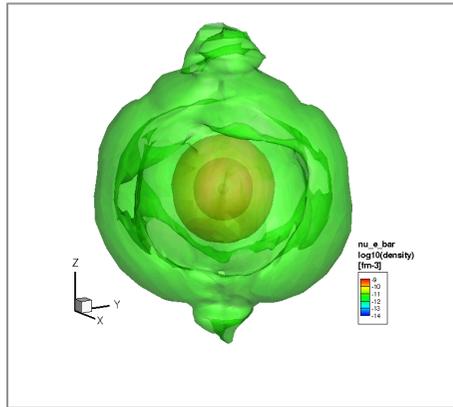


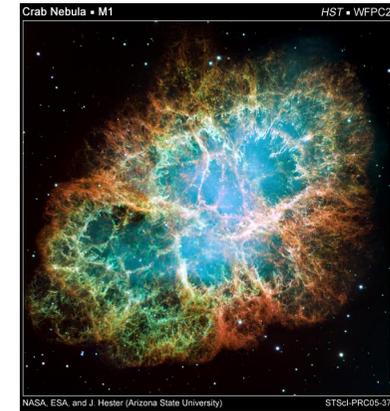
超新星爆発のメカニズムを探る



K. Sumiyoshi

住吉光介

沼津工業高等専門学校教養科



<http://hubblesite.org>

- 星の最期に起こる天体現象
- 極限状況下での物質・ニュートリノ

Science Cafe in Shizuoka
サイエンスカフェ  静岡 

2013. 6. 20

自己紹介

- 東京生まれ
- 東京都立大学・学位
 - KEK・理研・ドイツMPA
- 沼津・三島に来て14年
 - 静岡県は住みやすい

- 沼津工業高等専門学校
 - 5年間一貫(高+大)
 - 国立の高等教育機関
- 物理の授業・担任など
- 研究活動も行っている

- 専門: 宇宙原子核物理学
(Nuclear Astrophysics)
- 天文学者ではない
(と思う)



話の内容

- 超新星爆発とは何か？
 - 重い星の最期に起こる天体現象
 - ニュートリノが重要な鍵を握る
- 爆発メカニズム解明への道のり
 - 素粒子・原子核から星まで
 - スーパーコンピュータによる研究

超新星爆発: ある日突然、非常に明るい星が現れる

実は、重たい星の進化の最期

やがて暗くなり消える



爆発前



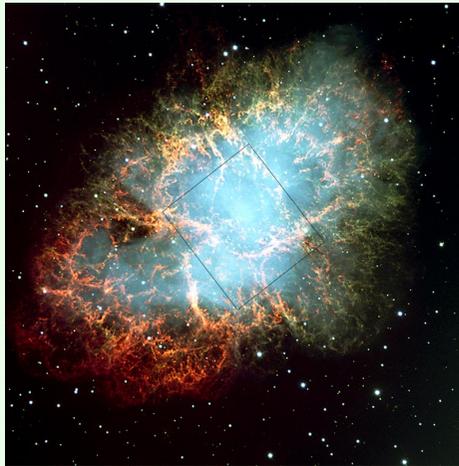
爆発後

1987年2月23日に観測された超新星 → のちに日本人のノーベル賞

出現頻度：年間数百個ほど観測されている

一つの銀河で百年で1~2回起きる程度

古くは185年、中国書物の記録「客星」



<http://hubblesite.org>

かに星雲：

1054年に観測された超新星爆発の残骸

客星出現例、皇極天皇元年秋、
陽成院貞観十九年正月廿五日、
見西方、宇多天皇寛平三年三月、
星在東成星東方、相去一寸所、



藤原定家
明月記にも

国会図書館, wikipedia

- 観測例：6249個
- 昨年は246個
SN 2012A - 2012il
- 今年既に110個
SN 2013df (6/7)
- このうち、およそ半分が
重力崩壊型超新星

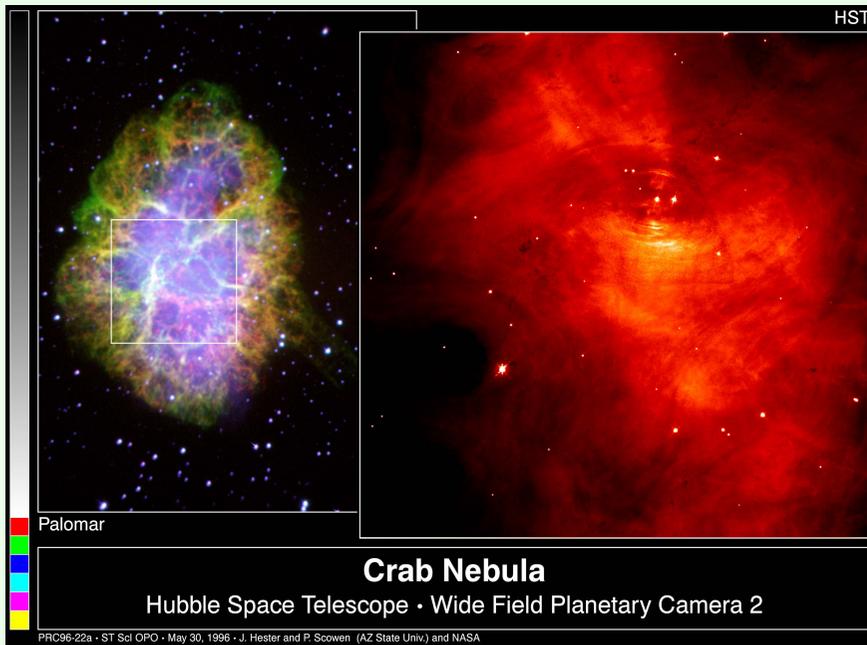
他に、

爆燃型超新星など

<http://www.sai.msu.su/sn/sncat/>のデータによる

超新星で残されるもの：中性子星/ブラックホール

かに星雲の中心にはパルサー



<http://hubblesite.org>

パルサー：規則正しい電波を出す
(例：1秒に30回)
→ 高速回転する中性子星

中性子星：超高密度の天体

質量：太陽質量の1.4倍

半径：約10キロ

密度：7億トン/1立方センチ
(cc=cm³)

原子核が溶けた中性子ガス塊



太陽質量が
静岡市に集中

中性子星の大きさ

google map

超新星で放出されるもの：重元素

高温高密度で、爆発的に重元素合成が行われる

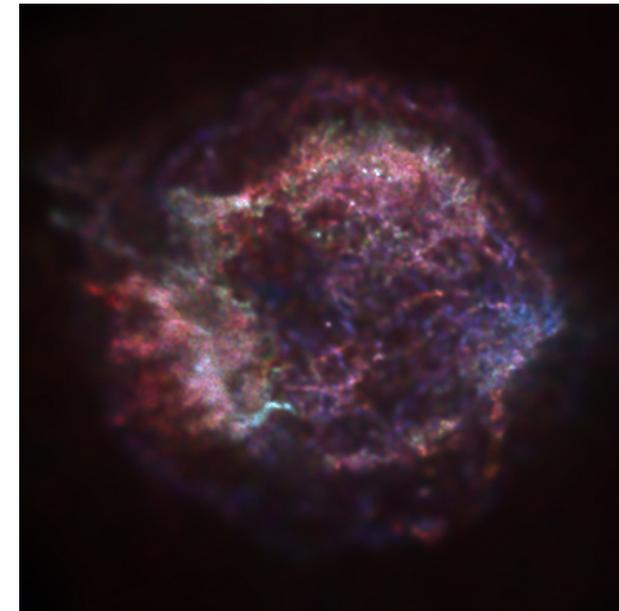
重元素：鉄(原子番号26)以降

作られた元素を放出

元素の周期表

	1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8	1B	2B	3B	4B	5B	6B	7B	0		
1	H															He		
2	Li	Be							B	C	N	O	F			Ne		
3	Na	Mg							Al	Si	P	S	Cl			Ar		
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	L	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	A															
			L	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
			A	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

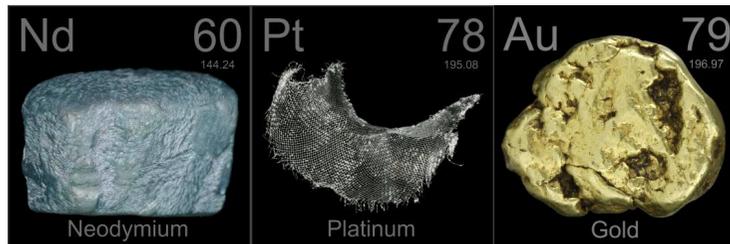
<http://ccinfo.ims.ac.jp/periodic/indexj.html>



