## ニュートリノ輻射流体シミュレーション による連星中性子星合体

関口 雄一郎(基礎物理学研究所) with 木内建太, 久徳浩太郎, 柴田大, 西村信哉, 和南城伸也

## 一般相対論的ニュートリノ輻射流体計算(関口,木内)

#### <u>課題の概要</u>:

- ▶ 連星中性子星合体に対する一般相対論的輻射流体シミュレーションを京で行い
  - ▶ 合体過程
  - ▶ 物質の放出量・組成・熱力学状態
  - 重力波の波形
  - ニュートリノの光度
  - などを解明する
- ▶ 現状
  - 連星中性子星合体に適した輻射流体解法の探求と決定
  - ▶ ベースコードの開発:今年度前半までに完成
  - 単ノードチューニング(通信部分は木内コードを利用)
  - ▶ テスト及び小・中規模計算を実行(FX10)

# 連星中性子星の合体

- 周辺分野との関連で高まる期待・重要性
- ▶ <u>ガンマ線バーストの起源</u>: (figure from NASA)
  - ▶ 標準シナリオ(合体→大質量中性子星→ブラックホール降着円盤) + 磁場/ニュ
- ▶ <u>重力波の電磁波対応天体</u>: (figure from web.mit.edu)
  - 合体時質量放出に起因する電磁波放射に注目があつまる
     重力波初検出(=ノーベル賞)における重要課題の一つに!
- <u>
  重元素(e.g., 金・プラチナ)の起源</u>:
  - 超新星爆発では合成が困難 (Robert et al. 2010; Wanajo et al. 2011)
  - → 連星合体における rapid neutron capture (R過程元素合成)
- 数値相対論計算によってのみ決定的な知見が得られる
  - 世界的にもトップランナー:マイルストーン的シミュレーション





# 計算コードの概要

#### アインシュタイン方程式: Puncture-BSSN/Z4c formalism

#### <u>一般相対論的輻射流体</u>

- 輻射移流項の計算: Truncated Moment scheme (Shibata et al. 2011; Thorne 1981)
  - ・状態方程式:有限温度核物質状態方程式+低密度でのTimmes EOS への拡張
  - gray or multi-energy but advection in energy-space is not included
  - Fully covariant and relativistic M-1 closure
- ソース項の計算: two options
  - ▶ **陰的解法 : Bruenn's prescription w.o. 電子散乱, pair proces**ses
    - □ 超新星 modelling 業界の minimum setup
  - ▶ 陽的解法: <u>京でのシミュレーションに採用</u>
    - □ E-captures: thermal unblocking, weak magnetism; NSE rate
    - Iso-energy scattering : recoil, Coulomb, finite size
    - Electron scattering in an approximate manner
    - □ E±annihilation, plasmon decay, bremsstrahlung
    - Diffusion rate (Rosswog & Liebendoerfer 2004)
- ▶ レプトン数保存の計算

## チューニング状況:実行効率

- ・輻射流体ソルバ:実行効率14% ⇒ 21%(if分岐の徹底的縮減、Fermi-Dirac 積分計算のアルゴリズム変更、メモリアクセスチューニング (throughput 37~40GB/s; cf. 京での実測値46GB/s))
- ▶ Closureソルバ: 実行効率 11.5% ⇒ 23% (if分岐の縮減・人力unroll)
- ▶ 光学的深さソルバ:実行効率 2.5% ⇒ 7.5% (if分岐の徹底的縮減)
- ・状態方程式テーブルサーチ:1%程度の向上(探査アルゴリズムの改良)



# チューニング状況:所要時間

- ▶ 輻射流体ソルバ: 所要時間 43%縮減
- Closureソルバ:所要時間 45%縮減
- ▶ 光学的深さソルバ: 所要時間 9.5%縮減
- ▶ 状態方程式テーブルサーチ: 一部に大きな(35%)改善



# 連星中性子星の合体

## ▶ <u>連星中性子星に資源投入する理由</u>

- 周辺分野との関連で高まる期待・重要性
- ガンマ線バーストの起源: (figure from NASA)
  - ▶ 標準シナリオ(合体→大質量中性子星→ブラックホール降着円盤) + 磁場/ニュートリノ
- ▶ <u>重力波の電磁波対応天体</u>: (figure from web.mit.edu)
  - ▶ 合体時質量放出に起因する電磁波放射に注目があつまる
  - ▶ 重力波初検出(=ノーベル賞)における重要課題の一つに!

#### <u>重元素の起源</u>:

- 超新星爆発では合成が困難 (Robert et al. 2010; Wanajo et al. 2011)
- ▶ ⇒ 連星合体における rapid neutron capture (R過程元素合成)
- ▶ 数値相対論計算によってのみ決定的な知見が得られる
  - ▶ 世界的にもトップランナー:マイルストーン的シミュレーション







## 重元素(鉄族より重い)の起源

- ▶ 基本的に中性子捕獲反応で作られる
  - ▶ 陽子捕獲:クーロン障壁の存在
    - クーロン障壁を乗り越えるようなエネルギーでは原子核を壊す





# 宇宙の錬金術: recipe to cook gold



- Neutron capture : packing neutrons into 'seed' nuclei n + (Z,N) ⇒ (Z,N+1)
  - (中性子数)/(種原子核数) 大 が必要
  - ► A(gold) A (seed) ~ 100
- Low electron(proton) fraction Ye
  - 充分な数の中性子の存在
- Higher entropy per baryon (爆発現象)
  - 種原子核の生成を抑制
  - <u>Short expansion time (爆発現象)</u>
  - 種原子核の生成を抑制



#### 超新星爆発: (Burbidge et al. 1957)

- theoretically disfavored
- ニュートリノ加熱機構ではニュートリノを充分に吸収する必要があるが、その 場合には低Ye環境を保てない(c.f. 滝脇くんの発表)

#### 連星中性子星の合体: (Lattimer & Schramm 1974)

Recently accumulates a wide interest

## Kilo-nova/Macro-nova/r-process-nova

▶ 実際に r-process 元素の崩壊熱起源と思しき天体現象(Li & Paczynski 1998)が short y線バースト GRB130603B に付随して発見される! ⇒short y線バーストは連星中性子星合体起源の可能性 ⇒重力波の電磁波対応天体として重要!

# LETTER

doi:10.1038/nature12505

#### A 'kilonova' associated with the short-duration γ-ray burst GRB130603B

N. R. Tanvir<sup>1</sup>, A. J. Levan<sup>2</sup>, A. S. Fruchter<sup>3</sup>, J. Hjorth<sup>4</sup>, R. A. Hounsell<sup>3</sup>, K

Short-duration  $\gamma$ -ray bursts are intense flashes of cosmic  $\gamma$ -rays, lasting less than about two seconds, whose origin is unclear<sup>1,2</sup>. The favoured hypothesis is that they are produced by a relativistic jet created by the merger of two compact stellar objects (specifically two neutron stars or a neutron star and a black hole). This is supported by indirect evidence such as the properties of their host galaxies<sup>3</sup>, but unambiguous confirmation of the model is still lacking. Mergers of this kind are also expected to create significant quantities of neutron-rich radioactive species<sup>4,5</sup>, whose decay should result in a faint transient, known as a 'kilonova', in the days following the burst<sup>6-8</sup>. Indeed, it is speculated that this mechanism may be the predominant source of stable r-process elements in the Universe<sup>5,9</sup>.



