

短いGRBは重力波天体か？

2017.4.28 重力波交流会

河合誠之(かわいのぶゆき)

(東京工業大学 理学院物理学系)

概要

- 長いガンマ線バーストと短いガンマ線バースト
- 短いガンマ線バーストの観測 – 特徴と環境
- 中性子星の合体か
- 重力波の対応天体探索
- 今後の観測戦略

- 参考資料

- [Edo Berger “Short GRBs: Progenitors, r-Process Nucleosynthesis, and Gravitational Waves”](http://www.gw.hep.osaka-cu.ac.jp/GWPAW2015/uploads/18th_05-%5BFollow-ups_Counterparts_1_X_Gamma_ray%5D_Berger_presentations.pdf)

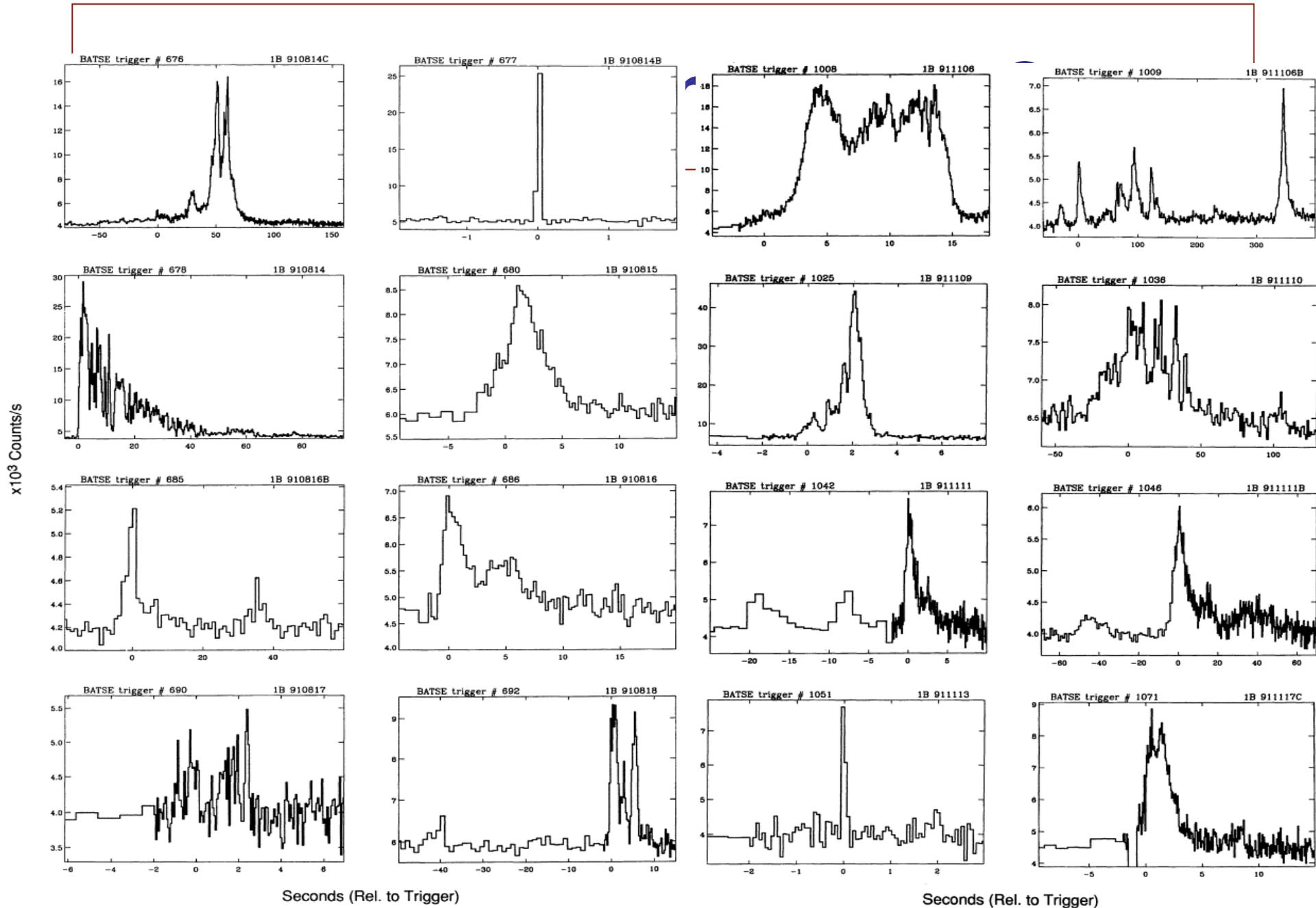
http://www.gw.hep.osaka-cu.ac.jp/GWPAW2015/uploads/18th_05-%5BFollow-ups_Counterparts_1_X_Gamma_ray%5D_Berger_presentations.pdf

GWPAW 2015, 大阪

- T.Sakamoto “Latest Reports on Short GRBs”

[新学術領域「重力波天体」隔月研究会 2014/11](https://yukimura.hep.osaka-cu.ac.jp/wiki/pages/Y0q4f3h3/BiMonthly_Workshop_at_Tokyo_Tech_November_2014.html)

https://yukimura.hep.osaka-cu.ac.jp/wiki/pages/Y0q4f3h3/BiMonthly_Workshop_at_Tokyo_Tech_November_2014.html

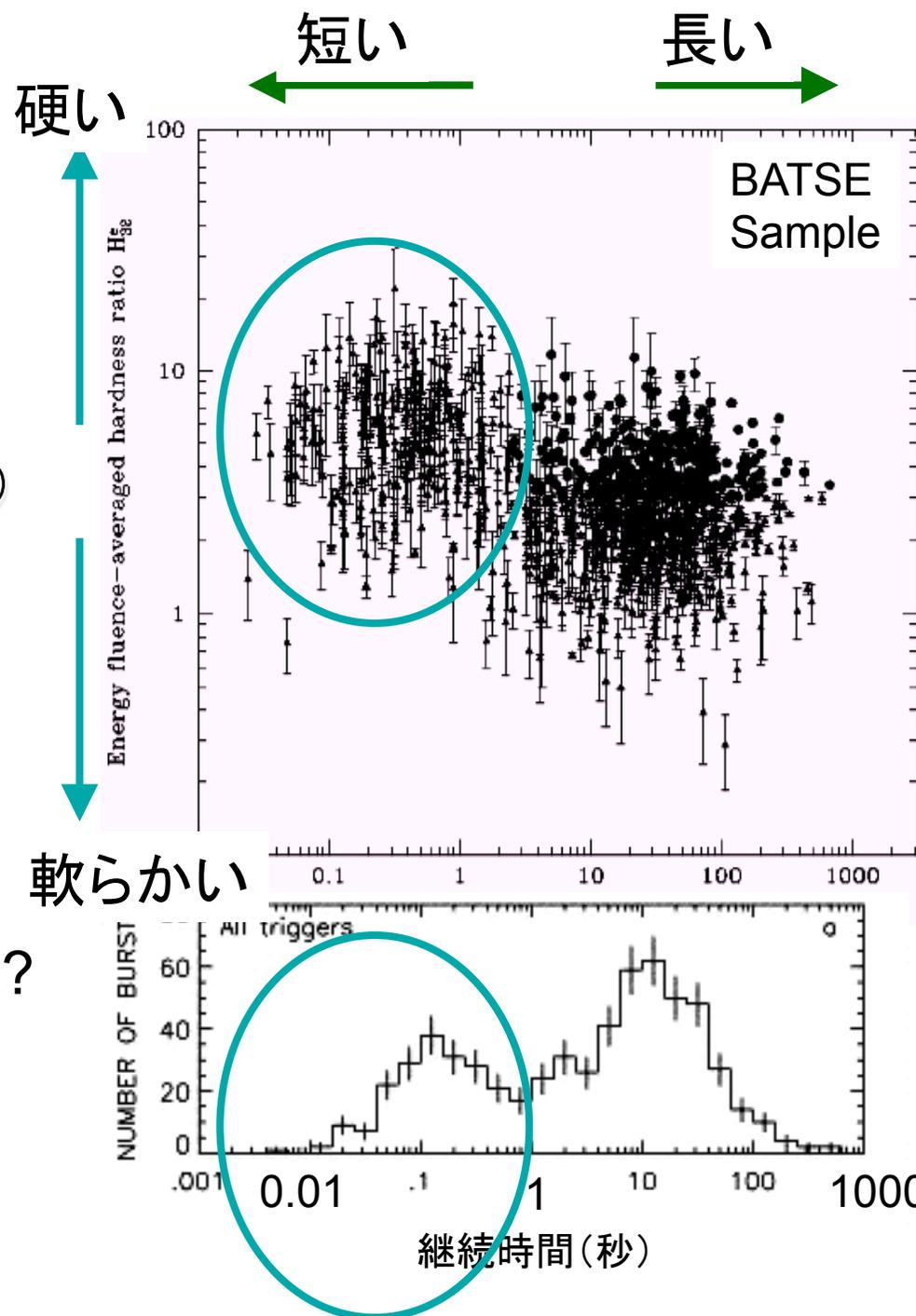


“短くて硬い” ガンマ線バースト

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？

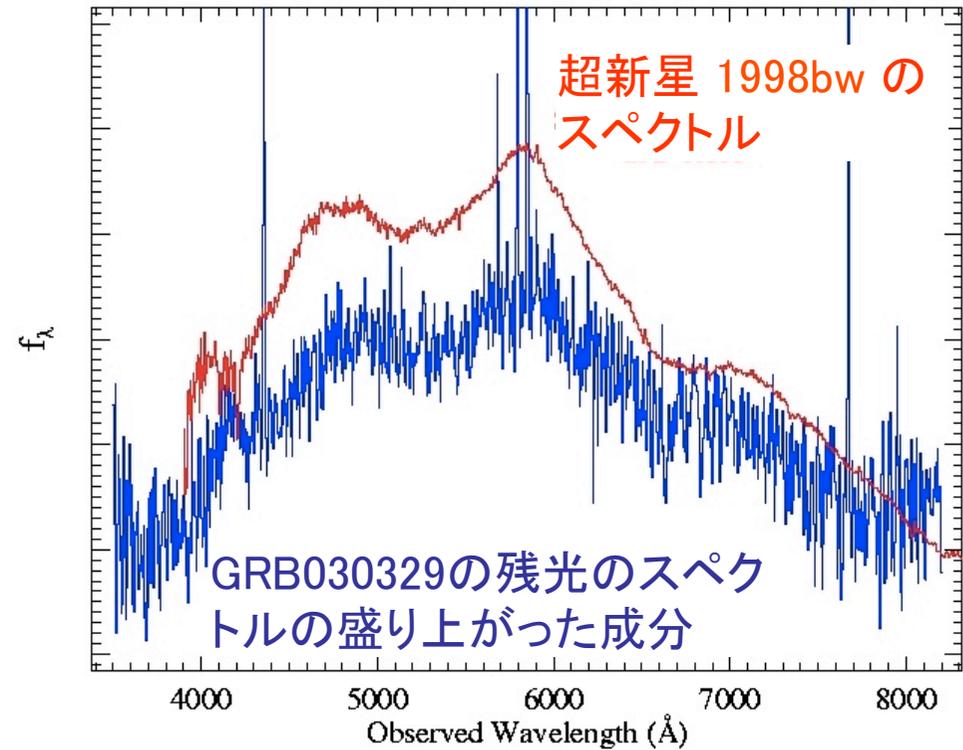
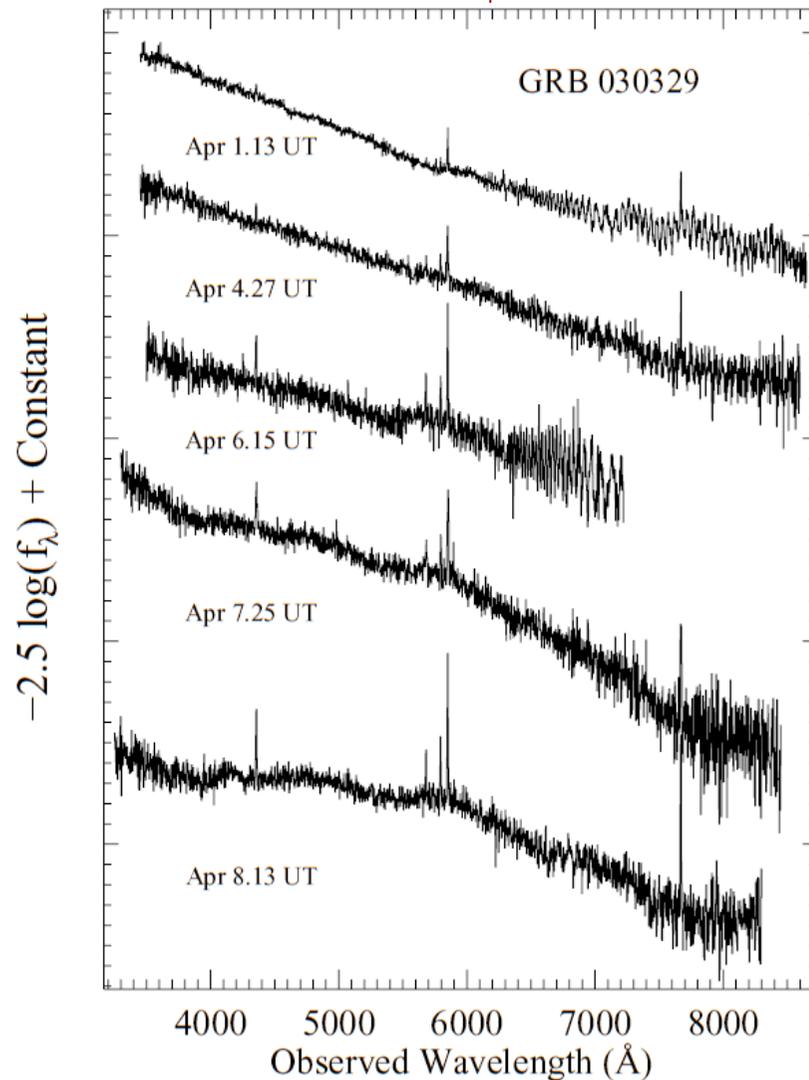


ガンマ線バーストの起源の謎

- 巨大なエネルギー ($> 10^{42}$ J) を ≤ 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

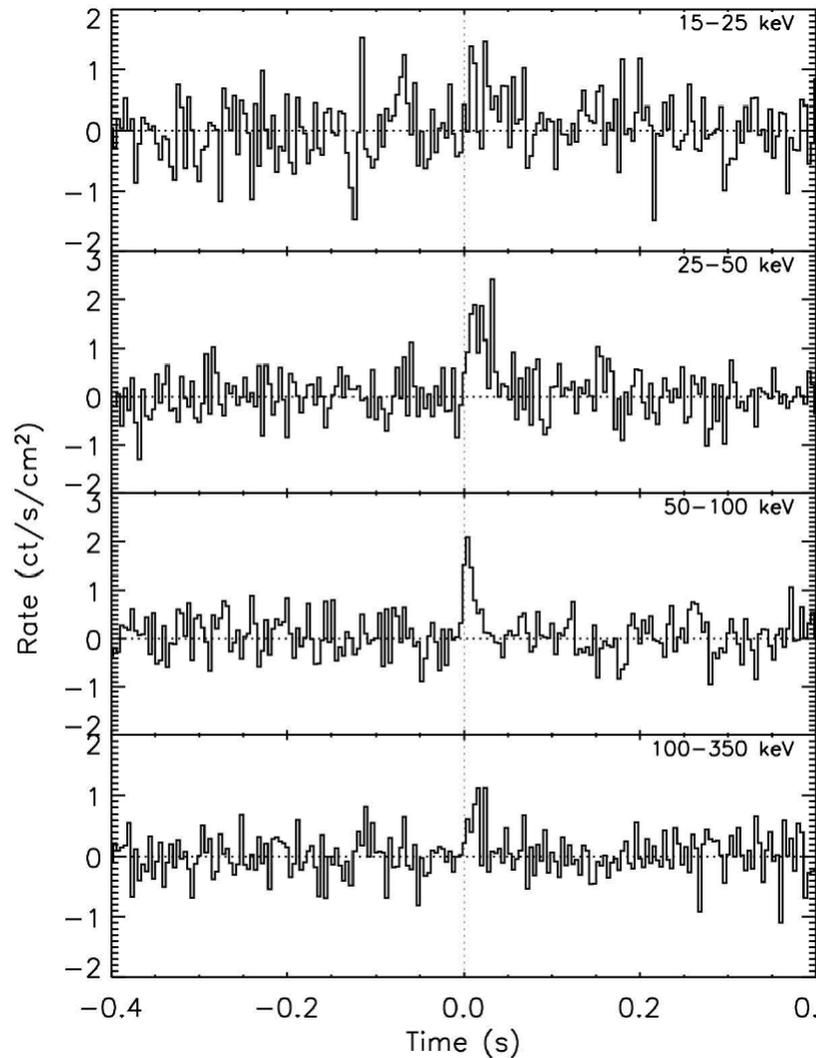
GRB030329の残光の
スペクトルの変化

超新星との関係が確立！



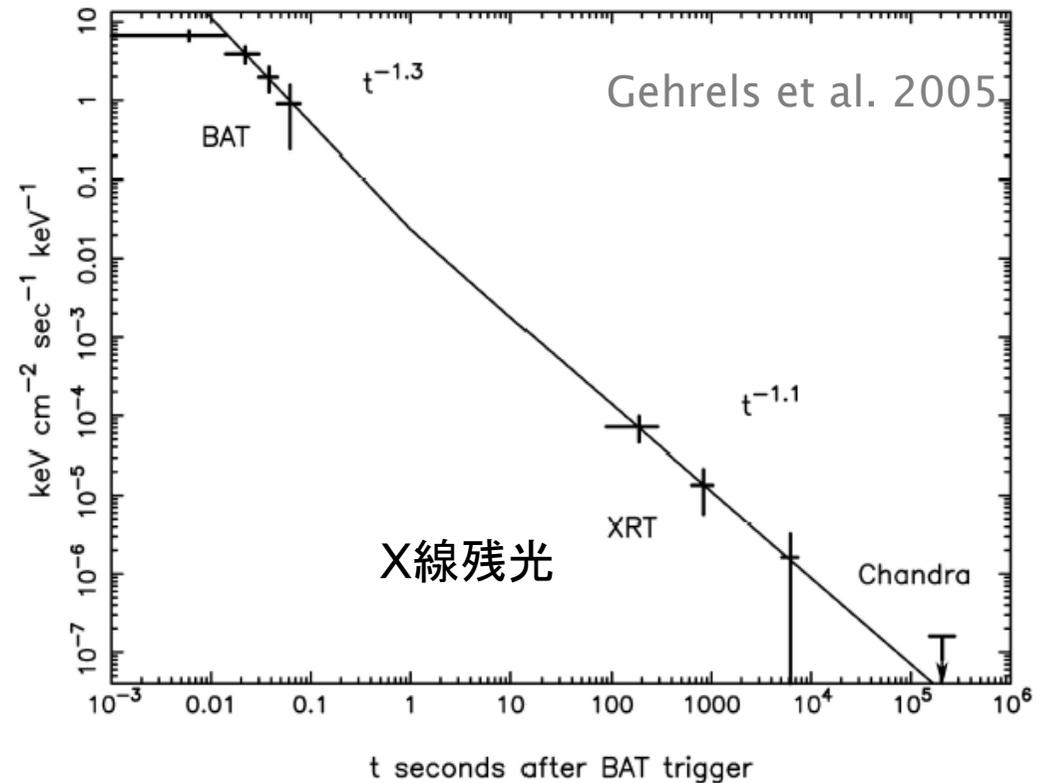
Stanek et al. 2003
also Fynbo et al.
Kawabata et al.

