

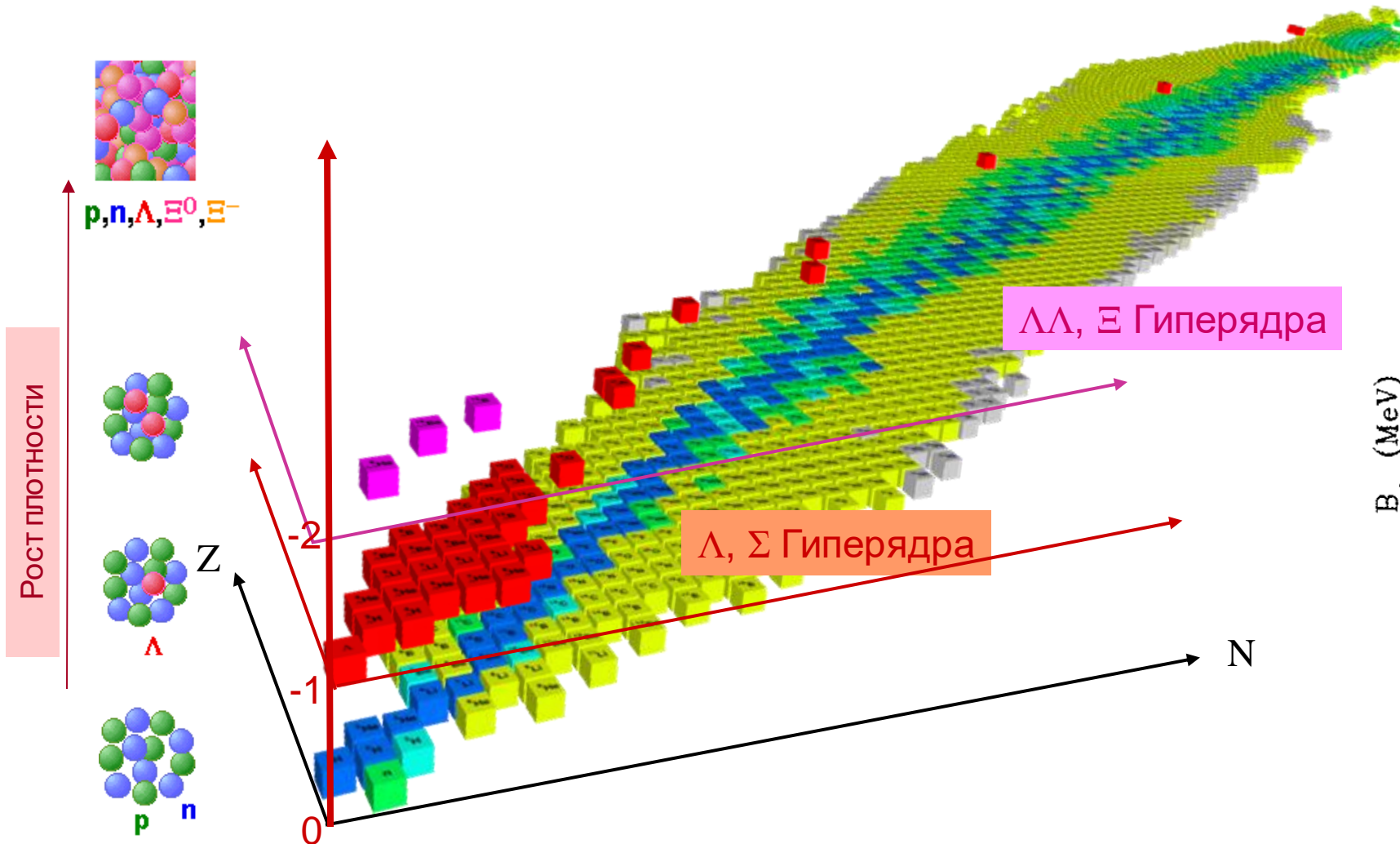
Структура YN и YY взаимодействий в материи нейтронных звёзд

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

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

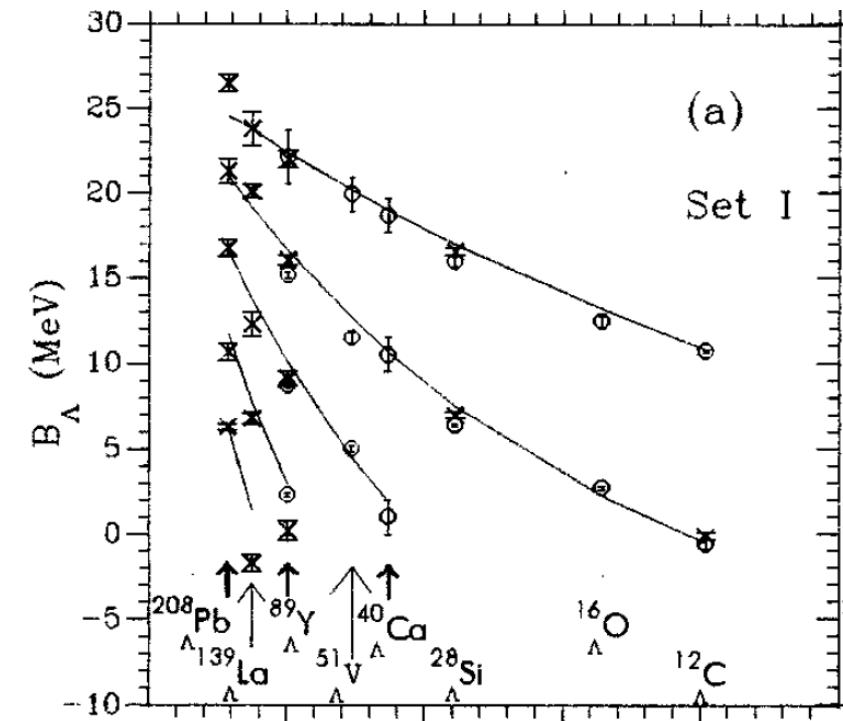
Москва, 28.03.2024

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

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

- Химическое равновесие

$$\begin{cases} \mu_p(Y_p, Y_\Lambda) + \mu_e(Y_e) = \mu_n(Y_p, Y_\Lambda) \\ \mu_\mu(Y_p, Y_e) = \mu_e(Y_e) \\ \mu_\Lambda(Y_p, Y_\Lambda) + m_\Lambda = \mu_n(Y_p, Y_\Lambda) + m_n \end{cases}$$

