



Экзотические ядерные системы:

атомные ядра и гиперядра вблизи границы существования ядер,
материя нейтронных звезд

Т.Ю. Третьякова
НИИЯФ МГУ

Проект «Ядерная астрофизика»

НИИЯФ МГУ, физический факультет МГУ
(теоретическая часть)

- Нуклонные и гиперонные взаимодействия в экзотических ядерных системах
- Определение границ ядерного континента и моделирование r -процесса звездного нуклеосинтеза

Научные сотрудники:

Д.Е. Ланской
Т.Ю. Третьякова
К.А. Стопани
Е.В. Владимирова

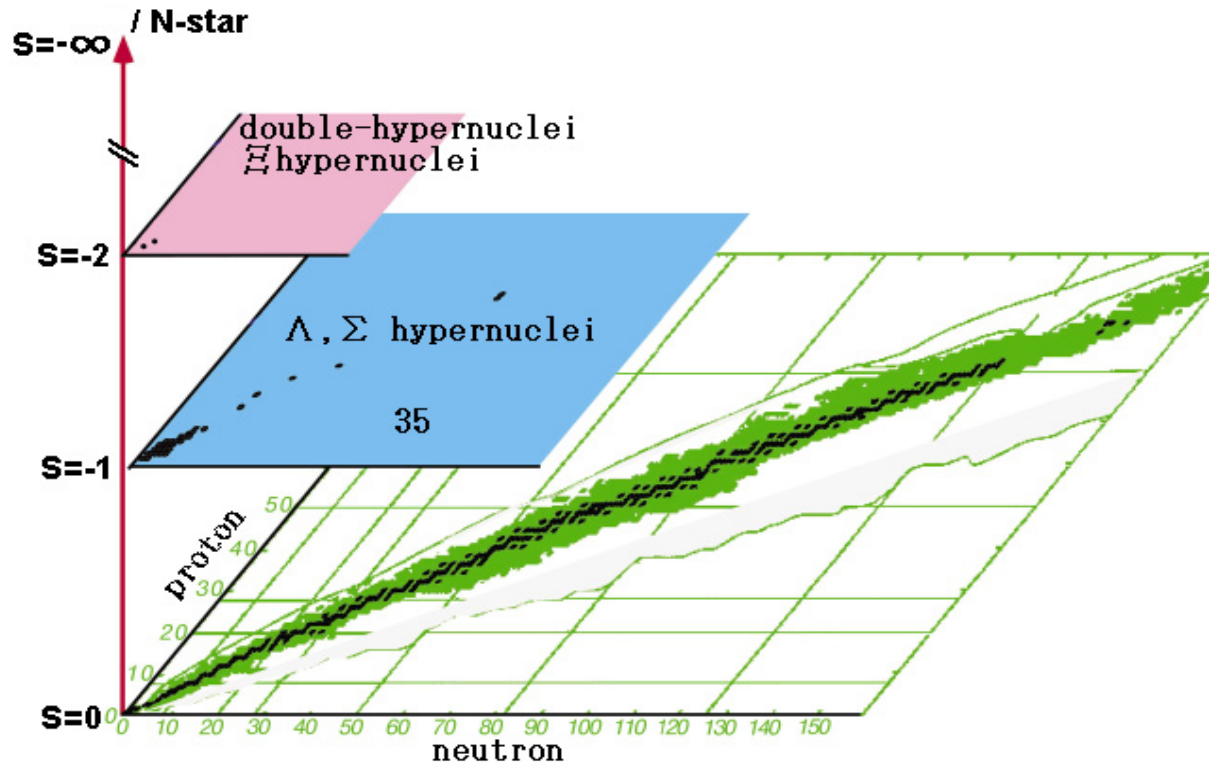
Аспиранты и студенты:

С.В. Сидоров
М.С. Хирк
С.А. Михеев
В.В. Негребецкий
М.В. Симонов
Т.Р. Алиев
А.С. Корнилова
И.А. Мостаков
А.И. Насакин

Экзотические ядерные системы

- Легкие Λ -гиперядра с протонным и нейтронным избытком
- Нейтрон-избыточные ядра и моделирование r -процесса
- Предсказание масс сверхтяжелых элементов
- Нейтронные звезды

Strange matter



Легкие экзотические Λ гиперядра

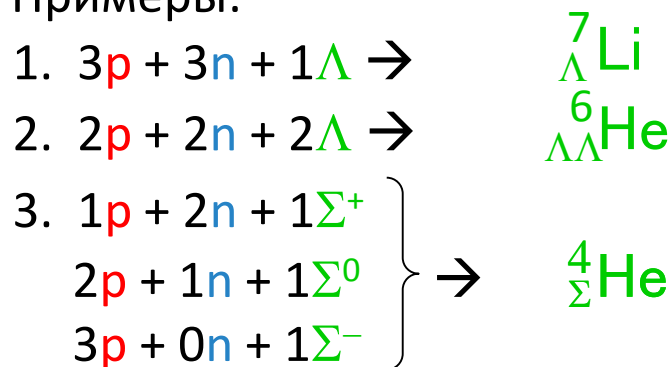
Sidorov, Lanskoj, Tretyakova PoS (PANIC2021)216

Обозначения:

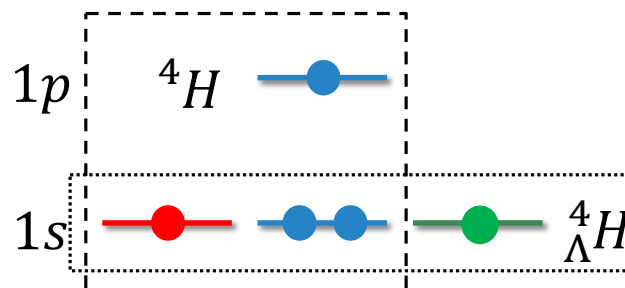
AZ
 ΛZ

- A -- Полное число барионов (нуклоны & гиперон)
- Z -- Заряд
- Λ -- гиперон (другие: Σ , Ξ , ...)

• Примеры:



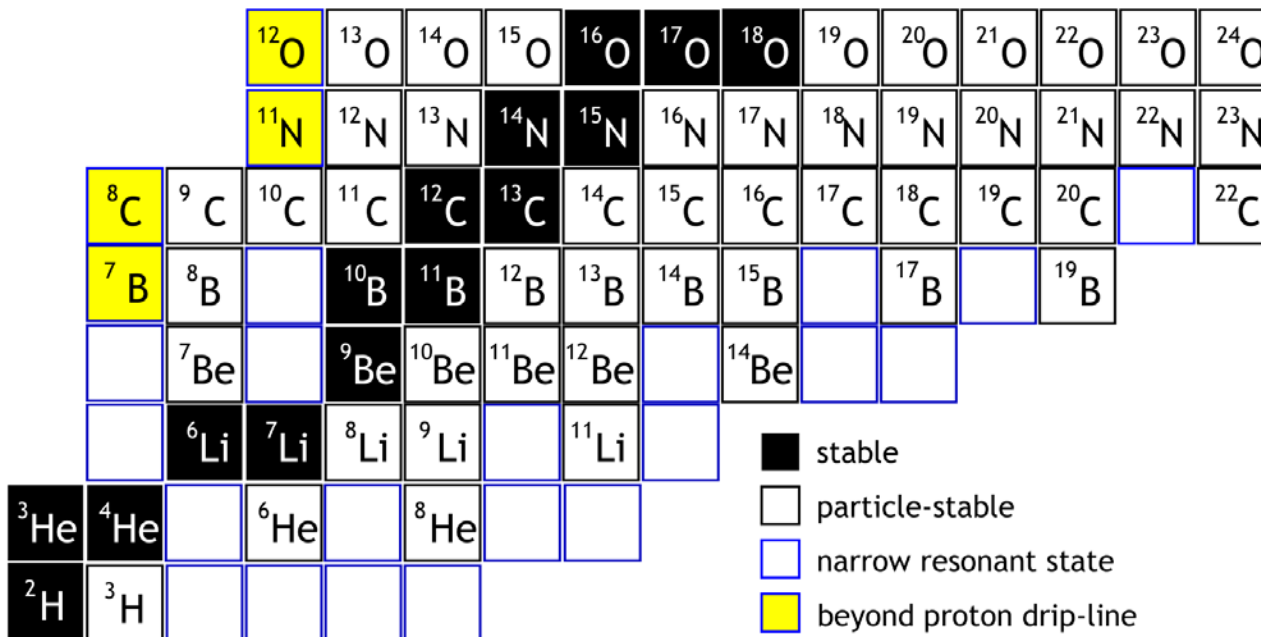
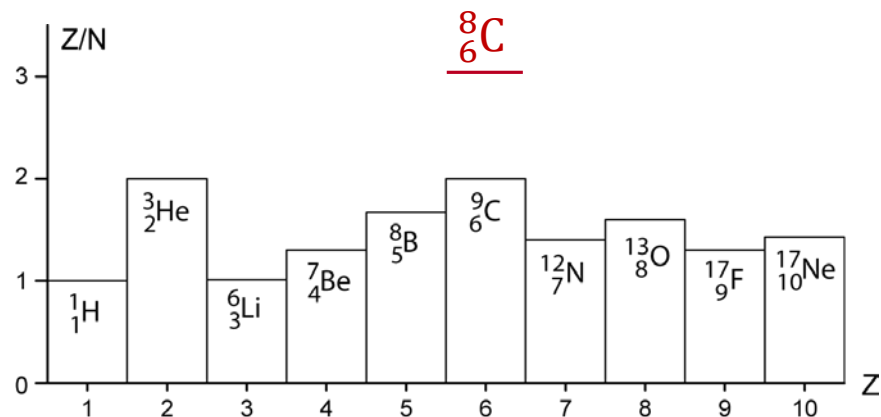
$$B_{\Lambda}(^{A+1}_{\Lambda}Z) = B_{tot}(^{A+1}_{\Lambda}Z) - B_{tot}(^AZ)$$



Легкие экзотические Λ гиперядра

Мотивация: Новые экспериментальные возможности синтеза экзотических гиперядер в реакциях столкновения тяжелых ионов

Цель: Определение сдвига границы существования гиперядер по сравнению с протонизбыточными ядрами в диапазоне $5 \leq Z \leq 8$



