

## 第2部

---

### それぞれの100年

第1章 宇宙線研究の100年

第2章 工学研究の100年

〔補遺〕自動車産業に貢献する薄鋼板のプレス技術

第3章 工作部の100年

第4章 生物科学研究の100年

〔補遺〕FANTOMプロジェクト

第5章 女性科学者の100年

第6章 図書館の100年

100年の積み重ねは大きい。仁科芳雄らの清水トンネルにおける先駆的な宇宙線研究の先に、今日のニュートリノ研究がある。薄鋼板のプレス技術の研究は、自動車産業繁栄の確固たる礎を築いた。高性能の測定機器や工作機械は、日本の産業が自立する手段を提供した。さらに、ゲノム科学を推進するFANTOM プロジェクトは、iPS細胞誕生に大きく貢献した。理研はまた、女性科学者にとって最初の研究拠点であり、楽園であった。

# 第1章

## 宇宙線研究の100年

理化学研究所における宇宙線研究は仁科芳雄博士が先駆けとなった。1931（昭和6）年に開設された仁科研究室の五つの研究課題の中に、しっかりと宇宙線研究が入っていたのである。宇宙線の発見は1912年でまだ日は浅かったが、加速器が誕生する前であり、いわば天然の加速器として素粒子物理学に大きく貢献したのである。陽電子、ミューオン、パイ中間子はいずれも宇宙線の中から発見されている。特にミューオンは理研での発見が最も早かったにもかかわらず、論文発表の手続きの不運で、発見者の名声を取り損なった。

その後、仁科電離箱などによる広域の宇宙線観測、あるいは清水トンネルでの地下深部観測などを通じて、宇宙線の特徴が明らかにされていった。第二次世界大戦の苦境を超えて、戦後は、南極観測あるいは国際地球観測年などで、理研の宇宙線グループはその存在感を高めていった。わが国における宇宙線研究者の供給基地となったのである。

1960年代以降、理研での宇宙の研究は宇宙線から、高エネルギー光子を用いた宇宙物理学、天文学の方向に軸足を移していった。小田稔の「すだれコリメータ」や一連のX線天文衛星「はくちょう」「てんま」「ぎんが」「あすか」によって、日本の研究が世界をけん引する時代を迎えたのである。

そのような研究の重要課題の一つはガンマ線バースト（GRB）で、重力波が検出されたこと（2016）を受け、その重要度は急上昇している。理研は国際宇宙ステーションISSに全天X線監視装置MAXIを打ち上げ設置し、GRBなどの突発現象を常時監視している。これは天体観測に不向きなISSの特徴を逆手に取ったアイデアの勝利であり、これまでに100例を超すGRB、18個のX線新星を発見するなど成果を挙げている。

宇宙線（荷電粒子）に関する大きな課題の一つは、 $10^{20}$ eVという超高エネルギー宇宙線（UHECR）の起源を特定し、その加速機構を突き止めることである。これを大気圏外から行うべく、日欧露などによるK-EUSO計画が着々と進んでいる。

### 第1節 宇宙線の発見

今から約100年前、すでに放射線の存在は知られており、それは地殻（ウラン系列など）から来るので、上空では大気により遮蔽されて減るだろうと期待されていた。ところがエッフェル塔の上部での測定などから、その予想と食い違う実験結果が散見されるようになり、ついに1912年にオーストリアのヘス（V. Hess）は自ら検電器を携え気球に乗り観測を行ったところ、高度4kmを超える上空に昇ると確かに放射線が強くなる（検電器が速く放電してしまう）ことを発

見した。これが自然放射能のうち、宇宙線とよばれる成分、すなわち宇宙のどこかで加速された高エネルギー粒子（主に陽子）が、地球に降り注ぐ現象の発見であった。

宇宙線が地球の大気に突入すると、さまざまな素粒子反応が「ねずみ算」のように起こり、多くの粒子が連鎖的に生成され、当初1個の宇宙線が持っていた巨大なエネルギーが、膨大な数の粒子に分配される。こうして生じた粒子は二次宇宙線とよばれ、それらが地上で盛んに観測されるようになったのである。

以来、宇宙線の研究は大きく三つの観点から進められてきた。

第1に宇宙線は、貴重な天然の加速器であり、1950年代に入って高効率の加速器が次々に開発されるまで、宇宙線の研究は素粒子物理学のけん引役を果たした。例えばアンダーソン (C. Anderson) により1932 (昭和7) 年には陽電子が、1937年にはミューオンが、1947年にはパウエル (C. Powell) により湯川秀樹博士の予言したパイ中間子が、また同じころストレジネスをもつラムダ粒子が、いずれも二次宇宙線の中に発見された。

第2の意義は、そのような超高エネルギーの粒子が、宇宙のどこで、どう加速されているのかを理解するという宇宙物理学としての観点で、これは現在でも未解決である。第3は、宇宙線をプローブとして、それらが伝搬して来る惑星間空間の物理状態、太陽風の影響、太陽活動などを調べるという立場であり、こちらは太陽地球環境研究という分野につながる。

## 第2節 仁科研究室での宇宙線事始め

### 理研の仁科研究室

日本で1930 (昭和5) 年ごろに宇宙線の研究に先鞭を付けたのは、「日本の現代物理学の父」と称される仁科芳雄博士である。博士



図1 コペンハーゲンに留学中の仁科と友人たち (1925)  
左から右へ、仁科、デニソン (D. M. Dennison : 米)、クーン (W. Kuhn : スイス)、クローニヒ (R. Kronig : オランダ)、レイ (B. B. Ray : インド)。  
Kubo, R.: "Yoshio Nishina, the Pioneer of Modern Physics in Japan", in *Evolutionary Trends in the Physical Sciences* (Springer Proceedings in Physics, 57, 1991) より転載。

はクライン-仁科の公式で知られるように、卓抜な理論家であるとともに、実験家としても出色の存在で、その研究は広く実験と理論をカバーしていた。物理学では理論と実験が分離しがちで、両方でトップクラスという「二刀流」の物理学者は、仁科を除けば、エンリコ・フェルミ (Enrico Fermi) ぐらいではないだろうか。仁科は図1のように、コペンハーゲンでニールス・ボーア (Niels Bohr) の下で研さんを積み、帰国して1931年に理研で研究室を開設したのだが、その際に掲げた研究課題は、(1)量子力学、(2)原子核物理学、(3)X線分光による原子・分子の研究、(4)宇宙線の研究、(5)高エネルギー光子ビームの生成、であった。

驚くべきことにその多くが、現在の理研における物理学研究へと発展し、脈々と受け継がれている。(4)が

本章の主題であるが、(2)は理研の歴代のサイクロトロンからRIビームファクトリーへ成長し、(5)はSPRing-8からX線自由電子レーザー施設SACLAへと発展してきた。また仁科が多くの後輩を育てたことも有名で、当時の仁科研の室員表を見ると、多くのメンバーの中に2名だけ「研究員」の肩書きを持つ者がおり、それが日本最初のノーベル物理学賞の受賞者となった湯川秀樹（1946年に受賞）と2番目（1965年）に受賞者となった朝永振一郎であった。

### ミューオンの発見

当時、宇宙線の飛跡を見る主な計測器は霧箱で、それに強い磁場を掛けると、飛跡の曲がり方から、電荷の正負、運動量と電荷の比などが分かるが、それには大電流が必要である。仁科は横須賀の海軍工場に頼み込み、潜水艦の蓄電池に充電するための特殊な電源を使わせてもらい、測定を行ったそうである。当時、宇宙線には透過力が強い「硬成分」と透過力の弱い「軟成分」があることが知られており、仁科らは前者が陽子、後者が電子や陽電子と考え、それを検証しようと実験していた。すると1937年に大発見がもたらされた。その発見論文は簡潔で力強い。和訳すると「硬い成分の中に、驚いたことに、陽子よりずっと透過力が強く、しかも正負両方の電荷を持つ粒子が混じっていた。（中略）この結果は、電子よりは重く陽子よりは軽い、新種の粒子があると考えると最も自然に説明できる」「この粒子の質量は、陽子の7分の1から10分の1と推定できる」。エネルギーで表記すれば94-134MeV（メガ電子ボルト）であり、これが質量105.65MeVを持ち「電子の重い姉妹」とよぶべきミューオンの発見であり、質量の推定は大変正確であった。図2にその霧箱写真を示す。

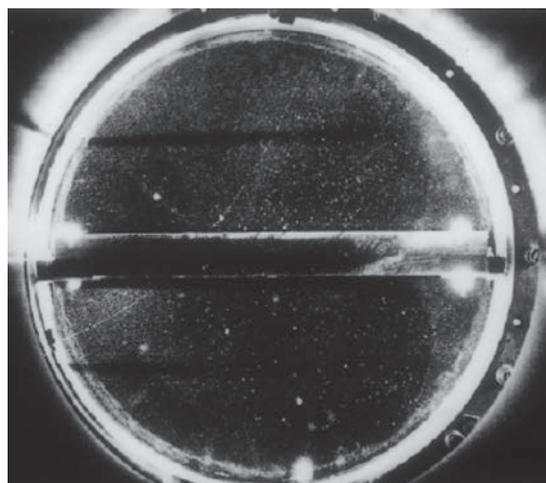


図2 仁科らによる霧箱写真 中央上部から左下に向け、ミューオンによる弓なりの軌跡がみられる。小林誠・西村純・池田長生編、仁科記念財団、*Publication*, No.52、2010年12月、p.13。

しかし、わずか数カ月前に、上記のアンダーソンと弟子のネッダーマイヤー（S. Neddermeyer）が、同様な発見を発表していたため、第一発見者の栄誉はそちらに譲らざるを得なかった。実は仁科らの論文が先に受理されていたが、レター誌には長過ぎ本論文に回されたため、タッチの差で遅れをとったという。

霧箱は、気体を詰めた箱のピストンを引いて過飽和状態を作ると、放射線の飛跡が見やすくなる。この実験では粒子の通過に同期したガイガー計数管の信号でピストンを引くことで、検出効果が大幅に上昇した。今日の言葉でいう同時計数（コインシデンス）である。この技術も、理研の仁科研究室で、嵯峨根遼吉（長岡半太郎の五男）が独自に開発したが、こちらもブラケット（P. Blackett）らに先を越されたという。

### 仁科型電離箱

宇宙線の時間変動も重要な研究項目となった。例えば1936年6月19日、皆既



図3 左：理研記念史料室に保管されたネーア型電離計。中ほどより少し右に読み取り用の接眼レンズが見られる。  
右：仁科加速器研究センターに保管された仁科型電離箱の2号機。ガスは抜かれ0気圧になっている。

日食が北海道に起きた際、斜里岳（1260m）の頂上付近にネーア型の電離計を設置したところ、日食によって宇宙線強度が変わらないことが確認された。これは宇宙線のうちの太陽に起源を持つもの（主に低エネルギー）が少数派であることを示す。図3（左）は、理研記念史料室に保管されているネーア型電離計で、そのころに使用されたものの一つと思われる。

