

ニュートリノで起こる星の大爆発、 ”超新星”を計算機上で再現する

滝脇知也

国立天文台

天文シミュレーションプロジェクト

HPCI 専門研究職員

自己紹介

1991-1994(15) 豊島区立池袋中学校<= 山下先生との出会い

1994-1999(18) 私立開成学園高校<= 生意気な高校生活

1999-2001(20) 東京大学教養学部理科一類<= 教養の授業

2001-2003(22) 東京大学理学部物理学科<= 学生のレベル高い

2003-2005(24) 東大 大学院 修士課程<= 佐藤勝彦先生

やりたい分野の悩み

2005-2008(27) 東大 大学院 博士課程<= 学振DC1

研究で苦労

2008-2009(28) 東大附属 ビッグバンセンター 特任研究員

2009-2011(31) 国立天文台 CfCA 博士研究員

2年後にHPCI 専門研究職員
京コンピュータで大きな成果

京コンピュータ

1 予測する生命科学・医療および創薬基盤

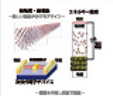
理化学研究所※
(協力組織: 東京大学工学系 / 医科学研究所ほか)



Life science / Drug manufacture

2 新物質・エネルギーの創成

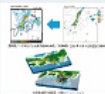
東京大学物性研究所※
分子科学研究所、東北大学金属材料研究所



New materials and Energy Creation

3 防災・減災に資する地球変動予測

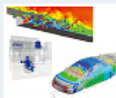
海洋研究開発機構※
(協力組織: 東京大学大気海洋研究所 / 情報学環 / 地震研究所、気象庁気象研究所、東北大学ほか)



Global change prediction
for disaster prevention / reduction

4 次世代ものづくり

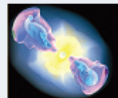
東京大学生産技術研究所※
日本原子力研究開発機構、宇宙航空研究開発機構



MONOZUKURI
(Industrial Innovation)

5 物質と宇宙の起源と構造

筑波大学計算科学研究センター※
高エネルギー加速器研究機構、国立天文台



The origin of matter and the universe

※印は代表機関



10Pflops=パソコン10万台の性能
地球上の全人口70億人が電卓を
持って集まり、全員が24時間不眠不
休で1秒間に1回のペースで計算を
続け、約17日間かけてようやく終わ
る計算が1秒で終わる。

京コンピュータで超新星爆発の機構解明に挑む

急に現れる天体、新しい星？ 超新星

明月記

後冷泉院・天喜二年四月「五月」中旬以後の丑の時、**客星** 觜(し)・参(しん)「オリオン座」の度に出づ。東方に見(あら)わる。天関星「おうし座ゼータ」に孛(はい)す。大きき歳星「木星」の如し。

1054年(平安時代)



藤原定家

超新星残骸	超新星の名称	記録の残された主な文献
Lupus	SN1006	明月記、宋史
Crab	SN1054	明月記、宋史
3C 58	SN1181	明月記、宋史
Tycho	SN1572	ティコ、名実録
Kepler	SN1604	ケプラー、李朝実録
Cas A		

客星は彗星ではない新しい星とのこと。

日本や中国では突発的な天体現象を占いに用いており、大きな関心事だった。

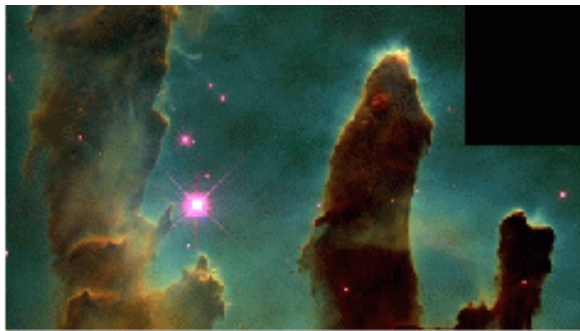
宇宙で最も明るい天体の一つ



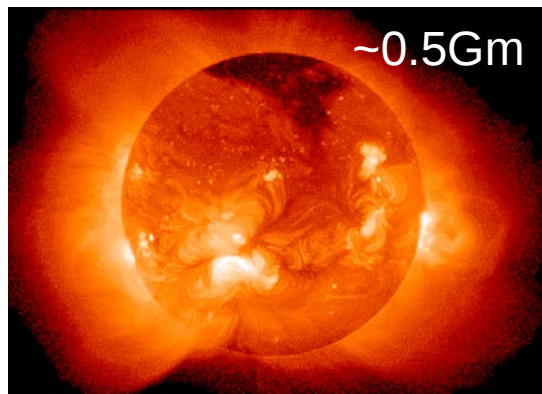
Supernova 1987A in the Large
Magellanic Cloud (1987 Oct)
 $D_{\text{LMC}} = 48.8 \text{ kpc} = 12 \text{ 万光年}$

絶対等級(10pc)-18等級
太陽(4.8等級)の10億倍の明るさ
天の川銀河(-20.5等級)の6分の1
100日程度で減光していく

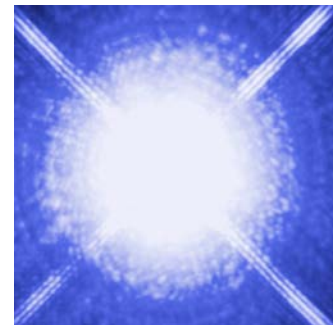
星の一生と最期の大爆発



ガス雲



主系列星(例えば太陽)



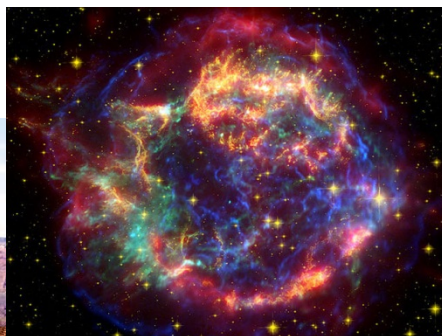
白色矮星(シリウス)

軽い星は長寿
~100億年

重い星は短命
~1000万年



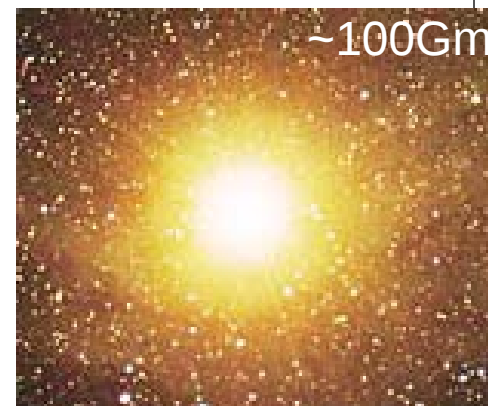
中性子星(パルサー)
やブラックホール



超新星残骸(Cas A)

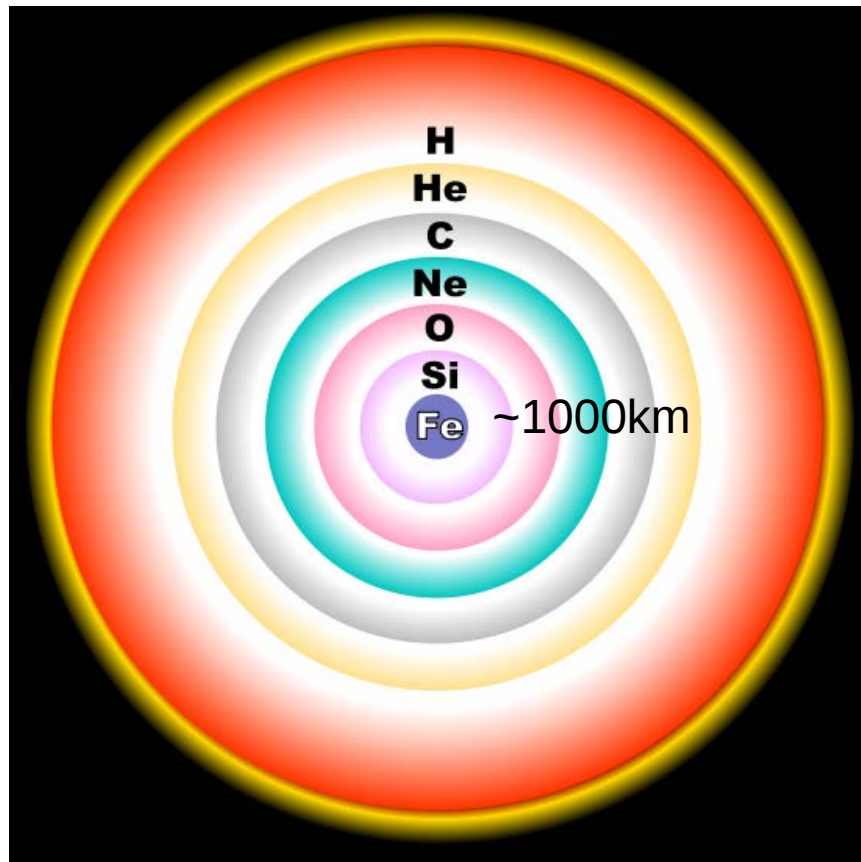


超新星爆発(1987A)



赤色巨星(アンタレス)