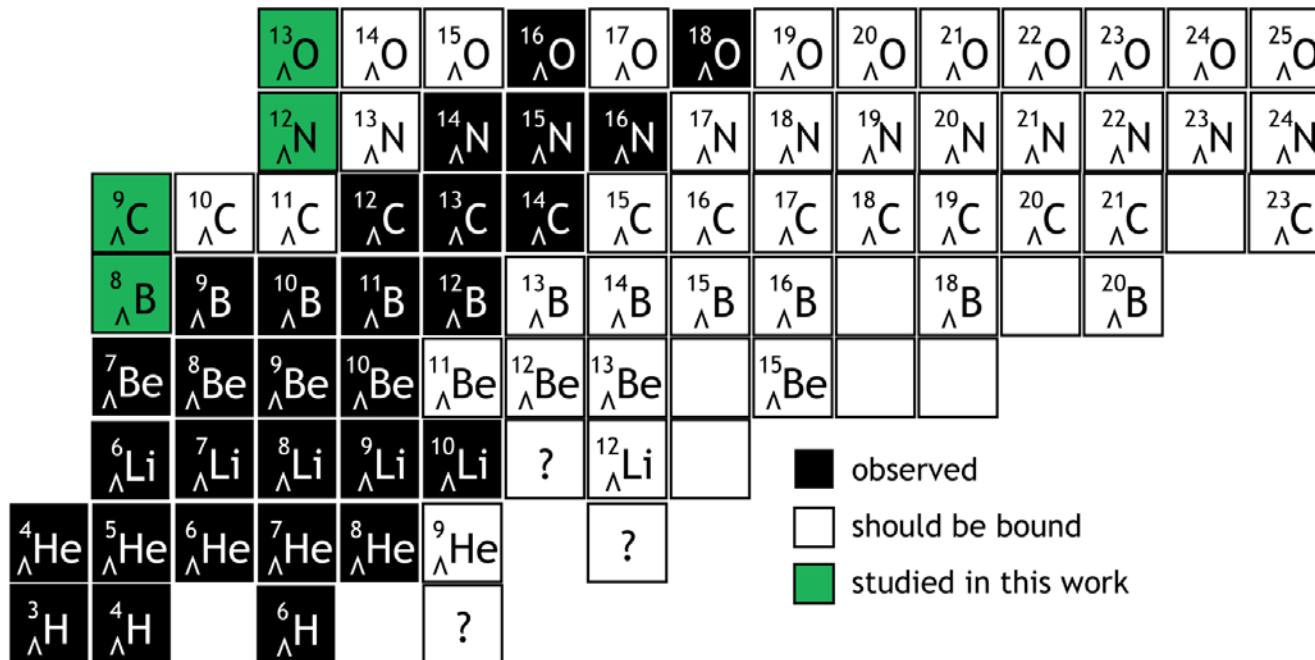
Легкие экзотические Λ гиперядра

- Стабильность нуклонного остова по отношению к испусканию нуклонов гарантирует существование Λ гиперядра
- Λ -гиперон может дополнительно связывать нуклонный остов
- **Притягивающее ΛN -взаимодействие** может привести к связыванию изотопов за границей протонной стабильности

- **PROTON DRIP-LINE:**

$$S_p({}^A_{\Lambda}Z) = S_p({}^{A-1}Z) + B_{\Lambda}({}^A_{\Lambda}Z) - B_{\Lambda}({}^{A-1}_{\Lambda}(Z-1)),$$

$$S_{2p}({}^A_{\Lambda}Z) = S_{2p}({}^{A-1}Z) + B_{\Lambda}({}^A_{\Lambda}Z) - B_{\Lambda}({}^{A-2}_{\Lambda}(Z-2)).$$



Легкие экзотические Λ гиперядра

Подход Скирма-Хартри-Фока

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

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

NN: SLy4, SkM*, SkIII

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

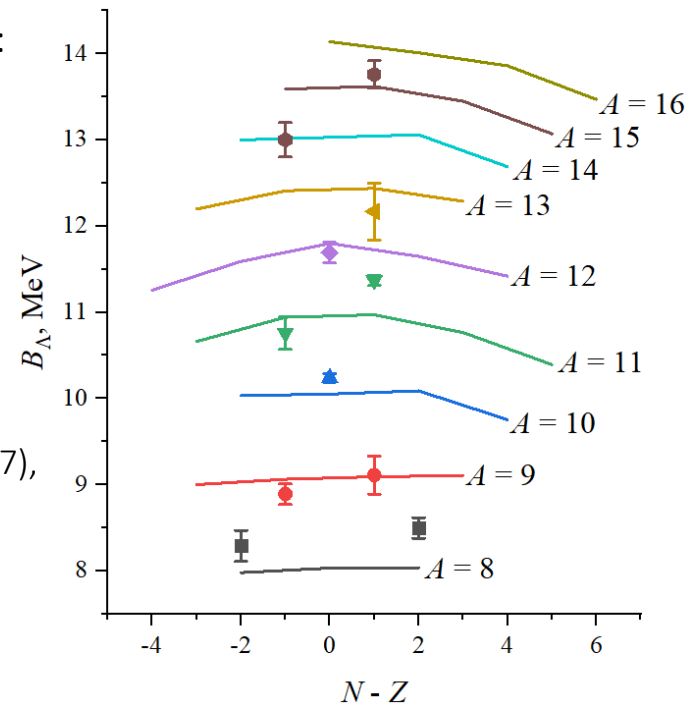
$$V_{\Lambda N}(\mathbf{r}_\Lambda, \mathbf{r}_q) = t_0^\Lambda(1 + x_0^\Lambda P_\sigma)\delta(\mathbf{r}_{\Lambda q}) \\ + \frac{1}{2}t_1^\Lambda(\mathbf{k}^2\delta(\mathbf{r}_{\Lambda q}) + \delta(\mathbf{r}_{\Lambda q})\mathbf{k}'^2) \\ + t_2^\Lambda\mathbf{k}'\delta(\mathbf{r}_{\Lambda q})\mathbf{k} + \frac{1}{6}t_3^\Lambda\rho^\alpha(\mathbf{R})\delta(\mathbf{r}_{\Lambda q})$$

ΛN : SLL4, SLL4' (Schulze and Hiyama, 2014),

YBZ5 (Yamamoto et al, 1988), LY1, LY5 (Lansky and Yamamoto, 1997),

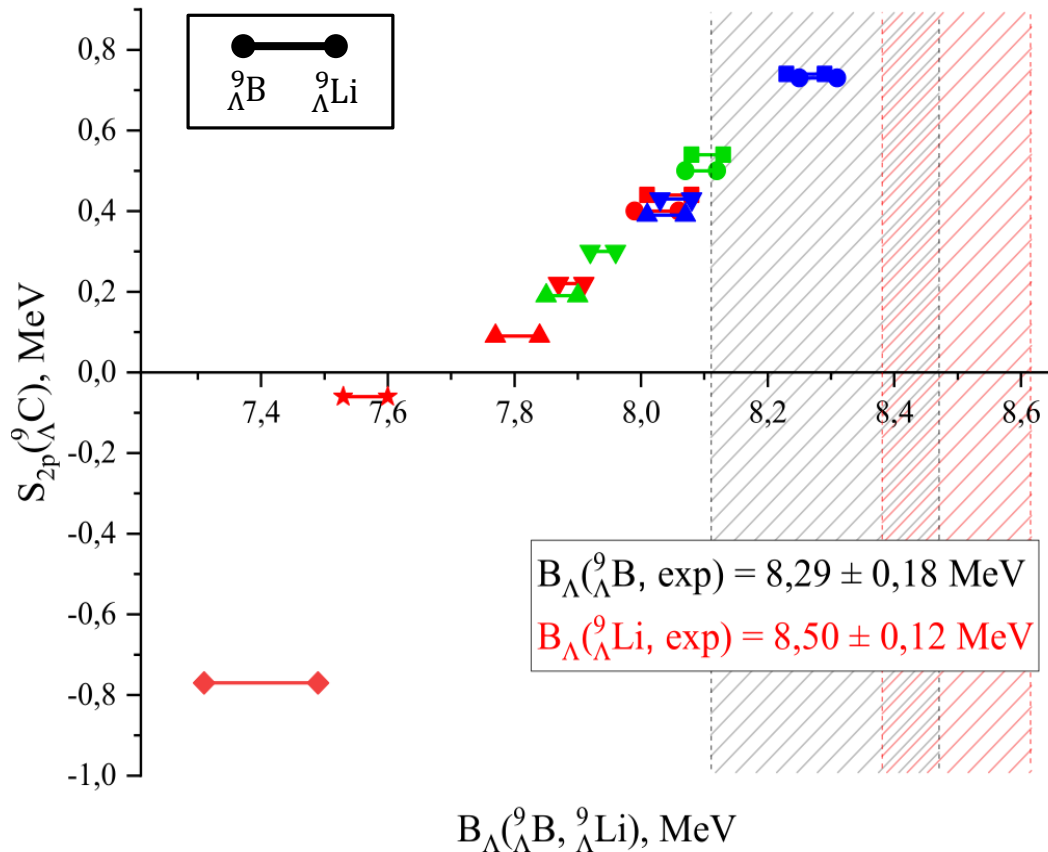
SkSH1 (Fernandez et al, 1989)

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



Легкие экзотические Λ гиперядра

Энергия отделения $2p$ в ${}^9_{\Lambda}\text{C}$



В то время как ${}^8\text{C}$ распадается с испусканием 4 протонов, для ${}^9_{\Lambda}\text{C}$ критическим является канал распада с испусканием $2p$ и образованием ${}^7_{\Lambda}\text{Be}$. Слева представлена величина

$$S_{2p}({}^9_{\Lambda}\text{C}) = S_{2p}({}^8\text{C}) + B_{\Lambda}({}^9_{\Lambda}\text{C}) - B_{\Lambda}({}^7_{\Lambda}\text{Be})$$

calc \curvearrowright

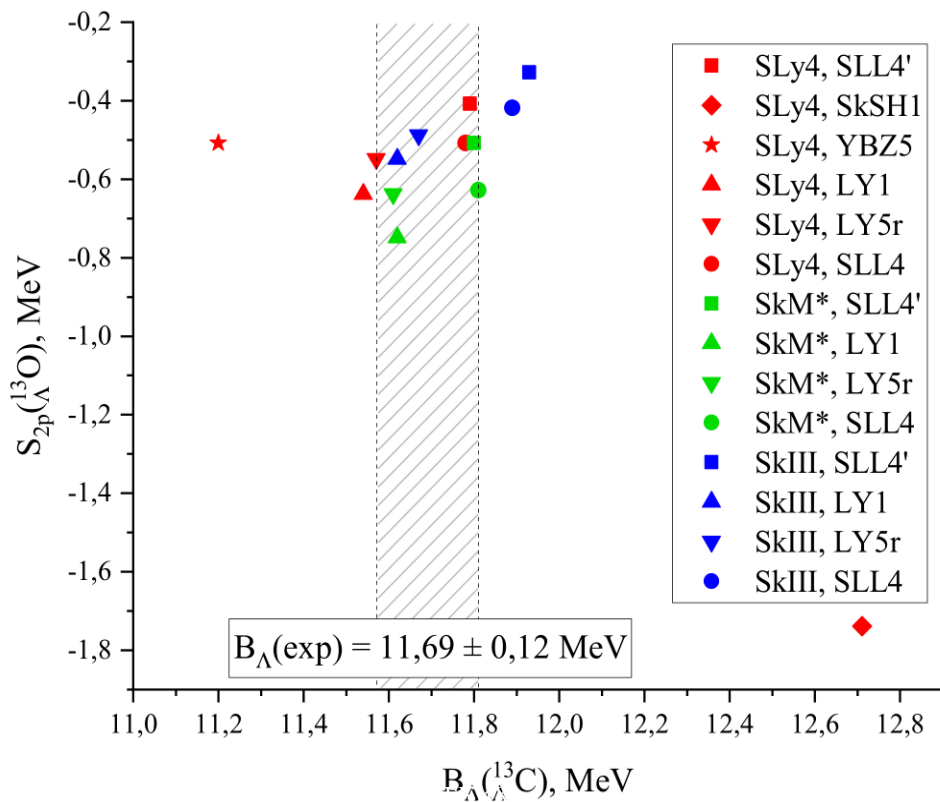
exp: -2,14 МэВ \uparrow exp: 5,16 МэВ \uparrow

как функция B_{Λ} в ${}^9_{\Lambda}\text{B}$ и ${}^9_{\Lambda}\text{Li}$ для разных NN и LN взаимодействий Скирма. Чем лучше описываются $B_{\Lambda}({}^9_{\Lambda}\text{B})$ и $B_{\Lambda}({}^9_{\Lambda}\text{Li})$, тем больше энергия отделения $2p$ в ${}^9_{\Lambda}\text{C}$. Таким образом $S_{2p}({}^9_{\Lambda}\text{C}) > 0$.

${}^9_{\Lambda}\text{C}$ связано!

Легкие экзотические Λ гиперядра

Энергия отделения $2p$ в ${}^{13}_{\Lambda}\text{O}$



${}^{12}\text{O}$ распадается с испусканием 2 протонов ($S_{2p}({}^{12}\text{O}) = -1,638 \text{ MeV}$), поэтому можно ожидать, что так же распадается ${}^{13}_{\Lambda}\text{O}$. Слева:

$$S_{2p}({}^{13}_{\Lambda}\text{O}) = S_{2p}({}^{12}\text{O}) + B_{\Lambda}({}^{13}_{\Lambda}\text{O}) - B_{\Lambda}({}^{11}_{\Lambda}\text{C})$$

exp \rightarrow \leftarrow calc \rightarrow

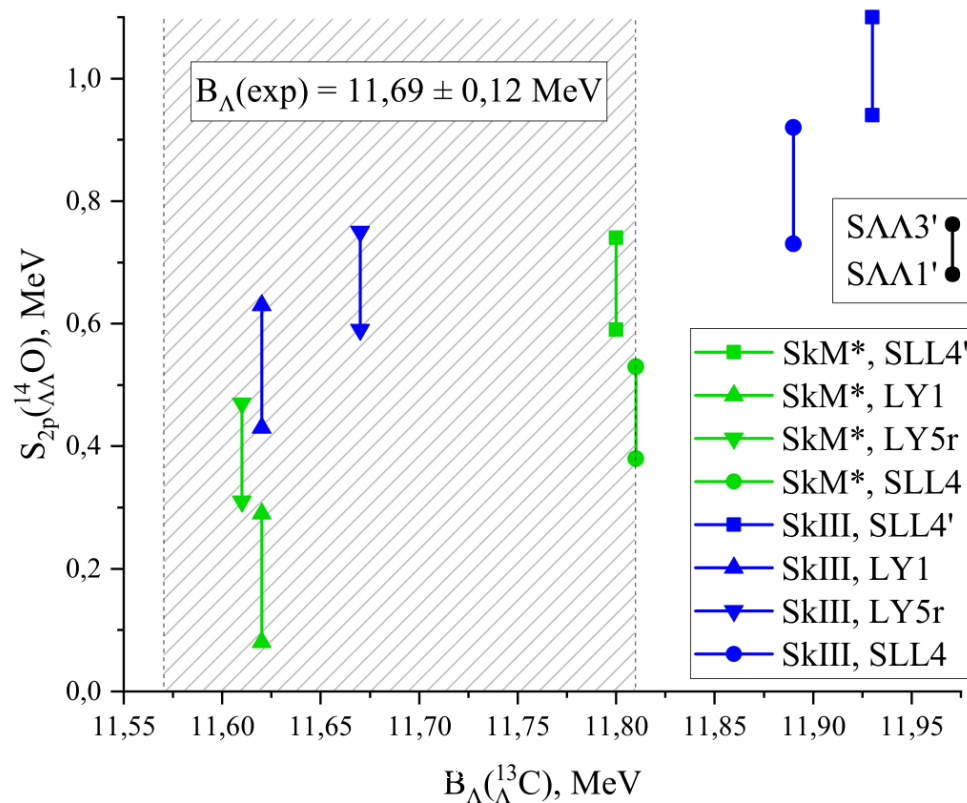
как функция $B_{\Lambda}({}^{13}_{\Lambda}\text{C})$. Большая часть результатов согласуется с экспериментальной энергией связи гиперона в ${}^{13}_{\Lambda}\text{C}$.

${}^{13}_{\Lambda}\text{O}$ не связано

${}^8_{\Lambda}\text{B}$, ${}^{12}_{\Lambda}\text{N}$ также не связаны

Легкие экзотические Λ гиперядра

Гиперядра с двойной странностью. Энергия отделения $2p$ в ${}^{14}_{\Lambda\Lambda}O$



$$S_{2p}({}^{14}_{\Lambda\Lambda}O) = S_{2p}({}^{12}O) + B_{\Lambda\Lambda}({}^{14}_{\Lambda\Lambda}O) - B_{\Lambda\Lambda}({}^{12}_{\Lambda\Lambda}C)$$

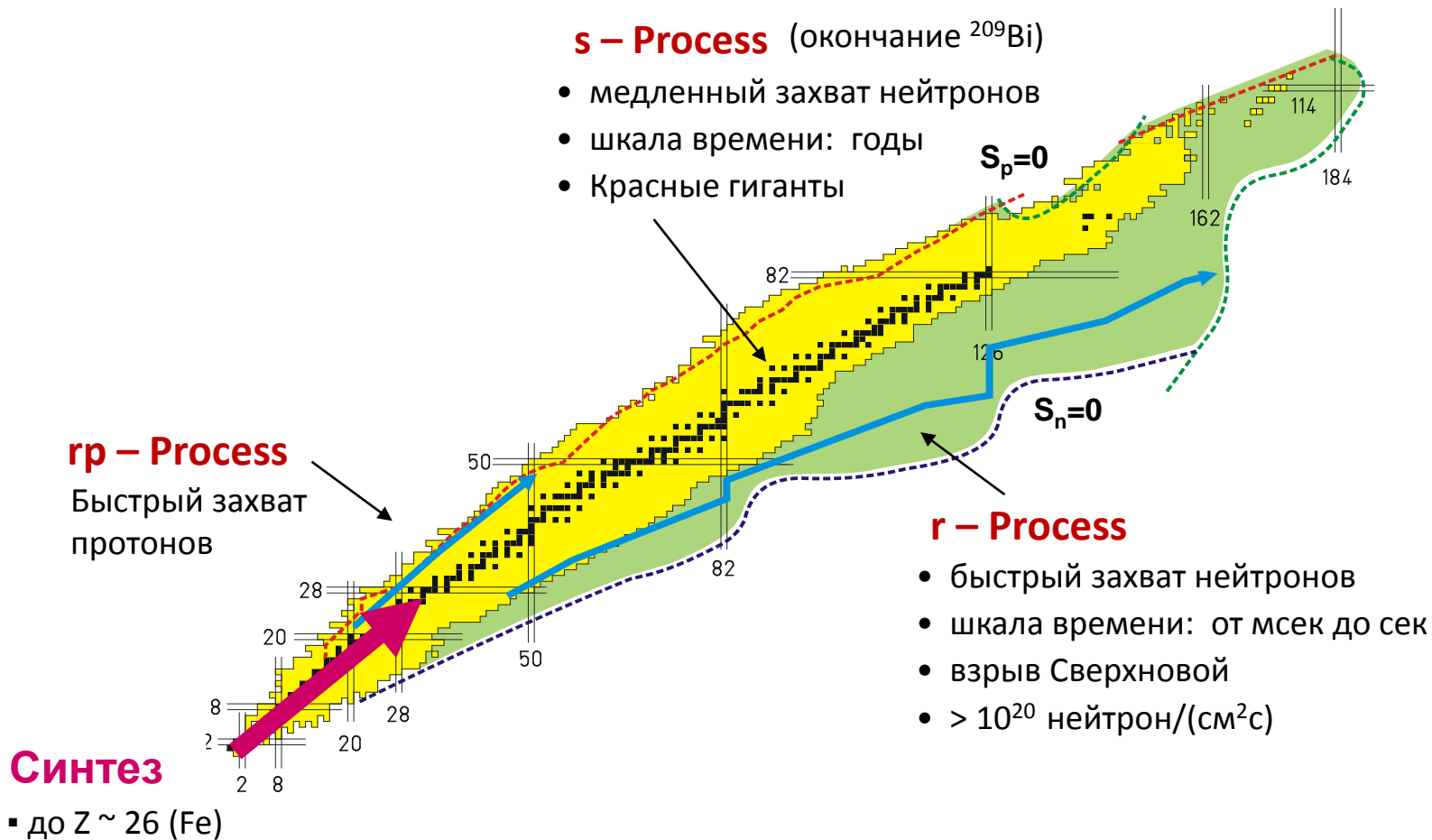
exp
cal
c

как функция $B_{\Lambda}({}^{13}_{\Lambda}C)$ для разных NN и ΛN взаимодействий Скирма. Ранее мы пришли к выводу, что ${}^{13}_{\Lambda}O$ не связан; добавление второго гиперона досвязывает гиперядро.

${}^{14}_{\Lambda\Lambda}O$ связано!

Массы неизвестных ядер и нуклеосинтез

Negrebetskiy, Vladimirova, Simonov, Stopani, Tretyakova PoS (PANIC2021)333



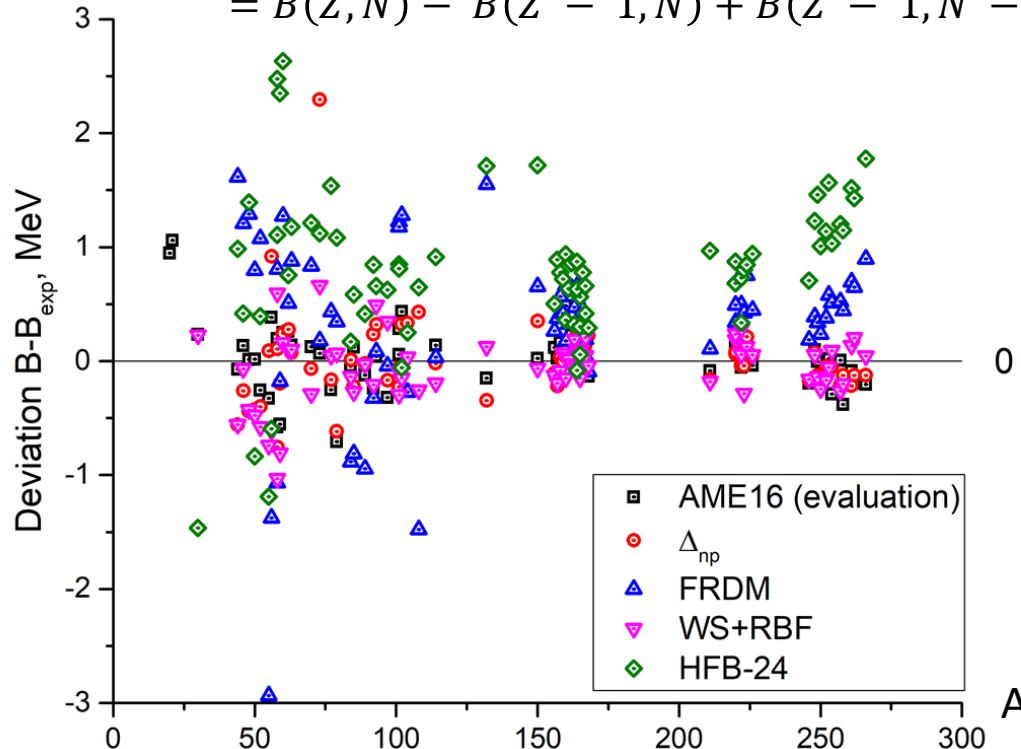
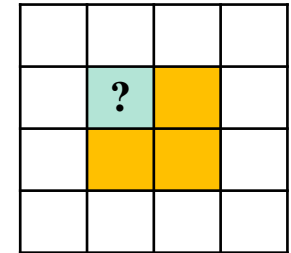
Метод локальных массовых соотношений