仁科らは宇宙線の強度変化を多地点で長期にわたって測定すべく、1935年ごろから40気圧のアルゴンを詰めた電池駆動の「仁科型電離箱」を設計し、それが理研の工作部で製作された。これは宇宙線によりアルゴンが電離されて流れる微小な電流を、さまざまな工夫で精度よく計測し、検流計の針の振れをフィルムに記録するという、当時としては最先端の装置であり、これを使い、サハリン（豊原）、東京、富士山、台湾（阿里山）、パラオという、当時の日本の統治地区を北から南まで利用した壮大な観測が行われた。異なる緯度を選んだのは、赤道付近ほど地磁気が強く、低エネルギーの宇宙線は磁場に跳ね返されて大気へ突入できないのに対し、極地方では低エネルギーの宇宙線まで、突入できるからである。

後に1号機は乗鞍観測所（第3節で述べる）に移設され、5号機は理研板橋分所（同じく第3節参照）に置かれるなど、5台はそれぞれ別の経歴をたどり、うち5号機は国立博物館に、2号機はガス抜きと較正用のウラン線源の取り出し後、理研仁科加速器研究センターに保管されている。図3（右）にその写真を示す。

現在、大きな太陽フレアのあと数日にわたり、地球に到来する宇宙線の強度が減少することが知られており、1936年にフォーブッシュ（S. E. Forbush）が発見したため「フォーブッシュ減少」とよばれている。しかし1942年2月28日、同3月7日、および1947年7月25日の3回にわたり、宇宙線強度が「増加」する場合もあることが、同じくフォーブッシュにより報告された。これを知った宮崎友喜雄、三浦功、和田雅美、西村純らはデータを再解析し、1942年3月7日に確かに駒込と<sup>まみあな</sup>狸穴に置かれた仁科型電離箱で、宇宙線の増加が記録されていること

を確認したが、さまざまないきさつで投稿論文にはならなかったという。このように宇宙線の増加や減少が起こるのは、太陽フレアの約1日後に、フレアで放出された磁化プラズマが地球に到来し、そこに含まれる太陽起源の低エネルギー宇宙線が数時間ほど急増するが、プラズマの津波が地球を超えて広がってゆくと、今度は太陽系外から侵入してくる高エネルギーの宇宙線（銀河系やその外で作られた）を押し戻し、宇宙線の「減少」に転じるためである。実際、仁科型電離箱の測定では、宇宙線強度が、太陽の黒点数の変化から1年ほど遅れて変化することも観測されたという。

### 清水トンネルでの実験

1934年、日本学術振興会に、宇宙線の委員会（第10小委員会、通称「仁科学振」）が設置され、日本の宇宙線研究が大きく進展し始めた。その一環として仁科らは、宇宙線が地中どこまで深く突入するかを調べるため、鉄道省に掛け合い、上越線の清水トンネルの中に観測小屋を作った。図4はその一コマである。川端康成が小説『雪国』の冒頭で「国境の長いトンネルを抜けると雪国であつた」と書いたその清水トンネルは、群馬・新潟県境に聳える谷川岳の山腹を貫き、延長9.7kmで当時は日本最長であった。観測小屋は山頂部から約500mの深さ（水の厚みに換算して1400m相当）にあり、そこに上方から到来する宇宙線を、三層に重ねたガイガー計数管で同時計測したのである。今ではカミオカンデのニュートリノ研究に代表されるように、地下深く貫通する宇宙線成分を調べるため、地下実験は広く行われているが、当時としては画期的なことであった。

博士らは、計数管の層間にさまざまな厚みの鉛ブロックを挟み、1936年から1944年まで4600時間もの測定を行った。その結果、この深い地中にも宇宙線が到達すること、またそれらは透過力が強く、20cm厚の鉛を容易に透過することを発見した。主成分はミューオンであるが、1940年に発表された論文では、「これらが主に荷電を持ったメゾン（今日でいうミューオン）なのか、または中性のニュートリノなのかは、判然としなない」と書かれている。ニュートリノが仮想的粒子として、パウリ（W. Pauli）により提案されたのが1934年ごろであり、ライネス（F. Reines）とカウアン（C. Cowan Jr.）により、初めて実測されたのが1950年代半ばなので、素晴らしい卓見と言えよう。仁科らは論文で、上野駅、水上駅、および越後湯沢駅の駅員に対する謝辞も忘れなかった。



図4 清水トンネル内で、機器の据え付けを見守る仁科芳雄（中央）と宮崎友喜雄（右）。近藤一郎「仁科型電離箱に関するメモ」より。

## 第二次世界大戦によるダメージ

こうした宇宙線の研究に、戦争は大きなダメージを与えた。1945年8月6日、広島に原爆が投下された直後、仁科は現場を視察したが、その際に放射線の被曝を受けた可能性は否定できない。仁科はその後、理研コンツェルンの強制解体や新しい（株）科学研究所の経営に苦労する中で、1945年11月には日本に進駐した連合国軍最高司令官総司令部（GHQ）により、仁科らが心血を注いだ理研サイクロトロンが軍事研究と誤解されて海洋投棄された。さらには1946年2月、原因不明の火災により清水トンネルの装置が焼失するなど、失意の日々が続いた。これらの心労の結果であろうか、仁科は1951年に60歳で肝臓がんにより他界し、それが理研および日本の宇宙線研究にとって大きな痛手になったことは、想像に難くない。

## 第3節 戦後の宇宙線研究の再出発

### 板橋での研究再開

戦時中、宇宙線研究室は金沢に疎開していたが、終戦後に仁科がGHQと交渉し、空襲により大きな損害を受けた駒込に代わって、GHQ管理下にあった板橋区加賀町に1946（昭和21）年、理研・板橋分室を置いて研究を再開した。石神井川に沿ったこの分室は、終戦までは旧陸軍の第二造兵廠<sup>しょうしょう</sup>として武器製造に用いられており、そのうち図5に示す頑丈なレンガ造りの細長い平屋4棟が理研の建屋として転用されたのである。板橋ではその後、山崎文男（主任任期1952-1959）、



図5 2015年の理研・板橋分所

宮崎友喜雄（同1959-1973）、和田雅美（同1973-1985）と歴代の主任に率いられた宇宙線研究室が研究を行い、理研は日本の宇宙線研究のメッカとして多くの人材を輩出した。ある年代から上の日本の宇宙線研究者で、理研に多少とも関係を持たなかった人はまれであろう。理研から名古屋大学に移った関戸弥太郎、理研から気象研究所（ついで神戸大学）に移った皆川理、理研から立教大学に招かれた中川重雄、大阪市立大学の渡瀬譲らが、宇宙線の観測的研究を推進したのである。

宇宙線粒子はエネルギーが高いため、薄い鉛板を容易に突き抜ける。それどころか、鉛の内部で次々に2次、3次、4次、…と粒子を作るため、鉛板からは複数の粒子が抜け出してくる。鉛を厚くするにつれ、出てくる粒子数も増加するが、あまり厚くなって粒子の数が増えると、個々の粒子に分配されるエネルギーが下がり、新たに粒子を生成できなくなるため、粒子は崩壊やエネルギー損失で減り始め、つき抜けて出てくる粒子数は減少に転じる。すでに1932年ごろにロッシ（Bruno Rossi）らは同時計数法を導入し、鉛板の厚みを横軸にとり、1個の宇宙線から作られる粒子の数を縦軸にとった「ロッシ曲線」を作成した結果、典型的な宇宙線に対しては、鉛の厚みが約2cmの時に曲線が最大（2次粒子の数が

最大)になることを発見していた。

戦前、このロッシ曲線に第2の極大がある可能性が浮上したが結論は出ていなかった。仁科研の亀田薫および三浦功は板橋でこの問題に取り組んだ結果、図6に示すように「ロッシ曲線」に、既知の2cmでの極大に加え、15cm付近に第2の極大があることを証明した。今日の言葉で言うと、第1の極大は宇宙線に含まれる電子成分が電磁相互作用により作り出す電磁シャワー、第2極大は、宇宙線の陽子成分が鉛の原子核と核力相互作用して作り出すハドロンシャワーだった。電磁力に比べ核力は、近距離ではずっと強いが、到達距離がはるかに短いため、核力相互作用は起こりにくいのである。

亀田・三浦の実験では、入射粒子を鉛直方向のものに絞り、陽子の流束が極大になる条件を利用したことが成功の鍵だったという。この実験の最中に、仁科が友人でありノーベル賞受賞者であるラビ (I. Rabi) 博士を板橋に案内した際、ラビ博士は亀田・三浦の実験装置 (寄せ集めだったそうだが) を見てその重要性を直ちに理解し、結果を *Physical Review* に投稿するよう強く薦めたという。結局この結果は、戦後に湯川秀樹らが創設した日本の雑誌 *Progress of Theoretical Physics* に掲載された。装置も資材も払底していた戦後の悪条件の中、優れたアイデアで導かれたこの実験結果は、日本および理研の宇宙線研究が戦災から立ち直る第一歩となったと言えよう。

このように日本の宇宙線研究のいわば心臓部として機能した板橋分所だったが、1986年、和田雅美から松岡勝への主任の交替に伴い、宇宙線研究室は宇宙放射線研究室と改称され、研究の舞台は和光に移った。研究テーマも古典的な宇宙線研究から、飛翔体を用いた宇宙の観測的研究へと大きく舵を切った (詳細は第4節)。2015年3月、板橋分所は理研により閉鎖が決定されたが、幸い板橋区のご厚意により、建物を含む一帯は史跡公園として保存される予定である。

### 空気シャワーと乗鞍観測所

1950年代、空気シャワーとよばれる現象が、理論的にも実験的にも宇宙線の中心課題の一つとなった。図6のロッシ曲線で、鉛板を大気で置き換えてみよう。例えば  $10^{15}$ eV という超高エネルギーの宇宙線1個が大気に突入すると、次々に粒子を作り、地上高度およそ16kmでそれら粒子数が数十万-数千万個という極大に達し (この高度をポツァー極大という)、それ以降は粒子が崩壊などで次第に数を減じつつ、ほぼ光速に近い速度で一挙に地上に降り注ぐのである。これが空気シャワーとよばれる現象で、1発のシャワーは地上で直径数百mにも広がる。

