МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ М. В. ЛОМОНОСОВА
КАФЕДРА ОБЩЕЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

СВОЙСТВА МАТЕРИИ НЕЙТРОННЫХ ЗВЁЗД И ЭФФЕКТИВНЫЕ БАРИОН-БАРИОННЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Выполнил: Михеев Семен Алексеевич
Научный руководитель: к.ф. - м.н. Третьякова Татьяна Юрьевна

Москва 2020

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ

- Построение уравнения состояния бесконечной ядерной материи с использованием эффективного взаимодействия Скирма
- Изучение влияния энергии симметрии на свойства равновесной ядерной материи
- Расчет характеристик нейтронных звезд с использованием полученного уравнения состояния

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СКИРМА

$$
\begin{aligned}
V(\vec{r_1}, \vec{r_2}) = {} & t_0(1 + x_0 P_\sigma)\delta(\vec{r}) \\
& + \frac{1}{2} t_1 (1 + x_1 P_\sigma)[\vec{P}'^2 \delta(\vec{r}) + \delta(\vec{r}) \vec{P}^2] \\
& + t_2 \vec{P}' \delta(\vec{r}) \vec{P} \\
& + \frac{1}{6} t_3 (1 + x_3 P_\sigma)[\rho(\vec{R})]^\sigma \delta(\vec{r}) \\
& + i W_0 \vec{\sigma} [\vec{P}' \times \delta(\vec{r}) \vec{P}]
\end{aligned}
$$

$\vec{r} = \vec{r}_1 - \vec{r}_2$, $\vec{R} = \frac{1}{2}(\vec{r}_1 + \vec{r}_2)$, $\vec{P} = \frac{1}{2i}(\nabla_1 - \nabla_2)$, $\vec{\sigma} = \vec{\sigma}_1 + \vec{\sigma}_2$, $P_\sigma = \frac{1}{2}(1 + \vec{\sigma}_1 \vec{\sigma}_2)$

ФОРМАЛИЗМ.
УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ЯДЕРНОЙ МАТЕРИИ

Энергия на нуклон

$$\begin{aligned}\varepsilon(Y_p,n) = \frac{E}{A} = \frac{H}{n} = \frac{3}{5}\frac{\hbar^2}{2m}(\frac{3\pi^2}{2})^{2/3}n^{2/3}F_{5/3} \\ + \frac{1}{8}t_0 n[2(x_0+2)-(2x_0+1)F_2] \\ + \frac{1}{48}t_3 n^{\sigma+1}[2(x_3+2)-(2x_3+1)F_2] \\ + \frac{3}{40}(\frac{3\pi^2}{2})n^{5/3}[[t_1(x_1+2)+t_2(x_2+2)]F_{5/3} \\ + \frac{1}{2}[t_2(2x_2+1)-t_1(2x_1+1)]F_{8/3}],\end{aligned}$$

$$F_m(Y_p) = 2^{m-1}[{Y_p}^m + (1-Y_p)^m]$$

Энергетическая и массовая плотность

$$\epsilon(n_e,n_p,n_n,n_\mu) = n_b\varepsilon + n_n m_n c^2 + n_p m_p c^2 + \epsilon_e(n_e) + \epsilon_\mu(n_\mu)$$

$$\rho(n) = \frac{\epsilon(n)}{c^2}$$

Энергия симметрии и её производные

$$a_s = \frac{1}{8}\frac{\partial^2\varepsilon}{\partial Y_p^2}_{Y_p=1/2}$$

$$L = 3n_0(\frac{\partial a_s}{\partial n})_{n=n_0}$$

$$K_{sym} = 9n_0^2(\frac{\partial^2 a_s}{2})_{n=n_0}$$

Давление

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

Условия равновесия

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

Химические потенциалы

$$\mu_p = \varepsilon(n,Y_p) + n\frac{\partial\varepsilon}{\partial n}(n,Y_p) + (1-Y_p)\frac{\partial\varepsilon}{\partial Y_p}(n,Y_p)$$

$$\mu_n = \varepsilon(n,Y_p) + n\frac{\partial\varepsilon}{\partial n}(n,Y_p) - Y_p\frac{\partial\varepsilon}{\partial Y_p}(n,Y_p)$$

