

# A First ~~Transient~~ Targeted Search for ① Gravitational-Wave Bursts from Core-Collapse Supernova in Data of First-Generation Laser Interferometer Detectors

arXiv: 1605.01785

## Abstract:

2007-2011年

270 CCSNe の burst search.

LIGO, ~~Virgo~~ Virgo, GEO  
(L, H1, H2)

< 15 Mpc

9ヶ月 time window

4台 < 2台 > 以上の detector.

も、それらしい GW は 見つかりました。

## Introduction:

Core Collapse Supernova.

重力崩壊 → core bounce → shock stall → shock revival

→ reach surface → EM. (Type II, or Type Ib Ic)

~~shock~~ reach surface も 17.25 重畳!! (後述)

この progenitor の 1 に 5% L. GW search の

time window の 半分が 変化した。

近頃の SN  $\approx 10^{-12}$  -  $10^{-8} M_{\odot} c^2$  の重力波が予想

昔の観測りは optimistic.  
2nd generation laser interferometers への

$D \leq 1 \sim 100 \text{ kpc}$  くらいで観測可能

特殊な条件(経路)がある  $D \geq 10 \sim 15 \text{ Mpc}$  かつ  
観測可能な重力波は first generation への

special and rare progenitor characteristics.  
all-sky search は行われていた。加えては観測可能

Target search の特徴

well-defined temporal on-source window  
arrival time

constrain sky location of the source.

preliminary selection of four targets

SN 2007gr, 2008ax, 2008bk, 2011dh

Table 1 に特徴, Fig 1 に window 内での  
detectors の稼働状況がわかる。

2008 ax と 2008 bk は LIGO S5 と S6 の間  
H2 と GEO の観測が行われた。

その他 2007gr と 2011dh の 2 種類

# Targeted core-collapse supernovae.

Galactic + Magellanic Cloud CCSN  $t_0 \pm t_0 \pm 3$ .  
neutrino 検出 精度に GW window を決めた  
 $\sim O(10s)$  or  $O(1min)$

$$10000 \left( \frac{10kpc}{D} \right)^2 \quad [event / 20s]$$

検出範囲 100kpc, 7.12x4.7  
event 検出 精度 10kpc 以上は  
検出可能 (か 実際は 3MHz search (7.12))

$D \sim O(Mpc)$  以上

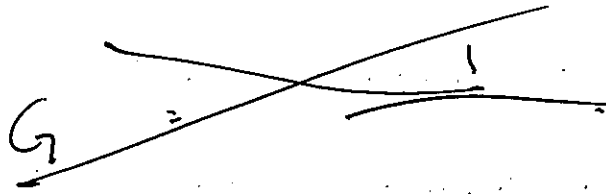
based on estimates of:

- ① - the explosion time
- ② - explosion energy.
- ③ - radius of the progenitor.

① time at supernova shock breaks out of the stellar surface and EM emission begins.

- supernova の light curve and spectrum 分かる程度分かる

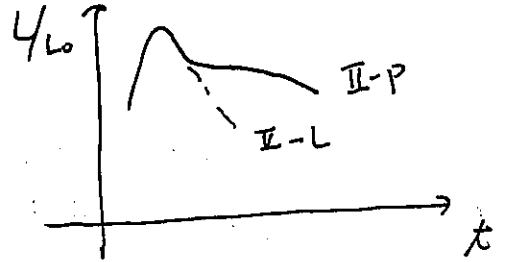
- pre-explosion の image 検出 分かる



o A red supergiant progenitor

$R \sim 500 - 1500 R_{\odot}$

Type II-P supernova.



外層の水素が豊富

途中で水素のイオン化の進行により、光の不透明度が増し、光がはたらく時期が長くなる。水素の再結合の温度が下がるとまたはたらく。

つまり、たぶん水素層が厚い、つまり shock breakout までに時間がかかる。

1-2日 ~~shock~~ core bounce  $\rightarrow$  shock breakout.

o A yellow supergiant

ある程度に水素層が薄く、つまり、 $\Gamma$  しているもの。

$R \sim 200 - 300 R_{\odot}$

Type IIb supernova.