1次粒子が電子やガンマ線の場合には、電子・陽電子ペアと2次的ガンマ線が連鎖的に作られることから、電磁シャワーとよばれる。他方で出発点が陽子の場

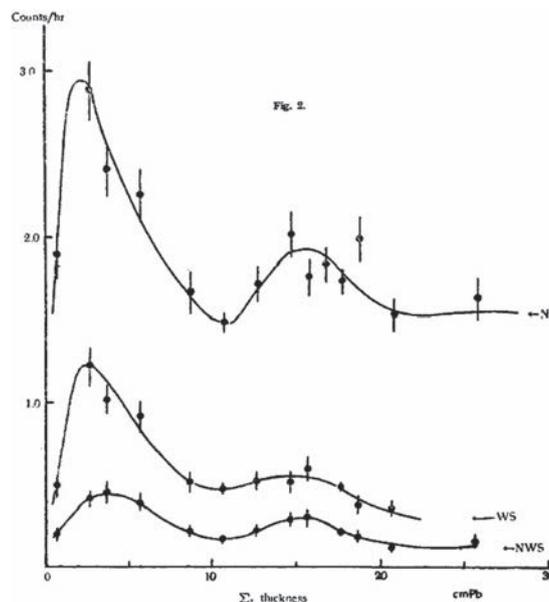


図6 板橋で宇宙線を用いて測定された鉛のロッシ曲線  
第2極大が見られる。[*Prog. Theor. Phys.* 5, 323 (1950)]。

合、核力により多数のパイ粒子が作られ、そのうち中性パイ粒子は直ちに2個のガンマ線に崩壊して、電磁シャワーを起こす。また荷電パイ粒子はミューオンへと崩壊して地上に達し、ハドロンシャワーとよばれる。1952年ごろ西村純と鎌田甲一により開発された「三次元電子シャワー理論」は、シャワーの発達を記述するモデルとして大きな役割を果たした。

宇宙線の研究には、高山での観測が適している。そこで朝永振一郎や武谷三男の支援の下、朝日新聞の学術奨励金により1950年、長野・岐阜県境の乗鞍岳の肩に当たる標高2780m地点に、すでに存在した大阪市大の小屋と並んで宇宙線の実験室（通称・朝日小屋）が建設され、各種の霧箱、仁科型の1号機などによる

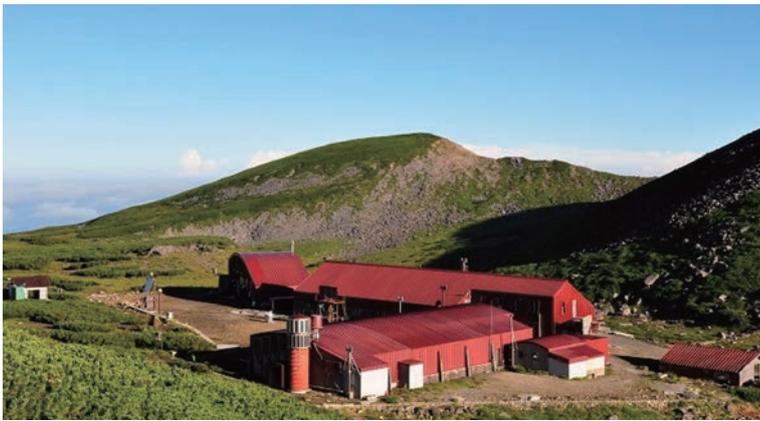


図7 現在の乗鞍宇宙線観測所 東京大学宇宙線研究所HPより。

観測が始まった。これら二つの小屋は1953年には東京大学附置の乗鞍宇宙線観測所へと統合・発展し、1955年に東京大学原子核研究所が田無市（現西東京市）に設立された（1976年に宇宙線研究所として独立）。さらに本節で述べる世界標準の中性子モニターが設置されると、通年観測が必要となり、理研・板橋分所の所員も含めて交替で当番を務めることとなった。車の通わない冬期には、吹雪や滑落の危険を冒して

徒歩やスキーで登り降りしたという。図7に現在の乗鞍観測所を示す。

乗鞍と並んで理研が空気シャワー研究に用いたのが、航空機であった。1959年から1979年まで、各種測定器を積んだ日本航空の航空機が17回にわたりチャーターされ、高度変化を見るため地上5-12kmのさまざまな高度を選び、緯度変化を見るため北海道や九州へ飛行した。初期には4発プロペラ機のダグラスDC-6BやDC-7、のち4発ジェット機のDC-8やコンベア880が用いられた。また理研の和田、岡野眞治らは東京-札幌の定期便ジャンボジェット2階の同一座席に宇宙線の計測装置を載せ、年に数回の往復測定を行った。これらの観測により、図8のように、地上から高度10km付近までの宇宙線の様子が分かってきた。

空気シャワー現象は現在でも、超高エネルギーの宇宙線陽子やガンマ線の発生源・加速機構を調べる重要な情報源であり、その観測方法として、

- (i) 地上に検出器群を展開しシャワー粒子を直接に検出する方法

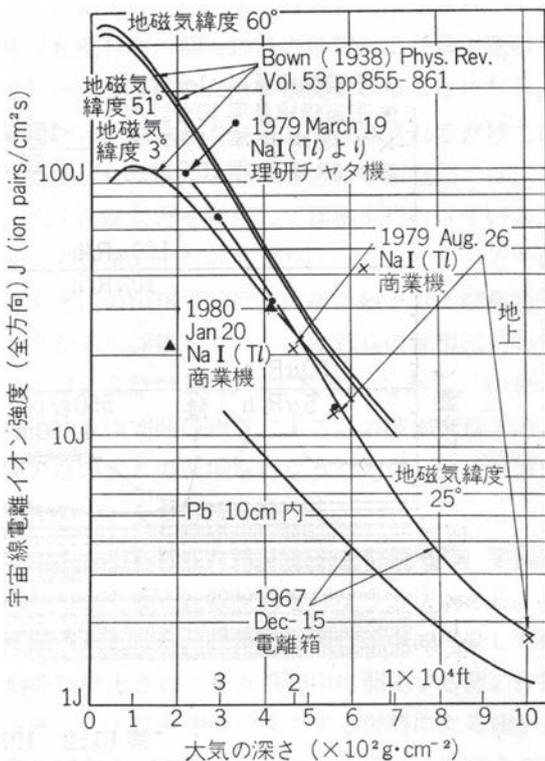


図8 航空機などを用いて明らかになった、高度による宇宙線強度の変化 [理研報告56、15 (1980)]。

(ii)シャワー粒子が大気に突入する際に作り出すチェレンコフ光ビームを地上から観測する方法

(iii)同じく粒子が大気上層部で作る微弱な大気蛍光を地上ないし宇宙空間から観測する方法

という三つが開発されてきた。

例えば1960年代にボリビアのチャカルタヤ山で始まった標高4700m地点（ほぼ0.5気圧）での空気シャワーアレイ実験は、前述のロッシと後に第4節で登場する小田稔との立案でスタートし、当初主に(i)が用いられた。理研は工作部（のち技術部、研究基盤技術部と変遷）を中心に、東大、大阪市大、東工大、MIT、ボリビア・サンアンドレアス大などと協力して装置開発や現地での建造に参加し、西克夫、田島典夫、山田豊、霜田進らが貢献した。

現代では、東大宇宙線研究所が米国ユタ州で展開しているテレスコープ・アレイ（TA）実験や、南米で実施中の大型国際協力プロジェクト「ピエール・オージェ実験」はともに(i)と(iii)の併用、世界規模で計画が進行中のチェレンコフ・テレスコープ・アレイ（CTA）計画は(ii)、後述の理研主導のK-EUSO計画は(iii)を用いる。

乗鞍などを利用した新しい研究として、宇宙線研究室の流れを汲む牧島宇宙放射線研究室では2006年、土屋晴文らを中心に東大と共同チームを組み、岡野の支援も得て、雷雲から飛来するガンマ線の検出実験を開始した。後に京都大学、金沢大学なども加えて発展中で、これまで乗鞍やチベット<sup>ヤンパーチン</sup>羊八井（後述）での夏の雷雲に加え、新潟県柏崎の刈羽原子力発電所で、季節風に伴う冬の雷雲から強いガンマ線放射を20例以上も検出してきた。雷雲内部の強い電場で電子が逃走的に加速され、制動放射でガンマ線を出し、そのビームが下方に向くと地上の検出器に到達すると考えられる。ガンマ線放射は2-3分も続く場合と1秒以下の場合があり、陽電子の生成を伴う例も発見された。

これまで宇宙での粒子加速機構としては主に、衝撃波の上流と下流の間を粒子が往復し徐々にエネルギーを高めるといふ、統計的加速（一次のフェルミ加速）が主流であったが、この雷雲の観測結果は、濃密な1気圧の大気中においてさえ電子が最大で20MeVまで加速されることを意味しており、宇宙では普遍的に「静電場加速」が起こっている可能性を示唆する。

### 南極での宇宙線観測

日本は1956年に南極観測を開始し、第1・2・6次の観測隊には理研・宇宙線研究室の小玉正弘が、宇宙線担当として参加した。極地では地磁気が弱く低エネルギーの宇宙線まで到来すること、分厚い氷により地殻からの放射線が遮蔽されること、氷サンプルが過去を記録する貴重な媒体になることなどのため、南極は、宇宙線や気候の長期変動、大気の循環などの優れた実験室となる。特に宇宙線は陽子など正電荷を持つものが主成分なので、地磁気で曲げられる際に、東西や南北の微小な非対称性を生じる。これは粒子と反粒子の非対称性の結果と言ってもよい。1次隊では小玉らは観測船「宗谷」にネーア型電位計を搭載し、航海中も

南半球と北半球の緯度効果の差を検出し、中性子成分と中間子成分を分離するなどの成果を上げた。

こうした南極観測にはさまざまなドラマが伴うことは想像に難くない。第1次観測隊では、氷に閉じ込められた「宗谷」がソ連の砕氷船「オビ号」に救出される出来事があったものの、全般に大成功だった。対して第2次観測隊は悪絶な氷に阻まれ、1次隊が設営したオングル島の昭和基地に接岸できず、今度は米国の砕氷船「バートン・アイランド号」に助けられ、第1次越冬隊を収容するのがやっとで、越冬断念を余儀なくされた。その際15頭のカラフト犬が置き去りにされたが、うち奇跡的にタロとジロの2頭を1年後の1959年1月に救出したのが第3次隊で、そこには理研からは、小玉の後を継いだ福島紳が加わっていた。その福島は、第4次観測の1960年10月10日にカラフト犬に餌をやるため昭和基地から外出したが、猛烈な地吹雪の中で迷い基地に帰還せず、1週間後に捜索は打ち切られた。彼の遺体が4km離れた地点で発見されたのは、7年半後で、それより第57次の観測隊の今日まで、南極観測隊（支援要員を除く）の死亡事故は起こっていない。



図9 初代の南極観測船「宗谷」 日本財団電子図書館より。

図9の「宗谷」は、当初ソ連から砕氷型貨物船として日本に発注された排水量4000トン弱の船で、太平洋戦争では海軍補給船として数々の死地を奇跡的に生き延び、戦後は引揚船として2万人もの軍・民間人を戦地から内地に運んだ。1949年には海上保安庁の灯台補給船として国内の灯台を巡回し、ついで南極観測船として、その後も巡視船として1978年の退役までに海難救助で1000名以上の人命を救った「奇跡の船」であった。

