

日本物理学会誌

■ 特集「宇宙線 100 周年」

BUTSURI

第67巻 第12号(通巻 755号) ISSN 0029-0181

昭和30年 6月13日 第3種郵便物認可

平成24年 12月5日発行 毎月5日発行

2012 VOL. 67 NO.

12



口絵：今月号の記事から	811
巻頭言 物理を学ぶと何が身につくか	三沢和彦 815

特集「宇宙線100周年」

我が国における宇宙線研究の始まり	西村 純 816
宇宙線を直接捉える <small>口絵</small>	鳥居祥二 821
大気は絶妙な厚さの検出器—宇宙線エネルギーの限界を求めて <small>口絵</small>	永野元彦, 福島正己 827
宇宙線の源と加速・伝播の理論 <small>口絵</small>	大平 豊, 山崎 了, 寺澤敏夫 832
ニュートリノというプローブで何がわかるか <small>口絵</small>	中畑雅行, 吉田 滋 837
重力波検出：一般相対論の直接検証なるか <small>口絵</small>	藤本眞克 841
素粒子・宇宙論に挑む宇宙線反粒子観測 <small>口絵</small>	吉村浩司, 山本 明 844
一瞬の閃光をより精密に <small>口絵</small>	手嶋政廣 850
今年で宇宙X線も発見50年 <small>口絵</small>	牧島一夫, 高橋忠幸 854
宇宙線研究所の果たしてきた役割	荒船次郎, 梶田隆章 860

JPSJの最近の注目論文から 8月の編集委員会より	安藤恒也 866
平成24年度科学研究費補助金(基盤研究等) 審査結果報告	青木健一, 杉立 徹 868
学界ニュース 第12回素粒子メダル：小谷恒之氏, 高杉英一氏, 土井 勝氏, 西浦宏幸氏	百武慶文 871

歴史の小径	マティアスの法則の成立過程と超伝導体 MgB ₂ の発見	溝畑典宏 871
追悼	宮本梧楼先生ご逝去	浅見 明, 川崎 温 874
	丸森壽夫先生を偲ぶ	坂田文彦 875

新著紹介		876
会員の声	■石の上にも3年…	878

掲示板	■人事公募 ■学術的会合 ■その他	879
行事予定		885

会告	■2012年会費未納の方へお知らせ ■2013年分(2013年1月~12月)会費自動振替の実施について ■賞および研究援助の候補者の募集について ■第68回年次大会の参加登録・講演概要集購入のご案内(講演申込者以外の方への案内です) ■第9回Jr.セッションの開催 ■第68回年次大会会場における託児室の設置について ■第68回年次大会講演概要集原稿の書き方および提出について ■2012年11月1日付新入会者 ■会長任期2年制への移行について	888
----	--	-----

本会記事	■2012年秋季大会 ■2012年秋季大会の忘れ物 ■日本物理学会 第7回若手奨励賞受賞者43名(五十音順)	894
------	--	-----

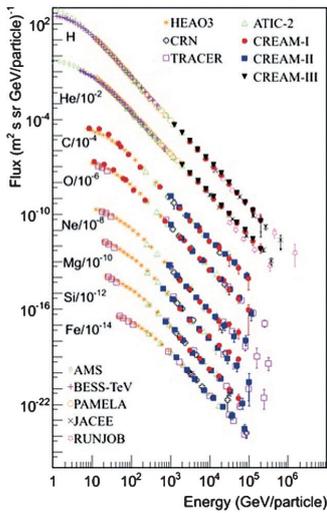
本会関係欧文誌目次	897
第67巻(2012) 総目次	i
主題別索引・著者索引・新著紹介原著者索引	vii

Graphic Page	811
Editorial	
<i>What Should We Learn by Studying Physics?</i>	Kazuhiro Misawa 815
<hr/>	
The Centenary of the Discovery of Cosmic Rays	
<i>Birth of Cosmic-ray Studies in Japan</i>	Jun Nishimura 816
<i>Observing Cosmic Rays in Space</i>	Shoji Torii 821
<i>Measuring UHECR with Atmosphere</i>	Motohiko Nagano and Masaki Fukushima 827
<i>Source, Acceleration and Propagation Theories of Cosmic Rays</i>	Yutaka Ohira, Ryo Yamazaki and Toshio Terasawa 832
<i>What Can We Learn with Neutrinos?</i>	Masayuki Nakahata and Shigeru Yoshida 837
<i>Detection of Gravitational Waves Comes True Soon?</i>	Masa-Katsu Fujimoto 841
<i>Study of Elementary Particle Phenomena in Early Universe through Observation of Cosmic-ray Antiparticles</i>	Koji Yoshimura and Akira Yamamoto 844
<i>VHE Gamma Ray Astronomy: Higher and Higher Precision Measurements for Faint Blue Flashes</i>	Masahiro Teshima 850
<i>Half a Century of Cosmic X-ray Research</i>	Kazuo Makishima and Tadayuki Takahashi 854
<i>The Role of the Institute for Cosmic Ray Research</i>	Jiro Arafune and Takaaki Kajita 860
<hr/>	
JPSJ Selected Papers in the Latest Issue	Tsuneya Ando 866
Memoir on the Screening Reviewed: FY 2012 Grants-in-Aid for Scientific Research from the Japan Society for the Promotion of Science	Ken-Ichi Aoki and Toru Sugitate 868
Physics Community News	
<i>Particle Physics Medal: Tsuneyuki Kotani, Eiichi Takasugi, Masaru Doi and Hiroyuki Nishiura</i>	871
The Path to History	
<i>The Establishment Process of Matthias' Rule and the Discovery of MgB₂</i>	Norihito Mizohata 871
Obituary	
<i>Tribute to the Memory of Goro Miyamoto</i>	Akira Asami and Sunao Kawasaki 874
<i>In Memory of Professor Toshio Marumori</i>	Fumihiko Sakata 875
Book Reviews	876
Letters and Comments	878
<hr/>	
Notice Board	879
<hr/>	
JPS Announcements	888
JPS News	894
<hr/>	
Contents 2012	i
Index 2012: Subject Index, Author Index, Original-Author Index for Book Reviews	vii

表紙の説明 Hessによる宇宙放射線発見から100年の間で研究対象も多様化してきた。表紙には本号の特集に関連する写真等を集めた。1. 乗鞍観測所, 2. 3. 明野観測所, 4. 空気シャワーシミュレーション, 5. 6. TA (口絵), 7. 8. チベットAS_γ実験, 9. 10. チャカルタヤ観測所, 11. SK (口絵), 12. SN1987Aニュートリノ事象, 13. 小柴先生, 14. IceCube (口絵), 15. KAGRA (口絵), 16. 宇宙線研究所, 17. 18. JANZOS 鏡, 19. CANGAROO 3.8 m 鏡, 20. CTA 完成予想図, 21. 大樹航空宇宙実験場, 22. 南極周回気球, 23. PPB-BETS 電子シャワー, 24. BESS (口絵), 25. 26. RUNJOB, 27. 「すざく」(口絵), 28. *Astro-H* (口絵), 29. ISS, 30. CALET (口絵), 31. JEM-EUSO, 32. 嵯峨根先生, 33. 気球観測, 34. イオンチェンバー, 35. 大型マグネット霧箱, 36. 霧箱ミュー粒子, 37. 清水トンネル実験, 38. 仁科先生。下は物理学会シンポジウム「宇宙線発見から100年」(2012年9月12日)での記念撮影。(出典: 2. 3. 7. 8. 宇宙線研HP, 27. 28. ISAS/JAXA, 29. JAXA/NASA, 32. 「嵯峨根遼吉記念文集」より転載, 13. と 33~38. 仁科記念財団提供)

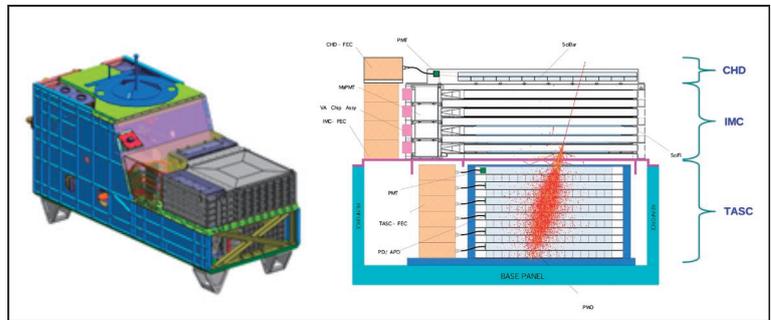


特集 「宇宙線を直接捉える」 p.821

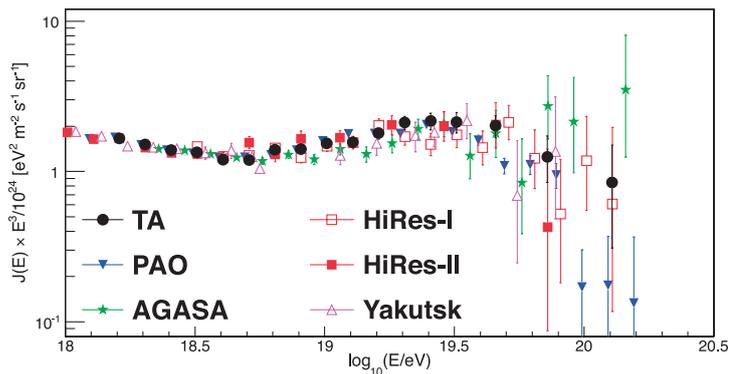


左図：原子核成分毎のエネルギースペクトルの観測結果 (Eun-Suk Seo, 32nd ICRC (Beijing) Rapporteur Talk (2011) より引用). 南極周回気球, スペースシャトル, 人工衛星のデータ等の重ね合わせ. 原子核成分は, 超新星残骸における衝撃波で加速され, 星間物質との衝突による核破砕反応によりエネルギー損失や核種の変化が起こり, 磁場による閉じ込め領域から銀河系外へ漏れだす, と考えられている. これらのプロセスは原子核の成分 (電荷) に依存するため, 各成分毎のエネルギースペクトルの観測が行われている. 最新の結果では, 各成分のスペクトルにもベキの変化が確認されており, 電子や陽電子比の過剰とも相まって, それぞれの関連性なども含めた議論を呼んでいる.

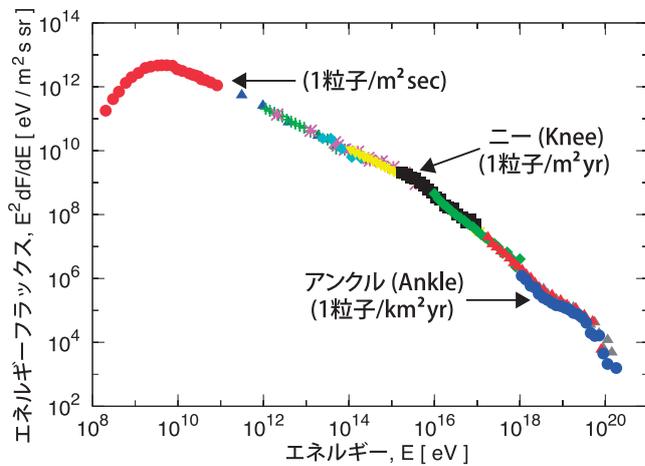
右図：国際宇宙ステーション (ISS)「きぼう」に搭載される予定の宇宙線観測装置 (CALET) の概観図と主検出器であるカロリメータの側面からみた概念図. カロリメータに 1 TeV の電子が入射した場合のシミュレーション計算を示す. 日本初のスペースでの本格的宇宙線観測となる CALET は 2014 年に打ち上げ予定となっている.



特集 「大気は絶妙な厚さの検出器 — 宇宙線エネルギーの限界を求めて」 p.827



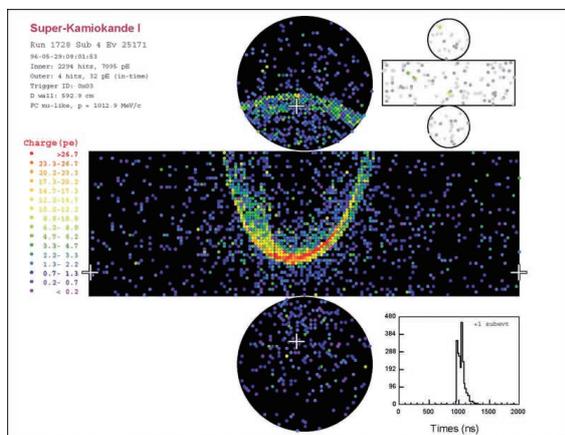
最高エネルギー宇宙線を観測する米国ユタ州での Telescope Array (TA) 実験：空気シャワーによる大気の発光を撮像する望遠鏡 (左上図) と, 地表で粒子密度を測定するシンチレータ・アレイ (左下図) からなる. 右図は, 観測されたエネルギー・スペクトルに, エネルギーの 3 乗をかけて表示したもので, $10^{19.7}$ eV を超えると, 急激に到来数が減ることが, TA を含む 3 つの実験で確立された. これは, 極高エネルギーに達した宇宙線と, 宇宙背景放射との反応によって生じた (GZK 効果) と考えられている.



RUNJOB, 黄逆三角: Tibet AS- γ , 黒四角: KASKADE, 赤三角: HiRes-II, 青丸: PAO.

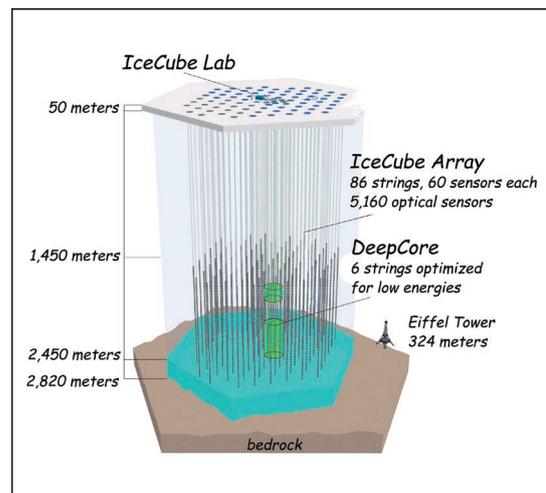
宇宙線の全粒子エネルギースペクトル。カラーは観測実験の違い。 $10^{15.5}$ eV (ニー)と $10^{18.5}$ eV (アングル), $10^{19.5}$ eV 付近に折れ曲がりを持つ。フラックスが 10^{10} eV 以下で下がっているのは太陽風の影響。宇宙線の起源と加速機構, スペクトルの形成機構を理解しようと我々は100年間悩み続けている。

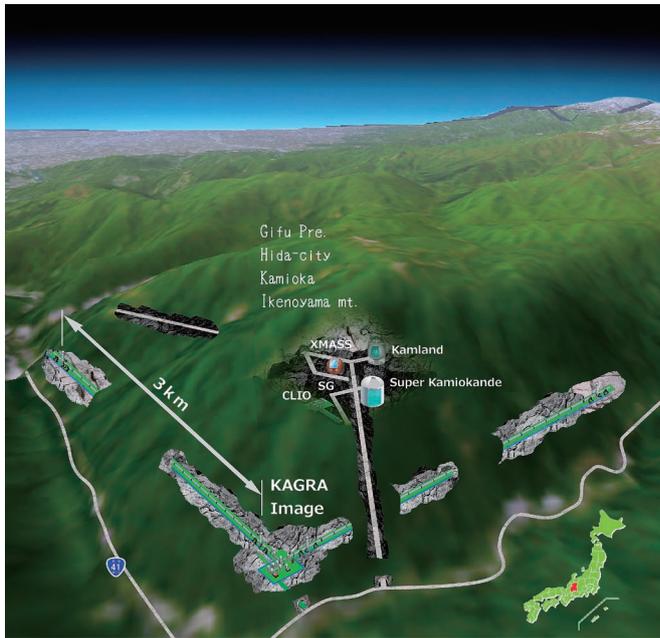
宇宙線の全粒子エネルギースペクトルについては, 本特集記事「宇宙線を直接捉える」および「大気は絶妙な厚さの検出器—宇宙線エネルギーの限界を求めて」にも関連する記述があるので, この図を参照しながらお読みいただきたい。赤丸: LEAP, 青三角: S. P. Swordy, Space Science Rev. **99** (2001) 85の図1より, 緑十字: ATIC, マゼンタ米印: PROTON, 水色菱形: 緑四角: KASKADE-Grande, 灰三角: HiRes-I,



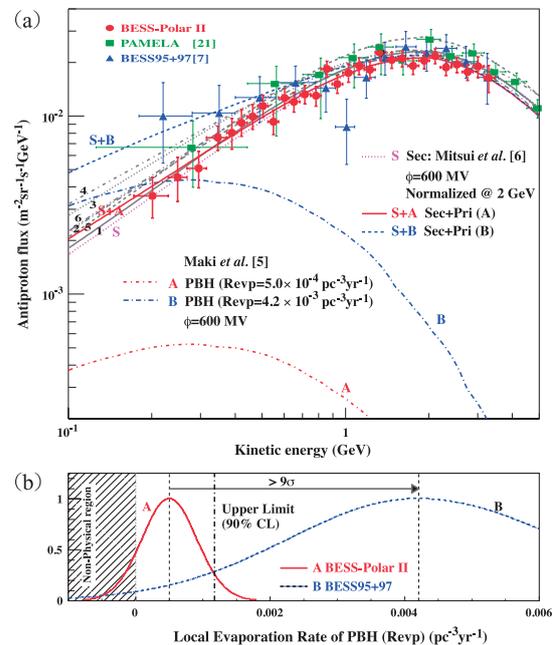
スーパーカミオカンデで捉えられたニュートリノ事象の一例。ニュートリノが反応した際に生成される荷電粒子が発するチェレンコフ光を水槽内部に並べられた光電子増倍管が捉える。光のリングパターンから到来方向, エネルギー, 粒子の種類が再構成される。ニュートリノの強度や到来方向分布によってニュートリノ振動が発見され, ニュートリノが質量を持つことが分かった。

南極点直下の氷河に建設されたIceCube実験装置の全体図。2500 mの深さの縦穴を86本掘り光検出器を埋設した。約6年間にわたる建設期間を経て, 2011年5月より本格稼働を始めた。高エネルギー宇宙線の痕跡をニュートリノ捕捉によって探索する。

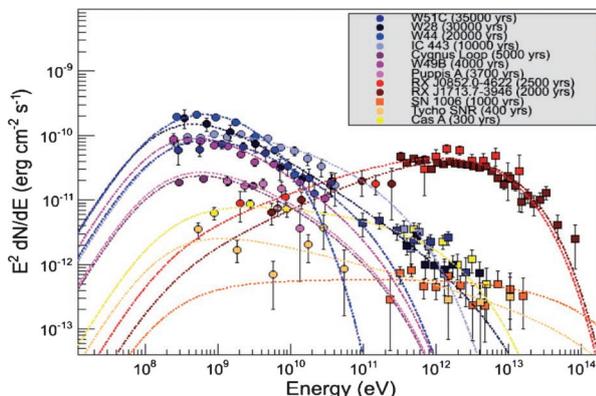
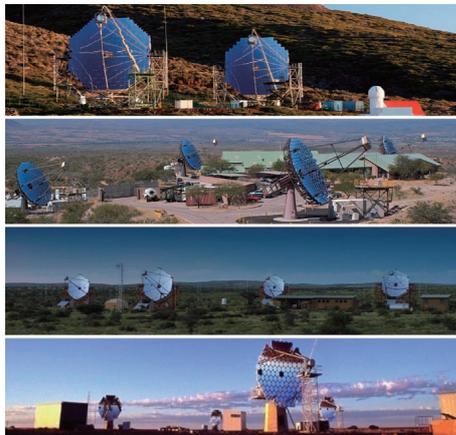




米欧の Advanced LIGO や Advanced VIRGO とともに重力波の初検出と重力波観測網の形成を目指す我が国の大型低温重力波望遠鏡（愛称 KAGRA）が神岡鉱山に建設中である。KAGRA は地面振動が小さい地下への設置、鏡の熱雑音による振動を抑える鏡の低温化、量子雑音の周波数特性をコントロールして重力波検出感度を増す帯域可変型干渉計方式の採用という 3 つの特徴を持つ。KAGRA は 8 億光年までの距離で発生する連星中性子星の衝突・合体からの重力波が検出できるため、数年間の観測で重力波が検出される確率は高い。



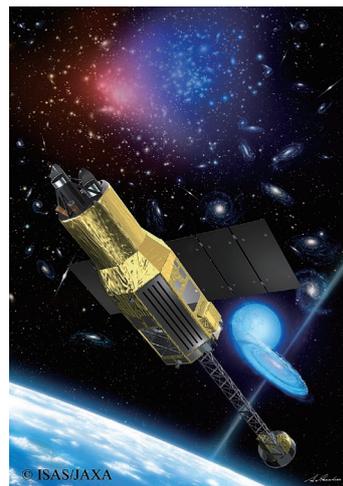
左図：PAMELA, BESS-Polar II, AMS-02 の測定器の写真。右図：(a) BESS-Polar II と PAMELA により得られた反陽子流束の最新データを BESS95+97 のデータおよび様々なモデル計算とともに示す。BESS95+97 のデータでは低エネルギー領域において過剰がみられるのに対して、BESS-PolarII, PAMELA のデータはいずれも衝突起源反陽子からの予測とよく一致しているのがわかる。(b) 低エネルギーにおける過剰を原始ブラックホール (PBH) の蒸発からの寄与と考えた場合、BESS95+97 (B) では有意な蒸発率を示すが、BESS-Polar II (A) では 0 と無矛盾な値を示し、 9σ の確度で BESS95+97 から示唆される値を否定した。



左図：第三世代のチェレンコフ望遠鏡。上から、MAGIC (カナリー諸島ラパルマ),¹⁾ VERITAS (米国アリゾナ),²⁾ HESS (ナミビア),³⁾ CANGAROO (オーストラリア・ウーメラ)。⁴⁾ 2011年に、CANGAROOはその観測使命を終了し、シャットダウンする。2012年に、MAGIC, VERITASはカメラをより高感度化、HESSは中央に28 m口径の新たな望遠鏡を設置しHESS-IIへとアップグレードする。1) J. Aleksic, *et al.* [MAGIC Coll.]: *Astropart. Phys.* **35** (2012) 435. 2) <http://veritas.sao.arizona.edu/> 3) <http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/> 4) R. Enomoto, *et al.*: *Astropart. Phys.* **16** (2002) 235.

右図：第三世代のチェレンコフ望遠鏡によって、2012年現在およそ150の100 GeV以上のガンマ線天体が検出され、他波長の観測とも合わせてガンマ線天文学が確立されている。例えば右図は、フェルミガンマ線衛星、HESS, MAGIC, VERITASによる観測で得られたシェル型超新星残骸からのガンマ線エネルギースペクトルである。このグラフから、超新星爆発のエネルギーが宇宙線のエネルギーに転嫁されていく様子が読み取れる。詳しくは本文を参照していただきたい。

左図：日本5機目の宇宙X線衛星「すざく」の打ち上げ。2005年7月10日の日本時間12:30、鹿児島県にあるJAXA内之浦宇宙空間観測所より、固体三段式のM(ミュー)5型ロケット6号機が発射された。搭載されたAstro-E2衛星は無事に近地球周回軌道に投入され、「すざく」と名付けられた。これは2000年2月10日、同じM5型ロケット4号機で打ち上げられたが、ロケット1段目の不具合により軌道に乗らなかった、ASTRO-E衛星の再挑戦機である。「すざく」はX線望遠鏡とX線CCDカメラ(XIS)の組み合わせで0.3–10 keVを、また硬X線検出器(HXD)で10–600 keVをカバーする。



右図：日本6機目の宇宙X線衛星ASTRO-Hの想像図。同衛星は「すざく」の後継機として、広汎な国際協力を取り込んで建造中であり、H2Aロケットを用いて種子島宇宙センターより2014年度に打ち上げ予定である。搭載される観測機器はすべて衛星の長軸方向に揃った視野をもち、同じ天体を同時に観測する。

物理を学ぶと何が身につくか

三沢和彦 (物理教育委員長)

今年度の高校1年生から、理科の新学習指導要領が実施され、すべての普通科高校生に理科の基礎科目のうち3科目が必修となった。¹⁾ ここで言う基礎教科とは、物理基礎、化学基礎、生物基礎、地学基礎の4つのことを言う。4つのうちから3つであるから、事実上ほぼすべての普通科の高校生が物理基礎を履修することが予想される。これまでのいわゆる「ゆとり世代」と呼ばれる学習指導要領では、総合理科A、総合理科B、理科基礎のうちの1科目と、物理I、化学I、生物I、地学Iのうちの1科目という組み合わせが必修とされていたため、物理という名のつく科目を1つも学ばずに高校を卒業するという事態がありえた。それに比べると、改訂後は物理を学ぶ高校生が増えることは喜ばしい。

しかし、いろいろと検討しているうちに、話はそう簡単ではないということがわかってきた。新課程の物理は、物理基礎と物理の2科目からなる。物理基礎は、基礎3科目必修のうちの1科目とするために内容が絞こまれた。全体の半分は「物体の1次元運動と力学的エネルギー」に充てられ、残りの半分で熱と波と電気および様々なエネルギーを一通り扱うことになっている。この構成に関して、物理学会員の何人かに印象を尋ねてみた。すると、大きく分けて以下の2通りの意見に分類できるように感じた。

ひとつは、「すべての高校生を対象としているのは歓迎できるが、力学の一次元運動だけでは内容が薄いように見える。力学以外の分野も充実させた方がよかったのではないか」という主旨の意見であり、もうひとつは、「熱と波と電気など後半の取り上げ方が断片的かつ中途半端であり、かえって弊害が出るのではないか。もう少し絞り込んだ方がよかったのではないか」という主旨である。どちらも一理ある捉え方であり、どちらがより適切な意見

だとは決められない。その理由は、我々が物理基礎というものに何を期待するかが、状況によって異なるからと考える。

実際、新学習指導要領の物理基礎の目的として、

- (1) 日常生活や社会との関連を図りながら自然現象への関心を高める
- (2) 目的意識をもって観察、実験などを行う
- (3) 物理学的に探究する能力と態度を育てる
- (4) 物理学の基本的な概念や原理・法則を理解させる
- (5) 科学的な見方や考え方を養う

の5項目が列記されている。この目的は、私から見るとやや欲張った要請に感じられる。これらの項目のうち、どこに重点をおくべきであるかと考えるかで、物理基礎という科目に対する評価が分かれるのであろう。

たとえば、(1)の日常生活や社会との関連を図りながら関心を高める対象、あるいは、(4)の物理学の基本的な概念や原理・法則を理解させる対象としては、「物体の運動と様々なエネルギー」だけでは不十分ではないか。物理学はすべての自然現象あるいは科学技術の根幹をなすという考え方は、物理学会員の間では異論がないだろう。そうであるならば、力学だけではなく、電磁気学や熱力学などもバランスよくとり扱ってほしいと思うのも無理はない。その一方で、(3)の物理学的に探究する能力と態度、あるいは、(5)の科学的な見方や考え方としては、扱う現象の種類を絞って、考え方の過程や論理の構成を一貫して示す必要があるのではないか。この立場からは、いろいろな分野を網羅的に扱おうとすると断片的な知識をなぞるだけとなり、理解を定着させることは望めない、と思うのもやはり無理はない。

さらには、私自身は(2)の観察、実験などを行うことが理科を学ぶ出発点

であると強調したい。理系の進路を選択しない高校生であっても、実験科学の考え方を一度は体験しておいてほしいと思う立場である。その観点からは、上記(3)(5)の目的であっても、基本の原理・法則から始めて具体的な現象に演繹していくアプローチよりも、具体的な現象の観察から始めて一般的な法則性を類推していくアプローチの方が、物理の初学者に対しては望ましいと考えている。²⁾

このように考えてくると、物理を学習することの目的をどのように設定するかが自明ではないことがわかるであろう。目的を明確に設定するためには、「物理を学ぶと何が身につくか」ということ自体を、教える者が自ら定義しなければならない。さらにその教育の効果を十分に上げるためには、「物理を学ぶと何が身につくか」を学ぶ者に対して明確に提示する必要がある。そうしてあらためて新学習指導要領に記載された物理基礎の目的をよく読んでみると、「物理学的に探究する」「物理学の基本的な概念」「科学的な見方や考え方」とはそもそも何か、という問題提起に行き当たる。私たちは、そのような基本的な概念を学生に明快に伝えられるだろうか。基本的概念の定義が定まらないまま、項目のみを表面的に追うことがないようにするのは、私たち教員の責任であろう。第68期の物理教育委員会では、物理教育に関するそのような根源的な問題についても議論し、広く学会員の皆さまとも意見を交換していきたいと考えている。

参考文献

- 1) この他に、「科学と人間生活」1科目および「物理基礎」「化学基礎」「生物基礎」「地学基礎」のうちからもう1科目という選択方式もある。文部科学省高等学校学習指導要領のサイト http://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/new-cs/youryou/1304427.htm
- 2) 三沢和彦：大学の物理教育 18 (2012) 42—物理学は積み上げ型の学問ではない？

(2012年8月30日原稿受付)

特集「宇宙線 100 周年」

我が国における宇宙線研究の始まり

西村 純 ◇

1920年代にボーアの研究所で過ごした仁科芳雄は1928年に帰国したが、我が国における現代科学普及の重要性を考え、長岡半太郎に依頼してディラックとハイゼンベルグを日本に招請している。仁科自身も1931年には京都大学で講義を行っていた。湯川・朝永はこれらに刺激を受けて量子力学の研究に進んだと云われている。仁科は1931年に理研に彼の研究室が発足すると、宇宙線の研究に取り組み、理論的研究、マグネット霧箱による中間子の研究、深部地下での観測、緯度効果、連続観測等広範にわたる研究を展開した。仁科研究室は戦争末期に壊滅的な被害を受けたが、我が国の宇宙線研究は戦後、多くの方々からの支援の下に発展し、新しい展開を見せて今日に至っている。

1. 宇宙線の発見

今年(2012年)は宇宙線が発見されてから100年目にあたる。アメリカおよびヨーロッパでは宇宙線発見を記念して研究にゆかりのある場所で記念の国際学会が開かれている。我が国でも仁科財団と東京大学宇宙線研究所との共催の下に記念講演会を12月に開くことが計画されている。

