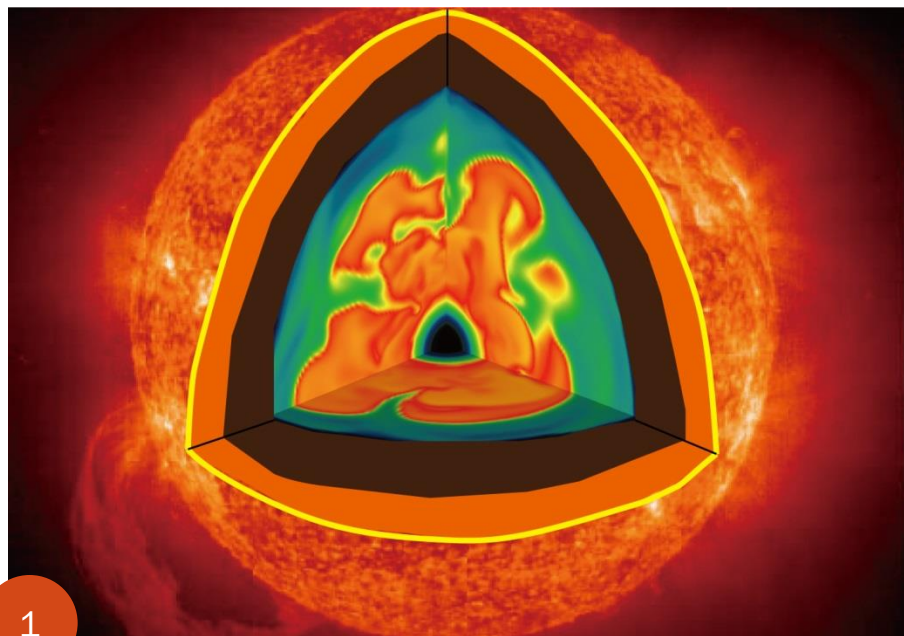


理論物理と計算物理から迫る 超新星爆発のメカニズム



1

滝脇知也
理化学研究所

二部構成

自己紹介

超新星爆発の研究

自己紹介(研究を始めるまで)

1991-1994(15) 豊島区立池袋中学校

山下先生との出会い

好きな定理:Pappus-Guldinusの定理

1994-1999(18) 私立開成学園高校

生意気な高校生活

3次方程式の解について

ダイオキシンの化学式



1999-2001(20) 東京大学教養学部理科一類

教養の授業(国際関係論、生命倫理)

2001-2003(22) 東京大学理学部物理学科

学生のレベル高い(初めての挫折?)

週3-4で自主ゼミ

5月祭で初めての本格的シミュレーション

自己紹介(研究を始めてから)

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(二度目の挫折?、両親の励まし)

2008-2009(28) 東大付属 ビッグバンセンター 特任研究員

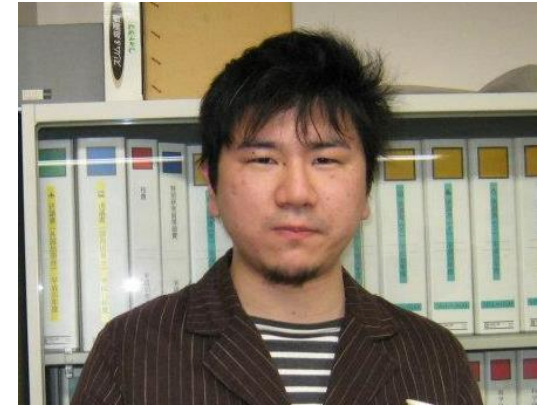
2009-2014(34) 国立天文台 CfCA

博士研究員=>=>特任助教

京コンピューターを使用して成果

2014- 現在(34) 理化学研究所 研究員

NHKなどから取材



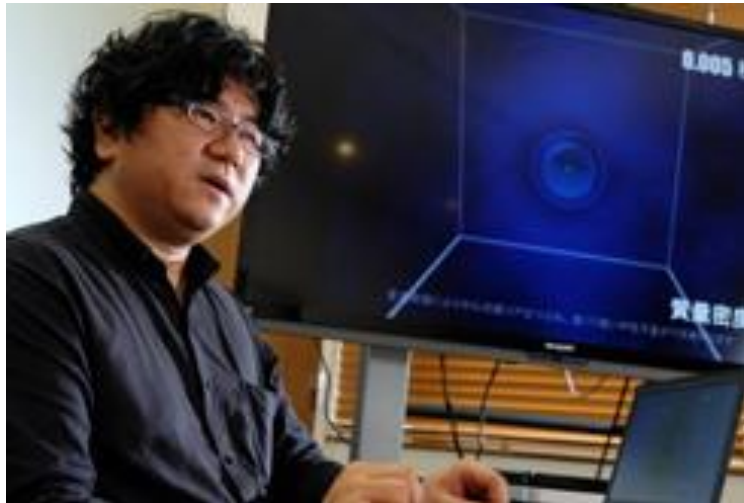
分野選択の悩み

- 時空の幾何学、一般相対性理論に惹かれる
⇒宇宙物理の研究室へ
- 一般相対論の理論的研究がやりたかったが、
佐藤先生には超新星爆発の計算機的研究を勧められる。
- 結局、超新星爆発の研究の道を歩む。
博士論文も取得し、京コンピュータでも成果をあげた。



佐藤勝彦：
インフレーション理論
マルチバース生成
ニュートリノトラッピング

紫綬褒章、日本物理学会会長、
日本学士院会員、文化功労者



3つの物理学

- 理論物理学
- 計算物理学
- 実験（観測）物理学

超新星を例にそれぞれ説明する。
今後進む道の選択の助けに。

超新星爆発の研究

1. 超新星爆発とは何か
2. 理論的アプローチ
3. シミュレーション
4. 理論的アプローチ
5. 観測の紹介
6. まとめ

超新星爆発の研究

1. 超新星爆発とは何か
2. 理論的アプローチ
3. シミュレーション
4. 理論的アプローチ
5. 観測の紹介
6. まとめ

超新星：宇宙で最も明るい天体



1987A 太陽の 10^9 倍の明るさ
(星が 10^9 個集まってる)天の川銀河と等しい
(1987aの場合 10^{10} 倍遠いので太陽より暗い)

