

# 超新星爆発からの重力波と メカニズム解明に向けた研究

第一回 宇宙素粒子若手の会 秋の研究会

2016/10/30 東京大学 柏キャンパス

大阪市立大学：横澤孝章

members : Y.Suwa, N.Kanda, Y.Koshio, M. Vagins





# Contents

- ・ (Introduction長め)超新星爆発とそこから生じる重力波とニュートリノ
- ・ (Introduction2)超新星爆発からの重力波の検出
- ・ (研究内容)超新星爆発コアの回転に関する研究



# Supernova explosion mechanism

- 宇宙でenergeticな現象の一つ
  - トータル  $10^{53}$  ergのエネルギーが放出される
  - 99%のエネルギーがニュートリノとして放出
- 大まかな爆発シナリオは解明されつつあるが、詳細な部分で不明瞭な箇所がある
  - 親星の初期コンディション(質量、回転等)
  - 衝撃波停滞から復活のメカニズム(neutrino driven explosion mechanism?)
- 次ページからおおまかなニュートリノ駆動型超新星爆発とその時に出てくる信号の説明

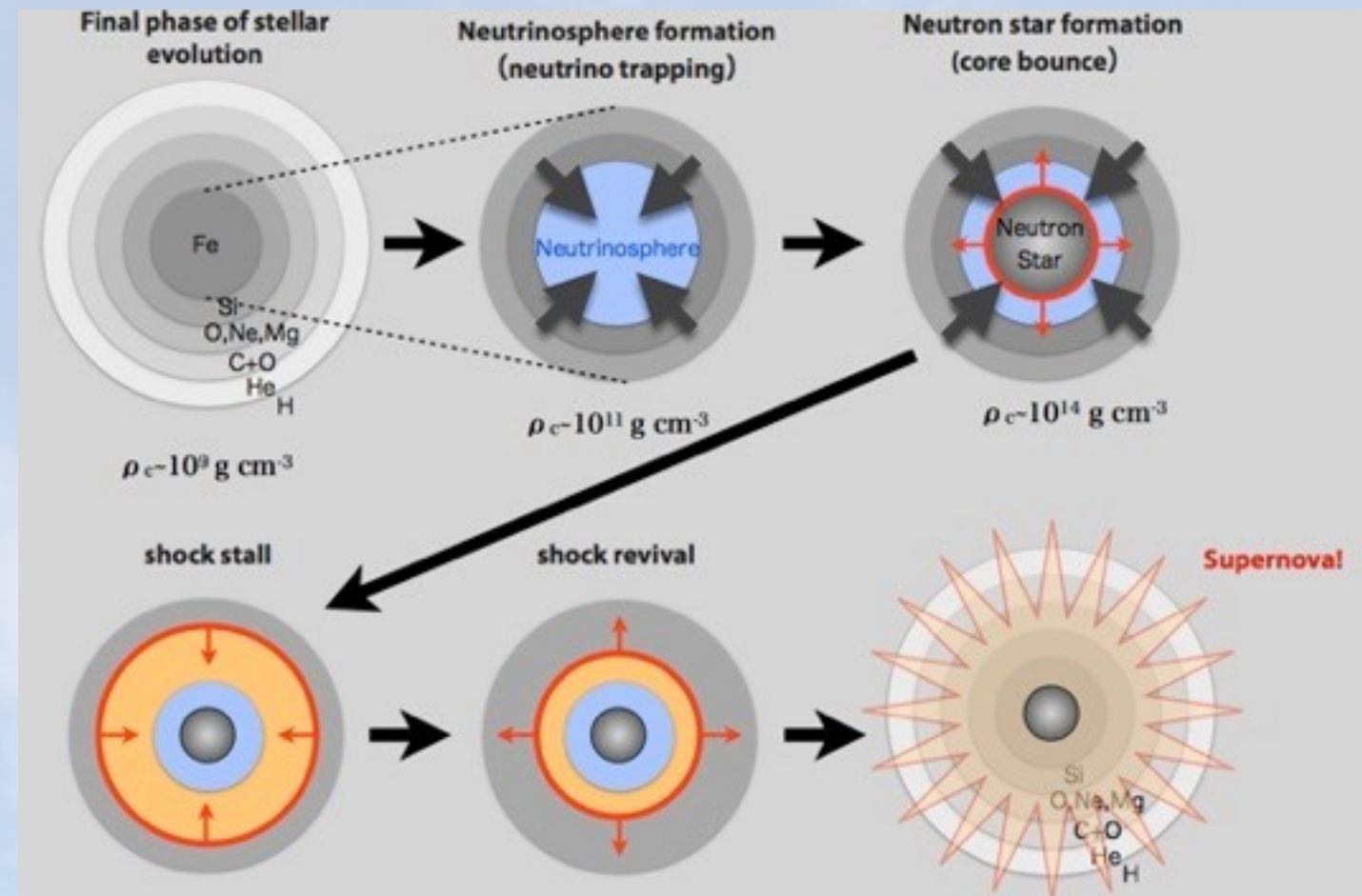
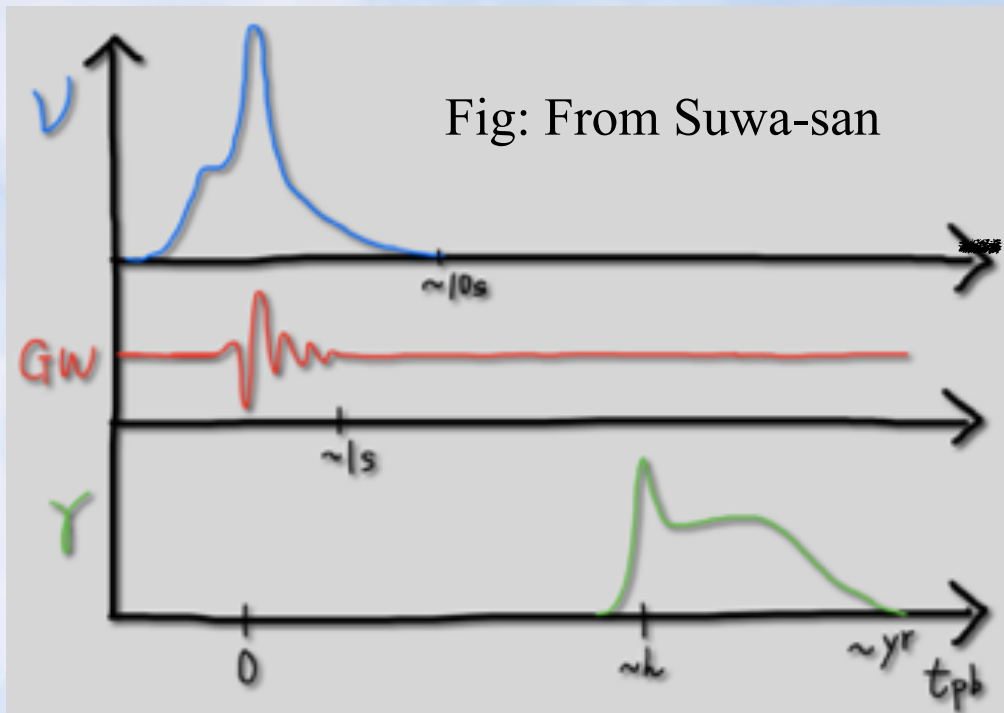


Fig: From Suwa-san

Fig: From Suwa-san



## - 重力波・ニュートリノ共に中心コアの情報を運んでくる

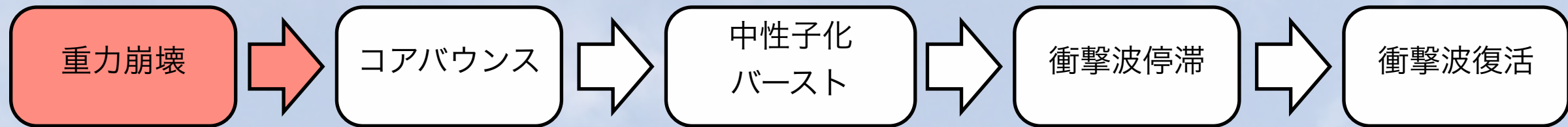
- 爆発メカニズム解明に向けた鍵となる物理現象
  - コアバウンス
  - 衝撃波の停滞と復活; SASI、対流、etc..

## - Time-domain Multi-Messenger Astronomy

- Broadband photons (radio to gamma)
- Multi-energy neutrinos (MeV to PeV)
- Multi-frequency GWs (Hz to kHz)
- 物理現象の特徴信号抽出と特徴時間の取得

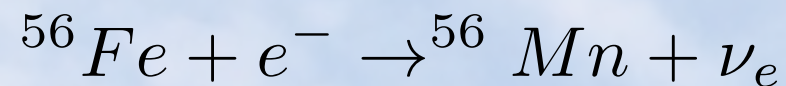


# Supernova explosion mechanism



## 重力崩壊

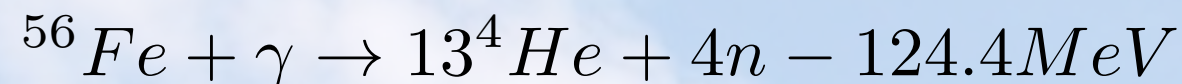
- 電子捕獲反応



ニュートリノが自由に逃げれる程度の密度 ( $10^9 \text{g/cm}^3$ )

→ 重力崩壊が進む方向の反応

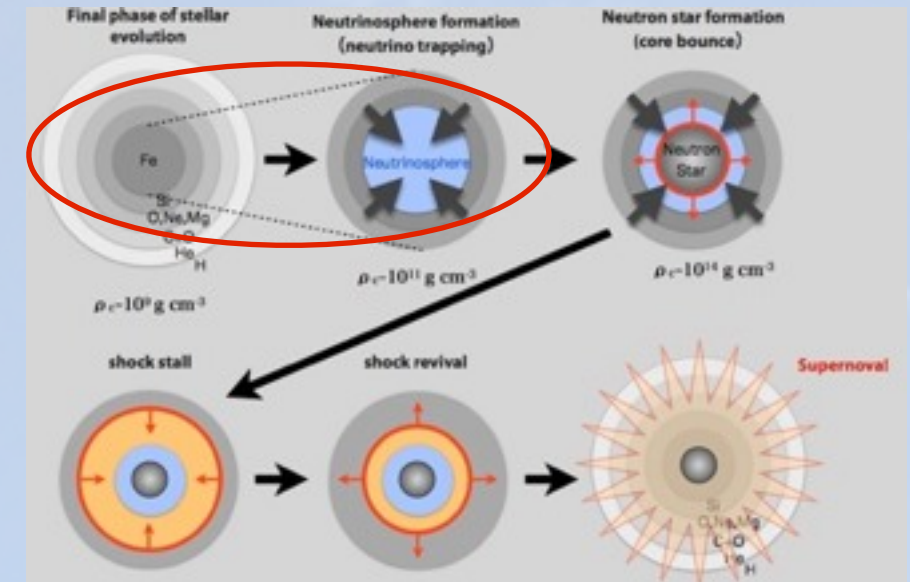
- 鉄光分解反応



恒星中心部が中性子リッチになっていく。この反応は吸熱反応

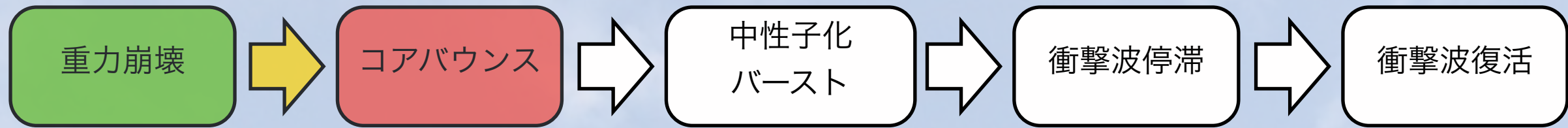
→ こちらも重力崩壊が加速する反応

中心コア密度が  $\rho > 10^{12} \text{g/cc}$  となると、ニュートリノの平均自由行程が短くなり、自由に抜けられなくなる。→ ニュートリノ球を生成する。





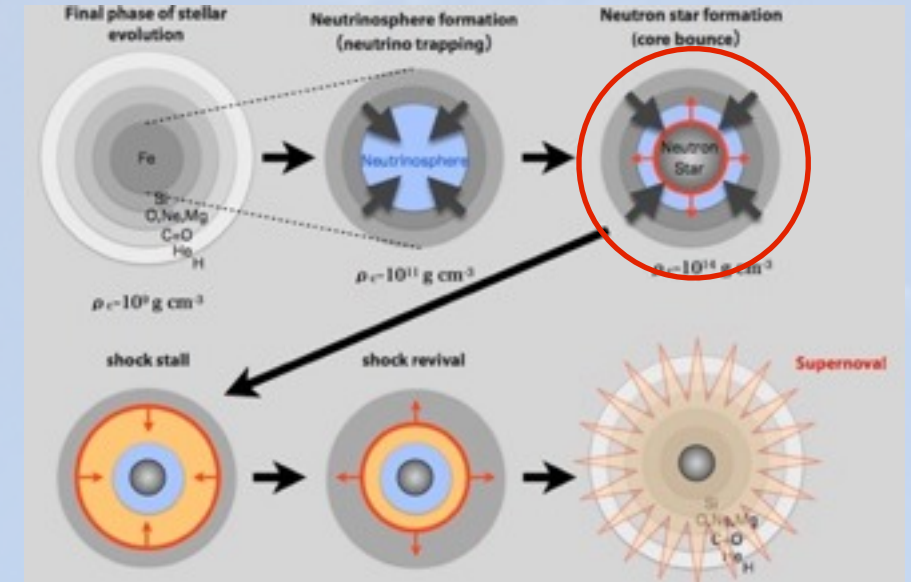
# Supernova explosion mechanism



## コアバウンス

コア中心密度が  $\rho > 10^{14} \text{ g/cc}$  を超えると、これ以上収縮できなくなりコアがバウンスする。その際に衝撃波が生じる。

高密度での状態方程式(Equation of State, EoS)や原始中性子星(Proto Neutron Star)の初期回転、親星の初期条件によって、強い重力波が出てくる。



重力波波形と中心密度の時間変化の一例 (DFM波形)

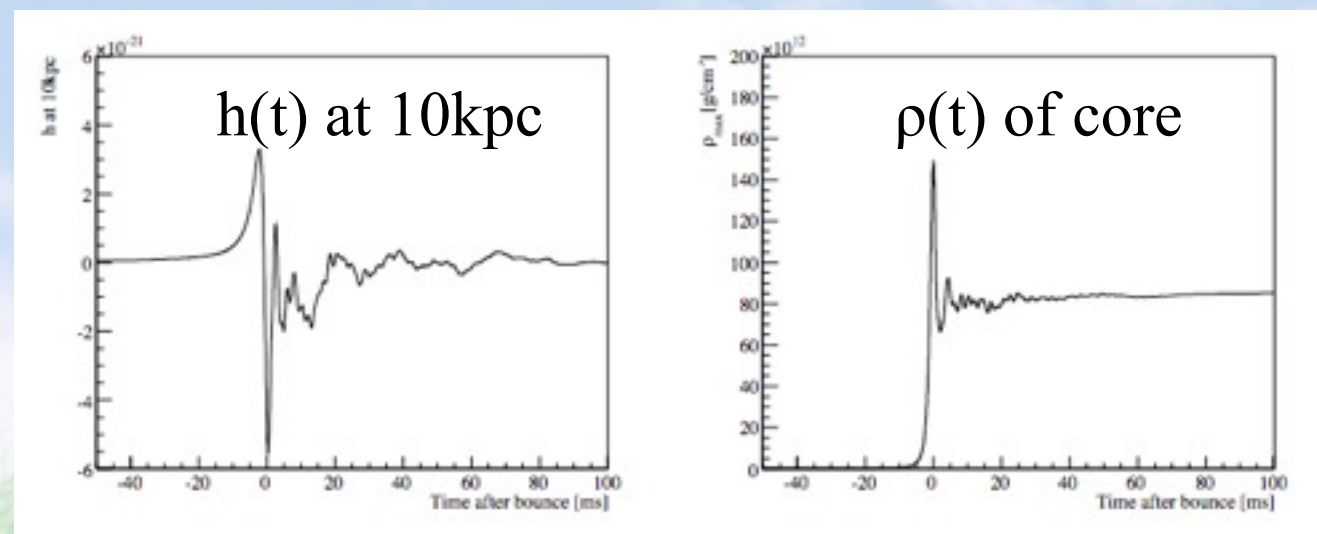
$$I_{\mu\nu} = \int \rho(\vec{r})(x_\mu x_\nu - \frac{1}{3} \delta_{\mu\nu} r^2) d^3x$$

$$\mathcal{L}_{gw} = \int_{r \rightarrow \infty} T_i^{0gw} n^i r^2 d\Omega$$

$$= \frac{G}{5c^5} \langle \ddot{I}_{\mu\nu} \ddot{I}^{\mu\nu} \rangle$$

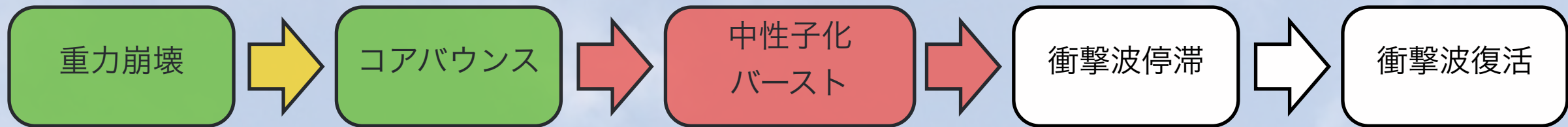
$$h_{\mu\nu} \simeq \frac{2G}{rc^4} \ddot{I}_{\mu\nu}$$

Mass quadrupole moment  
axis asymmetry



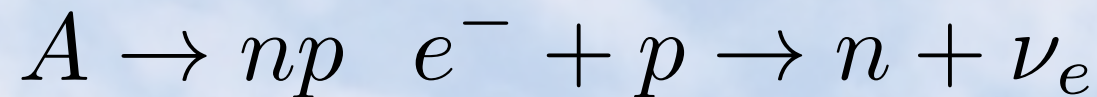


# Supernova explosion mechanism



## 中性子化バースト

生じた衝撃波が以下の反応をしながら広がっていく。その際にどんどんエネルギーを失う。



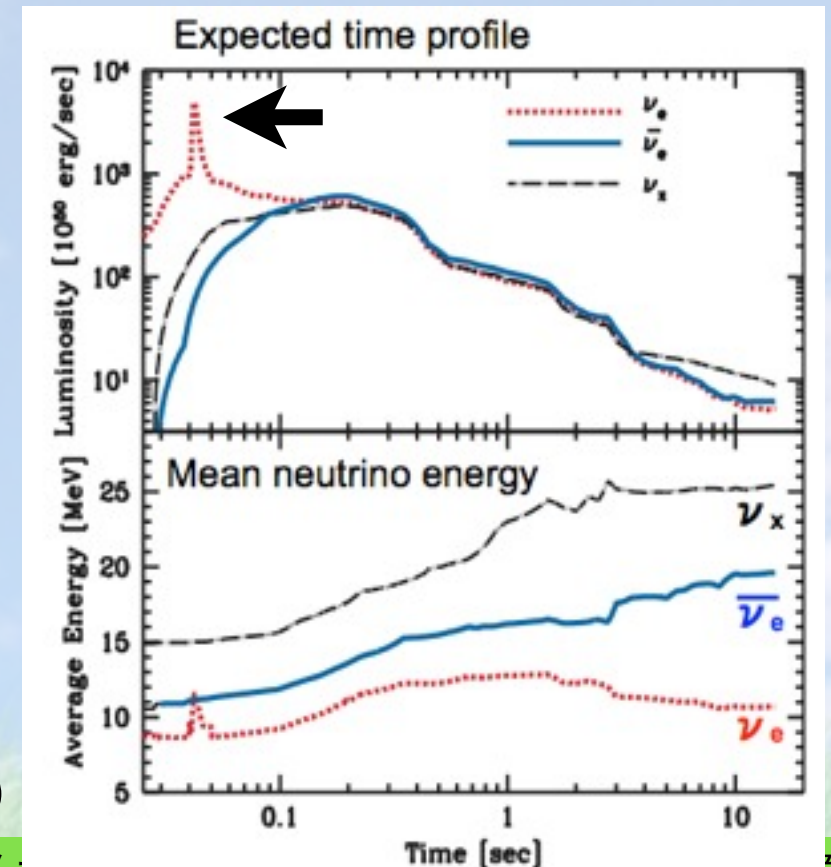
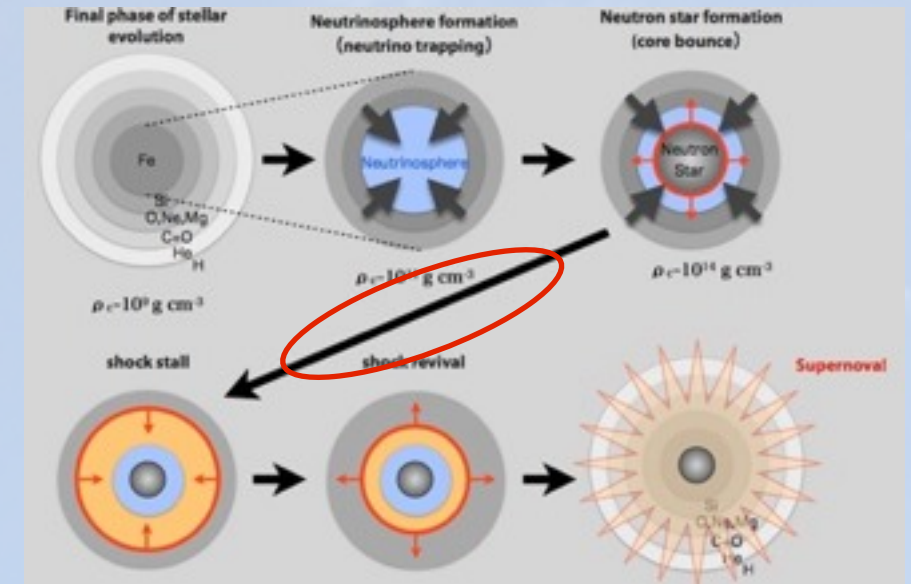
不透明さの原因である原子を分解していく。

$r(\text{shock wave}) < r(\text{neutrino sphere})$  :  
上反応で生成された  $\nu$  はトラップされている。

$r(\text{shock wave}) > r(\text{neutrino sphere})$  :  
不透明さが解消されて  $\nu$  がバースト的に放出される  
->中性子化バースト

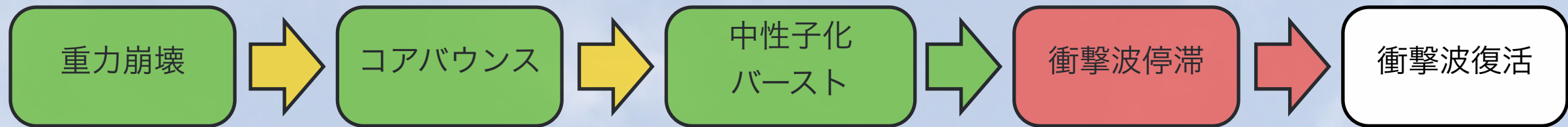
初期の陽電子不足により anti- $\nu$  はあまり生成されない。

Luminosity and mean energy estimated by  
Livermore group (Astrophys. J 295(1985)14)





# Supernova explosion mechanism



## 衝撃波停滞

衝撃波が物質を進むにつれてエネルギーを失い、一度停滞をする(delayed explosion model)

- PNS周辺では、対生成反応により全フレーバーのニュートリノが生成される。
- ニュートリノ駆動型モデルでは、このニュートリノのエネルギーの一部が衝撃波に与えられ、衝撃波が復活する。

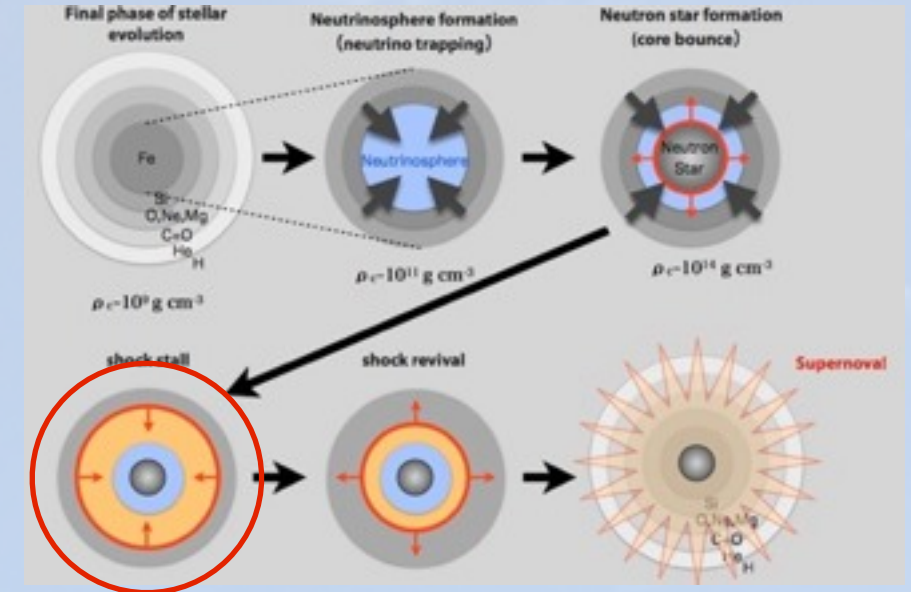
Key of shock revival : heating v.s. mass accretion

$\tau_{\text{heat}}$  : time scale of neutrino heating

$\tau_{\text{adv}}$  : time scale of matter flow

$$\tau_{\text{heat}} \sim \frac{GM_{\text{core}}m_u}{q_\nu r} \sim 80\text{ms} \left(\frac{M_{\text{core}}}{1.5M_\odot}\right) \left(\frac{L_\nu}{10^{53}\text{erg s}^{-1}}\right)^{-1} \left(\frac{\langle\epsilon^2\rangle}{(15\text{MeV})^2}\right)^{-1} \left(\frac{r}{200\text{km}}\right)^{-1}$$

$$\tau_{\text{adv}} \sim \frac{r_{\text{shock}} - r_{\text{gain}}}{v_r} \sim 50\text{ms} \left(\frac{r}{100\text{km}}\right) \left(\frac{v_r}{2 \times 10^8\text{cm s}^{-1}}\right)^{-1}$$



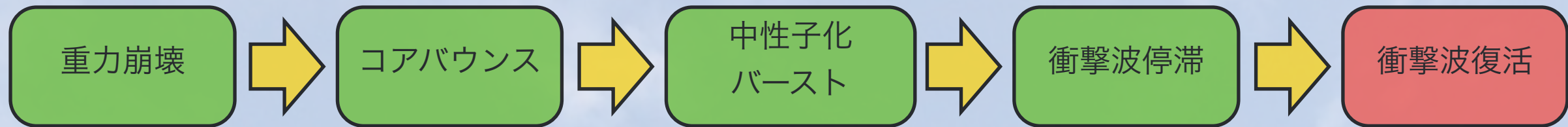
Explosion condition :  $\tau_{\text{heat}} > \tau_{\text{adv}}$

SASI, convection can be introduced by success of multi-dimensional numerical simulation

Both SASI and convection phenomenon makes longer!  
→ Next slide

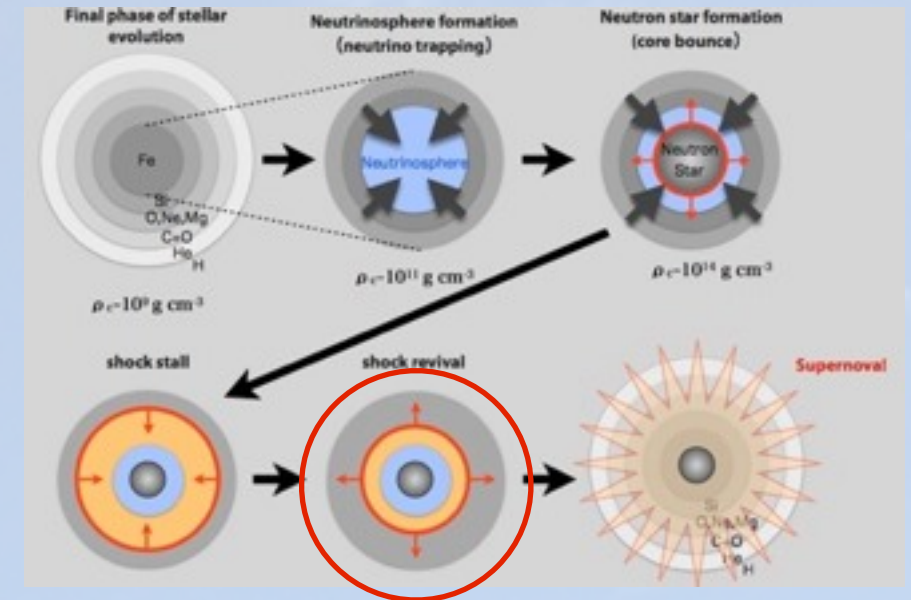
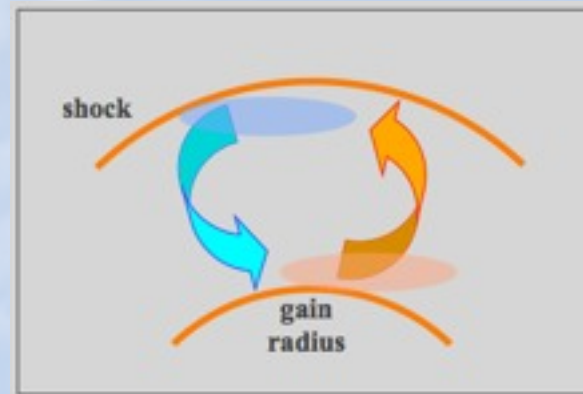
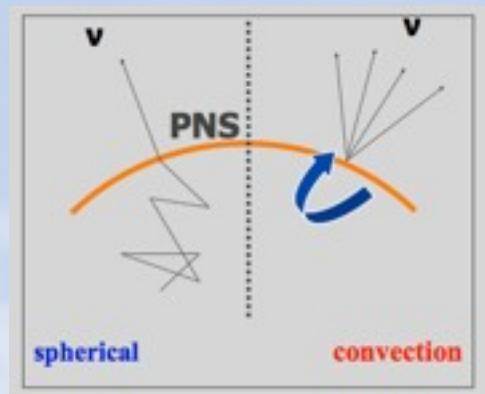


# Supernova explosion mechanism



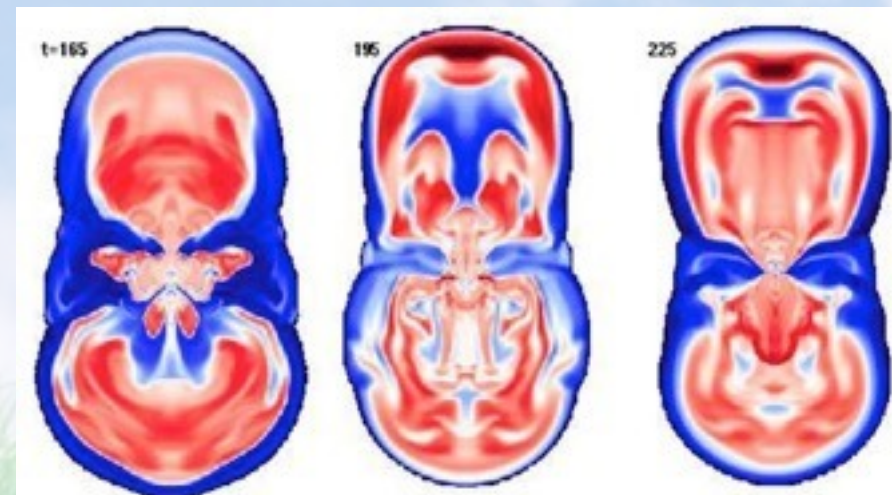
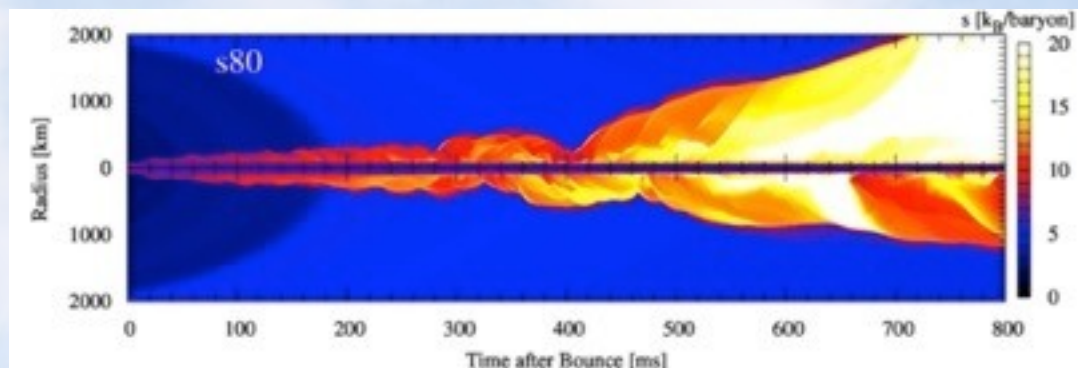
## 衝撃波復活

Convection  
not only radial  
direction moment



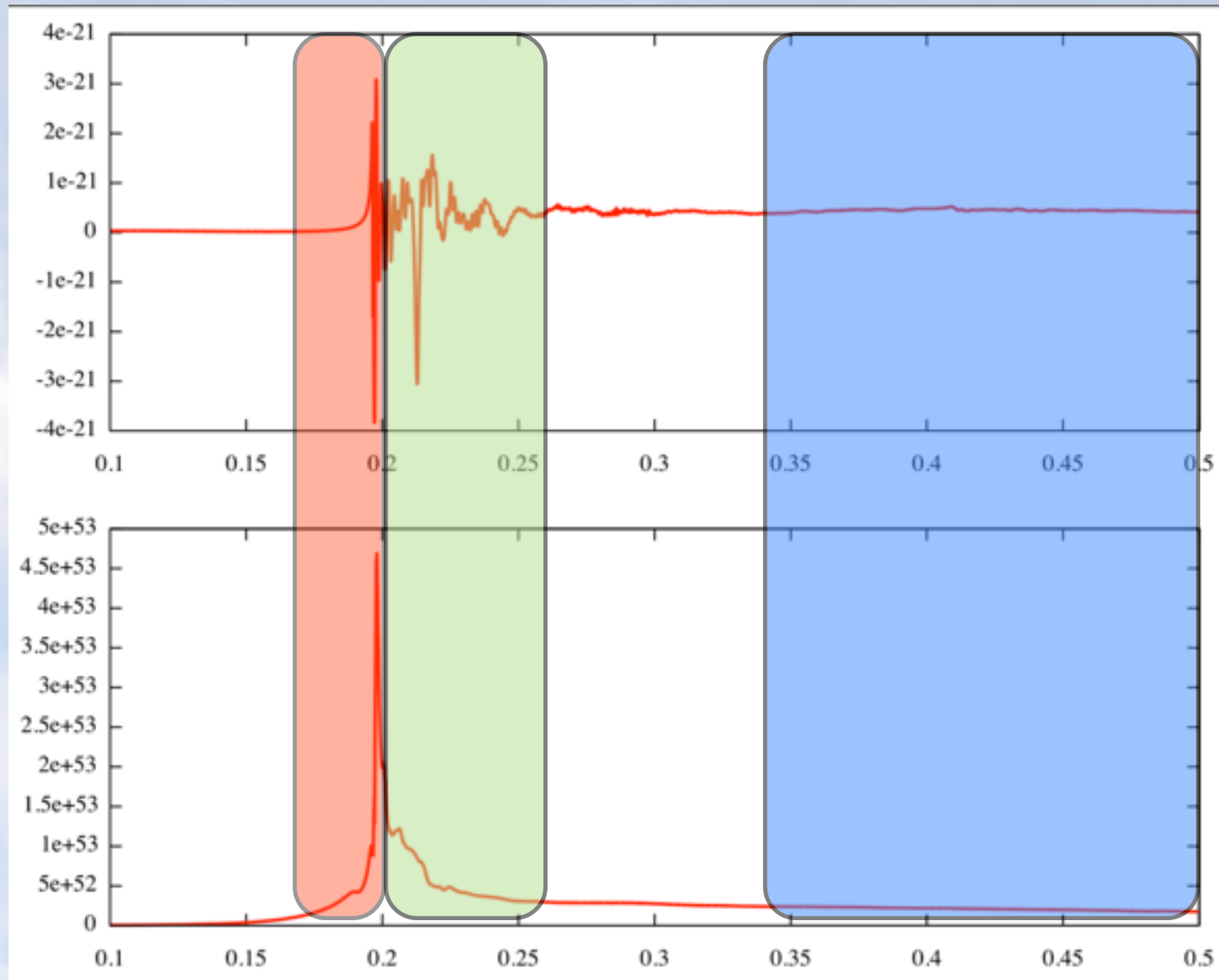
## Standing Accretion Shock Instability (SASI)

- 非球対称で、低次( $l=1,2$ )の衝撃波の不安定な成長
- PNS(Proto Neutron Star)付近で降着物質がheat upされニュートリノが放出
- 非球対称なheat upによりニュートリノルミノシティの時間変化(up to 10%?)が期待される





# Supernova explosion mechanism



2次元数値シミュレーション

Suwa et. al. 2013

progenitor mass:  $11.2 M_{\odot}$

Rapid core rotation model

重力波・ニュートリノは中心情報を運んでくる。それぞれのフェーズで特徴的な信号が現れることが期待されている。

ニュートリノ: thermal motion

重力波: matter motion

Strong GW from core bounce?


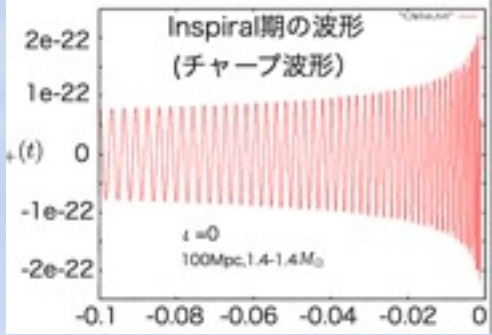

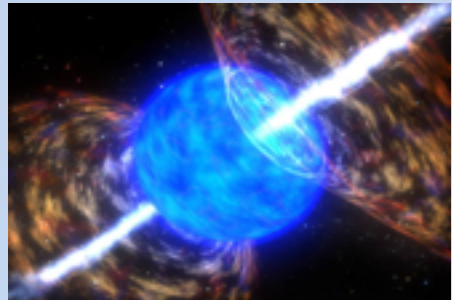
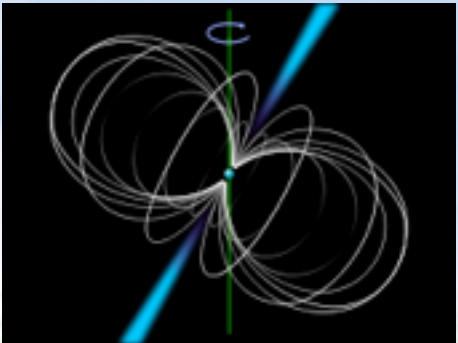
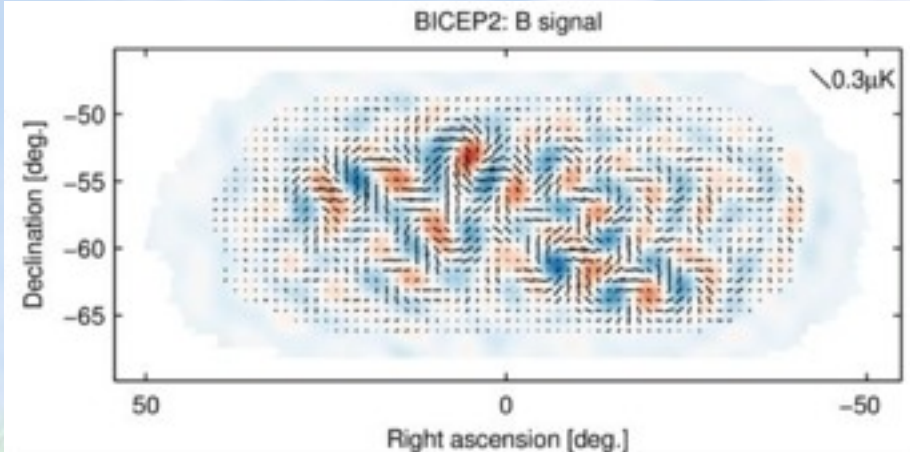
Characteristics of prompt convection phase?

Is there signals from shock stall phase?

Characteristics of SASI/convection phase?



# Candidate GW sources

	Known waveform	Unknown waveform
Short duration	<p>Compact Binary Coarseness NS-NS, NS-BH, BH-BH, ... Matched filtering</p>   <p><a href="http://www.nasa.gov">http://www.nasa.gov</a></p>	<p>Supernova, GRB, pulsar glitch Soft Gamma Repeater, ... Excess power, TF clustering, ...</p>   <p><a href="http://www.eso.org">http://www.eso.org</a>      <a href="http://www.nasa.gov">http://www.nasa.gov</a></p>
Long duration	<p>mili-second pulsar, radiometry LMXB search F-statistics, performance GPGPU</p>  <p><a href="#">Wikipedia</a></p>	<p>Stochastic GW, Cosmic string GW, ...</p>  <p><a href="http://bicepkeck.org">http://bicepkeck.org</a></p>

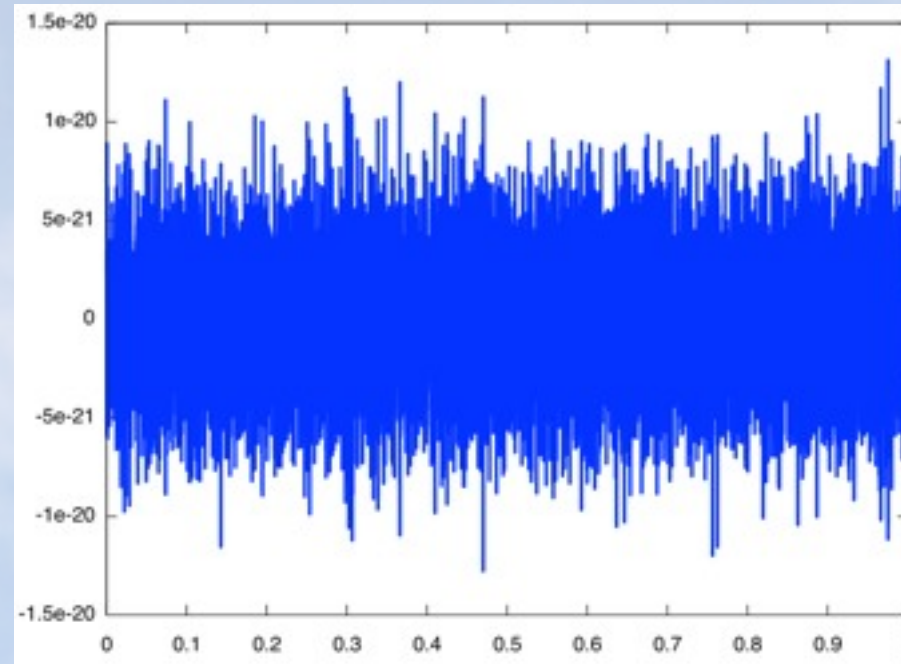
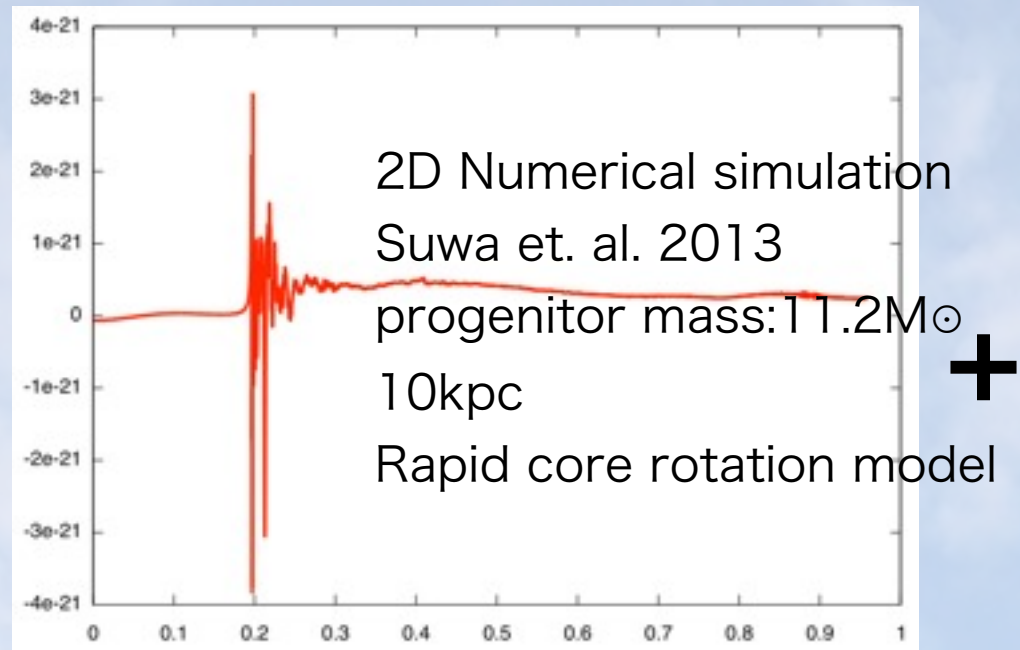


# Candidate GW sources

$$S_{obs}(t) = \underbrace{(F_+ h_+(t) + F_\times h_\times(t))}_{\text{GW signal}} + \underbrace{n(t)}_{\text{Detector noise}}$$

GW signal

Detector noise



Simulation :  
KAGRA noise  
Stationary,  
Gaussian noise

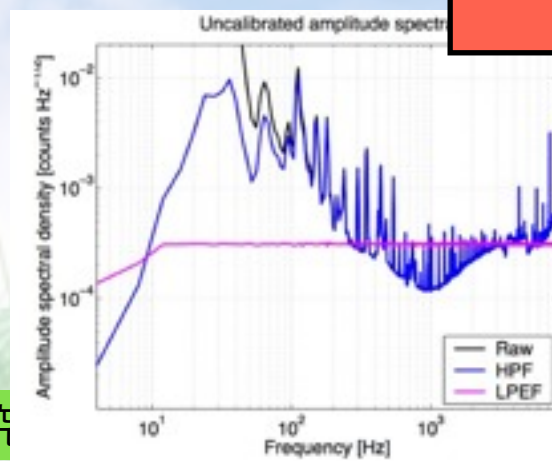
Time form gravitational collapse[s]

Flatten a frequency characteristic

Whitening

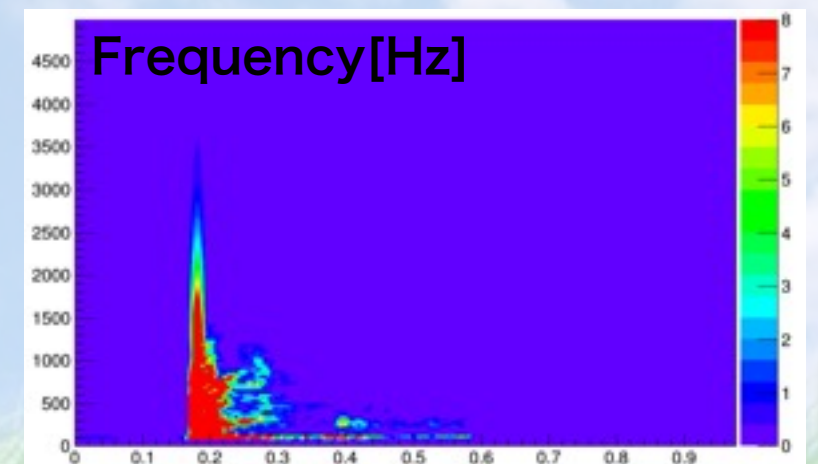
Linear prediction error filter

$$\tilde{x}[n] = \sum_{m=1}^M c[m]x[n-m]$$



Expand to TF plane

Search transient signal

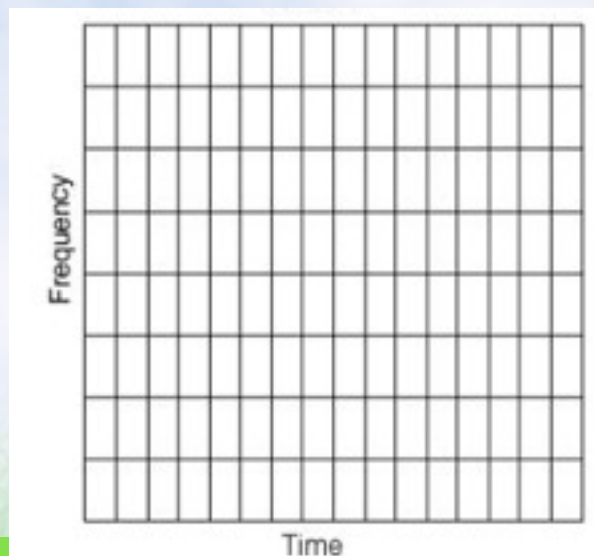




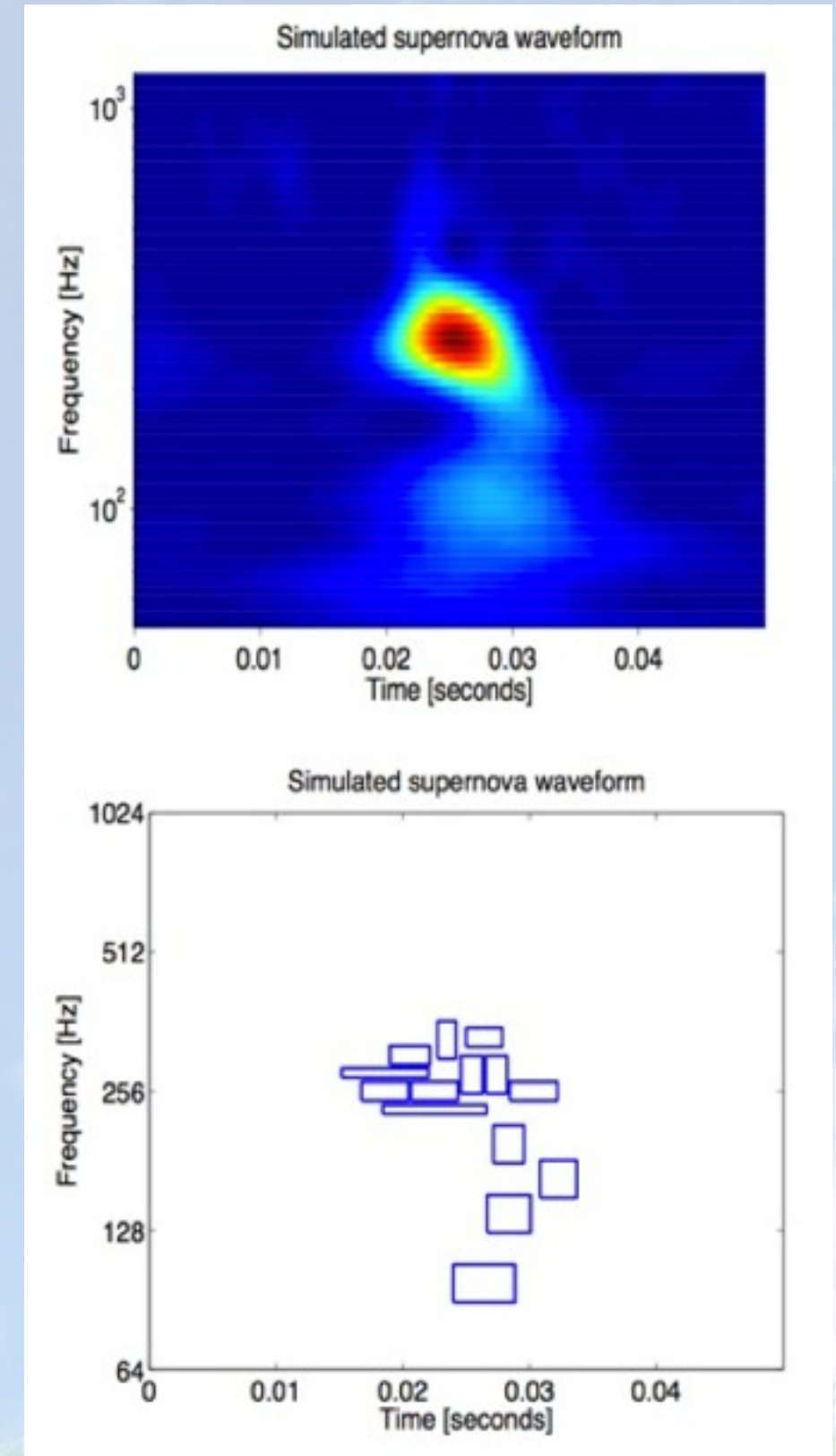
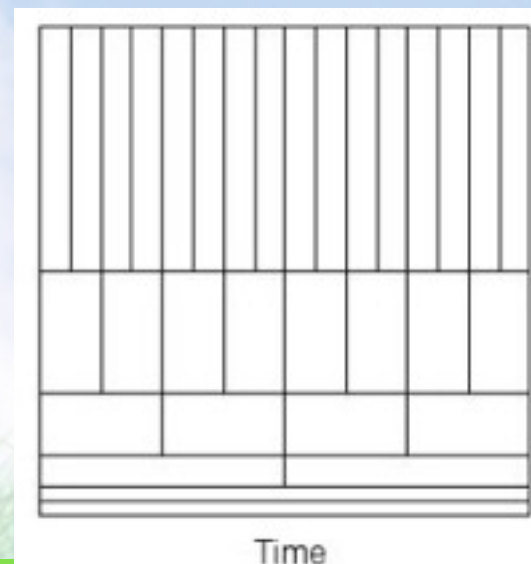
# Excess power analysis

- Analysis flow :
  - Data quality check, commissioning
  - Transform to TF plane
  - Search the local high power pixel
  - Clustering
  - Event reconstruction
- Obtain Signal to Noise ratio effectively
- Extract characteristics Time and Frequency
- Check with noise catalogue

Short Time  
Fourier Transform



Wavelet



K.Hayama



# Coherent network analysis

- Coherent network analysis

$$\begin{array}{cccc}
 \begin{bmatrix} x_1(t) \\ \vdots \\ x_d \end{bmatrix} & = & \begin{bmatrix} F_{1+}(\theta, \phi) & F_{1\times}(\theta, \phi) \\ \vdots & \vdots \\ F_{d+}(\theta, \phi) & F_{d\times}(\theta, \phi) \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} h_+(t) \\ h_\times(t) \end{bmatrix} & + & \begin{bmatrix} n_1(t) \\ \vdots \\ n_d(t) \end{bmatrix} \\
 \text{Data} & & \text{Detector response} & \text{GW} & & \text{Detector noise}
 \end{array}$$

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{h} + \mathbf{N}$$

- Solve the inverse problem  $\mathbf{h}$  with maximum likelihood method
- Changing source direction ( $\theta$ ,  $\phi$ )
- Find the likely GW waveform  $\mathbf{h}$

$$\mathbf{L} = \max(-\|\mathbf{x} - \mathbf{A}\mathbf{h}\|^2) \quad \text{where} \quad \|x\|^2 = \sum_{i=1}^d \int_0^T x_i(t)^T x_i(t) dt$$

$\|\text{data}(x) - \text{estimated signal}(\xi)\|^2$

$$h = (A^T A)^{-1} A^T x$$

- Various pipelines are proposed
  - coherent WaveBurst
  - Xpipeline
  - RIDGE etc

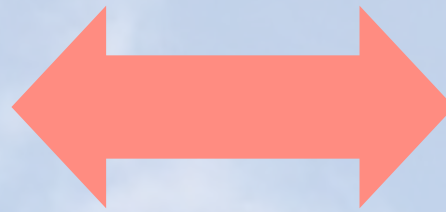


# Probing core rotation

- Submitted to ApJ (ApJ 812:26(2015), arXiv : 1410.2050)
- Focus on **GW observed time( $t_{\text{obs\_gw}}$ )** and **Neutronization burst time( $t_{\text{obs\_nburst}}$ )**
- Supernova detection simulation with KAGRA and EGADS/SK+Gd detector

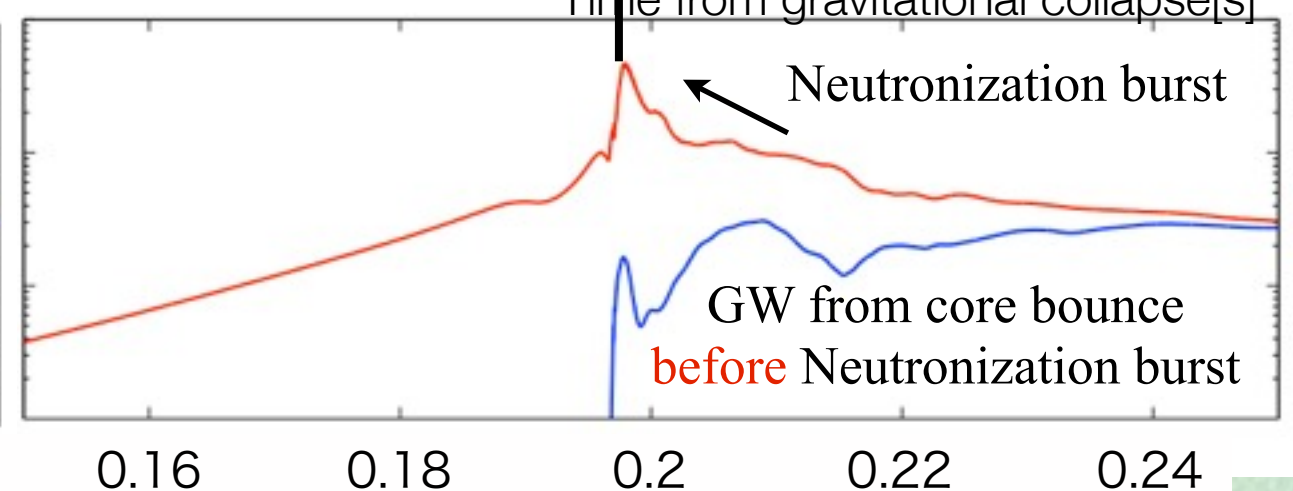
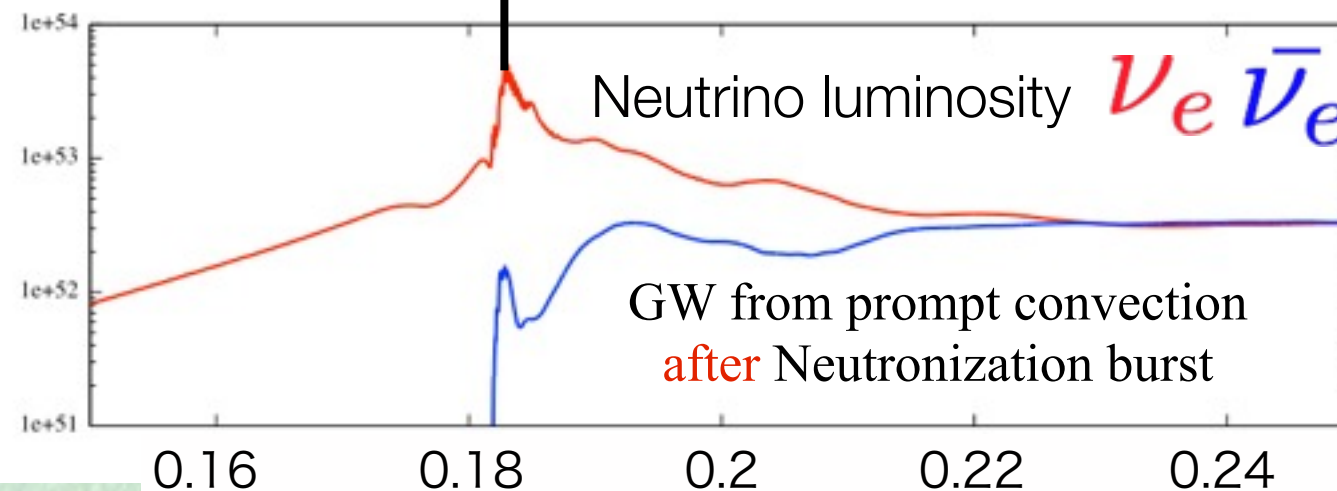
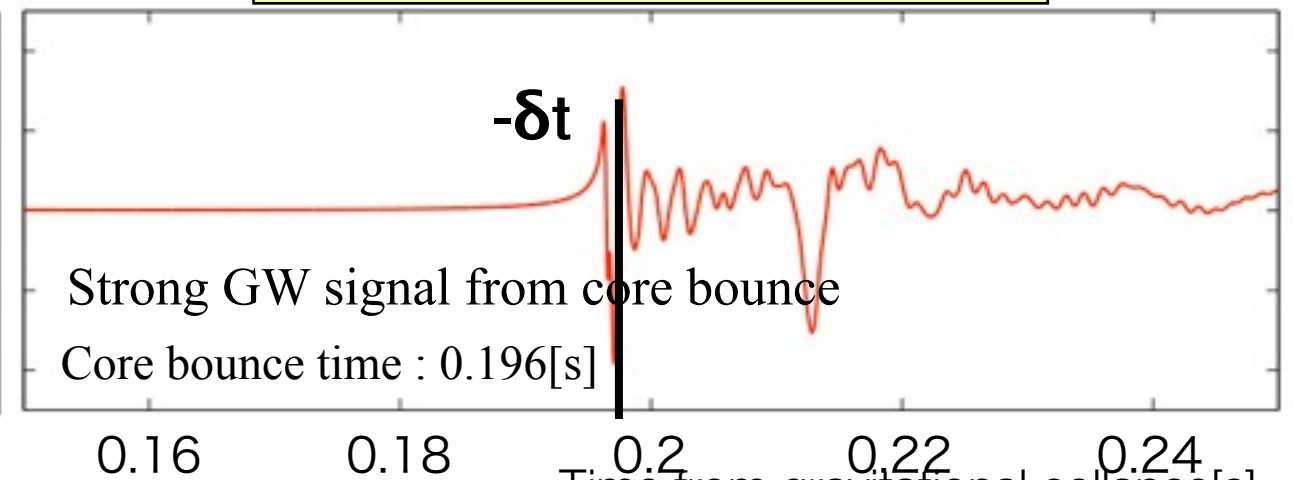
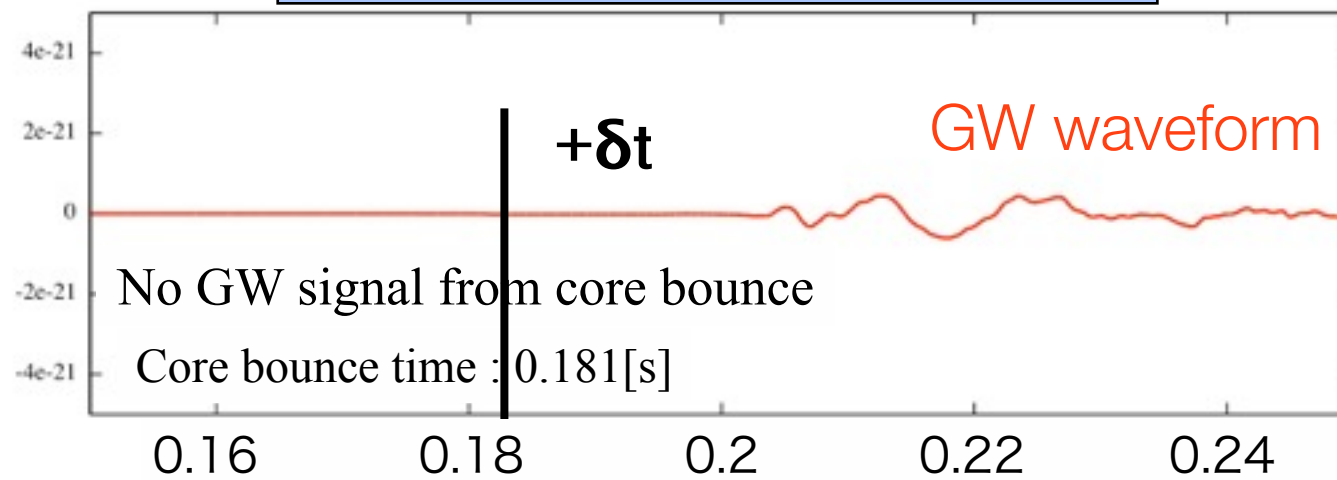
**No core rotation**  
**No GW signal from core bounce**  
 GW from prompt convection **after**  
 Neutronization burst

**Strong core rotation**  
**Strong GW signal from core bounce**  
 GW from core bounce **before**  
 Neutronization burst



No core rotation case (0[rad/s])

core rotation case( $\pi$ [rad/s])





# Detectors and simulations

## Robust analysis

Simple search, single detector

Study with **KAGRA** and **EGADS/SK+Gd**  
neutron tagging with Gd(90%)  
test tank for GADZOOKS! project



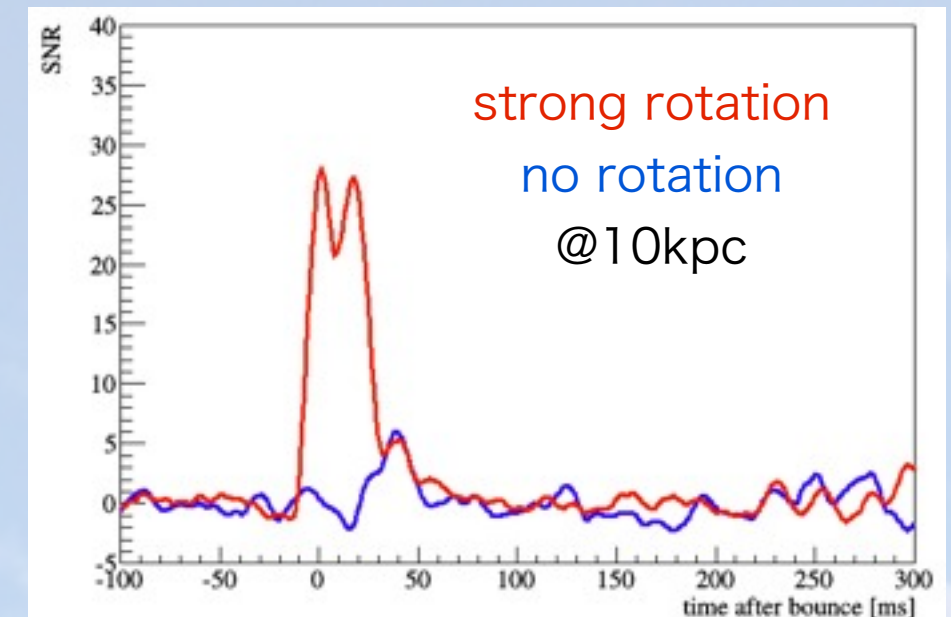
## GW analysis

Excess power filter

+ Short Time Fourier Transform

Generate signal  $s(t)=h(t)+n(t)$

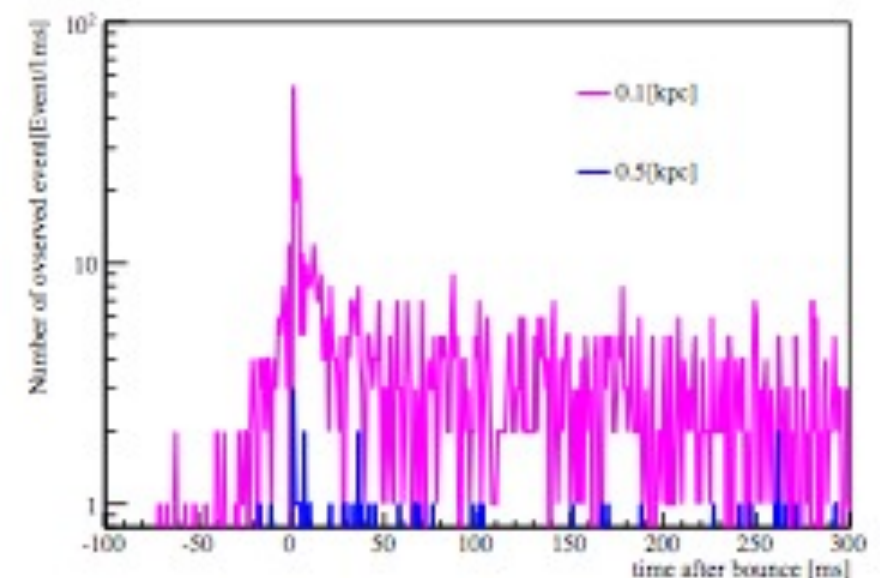
Search window which give  $SNR > 8$



## Neutrino analysis

generate signal with Poisson statistics

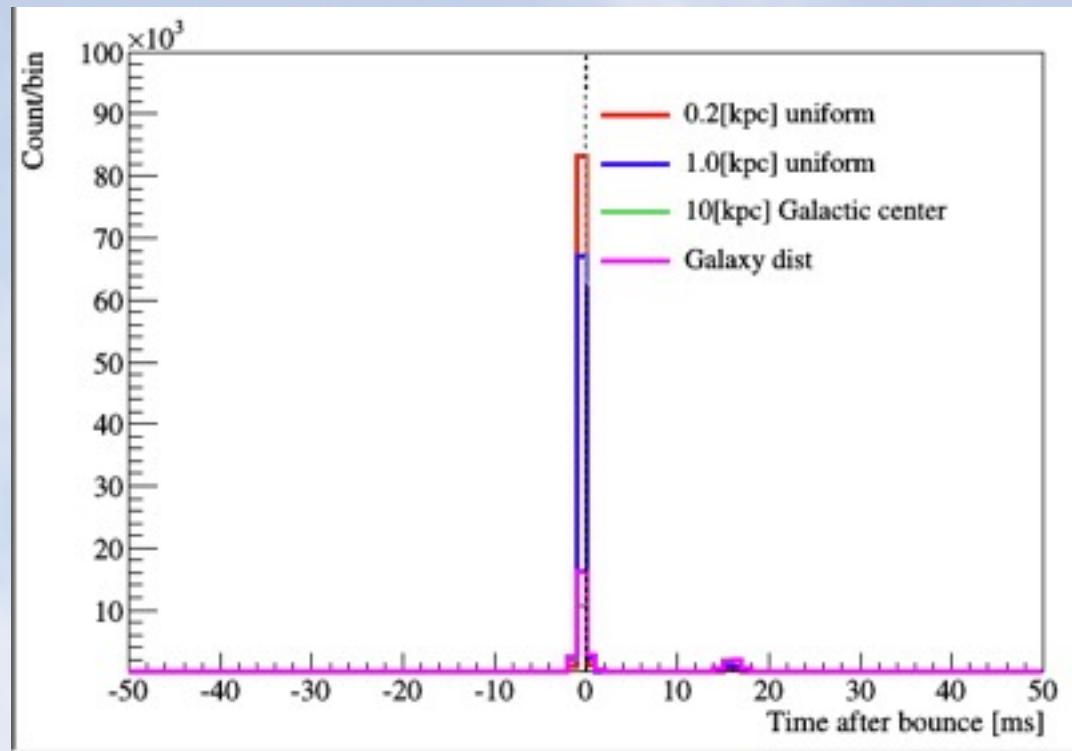
search window which give max number  
of observation electron neutrino



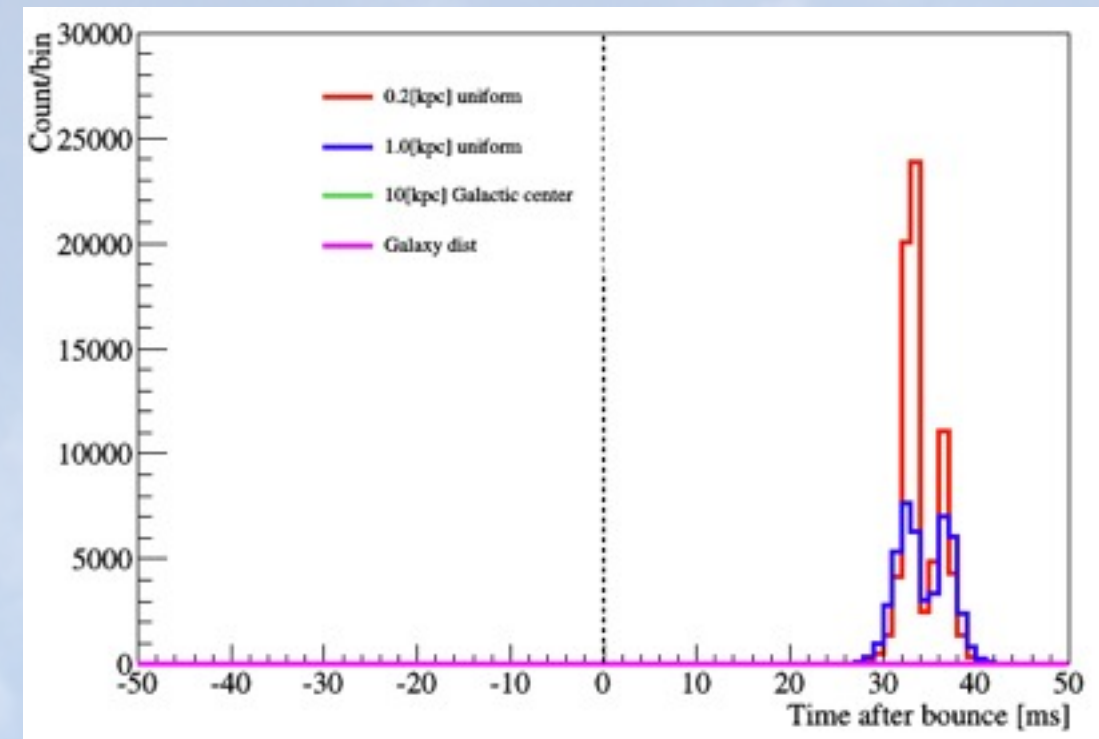


# Epoch time of GW and neutronization burst

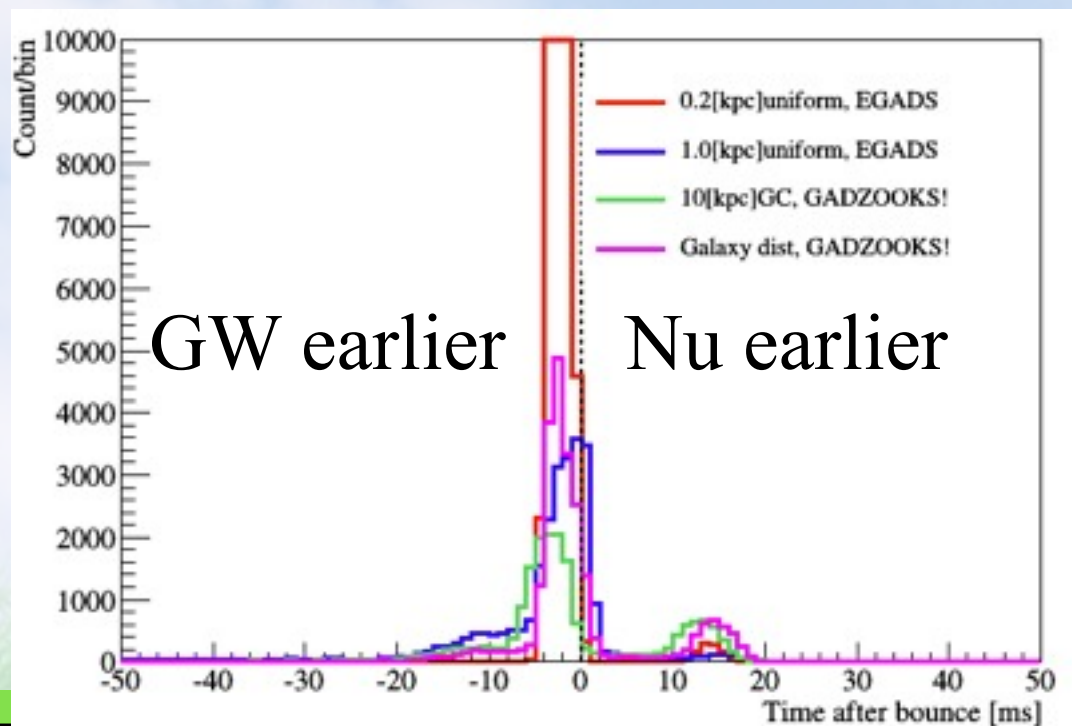
GW epoch : 1.0 pi rad/s



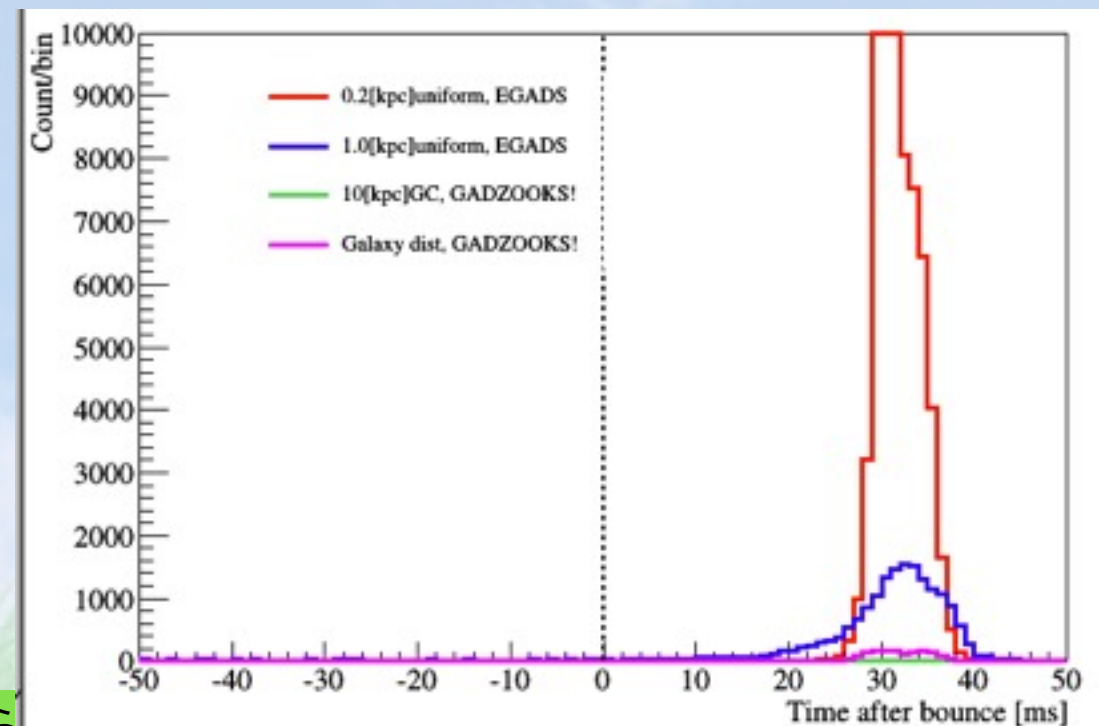
0.0 pi rad/s



GW - Nu epoch : 1.0 pi rad/s



0.0 pi rad/s

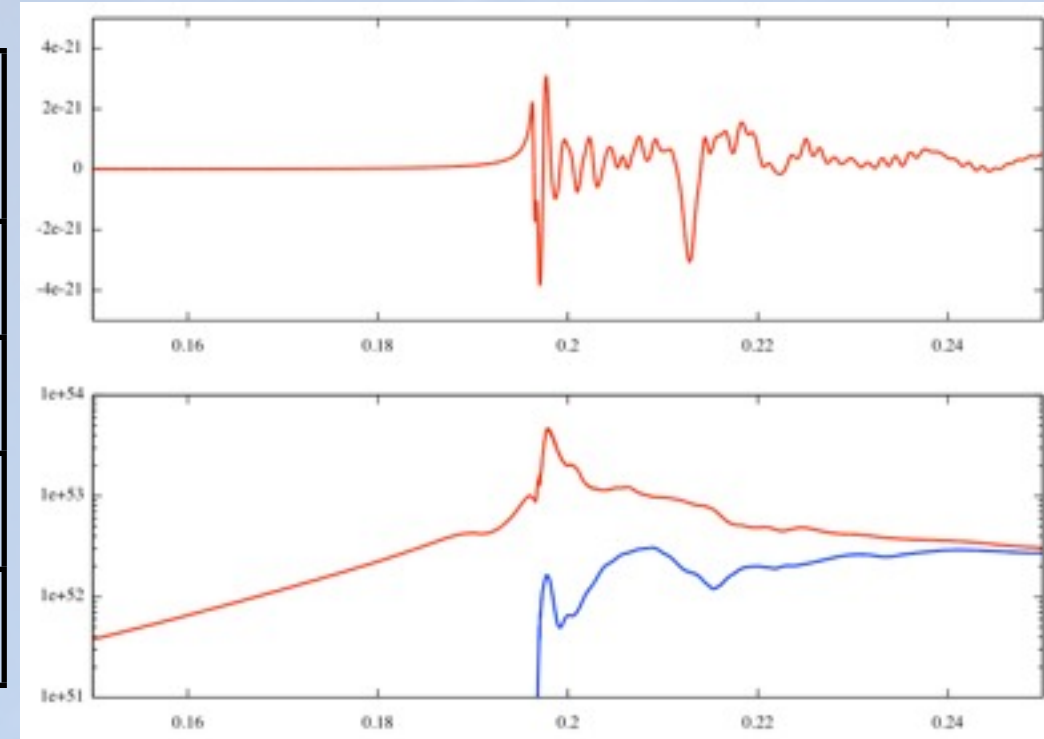




# Result : Strong core rotation model

For “Strong” core rotation model:

Preliminary	KAGRA det. eff. [%]	EGADS Nburst [%]	SK+Gd Nburst [%]	Evaluate rotation [%]
0.2kpc uniform	88	100	--	98
1.0kpc uniform	74	40	--	80
Galactic Center	22	--	95	75
Galaxy distribution	27	--	82	76

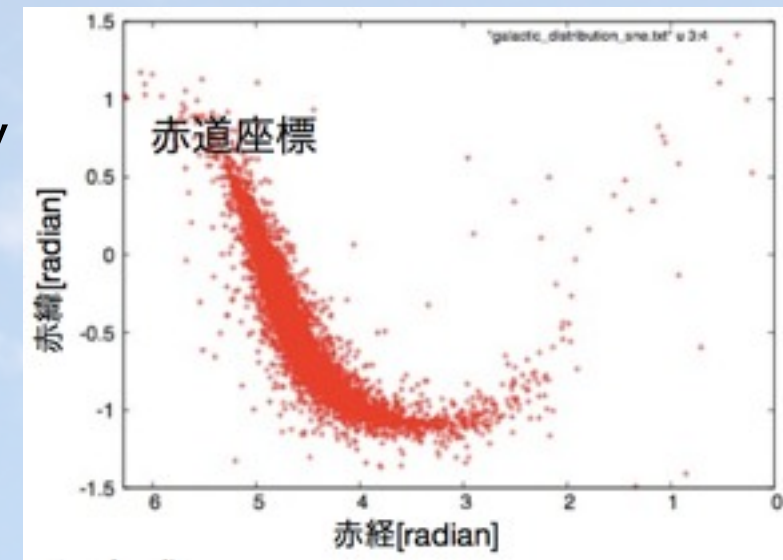


- For neutrino detector, identification probability of neutronization burst is described
- In 0.2 or 1.0 kpc, current SK DAQ may not work correctly
- In GC, a few of electron neutrino will be observed
- KAGRA analysis
  - First window which satisfied SNR>8
- Galactic Center
  - decl : -28°56'10.23", 10kpc
- Galaxy distribution :

exponential disk model

$$dN \propto R dR dz e^{-\frac{R^2}{2R_0^2}} e^{-\frac{|z|}{h}}$$

where,  $R_0 \sim 3.5\text{kpc}$ ,  $h \sim 320\text{pc}$

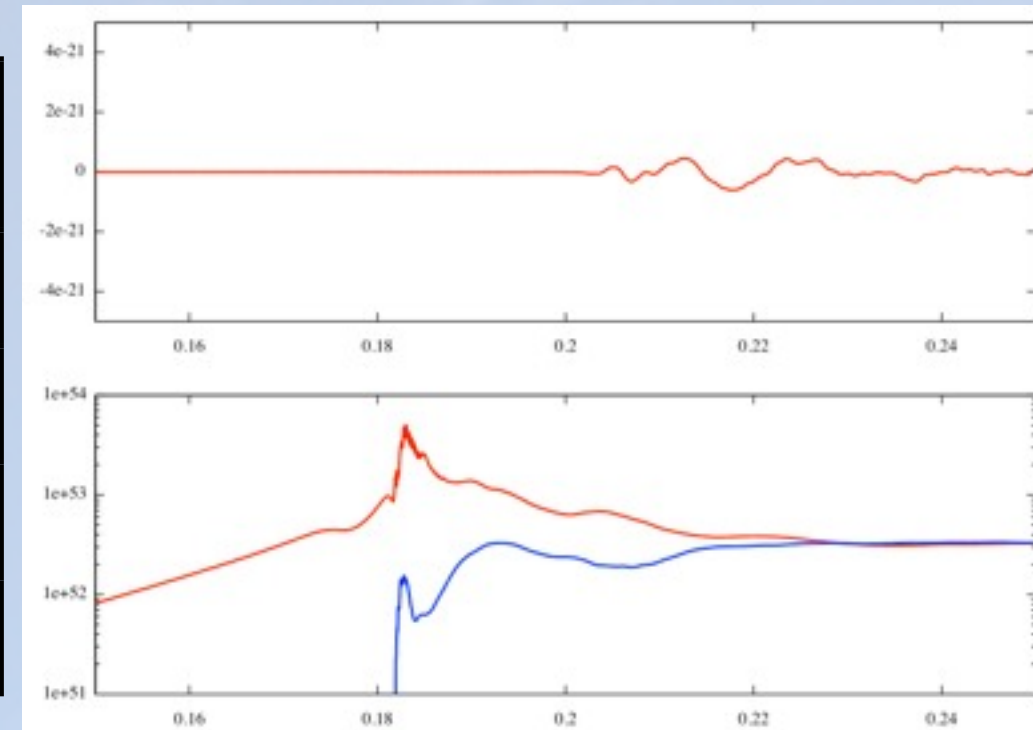




# Result : No core rotation model

## For “No” core rotation model:

Preliminary	KAGRA det. eff.[%]	EGADS det. eff.[%]	SK+Gd det. eff[%]	Evaluate rotation[%]
0.2kpc uniform	74.8	100.0	--	0.0
1.0kpc uniform	46.5	46.8	--	20.8
Galactic Center	0.0	--	97.5	NaN
Galaxy distribution	1.5	--	84.6	0.2

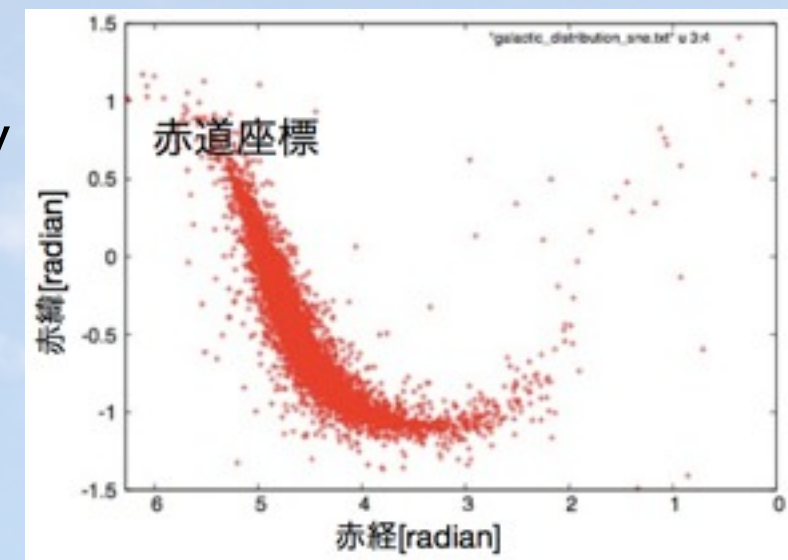


- For neutrino detector, identification probability of neutronization burst is described
- In 0.2 or 1.0 kpc, current SK DAQ may not work correctly
- In GC, a few of electron neutrino will be observed
- KAGRA analysis
  - First window which satisfied SNR>8
- Galactic Center
  - decl : -28°56'10.23", 10kpc
- Galaxy distribution :

exponential disk model

$$dN \propto R dR dz e^{-\frac{R^2}{2R_0^2}} e^{-\frac{|z|}{h}}$$

where,  $R_0 \sim 3.5\text{kpc}$ ,  $h \sim 320\text{pc}$





# Summary

- ・ 超新星爆発メカニズム解明のために、重力波・ニュートリノの同時解析というのは重要な役割を果たす。
- ・ 重力波天文学の幕開けとともに銀河内超新星爆発はすごく期待されている。
- ・ いろいろなグループと共同研究を行っていききたい。
- ・ 早く、爆発してください(ただ、KAGRAがfull specになるであろう2020年以降が望ましい。)