X-ray image

<http://chandra.harvard.edu>

金・プラチナ・レアアースなどの起源は
超新星か？



<http://periodictable.com>

カシオペアA:
超新星(~1680年)の残骸
 ^{44}Ti の存在を確認

超新星で放出されるもの:ニュートリノ

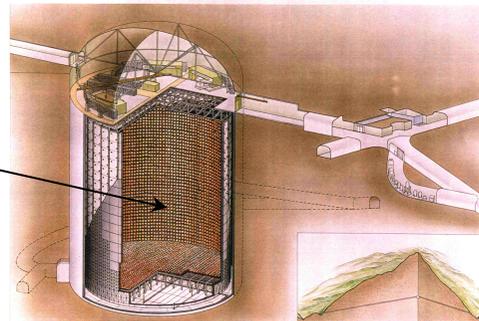
爆発時に大量のニュートリノが発生

1987年の超新星ニュートリノ検出 → 2002年ノーベル物理学賞



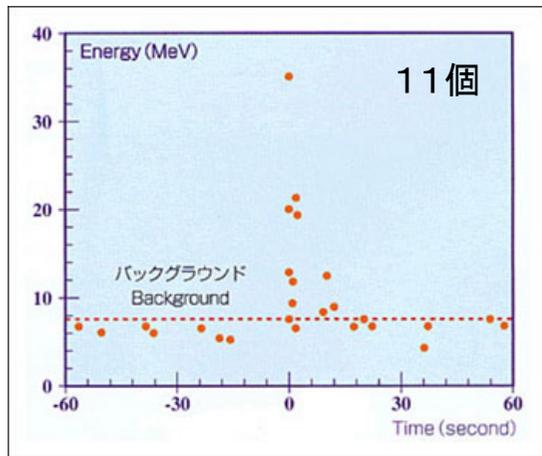
SN1987A

ν



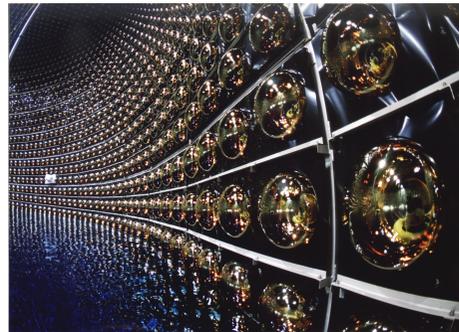
SUPERKAMIOKANDE INSTITUTE FOR COSMIC RAY RESEARCH UNIVERSITY OF TOKYO

ニュートリノ検出施設
岐阜県神岡
現 SuperKamioKande



次の超新星では
400~10000個を検出できる

浜松フォトニクス光技術



<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/>

日本経済新聞 2002年(平成14年)10月9日(水曜日) ©日本経済新聞社 2002 (日刊)

小柴氏にノーベル賞

東大名誉教授

素粒子ニュートリノを観測 天体物理学を開拓

日本人、3年連続の受賞

小柴昌俊氏(こしば・まさとし) 1928年9月19日豊橋市生まれ。51年東京大学理学部卒業。米ロチェスター大学、シカゴ大学で研究生生活を送り、70年東大理学部教授。87年、超新星からのニュートリノを世界で初めて検出。97年文化勲章受賞。東大退官後、後独ハンブルク大学、東海大学で教鞭をとる。2000年イスラエルのウルブ賞を、今回同時受賞した米国のデービス博士と共同で受賞している。現在、東京大学素粒子物理国際研究センター参加。76歳。

日本人の受賞者は、00年の川添壽一(化学賞)、01年の梶田隆章(物理学賞)に続き3年連続で日本人がノーベル賞を受賞した。小柴氏は、超新星爆発時に発生するニュートリノを観測し、天体物理学を開拓した。1987年、超新星SN1987Aの爆発時に、スーパーカミオカンデでニュートリノを検出した。この発見は、超新星爆発のメカニズムを明らかにし、天体物理学の発展に大きく貢献した。

素粒子ニュートリノを観測
天体物理学を開拓

「2001年の野依良芳(化学賞)に続き3年連続で日本人がノーベル賞を受賞した。小柴氏は、超新星爆発時に発生するニュートリノを観測し、天体物理学を開拓した。1987年、超新星SN1987Aの爆発時に、スーパーカミオカンデでニュートリノを検出した。この発見は、超新星爆発のメカニズムを明らかにし、天体物理学の発展に大きく貢献した。」

ニュートリノ:素粒子の一つ
電子の仲間、電荷を持たない
ほとんど相互作用しない

超新星爆発のエネルギー

莫大なエネルギーが放出される

- 爆発エネルギー: 1 [ベーテ]
 - 物質放出の運動エネルギー

$$1[\text{ベーテ}] = 10^{44} [\text{ジュール}]$$

太陽が100億年で放出するエネルギーに匹敵

- 太陽の光度: 4×10^{26} [ワット]
- 原子炉一基の出力: 10億[ワット] = 10^9 [ワット]

- ニュートリノエネルギー: 100 [ベーテ]
 - 超新星ニュートリノ検出データ

ハンス・ベーテ



<http://www.nobelprize.org>

1967年ノーベル物理学賞
星でのエネルギー生成

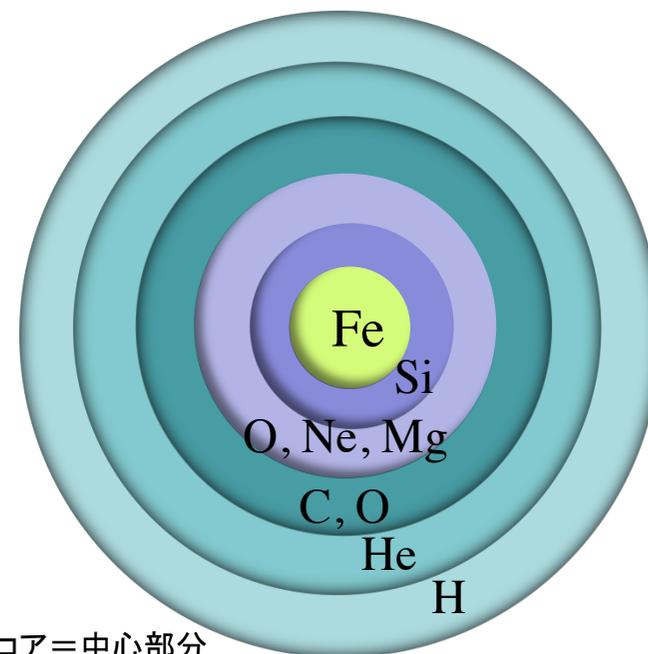
重い星の最期に起こる天体現象

太陽質量の10倍以上の星

寿命1千万年

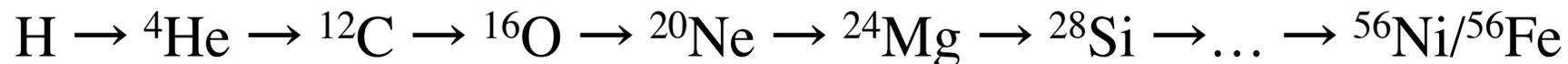
星の構造: 層状に元素が溜まる

- 密度・温度が高い
 - 核融合反応が進む
- 星の中心に鉄コアができる
 - 原子核: 鉄(^{56}Fe)が一番安定



- 鉄コアがさらに重くなる→ 重力でつぶれ始める
 - 中心では核融合反応は起きない(燃料切れ)

核融合反応の系列:



(少し昔の)数値シミュレーションの例

シナリオ

鉄コアがつぶれる



中心がはね返る

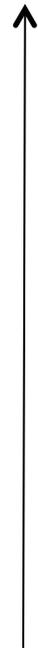


衝撃波が発生

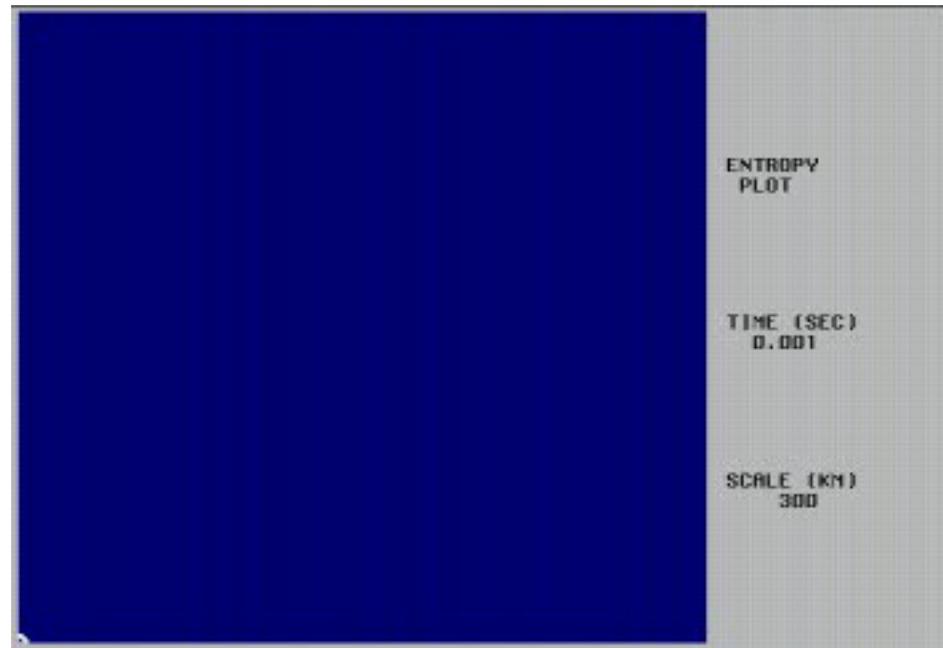


爆発へ

300キロ



Adam Burrows (1995)