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。大ささ歳星
「木星」の如し。



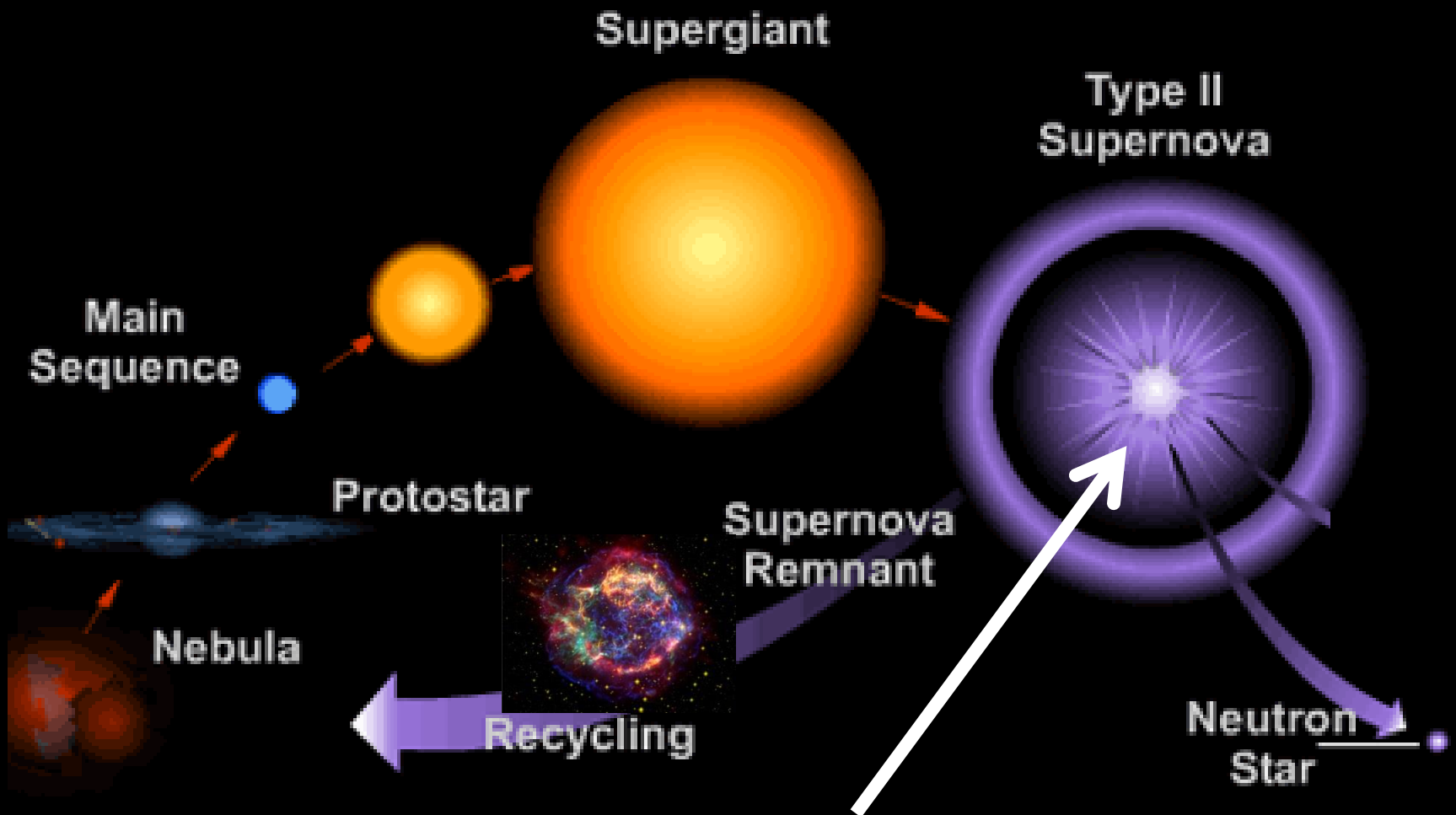
藤原定家



客星は彗星ではない新しい星とのこと。

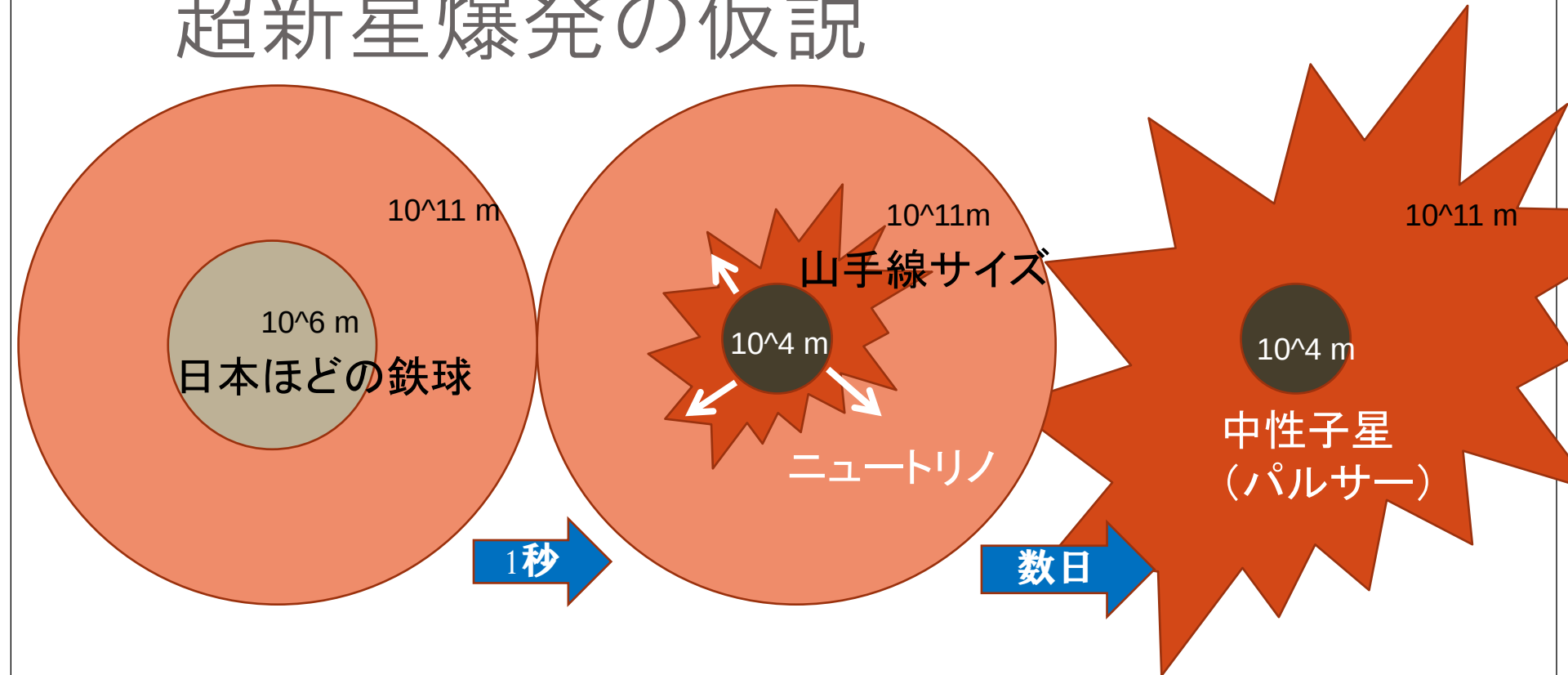
日本や中国では突発的な天体現象を占いに用いており、大きな関心事だった。

星の一生と最期の大爆発



実は、ここでどうして爆発するのか
はっきりわかってない！

超新星爆発の仮説



超新星は日本ほどの鉄玉が1秒で10kmに収縮して、
その収縮した分のエネルギーで外側を爆発させる現象！
不思議なことにニュートリノが爆発を後押しする！

基本方程式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{v} = 0$$

$$\frac{\partial \rho Y_e}{\partial t} + \nabla \cdot \rho Y_e \mathbf{v} = \left(\frac{\delta \rho Y_e}{\delta t} \right)_v$$

$$\nabla \equiv \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{pmatrix}$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \nabla \cdot (e + p) \mathbf{v} = \rho \mathbf{v} \cdot \nabla \Phi + \left(\frac{\delta e}{\delta t} \right)_v \quad e = \frac{1}{2} \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{v} + e_{\text{int}}$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v} + p \mathbf{I}) = \rho \nabla \Phi + \left(\frac{\delta \rho \mathbf{v}}{\delta t} \right)_v$$

+ニュートリノの運動の方程式(難しい,今回は物質の運動に注目するので略)

上から質量の輸送、電子(陽子)数の輸送、全エネルギーの輸送、運動量の輸送の式。(変数の意味は口頭で)

圧力は原子核物理の理論から計算される。

超新星爆発の研究

1. 超新星爆発とは何か
2. 理論的アプローチ
3. シミュレーション
4. 理論的アプローチ
5. 観測の紹介
6. まとめ

理論的アプローチ

- 本質的なタームだけとりだして、なるべく解析的に解く。

ニュートリノを簡易化

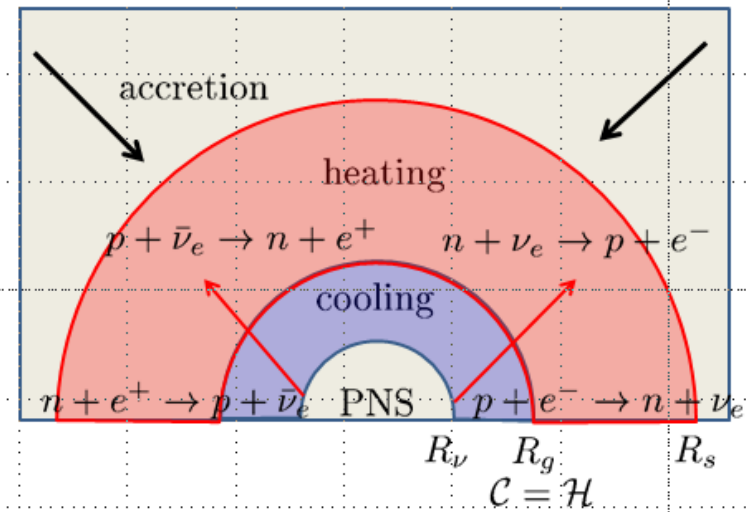
e.g. Burrows & Goshy 1993

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{v} = 0$$

~~$$\frac{\partial \rho Y_e}{\partial t} + \nabla \cdot \rho Y_e \mathbf{v} = \left(\frac{\delta \rho Y_e}{\delta t} \right)_v$$~~

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \nabla \cdot (e + p) \mathbf{v} = \rho \mathbf{v} \cdot \nabla \Phi + \left(\frac{\delta e}{\delta t} \right)_v$$

~~$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v} + p \mathbf{I}) = \rho \nabla \Phi + \left(\frac{\delta \rho \mathbf{v}}{\delta t} \right)_v$$~~



$$T \propto r^{-1}$$

ニュートリノの加熱・冷却だけ考慮する。

電子ニュートリノと反電子ニュートリノのエネルギールミノシティの差を無視する。

加熱

冷却

$$\left(\frac{\delta e}{\delta t} \right)_v / \rho = 4.8 \times 10^{32} \left[1 - \sqrt{1 - (r_\nu/r)^2} \right] \frac{L_{\nu_e} (\text{foe s}^{-1})}{2\pi r_\nu^2} T_\nu^2 - 2.0 \times 10^{18} T^6 \quad (\text{ergs s}^{-1} \text{ g}^{-1}),$$

球対称・定常近似

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} r^2 \rho v_r = 0$$

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} r^2 (e + p) v_r = \rho v_r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{GM}{r} \right) + \left(\frac{\delta e}{\delta t} \right)_v$$