1912年8月、オーストリアの科学者ヘス(V. Hess)¹⁾は自由気球に乗り、金箔検電器を改良した検出器を搭載して高度5 km付近まで上昇し、高度によるガスの電離度の変化を調べた。ヘスがこの気球実験を行ったのはそれに先立つ幾つかの実験があったからである。

1900年にはドイツの科学者のエルスターとガイテル(J. Elster & H. Geitel)、イギリスの科学者ウイルソン(C. T. R. Wilson)^{2,3)}はガスの電気伝導度は放射線から生れるイオンによると考え実験を行っている。1909年にはドイツの科学者ウルフ(Th. Wulf)はエッフェル塔(300 m)の上で地上からの放射線影響を避けて電離度の観測を、同じ年にスイスのゴッケル(A. Gockel)、1911年にはヘス自身が気球実験を行っている。しかし、地上及び検出器から以外の放射線があるのかどうか明快な答えは得られなかった。

ヘスはRaCのガンマ線の空中での吸収係数を実測して高精度の観測と解析に備えると共に、検電器の感度が気圧の影響を受けない様に気密にした2個と気密なしの1個とを搭載して1912年の実験に臨んだ。気球が数百メートルの高さに上がるまでは電離度は減り続けたが、以後は増加を続け、高度5 kmで地上の約4倍に達することを見出した。

ヘスはこの結果を分析して、「地面からの放射線は高度数百メートルまでに吸収され、上空から新たに透過性の高い放射線が入射しているに違いない」と学会に報告した。同じ年、イタリアのパッシーニ(D. Paccini)は水中ではガスの電離度が減ることから、地球外からの放射線入射を示唆している。

ヘスの実験の翌年1913年から、ドイツの科学者コールヘルスター(W. Kolhörster)^{2,3)}は酸素吸入器をつけて高度9 kmまで気球観測を行い、5 kmまではヘスの観測と一致し、それ以上の高度でも電離度が上がり続けることを確か

めた。

しかし、「地球外からの放射線」とする考えは直ぐには受け入れなかった。当時、放射線でその様に透過力の強いものは知られていなかったためである。大気中に含まれる放射性物質によるものか？ 高層での雷が関係するのではないか？ もし後者ならば気象的な変動に伴うのではないか？

第一次大戦後、アメリカではミリカンが高山や水中、より高い15 km程度の高度までの気球観測等を大規模に行い、これらの実験事実を解析して、1925年には地球外起源という意味を込めてCosmic Raysという名前を提唱した。彼は、宇宙で元素が作られた時に、原子核の質量欠損分がガンマ線として放出され、これが宇宙線であると主張した。原子核の質量欠損に相当するエネルギーのガンマ線が元素の存在比に比例して入射していれば、大気中の吸収曲線が説明できる(当時は電子対生成は知られていなかった)と云う理由である。宇宙線は「元素誕生の産声」であるという説に固執して、緯度効果等の実験結果を無視して、コンプトンやヨーロッパの科学者との間で激しい論争を起こしている。

私見では宇宙線が宇宙起源の高速荷電粒子である事が確定したのは1926年にアムステルダムからジャカルタへの航海で、スエズ運河付近で宇宙線強度の減少を観測したオランダの科学者クレイ(J. Clay)、(コンプトンは1932年、ミリカンも1933年に同意)の緯度効果観測によるもので、Cosmic Raysと云う名前もこの辺りの時期に定着した。

同じ頃、宇宙線中に高エネルギー現象や新粒子が発見され、宇宙線が宇宙起源の放射線であることの発見と共に、高エネルギー物理学にとっての重要性が認識され、宇宙線は学問の一分野として考えられる様になった。ヘスは「陽電子」の発見者アンダーソン(C. D. Anderson)と共に、「宇宙線の発見」で1936年にノーベル賞を受賞している。

2. 我が国での宇宙線研究

ヨーロッパで始まり、第一次大戦後にアメリカで研究が進められた宇宙線研究がどの様にして日本でも始まったのか、調べて見ると幾つかの流れがあることが分かる。³⁾

●京都大学：長谷川万吉

京都大学の長谷川は宇宙線研究を進めていたコールヘルスターの研究室で研究を続けていたが、1930年に電離箱を譲り受けて帰国した。しかし、その2,3年後に宇宙線の研究をやめて、地磁気の研究に専念している。

●東京大学：木下季吉

木下はマンチェスターのラザフォードの研究室で写真乾板を用いて初めて α 線計測を行った。原子核乾板分野の創始者である。帰国後、東京大学で放射線の講義を行い、学生の石井千尋にボーテ (W. Bothe) とコールヘルスターのカウンターによる同時放電で「宇宙線中に高エネルギー粒子線が存在する」ことを証明した歴史的な論文の紹介をさせている。石井は卒業と同時に理研の仁科研究室に入室、清水トンネルの研究、仁科型電離箱の製作に携わった。

●大阪大学：菊池正士

菊池は宇宙線研究の重要性に着目し、研究室では渡瀬譲達³⁾に宇宙線シャワーの研究を勧めていた。しかし、菊池研究室でのサイクロトロンの実験開始に伴い渡瀬達は加速器実験に移り、大阪大学での宇宙線の研究は中断した。

●理化学研究所：仁科芳雄^{3,4)}

仁科はヨーロッパに滞在中はX線分光学やコンプトン散乱の実験を行っていたが、帰国の少し前に当時発表されたばかりのディラックの電子論に基づいてコンプトン散乱の断面積「クライン仁科の式」を計算している。仁科の研究室は1931年に理研に発足しているが、我が国で宇宙線を研究目的に掲げた最初の研究室である。研究室発足時の研究員は嵯峨根遼吉であり、次いで竹内証が加わった。

3. 仁科研究室の宇宙線研究

3.1 宇宙線中の陽電子

嵯峨根はまず当時発表されたばかりのガイガー計数管を作り、また、宇宙線を見やすくするために、普通は水平に置いて使う霧箱を縦型にして試作している。断熱膨張の後、霧箱の中の霧粒の生成に都合の良い過飽和状態にある時間は0.1秒以下である。その様な瞬間に宇宙線が通過しなければよい飛跡は撮れない。良い飛跡の撮れる確率は非常に少ない。そこで計数管を霧箱の上下に置き、同時放電回路で粒子の通過を確かめて霧箱を膨張させる方式を独自に考案し得意になっていた。カウンターコントロールのマグネット霧箱はブラケットの研究室でも同じ頃開発されていた。その論文がNatureに発表されたのを見た嵯峨根は「やられてしまったよ……!!」と残念がっていたと、朝永振一郎と竹内の随想録^{5,6)}に述べられている。ブラケットはこのカウンターコントロール霧箱の開発とそれによる宇宙線の研究で後にノーベル賞を受賞している。

アメリカのアンダーソンがマグネット霧箱で宇宙線中に陽電子を発見したのは1932年である。宇宙線が素粒子物理学の研究に最初に寄与した画期的な事柄である。朝永は同じ年に仁科研に入室している。

仁科は陽電子はガンマ線が原子核近傍で電子対生成を行い発生したと考え、朝永及び坂田にディラックの電子論を用いて陽電子発生断面積を計算するよう指示している。この結果はハイトラーの教科書⁷⁾に非相対論的な場合の正確な解として紹介されている。量子力学発展の中心地である欧米から遠く離れた我が国で、この様な高度な研究がいち早く行われたことは特筆に値することである。

一方、竹内達は改めて霧箱の写真調べて見ると、霧箱の壁から電子対が発生している飛跡が撮られていた。電子が壁に衝突して後方散乱したと誤って解釈していたと竹内は後に述べている。⁶⁾

3.2 Muonの発見

仁科は1935年からコックロフトやサイクロトロンの計画・建設に取り掛かったため、嵯峨根はサイクロトロンの建設に移った。宇宙線研究では直径40cmの大型のマグネット霧箱の製作を計画し、竹内がこれにあたった。世界最強に近い1.7テスラのマグネットを用意したが、理研(駒込)では受電設備が不十分で、実験は横須賀の海軍工廠で1936年から行われている。

Muonが宇宙線中に発見されたのは1937年で、これは陽電子発見に続く宇宙線による素粒子研究の重要性を示す画期的な出来事であった。Muonの発見はネッダーマイヤー (S. H. Neddermeyer) とアンダーソンがその存在を示し、ストリート (J. C. Street) とステイブソン (E. C. Stevenson) が質量を測定してその存在を確定的にした後、少し遅れて精度の高い質量観測を仁科・竹内・一宮(虎雄)が行ったと思っている人が多い。しかし、これは事実とは違う。

湯川秀樹の中間子の論文は1935年に出版されていて、仁科は湯川の相談に乗っていた。仁科研のMuon発見の当時の事情について有志^{*1}と共に仁科財団にある資料をもとに調べることにした。仁科の往復書簡集⁴⁾には仁科の手紙のコピーが完全な形で記載されており、貴重な資料であった。また、関連する原論文と科学史の文献を参考にした。

仁科達は霧箱の中に3.5cm厚の鉛板を入れ、鉛板を通り抜ける前後の荷電粒子の運動量の変化を測定して、質量を決めていた。最初中間子の飛跡の写真を解析したと思われる1937年の7月27日に、竹内は手紙で仁科宛に：

「もう1本か2本撮れないと何だか不安です……」と述べている。しかし、受け取った仁科は即日湯川に；「…次に小生達の実験についてお知らせします……、結局、その鉛におけるrangeを求めeはelectronと同じとしてmを求めますと、陽子の1/6ないし1/7の間にあることが大体判りました。但しこの点はさらに正確を期するため実験を進めています……。」と手紙を出している。

この結果は8月15日に岩波の「科学」に「新粒子の発見」

^{*1} 2008年から2009年にわたって、数回検討会が行われた。主な出席者は荒船次郎、池田長生、江沢洋、中根良平、仁科浩二郎、仁科雄一郎、西村純、宮沢弘成、山崎敏光、山田作衛の諸氏である。本文中の記述についての文責は筆者にある。

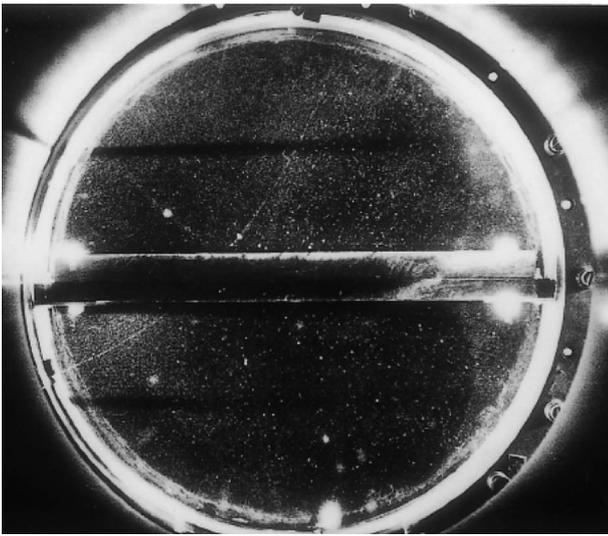


図1 仁科研究室でとらえたMuonの飛跡(仁科記念財団提供)。仁科研究室の霧箱は直径40 cm、磁場1.7テスラで、霧箱の中に置いた3.5 cmの鉛板中での運動量損失から質量を測定した。測定された質量は $223 \pm 39 m_e$ (m_e は電子質量)で、現在知られているMuonの質量、約 $207 m_e$ に近い。⁸⁾一方、ストリート・ステイーブンソン達の結果は、質量= $130 \pm 33 m_e$ 、でかなりずれていた。⁹⁾

という題目で投稿し発表され、Phys. Rev.にも投稿して8月28日には受理され12月1日号に掲載されている。⁸⁾

一方、同じ様に質量の測定を行ったストリート達の論文は1カ月余り後の10月7日にPhys. Rev.に受理され、仁科達より一月早い11月1日号に掲載⁹⁾されて居る。他の科学者から見れば、ネッダーマイヤー達の論文がPhys. Rev.に出て、新粒子が存在するのかなど思っている所へ、ストリート達の論文が出て、中間子の存在が確定したと思った。より精度は高いが、仁科達の論文はその一カ月後で(図1)、あまりインパクトがなかったのではないかと。本来ならば、ストリート達より1月早く出版されるべきであったのに、どうして2カ月も遅れたのか。仁科達の論文はレターとして投稿したが、長すぎて本論文に廻されたためである。

しかし、論文受理の時期及び測定精度から見て、仁科達の成果はストリート達と同じようにMuonの発見に重要な寄与をしたと評価すべきだと考えられる。

仁科研究室では中間子の質量測定や新粒子研究はその後も続けられ、国際的に第一線のレベルに立っていたが1945年の空襲で施設を焼失し多くの資料も失われてしまった。

戦前、仁科研究室では、Muonの研究以外にも、深い地下での宇宙線観測、緯度効果、宇宙線の強度変化の観測、上空の宇宙線観測など幅広く研究が進められていた。その規模は研究室と云うより、研究所のスケールであったと云える。その内の2,3の活動について取り上げることにした。

3.3 清水トンネルでの実験

仁科はハンガリーのバルノーシー(J. Barnothy)とフォーロ(M. Forro)達の地下732 mwe (mweは水深に直した深さ)の実験(1937年)に刺激されて、石井と関戸弥太郎に清水トンネルの深地下での宇宙線観測を勧めた。実験は1939年に始まり、後に宮崎友喜雄も加わり、深さ1,400

mwe, 3,000 mweの2箇所で行われた。観測は戦時中も行われたが、終戦から約半年後に失火のため実験は終了した。

深さ3,000 mweは1951年にアメリカでの観測が発表されるまでは世界最深の観測データであり、2中間子の解析に関連して貴重なデータを提供することになった(後述)。

3.4 仁科型電離箱

宇宙線の強度を長期的に観測するため、安定な電離箱を作る計画が1935年に立てられた。この様な計画は当時アメリカやヨーロッパでも立てられている。緯度の違う各地に配置して、宇宙線の緯度による変動を測定する計画である。北から、樺太、札幌、東京、台北、パラオの5カ所を想定し5台製作した。実際に配置したのは、東京で理研(駒込)と東京天文台支所(麻布狸穴)である。

アメリカも、フォーブッシュ(S. Forbush)が中心となりカーネギー研究所が北はグリーンランド、南はニュージーランドにカーネギーメーターと呼ばれる電離箱を配置していた。フォーブッシュが戦後これらの戦時中のデータを解析した所、1942年2月28日と3月7日に、全世界的に宇宙線の異常な増加があることを発見した。フォーブッシュ増加と呼ばれる現象である。後に太陽の爆発に伴う高エネルギー粒子の発生であることがわかった。フォーブッシュの論文が戦後間もない1946年に日本に届いた時、仁科型のデータを改めて調べて見ると2月28日には増加はないが、3月7日には確かに増加が認められた。東京は地磁気緯度が低いのでエネルギーの低い粒子は入射し難いためと考えられる。貴重なデータであった。

1942年当時、担当者であった宮崎はこの異常増加に気が付き、直ちに「理研講演会」で報告したことを話してくれた。しかし、前列に座る恐れ長岡や仁科から「回路の電気系のノイズではないか、もっと細かく検討せよ」とコメントが出て、恐れをなして、そのままになってしまったとのことである。

太陽フレアによる宇宙線加速と云う大きな発見を逃した。

3.5 緯度効果、気温効果、連続地上観測、気球観測等

仁科研究室はこのほか、日本郵船に依頼して、オーストラリア航路、シアトル航路などで、緯度効果を、また大型の計数管による計測装置での連続観測を行い、気圧効果や気温効果の研究など幅広く行っている。気球による上空の宇宙線の観測も試みていたが1943年になると、戦争の影響で取りやめになった。やがて、1945年の空襲により、駒込にある理研の宇宙線関係の施設は大方失われてしまい、金沢に疎開していた連続観測の機器だけが生き残ることになった。

3.6 理論的な研究¹⁰⁾

戦前に行われたアメリカのシャイン(M. Schein, W. P. Josse and E. O. Wollan)達の気球実験の論文は、仁科研究室にも戦争の始まる前に届いていた。実験結果を詳細に解析した玉木英彦はそれまでの一次宇宙線を陽電子とする考えは誤りで、陽子であるとの結論に達していた。問題は上

空中の数多くの電子やガンマ線の源を何処に求めるかであった。Muonの寿命が長いので、その崩壊電子では、上空で観測されている量は供給できない。

また、宇宙線中に見つけられた中間子(Muon)は核相互作用が小さく、湯川の提唱した中間子とは異なる性質を持っていた。日本では戦時中も、中間子の検討を巡って「中間子討論会」と呼ばれる会が半年に一回程度開かれ、坂田昌一・谷川安孝・井上健はこの矛盾を解くために、2中間子論を提起していた。武谷三男は中性中間子はガンマ線に短い時間で崩壊し、これが宇宙線中の上空での「電子成分」の源であるという考えを提起した。日本でのこれらの研究の成果は戦後になって初めて世界に知られることになった。

4. 戦後の宇宙線研究

原子核乾板の感度を改良して、1947年にはパウエルのグループは宇宙線中に π - μ 崩壊を発見し、宇宙線中に2種類の中間子があることを発見した。湯川は1949年にノーベル賞を受賞している。戦時中に坂田・谷川・井上(1943)が、戦後にマールシャク(R. E. Marshak)とベーテ(H. A. Bethe)(1947)が提唱した2中間子の考えが基本的に正しいことを示す事柄であった。¹⁰⁾

π - μ 中間子の発見の年、K中間子も霧箱の中で発見されている。宇宙線研究は新しい時代を迎え、諸外国では高山の宇宙線観測所で新粒子や高エネルギーシャワー現象の研究が行われ、また原子核乾板という新たな観測器が出現してこれを搭載して気球実験が始められるようになった。

日本では理研は解体されて、株式会社科学研究所として生き残ることになった。もはや、大規模な研究を行うことはできない。関戸は1943年に名古屋大学に宇宙線研究室をつくるために移っていた。金沢に疎開していた宇宙線の連続観測を行っていた仁科研のグループは駒込の理研の施設が焼失したため、板橋の旧陸軍の造兵廠の跡地を借りて研究を続けることになり、宮崎がこれを引き継ぐことになった。

原子核研究が連合国によって禁止されたため、理研で放射線研究を行っていた皆川理は気象研究所に移り、宇宙線の研究を始め、後に神戸大学に移った。同じく中川重雄は立教大学に移り、宇宙線の研究室を開くことになった。

関西では、渡瀬を中心として大阪市立大学に宇宙線の研究室が生まれた。この様にして、戦後の宇宙線の研究は、科学研究所(理研)、気象研究所、立教大、名古屋大、大阪市大の5つの大きな拠点に加えて、各大学での理論と原子核乾板のグループが加わって発足することになった。

極端に経済状態の悪い日本では、経済的制約の少ない理論的解析の方面から研究成果が出始めた。戦時中の研究、坂田・谷川・井上の2中間子論、宇宙線の電子成分が中性中間子に起因とする武谷の指摘も欧文で改めて発表された。朝永の下で学んだ早川幸男は、清水トンネルの地下の宇宙線強度の解釈に取り組んだ。早川は地下深部に到達する

Muonのエネルギー損失として、電離損失、輻射損失に加えて、朝永が計算した荷電粒子による電子対生成エネルギー損失を考慮した。また清水トンネルの地下に到達する数百GeV以上のMuonの強度は、親となるPionの寿命がエネルギーとともに延びて、大気中で核作用を起こしてMuonに崩壊し難くなることを考慮することにより理解できることを示した。この時期、藤本陽一・山口嘉夫は原子核乾板中の核崩壊(スター)の新しい理論を提起している。

5. 乗鞍の観測所(「朝日の小屋」と「乗鞍宇宙線観測所」)

実験関係では各々少ない機材を生かして、どの様に研究を進めようか悩んでいた時に、画期的な出来事が起きた。それは1949年に朝日新聞社が乗鞍山上に宇宙線観測のための実験室をつくる研究奨励金100万円(今の金額で云えば1億円以上か?)を出してくれたことである。奨励金は、大阪市立大学:渡瀬、名古屋大学:関戸弥太郎、気象研究所:皆川理、科学研究所:宮崎友喜雄の4名の方々が受けられた。

この時期、大阪市大にも乗鞍の上に観測所を立てる計画があり、1950年には大阪市大の小屋、次いで朝日の小屋が乗鞍山上で稼働することになった。朝日の小屋は建坪15坪でその内実験室は7坪であった。ここで神戸大学・名古屋大学・理研の3グループが実験をする。いかにも狭い。結局、日本学術会議の原子核特別委員会に渡瀬、皆川、関戸が提案して文部省に本格的な研究施設を作ることを申し入れることになった。東京大学附置の乗鞍宇宙線観測所はこのようにして生まれた。名前は観測所であるが、法的には共同利用研究所であり、同じ1953年度に湯川のノーベル賞受賞を記念して造られた京都大学の基礎物理学研究所とともに、日本で初めての大学附置共同利用研究所として発足した。

乗鞍観測所が立案された1950年頃は世界的に新粒子の研究は宇宙線で行われていた。諸外国では高山観測所は1930年代から活発な活動を行っていて、その主流をなすのは新粒子や空気シャワーの研究であった。しかし、乗鞍が完成した1953年にはアメリカのブルックヘブン国立研究所で3 GeVのコスモトロンと呼ばれる加速器が動き出して、新粒子の研究は加速器の研究の分野へと移行した時期である。観測所が出来上がったタイミングがやや遅かった。

さもなければ、もっと成果が上げられていたはずである。大阪市立大学の三宅三郎は150気圧、直径50 cm、深さ20 cmの高圧水素霧箱を世界に先駆けて開発し、中間子多重発生の数例をとらえたが、^{*2} 残念なことに、この分野が加速器に移ったタイミングであった。しかし、乗鞍宇宙線観測所は空気シャワーや大型霧箱による超高エネルギー現

^{*2} 三宅達¹²⁾がこの高圧水素霧箱で同時に測定したnp散乱法による宇宙線中性子のエネルギースペクトルは精度が高く、その後、メモリーが飛躍的に増した大型計算機のビットエラーの推定に現在も使われていることである。

象の観測、大型の山上エマルジョンチャンバーの開発と観測、宇宙線連続観測、太陽フレアに伴う高エネルギー中性子の増加などの研究の場として研究者を育て、その後の日本の宇宙線研究発展の基盤を築いた役割は大きい。

原子核研究所が出来上がるまでのこの時期、理論的な研究では早川は宇宙線の超新星起源説、放射性同位元素¹⁰Beを用いる宇宙線銀河拡散研究、ガンマ線天文学の提唱など、西村純と鎌田甲一は三次元シャワーの理論を提唱している。中間子の多重発生については、フェルミ理論やランダウ理論に刺激されて、基礎物理学研究所で木庭二郎と早川が中心になって検討会を開き、全国的にその研究を広めたことはその後の宇宙線研究発展に大きな役割を果たした。検討会に刺激されて西村による「ジェットシャワーの二次粒子の横運動量の重要性」、高木修二の「多重発生モデル」、丹生潔の「2中心火の玉モデル」などが提唱されている。

6. 原子核研究所

乗鞍宇宙線観測所が創設されたのは1953年のことである。この年はサンフランシスコ平和条約が結ばれた翌年に当たる。戦後遅れた原子核実験の研究を一挙に取り戻そうと計画が議論され、日本学術会議の原子核特別委員会で纏めた案が原子核研究所である。その案は「高性能のサイクロトロンを持ち原子核の研究を行い、中間子を生成できる高エネルギー加速器の準備を行う。宇宙線部及び理論部を持ち研究を行う全国共同利用の研究所」であるとしている。

宇宙線としては原子核研究所にどのような研究部門を持つべきか？ 1956年の2月に、全国の関係研究者が基礎物理学研究所に集まり、具体的な構想について一週間にわたる討論が行われている。会をまとめたのは木庭・早川・藤本である。

空気シャワーの観測器についてはMITで装置の開発に携わっていた大阪市立大学の小田稔が大型プラスチックシンチレーターによる空気シャワー観測装置を提案し、それに新しいアイデアを盛り込んで取り組むことになった。

原子核乾板関係では、「ジェットシャワーの二次粒子の横運動量」をエマルジョンチャンバー(ECC)で気球観測する計画が西村により提唱された。ECCは乾板と金属板等を組み合わせた観測器で、高価な原子核乾板を節約し、経済的な負担が少なく実験ができる利点もあった。神戸大学の皆川と立教大学の中川が気球開発を行っていたので、全国的共同実験として行うという計画であった。会の終わり頃に、基礎物理学研究所に招待されて来られていたパウエル博士も計画を聞いて、大いに励まして下さった。原子核研究所の宇宙線部はこの様にして1956年に発足した。

乗鞍宇宙線観測所を経て、原子核研究所に宇宙線研究室が開かれたのは、戦後荒廃に帰した我が国の宇宙線研究が国際的レベルに復帰しようとしていた時期に当たる。

原子核研究所の宇宙線部発足後の詳細は文献11に譲るが、空気シャワー研究で開発された放射線観測器技術は全

国の各大学で有効に活用され、我が国での空気シャワーをはじめ宇宙線研究の観測技術のレベルを一挙に引き上げた。系外銀河から到来したと思われる 10^{19} eV以上の超高エネルギー宇宙線の起源、ガンマ線点源の研究など多彩な発展を見せて現在に至っている。空気シャワーの観測に関連して開発された福井・宮本のスパークチャンバーは高エネルギー物理学、ガンマ線天文学の観測器に使われて活躍した。

宇宙線の国際協力実験は1960年代に始まったが、当時国際協力は珍しく、宇宙線分野以外ではあまり存在していなかった。日本の優れた研究を取り入れるため、相手国の希望で実現した共同実験である。一つはインドと大阪市立大との共同研究で、コラ金鉱の地下深部で三宅は大気中で発生した宇宙線ニュートリノからの二次粒子の観測に世界で初めて成功した。

原子核研究所の発足時に提案されたECCは大型化して山上に展開して超高エネルギー現象の直接観測を行い、一方航空機や気球に搭載して丹生によるチャームを含む粒子の発見をもたらした。また、長時間気球観測により、高エネルギー一次宇宙線の直接観測を可能にしてきた。名古屋大学では改良を重ね、CERNの加速器からのニュートリノ観測のためにグランサッソの地下実験室で使用している。

気球観測の技術は宇宙線の分野以外からの要望も多いため、1966年に宇宙航空研究所(現宇宙科学研究所)に移行し、より広い宇宙科学分野を対象に発展することになった。

今年はX線天文学発足50周年に当たるが、物理的内容も観測方法も宇宙線研究に近い。世界的にもこの新しい分野の発展に寄与した宇宙線研究者が多い。我が国においても、宇宙線研究を行っていた早川、小田、田中(靖郎)、宮本達がこの分野の発展につくして成果をもたらした。

宇宙線研究の組織としては、1978年に組織改正が行われ、乗鞍宇宙線観測所と原子核研究所の宇宙線部を統合して現在の共同利用研としての宇宙線研究所が創設された。

宇宙線研究の現在に至る発展は本特集の各記事に詳しいが、飛翔体による反粒子・一次電子・重粒子の精密観測、地上からの高エネルギーガンマ線点源や 10^{19} eVを越す系外銀河起源の超高エネルギー宇宙線の研究が行われている。

1987年に神岡では小柴昌俊が超新星1987A爆発に伴うニュートリノ発生をとらえることに成功した。続いてスーパーカミオカンデによるニュートリノ振動の観測、カムランドの活躍など、ニュートリノ物理学は宇宙線研究の一大分野として登場し、さらに重力波や暗黒物質の観測など宇宙線の新しい研究分野が発展することとなった。

宇宙線研究の発展の歴史を振り返ってみると、地球物理学、太陽物理学、宇宙物理学と高エネルギー物理学に関連して常に問題意識を持って新たな分野を生み出しながら発展し続けてきたことが判る。内容は変わってきたように見えるが、ミリカンが宇宙線と初めて名付けた「宇宙から入射するミステリアスな放射線」という趣旨は変わっていない。

参考文献

- 1) V. F. Hess: Phys. Zeits **13** (1912) 1084.
- 2) S. Hayakawa: *Cosmic Ray Physics* (John Wiley & Sons, 1966).
- 3) Y. Sekido and H. Elliot, ed.: *Early History of Cosmic ray Studies* (D. Reidel Pub. Company, 1982).
- 4) 中根良平他編:『仁科芳雄往復書簡集』(みすず書房, 2006).
- 5) 朝永振一郎:『朝永振一郎著作集6 開かれた研究所と指導者たち』(みすず書房, 1981) p. 35.
- 6) 竹内 桓:『霧箱による宇宙線の研究』,『仁科芳雄』(玉木英彦, 江沢洋編:みすず書房, 2005) p. 105. その他, 雑誌『自然』1975年7月号等にもある.
- 7) W. Heitler: *The Quantum theory of the Radiation* (Oxford Clarendon Press, 1954).
- 8) Y. Nishina, M. Takeuchi and T. Ichimiya: Phys Rev. **52** (1937) 1198.
- 9) J. C. Street and E. C. Stevenson: Phys Rev. **52** (1937) 1003.
- 10) L. M. Brown and L. Hoddeson: *The Birth of Particle Physics* (Univ. Chicago Press, 1980), 内容の一部は早川幸男監訳(講談社, 1986)で出版.
- 11) 西村 純:『現代物理学の歴史』(朝倉書店, 2004) p. 145.
- 12) S. Miyake, K. Hinotani and K. Nunogaki: J. Phys. Soc. Jpn. **12** (1957) 113.

著者紹介



西村 純氏: 科学研究所仁科研究室, 神戸大学, 東京大学原子核研究所を経て宇宙科学研究所へ. 同研究所では, 宇宙科学観測用大気球の開発等に取り組んだ. 1997年神奈川大学で定年. 今日に至る.

(2012年6月20日原稿受付)

Birth of Cosmic-ray Studies in Japan

Jun Nishimura

abstract: Systematic studies of cosmic rays in Japan were started when the Nishina Laboratory was founded in Riken in 1931, after Nishina came back from the Niels Bohr Institute in Copenhagen. He spent a great deal of effort to spread modern physics in Japan, which later established the strong group of theoretical physicists including Yukawa, Tomonaga, Sakata and others. Nishina constructed a cloud chamber with a strong magnetic field of 1.7 Tesla, which lead to the success of precise measurements of mass of mesons in 1937. His laboratory concerned with comprehensive cosmic-ray studies including the deepest under ground experiment at Shimizu Tunnel (3,000 mwe), continuous observation of cosmic ray intensity by constructing Nishina Type Ionization Chambers, observations of Latitude Effect, Pressure and Temperature effects and other efforts. Here description is made for the Cosmic ray research in our country, started from Nishina laboratory, developed later at each time by introducing new concept and also by exploring new fields.

宇宙線を直接捉える

鳥居 祥二 (早稲田大学理工学術院理工学研究所 169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

地球に降り注ぐ宇宙線を大気の希薄な高い高度で直接捉えて, その組成とエネルギースペクトルを測定することは, 宇宙線の加速・伝播機構を解明する上で不可欠な手段である. 日本は気球実験により高エネルギー領域での電子や陽子・原子核成分の観測において世界をリードしてきた歴史がある. 2000年以降には, 高度なエレクトロニクス技術を駆使した観測装置の開発と, 南極周回気球等による長時間観測の実施により, 加速・伝播機構の理解が大きく進展している. 今後は, 国際宇宙ステーション等の利用により, 暗黒物質や反物質といった素粒子と宇宙の謎に本格的に挑む研究も開始されつつある. このような宇宙線の直接観測の成果と今後の展望について解説する.

1. はじめに

宇宙線が宇宙から降り注ぐ放射線として, その存在が確かめられてから100年が経過したが, まだその本質的な部分である加速や伝播の機構さえ完全に解明されたとは言えない状況にある. それどころか, 観測が進むにつれて従来の理解では説明できない新たな観測結果が報告されているという現状である. 宇宙線の研究は, 粒子の生成・消滅という素粒子・原子核物理学と, 粒子の加速・伝播という宇宙物理学の2つの側面を持っており, 観測される宇宙線の粒子種別(組成)やエネルギースペクトルは両者が複雑にからみあった現象である. このため, 宇宙線の正確な理解のためには, 組成やスペクトルの高精度な観測により各々の側面を正確に切り分けることが不可欠である.

宇宙線は 10^8 から 10^{20} 電子ボルト(eV)に及ぶ12桁のエネルギー領域にわたって観測されており, 全粒子スペクトルはほぼ冪型の関数($E^{-\beta}$)でエネルギーとともに粒子数が急激に減少している. 10^{10} eV以下の領域では, 銀河系起源の宇宙線(銀河宇宙線)が太陽系磁場で散乱されるため, 太陽の活動による強度変化が見られる. 一方, 高エネルギー側では, 10^{15} - 10^{16} eVの領域に“ニー”と呼ばれるスペクトル折れ曲がり, 10^{18} eV付近に“アングル”と呼ばれる反り上がりが観測されている. ニーは銀河宇宙線の加速限界によるものと考えられており, アングルは銀河系外宇宙線の寄与によると解釈されている.¹⁾

銀河宇宙線の主成分は, 陽子, ヘリウムから鉄に至る原子核成分で, その割合は太陽系近傍の元素の存在比とは少

し異なっている。その理由は、宇宙線源で加速された粒子のほかに、銀河内を伝播する間に星間ガスと衝突して発生する粒子があることによる。前者は一次成分、後者は二次成分と呼ばれている。このような両成分を含む組成とエネルギースペクトルの観測から、銀河宇宙線の加速及び伝播機構の解明が行われている。

宇宙線のフラックスは、ニー領域では1年間に1 m²あたり1 イベント程度と極めて少ないため、観測技術的な制約から、飛翔体による直接観測はこのエネルギー領域までが限界である。それ以上のエネルギー領域の観測は、宇宙線が大気と衝突を繰り返して増殖する粒子群（空気シャワー）を、地上に設置した装置で測定する方法で、間接的に行われている。²⁾

銀河宇宙線は、これまでに国内外で多くの観測が実施されており、特に最近の南極周回気球実験や衛星観測により、陽子・原子核に加えて電子や反陽子、陽電子といった反粒子を識別した観測データが得られている。この結果、銀河宇宙線は、「超新星残骸における衝撃波によって加速され、銀河内において拡散的に伝播して銀河外へ漏れだす」という“標準モデル”による理解が進んでいる。³⁾

一方、観測精度の向上により、標準モデルでは予想されなかった、(1) 電子・陽電子における過剰成分の存在、(2) 陽子・ヘリウム成分等におけるスペクトルの変化、を示す観測結果が報告されている。これらの結果が、標準モデルの進展に寄与するとともに、新たな加速源や暗黒物質の発見をもたらす可能性もあり、今後の観測計画に大きな期待が寄せられている。

本稿では、宇宙線を“直接捉える”ことにより、組成とエネルギーが高精度に測定可能な飛翔体観測の成果と、今後の展開について概観する。

2. 日本における飛翔体観測

日本における飛翔体観測は、原子核乾板を駆使したエマルジョンチェンバー (EC) の開発によって世界をリードした歴史がある。⁴⁾ 国際的には、シカゴ大学を中心とした原子核乾板による国際共同気球実験 (ICEF) が実施された。国内では原子核乾板と金属板を交互に積層することにより、経済的かつ大型化が可能な EC を開発して気球実験が行われた。国内の気球観測は地理的な制約で数日間の観測に限られるため、日米 (一次電子, JACEE) 及び日露 (RUNJOB) の共同研究により長時間気球観測が実施された。その結果、以下に示すような、テラ電子ボルト (TeV) 領域に及ぶ電子観測とニー領域に迫る主要な原子核成分の観測が世界に先駆けて達成されている。

3. 一次電子観測

電子は超新星残骸の衝撃波で加速された後、拡散過程によって銀河内を伝播するが、その際に磁場によるシンクロトロン輻射と星間光子との逆コンプトン散乱によるエネルギー

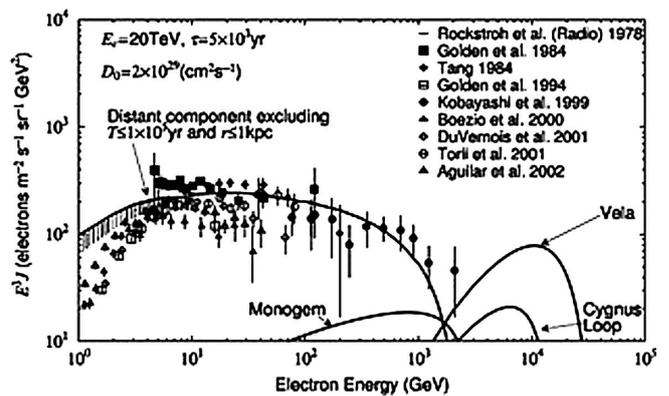


図1 電子スペクトルの観測結果 (2003年時点) と超新星残骸での衝撃波加速と拡散過程を用いたモデル計算との比較。TeV領域では近傍加速源 (Vela, Cygnus Loop, Monogem) のみが寄与する。(文献7より引用)

ギー損失を受ける。これらの電磁的過程におけるエネルギー損失の割合はいずれもエネルギーの二乗に比例し、電子が銀河内を伝播する様子は次式のように記述される。^{5,6)}

$$\frac{dN_e}{dt} - \nabla \cdot (D \nabla N_e) - \frac{\partial}{\partial E} (b E^2 N_e) = Q \quad (1)$$

ここで、 $N_e(t, r, E)$ は加速後の経過時間 t 、加速源からの距離 r におけるエネルギー E の電子の密度を表す。 Q は加速源における電子生成率、 D は銀河内拡散係数、 b はエネルギー損失に関する定数である。

簡単のためエネルギーのみに注目すると、その時間的な変化は $dE/dt = -bE^2$ で表され、エネルギーが E の電子は時間 $T = 1/bE \sim 2.5 \times 10^5 \text{年}/E \text{ (TeV)}$ の間にほとんどのエネルギーを失う。さらに、この間に伝播する距離 R は、式(1)の解より $R = (4DT)^{1/2} \sim 600/E \text{ (TeV)}^{1/2} \text{ pc}$ (パーセク: 3.26 光年) となる。その結果、TeV領域の電子は、寿命が数10万年以下で、加速源までの距離が1 kpc以内に限られることがわかる。この条件を満たす加速源の候補としての超新星残骸は Vela, Monogem, Cygnus Loop など数例にすぎないため、これらの加速源を同定可能な、特徴あるスペクトル構造が TeV 領域に存在すると期待される。

西村等は、この点に着目して、1960年代より30年間以上に亘って EC による電子観測を継続的に実施した。⁶⁾ そして、図1に見られるように、世界で初めて TeV 領域の観測に成功し、太陽系近傍のいくつかの超新星残骸からの寄与を計算し、観測結果との比較を行った。⁷⁾

電子観測の重要性は世界的にひろく認識されており、諸外国においても様々な観測装置を開発して観測が実施された。その代表例として、マグネット・スペクトロメータとカロリメータ及び遷移放射検出器 (TRD) を組み合わせた、シカゴ大学の HEAT と呼ばれる気球観測⁸⁾ が挙げられる。これらの観測は、EC に比べて有効面積が小さく、マグネットの磁場強度の制約等から数100ギガ電子ボルト (GeV) 以下に限られる。しかし、入射粒子の電荷の正負を判定することにより反陽子、陽電子の識別が可能で、反粒子や同位体の観測を含む高精度な観測結果が得られた。⁹⁾

筆者らは、EC以外のエレクトロニクスを用いた装置では困難な TeV 領域での電子観測を実現するため、シンチファイバーと多チャンネル読み出しシステムを駆使した気球搭載用イメージングカロリメータ (BETS) の開発を行った。¹⁰⁾ BETS は小型軽量ではあるが有効面積が大きいいため、10–100 GeV 領域の電子スペクトルの観測に成功している。その結果により、超新星爆発のエネルギー放出量、拡散係数のエネルギー依存性などについて標準モデルの定量化を図った。¹¹⁾ さらに、観測量の飛躍的増大を図るために、国立極地研究所の特別事業として南極昭和基地における南極周回気球 (PPB: Polar Patrol Balloon) 実験による観測を実施した。これは、日本の PPB としては初めての大型観測であり、約2週間という長時間観測を達成した。加えて、エレクトロニクスを用いた装置による 100–1,000 GeV 領域における世界最初の観測となった。¹²⁾ PPB 実験用に開発された装置 (PPB-BETS) では、宇宙実験に不可欠な技術が採用されており、国際宇宙ステーション (ISS) における観測プロジェクトへと発展している。

4. 長時間気球による原子核成分の観測

陽子・ヘリウムを含む原子核成分は、電子と同様に超新星残骸における衝撃波で加速されると考えられている。しかし、その後の銀河内伝播過程は電子とはかなり異なる。電磁的なプロセスはほとんど無視できるが、星間物質との衝突による核破碎反応により、エネルギー損失や核種の変化 (一次成分の消滅と二次成分の生成) が起こる。そして、高エネルギーになるほど、磁場による閉じ込め領域から銀河系外へと早く漏れだす (Leaky Box Model)。このようなプロセスの正確な理解には、星間空間の密度、重原子核の相互作用断面積や銀河磁場の構造などの情報が必要となるが、星間空間での加速・減速が無視できる場合には、原子核成分の伝播過程は、近似的に次式で表される。

$$\frac{N_i(E)}{\tau_{\text{esc}}(E)} = Q_i(E) - \frac{\beta c \rho}{\lambda_i} N_i(E) + \frac{\beta c \rho}{m} \sum_{j \geq i} \sigma_{i,j} N_j(E) \quad (2)$$

ここで $N_i(E)$ は i 番目の核種 (エネルギー E における) 密度を表し、 $Q_i(E)$ は加速源における発生率である。 τ_{esc} は磁場による閉じ込め領域における平均滞在時間を示す。速度 βc の粒子が密度 ρ の閉じ込め領域で通過する物質量は単位時間当たり $\beta c \rho$ なので、 i 番目の粒子が衝突する平均自由行程を λ_i とすると、 $\beta c \rho / \lambda_i$ が単位時間当たりの衝突回数になり、右辺第2項は、 i 番目の粒子が衝突により減少する割合を意味する。 $\sigma_{i,j}$ は j 番目の粒子が衝突して、破碎反応により i 番目の粒子を作る断面積を示す。 m を衝突する星間ガス (大部分は水素) の質量とすると、 $\beta c \rho / m$ は単位面積×単位時間当たりの衝突回数になるので、右辺第3項は i 番目の粒子より重い粒子が i 番目の粒子を生成する割合を示す。この N_i の値を求めるには、 i より大きな j ($=i+1, \dots, n$) の連立方程式を解く必要がある。その結果を使えば、地球近傍の観測値から、加速源での組成比を導くことができる。

この方程式の正確な解を得るには、いくつかの仮定と複雑な計算が必要である。ここでは、エネルギースペクトルの変化についてのみ注目すると、核種の違いによって次のような差異があることが予測される。漏れだしの寄与 (左辺) は陽子、ヘリウムのように星間物質との衝突確率が低い軽元素で重要となり、右辺の第2,3項の破碎反応による消滅及び生成の効果は重元素において主要な寄与をする。したがって、加速源でのエネルギースペクトル $Q_i(E)$ が $E^{-\gamma}$ に比例し、 $\tau_{\text{esc}}(E) \propto E^{-\delta}$ の場合に、観測される軽元素のスペクトルの冪は、 $-(\gamma+\delta)$ で与えられる。一方、重元素では相互作用が先に起こるため、漏れだしによる効果は弱まると考えられる。

原子核のスペクトルは、このような理由以外にも、加速限界エネルギーによっても変化する。衝撃波加速では、最大加速エネルギーは原子核の電荷量 (Z) に比例することが知られており、 $E_{\text{max}} = 100 \times Z \text{ TeV}$ と近似的に求められている。このため、陽子では約 100 TeV でスペクトルが変化するのに対して、重原子核では、 Z に比例したエネルギーで変化が起こる。二つの原因は、主にこの効果によると考えられている。このように、原子核成分毎のスペクトルは、粒子の加速・伝播と生成・消滅に関連している。

原子核成分の観測は、古くは1960年代に行われたソ連邦時代のグリゴロフ等によるプロトン衛星による観測があり、現在でも 10^{15} eV に及ぶ全粒子スペクトルの結果として、重要な意味を持っている。2000年以前の段階では、米国の衛星観測 (HEAO3, CRN) に加えて、ECを用いた気球観測実験が高エネルギー領域での観測において成果を挙げた。JACEE¹³⁾ は南極周回気球実験5回を含む観測を実施し、RUNJOB¹⁴⁾ はシベリア横断気球実験を含む観測により、 10^{14} eV 以上の領域まで主要原子核成分のスペクトルを求めることに成功している。

それ以降には、主に米国において大型観測装置による南極周回気球実験が実施された。CREAM¹⁵⁾ とATIC¹⁶⁾ はいずれもイメージング機能のあるカロリメータを主体とした装置である。TRACER¹⁷⁾ は、粒子のローレンツ因子を測定できるTRDと電離損失 (dE/dx) 及びチェレンコフ光を測定する装置を巧みに組み合わせ、装置の軽量化を図り有効面積の増大を達成している。さらに、マグネット・スペクトロメータを用いて、気球観測実験のBESS⁹⁾ や、スペースシャトルに搭載されたAMS-01¹⁸⁾ により、陽子とヘリウムが数 100 GeV まで精密に測定されている。HEAT とほぼ同じ装置構成を持ったPAMELAは、2006年6月から現在まで観測を続け、後述するように、電子・陽電子を含む詳細かつ興味深い観測データが得られている。これらの結果をまとめた一次宇宙線成分の観測結果を図2に示す。これらの観測結果は、必ずしもすべてが一致するわけではないが、全体的には理論的な予測と矛盾していない。

二次成分は、星間空間で一次成分によって生成されるため、両者の比は一次成分がどれくらいの星間物質を通過し

たかの指標となる。特に、Li, Be, Bなどの軽元素は星の元素合成ではほとんど生成されないで、宇宙線中にあるこれらの原子核は大部分が二次成分として作られたものである。したがって、例えばB/C比のエネルギーによる変化から、通過物質量のエネルギー依存性 ($E^{-\delta}$) が求まる。図3に示す結果から、高エネルギー領域では $\delta=0.3-0.6$ という値が得られ、先の考察より加速源におけるスペクトルの冪は、 $\gamma=2.1-2.4$ と予測される。この値は、単純な衝撃波加速モデルで予言される2.0より少し大きな値になっており、加速機構のより詳しい検討が行われている。³⁾ この意

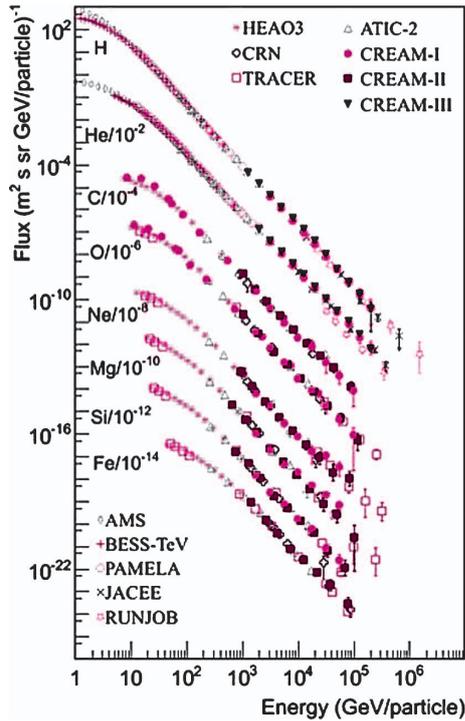


図2 原子核成分毎のエネルギースペクトルの観測結果。(Eun-Suk Seo, 32nd ICRC (Beijing) Rapporteur Talk (2011) より引用。)(フルカラー口絵参照)

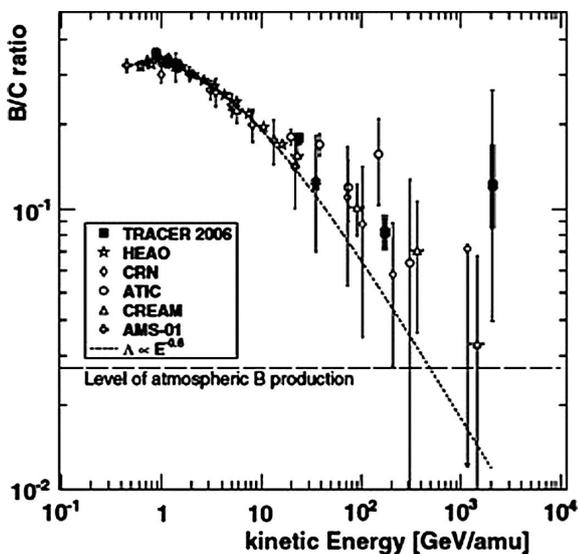


図3 B/C比のエネルギー依存性の観測結果。長い点線は大気中でのBの生成による気球実験での限界値。(文献17より引用。)

味で、B/C比の高精度測定は、今後の観測の主要な課題である。

5. 宇宙線観測における新展開

5.1 高エネルギー電子・陽電子

PAMELA以前の陽電子観測は、10 GeV以上の領域では観測量が十分でなく、気球実験での残留大気の影響もあり、不確実性が含まれていた。PAMELAは、図4に示すような1.5-100 GeVの領域で電子+陽電子(全電子)中にしめる陽電子の割合(陽電子比)を高精度に観測した。標準モデルでは、陽電子は陽子等が星間物質と相互作用して生成されるので、エネルギーとともに陽電子比は減少することが予測される。しかし、PAMELAの観測結果は全く逆に10 GeV以上では急激な増大を示している。¹⁹⁾ PAMELAのその後の観測とFermi/LATによる地磁気による東西効果を巧みに利用した最近の観測²⁰⁾から200 GeVまでのデータが得られており、この増大の傾向は続いているようである。この陽電子比の過剰の原因として、地球近傍の天体(パルサー風星雲や厚い物質に覆われた超新星残骸など)や暗黒物質の対消滅・崩壊による陽電子生成が検討されている。

電子のスペクトルについては、2008年にATICによる新たな展開があった。²¹⁾ 最近までの観測結果のまとめを図5に示す。ATICは、マグネットを持たないため、電子と陽電子を区別することはできないが、図5に示すように300-800 GeVの領域で冪型のスペクトルに対して“過剰”があることを報告した。PPB-BETSでは、統計的に有意とは言えないが、ATICと矛盾しない結果が得られた。²²⁾ 全電子スペクトルは、標準モデルでは電子が大部分であり、このエネルギー領域では図1に示すような冪型の分布を持つ。このため、ATICの結果は超新星残骸以外の電子加速源が

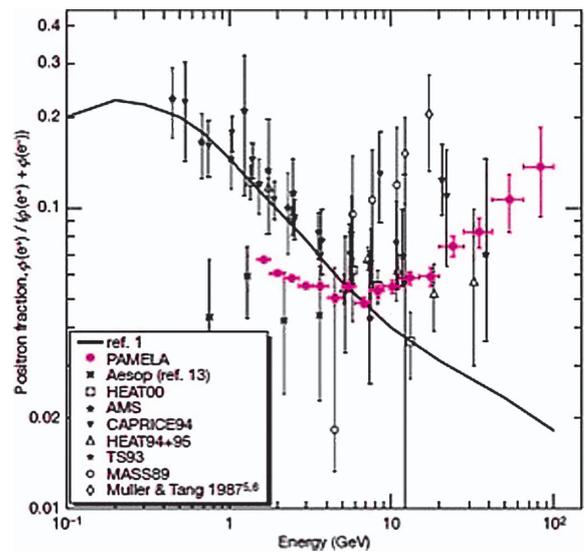


図4 PAMELAによる陽電子比の観測結果とそれまでの観測結果の比較。実線は標準モデルによる計算結果を示す。10 GeV以下では太陽変動の影響を受けており、その補正を行うと、PAMELAの結果は標準モデルで説明可能である。(文献19より引用。)

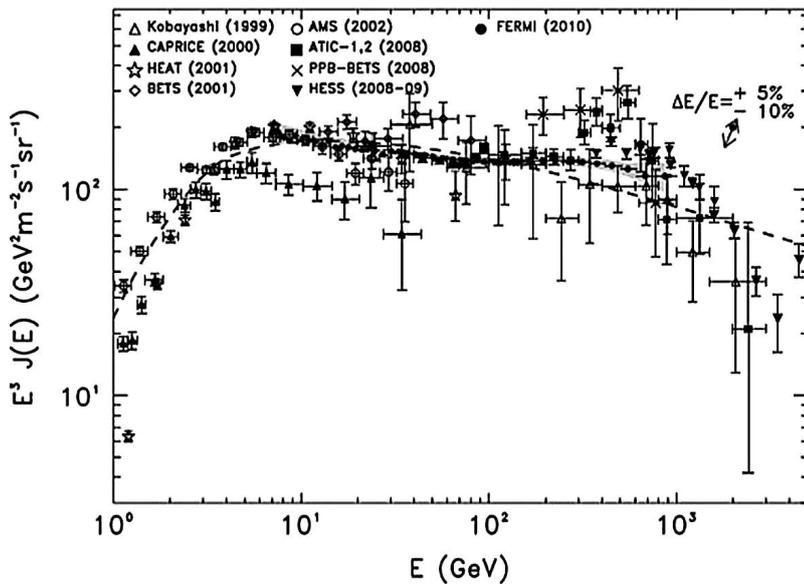


図5 最近の全電子エネルギースペクトルの観測結果と標準モデル(点線)による冪型関数のスペクトルの比較。(文献24より引用。)

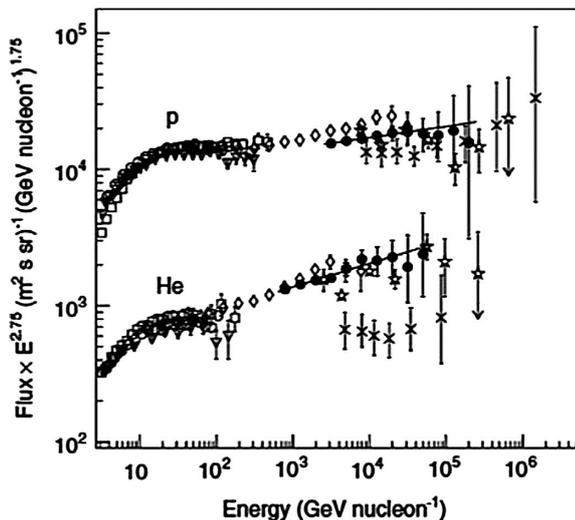


図6 CREAMによる陽子、ヘリウムのエネルギースペクトルの観測結果とそれまでの観測結果の比較。図中の記号●がCREAMで、その他は□(BESS)、▽(CAPRICE98)、○(AMS)、◇(ATIC)、☆(JACEE)、×(RUNJOB)を表す。(文献25より引用。)

存在することを示唆することになる。

この全電子の過剰を、PAMELAの陽電子比と関連すると考えるのは自然なことなので、両方の“異常”を説明するモデルが多く、理論家によって提案された。近傍パルサー等の新たな電子・陽電子加速源の存在とともに、注目を集めたのが暗黒物質の対消滅・崩壊によるという仮説である。これまでの宇宙論的観測から暗黒物質の正体はWeakly Interacting Massive Particles (WIMPs)と呼ばれる非常に重く、弱い相互作用しかない電氣的に中性な粒子と考えられている。しかし、素粒子の標準模型ではそのような粒子が存在しないため、新しい素粒子模型で予言されるTeVスケールで現れる超対称性(SUSY)粒子や余剰次元モデルにおけるKaluza-Klein(KK)粒子が有力な候補になる。²³⁾

その後ガンマ線観測衛星のFermi/LATが、高統計な全電子スペクトルの観測結果を報告した。²⁴⁾ その結果は、図5に見られるように、ATICに見られた“明らかな過剰”は示さないが、標準モデルに対して“緩やかな”スペクトルであり、やはり近傍加速源や暗黒物質の寄与を考慮する必要がある。^{*1)}

ATIC及びFermi/LATは、それぞれが陽子・原子核成分とガンマ線の観測を目的としており、高エネルギーの電子観測に最適化された装置では無い。このため、両者の食い違いの原因は専門家の間でもまだ統一的な見解が得られていない状況である。しかしながら、これらの新たな観測によって、全電子成分のスペクトルは、標準モデルでは理解が困難であり、電子観測に最適化した装置による高精度観測の実現が期待されている。

5.2 陽子・原子核成分

陽子・原子核成分のスペクトルは、標準モデルによれば、衝撃波加速の限界エネルギー(ニー領域)までは、あまり急激な変化はしないと考えられ、各成分のスペクトルの冪も伝播過程での変化は緩やかであると予測される。しかし、最近のいくつかの高精度観測から、陽子・ヘリウムのスペクトルには、核子あたり200 GeVの近辺で変化が見られることが報告されている。図6に見られるようにCREAMでは陽子は2.75→2.66、ヘリウムは2.75→2.58の変化が観測されている。²⁵⁾ PAMELAによる観測²⁶⁾でも、ほぼ同じ変化が観測されており、観測装置による系統的な問題とは考えにくい。このような傾向は、JACEEによる 10^{14} eVまでの観測とも一致している。さらに、重原子核成分(O, Ne, Mg, Si, Fe)でも同じ傾向が見られることが報告されている。²⁷⁾ これらの変化については、電子・陽電子の過剰との関連性などを含めて、理論的な解釈が試みられている。

6. 国際宇宙ステーションにおける宇宙線観測

ISSは宇宙線観測のために最適な手段として、初期の頃から観測提案が行われていた。その中で、AMS-02は2011年5月に打ち上げられて観測を開始しており、²⁸⁾ 筆者らの提案によるCALorimetric ELection Telescope (CALET)が2014年の打ち上げを目指して開発が進められている。^{29), *2)}

AMS-02は、PAMELAとほぼ同じ原理であるが装置の規模が約100倍大きい。しかし、打ち上げ間近になって、超伝導磁石が永久磁石に変更になり、磁場強度が0.8テスラから0.15テスラとかなり減少している。この変更による、測定可能な最大運動量(～1 TeV/c)の減少をさけるため、

*1) 図5に示されているHESSは直接観測ではなく、地上のチェレンコフ光の観測結果で、数TeVの領域までスペクトルが得られているが、観測手段の違いにより本稿では説明を割愛する。

*2) CREAMを用いたISSでの観測計画も、COSPAR(2012)等で発表されている。

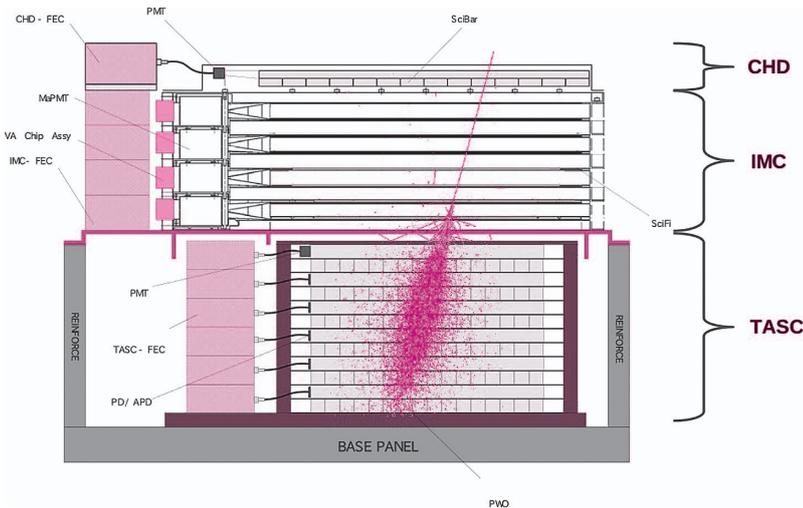


図7 CALET カロリメータの側面からの概観図と1 TeVの電子が入射した場合のシミュレーション計算。装置の内部構造の説明は本文参照。(フルカラー口絵参照。)

