

素核宇宙融合レクチャーシリーズ 第13回

“Why Astrophysical Big Bang?”



長瀧天体ビッグバン研究室

理化学研究所
准主任研究員

長瀧 重博

主催：計算基礎科学連携拠点 (JICFuS) HPCI戦略プログラム分野5「物質と宇宙の起源と構造」
共催：理化学研究所 iTHESプロジェクト 2014年11月27日-28日、理研和光キャンパス

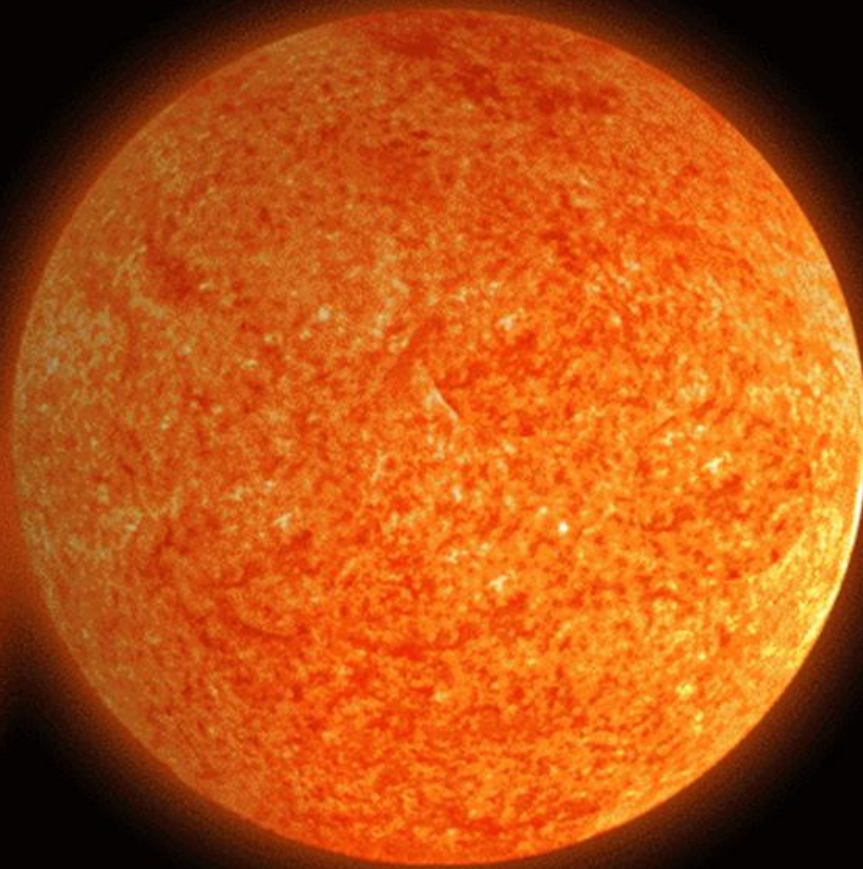
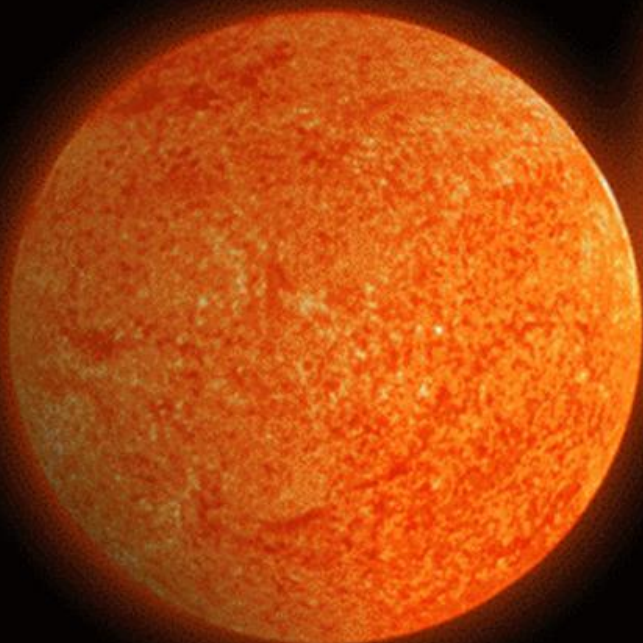
巨大な星は爆発します

Antares

アンタレス

ベテルギウス

Betelgeuse



Sol Sirius Pollux
たいよう

Arcturus



Rigel



Aldebaran

The Cosmos Newsより

明日起こるかもしれない超新星爆発 ～ベテルギウス～



超新星なくして地球・人類の存在なし。



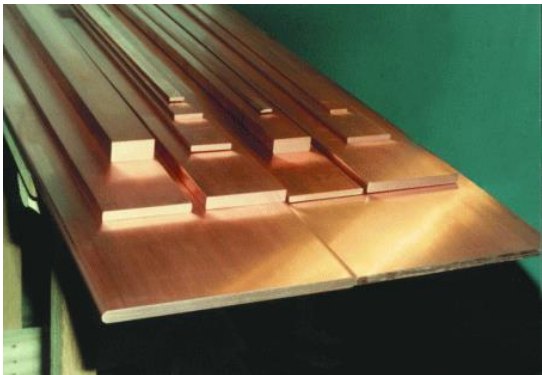
炭素(陽子の数=6)。



マグネシウム
(陽子の数=12)。



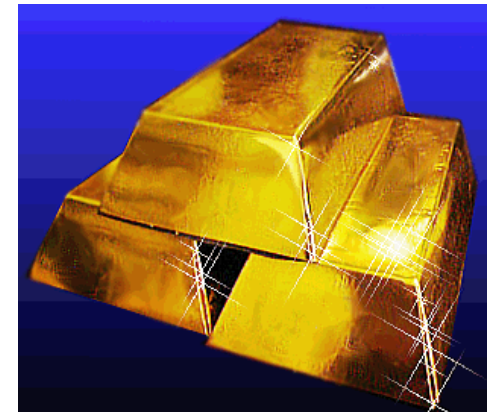
鉄(陽子の数=26)。



銅(陽子の数=29)。



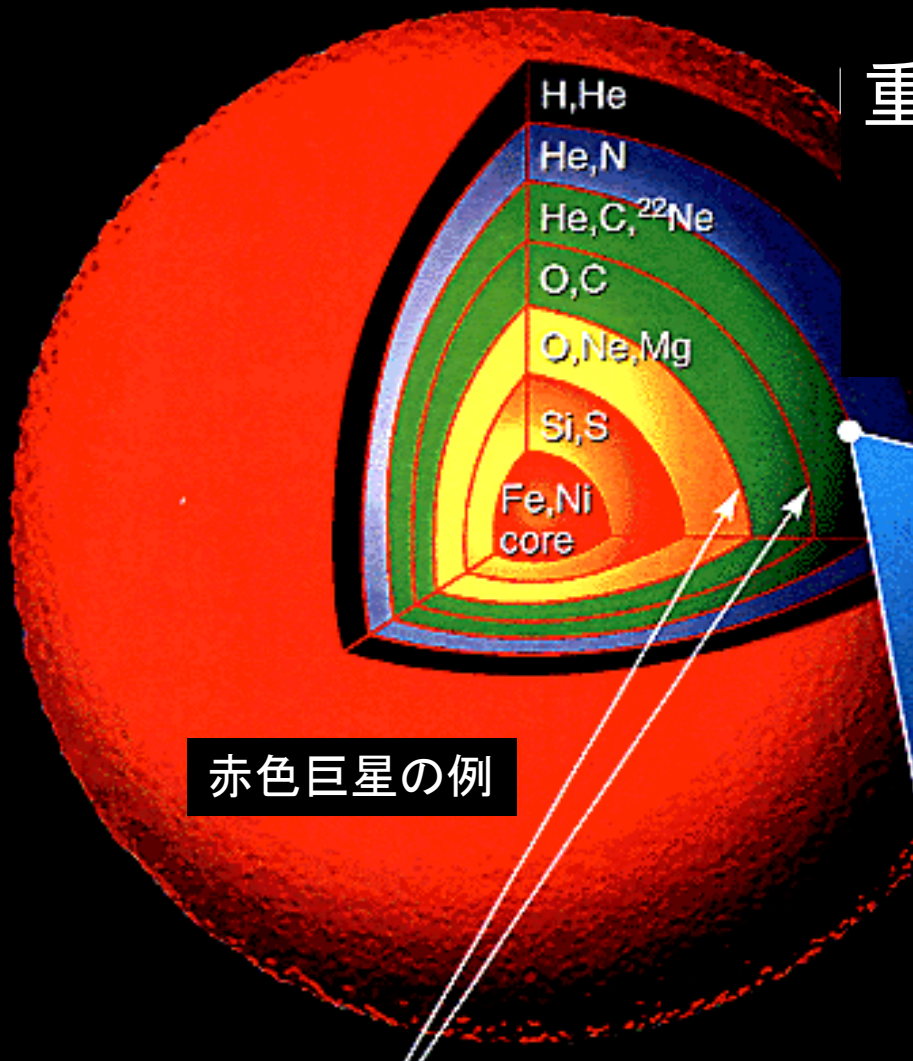
銀(陽子の数=47)。



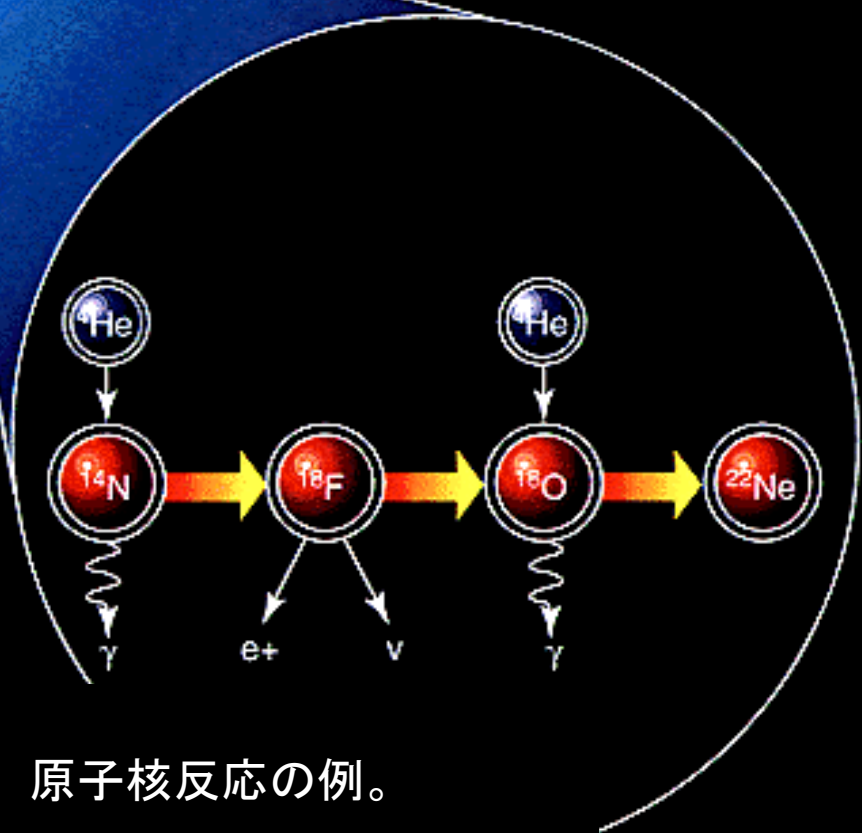
金(陽子の数=79)。

重い元素は星の中で作られる。

NASAのホームページより
(日本語は加筆・修正)。



赤色巨星の例



原子核反応の例。

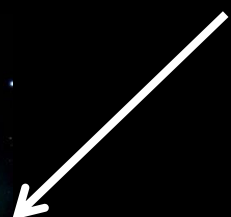
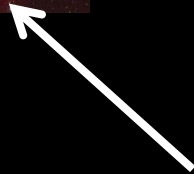
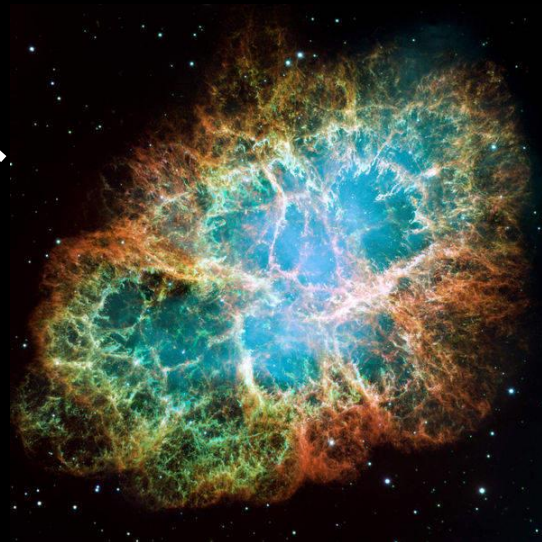
星の中心程、重い原子核が出来る。
H:水素(陽子数1)、He:ヘリウム(陽子数2)
C:炭素(6)、N:窒素(7)、O:酸素(8)
Ne:ネオン(10)、Mg:マグネシウム(12)
Si:シリコン(14)、S:硫黄(16)、Fe:鉄(26)
Ni:ニッケル(28)

NASAのホームページから。超新星爆発のコンピューターグラフィクス。

宇宙の輪廻・転生



輪廻を通して、
宇宙に少しずつ
重い元素が溜まる。



地球の誕生



地球誕生時のコンピュータグラフィクス。NASAホームページより(BBCでも放送)。

ここまでのまとめ

- 巨大な星は爆発します(超新星爆発)。
- 巨大な星では様々な重い元素が作られ、それらは超新星によって宇宙にばら撒かれます。
- 超新星なくして地球・人類の存在なし。

超新星爆発はどうして起こるか？ ～80年続いている謎～

5. *The super-nova process*

We have tentatively suggested that the super-nova process represents the transition of an ordinary star into a neutron star. If neutrons are produced on the surface of an ordinary star they will “rain” down towards the center if we assume that the light pressure on neutrons is practically zero. This view explains the speed of the star’s transformation into a neutron star. We are fully aware that our suggestion carries with it grave implications regarding the ordinary views about the constitution of stars and therefore will require further careful studies.

W. BAADE

F. ZWICKY 1934

超新星とは通常の星が中性子星に転化する際に起こる現象なのではないか？ と指摘。

京による超新星爆発シミュレーション ～80年来の謎、解明に光明～

京(KEI) = 10 Peta=10¹⁶.



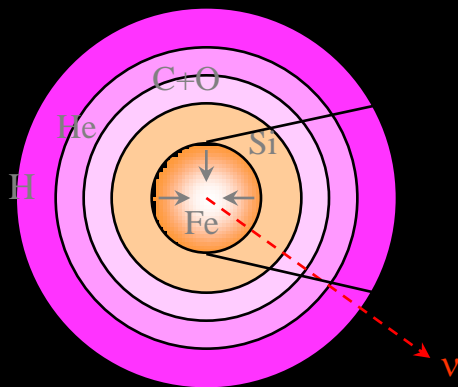
滝脇研究員



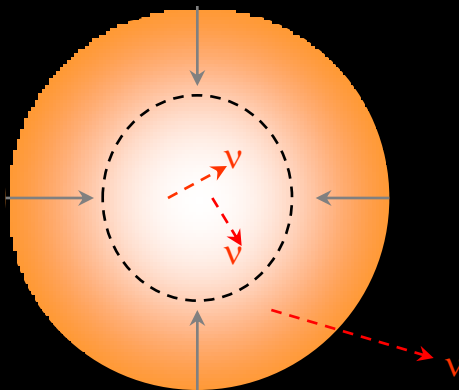
- HPCI戦略プログラム分野5「物質と宇宙の起源と構造」研究課題(3)「超新星爆発およびブラックホール誕生過程の解明」に選定。
- 平成24年度、京の戦略プログラム利用枠(7枠)に選定。
- ポスト京(2020年度より稼働予定)による完全解明の期待高まる！

解明されてきた超新星爆発のメカニズム

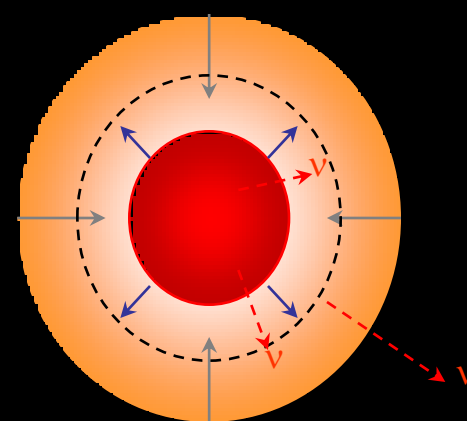
核燃料不足。
重力により潰れる



密度上昇。
ニュートリノすら
閉じ込められる



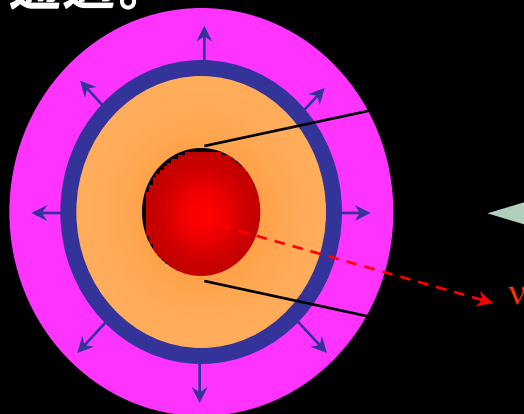
更に密度上昇。
中性子星形成。
非常に固くなる。



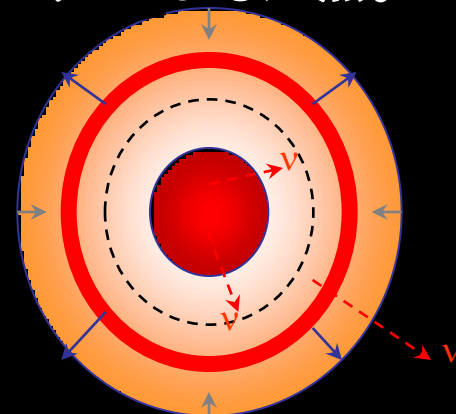
超新星爆発！



爆発波面が星を
通過。



反跳による爆発波面形成。
ニュートリノによる加熱。

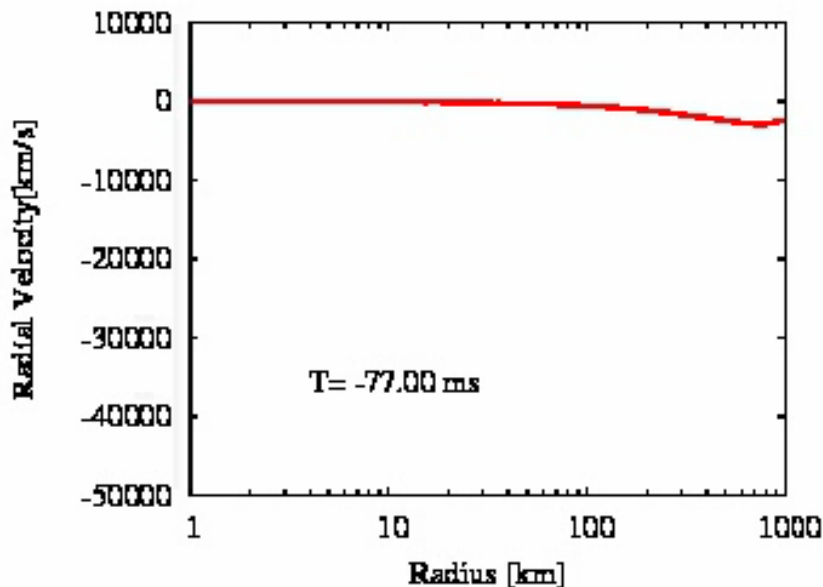


最重要効果 1 : 高密度状態方程式

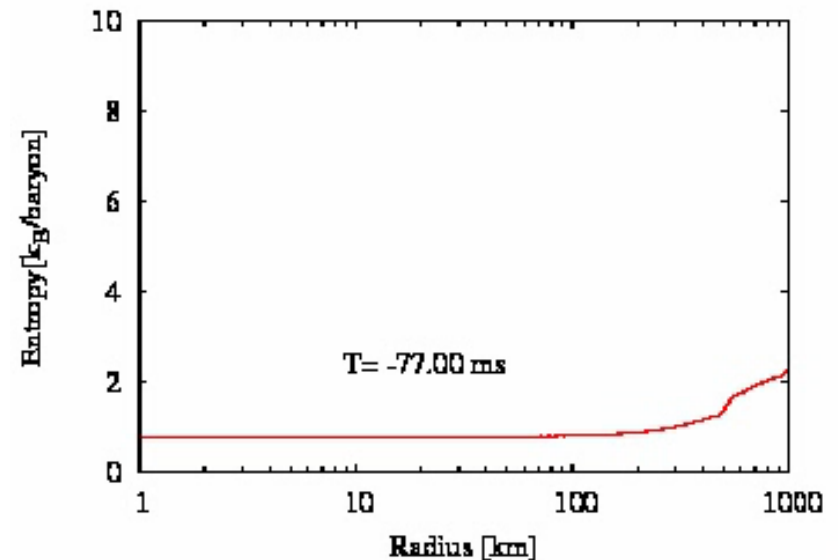
衝撃波の形成に強く寄与。

左図：速度

右図：一核子あたりのエントロピー: T^3/ρ



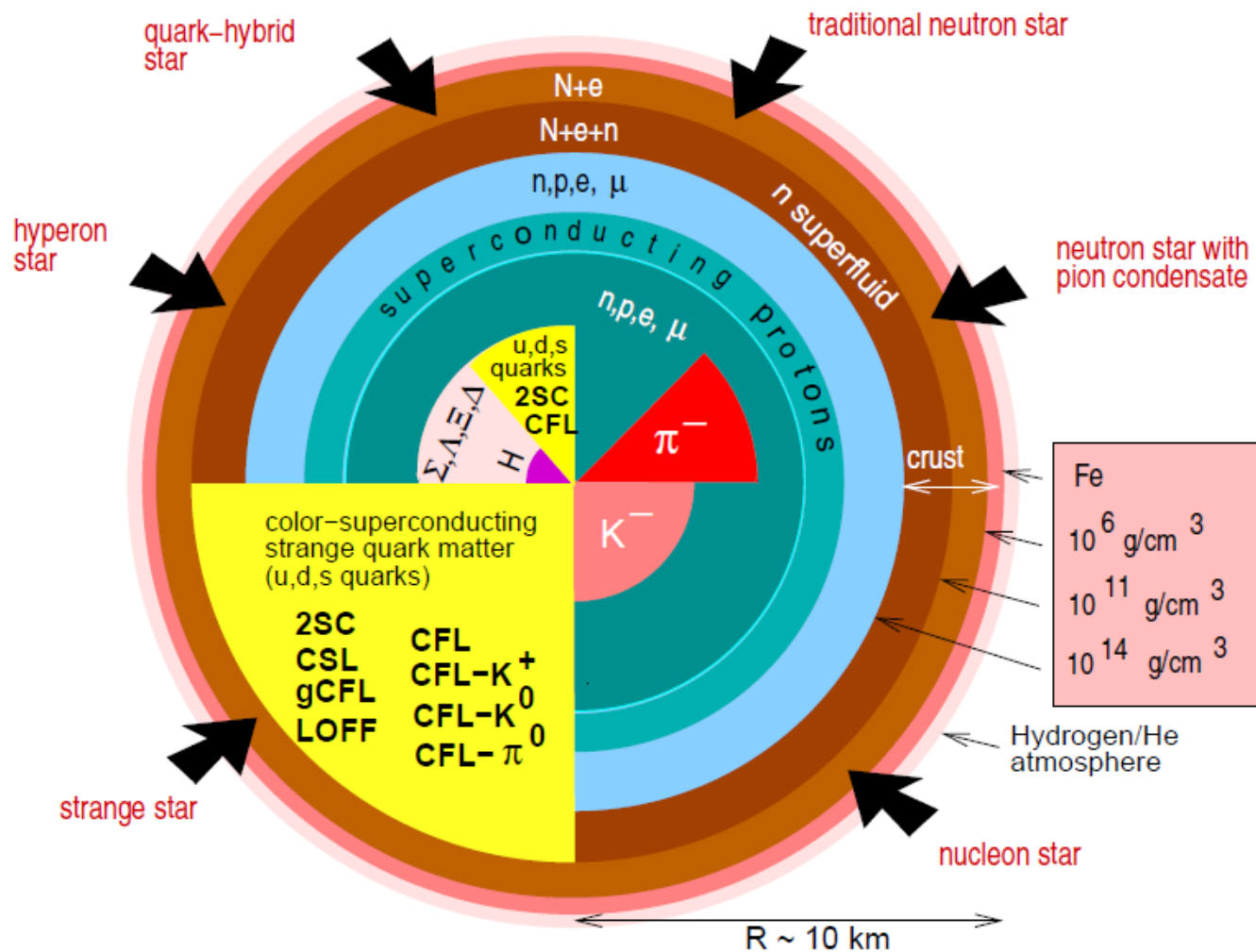
半径



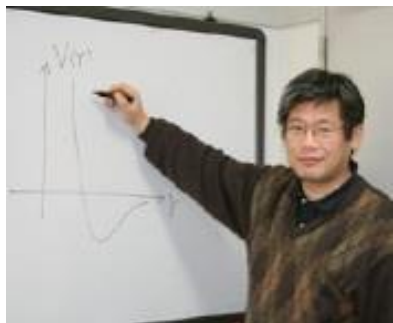
半径

超新星ダイナミクスに於ける原子核物理

～高密度物質に於ける状態方程式～



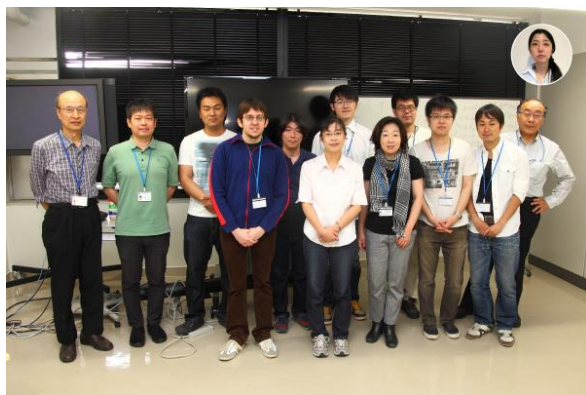
理研の原子核理論グループとの連携



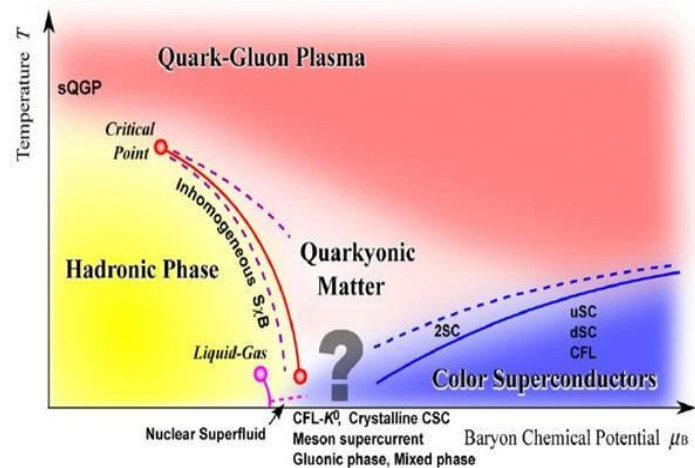
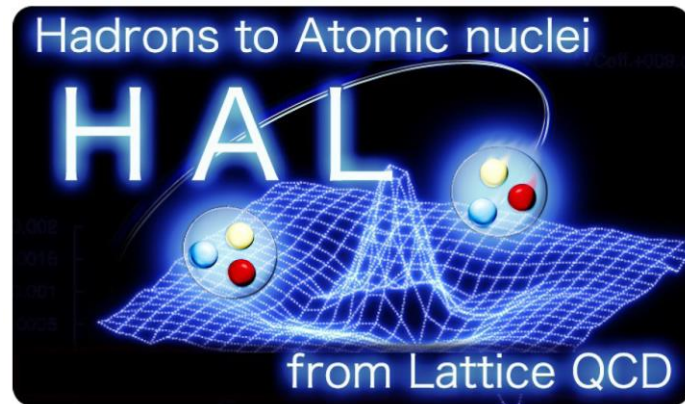
Dr. T. Hatsuda



Dr. E. Hiyama

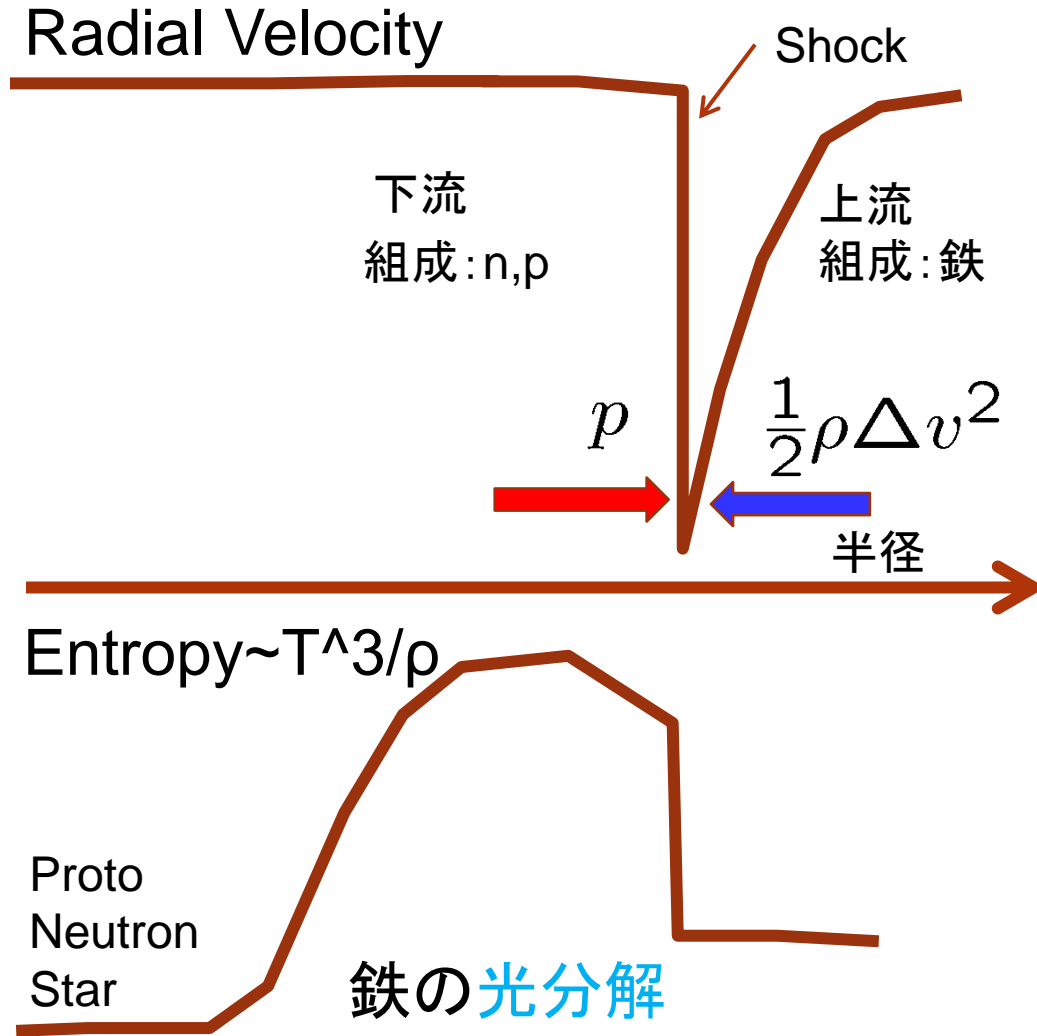


Dr. T. Nakatsukasa



中性子星はどれ位固いの？
→ 超新星爆発にとって(最)重要。

最重要効果2: ニュートリノ物理



ニュートリノによる
加熱と冷却

衝撃波のバランス

$$p = \frac{1}{2}\rho\Delta v^2$$

下流
圧力

上流
(降り積もって
くるもの)

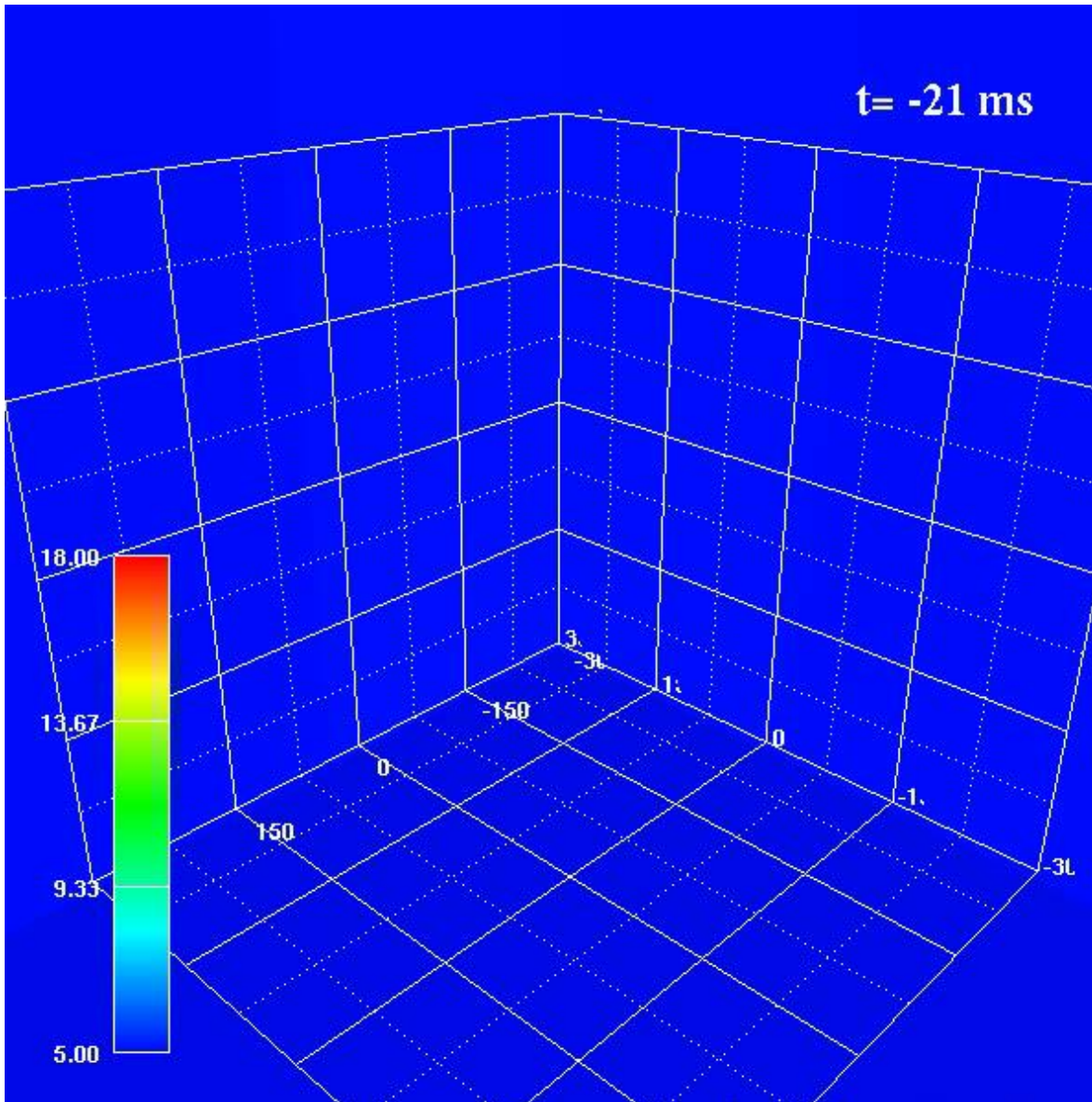
下流の圧力を決める物理
(1) 鉄の光分解 & ニュートリノ
冷却



(2) ニュートリノ加熱



爆発に失敗する超新星シミュレーション例



T. Takiwaki (RIKEN)

EoS : LS-K220

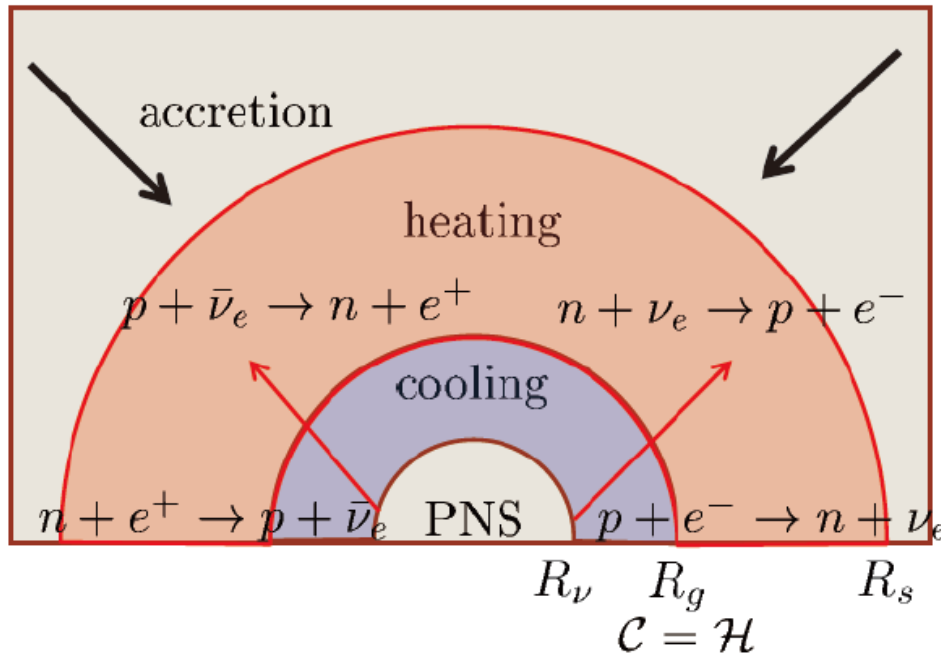
resolution :
384(r)x1(θ)x1(φ)
The finest grid

Neutrino Transport :
Ray-by-Ray:IDSA
+Leakage

Hydro:
HLLE, 2nd order

冷却効果 と 加熱効果のバランス

From T. Janka 01



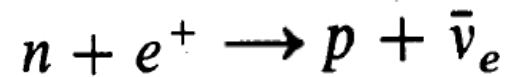
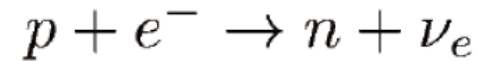
$$s_\gamma = 4a_\gamma (kT)^3 / (3\rho/m_u) \sim \text{Const}$$

i.e. ρ is proportional to T^3

$$\text{Also. } \rho(r) \sim \rho_s \left(\frac{R_s}{r} \right)^3$$

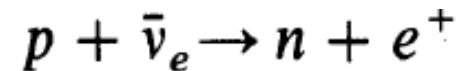
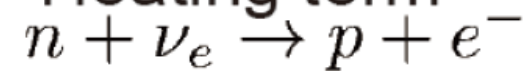
$$\longrightarrow C \propto 1/r^9 \quad \mathcal{H} \propto 1/r^5$$

-Cooling term



$$Q_\nu^- = (3\alpha^2 + 1) \frac{\pi \sigma_0 c (kT)^6}{(hc)^3 (m_e c^2)^2} \frac{\rho}{m_u} \\ \times [Y_p \mathcal{F}_5(\eta_e) + Y_n \mathcal{F}_5(-\eta_e)] \\ \approx 145 \frac{\rho}{m_u} \left(\frac{kT}{2 \text{ MeV}} \right)^6 \left[\frac{\text{MeV}}{\text{s}} \right]$$

-Heating term



$$Q_\nu^+ = \frac{3\alpha^2 + 1}{4} \frac{\sigma_0 \langle \epsilon_{\nu_e}^2 \rangle}{(m_e c^2)^2} \frac{\rho}{m_u} \frac{L_{\nu_e}}{4\pi r^2 \langle \mu_\nu \rangle} (Y_n + 2Y_p) \\ \approx 160 \frac{\rho}{m_u} \frac{L_{\nu_e, 52}}{r_7^2 \langle \mu_\nu \rangle} \left(\frac{kT_{\nu_e}}{4 \text{ MeV}} \right)^2 \left[\frac{\text{MeV}}{\text{s}} \right]$$

So, Cooling Dominates at small r , while Heating Dominates at large r .

理研の京プロジェクト & ポスト京プロジェクト

京(KEI) = 10 Peta=10¹⁶.

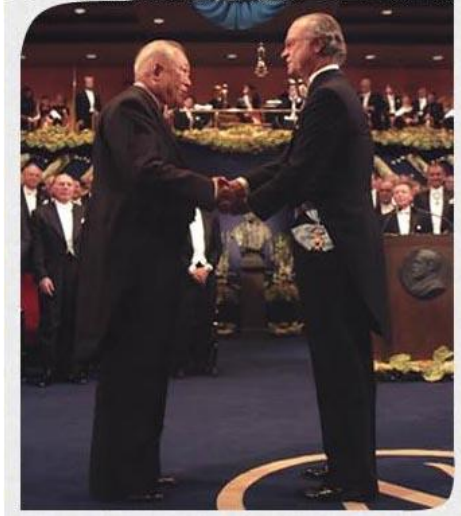


©RIKEN

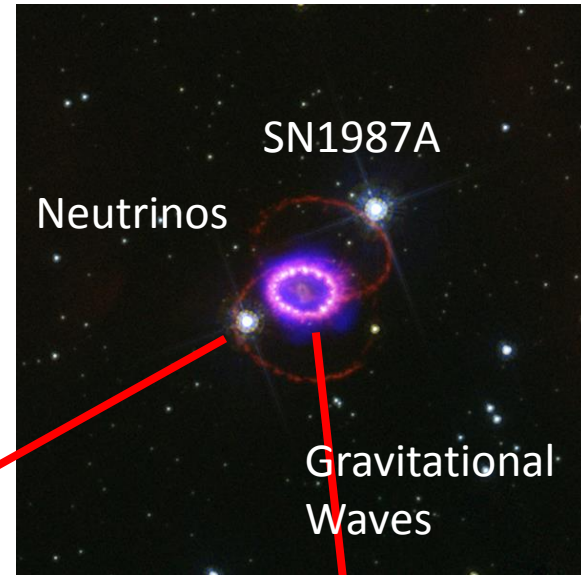
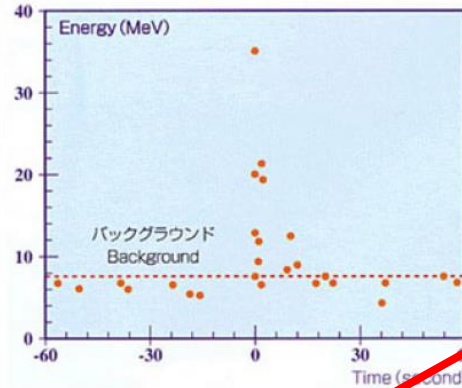
K-Computer's Speed is 10 Peta Flops (Fastest in the World in Jun. –Nov. 2011. Now 4th ranked).
The Post-K-Project (Exa-Flops, 2020-) has already started in RIKEN.

ニュートリノ・重力波源としての超新星

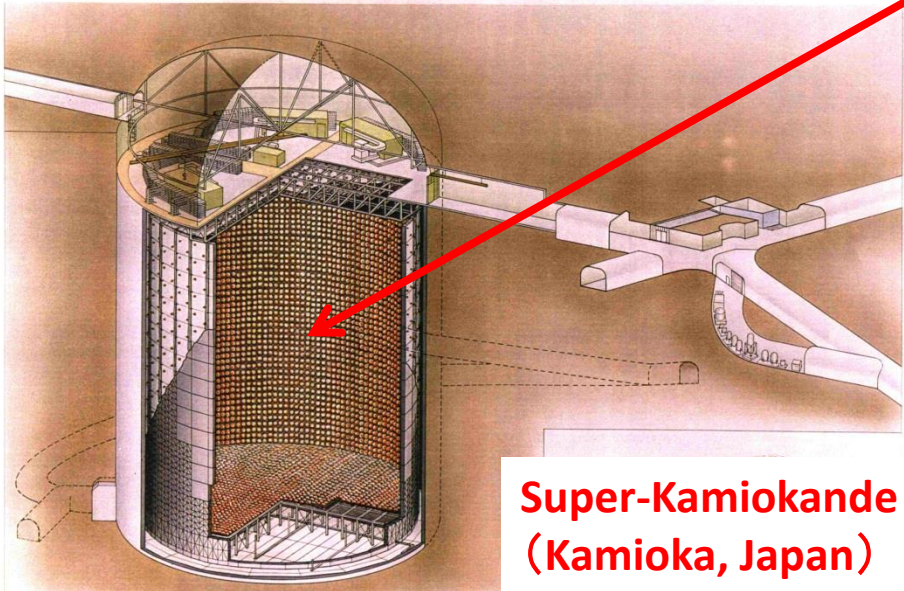
▼ノーベル賞を受ける小柴名譽教授 (2002年12月10日)



Prof. M. Koshiba,
Awarded the Nobel Prize
in Physics (2002).

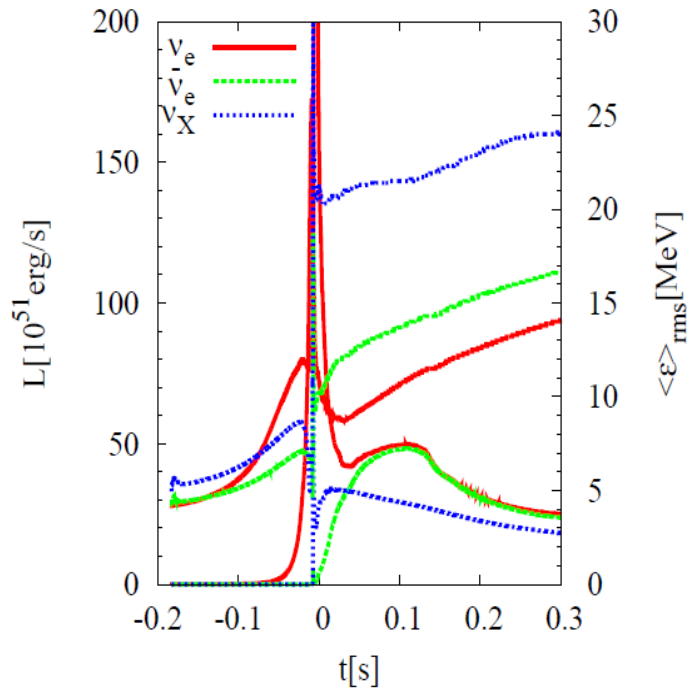


KAGRA (2018-)
(Kamioka, Japan)

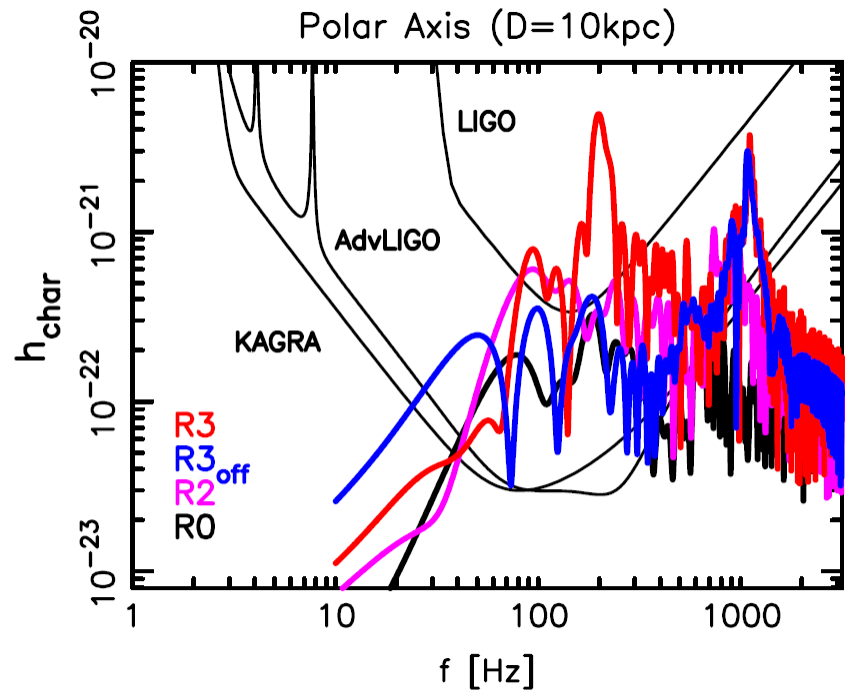


Super-Kamiokande
(Kamioka, Japan)

超新星からのニュートリノ・重力波信号



Time Evolution of Neutrino Luminosity

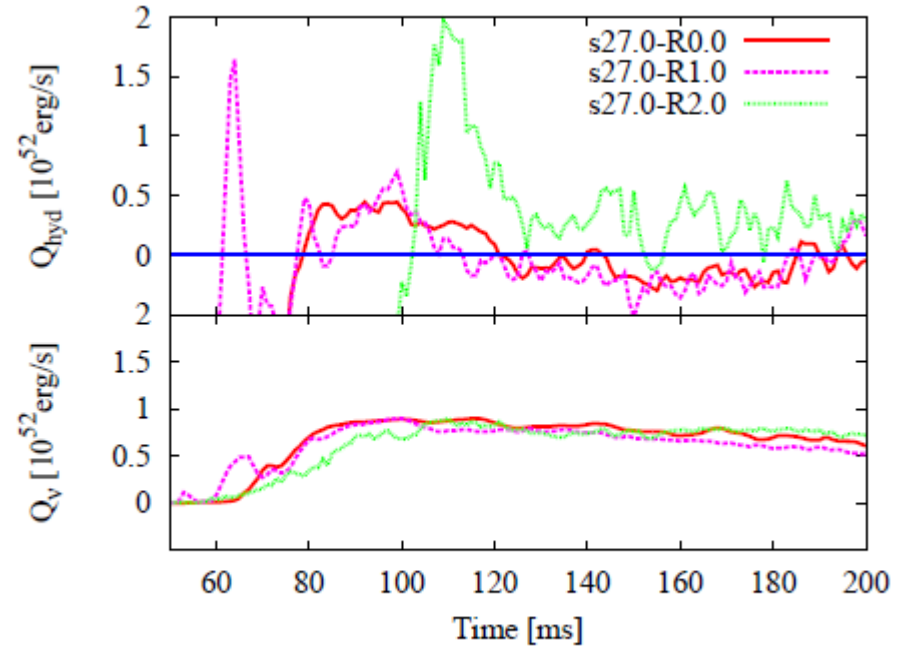
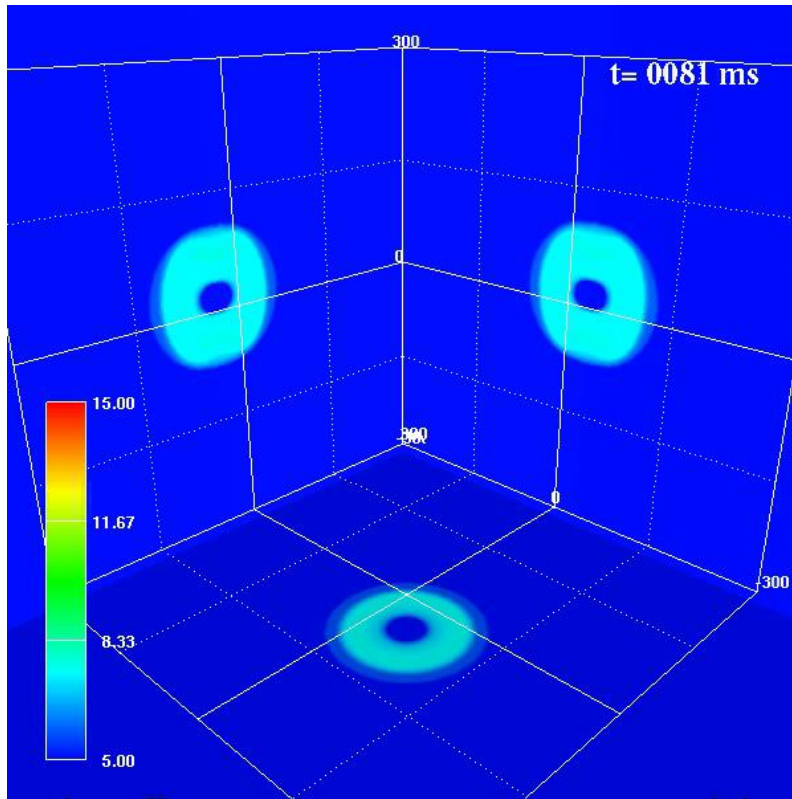


