

中性子星の観測と理論~研究活性化ワークショップ~
10-12/Aug. 2021@ ONLINE

中性子星内部の状態と熱的進化

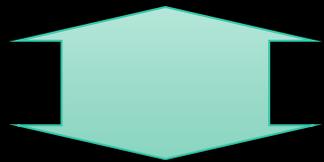
野田常雄 (久留米工業大学)

In collaboration with

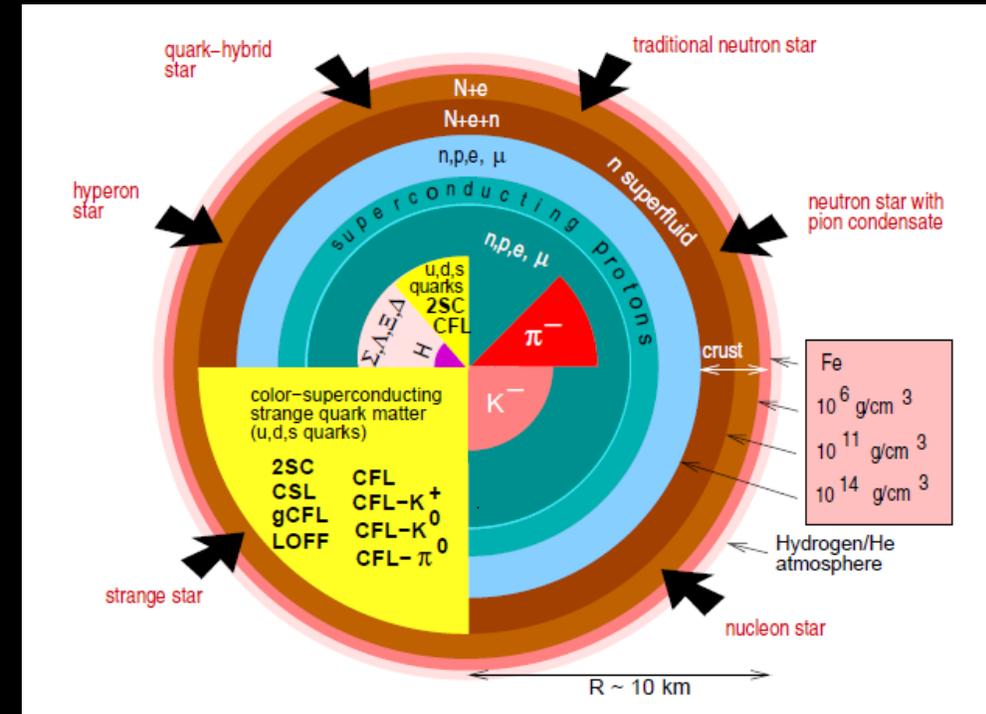
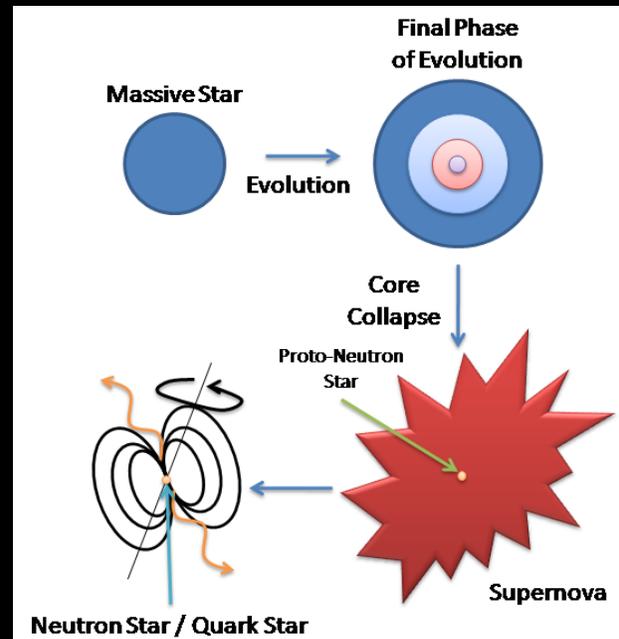
安武伸俊(千葉工業大学), 橋本正章(九州大学), 土肥明(九州大学/理研),
丸山敏毅(原子力機構), 巽敏隆 (大阪産業大学)

中性子星の内部状態

- 中性子星内部は**核密度を超える高密度**
 - クォークの閉じ込め解放
 - ハイペロン混合
 - メソン凝縮
 - 核子の超流動



- 観測からの制限
 - M-R関係等
- 恒星進化・超新星



F. Weber, Prog. Part. Nucl. Phys. 54, 193 (2005)

中性子星における状態

- **Atmosphere / Envelope:** 軽元素 (H, He, C ...)
- **Surface** ($\rho < 10^6$ g/cm³): Fe lattice
- **Outer Crust** ($\rho < 4.3 \times 10^{11}$ g/cm³):
原子核の格子構造 + 相対論的・縮退電子 (白色矮星物質)
- **Inner Crust** ($\rho < 2 \times 10^{14}$ g/cm³):
中性子過剰原子核 + 超流動中性子(¹S₀) + 電子

