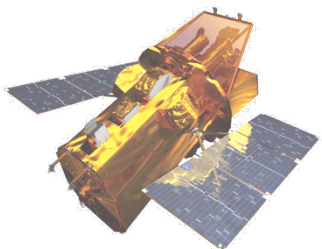
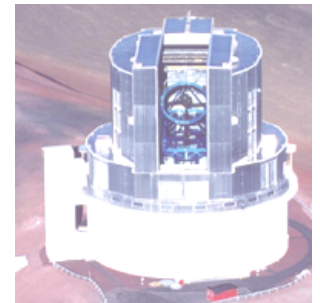


# ガンマ線バースト - 宇宙最大の爆発現象

- ガンマ線バーストとは
- 高赤方偏移GRB
- GRB母銀河の金属量
- Fermiによる高エネルギーガンマ線観測
- 謎の“短い”ガンマ線バースト



河合誠之（東工大）



# 本講演の目的

- ガンマ線バーストの面白さを知っていただく
- ガンマ線バーストに向いている人（私見）
  - ◆ ちょっとリスクがあっても一山あてたい
  - ◆ 他の人が知らないことを先に知りたい
  - ◆ いろいろな人と一緒にやってみたい
  - ◆ いろいろなことに首を突っ込みたい
  - ◆ 世の中の大勢とちょっと違うことをしてみたい
  - ◆ 新しいものをすぐ使ってみたい

# 「ガンマ線バースト」の面白さ

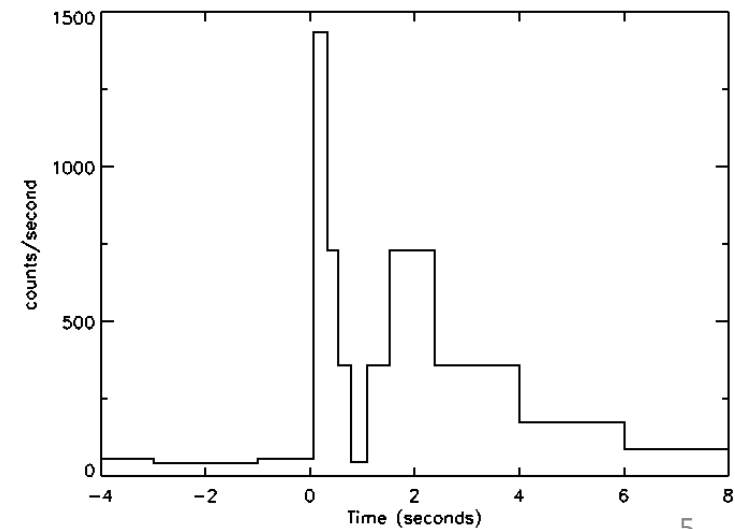
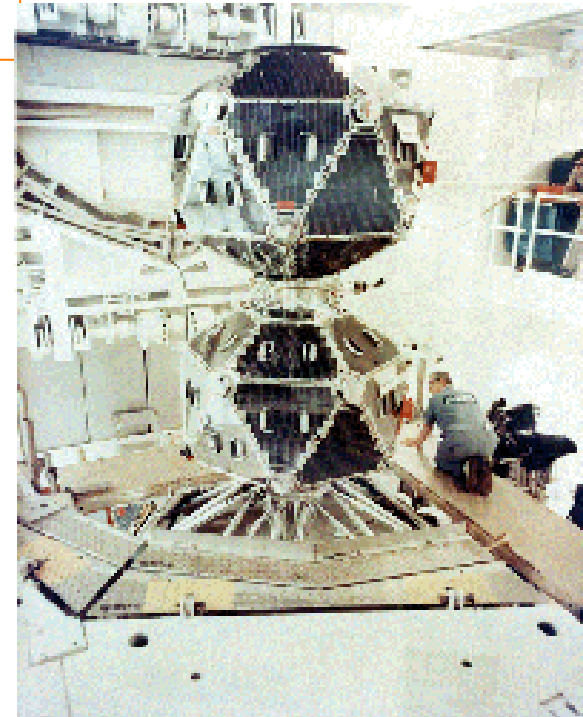
- 宇宙最大の爆発現象
  - ◆ 太陽の一生分のエネルギーを数秒で放射
- 相対論的ジェット  $\Gamma \approx 100-1000$  を発生
  - ◆ ジェットの駆動、コリメーション
  - ◆ 高効率な放射
- 宇宙の果てまで見通せるほど明るい
  - ◆ 太古の宇宙を照らす光源 → 電離度、元素組成
- 長いバーストは大質量星の死に関連
  - ◆ 宇宙最初の星を見る？
- 短いバーストは連星中性子星の合体現象？
  - ◆ 重力波源の同定？

# 「ガンマ線バースト」の面白さ

- 80年代末ごろの天文学の難問
  - ◆ 太陽ニュートリノ問題
  - ◆ 暗黒物質
  - ◆ ガンマ線バースト
- とにかく、分からない。
  - ◆ 距離、エネルギー規模、放射機構、エネルギー源、母天体、天体種族...
    - 最近傍の説: オールトの雲 + 太陽系外反物質彗星
    - 最有力候補: 銀河系内中性子星
  - ◆ 1990年代: コペルニクスの転回
    - → 宇宙論的遠方のジェット

# ガンマ線バーストの発見

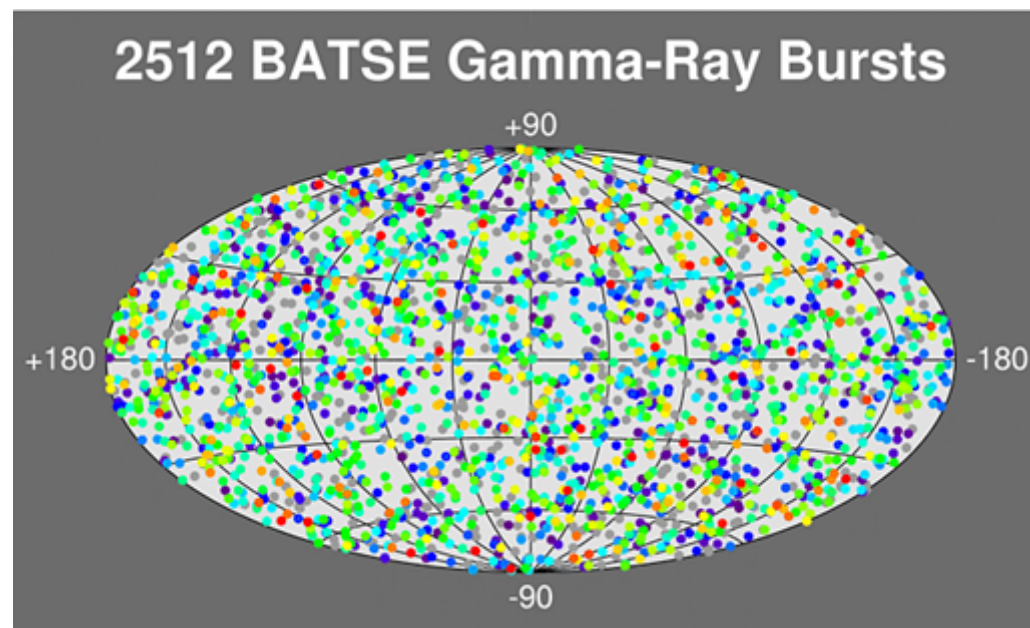
- 核実験監視衛星によって、宇宙からのガンマ線爆発を『思いがけず』初検出: ~1967年
- ロスアラモス研究所のグループ(クレベサデル他)
- Star Wars?



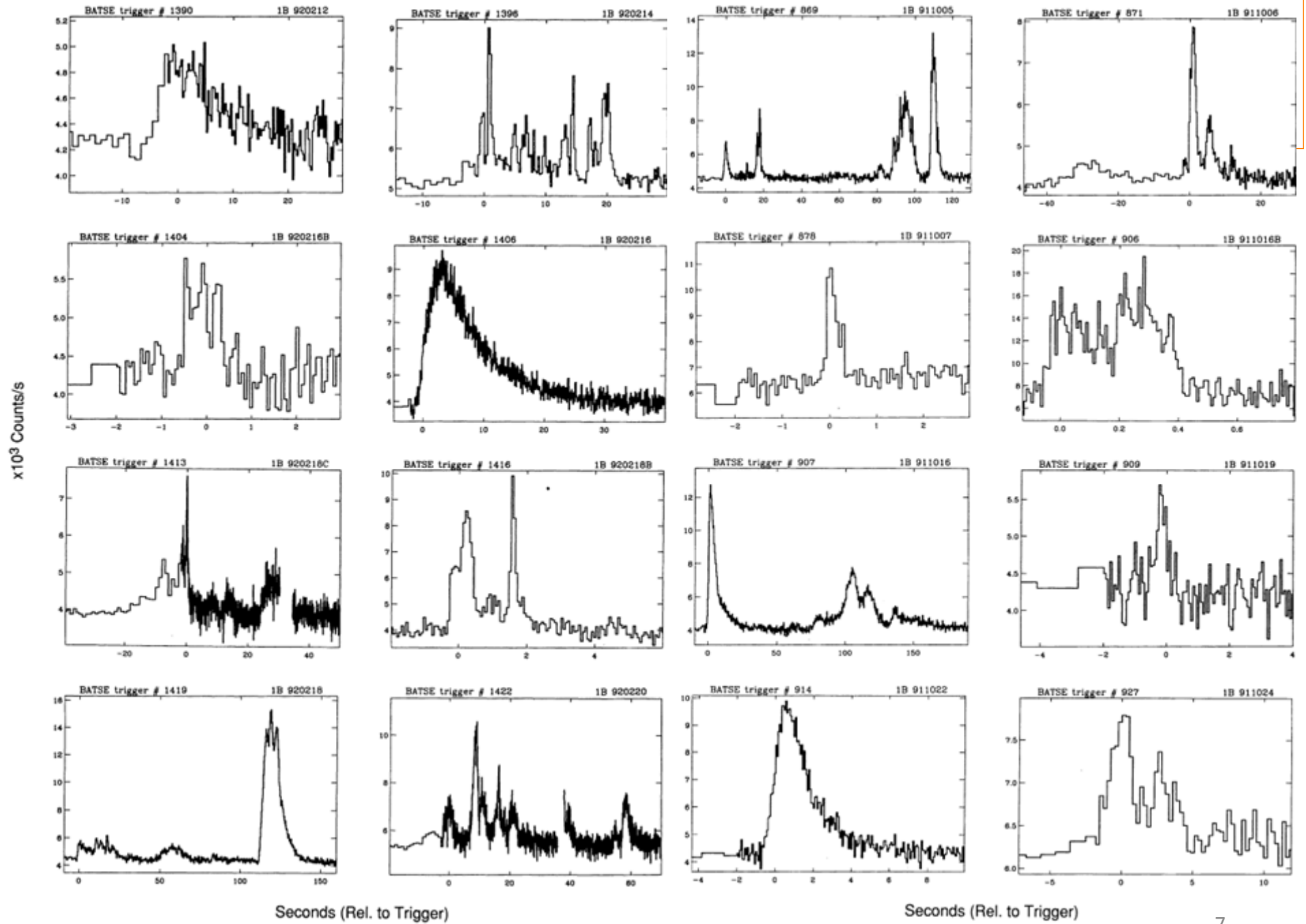
# 高感度で暗い(=遠い)ものまで見れば...

コンプトンガンマ線天文台衛星 (1991-2000)

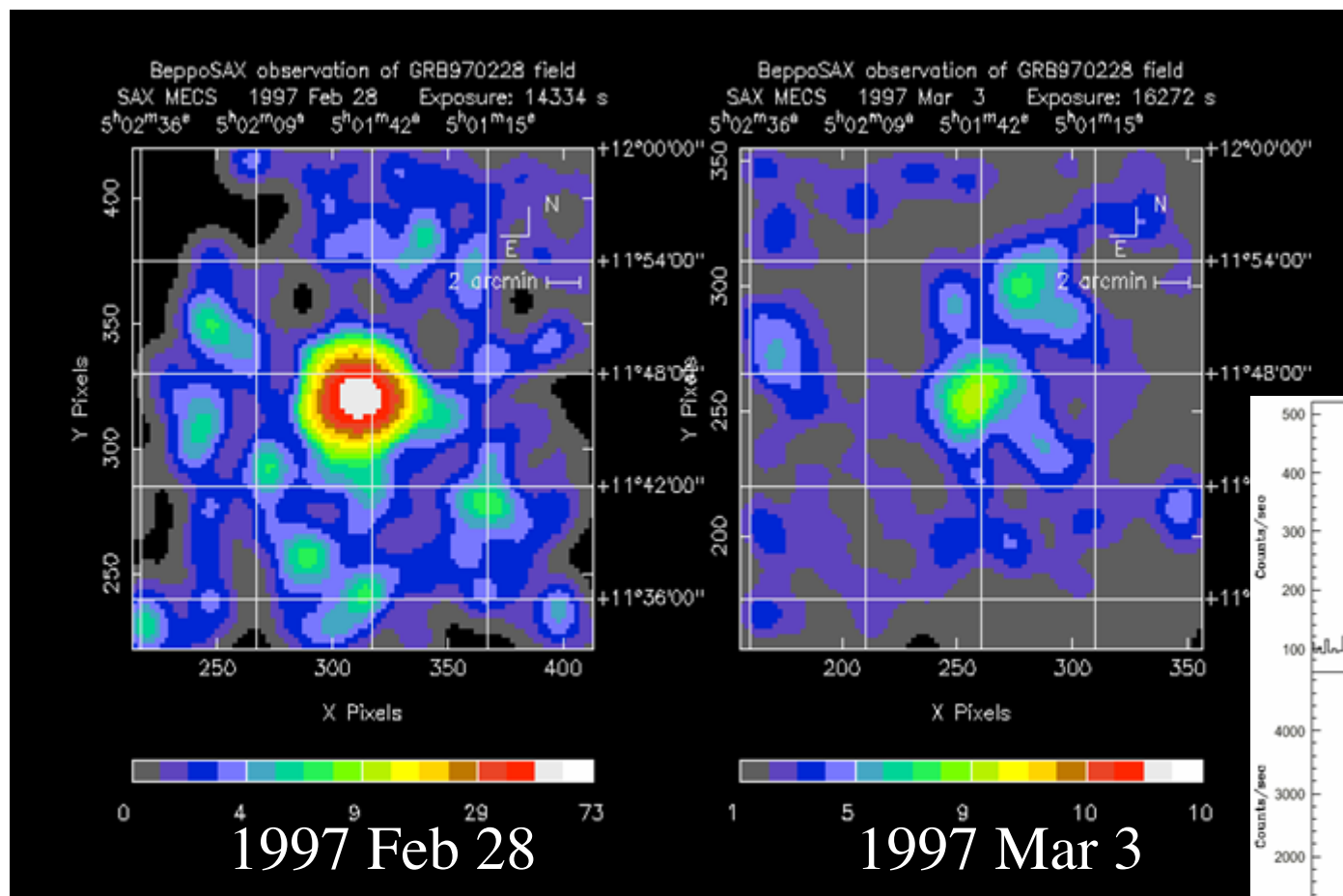
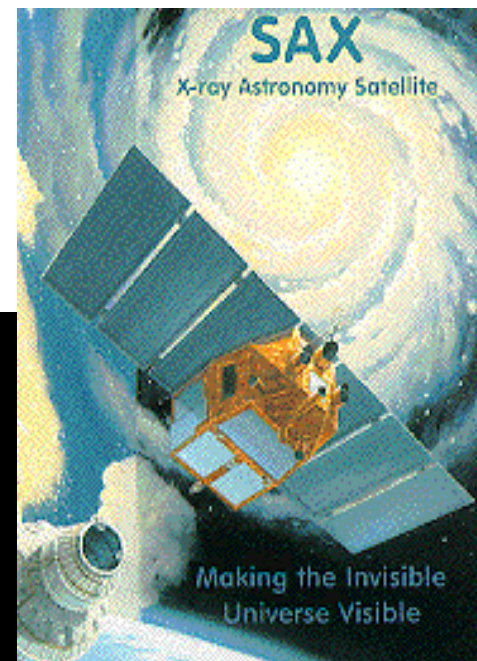
2000年6月に廃棄  
(大気圏再突入)



バッツィー実験 (BATSE)

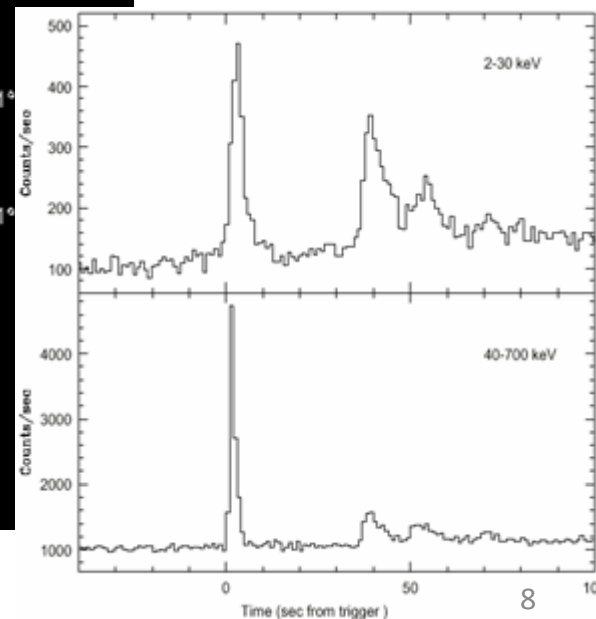


# ベッポサックス衛星(1996-2002)による X線残光の発見 (GRB970228)



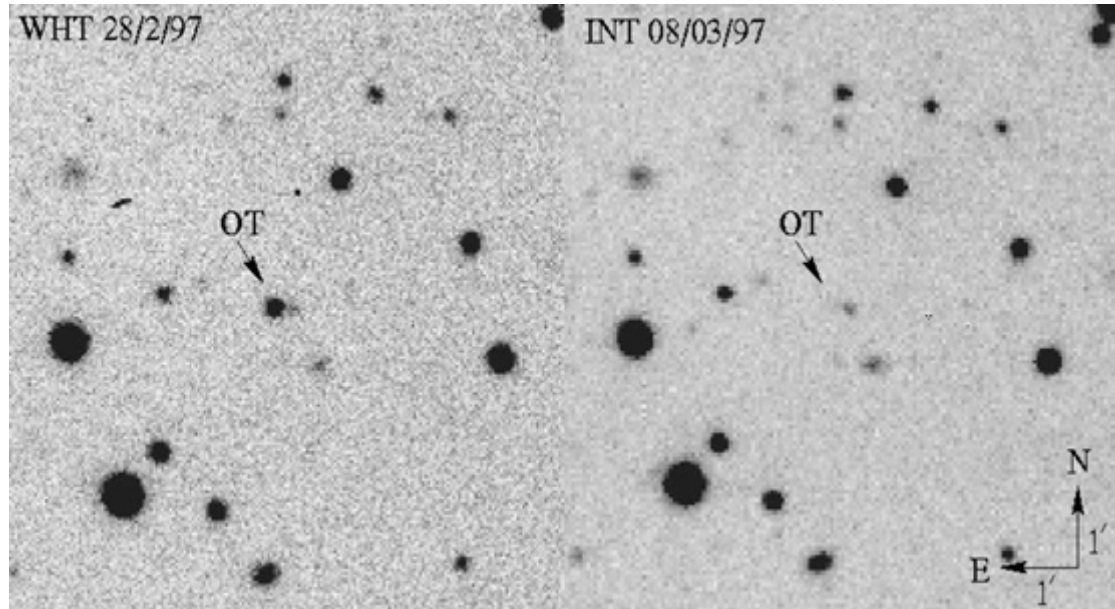
8時間後

3日後



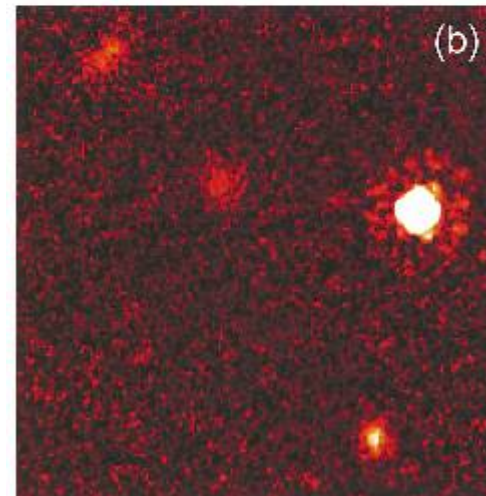
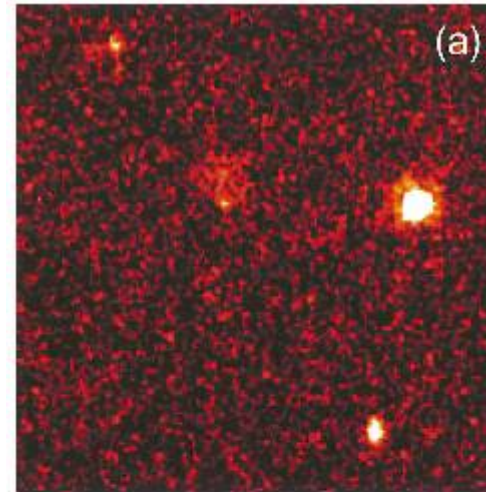


# 可視光殘光



8時間後

9日後



# GRB970508: 最初の赤方偏移

- 吸収線(母銀河か手前の物質)

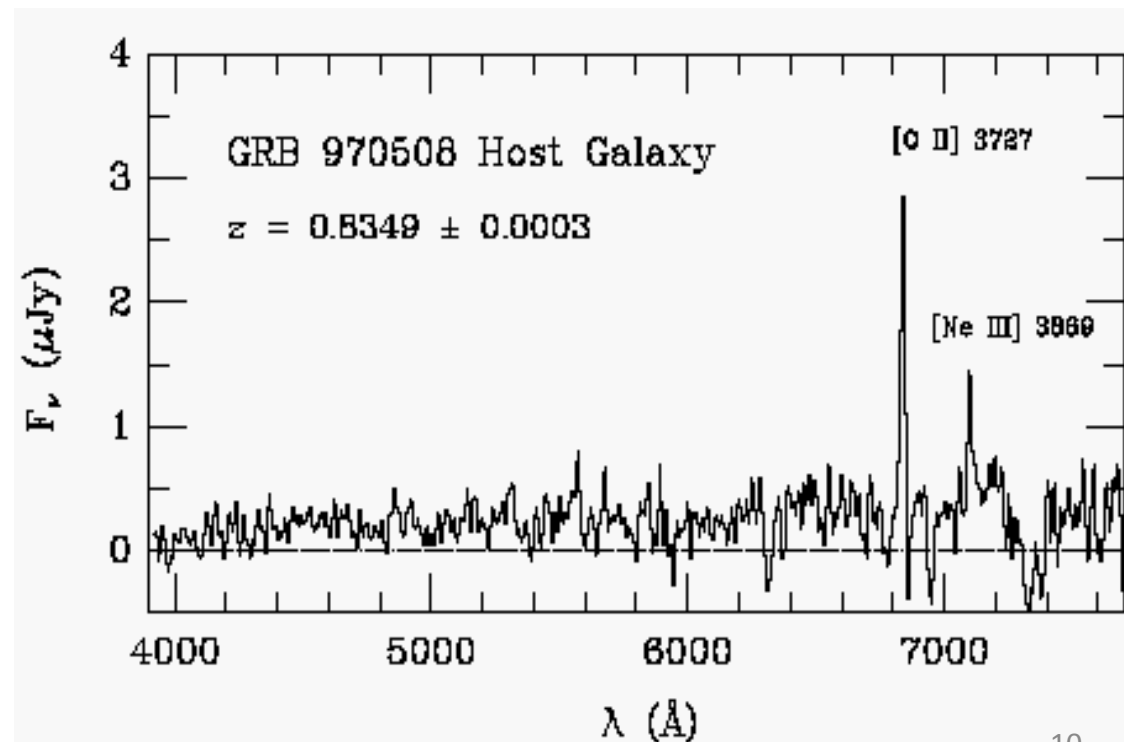
- ◆  $z > 0.835$

- 母銀河の輝線

- ◆  $z = 0.835$

**70億光年！  
本当に遠い**

酸素 ネオン



# ガンマ線バーストの起源の謎

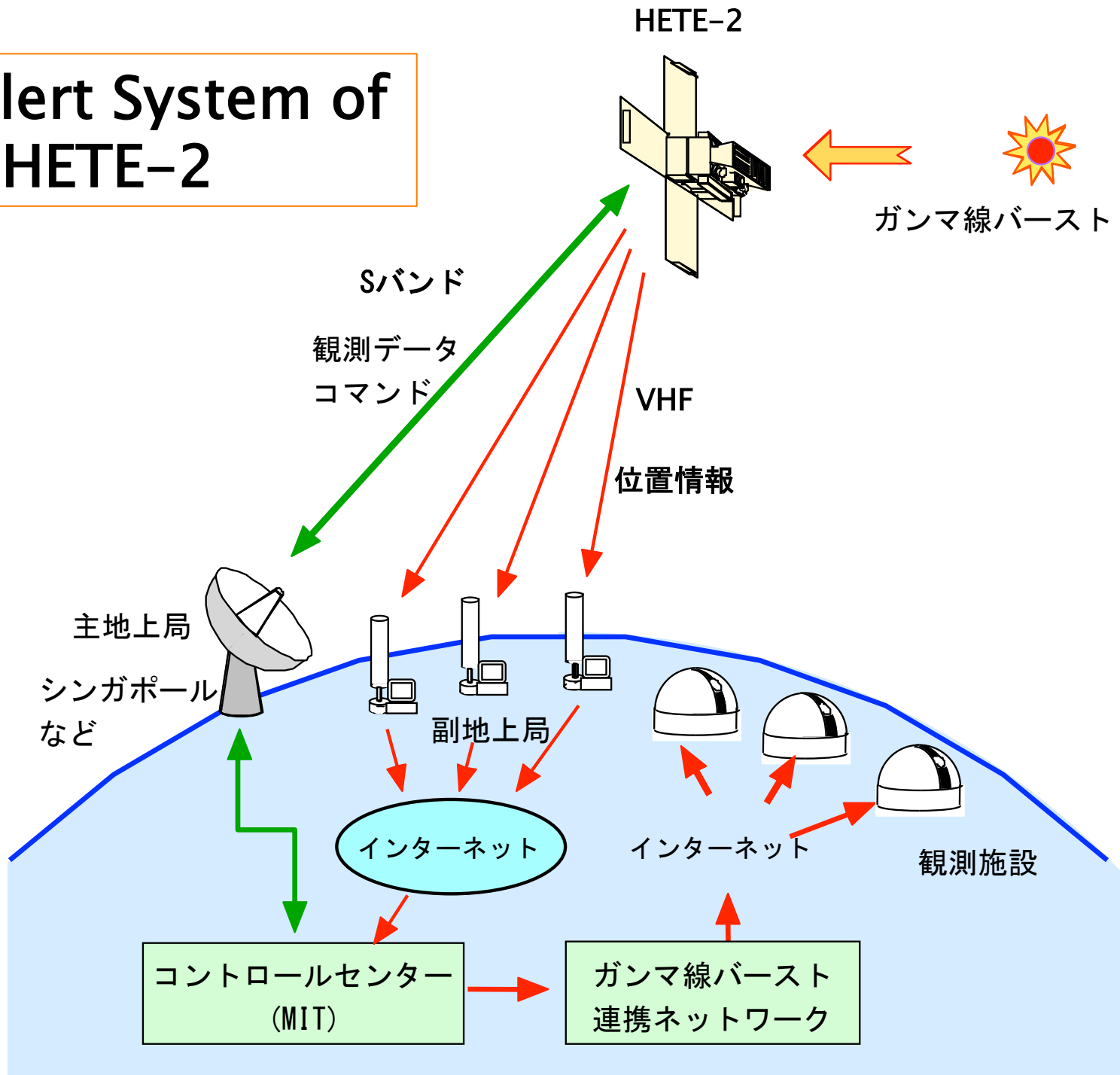
- 巨大なエネルギー ( $> 10^{42}$  J) を  $\leq 10$  s で放出
  - ◆ 候補となる天体現象は少ない
  - ◆ 恒星の重力崩壊
    - 大質量星の一生の最後
    - 普通は超新星になる
  - ◆ 中性子星連星の合体
    - NS+NS または NS+Black Hole
    - 宇宙年齢内に合体する連星系が存在

# HETE (High Energy Transient Explorer)

## 高エネルギー変動天体探査機

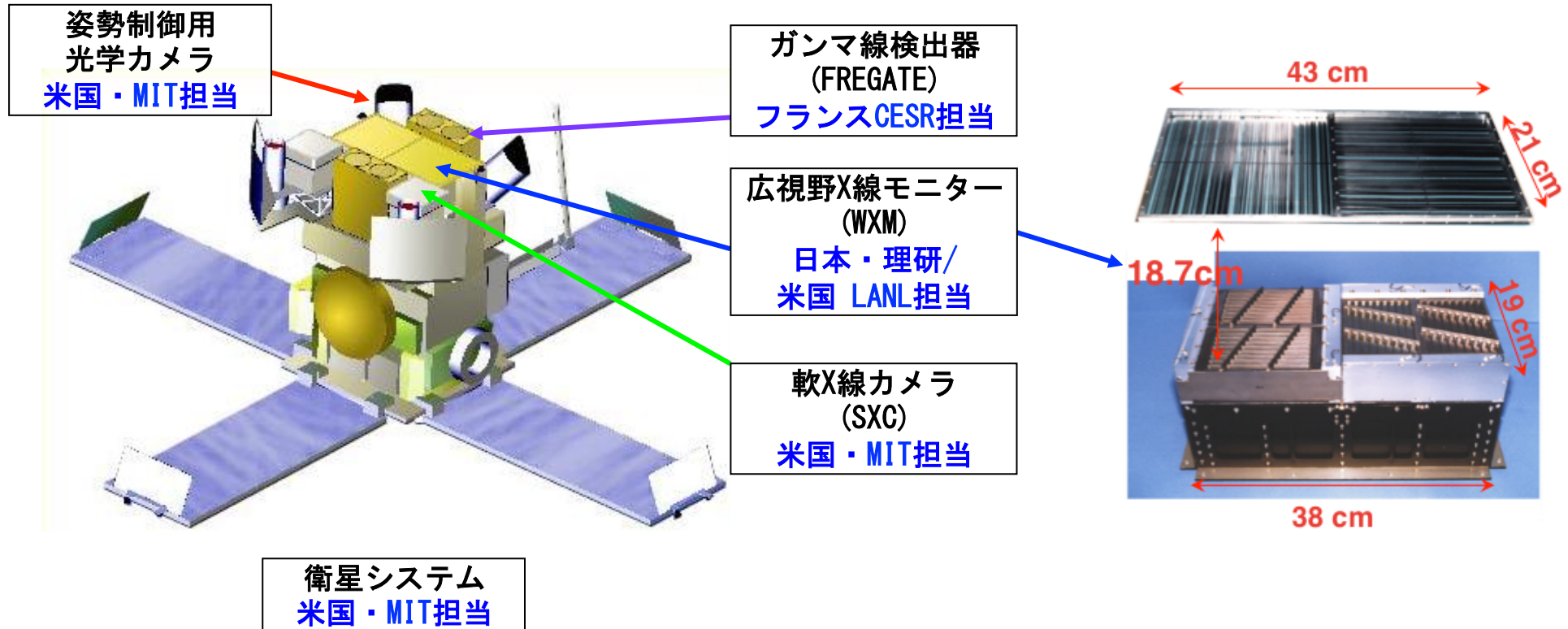
- 日・米・仏の国際共同プロジェクト
  - ◆ (構想:1983, 提案:1989, 一号機:1996)
  - ◆ PI: G. Ricker (MIT), 日本のリーダー:松岡勝 (理研主任研究員)
- “Cheaper, cheaper, cheaper”
- HETE-2: 2000年10月9日に打上げ
- 特徴:ガンマ線バーストの正確な位置を発生直後(数十秒以内)に全世界に速報する。
- HETEの位置情報は、無条件・無償で誰にでも提供)

# GRB Alert System of HETE-2



# HETE-2 (2000-2006)

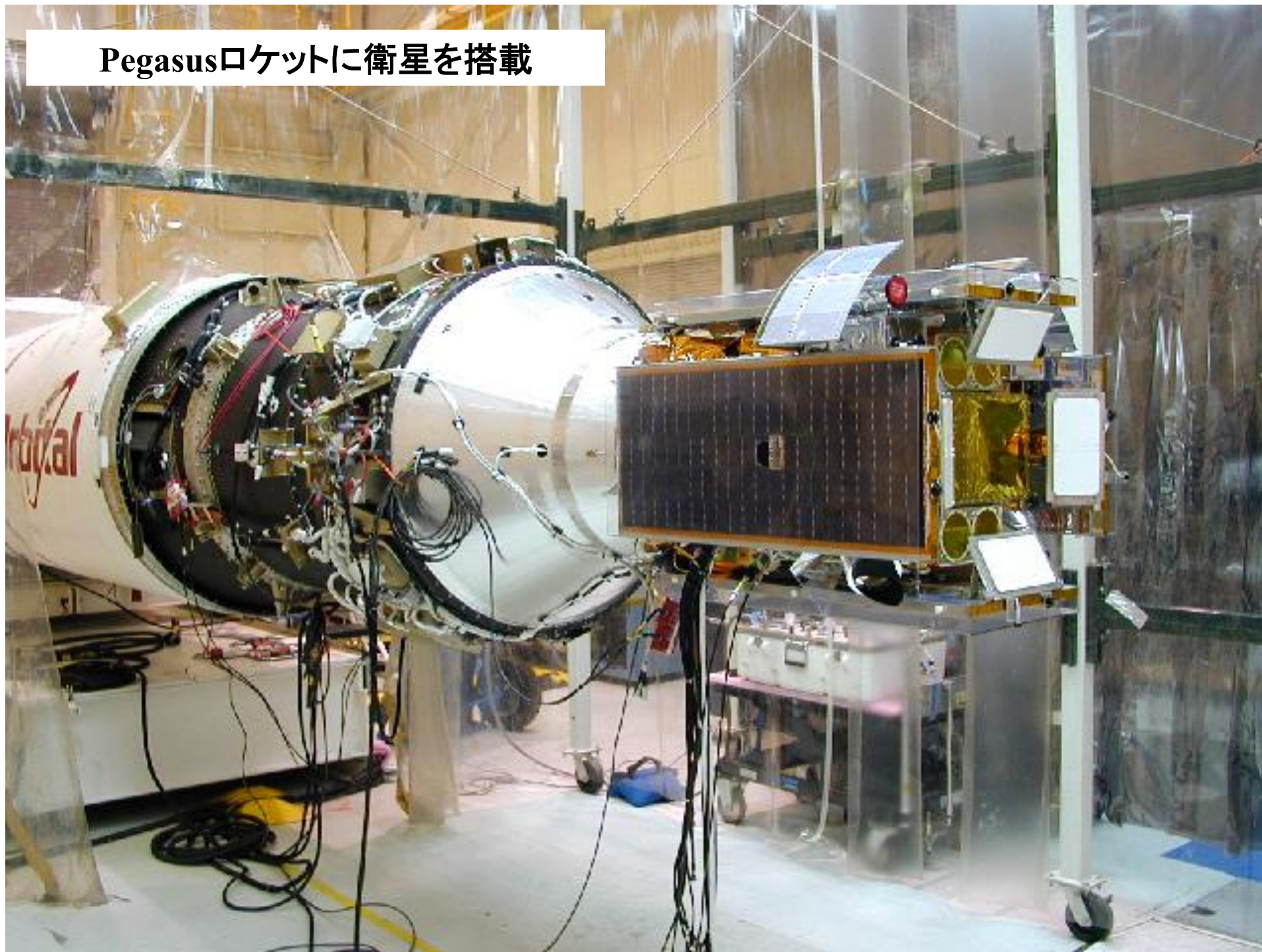
## 日米仏の国際協力による製作



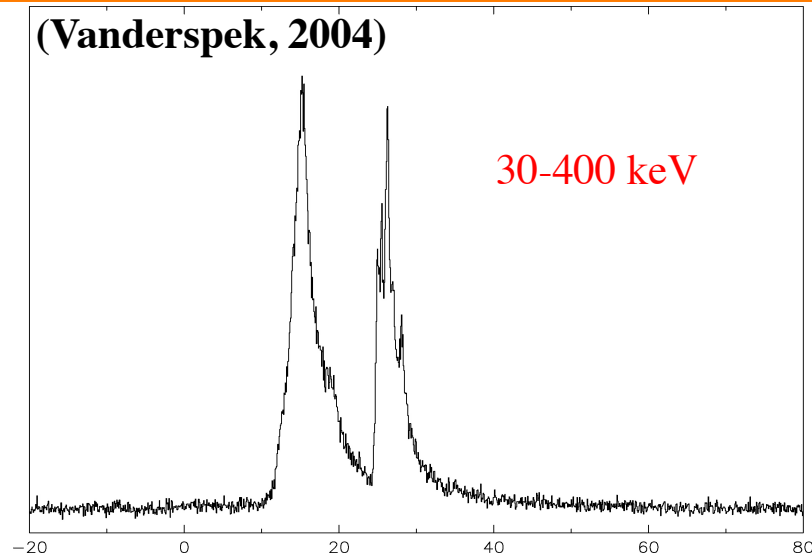
通信 送信 S-band (2.272 GHz) 250 kbps  
VHF (137.96 MHz) 300 bps  
受信 S-band (2.092 GHz) 31 kbps

重さ 124 kg  
高さ 89 cm  
横幅 66 cm  
軌道 高度 625 km、赤道軌道  
寿命 2年～  
姿勢 反太陽方向を常に向く

# Pegasusロケットに衛星を搭載



# HETE-2の代表的成果: 超新星を伴うGRBの発見

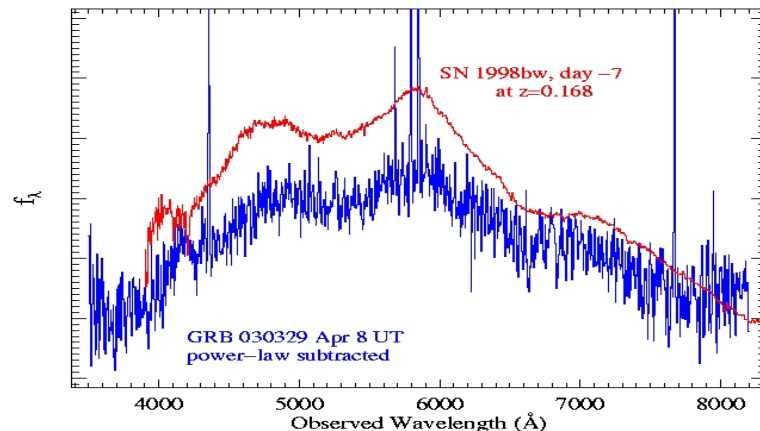


## GRB 030329

Exceptionally High fluence  
( $1.5 \times 10^{-4} \text{ ergs cm}^{-2}$ )  
典型的なGRB (本体・残光)  
 $z=0.1675$

Type Ic 超新星の発見

⇒ SN2003dh



Stanek et al. (2003; also Fynbo et al. 2003)

## GRB-SN connections

GRB 980425/1998bw

GRB 030329/2003dh

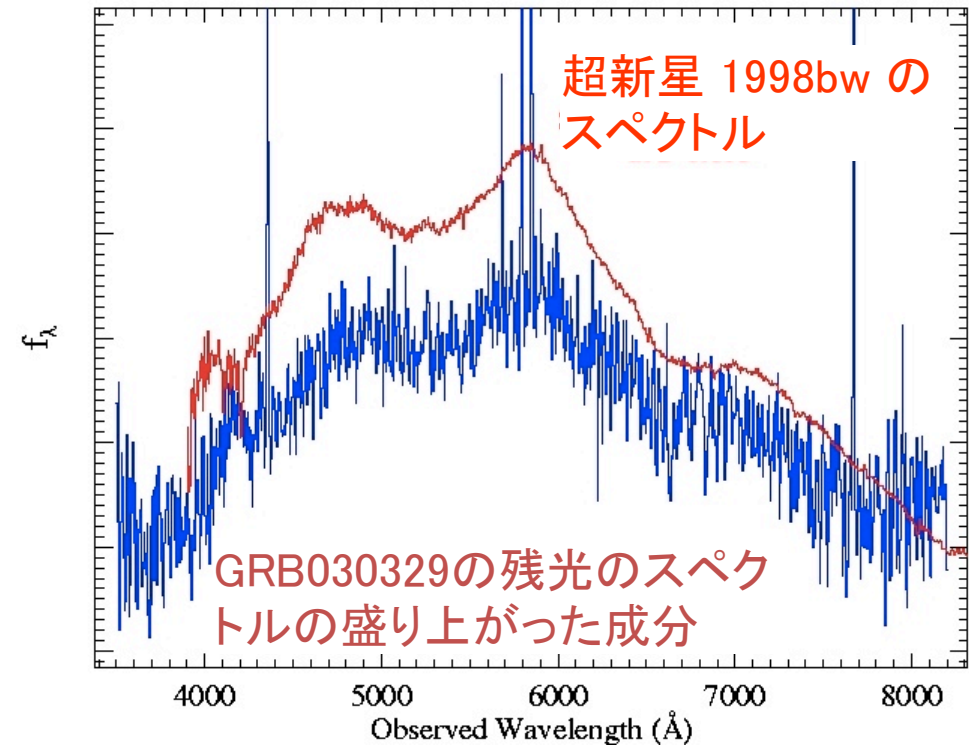
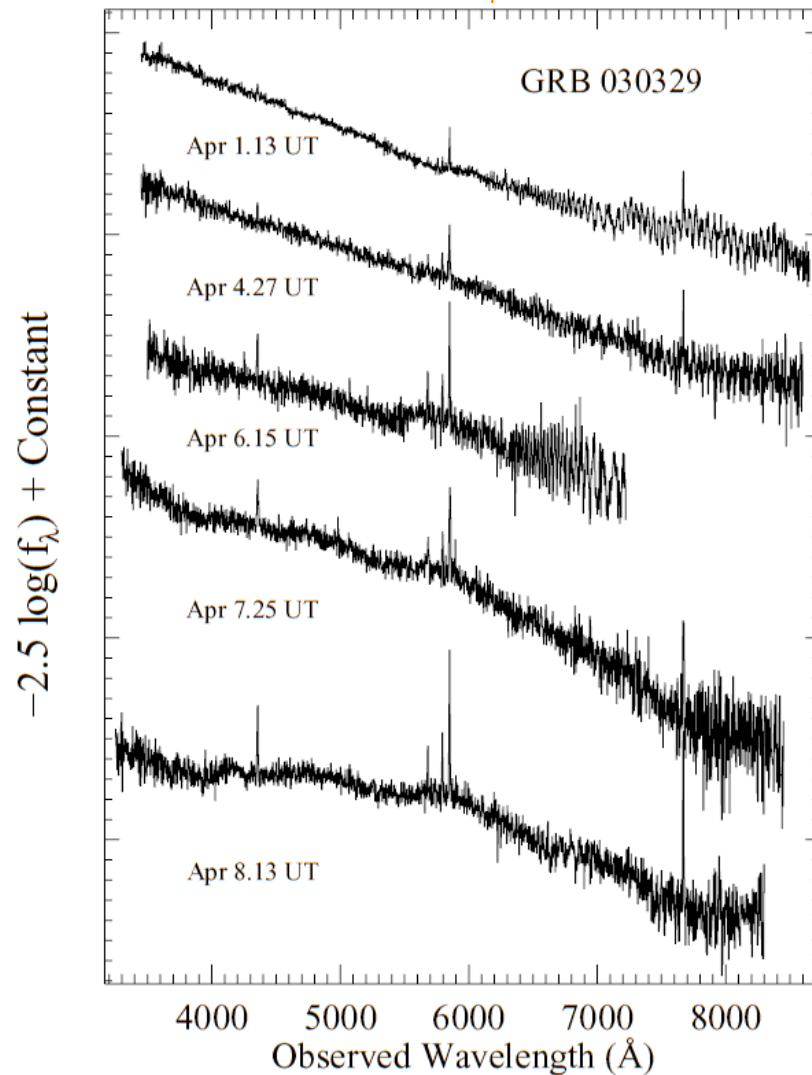
GRB 031203/2003lw 確立

GRB 060218/2006aj



GRB030329の残光の  
スペクトルの変化

# 超新星との関係が確立！



Stanek et al. 2003  
also Fynbo et al.  
Kawabata et al.