- Уравнение Толмана-Оппенгеймера-Волкова

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

$$\frac{dm}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r)$$

- Коэффициент приливной деформируемости

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

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

- GW170817

$$M_{chirp} = 1.186_{-0.001}^{+0.001} \quad M_{chirp} = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}}$$

$$\bar{\Lambda} \leq 900 \quad \bar{\Lambda} = \frac{16(m_1 + 12m_2)m_1^4 \Lambda_1 + (m_2 + 12m_1)m_2^4 \Lambda_2}{(m_1 + m_2)^5}$$

$$m_1 = 1.4M_\odot \rightarrow \Lambda = 70 - 580$$

$$R = 10.5 - 13.3 \text{ км [1,2,3]}$$

[1] B. Abbott et al. (LIGO Scientific and Virgo Collaboration), Phys. Rev. Lett. 119, 161101 (2017)

[2] B. Abbott et al. (LIGO Scientific and Virgo Collaboration), Phys. Rev. Lett. 121, 161101 (2018)

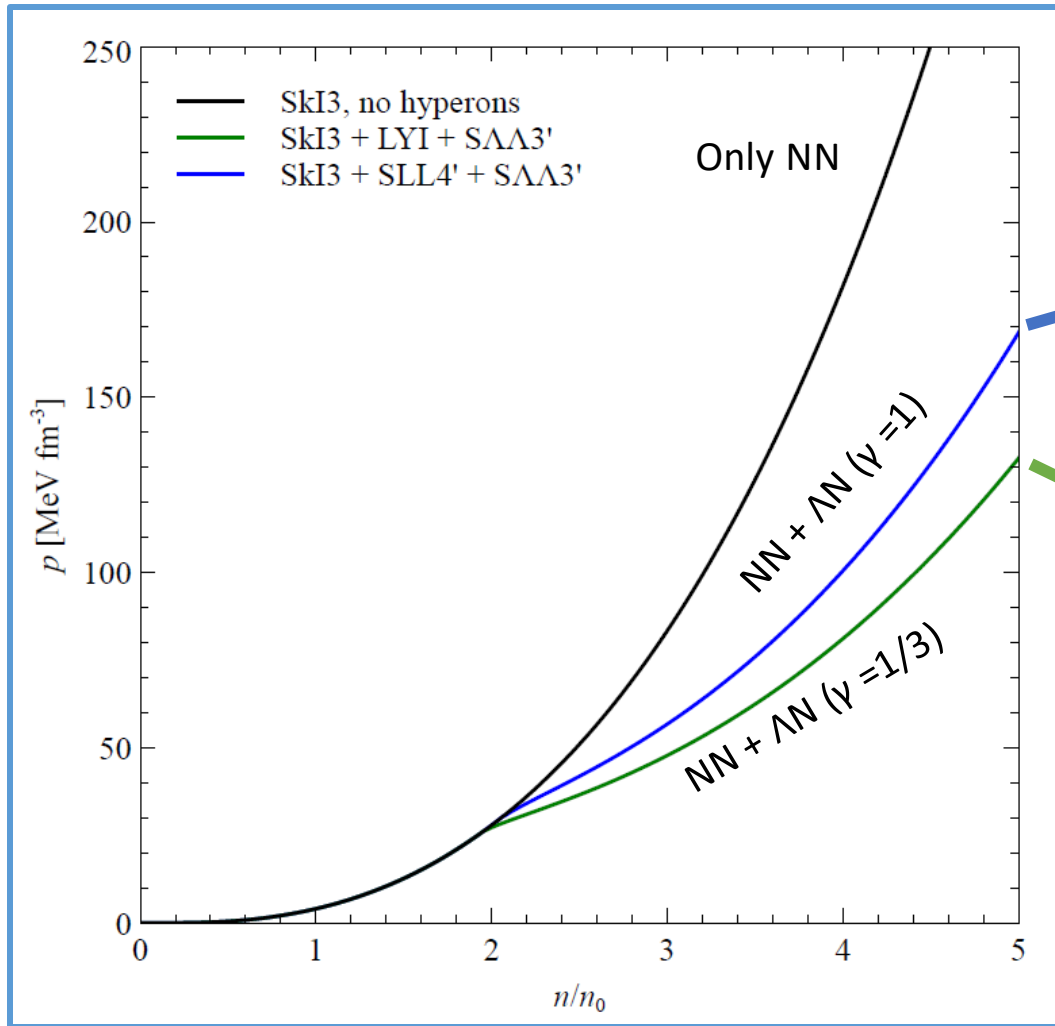
[3] B. Abbott et al. (LIGO Scientific and Virgo Collaboration), Phys. Rev. X 9(1) 011001 (2019).