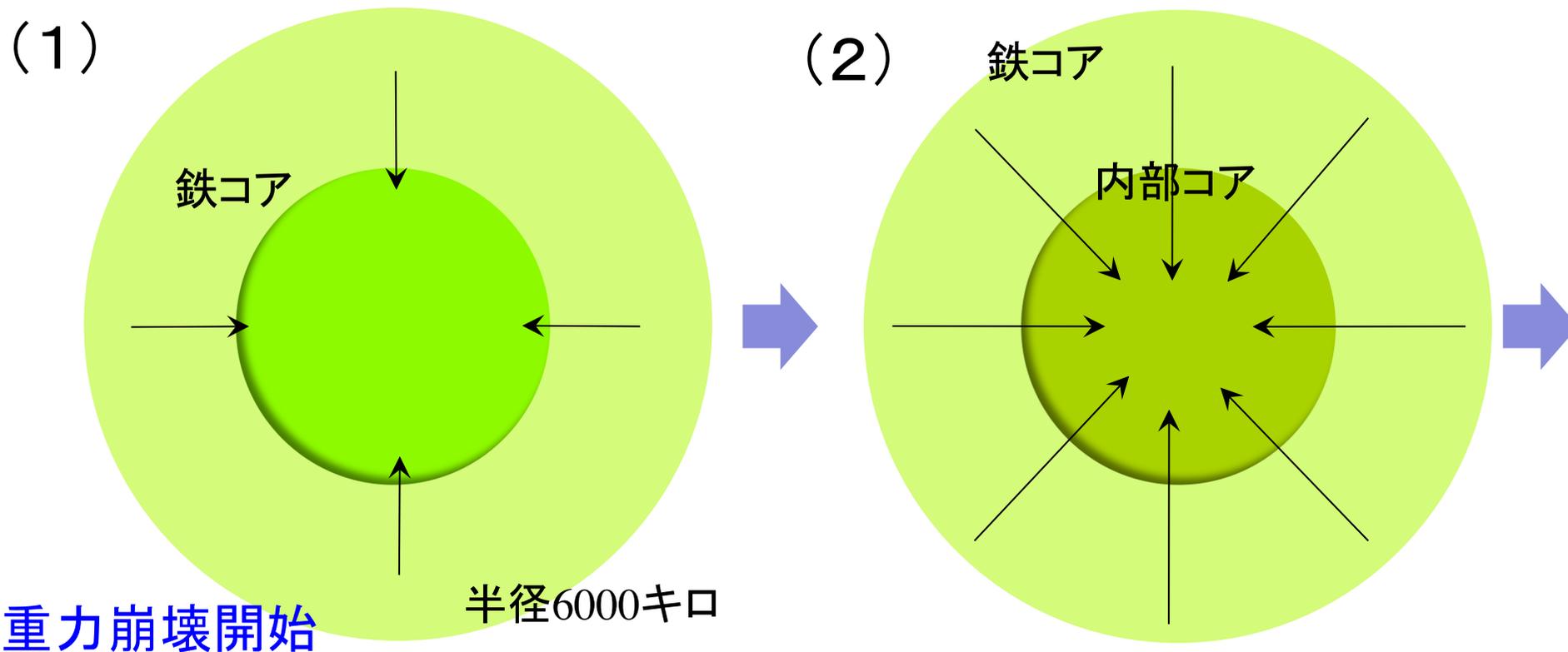


色は温度に対応する
(赤: 熱い、青: 冷たい)

約1秒ほどの出来事

爆発メカニズム:鉄コアの重力崩壊

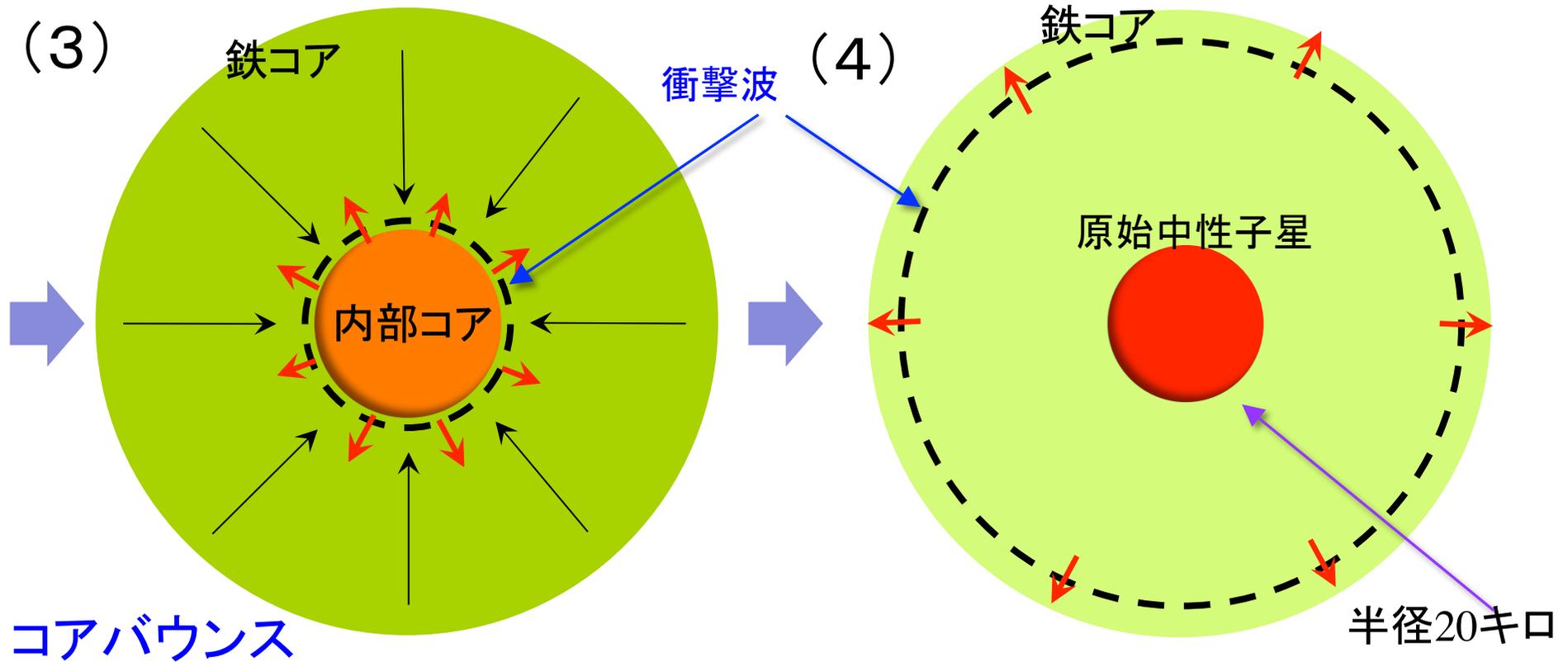
- 鉄コアが潰れだして、密度・温度が上昇



中心の 密度 1万トン/cc
温度 100億度

爆発メカニズム: 中心がバウンス

- はね返り、衝撃波が発生 → 爆発へ



中心の 密度 5億トン/cc
温度 1000億度

これ以上圧縮できないほど、固い核物質

原始中性子星の誕生
→ 超新星爆発へ

爆発のエネルギーはどこから？

- 鉄コアから中性子星へ圧縮
 - 半径6000キロから10キロへ
- 重力エネルギーが生み出す: 100[ベータ]
- 爆発には十分なエネルギーに思える

- 爆発エネルギー: 1[ベータ]
 - 物質放出の運動エネルギー

- ニュートリノエネルギー: 99[ベータ]
 - 超新星ニュートリノ検出データ

実は、ほとんどがニュートリノ放出に消費されてしまう

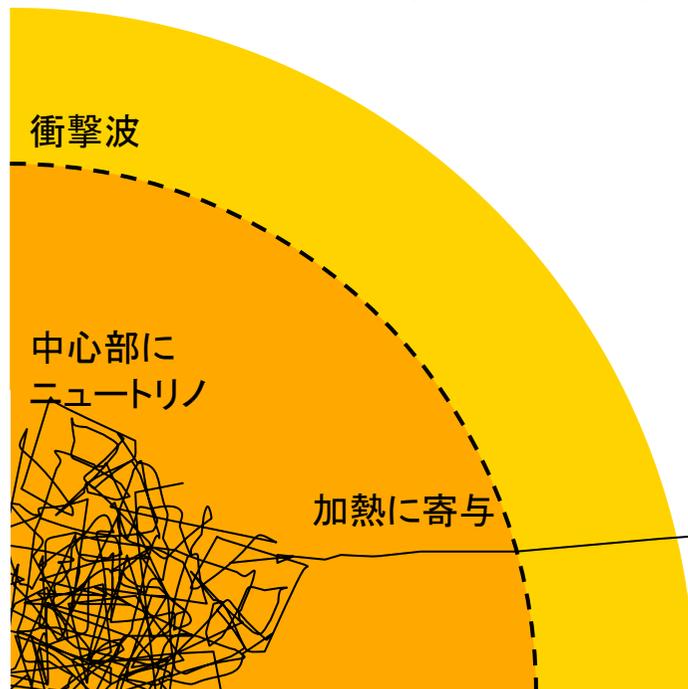
ニュートリノが爆発の鍵を握っている

- 重力エネルギーの変換

- 圧縮 → 熱エネルギー → ニュートリノ発生
- その約1%が爆発エネルギー

- 放出ニュートリノの一部が使われる

- 物質に吸収されると、加熱に寄与



どれくらい

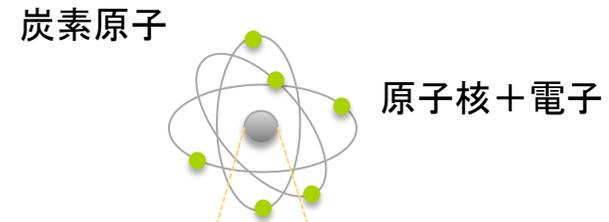
ニュートリノが作られる？
中心に溜まっているか？
放出される量は？
途中で吸収されるのか？

超新星ニュートリノ

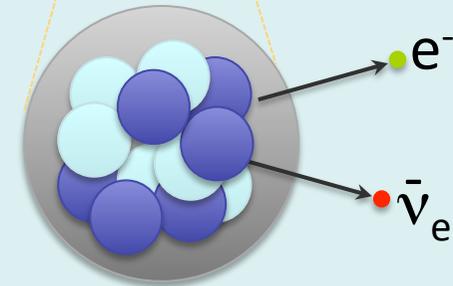
ニュートリノとは?

