

平成 23 年 5 月 10 日現在

機関番号：14301

研究種目：特定領域研究（計画研究）

研究期間：2007 ～ 2010

課題番号：19047004

研究課題名（和文） ガンマ線バーストの起源の理論的研究

研究課題名（英文） Theoretical Research on the Origin 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）：各分担者が①Gamma Ray Burst（以後 GRB と略称）の距離指標の研究②GRB の親星、母銀河の研究③GRB と超新星爆発の研究④ジェットの発生と伝搬の研究⑤GRB と残光の放射機構等を主にとりあげ、TV 会議等を駆使して常時緊密に連絡を取りながら GRB の起原に迫る研究を行った。その結果①重元素が存在しない初代星が宇宙初期の密度揺らぎから形成されて、進化をし、最終的に GRB として観測される過程を明らかにすることが出来た。②初代の GRB までの距離を決める手段としての米徳関係式はデータの精度が 10% レベルのものに絞り、光度を GRB 静止系で決めると距離指標となることが分かった。これら以外にも③米徳関係式の起源④GRB の shallow decay phase の起源⑤相対論的 MHD コードによる GRB のエネルギー源の解明等にも大きな成果があった。

研究成果の概要（英文）： Adopting either ①Gamma Ray Bursts (GRB) as a distance indicator, ②Progenitor and host galaxy of GRB, ③ Supernova associated with GRB, ④ Emergence and propagation of jets, or ⑤Radiation mechanism of prompt emission and afterglow of GRB etc as a research theme of each member, we performed the cooperative research program on GRB using TV conference system to communicate each other frequently. As a result, we succeeded in ①simulating the formation of the first stars without metal and evolving them up to be seen as GRBs. ②We also reanalyzed Yonetoku relation as a distance indicator to the first GRB and found that Yonetoku relation is a good distance indicator if we restrict only data within 10% errors and define the luminosity in the rest frame of GRBs. Besides these researches, big progress in ③the origin of Yonetoku relation ④the origin of the shallow decay phase of GRBs ⑤ relativistic MHD numerical simulations to clarify the origin of energy of GRBs etc. has been made.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	7,500,000	0	7,500,000
2008 年度	13,100,000	0	13,100,000
2009 年度	13,100,000	0	13,100,000
2010 年度	12,200,000	0	12,200,000
年度			
総計	45,900,000	0	45,900,000

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、初代星の形成、超新星爆発、ジェット、残光、距離指標

1. 研究開始当初の背景

継続時間が長いガンマ線バースト（以下 GRB と略称）は特異な超新星の爆発時にジェットが飛び出して発生することが分かって来た。GRB が特異な超新星なら宇宙で最初に星ができた太古の宇宙にも GRB は存在した可能性がある。しかも GRB は宇宙で最も明るい光源として知られているので宇宙の果てでも観測できるのではないかと考えられている。代表者が米徳らと発見した GRB の光度とスペクトルのピークのいわゆる米徳関係式を赤方変移の決まっていない 600 個程度の GRB に適用して赤方変移 $z=10$ 程度の GRB が存在することを推定していた。理論的には赤方変移 $z=30$ 程度の GRB もあるのではないかという予想がある。実際 2005 年には Swift 衛星が稼働し始めて直ぐに領域代表者の河合らはすばる望遠鏡を用いて $z=6.29$ の GRB を発見した。このような遠方の GRB がさらに見つかるかと予想されたが、その予想通り 2008 年には $z=6.7$ の GRB080913 また 2009 年には $z=8.2$ の GRB090423 が発見された。予想通りの進展であり、特に $z=8.2$ の GRB090423 は今まで観測された中で最も遠い天体として認知された。このように、本領域のタイトル通り太古の宇宙が見えつつある。

