

НИИЯФ МГУ

Гиперонные взаимодействия в нейтронных звёздах

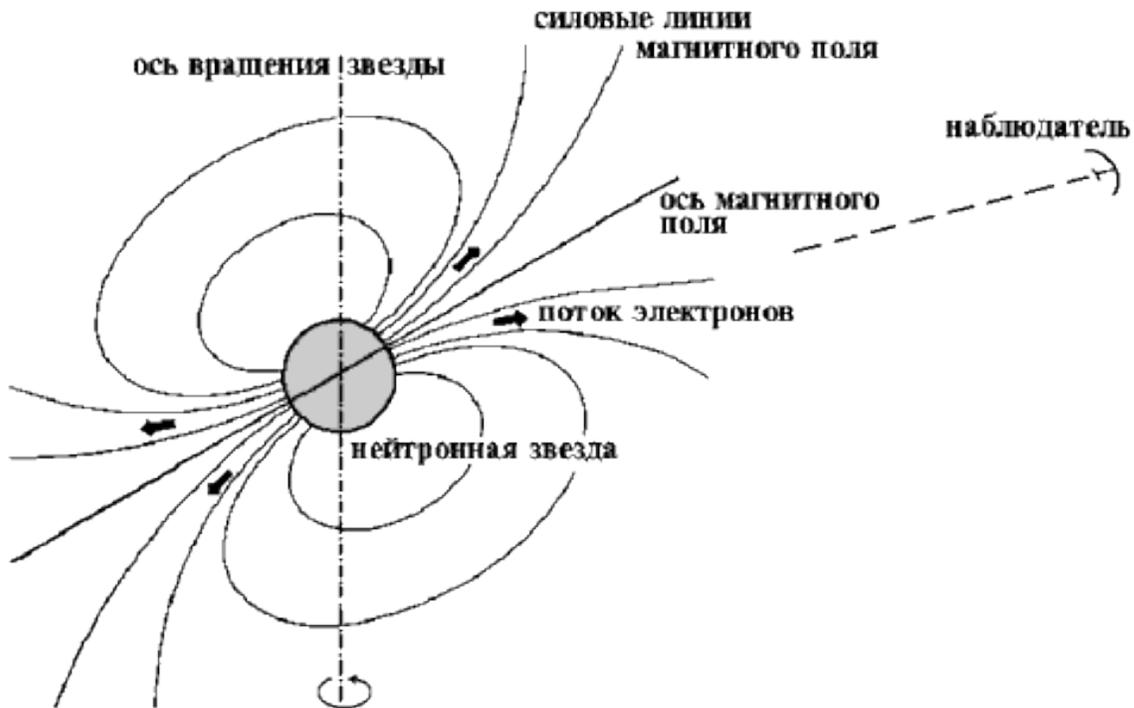
С.А. Михеев, Д.Е. Ланской, А.И. Насакин, Т.Ю. Третьякова

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-22-00077

Москва, 16.05.2024

Нейтронные звёзды

- Наблюдаются в основном в радиодиапазоне (> 3000)
- Около 10% находятся в двойных системах
- Всего в галактике $10^8 - 10^9$ нейтронных звёзд



Основные разновидности

- Радиопульсары
- Рентгеновские пульсары
- Магнетары
- Барстеры

Массы нейтронных звёзд

- Могут быть измерены только для звёзд в двойных системах исходя из периодов, лучевых скоростей и законов Кеплера.

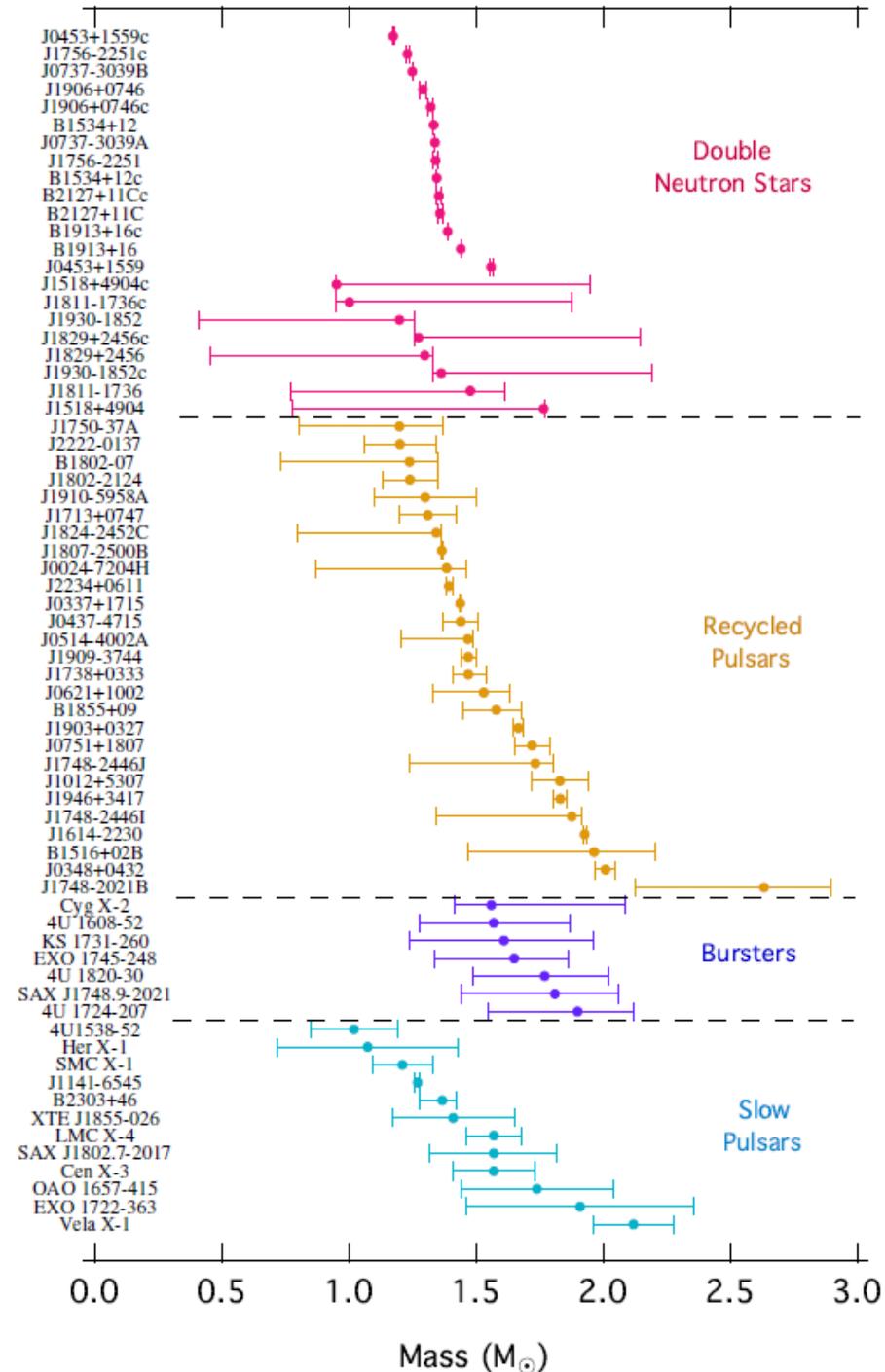
$$f(M_p, M_c, i) = \frac{(M_c \sin i)^3}{(M_p + M_c)^2} = \frac{P_b v_1^3}{2\pi G}$$

- Самые массивные:

- PSR J0740+6620 $2.08^{+0.07}_{-0.07} M_\odot$
- PSR J0952-0607 $2.35 \pm 0.17 M_\odot$

- Самая лёгкая:

- HESS J1731-347 $0.77^{+0.20}_{-0.17} M_\odot$



Радиусы нейтронных звёзд

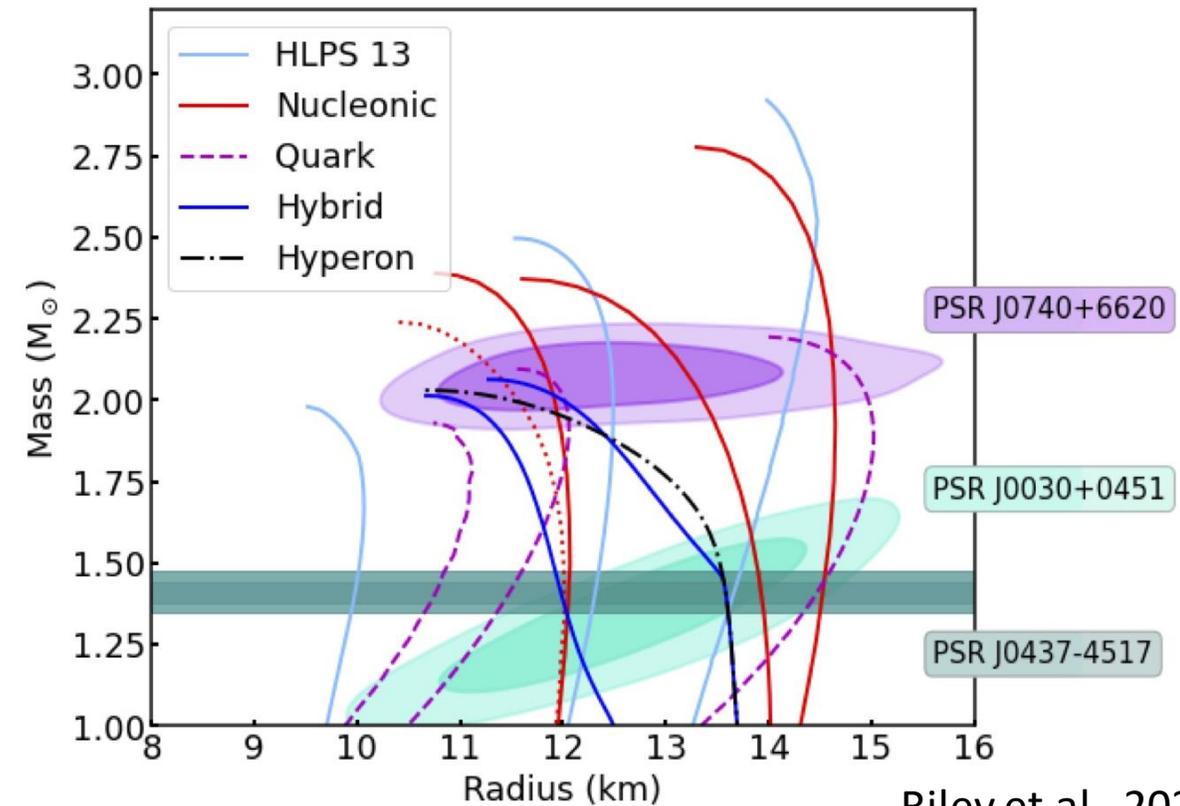
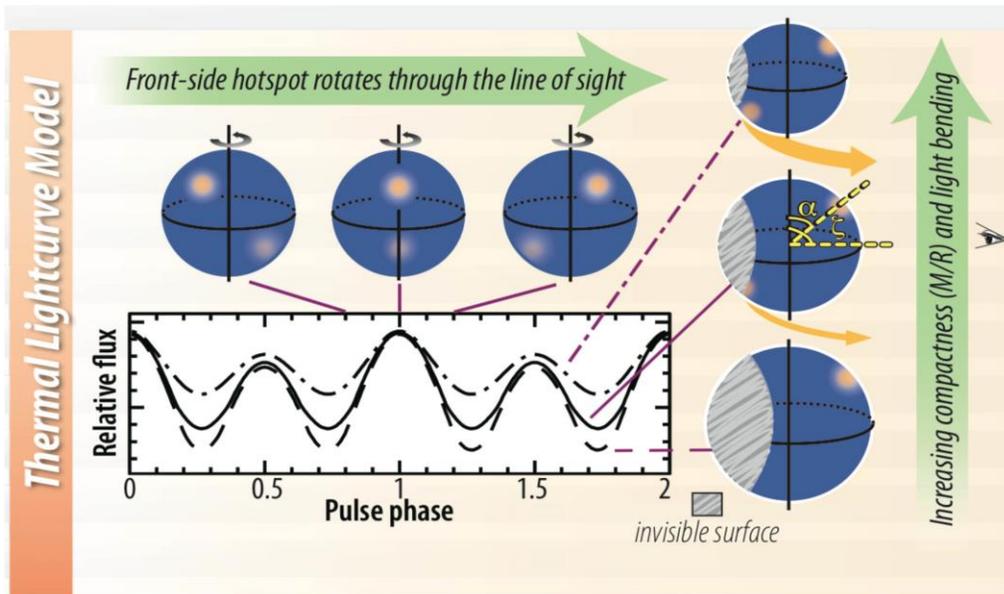
- Методы измерений:
 - Спектроскопические измерения
 - Моделирование профиля импульса
- ***The Neutron Star Interior Composition ExploreR (NICER)***

- PSR J0030+0451

$$M = 1.34_{-0.16}^{+0.15} M_{\odot}, R = 12.71_{-1.19}^{+1.14} \text{ km}$$

- PSR J0740+6620

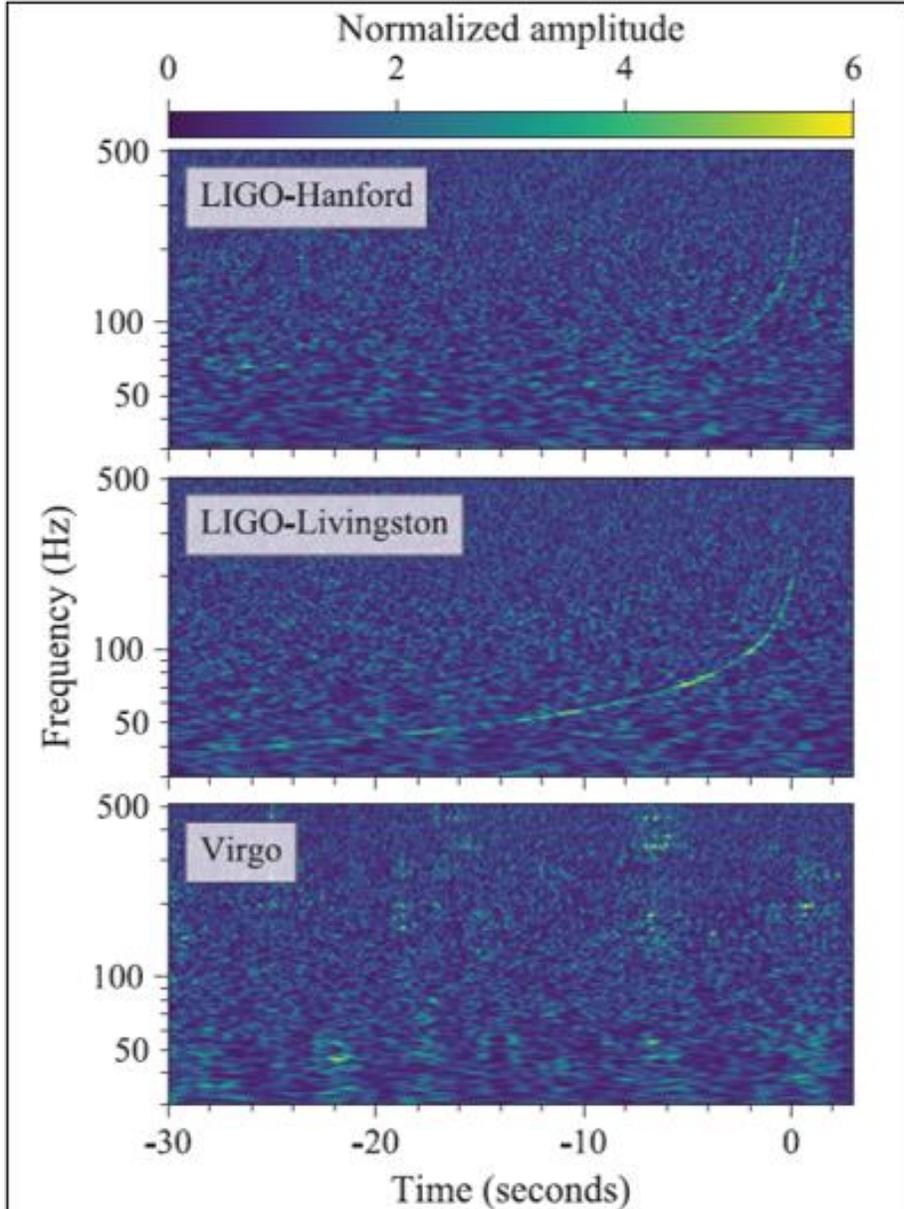
$$M = 2.072_{-0.066}^{+0.067} M_{\odot}, R = 12.39_{-0.98}^{+1.30} \text{ km}$$



Приливная деформируемость

$$Q_{ij} = -\lambda \varepsilon_{ij}$$

$$\Lambda = \frac{\lambda}{M^5}$$



GW170817

Слияние двух нейтронных звезд
Наблюдалось детекторами гравитационных волн LIGO / Virgo и более 70 электромагнитными обсерваториями.



- Росстояние: 130 млн. световых лет
- Произошло: 17 Августа 2017
- Тип: Слияние нейтронных звезд

12:41:04 UTC
Детектирована гравитационная волна от слияния нейтронных звезд

Гравитационная волна
Две нейтронные звезды, каждая размером с город, но с массой не меньше массы Солнца

Гамма излучение
Короткая вспышка гамма-излучения это яркий луч гамма излучения, генерируемый сразу после слияния звезд

+ 2 секунды
Детектирована вспышка гамма излучения.

GW170817 позволяет нан впервые измерить скорость расширения вселенной напрямую, используя гравитационные волны.

Регистрация гравитационного излучения от слияния нейтронных звезд позволяет нам узнать больше о строении этих необычных объектов

Регистрация этого события различными детекторами подтверждает, что слияние нейтронных звезд может породить вспышки гамма излучения

Au
Полученные данные о килоновой позволили показать, что столкновения нейтронных звезд могут быть источником большинства тяжелых ядер, например золота, во вселенной.

Наблюдение гравитационных и электромагнитных волн от одного события позволяет уверенно утверждать что гравитационные волны распространяются со скоростью света

Килоновая
Эволюция богатого нейтронами вещества вызывает свечение килоновой, происходит синтез тяжелых элементов, таких как золото и платина

+ 10 часов 52 минуты
Новый яркий источник оптического излучения обнаружен в галактике NGC 4993, в созвездии Гидры.

+ 11 часов 36 минут
Наблюдается инфракрасное излучение

+ 15 часов
Детектировано яркое ультрафиолетовое излучение.

+ 9 дней
Обнаружено рентгеновское излучение

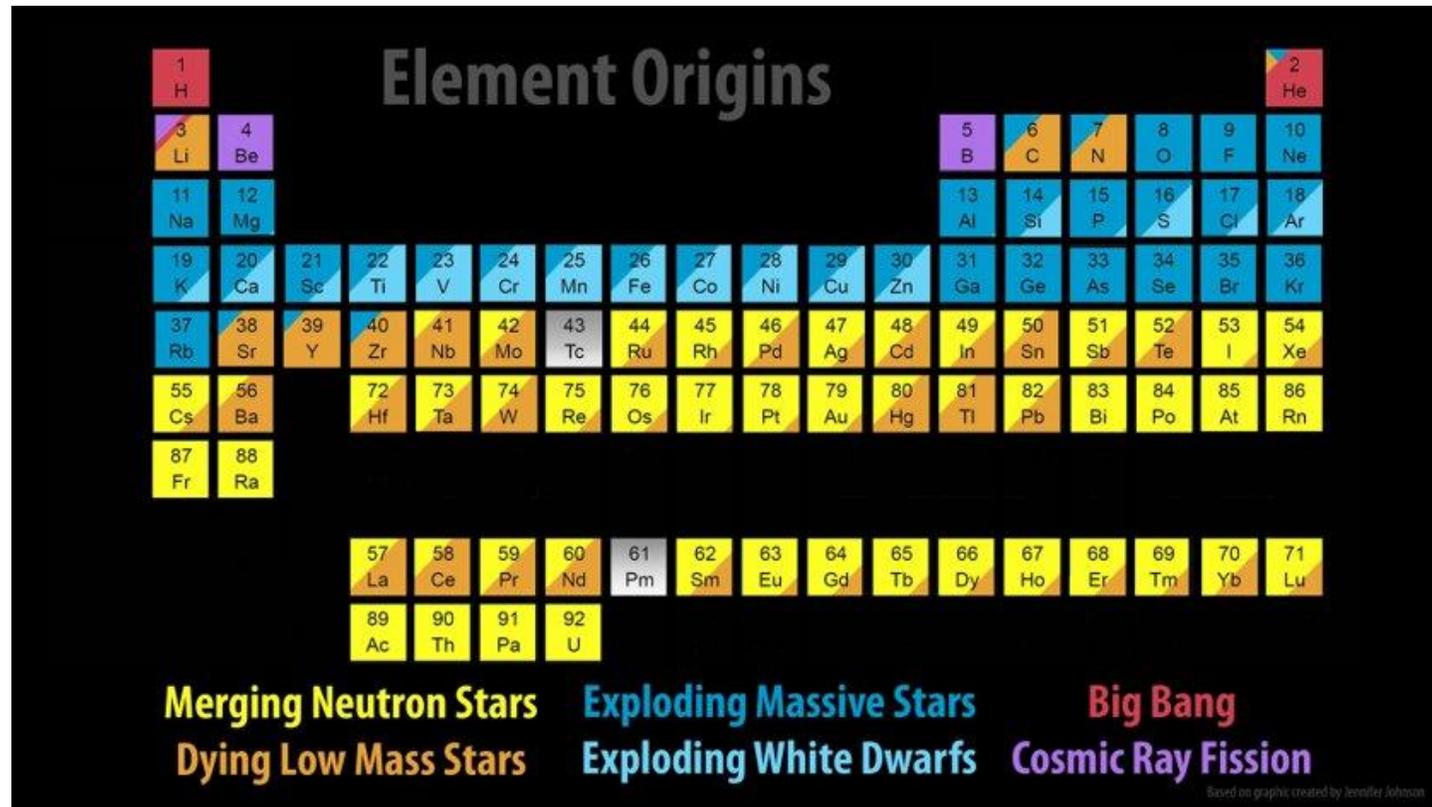
Остаточное радио-излучение
Выброс материала из звезды приводит к ударной волне в межзвездной среде. Это создает радио-излучение, которое может продолжаться годами.

+ 16 дней
Обнаружено излучение радио-диапазона

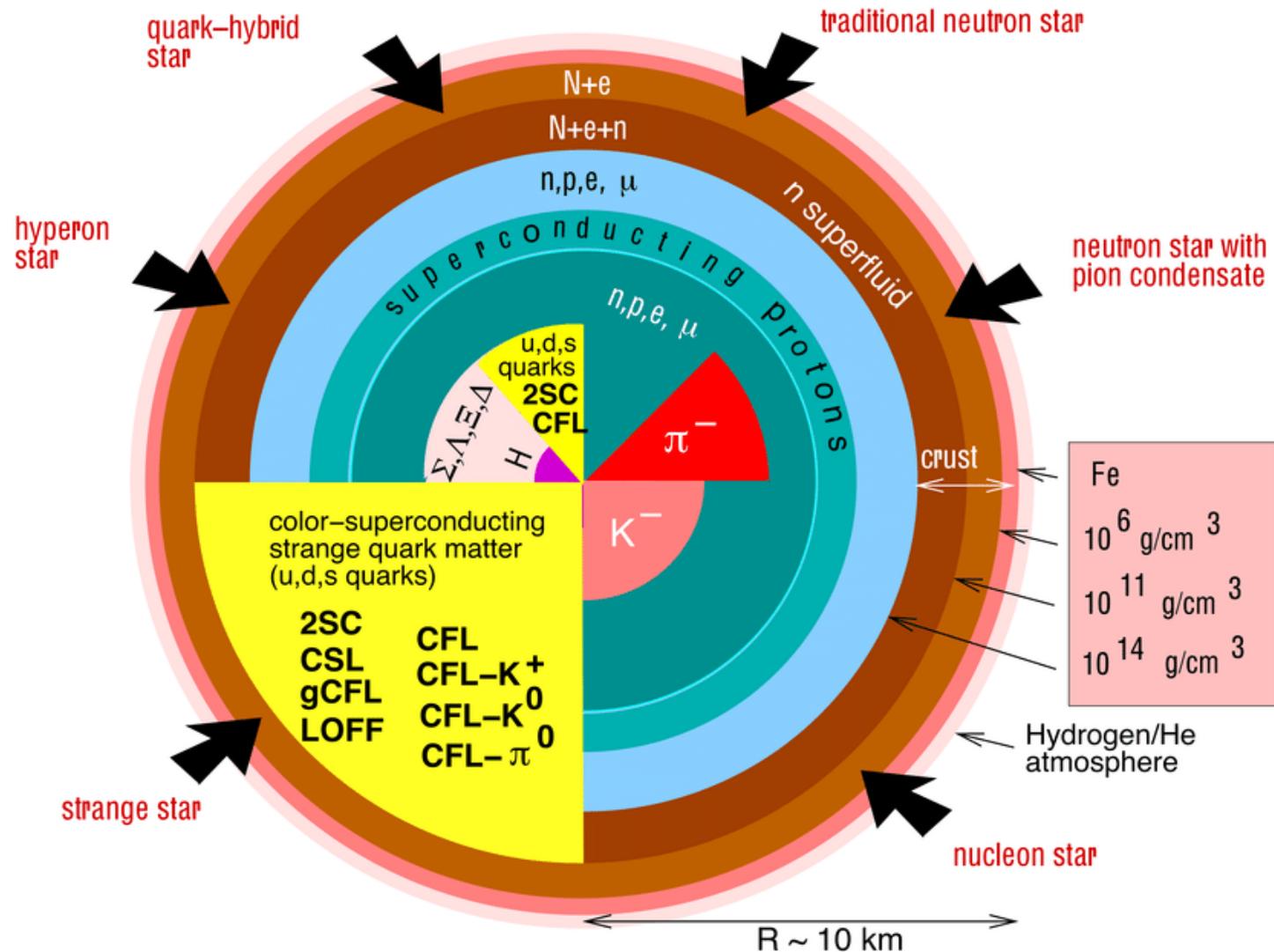
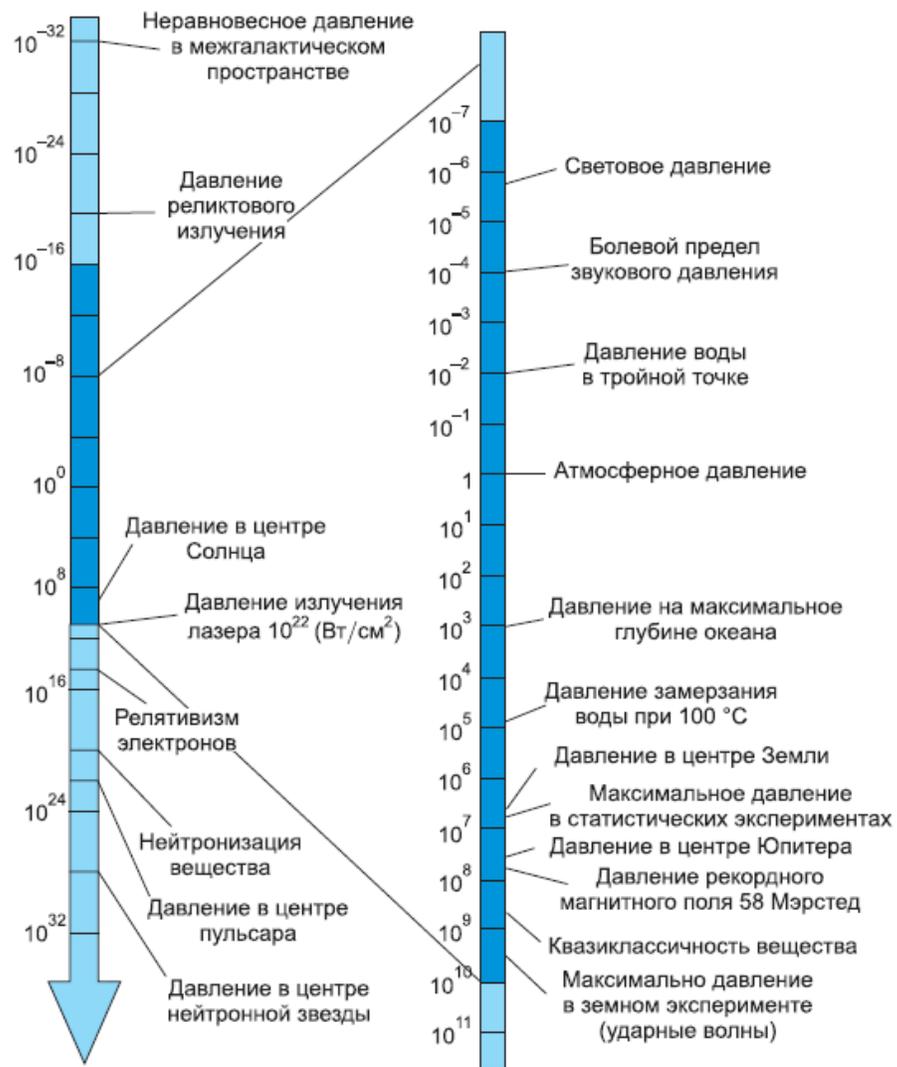
Приливная деформируемость

- **GW170817** (Нейтронная звезда + нейтронная звезда): $\Lambda = 70 - 580$, $R = 10.5 - 13.3$ км
- **GW190814** (Чёрная дыра + ???????): $\Lambda = 458 - 889$, $R = 12.1 - 13.7$ км

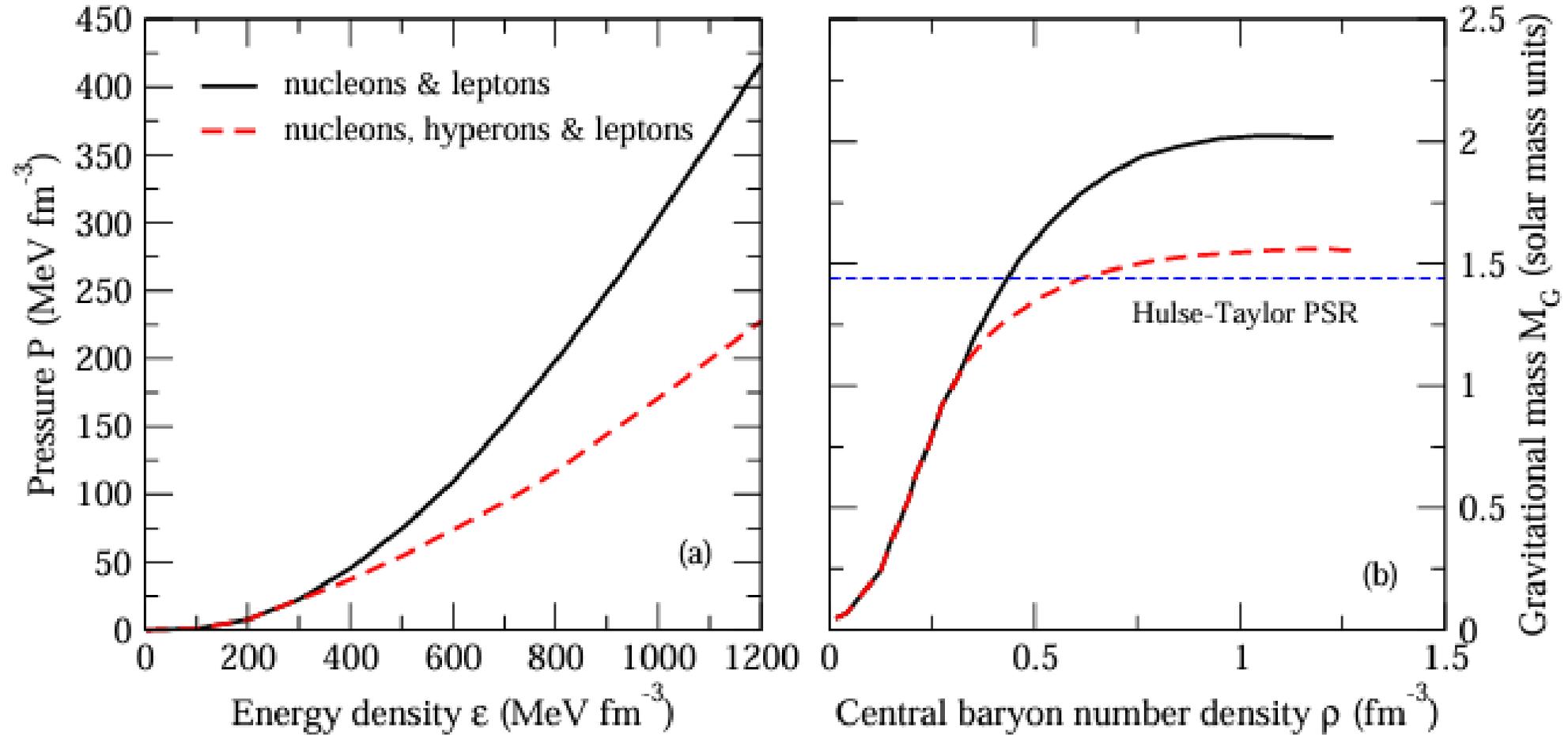
Слияние нейтронных звёзд



Почему нейтронные звёзды?



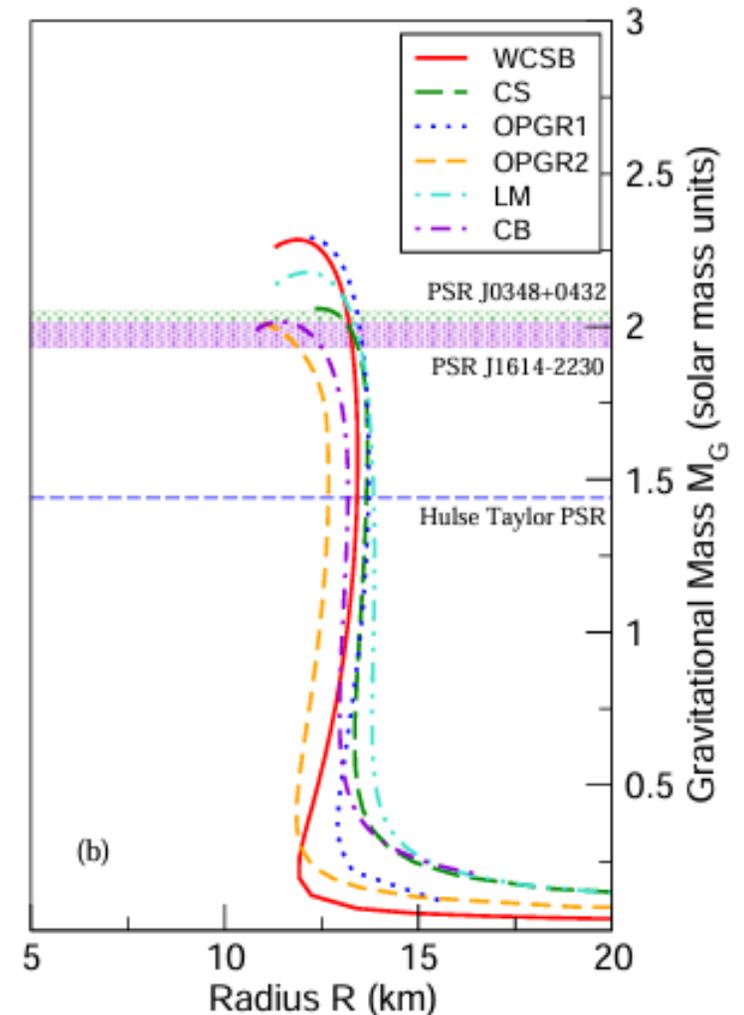
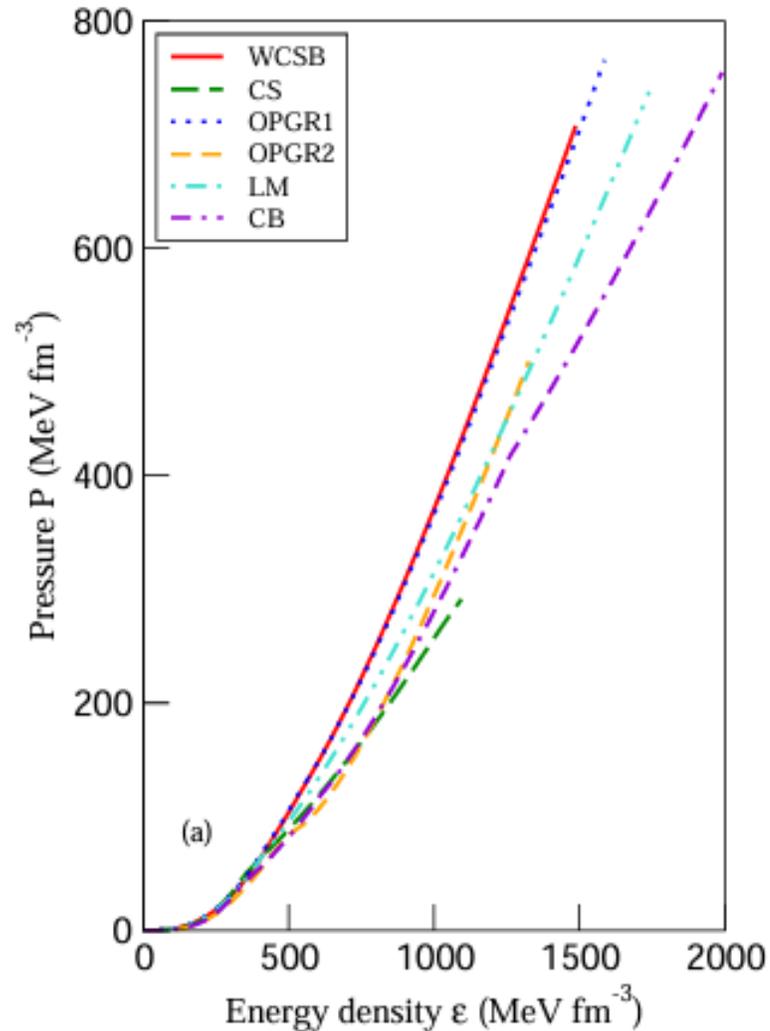
Hyperon puzzle



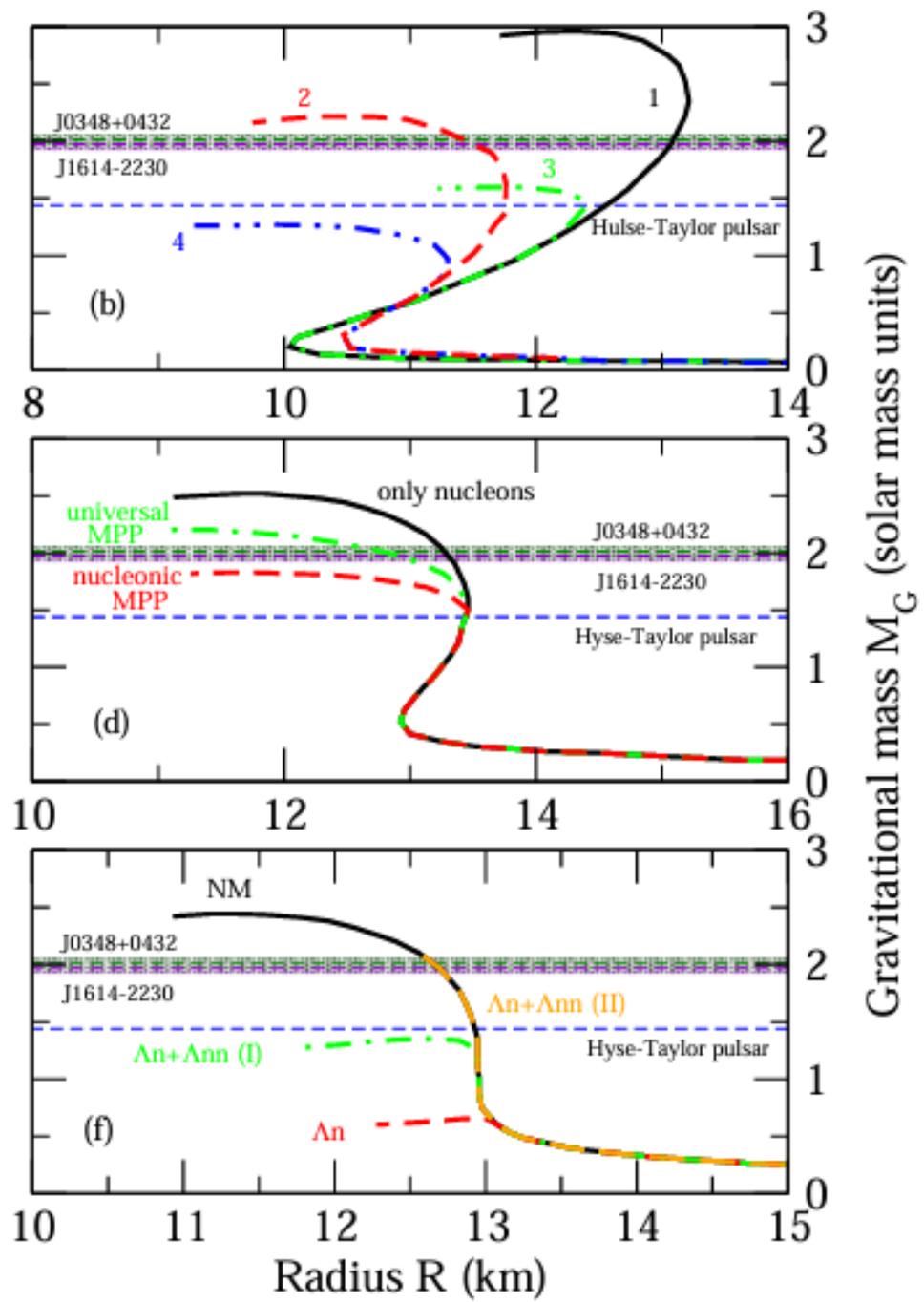
Гиперон-гиперонное отталкивание

Популярный способ решения в модели релятивистского среднего поля.

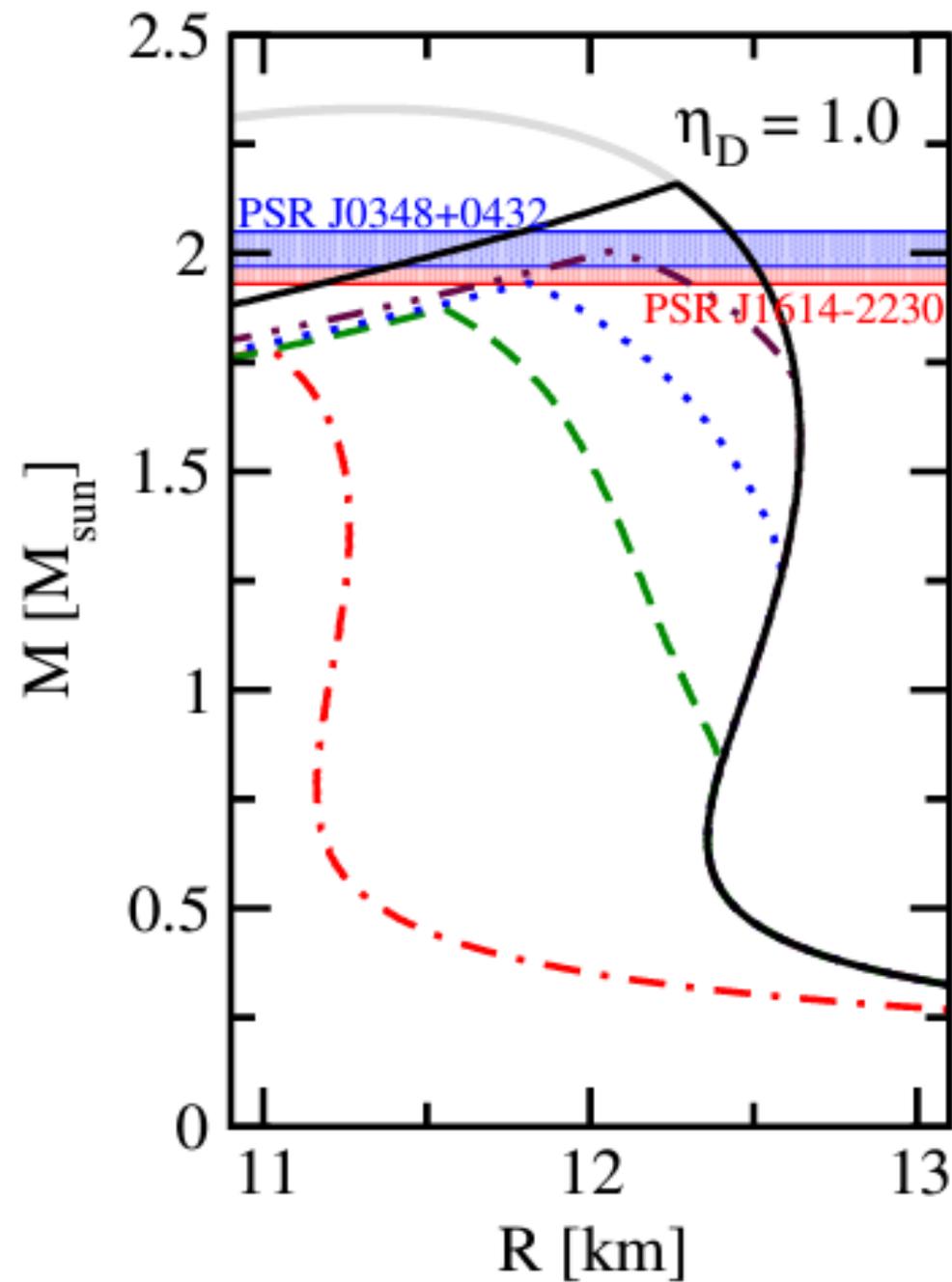
- Добавление мезонов со скрытой странностью
- Зависимость констант связи от плотности



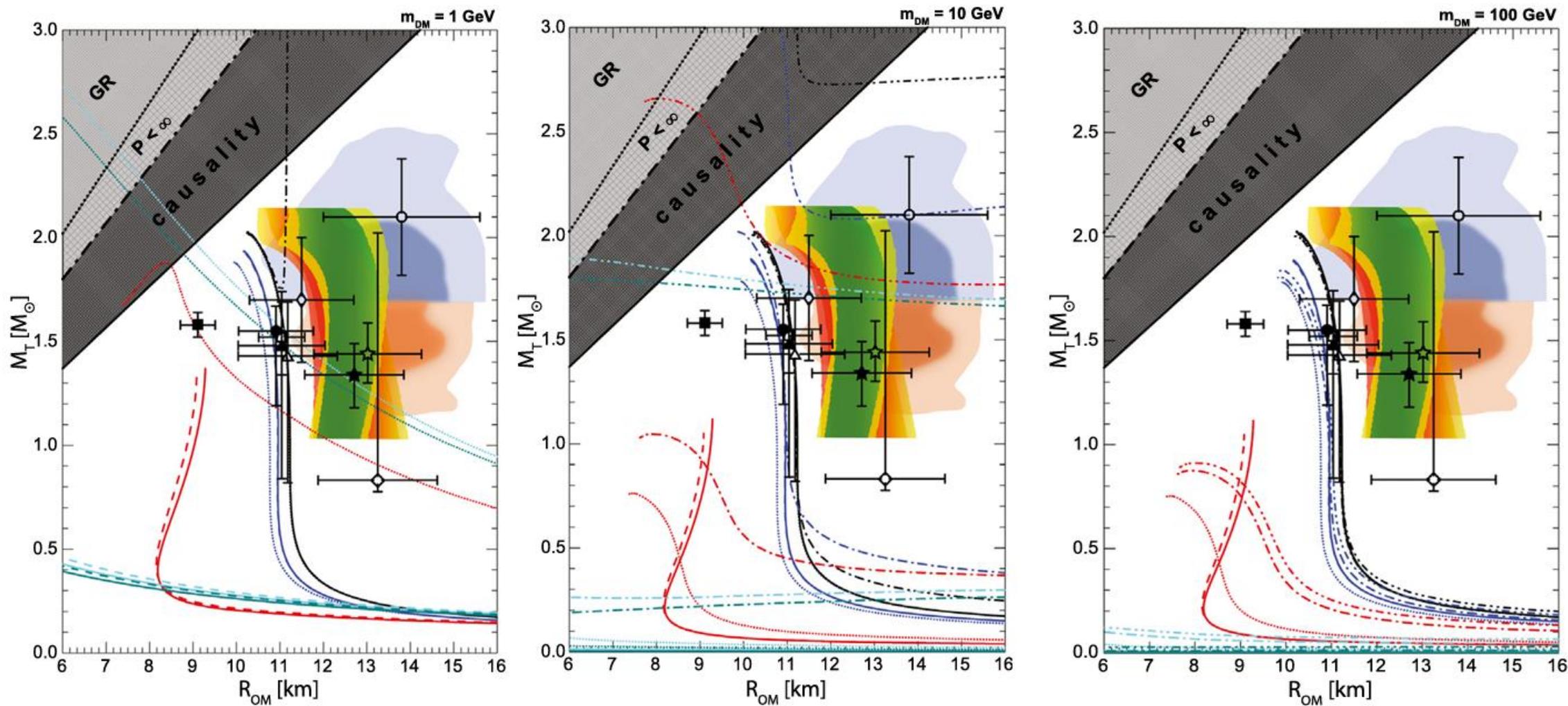
Тройные силы



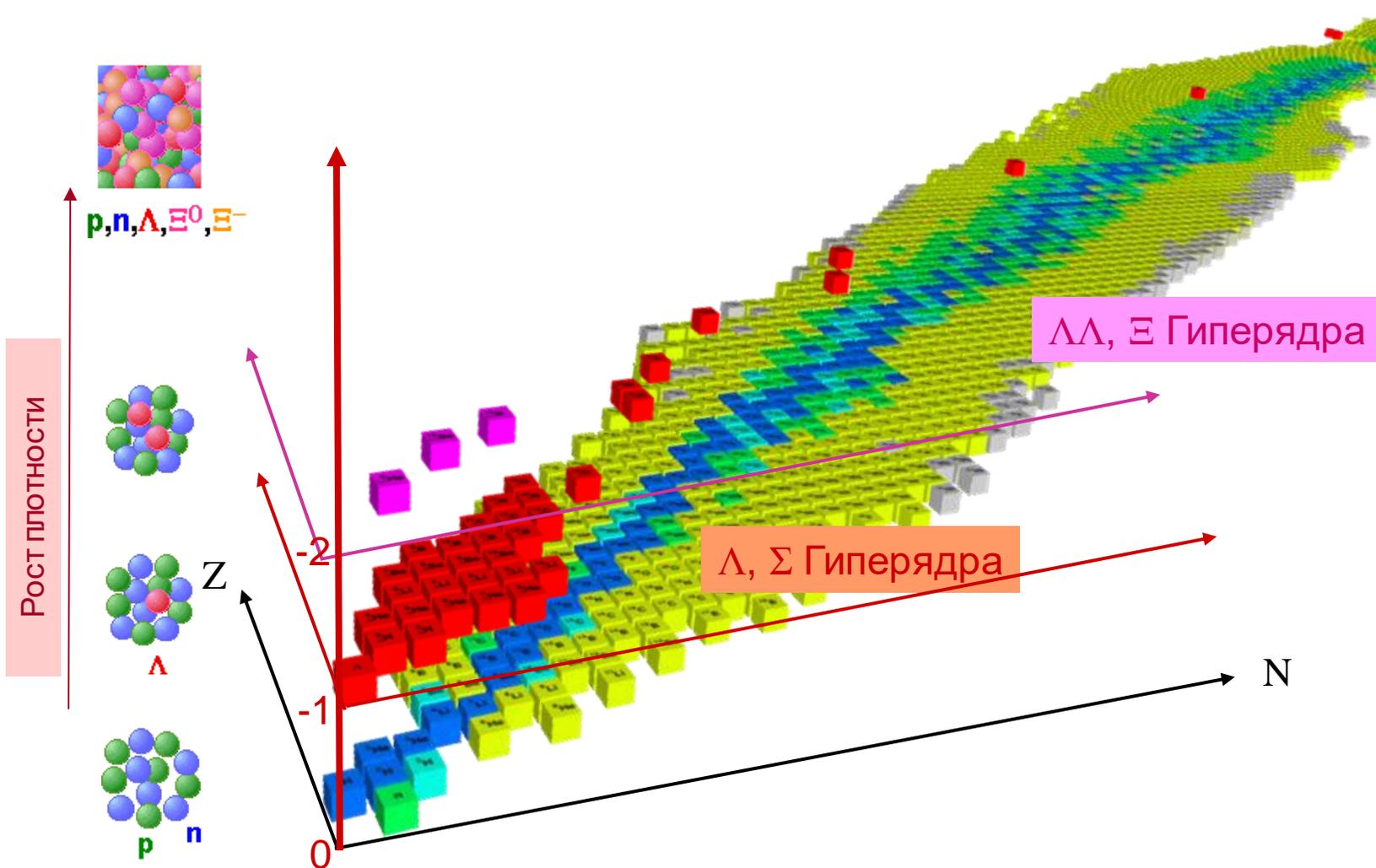
Кварковая материя



Тёмная материя

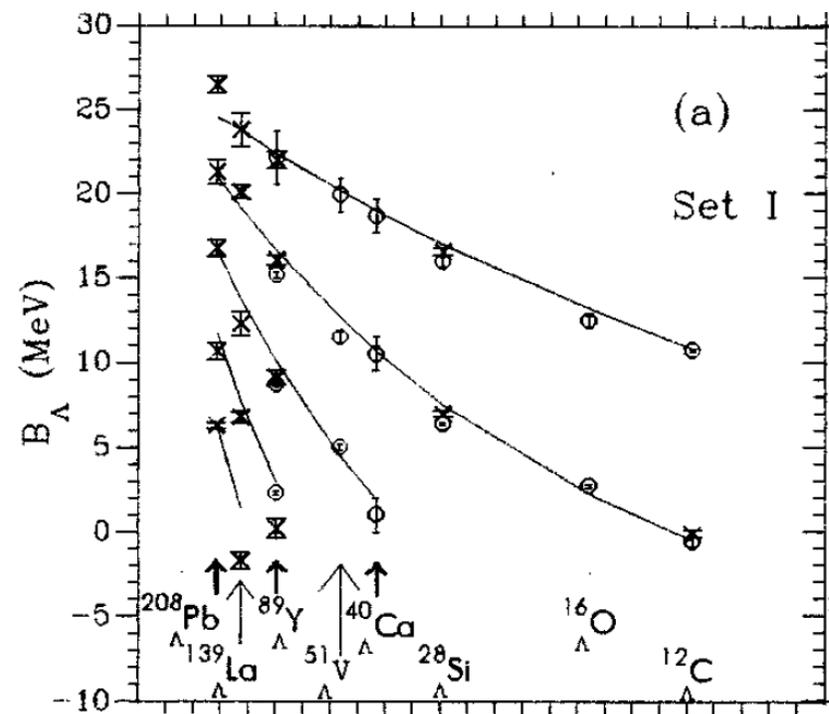


Гиперядра и гиперонные взаимодействия



Энергия связи гиперона

$$B_{\Lambda}({}^{A+1}_{\Lambda}Z) = B_{\text{tot}}({}^{A+1}_{\Lambda}Z) - B_{\text{tot}}({}^AZ)$$



D. E. Lanskoj, 1997

Взаимодействие Скирма

$$\begin{aligned}
 V_{\Lambda N}(\vec{r}_{\Lambda}, \vec{r}_N) &= u_0(1 + \xi_0 P_{\sigma})\delta(\vec{r}_{\Lambda} - \vec{r}_N) \\
 &+ \frac{1}{2}u_1(1 + \xi_1 P_{\sigma})[\vec{P}'^2\delta(\vec{r}_{\Lambda} - \vec{r}_N) + \delta(\vec{r}_{\Lambda} - \vec{r}_N)\vec{P}'^2] \\
 &+ u_2\vec{P}'\delta(\vec{r}_{\Lambda} - \vec{r}_N)\vec{P}' \\
 &+ iW_0^{\Lambda}\vec{P}'\delta(\vec{r}_{\Lambda} - \vec{r}_N)[\vec{\sigma} \times \vec{P}']
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_{\Lambda\Lambda}(\vec{r}_1, \vec{r}_2) &= \lambda_0\delta(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) \\
 &+ \frac{1}{2}\lambda_1[\vec{P}'^2\delta(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) + \delta(\vec{r}_1 - \vec{r}_2)\vec{P}'^2]
 \end{aligned}$$

Параметризация ЛН-взаимодействия	γ
YBZ6	1
YBZ2	1
SLL4'	1
LYI	1/3
YMR	1/8

Тройные силы

$$V_3 = V_{\Lambda NN}(\vec{r}_{\Lambda}, \vec{r}_{N1}, \vec{r}_{N2}) = u_3\delta(\vec{r}_{\Lambda} - \vec{r}_{N1})\delta(\vec{r}_{\Lambda} - \vec{r}_{N2})$$

Силы зависящие от плотности

$$V_3 = V_{\Lambda N}(\vec{r}_{\Lambda}, \vec{r}_N, \rho) = \frac{3}{8}u_3(1 + \xi_3 P_{\sigma})\delta(\vec{r}_{\Lambda} - \vec{r}_N)\rho^{\gamma}\left(\frac{\vec{r}_{\Lambda} + \vec{r}_N}{2}\right)$$

Нейтронные звёзды

- Химическое равновесие

$$\begin{cases} \mu_p + \mu_e = \mu_n \\ \mu_\mu = \mu_e \\ \mu_\Lambda + m_\Lambda = \mu_n + m_n \end{cases}$$

- Уравнение Толмана-Оппенгеймера-Волкова

$$\frac{dP}{dr} = \frac{G [\rho(r) + P(r)/c^2][m(r) + (4\pi r^3 P(r)/c^2)]}{r^2 [1 - (2Gm(r)/rc^2)]}$$
$$\frac{dm}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r)$$

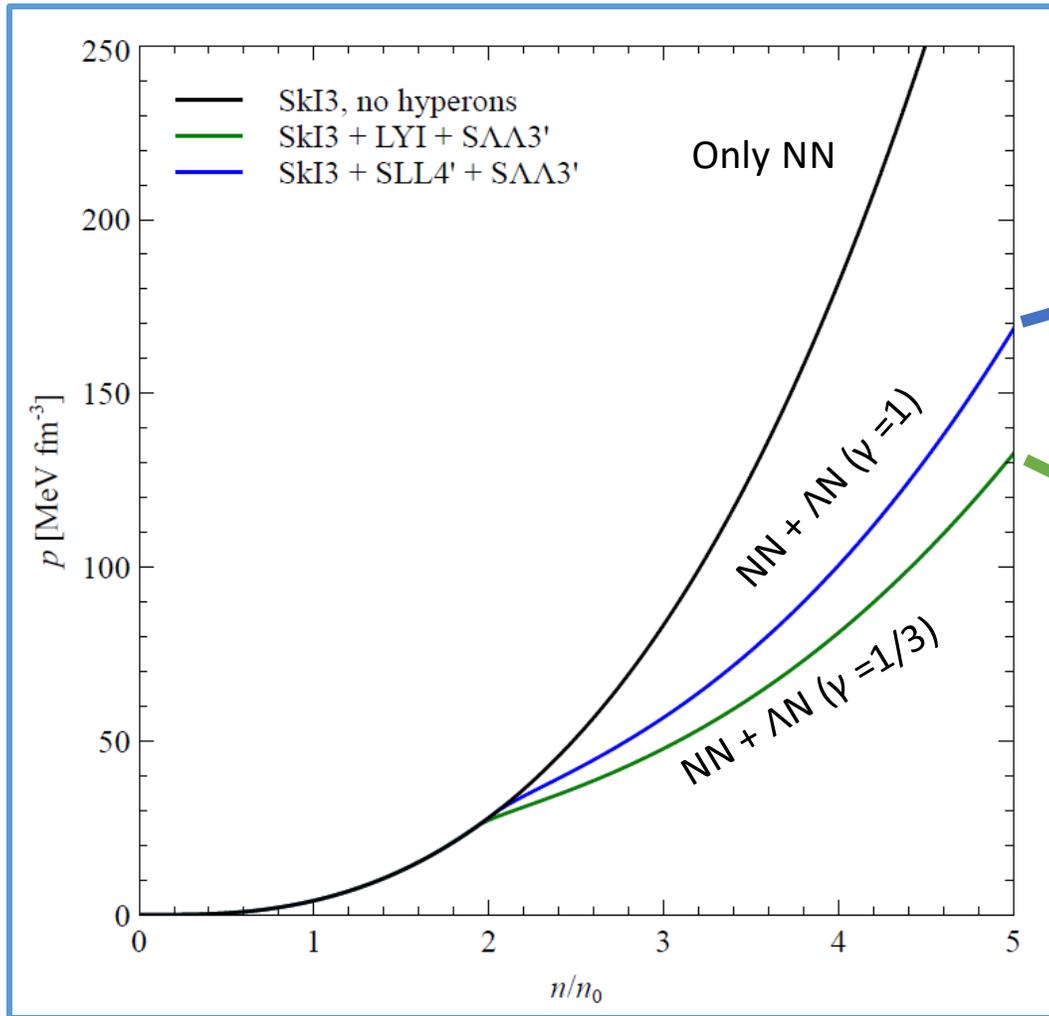
$\rho(0) \longrightarrow M, R$
Совокупность $\rho(0) \longrightarrow M(R)$

- Коэффициент приливной деформируемости

$$Q_{ij} = -\lambda \varepsilon_{ij}$$

$$\Lambda = \frac{\lambda}{M^5}$$

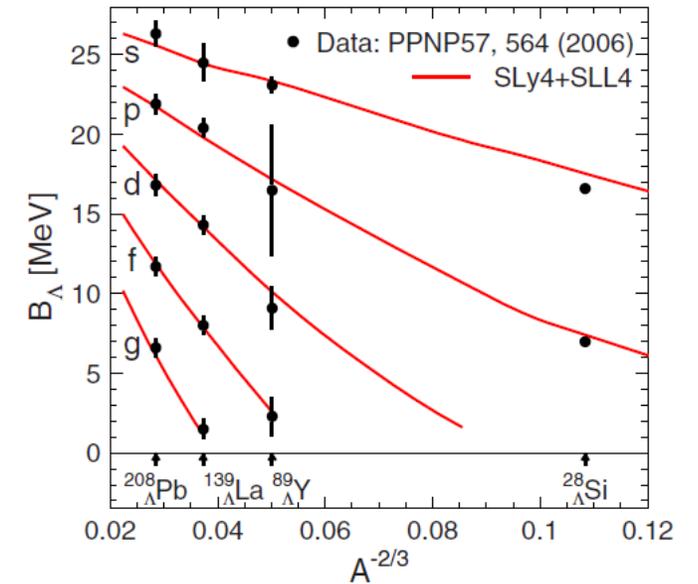
Уравнение состояния материи нейтронных звёзд



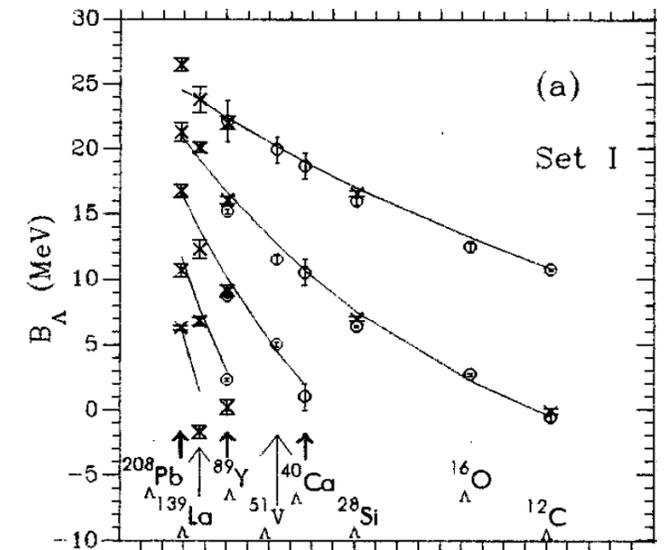
SLL4'

LYI

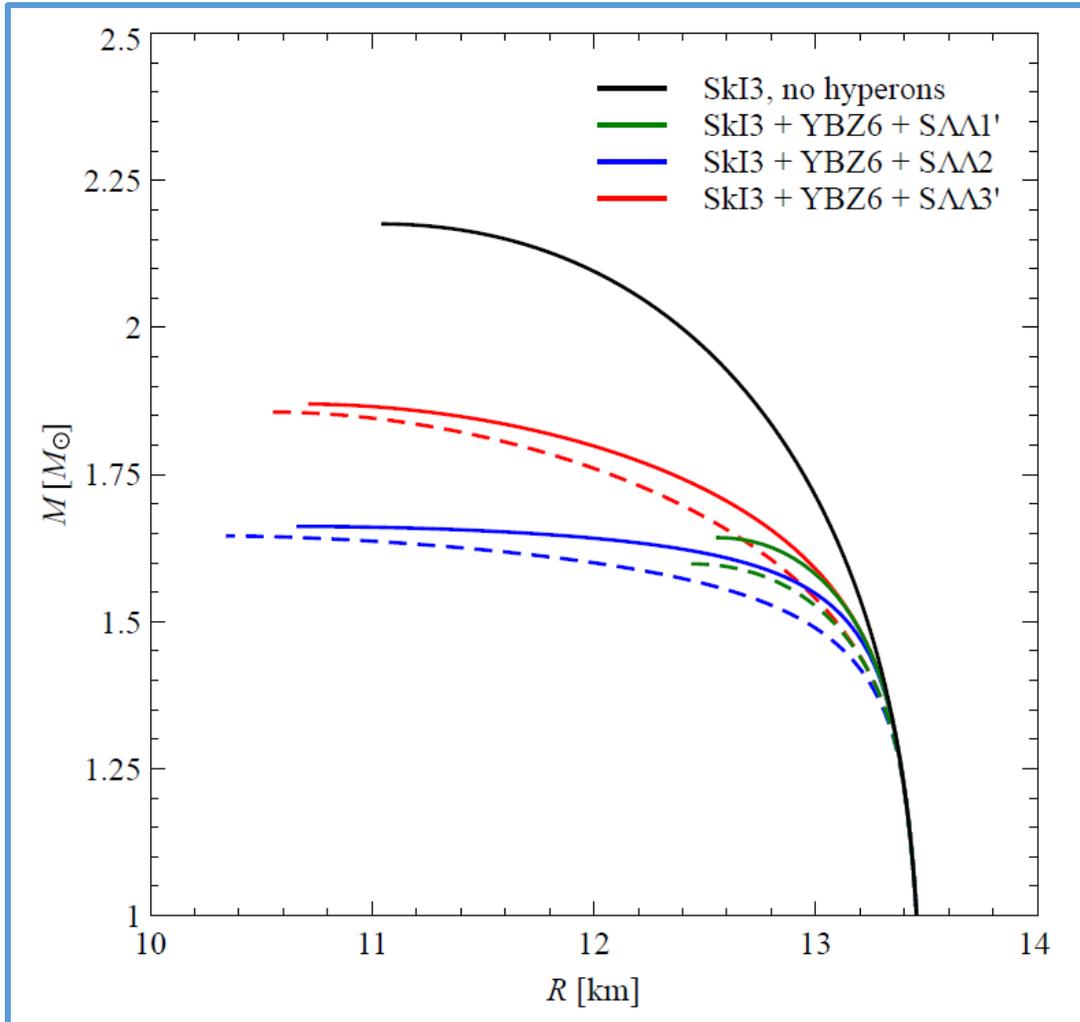
H.-J. Schulze, Hiyama E., 2014



D. E. Lansky, Yamamoto Y., 1997



Тройные силы и силы зависящие от плотности

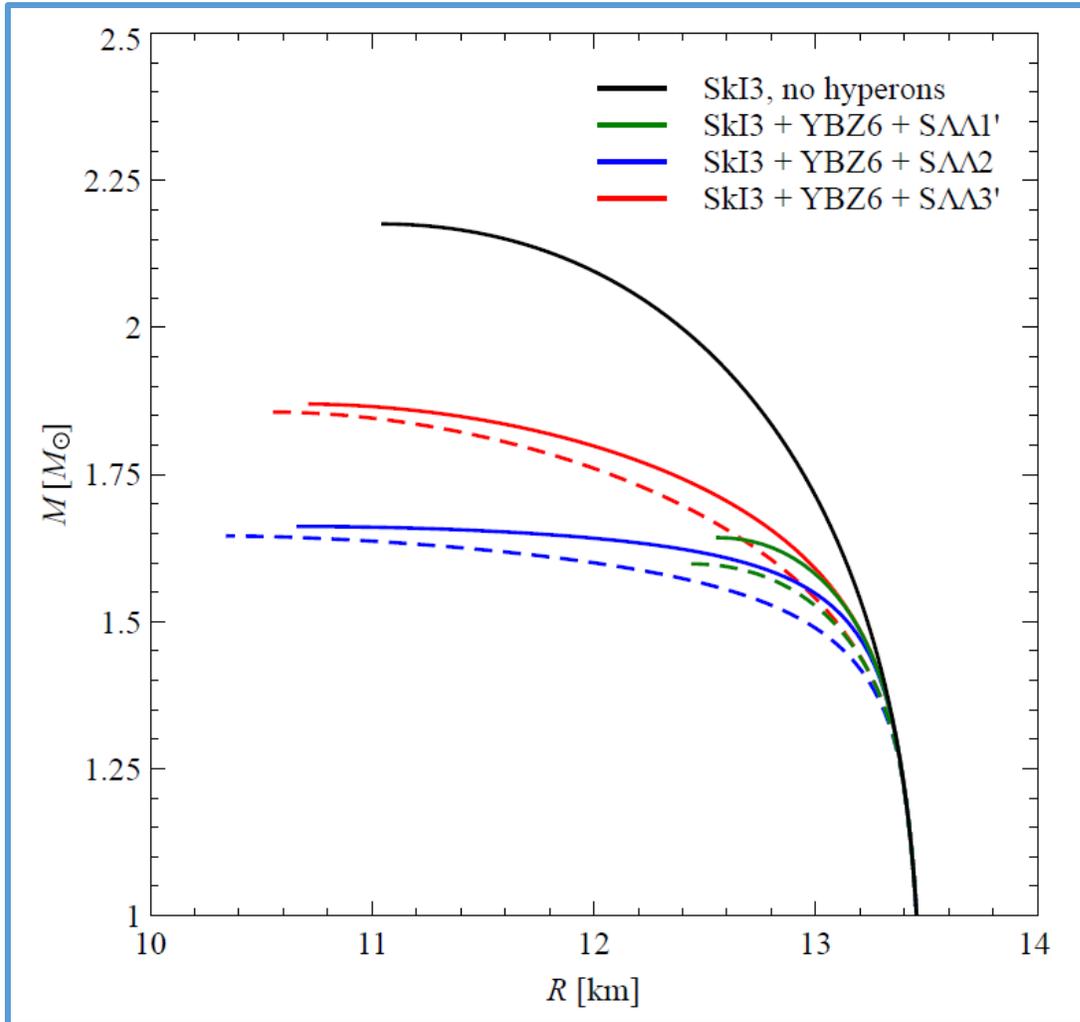


$$V_3 = V_{\Lambda NN}(\vec{r}_\Lambda, \vec{r}_{N1}, \vec{r}_{N2}) = u_3 \delta(\vec{r}_\Lambda - \vec{r}_{N1}) \delta(\vec{r}_\Lambda - \vec{r}_{N2})$$

$$V_3 = V_{\Lambda N}(\vec{r}_\Lambda, \vec{r}_N, \rho) = \frac{3}{8} u_3 (1 + \xi_3 P_\sigma) \delta(\vec{r}_\Lambda - \vec{r}_N) \rho^\gamma \left(\frac{\vec{r}_\Lambda + \vec{r}_N}{2} \right)$$

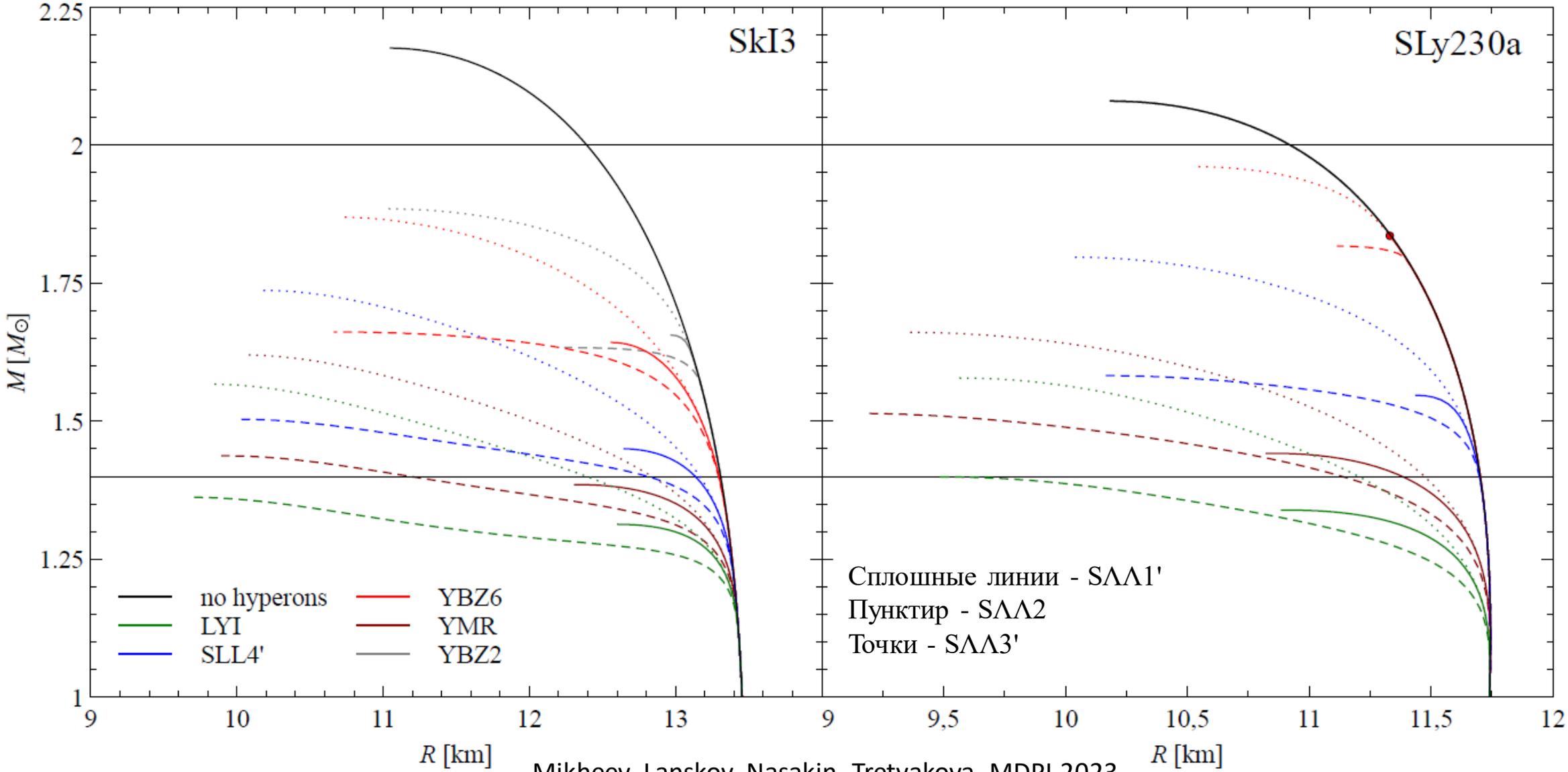
**Сплошные линии - силы зависящие от плотности,
пунктирные линии - тройные силы**

Λ-взаимодействие

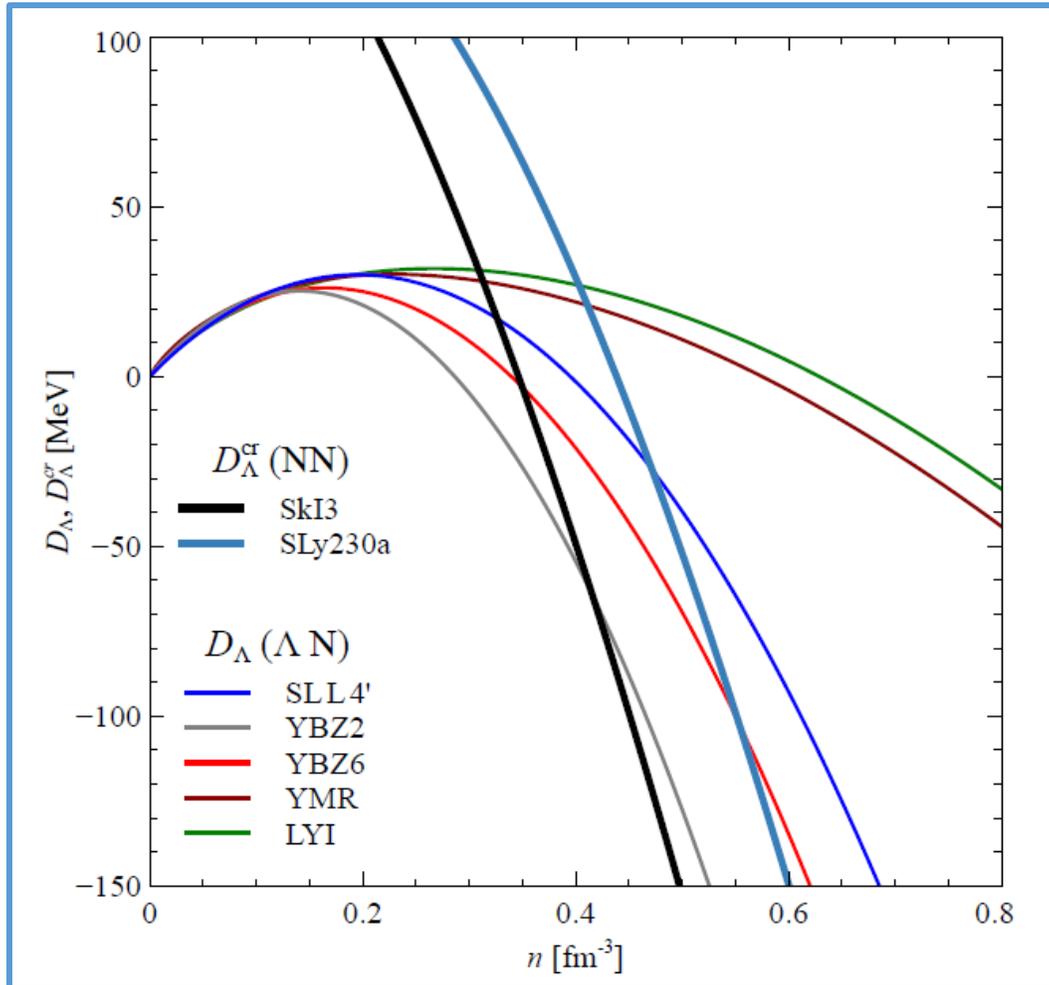


Λ-взаимодействие	Радиус взаимодействия
SΛΛ1'	Малый
SΛΛ2	Средний
SΛΛ3'	Большой

Массы и радиусы нейтронных звёзд для различных барионных взаимодействий



Точка появления гиперонов



Энергия связи Λ гиперона в чисто нуклонной материи

$$D_\Lambda = -\mu_\Lambda.$$

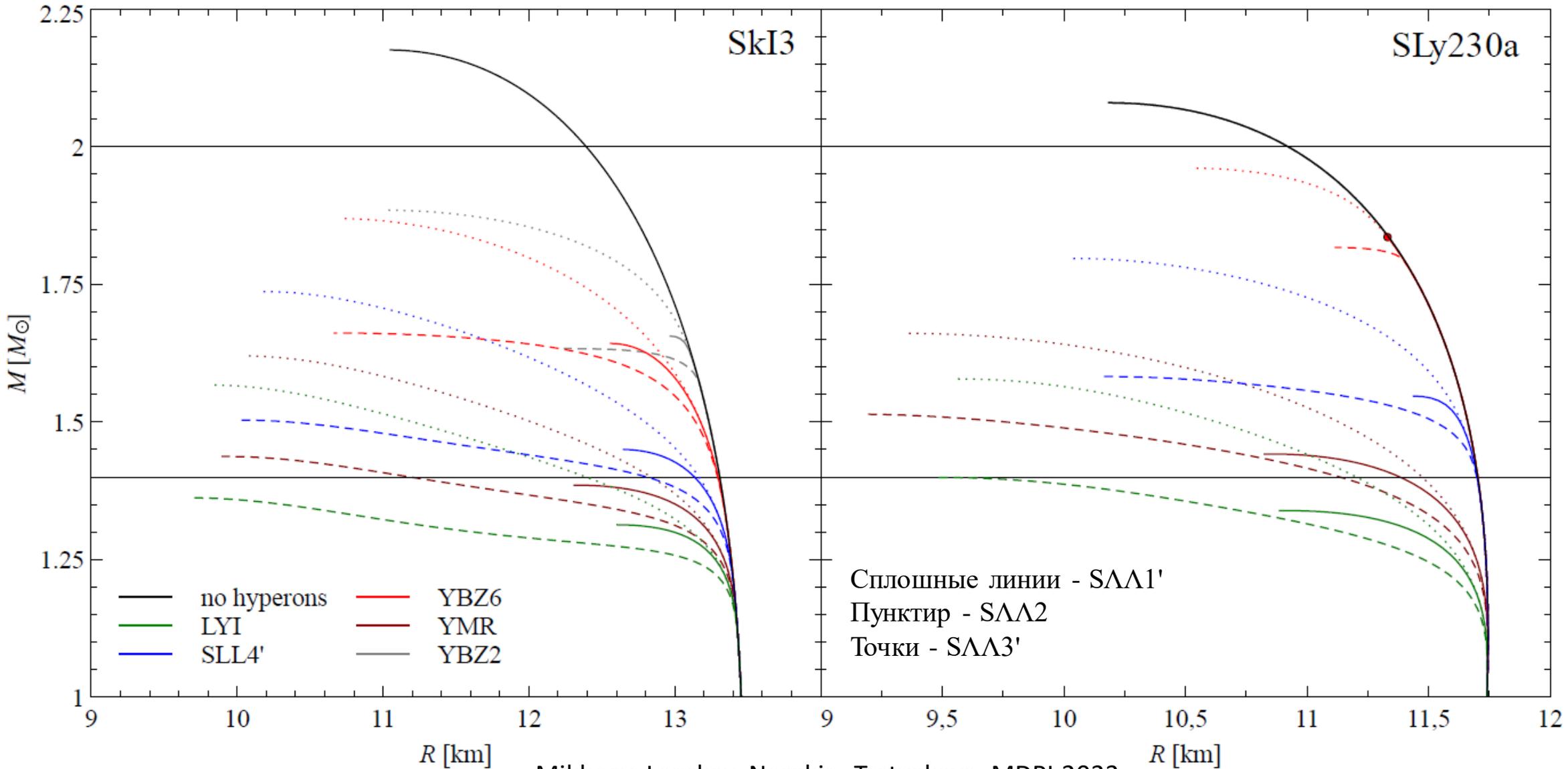
Критическая энергия Λ гиперона

$$D_\Lambda^{cr} = m_\Lambda - m_n - \mu_n.$$

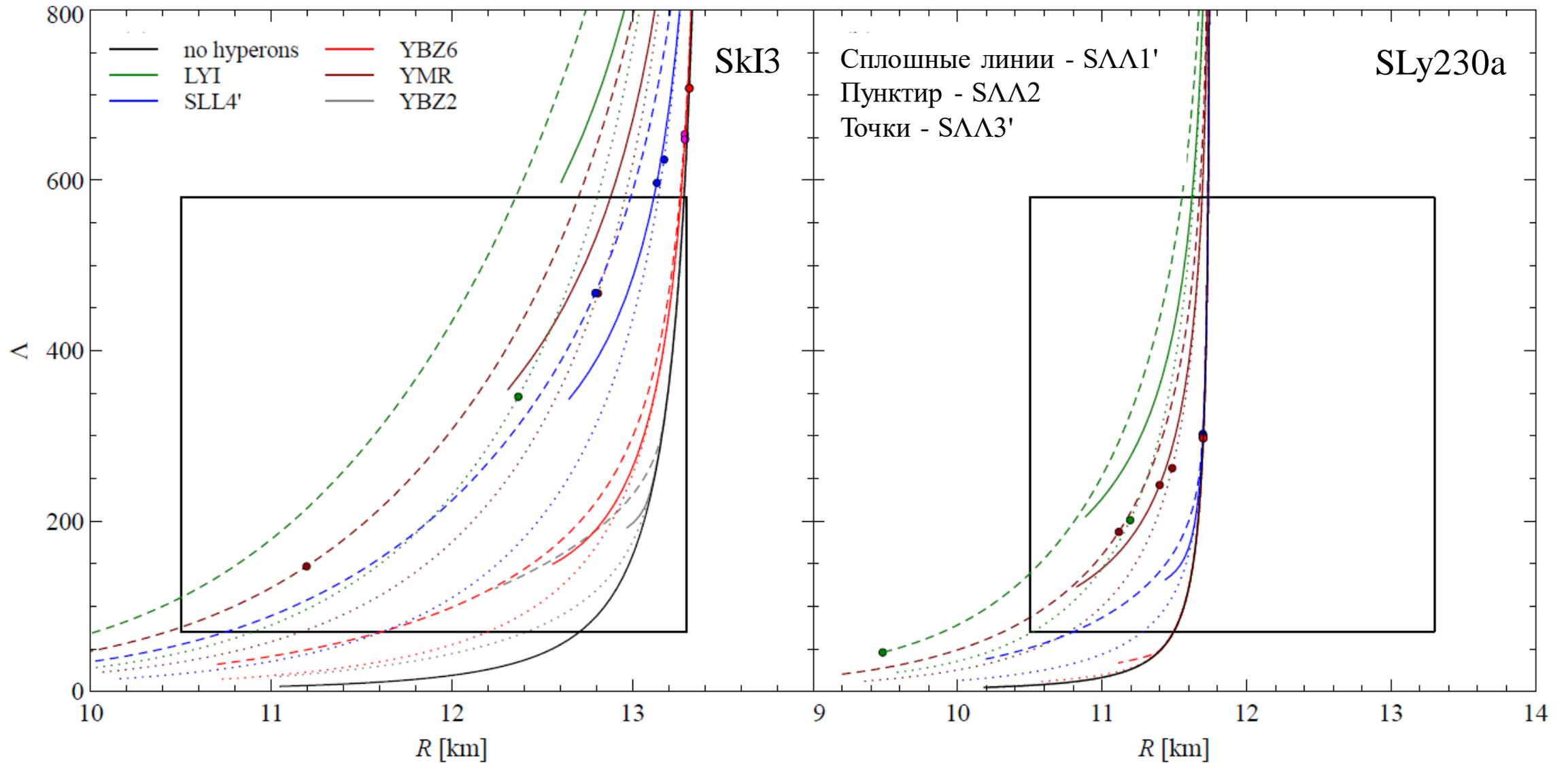
Условие появления Λ гиперона

$$D_\Lambda = D_\Lambda^{cr}$$

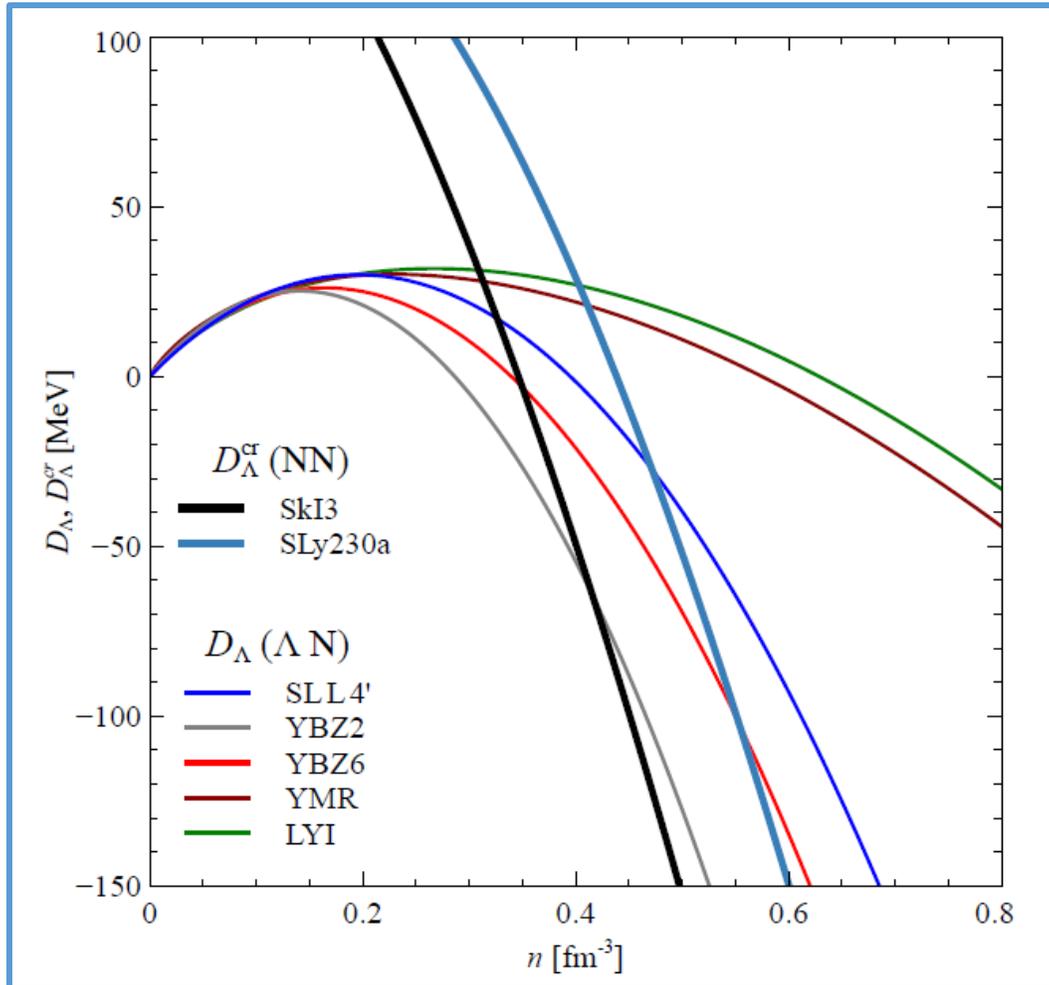
Массы и радиусы нейтронных звёзд для различных барионных взаимодействий



Зависимость приливной деформируемости от радиуса



Точка появления гиперонов



Энергия связи Λ гиперона в чисто нуклонной материи

$$D_\Lambda = -\mu_\Lambda.$$

Критическая энергия Λ гиперона

$$D_\Lambda^{cr} = m_\Lambda - m_n - \mu_n.$$

Условие появления Λ гиперона

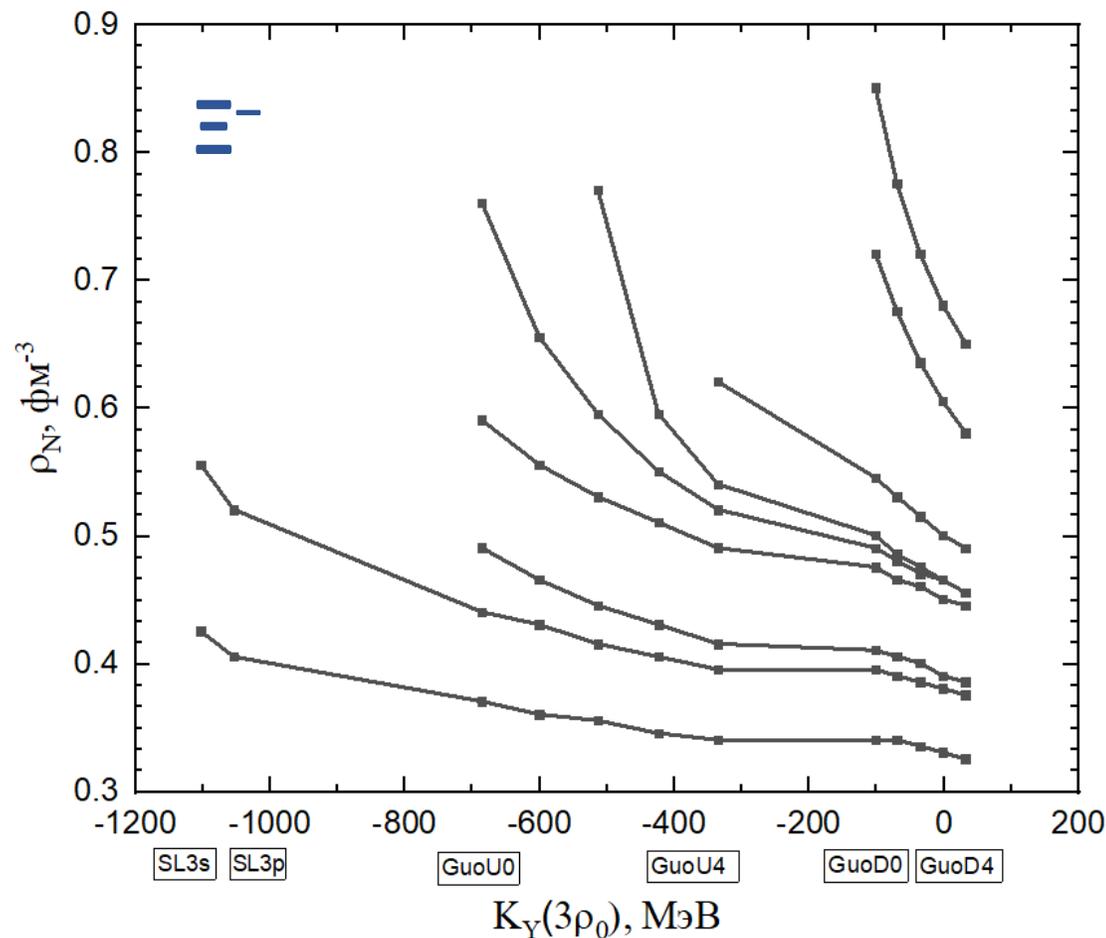
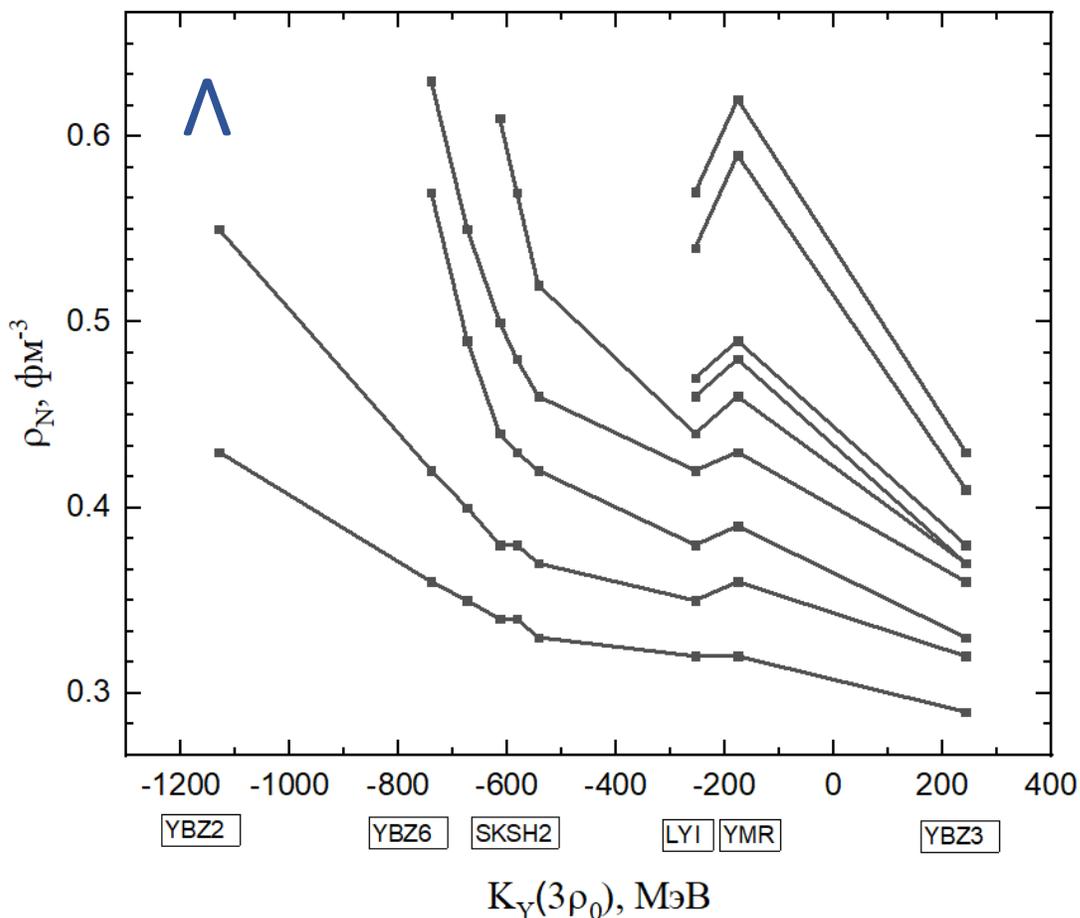
$$D_\Lambda = D_\Lambda^{cr}$$

Корреляции между плотностью появления гиперонов и свойствами гиперонного взаимодействия

**Сжимающая способность
 Λ -взаимодействия**

Ланской, Третьякова, ЯФ 1989

$$K_Y = k_F \frac{dD_Y}{dk_F} = 3D_Y - \left(1 - \frac{m_Y^*}{m_Y}\right) \left(\frac{6}{5} \frac{\hbar^2}{2m_Y^*} k_0^2\right) - \frac{9}{8} \gamma u_3 \rho_0^{1+\gamma}$$



SGII
SkM*
SKRA
Skxs20
KDE0v1
SLy230a
SkO
SGI
SkI3

Заключение

- В нейтронных звёздах зависимость от нуклонной плотности (ρ^ν) и тройные ΛNN силы не являются эквивалентными способами описания многочастичных эффектов в ΛN -взаимодействии
- Наиболее подходящими для описания нейтронных звёзд являются параметризации с показателем степени нуклонной плотности $\gamma = 1$.
- Точка появления гиперонов тесно связана с максимальной массой нейтронной звезды и имеет важное значение для решения "hyperon puzzle"
- Существует сильная корреляция между плотностью появления гиперонов и сжимающей способностью гиперон-нуклонного взаимодействия

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