

宇宙線超重核観測計画

早稲田大学 小平聡、道家忠義、長谷部信行、晴山慎、宮地孝、宮島光弘、桜井邦朋、太田周也、
佐藤匡、清水雄輝、鷹野正利、鳥居祥二

放射線医学総合研究所 安田仲宏

横浜国立大学 中村正吾、亀井拓也

高エネルギー加速器研究機構 俵裕子

日本大学 小倉紘一、三角尚治

東邦大学 渋谷寛

岐阜大学 仲澤和馬

Observation Program of Ultra Heavy Nuclei in Galactic Cosmic Rays

S. Kodaira, T. Doke, N. Hasebe, M. Hareyama, T. Miyachi, M. Miyajima, K. Sakurai, S. Ota, M. Sato, Y. Shimizu, M. Takano and S. Torii
Waseda University, Tokyo 169-8555
E-Mail: koda@aoni.waseda.jp

N. Yasuda
National Institute of Radiological Sciences, Chiba 263-8555

S. Nakamura and T. Kamei
Yokohama National University, Kanagawa 240-8501

H. Tawara
High Energy Accelerator Organization, Ibaraki 305-0801

K. Ogura and S. Mikado
Nihon University, Chiba 275-8576

H. Shibuya
Toho University, Chiba 274-8501

K. Nakazawa
Gifu University, Gifu 501-1193

Abstract: The origin of galactic cosmic rays (GCRs) nuclei is still unknown. The precise observation of ultra heavy nuclei ($Z \geq 30$) in GCRs is important to resolve the problems remained in cosmic ray astrophysics. Observation program of these nuclei in GCRs is proposed with the use of high performance solid-state track detector (SSTD) on board long-duration balloon or International Space Station (ISS). The program focuses to measure the isotopic abundance above iron-peak elements and the composition of the rare ultra heavy nuclei up to actinide elements with relativistic energy. The observation of their nuclear composition covers a wide range of scientific themes including studies of nucleosynthesis of cosmic ray sources, chemical evolution of galactic material, the characteristic time associated with cosmic rays, such as heating and acceleration mechanism of cosmic ray particles. In order to achieve the objectives, long-duration balloon and/or ISS capable of carrying very large scientific payloads for long extended period is thought as best suited. The possible approach is based on a large telescope array consisting of modularized SSTD stacks.

Key words: Galactic Cosmic Rays, Ultra Heavy Nuclei, Space Utilization, Space Station, Solid-State Track Detector

1. はじめに
銀河内を飛び交う高エネルギー宇宙粒子線(銀河宇宙線)が初めて観測されてからおよそ 100 年が経過しようとしているが、未だにその起源や粒子加速

機構、銀河空間における伝播過程は明らかとなっていない。銀河宇宙線の源域における同位体を含めた超重核（原子番号 $Z \geq 30$ ）の化学組成は、図 1 に示すように太陽系組成に比べて宇宙線中に過剰で[1]、銀河宇宙線の起源や年齢、宇宙線粒子加速や輸送機構のみならず、銀河物質の化学的進化や中性子捕獲反応による元素合成過程に関して豊富な情報を担っている。これまでに $Z \leq 30$ の元素域では同位体を含め詳細な化学組成の観測が高精度で実現されているが[2]、決定的に銀河宇宙線の謎を解き明かすには至っていない。銀河宇宙線中の超重核成分を高精度に観測することで、その起源や加速および伝播機構を解明し、銀河物質の化学進化や元素誕生の現場の様子を詳細に調べることができ、軽元素で得られた宇宙像を更に展開し深めることができる。

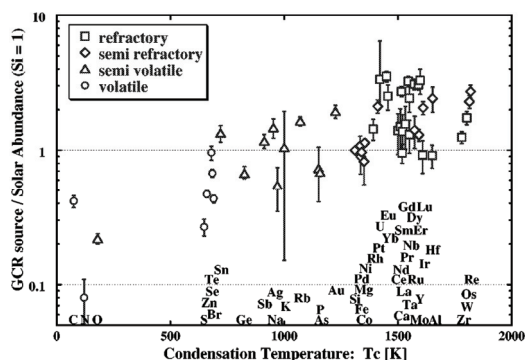


図 1. 各元素の凝縮温度 (T_c) に対する宇宙線源組成と太陽系組成の存在比[1]。

宇宙線中の超重核成分の観測は HEAO-3 等の飛翔体により実施されたが、観測統計量と検出器の粒子識別能力の不足のために核電荷成分の観測のみで、同位体成分の観測は行われてない。将来計画では、高い統計精度を確保するための観測検出器の面積化と高い粒子識別能力を持つ観測検出器が必須である。本研究では固体飛跡検出器がこの両方の点において優れた特性を示すことに着目し、高性能固体飛跡検出器の開発と宇宙ステーションを利用した面積固体飛跡検出器アレイによる宇宙線超重核観測を計画している。本稿では宇宙線超重核観測の科学的意義と高性能固体飛跡検出器の開発現状について報告する。