赤色巨星の中身



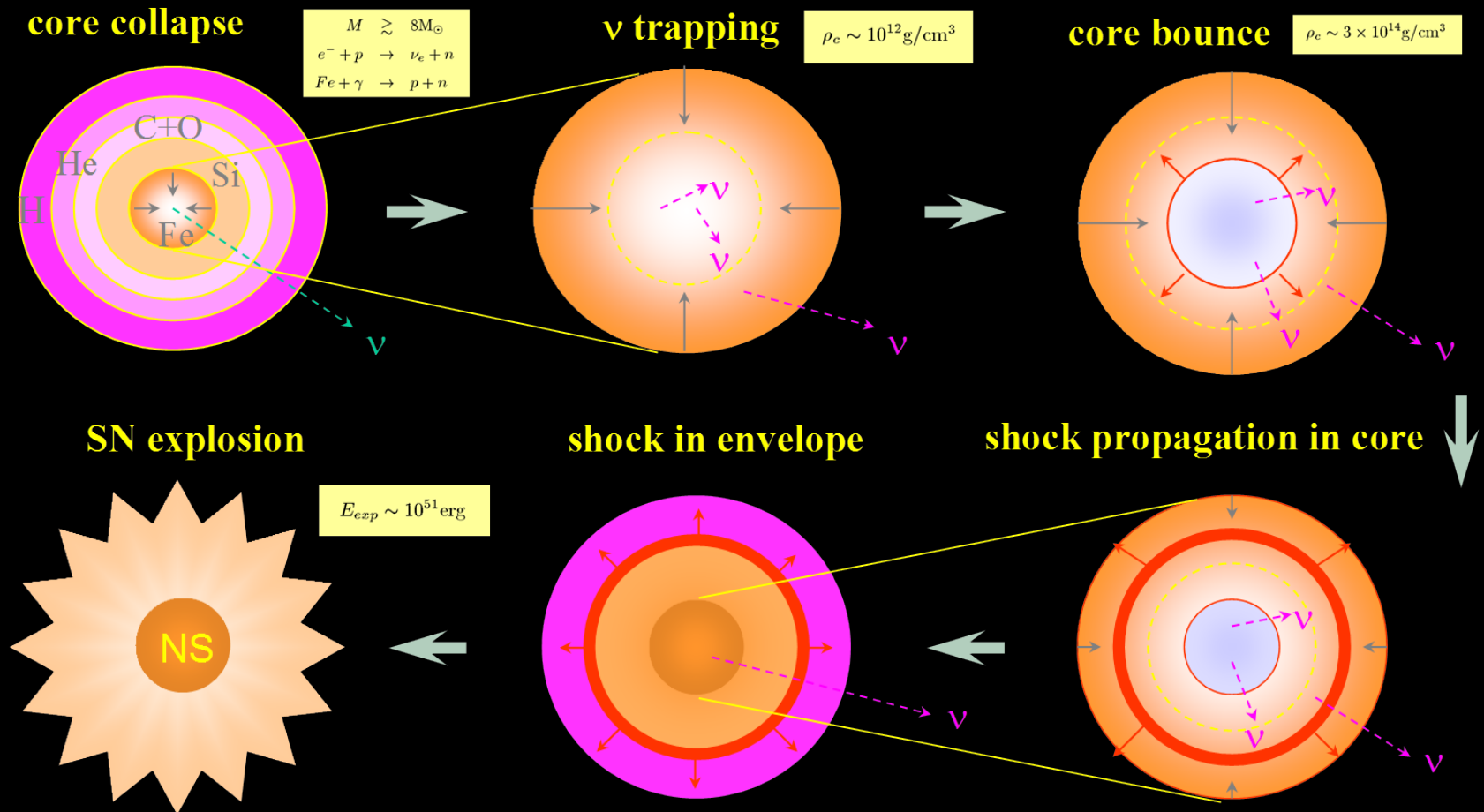
Wikipedia

若い星は水素とヘリウムしかない。トリプルアルファ反応が困難。

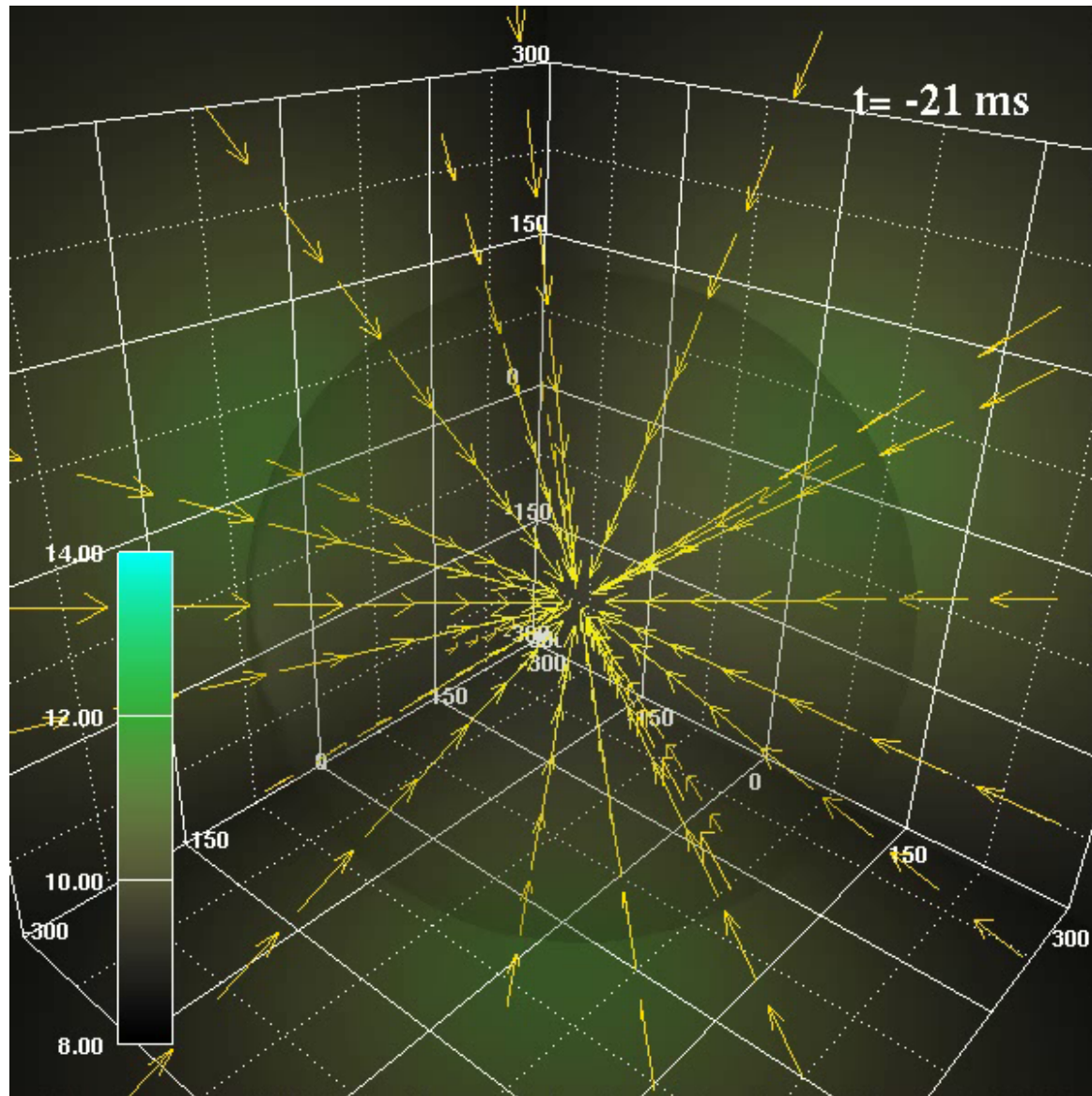
年を取るにつれ、核融合で中心に重元素が出来ていく（地球、人類の起源）。

安定な鉄ができると元素合成がとまり、自分の重力を支えきれず潰れる。

ニュートリノ駆動型超新星爆発 概念図



Birth of proto-neutron star



色: 密度

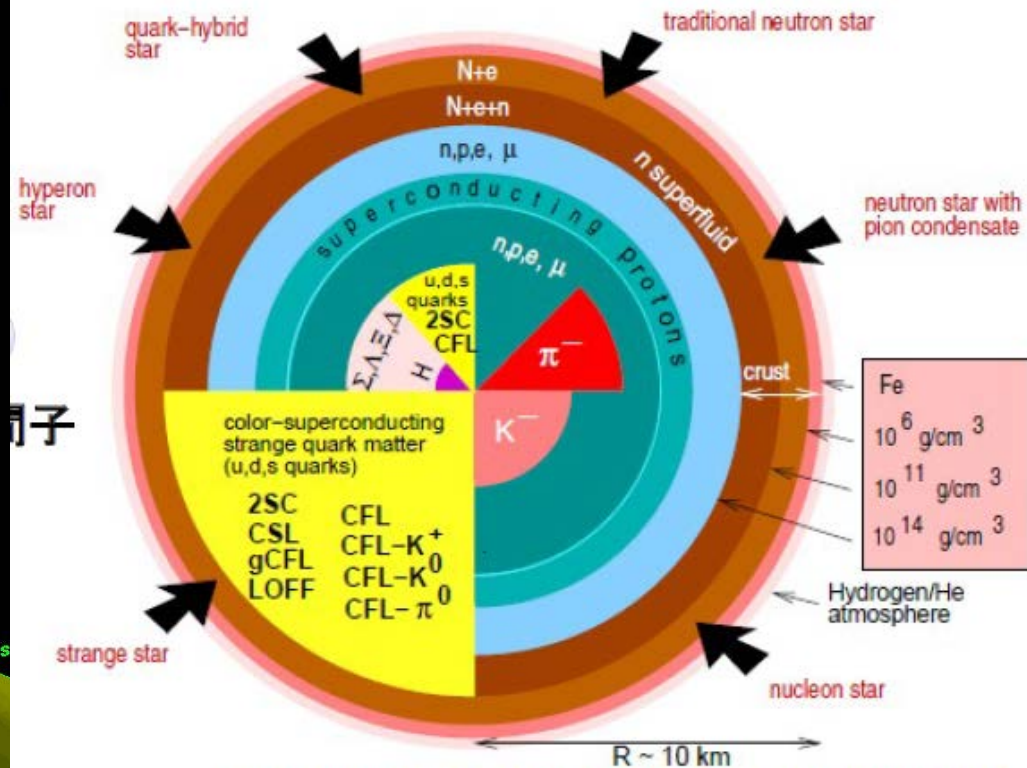
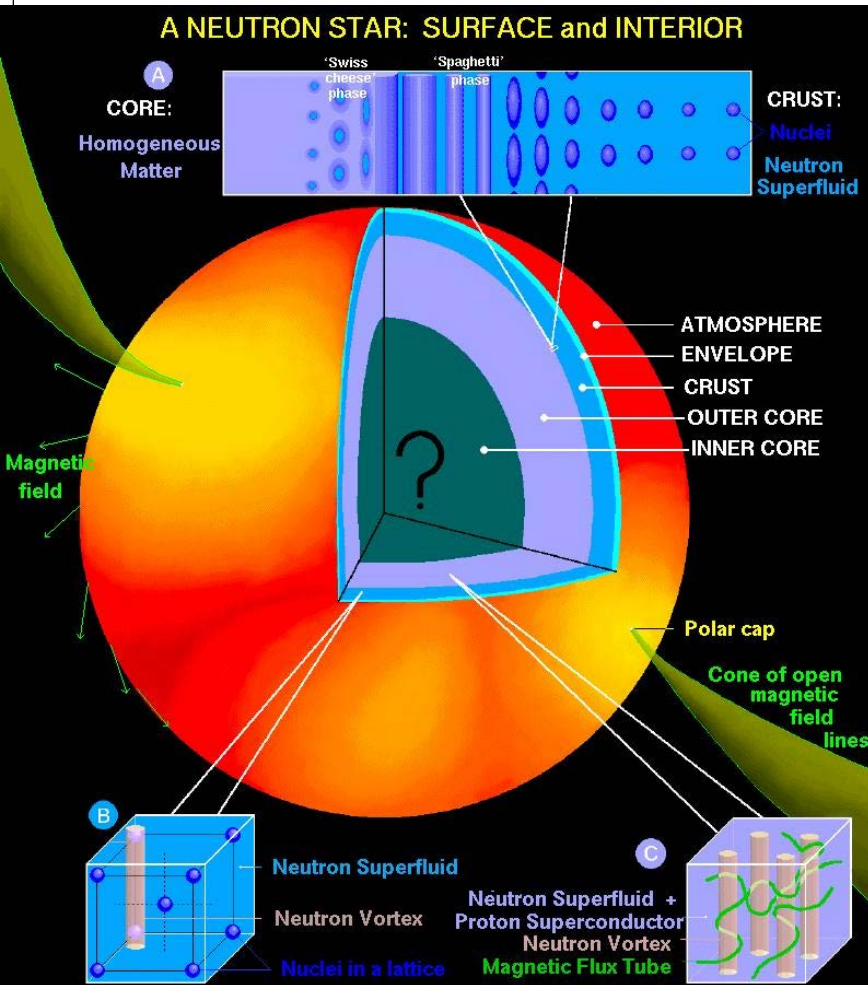
ベクトル: 速度

$3 \times 10^{14} \text{g/cc}$: 核密度

$1 \times 10^{12} \text{g/cc}$: ニュート
リノトラッピング

$1 \times 10^{11} \text{g/cc}$: proto-
neutron star

中性子星の中身



F. Weber, Prog. Part. Nucl. Phys. 54 (2005) 193

中性子星の中身は中性子じゃない？

<http://www.astro.umd.edu/~miller/nstar.html>

物理学と天文学と超新星爆発 研究の意味の確認

物理学：超新星爆発の機構には自然界の4つの力が全て登場する。我々が自然をどの程度理解しているのかの試金石

天文学：超新星爆発は星の進化の末の終状態。我々の住む宇宙の最小単位である“星”を理解するためには欠かせない存在。

超新星は重元素の工場。人類の起源。

超新星のモデリング

出てくる物理

○弱い相互作用(ニュートリノ反応)

○強い相互作用(核力)

○自己重力

○電磁気力

○流体力学←今日はここに注目

粒子の運動から、 集団の運動の記述へ

粒子の運動法則

ニュートンの第二法則

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = \mathbf{F}$$

集団の記述へ

ある場所に着目したとき、

ある運動量をもった粒子が何個いるのか？

その数の変化を記述

ボルツマン方程式

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\mathbf{p}}{m} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{F} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{p}} = \left. \frac{\partial f}{\partial t} \right|_{\text{coll}}$$