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} r^2 (\rho v_r^2 + p) = \rho \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{GM}{r} \right)$$

r : 中心からの座標。星はまずは丸いだろう！

定常状態を仮定して良いのかは後程明らかに。

$\Phi = \frac{GM}{r}$ 重力ポテンシャルは中心質量(M)の関数になる。

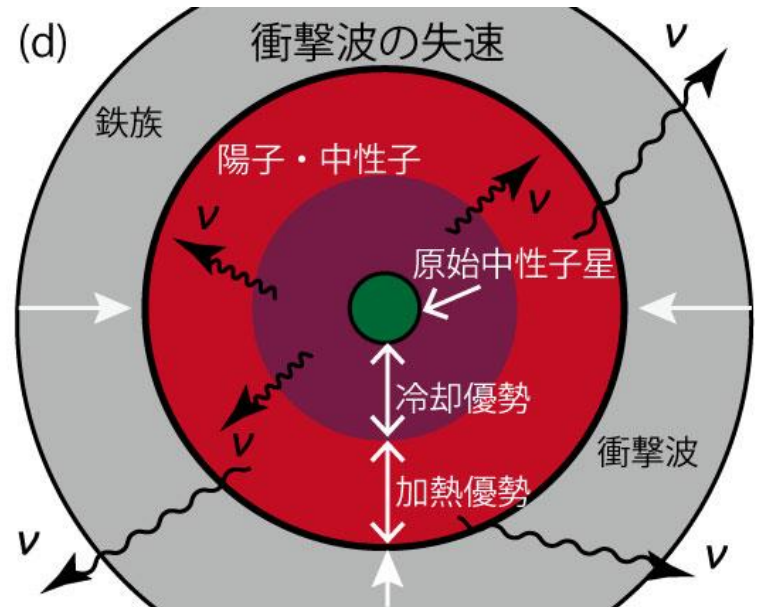
式の整理

$$4\pi r^2 \rho v_r = \dot{M}$$
$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} r^2 (e + p) v_r + \rho v_r \frac{GM}{r^2} = \left(\frac{\delta e}{\delta t} \right)_v$$
$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} r^2 (\rho v_r^2 + p) + \rho \frac{GM}{r^2} = 0$$

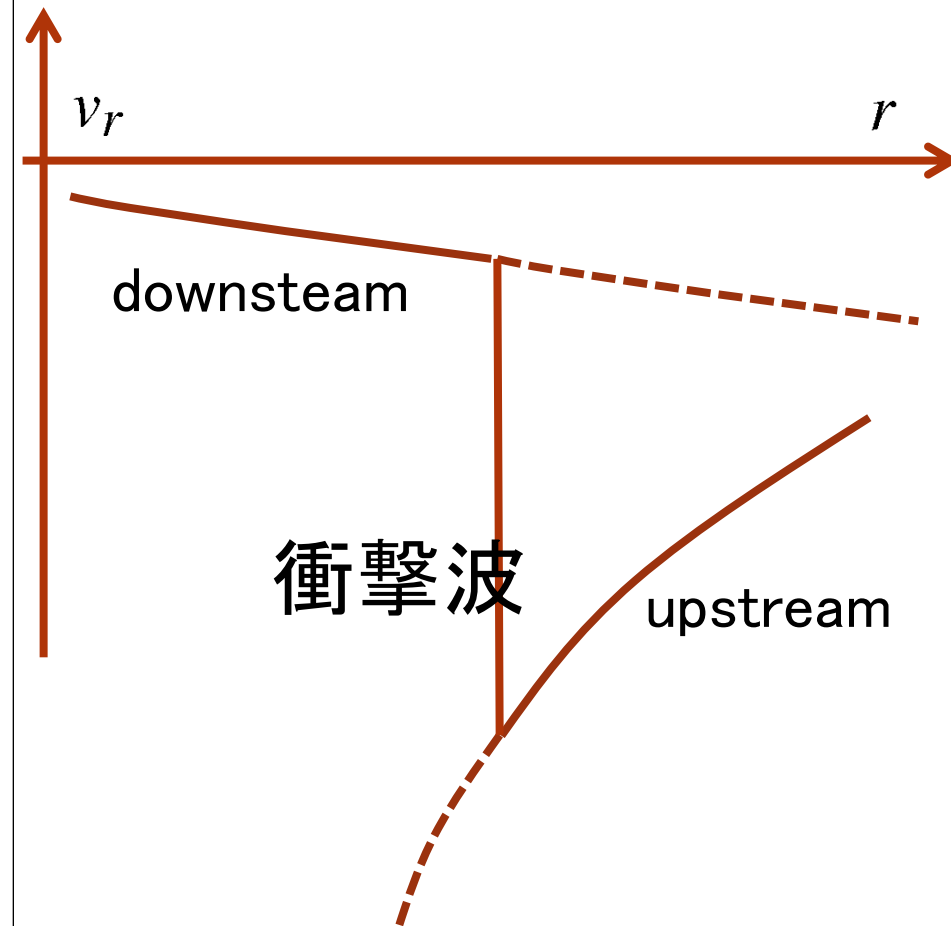
$M, \dot{M}, L_\nu$ パラメータ

$\rho(r), v_r(r), T(r)$ 変数3つ、式3本

$e(\rho, T), p(\rho, T)$ に注意



衝撃波解の構成



外側は超音速解(cold)

内側は亜音速解(hot)

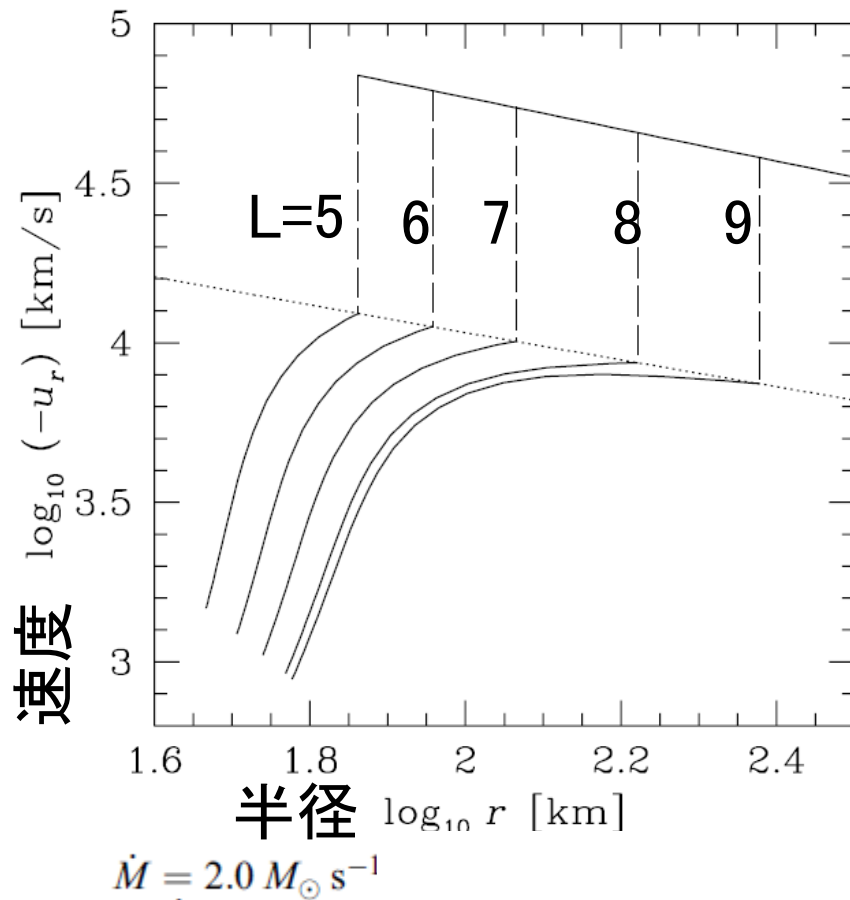
それを衝撃波で繋ぐ。

(衝撃波が止まって見える系で) 衝撃波の左右ではフラックスが釣り合う(Rankine-Hugoniot)。

$$\left(\frac{\rho v_r^2}{2} + (e_{\text{int}} + p) \right)_{\text{down}} = \left(\frac{\rho v_r^2}{2} \right)_{\text{up}}$$

