

Cassiopeia A 中性子星の冷却曲線の観測から考えられる物理過程について

九州大学 林田晃太郎、野田常雄、橋本正章

これは'Cooling neutron star in the Cassiopeia A supernova remnant: evidence for superfluidity in the core', Peter S. Shternin, Dmitry G. Yakovlev, Craig O. Heinke, Wynn C. G. Ho and Daniel J. Patnaude, Mon. Not. R. Astron. Soc. 412, L108 - L112(2011)の紹介です。

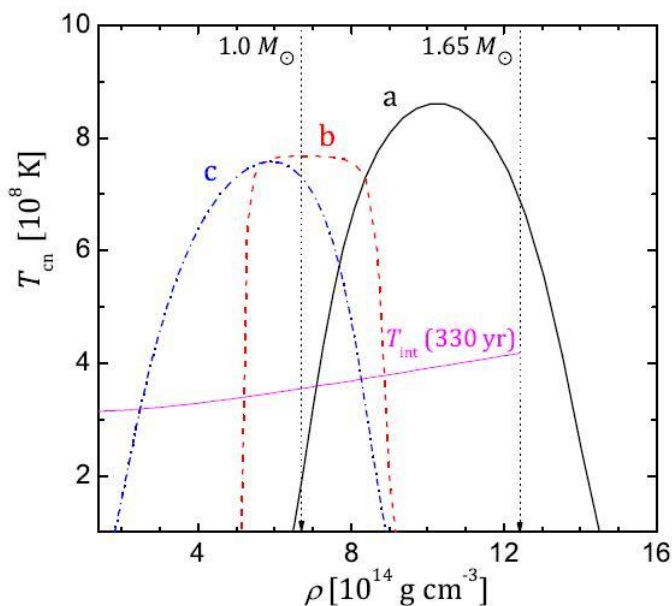
1 INTRODUCTION

中性子星(NS)は超新星超新星爆発で誕生し、主にニュートリノ放射により冷却される。一般的に NS 内のニュートリノは平均自由行程が十分長いので、内部の物質と相互作用せずにエネルギーを持ち出すことができる。NS コアでは様々な過程でニュートリノが生成されるが、その生成過程は原子核物理に関係しており、いまだ不確定な部分が多い。NS の冷却の様子を調べることで不確定要素に制限を与えることができる。

Cassiopeia A NS は比較的地球に近く、質量の見積もりができていた孤立中性子星である。また、連続した表面温度低下が観測されているのはこの NS だけとなっている。

Ho & Heinke(2009),Heinke & Ho(2010)は Cas A NS を 10 年間に渡り観測し、表面温度が今まで考えられていた冷却曲線よりもずいぶん早く冷却されていることが分かった。この論文では Heinke & Ho(2010)がフィットさせたデータに 2010 年の Chandra による最新の観測データを加えている。

