高密度物質と中性子星の物理
Physics of Neutron Star Matter

京大基研　大西　明
Akira Ohnishi (YITP, Kyoto Univ.)

- 中性子星の基本的性質
- 状態方程式を記述する理論模型
- 対称エネルギーと非対称核物質の状態方程式
- ハイパー核物理と高密度核物質の状態方程式
- 中性子星におけるエキゾチック自由度
- Supplementary Contents
  - 実験･観測･理論で解き明かす中性子星物質状態方程式
  - 重イオン衝突とハイパー核から中性子星へ
- まとめ

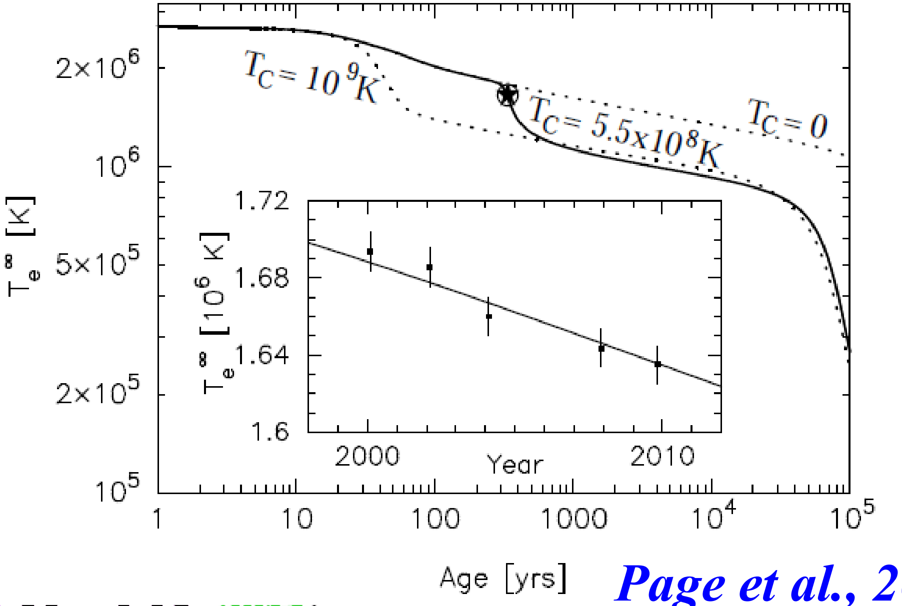
大阪大学集中講義　7/30-8/1

今回触れられなかった話題

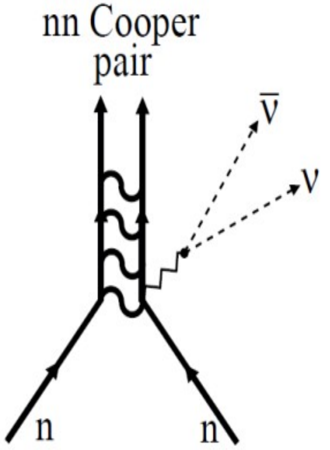
- エキゾチック自由度
  - 中間子凝縮 (π 凝縮、K 凝縮) 、クォーク物質、…
- 中性子星の冷却と超流動
- 中性子星と冷却原子
- 中性子星中の磁場
- パスタ原子核

