

超新星爆発:

—素粒子・原子核過程と流体の統合シミュレーション—

東大理 佐藤勝彦

- はじめに
- 星の進化と超新星
- 球対称シミュレーションの現状
- 自転・磁場も考慮した超新星爆発のシミュレーション
- 重力波
- まとめ

宇宙研究におけるシミュレーションの役割

- 宇宙現象は、その時空的スケールが極めて大きいいため、実験は不可能。観測といえどもその断片を見ることしかできない。
- また、ミクロの法則から大スケールの重力まで緒階層が同時に現象を支配する複雑系。
- 数値シミュレーションは宇宙の現象・進化を理解する不可欠な手段。

筑波大学計算科学研究センターの、日本、世界での宇宙研究における役割は極めて大きい。



超新星1987A

1987年2月23日

午後4時34分

16万年前に大マゼラン雲で超新星爆発が起こった。16万年の旅を終えて地球にやってきたニュートリノを検出

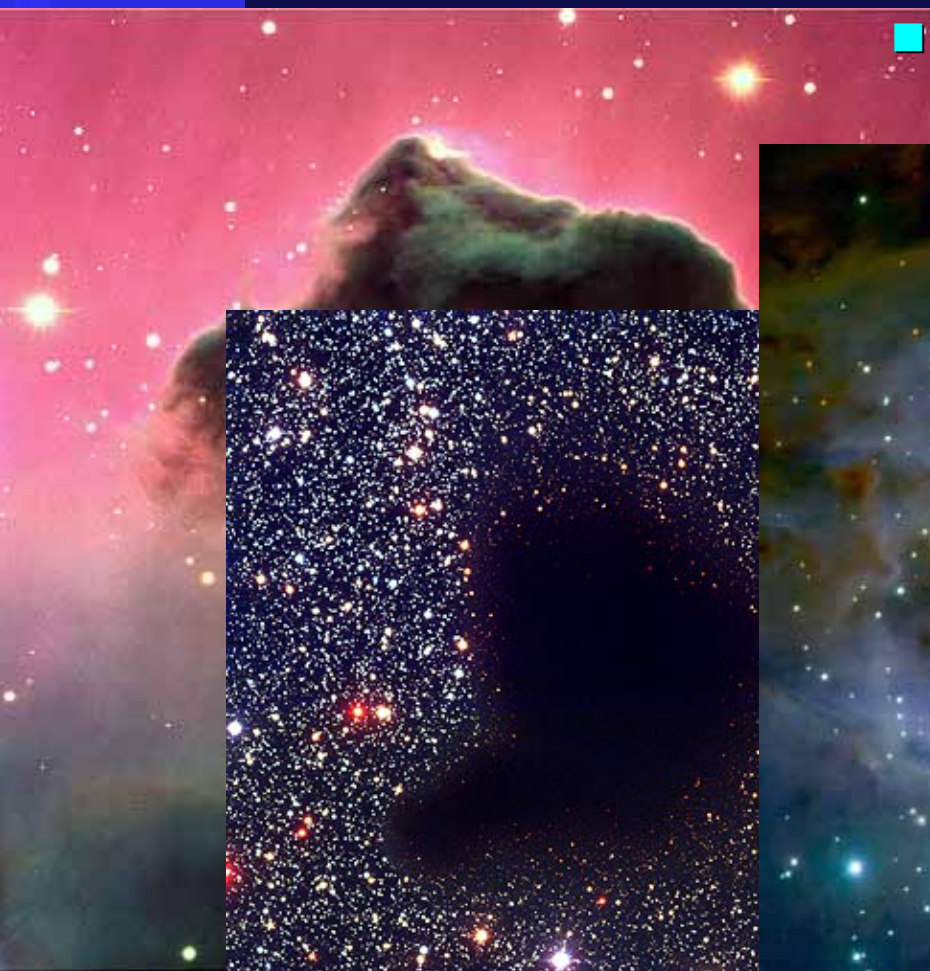
たニュートリノを検出

このとき10兆個のニュートリノが私たちの体を通り、再び宇宙空間に飛び去っていった。

地中深く設置されたカミオカンデが11個を検出

2. 星の進化と超新星

- 星は銀河に漂うガスが集まって作られる。
- 星の一生は生まれたときの質量で決まる。



Pre-Collapse Black Cloud B68 (visual
(VLT ANTU + FORS 1)



オリオン
大星雲

The Orion



すばる

星の進化



もし星の質量が太陽の8倍より小さいと、ここで核燃焼は止まり、外層が星風として放出、**惑星状星雲**となる。中心のコアは**白色矮星**になる。

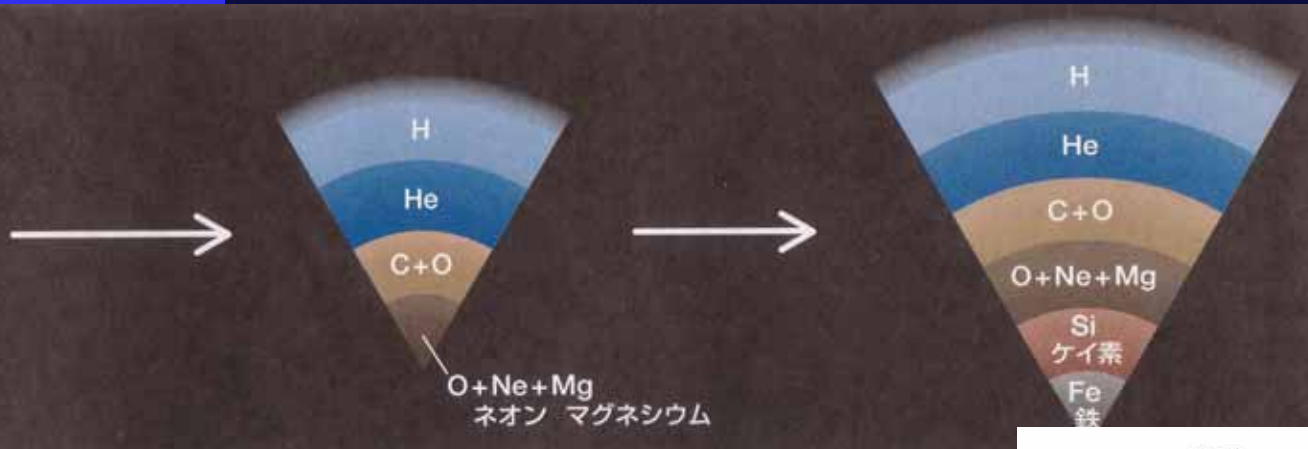
白色矮星:

地球の大きさ程度だが、スプーン一杯分の質量が1トンを超える、高密度の星。

そして、宇宙の宝石とも言える惑星状星雲が作られる。



もし質量が太陽の8倍程度より大きいと



超新星爆発

40倍より小さいと?

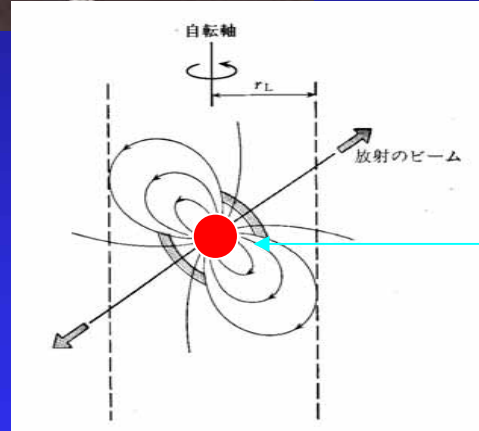


中性子星

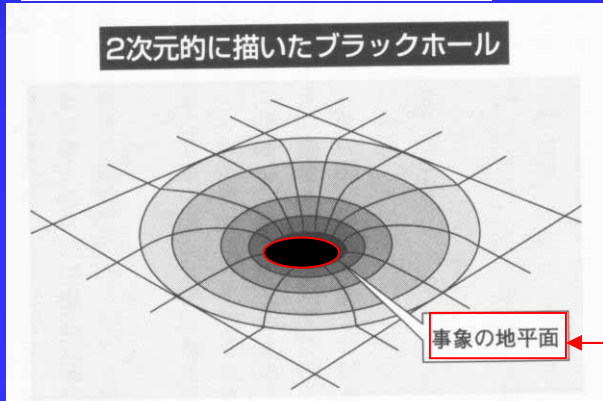
40倍より大きいと?