Массовое соотношение для оценки остаточного np -взаимодействия:

$$\begin{aligned} \Delta_{np}(Z, N) &= S_{np}(Z, N) - [S_p(Z, N - 1) + S_n(Z - 1, N)] = \\ &= [B(Z, N) - B(Z, N - 1)] - [B(Z - 1, N) - B(Z - 1, N - 1)] \end{aligned}$$

Предсказываемая энергия связи (1 из 4 возможных формул):

$$\begin{aligned} B_{pred}(Z, N - 1) &= \\ &= B(Z, N) - B(Z - 1, N) + B(Z - 1, N - 1) - \Delta_{np}^{approx}(Z, N) \end{aligned}$$



Среднеквадратичное отклонение, кэВ

Результат Δ_{np} 381

WS+RBF (macro-microscopic) 298

[Na-Na Ma et al. Chinese Phys. C. 43 (2019)]

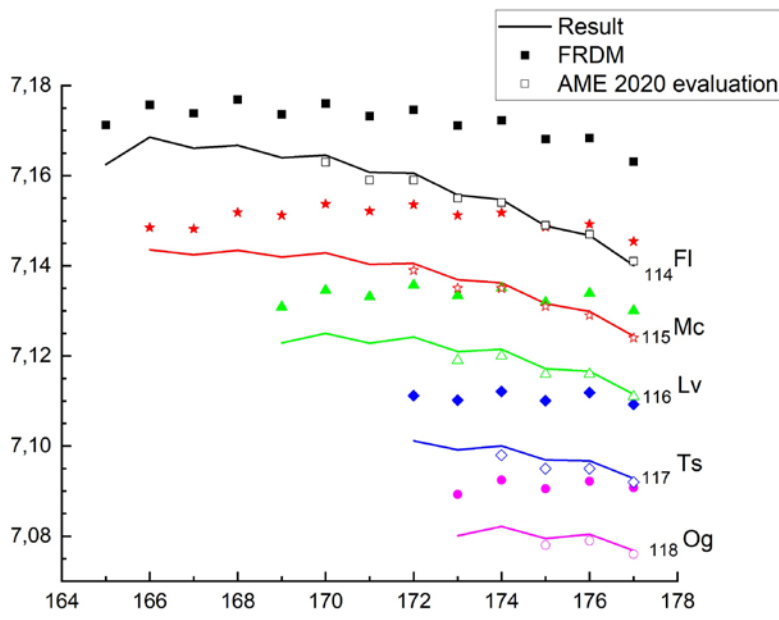
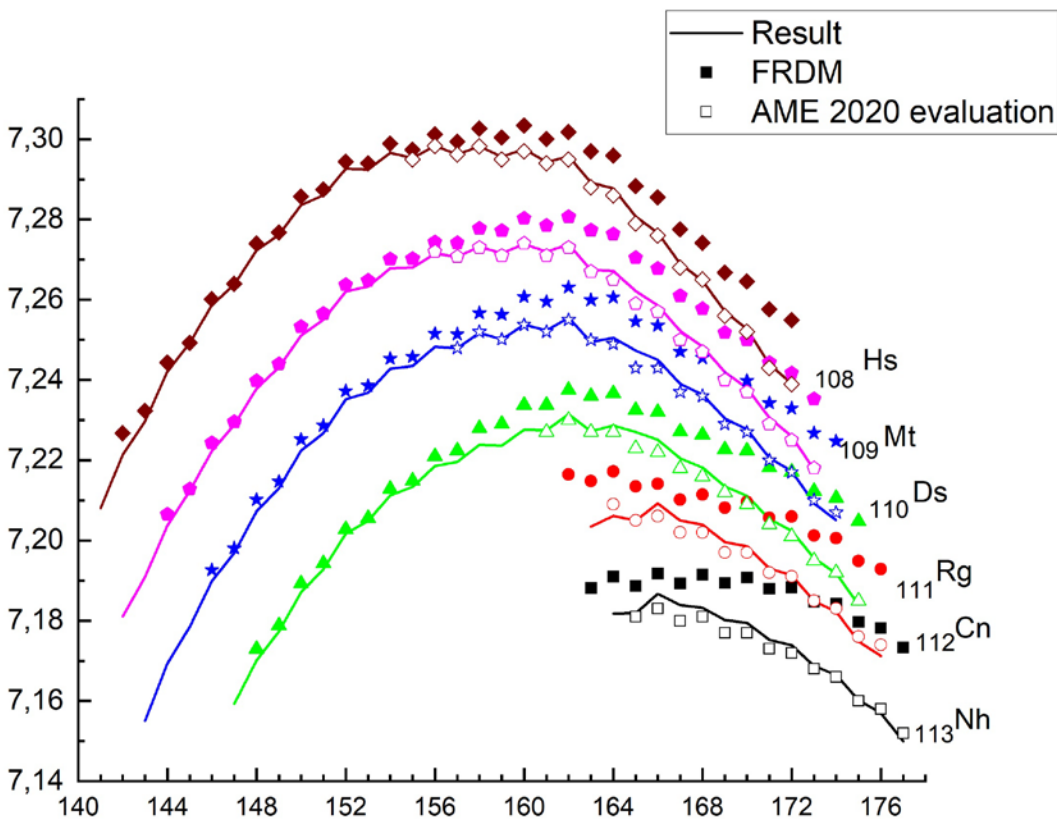
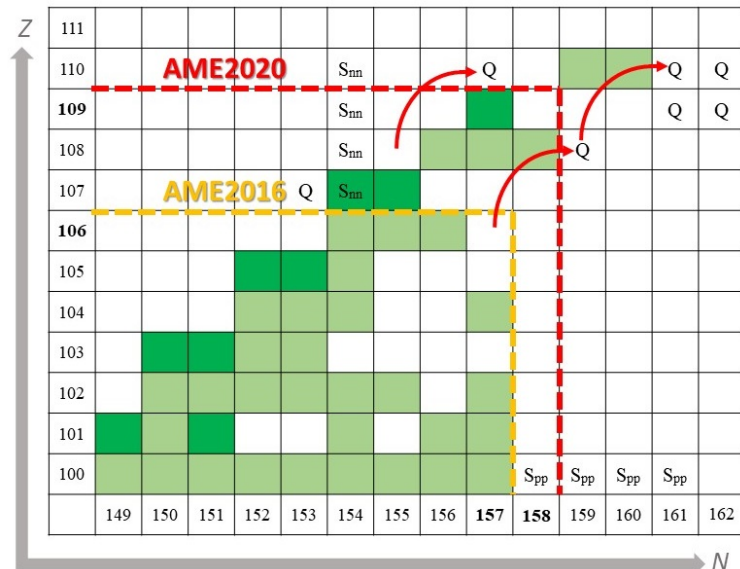
HFB-24 model (microscopic) 715

[Goriely S. et al. Phys. Rev. Lett. 102. 152503 (2015)]

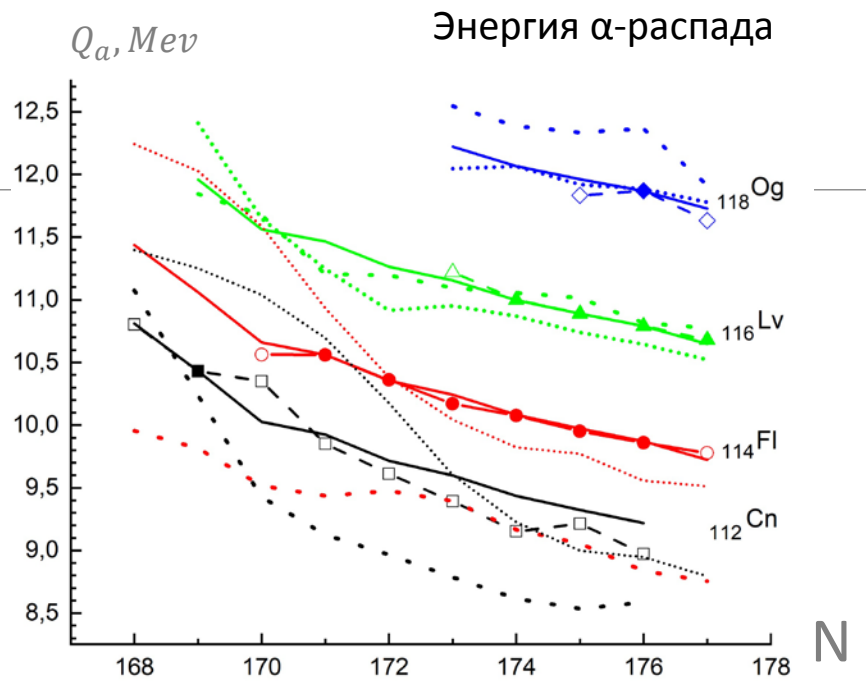
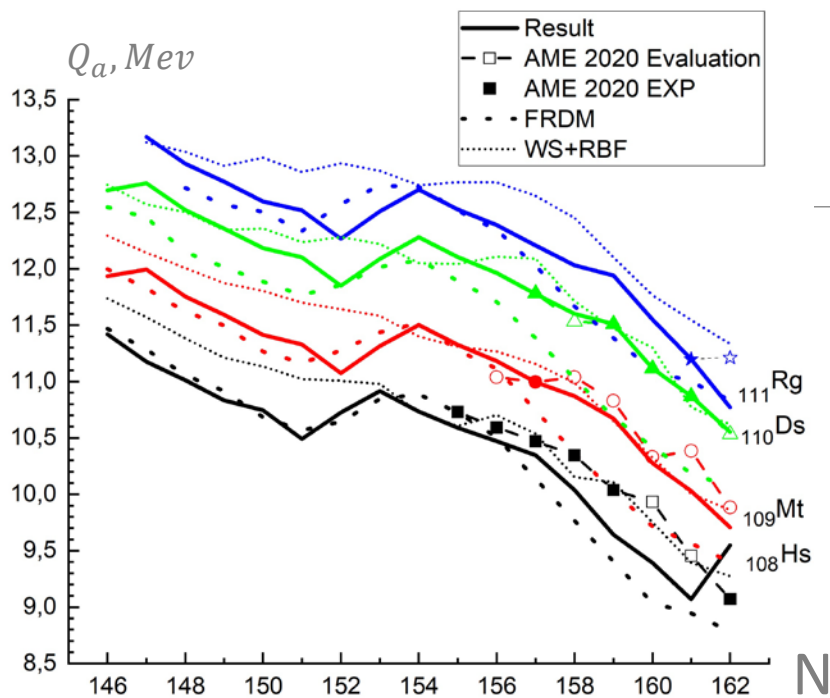
FRDM (macro-microscopic) 791

[Moller P. et al., ADNDT. 59. 185 (2016)]

Результаты: сверхтяжелые элементы



Результаты: сверхтяжелые элементы

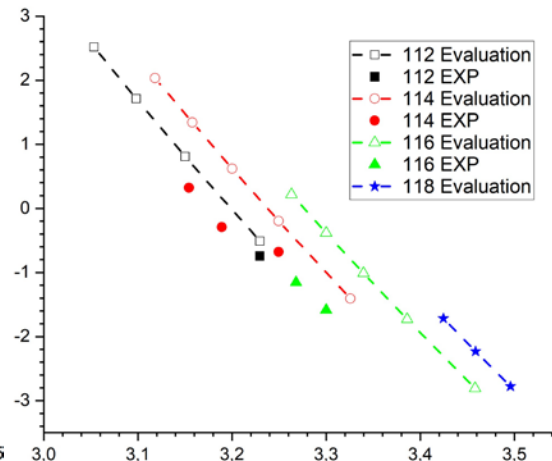
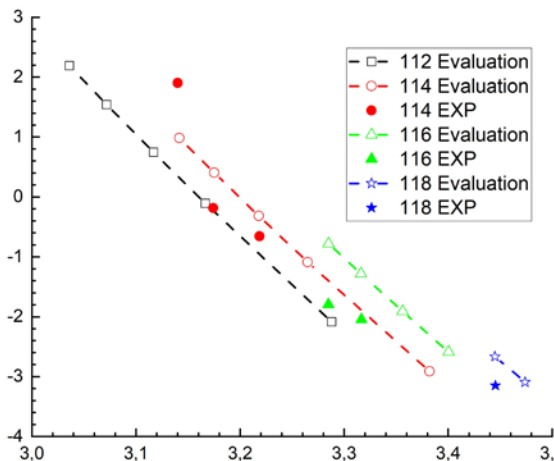


Период полураспада по α -каналу

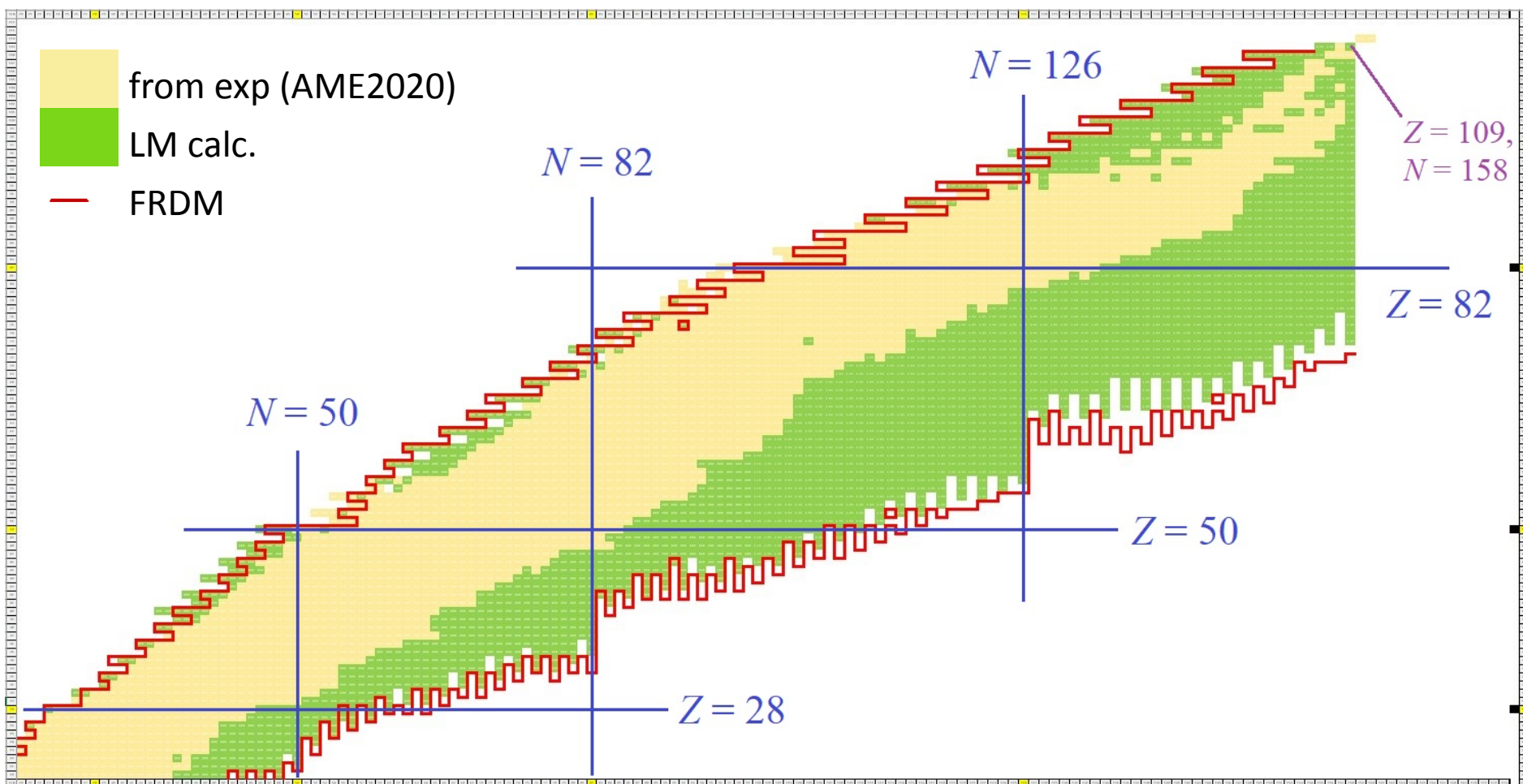
$$\lg T_\alpha = \frac{(cZ+d)}{\sqrt{Q}} + (fZ+e) + h_{\log}$$

Viola et al 1966

Parkhomenko Sobiczewski 2005



Результаты: границы стабильности



AME2020: Wang et al. Chinese Phys. C 45, 030003 (2021).

FRDM: Moller P. et al., ADNDT. 59. 185 (2016)

Система уравнений нуклеосинтеза:

$$\frac{dY_i}{dt} = \underbrace{\sum_k (\bar{\varphi}) \lambda_k Y_k}_{\text{распады}} + \underbrace{\sum_j (\bar{\varphi}) \lambda_j Y_{j1} Y_{j2}}_{\text{2х част. реакции}} + \underbrace{\sum_l (\bar{\varphi}) \lambda_l Y_{l1} Y_{l2} Y_{l3}}_{\text{3х част. реакции}}$$

Y_i - концентрации изотопов (> 7500 нуклидов)

λ_k - скорости реакций ($\sim 10^5$ процессов)

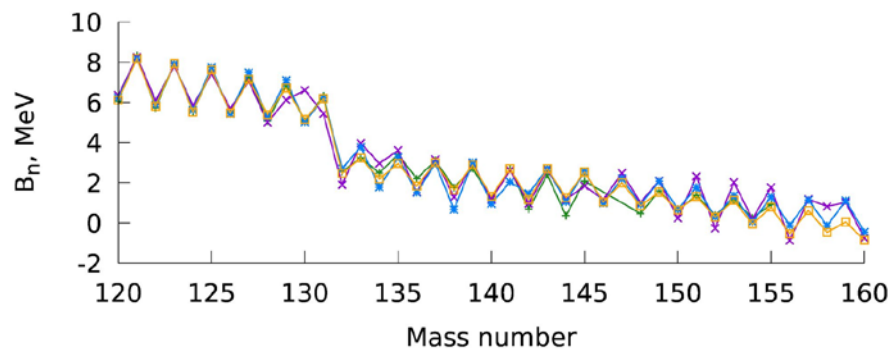
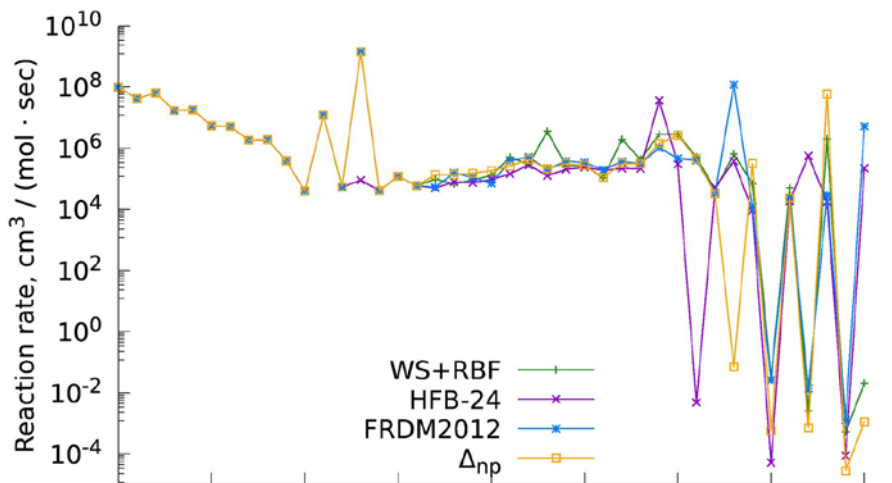
Скорость реакции нейтронного захвата

$$\lambda(T) = \sqrt{\frac{8}{\pi m}} \frac{N_A}{(kT)^{3/2} G(T)} \int_0^\infty \sum_\mu \frac{(2I^\mu + 1)}{(2I^0 + 1)} \sigma^\mu(E) E \exp\left(-\frac{E + E_x^\mu}{kT}\right) dE$$

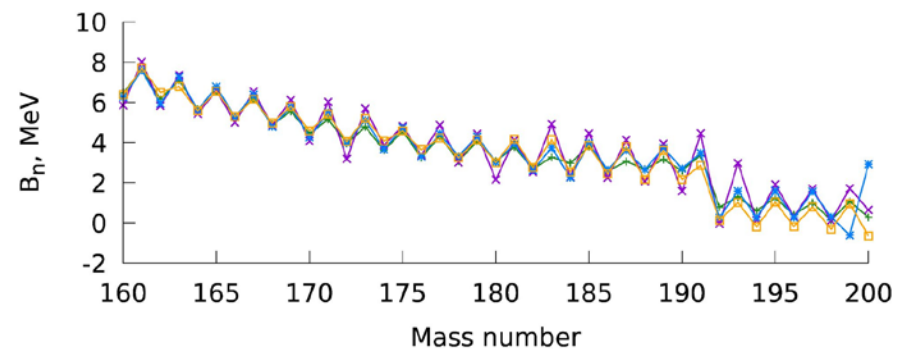
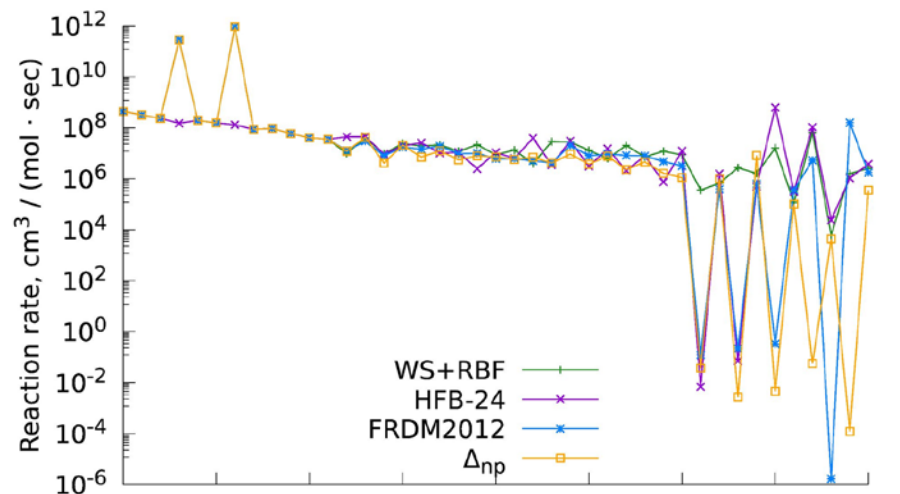
Влияние выбора массовой модели на скорости (n,γ) реакций

