

# Структура мантии нейтронной звезды

Дж.М. Пирсон<sup>1</sup>, Н. Шамель<sup>2</sup>, А.Ю. Потехин<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Монреальский университет (UdeM)

<sup>2</sup>Брюссельский свободный университет (ULB)

<sup>3</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе

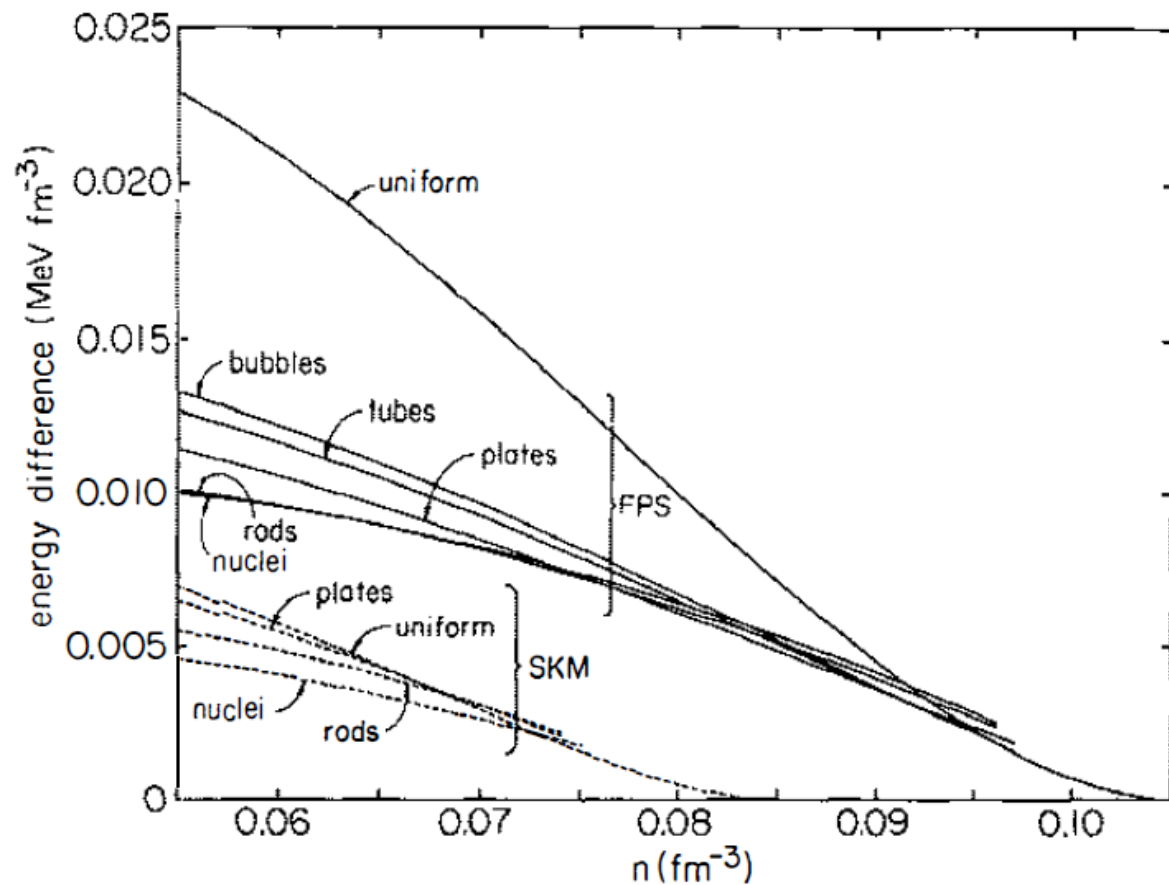
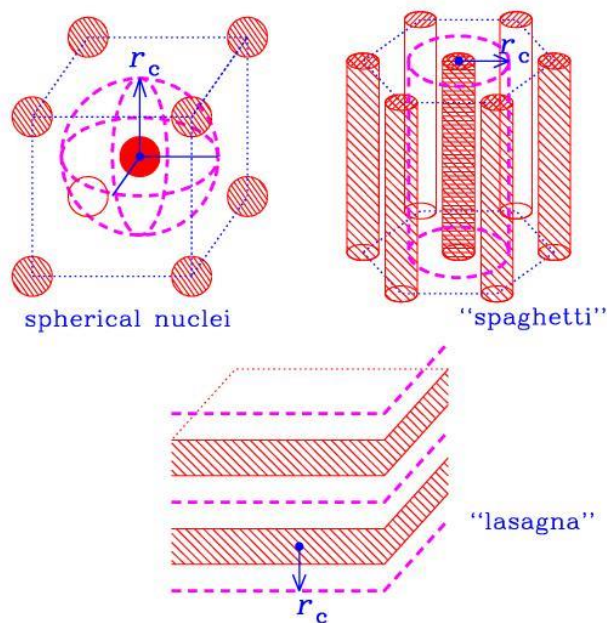


# Строение нейтронной звезды



# Несферические формы

Обзор: Pethick & Ravenhall, *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **45**, 429 (1995)