- Hyperon puzzle

PSR J0740+6620, $M = 2.08 \pm 0.07 M_\odot$

PSR J0952-0607, $M = 2.35 \pm 0.17 M_\odot$

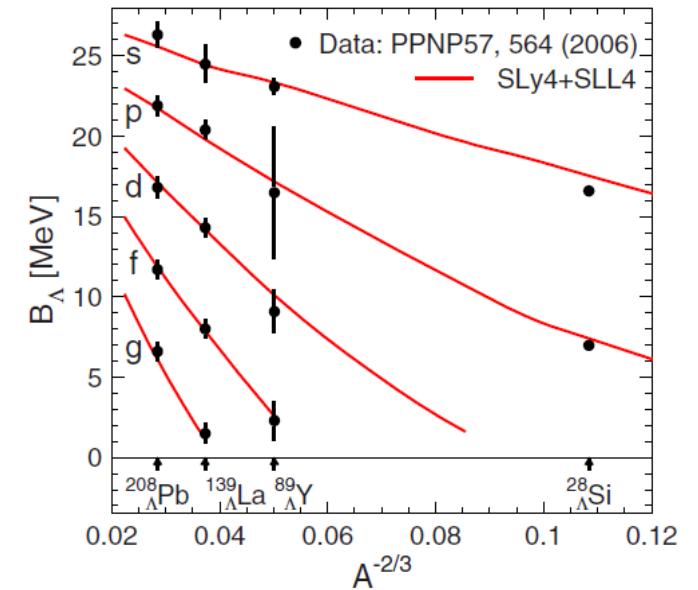
Уравнение состояния материи нейтронных звёзд



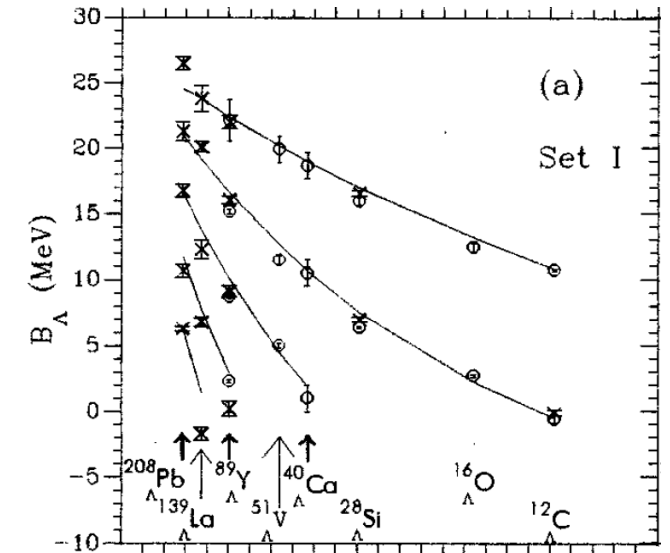
SLL4'