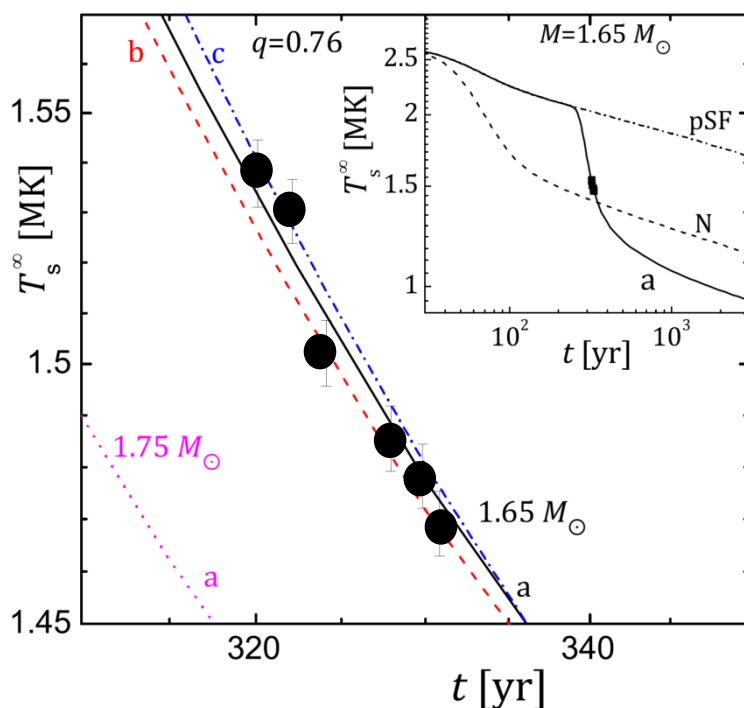
2 SECOND TEMPERATURE DROP



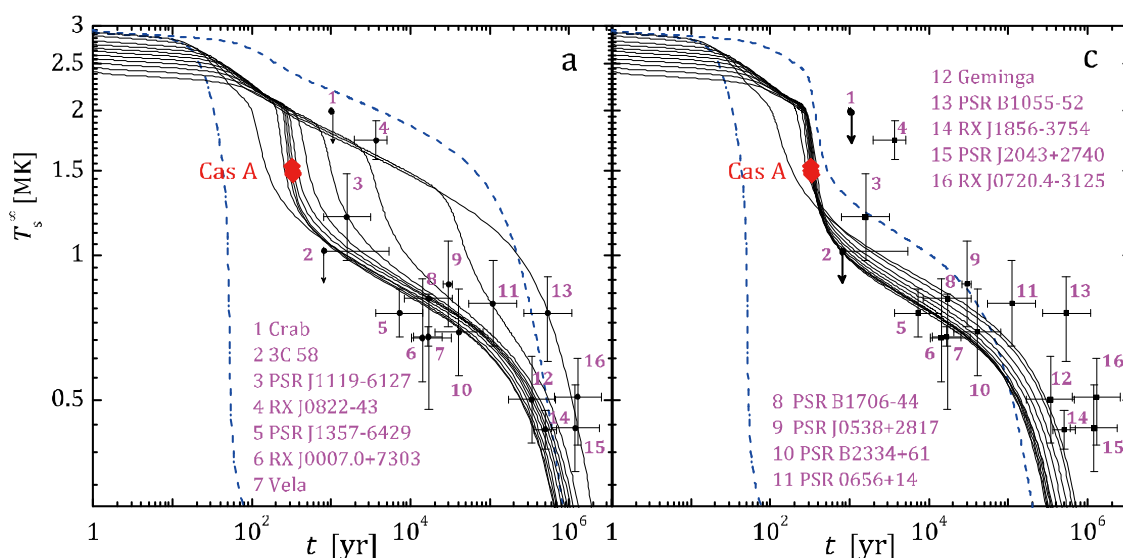
左図は観測値を説明するために考えられる現象論的モデル a、b、c である。横軸は密度、縦軸は相転移温度となっている。a、b、c の順に中性子の 3 重項超流動状態が起きる転移温度 (T_{cn}) が小さくなるようなモデルになっている。薄い紫の実線は 330 歳の NS の内部構造を示している。質量の書いてある縦線は、その質量での最大の密度を表している。モデルの曲線と、内部構造の線が交わる部分で超流動転移が起こり、転移するときのみ冷却が加速されるということになる。

右の図内の黒い丸印が近年観測された Cassiopeia A NS の表面温度低下の観測値である。

横軸は中性子星が誕生してからの時間、縦軸は表面温度となっている。右上の小さい図は拡大図で、質量は $1.65M_{\odot}$ で計算されており、pSF は陽子超流動効果を取り除いた場合、N はすべての超流動効果を取り除いた場合での理論曲線となっている。q は相転移温度を調整するようなパラメタで、ここでは 0.76 として計算されている。状態方程式 (Equation of State : EoS)には Akmal-Pandharipande-Ravenhall(APR)の EoS を用いている。

