

中性子で強磁性？



2012年8月31日@京大基研
「ハドロン物質の諸相と状態方程式
—中性子星の観測に照らして」



強磁性中性子星の機構の提案



橋本幸士
(理研 仁科セ 理論部門)

衛藤稔さん (山形大), 初田哲男さん (理研), との共同研究

問題

マグネターの強磁場

原因

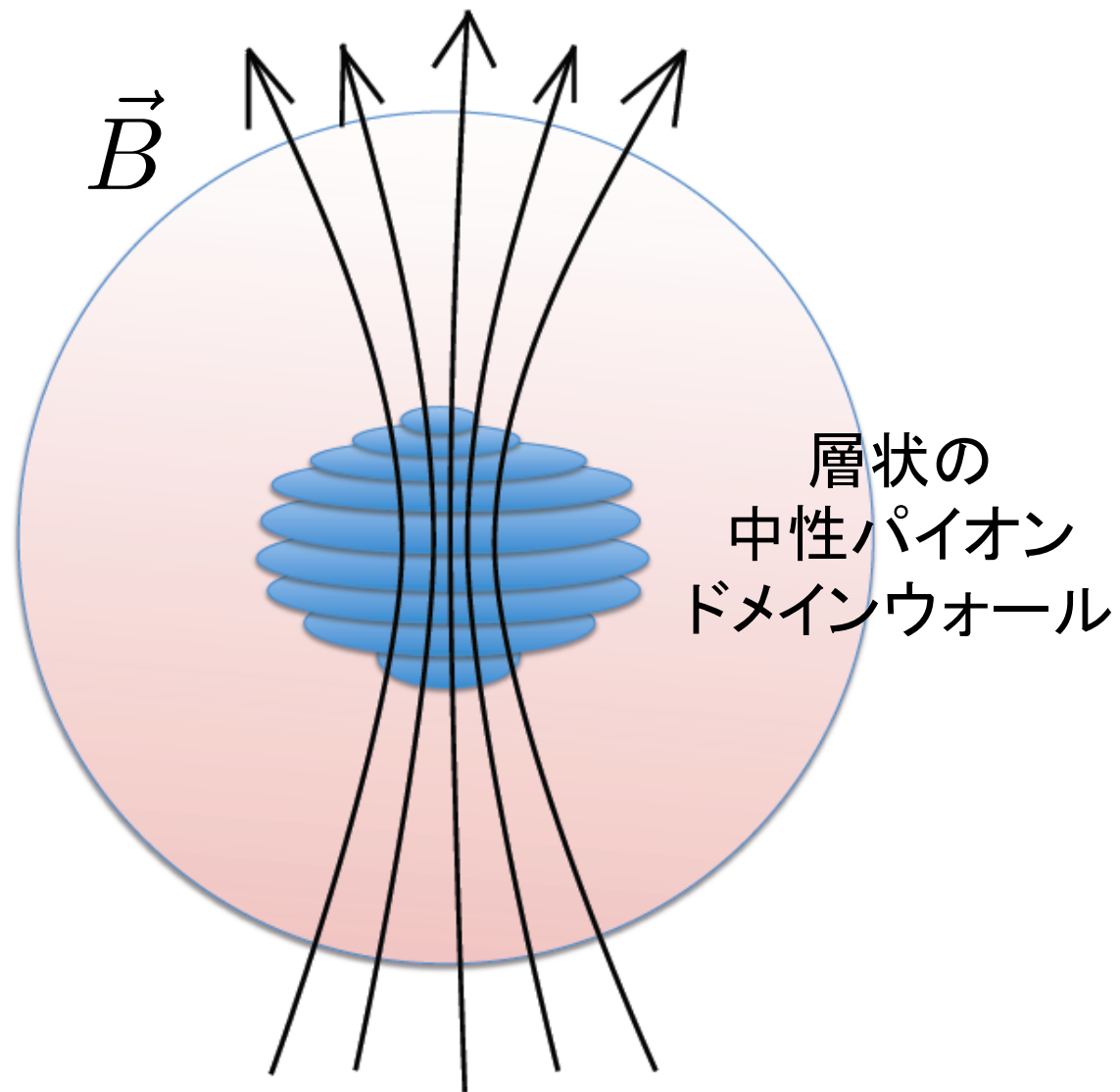
高密度中性子物質での磁場生成機構がない？

我々の解(提案)