「宗谷」による6回の南極観測の後、一時中断を経て、1965年に第2世代の砕氷船「ふじ」が就航すると、それまでの海上保安庁に代わり海上自衛隊つまり防衛庁（現防衛省）が船を担当することになった。これは日本物理学会が1967年に採択した「日本物理学会は今後内外を問わず、一切の軍隊から援助、その他一切の協力関係をもたない」という「決議3」に真っ向から抵触するため、南極での宇宙線観測は徐々に難しくなり、その間オーロラのX線観測などの成果があったものの、第14次隊（1972-1974）を最後に、南極での宇宙線観測は幕を閉じた。

近年では、第46次越冬隊員だった五十嵐誠が2006-2008年度にかけ、牧島宇宙放射線研究室の協力研究員となった。彼や仁科センター・望月雪氷宇宙科学研究ユニットの望月優子、高橋和也、中井陽一らは、国立極地研究所と協力し、南極の氷床サンプルを化学分析することで、氷を記憶装置として過去の超新星に伴う宇宙線の痕跡や太陽活動の記録を探索しており、氷の年代決定の精度向上にも成功している。

## 宇宙線世界資料センター (WDC)

日本の南極観測への参加は、1957-1958年に全世界的に行われた、国際地球観測年 (IGY) とよばれる国際研究プロジェクトの一環を成すものだったが、このIGYは、他にも大きな影響を与えた。一例として、標準化された中性子検出器を全世界に配備し、その1時間集積のカウント数を連続的に記録・保存・配布する宇宙線世界資料センター (WDC) 活動が始まり、理研は日本での責任機関となった。

すでに述べた空気シャワーでは、1個の宇宙線から最終的に、ミューオン、ニュートリノ、中性子、ガンマ線、電子など、多数の (準) 安定な粒子群が生成され、地上に降り注ぐ。このうち中性子は、宇宙線の核子成分を知る良いモニターになるため、理研では板橋に28本、乗鞍に12本の中性子モニターが配備された。WDCではその連続観測データに加えて、世界の数十カ所から届く中性子カウント数 (大気圧に対する補正済み) を統一書式に従って整理し、グラフやデータブックとして作成し、のち磁気テープに記録するという作業が始まった。

WDCの作業には湯川秀樹の指導の下、当時日本で最速・最大容量を誇った理研の計算機が役立ったという。しかし当時、全世界から紙媒体や紙テープで届くデータは、英語、ドイツ語、ロシア語など使用言語も多様、データ書式も雑多で、それを注意深く検査し、不良データの検出、データ提供者への確認と修正、統一書式に従ったデータのタイプ入力など、長期にわたり根気のいる人力作業が必要であった。後にデータ入力の一部を業者に委託したものの、こうした作業の全般は、井上葵と高橋 (坂本) 恵美子により行われた。今日でいうデータベースを、その言葉すらまだ流通していない時代に、少数の人間が多大な献身により支えた事例であろう。こうしたきめ細かい作業は、日本人の得意とするところだったようで、外国人研究者から大いに感謝されたという。1991年より、WDCの日本での責任機関は理研から、全国共同利用研究所である名古屋大学・太陽地球環境研に移管された。

理研の担当する中性子モニターのうち、乗鞍に置かれた12本は図10に示すように、1991年6月4日、巨大太陽フレアに伴う中性子の放出を約2時間にわたり検出することに成功した。板橋にあった28本は1998年、チベット高原の高度4300mにある羊八井で日中共同で展開されている、東大宇宙線研のチベット空気シャワー実験場に移設された。その維持にも、すでに述べた山田豊と霜田進が貢献している。2005年6月20日には巨大太陽フレアに伴う中性子の増加を1.5時間ほど検出した。この中性子モニターも現在は、同じ羊八井で中性子の検出を行っている名古屋大学に移管されている。こうして宇宙線の研究に関して理研が果たしてきた役割は、次第に全国共同利用研究所に受け渡されていった。

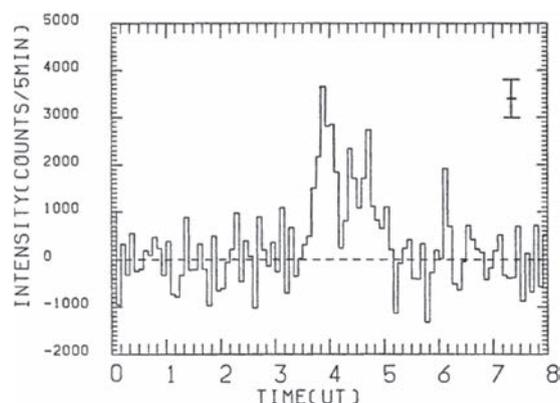


図10 乗鞍に置かれた中性子モニターで観測された、1991年6月4日の太陽フレアに伴う中性子の増加 [Proc. 22nd International Cosmic Ray Conference, 3, 37 (1991)].

## 第4節 宇宙線から宇宙X線へ

### 宇宙線研究の転換期

時間を逆戻りさせてみると、実は1950年代には全世界で、第1節に述べた宇宙線研究の三つの側面全てに、大きな転換期が訪れていた。

第1の観点では、このころからシンクロトロンなど地上での加速器技術が長足の進歩を遂げた結果、望んだエネルギーを持つ高エネルギー粒子それも欲しい種類が自由に生成できるようになり、宇宙線という天然の加速器に頼る必要がなくなった。理研では仁科と後継者の主導で、次々に加速器のレベルアップが実現し、ついに2006（平成18）年からは「世界に冠絶する」RIビームファクトリーが稼働を始めている。

第2の観点に関しては、荷電粒子である宇宙線は、伝播過程で宇宙に遍在する磁場で曲げられてしまい、到来方向を測定しても発生源が特定できないという、大きな困難が立ちはだかった。

第3の観点に対しては、このころからロケットや人工衛星といった飛翔体が発達し、より直接的な手段で、惑星間空間の研究が可能となったのである。先述のIGYはこれに大きく拍車を掛け、人工衛星による科学観測が始まった。ソ連はスプートニク1号（1957）、アメリカはエクスペローラ1号（1958）を打ち上げた。後者は長楕円軌道を持ち、衛星の高度が変わるにつれ、搭載されたガイガー計数管の計数が大きく変化することから、地球を取り巻く強い放射線帯、すなわちヴァン・アレン帯が発見されたのである。

人工衛星に先立ち、米国がドイツから押収したV2号ロケットを科学観測に用いる過程で、ある発見がなされた。1949年、遮光した燐光体を積んだ数機のロケットが昼間に打ち上げられた結果、回収した燐光体が感光しており、太陽からX線が到来することが分かったのである。X線はレントゲン写真で見えるようにわれわれの体は透過するが、大気では吸収されてしまうため、それまで人類はこの現象に気付かなかったといえる。温度6000℃を持つ太陽の表面からの放射スペクトルは、可視光から紫外線まで延びるが、波長が短くなるにつれ強度は急速に下がるため、X線までは届かない。よって太陽からのX線は、われわれが目にする可視光とは異なる起源（今日の理解では高温コロナ）を持つことが示唆された。

この間にはまた、宇宙からガンマ線（X線よりさらに短波長の電磁波）が到来するという期待が高まった。その理論的な先導役となったのは、素粒子論から宇宙物理学まで広く足跡を残した巨人である名古屋大学の早川幸男で、宇宙線が超新星残骸で加速され、それに伴いガンマ線が放射される可能性や、宇宙線と星間ガスの衝突で生じた不安定原子核からのガンマ線が観測される可能性など、20-30年後に検証される描像をいち早く1950年代に提唱した。ガンマ線、および後述のX線を用いる利点は明らかで、これら高エネルギーの光子は電荷を持たず、宇宙の磁場で曲げられないため、その到来方向を知れば発生源が特定でき、宇宙線荷電粒子の持つ困難を回避できるからである。こうして、第1節に述べた

第1の観点に沿って発展してきた宇宙線の研究は、高エネルギー光子を用いた第2の観点、すなわち宇宙物理学・天文学に軸足を移し始めたのである。

### 宇宙X線源の発見

1962年にジャコーニ (R. Giacconi) ら米国の宇宙線研究者は、半ば偶然に「さそり座」の方角から強いX線を検出し、その発生源、すなわち「さそり座X-1」はおそらく太陽系外にあると見抜いた。これは誰一人として予想していなかった驚きであり、その立役者ジャコーニは、この業績で2002年にノーベル物理学賞を受賞している。またこの発見を日本人として目の当たりにしたのが、のちに宇宙科学研究所長 (1984-1988) や理研理事長 (1988-1993) を歴任し、文化勲章を受章 (1993) する小田稔であった。小田はロッシの下で宇宙線シャワーの実験を行うべく、1963-1966年、MITに客員教授として滞在していた。

X線は可視光のように簡単に反射や屈折を起こさないので、直進性を利用するしかない。そこで小田は、ロケットや気球など姿勢が不安定でふらつく状態でも、精度よくX線の到来方向を決定できる仕組みとして、「すだれコリメータ」を提案した。これは米国ケンブリッジの街のペットショップで、ハツカネズミが「回し車」を回している際、手前と後側の棧により縞模様ができることにヒントを得たそうである。

小田はアメリカで、また帰国後は宮本重徳、松岡勝らと「すだれコリメータ」を搭載した気球やロケットでの観測を繰り返した結果、「さそり座X-1」が恒星のように小さい天体であることを突き止め、X線は宇宙線と星間ガスの衝突によるものではないことを示した。この研究に加わった理研の和田雅美は、「データ解析の芸術家」として手腕を発揮し、理研が飛翔体を用いた観測に進出する契機を作った。さらに小田らは、天文学者の寿岳潤、大沢清輝などと協力し、X線で決めた「さそり座X-1」の誤差範囲に、岡山にある東京天文台 (当時) の望遠鏡により、光学対応天体を発見した。結果は図11のように米国で追認され、1966年に発表された。

1962年のジャコーニらの発見が、物理学の学術誌 *Physical Review Letters* に掲載されたのに対し、この可視光同定は天文学の学術誌である *Astrophysical Journal Letters* に掲載されたことは象徴的で、宇宙X線の研究が「X線天文学」として成立する契機となった。今日の理解では「さそり座X-1」は、低質量の星と中性子星とが近接連星を成し、星のガスが中性子星の重力に引かれて降着する際に1000万℃の高温になってX線を発生すると同時に、星と降着ガスの双方から可視光が発生すると考えられる。同様に1970年代半ば、小田らの努力により、別の強いX線源「はくちょう座X-1」は、恒星とブラックホールの連星であることが判明し、ブラックホールが実在することがほぼ確実にされた。