# GRBは大質量星の死に伴って発生

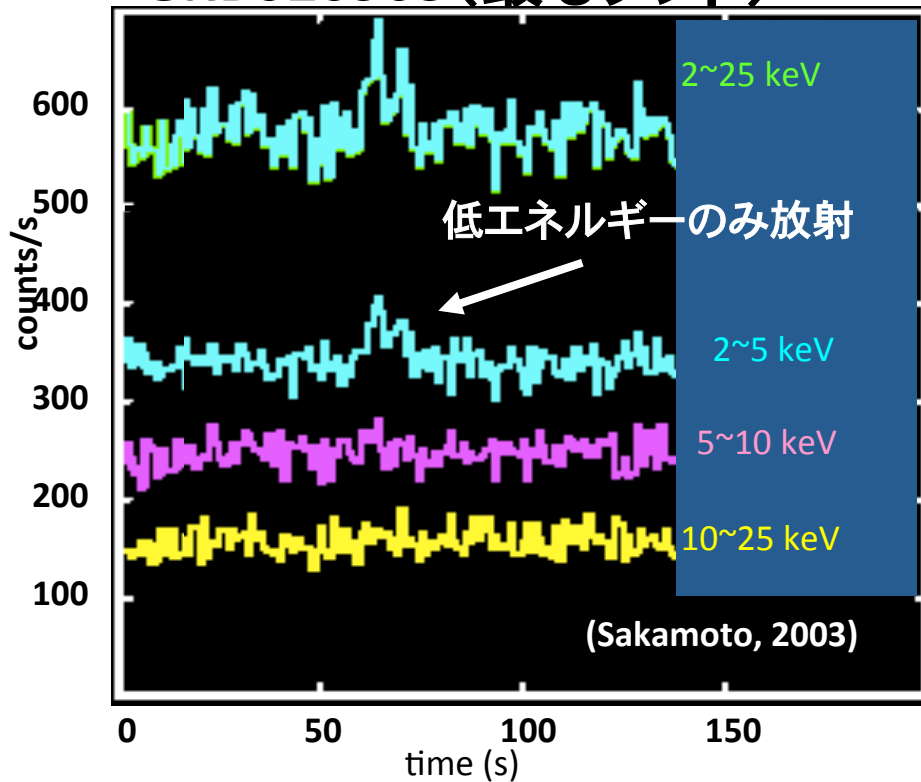
- “Collapsar” ---有力理論モデル
- 星生成銀河、星生成領域に発生
- GRB030329 → 関連が確立



- GRB発生率  
→ 星生成率の指標
- 星一個から発生  
→ 初代星を見られる
- 母銀河を内部から照らす → ISMの元素組成

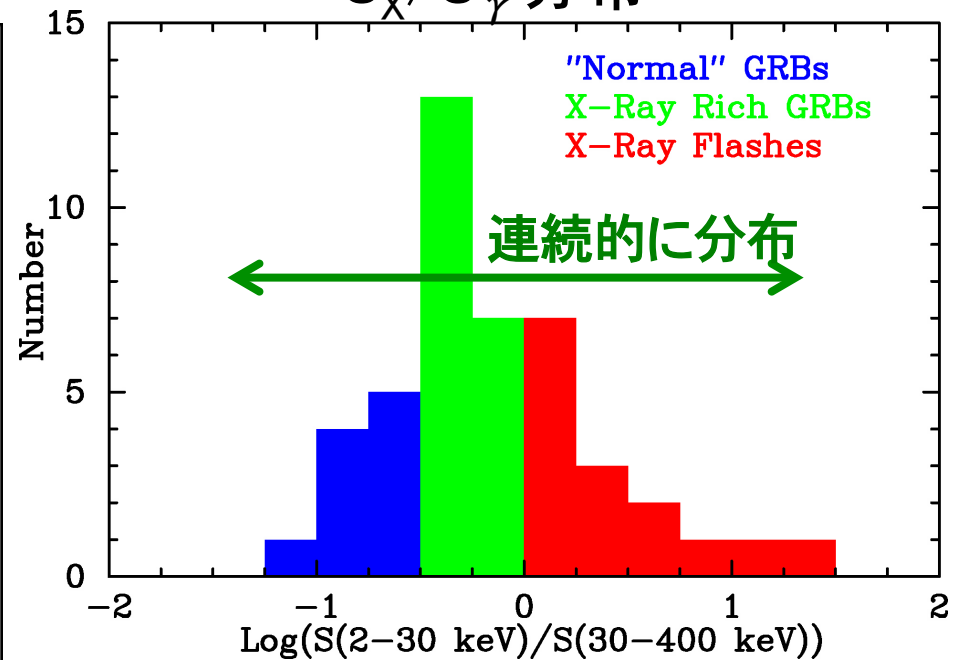
# HETE-2の代表的成果：X線フラッシュの観測

## GRB020903 (最もソフト)



- 可視光残光→母銀河の発見
- 赤方偏移  $z=0.25$
- 起源は普通のGRBと同じ

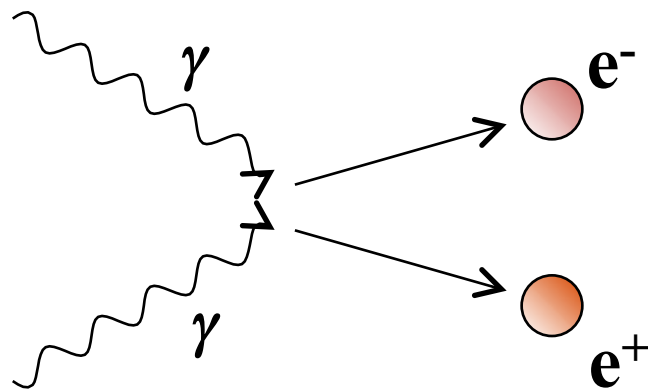
## $S_X/S_\gamma$ 分布



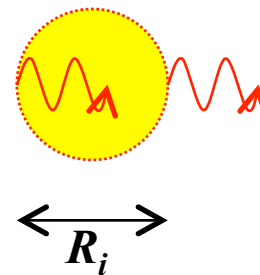
- GRBと本質的に同じ現象
- Swiftでは観測困難  
→ 現在はMAXIが観測

# ガンマ線バーストのコンパクト問題 (Compactness Problem)

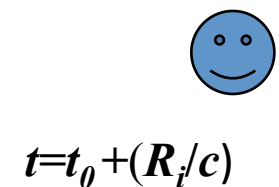
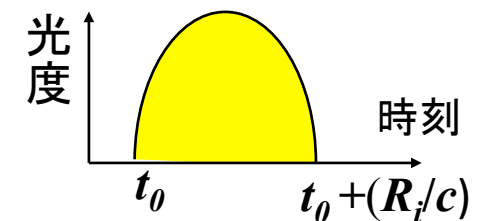
- ガンマ線バーストには、1 MeVを越えるガンマ線が多く含まれている。
- $E > 2m_e$  (電子質量) のガンマ線は、電子陽電子対を生成して消える
- ガンマ線バーストの速い時間変動  
→ 光源が小さい → 光子の密度が高い



電子陽電子対生成



光源の大きさ和时间変動



# ガンマ線バーストのコンパクト問題 (Compactness Problem)

- ガンマ線バーストのエネルギー

$$E = 4\pi D^2 F = 10^{43} \text{ J} \left( \frac{D}{3 \text{ Gpc}} \right)^2 \left( \frac{F}{10^{-10} \text{ J/m}^2} \right)$$

- 電子陽電子対生成

$$\gamma\gamma \rightarrow e^+e^- \text{ if } \sqrt{E_1 E_2} > m_e c^2$$

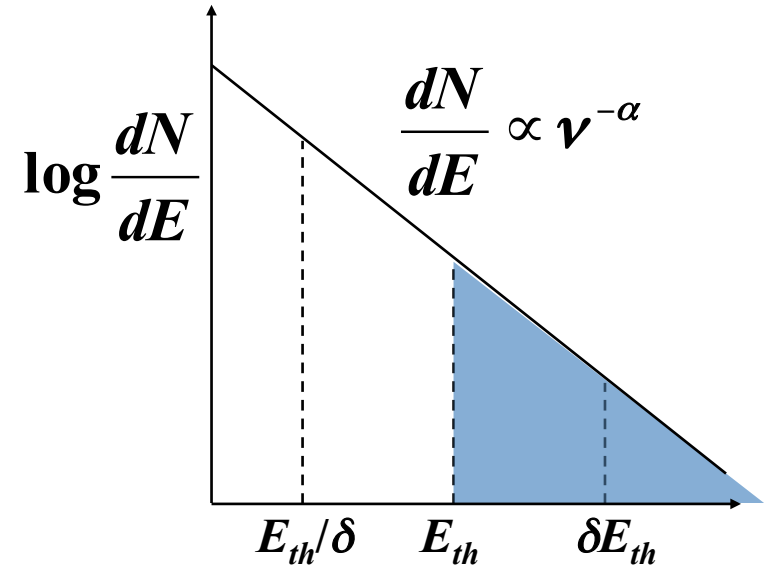
$$\tau_{\gamma\gamma} = f_p \sigma_T \frac{E}{m_e c^2} / 4\pi R_i^2 = \frac{f_p \sigma_T F D^2}{R_i^2 m_e c^2} \quad (\text{Size } R_i < c\delta T \sim 3000 \text{ km})$$

$$= 10^{13} f_p \left( \frac{D}{3 \text{ Gpc}} \right)^2 \left( \frac{F}{10^{-10} \text{ J/m}^2} \right) \left( \frac{\delta T}{10 \text{ ms}} \right)^2$$

- 対生成の確率がとても大きい  
→ガンマ線は出てこられない

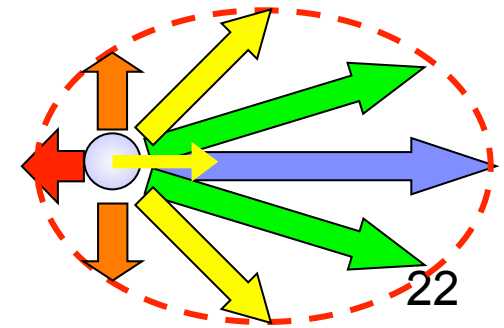
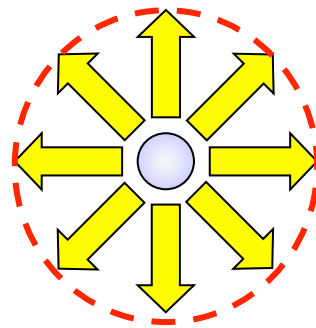
# コンパクト問題の解決法： 相対論的運動 (*Relativistic Motion*)

- 光子のエネルギー:  $h\nu_{obs} / \delta$ 
  - 対生成できる閾値エネルギーを超える光子が減る
    - $f_p \times \delta^{1-\alpha}$



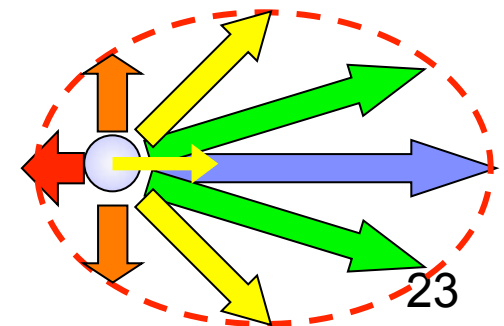
- 相対論的ビーミング:

$$L_s = \delta^4 4\pi D F^2$$



# 相対論的ビーミング (*Relativistic Beaming*)

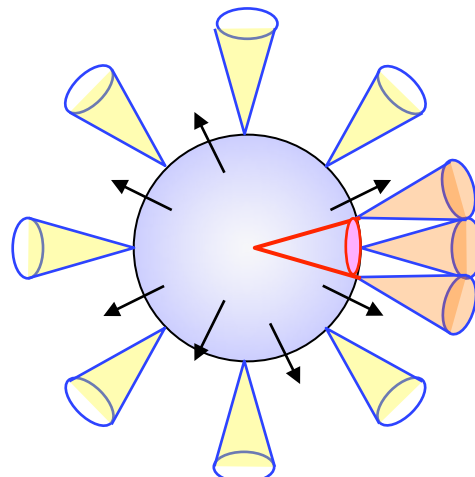
- 輻射源の固有系での時間間隔:  $\Delta t_s$
- 観測される時間間隔:  $\Delta t_{\text{obs}}$   $\Delta t_{\text{obs}} = \Delta t_s / \delta$
- ビーミング因子:  $\delta = \frac{1}{\Gamma(1 - \beta \cos \theta)}$ 
  - ◆  $\theta$  の減少関数 ( $\cos \theta = \beta \rightarrow \delta = \Gamma$ ,  $\theta = \pi/2 \rightarrow \delta = 1/\Gamma$ )
  - ◆ 相対論的速度で運動する光源から放出された光が源の運動方向に集中する割合を示す。



# 相対論的ビーミングの効果

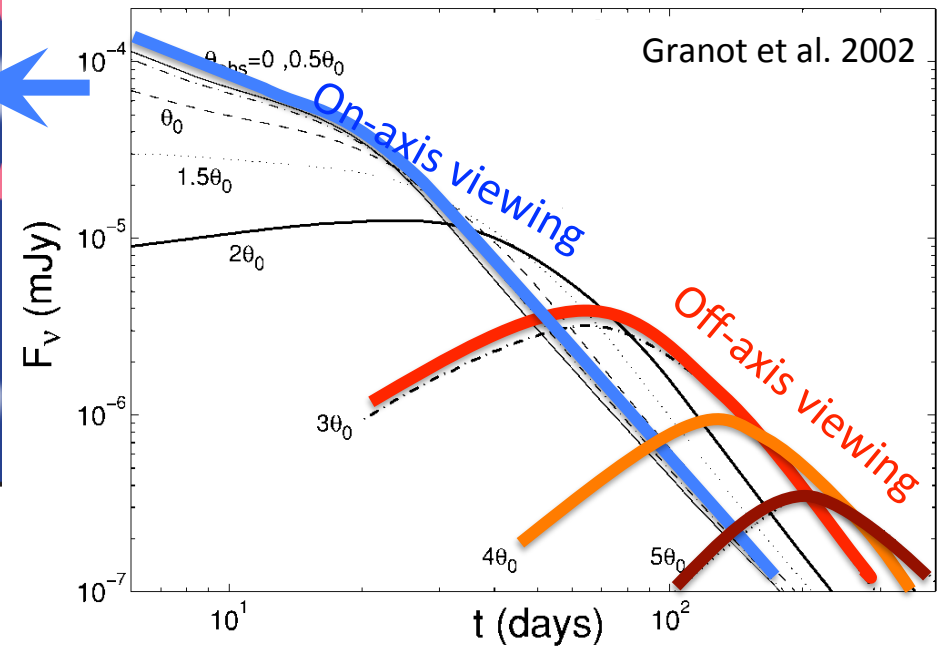
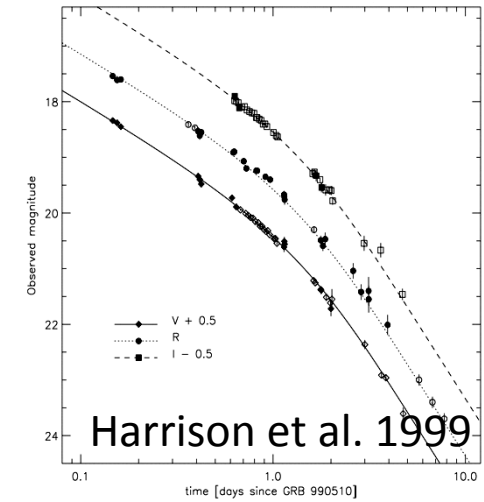
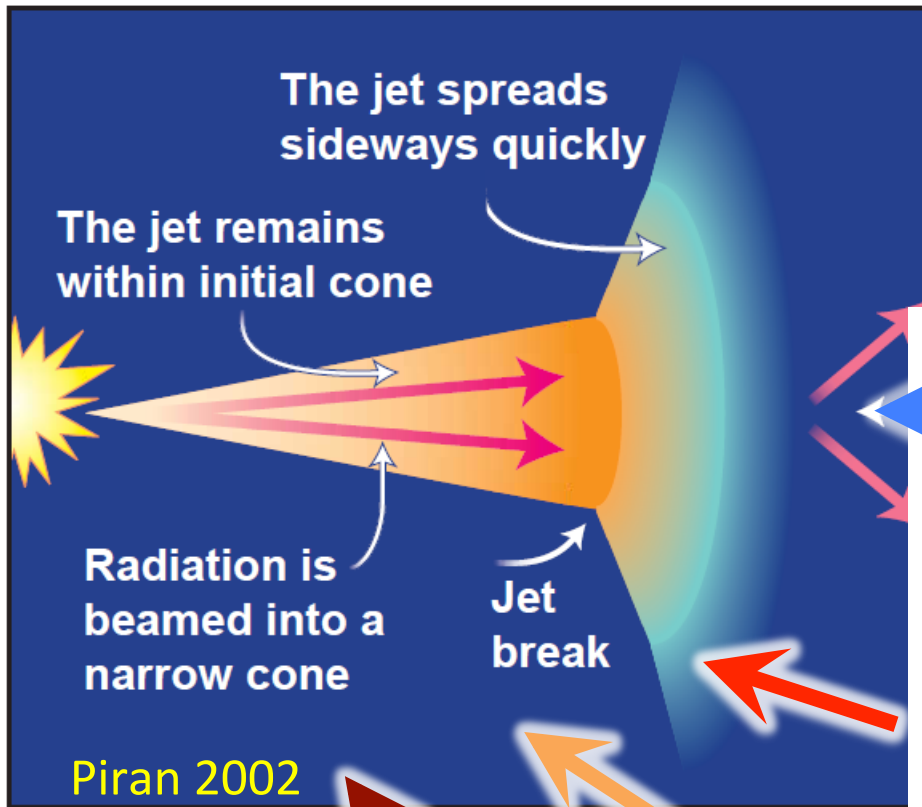
## *(Relativistic Beaming)*

- 時間尺度が縮む ( $\times \delta^{-1}$ )
- 光子一つ一つのエネルギーが高くなる ( $\times \delta^1$ )
- 放射流束(フラックス)が強くなる ( $\times \delta^4$ )
- 放射が狭い角度内 ( $\theta < \Gamma$ ) に集中する
  - ◆ 放射源が球対称に膨張していても、観測できるのは、 $\delta$  が大きい、視線方向に運動している狭い角度内の部分のみ





# ジェット・ブレーク



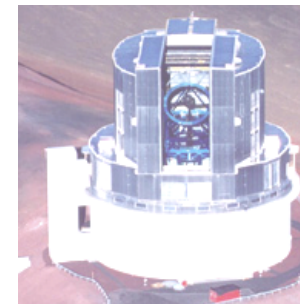
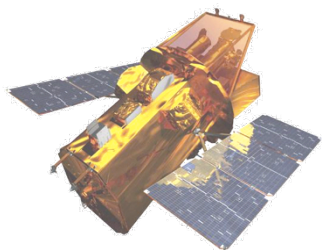
Jet Break:  $\Gamma \approx 1/\theta$

# ガンマ線バーストの火の玉モデル



内部  
エンジン

# 高赤方偏移GRB



現在

太陽系の形成

銀河の進化

宇宙が透明に  
再電離の完了

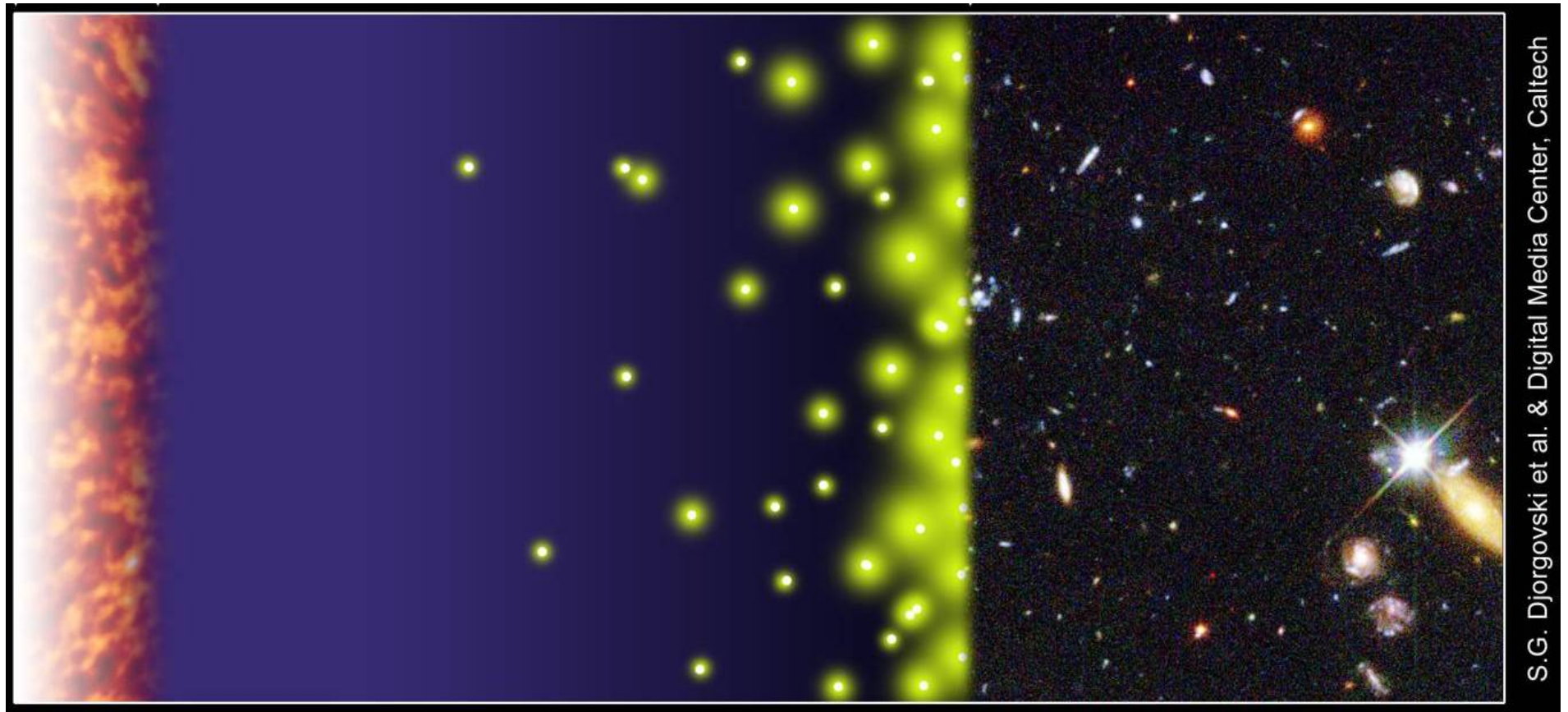
再電離の開始  
宇宙最初の星

暗黒時代

宇宙の中性化

電離した火の玉

ビッグバン



40万年

2億～5億年

9億年

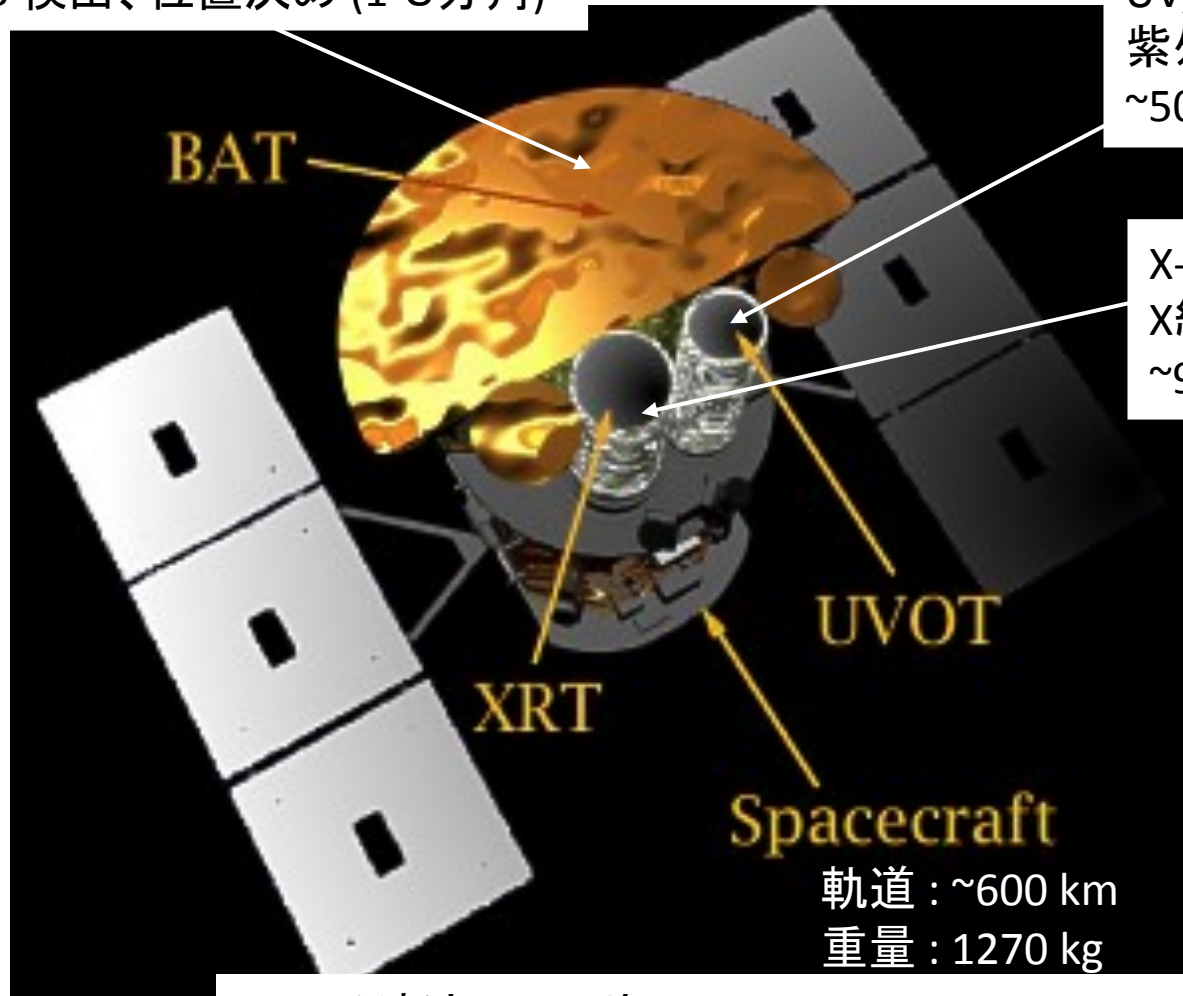
90億年

137億年

宇宙の年齢

# Swift 衛星 (2004—)

Burst Alert Telescope (BAT)  
GRB 検出、位置決め (1-3分角)



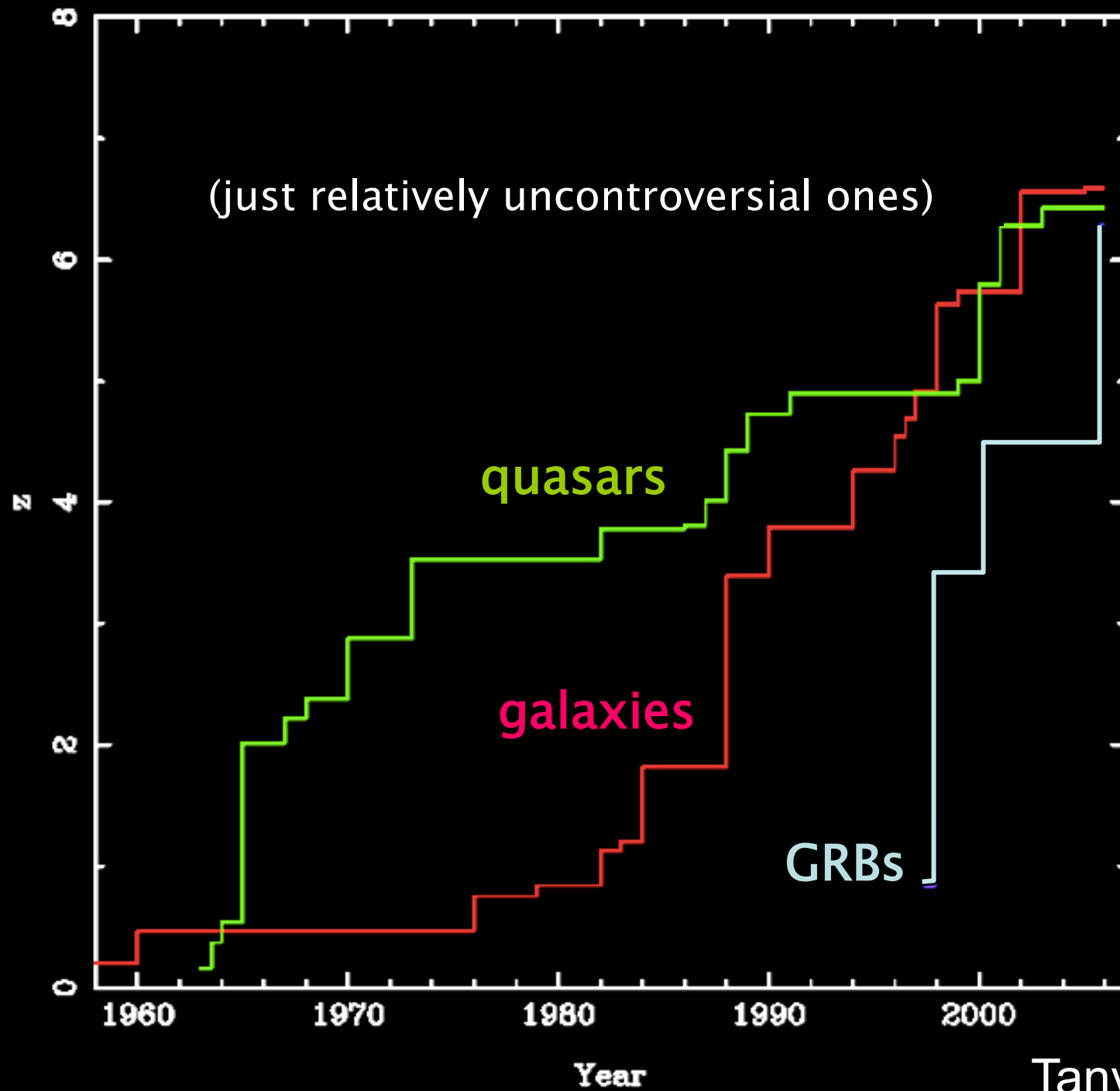
UV/Optical Telescope (UVOT)  
紫外線/可視光残光観測 (0.5")  
~50% GRB に可視光残光