Оценка скоростей реакций (n,γ) на нейтронноизбыточных изотопах

Indium

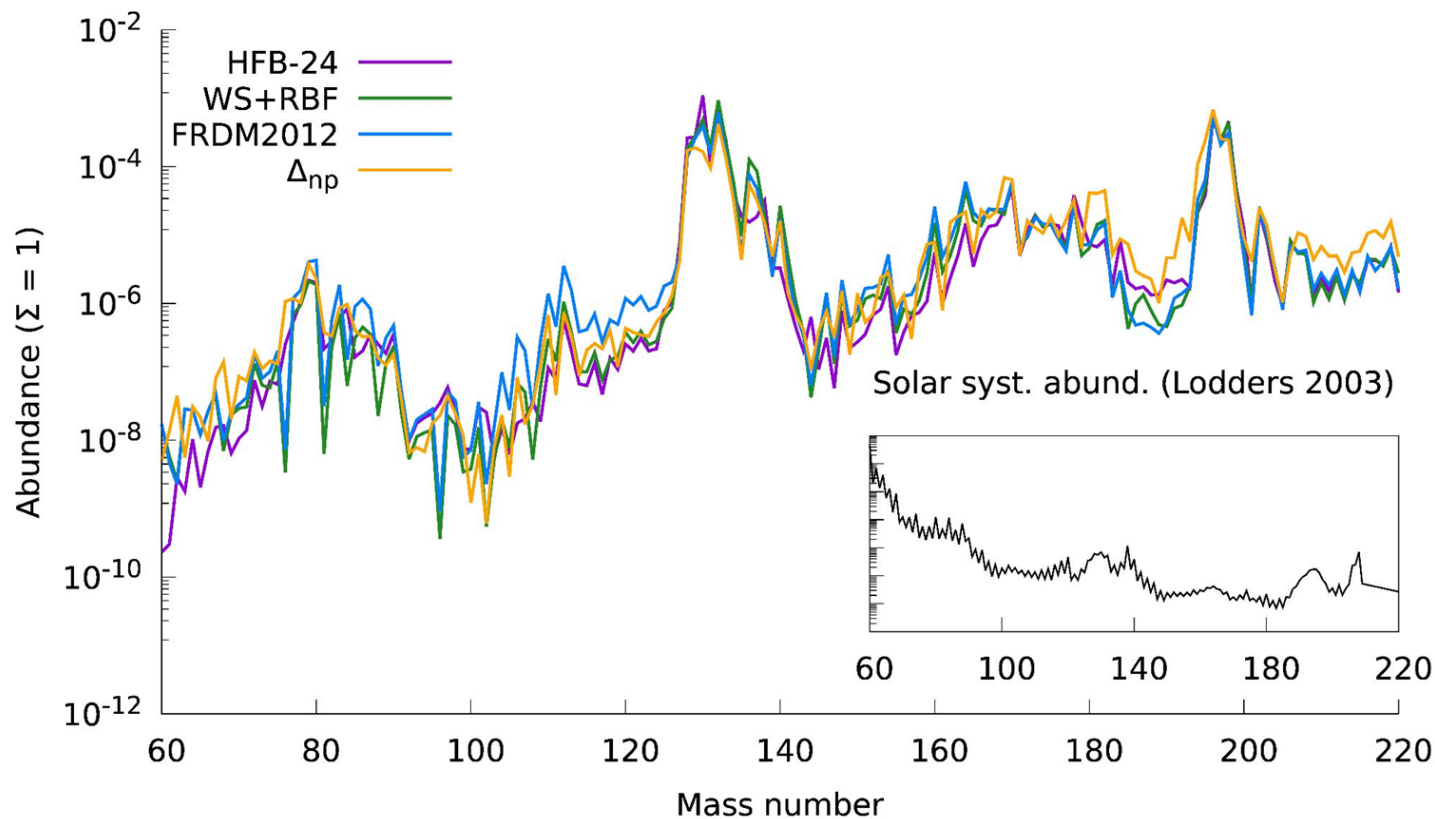


Terbium



TALYS package (Koning et al., Nucl. D. Sheets. 2019)

Результаты: применение оценок энергий для астрофизических расчетов



FRDM: Moller P. et al., *ADNDT*. 59. 185 (2016)

WS+RBF: Na-Na Ma et al. *Chinese Phys. C*. 43 (2019)

HFB-24: Goriely S. et al. *Phys. Rev. Lett.* 102. 152503 (2015)

Адронная материя в нейтронных звездах

Михеев, Ланской, Насакин, Третьякова ЯДРО 2022, Москва

$N_u \sim N_d \sim N_s$ Странность в нейтронных звездах ($\rho > 3 - 4\rho_0$)



Странность адронной материи ($A \rightarrow \infty$)

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

Рост плотности



Λ



p n

Z

-2

-1

0

Λ, Σ Гиперядра

$\Lambda\Lambda, \Xi$ Гиперядра

N

Адронная материя в нейтронных звездах

- **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 $M > 2M_s$
 - J0740+6620: $M = 2.14 \pm 0.10 M_{\odot}$ [Cromartie et al. 2020]
 - PSR J0348+0432: $M = 2.01 \pm 0.04 M_{\odot}$ [Antoniadis et al. 2013]
 - PSR J164-2230: $M = 1.93 \pm 0.02 M_{\odot}$ [Demorest et al. 2010]
- измерен сигнал от слияния двух нейтронных звёзд (**GW170817**): оценка приливной деформируемости, сигнал r-процесса

Адронная 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

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

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

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

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

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

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

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

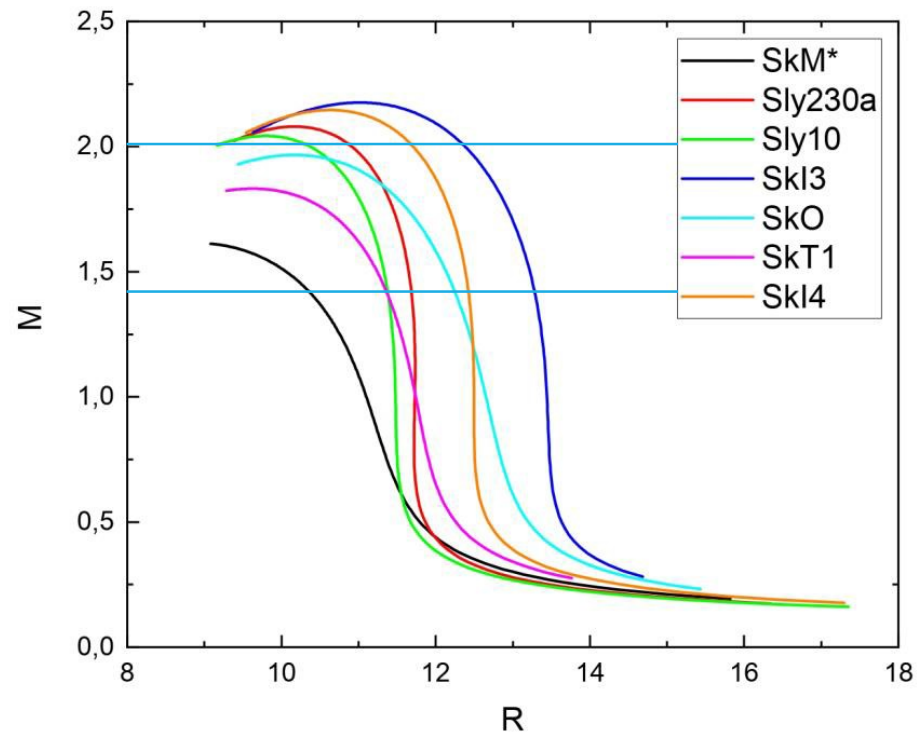
Адронная материя в нейтронных звездах

Уравнение Оппенгеймера-Волкова

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

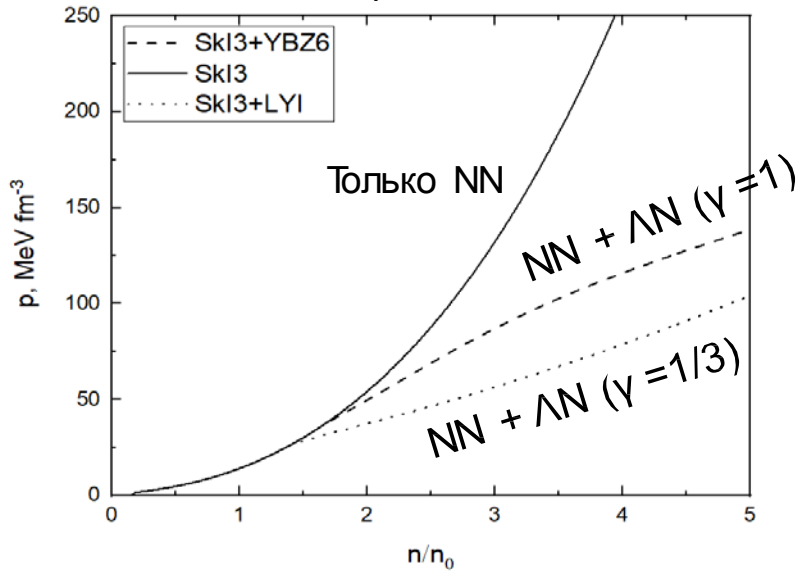
$$\frac{dm}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r)$$

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

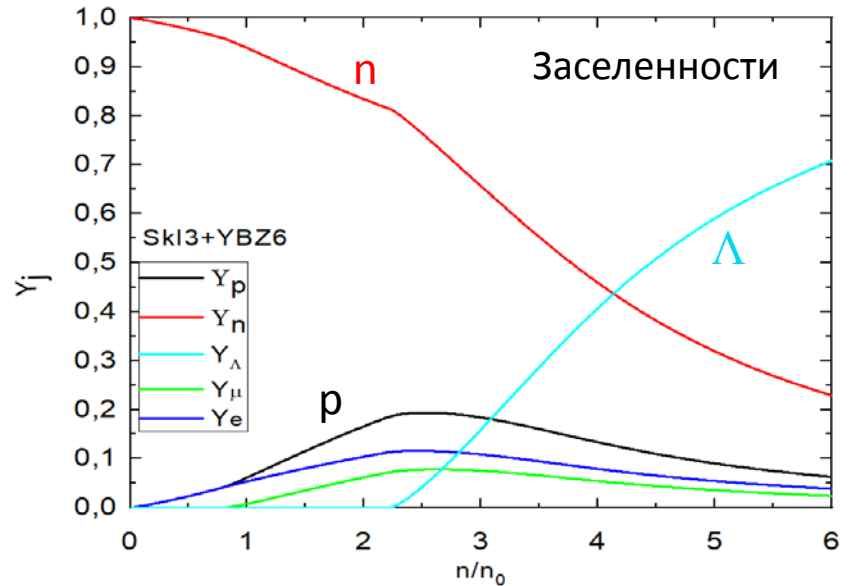
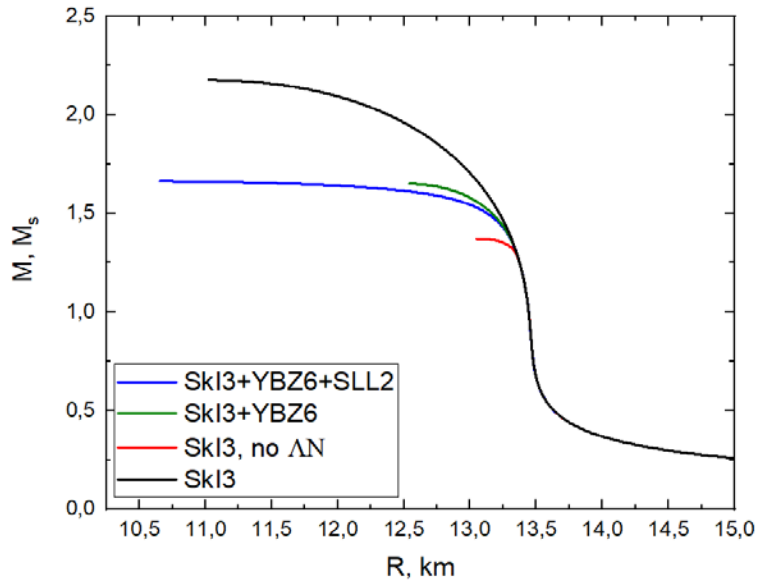
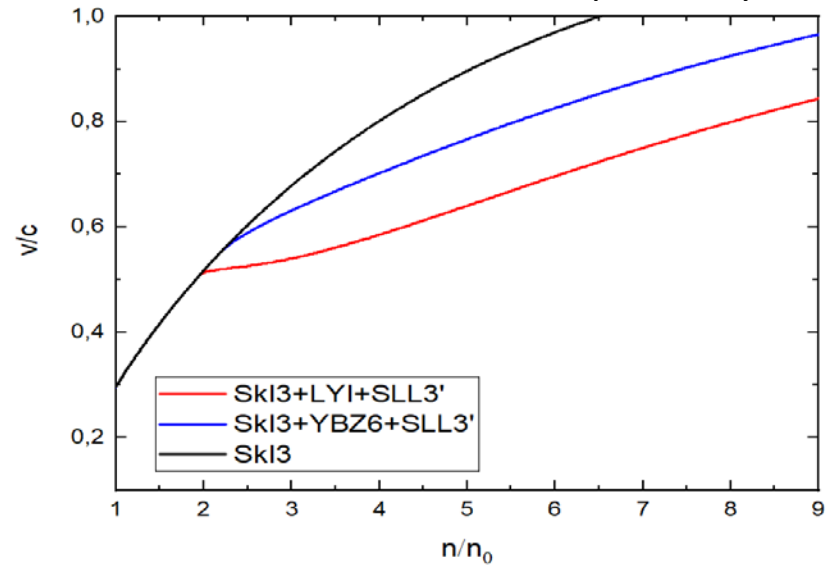