飛跡検出部の改造が行われた。このため、装置の立体角がかなり減少し、飛跡検出装置のキャリブレーションが長期に亘って実施されている。AMS-02では、TeV以下の領域で、宇宙線各成分(同位元素を含む)の高精度なスペクトル観測が期待されている。特に、陽電子や反陽子の観測や反ヘリウムの探索では、これまでの観測を遥かにしのぐ統計量(又は上限値)が得られる。その結果、加速・伝播モデルの高精度化に加えて、電子・陽電子と陽子・原子核成分のこれまでの結果を確証(あるいは変更)する観測が期待されている。

CALETは、日本の宇宙線観測としては初めての本格的な宇宙実験であり、5年間の観測を予定している。日本独自の技術開発を駆使した、高エネルギー領域での電子観測に最適化された装置であり、図7に示すように、電荷測定器(CHD)、イメージングカロリメータ(IMC)及び全吸収型カロリメータ(TASC)で構成されている。IMCによる宇宙線シャワーの可視化とTASCによるエネルギー測定により、電子とガンマ線についてTeV領域に及ぶ観測が可能である。この結果、近傍加速源の検出(図1参照)が期待されるだけでなく、暗黒物質の探索について新たなエネルギー領域を開拓できる。CALETは、陽子・原子核成分について、入射粒子の電荷を $Z=1-40$ の領域で識別し、一次成分であれば数100 TeVの領域まで観測可能である。これまでの気球実験で得られたスペクトルの変化について高精度な検証が可能である。B/C比の観測では、TeV領域までのエネルギー依存性(δ)を0.05以内の精度で決定できる。

7. 今後の展望

最近の直接観測技術の飛躍的な進展によって、銀河宇宙線の標準的な描像が明らかになりつつある。それと同時に、未知の加速天体や暗黒物質との関連を示唆する観測結果も得られており、標準モデルの高精度化とともに、宇宙線研究は新たな段階へと進む時期を迎えていると言える。

そのために必要な観測として、AMS-02とCALETは、エネルギー領域や観測対象についてお互いに相補的な役割を果たすことができ、両者の高精度な観測結果によって、今後の宇宙線研究の新たな方向性が示されることが期待される。さらに大規模な観測を目指して、TANSUO(中国)³⁰⁾ Gamma-400(ロシア)³¹⁾ HepCAT(米国)³²⁾など、新たな観測計画が提案されている。AMS-02とCALETは、これらの計画の原動力ともなる重要な役割を担っているといえる。

このような観測の進展が実現すれば、X線やガンマ線などの電磁波観測とも相互比較が可能な高精度データを得ることにより、電磁波と粒子を統合した総合的な高エネルギー宇宙の研究が可能となり、宇宙物理学に新たな展望が開かれることが期待される。

参考文献

- 1) 鳥居祥二, 槇野文命: 日本物理学会誌 **56** (2001) 8.
- 2) 永野元彦, 福島正己: 日本物理学会誌 **67** (2012) 本特集.
- 3) 大平 豊, 山崎 了, 寺澤敏夫: 日本物理学会誌 **67** (2012) 本特集.
- 4) 西村 純: 日本物理学会誌 **67** (2012) 本特集.
- 5) A. M. Atoyan, *et al.*: Phys. Rev. D **52** (1995) 3265.
- 6) J. Nishimura, *et al.*: Astrophys. J. **238** (1980) 394.
- 7) T. Kobayashi, *et al.*: Astrophys. J. **601** (2003) 340.
- 8) M. A. Du Vernois, *et al.*: Astrophys. J. **559** (2001) 296.
- 9) 反陽子の観測を目的に行われた BESS 実験などについては、吉村浩司, 山本 明: 日本物理学会誌 **67** (2012) 本特集.
- 10) S. Torii, *et al.*: NIM A **452** (2000) 81.
- 11) S. Torii, *et al.*: Astrophys. J. **559** (2001) 973.
- 12) 鳥居祥二, 山上隆正, 江尻全機: 日本物理学会誌 **60** (2005) 960.
- 13) K. Asakimori, *et al.*: Astrophys. J. **502** (1998) 278.
- 14) V. A. Derbina, *et al.*: Astrophys. J. **628** (2005) L41.
- 15) H. S. Ahn, *et al.*: Astrophys. J. **715** (2010) 1400.
- 16) A. D. Panov, *et al.*: Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **73** (2009) 56.
- 17) A. Obermeier, *et al.*: Astrophys. J. **742** (2011) 14.
- 18) M. Aguilar, *et al.*: Phys. Rep. **366** (2002) 331.
- 19) O. Adriani, *et al.*: Nature **458** (2009) 607.
- 20) M. Achermann, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **108** (2012) 011103 (1-7).
- 21) J. Chang, *et al.*: Nature **456** (2008) 363.
- 22) K. Yoshida, *et al.*: Advances in Space Research **42** (2008) 1670.
- 23) 鳥居祥二: 日本物理学会誌 **64** (2009) 239.
- 24) A. A. Abdo, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **102** (2009) 181101 (1-6).
- 25) Y. S. Yoon, *et al.*: Astrophys. J. **728** (2011) 122.
- 26) O. Adriani, *et al.*: Science **332** (2011) 69.
- 27) H. S. Ahn, *et al.*: Astrophys. J. **714** (2010) L89.
- 28) A. Kounine: Proc. of 32nd ICRC (Invited Talk) **12** (2011) 3.
- 29) S. Torii, *et al.*: Proc. of 32nd ICRC **6** (2011) 347.
- 30) J. Wu and J. Chang: Proc. of 32nd ICRC **5** (2011) 228.
- 31) A. M. Galper, *et al.*: Astrophys. Space Sci. Trans. **7** (2011) 75.
- 32) J. W. Mitchell, *et al.*: Proc. of 31st ICRC OGI.5 (2009).

著者紹介



鳥居祥二氏: 専門分野は宇宙線物理学で、特に高エネルギー電子観測を実施している。気球実験を経てISS搭載機器(CALET)を開発中。関連した研究として、LHCfとチベットASγ実験に参加している。

(2012年9月10日原稿受付)

Observing Cosmic Rays in Space

Shoji Torii

abstract: Direct measurements of the charged cosmic radiation (cosmic ray) impinging on Earth, play an essential role to get information of the acceleration and propagation mechanism by providing the relative abundance and the energy spectra. Observations, using balloonborne detector, in Japan were historically achieved especially in field of the high energy electrons and hadrons. Since 2000, the cosmic ray ob-

servation in worldwide has done a remarkable progress by development of the detectors with high-technology electronics system and by success of the long duration ballooning, such as, in Antarctica. Further space observations planned at International Space Station will challenge to resolve the puzzles of the dark matter and the anti-matter in universe. The achievements of the direct observations by present days and the future prospect will briefly be reviewed in this article.

大気は絶妙な厚さの検出器—宇宙線エネルギーの限界を求めて

永野元彦*

福島正己 (東京大学宇宙線研究所 277-8582 柏市柏の葉5-1-5)

頻度が極端に少なく、飛翔体では観測できないエネルギーの宇宙線は、それが地球大気中で引き起こす「空気シャワー」現象によって観測が可能になる。「空気シャワー」の発見から最高エネルギー宇宙線探索の歴史を回顧し、ピエール・オージェ観測所とテレスコープアレイ実験による最新の結果を示し、今後を展望する。

1. 序論

宇宙線の発見から100年を経過して、 10^{20} eV近辺に宇宙線のエネルギー上限が見えてきた。この上限エネルギーの宇宙線の頻度は、東京山手線の内側より大きい 100 km^2 の面積に1年に1個程度にすぎない。このような宇宙線をとらえることができるのは、 $1,000 \text{ g/cm}^2$ 相当と、絶妙な厚さの地球大気が存在するお蔭である。

宇宙線は大気に突入し、窒素や酸素の原子核と衝突して π 、K中間子などの多重発生を繰り返し、発生した π^0 からの崩壊ガンマ線が電磁カスケードを引き起こす。この「空気シャワー」と呼ばれる現象は、多数の粒子が広大な領域に広がって降ってくるので、地表に間隔をおいて設置した検出器で分布を測定したり、シャワーの軌跡から等方的に放射される蛍光を望遠鏡で撮像して観測できる。すなわち大気をカロリメーター(標的+吸収層+発光層)として宇宙線をとらえ、そのエネルギーや到来方向を測定する。

10^{10} eVから 10^{20} eVの上限に至る10桁以上のエネルギー領域にわたって、宇宙線エネルギー・スペクトルは、ほぼエネルギーの-3乗のべき関数で伸びている。 $10^{15.5}$ eVと 10^{19} eV近辺に、わずかなべきの変化が見られるにすぎない。 $10^{15.5}$ eV以上の宇宙線頻度は1年で 1 m^2 あたり約1個であり、これを超えるエネルギーの宇宙線の観測には飛翔体に載せた検出器でなく、「空気シャワー」観測装置が用いられる。本稿では、この「空気シャワー」の発見から、 10^{20} eVに至る最高エネルギー宇宙線探索の歴史を回顧し、現在までに解明された研究結果を解説する。

2. 空気シャワーの発見

1938年にオージェ(P. Auger)等は「拡大シャワー」(Grandes gerbes, Extensive showers)の存在を発表した。¹⁾ それ以前には、3角形の各頂点にガイガー・ミュラー計数器(以降GM)を配置し、一辺の距離を離しても同時に粒子が入射する広がったシャワーの存在が報告されていた。オージェ等はGMに有機ガスを混ぜることにより、時間分解能をmsecから μsec に向上させ、GMを150 m離しても同時計数が存在することを示した。すなわち、粒子の分布が大きく広がったシャワーが存在し、それらの起源は実験室の天井ではなく、大気上空から発達する「拡大空気シャワー」(Extensive Air Shower, 以後EASと略記)であることを明らかにした。

当時急速に進展していたカスケード理論による説明に大いに後押しされ、オージェ等は地上ばかりでなく、高山や飛行機でも実験を行い、高度変化を詳しく調べた。オージェ等はこれらの一連の観測により²⁾「大気頂上でのエネルギーが 10^{15} eVを超える宇宙線が存在する」ことを発表した。当時のエネルギー推定は必ずしも正しくないが、宇宙に 10^{15} eVにも達する放射線が存在することは驚きであった。

3. 銀河系外を起源とする宇宙線

1940年代後半には、気球実験により一次宇宙線のほとんどが陽子であり、重い原子核も含まれることが明らかになった。1950年代の初頭には電波天文学がはじまり、銀河磁場の存在が明らかになり、1950年代初期にフェルミ(E. Fermi)は荷電粒子が分子雲中のプラズマに凍結された磁場と繰り返し衝突することによる「フェルミ加速」を提唱した。そうだとすれば、銀河系は有限の大きさだから、

* 東京大学名誉教授

ある程度以上には加速できない。10¹⁵-10¹⁶ eV程度に上限があるだろうと予測し、この上限を観測する実験を考えたのがMITのロッシ(B. Rossi)である。

ロッシのグループは1955年から1957年にかけて、ボストンの近郊アガシスの森に、1 m²の液体トルエンシンチレータの検出器を15台、直径約500 mの円内に並べ、EAS観測を行った。EASは薄いディスクのようになって降ってくるから、検出器への到達時間差からEASの到来方向を決める方法や、中心の位置をいろいろ変えて粒子数の分布がスムーズになるように中心と全粒子数を決める方法が、アナログコンピュータを開発して実行された。

アガシスの観測では、予想の上限をはるかに超えて約10¹⁸ eVのEASが観測された。³⁾ 推定されていた銀河磁場では銀河系内に閉じ込めることはできず、銀河系外起源の宇宙線が存在する可能性が指摘された。エネルギーがどこまで伸びているかを求めて、ニューメキシコのアルバカーキ郊外のヴォルカノ・ランチに、リンズレー(J. Linsley)がEAS観測装置を設置した。面積3.3 m²のプラスチック・シンチレーション検出器を鉛10 cmの上下に配置した装置を19台、約8 km²の領域内に配置したものである。ヘスの宇宙線発見50周年を記念するかのようになり、1962年に推定10²⁰ eVの宇宙線が観測された。⁴⁾

1965年に2.7 K宇宙背景放射が発見されるとすぐに、グライセン(K. Greisen)と、ザツェピンとクズミン(G. T. Zatsepin and V. A. Kuzmin)が独立に「たとえ10²⁰ eVを超える銀河系外起源の宇宙線が存在しても、背景放射光子との光核反応によりエネルギーを失う。観測できるとすれば、その加速天体は衝突回数が少ない距離(約1.5億光年)に限られ、その範囲には加速できそうな天体はほとんどないので、光核反応の閾エネルギー(4-6)×10¹⁹ eVの近傍に、宇宙線エネルギーの上限が存在するであろう」と予測した。この上限は提唱者の頭文字をとって「GZK上限」と呼ばれる。加速天体までの距離がGZK上限を起こさない程近いとすると、その候補の数が限られる。また現在知られている銀河系内・外の磁場中では、このエネルギーの宇宙線はほぼ直進し、点源探索が期待できる。

4. 宇宙ガンマ線観測、事始め

MITのアガシス装置の開発と建設に貢献した小田稔等が中心となり、1956年原子核研究所(核研)に空気シャワー観測装置が建設された。MITの実験に少しの遅れをとったが、「鉛ガラスのチェレンコフ検出器」や、福井崇時・宮本重徳による「スパークチェンバー」が発明され、宇宙線のみならず、高エネルギー実験でも有力な検出器として活躍することとなった。

核研でEASの解析を開始してすぐに、「もし一次ガンマ線が存在すれば、電磁カスケードなのでμ粒子が極端に少ないシャワー(μ less シャワー)になるはずである」との議論がなされた。宇宙線が銀河系内を伝播中に、星間物質と

核相互作用を起こし、発生したπ⁰が崩壊してできるガンマ線の存在が提唱されており、高山でこの宇宙起源ガンマ線を観測しようとする気運が高まった。

そこで菅浩一が中心になり、核研・MIT・ボリビアのサン・アンドレ大学が共同で、ボリビアのチャカルタヤ山上(高度5,200 m)に60 m²のμ粒子検出器をそなえたEAS観測装置(BASJE)を建設し、1962年初頭から一次ガンマ線観測が開始された。数年間の観測で、μ less シャワーを選択することにより、赤経200°-220°方向に4σの増大があったが、⁵⁾ 一次ガンマ線であるとの結論には至らなかった。

一次ガンマ線観測については、その後大きな展開が2回あった。一つは1983年にドイツのキール大学グループが、白鳥座X-3方向から10¹⁵ eV領域のガンマ線を観測したと発表したことである。この天体は時々電波フレアを起こす強いX線星であり、多くの研究者に夢を抱かせ、世界中の既設の装置に加えて、シカゴ大学により米国ユタ州に建設されたCASA-MIA、ロスアラモスに建設されたMilagro、大阪市大とタタ研究所共同でインド・ウーティに建設された装置など、新しく大型装置も参入して、ガンマ線源探索が始まった。しかし今日に至るまで、10¹⁵ eV領域ではガンマ線点源は見つかっていない。

二つ目は1987年のマゼラン星雲中の超新星爆発(SN1987A)にともない、再びガンマ線観測が注目されたことである。日本では各所の大学が共同で、ニュージーランドのブラックバーチ山上に急遽EASアレイとチェレンコフ望遠鏡(JANZOS)を設置して7年間観測を行ったが、10¹²-10¹⁴ eV領域ではガンマ線は観測されなかった。しかし、この実験が日本グループのチェレンコフ望遠鏡によるTeV領域のガンマ線源探索実験のきっかけになった。

地表EASアレイで初めてガンマ線源の観測に成功したのは、チベット空気シャワー観測装置である。1989年から中国チベット自治区ヤンパーチン(高度4,300 m)に、宇宙線研究所と中国科学院高能物理研究所が共同して観測装置を設置した。1990年から観測を始め、その高精度の到来方向決定により、EASによる月や太陽の影を明確にとらえた。10¹² eV領域のガンマ線源の観測に成功した⁶⁾ばかりでなく、EAS最大発達の高高度を利用して、10¹⁴-10¹⁷ eVで信頼度の高いエネルギー・スペクトル測定を行った。

5. 空気シャワー軌跡の撮像(蛍光観測法)

「EAS中の電子・陽電子が大気中の窒素分子や分子イオンを励起して発する蛍光をとらえる」すなわち、地球をとりまく大気を発光体として利用する可能性が初めて論じられ、その記録が残っているのは、1958年夏に乗鞍岳で行われたシンポジウムである。⁷⁾ その後、1962年にボリビア、ラパスで行われた国際シンポジウムで、菅、チュダコフ(A. Chudakov)により、蛍光観測法のより具体的な議論がなされた。⁸⁾

一方グライセンが主導するコーネル大学グループは、蛍

光観測法によるEAS観測の実用化に取り組んだ。試行錯誤の後、1966年に天球を500セグメントに分け、光電子増倍管でEASの軌道から発せられる光子の到達時刻と光子数を記録する装置が完成した。⁹⁾ EASの観測には至らなかったが、この蛍光観測法は、後に米国ユタ大学のフライズ・アイ実験として花開いた。

日本では、コーネル大学から帰国した棚橋五郎を中心として、1968年、口径1.6 mのフレネルレンズの焦点に27本の光電子増倍管を並べた装置による観測が、堂平山で始まった。晴天で月のない夜、約90時間の間に、エネルギー約 10^{19} eVの宇宙線が観測された。これは約3.6 km遠方に、ほぼ天頂方向からきたEASの軌跡であることが示され、世界で初めての蛍光法でのEAS観測となった。¹⁰⁾

6. GZK上限「ある・なし」論争

GZK上限を超えるリンズレーの 10^{20} eVの事象に触発されて、1960年代後半に、英国リーズ大学のハベラパーク・アレイ、豪州シドニー大学のSUGAR、極寒の地シベリア・ヤクーツクの宇宙物理研究所のアレイによる観測が始まった。ハベラパーク、SUGARでは 10^{20} eV事象が観測され、ヤクーツクでは観測されず、「ある・なし」の決着を目的の一つとして新たな観測が始まった。

フライズ・アイ (Fly's Eye; FE): 米国ユタ大学グループは、1973年頃から蛍光観測法の技術開発に取り組み、FEのプロトタイプをヴォルカノ・ランチに設置して、1976年からEASアレイとの連動実験を行った。この試験観測の後、ソルトレーク市近郊の小高い丘の上に建設されたFE-Iは、直径1.6 mの反射鏡67枚の各焦点に光電子増倍管をモザイク状に並べ、全天を観測した。またFE-IIは、FE-Iの一部の視野を同時に観測した。1981年から1992年まで観測を行い、1994年にFE-Iによるエネルギー・スペクトルを発表し、GZK上限の存在を提唱した。¹¹⁾ FEによる、大気蛍光の観測・較正・解析方法の地道な開発は、以後の蛍光観測法の基礎となっている。

明野超大空気シャワー観測装置 (AGASA): 核研EAS観測装置より高いエネルギー領域で、核相互作用と一次宇宙線の起源を探究する目的で、山梨県明野(高度920 m)に、明野空気シャワー観測装置が建設された。種々異なった検出器間隔のシャワーアレイが階層構造をなし、1978年から稼動した。その後アレイは順次拡大され、1990年に当時世界最大の観測領域(約100 km²)を持つAGASAが完成した。

明野のデータは、 $10^{14.5}$ eV領域から最高エネルギーまで、5桁以上のエネルギー範囲で、系統的にエネルギー・スペクトルを決定したのが特徴である。 $10^{15.5}$ eVと 10^{19} eVにおけるスペクトルの曲がりの他に、それらの中間にあたる 10^{18} eV近傍にスペクトルの曲がりの存在を示した。またGZK上限は存在せず、更にエネルギー・スペクトルは伸びていると発表した。¹²⁾ 宇宙線の到来方向については、 4×10^{19} eVを超えた宇宙線は大局的には一様分布だが、離

角が2.5度という測定誤差内に、2あるいは3個の宇宙線が集中する「クラスター」が数カ所観測された。到来方向が完全に一様なら、このようなことが起こる確率は、2.9%程度である。¹³⁾

GZK上限やクラスターについてのAGASAの結果は、FEや次節で述べるHiResの結果と反し、一次宇宙線が初期宇宙にできた相転移欠陥の崩壊から生じる粒子である可能性や、荷電粒子による天体探索の可能性を示唆し、多くの他分野の研究者も巻き込み、この分野を活性化させ、後の大型国際研究の推進を促した。

高分解能フライズ・アイ (HiRes): FEの結果を更に精度を上げて検証すべく、High-Resolution Fly's Eyeが同じユタの砂漠地帯に建設された。仰角 3° - 17° 、全方位角を視野角約1度でカバーするHiRes-Iと、12.6 km離れた地点に設置したHiRes-II(仰角は 3° - 31°)からなる。2004年にはHiRes-Iを使って、GZK上限の存在を観測したFEの結果を確認するスペクトルを発表した。¹⁴⁾ 2カ所の望遠鏡の同時観測によるステレオ観測では、EASの到来方向やEASまでの距離が正確に決められる。また、縦方向発達を撮像して、EAS中の電子数が最大となる大気深さ(X_{\max})を求めることができる。この X_{\max} は、一次宇宙線が陽子の場合に、重い原子核の場合より深くなる。このことを用いて、HiResは $10^{18.2}$ - $10^{19.8}$ eVのEASを作った一次宇宙線は、陽子であるとして矛盾しないこと、¹⁵⁾ また 10^{19} eV以上で、到来方向分布にクラスターが確認できないことを発表した。いずれもステレオ観測の結果である。

7. 全天探査が始まる

最高エネルギー宇宙線を、広大な領域の地表アレイと蛍光望遠鏡で同時観測し、更に南北の天球をカバーしてその起源を探索しようとする大型計画は、1990年頃から世界的に検討され、2000年代に入って、ピエール・オージェ観測所とテレスコープ・アレイ実験として実現した。

ピエール・オージェ観測所 (PAO): PAOは、EAS観測で初の大型国際共同研究として、欧州・南北米の研究者が協力して2001年から建設が始まり、2008年に完成した。南米アルゼンチンのパンパに1,600台の大型水タンク(底面積10 m²高さ1.2 m)を、一辺1.5 kmの三角形の網目状に並べ、3,000 km²をカバーする。その周り4カ所から大気蛍光を観測する。深い水のタンクはEAS中の電磁成分よりも μ 粒子成分に対して感度が高く、ニュートリノから生じる水平方向のEASに対する感度も大きい。広大な領域から地表アレイの情報を集めるために、各検出器にGPSを備え、トリガーとデータ収集を無線で行う。蛍光望遠鏡にはシュミット式光学系を用いて、視野角29度を解像度1.5度でカバーしている。

地表アレイでEASのエネルギーを求めるためには、シャワー軸から1,000 m離れた地表での μ 粒子相当の粒子数密度をエネルギー指標とする。この指標を、地表アレイと

望遠鏡で同時観測した宇宙線事象を使って較正し、エネルギーを決定する。地表アレイは100%に近い稼働率を持つために観測できる事象数が多く、一年を通じてほぼ同じ天球領域を観測できる。^{*1} このため、エネルギー・スペクトルと到来方向異方性の解析には、PAOもTAも、望遠鏡でエネルギー較正した地表アレイのデータを用いている。

テレスコープアレイ実験 (TA): TAは、米国ユタ州の砂漠地帯に、宇宙線研・東工大・大阪市大を中心とする日本と、ユタ大学を主要なメンバーとする米国の国際共同で建設した。2004年から建設を始め、韓国とロシアが加わり2008年に完成した。地表アレイは、3 m²のプラスチック・シンチレータ507台を格子状に並べて、約700 km²の地表をカバーしている。その周り3カ所から仰角3-33°のアレイ上空を解像度1.0度で観測する。TAは、アレイの面積がPAOの4分の1であり3年遅れてのスタートであったが、エネルギー決定の信頼度を高める幾つかの工夫を凝らした。なかでも、KEK入射器グループの協力を得て40M eV電子線形加速器を観測サイトに設置し、大気中に射出した電子ビームを基準光源として、望遠鏡の一括較正を行う新しい試みが進行中である。

TAの地表アレイでは、シャワー軸から800 mの粒子数密度を、EASシミュレーションによる期待値分布と比較してエネルギーを仮決定する。これを、地表アレイと望遠鏡で同時観測した宇宙線事象を使って、望遠鏡のエネルギーと等しくなるように補正して最終的なエネルギーとする。望遠鏡によるエネルギー決定の系統誤差は、蛍光効率・測定系・大気透明度補正・事象再構成 (μ, ν として地中に失われる分の誤差を含む)それぞれが10%程度の寄与で、現在のところ合計して約20%である。

8. 最新結果と課題

図1に、エネルギー・スペクトルについてPAO¹⁶⁾とTA¹⁷⁾の最新の結果と、AGASA¹²⁾とHiRes¹⁴⁾の最終結果を示す。図1では、スペクトルの変化がよくわかるように、縦軸は頻度にエネルギーの3乗をかけてプロットしてある。また、望遠鏡によるエネルギー測定をの系統誤差を考慮して、PAOについてはエネルギーを一括して10%上げ、TAとHiResについては9%下げてプロットした。地表アレイ単独でエネルギー測定を行ったAGASAとヤクーツクについては、それぞれ35%と45%エネルギーを下げてある。

このようなエネルギー尺度の調整を行うと、各実験のスペクトルは良く一致する。スペクトルには、10^{18.7} eV付近に、ベキ指数が-3.3から-2.7に変わる「くぼみ」のような曲がりがあり、^{*2} 約10^{19.6} eVから上では、宇宙線の到来が急激に減る「上限」が見られる。AGASAについては、10²⁰ eV以上の事象は2例となり、「GZK上限がない」とい

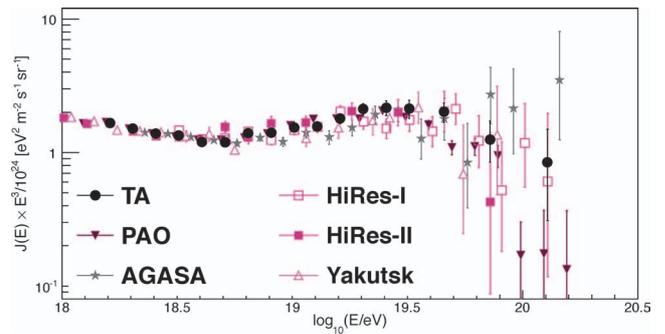


図1 極高エネルギー宇宙線のエネルギー・スペクトル。各実験のエネルギー尺度を調整してプロットしてある(本文参照)。(フルカラー口絵参照)

う結論の有意度は大きく下る。このように、異なった観測方法を持つ3つの実験：(1) 蛍光望遠鏡のHiRes、(2) 水タンク・アレイのPAO、(3) シンチレータ・アレイのTAの結果が一致することから、「くぼみ」構造と、エネルギー「上限」の存在は実験的に確立したと言って良い。

しかし、観測された「くぼみ」と「上限」の成因については、実験間で見解が一致していない。これは一次宇宙線の粒子種観測の結果が異なるからである。すなわち、PAOの測定では約10^{18.6} eVから上の領域で徐々に陽子から重い原子核へと成分が変化している¹⁸⁾のに反し、HiRes¹⁵⁾とTA¹⁹⁾の測定では、10^{18.2} eVから10^{19.8} eVの領域で陽子であり、変化がない。陽子であれば、CMBとの衝突による電子・陽電子対生成が「くぼみ」を作り、核子共鳴状態經由の π 中間子生成が「GZK上限」を作ることになる。原子核、例えば鉄核の場合、「上限」はCMBとの衝突による原子核の光分解から起こるが、「くぼみ」にはCMBとの衝突以外に別の原因を考える必要がある。

到来方向分布については、PAOもTAも10¹⁹ eV以上の領域で大局的に等方的である。同一方向から複数の宇宙線が到来するクラスターも見つかっていない。PAOが2007年に公表した、10^{19.76} eVを超える宇宙線と近傍の活動銀河核との相関²⁰⁾は、新たな観測を加えると相関の割合が33%まで減少し、²¹⁾ 偶然相関(21%)からの有意度は3 σ 未満となった。北半球のTAでも、同じ程度の相関が観測されているが、有意ではない。

以上のように、PAOとTAは一次宇宙線の粒子種の観測結果とエネルギー測定で異なるため、これらの違いを理解すべく、検出器の相互較正やデータ解析手法の交換などの交流を始めている。並行して、PAO、TAともに低エネルギー領域(10¹⁷ eV以下)まで観測を広げる機能拡張に力を注いでいるが、これは、より広いエネルギー領域で正確なスペクトル形状と粒子種の変化を測定し、「くぼみ」や「上限」の成因を確定するためである。また「上限」を作る粒子種が陽子であれば、南極の新観測装置IceCubeによって、GZK過程から生じる10¹⁸ eV付近のニュートリノが観測されるかもしれない。これらの実験の競争と協力で、最高エネルギー宇宙線は、まもなく全天で統一的理解されるはずである。

^{*1} 蛍光望遠鏡の観測は、月のない晴れた夜間に限られるため、平均的な稼働率は10%程度になる。また季節毎に観測できる天球が異なる。

^{*2} このスペクトルの構造は、人間の足の曲がりになぞらえて「くるぶし」(ankle)と呼ばれることがある。

一方、最高エネルギー宇宙線が大気中でEASを作る物理過程は十分に理解されていない。たとえばTAやAGASAの地表アレいで測定した粒子数密度から、シミュレーションを使って求めた一次宇宙線のエネルギーが、蛍光望遠鏡で実験的に決めたエネルギーより30%近く大きい点が説明できない。同様に、PAOではシミュレーションから期待される2倍に近い数の μ 粒子が観測されている。EASの発達に大きな影響を及ぼす、極高エネルギーでの衝突断面積、発生多重度や運動量分布などが加速器による測定の外挿で良いのか、また、Quark Gluon PlasmaやColor Glass Condensationなどの影響が見られるかなど、素粒子・原子核物理にかかわる検討が重要になってきている。