原子核から
中性子がこぼれる

原子核がとける

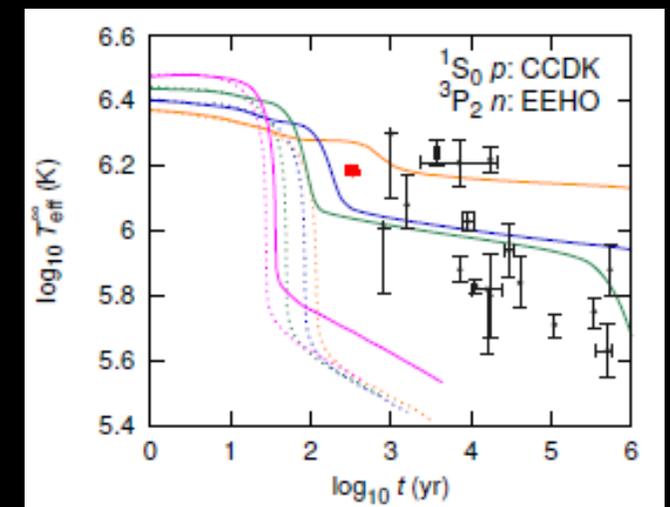
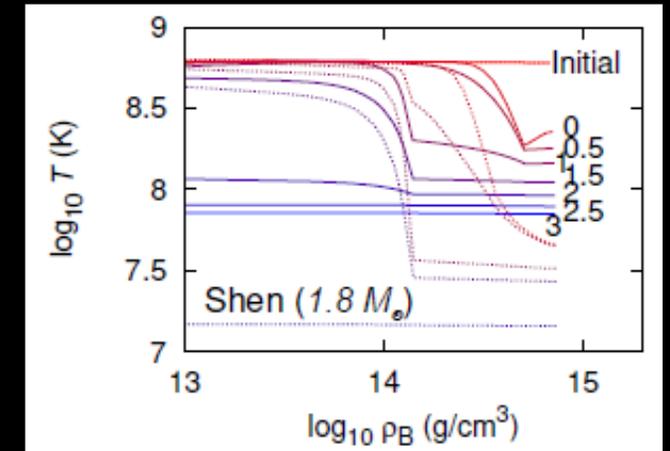
Core

- **Neutron Liquid** ($\rho < 10^{15}$ g/cm³):
超流動陽子 / 中性子(¹S₀, ³P₂) + 電子
- **Ultradense Core** ($\rho > 10^{15}$ g/cm³):
メソン凝縮 / ハイペロン混合 / クォークの閉じ込め解放 + 超流動陽子 / 中性子(³P₂) + 電子

(cf. Shapiro & Teukolsky (1983))

Thermal History of Neutron Stars

- 中性子星は超新星爆発時に生まれる
 - 生まれた直後は高温 ($\sim 10^{10}$ K)
 - 単独星は**内部に熱源を持たない**
 - 熱エネルギーをニュートリノ放射で放出
 - 冷えるだけ
 - $t < 10^5$ yr: ニュートリノ
 - $t > 10^5$ yr: フォトン (X線)
1. コアが先に冷える
 2. 外部はしばらく温かいまま
 3. Isothermal化(~ 100 年) \rightarrow 表面温度が下がり始める



Cooling of Neutron Stars

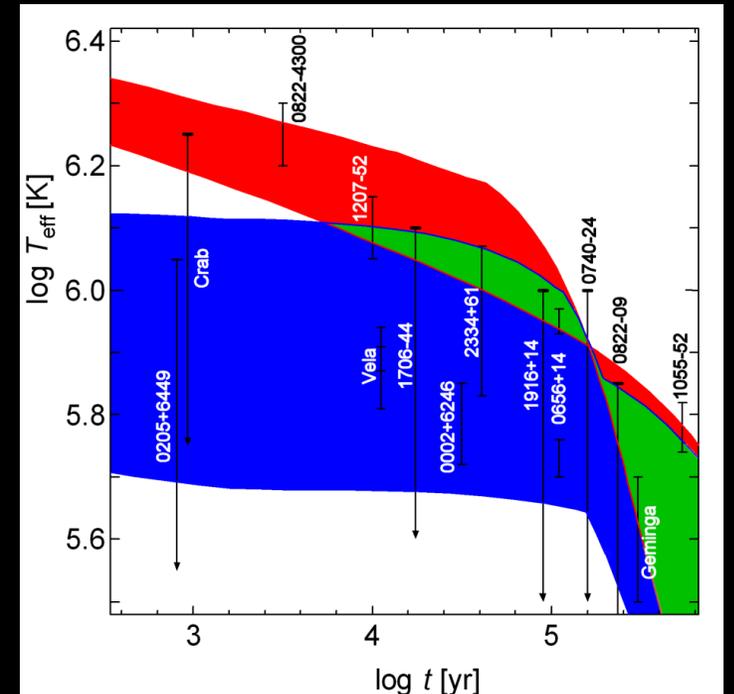
中性子星の冷却過程は内部の状態に強く依存

- **Normal nuclear matter**
- π condensation
- K condensation
- **Quark matter**
- **Superfluidity**
- etc...