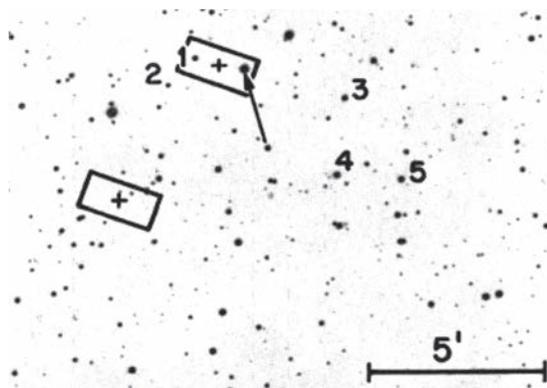


図11 パロマー天文台の光学写真 (白黒反転) の上に、「すだれコリメータ」で決定された「さそり座X-1」の誤差範囲が二つの箱として示してある。矢印の星は岡山天文台での観測により、異常に紫外線が強いと判明し、光での対応天体と決定された [*Astrophys. J.* 146, 316 (1966)]。



図12 1988年1月、小田稔（右）から西村純（左）への、宇宙科学研究所長の引き継ぎ。この後、1988年4月に小田は理研理事長に着任（『ISASニュース』2001年5月号）。

### X線天文学の発展と理研での新しい方向性

その後、宇宙科学研究所（宇宙研：東大宇宙航空研究所が1981年に独立）を舞台に、1979年には日本初のX線天文衛星「はくちょう」、1983年には2代目の「てんま」、1987年には3代目の「ぎんが」、1993年には4代目の「あすか」が自前のミュー型固体ロケットで打ち上げられた。こうした研究を理論と観測の両面から主導したのは早川幸男であり、また実験面の主導者は小田、それを継いだ田中靖郎（名大から宇宙研）、スパークチェンバーの開発者である宮本重徳（宇宙研から阪大）、計算機に強い近藤一郎（東大宇宙線研）ら、いずれも宇宙研の出身者であった。宇宙研に移った

西村純は、大気球の開発によりこれらの活動を支援した。図12は、宇宙科学研究所長が小田から西村へ引き継がれた場面である。

X線の計測技術も日進月歩で、金属の表面にすれすれに入射させて反射・集光・撮像する技術や、個々のX線光子のエネルギーを精密に計測する技術が、日本および世界で開発された。こうしてロケット技術、衛星技術、およびX線計測技術が歩調を合わせて進展した結果、日本はX線天文学で世界に比肩するようになった。仁科により蒔かれた多くの種のうち、一つは加速器科学として、また別の一つはロケット・科学衛星・宇宙機を用いる宇宙科学として、根っこは共有するものの手段の異なる「重厚長大科学」となったのである。

理研ではこの間、第3節で述べたように1986年に、宇宙線研究室の主任のバトンが和田雅美より松岡勝に受け継がれ、宇宙放射線研究室と改称し、舞台も和光に移った。第4節で述べた宇宙線研究の趨勢を読んだ結果、理研での研究に大きな転換が行われたと評価できる。以後、理研では主に三つの方法により宇宙線研究が展開された。

一つ目は、宇宙研と協力したX線天文学の観測的研究で、特に活動銀河核などの研究が進められ、それらのスペクトルに鉄輝線などの構造が発見され、また活動銀河核のスペクトルを重畳することで宇宙X線背景放射が再現できることが、世界に先駆けて示された。

第2は従来の宇宙線荷電粒子の研究で、竹内一、今井喬、河野毅、宮坂浩正らにより宇宙線重イオン成分や、地球放射線帯を構成する粒子（地球磁場に捕捉された2次宇宙線）が研究された。手段としては飛翔体が多用されるようになり、宇宙研の観測ロケットや、太陽X線衛星「ひのとり」（1981年）に搭載された粒子・X線観測器に加え、宇宙開発事業団（NASDA）が運用する技術試験衛星「きく6号」（ETS-6：1984年）や地球観測プラットフォーム技術衛星「みどり」（ADEOS：1996年）に粒子計測装置が搭載された。当時まだ科学技術庁と文部省が統合されておらず、宇宙開発は文部省の宇宙科学研と科技庁のNASDAでほぼ独立に進められており、科技庁傘下にあった理研としては、宇宙研の科学衛星ではなく、NASDAの実用衛星に参加することが自然だったからである。

そして第3の柱として理研・宇宙放射線研は第5節に述べるように、宇宙研とは別に、独自の二つの宇宙機すなわちHETE-2とMAXIの開発に邁進することとなった。

### X線で暴く宇宙線の加速源

現在では、各種の恒星、白色矮星、単独および連星を成す中性子星、超新星残骸、連星を成すブラックホール、星間空間の高温プラズマ、活動銀河核、銀河団など、ほぼ全ての天体が多少ともX線を出すことが分かっており、特に爆発、衝突、高速回転、超強重力、超強磁場など、エネルギーの集中する場所に関して、X線が不可欠な情報源となっている。加速された電子はシンクロトロン放射などで強いX線を出すため、宇宙線の加速源を探索する上でも、X線は強力な手段となる。こうしたX線は、宇宙線の加速現場で発生したのち磁場に曲げられず直進すること、現代では可視光望遠鏡に迫る解像度でX線の撮像ができることに加え、1個の高エネルギー電子がざっと1億個ものX線光子を生成するため、情報が大幅に増幅されて観測しやすくなるという利点も見逃せない。

この点で最も重要な成果の一つは、1995年に京大の小山勝二らが、西暦1006年に発生した超新星残骸（SNR）であるSN1006を、「あすか」や米国のチャンドラ衛星で観測した結果、そのX線放射が、 $10^{14}$ eVまで加速された宇宙線電子によるシンクロトロン放射である、と見抜いたことであろう。X線観測からは陽子加速に関する情報が得られないのは難点だが、陽子も同様に加速されていると考えるのが自然なので、これはSNRが宇宙線の加速源（の一つ）であるとする長年の説に決定的な証拠を与えたと言える。この研究は、小山の弟子である馬場彰が、理研の基礎科学特別研究員として大きく発展させた。また「あすか」の観測では図13に示すように、東大で大橋隆哉や牧島一夫が開発した撮像型ガス蛍光

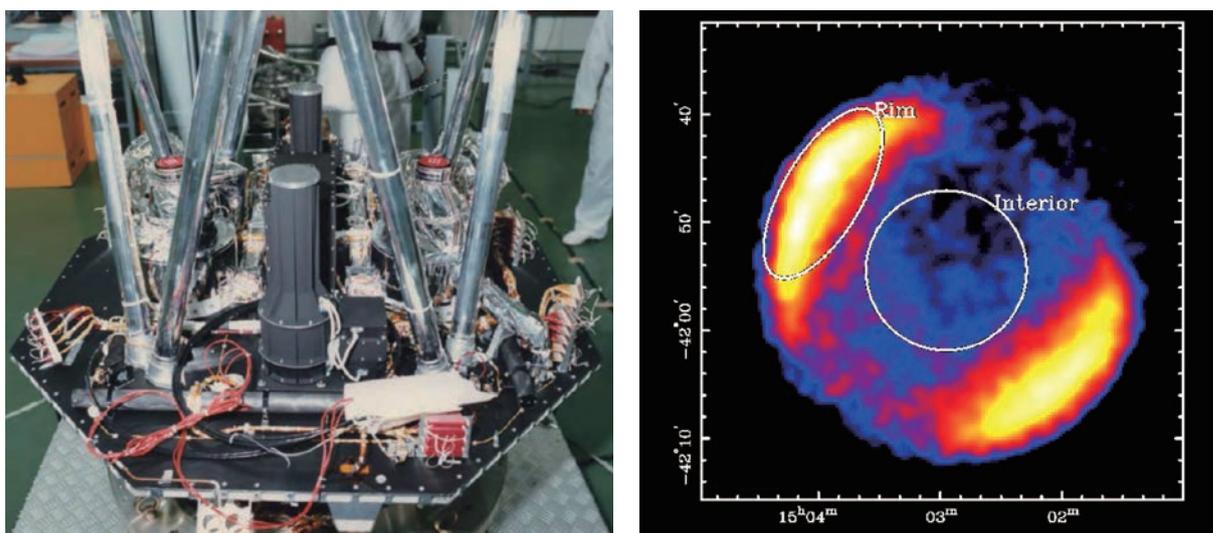


図13 左：組立て途中の日本4機目の宇宙X線衛星「あすか」。ずっと上方に四つのX線望遠鏡があり、これはその焦点面を示す。黒い二つの筒が、撮像型ガス蛍光比例計数管。

右：「あすか」撮像型ガス蛍光比例計数管で得られた、1006年の超新星残骸のX線（1-10keV）像。黄色く明るい部分が、加速された宇宙線電子の放射するシンクロトロンX線 [Nature 378, 255 (1995) 9]。

比例計数管が活躍した。

SN1006やその他いくつかのSNRで、電子が $10^{14}$ eVまで加速されることが分かってきたが、地上に降り注ぐ最高エネルギーの宇宙線は、 $10^{20}$ eVを超える。よってSNRを凌駕する加速源があるはずで、それらは銀河系外の天体の可能性が高い。その候補の一つとして理研で盛んに研究されてきた現象がある。1967年、ソ連の大気圏内核実験を監視するため米国がガンマ線検出器を積んだ衛星を打ち上げたところ、地上ではなく、空から時おりガンマ線の津波が到来する現象を検出した。これが未知の天体現象であると判明し、ガンマ線バースト（GRB）と名付けられた。1991年に打ち上げられたアメリカの巨大なコンプトン・ガンマ線観測衛星は、日に数個のGRBを検出し、それらが天空に一様かつランダムに分布すること、また遠方ではGRBの発生数が有意に減ることを発見した。よって解釈は二つに絞られる。一つは、GRBが銀河系を含む局所銀河群の中で起きている近場の現象であるという解釈、他方はGRBが宇宙論的な遠方で起きる現象で、遠方で減るのは宇宙の進化が見えているとするものである。後者とすれば、その爆発の規模たるや巨大なもので、宇宙線の加速源として有力であろう。これが1990年代半ばの状況であった。

## 第5節 現在の理研での宇宙研究

### ガンマ線バーストとHETE-2衛星

GRBの上記2説に決着をつけるには、数十秒で消えるGRBの位置を即座に精度よく決め、速やかに地上望遠鏡に通報し、追観測を行うことが近道である。この先進的なアイデアを基に理研の松岡勝、河合誠之、吉田篤正らは、科技庁からの予算と日米仏の協力により、HETE（High Energy Transient Explorer）とよばれる重量140kgの小型衛星を開発し、1996（平成8）年に米国ワロップス島からペガサスロケットで赤道軌道に打ち上げた。これは、「科学衛星は文部省、実用衛星は科技庁」という、当時の厳しい縦割りの垣根を突破した快挙でもあった。

HETEの主観測装置は理研の開発したガス検出器で、広い視野でGRBを2-25keV（キロ電子ボルト）というX線領域で捉え、それらの光子を用いて位置を機上の計算機で自動決定し、赤道上に配置された地上局に結果を通報し、直ちに全世界の光学望遠鏡に情報が配信されるという先端的な仕組みだった。しかし不幸にも、HETEおよび混載されたもう1機の衛星はロケット3段目から分離できず、見殺しになってしまった。

