

重力波源としての短時間ガンマ線バーストの発生率

鳥屋子 あすか (金沢大学大学院 自然科学研究科)

Abstract

継続時間が短いガンマ線バーストは重力波と同じ起源で発生すると考えられている。SGRB のガンマ線スペクトルと光度の間に $E_{peak}-L_{peak}$ が成立することが分かっている (Tsutsui et al. 2013)。これを利用し、コンプトン衛星の BATSE 検出器で観測された SGRB の赤方偏移 (z 、距離) と光度 (L) を推定した。ここで得られた赤方偏移分布から SGRB の発生率を求めたところ、近傍における SGRB の発生率は 6.3×10^{-10} events Mpc $^{-3}$ yr $^{-1}$ と予想した。さらに、ジェットの幾何学補正を行った場合、重力波観測施設がターゲットとしている 200 Mpc 以内においては少なくとも年間 ~ 3.8 events 以上の重力波が検出されると予想している (Yonetoku et al. 2014)。もし、中性子星とブラックホールの合体によるものならば観測範囲は大きくなり、年間 ~ 146 events 程度と考えられる。現在、フェルミ衛星の GBM 検出器の観測データに対しても同様の解析を進めており、先の結果と合わせてより精度の高い推定を行う予定である。

1 はじめに

重力波の観測は、宇宙論、相対論など物理の発展にとって重要である。実際に重力波を観測した例はまだないが、重力波観測の実現のため 2018 年頃からの重力波観測装置の稼働に向けて KAGRA、Advanced-LIGO、Advanced-VIRGO などの建設が進んでいる。これらの重力波観測装置が始動する前に、重力波の理論モデルや現在観測されている天体の情報などから重力波の発生頻度を見積もることが必要である。

2 研究背景

2.1 ガンマ線バースト (GRB)

ガンマ線バースト (Gamma-Ray Burst: GRB) は短時間 (数 msec \sim 数 100sec) に激しい時間変動を伴い 10^{52} erg ものエネルギーをガンマ線放射として解放し遠方宇宙から飛来する宇宙最大の爆発現象である。また GRB は発生方向に偏りが無く、全天で 1日に 1回程度ランダムに発生している天体現象である。GRB は非常に明るい現象であるため、現在観測できる現象の中でも最も遠方、初期の宇宙の状態を観測することが可能となる。GRB のライトカーブ (フラックスの時間変動) を描くと様々な形状があるが、一般的には急激に増光し、緩やかに減光している。また、エ

ネルギーとフラックス (F) のスペクトルを対数をとって描くと図 1 (M.S. Briggs et al. 1999) のように低エネルギー側と、高エネルギー側で傾きが異なり、折れ曲がりが存在する (D. Band et al. 1993)。このとき得られたパラメータを利用し、縦軸をエネルギーフラックスにすることで解放効率の最も良いエネルギーの大きさが一つの GRB について得られる。このエネルギーを E_{peak} という。またこの E_{peak} は最大光度 L_{peak} と相関関係 (Yonetoku et al. 2004) があることが分かっている。 L_{peak} は、図 2 のようなライトカーブを描いたとき最も光子を受光している時間の平均の光度のことである。

GRB は大きく 2 種類に分類される。GRB として輝いている時間が観測者の系で 2 sec 以上である場合は Long GRB (LGRB) といい、2 sec に満たないものは Short GRB (SGRB) という。LGRB は大質量星が崩壊しブラックホールが形成されるとき、ジェットが形成され物質流同士の衝突により内部衝撃波が生成され、加速された電子が磁場に巻き付きシンクロトロン放射で輝くと考えられている。SGRB は中性子星連星の衝突・合体によりブラックホールが形成されるときジェットが生成され LGRB と同様な過程で放射しているのではないかと考えられている。さらに中性子星連星の衝突・合体により形成されるブラックホールに中性子星が衝突・合体するような

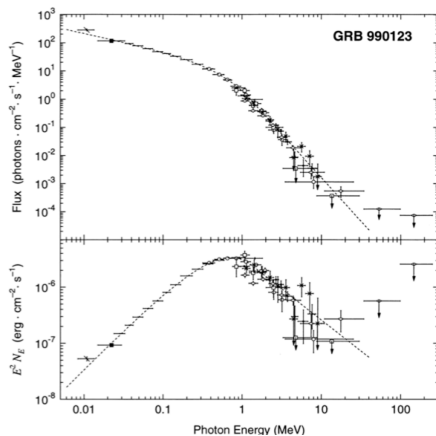


図 1: E_{peak} と L_{peak} の関係
(M.S.Briggs et al. 1999)

イベントに関しても SGRB の発生源になるのではないかとされている。どちらのライトカーブも始めに、急激な増光の後緩やかに減光していくプロンプト放射というのが見える。この部分が GRB の本体である。LGRB はプロンプト放射の後に残光 (アフターグロー) が見えるものがある。また SGRB については最近プロンプト放射の後に数 100 sec もたらだらとぼんやり光るエクステンデッドエミッション (Extended Emission:E.E.) が見えるイベントがあることが報告されている (Nakamura et al. 2014) が起源は分かっていない。

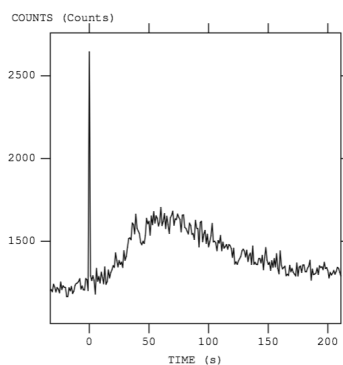


図 2: SGRB のライトカーブ

2.2 重力波と SGRB

重力波は光速で伝播する時空のゆがみのことである。また、中性子星連星の衝突・合体が起きたとき強い重力波が放出すると考えられている。これは SGRB と同じ起源であり、重力波と SGRB は同時に発生していると考えられる。重力波を実際に観測することはまだ実現されていないが既に電磁波で観測されている SGRB の観測データと、将来重力波観測装置で得られる重力波の観測データを組み合わせることで、重力波源の物理情報を引き出すことができる。これを念頭に置き、重力波観測を支えるためすでに観測されている SGRB の観測データを用いることで重力波の発生頻度を見積もることが必要である。

3 解析方法

コンプトンガンマ線観測衛星である、CGRO 衛星 (1991–2000) の BATSE 検出器の観測データを用いて解析を行った。

GRB の継続時間を評価する方法として T_{90} がよく使われる。一般に T_{90} というのは、バックグラウンドを引いてプロンプト放射の部分の光子数が 90 % となる時間のことである。 T_{90} が 2 sec 未満のもので、光度の大きなものを順番に選んで解析を行う。今回は統計上解析ができるぎりぎりの明るさ ($> 4 \times 10^{-6} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) で制限をかけたところ、BATSE 検出器が観測した GRB は 2704 events から 53 events となった。

SGRB の発生頻度を見積もるために、 E_{peak} をまず求める。図 1 のような GRB の光子微分フラックスは規格化定数 A 、低エネルギー側のべき α 、高エネルギー側のべき β 、スペクトルがブレイクするエネルギー E_0 を用いて

低エネルギー側 $E \leq (\alpha - \beta)E_0$

$$N(E) = A \left(\frac{E}{100 \text{ keV}} \right)^\alpha e^{-\frac{E}{E_0}} \quad (1)$$

高エネルギー側 $E \geq (\alpha - \beta)E_0$

$$N(E) = A \left(\frac{E}{100 \text{ keV}} \right)^\beta \left(\frac{(\alpha - \beta)E_0}{100 \text{ keV}} \right)^{\alpha - \beta} e^{(\alpha - \beta) \frac{E - (\alpha - \beta)E_0}{E_0}} \quad (2)$$

式 (1),(2)(D.Band et al. 1993) の形をしている。近年 E_{peak} は SGRB の最大フラックス F_{peak} と以下の関係式を満たすことが報告されている (Tsutsui et al. 2013)。

$$\frac{d_L^2}{(1+z)^{1.6}} = \frac{10^{51}}{4\pi F_{peak}} \left(\frac{E_{peak}}{100 \text{ keV}} \right)^{1.6} \quad (3)$$

SGRB の E_{peak} を式 (1)、(2) からフィッティングし求め、 E_{peak} と L_{peak} の式 (3) より、観測位置から SGRB が発生した位置までの光度距離 d_L として、観測量 (F_{peak}, E_{peak}) から式 (3) の左辺、すなわち距離に関する値を得られる。この式は赤方偏移の値が分かっているイベントに関しては、光度距離が得られるということを意味している。また宇宙論から赤方偏移と天体までの距離の関係から式 (3) が、 z 、 d_L が独立に得られ、 L_{peak} が得られる。

ここから、暗いために観測されなかった SGRB の数などを L_{peak} の累積頻度分布を描き見積もり、SGRB の発生頻度を予想する。このとき得られる SGRB の発生頻度はジェットが細く絞られているために観測されなかった SGRB を考慮していないため、ジェットの幾何学補正と重力波観測施設がターゲットとしている 200 Mpc より近傍という条件を考慮することにより、重力波の観測される数を見積もる。

4 CGRO 衛星 BATSE 検出器の解析結果

以上の解析方法を用いてまず観測データから得た E_{peak} と F_{peak} を式 (3) に適用することで得られた赤方偏移 z に対する最大光度 L_{peak} の分布は図 3(Yonetoku et al. 2014) の様になった。図 3 に引かれている直線はイベントの取捨選択をしたさいにした明るさの制限を表しており、黒色で四角の点は z が確実に分かっているもので、点が無くエラーバーがついているものが (3) 式を用いて得られたものである。エラーバーはフィットパラメータの 1σ 誤差である。検出器で観測できなかった暗い SGRB について図 3 の z と L_{peak} の分布の様子から、右下部分にある空白部分に対して見積もりを行う。その結果、 L_{peak} の値に対してどれだけのイベントが存在するか累積頻度分布を

描いたのが図 4(Yonetoku et al. 2014) である。赤いラインが L_{peak} の累積頻度分布のベストフィットとなる部分であり、グレーの部分はフィットパラメータの誤差の範囲でモンテカルロを 100 回振ったものであり、赤いラインの誤差の指標である。 L_{peak} の累積頻度分布の見積もりを利用することにより、図 3 の空白部分の分布が埋め、 z の値に対する SGRB の発生率の分布を図 5(Yonetoku et al. 2014) の様に得た。

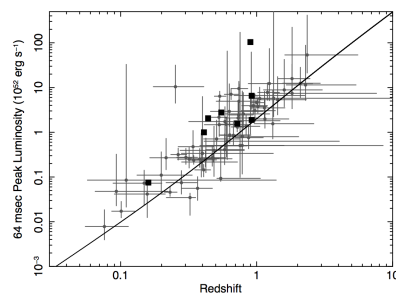


図 3: z と L_{peak} の分布 (Yonetoku et al. 2014)

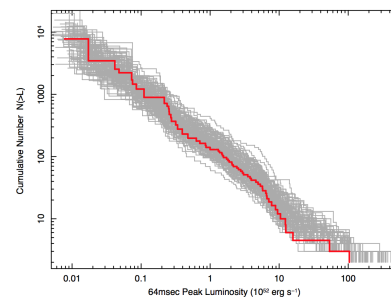


図 4: L_{peak} の累積頻度分布の見積もり (Yonetoku et al. 2014)

近傍における SGRB の発生率を図 5 の $z = 0$ を見て 6.3×10^{-10} events $\text{Mpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ とわかる。観測データから示唆されているジェットの開き角が $\sim 6^\circ$ として幾何学的補正を行い、重力波観測施設がターゲットとしている 200 Mpc という条件を加えて、少なくとも年間 ~ 3.8 events の観測ができると予想した (Yonetoku et al. 2014)。

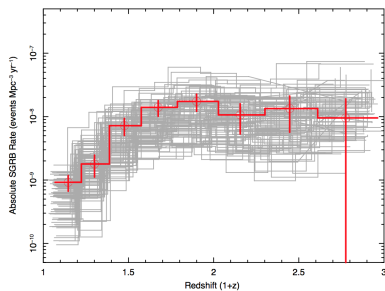


図 5: SGRB の発生頻度の見積もり
(Yonetoku et al. 2014)

5 まとめ

SGRB は中性子星連星が衝突・合体したときに重力波と同時に発生すると考えられている。このことから、既に観測されている SGRB を用いてまだ観測が実現されていない重力波の発生頻度を見積もることができる。

SGRB においても $E_{peak}-L_{peak}$ の相関関係があることが分かり、SGRB の観測データから z や L_{peak} を求めることができる。

BATSE 検出器の解析結果から近傍における SGRB の発生率は 6.3×10^{-10} events $\text{Mpc}^{-3} \text{yr}^{-1}$ であり、そこから重力波観測施設が 1 年間に少なくとも 3.8 events は観測できると予想した。また、ブラックホールと中性子星との合体によるものならば、ブラックホールが極めて重いため観測範囲が大きくなり 1 年に ~ 146 events 程度観測されると予想できる。

6 今後

E.E. はジェットのように絞られていないため E.E. が発生したときは、SGRB のプロンプト放射が観測されなくても重力波と同時に E.E. の観測ができると考えられる。しかし、E.E. は SGRB のプロンプト放射と比較すると暗いイベントである。そこで、BATSE 検出器は ~ 25 keV から読み出せるのに対し、Fermi 衛星の GBM 検出器は ~ 8 keV から読み出しができるため E.E. の解明が期待できる。

見積もりの精度を上げることを目標に、現在 Fermi 衛星 GBM 検出器でも同様に解析を進めている。

E_{peak} の解析結果を GCN の速報で E_{peak} が得られているものと比較し解析方法が正しいことが確認できた。また明るいものから順に解析を行い 15 events について E_{peak} を得られている。これを元に Fermi 衛星の GBM 検出器のデータを用いた SGRB の発生頻度を求め、BATSE 検出器の発生頻度の結果と比較、検証を行いたい。

Reference

- Tsutsui et al., MNRAS, 431, 1398 (2013)
- Yonetoku et al., Apj, accepted (2014)
- M.S.Briggs et al., Apj, 524: 82-91 (1999)
- D.Band et al., Apj, 413: 281-292 (1993)
- Yonetoku et al., Apj, 609, 935 (2004)
- Nakamura et al., arXiv: 1312. 0297v2 (2014)