Signal of Gravitational Wave in Freq. Space



T. Takiwaki
(RIKEN)

回転の効果



Spiral wave がエネルギーを外に運んでいる。
最終的に爆発する。

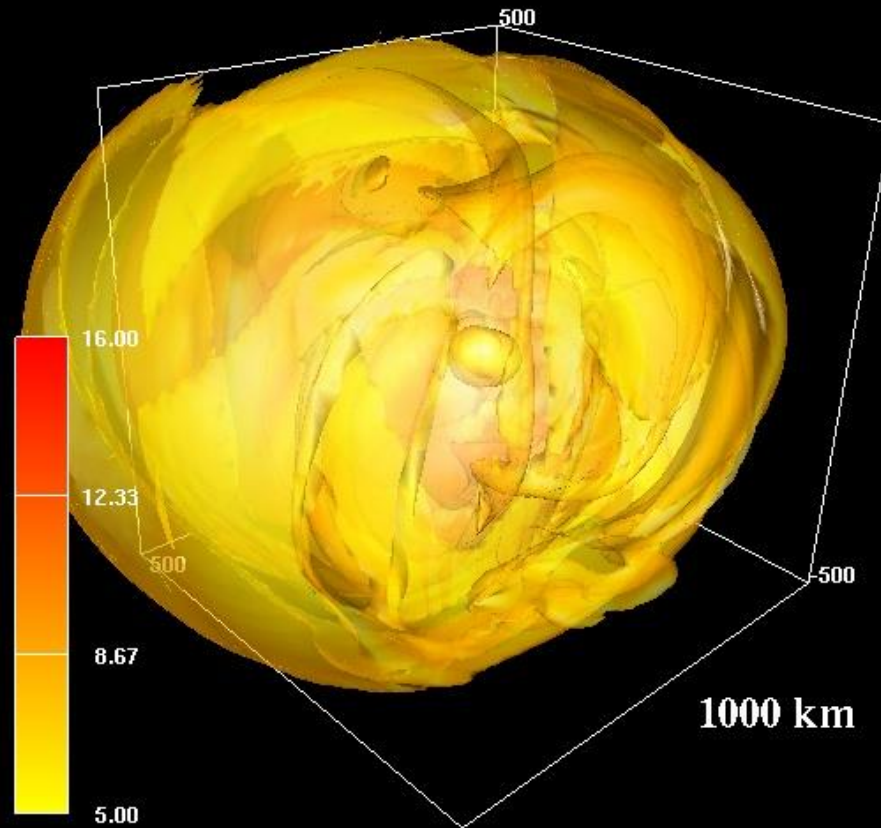


T. Takiwaki
(RIKEN)

回転は超新星イジェクタの非対称性と関連？

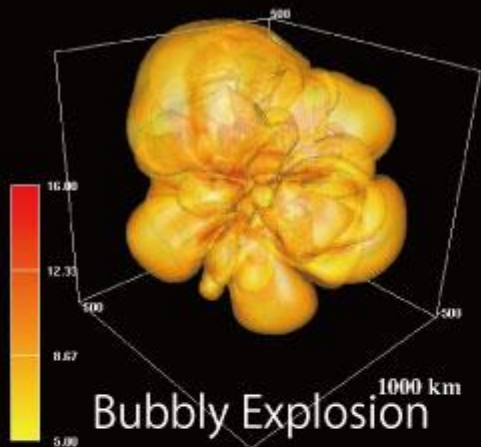
Entropy

t= 0250 ms

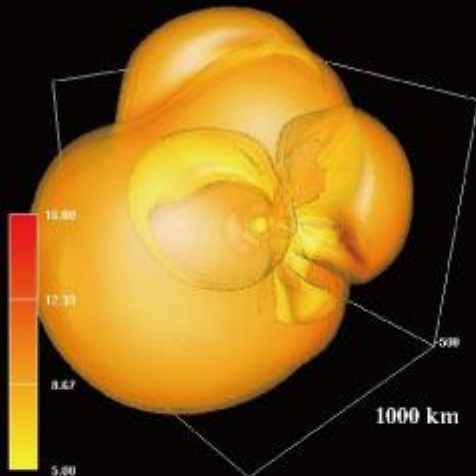


このケースでは赤道方向に強い爆発を示す。

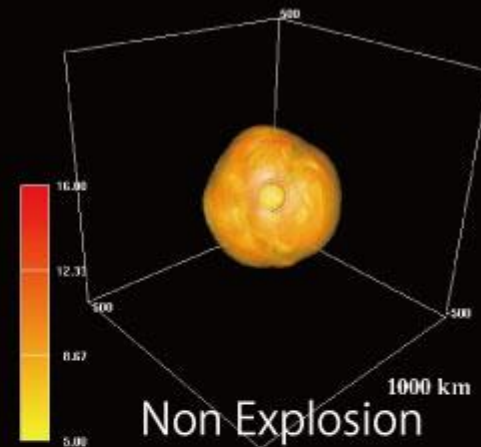
11.2 wo rotation $t = 0220$ ms



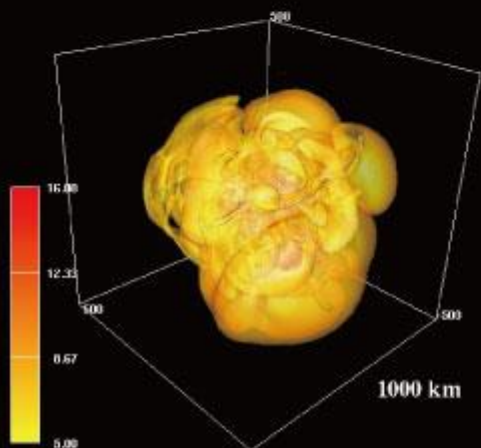
13.0 wo rotation $t = 0270$ ms



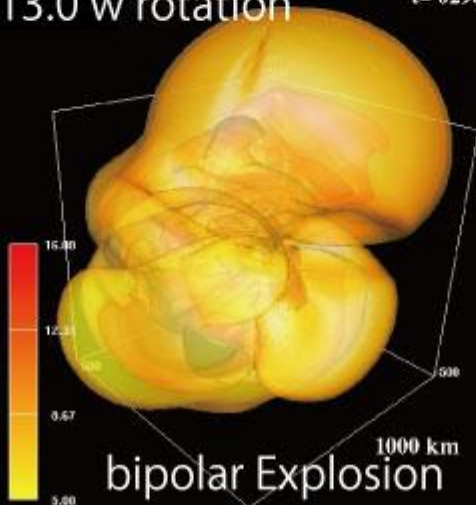
27.0 wo rotation $t = 0250$ ms



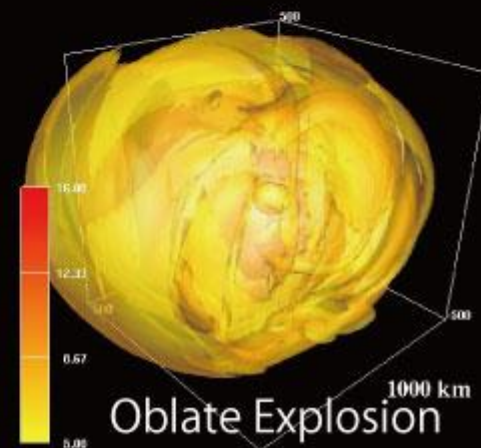
11.2 w rotation $t = 0200$ ms



13.0 w rotation $t = 0290$ ms



27.0 w rotation $t = 0250$ ms

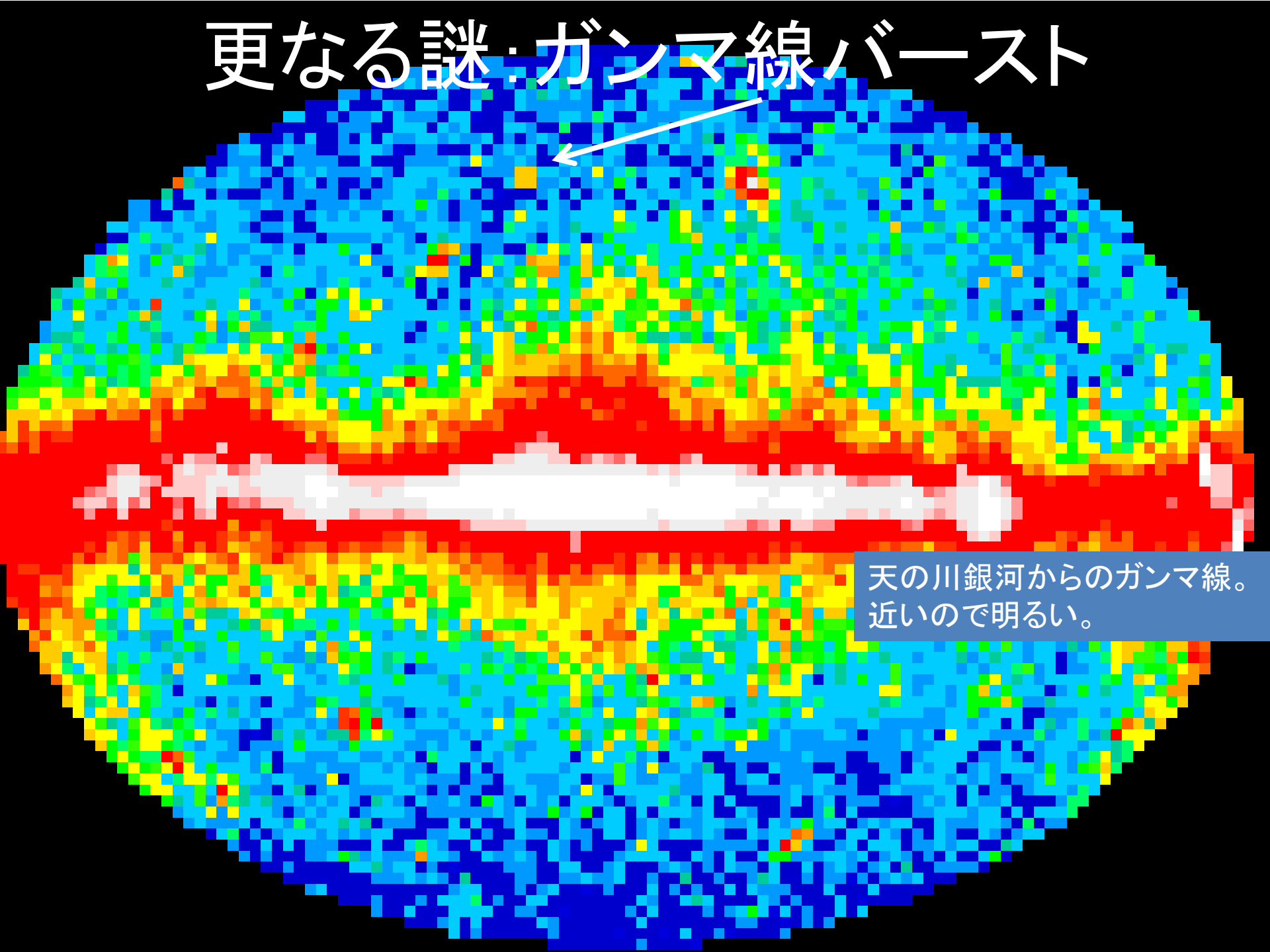


質量と回転によってバラエティに富んだ爆発（と非爆発）が実現される。

超新星SN1987A: 非対称な爆発を示している！



更なる謎：ガンマ線バースト



天の川銀河からのガンマ線。
近いので明るい。

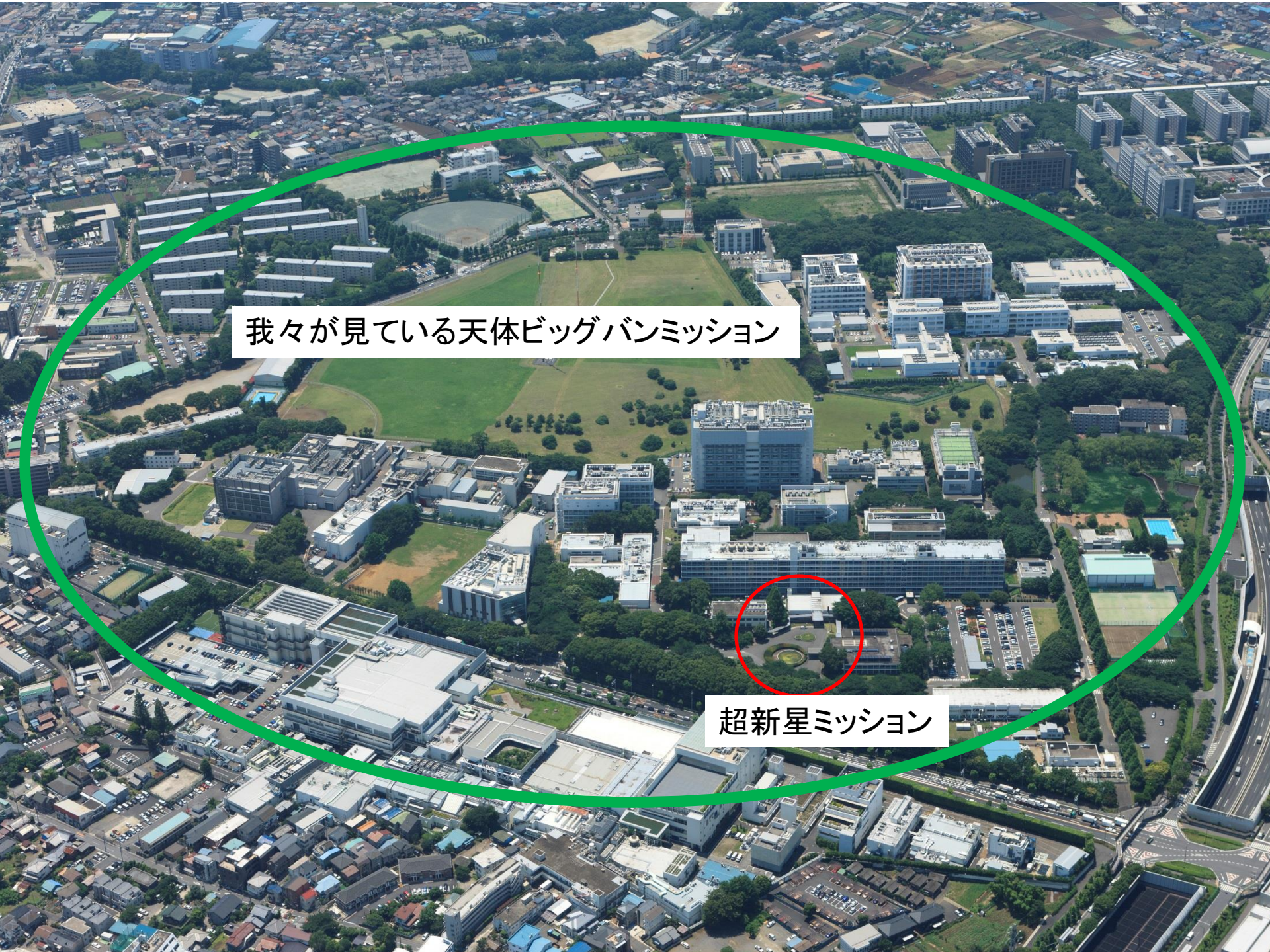
我々のロードマップ

- 2018年: KAGRA完全稼働(重力波検出器)
- 2020年: ポスト京・始動(~ 1000 Peta-Flops = 1Exa-Flops)
- 2020年: ポスト京による超新星完全シミュレーション
- 2025年: ガンマ線バースト完全シミュレーション
- 203X年: 銀河系内で超新星爆発(ベテルギウス?)
スーパーカミオカンデ・KAGRAでニュートリノ・重力波検出!
理研原子核理論・実験の正しさが証明される!
我々の超新星爆発理論の正しさが証明される!
- 204X年: 日本から多数のノーベル物理学賞受賞者!
- 我々の夢は続く...

超新星爆発機構は天体ビッグバン現象の表玄関



Thanks to Takiwaki-san, HPCI members, K-Project, ...

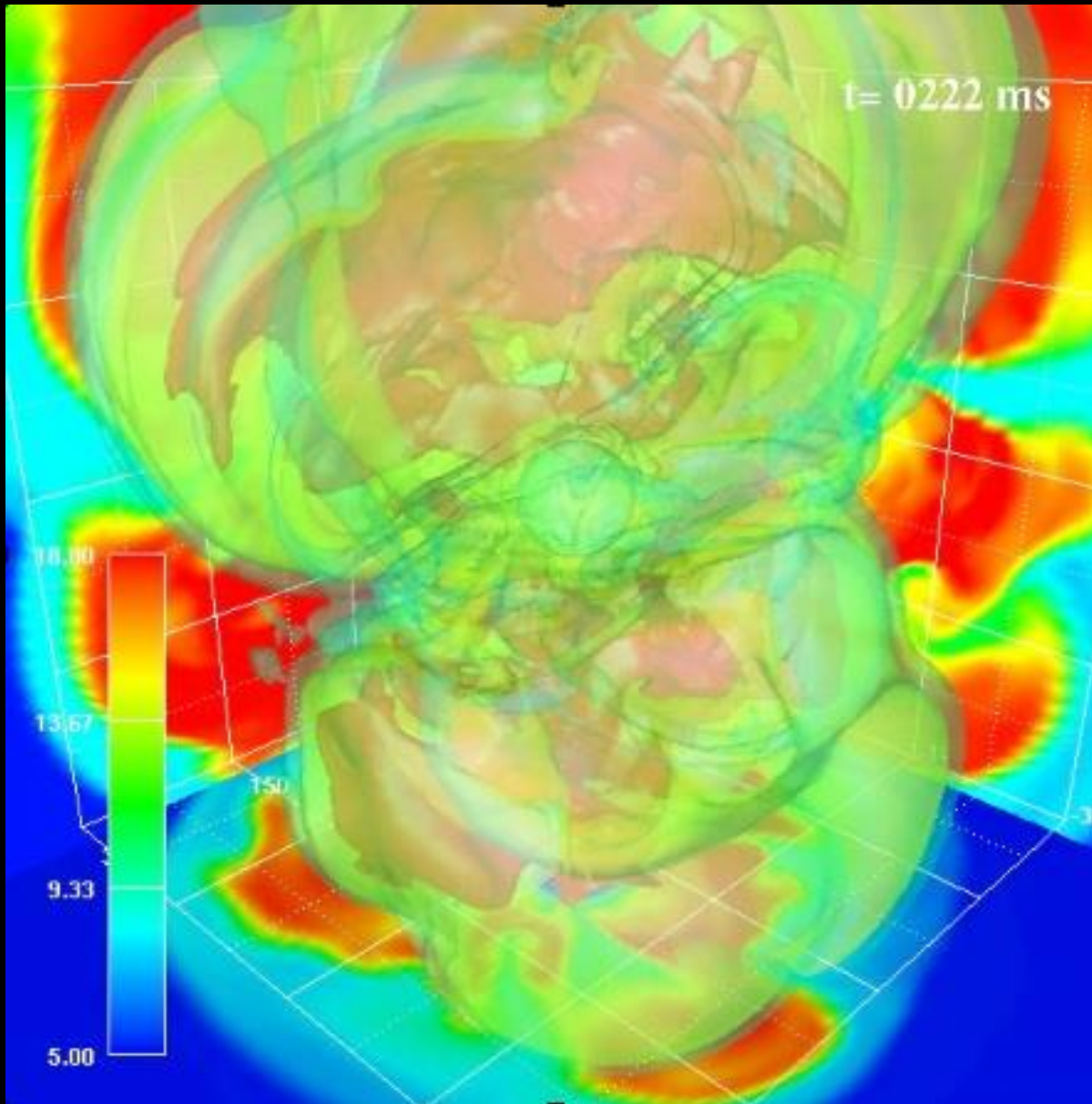


我々が見ている天体ビッグバンミッション

超新星ミッション

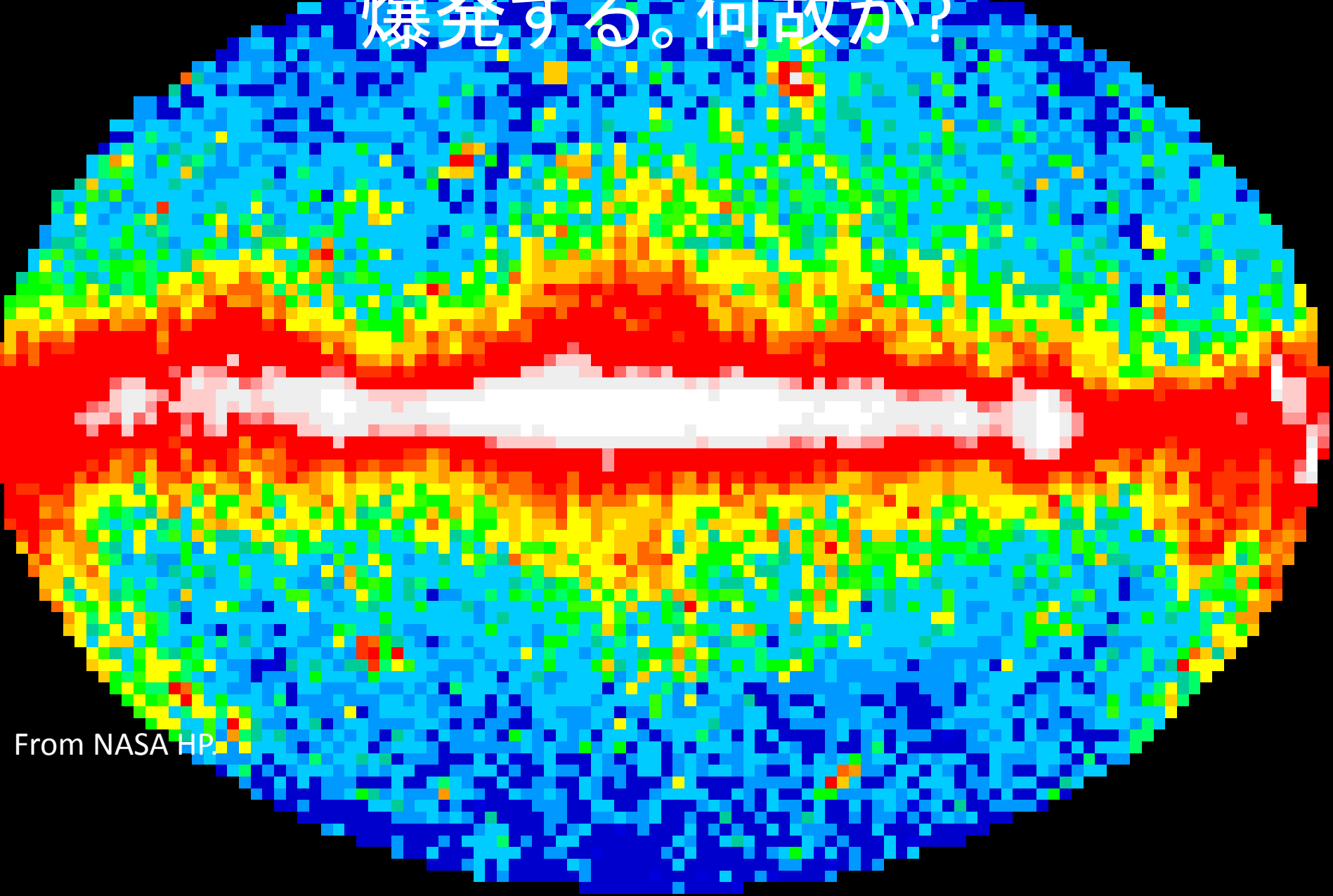
§ 長瀧天体ビッグバン研の挑戦

何故巨大星は爆発するのか？



Simulation by
T. Takiwaki
(RIKEN)

一部の超新星はガンマ線バーストして
爆発する。何故か？



From NASA HP.

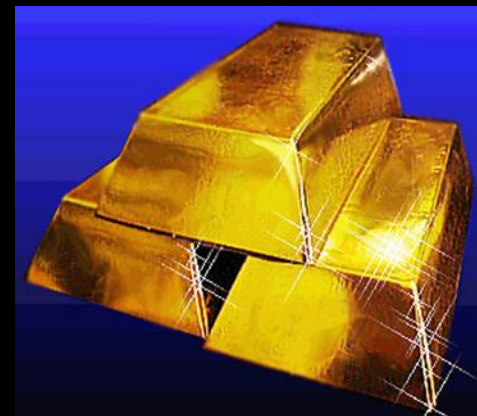
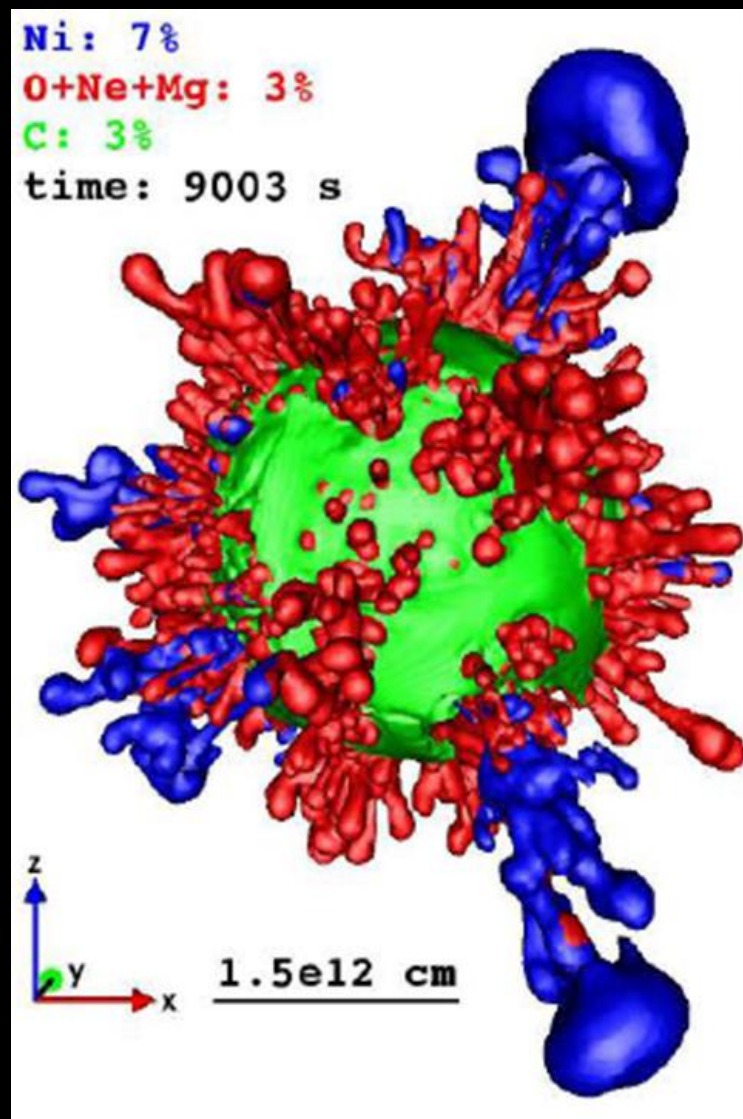
超新星は重元素の起源。 しかしどの元素がどれだけ出来ているのか？



Simulation by
A. Wongwathanarat
(MPA → RIKEN)



S. Wanajo
(RIKEN)



Origin of Gold?



Origin of Uran?

超新星やガンマ線バーストの放射機構は？



A. Tolstov (RIKEN→IPMU)



Y. Teraki(RIKEN)

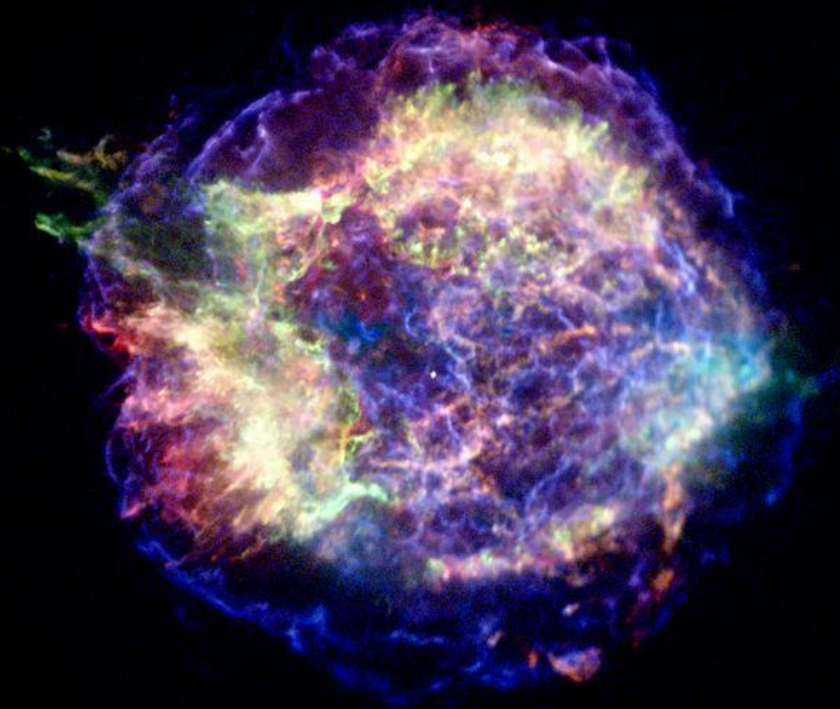


H. Ito (RIKEN)

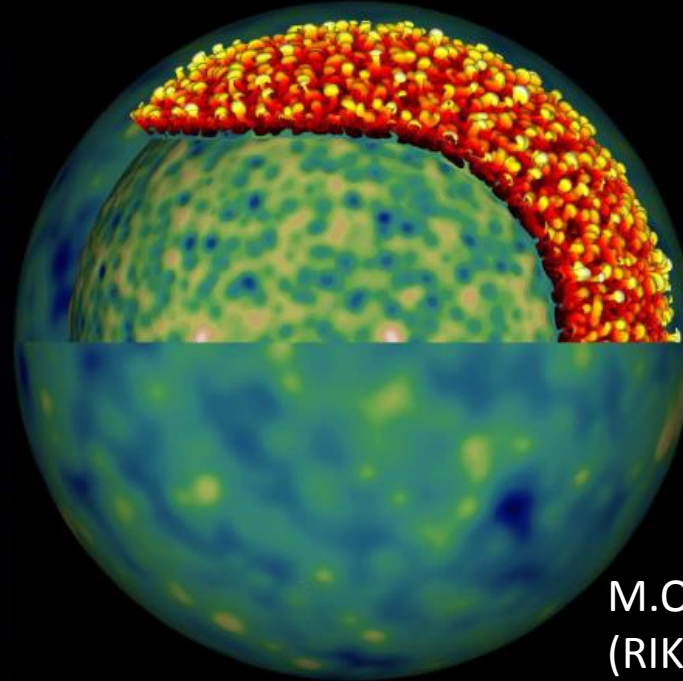


J. Matsumoto (RIKEN)

超新星残骸には謎・物理が一杯！



X-ray Image of Cassiopeia A by
Chandra



Simulation by
D. Warren



S.H. Lee
(RIKEN→
JAXA)



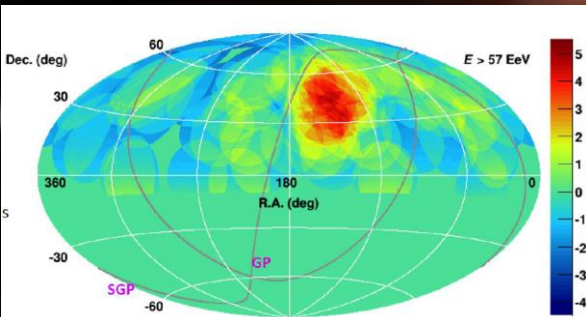
M. Ono
(RIKEN→Kyushu U.)



D. Warren
(NCSU→RIKEN)

Morphology? Composition? Cosmic-Ray Production?

ガンマ線バースト・極超新星は 最高エネルギー宇宙線加速器か？

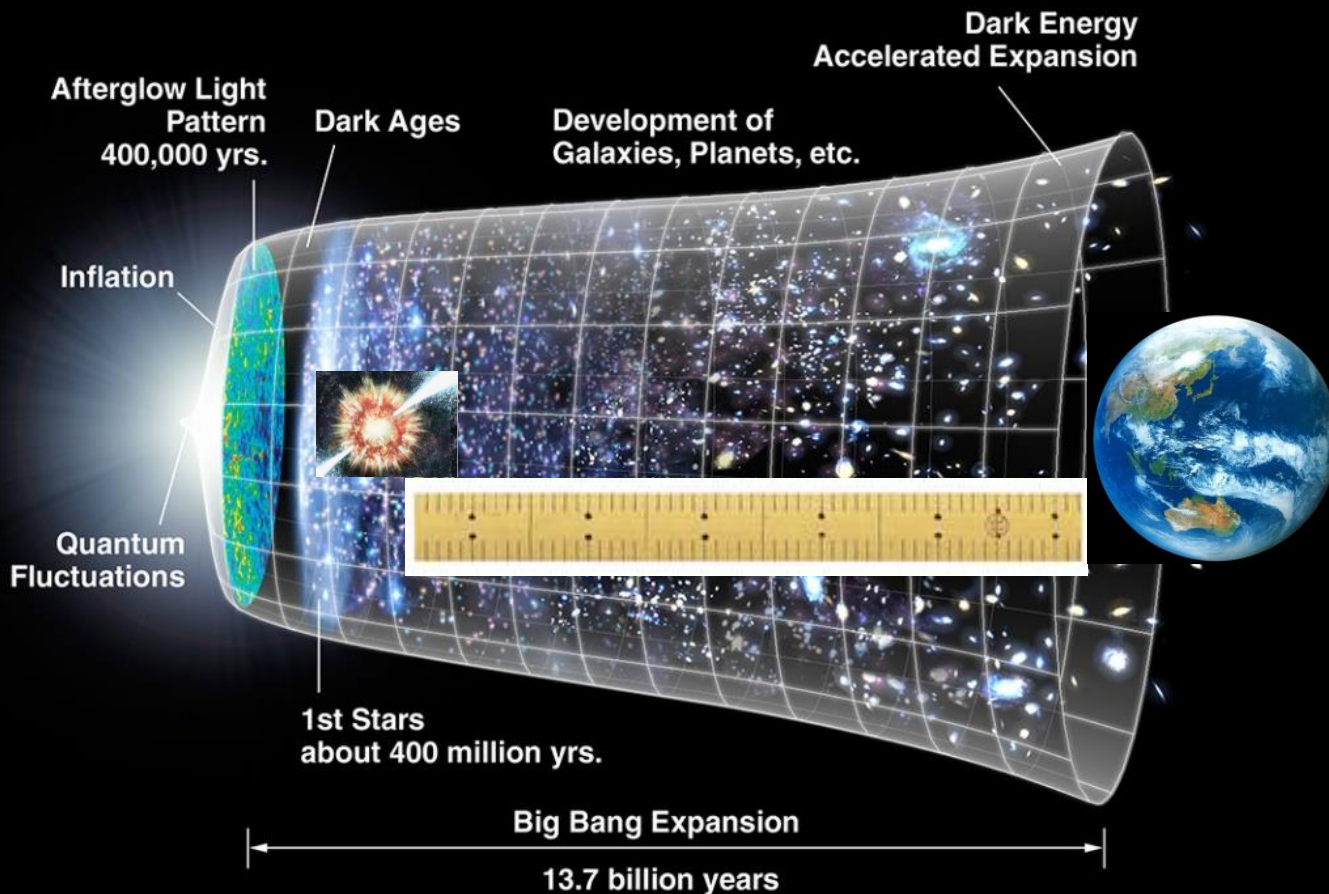


Telescope Array実験(日本-アメリカ)が見つけた最高エネルギー宇宙線ホットスポット 2014

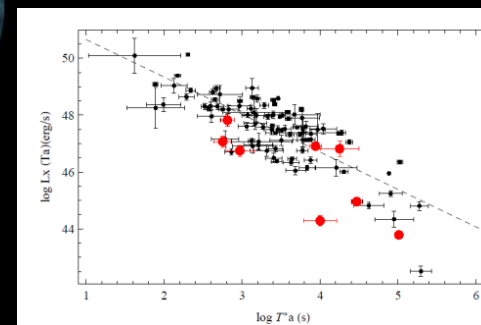
© A. Roquette (ESO)

ガンマ線バーストは宇宙最長のものさしになれるか？

WMAP HPより。一部改編。



M. Dainotti (RIKEN)



The Dainotti's 関係式

Maria Dainotti、2013年、The Dainotti's Relationでイタリア共和国メリット勲章受賞！

長瀧天体ビッグバン研メンバーと共同研究者

From 1st April 2013

~Toward Full-Understanding of Supernovae and GRBs~

- Central Engine: Nagataki (PI), Takiwaki , Barkov
- Explosive Nucleosynthesis: Wongwathanarat, Wanajo, Mao
- Shock Breakout/Light Curve/Spectrum: Tolstov, Blinnikov (ITEP), Tominaga (Konan), Tanaka (NAOJ), Maeda(Kyoto)
- Propagation of Relativistic Jet: Matsumoto, Mizuta
- Gamma-Ray Emission (GRBs): Ito, Teraki, Pe'er (UCC)
- Afterglow(X-ray,Opt,Radio): Warren, Ellison (NCSU), MacFadyen(NYU).
- Remnants: Lee, Ono, Warren, Slane (CfA), Patnaude (CfA)
- UHECRs, VHE-neutrinos/gamma-rays: Allard (APC), Kusenko (UCLA), He (PAO)
- GRB Cosmology: Dainotti

... and More!

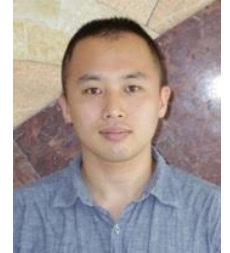
Small
Radi



Large
Radi

長瀧天体ビッグバン研究室

- 研究室主催者: 長瀧
- 現在の研究員: 伊藤, 松本, Dainotti, Barkov, 寺木, Wongwathanarat, 滝脇
- 以前の研究員: 小野 (九大), Lee(JAXA), Tolstov(IPMU), Mao(九大)
- 2015年度着任予定の研究員: Warren, 横倉, 田中, Maybe More!



完