

素核宇宙融合レクチャーシリーズ 第13回

“Why Gamma-Ray Bursts?”



長瀧天体ビッグバン研究室

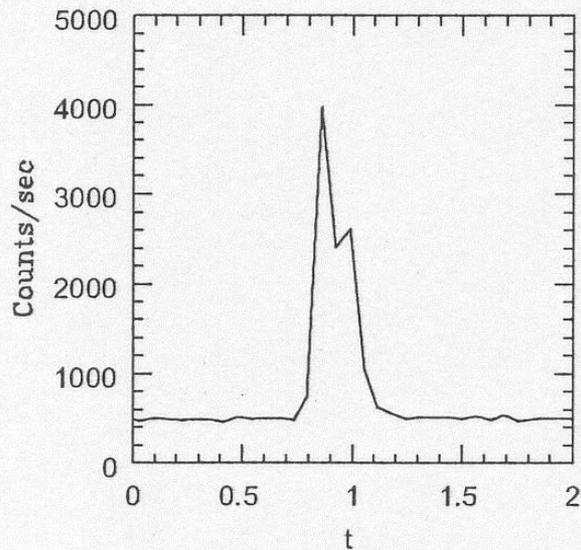
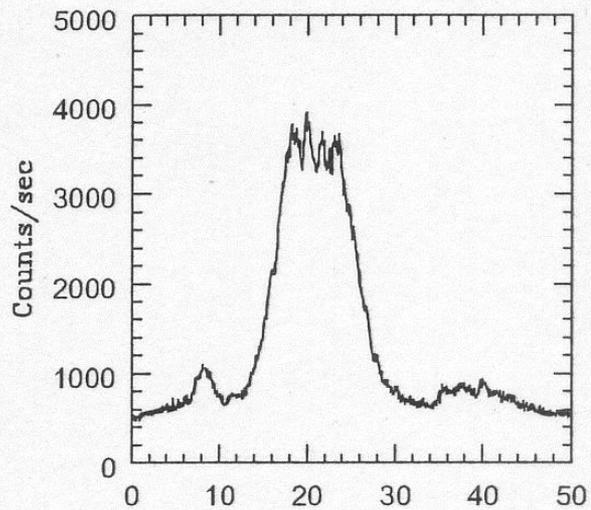
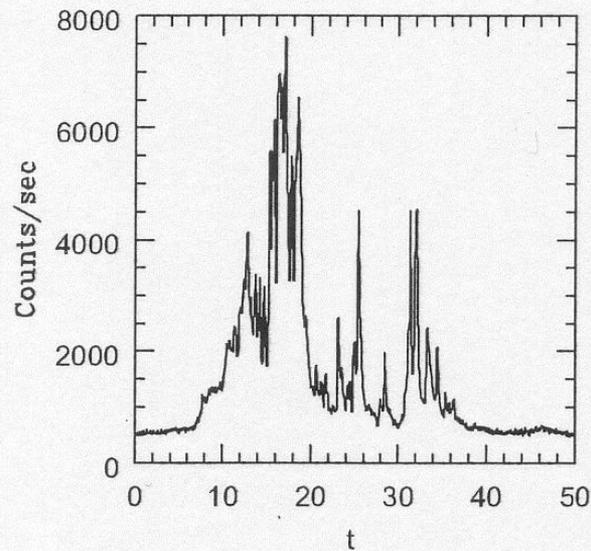
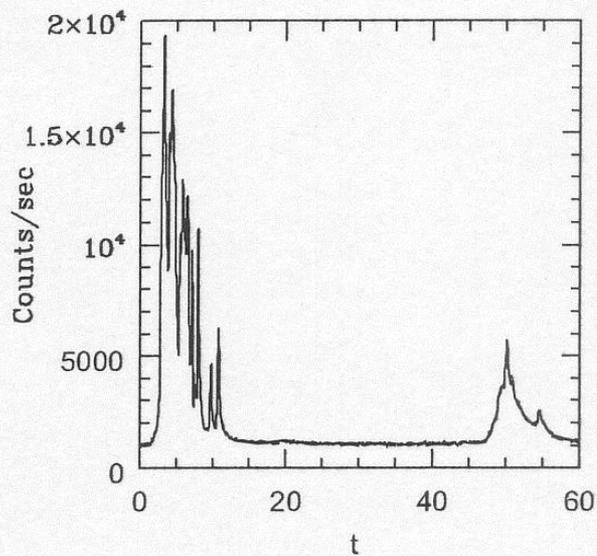
理化学研究所
准主任研究員

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

ガンマ線バーストの時間変動例

ガンマ線の一秒あたりのカウント数



時間^t (秒)

最初のガンマ線バースト報告 (1973年)

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, **182**:L85–L88, 1973 June 1

© 1973. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

OBSERVATIONS OF GAMMA-RAY BURSTS OF COSMIC ORIGIN

RAY W. KLEBESADEL, IAN B. STRONG, AND ROY A. OLSON

University of California, Los Alamos Scientific Laboratory, Los Alamos, New Mexico

Received 1973 March 16; revised 1973 April 2

ABSTRACT

Sixteen short bursts of photons in the energy range 0.2–1.5 MeV have been observed between 1969 July and 1972 July using widely separated spacecraft. Burst durations ranged from less than 0.1 s to ~ 30 s, and time-integrated flux densities from $\sim 10^{-5}$ ergs cm^{-2} to $\sim 2 \times 10^{-4}$ ergs cm^{-2} in the energy range given. Significant time structure within bursts was observed. Directional information eliminates the Earth and Sun as sources.

核実験監視衛星Vela5A,5B,6A,6Bによる観測報告。
最初の観測は1967年のVela3, 4によるものだった。
発見以降、しばらくアメリカ国家機密だった。

宇宙的距離を測るにはラインが必要。

ハッブルの法則

$$v = H_0 D$$

$$H_0 = 67.80 \pm 0.77$$

km/s/Mpc

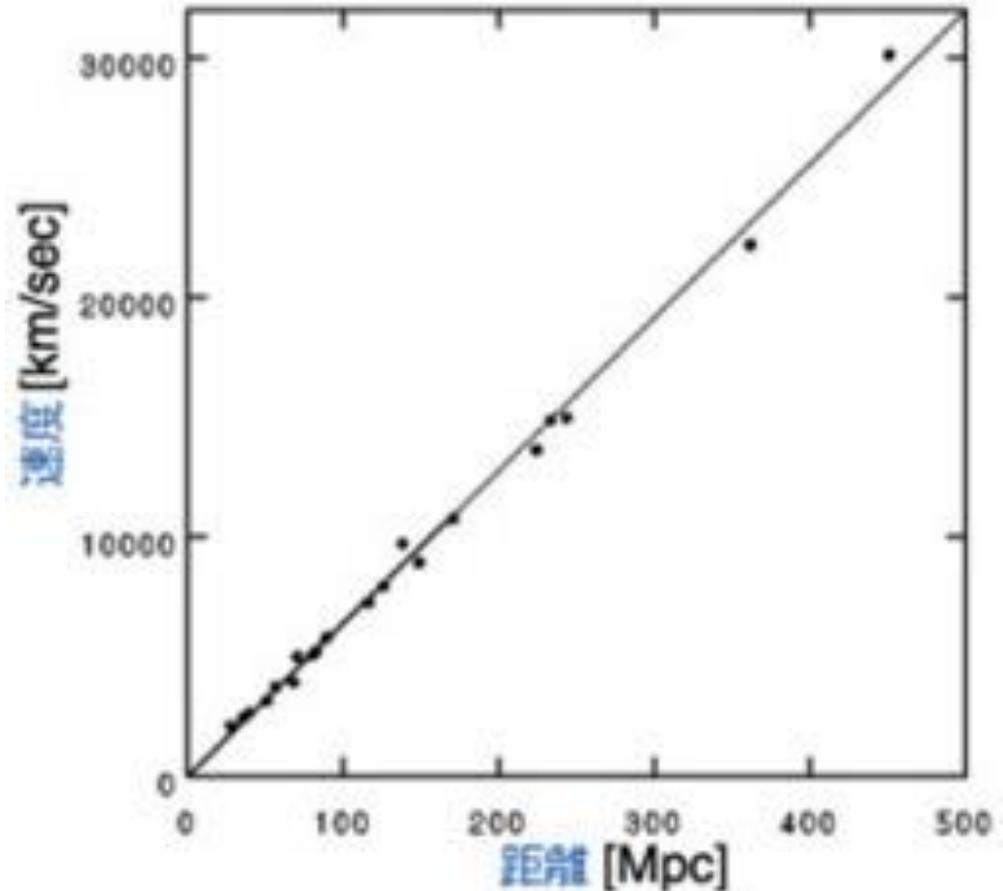
1pc = 3.26光年。

銀河サイズ ~ 10kpc.

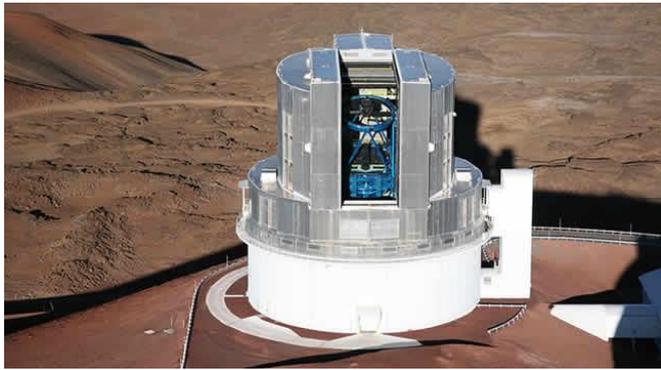
銀河間距離 ~ 1Mpc

宇宙の地平線 ~ 3000Mpc

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \quad \text{Doppler Shift}$$

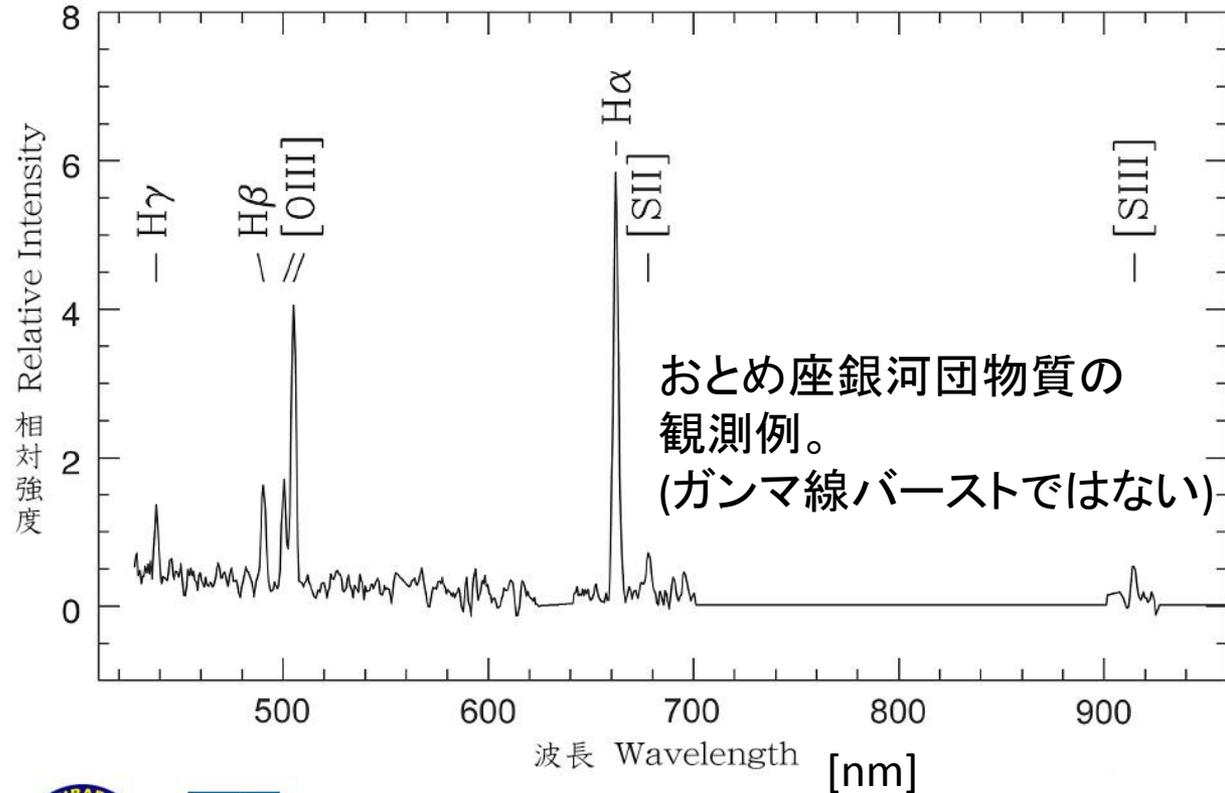


ハッブルの法則(波長のずれ)で 天体までの距離を評価する。

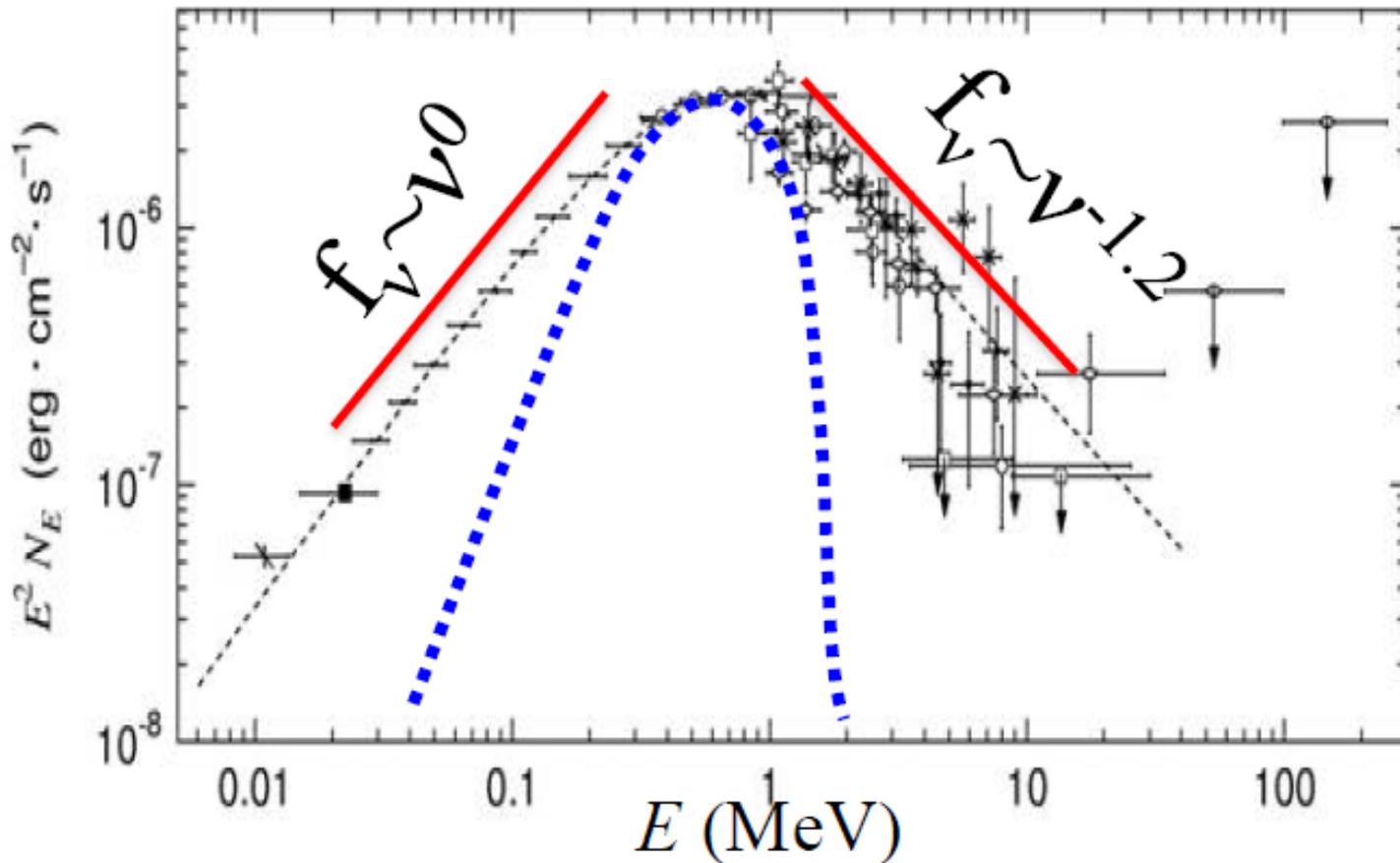


$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$$

ガンマ線では(今のところ)
出来ない!
ガンマ線バーストまでの
距離が分からない!



スペクトルは非熱平衡的。



典型的なガンマ線バーストエネルギーースペクトル例。
青は一温度のプランク分布(熱分布)でのフィット。

遠方宇宙起源説の弱点？

$$E = 4\pi D^2 F = 10^{50} \text{ erg} \left(\frac{D}{3000 \text{ Mpc}} \right)^2 \left(\frac{F}{10^{-7} \text{ erg/cm}^2} \right)$$

$$R_i < c\delta T \approx 3000 \text{ km}$$

—————> 温度 $\sim 1 \text{ MeV}$ と推定出来る。

$$\tau_{\gamma\gamma} = 10^{13} f_p \left(\frac{F}{10^{-7} \text{ erg/cm}^2} \right) \left(\frac{D}{3000 \text{ Mpc}} \right)^2 \left(\frac{\delta T}{10 \text{ ms}} \right)^{-2}$$

平均自由行程 \ll システムサイズ 即ち**熱的スペクトル**となる。
観測は非熱的なので、**整合しない**。

天の川銀河起源説ならOK。

$$E = 4\pi D^2 F = 10^{50} \text{ erg} \left(\frac{D}{3000 \text{ Mpc}} \right)^2 \left(\frac{F}{10^{-7} \text{ erg/cm}^2} \right)$$

従って $D \sim 10 \text{ kpc}$ (天の川) なら、 $E \sim 10^{39} \text{ erg}$.

また、 $R_i < c\delta T \approx 3000 \text{ km}$

—————> (熱化すれば) 温度 $\sim 10^7 \text{ [k]} \sim 1 \text{ keV}$

—————> $\tau_{\gamma\gamma} \sim 100 f_p \ll 1$. f_p は e^+e^- を作れる光子の割合。

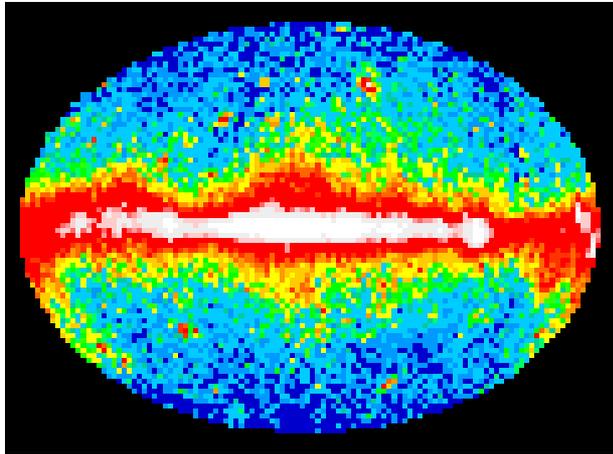
実際には平均自由行程 \gg システムサイズなので一般に**熱化しない**。
即ち一般に**非熱的スペクトル**となる。観測は非熱的なので、**整合する**。

Compton Gamma Ray Observatory (CGRO), NASA, (1991.4-2000.6)

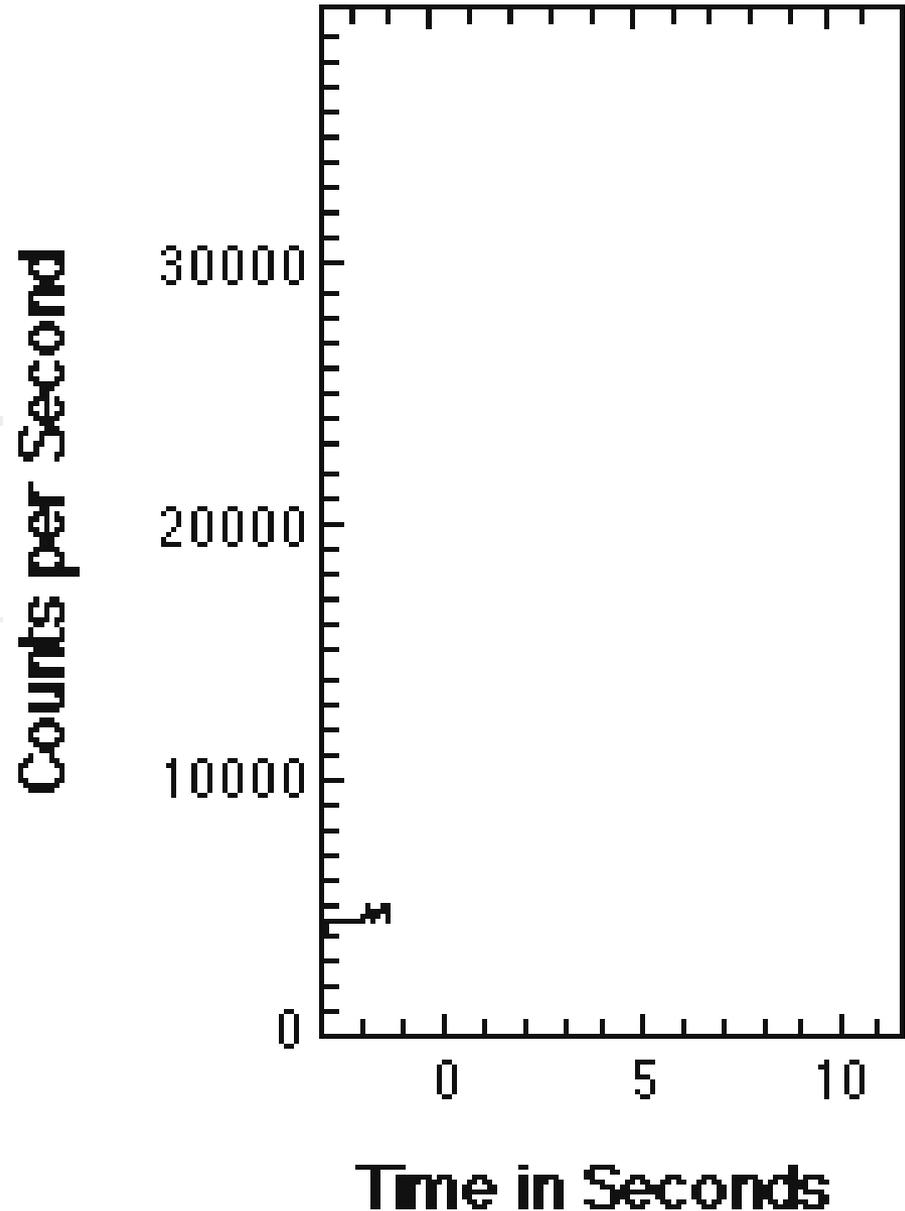
- Detected more than 2,600 gamma ray bursts.



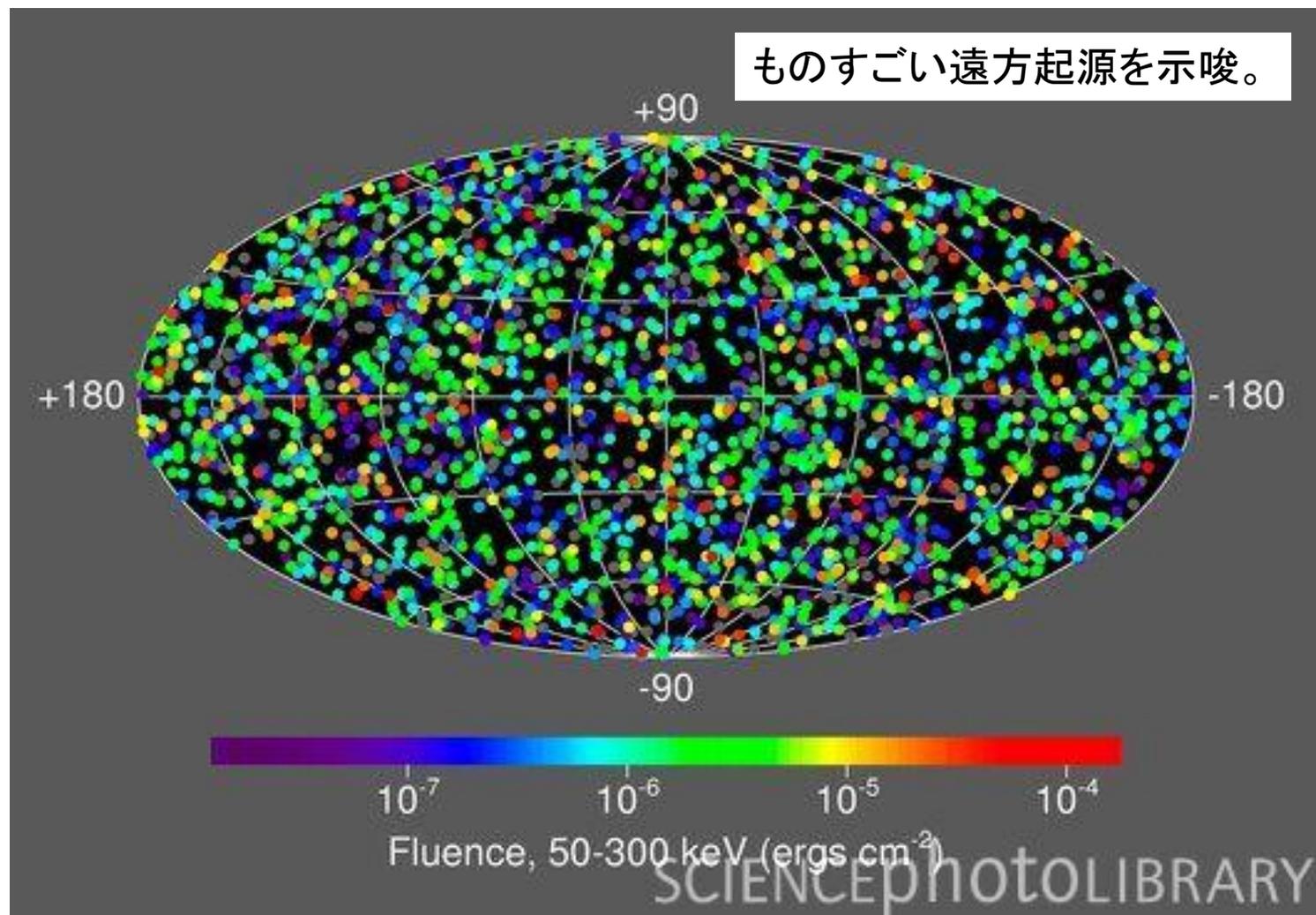
天の川銀河から外れたところで発生！



ガンマ線で見えた全天図
NASAホームページより。
繰り返し再生中。

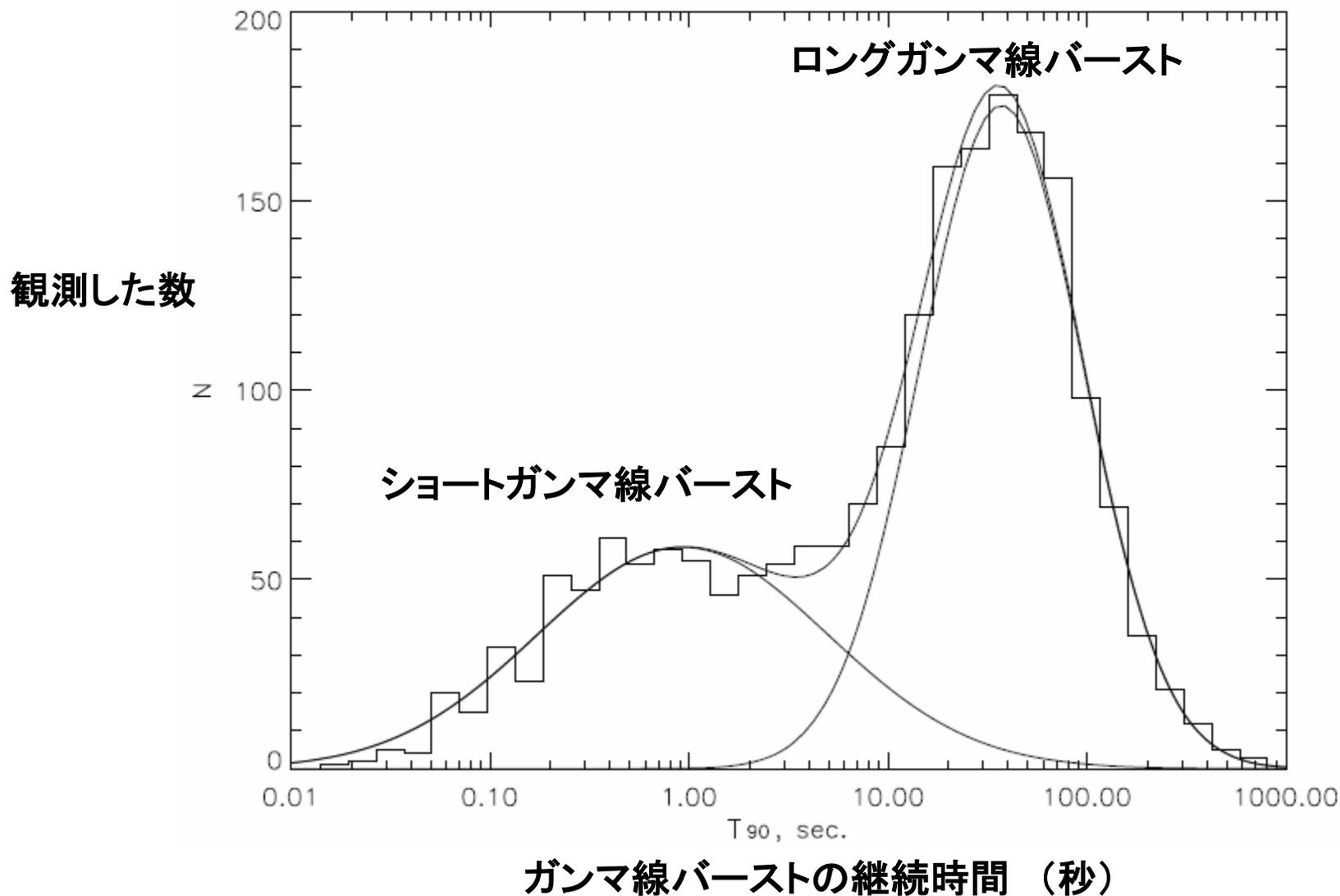


ガンマ線バーストの到来方向は等方的!!



ガンマ線バーストの到来方向分布図

ガンマ線バーストの起源は2つ？



BeppoSAX衛星, Italy-Netherlands (Apr.1996-Apr.2003)



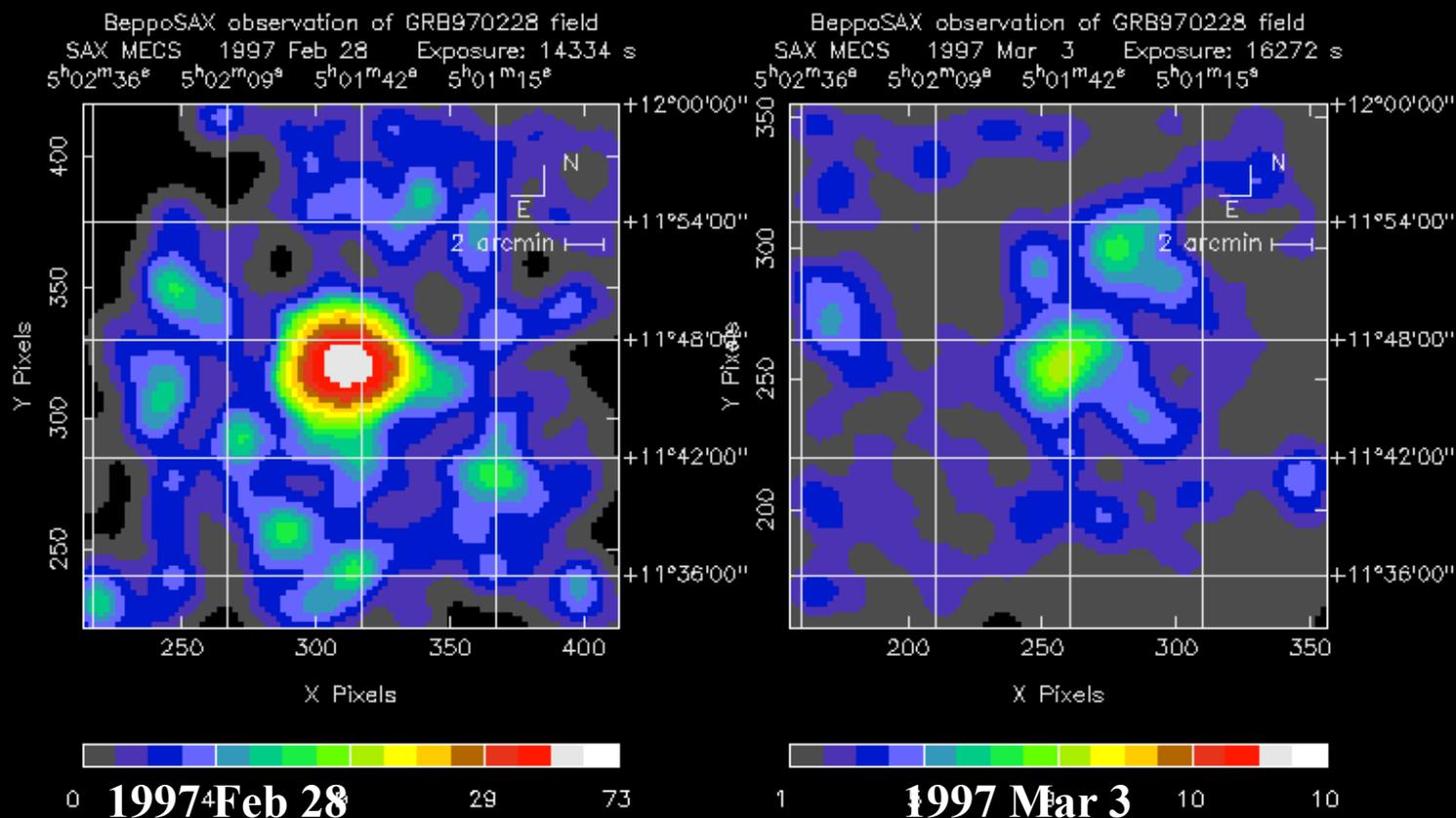
0.1 - 300 keVをカバー。
ガンマ線だけでなくX線もカバー
していた。