ν (ギリシャ文字ニュー)

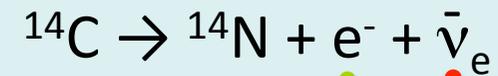
- 電子の仲間: 素粒子の一つ
 - クォーク・レプトン
- 電荷を持たない: 中性
- ほとんど反応をしない
 - 我々の体・地球も通り抜ける
- 弱い相互作用
 - 例1: 原子核崩壊(炭素14)
 - 例2: 陽子と中性子の変換



原子核(陽子+中性子)



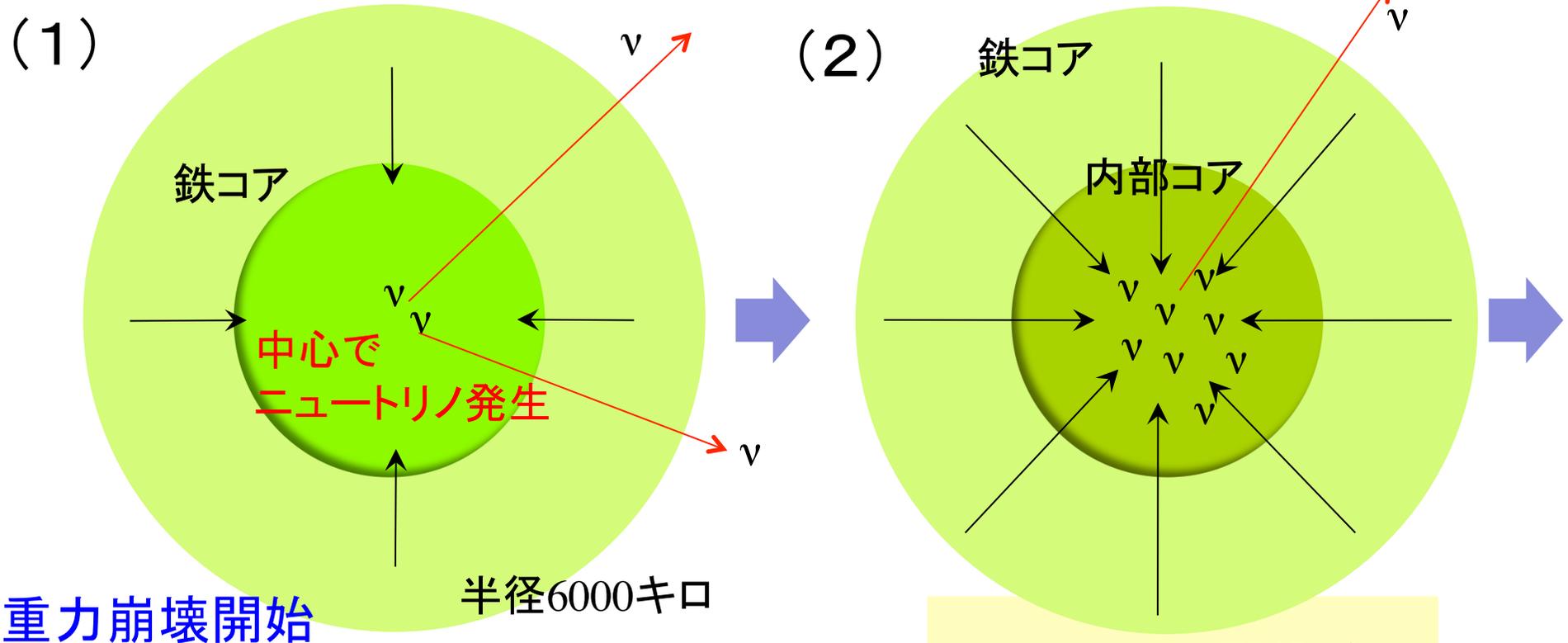
原子核のベータ崩壊



中性子のベータ崩壊

爆発メカニズム:鉄コアの重力崩壊

- 鉄コアが潰れだして、密度・温度が上昇

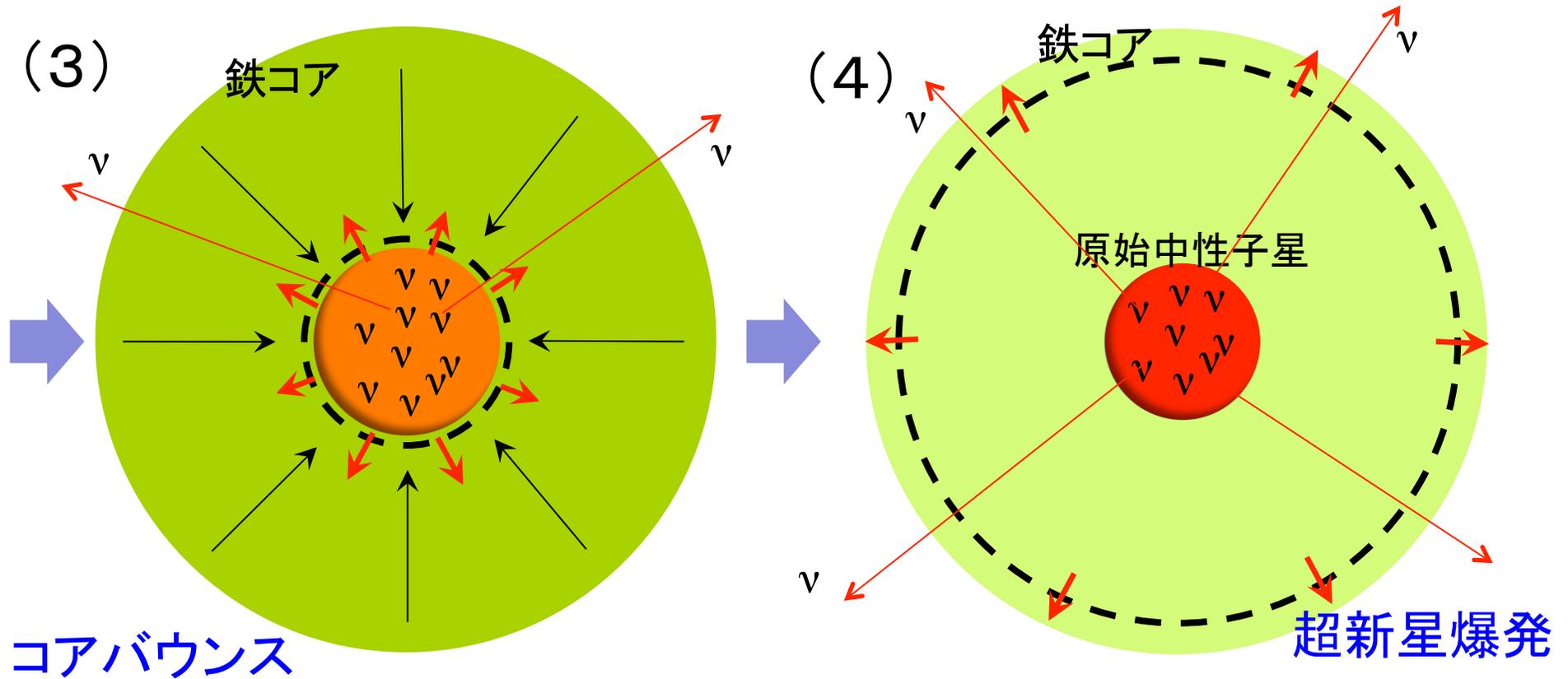


中心の 密度 1万トン/cc →密度100倍
温度 100億度

ニュートリノ閉込め
密度が高すぎて
ニュートリノは脱出できず
中心に溜まり始める

爆発メカニズム: 中心がバウンス

- はね返り、衝撃波が発生 → 爆発へ



中心に大量のニュートリノ
徐々に放出される

超新星ニュートリノとなる
約20秒ほど続く

前半のまとめ

- 超新星爆発とは何か？
 - 重い星の最期に起こる天体現象
 - 鉄コアが重力崩壊、はね返って爆発に至る
 - ニュートリノが重要な鍵を握る
 - ニュートリノ閉込め、大量に放出される
 - 爆発は再現できるのか？
 - 実は(3)バウンスから(4)爆発へ至るのが難しい
- 爆発メカニズム解明への道のり
 - 素粒子・原子核から星まで
 - スーパーコンピュータによる研究