LYI

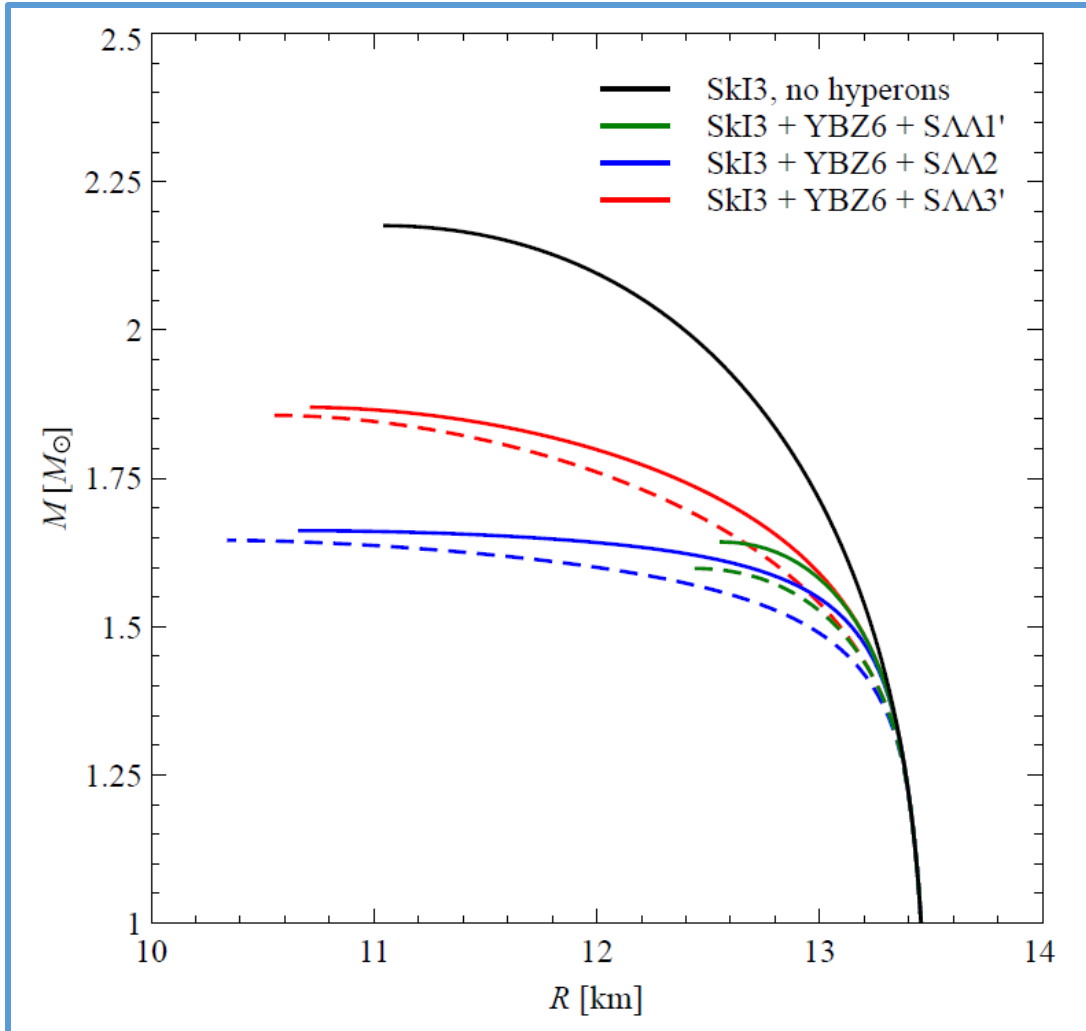
H.-J. Schulze, Hiyama E., 2014



D. E. Lanskoj, Yamamoto Y., 1997



Тройные силы и силы зависящие от плотности

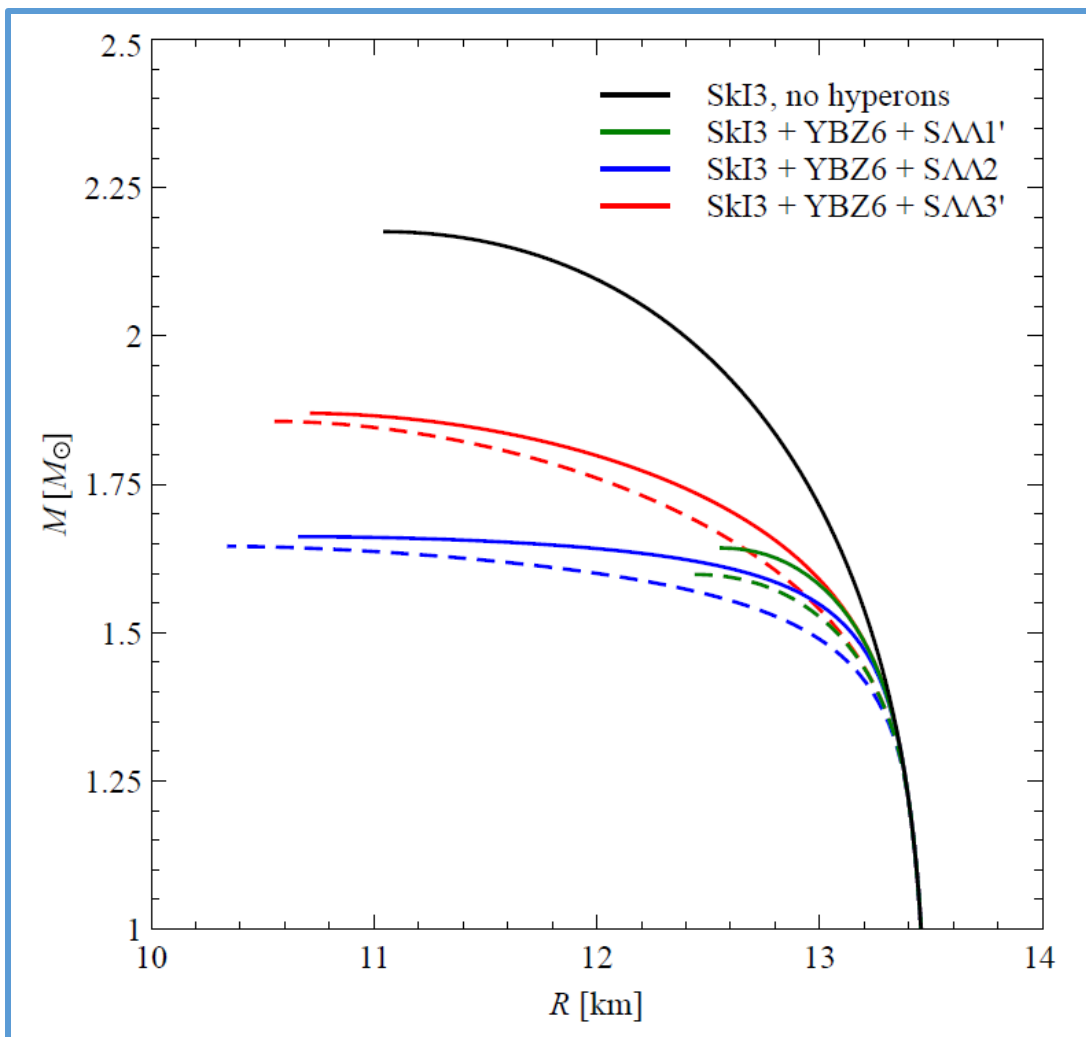


$$V_3 = V_{\Lambda NN}(\vec{r}_\Lambda, \vec{r}_{N1}, \vec{r}_{N2}) = u_3 \delta(\vec{r}_\Lambda - \vec{r}_{N1}) \delta(\vec{r}_\Lambda - \vec{r}_{N2})$$

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

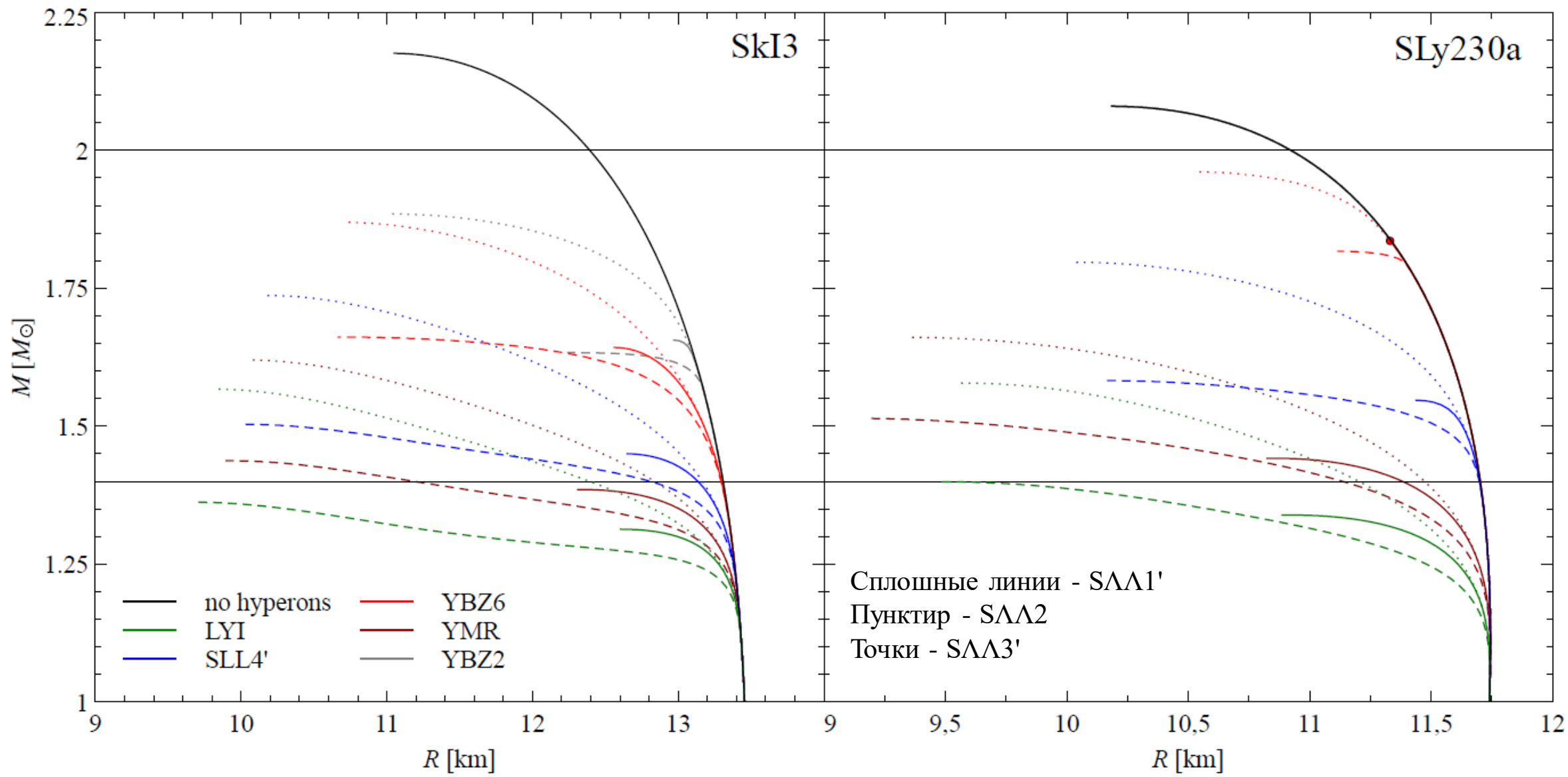
**Сплошные линии - силы зависящие от плотности,
пунктирные линии - тройные силы**