2. 宇宙線超重核観測の科学的意義

銀河宇宙線の種となる物質が、星間物質に由来するのか、または超新星爆発による放出物に由来するものか、もしくはその混合物なのか、はっきりとした結論はこれまで得られていない。最近の

ACE/CRIS による鉄族までに至る重核成分の同位体観測の結果によると[2]、宇宙線中の ^{22}Ne や ^{58}Fe の太陽系組成に対する存在比過剰から、O 型と B 型の星が集中している OB アソシエーション起源が示唆されている。もし、超重核成分の r 過程元素が宇宙線中に過剰であれば、それは宇宙線の起源が超新星爆発にあり、その発生頻度が非常に高い OB アソシエーション起源の証拠となる。また、宇宙線加速領域への注入に関係する初期加速機構に関しては、ガスからの FIP (First Ionization Potential) 説とダスト・グレインからの Volatility 説が考えられているが、どちらが本質的な初期加速機構として働いているかは決着がついていない。これらの問題を解く重要な情報を担っているのが鉄族よりも重たい宇宙線中の超重核成分である。

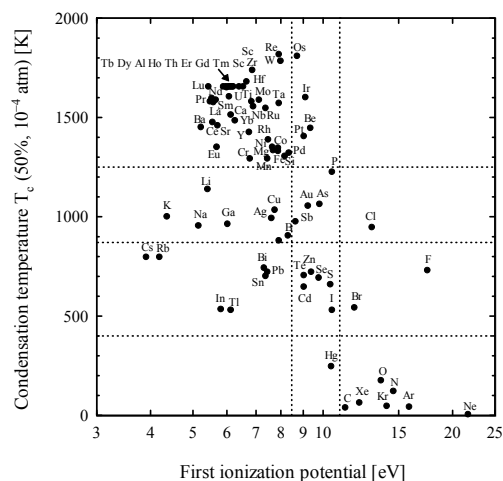


図 2. FIP と凝縮温度 (T_c) との関係[3,4]。

特に期待される科学的成果の一つに、宇宙線加速領域への注入に関係する初期加速機構の解明が挙げられる。この初期加速機構に関して FIP 説と Volatility 説が考えられているが、FIP と Volatility には図 2 に示すような、FIP の値が高い元素ほど Volatile であるという良い逆相関関係が見られ[3]、宇宙線への注入には両方のバイアスを受けている可能性がある。しかしながら、超重核元素中には、Cs や Rb などの FIP が低く Volatile な元素や、Os や Ir など比較的 FIP が高く Refractory な元素など相関関係から外れる元素が幾つか存在する。このような相関関係から外れる元素 (Ga, In, Tl, Rb, Sn, Cs, Pb, Bi 等) は何れも超重核であり、高精度にその存在比を測定し比較することによって、宇宙線の初期加速機構が FIP と Volatility ではどちらが支配的であるかという長年の論争を決着することができるものと期待される。

3. 高性能固体飛跡検出器の開発

超重核成分を観測するためには、観測検出器を数 m^2 以上の大面積に展開でき、質量及び電荷の高い決定精度を有する粒子線検出器でなければならない。その最有力候補として固体飛跡検出器に着目している。固体飛跡検出器は軽量で煩雑なエレクトロニクスを要しない上、安価であるため、大面積の検出器アレイを展開することが可能である。固体中に荷電粒子が通過した際に残される放射線損傷(潜在飛跡)は、エッチング処理することで円錐状の穴、エッチピットと呼ばれる飛跡が形成される(図3)。固体飛跡検出器は、その穴の大きさ等を光学顕微鏡下で観察・測定することで、入射粒子の持つエネルギーや電荷、質量を弁別することができる。従来の固体飛跡検出器の解析には膨大な時間とマンパワーが必要とされ、飛跡の解析においても大きな誤差が伴った。大面積固体飛跡検出器に生成した超重核飛跡を高速にかつ高精度に抽出・解析するには、従来の固体飛跡検出器の解析手法では到底無理であった。そこで本研究では、高い粒子決定精度を有する高性能固体飛跡検出器(CR-39とBP-1)と高精度かつ高速に飛跡を読む自動解析装置による高性能粒子検出システムの開発を進めている。

