

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601  
研究種目：若手研究(B)  
研究期間：2012～2013  
課題番号：24740118  
研究課題名(和文) Superluminous Supernova Rates

研究課題名(英文) Superluminous Supernova Rates

## 研究代表者

Quimby Robert.M (QUIMBY, Robert Michael)

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任研究員

研究者番号：10624140

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：高輝度超新星はピーク時の明るさが従来知られている超新星の数百倍となる、稀な超新星である。最近発見され、起源は不明な点が多いが、その明るさから遠方宇宙を探ることができる可能性がある。本研究では、初めて近傍の高輝度超新星の発生頻度を発表した。これは爆発した星の特徴を知る上で重要な手がかりを与える。また、他のグループが「新しいタイプの高輝度超新星」と発表した天体を検証した結果、これが強い重力レンズ現象によって増光されたIa型超新星と発見し、将来同様の現象を発見するための新手法を発表した。このような強い重力レンズを通して観測されるIa型超新星の使用で、ハッブルパラメータの直接測定が可能となるだろう。

研究成果の概要(英文)：Superluminous supernovae are a rare group of objects that have peak luminosities hundreds of times brighter than normal supernovae. They have only been discovered recently, and much is still unknown about their origin. However, their high luminosities make them potentially useful targets for probing the high redshift universe. Through this proposal, we have published the first measurement of the local superluminous supernova rate. This provides an important constraint on the nature of the progenitor systems. We further reclassified an object that was identified by others as a new type of superluminous supernova. We found that the object is actually the first Type Ia supernova seen through a strong gravitational lens, and we published a new technique for identifying more such objects in the future. In the future, such strongly lensed Type Ia supernovae can be used to make direct measurements of the Hubble parameter.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学 天文学

キーワード：高輝度超新星

## 1. 研究開始当初の背景

数年前、超新星研究のコミュニティは、距離指標として宇宙論で使われることで有名な Ia 型超新星の 10 倍の明るさに達した SN2006gy の発見に驚いた。世界のいくつかのチームが、この現象を詳細にわたって研究した結果、光として放出されたエネルギーだけでも 10 の 51 乗エルグを越えることが判明し、従来の理論では説明することが難しかった。SN2006gy の発見の直後、我々はさらに明るい SN2005ap の解析を発表した。SN2006gy では、星から放出され周囲にある水素が多い星間物質との相互作用を示す、細いバルマー線が観測されていたが、SN2005ap では、水素が全く見つからなかった。この発見以来、超新星研究者達は、私が同定した数個の超新星を含め、さらに多くの高輝度超新星 (Super-Luminous Supernova : SLSN) を発見した。高輝度超新星には、周囲の水素ガスと相互作用を起こす SLSN-II 型と、水素が見つからない SLSN-I 型の 2 つの種族があるようだった。

これらの超新星が、どのように大きなエネルギーを放出するかはまだ解明されていないが、我々の最近の研究は、興味深いいくつかの可能性を示している。SLSN-II 型は、疑いなく周囲の物質との相互作用で大きなエネルギーを生み出している。爆発による運動エネルギーを効率よく光に変換しているのである。SN2006gy から放出された全エネルギーを見積もった結果から、重力崩壊によるエネルギーの他にどれくらいのエネルギーが必要か制限することができた。特筆すべきは、SN2006gy が、対不安定型超新星現象 (Pair-Instability) によって質量の大きい核を持つ星が、核爆発を引き起こし、Ia 型超新星のエネルギー源にもなっている放射性物質であるニッケル 56 を大量に生み出した可能性である。SN2006gy は、このような方法でエネルギーを得ていたと考えるには、暗くなるのが速すぎる。しかしながら、非常に多くのニッケル 56 が生み出された可能性は今でも残っている。(最近発見された、SN2007bi は、論争はあるものの、ニッケル 56 が大量に生み出されたと考えられている) これに関連して、ピーク時の明るさと、とても速く暗くなった SN2006gy を説明するモデルとして、脈動する対不安定超新星型 (Pulsational Pair-Instability) モデルも提唱されている。このような脈動は、質量の大きな星が進化の最終段階で起こす現象で、大量の質量を周囲に放出し、これが周囲の星間物質となり、超新星が起こった時に相互作用しているのかもしれない。

