

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени М.В. ЛОМОНОСОВА

Физический факультет

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына

# Свойства $\Lambda N$ - и $\Lambda\Lambda$ -взаимодействий и характеристики нейтронных звёзд

**С.А. Михеев**

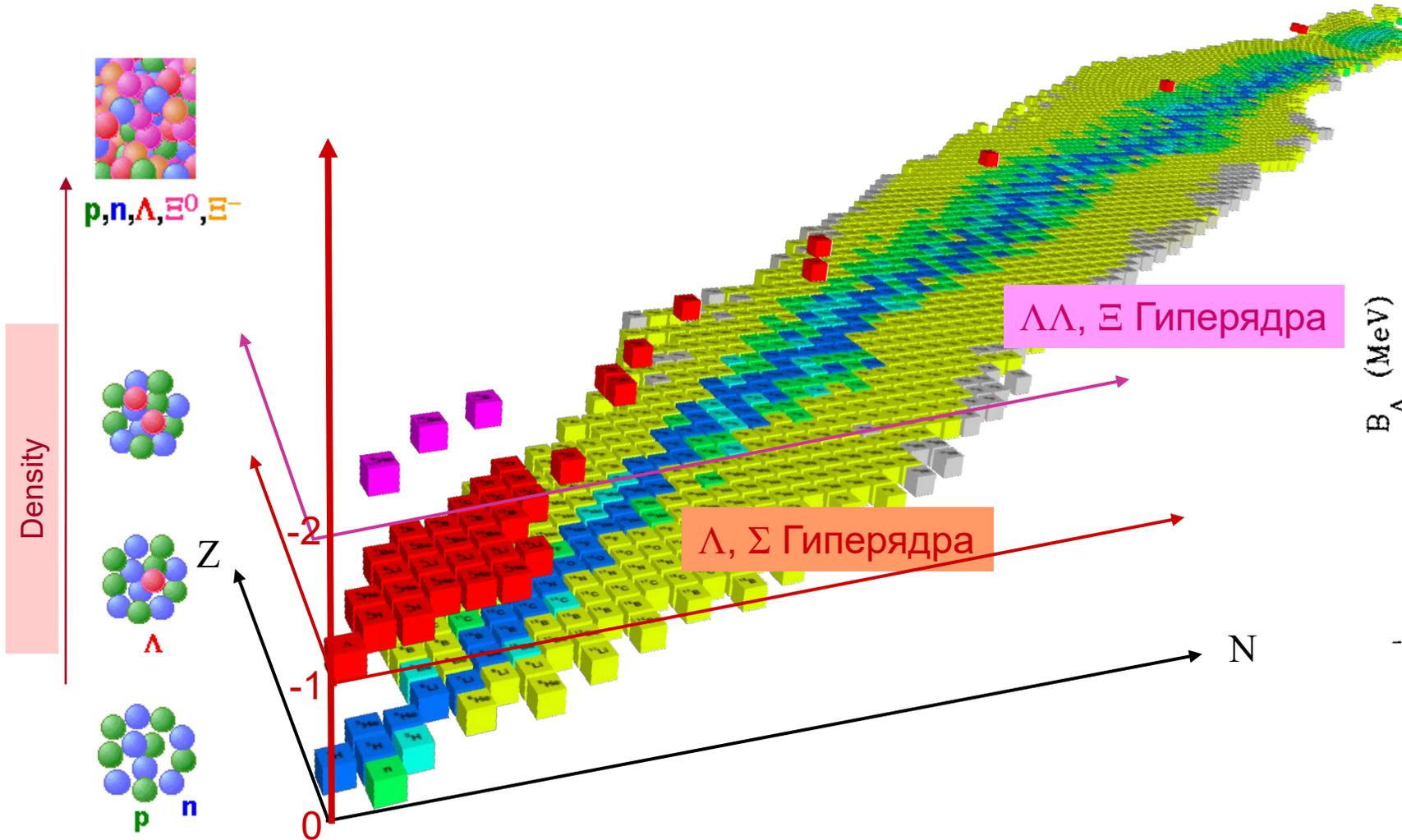
*По материалам кандидатской диссертации*

Специальность 1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий

Научный руководитель: к.ф.-м.н. Третьякова Татьяна Юрьевна

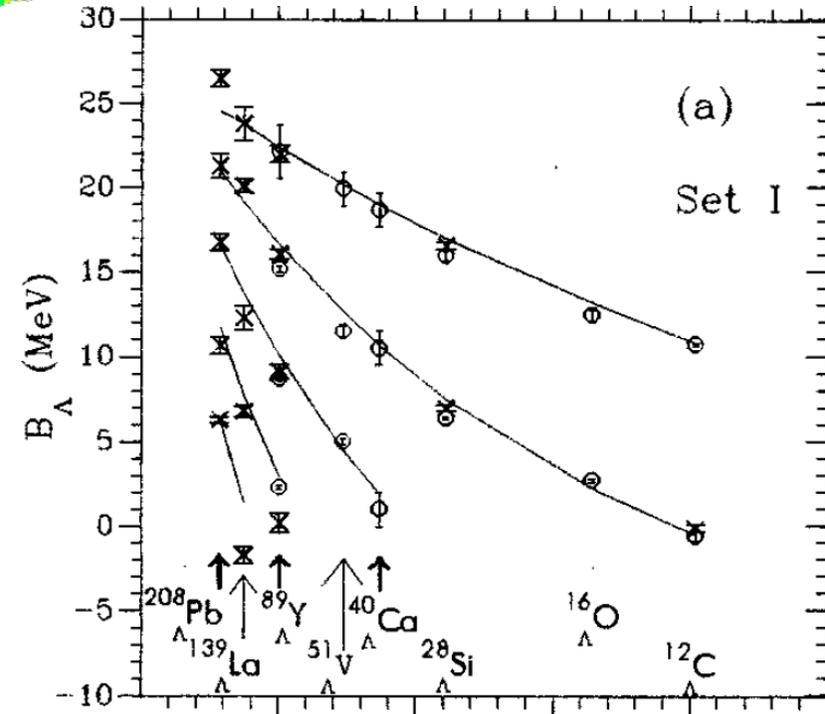
**Москва, 29.01.2026**

# Актуальность. Гиперонные взаимодействия



## Энергия связи Λ-гиперона

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



Энергия связи гиперона в чисто нуклонной материи

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

# Актуальность. Нейтронные звёзды

- **Нейтронные звёзды** – 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:  $R \sim 10 - 12$  км
  - Плотность:  $\rho \sim 10^{14} - 10^{15}$  г/см<sup>3</sup>
- В основном наблюдаются как радиопульсары (известно  $> 2500$ )
- Массы измеряются для звёзд в двойных системах (10%)
- Верхняя граница для массы нейтронной звезды должна быть  $M > 2M_{\odot}$ 
  - 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:  $M = 2.027 \pm 0.067 M_{\odot}$  ;  $R = 12.39 \pm 1.14$  км [Riley et al. 2021]

# Актуальность

- Существующая на сегодняшний день информация о  $\Lambda$  гиперонных взаимодействиях основана на исследовании  $\Lambda$ -гиперядер, существующих при нормальной ядерной плотности
- Нейтронные звёзды представляют собой системы с экстремально большими плотностями, материя которых включает в том числе и  $\Lambda$ -гипероны
- Исследование свойств гиперонных взаимодействий в экстремальных условиях необходимо для лучшего понимания свойств этих взаимодействий и важно для физики тяжёлых ионов (RHIC, NICA)

# Цели работы

Исследование влияния свойств гиперонных взаимодействий на характеристики нейтронных звёзд:

- Изучение корреляций между плотностью, при которой в материи нейтронных звёзд появляются  $\Lambda$ -гипероны, и характеристиками  $\Lambda N$ -взаимодействия
- Исследование роли гиперон-нуклонных  $\Lambda N$ -сил и гиперон-гиперонных  $\Lambda\Lambda$ -сил, зависящих от нуклонной плотности, при описании нейтронных звёзд
- Изучение различий между трёхчастичными  $\Lambda NN$  силами и  $\Lambda N$ -силами, зависящими от нуклонной плотности, применительно к материи нейтронных звёзд
- Исследование влияния эффекта нарушения зарядовой симметрии в  $\Lambda N$ -взаимодействии на характеристики нейтронных звёзд

# Взаимодействие Скирма

## $\Lambda N$ -взаимодействие

$$\begin{aligned}
 V_{\Lambda N}(\vec{r}_\Lambda, \vec{r}_N) &= u_0(1 + \xi_0 P_\sigma) \delta(\vec{r}_\Lambda - \vec{r}_N) \\
 &+ \frac{1}{2} u_1(1 + \xi_1 P_\sigma) [\vec{P}'^2 \delta(\vec{r}_\Lambda - \vec{r}_N) + \delta(\vec{r}_\Lambda - \vec{r}_N) \vec{P}^2] \\
 &+ u_2(1 + \xi_2 P_\sigma) \vec{P}' \delta(\vec{r}_\Lambda - \vec{r}_N) \vec{P} \\
 &+ iW_0^\Lambda \vec{P}' \delta(\vec{r}_\Lambda - \vec{r}_N) [\vec{\sigma} \times \vec{P}]
 \end{aligned}$$

Параметры $\Lambda N$ -взаимодействия	$\gamma$
<b>YBZ6</b>	<b>1</b>
<b>YBZ2</b>	<b>1</b>
<b>SLL4'</b>	<b>1</b>
<b>LYI</b>	<b>1/3</b>
<b>YMR</b>	<b>1/8</b>

## Трёхчастичные силы

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

## Зависимость от плотности

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

## $\Lambda\Lambda$ -взаимодействие

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

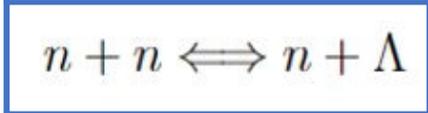
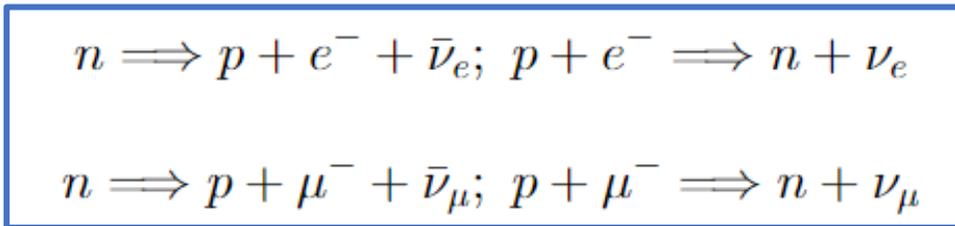
## $\Lambda\Lambda$ -взаимодействие с зависимостью от плотности

$$V_{\Lambda\Lambda} = \sum_1^3 (a_i + b_i k_F + c_i k_F^2) e^{-\frac{r^2}{\beta_i^2}}$$

# 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

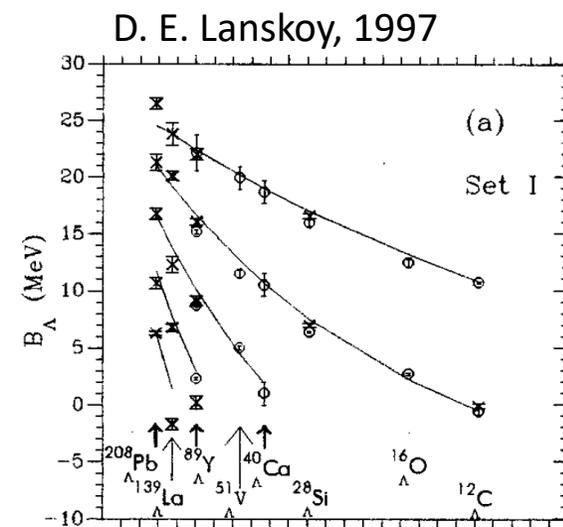
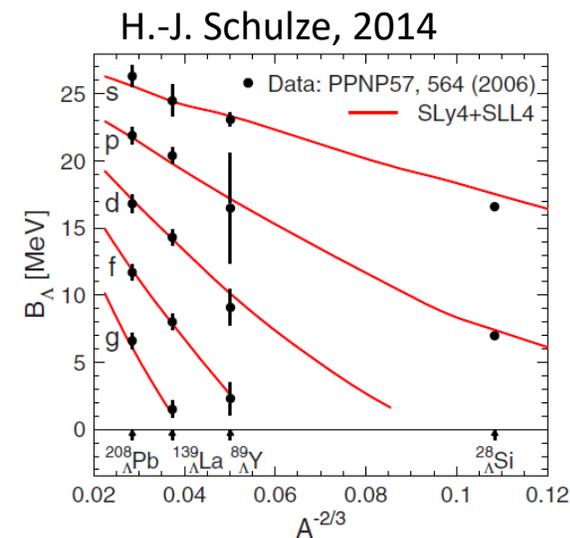
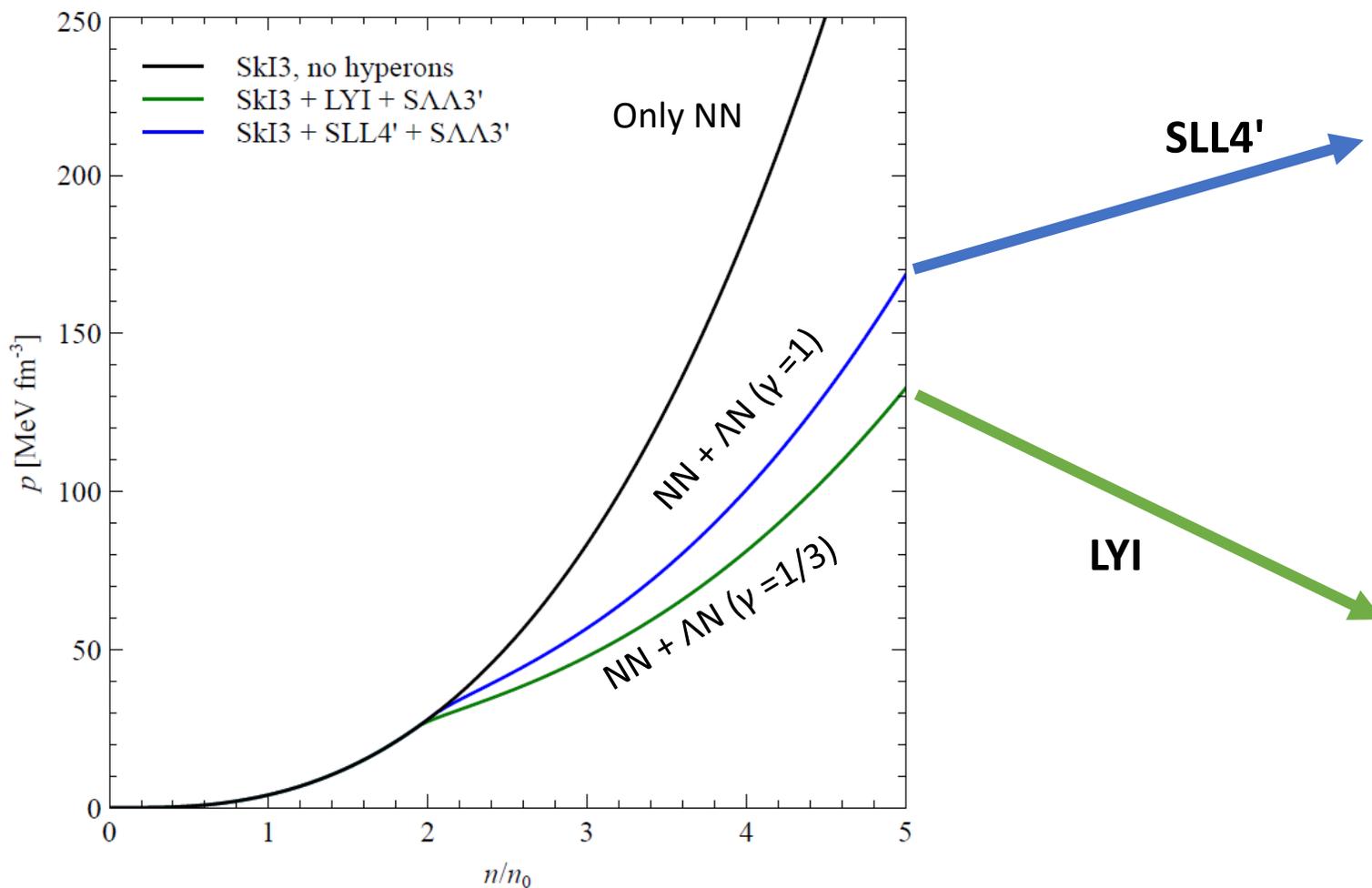
$$\frac{dP}{dr} = \frac{G [\rho(r) + P(r)/c^2][m(r) + (4\pi r^3 P(r)/c^2)]}{r^2 [1 - (2Gm(r)/rc^2)]}$$
$$\frac{dm}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r)$$

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

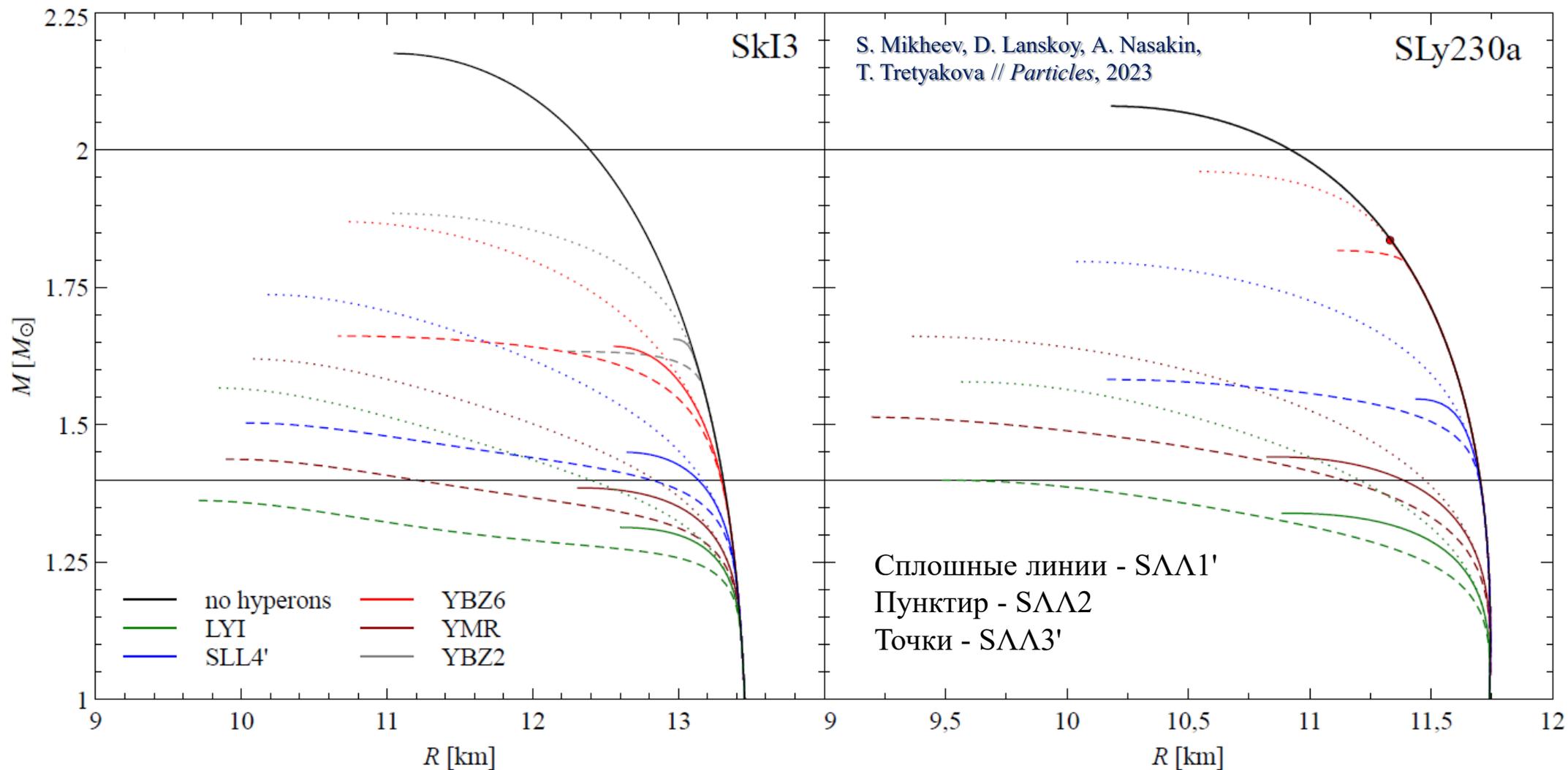
$\rho(0) \longrightarrow M, R$   
Последовательность  $\rho(0) \longrightarrow M(R)$

# Уравнение состояния материи нейтронных звёзд

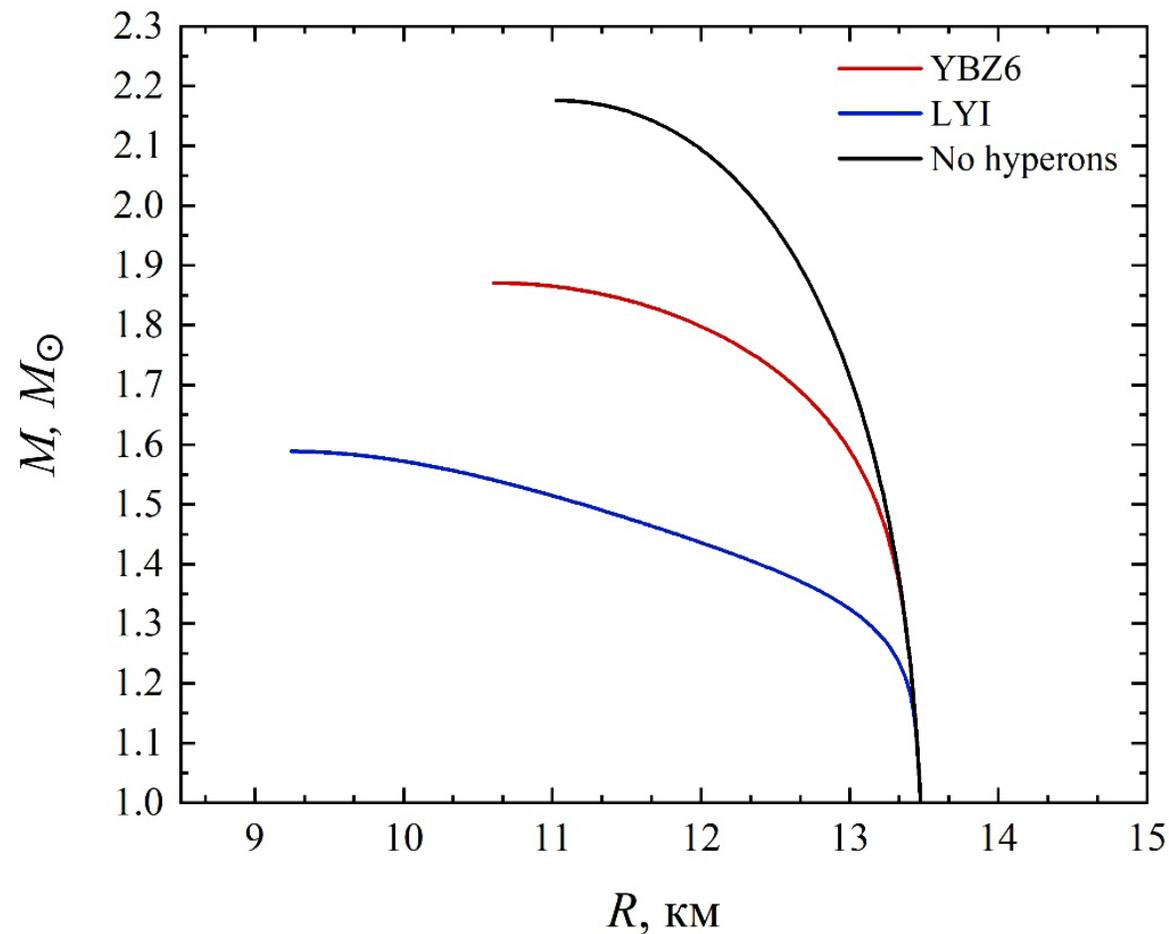
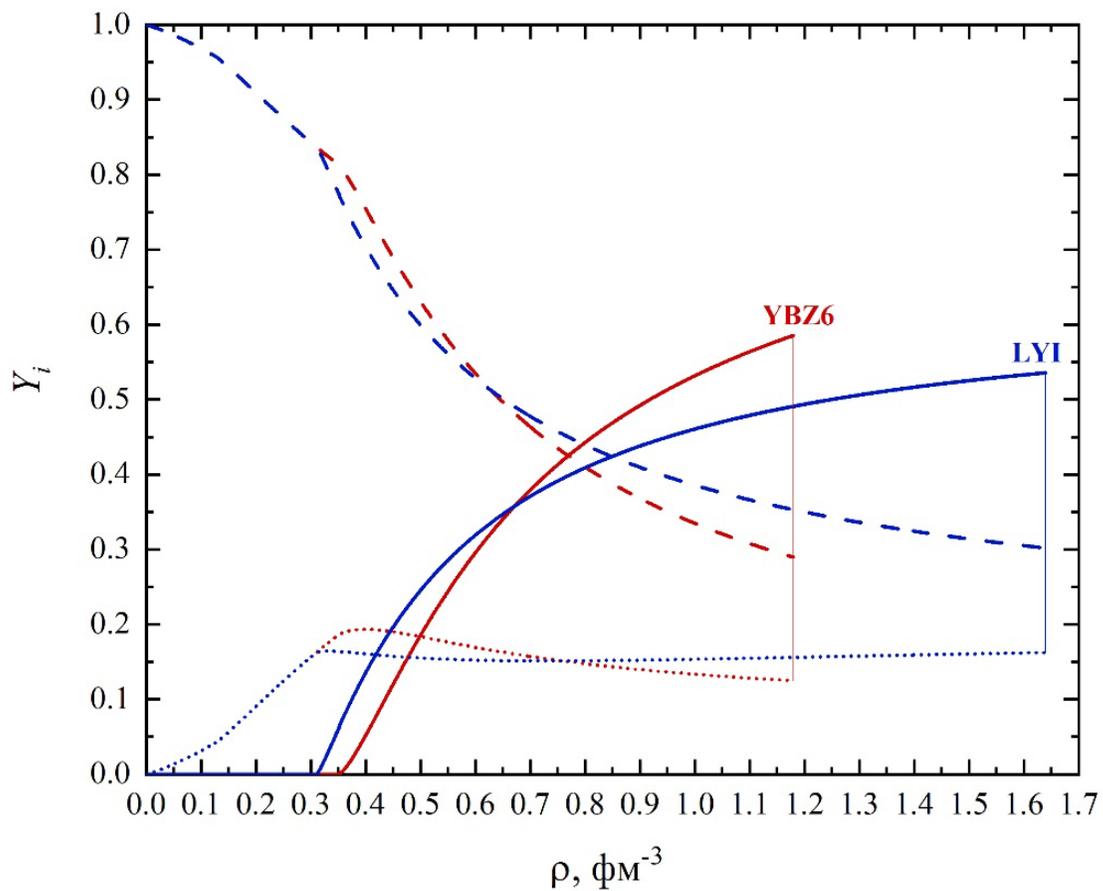
S. Mikheev, D. Lanskoj, A. Nasakin, T. Tretyakova // *Particles*, 2023



# Массы и радиусы нейтронных звёзд для различных барионных взаимодействий



# Массы нейтронных звёзд и появление гиперонов

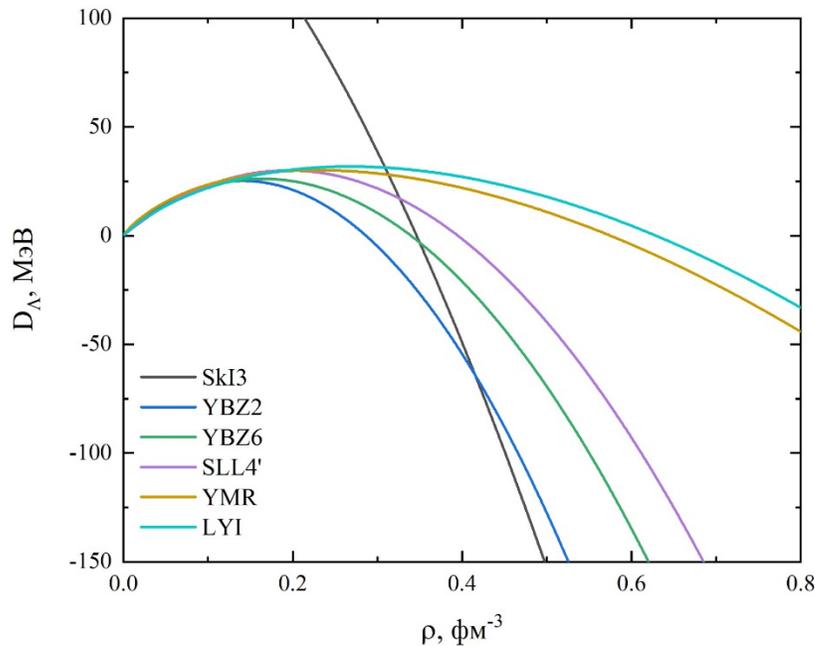


# Зависимость плотности, при которой появляются гипероны, от сжимающей способности гиперон-нуклонного взаимодействия

## Условие появления $\Lambda$ -гиперонов

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

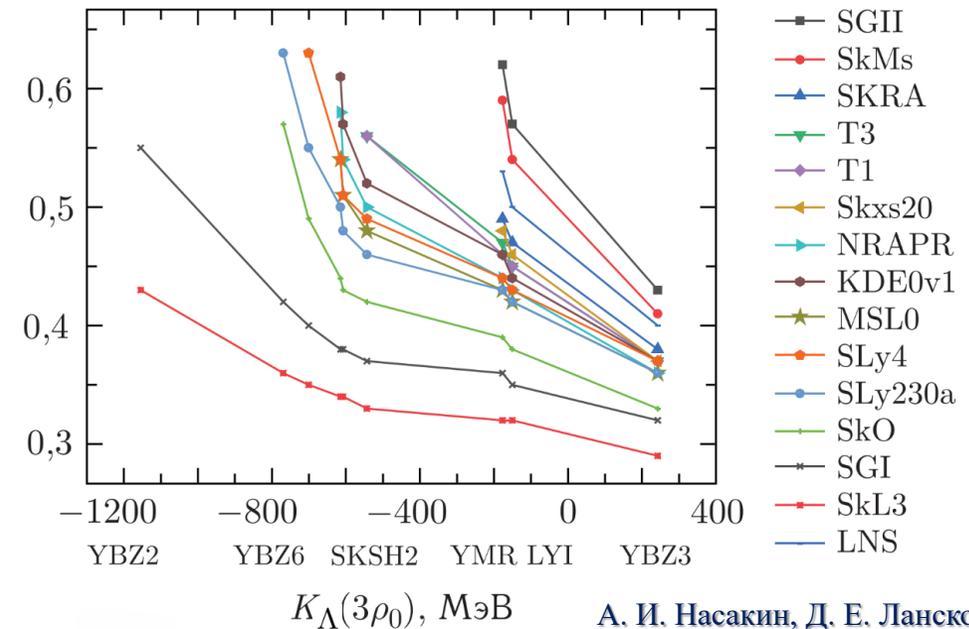
$$-\mu_{\Lambda} \Big|_{\rho_{\Lambda}=0} = m_{\Lambda} - m_n - \mu_n$$



## Сжимающая способность $\Lambda N$ -взаимодействия

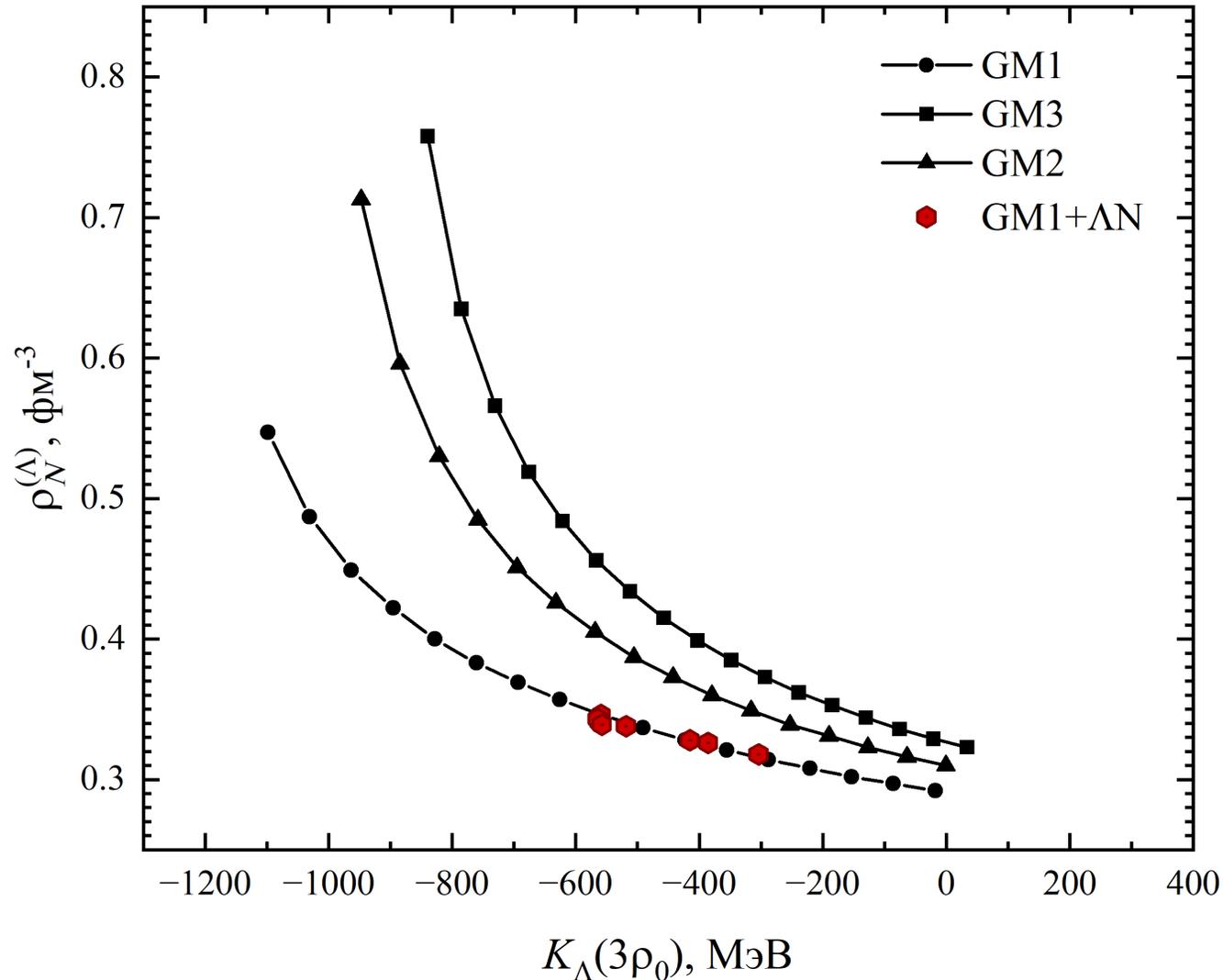
$$K_{\Lambda} = 3\rho \frac{dD_{\Lambda}(\rho)}{d\rho}$$

$\rho_N^{(\Lambda)}$ ,  $\text{fm}^{-3}$

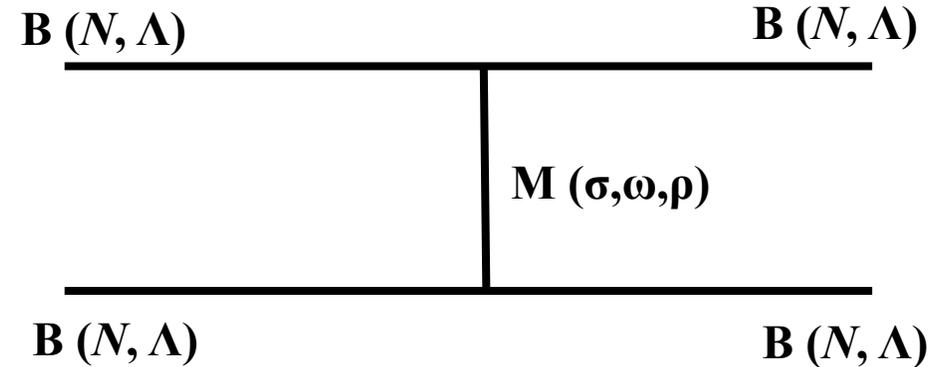


А. И. Насакин, Д. Е. Ланской, С. А. Михеев,  
Т. Ю. Третьякова // ЭЧАЯ, 2025

# Зависимость плотности, при которой появляются гипероны, от сжимающей способности гиперон-нуклонного взаимодействия



Релятивистская теория среднего поля

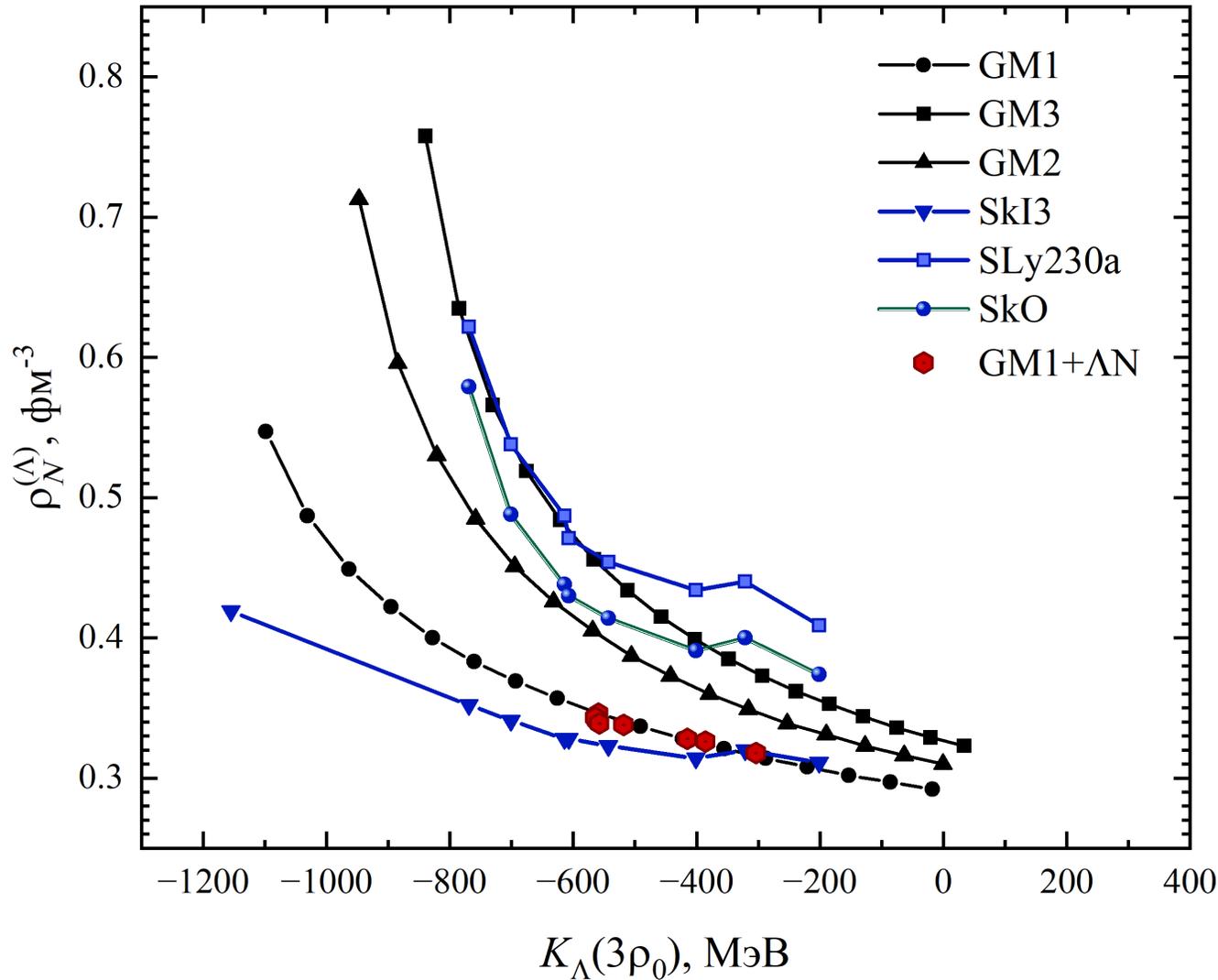


Параметры  $\Lambda$ N-взаимодействия

$$x_\sigma = g_{\sigma\Lambda\Lambda} / g_{\sigma NN}, x_w = g_{w\Lambda\Lambda} / g_{w NN}$$

$$D_\Lambda = x_w g_{w NN} w_0 - x_\sigma g_{\sigma NN} \sigma$$

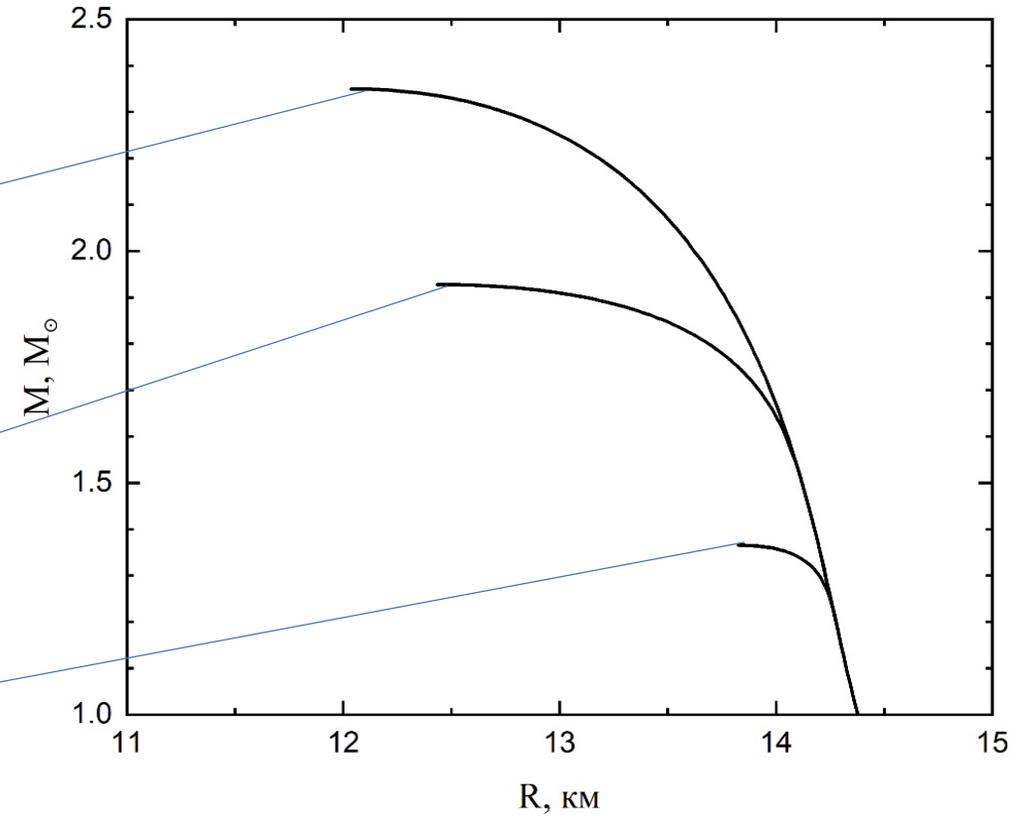
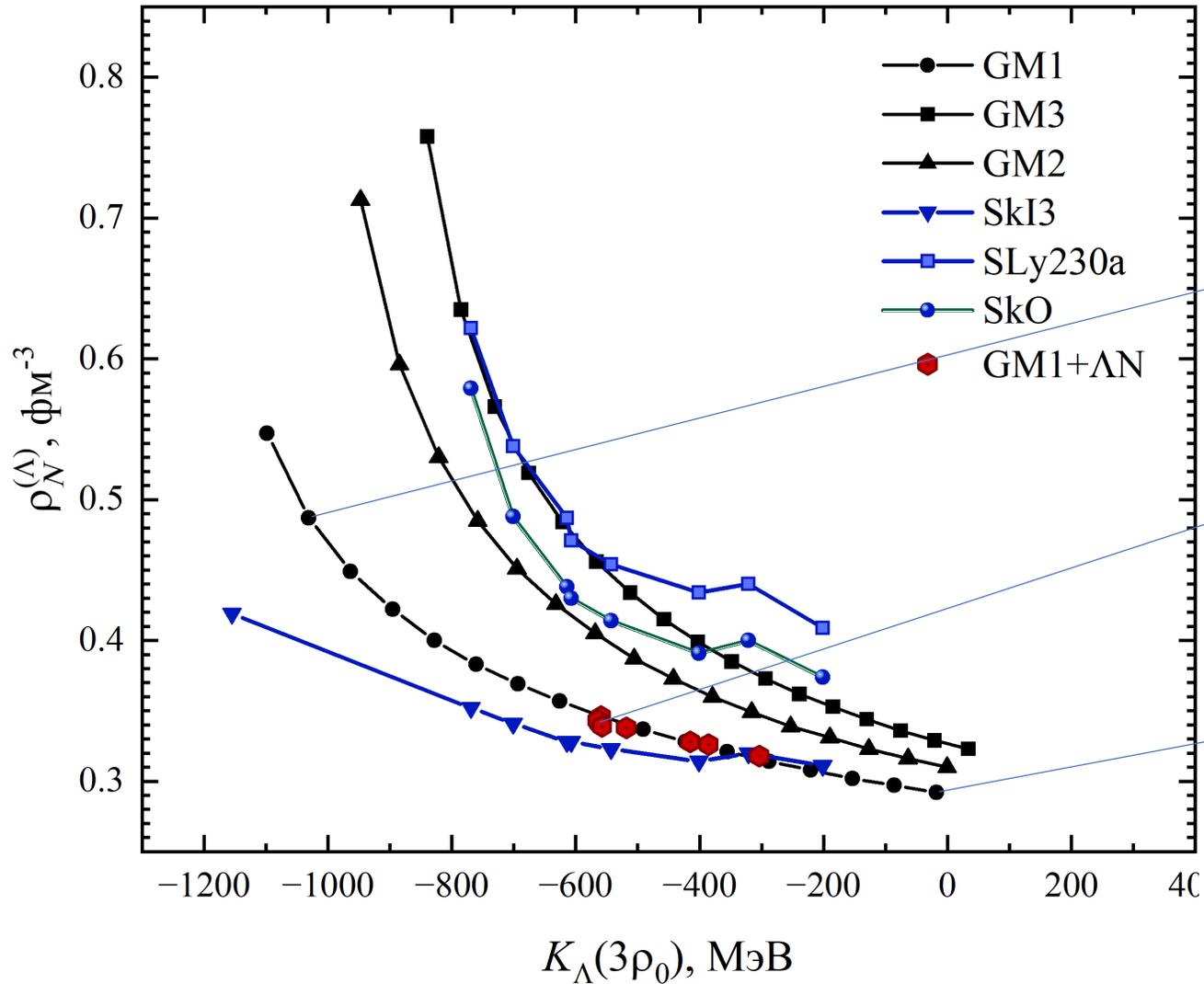
# Зависимость плотности, при которой появляются гипероны, от сжимающей способности гиперон-нуклонного взаимодействия



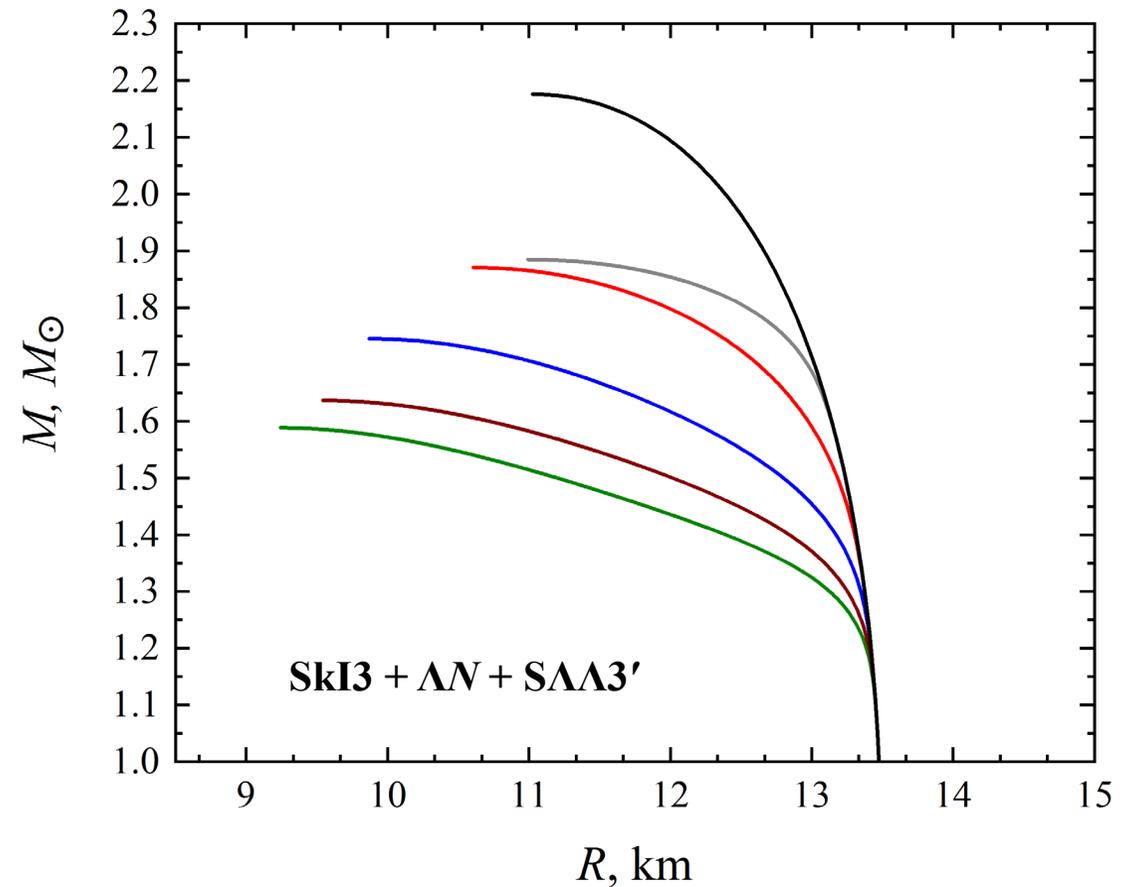
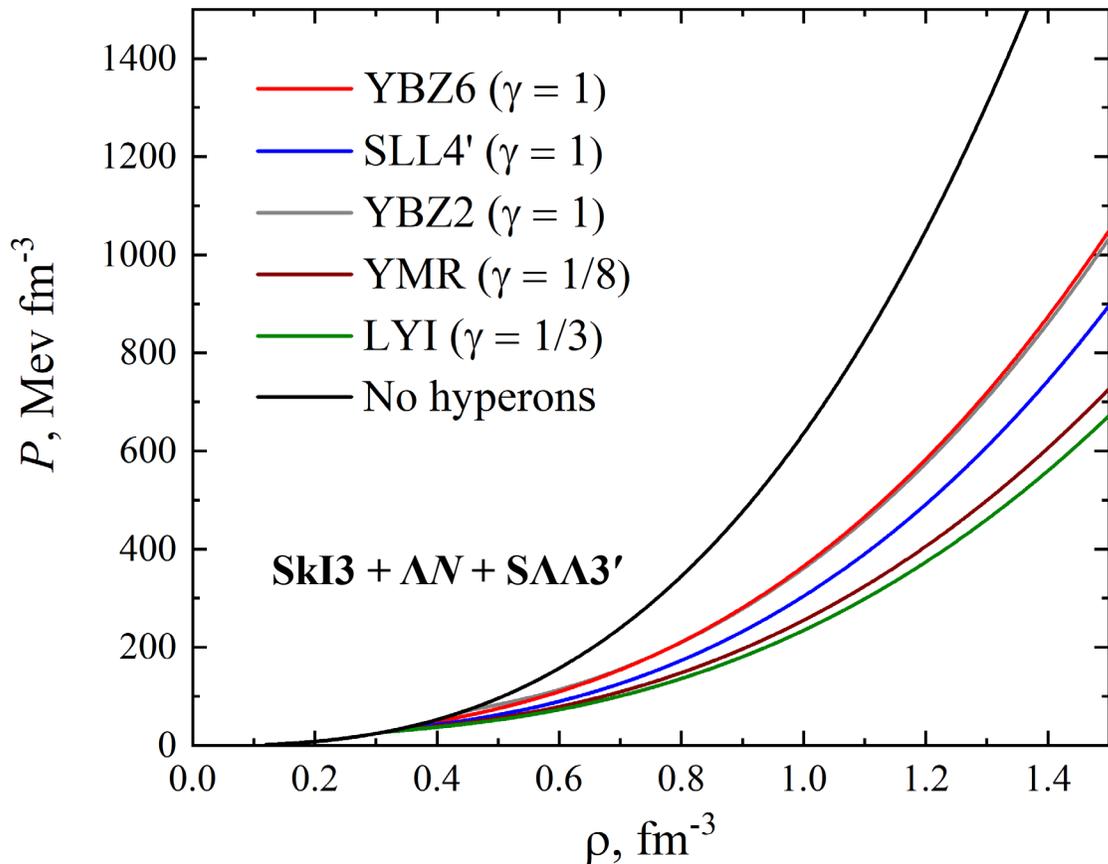
Сжимающая способность  $\Lambda N$ -взаимодействия

$$K_{\Lambda} = 3\rho \frac{dD_{\Lambda}(\rho)}{d\rho}$$

# Зависимость плотности, при которой появляются гипероны, от сжимающей способности гиперон-нуклонного взаимодействия



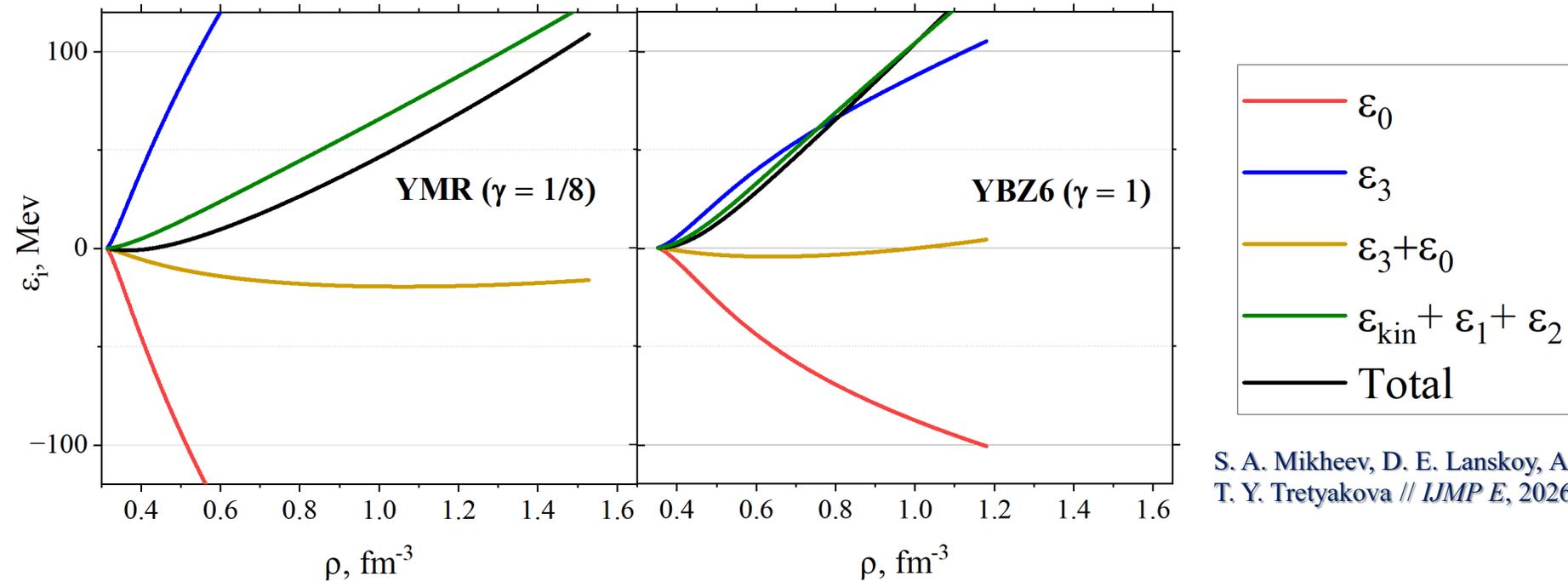
# Зависимость $\Lambda N$ -взаимодействия от плотности



