



KYUSHU
UNIVERSITY

QCD相転移とカラー超伝導を考慮 した高密度星の冷却

野田 常雄 (九大理)

Collaboration with

橋本正章(九大理)、安武伸俊(千葉工大)

丸山敏毅(JAEA)、巽 敏隆(京大理)、藤本 正行(北大理)

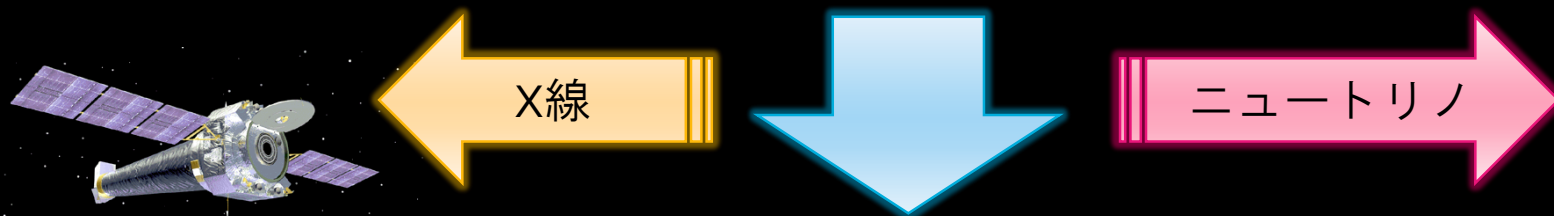
基研研究会

「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—」

Introduction

- 中性子星は熱源を持たない

超新星爆発で誕生



冷えた中性子星

- 冷却のメカニズム(主にニュートリノ)で冷え方が異なる
- ニュートリノの放射率は内部の状態を反映

高密度星の冷却

- EOS
 - EOSは星ごとに違うことはない(ひとつのThe EOS)
- Standard Cooling Processes
 - 核物質中で普遍的に効く冷却プロセス
 - Modified URCA + Bremsstrahlung
- Exotic Cooling Processes
 - Standard Coolingでは説明できない星がある
 - 3C58、Vela
 - 高密度でExotic Phaseが出現 ⇒ Exotic Cooling
- NSの質量によってCooling Processが決定
 - 重い星 ⇒ 中心でExotic Phase出現 ⇒ Exotic Cooling
 - 軽い星 ⇒ 中心まで普通の核物質 ⇒ Standard Cooling

Cassiopeia Aの観測までは...

Cassiopeia A (問題I)

