26.12.2011@超新星研究会(京大基研)

クォーク=ハドロン相転移による 超新星爆発での重元素合成



西村 信哉 バーゼル大学(スイス)



- <u>イントロダクション</u>
  - クォーク=ハドロン相転移による超新星と
     その元素合成環境について
- 計算の詳細と結果
  - 放出物全体の組成
  - 中性子と陽子過剰の元素合成
- <u>まとめ</u>



## <u>クォーク・ハドロン相転移による超新星</u> コアバウンス後に原始中性子星がQCD相転移するシナリオ: Sagert et al. (2009)、Fischer et al. (2011)



## <u>爆発モデルからみる放出物と組成</u>

#### 爆発モデル各層の進化





- <u>r-process</u>(中性子過剰、あるいは高エントロピー)
  - (通常の) 超新星爆発 (> 10M<sub>☉</sub>)
    - •SASI による爆発
    - ・ニュートリノの影響によりYe > 0.48

(Fujimoto et al. 2011)

- ・(ONeMg星の)超新星爆発(EC 超新星)
  - ・1Dでも2Dでも爆発)
  - ・2D だと Y<sub>e</sub> > 0.4; weak r-process の可能性 (Wanajo 2009, 2011)
- ・他、磁場や回転などによる超新星
  - ・より中性子過剰の物質が放出される可能性あり

<u> ッp-process</u>:陽子過剰 <u>かつ</u> ニュートリノ放射環境

- ・超新星コア付近の陽子過剰な環境
  - $\cdot \nu$  p-process (Fröhlich 2006, Pruet 2006, Wanajo 2006)



Ye (10,000km)

0 46



## <u>r-process の期待</u>



モチベーション

例

・爆発モデルの成功 (Sagert 2009)

- ・ニュートリノでの観測について (Dasgupta 2010)
- ・爆発モデルの詳細解析 (Fischer 2011)
- <u>放出元素の宇宙への影響 NEW!</u>

クォーク、ハドロン物理から爆発的天体現象

シミュレーション、元素合成まで

近年、注目されている素・核・宇宙の融合点

クォーク力学・原子結構造に基づく	シオージガ子・原子板構造に巻	シオーシガチ・原于使構造に巻うく爆光的大体現象と元素古成		
http://aspht1.ph.noda.tus	ac.jp/bridge_a03/index.html	≙▼C <mark>8</mark> *		
	クォーク力学・原子核構造に基づ	づく爆発的天体現象と元素合成		
平成20年度から開始され 「クォーク力学・原子核	た新学術領域研究(研究領域提案型) 「素核宇宙顧 構造に基づく爆発的天体現象と元素合成」 について	合による計算科学に基づいた重層的物質構造の解明」 の情報です。	の 計画研究	
トップ/お知らせ われた				
概要	2			
• <b>研</b> 9	会「素核宇融合による計算機物理学の進展 - ミ	クロとマクロの架け橋 - 」 💻		
新学 資料 「男	術領域「素核宇宙融合」とHPCI戦略プログラム 核宇融合による計算機物理学の進展 - ミクロとマク ご参加ください	分野5に関連した研究会 クロの架け橋 - 」が開催されます。		
研究会など日開	:2011年12月3日午後1時開始~12月5日	(月)15:00終了(予定)		
リンク 単分 主保	場所:合歓の郷 http://www.nemunosato.com/in :新学術領域研究「素核宇宙融合による計算科学に	dex.html 基づいた重層的物質構造の解明」		
メンバーのみ	日下で「戦略ノロシラム分野5「初員と千田の起源	泉と1月2日」		

## <u>mass zones: 4つの成分</u>

zone #	$M_{\#} \ [10^{-2} M_{\odot}]$	$\Delta \overline{M_{\#}} \ [M_{\odot}]$	$Y_{\rm e,NSE}$	$t_{\rm ej}$
001 - 014	0.000 - 0.208	$1.496 \times 10^{-4}$	0.20	
015-019	0.210 - 0.216	$1.474 \times 10^{-5}$	$\sim 0.55$	$1.5 \sim$
020 - 050	0.217 - 0.232	$1.063 \times 10^{-5}$	$\sim 0.33$	$\sim 0.5$
051 - 120	0.250 - 1.482	$1.786 \times 10^{-4}$	$0.33 \sim 0.50$	$\sim 0.5$

 $M_{\#}:$  mass coordinates relative to the innermost zone of  $1.48 M_{\odot}$   $\Delta \overline{M_{\#}}:$  the averaged mass of the zone  $Y_{\rm e,NSE}:$   $Y_{\rm e}$  at the end of NSE (below T=9 GK)  $t_{\rm ej}:$  ejection time after the bounce

- ・原始中性子星(放出されない)
- ・ニュートリノ駆動風
  - ・原始中性子星からの風
- •delayed 成分
  - ・第二の衝撃波で放出
- •prompt 成分
  - (放出質量の大部分~98%)



#### <u>爆発モデルと元素合成シミュレーション</u> <u>爆発モデル</u>

- •流体力学:AGILE-BOLTZTRAN コード(Liebendörfer et al. 2004)
  - ・ (球対称) 一般相対論的ニュートリノ輸送 + マイクロ物理
- ・EOS: Shen EOS(核物質) + MIT bag model(クォーク物質) ・親星: 10.8 M₀ by Woosley et al. 2002

#### 元素合成

- ・ 爆発モデルを元にポストプロセス計算
- ・初期進化は流体シミュレーションの物理量(NSE 状態)
- (フル)核反応ネットワーク(4000核種以上)
  - 反応率一般:REACLIB (Rauscher&Thielemenn 2000)
  - 質量公式(理論): FRDM (Möller et al. 1995)
  - ・ 自発、β-delayed 核分裂
- ニュートリノ反応
  - ・放出物質と原始中性子星の進化に応じてダイナミックに計算
  - ・
     核子との反応のみ考慮(Qian & Woosley 1996)

## <u>エントロピー と Ye :NSE終了(T = 9 GK)</u>



## <u> 組成分布 (α-freezeout)</u>

(c) innermost (proton rich)



## <u> 組成分布 (α-freezeout)</u>



0.25 0.30 0.35 0.40 0.45 0.50 enclosed mass,  $[10^{\text{-2}}~\text{M}_{\odot}]$ 

最終組成:核ゾーン毎に



#### <u>内側(再加速される成分)</u>





典型的な  $\nu p$ -process (ニュートリノ反応なしと比較)





# <u>integrated final abundances</u> 観測との比較(太陽系、weak r-process)



## <u>まとめ</u>

#### <u>r-process</u> 元素合成について

- reproduce  $A \sim 100$  r-element (weak r-process)
- main r-process のためにはは  $Y_e$  が 40% マイナス
- (不定性の範囲内でも main r-process はムリ)
- 別の親星、EOS、多次元モデル etc. があれば。。。
- <u>ニュートリノ駆動風について</u>
  - 今回の爆発モデルだと、通常の超新星と同様の環境
  - A ~ 60 を越えて A ~ 90 の陽子過剰安定核を生成
  - EOS によって Y<sub>e</sub> の進化やニュートリノ物理量
     (光度、平均エネルギー)変わってくればおもしろい