ブラックホール

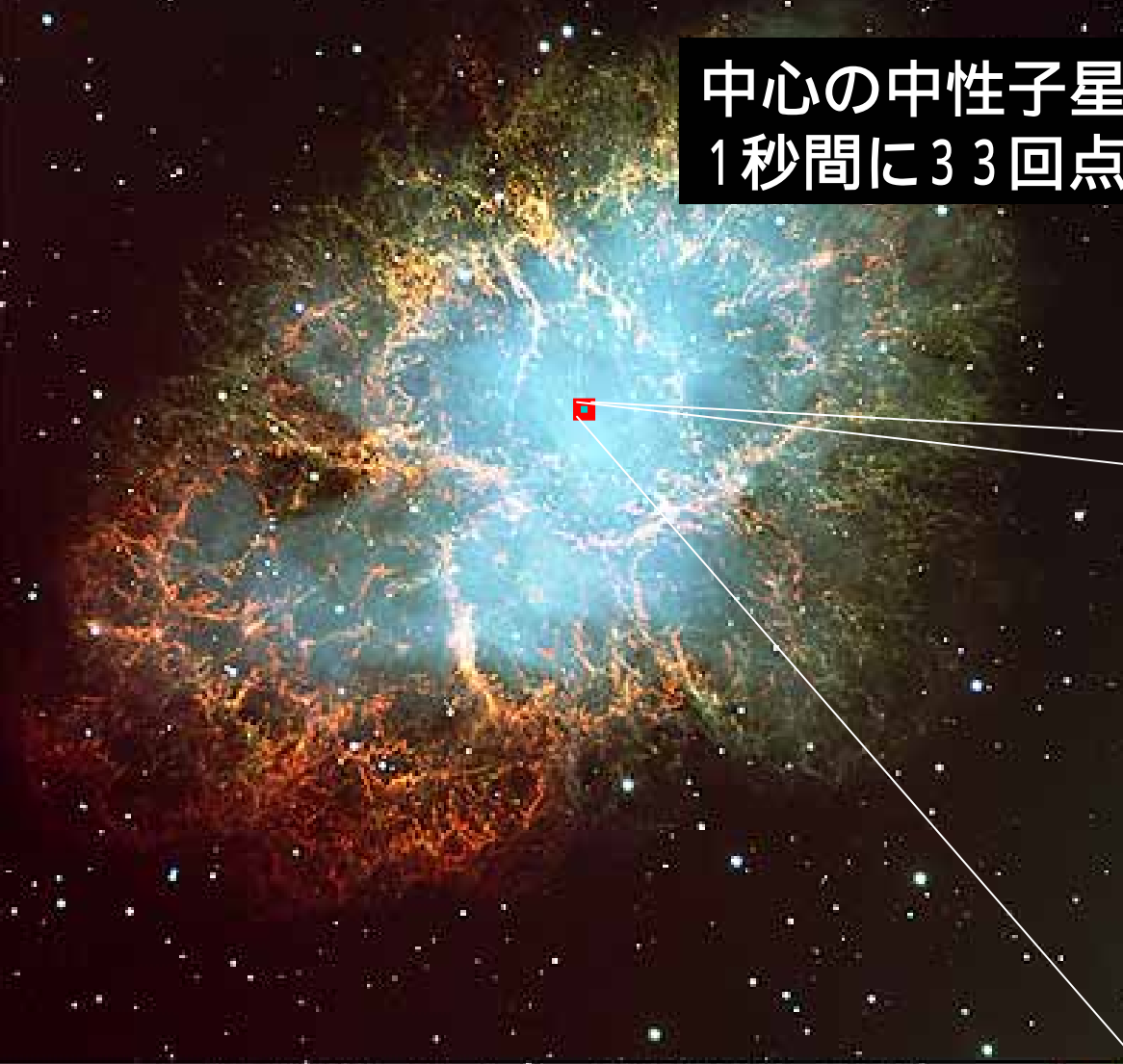


半径、10 km 程度だが
スプーン一杯が10億トン

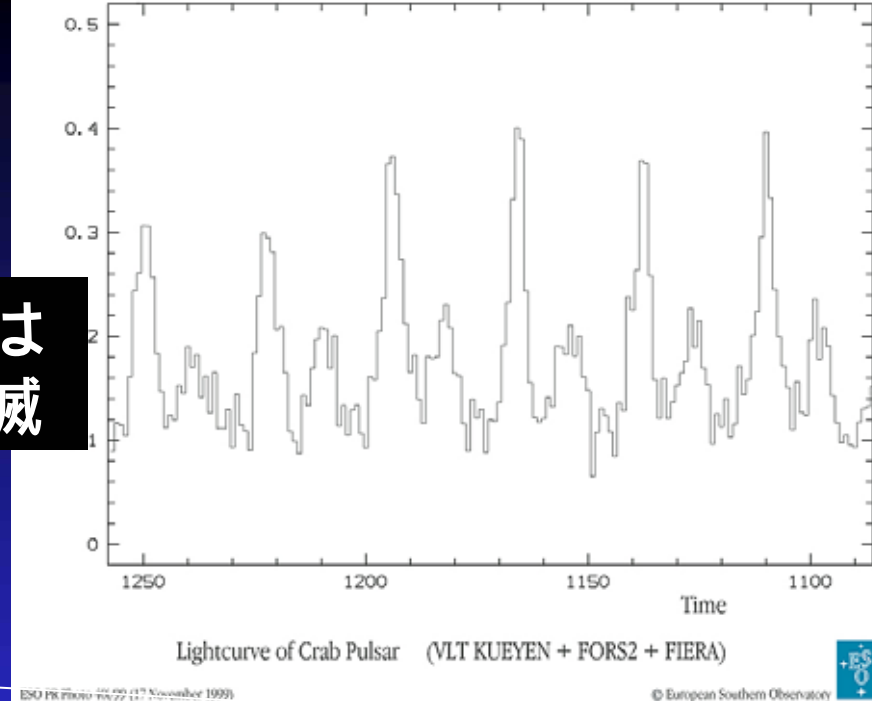


事象の地平線を越えるともはや逃げ出せない。

かに星雲： 明月記の超新星残骸



中心の中性子星は
1秒間に33回点滅

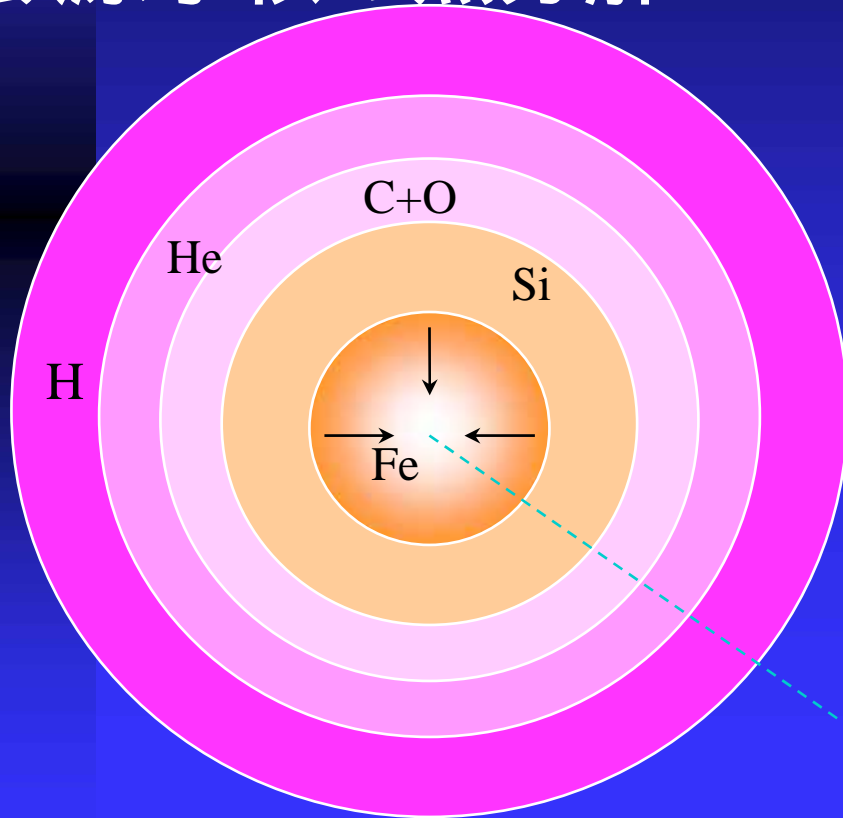


The Crab Nebula in Taurus (VLT KUEYEN + FORS2)



中心に作られた鉄のコアは、密度と温度が高く
なったため不安定になり、自分の重みでつぶれる。

1. 鉄原子核の熱分解



2. 原子核の電子捕獲



⋮

電子のフェルミ縮対圧力が星を支えていたが、それが減少し、そのエネルギーはニュートリノによって持ち去られる。

重力崩壊型超新星の爆発機構

コアを重力崩壊させ、その解放された重力エネルギーで外層を吹き飛ばす。

重力崩壊

$$M \gtrsim 8M_{\odot}$$

$$e^{-} + p \rightarrow \nu_e + n$$

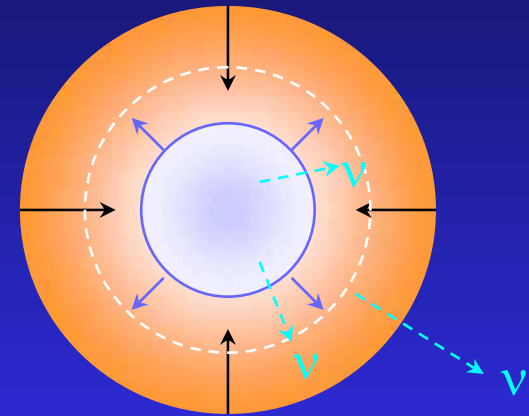
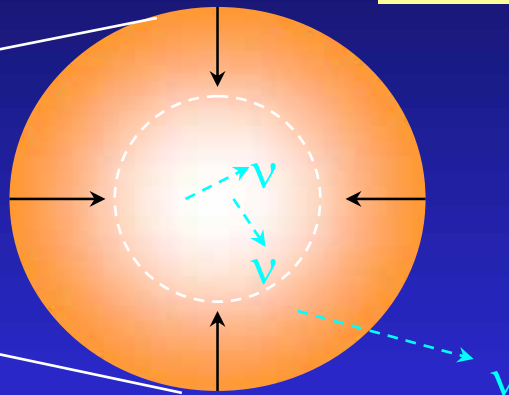
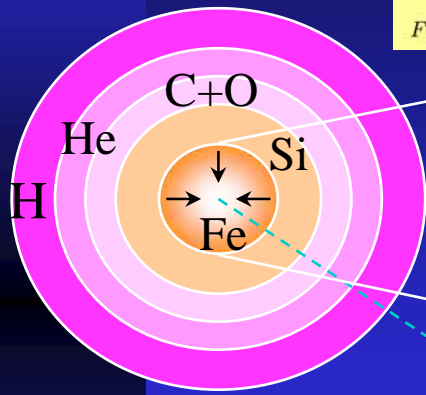
$$Fe + \gamma \rightarrow p + n$$

ν トラッピング

$$\rho_c \sim 10^{12} \text{g/cm}^3$$

コアのバウン

$$\rho_c \sim 3 \times 10^{14} \text{g/cm}^3$$



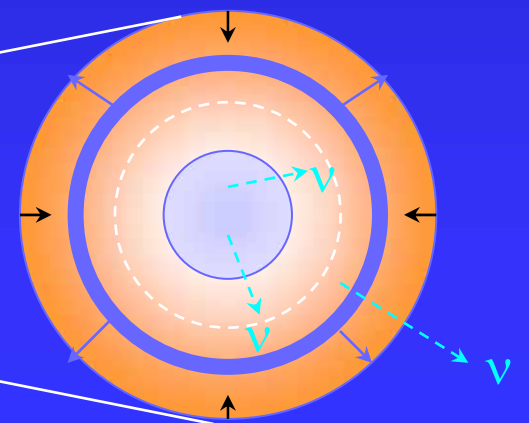
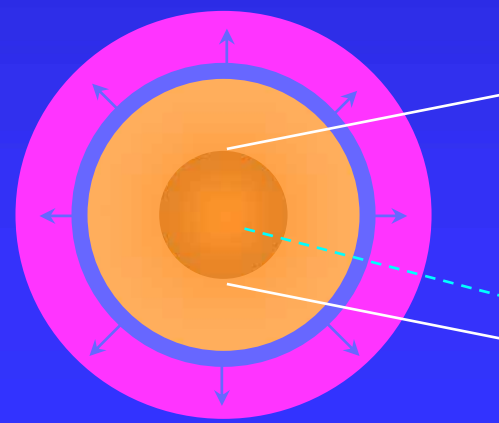
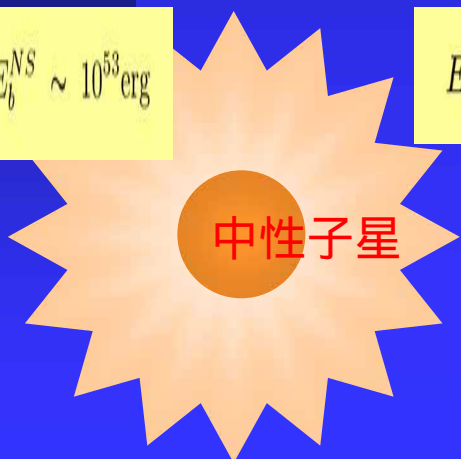
SN explosion

shock in envelope

shock propagation in core

$$E_{tot} \sim E_b^{NS} \sim 10^{53} \text{erg}$$

$$E_{exp} \sim 10^{51} \text{erg}$$



重力崩壊型超新星の物理

一 素粒子・原子核課程と流体の統合シミュレーション一

- マクロの物理
 - 流体計算
 - 自転
 - 対流
 - 輻射()輸送
 - 一般相対論
 - 重力波
 - 磁場

- ミクロの物理
 - 弱い相互作用
 - 物質とニュートリノとの相互作用
 - ニュートリノ振動
 - 核物理
 - 原子核の合体、融合、溶解
 - 状態方程式
 - ニュートリノのコヒーレント散乱
 - 輸送係数の多体効果

星の運命は宇宙の進化も支配。

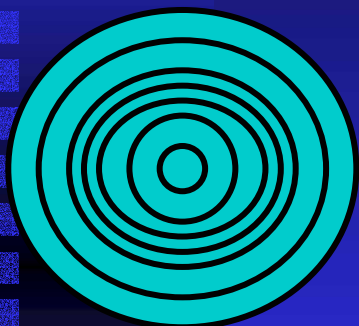
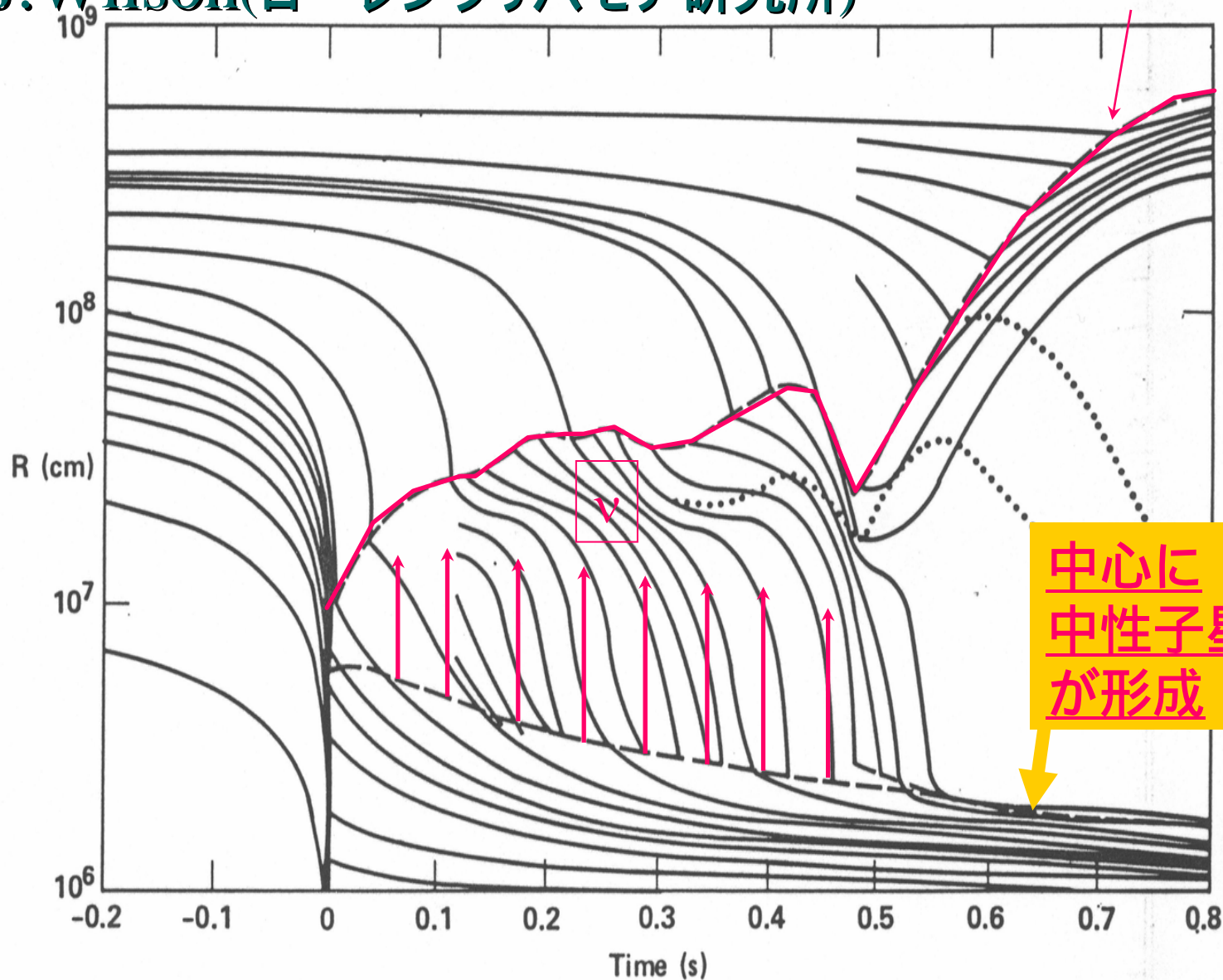
- 宇宙における元素の起源・化学進化
 - 爆発的元素合成, r-プロセス → 生命の材料であるCNO合成、取り出し
- 中性子星、ブラックホール、ガンマ線バースト源
- 高エネルギー粒子加速

球対称・磁場なし仮定のシミュレーション

- 星の進化は球対称仮定の理論で良くあう。
(しかし重力崩壊では星のコアはスピナップ、磁場も巻き込み、MRI不安定性で強められる。)
- ニュートリノ輸送の計算は極めて困難で、とても2次元、3次元での輻射流体計算は不可能。 ← - 梅村講演
(中心では平均自由行程極めて短い、外層では無限に長い、しかもエネルギー依存性大)
- さらに磁場まで入れる計算は不可能
- 一般相対論的重力崩壊計算が可能。
- 厳密な状態方程式を用いた流体計算が可能。