2. 研究の目的

このような研究の進展に伴い GRB に関連する理論的研究も多分野にまたがり一人の研究者が全てをカバーすることは不可能になって来た。したがって、研究者が常時情報を交換する有機的な組織が必要である。理論の計画研究はまさにこれを狙いとしている。各分担者は①GRB の距離指標の研究②GRB の親星、母銀河の研究③GRB と超新星爆発の研究④ジェットの発生と伝搬の研究⑤GRB と残光の放射機構の研究を主にとりあげ、TV 会議等を駆使して常時有機的な繋がりを深めることで過去から現在に至る GRB の起原に迫ることを主要な目的とする。そして、①宇宙最初の星(初代星)はいつ生まれたのか？②水素とヘリウム以外の重元素はどのように宇宙に広がったのか？③星生成率は時代とともにどう変化したのか？④銀河は、いつ、どのように生まれたのか？⑤どのような星が GRB をおこすのか？⑥GRB を距離指標として宇宙を測れるのか？等の根源的な問いの答えを追求する。また、全く新しい発見にも対応して理論的な考察を行い論文を発表することも行

う。

3. 研究の方法

理論的な研究では、新しい情報の収集と仲間同士の議論が極めて重要である。そのために領域が採用されて直ちに TV 会議システムを導入することにした。京都大学に 5 局接続可能な親局を作り、京大以外の各分担者には 1 局のみ接続できる TV 会議システムを購入した。まず、メールで毎日配布される学術論文のうち本計画研究に関係したものを取り上げ議論するために、毎週月曜の 3 時 15 分から 2 時間位 TV 速報会を行った。これには東工大等の実験グループも加わり最大 9 局繋がることになった。また、国際会議の参加者による報告と議論も行うようにした。初年度の 2007 年度には 13 回、2008、2009、2010 年度にはそれぞれ 37 回、38 回、39 回開催した。祝日や盆休み以外はほとんど毎週おこなったことになる。紹介された論文の PowerPoint ファイルは京大天体核研究室のホームページ上で領域の研究者に公開されている。毎回取り上げる論文数は数編程度なので、領域期間中に 600 編程度の論文のデータを集めたことになったが、実験グループを含む多くの研究者にこのデータベースは役にたったと思われる。また、1 から 2 カ月に 1 回はあるテーマに絞って 4 時間程度報告してもらう月例会も開催した。メンバーは基本的には理論グループを中心とした。この月例会は 26 回開催したが、発表の PowerPoint ファイルは京大天体核研究室のホームページ上で領域メンバーに公開されている。

4. 研究成果

4 年間で発表した学術論文数は 111 編で、国際会議での発表は 32 件に達するので主要な成果に絞って記述する。(1)宇宙論的初期条件から始めて、原始星の形成まで輻射・化学過程を組み込んだ 3 次元流体シミュレーションにより初めて初代の星形成過程を計算した。この原始星の初期質量は 1/100 太陽質量以下と小さいものの、周囲には高密度のガスが大量に存在し、原始星へ降着する。そのため、原始星は数 100 太陽質量の超大質量星へと成長し GRB の親星となる可能性があることが分かった。(論文 1。これは NHK7 時のニュース並びに主要な新聞で紹介された。)(2)GRB の早期 X 線残光に見られる Plateau phase のふるまいを説明する新たなモデルとして、「時間差をおいて出る 2 成分ジェット

モデル」を提唱した。このモデルによると、Swift時代に入ってから新たに得られたX線残光の振る舞いを説明するとともに、GRB発生の数千秒前にX線のプリカーサが検出される。これは現在稼働中のMAXIで確認可能であるので計画研究A01班と密接に関連している。(論文2)

(3)GRBの大きな謎の一つにエネルギー変換効率が50%程度にまでなるといふことがある。これを解決するためにまずGRBの主要なエネルギーは光球表面から出ているとするモデルを採用する。しかし、GRB自身は非熱的な放射であるので、光球表面で電子陽電子対と陽子が2流体不安定を起こして、非熱的な放射をするシナリオを提案した。特に親星をジェットが付きぬけた辺りで不安定が起こりかつローレンツ因数が光度の平方根に比例すると米徳関係式を導けることが分かった。この研究には代表者と分担者2名が参加している。(論文3)