GRB 050509B detected by Swift



17/4/28

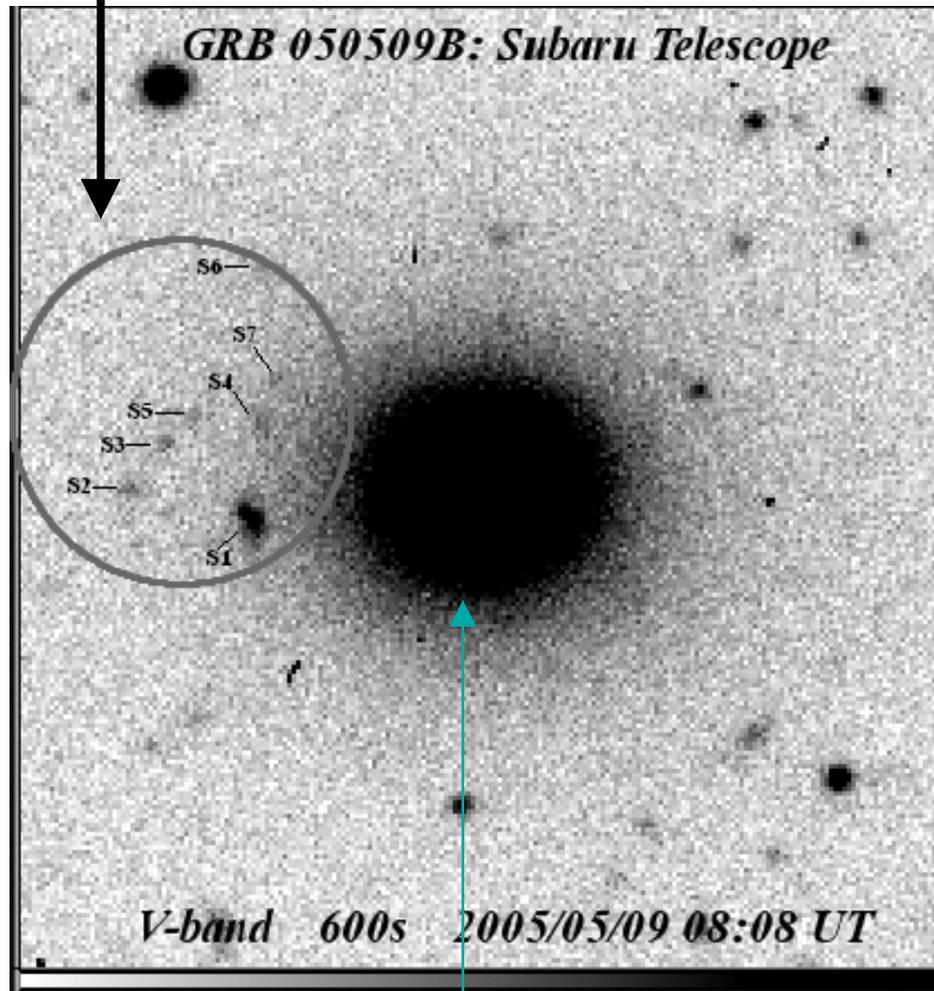
Gehrels et al. 2005



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



- 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

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

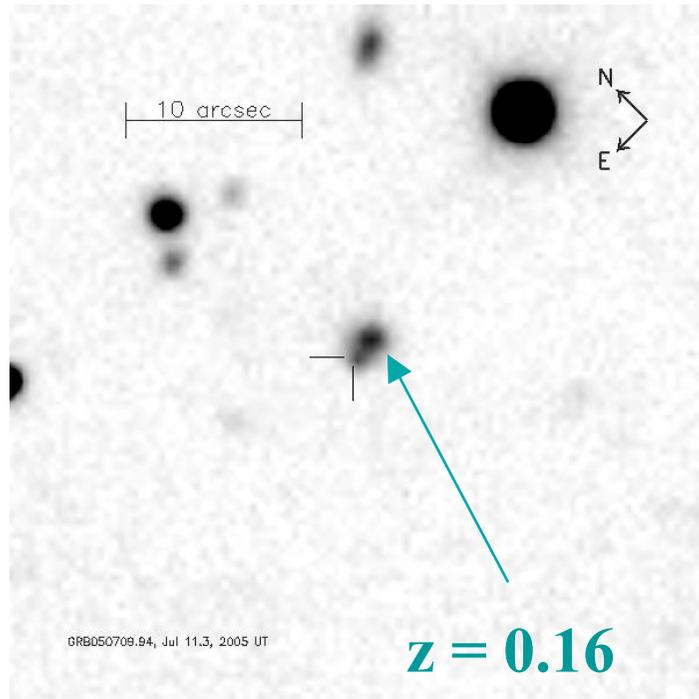
Elliptical galaxy

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

Bloom et al. 2005

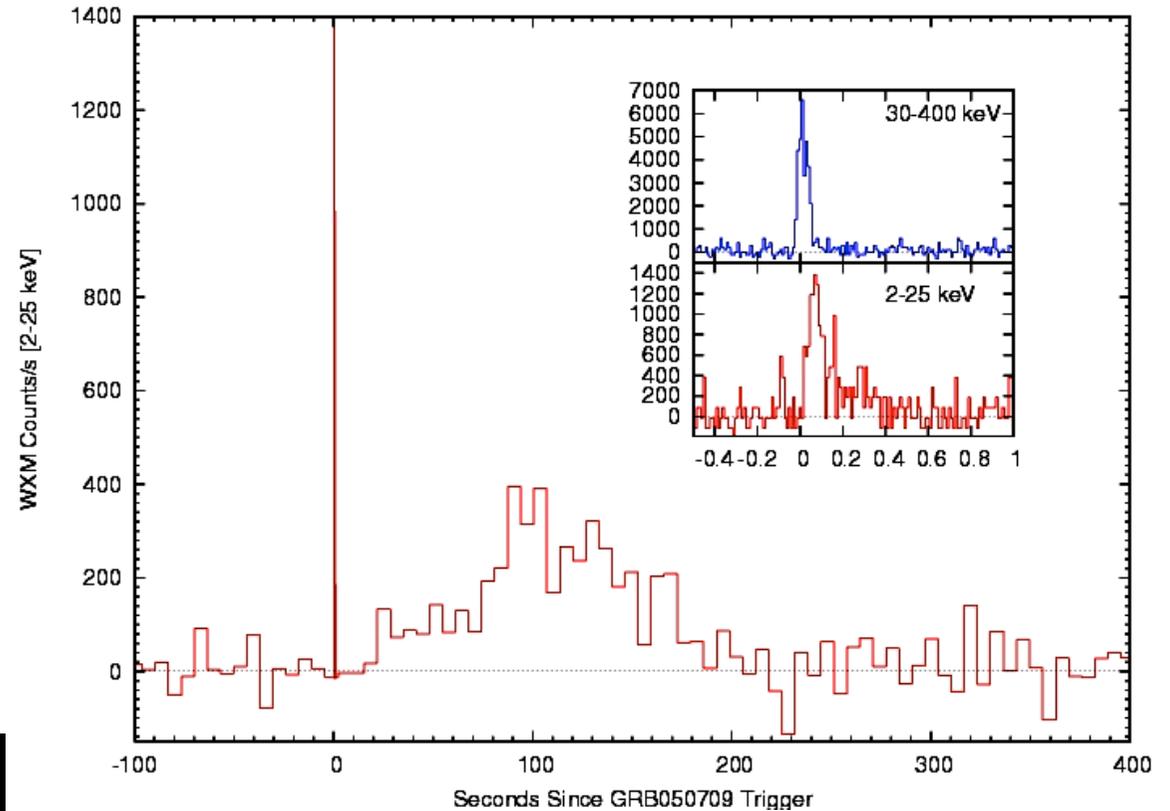
17/4/28
S-Cam (Kosugi, Takada, Furusawa, Kawai)
 $z = 0.2249 \pm 0.0008$

GRB050709 localized by HETE-2



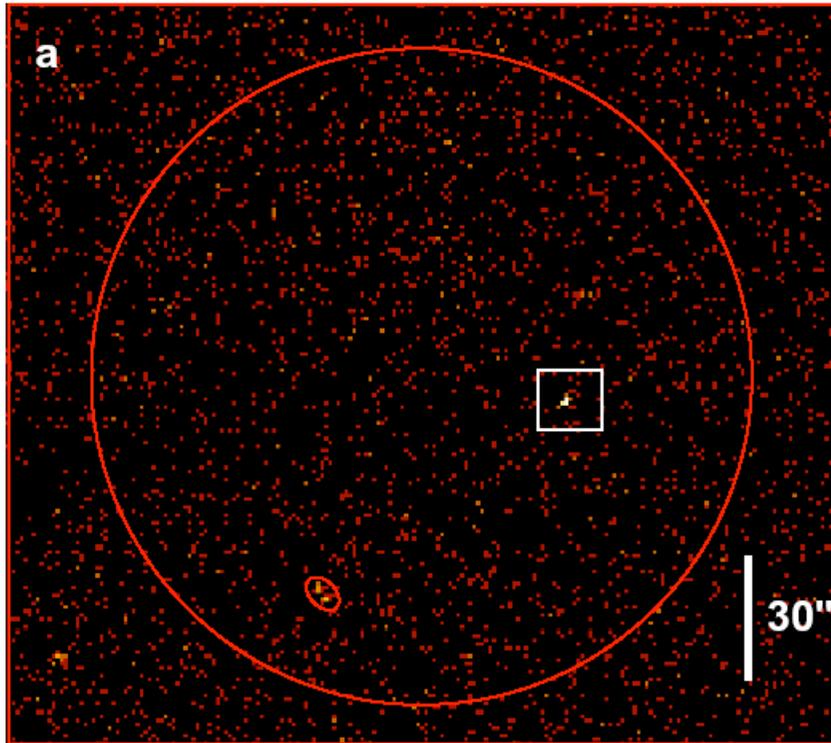
X-ray afterglow candidate

http://www.astro.ku.dk/~brian_j/grb/grb050709.94/

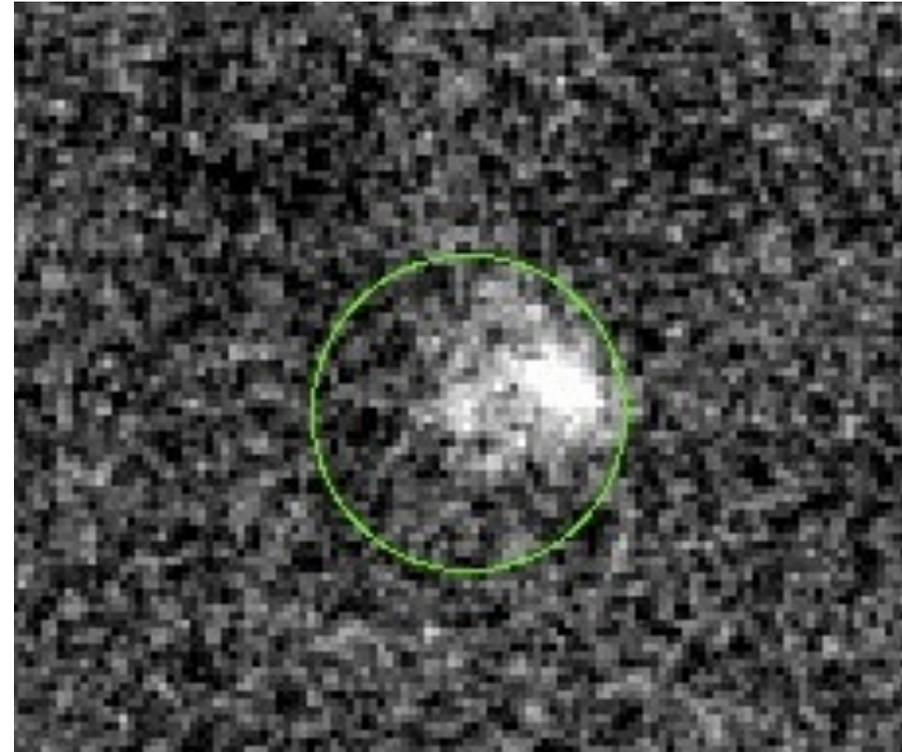


<http://space.mit.edu/HETE/Bursts/GRB050709/>

GRB 050709: 位置決定、X線残光と可視光残光



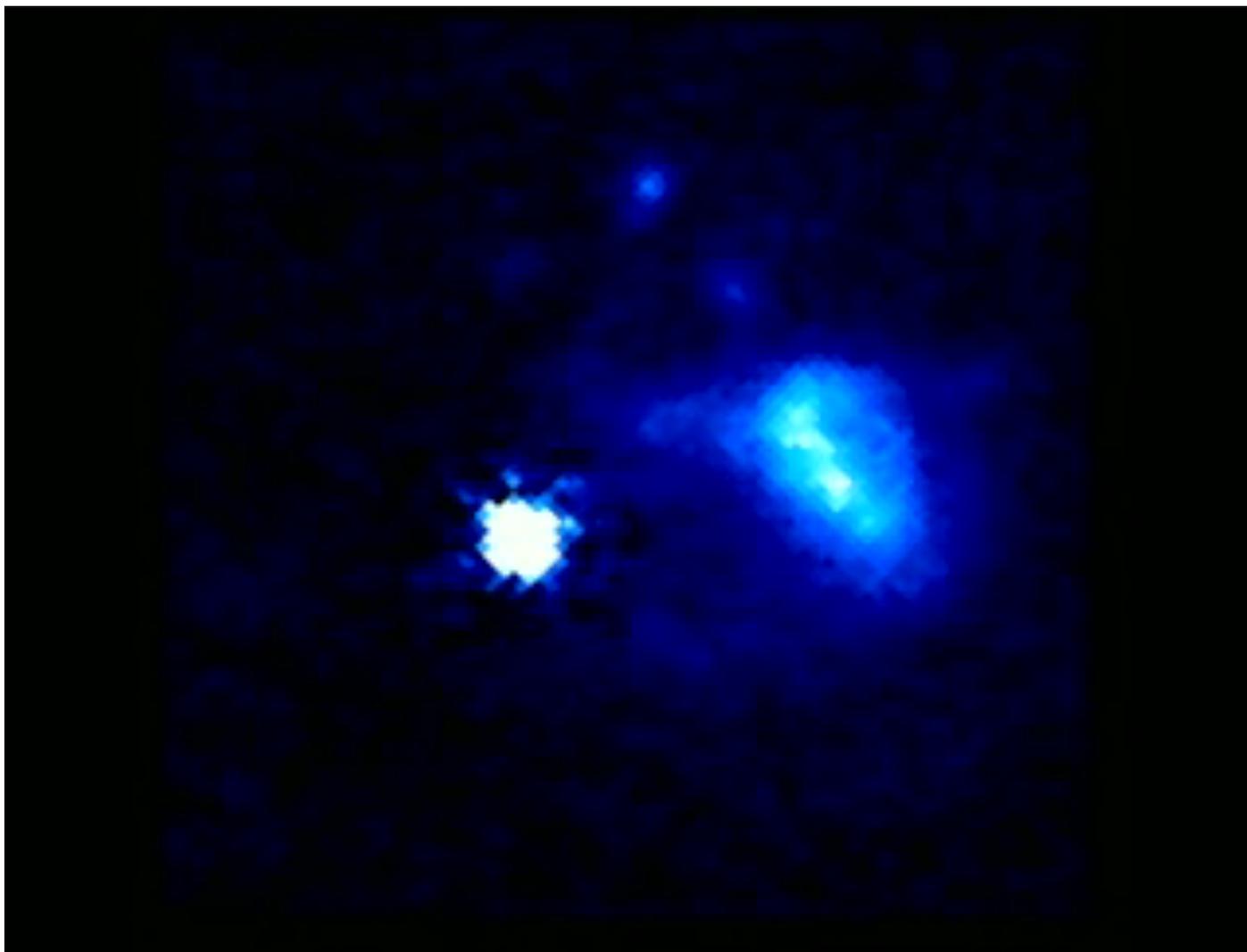
チャンドラX線望遠鏡



すばる望遠鏡(波長2 μ 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

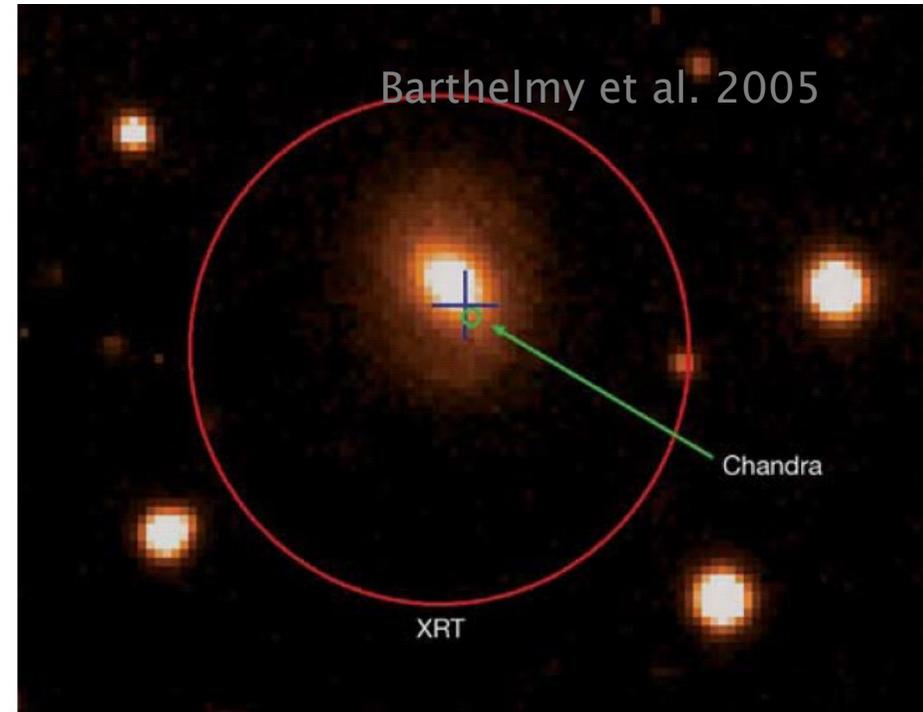
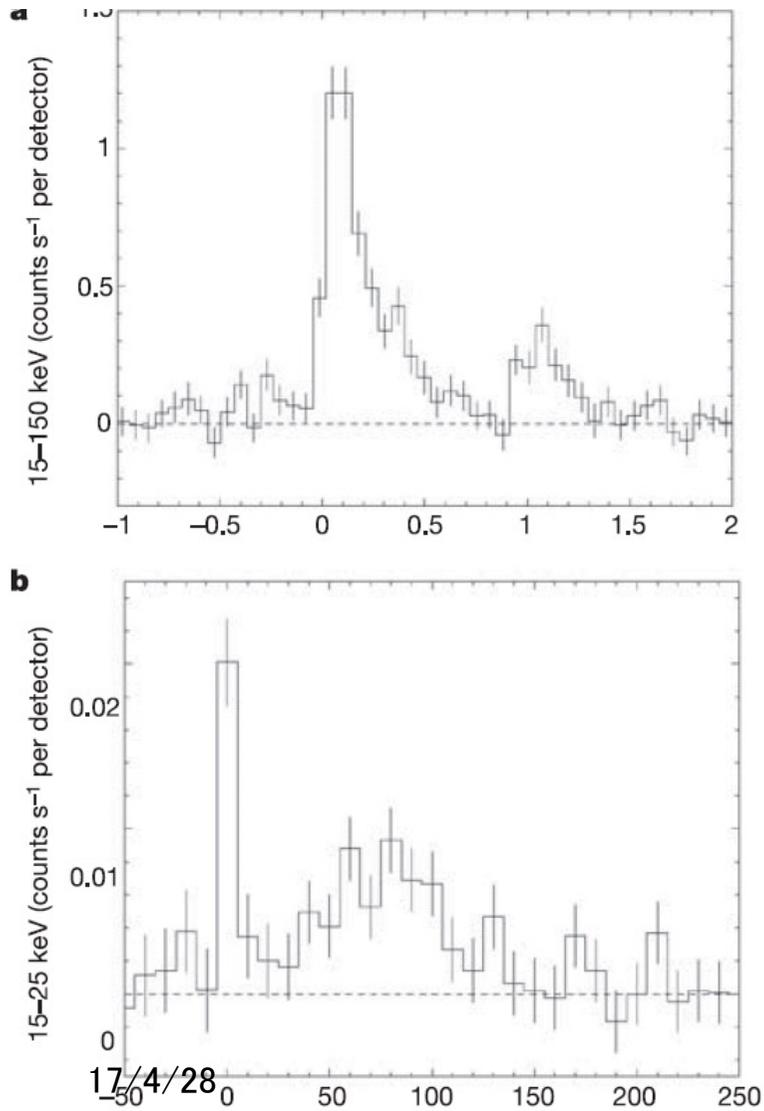
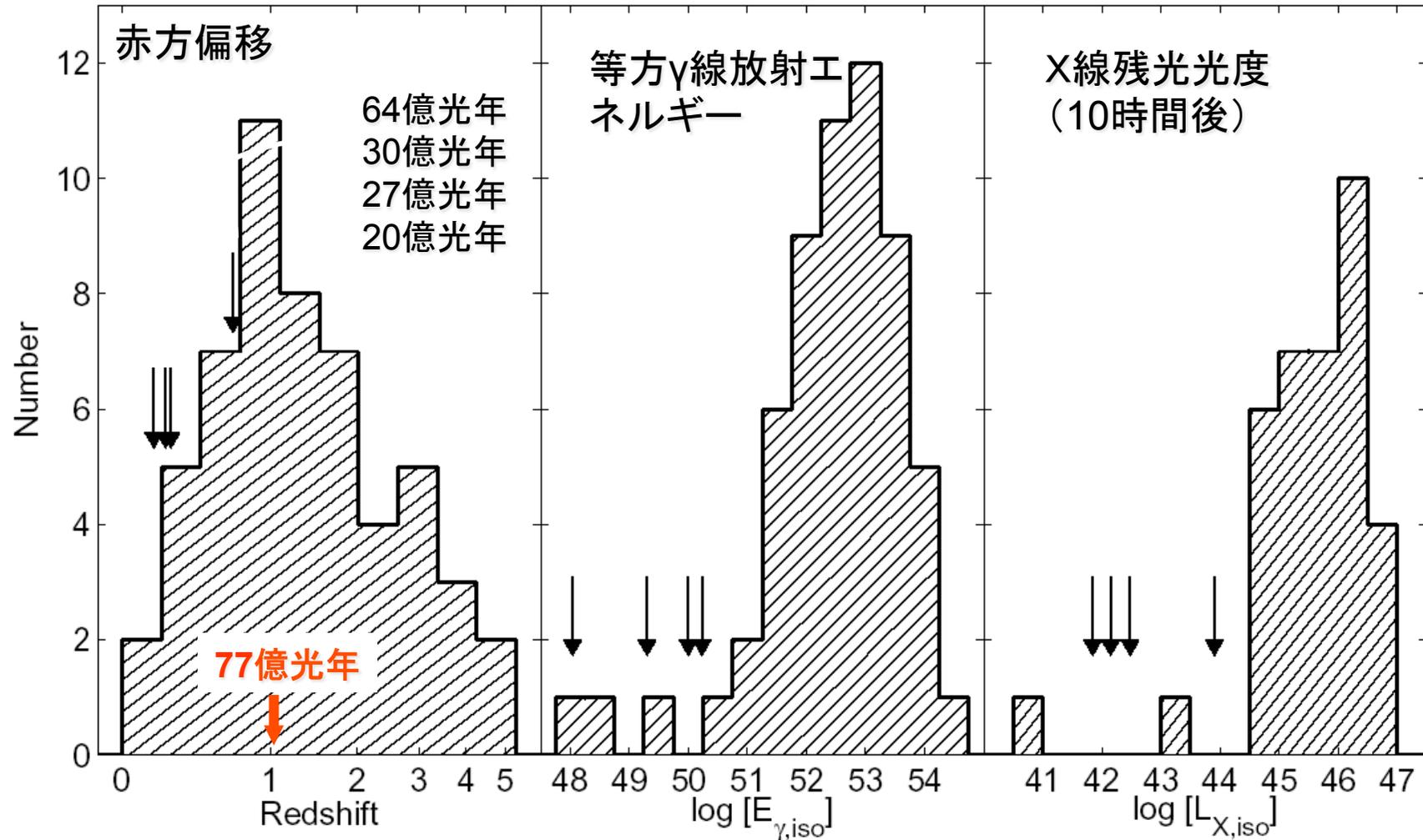