Λ-взаимодействие

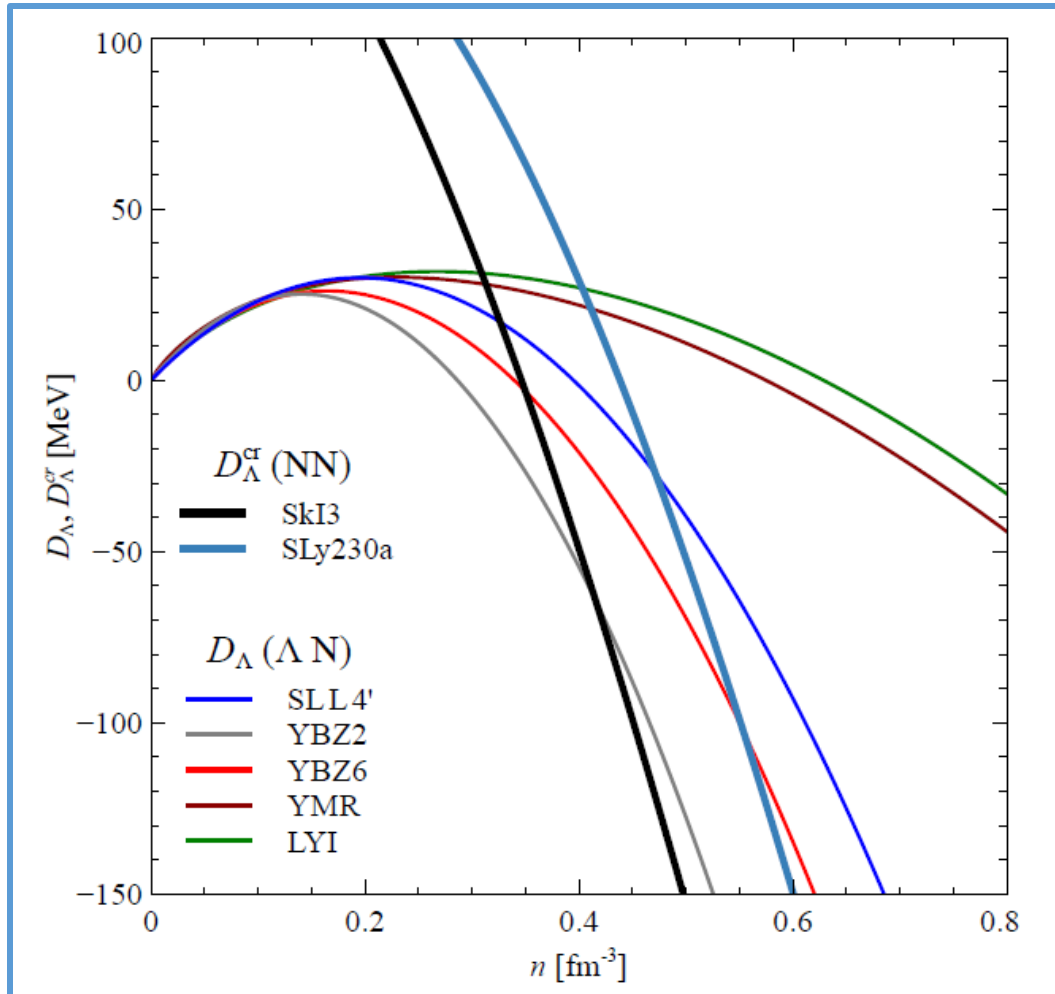


Λ-взаимодействие	Радиус взаимодействия
SΛΛ1'	Малый
SΛΛ2	Средний
SΛΛ3'	Большой

Массы и радиусы нейтронных звёзд для различных барионных взаимодействий



Точка появления гиперонов



Энергия связи Λ гиперона в чисто нуклонной материи

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

