

平成 16 年度科学研究費補助金（基盤研究（S））研究状況報告書

ふりがな		ふくい やすお		所属研究機関・部局・職		名古屋大学・大学院理学研究科・教授	
研究代表者氏名		福井 康雄					
研究課題名	和文	銀河系およびマゼラン銀河内の膨張ガスシェルの観測的研究					
	英文	An Observational Study of Expanding Gas Shell in the Galaxy and the Magellanic Clouds					
研究経費		平成14年度	平成15年度	平成16年度	平成17年度	平成18年度	総合計
16年度以降は内約額 金額単位：千円		34,400	24,300	21,900	4,200	0	84,800
研究組織（研究代表者及び研究分担者）							
氏名	所属研究機関・部局・職	現在の専門	役割分担（研究実施計画に対する分担事項）				
福井 康雄	名古屋大学・大学院理学研究科・教授	電波天文学	研究統括				
水野 亮	名古屋大学・太陽地球環境研究所・教授	大気科学・電波天文学	受信機開発・観測				
大西 利和	名古屋大学・大学院理学研究科・助教授	電波天文学	観測ソフト開発・観測				
小川 英夫	大阪府立大学・総合科学部・教授	電波天文学	受信機開発				
米倉 覚則	大阪府立大学・総合科学部・助手	電波天文学	受信機開発・観測				
当初の研究目的（交付申請書に記載した研究目的を簡潔に記入してください。）							
<p>本研究は、我々の銀河系および銀河系に最も近い系外銀河である大小マゼラン銀河に対して、徹底したミリ波掃天観測を行い、分子ガス雲の分布と運動の全貌を明らかにすることを目的とする。これら3銀河は、20万光年程度以内の距離に近接しているが、各々異なる進化を経て異なる重元素量を持つに至ったと考えられている。3銀河の分子ガス雲の分布と運動、そしてそこで形成されている星・星団の特徴を比較することによって、分子ガス雲および星・星団の形成過程を、特に超新星爆発によるダイナミカルな影響という観点から解明しようというのが本研究のねらいである。この研究によって、従来十分検討のなされなかった、超新星爆発に起因する星形成の銀河規模での量的評価が可能となり、銀河の進化の解明にユニークに寄与できると考えられる。</p> <p>本研究は以下に掲げる2つの観測を通して、超新星爆発によるダイナミカルな影響という統一した観点から、分子ガス雲形成および星・星団形成過程を明らかにすることを目指す。</p> <p>1. 名古屋大学大学院が南米チリ共和国に設置した4m電波望遠鏡「なんてん」を用いて、スーパーシェルの力学的影響の詳細観測を行う。銀河系内のスーパーシェルにおけるガス雲の分布、運動を詳細に観測し、理論モデルとの比較を通してシェルの成長に関する動力的なプロセスおよびシェルによる分子雲形成、星・星団形成のトリガー機構を解明する。</p> <p>2. 同じく「なんてん」を用いて、大小マゼラン銀河におけるスーパーシェル、および、さらに巨大なスーパージャイアントシェル(=SGS)と星団形成の観測的研究を行う。</p>							

これまでの研究経過（研究の進捗状況について、必要に応じて図表等を用いながら、具体的に記入してください。）

本研究の目的を達成する手段としては、「なんてん」望遠鏡を用いた CO(1-0)スペクトルでの銀河面・大小マゼラン雲の分子雲探査と、そのデータをもとにした CO(2-1)等の高励起スペクトルを用いた詳細観測、の2つに大きく分けることができる。前者の分子雲探査は以下に述べるように順調に進み、2003年10月をもって Las Campanas 天文台での観測を終了した。高励起スペクトルの観測は、標高 2400m の Las Campanas 天文台で行うよりも、さらに観測条件の良い標高 4800m のアタカマ高地に望遠鏡を移設後(NANTEN2 計画)、集中して観測を進めたほうが最終的には天文学的成果を素早く効率的に出すことができると判断し、現在はそのための望遠鏡移設作業を行っている。以下では、銀河面・大小マゼラン雲の分子雲探査の結果と、高励起スペクトル観測のために必要なシステムの開発状況についてまとめる。

1. 「なんてん」による銀河面・大小マゼラン雲の CO(1-0)分子雲探査

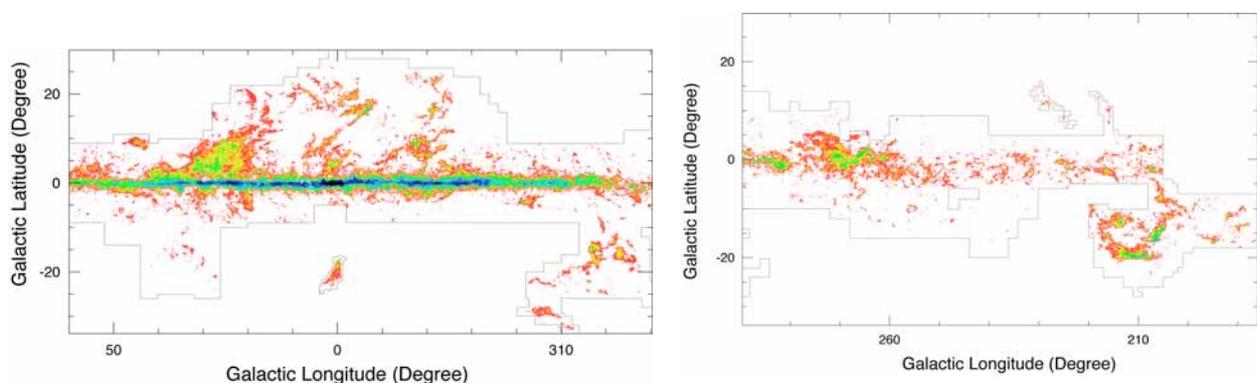
銀河面の探査については、以下の図に示す通り、銀経 220-360-60 度、銀緯±10 度の範囲についてはほぼ完全にカバーし、180-220 度の領域については、オリオン巨大分子雲を中心に分子ガスの分布を明らかにした。総観測点数は 1,100,000 点に及び、質・量の点で世界の他のデータを凌駕している。このデータの解析により、以下のような新たな知見を得ることができた。

- ・ TeV ガンマ超新星残骸 G347 と相互作用する分子雲を発見し、その距離を精度よく決定して、宇宙線陽子加速の現場の特定、陽子加速の定量的評価を初めて行った（論文番号 2 等；詳細は特記事項参照）
- ・ 銀河系中心領域で、銀河面に垂直に伸びた構造を数多く新しく発見した。これは、銀緯方向±5 度の領域を漏れなく詳細に観測することにより初めて明らかになった構造である。また、さらに高感度観測を行うことにより、銀河面から数百パーセク離れた場所に、通常の銀河回転だけでは説明することのできない速度成分を持つ巨大分子雲を発見し、約 1 千万年前の銀河中心付近での爆発的現象がこの特異な分子雲を形成した可能性が高いことを明らかにした（国際会議[番号 3]等で発表）。
- ・ 銀河系外縁部の Warp 領域の初めての広域分子雲探査を行い、銀河系の中心からの距離が 14kpc 以上の分子雲約 70 個を検出した。分子ガスの量と比較して中性水素ガスが非常に多く、これは弱い重力場を反映していると思われる。この結果は Nakagawa et al.として ApJ に投稿中である。
- ・ 高銀緯領域のアーク状の中性水素ガス雲、約 140 平方度を CO(1-0)で観測し、長さ 30pc に及ぶアーク状に連なる分子雲複合体を検出した。この観測により、分子雲形成期にある非常に若い天体高銀緯分子雲 HLCCG 92-35 の発見に至った（論文番号 3）
- ・ 大マゼラン銀河の分子雲探査
大マゼラン雲の高感度分子雲探査が終了し、質量 10,000 太陽質量以上の巨大分子雲のほぼ完全なサンプルを得ることができた。これは、世界的に見ても初めての一つの銀河全域に渡る均質な巨大分子雲のサンプルであり、世界的な評価も極めて高い（国際会議[番号 1, 4]等で発表）。特に興味深い結果は、銀河系にはほとんど見られない、星が形成されていない巨大分子雲の割合が多いことであり（すべての巨大分子雲のうち 1/3）、この事実は大マゼラン雲で活発に巨大星団が形成されている要因である可能性が高い。
- ・ 大小マゼラン雲ブリッジ領域の分子雲探査
大小マゼラン雲を結ぶ中性水素ガス領域であるブリッジ領域の分子雲探査を行い、6 領域で CO(J=1-0)スペクトルの検出に成功した。詳細は特記事項に記述した。