ニュートリノ放射

Exotic phase は高密度で出現し、**星を急激に冷却**
出現密度以上の中心密度の星 = 重い星

単独星の観測と冷却計算の突合せ
⇒ 高密度状態の制限



(TN+ 2006)

ニュートリノ放射

- 全ての中性子星で起こるもの (**Standard**)
 - Modified URCA: **弱い**
 - 核子の超流動: **やや強い**(遷移時のみ)
- 重い中性子星で起こるもの (**Exotic**)
 - Quark β -decay (**クォーク物質**を考慮): **強い**
 - Direct URCA ($y_p < 1/9$ のとき): **強い**
 - π , K, H (出現したら): **強い**
- 超流動・超伝導
 - 超流動遷移時にニュートリノ放射
 - 超流動状態では**反応に含まれる他のニュートリノ放射の抑制**
→ 「強い」放射を適度に弱める

クォーク・ハドロン連続性を考慮した ハイブリッド星の冷却

内部の物質のニュートリノ放射に着目して

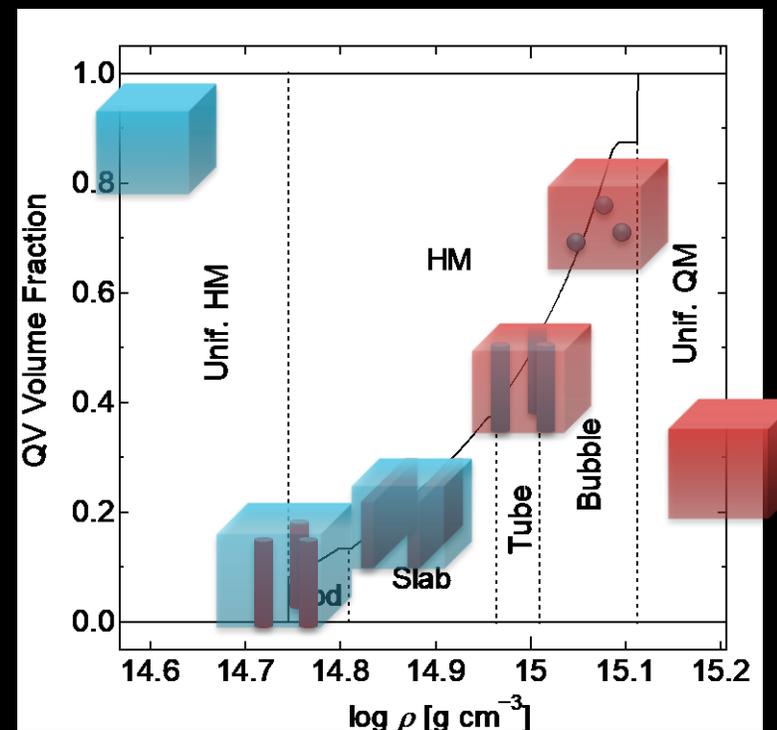
高密度領域でクォーク物質

- **normalなクォークは強い冷却**
- 低温のためカラー超伝導 (CSC)
- CSCではニュートリノ放射の抑制

$$\propto \exp(-\Delta/k_B T)$$

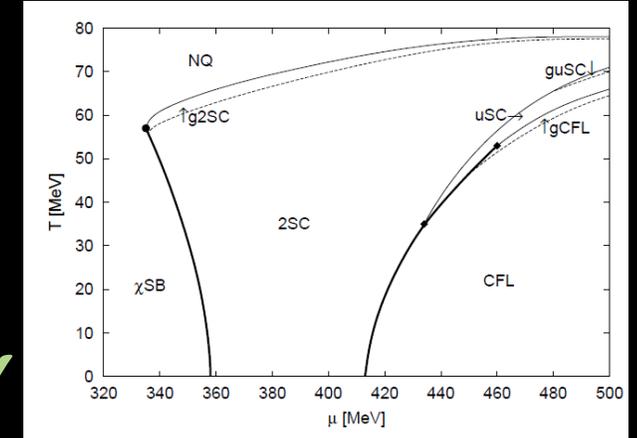
- ハドロン相との境界
 - クォーク・ハドロン混合相
 - 本モデルでは**最高密度でも混合相**

