

課題 3

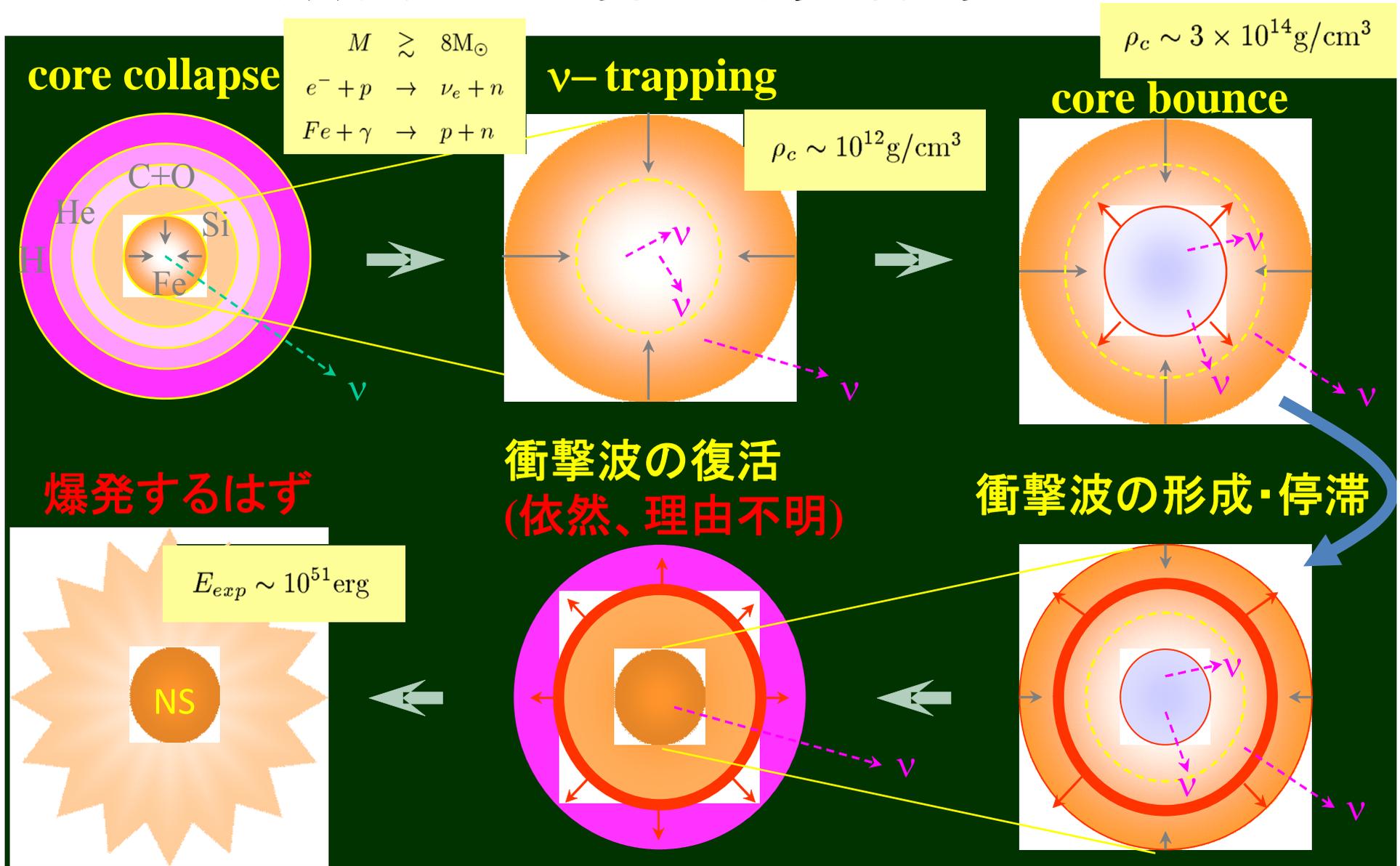
重力崩壊型超新星爆発とブラック ホールの誕生機構の解明

柴田 大

京都大学基礎物理学研究所

固武慶、**滝脇知也**(国立天文台)、住吉光介(沼津高専)、
関口雄一郎、**木内建太**、**諏訪雄大**(京大)、
山田章一、**長倉洋樹**(早稲田)、ほか