超新星の爆発メカニズムを解明するには

- 4つの力(重力・電磁力・強い力・弱い力)全てが関与する

- 流体力学
- ニュートリノ輻射輸送
- 一般相対論

- 原子核物理学
- 素粒子物理学
- 計算科学

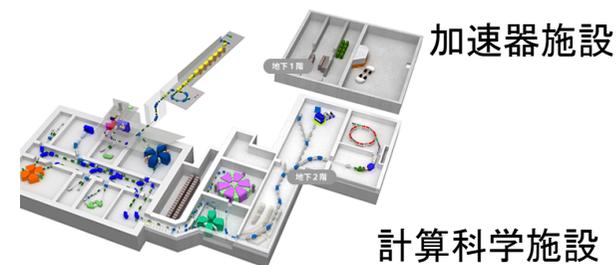
「星のダイナミクス」と「マイクロ科学」を同時に解明する

- **グランドチャレンジ問題**

数値計算シミュレーションによる解明

- 様々な分野の研究者による協力
- 大規模なスーパーコンピュータ

が必要



原子核物理学: 高温高密度における物質

- **どんな存在形態なのか、エネルギー・圧力は?**

- 密度: 10^{15} g/cm^3
- 温度: 10^{12} K
- 中性子割合: 0.9

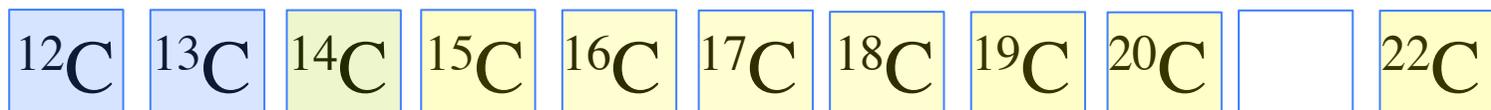
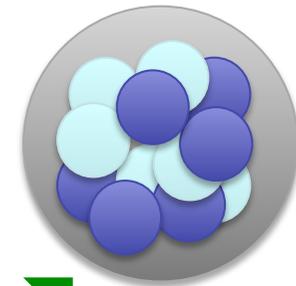
- **地上では達成できない領域:**

- 実験データから理論的に予測する

- **ヒント: 原子核の内部**

核物質密度: $3 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$

炭素原子核



自然界に存在

→ 人工的に作り出して実験

存在限界

中性子
割合

0.5

0.6

0.7

0.73

なるべく中性子が多い同位体を調べる → →

超新星物質の状態方程式データテーブル

- 広い範囲の密度・温度・組成での物質の状態を予測

- 密度: $10^5 \sim 10^{15} \text{ g/cm}^3$
- 温度: $0 \sim 10^{12} \text{ K}$
- 中性子割合: $0.5 \sim 1$

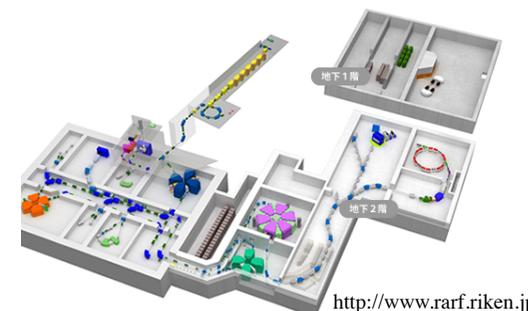
- 原子核実験データ+核子多体理論

- 不安定核ビーム実験施設

- 原子核データとしてシミュレーションに組み込む

- エネルギー、圧力、組成(陽子,中性子,原子核,電子など)
- データを公開、世界標準に
申・土岐・親松・住吉(1998, 2011)

理化学研究所
RIビームファクトリー



<http://www.rarf.riken.jp>

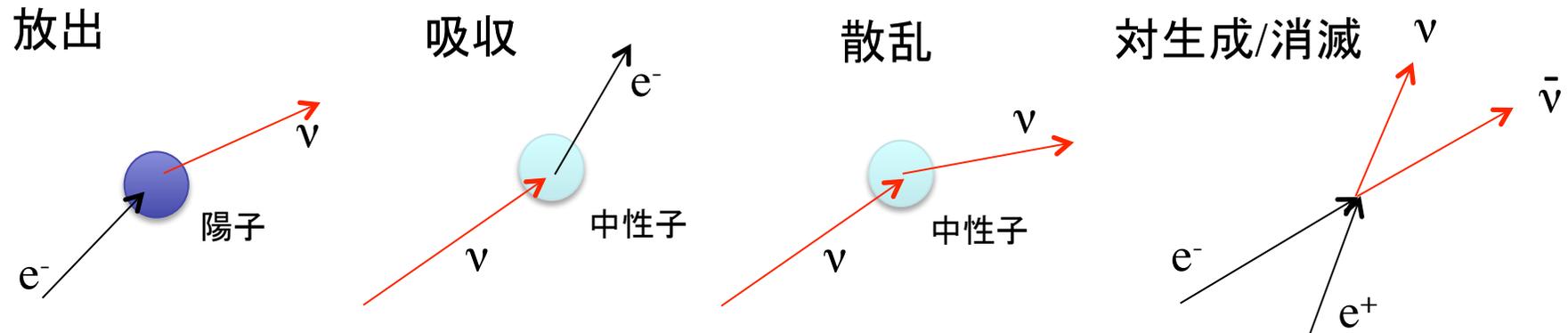
```
cccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccc  
Temperature= 1.000000E-01
```

```
5.100000E+00 7.581421E-11 -2.000000E+00 1.000000E-02 -1.524779E+00  
5.200000E+00 9.544443E-11 -2.000000E+00 1.000000E-02 -1.502472E+00  
5.300000E+00 1.201574E-10 -2.000000E+00 1.000000E-02 -1.480166E+00  
5.400000E+00 1.512692E-10 -2.000000E+00 1.000000E-02 -1.457861E+00  
5.500000E+00 1.904367E-10 -2.000000E+00 1.000000E-02 -1.435557E+00  
5.600000E+00 2.397456E-10 -2.000000E+00 1.000000E-02 -1.413255E+00  
5.700000E+00 3.018218E-10 -2.000000E+00 1.000000E-02 -1.390953E+00  
5.800000E+00 3.799711E-10 -2.000000E+00 1.000000E-02 -1.368653E+00  
5.900000E+00 4.783553E-10 -2.000000E+00 1.000000E-02 -1.346354E+00  
6.000000E+00 6.022137E-10 -2.000000E+00 1.000000E-02 -1.324056E+00  
6.100000E+00 7.581421E-10 -2.000000E+00 1.000000E-02 -1.301759E+00  
6.200000E+00 9.544443E-10 -2.000000E+00 1.000000E-02 -1.279464E+00  
6.300000E+00 1.201574E-09 -2.000000E+00 1.000000E-02 -1.257169E+00  
6.400000E+00 1.512692E-09 -2.000000E+00 1.000000E-02 -1.234876E+00  
6.500000E+00 1.904367E-09 -2.000000E+00 1.000000E-02 -1.212584E+00  
6.600000E+00 2.397456E-09 -2.000000E+00 1.000000E-02 -1.190294E+00
```

<http://user.numazu-ct.ac.jp/~sumi/eos>

超新星物質でのニュートリノ反応データ

- ニュートリノが物質と相互作用する反応率すべて



- 実験データは僅か → 理論的に予測
 - ニュートリノビーム実験は難しい(ほとんど反応しない)
- ニュートリノデータとしてシミュレーションに組み込む
 - 散乱: どれくらい閉込めるか、吸収: 物質を加熱
 - 例: 中心密度 10^{12} g/cm^3 の頃、
平均自由行程: 300m (ニュートリノ-原子核散乱)

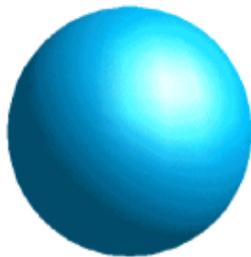
数値シミュレーションによる解明

古くは
1966年から

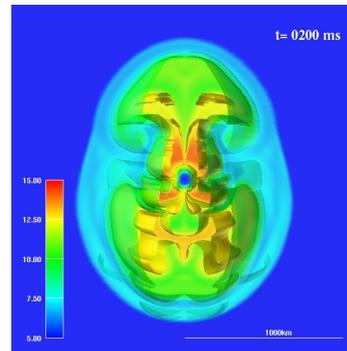
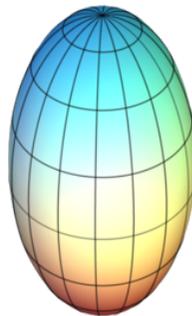
- スーパーコンピュータの発展と共に
 - ニュートリノ輻射流体計算: 近似から厳密へ
 - ニュートリノ・核物理データ: より高い信頼度へ
 - 空間次元: 球対称から多次元へ

