

ガンマ線バーストのスペクトルと明るさの相関関係の起源 —宇宙最大の爆発現象の理論的解明へ前進—

理化学研究所（理研）開拓研究本部長瀧天体ビッグバン研究室の伊藤裕貴研究員、長瀧重博主任研究員、数理創造プログラムのドナルド・ウォレン研究員、金沢大学理工研究域数物科学系の米徳大輔教授らの国際共同研究グループ[※]は、国立天文台、理化学研究所、京都大学基礎物理学研究所のスーパーコンピュータを用いて、宇宙最大の爆発現象である「ガンマ線バースト^[1]」におけるスペクトルと明るさの相関関係（米徳関係^[2]）を、数値シミュレーションによって理論的に再現することに成功しました。

経験則であった米徳関係の理論的基盤を示した本研究成果は、長年の謎となっていたガンマ線バーストの放射機構の解明に大きく貢献すると期待できます。

ガンマ線バーストの放射機構の理論モデルとして、近年「光球面放射^[3]モデル」が注目を集めています。しかし、理論的な精査はまだ不十分であり、このモデルの妥当性を実証するには至っていませんでした。

今回、国際共同研究グループは、相対論的流体シミュレーション^[4]と輻射輸送シミュレーション^[5]を組み合わせることによって、大質量星の爆発に伴う相対論的ジェット^[6]からの光球面放射の評価を行いました。その結果、ガンマ線バーストの観測から経験則として知られていた米徳関係が、ジェットが大質量星の外層を突き抜ける際に形成する構造に起因して、自然に再現されることを明らかにしました。この結果は、ガンマ線バーストの主な放射機構が光球面放射であることを強く示しています。

本研究は、英国のオンライン科学雑誌『*Nature Communications*』（4月3日付け：日本時間4月3日）に掲載されました。

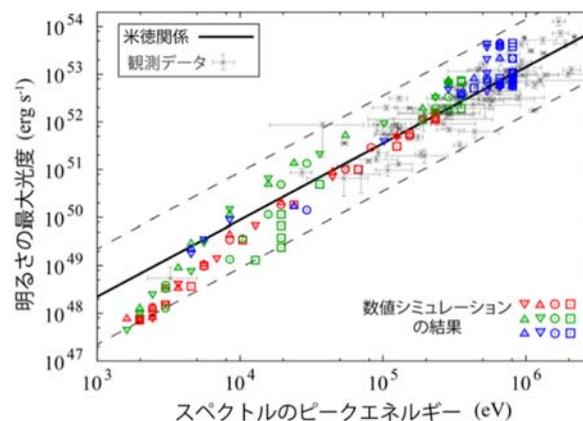


図 米徳関係と数値シミュレーションの結果の比較

※国際共同研究グループ

理化学研究所

開拓研究本部 長瀧天体ビッグバン研究室

研究員 伊藤 裕貴 (いとう ひろたか)

(数理創造プログラム 研究員)

主任研究員 長瀧 重博 (ながたき しげひろ)

(数理創造プログラム 副プログラムディレクター)

数理創造プログラム

研究員 ドナルド・ウォレン (Donald C. Warren)

金沢大学 理工研究域 数物科学系

教授 米徳 大輔 (よねとく だいすけ)

リーズ大学 Faculty of Mathematics and Physical Sciences

Research Fellow 松本 仁 (まつもと じん)

パデュー大学 Department of Physics and Astronomy

Postdoctoral Researcher マキシム・バーコフ (Maxim V. Barkov)

※研究支援

本研究は、日本学術振興会（JSPS）科学研究費補助金若手研究B「相対論的ジェット中の輻射輸送計算に基づいたガンマ線バーストの放射機構の系統的研究（研究代表者：伊藤裕貴）」をはじめ、同国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）「微視的な散逸過程を考慮した輻射輸送計算から探るガンマ線バーストの放射機構（研究代表者：伊藤裕貴）」による支援を受けて行われました。また、本研究は、国立天文台のスーパーコンピュータ「アテルイ」および「アテルイ II」、理化学研究所の「HOKUSAI」、基礎物理学研究所の「Cray xc40」を利用して得られた成果です。