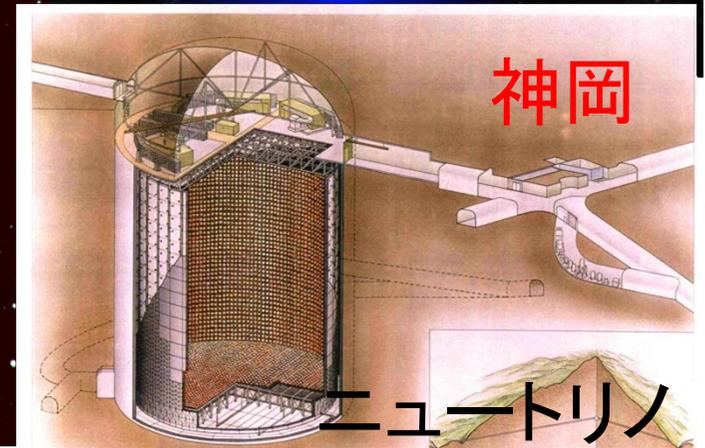
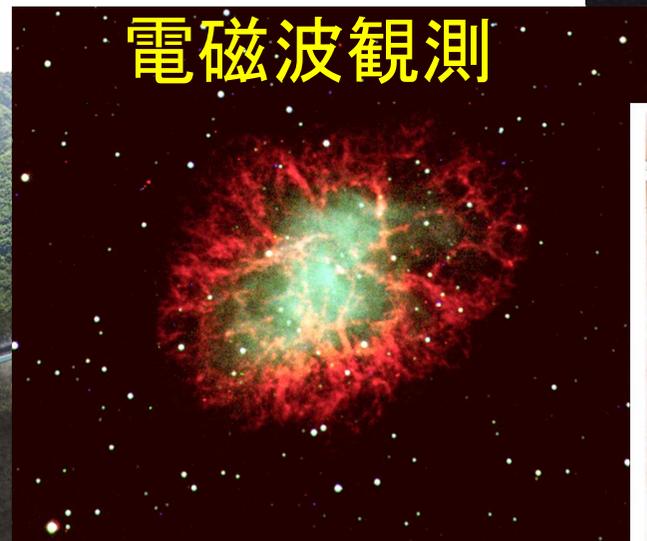
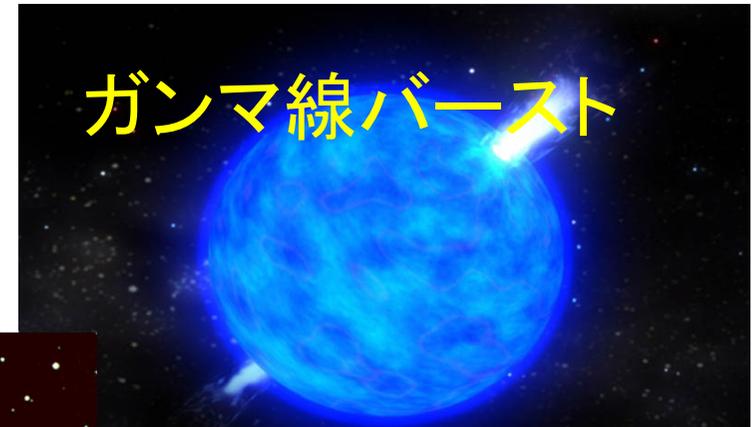
重力崩壊型超新星爆発標準シナリオ



山田章一さんの図を改変

なぜ星の重力崩壊/超新星爆発か？

- 自然界の4つの相互作用がすべて関与する稀な現象
→ 基礎科学におけるシミュレーションの難題として象徴的。爆発機構は未解明。
- 観測可能なシグナルを放射
→ 宇宙物理学における重要な研究対象の1つ



なぜ星の重力崩壊/超新星爆発か？

- あらゆる物理法則が関与する、もっとも難しい問題の1つを扱っている
 - 宇宙・天文分野の高汎用性コードが作られる
- 応用範囲: 超新星爆発、ガンマ線バースト、連星中性子星/ブラックホール-中性子星連星/連星ブラックホールの合体、ブラックホール降着円盤、宇宙ジェットなど:
 - 高エネルギー宇宙現象研究の基盤整備:
大型観測計画(X線、 γ 線、ニュートリノ、重力波)と関連
- 高次精度差分、適合多層格子法、ボルツマン方程式の解法、など最先端のコード開発
 - 他分野でも有用

爆発の機構の候補

- ニュートリノ加熱機構 + 流体不安定性

重力崩壊物質は降り積もる前にニュートリノ加熱で停滞した衝撃波を吹き飛ばす。

注: 球対称の仮定のもとでは不可能そう。対流、流体不安定性などを利用し、物が降り積もるのを遅らせる間に、十分な加熱を行う

- 回転磁気流体不安定性機構

一定の回転エネルギーが存在すれば、回転エネルギーが磁気エネルギーに転換し、やがて磁気圧で停滞した衝撃波を吹き飛ばす。あるいは、対流などの運動エネルギーを磁場を用いて爆発エネルギーに転換。

シミュレーションで解明するには

- 流体/磁気流体方程式を解く
- ニュートリノ輻射輸送を解き、物質と輻射場の相互作用を考慮する
(究極的には3+3次元ボルツマン方程式を解く)
- 高温・高密度各物質の状態方程式を考慮する
- 組成(陽子、中性子、ヘリウム、重い原子核、電子、など)の変化を追う
- 一般相対論的重力を考慮する
(アインシュタイン方程式を解く)
などの必要がある

究極のシミュレーション

Solve the following equations:

$$\nabla_{\mu}(\rho u^{\mu}) = 0$$

Continuity

$$\nabla_{\mu} T_{\nu}^{\mu} = 0 \quad + \text{ EOS Table}$$

HD/MHD

$$\nabla_{\mu}(\rho Y_e u^{\mu}) = Q_e$$

Electron fraction

$$G_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$$

General relativity

$$p^{\mu} \frac{\partial f}{\partial x^{\mu}} + \dot{p}^{\mu} \frac{\partial f}{\partial p^{\mu}} = S[f, \rho, T \dots]$$

Radiation transfer

十分な分解能の計算は、「京」でも難しい。
まずは、各部分で準備を進める
(ただしそれでも、全て世界最先端事業)

現状

- 空間次元は2次元(軸対称)がせいぜい
→ 非軸対称計算への競争が始まったところ。
- 空間多次元でボルツマン方程式を解く試みも始まったばかり。さまざまな近似解法が試みられている。
- 一般相対論的効果を入れた超新星爆発の物理的計算は未だなされていない。
- 磁気流体計算も行われているが、肝心の磁気流体不安定性を分解した計算はない。
- ブラックホールの誕生を多次元で追う試みも始まったばかり。

今後数年、国際的に激しい競争が予想される

課題3.1: 空間3次元輻射流体＋位相空間1次元輻射輸送 (ニュートン重力/近似的相対論)

- ニュートリノ輻射輸送の本質的効果を取り入れながら、**世界で初めて空間3次元の輻射流体を解く**
- 原子核理論に基づく状態方程式を考慮
- 十分な分解能で流体不安定性を正しく考慮
- 想定している計算: 約1PF月/モデル、数モデル。
(r, θ, ϕ) グリッドで、およそ(700, 128, 256)。
エネルギー空間20グリッド。
実時間、約1秒(300万～500万時間ステップ)。
テストは順調。