このような大量の質量放出が、水素ガスが少ない SLSN-I 型超新星を解明する鍵になるのかもしれない。脈動の第一段階で、水素ガスの層が引き剥がされ星間に放出され、それに続く脈動によって、水素ガスのなくなった層

が星間に広がり殻を作り、最後の超新星爆発の時にこの殻と相互作用して、観測では水素が見えないのかもしれない。以前、論文では SLSN-I 型の半径は、巨星としても大きすぎることを示したが、水素ガスが剥ぎ取られた星と考えると尚更巨大すぎる。超新星爆発からのエネルギー注入の前に、巨大で質量の大きい殻を形成することが必要とされる。私の論文が出た後で、2 つのグループが独立に新しい理論を発表した。この理論によると、周囲に放出されたガスは、まさに生まれようとしているマグネターによってエネルギーが供給されているという。速い速度で自転している中性子星はその回転のエネルギー(10 の 52 乗エルグに達することがある)を磁力を介して周囲の星間物質に注入することができるのである。

SLSN-I 型と SLSN-II 型のモデルで共通の要素は、質量の大きな星が必要であるということである。脈動対不安定超新星爆発には、太陽質量の 90 倍から 130 倍が必要と考えられ、対不安定超新星爆発にはさらに大きな質量、マグネターには若干それらよりも小さい質量が必要とされている。いずれにせよ、このような高輝度超新星は、星の初期質量関数を推定する上で貴重な情報を与えてくれる。宇宙進化の歴史の中で、どのような頻度でこの高輝度超新星が起こるかを調べることによって、全体の星形成史の中で質量関数がどのように進化してきたか知ることができるようになるだろう。これとは独立に、我々は観測的に、これらの超新星はとても明るく、ラインの起伏のない滑らかなスペクトルを持っていることを知っている。このことを利用して、超新星がどのような環境にいるのか、スペクトルに現れる吸収線を使って初期宇宙の見えない世界を探ることができるようになる可能性もあり、どのような環境で高輝度超新星が起こるのか、我々は知ることができるようになるであろう。

## 2. 研究の目的

高輝度超新星は、星形成史や、星の進化、遠方の宇宙を探ることができる可能性を秘めている。この分野の研究は大きく成長しつつある。しかしながら、この現象をよりよく理解するためには、宇宙にあるたくさんの時間変動天体の中から高輝度超新星を抽出しなければならない。本研究の目的は、高輝度超新星を同定する新しい技術を開発し、この技術を使って高輝度超新星の発生頻度を赤方偏移の関数として測定することである。本研究が開発する技術には、撮像された画像から時間変動天体を同定し、その中から背景銀河の寄与を差し引き、数ある候補天体の中から高輝度超新星を検出することも含む。

## 3. 研究の方法

望遠鏡による宇宙探査において、新しい高輝度超新星を発見する第一段階は、時間変動しない銀河や星を取り除くことである。現在は、差分画像、すなわち前夜までに撮像されたデータを重ね合わせた画像と、新しく撮像された画像を正確に揃え、日々刻々と変わる大気によって変動する星像から両者を同じ条件に落として、画像の引き算をしている。原理的には、この差分画像には時間変動する天体だけが残されることになる。しかしながら、現実的には差分画像は不完全で、残された差分の多くは実際の天体ではない。よって、新しい技術を開発し時間変動天体を見つける必要に迫られた。実際、最初の高輝度超新星、SN2006gy、の発見は明るい銀河の中心核付近で、これまでの差分画像処理では問題が多い場所であった。