1. 背景

「ガンマ線バースト」は、突発的に大量のガンマ線が降り注ぐ、宇宙で最も明るい天体現象です。その起源は長らく謎となっていましたが、理論・観測的研究の進展に伴い、少なくとも一部のガンマ線バーストは、太陽質量の約10倍以上の大質量星が一生の終わりに爆発する際に噴出する相対論的ジェットによって発生することが分かってきました。しかし、ジェットからガンマ線が放射される物理過程は、最初の発見から約50年経過した現在でも解明されておらず、宇宙物理学の主要な研究課題の一つとなっています。

そのような中で、近年注目を集めている放射機構の理論モデルとして、「光球面放射モデル」があります。光球面放射モデルは、ジェットの内部に捕縛されていた大量のガンマ線が、ジェットが膨張するにつれて解放されることによってガンマ線バーストが発生するというシナリオです。このモデルは、従来の理論モデルでは説明が難しかった特徴を説明できるといった長所があるため、現在有望視されており、多くの研究が行われています。

しかし、理論的な精査はまだ不十分であり、このモデルの妥当性を実証するには至っていません。光球面放射を適切に評価するためには、大質量星の外層と衝突しながら伝搬するジェットから放出されるガンマ線を理論計算から見積もる必要があります。しかし、多くの研究は単純化した状況設定における計算

や、近似的なアプローチを採用しているため、現実的なジェットのダイナミクスを反映した光球面放射の詳細は解明できていないのが現状です。

2. 研究手法と成果

国際共同研究グループは、大質量星（太陽質量の16倍）の中心領域から噴出された相対論的ジェットの光球面放射を、大規模な3次元相対論的流体シミュレーション（図1）および輻射輸送シミュレーションを実行することによって評価しました。

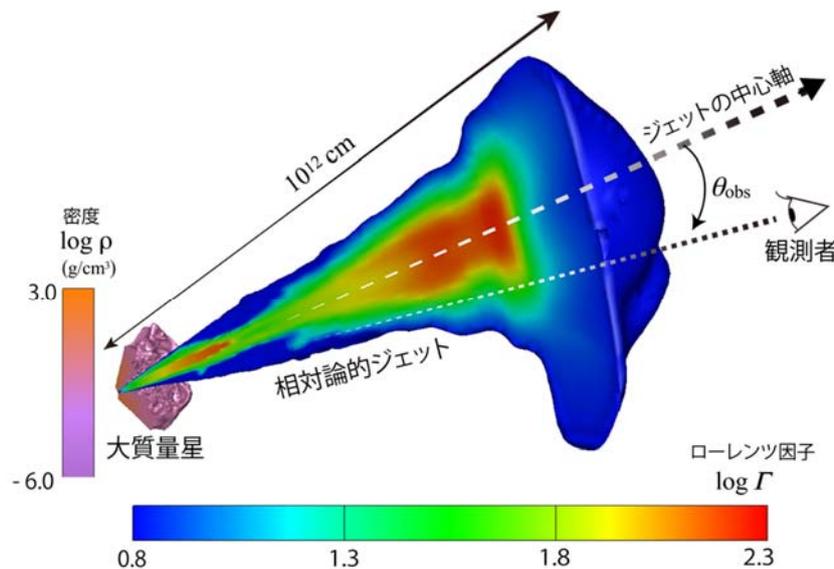


図1 大質量星を突き破るジェットの相対論的流体シミュレーション

星の外層との衝突によって、相対論的ジェットは非一様な構造を形成する。中心軸付近は、エネルギーとローレンツ因子（相対論的な速度の指標）が大きい成分が存在し、中心軸から離れるほどエネルギーとローレンツ因子は小さくなる傾向を示す。観測者は、視線方向上の物質の放射を最も強く検出するため、観測者の見込み角（ θ_{obs} ）が大きくなるほど、エネルギーが低い遅いジェット成分からの放射が観測される。

