

Ломоносовские чтения - 2025



Барионные взаимодействия и материя нейтронных звезд

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

Работа поддержана грантом РФФИ 24-22-00077

Странные барионные системы

$N_u \sim N_d \sim N_s$

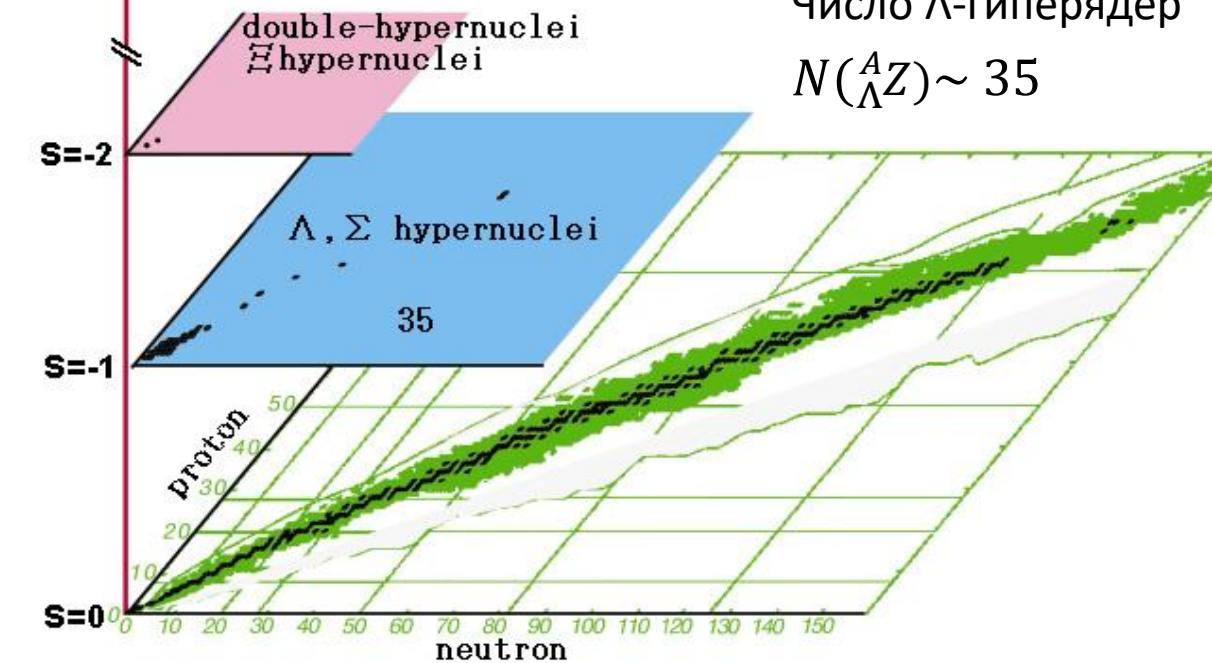


$p, n, \Lambda, \Xi^0, \Xi^-$

Strange matter
/ N-star
 $S = -\infty$

Число событий
 $N(\Lambda\Lambda Z) < 10$

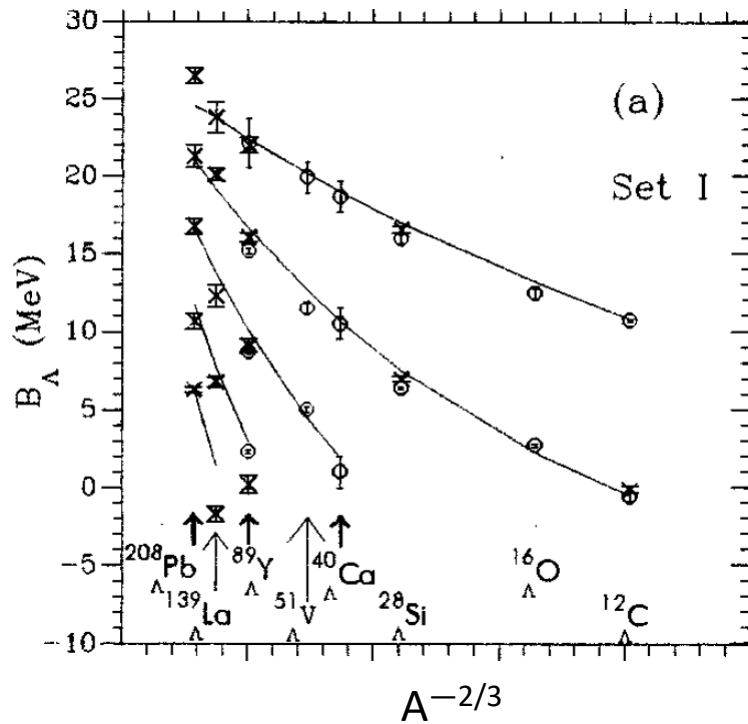
Число Λ -гиперядер
 $N(\Lambda Z) \sim 35$



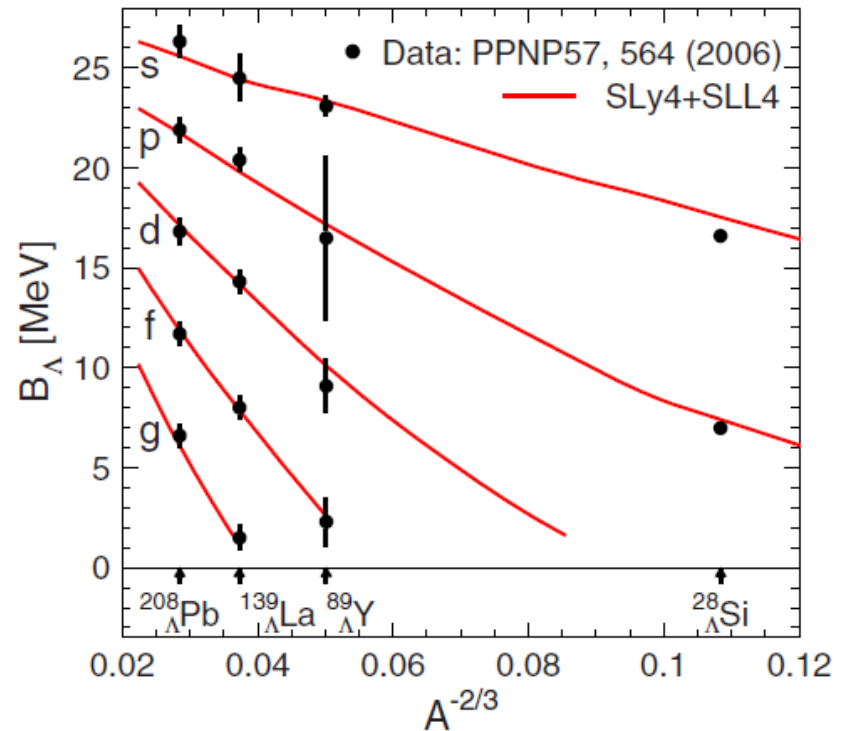
Число ядер
 $N(AZ) > 2500$

ΛN-взаимодействия

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



Lanskoy, Yamamoto, 1997

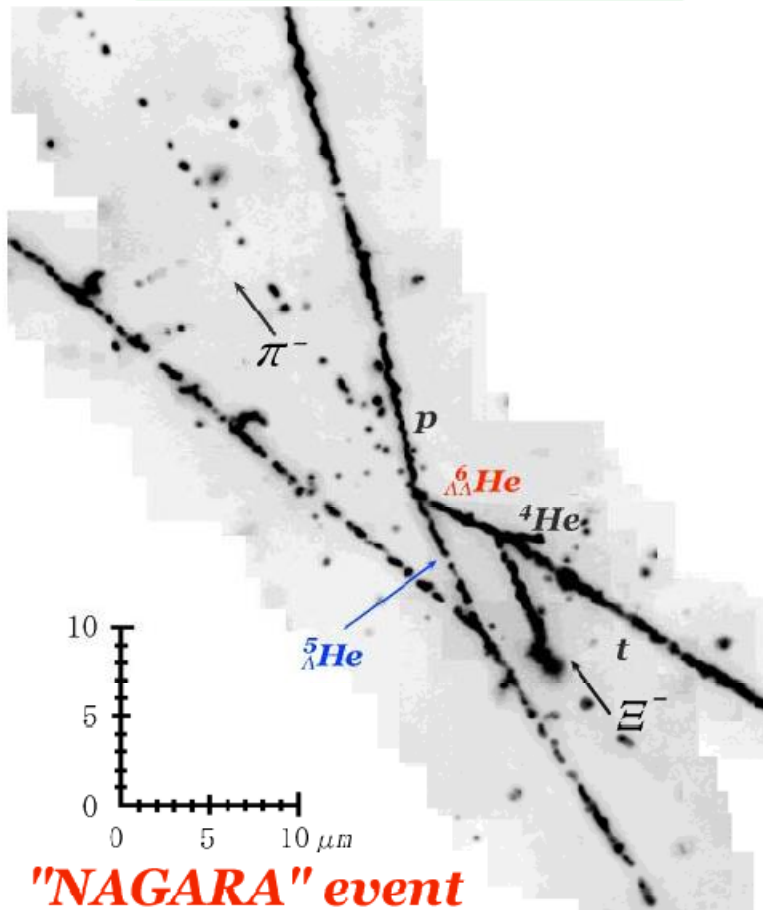


Schulze, Hiyama, 2014

Гиперядра с двойной странностью

${}^6_{\Lambda\Lambda}\text{He}$ double-hypernucleus

Unique interpretation!!



"NAGARA" event

presented by E373(KEK-PS) on Jan.2001

- $\text{C}(\text{K}^-, \text{K}^+)$ reaction to produce Ξ^- then stop it in emulsion
(H. Takahashi et al., PRL87(2001)212502)

- Binding energy of ${}^6_{\Lambda\Lambda}\text{He}$ is obtained to be

$$B_{\Lambda\Lambda} = 7.3 \pm 0.3 \text{ MeV}$$

(from $\alpha + 2\Lambda$)

- In order to extract $\Lambda\Lambda$ interaction, we take

$$\Delta B_{\Lambda\Lambda} = B_{\Lambda\Lambda} - 2B_{\Lambda}({}^5_{\Lambda}\text{He})$$

$$= 0.67 \pm 0.17 \text{ MeV}$$

→ weakly attractive

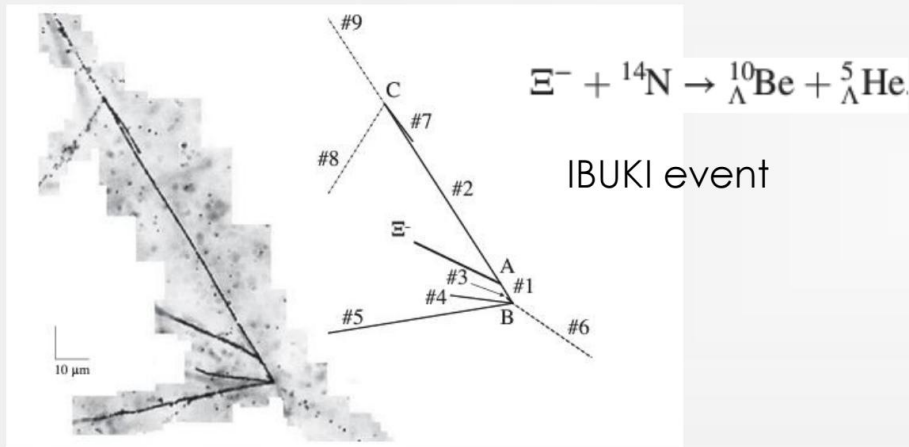
Гиперядра с двойной странностью

Ξ^- -Nuclear Bound States

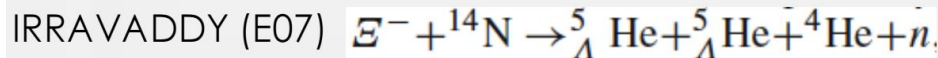
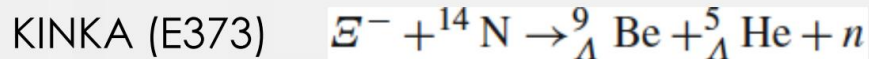
KEK E373 and J-PARC E07 experiments

