

平成 23 年 5 月 10 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007 ～ 2010

課題番号：19540283

研究課題名 (和文) ガンマ線バースト現象の統一理論の構築

研究課題名 (英文) Towards the Unified Picture of Gamma Ray Bursts

研究代表者

中村卓史 ( Nakamura Takashi )

京都大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：80155837

研究成果の概要 (和文)：Gamma Ray Bursts (GRB と略称) の起源は未だに良く解っていない。統一的な描像を得るためには星の進化理論での星の光度と表面温度のいわゆる HR ダイアグラムに対応するものが必要である。この目標に対して次のような成果があった。①宇宙論に依存せずに米徳関係式等を TypeIa 超新星を用いて calibrate する方法を確立した。②米徳関係式等の進化効果と選択効果はせいぜい  $2\sigma$  レベルであることがわかった。③米徳関係式の精度を上げるには、継続時間依存性、誤差の少ないイベントのみにかぎること、物理量を定義するのに GRB 静止系を採用することが必要であると分かった。

研究成果の概要 (英文)：The origin of Gamma Ray Bursts (GRB) is still not known well. To construct the unified picture of GRBs, we need to find the diagram similar to HR diagram concerning the luminosity and the surface temperature of stars in stellar evolution theory. For this purpose we succeeded in following points. ① We found a method to calibrate Yonetoku relation independent of cosmological models using TypeIa supernovae. ② We found that the evolution and selection effects of Yonetoku relation are at most two sigma levels. ③ To increase the accuracy of Yonetoku relation, we should add the dependence of the relation to the duration, use only the events with small observational errors and define the physical quantities in the rest frame of GRBs.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	700,000	210,000	910,000
2008 年度	700,000	210,000	910,000
2009 年度	700,000	210,000	910,000
2010 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：相対論的天体物理学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：ガンマ線バースト、距離指標、統一理論、宇宙論

1. 研究開始当初の背景

Gamma Ray Bursts (以後 GRB と略す) と

は、1973 年に初めて見つかった天体現象である。GRB は宇宙論的距離から 10 秒間程度、

光子のエネルギー200keV 程度をピークとしたガンマ線が地球にやってくる現象で年間1000 イベント程度存在する。距離は100 億年程度であり、エネルギー放出率は見渡す限りの宇宙の全ての銀河のエネルギー放出率をあわせたものと同じかそれ以上になる。つまり、宇宙で最も Violent で明るい現象であるが、その起源は未だに不明である。1997 年までには距離すら不明であったが、Beppo-SAX 衛星の観測等から宇宙論的な距離であることが確定した。その後、2000 年初頭には内部一外部衝撃波シンクロトロンモデルがスタンダードな理論として確立した。しかしながら、2004 年に打ち上がった Swift 衛星は予期に反してスタンダードな理論で説明できない現象を数多く発見した。スタンダード理論では、GRB が始まってから1000 秒から1 万秒あたりでは時間の逆数に比例して明るさが減るはずであるが、これに反して、時間の平方根程度に逆比例するイベントが大量に見つかり出したのが、1 例である。他にも①エネルギー危機と呼ばれる高いガンマ線への変換効率②非同色な減光曲線③X 線でジェット構造が見えない GRB が多いこと等のスタンダード理論に反した現象がいくつも見つまっている。これらの意外な現象を説明すべく多くの理論が今も提案されているが、どれも決めてに、欠けている。

## 2. 研究の目的

GRB には3 つの混乱期があった。発見当初の1970 年代は GRB を説明すべく GRB の数より多い諸説が入り乱れた第1 の混乱期である。1990 年代は GRB までの距離に関して①宇宙論的距離と②銀河のハローの2 つの説が対抗した第2 の混乱期。そして、スタンダード理論が崩壊した2007 年頃から始まる第3 の混乱期が今も続いている。このような状況下で GRB の統一理論を構築するには種々の GRB 現象を記述する適当なダイアグラムの整備が不可欠である。どういうことかと言うと星の場合を考えるとわかり易い。星の表面温度と光度のいわゆる HR ダイアグラムでは水素燃焼時代の主系列は1 つの線上にある。また、白色矮星、赤色巨星等も別の線上にあって全く違う種類の星を1 つのダイアグラム上で議論でき星の理解が進んだ。本研究では統一理論の構築に向けて GRB で成立する種々の関係式を整備することをその第1 目標とする。

## 3. 研究の方法

2004 年に金沢大学の米徳助教と共同で提案した GRB に関する  $L_p$ - $E_p$  関係式(米徳関係式とも呼ばれていて、この関係式を提案した論文(ApJ 609 (2004) 935-951 の2011 年5 月現在の引用回数198) は、本研究計画と密接に関係しているので、金沢大学との共同研究を2007 年から始めた。最初の中村が大学

院生の筒井を伴って、金沢に出張して共同研究を開始した。2007 年の末には京大に TV 会議システムが導入されたので、1 か月に1 回 TV 会議を行うことでより頻繁に共同研究をすることが可能になった。また2009 年頃から名古屋大学の高橋慶太郎研究員も共同研究に参加したので、京大、金沢大と名古屋大間での TV 会議で研究を進めた。この共同研究は、本科研費の終了後も続いている。

## 4. 研究成果

(1)最大 Fulux  $L_p$  と違うエネルギーバンドにやってくる光子の到着時間の差(Spectral Lag)が相関しているという主張があったが BATSE の565 のイベントについて解析するとこの関係式は赤方変移依存性を持つことが判明した。(論文7)

(2)統一理論の構築のためには TypeIa 超新星の光度と減光率の関係式のような関係を GRB で確立することが重要であるが、このためには宇宙論パラメーターに依存せずに GRB までの距離を決める必要がある。我々は赤方変移が1.7 までの TypeIa 超新星を用いて  $L_p$ - $E_p$  関係式を確立することに世界に先駆けて実行した。その後この種の論文が多く出だしたが論文6 は真っ先に引用されている。さらに得られた宇宙論パラメーターに依存しない関係式を用いて、高赤方変移で宇宙論パラメーターがどう制限付けられるかを論じた。赤方変移が5 を超える天体は GRB くらいしか有望でないのでデータの増加が重要である。論文5 では現在のデータでの宇宙論パラメーターに対する制限を論じた。

(3)2004 年に中村と金沢大学の米徳らが発見した米徳関係式 ( $L_p \propto E_p^2$ ) はさらに低分散な関係式になることが望ましい。一方2002 年に Amati は  $E_{iso} \propto E_p^2$  なるいわゆる Amati 関係式を発見した。両者は似ているが GRB の光度が一定でない限り独立なものである。実際のデータで両者の独立性はそれぞれを用いた赤方変移の残差に相関がないことで確かめられた。そこで、 $L_p$ ,  $E_{iso}$  と  $E_p$  の3 つを使うとさらに分散の少ない関係式が得られるのではないかと言う予想の下で  $L_p \propto E_p^{1.82} T_L^{0.34}$  なる関係式を発見した。(論文4、ここで  $T_L = E_{iso}/L_p$ 。) この関係式は本研究の申請書で予測した  $E_{iso} \propto E_p^2 T_d^{-1}$  とは異なるが時間に関係した物理量を入れるという意味では精神は似ている。(ここで  $T_d$  は GRB の継続時間) 得られた関係式の物理的な説明を論文4 で GRB の Photospheric Model の範疇で行ったところ  $L_p \propto E_p^2 T_L^{-0.25}$  を得た。両者は一致していると言える。

(4)中間報告の段階では次のような方針を立てた。赤方変移の決まった GRB の数は80 を超えるようになったので、さまざまな関係式の進化効果、観測限界効果を調べることが可

能になってきている。もし、進化効果が有意にあれば、それはGRB現象の統一理論に大きく関わってくるからである。現在のところ米徳関係式に進化効果がみられ、Amati関係式に観測限界効果が見られると言う予備的な結果を得ている。ただ、これは見かけの可能性があつて、peak luminosityを決めるのに rest frame で同じ時間を取ることにすれば、米徳関係式の進化効果はなくなる可能性があり、これを現在精査している。また、発見した  $L_p$ 、 $TL=E_{iso}/L_p$  と  $E_p$  の間の関係式についても観測誤差のすくない Gold Event に限ると分散が少なくなる可能性があるのもそれらも追求し行く方針である。

(5) ガンマ線バーストでは、スペクトルは Band 関数という Broken Power Law が良く成り立っている。この非熱的な放射のピークエネルギー  $E_p$  と 1 秒を bin に採った光度  $L_p$  に米徳関係式 ( $L_p \propto E_p^2$ ) が成立することが、知られている。この関係式の理論的な説明はついていないが、GRB の統一理論はこの関係式を自然に満たす必要がある。しかし、米徳関係式の進化効果と選択効果はまだ調べられていなかった。そこで、2009 年末までに赤方偏移の測られた GRB 200 ケ中、スペクトルが精度良く決定された 101 を①明るさの異なる 3 つのグループと②赤方偏移の異なる 3 つのグループに分けて、それぞれのグループ内で、米徳関係式を求めた。その結果、①に関してはどのグループでも  $1\sigma$  の範囲内で、同じ関係式になる。また②に関しては、進化効果が見えるがそれは  $2\sigma$  レベルであることが分かった。この進化効果の原因は、 $L_p$  を決める時に観測者系で 1 秒にしているが、実際には GRB の静止系では赤方偏移に応じて 1 秒より短い時間になっているためと考えられる。というのも、一般に GRB は激しく時間変動しており、短い時間間隔を考えるほど  $L_p$  が大きくなるからである。つまり、GRB 静止系での時間を一定にして、 $L_p$  を測るなら、進化効果がないと予想できた。(論文 3)そこで、次に  $L_p$  を決めるのに GRB 静止系を用いるだけでなく  $E_p$  が 10% の精度で決まっているプラチナデータに絞ると、GRB の数は減るが reduced  $\chi$  が 1.3 の精度の良い米徳関係式を求めることに成功した。(論文 2) 今後はこの精度良い関係式を満たす GRB の統一理論を作るのが課題である。

##### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

1. The improved  $E_p$ - $TL$ - $L_p$  diagram and a robust regression method, R. Tsutsui, T.

Nakamura, D. Yonetoku, T. Murakami, Y. Morihara and K. Takahashi Publ. Astron. Soc. Japan 2011 in press

2 Probing Early Cosmic Magnetic Fields through Pair Echos from High-Redshift GRBs, Keitaro Takahashi, Susume Inoue Kiyomoto Ichiki and Takashi Nakamura, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 410 (2011) 2741-2748

3 Possible Origins of Dispersion of the Peak Energy—Brightness Correlations of Gamma-Ray Bursts, D. Yonetoku, T. Murakami, R. Tsutsui, T. Nakamura, Y. Morihara, and K. Takahashi Publ. Astron. Soc. Japan 62 (2010) 1495-1507

4 Cosmological constraints from calibrated Yonetoku and Amati relation suggest fundamental plane of gamma-ray bursts, Ryo Tsutsui Takashi Nakamura, Daisuke Yonetoku, Toshio Murakami, Yoshiki Kodama, Keitaro Takahashi, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 8(2009), 15

5 Constraints on  $w_0$  and  $w_a$  of dark energy from high-redshift gamma-ray bursts, Ryo Tsutsui, Takashi Nakamura, Daisuke Yonetoku, Toshio Murakami, Sachiko Tanabe, Yoshiki Kodama, Keitaro Takahashi, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 394 (2009) L31-L35

6 Gamma-Ray Bursts in  $1.8 < z < 5.6$  Suggest that the Time Variation of the Dark Energy is Small, Yoshiki Kodama, Daisuke Yonetoku, Toshio Murakami, Sachiko Tanabe, Ryo Tsutsui, Takashi Nakamura, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 391 (2008) L1-L4

7 Redshift-dependent lag-luminosity relation in 565 BATSE gamma-ray bursts, Ryo Tsutsui, Takashi Nakamura, Daisuke Yonetoku, Toshio Murakami, Sachiko Tanabe, Yoshiki Kodama, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 386 (2008) L33-L37

8 Unstable GRB Phosphores and  $e^+e^-$  Annihilation Lines? Kunihito Ioka, Kohta Murase, Kenji Toma, Shigehiro Nagataki, Takashi Nakamura, Astrophys. J. 670 (2007) L77-L80

[学会発表] (計 5 件)

1 Spectral Epeak-Luminosity -Origin of Dispersion and its Improvement, D. Yonetoku, T. Nakamura et al, 'Deciphering the Ancient

Universe with GRB', April 19, 2010, Kyoto  
Japan

2 Cosmological constraints from calibrated  
Yonetoku and Amati relation imply the  
second parameter of Gamma Ray bursts  
Ryo Tsutsui Takashi Nakamura, Daisuke  
Yonetoku, Toshio Murakami,, Yoshiki  
Kodama, Keitaro Takahashi,  
'Gamma Ray Bursts 2008' 2008 October  
Huntsville USA

3 Redshift-dependent lag-luminosity  
relation in 565 BATSE gamma-ray  
bursts, Ryo Tsutsui, Takashi Nakamura,  
Daisuke Yonetoku, Toshio Murakami,  
Sachiko Tanabe, Yoshiki 'Gamma Ray  
Burst 2007' 2007 November , Santa Fe  
USA

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中村卓史 (Nakamura Takashi )

京都大学大学院理学研究科・教授

研究者番号：80155837