X-Ray Telescope (XRT)  
X線残光観測 (~ 5 秒角)  
~90% GRB に X線残光

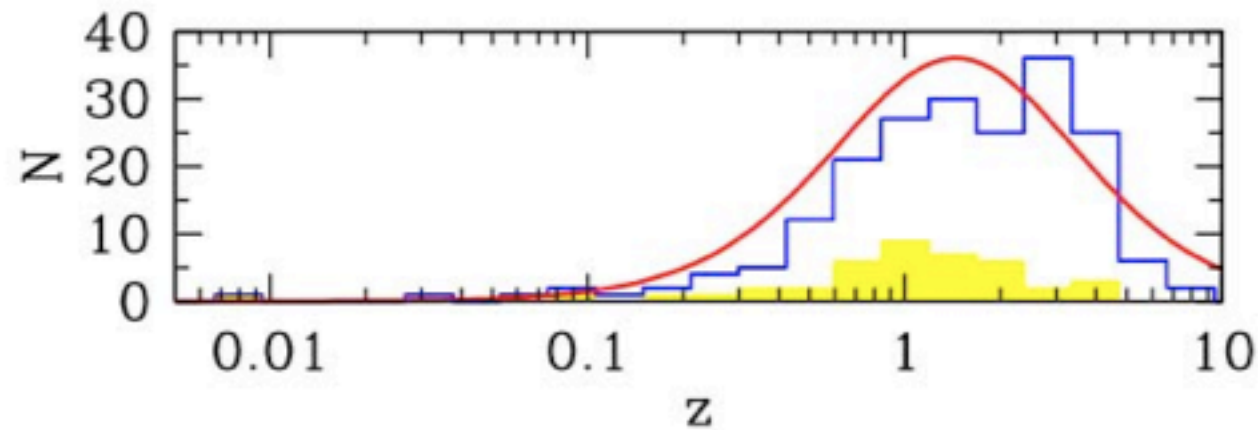
軌道 : ~600 km  
重量 : 1270 kg

BAT 以外は XMM や Spectrum X-gamma の  
スペアー品や同じデザインで製作

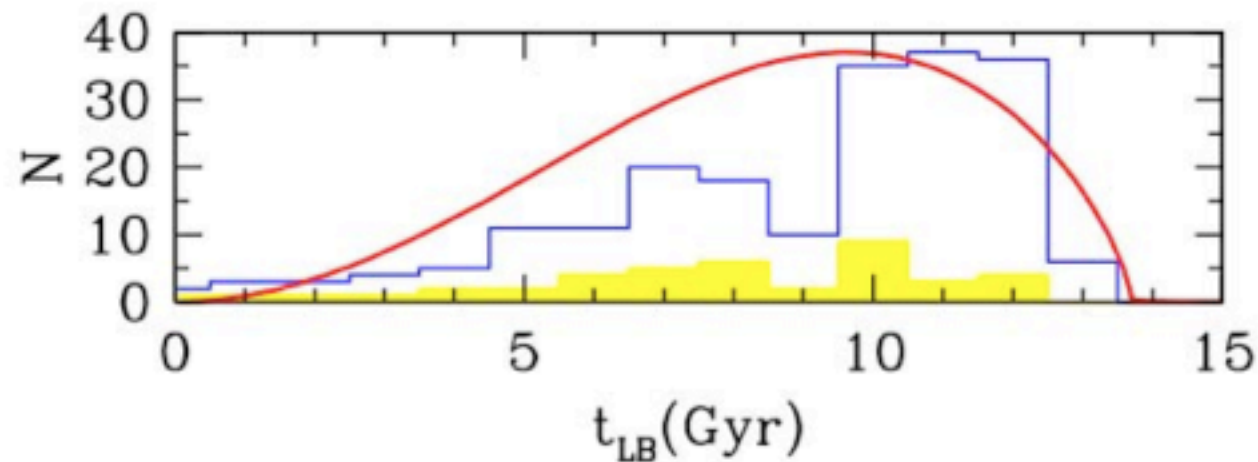




# 500 GRBs 158 Redshifts

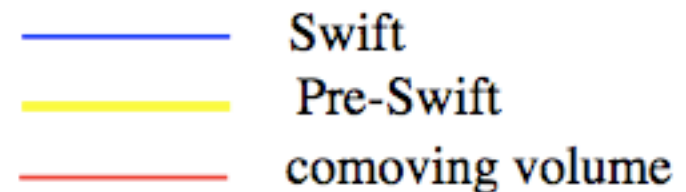


redshift



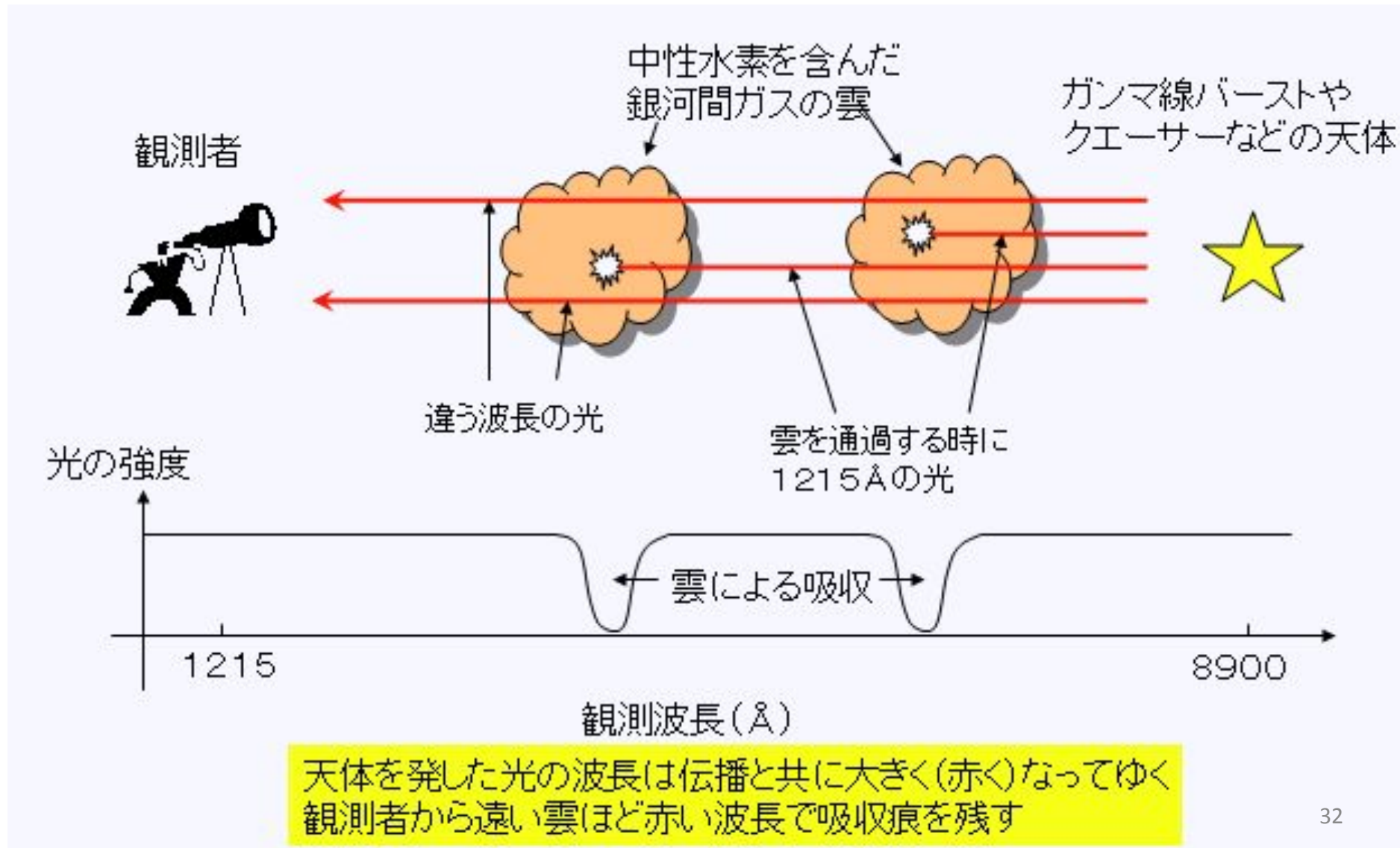
look-back time

NG, Ramirez-Ruiz & Fox 2009

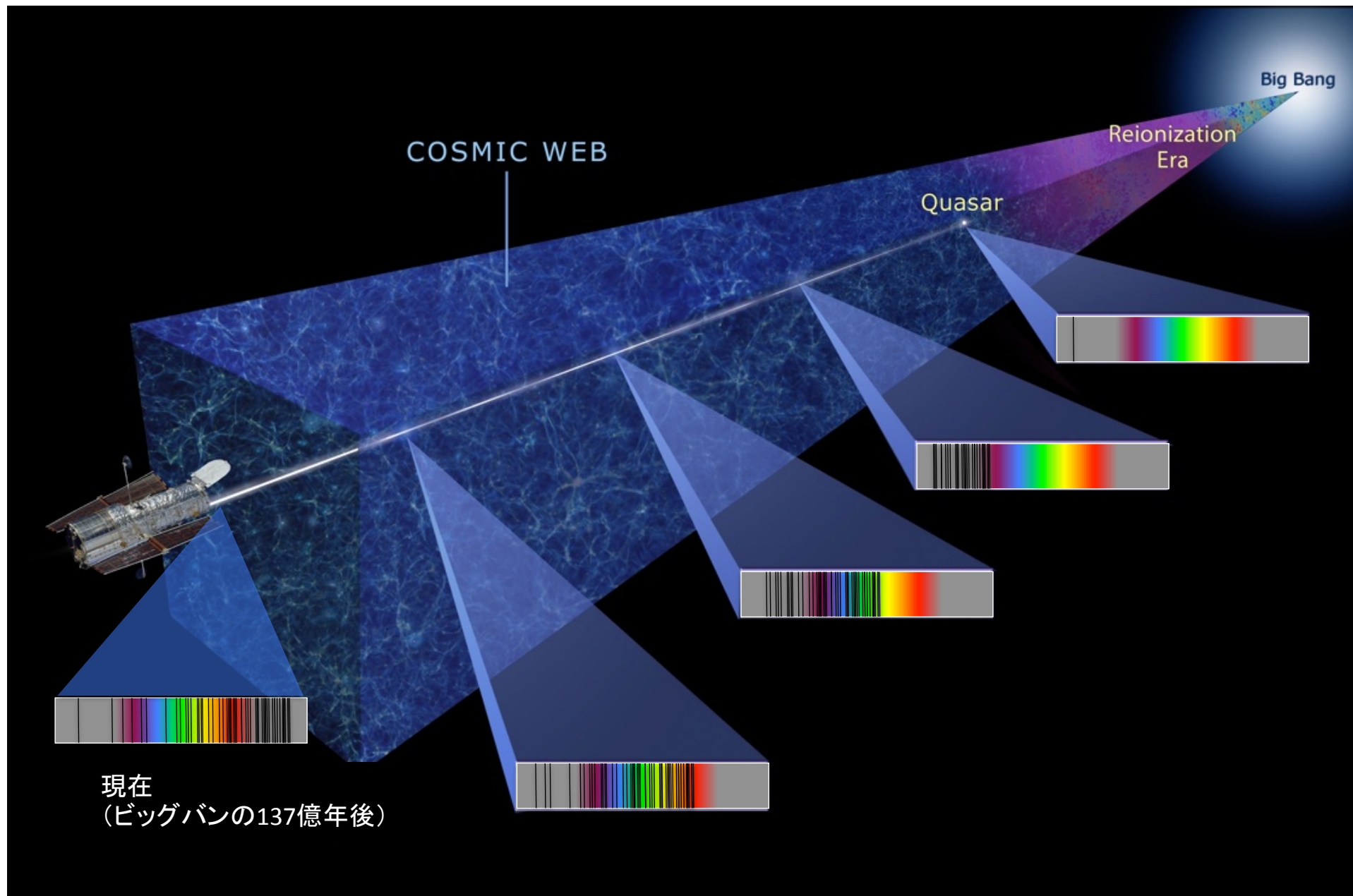


# 距離の決定法

銀河間ガス(水素)によるライマン $\alpha$ 線吸収を利用

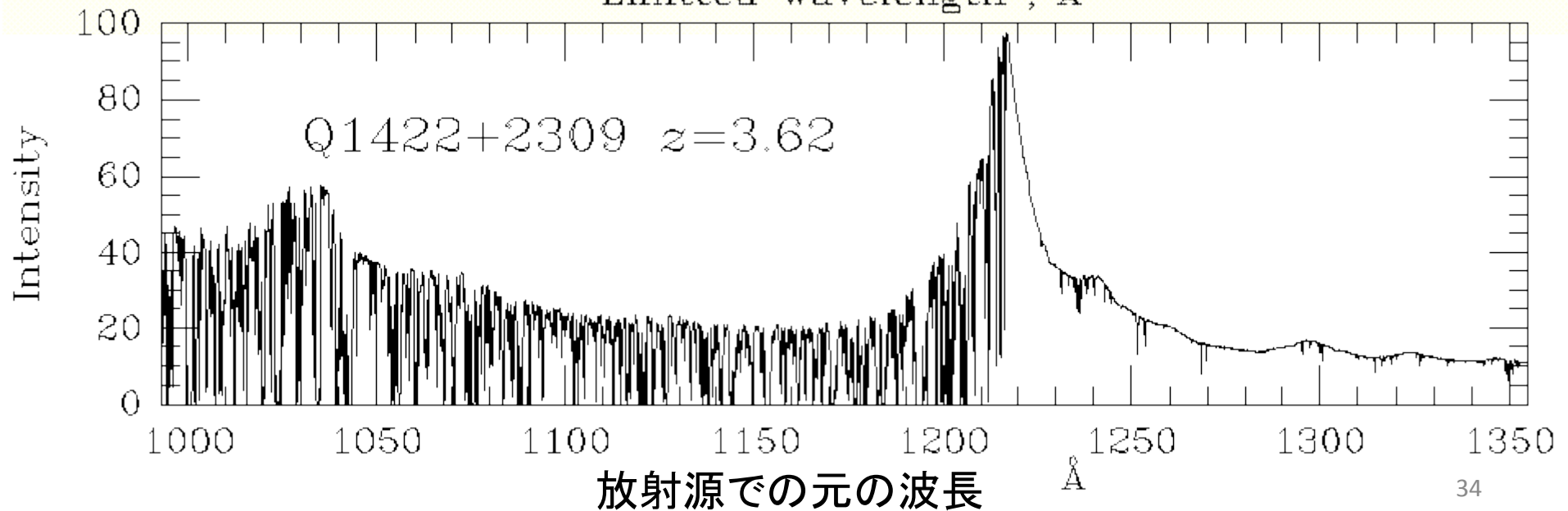
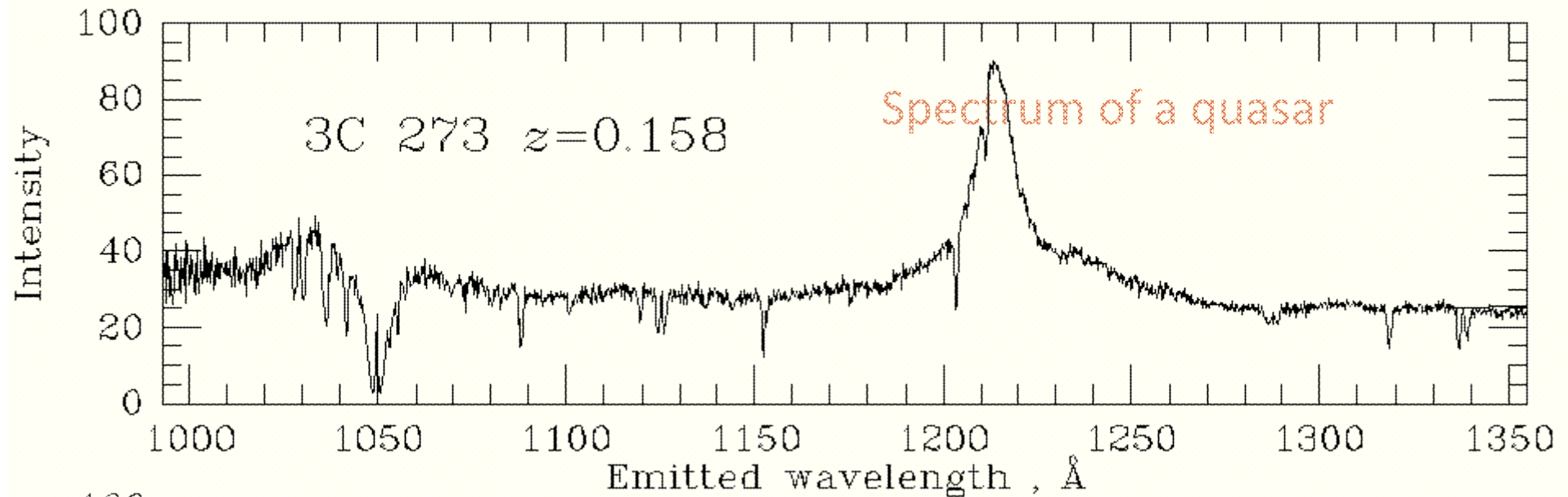


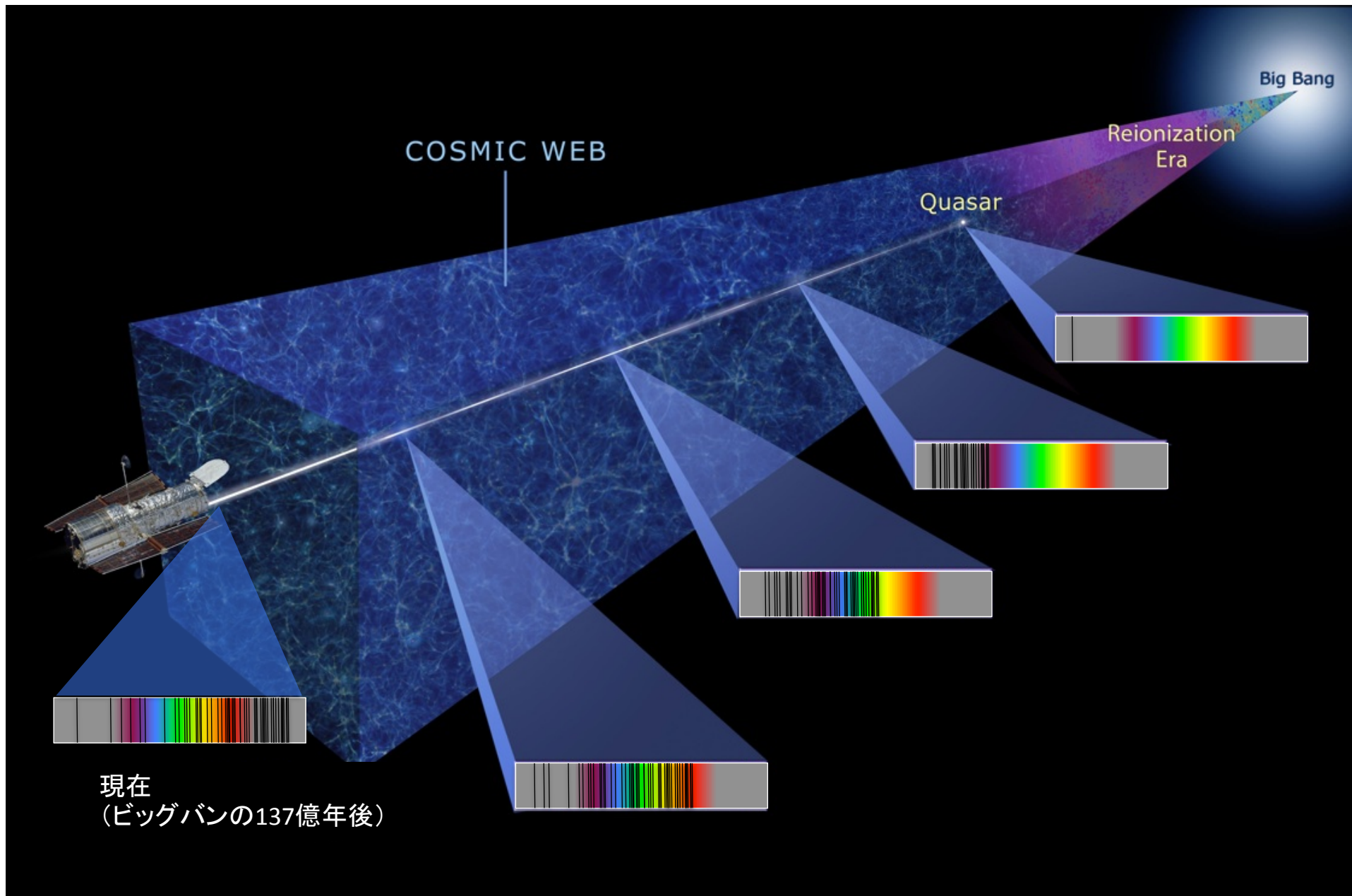


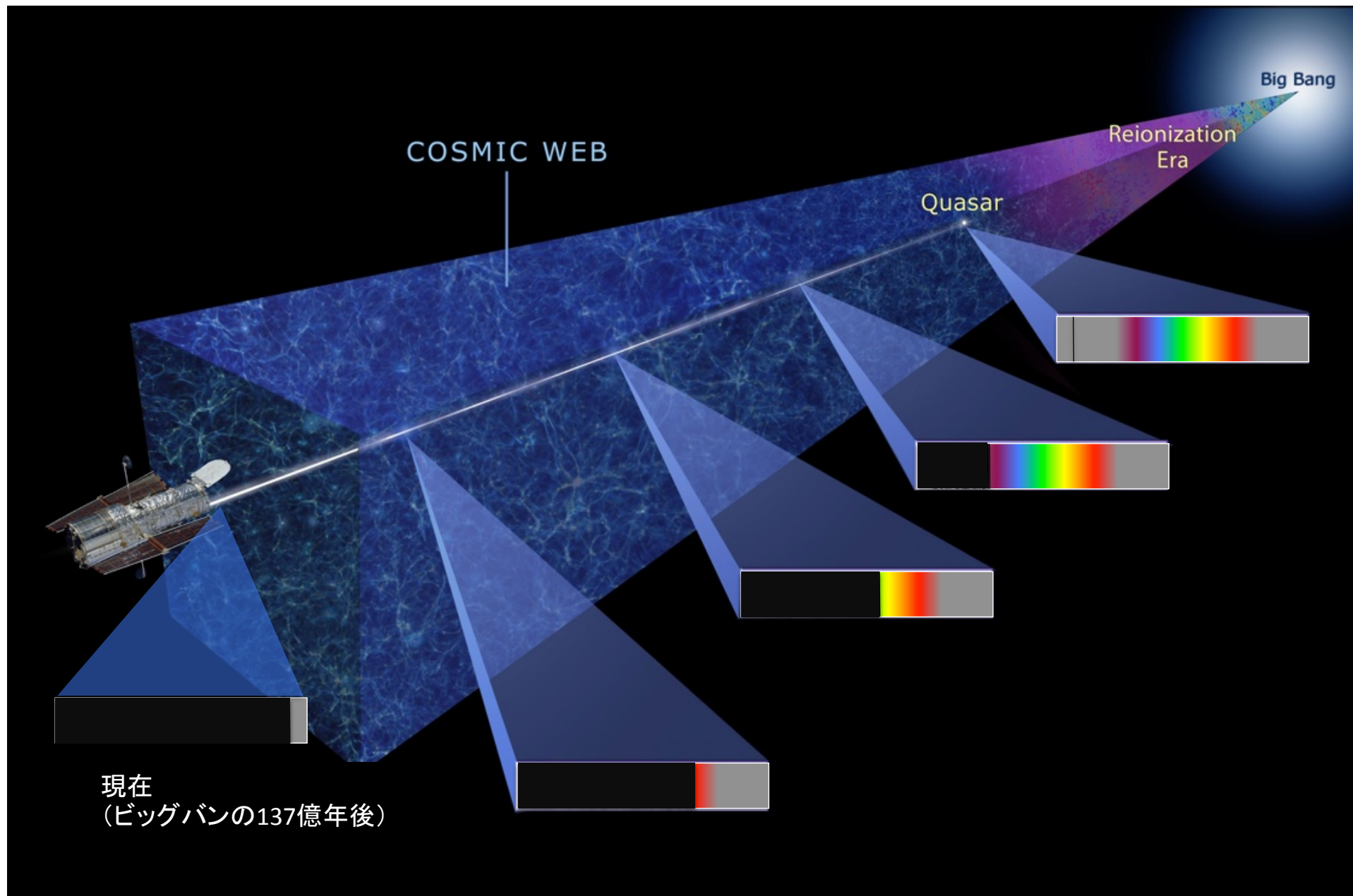


# The Lyman Forest ライマンαの森

<http://www.astr.ua.edu/keel/agn/>





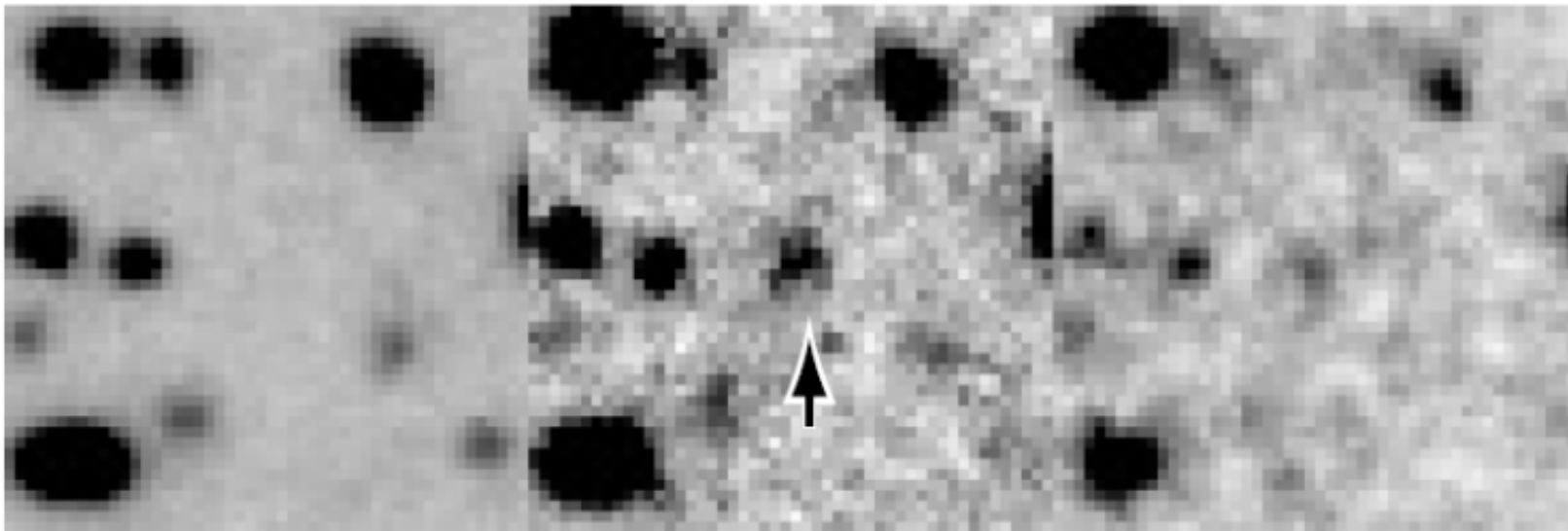


# 実例@ $z=5$ with すばる

Vバンド(550nm)

Iバンド(800nm)

$z'$ バンド(930nm)



ES1:  $z=5.19$

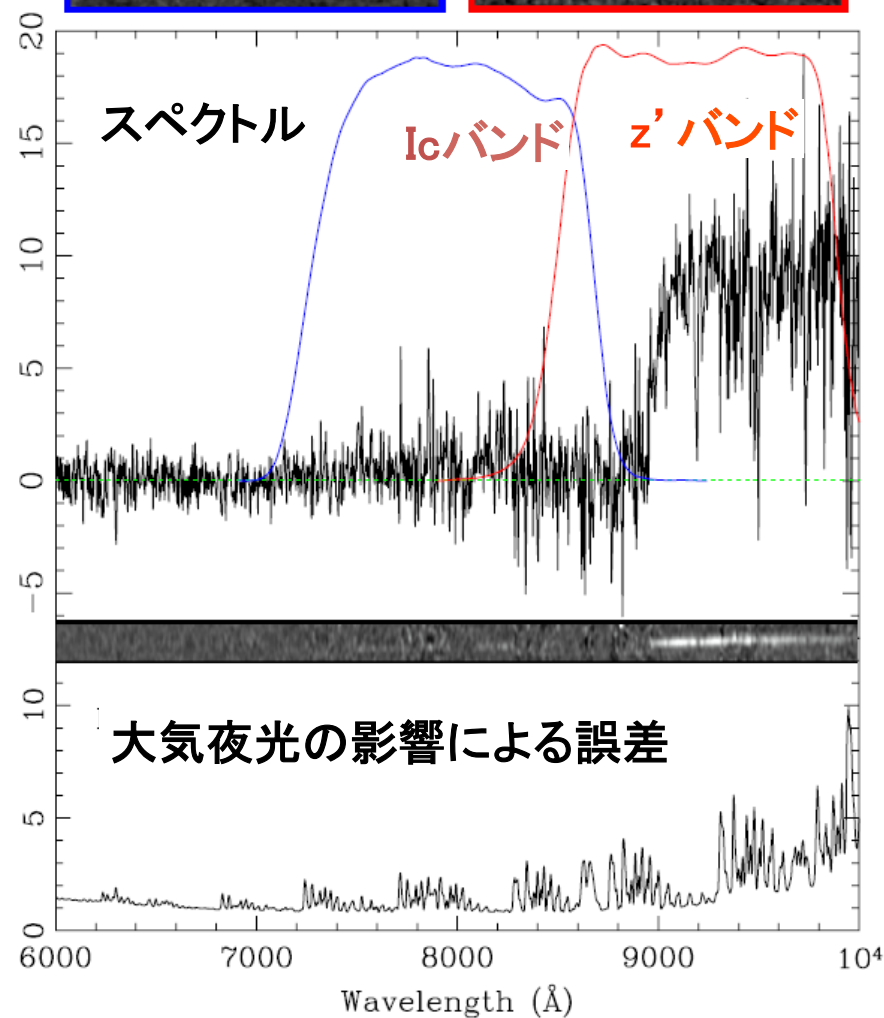
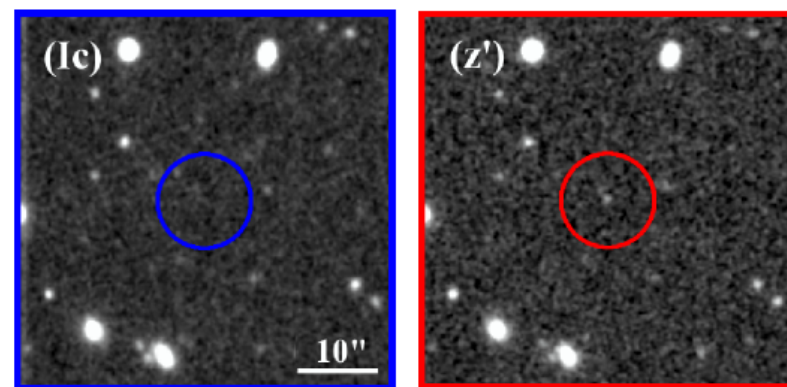
$I_c = 24.41$ ,  $V-I_c > 3.59$ ,  $I_c-z' = 0.37$

Iwata, Ohta, et al. PASJ 55, 415 (2003)

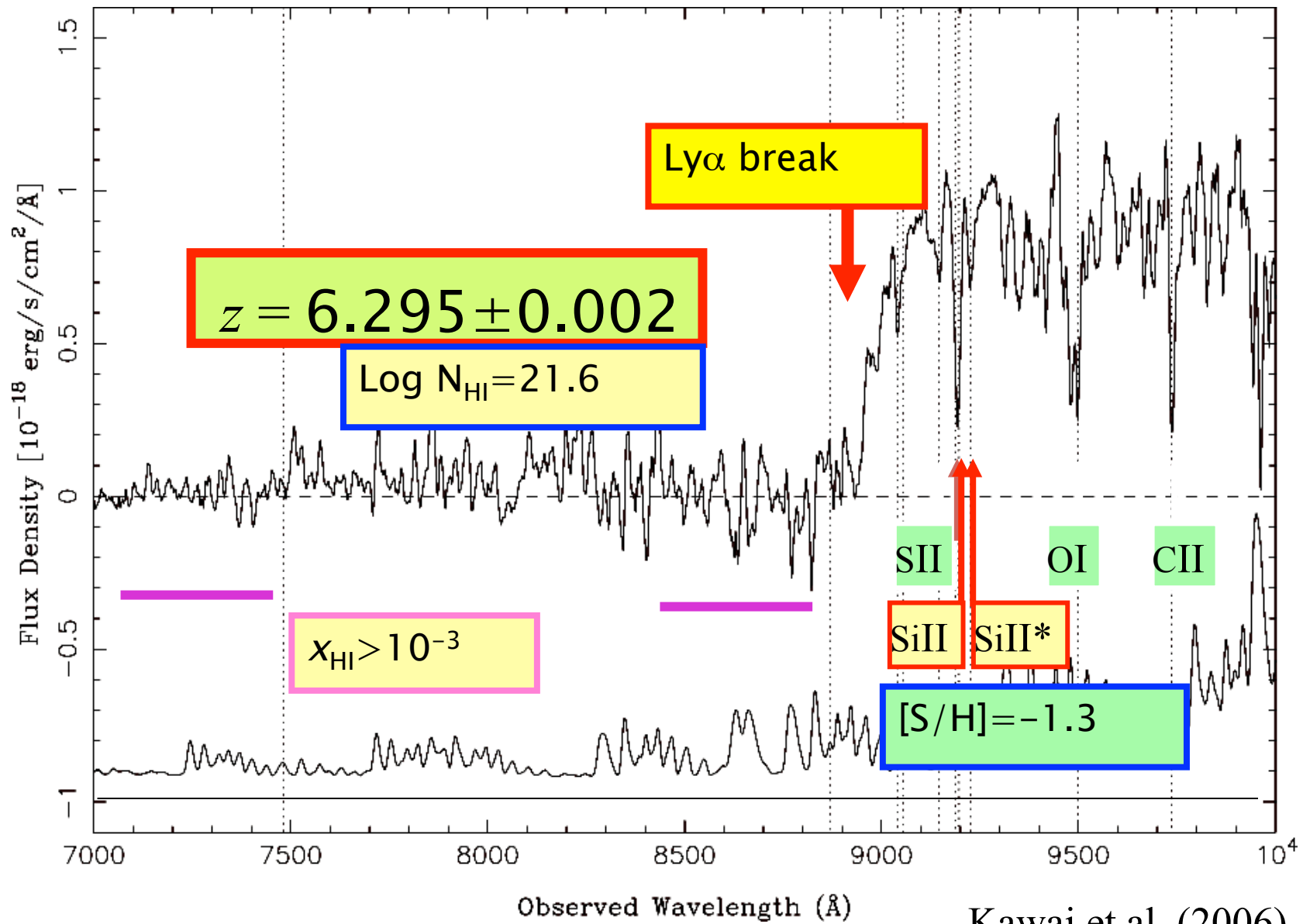
すばる望遠鏡による成果:  
z=6.3 ガンマ線バーストの  
残光分光観測



すばる 8.2 m 望遠鏡  
国立天文台,  
ハワイ マウナケア山頂



# GRB 050904 at t=3.4 d

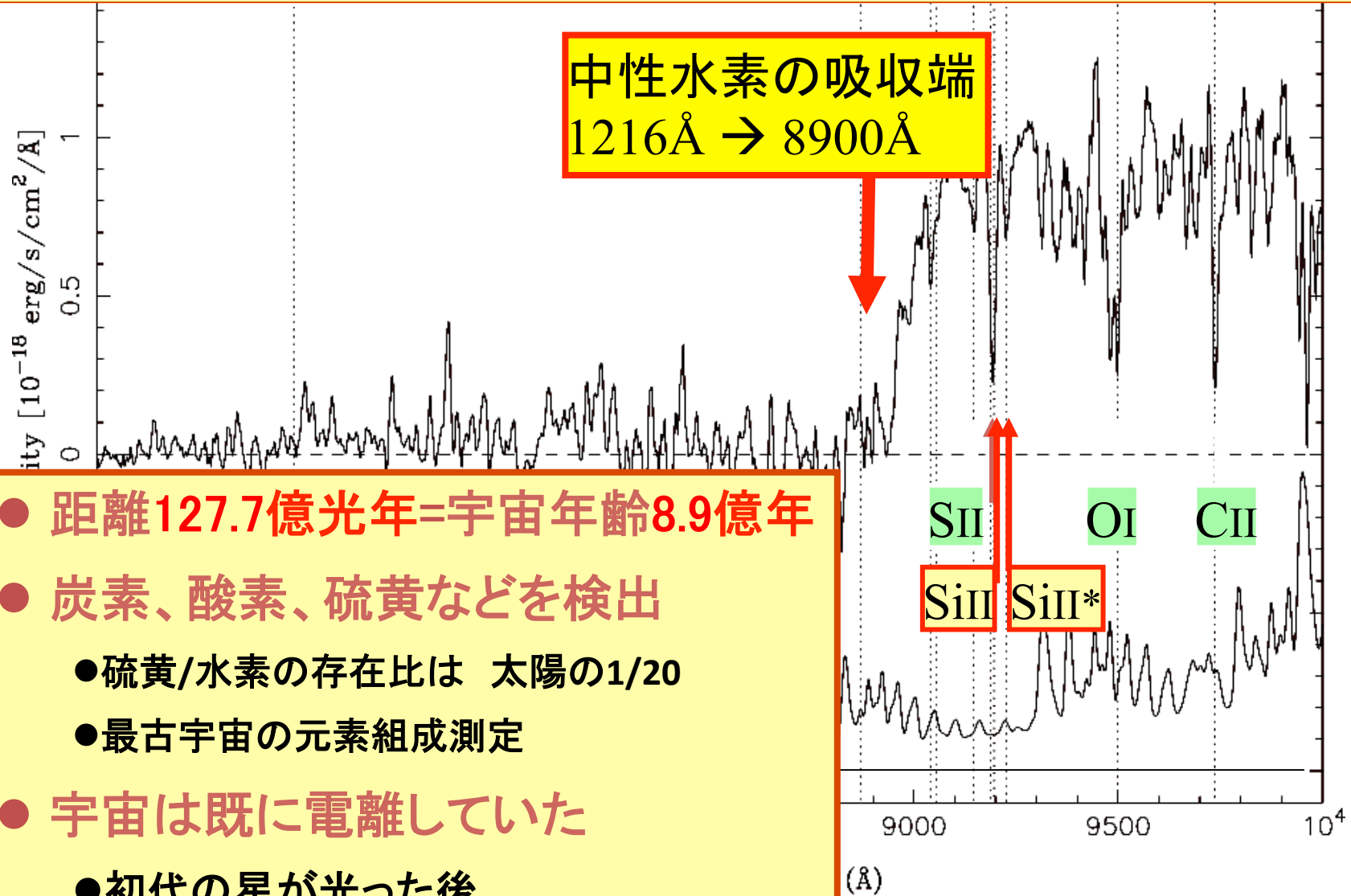


Subaru FOCAS 4.0 hrs,  $\lambda/\Delta\lambda \approx 1000$

Kawai et al. (2006)

Totani et al. (2006)<sup>39</sup>

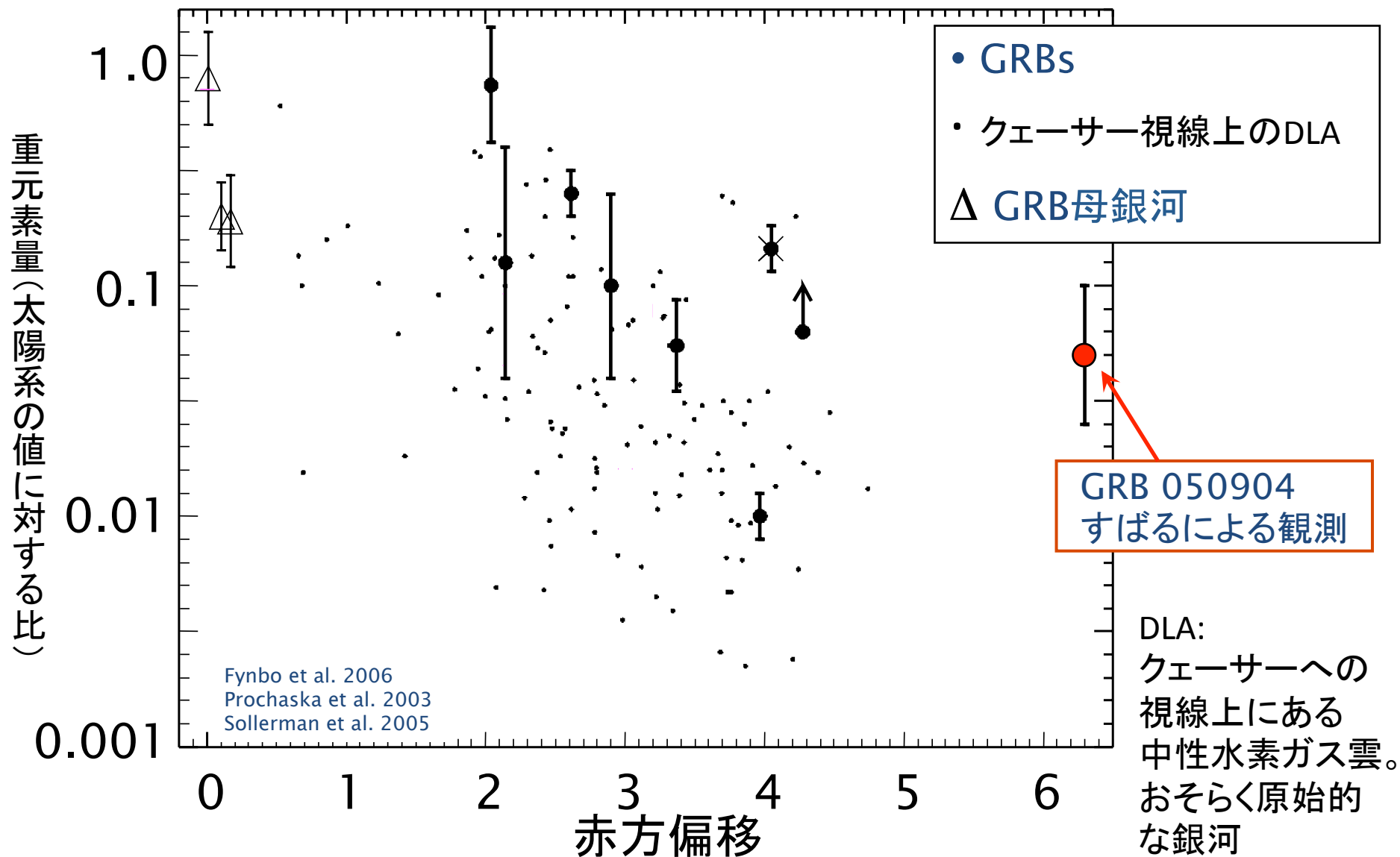
# すばる望遠鏡で観測した 観測史上最遠GRBの残光のスペクトル



Subaru FOCAS 4.0 hrs,  $\lambda/\Delta\lambda \approx 1000$  (Kawai et al., 2006)