Hyperon puzzle

Уравнение состояния



Скорость звука



Адронная материя в нейтронных звездах

Приливная деформируемость

Коэффициент приливной деформируемости определяется как 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

$$M_{chirp} = 1.186_{-0.001}^{+0.001} \quad M_{chirp} = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}}$$
$$\bar{\Lambda} \leq 900 \quad \bar{\Lambda} = \frac{16(m_1 + 12m_2)m_1^4 \Lambda_1 + (m_2 + 12m_1)m_2^4 \Lambda_2}{13(m_1 + m_2)^5}$$

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

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

Адронная материя в нейтронных звездах

Приливная деформируемость

Расчет

$$r \frac{dy(r)}{dr} + y(r)^2 + y(r)F(r) + r^2 Q(r) = 0$$

$$F(r) = \frac{r - 4\pi r^3 [\epsilon(r) - p(r)]}{r - 2m(r)}$$

$$Q(r) = \frac{4\pi r \left[5\epsilon(r) + 9p(r) + \frac{\epsilon(r) + p(r)}{\partial p(r) / \partial \epsilon(r)} - \frac{6}{4\pi r^2} \right]}{r - 2m(r)} - 4 \left[\frac{m(r) + 4\pi r^3 p(r)}{r^2 [1 - 2m(r)/r]} \right]$$

$$y_R \equiv y(R), \quad C \equiv m/R$$

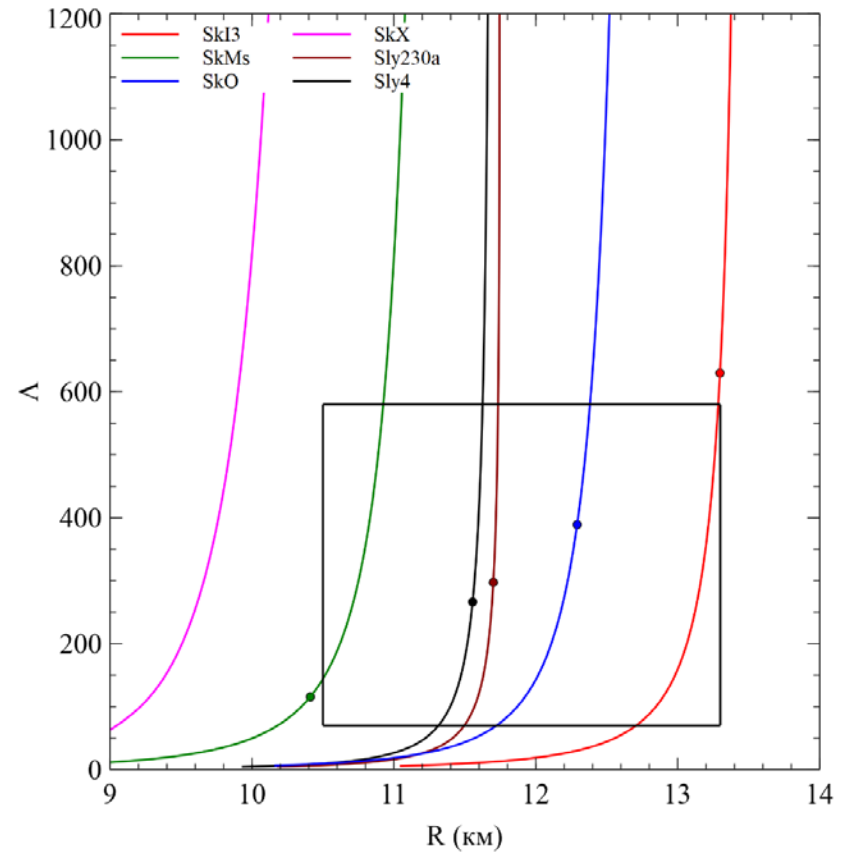
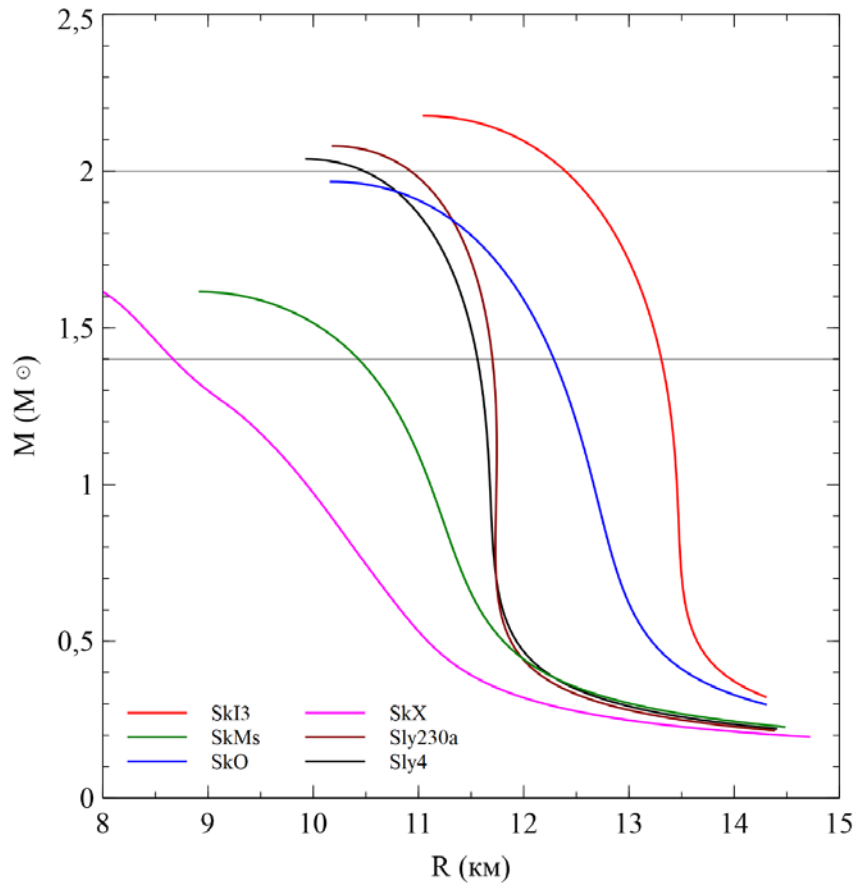
$$k_2 = f(y_R, C)$$

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

[1]Tuhin Malik, Phys. Rev. C 98 035804 (2018)

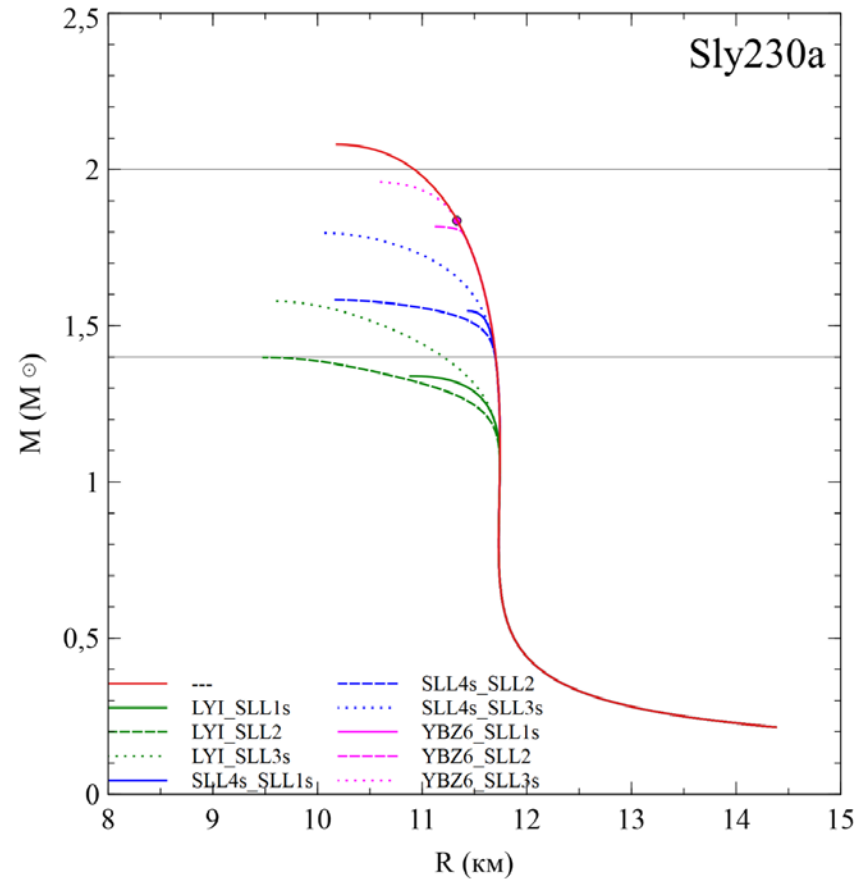
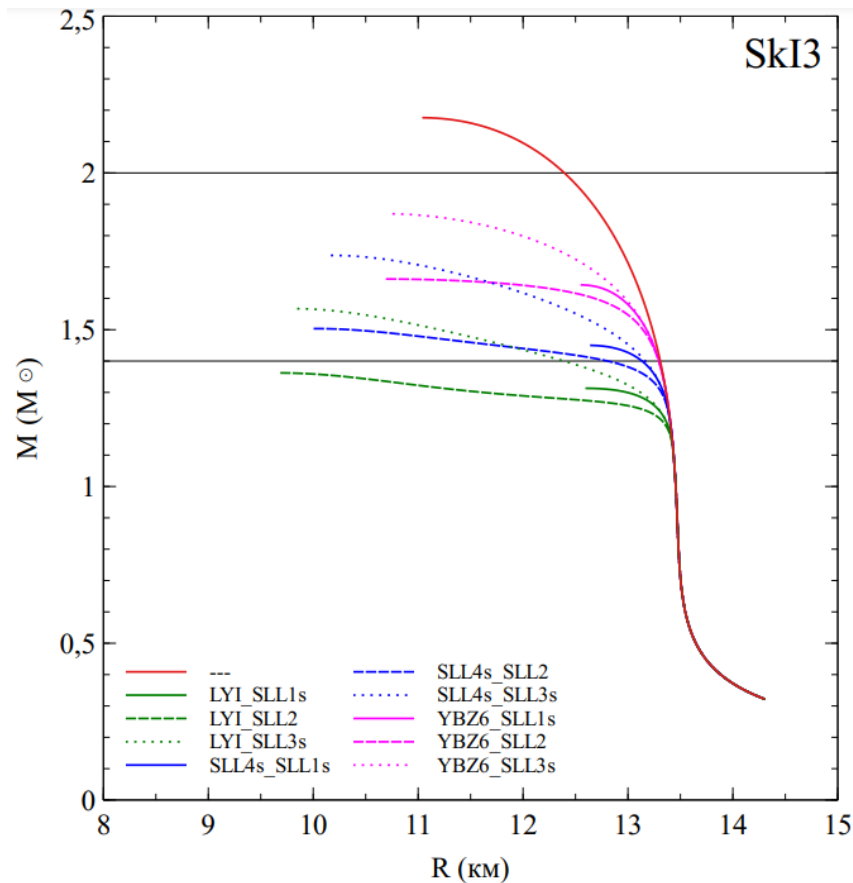
Адронная материя в нейтронных звездах