## Kilo-nova/Macro-nova/r-process-nova

▶ 実際に r-process 元素の崩壊熱起源と思しき天体現象(Li & Paczynski 1998)が short γ線バースト GRB130603B に付随して発見される! ⇒short y線バーストは連星中性子星合体起源の可能性 ⇒<u>重力波の電磁波対応天体として重要!</u>

# LETTER

# Gold seen in neutron star collision debris

Material ejected in gamma-ray bursts may be source of heavy elements BY ERIN WAYMAN 3:20PM, JULY 22, 2013

#### A 'kilonova' associat γ-ray burst GRB130

N. R. Tanvir<sup>1</sup>, A. J. Levan<sup>2</sup>, A. S. Fruchter<sup>3</sup>, J. Hjor

Short-duration  $\gamma$ -ray bursts are intense flashes of c lasting less than about two seconds, whose origin is t favoured hypothesis is that they are produced by a created by the merger of two compact stellar objects (s] neutron stars or a neutron star and a black hole). Thi by indirect evidence such as the properties of their l but unambiguous confirmation of the model is still gers of this kind are also expected to create significan neutron-rich radioactive species<sup>4,5</sup>, whose decay shot faint transient, known as a 'kilonova', in the days burst<sup>6-8</sup>. Indeed, it is speculated that this mechanists predominant source of stable r-process elements in the



GOLD EXPLOSION New observations suggest that colliding neutron stars (shown in this artist's conception) produce short gamma-ray bursts. Such collisions also eject material that may be the source of the universe's gold and other heavy elements.

## 連星中性子星の合体と r-process 元素合成

Mass ejection from BNS merger : two components



# 質量放出の状態方程式(EOS)依存性

- Shen EOS: '硬いEOS'
  - 中性子星半径:大
  - ▶ 潮汐破壊成分 dominant
  - 冷たい中性子星物質 dominant
- <u>Steiner EOS: '柔らかい'</u>
  - 中性子星半径:小
  - ▶ 潮汐成分 less dominant
  - 合体時高速、強い圧縮
  - ▶ 衝撃波加熱成分 dominant
  - ▶ 観測・理論モデルと コンシステントなEOS





Steiner EOS では高温のため陽電子捕獲が進む Steiner EOS では陽電子捕獲反応によって Ye (Yp) が上昇する



## Steiner EOS では高温のため陽電子捕獲が進む ・ 陽電子捕獲の結果 Steiner EOS では高い反電子ニュートリノ光度





## 連星中性子星は重元素の起源か?

- ejectaの熱力学諸量に基づくr-process 元素合成計算:
  - Steiner EOS:ニュートリノ反応により Ye が変化、太陽組成をよく再現
  - Shen EOS : Ye が低すぎるため、質量数の小さい元素が作れず



# まとめ

#### <u>課題の概要</u>:

 一般相対論的輻射流体コードを構築し、京によるシミュレーションで 連星中性子星合体過程を解明する

#### 今年度の成果:

- ▶ 一般相対論的輻射流体コードの構築、およびチューニング
  - 世界で初めて連星中性子星合体の一般相対論的輻射流体シミュレーション に成功
- ・観測・理論とコンシステントな状態方程式(Steiner EOS)を用いた 場合に、太陽組成に見られるパターンの再現に成功
  - ニュートリノ相互作用の重要性が初めて明らかになった
  - 連星中性子星合体が重元素の起源である可能性を示唆

#### <u>今後の予定</u>:

京でのシミュレーション

## 2014年度の計画

- 大規模計算の実行、収束性の確認
  - ▶ 解像度:グリッド幅=150m,1372ノード
  - 格子点:(各階層の格子点)<sup>3</sup>×(階層の段数)=520×520×260×7
  - ▶ 時間ステップ:約20万ステップ、物理時間約50ms
  - ▶ 所要計算時間:約70万ノード時間/modelの見込み

#### ) 質量比、状態方程式を変えたサイエンスラン

- R過程元素合成の'universality'調べる
  - 観測によると、R過程元素合成は「各イベントが太陽組成とほぼ同じ組成パター ンを作り出すべき」
  - ▶ 連星パラメータ依存性を調べる



## s-process / r-process path



\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## s-process / r-process path



## the r-process cite の示す 'Universality'



- 金属欠乏性の観測

   1-2回程度の金属
   汚染を経験
- どの星の組成も太陽 組成とよい一致 (Z=40~100, A>90)

太陽組成は異なる 組成パターンの重ね 合わせの結果ではな く、各 r-process event が universal に太陽組 成に近いことを示唆



