

ガンマ線バーストを用いた相対性理論の検証

中川兼治

立命館大学 理工学研究科

概要

相対性理論の仮定の一つである“真空中の光速不変原理”は、量子力学に基づく重力理論が対象とする大きさ (Planck scale $M_{\text{Planck}}c^2 = 1.22 \times 10^{19}$ [GeV]) で破られることがありうることが予言されている。量子重力理論によると、超高エネルギー現象では光の速さは光子のエネルギーの自身のエネルギー、もしくは自身のエネルギーの 2 乗に依存して変化すると予言されている。これは光速不変の原理が、超高エネルギー現象において破れることを意味している。光速不変の原理の検証を行うべく、2009 年に Nature に掲載された論文 “A limit on the variation of the speed of light arising from quantum gravity effects” をもとに、Fermi 衛星によるガンマ線バースト GRB090926A の観測データを用いて量子重力理論の予言の検証を行った。その結果、ローレンツ不変性の破れ (LIV) の項に、 $M_{\text{QG}}/M_{\text{Planck}} > 8.10 \times 10^{-2}$ ($M_{\text{QG},1}$ は量子重力理論の質量スケール、 $M_{\text{Planck}}c^2 = 1.22 \times 10^{19}$ GeV はプランク質量) という値の制限をつけることができた。この制限は GRB090510 を用いて打ち立てた制限に比べれば、それほど厳しくない制限であった。

1 序説

量子力学に基づく重力理論のなかには、Planck scale ($M_{\text{Planck}}c^2 = 1.22 \times 10^{19}$ GeV) から特殊相対性理論で仮定されている“真空中の光速不変の原理”が破られることが予言されている。これは時空を連続体ではなく、時空には多くの泡 (foam) のようなもので構成されていると仮定されているからである。そして高エネルギーの massless 粒子はこの泡の影響を受けやすくなり、その結果、異なるエネルギーを持つ massless 粒子の到着時刻の差は、粒子自身のエネルギー、もしくはエネルギーの 2 乗に比例すると考えられている。

このような効果は小さいものと考えられるが、ガンマ線バーストなどで同時に発生したエネルギーの異なるガンマ線が宇宙論的な距離を旅する間に、その影響が徐々に蓄積し、地球近傍に到来するころには我々が検出できる程度の時間差が生じていると考えられる。

そこで、2009 年に Nature に掲載された論文、“A limit on the variation of the speed of light arising from quantum gravity effects” を参考に、フェルミガンマ線宇宙望遠鏡が観測した GRB090926A のデータを

解析することで、量子重力理論が予言しているように真空中の光速不変の原理が破られているのか実際に検証を行った。

2 GRB090926A

GRB090926A は 2009/9/26 04:20:26.99 [UT] に GBM がトリガーを引いたガンマ線バーストである。RA, Dec の値はそれぞれ、 $RA = 353^\circ.401$, $Dec = -66^\circ.3239$ である。また赤方偏移 z は VLT による母銀河の観測により $z = 2.1062$ である。また $T_{90} = 13.9$ [s] であった。

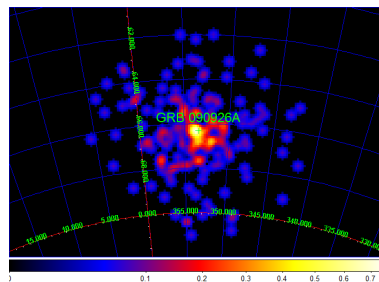


図 2.1 LAT が観測した 20MeV から 300GeV のデータをもとに作成した Count Map

3 解析

LAT と GBM のデータでは解析方法が異なるため、それぞれ別々に述べる。

3.1 GBM のデータ解析

はじめに GBM が観測したデータを FSSC (Fermi Science Support Center) から入手し、各検出器ごとの Light Curve を作成した。その際、解析には FSSC が供給する Fermi 解析ツール (gtselect, gtmktime, gtbins) を用いた。また GBM のデータにはバックグラウンド光子の情報も含まれているので、それらの光子の推定も行った。その後、先に作成した Light Curve から推定されたバックグラウンド光子を差し引き、GBM 装置毎の Light Curve を作成した。(“gt”で始まるコマンドは Fermi 解析ツールである。) また、Light Curve の横軸は、GBM がトリガーを引いた時刻を 0[s] とする時刻 (Trigger Time) にした。

3.2 LAT のデータ解析

LAT のデータも FSSC から入手でき、Photon データと Spacecraft データからなる。まず gtselect を用いて、必要なイベントクラスのデータを選択した。そのときのイベントクラスは、evclsmin=1, evclsmax=3、最大天頂角は 105° とした。また、解析には 20MeV から 300GeV の範囲の光子を用いた。次に gtmktime を用いて先ほど gtselect で振り分けたデータと衛星運用データをつなぎ合わせ、有効なデータに限るようフィルターをかけた後、gtbins を用いて Light Curve とカウントマップを作成した。同時に、時間とエネルギーの関係を示したグラフを作成した。

また GBM と同様に、Light Curve の横軸は、GBM がトリガーを引いた時刻を 0[s] とする時刻 (Trigger Time) にした。

4 考察

量子重力理論で予言されているような到着時刻の差は以下の式で表すことができる。

$$\Delta t = s_n \frac{(1+n)(E_h^n - E_l^n)}{2H_0 (M_{QG,n} c^2)^n} \int_0^z \frac{(1+z')^n}{\sqrt{\Omega_m(1+z')^3 + \Omega_\Lambda}} dz' \quad (4.1)$$

そして LIV が linear ($n = 1$) の場合の時間のずれは簡単に、以下のように表すことができる。

$$\Delta t = \frac{\Delta E}{H_0 M_{QG,1} c^2} \int_0^z \frac{(1+z')}{\sqrt{\Omega_m(1+z')^3 + \Omega_\Lambda}} dz' \quad (4.2)$$

ここで、 z は赤方偏移、 $\Delta E = E_h - E_l$ である。また Ω_m , Ω_Λ , H_0 に関しては、一般的な値である $\Omega_m = 0.27$, $\Omega_\Lambda = 0.73$, $H_0 = 71$ (km/sec/Mpc) を用いた。そして式 (4.2) の積分の項を計算すると 2.38 と求めたので、式 (4.2) は単純に、

$$\Delta t \cong \frac{2.38 \times \Delta E}{H_0 M_{QG,1} c^2} \quad [\text{s}] \quad (4.3)$$

と表すことができた。 $n = 2$ の場合は用いる式が $n = 1$ の場合と異なり、また解析作業も複雑になるため、今回は $n = 1$ の場合のみ考えた。実際に式 (4.3) を用いて、量子重力理論の質量とプランク質量との比 ($M_{QG,1}/M_{\text{Planck}} = \xi_1$) を求めた結果を、表にまとめた。

表 4.1 の (i) の条件は、Trigger Time= 21.7187 [s] に観測された約 20 GeV の光子が、< 1 MeV で GRB の始まる Trigger Time= 1.73 [s] に出発した (放出された) 光子が遅延して到達したものと仮定し、量子重力理論の質量スケールとプランク質量との比 (ξ_1) に制限をかけた結果である。次に (ii) は (i) と同様、Trigger Time= 21.7187 [s] に観測された約 20GeV の光子が、> 100 MeV で GRB の始まる Trigger Time= 1.34 [s] に出発した (放出された) 光子が遅延して到達したと仮定し、量子重力理論の質量スケールとプランク質量との比 (ξ_1) に制限をかけた結果である。また (iii) も (i), (ii) と同様に、Trigger Time= 21.7187 [s] に観測された約 20GeV の光子が、>1 GeV で GRB の始まる Trigger Time= 1.64 [s] に出発した (放出された) 光子によるものとして仮定し、量子重力理論の