# 重元素量 vs. 赤方偏移

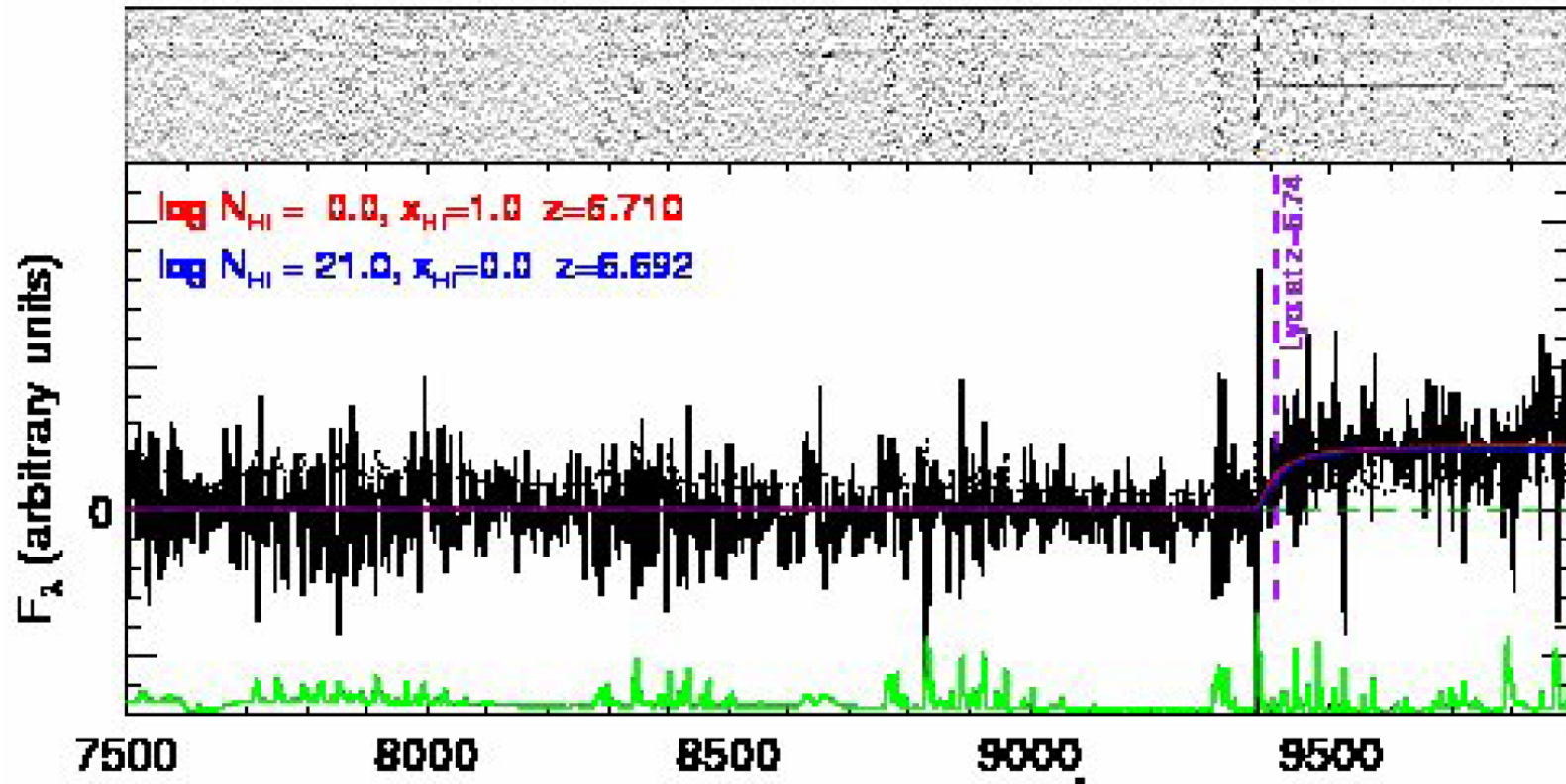


# ガンマ線バーストでわかること

- 一番最初の星ができたのはいつか？（いつ爆発した？）
- 宇宙で星が輝き始めたのはいつか？
- 宇宙の重元素いつできて、どのように広がったか？

# GRB 080913

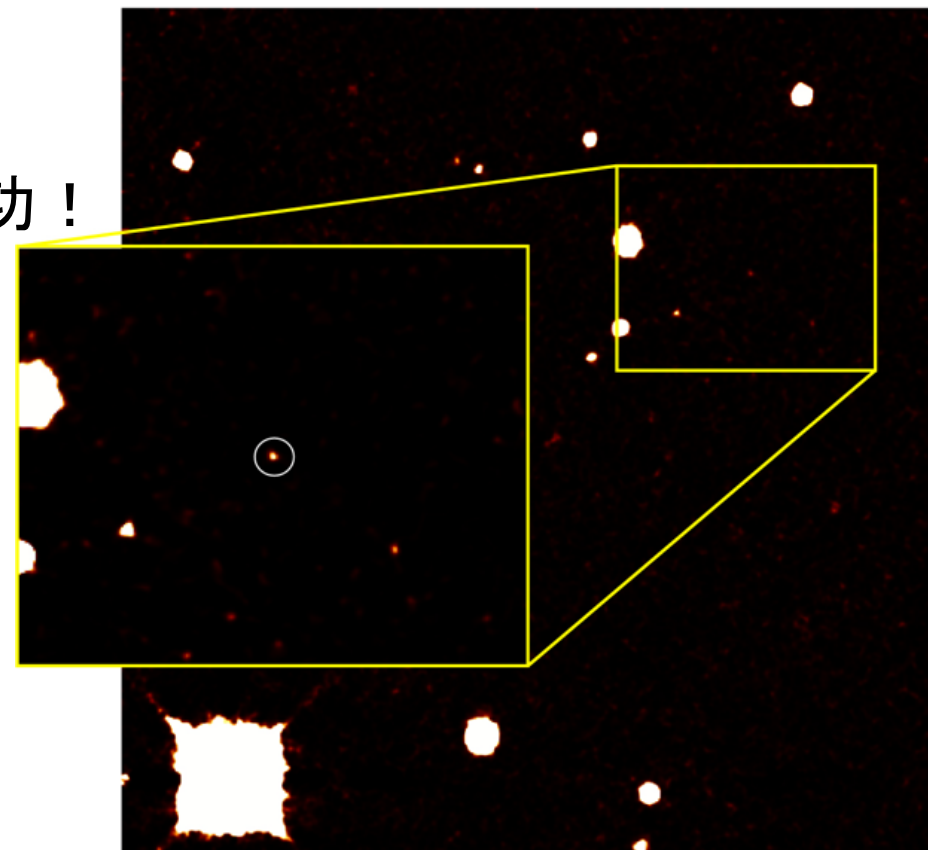
3年ぶりに記録更新:  $z=6.7$   
128.4億光年  
しかし、残光は暗かった



VLT/FORS2 2400sec Greiner et al. 2009

# GRB 090423

- 圧倒的に記録更新:  $z=8.2$   
130.4億光年
- 岡山188cm望遠鏡で撮像に成功！

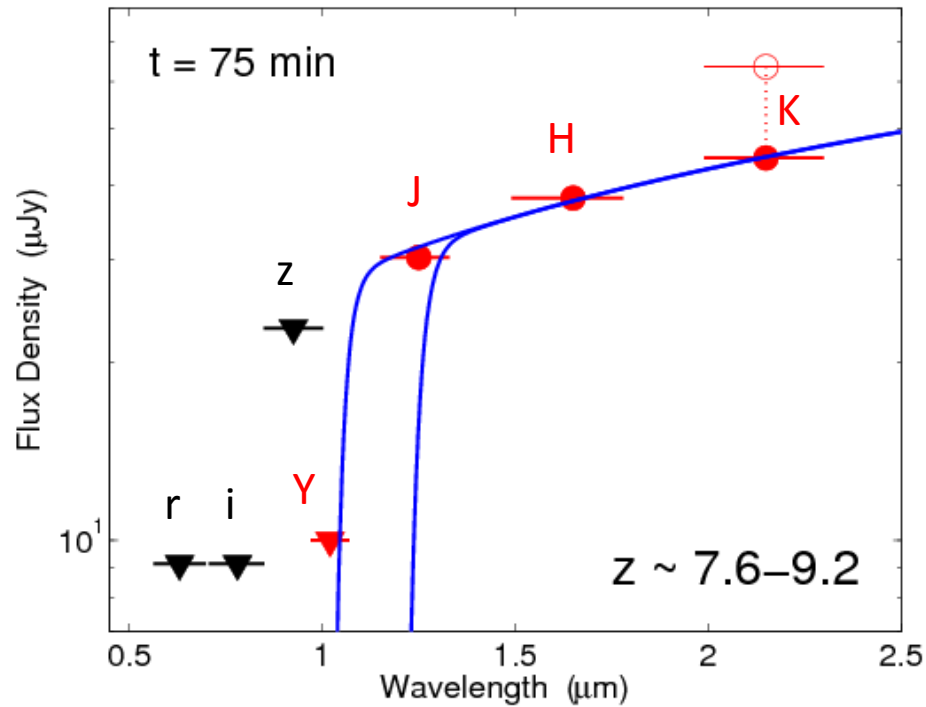


OA0-ISLE J band

国立天文台 岡山天体物理観測所



# 最高赤方偏移の証拠



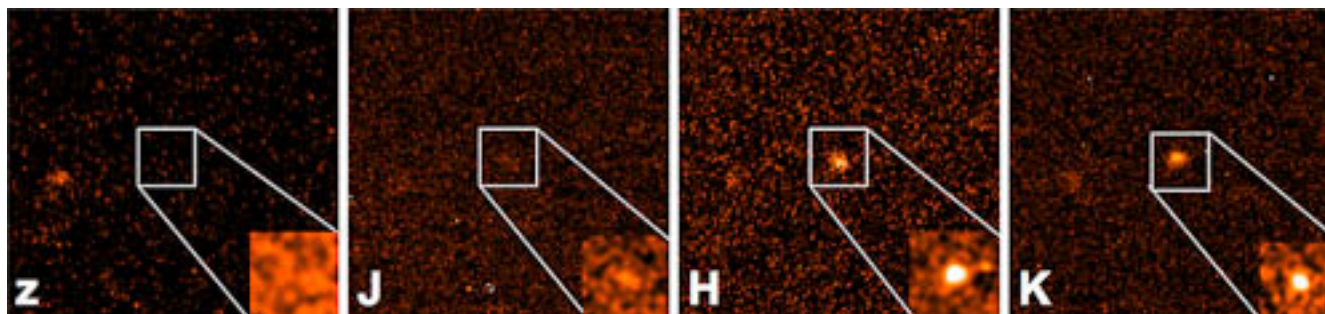
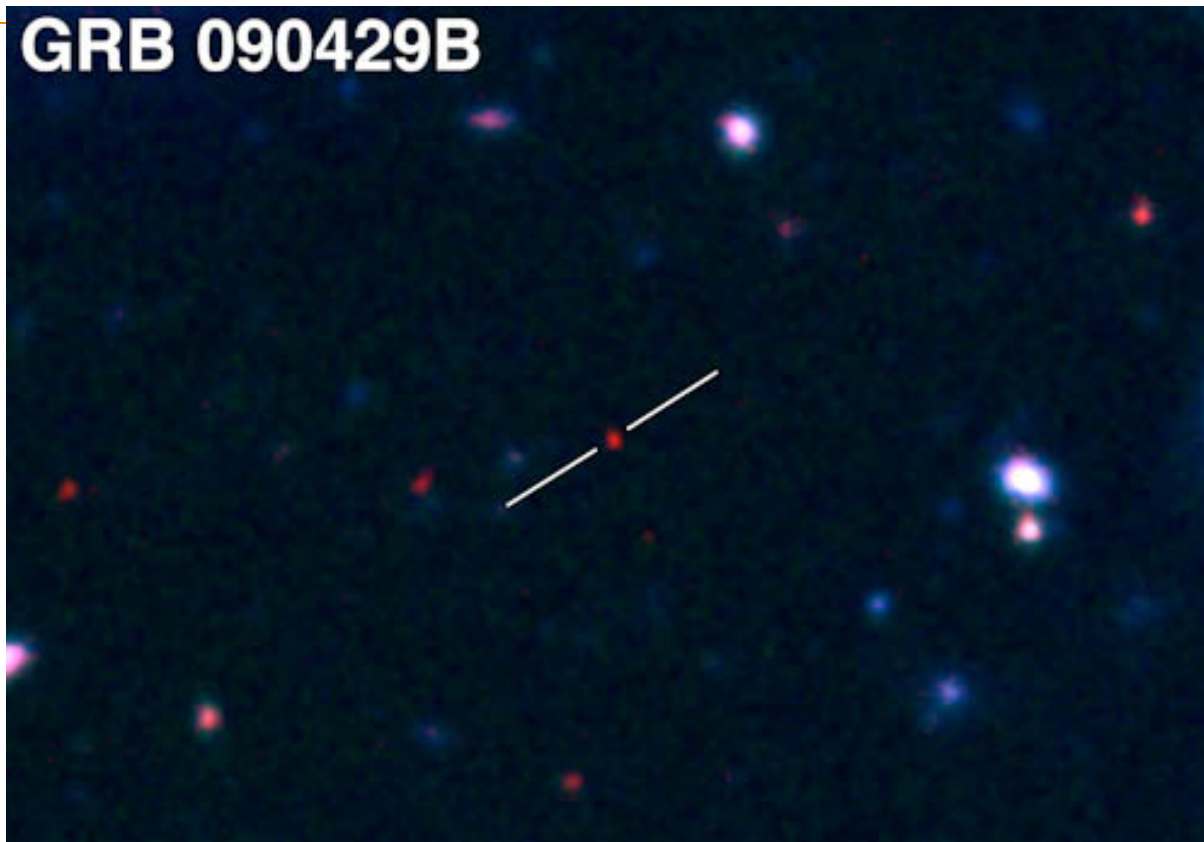
ジェミニ望遠鏡 (ハワイ マウナケア山頂)

Berger et al.



# 最高記録 $z=9.4!$ (131.4億光年)

GRB 090429B



現在

太陽系の形成

銀河の進化

宇宙が透明に  
再電離の完了

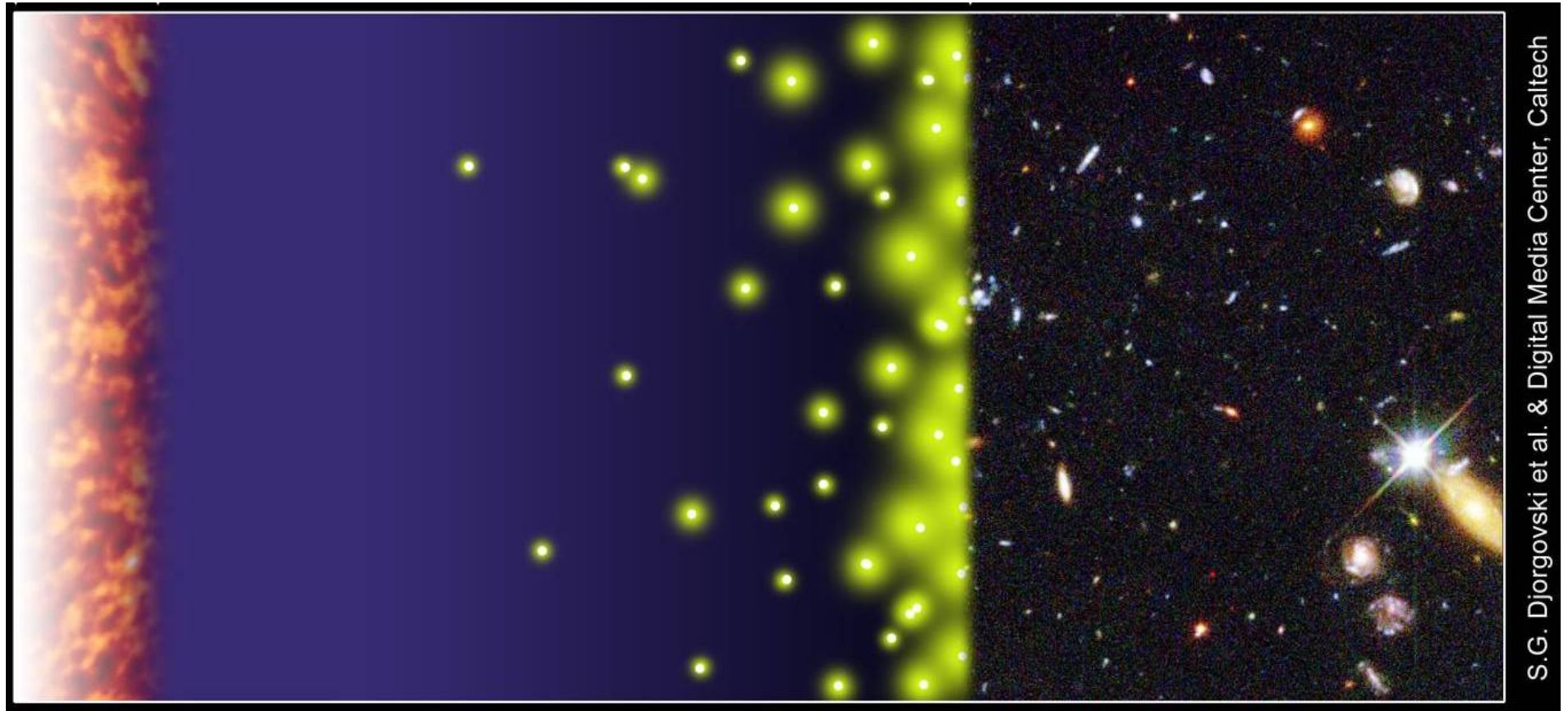
再電離の開始  
宇宙最初の星

暗黒時代

宇宙の中性化

電離した火の玉

ビッグバン



40万年

2億~5億年

9億年

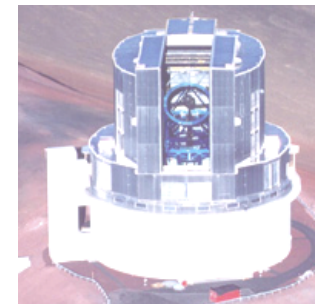
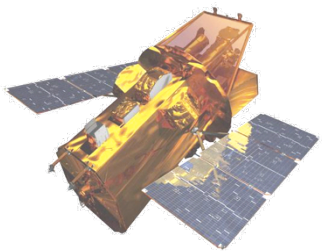
90億年

137億年

宇宙の年齢

# GRB母銀河の金属量

(と大量絶滅?)





Fruchter et al. 2006

980613

980703

981226

990123

990506

990510

990705

990712

991208

991216

000131

000301c

000418

000926

- GRBは銀河の中の最も明るいところで集中的に発生  
(cf. 重力崩壊型超新星はだいたい明るさに比例)

010222

010904

011030

011121

011211

020107

020305

- GRB 母銀河は超新星母銀河より小さくて不規則形

- → GRBは低金属環境の大質量星から発生

020322

020331

020405

020410

020427

020813

020903

021004

021211

030115

030323

030329

040924

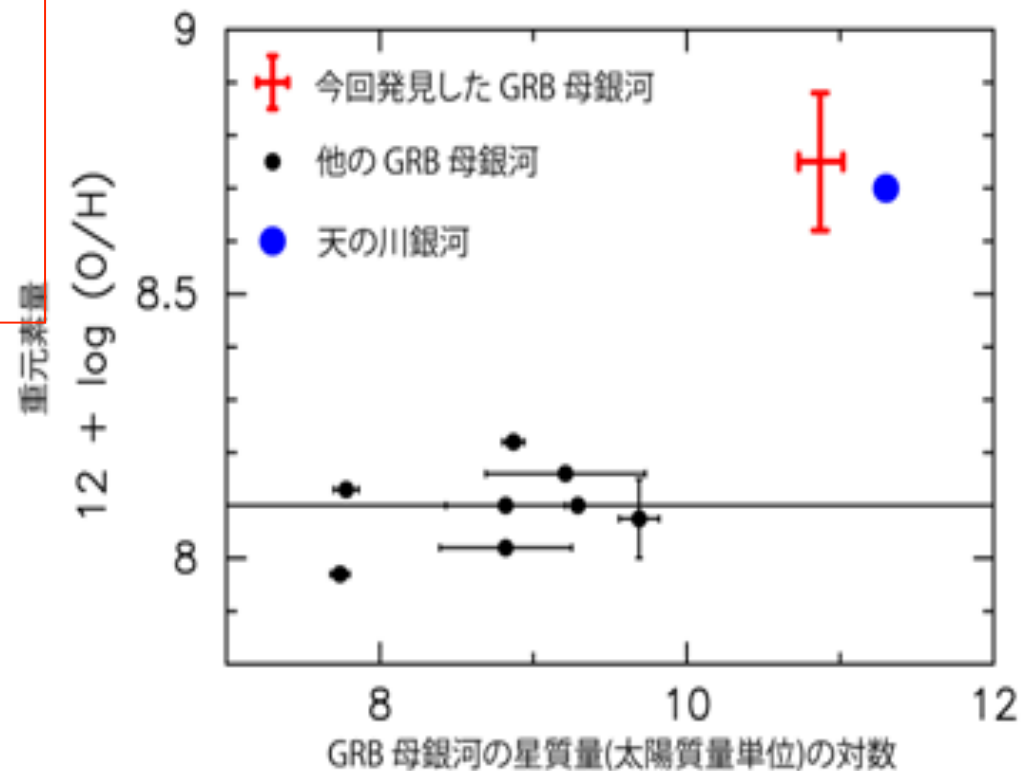
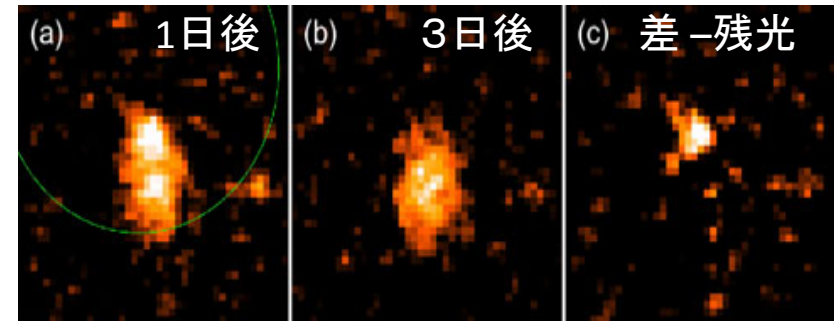
041006

# すばる望遠鏡による成果： ダークGRBの母銀河

- GRB 080325
  - ◆ すばる望遠鏡で赤外残光を発見
  - ◆ 翌年に母銀河を6色撮像
    - 赤方偏移 1.9
    - 質量～天の川とほぼ同じ
    - 重元素量が多い



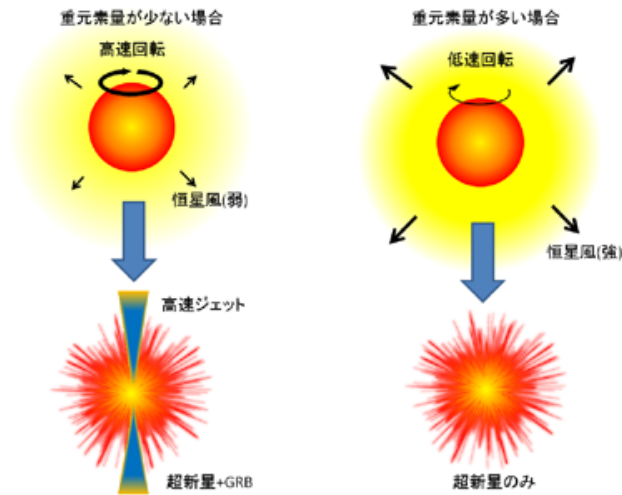
- GRB母銀河の一般的特徴
  - 小さい
  - 重元素が少ない



(Hashimoto et al., 2010)

# ガンマ線バーストの起源の新しい観測的証拠

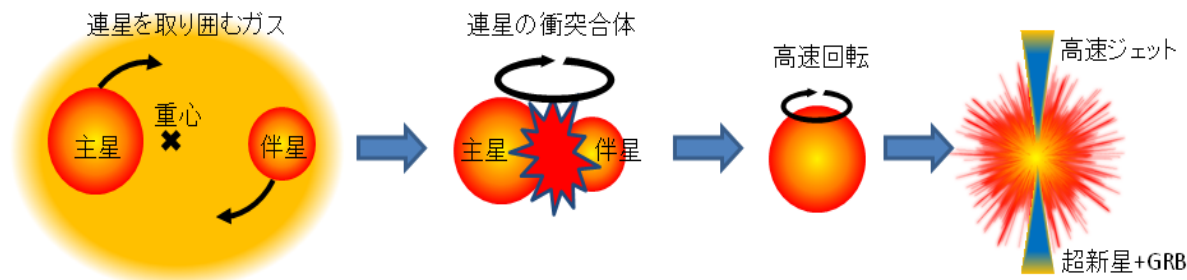
## 標準的描像：重元素の少ない単独星



さまざまな意義

- GRBの種族
- GRBの頻度
- ジェット機構
- ...

## 新たに観測的証拠シナリオ：連星



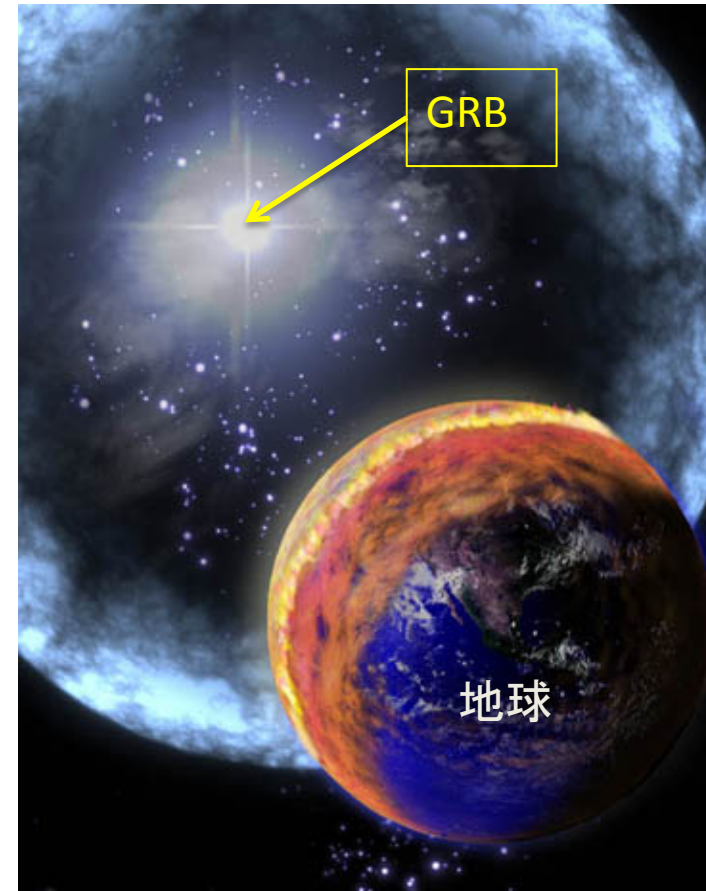
- 天の川銀河でもGRBは発生する！

→オールドビス紀の生物の大絶滅はGRBが原因？

# ガンマ線バーストは 重元素が多い環境でも発生する!

52

- 天の川銀河でも起きる
- もし太陽系近傍で  
起きたら



GRBが地球近辺で起きたときの  
イメージ図(NASA)



## **Did a gamma-ray burst initiate the late Ordovician mass extinction?**

A.L. Melott et al., *International Journal of Astrobiology* (2004)

論文紹介：川上孝介

# 生命に危険なGRBが起こる頻度

一銀河あたりのGRBの頻度( $F_{gal}$ )

一銀河のあたりの  
GRBの頻度

=

近宇宙GRBの単位体積あたりの頻度  
銀河の個数密度

$$F_{gal} = \frac{F_U [Gpc^{-3} y^{-1}]}{D_{gal} [Gpc^{-3}]}$$

$$F_U = 0.44 \text{ Gpc}^{-3} \text{ y}^{-1} \quad [\text{Guetta et.al (2003)}]$$

$$D_{gal} = 3 \times 10^6 \text{ Gpc}^{-3} \quad [\text{Loveday et.al(1992)}]$$

$$F_{gal} = 1.5 \times 10^{-7} [y^{-1}]$$

↔ 600万年に一回起こる

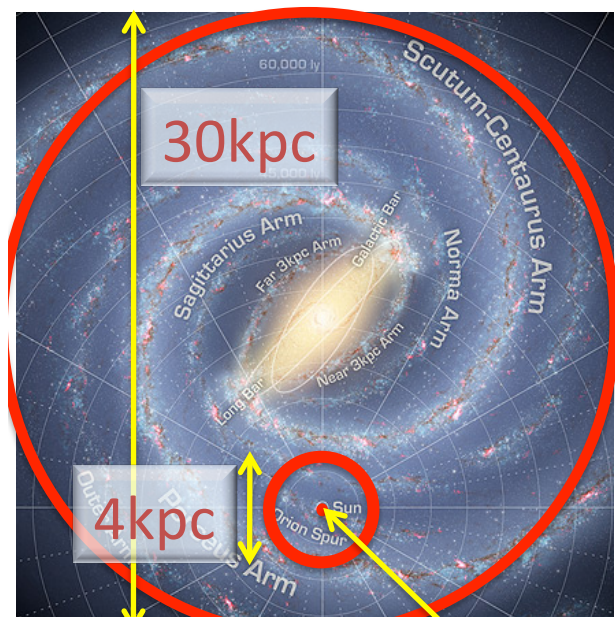
地球から距離 $R_{gal}$ 内でのGRBの頻度

銀河を半径 $R_{gal}$  kpcの2次元の面とみなす

地球から距離 $R$ で  
GRBが起こる頻度

$$F_R = F_{gal} \times \left( \frac{R}{R_{gal}} \right)^2$$

$$= \frac{1}{3.75 \times 10^8} \left( \frac{F_{gal}}{1.5 \times 10^{-7}} \right) \left( \frac{R_{gal}}{15[kpc]} \right)^{-2} \left( \frac{R}{2[kpc]} \right)^2 \quad [y^{-1}]$$



赤い円は太陽から  
半径2kpcの円

太陽

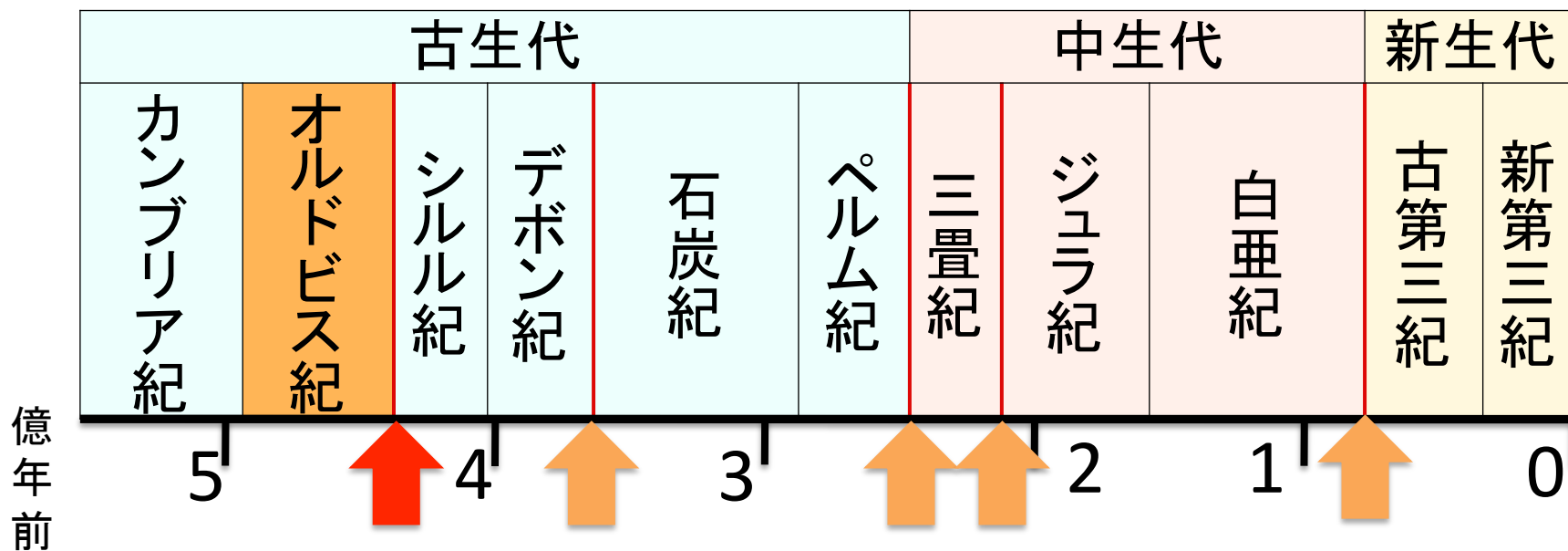
平均的GRBが生物に危害を与える距離: 2kpc



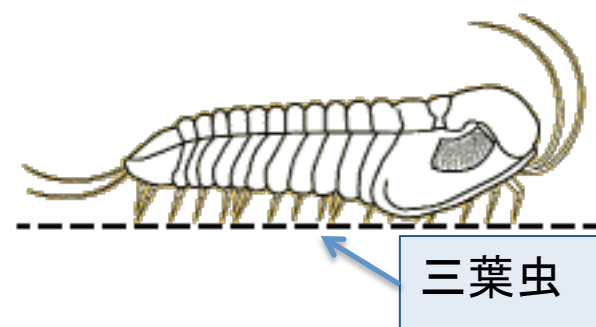
平均3.8億年に一度はGRBによる大絶滅

天の川銀河(NASA)

# オルドビス紀とは



- 生命の多様化が進んだ時期。
- 非常に温暖。
- 三葉虫などが生息。
- 生態系は陸地には進出していなかった。
- 大気酸素濃度、オゾン濃度は現在と同程度



↑: 大量絶滅



# オルドビス紀末期の環境変化

急激な寒冷化

地球外の要因が必要。  
(Herrmann et al.2003)

大規模・広範囲の絶滅

氷河期だけでは説明がつかない。  
氷河期の以前から絶滅が開始。  
(Brenchley et al. 2003)

一部の三葉虫のみ生存

幼虫の過ごし方に注目

海面で成長する種族

絶滅傾向

海底で成長する種族

生存傾向

紫外線が増加？

# GRBが環境・生命に及ぼす影響

58

ガンマ線が窒素分子を分解  $N_2 + \gamma \rightarrow 2N$

$NO_x$ が大量生成  $N + O_2 = NO + O$

オゾン減少

寒冷化

酸性雨

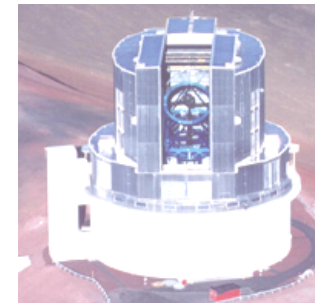
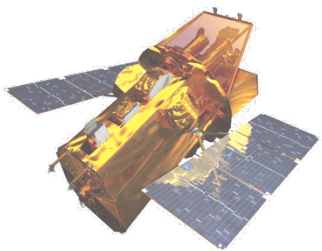
大量絶滅



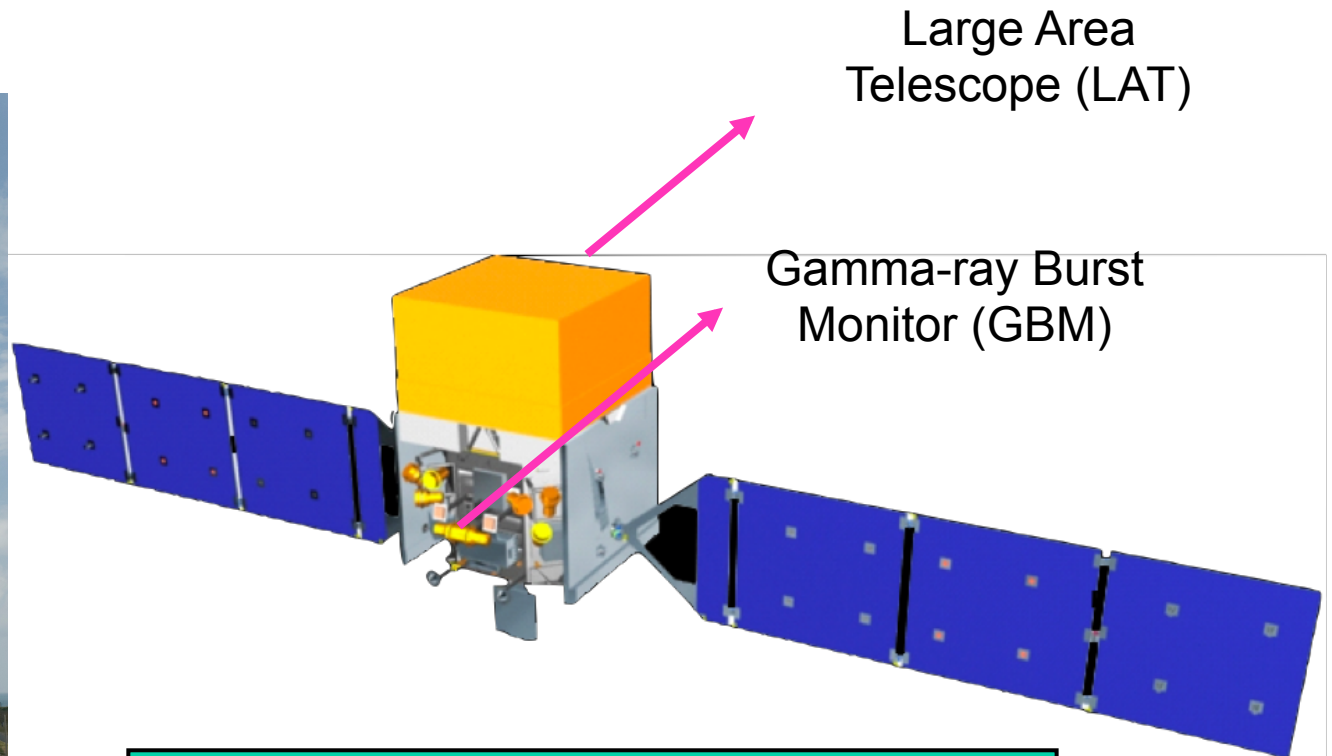
空が赤黒く変色  
強烈な紫外線  
(画像: NASA)

# Fermiガンマ線宇宙望遠鏡による 高エネルギーガンマ線観測

高いローレンツ因子  
光速度不変の検証



# Fermi Gamma Ray Space Telescope

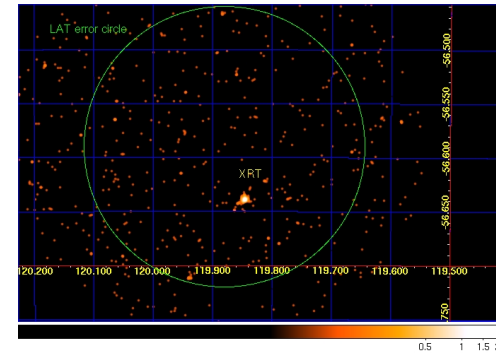
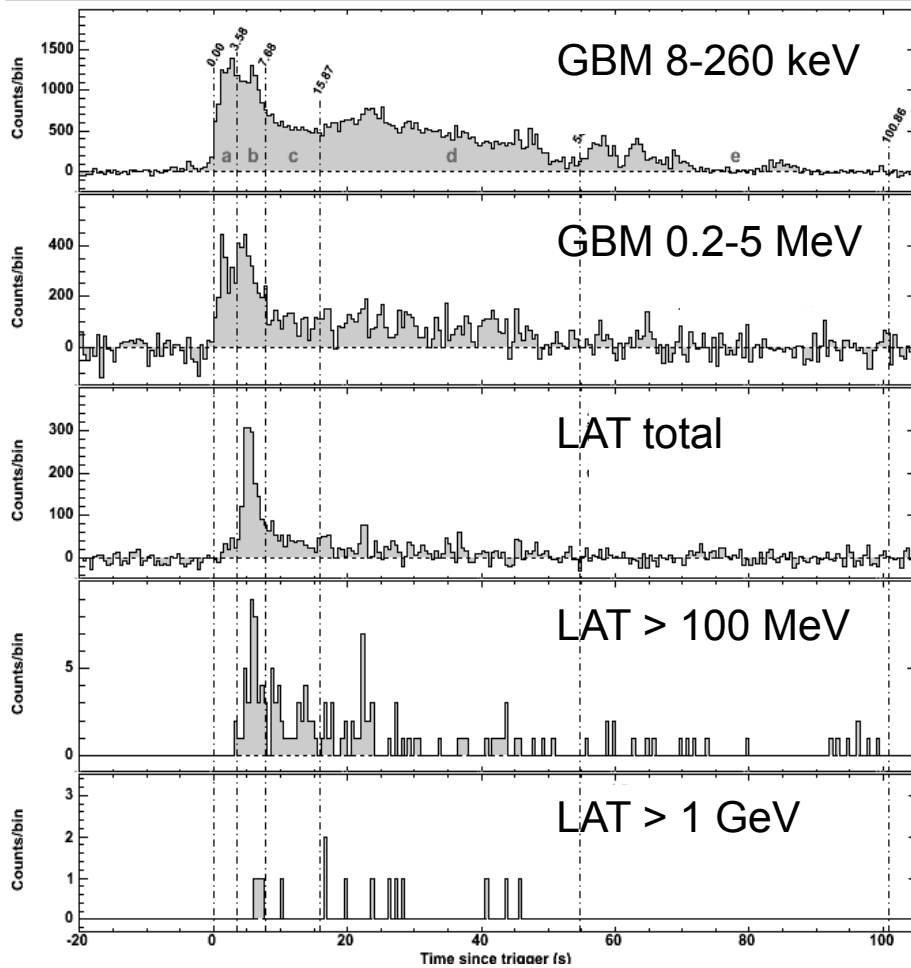
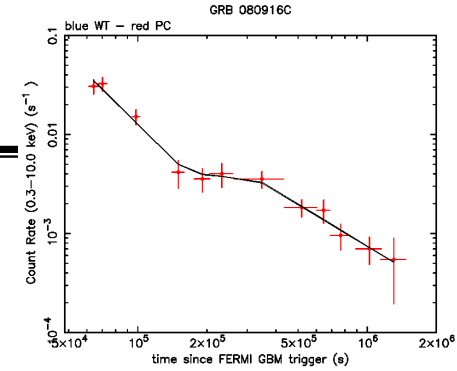
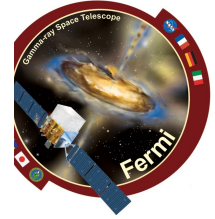