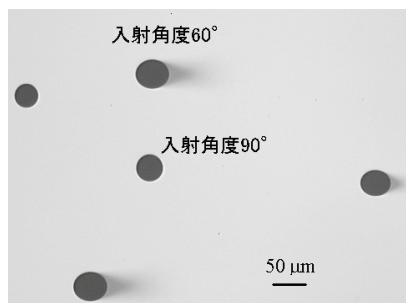


図3. CR-39に生成した鉄核のエッチピットの顕微鏡画像。

3.1 高性能CR-39固体飛跡検出器の開発

CR-39は原理的に、電離損失過程で放出される δ 線のうち高エネルギーのものは飛跡生成に寄与しないので、エネルギー付与に関する統計的なゆらぎの影響を受けにくいために、優れた粒子弁別能を持つと考えられる[5]。本研究では、高純度のADC(Allyl diglycol carbonate)モノマーを重合させたBARYOTRAK(フクビ化学工業(株))を基材とし、重イオン加速器による重イオンビームを用いた感度応答の較正実験、粒子識別能力試験(電荷および質量分解能の評価)、環境性能(温度特性、真空度特性)、 Z/β 検出閾値の制御について研究を実施した。その結果、CR-39を用いて鉄核において

0.20cuの電荷分解能、0.22amuの質量分解能を達成している[6]。また、重イオン照射時の温度変化と圧力変化に伴う応答感度の変化を調べた[7]。CR-39は室温よりも高い温度で、その応答感度は大きく影響されるが、 $30^{\circ}C$ 以下の低温領域においては応答感度の変動は殆ど見られず、一定の感度で安定に動作する。従って、 $30^{\circ}C$ 以下に保持することで、応答感度の変化は抑えることができる。また、重イオン照射時の圧力(大気圧)に対するCR-39の応答感度の変化を調べた結果、数百 Torrの領域では殆ど応答感度に変化は見られず安定することが分かった。更に、宇宙線中の鉄核より軽い核の強度は超重核よりもずっと大きいので、軽い核に応答しない検出器、言い換えれば超重核のみに応答することが望ましい。そこで、CR-39にDAP(Diallyl phthalate)樹脂を重合させる工夫をフクビ化学工業(株)の協力を得て試みている。現段階で、DAPの重合割合が増えるに従い検出可能な荷電粒子 Z/β の閾値が上昇することが、実験的に得られた。従って、DAP重合割合を調整することで、 Z/β 検出閾値を制御することができ、必要とする Z/β 値を有する検出器が製作できることが実証された[8]。CR-39は宇宙線観測環境下で、温度や真空度を制御する必要性はあるが、重荷電粒子の電荷及び質量決定精度に優れていることから、超重核観測のための検出器として最有力候補である。

3.2 高性能BP-1固体飛跡検出器の開発

1988年にWangらによって開発されたBP-1ガラス固体飛跡検出器[9]は、温度依存性が非常に少なく真空でも有感である。すなわち、特段の温度制御や気密性を要求しない。従って、BP-1固体飛跡検出器は観測環境が厳しい宇宙空間において非常に有利である。しかし、これまでのBP-1は検出できる電荷閾値が $Z=50$ 以上であり、重荷電粒子に対する応答がCR-39に比べて悪い。また、BP-1の質量決定精度は、これまで十分な分解能が達成されていない。そこで、我々は観測環境に非常に強く、宇宙空間における観測にきわめて有利なBP-1について、ガラス構成組成(P_2O_5 : 65.2 wt%, Na_2O : 4.4 wt%, SiO_2 : 5.0 wt%, BaO : 25.3 wt%)の最適化と品質の均一化を目指し、オハラ(株)の協力を得て、宇宙線超重核観測に指向した高性能BP-1ガラスの開発と加速器実験による試作ガラスについて、応答感度試験、組成分析試験等の種々の基礎試験を実施する段階まで到達している。また、手作業による試作現行ベースから製品製造ラインへの拡張によって、均一性の高いBP-1を供給しつつある。

3.3 高速・高精度の解析システムの開発

従来の固体飛跡検出器の解析法は多大な労力と時間を要した。これまでの光学顕微鏡下の CCD 撮像方式に代わり、1次元ラインセンサを導入することで撮像の高速化(約 38 秒/cm² @ 0.35μm/pixel)が既に実現されている[10]。また顕微鏡上試料の自動配置・回収システムの構築[11]、撮像画像の高速解析プログラムの開発[10]により、解析時間が従来の約 1/100 を構築されている(図 4)。これにより全自動で高速に相対論的速度にある超重核元素を高精度に同定することが可能となった。また、大面積(数 m²以上)の検出器を展開する観測を行い、目標とする宇宙線超重核成分を探し出し解析することは容易でない。そこで、宇宙線超重核によって生成した貫通孔のみを効率的に検出するシステムとして、真空紫外光を用いた貫通孔検出システムが既に構築されている[12]。以上のように、表面飛跡解析システムの高速化は既に達成されている。