$$(\rho v_r^2 + p)_{\text{down}} = (\rho v_r^2)_{\text{up}}$$

実際の解

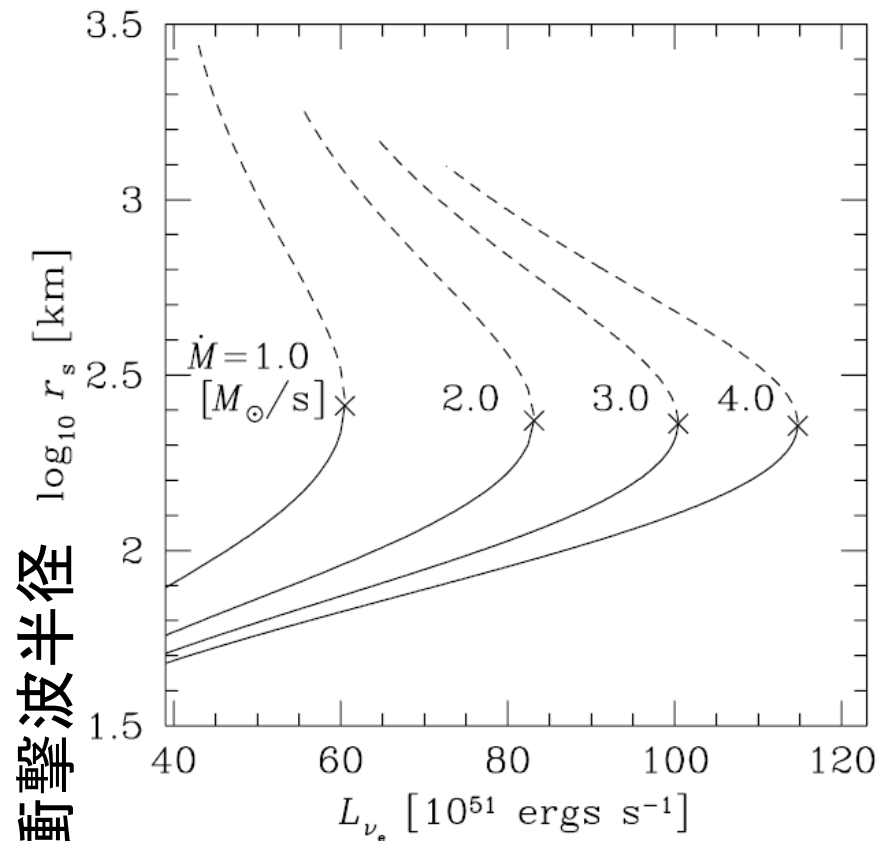


Yamasaki+2005

質量降着率($\dot{M}$)を固定して
ニュートリノ光度 L_{ν} を変化。

L_{ν} が大きくなると
衝撃波半径 r_s が広がる。

クリティカル ルミノシティ



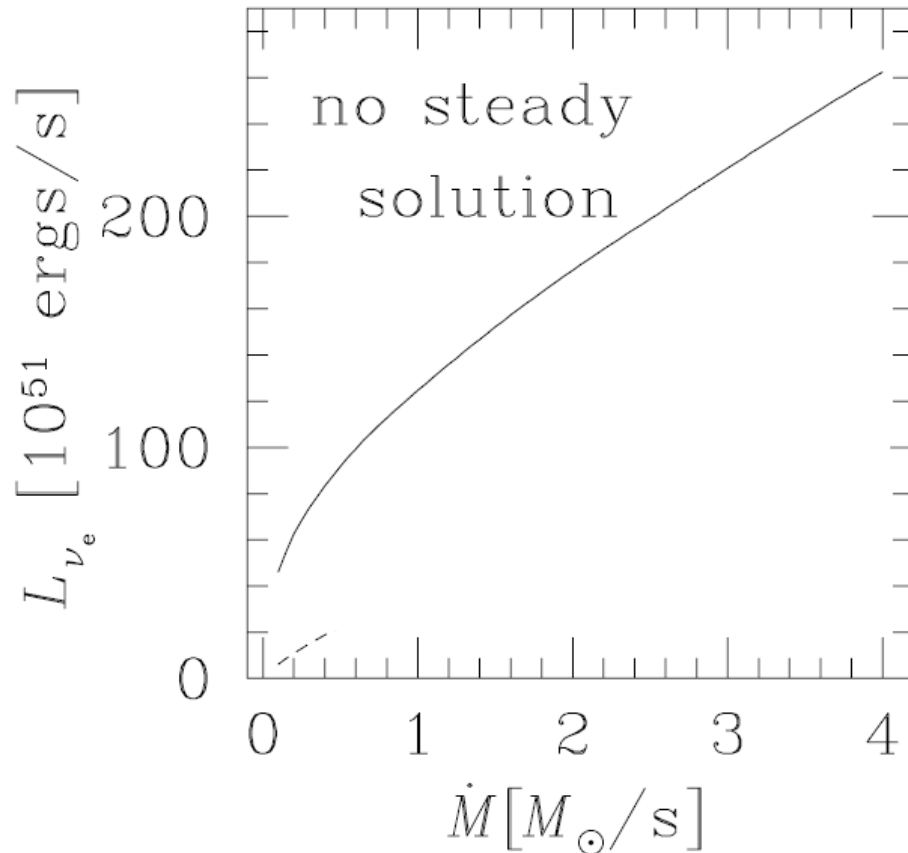
Yamasaki+2005

$\dot{M}$ L_{ν} を決めると r_s が求まる。

$\dot{M}$ を固定して L_{ν} を大きくすると r_s がないパラメータが存在。

その限界の L_{ν} を
クリティカルルミノシティと呼ぶ。

クリティカルカーブ



Yamasaki+2006

$\dot{M}$ に対してcritical L が決まる。

$L > L_{\text{critical}}$ なら爆発するだろう。

解析解から、任意のパラメーターの解がわかる。
理論的なアプローチでは理屈が分かる！

理屈：重要なパラメーターとパラメータに対する解の挙動。

超新星爆発の研究

1. 超新星爆発とは何か
2. 理論的アプローチ
3. シミュレーション
4. 理論的アプローチ
5. 観測の紹介
6. まとめ

シミュレーションによるアプローチ

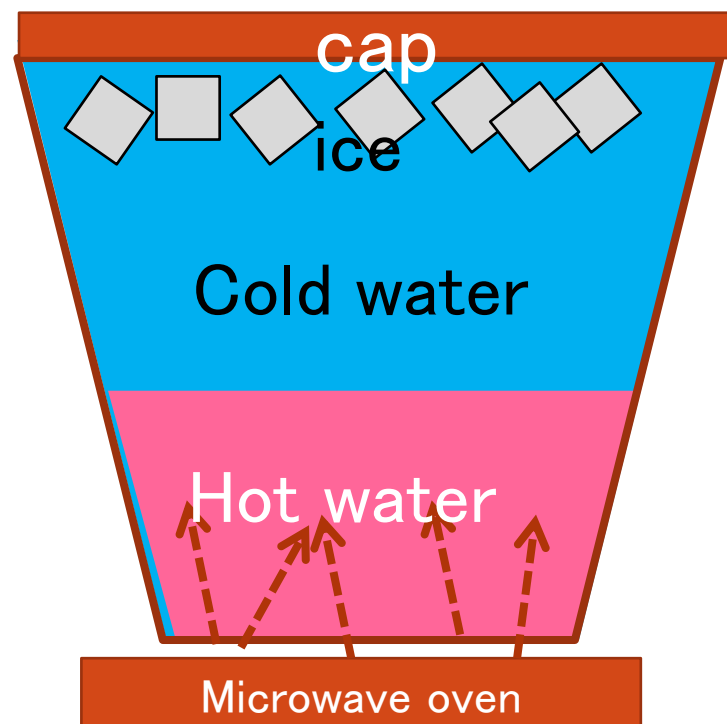
- どうすれば超新星が爆発するのは分かったが、実際にどのくらい強くニュートリノがでるのは分からない。
- 計算機によるシミュレーションに頼る必要がある。