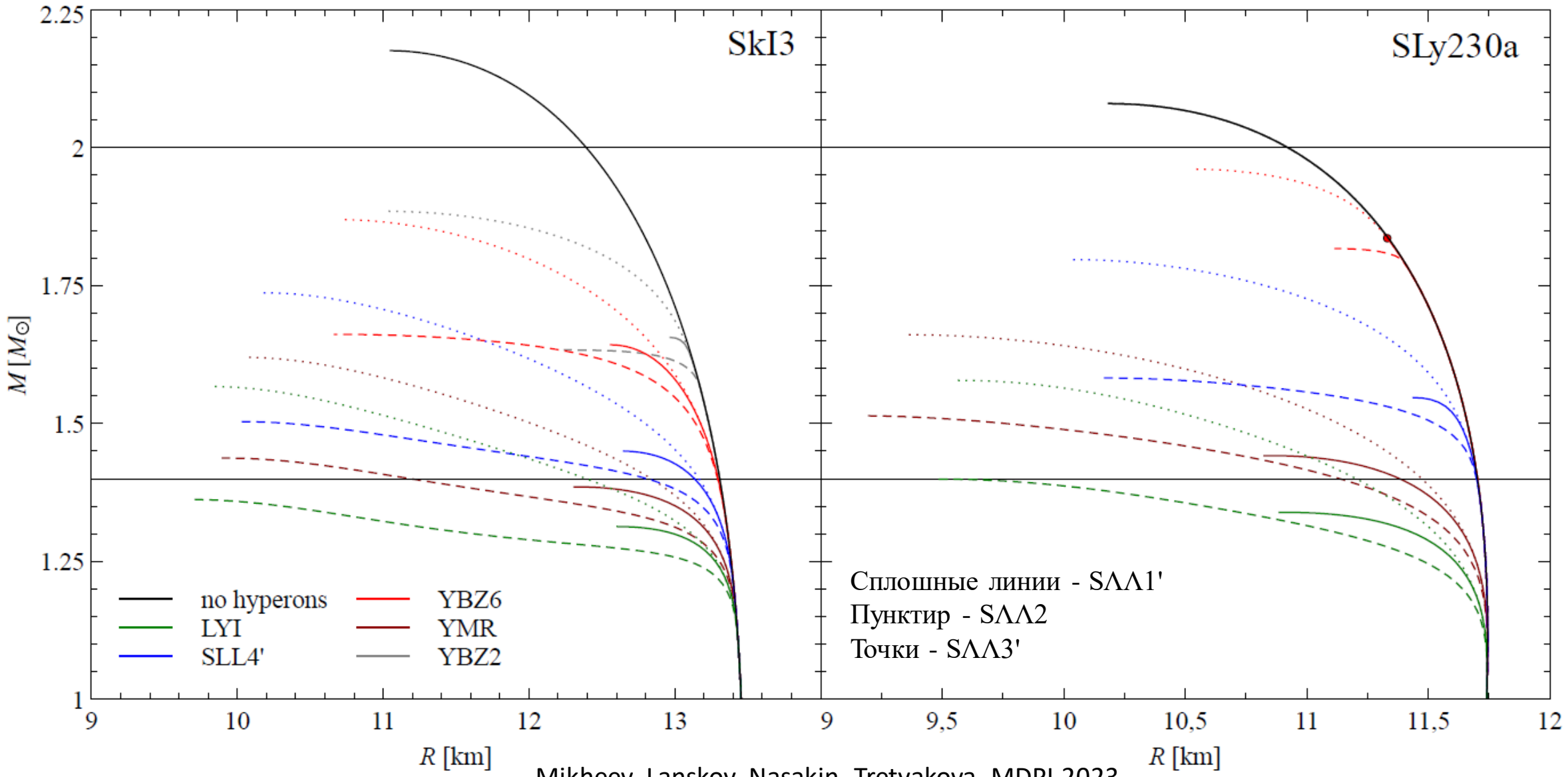
Критическая энергия Λ гиперона

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

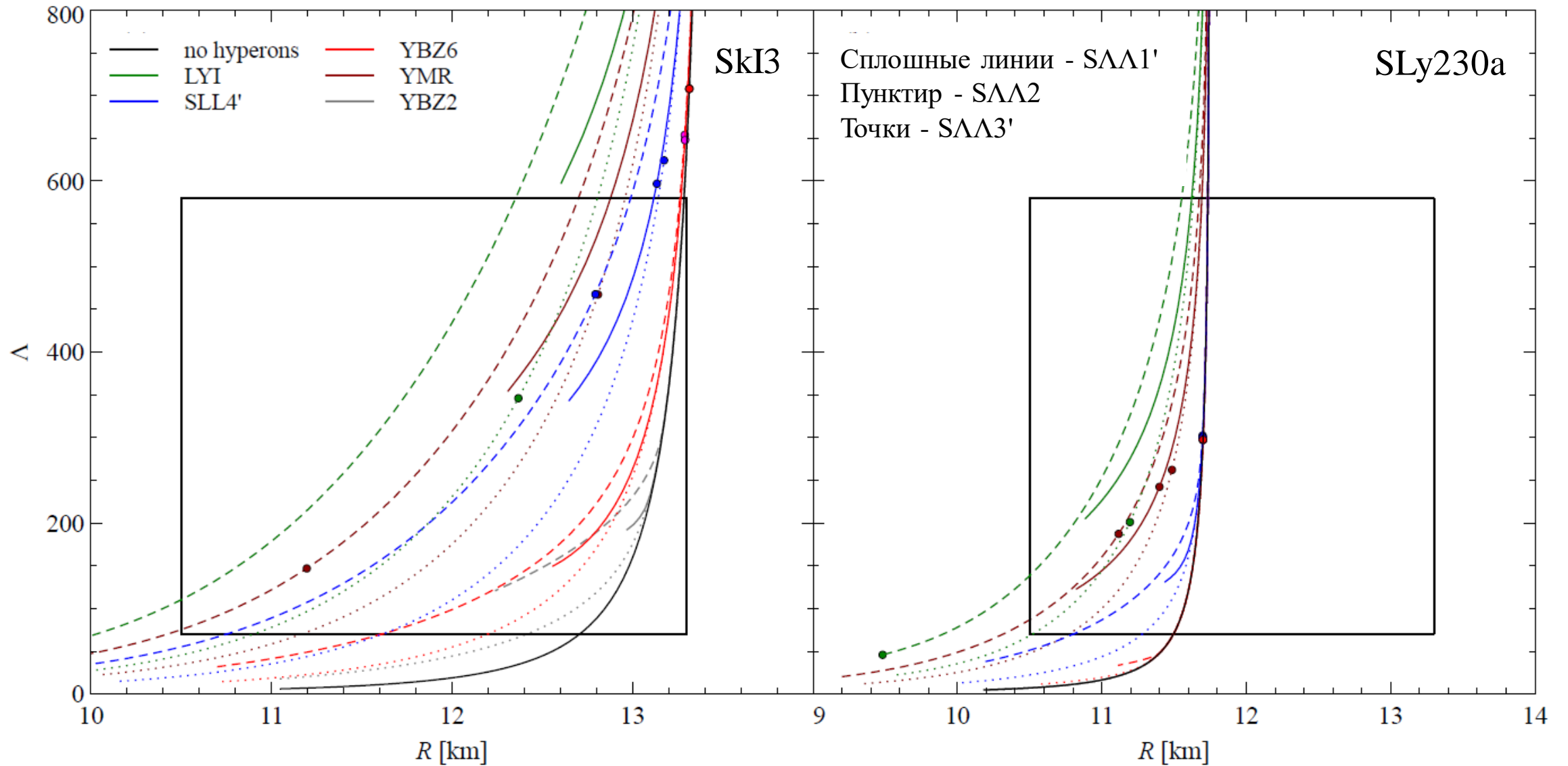
Условие появления Λ гиперона

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

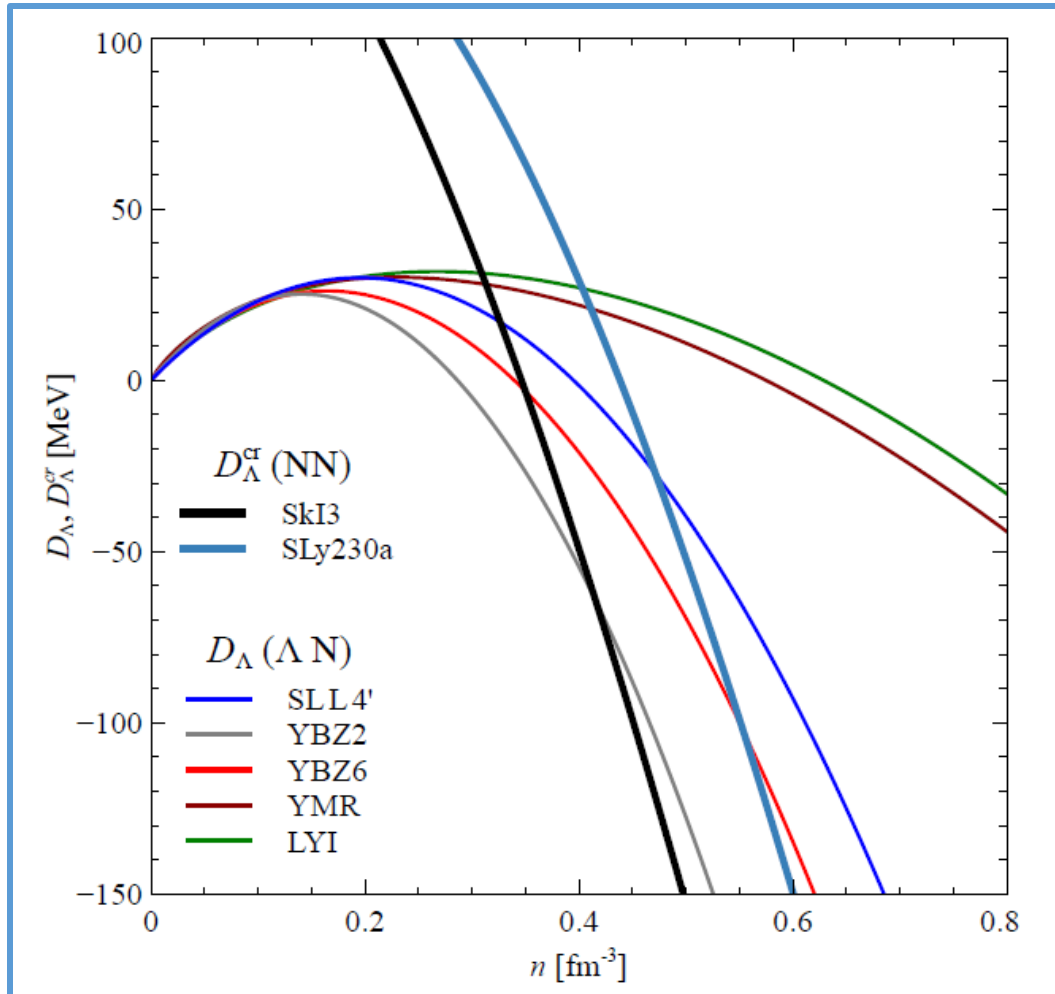
Массы и радиусы нейтронных звёзд для различных барионных взаимодействий