新事実が明らかになっていく

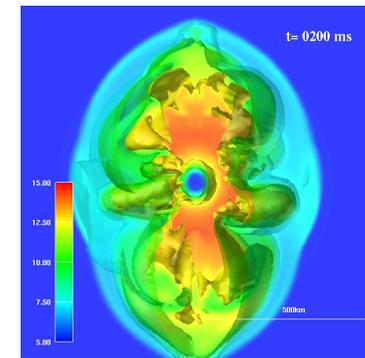
2000年頃
1次元: 球対称



2005年以降
2次元: 軸対称



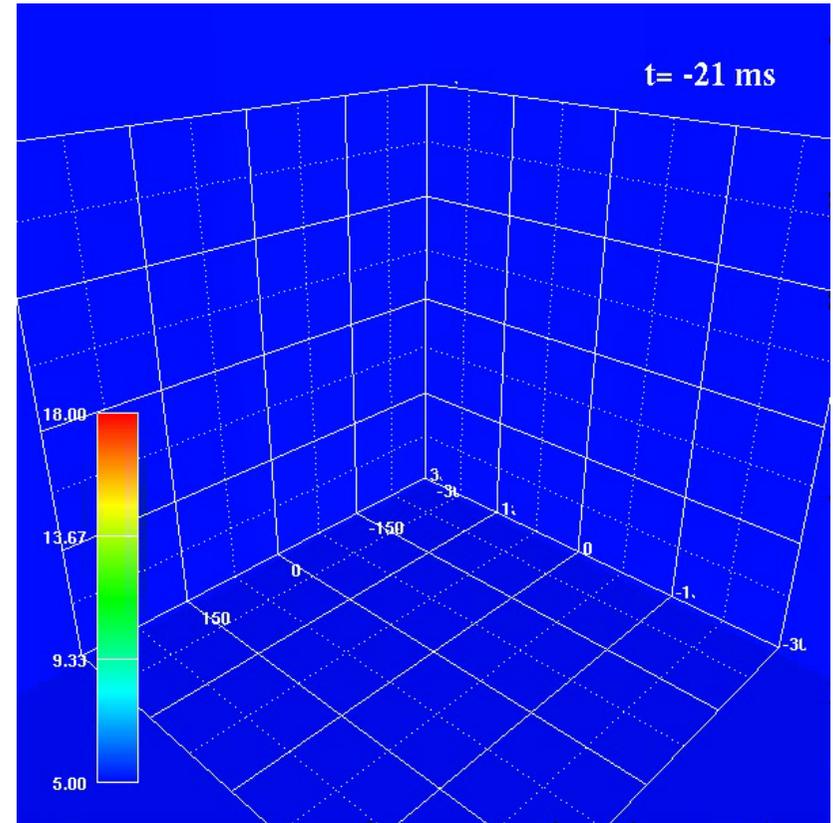
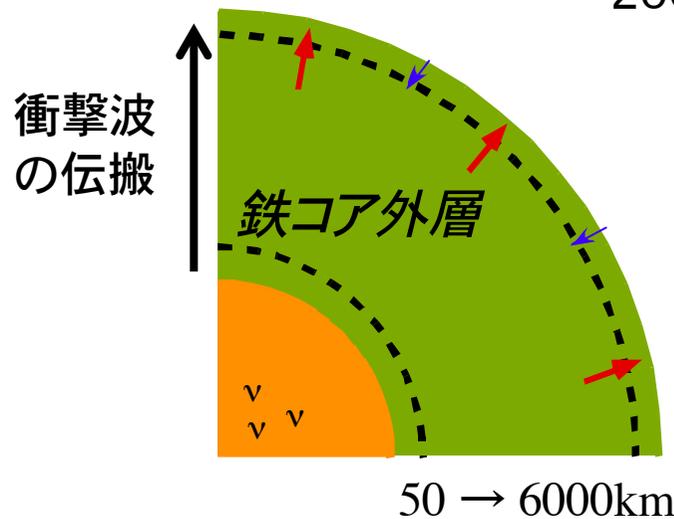
ごく最近
3次元: 対称性仮定無し



数値シミュレーションの結果

- 球対称では爆発しない
 - 第一原理計算(輻射流体)

2000年頃～



滝脇氏提供

- 衝撃波が鉄コアの途中で停まってしまう
 - 外層が降り積もる
 - 鉄を分解する
- エネルギー損失
- 初期エネルギーを使い果たす

爆発を起こすには?: ニュートリノ加熱

- ニュートリノの一部が陽子・中性子に吸収される
- 衝撃波の後ろを温める
外向きに押し出す

→ 衝撃波の復活へ

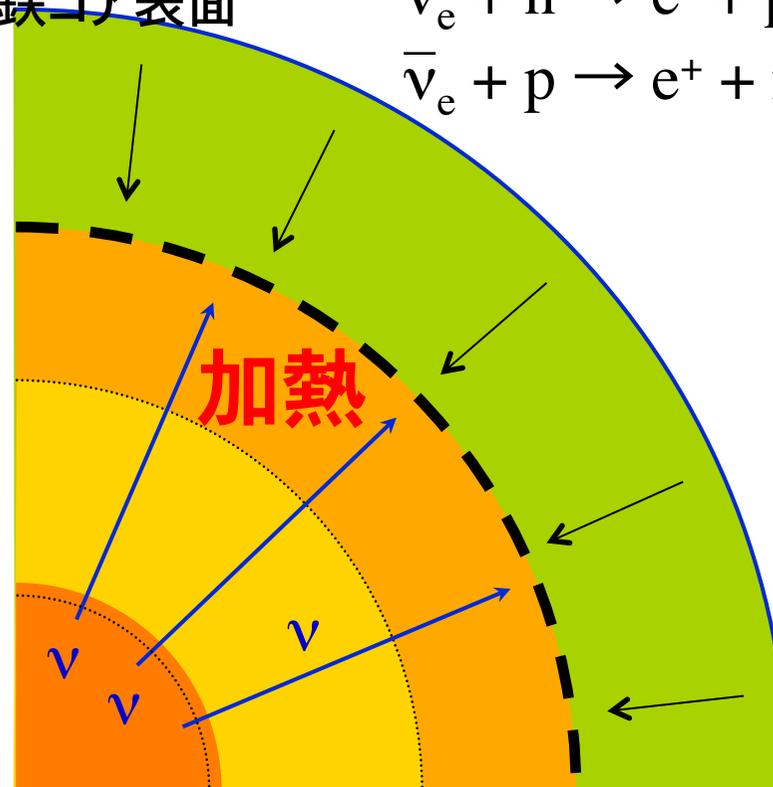
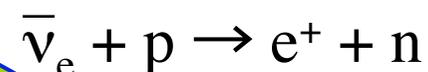
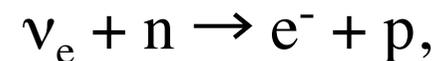
- ニュートリノの放出・吸収
- 標的量・加熱時間に依存

エネルギー獲得

最終的に1[ベータ]になるのか?

コアバウンス後の様子

鉄コア表面



原始中性子星

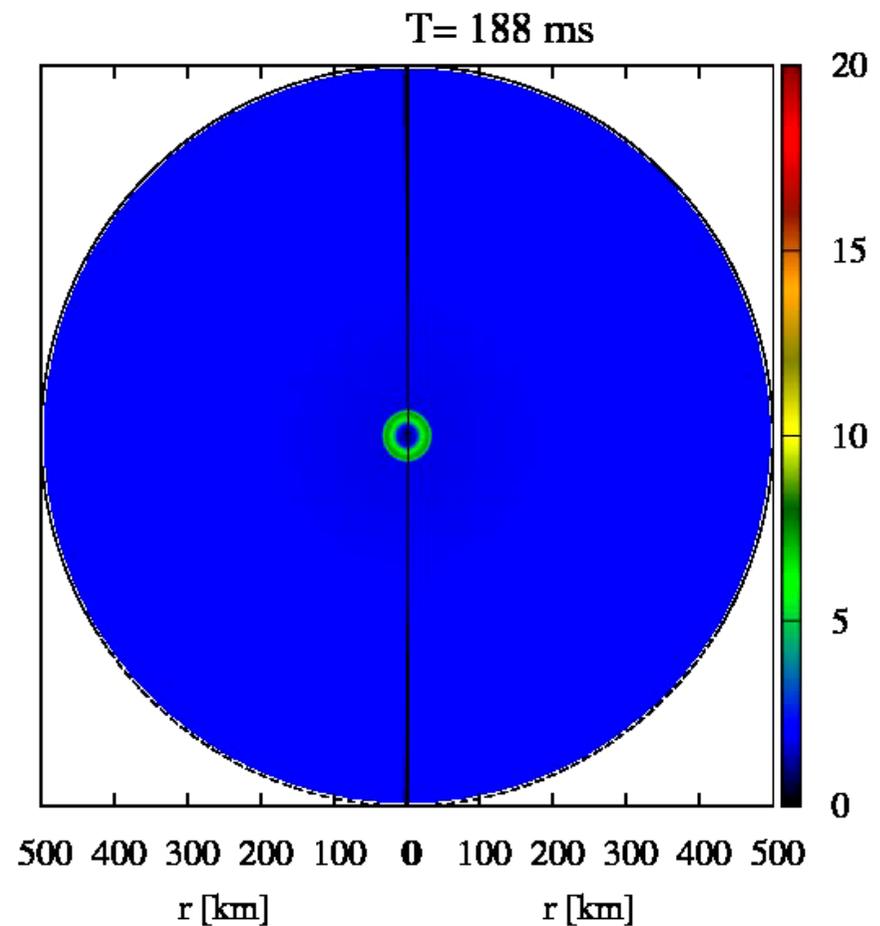
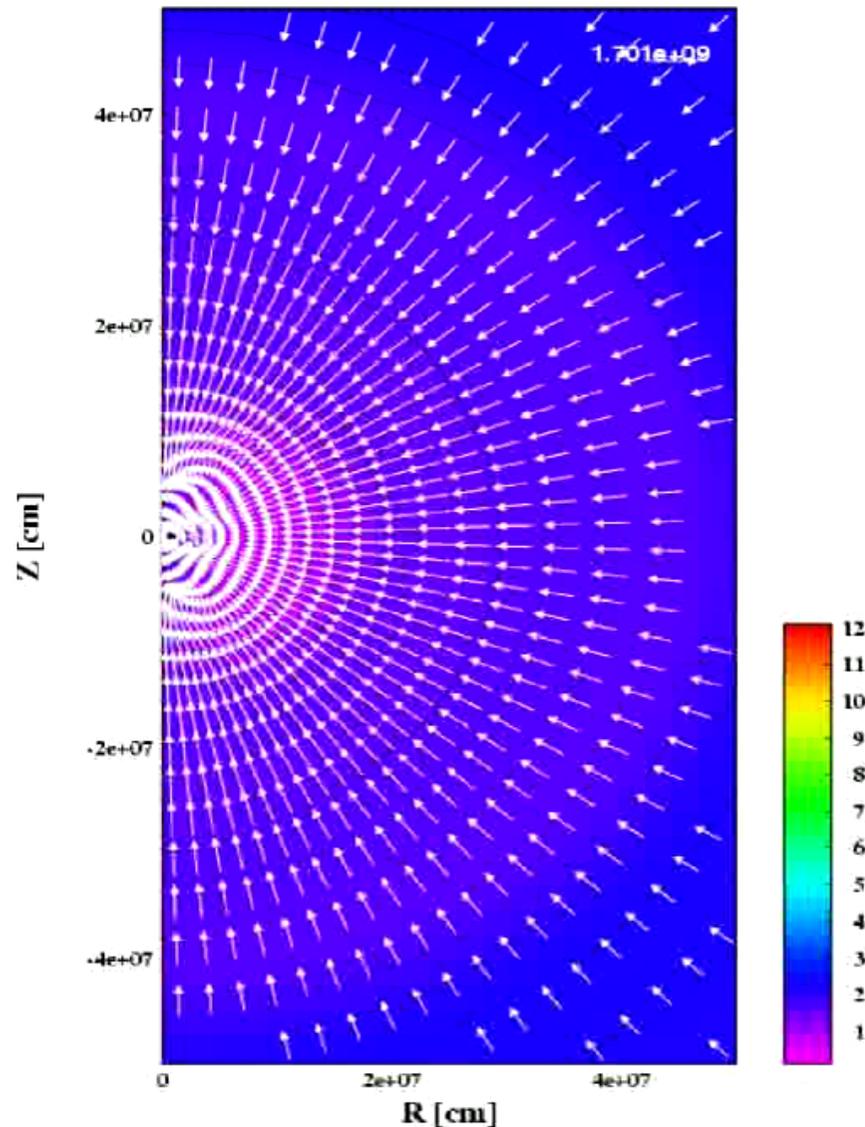
衝撃波