(4)米徳関係式のように距離指標となる関係式を導くためには普通今まで宇宙論パラメータを仮定してきた。しかし、 $z=10$ のような高赤方変移を考えると宇宙論を仮定せずに距離指標を決めることが重要である。そこで多くの距離指標が今までやって来たように z が小さい場合(具体的には $z<1.7$)で米徳関係式をType Ia超新星の距離指標を使って更正した。これは我々が論文4で始めて行ったもので、その後の論文では必ず引用されている。これは代表者とA01、A02の分担者との共同研究である。(論文4)

(5)種族III(PopIII)星が質量降着によって約1 Msunから質量を増やしながら進化していく過程を、重力崩壊の段階まで計算した。Pop III.1星はほぼ1000太陽質量まで成長するので、ブラックホールを形成する。これらは、宇宙初期のガンマ線バースト源となるとともに、巨大質量ブラックホールの種ともなり得る。この計算でPop III星の質量降着率は、Yoshida-Omukaiの初代星形成の計算で与えられた率を使用しており、分担者大向の質量降着の計算を、重力崩壊段階まで続けたものに対応する。(論文5)

(6)一般相対論的磁気流体コードを開発し、ガンマ線バーストでのジェット形成シミュレーションを行なった。回転しているブラックホールからの回転エネルギー引き抜き効果により、ジェットが形成されていることが示された。(論文6)

(7)米徳関係式やAmati関係式は有望な距離指標候補であるが、これらに進化効果や観測によるバイアス効果がないか調べた結果 2σ レベルではないことが分かった。データの精度が10%レベルのものに絞ると、光度をGRB静止系で決めるとReduced χ が1.3のType Ia超新星に匹敵する改良版の米徳関係式を得た。(論文

7)これは代表者とA01、A02の分担者との共同研究である。

(8)分担者の大向らの研究によって、宇宙で最初に生まれる初代星は非常に巨大であることが示唆されている。分担者の井岡はGRBのジェットが巨大な星を突き破って初代GRBになりえることを明らかにした。予想される光度や継続時間は観測を行う計画研究A01、A02への指針となった。(論文8)

(9)分担者の大向はメタルがゼロの星形成で、先に出来た原始星の光によるフィードバック効果を調べた。その結果降着円盤が原始星の輻射により蒸発して、最終的にできる星は太陽質量の40倍程度であることが判明した。(論文9)

(10)分担者の山崎はGRBのshallow decay phaseを説明するために、既にtwo jets modelを提案したが、モデルの予言について考察した。GRB本体のガンマ線放射は、先行する「ジェット1」に追いついたときに、これらの高エネルギー電子によって逆コンプトン散乱を受け、さらに高エネルギーのGeV-TeV帯域のガンマ線を放射する可能性があり、Fermi衛星で観測可能な事が分かった。(論文10)

(11)最近、極端に明るい超新星(Luminous Supernova: LSN)の一群が発見されるようになり、Pair Instability Supernova(PISN)であるという主張がなされている。100 Msun程度の大質量星が重力崩壊し、極超新星という巨大エネルギーの爆発をした場合、十分な量の ^{56}Ni を放出し、LSNの光度曲線や爆発のdynamicalな特徴をよく説明できることを示した。(論文11)

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111件)

1. The improved Ep-TL-Lp 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. "Can Gamma-Ray Burst Jets Break Out the First Stars?", Y. Suwa & K. Ioka, the Astrophysical Journal, Volume 726, 107-114 (2011)
3. "On the Implications of Late Internal Dissipation for Shallow-Decay Afterglow Emission and Associated High-Energy Gamma-Ray Signals", K. Murase, K. Toma, R. Yamazaki & P. Meszaros, the Astrophysical Journal, Volume 732, 77-93 (2011)