$f(\mathbf{x}, \mathbf{p})$ 空間3次元 位相空間3次元

集団の運動をとらえる

渋谷



北へ速度 3km/h で進む人5人
北へ速度 4km/h で進む人15人
東へ…
西へ…
南へ…

すごく混んでくると??

満員電車



60人が乗車
電車は 40km/h で北に移動
平均速度 0.01km/h で動いて人とぶつかり
あっている。

混んでくると、少ない情報で集団の運動を記述できる

流体力学

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0,$$

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla P - \rho \nabla \Phi,$$

$$\frac{\partial e^*}{\partial t} + \nabla \cdot [(e^* + P) \mathbf{v}] = -\rho \mathbf{v} \cdot \nabla \Phi + Q_E,$$

$$\nabla \equiv \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{pmatrix} \quad \frac{d}{dt} \equiv \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla$$

$\rho(\mathbf{x})$ 空間3次元

密度、速度(3成分)、エネルギーで

粒子の集団＝流体の様子を記述。

ニュートリノ 輻射輸送

ニュートリノの半径 10^{-22}cm 水素 10^{-8}cm
物とぶつからない $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$ 原子核 10^{-13}cm
流体近似しにくい。 $n + \nu_e \rightarrow p + e^-$

ボルツマン方程式を解く必要がある。

ただし、何も近似しなければ(N^6)京の100倍のコンピュータを用いても計算が終わらないので、多少の近似をして計算量を抑える。

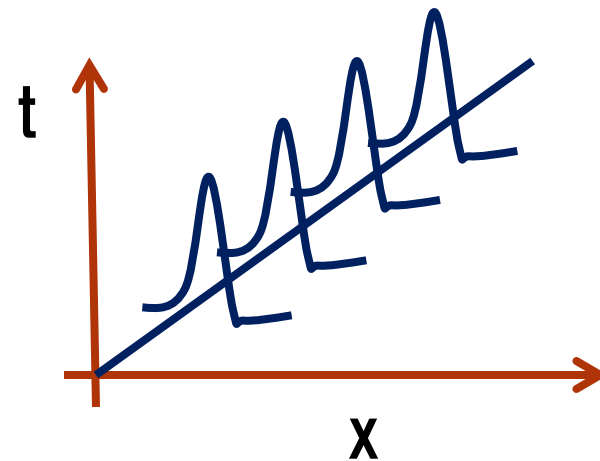
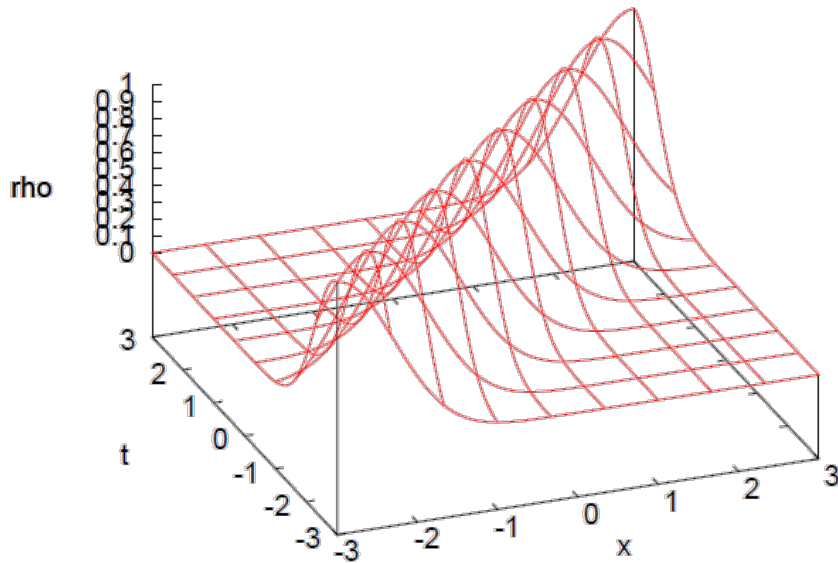
滝脇の場合、ニュートリノの動く方向に仮定をいれて位相空間を3次元から1次元に縮小(N^4)。

流体 シミュレーション

空間と時間を離散化してコンピュータ上で微分方程式を解く。

波動方程式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + v \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0 \quad \rho(x, t) = f(x - vt)$$