Coulomb-Assisted Ξ^- - ^{14}N $1p_{\Xi^-}$ nuclear bound state

Hayakawa (J-PARC E07), PRL (2021)

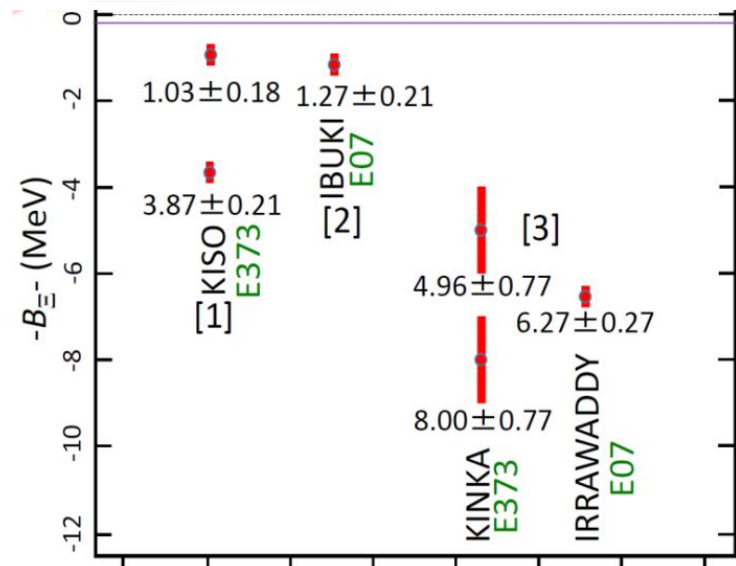


Yoshimoto, PTEP (2021)



$\rightarrow 1s_{\Xi^-}$ nuclear state

Ξ hypernucleus ($^{15}_{\Xi}\text{C}$ [Ξ^- - ^{14}N])



- [1] K. Nakazawa, et. al., Prog. Theor. Exp. Phys. **2015**, 033D02 (2015), E. Hiyama and K. Nakazawa, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. **68**, 131 (2018).
- [2] S. Hayakawa, et. al., Phy. Rev. Lett., **126**, 062501 (2021).
- [3] M. Yoshimoto, et. al., Prog. Theor. Exp. Phys. **2021**, 073D02 (2021).

Nakazawa 2021

Нейтронные звезды

- **Нейтронные звезды** – компактные объекты, появляющиеся в результате гравитационного коллапса массивных звезд ($8 M_{\odot} < M < 25 M_{\odot}$) в ходе вспышки сверхновой

- Масса: $M \sim 1 - 2 M_{\odot}$ (большая часть наблюдений $1.4 M_{\odot}$)
- Радиус: $R \sim 10 - 12 \text{ km}$
- Плотность: $\rho \sim 10^{14} - 10^{15} \text{ г/см}^3$
- Массовое число: $N_b \sim 10^{57}$ (“гигантское (гипер) ядро”)
- В основном наблюдаются как радиопульсары (известно > 2500)
- Массы измеряются для звёзд в двойных системах (10%)
- Верхняя граница для массы нейтронной звезды должна быть $M > 2M_s$
 - PSR J0348+0432: $M = 2.01 \pm 0.04 M_{\odot}$ [Antoniadis et al. 2013]
 - J0740+6620: $M = 2.14 \pm 0.10 M_{\odot}$ [Cromartie et al. 2020]
 - PSR J0952-0607: $M = 2.35 \pm 0.17 M_{\odot}$ [Romani et al. 2022]
 - PSR J0740+6620: $M = 2.027 \pm 0.067 M_{\odot}$; $R = 12.39 \pm 1.14 M_{\odot}$ [Riley et al. 2021]
- измерен сигнал от слияния двух нейтронных звёзд (**GW170817**): оценка приливной деформируемости, сигнал r-процесса

Взаимодействия Скирма

- Нуклон-нуклонный потенциал Скирма (Vautherin and Brink, 1972):

$$V_{NN}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = t_0(1 + x_0 P_\sigma) \delta(\mathbf{r}_{12}) + \frac{1}{5} t_1(1 + x_1 P_\sigma) (\mathbf{k}'^2 \delta(\mathbf{r}_{12}) + \delta(\mathbf{r}_{12}) \mathbf{k}^2) \\ + t_2(1 + x_2 P_\sigma) \mathbf{k}' \delta(\mathbf{r}_{12}) \mathbf{k} + \frac{1}{6} t_3 \rho^\alpha(\mathbf{R})(1 + x_3 P_\sigma) \delta(\mathbf{r}_{12}) + iW(\sigma_1 + \sigma_2) [\mathbf{k}' \times \delta(\mathbf{r}) \mathbf{k}]$$

Более 300 параметризаций

- Гиперон-нуклонный потенциал Скирма (Rayet, 1981):

$$V_{YN}(\mathbf{r}_Y, \mathbf{r}_q) = t_0^Y(1 + x_0^Y P_\sigma) \delta(\mathbf{r}_{Yq}) + \frac{1}{2} t_1^Y (\mathbf{k}^2 \delta(\mathbf{r}_{Yq}) + \delta(\mathbf{r}_{Yq}) \mathbf{k}'^2) \\ + t_2^Y \mathbf{k}' \delta(\mathbf{r}_{Yq}) \mathbf{k} + \frac{1}{6} t_3^Y \rho^\gamma(\mathbf{R}) \delta(\mathbf{r}_{Yq})$$

ΛN - около 20 параметризаций

ΞN – SL3x (Sun et al 2016)

– GZSx (Guo et al 2021)

- Гиперон-гиперонный потенциал Скирма:

$$V_{\Lambda\Lambda}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \lambda_0 \delta(\mathbf{r}_{12}) + \frac{1}{2} \lambda_1 (\mathbf{k}'^2 \delta(\mathbf{r}_{12}) + \delta(\mathbf{r}_{12}) \mathbf{k}^2) + \\ + \lambda_2 \mathbf{k}' \delta(\mathbf{r}_{12}) \mathbf{k}$$

$\Lambda\Lambda$: $S\Lambda\Lambda1'$, $S\Lambda\Lambda2$, $S\Lambda\Lambda3'$

(Lanskoy, 1998,

Minato and Hagino, 2011)

$$V_{\Lambda\Lambda}^{(3)}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \lambda_3 \rho_N^\beta(\mathbf{R}) \delta(\mathbf{r}_{12})$$

Барионная материя в нейтронных звездах

Химическое равновесие

$$\mu_p + \mu_e = \mu_n$$

$$\mu_\mu = \mu_e$$

$$\mu_\Lambda + m_\Lambda = \mu_n + m_n$$

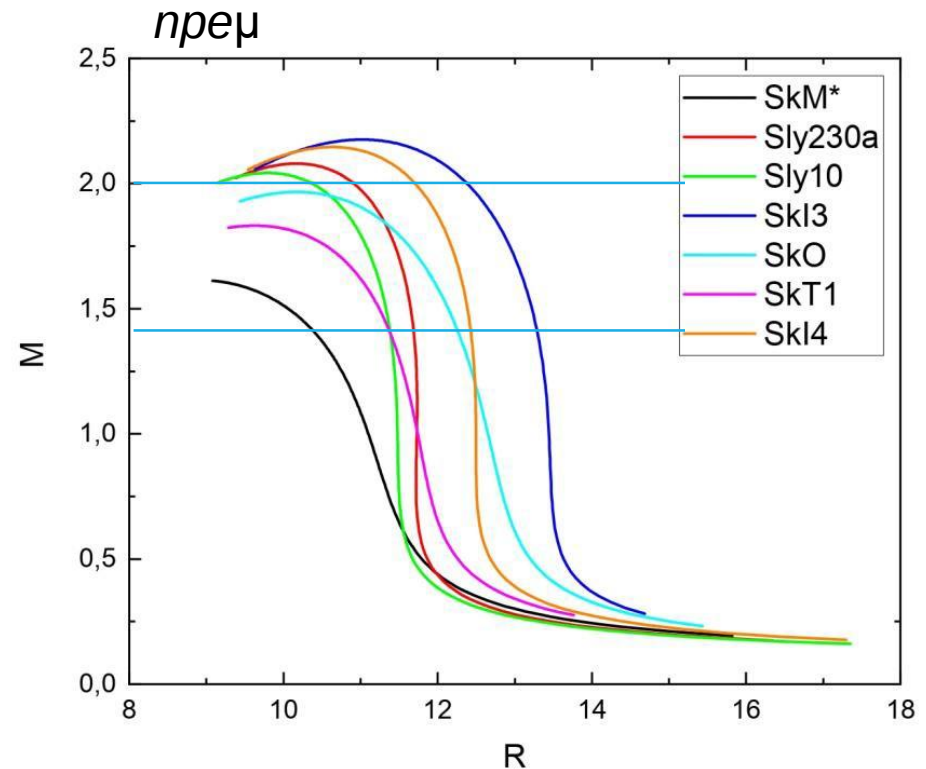
$$\mu_\Xi + m_\Xi + \mu_p + m_p = 2\mu_\Lambda + 2m_\Lambda$$

Уравнение Оппенгеймера-Волкова

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

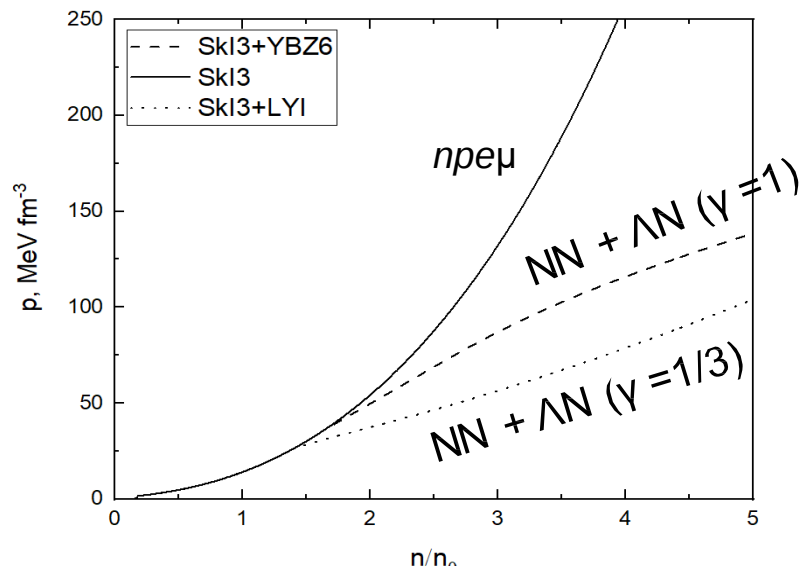
$$\frac{dm}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r)$$