Typical 1D simulation

超新星の大問題

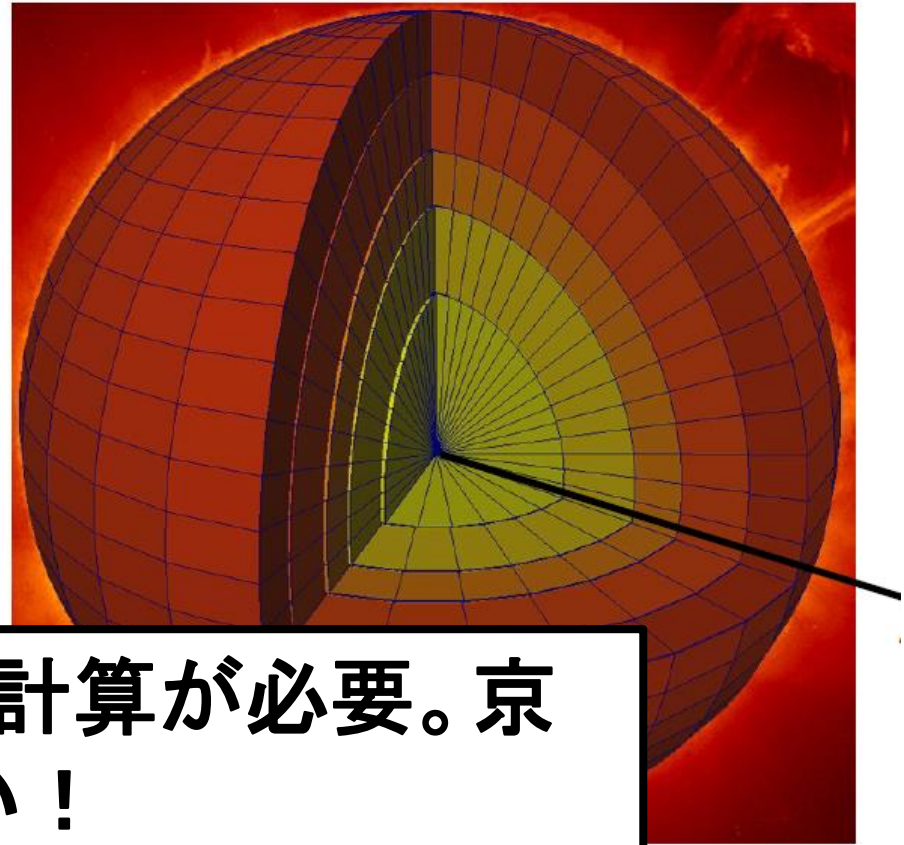
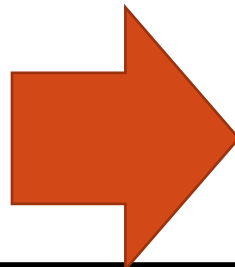
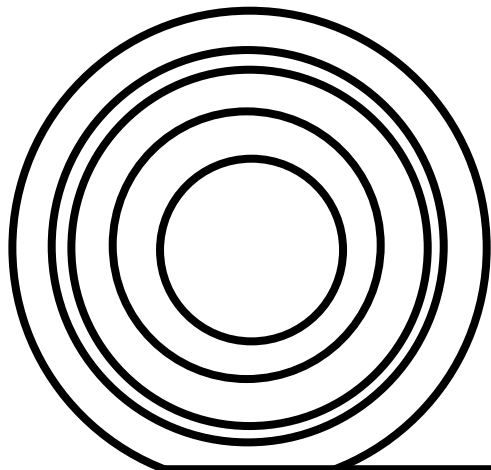
自然には爆発している超新星が
シミュレーションでは爆発しない！
1980年代からの大問題。
2000年から2005年の研究で、
(1次元の仮定では)超新星が
爆発しないことが明らかに。

(Liebendoerfer+2001, Rampp+2002,
Thompson+2003 and Sumiyoshi+2005)



From 1D to 3D

なぜ京が必要だったか？

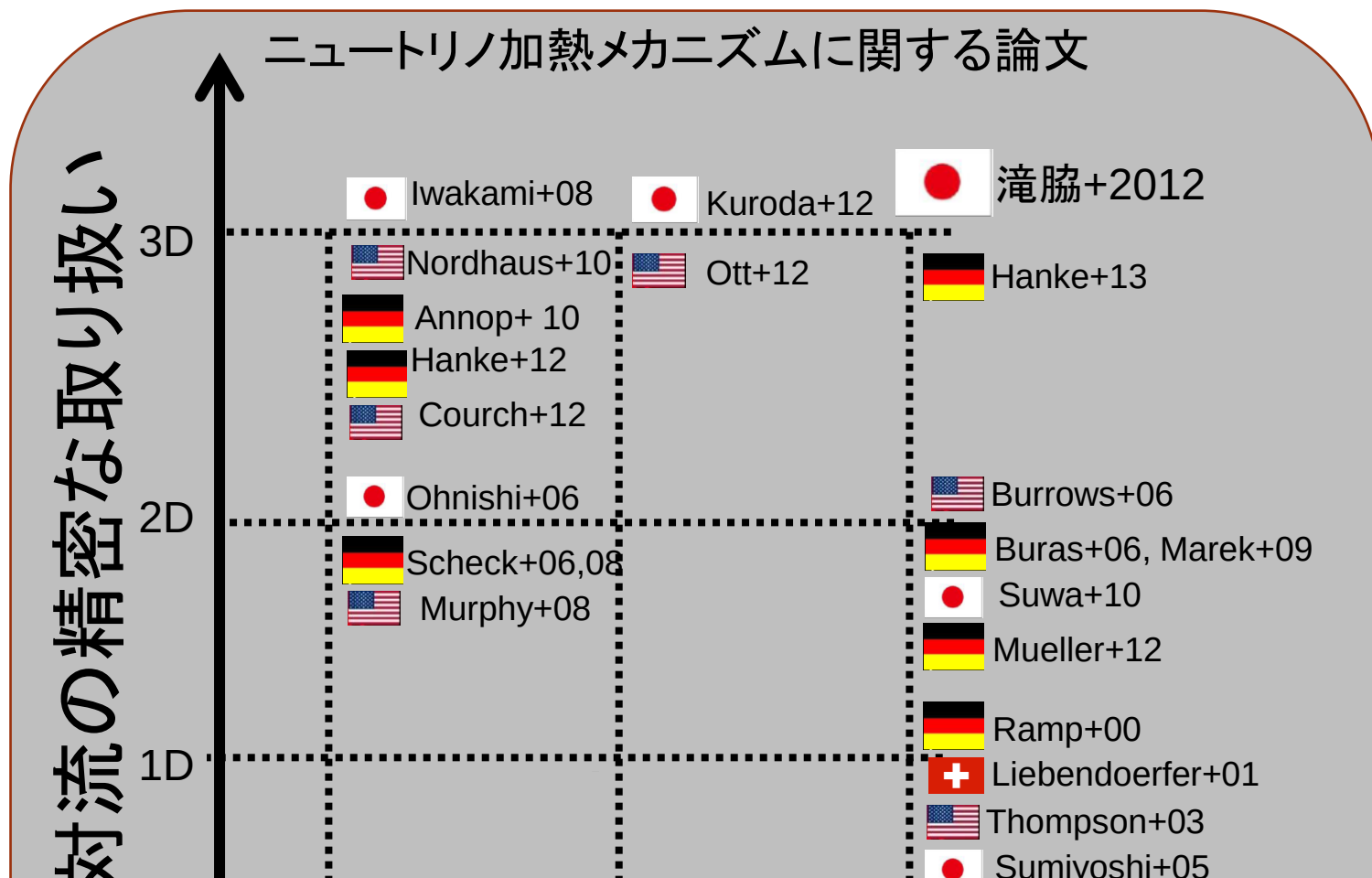


**100万倍以上の計算が必要。京
でなければ難しい！**

パソコン
丸い計算格子
現実と違う！

スパコン
複雑な計算格子
現実と同じ条件を再現！

なぜ京でやる必要がある？



準備状況と、問題の重要性から、H24年の
京の重点配分枠の優先課題、7課題に選ばれて計算した！
京の5%を60日 (/model) 借り切って計算している。

一般相対論的な場合

Kuroda+ 2015

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

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

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

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

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

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

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

2015年、やっと一般相対性理論に基づいた計算が可能に。

ブラックホールができる場合なども議論できる。

修士での夢に帰ってくる？

シミュレーションによるアプローチ

- 計算機によるシミュレーションでは、3次元シミュレーションなら爆発することは分かったが、なぜだかわからない。
- 重要な要素は何だったのか？ 見た目が一番違うのは対流の有無。

超新星爆発の研究

1. 超新星爆発とは何か
2. 理論的アプローチ
3. シミュレーション
4. 理論的アプローチ
5. 観測の紹介
6. まとめ

対流の効果を取り入れるために(準備)

Steady state

$$\nabla \cdot \rho \mathbf{v} = 0$$

$$\nabla \cdot (e + p) \mathbf{v} = \rho \mathbf{v} \cdot \nabla \Phi + \left(\frac{\delta e}{\delta t} \right)_v$$

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v} + p \mathbf{I}) = \rho \nabla \Phi$$

Incompressible $\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$

$$\mathbf{v} \cdot \nabla \rho = 0 \quad (1)$$

$$\mathbf{v} \cdot \nabla (e + p) = \rho \mathbf{v} \cdot \nabla \Phi + \left(\frac{\delta e}{\delta t} \right)_v \quad (2) \quad e = \frac{\rho v^2}{2} + e_{\text{int}}$$

$$\rho \mathbf{v} \cdot \nabla (\mathbf{v}) + \nabla p = \rho \nabla \Phi \quad (3)$$

(3)とvを内積をとって(2)から引き、
そのあと熱力学の関係式を使用 $T ds = de_{\text{int}}$

$$T \mathbf{v} \cdot \nabla s = \left(\frac{\delta e}{\delta t} \right)_v$$

対流の効果を取り入れる

$$\mathbf{v} \cdot \nabla \rho = 0$$

$$\mathbf{v} \cdot \nabla s = \left(\frac{\delta e}{\delta t} \right)_v / T$$

$$\rho \mathbf{v} \cdot \nabla (\mathbf{v}) + \nabla p = \rho \nabla \Phi$$

$A = \langle A \rangle + A'$ 平均量 (= 球対称成分) とそれからのずれ (= 対流成分)

$\langle A' \rangle = 0$ ずれに平均操作をするとゼロ

$$\nabla \cdot (\langle \rho \rangle \langle \mathbf{v} \rangle + \langle \underline{\rho' \mathbf{v}'} \rangle) = 0 \quad (4)$$

$$\nabla \cdot (\langle s \rangle \langle \mathbf{v} \rangle + \langle \underline{s' \mathbf{v}'} \rangle) = \left\langle \left(\frac{\delta e}{\delta t} \right)_v / T \right\rangle \quad (5)$$

$$\langle \rho \mathbf{v} \rangle \cdot \nabla \langle \mathbf{v} \rangle + \nabla \cdot \langle \underline{\rho \mathbf{v}' \mathbf{v}'} \rangle + \nabla \langle p \rangle = \langle \rho \rangle \nabla \Phi \quad (6)$$

