatl = Eomold + Edmold
    EPomold = Eomold + Pomold
    EPdmold = Edmold + Pdmold
    z = 5 * Etotatl + 9 * Ptotatl + EPomold / coold + EPdmold / cdold
    const1 = 1.3231 * 10**-6
    const2 = 2 * 1.4766

    e1 = 1 / (1 - const2 * Mtotatl / r)
    v1 = (const2 * Mtotatl + 8 * PI * Ptotatl * const1 * r**3) / (r**2 - r * cons
    q1 = 4 * PI * e1 * const1 * z - 6 * e1 / r**2 - v1**2
    x1 = 1 + 4 * PI * r**2 * const1 * (Ptotatl - Etotatl)
    Y1 = -1 * (yold**2 + yold * e1 * x1 + r**2 * q1) / r
    l1 = h * Y1

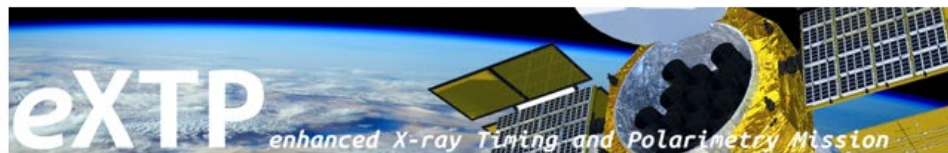
    e2 = 1 / (1 - const2 * Mtotatl / (r + h/2))
    v2 = (const2 * Mtotatl + 8 * PI * Ptotatl * const1 * (r + h/2)**3) / ((r + h/
    q2 = 4 * PI * e2 * const1 * z - 6 * e2 / (r + h/2)**2 - v2**2
    x2 = 1 + 4 * PI * (r + h/2)**2 * const1 * (Ptotatl - Etotatl)
    Y2 = -1 * ((yold + l1/2)**2 + (yold + l1/2) * e2 * x2 + (r + h/2)**2 * q2) /
    l2 = h * Y2

    e3 = 1 / (1 - const2 * Mtotatl / (r + h/2))
    v3 = (const2 * Mtotatl + 8 * PI * Ptotatl * const1 * (r + h/2)**3) / ((r + h/
    q3 = 4 * PI * e3 * const1 * z - 6 * e3 / (r + h/2)**2 - v3**2
    x3 = 1 + 4 * PI * (r + h/2)**2 * const1 * (Ptotatl - Etotatl)
    Y3 = -1 * ((yold + l2/2)**2 + (yold + l2/2) * e3 * x3 + (r + h/2)**2 * q3) /
    l3 = h * Y3
```



[arXiv:2109.09882](https://arxiv.org/abs/2109.09882)

**Exotic measurements**



THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 896:L44 (20pp), 2020 June 20

<https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab960f>

© 2020. The American Astronomical Society.

**OPEN ACCESS**

**GW190814: Gravitational Waves from the Coalescence of a 23 Solar Mass Black Hole with a 2.6 Solar Mass Compact Object**

Article | Published: 24 October 2022

**A strangely light neutron star within a supernova remnant**  $M = 0.77M_{\odot}, R = 10.4\text{km}$

Victor Doroshenko, Valery Suleimanov, Gerd Pühlhofer & Andrea Santangelo

*Nature Astronomy* 6, 1444–1451 (2022) | Cite this article

PRD. 105, 063005  
APJ. 922 (2021) 242  
PRD. 104, 063028 (2021)  
[arXiv:2306.12326](https://arxiv.org/abs/2306.12326)  
[arXiv:2307.12748](https://arxiv.org/abs/2307.12748)

آنچه که می دانیم یک قطره  
و آنچه که نمی دانیم یک اقیانوس است