LAT - 20 MeV - >300 GeV  
GBM - 10 keV - 25 MeV





# LAT GRB 080916C



XRT

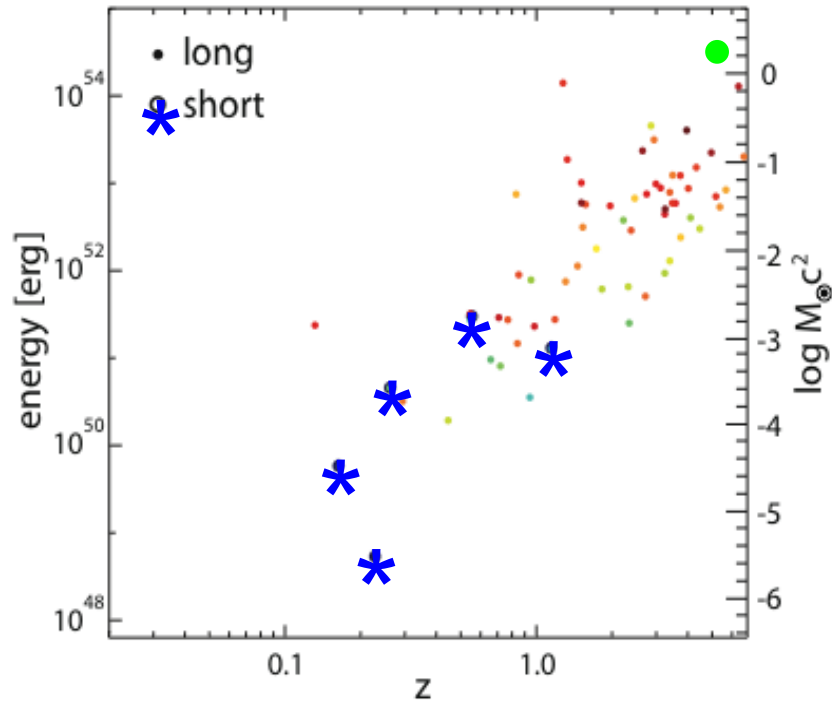
Long GRB  
 $z = 4.35$   
Extended emission  
Lag in MeV/GeV onset  
Highly luminous  
Lorentz factor (jet)  $> 860$   
( $\gamma\gamma$  absorption argument)

# LAT GRB 080916C



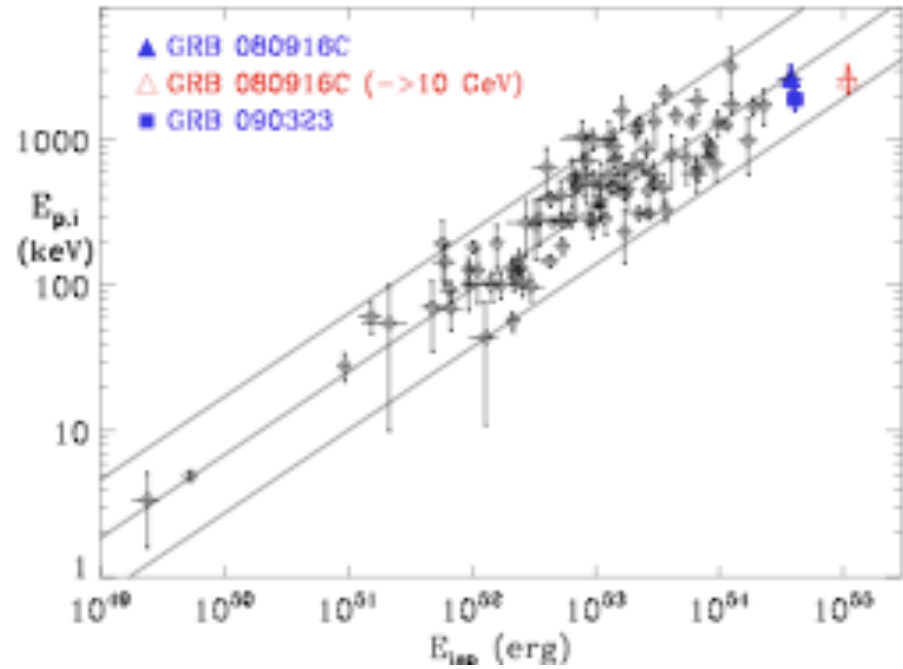
$E_{\text{iso}}$  vs  $z$

GRB 080916C



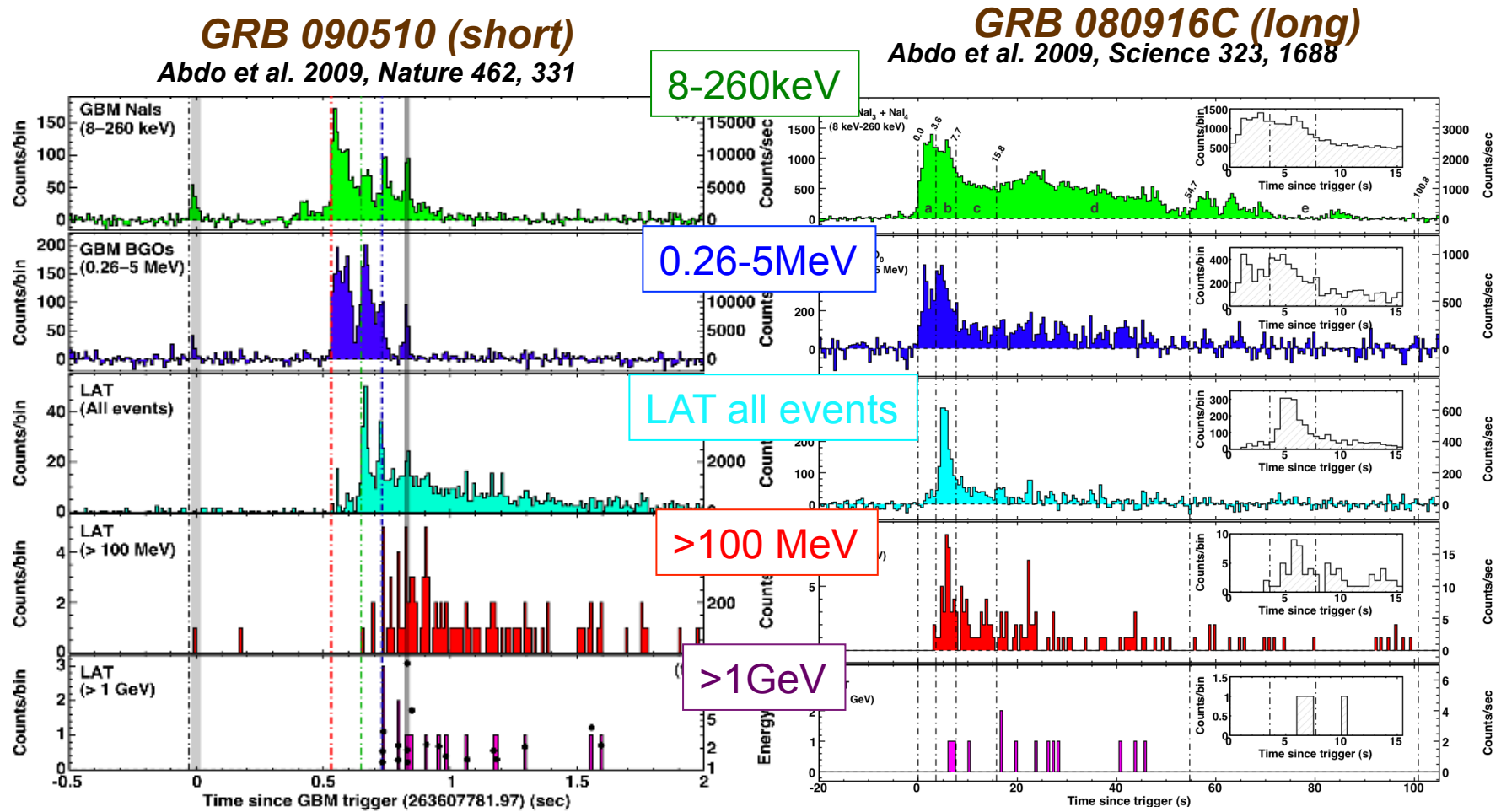
Gehrels

$E_{\text{peak}}$  vs  $E_{\text{iso}}$



Amati et al. 2009

# HE delayed onset in short and long GRBs

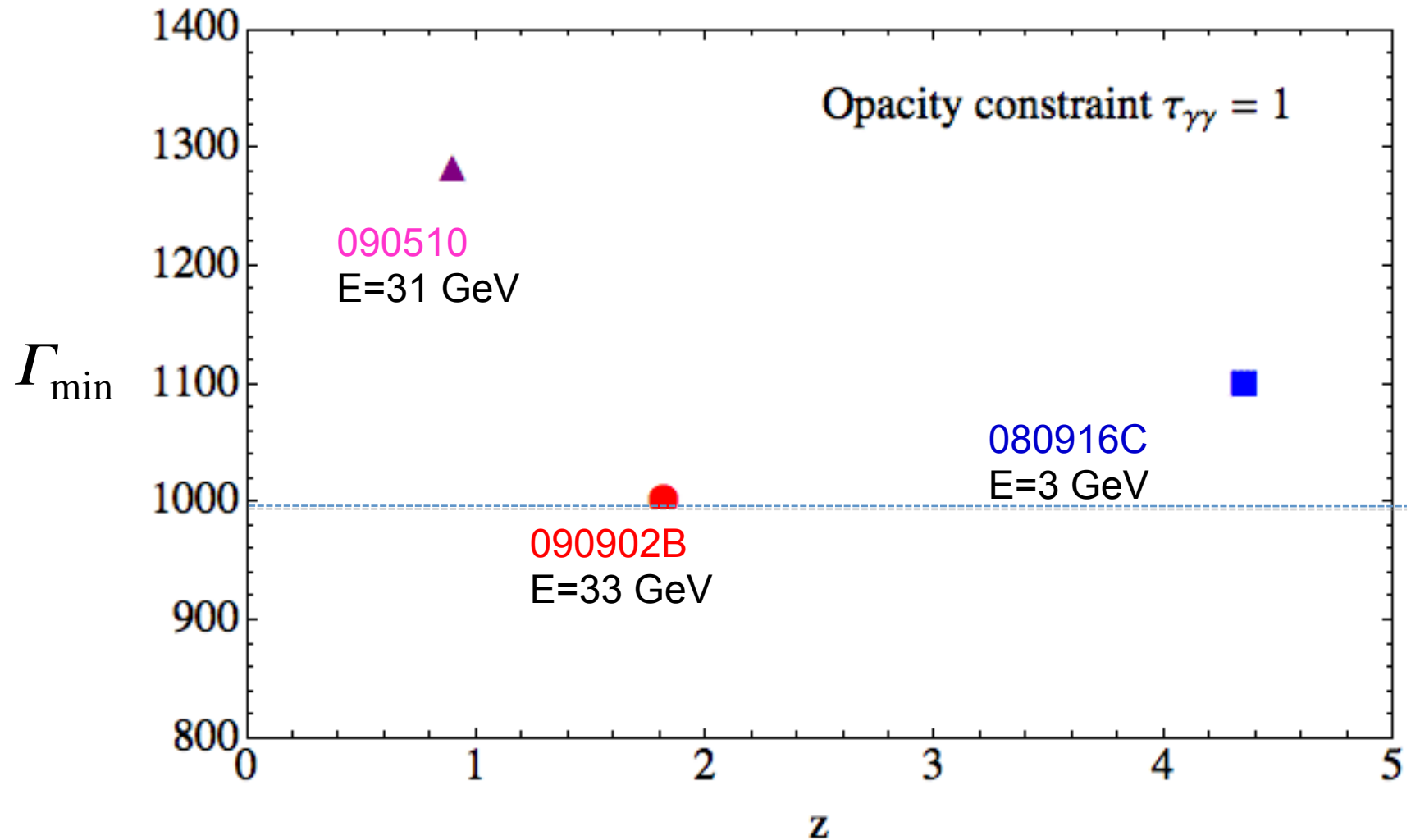


The first few GBM peaks are missing in the LAT but later peaks coincide  
 Delay in HE onset: 0.1-0.2 s

The first LAT peak coincides with the second GBM peak  
 Delay in HE onset: ~4-5 s

**HE delayed onset can be seen from almost all LAT GRBs**

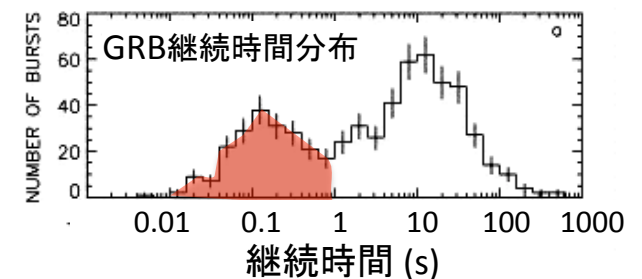
# Limit on bulk Lorentz factor





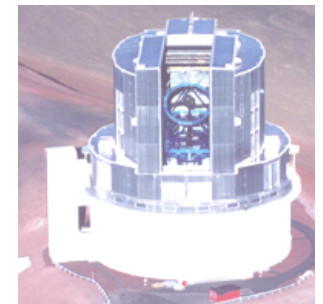
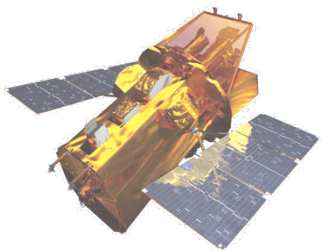
# GRBの次は？ 今正体不明なもの

- ダークマター
  - ◆ 素粒子物理実験による直接検出
- ダークエネルギー
  - ◆ 単一目標の巨大産業
  - ◆ 生きているうちに解明できそうな気がしない
  - ◆ 観測が間接的、統計的なので私の趣味じゃない
    - “Fundamentalist Physics: why Dark Energy is bad for astronomy”  
Simon White (arxiv:0704.2291)
- 短いガンマ線バースト
  - ◆ 重力波による直接検証が現実的に



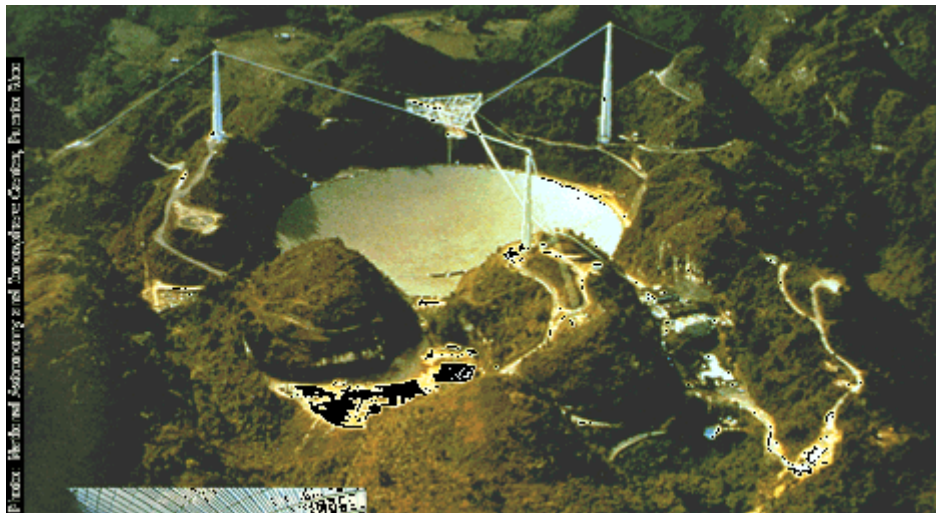
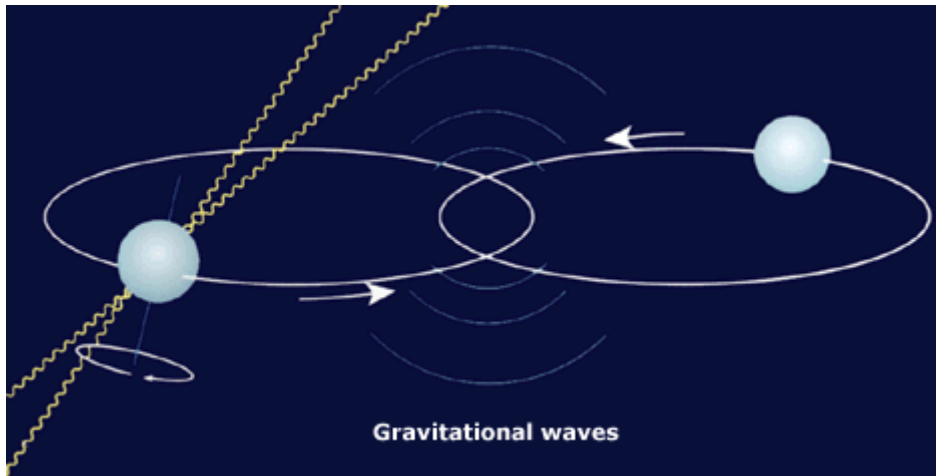
# 短いガンマ線バースト

重力波源の最有望候補

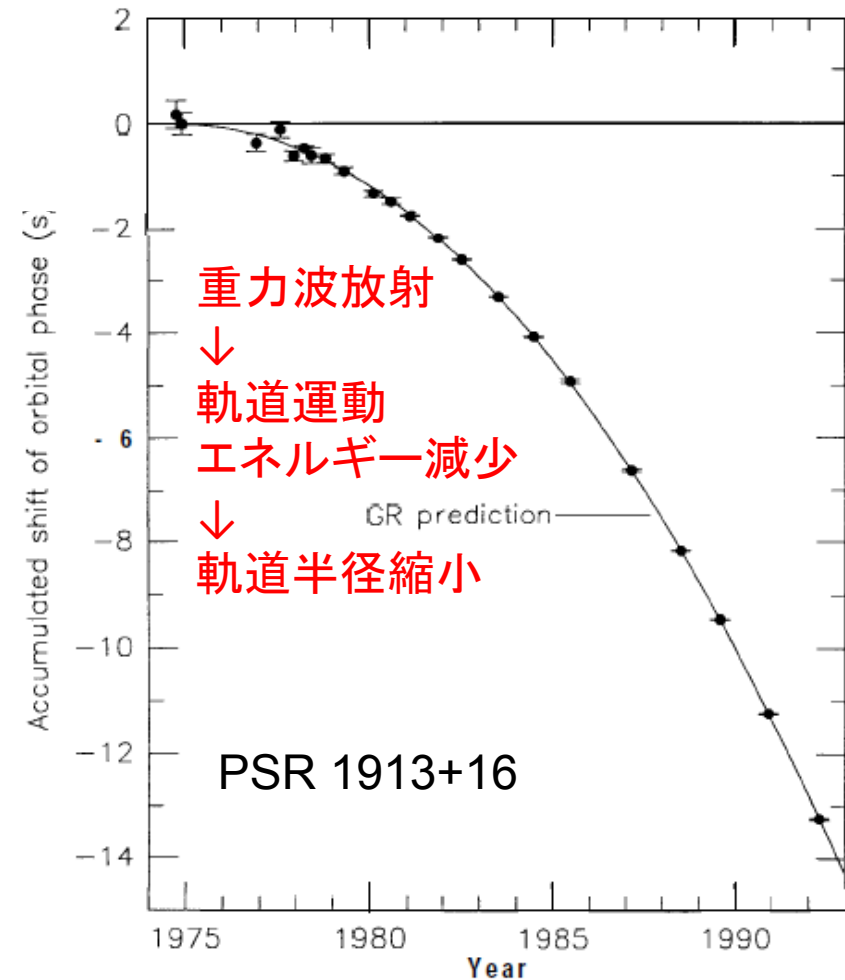


# 短いガンマ線バーストの最有力候補： 中性子星連星の合体

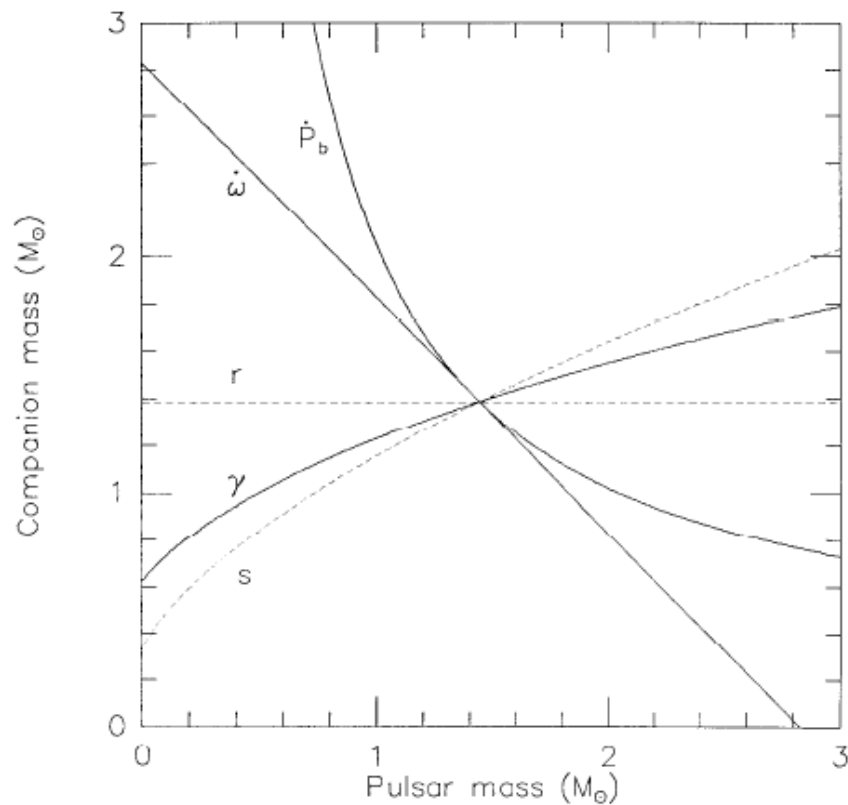
J.H. Taylor and R.H Hulse  
1993 Nobel Prize in Physics



17/29/14

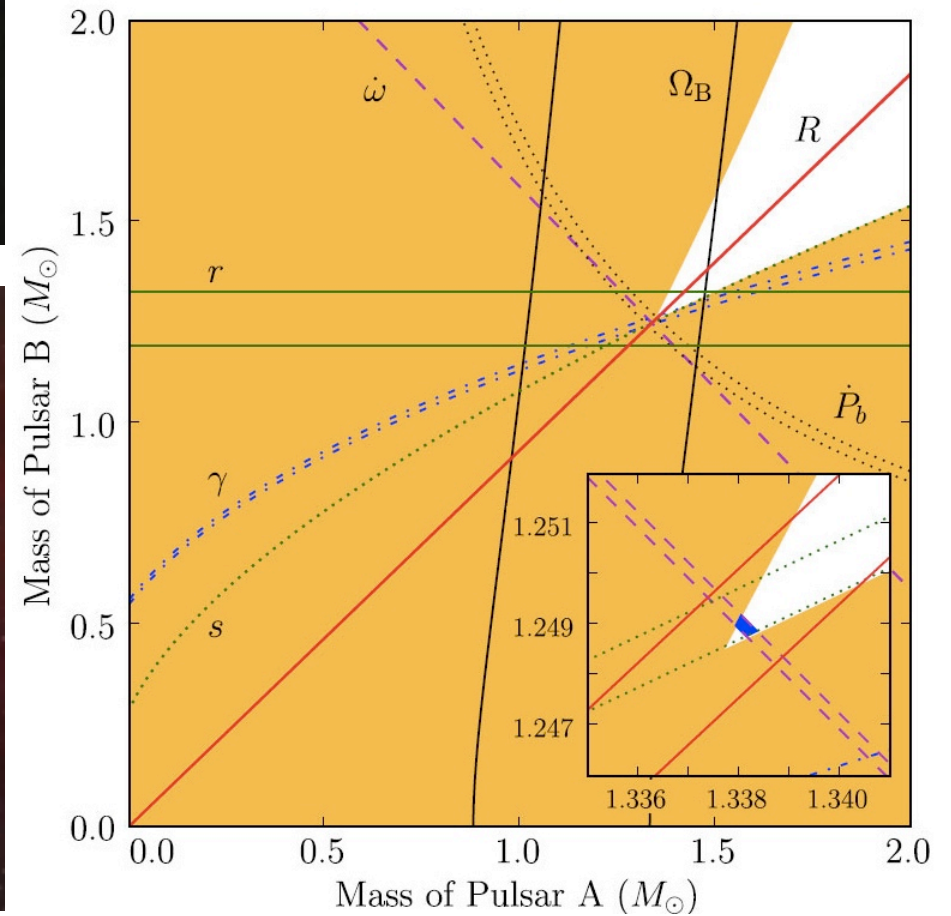
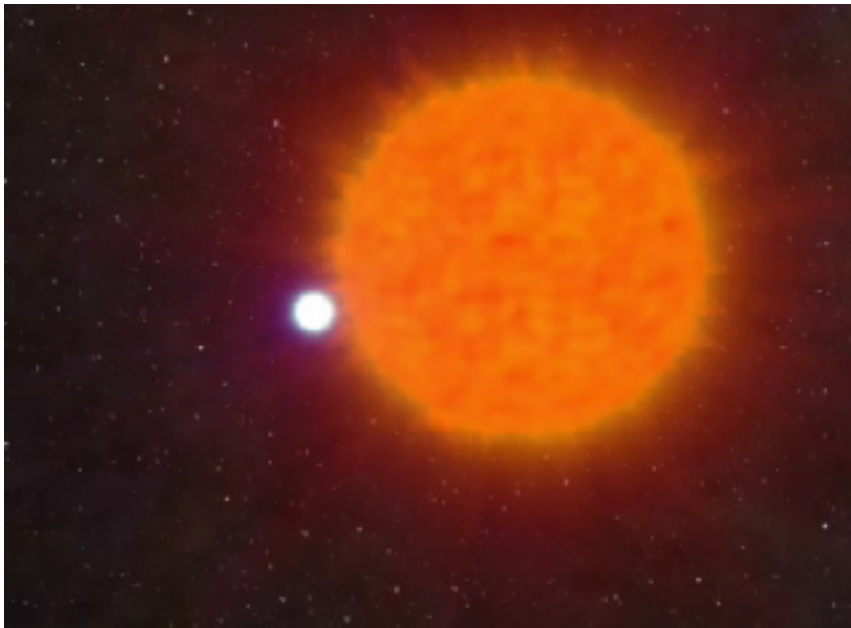
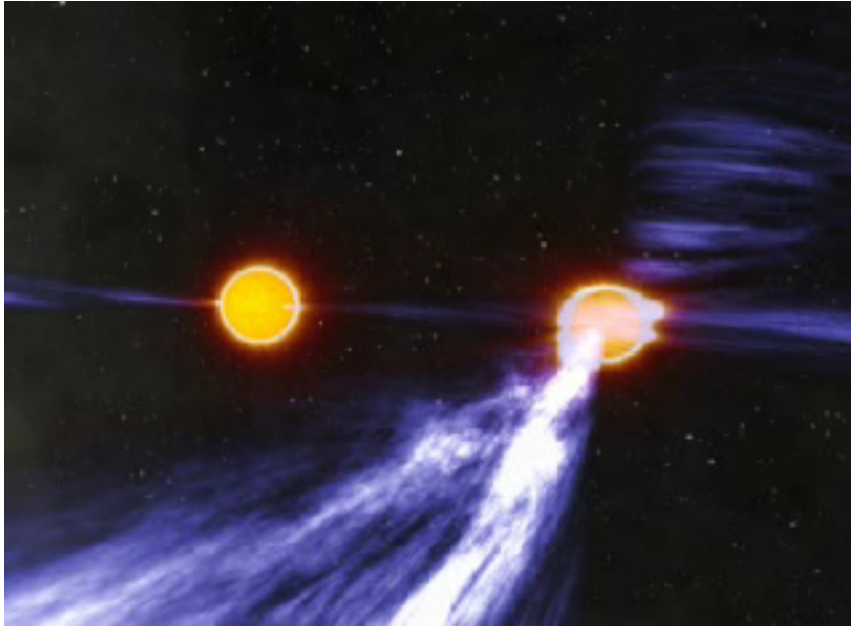


# 一般相対論の予言との一致

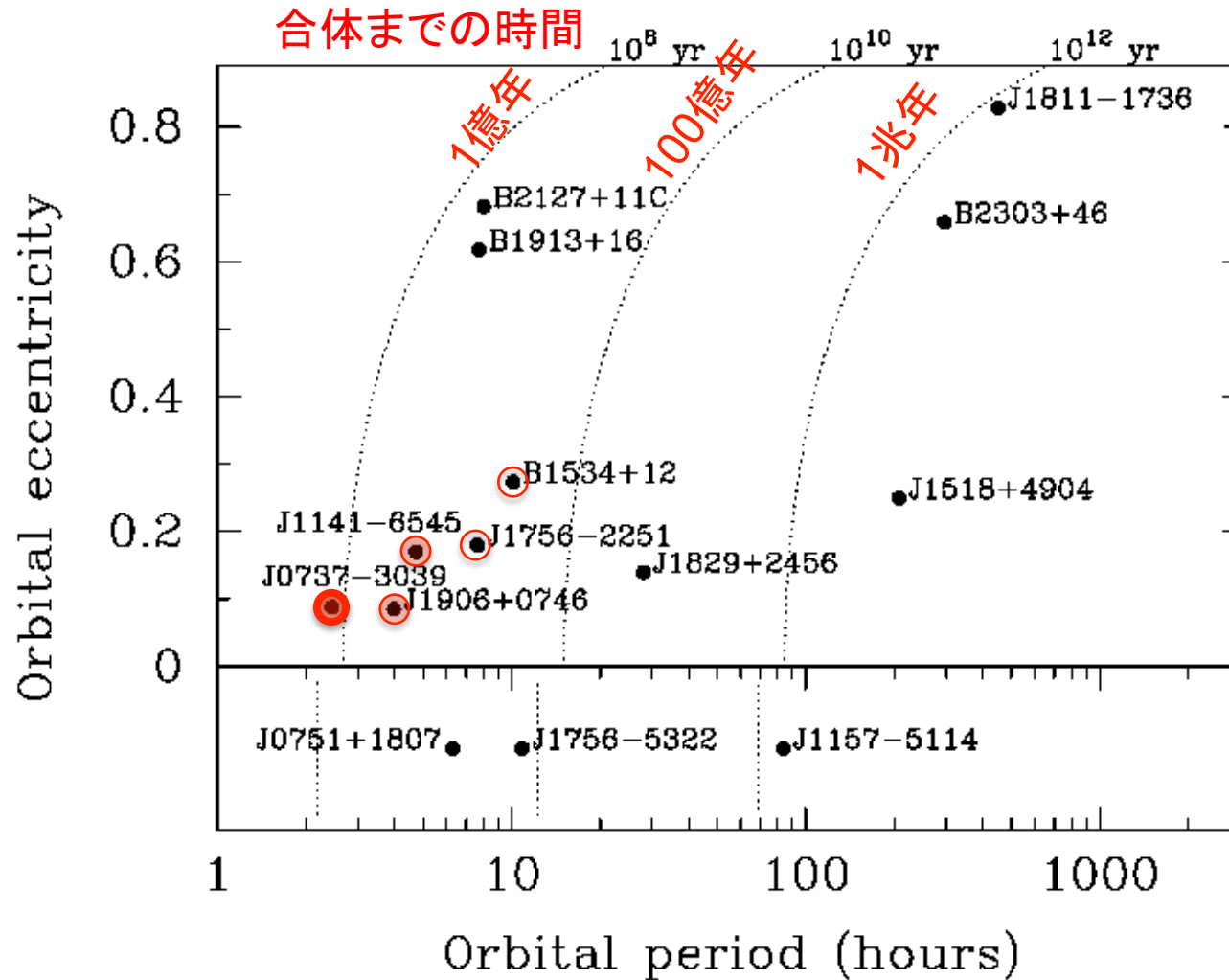


- $\dot{P}_b$  軌道周期の変化率
- $\dot{\omega}$ : 近星点経度の変化率
- $\gamma$ : 重力赤方偏移
- $r, s$ : Shapiro Delayのパラメータ (重力場での光の遅れ)
- →重力波の存在(一般相対論の予言)を間接的に検証

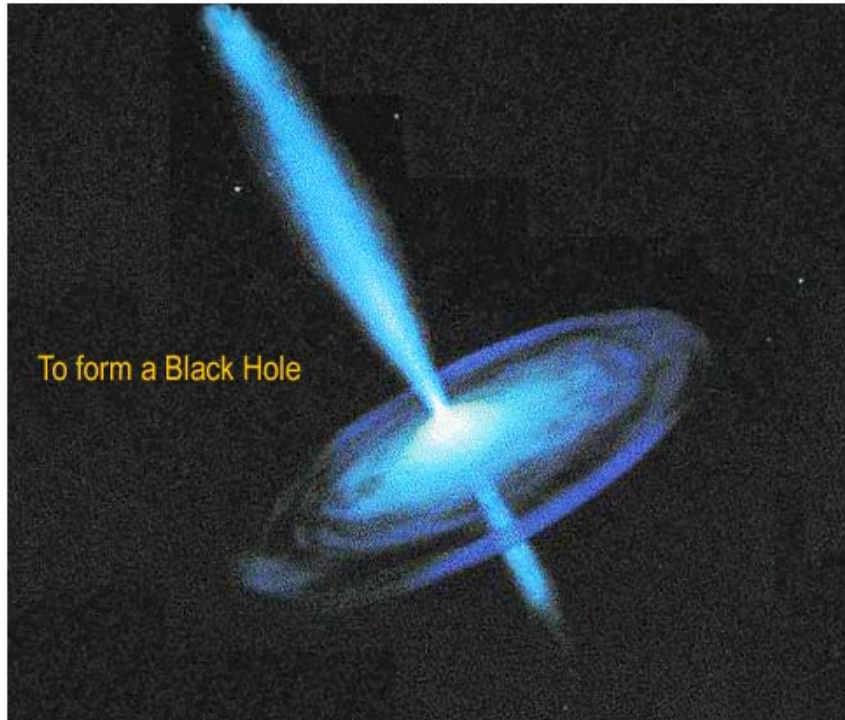
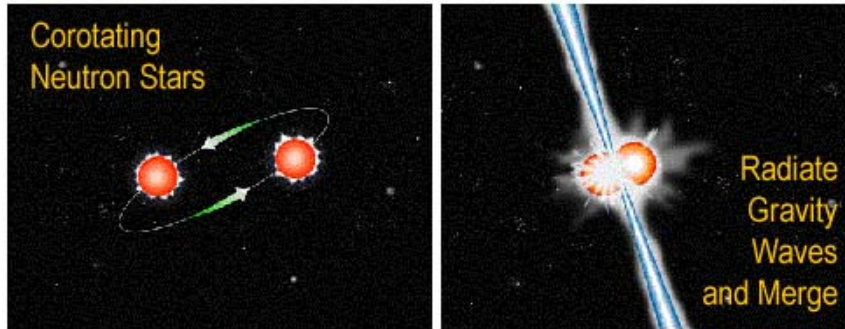
# Double Pulsar