Quark Phase

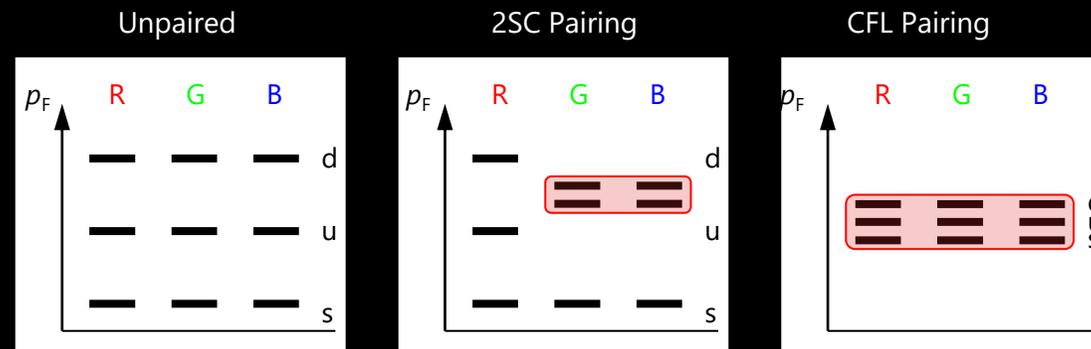


Pairing of Quarks

- クォーク物質のカラー超伝導には**複数のペアリング**
 - カラーとフレーバーの自由度・対称性
- CFL相** (Colour Flavour Locking ・ **高密度側** **X**)
 - すべてのカラー・フレーバーがペアを組める
 - RGB全クォークが超伝導に** → **ニュートリノ放射が抑制** **✓**
- 2SC相** (Two Flavour Superconductivity ・ **低密度側** **✓**)
 - カラー・フレーバーともに2つがペアを組める
 - 超伝導にならないnormalなクォークが1/3残る** → **強いニュートリノ放射** **X**



Rüster et al. (2006)

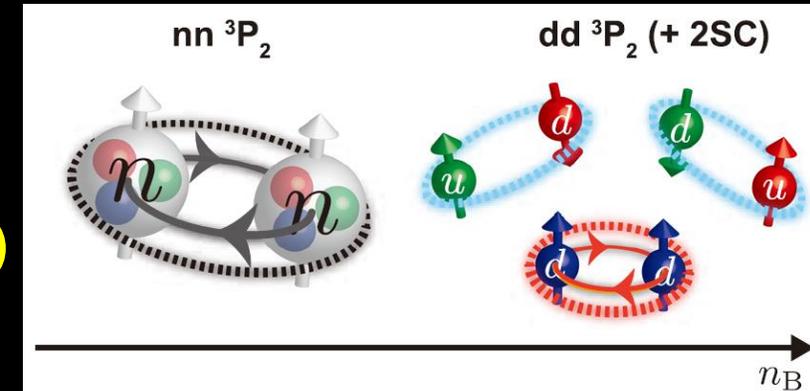


Quark-Hadron Continuity

中性子 ${}^3P_2 \rightarrow$ クォーク ${}^3P_2 + 2SC$ の連続的变化 (Fujimoto+ PRD 101, 094009, (2020))

- 中性子 3P_2 を、dクォークが引き継ぐ \rightarrow 他は2SCを組める

- 全てのクォークがペアを組める
- 2SC状態で強いクォーク冷却を抑制可能(2SC+ <dd>)



- 仮定: 中性子 3P_2 の臨界温度がdクォークの 3P_2 に引き継がれる
 - 陽子の 1S_0 の寄与は考えない
 - 2SCやCFLの Δ は数十MeV
 - sクォークは出現しない

- n,p とともに超流動を考慮

Neutron: 1S_0 , 3P_2 Proton: 1S_0

- 臨界温度 (T_{cr})