~200km

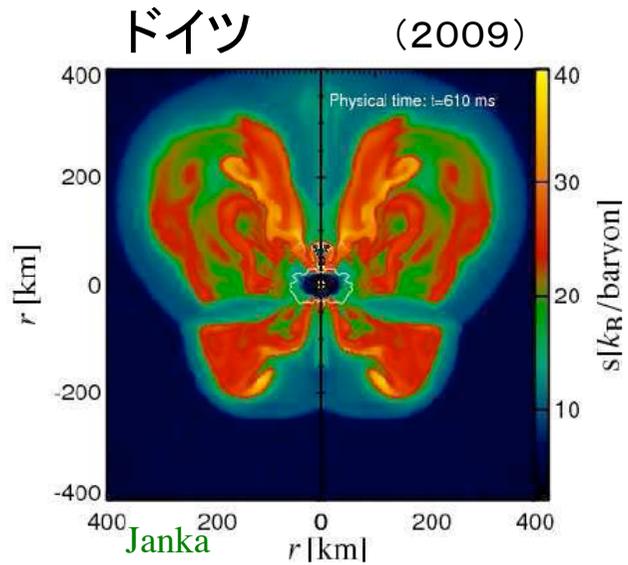
爆発を起こすには?: 多次元な効果が助ける

- 対流、上下非対称

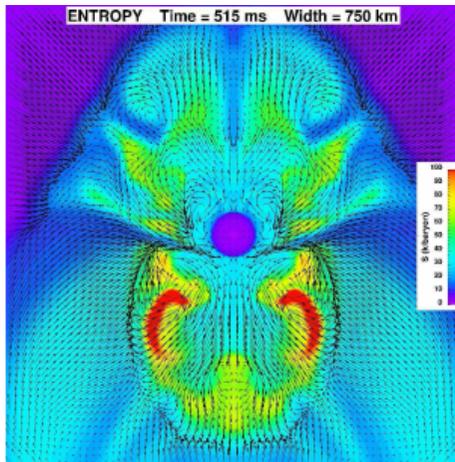
→加熱効率、加熱時間 ↑



軸対称計算では爆発の例が多く見られる



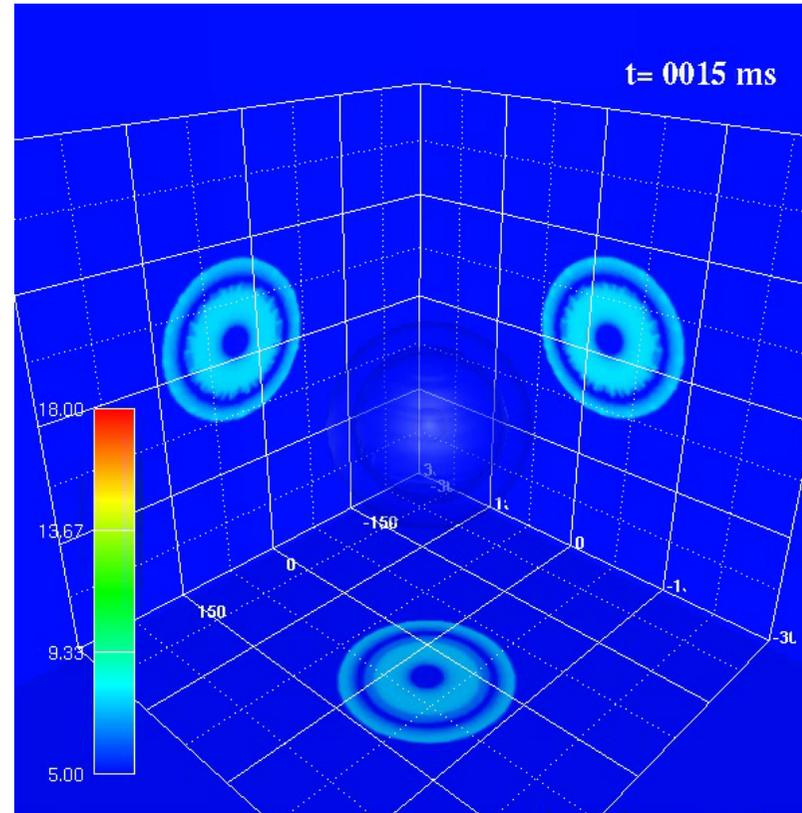
アメリカ (2006)



世界のグループが競争

日本

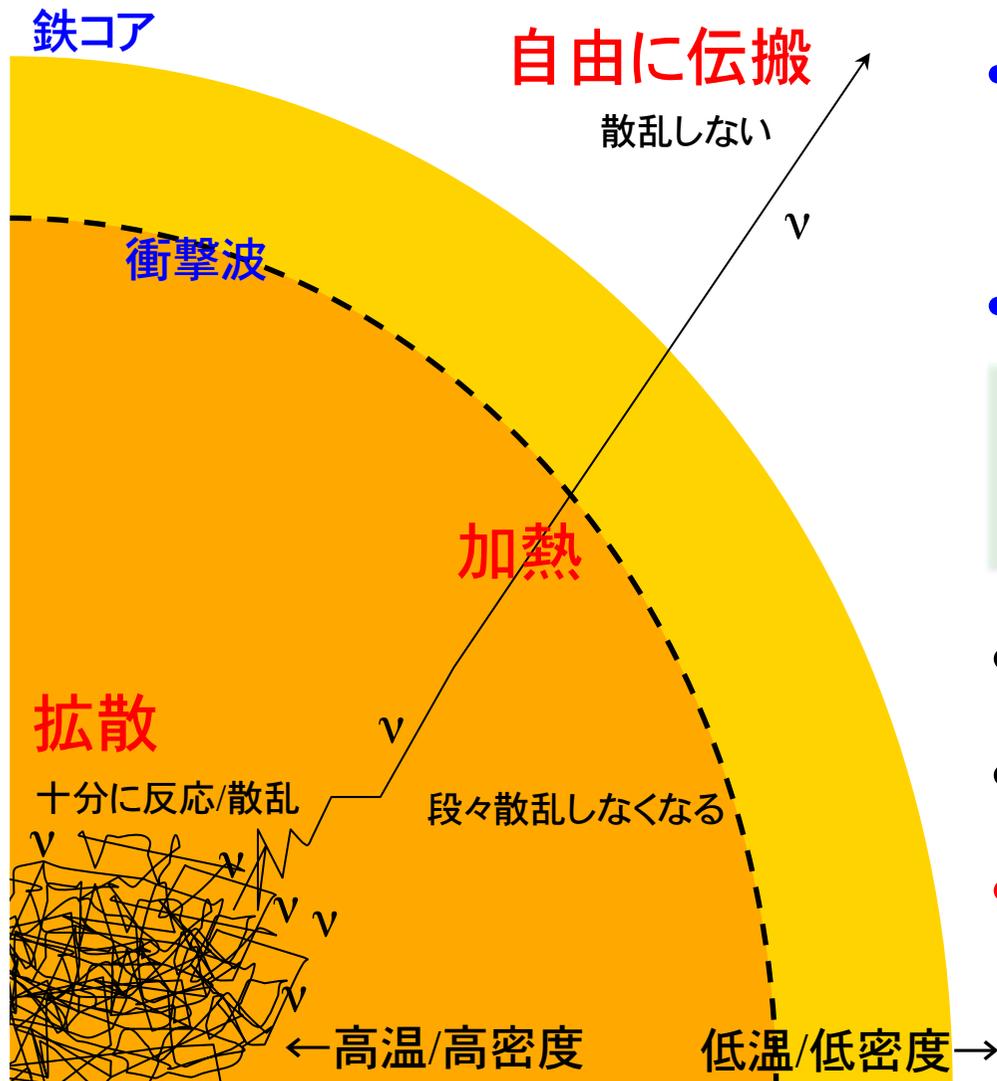
滝脇氏提供



- ただし、軸対称の仮定は強すぎる
- 爆発エネルギー不足 (0.1 ベーテ)
- ニュートリノ輻射輸送は近似

ニュートリノ輻射輸送計算: 残された課題

- 星内部からニュートリノが出てくるまで、伝搬・反応を計算する
 - ν の空間分布、エネルギー分布、角度分布のすべて



- 重要な所は非平衡状態
 - 熱平衡・化学平衡なら簡単
- ボルツマン方程式を解く

$$\frac{1}{c} \frac{\partial f_\nu}{\partial t} + \vec{n} \cdot \vec{\nabla} f_\nu = \frac{1}{c} \left(\frac{\delta f_\nu}{\delta t} \right)_{collision}$$