超新星爆発のコンピュータシミュレーション

J. Wilson (ローレンツリバモア研究所)



星をたまねぎの皮のように輪切りにしてコンピュータシミュレーションを行う。

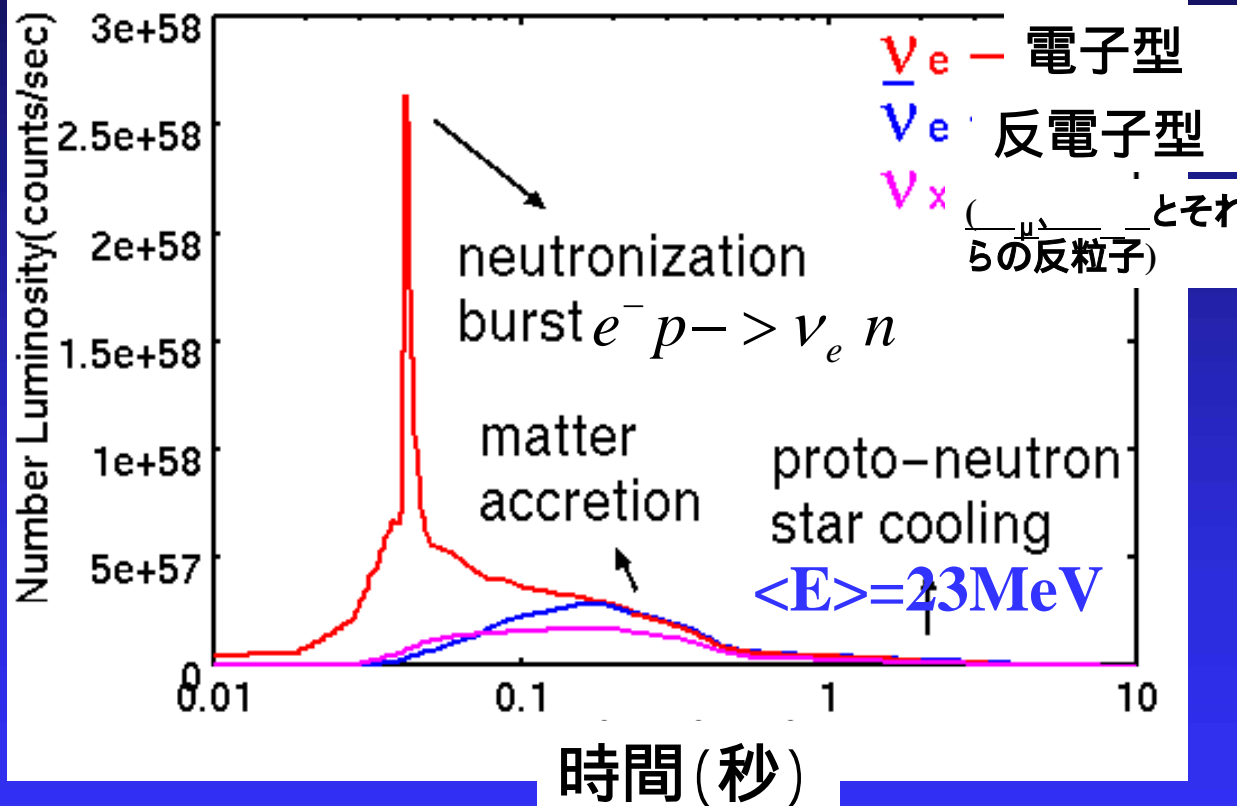
コンピュータシミュレーションによるニュートリノバーストの予言。

(戸谷、佐藤、ダルヘッド、ウイルソン、98)

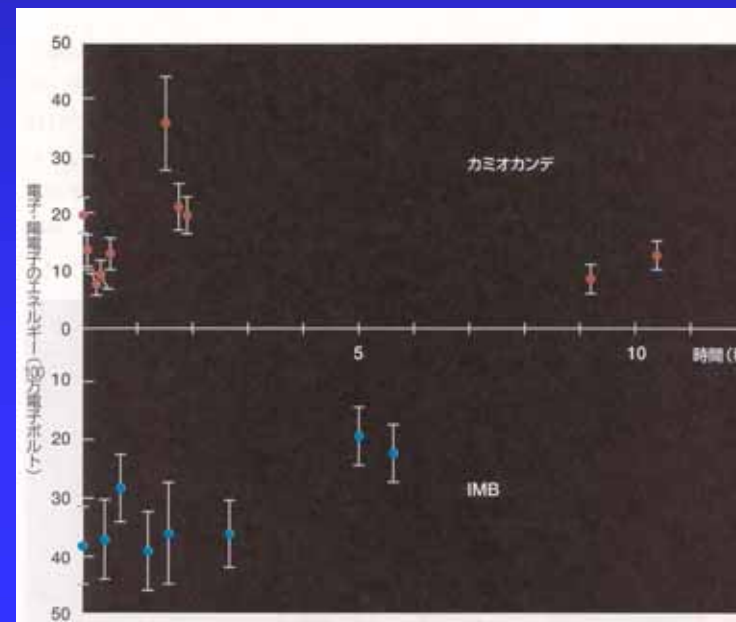
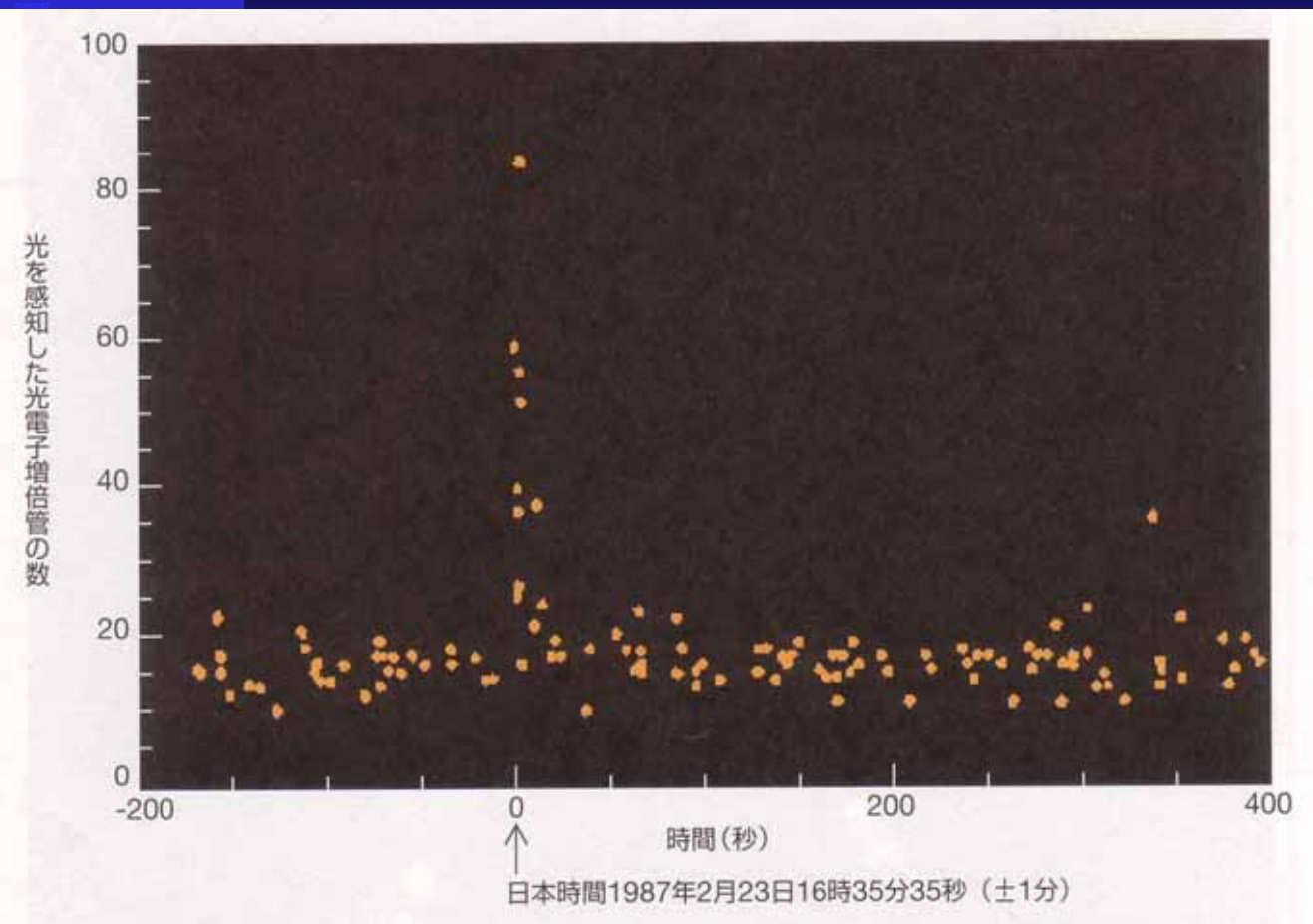
トラッピング理論の予想どおりニュートリノバーストは

10秒程度続く。

放出されるニュートリノの数の時間変化



カミオカンデによる超新星1987Aからの ニュートリノバーストの検出



カミオカンデの観測で何がわかったか？

- 超新星爆発が星の重力崩壊で確かにおこっていることを実証。
- ニュートリノとして放出されたエネルギーは、中性子星が形成されたとした場合とよく一致。

1 - 3×10^{53} エルグ

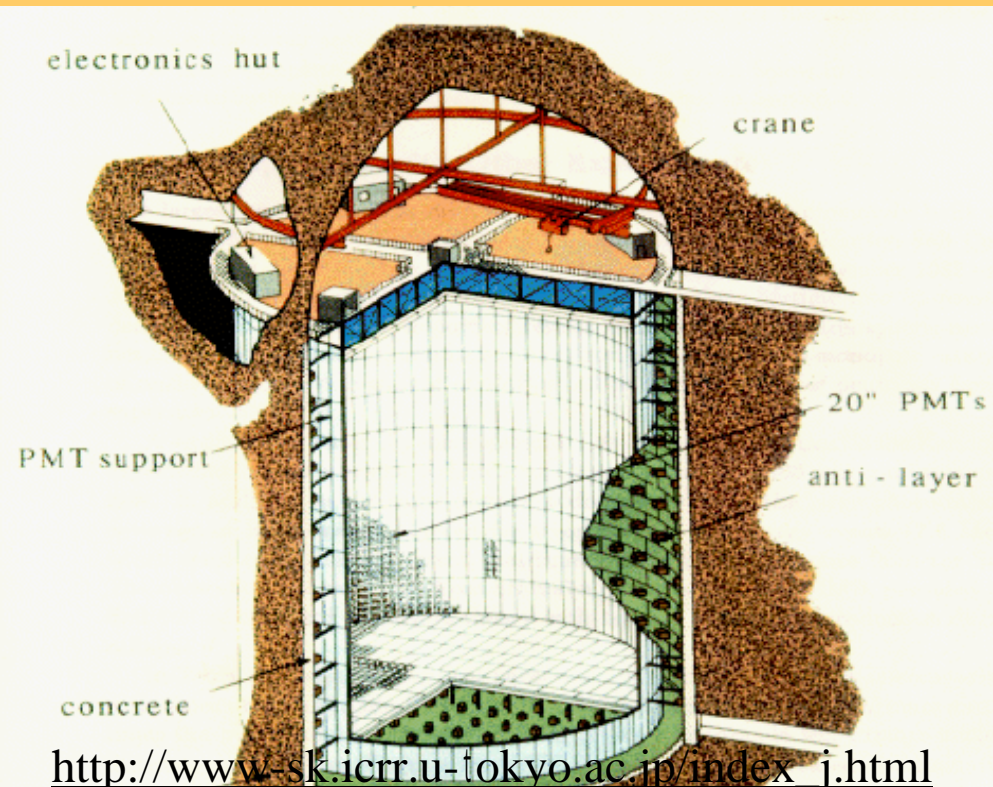
- ニュートリノが確かにトラップされていた。
ニュートリノバースト持続時間: 10秒程度

超新星が重力崩壊で起こったことを実証する、歴史に残る偉大な成果

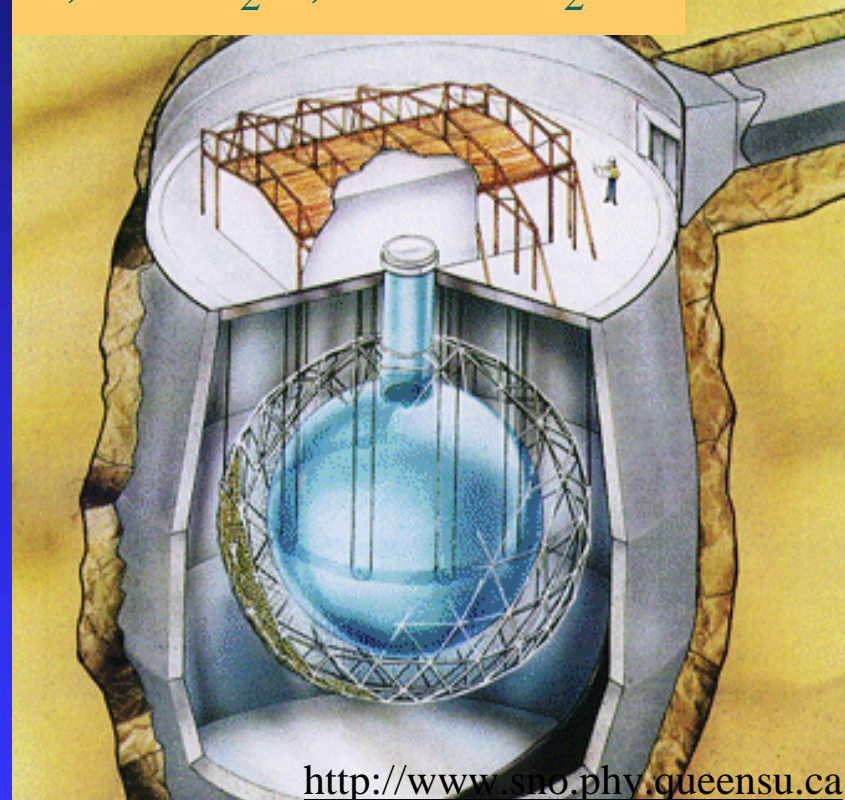
11個ではあまりにも少ない。しかし、今や巨大な検出器が稼動している !