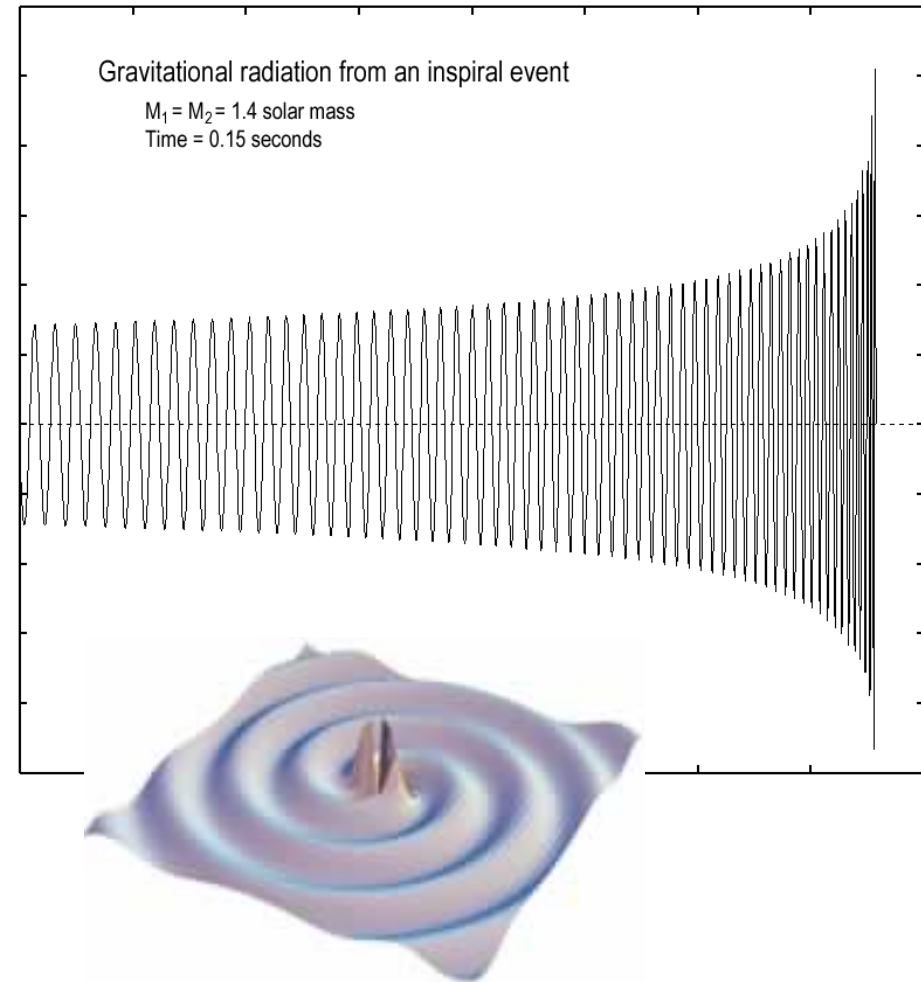
# 既知の中性子星連星系



# 中性子星合体による重力波

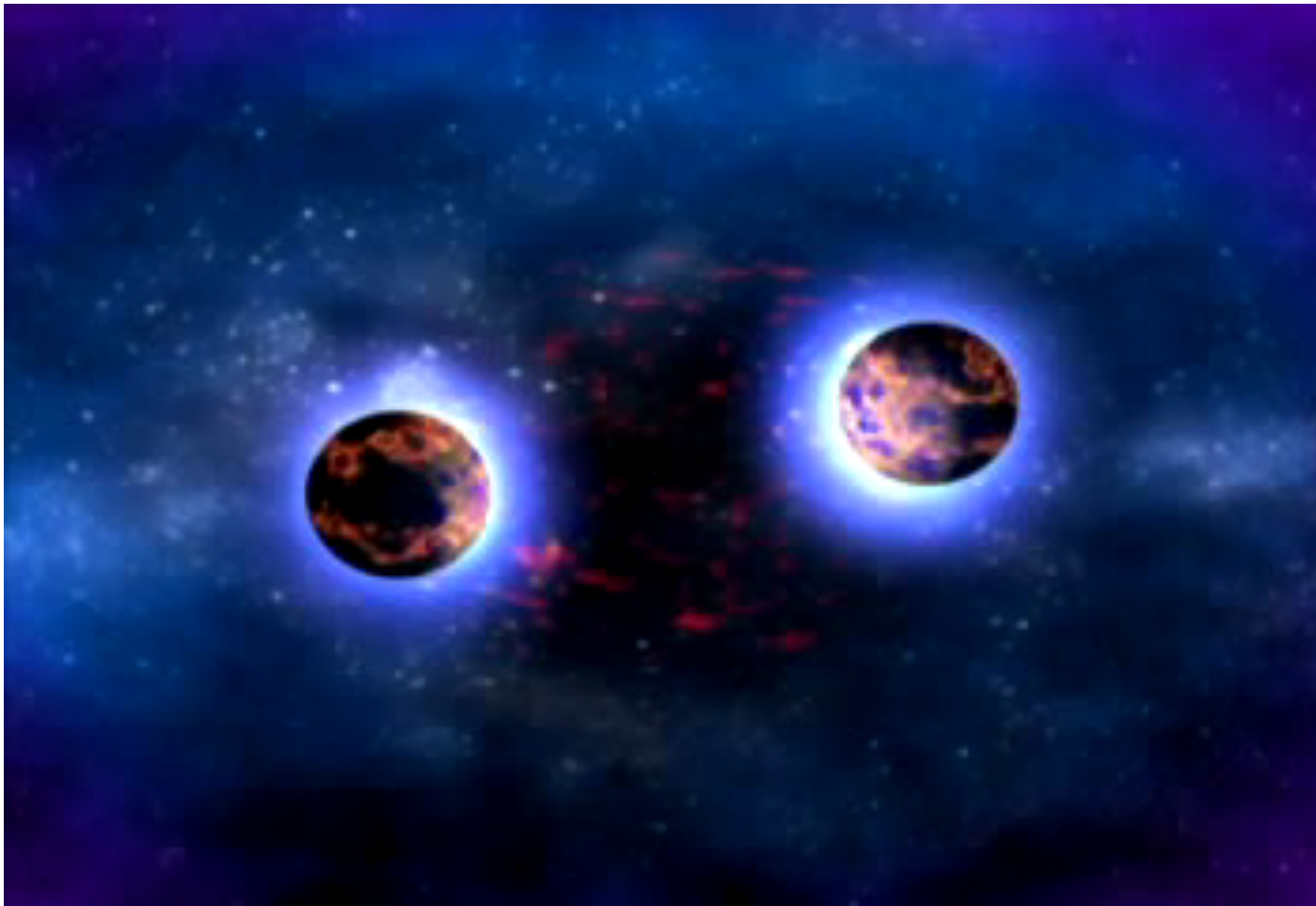


7/29/14



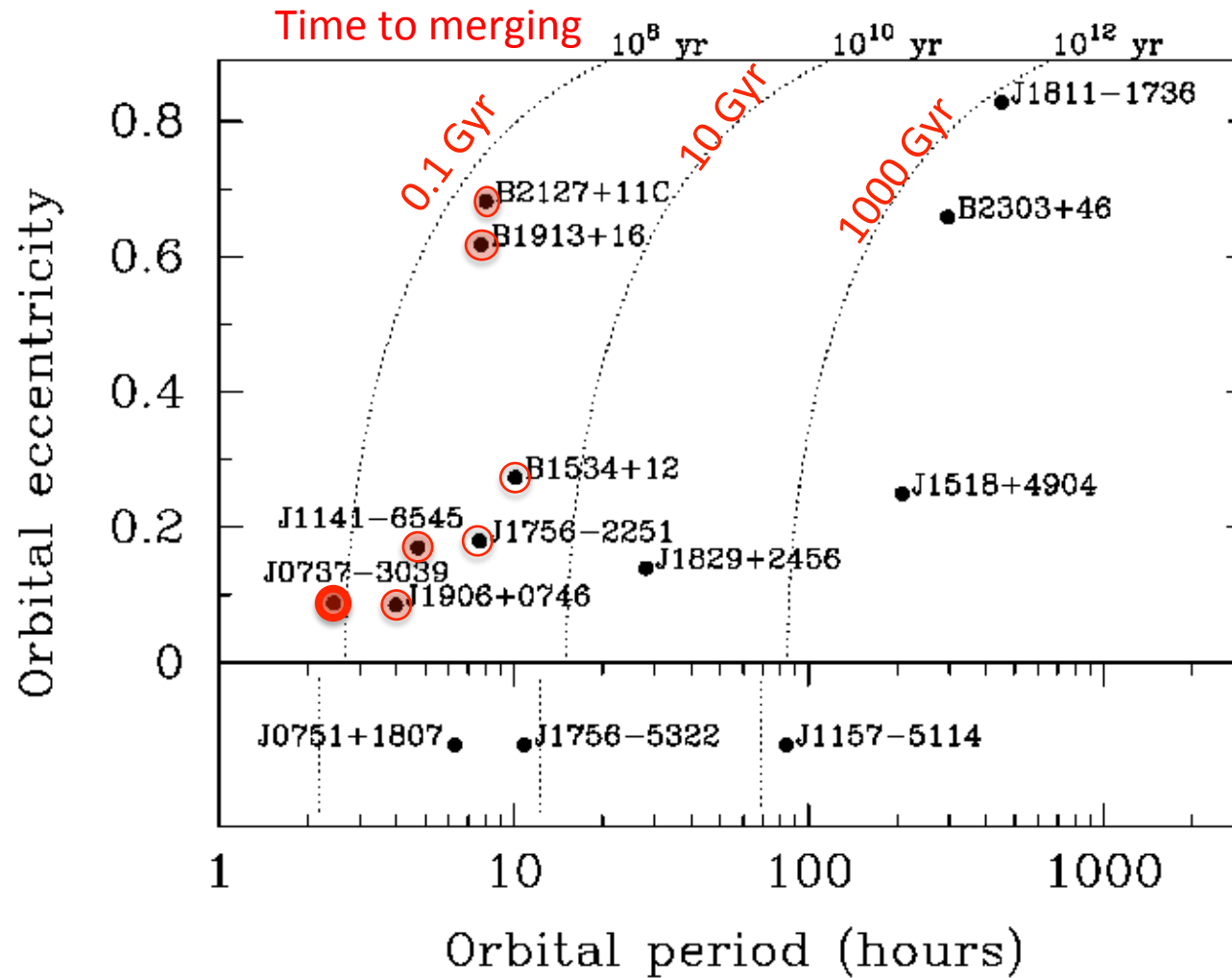
Slide courtesy of D. Frail

# 中性子星連星の合体(想像)





# Known neutron star binaries

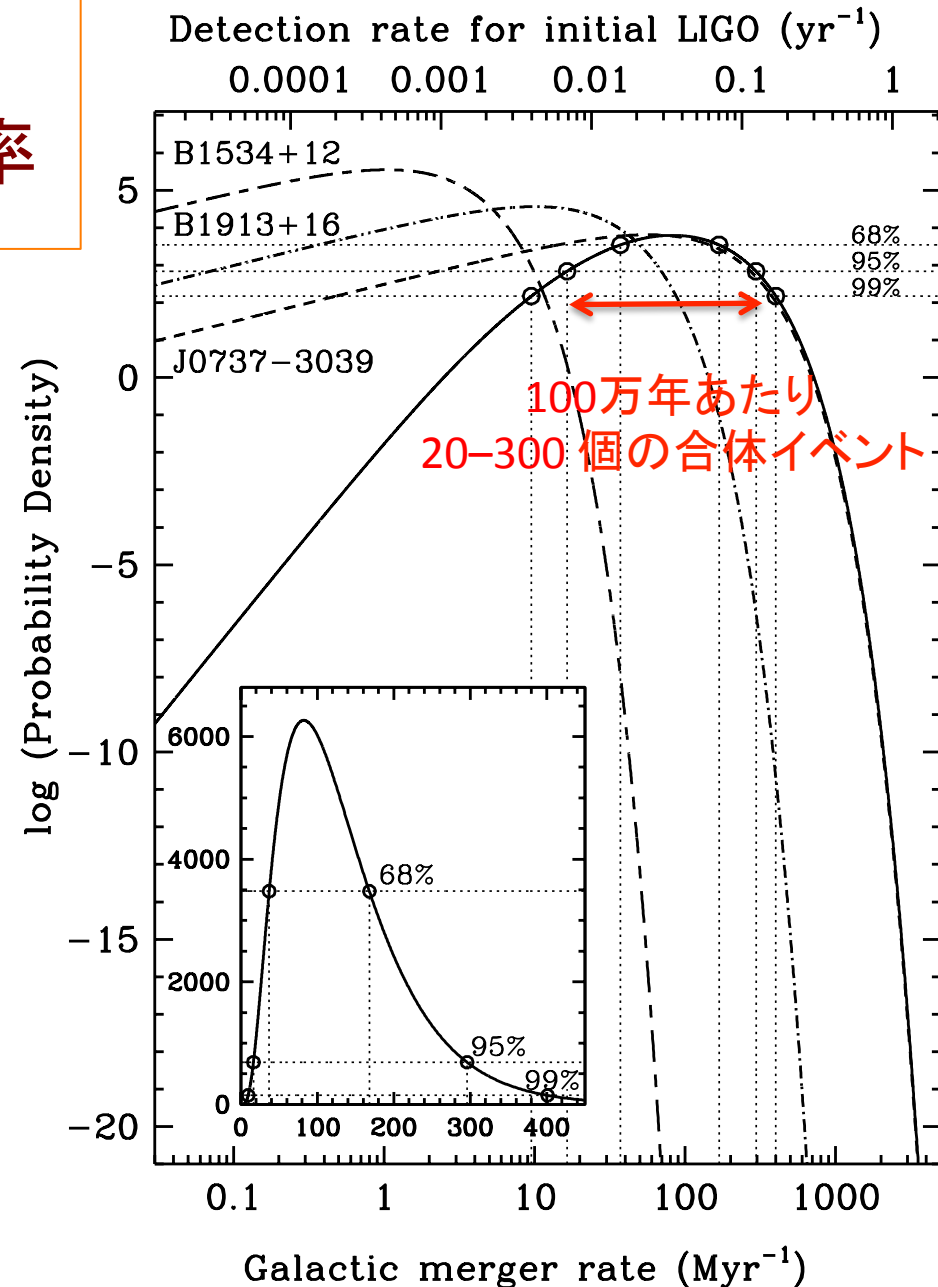


宇宙年齢以内に合体する中性子星連星が銀河系内に7個知られている

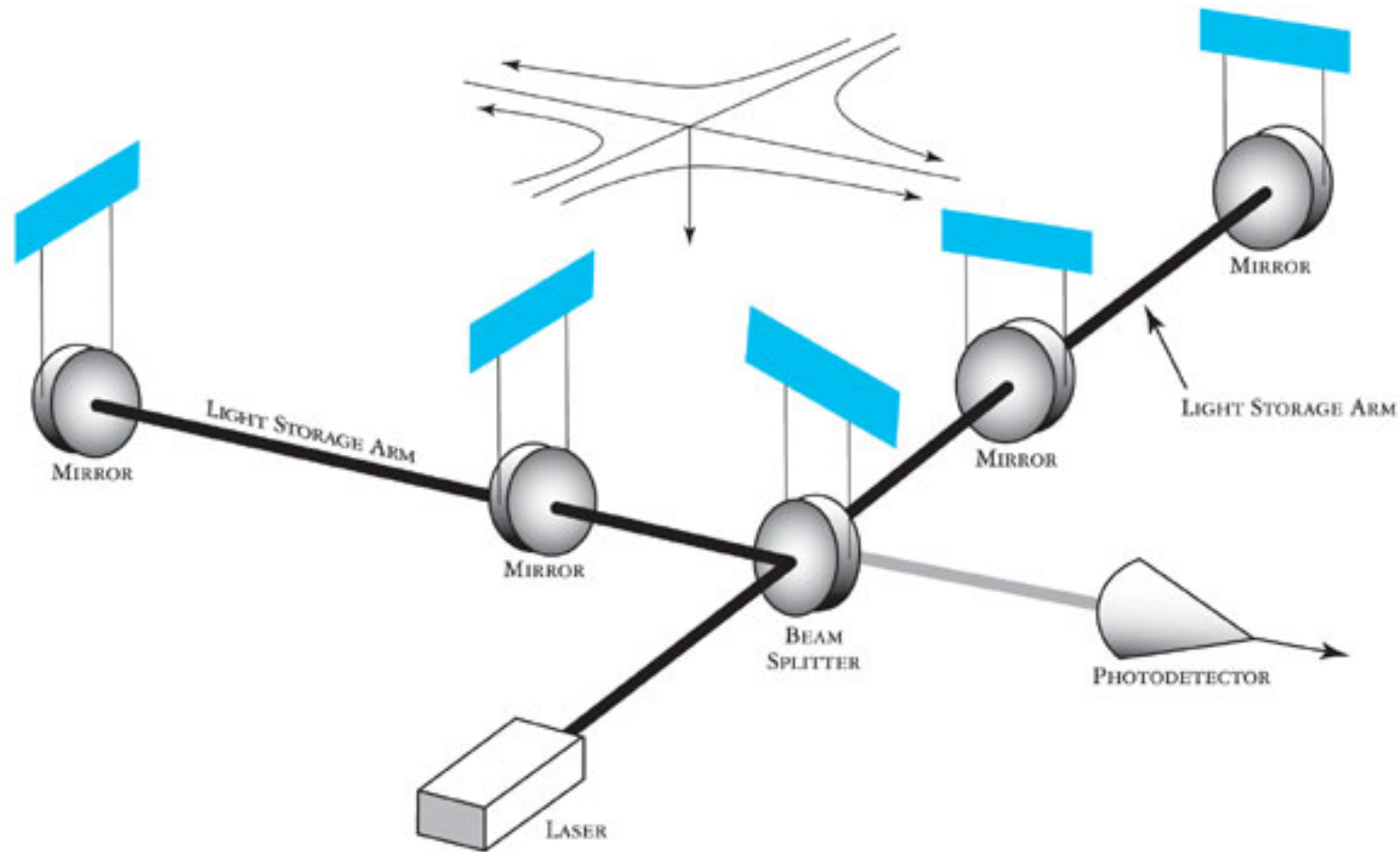
# 重力波望遠鏡による 中性子星連星合体の検出率

- LIGO (到達距離~ 20 Mpc)  
→ 10–630 年に1個 (95%CL)
- LCGT (到達距離~ 200 Mpc:  
z=0.05)  
→ 1年に 2–100 個
- 一方、短いガンマ線バーストの検  
出率 年間<100 (0.16 < z < 1)

→ ほとんどの中性子星連星合体は  
短いガンマ線バーストとしては  
観測にかかっていない



# 重力波干涉計





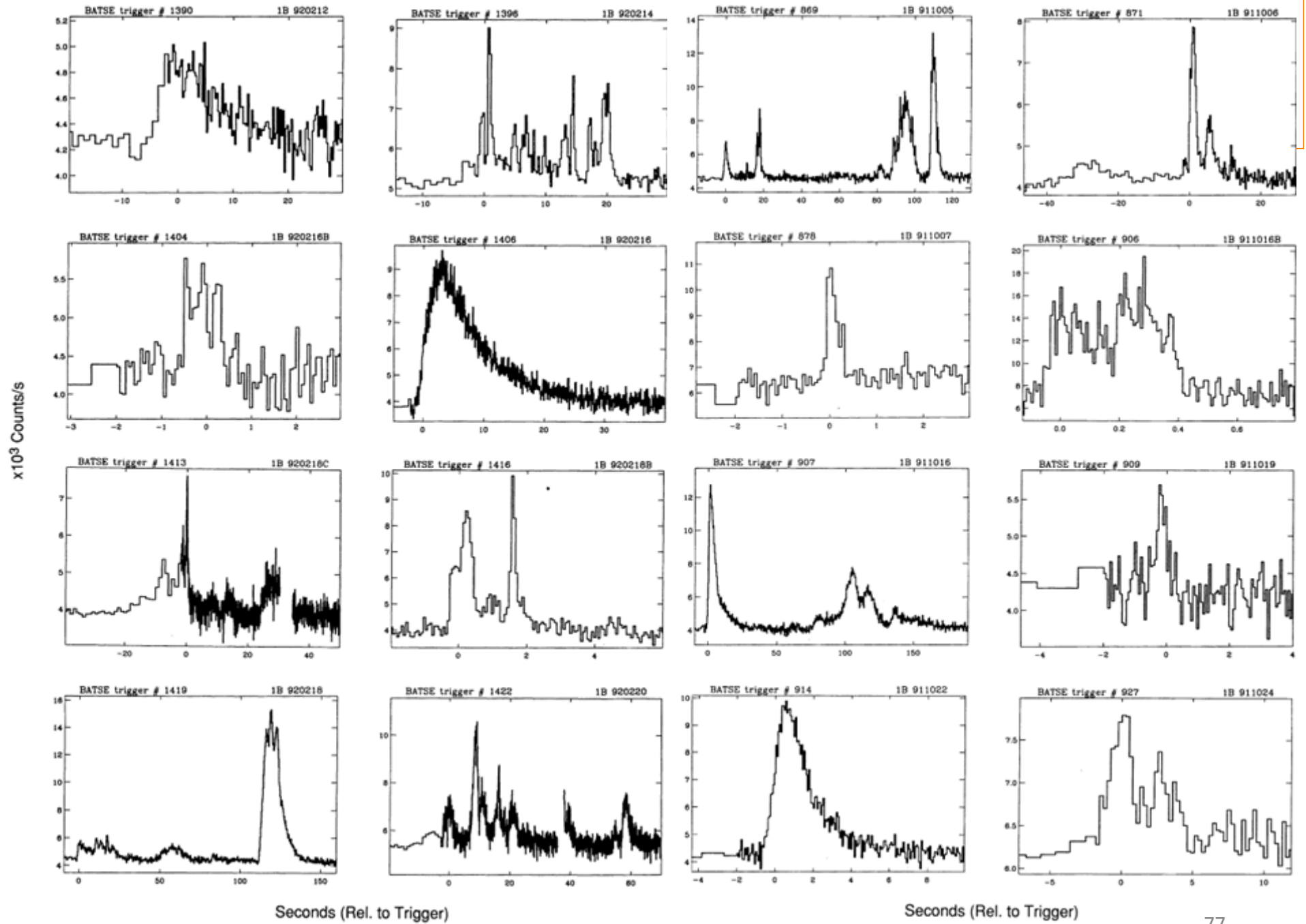
[http://www.ligo.caltech.edu/LIGO\\_web/seminars/pdf/surf06.pdf](http://www.ligo.caltech.edu/LIGO_web/seminars/pdf/surf06.pdf)

# Global network of detectors

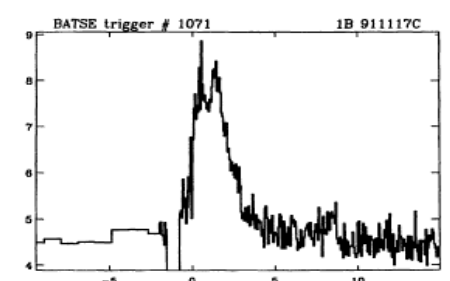
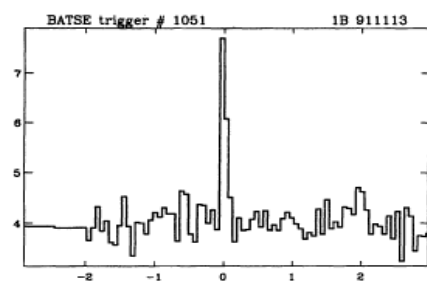
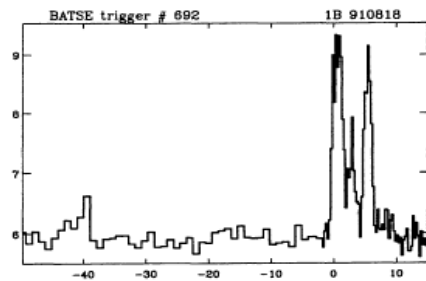
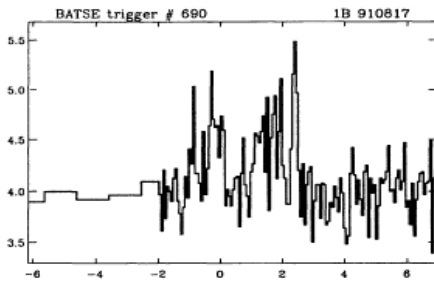
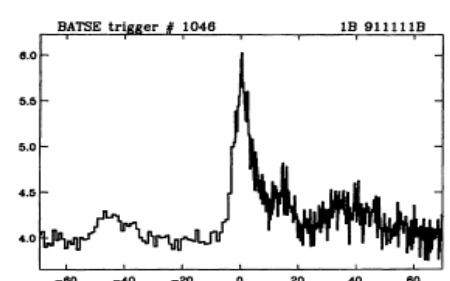
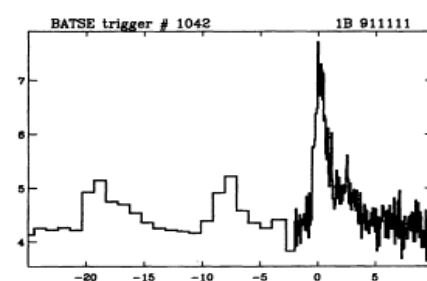
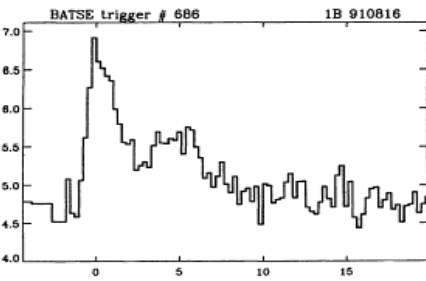
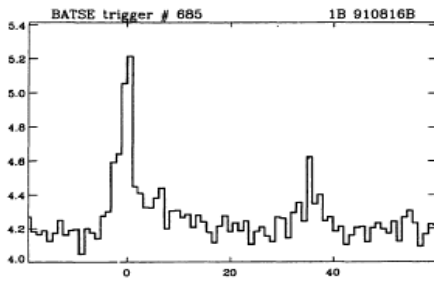
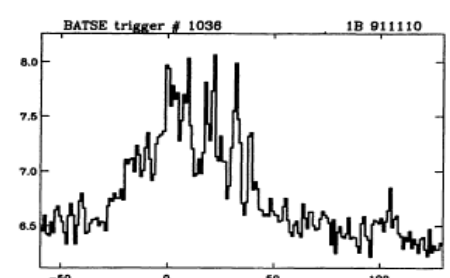
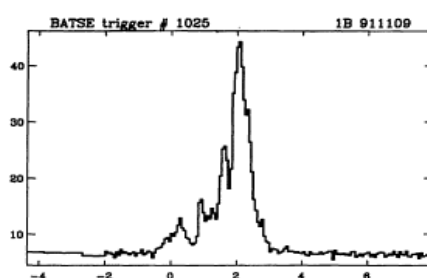
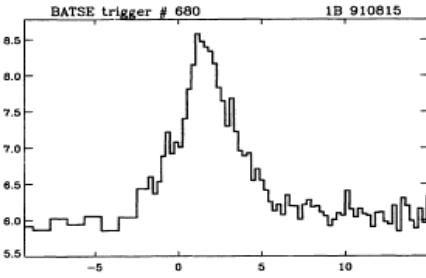
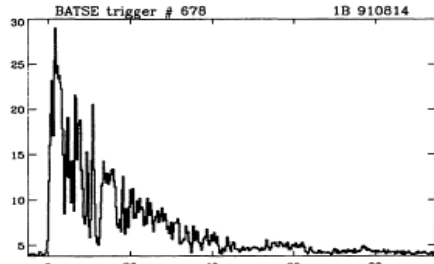
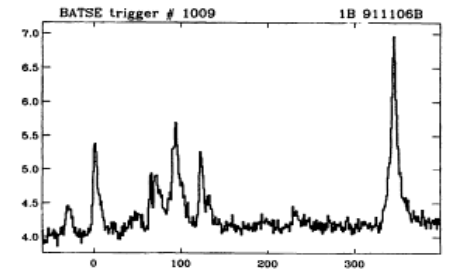
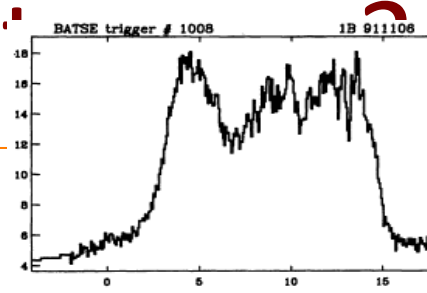
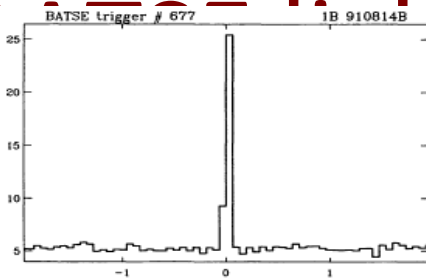
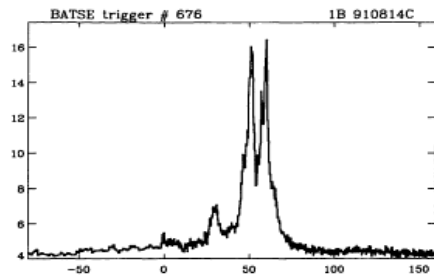


- Simultaneous detection (within msecs)
- Detection confidence
- Sky location
- Source polarization
- Verify light speed propagation





x10<sup>3</sup> Counts/s



Seconds (Rel. to Trigger)

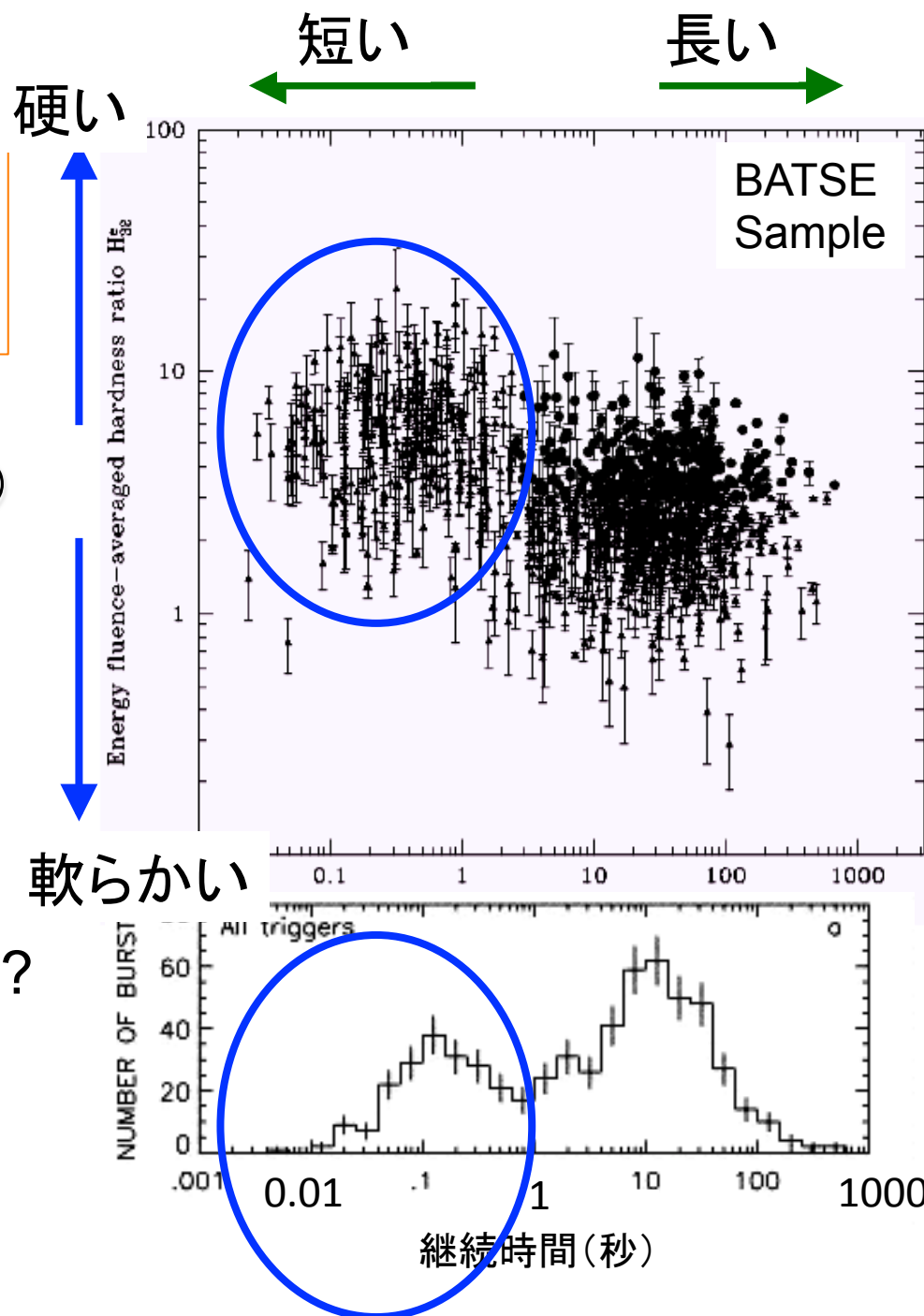
Seconds (Rel. to Trigger)

# “短くて硬い” ガンマ線バースト

継続時間が短くスペクトルが硬い  
(高いエネルギーのガンマ線が多い)

X線、可視光残光検出例なし

- 起源が違う？
  - 超新星？
  - 中性子星連星の衝突合体？
  - マグネターのフレア？

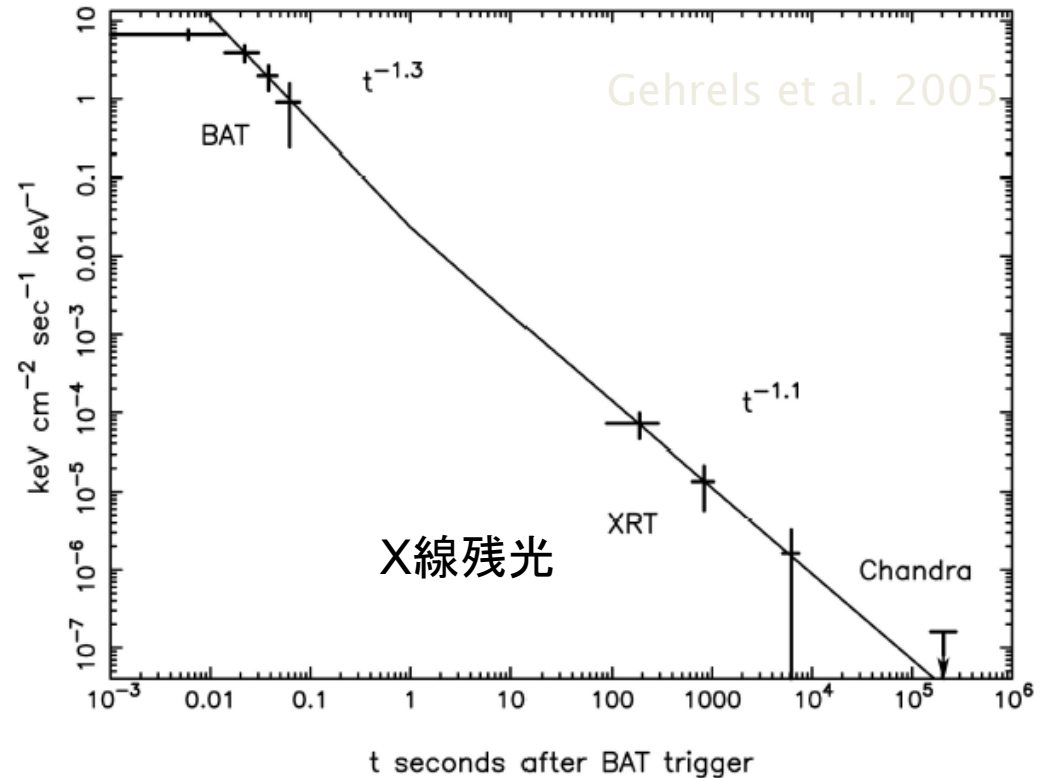
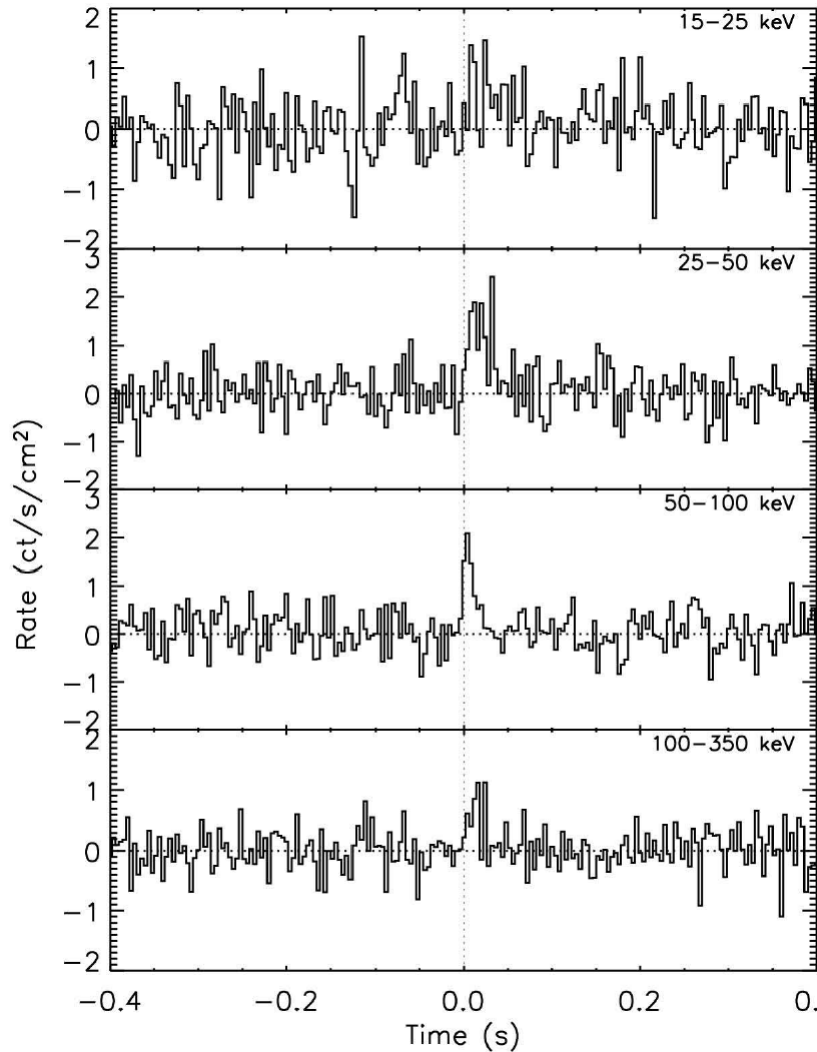


# ガンマ線バーストの起源の謎

- 巨大なエネルギー ( $> 10^{42}$  J) を  $\leq 10$  s で放出
  - ◆ 候補となる天体現象は少ない
  - ◆ 恒星の重力崩壊
    - 大質量星の一生の最後
    - 普通は超新星になる
  - ◆ 中性子星連星の合体
    - NS+NS または NS+Black Hole
    - 宇宙年齢内に合体する連星系が存在



# GRB 050509B detected by Swift

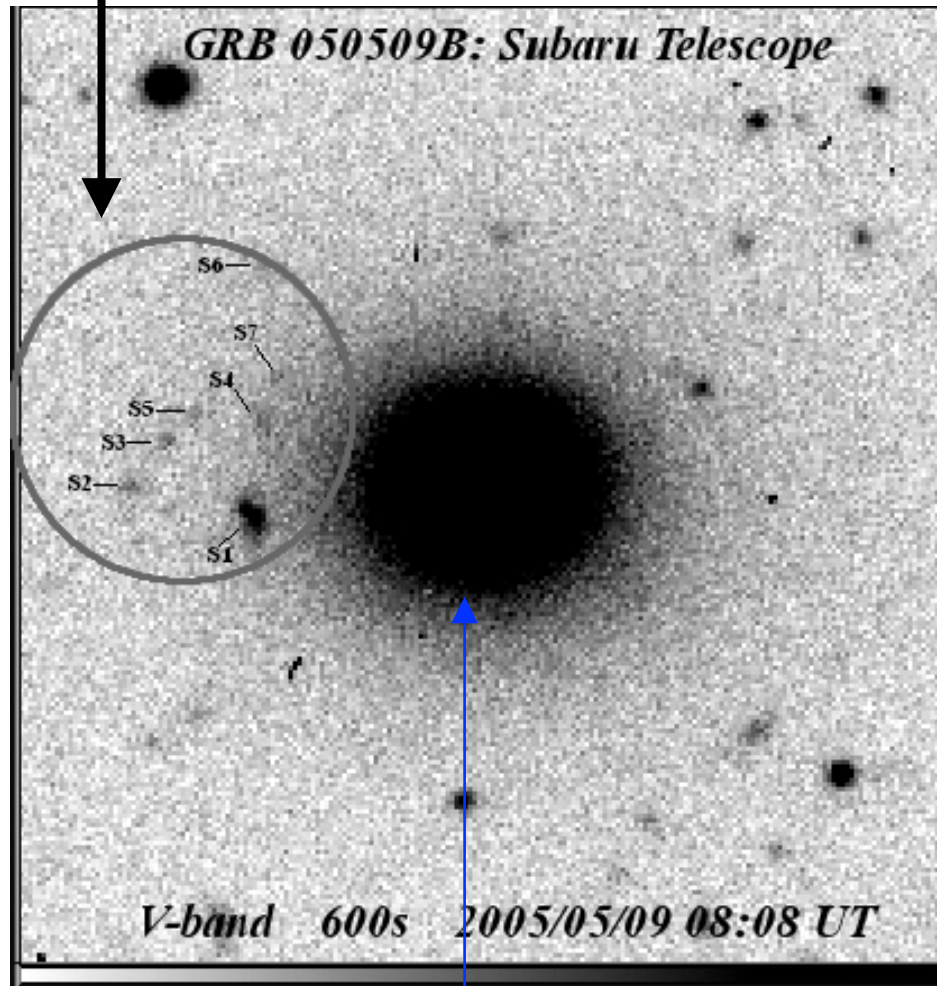


短いガンマ線バーストからX線残光の最初の検出

→短いガンマ線バーストの位置を始めて、秒角の精度で決定

# 楕円銀河（ $z=0.225$ ）で発生？

X線残光による誤差円



S-Cam (Kosugi, Takada, Furusawa, Kawai)

$z = 0.2249 \pm 0.0008$

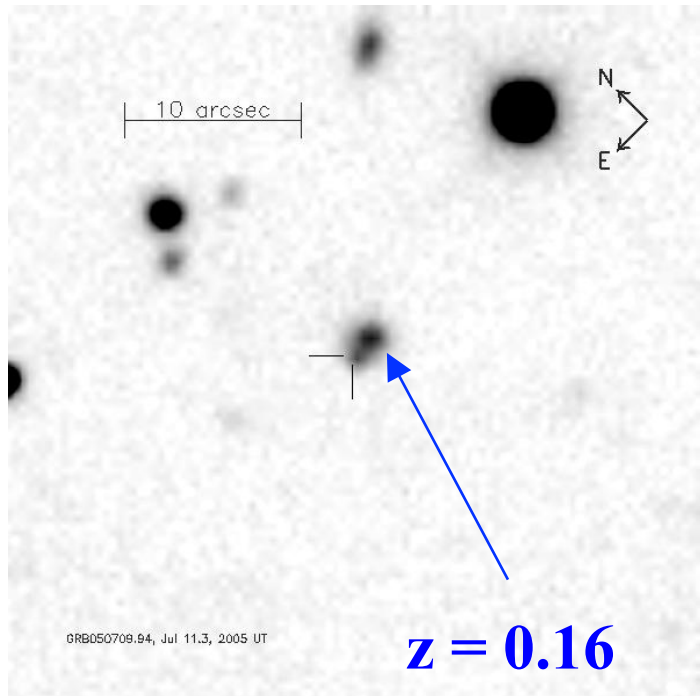
- 赤方偏移の小さい(距離の近い)楕円銀河の近傍で発生
- 楕円銀河:ほとんど新しい星が生まれていない
- しかし、誤差円の中には多くの遠方銀河も含まれている
- 関連は決定的とはいえない

$z=0.225$   $L_{H\alpha} < 1.2 \times 10^{40} \text{ erg s}^{-1}$

Elliptical galaxy Bloom et al. 2005

$SFR < 0.1 M_{\text{sun}}/\text{yr}$

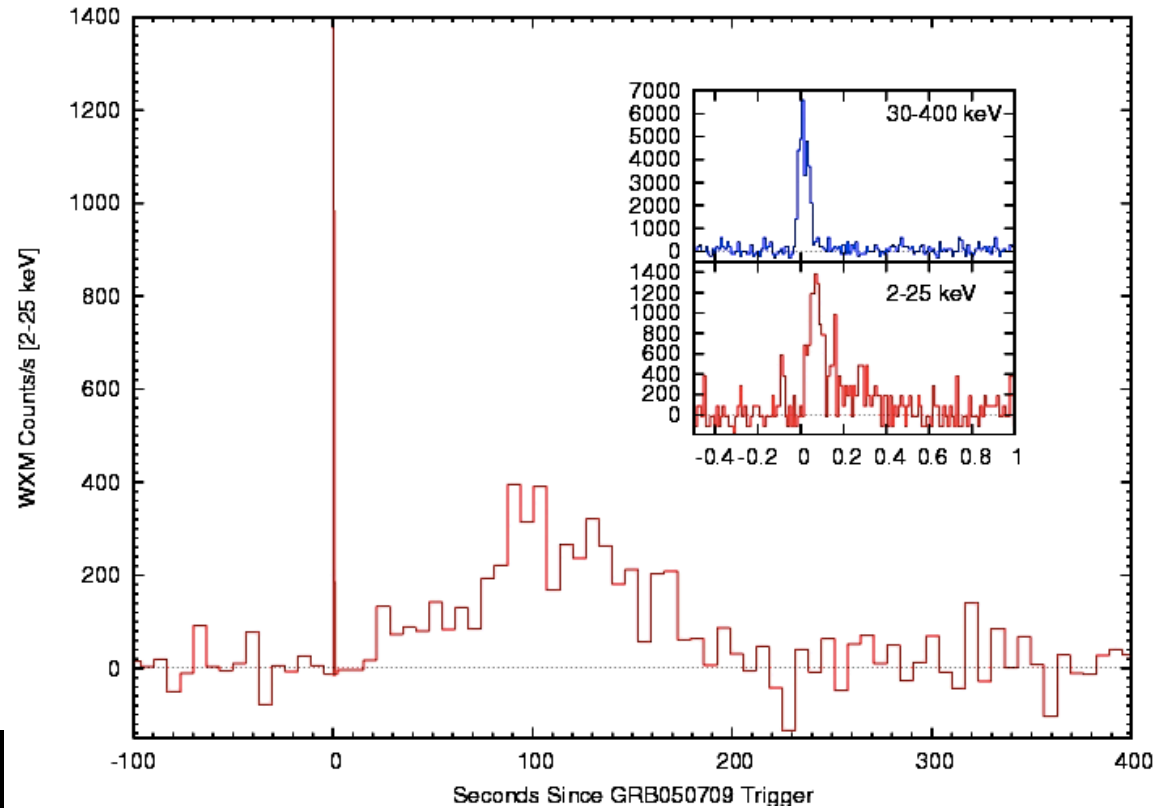
# GRB050709 localized by HETE-2



X-ray afterglow candidate

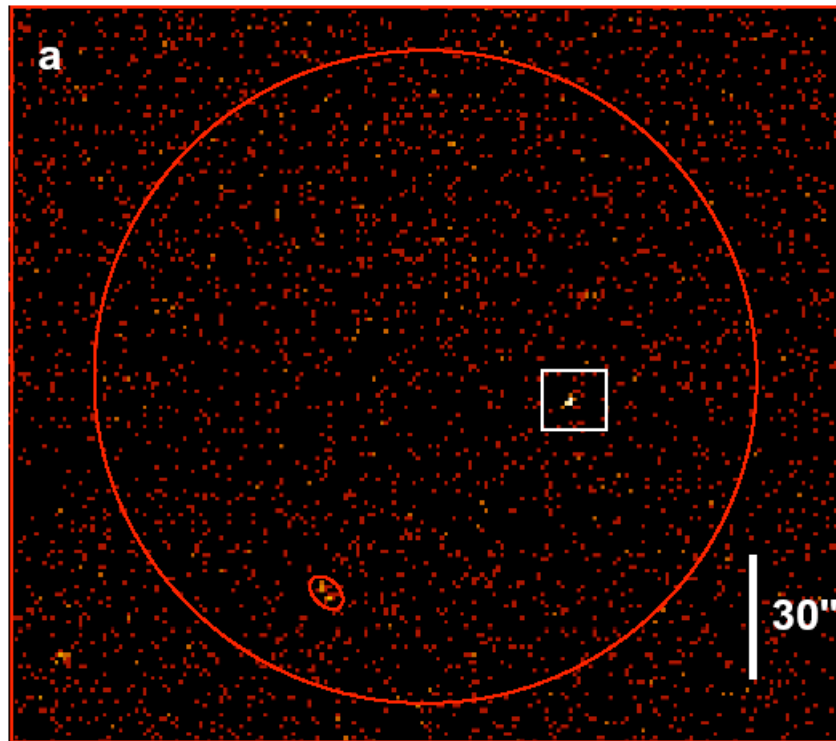
[http://www.astro.ku.dk/~brian\\_j/grb/grb050709.94/](http://www.astro.ku.dk/~brian_j/grb/grb050709.94/)

CISCO (Kosugi, Aoki, Kawai, ...)