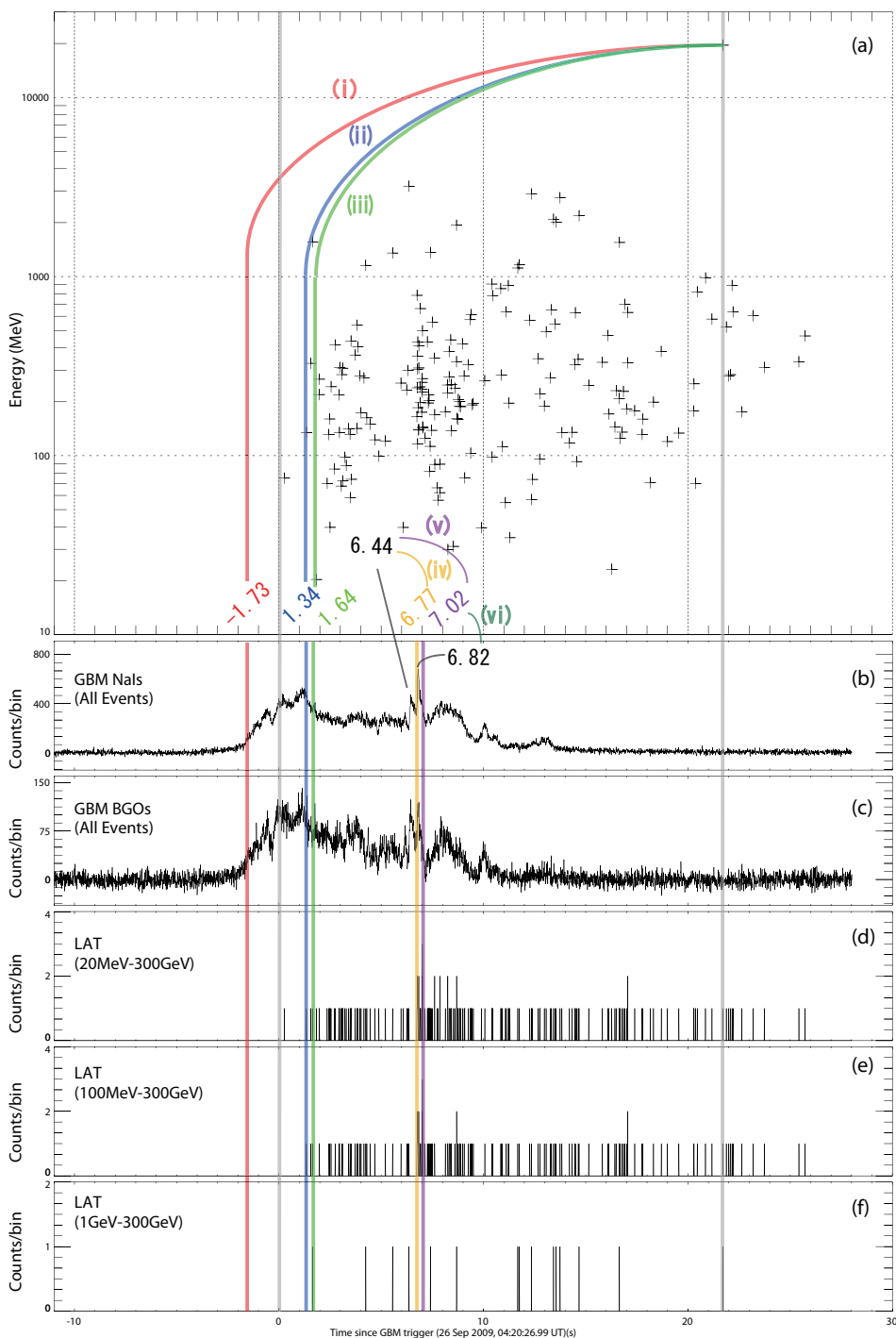


図 3.1 異なるエネルギーでの GRB090926A の Light Curve

質量スケールとプランク質量との比 (ξ_1) に制限をかけた結果である。(iv) は図 3.1 (d)-(e) に示した > 20 MeV の光度曲線の Trigger Time = 6.77 [s] のスパイク (橙) が、図 3.1 (b)-(c) で示した < 1 MeV の光度

曲線の主要な 2 つのスパイクの 1 つ目のスパイクと同時刻に出発した (放出された) 光子によるものとして仮定し、量子重力理論の質量スケールとプランク質量の比 (ξ_1) に制限をかけた結果である。(v) は図

3.1 (d)-(e) に示した > 20 MeV の光度曲線の Trigger Time= 7.02 [s] のスパイク (紫) が、図 3.1 (b)-(c) で示した < 1 MeV の光度曲線の主要な 2 つのスパイクの 1 つ目のスパイクと同時刻に出発した (放出された) 光子によるものとして仮定し、量子重力理論の質量スケールとプランク質量の比 (ξ_1) に制限をかけた結果である。(vi) は図 3.1 (d)-(e) に示した > 20 MeV の光度曲線の Trigger Time= 7.02 [s] のスパイク (紫) が、図 3.1 (b)-(c) で示した < 1 MeV の光度曲線の主要な 2 つのスパイクの 2 つ目のスパイクと同時刻に出発した (放出された) 光子によるものとして仮定し、量子重力理論の質量スケールとプランク質量の比 (ξ_1) に制限をかけた結果である。

5 結論

大気チェレンコフ望遠鏡により > 100 GeV で活動銀河 Markarian 501 のフレアを観測して量子重力理論の質量のスケールの下限を求めた結果とプランク質量との比 (ξ_1) は、 $\xi_{1, \text{Mkn}501} > 0.017$ と制限された。また、Short GRB である GRB090510 を用いて、高エネルギーの光子と低エネルギーの光子の到着時刻の差から、量子重力理論の質量スケールとプランク質量との比に、 $\xi_{1, \text{GRB}090510} > 1.19$ という制限がついた。ガンマ線バースト GRB090926A を用いて LIV の項の値に制限をつけた結果、 $\xi_1 > 8.10 \times 10^2$ (表 4.1 (ii)) と求まった。この制限は、GRB090510 の制限に比べれば、あまり厳しいものであるとは言いがたい。

Short GRB は Long GRB に対して、相対的に高いエネルギーのガンマ線を放射する傾向がある。なの

で今後同様な解析を行うには、Short GRB を解析するのが望ましいと考えられる。

参考文献

- 1) J.Albert et al, “Probing quantum gravity using photons from a flare of the active galactic nucleus markarian 501 observed by the magic telescope,” Phys. Lett. B 668 (2008) 253-257
- 2) A.A.Abdo et al, “A limit on the variation of the speed of light arising from quantum gravity effects,” Nature 462 (2009) 331-334

[¶] $s_n = 1$ は positive time-delay ($v_{\text{ph}} < c$, つまり $t_h > t_{\text{em}}$) を示しており、 $s_n = -1$ は negative time-delay ($v_{\text{ph}} > c$, $t_h < t_{\text{em}}$) を示している。

** Trigger Time= 6.77 [s] に観測された高エネルギー光子のエネルギーを 100 MeV, Trigger Time= 6.44 [s] に観測された 1 つ目の山のエネルギーを 3.67×10^{-3} MeV として解析を行った。

^{††} Trigger Time= 7.02 [s] に観測された高エネルギー光子のエネルギーを 100 MeV, Trigger Time= 6.44 [s] に観測された 1 つ目の山のエネルギーを 3.67×10^{-3} MeV として解析を行った。

^{‡‡} Trigger Time= 7.02 [s] に観測された高エネルギー光子のエネルギーを 100 MeV, Trigger Time= 6.82 [s] に観測された 2 つ目の山のエネルギーを 3.67×10^{-3} MeV として解析を行った。

表 4.1 量子重力理論の質量とプランク質量との比 $M_{\text{QG},1}/M_{\text{Planck}}$ の制限

	$t_{\text{start}} - T_0$ (s)	Limit on $ \Delta t $ (s)	Reasoning for choice of t_{start} or limit on Δt or $ \Delta t/\Delta E $	E_l (MeV)	Valid for s_n^{q}	Lower limit on $M_{\text{QG},1}/M_{\text{Planck}}$
(i)	-1.73	< 23.45	start of main < 1MeV emission	0.1	1	$> 7.06 \times 10^{-2}$
(ii)	1.34	< 20.38	start of main > 0.1GeV emission	100	1	$> 8.10 \times 10^{-2}$
(iii)	1.64	< 20.08	start of main > 1GeV emission	1000	1	$> 7.84 \times 10^{-2}$
(iv)**	6.77	< 0.34	橙と1つ目の山	3.67×10^{-3}	1	$> 2.57 \times 10^{-2}$
(v)††	7.02	< 0.59	紫と1つ目の山	3.67×10^{-3}	1	$> 1.46 \times 10^{-2}$
(vi)‡‡	7.02	< 0.20	紫と2つ目の山	3.67×10^{-3}	1	$> 4.24 \times 10^{-2}$