S. A. Mikheev, D. E. Lanskoj, A. I. Nasakin, T. Y. Tretyakova // *IJMP E*, 2026

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

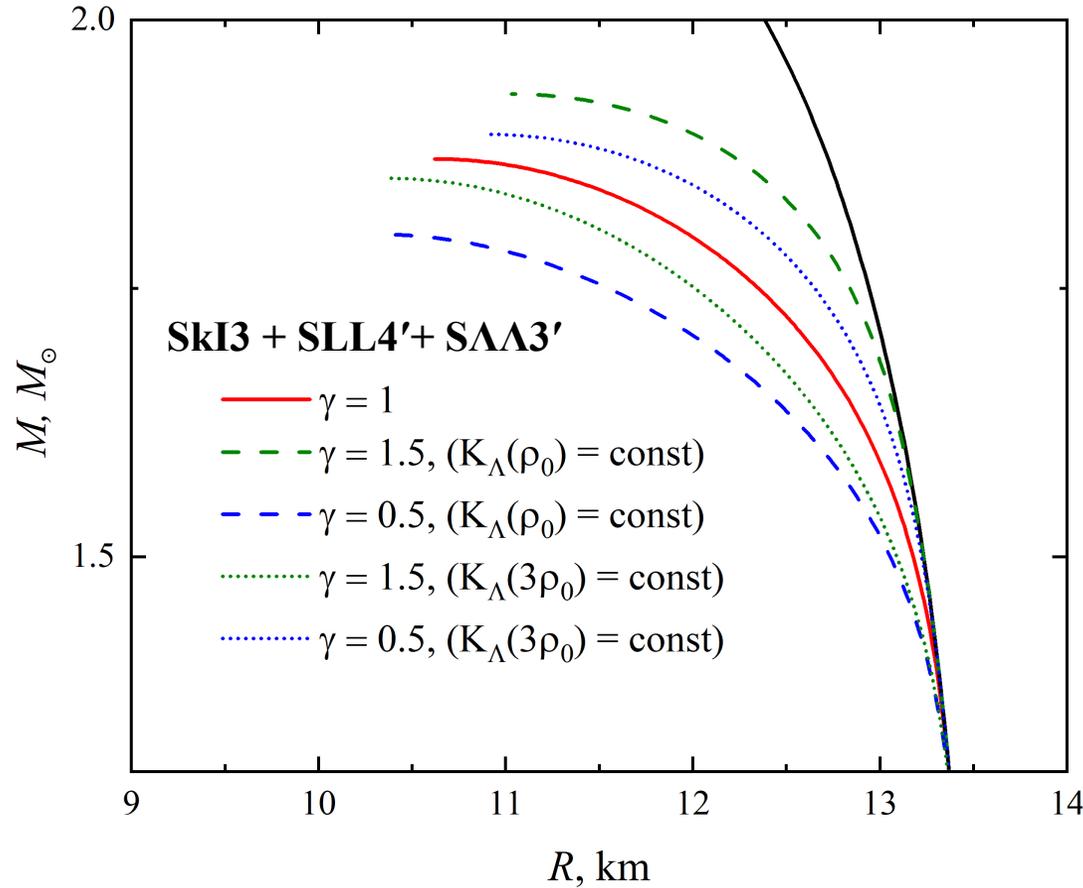
# Вклады различных слагаемых в энергию на барион



S. A. Mikheev, D. E. Lanskov, A. I. Nasakin,  
T. Y. Tretyakova // *IJMP E*, 2026

$$\begin{aligned}
 V_{\Lambda N}(\vec{r}_\Lambda, \vec{r}_N) = & \underbrace{u_0(1 + \xi_0 P_\sigma) \delta(\vec{r}_\Lambda - \vec{r}_N)}_{\text{red}} \\
 & + \frac{1}{2} \underbrace{u_1(1 + \xi_1 P_\sigma) [\vec{P}'^2 \delta(\vec{r}_\Lambda - \vec{r}_N) + \delta(\vec{r}_\Lambda - \vec{r}_N) \vec{P}^2]}_{\text{green}} \\
 & + \underbrace{u_2(1 + \xi_2 P_\sigma) \vec{P}' \delta(\vec{r}_\Lambda - \vec{r}_N) \vec{P}}_{\text{green}} \\
 & + \frac{3}{8} \underbrace{u_3(1 + \xi_3 P_\sigma) \delta(\vec{r}_\Lambda - \vec{r}_N) \rho_N^\gamma \left( \frac{\vec{r}_\Lambda + \vec{r}_N}{2} \right)}_{\text{blue}}
 \end{aligned}$$

# Массы и радиусы нейтронных звёзд для различных значений $\gamma$



S. A. Mikheev, D. E. Lanskoj, A. I. Nasakin, S. V. Sidorov, T. Yu. Tretyakova // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics.*, 2025

**Изменяемые параметры:  $\gamma, u_0, u_3$**

## Энергия связи $\Lambda$ -гиперона в нуклонной материи

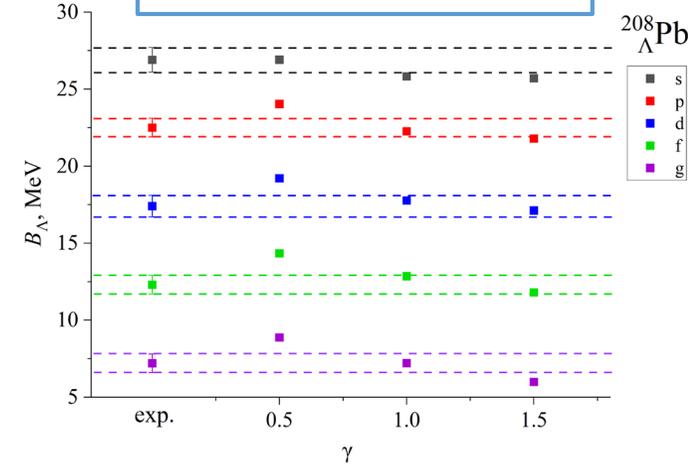
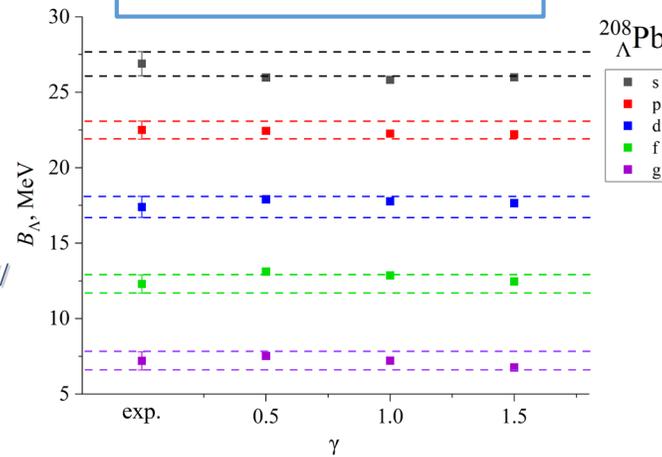
$$D_{\Lambda} = -\mu_{\Lambda}$$

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

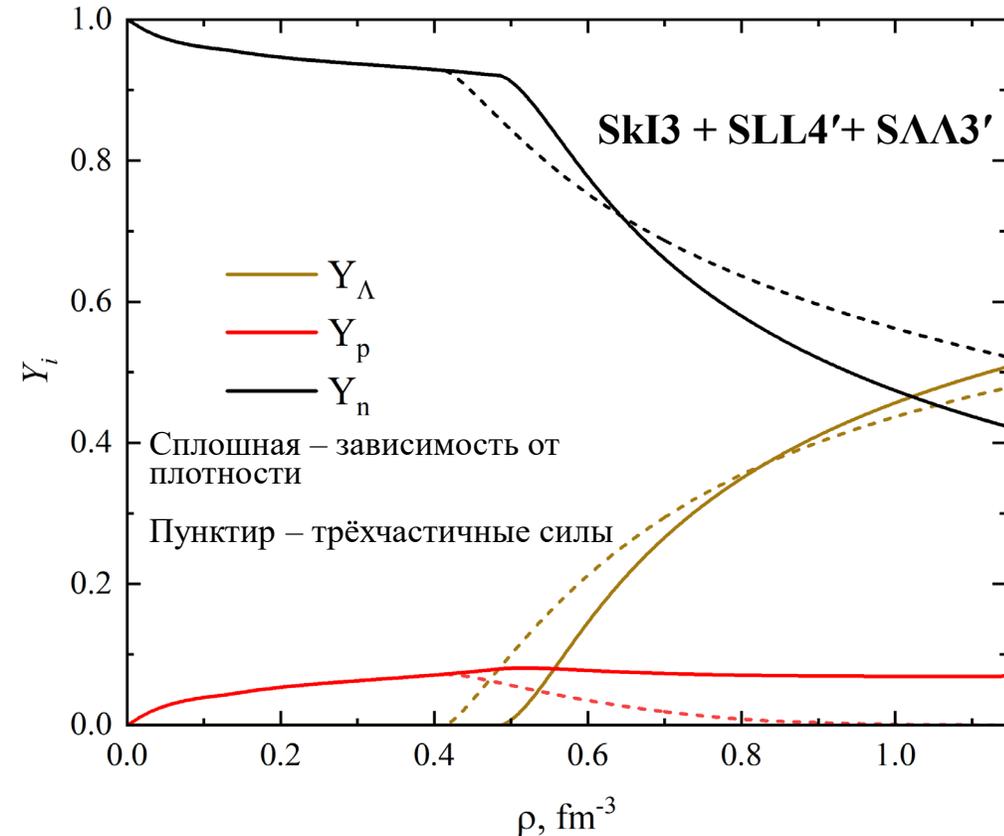
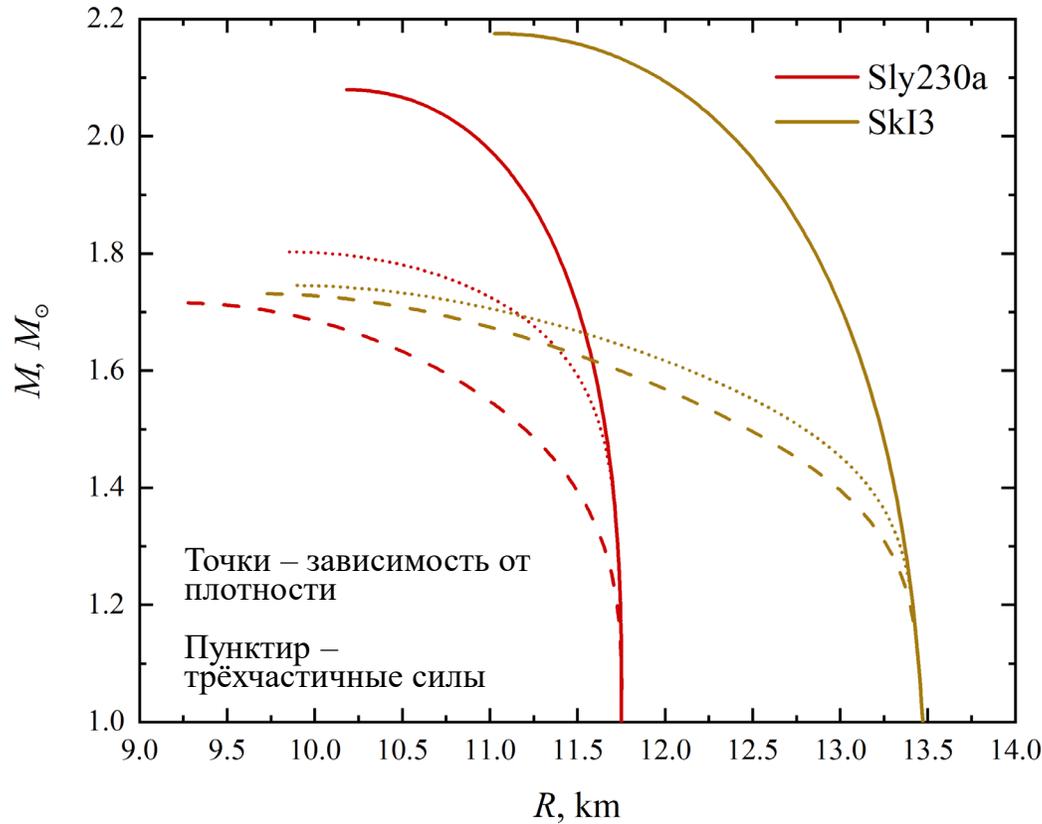
## Сжимающая способность $\Lambda N$ -взаимодействия

$$K_{\Lambda}(\rho_0) = \text{const}$$

$$K_{\Lambda}(3\rho_0) = \text{const}$$



# Тройные силы и зависимость от плотности



S. A. Mikheev, D. E. Lanskoj, A. I. Nasakin, T. Y. Tretyakova // *IJMP E*, 2026

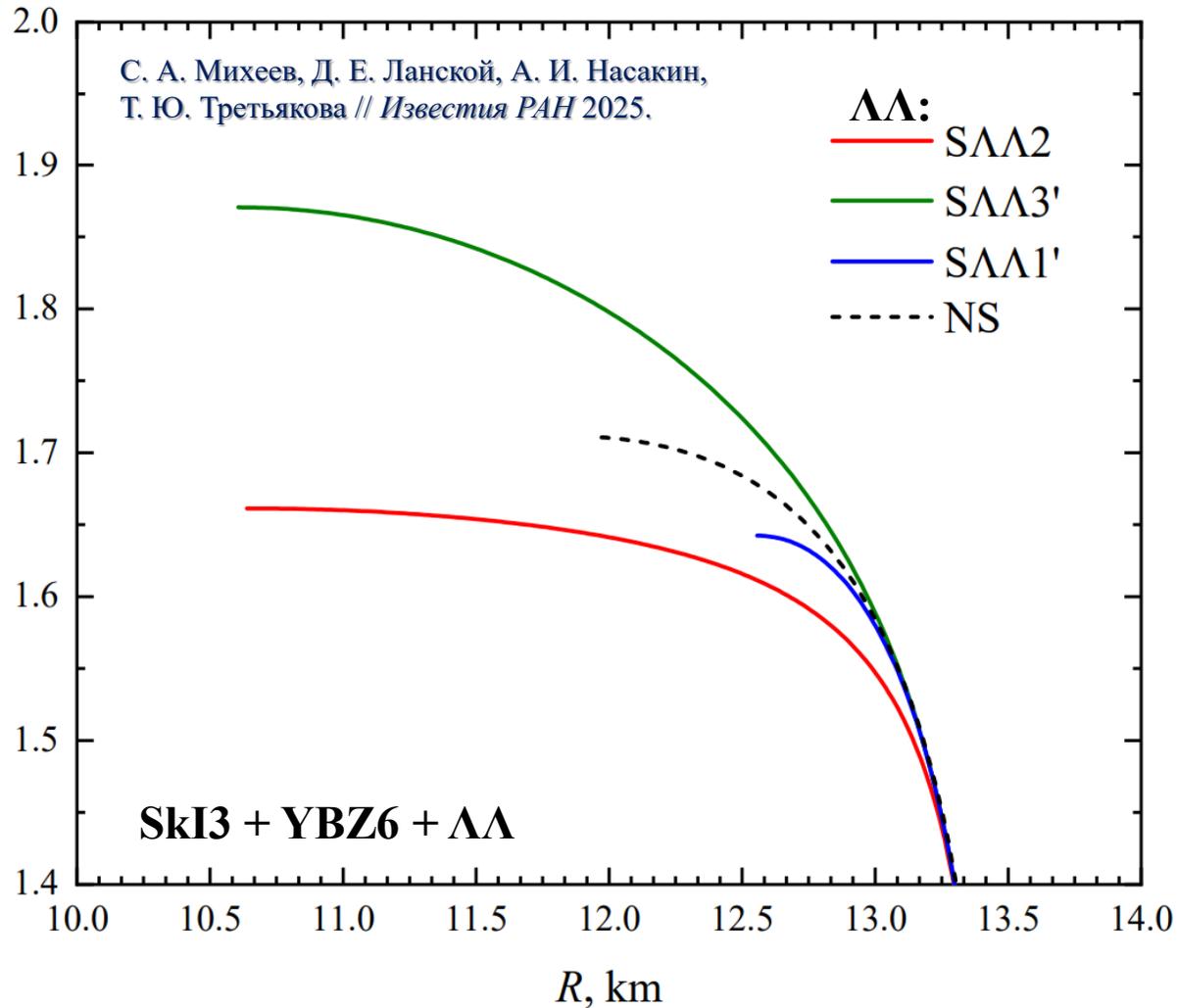
## Трёхчастичные силы

## Силы, зависящие от плотности

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

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

# ΛΛ-взаимодействие, зависящее от нуклонной плотности



D. E. Lanskoy, 1998, Minato F., 2011

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

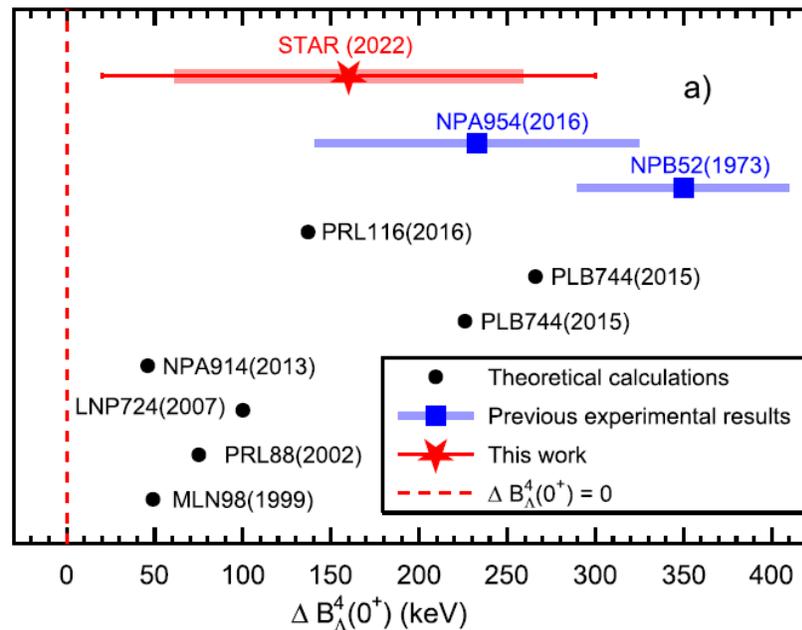
**NS – зависящие от плотности взаимодействия**

NSC89 (Nijmegen) → NS (Gauss) → NS (Skyrme)

$$V_{\Lambda\Lambda} = \sum_1^3 (a_i + b_i k_F + c_i k_F^2) e^{-\frac{r^2}{\beta_i^2}}$$

# Нарушение зарядовой симметрии в $\Lambda N$ -взаимодействии

Нарушение зарядовой симметрии (CSB) – эффект нарушения изоспиновой симметрии, вызванный электромагнитными силами.