翌年、ちょうど理研で開催されたGRB研究会の最中に、イタリアのX線衛星BeppoSAXによる大発見のニュースが飛び込んできた。搭載された広視野のX線検出器が明るいGRBであるGRB970228（数字は1997年2月28日の意味）を捉え、急ぎ衛星をその位置に向けたところ、狭視野のX線望遠鏡で、徐々に消えて行くX線の「残光」が検出され、その位置が精度よく決まり、16時間後には地上の望遠鏡でその位置に、可視光でも残光が検出されたのである。

この位置が後にハッブル宇宙望遠鏡など大型の望遠鏡で探査された結果、このGRBは約80億光年というはるか遠方にある銀河で発生したことが確かめられた。2説の一方に軍配が上がり、GRBが凄まじい大爆発であることが確立したのである。この発見の主導者ピロ（Luigi Piro）は理研で4年ほどポスドクを務め、いわば理研育ちの人物であった。現在では多くのGRBの後に、数時間にわたりX線で、また可視光ではさらに長く、「残光」が続くことが分かっている。

この大魚を逃したHETEだったが、定年間際の松岡がNASA・理研・科技厅に対して必死の働きかけを行った結果、再挑戦が認められ、同じ設計の衛星HETE-2が2000年10月9日に打ち上げられた。2001年度から、理研の宇宙放射線研の主任は、牧島に引き継がれ、HETE-2はその体制で運用され、玉川徹、芹野（鈴木）素子らが最前線でその運用に奮闘した。HETE-2の最大の成果は、2003年3月29日の日本時間20:37（世界時11:37）に起きたGRB030329で、衛星からの自動アラートは87秒後に、また人間が介在した精度の良い位置は13分後に全世界に配信された。幸い日本では光学観測に適した夜間で、全国的に晴れて月も新月に近いなど、絶好の条件がそろっていた。そのため理研で鳥居研一らが運用する自動制御の小型望遠鏡を含め、さまざまな（半）自動望遠鏡が一斉にその方向を向いた結果、図14に示すように、消え行く可視光の残光を見事にキャッチできた。しかも驚くべきことに、「すばる」など大型望遠鏡などでその残光を追跡したところ、1週間ほど後にその光スペクトルが、超新星爆発に特有な顔つきに変貌したのである。これにより、GRB030329は1.9億光年の距離（GRBとしてはかなり近傍）で、大質量星が進化の最期に重力崩壊し、おそらくブラックホールができる際に発生したことが判明したのである。

HETE-2はまた、GRBのうち継続時間の短い（<2秒）ものは、やはり宇宙の遠方で、中性子星同士の合体で発生する可能性が高いことを突き止めた。徐々に電源系の劣化が進み、2007年度で運用は打ち切られたものの、HETE-2は、

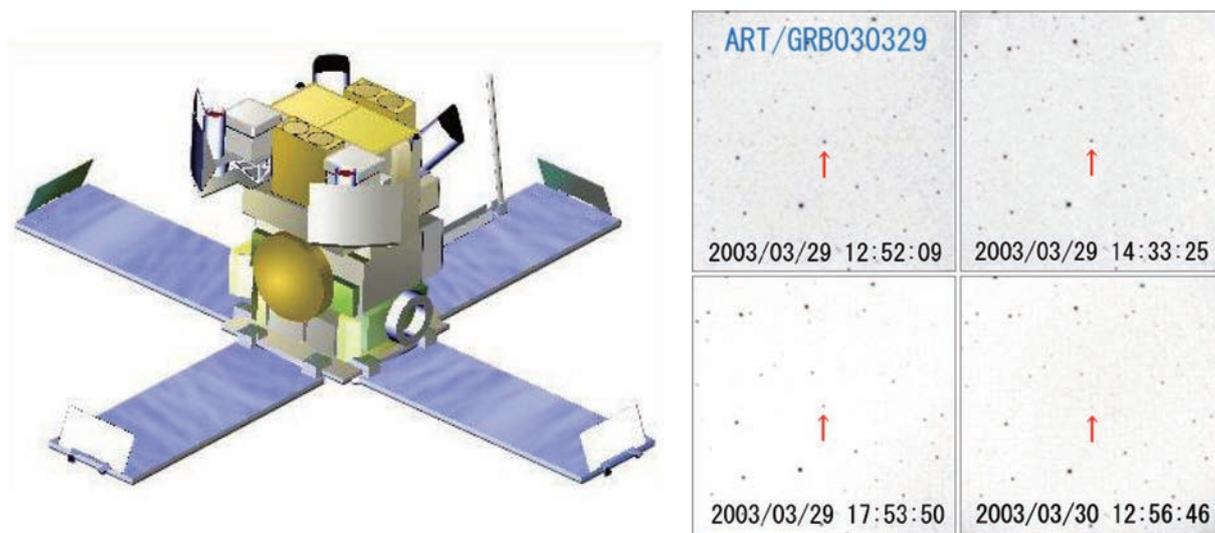


図14 左：小型衛星HETE-2のイラスト。

右：HETE-2の速報を受け、理研・研究本館の屋上で鳥居研一が自動望遠鏡で捉えたGRB030329の光学残光（赤い矢印）。発生直後には12等級だったが、1日かけて16等級まで減光した [Astrophys. J. Lett. 597, L101 (2003)]。

大質量星がブラックホールへと崩壊する際に長いGRBが、また中性子星同士が合体する際には短いGRBがそれぞれ発生するという筋書きを明らかにした。GRBの発見から30余年を経ての快挙であった。これら二つのタイプのGRBどちらも、激しい宇宙線の加速が起きている不思議ではないので、これらの発見は、宇宙線の研究にも大きな進展となった。理研では2013年以来、長瀧重博の率いる天体ビッグバン研究室が、超新星爆発、GRBの発生、そこでの粒子加速などに、理論的・数値的研究を活発に展開している。

### 全天X線監視装置MAXI

理研・宇宙放射線研によるもう一つの大きな業績は、理研、JAXA（宇宙航空研究開発機構）、阪大、東工大、青学大、日大、京大、中央大、宮崎大などが協力して、2009年に国際宇宙ステーション（ISS）に搭載した全天X線監視装置MAXIである。これは松岡らが1996年、ISSの日本実験モジュール「きぼう」の船外プラットフォームに搭載する第1期の実験として提案し、NASDAにより採択されたものである。ISSは地球周回のたびに姿勢も1回転するので、天体観測には不向きと考えられていたが、それを逆手に取って、全天をスキャンするという卓抜な発想の勝利であった。

理研とNASDAの間では、搭載装置の建設、打ち上げ、軌道上での運用はNASDAが責任を持ち、データの処理・公開・科学利用は理研が担当するという協定が結ばれ、松岡は理研よりNASDAに移籍してその主導に当たった。MAXIの予算の大部分はNASDAが負担し、理研はその1割程度のマッチング予算を概算要求により獲得して研究の推進に当たった。しばしば宇宙実験は理研に大きな予算的負担をかけると誤解されがちだが、この例で分かるように、実情は決してそうではない。

MAXIは当初2004年に日本のH2ロケットで打ち上げ予定だったが、ISS計画の遅れ、スペースシャトル・コロンビアの事故（2003年2月）、日本での予算逼迫などにより大幅に遅れ、引き継いだ牧島の定年直前の2009年7月、図15のようによくスペースシャトル・エンデバーでISSへと打ち上げられ、同8月より稼働を開始した。理研では三原建弘、杉崎睦、芹野（鈴木）素子、JAXAから理研に戻った松岡らが、理研から日大に移った根来均や東工大に移った河合誠之

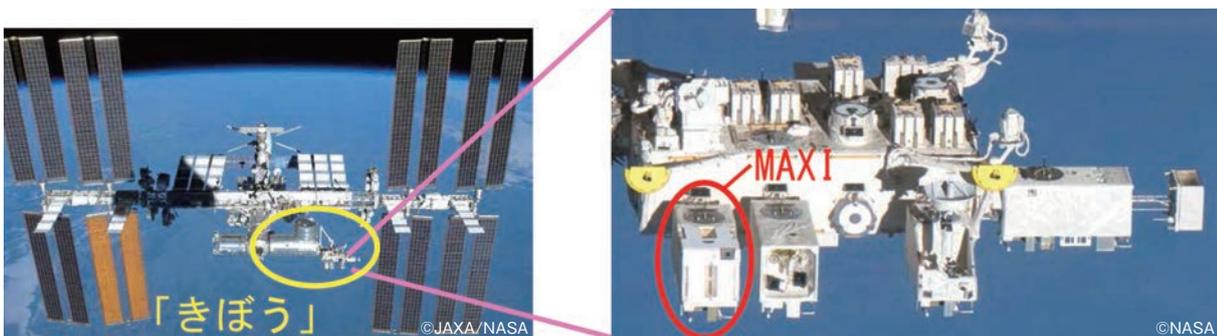


図15 ISS搭載MAXI装置。左はISSの全景で、2本のピンクの線で挟まれた部分が「きぼう」の船外プラットフォーム。右はその拡大図で、赤丸で囲った部分がMAXIである。

らと協力してその運用に当たった結果、2012-2014年度、続いて2015-2017年度と、2回にわたる運用延長が認められた。ISSの稼ぎ頭として活躍しており、2018年度以降のさらなる運用延長もJAXAに申請予定である。

MAXIは比例計数管や阪大が担当する国産CCD素子を搭載し、92分ごとのISSの地球周回を利用して全天に散らばるX線源の強度やスペクトルを連続監視し、それらの長期変動を調べ、また既知天体の急激な増光・減光、未知天体の出現、GRBなどの突発現象を捉える装置である。得られたデータは全世界に向け即時公開されるとともに、突発現象の検出は電子メールで全世界に速やかに通知される。これまで、18個のX線新星（うち7個がブラックホール）、100例を超えるGRB、近傍の星から多数のフレアなどを検出し、遠方の銀河中

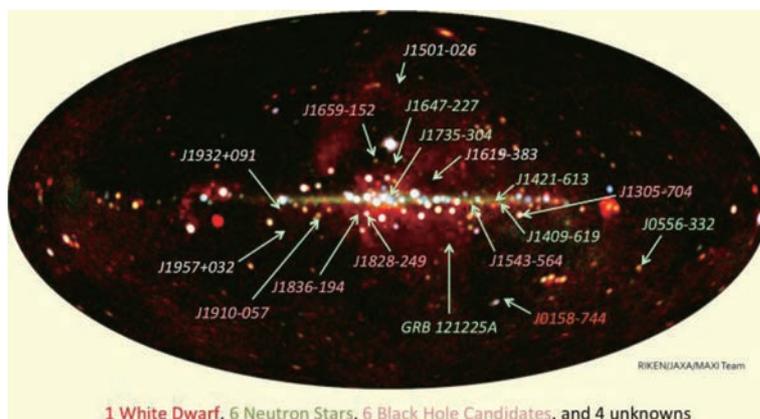


図16 MAXIが7年間かけて集積した全天X線マップに、MAXIがこの間に検出した17個のX線新星の位置を重ねたもの。うち6個はブラックホール連星である [©JAXA and RIKEN]。