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

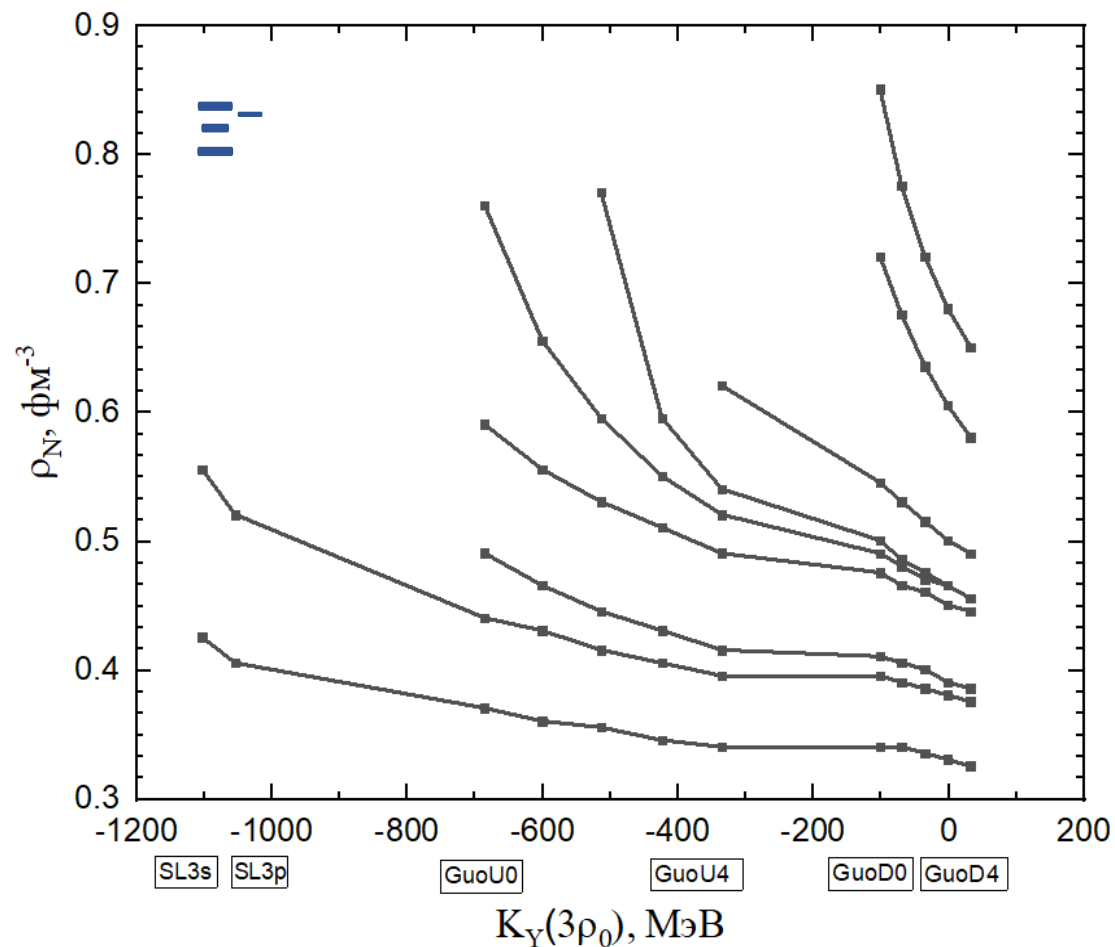
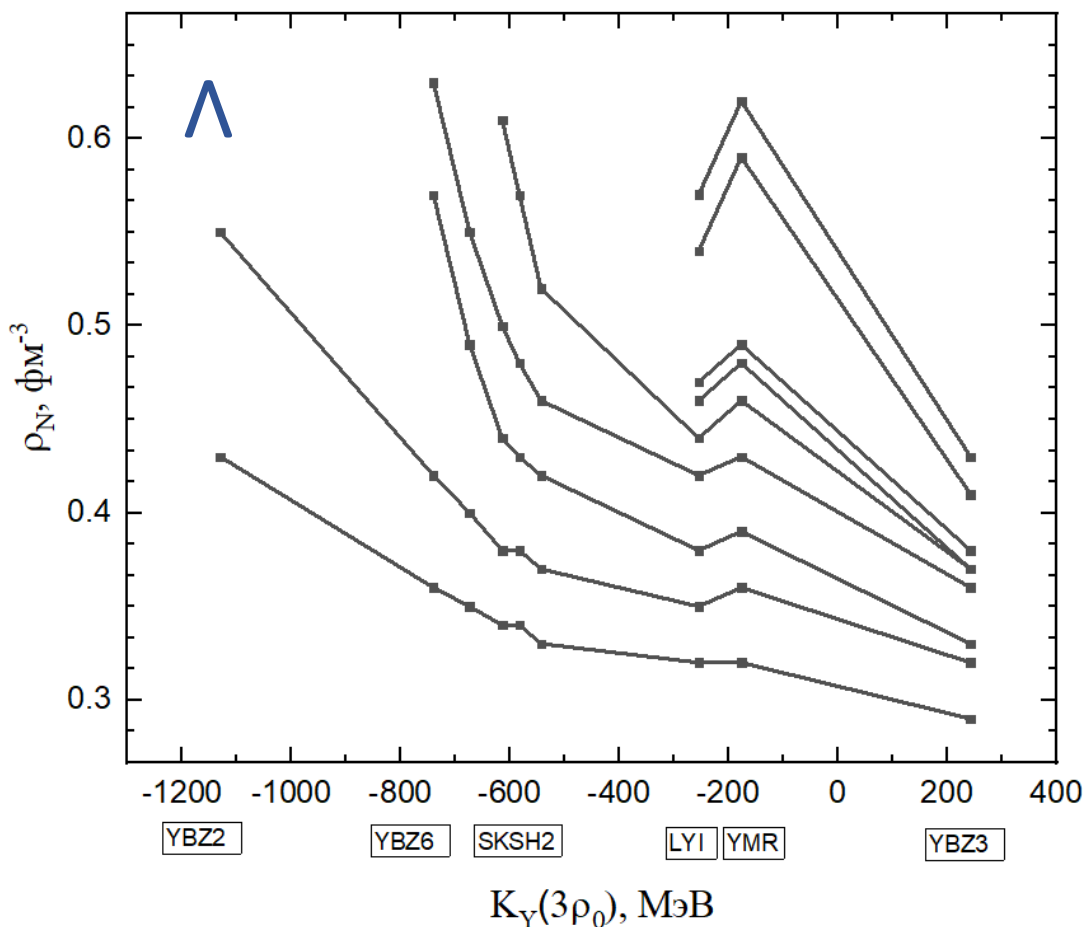
$$D_\Lambda = D_\Lambda^{cr}$$

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