稼働し始めたLHC加速器での正面衝突は、実験室系で約 10^{17} eVに相当する。LHCf, TOTEMなどの最前方実験、あるいはATLAS, CMS, ALICEなどによって、自然現象としてのEASの理解が一段と進むことが期待される。

9. 展望

観測された最高エネルギー宇宙線の数、この10年で一桁近く増加し、スペクトルの「上限」が確認され、これは宇宙を満たす背景放射と、宇宙線との反応で説明できるようになった。しかし「 10^{20} eVを超える粒子は宇宙のどこで生まれるのか」、「エネルギーの限界はどこか」という、宇宙線の起源にかかわる基本的な疑問は、依然として答えられていない。

観測された「上限」の原因がGZK過程によるものであれば、発生源でのエネルギーはGZK上限より高く、宇宙線の加速限界は判っていないことになる。発生源は100 Mpc程度の比較的近い宇宙にあるはずだが、この範囲の活動銀河核や電波銀河など、期待された発生源との相関は見えていない。^{*3} 従って粒子を 10^{20} eVを超えるエネルギーまで加速する物理機構も、加速の限界も未知のままである。

2012年2月、CERNにおいて最高エネルギー宇宙線の観測を総括し、将来の研究の方向を探るUHECR2012シンポジウムが開催された。²²⁾ 200人を超える参加者があり、国際的な協力によって直面する課題を解決し、将来計画を推進する枠組みが議論された。図1は、その時に組織された実験横断のworking groupによって、まとめられたものである。

将来計画については、1,000事象を超える最高エネルギー宇宙線を観測し、その発生源の解明を目指す次世代巨大アレイド計画とJEM/EUSO計画が議論された。JEM/EUSOはフレネルレンズを用いた広視野望遠鏡を宇宙ステーションに下向きに取り付け、地球大気中でのEASの発光を宇宙から観測する計画である。高度400 kmから地球大気を直径約460 kmの領域で観測する。粒子種の弁別(陽子か鉄か)は難しく、観測可能エネルギーも 10^{19} eV後半以上

になるが、南天・北天の区別なく全天をほぼ一様に観測できる点が魅力的である。次世代巨大アレイはTAやPAOの検出器技術を生かし、約40,000 km²の地表をカバーして、精度の良い最高エネルギー事象を確実に増やす計画である。地表検出器に電磁成分と μ 成分を分離する機能を加え、また蛍光望遠鏡あるいは電波によるハイブリッド観測で、粒子種の弁別やニュートリノの検出を行うことが重要な検討・開発項目である。

地球を大きな検出器として使い、地表から宇宙から、異なった方法で観測を行うこれらの新計画が実現して、最高エネルギー宇宙線の起源が解明される日が待ち望まれる。

参考文献

- 1) P. Auger, R. Maze and T. Grivet-Meyer: Acad. des Sciences, Paris, **206** (1938) 1721.
- 2) P. Auger: in *Early History of Cosmic Ray Studies*, ed. Y. Sekido and H. Elliot (D. Reidel Pub. Company, 1985) pp. 213-218.
- 3) C. W. Clark, et al.: Phys. Rev. **122** (1961) 637.
- 4) J. Linsley: Phys. Rev. Lett. **10** (1963) 146.
- 5) K. Kamata, et al.: Can. J. Phys. **46** (1968) S72.
- 6) M. Amenomori, et al.: Astrophys. J. **525** (1999) L93; *ibid.* **709** (2010) L6.
- 7) 村山 喬: 宇宙線研究 **3** (1958) 449.
- 8) K. Suga: Proc. 5th Int. Symp. Cosmic Rays, La Paz, ed. I. Escobar, et al. **2** (1962) XLIX-1-5.
- 9) A. N. Bunner, K. Greisen and P. Landecker: Can. J. Phys. **46** (1967) 266.
- 10) T. Hara, et al.: Acta Phys. Acad. Sci. Hung. **29** (1970) 369.
- 11) D. J. Bird, et al.: Phys. Rev. Lett. **71** (1993) 3401.
- 12) M. Takeda, et al.: Astropart. Phys. **19** (2003) 447.
- 13) M. Takeda, et al.: Astrophys. J. **522** (1999) 225.
- 14) R. U. Abbasi, et al.: Phys. Rev. Lett. **100** (2008) 101101.
- 15) R. U. Abbasi, et al.: Phys. Rev. Lett. **104** (2010) 161101.
- 16) J. Abraham, et al.: Phys. Lett. B **685** (2010) 239.
- 17) T. Abu-Zayyad, et al.: arXiv: 1205.5067v1 (2012).
- 18) J. Abraham, et al.: Phys. Rev. Lett. **104** (2010) 091101.
- 19) Y. Tsunesada: Proc. of the 32nd Int. Cosmic Ray Conf. (ICRC), Beijing, 2011, arXiv: 1111.2507v1.
- 20) J. Abraham, et al.: Science **318** (2007) 938.
- 21) K. H. Kampert: Proc. of the 32nd ICRC, Beijing, 2011.
- 22) <http://indico.cern.ch/conferenceDisplay.py?confId=152124>.

著者紹介



永野元彦氏: 宇宙線物理学。東大核研, キール大, BASJE, 明野観測所の宇宙線観測に参加。1987-1998年AGASA研究代表者。



福島正己氏: 宇宙線物理学。電子陽電子衝突実験 (Mark-J, L3, Belle) を経て宇宙線研究に参加。2003-2011年TA研究代表者。

(2012年5月15日原稿受付)

Measuring UHECR with Atmosphere

Motohiko Nagano and Masaki Fukushima

abstract: A history of measuring the extensive air shower is reviewed from its discovery to the most recent findings.

^{*3} 南半球では、PAOによって電波銀河Cen Aとの相関が示唆されているが、統計的に確立していない。

宇宙線の源と加速・伝播の理論

大平 豊 (青山学院大学理工学部 252-5258 相模原市中央区淵野辺5-10-1)
山崎 了 (青山学院大学理工学部 252-5258 相模原市中央区淵野辺5-10-1)
寺澤敏夫 (東京大学宇宙線研究所 277-8582 柏市柏の葉5-1-5)

宇宙線の起源の問題は、多くの研究者を魅了し悩ませている。地球に降り注ぐ宇宙線のエネルギースペクトルは10桁にもわたって冪型を示し、 $10^{15.5}$ eV, $10^{18.5}$ eV, $10^{19.5}$ eVで折れ曲がりを持つ(図1)。最近では、 10^{11} eV付近にも構造があると報告されている。宇宙線はどこでどのように加速されているのか、エネルギースペクトルをどうやって説明するのか、我々は宇宙線の発見以来100年間悩み続けている。100年間の考察の一部を紹介する。

1. はじめに

100年間の努力で、宇宙線に関していろいろなことが分かってきた。 10^{10} eV程度の宇宙線は、我々の銀河系外からの伝播時間が宇宙年齢を超えることから、我々の銀河内に起源を持つ。 10^{19} eV以上の超高エネルギー宇宙線は、その直進性より銀河内の天体が起源なら強い非等方向性が期待されるが、実際は非常に小さい。従って、超高エネルギー宇宙線は我々の銀河系外に起源を持つと考えるのが自然である。どのエネルギー帯が銀河系内起源と系外起源の分け目なのかは未だ分かっていない。銀河系内を起源にする宇宙線(銀河宇宙線)に関しては、既に標準モデルと呼ばれるような理論が存在する。銀河系外を起源にする超高エネルギー宇宙線(銀河系外宇宙線)に関しても盛んに議論されている。それらについて解説する前に、宇宙線の磁場中の運動について紹介する。現在の理論では粒子加速に磁場は必須であるが、一方で磁場のために宇宙線は直進できずその加速領域が同定できない。加速領域と伝播領域での磁場の大きさ、乱れ具合が分からないために理論も仮定だらけになる。粒子加速に必須な磁場が原因で、我々は100年悩んでいると言っても過言ではない。

2. 宇宙線と磁場

宇宙線のほとんどは荷電粒子(主に原子核)である。銀河内には 10^{-6} G ($1\text{ G} = 10^{-4}\text{ T}$)程度の磁場が、銀河系外に

は 10^{-16} – 10^{-9} G程度の磁場があることが分かっている。²⁾ 銀河系外でも銀河団のような領域では 10^{-6} G程度ある。一様な磁場の中では、宇宙線は磁場に垂直な方向には円運動し、磁場に平行な方向には自由運動をする。磁場 B の中での電荷 Ze 、相対論的なエネルギー E を持つ宇宙線のジャイロ半径 r_g は

$$r_g = \frac{E}{ZeB} = 10^2 \text{ kpc } Z^{-1} \left(\frac{E}{10^{20} \text{ eV}} \right) \left(\frac{B}{10^{-6} \text{ G}} \right)^{-1} \quad (1)$$

となる($1\text{ pc} = 3.09 \times 10^{18}\text{ cm}$, 銀河の半径が約15 kpcである)。一般に磁場は揺らいでおり、宇宙線は単純な螺旋軌道を描かない。宇宙線のジャイロ半径と同程度の波長の揺らぎがあると、宇宙線の軌道はランダムになり、宇宙線は拡散的に振る舞う。磁場の揺らぎがランダム位相でないときは、宇宙線は準拡散や超拡散といった振る舞いをする。¹⁷⁾ 磁場の揺らぎの振幅 δB が大きくなるほど平均自由行程が短くなり、 δB が揃った磁場 B と同程度になると、拡散は等方的でその平均自由行程はジャイロ半径程度になる(ボーム極限)。そのときの拡散係数は $D_B = r_g c/3 = cE/3ZeB$ となり、エネルギー E に比例する。磁場の大きさや揺らぎの性質は宇宙線の振る舞いに大きく影響する。

3. 銀河宇宙線の標準モデル

銀河宇宙線のエネルギー密度は、約 1 eV/cm^3 、銀河全体のエネルギーは約 10^{67} eVである。銀河宇宙線は 10^7 year程度で銀河外へ抜け出すので(3.3章)、銀河宇宙線を維持するには 10^{60} eV/year程度のエネルギー供給が必要である。以下では「銀河宇宙線は超新星残骸で衝撃波統計加速により加速され、銀河内を拡散的に伝播して銀河外へ抜け出す」というパラダイムとその問題点を解説する。

3.1 超新星残骸

大質量の星は一生の最期に重力崩壊を起こし、それがきっかけで大爆発を起こす。また白色矮星に質量降着が生じ臨界質量を超えると爆発する。超新星残骸とはその大爆発の残骸である。爆発直後、星の外層は約 10^4 km/s で吹き飛び、周りにある星間ガスを掃き集めながら膨張する。その際、星間ガスと吹き飛んだ星の外層の中に衝撃波が形成される。衝撃波で加熱されたガスは、1,000万度以上にもなる。初めほぼ等速で膨張していた超新星残骸は(自由膨張期)、

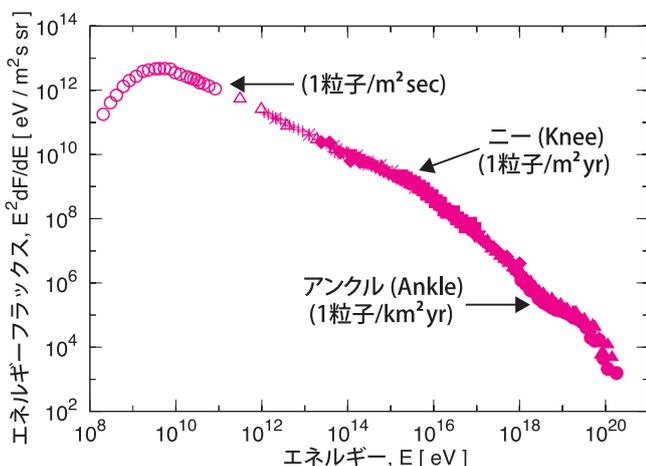


図1 宇宙線のエネルギースペクトル。^{1,2)}(フルカラー口絵参照.)

星の外層と同程度の星間ガスを掃き集めると減速をはじめ (セドフ期). 超新星残骸の発生頻度は約 0.03/year なので, 星の外層が吹き飛ばすエネルギー ($\sim 10^{63}$ eV) の約 10% が銀河宇宙線に渡れば, 銀河宇宙線を供給できる. 実際に電波から X 線, ガンマ線の観測により, 高エネルギー粒子が超新星残骸で加速されていることは確認されている.³⁾ この光子の観測とエネルギー供給, また宇宙線原子核の組成の観点から, 超新星残骸の銀河宇宙線起源説が支持されている. しかし, 超新星残骸で原子核が加速されている直接証拠は未だなく, どのタイプの超新星爆発 (超新星爆発には様々な種類がある) の残骸が宇宙線生成に寄与するかも分かっていない.

銀河宇宙線の原子核組成から, 大質量星が集団で作られて次々と爆発するような領域 (スーパーバブル) が源という説もある.⁴⁾ また銀河系内の超新星残骸で, どのエネルギーまでの宇宙線を作っているのかもよく分かっていない. 10^{15} eV 程度までの宇宙線は陽子が支配的で, 10^{15} eV から 10^{17} eV に向かって宇宙線の組成が重元素へとシフトしているため,⁵⁾ 超新星残骸で $10^{15.5}$ eV までの宇宙線陽子と, 10^{17} eV までの鉄の宇宙線が加速されているという考え方が主流である.

宇宙線には, 電子や陽電子も含まれる. 宇宙線電子も超新星残骸を起源に持つと考えられている. 最近では, 宇宙線の電子・陽電子観測から, 10^{11} - 10^{12} eV の電子陽電子宇宙線は高速回転する中性子星 (パルサー)^{6,7)} や白色矮星,⁸⁾ 銀河系内のガンマ線バースト⁹⁾ が起源である可能性も示唆されている.

3.2 衝撃波統計加速 (DSA)

粒子を高エネルギーに加速する理論的アイディアは沢山存在する. アイディアに共通するのは, 加速が宇宙プラズマ中に発生した電場 (交流または直流) によると考えることである. なかでも, 最も支持されているのは衝撃波統計加速 (Diffusive Shock Acceleration; DSA) である (1次 Fermi 加速とも呼ばれる).¹⁰⁾ 衝撃波静止系では, 上流のプラズマが速度 u_1 で衝撃波面に向かって流入し, 衝撃波面で減速, 加熱, 圧縮され, 速度 u_2 で下流に流れる. プラズマ中にはアルフヴェン波などの磁場の乱れが存在している. 荷電粒子である宇宙線の運動は, 乱れた磁場の中では拡散的になる. 宇宙線は一度衝撃波下流に流れても, 拡散により一部は衝撃波上流にしみ出す. 拡散長 L_{diff} は, 移流時間スケール $t_{\text{adv}} \sim L_{\text{diff}}/u_1$ と拡散時間のスケール $t_{\text{diff}} \sim L_{\text{diff}}^2/D(E)$ の釣り合いより, $L_{\text{diff}} \sim D(E)/u_1$ となる. $D(E)$ はエネルギー E を持つ宇宙線の拡散係数である. 上流へしみ出した宇宙線は磁場の波と散乱するため, 衝撃波速度が一定のときは, 無限上流まで流れに逆らって進むことはできず, いつかは衝撃波面を通過して再び下流へ流れる. その一部が, 再び拡散によって上流へしみ出す. すると衝撃波面を何度も往復する粒子が現れる (図2). 衝撃波面ではプラズマが圧縮されている. 衝撃波圧縮に伴い宇宙線はエネルギーを

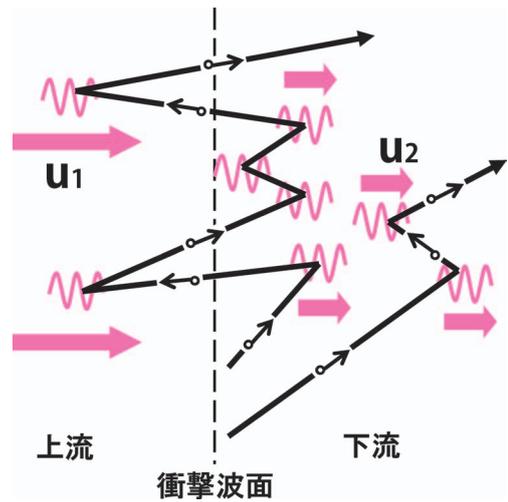


図2 衝撃波統計加速 (DSA) の説明図.³⁾

得るので, 何回も衝撃波を往復した宇宙線ほどエネルギーを得ることになる. しかし, そのような経験をする粒子は往復回数が増えると少なくなる. その結果, 衝撃波面での宇宙線のエネルギースペクトルは以下の冪型になる.¹⁰⁾

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-s}, \quad s = \frac{u_1/u_2 + 2}{u_1/u_2 - 1} \quad (2)$$

強い衝撃波極限では $u_1/u_2 = 4$ なので, DSA 理論は強い衝撃波ならどこでも $s=2$ を予言する. 少ない仮定で普遍的な冪指数を予言する DSA 理論は, 広く受け入れられている. 太陽圏内で生じる衝撃波の直接観測からも, DSA 理論を支持する観測が得られている.

観測との矛盾もある. 超新星残骸からの電波やガンマ線スペクトルから期待される宇宙線スペクトルの冪指数は, DSA 理論が予言する冪指数より大きい (DSA 理論の予言より高エネルギー粒子が少ない). 最近, 地球での宇宙線陽子と宇宙線ヘリウムの冪指数が異なることが報告された.¹¹⁾ DSA 理論によれば, 冪指数は粒子の種類によらない.

観測との矛盾だけでなく理論的な問題もある. DSA 理論は, 拡散的に振る舞う粒子の存在を仮定している. プラズマの主成分である熱的粒子は磁場に束縛されているため拡散的には振る舞うことはできず, 十分に高いエネルギーを持った粒子だけが拡散的に振る舞うと考えられる. しかし, まだその境目のエネルギーを決める確たる理論的根拠がないため, どれだけの粒子が拡散的に振る舞うか, つまりどれだけの粒子が加速されるかは予言できないのである.

典型的な星間空間の磁場の値 10^{-6} G では, 最高エネルギーが $10^{15.5}$ eV に届かないという問題もある. エネルギー増加の時間スケール t_{acc} は, DSA 理論では拡散長 L_{diff} まで拡散する時間スケールになり, $t_{\text{acc}} \sim t_{\text{diff}} = D(E)/u_1^2$ となる. 超新星残骸のセドフ期では u_1 が減速して加速効率が下がる. そのため最高エネルギーは, 超新星残骸が自由膨張期の間 ($t_{\text{free}} \sim 200$ year) に宇宙線が加速する条件 ($t_{\text{acc}} = t_{\text{free}}$) で決まり,

$$E_{\max} = 6 \times 10^{13} \text{ eV } Z \left(\frac{B}{10^{-6} \text{ G}} \right) \left(\frac{u_1}{10^4 \text{ km/s}} \right)^2 \left(\frac{t_{\text{free}}}{200 \text{ year}} \right) \quad (3)$$

となる (ボーム拡散係数 $D_B(E) = cr_g/3$ を用いた). 10^{-6} G では $10^{15.5} \text{ eV}$ まで加速できず, 磁場を 100 倍程度に増幅する必要がある. 実は X 線の観測から, 超新星残骸の衝撃波近傍で 100 倍以上の磁場増幅が示唆されている.³⁾ 面白いことに, 加速された宇宙線が衝撃波上流にしみ出す際, 上流で磁場を増幅することが理論的に示されている.¹²⁾ 加速した粒子が自ら磁場を増幅し, 最大エネルギーを大きくしていると考えられている. しかし増幅された磁場の値を正確に予言するには至っていない.

3.3 銀河宇宙線の銀河内伝播

超新星残骸を抜け出した宇宙線は, 銀河内をさまようことになる. 銀河磁場は銀河の端で急に弱くなるので, 宇宙線が銀河の端にくるとほぼ直線運動をして銀河から去っていく. 銀河内の定常的な宇宙線のエネルギースペクトルは, 超新星残骸からの供給と銀河からの脱出の釣り合いで定まる. 高エネルギーなほど, ジャイロ半径が大きくなるため銀河から脱出しやすくなる. そのため定常的なスペクトルは, 超新星残骸で作られたスペクトルより高エネルギー側がより少ない状態になる. エネルギー E の宇宙線の生成率を $Q_s(E)$, 銀河内の滞在時間を $T_{\text{res}}(E)$ とすると, 銀河宇宙線の定常スペクトル dN_{CR}/dE は, 以下で与えられる.¹³⁾

$$\frac{dN_{\text{CR}}}{dE} = Q_s(E) T_{\text{res}}(E) \quad (4)$$

滞在時間 $T_{\text{res}}(E)$ は銀河内の宇宙線の拡散係数を $D_{\text{gal}}(E)$, 銀河面の厚みを H とすると, $T_{\text{res}} \sim H^2/D_{\text{gal}}(E)$ となる. 宇宙線の炭素の一部は, 星間ガスと衝突して高エネルギーのホウ素になる. 滞在時間に比例してホウ素が作られるので, 宇宙線のホウ素と炭素の比から滞在時間を調べることができる. また, 銀河は円盤状で非等方な形をしていることから, 宇宙線が飛び出す境界の影響が宇宙線の到来方向の非等方性から分かる. 非等方性は $D_{\text{gal}}(E)/cH$ 程度となるので, 非等方性の観測からも滞在時間のエネルギー依存性が得られる. これらの観測より, $T_{\text{res}}(E) \sim 6.6 \times 10^6 \text{ year } (E/Z \times 10 \text{ GeV})^{-0.3}$ と分かっている.¹⁴⁾ 地球での観測より $dN_{\text{CR}}/dE \propto E^{-2.7}$ なので $Q_s(E) \propto E^{-2.4}$ となる. 単純な DSA 理論は $E^{-2.0}$ を予言するので, 我々は何か重要な物理過程を見落としている可能性がある.

3.4 標準モデルの最近の進展

銀河宇宙線の標準モデルには, 理論的に未解明な点と観測との矛盾点があることを述べた. 後者に関しては, 解決案が提案されている. DSA 理論の冪指数 $s = 2.0$ からのズレを説明するために中性粒子の効果¹⁵⁾ や, 宇宙線の非等方拡散,¹⁶⁾ 通常の拡散と異なる準拡散¹⁷⁾ や, 宇宙線を散乱する波の伝播速度の効果¹⁸⁾ などが指摘されている. そのほとんどが磁場の乱れに依存した効果であり, 磁場揺らぎの非線形発展の正確な理解が必要になってきたと言える.

また加速領域からの宇宙線の脱出過程にも注目が集まっ

ている. 拡散で広がる距離は, 時間の 0.5 乗に比例する. セドフ期では, 超新星残骸は時間の 0.4 乗に比例して膨張するため, 宇宙線が超新星残骸を追い越して脱出することが可能である. より高エネルギーの宇宙線ほど早く拡散で広がるので早く超新星残骸から脱出する. 宇宙線が脱出するまでの間, 宇宙線は超新星残骸内に蓄えられる. 各時刻に超新星残骸から脱出する宇宙線のエネルギーを $E_{\text{esc}} \propto t^{-a}$ (時間と共に減少), 超新星残骸内の宇宙線のエネルギースペクトルを $dN_{\text{SNR}}(t, E)/dE \propto t^b E^{-s}$ (時間と共に増加) とすると, 脱出した宇宙線のエネルギースペクトルは, t を消去して $dN_{\text{esc}}/dE \propto E^{-(s+b/a)}$ となる.¹⁹⁾ 超新星残骸から脱出した宇宙線のエネルギースペクトルは, このように加速領域のものとはズレる. 3.3 章で現れた $Q_s(E)$ が E^{-2} と異なることが説明できる. 陽子とヘリウムで b/a が異なれば, 陽子とヘリウムのスペクトルの違いを説明できる.²⁰⁾ しかし a は磁場の時間発展, b は宇宙線注入の時間発展の理解が不十分なため, 現在では不定性の大きなパラメータとなっている.

4. シミュレーションによる研究

近年の発展が目覚ましいシミュレーションによる宇宙線加速と磁場に関する研究を紹介する. 衝撃波での粒子加速を調べるために, 電磁場中の荷電粒子の運動とそれらが作る電流から電磁場を自己無撞着に解くプラズマ粒子シミュレーションが盛んに行われている. 粒子シミュレーションによって, 衝撃波での磁場増幅²¹⁻²³⁾ や, 衝撃波での粒子加速²⁴⁾ と冪型のエネルギースペクトル形成^{25, 26)} などが再現されはじめている. 計算機資源が足りないため, 現実的な状況設定での計算ができず沢山問題もあるが, DSA 理論では仮定されている加速粒子への注入や, 線形解析では分からない磁場の増幅限界など少しずつではあるが解明されはじめている. 磁気流体シミュレーションによって, 大規模構造形成に伴う銀河系外磁場の形成を調べる試み²⁷⁾ や, 超新星残骸やガンマ線バーストなどの天体での磁場増幅機構^{28, 29)} の研究も行われるようになってきた.

5. 超高エネルギー宇宙線 (銀河系外宇宙線)

最初に述べたように, 10^{19} eV 以上の超高エネルギー宇宙線は銀河系外起源と結論されているが, 観測的制限が緩いため, それ以上の絞り込みはできておらず, 標準とされるモデルはない. 加速源候補もガンマ線バースト, 活動銀河核, 超強磁場中性子星, 銀河団などにわたり, 加速機構の候補も, 銀河宇宙線と同じ DSA や乱流加速 (2 次 Fermi 加速), 単極誘導による電場加速, 航跡場加速など様々である. 加速源から我々の銀河系に至るまでの宇宙線の伝播も, 銀河系外の磁場の状態がよく分からないため不定性が大きい. また主たる構成成分が, 陽子や軽元素なのか, 鉄のような重元素なのか, 理論的考察も盛んである.

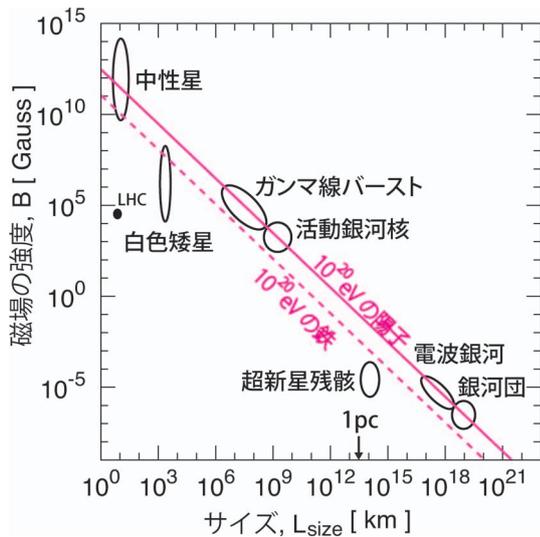


図3 Hillas プロット.³⁰⁾ 赤い実線または破線より上側が、 10^{20} eVの粒子に対して $L_{\text{size}} > r_g$ となる領域 (式(5)). 実線が陽子、破線が鉄の場合.

5.1 超高エネルギー宇宙線の加速天体

10^{20} eV もの超高エネルギー宇宙線を加速できる天体はある程度しぼられる. 加速領域の大きさ L_{size} がジャイロ半径 r_g 以上である条件から

$$E_{\text{max}} < 10^{20} \text{ eV } Z \left(\frac{B}{10^{-4} \text{ G}} \right) \left(\frac{L_{\text{size}}}{1 \text{ kpc}} \right) \quad (5)$$

となる (図3). 鉄のような原子番号 Z の大きい粒子の方が最大エネルギーを得やすい. 超高エネルギー宇宙線を作るには、磁場や加速領域が大きい必要がある. この条件を満たせる天体が、ガンマ線バーストや活動銀河核、中性子星、銀河団となる. 実際にこれらの天体で電子が加速されていることは、光子の観測によって分かっている. 加速領域の大きさ以外にも、拡散で逃げるまでに加速するとか、エネルギー損失の時間スケールより加速時間が短いなどの条件がある. これらを考慮すると、どの天体も 10^{20} eV を大きく上回することはできない. 銀河団に関しては、陽子は 10^{19} eV 程度が精一杯で、宇宙線の組成が鉄のような大きな原子番号 Z を持たないと 10^{20} eV に到達しない.³¹⁾

5.2 超高エネルギー宇宙線の加速機構

銀河団では構造形成に伴う降着衝撃波 (衝撃波速度は 10^3 km/s 程度) が生じ、衝撃波統計加速 (DSA) によって粒子が加速される可能性がある. ガンマ線バーストや活動銀河核では、衝撃波速度がほぼ光速の相対論的衝撃波が生じ、DSA によって粒子が加速される可能性がある. 相対論的衝撃波での DSA は、非相対論的衝撃波の場合とは異なり、加速された粒子の冪指数 s は様々な値をとり得る.³²⁾ 実際、光子の観測から期待される電子のエネルギースペクトルは様々である. 複数の天体が超高エネルギー宇宙線の源となると、異なる冪指数を持ったスペクトルの足し合わせでいいのかという問題もある. 活動銀河核の場合は衝撃波での DSA だけでなく、銀河中心のブラックホールから放出されるジェットの間でのシェアー加速や、ブラックホール磁

気圏での単極誘導による電場加速や遠心力加速も提案されている.³³⁾ 強磁場中性子星の場合も、ブラックホール磁気圏と同様の加速機構が期待されている.^{34, 35)}

5.3 超高エネルギー宇宙線の銀河系外伝播

超高エネルギー宇宙線が陽子の場合、伝播中に宇宙背景放射などの光子と相互作用して、パイ中間子や電子陽電子を作りエネルギーを減らす. 10^{20} eV 以上の宇宙線は約 100 Mpc 伝播すると、もとのエネルギーを持つ宇宙線の数は半分以下になる.²⁾ そのため 100 Mpc 以上離れたところに源があると、最高エネルギーが 10^{20} eV 以上でも、地球上で観測される宇宙線スペクトルは 10^{20} eV 付近でフラックスが急に下がる (GZK 減衰). 鉄が超高エネルギー宇宙線の場合も、約 100 Mpc の伝播で数が半分に減り、炭素などの場合は光分解反応により 20 Mpc 程度の伝播で、そのエネルギーの宇宙線が半分に減る. 宇宙線源が 100 Mpc 以上離れている場合、背景放射の光子と反応することでそのスペクトルは変形する.