X線は角度分解能がいい。
分解能 1' (1分角)程度。

位置決定性能に優れている。

c.f. ガンマ線領域での位置決定
精度 \sim 1度角。

1997年の革命的発見: X線アフターグロー



8時間後

3日後

最初の報告は
理研で行われた。

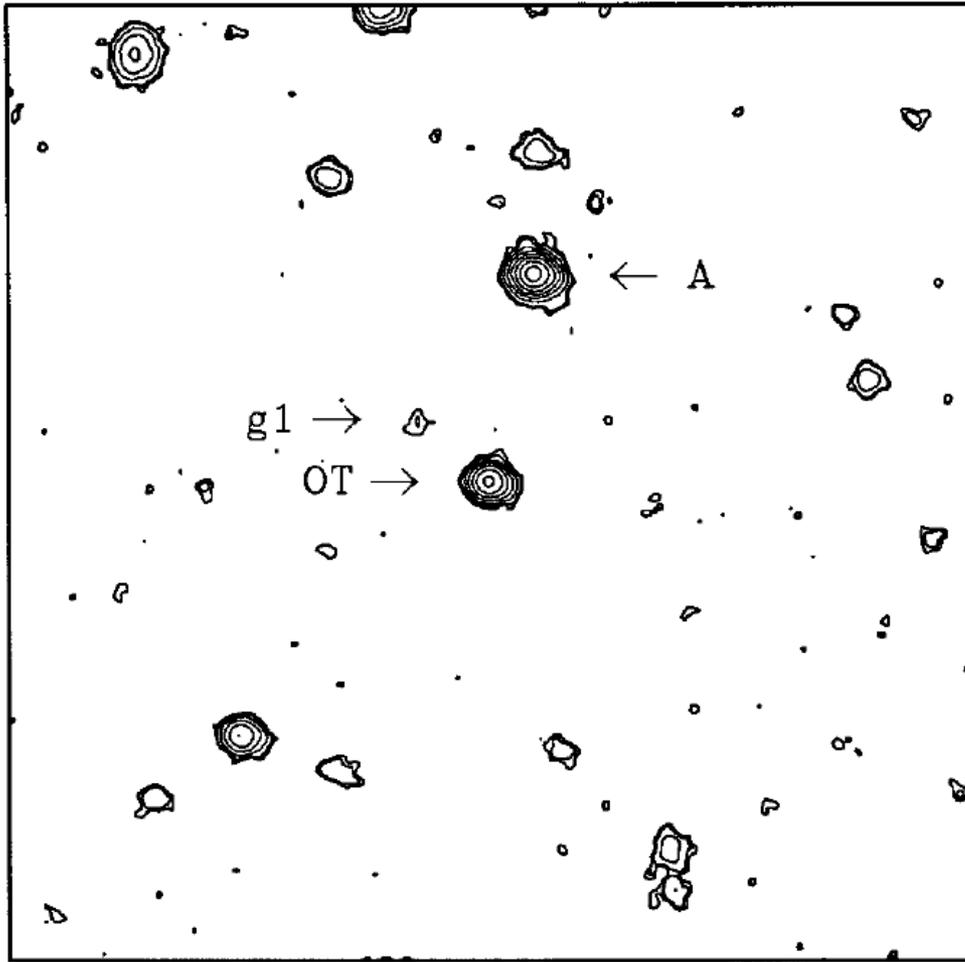
ガンマ線バーストGRB970228に続いて、
残光(アフターグロー)がX線領域で発見された。

可視光でもアフターグロー起こっていた！

GRB970508

Djorgovski et al. Nature 1997

地上の望遠鏡でフォローアップ。



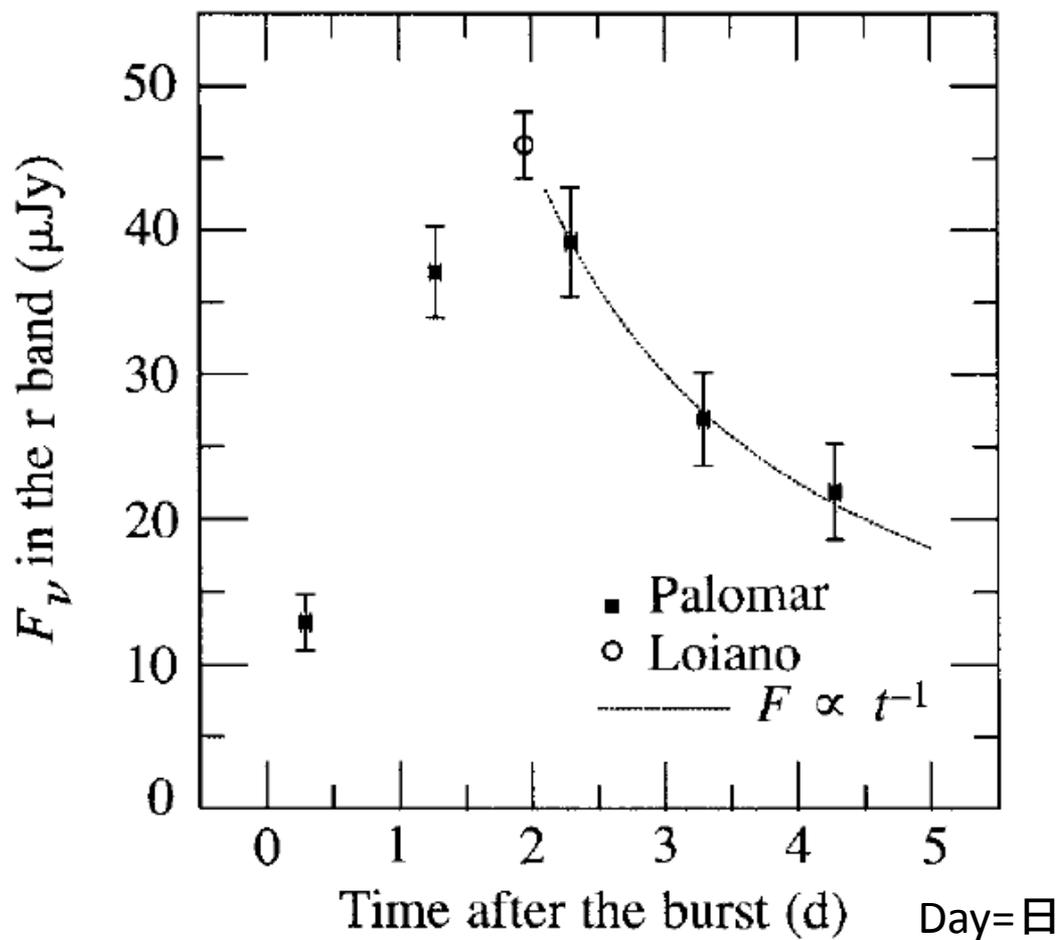
Palomar Observatory, California, US

1分角 × 1分角の可視光イメージ

ガンマ線バースト後、増光し、減光

GRB970508

Djorgovski et al. Nature 1997



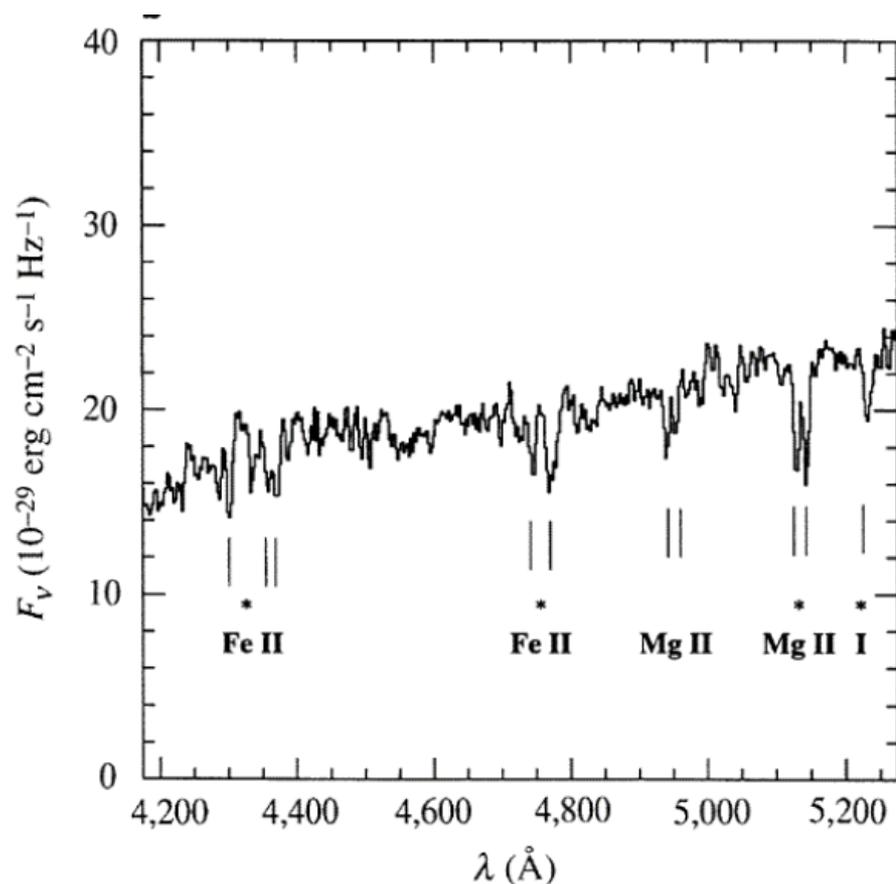
可視光のライトカーブ
(光度曲線)

Optical Afterglow

ライン吸収線が可視光で見つかる！

GRB970508

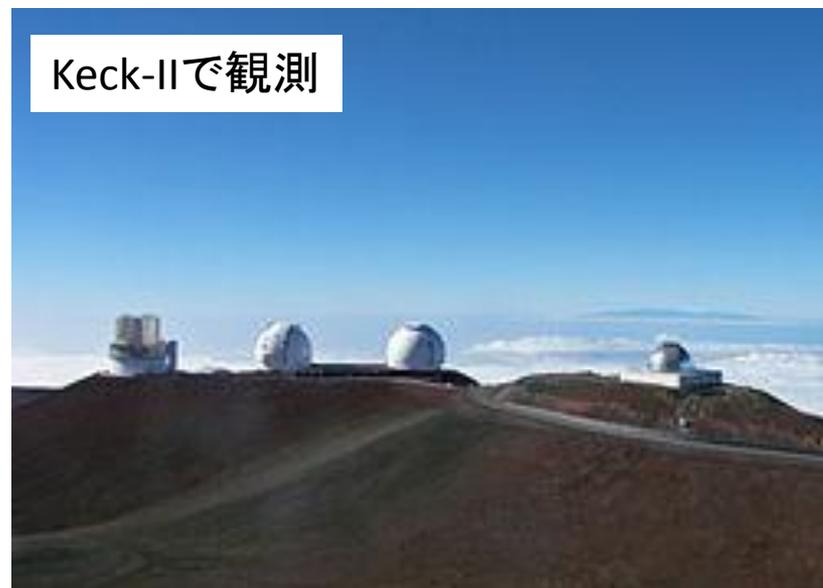
Metzger et al. Nature 1997



$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 0.835$$

→ 2981 Mpc !

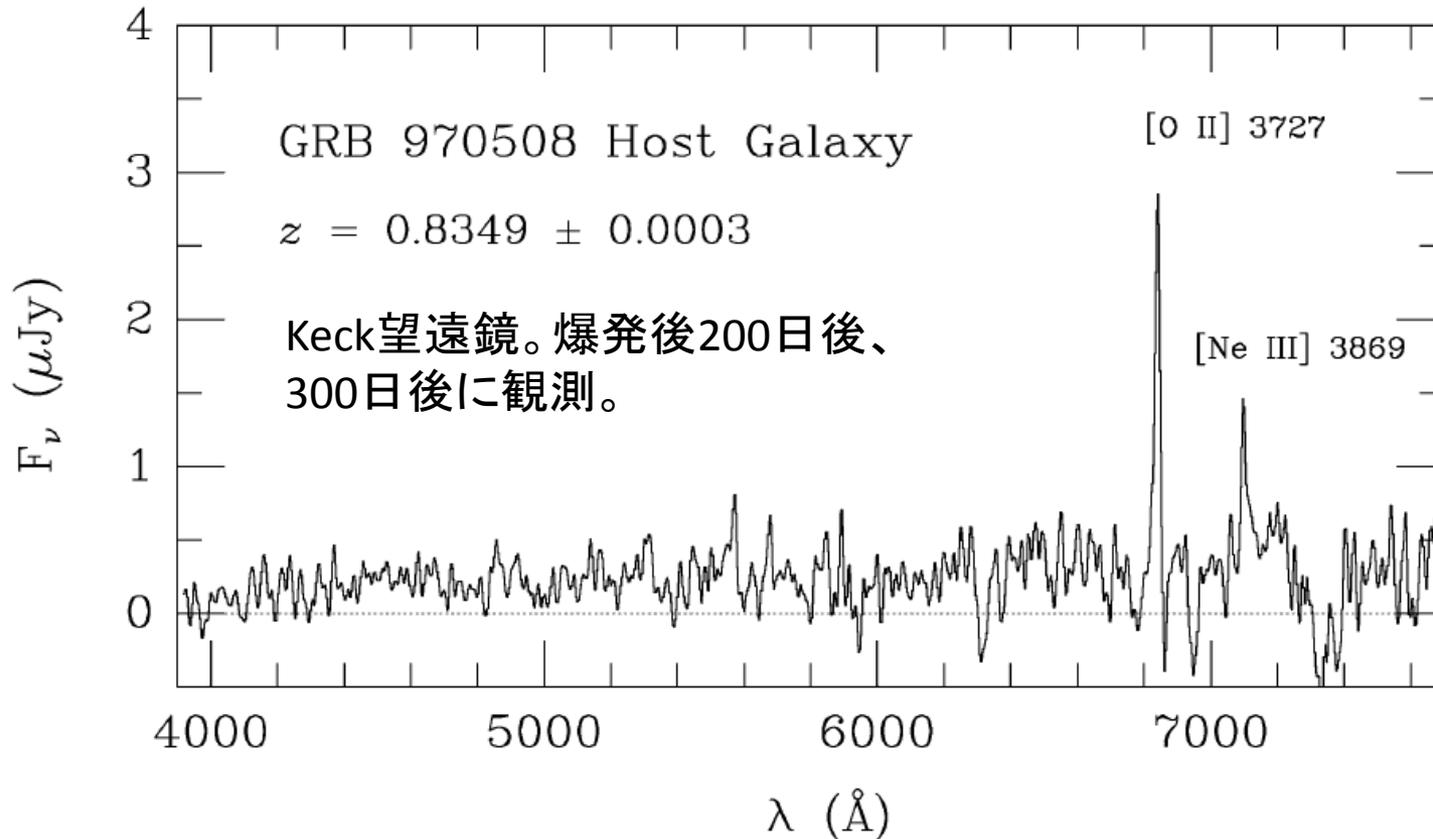
Keck-IIで観測



1997年5月11日に撮ったOptical Afterglowの可視光スペクトル

親銀河が同定される！

Bloom et al 1998

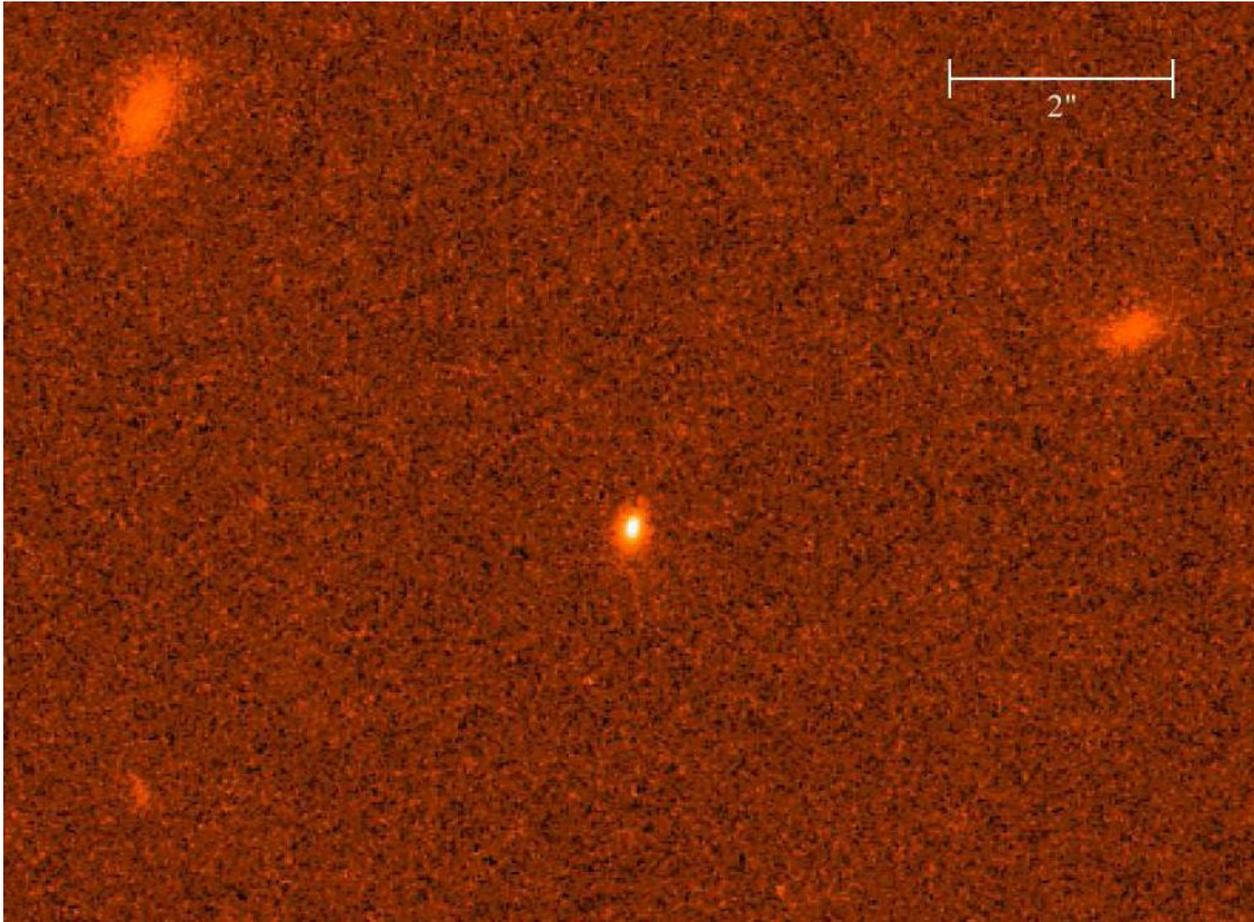


$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 0.835$$

可視光アフターグローで見た吸収線は親銀河中の物質だったと断定。

爆発454日後、HSTにより親銀河同定。

Fruchter et al. 2000.



中央の天体が親銀河。Optical Afterglowはもう暗くなっている。

以上で天の川銀河内起源説完全終了。

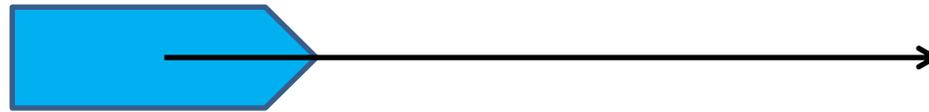
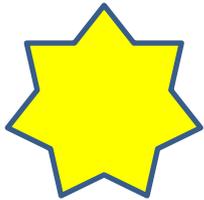
但しこの時点ではロングガンマ線バーストのみ。
8年後、ショートガンマ線バーストも遠方宇宙起源と確認。

遠方起源でも相対論効果を考えればOK

～ガンマ線バーストは超高速流からの放射～

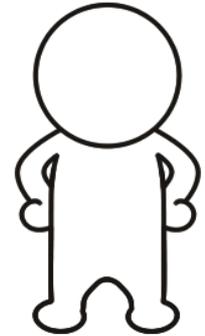
Paczynski (1986) Goodman (1986)

爆発天体



相対論的流体の中(静止系)では
10keV程度。

ガンマ線(～1MeV)として観測。



観測者

$$\Gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

$$V=0.9c \quad \rightarrow \quad \Gamma=2.3$$

$$V=0.99c \quad \rightarrow \quad \Gamma=7.1$$

$$V=0.999c \quad \rightarrow \quad \Gamma=22$$

$$V=0.9999c \quad \rightarrow \quad \Gamma=71$$

$$V=0.99999c \quad \rightarrow \quad \Gamma=223$$

$$V=0.999999c \quad \rightarrow \quad \Gamma=707$$

$$E' = \frac{E}{\Gamma} \sim \frac{1\text{MeV}}{100} = 10\text{keV}$$

ガンマ線バースト流体の速度は(最低)この位と考えられる。

ローレンツ因子。
vは流体の速度。
cは光速。

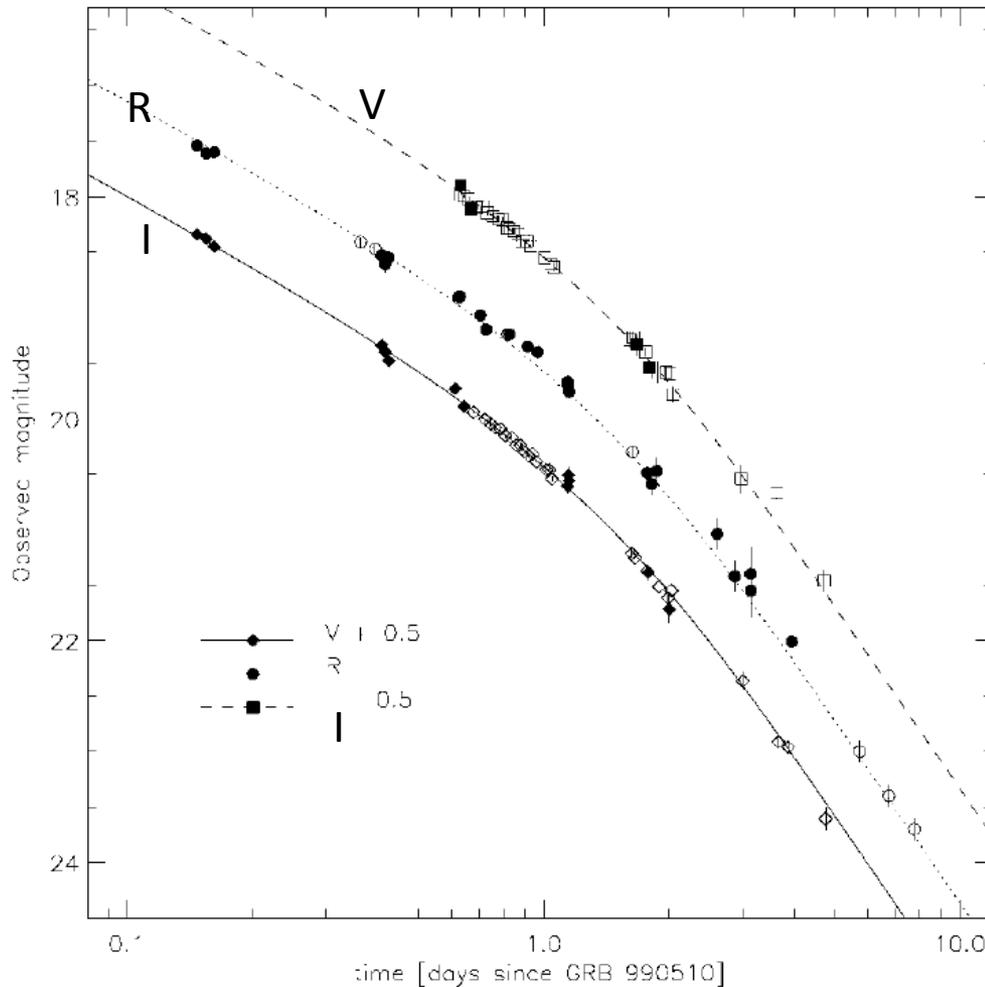
只しかしこれを実現するのは極めて難。 c.f. 電子質量=511keV.

ガンマ線バーストは(きっと)ジェット

- 等方だとするとあまりにもエネルギー多過ぎる(ガンマ線エネルギーだけで 10^{54} erg超えるものもある)。
- 観測的な示唆もある。
- 観測的には全てのガンマ線バーストがジェットの兆候を示している訳ではない。

観測的示唆 = ジェットブレイク

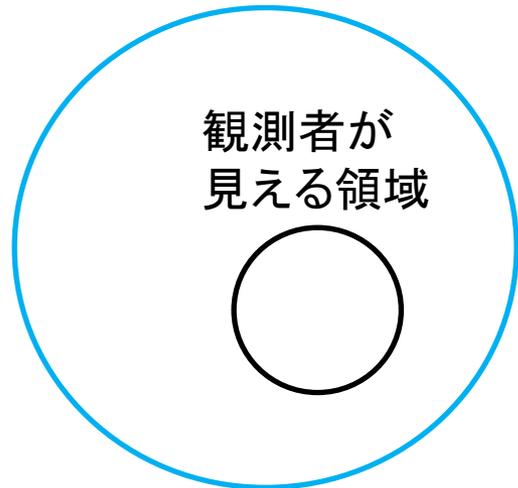
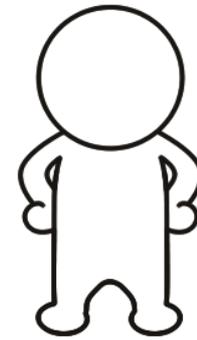
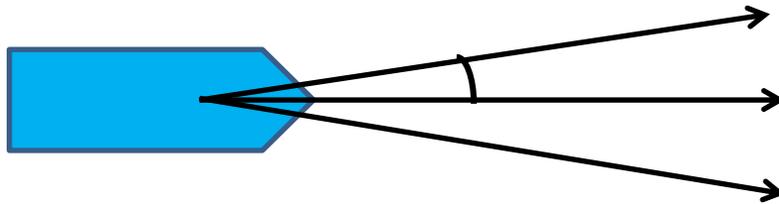
Harrison et al. 1999



多波長で同時にブレイク
(減光)!

ジェットブレイクも相対論効果

角度 $\sim 1/\Gamma$ ビーミング効果と言う。



観測者が
見える領域

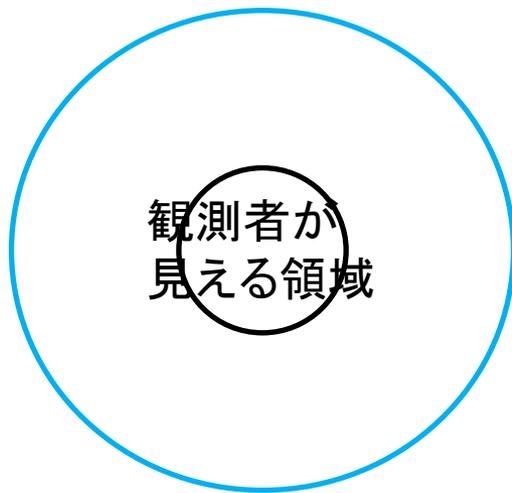
ジェットの断面

ジェットの開き角 $> 1/\Gamma$ のとき、
こういう事が起こる。

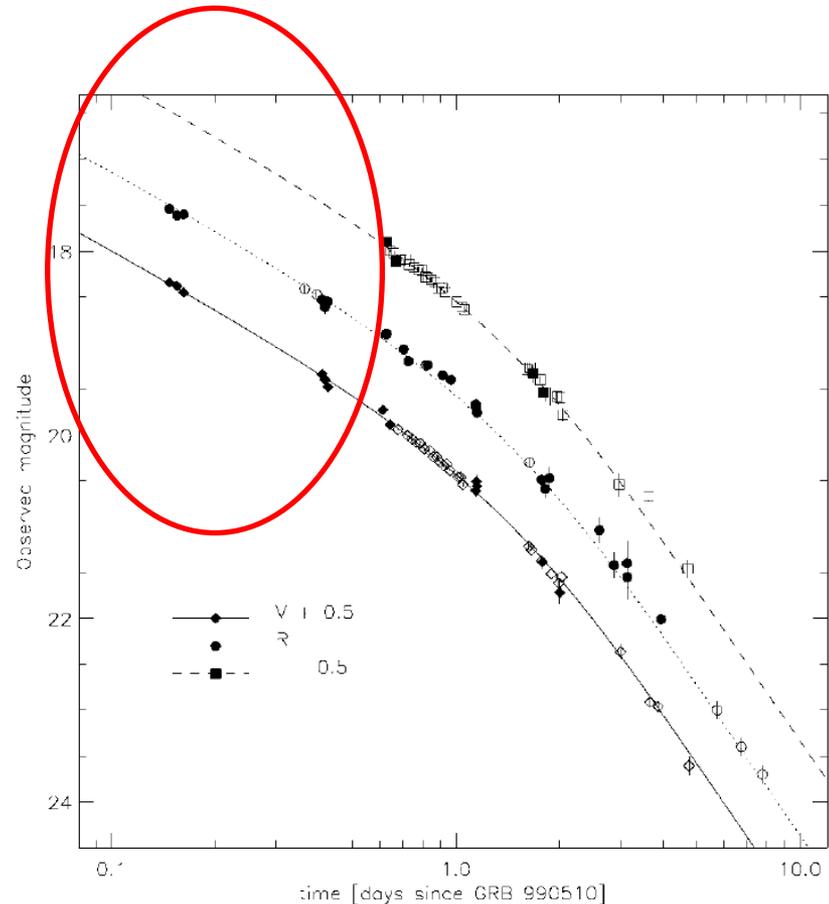
減速効果を考えると。。

始めは「大きい」。

ジェットの開き角 $> 1/\Gamma$



ジェットの断面



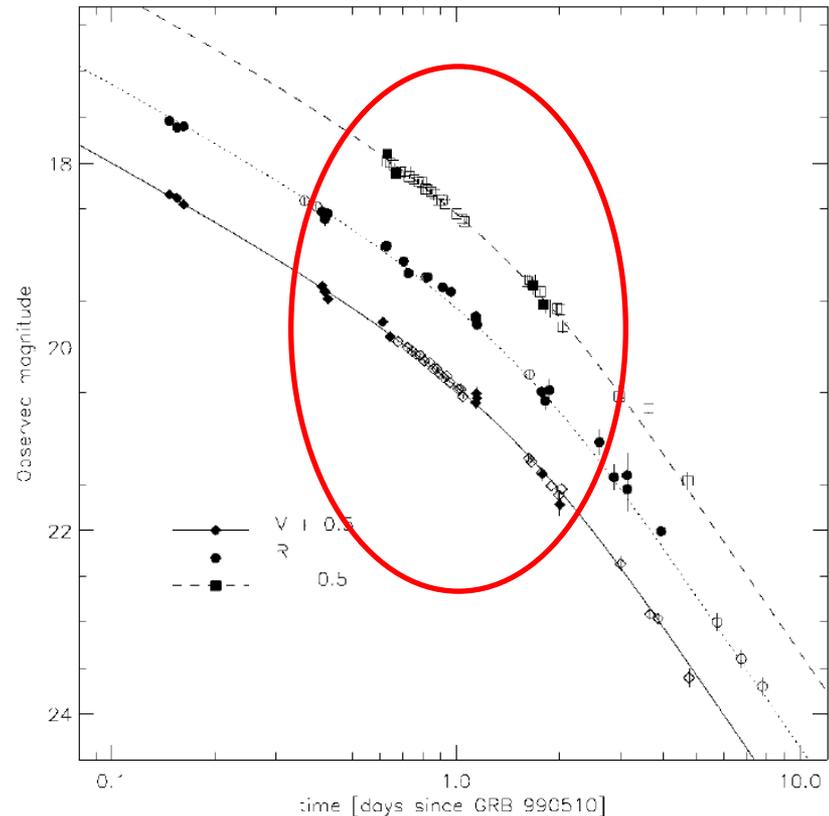
減速効果を考えると。。

次第に Γ が小さくなる。

ジェットの開き角 $\sim 1/\Gamma$



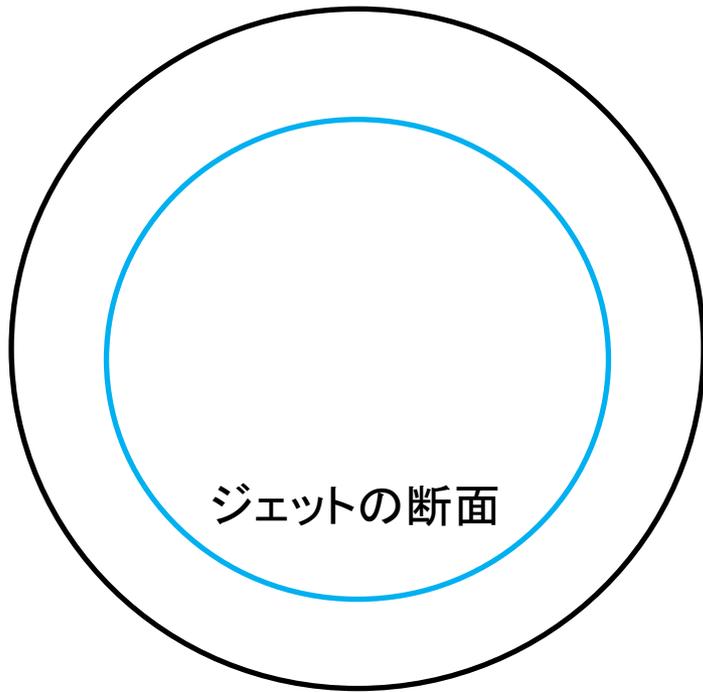
ジェットの断面



減速効果を考えると。。

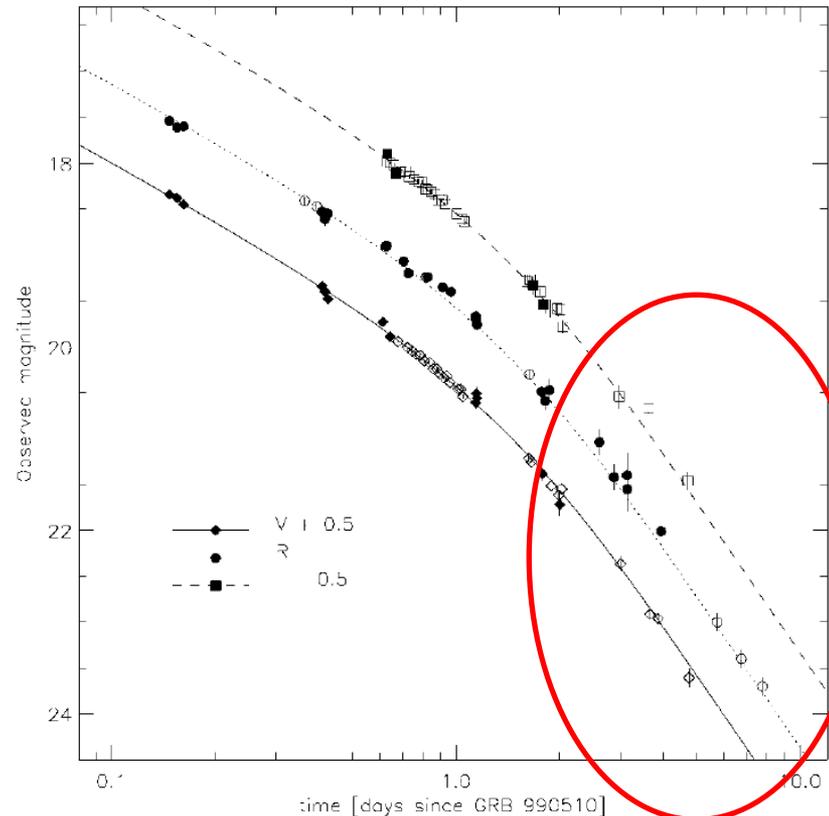
更に Γ が小さくなる。

ジェットの開き角 $< 1/\Gamma$



観測者が
見える領域

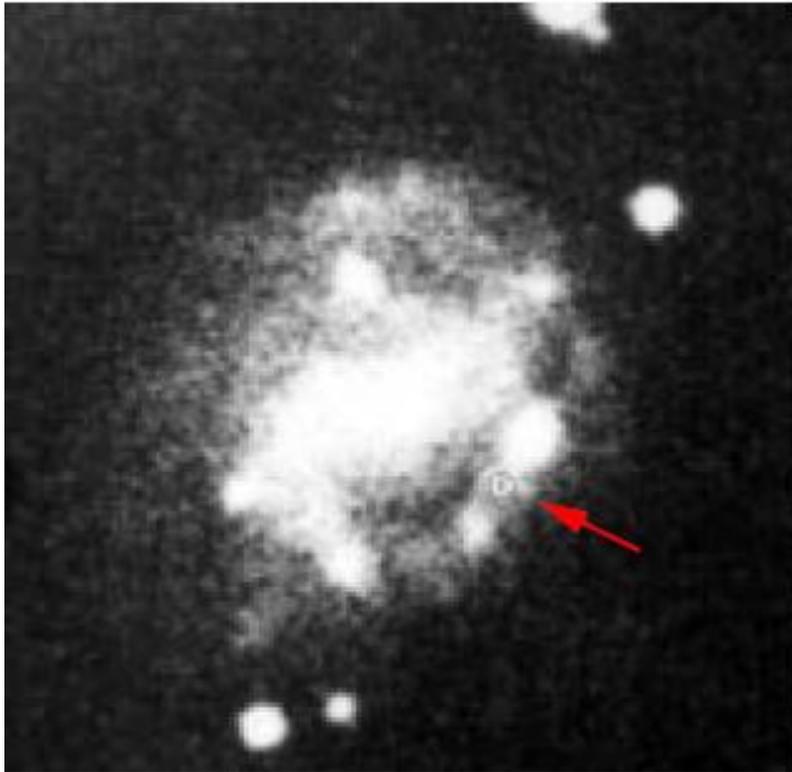
このメカニズムは波長に依らない。
観測と整合する！



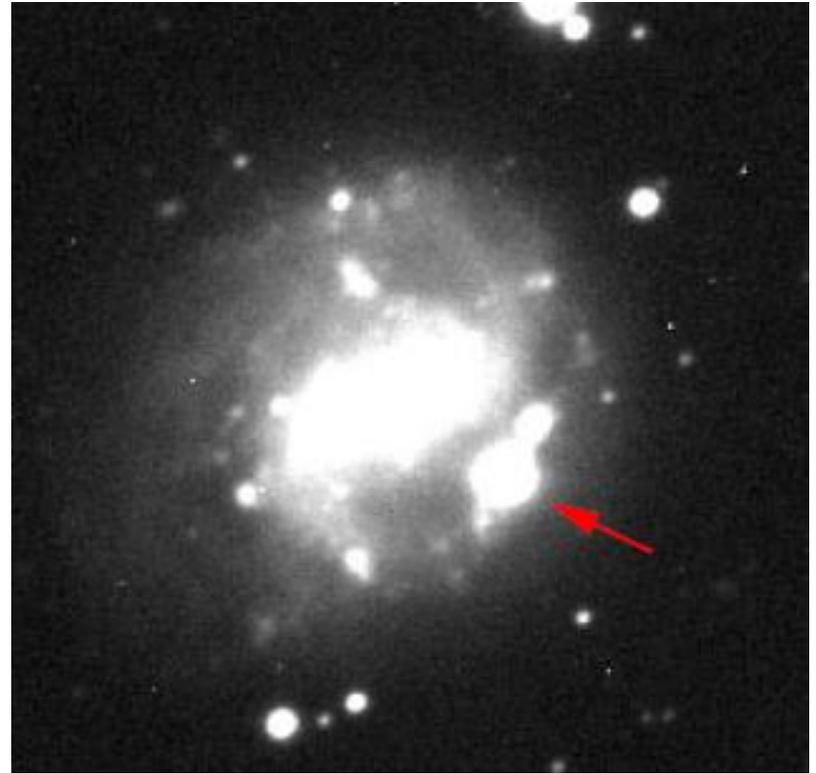
典型的に立体角の1/50程度か。

GRB980425/SN1998bw: ガンマ線バーストと超新星が同時発生！

Galama et al. Nature 1998, Iwamoto et al. Nature 1998



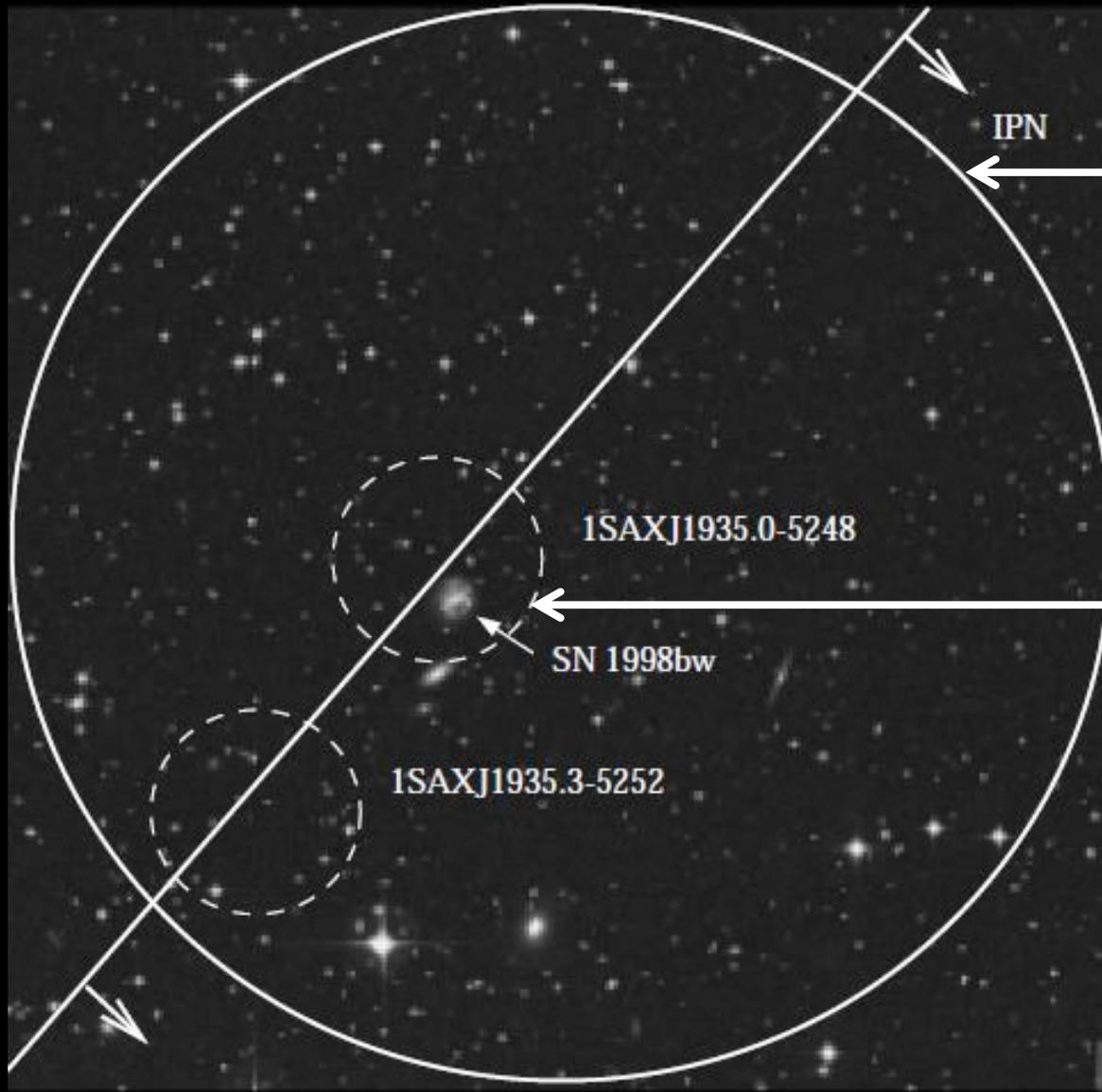
渦巻き銀河ESO 184-G82
(1976年撮影)
 $Z=0.0084$ (= 37.5Mpc)
すごい近傍で起こった。



超新星SN1998bw (May 1st, 1998)
(Galama et al. 1998)。

ガンマ線バーストGRB980425と 超新星SN1998bwの位置関係

Galama et al.
(1998)



WFC(2-28keV)での
位置決定精度。
半径8分角

NFI (Narrow
Field Instruments)
での位置決定精度
半径1分角程度。

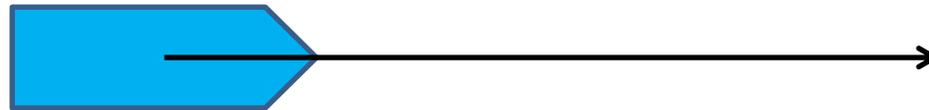
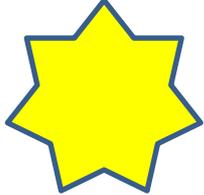
背景画像は
可視光像

超新星ーガンマ線バースト系

～ガンマ線バーストは超高速流からの放射～

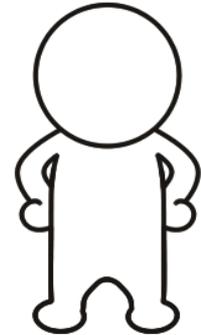
Paczynski (1986) Goodman (1986)

爆発天体
→ 超新星だった！



相対論的流体の中(静止系)では
10keV程度。

ガンマ線(～1MeV)として観測。



観測者

$$\Gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

V=0.9c	→	Γ=2.3
V=0.99c	→	Γ= 7.1
V=0.999c	→	Γ=22
V=0.9999c	→	Γ=71
V=0.99999c	→	Γ=223
V=0.999999c	→	Γ=707

$$E' = \frac{E}{\Gamma} \sim \frac{1\text{MeV}}{100} = 10\text{keV}$$

ローレンツ因子。
vは流体の速度。
cは光速。

ガンマ線バースト流体の
速度は(最低)この位と
考えられる。

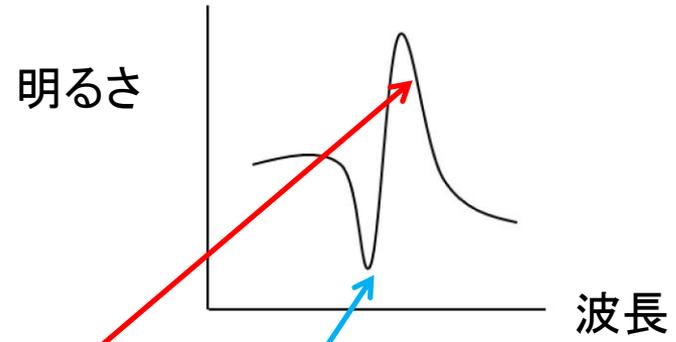
只しかしこれを実現するのは極めて難。 c.f. 電子質量=511keV.

ライトカーブとライン幅について

山岡 均 (九大・理)

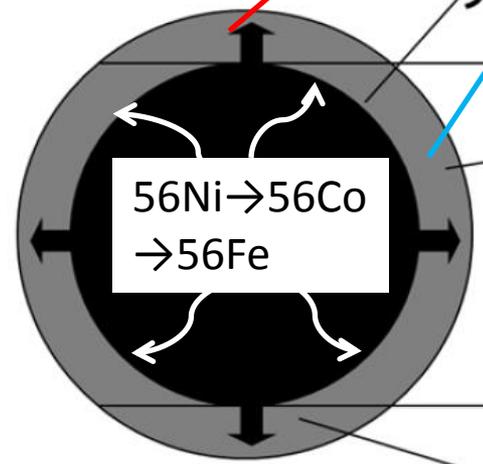
一部長瀧が改編。

56Niの
量で決まる。
光球面まで
到達するのに
時間かかる。

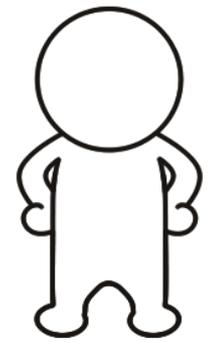


光球面: 連続スペクトルの源

膨張ガス: 吸収線を形成
近づく運動 → 短波長側に
例: ケイ素 実験室635nm
10000km/sの超新星615nm



膨張ガス: 輝線を形成
前後の運動 → 広い線幅
輝線は「膨大な大気」の証拠

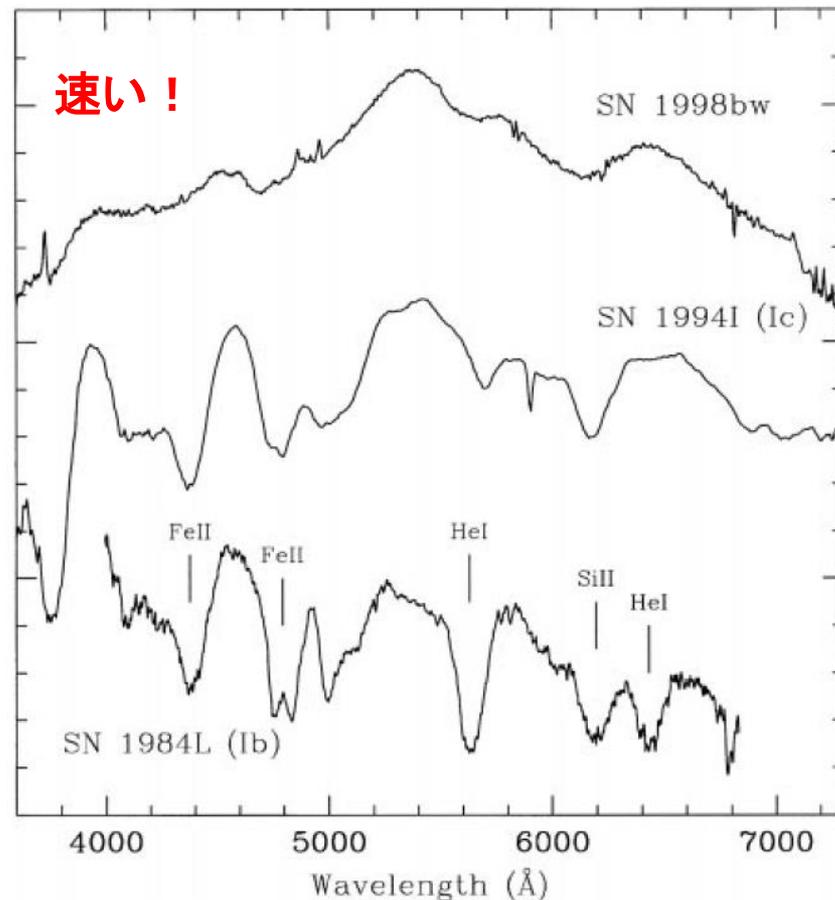
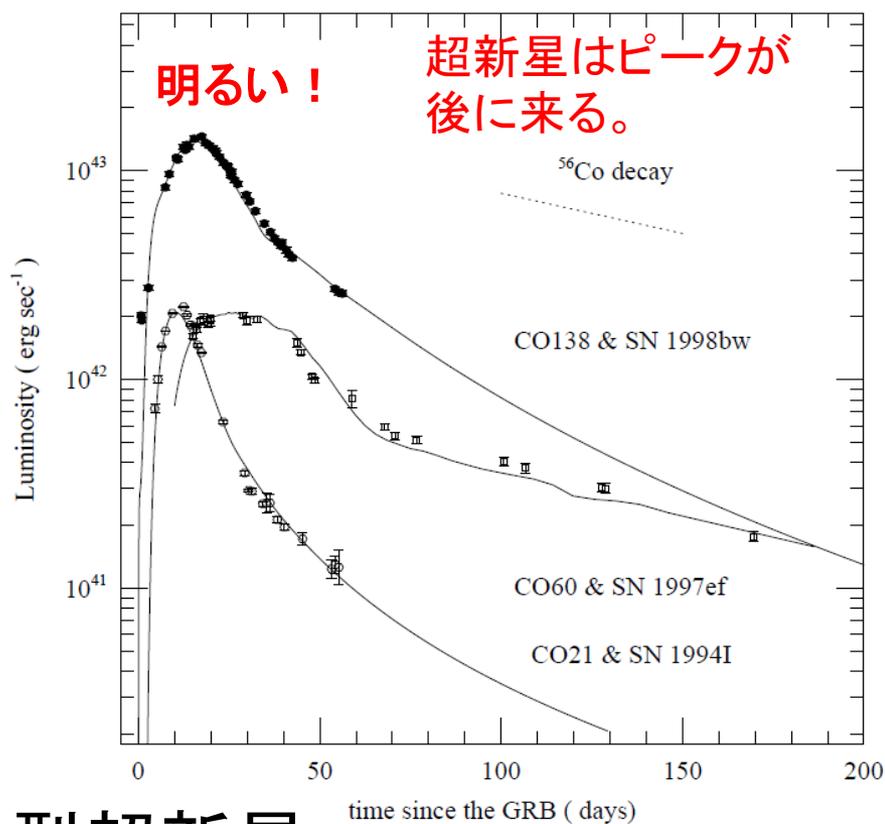


観測者

決め手はライトカーブとスペクトル。

特異な超新星 = 極超新星 = Hypernova

Iwamoto et al. Nature 1998



Ic型超新星

水素層・ヘリウム層をなくした大質量星の爆発と断定

GRB980425・SN1998bwはいずれも特異

- GRB980425: $\sim 10^{47}$ erg

普通のガンマ線バーストに比べて4桁程暗い。
近傍で起こったので見えた。

- SN1998bw: $\sim 10^{52}$ ergs

普通の超新星に比べて10倍程大きなエネルギーで爆発
(極超新星と呼ばれる)。

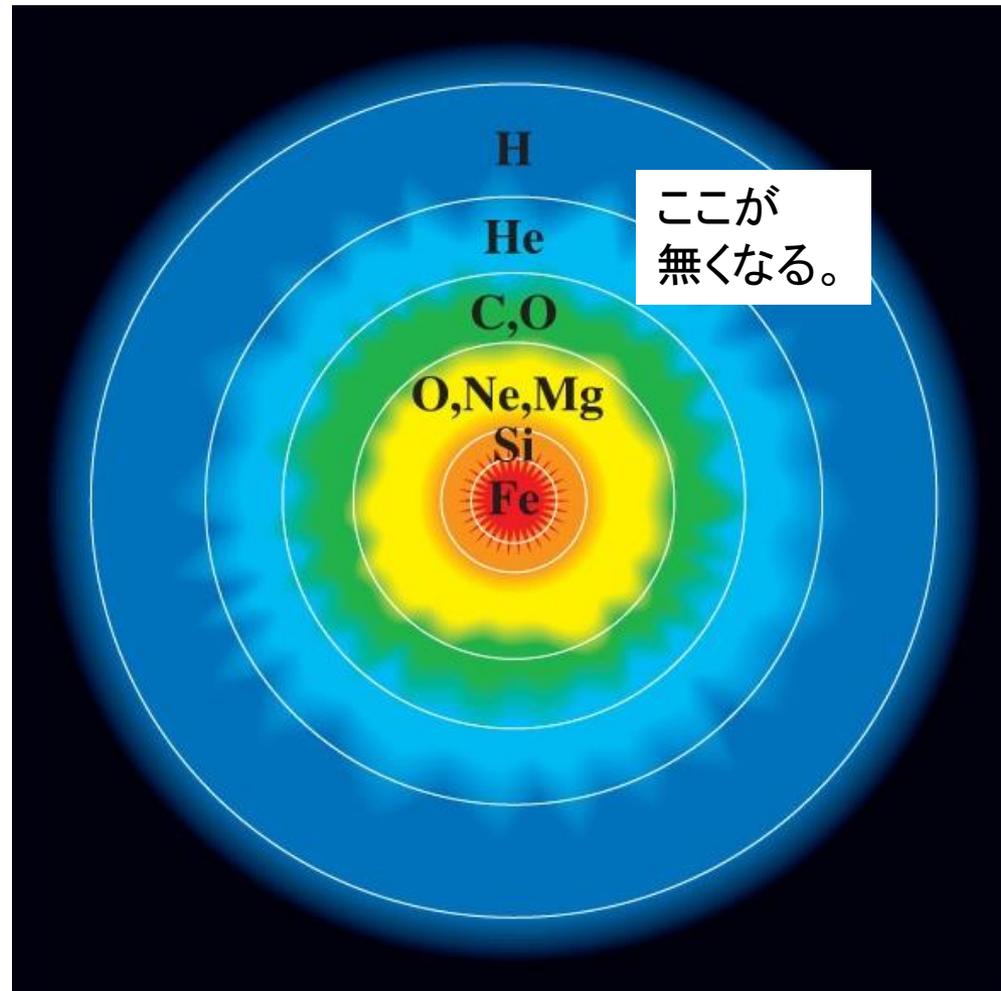
明るさも通常のものより10倍程明るい。

Ic型超新星だった(水素、ヘリウム層なし)。

例外的な現象だったのだろうか？

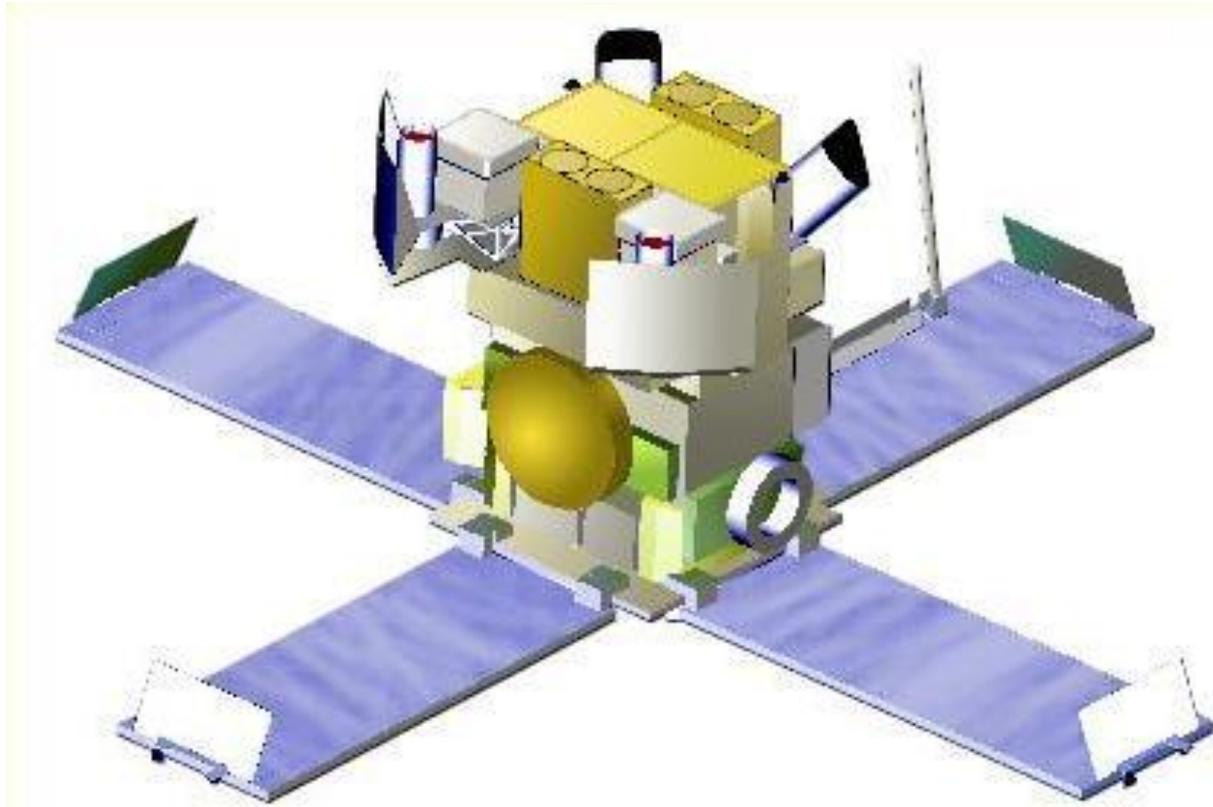
Type Ic 型超新星とは

超新星を起こす前に水素層・ヘリウム層が星風によって剥ぎ取られている。



理科年表オフィシャルサイトより。

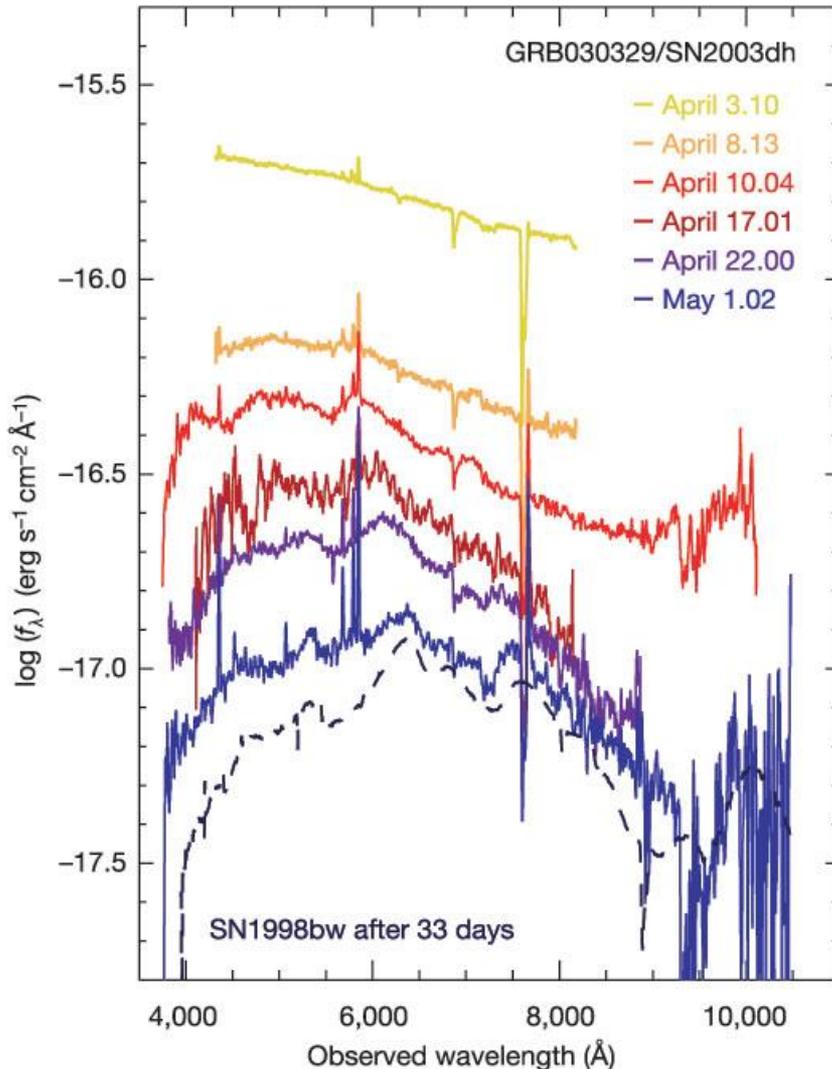
HETE-II NASA/MIT (Oct.2000-Mar.2007)



GRB030329/SN2003dh

Hjorth et al., Nature, 423, 847 (2003)

VLT (ESO) チリ望遠鏡でフォローアップ



$z = 0.1685$ 810 Mpc

GRB Energy $\sim 9 \times 10^{51}$ erg
Normal!

初めはOptical Afterglowが卓越。

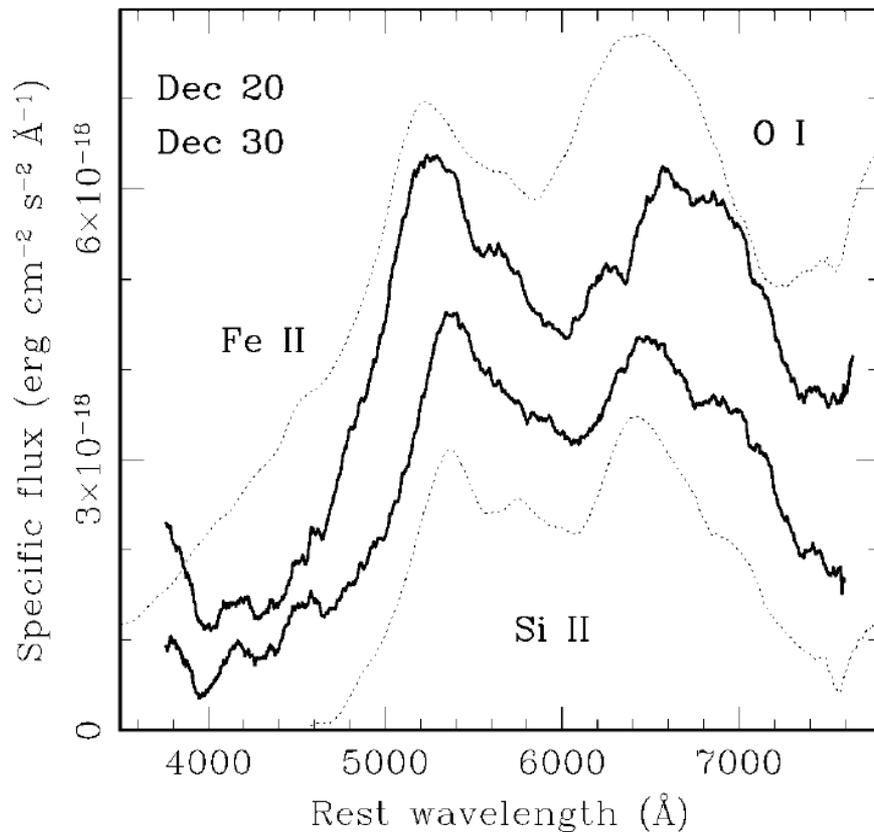
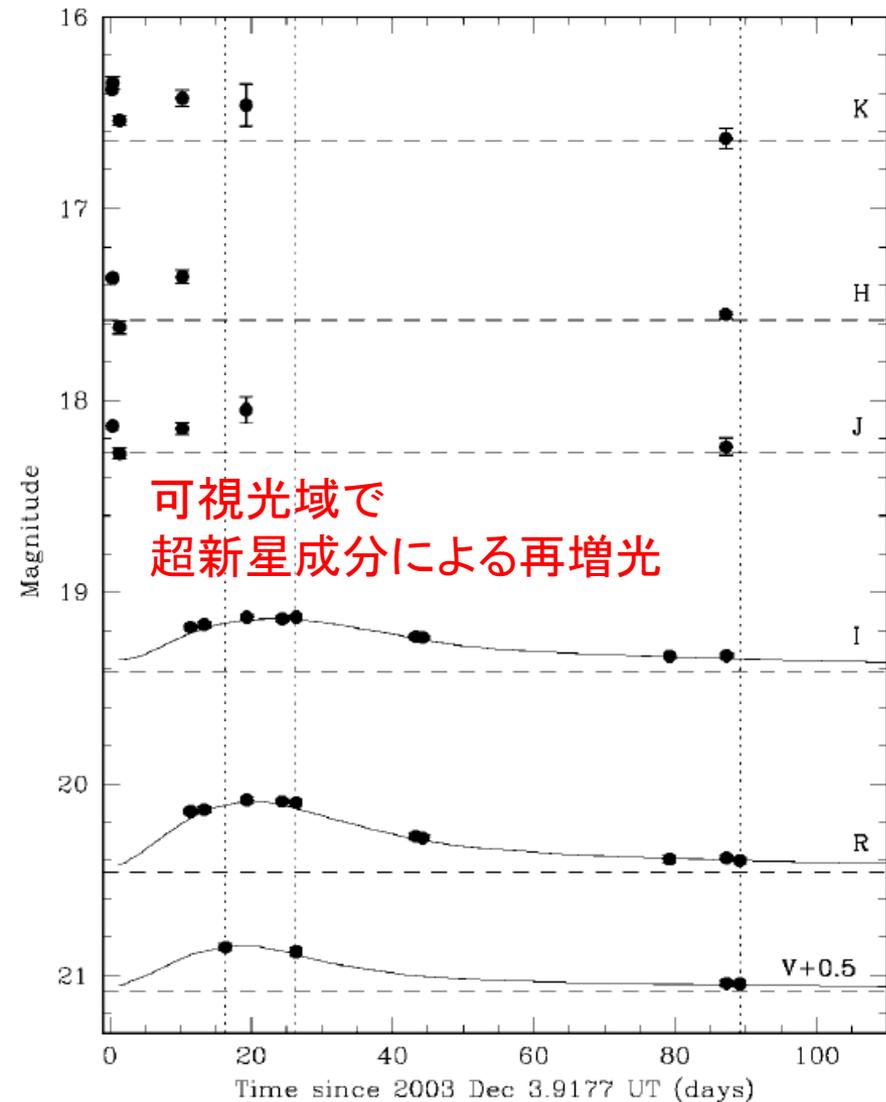
次第に超新星成分が卓越(超新星はピークが後に来る)。

スペクトルがSN1998bwとそっくりだった！

GRB031203/SN2003lw

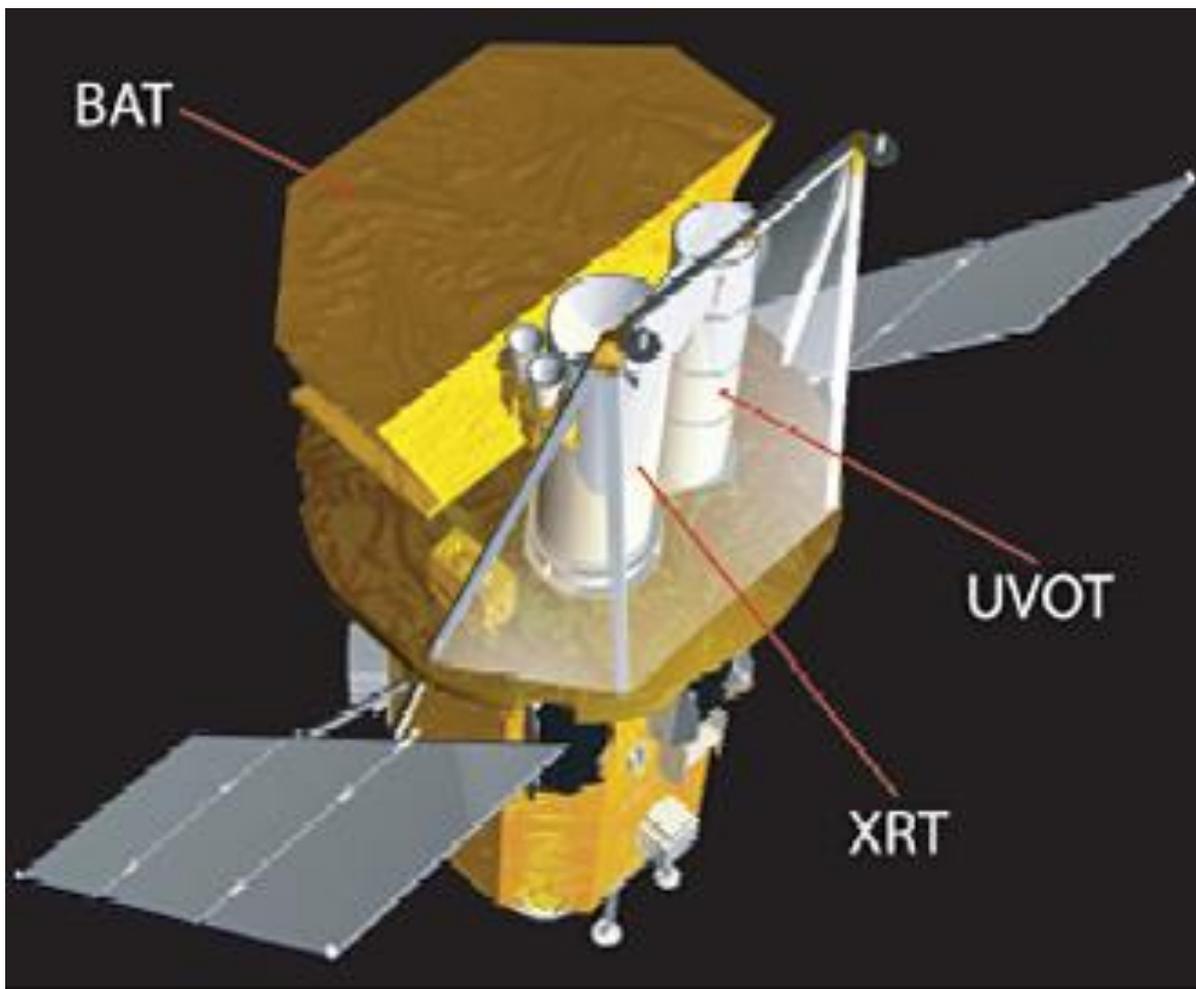
By Integral/NTT Malesani et al. 2004

GRB Energy $E_{\text{iso}} \sim 3 \times 10^{49}$ ergs
 $z = 0.1055 \pm 0.0001$



実線がSN2003lw (17, 27日後)
点線がSN1998bw(13.5, 23.5日後)

SWIFT, NASA (Nov. 2006-)



BAT:
視野 2ステラジアン
15-150 keV

XRT
0.3-10 keV
位置決め、残光観測

UVOT
紫外線—可視光
(170-600) nm.
位置決定精度 0.2-0.3秒角。
スペクトル機能も一応あり。

位置決定も衛星でやっ
てしまう。→ 高速化。

GRB100316D/SN2010bh

$$z = 0.0591 \pm 0.0001$$

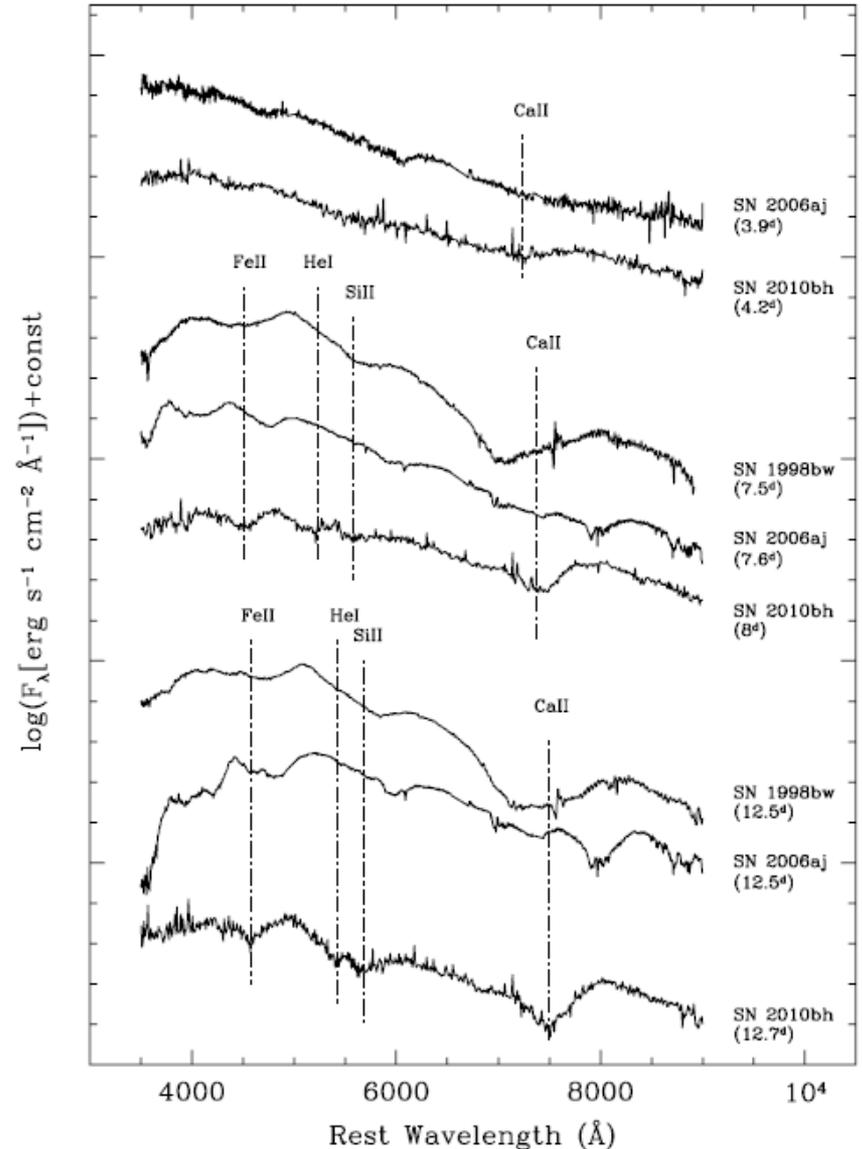
261 Mpc

$$E_{\text{iso}} \geq (3.9 \pm 0.3) \times 10^{49} \text{ erg}$$

SN2010bhはTypeIbc型の極超新星

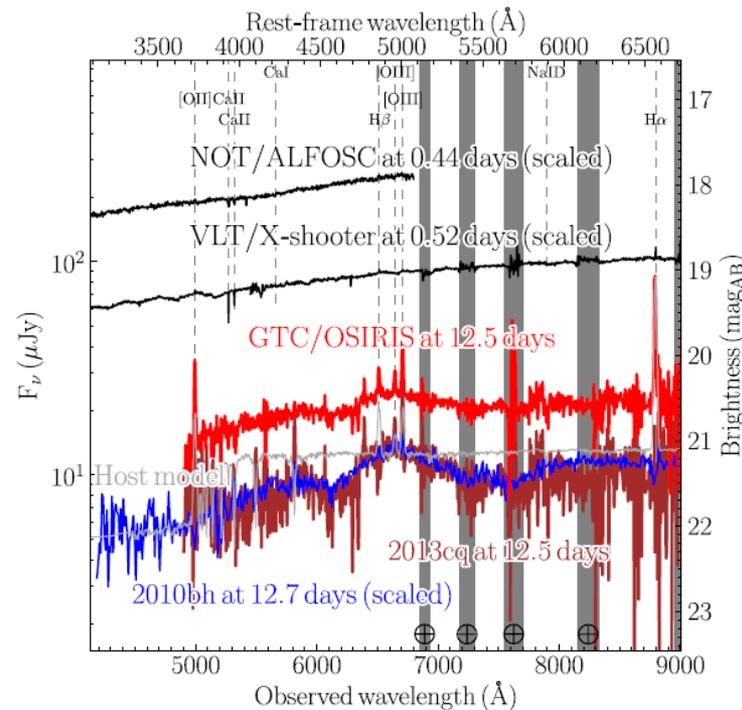
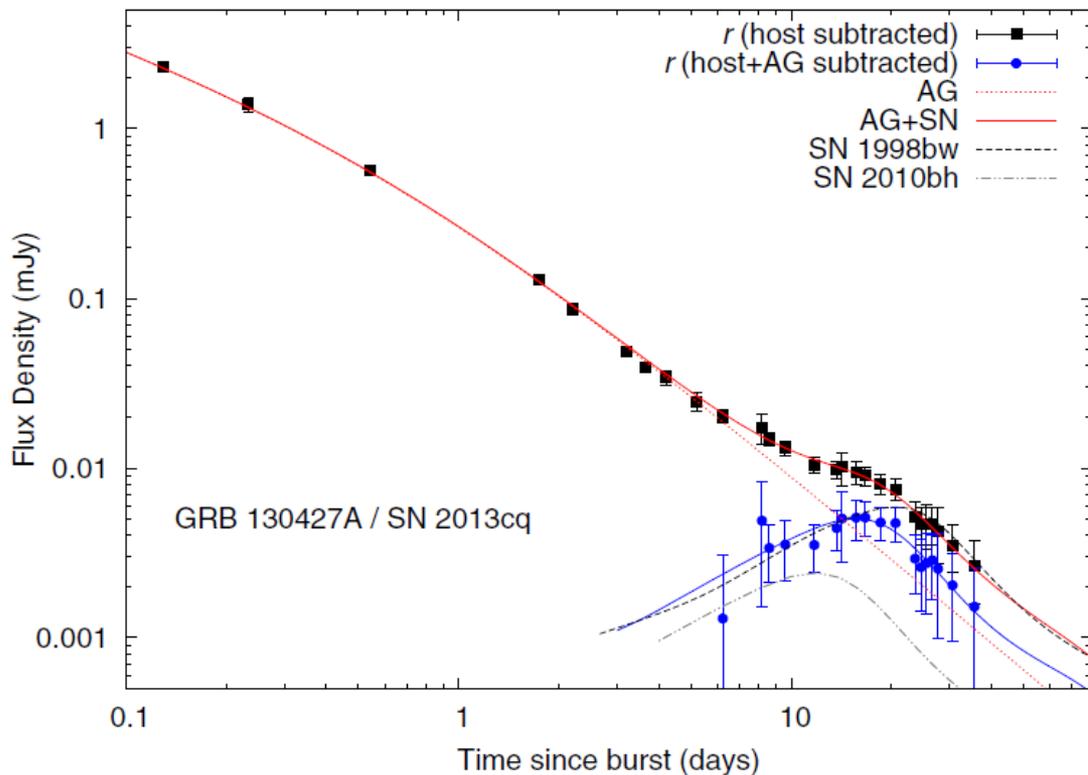
$$E_k \approx 10^{52} \text{ erg and } M_{\text{ej}} \approx 3 M_{\odot}$$

FILOMENA BUFANO et al. 2012



GRB130427A/SN2013cq Xu et al. 2013

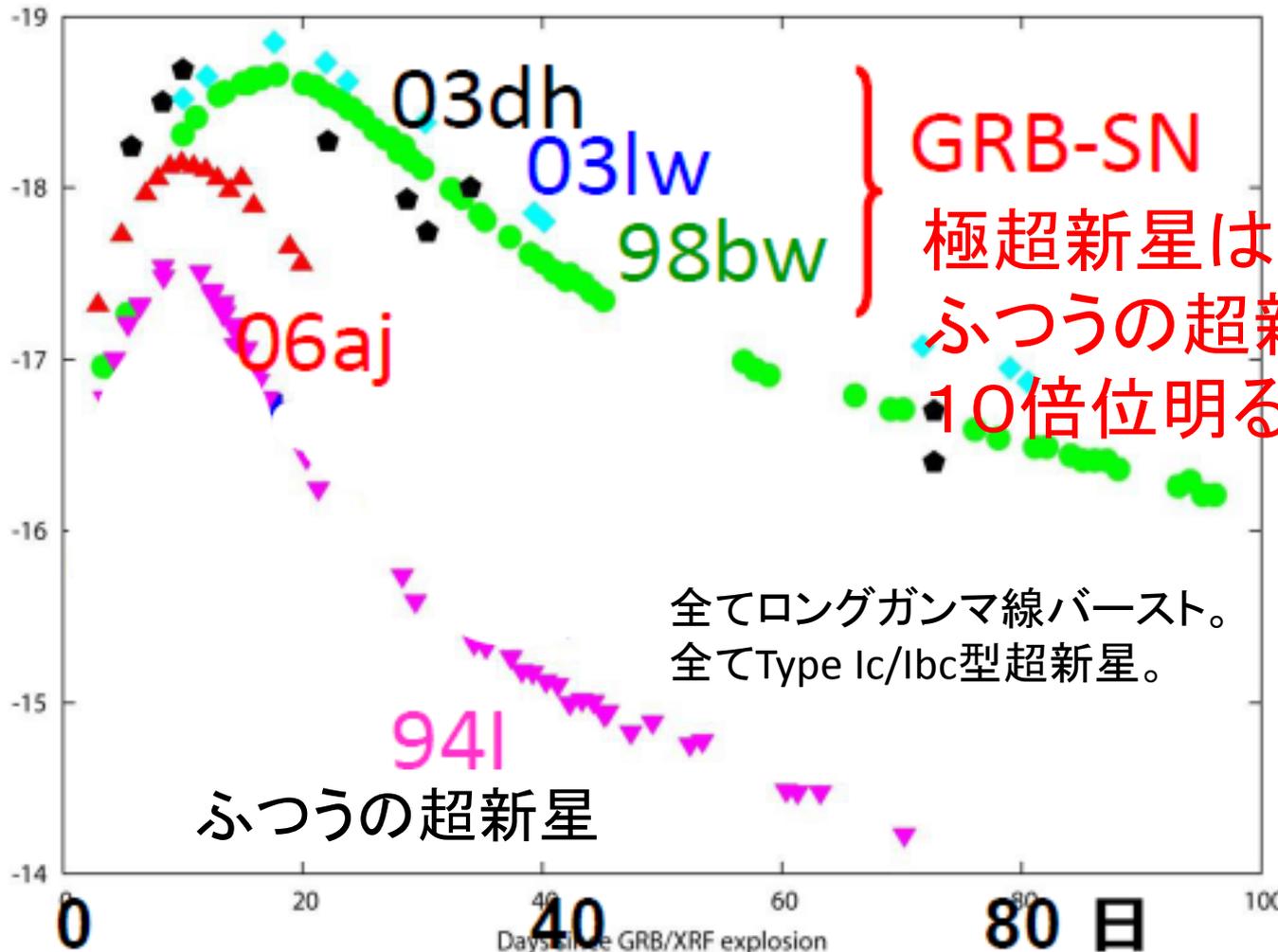
<p>GRB</p> <p>$z = 0.3399 \pm 0.0002$, 1392Mpc</p> <p>$E_{\text{iso}} \sim 9.6 \times 10^{53}$ erg</p>	<p>SN</p> <p>$E_{\text{K}} = (6.39 \pm 0.70) \times 10^{52}$ erg,</p> <p>$M_{\text{ej}} = 6.27 \pm 0.69 M_{\odot}$</p> <p>$M_{\text{Ni}} = 0.28 \pm 0.02 M_{\odot}$</p>
--	--



ガンマ線バーストと一緒に起こる 超新星は極超新星が多い

スライドは
前田氏(京大)

超新星の明るさ(絶対光度)



爆発からの時間(日)



ガンマ線バーストのコンピューターグラフィクスNASAのホームページより

ガンマ線バーストの発生頻度 << 超新星の発生頻度

z=0 (現在)のガンマ線バースト発生頻度 David Wanderman¹ and Tsvi Piran² 2010

$$\rho_0 = 1.3_{-0.7}^{+0.6} [Gpc^{-3} yr^{-1}] \longrightarrow 1 \text{ event per galaxy per } 10^7 \text{ years}$$

with $L \geq 10^{50} \text{ erg/sec}$

the beaming factor of about 50 (see Guetta et al. 2005).

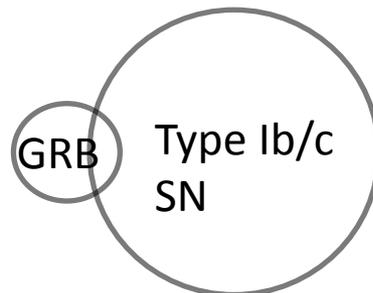
を考えると、 1 event per galaxy per $2 \cdot 10^5$ years.

c.f. 重力崩壊型超新星の発生頻度 銀河系一個あたり、約100年に一度。
Type Ib/cに限ると約1000年に一度。

近傍銀河 (<200Mpc) で起こったType Ib/c SNe 約200個の電波観測のうち、GRB radio afterglowらしきもの(Off-Axis含む)を示したのは10%未満、という報告もある (Soderberg et al. 07)。

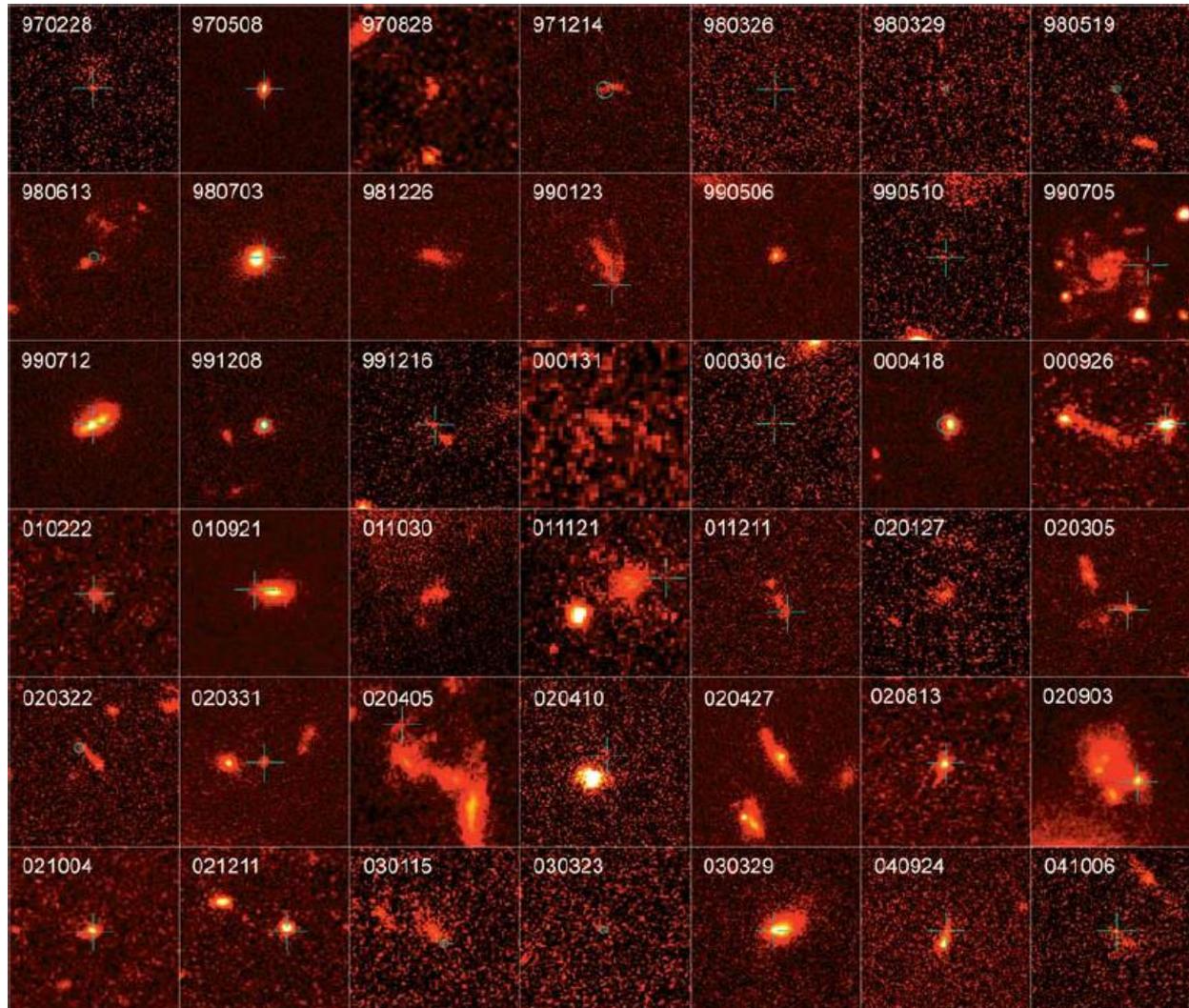
まとめ：超新星とガンマ線バーストの関係

- 少なくとも一部のガンマ線バーストは超新星と一緒に起きている。
- その超新星は今のところ全てType Ib/c型。
- その超新星は極超新星であることが多い。
- 今のところ以上の発見は全てロングガンマ線バースト。
- ガンマ線バーストの発生頻度はType Ib/c型超新星発生頻度より(ずっと)小さい。



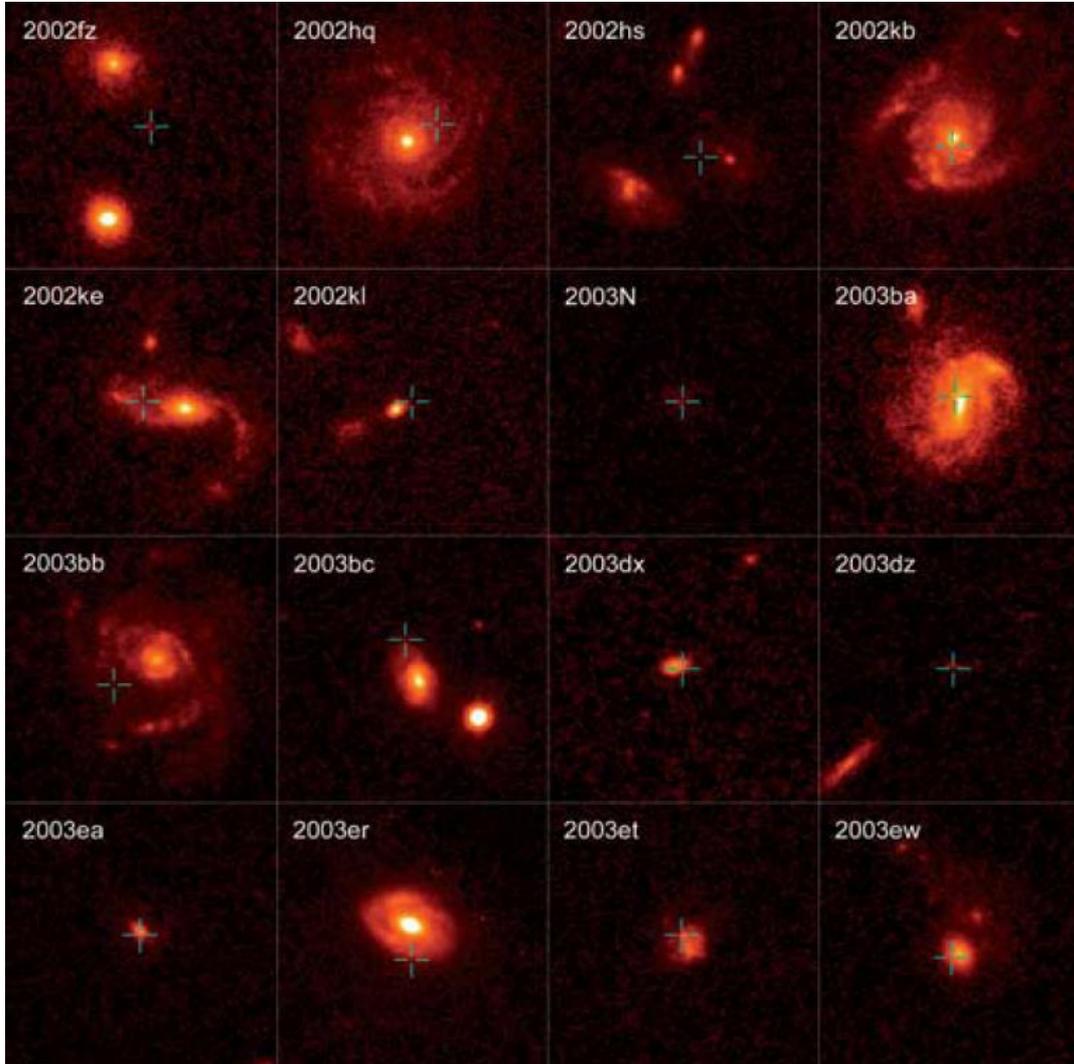
ガンマ線バーストの親銀河

Fruchter et al. Nature 2006



重力崩壊型超新星の親銀河例

Fruchter et al. Nature 2006



In Fynbo, Malesani, Jakobsson 2013,

“GRBs host galaxies have been found to be predominantly **young, actively star-forming and sublumino**us.”

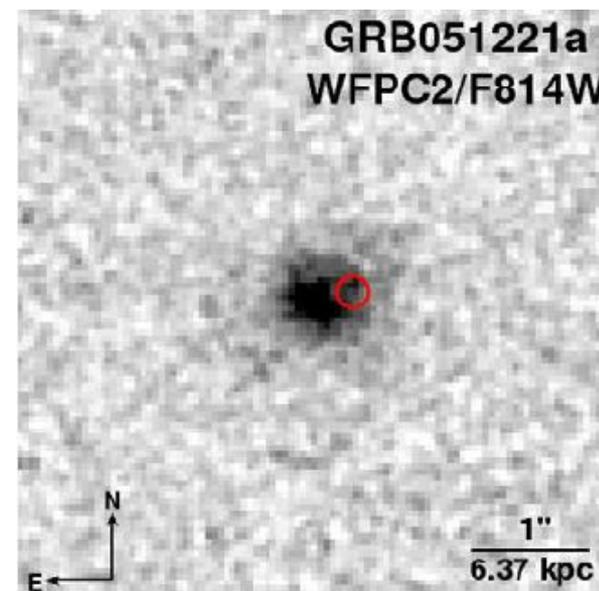
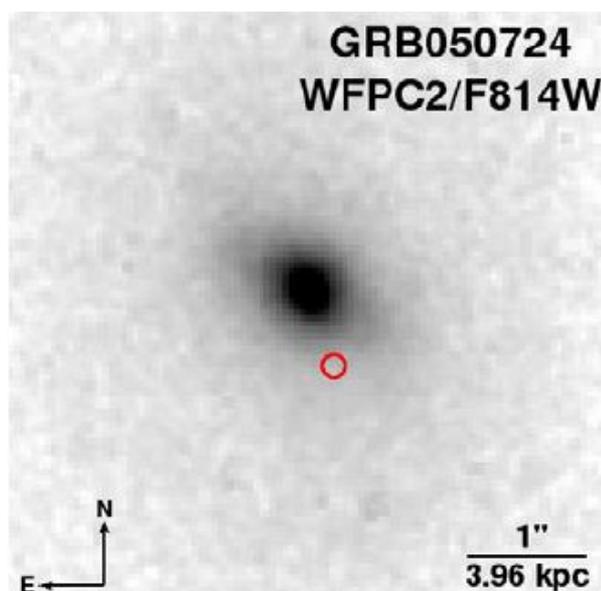
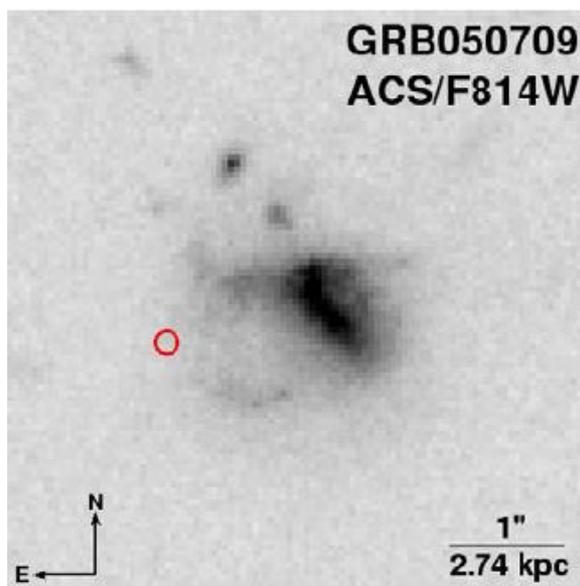
同論文にて、Metallicityについても言及あり。

以前はLow-Metallicityな親銀河が多いと報告されていたが(Stanek et al. 2006 etc)、最近はHigh-Metallicityのものも見つかってきており(Schulze et al. 2014 etc)、結論しにくい。

ショートガンマ線バーストについて

By Swift/HST.

Fong et al. 2010



今のところ超新星のような対応天体は見つかっていない。
親銀河の中心からかなり離れたところで良く発生しているようにも見える
(同定した10個のShort GRBの平均で~5kpc away from the center)？

Swiftの時代にShort GRBsも宇宙論的距離にあると確定した。

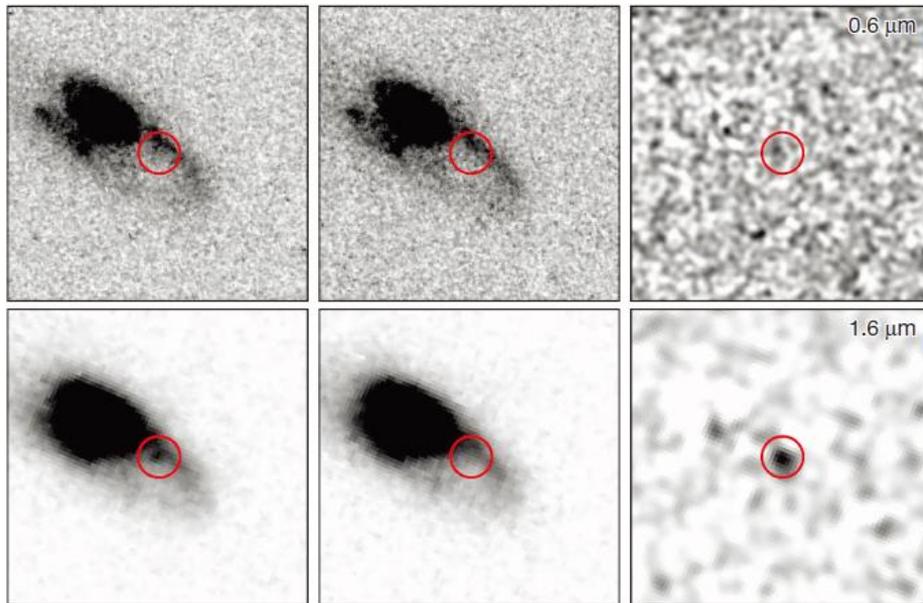
KilonovaとShort GRB130603B

Tanvir et al. Nature 2013

9日後

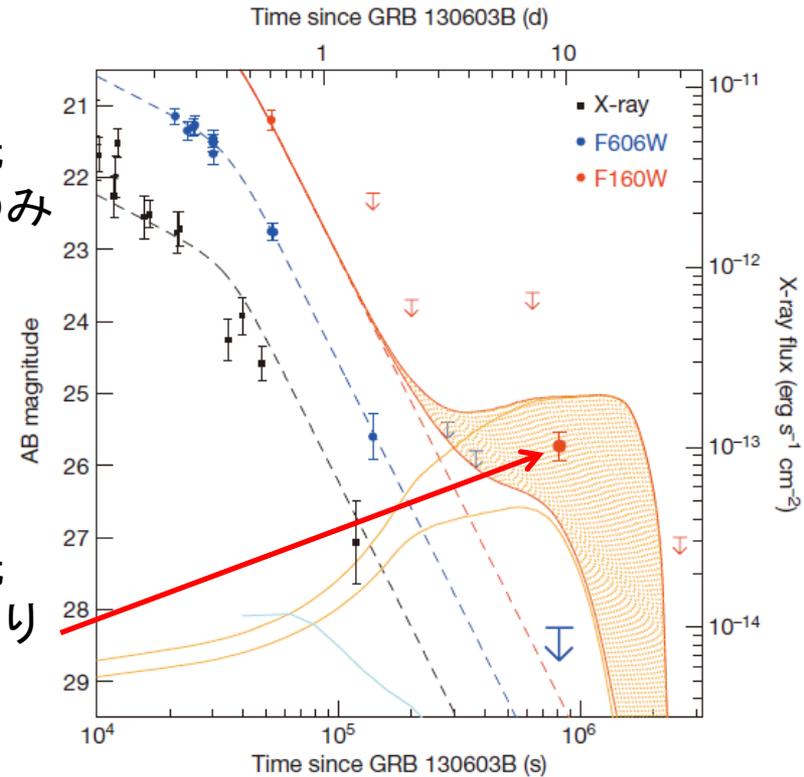
30日後

差分



可視光
上限のみ

赤外光
差分あり



9日後

R-process元素合成のDecayが熱源か？

完