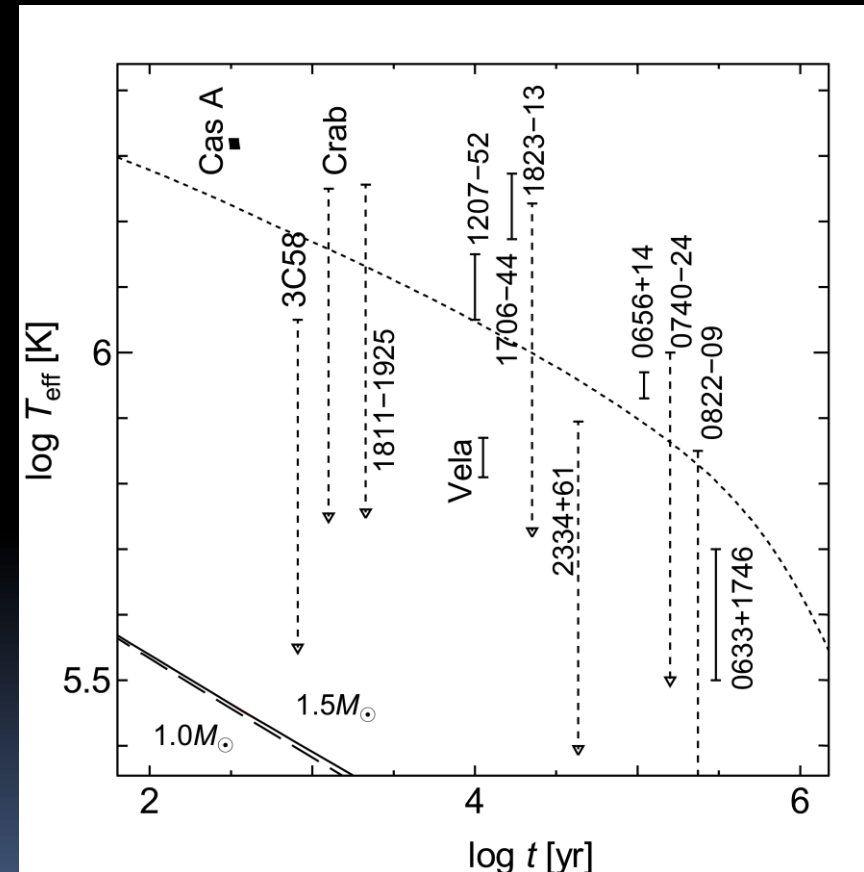
- 1680年前後の超新星残骸

- 中心天体(中性子星?)がChandraで観測

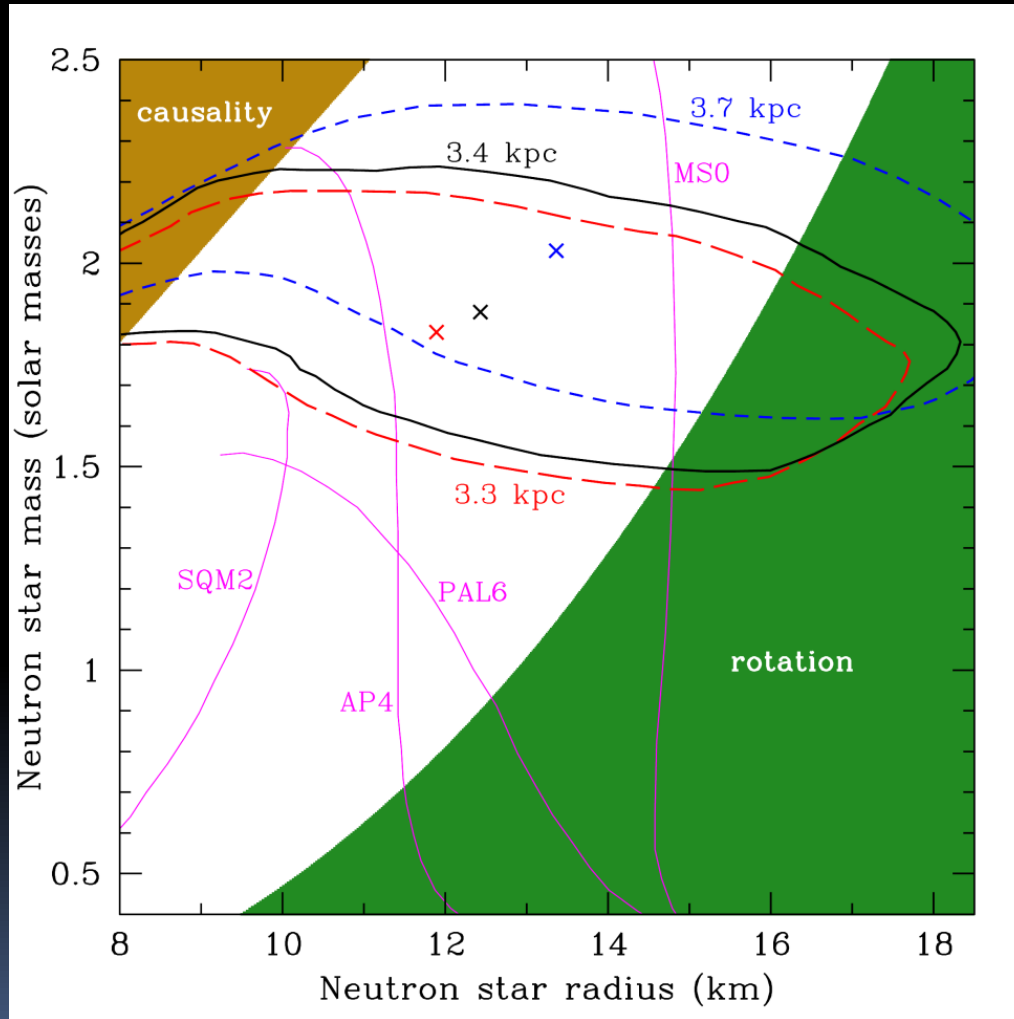
- Ho & Heinke

Nature 462, 71 (2009)

- $2.4 M_{\odot} > M > 1.5 M_{\odot}$
- $1.75 \times 10^6 \text{ K} > T_{\text{eff}} > 1.56 \times 10^6 \text{ K}$
- M-R観測 (単独星では珍しい)



Cassiopeia A



距離の不定性あり

半径については不定性が大きい

ここでは質量のみを考える

Cassiopeia Aの観測結果から

- Cas Aは重くて熱い
 - $M_{\text{Cas A}} > 1.5M_{\odot}$
 - 中心密度が高いが冷えていない
 - Standard Coolingと同等
- 他の冷えている高密度星との整合性
 - Cas AはStandardなNS、冷えているのはもっと重い
 - 質量の観測値(NSbinary: $\sim 1.4M_{\odot}$)と比較して不自然
 - Cas Aは重く、Exoticな状態を持つが冷えない
 - 実現方法は...?

カラー超伝導 in Quark Phase

Cassiopeia A (問題II)

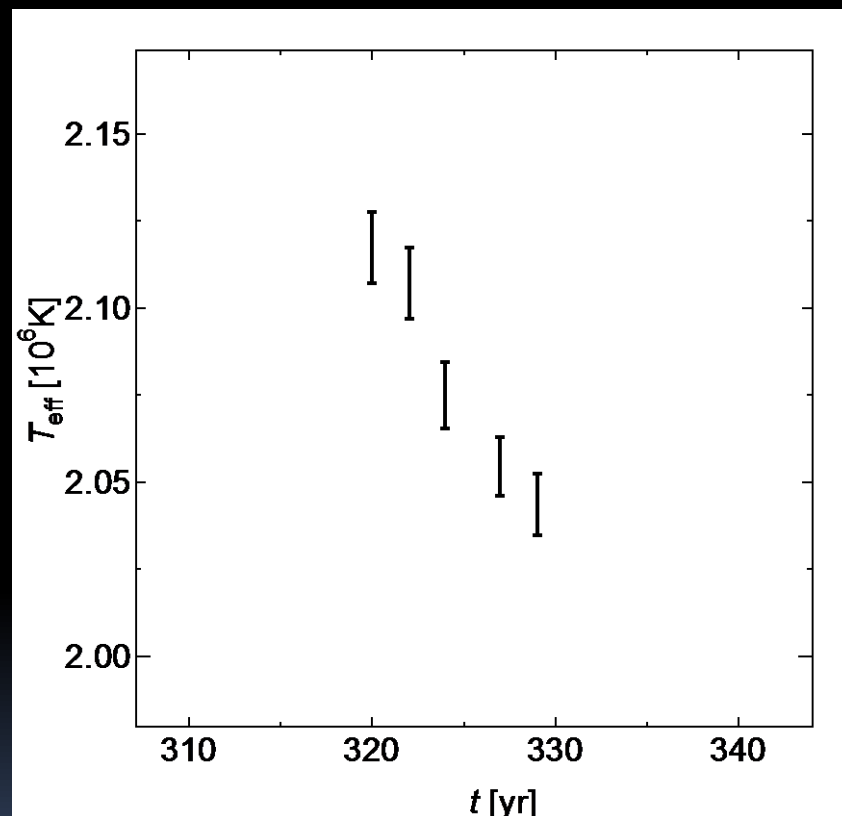
- 観測されているここ10年間程度で急激な有効温度の低下

Heinke & Ho, ApJ L719, 167 (2010)