その結果、ガンマ線バーストの観測から経験則として知られていた「スペクトルのピークエネルギーと明るさの最大光度の間に成立する相関関係（米徳関係）」が再現されることが明らかになりました。ジェットは星の表面を突き破った後に、内部に捕縛していたガンマ線を放出しますが、星の外層物質と衝突することで中心軸から離れるにつれて、エネルギーやローレンツ因子^[7]（相対論的な速度の指標）が小さくなるといった構造を形成します。その構造を反映して、観測者の視線方向が中心軸から離れるほど観測されるピークエネルギーと明るさが共に小さくなり、二つの観測量に相関が生まれます。その相関関係が、ジェットのパワー^[8]や継続時間によらず、ガンマ線バーストの米徳関係とよく整合することが示されました（図2）。

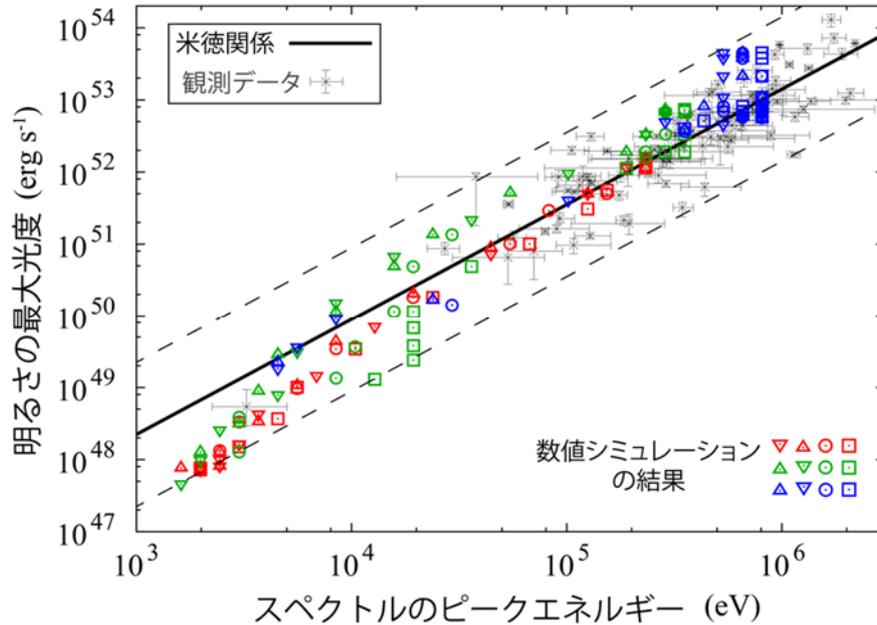


図2 米徳関係と数値シミュレーションの比較

相対論的ジェットの高エネルギー成分の非一様な構造に起因して、スペクトルのピークエネルギーが大きくなるほど、明るさの最大光度は高くなる傾向を示す。その結果、二つの観測の間には相関関係が生まれ、それが観測されている米徳関係をよく再現している。

本研究成果は、現実的な状況設定に基づき光球面放射の詳細な評価を行うと、米徳関係が自然に再現されることを意味しています。米徳関係は、ガンマ線バースト放射の主な成分の普遍的な性質を反映しています。そのため、光球面放射以外の寄与を排除できないものの、この事実はガンマ線バーストの主な放射機構は光球面放射であることを強く示しています。

3. 今後の期待

本研究では、数値シミュレーションによって、ガンマ線バーストにおける米徳関係が光球面放射によってよく再現されることを示しました。この結果は、長年の謎であったガンマ線バーストの放射機構の全容解明につながると期待できます。ガンマ線バーストの放射機構の確立は、大質量星の爆発機構を解明するための重要な第一歩にもなります。

また、本研究は経験則であった米徳関係に理論的基盤を与えており、より精度の高い相関関係式の導出にもつながります。米徳関係は、ガンマ線バーストの観測を宇宙論^[9]の研究に応用する有用なツールにもなっているため、本研究成果の当該分野に対する貢献も期待できます。

4. 論文情報

<タイトル>

The photospheric origin of the Yonetoku relation in gamma-ray bursts

<著者名>

Hiroataka Ito, Jin Matsumoto, Shigehiro Nagataki, Donald C. Warren, Maxim V. Barkov, and Daisuke Yonetoku