- もし、我々の銀河の中心で超新星爆発が起こると
SKでは 10,000 個 SNOでは350 個観測できるはずである。

総重量 : 50,000トン、もと装置の30倍



1,000tD₂O, 1.400t H₂O

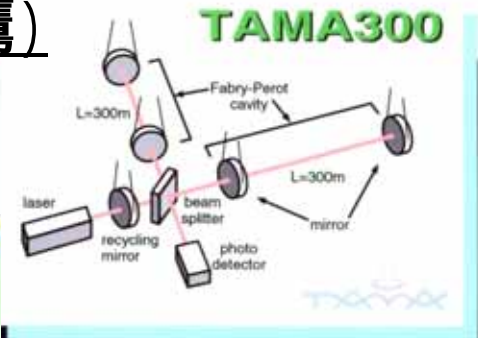


超新星ニュートリノ観測から、爆発の機構が解明され、また
ニュートリノ物理についての情報が得られるに違いない。

もし超新星が銀河中心でおこったとすると、TAMA、LIGOで観測可能。

震幅が10のマイナス20乗程度

国立天文台(三鷹)

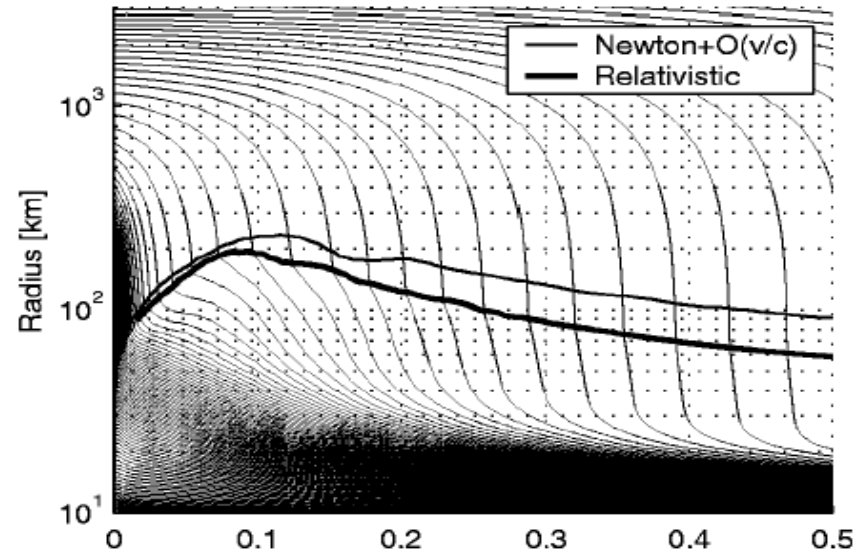


ニュートリノ(スーパーカミオカンデ)と重力波(TAMA)で同時観測が行われれば、超新星の爆発の様子もはっきりと見えてくるかもしれない。

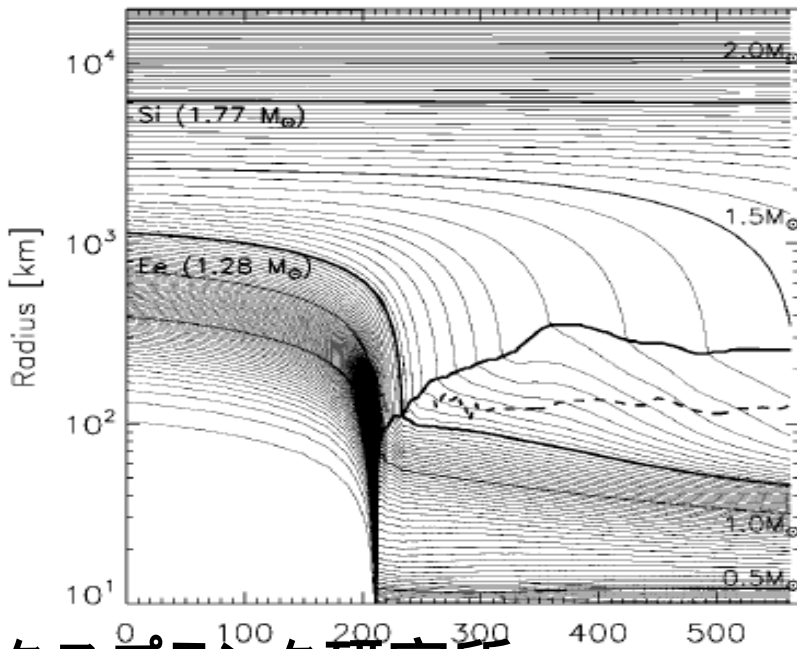
最近の超新星爆発のシミュレーション

爆発がおこらず星がブラックホールになってしまう。

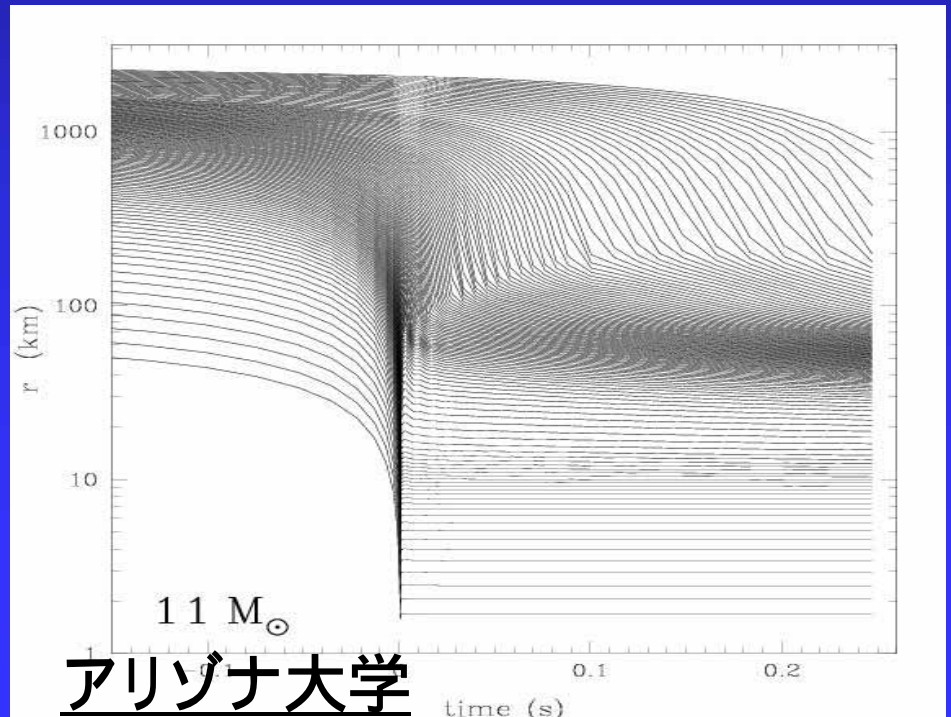
しかし、自転も磁場も考慮されていない。



ブルックヘブン研究所



マックスプランク研究所



アリゾナ大学

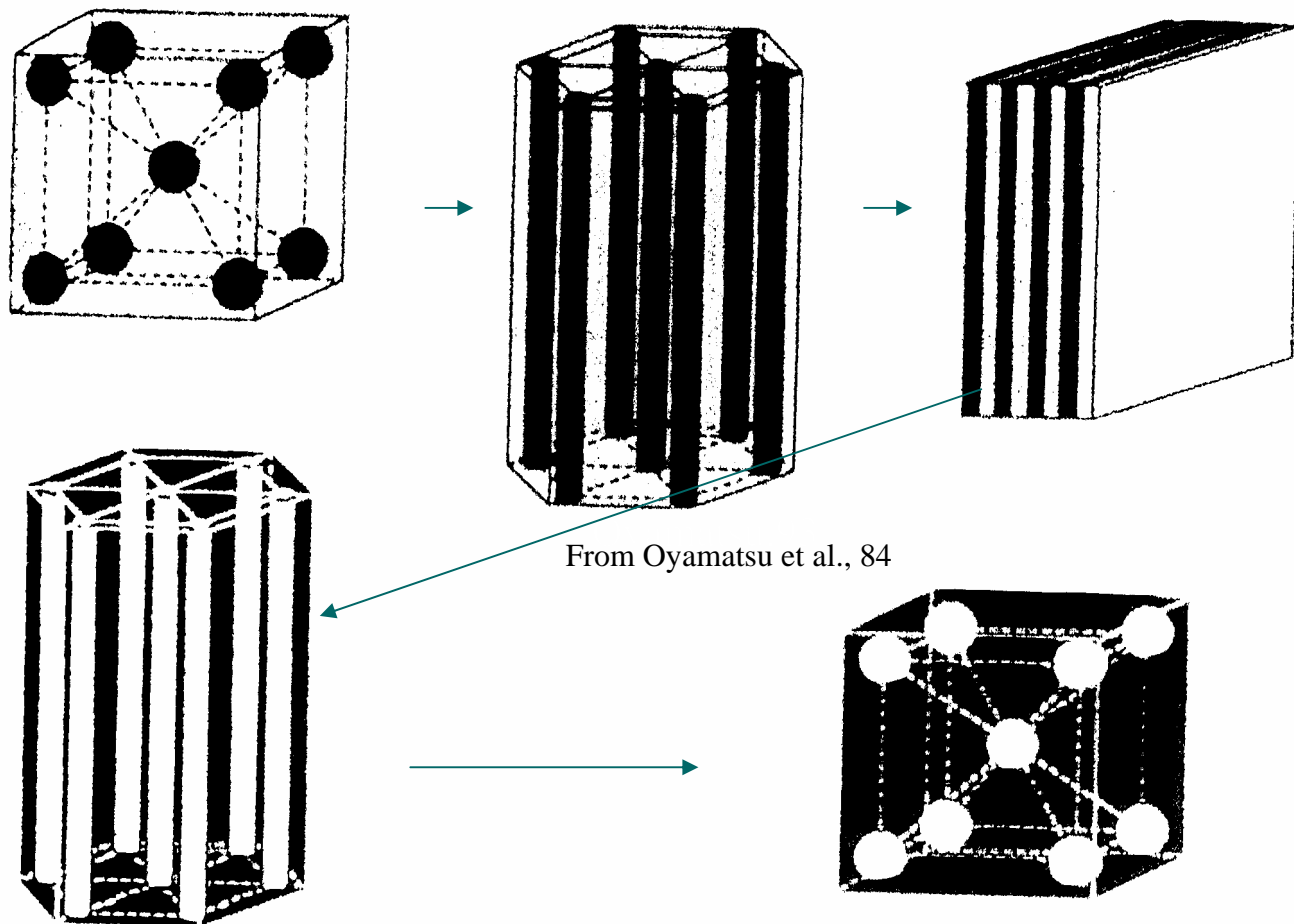
なぜ爆発しないのか？

1. マイクロフィジクス (neutrino processes, EOS etc.) は今もって不十分？ なにか重要なプロセスを見落としている？ → 一例、原子核の溶解
2. 数値シミュレーション法 (neutrino transfer , convection, etc) はまだ信頼できない？
3. 球対称シミュレーションは基本的に不適切。自転、磁場は爆発の本質的役割を担っている？
(=> 今日の主テーマ)

物質密度の上昇と温度の中で原子核はどのようにくっ付き一様核物質となるのか？

“原子核パスタ”構造

(Ravenhall & Pethick.,83, Hashimoto et al.,84, Oyamatsu et al., 84,...Maruyama et al., 98, Watanabe et al., 00, and 01, Iida et al.,01)



QMD method
(Maruyama et al. 98).

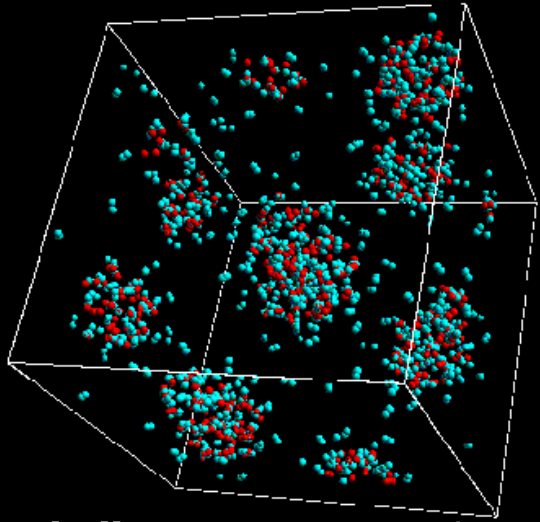
Watanabe et.
al .,01,02,03,04).