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

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

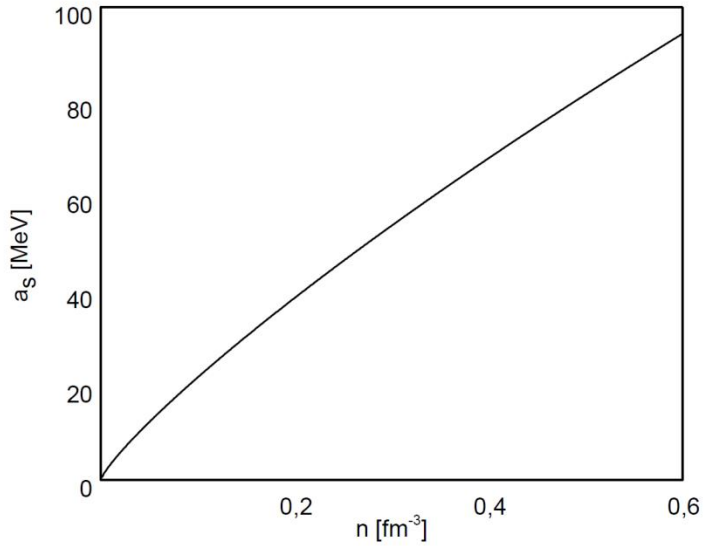
Заселённости

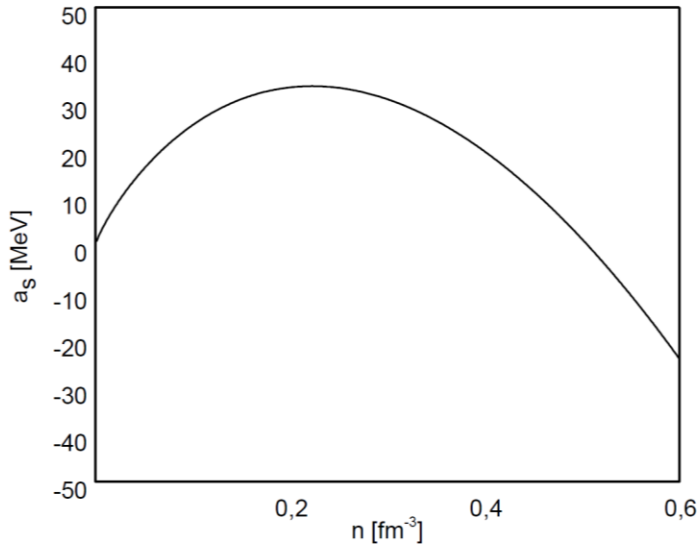
$$Y_i = \frac{n_i}{n_b},$$

$$n_b = n_n + n_p$$

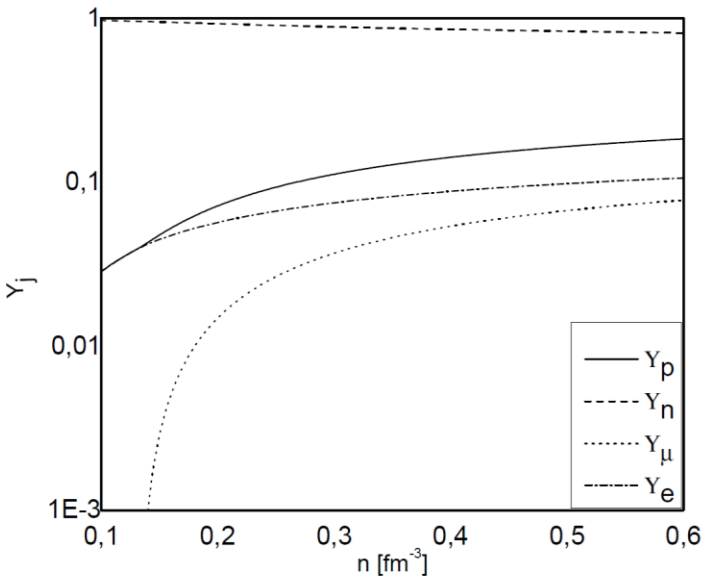
ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГИИ СИММЕТРИИ