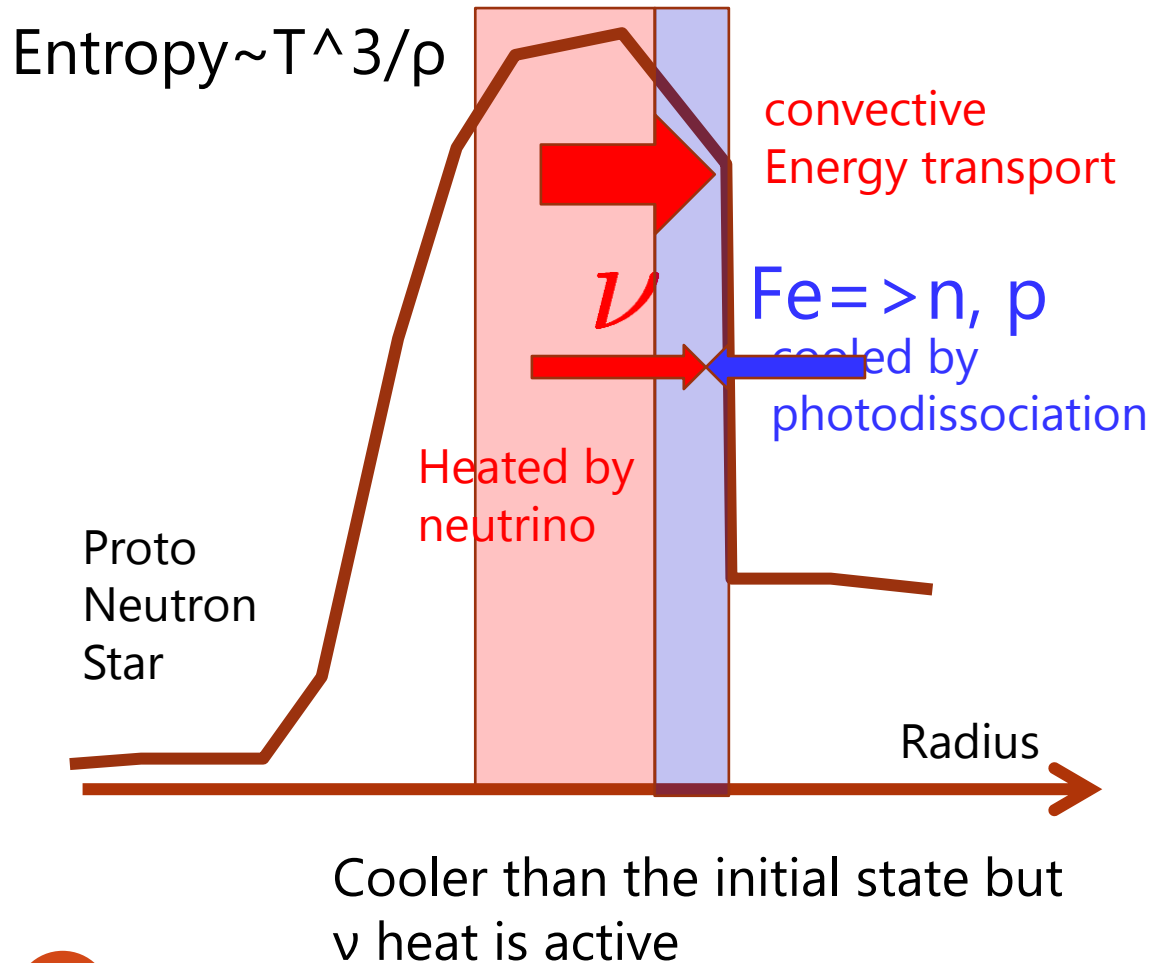
対流により、平均流に対して付加的な輸送が生じている！

Convective Energy Flux

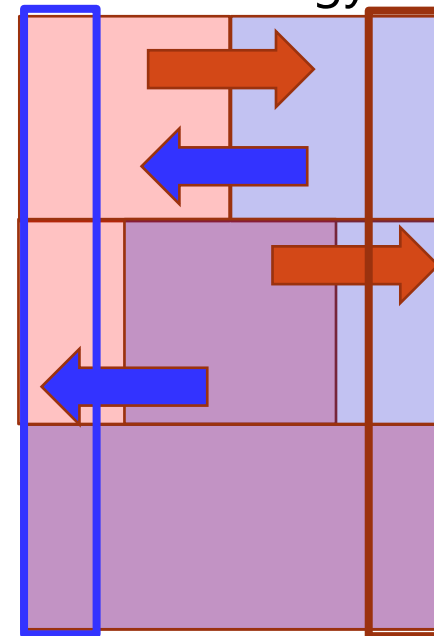
$$\nabla \cdot (\langle s \rangle \langle \mathbf{v} \rangle + \langle s' \mathbf{v}' \rangle) = \left\langle \left(\frac{\delta e}{\delta t} \right)_\nu / T \right\rangle$$

Negative entropy gradient leads Rayleigh-Taylor instability

(Cold heavy matter is put over Hot light matter)



Rayleigh-Taylor convection transfer energy outward.



Hotter than the initial state

対流の方程式

平均流ではなく、対流の発達に注目

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} + \frac{1}{\rho} \nabla p = \nabla \Phi \quad (7) \quad \text{から出発}$$

平均流とずれに分解

$$\frac{\partial \langle \mathbf{v} \rangle + \mathbf{v}'}{\partial t} + (\langle \mathbf{v} \rangle + \mathbf{v}') \cdot \nabla (\langle \mathbf{v} \rangle + \mathbf{v}') + \frac{1}{\rho} \nabla (\langle p \rangle + p') = \nabla \Phi \quad (8)$$

これを平均する((6)と似た式になる)

$$\frac{\partial \langle \mathbf{v} \rangle}{\partial t} + \langle \mathbf{v} \rangle \cdot \nabla \langle \mathbf{v} \rangle + \nabla \cdot \langle \mathbf{v}' \mathbf{v}' \rangle + \frac{1}{\rho} \nabla \langle p \rangle = \nabla \Phi \quad (9)$$

元から平均を引く(つまり(8)-(9))

$$\frac{\partial \mathbf{v}'}{\partial t} + \mathbf{v}' \cdot \nabla \mathbf{v}' + \langle \mathbf{v} \rangle \cdot \nabla \mathbf{v}' + \mathbf{v}' \cdot \nabla \langle \mathbf{v} \rangle - \nabla \cdot \langle \mathbf{v}' \mathbf{v}' \rangle + \frac{1}{\rho} \nabla p' = 0$$

対流成分の時間発展方程式が求まった！

対流の方程式

$$\langle \rho \mathbf{R} \rangle = \langle \rho v' v' \rangle$$

$$\begin{aligned} \partial \langle \rho \mathbf{R} \rangle / \partial t + \mathbf{v} \cdot \nabla \langle \rho \mathbf{R} \rangle + \langle \rho \mathbf{R} \rangle \otimes \nabla \cdot \mathbf{v} = & + \langle \rho' v' \rangle \otimes \mathbf{g} \\ & + [\langle \rho' v' \rangle \otimes \mathbf{g}]^T \quad \text{Buoyant production} \\ & - \langle \rho \mathbf{R} \rangle \cdot \nabla \mathbf{v} - [\langle \rho \mathbf{R} \rangle \cdot \nabla \mathbf{v}]^T \quad \text{Shear production} \\ & - \langle \nabla \otimes F_P + [\nabla \otimes F_P]^T \rangle \quad \text{Pressure flux} \\ & + \langle P' \nabla v' + [P' \nabla v']^T \rangle \quad \text{Pressure strain} \\ & - \nabla \cdot \langle \rho v' \otimes \mathbf{R} \rangle \quad \text{Turbulent transport} \\ & - \rho_0 \epsilon \quad \text{Dissipation,} \end{aligned}$$

$$\langle F_s \rangle = \langle s' v' \rangle$$

$$\begin{aligned} \partial \langle F_s \rangle / \partial t + \mathbf{v} \cdot \nabla \langle F_s \rangle \\ + \langle F_s \rangle \nabla \cdot \mathbf{v} = & + \rho_0 \eta \langle Q \rangle \mathbf{g} \quad \text{Buoyant production} \\ & - \langle F_s \rangle \cdot \nabla \mathbf{v} - \langle \rho \mathbf{R} \cdot \rangle \nabla s_0 \quad \text{Gradient production} \\ & - \langle s' \nabla P' \rangle \quad \text{Pressure covariance} \\ & - \nabla \cdot \langle v' \otimes F_s \rangle \quad \text{Turbulent transport} \\ & + \langle \rho v' \dot{q} / T \rangle \quad \text{Heat production,} \end{aligned}$$