- 密度依存を関数化

冷却への影響

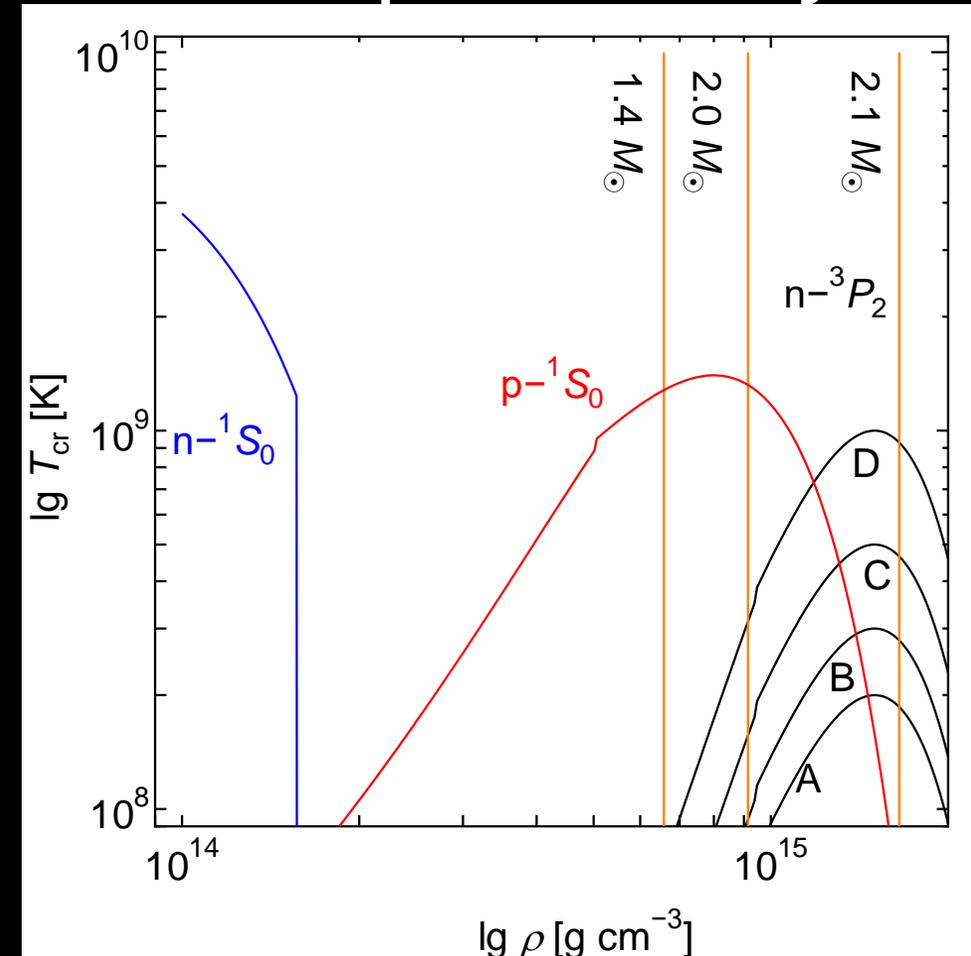
超流動転移時: **Strong cooling (PBF)**

(Page+ 2004)