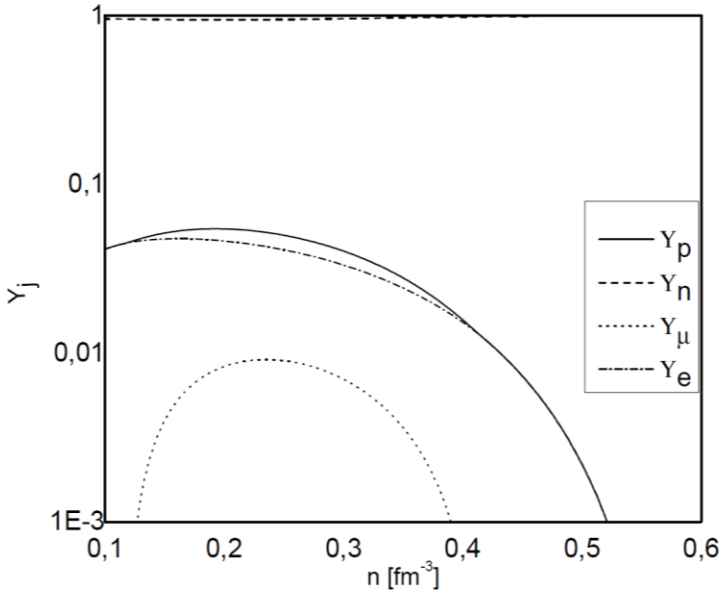
Зависимости энергии симметрии от плотности





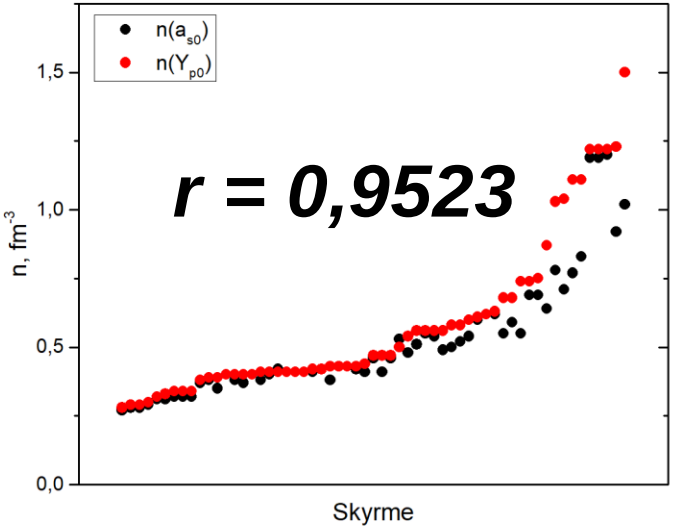
Зависимости заселённостей от плотности



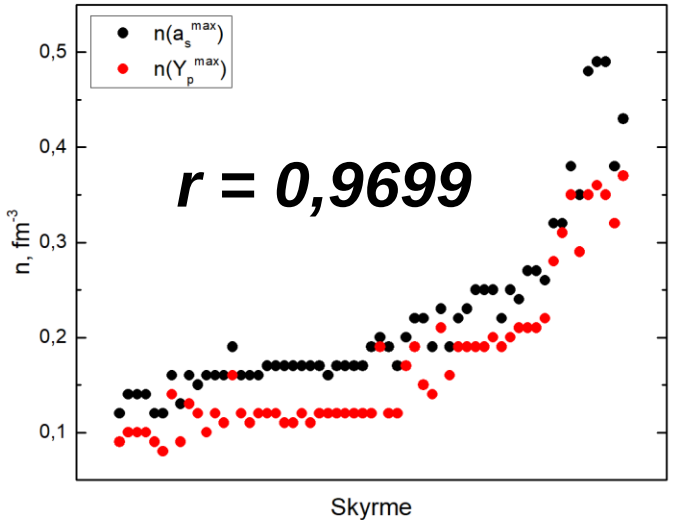


ЭНЕРГИЯ СИММЕТРИИ

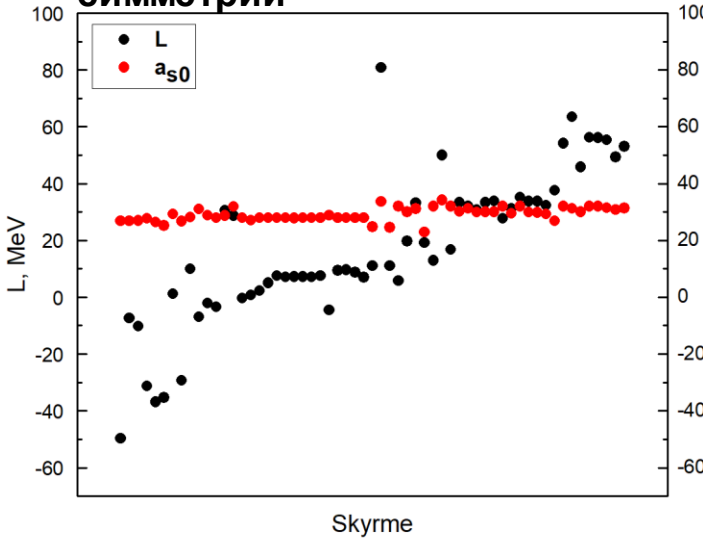
Плотности при достижении нуля



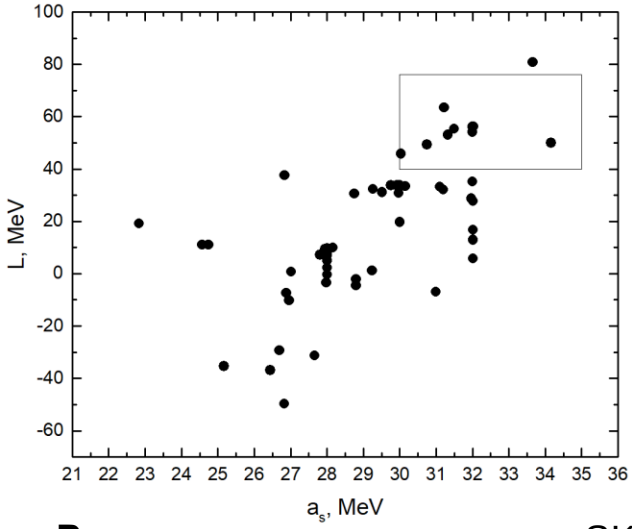
Плотности при достижении максимума