Figure 2 | VLT optical image¹⁷ showing the association of GRB050724 with the galaxy. The blue cross is the position of the optical transient^{16,17}. The XRT (red circle) and Chandra (green circle) burst positions are superimposed on a bright red galaxy at redshift $z = 0.258$ (ref. 5), implying a low-redshift 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 ~ 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 γ 線バーストの 赤方偏移と放射エネルギーの分布

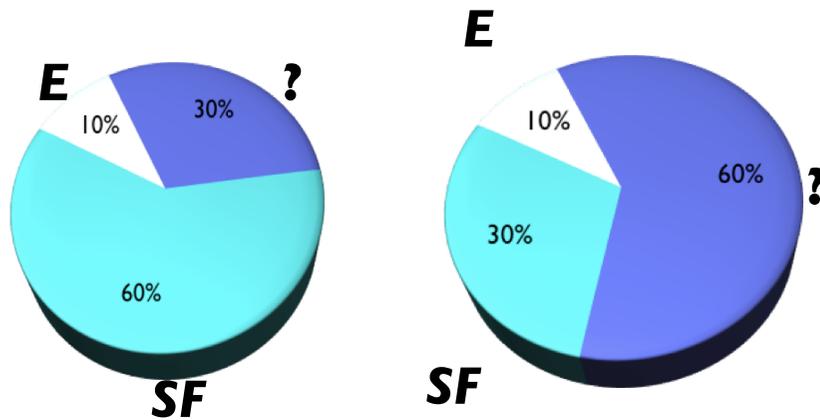
(矢印: 短いバースト)



短いGRBの母銀河と赤方偏移の分布

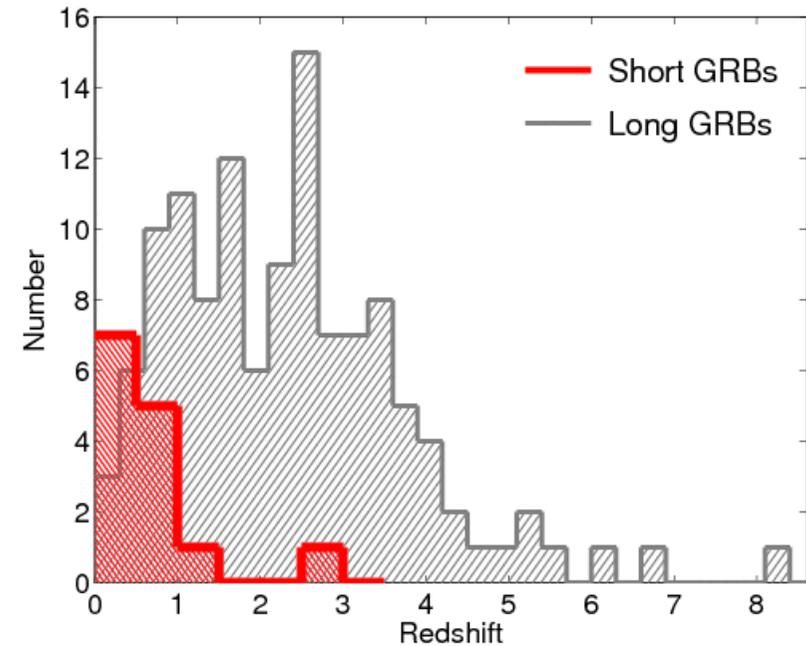
Optical Afterglows X-ray Afterglows

Berger et al. 2007; Berger 2009



E: 楕円銀河 (古い星のみ)
F: 星を生成している銀河

Confirmed hosts – E:SF = 2:11

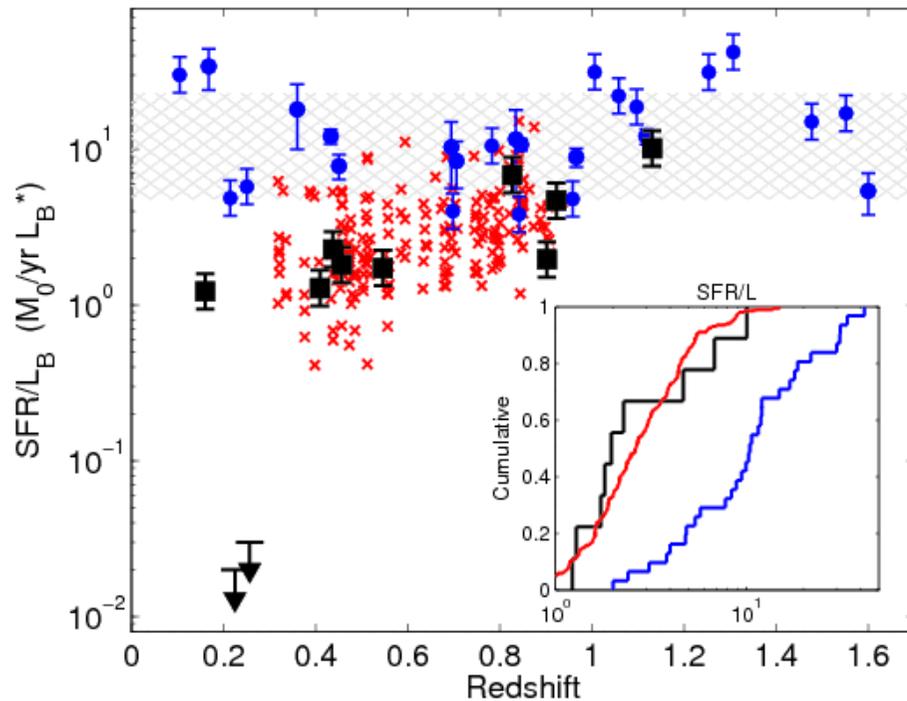


約半数の短いGRBは
 $z > 0.7$

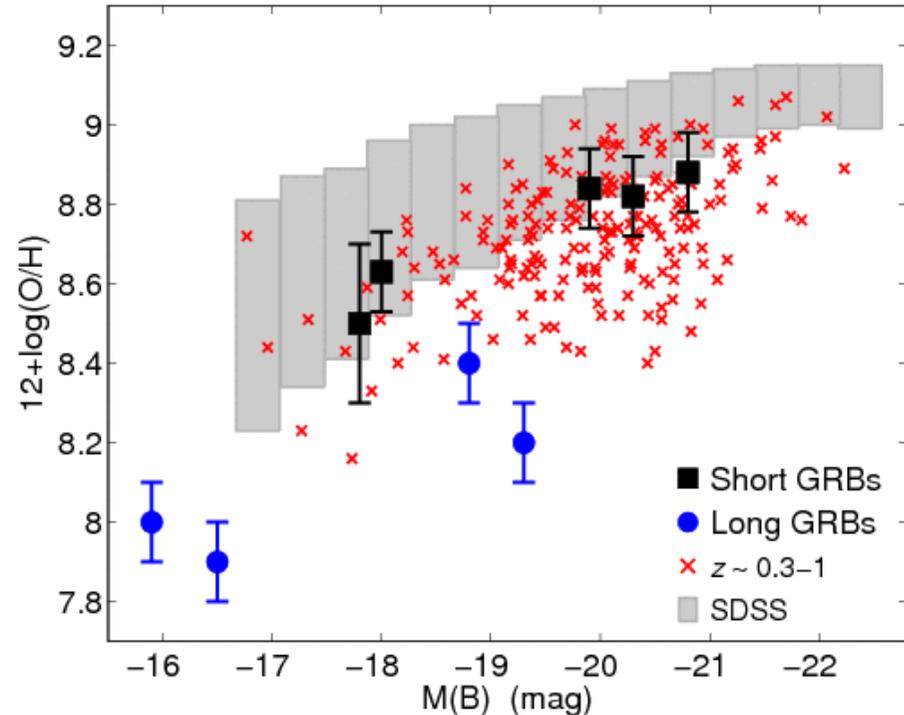
$\Rightarrow \langle \text{age} \rangle \leq 7 \text{ Gyr}$

短いGRBの母銀河 星形成率(SFR)と重元素組成比

Berger 2009

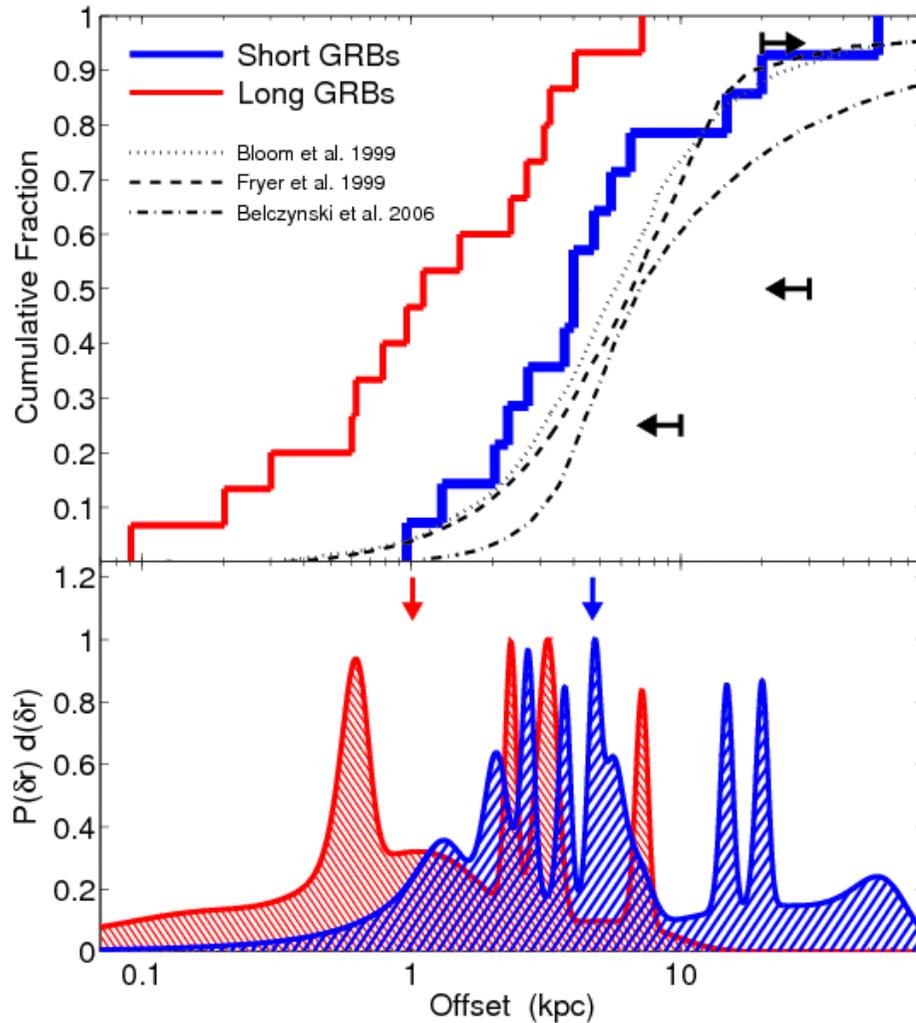


Short GRB hosts have lower specific star formation rates than long GRB hosts; they trace the general galaxy population

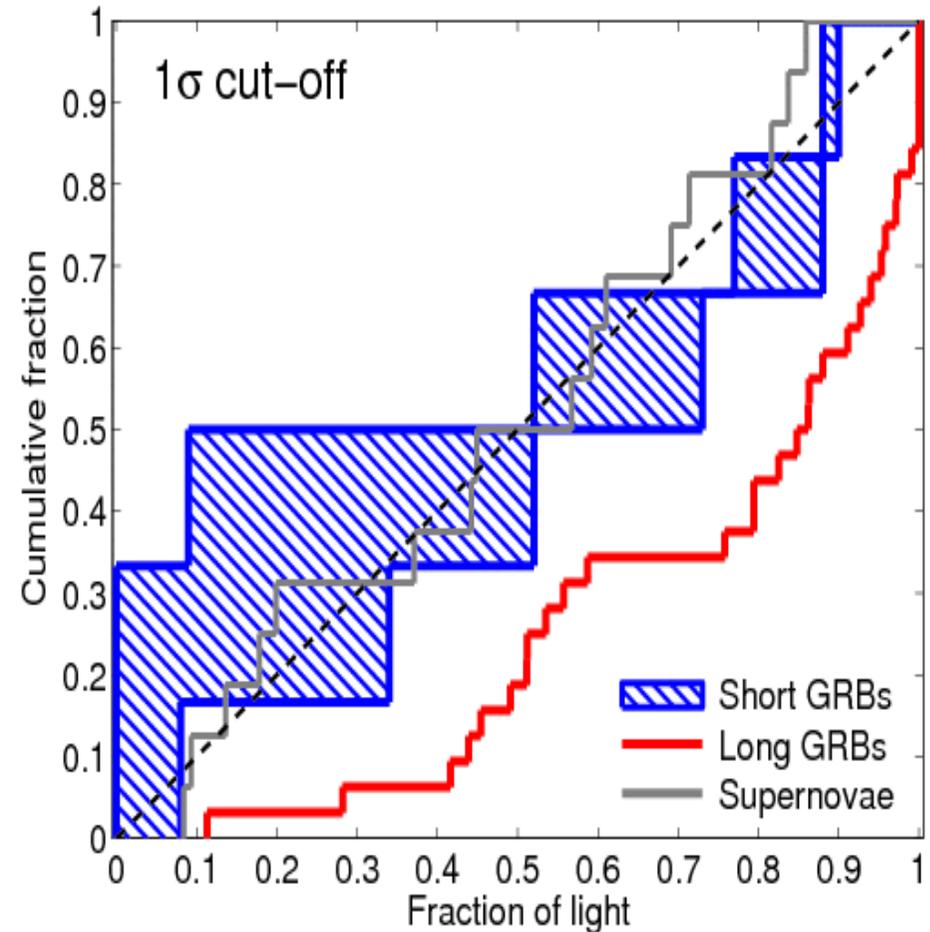


Short GRB hosts have higher metallicities than long GRB hosts; they trace the general galaxy population

短いGRBの銀河内の位置と環境



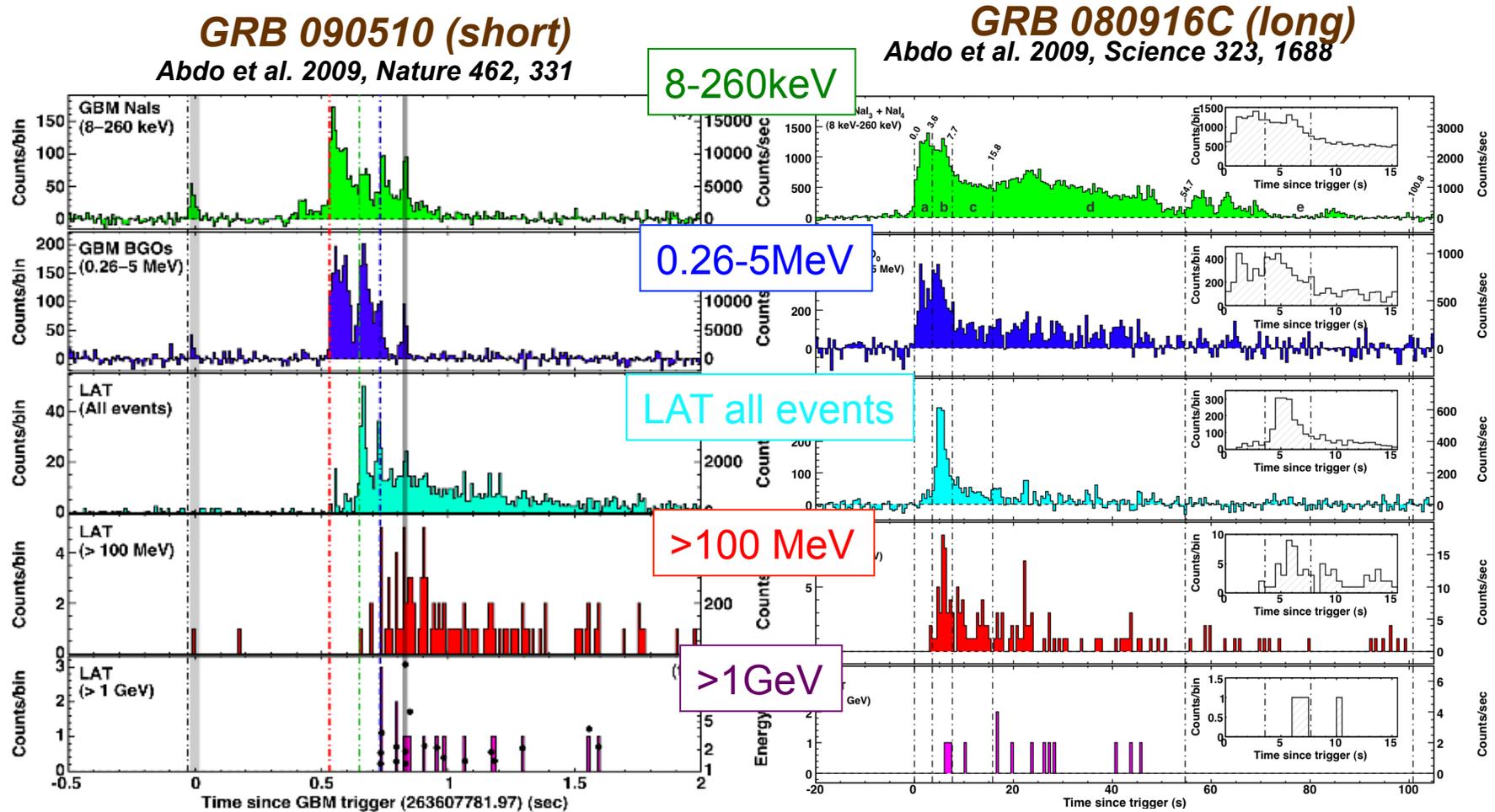
Fong, Berger, & Fox 2009



Fong, Berger, & Fox 2009

Short GRBs trace the light distribution of their host galaxies

Prompt emission of long and short GRBs

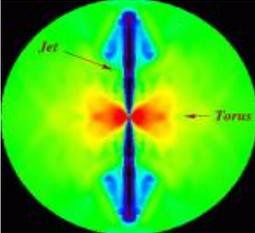
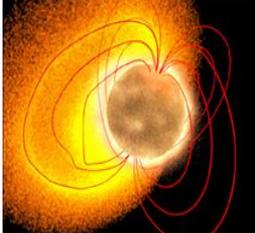
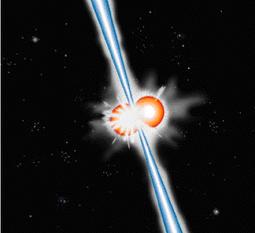