4. "Evolution of Massive Protostars via Disk Accretion", T. Hosokawa, H. W. Yorke & K. Omukai, the Astrophysical Journal, Volume 721, 478-482 (2010)
5. "A Core-collapse Supernova Model for the Extremely Luminous Type Ic Supernova 2007bi: Alternative to Pair-instability Supernova Model", Moriya, T., Tominaga, N., Tanaka, M., Maeda, K., and Nomoto, K., Astrophysical Journal, 717, L83--L86, 2010.
6. "Evolution of Very Massive Population III Stars with Mass Accretion from Pre-main Sequence to Collapse", Ohkubo, T., Nomoto, K., Umeda, H., Yoshida, N., and Tsuruta, S., The Astrophysical Journal, 706, 1184--1193, 2009
7. "Development of a General Relativistic Magnetohydrodynamic Code and Its Application to the Central Engine of Long Gamma-Ray Bursts" S. Nagataki The Astrophysical Journal, Volume 704, Issue 2, pp. 937-950 (2009)
8. "Prior Emission Model for X-ray Plateau Phase of Gamma-Ray Burst Afterglows", Ryo Yamazaki, The Astrophysical Journal Letters, 690, L118-L121 (2009)
9. "Protostar Formation in the Early Universe" Yoshida, N., Omukai, K., & Hernquist, L. (2008) Science, 321, 669
10. Gamma ray Bursts in $1.8 < z < 5.6$ suggest that the time variation of dark energy is small Y. Kodama, D. Yonetoku, T. Murakami, R. Tsutsui and T. Nakamura, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 391, L1-L4 (2008)
11. Unstable GRB Photospheres and e⁺/e⁻ Annihilation Lines Ioka, Kunihito; Murase, Kohta; Toma, Kenji; Nagataki, Shigehiro; Nakamura, Takashi The Astrophysical Journal, 670, L77-L80 (2007)
[学会発表] (計 43 件)
1. Gamma Ray Cosmology Project
Ryo Tsutsui Takashi Nakamura, Daisuke Yonetoku, Toshio Murakami, Keitaro Takahashi,
'The Essential Cosmology for the Next Generation' 2010 January Playa del Carmen Mexico
2. Low metallicity Star Formation K. Omukai, 'The First Stars and Galaxies' 2010 March Austin USA
3. Prior Emission Model for the Plateau Phase in the X-ray Afterglow Ryo Yamazaki 'The Shocking Universe' 2009 June Venice Italy

4. Toward Understanding of GRB-Supernova Connection by General Relativistic MHD simulation S. Nagataki '4th Sakharov Conference on Physics 2009 May Moscow Russia
5. Chemical Yields from supernova and intermediate-mass stars K. Nomoto 'The Galaxy Disk in a Cosmological Context IAU Symp. 250 2008 June Copenhagen Denmark

[その他] 各種受賞があった。

分担者の大向一行: 「宇宙初期の星形成過程の研究」 2011 年度 文部科学大臣表彰 若手研究者賞

分担者の山崎了: 「ガンマ線バーストの多様性に関する理論的研究」 2009 年度日本天文学会研究奨励賞

分担者の井岡邦仁: 「Off-axis ガンマ線バーストの研究」 2008 年度日本物理学会若手奨励賞

分担者の井岡、山崎、大向は、本計画研究中に助教から准教授に昇格した。

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

(2) 研究分担者

野本憲一 (Nomoto Kennichi)
東京大学・数物連携宇宙研究機構・特任教授
研究者番号: 90110676

長滝重博 (Nagataki Shigehiro)
京都大学基礎物理学研究所・准教授
研究者番号: 60359643

大向一行 (Omukai Kazuyuki)
京都大学大学院理学研究科・准教授
研究者番号: 70390622

井岡邦仁 (Ioka Kunihito)
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授
研究者番号: 80402759

山崎了 (Yamazaki Ryo)
青山学院大学・理学研究科・准教授
研究者番号: 40420509