流体 シミュレーション

離散化

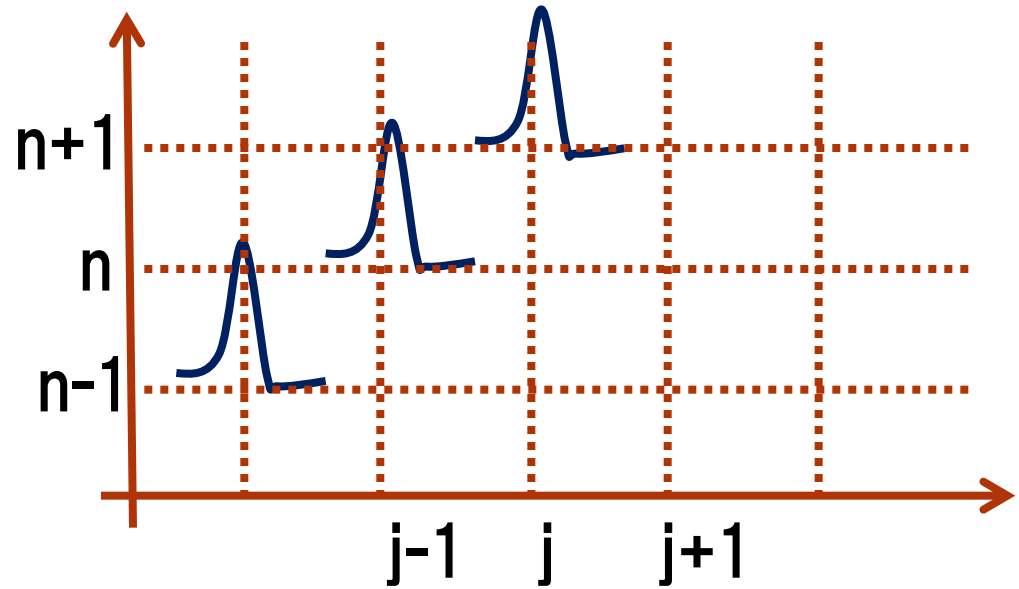
$$t = n\Delta t \quad x = j\Delta x$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + v \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\rho_j^{n+1} - \rho_j^n}{\Delta t} + v \frac{\rho_j^n - \rho_{j-1}^n}{\Delta x} = 0$$

$$\rho_j^{n+1} = \rho_j^n - v \left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \right) (\rho_j^n - \rho_{j-1}^n)$$

1stepずつ進む $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ 、 $\rho_j^{n+1} = \rho_{j-1}^n$ 離散化しても解を再現！



実は $\frac{\rho_j^{n+1} - \rho_j^n}{\Delta t} + v \frac{\rho_{j+1}^n - \rho_j^n}{\Delta x} = 0$ ではダメ。正しい作法で行うべし。

一般相対論的な場合

$$(\partial_t - \mathcal{L}_\beta)\tilde{\gamma}_{ij} = -2\alpha\tilde{A}_{ij}$$

$$(\partial_t - \mathcal{L}_\beta)\phi = -\frac{1}{6}\alpha K$$

$$(\partial_t - \mathcal{L}_\beta)\tilde{A}_{ij} = e^{-4\phi} \left[\alpha(R_{ij} - 8\pi\gamma_{i\mu}\gamma_{j\nu}T_{(\text{total})}^{\mu\nu} - D_i D_j \alpha) \right]^{\text{trf}} + \alpha(K\tilde{A}_{ij} - 2\tilde{A}_{ik}\tilde{\gamma}^{kl}\tilde{A}_{jl})$$

$$(\partial_t - \mathcal{L}_\beta)K = -\Delta\alpha + \alpha(\tilde{A}_{ij}\tilde{A}^{ij} + K^2/3) + 4\pi\alpha(n_\mu n_\nu T_{(\text{total})}^{\mu\nu} + \gamma^{ij}\gamma_{i\mu}\gamma_{j\nu}T_{(\text{total})}^{\mu\nu})$$

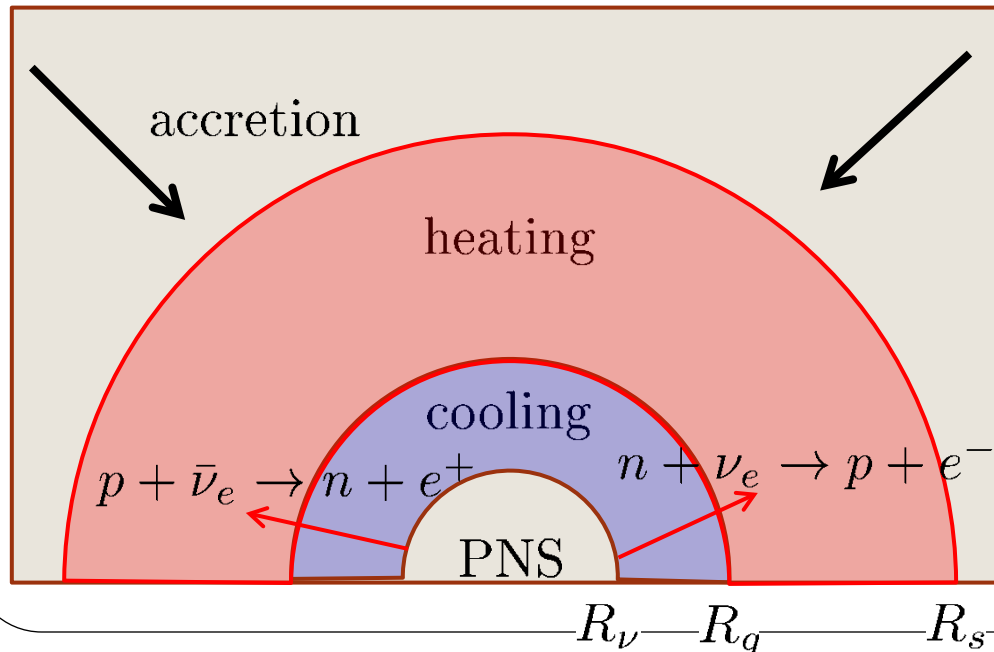
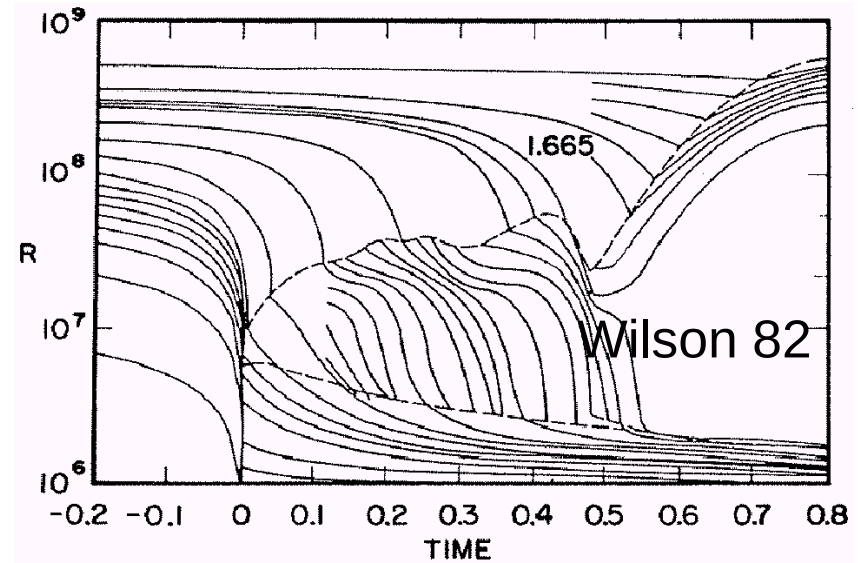
$$\begin{aligned} (\partial_t - \beta^k \partial_k)\tilde{\Gamma}^i &= 16\pi\tilde{\gamma}^{ij}\gamma_{i\mu}n_\nu T_{(\text{total})}^{\mu\nu} \\ &\quad - 2\alpha\left(\frac{2}{3}\tilde{\gamma}^{ij}K_{,j} - 6\tilde{A}^{ij}\phi_{,j} - \tilde{\Gamma}_{jk}^i\tilde{A}^{jk}\right) \\ &\quad + \tilde{\gamma}^{jk}\beta_{,jk}^i + \frac{1}{3}\tilde{\gamma}^{ij}\beta_{,kj}^k - \tilde{\Gamma}^j\beta_{,j}^i + \frac{2}{3}\tilde{\Gamma}^i\beta_{,j}^j + \beta^j\tilde{\Gamma}_{,j}^i - 2\tilde{A}^{ij}\alpha_{,j}, \end{aligned}$$

$$\partial_t(e^{6\phi}E_{(\nu)}) + \partial_i[e^{6\phi}(\alpha F_{(\nu)}^i - \beta^i E_{(\nu)})] = e^{6\phi}(\alpha P^{ij}K_{ij} - F_{(\nu)}^i\partial_i\alpha - \alpha Q^\mu n_\mu),$$

$$\partial_t(e^{6\phi}F_{(\nu)_i}) + \partial_j[e^{6\phi}(\alpha P_{(\nu)_i}^j - \beta^j F_{(\nu)_i})] = e^{6\phi}[-E_{(\nu)}\partial_i\alpha + F_{(\nu)_j}\partial_i\beta^j + (\alpha/2)P_{(\nu)}^{jk}\partial_i\gamma_{jk} + \alpha Q^\mu\gamma_{i\mu}],$$

超新星の研究の歴史

- Colgate & White '66
シミュレーション開始。
- 佐藤勝彦 '75
ニュートリノ トラッピング
- Wilson' 82
ニュートリノ加熱で爆発