$$M = \int_0^R 4\pi r^2 \rho dr$$

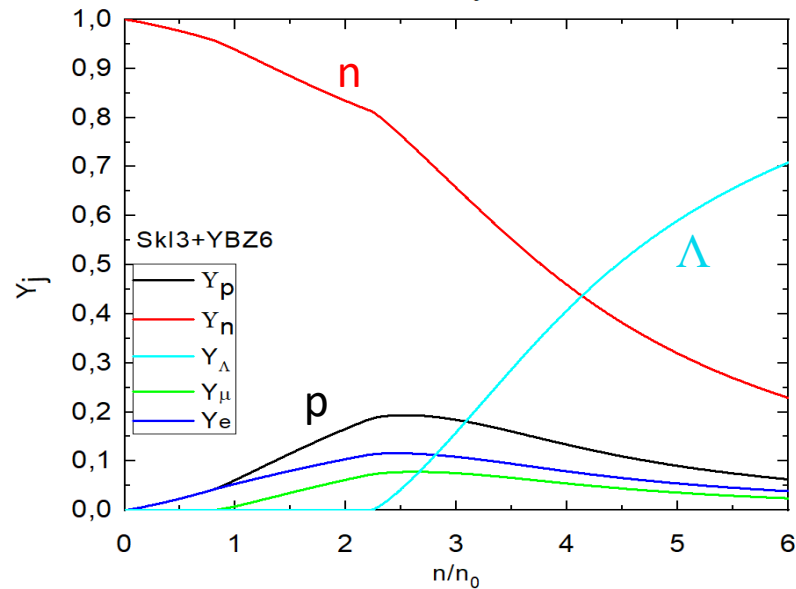
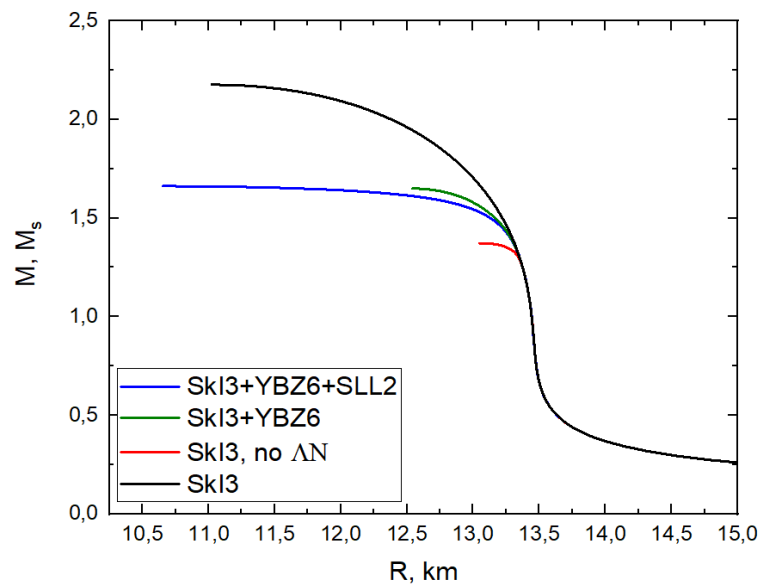
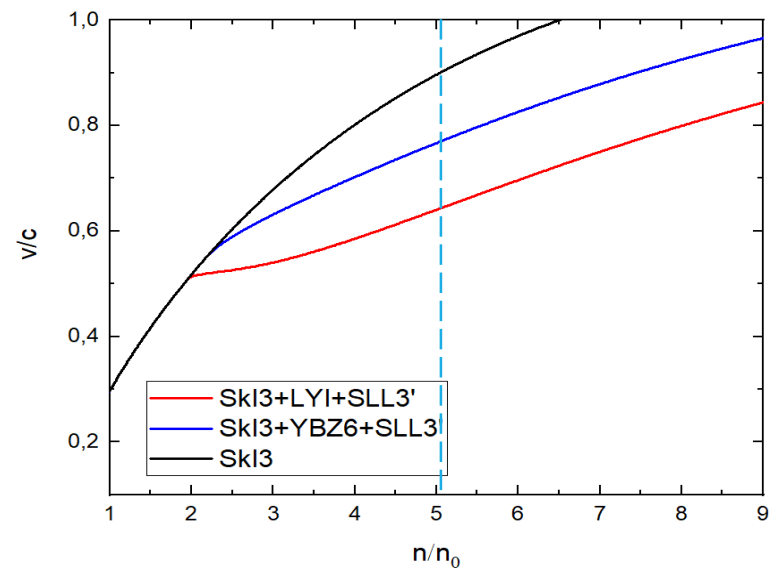


Hyperon puzzle

Уравнение состояния

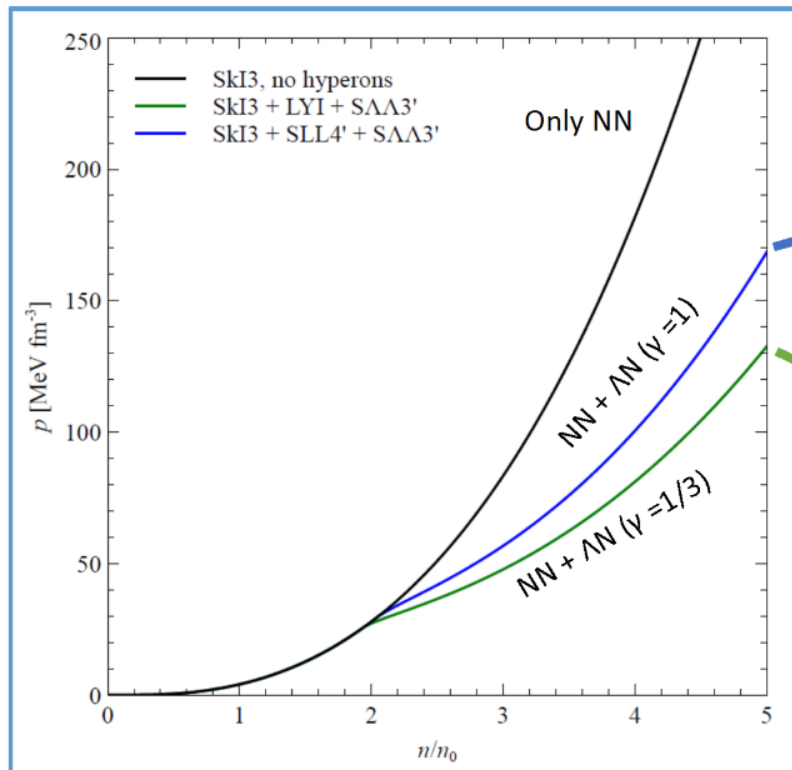


Скорость звука



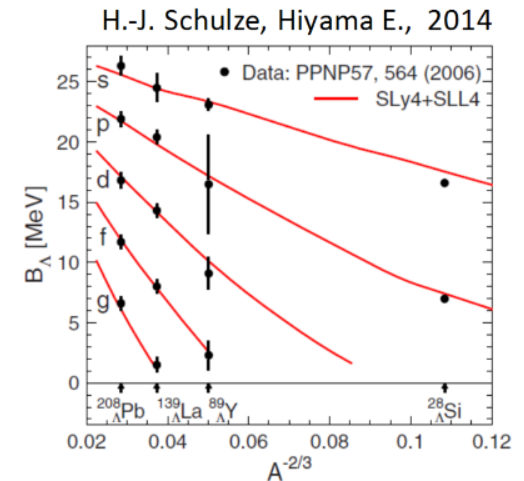
Hyperon puzzle

Уравнение состояния материи нейтронных звёзд

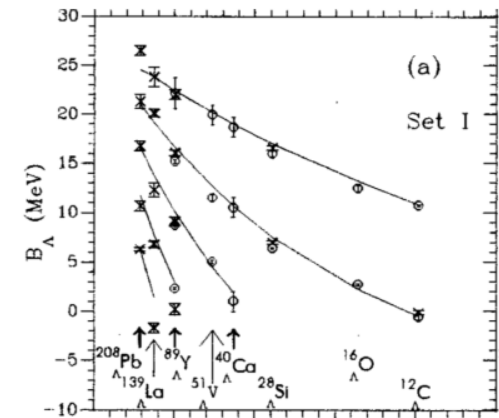


SLL4'

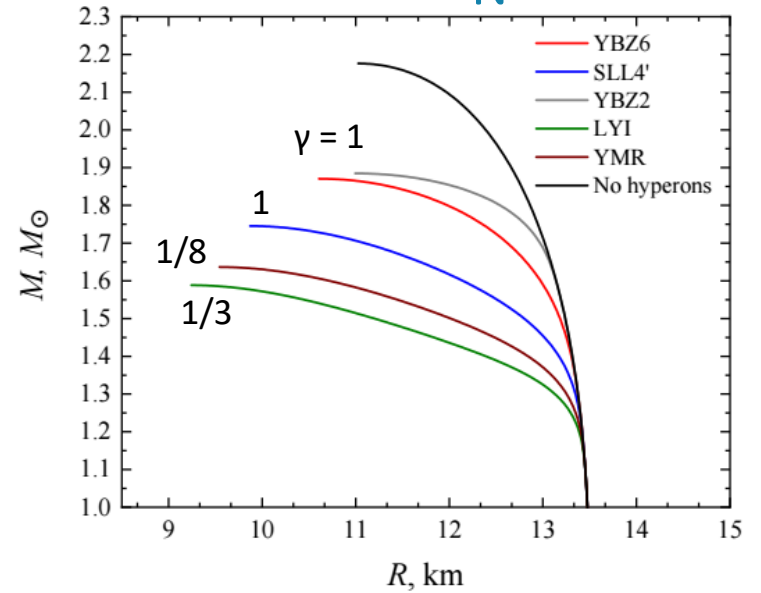
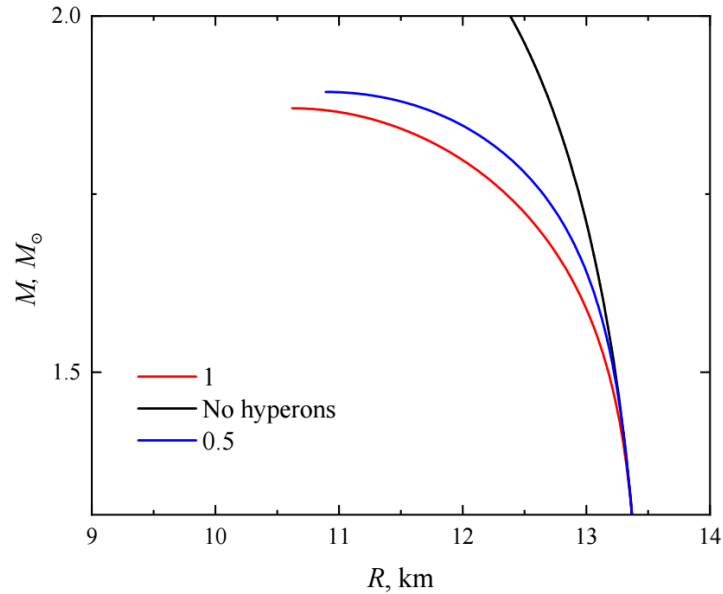
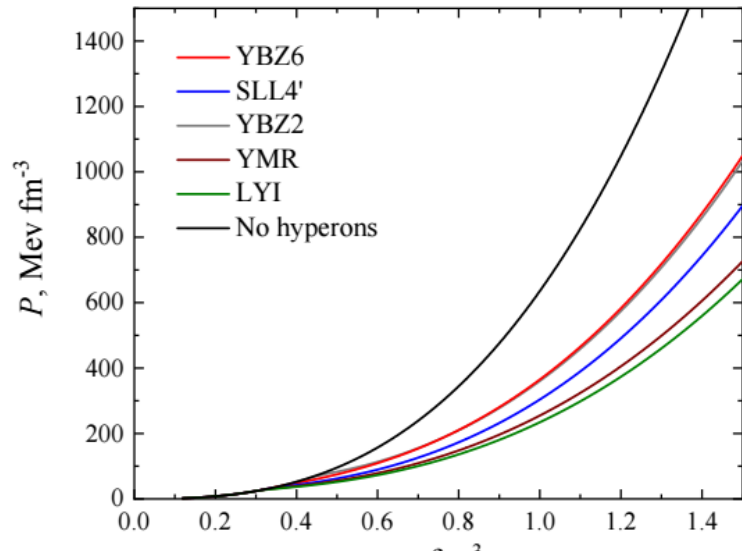
LYI