並列化、効率化が当面の課題

空間3次元、位相空間1次元の輻射流体 超新星爆発計算

バウンス
後の時間

グリッド数: 300(r)x64(θ)x32(ϕ)x12(ϵ)

空間

エネルギー

10TF・月@CRAY-XT4

— ρ_0 —



空間スケール



固武慶、瀧脇知也提供

課題3.2: 空間3次元一般相対論的磁気流体 + 簡略化したニュートリノ冷却・加熱

- 空間3次元のGR磁気流体方程式を高解像度で解く。
回転磁気流体不安定性などの寄与を決める。
- EOS、ニュートリノの効果を定性的に考慮
→ 流体不安定性・磁場の増幅に寄与
- 階層多層格子法を導入し、高分解能を実現
- 想定している計算: 約1PF月/モデル、数モデル。
(x, y, z)座標で8段格子。1階層 512^3 を想定。もっとも分解能の良い階層で、グリッド幅約100m。実時間、約0.3秒を想定(200万時間ステップ)。

並列化が当面の課題

課題3.3: 空間3次元一般相対論的輻射流体

- ニュートリノ輻射輸送の本質的効果を取り入れながら、空間3次元の輻射流体を一般相対論的に解く
- 十分な分解能で流体不安定性を正しく考慮
- 階層多層格子法を用いる(開発済み+簡易コード済)
- 独自の一般相対論的輻射輸送定式化を導入
- 想定している計算: (x, y, z) 座標で8段階層。各 256^3 程度。最小グリッドサイズ約200m。実時間、約0.5秒(約150万時間ステップ)。
- GRで輻射が入れば十分に強いインパクト: 1st step は位相空間を解かない、2nd step で位相空間1D
- ブラックホールの誕生過程の解明が主目的