我々は、超新星を見つける手助けになるかもしれない、新しい検出技術を採用した。我々は重力レンズを研究するチームの力を借りることにした。重力レンズチームは、それぞれの銀河が観測された夜にどれくらい大気によって星像がゆがめられているか、観測されたデータに対応するモデルを見つけることができる。この手法の優れている点は、モデルを決定するのに蓄積されたすべての画像情報を最大限使うことである。従来参照画像を差し引く手法では、質のよいデータだけを参照画像に使っていたので、質の悪いデータの情報は失われていた。重力レンズの解析に使われる手法は、生データの画像も活用する。差分画像では、新しい画像を参照画像上の同じピクセルの上に変換させなくてはならない。この手法は新たなノイズを加えてしまう弱点があり、重力レンズの解析では避けている。

高輝度超新星が同定されると、選択された過程がわかっているならば、体積あたりの発生頻度を決定することができる。あいにく高輝度超新星候補を分光観測（その特徴を知るために不可欠）する為に選択する過程は、系統的には行われていない。人為的な選択が行われている為、なぜこの候補天体が選ばれ、なぜあの候補天体が選ばれなかったのか決定するのはとても難しい。高輝度超新星はその数がとても少ないため、選択効率を決定するのが特に難しい。比較的サンプル数が多い、Ia型超新星が選択バイアスを決めることを可能にしてくれる。観測された分布は、より完全な探査と比較して、我々の選択バイアスを決めることができる。

高輝度超新星発生頻度は、爆発する星のシステムを推定するのに使われる。基本的に高輝度超新星は、爆発する星の死亡率を決めており、高輝度超新星の発生率を説明するのに十分な数の星が形成されていなければならない。観測された高輝度超新星の特徴は、新発見の天体や他の稀な現象を除去することにも役に立っている。これがなくては、他の天体との混在を許してしまうことになるだ

ろう。例えば、高輝度超新星は、その色の取りうる範囲が決まっており、もしある天体が、この色の範囲とかけ離れた色を持っていたとしたら、簡単に見つけ、取り除くことができるであろう。

#### 4. 研究成果

近傍宇宙での高輝度超新星発生頻度の論文を発表した。まず、撮像探査データから高輝度超新星の候補を見つける新しい手法を試した。小さいが、バイアスのないサンプルを使い、近傍における高輝度超新星の発生頻度を測定した。この測定をする為に、まず同じデータからIa型超新星の発生頻度に関する論文を発表した。この過程は、モンテカルロシミュレーションを使って、探査効率と選択バイアスをモデル化ができることを証明するのに必要であった。超新星のうち、2-3晩しか検出されなかったものは、分光観測される可能性が少ないことがわかった。これは、探査の方法から来る帰結ではなく、候補天体を分光観測の為に選択する際の人為的なバイアスである。これまで発表されてきた文献にあるIa型超新星の発生頻度は、このバイアスの影響で、本当の発生頻度を過小評価しているかもしれないことを見出した。

高輝度超新星発生頻度の論文の中で、SLSNは千個の超新星に一つ起こる現象であることを突き止めた。この結果は、超輝度超新星が本当に稀な現象であることを実証している。また、分光観測で、水素ガスが少ないとわかった高輝度超新星のグループは、ピーク時の絶対等級の分布がとても限られていることを示唆する結果を得た。もしこれが本当ならば、高輝度超新星は宇宙論を探る手法として使えるようになるかもしれない。加速膨張を発見したことで有名なIa型超新星よりも遠くの宇宙を探ることができるようになるだろう。

撮像データから高輝度超新星を検出する手法を改善していくにあたって、Palomar Transient Factory (PTF) から数テラバイトもの撮像データを獲得した。新しいデータベースを導入し、データを処理する為の数知れないスクリプトを書いた。例えば、Montage (Caltechが開発した)パッケージに基づき、綺麗な露出の重ね合わせの画像を作った。これらの道具を使って、重力レンズ研究で使われる手法が高輝度超新星の発見に採用できるのかどうか、実験を繰り返した。その結果、この手法は参照画像のある背景銀河を取り除くのに使えることがわかった。将来この手法が従来手法に比べ、有為な結果をもたらすのかどうか、論文化したいと考えている。