Характеристики нейтронных звезд для различных параметризаций NN сил



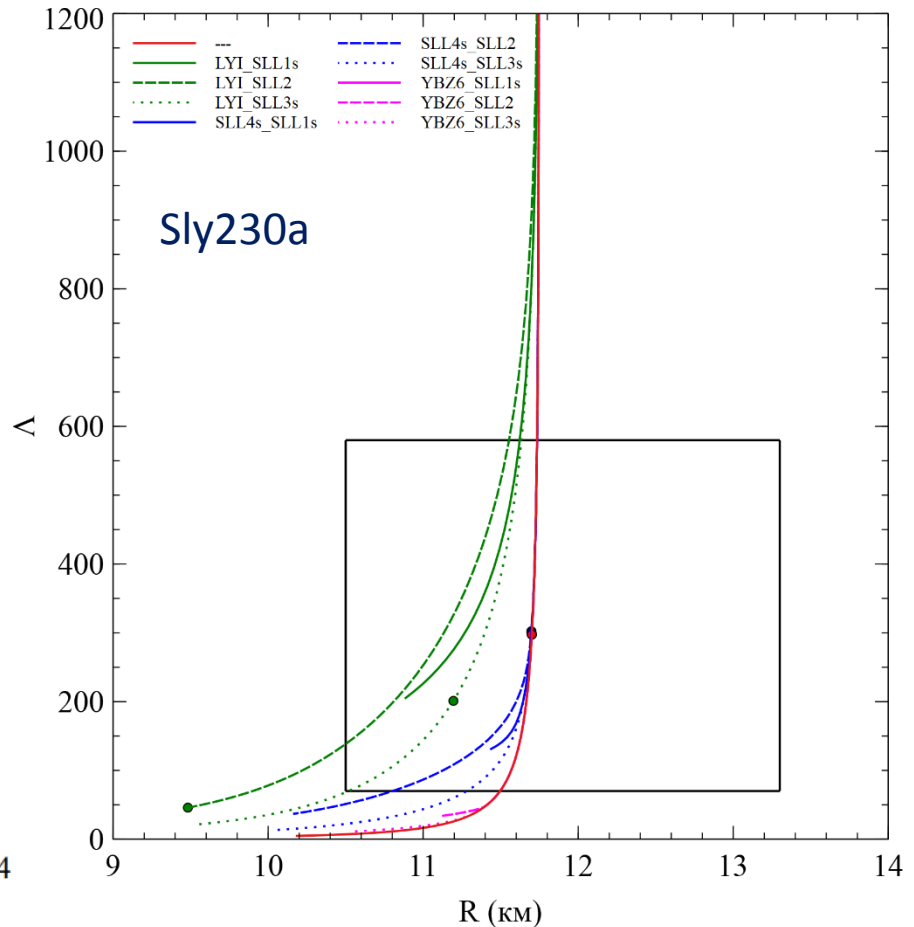
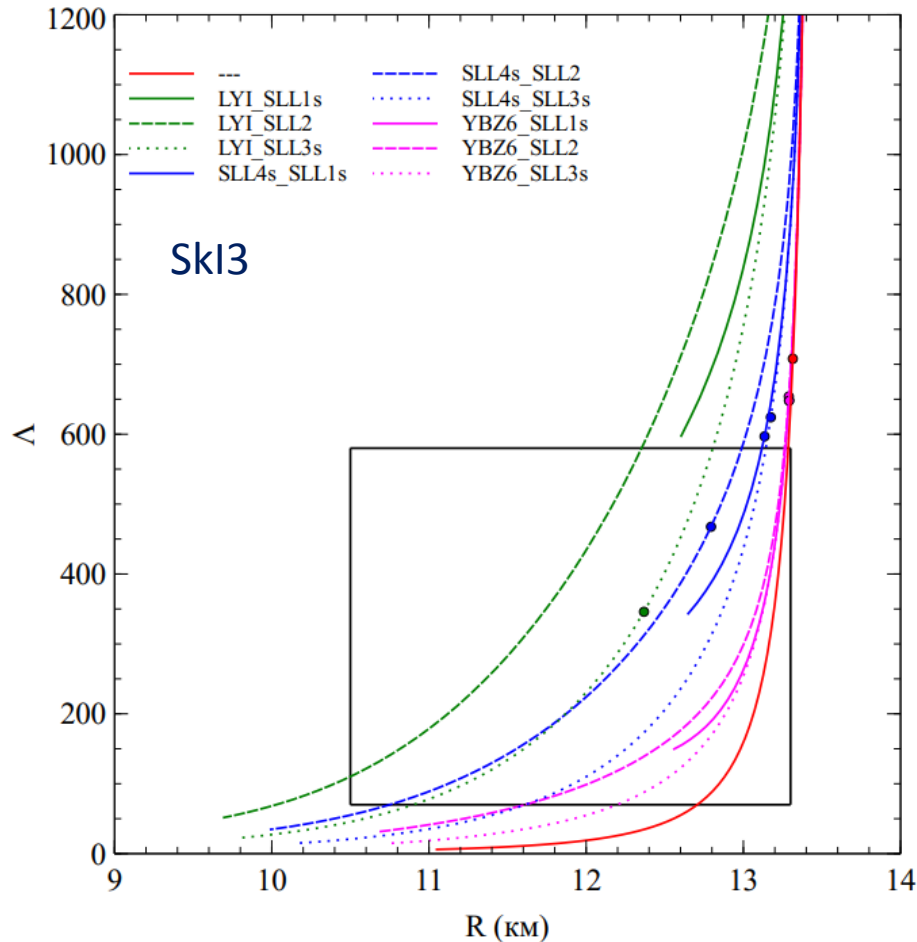
Адронная материя в нейтронных звездах

Характеристики нейтронных звезд для различных параметризаций ΛN и Λ сил



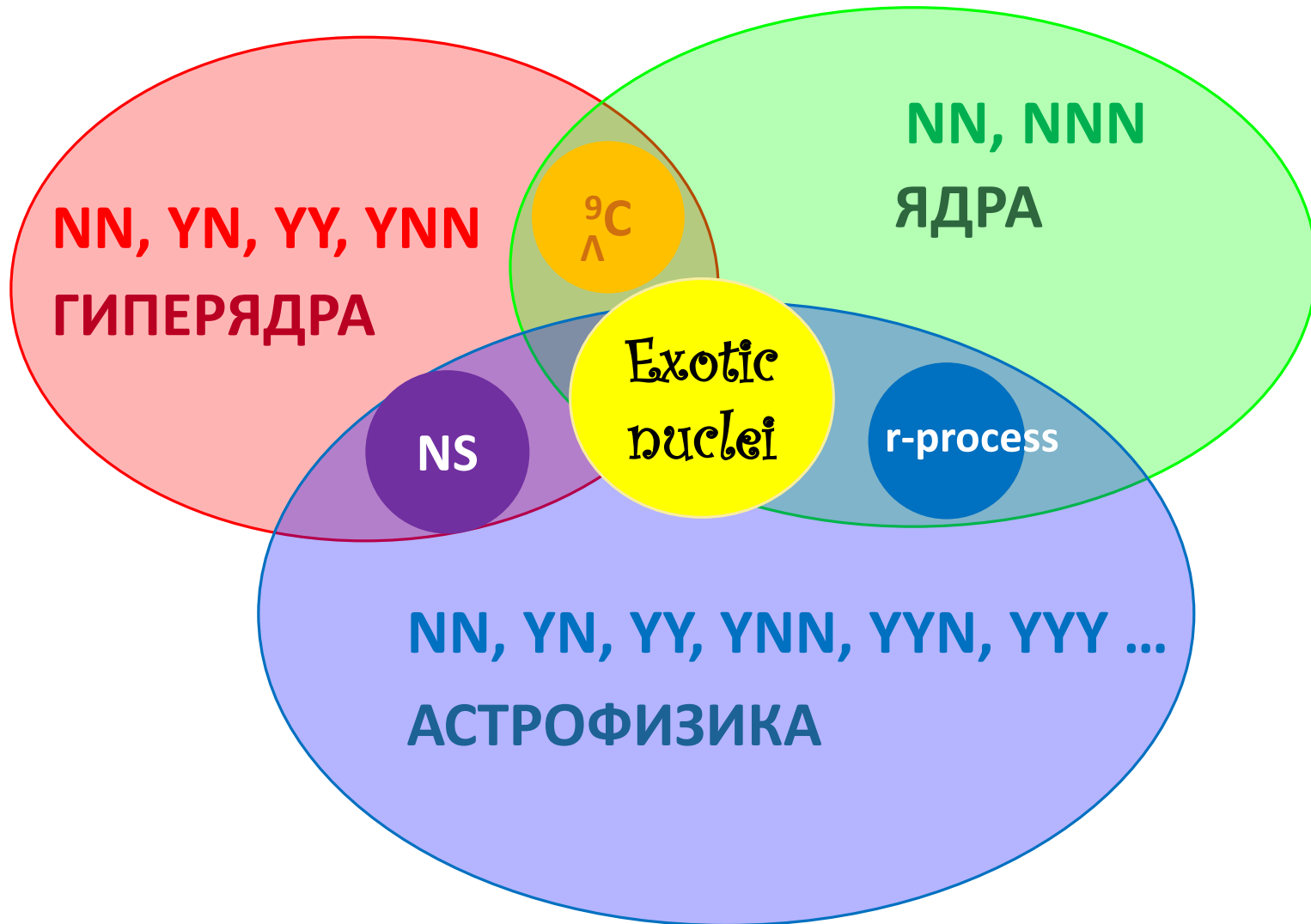
Адронная материя в нейтронных звездах

Зависимость приливной деформируемости от радиуса звезды для материи включающей гипероны



Экстремальное состояние вещества

ФИЗИКА ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