

## 星間分子と造岩鉱物の分光計測と理論的研究

宇宙・地球科学における分光計測チーム（課題番号：147005）

研究期間：平成 26 年 7 月 29 日～平成 29 年 3 月 31 日

研究代表者：御園雅俊 研究員：固武 慶、藤 昇一

### 【研究成果】

#### I. 星間物質

多様な大質量星に対して多次元のニュートリノ輻射輸送流体シミュレーションを実行し、中心核（コア）における重力崩壊から爆発の開始に至るまでの動的進化を大規模数値シミュレーションで系統的に調べた。結果、コアの重力収縮度が爆発の成否に本質的であることを示した。特に、爆発に際して超新星コアから放射されるマルチメッセンジャー（重力波、ニュートリノ、電磁波放射）の相関解析を世界に先駆けて行うことに成功した。超新星ニュートリノ観測が、重力波の観測可能性を飛躍的に高めることを指摘した点、光学観測に関しては、天の川銀河の全領域に対して超新星のフォローアップ追跡観測ができるよう使用すべき大型望遠鏡の選定・観測戦略を精査した点が特筆すべき成果であると考えている。

本申請課題では、これまで申請者が得た一連の超新星研究の成果を大きく発展させ、大質量星の爆発の成否を握る条件の精査、マルチメッセンジャー天文学から迫る爆発機構の解明を行うことを研究目的として研究を行った。具体的には、申請者がこれまで開発してきた空間 2 次元、3 次元、一般相対論的 3 次元の超新星シミュレーションをそれぞれの研究目的に応じて実行し、課題(1)多様な親星を用いた多次元シミュレーションの実行および爆発機構の解明、課題(2)多次元シミュレーションに基づくマルチメッセンジャーシグナルの定量的予測とその観測可能性の精査、を行うことを研究目的として以下の成果を得た。

#### 課題(1)について

図 1 のパネルは、IDSA 法に基づく 2 次元超新星爆発シミュレーションを、国立天文台 XC を始めとする並列計算機で実行した結果を表す。s13.0、s75.0などは親星の質量（13太陽質量、75太陽質量）を表す。s13、s75では

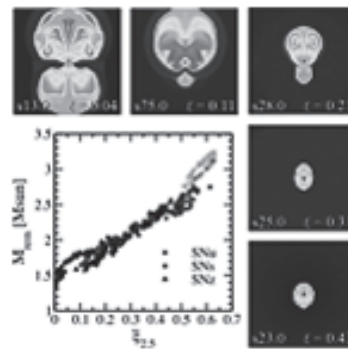


図 1：パネルは IDSA 法を用いた 2 次元超新星シミュレーション例、左下の（大きなパネル）は、コア集中度（x 軸）と中性子星の質量（y 軸）の関係を示す。

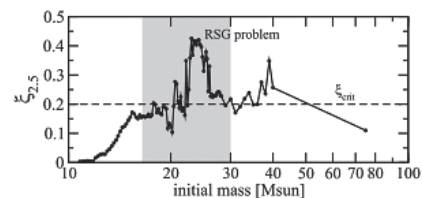


図 2：親星の質量（x 軸）とコアのコンパクトネス（y 軸）の関係。WHW02 の親星モデルの場合、 $\xi = 0.2$  を境に、これ以上のコンパクトネスを持つ親星（グレーで塗られた領域）を爆発させることが極めて難しいことを示す数値計算結果と整合性が良い。

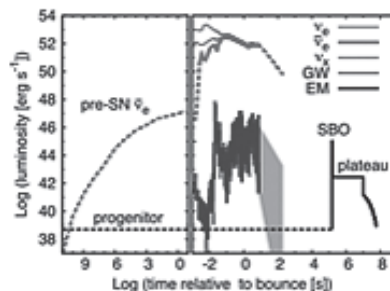


図 3：セルフコンシステント長時間超新星シミュレーションに基づくマルチメッセンジャーシグナルの理論予測。ニュートリノ、重力波、電磁波（可視）シグナルの時間発展を（コアバウンスを基準に）連続的に明らかにすることに成功した。

パネルの中で高エントロピー領域（白い領域）が鉄コアを突き抜けて、爆発を開始していることを示している。一方、s28やs23では高エントロピー領域が小さく、これらは爆発に失敗しているモデルである。この爆発の成否を支配的に決めているのが、“コアのコンパクトネス”と呼ばれるコアの重力収縮度であることを明らかにした。実際、パネルのζがコンパクトネスパラメータと呼ばれるもので、左上(s13(ζ=0.04))から右下パネル(s23(ζ=0.43))にかけて上昇しており、詳細な解析からζが0.2付近までは、コンパクトネスの上昇に伴う重力エネルギーの解放、すなわちニュートリノ光度が上昇するため、爆発エネルギーが上昇するものの、これを過ぎると、コアにおける重力的束縛が強すぎてニュートリノ加熱で爆発を起こすことが極めて難しいことを明らかにした。