Murphy+ 2011

これらの項の超新星爆発での重要性や役割はまだ完全に理解されていない。

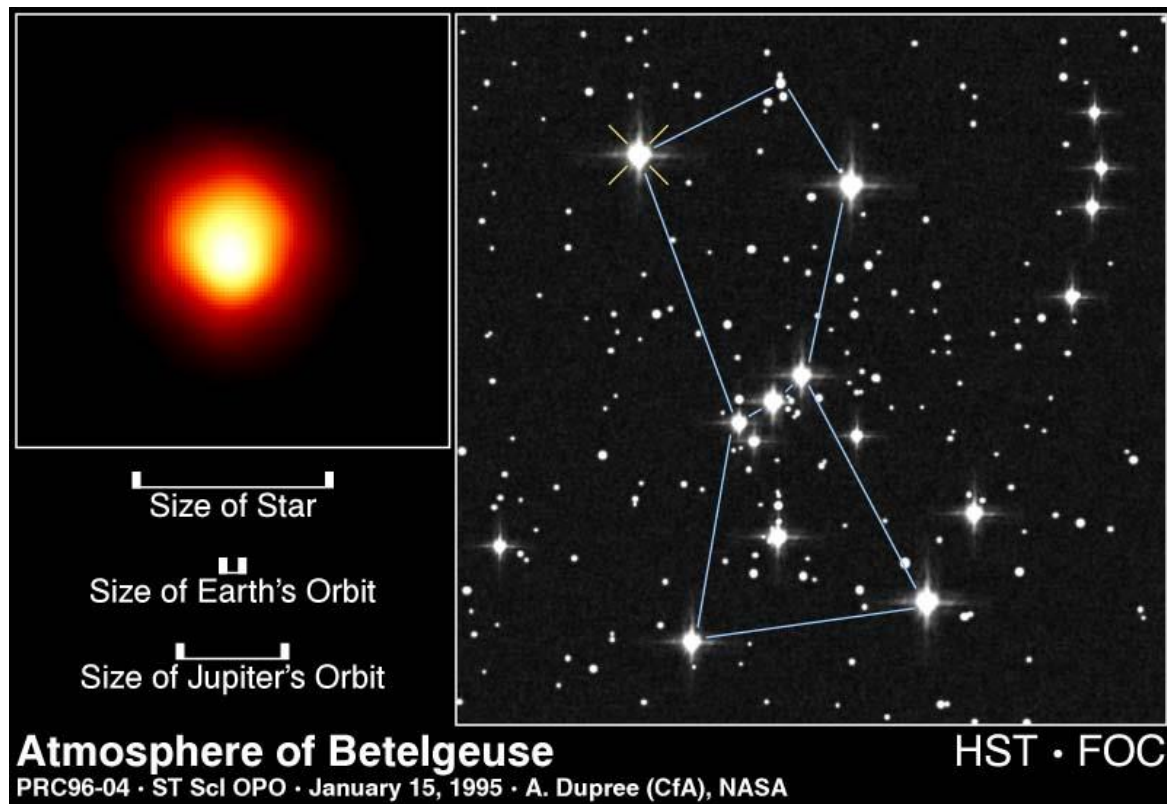
理論物理と計算物理

- シミュレーションは複雑な現象を取り扱えるが、解釈がよく分からないことが多い。
- シミュレーション結果をみつつ、簡易モデルを修正していくことで、現象を理解しつつ、現実に接近することができる。

超新星爆発の研究

1. 超新星爆発とは何か
2. 理論的アプローチ
3. シミュレーション
4. 理論的アプローチ
5. 観測の紹介
6. まとめ

ベテルギウスは爆発するか



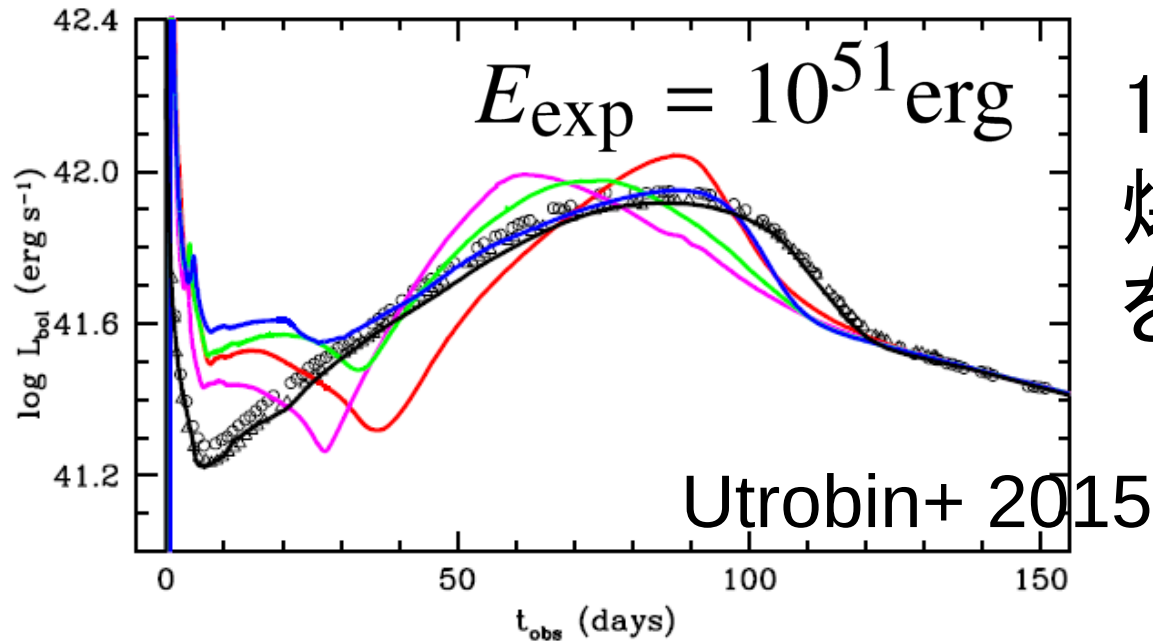
左上。オリオン座の肩のところ。

進化段階としてはいつ爆発してもおかしくない。

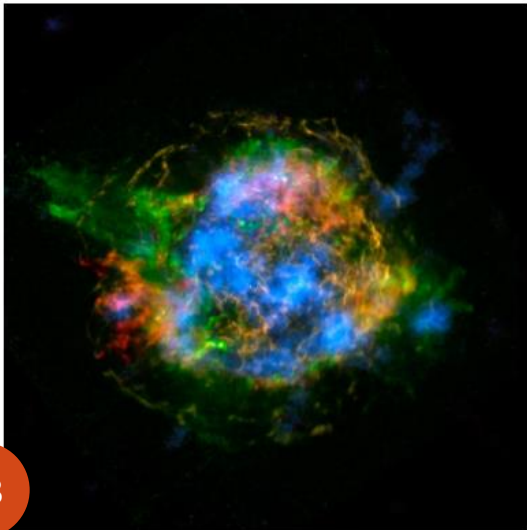
650光年とかなり近くで起こる。

地球では月程度の明るさに見え、昼でも観測可能。

超新星の現在の観測



1987Aの光度曲線
爆発のエネルギー
を与える。



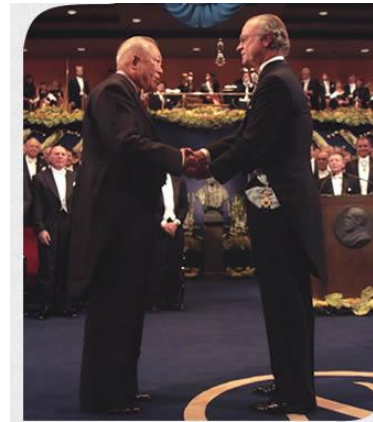
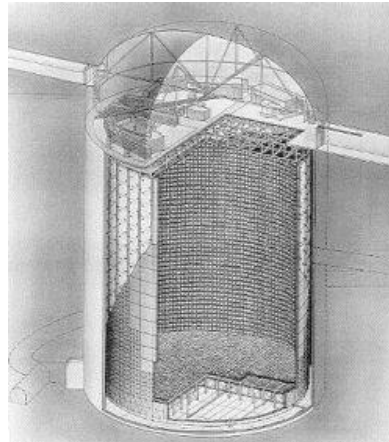
元素の分布に爆発の仕方の名残

図1 超新星残骸カシオペアAのX線イメージ: 青色はNuSTAR衛星がとらえた放射性元素(チタン)の高エネルギーX線²⁾. 他の色はChandra衛星がとらえた低エネルギーX線で赤は鉄, 緑はケイ素やマグネシウム, 黄色は連続X線を表す (©NASA/JPL-Caltech/CXC/SAO).

超新星の将来の観測

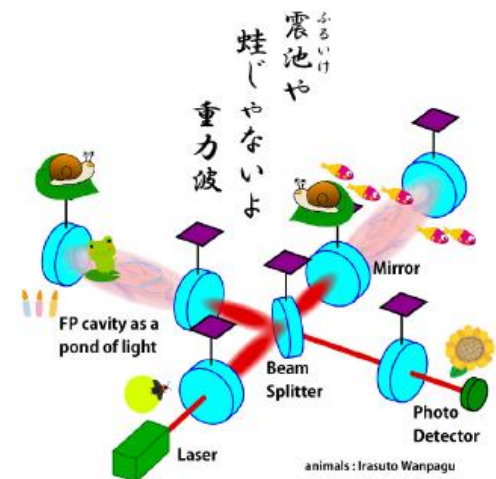
○ニュートリノ

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

KAGRA, 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。



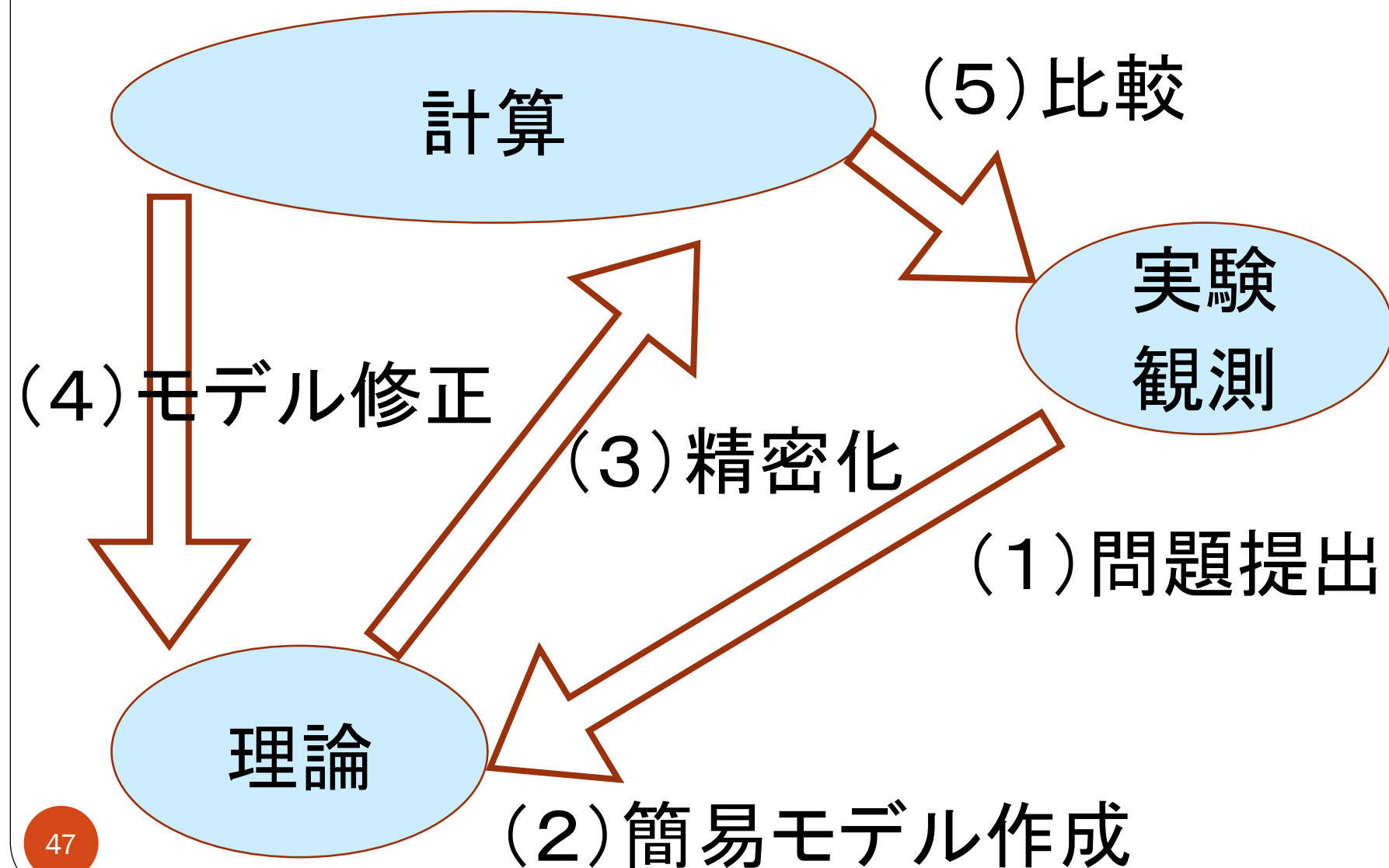
実験(観測)物理

- 理論や計算が説明すべき事実を与える。
実験: 問題提出者
理論: 回答者
- 基本的に大きな実験からは新たな事実が生まれる。
予算がある限り着実な歩み。
- 真に驚くべきことは観測からもたらされる。
例: 宇宙の加速膨張
- ノーベル賞は観測や観測によって確かめられた理論に授けられる。

超新星爆発の研究

1. 超新星爆発とは何か
2. 理論的アプローチ
3. シミュレーション
4. 理論的アプローチ
5. 観測の紹介
6. まとめ

理論と計算と実験（観測）



理論と計算と実験（観測）

どんな能力が必要か？

(1) 実験（観測）家：問題提出
アイデア、リーダーシップ

(2) 理論家：簡易モデル作成
物理の知識（広く浅く）、好奇心

(3) 計算家：精密化

物理の知識（狭く深く）、忍耐力、計算機との親和性

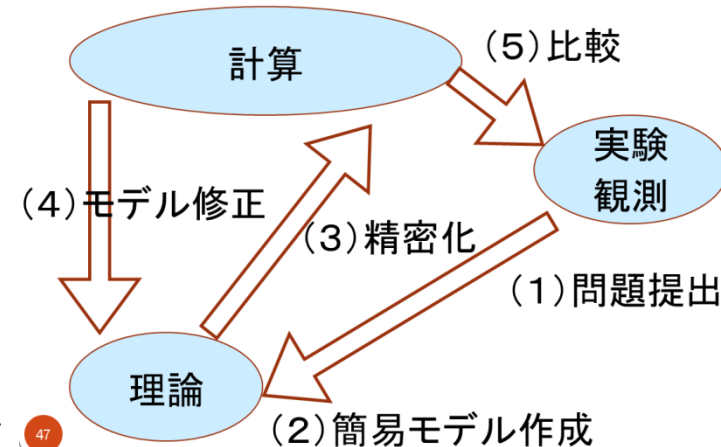
(4) 計算家、理論家：モデル修正

アイデア、物理の知識（広く浅く）

(5) 計算家、実験家：比較

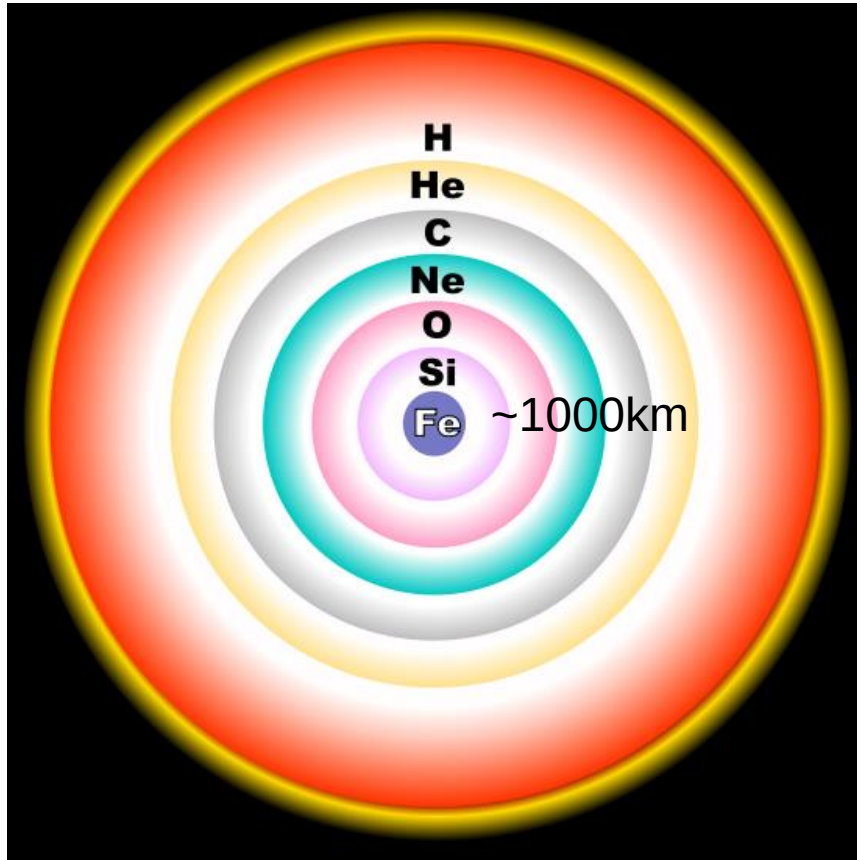
好奇心、人脈

あなたの特性と合うのはどれでしょう？



Appendix

爆発直前の星の中身：赤色超巨星



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。

(a)

