

Athena++をもちいた銀河進化計算

筑波大学 4年

宇宙理論

古谷田 和真

目次

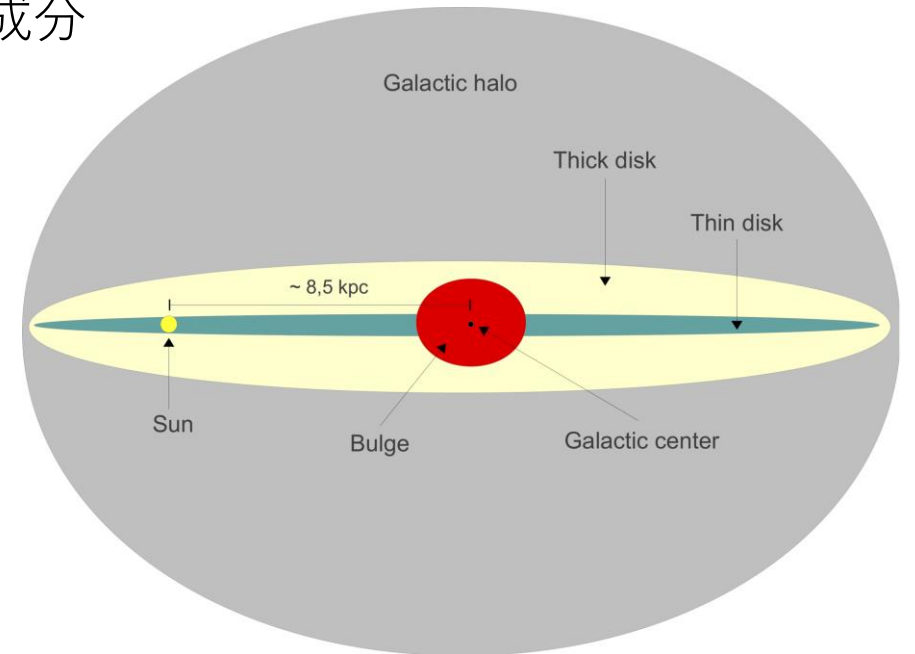
- 研究の背景
- 目的
- Athena++とは
- 実際の研究
- まとめ

研究の背景 (1)

- 現在、我々の住んでいる Milky Way の円盤成分として、厚みの異なる2つの成分、Thick disk とThin disk が存在することが分かっている。
→2層構造をとる理由は現在研究が進んでいる

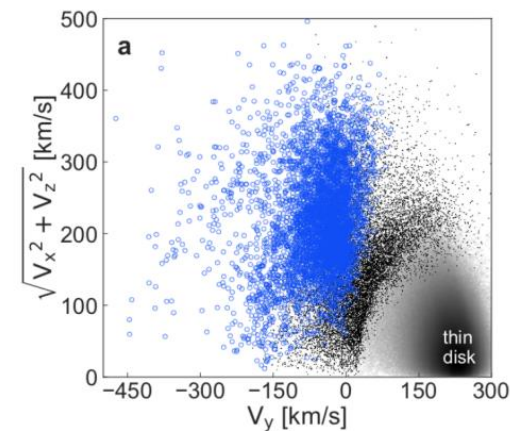
• Thick disk : 厚い円盤成分
約 1 kpc

Thin disk : 薄い円盤成分
約 300 pc

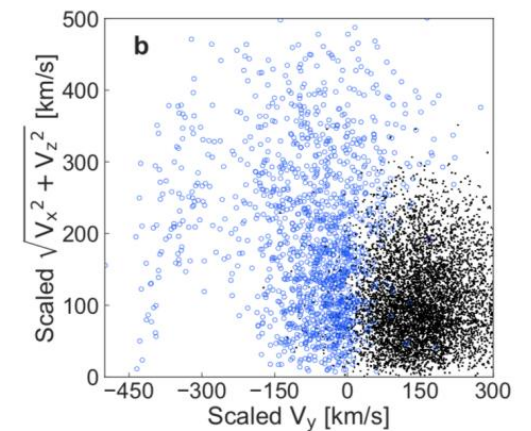


研究の背景 (2)

- ヨーロッパ宇宙機構(ESA)の位置天文観測望遠鏡である Gaia が、2018 年に公開した Gaia Data Release 2 (Gaia DR 2) によると、disk の回転に逆行する恒星 (青) が多数存在している。(図 1,a)
- 銀河衝突シミュレーションによる銀河衝突で、形成される銀河を構成している粒子の速度成分。(図 1.b) (Villalobos & Helmi 2008)
- 図 1.a、1.b を比較すると、逆行している成分がとてもよく似ている。
→過去に天の川銀河は他の銀河と衝突しているのではないか。



