

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：13601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23740148

研究課題名(和文)多視線分光法によるマゼラニック・ブリッジ内部構造の解明

研究課題名(英文)Three Dimensional Mapping of the Magellanic Bridge by High-Resolution Spectroscopy toward Multiple Sightlines

研究代表者

三澤 透(MISAWA, Toru)

信州大学・全学教育機構・准教授

研究者番号：60513447

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円、(間接経費) 780,000円

研究成果の概要(和文)：大小マゼラン雲(LMC, SMC)を結ぶ連結構造であるマゼラニック・ブリッジ(MB)の内部構造とその起源を、背後に存在する7つ活動銀河核の可視・紫外高分散分光スペクトルを用いて探った。視線方向による吸収構造の違いはMBのみならず、マゼラニック・ストリーム(MS)にも見られる。全マゼラン系に含まれるガス質量はLMCとSMCに含まれるHIガスの量を凌駕するため、MBの起源はLMCとSMCの相互作用時におけるSMCからのガスの剥ぎ取りである可能性が高いという結論に至った。

研究成果の概要(英文)：The Magellanic Bridge (MB) is a physical connection between the Large and Small Magellanic Clouds (LMC, SMC). High-resolution spectroscopy of AGNs behind it is a powerful tool to investigate the internal structure of the MB. Absorption strength and profile are clearly different between sightlines toward not only the MB but the Magellanic Stream (MS). Because the total amount of gas in the MB and the MS is greater than the HI gas of the LMC and the SMC, the MB was probably formed by a tidal stripping from the SMC through gravitational interactions between the LMC and the SMC.

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：マゼラニック・ブリッジ ケーサー吸収線 国際情報交流(アメリカ)

## 1. 研究開始当初の背景

長らくその存在が予想されてきた LMC と SMC の連結構造は、今からおよそ 50 年前に連続的に分布する中性水素ガスとしてはじめて観測的にとらえられた。その後も 2000 万年程度の若い星や分子ガスの存在が確認されている。数値シミュレーションによると、MB はおよそ 2 億年前の LMC と SMC の力学的相互作用によって作られたと考えられているが、その相対的な位置関係から特に SMC との関係が強いと考えられている。マゼラニック・ブリッジ (MB) の形成史を探る上でその星間物質の化学組成の解明は欠かせない。現在、MB の重元素汚染に対する 3 つのシナリオ (相互作用時における SMC からのガスの剥ぎ取り、SMC の銀河風による重元素汚染、局所的な星形成活動にともなう重元素汚染) が提案されており、それぞれが MB 自身の形成と密接にリンクしている。

従来、MB の化学組成は、MB 内部の星、あるいはその星を背景光源とした星間物質の吸収線観測から評価されてきた。銀河系や SMC より低い金属量が見積もられた一方で、星周領域特有のバイアス (高電離・高密度領域) を受けている可能性が否めない。キューサーをはじめとする活動銀河核 (AGN) は、起伏の少ないスペクトルを持つこと、そして原理的にバイアスのない吸収線探索ができることから、背景光源として最適の天体である。しかし、星と比べて実視等級が暗いことから MB を研究するための道具としては積極的に利用されてこなかった。

そこで我々はハubble宇宙望遠鏡 (HST) で取得されたキューサー PKS0312-770 の紫外高分散スペクトルをもとに、初めて MB の典型的な化学組成の評価に成功した (Misawa et al. 2009, ApJ, 695, 1382)。30 種類以上の吸収線を検出し、Cloudy による光電離モデルを適用した結果、MB に対する様々な特徴 (SMC と同程度かやや高い金属量、他の元素に対する窒素の欠乏、500 K 程度の極低温ガスの存在、光電離モデルに対するカルシウムの極端な不足傾向) を得ることに成功した。しかし MB のより詳細な内部構造を探るためには、同様の観測を複数の視線方向に対して行う必要があった。

## 2. 研究の目的

MB の形成メカニズムと化学進化の全貌を解明することが本研究課題の目的である。AGN を背景光源とした我々の予備研究は、すでに MB の化学進化に対して一定の制限を与えている。例えば、星周領域 (高密度領域) と比べて星間空間 (低密度領域) の金属量が高いこと。これは SMC からの銀河風モデルをサポートする。重元素を大量に含んだ銀河風は一様に拡散するが、ガス密度が低い星間空

間においては局所的に存在していた metal-poor なガスとの混合が進まないため、比較的高い金属量を維持できる可能性がある。実際に、キューサー吸収線として検出される吸収体には金属量と柱密度の間に逆相関がみられる。一方で、窒素の欠乏傾向は局所的な星形成活動をサポートする。窒素は中小質量星 (LIMS) による供給が最も重要である。ごく最近に爆発的な星形成が行われた場合、LIMS による窒素の供給が起こる前に、大質量星による大量の元素が供給され、比較的高い金属量および窒素の欠乏傾向を再現することが可能である。この結果は星間空間における高い金属量とも矛盾しない。しかし複雑な内部構造を持つ MB の化学進化を、たった一つの視線方向の情報だけで解明することは現実的でない。そこで本研究では、MB の背後に存在する複数の AGN を背景光源として用い、MB 内部の金属量および、化学組成の 3 次元分布の再現を試みる。

このように本研究の特徴として、(1) 背景光源として MB と物理的な関わりを持たない AGN を用いること、(2) 複数の AGN を観測することにより MB の 3 次元分布を再現すること、が挙げられる。また、(3) 多波長 (紫外、可視、電波) で観測することにより、包括的な情報 (化学組成、ダスト量、冷たい中性水素の量) を得るという点でもユニークな研究であるといえる。さらに SMC からの距離の依存性なども考慮に入れ、MB の形成メカニズムや化学進化に対する最終的な結論を得ることを目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究では、MB の背後に存在する比較的明るい 5 つの AGN (図 1) を、可視・紫外・電波領域で分光観測することにより、各視線方向の物理的 (ガス温度、密度、電離状態)、化学的 (金属量、元素組成) 諸性質を定量的に評価し、その 3 次元マップを構築するとともに、SMC との位置関係から MB の形成メカニズムと重元素汚染の起源に迫ることを主な目的とする。また単独の吸収体を複数の視線方向から探るこのような手法は、観測可能な背景光源の増加とともにその重要性がますます高まると考えられる。来るべき 30m 級望遠鏡時代に備え、この多視線分光観測技術の確立をめざす。これらを目的とした研究計画を以下にまとめる。

- (1) Very Large Telescope (VLT) を用いて可視高分散分光観測 (分解能  $R \sim 40,000$ ) を行った 7 天体 (AGN) のうち、十分な S/N 比 ( $\geq 20 \text{ pix}^{-1}$ ) のスペクトルが得られた 5 天体に対して、MB による吸収線の比較を行う。可視域で検出される主な吸収線は Ca II H, K 線、Na I D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> 線だけであるが、特に前者はダスト吸

着の影響を強く受けるため、ダスト量の評価に利用される。一方、電子遷移に伴う吸収線の大半は紫外領域に存在する。そのためガスの化学組成を調べるうえで紫外高分散分光観測は不可欠である。前回の HST 修理ミッションの際に搭載された新しい高感度紫外分光装置 (COS) は、従来の分光器 (STIS) と比べて感度が高く、観測可能なターゲット数の大幅の増加が見込める。そこで、HST/COS を用いて MB の背後に存在する比較的明るい 3 天体 (AGN) の紫外分光観測 ( $R \sim 20,000$ ) を行い、やはり視線方向による吸収構造の違いを比較する。紫外域で検出できる吸収線 (例えば、O I, Fe II, Si II, C II, Si IV, C IV) は豊富であり、後述する光電離モデルを行う上で不可欠な情報を与える。

- (2) 可視分光観測で検出される Ca II、Na I 吸収線、および紫外分光観測で検出される 30 種以上の吸収線情報をもとに Cloudy による光電離モデルを適用する。光電離モデルの結果から様々な元素の柱密度、速度幅を見積もることができる。これらの情報を基に、疑似吸収線を合成し、直接観測データと比較する手続きが必要になるが、この一連の作業をスムーズに行うためのコードはすでに開発済みである。入射フラックスとしては、背景放射のみならず、銀河系や LMC からの輻射も考慮に入れる。光電離モデルから得られる様々な物理量 (重元素量、電離状態、ガス密度・温度など) の MB 内部における 3 次元分布を再現し、中性水素柱密度との相関や、SMC からの距離依存性を探る。
- (3) 1 天体につき 1 視線方向のみを捉えてきた従来のキューサー吸収線研究に対し、本研究では単独の吸収体 (MB) を複数の視線方向で探るという斬新なものである。このいわば多視線分光法は、観測天体の飛躍的な増加が見込める次世代 30m 級望遠鏡時代に強力な武器となる。暗い AGN だけでなく、存在頻度の高い銀河も背景光源として用いることができれば、空間情報の飛躍的な向上が見込める。ひとたび有効な手法が確立されれば、MB に対するより詳細な内部構造の解明が可能となる。ゆくゆくは銀河間物質を対象とした大規模構造の探査に発展できる可能性も秘めている。そこで、現有望遠鏡でも可能な「重力レンズ天体」を用いた多視線観測の可能性について検討する。

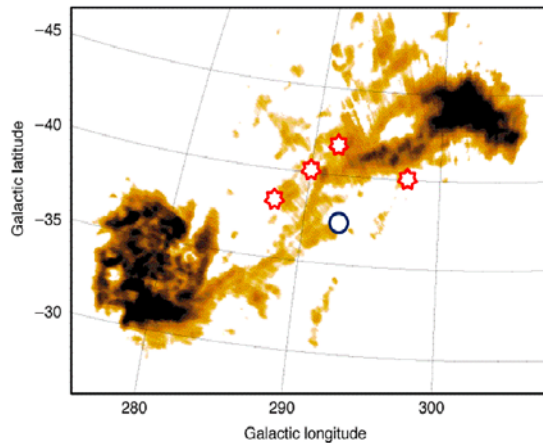


図 1 : マゼラニック・ブリッジの HI 21cm 輝線マップ (Putman et al. 1998, Nature, 394, 752) と背景光源 (AGN) の位置 (星印)。丸印は観測済みの AGN (PKS0312-770) の位置。

#### 4. 研究成果

本研究課題に対し以下の結果を得るとともに、主要学術論文 2 本、主要学会発表 3 件を通して、広く国内外に公表した。

- (1) VLT/UVES で取得された 5 天体の可視高分散スペクトルの詳細な解析の結果、視線方向による Ca II H, K 吸収線、Na I D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> 吸収線の明らかな違いを確認した (図 2)。吸収線の大まかなプロファイルは MB の 3 次元内部構造を反映しており、吸収強度比はガスの化学組成やダスト存在量の違いを反映している可能性がある。また、Ca II の吸収強度は一見したところ SMC からの距離依存性が無いように見えるが、SMC から最も離れた視線方向においてのみ検出されていないという大変興味深い結果を得た。HST/COS による紫外高分散分光観測は、特に目立ったトラブルもなく予定通り実行され、期待通りのデータを取得することに成功した。近傍宇宙に存在する MB に対しては重要な吸収線の多くが紫外域にとどまるため、詳細な光電離モデルを行うためには紫外スペクトルが不可欠である。その後、HST/COS による紫外分光データには波長較正の精度に問題があることが分かり、通常とは異なるデータ解析の手続きが必要になったが、COS のデータ解析に詳しいウィスコンシン大学の研究グループの協力により解決された。VLT/UVES で取得した可視高分散スペクトル (5 天体)、HST/COS で取得した紫外高分散スペクトル (3 天体)、および、すでに我々のグループで過去に観測している HST/STIS による紫外高分散スペクトル (1 天体) を用いた、MB に対する多視線・他波長分光観測の結果を報告し

た（国際研究会1件、国内学会1件）。

- (2) HST/COS のデータ解析で協力を依頼したウィスコンシン大学のグループは、我々と同様の研究を、マゼランック・ストリーム (MS; LMC/SMC の相互作用がもたらしたもう一つのガス構造) に対して行っていたため、サイエンスにおいても協力体制を結び、本研究を MB と MS を包括するプロジェクトに発展させた。HST/COS で取得された全 69 視線 (内、3 視線が MB 方向) に対する紫外多視線分光観測の結果、以下の傾向を確認した: 1) MB と MS を含む全マゼラン系に対する吸収線検出率 (すなわち Covering factor) は、およそ 80%、2) 中性水素量と電離レベル (サンプル数が多いため、Cloudy による光電離モデルの代わりに、Si III/Si II 比などのイオン強度比で評価) の間に逆相関がある、3) MB の視線方向で最も中性水素柱密度が大きい (すなわち DLA の候補に対応)、4) 全マゼラン系に含まれるガス質量 (およそ  $10^9 M_{\odot}$ ) は LMC と SMC に含まれる H I ガス質量を凌駕するため、LMC と SMC は当初保有していたガスの多くを失った可能性がある。本研究の結果から、MB の起源として提案されている 3 つのシナリオ (LMC/SMC 相互作用時における SMC からのガスの剥ぎ取り、SMC の銀河風による重元素汚染、局所的な星形成活動にともなう重元素汚染) のうち「相互作用時におけるガスの剥ぎ取り」による影響が最も大きいことを確認した (学術論文 1 本)。
- (3) 本研究の観測手法 (背景 AGN を用いた単独天体の多視線分光観測) の応用として、重力レンズクェーサーを背景光源とした、遠方天体の多視線観測の可能性を 2 つのケースについて検討した。背景光源であるクェーサー自身から噴き出すガス (アウトフロー) を 2 視線で観測するという試みでは、わずかではあるが視線方向による吸収構造の違いを確認した。また、手前にある銀河・銀河間物質に対する多視線観測については、ガスの電離状態に応じてその空間分布傾向の違いがみられることを確認した。いずれも多視線観測だからこそ得られた結果である。このような観測は、天体の遠近にかかわらず次世代 30m 級望遠鏡時代の主要テーマになりうる (学術論文 1 本、学会発表 1 件)。

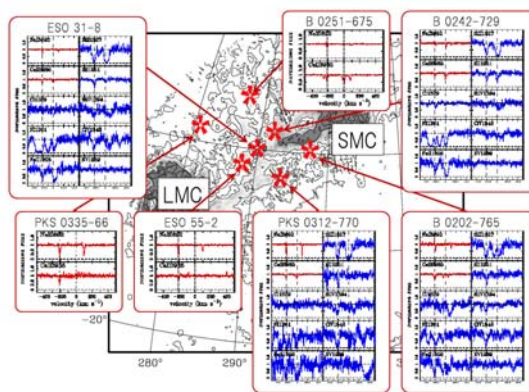


図 2 : 多視線分光観測の結果。赤が可視、青が紫外スペクトルを表す。S/N 比が低いスペクトルも含まれている。

#### 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 6 件)

- ① Andrew J. Fox, Bart P. Wakker, Kathleen A. Barger, Audra K. Hernandez, Philipp Richter, Nicolas Lehner, Joss Bland-Hawthorn, Jane C. Charlton, Tobias Westmeier, Christopher Thom, Jason Tumlinson, Toru Misawa, J. Christopher Howk, L. Matthew Haffner, Justin Ely, Paola Rodriguez-Hidalgo, Nimisha Kumari, “The COS/UVES Absorption Survey of the Magellanic Stream. III: Ionization, Total Mass, and Inflow Rate onto the Milky Way”, *The Astrophysical Journal*, 査読有, Vol. 787, Issue 2, 2014, article id. 147, DOI:10.1088/0004-637X/787/2/147
- ② Toru Misawa, Naohisa Inada, Ken Ohsuga, Poshak Gandhi, Rohta Takahashi, Masamune Oguri, “Spectroscopy along Multiple, Lensed Sight Lines through Outflowing Winds in the Quasar SDSS J1029+2623”, *The Astronomical Journal*, 査読有, Vol. 145, Issue 2, 2013, article id. 48, 12 pp. DOI:10.1088/0004-6256/145/2/48

[学会発表] (計 13 件)

- ① 小山田涼香, 三澤透, 稲田直久, 大栗真宗, “レンズクェーサーを用いた多視線による高赤方偏移吸収体の諸性質の解明”, 日本天文学会 2014 年春季年会 (国際基督教大学), 2014 年 3 月 21 日, R23a
- ② Toru Misawa, Jane C. Charlton, Henry A. Kobulnicky, Philipp Richter, Paola Rodriguez-Hidalgo, Bart P. Wakker, Andrew Fox, “多視線高分散分光観測に

よるマゼラニックブリッジの3次元マッピング”, 日本天文学会 2013 年春季年会 (埼玉大学), 2014 年 3 月 20~23 日, R14c

- ③ Toru Misawa, Jane C. Charlton, Henry A. Kobulnicky, Philipp Richter, Paola Rodriguez-Hidalgo, Bart P. Wakker, Andrew Fox, “Three Dimensional Mapping of the Magellanic Bridge by High-Resolution Spectroscopy toward Multiple Sightlines”, The Magellanic System: In Perspective (Magellanic Clouds Workshop) (The University of Western Australia), 2012 年 9 月 10 ~ 13 日

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

三澤 透 (MISAWA, Toru)

信州大学・全学教育機構・准教授

研究者番号: 60513447