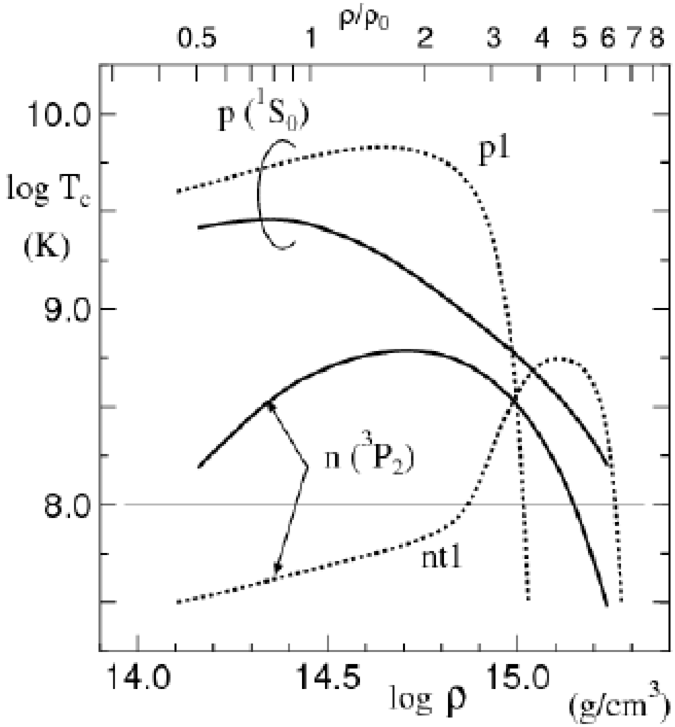
核子超伝導状態と冷却曲線

- 表面温度測定と冷却曲線
  - 超伝導状態 → ギャップ → ν 放出の抑制
  - Onset of superfluidity → 急速な冷却
  - Cas A の正確な温度測定と冷却率の測定
    Heinke, Ho, ApJ 719('10) L167 [arXiv:1007.4719]
    Page et al., PRL 106 ('11) 081101 [arXiv:1011.6142]
- 核物理への宿題: $5\rho_0$ 程度までのギャップを正確に測定・計算できるか？



Page et al., 2011





Takatsuka

中性子物質と冷却原子

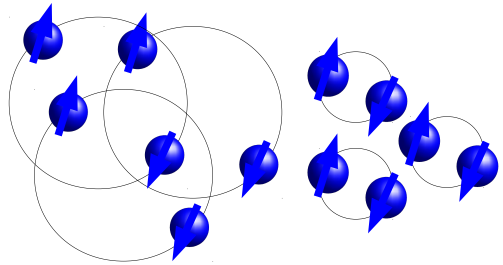
- **BEC-BCS crossover and unitary gas**
  - **散乱長 >> 粒子間距離 → EOS は普遍的 (unitary gas)**

$$E^{\text{Unitary}} = \xi E^{\text{Free}} \qquad \xi \simeq 0.4 (\text{Bertsch parameter})$$

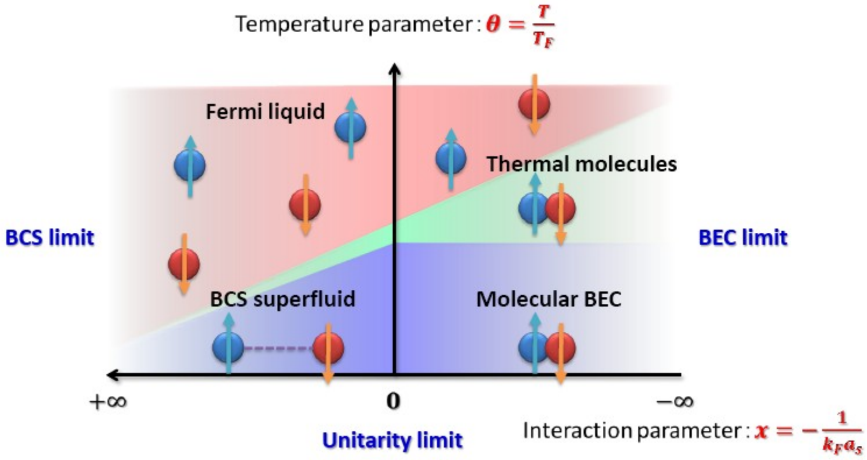
  - **nn 間の $^1S_0$ 散乱長は長い！($a_0 = -18.5$ fm)**
    → Drip した中性子ガスを、ほぼ unitary gas とみなせる ($-1/k_F a_0 \sim 0.1$)

- **My question**
  - **核子あたりの相互作用エネルギー ∝ $k_F^2 \propto \rho^{2/3}$**

$$\frac{V^{\text{Unitary}}}{N} = (\xi - 1)\frac{3}{5}\frac{\hbar^2 k_F^2}{2m} \propto \rho^{2/3}$$

