

重力波天文学と 電磁波対応天体

理化学研究所 iTHES
(理論科学連携研究推進グループ)

久徳浩太郎

目次

- 重力波天文学
- 一般相対論と重力波
- 連星からの重力波
- 電磁波対応天体
- 将来展望とまとめ

(注)

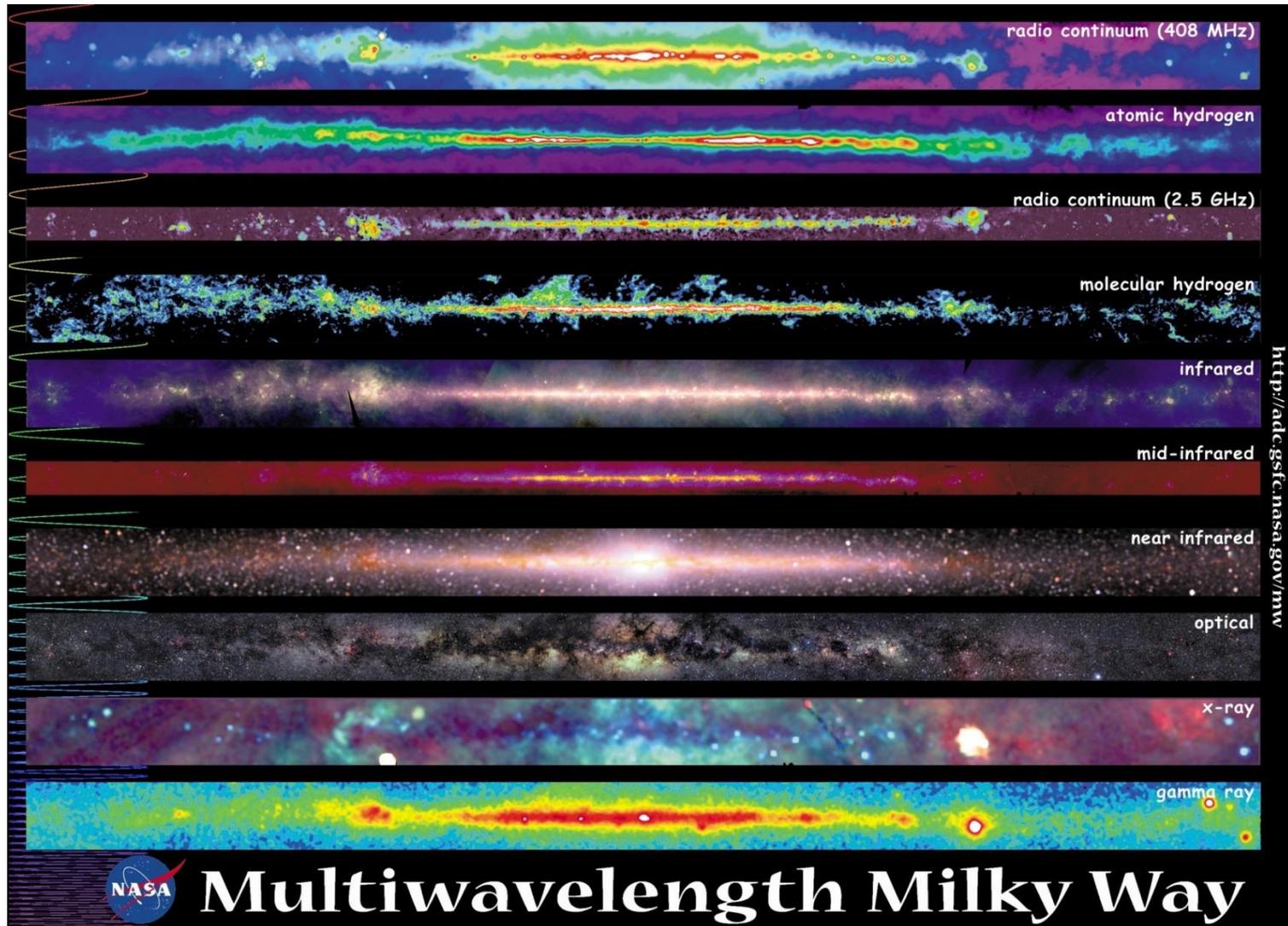
コンパクト天体連星合体の話しかしません
質問はいつでもどうぞ

重力波天文学

目で見える宇宙



多波長での宇宙



多波長から多粒子へ

強い

強い相互作用(: 遠くまで届かない)

電磁相互作用: 電磁波

信号は強いがすぐに隠されてしまう

弱い相互作用: ニュートリノ

電磁波と重力波との間、確立しつつある

重力相互作用: 重力波

信号は弱いがものすごく深くを見える



弱い

私見：重力波天文学の目指すこと

重力波「を」研究する→重力波物理学(?)

- 相対論の動的な性質を検証する
- 重力波(重力子)の性質を調べる

重力波「で」研究する→重力波天文学

- 時空を調べる(no hair propertyなど)
- 中性子星を調べる(状態方程式など)

多粒子天文学(multimessenger astronomy)も

一般相対論と 重力波

一般相対論

現在までで最も成功している重力理論

$$\text{「時空」 } G_{ab} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{ab} \text{ 「物質」}$$

太陽系テストの通過、GPSへの応用

重力レンズ、Shapiro時間遅れなどの観測手段

膨張宇宙、ゆらぎの発展

ブラックホールの存在

...そして重力波

重力波

光速で伝わる時空の歪みの波：時空のさざ波
一般相対論の最も本質的な予言の一つ

時空が平坦な状態から少しだけ歪むと

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu} \text{ (平坦 + 歪み)}$$

Einstein方程式曰く、歪みは光速度で伝わる

$$\left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 \right) h_{\mu\nu} = 0$$

Maxwell方程式での電磁波と同様の現象

重力波の放射源

四重極放射(電磁気学における双極子放射)

$$h_{ij}^{TT} = \frac{2G}{c^4 r} \frac{d^2 Q_{ij}^{TT}}{dt^2}$$

$Q_{ij} = \int \rho(x_i x_j - x^2 \delta_{ij}/3) d^3 x$ は質量四重極

“TT”=transverse-tracelessは横波の意(2成分)

大雑把には、振幅＝質量×(速度)²/距離

重いものが速く動くと重力波が強く放射される

→コンパクト天体が主要な放射源になる

天体と一般相対論

重力の強さ $\sim GM/c^2R$ ($G = c = 1$ では M/R)

通常为天体: 地球 $\sim 7 \times 10^{-10}$, 太陽 $\sim 2 \times 10^{-6}$

Newton重力による取り扱いで大抵はOK

コンパクト天体: ブラックホール ~ 0.5

中性子星 ~ 0.2

一般相対論でないと適切に記述できない

(あと宇宙全体も一般相対論の対象)

ブラックホール

最も重力の強い天体（「高密度」とは限らない）

重力理論の綺麗な実験場

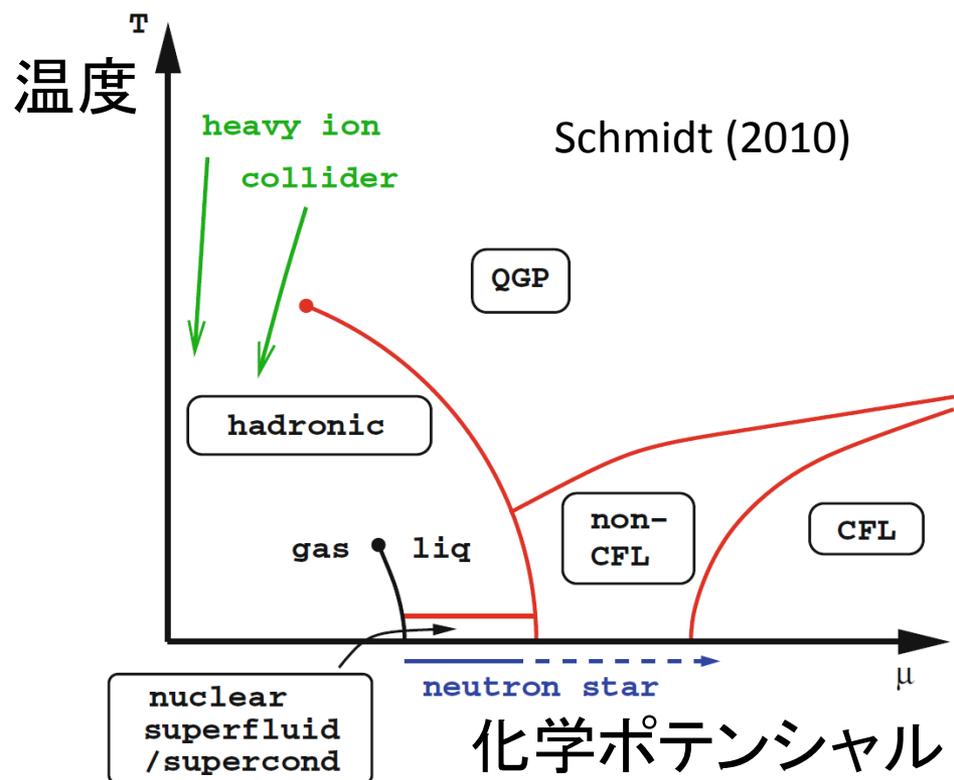
Chandrasekhar: “The black holes of nature are the most perfect macroscopic objects there are in the universe: the only elements in their construction are our concepts of space and time.”

一般相対論なら質量、角運動量（電荷ゼロ）で
時空の構造は一意に決まる: no-hair theorem

ガンマ線バーストなど高エネルギー天体現象も

中性子星

主に中性子でできている天体 or 巨大な原子核
中性子の縮退圧で支えられている **のではない**



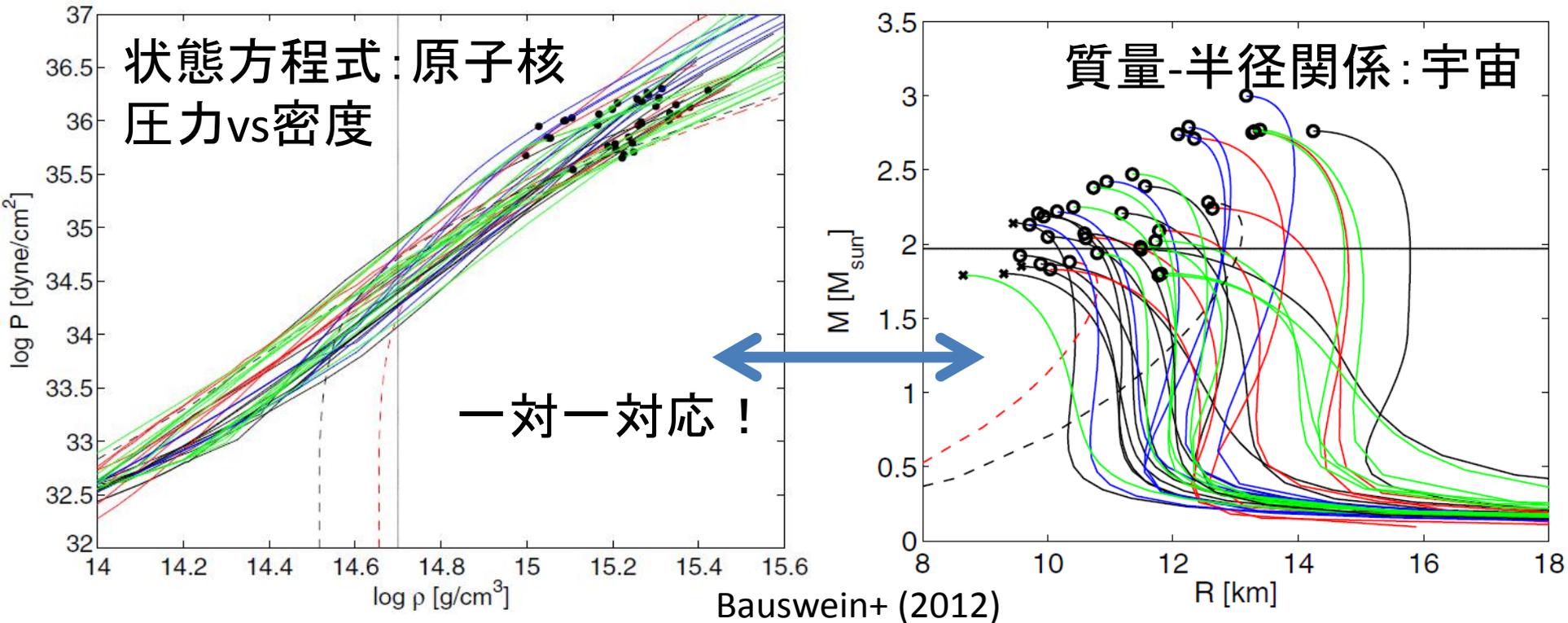
- 低温
- 高密度
- 非対称 ($n \gg p$)

原子核物理の実験場
粒子、相互作用...

中性子星の状態方程式

原子核密度以上での状態方程式は未解明

重力波天文学で質量-半径関係を突き止めたい



コンパクト天体の連星

- 最も有望な重力波源
 - 重力理論の検証
 - 中性子星の状態方程式へのプローブ
- ショートガンマ線バーストの起源天体候補
 - 宇宙物理における最大の謎の一つ
- 中性子過剰な物質の供給源候補
 - r過程元素合成(鉄より重い中性子過剰核)
 - 電磁波放射の引き金

重力波放射の観測的証拠

連星パルサーPSR B1913+16

重力波による軌道の減衰

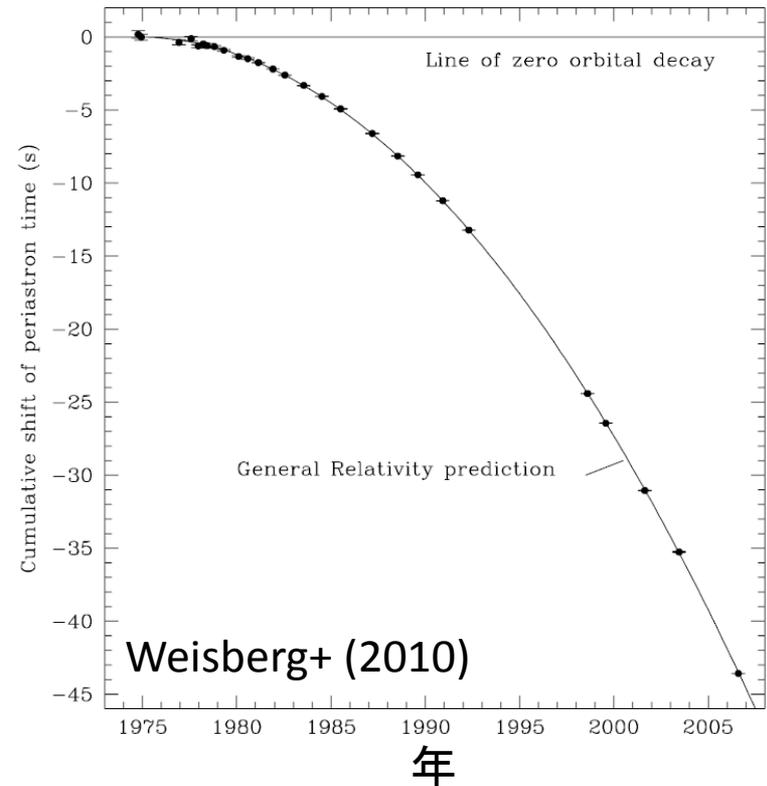
$$\dot{P}_b^{\text{GR}} = -\frac{192\pi G^{5/3}}{5c^5} \left(\frac{P_b}{2\pi}\right)^{-5/3} \left(1 + \frac{73}{24}e^2 + \frac{37}{96}e^4\right) \times (1 - e^2)^{-7/2} m_1 m_2 (m_1 + m_2)^{-1/3}$$

P_b : 軌道周期

e : 軌道離心率

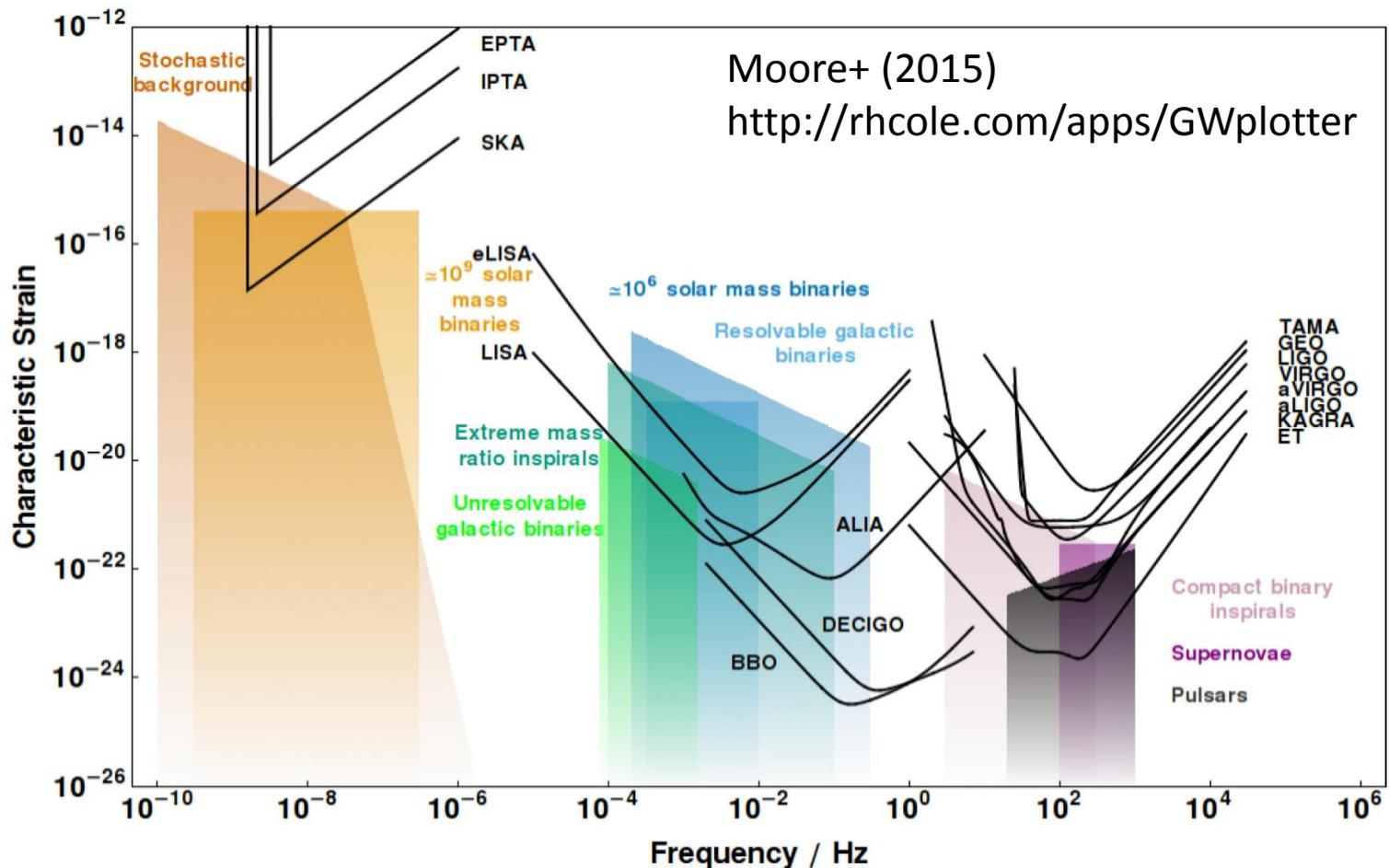
しかし直接検出はまだ: 伝播、重力波の速度...

縦軸: 軌道周回数のずれの積算



色々な検出計画

これ以外にも共振型、原子干渉計、CMB...



第二世代地上重力波望遠鏡

http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/wp-content/themes/lcgt/images/img_abt_lcgt.jpg

KAGRA (Kamioka)
2017年 稼働開始予定

Advanced LIGO (Hanford)
2015年秋 稼働開始予定

<https://www.advancedligo.mit.edu/graphics/summary01.jpg>



Advanced Virgo (Pisa)
2016年 稼働開始予定

<http://virgopisa.df.unipi.it/sites/virgopisa.df.unipi.it.virgopisa/files/banner/virgo.jpg>

第一世代での重要な成果

重力波は直接検出されてはいない

それ自体からいくつかの制限が得られている

- 背景重力波への上限 (LIGO-Virgo 2009)
 - ビッグバン元素合成よりも厳しい制限
- パルサーへの上限 (LIGO 2009, LIGO-Virgo 2011)
 - Crab, Velaのスピンドアウンは重力波ではない
- 連星の合体率への上限 (many by LIGO-Virgo)
 - 知る限り重要な数字は出ていないはず

重力波の検出に向けて

第二世代検出器はもうすぐできる→OK

正確な理論波形＝テンプレートが必要

- 雑音を抑えるために理論波形と相関を取る
- この5年くらいで整備は進んだ(と思う)

データ解析のパイプライン開発、マンパワー...

- 特に日本ではデータ解析研究者が少ない
- 今後かなり旨味のあるポジションかも？

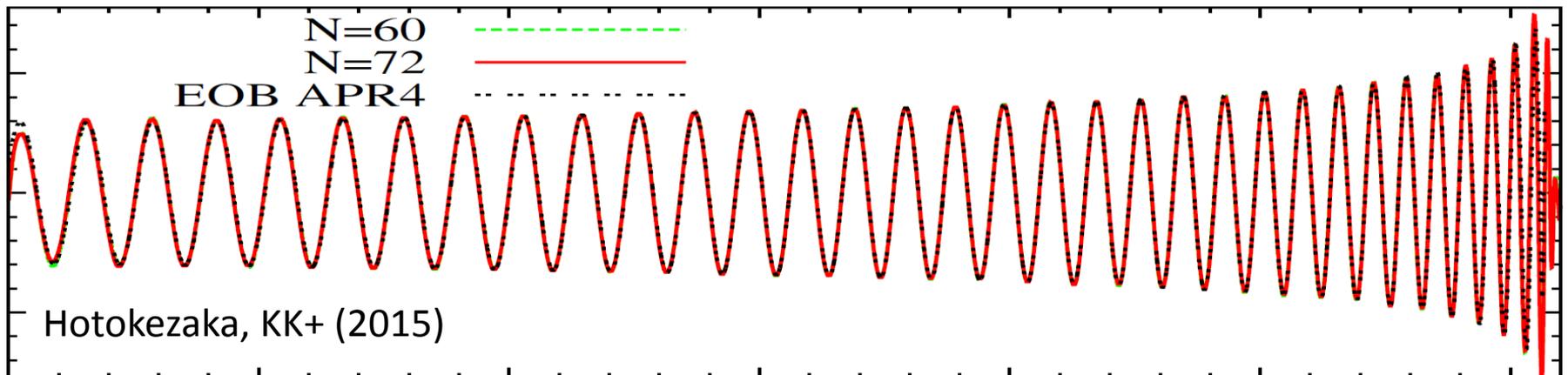
連星からの 重力波

連星からの重力波の理論計算

本質的な問題設定は

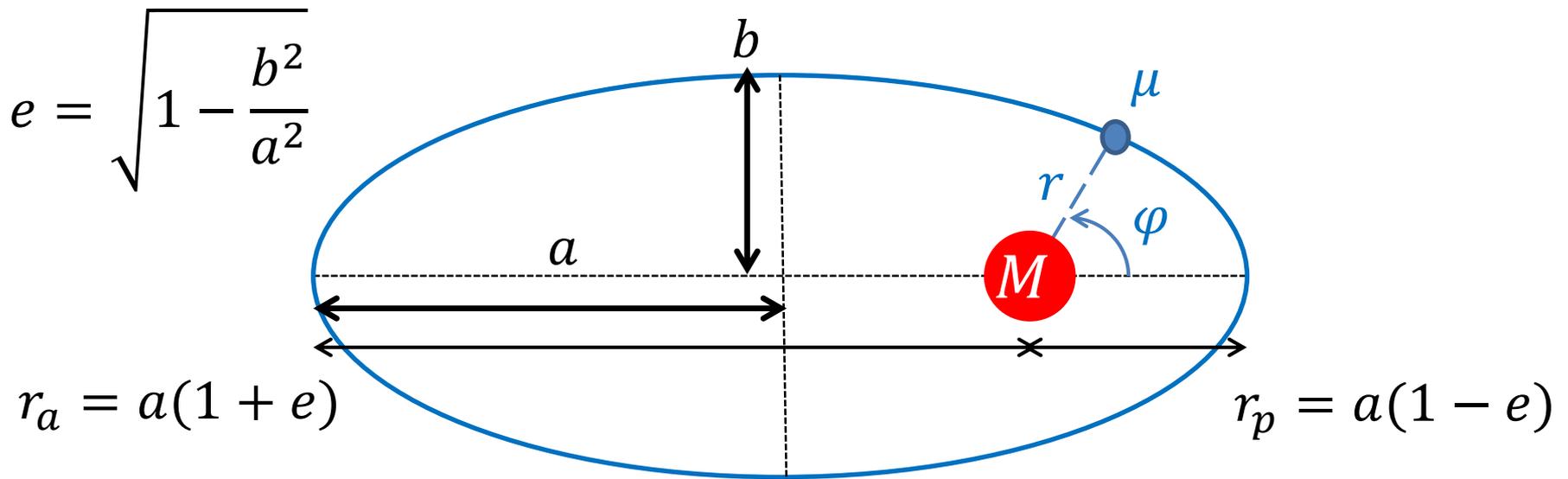
「重力の影響下での二体問題を解きなさい」

- 重力波は系の巨視的な運動を反映している
- 特に重力波の位相は重要な情報を持つ
- 正確な位相の計算 = 正確な軌道の計算



Newton重力での連星の運動

閉じた楕円軌道になり、 (a, e) で指定される
(より物理的にはエネルギーと角運動量)



注: 全質量 M の位置は見やすいように内側にずらしている

連星からの重力波

基本になるのは四重極公式とその反作用

(1) 軌道長半径 a は減少する ($a \propto |E|^{-1}$)

-> 軌道角振動数 $\Omega = \sqrt{GM/a^3}$ は増加する

-> 重力波の振幅・振動数はともに増加する

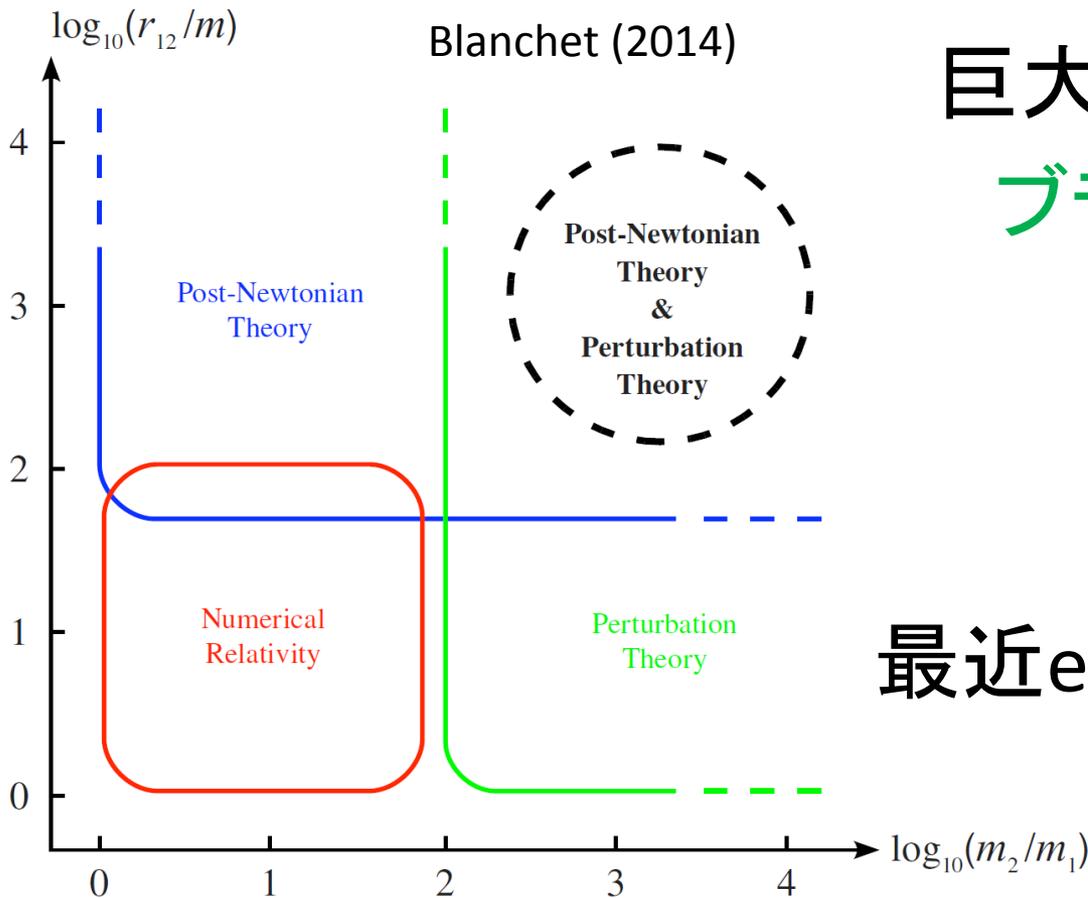
いわゆるチャープ信号(chirp signal)

(2) 軌道離心率 e はさらに早く減少する

-> 現実の連星の合体直前は $e \approx 0$ の円軌道

一般相対論での二体問題

連星が遠い場合はpost-Newton近似で解ける



巨大BH + 軽い天体なら
ブラックホール摂動法

どちらでもなければ
数値相対論

最近effective one bodyが
統合を試みている

数値相対論

連星の合体段階ではほぼ唯一の定量的手法

Einstein方程式

$$G_{ab} = (8\pi G/c^4)T_{ab}$$

流体の方程式

$$\nabla_a(\rho u^a) = 0, \quad \nabla_b T^{ab} = 0$$

+状態方程式 $P = P(\rho, T)$

これらを計算機上で数値的に解く

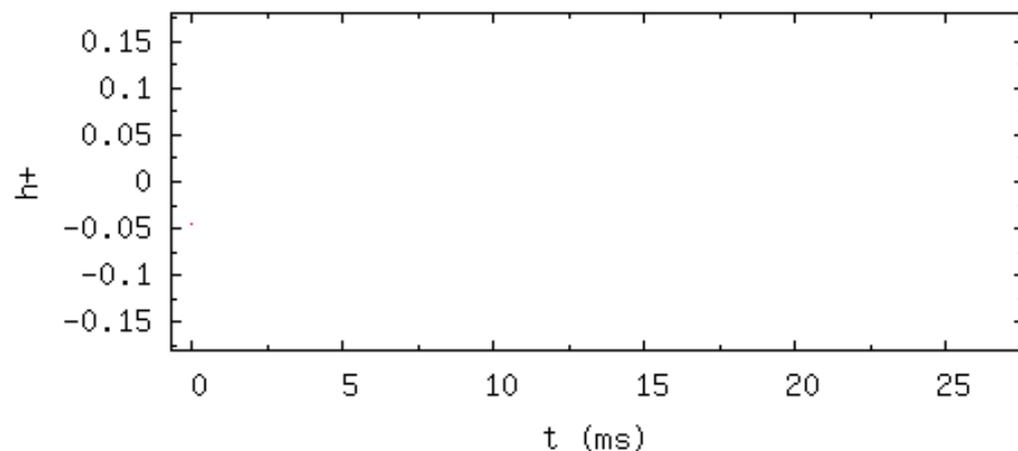
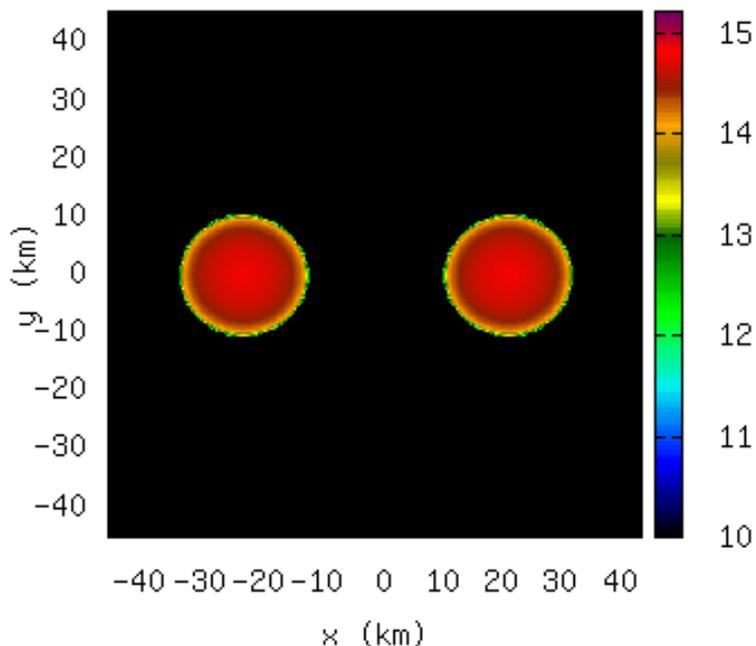
必要ならMaxwell方程式、ニュートリノ輸送...

連星中性子星の合体

左: 等質量連星、軌道面上の静止質量密度

右: 連星の回転軸から見た重力波

t=0 ms

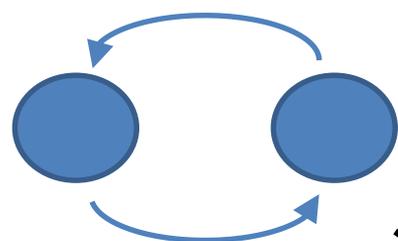


仏坂健太氏によるアニメーション
From Hotokezaka, KK+ (2011)

連星中性子星からの重力波

Early inspiral: 質量、スピン...

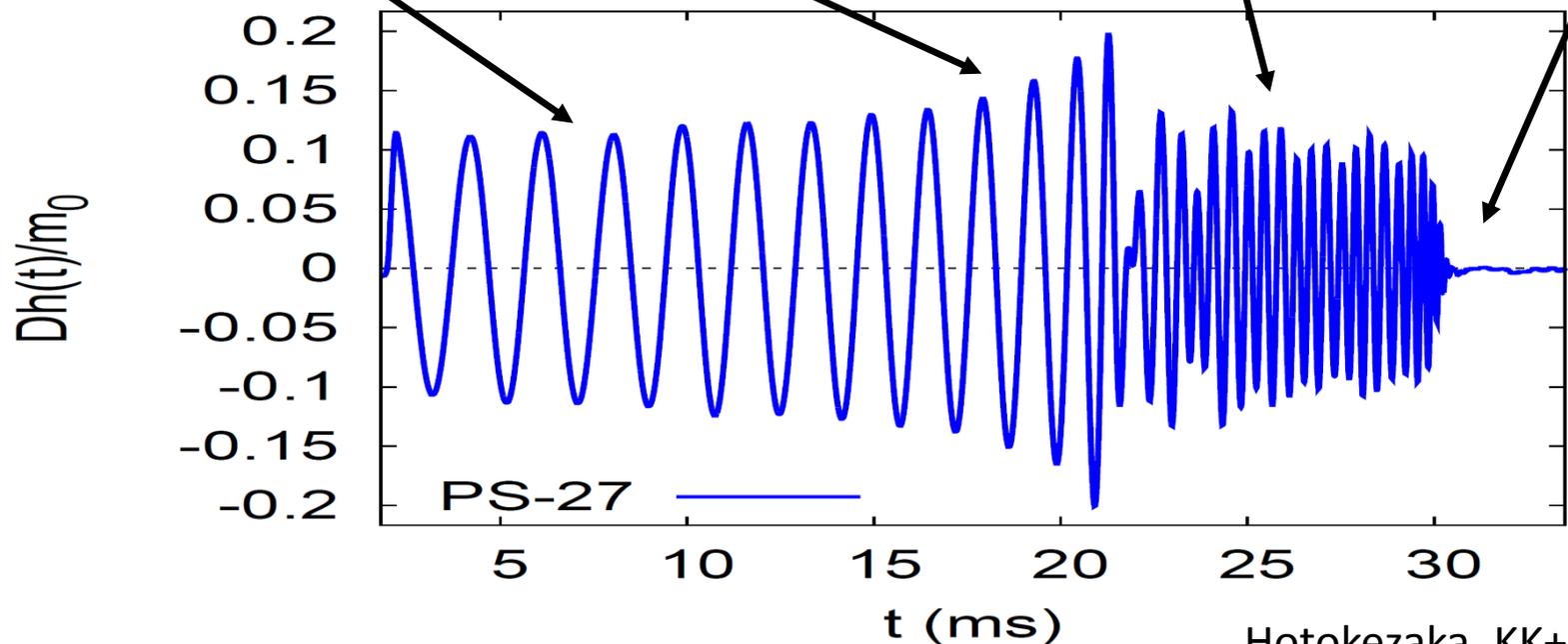
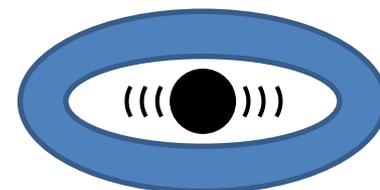
HMNS: 極限状況の物理



Late inspiral and merger:
潮汐変形、状態方程式



Ringdown: BH



Hotokezaka, KK+ (2011)

重力波から読み取れる物理

インスパイラルは概ね理解できてきた

- 質量、スピン、中性子星の潮汐変形率

合体後の(hyper/supra-)massive neutron starはまだまだ見るべきものが隠れていそう

- 新たな粒子の出現？ (Sekiguchi, KK+ 2011)

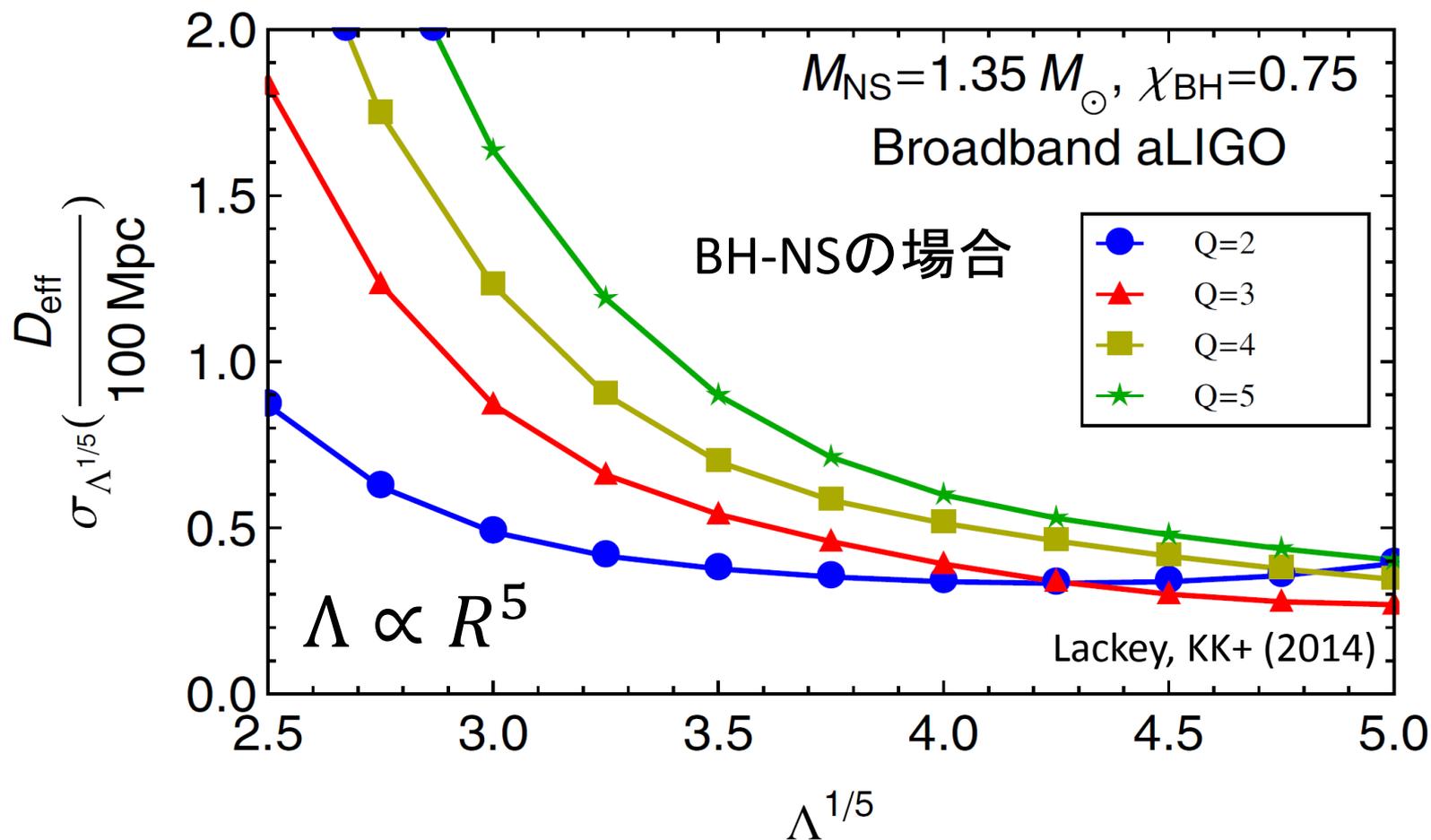
- 中性子星の最大質量？ (Bauswein+ 2013)

ただ典型的に高振動数(数kHz)にピーク...

データ解析手法を考えることも重要

例：中性子星の半径

10%~1kmくらいの精度はそれなりに期待できる



電磁波対応天体

電磁波対応天体の重要性

重力波天体が出す電磁波→電磁波対応天体

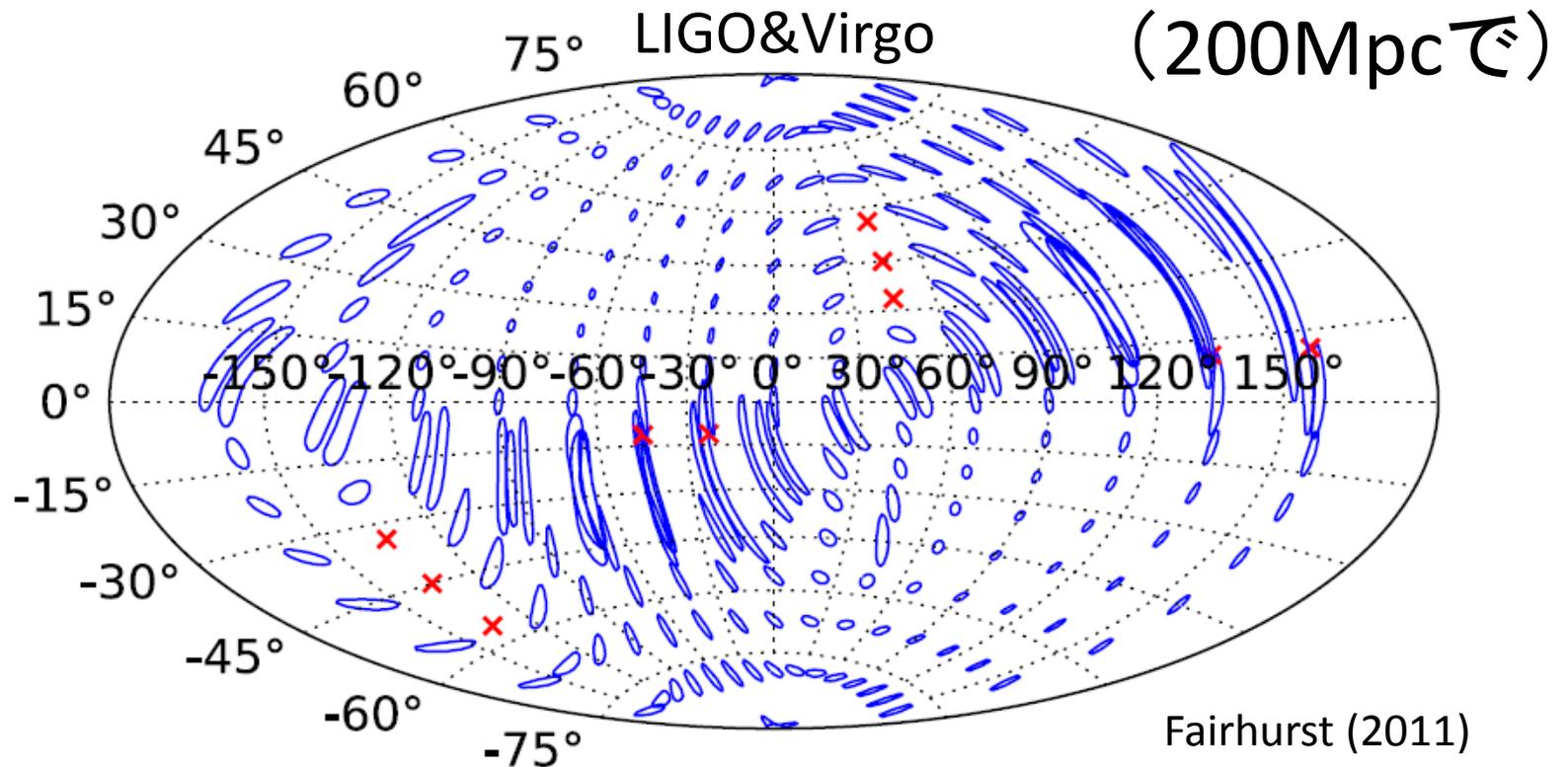
なぜここにきて電磁波を考えることに？

- **重力波検出の傍証を与える**
 - 今までも検出したという報告は複数あったがどれも追検証を生き残らなかった
- **重力波だけではわからない情報を得る**
 - 光度距離(GW)-赤方偏移(EM)→宇宙論
 - 元素合成の様子(個人的願望)

電磁波による位置決定の必要性

重力波観測は位置決定精度が低い

典型的に20-30平方度：銀河は~10個/平方度



電磁波対応天体の理論モデル

全て中性子星がある場合、他にも色々ある

- 合体前の磁気圏放射 (e.g., Ioka-Taniguchi 2000)
- 合体前のクラスト破壊 (Tsang+ 2012)
- ショートガンマ線バースト: SGRB (e.g., Nakar 2007)
- 高速電波バースト: FRB (e.g., Totani 2013)
- 衝撃波ブレイクアウト (Kyutoku+ 2014)
- macronova/kilonova (Li-Paczynski 1998)
- 星間物質とエジェクタとの衝突 (Nakar-Piran 2011)

電磁波対応天体の理論モデル

元ネタ(多分): 他天体の知見が予言に有用

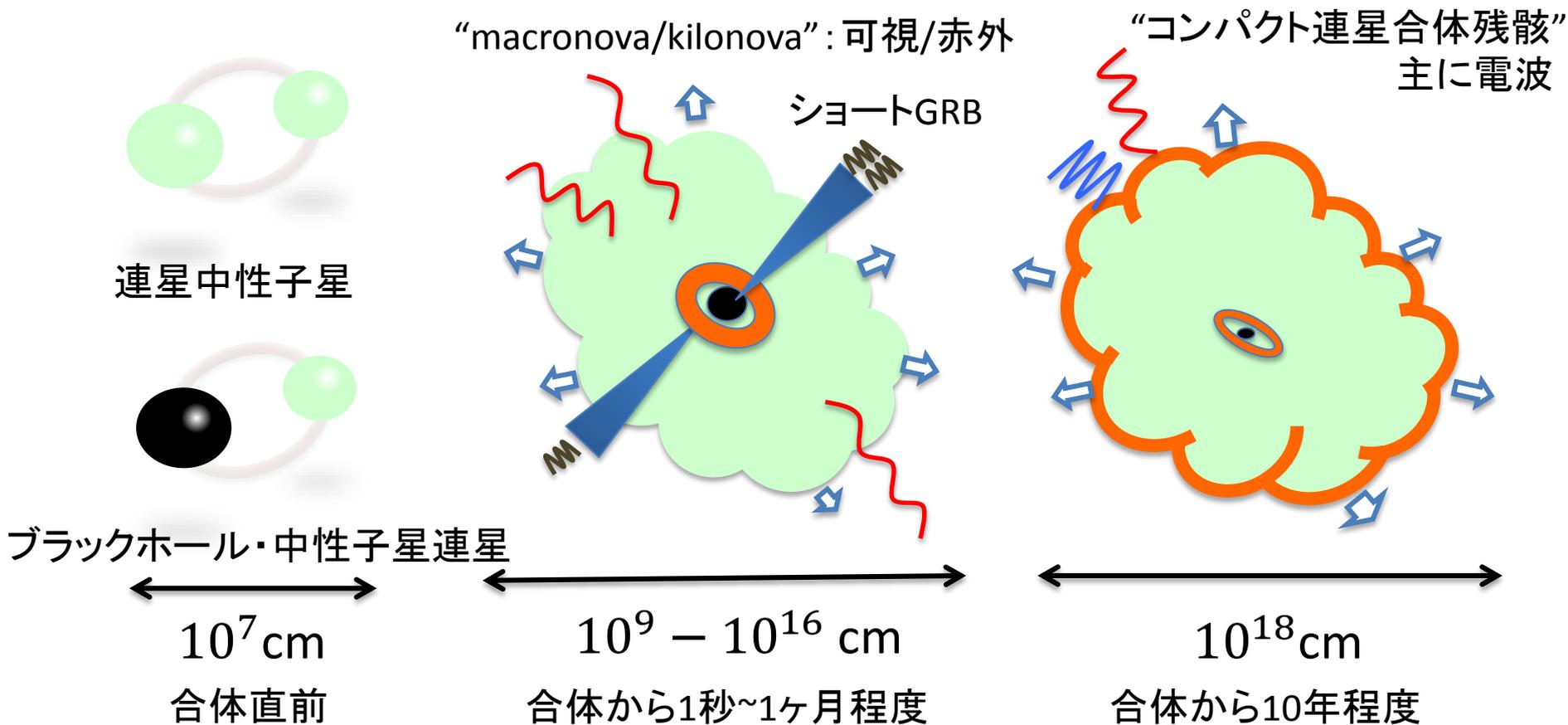
- 木星磁気圏・パルサー磁気圏
- マグネターフレア
- SGRBはそのまま
- パルサー放射
- 超新星爆発の衝撃波ブレイクアウト
- Ia型超新星
- 超新星残骸、GRB残光

提唱されている電磁波対応天体

全て中性子星がある場合、他にも色々ある

- 合体前の磁気圏放射 (e.g., Ioka-Taniguchi 2000)
- 合体前のクラスト破壊 (Tsang+ 2012)
- ショートガンマ線バースト: SGRB (e.g., Nakar 2007)
- 高速電波バースト: FRB (e.g., Totani 2013)
- 衝撃波ブレイクアウト (Kyutoku+ 2014)
- macronova/kilonova (Li-Paczynski 1998)
- 星間物質とエジェクタとの衝突 (Nakar-Piran 2011)

質量放出と電磁波対応天体



物質が飛べば光る可能性がある！

絵の原案は仏坂健太氏

ショートガンマ線バースト

10^{49-51} ergを2秒間で放射

連星合体起源と目される

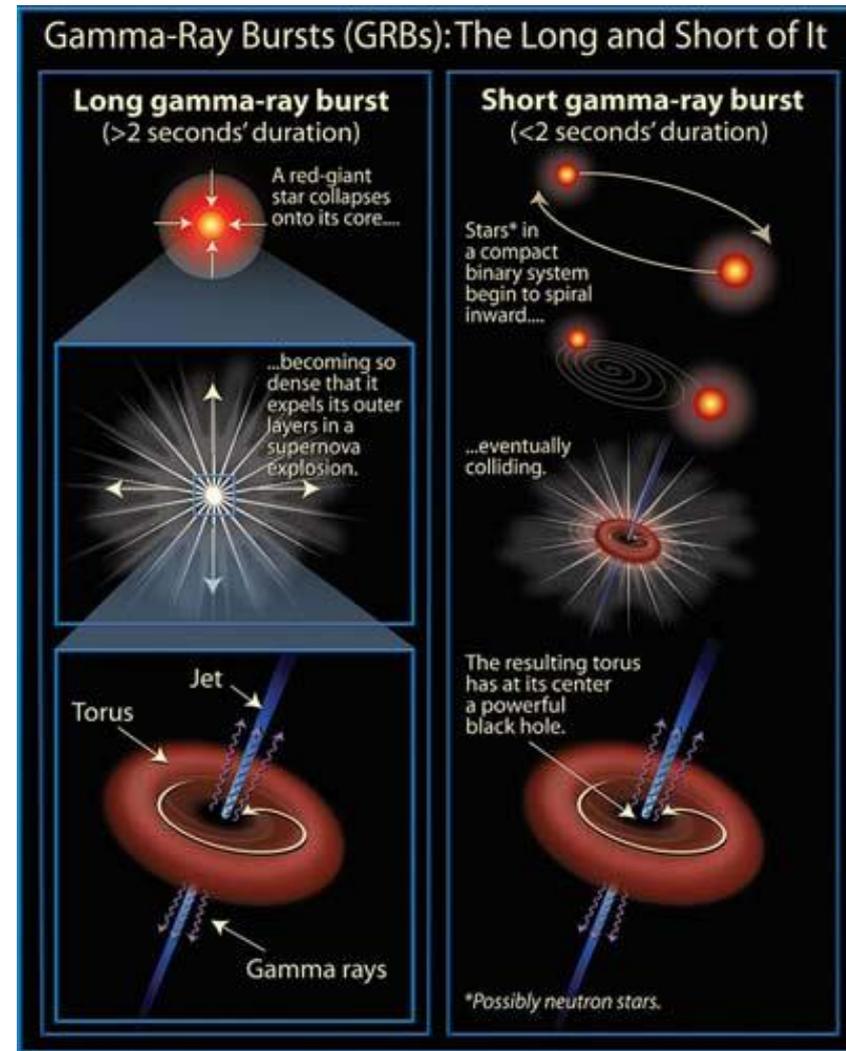
(ロングは星の重力崩壊)

重力波との同時観測で

起源を決定したい

観測されれば残光から

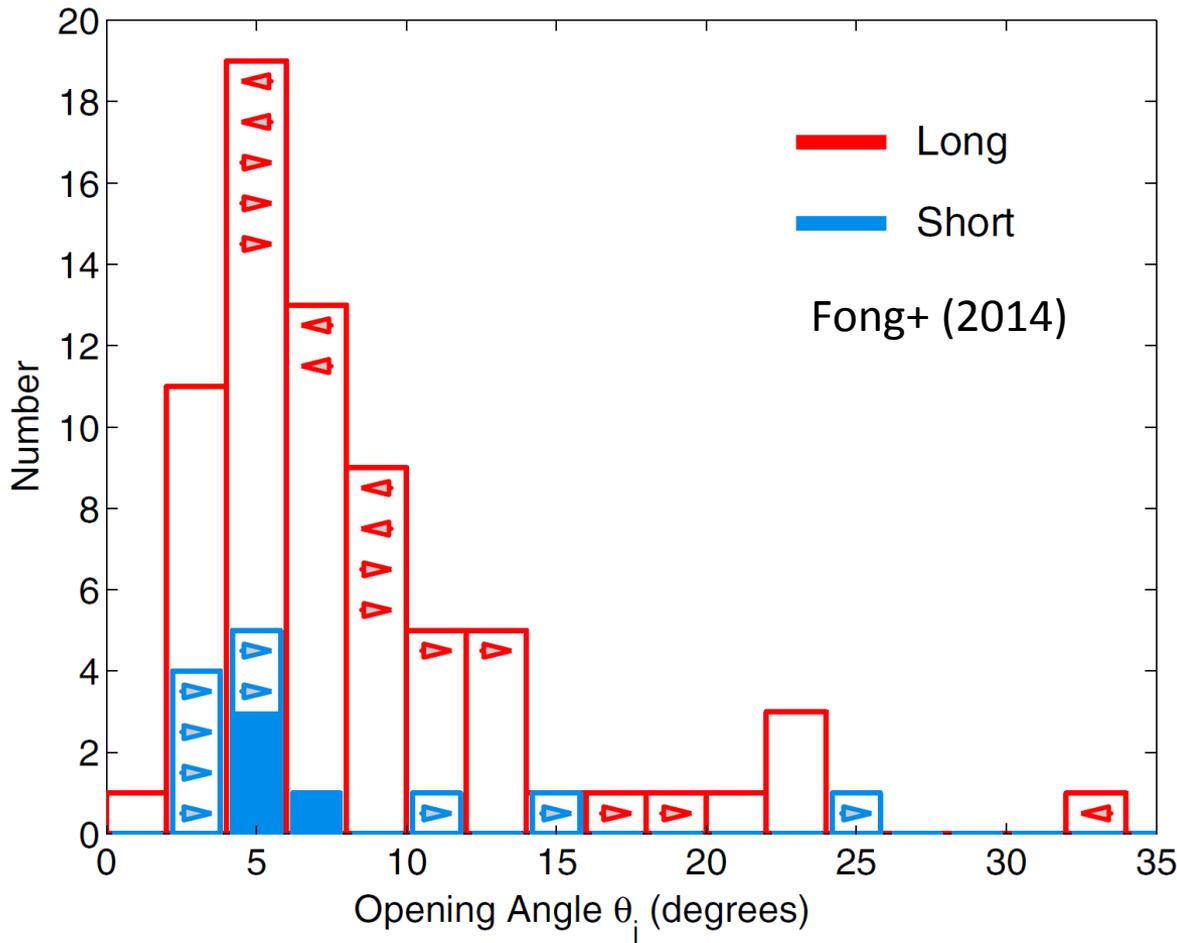
母銀河も決定できる



http://www.daviddarling.info/images/gamma-ray_bursts.jpg

問題：ジェットの開き角

典型的には10度以下？重力波はほぼ等方的...



全ての合体が
SGRBとしても
GWへの付随は
せいぜい数%

十分近傍での
観測実績もなし

等方的な電磁波放射

球対称or非相対論的速度の質量放出に付随

1. macronova/kilonova

r過程元素の放射性崩壊による準熱的放射
可視光～赤外、10日くらいの時間スケール

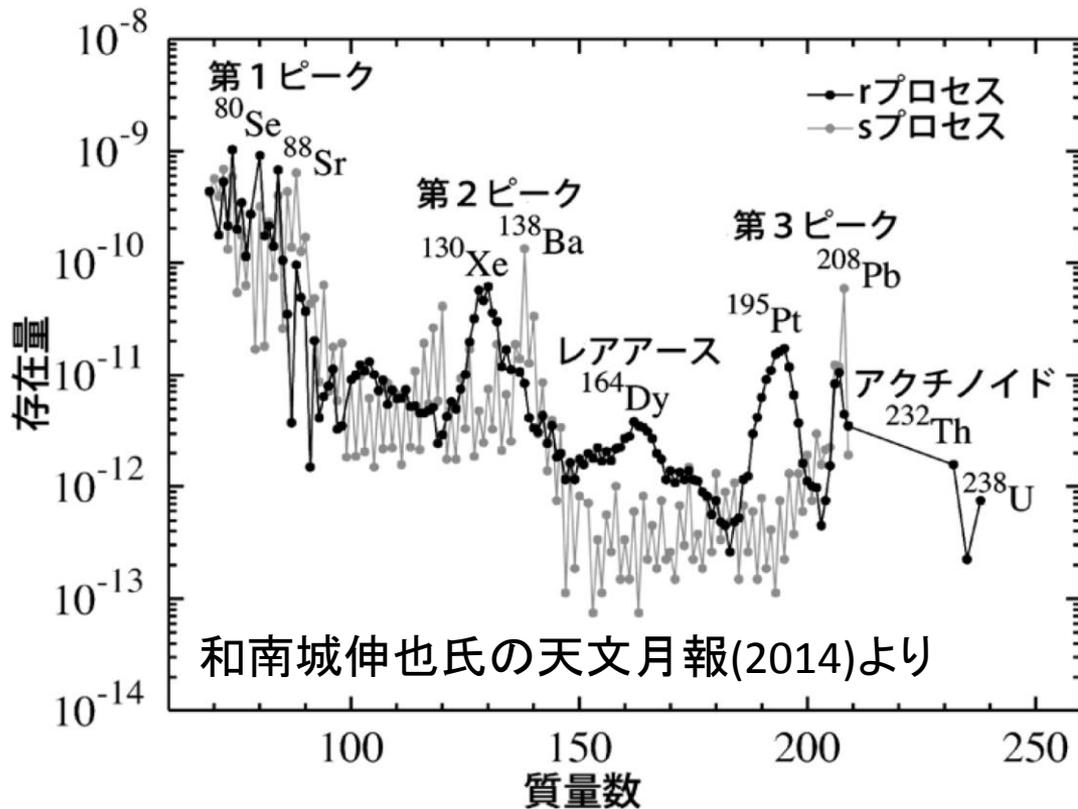
2. エジェクタと星間物質との衝突

加速された電子によるシンクロトロン放射
主に電波、10年くらいの時間スケール

r過程元素合成

重い中性子過剰核：金、プラチナ、レアアース...

“rapid”： β 崩壊より早く中性子を捕獲する反応



人間にも重要

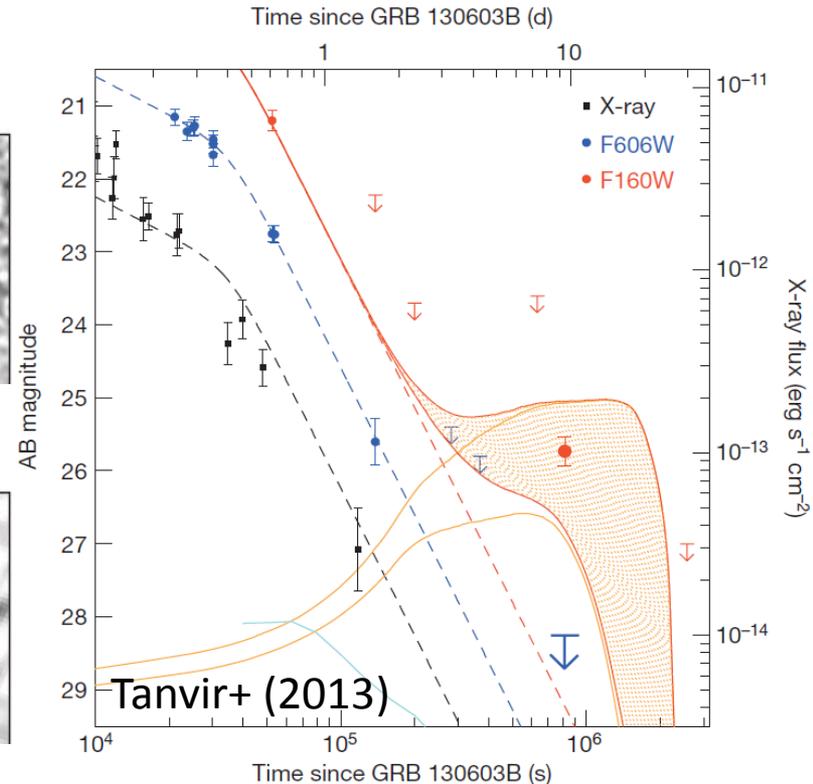
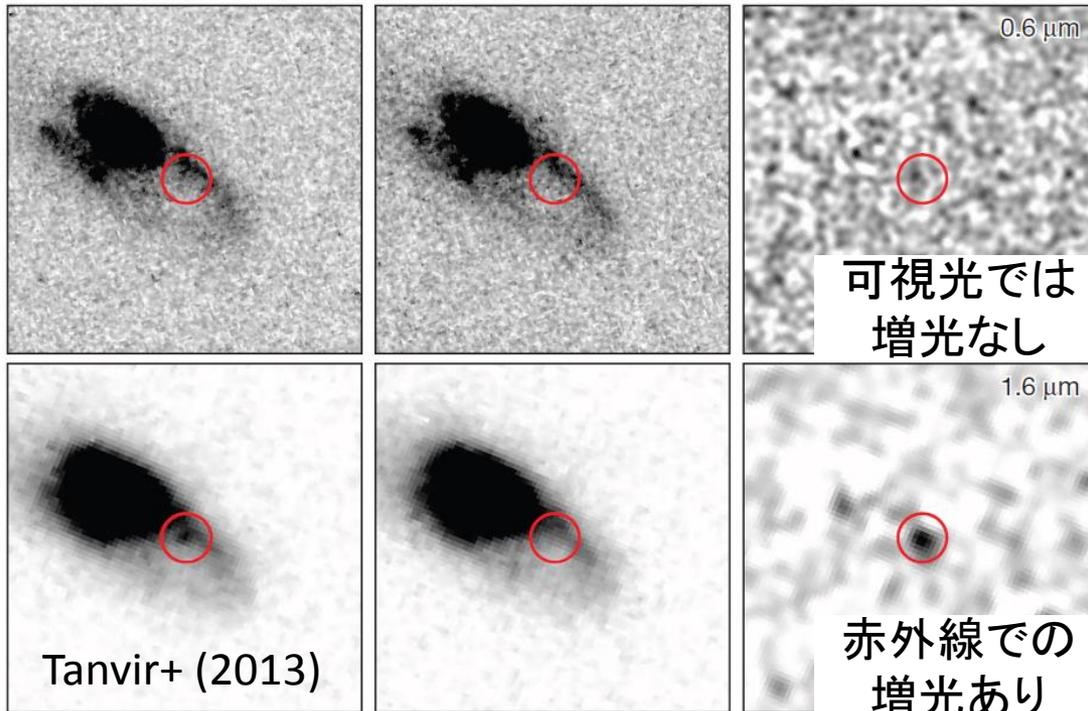
起源天体は未知

- 超新星爆発
- 連星合体

候補天体 GRB 130603B

合体9日後に近赤外線「だけ」での増光現象

9day (event?) - 30day (background) = Excess brightening



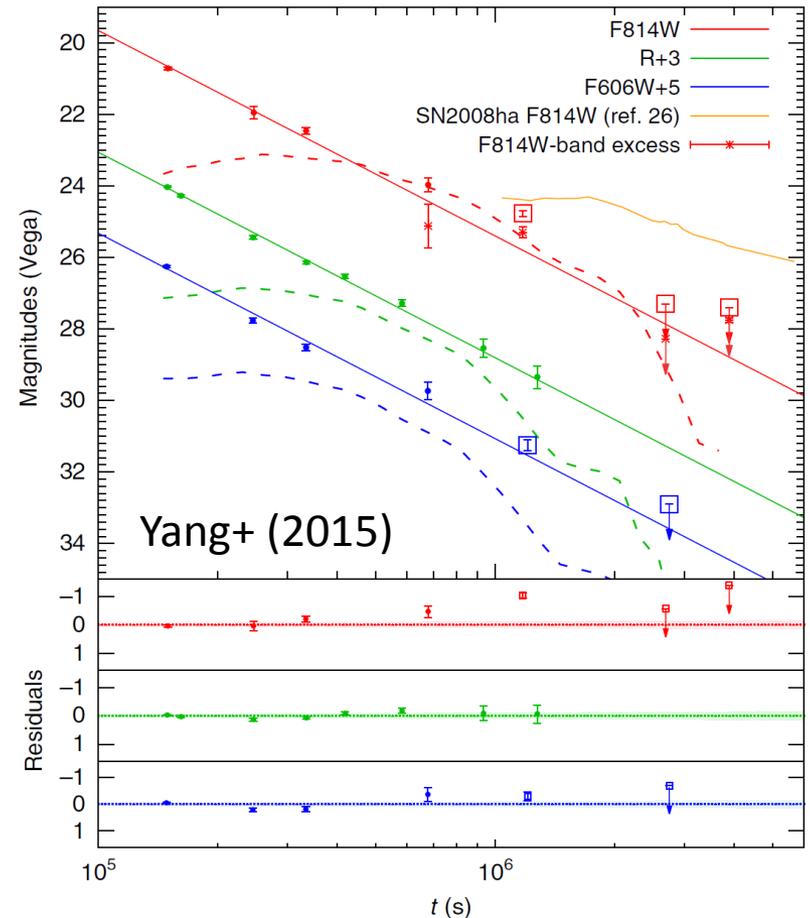
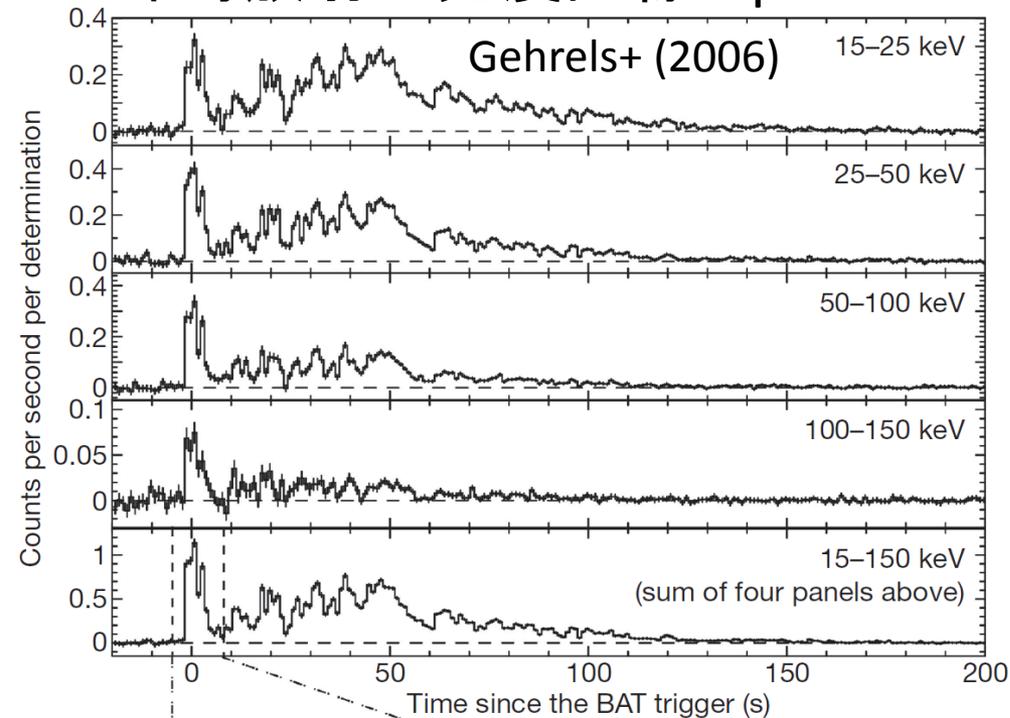
光度(等級)の時間発展

候補天体2 GRB 060614

“long-short” GRB ($T_{90} = 102\text{s}$)を再解析

13.6日後に近赤外増光

即時放射の光度曲線: spike+EE?



なぜ見つからなかったか？

理論予言が正確でなかったために

違う波長を違う時期に探していたから

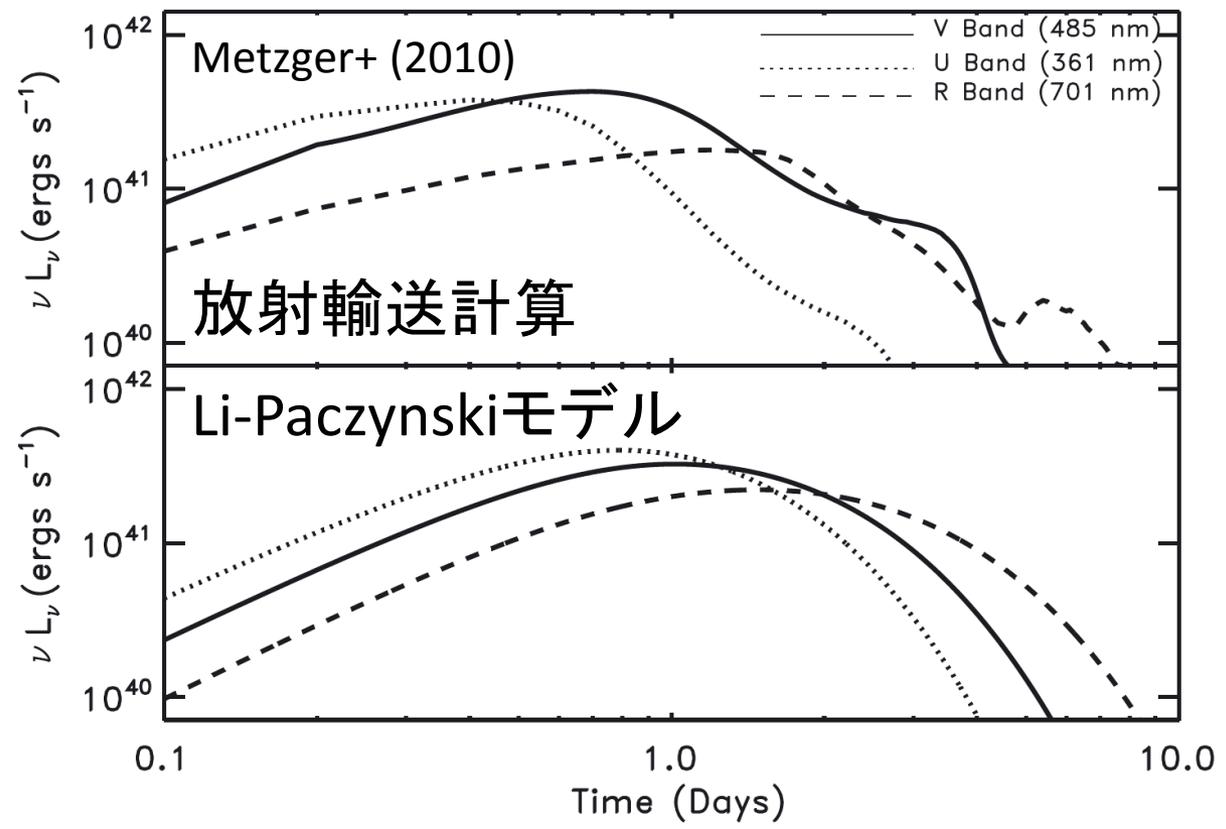
(SGRBの連星起源を確かめたい動機はあった)

Berger+ 2013のIntroductionより

In recent years there have been a few unsuccessful searches for a kilonova signature in short GRBs (Bloom et al. 2006; Perley et al. 2009; Kocevski et al. 2010), but these were focused in the optical band, which current models show to be strongly suppressed (Barnes & Kasen 2013).

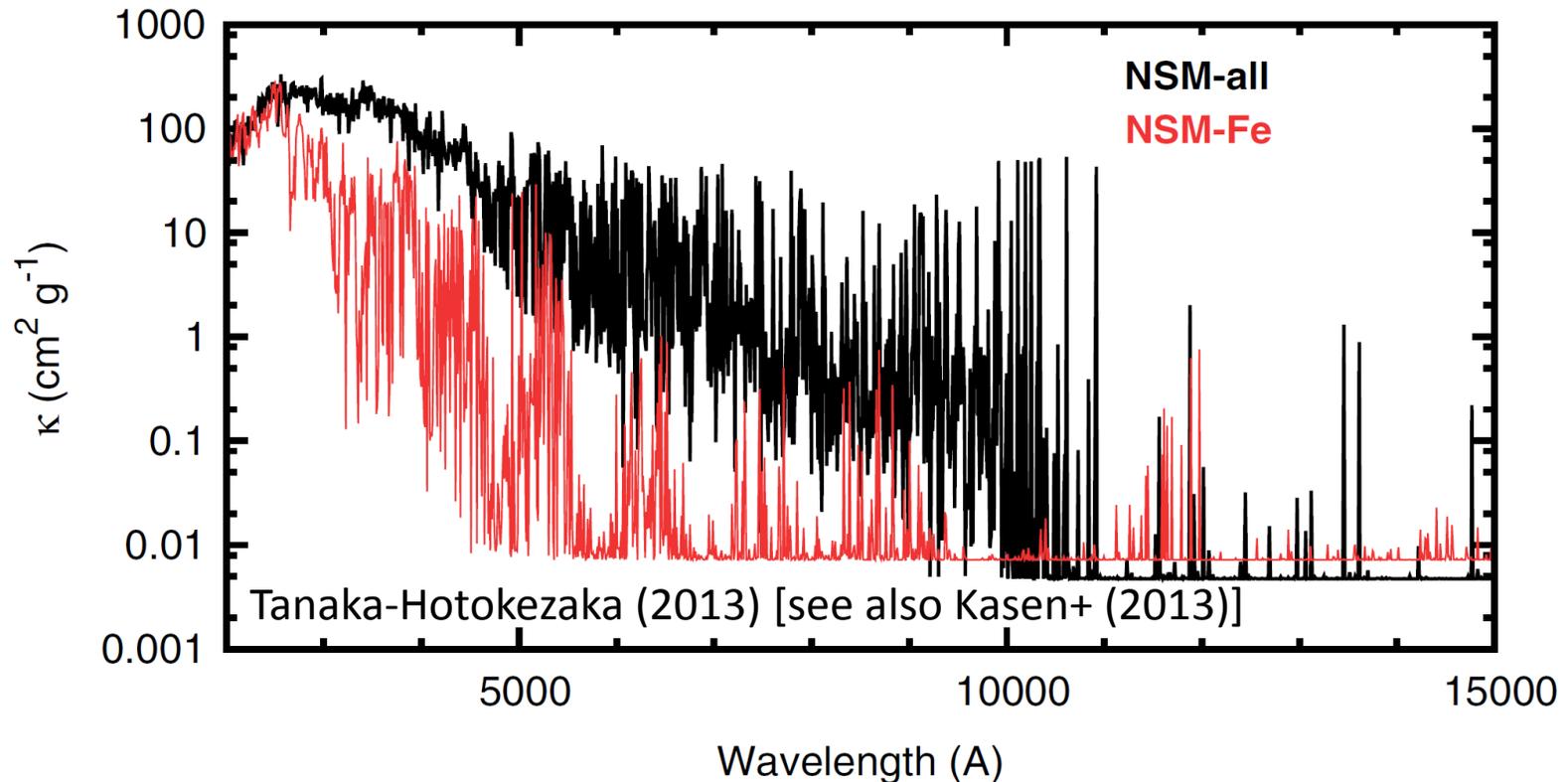
2012年くらいまでの理論予測

鉄族元素のopacity(不透明度)を仮定していた
→合体1日に可視光で光ると思って探していた



r過程元素のopacity

準位構造が複雑かつ多核種なので大きくなる
まだline listも理論計算も全くcompleteでない

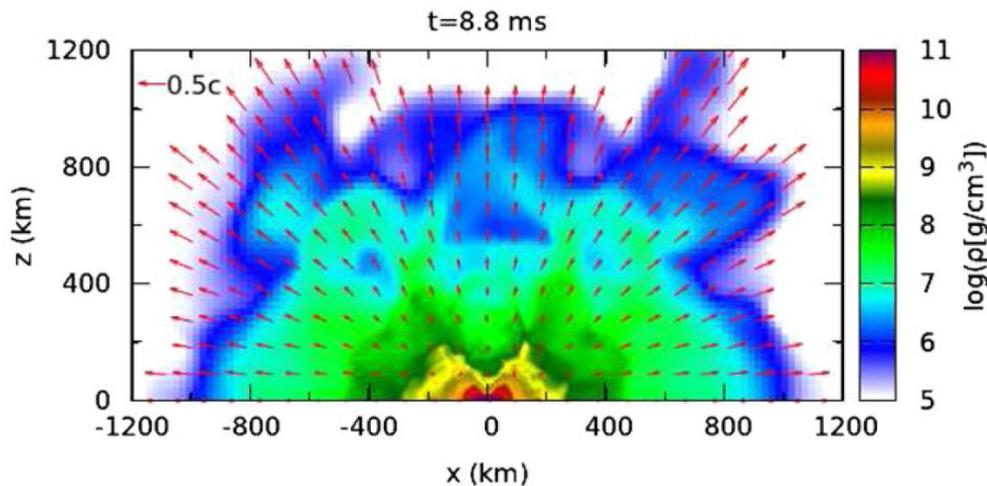


数値相対論の役割

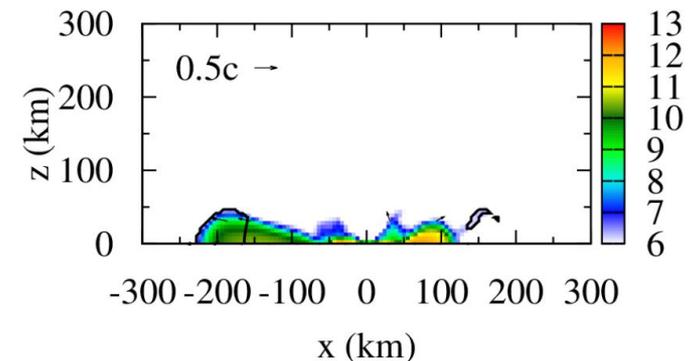
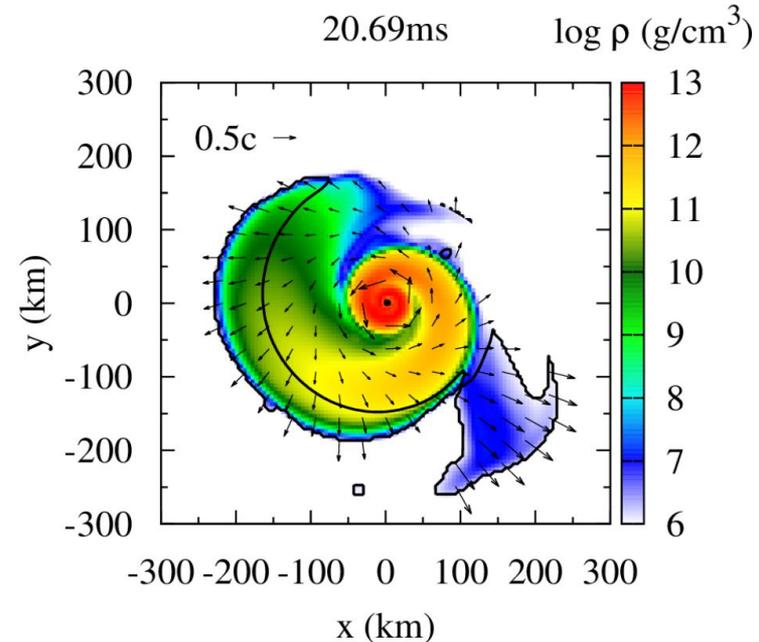
質量放出の性質を調べる

質量、速度、組成、形状...

ほぼ唯一の定量的計算手法



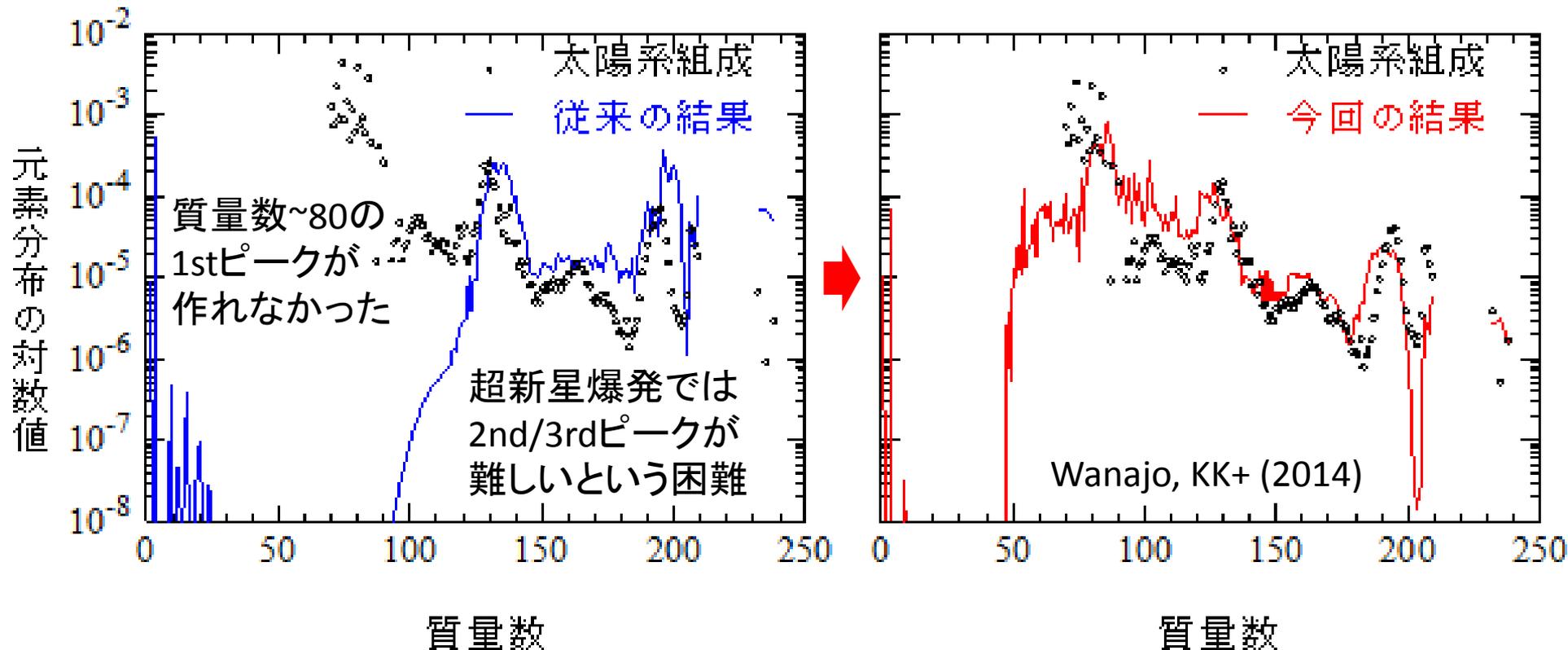
NS-NS: Hotokezaka, KK+ (2013)



BH-NS: Kyutoku+ (2015)

r過程と数値相対論

一般相対論による連星中性子星合体計算だと
太陽系組成を全体的にうまく再現できている

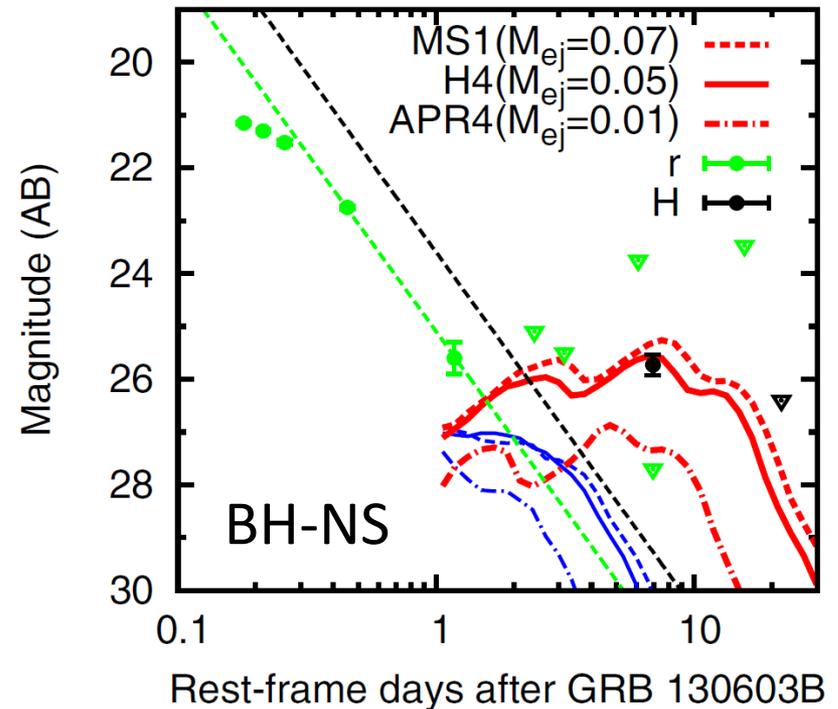
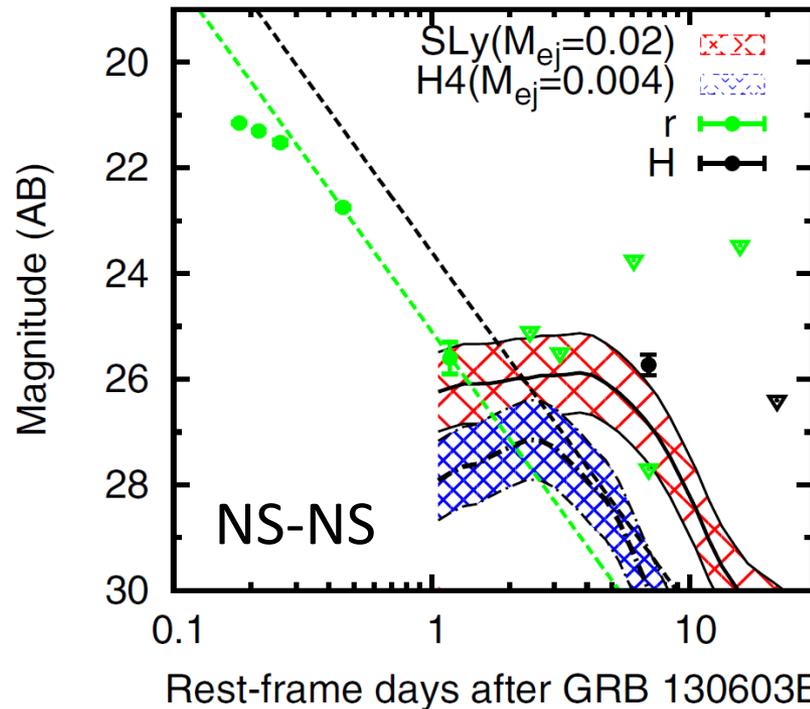


http://www.riken.jp/pr/press/2014/20140717_2/

放射輸送計算への応用

多波長光度曲線の定量的な計算の土台になる

GRB 130603Bの近赤外増光は説明できそう



Hotokezaka, KK+ (2013)

将来展望と まとめ

コンパクト天体連星合体について

合体までの様子は概ねよくわかってきた

- 合体過程、重力波放射、力学的質量放出

合体後に起こる現象はまだ研究が不十分

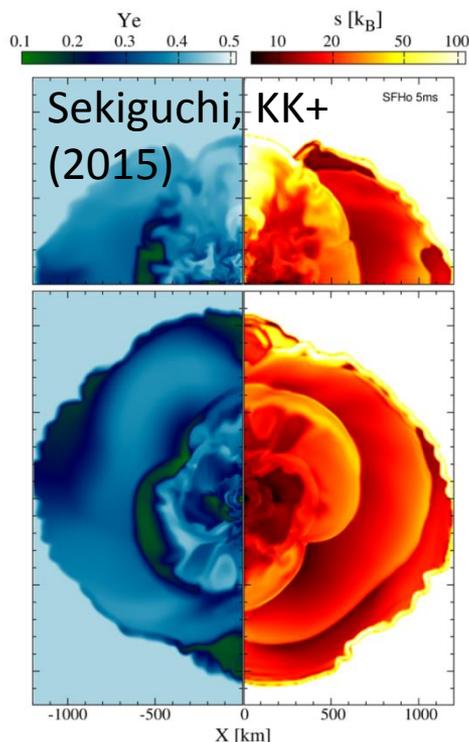
- 大質量中性子星からの重力波をどう見る？
- 質量放出、r過程、電磁波放射の全体像は？
- ショートガンマ線バーストは起こるのか？

現実的物理を取り入れた計算の実行が課題

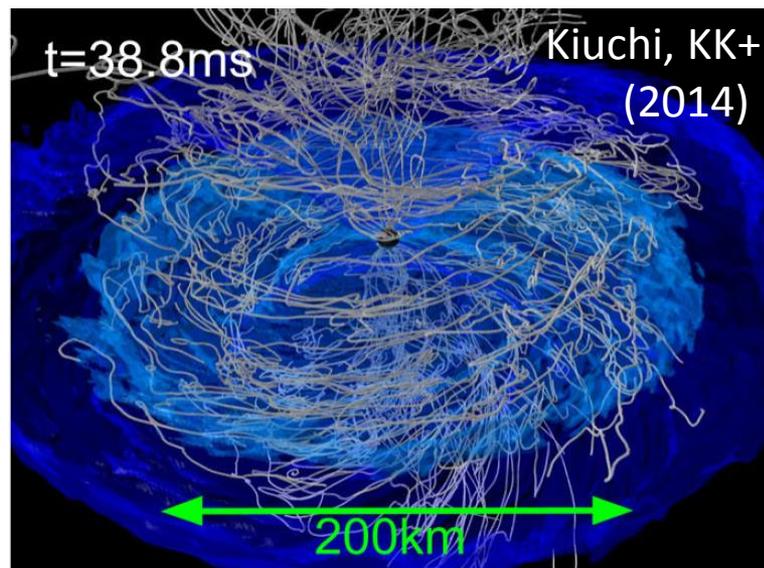
質量放出の全体像

ブラックホール降着円盤の「円盤風」は未解明

ニュートリノ駆動風、磁気駆動風...



質量？速度？
化学組成？
元素合成？
電磁波放射？



一貫した計算による全体像の理解が急務

重力波への電磁波追観測は？

今ある理論モデルを参考に戦略を立てつつもオープンマインドに行うのが重要ではないか

- 間違った理論モデルを元にすると同違える
- 現状のシミュレーションはまだ机上の空論
- 観測されたmacronova/kilonovaは参考になると個人的には思うが、確実ではないだろう

もちろん無限の観測資源は投入できないので今後も理論予言を正確にする努力は必要

将来展望

まずは重力波天文学を実現させること

重力波・ショートガンマ線バーストの同時観測

- ショートガンマ線バーストの連星起源を検証
- 重力波が光速で伝播していることを検証

電磁波でmacronova/kilonovaが観測される

- r過程元素の合成現場であることを検証

宇宙重力波検出器、未知の現象(どう解析?)

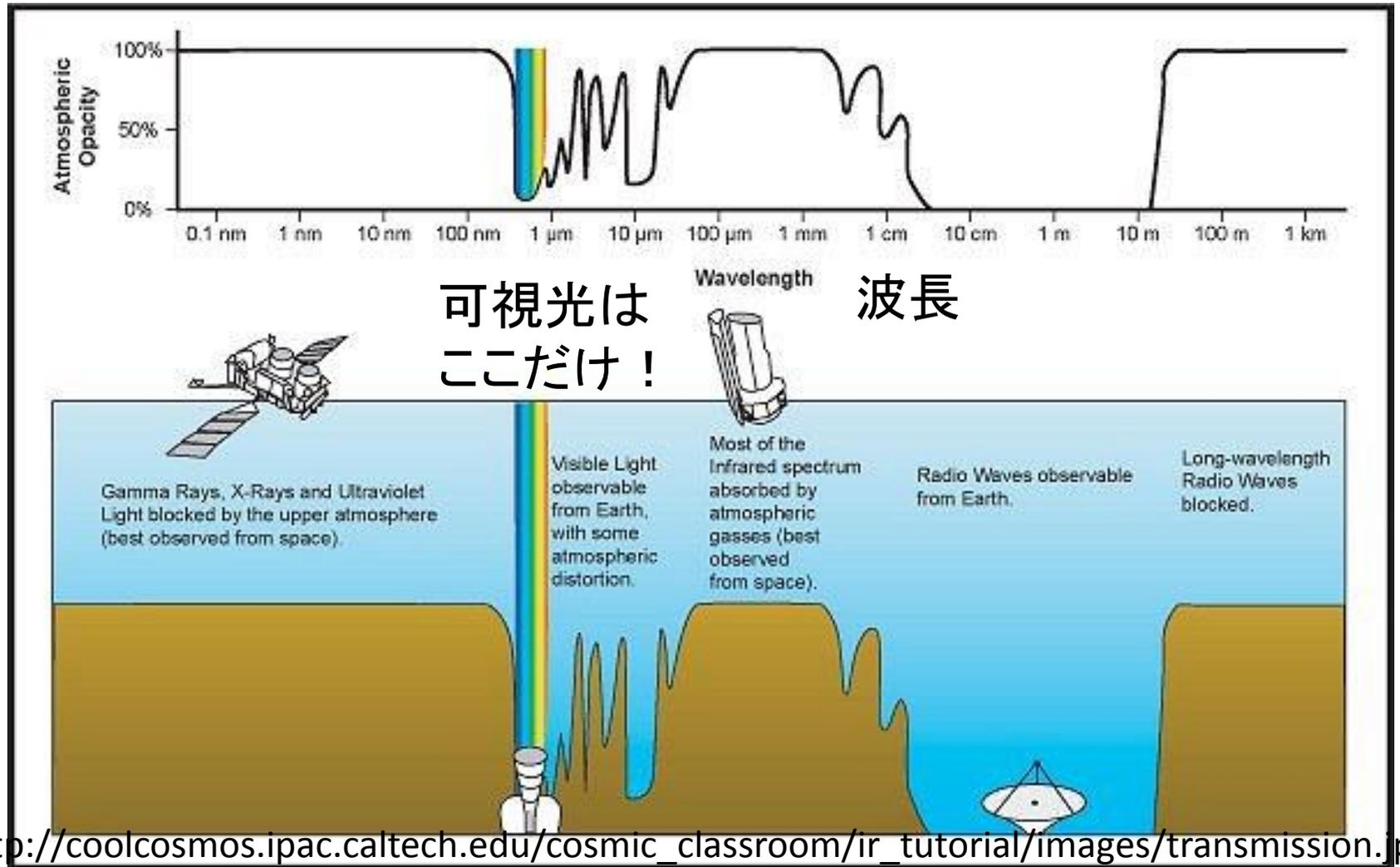
まとめ

- 重力波天文学の幕開けは近い
- 中性子星などコンパクト天体が作る連星の合体は重力波源として最も有望である
- さらに電磁波放射や重元素合成も興味深い
- 数値相対論シミュレーションによって合体の様子は正確にわかるようになってきた
- 理論、重力波データ解析、追観測戦略などまだまだやることは山積み

Appendix

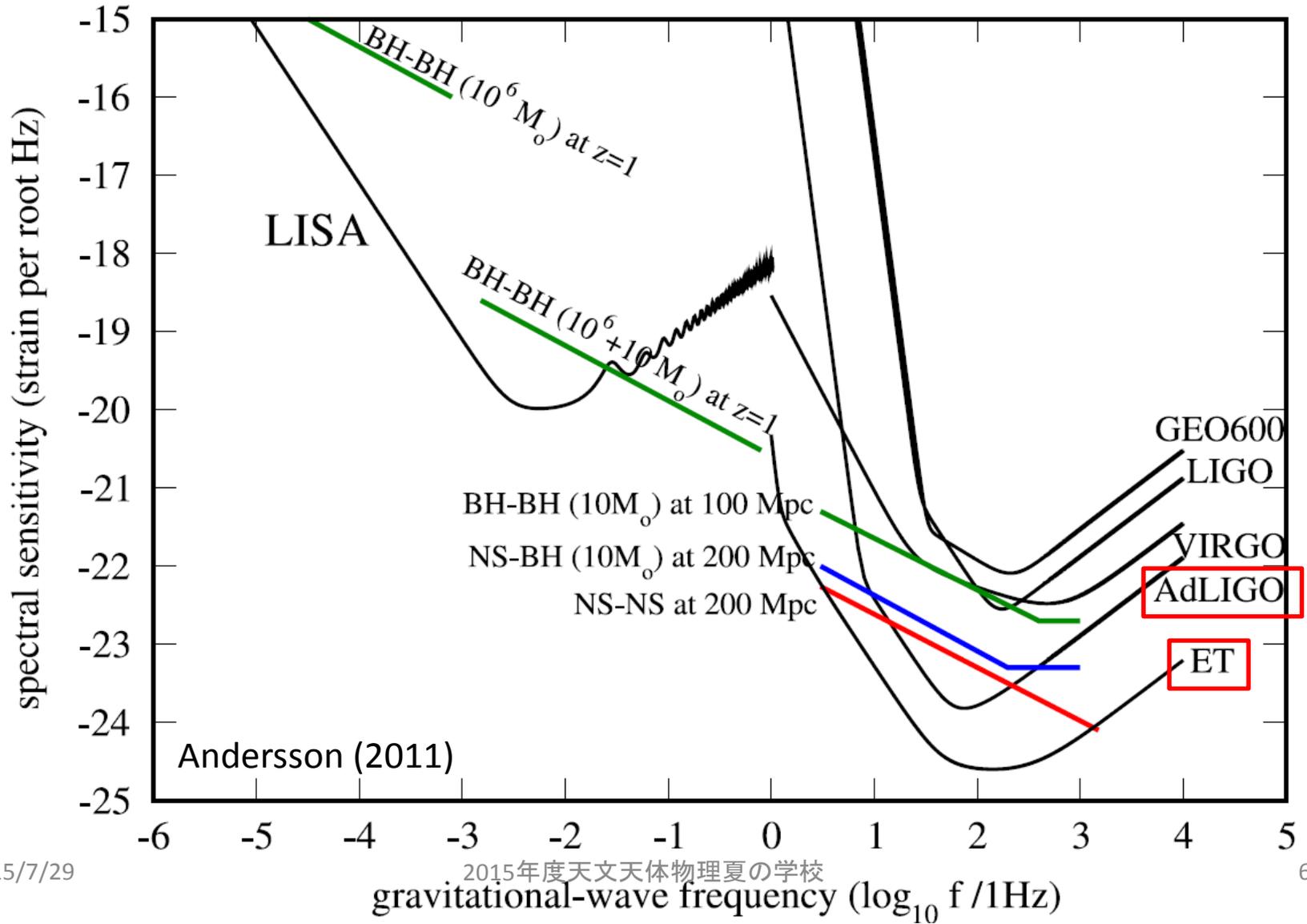
大気の窓

不透明度



http://coolcosmos.ipac.caltech.edu/cosmic_classroom/ir_tutorial/images/transmission.jpg

干渉計の感度

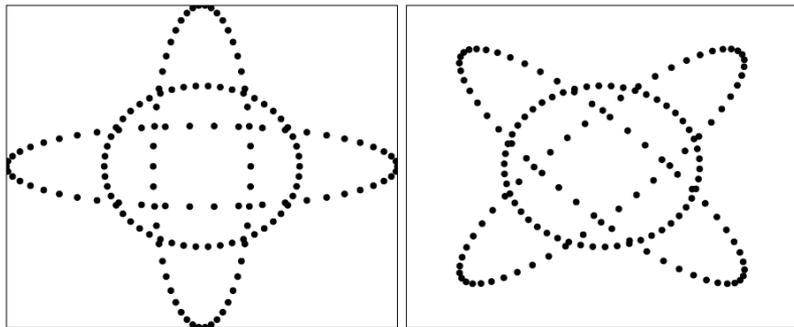


検出方法

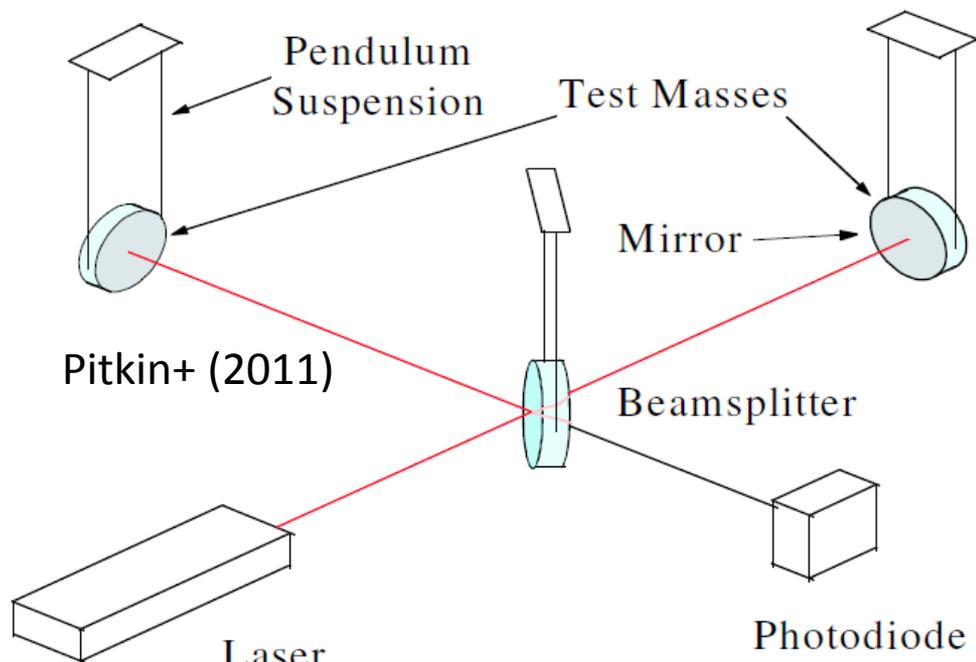
有限の距離での現象をとらえる：測地線偏差

$$\frac{d^2 x^i}{dt^2} = -R^i_{0j0} x^j \approx \frac{1}{2} \ddot{h}^{TT}_{ij} x^j$$

レーザー干渉計



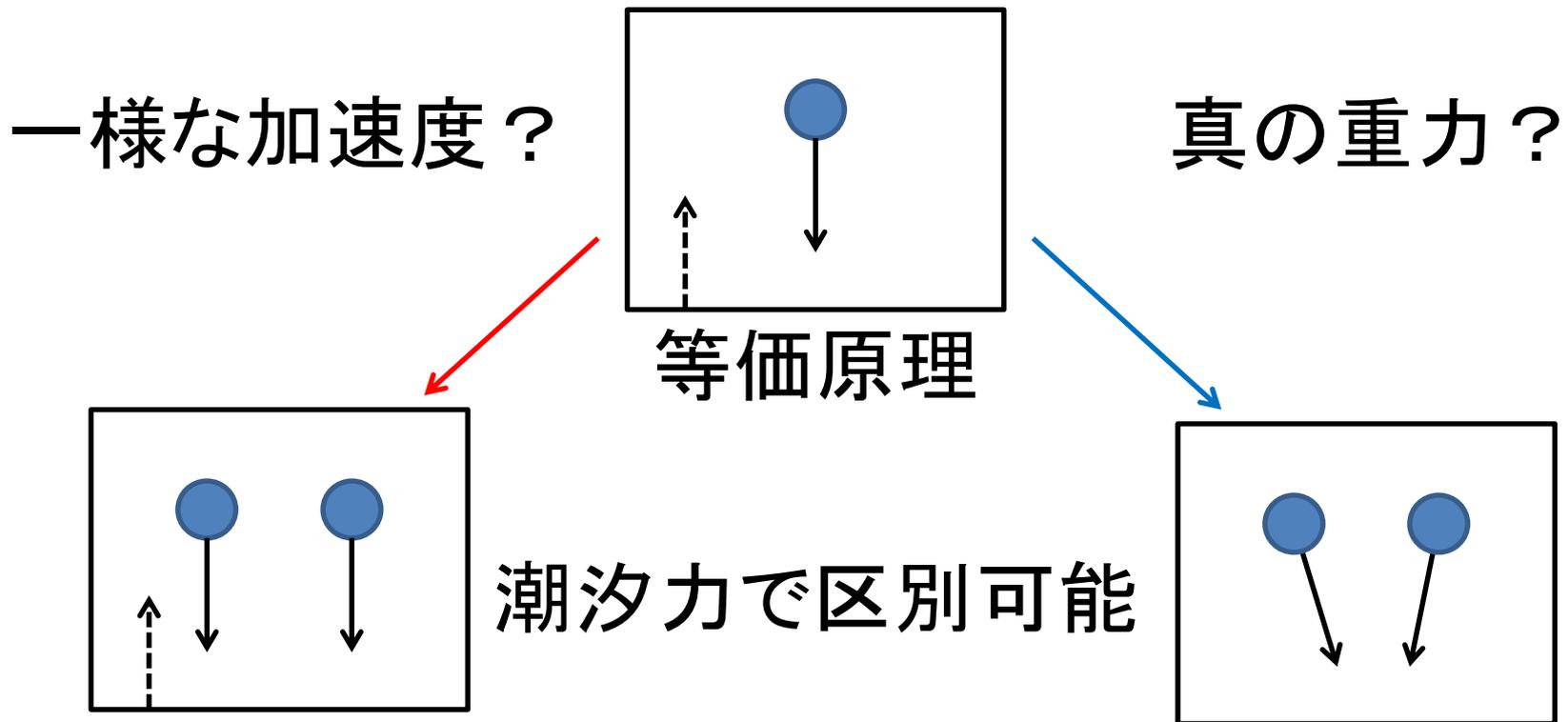
Sathyaprakash&Schutz (2009)



Pitkin+ (2011)

真の重力としての潮汐力

場所による重力の違い: $\partial^2 \Phi_{\text{grav}} / \partial x^i \partial x^j$



Newton重力での二体問題

ラグランジアン

$$L = \frac{1}{2}m_1\boldsymbol{v}_1^2 + \frac{1}{2}m_2\boldsymbol{v}_2^2 + \frac{Gm_1m_2}{|\boldsymbol{x}_1 - \boldsymbol{x}_2|}$$

→重心系では一体問題に書き直せる

$$L = \frac{1}{2}\mu\dot{r}^2 + \frac{1}{2}\mu r^2\dot{\phi}^2 + \frac{GM\mu}{r}$$

換算質量 $\mu = m_1m_2/(m_1 + m_2)$ を持つ粒子が
全質量 $M = m_1 + m_2$ の作る重力場で運動する

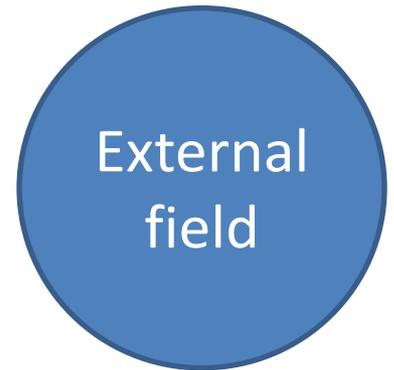
潮汐変形率

流体が軌道進化へ及ぼす影響を特徴付ける量

$$\Lambda = G\lambda \left(\frac{c^2}{GM} \right)^5 = \frac{2}{3} k \left(\frac{c^2 R}{GM} \right)^5$$



$$Q_{ij} = -\lambda \varepsilon_{ij}$$



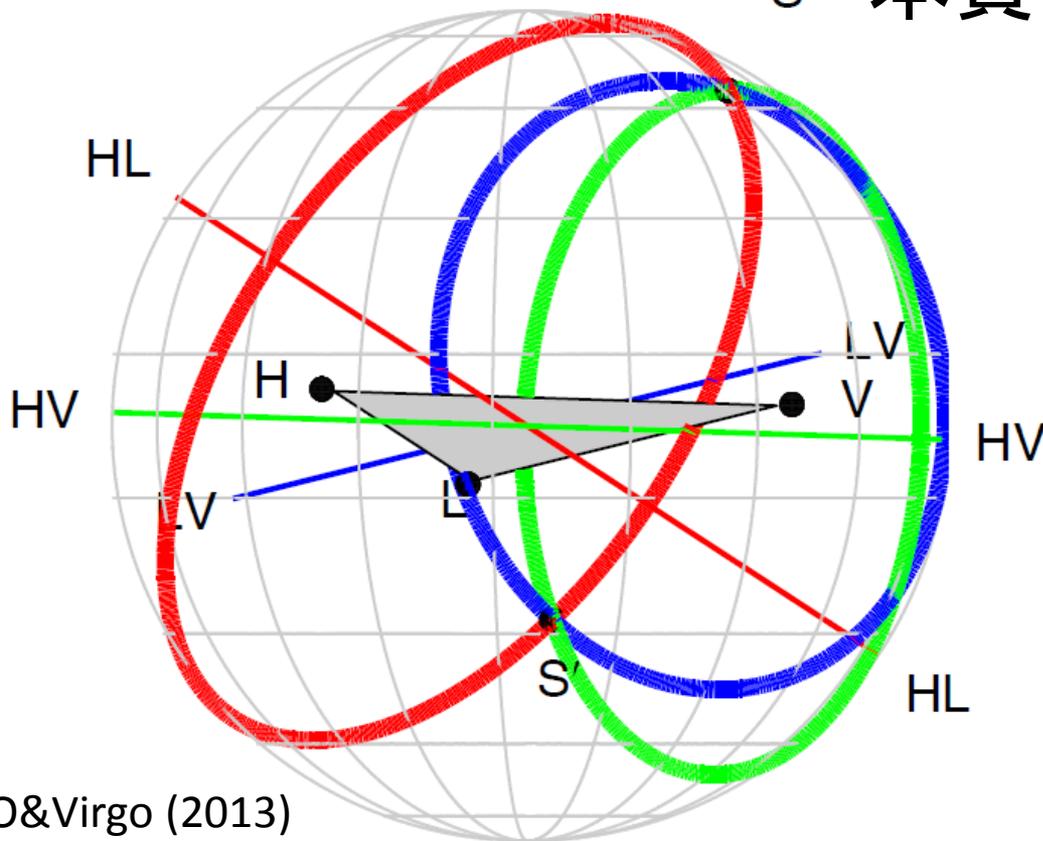
$$Q_{ij} \equiv \int \rho \left(x_i x_j - \frac{x^2}{3} \delta_{ij} \right) d^3x$$

$$\varepsilon_{ij} \equiv \frac{\partial^2 \Phi_{\text{ext}}}{\partial x^i \partial x^j}$$

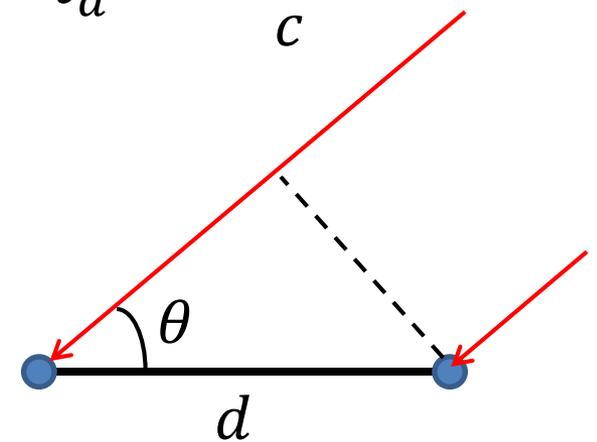
重力波検出器での位置決定

時間差を利用して天球上での位置を三角測量

s 本質的に複数台必要



$$t_d = \frac{d \cos \theta}{c}$$

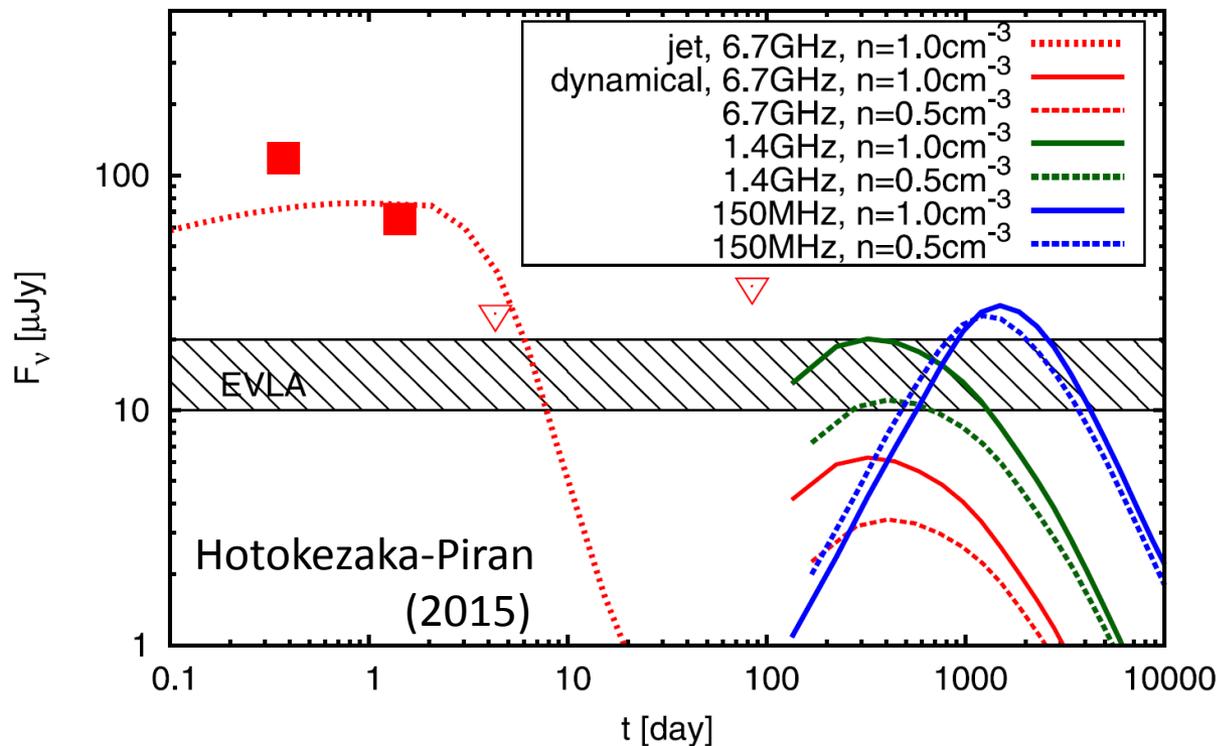


LIGO&Virgo (2013)

エジェクタと星間物質との衝突

衝撃波で電子が非熱的に加速され、磁場増幅
ほぼ確実だが、環境(星間物質)依存性が高い

GRB 130603B, $z=0.356$



SGRB追観測で
見つかるかも

星間物質密度は
高くなさそう...

それ以外の増光現象の可能性

例：連星中性子星からの衝撃波ブレイクアウト
 合体直後からX線、可視、電波と等方的に増光