水素量は弱く、つまり、 $\Gamma$  しているか、質量が小さく、つまり、 $\Gamma$  しているか、たぶん、IIb型に近いスフィアになる。つまり、ほぼ、 $\Gamma$  の層に少しだけ水素層があるもの。たぶん、伴星に与えられた  $\Gamma$  している。

0.5日 後  $\Gamma$  する。

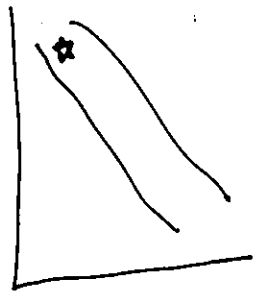
\* A blue supergiant.

ちよって特殊.

$R \sim 100 R_{\odot}$

Type II P 型だから.

半径からしてはささいなの. すでに表面に到着. 2-3h.



HR 図

SN1987A に対しては.

neutrino も 2-3 時間前に観測されたと.

- 時間からして SN1987A も、もう少し遅く観測された.  
(99% 無い)

ワイルド-レイ星

Wolf-Rayet star progenitor:

- 膨張の過程で、恒星風により、水素層が剥きさらされていく.

つまり、高温部が露出した青色巨星

- 伴星にぶつかると、壊れていく. 子星も残る.

Type Ib, Ic

水素がほとんどなく、ヘリウム線も見えない.

$R \sim 10 R_{\odot}$  くらいしかないため.

10-100s くらい. の差がある.

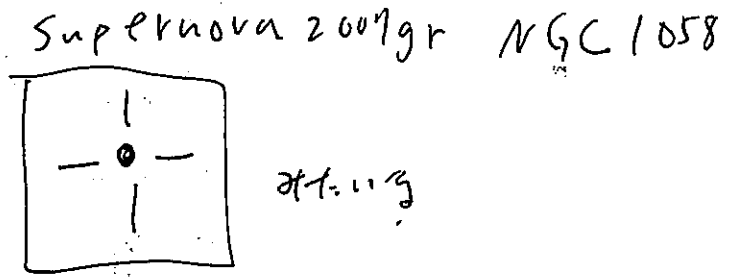
Type Ⅱ 外層の色

地下核研究、2 回超新星 = 2-11/研究会.

特殊な変容のものもあるから。2007-2011年の (6)  
 大体のSNは、explosionが13数日〜1ヶ月観測されている。

HPが観測されている

20xx/ \_\_\_\_\_ No  
 \_\_\_\_\_ Pre discovery  
 \_\_\_\_\_ Pre discovery  
 \_\_\_\_\_ Discovery



この情報から constrain してあげたい。

- (i) 観測されている個々の時間
- (ii) explosion time がどれくらい、という supernova.  
 と light curve + spectrum の比較。
- (iii) light curve の 外挿 [84] ← 時間から推定  
 されている

Estimating the Explosion Time of CCSNe  
 from Their Optical Light Curves

- (iv) Type II である。light curve から  
 expanding photosphere method.

100% 以上の SN は amateur astronomer ではなく  
 professional

candidate 選択

- (i) 10-15 Mpc 以内
- (ii) explosion time が 2週間以内以内の不安定性
- (iii) science program の detector の window 幅は 1-2 週間  
 以上

Candidate #. 42.

Table 1

(7)

2007gr

Type Ic,  $10.55 \pm 1.95$  [Mpc],

2007/8/10.39 - 15.51 5.12 [day]

H1, H2, L1, V1 93% の時間から 2 detecto 以上.

15.5117. discovered time.

(compact stripped-envelope star.

10.55 M. last non-discovery

100 sec 単位 GW の explosion の差

R.A.  $02^h 43^m 27.98$

Dec. =  $+37^{\circ} 20' 44'' . 17$ .

SN 2008ax と SN 2008 bk は省略.

SN 2011dh.

Type IIb,  $8.4 \pm 0.7$  [Mpc]

2011/5/36.37 - 31.89 1.52 [day]

G1, V1 37%

early discovery (pre-discovery 31.840)

last non-discovery 31.365

progenitor: high probability ~~1-~~ yellow supergiant star.

(~~1~~ ~~と~~ ~~super~~ ~~neutrino~~ search 単位 Mpc)  $\sim 100 R_{\odot}$   
few

Congratitude: 1日前 (pre discovery)

(8)

Location RA  $13^h 30^m 05^s . 12$

Dec  $+47^{\circ} 20' 21'' . 30$

### III detector networks and coverage

2007gr. ISS phase

H1, H2, L1, G1 (75%, 76%, 65%, 77%) 87%

2011uh if. VSR4/SBE V1, G1

~78% -62%

Fig 1 から取り出したデータ

### IV search methodology

X-Pipeline の coherent waveburst

1. 17-から集中してのイベントを探す ("loudness")  
2. 複数の detector の consistency を試す (coherent test)  
3. 時間軸をずらして FAR を見つける。

Fig 3 に. significance に対する誤認率

for SN 2007gr H1H2L1V1 network

$10^{-3} \sim 35$

off time a time shift background あり. FAR

( 仮に検出された event の 10% くらいは noise ) を減らす

on time search して event 候補を FAR の event を減らす

$FAP = 1 - \exp(-R T_{on})$  して event の FAP を減らす

$O(10^{-3})$  くらいは candidate あり?



## C. Simulated Signals and Search Sensitivity ⑨

1. Find loudest event in the window consistent with location (SNR)
2. "inject" theoretical waveform every 100  $\pm$  10 s to time shifted background.
  - specific.  $\checkmark$  to distance.
3. calculate detection efficiency & consistency test passes & data quality cut pass & event threshold  
 determine detection efficiency as a function of distance.

three classes of GW signals

1) 2D or 3D CE SN simulation

2) semi-analytic phenomenological waveform

$$h = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{4}{15} \frac{G}{c^3}} \frac{M^2}{r} \frac{v^2}{c^2}$$

3) ad-hoc (SG) waveform

$$h_{rss} = \sqrt{\int \langle h_x^2(t) + h_y^2(t) \rangle_{\Omega} dt}$$

angle-averaged root-sum-squared

Pinnel metric

S : zero-age-sequence masses

A : angular momentum

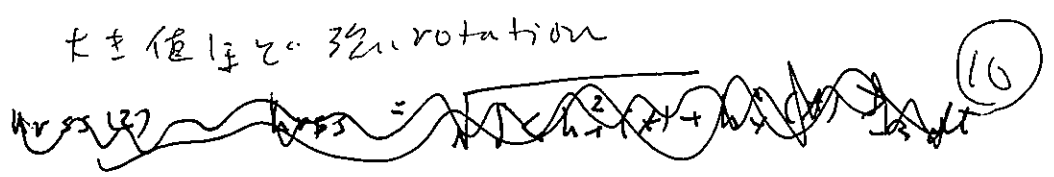
masses

1. 50, 600 km uniform

2. 600 km [ ]

3. 500 km [ ]

0 目録量 大値に2.3 rotation



f<sub>peak</sub>

$$f_{\text{peak}} = \frac{\int_0^\infty \frac{\bar{z}_A \hat{h}_A(t) \hat{h}_A^*(t)}{S_n(f)} df}{\int_0^\infty \frac{\bar{z}_A \hat{h}_A(t) \hat{h}_A^*(t)}{S_n(f)} dt}$$

detector sensitivity  $\propto \frac{1}{\sqrt{S_n(f)}}$  frequency peak

7<sup>th</sup> optimal SNR @ 0.1 Hz



- 2D general-relativistic study of Dimmelmeier et al. 15MO, LS EoS, Lattimer-Swesty rotating ~~CC~~ CFS

non-rotating  $\rightarrow$  SASI の GW 大値

Yadunin 2D

Müller et al 3D

strong excitations of  $l=1$  g-mode acoustic model  $\rightarrow$  解析的モデル

近頃の simulation  $\rightarrow$   $l=1$  の g-mode は 振盪する  $\rightarrow$  解析的モデル

## 2. Phenomenological Waveform Models

(11)

Long-lasting Bar Mode.

rapidly rotation  $\rightarrow$  PNSa 変型

$M: 0.2$  or  $1.0 M_{\odot}$

$f: 400, 800$  Hz

$\Delta = 25, 100, 1000$  [ms]

星の通し Table 2.1 の  $t_{\text{KN}} - t_0$  に 与えられた  
 長手方向の波長  $\Delta$  について



MA scale fragment in a thick accretion  
 torus around BH.

$M_{\text{BH}}$ , central BH mass 3, 10

$q = H/v$   
 torus thickness

$H$  disk scale height

0.3

$v$  local radius.

0.6

~~ad~~  $\Rightarrow$  時間内 加減.  $t_0$  (水 草月)  
 $c$  の  $<$  長さ  $t$   $<$  ".  $t_0$   $t_0$   $t_0$  ...  $t_0$  ?

# Ad-Hoc waveform

$$h_{4,x} = (3), (4),$$

$\alpha = \cos i$  ellipticity.

$$235, 1304 \quad \dot{L} = 0 \quad \alpha = 8.9$$

$\vee \quad -1 < i < 1$

High frequency search 7-12. 1304 ~~Hz~~ Hz の

Hardware injection to efficiency  $\neq$  検出率  
= Hardware 性能がLC 3.17.

all search 7- 235-MHz. 12, 7.12. 1304Hz  $\in$

## D. systematic uncertainty

- calibration uncertainties in the strain data.
- Poisson uncertainties injection to 有限回しか  
検出率の7.12.

Poisson:

Bayesian technique を使. 7. 90% 信頼区間を  
検出 (検出率)

calibration:

G1, H1 10% ~~strain amplitude error.~~ hrss estimation error.

H2 14% , 6-87, VL

1 $\sigma$  uncertainty amplitude to distance to  
factor 1.28 @ 90% C.L.

V. search result.

Table Vに 各種検出器等についておける  
 最も noisiest event に対する FAR (false  
 Alarm rate) を示す。 timing window の大きさ  
 False Alarm Probability を示す。

FAR: background study により significant 以上の event は 10% 以下に  
 H1H2L1V1 の  $1.7 \times 10^{-6} \text{ Hz}$  である。  $FAP = 0.177$

$$P = 1 - \exp(-P_{\text{on}} t)$$

time slided back-ground からの candidate event の  
 発生率が  $\lambda$  である。 window の大きさを  $T$  とする。この event は  
 background からのものである。 H1H2L1V1 case の  
 CWB X-pipeline の  
 candidate event は 10% 以下

Detection efficiency vs distance

Fig. 4.5 CWB の X-PIPELINE による loudest event より大きい significant  
 case 2007 gr search の場合。 95% 以上 detect

$\sim 11 \text{ kpc}$  multiD simulation  
 $\sim 100 \text{ kpc}$  and  $1 \text{ Mpc}$  fragmentation var.

SNR 0.11 以下の factor 3 以下に減少

G12 V1 による polarization 検出。  $\rightarrow T_c$  background  
 rejection が必要。

CCSNe 45° rotate  $\rightarrow$  orthogonal GW polarization  
 $\rightarrow$  CCSNe simulation は ~~linear~~ linear total polarization  
 (検出率) 10 Mpc に sensitivity がある。

V1. G12 の coherence  
 の検討

constraints on Energy Emission  
Sine wave study

measure the efficiency as a function of hrs

237 Hz and 1304 Hz

table 6

efficiency for 40 SG, detectors having

max efficiency of 1/2 efficiency is 2 hrs

50%.  $7 \text{ hrs} < \dots$

coincident data correlation on source window  
(limit error ...)

measure of the distance reach of the  
instruments independent of their duty cycle

$hrs < \rightarrow E_{GW}$

$$E_{GW} = \frac{\pi^2 c^3}{G} D^2 f_0^2 hrs^2$$

$D = 10.55 \text{ Mpc} \approx 20079 \text{ kpc}$

$8.40''$

duty factor ...  
detection efficiency ...  
100% ...  
maximum ...

~~Model Exclusion confidence~~

~~Fig 4 & 5 constraint~~

Fig 6: detect or noise factor of  $A_{1. \pm L \dots}$   
exclusion probability

275 Hz  $6.7 \times 10^{52}$  -  $1.0 \times 10^{53}$

constant 275 Hz a 185%  $\in 2 \times 10^{150}$   $4.12 \text{ EeV}$   
noise floor level 185% 3

kHz frequency H. extra-Galactic 275 Hz

$0(10) M_{\odot}$  以上の重力波が下...  
1.4-1.6 Neutron star 爆発  $\sim 0.15 M_{\odot}$

1987A @ kinetic energy  $0(10^{47})$   
explosion

on time coverage

SN 2011 dh 7- 317%  
SN 2007 g 7- 93%

今後 10 個 (2017) Super nova が 検出される  
11.7. そのために、detection efficiency が計算  
される。その結果、excluded 7-23

$$P_{\text{excl}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \epsilon_i(d_i))$$

$\epsilon_i(d_i)$  は、その距離での検出率を意味する。

$$\epsilon_i(d_i) \rightarrow \epsilon_i = \int_0^{\infty} d\bar{d} \pi_i(d\bar{d}) \epsilon_i(\bar{d})$$

distance prior

Advance detector: SN が 観測される可能性  
は 0.17 18%  $\sim 0.17$  7-23 検出率。





~~2/1/20~~

(17)

SN2007gr SG wave form 130 hrss と他のSNと比較

FAR thres hold を fix (7  $\mu$  = 13  $\pm$  7  $\mu$  hrss) = 2.7  $\mu$   
50% efficiency の 仮定を比較する。

50% search ~~7.4~~  $\mu$  = 2.7  $\mu$

235 Hz  $5.0 \times 10^{-22}$  /v Hz

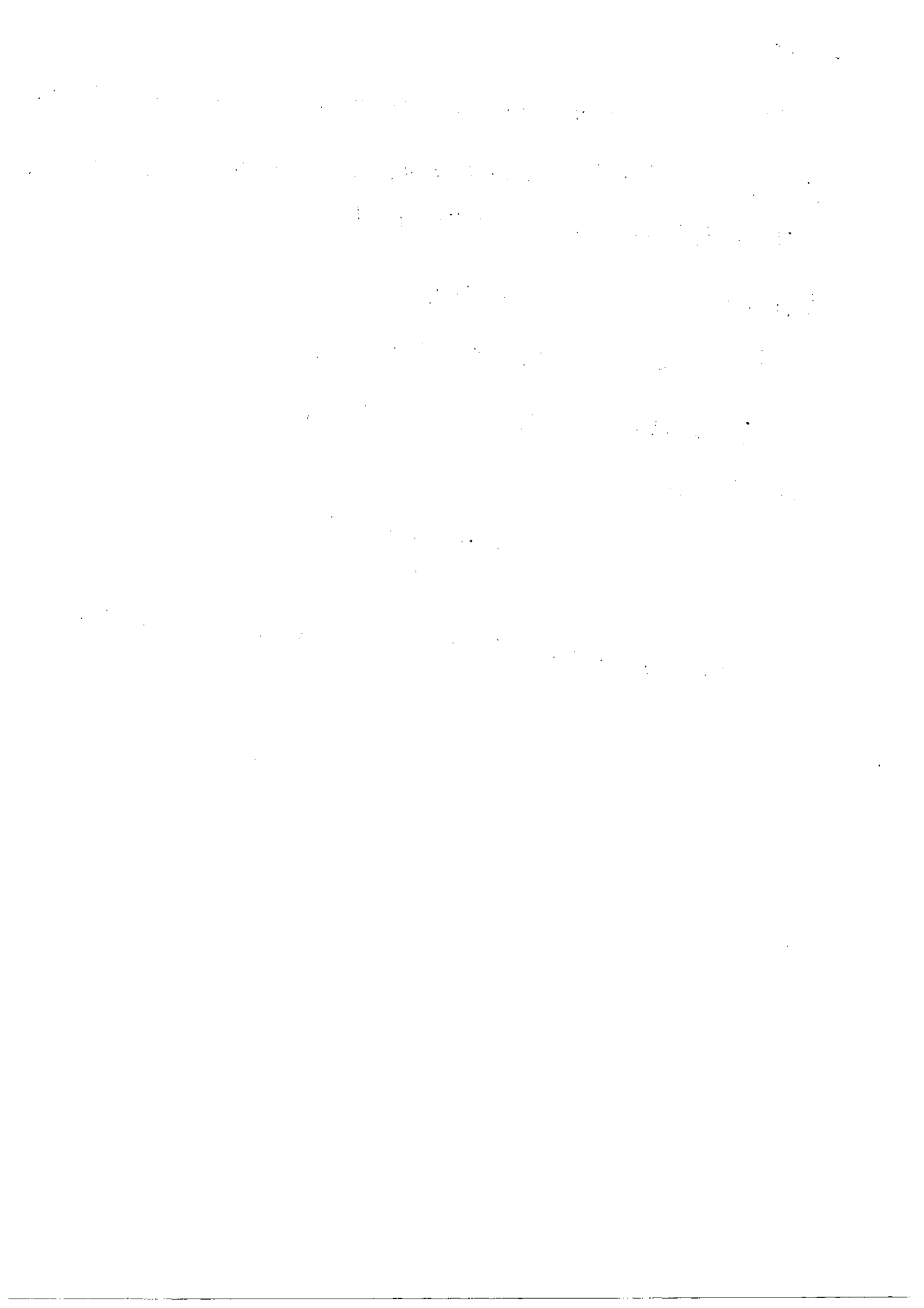
1364 Hz  $2.2 \times 10^{-21}$  /v Hz

all sky search  $\rightarrow$  7.

$17.6 \times 10^{-22}$

$2.9 \times 10^{-21}$

30% ~ 40% higher.  $\rightarrow$   $\mu$  on time window



# 大質量超新星の親星の種類と進化 ①

超新星の分類：主に最大光度時のスペクトルによる。

Ia Si線 II H線 Ib He

Ic no H, He, Si

light curve

後半は  $1/t$  で光る。

前半 ( $\sim 100$  day) に光度一定の  $t$  があるか、それがあるか。

II型 SNe Plateau

これは、厚い水素層を持つ、下赤色超巨星

おおよそ mass loss して、single  $11 \sim 18 M_{\odot}$

shock wave 通過  $\rightarrow$  水素電離  $\rightarrow$  光の opacity <sup>上がる</sup> ~~あがる~~

$\rightarrow$  photosphere の温度はほぼ一定であるため。

長時間にわたって、 $L \sim 4\pi R^2 \sigma T_{ph}^4 \sim$  一定である。

$\rightarrow$  徐々に冷えて水素再結合  $\rightarrow$  opacity がおちる。

$\rightarrow$  光度が落ちる。

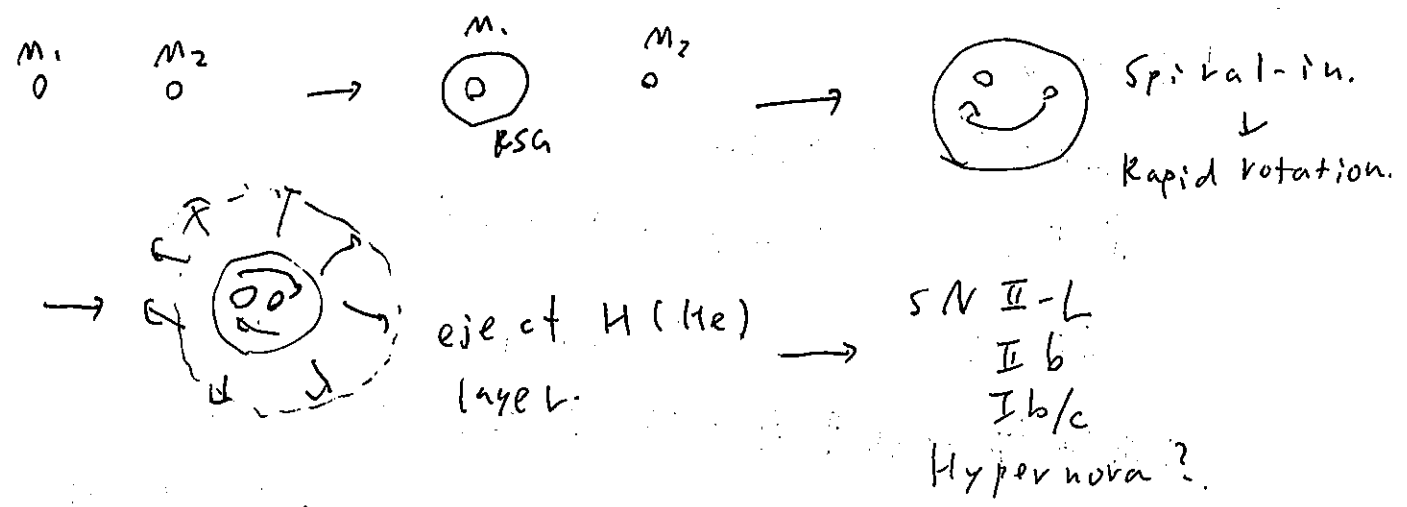
II-L 型 SNe は、水素層が厚いので、この plateau が (おおよそ) 無い。ここで水素層の厚さが大きめに合致する。

重く金属の多い星は Mass Loss が 99%

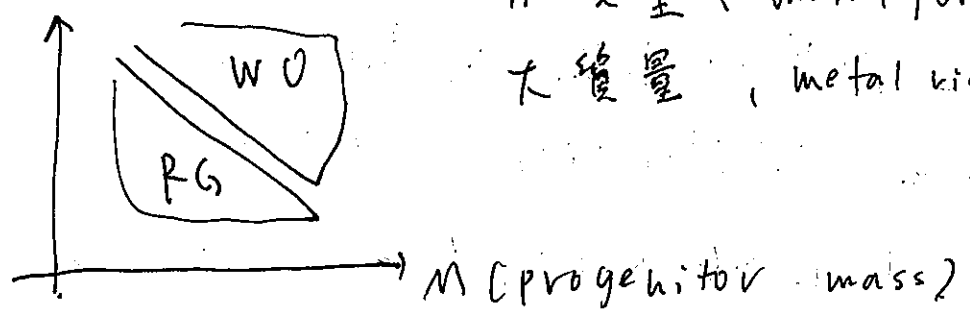
mass loss rate の不定性により H 層を Single 7-  
無くす質量は分かっている。

single or binary?

$M_1 \gg M_2$  の伴星が及ぶ。



Z (metallicity)



小質量, metal poor Red giant.  
 大質量, metal rich Wolf-Rayet

Asiago SN catalogue ~ 2015

Ia	II	IIp	Ic	IIu	Ia	Ib	IIb
58%	17%	7%	4%	4%	pec 3%	2%	2%

II は H 層が見えるか Sub class が分かるもの。

Ib/c	IIpec	II L
1%	0.5%	0.4%

# SN 1987A の超新星の謎

も53h有明な爆発直前のため、実は、謎の部分を持つ。

- 爆発前に青かった
- (何となく良く見せていたか) 3つのリングが見える
- Ejecta が非対称
- 組成が少し変 (He が多い) 等々
- 3-4 h 前 (explosion の) neutrino 観測あり

表面が赤い → 表面温度が低い → 膨らんでいる  
→ Red ~~giant~~ super giant star. (赤色超巨星)

→ たか青かった 3-4 h 前 = neutrino

(PSG だと 1-2d おくぬきと思われる?)

He 線が見える II P 型 light curve になる?

現在までのところは一番成功しているモデルは、

Podsiadlowski による連星合体モデル。

15M<sub>⊙</sub> と 5M<sub>⊙</sub> の 周期10年程度の連星

15M<sub>⊙</sub> の方が赤色巨星化 → 合体

合体時にリング状に質量を放出、角運動量を放出、質量降着。

外層が重くなったので、半径収縮、赤色から青色へ。  
そのまま爆発

リング形成 シュレーショルも行われていた。

Faint SN

暗い超新星

(4)

1. SN 1997D type (II型, massive, M<sub>200</sub> ~ 40 M<sub>⊙</sub>)
2. Ultra stripped SNe Ic (SN 2005ek like)
3. electron capture SN ONeMg SN etc  
呼ばれぬ。 Crab pulsar の元は SN かそれか?

HN に子孫に失敗した Failed SN 中心エンジンには BH or Magnetar

IIc 型

H 線が非常に narrow

星周物質と超新星物質との相互作用を示唆  
非常に近い星であるのに水素があまりにもかかぬ不  
進化末期の mass loss late が非常に大きい。

Super luminous SNe

定義: 絶対等級 -21 等より明るい

SLSN-I 水素あり SLSN-II 水素無し

SLSN-R (radio active decay)

スーパノバが分かれているのは (IIc 型)