MD-GRAPE

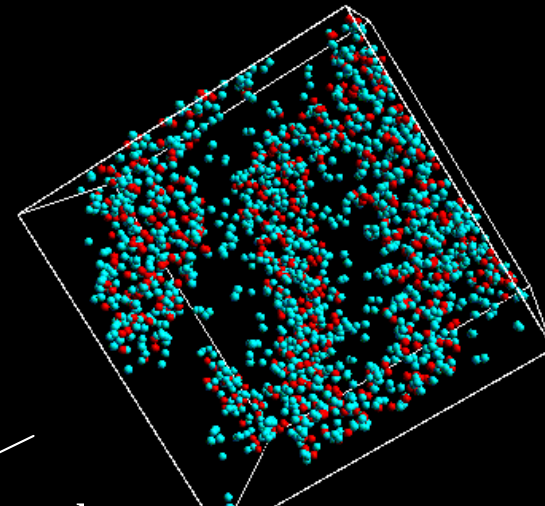
を用いて計算。

量子動力学(QMD) 計算の結果

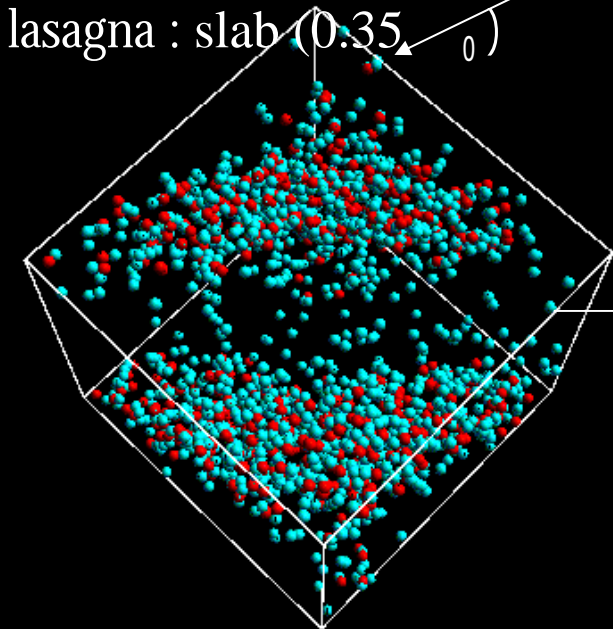
Watanabe,Sato,Yasuoka,E
bisusaki; PRC '02, '03, '4



meat ball: sphere(0.1₀)

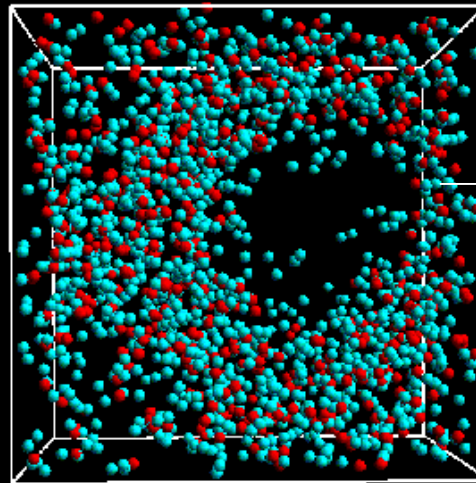


spaghetti : cylinder (0.18₀)

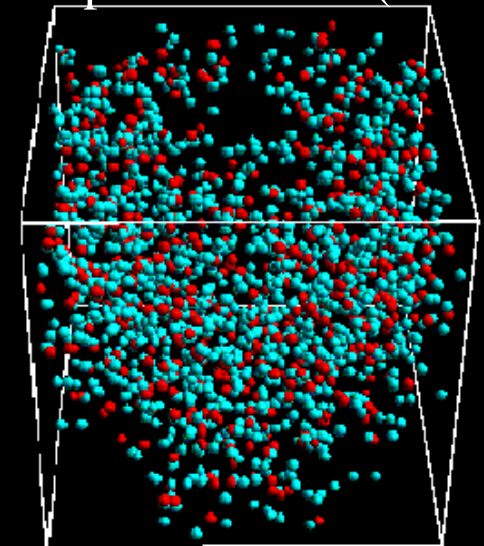


lasagna : slab (0.35₀)

anti-spaghetti :
cylinder hole (0.5₀)



anti meat ball:
Spherical hole (0.55₀)

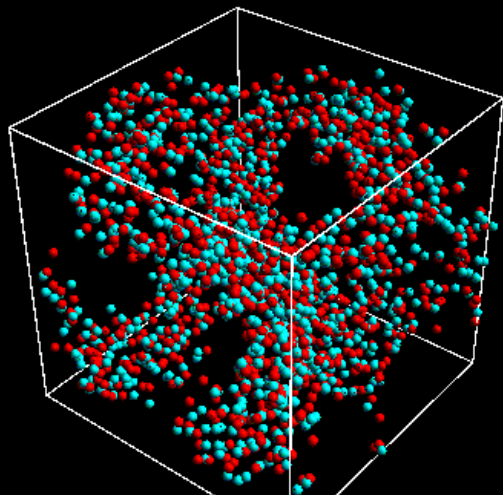


Model:
N= 2048
T~0.1MeV
X=p/(p+n)=0.3
陽子 中性子

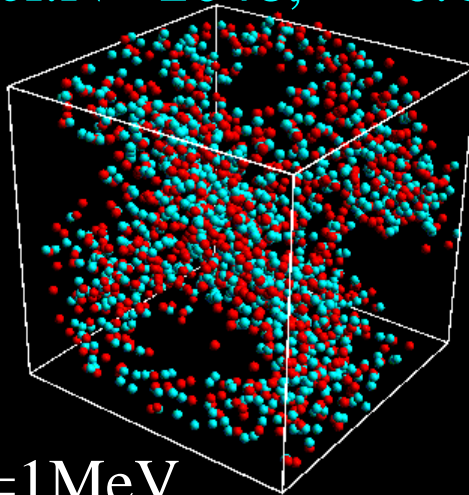
温度上昇による pasta 構造の溶解:

Model: $N = 2048$, ~ 0.35

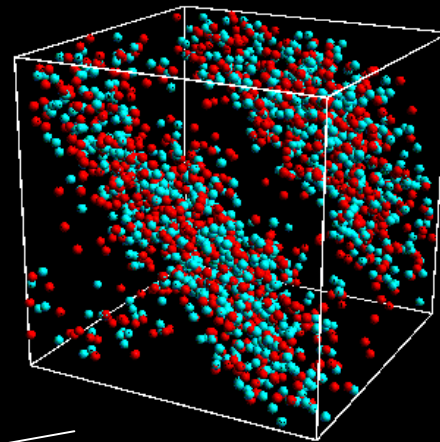
$X = p/(p+n) = 0.5$



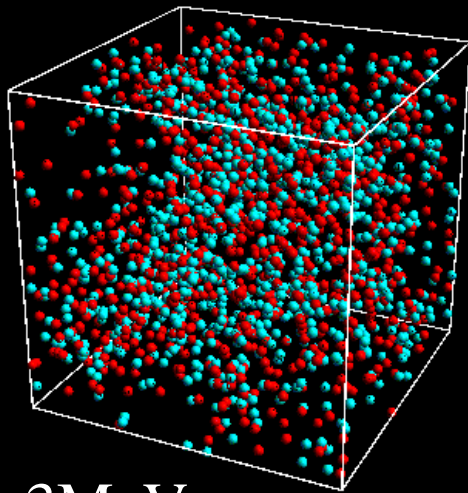
$T = 0.1 \text{ MeV}$ (cylinder+slab)



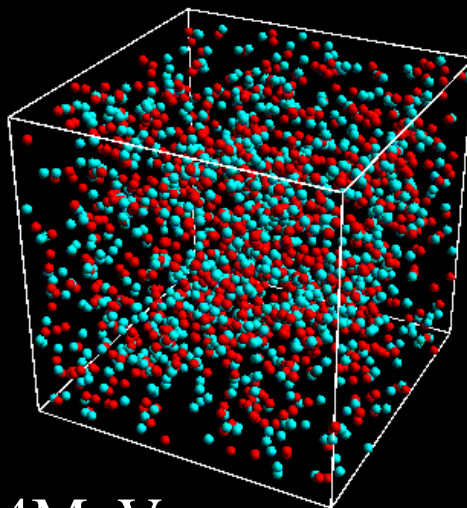
$T = 1 \text{ MeV}$



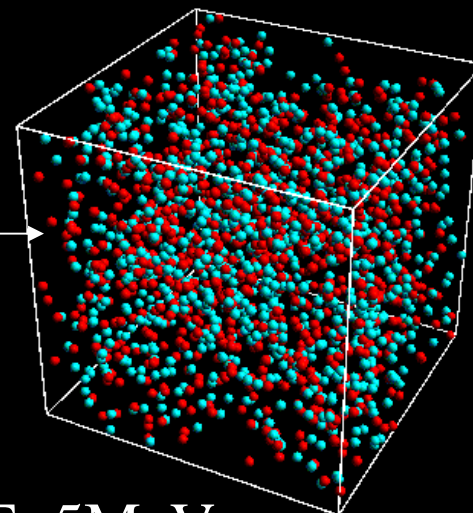
$T = 2 \text{ MeV}$ (slab)



$T = 3 \text{ MeV}$



$T = 4 \text{ MeV}$ (almost homogeneous)



$T = 5 \text{ MeV}$

Minkowski Functionals

A powerful tool for morphological analysis

About a surface of a body K in 3D space

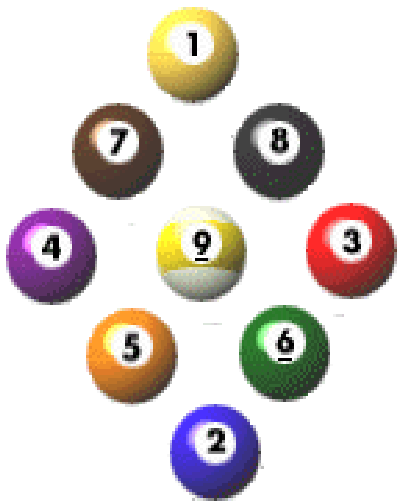
mean curvature $H = (\kappa_1 + \kappa_2)/2$

Gaussian curvature $G = \kappa_1 \kappa_2$
 κ_1, κ_2 : principal curvatures

Euler characteristic

$$\chi = \frac{1}{2\pi} \int_{\partial} G dA$$

= (number of isolated regions) – (number of tunnels)
+ (number of cavities)



$$\chi = 9$$



$$\chi = 3 - 3 = 0$$



$$\chi = 1 - 5 = -4$$

位相図 ($\chi = 0.3$)

$\langle H \rangle > 0$ $\langle H \rangle > 0$ $\langle H \rangle > 0$ $\langle H \rangle = 0$ $\langle H \rangle < 0$ $\langle H \rangle < 0$ $\langle H \rangle < 0$

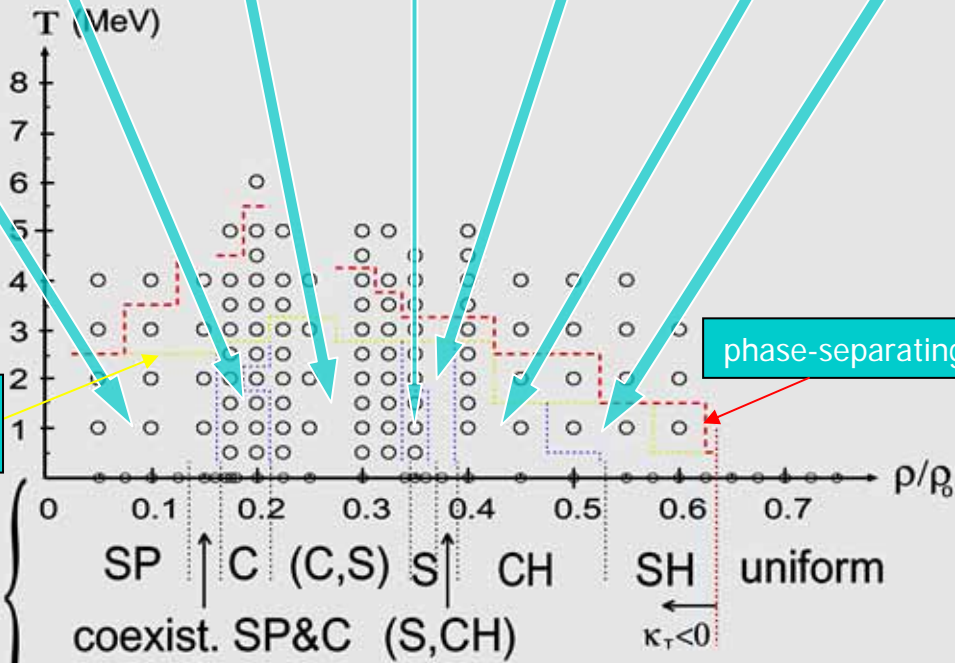
Structure with $\langle H \rangle < 0$ ("intermediate" phase) : Sponge-like

Euler characteristic

= (number of isolated regions) – (number of tunnels)
 + (number of cavities)

$$\chi = \frac{1}{2\pi} \int_{\partial} G dA$$

$\chi = 0.3$



limit for identification of nuclear surface

phase-separating region

About a surface of a body K in 3D space

mean curvature $H = (\kappa_1 + \kappa_2)/2$

Gaussian curvature $G = \kappa_1 \kappa_2$

κ_1, κ_2 : principal curvatures

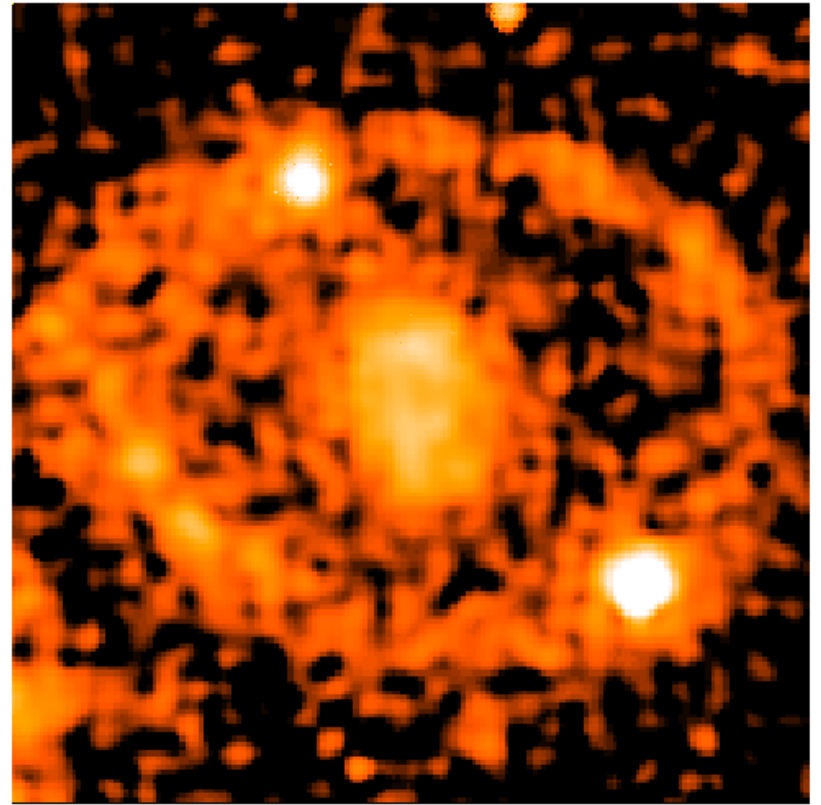
超新星爆発にたいする自転と磁場の効果

超新星爆発を起こすような大質量星は速く自転していることが知られている。

超新星1987Aの爆発後の写真は爆発前の星が速く自転していたことを示している。

またその爆発も自転軸方向に起こったことが観測から示唆されている。

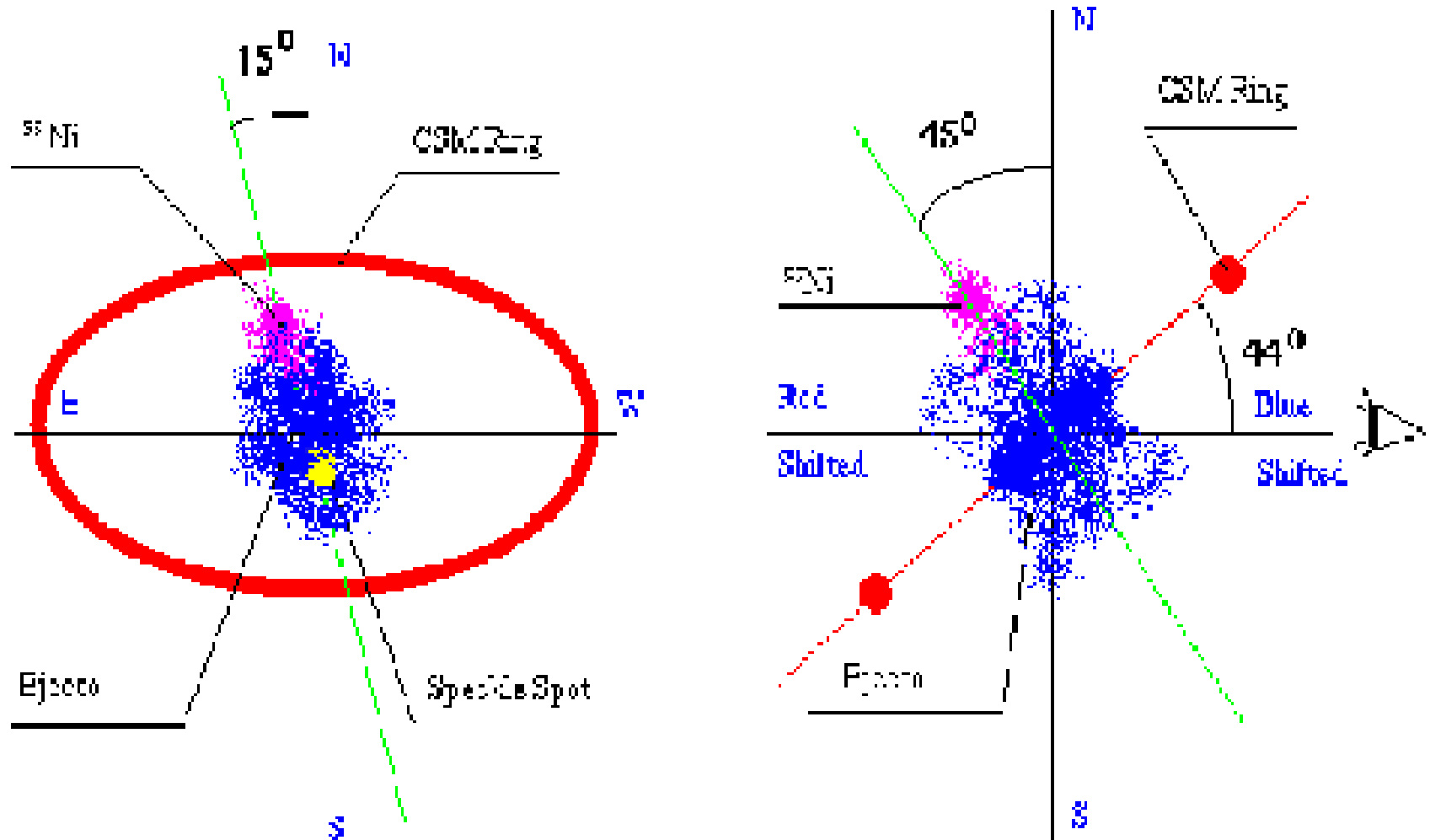
Supernova 1987A Rings



Hubble Space Telescope
Wide Field Planetary Camera 2



Observations suggest pre-supernova stars have large angular momentum.



多くのグループが磁化・自転重力崩壊のシミュレーションにチャレンジしているが...

Mesh code

2dim.

LeBranc & Wilson (70), Symbalisty (84)

Moenchmeier et al (91), Yamada, Sato (93,94), Shimizu et al (94,01), Ardeljan et al. (00) Kotake, Yamada, Sato(02,03), Burnas et al (03)

.....

3-dim.

Shimizu, Yamada, Sato (94)

SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics)

Herant et al ('94)

Fryer ('99), Fryer et al ('01), Fryer and Warren ('02)

.....

極めて困難なシミュレーション

multi-dimension neutrino transport

general relativistic treatment

.....

いずれも満足できるものはない。

磁気自転重力崩壊のシミュレーション

T. Takiwaki, K. Kotake, S. Nagataki and K. Sato (2004)

計算方法

2dim-ZEUS CODE

■ 基礎方程式 (MHD)

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad \text{ローレンツ力}$$

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla p - \rho \nabla \phi - \frac{1}{4\pi} (\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}$$

$$\rho \frac{D}{Dt} \left(\frac{e}{\rho} \right) = -p \nabla \cdot \mathbf{v} - L_\nu$$

$$\frac{d\mathbf{B}}{dt} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad \text{Neutrino による cooling}$$

$$\frac{D}{Dt} \equiv \frac{d}{dt} + \mathbf{v} \cdot \nabla \quad \text{自己重力含}$$

$$\nabla^2 \Phi = 4\pi G \rho$$

● 状態方程式

Shen et al. (1998)

- Boltzmann Gas (低密度)
- Thomas Fermi approximation
- Relativistic Mean Field Theory (高密度)

Realistic

● $\mathbf{B} = 0$ (CT法)

モデルとパラメータ

- 磁場の強さ、自転の速さの2つのパラメータによって爆発がどのように変化するか系統的に調べる。

T/|W|: Initial ratio of rotational/gravitational energy

	1%	2%	4%
0	B0TW1	B0TW2	B0TW4
10^9 G	B9TW1	B9TW2	B9TW4
$10^{10.5}$ G	B10.5TW 1	B10.5TW2	B10.5TW4
10^{12} G	B12TW1	B12TW2	B12TW4

B12TW4

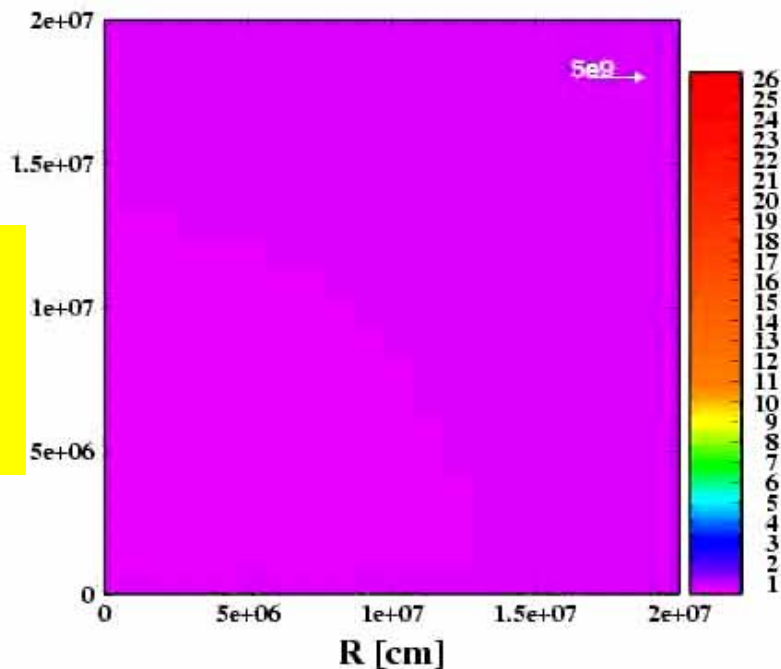
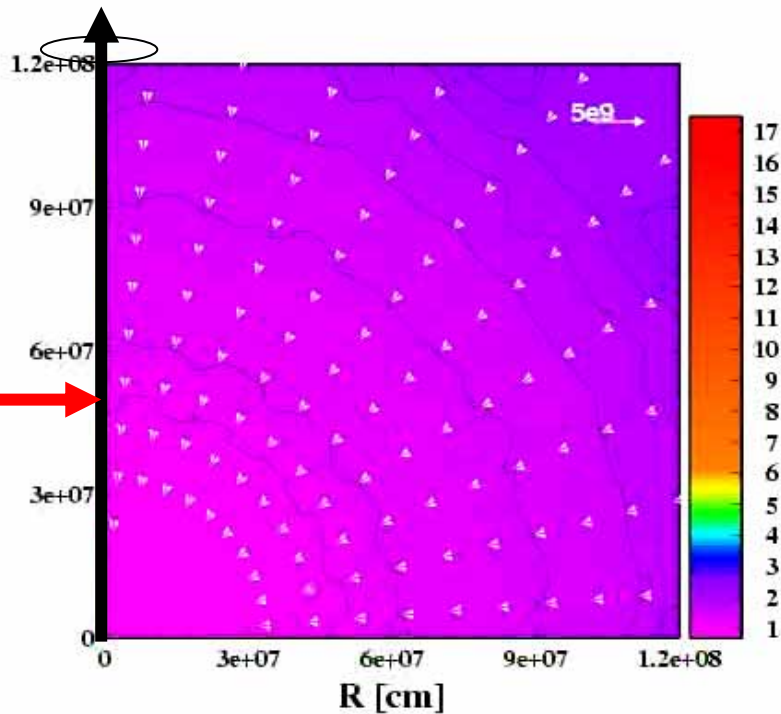
Color contour : Entropy per baryon
Arrows: fluid velocity are displayed.

Rapid rotation on the axis.

ジェットの爆発が自転軸に沿って強められた磁場に押されて起こる。

しかしジェットのコリメーションは弱い。

Bottom figure:
Zoom-up of
the central part



B12TW2 model

自転速度を遅くすると爆発はどう変化するか？

T/|W|: Initial ratio of rotational/gravitational energy

Initial Magnetic field (gauss)

	1%	2%	4%
0	B0TW1	B0TW2	B0TW4
10^9 G	B9TW1	B9TW2	B9TW4
$10^{10.5}$ G	B10.5TW 1	B10.5TW2	B10.5TW4
10^{12} G	B12TW1	B12TW2	B12TW4

B12TW2

Entropy distribution and fluid velocity

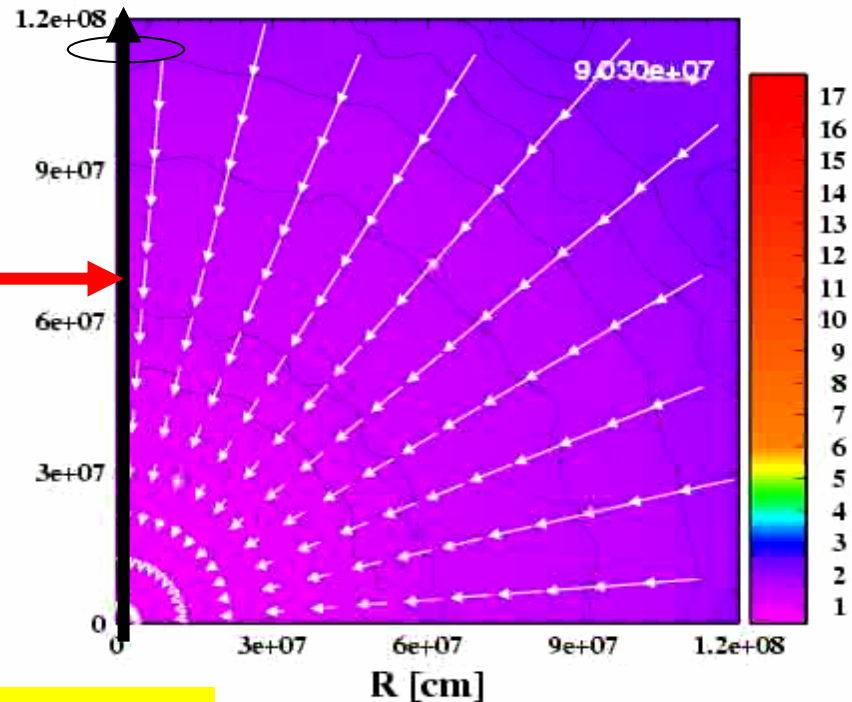
Rapid rotation on the axis.