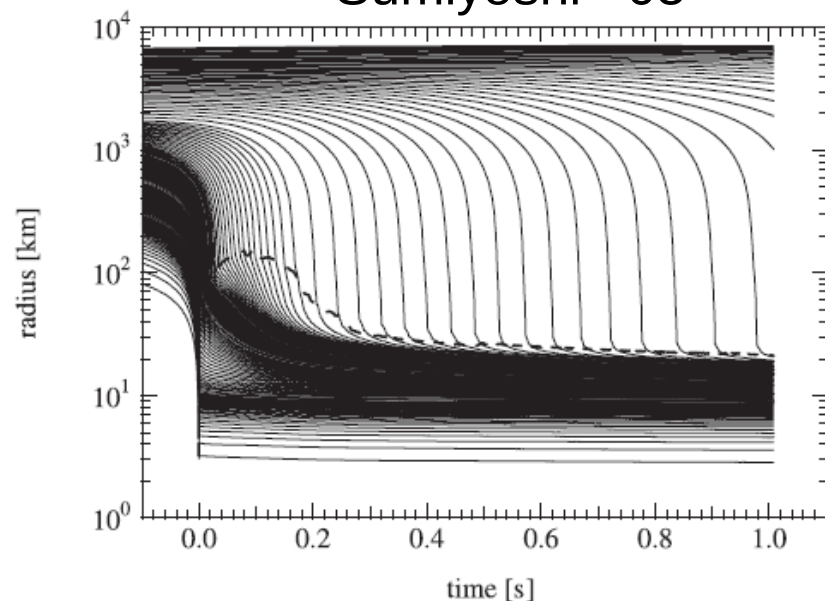
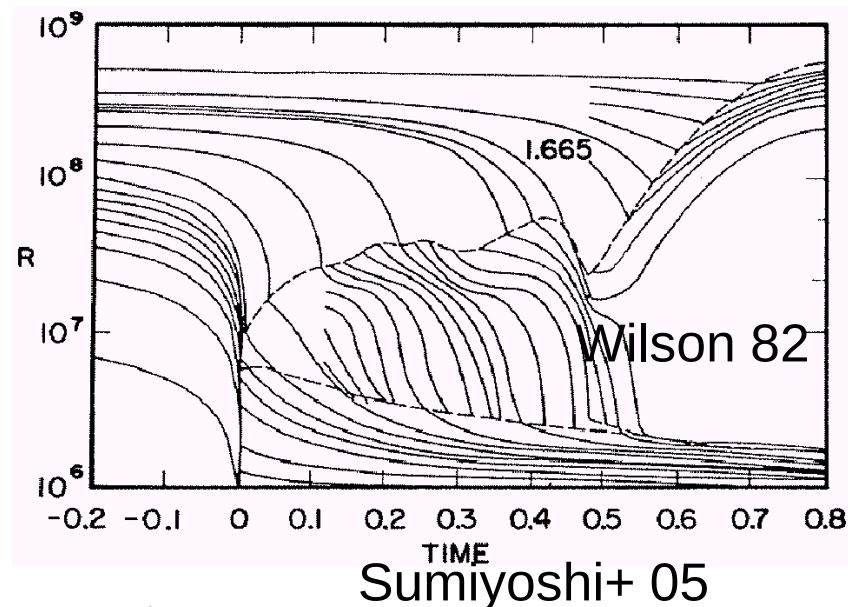


$$\begin{aligned} \mathcal{C} &\propto 1/r^9 & p + e^- &\rightarrow n + \nu_e \\ \mathcal{H} &\propto 1/r^5 & n + \nu_e &\rightarrow p + e^- \end{aligned}$$

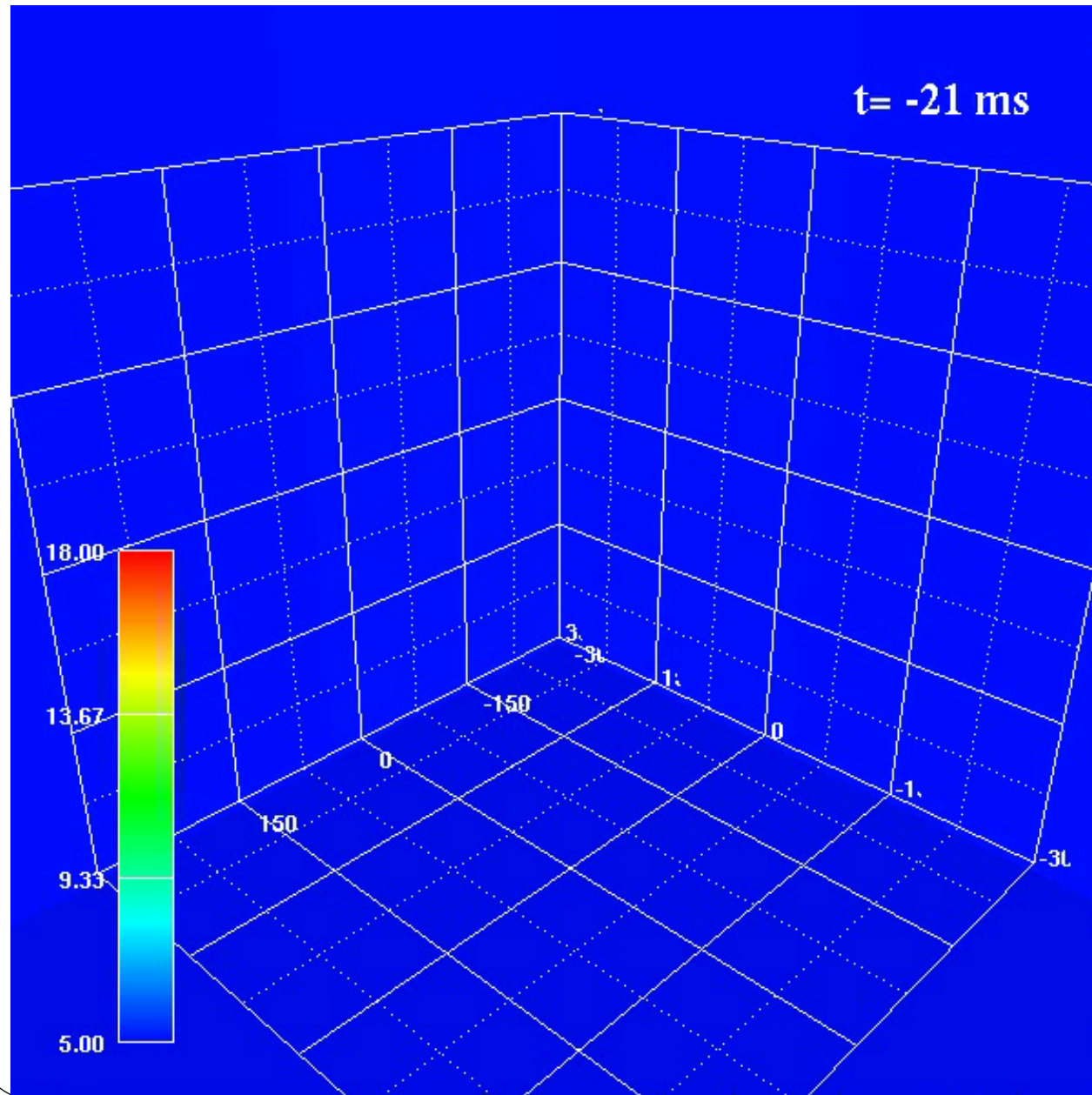
超新星の研究の歴史

- Colgate & White '66
シミュレーション開始。
- 佐藤勝彦 '75
ニュートリノ トラッピング
- Wilson '82
ニュートリノ加熱で爆発
- 2000年代のシミュレーション
では爆発させられないことが分
かった？

なぜ？



Unsuccessful supernovae simulation

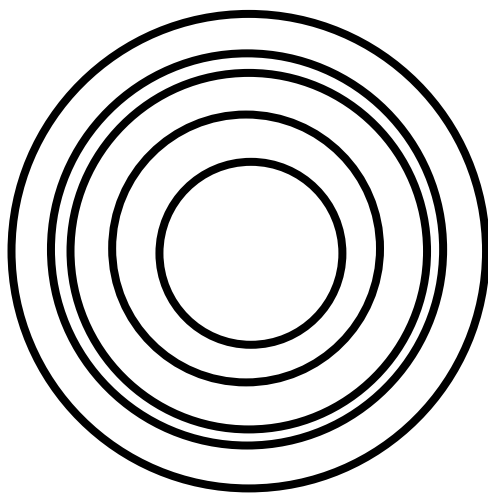


1D:

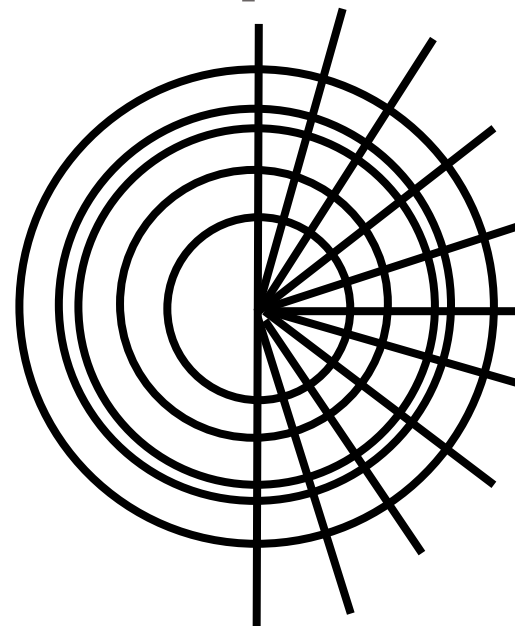
Entropyの可視化
衝撃波の波面の
伝搬のアニメー
ション

爆発に失敗

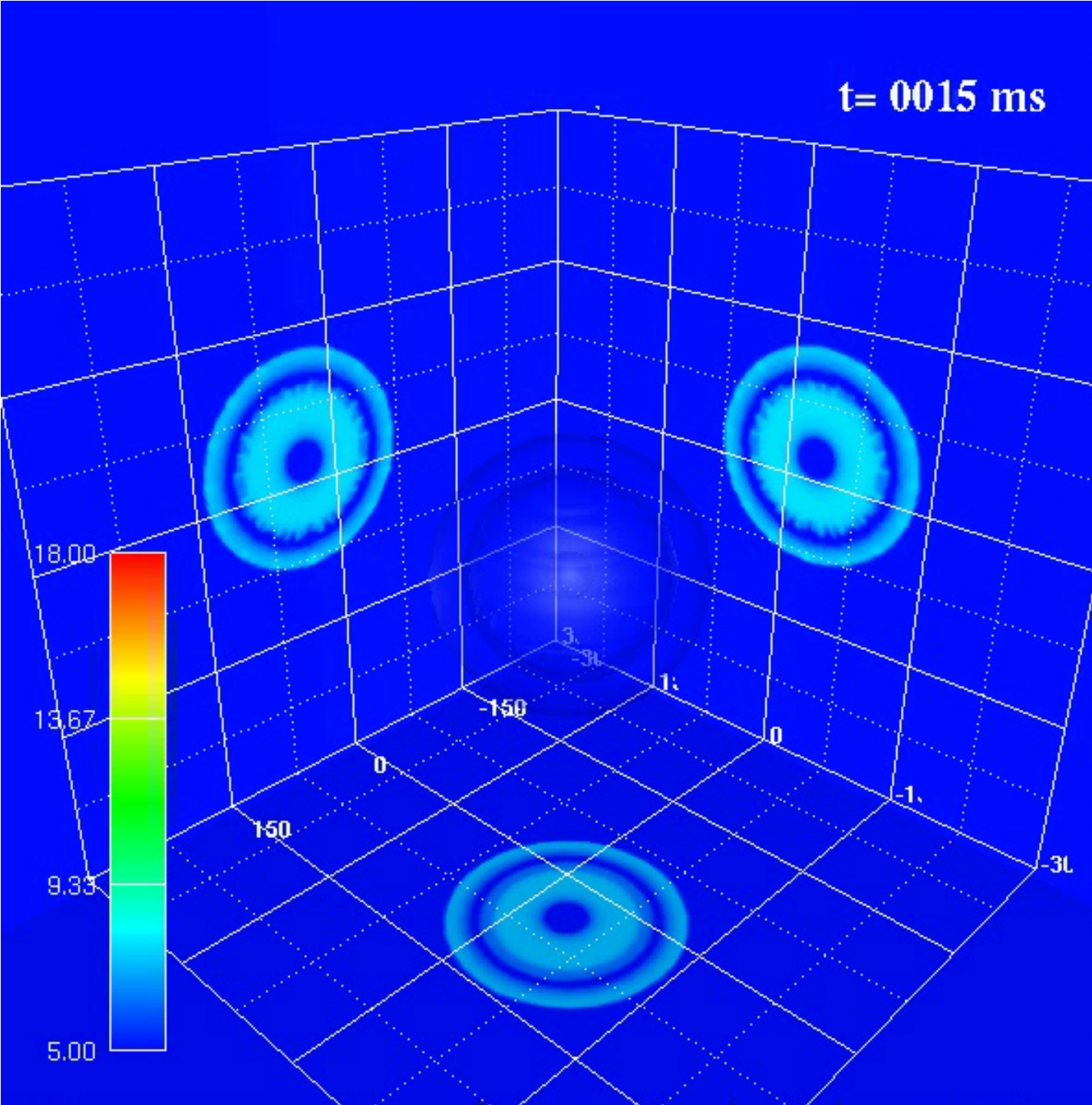
では 2 次元軸対称では？



1次元球対称



2次元軸対称



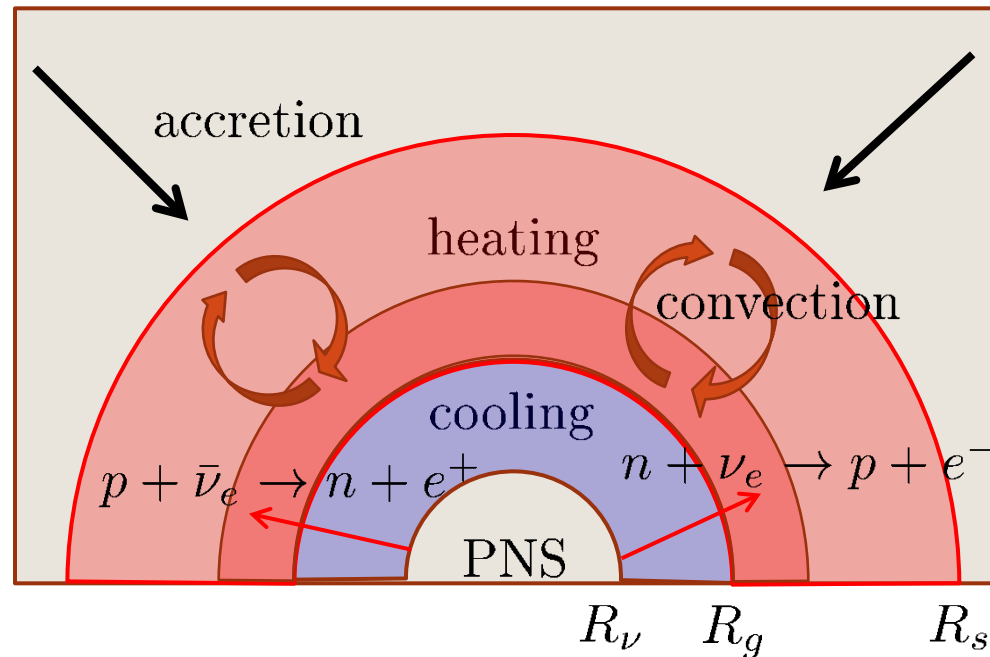
2D:

Entropyの可
視化

衝撃波の波面
の伝搬のアニ
メーション

軸対称の対流
大きなスケー
ルの振動

対流

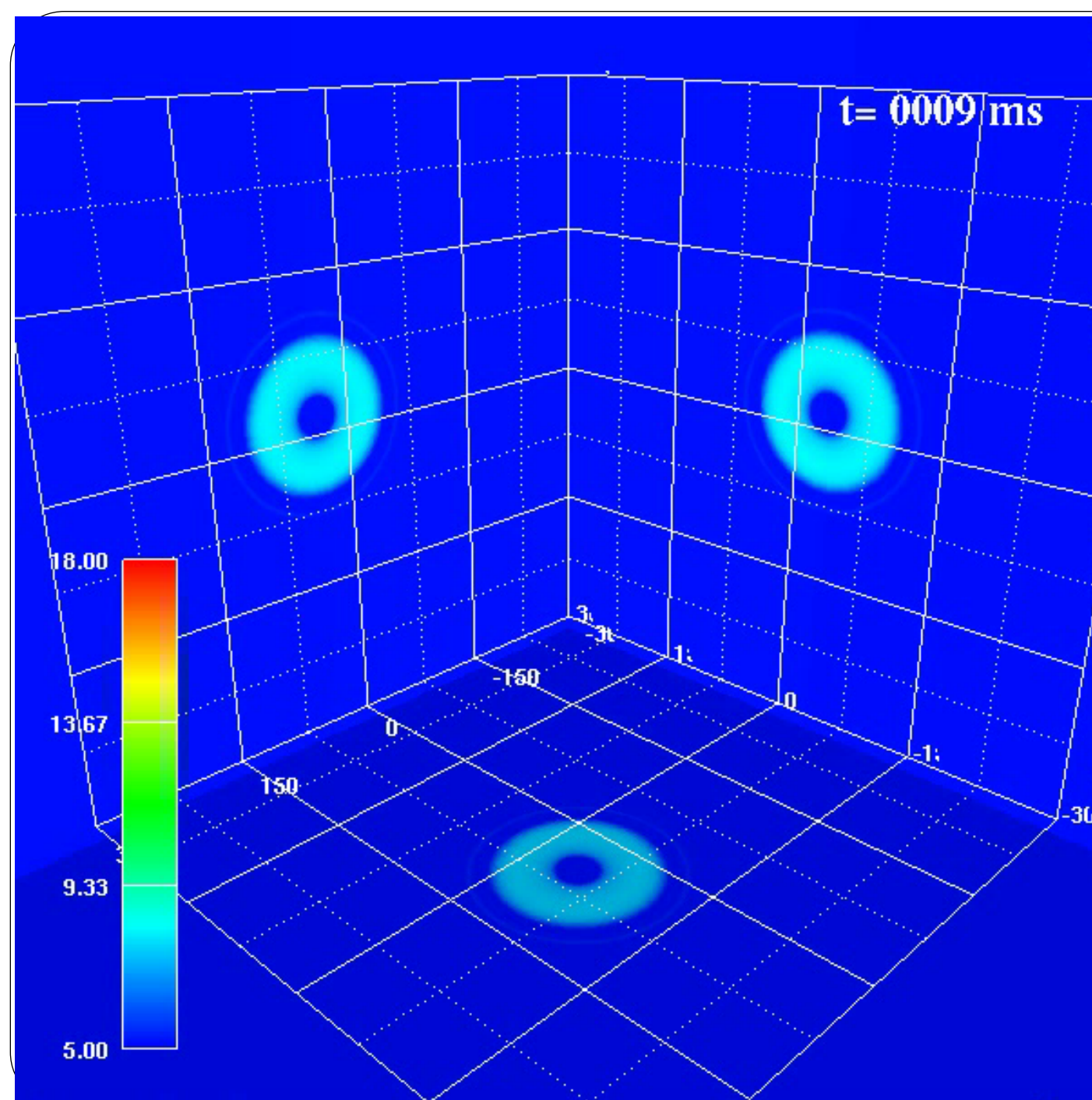


$$\mathcal{C} \propto 1/r^9 \quad p + e^- \rightarrow n + \nu_e$$

$$\mathcal{H} \propto 1/r^5 \quad n + \nu_e \rightarrow p + e^-$$

対流によってニュートリノ加熱の
効率が上がる。

ならば 3 次元では？

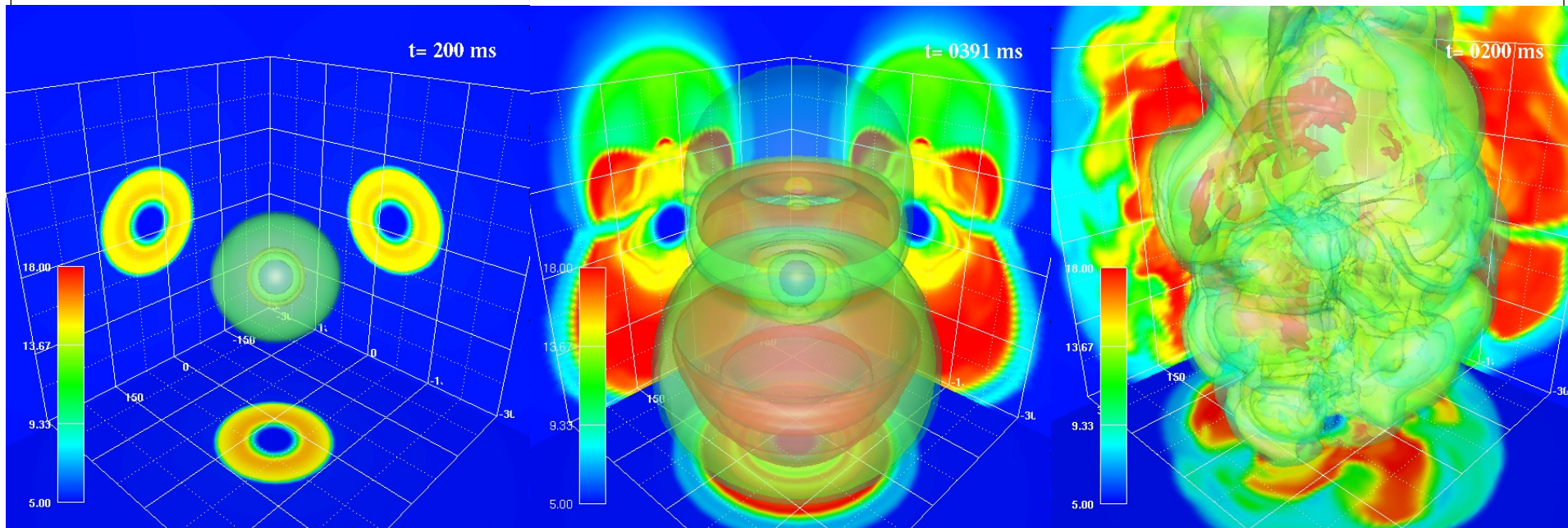


3D:
Entropyの可
視化

衝撃波の波面
の伝搬のアニ
メーション

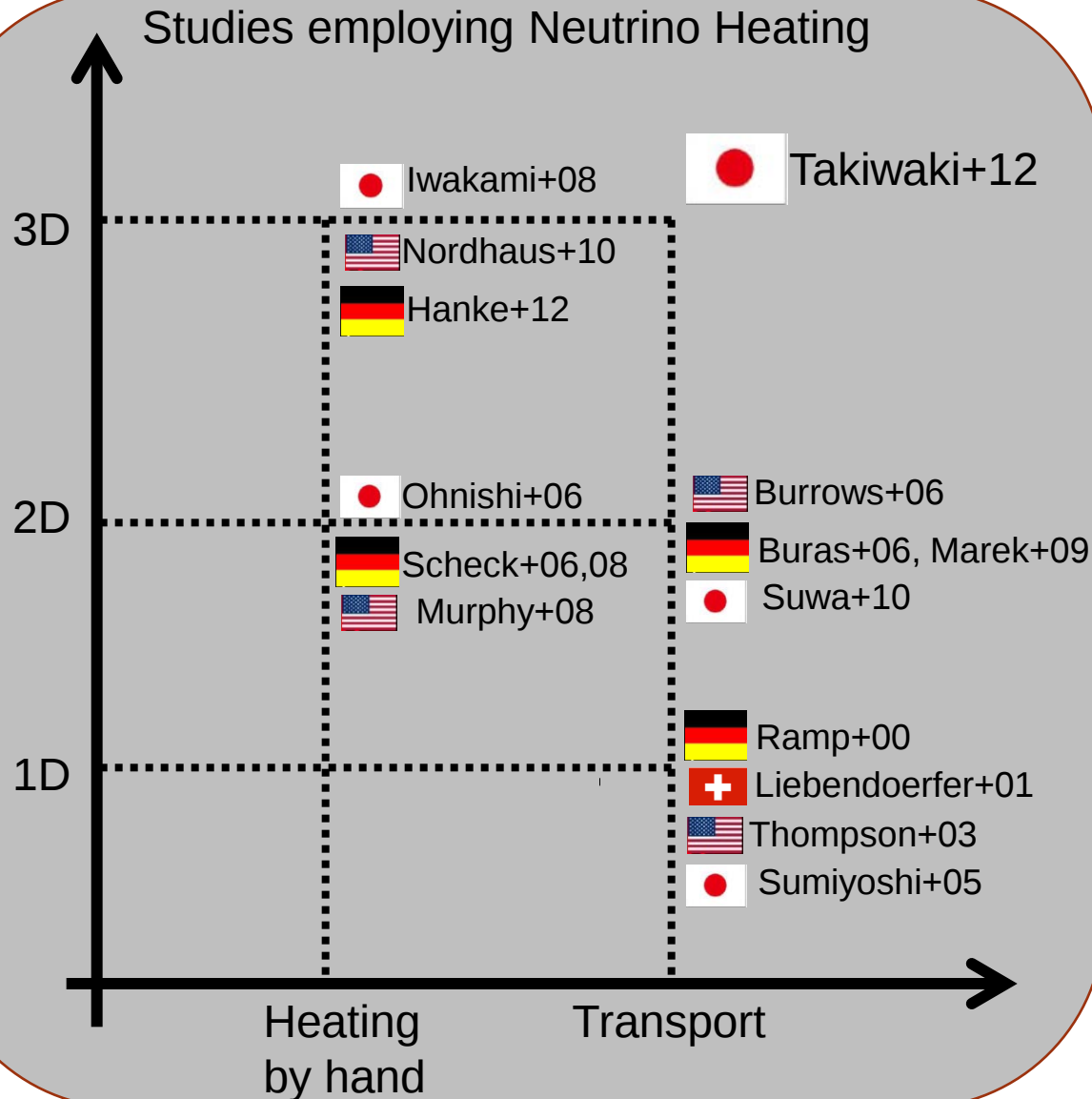
自然な対流

1D,2D,3Dの違い



対流の形状がだいぶ違う。
3D>2d>1Dの順に元気

計算の特徴



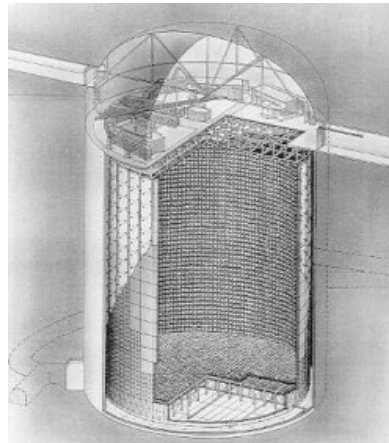
1D=>2D=>3Dと研究が進んできた。2Dで対流の効果が入ったのは大きいですが、やはり自然とは違う。