超流動転移後: **他のニュートリノ放射の抑制**

- n- 3P_2 の臨界温度を2SC+ <dd> が引き継ぐ
- n, d- 3P_2 のモデルを変化させて計算

Nucleon Superfluidity

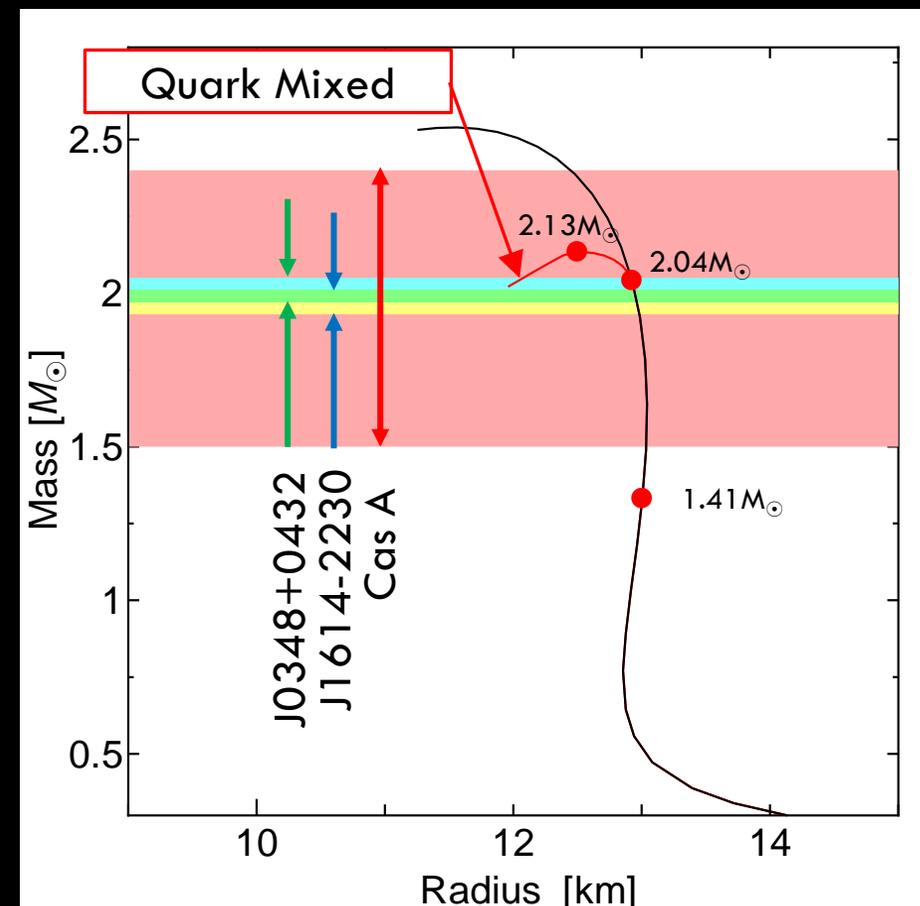


Models

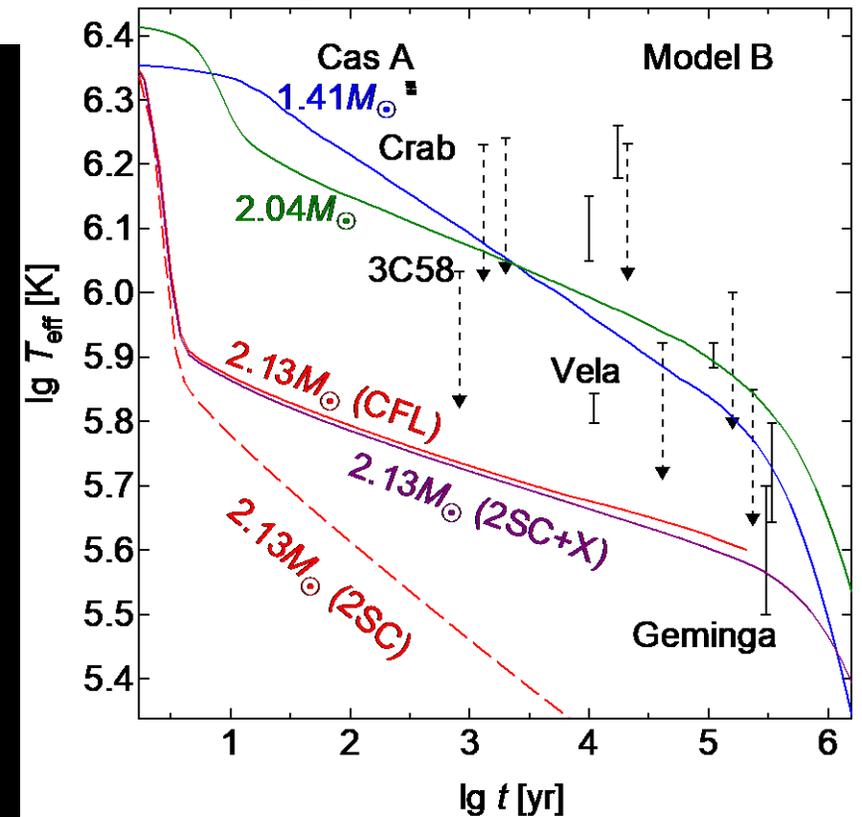
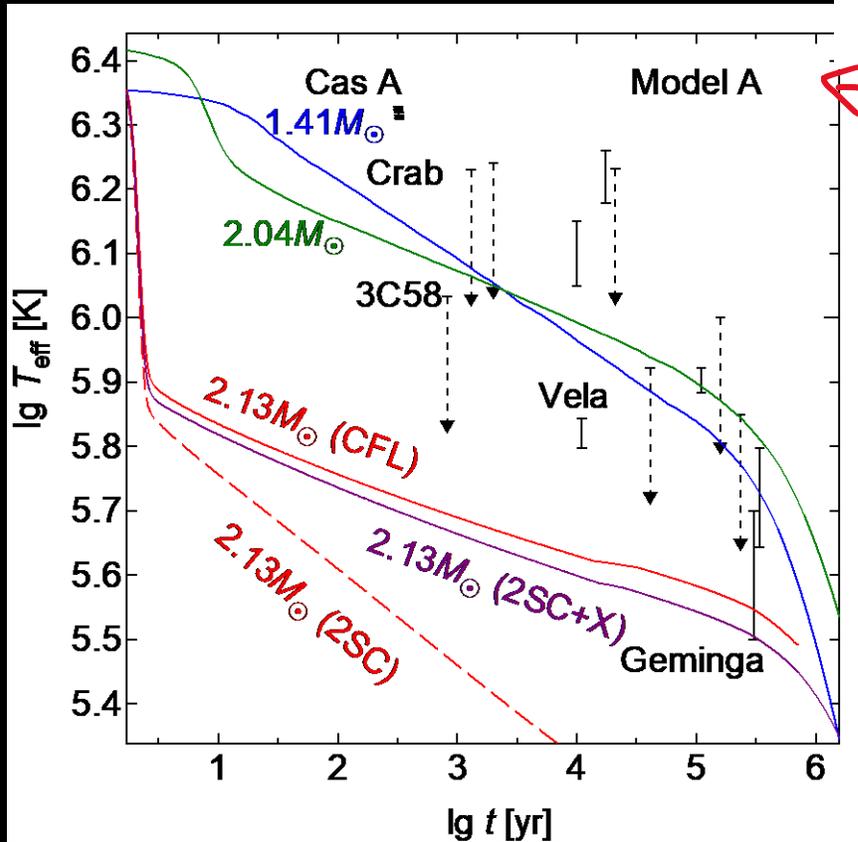
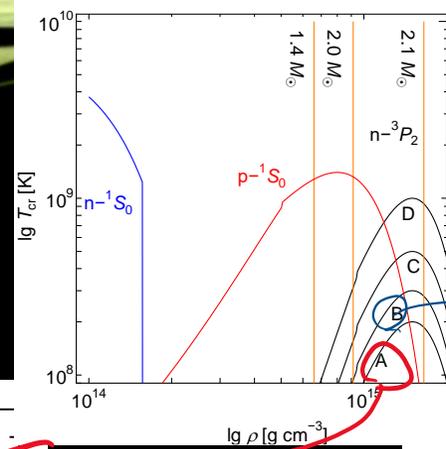
- 最大質量が $2M_{\odot}$ まで達するEoS
 - Brueckner-Hartree-Fock (HM) + Dyson-Schwinger (QM)
 - HM-QM間で混合相
(Yasutake+ 2016)

