もっと大規模な計算が必要なのか?

ニュートリノ輻射輸送、計算科学との連携



多次元性が重要

ニュートリノ加熱との組み合わせ

数値シミュレーションによる解明 古くは 1966年から

- スーパーコンピュータの発展と共に
 - ニュートリノ輻射流体計算:近似から厳密へ
 - ニュートリノ・核物理データ:より高い信頼度へ
 - 空間次元:球対称から多次元へ

新事実が明らかになっていく



多次元計算:非対称性の役割が明らかに 対流,回転,非等方v放射,磁場,... 観測による傍証 流体不安定性とニュートリノ加熱





多次元でのニュートリノ加熱

Suwa et al. ApJ (2013)

SN1987A

多次元計算によるEOS影響の研究 Suwa et al. ApJ (2012) Shen EOS vs LS-EOSによる比較 (K, A_{sym}が違う)



2D(軸対称)で爆発している例

バウンス後~500ms経ってから爆発へ



課題:異なる計算手法、状態方程式の違い、エネルギーが低い

3D(対称性無し)での計算が可能になってきた

- ・2次元には無い流体不安定性→ニュートリノ加熱に有利?
- ・ニュートリノ輻射輸送は近似的扱い



larger 3D simulations running @ K-computer by Takiwaki et al.



```
爆発している!!
まだエネルギー不足 0.3ベーテ
もっと重い星の場合は?
```

ニュートリノ輻射輸送が鍵

加熱量:ニュートリノから物質へ

v-加熱は中間領域で起こる: 拡散と自由伝搬の間 $ニュートリノ輻射の詳細が必要: エネルギー・角度分布 <math>f(E_v, \theta_v)$



$$Q_{v}^{i} \approx 110 \frac{MeV}{s \cdot N} \left(\frac{L_{v} E_{v}^{2}}{R_{7}^{2} < \mu >} X_{i} \right)$$

Janka A&A (1996)



爆発の可否への影響は大きい

10~20%の加熱率変動でも爆発の可否に影響がありえる



• ニュートリノ輻射輸送による緻密な計算が必要

ν輻射輸送:近似・厳密計算の変遷

- 厳密計算手法
- Boltzmann equation
- Moment formalism, Monte-Carlo *1Dにおけるニュートリノ放出予測・ミクロ物理の検証*
- 近似計算手法の変遷
- Light bulb, Leakage scheme 放出表面を固定, 放出時間を考慮
- Diffusion, IDSA, Ray-by-ray 拡散近似, 1Dを拡大適用
 2D, 3Dにおける爆発メカニズム探索



1D

dius [km]



ν輻射輸送:近似から厳密計算へ

- 2D, 3D: 近似計算手法
 - state-of-the-art simulations
- Diffusion (flux limited) 中心付近のみ
- Ray-by-ray (radial transport) 動径方向のみ

2D S_n-method Ott et al. (2008) ApJ



- 3次元ニュートリノ輻射輸送計算コード
 - 近似の影響を明らかにする Sumiyoshi & Yamada, ApJS (2012)
 - 厳密計算へ置き換える → Grand Challenge

6次元ボルツマン方程式の解法

大規模計算で解くための工夫



ニュートリノ輻射輸送方程式



- 衝突項:全てのν吸収・放出・散乱過程
 - 散乱前後のエネルギー・角度ごとに積分計算
 - •状態方程式に依る組成・ニュートリノ反応率、相対論

Sumiyoshi & Yamada, ApJS (2012)

衝突項:ニュートリノ反応による寄与

Bruenn (1985) + Shen

• 爆発メカニズム解明に必要な基本セット



- ここ数年の計算資源で扱うための処方:
 - エネルギーが変化する反応は扱わない(電子散乱)
 - 線形方程式の範囲で取り入れる(対生成・消滅)
 - ローレンツ変換の効果を取り入れる(作業中)

主な計算負荷:大規模疎行列の解法





2D/3D超新星コアへの応用

多次元でのν輻射輸送の振舞は?