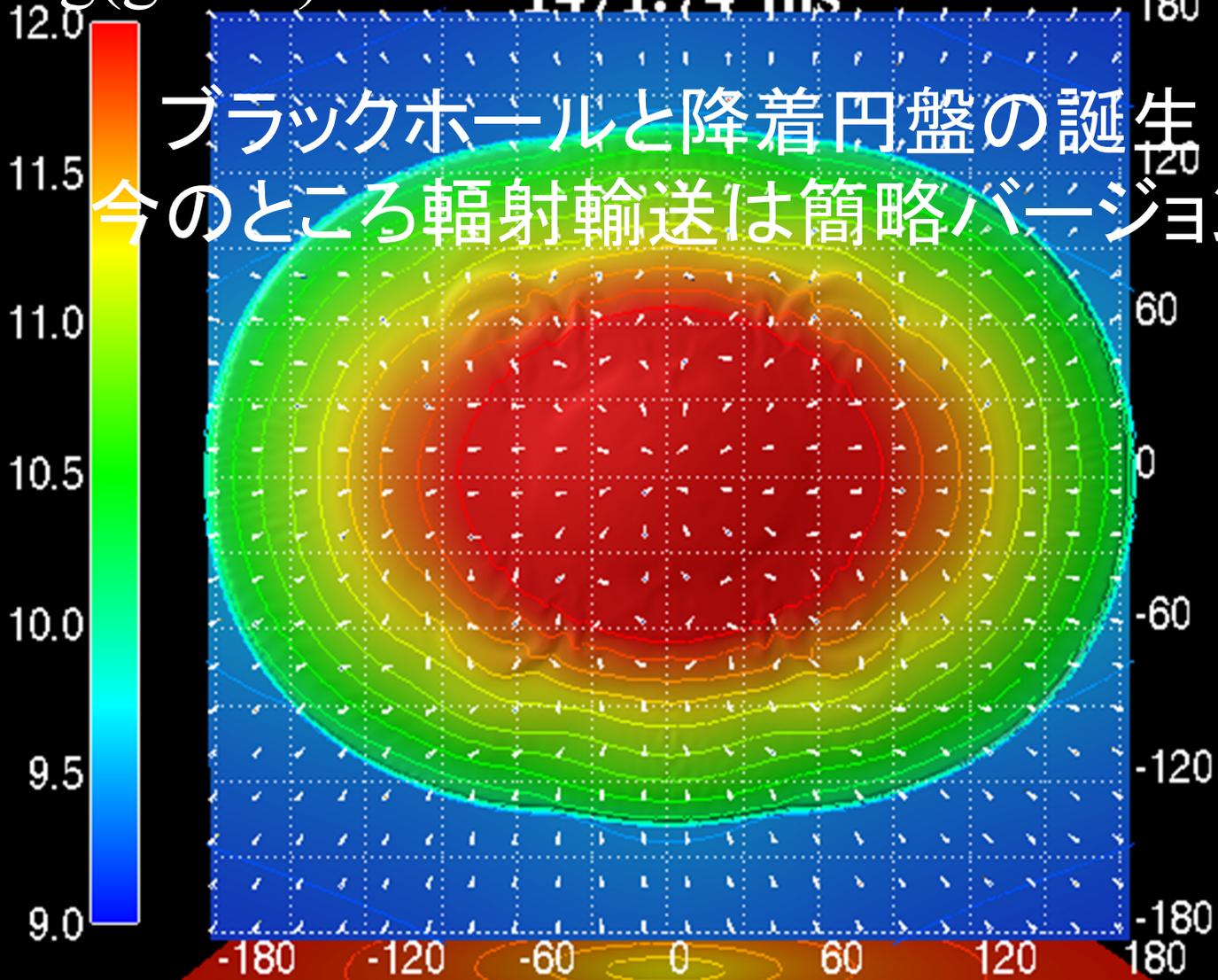
輻射流体の導入 + 並列化が課題

Log(g/cm³)

1471.74 ms

km

ブラックホールと降着円盤の誕生
今のところ輻射輸送は簡略バージョン



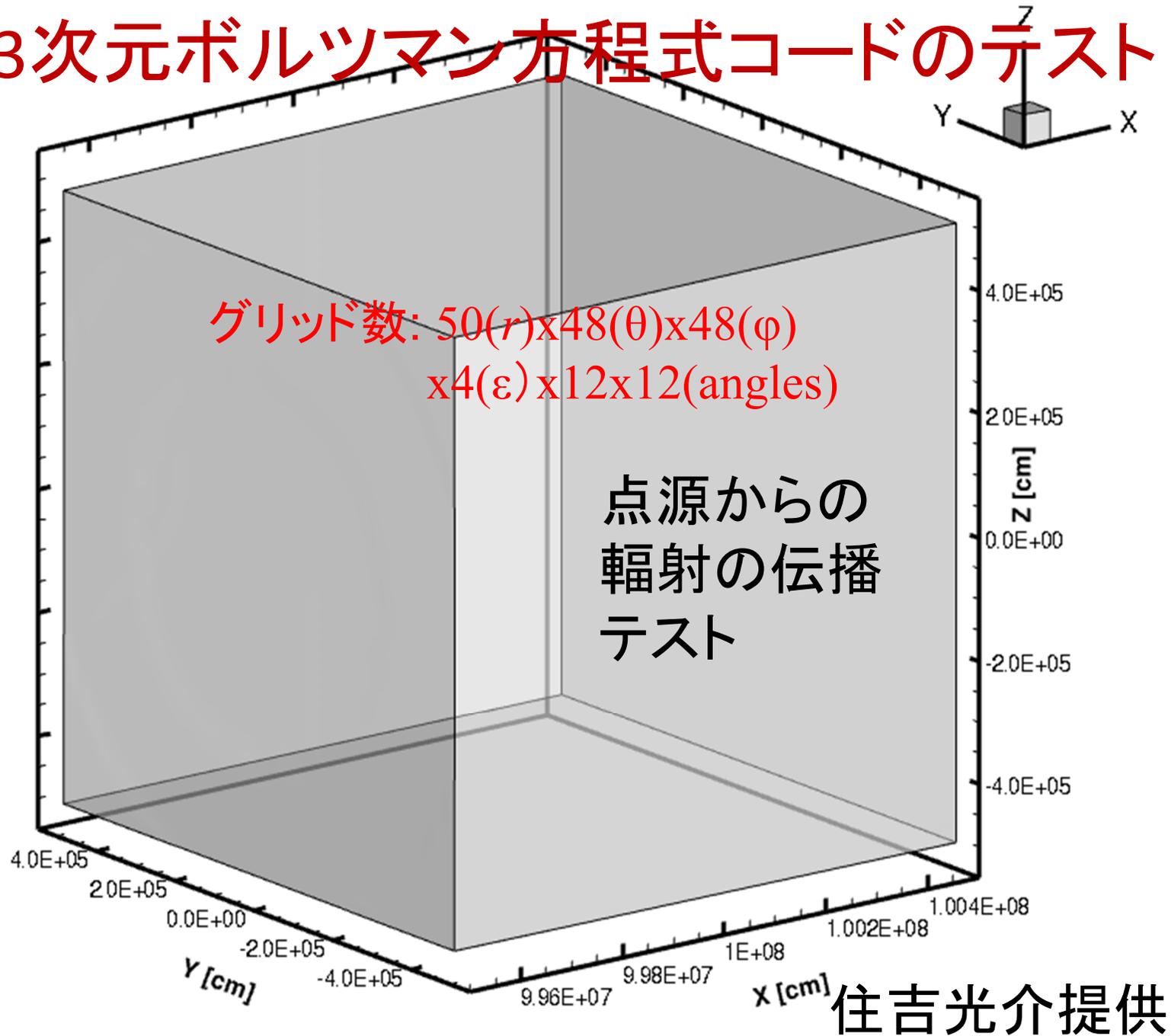
関口雄一郎提供

課題3.4: 空間3次元輻射流体＋位相空間3次元 輻射輸送(ニュートン重力)

- ニュートリノ輻射輸送の位相空間3次元、空間3次元の輻射流体(Full ボルツマン方程式＋流体)を解く。
- 原子核理論に基づく状態方程式を考慮
- 目指す分解能は、今後決定
- 現在コードを開発中。ボルツマン方程式解法コードは完成。現在、流体とのカップルを進めている。
- 「京」では軸対称計算を行うことが現実的

当面は流体コードに
輻射を組み込む作業

3次元ボルツマン方程式コードのテスト



到達目標

- **ニュートン重力計算:**

- I. 2~3年後: 空間3次元、位相空間1次元の輻射流体シミュレーションを現状の軸対称以上の分解能で「京」で実行し、成果をあげる。
- II. 3年以内に空間3次元、位相空間3次元のボルツマン輻射流体コードを完成し、4~5年目に京で軸対称シミュレーションを実行。次世代で3D計算を目指す。

- **一般相対論(数値相対論):**

- I. 2~3年後: 空間3次元高分解磁気流体計算 or 空間3次元輻射流体(位相空間0次元)
- II. 3~5年後: 空間3次元、位相空間1次元の輻射流体コードを確立。4~5年後: 「京」でシミュレーションを実行

体制

3.1: 3+1+1 輻射 流体計算	固武 慶、滝脇知也(国立天文台)、 諏訪雄大(京都)
3.2: 高解像度磁 気流体計算	変更あり: 木内建太、関口雄一郎、柴 田 大(京都)
3.3: 3+1+1 一般 相対論的輻射流 体計算	柴田 大、木内建太、関口雄一郎、 諏訪雄大(京都)
3.4: 3+3+1 輻射 流体計算	住吉光介(沼津高専)、松古栄夫(KEK), 山田章一(早稲田)、中里健一郎(東理 大)、長倉洋樹(早稲田)