最大質量でも中心は混合相

- 表面組成は ^{56}Fe
- 冷却
 - Modified URCA + Bremsstrahlung
 - n-Super(1S_0 , 3P_2), p-Super(1S_0)
 - **Direct URCA** ($y_p > 1/9$)
 - **Quark Cooling** with Colour Superconductivity (CSC)
- パラメータ
 - **質量**
 - **n, d- 3P_2 超流動**の臨界温度の密度依存
 - **CSCのペアリング** (CFL / 2SC / 2SC+ <dd>)

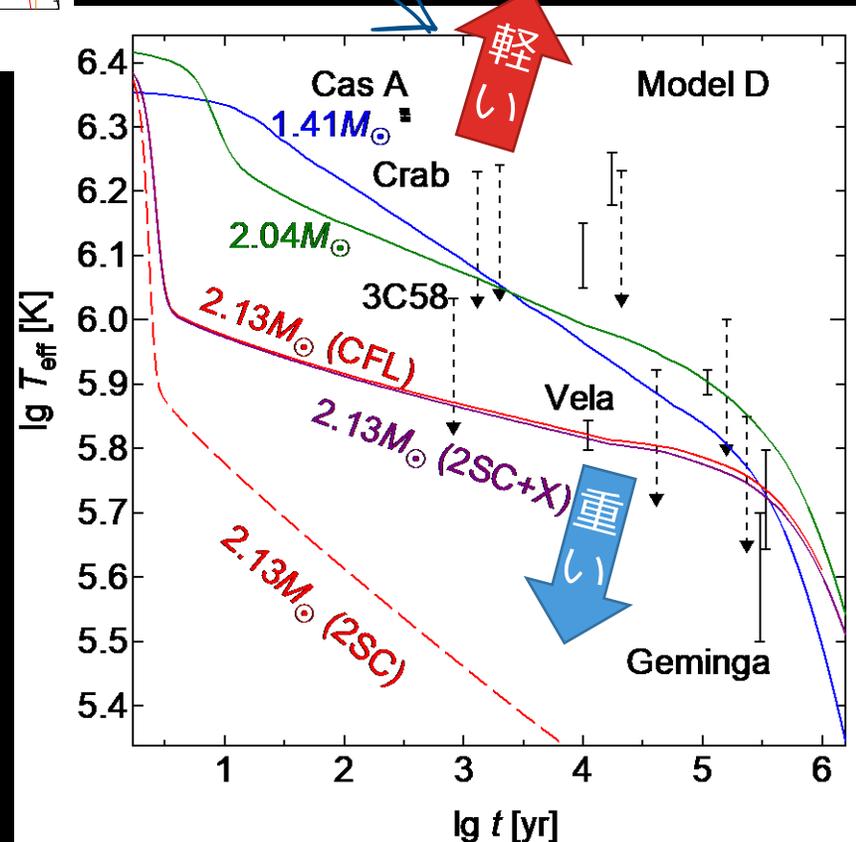
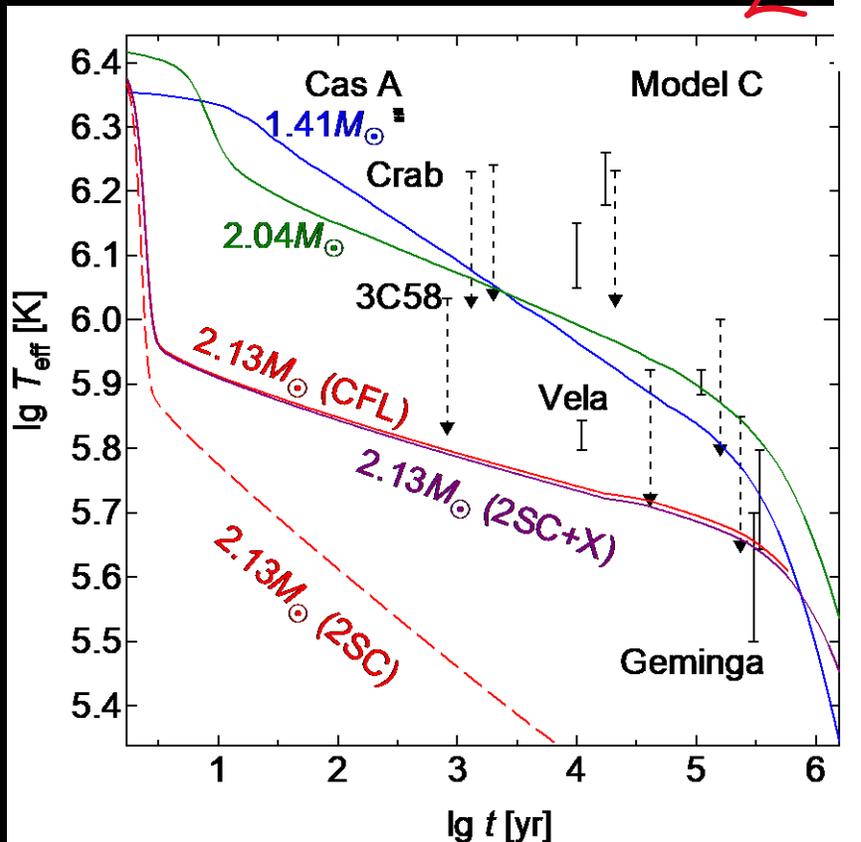
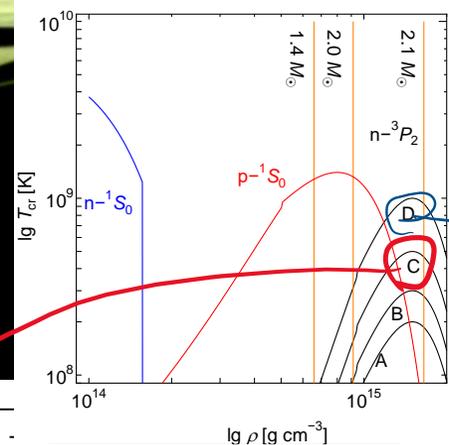