- 空間3 + 運動量3: 6次元問題
- 計算量が膨大すぎる
- これまでは近似計算だった

6次元空間でニュートリノ輻射輸送計算

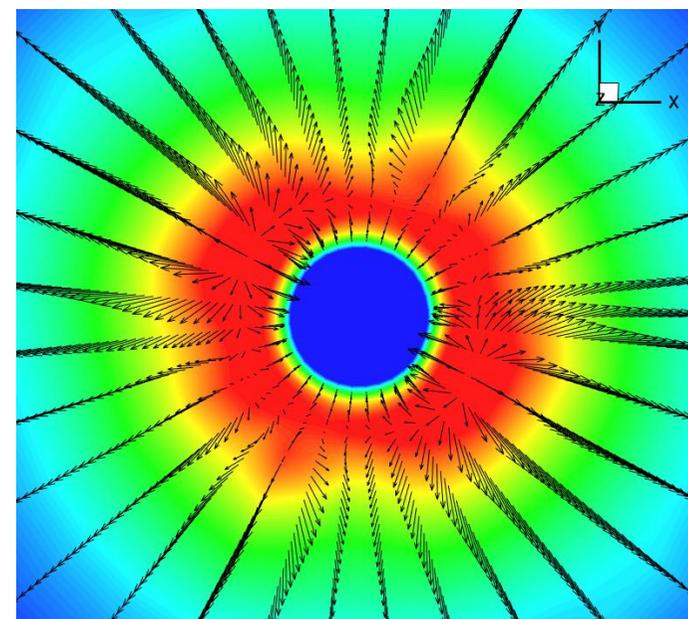
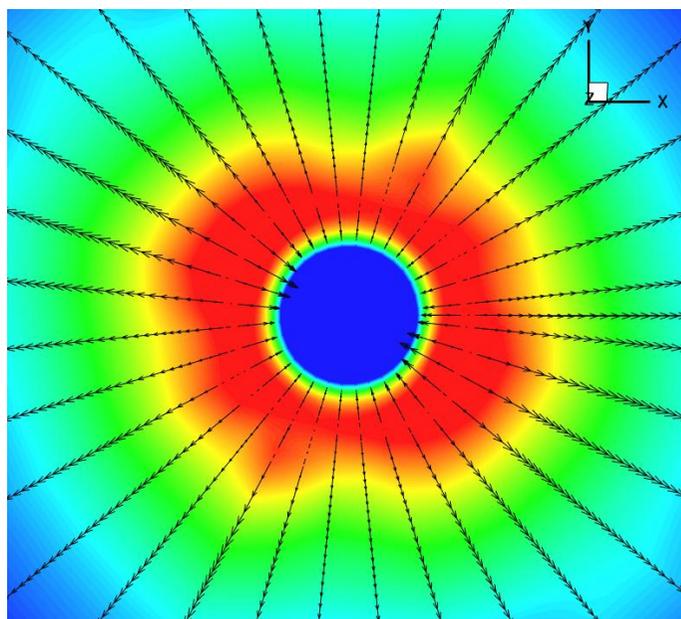
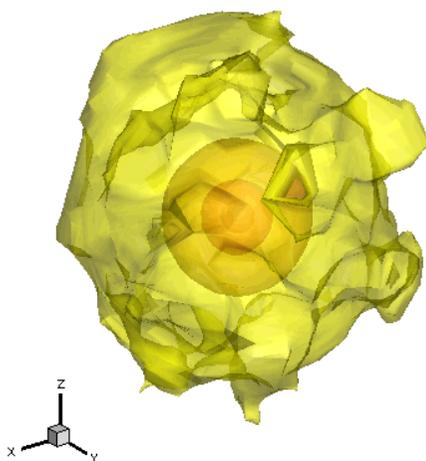
- **世界で初めて計算を実現した** 住吉・山田 (2012)

ニュートリノの発生・伝搬

3次元物質分布における ν 輻射を記述

旧近似計算(放射状のみ)

最新6D計算(斜めにも飛ぶ)

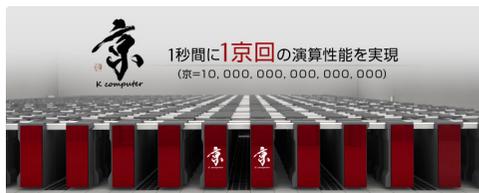


ニュートリノ密度(赤:高密度)と流束(矢印)

超新星コア, バウンス後0.2s



KEK SR16000



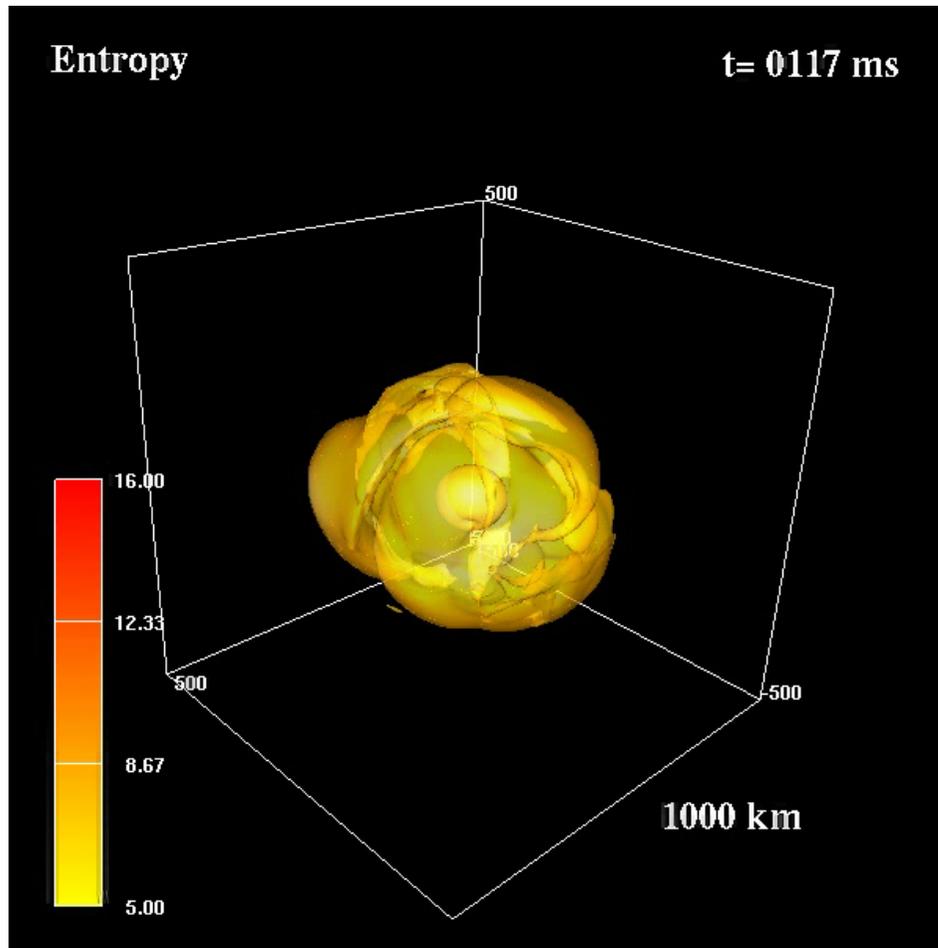
K-computer

<http://jp.fujitsu.com>

次世代スーパーコンピュータが必要

3次元超新星爆発シミュレーション

- 世界初の3Dニュートリノ輻射流体計算
 - 京コンピュータによる最新の結果



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



太陽質量11倍の星

滝脇知也(国立天文台)氏による

全体のまとめ

- 超新星爆発とは何か？

- 重い星の最期に起こる天体現象
 - 鉄コアが重力崩壊、はね返って爆発に至る
- ニュートリノが重要な鍵を握る
 - ニュートリノ閉込め、大量に放出される

- 爆発メカニズム解明への道のり

- 素粒子・原子核から星まで
 - 地球では到達できない極限環境
- スーパーコンピュータによる研究
 - 丸くない形状で爆発に至る

より大規模な計算、系統的な研究が必要

将来の夢

- 6次元ボルツマン輻射流体によるフル3D計算
 - 爆発メカニズムを確定 第一原理
 - 爆発エネルギーを決める 長時間
 - 様々な星による違い 系統性
 - ニュートリノ・核物理 信頼性
 - 重元素合成の現場 高解像度
 - ブラックホール形成 一般相対論
- エクサスケール・スーパーコンピュータ
 - 京コンピュータの100倍規模 (2020年頃)
- 自然科学・計算技術の発展へ