Первая производная энергии симметрии



Ограничения



J. R. Stone, P. D. Stevenson, Phys. Rev C 85 035201 (2012)

Разумные параметризации: SKRA, SKT1, SKT2, SKT3, SKT4, SKM, SKM*, SIV, SII

НЕЙТРОННЫЕ ЗВЕЗДЫ

Уравнение Оппенгеймера-Волкова

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

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

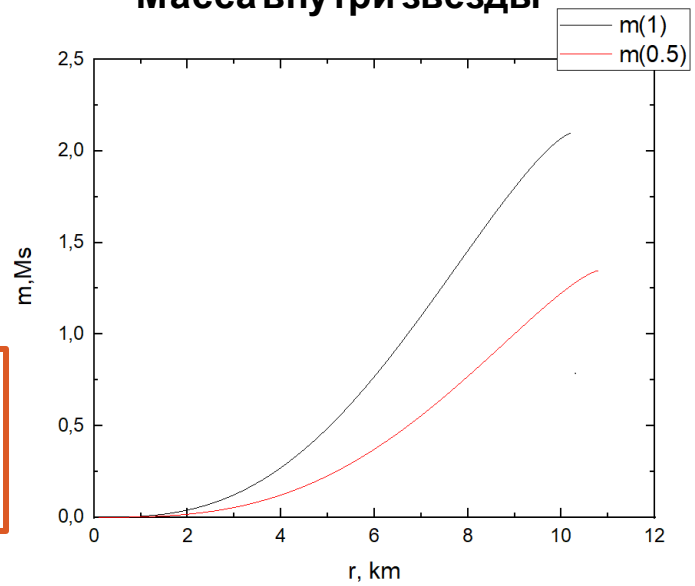
Полная масса звезды

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

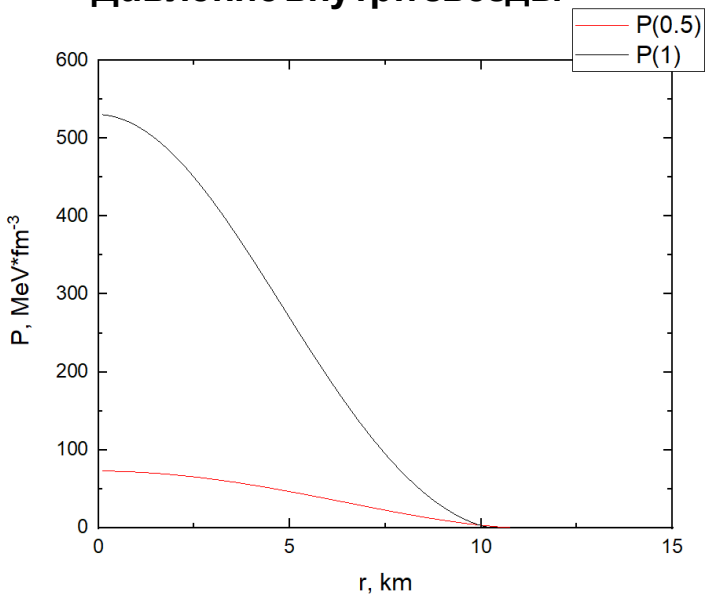
Число барионов

$$A = \int_0^R \frac{4\pi r^2 n dr}{(1 - (2Gm(r)/rc^2)^{1/2})}$$

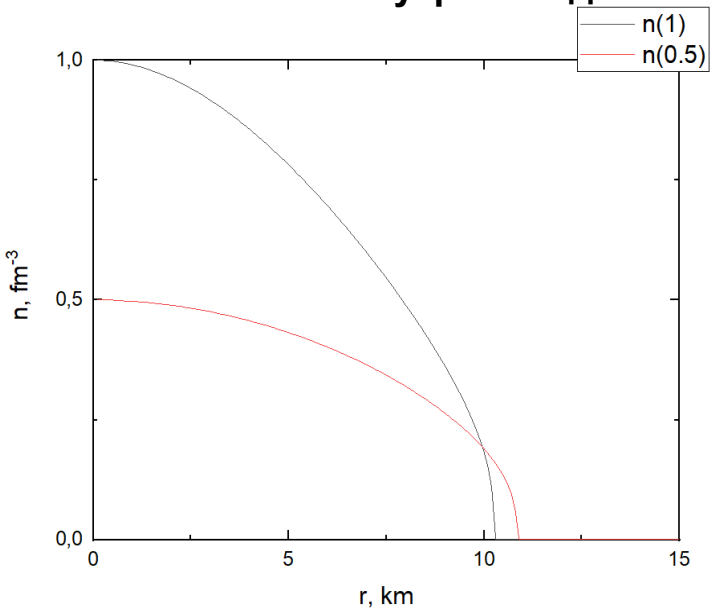
Масса внутри звезды



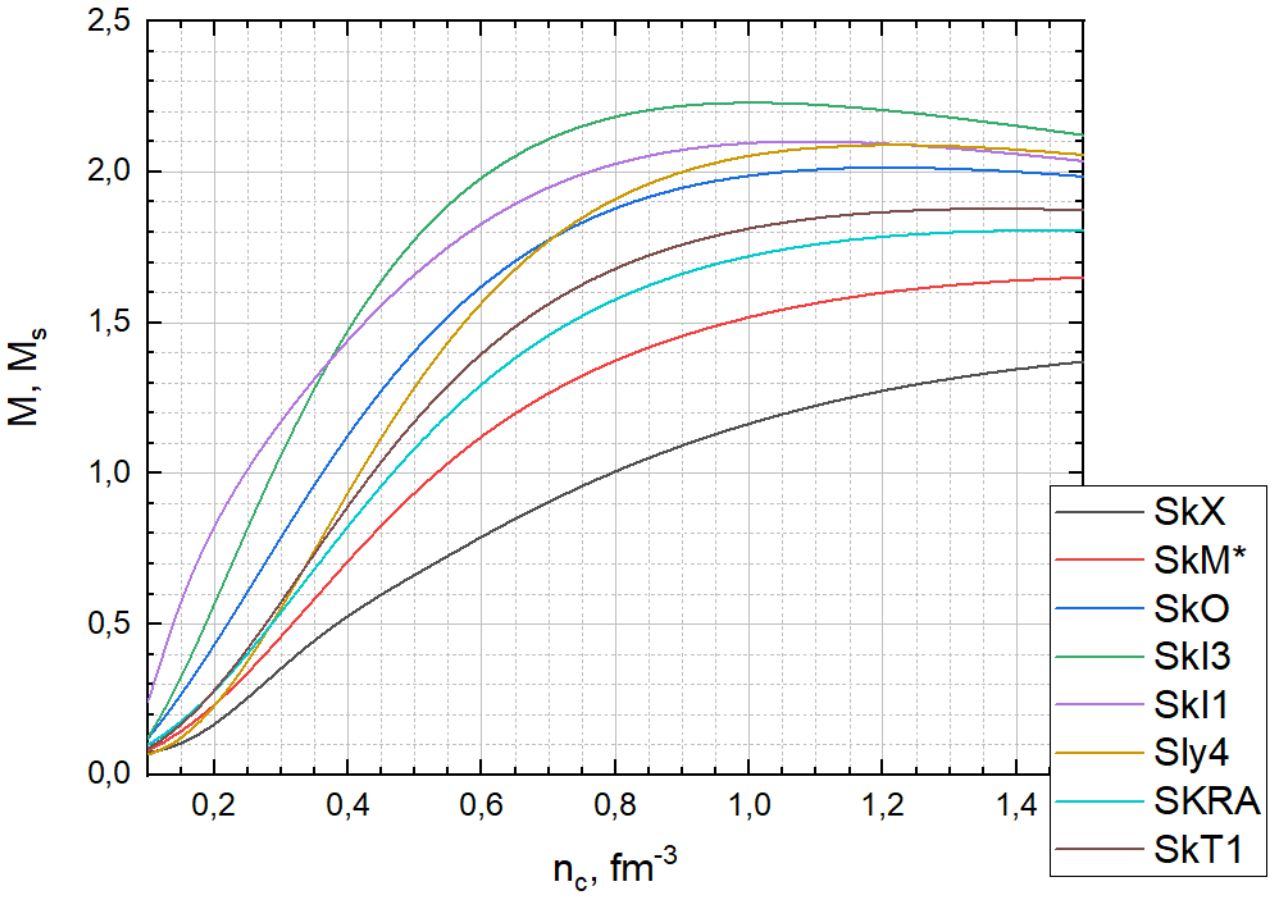
Давление внутри звезды



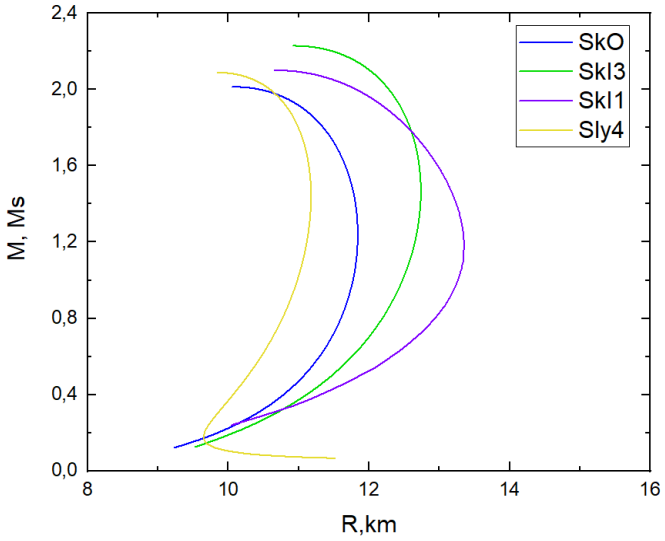
Плотность внутри звезды

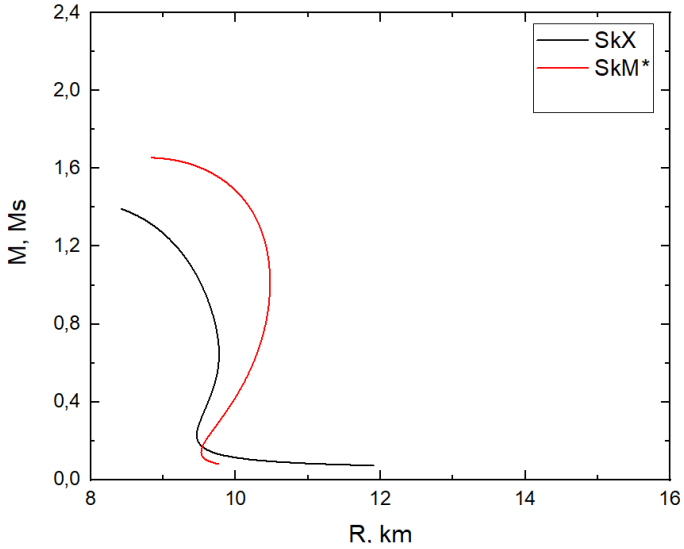


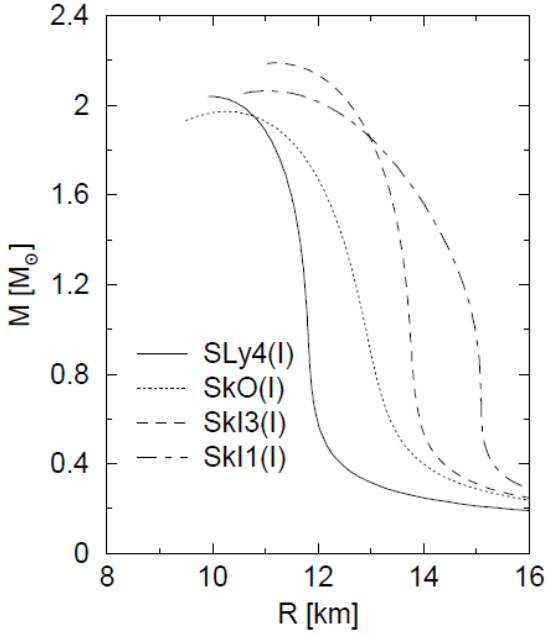
ЗАВИСИМОСТЬ МАССЫ ОТ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ

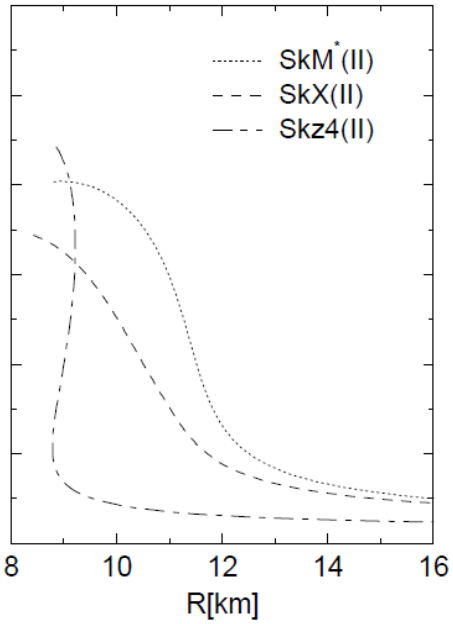


ЗАВИСИМОСТЬ МАССЫ ОТ РАДИУСА









СРАВНЕНИЕ С РЕЗУЛЬТАТАМИ ДРУГИХ АВТОРОВ

Skyrme	n_{max}			M_{max}			R_{max}		A_{max}	
	1	2	3	1	2	3	1	2	1	2
Sly230a	1,15	1,15	1,15	2,13	2,1	2,08	10,13	10,25	3,03	2,99
Sly230b	1,22	1,21	–	2,09	2,05	–	9,85	9,99	2,97	2,91
SkO	1,21	–	1,19	2,01	–	1,97	10,06	–	2,8	–
Sly10	1,23	–	1,17	2,09	–	2,04	9,75	–	2,98	–

Skyrme	$n_{1.4}$			$R_{1.4}$			$A_{1.4}$		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Sly230a	0,51	0,51	0,52	11,28	11,8	11,78	1,86	1,85	1,88
Sly230b	0,54	0,54	–	11,18	11,7	–	1,86	1,85	–
SkO	0,5	–	0,5	11,8	–	12,46	1,85	–	1,86
Sly10	0,56	–	0,56	11,04	–	11,48	1,87	–	1,85

1. Эта работа

2. Chabanat E., Bonche P., Haensel P., Meyer J., Schaeffer R. Nucl.Phys. A 627 (1997)

3. J. R. Stone, J. C. Miller, R. Koncewicz, P. D. Stevenson, M. R. Strayer, Phys. Rev C 68, 034324 (2003)

ВЫВОДЫ

1. Существует большое разнообразие параметризаций Скирма схоже описывающих стабильные ядра, но показывающих совершенно разное поведение при больших плотностях.

2. Основываясь на поведении энергии симметрии эти параметризации можно разделить на две группы.

3. Наблюдаются корреляции между плотностями достижения нуля энергией симметрии и протонной заселённостью материи нейтронной звезды с коэффициентом ***r =0,9523***. Также наблюдаются корреляции между плотностями достижения максимума энергией симметрии и протонной заселённостью с коэффициентом ***r =0,9699***.

4. Во второй группе разумными для описания нейтронных звёзд являются следующие наборы параметров: **SKRA, SKT1, SKT2, SKT3, SKT4, SKM, SKM*, SIV, SII**.

5. Модель Скирма пригодна для описания материи нейтронных звёзд лишь на определённом диапазоне плотностей.

6. Несмотря на вышеуказанные недостатки модель Скирма неплохо справляется с описанием максимальной массы нейтронной звезды и бесконечной ядерной материи.

7. В отличии от многих других параметризаций второй группы, параметризации, отобранные нами в качестве разумных, показывают более реалистичные результаты при описании массы нейтронной звезды.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!