高輝度超新星種族に関するの二番目の発生頻度の論文の後、PS1-10afx という名前の新しく発見され、高輝度超新星の一つと提示された天体のことを知った。しかしながら、その距離にしてはとても明るいということ

以外、これまで知られている高輝度超新星と共通する特徴は乏しかった。この天体は、とても赤く、暗くなるのも速く、スペクトルの特徴も違っていた。さらに、これまでの水素のない高輝度超新星と違って、とても明るい銀河の中にあった。この違いは、PS1-10afx が全く新しいタイプの高輝度超新星か、もしくは全く別物かであることを示唆していた。

PS1-10afx のスペクトルに見覚えのある特徴にささやかれ、データを普通のタイプの超新星と比較してみると、とてもよく符号することがわかった。PS1-10afx のスペクトルは、良く知られている Ia 型超新星のスペクトルととてもよく合致した。特に、ケイ素と硫黄を示す証拠があった、これは Ia 型超新星特有であり Ia 型であることを決定づけた。次に、PS1-10afx の測光を調べた。PS1-10afx のデータは、色と光度曲線について普通の Ia 型超新星ととてもよい一致を見せた。しかしながら、決定的に違うことがひとつだけあった。Ia 型超新星の特徴であり、宇宙論を探る上で使われている光度曲線幅と明るさの関係をあてはめてみると、観測された PS1-10afx は、期待される明るさよりも約 30 倍明るいことが判明した。この 30 倍という倍率は、時間にも色にも依拠せず一定であった。

Ia 型超新星種族の均質な特徴と、これまでに Ia 型超新星を理解する為に向けられた研究を鑑み、分光的にも測光的にも驚くほど Ia 型と合致する天体が、異常に高い光度を持っているとは考えにくい。それゆえ、我々は PS1-10afx は実は普通の Ia 型超新星の光度を持っていて、なんらかの外部の要因により見かけ上明るく見えているのではないかという仮説を立てた。これまで知られている、このような宇宙物理学現象を起こすものは、重力レンズである。我々は、この仮説を、重力レンズを起こすのに必要な質量の、予想される位置と大きさの予想と共に、*Astrophysical Journal* 誌に発表した。

その当時入手可能だったデータからは、PS1-10afx が起きた銀河の存在は明らかかなものの、仮説上の重力レンズを同定することはできなかった。よって、我々は重力レンズを起こしている天体を我々の手で見つけることにした。10m のケック望遠鏡を使い、深い分光観測を超新星のあった場所、そして既に暗く消えてしまった場所がかつ背景銀河が見え、まだ見ぬ重力レンズを起こしている銀河のあるべき場所で行った。この新しいデータは、既にその存在がわかっている背景銀河からの光が明確に捉えたのと共に、手前にある第二の銀河の存在も示していた。我々は、重力レンズ仮説が予言した、第二の銀河が視線方向沿いに存在していることを確認したのである。

サイエンス誌で発表した論文では、第二の銀河の存在の証拠と、この銀河が、PS1-10afx の増光を説明できることを示した。手前にあ

った銀河までの距離とその質量は、観測による分離角度と強い重力レンズ作用によって分離された像からの時差からの制限とも合致する。特に、強い重力レンズ作用によって 4 つの超新星の像が形成されたと考えられるが、その分離角は、0.1 秒以下で、Pan-STARRS の超新星探査ではとても分離できない。また、予想された分離した像からの時間差も、一日よりも短く、これは探査データからでは短すぎて検出できなかったはずである。

これは、Ia 型超新星もしくは、標準光源が強い重力レンズ作用を受け増光された初めての観測である。我々の論文の中では、重力レンズを受けた超新星をどうやって選択するかという新しい手法についても発表した。これによって、将来このような発見は 10 倍程度の数で見つかると思われる。重力レンズは背景の天体を明るくするが色は変えない。それゆえ増光された遠方の超新星は、同じみかけの明るさの超新星の中で、とても赤いものを探せば検出できるはずである。