2. 観測システムの開発状況

230GHz 帯の受信機システムの基礎的な開発はほぼ終了しており、現在 345GHz 受信機システムの開発を主に行っている。空間分解能が高い点、より高密度・高温領域を選択的に観測することができるため、望遠鏡移設後できる限り早く 345GHz のシステムを搭載したいと考えている。また、観測効率・キャリアレーション精度向上のため、2SB ミキサの開発も同時に行い、100GHz 帯についてはめどが付き、230, 345GHz 帯の設計等も行っている。

さらに、昨年度末に Las Campanas 天文台現地において、駆動システムの更新：駆動モータ・コントローラ・制御 OS の変更(Realtime Linux)、を行い OTF 観測に必要な駆動性能がほぼ達成されていることを確認した。



図：「なんてん」によって得られた銀河面 CO(1-0)分子雲広域探査の結果

特記事項 (これまでの研究において得られた、独創性・新規性を格段に発展させる結果あるいは可能性、新たな知見、学問的・学術的なインパクト等特記すべき事項があれば記入してください。)

「これまでの研究経過」の中で述べた研究成果の中でも、下記の2つは特に天文学的なインパクトが非常に大きいので、ここに記載する。

1. TeV ガンマ線超新星残骸と相互作用する分子雲

超新星残骸(SNR)は、銀河系に満ちている宇宙線のうち 10^{15} eV 以下のエネルギーを担う成分について主な加速現場であると考えられている。特にその主成分である陽子が SNR において加速されているかどうかという問題は、現在まで大きな興味の対象であった。

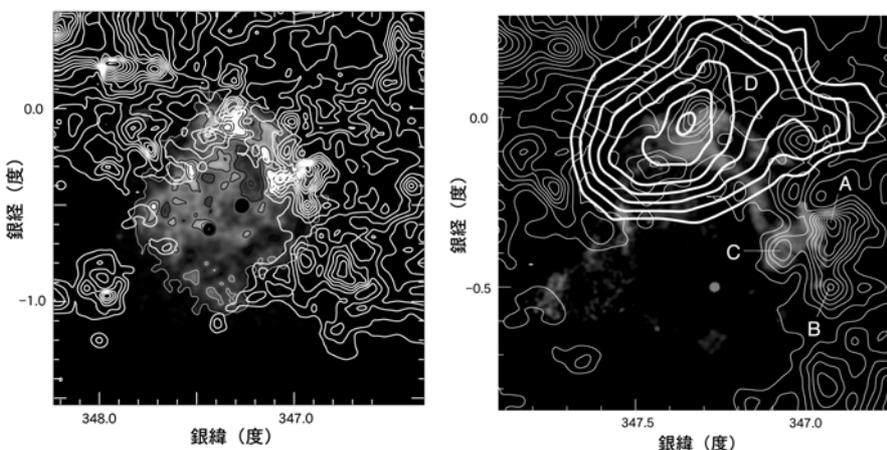
我々の CO(1-0)スペクトルによる観測により、TeV ガンマ線 SNR G347.5-0.5 と相互作用している分子ガスの存在を明らかにした(下図)。この分子ガスは非熱的 X 線放射の空間分布と非常によい空間分布を示していた。銀河回転のモデルから導いた力学的距離は約 1kpc であり、初めてこの SNR までの距離を決定することができた。これにより、はじめてさまざまな物理量を精確に決定できるようになり、このことが、重要な研究結果の発見に結びついた。従来の空間分解能の悪い分子ガスのデータとの比較では、空間分布の比較が難しく、6kpc と非常に遠い天体ではないかと示唆されていたが、我々の質の良いデータにより、この推定はほぼ間違えていることが明らかになった。

計算の結果、約 200 太陽質量の分子雲が X 線および TeV ガンマ線のピークに付随していた。また、数 TeV のエネルギー領域に見られるスペクトルの急な傾きは、今のところ、衝撃波面内で加速された高エネルギー陽子によるパイ中間子崩壊によって説明されている。これらのことは、SNR と分子雲の相互作用が陽子加速の源である可能性を示している。この結果から、加速された陽子の総エネルギーを約 10^{48} erg (加速効率 0.1%に相当)と推定し、陽子加速の問題における観測的な制約を与えることに成功した。

さらに、「なんてん」の観測結果と X 線、ガンマ線との観測結果の比較から、同様の天体が見つかっており、「なんてん」によってこれまでに得られた銀河面広域 CO 探査のデータは、近い将来打ち上げられる予定のガンマ線衛星 GLAST などによって検出されるであろうさまざまな高エネルギーガンマ線源の解析において、非常に強力な武器になると期待できる。

2. 大小マゼラン雲ブリッジ領域の分子雲探査

この領域では、以前の観測から若い星が発見されており、これらの星の起源がブリッジ内部に存在する分子雲であるという可能性が示唆されてきた。その後、2002年に Muller et al. が小マゼラン雲に比較的近い領域で分子雲を初めて発見した。我々は、さらにブリッジ中心部に近い領域の CO(1-0)観測を行い、6領域で CO スペクトルの検出に成功した。それぞれの分子雲の質量は、5千太陽質量程度であり、総質量は約 36,000 太陽質量であった。中性水素、遠赤外線との比較から、ブリッジ領域はガス・ダスト比が小マゼラン雲よりもさらに高く、重元素量(小マゼラン雲の半分程度)が少ない宇宙誕生初期に近い環境であることを示した。また、銀河系外縁部 warp 領域との比較や星団と分子雲との位置比較を行うことで、これらの分子雲でも星形成を起こす可能性が十分にあることがわかった。さらに、ブリッジ領域の質量が、近傍の矮小銀河の質量と比べても遜色がないこと、本観測領域のガスが重力的に束縛されていることから、この領域が将来矮小銀河としての進化を遂げる可能性もあることがわかった。これらの結果から、この領域は宇宙初期の、現在の銀河のもととなる building block と環境が酷似しており、この時代の星間物質の性質、星形成の研究の極めて貴重なターゲットであることがわかった。



左図: X 線衛星 ROSAT による X 線強度分布(グレースケール)と、「なんてん」望遠鏡による CO(1-0)分子輝線の強度分布(等高線)を重ねたもの。分子雲が抜けている場所に、X 線が満たされている様子がわかる。

右図: 細い等高線は上記と同じ CO の分布、グレースケールは、X 線衛星 XMM-Newton によって得られた X 線強度分布、太い等高線は、CANGAROO による TeV ガンマ線の相対強度分布。それぞれのピークがよく一致している。

研究成果の発表状況 (この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文(発表予定のものを記入することも可能。)の全著者名、論文名、学協会誌名、巻(号)、最初と最後のページ、発表年(西暦)、及び国際会議、学会等における発表状況について記入してください。)

論文リスト

1. L. V. Tóth, M. Haas, D. Lemke, K. Matta, & T. Onishi, "Very cold cores in the Taurus Molecular Ring as seen by ISO", A&A, in press (2004)
2. Y. Fukui, Y. Moriguchi, K. Tamura, H. Yamamoto, Y. Tawara, N. Mizuno, T. Onishi, A. Mizuno, Y. Uchiyama, J. Hiraga, T. Takahashi, K. Yamashita, & S. Ikeuchi, "Discovery of Interacting Molecular Gas toward the TeV Gamma-Ray Peak of the SNR G 347.3--0.5", PASJ, 55, L61-L64 (2003)
3. H. Yamamoto, T. Onishi, A. Mizuno, & Y. Fukui, "High-Latitude Molecular Clouds in an H I Filament toward the MBM 53, 54, and 55 Complex: Existence of an H₂ Cloud with Low CO Intensity", ApJ, 592, 217-232 (2003)
4. K. Xiao, H. Ogawa, & Y. Fukui, "An Experimental Study of Harmonic SIS Mixing at 205-235 GHz", IEEE Trans. Appl. Supercond., 13, 3856-3861 (2003)
5. T. Onishi, A. Mizuno, A. Kawamura, K. Tachihara, & Y. Fukui, "A Complete Search for Dense Cloud Cores in Taurus", ApJ, 575, 950-973 (2002)
6. M. Ando, T. Nagata, S. Shuji, N. Mizuno, T. Kawai, H. Nakaya, & Tan S. Glass, "Near-Infrared and CO (J=1-0) Observations of Photodissociation Regions in M17", ApJ, 574, 187-197 (2002)
7. T. Onishi, N. Mizuno, and Y. Fukui, "New View of Molecular Gas Distribution of the Southern Sky: CO Surveys with NANTEN", 4th Cologne-Bonn-Zermatt Symposium, The Dense Interstellar Medium in Galaxies, Springer-Verlag, 91, 203-209 (2004)
8. N. Mizuno, T. Onishi, and Y. Fukui, "Giant Molecular Clouds and on-going Star Formation in the LMC", 4th Cologne-Bonn-Zermatt Symposium, The Dense Interstellar Medium in Galaxies, Springer-Verlag, 91, 151-154 (2004)
9. N. Mizuno, H. Aoyama, T. Onishi, A. Mizuno, and Y. Fukui, "A Large Scale CO Survey towards the Orion-Eridanus Region with NANTEN", In Galactic Star Formation Across the Stellar Mass Spectrum, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 287, 47-51 (2003).
10. H. Aoyama, N. Mizuno, T. Onishi, A. Mizuno, and Y. Fukui, "A Large Scale Study of H₁₃CO⁺ and C₁₈O (J = 1-0) in Orion B", In Galactic Star Formation Across the Stellar Mass Spectrum, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 287, 42-46 (2003).
11. T. Onishi, A. Mizuno, and Y. Fukui, "New Views of Molecular Gas Distribution of the Southern Sky with "NANTEN": A Survey for Molecular Supershells", In Galactic Star Formation Across the Stellar Mass Spectrum, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 287, 36-41(2003).
12. A. Mizuno, N. Mizuno, T. Onishi, and Y. Fukui, "Physical properties of molecular clouds from the galactic center to the galactic warp", Milky Way Surveys: The Structure and the Evolution of Our Galaxy, The 5th Boston University Astrophysics Conference, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, in press, (2004)
13. K. Tachihara, T. Onishi, A. Mizuno, and Y. Fukui, "H₁₃CO⁺ Dense Core Survey in the Ophiuchus North Region", IAU Symposium, 221: Star Formation at High Angular resolution (The Astronomical Society of the Pacific:San Francisco), in press (2004)

国際会議

1. Y. Fukui, "GMCs and star formation therein in the Milky Way and the Magellanic system", The Young Local Universe, March 21-28, 2004, La Thuile, Aosta Valley, Italy(招待講演)
2. T. Onishi, "Evolution from dense cores to protostars in low-mass star forming regions", The Young Local Universe, March 21-28, 2004, La Thuile, Aosta Valley, Italy (招待講演)
3. T. Onishi, "CO survey of the Southern Milky Way", 4th Cologne-Bonn-Zermatt Symposium "The Dense Interstellar Medium in Galaxies", September 22-26, 2003, Zermatt, Switzerland (招待講演)
4. N. Mizuno, "Giant Molecular Clouds and on-going Star Formation in the LMC", 4th Cologne-Bonn-Zermatt Symposium "The Dense Interstellar Medium in Galaxies", September 22-26, 2003, Zermatt, Switzerland