ニュートリノ輻射輸送をきちんと取扱いながら、3次元の自然な対流運動を考慮した初めての計算(ApJ in press, arXiv:1108.3989)。

超新星からのマルチメッセンジャー

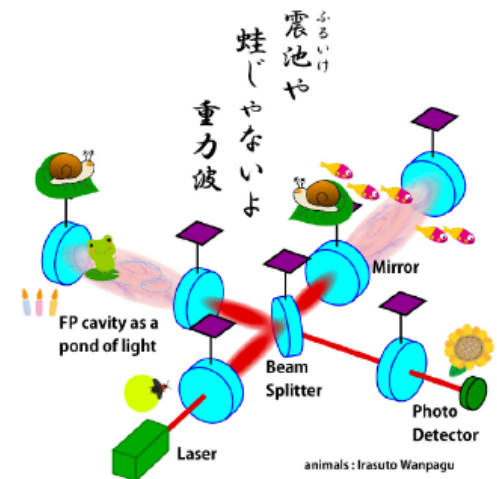
○ニュートリノ

小柴名誉教授は
1987Aのニュートリノ
をスーパーカミオカン
デで検出してノーベ
ル賞を受賞

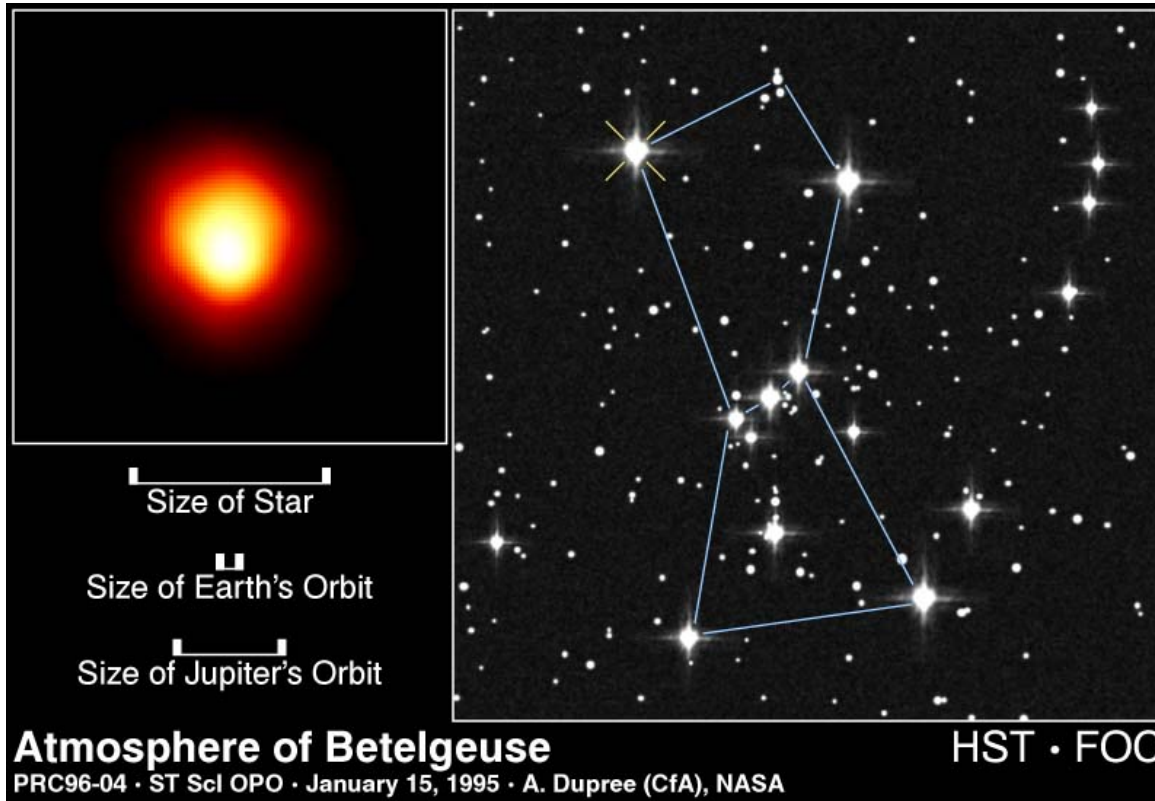


○重力波

KAGURA, 重力波干
渉計が時空の振動、
重力波検出を狙う。
ノーベル賞級の計画



ベテルギウスは爆発するか



左上。オリオン座の肩のところ。

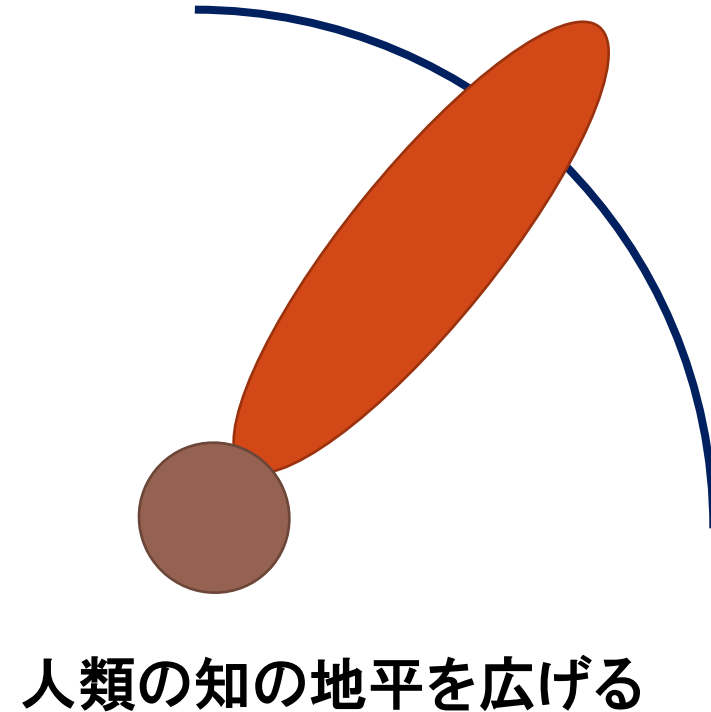
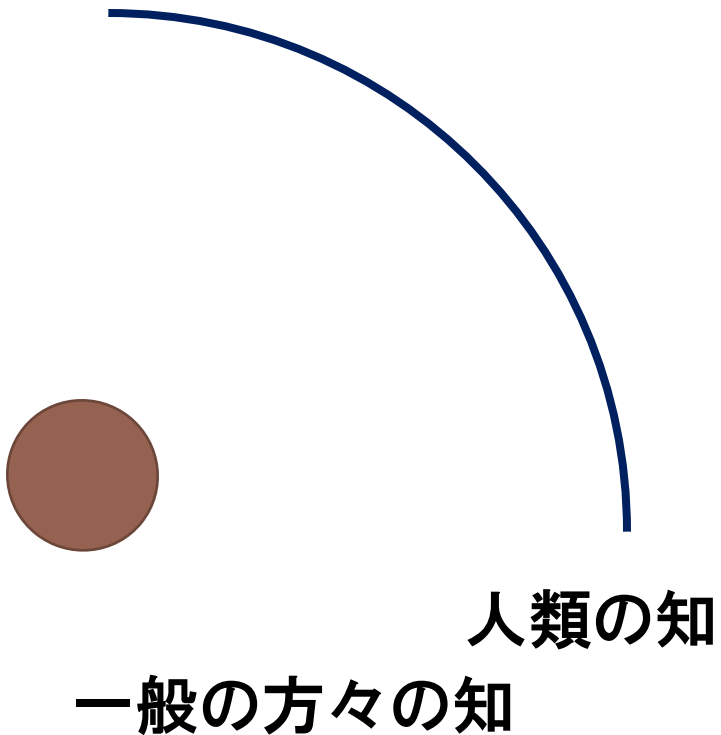
進化段階としてはいつ爆発してもおかしくない。

650光年とかなり近くで起こる。

地球では月程度の明るさに見え、昼でも観測可能。

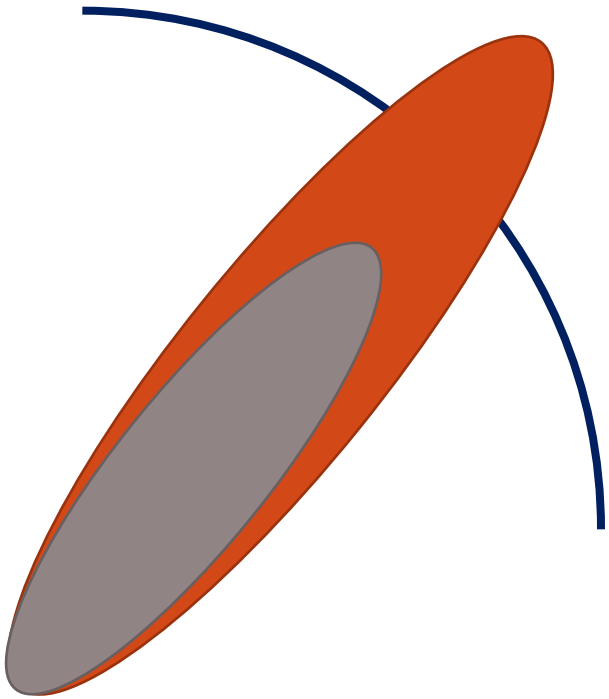
きちんとシミュレーションして自然を理解していきたい。

研究者という仕事

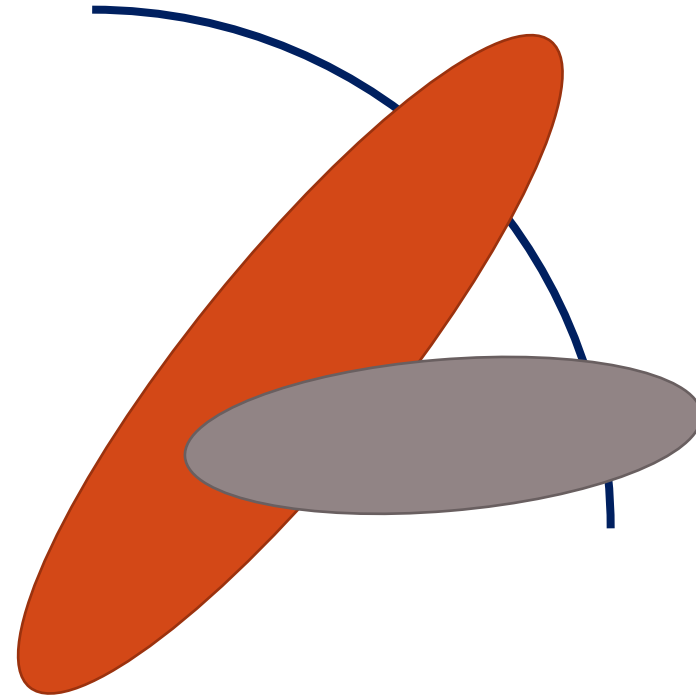


From
The Illustrated Guide to a Ph.D.
Matthew Might

研究者という仕事



2番手の方は広げていない
(実際には1番の方が間違っていないかチェックするのは重要な仕事だが。)



少し隣は未開拓だったりする。
1方向への努力だけでなく、視野を広くもつ。

研究者という仕事

**基本的に全ての論文はなんらかの点でNO. 1 or only 1。
世界1の仕事をするのは希望じゃなくて義務！**

アカデミックポストは少なく、実際にはさらにそのNo.1の中で激しい競争を勝ち抜く必要あり。

組織に頼らず自分の実力が必要という意味ではアスリートに似ている。

突出した特技を持ちながらも周辺分野に幅広い視野を持ち、重要なこと、面白いことに集中することが大事！

3 msec