重力レンズによって分離された像と像の間で観測される時間差は、宇宙の膨張速度であるハッブル定数に比例する。よって、我々の結果は将来計画されている LSST などによって、宇宙膨張速度をより精密に測定することに繋がるかもしれない。

## 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5件)

Robert M. Quimby, Masamune Oguri, Anupreeta More, Surhud More, Takashi J. Moriya, Marcus C. Werner, Masayuki Tanaka, Gaston Folatelli, Melina C. Bersten, Keiichi Maeda, Ken'ichi Nomoto, "Detection of the Gravitational Lens Magnifying a Type Ia Supernova", *Science*, 344, 396-399 (2014) 査読有  
Maeda, K.; Nozawa, T.; Sahu, D. K.; Minowa, Y.; Motohara, K.; Ueno, I.; Folatelli, G.; Pyo, T. S.; Kitagawa, Y.; Kawabata, K. S.; Anupama, G. C.; Kozasa, T.; Moriya, T. J.; Yamanaka, M.; Nomoto, K.; Bersten, M.; Quimby, R.; Iye, M., "Properties of Newly Formed Dust Grains in the Luminous Type I In Supernova 2010jl", *Astrophysical Journal*, 776, 5 (2013) 査読有  
Quimby, Robert M.; Werner, Marcus C.; Oguri, Masamune; More, Surhud; More, Anupreeta; Tanaka, Masayuki; Nomoto, Ken'ichi; Moriya, Takashi J.; Folatelli, Gaston; Maeda, Keiichi; Bersten, Melina, "Extraordinary

Magnification of the Ordinary Type Ia Supernova PS1-10afx”, 768, 20-25 (2013) 査読有  
Quimby, Robert M.; Yuan, Fang; Akerlof, Carl; Wheeler, J. Craig, “Rates of superluminous supernovae at  $z \sim 0.2$ ”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 431, 912-922 (2013) 査読有  
Quimby, Robert M.; Yuan, Fang; Akerlof, Carl; Wheeler, J. Craig; Warren, Michael S., “On the Rates of Type Ia Supernovae in Dwarf and Giant Hosts with ROTSE-IIIb”, Astronomical Journal 144, 177-193 (2012) 査読有

〔学会発表〕(計7件)

Quimby, Robert M., “Discovery of a Gravitationally Lensed Type Ia Supernova”, すばるユーザーズミーティング FY2013, 2014年1月23日, 国立天文台(東京都三鷹市)  
Quimby, Robert M., “Discovery of Gravitationally Lensed Type Ia Supernova”, American Astronomical Society Meeting, 2014年1月8日, 米国・ワシントン特別行政区  
Quimby, Robert M., “Superluminous Supernovae”, WISH Meeting, 2013年12月2日, 国立天文台(東京都三鷹市)  
Quimby, Robert M., “Superluminous Supernovae”, iPTF Workshop, 2013年8月13日, 米国・カリフォルニア州パサデナ  
Quimby, Robert M., “Superluminous Supernovae”, Cook's Branch Astronomy Workshop, 2013年4月8日, 米国・テキサス州  
Quimby, Robert M., “Superluminous Supernovae”, IAU Symposium 296, 2013年1月8日, インド・ライチャック  
Quimby, Robert M., “Superluminous Supernovae”, Palomar Transient Factory Team Meeting, 2012年7月6日, 米国・カリフォルニア州サンタバーバラ

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ:

<http://member.ipmu.jp/robert.quimby/>

メディアによる報道:

(NHK; 和文)

<http://www9.nhk.or.jp/kabun-blog/200/186345.html>

(共同通信; 和文)

<http://www.47news.jp/CN/201404/CN2014042401001852.html>

(BBC; 英文)

<http://www.bbc.com/news/science-environment-27118405>

(ナショナルジオグラフィック; 英文)

<http://news.nationalgeographic.com/news/2014/04/140424-superbright-supernova-gravitational-lens-science/>

(Space.com; 英文)

<http://www.space.com/25617-bright-supernova-mystery-cosmic-lens.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

QUIMBY, Robert Michael

東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構・特任研究員

研究者番号: 10624140

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし