

日本物理学会 第69回年次大会
宇宙線・宇宙物理領域、理論核物理領域合同シンポジウム
重力波源とその電磁波、ニュートリノ対応天体

連星中性子星(NS-NS)合体からの 重力波・電磁波・ニュートリノ放射

仏坂健太
(京都大学)

Outline

- 連星中性子星合体の重力波天文学
- 連星中性子星合体に付随する電磁波
 - ✓ ショートガンマ線バースト
 - ✓ 質量放出に伴う電磁波放射
 - ✓ Short GRB 130603B の巨新星
- まとめ

重力波と人類の歩み

- ✓ 1916年、Einsteinの計算
=>一般相対論から重力波の存在の予言。
- ✓ 1974年、Hulse-Taylor パルサーの発見
=>理論予想どおりに重力波を放射。
- ✓ 2014年、BICEP2によるCMBの原始重力波起源のB-modeの発見!?
=>重力波は宇宙空間を伝播している。
- ✓ 201X年、重力波検出器によって、直接検出。

重力波天文学: 初検出に向けて

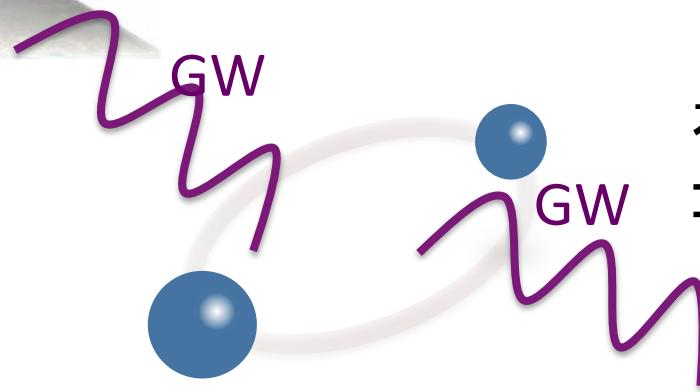
KAGRA



Advanced LIGO



Advanced Virgo



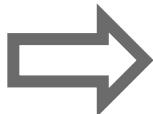
有望なターゲット:
コンパクト天体の合体

予想イベントレート(NS-NS合体) — Abadie et al (2010)

これまで (Initial LIGO, Virgo)

数年後から(KAGRA, Advanced LIGO, Virgo)

0.0002 ~ 0.2 /yr



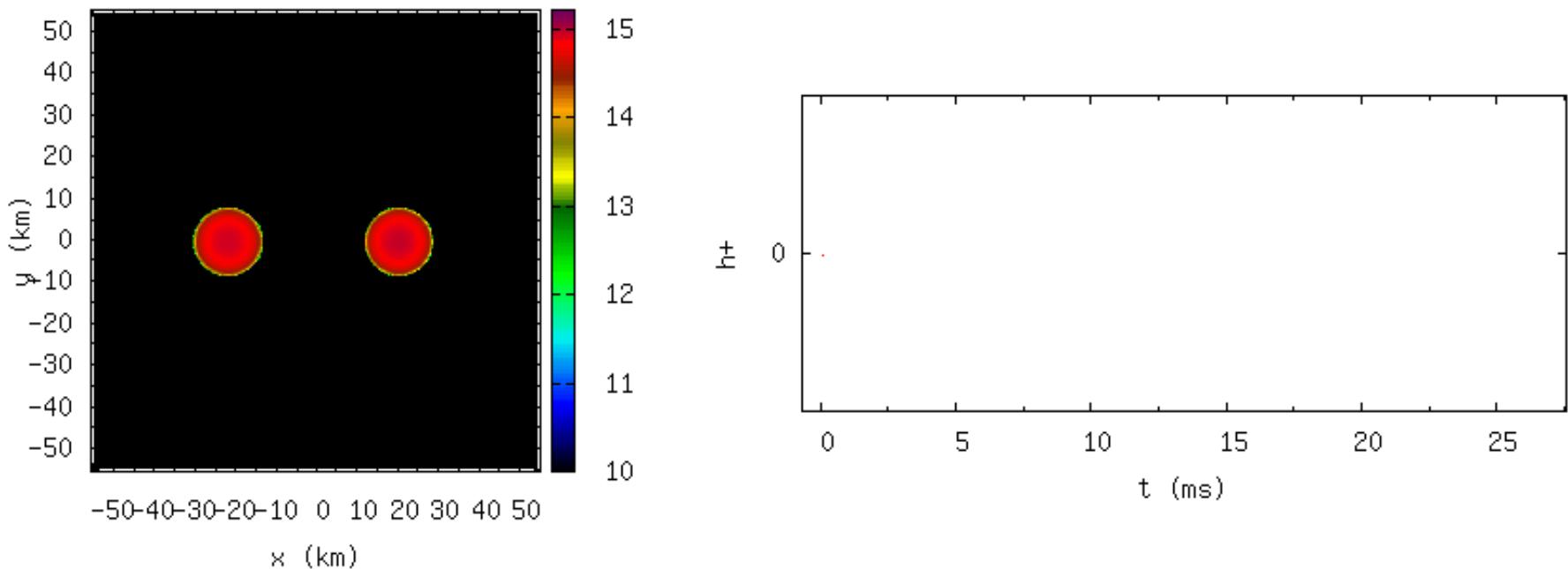
0.4 ~ 400 /yr

数値相対論：NS-NS合体と重力波形

$$M_1 = 1.4M_{\text{sun}} \quad M_2 = 1.3M_{\text{sun}}$$

EOS : APR (R=11km, Mmax=2.2Msun)のモデル

t=0 ms

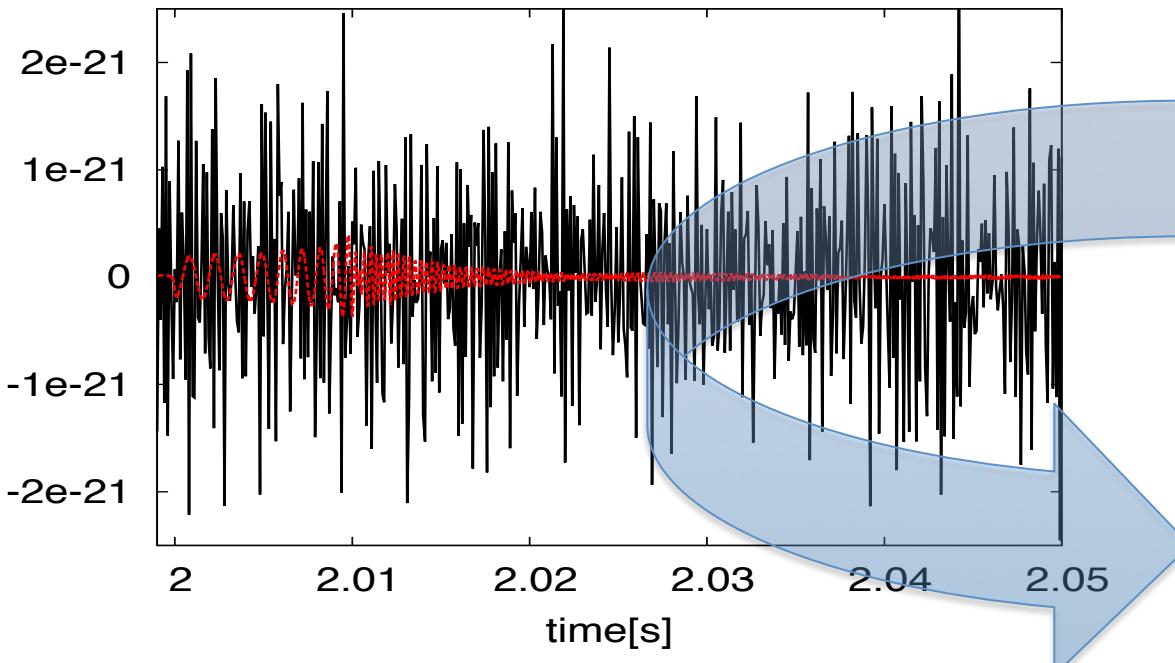


連星の質量・星の半径によって、重力波波形は異なる。

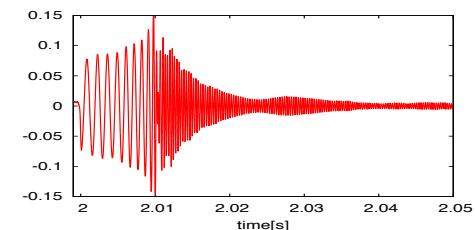
コンパクト連星合体からの重力波を捉える

マッチドフィルター解析

データ: 雑音 + 重力波



理論波形(テンプレート)



テンプレートとデータの
内積を取って重力波信号を
取り出す

運動に関わる物理量(質量など)

軌道運動

検出

重力波波形

重力波観測で測定される物理量

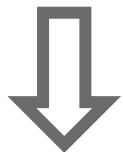
マッチドフィルター解析(SNR ~ 20 , 1.4-1.4Msun)

Rodriguez et al 2013, Read et al 2013

関連テーマ

- ✓ 天体の個々の質量が $\sim 15\%$ で測定。  連星進化
- ✓ 合体時刻 $\sim 1\text{ms}$ の精度でわかる?  GRB, gravity
- ✓ 中性子星の半径 $\pm 2\text{km}$ 程度で測定?  核物質
- ✓ 天体までの距離が $\sim \text{数}10\%$ で測定。  宇宙論
- ✓ 天球面上の位置が $\sim 10\text{deg}^2$ で測定  ! ?