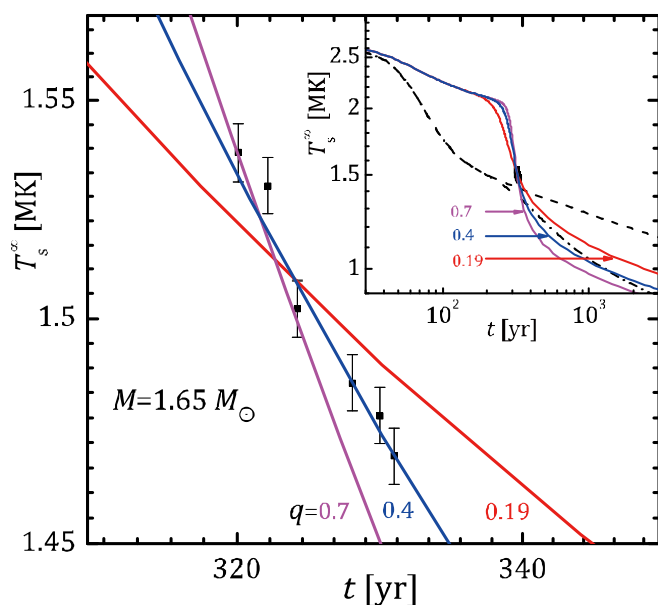


この論文では、中性子の超流動効果を取り入れることで、この冷却曲線を説明する。pSF は陽子超流動により modified Urca process が抑制され、NS 形成直後の温度低下が緩やかであるが、中性子超流動は取り入れていないため急な温度低下は起きない。N は modified Urca process が抑制されず、形成直後の温度低下が大きすぎて観測とは合わない。pSF や N から、超流動効果を取り入れなければ観測の傾きは説明できないことがわかる。



上図はモデル a での理論曲線とほかの中性子星の観測値が示されている。黒の実線は質

量が $1M_{\odot}$ から APR EoS を用いて得られる NS の最大質量 $1.929M_{\odot}$ までの質量で計算された冷却曲線である。基本的に NS は重いと冷えやすく、軽いと冷えにくくなる。破線はこの質量範囲で最も温かくなる $1M_{\odot}$ の NS で $10^{-8}M_{\odot}$ の炭素大気を持つ場合、一点鎖線は最も冷たくなる最大質量 $1.929M_{\odot}$ でコア内の陽子超流動効果を除いた場合である。Direct Urca process は $M > 1.829 M_{\odot}$ で働くとしているため、一点鎖線は冷却が速い。このように質量をパラメタとすればほかの NS も説明ができる。モデル a では最も温かいものと最も冷たいものが説明できないが、モデル c では、温かい星の大部分が説明できない。



左図は質量 $1.65M_{\odot}$ で計算された理論曲線で、因子 q の値を変えたものである。 T_{cn} はコア全体で一定としている。内部図の破線は超流動なし、一点鎖線は $q=0.76$ 、 $T_{cn}=4.3 \times 10^8 K$ とし、中性子超流動のみを入れている。冷却の速さから q に制限が設けられる。因子 q が大きいほど冷却は速くなる。 T_{cn} がコア全体で一定というのは現実的ではないため、因子 q は 0.4 より大きくなる。

3 CONCLUSIONS

観測から得られる制限をまとめると、

- (1) 中性子が 3 重項の超流動状態に転移する最大の温度は $T_{cn \max} \sim (7 \sim 9) \times 10^8 K$
- (2) 十分な温度低下のためにはコア内の $T_{cn}(\rho)$ 特性は幅が広いほうがよい
- (3) 因子 q は強すぎてはいけない ($q > 0.4$)
- (4) Second Temperature Drop の前のニュートリノ放射は modified Urca process のものより 30~100 分の 1 の大きさである (例えば陽子超流動で modified Urca process を抑制する)

となる。

これらの理論では、温度低下は数十年続き、現在 Cas A NS はニュートリノ放射が活発な時期にあるとされる。温度低下が今後 2、3 年で止まってしまうような観測とは矛盾してしまう。今後の観測から確認される。