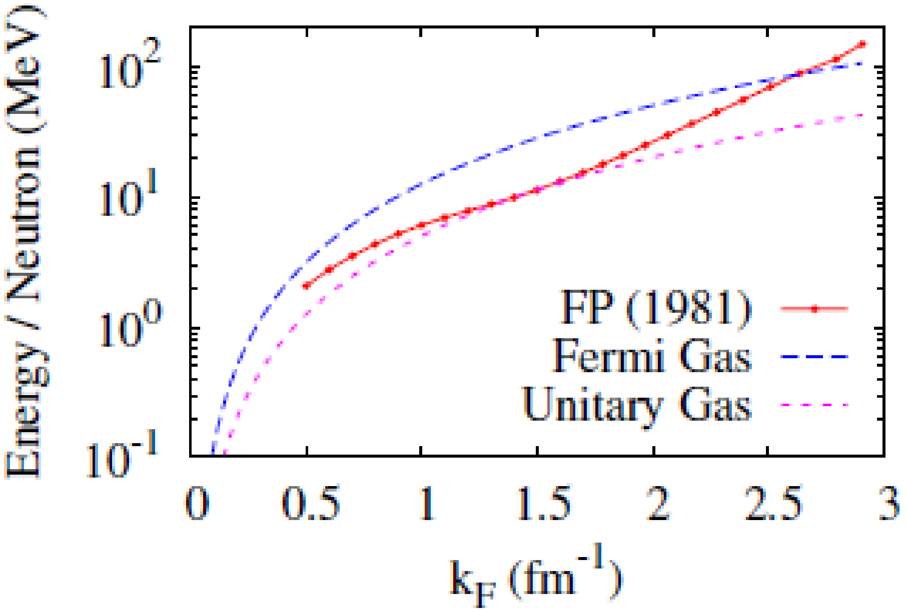


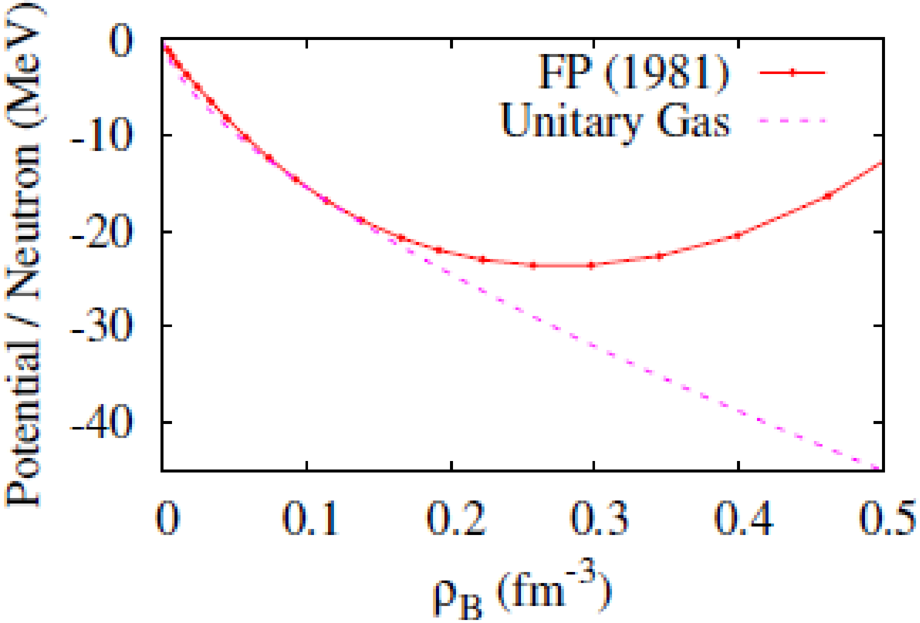
  - **どのようにして EOS(密度汎関数) に取り込むか？ (Hartree なら ∝ ρ)**
  - **unitary gas / BEC-BCS crossover は、クラスト・原子核の性質にどのような影響を及ぼすか？**



中性子星物質の状態方程式

- 変分法による計算結果
  Friedman-Pandharipande (1981)
  - 広い密度領域において
    $E_{unit} < E_{FP} < E_{Fermi}$
  - 低密度領域でポテンシャルエネルギーは $\rho^{2/3}$ と振る舞っているか？





中性子星の磁場の起源

- 中性子星中の磁場の強さ　$10^{12} - 10^{15}$ G
  - いかにして強い磁場を作るか？
  - いかにして磁場を保持するか？
- A new idea: Chiral Plasma Instability
  AO, N. Yamamoto, arXiv:1402.4760
  - Left-handed electrons are eaten in electron capture → chiral chem. pot.

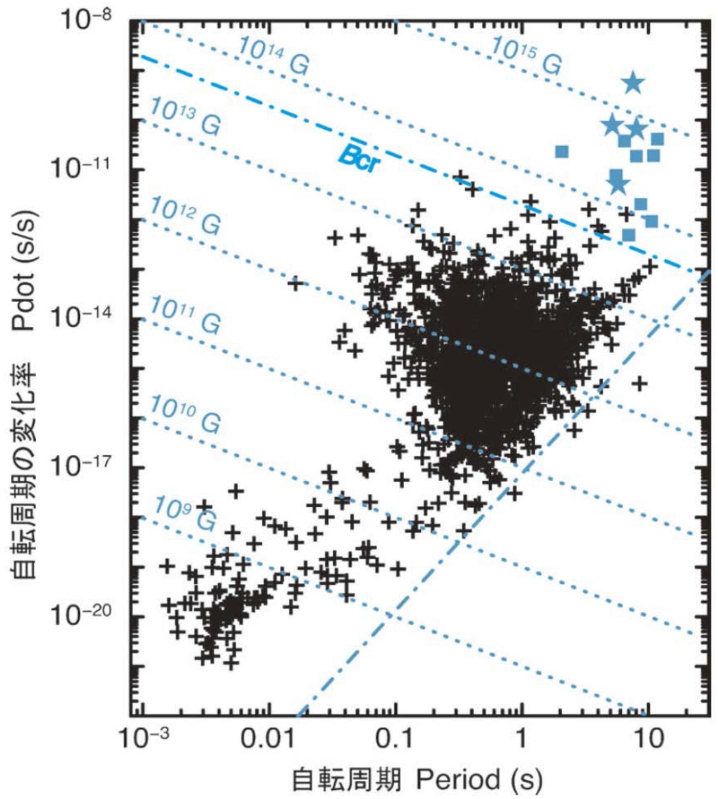
$$p + e^-_L \to n + \nu^e_L.$$

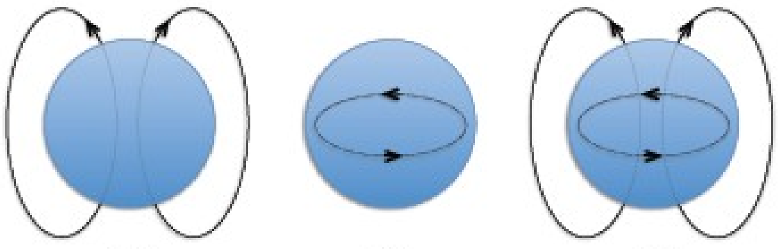
  - Chiral plasma instability: N_5 is converted to magnetic helicity

$$j_z = \frac{2\alpha}{\pi}\mu_5 B_z \qquad \frac{d}{dt}\left(N_5 + \frac{\alpha}{\pi}\mathcal{H}\right) = 0, \quad N_5 = \int dx\, n_5$$

  - Finite magnetic helicity makes magnetic field stable.

$$\mathcal{H} = \int dx\, \mathbf{A}\cdot\mathbf{B}$$





(a)　(b)　(c)

単位要件

- 次の条件で単位を出します。
  - 7コマの講義中、5コマ以上出席し、授業中の質問に答える。
  - 7コマの講義中、1コマ以上出席し、レポートを提出 (〆切 8/18) 。
- レポート問題（1、2のうち1問と3. ）

1. 中性子、陽子、電子のみからなる中性子星物質を考える。電子の質量を無視すると、核子あたりのエネルギーは、Lecture 1 で示したように

$$E_{\mathrm{NSM}}(\rho)=E_{\mathrm{SNM}}(\rho)+S(\rho)\delta^2+\frac{\Delta M}{2}\delta+\frac{3}{8}\hbar k_F(1-\delta)^{4/3}$$

と与えられる。ここで $\Delta M=M_n-M_p$ 、k_F は同じ密度での対称核物質のフェルミ波数である。核子あたりのエネルギーが最小となる非対称度 δ を求めよ。

2. SU(3) 不変な相互作用

$$\mathcal{L}_{\mathrm{BV}}=\sqrt{2}\{g_s\,\mathrm{tr}(M_v)\,\mathrm{tr}(\bar{B}B)+g_D\,\mathrm{tr}(\bar{B}\{M_v,B\})+g_F\,\mathrm{tr}(\bar{B}[M_v,B])\}$$
$$=\sqrt{2}\{g_s\,\mathrm{tr}(M_v)\,\mathrm{tr}(\bar{B}B)+g_1\,\mathrm{tr}(\bar{B}M_vB)+g_2\,\mathrm{tr}(\bar{B}BM_v)\}$$

において、バリオン・メソンの結合定数を g_D, g_F, g_s を用いて表せ。

3. 今回の講義において、中性子物質の物理の課題の中で各自が興味を持った項目をあげ、その理由を述べよ。