ジェットの爆発は強くなった。

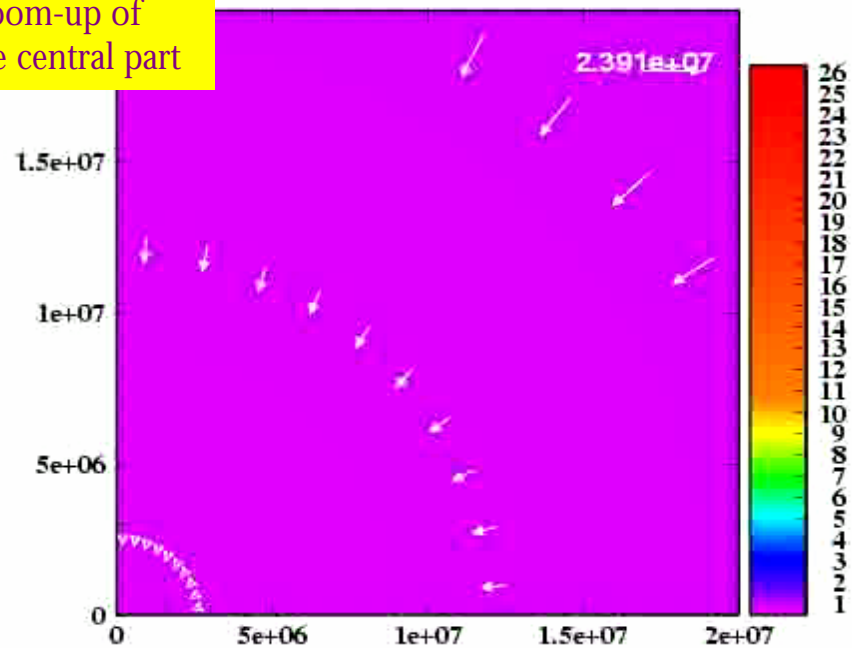
—遠心力が弱くなりより深く収縮し大きな重力エネルギーが解放されたから。—

ジェットはよりコリメイトされている。

High entropy clumps are ejected intermittently



Bottom figure:
Zoom-up of
the central part

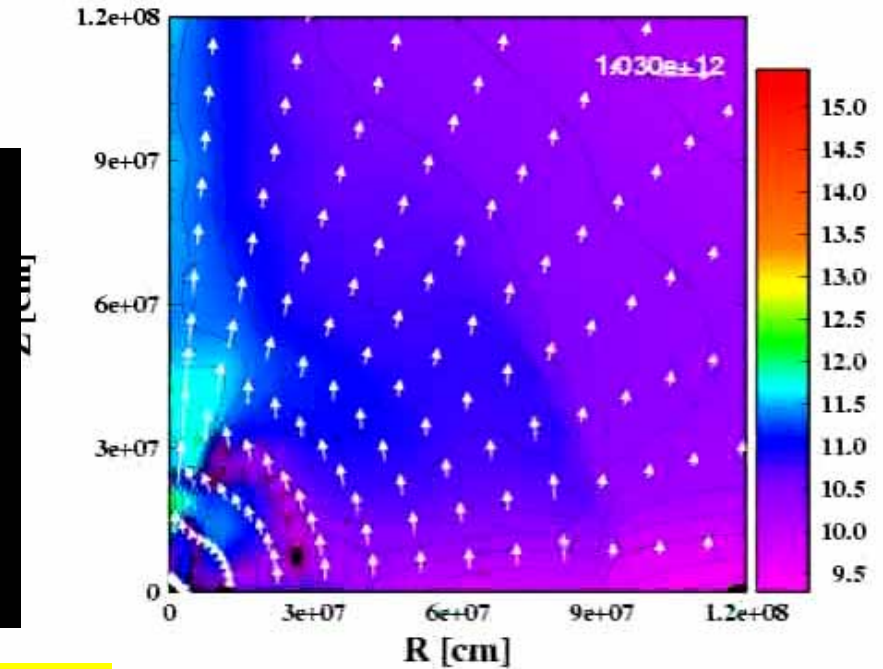


Model B12TW2(2)

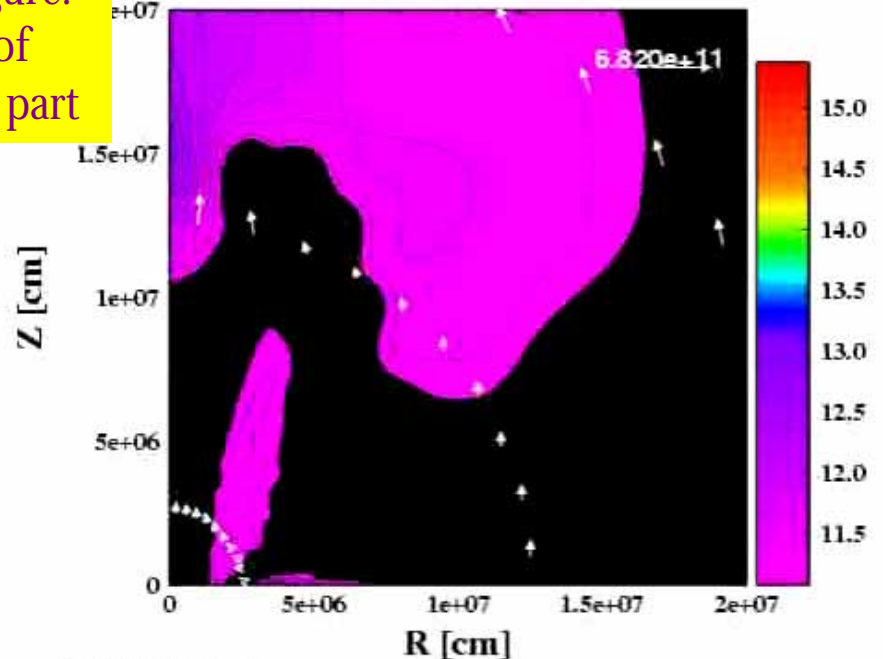
磁場がどのように強められたか見るために、磁場の進化を見る。

Color : strength of toroidal magnetic field

Arrows: direction of magnetic field on Z-R plane.



Bottom figure:
Zoom-up of
the central part



強いトロイダル磁場が

1) 微分回転による巻き込みによって
また、後期に

2) MRI (Magneto-Rotational Instability)
によって強められる。

磁場の巻き込みによる成長、MRIによる成長タイムスケールの比較

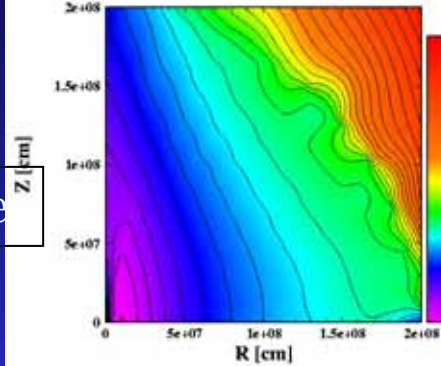
$$\tau_{MRI} = 4\pi \left| x \frac{d\Omega}{dx} \right|^{-1}$$

At the onset time of collapse

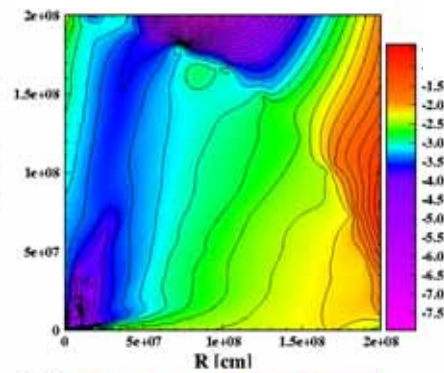
when the core bounces, $t=164\text{msec}$

When the jet is propagating, $t=235\text{msec}$

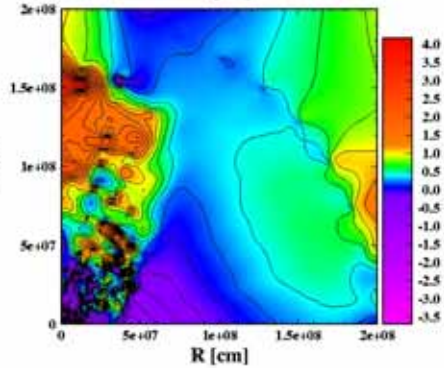
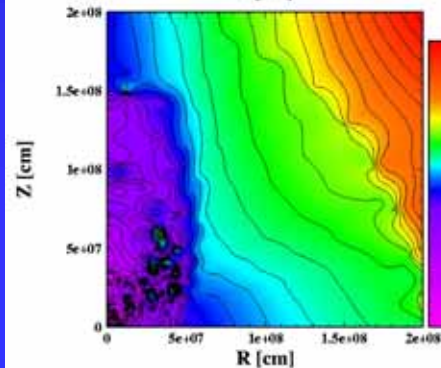
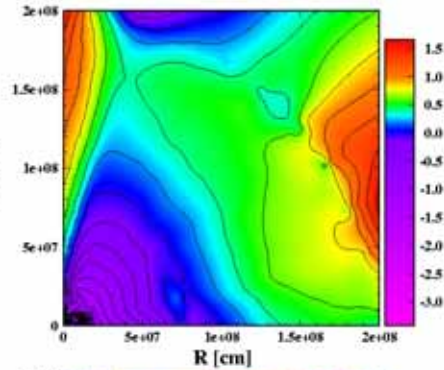
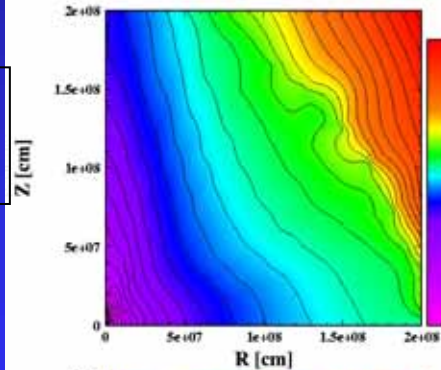
τ MRI



τ WRAP



$$\tau_{WRAP} = 4\pi \left| \frac{B_\phi}{B_X} \left(X \frac{d\Omega}{dX} \right)^{-1} \right|$$



初期では巻き込みによる成長。

最後はMRIによる成長が効果を現す。

B12TW1 model

より自転速度を遅くすると爆発はどう変化するか？.

T/|W|: Initial ratio of rotational/gravitational energy

Initial Magnetic field (gauss)

	1%	2%	4%
0	B0TW1	B0TW2	B0TW4
10^9 G	B9TW1	B9TW2	B9TW4
$10^{10.5}$ G	B10.5TW 1	B10.5TW2	B10.5TW4
10^{12} G	B12TW1	B12TW2	B12TW4

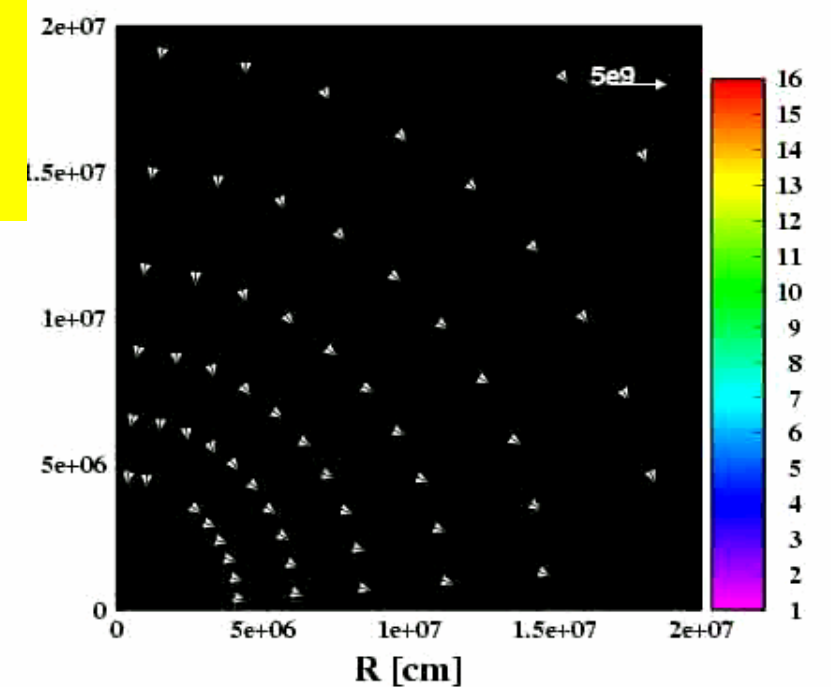
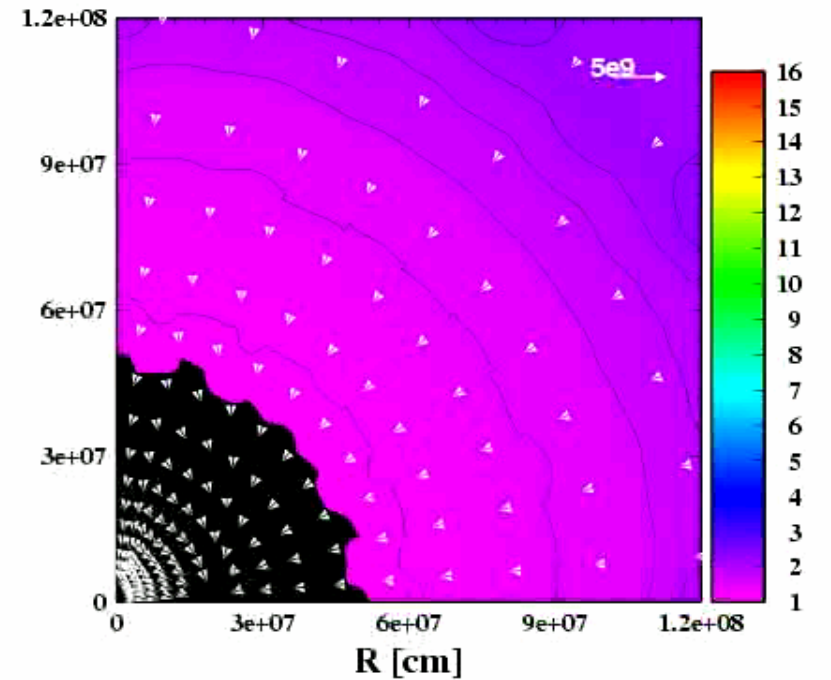
B12TW1 model

Entropy distribution and fluid velocity

このモデルで最も強いジェットの爆発が起こり
ジェットももっとも鋭い。

Bottom figure:
Zoom-up of
the central part

High entropy clumps are ejected intermittently



B9TW4 model

磁場を弱めると爆発はどうなるか？.

T/|W|: Initial ratio of rotational/gravitational energy

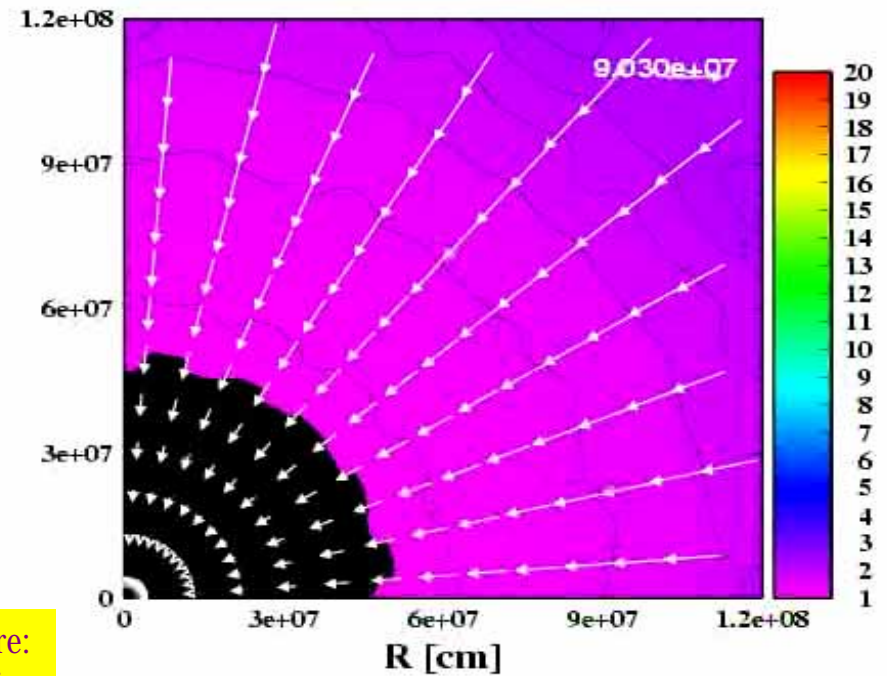
Initial Magnetic field (gauss)

	1%	2%	4%
0	B0TW1	B0TW2	B0TW4
10^9 G	B9TW1	B9TW2	B9TW4
$10^{10.5}$ G	B10.5TW 1	B10.5TW2	B10.5TW4
10^{12} G	B12TW1	B12TW2	B12TW4

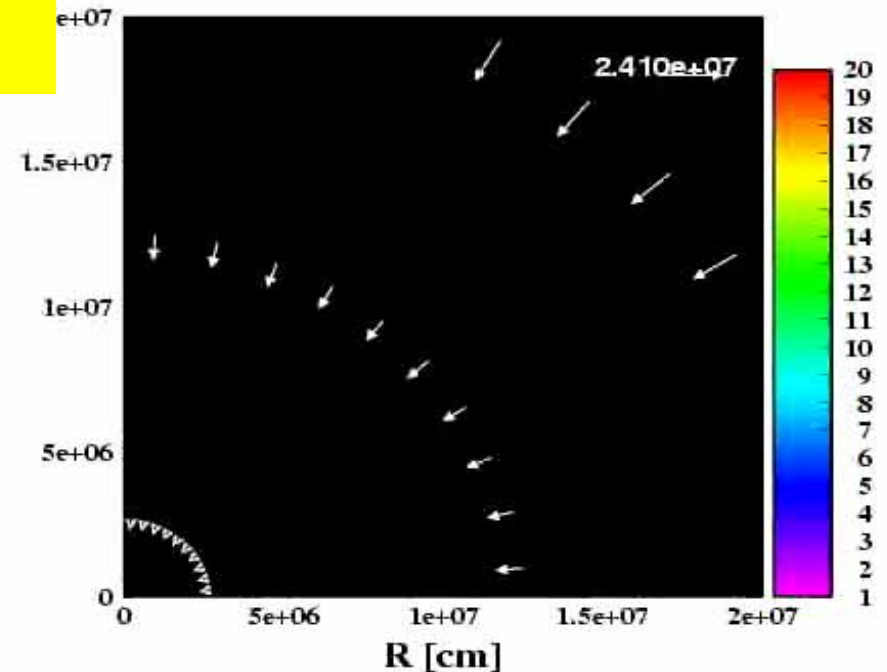
Case of B9TW4

Entropy distribution and fluid velocity

強いショックが発生するが、結局落下する物質によって停滞してしまう。



Bottom figure:
Zoom-up of
the central
part

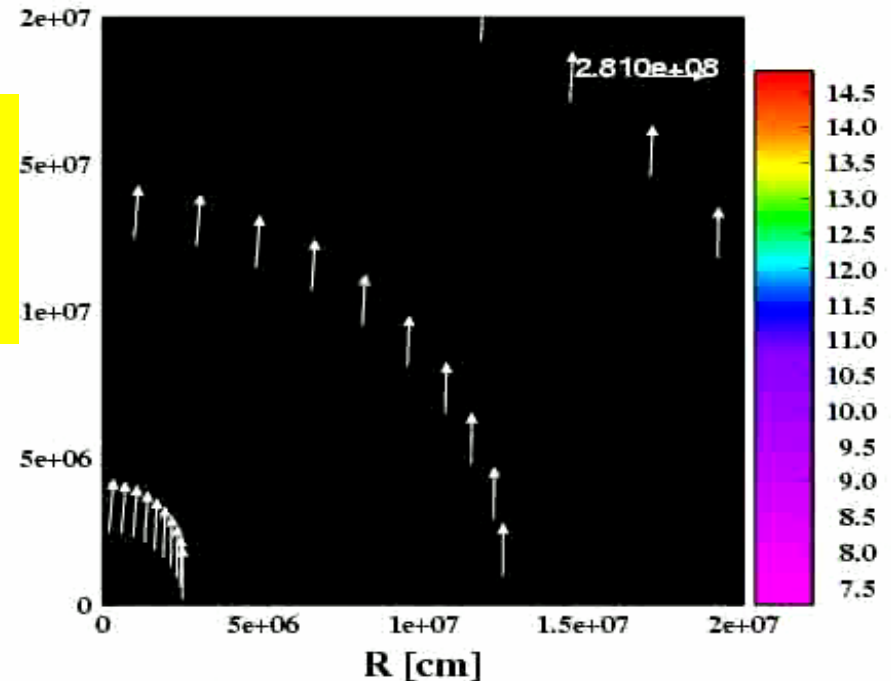
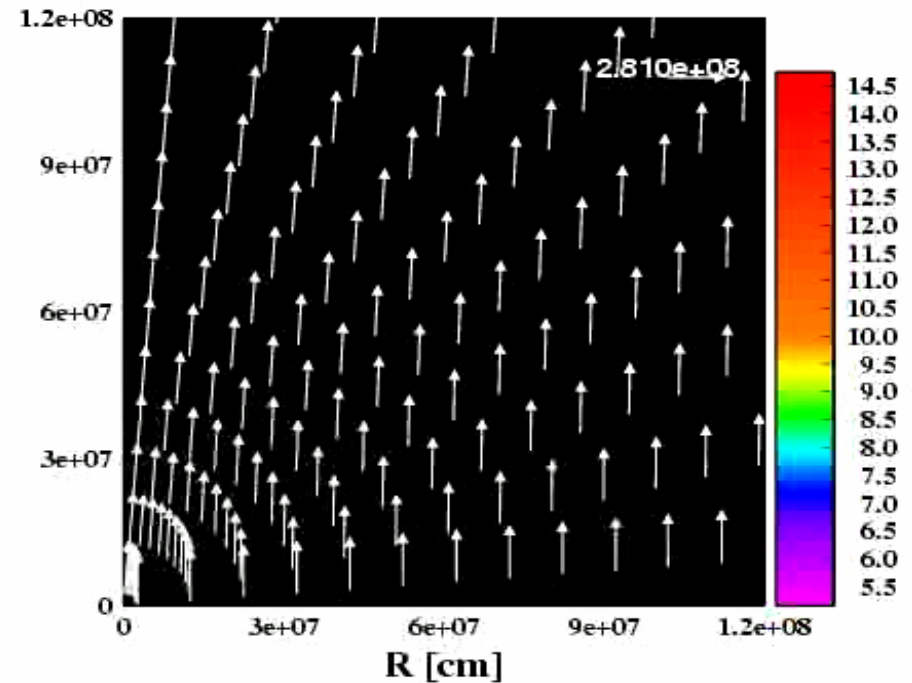


Evolution of the magnetic field in the model B9TW4

Strength of magnetic field and direction in Z-R plane.

Although the simulation was stopped at 800 msec, strong toroidal field is generating. There is the possibility that jet –like shock is generated by this increasing the magnetic field, and eventually the star explodes provided that the core doesn't collapse in to BH.

Bottom figure:
Zoom-up of
the central part



磁場の強さ、自転の速さに対する爆発エネルギーの依存性

- パラメータ範囲内では磁場が強いほど、また自転が弱いほど爆発は強くなる。

$T/|W|$: the ratio of rotational/gravitational energy

	1%	2%	4%
0	0	0	0
10^9	0.05	0.0008	0
3×10^{10}	4.7	0.37	0.03
10^{12}	44.0	5.8	1.8

Initial Magnetic field (gauss)

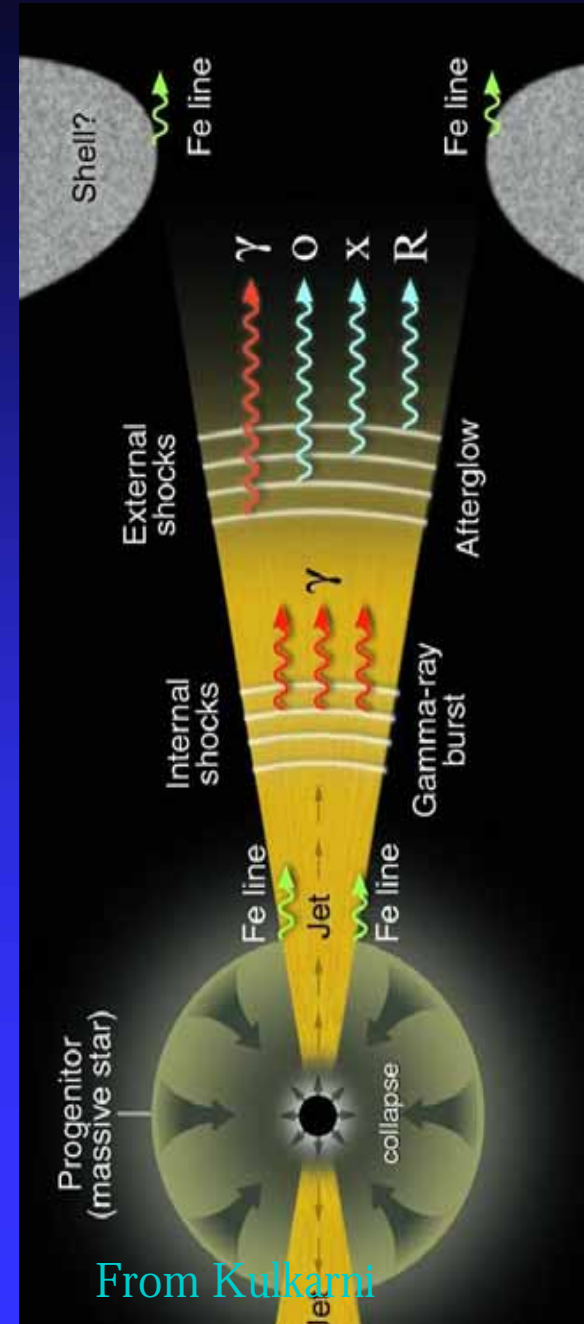
maximum Unit (10^{50} erg)

自転磁化コアの重力崩壊シミュレーションからの示唆

- 爆発エネルギーは自転のエネルギー T/W が小さいほど大きい。重力エネルギーが大きく解放されるから。
- 強いトロイダル磁場が主に自転軸近傍で巻き込みにより生じる。
- 磁場の強いほど爆発エネルギーは増大。しかも自転軸周りで強められた磁場によってジェットの爆発が自転軸に沿って生じる。

示唆(2)

- 強磁場、弱自転モデル、B12TW1は強く磁化した中性星 ($\sim 10^{15}$ G) を形成。マグネターの形成に対応
- 強磁場、強自転モデル、B12TW4はガンマ線バースト天体の形成に対応。生じたジェットの爆発で、自転軸方向に穴があく。物質降着は赤道面ではまだ続いており中心のコアはいずれブラックホールとなり、その周りには降着円盤が形成されるであろう。そこより再度ジェットが放出されるならそれはガンマ線バーストとして観測されるだろう。



まとめ

- 今持って、超新星爆発の具多的爆破機構は不明。
- 自転、磁場なしの球対称モデルでは、爆発は説明出来ない。
- 自転・磁場の効果が爆発の本質を担っている。
- この2つのパラメータの強さにより、星の最後の大往生のあり方が決まり、中性子星、マグネター、ガンマ線バースト源の形成が統一的に理解される。
- しかし、1. 現実的状态方程式の下に、2. 多次元ニュートリノ輸送、3. 一般相対論、4. 多次元磁気流体計算は現実には不可能。

- 世界、国内でそれぞれの経験を生かした多様なチャレンジが進められている。

国内 佐藤東大-山田早稲田: ニュートリノ、状態方程式
柴田東大駒場: 相対論、柴田京大: 磁気流体、
阪大: レーザシミュレーション……

外国 Mueller, Janka: MPI Garching, Woosley, Burrows: Supernova Science Center, Mezakappa et al: TeraScale Supernova Initiative

- 高感度ニュートリノ検出器 (SK, SNO, LVD, Kamland) や重力波検出器 (LIGO, TAMA, VIRGO, …) が稼働中。次の銀河内超新星が起これば1万発のニュートリノが検出され、また重力波の波形も観測されるかもしれない。その解析から爆発機構の解明を進めるためには、信頼出来るシミュレーションが不可欠である。