3次元v輻射輸送計算コードの応用

- MPI並列計算コード
 - KEK, YITP, UT: SR16000, $8 / 12 \times 12 \times 14$ (256 x 64 x 32, 6 x 12 x 14)
- 物質分布のもとでv輻射輸送を計算できる
 - ニュートリノ輻射の定常分布を調べる
 - 6Dボルツマン方程式により時間発展
 - ・ 定常解による流束,加熱率,モーメント量
- 2D/3D 超新星コアでのv輻射の特徴
 - 非動径方向の移流,近似計算の吟味
- 流体計算コードとの結合(長倉)
 - 2D v輻射流体コード,相対論化 → 3Dフル計算へ

3次元超新星コアにおけるニュートリノ輻射輸送



3次元超新星コアの物質分布

流体分布 (ρ, T, Y_e) 固定, 3D v輻射輸送を解いて定常解を求める



近似ν輻射輸送との比較

• Full-Boltzmann 6D:



• Ray-by-ray approximation: 非動径方向の移流をSwitch OFF



Sumiyoshi et al. (2013)

3次元超新星でのν輻射輸送:近似の場合

Z軸上から見た図

 $\overline{\nu}_{e}$ density, flux

Ray-by-ray:

 $\theta,\varphi\text{-advection OFF}$

r方向の流束のみ



3D Supernova core 150msec after bounce

3次元超新星でのv輻射輸送: Fullの場合

Z軸上から見た図

 $\overline{\nu}_{e}$ density, flux

6D-Boltzmann

非動径方向の 移流も記述できる

φ方向の流束



3D Supernova core 150msec after bounce







Sumiyoshi et al. (2013)

物質分布の角度分布における非一様性



31

We need Exa-scale computing

Scaling up to large scales

Scaling of memory and operations: Matrix

- Block dense matrix for v-angle changes in collision term
- Block size
 - $M=n_{\theta\nu} \ge n_{\phi\nu}$
- Memory size
 - $M^2 \times n_{\epsilon} \times N_{space}$
- Operations

 $M^3 \times n_{\epsilon} \times N_{space}$



Estimate by assuming: Kotake et a iso-energetic reactions & pre-condition by inversion of blocks

Necessary computational resources

• To run 6D Boltzmann solver with high resolution

Kotake et al. PTEP (2012)

| machine | space | neutrino | memory | operations |
|------------|-----------------|----------------------------|--------|---------------|
| Current | 256 x 32 x 64 | 8 x 12 x 14 | 2TB | 6 Tera /step |
| K-computer | 512 x 64 x 128 | 12 x 24 x 20 | 200TB | 2 Peta /step |
| Exascale | 512 x 128 x 256 | 24 x 24 x 24 | 3PB | 80 Peta /step |

- For 6D Boltzmann + Hydrodynamics with iteration Increase by a factor of ten more...
- Need Exa-flops machines for full 6D simulations

まとめと展望

- 超新星爆発メカニズムにおける核物理
 - 状態方程式の影響:固さ・柔らかさ,組成
 - ニュートリノ放出量・加熱による影響
 - 超新星ニュートリノ観測で状態方程式を探る
- 信頼できる原子核データ群の整備が重要
- 2/3次元超新星での爆発メカニズムの課題
 ニュートリノ輻射輸送計算の重要性
 6Dボルツマン方程式を解く計算コード
- 3次元v輻射流体計算コードへ - エクサスケールへ向けたグランドチャレンジ

原子核・天文・計算科学の共同研究

- 超新星爆発
 - 鈴木英之、中里健一郎
 - 山田章一
 - 長倉洋樹、岩上わかな
- 計算科学
 - 松古栄夫
 - 櫻井鉄也、今倉暁
- 天文シミュレーション
 - 固武慶、滝脇知也
 - 関口雄一郎

- 状態方程式テーブル
 - H. Shen
 - 親松和浩
 - 土岐博
- 状態方程式の拡張
 - 古澤峻
 - 大西明、石塚知香子
 - 鷹野正利、富樫甫
- ニュートリノ反応
 - 佐藤透、那須翔太、中村聡

新学術領域「計算科学による素核宇融合」

HPCI戦略P分野5「物質と宇宙の起源と構造」課題3

Supercomputing resources at KEK, YITP, UT, RCNP, K-Computer

Support from:

- Grant-in-Aid for Scientific Research (20105004, 20105005, 22540296, 24244036)