Delay in HE onset: 0.1-0.2 s

Delay in HE onset: ~4-5 s

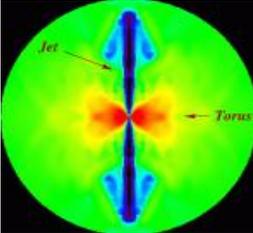
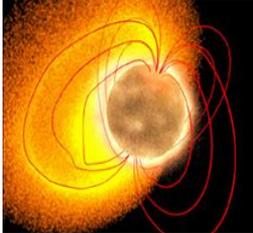
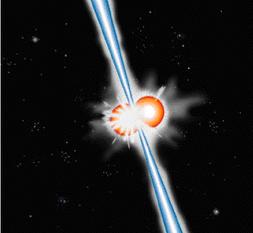
時間尺度以外は、極めて類似 → 爆発後の物理過程はほとんど同じ

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

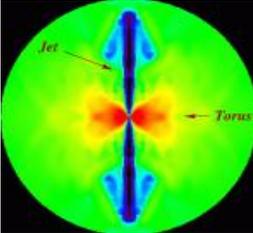
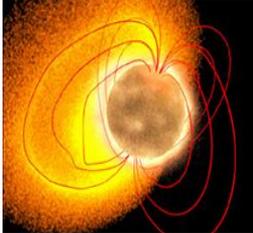
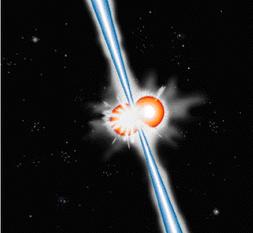
ガンマ線バーストの起源

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	
	コアプサー	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
	マグネターのフレア	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
	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

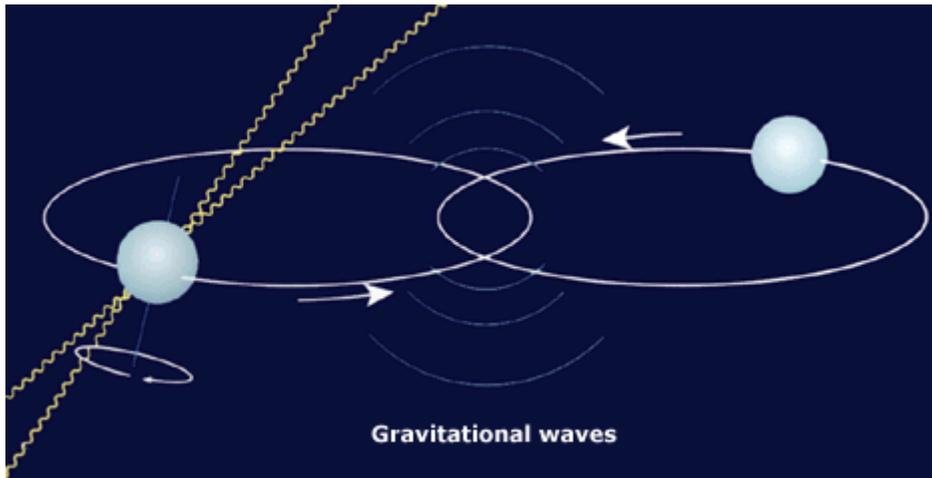
ガンマ線バーストの起源

モデルとの比較 **短いバースト**

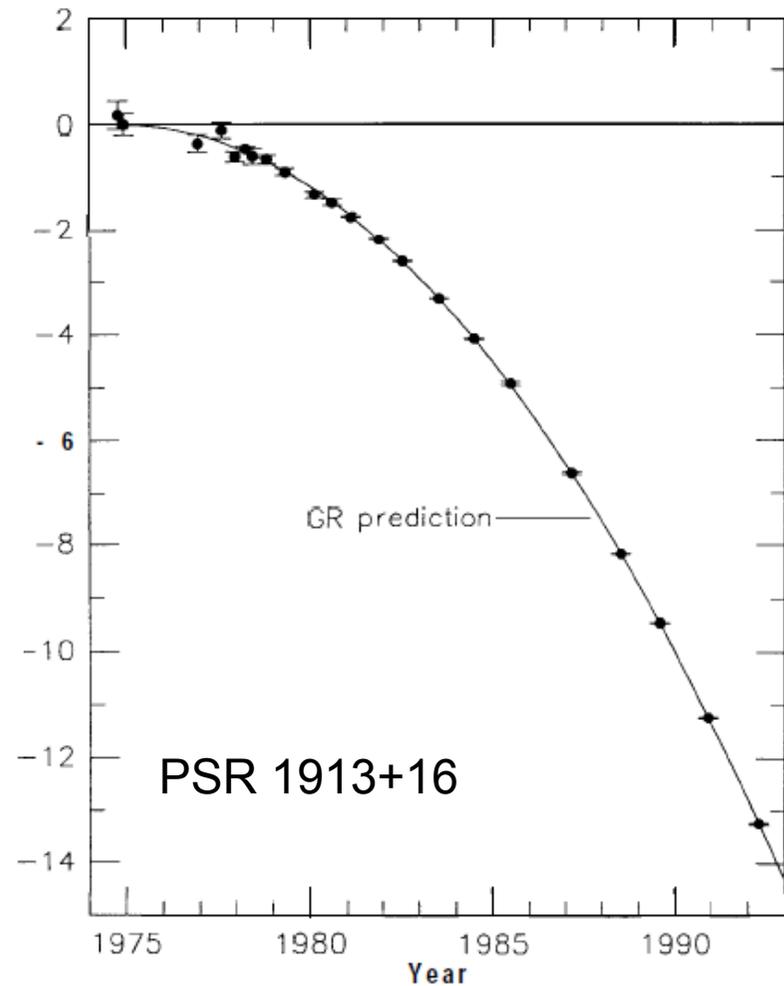
	仕組み	年齢	発生場所	継続時間
	コアブレイク	大質量星の最期の重力崩壊による大爆発	若い星 (数百万年以下)	星形成領域 >10秒
	マグネターのフレア	超強磁場中性子星の星全体規模の巨大地震	若い星 (数千万年以下)	星形成領域付近 <1秒
	高密度星の合体	古い中性子星またはブラックホールの連星の軌道縮小による衝突	古い星 数千万年～ 数十億年以上)	星形成と無関係: 銀河の重力圏内 どこでも <1秒

合体する中性子星連星

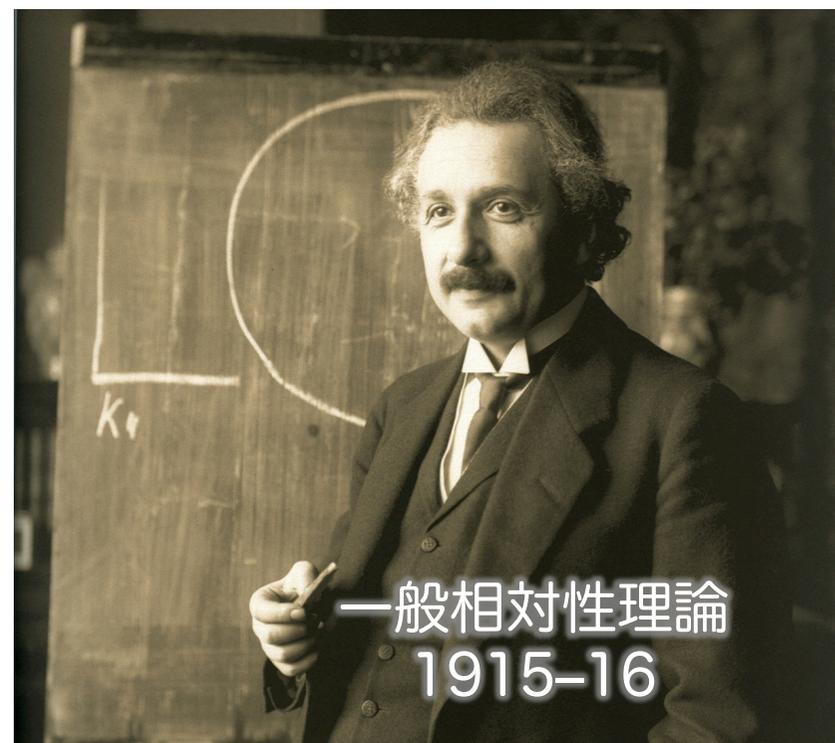
J.H. Taylor and R.H Hulse
1993 Nobel Prize in Physics



軌道位相のずれの蓄積
Acc

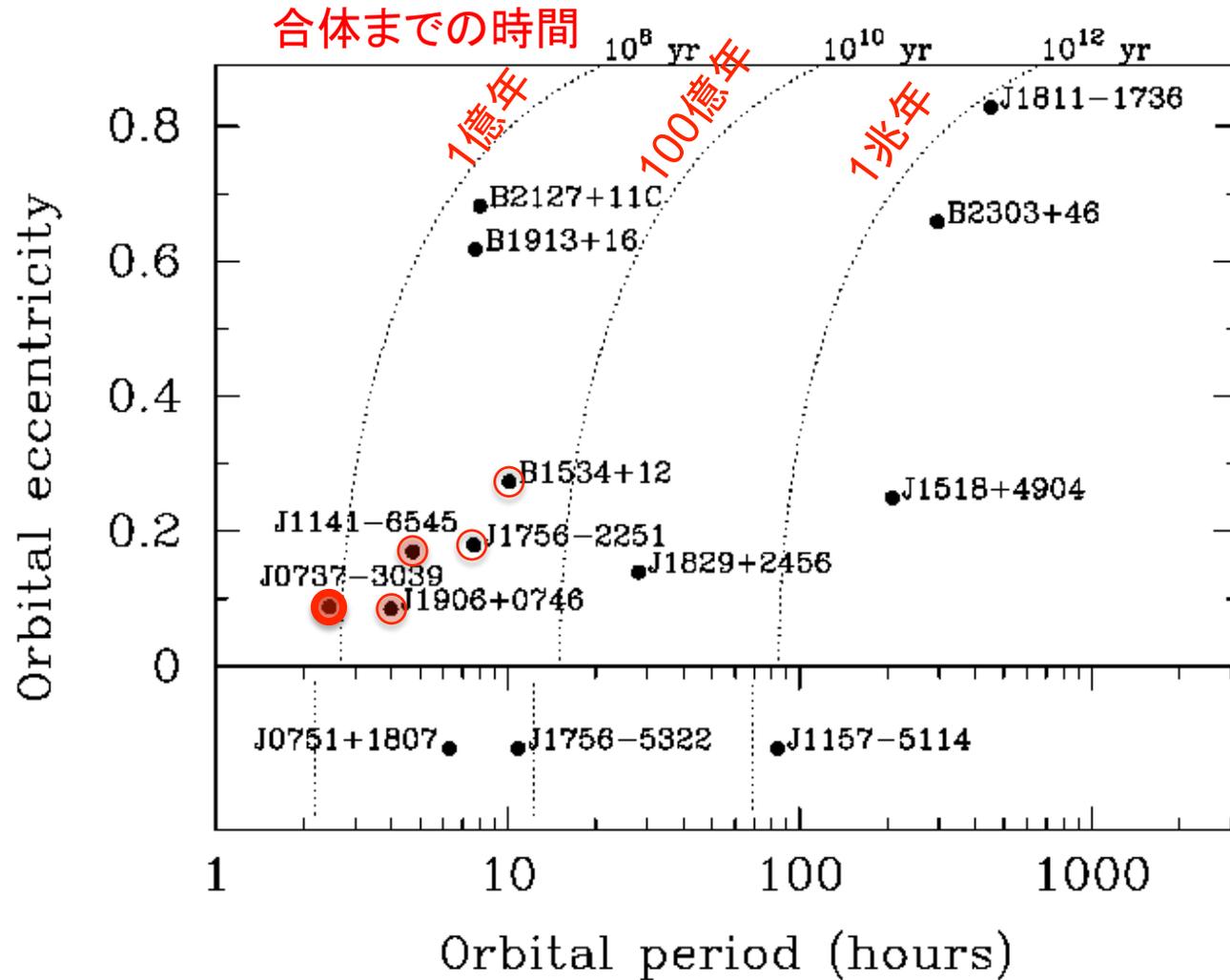


重力波



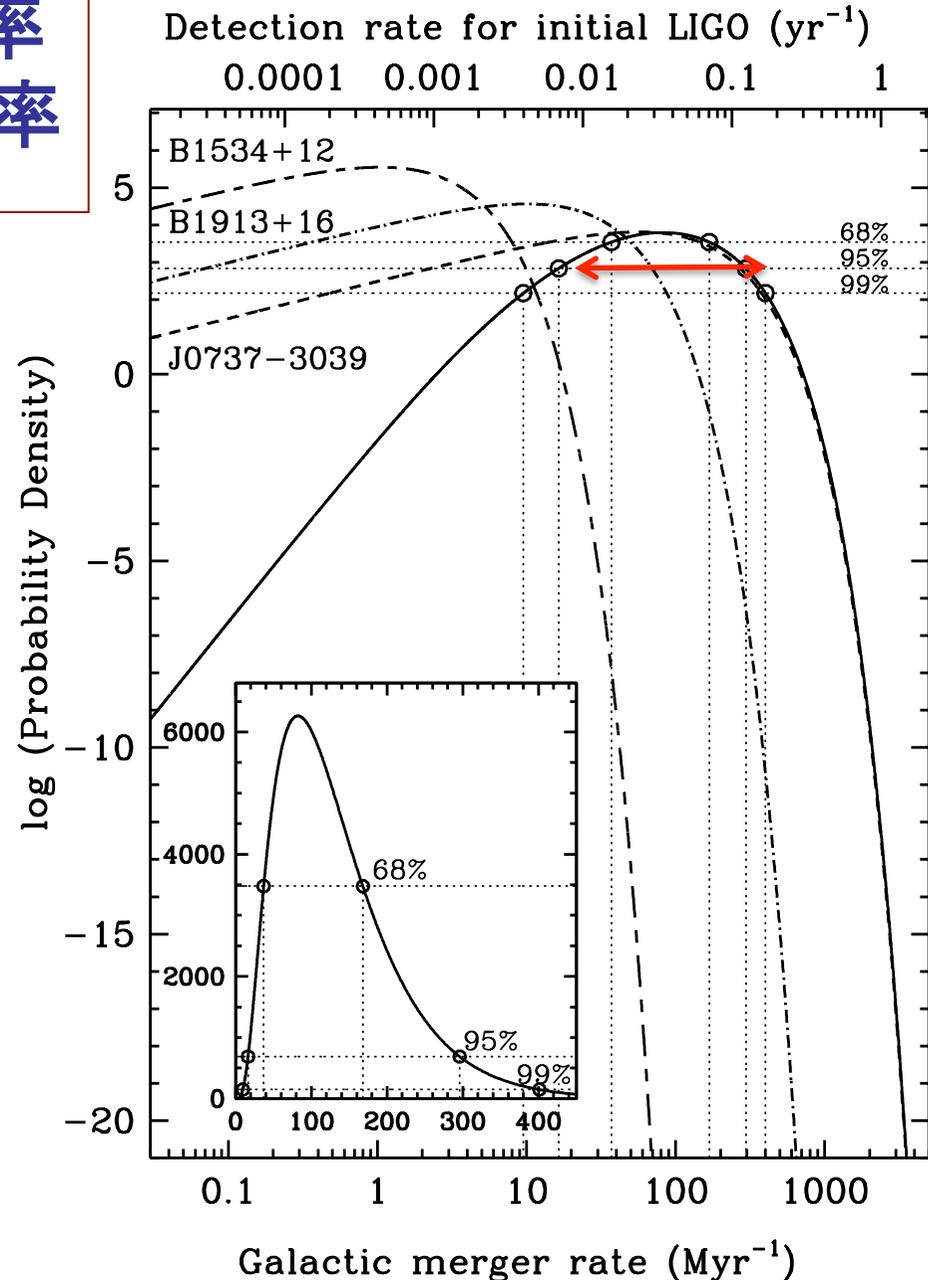
質量を持った物体の運動に伴って
空間の歪みが波として伝わる現象

既知の中性子星連星系



中性子星連星合体の発生率 と重力波望遠鏡による検出率

- LIGO (検出可能距離 20 Mpc)
→10–630年に1回 (95%信頼度)
- LCGT (検出可能距離 200 Mpc:
z=0.015)
→1年に 2–100個
- 短いGRBの検出数<100個/年
 - 大部分の中性子星連星合体は、GRBとして検出されていない

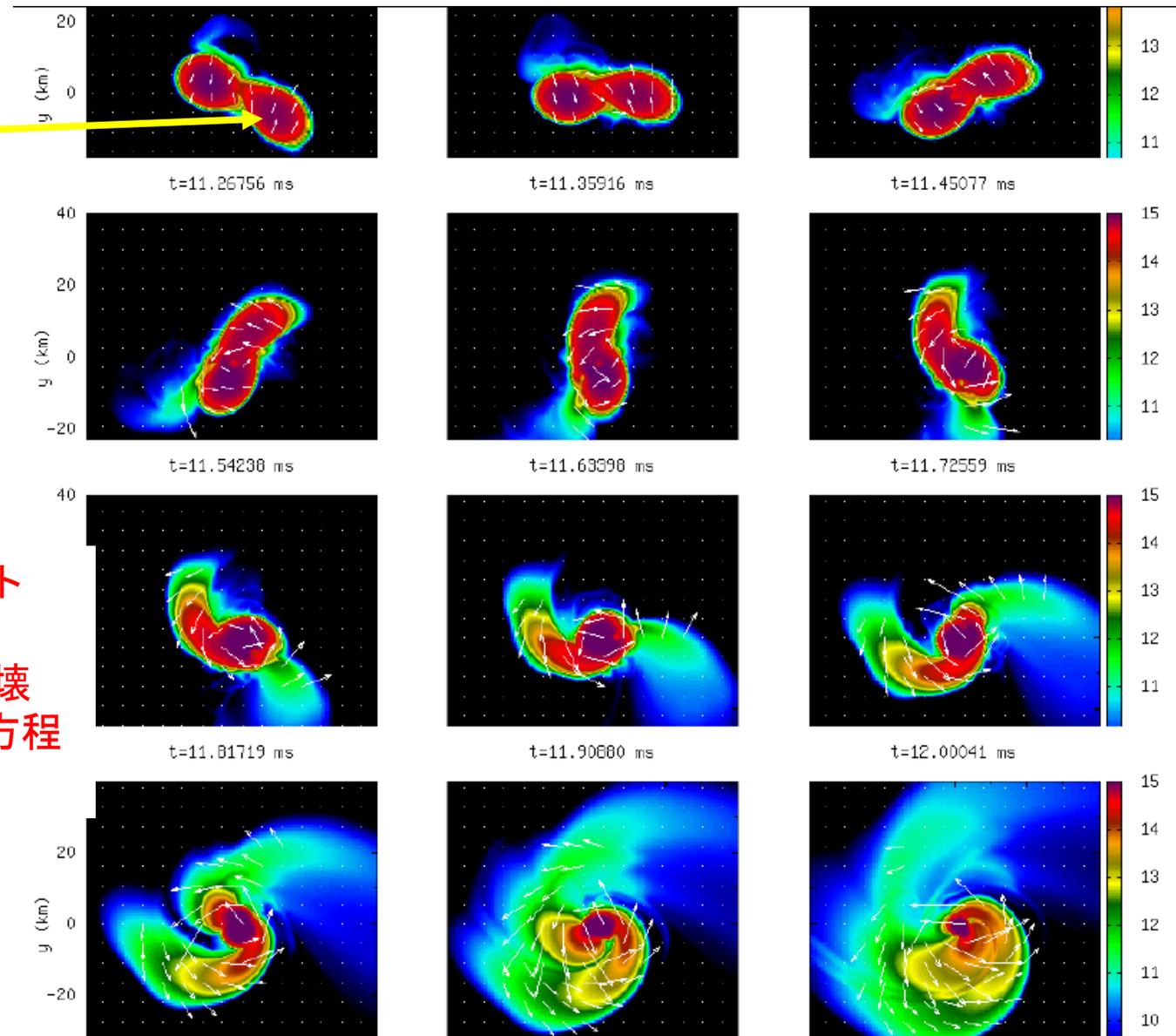


After neutron star binary merges...