- ✓ 重力波検出を他の実験(観測)
によって追確認できるか？
- ✓ 重力波天文学をより豊かなものできるか？



重力波の対応天体の観測に期待

Outline

- 連星中性子星合体からの重力波
- 連星中性子星合体に付随する電磁波
 - ✓ ショートガンマ線バースト
 - ✓ 質量放出に伴う等方電磁波放射
 - ✓ Short GRB 130603B の巨新星
- まとめ

重力波一電磁波観測

- 次世代重力波望遠鏡時代のコンパクト連星天文学
 - ✓ ~200Mpcまでカバーする => 数10万の銀河
 - ➡ 検出閾値付近のイベントが多い → 電磁波で確認 → 発見の手助け
 - ✓ 波源の位置決定が苦手(10deg^2)。
 - ➡ 電磁波で母銀河、距離を決定 → GW-photon伝播の物理
 - ✓ 重力波から合体時刻、天体の質量はわかるだろう。
 - ➡ 波源は中性子星？ブラックホール？または？ ⇔ 電磁波観測と比較

重力波源の電磁波による追観測が重要！！

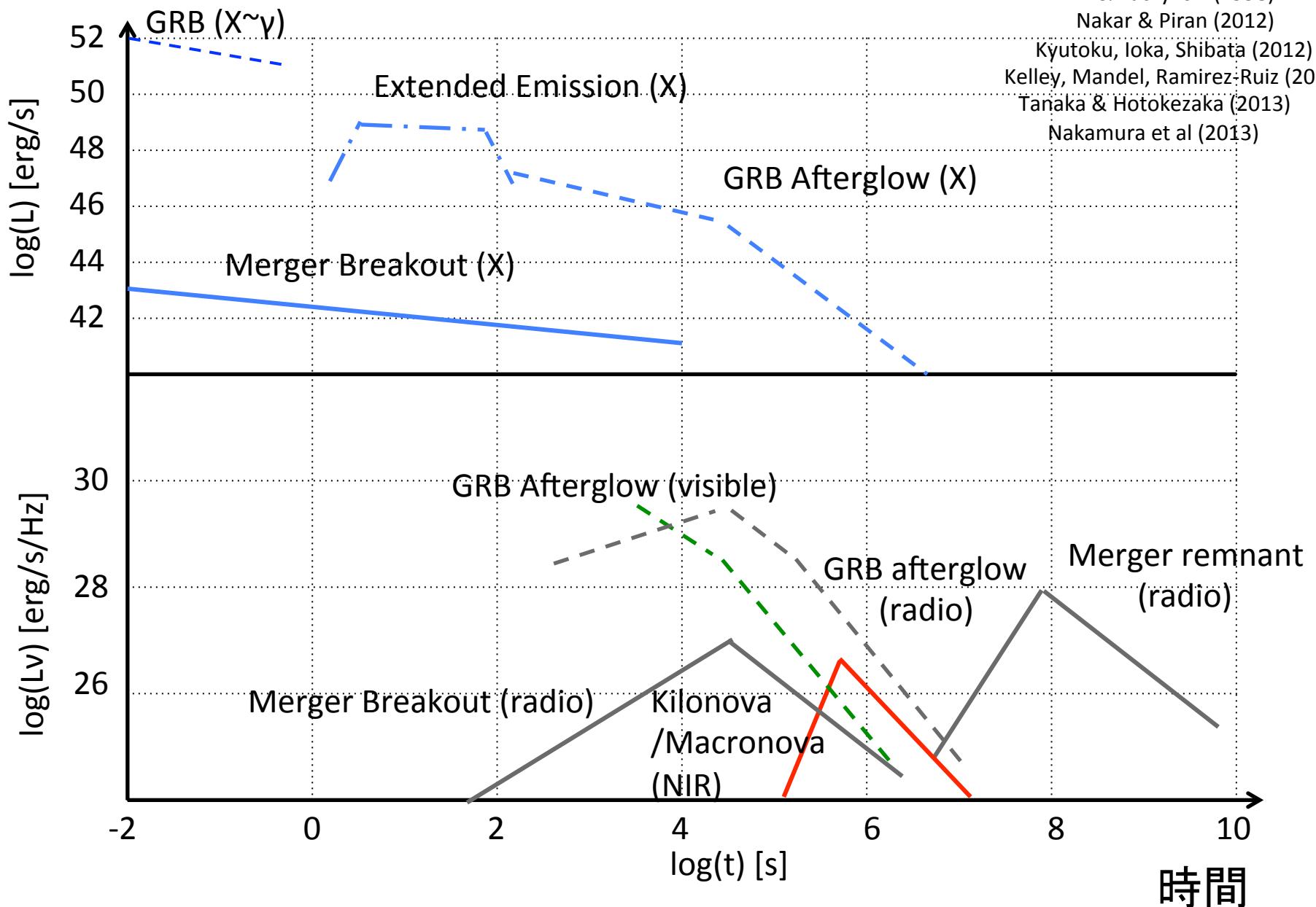
電磁波の観測戦略が必要

- ✓ 有望な重力波の対応天体とは？
 1. 連星中性子星合体に付随する確率が高い。
 2. 現在、または将来の望遠鏡で観測可能。
 3. 他の天体现象と区別可能。
- ✓ いつ、どの波長、どの感度で観測すべきか？

明るさ

予想光度曲線

Refs: Nakar (2007)
Norris & Bonnell (2006)
Sari, Piran, Narayan (1998)
Li & Paczynski (1998)
Nakar & Piran (2012)
Kiyotoku, Ioka, Shibata (2012)
Kelley, Mandel, Ramirez-Ruiz (2012)
Tanaka & Hotokezaka (2013)
Nakamura et al (2013)

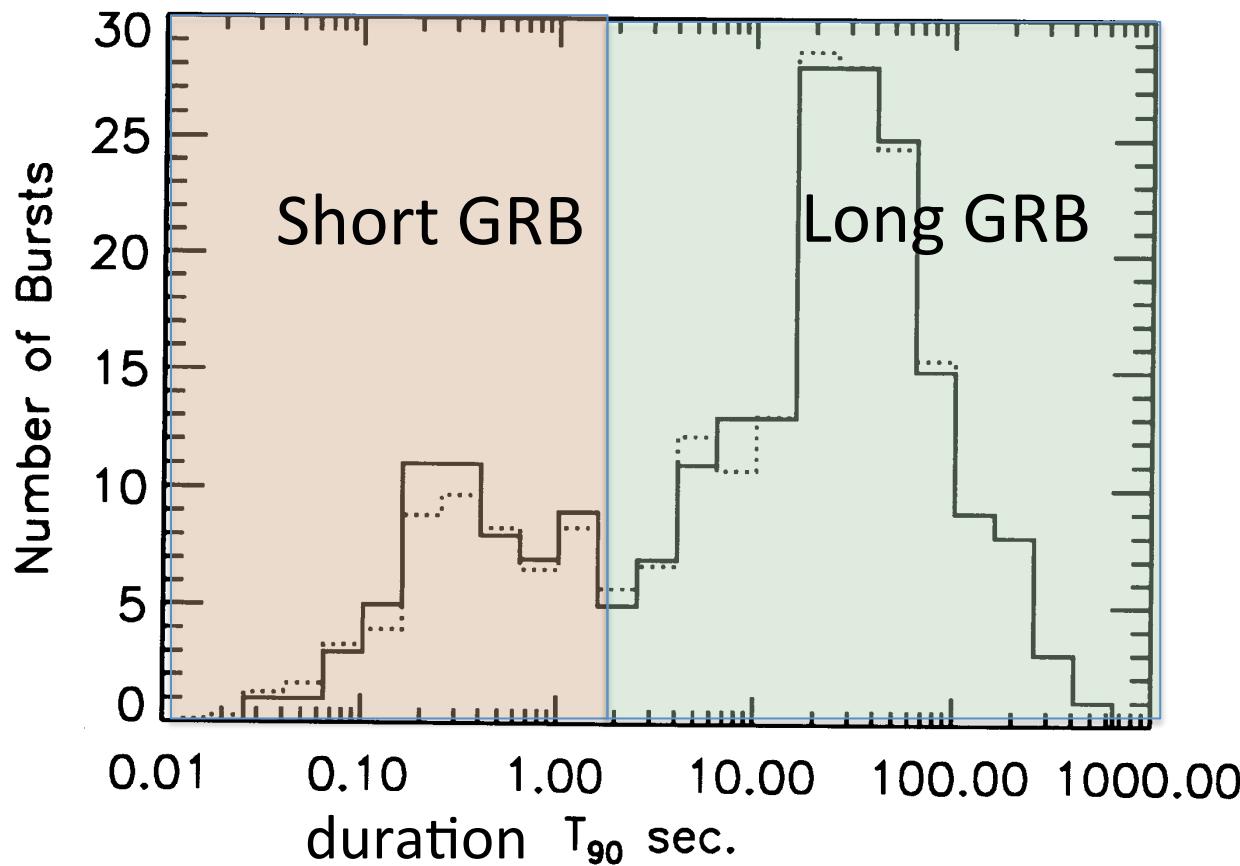


Outline

- 連星中性子星合体からの重力波
- 連星中性子星合体に付随する電磁波
 - ✓ ショートガンマ線バースト
 - ✓ 質量放出に伴う等方電磁波放射
 - ✓ Short GRB 130603B の巨新星
- まとめ

ショート/ロング ガンマ線バースト

非常に強度の高いガンマ線~X線が短時間に放射される現象。

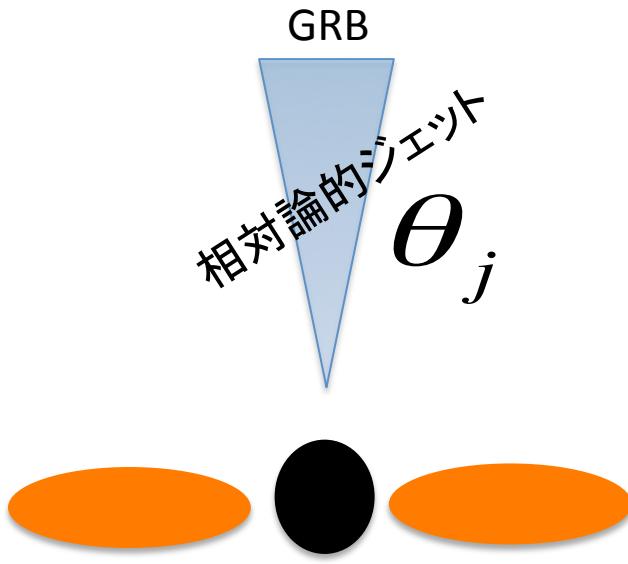


Kouveliotou
et al (1993)

Long GRB => ときどき超新星爆発が付随 => 一部は重力崩壊が起源
Short GRB => 星形成が終わった銀河でも起こる => コンパクト星合体？

とても明るい、観測済=>NS-NS合体の対応天体として有望！？

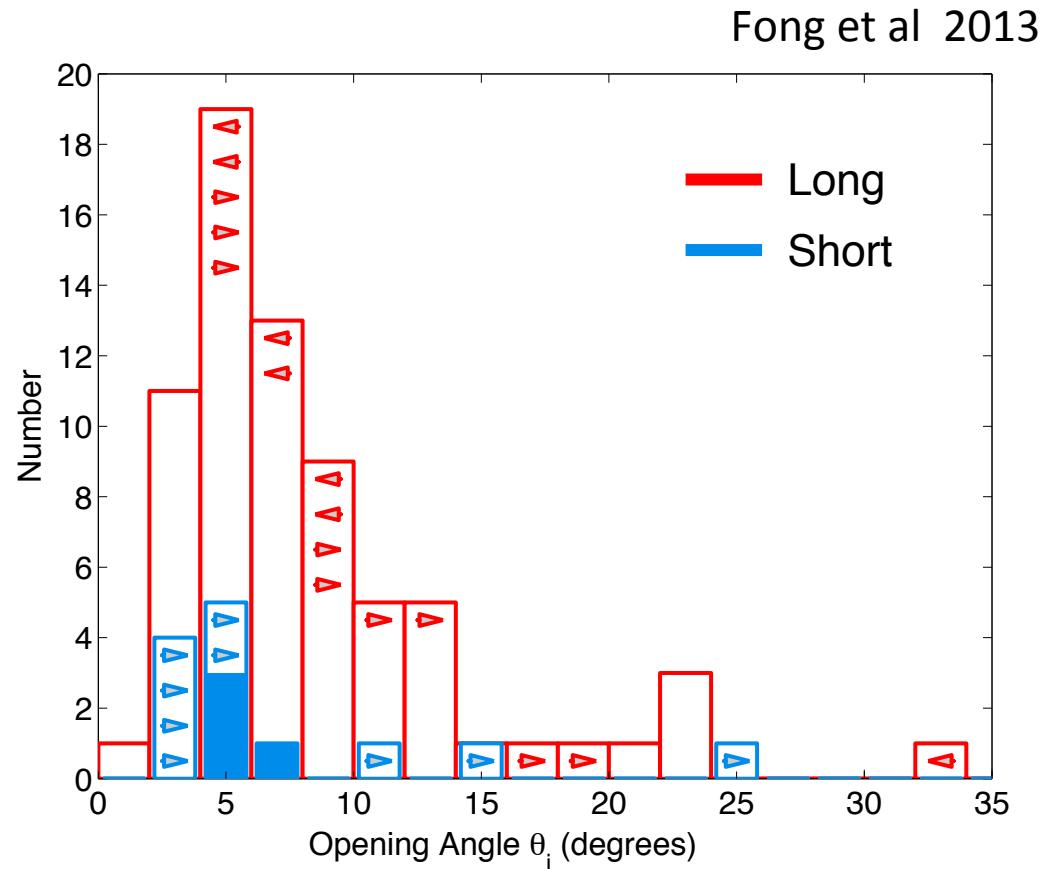
ショートガンマ線バースト： 絞られたジェットと観測頻度



強く絞られたものから、
広く開いたものまで存在
=>平均 $\sim 10^\circ$
=>GWと同時に観測される割合は低い。

イベントレート

“beaming collected” SGRB rate: $0.7 / \text{Myr/Mpc}^3$ (Guetta & Piran 2005)
Expected NS-NS merger rate: $1 / \text{Myr/Mpc}^3$ (Kalogera et al 2004)



ショートガンマ線バーストの長短

長所：

とても明るいので、現行の観測衛星で観測可能。
ショートガンマ線バーストの親星のsmoking gun。

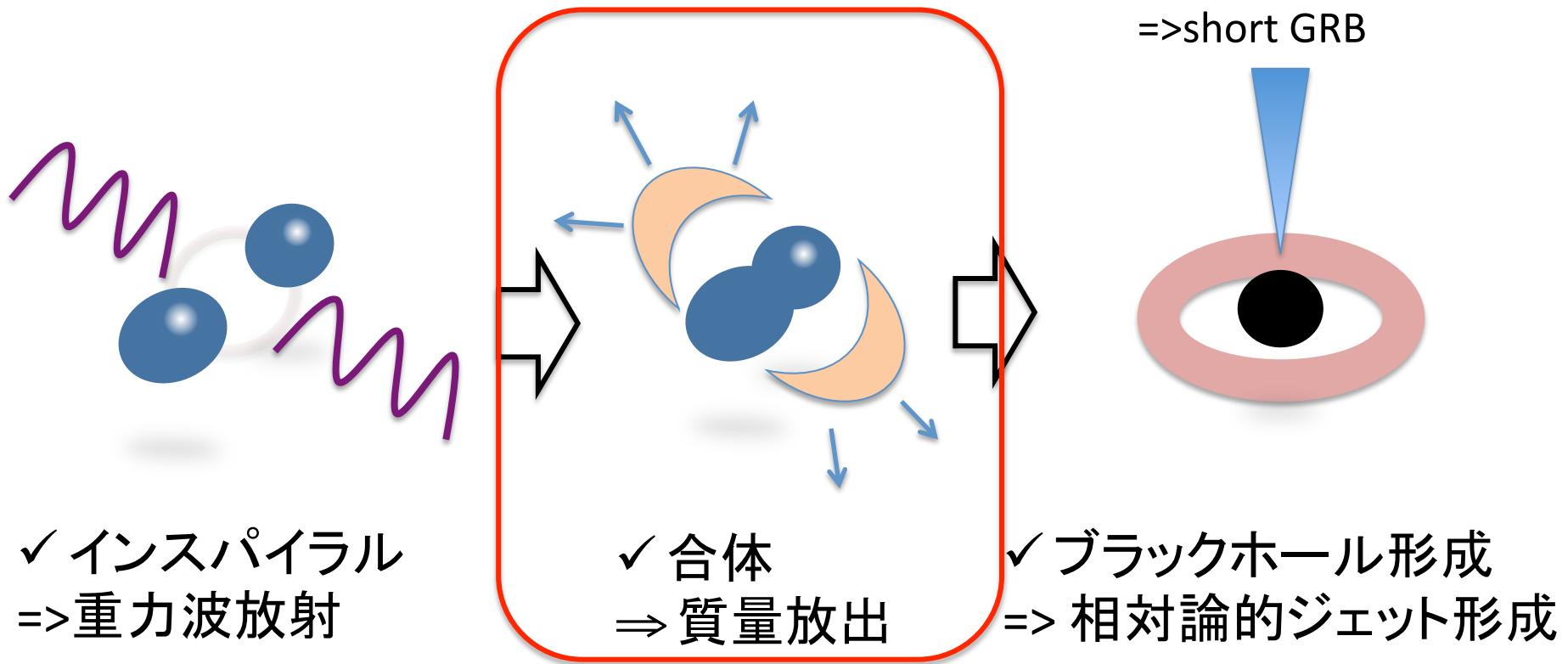
短所：

相対論的ビーミング + 絞られたジェットのため、
真っ正面の観測者にしか見えない。

Outline

- 連星中性子星合体からの重力波
- 連星中性子星合体に付随する電磁波
 - ✓ ショートガンマ線バースト
 - ✓ 質量放出に伴う等方電磁波放射
 - ✓ Short GRB 130603B の巨新星
- まとめ

合体=>質量放出=>(等方)電磁波放射

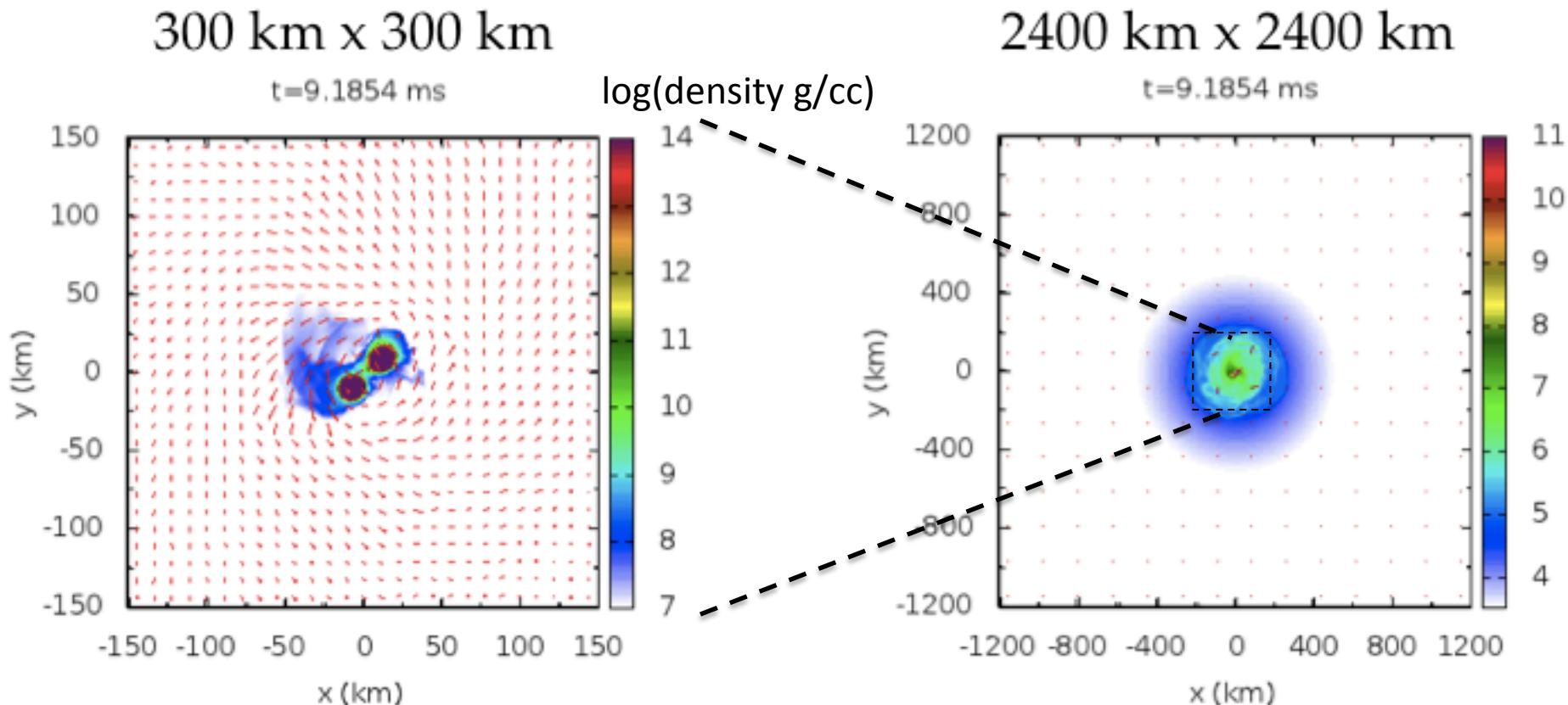


NS-NS合体では、質量放出は起こるのか？
質量放出が起こるとすると、どう光るのか？

数値相対論シミュレーション：赤道面の質量放出

KH et al. 2013

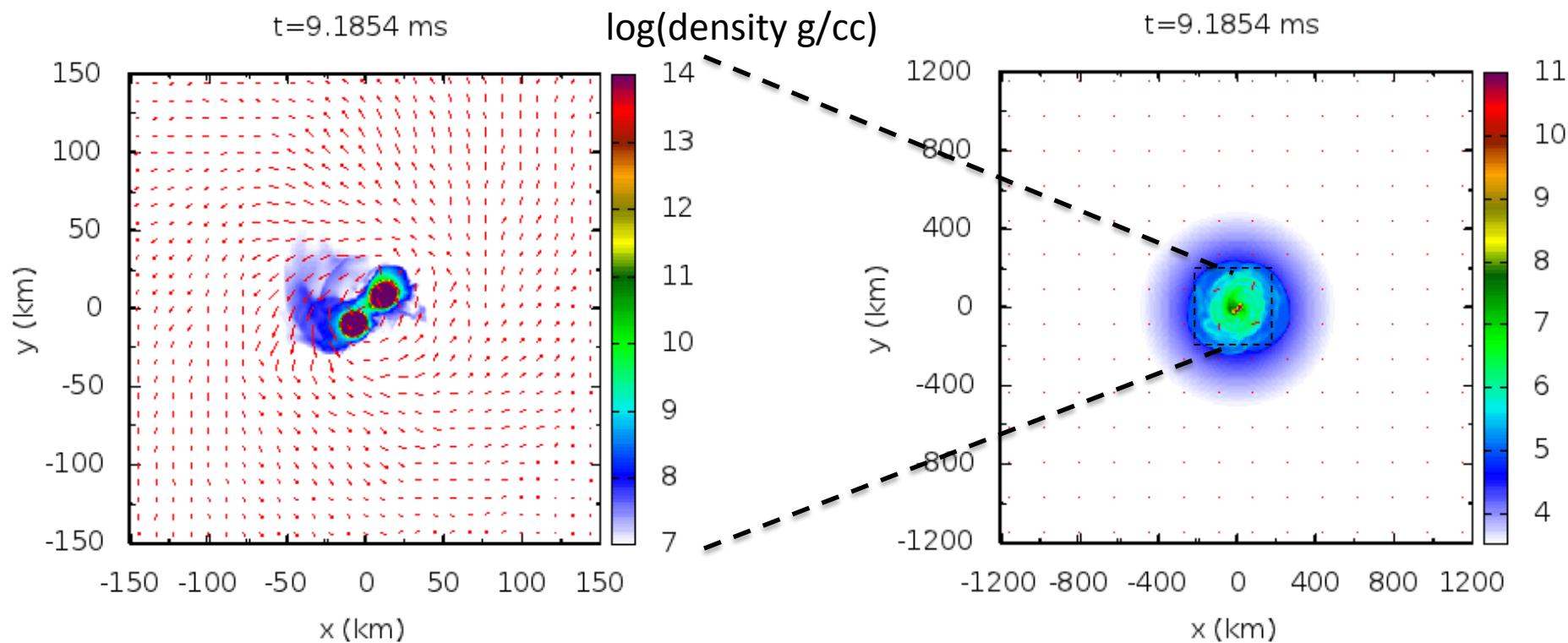
Model : 1.2Msun – 1.5Msun, EOS=APR



数値相対論シミュレーション：赤道面の質量放出

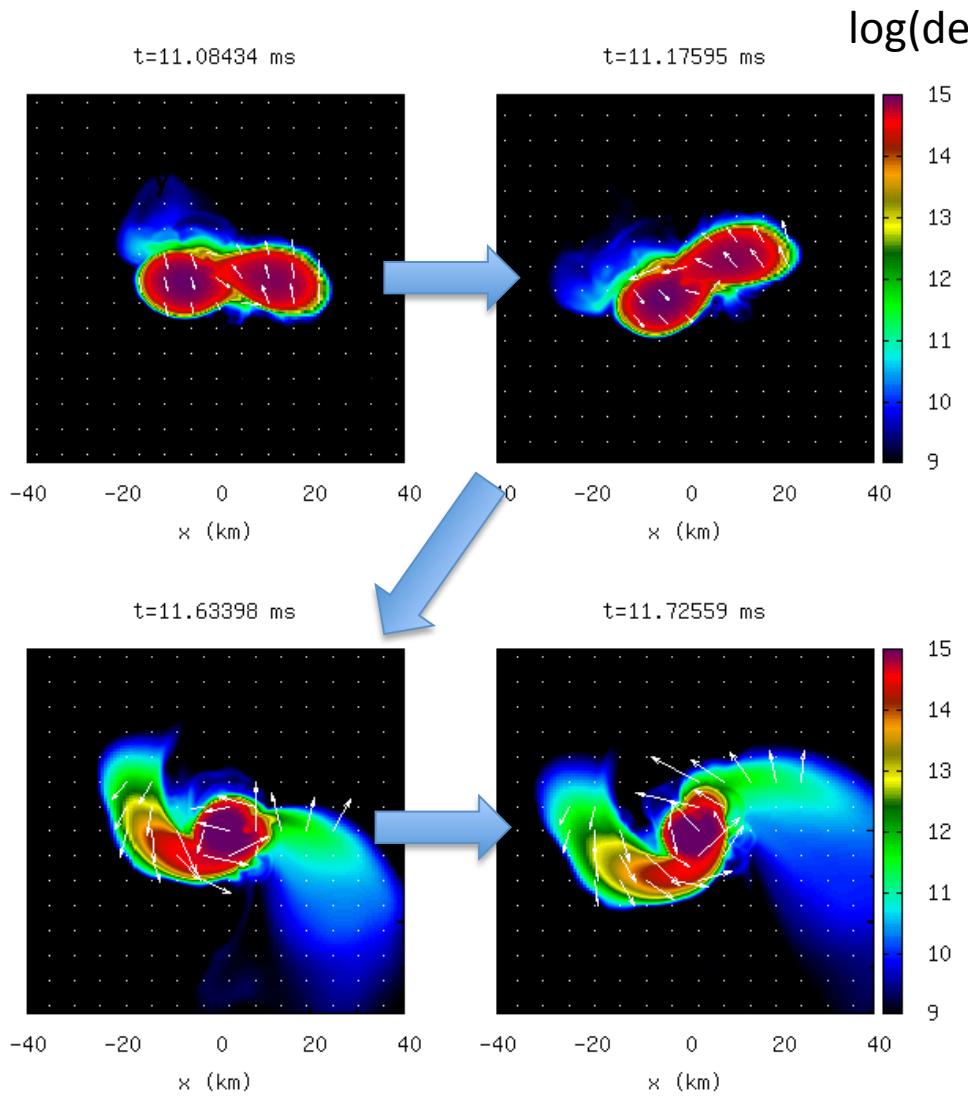
KH et al. 2013

Model : 1.2Msun – 1.5Msun, EOS=APR



質量放出 : $\text{Mej} \sim 0.01\text{Msun}$, $v \sim 0.2c$

質量放出機構(潮汐トルク)



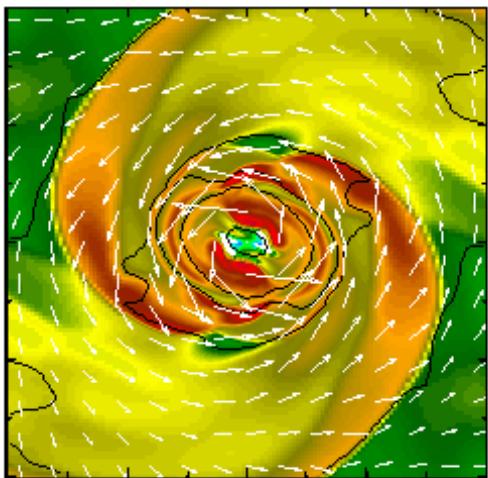
1. 軽い星が引き延ばされる
2. 外側が角運動量をもらう
3. 系から脱出する

特徴: 物質の放出は、赤道面に集中する。

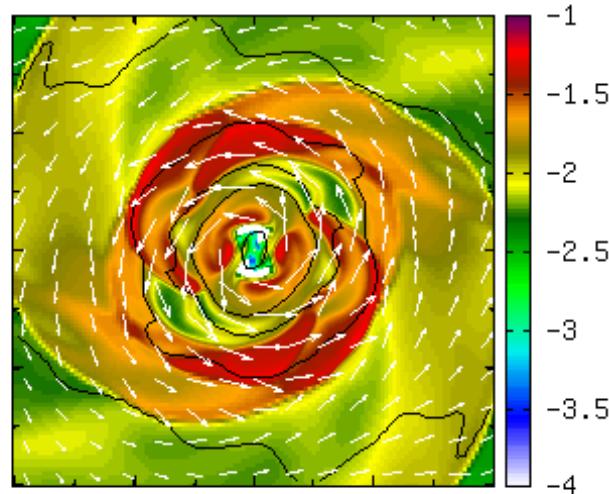
質量放出機構～衝撃波加熱～

Specific internal energy

$t=14.09692 \text{ ms}$

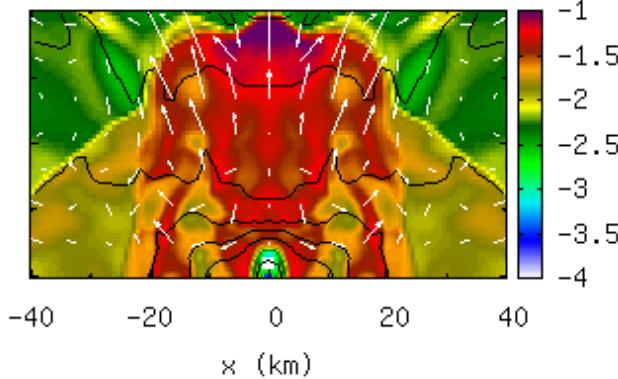
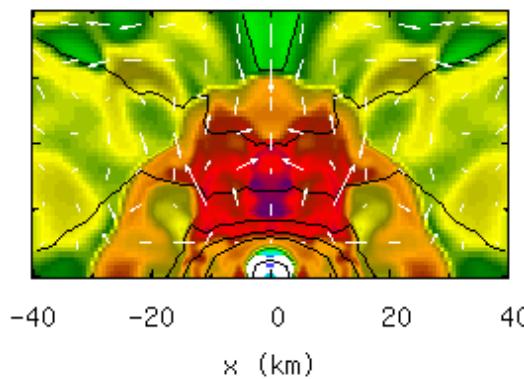


$t=14.27765 \text{ ms}$



赤道面

スパイラルアーム付近に
衝撃波形成

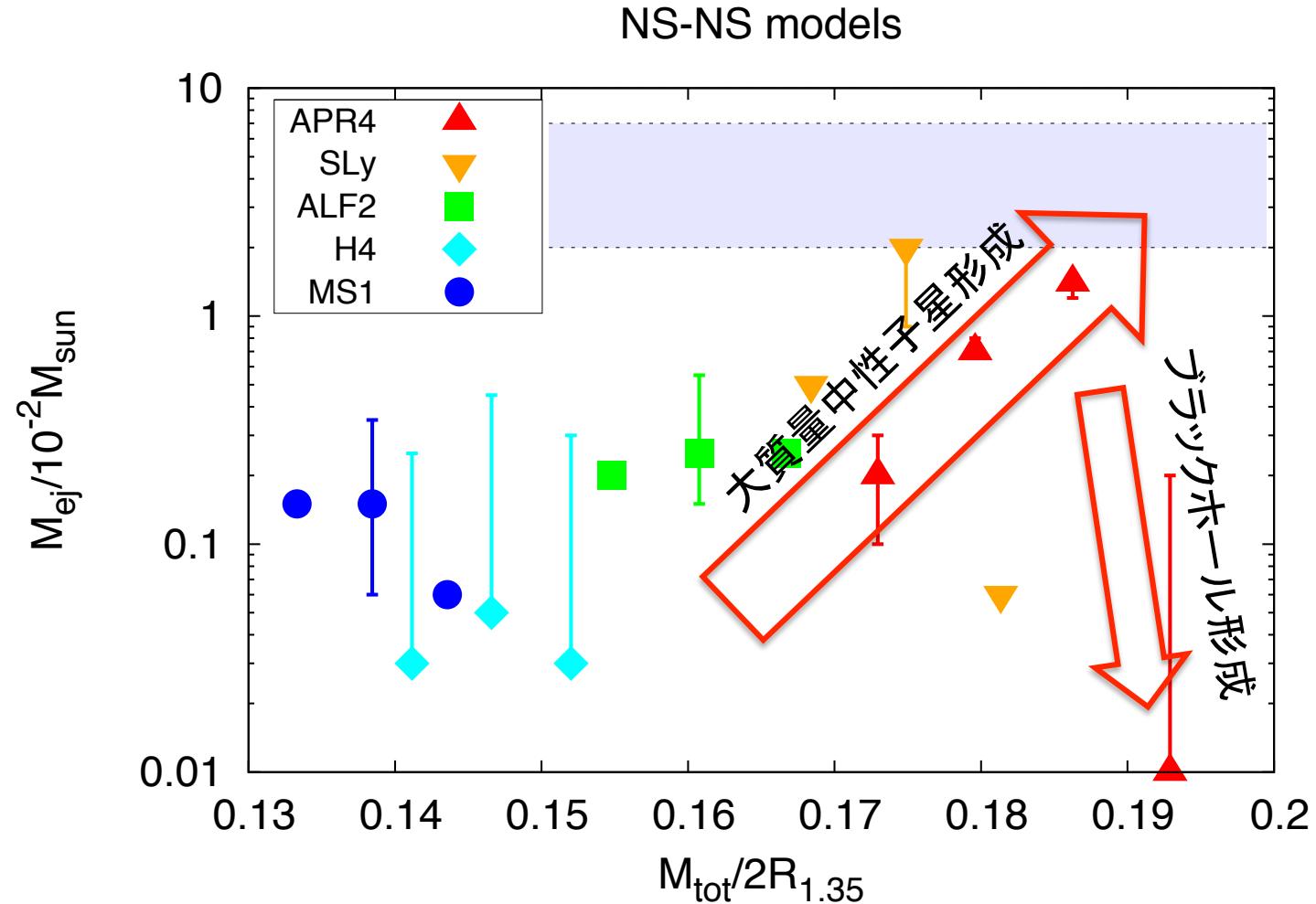


子午面

中性子星と外層の間に
衝撃波形成

Model=135Msun-1.35Msun, APR

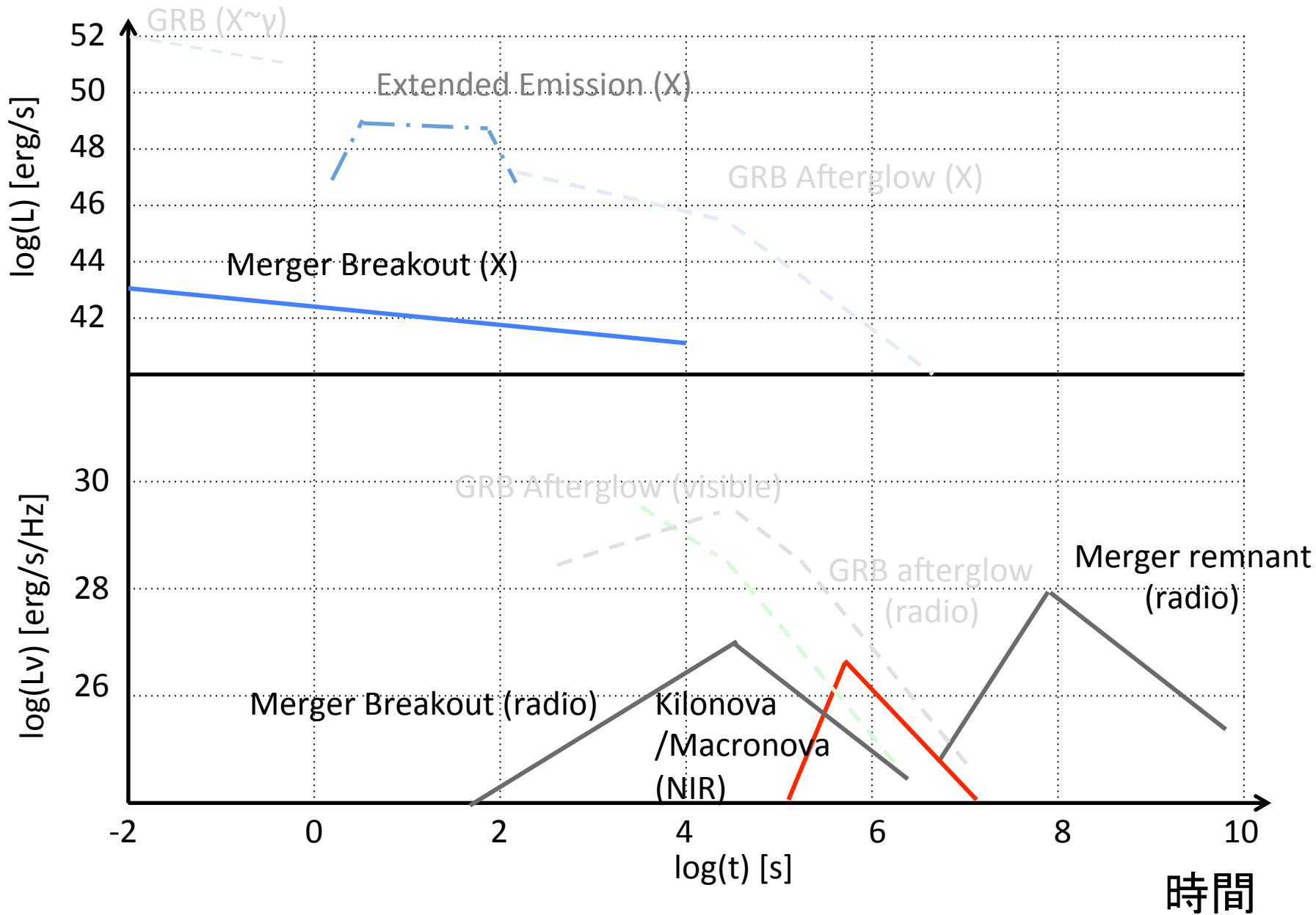
質量放出量: EOS依存性



超大質量中性子星形成に伴って、多くの物質が放出される。

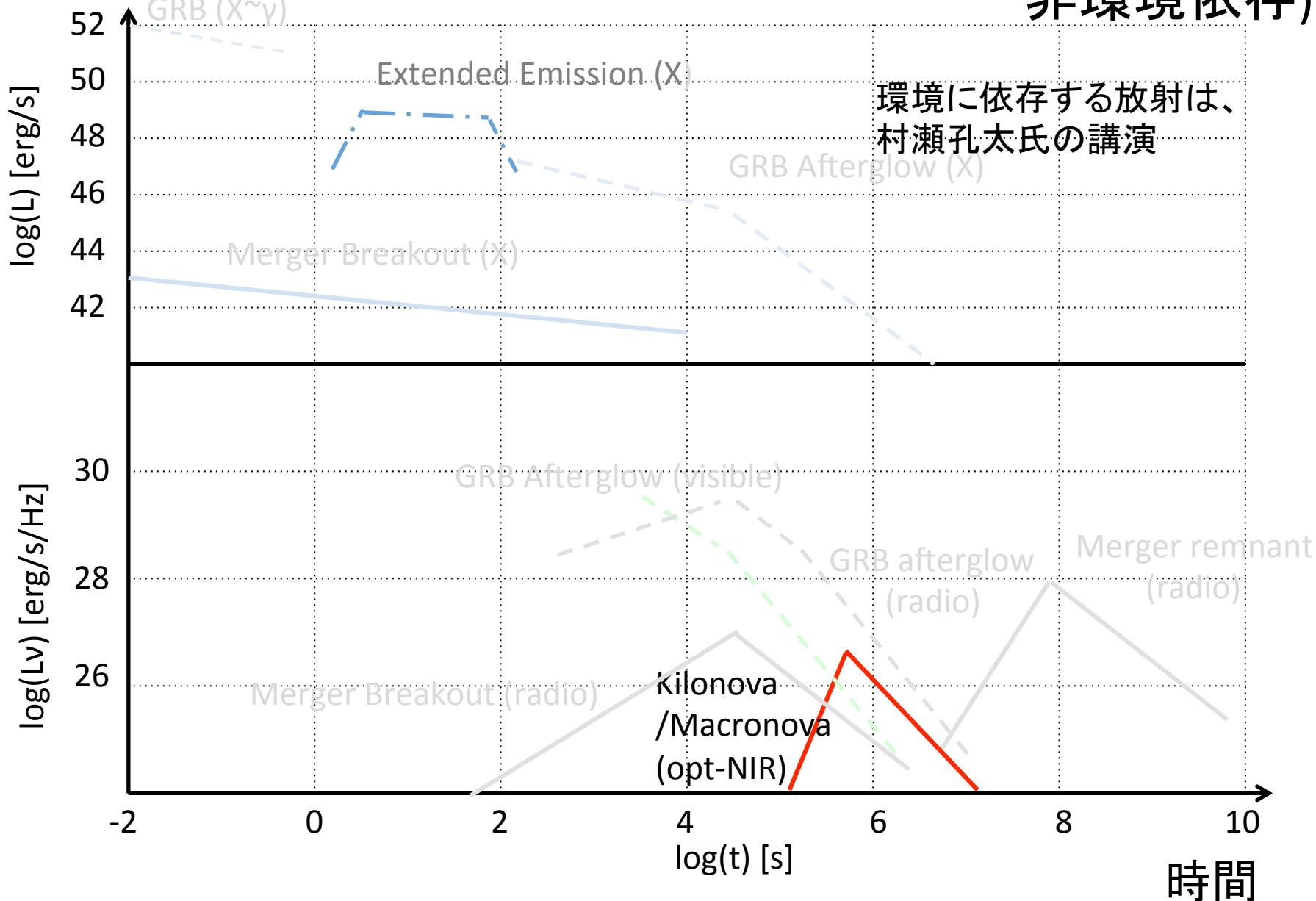
明るさ

質量放出にともなう電磁波: 予想光度曲線(4π)



明るさ

質量放出にともなう電磁波: 予想光度曲線(4π、 非環境依存)

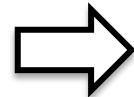
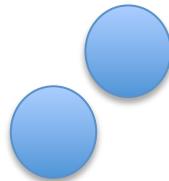


Kilonova/Macronova (巨新星)

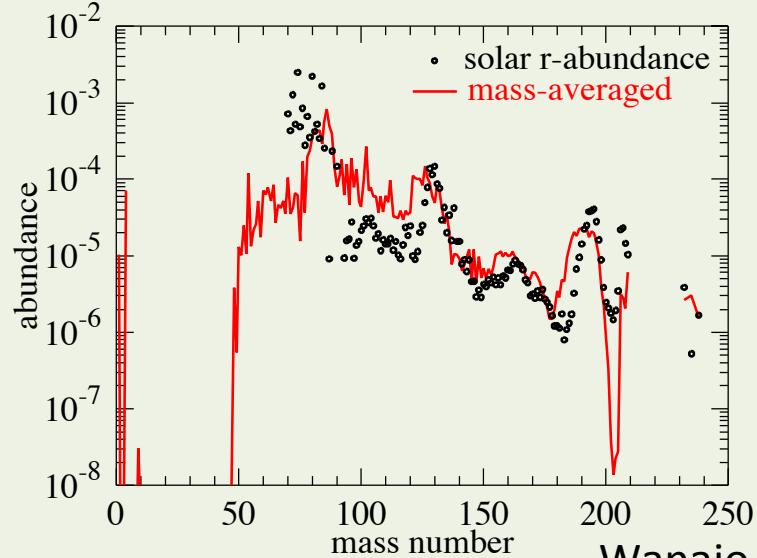
NS-NS合体の可視光対応天体として予想。Li & Paczynski 1998
Nova < Kilonova/Macronova < Supernova

NS-NS合体

質量の一部を放出
(重元素)



大量の重元素の
ベータ崩壊による加熱
によって輝く

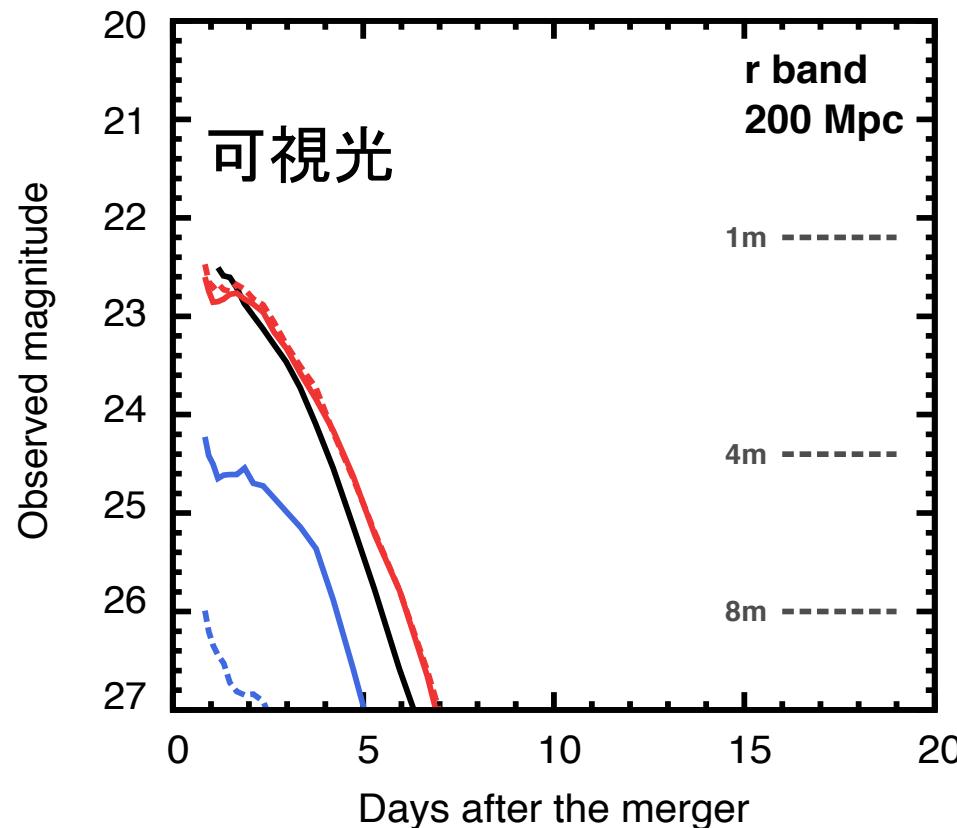


Wanajo et al 2014

Kilonova/Macronova の予想光度曲線

詳しくは、田中雅臣さんの講演にて

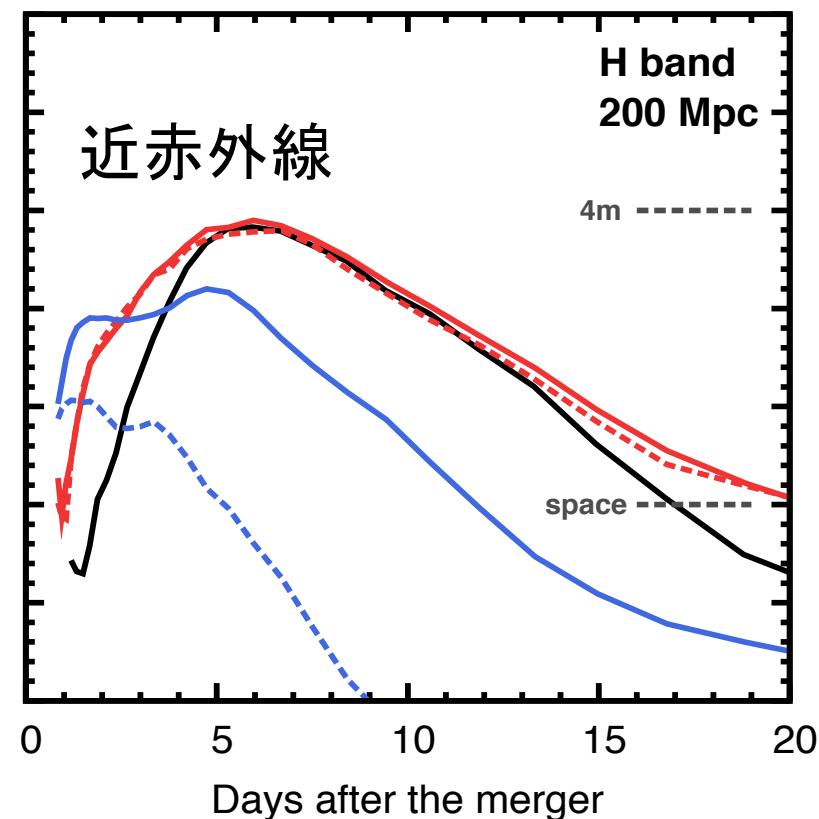
明るさ(等級)



Tanaka & KH 2013

See also Kasen Badnell & Barnes 2013

Barnes & Kasen 2013



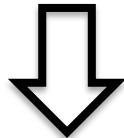
可視の赤側から、赤外にかけてday～weekで増光

Outline

- 連星中性子星合体からの重力波
- 連星中性子星合体に付随する電磁波
 - ✓ ショートガンマ線バースト
 - ✓ 質量放出に伴う電磁波放射
 - ✓ Short GRB 130603B の巨新星
- まとめ

2013年、“Kilonova/Macronova”発見？

ショートガンマ線バースト GRB 130603Bの後に、
“Kilonova/Macronova”的初めての観測に成功。



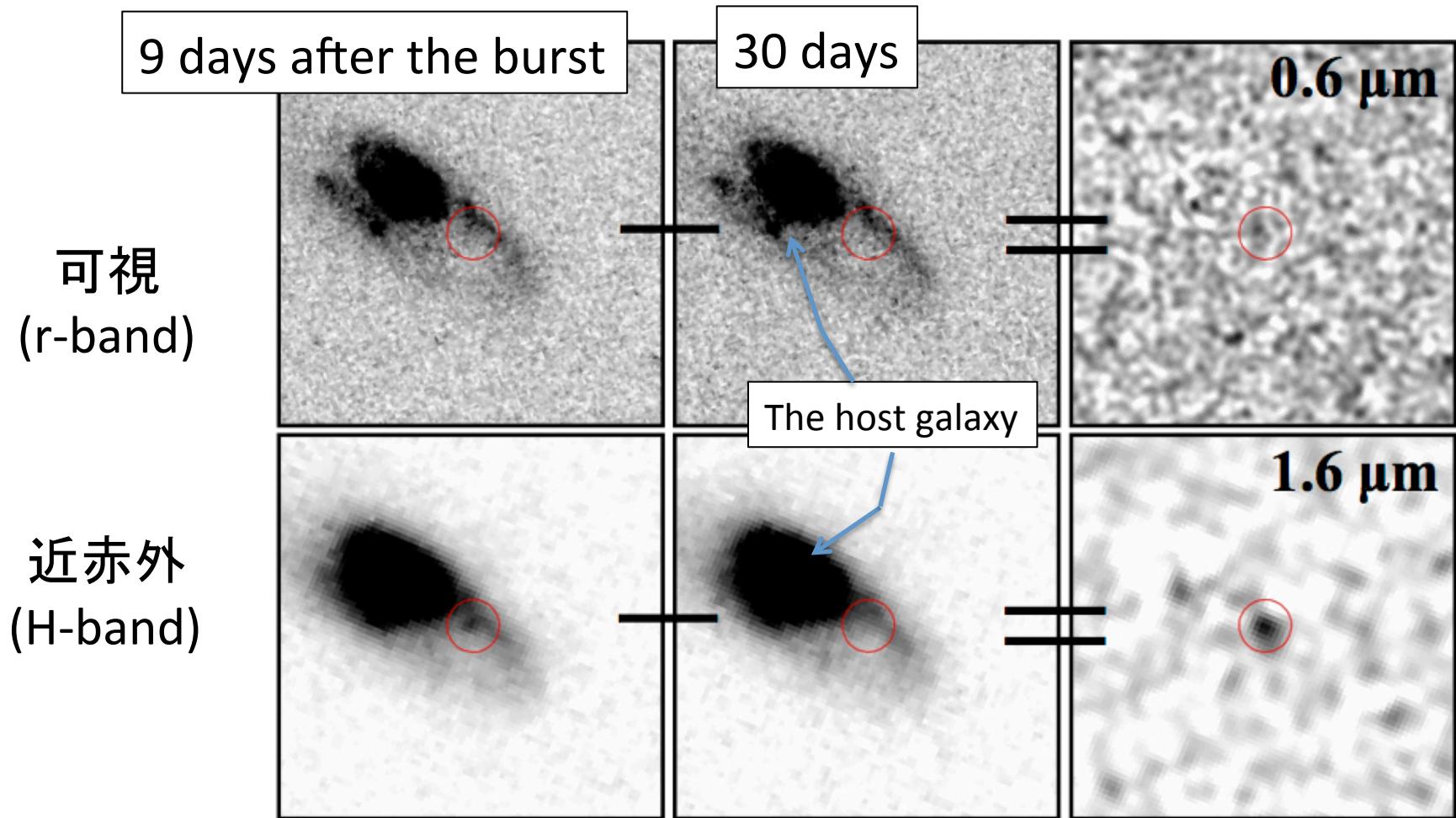
Tanvir et al., Nature, 2013
Berger et al., ApJ, 2013
de Ugarte Postigo et al, 2013

- ✓ ショートガンマ線バーストがコンパクト連星合体起源である傍証
- ✓ R-process の起源に迫る (地球質量の数10倍の金が生産)
- ✓ 重力波源の電磁波対応天体の有力候補

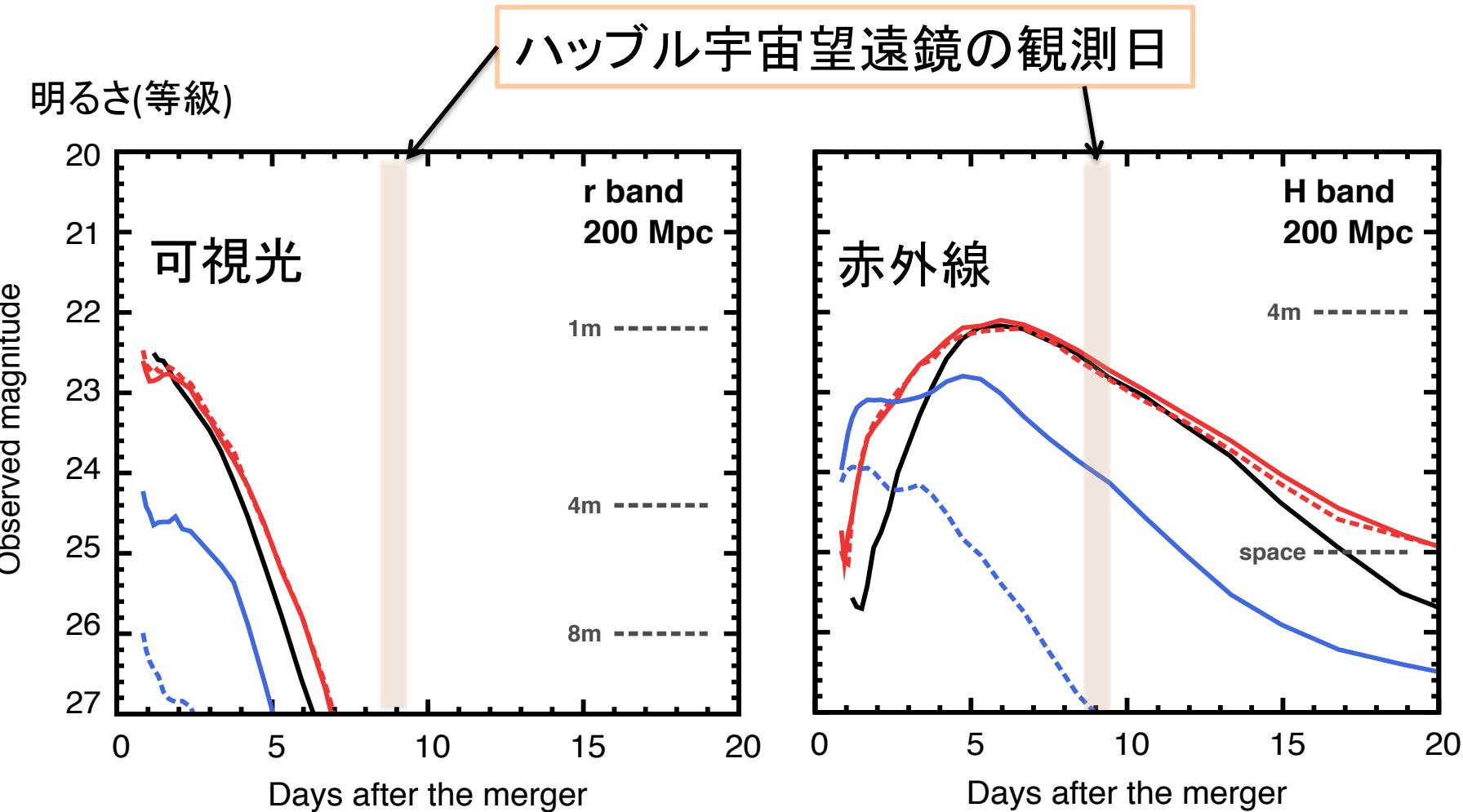
GRB 130603Bに付随した赤外増光

◆ Hubble Space Telescope によるイメージ

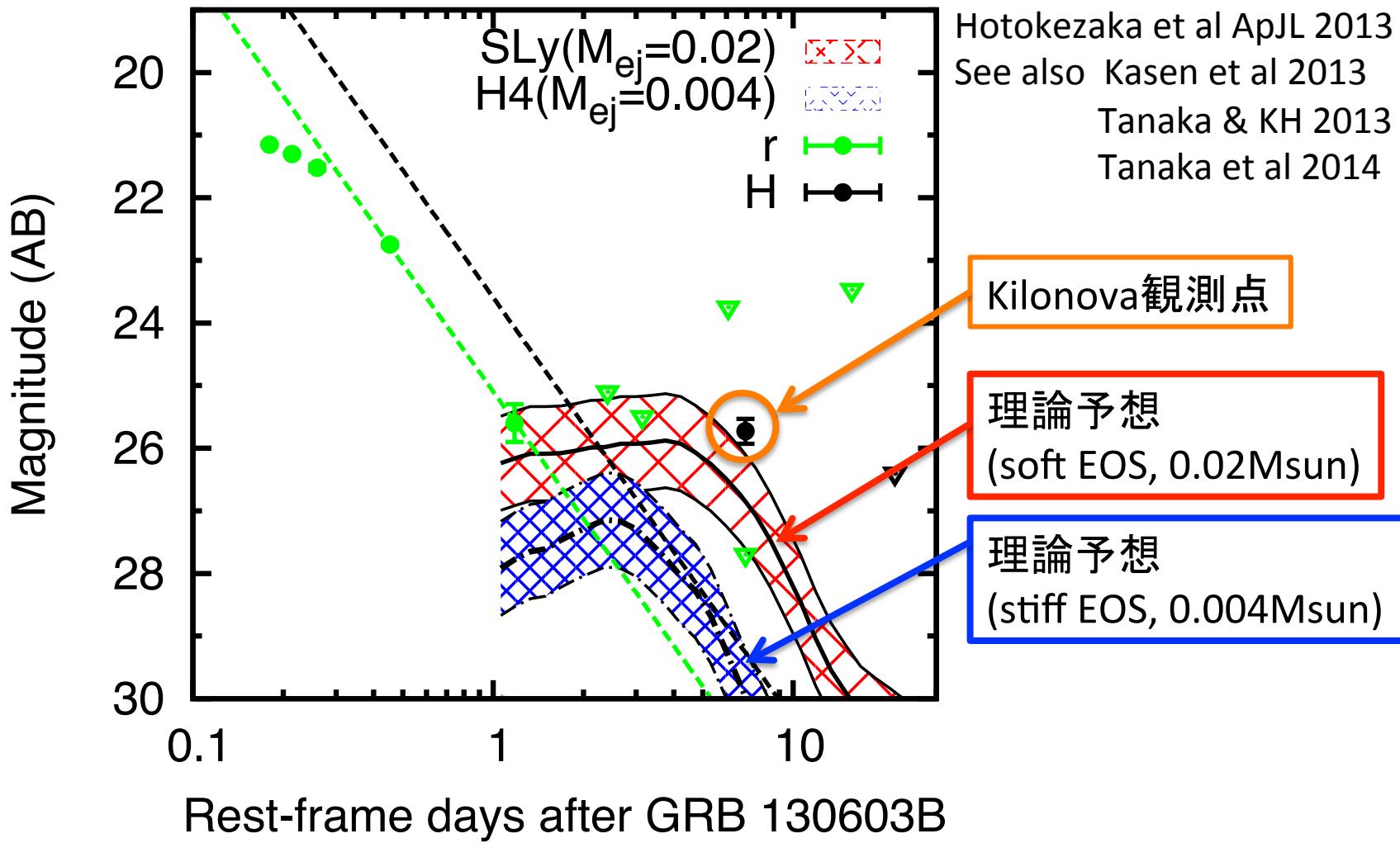
Tanvir et al. 2013



Tanaka & KH 2013



数値相対論+輻射輸送 vs 観測データ



- ✓ コンパクト連星合体の質量放出(特に、soft EOS)でよく説明できる。
- ✓ Kilonova/Macronovaから、r-process 元素の生産量を見積もれる。

まとめ

- コンパクト連星合体からの重力波の検出から推定可能量。
 - ✓ イベントレート
 - ✓ 中性子星の半径
 - ✓ 天体の質量
 - ✓ 波源までの距離
 - ✓ 合体時刻
- コンパクト連星合体時に一部の質量が放出される。
 - ✓ 0.0001 ~ 0.01Msun
 - ✓ 脱出速度程度
 - ✓ 比較的、等方的

質量放出に伴う電磁波対応天体の観測に期待！

- ✓ ショートガンマ線バースト:明るいけど、稀にしか見えないだろう。
 - ✓ Kilonova/Macronova: 可視(赤)～赤外で観測できる。
-
- Short GRB 130603Bに伴った赤外線増光。
Mej > 0.01Msun の r-process kilonova (macronova) ?

明るさ

予想光度曲線

Refs: Nakar (2007)
Norris & Bonnell (2006)
Sari, Piran, Narayan (1998)
Li & Paczynski (1998)
Nakar & Piran (2012)
Kiyotoku, Ioka, Shibata (2012)
Kelley, Mandel, Ramirez-Ruiz (2012)
Tanaka & Hotokezaka (2013)
Nakamura et al (2013)