超高エネルギー宇宙線は銀河系外磁場の影響を受けて伝播する. 超高エネルギー宇宙線のジャイロ半径は、場合によってはその伝播距離よりも大きくなり得る. そのため、超高エネルギー宇宙線の源からほぼまっすぐ我々までやってくる可能性がある. 実際に、近傍の1つの活動銀河核 (ケンタウルス A) から超高エネルギー宇宙線がいくぶん多めに来ているという報告や、様々な活動銀河核の位置と超高エネルギー宇宙線の到来方向に相関があるという報告もある.³⁶⁾ 但し、活動銀河核の方向の視野には多数の銀河や銀河団があるため、あらゆる天体が候補になる. ジャイロ半径よりも短い距離の宇宙線の伝播は空間の拡散として扱うことができない. 宇宙線の軌道は具体的な磁場の方向や、磁場の揺らぎの性質に大きく依存する. しかし、銀河系外磁場の値やコヒーレントスケールが何桁にもわたって分からないため、不定性は非常に大きい. 最高エネルギー宇宙線の組成が、陽子なのか鉄なのかでも、ジャイロ半径は 26 倍 (Z の違い) 異なる. 磁場のコヒーレントスケール λ_c が伝播距離 d と宇宙線のジャイロ半径 r_g より十分小さい場合、一つ一つの揺らぎでの軌道の変化角 $\delta\theta$ は小さくランダムに振る舞う. 伝播の結果変化する角度 θ は

$$\theta = \frac{\sqrt{2d\lambda_c/9}}{r_g} = 2.5^\circ Z E_{20}^{-1} B_{-9} d_{100}^{1/2} \lambda_1^{1/2} \quad (6)$$

となる³⁷⁾ ($E_{20} = E/10^{20}$ eV, $B_{-9} = B/10^{-9}$ G, $d_{100} = d/100$ Mpc, $\lambda_1 = \lambda/1$ Mpc). 軌道が直線からそれるため、同じ天体から放射された光子やニュートリノにくらべ宇宙線は遅れて地球に届く. 遅れ Δt は

$$\Delta t = \frac{d\theta^2}{4c} = 1.5 \times 10^5 \text{ year } Z^2 E_{20}^2 B_{-9}^2 d_{100}^2 \lambda_1 \quad (7)$$

となり、³⁷⁾ ガンマ線バーストや活動銀河核の突発的な現象と宇宙線は相関しなくなる. また、 $10^{17} B_{-9}$ eV 以下の宇宙線は Δt が宇宙年齢 (10^{10} year) 以上になり、地球に届かない.

5.4 超高エネルギー宇宙線のエネルギースペクトル

地球に届く銀河系外宇宙線のエネルギースペクトルを理論的に求めるには、源でのスペクトル、源での超高エネルギー宇宙線の組成、源の光子のエネルギースペクトル、源の時間空間分布、銀河系外磁場、銀河磁場を知る必要があるが、これら全てが不明である。従って、現在では観測されている銀河系外宇宙線のエネルギースペクトルや非等方性、組成から源での値などを調べる研究が盛んに行われている。

超高エネルギー宇宙線が陽子である場合、宇宙背景放射の光子との反応で変形されたスペクトルが、観測されているスペクトルと良くあう(ディップモデル)³⁸⁾。この場合、源のスペクトルは $Q_s(E) \propto E^{-2.6}$ 程度、銀河宇宙線との境目は $10^{17.7}$ eV 付近になる。観測は、このエネルギー領域での宇宙線組成が重元素から陽子に遷移しており、非常に良さそうである。しかし超高エネルギー宇宙線は重元素であるという報告³⁹⁾や、エネルギースペクトルが銀河宇宙線と滑らかにつながる理由が偶然なのかといった問題もある。一方、銀河宇宙線と銀河系外宇宙線の遷移がアंकル・エネルギー $10^{18.5}$ eV 付近(図1参照)というモデルもある(アंकルモデル)^{40,41)}。この場合は、源のスペクトルが $Q_s \propto E^{-2.1}$ 程度になる。組成は陽子や鉄が支配的なものや、様々な核種がまざったモデルがある。

5.5 超高エネルギー宇宙線と多粒子観測

超高エネルギー宇宙線を探る上で、近年のニュートリノやガンマ線の観測も無視できない。ガンマ線バースト起源説はニュートリノ観測により、少しずつ制限されはじめている⁴²⁾。活動銀河核からは、高エネルギーガンマ線が観測されている。宇宙線が宇宙背景放射や天体からの光子と反応した結果生じる高エネルギーガンマ線と解釈できる例も発見されている⁴³⁾。超高エネルギー宇宙線は伝播中に、宇宙背景放射の光子と反応してガンマ線やニュートリノを作る。最近では、それらが観測されていないということから、超高エネルギー宇宙線のモデルに制限が加わっている^{44,45)}。

6. 今後の展望

10^{15} eV 程度までの宇宙線の直接観測として AMS-02 や CALET が非常に統計精度の高いデータを提供してくれるだろう。それによって、銀河内の拡散係数についての不定性が小さくなり、銀河宇宙線源のモデルに強い制限を与えることができる。宇宙線電子に関しては、これまで統計が不足していた 10^{12} eV 以上のエネルギー領域が観測できる。最近報告された陽電子スペクトル異常についてもより高いエネルギー領域での様子が分かるだろう。

一方、超高エネルギー宇宙線についての間接観測として JEM-EUSO が計画されており、すばらしい統計精度が期待される。これにより、 10^{20} eV 以上のエネルギースペクトルが正確に観測され、GZK 減衰の様子から源までの距離

が分かるかもしれない。

電波観測では LOFAR や SKA などが計画されており、磁場についての制限が強くなることで宇宙線伝播の不定性が減る。他にも光子観測では、X線観測衛星 Astro-H や、地上ガンマ線望遠鏡の CTA や LHAASO などが計画されており、宇宙線起源天体からの高エネルギー放射がより詳細に観測され、加速領域の状態や加速現場でのエネルギースペクトルが求められる。DSA 理論の妥当性や宇宙線の脱出過程がより明らかになると期待される。

最近完成した IceCube や、KM3NeT などの幅広いエネルギー領域での高感度ニュートリノ観測により、宇宙線源での宇宙線と物質や光子との相互作用が制限される。太陽や惑星磁気圏以外の天体で陽子や原子核が加速されている完璧な証拠は未だないが、高エネルギーニュートリノが観測されれば、陽子や原子核の加速の初めての直接的な証拠となる。

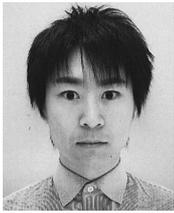
宇宙への展開ばかりでなく、地上実験も期待がある。大型レーザー NIF を使ったプラズマ実験では、有力な宇宙線加速領域の候補である無衝突衝撃波を作ろうという計画がある。日本では世界一の計算機である「京」がよいよ稼働し始めた。これまで計算機資源の都合でできなかった現実的な状況でのシミュレーションが可能になり、多くの発見が期待できる。このように、宇宙線研究は100年経っても未だ衰えることなく、むしろ加速的な発展が期待される。次の100年後には宇宙線が完全に理解されているのだろうか? 楽しみである。

参考文献

- 1) S. P. Swordy: *Space Science Rev.* **99** (1991) 85.
- 2) K. Kotera and A. V. Olinto: *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **49** (2011) 119.
- 3) 山崎 了, 馬場 彩: *日本物理学会誌* **64** (2009) 196.
- 4) R. E. Lingenfelter and J. C. Higdon: *Astrophys. J.* **660** (2007) 330.
- 5) W. D. Apel, *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **107** (2011) 171104.
- 6) N. Kawanaka, *et al.*: *Astrophys. J.* **710** (2010) 958.
- 7) S. Kisaka and N. Kawanaka: *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **421** (2012) 3543.
- 8) K. Kashiyama, *et al.*: *Phys. Rev. D.* **83** (2011) 023002.
- 9) K. Ioka: *Prog. Theor. Phys.* **123** (2010) 743.
- 10) R. Blandford and D. Eichler: *Phys. Rep.* **154** (1987) 1.
- 11) H. S. Ahn, *et al.*: *Astrophys. J.* **714** (2010) L89.
- 12) S. G. Lucek and A. R. Bell: *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **314** (2000) 65.
- 13) V. S. Berezinskii, *et al.*: *Astrophysics of Cosmic Rays*. North Holland, Amsterdam (1990).
- 14) F. C. Jones, *et al.*: *Astrophys. J.* **547** (2001) 264.
- 15) Y. Ohira: arXiv: 1202.4620.
- 16) A. R. Bell, *et al.*: *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **418** (2011) 1208.
- 17) J. G. Kirk, *et al.*: *Astron. Astrophys.* **314** (1996) 1010.
- 18) V. N. Zirakashvili and V. S. Ptuskin: *AIP Conf. Proc.* **1085** (2008) 336.
- 19) Y. Ohira, *et al.*: *Astron. Astrophys.* **513** (2010) A17.
- 20) Y. Ohira and K. Ioka: *Astrophys. J.* **729** (2011) L13.
- 21) M. A. Riquelme and A. Spitkovsky: *Astrophys. J.* **694** (2009) 626.
- 22) Y. Ohira, *et al.*: *Astrophys. J.* **698** (2009) 445.
- 23) L. Gargatè, *et al.*: *Astrophys. J.* **711** (2010) L127.
- 24) Y. Matsumoto, *et al.*: arXiv: 1204.6312.
- 25) A. Spitkovsky: *Astrophys. J.* **682** (2008) L5.
- 26) L. Gargatè and A. Spitkovsky: *Astrophys. J.* **744** (2012) 67.
- 27) J. Donnert, *et al.*: *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **392** (2009) 1008.
- 28) J. Giacalone and J. R. Jokipii: *Astrophys. J.* **663** (2007) L41.
- 29) T. Inoue, *et al.*: *Astrophys. J.* **734** (2011) 77.

- 30) A. M. Hillas: *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **22** (1984) 425.
 31) S. Inoue, *et al.*: arXiv: astro-ph/0701167.
 32) E. J. Summerlin and M. G. Baring: *Astrophys. J.* **745** (2012) 63.
 33) F. M. Rieger: arXiv: 1108.4565.
 34) P. Blasi, *et al.*: *Astrophys. J.* **533** (2000) L123.
 35) J. Arons: *Astrophys. J.* **589** (2003) 871.
 36) P. Abreu, *et al.*: *Astropart. Phys.* **34** (2010) 314.
 37) E. Waxman and J. Miralda-Escudé: *Astrophys. J.* **472** (1996) L89.
 38) V. Berezhinsky, *et al.*: *Phys. Rev. D.* **74** (2006) 043005.
 39) J. Abraham, *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **104** (2010) 091101.
 40) R. Aloisio, *et al.*: *Astropart. Phys.* **27** (2007) 76.
 41) D. Allard: arXiv: 1111.3290.
 42) R. Abbasi, *et al.*: *Nature* **484** (2012) 351.
 43) S. Sahu, *et al.*: *Phys. Rev. D.* **85** (2012) 043012.
 44) G. Decerprit and D. Allard: *Astron. Astrophys.* **535** (2011) A66.
 45) S. Yoshida and A. Ishihara: *Phys. Rev. D.* **85** (2012) 063002.

著者紹介



大平 豊氏: 専門は宇宙物理学。とくに高エネルギー天体現象と宇宙線、およびプラズマ物理学に興味がある。



山崎 了氏: 専門は宇宙物理学。とくに、ガンマ線バーストや超新星残骸で起こる高エネルギー宇宙線粒子加速の理論的・観測的研究を行っている。



寺澤敏夫氏: 専門は宇宙プラズマ物理学・宇宙線物理学。熱的分布から少し外れた超熱的粒子起源の研究から出発し、より高いエネルギーを持った宇宙線粒子起源の研究に進んできた。

(2012年5月17日原稿受付)

Source, Acceleration and Propagation Theories of Cosmic Rays

Yutaka Ohira, Ryo Yamazaki and Toshio Terasawa

abstract: The origin of cosmic rays has been attracting many scientists. The energy spectrum of cosmic rays is a power-law form covering an energy range of 10 decades and has three structures around $10^{15.5}$ eV, $10^{18.5}$ eV and $10^{19.5}$ eV. Moreover, recently, a new structure around 10^{11} eV was found. We have been puzzled, for a hundred years since the discovery of cosmic rays, how the spectrum is produced, where and how cosmic rays are accelerated, and so on. In this paper, we introduce a part of 100-year struggle for understanding cosmic rays.

ニュートリノというプローブで何がわかるか

中畑 雅行
吉田 滋

〈東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設 506-1205 飛騨市神岡町東茂住 〉

〈千葉大学大学院理学研究科 263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33 〉

2012年は、大マゼラン星雲での超新星爆発が観測され「ニュートリノ天文学」が誕生した1987年からちょうど25年目にあたり、ニュートリノ研究にとっても節目となる年である。この25年間にニュートリノの素粒子的描像は一変した。大気ニュートリノ観測によりニュートリノ振動が発見されニュートリノが質量を持つことがわかり、長年の懸案だった太陽ニュートリノ問題もニュートリノ振動が原因であることがわかった。加速器や原子炉を使ったニュートリノ振動研究も盛んに行われた。現在、質量階層性とCPフェーズを除くすべてのパラメータが決定された。ニュートリノをプローブとする天体物理学においては、SN1987Aのニュートリノ観測により超新星爆発の基本的な描像が正しかったことが証明され、またニュートリノ振動の効果を補正すれば太陽からのニュートリノは標準太陽モデルの予想と良く一致することがわかった。一方宇宙から届く高エネルギーニュートリノは宇宙線起源を調べる有用なメッセンジャーでもある。2011年に完成したアイスキューブ実験が本格観測を開始して、既に宇宙線起源に幾つかの重要な制限を加え始めている。

1. SN1987Aによるニュートリノ天文学の幕開け

ニュートリノは物質との相互作用が弱い素粒子であり、ニュートリノをプローブとして行う天文学では、天体の深

部を探ったり、宇宙の超遠方まで見渡したりすることができる。また、素粒子の標準モデルではニュートリノは質量を持たないとされているが、実際には質量を持つことがニ

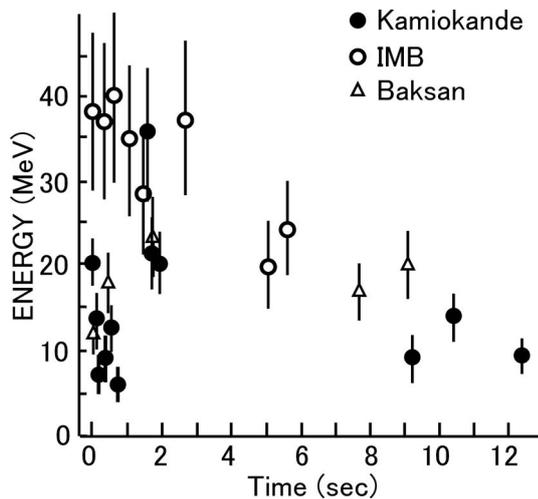


図1 カミオカンデ, IMB, Baksan 実験が捉えた SN1987A からのニュートリノ信号。個々の点はひとつひとつの現象をあらわす。横軸は最初の現象からの時間、縦軸は個々の現象のエネルギーをあらわす。

ニュートリノ振動研究によって明らかにされてきており、素粒子研究においても重要な鍵を握る粒子である。

1983年、陽子崩壊を探索するため3,000トンの水チェレンコフ検出器「カミオカンデ」がスタートした。しかし、陽子崩壊はいっこうに見つからなかった（スーパーカミオカンデになった今でもまだ見つからない）。陽子崩壊を探す実験はアメリカでも7,000トンのIrvine-Michigan-Brookhaven (IMB) 実験が走っていたが、カミオカンデは20インチ径という巨大な光電子増倍管を使用していたため、より低エネルギーの事象までみることができた。そこで、 ^8B 太陽ニュートリノ観測に向けて装置の改良を1984年から行った。当初のカミオカンデでは岩盤からの放射線をシールドする外水槽がなかったためそれを作り、また時間情報を取り込む電子回路を導入した。こうした改良がほとんど終了し、太陽ニュートリノのデータを取り始めた頃に SN1987A の信号が観測された。

太陽の8倍以上の質量を持つ大質量星はその進化の最終段階として中心部に太陽質量の1.4倍程度の質量を持つ鉄のコアを形成する。超新星爆発とは、そのコアが重力崩壊して中性子星やブラックホールが形成されることをきっかけとして起こると考えられている。重力崩壊のエネルギーの99%は、物質との相互作用が非常に弱いニュートリノによって星から運び出されると考えられていた。SN1987A の信号は1987年2月23日16:36 (日本時間) に届いた。その信号を図1に示す。観測された事象数は、カミオカンデ¹⁾ が11、IMB²⁾ が8、Baksan³⁾ が5であった。これらの信号が逆ベータ反応 ($\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$) による $\bar{\nu}_e$ による事象だとして、また3種類の粒子・反粒子ニュートリノがすべて同じだけエネルギーを運び出していたとすると超新星の爆発エネルギーはおおよそ 3×10^{53} erg であると見積もられた。これはまさに太陽程度の質量を持った物体が10 km サイズの物体に重力収縮した際に期待されるエネルギーにぴたりと一致し、超新星爆発の基本的なシナリオが正しかったこと

が証明されたのである。

2. ニュートリノ振動研究の展開

ニュートリノが質量を持ち、質量の固有状態と相互作用の固有状態の間に混合があると、ニュートリノが飛行中に他のニュートリノに変化してしまう現象（「ニュートリノ振動」）が起こる。ニュートリノには3つの種類があるため、混合を記述する行列は3つの角度 ($\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$) とひとつの CP フェーズ (δ) を使って以下のように書かれる。

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{-i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c_{21} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

($c_{ij} \equiv \cos \theta_{ij}$, $s_{ij} \equiv \sin \theta_{ij}$)。振動の周期を決めるのは質量の2乗差 ($\Delta m_{ij}^2 \equiv m_i^2 - m_j^2$) である。

ニュートリノ振動の最初の発見は、大気ニュートリノの観測によってであった。大気ニュートリノは一次宇宙線（高エネルギーの陽子やヘリウムなど）が大気中で反応し、その際に生まれる π や K 中間子が $\pi(K) \rightarrow \mu \nu_\mu$ と崩壊し、さらに $\mu \rightarrow e + \nu_e + \nu_\mu$ と崩壊する過程で生成されるため、 ν_μ/ν_e の比は1 GeV 程度以下の低エネルギーにおいては2ぐらいであることが予想される。カミオカンデの観測によって、この値が1.2ぐらいであると報告され「大気ニュートリノ異常」と呼ばれていた。50,000トンの水チェレンコフ実験装置「スーパーカミオカンデ」(SK) が1996年にスタートし、非常に多くの大気ニュートリノ事象を捉えて解析した結果、天頂角度によって（つまりニュートリノ飛行距離によって） ν_μ/ν_e の比が変わることがわかり、1998年にニュートリノ振動の最初の発見となった。⁴⁾ 大気ニュートリノ振動に関係する主たるパラメータは θ_{23} と Δm_{32}^2 である。

太陽ニュートリノ観測は、デービスらが1970年頃に塩素とニュートリノとの反応を使った放射化学法による実験により始まったが、標準太陽モデルからの予想に比べて有意に小さいという問題（「太陽ニュートリノ問題」）があった。1989年にカミオカンデは、リアルタイム検出器による太陽ニュートリノの観測に成功し、太陽ニュートリノ問題を確認した。そして、2001年に電子散乱を使ったSKの観測結果（これには荷電カレント(CC)反応と中性カレント(NC)反応の両方が寄与する)と重水を使ったカナダのSNO (Sudbury Neutrino Observatory) 実験のCC反応の結果を比較することによって、 ν_e である太陽ニュートリノの7割弱が地球に届いた時には ν_μ, ν_τ に変わっていることがわかった。⁵⁾ その後、この観測はSNO自身によるNC反応の観測によって精度が向上し、その結果、ニュートリノ振動の効果を考慮すれば標準太陽モデルが予想するニュートリノ強度は観測とよく合っていることがわかった。太陽ニュートリノに関係する主たる振動パラメータは、 θ_{12} と Δm_{21}^2

表1 ニュートリノ振動パラメータのまとめ。数値は、T. Schwetz 他,¹²⁾ 最近の θ_{13} 実験の結果,⁸⁻¹¹⁾ Super-Kamiokande group による解析より。

混合角 質量差	値 (主たる観測/実験)
$\sin^2 \theta_{12}$	0.304 ± 0.013 (太陽 ν , 長基線原子炉 ν)
$\sin^2 \theta_{23}$	0.51 ± 0.06 (大気 ν , 長基線加速器 ν)
$\sin^2 \theta_{13}$	0.0242 ± 0.0025 (短基線原子炉 ν , 長基線加速器 ν)
Δm_{21}^2	$7.44^{+0.20}_{-0.19} [10^{-5} \text{ eV}^2]$ (長基線原子炉 ν , 太陽 ν)
Δm_{31}^2	$2.45 \pm 0.09 / - (2.34^{+0.10}_{-0.09}) [10^{-3} \text{ eV}^2]$ (長基線加速器 ν , 大気 ν)

である。2002年にはすべての太陽ニュートリノ実験 (SK, SNO, デービス実験, ガリウムを使った実験) の結果を統合して、振動パラメータの解は「大角度解」*1 であるという示唆を得た。そして、2002年12月にはKamLAND実験が、原子炉からのニュートリノを使って、高い精度で大角度解を確認した。⁶⁾ 質量の大小については、太陽の物質効果を使って、 Δm_{21}^2 が正であること、つまり $m_2 > m_1$ であることがわかっている。

ニュートリノ研究は加速器を使った人工ニュートリノ実験によっても進展した。1999年から2004年までデータを取ったK2K (KEK to Kamioka) 実験は、大気ニュートリノ振動、つまり θ_{23} と Δm_{32}^2 による振動を確認した。⁷⁾ また、2005年から始まったアメリカのMINOS実験は Δm_{32}^2 の精度を向上させた。

残されていた混合角 θ_{13} も最近1年の間に確定した。まず、T2K実験 (東海J-PARCから神岡SKへの人工ニュートリノ実験) が2011年6月に有限の θ_{13} を 2.5σ レベルで示唆する結果を出し、⁸⁾ 2011年11月には短距離原子炉ニュートリノ実験であるDouble Chooz実験が有限値を示唆した。⁹⁾ そして、2012年3月には中国のDaya Bay実験が 5.2σ レベル、¹⁰⁾ 同年4月には韓国のReno実験が 4.9σ レベル¹¹⁾ で有限の θ_{13} を発表した。

このようにわかってきたニュートリノ振動パラメータのまとめを表1に示す。残された振動パラメータはCPフェーズであるが、これはJ-PARCから1メガトンの実験装置 (Hyper-Kamiokande) へといった将来の大型人工ニュートリノ実験が目指す研究テーマとなっている。

3. 今後の低エネルギーニュートリノによる天体物理学

前節に述べたように、太陽ニュートリノ問題はニュートリノ振動の効果を入れることによっていったんは解決したが、最近正確に測定されてきた太陽表面での重元素の存在比を入れると対流層の深さなどの値が合わないといった新たな問題が浮上してきている。こうした問題の解決のためには、CNOサイクルニュートリノの測定など、さらなる太陽ニュートリノの測定が切望されている。

*1 Δm^2 が 10^{-5} – 10^{-4} eV^2 のあたりで $\sin^2(2\theta)$ が0.5以上の解。太陽ニュートリノ問題を説明する解のひとつとしてあげられていた。

SN1987Aからのニュートリノによって超新星爆発の基本的なシナリオは証明されたが超新星爆発にはまだ謎が多い。例えば、知りえる限りの物理過程を入力した爆発シミュレーション計算でも爆発に成功していない。SN1987Aでは全部で24個の事象しか観測できなかったが、我々の銀河で超新星爆発が起きればSKで8,000事象ものニュートリノが期待でき、爆発過程の詳しい観測が期待できる。こうしたデータは、爆発シミュレーションの問題を解く鍵になるに違いない。また、宇宙の初めから蓄積されてきた超新星ニュートリノ (Supernova Relic Neutrino (SRN) と呼ばれる) を観測するために、SKにガドリニウムを溶かして中性子の同時計測を行うプロジェクトの開発研究も進められている。SRNが観測できれば、数多くの超新星爆発を平均したニュートリノエネルギーを測定することができる。また、SRNの観測数から爆発頻度を求めることができ、近年問題となっている星生成率から予測される爆発頻度と光学観測による爆発頻度との違い¹³⁾ について、新たな知見を与えることができる。

4. 高エネルギー宇宙をニュートリノで探る

ニュートリノが弱相互作用素粒子であるという特性は、高エネルギー領域、具体的には $\text{TeV} (= 10^{12} \text{ eV})$ 以上の帯域で宇宙を探索するという手段としても極めて有効である。通常、宇宙を調べるメッセンジャーである光は、高エネルギー帯では宇宙空間を満たしている背景光子場*2との衝突が免れないため、宇宙空間を隅々まで見渡すことができない。 $\text{PeV} (= 10^3 \text{ TeV})$ では、光は銀河系程度の大きさしか走ることができないことが知られている。ニュートリノにはこのような限界が無く、我々の銀河系、さらにはそれが属する銀河団を遥かに超えた遠方宇宙を探索することが可能である。さらにもう一つの大きな利点として、ニュートリノは高エネルギー宇宙線の産物であることが挙げられる。このような高エネルギー領域でニュートリノが生成されるとするならば弱崩壊をする中間子 (パイ中間子が代表的な例) が相対論的粒子として存在する必要がある。ほぼ唯一考えられる現実的機構は、高エネルギー宇宙線がマターあるいは輻射場と衝突して中間子を生成する場合である。つまり高エネルギーニュートリノがあるところ、それはすなわち高エネルギー宇宙線が存在するところ、ということになる。高エネルギーニュートリノの検出は長年の謎である宇宙線起源を解明する有力な手段である。

この考えの元は古く、既に1960年にKenneth GreisenとFrederick Reinesがそれぞれ独立に指摘している。¹⁴⁾ 1973年に端を発する深海の水を使うDUMMANDプロジェクト (当時の技術的な障壁により1995年に中止に至る)、1980年代にその最初のコンセプトが議論され、小規模な検出器

*2 ビッグバン由来のマイクロ波や、赤外線や可視光など星の放射によって形成されている輻射が宇宙を霞のように満たしている。最近では銀河系外背景光—Extra-galactic Background Lightとも総称される。

が埋設されたLake-Baikal実験, および南極の氷河を利用するAMANDA実験を経て, 21世紀になってようやく後述するアイスキューブ実験によって必要な感度を持った観測が開始され, ここに至るまでに数十年という時間を要した. 流量が極めて低いニュートリノを検出するために必要な莫大な容積を持つ検出器を建設・運転するために要求される技術と予算が不足していたためである. 宇宙線発見後100年を経て, 我々はニュートリノを介して宇宙線起源を探ることが可能になった幸せな時代に生きていると言える.

5. アイスキューブ実験

アイスキューブ (IceCube) 実験は南極点直下の深氷河を衝突標的兼チェレンコフ放射体として用いて1 km³の検出容量を持たせたニュートリノ検出器である.¹⁵⁾ 測定原理は水と氷の違いはあるものの, スーパーカミオカンデと同じである. ただし, 検出容量はスーパーカミオカンデの約2万倍である. その代わり自然の氷河を使うため測定精度の精密さには限界があり, 氷河内の不純物や気泡によりチェレンコフ光が散乱されながら検出器に届くためチェレンコフリングの個数やそのイメージからニュートリノフレーバーを識別するような芸当はできない. 大きいことはいいことだをモットーにした昔のアメ車のような実験である. 2002年に国際コラボレーションが結成され, 2005年より本格的な建設が開始され2010年12月に建設が終了した. 2011年5月よりフル稼働して継続的な観測が行われている.

エネルギーが高くなるとニュートリノの衝突断面積は増えるため, 検出器を埋設している場所に届く前にニュートリノが地球内で相互作用を引き起こす確率は増える. この結果生じたミュー粒子が, 極限の高エネルギー領域 ($\geq \text{EeV} = 10^{18} \text{ eV}$) ではタウ粒子さえもが1キロメートル以上も走りながらレンジアウトすることなく検出器に届きうる. このため実質的な衝突容量は検出器を埋設している容積よりも大きく, この増大量はエネルギーとともに増える. このためアイスキューブ実験で探索・検出を狙う宇宙ニュートリノのエネルギーは下はTeVから上はEeV以上まで, 6桁以上にもわたる. これほどのダイナミックレンジをカバーする宇宙物理・天文学の実験は他になく, 高エネルギーニュートリノ望遠鏡としての大きな特徴の一つである.

6. 高エネルギー宇宙線起源に対するニュートリノ観測からの制限

アイスキューブ実験では完成前からその時点で埋設された検出器群を用いた部分運転を実施してデータを取得してきた. 2008-2010年に5割から7割の検出器が稼働した時期のデータを元にした解析結果が公表されている. 以下に要約する.

- ニュートリノ放射の点源探索では有意な天体は見つかっていない. 感度中心のエネルギーは2-3 TeVである.¹⁶⁾
- γ 線バースト天体に同期したニュートリノ信号は今のと

ころ検出されていない. 高エネルギー宇宙線が γ 線バースト天体から放射されるという一時有力であった説はその修正を余儀なくされている.¹⁷⁾

- O(100 TeV)-O(PeV)領域での宇宙ニュートリノ全流量は上限値が得られており, (銀河系外)宇宙線加速天体として光学的に薄くニュートリノを生成するような衝突物質あるいは輻射場を持たないものが少なくとも一定数存在することを示唆する.¹⁸⁾

- PeV以上の超高エネルギー宇宙ニュートリノ探索は先行して2012年5月までの最新データまで解析が進行しており, その結果EeV($=10^{18} \text{ eV}$)以上の事象が見つかっていないことから, 超高エネルギー宇宙線の素粒子物理的起源説を完全に否定するとともに, 有力な起源候補天体であった大輝度電波銀河を放射源として想定する考え方にも大きな制約を与えている.^{19,20)}

これらは, アイスキューブ実験の部分観測データによって実現した感度では高エネルギー宇宙ニュートリノが検出されていないという結果からの帰結であるが, いずれも荷電宇宙線を直接測定する実験では導き出すことが困難な知見である. ニュートリノをプローブにして宇宙線起源を探ることの重要性を物語っている.