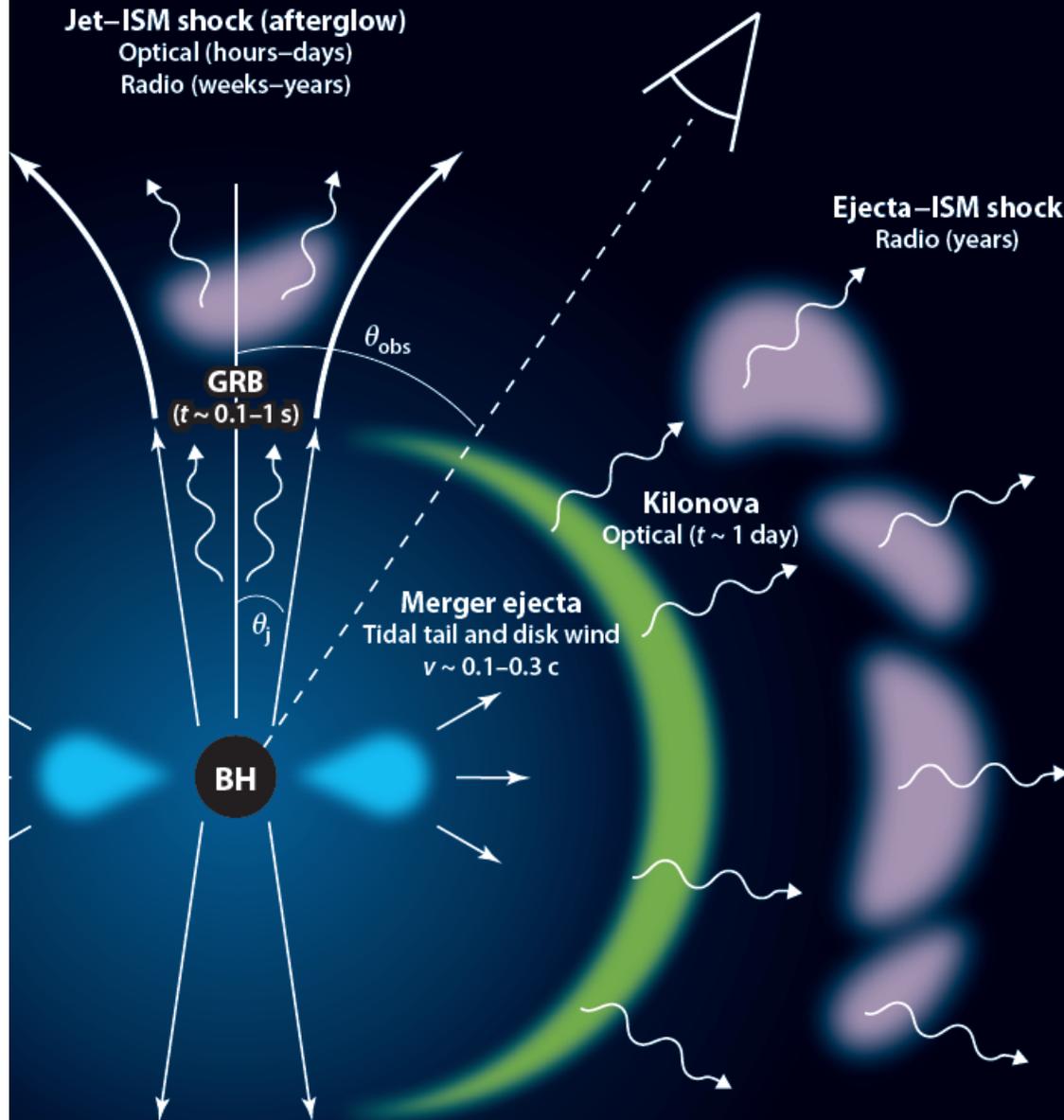
- ▶ Less massive NS is tidally deformed
- ▶ Angular momentum transfer by spiral arm and swing-by
- ▶ A part of matter is ejected **along the orbital plane**
 - 変形・質量放出・ジェット
 - 衝撃波形成
 - r-process元素合成・崩壊
 - 中性子星核物質状態方程式(EOS)に強く依存

Simulation by Hotokezaka et al. (2013)

Slide by Sekiguchi



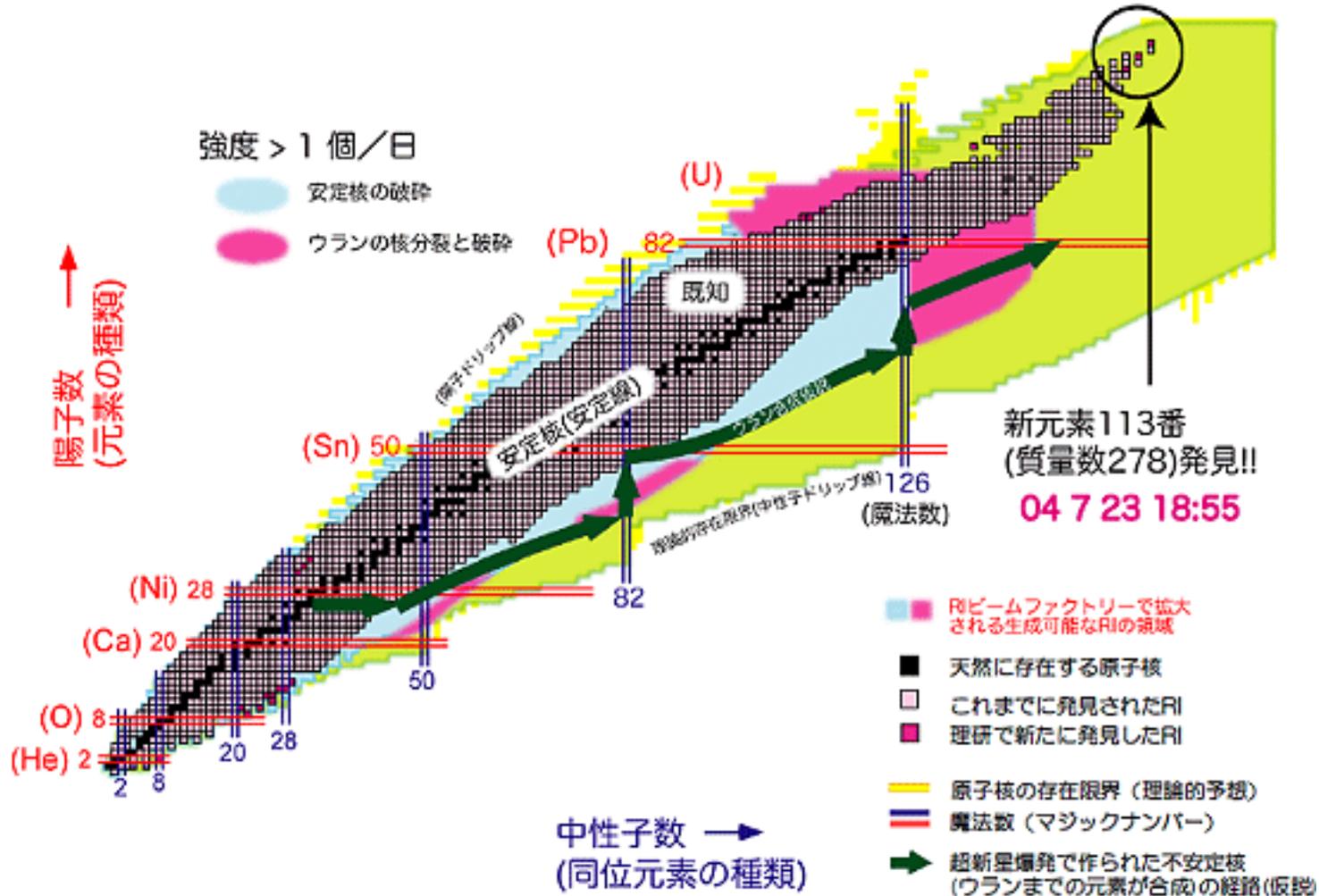
Electromagnetic Counterparts



- Distance
- Context
- Behavior of matter
- Nature of remnant

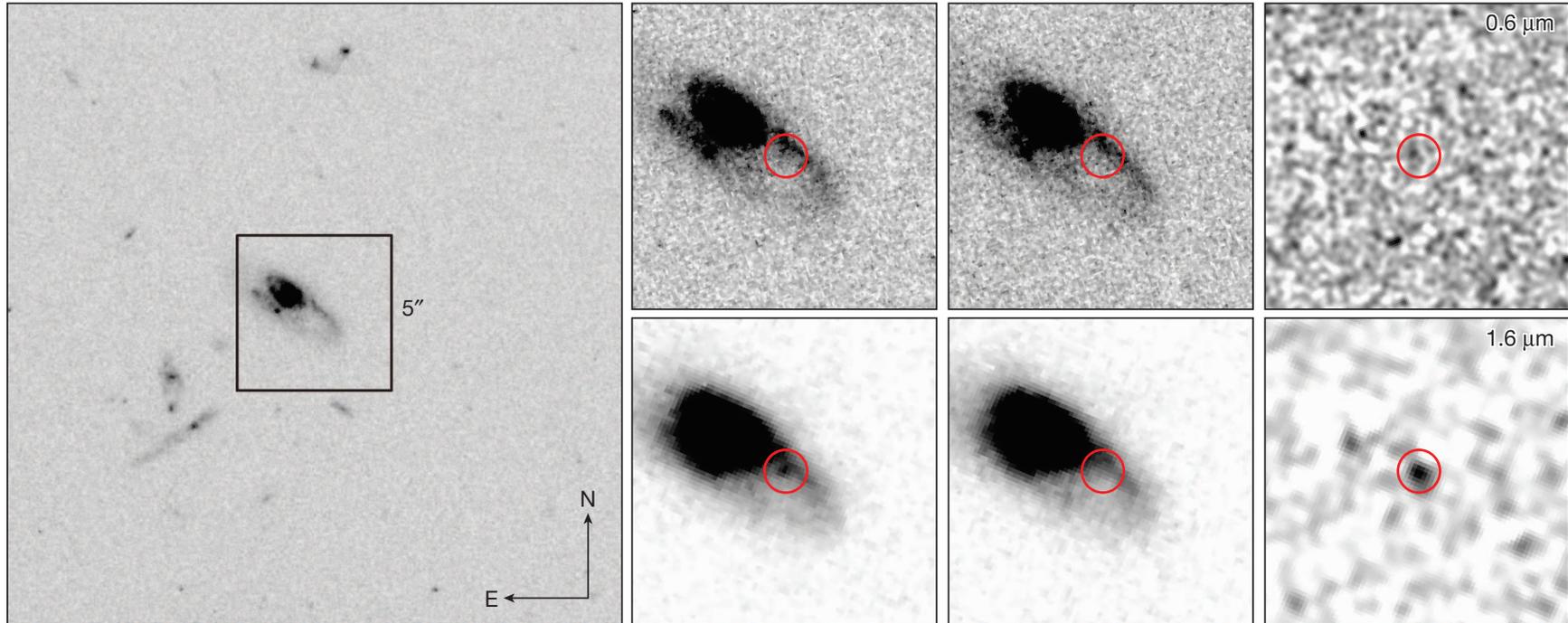
Expected EM emission both beamed and isotropic (short GRB, kilonova, ejecta/ISM interaction, speculative components)

中性子星合体での元素合成



short GRB GRB 130603B

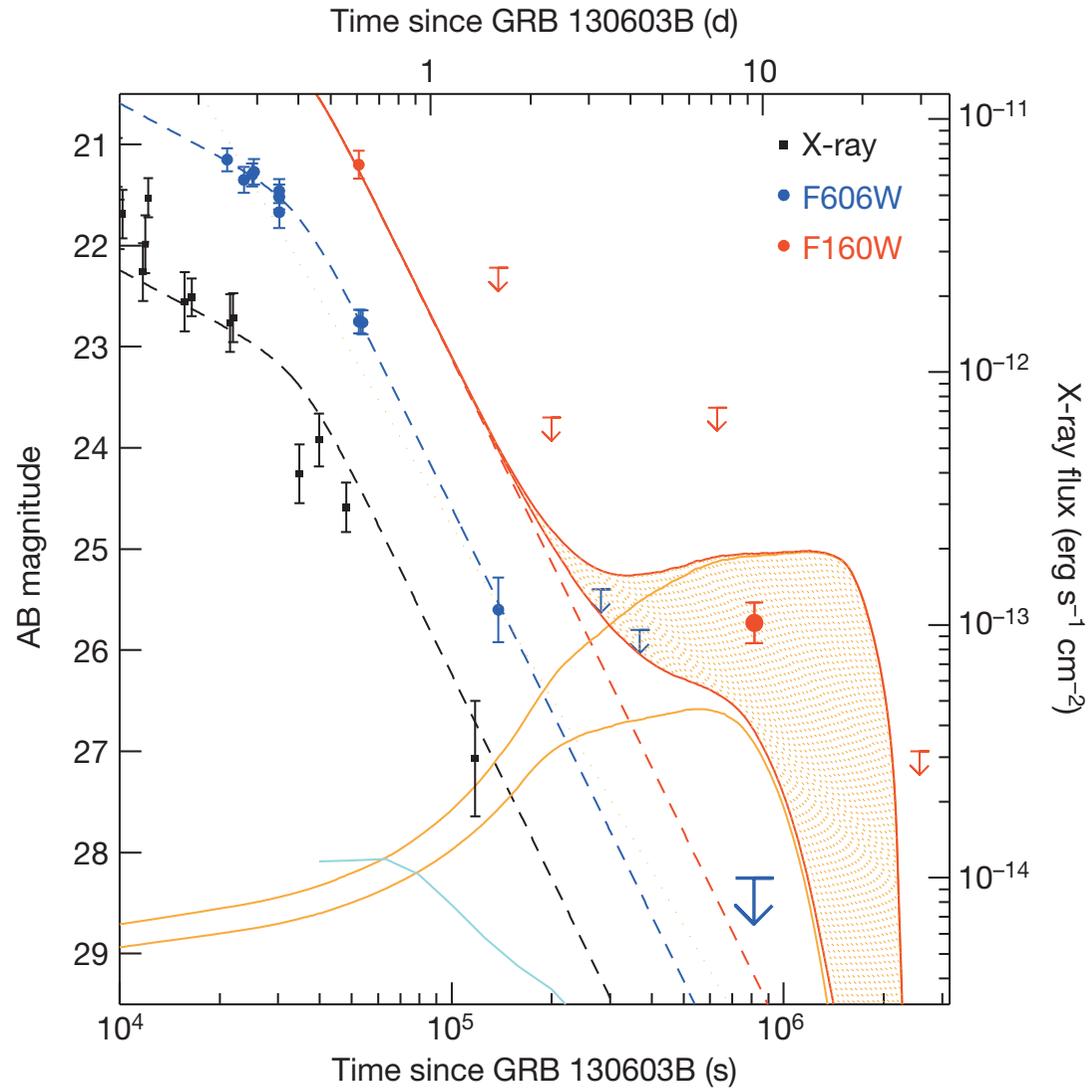
可視光 0.5 μm



近赤外線 1.6 μm

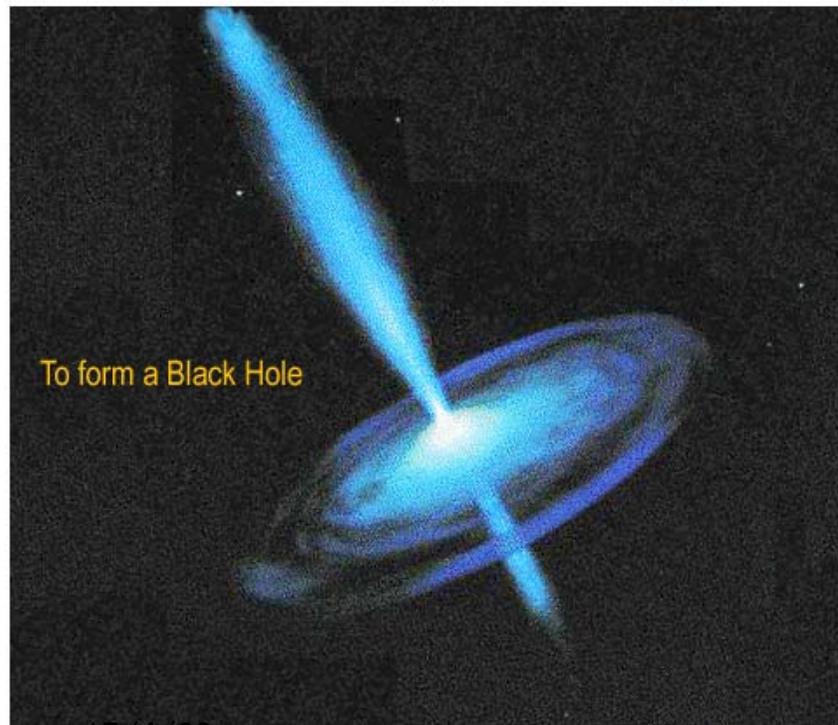
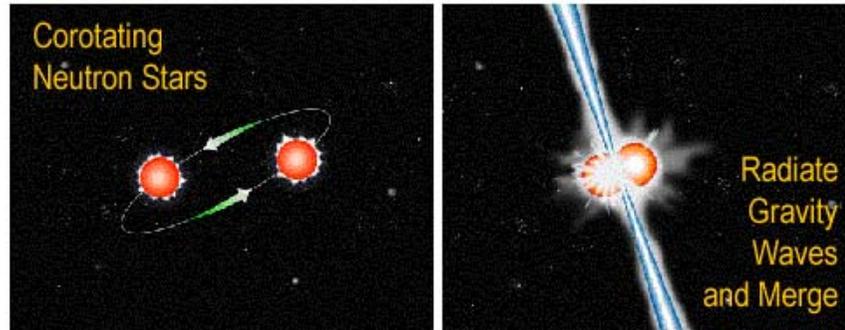
Tanvir et al. 2013