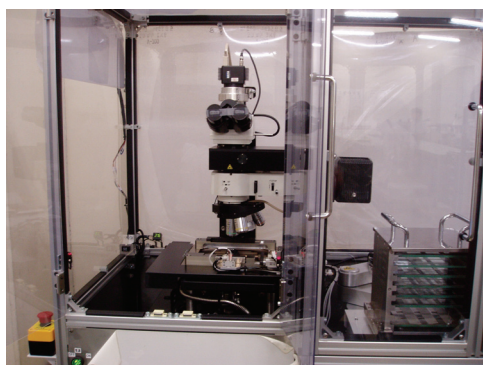


図 4. 高速自動読取顕微鏡システム。

粒子弁別精度を悪化させていた主原因である固体飛跡検出器の厚さ測定[13]について、従来のマイクロメータによる平均的な厚さ測定に代わり、2次元 CMOS センサを導入した光学的な方法によって、従来の測定精度よりも約 1 桁高くかつ局所的な厚さを測定する厚さ測定装置を開発した[14]。超重核同位体をより高い質量分解能で弁別するためには飛跡の 3 次元情報を得ることが重要であるので 3 次元読出機構を新たに開発中である。

4. まとめと今後の展開

宇宙線中の超重核成分を高精度に観測するために、高性能固体飛跡検出器(CR-39 及び BP-1)の開発を行い、CR-39 についてはほぼその性能評価を終えている。また解析システムについては、従来大変な労力と時間を解析に要していたが、新たに高速

画像撮像顕微鏡と自動試料配置システム、飛跡貫通孔検出システムが既に構築されており、高精度にかつ高速に大面積の固体飛跡検出器を解析することが可能となった。

今後の展開として、本研究で開発を行った高性能固体飛跡検出器を大面積に展開し、ISS あるいは長時間気球による宇宙線超重核を高精度観測するフェーズへと移行する。ISS において 4m²に検出器を展開し 3 年間観測した場合、HEAO-3 実験の統計量のおよそ 50 倍を得られると期待される。更に我々の実験では超重核の同位体(26≤Z≤54)を 0.1-0.35 amu の質量分解能、核電荷(26≤Z≤92)を 0.1-0.3 cu の電荷分解能で観測することができ、統計精度及び粒子決定精度共に世界最高精度での観測が実施可能である。高精度な超重核成分の観測的研究によって得られる知見により、宇宙線研究の一層の発展、また宇宙核物理学等の周辺分野への拡大と発展を促進することができるものと期待される。

謝辞

本研究は、放射線医学総合研究所の重粒子線がん治療装置 HIMAC における共同利用研究課題(15P146 及び 18P211)のビーム実験の結果の一部である。HIMAC 実験関係者の方々に記して感謝の意を表す。また本研究の一部は、科学研究費補助金(19840046)の助成を受けて遂行され、また(財)日本宇宙フォーラムが推進している「宇宙環境利用に関する地上研究公募」プロジェクトの一環として行ったものである。

参考文献

- [1] N. Hasebe et al., Nucl. Phys. A758 (2005) 292c.
- [2] M.H. Israel et al., Nucl. Phys., A758 (2005) 201c.
- [3] J.P. Meyer et al., Astrophys. J., 487 (1997) 182.
- [4] K. Lodders, Astrophys. J., 591 (2003) 1220.
- [5] T. Doke, T. Hayashi and K. Nagata, Proc. of the U.S. Japan Seminar on Charged-Particle Penetration Phenomena, (1982) 149.
- [6] S. Kodaira et al., Jpn. J. Appl. Phys., 46 (2007) 5281.
- [7] S. Kodaira et al., Proc. of the 30th Int. Cosmic Ray Conf., (in press).
- [8] S. Kodaira et al., Radiat. Meas., (in press).
- [9] S.C. Wang et al., Nucl. Instr. & Meth., B35 (1988) 43.
- [10] N. Yasuda et al., Radiat. Meas., 40 (2005) 311.
- [11] H. Tawara et al., Nucl. Instr. & Meth. A, (submitted).
- [12] 中村正吾 他, 宇宙放射線, Vol. 5 No. 1 (2006) 39.
- [13] S. Kodaira et al., Jpn. J. Appl. Phys., 43 (2004) 6358.
- [14] S. Kodaira et al., Nucl. Instr. & Meth., A574 (2007) 163.