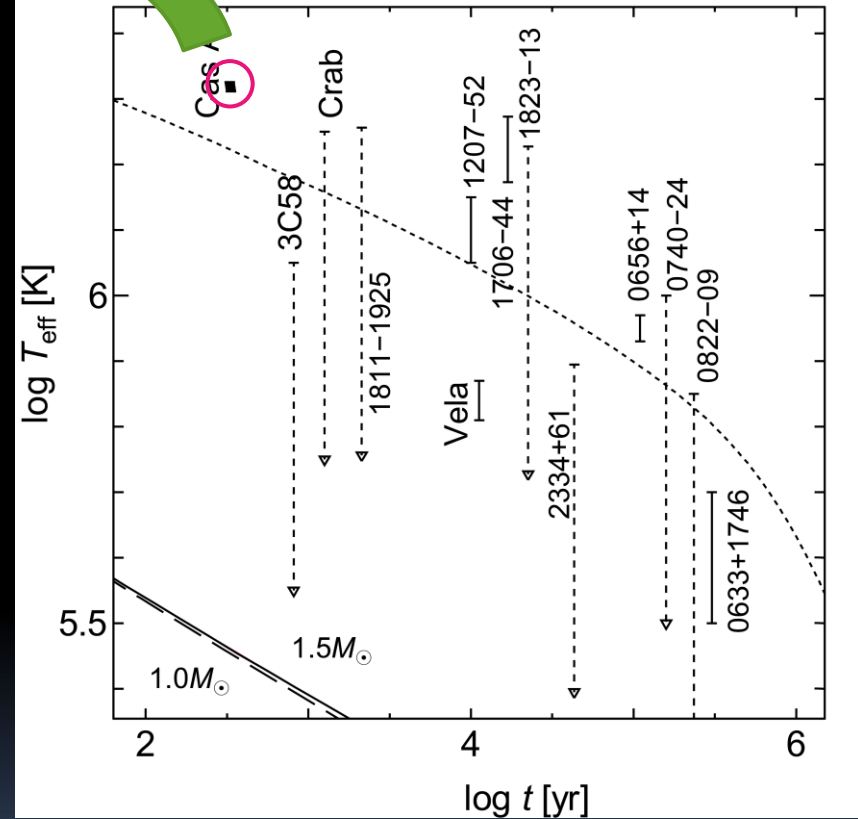
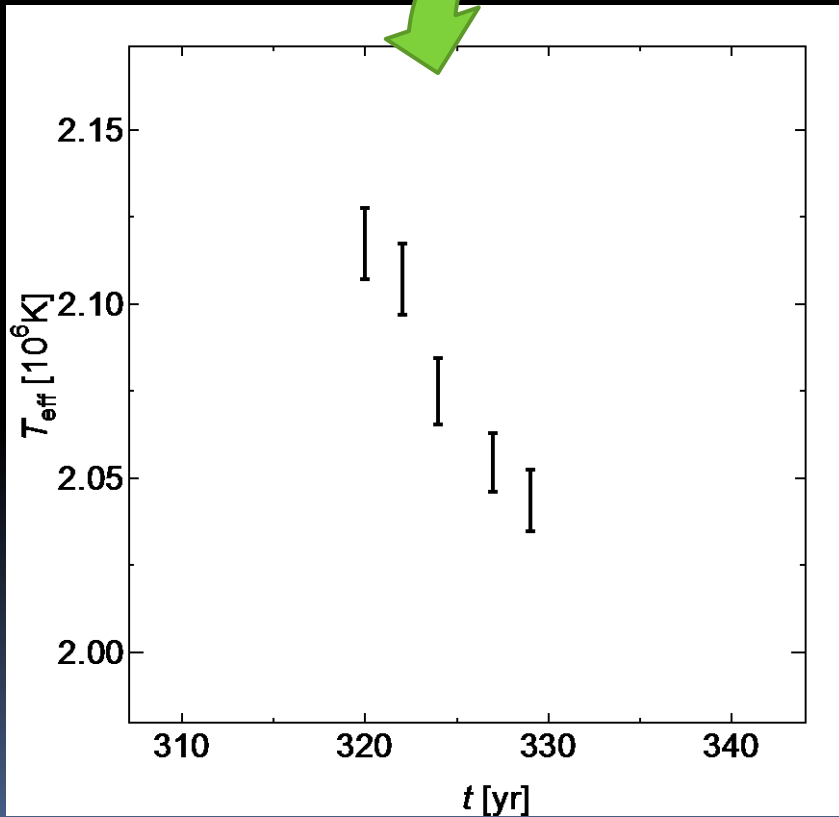
- 従来の冷却理論と比較すると速すぎる