short GRB GRB 130603B

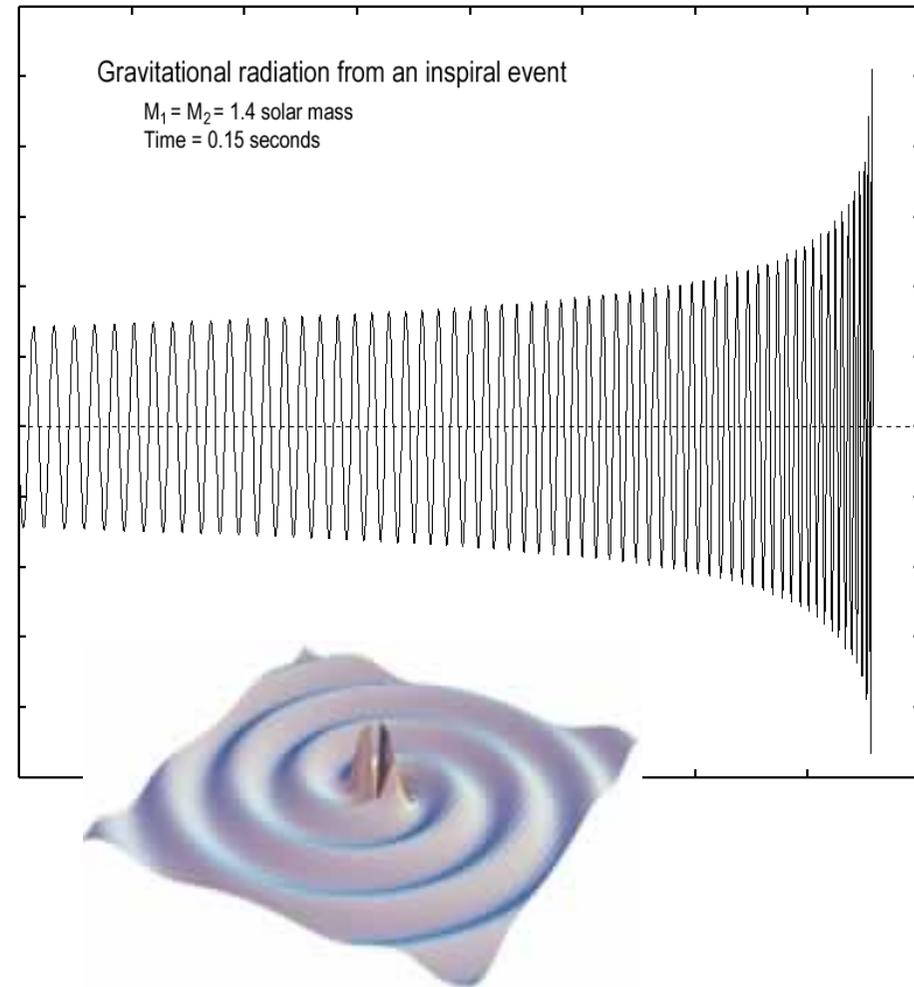


Tanvir et al. 2013

中性子星合体による重力波



17/4/28



Slide courtesy of D. Frail

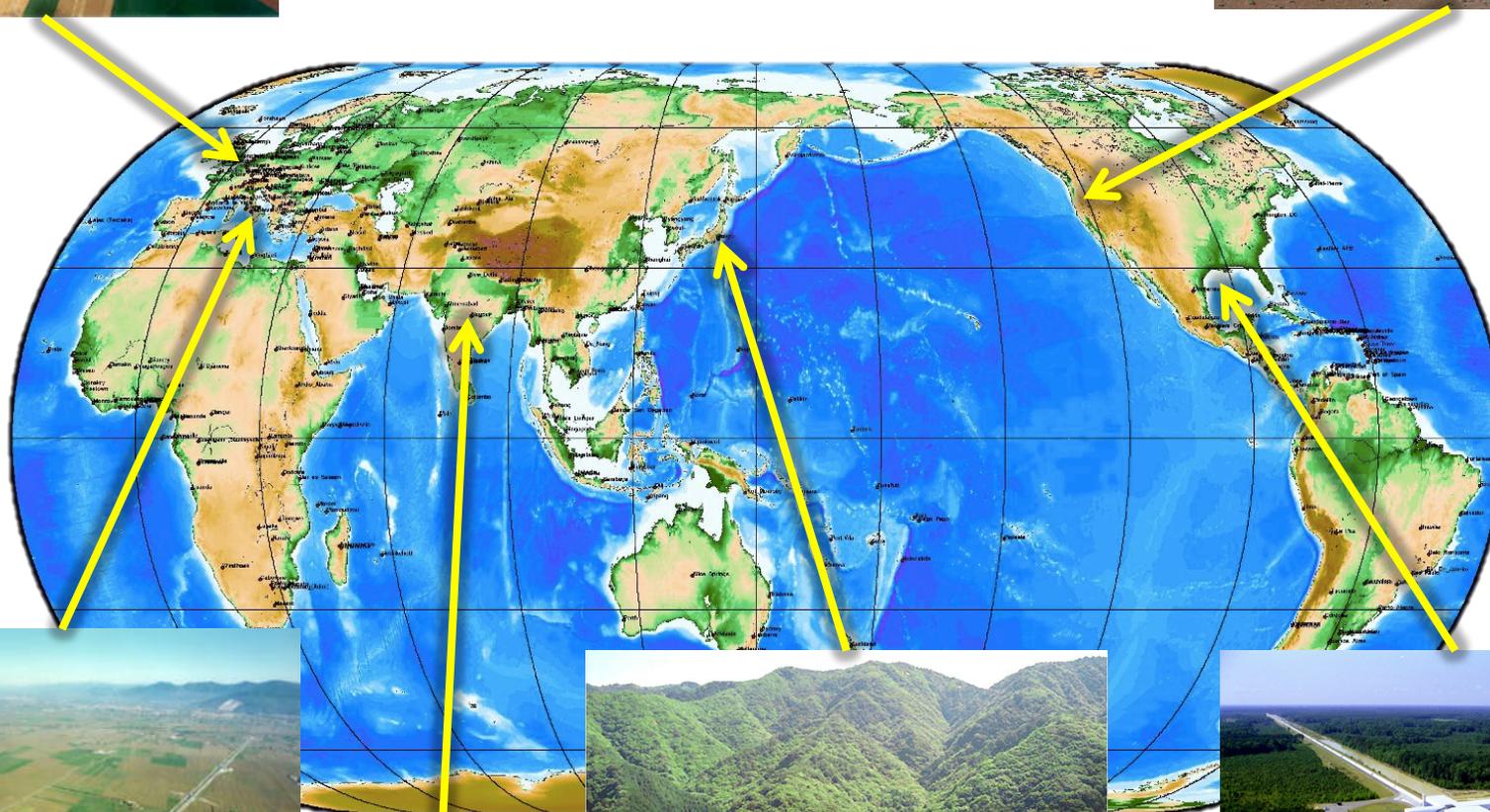


GEO

重力波検出は**予定**:
adv.LIGO, a-VIRGO,
KAGRA in 2015-16



LIGO



VIRGO

INDIGO



KAGRA



LIGO

17/4/28

重力波源となる天体



- 中性子星近接連星の合体
 - 確実に存在
 - KAGRA感度圏内発生頻度 ≈ 10 個/年
 - 短いガンマ線バーストの源(?)
- 中性子星-ブラックホール連星
 - 頻度の不定性大
- 重力崩壊型超新星
 - 非対称崩壊 – 観測的、理論的に確立
 - 感度：ごく近傍（銀河系内頻度 百年に一個）
- 未知の現象

重力波は受かるが…

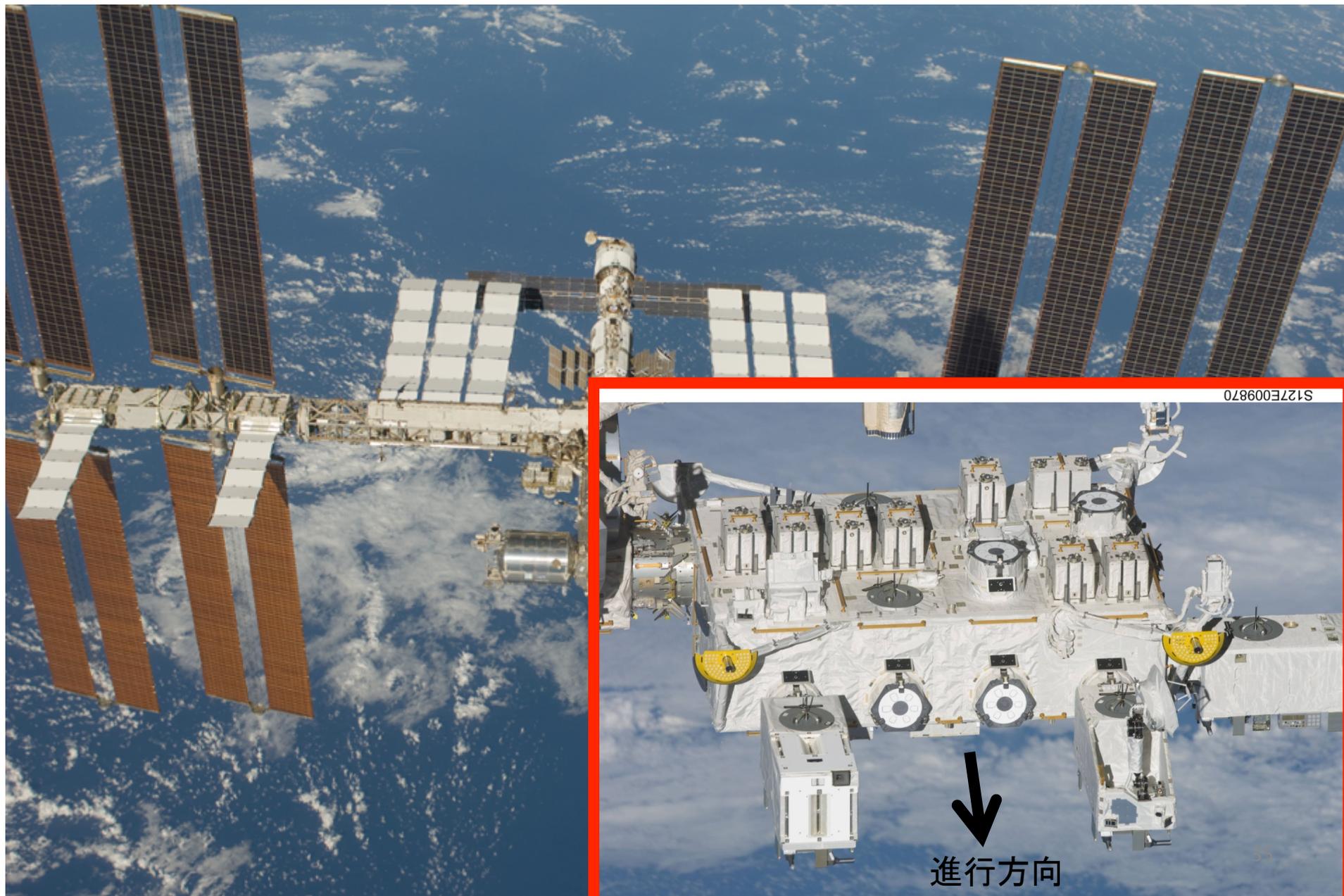
- 発生源、発生環境、距離がわからないと物理ができない
 - 反面教師：ガンマ線バースト 発見から30年
- 既知天体（母銀河、元の天体）との対応
 - 距離→エネルギー規模
 - 発生源、発生機構の情報
- しかし 重力波到来方向決定精度
数十～数百平方度 ☹
 - 電磁波対応現象の検出が必須

重力波観測から期待される成果

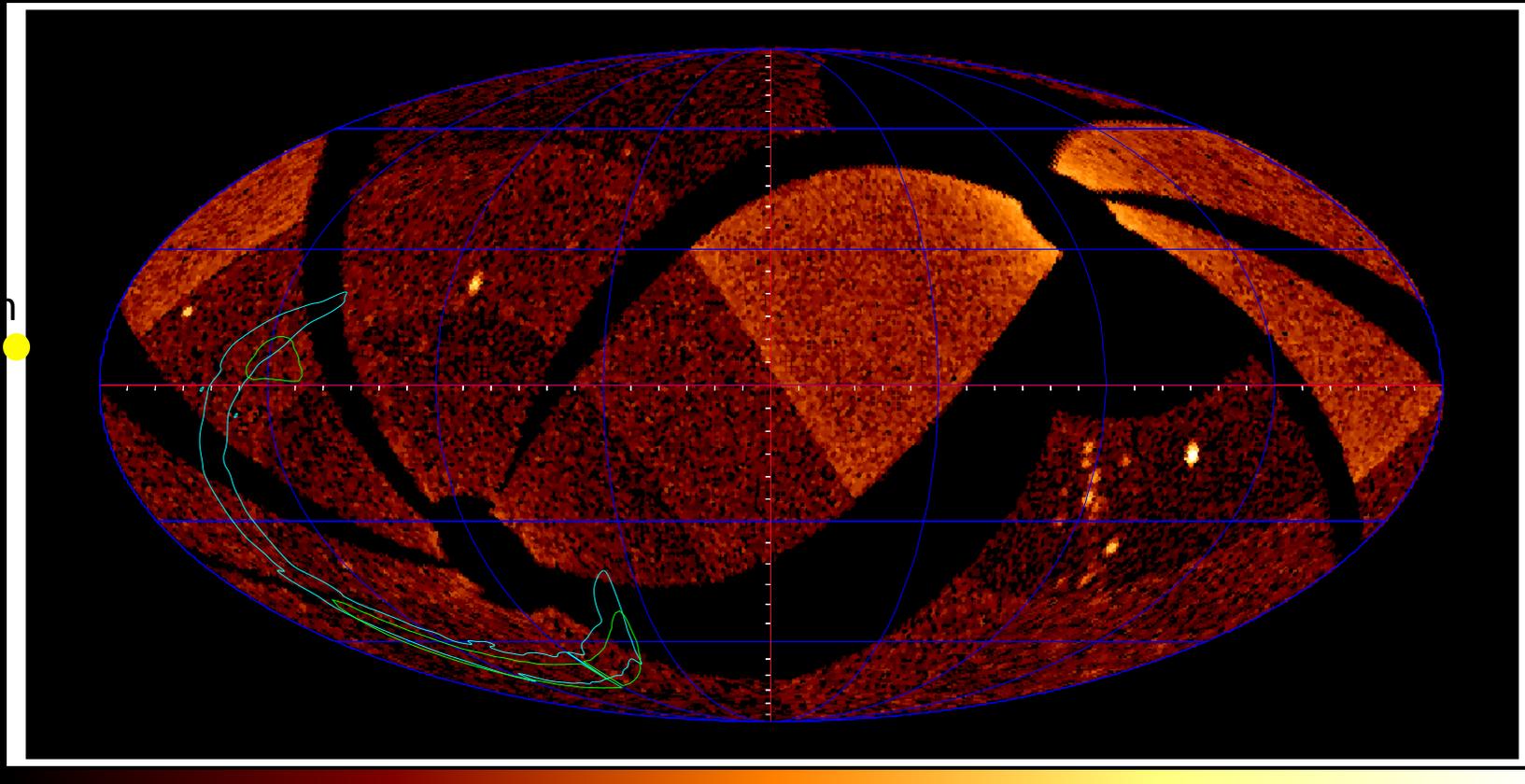
1. 強い重力場での一般相対性理論の確認
2. 高次元理論を含む修正重力理論の検証
3. 超高密度物質の物性（核物質EoS）
4. ガンマ線バースト現象の解明
5. 超新星爆発機構の解明
6. 全く予想もしなかった新発見…

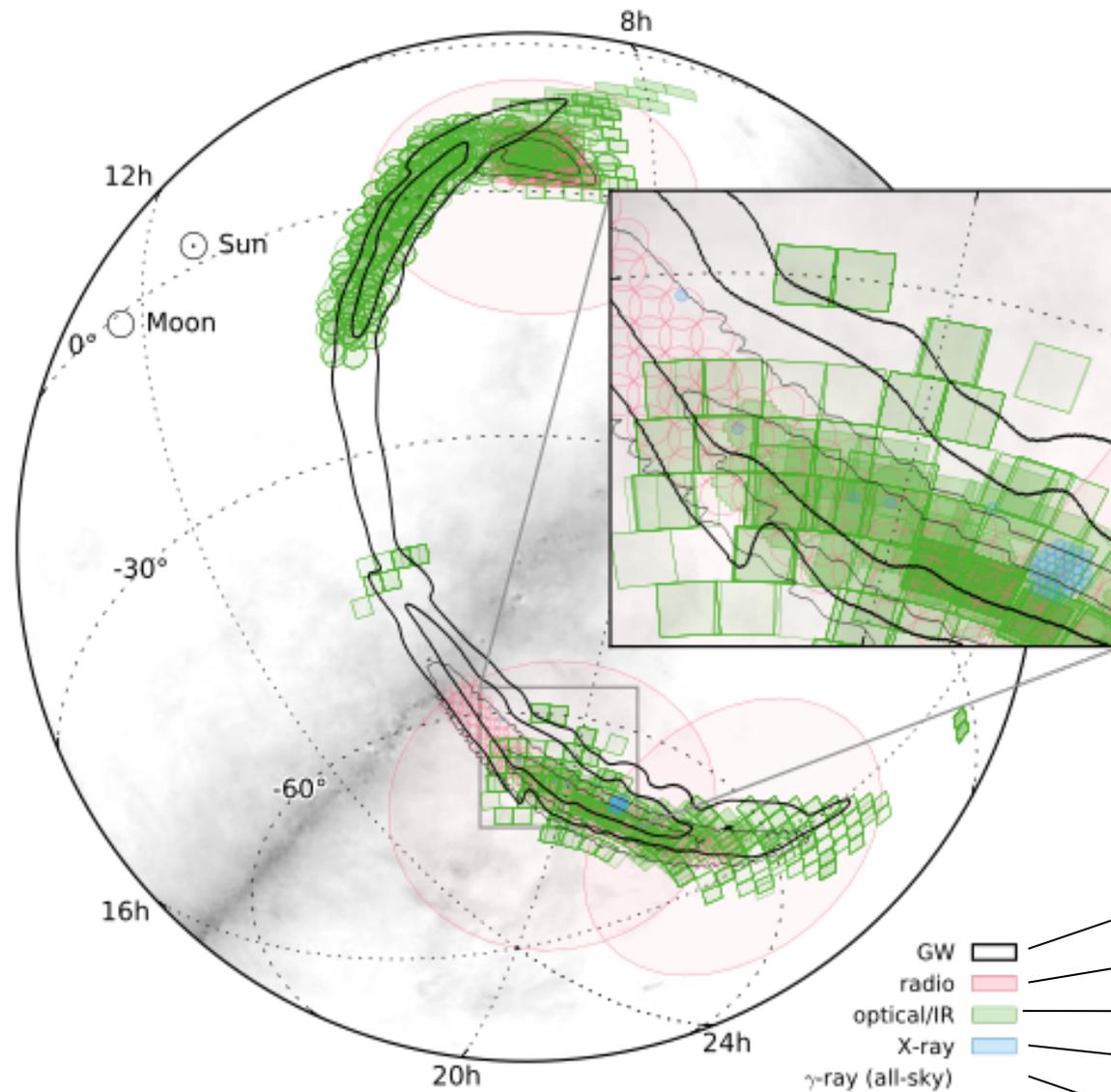
Einstein 一般相対論 (1915)から100年

MAXI 国際宇宙ステーション上の全天X線監視装置



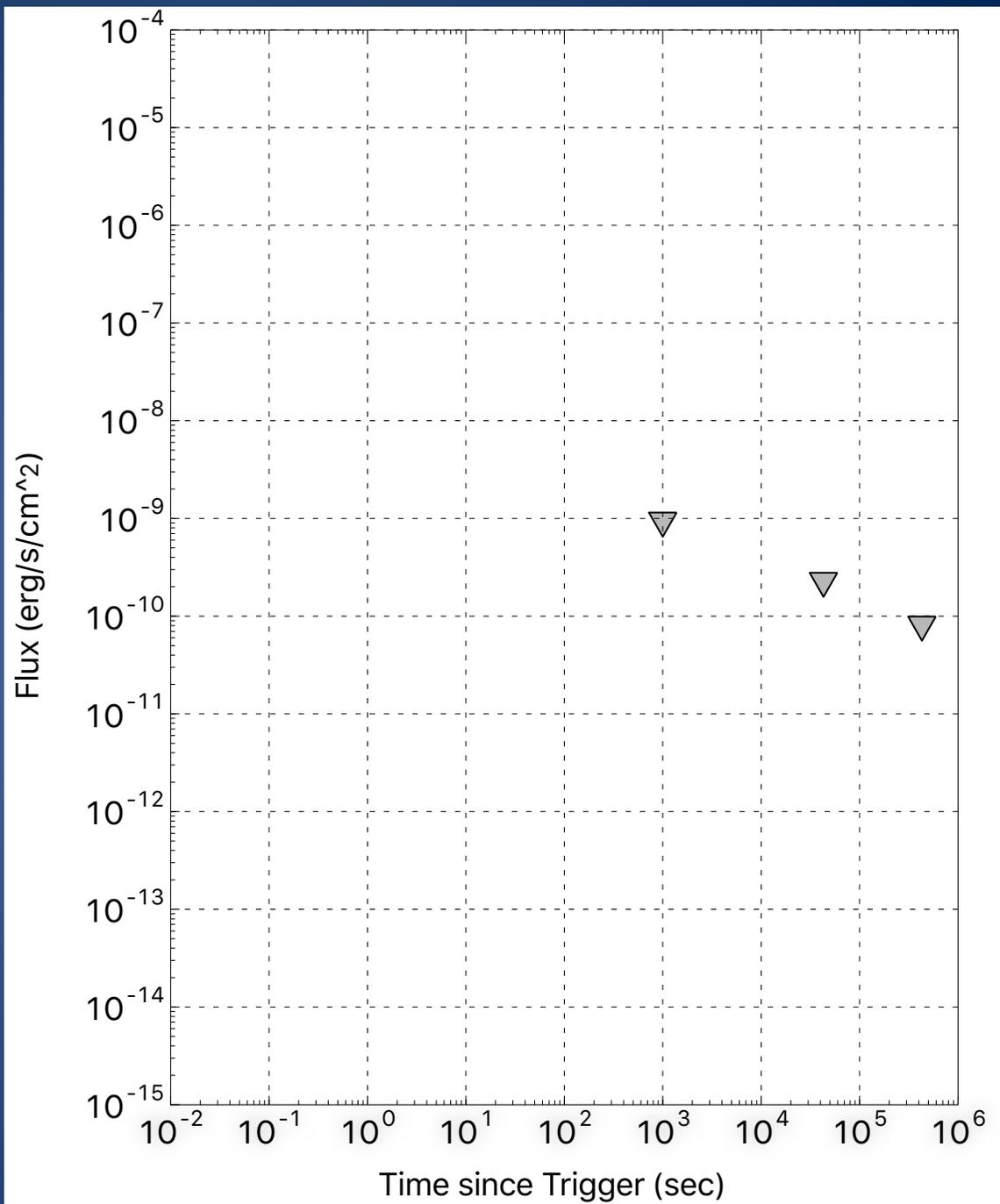
MAXIによる全天X線画像 (重力波発生後92分間)



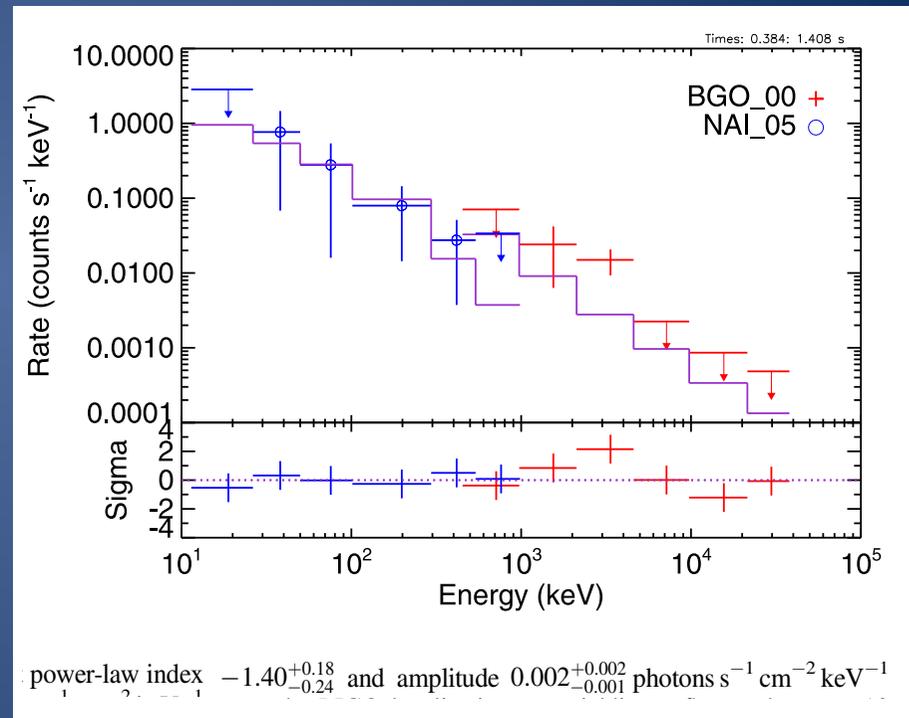
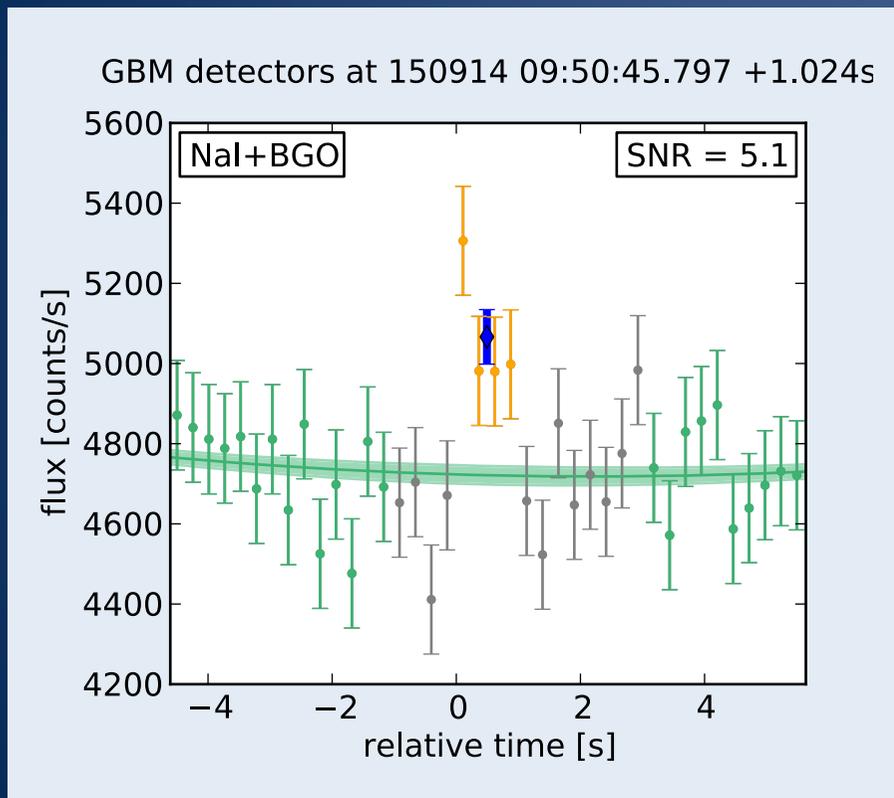


重力波
電波
可視光
X線
γ線

MAXI on GW150914



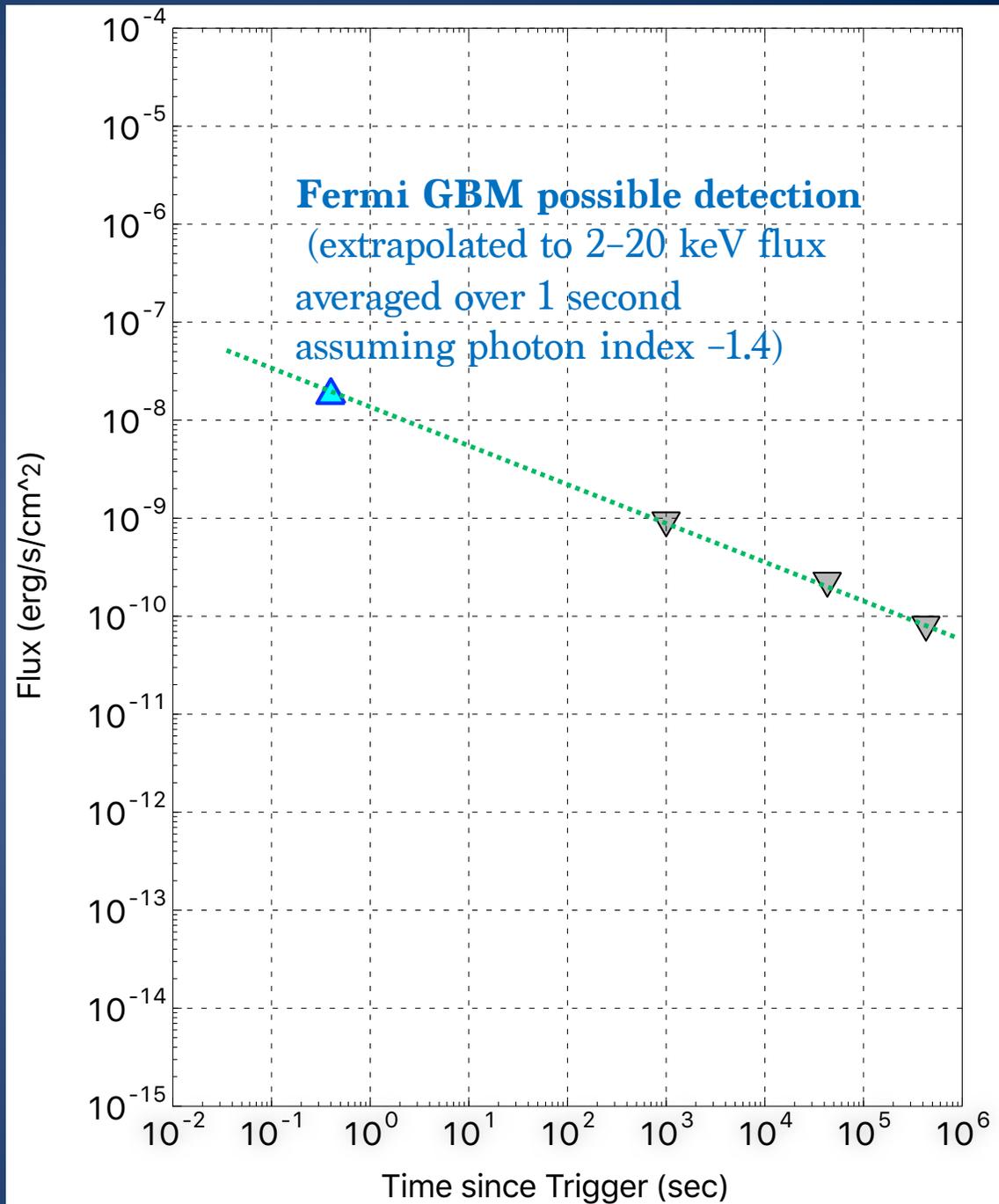
Possible detection of gamma-ray emission by Fermi GBM



Connaughton et al. 2016

MAXI on GW150914

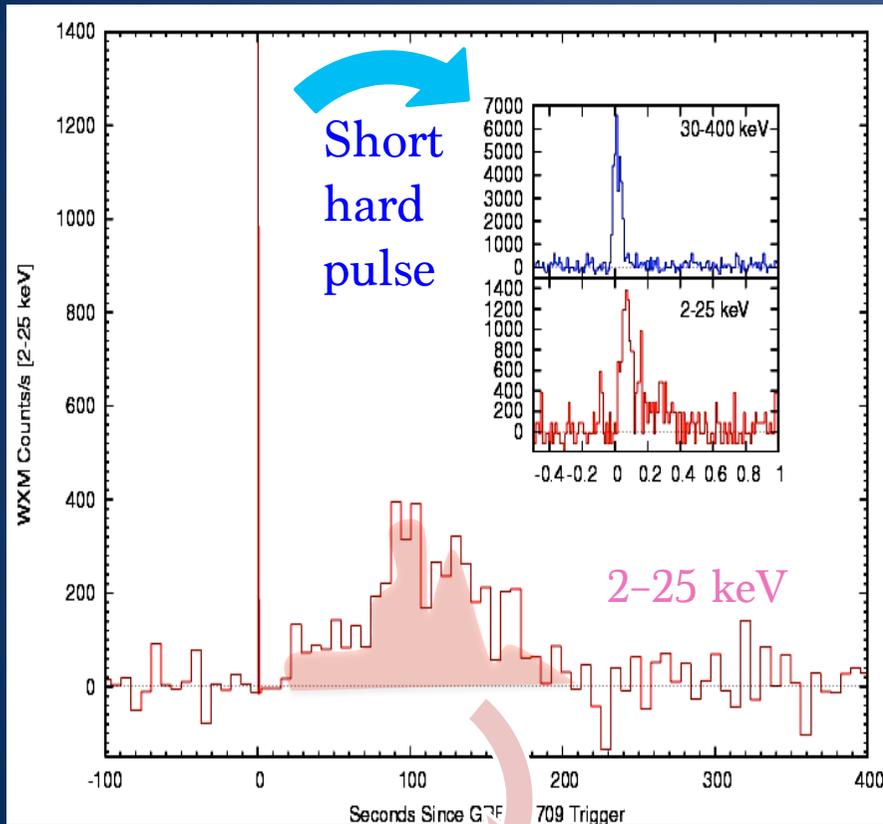
MAXI could have
marginally
detected GBM
SGRB if it was in
the field of view



Short GRB 050709

The only short GRB observed in soft X-ray

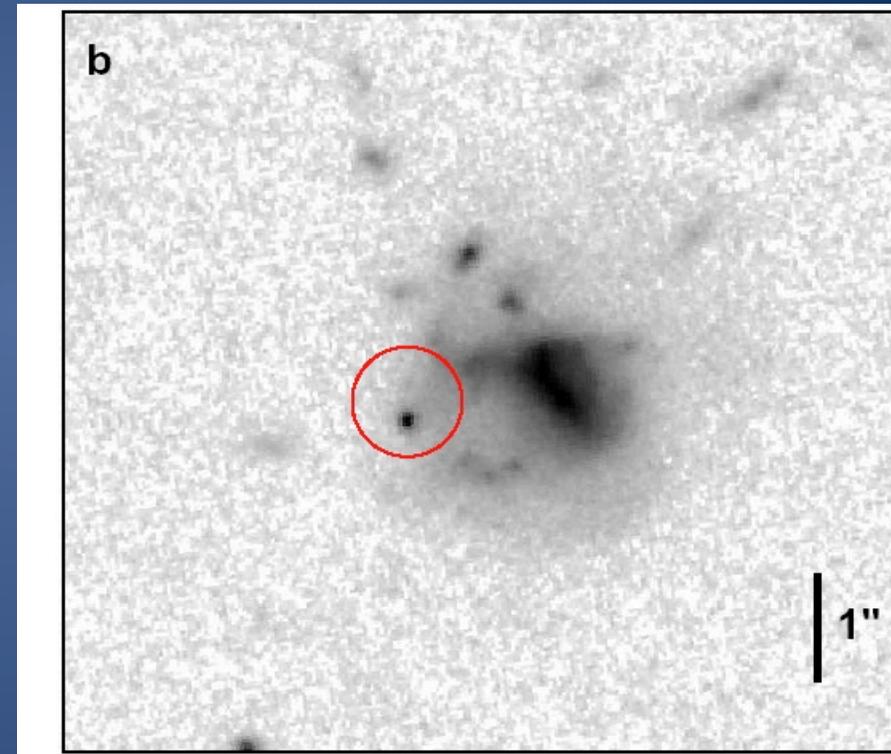
HETE-2 Villasenor et al. 2005



“Soft extended emission”

HST

Fox et al. 2005



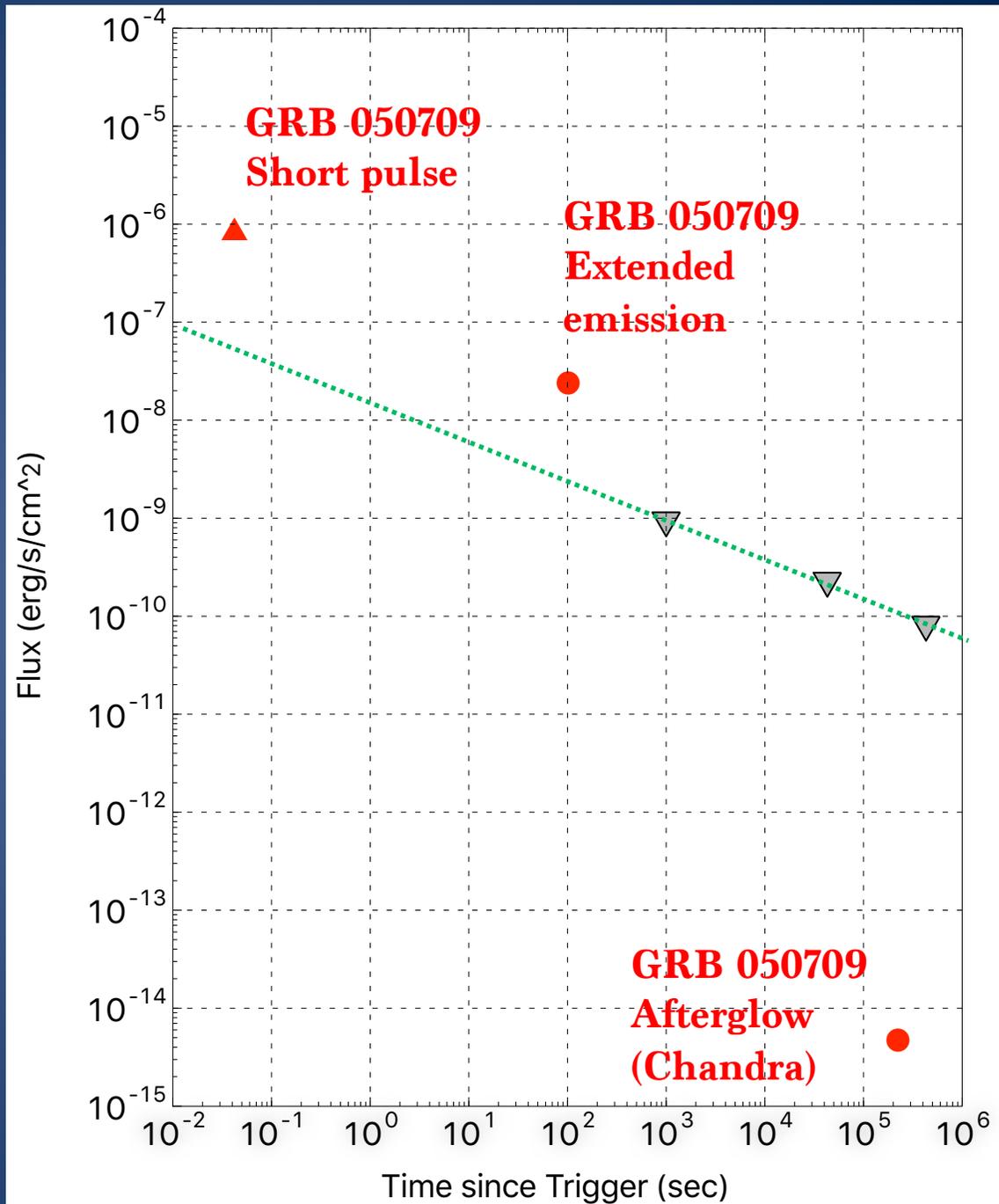
$z=0.160$

Dwarf irregular galaxy

$\text{SFR} = 0.2 M_{\text{sun}}/\text{yr}$

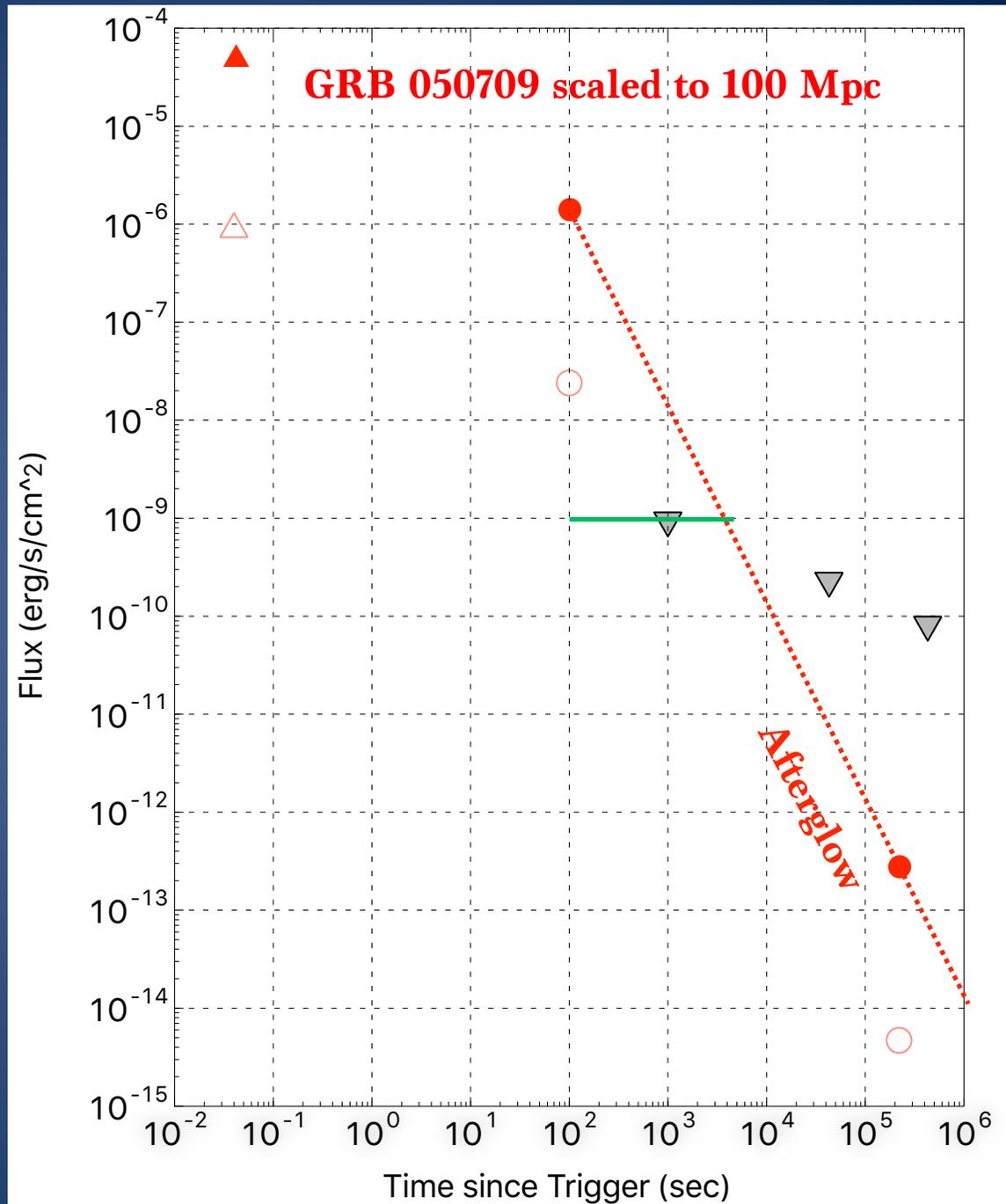
MAXI sensitivity for SGRB in GW range

MAXI could
easily detect
“short pulse” and
“soft extended
emission” of
GRB 050709



MAXI sensitivity for SGRB in GW range

“Soft extended
emission” or X-ray
afterglow of a short
GRB at O2 BNS
range may be
detected by MAXI
in the following
scan



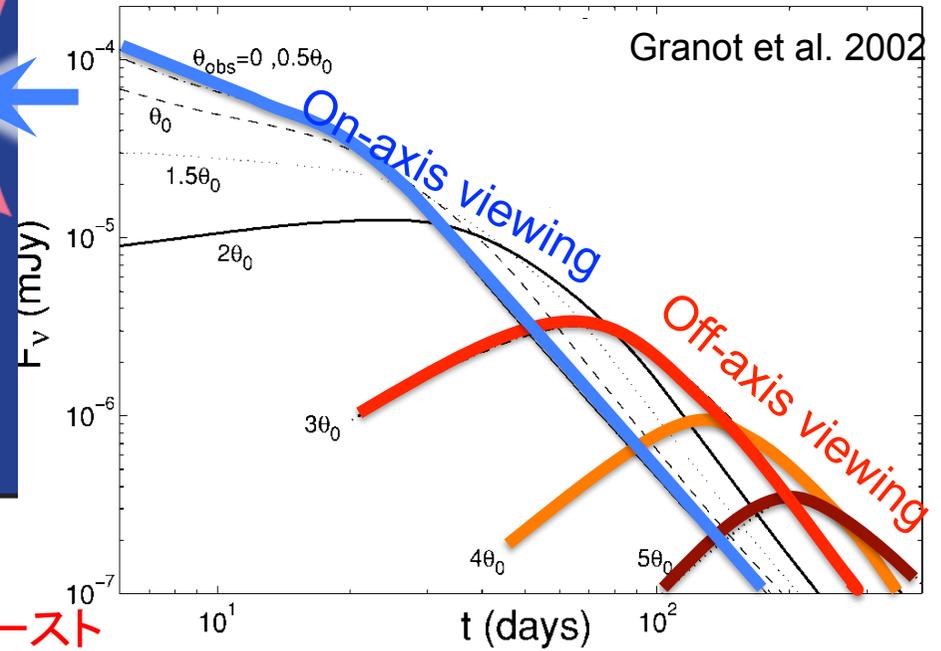
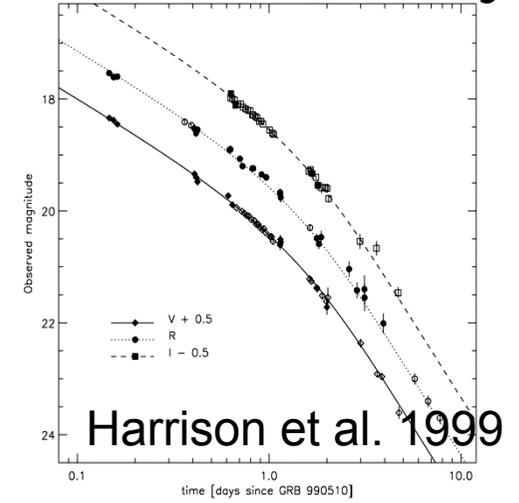
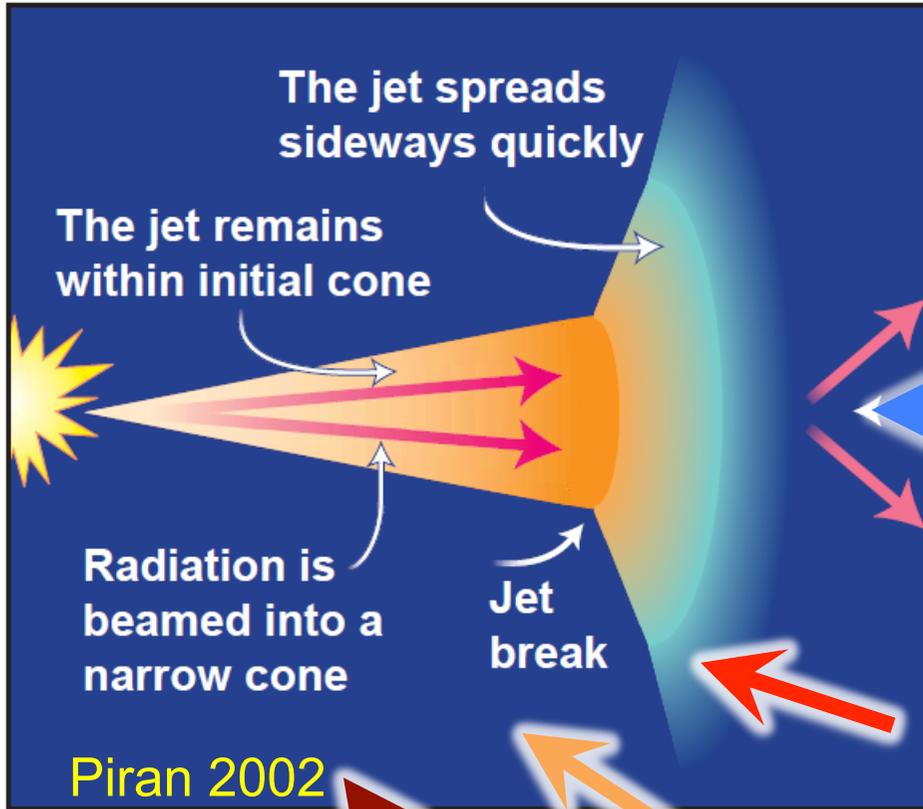
Short GRB

- 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 ≈ 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、 $z < 0.015$ \rightarrow 普通のGRBより圧倒的に近い
- \rightarrow 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 (≥ 10 度)
 - (2) 広い天空域を常時監視
 - GRB のない《残光》(orphan afterglow) を探す

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

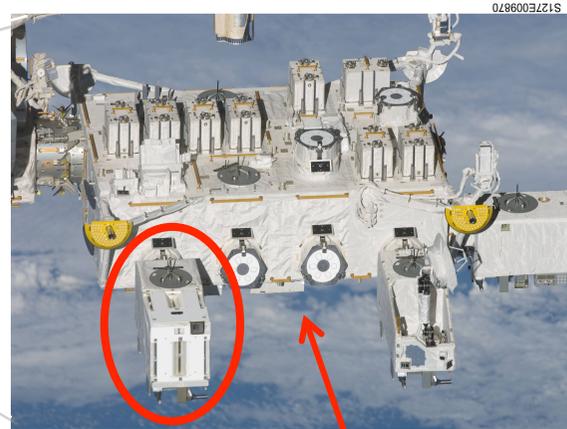
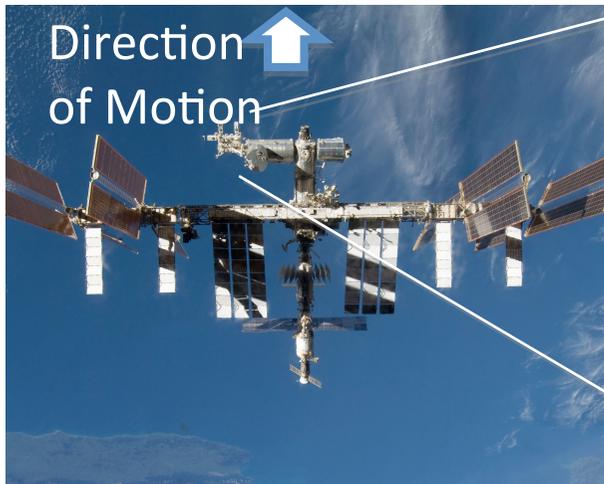
重力波バーストの観測戦略

- 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

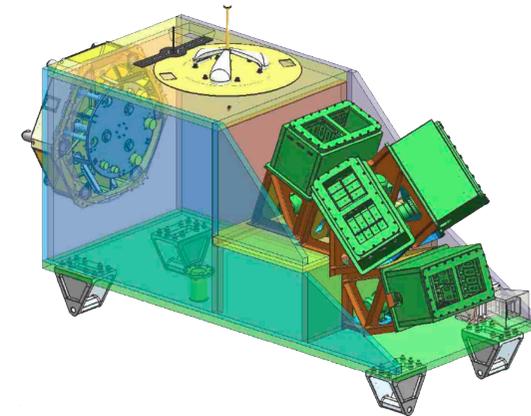
発生後の時間	位置精度	観測手段
1分	5°	重力波
2分	0.1°	X線広天域監視装置をチェック (可視光広天域監視カメラ?)
5分	4'' (=0.001°)	広視野地上(小)望遠鏡
1時間	<1''	地上大望遠鏡
1日	<1''	宇宙望遠鏡

“Wide-Field MAXI” on ISS

N. Kawai + WF-MAXI Team



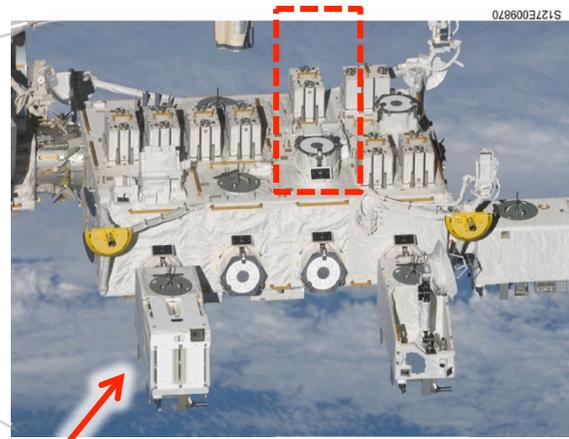
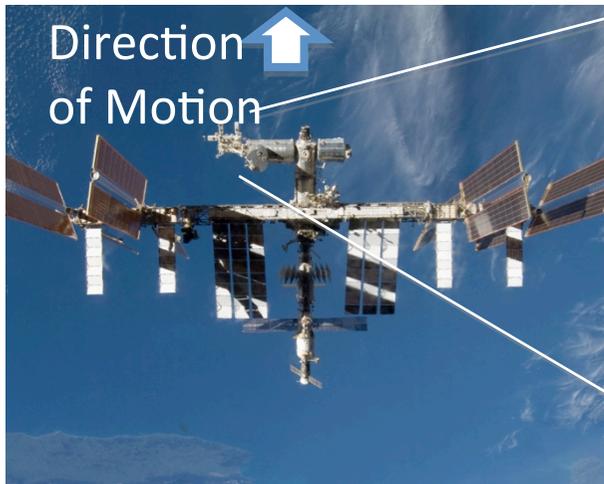
MAXI JEM EF



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

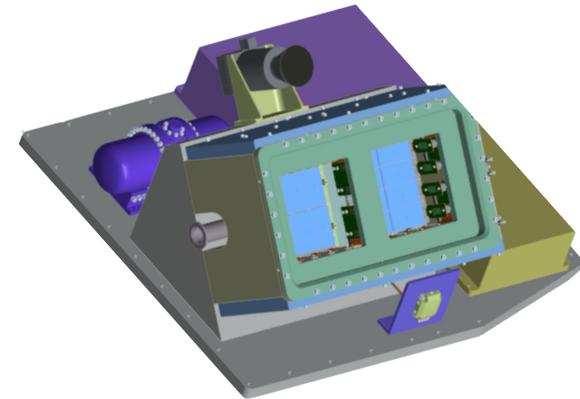
“iSEEP” Wide-Field MAXI

Proposed Feb 2015



MAXI

JEM EF



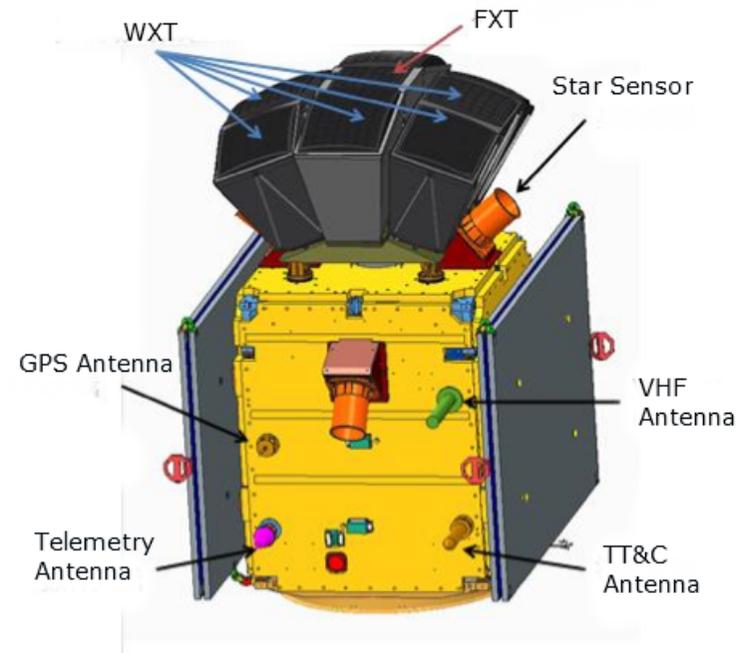
goals	Localization/notification of X-ray transients GW counterparts, black hole binaries, GRBs ...
field of view	≈ 10% of the sky (covers 80% sky in 92 min)
Instruments	Soft X-ray Large Solid Angle Camera (SLC: 0.7–10 keV)
sensitivity	50 mCrab /100 s (SLC)
pos. accuracy	0.1°
platform	ISS/JEM (Selection in 2015, operation 2019–)

Einstein Probe

Yuan 2015, Swift 10 years

Mission profile

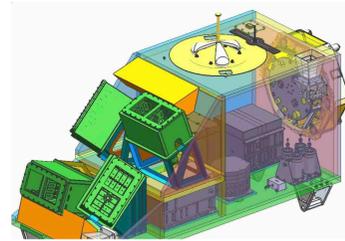
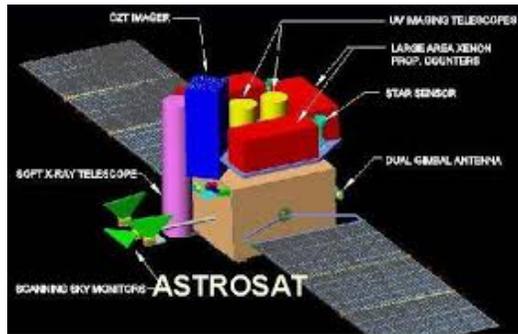
- ✧ Observing modes
 - ✧ Survey mode
 - ✧ X-ray follow-up observation
 - ✧ Target of opportunity
- ✧ Orbit:
 - ✧ 600km circular, 97min period
 - ✧ inclination $<30^\circ$
- ✧ Fast Alert downlink (to trigger multi-wavelength follow-up world-wide)
 - ✧ The VHF network (in collab. French)
 - ✧ Chinese relay satellites
 - ✧ Mass: 380 kg (payload 150kg)
 - ✧ Power: $< 450\text{w}$ (payload 200w)
- ✧ proposed launch: ~2020/2021
- ✧ Life time: 3(+2) years



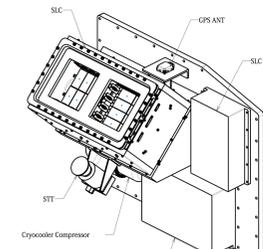
credit: MicroSat

Background

- Rejection of WF-MAXI / iWF-MAXI
 - ASTROSAT: a complemental detector(?) is on orbit
 - Shrinking budget => < \$2 million



Original model of WF-MAXI with full-size BUS for JEM
Cost~ \$50M



miniature version with iSEEP-BUS
Cost~ \$10M

80% is for Tests and Documents

- What can we do with <\$2M?



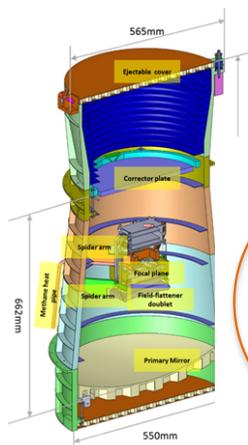
LOFT eROSITA HXMT Einstein Probe SVOM

Future missions have effective area larger than several thousands cm^2 !!
=> micro-satellite is too small comparing with these X-ray missions.

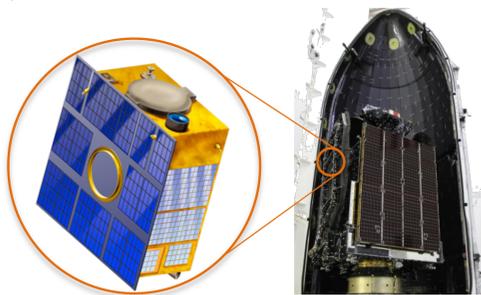
“Hibari” Microsatellite for UV Monitor

◆ Recent NUV Imaging mission:

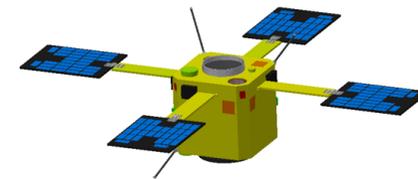
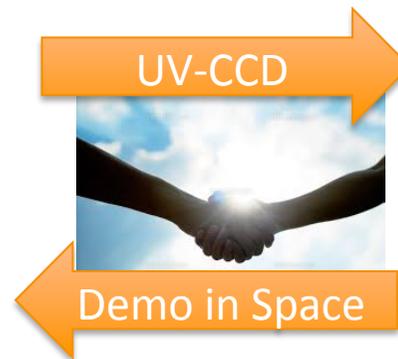
- GALEX ($\Phi 1.2^\circ$)
- UVOT/Swift (17'x17') FoV is not enough for GW astronomy
- ASTROSAT (28')
- **ULTRASAT (210 deg² 21.5mag 900s)**



may be the most recent shape



Caltech/JPL/Israel



Tokyo Tech small satellite team

Only the ULTRASAT can be used for GW follow-up.

- Caltech was searching for a chance to demonstrate their detector on orbit.
- We were searching for the UV-detector.

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 γ 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