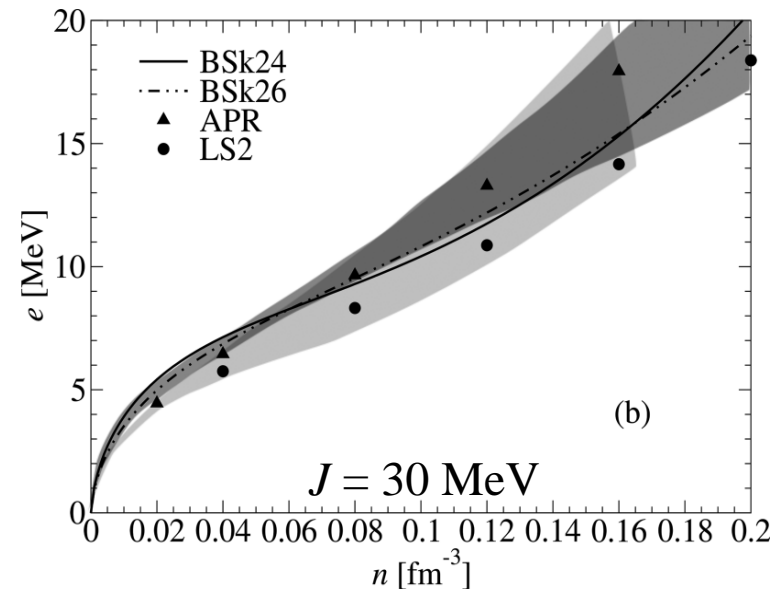
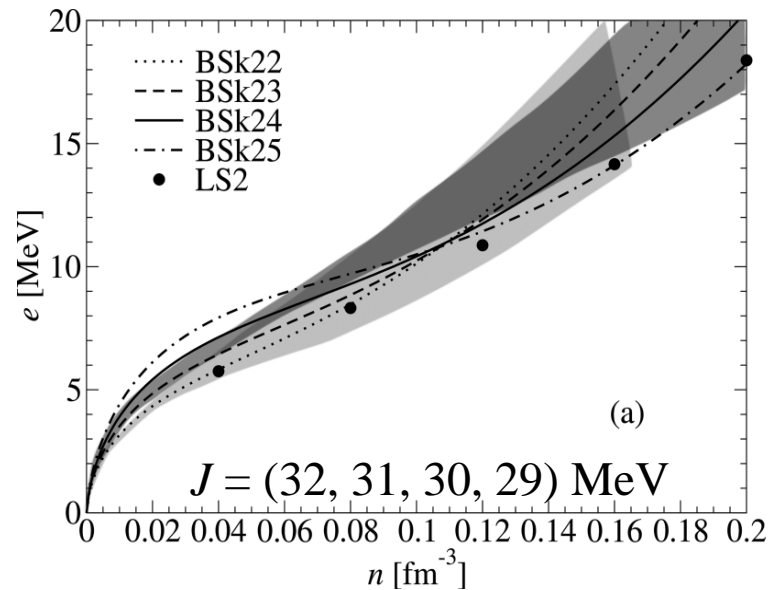
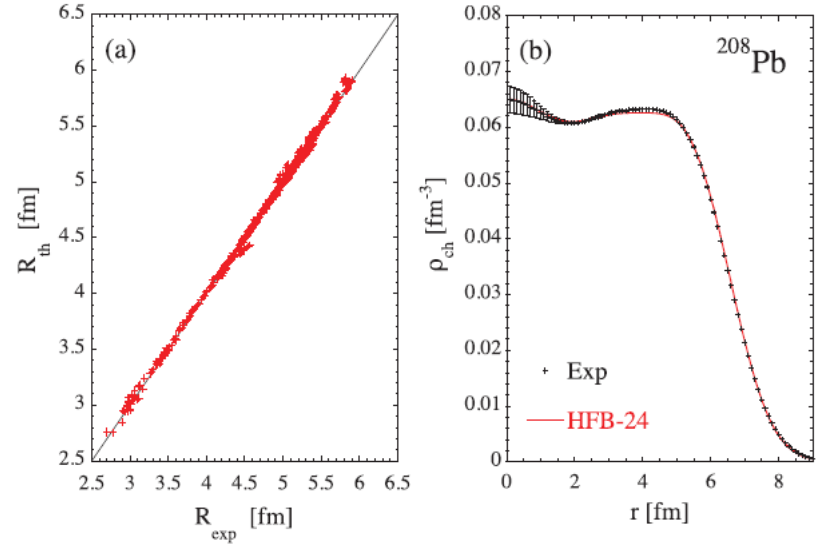
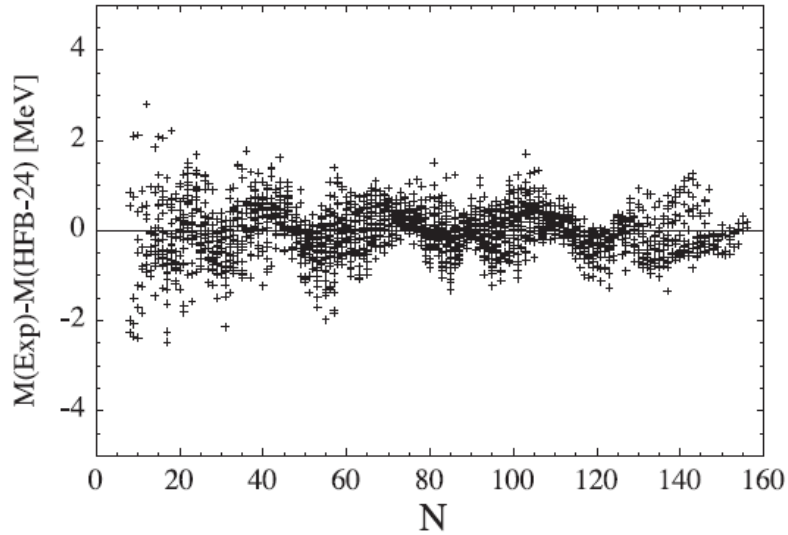


**Figure 8** Energies per unit volume of matter in  $\beta$ -equilibrium as a function of density for the uniform phase, and the three-, two-, and one-dimensional nucleus phases. All energies are measured with respect to the energy of a phase with two fluids in equilibrium when Coulomb and surface effects are neglected. The two nuclear interactions illustrated are SKM (75) and FPS (12).

# Уравнения состояния BSk22-26

Сравнение с экспериментальными результатами при «низких» плотностях

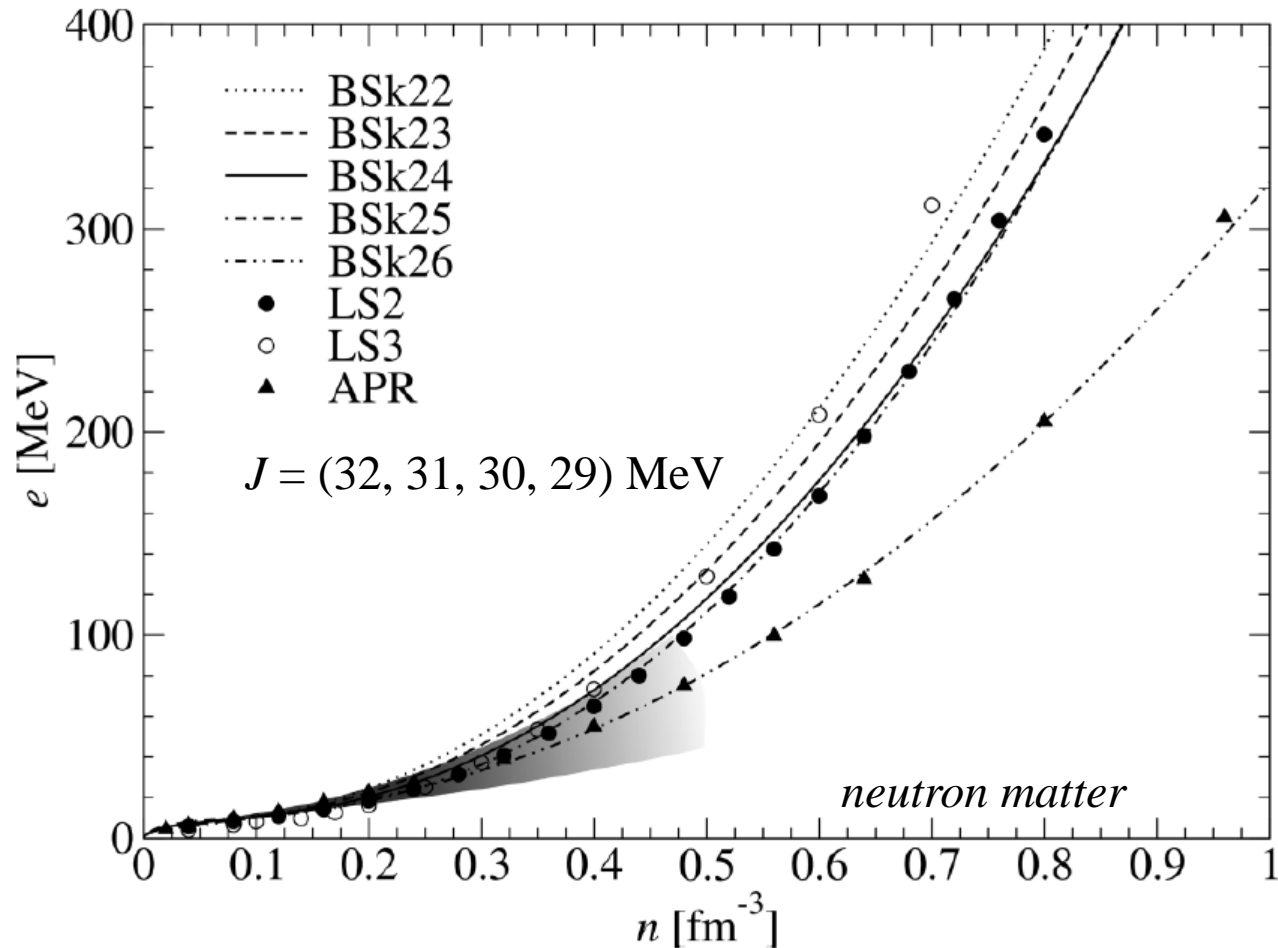
Goriely, Chamel, Pearson, *Phys. Rev. C* **88**, 024308 (2013)



# Уравнения состояния BSk22-26

Подгонки к «микроскопическим» расчётам для нейтронного вещества

Goriely, Chamel, Pearson, *Phys. Rev. C* **88**, 024308 (2013)



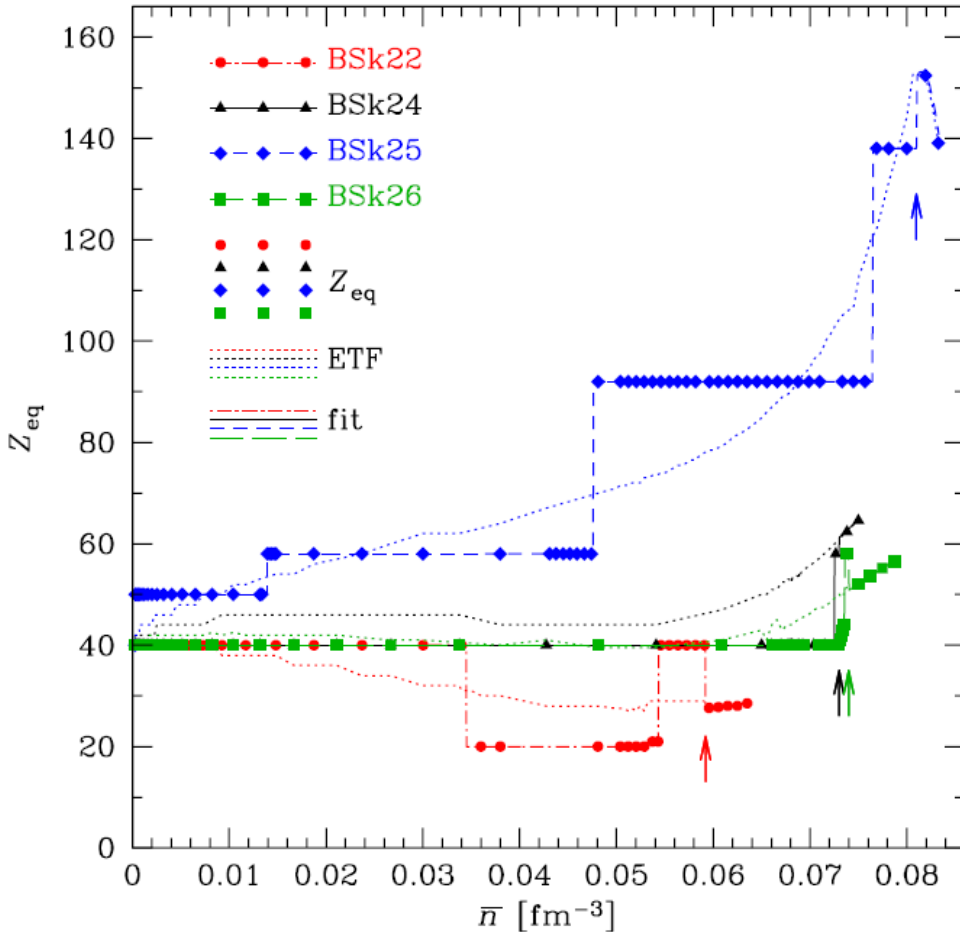
$$e(n, \eta) = a_v + \frac{1}{18}K_v\epsilon^2 - \frac{1}{162}K'\epsilon^3 + J\delta^2 + \frac{1}{3}L\epsilon\delta^2 + \frac{1}{18}K_{\text{sym}}\epsilon^2\delta^2 + O(\delta^4, \epsilon^4, \epsilon^3\delta^2),$$

где  $\delta = \frac{n_n - n_p}{n}$ ,  $\epsilon = \frac{n - n_0}{n_0}$

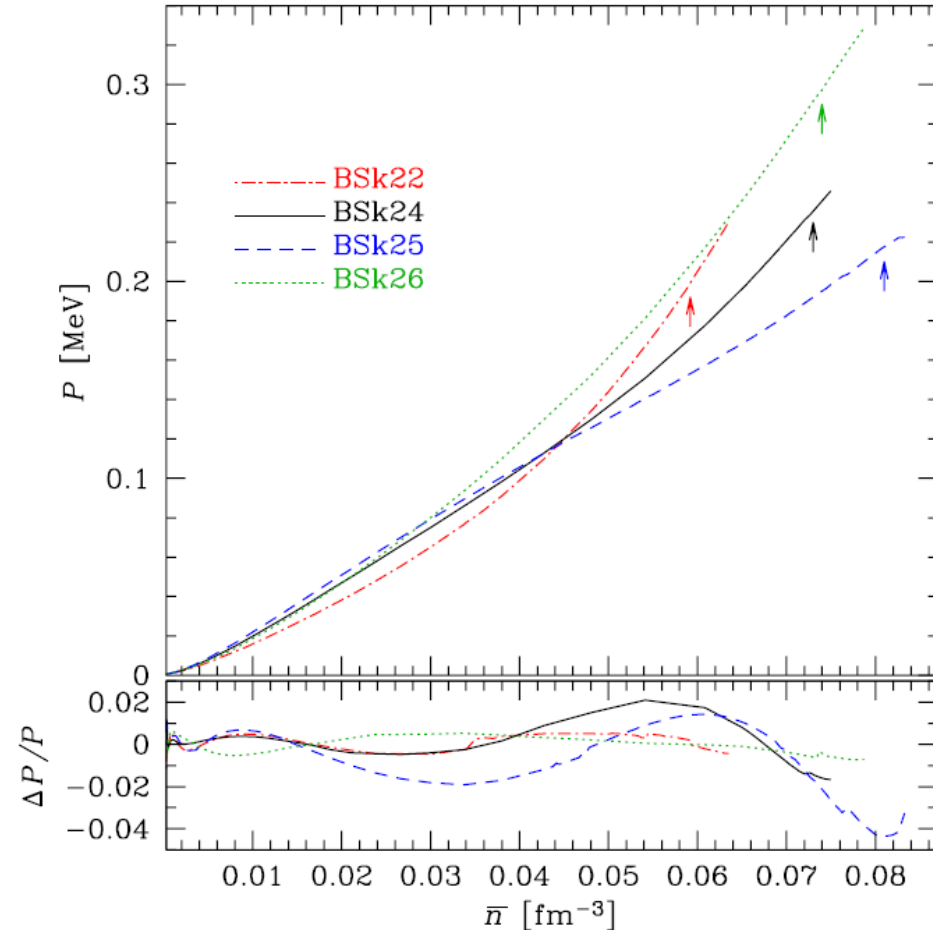
# Уравнения состояния BSk22, 24, 25, 26

Pearson et al., *MNRAS* **481**, 2994 (2018); *erratum*: **486**, 768 (2019); [arXiv:1903.04981](https://arxiv.org/abs/1903.04981)

## Внутренняя кора



Числа протонов в ячейке Вигнера – Зейтца:  
расчёты с оболочечными поправками и без них.

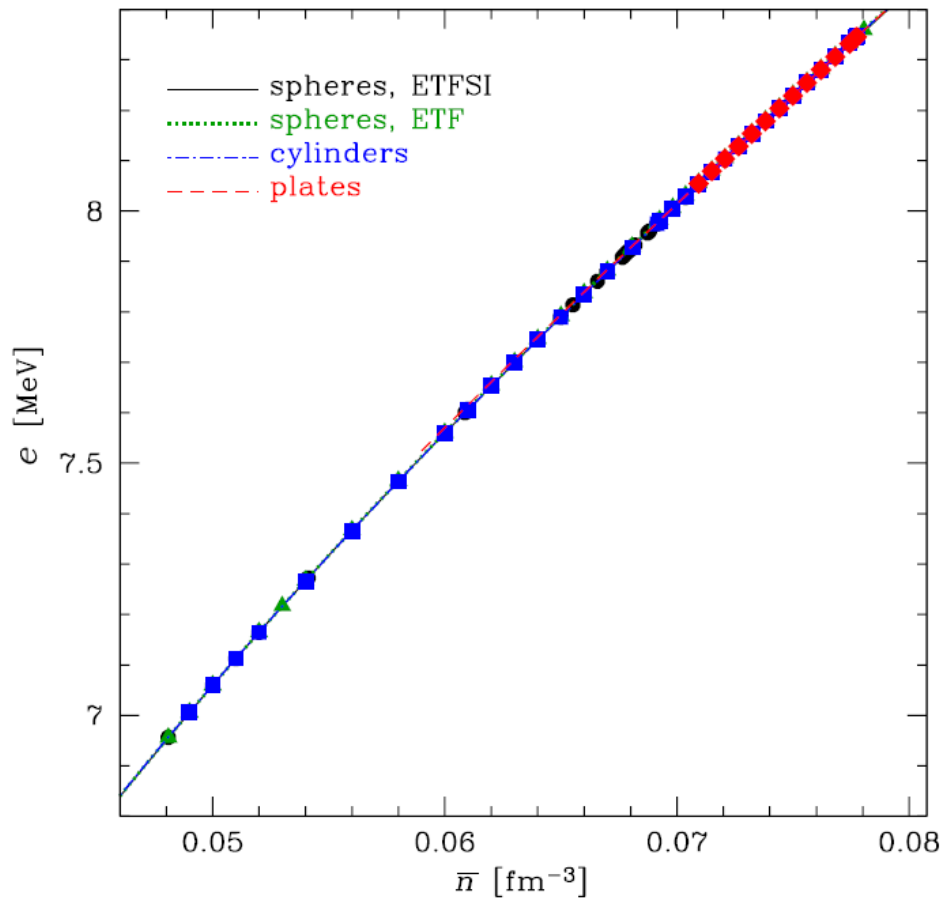


Уравнение состояния внутренней коры.  
Внизу – отличия от аналитической  
аппроксимации.

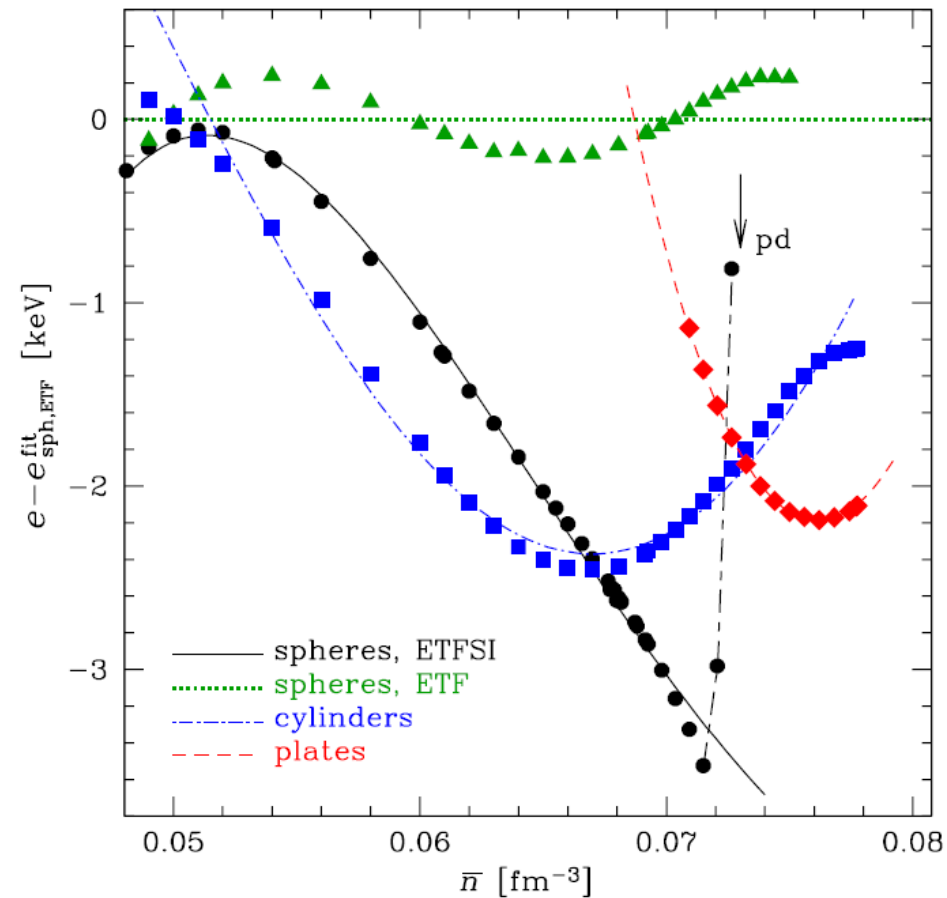
Протонное протекание:  $\mu_p \geq U_p(\xi = R) + M_p c^2$

# Плотность энергии

Pearson, Chamel, & A.P., *Phys. Rev. C* **101**, 015802 (2020); [arXiv:2001.03876](https://arxiv.org/abs/2001.03876)

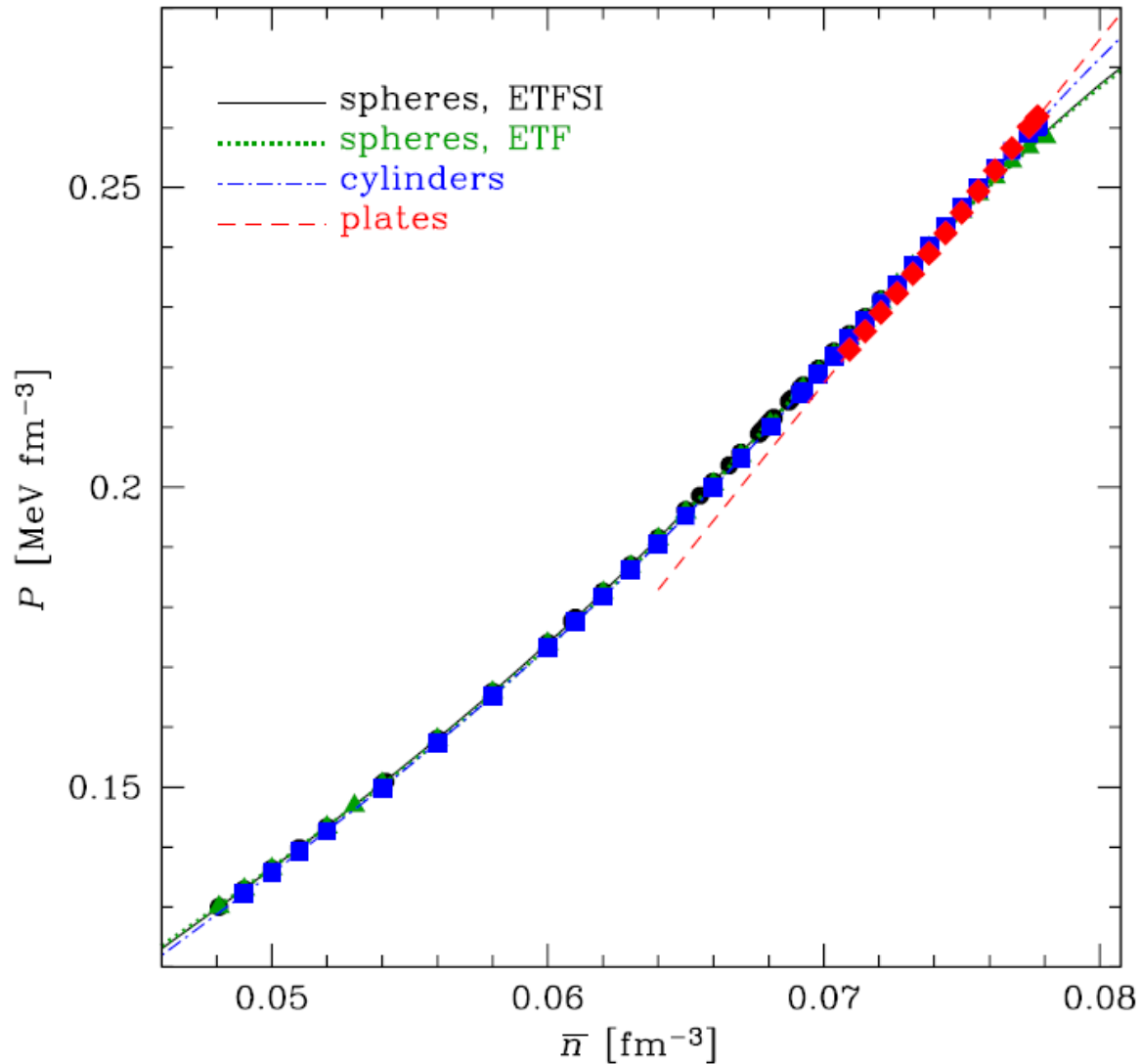


Энергия на барион для разных форм нуклонных кластеров.



**Различия** энергии на барион для разных форм нуклонных кластеров.

# Давление



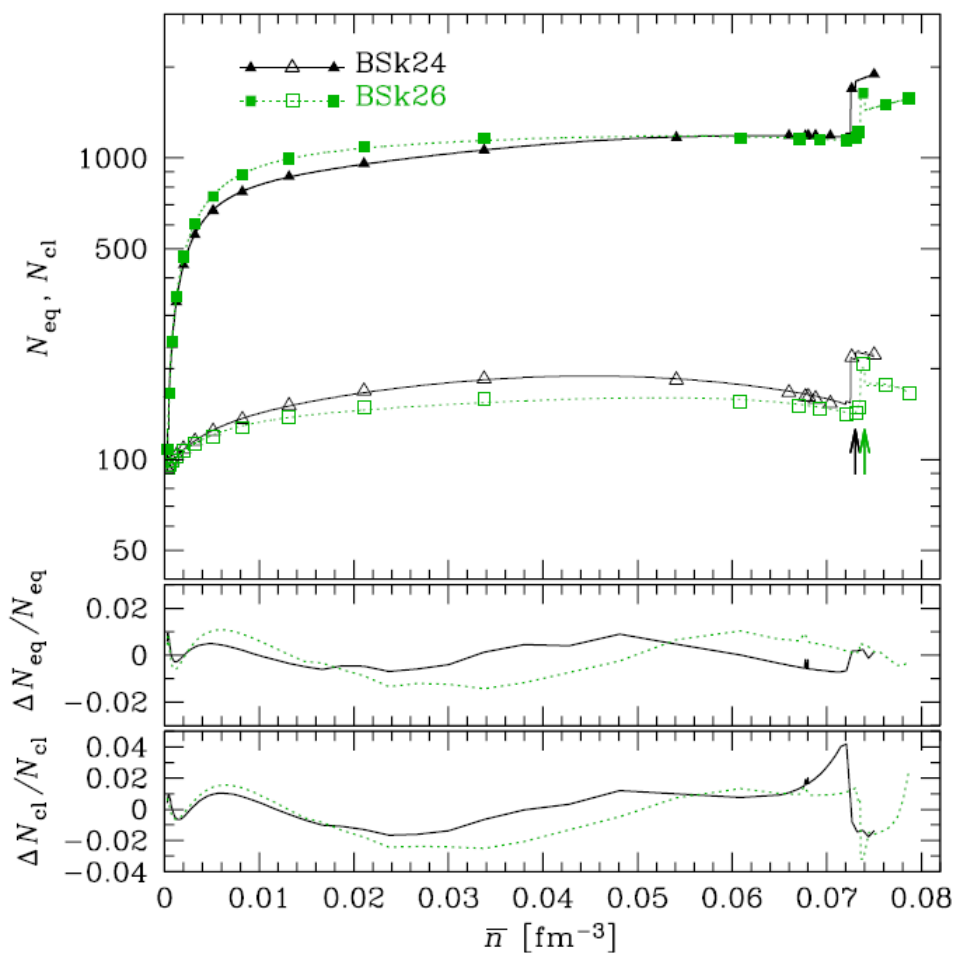
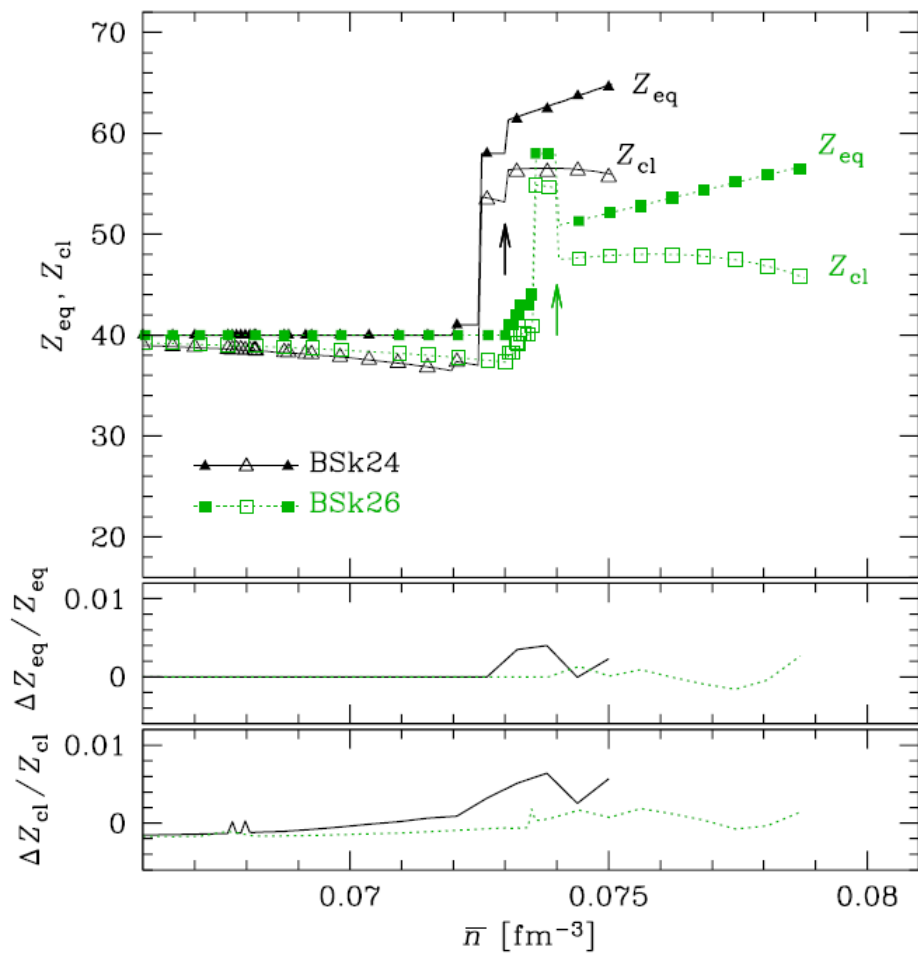
Давление как функция концентрации барионов для разных форм нуклонных кластеров, рассчитанная по обобщённой теории Томаса – Ферми 4-го порядка (ETF) с моделью BSk24. Для сферических форм показаны также результаты с поправками Струтинского и БКШ (ETSI).



# Количество протонов и нейтронов в ячейке Вигнера – Зейтца

## Сферы

Pearson et al., *MNRAS* **481**, 2994 (2018); *erratum*: **486**, 768 (2019); [arXiv:1903.04981](https://arxiv.org/abs/1903.04981)



Числа протонов в ячейке Вигнера – Зейтца.

Числа нейтронов в ячейке Вигнера – Зейтца.

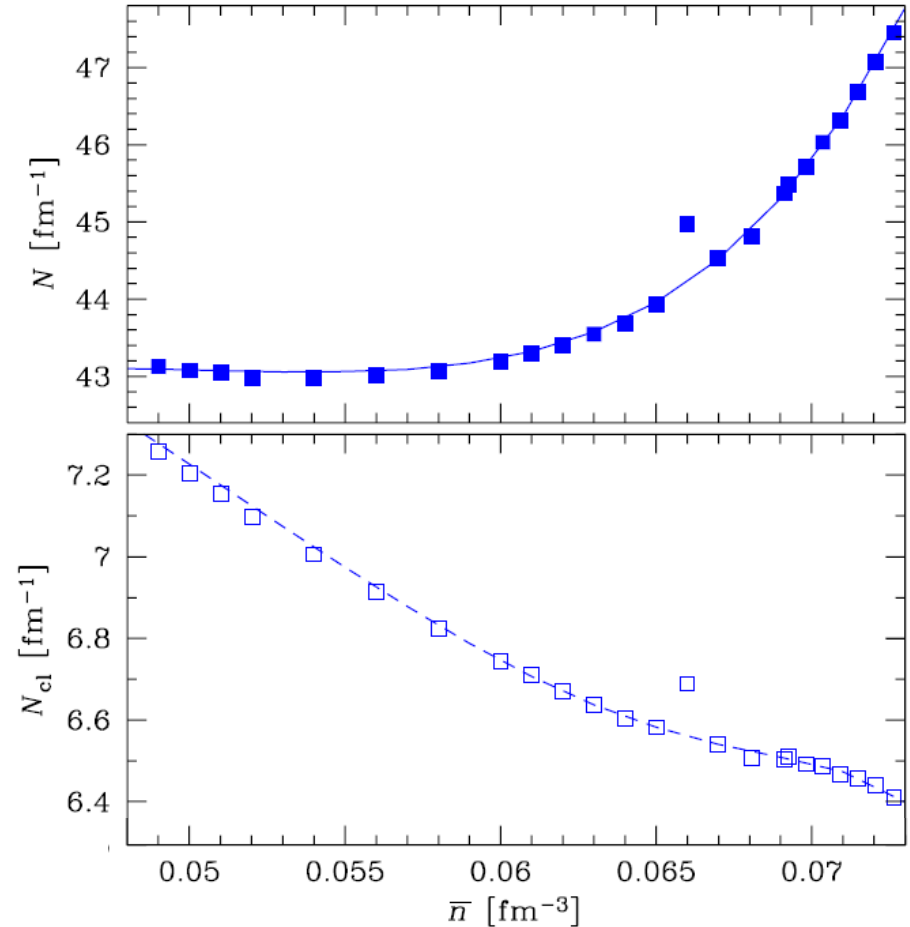
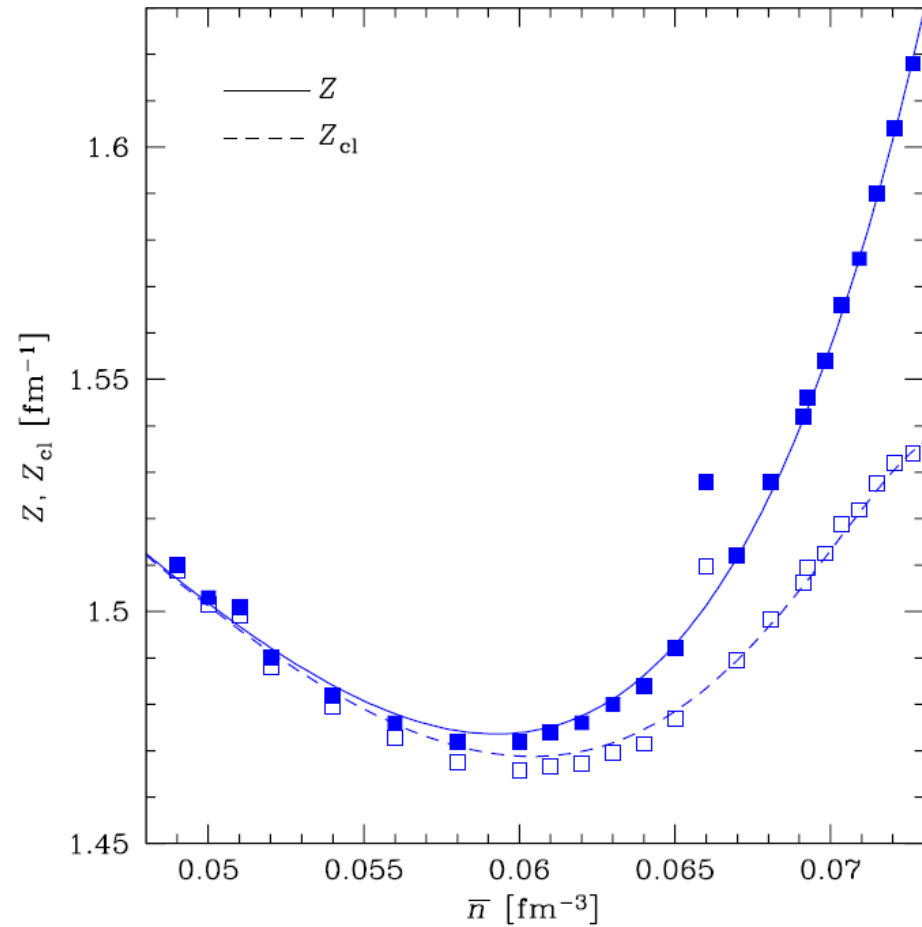
Расчёты по моделям BSk24 и BSk26.

Внизу – отличия от аналитических аппроксимаций.

# Количество протонов и нейтронов в ячейке Вигнера – Зейтца

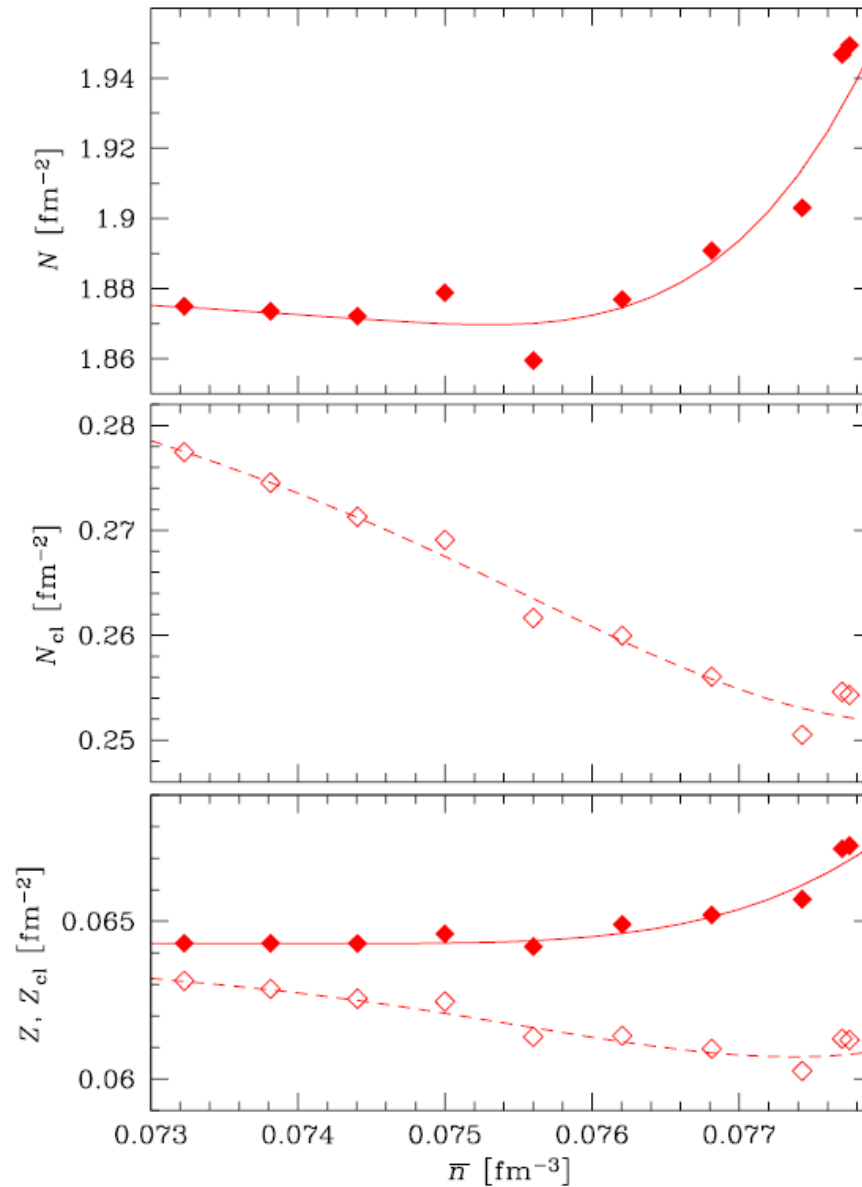
## Цилиндры

Pearson, Chamel, & A.P., *Phys. Rev. C* **101**, 015802 (2020); [arXiv:2001.03876](https://arxiv.org/abs/2001.03876)

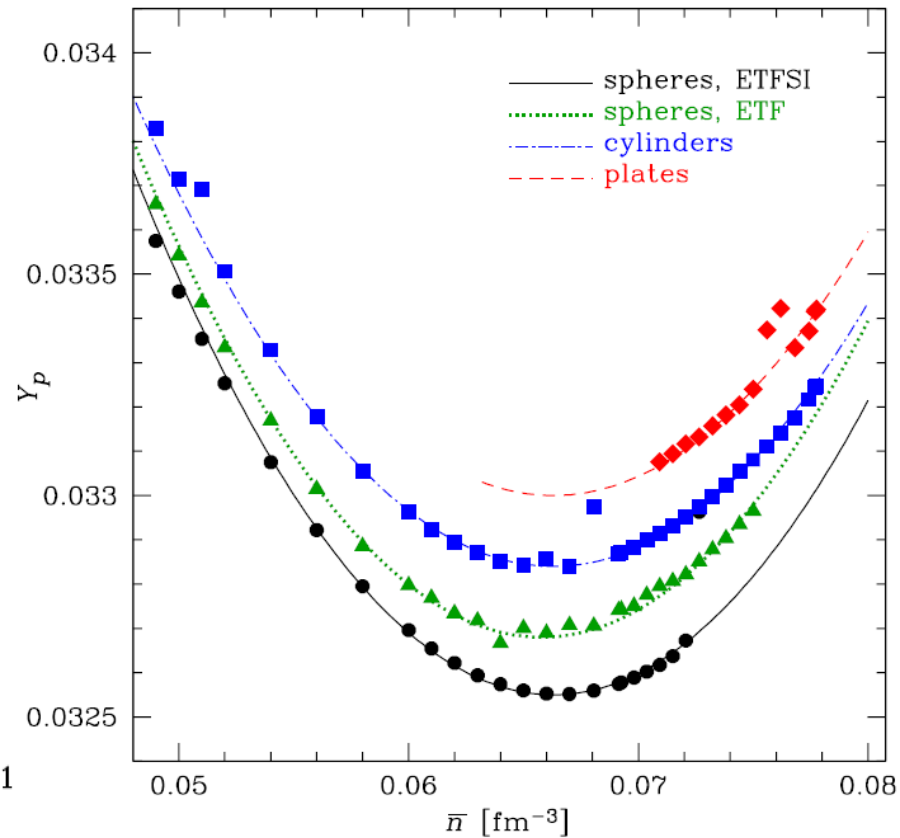
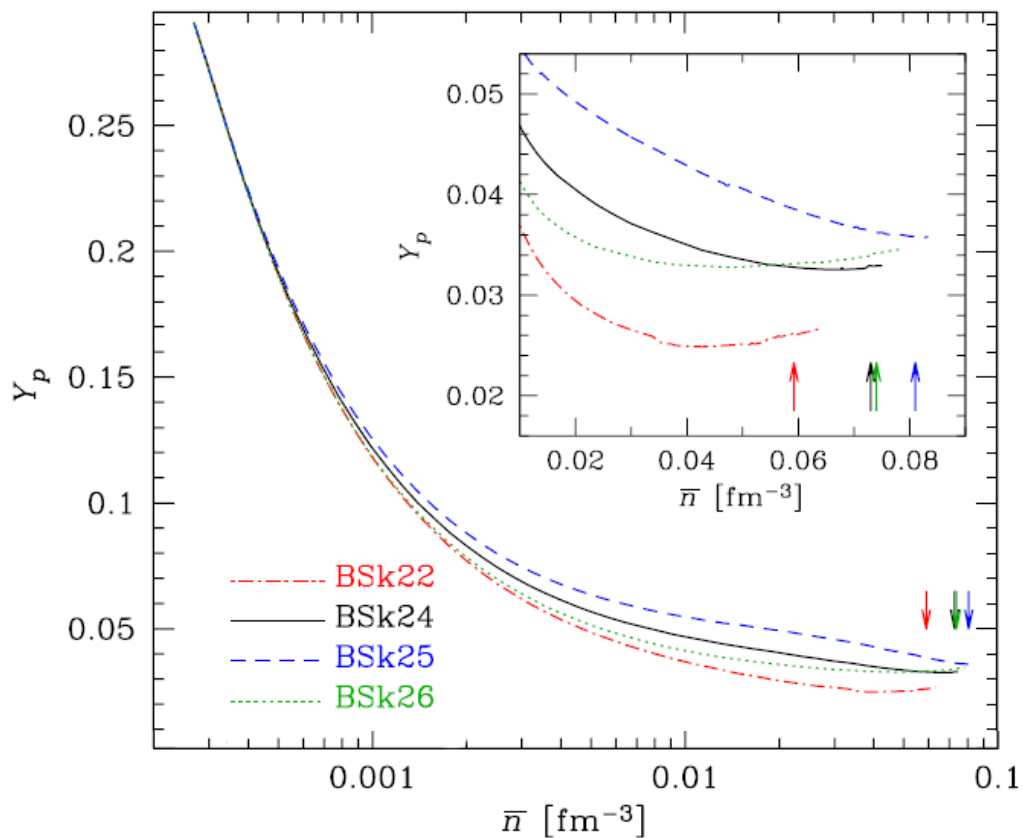


# Количество протонов и нейтронов в ячейке Вигнера – Зейтца

## Пластины



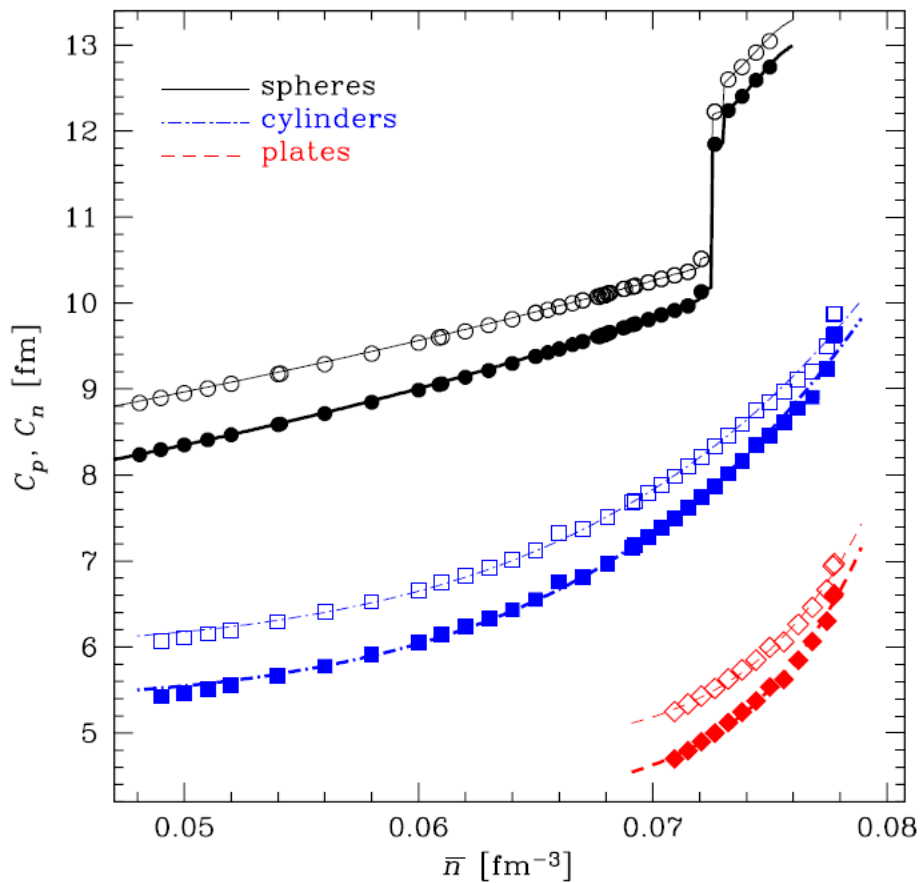
# Доля протонов



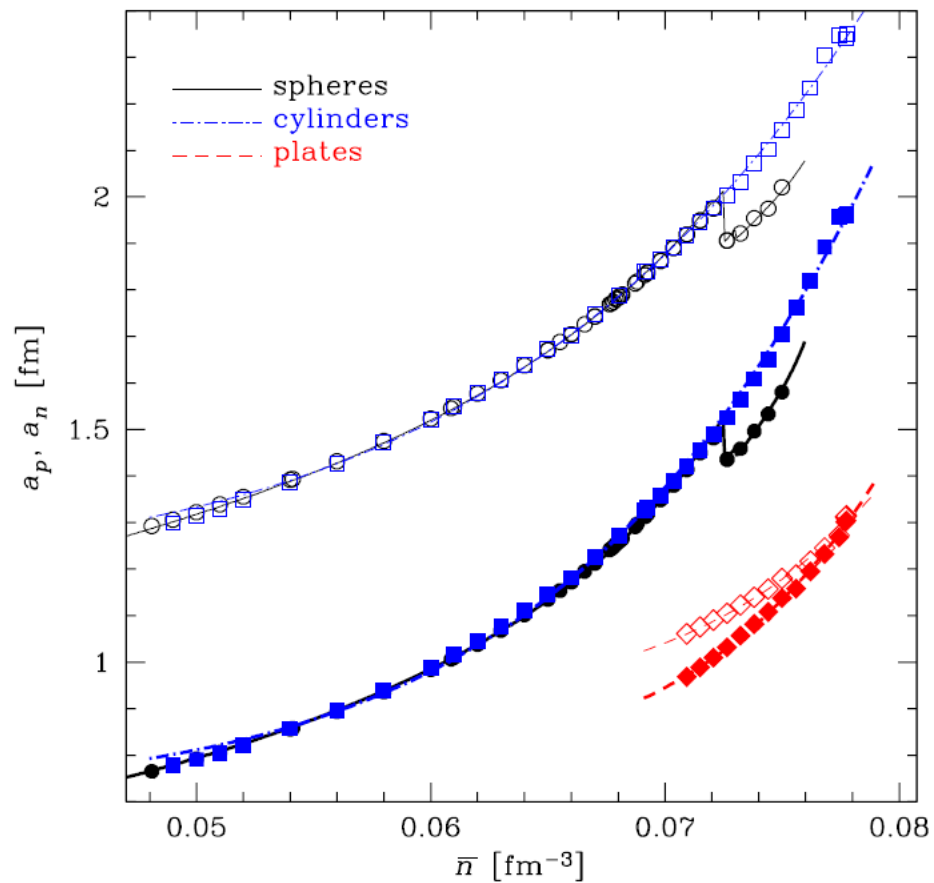
Доля протонов во внутренней коре нейтронной звезды для разных функционалов семейства BSk.

Доля протонов в мантии нейтронной звезды в модели BSk24 для разных форм нуклонных кластеров.

# Размеры и размытость нуклонных кластеров



Параметры размера.



Параметры размытости.

# Итоги

- ✓ На основе обобщённой теории Томаса – Ферми с функционалом взаимодействия BSk24 **рассчитано уравнение состояния** мантии нейтронной звезды для трёх канонических форм нуклонных кластеров – сферической, цилиндрической и пластинчатой.
- ✓ Показано, что в определённых диапазонах плотности **несферические** кластеры могут быть **энергетически выгодны**.
- ✓ **Не обнаружено инвертированных** («пузырчатых») фаз.
- ✓ В отсутствие поправок на парное взаимодействие и «оболочечных» поправок воспроизводится последовательность фаз вещества в основном состоянии, предсказанная в работах других авторов: с увеличением плотности, сначала **сферические** кластеры сменяются **цилиндрическими**, а затем цилиндрические – **пластинчатыми**.
- ✓ Если учесть оболочечные поправки для сферических ядер, то последовательность оказывается более сложной: **внутри слоя сферических** кластеров обнаруживается **прослойка с цилиндрическими** кластерами. Для проверки этой особенности следует включить указанные поправки в расчёты цилиндрических и пластинчатых форм.
- ✓ **Различия термодинамических функций** для разных форм настолько **малы**, что вряд ли могут проявляться в наблюдаемых свойствах нейтронных звёзд. Это, однако, не исключает существенных различий кинетических свойств вещества в этих фазах.

Pearson, Chamel, & A.P., *Phys. Rev. C* **101**, 015802 (2020); [arXiv:2001.03876](https://arxiv.org/abs/2001.03876)