心にある巨大ブラックホールに星が飲み込まれる現象、「はくちょう座」で過去に極超新星が発生していた徴候などを捉え、X線パルサーの挙動から中性子星の質量と半径を推定する新方法を編み出すなど、多くの成果を上げつつある。さらにMAXIは、超新星爆発を起こす寸前の重い白色矮星の表面で、核爆発が起こり突発的にX線を放射するイベントを捉えた。これは理研での原子核研究とも関連性が深い。図16はMAXIの全天X線マップと、MAXIが検出した17個のX線新星の位置を示す。

宇宙の研究で2016年に起きた最大の成果は、米国の重力波望遠鏡LIGOによる重力波イベントGW 150914およびGW 151226の検出であった。これらはともに、ブラックホール同士の合体だったため、それに伴う電磁波信号は微弱と考えられ、実際MAXIによる上限値も含め、いかなる波長域でも、それに同期した電磁波信号は検出されなかった。しかし2017年8月17日、中性子星どうしの合体による重力波が検出され、ほぼ同時に、フェルミガンマ線衛星により、付随するガンマ線バーストも検出され、また可視光でも対応天体が発見された。これにより、重力波が光速で伝わるということが明らかになり、短いGRBの起源に関するHETE-2の解釈も実証された。MAXIは観測条件が悪く、このイベントを取り逃がしたが、次回はぜひ大魚を捕えたい。特に2017年度中には、日本の重力波望遠鏡KAGRAが本格稼働を開始する予定であることから、打ち上げから8年を経てなおMAXIの役割は一段と重要となるであろう。

### 「すざく」と「ひとみ」

理研宇宙放射線研究室では牧島の世代（2001-2009）になり新たに、JAXA宇宙研のX線衛星プロジェクトに、ハードウェアの段階から参加するようになった。



図17 M5ロケット6号機によるX線衛星「すざく」の打ち上げ。2005年7月10日12:30、鹿児島県内之浦より。

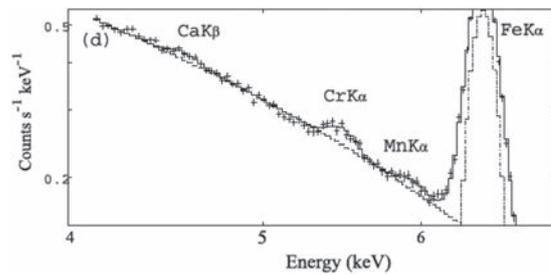


図18 「すざく」 CCDカメラで取得された、ティコ・ブラーエの超新星残骸のX線スペクトル。右端の強い鉄のK $\alpha$ 輝線、左端のカルシウムのK $\beta$ 輝線に加え、微弱なマンガンとクロムのK $\alpha$ 輝線が検出された [Publ. Astr. Soc. Japan 61, S167 (2009)]。

その背景には、2001年に文部省と科技厅が統合して文部科学省（文科省）となり、それを受けて2004年にNASDAと宇宙研がJAXAとして統合された結果、理研が宇宙研のプロジェクトに参加する気運が高まったことが挙げられる。また2000年2月にミューロケットの異常飛翔のため、宇宙研のX線衛星ASTRO-Eが失われてしまったが、その再挑戦機が認可され、短期間で搭載装置の再製作を行う必要もあった。理研は東大、宇宙研、広島大、埼玉大、金沢大、阪大、スタンフォード大などと協力し、搭載される硬X線検出器の開発を担い、寺田幸功らを中心に、そのアクティブシールド部を責任担当した。こうして2005年7月10日に誕生したのが重量1.7トンの「すざく」衛星で、図17にその打ち上げ場面を示す。

「すざく」の多彩な成果のうち、理研で玉川徹、早藤麻美、馬場彩らが導いた代表的なものが、1572年に発生したティコ・ブラーエの超新星残骸の観測結果である。「すざく」硬X線検出器では粒子加速の証拠となる非熱的な硬X線が検出され、またCCDカメラでは図18のように、X線ではほぼ初めて、マンガンとクロムの輝線を検出した。X線による観測が、宇宙線の加速と元素合成という、仁科の開拓した研究テーマに強く結びついたのである。ちなみに図18で観測された鉄、マンガン、クロムの組成比は、理研の本多光太郎の弟子に当たる青山永十郎が東北大金属材料研究所で開発した「タハード鋼」の組成比に近く、偶然とはいえ面白い。クロムは鋼に粘り気（タフ）、マンガンはかたい切れ味（ハード）を与えるためタハードとよばれ、旧日本軍の軍刀に使用されたそうである。

狭視野で天体を深く観測する「すざく」に対し、MAXIは同じX線帯域でも全天を「浅く広く」見るため、両者は相補性が良い。この二つの機能を手中にした日本の強みを最大限に生かすべく、牧島は両者の緊密な連携を推進した。その結果、MAXIの発見した新現象を「すざく」で追観測する体制が構築され、それが有効に機能して、例えばMAXIは2例のX線パルサーのX線増光を捉え、通報を受けた「すざく」の観測により電子サイクロトロン吸収線が検出され、磁場の値（ $4 \times 10^{12}$ と $6 \times 10^{12}$ ガウス）が精密に求まった。「すざく」は電源系の劣化により、2015年度で使命を終えた。

「すざく」の後継機として開発されたのが、JAXA宇宙研のASTRO-H衛星であった。理研では玉川徹、山田真也、野田博文らが、目玉装置である軟X線分光検出器(SXS)の開発に参加した。SXSは強力な冷却系を用いてセンサーを50mK(ミリケルビン)まで冷却し、X線の吸収による温度上昇から、光子のエネルギーを0.1%の精度で測定するという野心的な装置で、実は「すざく」に搭載されたが、液体ヘリウム冷媒の突沸のために稼働しなかったものである。

ASTRO-Hは2016年2月17日、日本のX線衛星としては初めてH2Aロケットで種子島より打ち上げられ、SXSを含め搭載装置は全て順調に立ち上がり、「ひとみ」と命名された。しかし痛恨にも、試験観測の途上だった3月26日、姿勢制御に伴う一連の異常事象により衛星は高速回転に陥って破損し、機能を失う結果となった。宇宙実験の難しさを物語る悲劇だが、幸いその再挑戦への道が開けつつある。

### 超高エネルギー宇宙線観測装置EUSO

X線観測は電子の加速現場を明らかにし、第1節で指摘した宇宙線研究の第2の側面(加速現場の同定)に貢献してきたが、宇宙線の主成分である陽子や重イオンに関しては情報を与えてくれないため、別の方法が必要となる。宇宙線陽子が星間ガス中の陽子と衝突すると、多数の中性パイ粒子ができ、その個々が二つのガンマ線光子に崩壊するので、70MeV(メガ電子ボルト)を中心に広い幅を持つガンマ線スペクトルが作られる。そこで、このガンマ線を検出すれば、陽子加速が探査できることになる。この研究は、2008年に誕生したフェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡などによる大気圏外からの観測や、第3節に述べた(ii)のチェレンコフ光を地上望遠鏡で捉える観測により、世界規模で進められている。今後、電子の出すガンマ線成分との切り分けに成功すれば、超新星残骸などの加速源で、電子とともに陽子がどの程度まで加速されているか、明らかになってくるだろう。

しかし、この中性パイ粒子の出すガンマ線を手段に用いても、宇宙線加速源の研究は閉じない。なぜなら超新星残骸などで確認された電子の最高エネルギーは高々 $10^{15}$ eVなのに対し、地上には $10^{20}$ eVを越す超高エネルギー宇宙線(UHECR)が降り注いでおり、それら陽子やイオンの加速源は依然として不明だからである。幸いUHECRはエネルギーが高く、磁場で曲げられる影響が弱まり、到来方向から発生源の位置を推定できるようになるため、粒子自身を直接検出するという宇宙線研究の本来の手法が復権する。これを行うには、第3節に述べた(i)、すなわち1個のUHECRから作られる極めて多数の空気シャワー粒子を、数km四方に展開する多数の検出器で検出する方法や、同じく(iii)の方法、つまり2次粒子の増幅過程で大気中の窒素や酸素の分子が刺激されて、微弱な発光を行う大気蛍光を望遠鏡で計測する方法が採られる。

UHECRはエネルギーが高いため直進性は良いが、到来数はどんどん減り、例えば $1\text{km}^2$ の面積を考えると、エネルギー $10^{18}$ eVを超えるものは年間100個ほど到来するが、 $10^{19}$ eV以上のものは年間1個程度に減ってしまう。よって地球の広い範囲をカバーする観測が必須である。大気蛍光の検出でいえば、宇宙空間から

夜の地球を見下ろし、微弱で短い発光を探索すれば、地上望遠鏡で空を見上げるよりずっと広い面積をカバーできる。この考えに基づき、ISSに搭載した望遠鏡で夜の地球を見下ろし、UHECRの作る大気蛍光を計測しようとするEUSO (Extreme Universe Space Observatory) 計画が、欧州を中心として1990年代末から提案され、日本は理研の戎崎俊一を中心にそこへの参加を表明した。

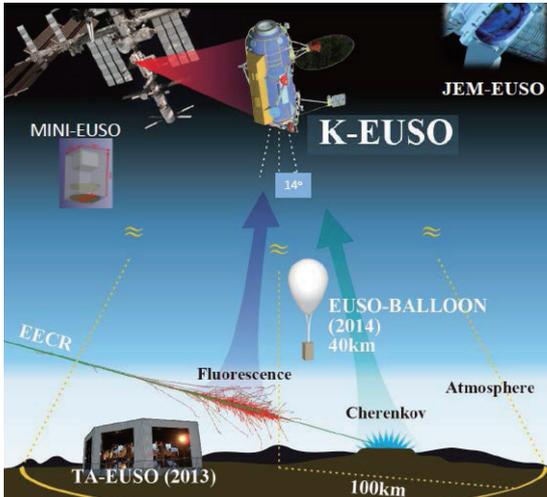


図19 K-EUSO装置の想像図と、三つの先駆実験 (EUSO Balloon, MINI-EUSO, TA-EUSO)。

当初、ISSの欧州モジュール「コロンバス」に搭載の計画であったが、欧州側の予算事情のためいったん計画が見直され、2005年ごろには、ISSの日本側モジュール (JEM) 「きぼう」 船外実験プラットフォームを用いるJEM-EUSO計画として再出発した。日本の責任が重くなる中、今度は日本側のISS予算の削減に遭遇し、「きぼう」の利用は難しくなった。しかし2014年ごろ、ロシアグループが同様な科学目的で提案して搭載が採択されていたKLYPVE計画との協議が進んだ結果、EUSOの技術をKLYPVEに持ち込んでK-EUSOとすることで、装置は2018年ごろ、ISSロシアモジュールへ搭載される道が開けた。戎崎やカソリーノ (Marco Casolino) を中心に準備が進んでおり、図19はその想像図と三つの先駆実験を示す。

K-EUSOにより、いま地上で稼働しているピエール・オージェ実験やテレスコープ・アレイ実験を上回る数のUHECRが検出されるとともに、これら二つが監視する南半球と北半球の間の不一致が解消すると期待される。イベントの到来方向からは、どんな天体がUHECRの加速源なのかが絞り込まれ、また観測されるエネルギースペクトルからは、「 $4 \times 10^{19}$ eV以上のUHECRは、飛行中に宇宙マイクロ波背景光子と衝突してエネルギーを失うため、数が激減するはず」という予測 (GZK限界) がどこまで正確に成り立つかが検証できるであろう。

### 宇宙研究の広がり

こうして理研では1980年代半ば以来、X線を主な手段として宇宙の研究が進められ、現在それはMAXIチームおよび玉川研に受け継がれているが、21世紀に入りその研究が広がりを見せ始めた。第3節で述べた雪氷宇宙科学ユニット、本節で触れた長瀧研究室による理論研究に加え、2015年度から坂井南美が准主任として、宇宙サブミリ波を用いて星・惑星の形成を探る研究室を立ち上げ、化学・天文学・物理学の境界領域を推進し始めた。光量子制御技術開発チームを率いる和田智之は、宇宙応用を含め高度なレーザー技術を開発しており、仁科センターでRIビームファクトリーを用い進められている「原子核反応のr過程」の研究も、宇宙の研究に強く結びつくものである。

各種プロジェクトの遂行のみならず、それらを通じた新たな科学パラダイムの構築も、理研の重要な役目である。牧島一夫は、理研 (および2014年度まで本務地だった東大) での研究を通じ、世界に類を見ない以下の三つの独創的な学説

を構築できたという。

第1は「あすか」による銀河団のX線観測をプラズマ物理学に結び付け、「個々の銀河団に属する銀河たちはX線放射プラズマの中を運動しつつ、宇宙年齢をかけて重力ポテンシャルの底に落下してきた」という壮大な予言である。光学望遠鏡を用いたその観測的検証には、基礎特研（基礎科学特別研究員）の稲田直久や川原田円、研修生の小波さおり、国際特別研究員制度の第1期生ガンディ（Poshak Gandhi）らが貢献し、立役者Gu Liyi（雇力意）は2017年度から基礎特研として理研に着任予定である。

第2は、近傍銀河に見られる明るいX線の点源が太陽の数百倍の質量を持つ「中質量ブラックホール」であるとする学説である。この研究は基礎特研の久保田あや、研修生の角田奈緒子らが推進し、戎崎の計算機実験とも連携して強化され、2015年の重力波の検出で俄然その信憑性が高まりつつある。

第3は中性子星の磁性を中性子のスピン整列による強磁性と見なす学説である。これは量子ハドロン物理学研究室の初田哲男主任研究員や、理研から阪大に移った橋本幸士ら、素粒子・原子核の理論家の興味を惹いている。

X線の観測技術でも新しい試みが進んでいる。偏光計測はX線天文学に残された大きな未踏地帯で、1970年代の後半に「かに星雲」のX線が約20%の偏光度を持つことが計測された例を除けば、ようやく最近になって、偏光測定の記事が散見されるようになったばかりである。硬X線の偏光計測にはトムソン散乱の異方向性が利用できるが、より光子数の豊富な1-10keVの軟X線帯域では、X線がガスに光電吸収される際に、光電子がX線の電場方向に飛び出しやすい性質を利用した偏光計が有利である。それにはガス中で光電子が走って作る電子雲の形を精度よく計測する必要があり、その切り札が、理研の玉川研究室で開発されたガス電子増幅フォイルである。これは図20のように、フィルムに穿孔された微小な孔を個々のガス比例数管として作動させ、高い位置分解能を実現するマイクロピクセル検出器である。現在、このガス電子増幅フォイルを用いたX線偏光衛星が世界のどこでいつ実現するか、注目の的となっている。状況は流動的であるが、2020年代初頭に実現すべく努力が

続けられている。実現した暁には、図13（右）など宇宙線電子のシンクロトロン放射の偏光計測、ブラックホール周辺における時空の歪みの探査、マグネターとよばれる超強磁場を持つ中性子星での量子電磁気学的効果の測定、パルサーでのサイクロトロン共鳴の詳細な診断など、多くの研究が進展し、理研はその中心の一つとなると期待される。

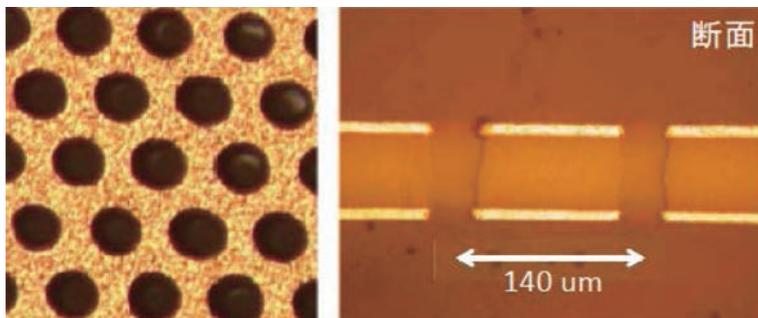


図20 理研で開発されたガス電子増幅フォイル。まずポリイミドフィルムの両面の銅箔電極にウェットエッチングで微小な孔を多数あけ、次にそれをマスクとしたレーザー照射により、50 $\mu$ m厚のフィルムにまっすぐな多数の孔をあける。[Nucl. Inst. Meth. Phys. A, 608, 390 (2006)]。

## 第6節 宇宙の進化と向き合う科学

以上のように理研では、仁科芳雄により始まった宇宙線の研究が、素粒子や原子核の物理学と相互作用しつつ、また宇宙物理学と結びつき、連綿と続きながら幅を広げてきた。こうした学問的蓄積を最大限に生かすことは、組織として極めて重要であると同時に、さまざまな研究機関が「宇宙」を標榜する現代にあって、理研は宇宙の研究に対する独自の戦略と美学を持たねばならない。宇宙の実験・観測的研究は、ロケット・衛星などの飛翔体の飛翔機会に依存するため、とりわけ長い時間と技術の蓄積・伝承を必要とし、研究の時間スケール、予算規模、マンパワーなどの面から、大学では実行が難しくなりつつある。他方JAXAでは、プロジェクトの実施が中心課題となる。そこで長期戦略のもと、新しい科学目的を樹立し、それに必要な技術の基礎開発を行い、独創的な宇宙ミッションを新たに創出・提案・実行することこそ、理研の特色が最も生かせる場面と考えられる。

では理研にふさわしい科学目的は何かといえば、例えば「進化する系の物理学」があると牧島一夫は考える。現代の実証的な科学では、扱う現象が再現性を持つことが大前提として要求される。しかるに宇宙物理学・天文学の分野では、時空の加速膨張、星の進化と終末、元素の合成、星や惑星系の形成、宇宙物質の化学進化など、不可逆な「進化」が本質的な役割を担っている。坂井研究室が、星・惑星の誕生をテーマとし、長瀧研究室が、星の死に際を扱うことは、まさに象徴的である。これら不可逆な現象に挑戦し、進化する系をどう物理学の体系に落とし込むかが、理研の宇宙研究に課せられた役割であるかもしれない。

宇宙における進化は多くの場合、数億年から数十億年という長い時間スケールを持ち、その時間変化を人類が直接に検知することは不可能である。そこでより大型の装置を開発し、宇宙のより遠方（より若いころ）を観測し、近傍（現在）の姿と比較するのが正攻法であるが、プロジェクトは巨大とならざるを得ない。他方で、超新星爆発による重元素の合成などの場合、現象そのものは秒オーダーの短い時間スケールで起こるなど、一見すると悠久の進化でも、実はまれに起こる不連続なジャンプの蓄積が効く場合もある。個々のジャンプは十分に人間のタイムスケールで追跡できるので、それを逃さず捉え、その本質を理解し、それらの蓄積を評価することは、宇宙の進化を解明する有効な手段の一つとなる。これが「時間領域天文学」とよばれる発展途上の分野で、MAXIはまさにそれを先導しつつあると言える。UHECRにしても、特殊な超新星爆発など、実は離散的な突発現象によって生成されている可能性があり、K-EUSOが実現した暁には、UHECRの観測においても、こうした視点も重要になると思われる。

より本格的に「進化」に立ち向かうには、そこに内在する新たな物理法則を意識する必要がある。星の進化は、自発的なエントロピー減少で特徴づけられるが、これをどう一般化すればよいのか。一様で均質だった宇宙に、なぜ強い密度の不一致が生じ、さまざまな天体を擁する複雑な構造が自発的に生じたのか。X線天体のように数千万度の高温を持つ部分と、星間分子雲のように10K（ケルビン）

程度の極低温部分が、いかにして分離し、かつ共存するのか。宇宙線の加速では、なぜ大量の低エネルギー粒子から少数の高エネルギー粒子にエネルギーが受け渡される「エネルギーの非等分配」が起こるのか。これら一見すると熱力学に背く挙動には、実は生物学に通じる部分がある。実際、牧島は宇宙放射線グループを率いていた2006-2009年度、概算要求に基づき「自発的進化系研究」と題する基礎科学研究課題を遂行し、この問題に先鞭をつけた。そのさらなる展開が待たれる。

理研での宇宙研究は、その本質的な多様性により、また歴史的な理由もあって、組織として分散していることが問題となっている。そこで2015年度から「理研宇宙連 (R-ASTRO)」とよばれる任意団体を結成し、緩やかな共同研究を開始した。そこには、MAXIチーム、K-EUSOチームと戎崎研究室、玉川研究室、長瀧研究室、坂井研究室、ISS「きぼう」の船内実験室で微小重力下における生物実験を企画する中野明彦などが加わっている。将来、宇宙生物学という未開拓分野や、「進化」という現象を、宇宙物理学と生物学の両面から攻める研究などが展開できれば、素晴らしい。

最後に、こうして連綿と続く研究を振り返ると、基礎研究の重要性が再認識できる。短期的な「出口指向」や手垢のついた「イノベーション」では、社会の関心はせいぜい10年程度しか引きつけることはできない。100年スケールで人類を支えるのは、やはり基礎学術研究である。このことは、1930年代に純粋な基礎学術として発展した量子力学が、半導体物理学・半導体産業を通じて現在の驚くべきIT社会を産み出したことが、何よりも雄弁に物語っている。こうした信条を理研人は胸を張り堂々と主張すべきであろう。