またこの結果を受けて、超新星の直接撮像観測でおおよそ16~30太陽質量の超新星が見つからないその物理的原因（Red Supergiant problem）の解決に導くアイデアを提唱することができた(図2参照)(論文3, 6参照)  
**課題(2)の主成果**

課題(1)の2次元計算から得られた結果を詳細に解析した結果、爆発エネルギーが観測値に近いモデル（17太陽質量）を選び出すことに成功した。このモデルに関して、計算領域を星の外層部まで広げ長時間計算を実行することで、爆発時に放射されるマルチメッセンジャーの定量的予測・観測可能性を精査した（図3参照）。

超新星が系内で起こった場合、ベテルギウスのような近傍で起こった場合、銀河系外で起こった場合の3つのシナリオに特化し、時系列的にマルチメッセンジャー観測を行う戦略を整理し、さらに観測から如何に爆発のメカニズムに迫れるか詳細に調べた。結果、特に銀河中心の超新星に対して、スーパーカミオカンデによるニュートリノ観測でコアバウンスの時間を決定することで、その後の超新星コアで発達する対流・流体不安定性の重力波の観測の信号・雑音比を向上させられることを明らかにした。重力波に関しては、LIGOに加え、VIRGOやKAGRAまで加えたコヒーレントネットワーク解析を行い、重力波信号の再構成、さらに信号・雑音比を定量的に明らかにすることが出来た。光学観測に関しては、ダストによる減光の効果を考慮することで、天の川銀河で超新星が起きた場合に使用すべき光学望遠鏡の選定・観測戦略を明らかにした。さらにより定量的なシグナル予想を可能にするため、一般相対論的コードの開発、3次元回転モデルのシミュレーションを実行することもできた。

**II. 造岩鉱物**

天然に産出する結晶である鉱物の分野では、エネルギー分散型X線分光分析装置を搭載した透過型分析電

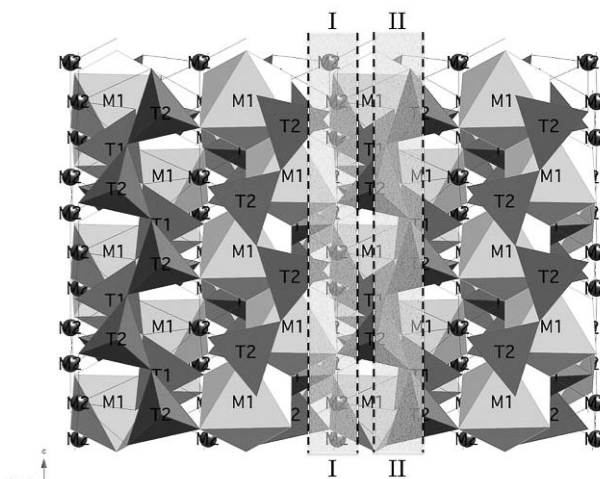


図4 opxの構造。点線で示した帯は2方向の入射で電子線密度がそれぞれ高くなる領域を示す。IではM2席、IIではT席とM1席の元素が検出される。

子顕微鏡を用いて席占有率の測定法であるALCHEMI (Atom Location by CHanneling Enhanced Microanalysis) 法に関する基礎的研究を行った。さらに通常のALCHEMI法に加えて角度高分解電子チャネリングX線分光(HARECXS; High Angular Resolution electron X-ray Spectroscopy) 法による分析を行った。エネルギー分散型X線分光分析装置は各元素に固有のエネルギーをもつ特製X線を受光し、それらのスペクトルから元素分析が可能である。

本研究で試料としたのは、かんらん石ならびに単斜輝石、斜方輝石といった主要な造岩鉱物であるが、それらの中でも、特に輝石の席占有率はそれらを含む岩石の地質温度へ適用できる可能性がこれまでも指摘されてきた。さらに、斜方輝石についてはALCHEMI法による席占有率を求めて成文化された報告例はない。

ALCHEMI法は、結晶内に形成されるブロッホ波の位置が電子線の入射方位によって変化する性質を利用した

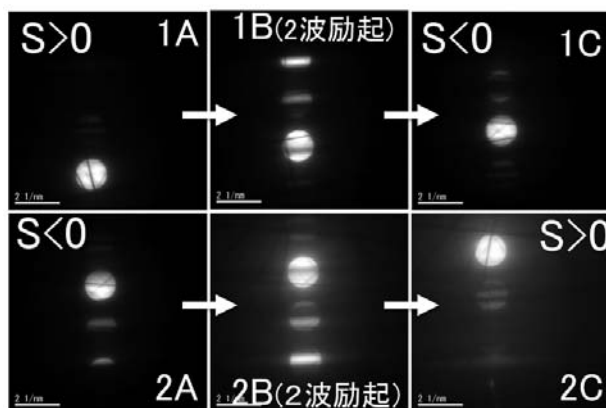


図5 連続的に入射条件が変化している事を示す回折パターンの例。最も明るい透過ディスク中の菊池線が対称的に変化している。

分析方法である。この性質を利用すれば、電子線の入射方位についてはブロッホ波の位置を制御することで特定の原子列からの特性X線を励起させることができる。この時、入射電子線が原子列に沿って密度が増大する、または異常透過する現象を電子チャネリング効果と呼ぶ。その際に得られた特性X線のカウント数より不純物元素の位置や、規則構造の解析に用いられる。

ALCHEMI法を用いたかんらん石の席占有率を求めた研究は過去に数例あり、最もチャネリング効果が卓越しておこる回折条件を詳細に決定し、より信頼性の高い席占有率を求めることを目的とした実験的研究も行われてきた。本研究でもそれらにならい、連続的に入射方位を変化させながら、特性X線の取り込みを行った。連続的に入射方位が変化している様子を示す電子線回折図形の例を図2に示した。ディスク内部に認められる菊池線が対称的に変化しているのが認められる。

HARECX法の基本原理解はALCHEMI法と同様であるが、より広い角度範囲から、より細かい角度ステップで電子線の入射方位を変化させ、測定されたX線強度プロファイルから、より詳細な原子配列に関する解析を行うとするものである。本研究ではいずれの試料に対してもHARECX法を適用している。

使用した分析電子顕微鏡は、福岡大学設置のJEM-2100および京都大学設置のJEM-2100Fである。特に後者は特性X線の受光面積が100平方ミリメートルと非常に大きいという特徴を持つ。試料の作製は京都大学設置の集束イオンビーム試料加工装置(FIB)を用いた。

かんらん石については、主要置換元素である、MgとFeがほぼ同様のプロファイルを示した。このことはM1およびM2席でこれらの2種の元素が同じ比率で分布していることを示しており、無秩序化しているものと考えられる。しかし、この実験における取り込み時間が短

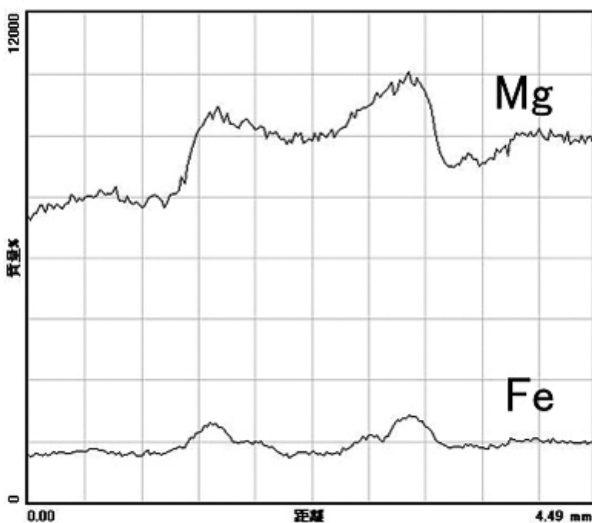


図6 opxのALCHEMIパターン。MgとFeが同様の挙動を示していることから無秩序化していることが読み取れる。

かったため、過去の研究でも言及されてきた微量元素のMnとNiが相反的な強度パターンを示すという特徴については、明確に捉えることができなかった。この点については、従来のALCHEMI法による長時間の特性X線の取り込みを行うことで確認した。

一方、斜方輝石と単斜輝石については、その構造の複雑さからMgとFeおよびSiが分布するM1、TおよびM2サイトが近接している(図1)。したがって、より詳細に角度分解を行う、HERACXS法での実験を行った。その結果を図3に示した。MgとFeは入射方位の変化に対して同様の強度パターンをしめしており、このことは、これらの元素がM1とM2サイト間で無秩序に分布していることを示していると考えられる。席占有率の導出にあたっては、Horita et al. (1995, Ultramicroscopy, 58, 237-335)の方法に従って計算を行った。一般には、Spence & Tafto (1983, J. Microsc. 130, 147-154)による研究例が多いが、Mgが無秩序に分布することを前提としており、MgとFeの占有率を厳密に求めようとする本研究の目的にそぐわないため、Horita et al.の方法に従った。斜方輝石ではM1とM2サイトではほぼ一定の値が得られたが、単斜輝石の値はばらつきが大きかった。この点については動力学理論に基礎を置いたシミュレーションとの対比や他の手法、例えば4軸X線回折法による席占有率との対比などを含めて、引き続き検討を進める必要がある。

### III. 分光計測

超高分解能レーザー分光計測は、原子や分子の励起状態における詳細な構造や様々なダイナミクスを解明するための強力な手段である。これまで申請代表者は、最外殻に1つだけの電子が存在するため単純なエネルギー準位構造を持つルビジウム原子や、生体分子や環境物質の基礎となる簡単な芳香族化合物であるナフタレン分子の超高分解能分光計測を行ってきた。これまでの研究によって、原子や多原子分子の持つ基本的な性質が明らかにされた。今回はこれらの結果を応用し、自然界における様々な物質の超高分解能分光計測を行った。

分光計測の精度は、主に分光用レーザーのスペクトル線幅と、光周波数の目盛によって制限される。この場合の分解能および精度は数MHz程度であり、依然として自然幅よりも大きいので、さらなる分解能・精度の向上が望まれていた。我々は、分光光源として線幅の狭い単一モードレーザーを使用し、周波数の目盛として光周波数コムを利用して、分解能および精度を100kHz程度とすることで、これ実現した。このように、従来と比べて1桁から2桁の改善をおこなうことで、自然幅が数MHz程度である分子に対して、分光システムの分解能で制限されないスペクトルが得られるようになった。

## 【研究業績】

- Takami Kuroda, Kei Kotake, and Tomoya Takiwaki, “A New Gravitational-wave Signature of Standing Accretion Shock Instability from Supernovae”, *The Astrophysical Journal Letters*, 829, L14, (6pp), (2016). DOI: 10.3847/2041-8205/829/1/L14
- Takami Kuroda, Tomoya Takiwaki, and Kei Kotake, “A New Multi-energy Neutrino Radiation-Hydrodynamics Code in Full General Relativity and Its Application to the Gravitational Collapse of Massive Stars”, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2, 20, (27pp), (2016). DOI: 10.3847/0067-0049/222/2/20
- K. Nakamura, S. Horiuchi, M. Tanaka, K. Hayama, T. Takiwaki, K. Kotake, “Multi-messenger signals of long-term core-collapse supernova simulations : synergetic observation strategies” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* (以下MNRASと記す), 460, 2, (24pp), (2016). DOI: 10.1093/mnras/stw1453
- Tomoya Takiwaki, Kei Kotake, and Yudai Suwa, “Three-dimensional simulations of rapidly rotating core-collapse supernovae: finding a neutrino-powered explosion aided by non-axisymmetric flows”, *MNRAS Letters*, 461, 1, (4pp), (2016). DOI: 10.1093/mnrasl/slw105
- Kazuhiro Hayama, Takami Kuroda, Kei Kotake, and Tomoya Takiwaki, “Coherent network analysis of gravitational waves from three-dimensional core-collapse supernova models”, *Physical Review D*, 92, 12, id.122001, (21pp), (2015). DOI: 10.1103/PhysRevD.92.122001
- Ko Nakamura, Tomoya Takiwaki, Kuroda Takami, and Kei Kotake, “Systematic Axisymmetric Core-collapse Supernova Simulations in Multiple Progenitors”, *Publication of Japan Astronomical Society Japan*, 67, 6, (16pp), (2015). DOI: 10.1093/pasj/psv073
- Akiko Nishiyama, Kazuki Nakashima, Ayumi Matsuba, and Masatoshi Misono, “Doppler-free two-photon absorption spectroscopy of rovibronic transition of naphthalene calibrated with an optical frequency comb”, *Journal of Molecular Spectroscopy*, Vol. 318, pp.40-45 (2015).
- S. Horiuchi, K. Nakamura, T. Takiwaki, K. Kotake, and M. Tanaka, “The red supergiant and supernova rate problems: implications for core-collapse supernova physics”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society Letters*, 445, Issue 1, (p.L99-L103), (2014). DOI: 10.1093/mnrasl/slu146
- A. Nishiyama, A. Matsuba, and M. Misono, “Precise frequency measurement and characterization of a continuous scanning single-mode laser with an optical frequency comb,” *Opt. Lett.*, 39,(16), 4923 (2014).
- A. Nishiyama, D. Ishikawa, and M. Misono, “Development of high resolution molecular spectroscopic system with an optical frequency comb,” *JPS Conf. Proc.*, 1, 013088 (2014).
- 西山明子, 石川大樹, 御園雅俊, “光周波数コムと音響光学変調器を用いた分光システムの開発とナフタレン分子の高分解能分光計測への応用”, *福岡大学理学集報*, 44(1), 11 (2014).