D. E. Lancsok, Yamamoto Y., 1997



Зависимость от плотности ρ_N

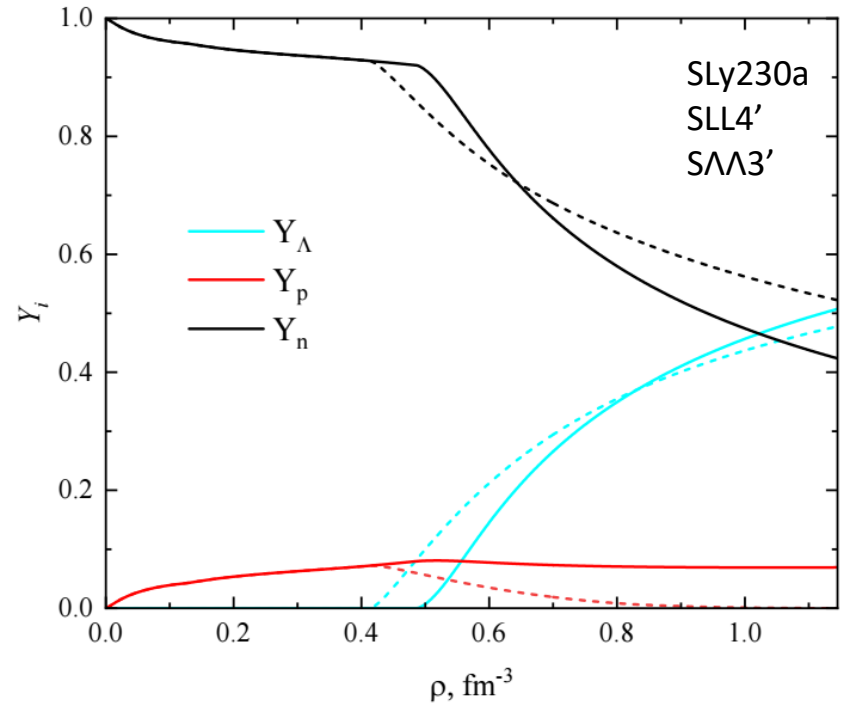
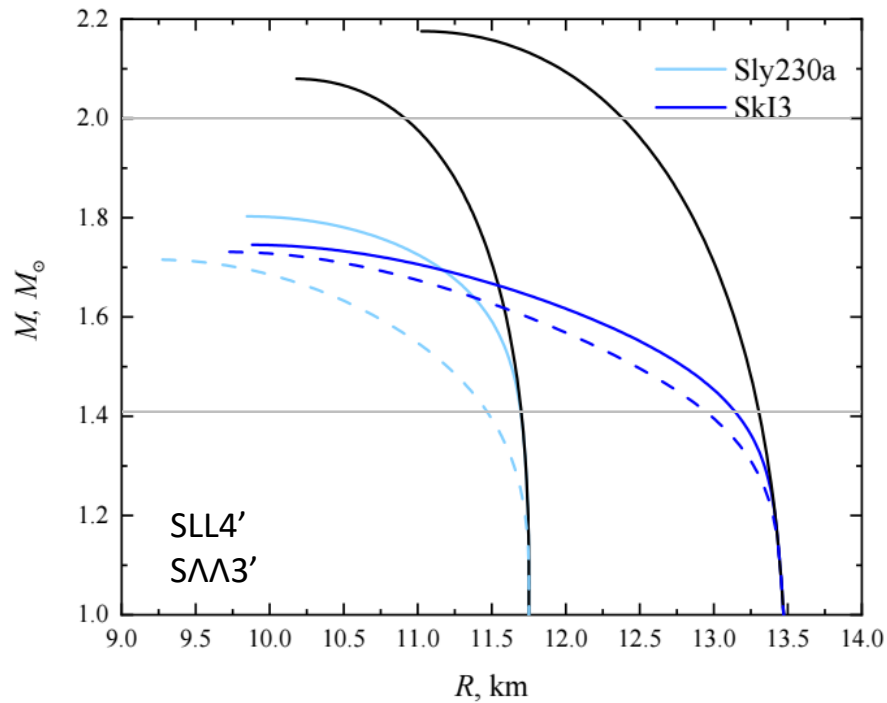


$$D_{\Lambda}(\rho_0) = 29,65 \text{ MeV}$$

YBZ6

γ	$u_0, \text{MeV fm}^3$	$u_1, \text{MeV fm}^5$	$u_2, \text{MeV fm}^5$	$u_3, \text{MeV fm}^{3+3\gamma}$
1	-352,29	100.40	79.60	2000
0.5	-604,55	100.40	79.60	2487.32

Тройные Λ NN-силы (или) Λ N-силы, зависящие от нуклонной плотности



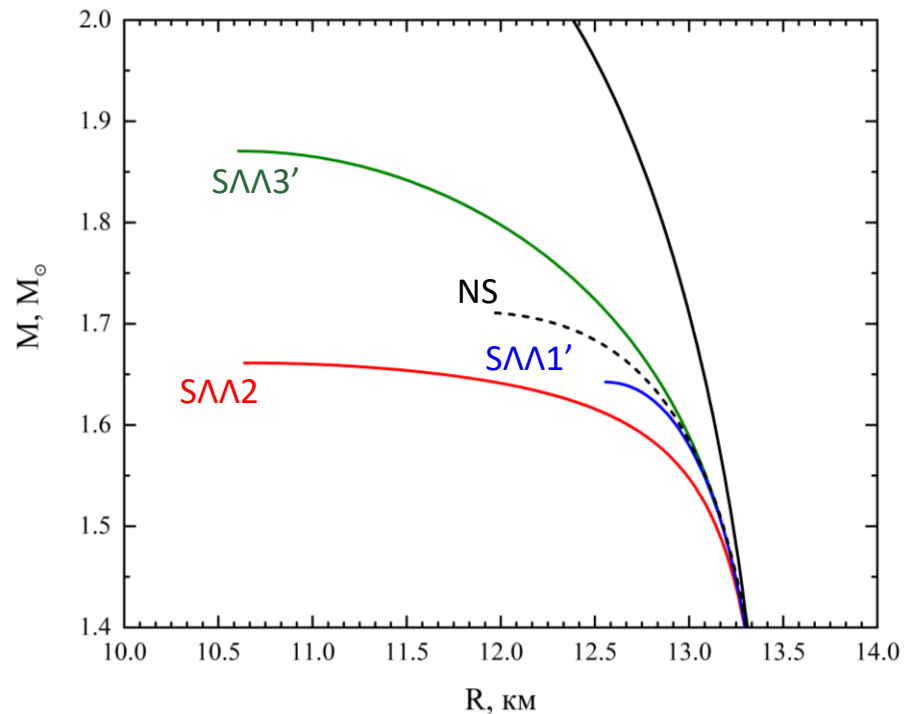
--- Λ NN
— Λ N(ρ_N)

Λ – взаимодействие

$S\Lambda\Lambda 1'$, $S\Lambda\Lambda 2$, $S\Lambda\Lambda 3'$
(без зависимости от плотности)

$\Lambda\Lambda$	Радиус взаимодействия
$S\Lambda\Lambda 1'$	Малый
$S\Lambda\Lambda 2$	Средний
$S\Lambda\Lambda 3'$	Большой

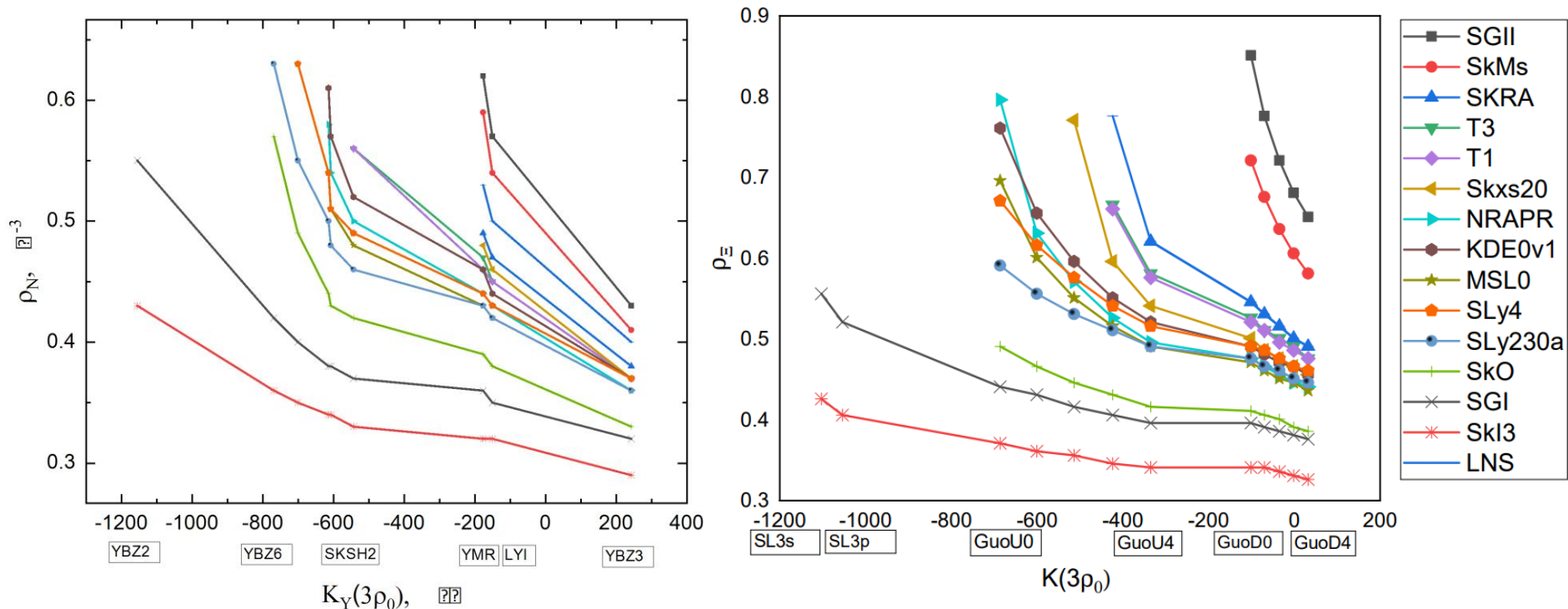
NS
(зависимость от плотности)
(Lanskoy, Yamamoto 1997,
Михеев и др. 2025)



Точка появления гиперонов

Сжимающая способность гиперон-нуклонного взаимодействия (Ланской, Третьякова 1989)

$$K_Y(\rho_N) = 3\rho_N \frac{dD_Y}{d\rho_N}$$



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках подхода с силами Скирма рассмотрена зависимость характеристик нейтронных звезд от свойств барионных взаимодействий.

Анализ уравнения состояния материи показал, что при высоких плотностях форма зависящего от плотности члена ΛN сил не является определяющей.

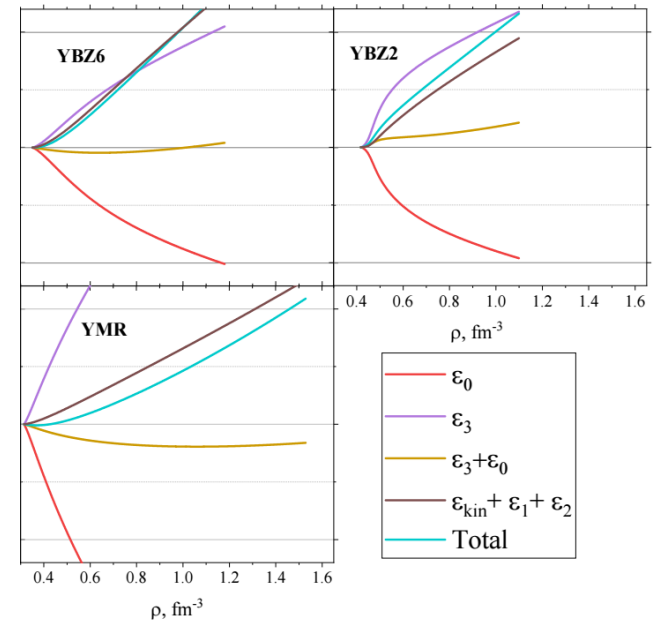
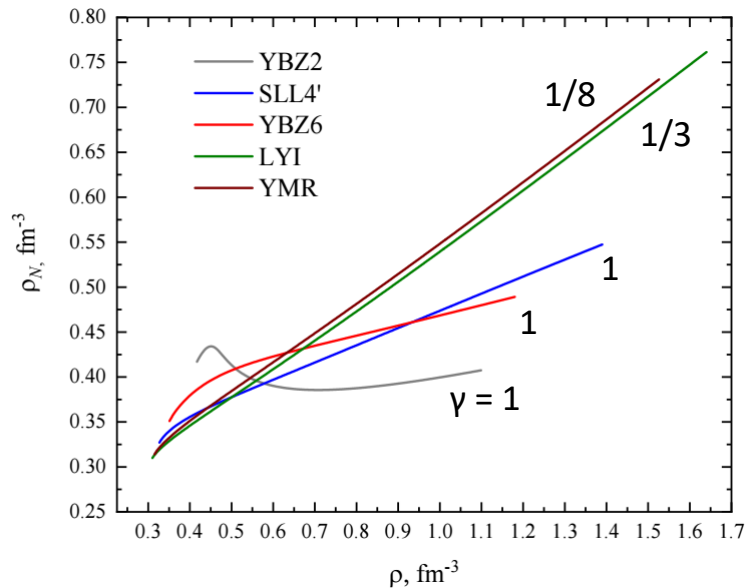
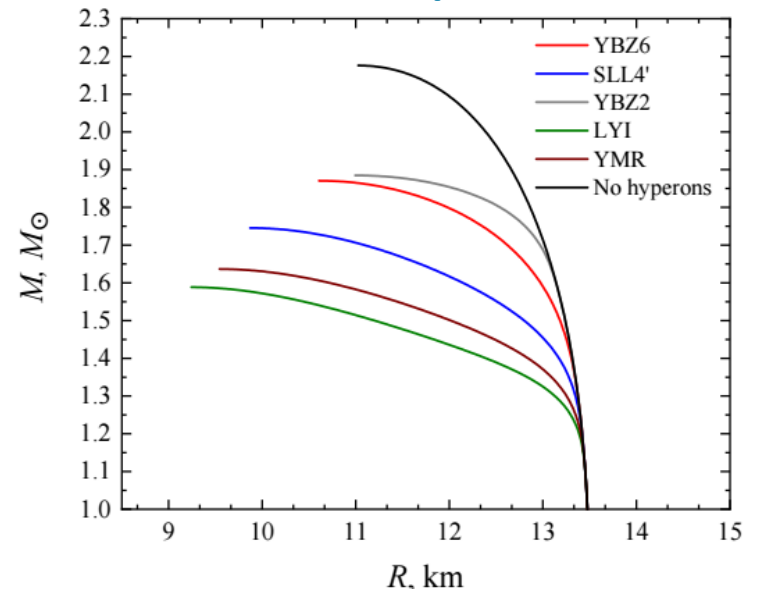
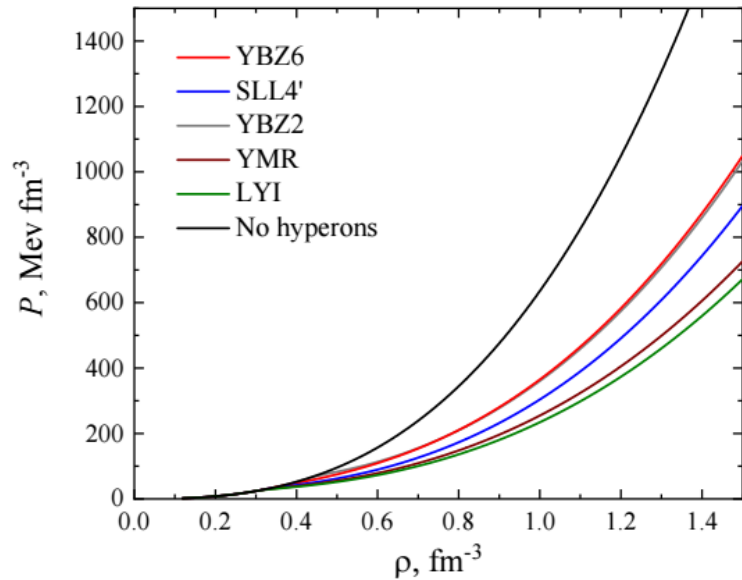
Вклад ΛNN не эквивалентен вкладу ΛN сил с зависимостью от ρ_N , при определенных условиях возможно появление $n\Lambda$ -материи.

Рассмотрены факторы, влияющие на появление Λ и Ξ гиперонов в материи нейтронных звезд и показано, что наиболее важной характеристикой YN -сил является его сжимающая способность. Показаны различные сценарии появления гиперонов в материи нейтронных звезд.

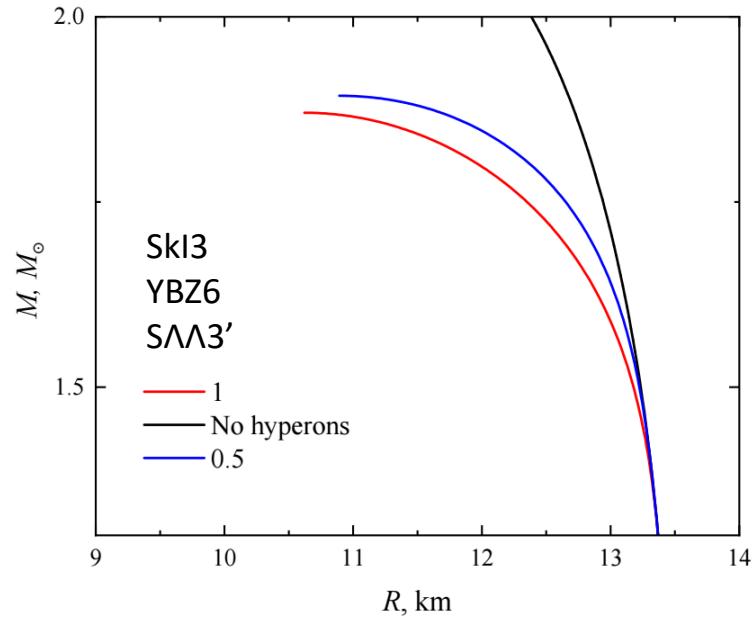
СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

Back-up

Зависимость от плотности ρ_N



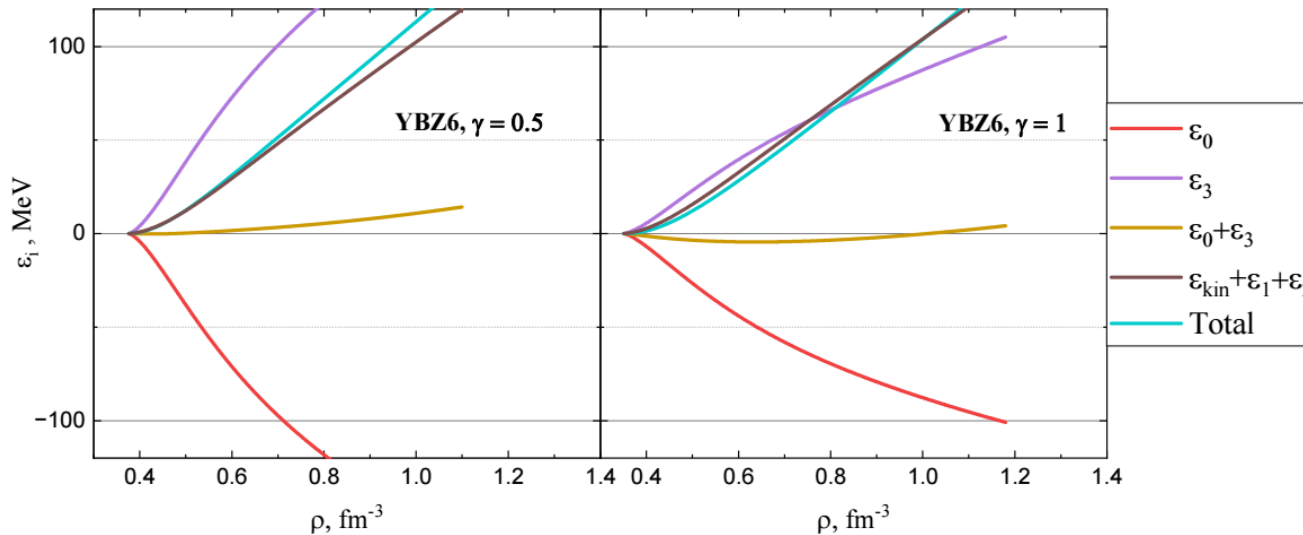
Зависимость от плотности ρ_N



$$D_\Lambda(\rho_0) = 30 \text{ MeV}$$

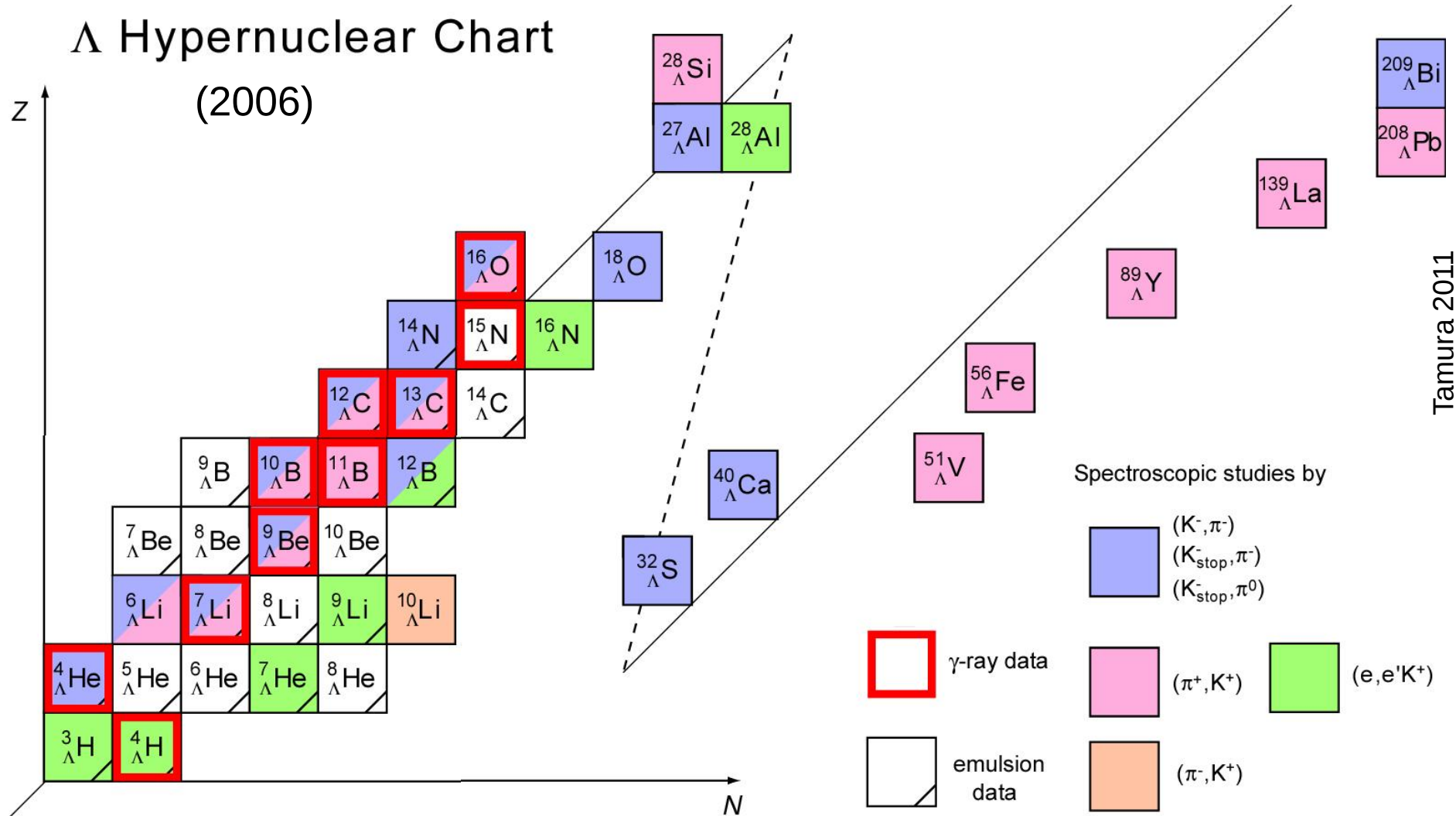
YBZ6

γ	$u_0, \text{ MeV fm}^3$	$u_1, \text{ MeV fm}^5$	$u_2, \text{ MeV fm}^5$	$u_3, \text{ MeV fm}^{3+3\gamma}$
1	-352,29	100.40	79.60	2000
0.5	-604,55	100.40	79.60	2487.32



Λ-гиперядра

Λ Hypernuclear Chart
(2006)



Updated from: O. Hashimoto and H. Tamura, Prog. Part. Nucl. Phys. 57 (2006) 564.

Tamura 2011

Барионная материя в нейтронных звездах

Полная энергия и плотность энергии

$$E = \langle \phi | T + V | \phi \rangle = \sum_i \langle i | T_i | i \rangle + \frac{1}{2} \sum_{i,j} \langle ij | V_{ij} | ij \rangle + \frac{1}{6} \sum_{i,j,k} \langle ijk | V_{ijk} | ijk \rangle = \int H dr$$

Энергия на нуклон $\varepsilon(Y_p, n) = \frac{E}{A} = \frac{H}{n} :$

Давление $p = n^2 \frac{d\varepsilon}{dn}$

Химическое равновесие

$$\nu_\ell + n \rightleftharpoons p + \ell^-,$$

$$\bar{\nu}_\ell + p \rightleftharpoons n + \ell^+,$$

$$n + n \rightleftharpoons n + \Lambda$$

$$\mu_i = \frac{\partial H}{\partial n_i} \quad i = n, p, \Lambda$$

$$\mu_e = \sqrt{m_e^2 + (3\pi^2 Y_e n)^{2/3}}$$

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

$$\mu_\mu = \sqrt{m_\mu^2 + (3\pi^2 Y_\mu n)^{2/3}}$$

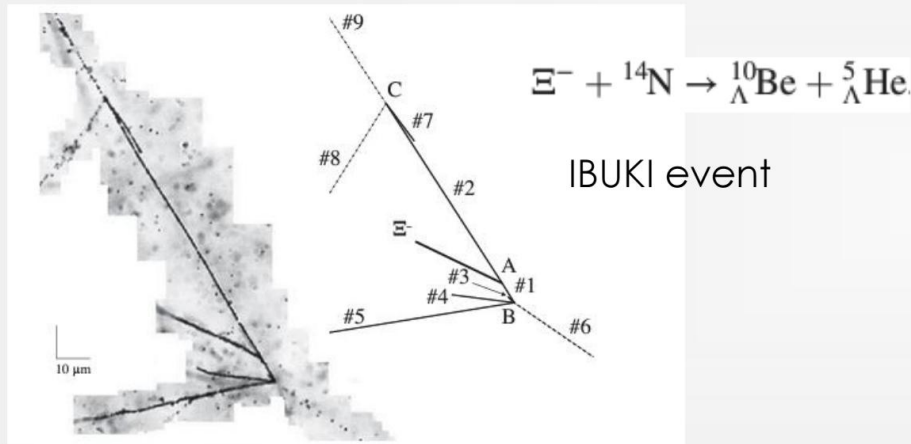
Гиперядра с двойной странностью

Ξ^- -Nuclear Bound States

KEK E373 and J-PARC E07 experiments

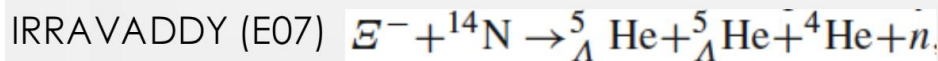
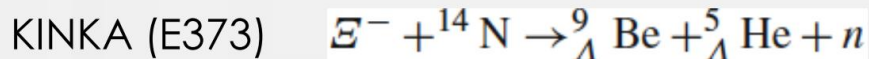
Coulomb-Assisted Ξ^- - ^{14}N $1p_{\Xi^-}$ nuclear bound state

Hayakawa (J-PARC E07), PRL (2021)



IBUKI event

Yoshimoto, PTEP (2021)



$\rightarrow 1s_{\Xi^-}$ nuclear state

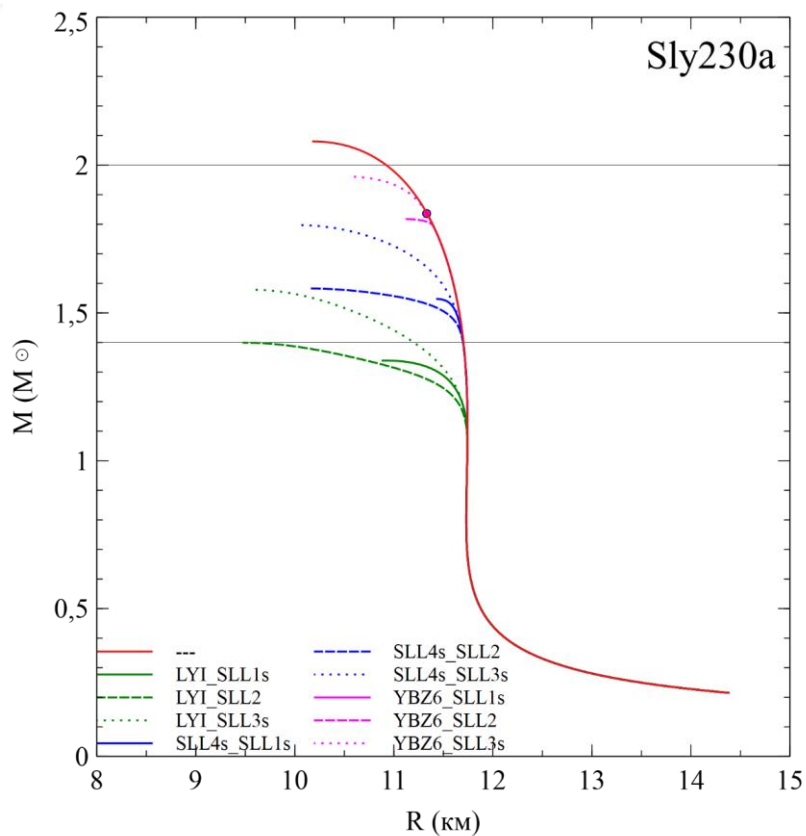
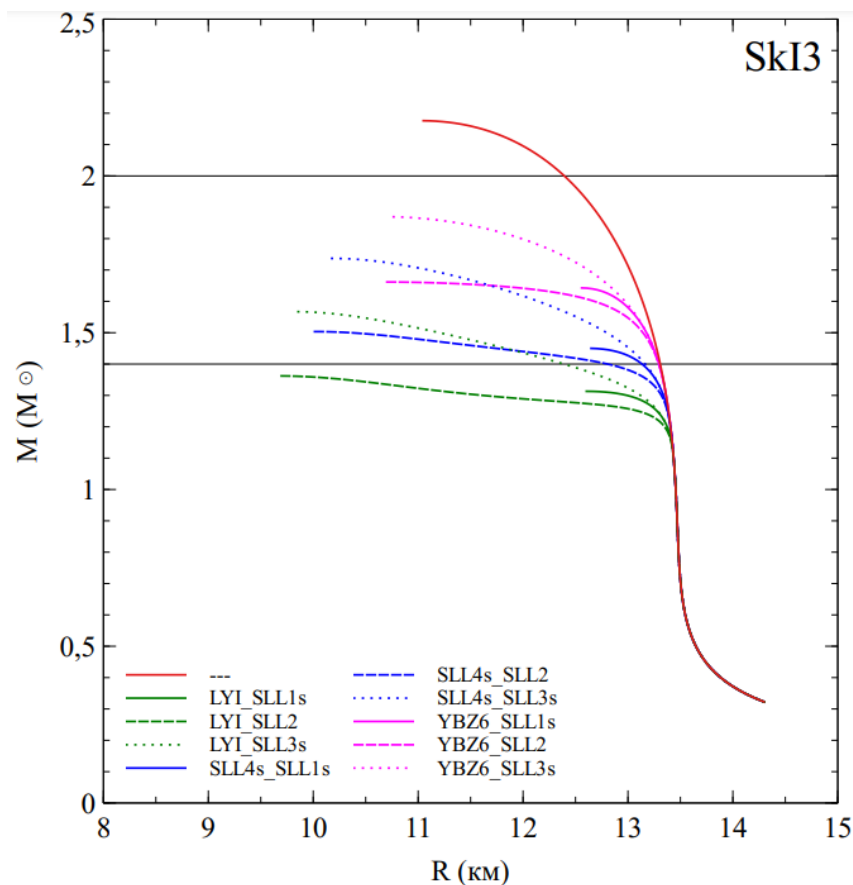
Ramos 2022

- All five twin- Λ two-body capture events: $V_{\Xi}(\rho_0) = 24.3 \pm 0.8$ MeV, down to 21.9 ± 0.7 MeV with Pauli correlations.
- KEK-E224 & BNL-E885: $V_{\Xi}(\rho_0) \approx 16 \pm 2$ MeV.
- BNL-E906: $V_{\Xi}(\rho_0) = 17 \pm 6$ MeV (recent HH).
- EFT & LQCD suggest $V_{\Xi}(\rho_0) \leq 10$ MeV.
- SHF using E07 ^{14}N input: $V_{\Xi} \approx 14 \pm 1$ MeV, with attractive ΞN & repulsive ΞNN terms.

E. Friedman, A. Gal, (2021)

Адронная материя в нейтронных звездах

Характеристики нейтронных звезд для различных параметризаций ΛN и Λ сил



Приливная деформируемость

Коэффициент приливной деформируемости --- коэффициент пропорциональности между внешним гравитационным полем и квадрупольным моментом самой звезды:

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

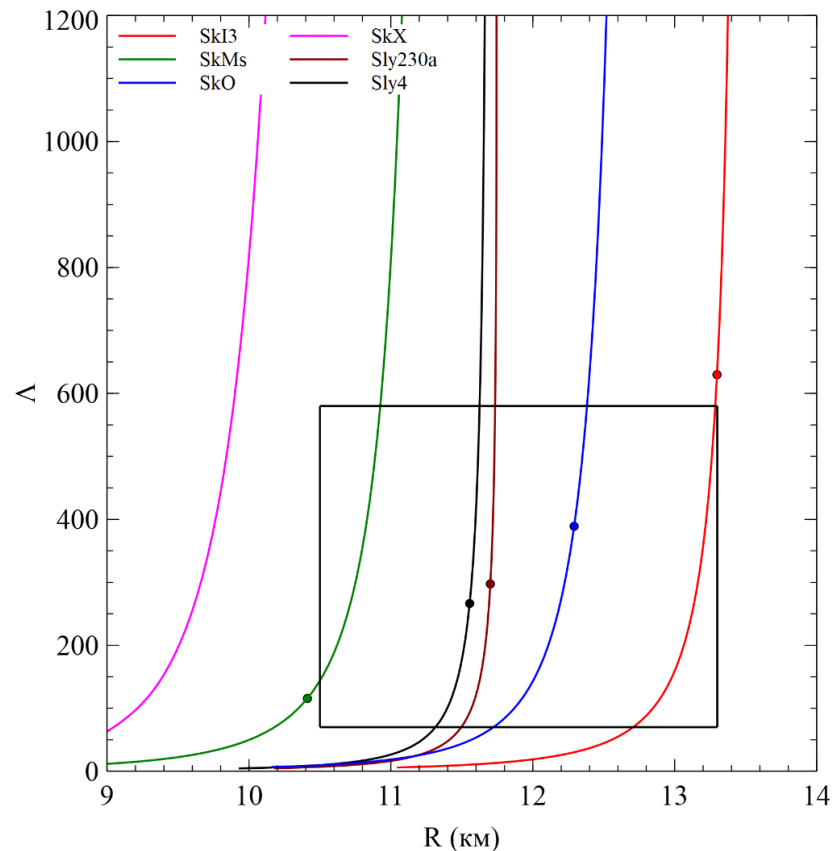
Приливные деформации удобнее описывать при помощи безразмерного коэффициента:

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

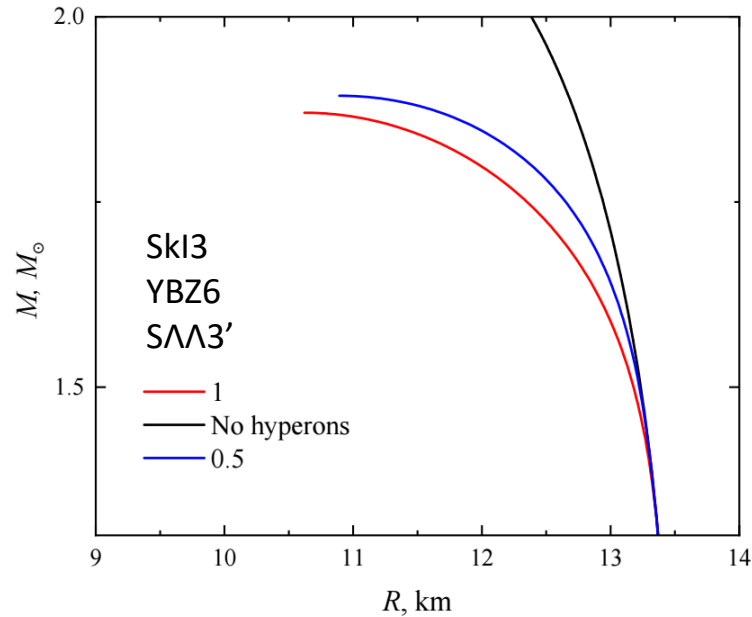
GW170817

$$m_1 = 1.4M_{\odot} \rightarrow \Lambda = 70 - 580$$
$$R = 10.5 - 13.3 \text{ км} [1,2,3]$$

Abbott et al. (LIGO Sci. and Virgo Coll.), PRL 2017
Abbott et al. (LIGO Sci. and Virgo Coll.), PRL 2018
Abbott et al. (LIGO Sci. and Virgo Coll.), PRX 2019



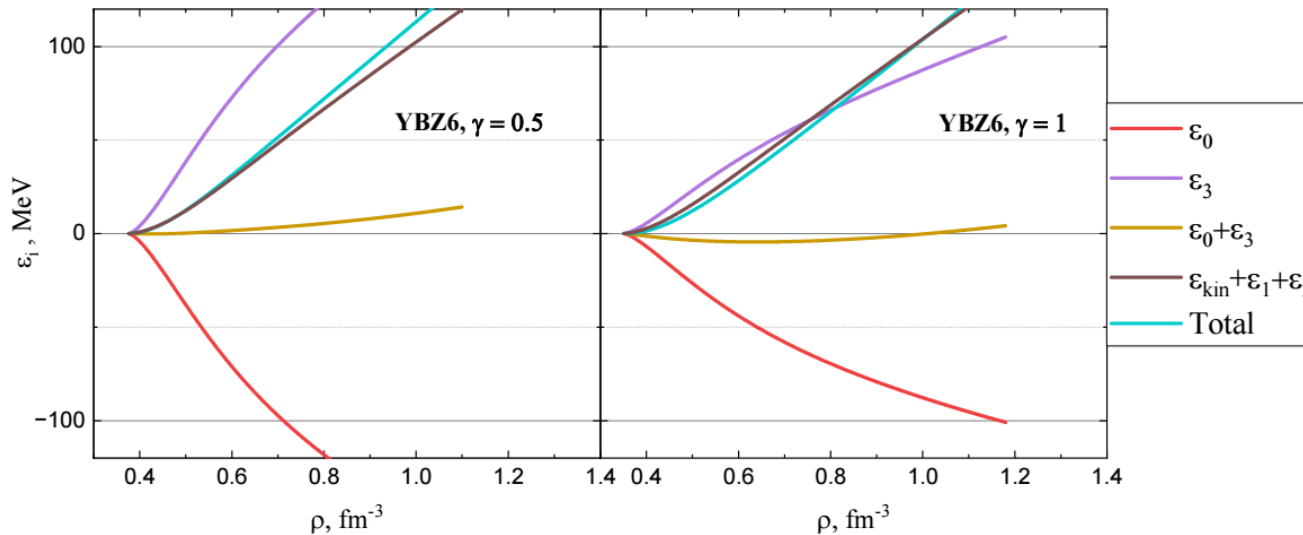
Зависимость от плотности ρ_N



$$D_\Lambda(\rho_0) = 30 \text{ MeV}$$

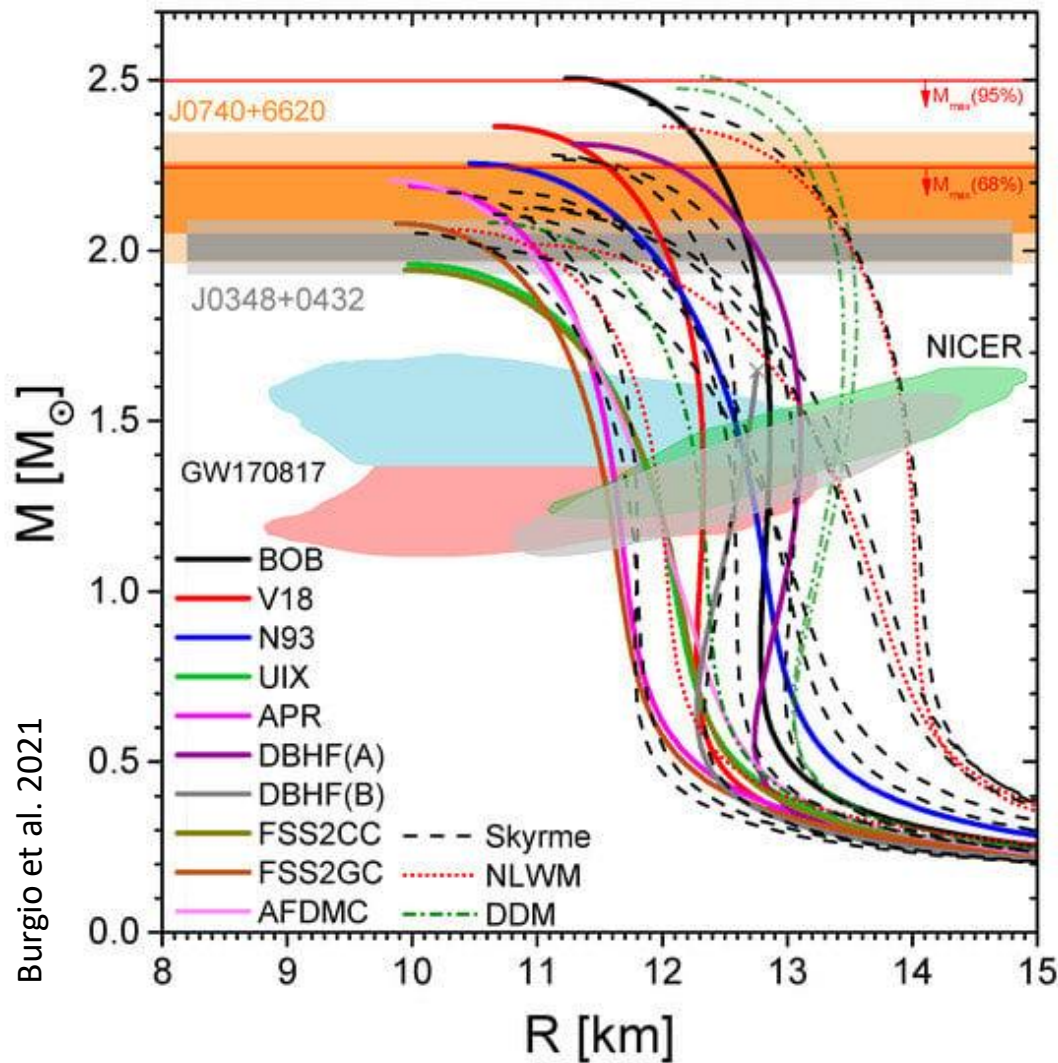
YBZ6

γ	$u_0, \text{ MeV fm}^3$	$u_1, \text{ MeV fm}^5$	$u_2, \text{ MeV fm}^5$	$u_3, \text{ MeV fm}^{3+3\gamma}$
1	-352,29	100.40	79.60	2000
0.5	-604,55	100.40	79.60	2487.32



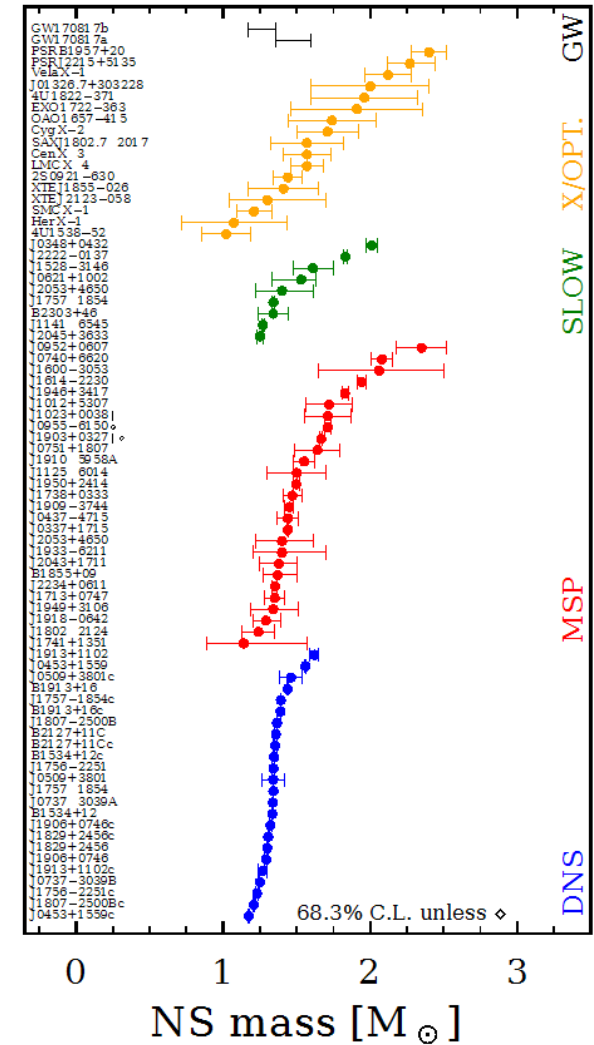
Нейтронные звезды

Массы / радиусы



Burgio et al. 2021

Массы



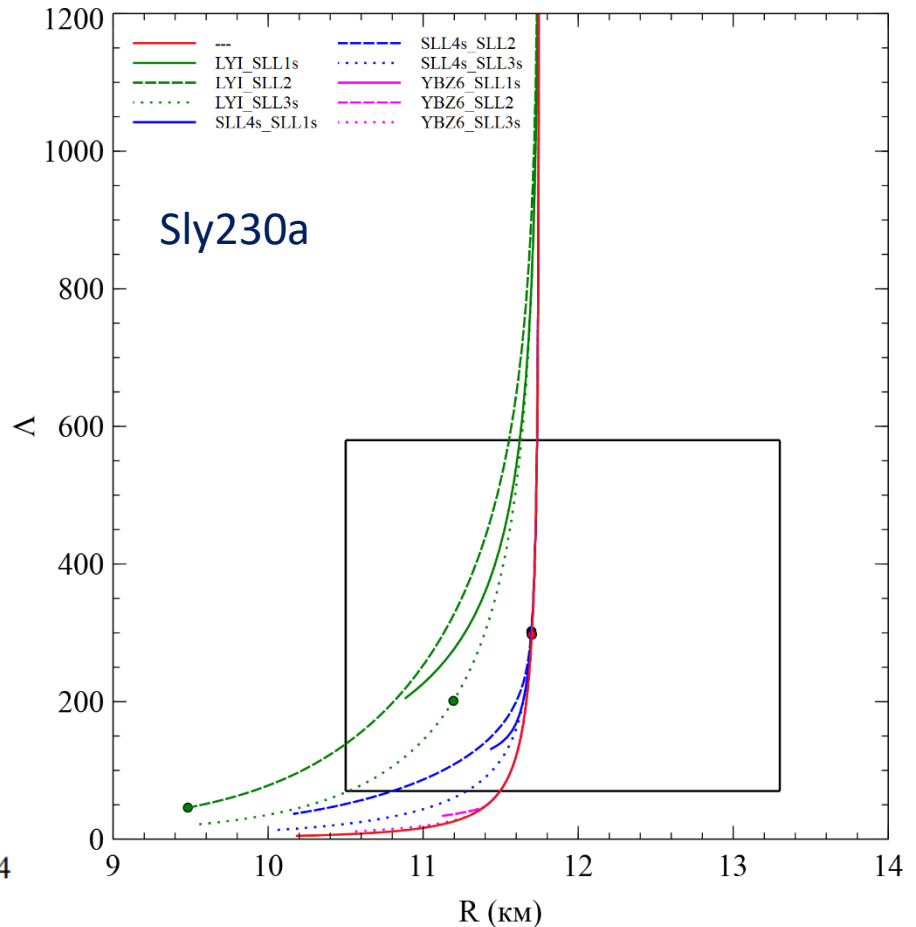
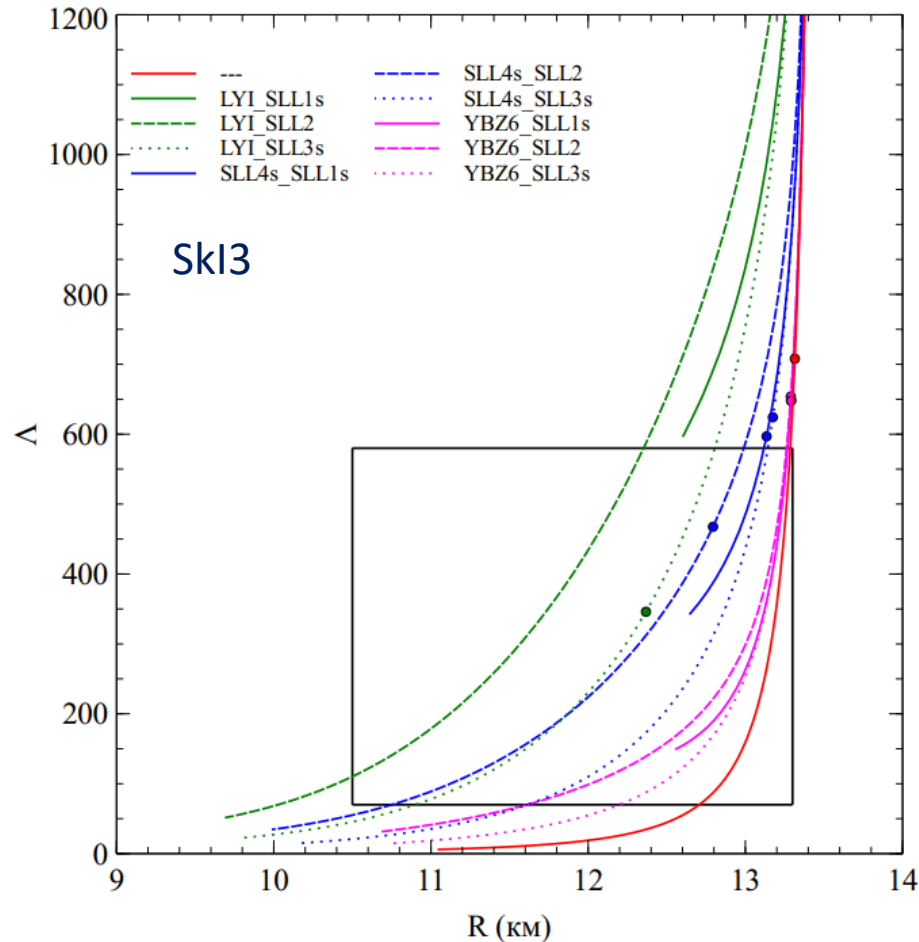
Suleiman et al 2021

Рассчитанные параметры нейтронных звезд

ΛN и $\Lambda\Lambda$	$R_{1.4}$	$\Lambda_{1.4}$	M_{max}	R_{max}
---	13.3	708	2.18	11.0
LYI_SLL1s	-	-	1.31	12.6
LYI_SLL2	-	-	1.36	9.7
LYI_SLL3s	12.4	346	1.57	9.8
SLL4s_SLL1s	13.1	597	1.45	12.6
SLL4s_SLL2	12.8	468	1.50	9.9
SLL4s_SLL3s	13.2	624	1.74	10.1
YBZ6_SLL1s	13.3	648	1.64	12.6
YBZ6_SLL2	13.3	654	1.66	10.7
YBZ6_SLL3s	13.3	649	1.87	10.7

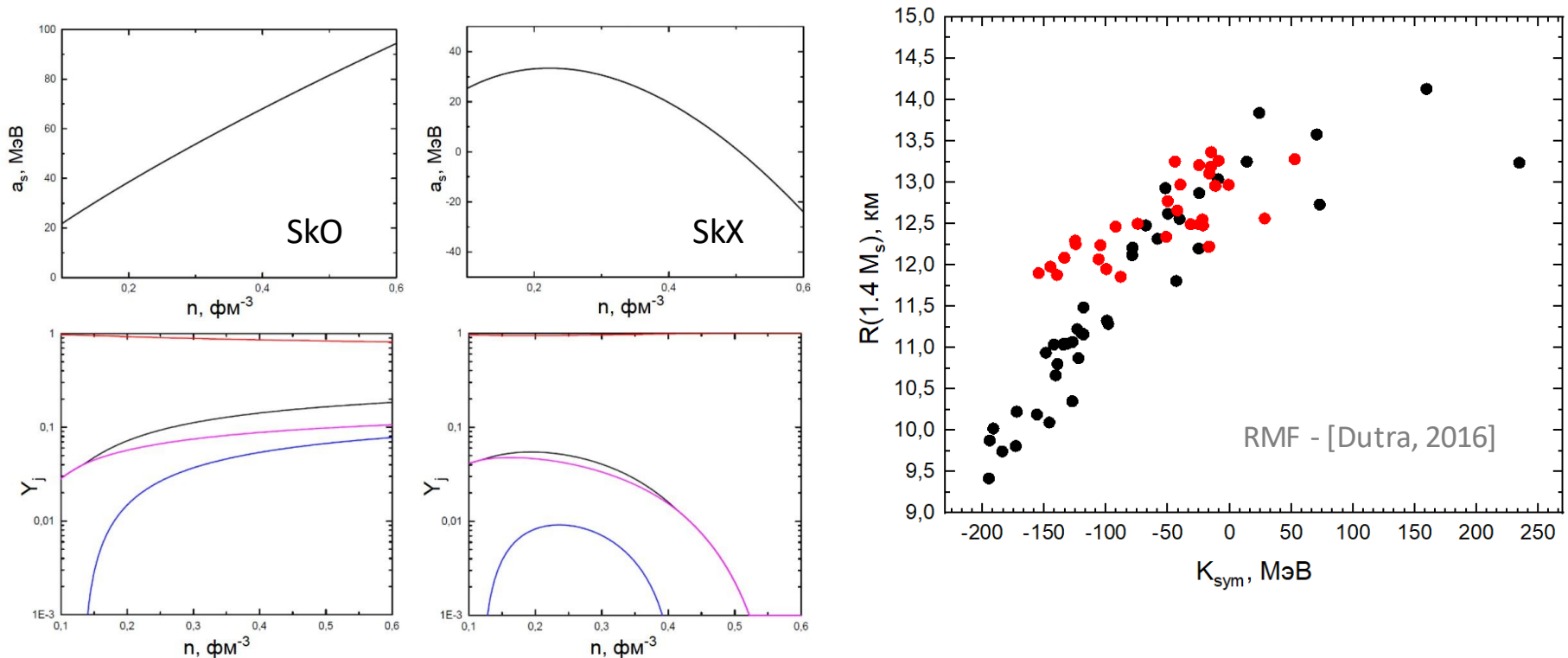
Адронная материя в нейтронных звездах

Зависимость приливной деформируемости от радиуса звезды для материи включающей гипероны



Адронная материя в нейтронных звездах

Влияние энергии симметрии



Наиболее сильные корреляции наблюдаются между характеристиками нейтронных звёзд и характеристиками материи, зависящими от изоспиновой асимметрии (L и K_{sym}). Существенно меньшие корреляции для несжимаемости K_{inf} .

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СКИРМА

$$\begin{aligned} V(\vec{r}_\Lambda, \vec{r}_N) &= t_0(1 + x_0 P_\sigma) \delta(\vec{r}) \\ &+ \frac{1}{2} t_1(1 + x_1 P_\sigma) [\vec{P}'^2 \delta(\vec{r}) + \delta(\vec{r}) \vec{P}^2] \\ &+ t_2 \vec{P}' \delta(\vec{r}) \vec{P} + V_3 \\ &+ i W_0 \vec{\sigma} [\vec{P}' \times \delta(\vec{r}) \vec{P}] \\ &= V_0 + V_1 + V_2 + V_3 + V_4, \end{aligned}$$

$$\vec{r} = \vec{r}_\Lambda - \vec{r}_N, \vec{P} = \frac{1}{2i}(\nabla_1 - \nabla_2)$$

Тройные силы и зависимость от плотности

$$\begin{aligned} V_3 &= V_{\Lambda NN}(\vec{r}_\Lambda, \vec{r}_{N1}, \vec{r}_{N2}) = t_3 \delta(\vec{r}_\Lambda - \vec{r}_{N1}) \delta(\vec{r}_\Lambda - \vec{r}_{N2}) \\ V_3 &= V_{\Lambda N}(\vec{r}_\Lambda, \vec{r}_N, \rho) = \frac{3}{8} t_3 (1 + x_3 P_\sigma) \delta(\vec{r}_\Lambda - \vec{r}_N) \rho^\gamma \left(\frac{\vec{r}_\Lambda + \vec{r}_N}{2} \right) \end{aligned}$$

Точка появления гиперонов

Обозначим энергию связи гиперона в чисто нуклонной материи:

$$D_Y \equiv -\mu_Y$$

Условие появления Λ -гиперонов:

$$m_\Lambda + \mu_\Lambda = m_n + \mu_n$$

Критическая энергия гиперона:

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

$$D_{\Xi^-}^{cr} = m_{\Xi^-} + m_p + \mu_p - 2m_n - 2\mu_n$$

Условие появления Ξ^- -гиперонов:

$$m_{\Xi^-} + \mu_{\Xi^-} + m_p + \mu_p = 2\mu_n + 2m_n$$

Таким образом условие появления гиперонов:

$$D_Y = D_Y^{cr}$$