<雑誌>

Nature Communications

<DOI>

10.1038/s41467-019-09281-z

5. 補足説明

[1] ガンマ線バースト

突発的に大量のガンマ線（最も高いエネルギー帯域（X線よりも高いエネルギー）の光子の総称）が飛来する、宇宙で最も明るい天体現象。ほぼ毎日観測されている現象であり、銀河系外で起こっている。継続時間が長いものと短いものでロングガンマ線バーストとショートガンマ線バーストの二種族に分類されるが、本研究では大質量星の爆発に関連して発生するロングガンマ線バーストに着目している。

[2] 米徳関係

明るい（最大光度が高い）ガンマ線バーストは、放射の主なエネルギーを保持しているガンマ線のエネルギー（スペクトルのピークエネルギー）が大きいことが経験則と知られており、その相関関係のことを指す。2004年に本研究グループの一員である米徳大輔氏らの研究によって発見され、後に米徳関係と呼ばれるようになった。

[3] 光球面放射

光子が物質による吸収や散乱の影響なく遠方へ到達できるようになる領域（光球面）から発せられる放射。

[4] 相対論的流体シミュレーション

相対論的な流体力学の方程式を、計算機で数値的に解く方法。流速が光の速度に近い場合の流体のダイナミクスを記述するために用いられる。

[5] 輻射輸送シミュレーション

輻射輸送方程式を、計算機で数値的に解く方法。輻射（光子）が物質と相互作用をしながら伝搬する様相を記述するために用いられる。

[6] 相対論的ジェット

ほぼ光の速度で伝搬する、ビームのように細く絞られたアウトフロー。

[7] ローレンツ因子

ほぼ光の速度で運動をしている物体の速さを表す指標。物体は光の速度を超えること

はできないが、そのローレンツ因子は光の速度に近づくほど大きくなり、上限は存在しない。光に比べて十分遅い場合は 1 を示す量であり、この因子が 1 より十分大きくなると相対論的效果が無視できなくなる。

[8] パワー

単位時間あたりに輸送されるエネルギーの量。

[9] 宇宙論

宇宙の起源や進化を探る研究分野。

6. 発表者・機関窓口

<発表者> ※研究内容については発表者にお問い合わせ下さい

理化学研究所

開拓研究本部 長瀧天体ビッグバン研究室

研究員 伊藤 裕貴 (いとう ひろたか)

(数理創造プログラム 研究員)

主任研究員 長瀧 重博 (ながたき しげひろ)

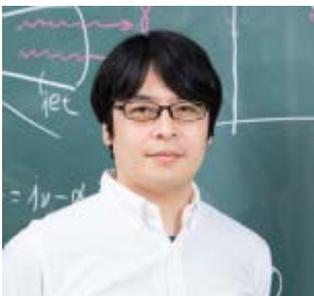
(数理創造プログラム 副プログラムディレクター)

数理創造プログラム

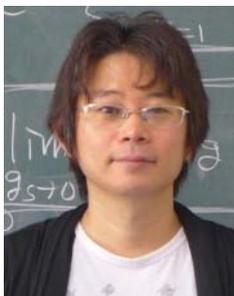
研究員 ドナルド・ウォレン (Donald C. Warren)

TEL : 048-467-9209 (伊藤)、048-467-9381 (長瀧) FAX : 048-462-9881

E-mail : hirotaka.ito[at]riken.jp (伊藤)、shigehiro.nagataki[at]riken.jp (長瀧)



伊藤 裕貴



長瀧 重博



ドナルド・ウォレン

<機関窓口>

理化学研究所 広報室 報道担当

TEL : 048-467-9272 FAX : 048-462-4715

E-mail : ex-press[at]riken.jp

金沢大学 総務部広報室

TEL : 076-264-5024 FAX : 076-234-4015

E-mail : koho[at]adm.kanazawa-u.ac.jp

国立天文台 天文シミュレーションプロジェクト 広報担当

福士 比奈子 (ふくし ひなこ)

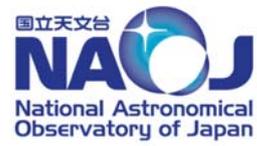
TEL : 0422-34-3836 (研究室)



理化学研究所



金沢大学
KANAZAWA
UNIVERSITY



E-mail : hina[at]cfca.jp

※上記の[at]は@に置き換えてください。