(図 1.a) Gaia DR 2 のデータ
太陽近傍の恒星の速度成分。
グレーは disk 内の恒星、黒と青は
halo 内の恒星。特に disk に逆行
するものを青で示す。



(図 1.b) 銀河衝突シミュレー
ションによる、恒星粒子の速
度成分。黒は元々 disk を構
成していた粒子、青は衝突銀
河を構成していた粒子。

研究の背景 (3)

- 約 10 Gyr 前に、massive satellite galaxy が Milky Way に衝突したことがThick disk と Thin disk の形成に大きく影響したことが分かっている。
- この衝突した massive satellite galaxy は Gaia Enceladusと名付けられた。
(Gaia Collaboration et al. 2018)
- N体シミュレーションによる研究では、thick disk 形成には質量 $\sim 10^{10} M_{\odot}$ 程度の massive satellite galaxy の衝突が有効に働くことが示唆された。
(Hayashi & Chiba . 2006)
- さらに、thick disk 内の恒星の重元素量と thin disk 内の恒星の重元素量が大きく異なっていることが分かっている。

目的

Gaia Enceladus の衝突によって、Milky Way のガスがどのような力学的進化をたどったのかを計算することにより、どのような過程を経て現在のような thin disk の形成に至ったかを明らかにする。

⇒円盤ガスと衛星銀河のガスの衝突をシミュレーションし、
円盤ガスの運動やガスの加熱・冷却過程を調べる。

(←卒業研究での目標)

- 以上をシミュレーションソフト：Athena++ を用いて解析する。

Athena++とは (1)

- 主な開発者

- **James M. Stone**

Professor
School of Natural Sciences
Institute for Advanced Study

- **Christopher J. White**

Joint Princeton/Flatiron Postdoctoral Fellow
Department of Astrophysical Sciences
Princeton University

- **Kengo Tomida**

Associate Professor
Astronomical Institute
Tohoku University

- **Kyle G. Felker**

Postdoctoral Appointee
Leadership Computing Facility
Argonne National Laboratory

Athena++とは(2)

- Athena++ … **C++** 言語で書かれた宇宙物理学用磁気流体シミュレーションコード
- 近似リーマン解法、Constrained Transport法を組み合わせた磁気流体計算
- **OpenMP、MPI** による並列化が可能
- 1,2,3次元の**圧縮流体力学**、磁気流体シミュレーションの計算
- 特殊及び一般相対論的流体力学、磁気流体シミュレーションの計算
- **デカルト座標、円筒座標、球座標**と非一様な格子間隔をサポートした**柔軟な格子配列**

Athena++とは (3)

- 今回の研究では、Athena++で計算した結果をVTKファイルの形式で得た。
- VTKファイルを可視化できる VisIt を導入しようとしたが失敗。

(吉川先生、Alex先生、その節はありがとうございました。)

- ParaView という可視化ソフトを導入し、解析を行った。
- ParaView…2次元及び3次元データセットを可視化することができるオープンソースアプリケーション。
VTKファイルなどのASCIIデータを、人間が理解できるように可視化することができる。

Athena++ とは (4)

- Athena++ に導入されているテスト問題の例
 - Sod の衝撃波管問題
 - Brio-Wu の衝撃波管問題
 - Orszag-Tang Vortex
 - Blast wave
 - Rayleigh-Taylor 不安定性

etc.

実際の研究 (1)

- Athena++によるシミュレーションが行える環境づくり、及びシミュレーション結果を可視化する (ParaView) ことができる環境づくり。
- Athena++をもちいて、簡単な動作確認を行い、操作になれるために比較的簡単にできる流体シミュレーションを行った。
- 点源爆発のモデルを作成し、シミュレーションを行った。
Sedov 解を求め、シミュレーション結果と比較した。
- 今回は点源爆発のシミュレーション結果を示す。

実際の研究 (2)

Athena++による点源爆発シミュレーション

- 超新星爆発などの宇宙空間での爆発現象→点源爆発とみなすことができる。
- 点源爆発で生じた衝撃波の伝搬は厳密解が存在する→ Sedov 解
- Sedov 解とは…一様媒質中の点源爆発によって生じた衝撃波の厳密な解

実際の研究 (3)