- 核子の超流動遷移に伴うニュートリノ放射
 - 臨界温度や放射プロセスの不定性大

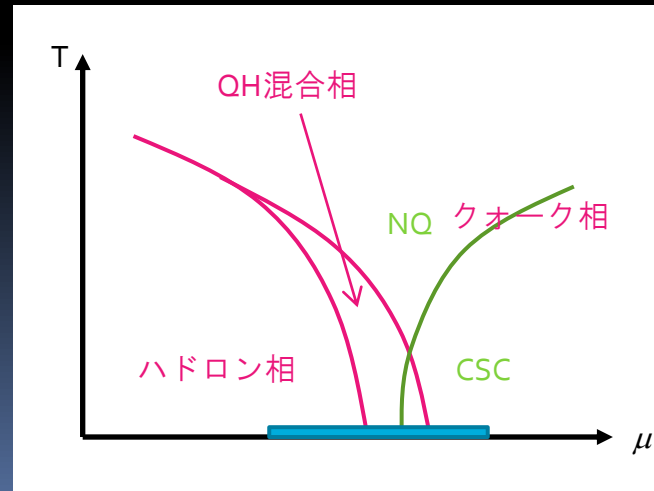


Cassiopeia A



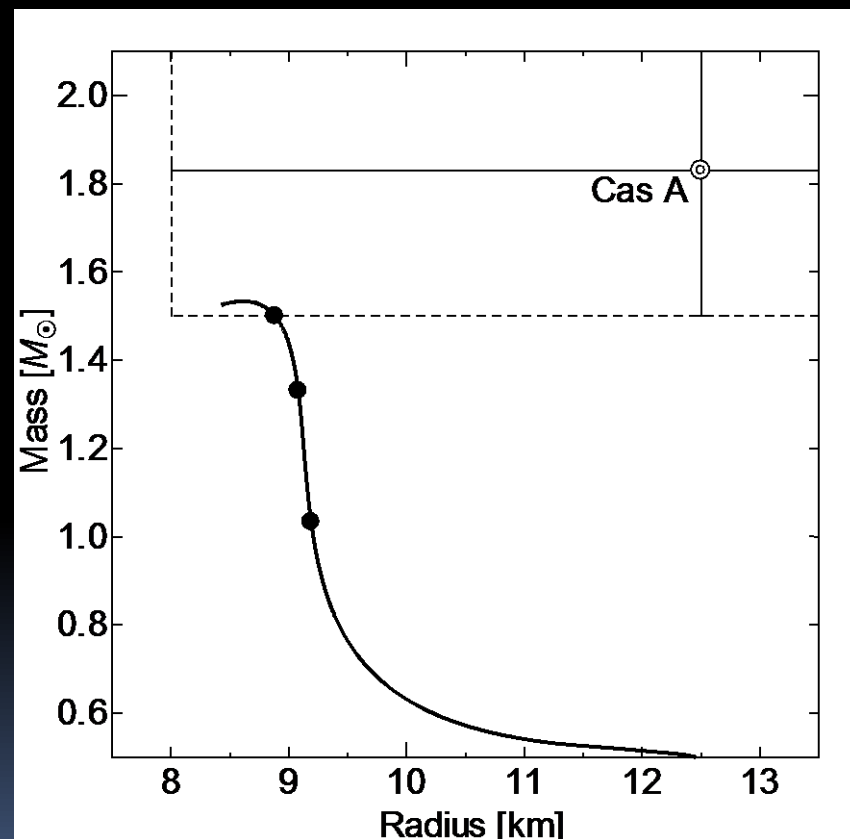
Motivation

- Cas Aの質量—温度関係を説明する
 - Cas Aは重い
 - クォーク物質を含み、内部でカラー超伝導
 - 他の観測とも矛盾しないように
- Cas Aの急激な冷却についても説明する
 - ハドロン相中での超流動



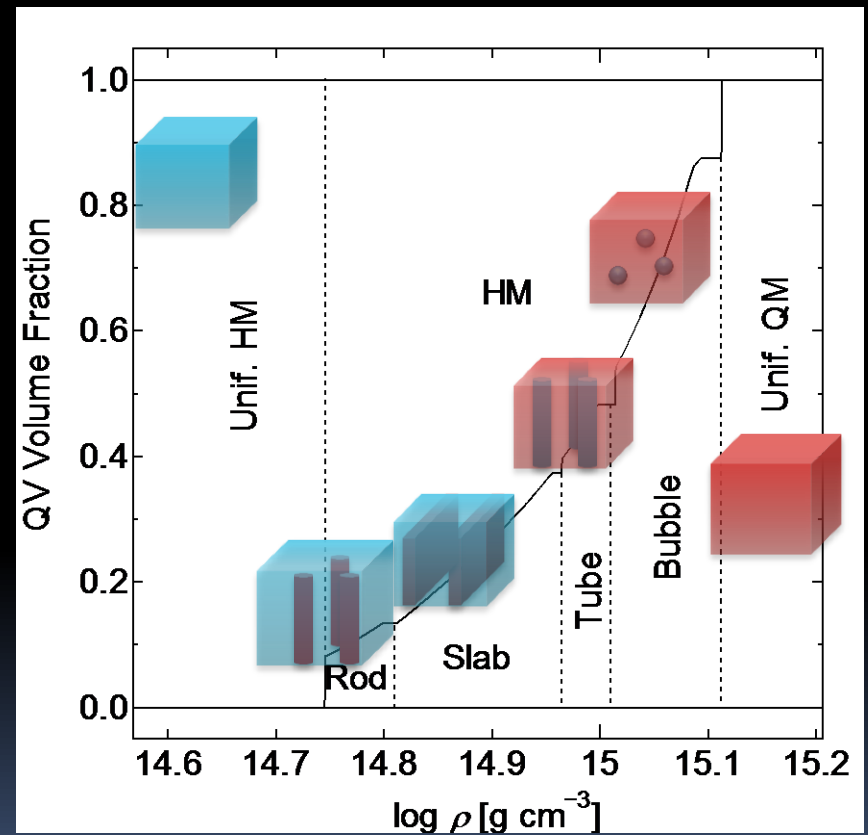
EOS/Model

- 構造までMixed Phase入りEOS
 - 構造部分もQM-HM MPを考慮
 - Yasutake (2009) / Maruyama (2007)
 - 「柔らかい」EOS
 - 中心密度は上昇しやすい
 - Cas Aの質量・半径ともぎりぎりconsistent
- $B=100\text{MeV}/\text{fm}^3$
 - $\alpha_s=0.2$
 - $\sigma=40\text{MeV}/\text{fm}^2$
- $M=1.5, 1.3, 1.0 M_\odot$



Mixed Phase

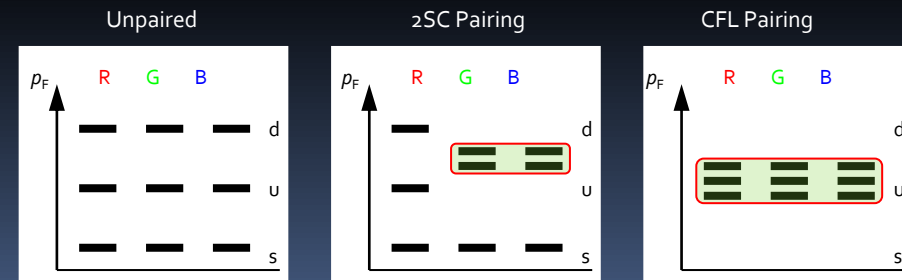
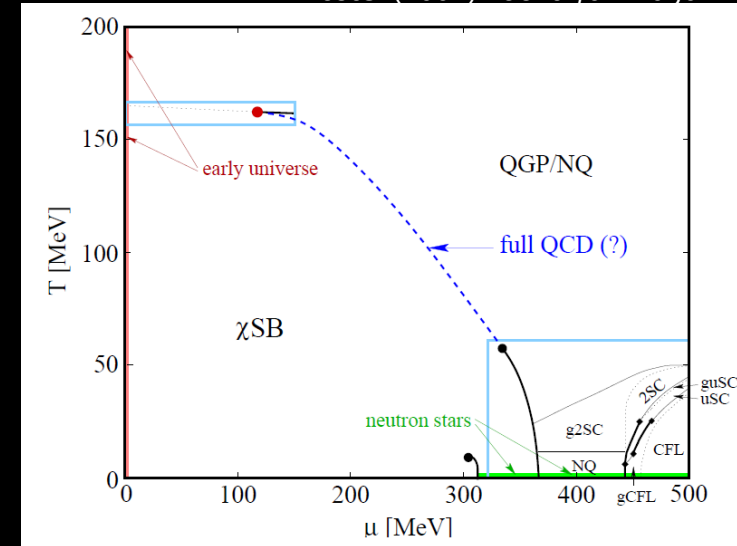
- HM \leftrightarrow QM間でMixed Phaseを考慮
- それぞれの密度で
 - Wigner-Seitz Cell Radius
 - Bag Radius
 - 形状 (droplet/rod/slab/tube/bubble)からQM/HM比を求める
- QM/HM比をQuark β -decayの ν 放射率に乗じる
 - なめらかな ν 放射率の上昇?



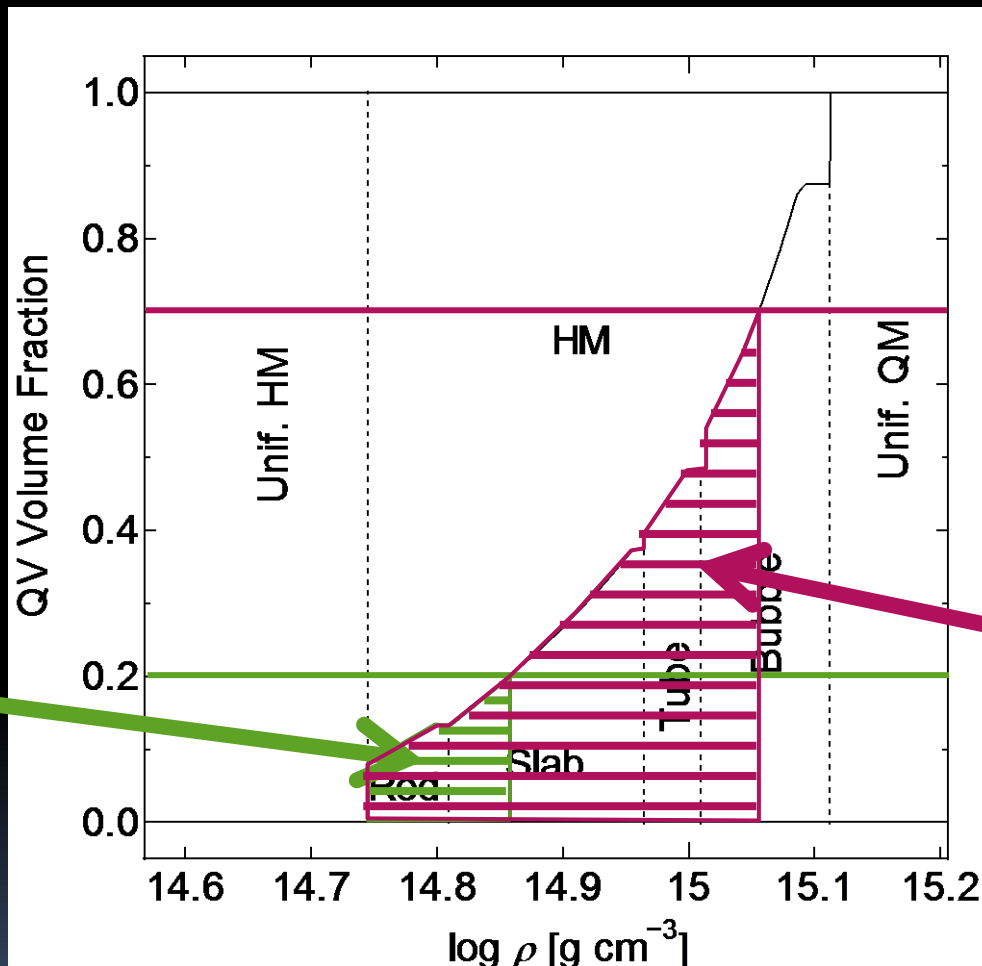
カラー超伝導

- 低温高密度領域でカラー超伝導相が出現
 - クォーク相中
 - クォークがペアを作る
 - ペアの組み方
 - CFL? 2SC? Or others?
- 核子の超流動と同様の効果
 - Large gap energy Δ (~数十MeV)
 - ニュートリノ放射を抑制
 - $\propto \exp(-\Delta/k_B T)$
 - 放射率を ~ 0

Rüster (2006) nucl-th/0612090



カラー超伝導



$F_C=20\%$ で
Quark Coolingが
効く範囲

$F_C=70\%$ で
Quark Coolingが
効く範囲

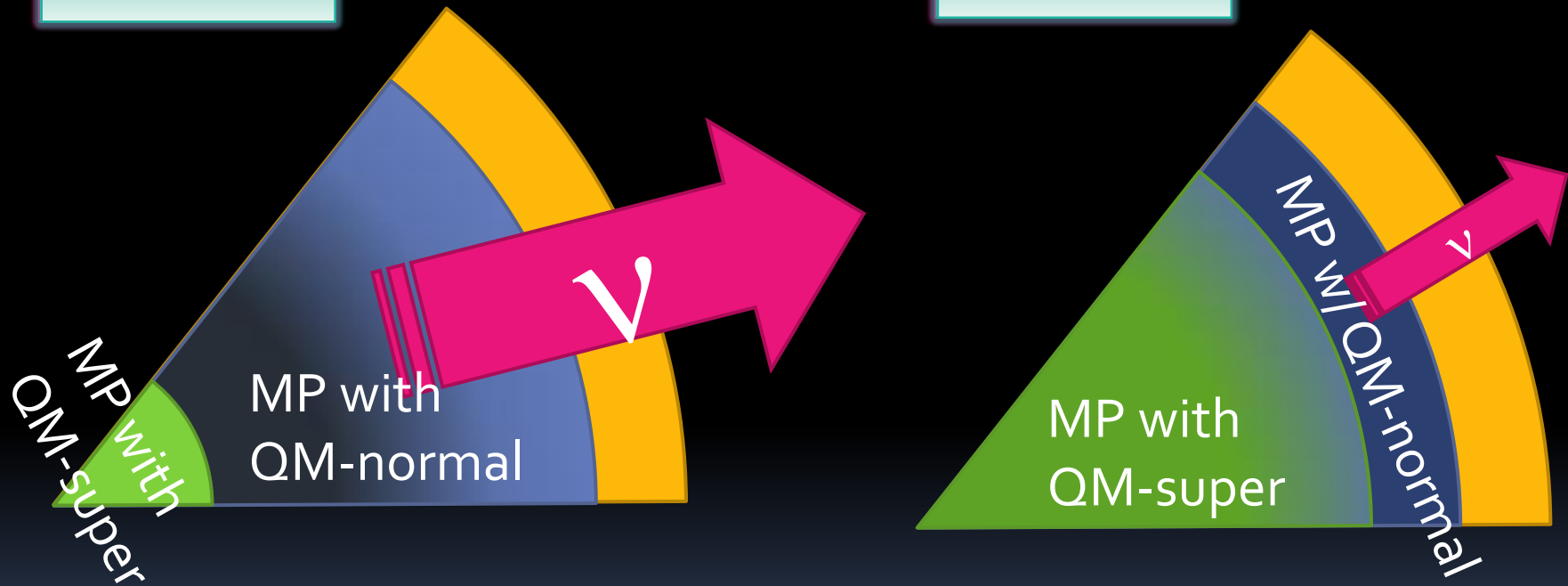
カラー超伝導の臨界密度に対応する値として F_C を導入
この点より高密度側ではカラー超伝導 (Quark Cooling を OFF)

星の構造 with カラー超伝導

F_c を固定した時...

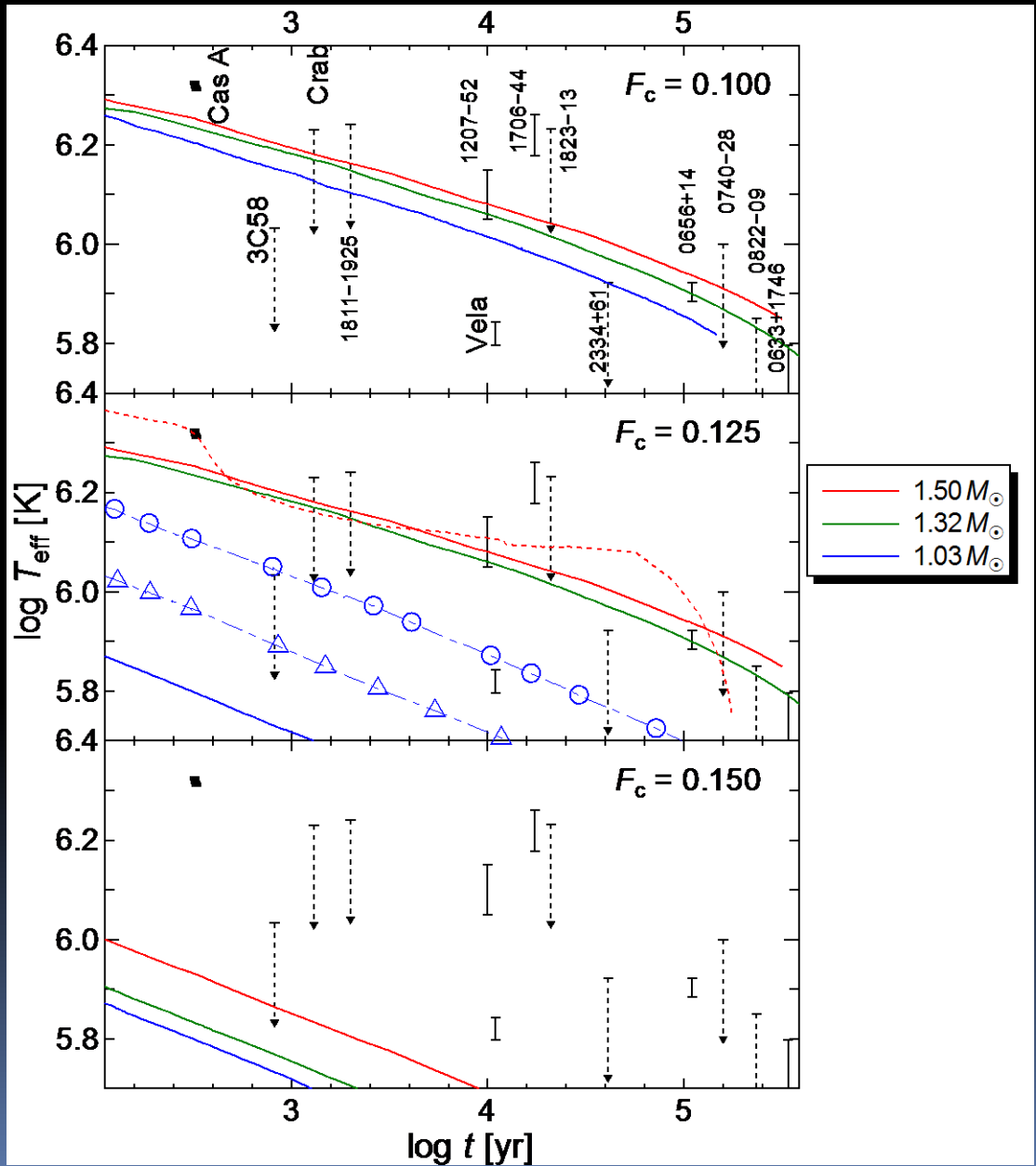
質量小

質量大



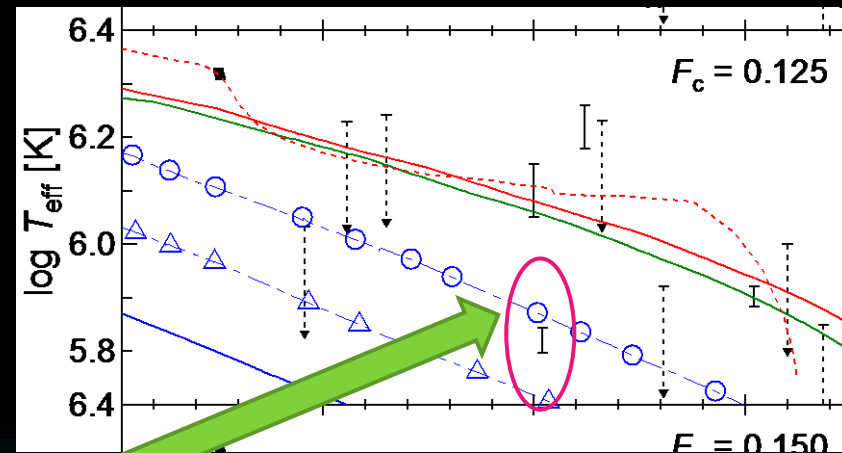
カラー超伝導の領域では、Quark β -decay(QBD)が効かない
 F_c を変化させることで、QBDの領域を調整できる
QM-normal: 通常のQM QM-super: カラー超伝導

Results I



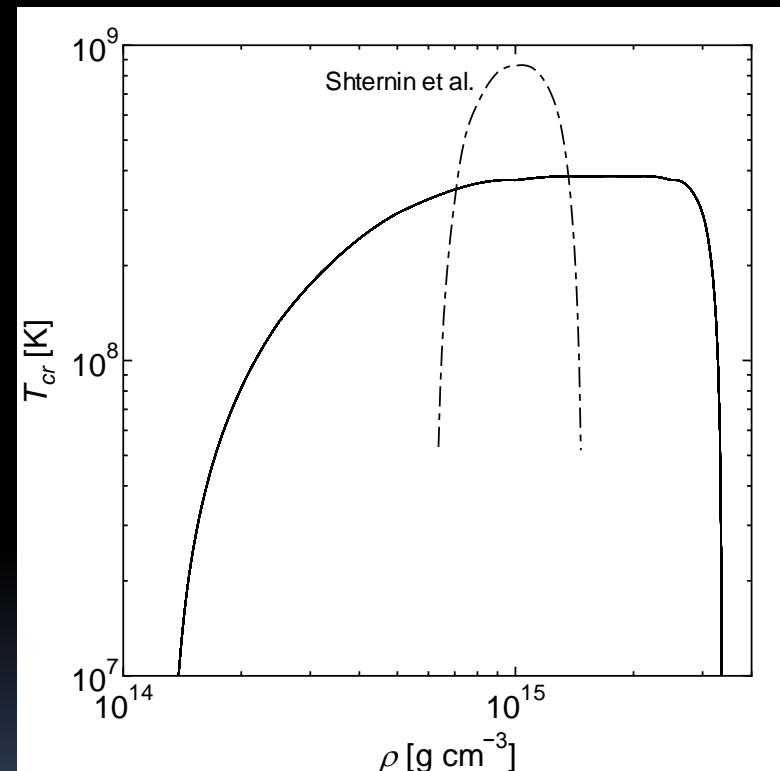
Results I

- カラー超伝導で重い星を冷えにくく
 - Cas Aの領域は組成で対応可
 - 冷えている星は軽い
- 問題点
 - Cas Aの最近の冷え方
 - Quark β -decayが効くとやはり冷えすぎる
 - Quark β -decayが1ケタ~2ケタ小さかったら...
 - ファインチューニングが必要