Results 1



Model A, Bともに、2SC+<dd>(2sc+x)がCFLに近づいている (冷えすぎていない)

Results 2



Model C, Dともに、2SC+<dd>(2SC+X)がCFLに近づいている (冷えすぎていない)
 Model DではVelaを通過している

Summary-ハイブリッド星の冷却

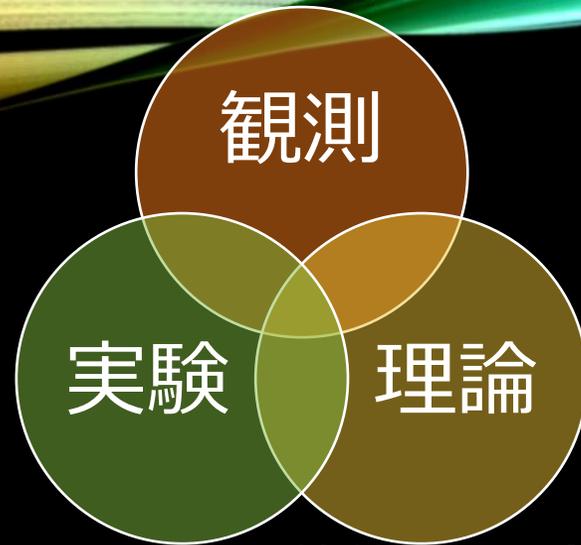
クォークのペアリングの違いで冷却曲線に振る舞いに変化が生じる

核子の超流動とクォークのカラー超伝導の両方が重要

- 2SCでは急な冷却 → 冷えすぎる \times
 - 出現密度は適切 \checkmark
- CFLではやや急な冷却(n - 3P_2 の臨界温度に依存) → 冷えた星を説明可 \checkmark
 - 出現密度はもっと高い \times
- **2SC+ $\langle dd \rangle$ ではCFL程度の冷え方** (n, d 3P_2 の臨界温度に依存) → **冷えた星を説明可 \checkmark**
 - 出現密度は適切 \checkmark
- カラー超伝導・核子の超流動をすべて考慮する必要あり

今後の課題

- ハドロン側EoS → Direct URCAが効かない(冷えない)EoSに2SC+ $\langle dd \rangle$ を組み合わせる
- s クォークありの場合



観測と内部状態

質量-半径関係

- 強い冷却→内部に「何らかの」Exoticな状態(強い冷却のどれかはわかりにくい)
 - 単独星の質量は測定困難 → **コンパクトネス**はわかる? → (EoSと合わせると)質量に制限
 - Velaがわかると非常にうれしい...
 - **連星中性子星の質量** → 連星系の冷却曲線に質量が載る

表面温度観測

- 冷却のタイムスケールが微妙に長い
 - 初期冷却期間 10^1 - 2 年 → 若い中性子星の**10年以上の連続観測**できれば...(Cas A, 1987A)
 - Cas A: 「冷えている」 vs 「冷えていない」 論争
 - 複数の観測機で観測できたら...

Liu et al. PRD 103, 063009 (2021)