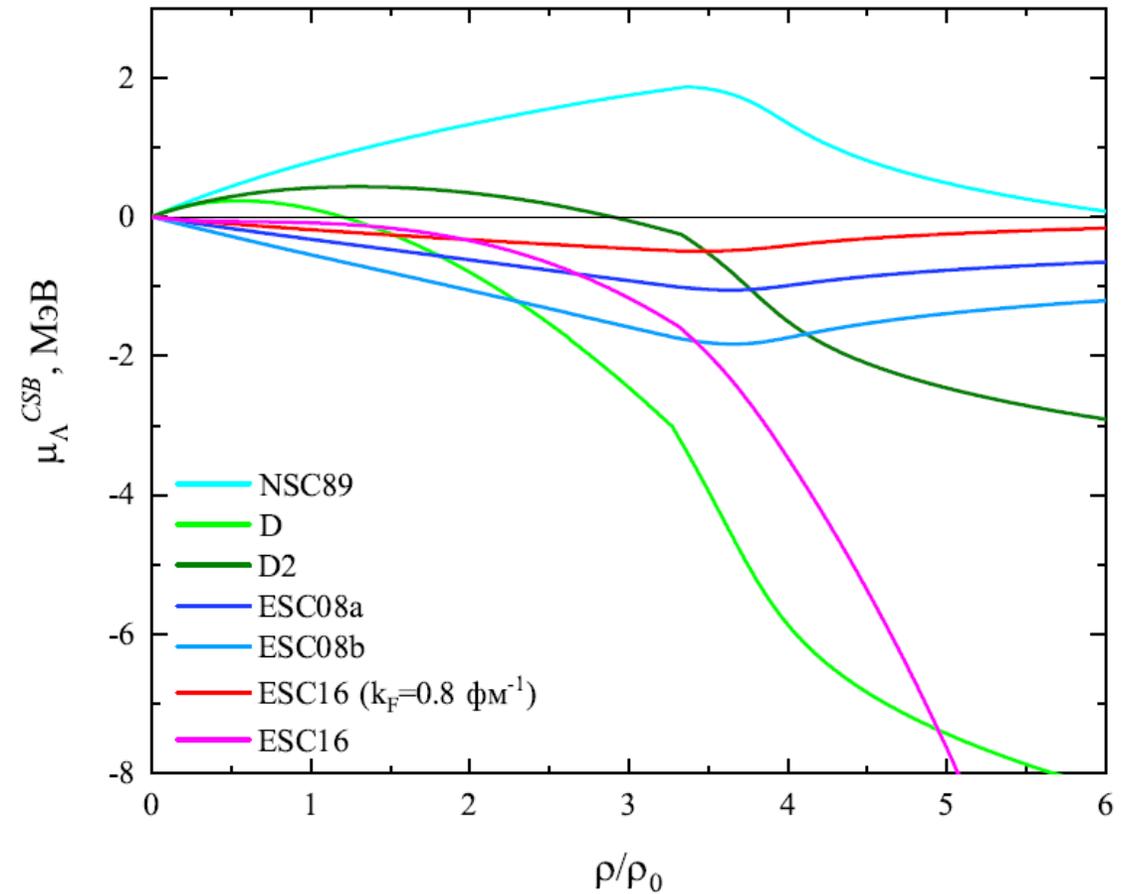
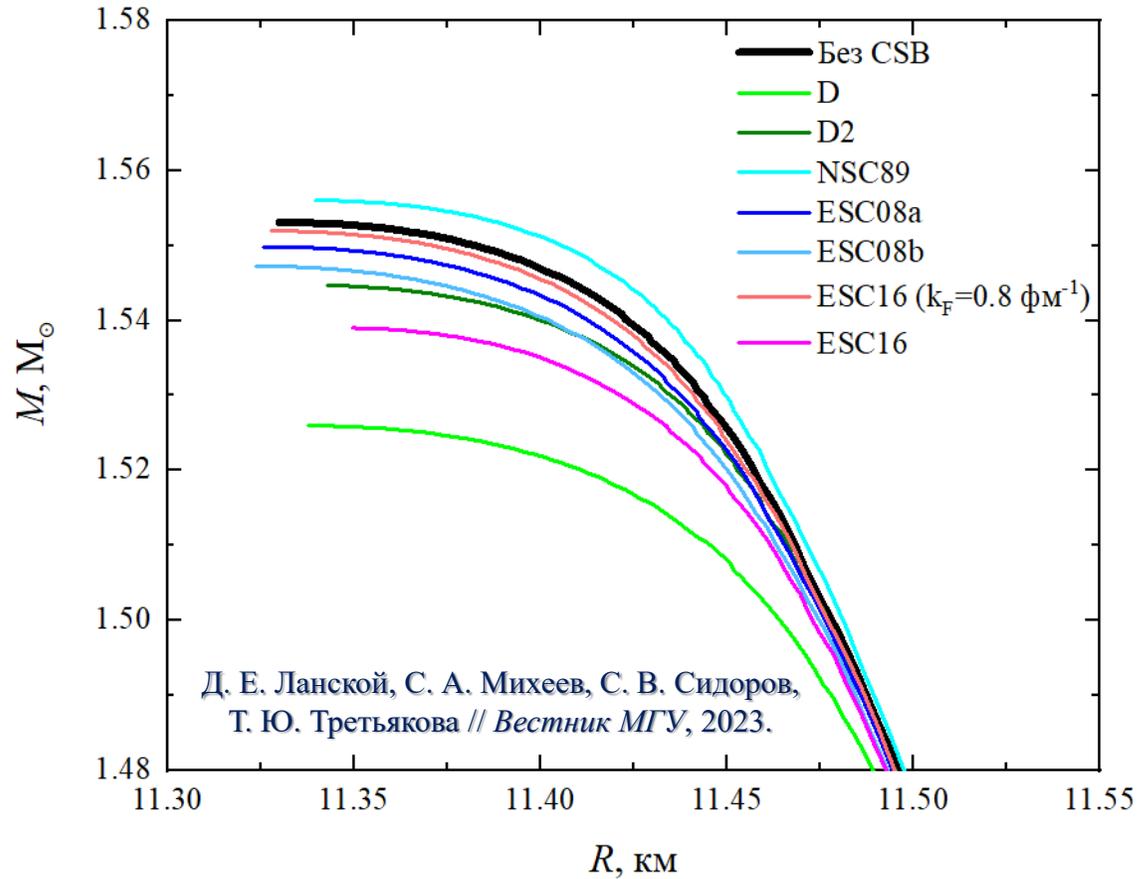


M.S. Abdallah, 2022

Модель	$a_0^{\text{CSB}},$ МэВ·фм <sup>3</sup>	$a_1^{\text{CSB}},$ МэВ·фм <sup>5</sup>	$B_{\Lambda}(^9_{\Lambda}\text{C}),$ МэВ	$B_{\Lambda}(^{13}_{\Lambda}\text{C}),$ МэВ	$B_{\Lambda}(^{23}_{\Lambda}\text{C}),$ МэВ
Без CSB	0	0	7,74	11,79	15,86
ESC08a	2,2660	-0,0092	7,68	11,80	15,92 ↑
ESC08b	3,7649	0,0776	7,64	11,80	16,00 ↑
D2	-5,6105	3,6480	7,83	11,79	15,73 ↓
NSC89	-6,5946	1,4628	7,89	11,79	15,64 ↓
D	-6,8277	8,1513	7,80	11,79	15,77 ↓
ESC16 при $k_F = 0,8 \text{ фм}^{-1}$	1,4423	-0,2061	7,70	11,79	15,91 ↑
ESC16 при $k_F = 1,3 \text{ фм}^{-1}$	0,5204	0,1242	7,73	11,79	15,87 ↑

Д. Е. Ланской, С. А. Михеев, С. В. Сидоров, Т. Ю. Третьякова // Вестник МГУ, 2023

# Эффект нарушения зарядовой симметрии в нейтронных звёздах



# Результаты работы

- Получено, что плотность, при которой в материи нейтронных звёзд появляются  $\Lambda$ -гипероны, плавно зависит от сжимающей способности  $\Lambda N$ -взаимодействия – величины, характеризующей способность гиперона модифицировать нуклонный остов  $\Lambda$ -гиперядра. Эта зависимость получена в двух различных подходах: формализме сил Скирма и релятивистской теории среднего поля – и носит универсальный характер. Количественно зависимость определяется также свойствами нуклон-нуклонного взаимодействия.
- Проанализирован вклад различных слагаемых скирмовского гиперон-нуклонного потенциала в уравнение состояния материи нейтронных звёзд. Показано, что даже при высоких плотностях уравнение состояния определяется не только членом, зависящим от нуклонной плотности, но и зависит от сложного сочетания вкладов различных слагаемых. Для сил, пропорциональных нуклонной плотности в некоторой степени  $\gamma$ , получены семейства потенциалов, которые дают более жёсткое уравнение состояния при большем либо при меньшем значении  $\gamma$ .
- Показано, что при использовании в скирмовском формализме трёхчастичных  $\Lambda NN$ -сил уравнение состояния материи нейтронных звёзд всегда мягче, чем для  $\Lambda N$ -сил, пропорциональных нуклонной плотности с той же амплитудой. При некоторых условиях трёхчастичные силы приводят к тому, что при высоких плотностях материя звезды состоит только из нейтронов и  $\Lambda$ -гиперонов, тогда как для сил, пропорциональных плотности, в материи присутствуют также протоны и лептоны.

# Результаты работы

- **Впервые построен скирмовский  $\Lambda\Lambda$ -потенциал, зависящий от нуклонной плотности.** Получено, что такой потенциал не приводит к качественным различиям по сравнению с ранее известными потенциалами без зависимости от плотности для уравнения состояния и зависимости массы нейтронной звезды от радиуса.
- **Впервые получен Скирмовский  $\Lambda N$  -потенциал, нарушающий зарядовую симметрию, и включающий члены, зависящие от импульсов и плотности.** Эффект нарушения зарядовой симметрии может иметь разные знаки в  $\Lambda$ -гиперядрах и нейтронных звёздах ввиду различия плотностей этих систем. Нарушение зарядовой симметрии приводит к изменению максимальной массы нейтронной звезды на несколько сотых масс Солнца.

# Положения, выносимые на защиту

- Плотность, при которой в нейтронных звёздах появляются гипероны, сильно коррелирует со сжимающей способностью  $\Lambda N$ -взаимодействия вне зависимости от подхода, используемого для расчётов.
- В формализме сил Скирма поведение уравнения состояния материи нейтронных звёзд при высоких плотностях зависит не столько от величины сил, зависящих от плотности, сколько от сложного сочетания различных слагаемых потенциала  $\Lambda N$ -взаимодействия. Может быть построено семейство потенциалов, которые при меньшем значении показателя степени  $\gamma$  в зависимости от плотности приводят к более жёстким уравнениям состояния, что может быть полезно для поисков путей решения «hyperon puzzle».
- При использовании трёхчастичных  $\Lambda NN$ -сил вместо  $\Lambda N$ -сил, пропорциональных нуклонной плотности, уравнение состояния материи нейтронных звёзд всегда смягчается. При определённом выборе потенциалов  $\Lambda N$ - и  $NN$ -взаимодействия трёхчастичные силы могут при высоких плотностях приводить к полному исчезновению лептонов и протонов.
- Включение зависимости от плотности в  $\Lambda\Lambda$ -взаимодействие в подходе с использованием сил Скирма не оказывает значительного влияния на максимальную массу нейтронных звёзд по сравнению с существующими потенциалами  $\Lambda\Lambda$ -взаимодействия без зависимости от плотности.
- Учёт эффекта нарушения зарядовой симметрии в нейтронных звёздах незначительно влияет на максимальную массу. При этом в нейтронных звёздах знак эффекта нарушения зарядовой симметрии может отличаться от знака в гиперядрах ввиду различия плотностей этих систем.

## Основные результаты работы были представлены на следующих конференциях:

- Международная Конференция «ЯДРО» (2020, 2022, 2023, 2024, 2025)
- International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2022)
- International Workshop «Infinite and Finite Nuclear Matter» (INFINUM), (2023, 2025)
- Научная конференция «Ломоносовские чтения» (2023, 2024)
- Межвузовская молодежная научная школа-конференция имени Б. С. Ишханова «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине» (2019, 2021, 2025)
- Физика нейтронных звёзд, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 2023
- International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems, Дубна, 2023

# Список публикаций

1. Корреляции между свойствами ядерной материи и характеристиками нейтронных звёзд / **Михеев С. А.**, Ланской Д. Е., Третьякова Т. Ю. // *Физика элементарных частиц и атомного ядра*. — 2022. — Т. 53, № 2. — С. 369.
2. Hyperonic interactions in neutron stars / **S. Mikheev**, D. Lanskoj, A. Nasakin, T. Tretyakova // *Particles*. — 2023. — Vol. 6. — P. 847–863.
3. Гиперядра и нейтронные звезды с гиперонными потенциалами, нарушающими зарядовую симметрию / Д. Е. Ланской, **С. А. Михеев**, С. В. Сидоров, Т. Ю. Третьякова // *Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия*. — 2023. — Т. 78, № 5.
4. Условия появления гиперонов в материи нейтронных звёзд / А. И. Насакин, Д. Е. Ланской, **С. А. Михеев**, Т. Ю. Третьякова // *Физика элементарных частиц и атомного ядра*. — 2025. — Т. 56, № 3. — С. 1583–1595.
5. Об особенностях гиперонных взаимодействий в нейтронных звёздах / **С. А. Михеев**, Д. Е. Ланской, А. И. Насакин, Т. Ю. Третьякова // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. — 2025. — Т. 89, № 5. — С. 826–831.
6. Medium effects in hyperonic interactions at neutron stars densities / **S. A. Mikheev**, D. E. Lanskoj, A. I. Nasakin, T. Y. Tretyakova // *International Journal of Modern Physics E*. — 2026. — Vol. 35, no. 1. — P. 2550059.
7. Density dependent hyperonic interactions in neutron stars / **S. A. Mikheev**, D. E. Lanskoj, A. I. Nasakin, S. V. Sidorov, T. Yu. Tretyakova // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. — Vol. 89, supplement issue 3 (принято в печать)



*СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ*