

原子核の高スピン励起状態の半径で探る スピン偏極核物質の状態方程式

萩野浩一

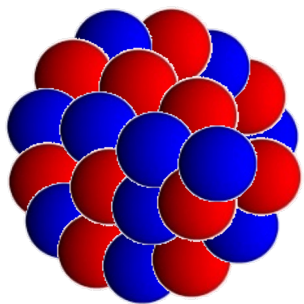
京都大学大学院理学研究科



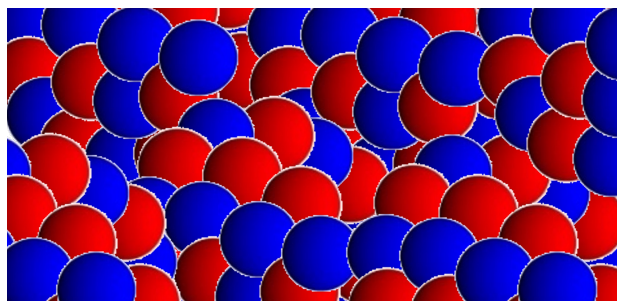
橘刀生(京大理)、吉田賢市(阪大RCNP)、Q. Zhang (CIAE)

1. はじめに: 無限核物質の状態方程式
2. 原子核のスピン・アイソスピンダイナミクス
3. スピン偏極核物質の状態方程式
4. まとめ

はじめに: 無限核物質の状態方程式

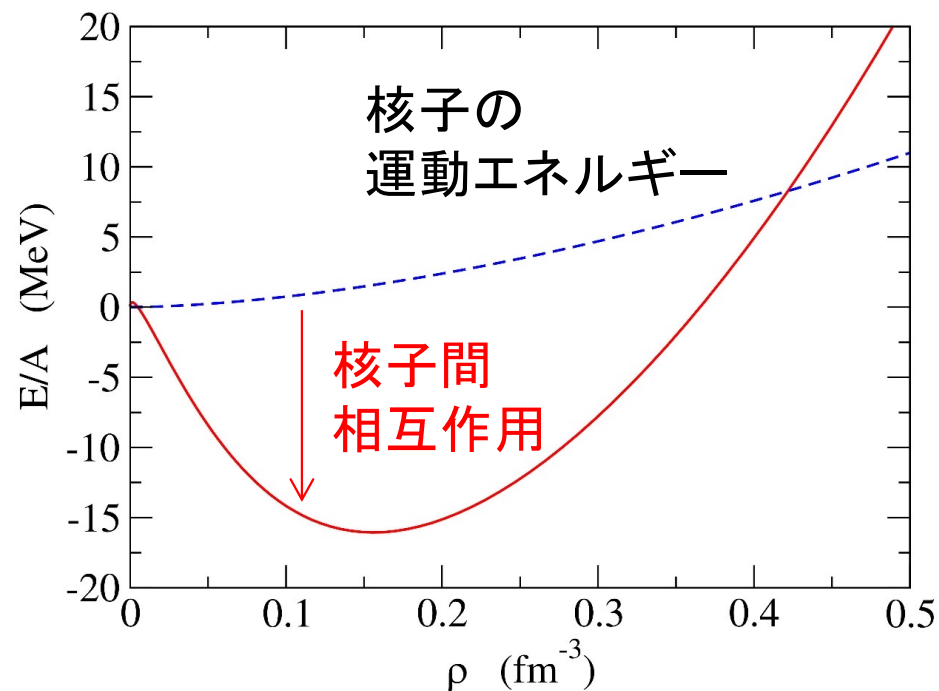


有限原子核



無限核物質
=陽子や中性子が
無限に広がった物質

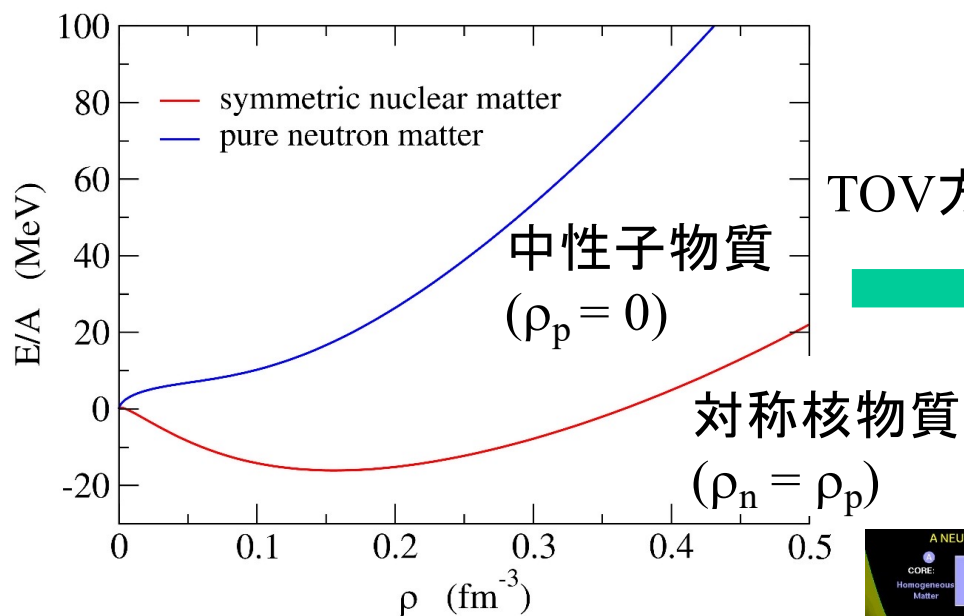
状態方程式 (E vs ρ)



$$E_{\text{kin}} = \frac{\hbar^2}{2m} \frac{3}{5} \left(\frac{6\pi^2}{g} \right)^{2/3} \rho^{3/5}$$

諸々の天体現象を支配する基本的な関係式

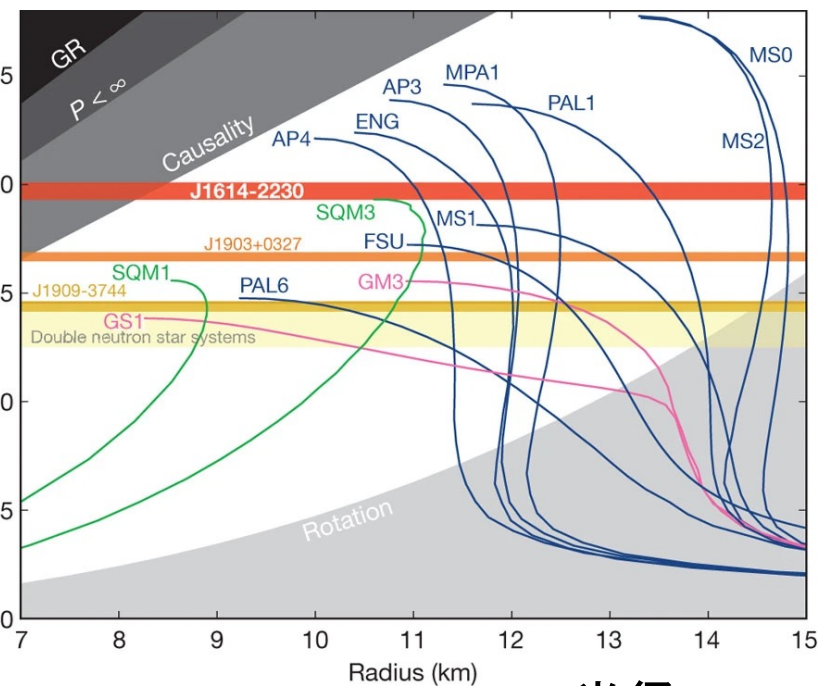
はじめに: 無限核物質の状態方程式



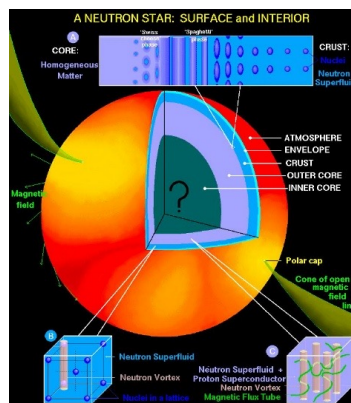
TOV方程式



質量 (太陽質量単位)



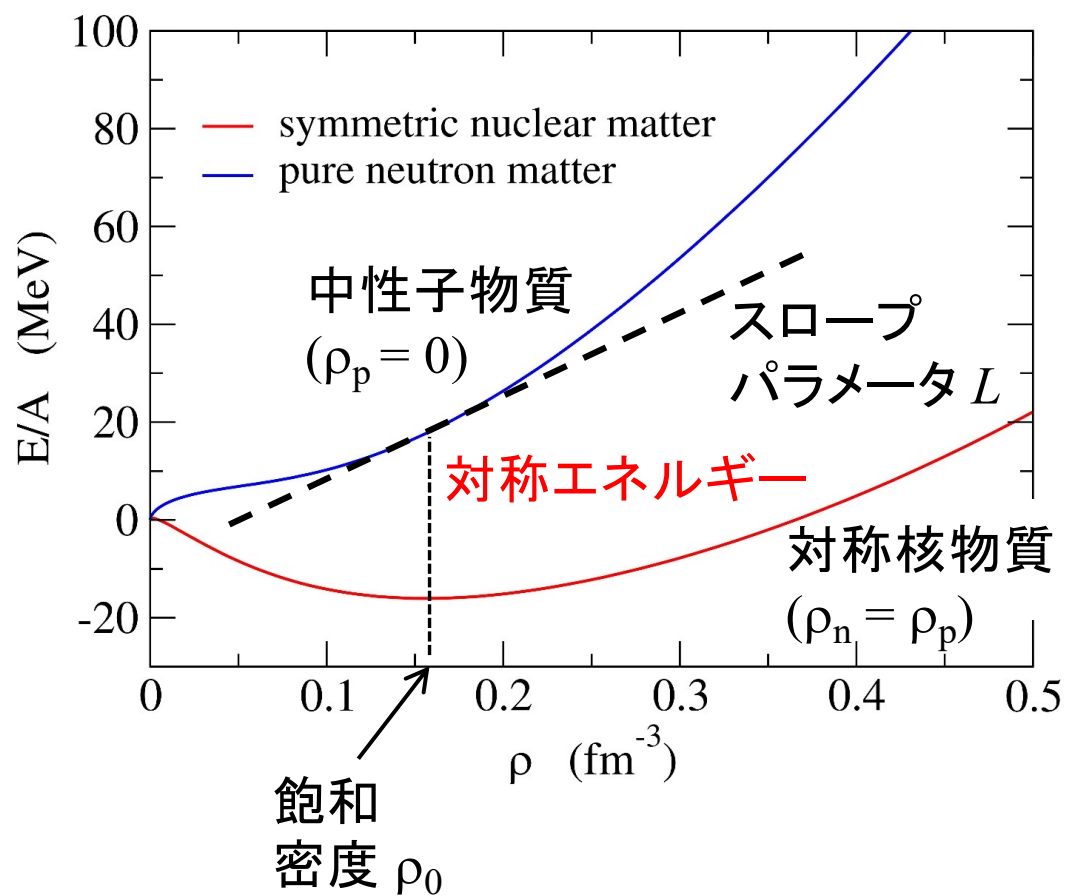
半径 (km)



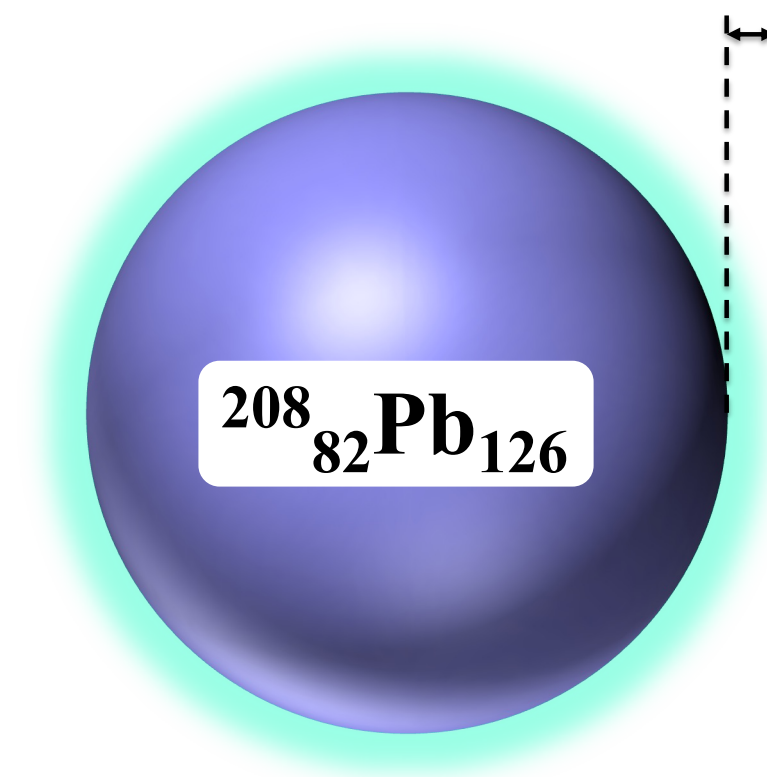
<https://pages.astro.umd.edu/~mcmiller/nstar.html>

P.B. Demorest et al.,
Nature 467, 1081 (2010)

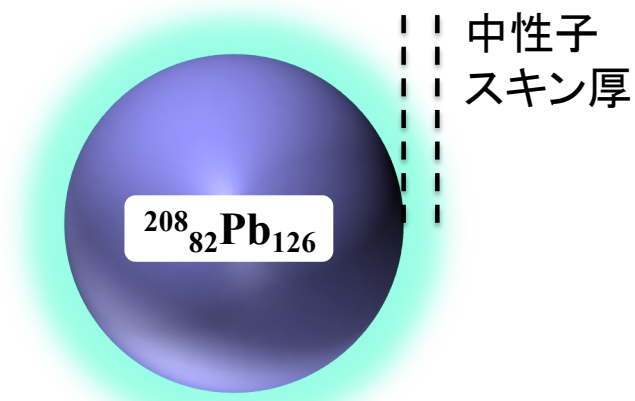
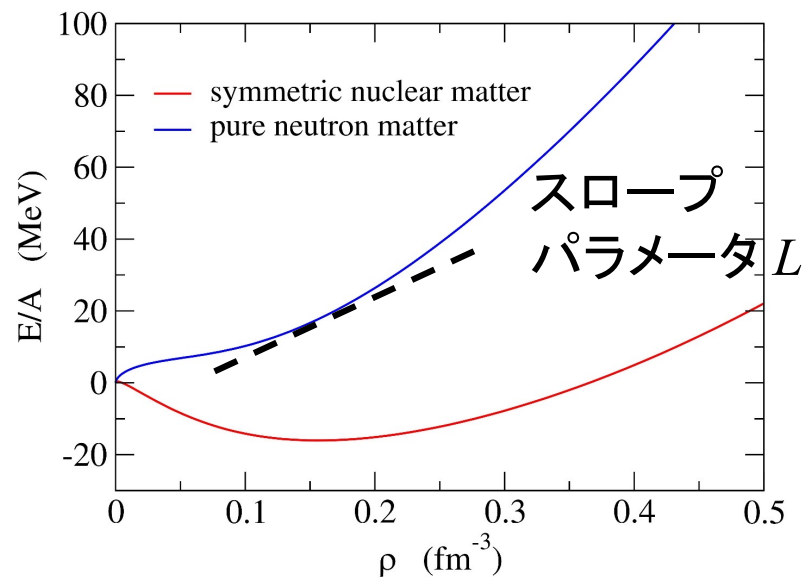
はじめに: 無限核物質の状態方程式



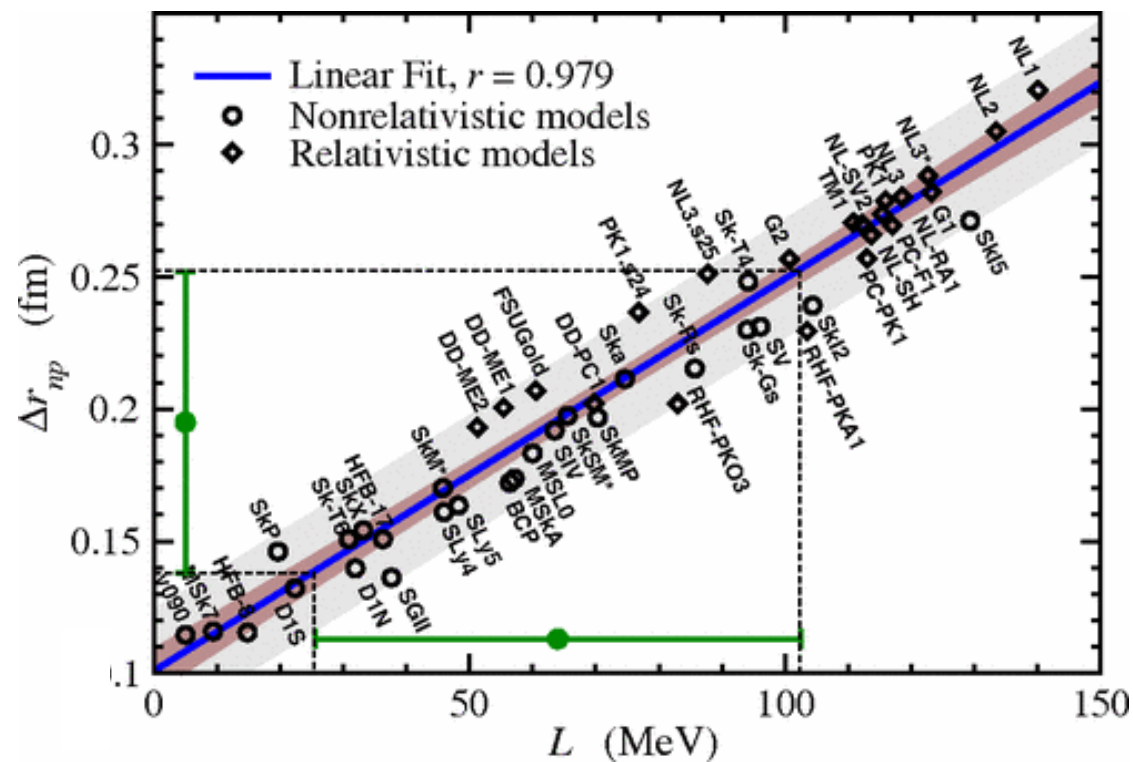
中性子スキン厚



はじめに: 無限核物質の状態方程式



^{208}Pb の中性子スキン厚と L パラメータの相関



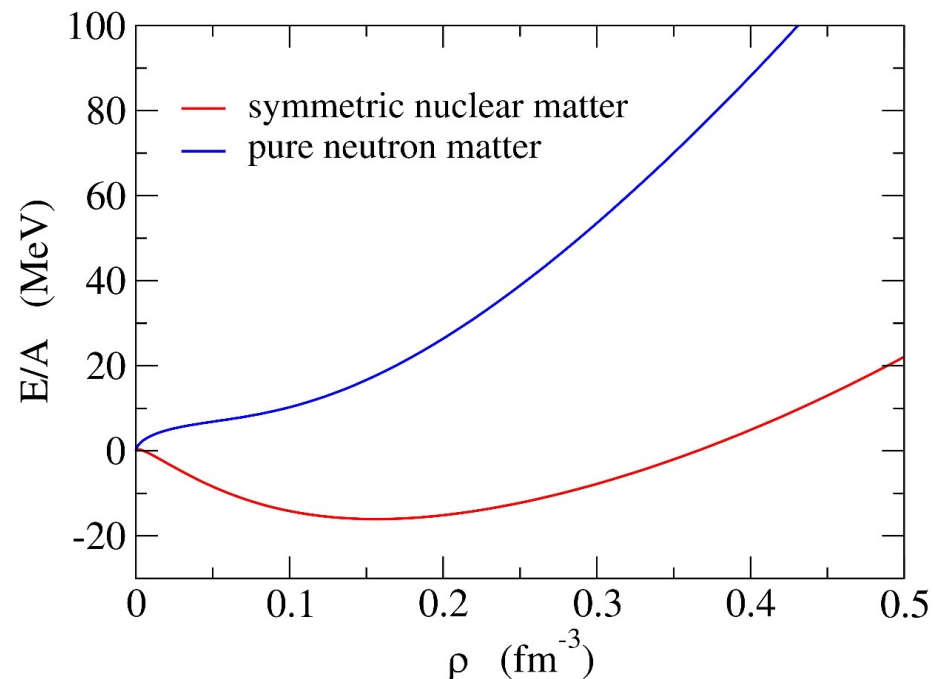
X. Roza-Maza et al., PRL106, 252501 (2011)

はじめに: 無限核物質の状態方程式

アイソスピン: 「核子」の内部自由度

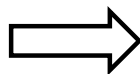
核子 $\left\{ \begin{array}{l} \text{アイソスピン・アップ} \rightarrow \text{中性子} \\ \text{アイソスピン・ダウン} \rightarrow \text{陽子} \end{array} \right.$
ハイゼンベルク

アイソスピンを変える
(陽子だったものを中性子にする)



対称核物質

$$\rho_n = \rho_p = \frac{\rho}{2}$$



中性子物質

$$\begin{aligned} \rho_n &= \rho \\ \rho_p &= 0 \end{aligned}$$

本研究で目指す物理

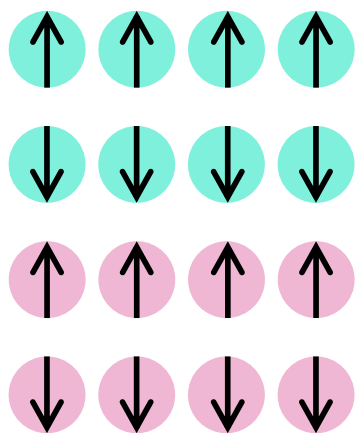
アイソスピン:「核子」の内部自由度

核子 $\left\{ \begin{array}{l} \text{アイソスピン・アップ} \rightarrow \text{中性子} \\ \text{アイソスピン・ダウン} \rightarrow \text{陽子} \end{array} \right.$

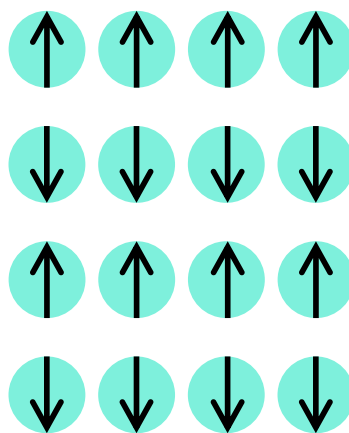
核子: フェルミオン $\rightarrow$ スピン自由度

- 中性子、スピン・アップ
- 中性子、スピン・ダウン
- 陽子、スピン・アップ
- 陽子、スピン・ダウン

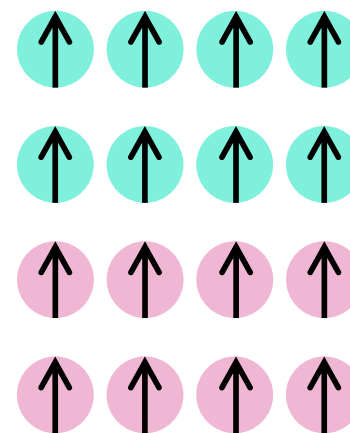
対称核物質



中性子物質



スピン偏極物質



アイソスピン

スピン

EOSは
どう変わる?

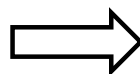
本研究で目指す物理

アイソスピン

対称核物質

$$\rho_n = \rho_p$$

$$\rho_{\uparrow} = \rho_{\downarrow}$$



中性子物質

$$\rho = \rho_n (\rho_p = 0)$$

$$\rho_{\uparrow} = \rho_{\downarrow}$$

?

スピン偏極核物質(一般)

$$\rho_{n\uparrow} \neq \rho_{n\downarrow} \neq \rho_{p\uparrow} \neq \rho_{p\downarrow}$$

地上実験からの制限?

スピン

スピン偏極核物質(対称)

$$\rho_n = \rho_p$$

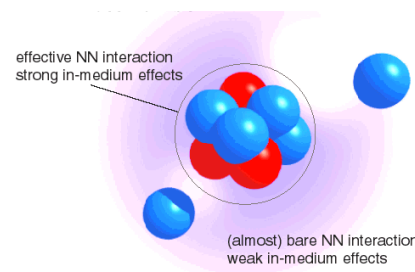
$$\rho_{\uparrow} \neq \rho_{\downarrow}$$

原子核のスピン・アイソスピンのダイナミクス

スピン・アイソスピンという原子核の基本的な自由度を任意に変化させると、核子多体系はどのように性質を変えるのか？

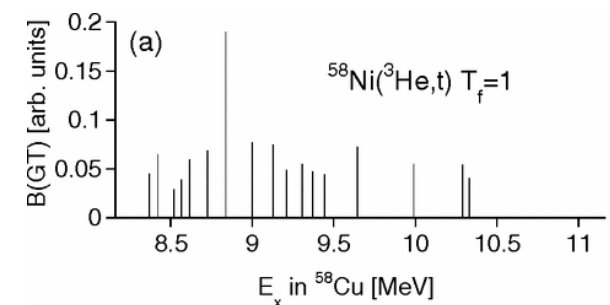
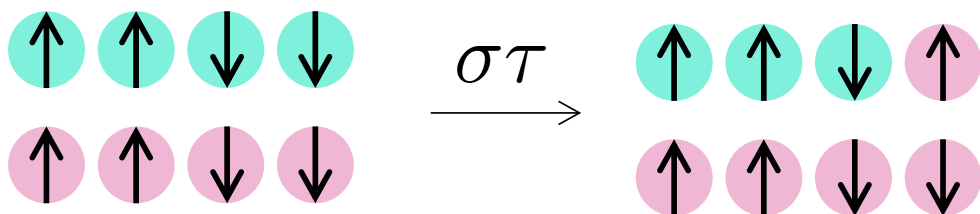
□ 中性子過剰核(アイソスピン自由度)

理研RIBF
アメリカ FRIB



中性子ハロー原子核

□ スピン反転を伴うガモフ・テラー遷移(スピン・アイソスピン自由度)

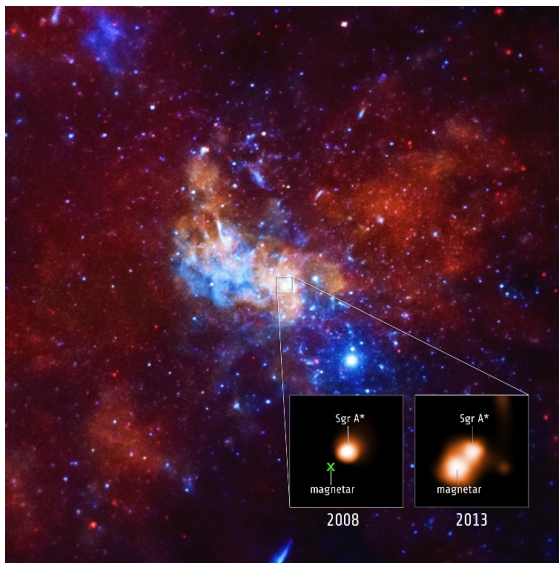


H. Fujita et al., PRC75, 034310 (2007)

原子核のスピン・アイスピンのダイナミクス

スピン・アイスピンという原子核の基本的な自由度を任意に変化させると、核子多体系はどのように性質を変えるのか？

本研究：無限核物質の立場から原子核のスピン・アイスピンのダイナミクスに迫る

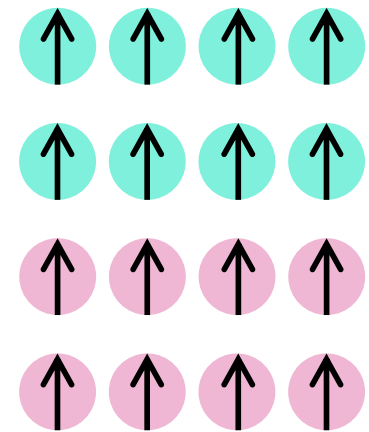


スピン偏極核物質

超強磁場 (~ 10 GT $\sim 10^{11}$ ガウス) 天体
「マグネター」で存在している可能性あり

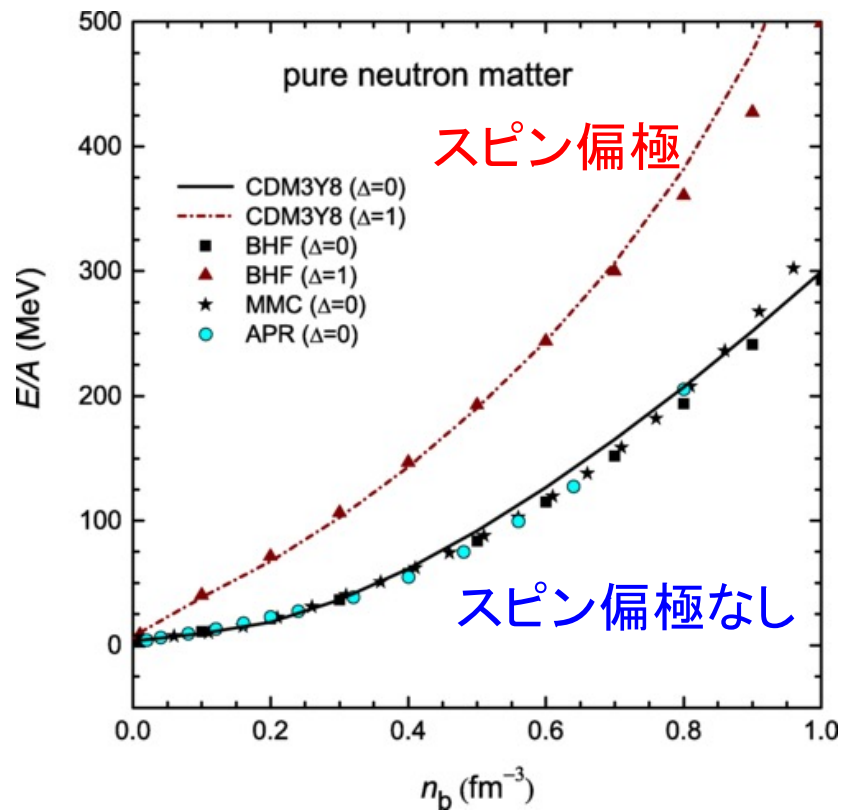
→スピン偏極核物質のEOSの
理解が必須

wikipedia



スピン偏極核物質のEOS

先行研究: N.H. Tan, D.T. Khoa, and D.T. Loan,
Phys. Rev. C102, 045809 (2020)



非相対論的平均場近似計算

→ スピン自由度は制限されていない



スピン自由度をより自然な形で取り込める
相対論的アプローチを用いる

最近の進展: 交換項を入れられるようになった

Q. Zhao et al., PRC106, 034315 (2022)

← スピン偏極核物質では本質的に重要

核構造

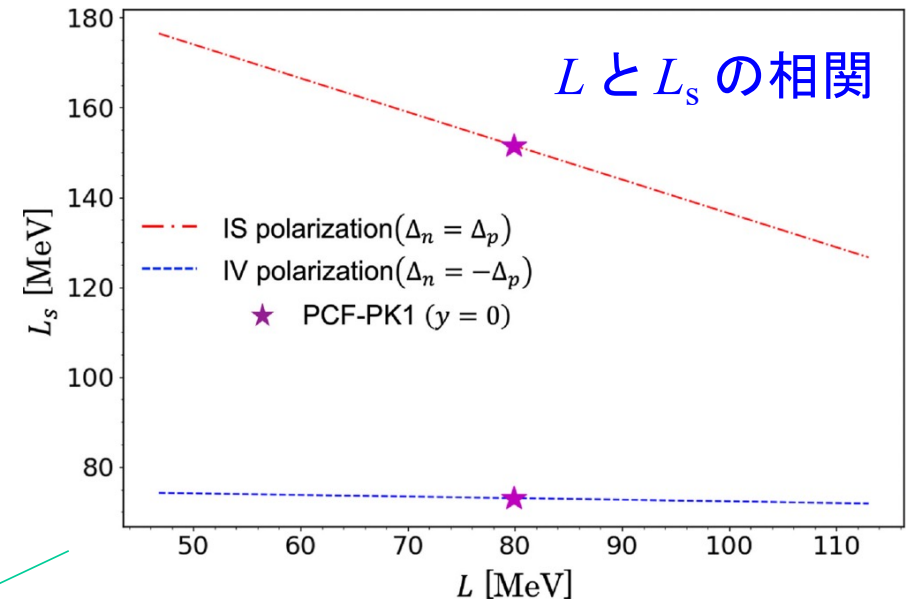
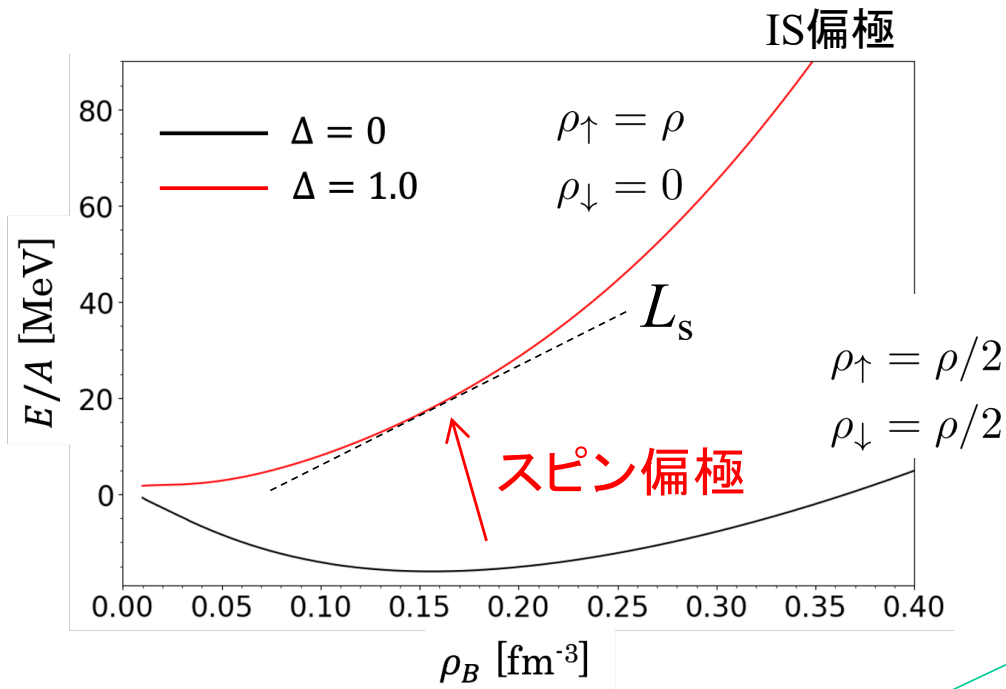
最新の
相互作用

スピン偏極核物質
のEOS

スピン偏極核物質のEOS

point coupling PCF-PK1相互作用による Rel. Hartree-Fock 計算

T. Tachibana, K. Hagino, K. Yoshida, and Q. Zhang, PRC112, 065806 (2025).



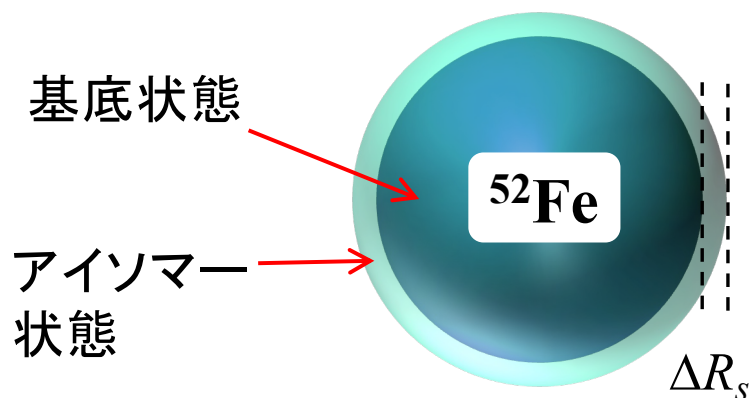
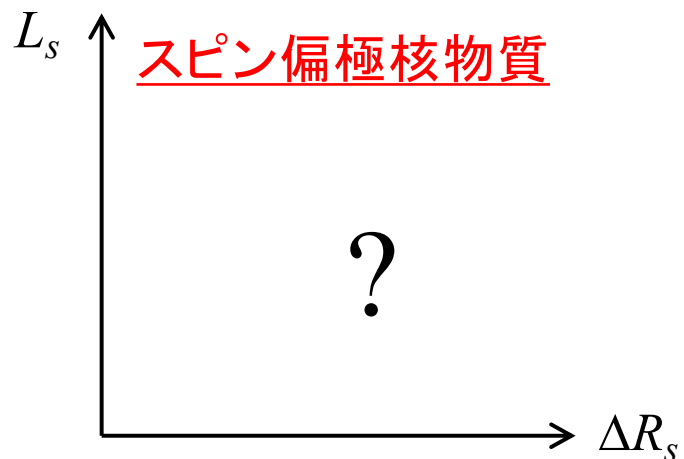
$$\Delta r_{\text{np}}(^{208}\text{Pb}) \rightarrow L \rightarrow L_s$$

$$\alpha(\rho) \rightarrow (1 - y)\alpha(\rho) + y\alpha(\rho_0)$$

cf. T. Inakura and H. Nakada, PRC92, 064302 (2015)

スピン偏極核物質のEOS

より直接的な比較? EOSの他の量?



$^{52}\text{Fe}(12^+ \text{状態})$ と ^{52}Fe (基底状態)

(MeV)

7.38 ————— 10^+

6.96 ————— 12^+

●●●●●●●○ $1f_{7/2}$

$j_z=7/2, 5/2$ を非占有
→ スピン偏極

0 ————— 0^+

$^{52}_{26}\text{Fe}_{26}$

$26 = 28 - 2$

●●●●●●●● $1f_{7/2}$

確率 6/8 ですべて
の j_z を埋める
→ スピン偏極なし

スピン偏極核物質のEOS

(MeV)

7.38 ————— 10^+
6.96 ————— 12^+

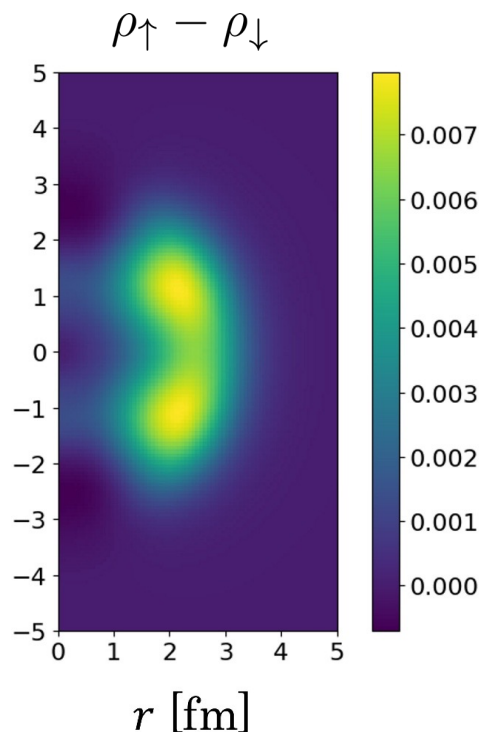
 $1f_{7/2}$

$j_z=7/2, 5/2$ を非占有
→ スピン偏極

0 ————— 0^+

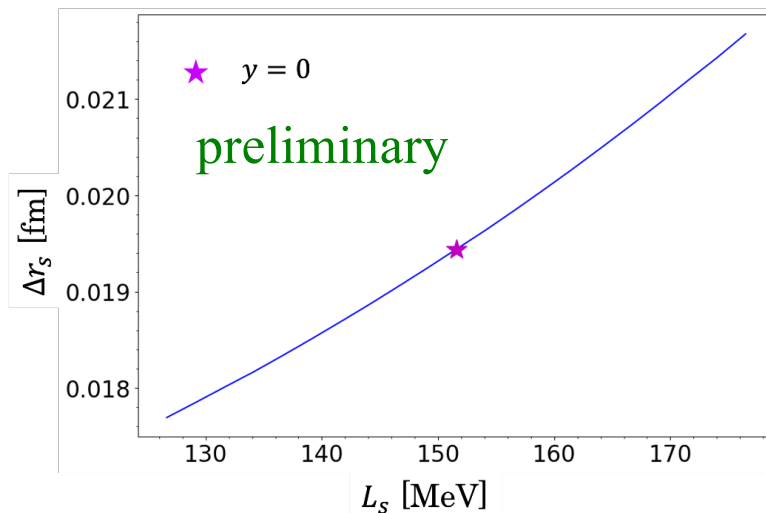
$^{52}_{26}\text{Fe}_{26}$

$26 = 28 - 2$



L_s と Δr_s の相関

$$\Delta r_s = r(12^+) - r(\text{g.s.})$$



cf. ESPRI* 実験

M. Dozono et al.

- 他のアイソマー？
- 他の観測量(励起エネルギー、遷移確率など？)
- EOSの他の量との相関？

T. Tachibana, K. Hagino, K. Yoshida, and Q. Zhang, in preparation.

まとめ

□ **本研究の目標:** (i) 相対論的HF法によるスピン偏極核物質のEOSの構築
(ii) EOSを制限する測定可能量の探索

□ **研究計画:**

✓ 1年目(2026年度)

- 一般の場合のスピン偏極物質のEOSの構築
- 高スピンアイソマー状態の記述のための準備(コード開発)

✓ 2年目(2027年度)

- $^{52}\text{Fe} (12^+)$ の核構造計算(半径など)
- 実験データとの比較による密度汎関数の精密化
- EOSとの比較、相関の探索
→マグネターなどの天体現象に対する知見

他の計画班との関係

