

重力レンズで最遠方超新星残骸を発見

濱野 哲史

〈東京大学大学院理学系研究科 天文学教育研究センター 〒181-0015 東京都三鷹市大沢2-21-1〉
e-mail: hamano@ioa.s.u-tokyo.ac.jp



宇宙論的遠方のクエーサーのスペクトルには、クエーサーの手前にたまたま存在する銀河中のガス雲の吸収線が検出される。特に、重力レンズ効果で複数像に分裂した「重力レンズクエーサー」を分光観測することで、本来小さくて見えなかったガス雲が拡大され、その構造を調べることが初めて可能になる。われわれは、すばる望遠鏡に搭載された近赤外線分光撮像装置IRCSを用いて、重力レンズクエーサーの中でも特に拡大効果が強いB1422+231を観測し、レンズ像A, Bを分解した近赤外線スペクトルを取得することに初めて成功した。検出された118.5億年前のガス雲の大きさや運動を詳細に調べた結果、そのガス雲は最遠方の超新星残骸であることがわかった。ガス雲の吸収線だけからその正体に迫った本研究は、重力レンズを用いた手法の高いポテンシャルを示したものである。

1. 遠くのガス雲を“影”で見る

近年の大型望遠鏡の活躍によって銀河の形成、進化についての理解は飛躍的に進んできたが、その詳細な過程についてはいまだわかっていないことが多い。大雑把に言えば、銀河はまずガスから星を形成し、一部の星は超新星爆発などを通して星としての一生を終えて再びガス中に還っていくという物質のサイクルを繰り返して進化する。したがって、銀河の進化を理解するにはその光度のほとんどを担う「星」だけでなく、その星の素となる「ガス」の性質も相補的に調べる必要がある。しかし、銀河が活発に形成された100億年以上前のガスは非常に暗く、望遠鏡で直接観測することは困難であり、その理解はほとんど進んでいないのが現状である。

しかし遠方の宇宙には、近傍には見られない「クエーサー」という明るい灯台のようにガス雲を照らし出してくれる天体が多く存在している。クエーサーとは銀河中心に存在する大質量ブラッ

クホールを取り巻くガスの円盤によって光を放射している天体の一種であり、銀河系全体の1,000倍程度にも及ぶ非常に高い光度で、幅広い波長帯の光を放射する。図1のようにクエーサーの明るい光がわれわれとの間にある銀河に付随するガス雲を通ったら、ガス雲に含まれる多様な原子やそれからなる分子などによってそれぞれに特徴的な波長(色)の光が吸収されスペクトル上に「吸収線」と呼ばれる細い凹みが多数現れる。このようにクエーサーの光に照らされ、そのスペクトル上に投影された“影”のようにして検出されるガス雲は「クエーサー吸収線系」と呼ばれており、宇宙論的遠方においてガス雲を調べられる唯一の方法として盛んに研究されている天体である。

クエーサー吸収線系の観測は、さまざまな原子・イオンの吸収線から遠方ガス雲の化学組成や運動などユニークな情報が得られる代わりに、ガス雲の全体像を見ることはできないという欠点がある。クエーサーがガス雲全体を照らし出してくれるくらい大きければよいのだが、残念ながらクエー

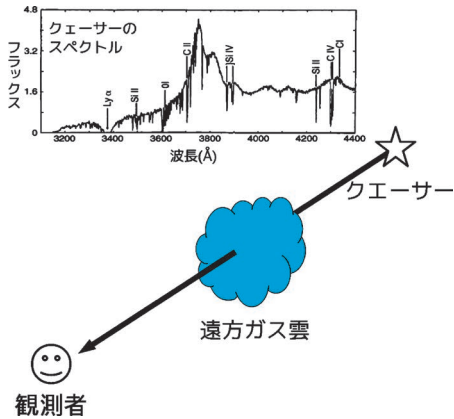


図1 クエーサー吸収線系の模式図. クエーサーからの光が手前のガス雲の中を通るとクエーサーのスペクトル (左上図) 上にさまざまな原子, イオンによる多くの吸収線が検出される. スペクトルはSchneider “Extragalactic Astronomy and Cosmology” 中の図より¹⁾.

クエーサーは非常に小さい天体であるためガス雲の1点しか照らしてくれない. そのため, ガス雲の形や大きさなど天文学的に重要な情報を調べることが原理的にできないのである.

2. 宇宙に浮かぶ巨大レンズ

しかし, クエーサーの中にはガス雲の全体とまではいかないがガス雲の数カ所を照らしてくれる「重力レンズクエーサー」という珍しい天体がある. 重力レンズクエーサーとは, クエーサーの光が地球に届くまでに偶然銀河や銀河団などの強い重力源の近くを通ると, 一般相対論的な効果によって光が大きく曲げられて複数の像に分裂して見える特殊な天体のことを指す. 図2にその模式図を示した. 図中では一つのクエーサーから放たれた光が2方向から観測者に届き, 観測者にとってはあたかも二つの別々の天体から光がやってきたように見える. この像の数は図に示したように二つである天体が多いが, 場合によっては三つや四つに分かれているものもある. この像の分裂を引き起こしている重力レンズ効果は1936年にアインシュタインによって予言されたもので²⁾, 重

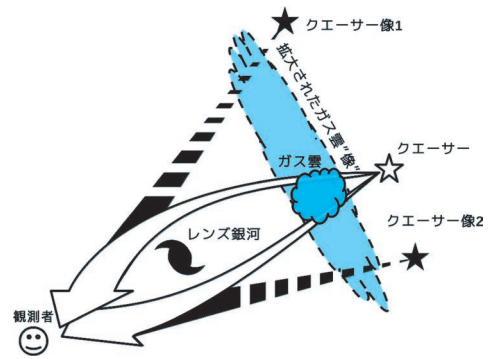


図2 重力レンズクエーサーの像の分裂と, それを利用したガス雲の観測の概念図. クエーサーからの光は実際は白矢印のような経路をたどっているが, それを受け取る観測者にとってはあたかも黒色の星で示した二つの像からやってくるように見える. それに伴って手前のガス雲も拡大されて見える.

力レンズクエーサーはその予言から半世紀近く経った1979年になってようやく一つ発見された³⁾, 比較的歴史の浅い天体種族の一つである. 現在ではさまざまなサーベイによって約100天体強が見つかっている⁴⁾.

図2のように, この重力レンズクエーサーとわれわれの間にガス雲が存在していると, 分裂した複数像の光はガス雲中の異なる場所を通って観測者に届く. ガス雲の中心のほうを通った像のスペクトルを調べれば強い吸収線が検出されるだろうし, 端のほうを通った像のスペクトル上には相対的に弱い吸収線が検出されるだろう. あるいは, ガス雲の中で化学組成にむらがあれば吸収線にもそのむらが反映されるだろう. このように重力レンズクエーサーを用いることで, 一般的なクエーサーの観測では決して得られなかったガス雲の空間的な情報を得ることができる.

また, 図2のように観測者から見るとガス雲はあたかも大きく拡大されたように見える. 重力レンズクエーサーはまさにその名の示すとおり, “宇宙空間に浮かぶ巨大なレンズ” としてガス雲を時には何百倍にも拡大してくれる. このレンズ

効果を利用することで、100億光年以上先の非常に遠い宇宙にあるガス雲であっても、数光年から数十光年の距離スケールの非常に小さな構造にまで分解して観測することができる。

われわれはこれらの特徴をもった重力レンズクエーサーに着目し、すばる望遠鏡に搭載された近赤外線分光撮像装置IRCSを用いて重力レンズクエーサーの高分散分光観測を行うことで、100億年以上前の形成途上にある銀河に付随したガス雲の空間構造を調べている。近赤外線という波長帯を用いるメリットは二つある。一つは、マグネシウムや鉄の吸収線をはじめとして多くの重要なイオンの吸収線が、われわれが対象としている遠方の宇宙（赤方偏移 z が3以上）においては近赤外線まで赤方偏移することである。もう一つは、近赤外線は大気の擾乱を受けにくく星像がシャープになるため、典型的に1秒角（1度の3,600分の1という非常に小さな角度）程度しか離れていない近接した重力レンズ像を分解して観測できる高い視力が実現できるという点である。本稿では、その最初の1天体として観測したB1422+231という重力レンズクエーサーの視線上に検出された118.5億年前のガス雲についての研究結果⁵⁾について紹介する。

3. 重力レンズクエーサー B1422+231

3.1 宇宙最大級の「レンズ」を使った観測

B1422+231は1992年に発見された重力レンズクエーサー⁶⁾で、近赤外線ではすべてのクエーサーの中で2番目に明るい天体である。図3は近赤外線取得されたB1422+231の画像を示している。A, B, C, D像の四つのレンズ像に分裂しており、クエーサー自身は119億光年先($z=3.628$)に位置している。

その明るさもさることながら、B1422+231の最大の特徴はその大きな拡大率にある。重力レンズの拡大率はレンズ銀河とクエーサー、観測者の位置関係とレンズ銀河の質量（分布）で決まるの

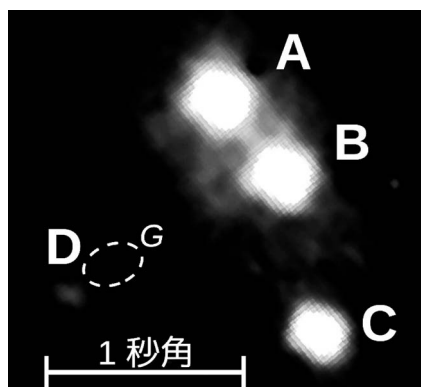


図3 B1422+231の画像。すばる望遠鏡とIRCS+AO（補償光学装置）を用いて筆者らによって取得された。この画像では検出できていないが、レンズ像A, B, C, Dに加えて、破線で表示した位置にレンズ銀河（G）が存在していることが知られている。

だが、B1422+231のレンズ銀河（図3中の“G”）は37.1億光年先($z=0.339$)とクエーサーと比較して観測者の近くに位置しているため拡大率が特に大きくなる。その値は現在までに100天体ほど見つかった重力レンズクエーサーの中でも特に大きく、まさに宇宙最大級のレンズと呼ぶことができよう。その発見以降、B1422+231はその明るさと拡大効果によって遠方ガス雲の詳細な構造を調べるツールとして用いられ、数本の論文が相次いで出版された⁷⁾⁻⁹⁾。

なかでも、Michael Rauch氏はハワイ・マウナケア山頂にあるKeck I 10 m望遠鏡の可視光高分散分光器HIRESを用いて取得されたB1422+231のA, C像のスペクトルを調べ、118.5億光年先に位置しているガス雲が非常に小さなスケールで構造をもっていることを発見した⁹⁾。A, C像の光線間の距離はそのガス雲の位置でわずか22パーセク（1パーセクは約3.26光年）ほどしか離れておらず、角度にしてわずか1ミリ秒角（1秒角の1,000分の1）に対応する非常に小さなスケールである。まさに、重力レンズクエーサーの拡大効果を最大限に利用できるユニークな天体と言える

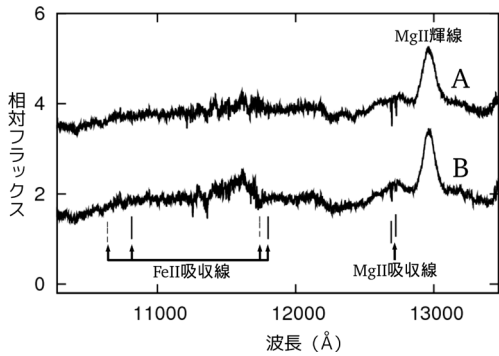


図4 解析の結果得られたB1422+231の近赤外線スペクトル（波長分解能は10,000）. 13,000 Åに見られるマグネシウム（Mg II）輝線はクエーサー自身が放出しているもの. その手前に位置しているガス雲による強いマグネシウム（Mg II）吸収線や弱い鉄（Fe II）吸収線がそれぞれのスペクトルに検出されている.

だろう.

Rauch氏がその論文を発表した1999年当時、筆者の指導教員である小林尚人氏はハワイでIRCSの開発に携わっており、完成したその装置を用いて2002年、2003年の2回に分けてB1422+231のA、B像を高い空間分解能で観測し、その近赤外線スペクトルを取得することに成功した。可視光は地球大気の影響を強く受けるため、0.5秒角しか離れていないA、B像を分解したスペクトルを取得するのは難しかったが、大気の影響を受けにくい近赤外線を用いたことに加え、すばる望遠鏡の優れた星像を活かすことで観測が可能になった。近赤外線の波長帯には、Rauch氏が発見した118.5億光年先のガス雲によるマグネシウムと鉄の吸収線が検出されることが期待され、A、C像の可視光スペクトルと合わせて三つの像の情報をうると、ガス雲の詳細な構造や化学組成を調べられる。筆者は大学4年生になった2009年に小林尚人氏に指導を仰ぐことになり、卒業研究のテーマとしてこの天体のデータ解析に取り掛かることになった。

3.2 すばるIRCSのスペクトル

解析の結果を図4に示す。スペクトル全体に見

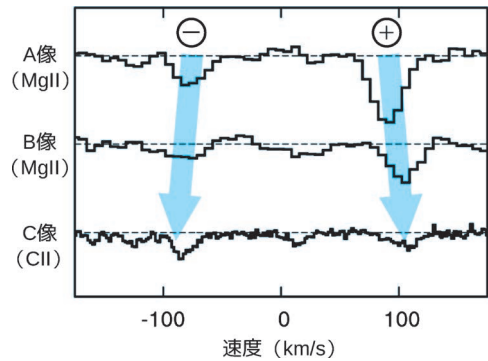


図5 A、B像に検出されたマグネシウム吸収線のスペクトル. Rauch氏提供のC像可視光スペクトルに検出された炭素の吸収線も合わせて表示した. 横軸は光のドップラー効果による波長の変化を速度に変換して表示している. ある速度を基準にとって0 km s⁻¹とし、そこから観測者に向かって運動しているガスの吸収線（“-”）と、観測者から離れるように運動しているガスの吸収線（“+”）がそれぞれすべてのスペクトルに検出されている. 2本の吸収線が対称に変化している様子が見えている.

られる輝線（13,000 Åに見られるマグネシウム輝線が顕著）がA像とB像で全く同じ位置、形をしているのは、まさにこれらの像が一つの同一のクエーサーから放出された光であることを示している。この縮尺だとノイズに紛れていてわかりにくいですが、スペクトルの下に印を付けた位置に118.5億光年先のガス雲中のマグネシウムや鉄による吸収線が検出された。このマグネシウム吸収線を拡大して表示したものが図5である。A、B像のマグネシウム吸収線と一緒にRauch氏によって取得されたC像に検出された炭素の吸収線も並べて表示した。ガスが運動していると吸収線の波長は光のドップラー効果によって本来の波長からずれた位置に現れる。ガスが観測者に向かってくる運動をしていると波長は短くなり、反対に遠ざかっていく運動をしていると波長は長くなる。このスペクトルでは、ある適当な波長を基準に取りドップラー効果を計算して、横軸を波長から相対速度に変換している。

まずこのスペクトルを見ると3像すべてに2本の吸収線が検出されており、約 200 km s^{-1} の相対速度で運動していることがわかる。次に各像間での違いを見てみると、A像からC像に向かうにつれて2本の吸収線の速度（の絶対値）はどちらもだんだんと大きくなっており、吸収線の深さはだんだんと浅くなっていることがわかる。速度の異なる複数の吸収線が検出されたらその数だけお互い無関係のガスの塊があると考えるのが自然だが、このように2本の吸収線がある速度（ 0 km s^{-1} ）を中心に対称的な変化を示していることは、これらが物理的に関連のあるガスであることを示唆している。このような吸収線が見つかることはたいへんまれで、それが118.5億光年先という遠方宇宙において数光年程度と非常に小さなスケールで見られたことはそれだけでもたいへん興味深い天体である。さて、このような観測された吸収線の特徴からガス雲の構造についてどのようなことがわかるだろうか？

4. ガス雲の正体

4.1 膨張シェル説

A, C像の可視光スペクトルによってこのガス雲を初めて検出した Rauch氏は、ガス雲が卵の殻のようなシェル状の構造をもっており膨張運動しているとこのような吸収線の特徴は再現できることを示した。図6にその模式図を示す。図中の右側からクエーサーの光がやってきて膨張シェルガスを通して左側の観測者のほうに抜けていく様子を、視線方向にガス雲を切って示している。このような形のガス中を光が通れば、シェルに入るときと出るときに生じる2本の吸収線がA, C像の両方で観測される。また図6のようにA像が膨張シェルの端のほうを、C像が中心付近を通っていると考えれば、像間での吸収線の違いもうまく説明できる。膨張速度の視線方向成分が吸収線の速度として観測されるため、シェルの外側を通るA像では速度（の絶対値）が小さくなり、対して内

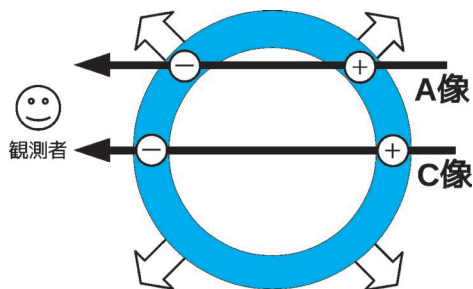


図6 膨張シェル説の模式図。B1422+231のA, C像の光線が途中の膨張シェル状のガス雲を通り抜け、“-”の場所では観測者に向かってガスが運動しているため吸収線は青方偏移し、“+”の場所では観測者から離れるようにガスが運動しているため吸収線は赤方偏移する。符号は図5の吸収線の符号と対応している。

側を通るC像では速度が大きくなる。また、吸収線の強さについてもシェルの内部を長く通るA像のほうが吸収線はより強く観測される。このように、膨張シェル説は観測された吸収線の特徴をきれいに説明できる。

われわれが新たに観測したB像はA, C像の中間あたりに位置している（図3）ので、もし本当に膨張シェル状のガスであったらA, C像の吸収線のちょうど中間的な特徴を示すはずである。図5で見たようにB像の吸収線は見事に中間的な吸収線を示しており、まさに先行研究で示唆された膨張シェル説を強く支持する結果が得られたわけである。

4.2 3次元膨張シェルモデル

膨張シェル構造をもっていることで知られるガス天体には、生まれたばかりの大質量星の周囲に形成される「電離水素（ H II ）領域」や、あるいは終末期の星が超新星爆発を起こして跡に残される「超新星残骸」などが挙げられる。われわれが調べている遠方ガス雲がこういった天体に対応するかを知るには、その構造だけでなく具体的な大きさや運動を調べる必要がある。それにはRauch氏が調べたA, C像だけでは不十分で、実はわれわれが新たに観測したB像の情報がカギになる。

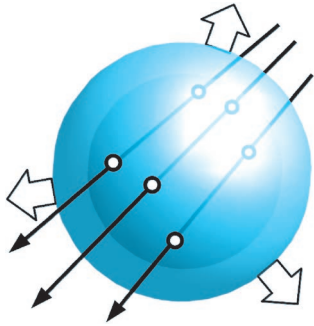


図7 3像の吸収線を説明する膨張シェルモデルの模式図。3像の光線が球状の膨張シェルガス雲を通り、白色の点で吸収を受ける。

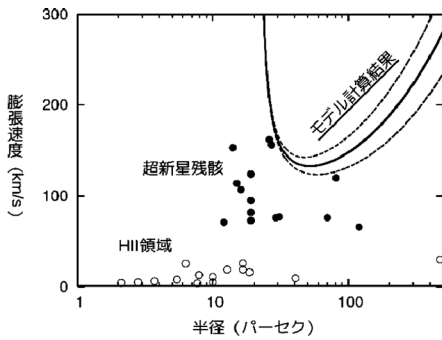


図8 3次元膨張シェルモデルによる計算の結果得られた遠方ガス雲の半径と膨張速度の関係。比較のために銀河系内で観測されている超新星残骸(●)とHII領域(○)の半径と膨張速度も併せてプロットした。

われわれは具体的なガス雲のパラメーターを調べべく、半径 R 、膨張速度 V で運動する球対称なシェル状のガス雲を視線が貫いているというモデル¹⁰⁾を用いて、各像に検出された吸収線の速度を再現できるような R, V を求めた。モデルの模式図を図7に示す。このモデルを使って半径や膨張速度を求めるには、可視光で観測されたA, C像の吸収線の速度だけでは情報が足りず、B像も含めた3像の情報があって初めて強い制限をつけることが可能になる。数学でたとえるなら2点を通る円はいくらでも大きなものが描け一意に決定することはできないが、3点になるとすべての点を通る円は一つに決定できる、ということに似

ているかもしれない。詳細な話をすればそう単純でもないのだが、とにかくこのモデルの場合、像の数が「2」から「3」になるということにはそれだけ大きな違いがある。このモデルでは計算の過程で R, V を含む八つの不定量が出てきてそれらの間に七つの式を立てることができる。その式を連立して R, V 以外の変数を消去すると R, V の関係式 $V=f(R)$ を求めることができる。 (R, V) の解を一意に決定するには実は像の数をさらに増やして「3」から「4」にする必要があるのだが、これらの関係式を求めることができただけでも大きな収穫である。

図8がその $V=f(R)$ をプロットしたものである。実線が計算で求められた遠方ガス雲の半径と膨張速度の関係で、その周りを取り囲んでいる2本の波線が観測量の誤差を考慮したこの関係式の誤差範囲(1σ)を示している。このモデルの結果は、実線上のすべての点と同確率で起こりうることではなく、確率的には実はちょうど底あたりの点が最も発生しやすい状況にある。すなわち、モデルの結果からこのガス雲は大体50から100パーセク程度の大きさで、膨張速度は 130 km s^{-1} 程度である確率が最も高いことになる。図8には膨張シェル構造をもった代表的な天体として先に挙げた超新星残骸とHII領域について、銀河系内で知られている代表的な天体の半径、膨張速度をプロットした。驚くべきことに、モデルの計算結果は超新星残骸の半径、膨張速度とほぼ同程度の値になっていることがわかる。

以上のモデル計算は吸収線の速度だけに注目したものであったが、われわれはさらに吸収線の強度が超新星残骸として適切であるかチェックした。吸収線の強度からは柱密度というガスの単位面積当たりの密度を知ることができ、モデルの結果から求められた半径と組み合わせることでガス全体の質量を大雑把に見積もることができる。質量と膨張速度がわかるとさらにエネルギーを見積

もることができ、超新星残骸として十分なエネルギーをもっているかどうかを確かめることができる。計算の結果、ガス雲全体の質量はだいたい100太陽質量程度と見積もられ、そこからさらに超新星残骸のエネルギーを見積もると、だいたい $\sim 10^{50}$ erg程度のエネルギーの爆発による残骸と同程度のエネルギーをもっていることがわかった。超新星爆発の典型的なエネルギーが 10^{51} erg程度といわれているので、誤差も大きい大雑把な計算であることを考えればこのガス雲は超新星残骸として矛盾がないエネルギーをもっていることになる。以上、大きさ、膨張速度、エネルギーの3パラメーターの一致から、われわれはB1422+231の手前に位置している118.5億光年先のガス雲が超新星残骸であると結論づけた。これは、本来ガス雲を1点でしか見ることのできないクエーサー吸収線系の研究において、重力レンズというツールを用いることで初めて遠方ガス雲の構造、大きさ、そしてその正体に迫ることができた希有な研究と言える。われわれが調べた遠方ガス雲は、単一の吸収ガス雲についてその具体的な起源に迫ることができた初めての例となった。

5. 最遠方の超新星残骸

われわれが取得したA, B像の近赤外線スペクトル上に検出されたマグネシウムの吸収線を用いてガスの運動を解析することで、118.5億光年先のガス雲は超新星残骸であることを見いだした。超新星残骸の元となる超新星爆発は、大きなエネルギーや重元素を宇宙空間に放出し、銀河の物理的・化学的進化を促進する重要な天体であり、爆発時に放出される明るい光をとらえようという研究が盛んに行われている。この天体はたったの1例でしかないが、約120億年前という宇宙初期において初めて検出された“最遠方の超新星残骸”として貴重な例となった。

さらに、図4にも示していたが、今回取得したスペクトル上には鉄の弱い吸収線がA像にのみ

検出された。鉄は、数ある元素の中でも最も安定な原子核をもち、宇宙・銀河の化学進化を調べるうえで最も重要な元素である。鉄元素は超新星爆発の中でもIa型という低質量星に起因する爆発で大量に合成され宇宙空間にばらまかれる。本研究で調べた最遠方超新星残骸に含まれる鉄の量を過去に検出されていたほかのクエーサー吸収線系と比べて見たところ、相対的に多くの鉄が含まれていることがわかった。鉄の吸収線は非常に弱くその量の測定には誤差が大きいため断定はできないものの、ガス雲に大量の鉄が含まれているということはこの超新星残骸がIa型超新星に起因する可能性を示唆する。

Ia型超新星は鉄を多く生成するという化学的な特徴をもつ一方で、爆発時の光度が一定という重要な物理的特徴をもっていることでも知られている。その性質を利用して遠方のIa型超新星までの距離を調べていくことで宇宙の加速膨張を調べた研究は、2011年のノーベル物理学賞を受賞している。これまで精力的に調べられてきたIa型超新星であるが、現在までに見つかった最も遠くのIa型超新星は約93億光年先のものである¹¹⁾。したがって、今回調べたガス雲が本当にIa型超新星に起因する超新星残骸であれば、「残骸」ではあるものの、最も遠くのIa型超新星の証拠を見つけたことになる。超新星を爆発時の「光」で見つけ出す手法では爆発してすぐに観測する必要があるうえ、遠くになればなるほど暗くなり見つけ出すのは難しくなるが、本研究では超新星残骸の「影」を重力レンズクエーサーという特殊な天体を使って調べることによって初めて発見が可能になったものである。

さて、本研究で調べたB1422+231はわれわれに貴重な発見をもたらしてくれたが、しかしまだたったの1例に過ぎない。今後も筆者らのグループでは、すばる望遠鏡とIRCSを用いて重力レンズクエーサーの観測を進めていき、銀河形成期のガス雲の構造を調べていく。その観測は高い空間

分解能が求められ非常に良好な天候条件が必要となるなど難しいものであったが、近年すばる望遠鏡ではAO188という望遠鏡の視力を向上させる補償光学装置が稼動しており、以前と比べて安定して高い分解能を達成できるようになった。この装置も合わせて活用していくことで、複数の重力レンズクエーサーのスペクトルを取得し、研究を幅広く進めていきたいと考えている。

謝 辞

本稿の科学的な内容は、2012年に筆者らが発表した投稿論文⁵⁾に基づいています。本研究を進めるにあたってご協力いただいた共同研究者の皆さま、また観測にあたってご協力いただいたすばる望遠鏡IRCS/AO関係者の皆さまに改めて感謝いたします。

参考文献

- 1) Schneider P., 2006, *Extragalactic Astronomy and Cosmology: An Introduction* (Springer, Germany), 219
- 2) Einstein A., 1936, *Science* 84, 2188, 506
- 3) Walsh D., et al., 1979, *Nature* 279, 381
- 4) Inada N., et al., 2012, *AJ* 143, 119
- 5) Hamano S., et al., 2012, *ApJ* 754, 88
- 6) Patnaik A. R., et al., 1992, *MNRAS* 259, 1
- 7) Bechtold J. and Yee H. K. C., 1995, *AJ* 110, 1984

- 8) Petry C. E., et al., 1998, *ApJ* 494, 60
- 9) Rauch M., et al., 1999, *ApJ* 515, 500
- 10) Rauch M., et al., 2002, *ApJ* 576, 45
- 11) Rodney S. A., et al., 2012, *ApJ* 746, 5

Detection of the Furthest Supernova Remnant with Gravitational Lensing
Satoshi HAMANO

*Institute of Astronomy, University of Tokyo, 2-21-1
 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-0015, Japan*

Abstract: In the spectra of distant quasars, absorption lines by the gas clouds in intervening galaxies are often detected. In particular, gravitationally lensed quasar, which shows multiple images by gravitational lensing effect, helps us to examine the spatial structure of gas clouds, which are too small to resolve directly. Using Subaru telescope and near-infrared high-resolution spectrograph IRCS, we succeeded to obtain the resolved near-infrared spectra of lensed images A and B of B1422+231, whose lensing effect is the strongest among known gravitationally lensed quasars. Investigating the size and kinematics of a gas cloud detected at 11.85 giga-light-year, we conclude that the gas cloud is the furthest supernova remnant ever detected. This study, which reveals the astronomical object corresponding to an absorbing gas cloud, shows the power of gravitational lensing.