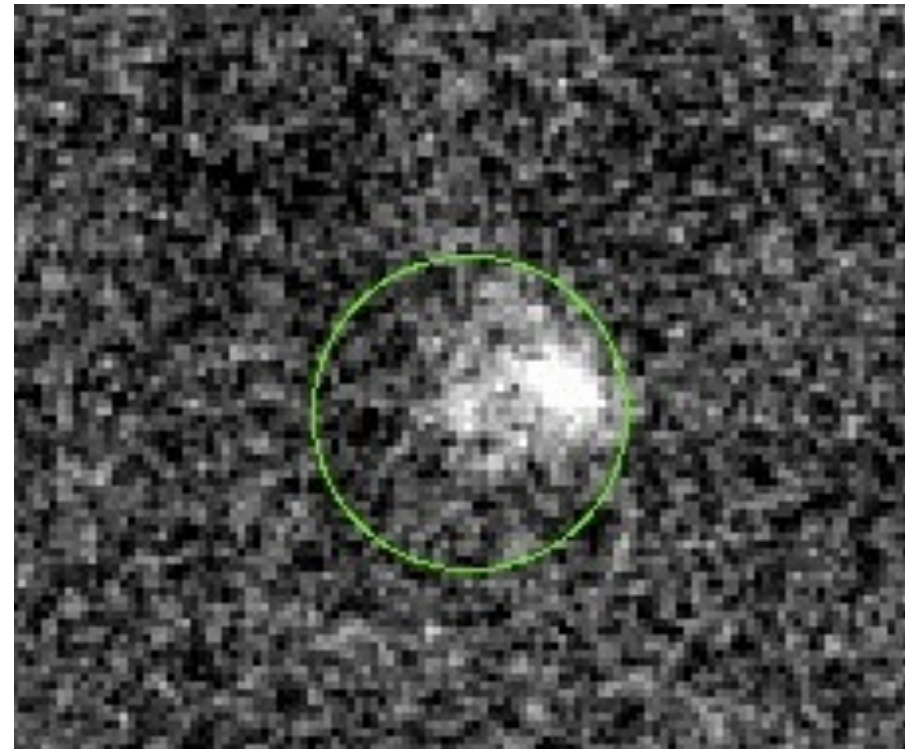


<http://space.mit.edu/HETE/Bursts/GRB050709/>

# GRB 050709: 位置決定、X線残光と可視光残光



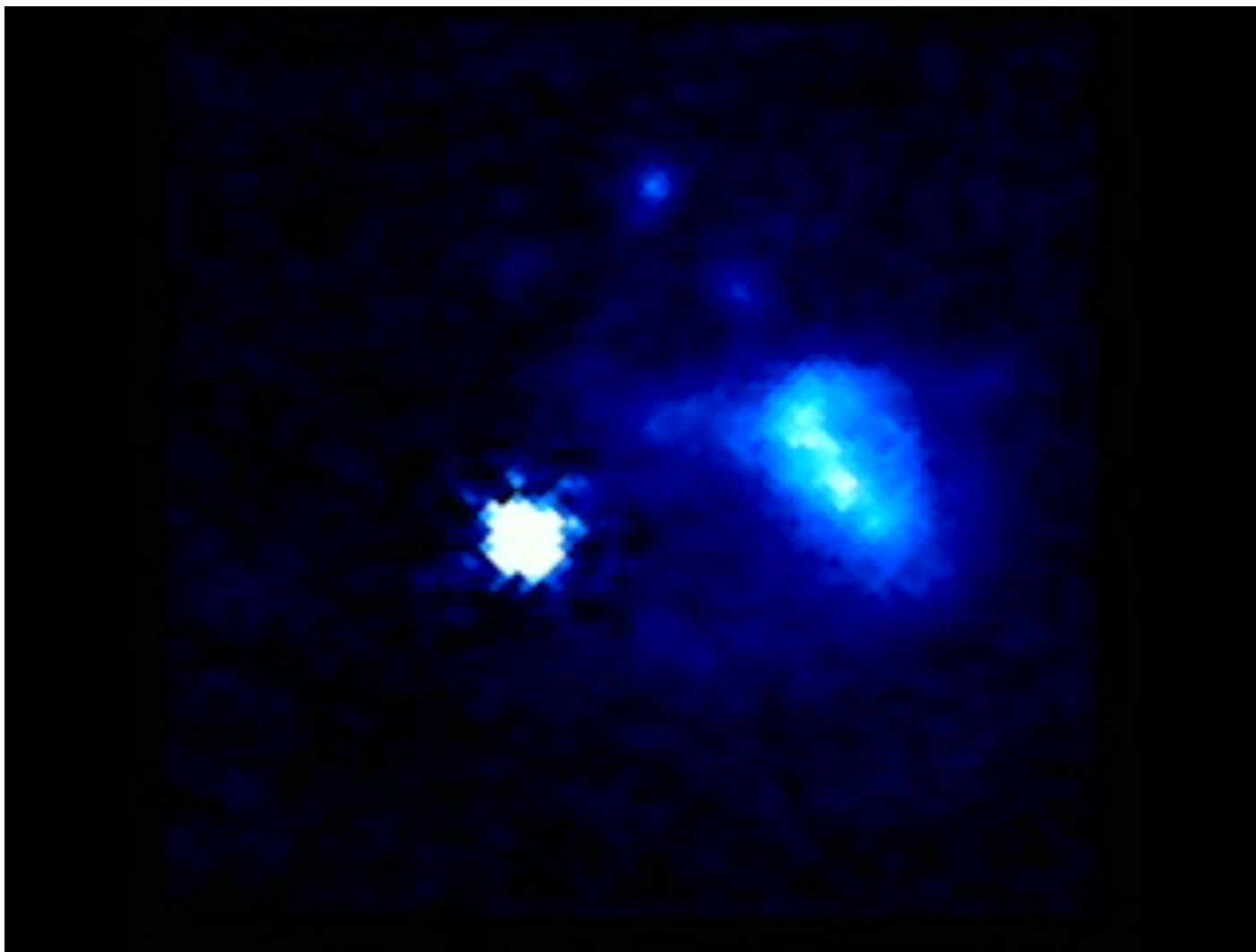
チャンドラX線望遠鏡



すばる望遠鏡(波長2 $\mu$ m赤外線)

- 短いGRBから初めて可視光残光を検出
- 矮小不規則銀河の周辺部で発生
- 新しい星が作られていない領域

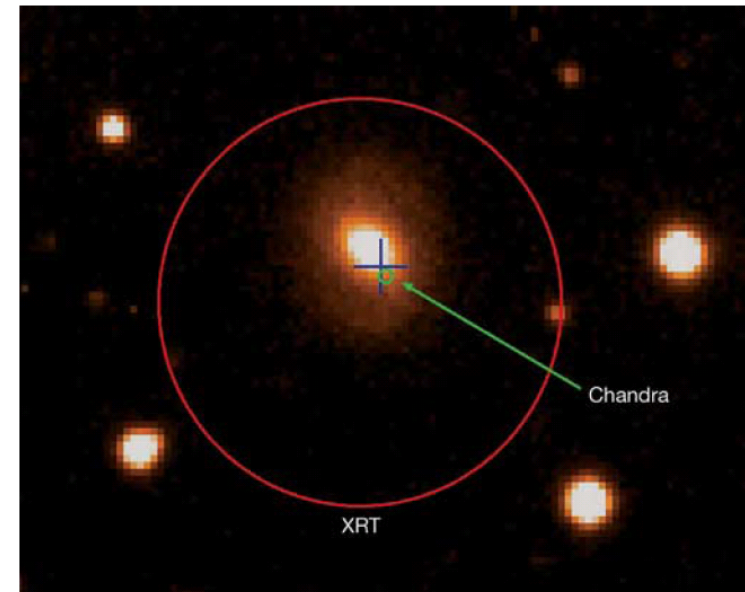
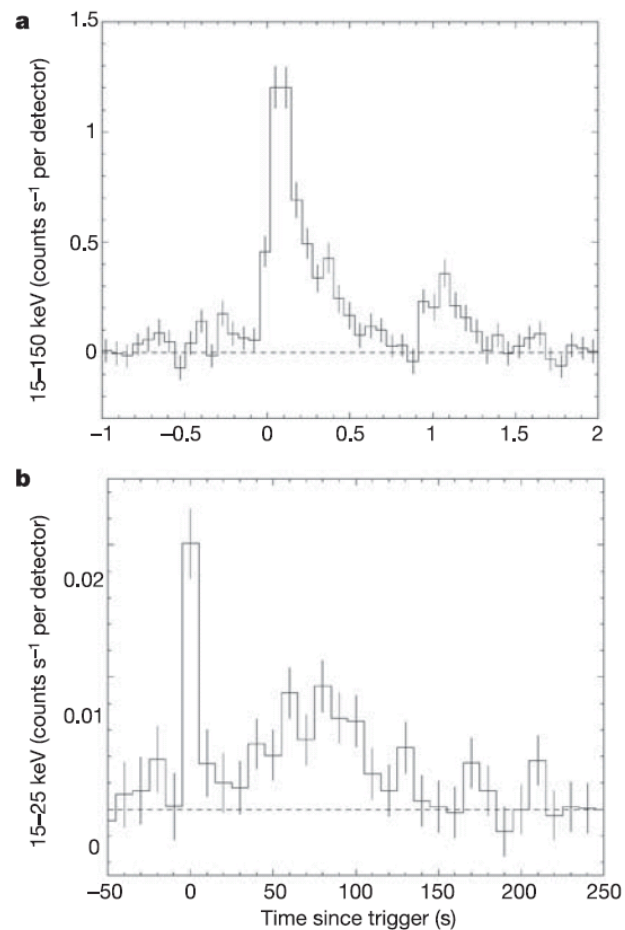
# ハッブル宇宙望遠鏡のムービー



Movie courtesy of D. Fox

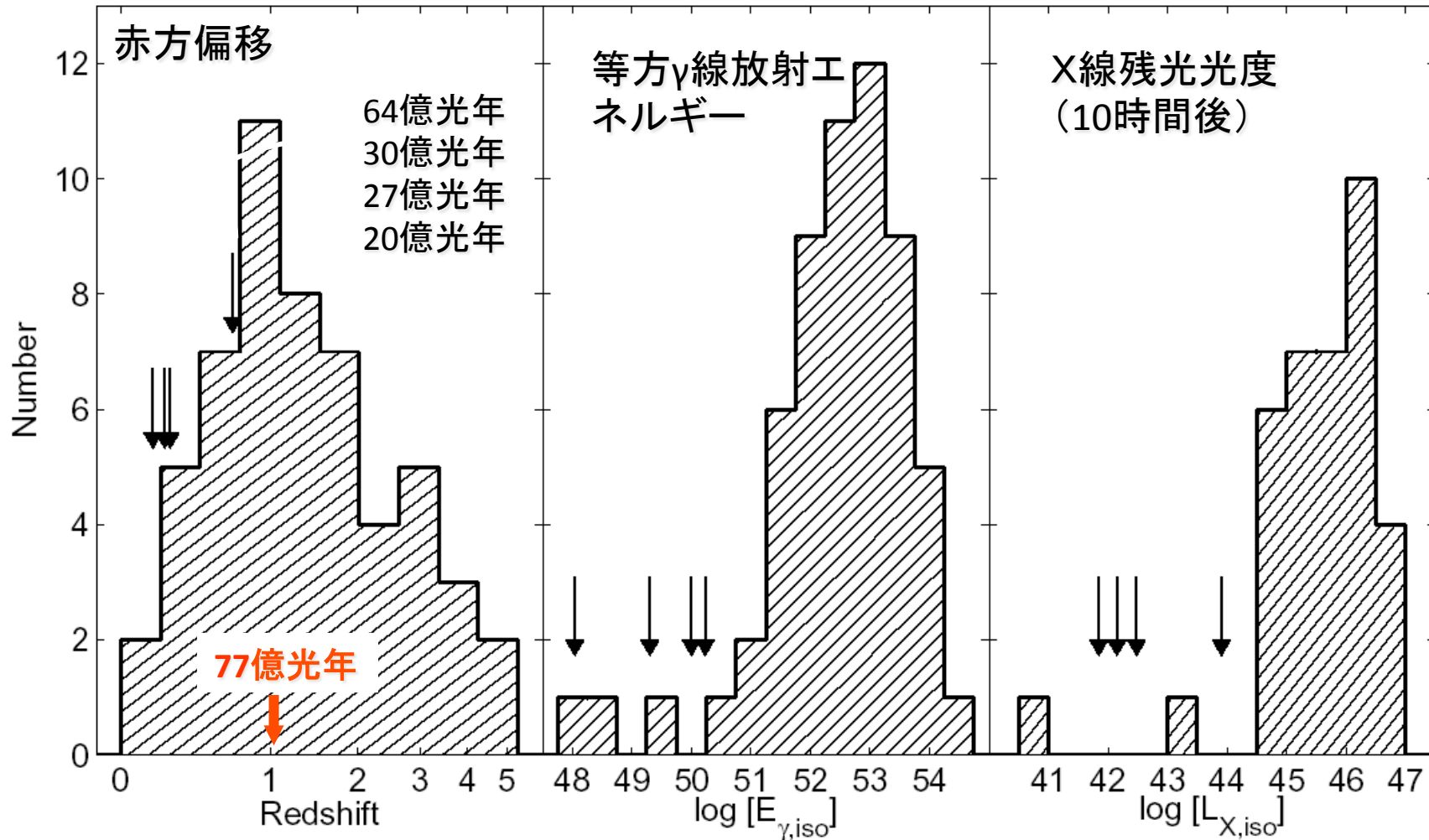
# GRB050724 localized by Swift

Barthelmy et al. 2005

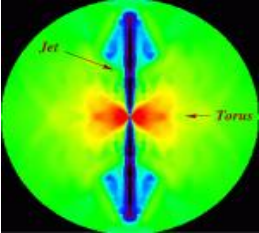
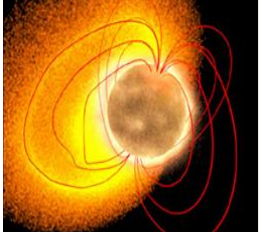
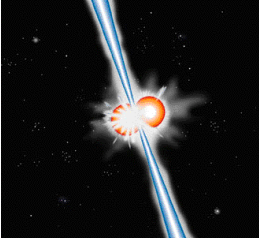


**Figure 2 | VLT optical image<sup>17</sup> showing the association of GRB050724 with the galaxy.** The blue cross is the position of the optical transient<sup>16,17</sup>. The XRT (red circle) and Chandra (green circle) burst positions are superimposed on a bright red galaxy at redshift  $z = 0.258$  (ref. 5), implying a low-redshift elliptical galaxy as the host. The XRT position has been further revised from the position of ref. 15 by astrometric comparison with objects in the field. The projected offset from the centre of the galaxy corresponds to  $\sim 4$  kpc assuming the standard cosmology with  $H_0 = 71 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  and  $(\Omega_M, \Omega_\Lambda) = (0.27, 0.73)$ .

# 距離が既知の $\gamma$ 線バーストの 赤方偏移と放射エネルギーの分布 (矢印: 短いバースト)

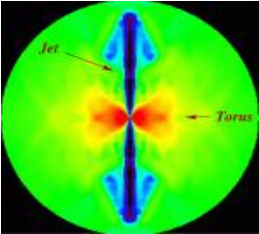
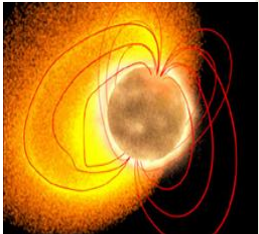
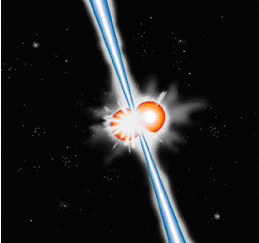


# ガンマ線バーストの起源 モデルとの比較

	仕組み	年齢	発生場所	継続時間
	大質量星の最期の重力崩壊による大爆発	若い星 (数百万年以下)	星形成領域	>10秒
	超強磁場中性子星の星全体規模の巨大地震	若い星 (数千万年以下)	星形成領域付近	<1秒
	古い中性子星またはブラックホールの連星の軌道縮小による衝突	古い星 (数千万年～数十億年以上)	星形成と無関係: 銀河の重力圏内どこでも	<1秒

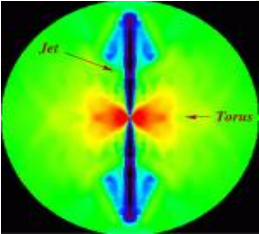
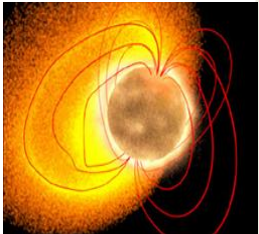
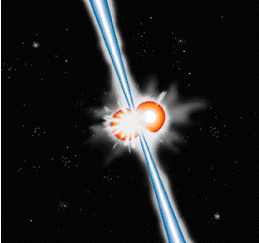


# ガンマ線バーストの起源 モデルとの比較 長いバースト

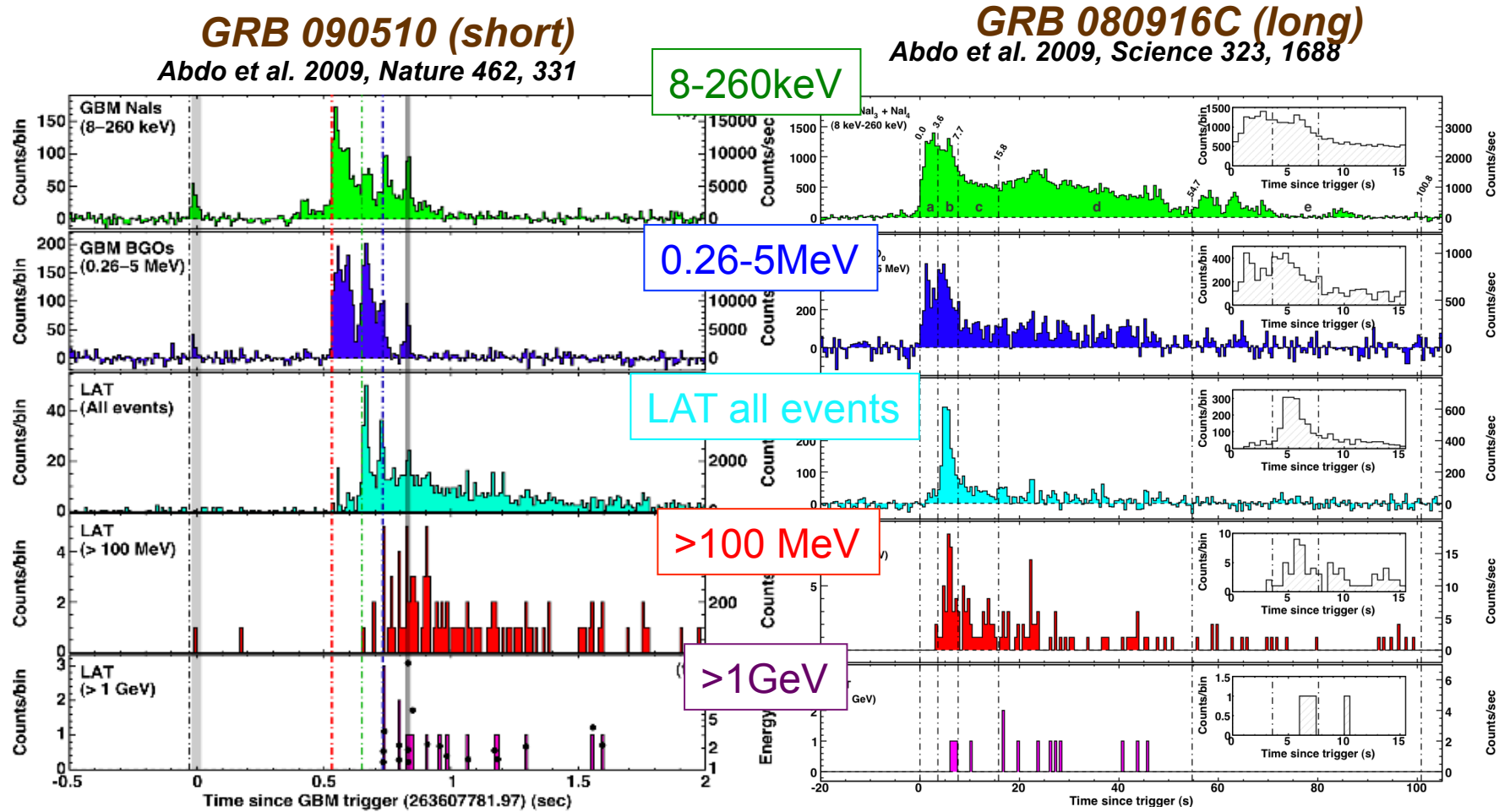
	仕組み	年齢	発生場所	継続時間
	大質量星の最期の重力崩壊による大爆発	若い星 (数百万年以下)	星形成領域	>10秒
	超強磁場中性子星の星全体規模の巨大地震	若い星 (数千万年以下)	星形成領域付近	<1秒
	古い中性子星またはブラックホールの連星の軌道縮小による衝突	古い星 (数千万年~数十億年以上)	星形成と無関係: 銀河の重力圏内どこでも	<1秒

# ガンマ線バーストの起源

## モデルとの比較 短いバースト

	仕組み	年齢	発生場所	継続時間
	<del>コアブレイク</del> 大質量星の最期の重力崩壊による大爆発	<del>若い星 (数百万年以下)</del>	<del>星形成領域</del>	<del>&gt;10秒</del>
	<del>マグネターのフレア</del> 超強磁場中性子星の星全体規模の巨大地震	<del>若い星 (数千万年以下)</del>	<del>星形成領域付近</del>	<1秒
	高密度星の合体 古い中性子星またはブラックホールの連星の軌道縮小による衝突	古い星 数千万年～数十億年以上	星形成と無関係： 銀河の重力圏内どこでも	<1秒

# Prompt emission of long and short GRBs



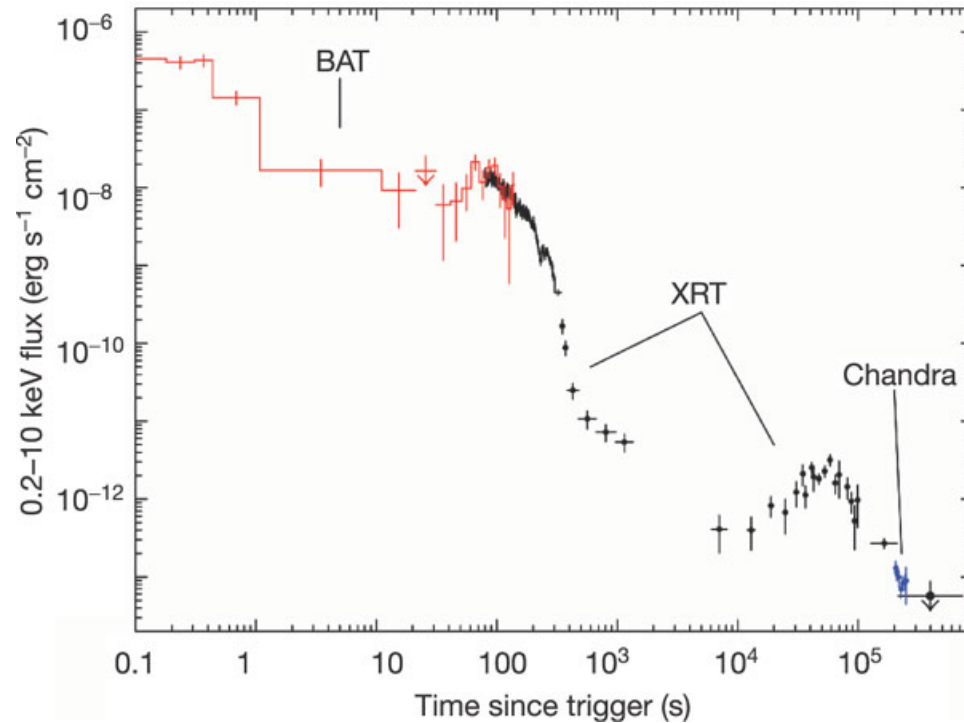
Delay in HE onset: 0.1-0.2 s

Delay in HE onset: ~4-5 s

時間尺度以外は、極めて類似 → 爆発後の物理過程はほとんど同じ

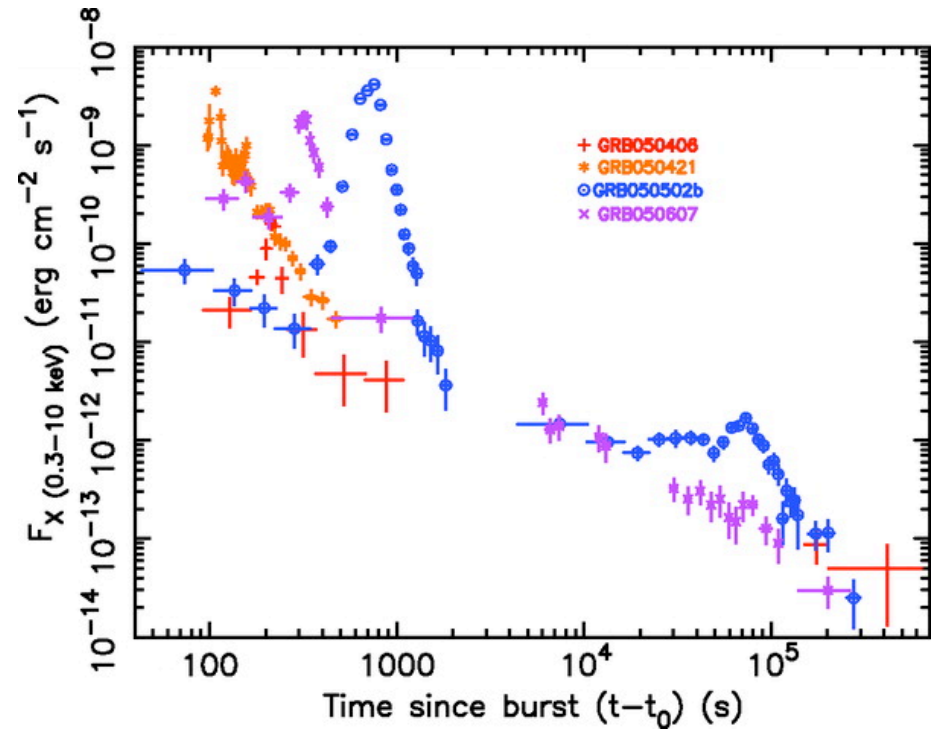
# Afterglow of short and long GRBs

Short GRB050724



Barthelmy et al. 2005

Long GRBs



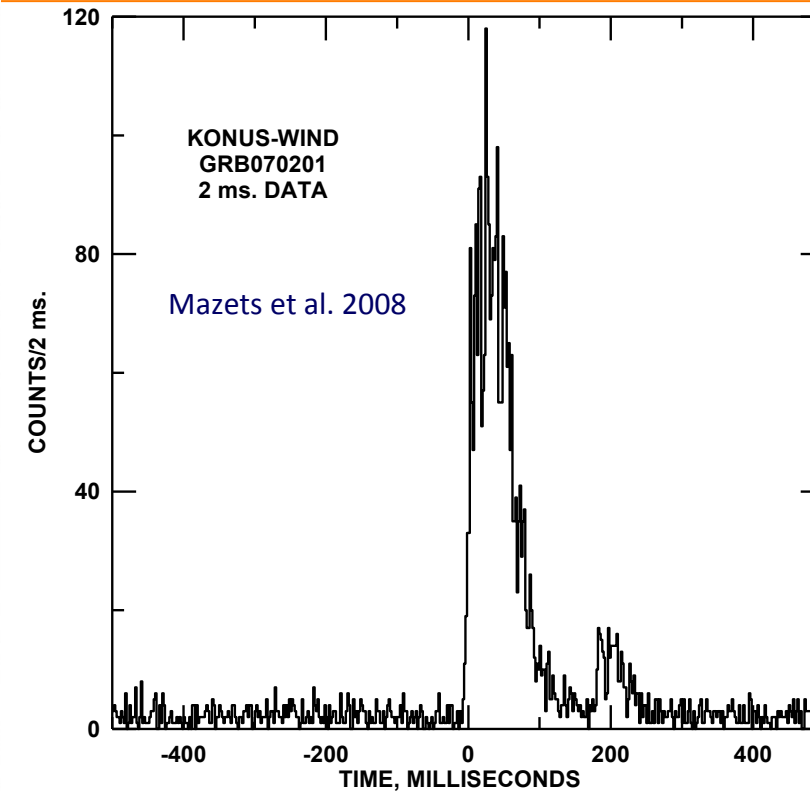
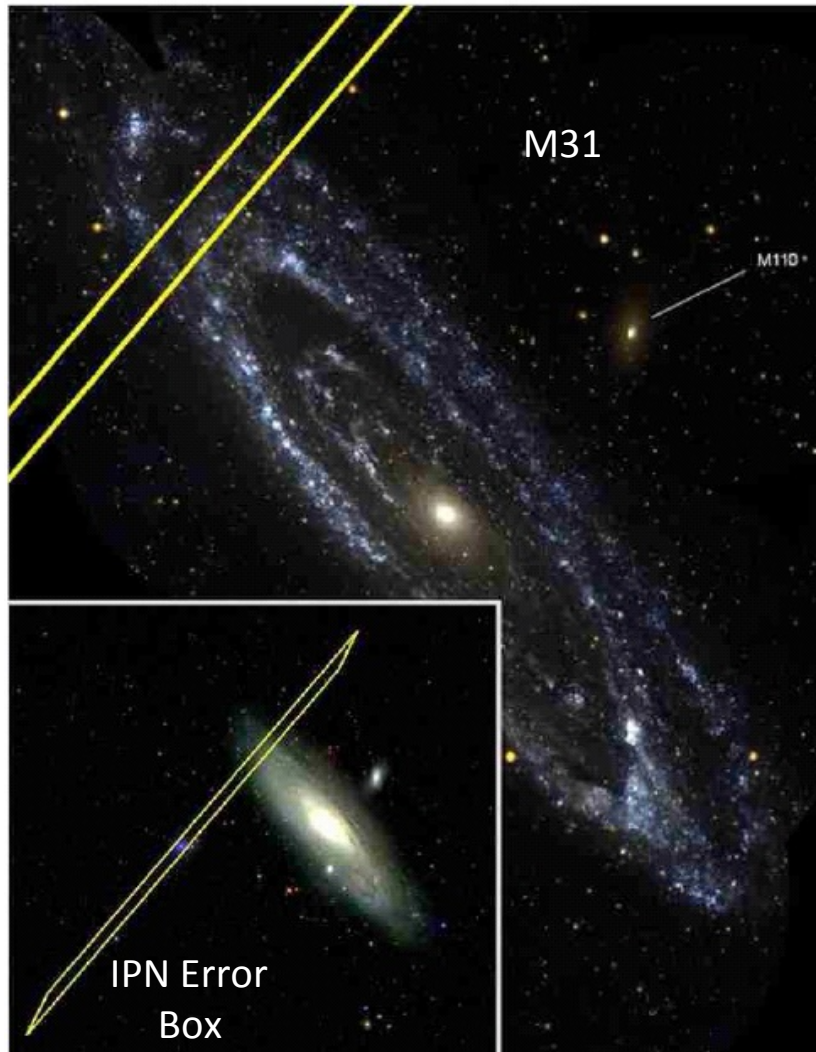
Nousek et al. 2006

X-ray afterglows are similar to those of long GRBs

X線残光の振る舞いも似ている → 爆発後の物理過程はほとんど同じ

# GRB070201

– アンドロメダ銀河で発生? (780 kpc)?



- 運転中の重力波望遠鏡(LIGO)で検出されず!  
→中性子星合体ではない  
(Abbott et al. 2008)  
 $E_\gamma = 1.5 \times 10^{45}$  erg

# Short GRB

- すべての種類の銀河で恒星の密度に比例して発生
- Fermi観測: 高いローレンツ因子
- 中性子星連星合体説は有力(決定的な証拠なし)
  - 決定的検証は重力波の検出!
- ビーミングがあれば多数の見えない(off-axis)事象。
  - Orphan afterglow
  - 重力波検出イベントは近傍 → 明るい orphan afterglow
    - 重力波トリガーによる対応天体追跡(10度視野?)
    - トリガーなし大立体角短時間トランジェント探査

# 中性子星連星合体は 短いGRBとして検出可能か

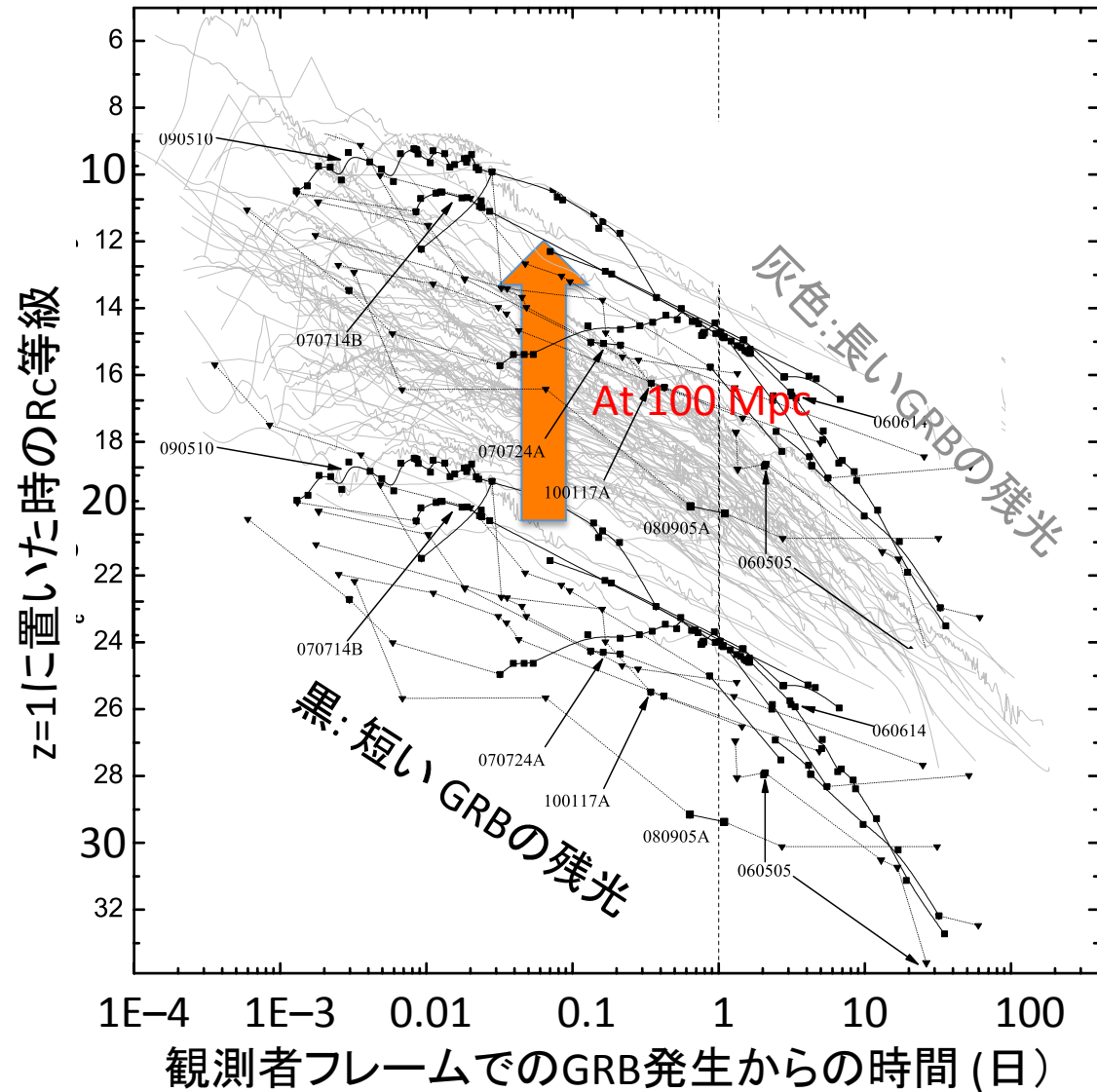
- 重力波望遠鏡の位置決定精度  $\approx 10$ 度
    - ◆ 光学対応天体を見つけるのは難しい
      - 普通の望遠鏡の視野にはいない
      - しかし、 $z < 0.015$  → 普通のGRBより圧倒的に近い
- いままでと異なる観測戦略が必要
- (1) 広い視野で追跡観測 ( $\geq 10$ 度)
  - (2) 広い天空域を常時監視
    - GRB のない《残光》 (orphan afterglow) を探す

# 重力波源となる天体現象

- 中性子星連星の合体
- ブラックホール連星の合体
- 重力崩壊型超新星
- ゆがんだ中性子星の回転
- 中性子星の星震

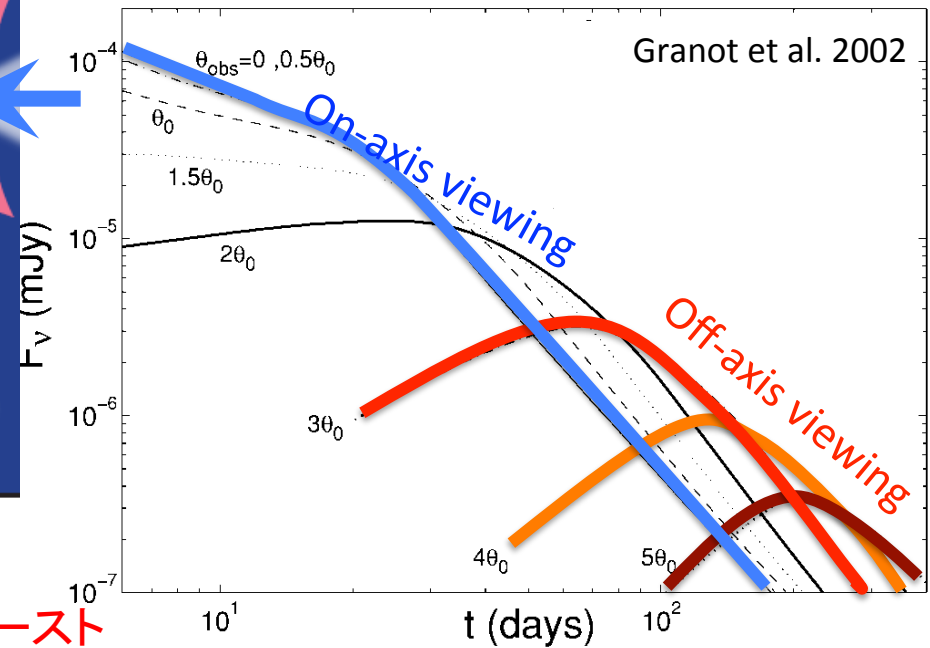
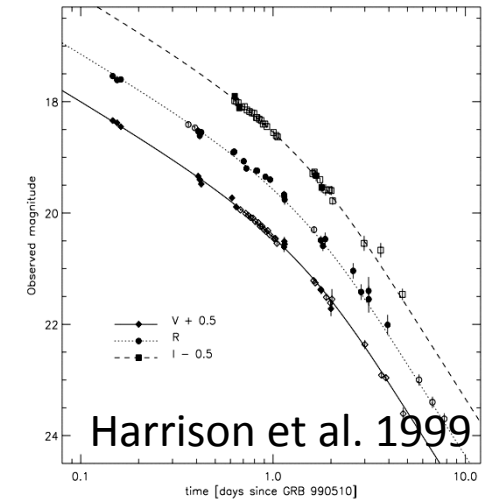
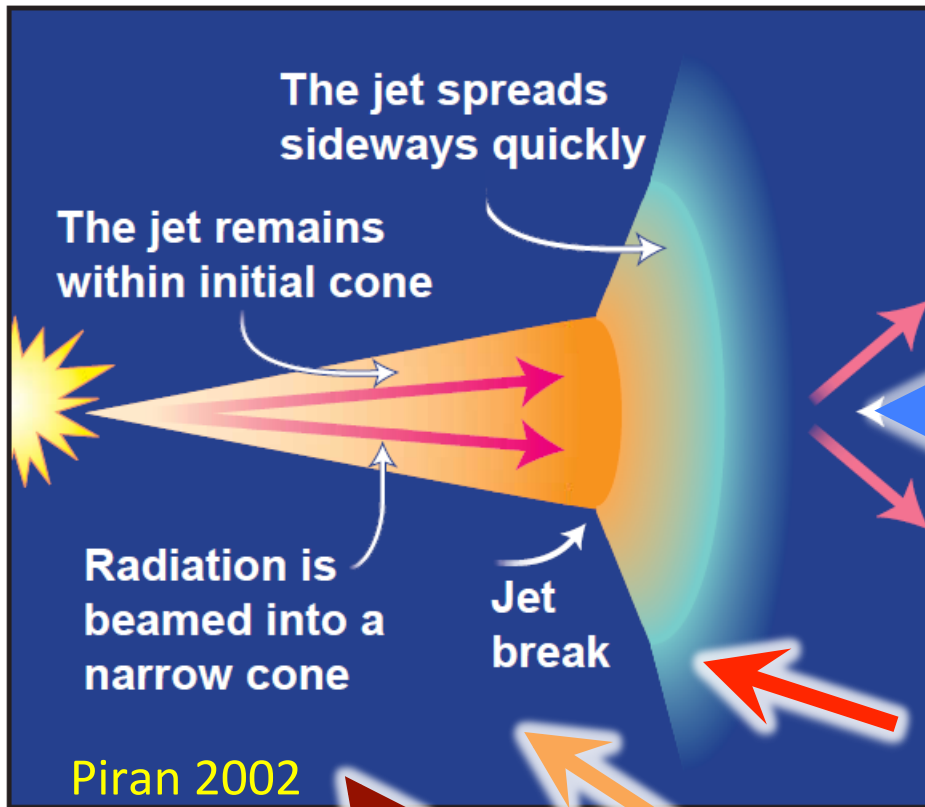


# 短いGRBの可視残光の明るさ



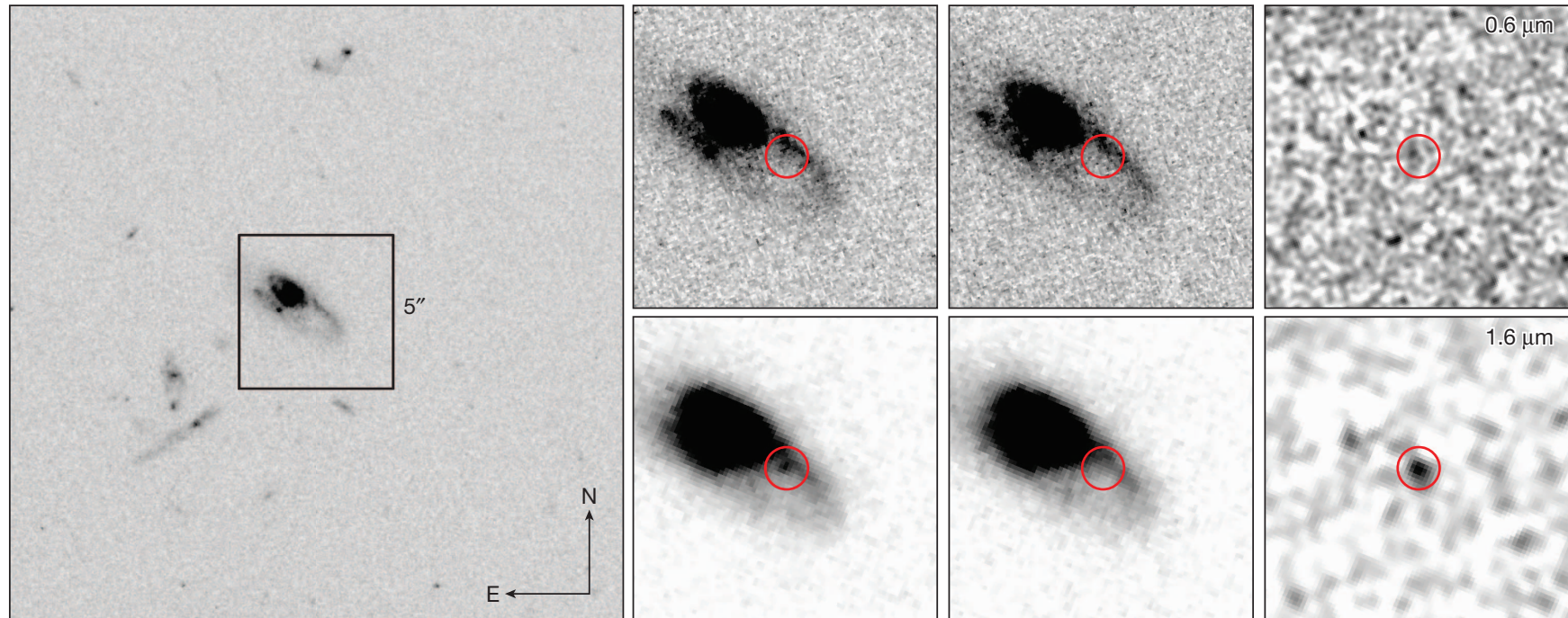
Kann et al. 2011

# ジェット・ブレイクと孤児残光



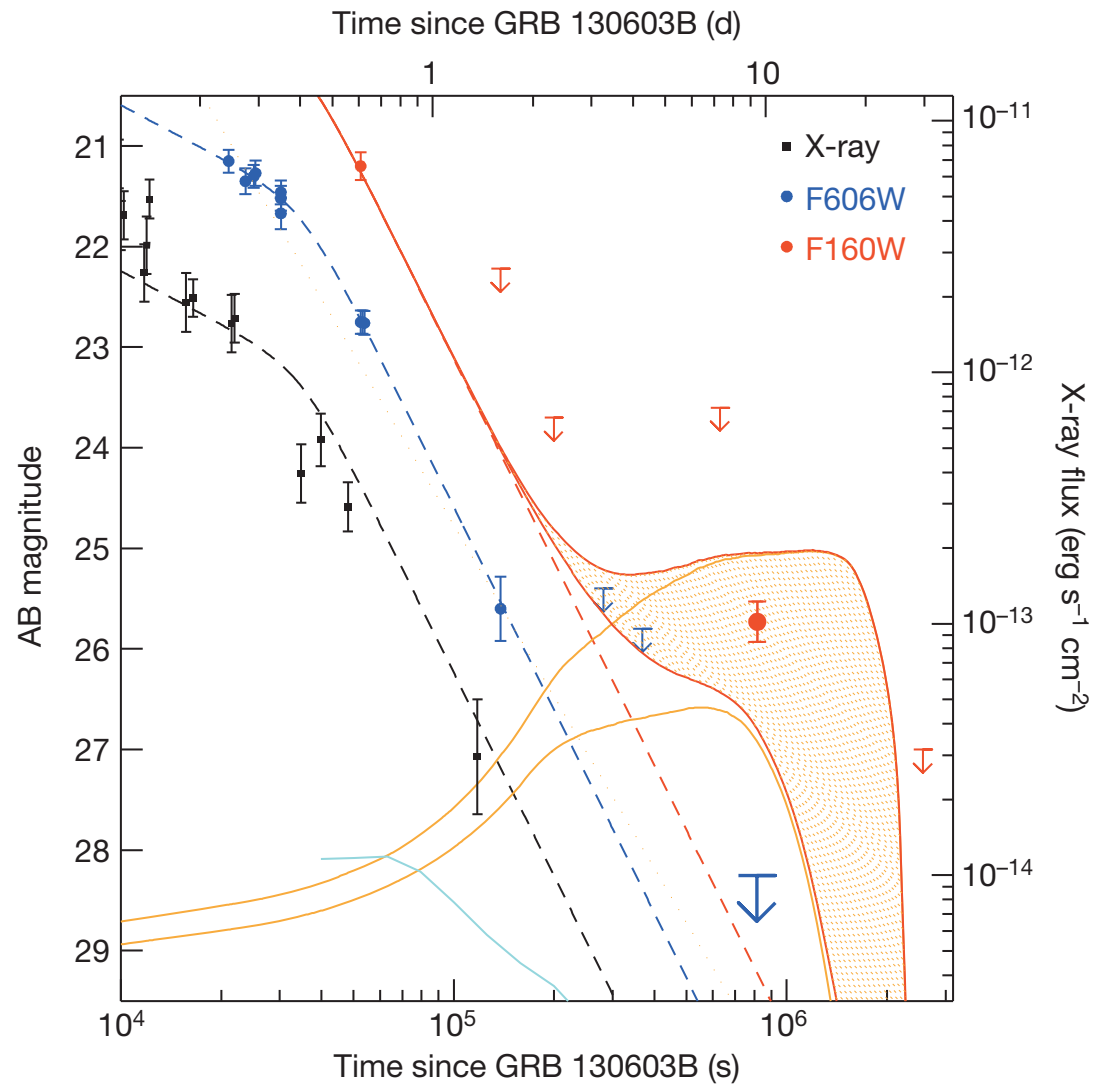
ジェットが観測者を向いていない大多数のバーストもバースト本体のない残光(孤児残光)は見える

# short GRB GRB 130603B with kilonova(?)



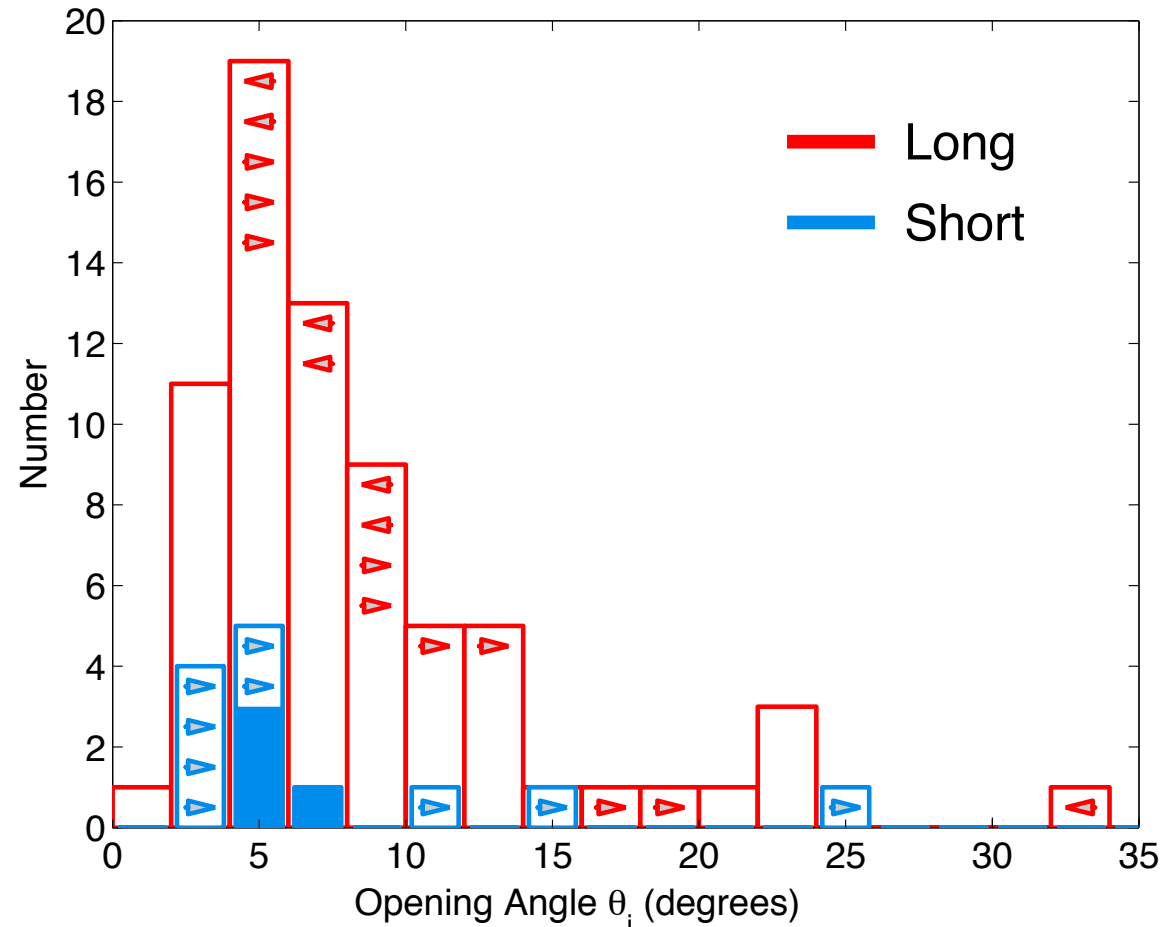
Tanvir et al. 2013

# short GRB GRB 130603B



Tanvir et al. 2013

# short GRB GRB 130603B



## GRB130603B

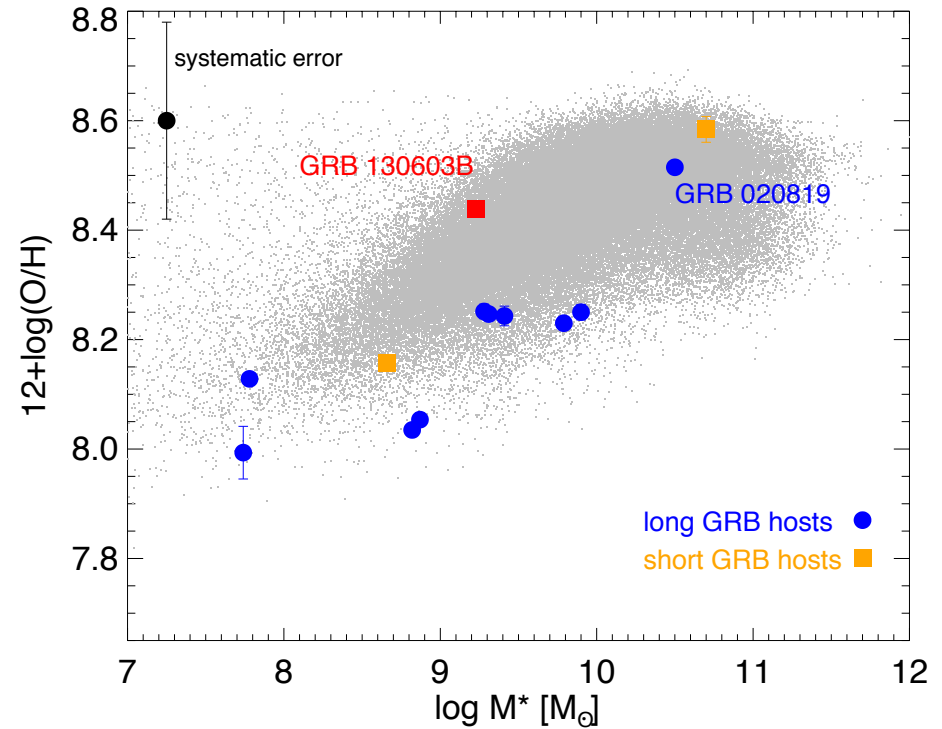
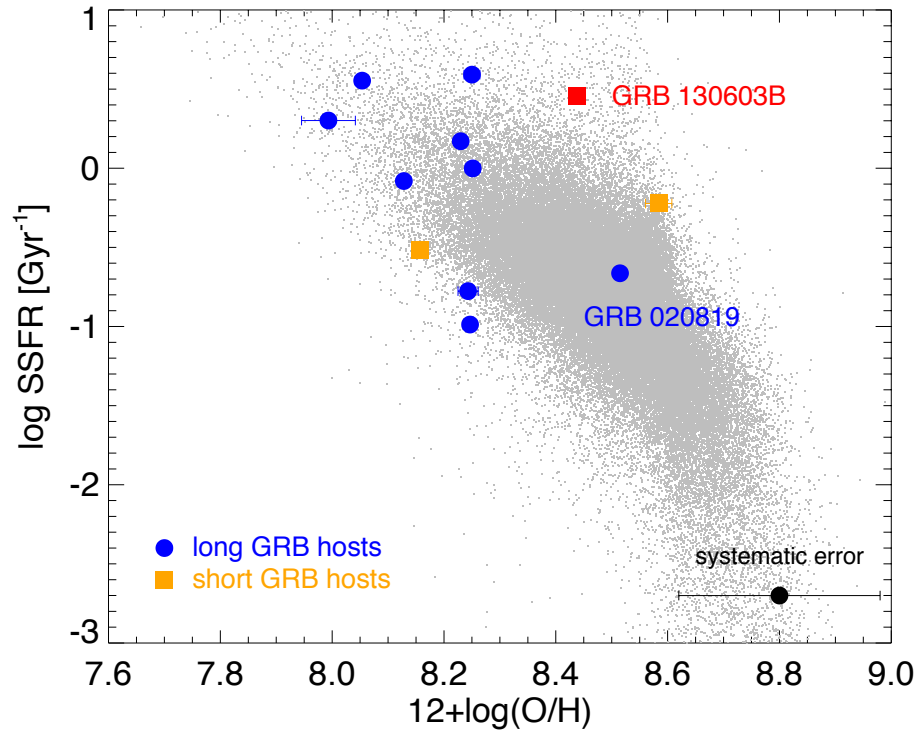
- $E_\gamma \approx (0.5-2) \times 10^{49}$  erg
- $E \approx (0.1-1.6) \times 10^{49}$  erg

## SGRB

- obs rate  $\approx 10 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$
- opening angle  $\approx 10^\circ$
- 
- true rate  $\approx 20 \text{ yr}^{-1}$  within 200 Mpc (LIGO, KAGRA range)

# short GRB GRB 130603B

102



- First spectra of a prototypical SGRB afterglow
- Absorption and emission features detected.
- $z = 0.3565 \pm 0.0002$
- $A_V = 0.86 \pm 0.15 \text{ mag}$
- Moderately star forming galaxy with near-solar metallicity
- $N_{\text{HX}}/A_V$  is consistent with the Galactic ratio
- differs from those found in LGRBs.

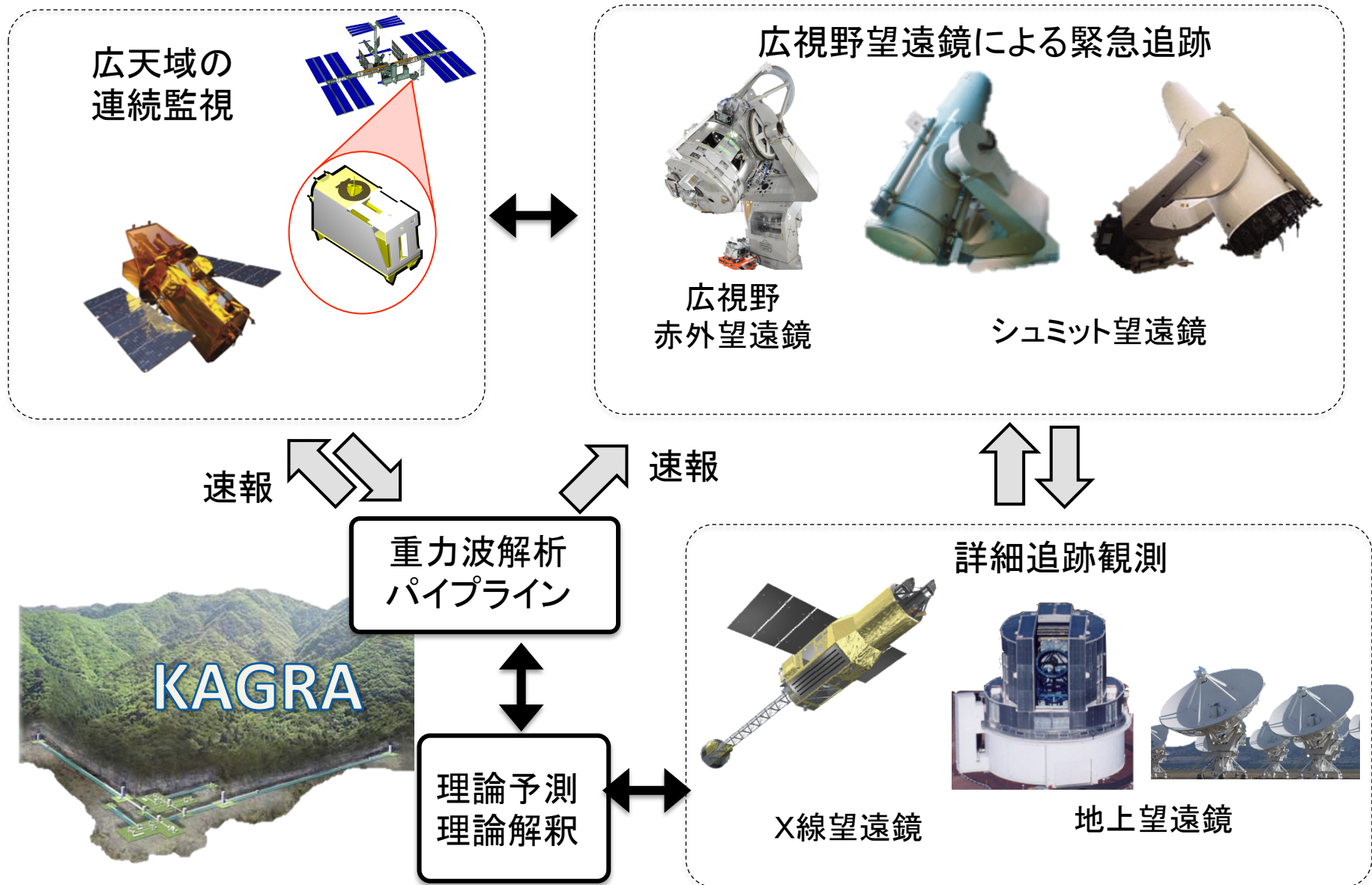
de Ugarte Postigo et al. 2013

# 重力波バーストの観測戦略

- 即応追跡・孤児残光探索の両面作戦
- 位置精度不足を補うには、速報が断然必要
  - ◆ 広視野可視・X線観測でリレー
- 想定シーケンス

発生後の時間	位置精度	観測手段
1分	5°	重力波
2分	0.1°	X線広天域監視装置をチェック (可視光広天域監視カメラ?)
5分	4" (=0.001°)	広視野地上(小)望遠鏡
1時間	<1"	地上大望遠鏡
1日	<1"	宇宙望遠鏡

# 重力波源対応天体の追跡戦略





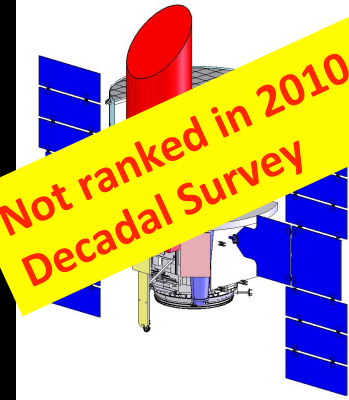
# Proposed transient missions

Lobster/ISS-Lobster



No selection made for 2012 Explorer MO AO

EXIST



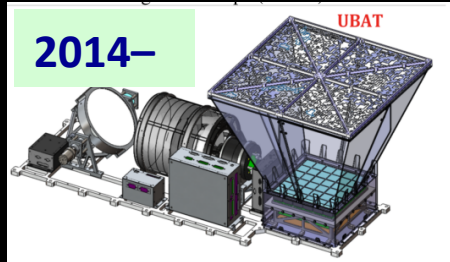
Not ranked in 2010 Decadal Survey

Janus



Not selected

UFFO Pathfinder



2014-

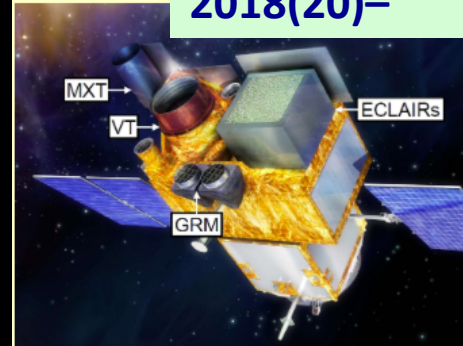
LOFT



No earlier than 2024 if selected

Solar array

SVOM



2018(20)-

A-STAR



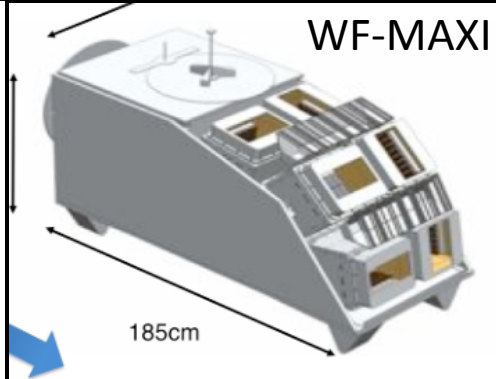
Not selected

CALET



No localization

WF-MAXI



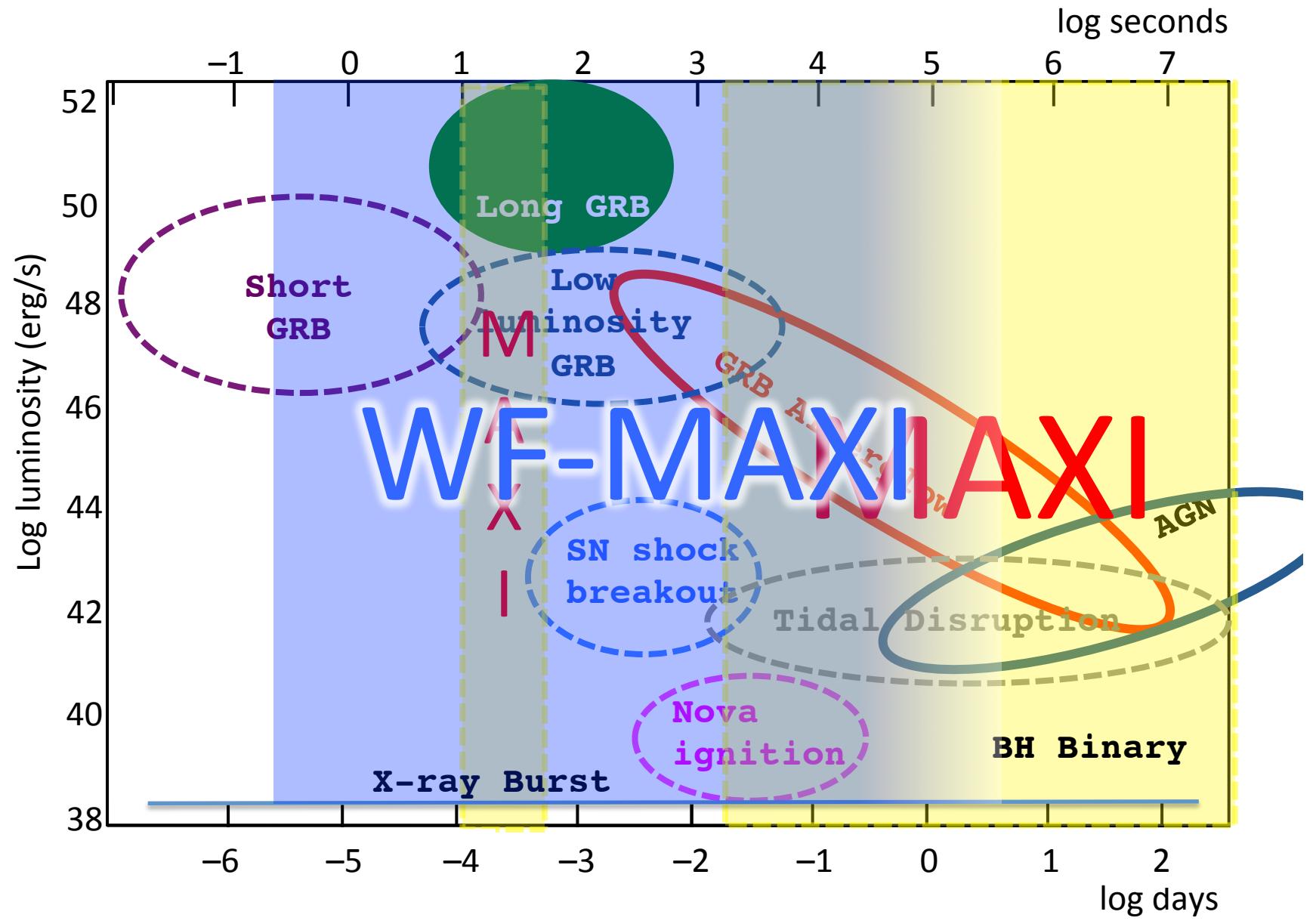
Astro-H/SGD shield



Hi-Z GUNDAM

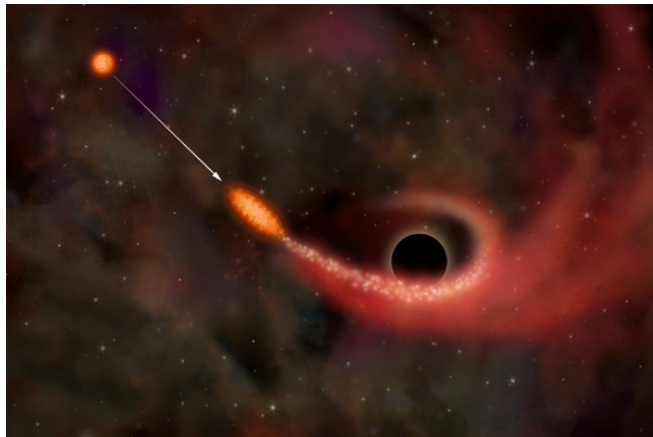


# X-ray transients: $L-\Delta t$



# Short soft X-ray transients

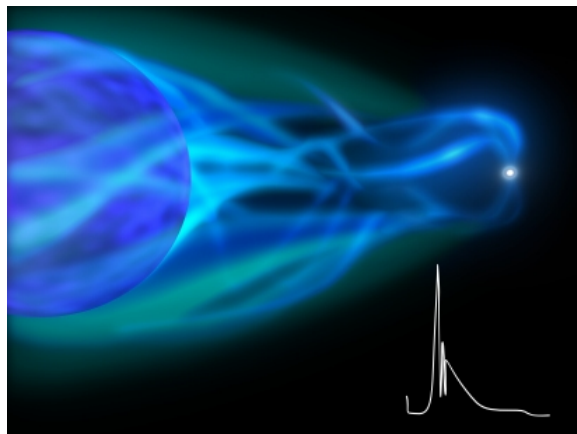
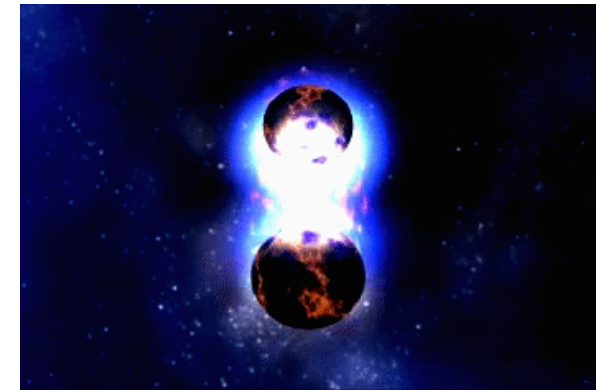
Tidal disruption



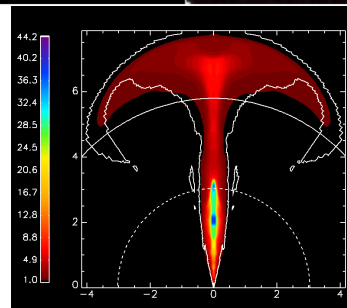
Supernova /GRB shock breakout



Merging neutron star binary



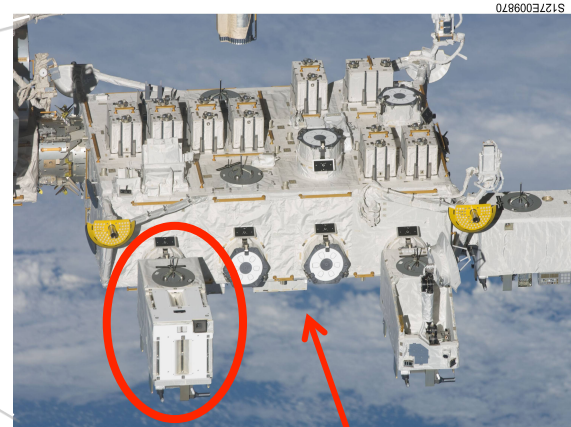
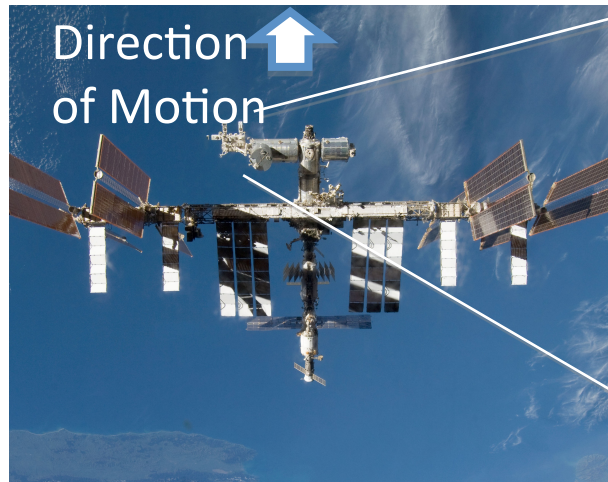
Supergiant fast X-ray transient



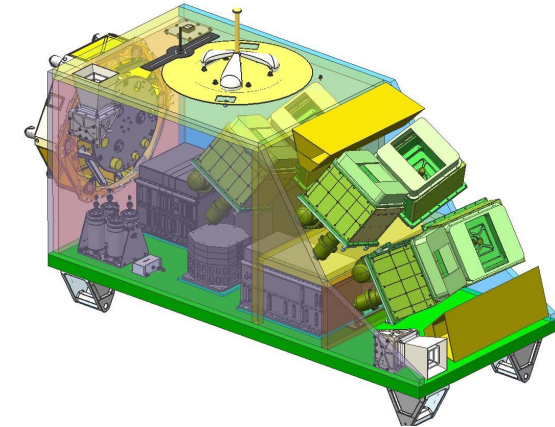
→ short GRBs associated with GW events  
Or, previously unknown soft X-ray transients

# “Wide-Field MAXI” on ISS

N. Kawai + WF-MAXI Team



MAXI JEM EF



<b>goals</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Counterparts for GW sources (adv. LIGO/VIRGO, KAGRA)</li> <li>• First large-sky monitor for short soft X-ray transients</li> </ul>
<b>field of view</b>	≈ <b>20% of the sky</b> (covers 80% sky in 92 min)
<b>Instruments</b>	Soft X-ray Large Solid Angle Camera (SLC: <b>0.7–10 keV</b> ) Hard X-ray Monitor (HXM: 20 keV–1 MeV)
<b>sensitivity</b>	50 mCrab /30 s (SLC) (≈ MAXI/GSC single camera)
<b>pos. accuracy</b>	0.1°
<b>platform</b>	ISS/JEM (selection in 2014, operation 2018– <b>for first GW</b> )

# 結論

- ガンマ線バーストは天文学の全分野に関連する重要な天体現象

- ◆ 恒星進化
- ◆ 銀河
- ◆ 初代星
- ◆ ブラックホール
- ◆ 相対論的ジェット
- ◆ 高エネルギー $\gamma$ 線
- ◆ 重力波
- ◆ ...

- ガンマ線バースト天文学の課題

- ◆ 初代星からのガンマ線バースト
- ◆ 短いガンマ線バースト
- ◆ 観測的チャレンジ
  - 重力波+多波長
  - Time-Domain Astronomy
    - 大立体角待ち受け
    - 即応追跡