なお最後の項目である超高エネルギー領域では, 大気ニュートリノバックグラウンドに卓越してPeVのエネルギーを持つニュートリノ事象が2事象検出されたことが2012年6月に開催されたニュートリノ物理・宇宙物理国際会議で報告された. この結果については筆者も深く関わり, 宇宙線起源に迫る突破口であると考えているが, その詳細については紙面数の都合もあり別の機会にご報告したい.

7. まとめ

SN1987Aによるニュートリノ天文学の幕開けから25年の歳月がすぎたが, その間にニュートリノの素粒子研究が目覚ましい勢いで進展した. ニュートリノ振動の研究によって, 質量差や混合角が測定されてきた. まだ, 質量階層性, CPフェーズは解明されていないが, ニュートリノという「プローブ」がどのようなものなのかは, かなりよくわかってきた. MeVニュートリノによる超新星や太陽の物理, TeV-EeVニュートリノによる高エネルギー宇宙線の起源を中心課題に, 今まさにニュートリノというプローブによる宇宙物理学・天文学が本格的に始まろうとしている.

参考文献

- 1) K. Hirata, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **58** (1987) 1490.
- 2) R. M. Bionta, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **58** (1987) 1494.
- 3) E. N. Alexeyev, *et al.*: Phys. Lett. B **205** (1988) 209.
- 4) Y. Fukuda, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **81** (1998) 1562; 梶田隆章: 日本物理学会誌 **58** (2003) 326.
- 5) 中畑雅行, 鈴木洋一郎: 日本物理学会誌 **57** (2002) 171.
- 6) 鈴木厚人: 日本物理学会誌 **58** (2003) 343.
- 7) 西川公一郎: 日本物理学会誌 **58** (2003) 332.
- 8) K. Abe, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **107** (2011) 041801; 安田 修: 日本物理

学会誌 66 (2011) 810.

- 9) Y. Abe, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **108** (2012) 131801.
- 10) F. P. An, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **108** (2012) 171803.
- 11) J. K. Ahn, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **108** (2012) 191802.
- 12) T. Schwetz, *et al.*: New J. Phys. **13** (2011) 063004.
- 13) S. Horiuchi, *et al.*: Astrophys. J. **738** (2011) 154.
- 14) K. Greisen: Ann. Rev. Nucl. Sci. **10** (1960) 63; F. Reines: Ann. Rev. Nucl. Sci. **10** (1960) 1.
- 15) 吉田 滋: 日本物理学会誌 **59** (2004) 358.
- 16) R. Abbasi, *et al.*: Astrophys. J. **732** (2011) 351.
- 17) R. Abbasi, *et al.*: Nature **484** (2012) 351.
- 18) R. Abbasi, *et al.*: Phys. Rev. D **84** (2011) 082001.
- 19) R. Abbasi, *et al.*: Phys. Rev. D **83** (2011) 092003.
- 20) S. Yoshida and A. Ishihara: Phys. Rev. D **85** (2012) 063002.

著者紹介



中畑雅行氏: 神岡宇宙素粒子研究施設にて、太陽ニュートリノ、超新星ニュートリノ、暗黒物質探索等の研究を行っている。



吉田 滋氏: 専門は宇宙線物理学、ニュートリノ天文学。IceCube 実験に参画し、ニュートリノを介して宇宙線起源を同定することを目指している。

(2012年7月5日原稿受付)

What Can We Learn with Neutrinos?

Masayuki Nakahata and Shigeru Yoshida

abstract: 2012 is the 25th year from the observation of SN1987A with which the neutrino astronomy was born. Our understanding of neutrinos has been drastically changed in the last 25 years. The discovery of neutrino oscillations by atmospheric neutrinos showed that neutrinos have masses, and the solar neutrino problem was solved by neutrino oscillations. Accelerator and reactor neutrino experiments were also performed. For the astrophysics probed by neutrinos, the SN1987A signals confirmed the basic scenario of the supernova explosion and the prediction of solar neutrino fluxes agree with model prediction once we correct for the effect of neutrino oscillations. The origin of cosmic rays can also be investigated by search for high energy cosmic neutrinos. The IceCube neutrino observatory has been in its full operation since 2011 and we began constraining some models of cosmic ray production mechanisms.

重力波検出：一般相対論の直接検証なるか

藤本 眞克 ◇

アインシュタインが一般相対論で予言した重力波の直接検出は実現まであと一步のところまで来ている。現在建設が進められている KAGRA^{*1}をはじめ Advanced LIGO や Advanced VIRGO が目標感度で運転を開始すれば、数年間の観測で連星合体による重力波を検出する可能性は高い。重力波検出の簡単な歴史とこの10年間の大型レーザー干渉計による重力波探査で得られた結果のいくつかを紹介する。

1. はじめに

アインシュタインが一般相対論により重力波の存在を予言して間もなく100年を迎えようとしている。

重力波の存在は、連星パルサーの公転周期の減少が重力波放出による軌道運動エネルギーの変化で説明できることから、間接的には検証されたと考えられている。¹⁾ 重力波を直接検出することで偏波や振幅、伝播速度などの情報が得られれば、一般相対論のより詳しい検証が可能となる。²⁾ さらに重力波は天体や宇宙の新しい観測手段となることも期待されており、直接検出への期待は大きい。³⁾

これまでに本誌でも重力波検出装置に関する記事が何度か掲載されていることから、⁴⁻⁶⁾ 本稿では重力波検出に関

する歴史を簡単に振り返った後で重力波探査の現状と今後の見通しを中心に解説する。

2. 重力波検出実験の歴史

1960年頃になって重力波検出に最初に取り組んだのは米国の Weber である。彼は重力波通過によって弾性体に生じる歪み応力をピエゾ素子で電気信号に変えて測ろうとした。そして1,000 km 離して置かれた2台の装置が同時に励振するのを観測して、重力波検出の証拠であると1969年に発表した。その直後から世界各地で追試のための実験が計画され実行された。しかしながら、Weberの装置より高感度と考えられる装置によっても肯定的な結果は得られず、1970年代半ばには Weber の現象は重力波によるものではないとの見解が大勢となったのである。しかしながら、こ

^{*1} Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope (LCGT) に付けられたニックネーム (2012年1月公開)。

の間に重力波検出についての真剣な検討が行われた結果、重力波検出は困難ながらも原理的に実現可能なものと認識されるようになり、実現を目指して研究が続けられてきたのである。

3. 共振型重力波検出器

Weberの追試の否定的結果をうけて、天文学的に予想される現実的な重力波を検出するためには検出装置の高感度化が不可欠であることが認識され、弾性体アンテナの大型化、低温化および機械的損失の低減化が進められた。また重力波によりアンテナに生じる変位や加速度などの検出器自体も高感度化が進められ量子限界に近いものが開発された。1980年代の半ば頃には重力波検出器として安定で定常的な長時間運転が可能となった。1990年代にはイタリア、オーストラリアと米国の4台の低温検出器が出そろい、国際観測網を形成して振幅^{*2}で 10^{-19} より大きい重力波パルスの探査観測を行った。⁷⁾ しかしながら重力波の検出には至らず、2000年代に入ると重力波検出計画の主力はより高感度なレーザー干渉計型重力波検出器に移っていった。

4. レーザー干渉計型重力波検出器

マイケルソン干渉計を重力波検出に利用するアイデアは1960年代にすでに発表されていたが、Weberの発表をうけて具体的な検討が真剣になされるようになった。⁸⁾ 共振型検出器が主流であった中で開発努力が続けられ、レーザー光の干渉を利用した測定での原理的雑音のひとつであるショット雑音限界で動作する重力波検出用レーザー干渉計の実験に成功したのは1980年代中旬であった。⁹⁾ これに力を得て重力波検出用の大型レーザー干渉計の建設計画が世界各国で提案されるようになり、TAMA300¹⁰⁾ やGEO600,¹¹⁾ LIGO,¹²⁾ VIRGO¹³⁾ などが1990年代半ばに建設を開始して2000年頃からは相次いで重力波探査のための長時間運転に成功したのである。運転を開始した大型レーザー干渉計はいずれもショット雑音で決まる感度での運転を目指したもので、第一世代の装置と呼ばれる。

5. 重力波検出研究で深まった基礎物理学

重力波検出装置で究極の感度を達成しようとするときに原理的な雑音として問題となるのが、熱雑音と量子雑音である。量子雑音については1980年頃から量子力学で現れる不確定性と重力波検出の感度限界との関係の議論がはじまった。^{14,15)} さきに述べたショット雑音のほかに光子数ゆらぎに伴う輻射圧雑音が影響するため、ハイゼンベルグの不確定性原理で決まる標準量子限界を超えて感度を高めることが可能かどうかという問題提起であった。その議論は量子光学や量子情報の分野も巻き込む論争となったが、重力波検出で標準量子限界を超える量子非破壊測定が可能で

あると2000年代のはじめにほぼ決着した。¹⁶⁾

もう一つの熱雑音についても重力波検出装置への適応にあたって新たな知見が2000年代に入って得られた。ミラーにレーザー光線が当たる箇所は、ミラーを吊るしている振り子の熱振動とミラー自身の弾性体としての熱振動の影響で局所慣性系に対して位置変動しており、これらが熱雑音として感度に影響する。ところが重力波信号の周波数帯はそれら振動の共振周波数から離れているため、熱振動の周波数スペクトルの形が重要である。それらは熱雑音を引き起こす損失機構によって変わりうるため、共振周波数から離れた周波数帯で熱振動を測る必要がある。¹⁷⁾ また、振動をモード展開してモードごとの損失を考えるとという共振型検出器で行われてきた方法にも問題があることが分かった。振動体内部で損失が主に働く箇所と光線が当たる場所が違くと熱振動の大きさがモード展開によるものと異なるため、揺動散逸定理^{*3}にもとづく新たな定式化が必要であった。¹⁸⁾

6. 第一世代検出装置の成果

2000年代に入ってから約10年間で、第一世代の大型レーザー干渉計はそれぞれ感度と安定度を向上させながら重力波探査のための観測運転とデータ解析を行ってきた。最近までの重力波探査データを解析して得られた結果をいくつか紹介する。

6.1 連星の合体

中性子星やブラックホールの連星が重力波を放出しながら次第に近づき最終的に合体する現象は、地上の装置に適した周波数帯で強い重力波が期待でき、波形予測も可能で最適フィルタリングによるS/N比の向上が望めることから、最も検出が期待できる重力波源と考えられている。

LIGOとVIRGOによる最近の結果を表1にまとめた。¹⁹⁾ 検出感度を1桁向上して観測を1年間行くと、観測範囲が体積で3桁増すので連星合体頻度の期待値の範囲に十分入るため、実際に検出される確率は非常に高いことが見てとれる。これがAdv.LIGO,¹²⁾ Adv.VIRGO¹³⁾ やKAGRA^{6,20)} といった現在進行中の第二世代検出器の目指すところであり、非常に高い確率で重力波検出が期待できる。

6.2 重力波バースト

超新星爆発やガンマ線バースト、マグネターなどからも

表1 連星合体発生頻度の観測上限値と理論的期待値。¹⁹⁾ (中性子星: NS, ブラックホール: BH)

連星のタイプ	NS-NS	NS-BH	BH-BH
各星の質量 (太陽質量単位)	1.35/1.35	1.35/5.0	5.0/5.0
観測限界距離 (Mpc)	40	80	90
発生頻度の上限値 ($\text{Mpc}^{-3}\text{y}^{-1}$)	1.3×10^{-4}	3.1×10^{-5}	6.4×10^{-6}
発生頻度の期待範囲 ($\text{Mpc}^{-3}\text{y}^{-1}$)	10^{-5} - 10^{-8}	10^{-6} - 10^{-9}	$10^{-6.5}$ - 10^{-10}

^{*3} 熱力学的平衡にある系のゆらぎと力学的応答を関係づける統計力学の定理。

^{*2} 重力波の振幅 (強さ) は歪みの大きさ (無次元量) で表される。

重力波が放出される可能性があり、重力波探査データから波形が未知のバースト的信号を探す解析も行われている。いくつかの典型的なバースト波形に対して発生頻度の上限值が求められており、LIGOとVIRGOのデータを使った全天サーベイで、ピーク振幅が 10^{-21} より大きい重力波の出現頻度が1年間に数回以下という値が得られている。²¹⁾ 重力波バーストの検出可能性に関しては、波形や振幅および周波数帯など様々な不確実な要素があるため、ほかの観測手段との連携が強く求められており、実際すでに連携したデータ解析なども行われている。

6.3 連続重力波

パルサーは自転する中性子星であるが、軸対称からずれた質量分布があれば重力波を放出している可能性がある。かにパルサーからの重力波探査は1970年代から80年代にかけて共振型検出器を用いて日本で行われたが、自転周期の変化がすべて重力波放射によるものと仮定した場合の重力波振幅 (Spin-Down limit: 以下SD) に比べておよそ3桁大きい上限値を与えたと留まっていた。²²⁾ レーザー干渉計が動き始めて上限値が徐々に下がっていき、2008年にSDを下回る上限値が得られるようになった。最近のLIGOのデータ解析では重力波振幅でSDの1/5以下、回転対称からのずれを回転楕円体で表したときの楕円率で 10^{-4} 程度の上限值が得られ、中性子星の状態方程式など物性に対しても有用な情報がもたらされるようになってきた。²³⁾ 帆座パルサーについても日本のレーザー干渉計CLIOによる観測的上限值が与えられていたが、²⁴⁾ 最近になってSDを下回る上限値も報告されている。²⁵⁾

7. 重力波検出実現にむけて

第一世代検出器は残念ながら幸運に恵まれず重力波検出には至っていないが、いくつかの重力波源について物理的に意味のある上限値を得るところまで到達した。前節で述べた連星合体からの重力波を高い確率で検出しようとする第二世代検出器では標準量子限界に達するか超える高感度を実現することが求められる。そのための熱雑音と量子雑音の低減法や振動対策などはプロジェクトごとに特色を持ちながら計画を進めている。それぞれの計画は互いに競争しながらも、技術情報や進行状況は原則的に公開して互いの経験や成果を取り入れるなど協力して重力波検出という困難な課題に立ち向かっている。確実に重力波の検出を主張するためにも複数の装置による相互確認は重要であり、その後の重力波天文学には地球規模の観測網が不可欠であることから、データ共有やデータ公開についての議論も進められている。第二世代の重力波検出器が完成し目標感度を達成するのはおよそ5年後と想定されるため、10年以内に重力波検出が実現する可能性は極めて大きいであろう。

参考文献

- 1) J. H. Taylor, L. A. Fowler and P. M. McCulloch: *Nature* **277** (1979) 437.
- 2) C. M. Will: *Living Rev. Relativity* **9** (2006) 3. [Online Article]: <http://www.livingreviews.org/lrr-2006-3>.
- 3) 中村卓史, 藤本真克: *日本物理学会誌* **45** (1990) 2.
- 4) 坪野公夫: *日本物理学会誌* **54** (1999) 328.
- 5) 黒田和明, 河邊径太: *日本物理学会誌* **62** (2007) 659.
- 6) 川村静児: *日本物理学会誌* **66** (2011) 841.
- 7) P. Astone, *et al.* [International Gravitational Event Collaboration]: *Phys. Rev. D* **68** (2003) 022001.
- 8) R. Weiss: Progress Report, Research Laboratory of Electronics, MIT **105** (1972) 54.
- 9) D. Shoemaker, R. Schilling, L. Schnupp, W. Winkler, K. Maischberger and A. Ruediger: *Phys. Rev. D* **38** (1988) 423.
- 10) 藤本真克: *応用物理* **74** (2005) 736.
- 11) <http://geo600.aei.mpg.de/>
- 12) <http://www.ligo.caltech.edu/>
- 13) <https://www.wiscascina.virgo.infn.it/>
- 14) C. M. Caves, K. S. Thorne, R. W. P. Drever, V. D. Sandberg and M. Zimmermann: *Rev. Mod. Phys.* **52** (1980) 341.
- 15) C. M. Caves: *Phys. Rev. D* **23** (1981) 1693.
- 16) H. J. Kimble, Y. Levin, A. B. Matsko, K. S. Thorne and S. P. Vyatchanin: *Phys. Rev. D* **65** (2001) 022002.
- 17) K. Numata, M. Ando, K. Yamamoto, S. Otsuka and K. Tsubono: *Phys. Rev. Lett.* **91** (2003) 260602.
- 18) K. Yamamoto, M. Ando, K. Kawabe and K. Tsubono: *Phys. Rev. D* **75** (2007) 082002.
- 19) J. Abadie, *et al.* [The LIGO Scientific Collaboration and The VIRGO Collaboration]: *Phys. Rev. D* **85** (2012) 082002.
- 20) <http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/>
- 21) J. Abadie, *et al.* [The LIGO Scientific Collaboration and The VIRGO Collaboration]: *Phys. Rev. D* **81** (2010) 102001.
- 22) T. Suzuki: *Proc. First Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Wave Experiments*, ed. E. Coccia (River Edge: World Scientific, 1995) p. 115.
- 23) B. P. Abbott, *et al.* [The LIGO Scientific Collaboration and The VIRGO Collaboration]: *Astrophys. J.* **713** (2010) 713.
- 24) T. Akutsu, *et al.*: *Class. Quantum Grav.* **25** (2008) 184013.
- 25) J. Abadie, *et al.* [The LIGO Scientific Collaboration and The VIRGO Collaboration]: *Astrophys. J.* **737** (2011) 93.

著者紹介



藤本真克氏: 専門は重力波天文学。検出実験に長年従事。最近は弱値測定の重力波検出器への適用の可否を検討中。

(2012年5月21日原稿受付)

Detection of Gravitational Waves Comes True Soon?

Masa-Katsu Fujimoto

abstract: Second-generation laser interferometric detectors are currently under construction and are expected to detect gravitational waves directly within ten years hereafter. Their strain sensitivities will be about one order of magnitude better than those of the first-generation detectors which have been operated in the 2000s. Briefly reviewed are the early history of the detectors, some significant progress in the knowledge of fundamental physics obtained from the development of the detectors, and some new upper-limits obtained from the surveys of gravitational waves by the first generation detectors.

素粒子・宇宙論に挑む宇宙線反粒子観測

吉村 浩司
山本 明

〈高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所 305-0801 つくば市大穂1-1〉

〈高エネルギー加速器研究機構・超伝導低温工学センター 305-0801 つくば市大穂1-1〉

地球に降り注ぐ粒子宇宙線の中の大部分は陽子やヘリウム原子核などの通常の「粒子」であるが、極めて微量の「反粒子」が含まれていることがわかっている。我々の周りの世界は物質優勢であり「粒子」で構成されているため、これらの「反粒子」は宇宙で起きている素粒子現象あるいは宇宙の進化の過程で生成され生き残ったものということになる。宇宙線の中に「反粒子」を探そうという試みは1960年頃から始まり、気球、人工衛星、宇宙ステーションに搭載された観測装置により、精力的に行われてきた。本稿では、宇宙線反粒子をプローブとして素粒子・宇宙論に挑んできた歴史を振り返りながら、近年、急速に解明が進んだ宇宙線反粒子観測の結果と今後の展望を俯瞰する。

1. 宇宙線の中の反粒子

地球には宇宙から数多くの粒子宇宙線が降り注いでいる。これらは、超新星爆発やパルサーなどで加速され、銀河内の磁場の擾乱で散乱され数千年かけて銀河系内を漂いながら、そのうちの一部が太陽圏に突入し地球に到達したものである。その組成を詳しく調べてみると、大半は陽子およびヘリウム原子核、電子などの「粒子」であり、「反粒子」は極めて微量しか含まれていない。この事実は我々の周り物質優勢であり、物質-反物質の対称性の破れに対する最も直接的な証拠となっている。

では、宇宙線の中の反粒子の起源は何だろうか？ 図1に示すように、反粒子のうち最も軽い原子核である反陽子は一次宇宙線（陽子、ヘリウム原子核が主）が銀河内を伝播する間に星間ガスとの衝突により、二次的に生成されると考えられている。その流束は標準的な宇宙線伝播モデルにより精度よく求められており、衝突反応の運動学的な理由により、1 GeV以下の低エネルギーの反陽子の生成は強く抑制されている。一方、暗黒物質の対消滅や崩壊、あるいは宇宙初期の重力の激しい擾乱により生成された原始ブラックホールの蒸発などからも反陽子が放出される可能性

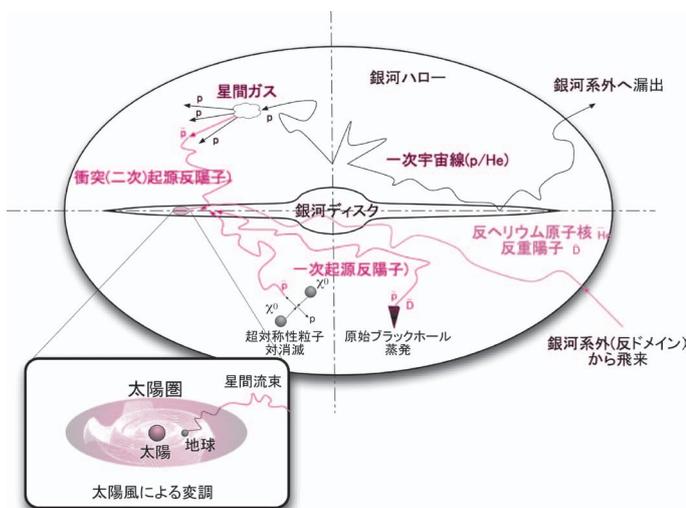


図1 宇宙線反粒子は宇宙空間のどこかで生成され、長い旅の末、地球に到達する。詳しく調べることで、宇宙空間で起きている様々な現象を知ることができる。

が指摘されている。これら一次的な起源を持つ反陽子は低エネルギーでの運動学的な抑制を受けないため、衝突起源の反陽子と区別できる可能性がある。

また、反ヘリウム原子核に関しては、星間での衝突で生成される確率が極めて低く、もし一例でも検出されれば、初期宇宙に起源があると考えられる。物質-反物質の非対称性は、宇宙初期の超高エネルギー状態におけるCP非保存、バリオン数の破れに起因しており、宇宙初期に反陽子が消滅した結果と解釈されているが、もしその破れが局所的なものであった場合、物質と反物質が隔離されたドメイン構造をしている可能性も指摘されている。反ヘリウムの探索は、反ドメインの存在の直接的な検証となる。

さらに、宇宙線反粒子は生成された後、銀河内あるいは太陽圏を伝播し地球に到達するまでに様々な物理現象の影響を受ける。そのエネルギースペクトルは経験した履歴を反映しているため、宇宙線の伝播モデル、太陽変調を理解する上でも、非常に重要な宇宙線の基礎データとなっている。

2. 先駆的研究

上に述べたように、宇宙線反粒子は非常に興味深い存在であったが、その流束は極めて小さく、検出するのは容易ではなかった。大きな面積立体角（アクセプタンス）を持つ測定器で、長時間観測を行わなければならない。しかも、厚い大気と衝突をして、対消滅してしまうので、観測装置は気球等の飛行体を用い、ほとんど大気がない高空まで持ち上げる必要があった。また、膨大な流束で降り注ぐ一次宇宙線との判別は、反粒子が原子核と反応して消滅するトポロジーを見るか、あるいは磁場で偏向した飛跡をとらえて、負電荷を持つことを示す必要があった。

このような困難な実験状況のもとで、気球に搭載された原子核乾板（エマルジョン）を用いて宇宙線反粒子の探索が行われたのは、1955年に反陽子が加速器実験で発見されて¹⁾から間もない1957年のことであった。²⁾当初は粒子識別の限界により低エネルギーに限られていたが、Alvarezの提案³⁾により、気球に搭載可能な超伝導磁石を用いて、強磁場中での荷電粒子の偏向の度合いからRigidity（運動量を電荷で割ったもの）を精度よく測定することにより

エネルギーを精密に決定することができる磁気スペクトロメータが開発され、高エネルギーでの観測が可能になった。そして、1979年のGoldenによる超伝導磁石を用いた観測により初めて宇宙線反陽子の観測結果が示され、Bogomolov, Buffingtonらもほぼ同時期にそれぞれ、永久磁石を用いたスペクトロメータによる観測、スパークチェンバーによる対消滅の観測により、宇宙線反陽子の存在を報告した。⁴⁾ 報告された反陽子/陽子流束比は標準的な宇宙線伝播モデルから予測されるものよりも高く、特にBuffingtonの結果は数桁も上回る衝撃的なものであった(図2)。これらの結果を説明すべく、様々な理論モデルが提唱されたが、中でも注目されたのは、超対称性粒子で構成された暗黒物質が対消滅を起こすというモデルであった。

これらの観測結果を確認するために様々な観測実験が行われたが、その大きな流れを作ったのが、当時の宇宙線研究者が結集して提案したASTROMAG計画である。⁵⁾ 宇宙ステーションに巨大なスペクトロメータを建設し、反陽子、反ヘリウムをはじめ様々な宇宙線を究極の精度で観測する

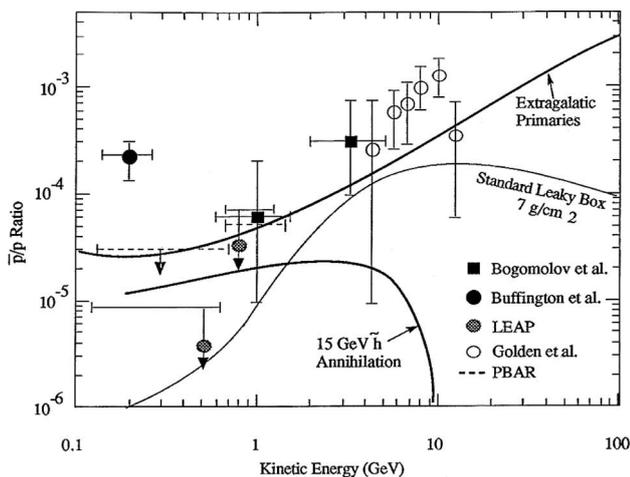


図2 1980年代の反陽子/陽子比の観測結果。¹⁰⁾

表1 宇宙線反粒子観測に関する年表。

年	出来事
1955	ベバトロン加速器を用いた反陽子の発見
1961	宇宙線反陽子の初めての探索結果
1964	Alvarezによる超伝導スペクトロメータの提案
1979	Goldenによる初めての宇宙線反陽子観測の報告
1979	Bogomolovによる反陽子報告
1981	Buffingtonによる低エネルギー宇宙線反陽子
1985	ASTROMAG, BESSの提案
1987	LEAP, PBARによる低エネルギー反陽子上限值
1992	IMAXによる質量の同定による反陽子の観測
1993	BESSによる低エネルギー反陽子の観測
1997	太陽活動極小期における反陽子流束
1998	スペースシャトルによるAMS-01の観測
2004	第1回南極周回飛行実験BESS-Polar I
2006	PAMELA打ち上げ
2007	第2回南極周回飛行実験BESS-Polar II
2009	PAMELAによる反陽子/陽子流束比
2010	PAMELAによる反陽子流束
2011	AMS-02打ち上げ
2011	BESS-Polar IIによる反陽子流束測定結果
2012	BESS-Polarによる反ヘリウムの探索結果

計画であった。残念ながら、スペースシャトル事故等の影響もあり、プロジェクト自体はキャンセルされたが、そこで検討された技術の多くはIMAX,⁶⁾ CAPRICE,⁷⁾ BESS⁸⁾等の気球実験として数多くのスピナウトを果たし、宇宙線反粒子や同位体元素の測定に大きく貢献した。そして、その積み重ねが20年後に、BESS-Polar, PAMELA, AMS実験⁹⁾へと繋がっていくことになる。表1に宇宙線反粒子観測に関する主な出来事を年表としてまとめた。

3. 気球搭載型超伝導スペクトロメータ—BESS

Buffingtonが報告した桁違いに大きい低エネルギー反陽子流束は1980年代後半に行われたLEAP, PBAR実験により否定されつつあったが、¹⁰⁾ いずれの実験も面積立体角が小さく、上限値を報告するのみであった。また、Goldenの報告した高エネルギーのデータも負電荷の電子との識別に閾値型チェレンコフカウンタを用いたもので、積極的に反陽子と同定したものではなかった。特に流束が小さい低エネルギーの反陽子を観測するためには、従来より桁違いに大きい面積立体角を有するスペクトロメータと優れた粒子識別装置を持つ測定器が必要であった。

当時、気球搭載型として開発されていた超伝導磁石は物質質量が大きく、低エネルギー粒子が透過できないため、コイルの横に飛跡検出器を置いて、外部の磁場(漏れ磁場)を利用する方法が主流であった。このため、使用可能な磁場空間は不均一で小さく、測定器の面積立体角は小さいものに限られていた。

低エネルギーの宇宙線は超伝導磁石を透過することができないという固定観念を打ち破ったのが、アルミ安定化超伝導線を用いた薄肉ソレノイドである。¹¹⁾ コイルの物質質量を極限まで低減することにより(最新のBESS-Polar用のもので1 g/cm²: 厚さ3.4 mmのアルミ板相当)、粒子透過性を高め、低エネルギー粒子の通過を可能にした。これにより、大型の飛跡検出器をソレノイド内部の均一な磁場空間に配置して、衝突型加速器の検出器と同様の同心軸状の円筒構

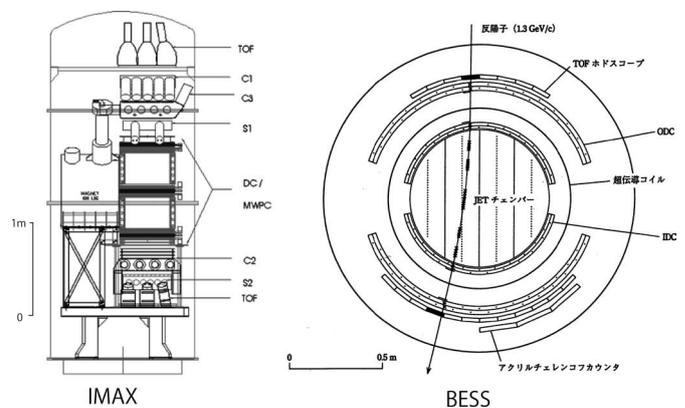


図3 質量の同定という確実な方法で宇宙線反陽子を同定したIMAX測定器とBESS測定器の断面図。重量、サイズは同程度であるが、面積立体角はBESSの方が30倍大きい。図中には実際に観測された反陽子事象の候補が示されている。

