

Suprime-Cam による Ia 型超新星観測

土 居 守

〈東京大学理学系研究科 〒181-0015 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: doi@ioa.s.u-tokyo.ac.jp

安 田 直 樹

〈東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構 〒277-8583 千葉県柏市柏の葉 5-1-5〉

e-mail: naoki.yasuda@ipmu.jp

Suprime-Cam は Ia 型超新星を用いた観測的宇宙論および Ia 型超新星の親星の研究において活躍をした。特に遠方超新星の探査能力はハッブル宇宙望遠鏡と双璧をなし、多数の超新星を発見したため、出現率の研究などにおいて世界最先端の結果を得た。一方で、測光精度においては、僅かな明るさの変化を測るには十分でなく、Suprime-Cam 単独では最大光度を精度よく測ることができなかった。Suprime-Cam を通しての Ia 型超新星の研究は HSC によってさらに飛躍を遂げようとしている。

1. コンタクト

すばる望遠鏡は 8-10 m 級望遠鏡唯一の本格的な主焦点を有する *1 という点で、望遠鏡完成前から、海外からの期待は大きく、Ia 型超新星を用いた観測的宇宙論的な研究において競っていた二つのグループ双方からコンタクトがあった。最初にコンタクトがあったのは、Supernova Cosmology Project (SCP) のリーダー、ローレンス・バークレイ国立研究所の Saul Perlmutter 博士で、1997 年 8 月に京都で開催された国際天文学連合総会の際に来日、岡村定矩東京大学教授（現 法政大学）と土居で面談をした。Perlmutter 博士から、遠方の Ia 型超新星が見つかり始めていること¹⁾、また宇宙項を含めた宇宙の物質エネルギー密度パラメータを制限するための定量的な検討が進んでいること²⁾の説明があった。実は Suprime-Cam

開発の出発点として木曾観測所のシュミット望遠鏡用に製作したモザイク CCD カメラ 1 号機³⁾の開発をまず行った関口真木博士（当時国立天文台助手）は、カメラが完成するとすぐに、遠方超新星を観測して宇宙論研究を行おうとした。しかしながら、しばらく努力をしたが発見できず、銀河観測を中心に研究を進めることとなった。実は断念した直後、Mark Philips 博士が Ia 型超新星の絶対光度と光度曲線の相関を発見⁴⁾、宇宙論的距離指標としての精度が格段に向上していた。そして Perlmutter 博士らが遠方超新星を発見し始めたということで、Suprime-Cam が完成すれば、素晴らしい展開が期待できそうだと、共同研究に向けて相談を開始、土居・安田を中心に準備を進めることとした。

ところが、しばらくたった 1999 年 9 月、超新星の理論研究の世界的権威の東京大学理学部天文

*1 他の望遠鏡は主焦点に小型の装置しか搭載できないが、副鏡を用いて焦点を合わせており、一般に視野が狭くなる。

学教室の野本憲一教授（現カブリ数物連携宇宙研究機構）を訪ねてきた High-Z Supernova Search Team (High-Z チーム) のリーダーの Brian Schmidt 博士から、やはり、超新星観測による宇宙論研究への参加の誘いが Suprime-Cam チームにあった。できるだけ多くの成果を出していくには両方のチームにメンバーが入るのが良いはずであったが、すでに SCP と共同研究の準備を始めていたため、競い合っている 2 チームの独立性を重視し、High-Z チームに参加をすとしたら、土居・安田以外のメンバーを紹介し、両チームに分かれることにしたい、と Schmidt 博士に返答した（内々に「真田家計画」と呼んでいた）。結局、Schmidt 博士からは、High-Z チームにはハワイ大学のメンバーがいて、すばる望遠鏡の観測時間へ応募が可能であるので、無理には Suprime-Cam チームからメンバーを必要としないと連絡があった。その結果、Suprime-Cam チームは SCP とのみ共同研究を進めていくことになった（図1がその様子である）。超新星探索のため最も重要だったのは、Suprime-Cam の画像同士を差し引いて増光を見つけるソフトウェアで、安田が SCP のメンバーから情報をもらって開発を行った。

2. 2001 年の探査

最初の観測は、2001 年の春の観測であった。Suprime-Cam の開発チームには、性能試験観測時間が 20 夜与えられていた。そのうちの 8 時間分を使って超新星探索のために繰り返し撮像を行うこととし、追加分光観測のために共同利用観測提案を行い、2001 年前期 (S01A) で FOCAS を 2 夜分使用できた。共同利用提案は土居・安田・Perlmutter 博士に加え、FOCAS の開発を中心におこなった柏川伸成氏・測光から天体の距離を決める研究を行っていた古澤久徳氏であった。その結果、3 個の赤方偏移 $z \sim 1$ の Ia 型超新星候補を発見、そのうち 1 個 (SN 2001cw) は最大光度前の赤方



図1 2002年にハワイ島・ワイメアのKeck望遠鏡基地で、Suprime-Camで発見した超新星候補をKeck望遠鏡ESIで分光観測するため準備をするPerlmutter博士・安田・土居（撮影：諸隈智貴）。

偏移0.95のIa型超新星で、ハッブル宇宙望遠鏡 (HST) による追加測光観測を行い、Suprime-Camで発見した超新星による宇宙論的な測定に初めて成功した⁵⁾。なお、2001年後期 (S01B) の提案前には、土居と安田がSCPの正式メンバーとなった。

3. 2002年の探査

2002年の春は2001年と同様に1カ月の間において同じ領域を観測する手法で7視野を*i*バンドで観測した。そのうち、1領域はSubaru Deep Fieldであった。発見した55個のIa型超新星候補のうち、13天体を分光観測した。内訳は、VLT/FORS2で5個、Keck/ESIで2個、Gemini/GMOSで5個、Subaru/FOCASで2個（1天体は2回観測された）である。さらに、2天体についてはVLT/ISAACでJバンドでの撮像も行った。このうち、赤方偏移が0.8–1.1のIa型超新星と確認できた4個について、光度曲線が描けるように、HST/ACSのフィルター F775W, F850LPで、約10日おきに5回の撮像観測を行った。

2002年の秋にはSubaru XMM-Newton Deep Survey (SXDS) とインテンシブプログラムの一部を使ってSXDSの5視野を観測した。このとき

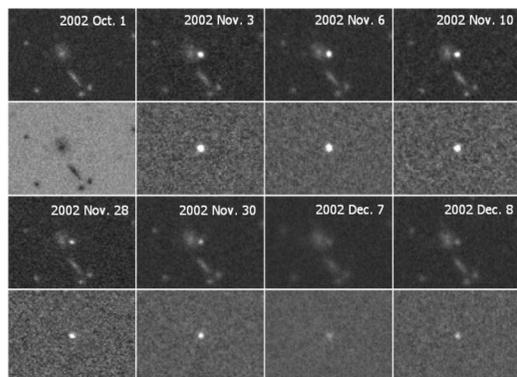


図2 Suprime-Camで観測したSN2002kp(赤方偏移0.928)の約2か月間の時間変化の様子。最上段・3段目のパネルが直接画像, 2段目・最下段のパネルが差分画像である。2段目左端は参照画像として使った2002年10月に取得した画像である。

は、すばる望遠鏡のデータで光度曲線が描けるように、*i*バンドで、10月初めに参照画像を撮ったあと、11月初めのランで2回、11月終わりから12月初めのランで2回の観測を繰り返し行った。*z*バンドでも11月に2回の観測を行った。この観測でも100個程度の変動天体が見つかり、41天体をIa型超新星候補とし、25天体を分光観測した。内訳は、VLT/FORS2で13個、Keck/ESIで11個、Gemini/GMOSで4個、Subaru/FOCASで2個(重複を含む)である。このうち、赤方偏移が1.0-1.3のIa型超新星と確認できた5個について、HST/ACSあるいはHST/NICMOSでの観測を複数回行った。

1視野に多数の超新星が見つかったこともあり、サイエンスの結果が出る前ではあったが、これらの成果は東京大学理学系研究科を通して、プレスリリースを行った。図2は発表した資料の一部であるが、分光観測で赤方偏移が0.928のIa型超新星と確認された超新星の時系列の画像である。差分画像を作るプログラムはうまく動作し、変動成分である超新星だけが残っている。

これらのデータは宇宙論のために利用する予定であったが、Suprime-Camでの測光精度を十分

詰めることができず、また、高赤方偏移の超新星については、光度曲線のピーク前の観測が十分ではなかったりしたため、宇宙論に使用できる結果を得るには至らなかった。測光精度が十分ではなかった原因は、観測日によって異なるシーイングの効果を精度よく補正できなかったことや、観測当時はSloan Digital Sky Survey (SDSS)もサーベイの初期段階で絶対較正をするための参照カタログが整備されていなかったなどが考えられる。ただ、測光精度があまり必要ない発生頻度に関する研究は進めることができた。SXDS領域での測光精度については、その後、SDSS DR8のデータと比較することで、八木らによって詳細に調べられている⁶⁾。

4. すばるの超新星宇宙論への貢献

遠方超新星を用いた宇宙論的パラメータの推定は、大気の影響がなく、超新星をシャープな点源として観測が可能なハッブル宇宙望遠鏡を用いた撮像(一部スリットレス分光)観測と、集光力の大きい8-10 m級望遠鏡による分光観測により、暗黒エネルギーが約7割・物質(暗黒物質を含む)が約3割の宇宙膨張モデルとよくあうことがHST Higher-Z SN team (High-Z チームを Riess 博士がハッブル宇宙望遠鏡を中心に発展させたチーム)とSCPの二つのグループによって示され、2011年12月(10月発表)にノーベル物理学賞がPerlmutter博士・Schmidt博士・Riess博士に授与された。すばる望遠鏡においては、暗い点源の可視光分光が8-10 m級望遠鏡で最も強力なFOCASがSuprime-CamよりもむしろSCPの宇宙論的パラメータ推定に高く貢献した。特に2005年よりSCPに博士研究員として参加した鈴木尚孝博士(現・東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構)を中心に、暗黒エネルギーが約7割含まれる際に予想される遠方超新星の明るさの反転(高赤方偏移で再び明るく見え始める)をHigh-Z チームと独立に示した⁷⁾。新たに見つかった

12個の遠方超新星のうち5個が、FOCASによって分光されている。

5. 超新星出現率

一方で、Suprime-Camのデータは、Ia型超新星の起源の手がかりを得るには最適のデータとなった。超新星探査能力で言えば、当時は口径3.6 mのCFHTに搭載されたMegacamと、口径2.5 mのSDSSの広視野カメラが、それぞれSuprime-Camの約75%および約50%の探査能力(視野×集光力)を有し、望遠鏡時間の大部分をサーベイ観測に用いていた。Suprime-Camは、これらの望遠鏡に比べ使える観測時間は少なかったが、より暗く遠い変光観測で威力を発揮し、1時間積分をすると典型的には25.5等(i_{AB})の明るさの変動を捉えることができた。明るさが変わる天体数は1平方度あたり約1,000個、活動銀河核と超新星がそれぞれ半分ずつ程度であると諸限らが示した⁸⁾。さらに戸谷らは、母銀河を調べることによってIa型超新星が生まれて爆発するまでの時間ごとの超新星数(Delay Time Distribution)は時間 t の逆数にほぼ比例し、重力波放出により白色矮星連星が合体する際のタイムスケールとほぼ同じことを示した⁹⁾。さらに奥村らはIa型超新星の出現率の時間(赤方偏移)に対する変化を赤方偏移1.4まで調べ、統計誤差が大きいもののほぼ単調に増加している結果を得た¹⁰⁾。Ia型超新星は、連星系にある白色矮星が、伴星から質量を徐々に得てチャンドラセカール質量に近づいて熱核暴走をする現象であることはほぼ一致した見解となっているが、相手の星が白色矮星なのか、赤色巨星なのか、主系列星なのか、あるいはこれらが混じっているとしたらどのような割合なのかについて長く議論が続いてきている。Suprime-Camによるこれらの研究は、Ia型超新星の親星の理解に向けて貴重な統計的な観測結果を提供した。

6. HSCへ向けて

すばる望遠鏡ではその後Hyper Suprime-Cam(HSC)が完成した。HSCではSDSSおよびLSSTのデータ解析ソフトの開発を主導しているプリンストン大学の協力も得て、大規模なサーベイデータを解析処理するためのソフトウェアが開発された。HSCのすばる戦略枠では弱重力レンズ効果による宇宙論が主な科学目標であるので、Point Spread Functionの測定には気が遣われており、測光較正のための外部カタログとしてPan-STARRS1のカタログを使い、測光精度は1%のレベルを達成しようとしている。また、戦略枠のうち、UltraDeep領域では総計の積分時間がバンドごとに7-19時間であるので、それらを分割することで、多色で長期間にわたる変動天体サーベイを実現することができる。実際、2016年11月から2017年4月にかけて、COSMOS領域で g, r, i, z, y の5バンドで各2エポック/月の観測を実施した。HSCの広視野もあり、約1,000個の超新星候補が見つかり、光度曲線の解析から約200個がIa型超新星と考えられている。

また、Ia型超新星の親星の謎に迫るため、爆発直後のIa型超新星の探査も開始、東京大学理学系研究科博士課程のJiangらは爆発後わずか約0.5日のIa型超新星の発見に成功した¹¹⁾。この超新星は初期に通常よりも明るく赤い増光を示し、また最大光度付近のスペクトルが通常のIa型超新星のスペクトルの特徴に加え、チタンなどの低温成分が顕著にみられることから、ヘリウムの薄い外層がまず核燃焼を開始し、その結果白色矮星の中心付近で熱核暴走を開始したと解釈できる。同様のスペクトルを示すIa型超新星はごく僅かな割合であるが、新たな爆発のしくみを発見したという点で画期的なものであり、またHSCがIa型超新星の起源を解明するうえでたいへん強力であることを示した。

このように、Ia型超新星に関係した宇宙論的あ

るいは親星の研究は、HSCというSuprime-Camの10倍近い探査能力をもつカメラが完成したことにより、飛躍的に発展をしようとしている。

参考文献

- 1) Perlmutter S., Gabi S., et al., 1997, ApJ 483, 565
- 2) Goobar A., Perlmutter S., 1995, ApJ 450, 14
- 3) Sekiguchi M., Iwashita H., Doi M., Kashikawa N., Okamura S., 1992, PASP 104, 744
- 4) Philips M., 1993, ApJ 413, L105
- 5) Amanullah R., Lidman C., et al., 2010, ApJ 716, 712
- 6) Yagi M., Suzuki N., Yamanoi H., Furusawa H., Nakata F., Komiyama Y., 2013, PASJ 65, 22
- 7) Suzuki N., Rubin D., et al., 2012, ApJ 746, 85 (2011年7月6日受理)
- 8) Morokuma T., Doi M., et al., 2008, ApJ 676, 163
- 9) Totani T., Morokuma T., Oda T., Doi M., Yasuda N., 2008, PASJ 60, 1367
- 10) Okumura J. E., Ihara Y., et al., 2014, PASJ 66, 49
- 11) Jiang J., Doi M., et al., 2017, Nature 550, 80

Observations of Type Ia Supernovae with Suprime-Cam

Mamoru Doi

Institute of Astronomy, School of Science, The University of Tokyo

Naoki YASUDA

The Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe, The University of Tokyo

Abstract: Suprime-Cam was actively used for supernova cosmology and for studying the origin of Type Ia supernovae. The survey power of Suprime-Cam was comparable to the imagers of the Hubble Space telescope. Many distant supernovae were found with Suprime-Cam, and the observational data were used, for example, to estimate the supernova rate. Photometric accuracy of Suprime-Cam, on the other hand, was not good enough to constrain the cosmological parameters. Recently more powerful HSC takes over the role and enhances the various activities that are carried out with Suprime-Cam.