高密度中性子物質

軸性アノマリー + π^0 ドメインウォール

新しい相 : QCD 強磁性



講演目次

1. パイオンのドメインウォール. 3 ページ

2. QCD 強磁性. 3 ページ

高密度中性子物質を記述する

中性子と中性パイオンの低エネルギー作用

$$\mathcal{L} = \bar{n}(i\gamma^\mu\partial_\mu + \mu\gamma_0 - M_n)n - \frac{1}{2f_\pi}(\bar{n}\gamma_\mu\gamma_5 n)\partial^\mu\theta + \frac{1}{2}(\partial_\mu\theta)^2 + f_\pi^2 m_\pi^2(\cos\theta - 1)$$

化学ポテンシャルで高密度中性子物質を記述

陽子中性子と中性・荷電パイオン: ワインバーグの作用

$$\mathcal{L} = \bar{\psi}(iD_\mu\gamma^\mu - M_N)\psi - g\bar{\psi}\gamma_5\gamma^\mu\boldsymbol{\tau}\psi \cdot D_\mu\boldsymbol{\phi} + \frac{1}{2}D_\mu\boldsymbol{\phi} \cdot D^\mu\boldsymbol{\phi} - \frac{1}{2}m_\pi^2(1 + \boldsymbol{\phi}^2/4f_\pi^2)^{-1}\boldsymbol{\phi}^2$$

$$D_\mu\boldsymbol{\phi} \equiv (1 + \boldsymbol{\phi}^2/4f_\pi^2)^{-1}\partial_\mu\boldsymbol{\phi}$$

$$D_\mu\psi \equiv \left[\partial_\mu + \frac{i}{4f_\pi^2}(1 + \boldsymbol{\phi}^2/4f_\pi^2)^{-1}\boldsymbol{\tau} \cdot (\boldsymbol{\phi} \times \partial_\mu\boldsymbol{\phi}) \right] \psi$$

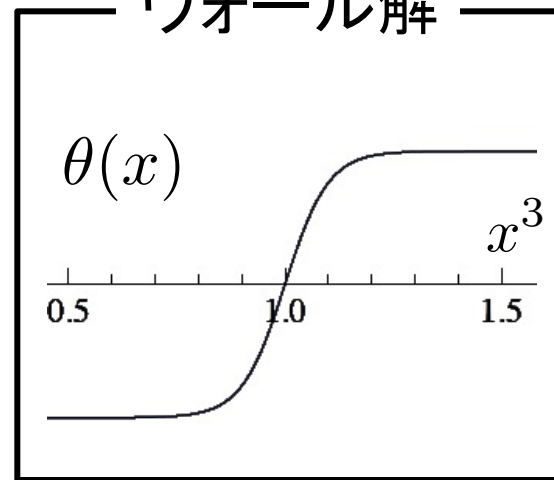
中性パイオンのドメインウォール

中性パイオンの作用はサインゴルドン模型

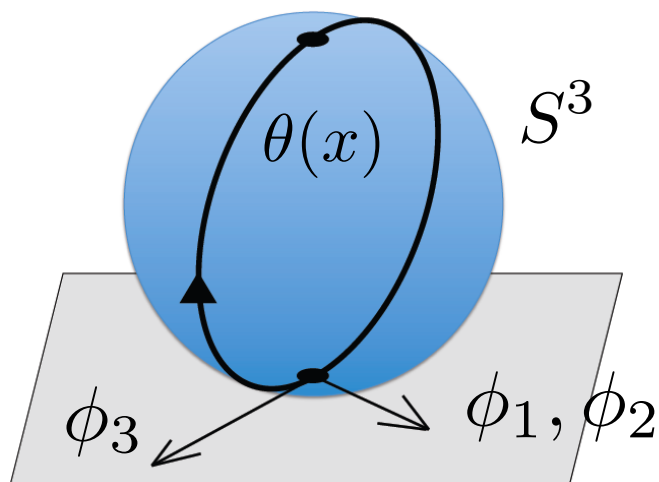
$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} f_\pi^2 (\partial_\mu \theta)^2 - m_\pi^2 f_\pi^2 \cos \theta$$

$\theta = 0$ と $\theta = 2\pi$ を結ぶ古典解がある.

ウォール解

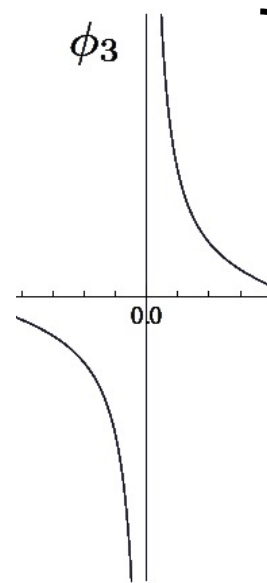


非線形 σ 模型のターゲット空間 $\sim \text{SU}(2) \sim S^3$



$$\phi_3 = \frac{2f_\pi}{\sinh[m_\pi x^3]}$$

$$\phi_1 = \phi_2 = 0$$

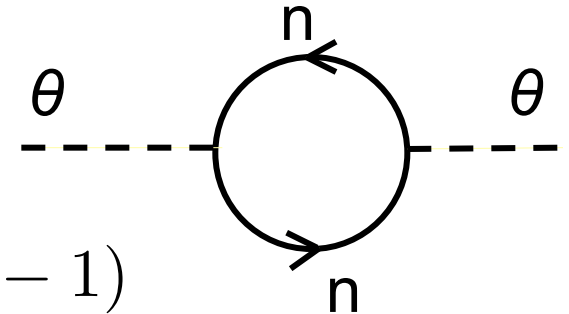


中性子物質中ではウォールは軽くなる

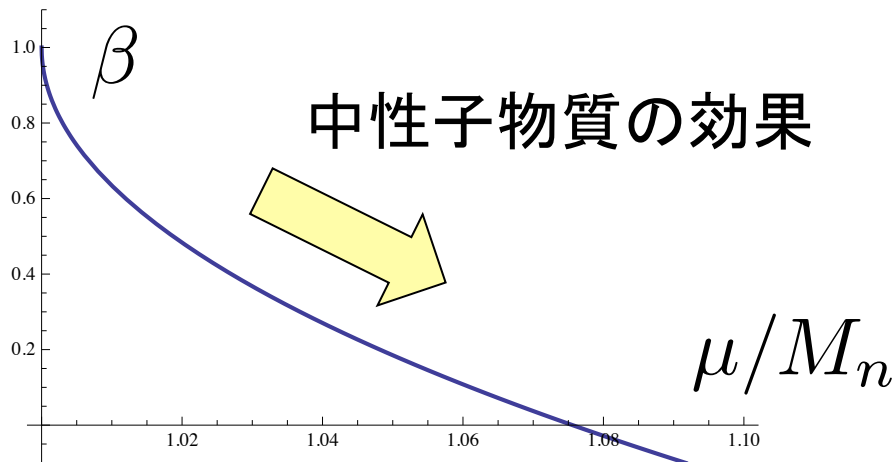
[Hatsuda 1986]

中性子を1ループで積分

→ 中性パイオンの有効作用が変化



$$\mathcal{L} = \frac{\alpha}{2}(\partial_0\theta)^2 - \frac{\beta}{2}(\partial_i\theta)^2 + f_\pi^2 m_\pi^2 (\cos\theta - 1)$$



高密度で β は減る

軽いドメインウォール

$$\mathcal{E}/S = 8\sqrt{\beta}f_\pi^2 m_\pi$$

荷電パイオンも補正を受け、高密度で似た変更を受ける。
Tomozawa-Weinberg 項・ πN シグマ項も重要。

講演目次

1. パイオンのドメインウォール. 3 ページ

中性子物質中ではとても軽くなる.

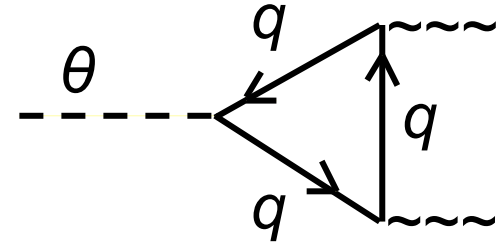
2. QCD 強磁性.

3 ページ

高密度＋初期磁場 でドメインウォール相

QCDの軸性アノマリ項 (崩壊 $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ に重要)

$$\mathcal{L}_{\text{anom}} = \frac{e}{4\pi^2} \mu_B B_3 \partial_3 \theta$$



磁場中のドメインウォールのバリオン数 $N_B/S = eB_3/2\pi$

[Son, Stephanov, 0710.1084]

単位バリオン数あたりのエネルギー:

$$\mathcal{E}/N_B = \frac{16\pi f_\pi^2 m_\pi}{eB_i \hat{n}_i} \sqrt{\beta}$$

もしこれが μ より小さければ、
ドメインウォール相が実現！

$$B \sim \sqrt{\beta} \times 10^{19} \text{ [G]}$$

$$\left[L_{\text{WZW}} = \frac{-ie}{16\pi^2} A_0^{(B)} B_3 \text{tr} [\tau_3 (U \partial_3 U^\dagger + \partial_3 U^\dagger U)] \right]$$
$$U \equiv (\sigma + i\boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{\pi})/f_\pi$$

QCD強磁性

ドメインウォールによる磁化: $M = \frac{e\mu_B}{4\pi^2} \partial_3 \theta$ [Son, Zhitnitsky, hep-ph/0405216]

ウォール間の距離 d で層なら $M = \frac{e\mu_B}{2\pi d}$

ウォール上のバリオン数密度 $\rho = \frac{eB_3}{2\pi} \frac{1}{d}$

$$M = \frac{\mu_B \rho}{B_3}$$

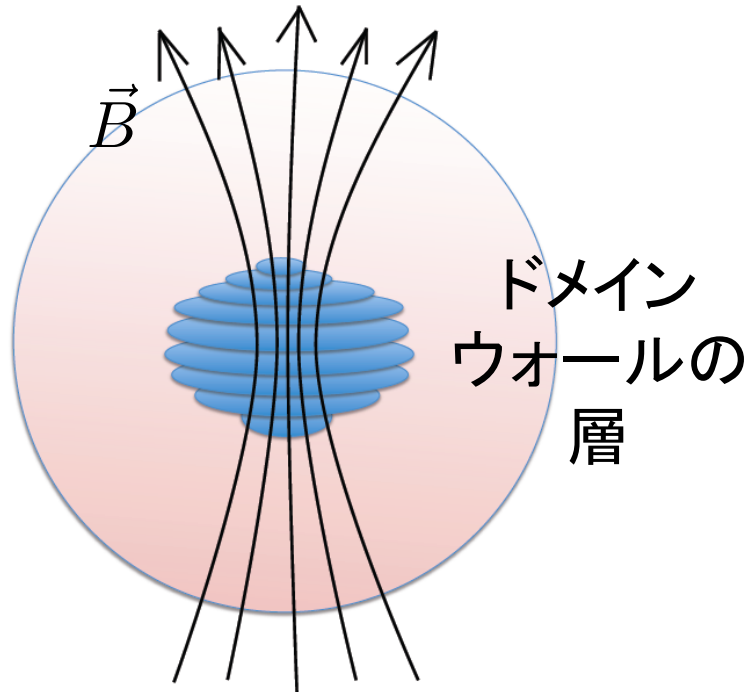
最終的に平衡

$$B_3 = M$$

$$B_3 \sim 10^{19} [\text{G}]$$

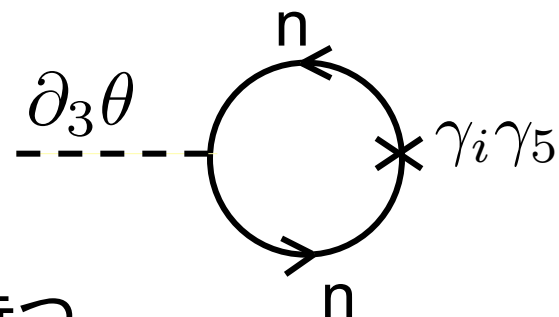
QCD強磁性.

自発磁化による強い磁場



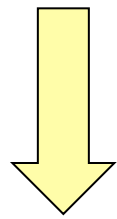
スピン整列による強磁性

中性子のスピンはウォール上で整列:

$$S_i(x) = \langle \bar{n} \gamma_i \gamma_5 n \rangle = (\beta - 1) f_\pi^2 \partial_i \theta(x)$$


→ ドメインウォールは中性子スピン密度を持つ

$$s_3/S = 2\pi(\beta - 1)f_\pi^2 \quad [\text{Hatsuda 1986}]$$



中性子の磁気モーメント

$$\mu = \frac{g e s_3}{2M_n} \quad \text{with} \quad g \sim -3.8$$

ドメインウォールが中性子スピン整列で磁化される

$$M = \frac{\pi |g| e f_\pi^2}{m_N} \frac{1}{d}$$

問題

マグネターの強磁場

原因

高密度中性子物質での磁場生成機構がない？

我々の解(提案)

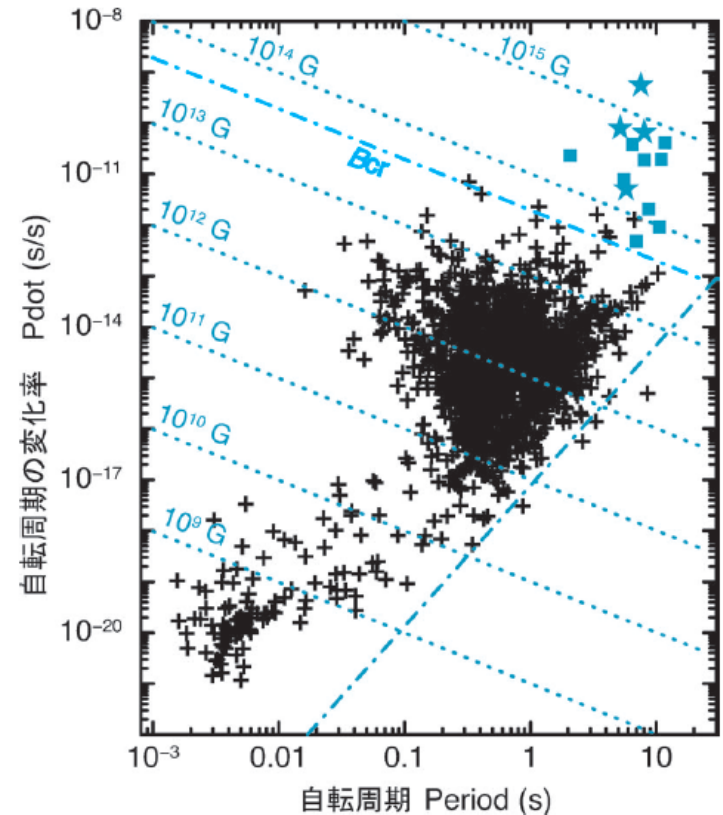
高密度中性子物質

軸性アノマリー + π^0 ドメインウォール

新しい相 : QCD 強磁性

今後の課題、いろいろ..

- ・ウォールの安定性
荷電パイオン凝縮との競合
- ・現実的な模型へ
核力の導入、ハイペロン
- ・ウォールによる状態方程式
- ・中性子超流動: 高密度でp波、
ウォール上でペアリング
- ・孤立中性子星の重力波放出
- ・マグネター分類？



[榎戸さんの天文月報 2012]