- 点源爆発で生じる流れは、球対称で断熱的とする。
- 運動方程式、連続の式、エネルギーの式はそれぞれ次のように書かれる。

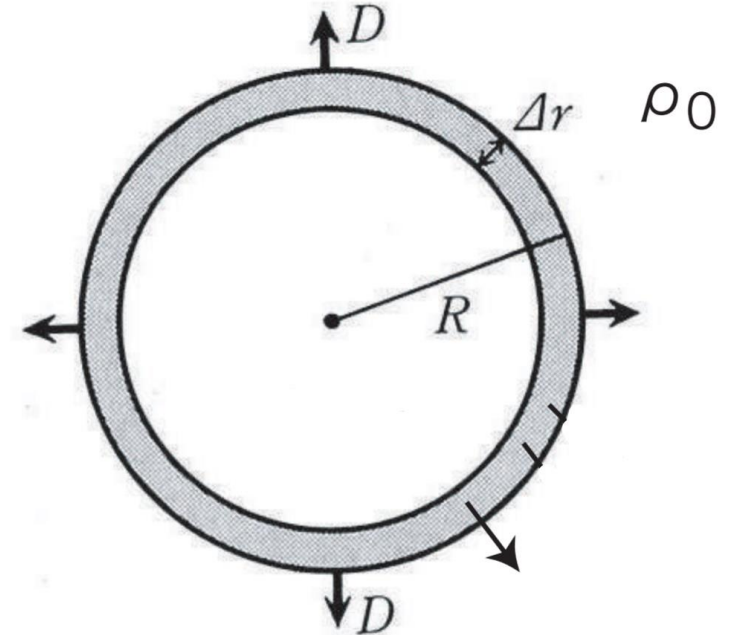
$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + v \frac{\partial \rho}{\partial r} + \rho \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{2\rho v}{r} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{p}{\rho^\gamma} \right) + v \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{p}{\rho^\gamma} \right) = 0 \quad (3)$$

実際の研究 (4)

- 爆発によって生じる流れは、爆発のエネルギー E_0 、静止気体の密度 ρ_0 によって特徴づけられる。
- 座標 r 、時間 t 、 E_0 、 ρ_0 から作られる無次元量 ξ を作ると、ただ 1つの独立変数で衝撃波が記述できる。
- 今回のモデルでは、衝撃波の位置 $R(t)$ について、シミュレーション結果と Sedov 解の結果を比較する。



実際の研究 (5)

- 時刻 t における衝撃波面の位置 $R(t)$ は次のように書ける。

$$R(t) = \xi_0 \left(\frac{E_0}{\rho_0} \right)^{\frac{4}{5}} t^{2/5} \quad (4)$$

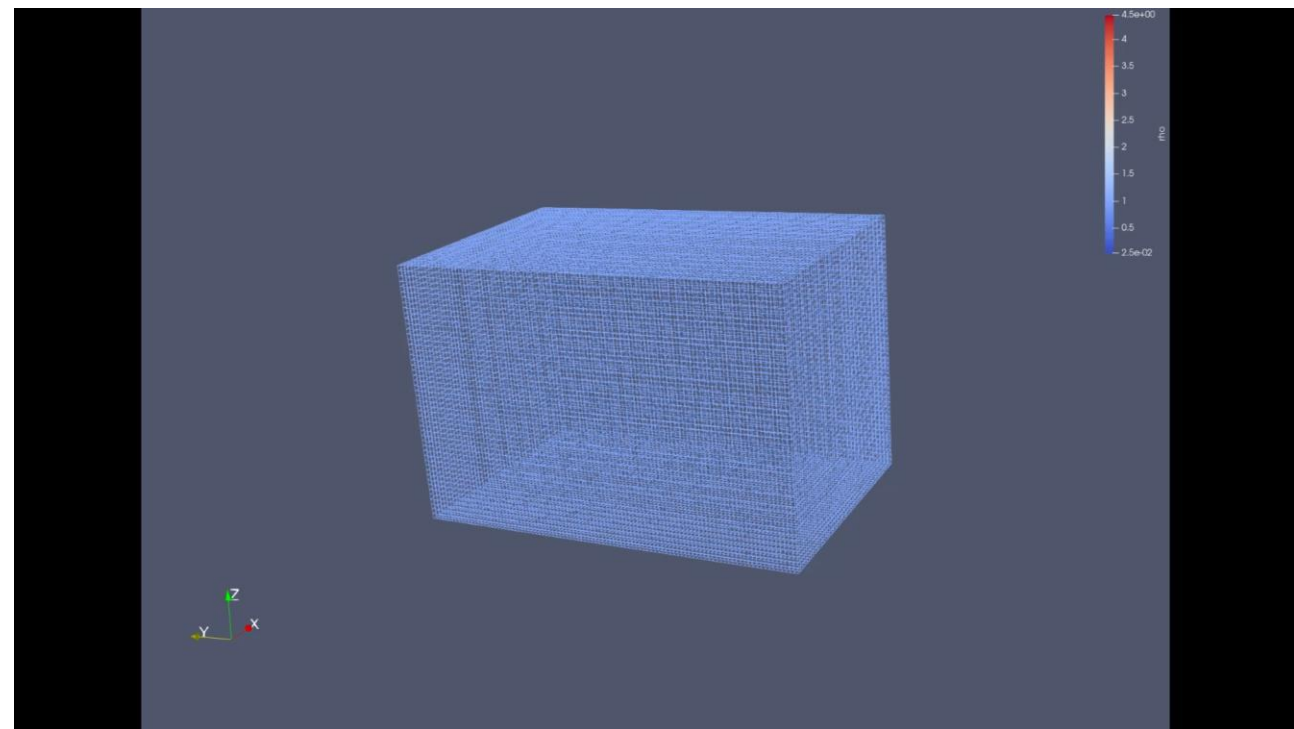
(Sedov et al. 1959)

