# Continuity from neutron matter to two-flavor quark matter with <sup>3</sup>P<sub>2</sub> superfluidity



Y. Fujimoto, K. Fukushima & W. Weise, Phys. Rev. D 101, 094009 (2020) arXiv:1908.09360 [hep-ph]

2020年8月25日,熱場の量子論2020@Remo

## 中性子星の状態方程式 (EoS)・質量-半径

### **QCDと観測に基づく model-independent な理解:**



EoS に強い1次相転移はなさそう e.g.: Han,Mamun,Constantinou, Prakash (2019), … → **クロスオーバー**的な物理を示唆

## 観測と整合する EoSの構成

Masuda, Baym, Hatsuda, Kojo, Powell, Song, Takatsuka (2013-)



Fujimoto, Fukushima, Weise (2019)

クォーク・ハドロン連続性 (QHC)

Fujimoto, Fukushima, Weise (2019

### 本発表の short summary:



クォーク・ハドロン連続性 (QHC)

't Hooft; Osterwalder, Seiler; Fradkin, Shenker; Banks, Rabinovici (late 70s)

- Fradkin-Shenker-...定理のdense QCDでの実現
- Fradkin-Shenker定理 (folk theorem) Higgsゲージ理論では、Higgs相と閉じ込め相との間に 相転移がない (=秩序変数で区別できない)
- **ハドロン相**(=閉じ込め相)と**カラー超伝導相**(=Higgs相)の大域 的な対称性が同じなら、2つの相は秩序変数では区別できず、 クロスオーバー的につながる
- 以降では、**超流動の秩序変数**を例にとって考える

## 3P2 中性子超流動

#### Tamagaki (1970); Hoffberg et al. (1970)

- 中性子星内核では、 ${}^{3}P_{2}$ 中性子超流動 が実現 - *P*-波:密度増加すると核力が斥力芯に当たる  $\rightarrow S$ -波 (*L* = 0) が抑制; *P*-波 (*L* = 1) が支配的に

- **スピン三重項** (S = 1): 反対称性から決まる

- 全角運動量 (J = 2): スピン軌道力から決まる

LS力の中で唯一引力的

 $V_{LS} \propto -L \cdot S = \begin{cases} +2 & ({}^{3}P_{J=0}) \\ +1 & ({}^{3}P_{J=1}) \end{cases}$ 

NN 散乱位相差 Phase shift (in degrees)  $SG 0^{0}$   $1S_0$   $3P_2$   $1D_2$   $P_0$   $1D_2$   $P_0$   $1D_2$   $1D_2$  $1D_2$ 

Aoki, Hatsuda, Ishii (2007)

### <sup>3</sup>P<sub>2</sub> 中性子超流動の秩序変数

Fujimoto, Fukushima, Weise (2019)

### - <sup>3</sup>P<sub>2</sub> 中性子超流動の秩序変数:

 $\Upsilon_{nn} \equiv n^{\mathsf{T}} C \gamma^i \nabla^j n$ スピン 角運動量



 $n \equiv \epsilon^{\alpha\beta\gamma} (u_{\alpha}^{\top} C \gamma^5 d_{\beta}) d_{\gamma} = \Phi_{2SC}^{\gamma} d_{\gamma}$ 

### <sup>3</sup>P<sub>2</sub> 中性子超流動の秩序変数

Fujimoto, Fukushima, Weise (2019)

-  $\Upsilon_{nn}$ の平均場近似 nn in ハドロン相  $\langle \Upsilon_{nn} \rangle \approx \langle u d \rangle u d \rangle^{3} P_{2} ペアリング$ in クォーク相  $\langle \Upsilon_{nn} \rangle \approx \langle u d \rangle \langle u d \rangle$  New

… クォーク相でも $U(1)_B$ とカイラル対称性破れる

### → 大域対称性がハドロン相と同じなので、 この2相はクロスオーバーでつながる

3P2 チャンネルでの <dd> ペアリング

 Fujimoto,Fukushima,Weise (2019)

 (1) dd 間の短距離斥力相互作用:

 カラー対称な dd クォーク交換によって生成

 [cf. 核力の斥力芯:
 Oka,Yazaki (1980)

 核子間のクォーク交換によって記述可]

(2) J = 2 での選択的引力:  $\mathscr{L}_{int} = G(\bar{\psi}\psi)^2 + H(\bar{\psi}\bar{\psi})(\psi\psi) - G_V(\bar{\psi}\gamma^\mu\psi)^2$ ... この模型は J = 2 で引力的な LS ポテンシャルを与える

[cf. LS ポテンシャルは1グルーオン交換の Fermi-Breit reduction によっても得られる] De Rujula,Georgi,Glashow (1974)

N

3Pっチャンネルでの <dd> ペアリング

(1) dd 間の短距離斥力相互作用:

カラー対称な dd クォーク交換によって生成

**Fujimoto**, Fukushima, Weise (2019)

(2) *J* = 2 での選択的引力:

 $\mathscr{L}_{int} = G(\bar{\psi}\psi)^2 + H(\bar{\psi}\bar{\psi})(\psi\psi) - G_V(\bar{\psi}\gamma^\mu\psi)^2$ ... この模型は J = 2 で引力的な LS ポテンシャルを与える

## 中性子星の冷却曲線からの示唆





- 観測と無矛盾な EoS 構成の1つ: クォーク・ハドロン連続性
- 現実的な中性子星環境からクォークへのクロスオーバーのシナ リオを構築
- クォーク相では、新奇カラー超伝導のパターンが発見された: ${}^{3}P_{2}$  チャンネルで dd ダイクォーク凝縮が生じる。 これを 2SC+<dd>相と呼ぶ。
- *U*(1)<sub>*B</sub> が破れるので、純粋な 2SC 相とは異なり渦が生じる: 非可換渦が生じることがわかっている</sub>*

Fujimoto, Nitta, Yasui (work in progress)