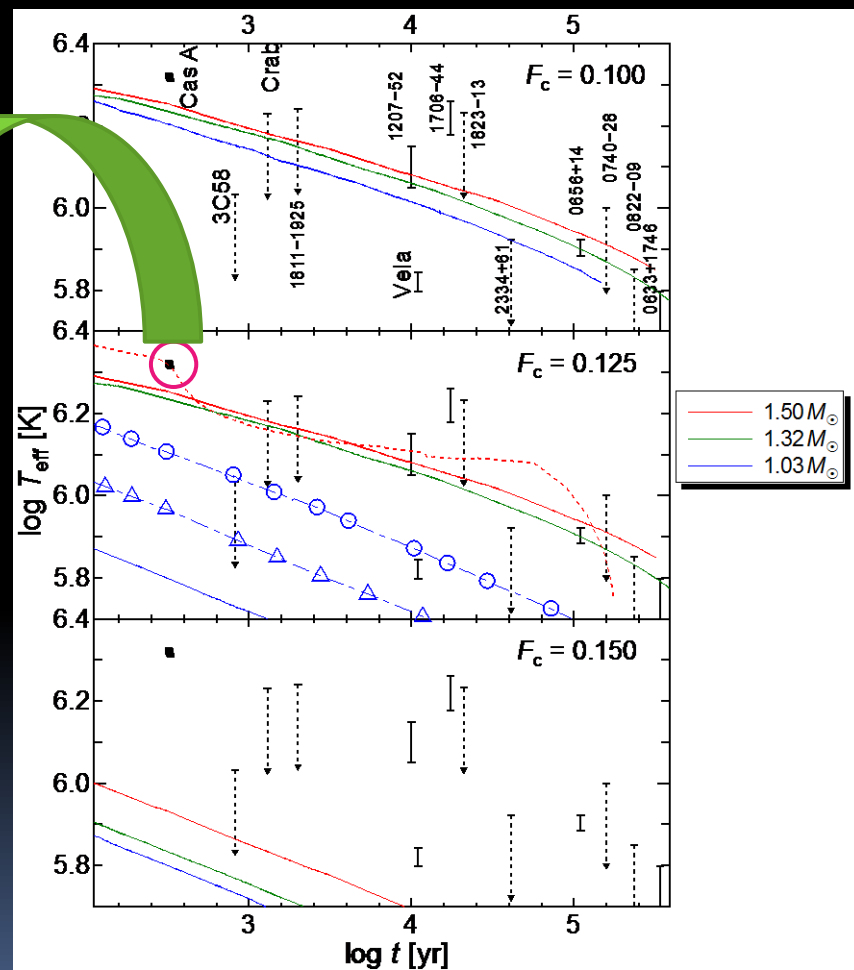
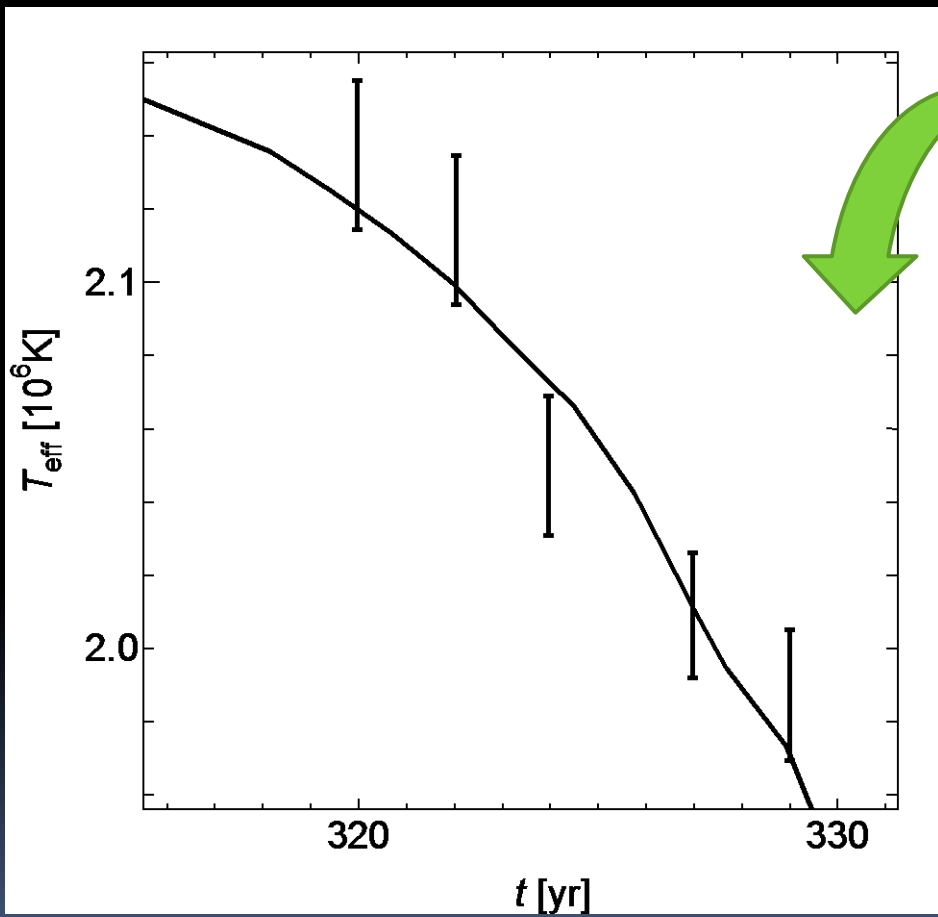


Cas Aの温度低下

- 超流動によるニュートリノ放射を考慮
 - 臨界温度の $\rho - T_{cr}$ 関係を変化
 - 放射率の不定性も考慮
 - MP中ではハドロン相の割合をニュートリノ放射率に乗じる
- MP中のクォークによるニュートリノ放射は変更なし
- 表面組成をC



Results II



Results II

- 超流動の効果を入れるとCas Aの温度低下は説明可能
 - $\rho - T_{cr}$ 関係とニュートリノ放射率のファインチューニングが必要
- 「重いと冷えない」状態は維持したまま

まとめ

- カラー超伝導を考慮すると重い星を冷えにくくすることができる
 - 軽い星が冷えやすくなる
 - 従来と逆センス
 - Cas Aの温度と質量については説明可能
- 核子の超流動によるニュートリノ放射でCas Aの冷え方は再現できる
 - ファインチューニングが必要
- $2M_{\odot}$ の観測値についてはEOSの変更が必要
 - 同じ手法の冷却計算は可能

今後の展望

- $2M_{\odot}$ まで到達できるEOSを使った計算
- カラー超伝導の取り扱い
 - P - ρ 関係への影響
 - 出現する相、 Δ
- 核子の超流動の取り扱い
- その他の高密度星現象を説明
 - X線バースト等...