- ξ_0 : 無次元パラメータ、 $\xi_0 = 1.15$ を採用
- E_0 : 衝撃波のシェルの運動エネルギーとシェルより内側の内部エネルギーの和
- ρ_0 : 静止しているガスの密度 今回は $\rho_0 = 0.5$ を採用
- (4) 式を実際に求め、衝撃波面の位置の時間発展のグラフを作成した。
- シミュレーション結果と、(4) 式の計算結果を比較して、点源爆発で生じる衝撃波面の位置の時間発展が、Sedov 解に従っていることを確かめた。

実際の研究 (6)

Athena++ によるシミュレーションの結果

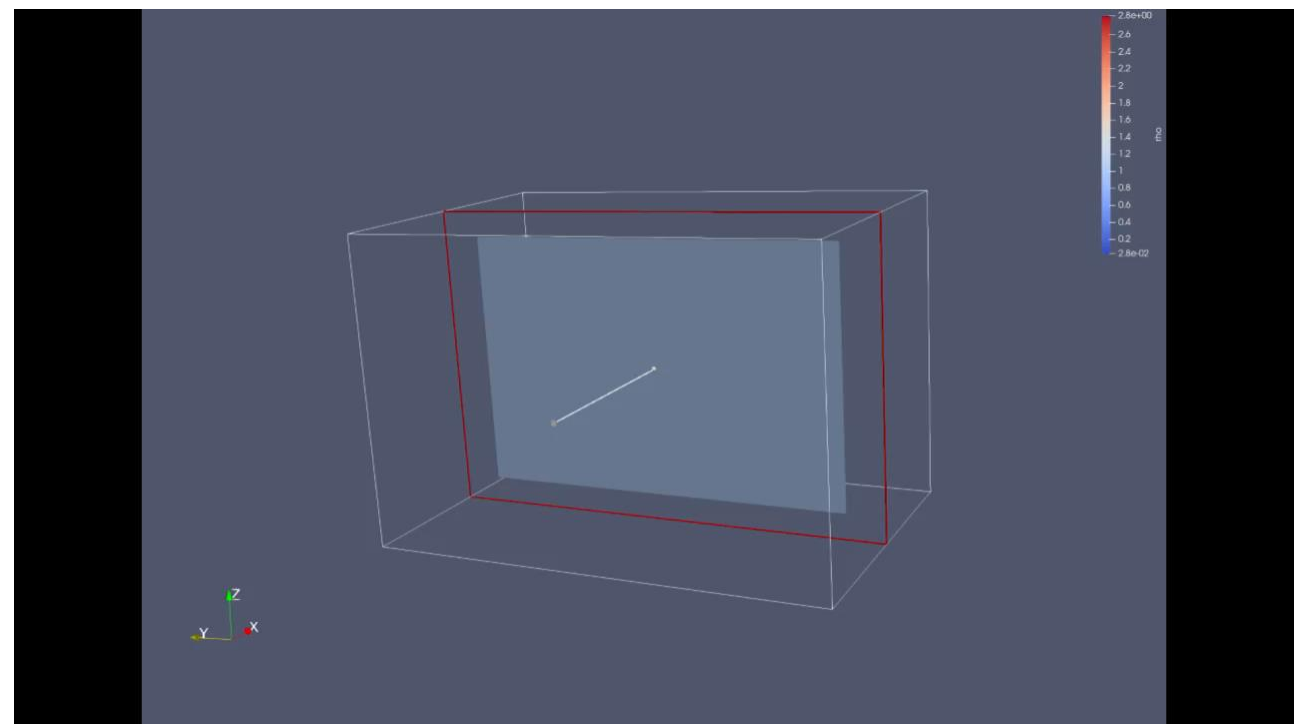
- 磁場なし
- 圧力比 = 500
- 壁面では周期境界条件
- $\gamma = 5/3$



(図2) Athena++ によるシミュレーション結果
衝撃波の伝搬の様子

実際の研究 (7)

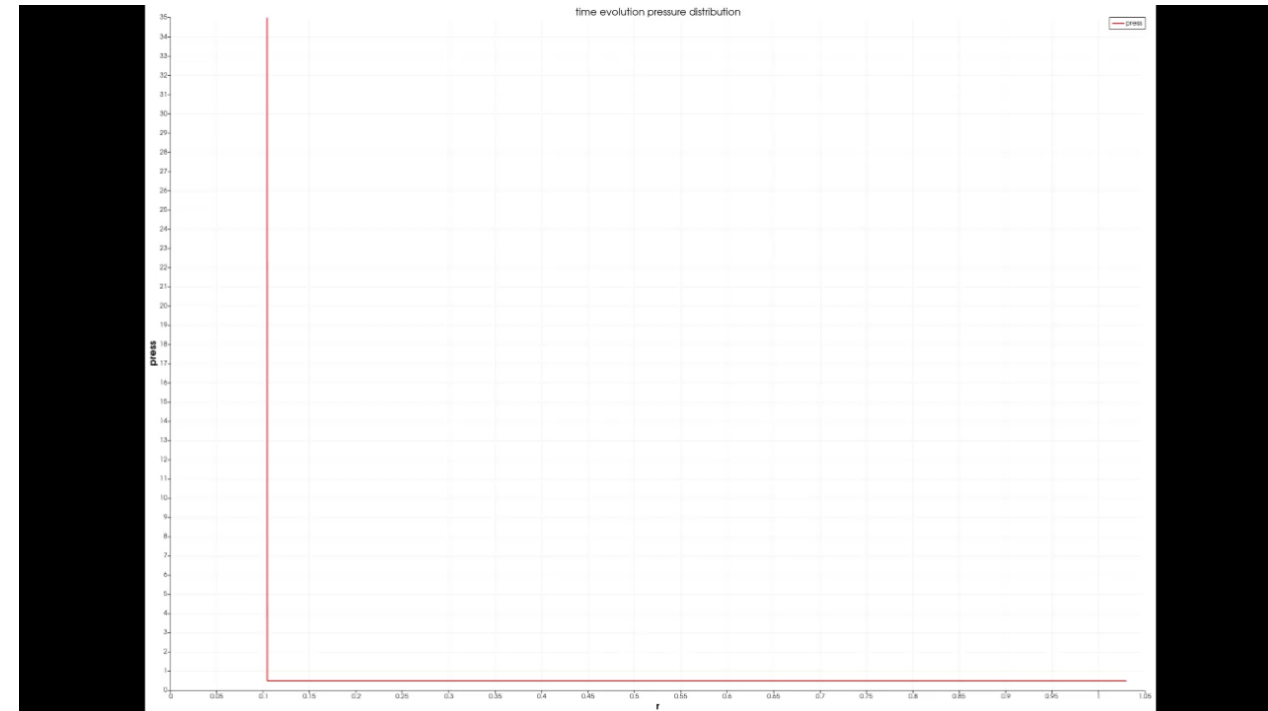
- $dt = 0.01$ [s]
- $t = 0 \sim 1$ [s] までの100サイクル
- メッシュ x方向 50
 y方向 100
 z方向 50



(図3) Athena++ によるシュミレーション結果
衝撃波の伝搬の様子 (断面図)

実際の研究 (8)

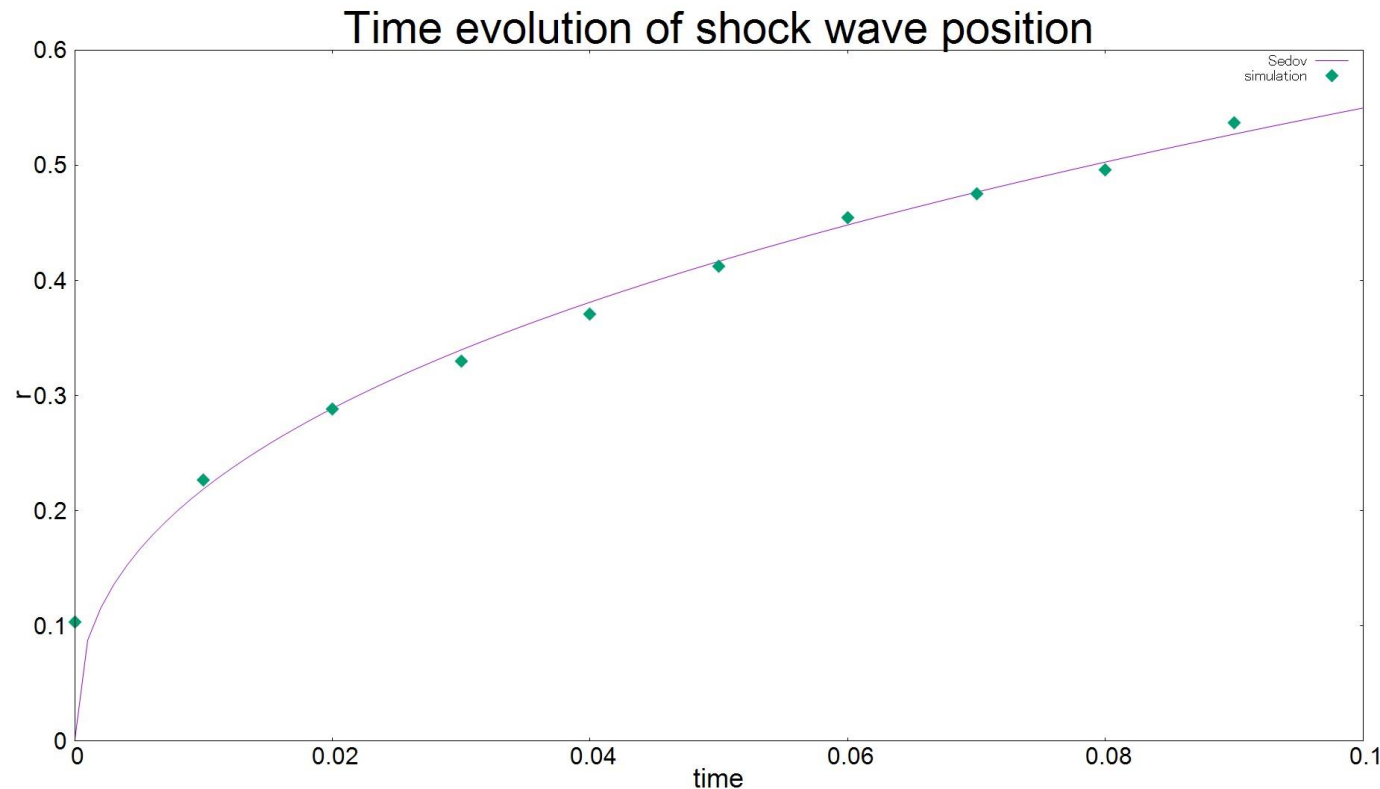
- 衝撃波の伝搬の様子
- 爆発の瞬間から衝撃波が広がっている様子が見て取れる。
- 横軸：爆発中心からの距離 r
縦軸：圧力 p



(グラフ1) 圧力分布の時間発展

実際の研究 (9)

- Sedov 解との比較
- 衝撃波面の位置の時間発展のグラフ
- 紫：(4)式の計算結果
- 緑：シミュレーション結果
- 確かに衝撃波の位置の時間発展が Sedov 解に従っていることが分かる。



(グラフ2) 衝撃波面の位置の時間発展
紫：(4)式の計算結果
緑：シミュレーション結果

まとめ

- これまでの研究で、Athena++ や Paraview を用いた解析方法についてなれることができた。
- 宇宙空間で実際に起こっている点源爆発について、シミュレーションで再現し、実際の現象と比較することにより、理解を深めることができた。
- 卒業研究では、円盤ガスと衛星銀河のガスの衝突をシミュレーションし、円盤ガスの運動やガスの加熱・冷却過程を調べていきたい。

ご清聴ありがとうございました