造をとることにより、 $0.4 \text{ m}^2 \text{ sr}$ という従来の測定器の数10倍の面積立体角を実現した(図3)。故折戸周治氏のグループが加速器実験で培ってきた測定器技術と山本(著者)のグループが開発した薄肉超伝導マグネット技術がうまく融合して、気球搭載型超伝導スペクトロメータ BESS (Balloon-borne Experiment with a Superconducting Spectrometer) が誕生した。

1987年に共同研究を開始し、BESS測定器を開発して、紆余曲折の準備作業を経て、1993年にカナダ北部で初めての飛行実験に成功した。約2トンのBESS測定器がNASAの巨大気球(上空で直径170 mに膨らむ)により36 kmの高空に持ち上げられ、残留大気が5 hPa(地上の0.5%)で観測を行い、宇宙から降ってくる反粒子を、質量の同定という方法で明確にとらえ、¹²⁾ 反ヘリウム原子核の探索を従来の10倍以上の感度で行うことができた。¹³⁾ 以後、ほぼ毎年、新たな検出器が付け加えられ測定器の改良を加えることにより観測対象を広げつつ気球による観測実験が続けられた。測定器を回収して、改良を加えながら、再び同じ測定器で観測を行うというサイクルで安価に実験が続けられるのが気球実験の特長である。また、低エネルギー宇宙線観測に影響を及ぼす太陽活動の様々なステージでデータを連続して取得でき、その影響を調べることができるのも大きなメリットの一つである。

BESS実験により、飛躍的に反陽子の測定精度が向上し、前々回の太陽活動極小期(1995年、1997年)に行われた観測BESS95+97により、高精度な反陽子流束(エネルギースペクトル)を得ることができた。¹⁴⁾ 得られたスペクトル

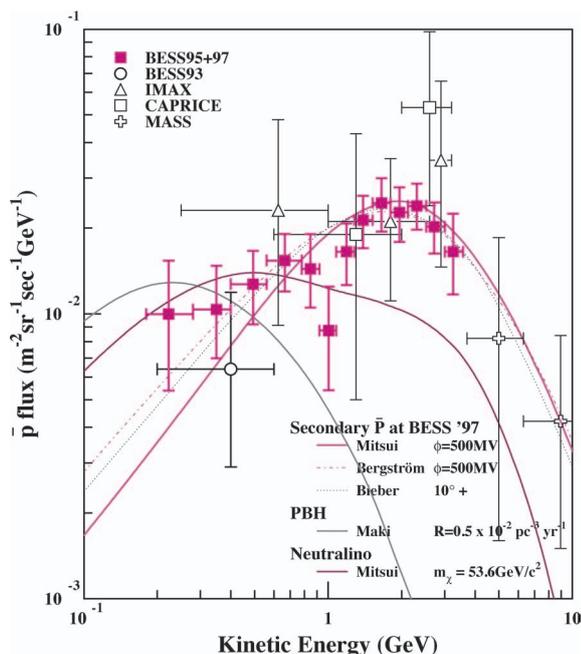


図4 前々回の太陽活動極小期に観測された反陽子の流束。¹⁴⁾ 横軸は運動エネルギー(エネルギーから静止質量エネルギーを除いたもの)である。2 GeV付近に衝突起源の反陽子から予測される特徴的なピークが認められた。1 GeV以下の低エネルギー領域ではスペクトルは平坦な形をしており、理論予測からのずれが見られる。

(図4)は一次宇宙線の星間ガスとの衝突から予測される曲線(2 GeV付近で特徴的なピークを持つ)とよく一致しているが、低エネルギー領域ではより平坦であるように見える。これは、あるいは超対称性粒子の対消滅、原始ブラックホールの蒸発等から生成された一次起源反陽子を示唆するものかもしれない。ただし、データの統計量が少なく、また理論計算に様々な不定性があるため、決定的なものとは言い難く、決着は次の太陽活動極小期でのさらに精度を向上させた観測に持ちこされることになった。

4. 長時間飛行体を利用した反粒子観測への進展

1990年代に実施された、BESS, IMAX, MASS等の実験による観測結果は、標準的な伝播モデルから予測される2 GeV付近のピーク領域の流束をよく再現し、観測された宇宙線反陽子の大部分は宇宙線の星間ガスとの衝突に起源を持つことが明らかになってきた。しかし、低エネルギー反陽子の起源、反陽子流束の精密データを用いた宇宙線伝播モデルの精密な検証、新たな素粒子現象の探索等、まだまだ反陽子をプローブとした課題は多く残っている。この解決のためには、飛躍的に統計精度をあげ、また、エネルギー範囲を広げた観測が必要であった。ゼロプレッシャー気球による、中緯度地域での飛行では長くても数日の観測しか行うことができず、すでに限界に近づいていた。そこで、より長い観測時間を求めて、衛星、国際共同宇宙ステーション(ISS)、長時間気球飛行実験を利用した観測実験、それぞれPAMELA, AMS, BESS-Polar実験へと展開していった(図5)。

PAMELA実験は、70°の傾斜角を持つ極軌道衛星に搭載された、永久磁石、シリコントラッカー、により構成され、優れた粒子識別能力と運動量分解能を持つ一方、面積立体角はBESSやAMSに比べ二桁小さい。PAMELA実験は、2006年に打ち上がり、以来データを順調に取り続け、数々のすばらしい成果を出した。中でも2009年に報告された陽電子比の異常な振る舞い¹⁶⁾は、驚きをもって受け止められ、多くの可能性が示唆された。一方、次節に示すように反陽子の流束には、宇宙線伝播モデルの予測からのずれはみられず、陽電子の過剰を説明する、数多くのモデルに対して強い制限を与える結果となっている。¹⁷⁾

AMS実験は、ノーベル物理学賞の受賞者Samuel Ting氏

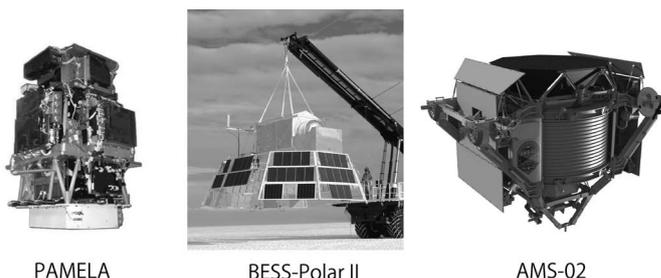


図5 PAMELA, BESS-Polar II, AMS-02の測定器の写真。(フルカラー口絵参照。)

が率いる、総勢600人のグループによる世界規模の共同実験である。巨大な磁石とシリコントラッカー、多彩な粒子識別装置により、宇宙線反陽子、反ヘリウムを究極の精度まで探索可能であり、そのほか、電子/陽電子、一次宇宙線、同位体元素、を幅広いエネルギー範囲で精度よく測定することが可能となっている。唯一の弱点はISSの軌道が51.6度の傾斜角を持つため、主に地磁気緯度の低い場所、すなわち地磁気カットオフRigidityの高い場所を飛翔し、低エネルギーの粒子への感度が低いことである。1998年にはスペースシャトルに搭載されて10日間テストフライトが行われ(AMS-01)、反ヘリウムの探索や一次宇宙線の観測による成果を報告した。¹⁸⁾ ISSに搭載される実機のAMS-02は、打ち上げの約1年前に、冷媒の寿命問題のために超伝導磁石から永久磁石に換装され、磁場の低減(0.8 T → 0.15 T)に対応して、トラッカーの再配置を行い、運動量分解能に与える影響を最小限にした後、2011年に最後のスペースシャトルでISSに打ち上げられた。現在、順調にデータ収集を続けている。この原稿が掲載されるころには、初めての観測結果が報告されているかもしれない。

BESS-Polar実験は、BESS実験の経験と技術を生かして、南極周回長時間飛行気球を利用した長時間観測実験として提案された。南極におけるキャンペーンは、NASAがNSFの協力を得て実施しているもので、夏の一時期に極点の周りを一周10日-2週間程度で周回する風を利用して、アメリカのマクマード基地の周辺から気球を放ち、1-3周回(これまでの最大42日間)の観測を行うというものである。南極の夏は太陽が沈まないために、夜間の気球高度維持のためのバラストを必要とせず、一日中太陽光を発電に利用できるというメリットもある。南極での長時間飛行を実現するために、測定器はすべての検出器にわたって全面的に作り直されることになった。¹⁹⁾ 超伝導磁石については、さらなる高強度化を施した超伝導線材を用いることで、コイルをサポートするシリンダーが不要になり、BESS実験で用いられていた磁石の半分以下の薄さ(1 g/cm²)を達成し、長時間(10日間)運転可能なものが開発された。また、従来のリチウム電池に替えて太陽光発電システムが開発された。さらに、超低エネルギーの反陽子を観測するために、測定器の低物質量化、高性能化が図られた。こうして開発されたBESS-Polar測定器の搭載により、粒子が通過する物質が、従来の18 g/cm²から4.5 g/cm²となり、100 MeVまでの反陽子を検出することが可能となった。

測定器は、2004年の太陽活動極大期から極小期の過渡期において第1回の飛行実験(BESS-Polar I)を行い8.5日間の宇宙線観測に成功した。その後、さらに測定器の改良を行い性能を向上させ、超伝導磁石の運転可能時間を1ヶ月にのぼした測定器で、太陽活動極小期の2007-8年に第2回のフライト(BESS-Polar II)を行い、約1.5周回で24.5日間の宇宙線観測に成功した。観測された宇宙線は、それぞれ8億、48億事象であり、すべて測定器に搭載したハード

ディスクに記録して、実験終了後回収された。次に、これらのデータを用いて、反陽子の測定、反ヘリウムの探索を行った結果を示す。

5. 反陽子流束の精密測定

図6にBESS-PolarIIにおける粒子識別の様子を示す。縦軸に飛行時間の測定により得られた粒子の速度(β)の逆数、横軸に飛跡の磁場中の曲がりから得られたRigidity(R)をプロットしたものである。右半分には正電荷の粒子、左半分には負電荷の粒子がバンド状に固まって見える。これは、それぞれの質量 $m = RZ/c^2\sqrt{1/\beta^2 - 1}$ に対応するものであり、反陽子は陽子と同じ質量を持つ負電荷粒子として、確実に同定されている。BESS-Polar IIでは太陽活動極小期において、7,886例の反陽子を観測することができた。これはBESS95+97(1995年、1997年の観測結果を合わせた結果)の約14倍の統計量に相当する。

観測された反陽子をもとに、観測時間、面積立体角、検出効率、大気による二次生成等を補正して反陽子流束が得られる。PAMELAおよびBESS-Polar実験で得られた反陽子流束を図7および図8に示す。PAMELA実験が報告したデータは衝突起源の反陽子から予測されるものとよく一致している。図8は、BESS-Polar IIで得られたデータに、BESS95+97、PAMELAのデータをオーバーラップする低エネルギー領域(図7)で重ねたものであり、ピーク領域で、3つのデータは誤差の範囲内でよく一致している。また、様々なモデルで計算された衝突起源の反陽子流束のいずれとも、よい一致を見せているが、低エネルギーのスペクトルの形に注目すると、低エネルギー反陽子を過剰に生成しないモデルとの一致がよいことがわかる。²⁰⁾ BESS95+97に見られた低エネルギー反陽子の過剰は再確認できなかった。この結果から、BESS95+97で示唆された、原始プラ

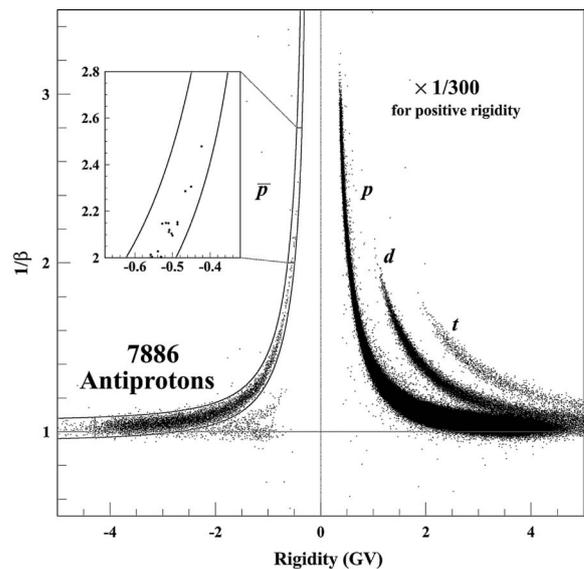


図6 BESS-Polar II フライトで観測された7,886例の反陽子(左側の実線で囲まれた領域内)。右半分には正電荷1を持つ粒子(陽子、重陽子、3重陽子)が明瞭に識別されている。(見やすくするため1/300にサンプリング。)

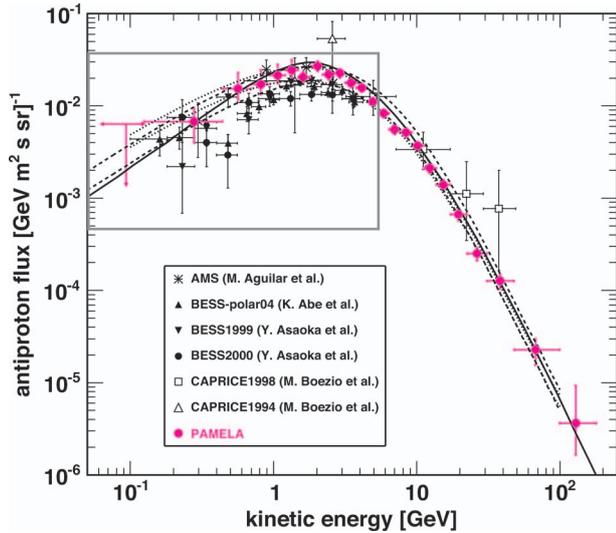


図7 PAMELA 実験により報告された60 MeVから180 GeVにおける反陽子流束¹⁷⁾ BESS (1999, 2000), BESS-Polar I, CAPRICE (1994, 1998), AMS-01のデータが示されている。示されている曲線は、衝突起源の反陽子から予測されるもので、伝播モデルの違い、様々な変数の不定性により若干ばらついているが、報告されたデータと誤差の範囲でよく一致している。

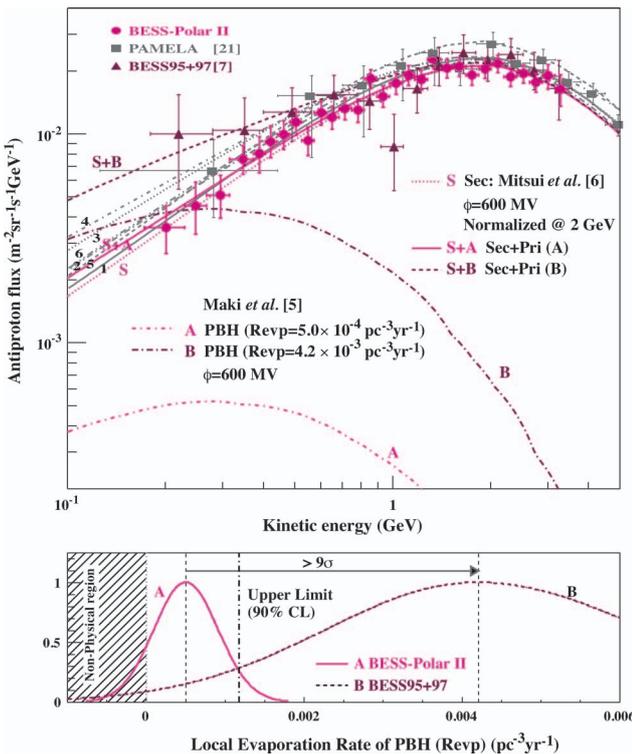


図8 (a) BESS-Polar II 実験と PAMELA 実験により観測された反陽子流束(図7の枠内の領域)を BESS95+97のデータとともに示す。曲線1-6は様々な宇宙線伝播モデルを用いた理論計算による衝突起源反陽子の流束である。そのうち、三井の計算の反陽子流束(曲線S)をとり、その上にPBHの蒸発からの反陽子の寄与があると仮定して、BESS-Polar II および BESS95+97、それぞれに対して、その強度を求めたものが曲線Aと曲線Bである。BESS95+97が低エネルギーの流束過剰から、PBHの貢献が大きいのに対して、BESS-Polar IIの流束は衝突起源のものに一致しているため、ほとんどPBHからの反陽子がないことがわかる。(b) PBHの単位体積(pc^3 :立方パーセク)・時間あたりの蒸発率の確率分布を BESS-Polar II, BESS95+97それぞれで求めたものである。BESS95+97は分布の幅が大きいものの、曲線Bで示すように中心値0.004という有意な値を示していたが、BESS-Polar IIのデータは0と無矛盾な値を示し、 9σ 以上で BESS95+97から予測される値を否定した。(フルカラー口絵参照)

ックホール (PBH) の蒸発率に関して、 9σ 以上の確度で、これを否定し $2 \times 10^{-7} \text{ pc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ の上限値 (90% 信頼度) が得られた。

以上のように、PAMELA および BESS-Polar II の結果により宇宙線反陽子流束が精度よく決定されたため、今後、様々な宇宙線伝播モデルあるいは、反陽子を生成するような素粒子現象については、非常に強い拘束条件を与えることになった。

6. 反ヘリウム原子核の探索

反ヘリウム原子核は、電荷2を持ち、エネルギー損失 dE/dx が電荷1の粒子の4倍で、負の Rigidity を持つ粒子として実験的に極めて明確に同定される。ただし、測定器の Rigidity 測定の分解能が有限であるために、高エネルギーのヘリウム原子核が負の高 Rigidity 領域になだれ込み、反ヘリウム原子核と区別できなくなる。このため反ヘリウム原子核として同定できる Rigidity の上限値は約 14 GV となっている。BESS-Polar II のデータを探索したところ、反ヘリウム原子核は観測されず、これまでの BESS および BESS-Polar のデータを全て合わせることで、ヘリウム原子核に対する反ヘリウムの原子核の流束比として、 6.9×10^{-8} 以下 (95% 信頼度) という厳しい上限値が得られた。²¹⁾ これまでの反ヘリウム原子核/ヘリウム原子核の流束比の上限値を図9に示す。これは、BESS 実験以前の上限値から、3桁の進展(感度向上)であり、我々の周りには、反物質でできた世界が存在しないことの、最も直接的な証拠である。今後、AMS-02によりさらに一桁以上の感度での探索が期待される。

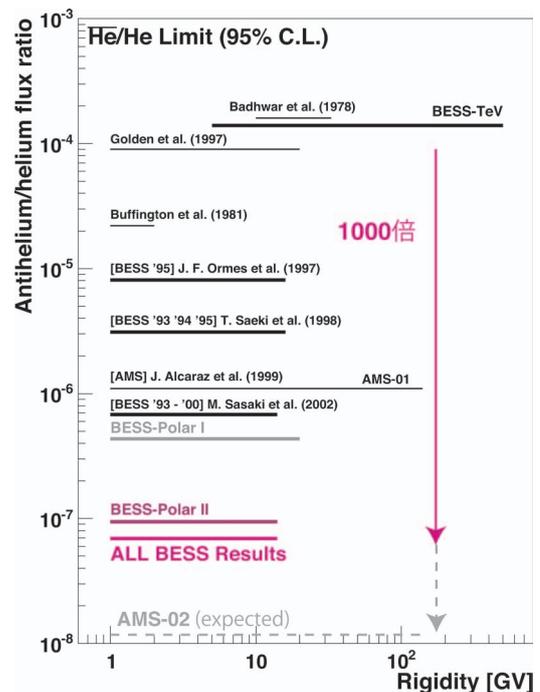


図9 反ヘリウム原子核/ヘリウム原子核の流束比の上限値の推移。BESS 実験により、それ以前に比べて約1,000倍厳しい上限値を設定することができた。

7. まとめ

1960年頃から始まった宇宙線反粒子の探求は、たゆみない観測技術の向上により約半世紀を経て、ようやく結論に辿り着きつつある。当初から様々な観測結果が報告され議論になっていた宇宙線反陽子については、BESS-Polar IIおよびPAMELAのデータにより、その大部分が一次宇宙線と星間ガスとの衝突に二次的起源を持つことがわかってきた。原始ブラックホールの蒸発や超対称性粒子の対消滅からの一次起源の寄与はほぼ否定されつつある。反ヘリウム原子核に関しては、大面積立体角を生かしたBESSおよびBESS-Polar実験により 10^{-7} レベルまで探索されたが、未だ、その兆候らしきものは見つかっていない。

間もなく報告されるであろうAMS-02の観測データにより、これらの問題に決着が着くことが期待されている。また、本稿では深く触れなかったが、宇宙線反重陽子の探索、PAMELAが報告した陽電子比の異常、一次宇宙線の冪の折れ曲がり等についても、その確認が急がれるところである。

AMS-02の結果により新たな知見を得て、さらにこの分野が進展していくことを期待して本稿の結びとしたい。

参考文献

- 1) O. Chamberlain, *et al.*: Phys. Rev. **100** (1955) 947.
- 2) H. Aizu, *et al.*: Phys. Rev. **121** (1961) 1206.
- 3) L. W. Alvarez: Physics Memo (503) (1964).
- 4) R. L. Golden, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **43** (1979) 1196; E. A. Bogomolov, *et al.*: Int. Cosmic Ray Conf., Kyoto **1** (1979) 330; A. Buffington, *et al.*: Astrophys. J. **248** (1981) 1179.
- 5) The Particle Astrophysics Magnet Facility report of the ASTROMAG Definition Team: interim report August (1986).
- 6) J. W. Mitchell, *et al.*: Proc. 23rd Int. Cosmic Ray Conf. **1** (1993) 519.
- 7) D. Bergström: Astrophys. J. Lett. **534** (2000) 177.
- 8) Y. Ajima, *et al.*: Nucl. Inst. Meth. **600** (2000).
- 9) BESS-Polar: <http://bess.kek.jp>; PAMELA: <http://pamela.roma2.infn.it>; AMS: <http://www.ams02.org>
- 10) R. E. Streitmatter, *et al.*: 21st Int. Cosmic Ray Conf. **3** (1990) 277; A. Moats, *et al.*: *ibid.* **3** (1990) 284; S. P. Ahlen, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **61** (1988) 145.
- 11) A. Yamamoto, *et al.*: IEEE Trans. Mag. **24** (1988) 1421; Y. Makida, *et al.*: Adv. Cryog. Eng. **37** (1992) 401.
- 12) K. Yoshimura, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **75** (1995) 3792.
- 13) J. F. Ormes, *et al.*: Astrophys. J. **482** (1997) L187; T. Saeki, *et al.*: Phys. Lett. B **422** (1998) 319.

- 14) H. Matsunaga, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **81** (1998) 4052; S. Orito, *et al.*: *ibid.* **84** (2000) 1078.
- 15) J. W. Mitchell, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **76** (1996) 3057.
- 16) O. Adriani, *et al.*: Nature **458** (2009) 607.
- 17) O. Adriani, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **105** (2010) 121101.
- 18) J. Alcaraz, *et al.*: Phys. Lett. B **461** (1999) 387.
- 19) A. Yamamoto, *et al.*: Adv. Space Res. **30** (2002) 1253; T. Yoshida, *et al.*: *ibid.* **33** (2004) 1755.
- 20) K. Abe, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **108** (2012) 051102.
- 21) K. Abe, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **108** (2012) 131301.

著者紹介



吉村浩司氏： 専門は素粒子、宇宙線実験。特に宇宙線観測を通しての初期宇宙の素粒子現象の解明、ミューオンを使った実験、測定器開発に興味がある。



山本 明氏： 専門は高エネルギー物理実験。素粒子物理、加速器における先端的超伝導技術応用に取り組んでいる。現在は、国際リニアコライダー計画の基盤となる超伝導加速器開発に取り組んでいる。

(2012年9月7日原稿受付)

Study of Elementary Particle Phenomena in Early Universe through Observation of Cosmic-ray Antiparticles

Koji Yoshimura and Akira Yamamoto

abstract: It is well known that among cosmic-ray particles, flying from the universe and entering into the earth, very small fraction of antiparticles are contained. Since our universe is matter-dominated, antiparticles naturally produced through elementary particle processes in the universe or remnant from the early universe. Attempts to search for “Antiparticles” among cosmic-ray particles were initiated around 1960’s. From then on, many experimental efforts have been made to unveil this rare species, using balloon-borne, satelliteborne, and space station experiments. In this article, we will review the brief history of challenge to observation of rare antiparticles. Recent progress about antiparticle measurement is reviewed.

一瞬の閃光をより精密に

手嶋 政廣 (東京大学宇宙線研究所 277-8582 柏市柏の葉5-1-5)

超高エネルギーガンマ線天文学は、第三世代チェレンコフ望遠鏡群 HESS, MAGIC, VERITAS により、急速な発展を続けている。現在では銀河系内外におよそ 150 の多様な天体を発見し、イメージングチェレンコフ技術という新しいツールをもとに、宇宙線の起源に迫りつつある。宇宙線発見から 100 年となるこの節目に、超高エネルギーガンマ線天文学におけるパイオニア的な研究から現在に至るまでの歴史、そして研究の現状、国際共同将来計画として準備が進められている次世代大型チェレンコフ望遠鏡アレイ CTA (Cherenkov Telescope Array) について解説する。

1. はじめに

近年のチェレンコフ望遠鏡による超高エネルギーガンマ線観測は凄まじいスピードで発展を続けている。およそ 150 のガンマ線天体が銀河系内外で観測されるとともに、¹⁾ 多種多様な天体で粒子が超高エネルギーまで加速され、それらが周囲の輻射場、物質と衝突し二次粒子としてガンマ線が放射されていることがわかってきた。観測も精密化、高感度化が進んできた。2008 年に打ち上げられたフェルミガンマ線衛星²⁾ のデータと合わせることにより、5 桁にわたるガンマ線スペクトルが得られ、さらに、X 線、光赤外、電波の他波長データと合わせ、多波長での観測データにより、天体での粒子加速、ガンマ線放射の機構が徐々に明らかになってきた。シェルタイプの超新星残骸は、ギンツブルグの予測通り宇宙線を 100 TeV あたりまでは加速しているようである。また、多数の活動銀河核も観測され、宇宙線加速を示唆する結果も得られつつある。さらにこの分野を発展させるため、次期国際共同実験 CTA (Cherenkov Telescope Array) の準備研究も進んでいる。³⁾ このように急速な発展を示す超高エネルギーガンマ線天文学について、今までの歴史、現在の状況、将来計画について述べる。

2. 第一世代チェレンコフ望遠鏡、空気チェレンコフ技術で超高エネルギーガンマ線観測に挑戦

1934 年にチェレンコフによりチェレンコフ光が発見され、⁴⁾ フランク、タムにより放射メカニズムが定式化された。その後、チェレンコフ光を使った空気シャワー測定はジェリーとガルブレイスにより 1953 年に行われた。⁵⁾ さらに宇宙ガンマ線を測定しようというパイオニア的な試みはチュダコフ、ザツェッピンらにより 1960-1964 年に 1.5 m 口径反射望遠鏡 12 台を一つのマウントにのせた望遠鏡によりクリミアにおいて行われた。⁶⁾ カニ星雲からの TeV ガンマ線フラックスに対して、現在測定されているフラックスのわずか 2 倍のところを上限値をつけていた。

2.1 SN1987A と日本の超高エネルギーガンマ線

1987 年に大マゼラン星雲で発生した超新星 SN1987A は、そのニュートリノがカミオカンデで観測され、当時の研究者に大きな衝撃を与えた。すぐさま、佐藤文隆氏によりガンマ線放射モデルが提唱された。⁷⁾ 新しく生まれたパルサーで効率よく宇宙線が超高エネルギーまで加速され、超新

星からの放出物質からなるシェルと相互作用し、大量のガンマ線が放出されるというモデルである。政池、村木らを中心としてニュージーランドに空気シャワーアレイを作り、新たに誕生した超新星残骸からの超高エネルギーガンマ線を探る JANZOS というプロジェクト⁸⁾ が立ち上がる。木舟、手嶋らは、明野観測所で棚橋、原が空気シャワー観測に使っていた 2 m 口径の固定型チェレンコフ望遠鏡をニュージーランド、ブラックバーチ山に設置し TeV ガンマ線を測定することを JANZOS グループで提案し了承され、日本人による大気チェレンコフ光によるガンマ線観測に向けた初めての実験を行う。⁹⁾ この努力は、天文台堂平観測所の月測距に使われていた 3.8 m 口径望遠鏡をもらい受けガンマ線望遠鏡として改造された CANGAROO-I の実験につながる。¹⁰⁾ この時点では、すでにイメージング法によるウィップル観測所の 10 m 口径チェレンコフ望遠鏡によるカニ星雲観測の成功を知っており、この 3.8 m 口径望遠鏡にもイメージングカメラを搭載した。

3. 第二世代チェレンコフ望遠鏡、超高エネルギーガンマ線天文学の誕生

最初の超高エネルギーガンマ線源の発見は、1989 年のウィップル観測所の 10 m 口径チェレンコフ望遠鏡 (図 1) によるカニ星雲の観測である。¹¹⁾ 37 本の光電子増倍管からなるカメラを焦点面に設置し、Hillas により提案されて



図 1 ウィップル 10 m チェレンコフ望遠鏡 (米国アリゾナ)。¹¹⁾ チェレンコフ光のイメージング法により、カニ星雲からのガンマ線の初観測に成功し、超高エネルギーガンマ線研究の礎を築く。

いたチェレンコフイメージによる宇宙線シャワーとガンマ線シャワーの識別を行い、その初観測に成功した。

また、ドイツを中心とするヨーロッパの研究者は、空気シャワーアレイ HEGRA を運用していたが、1990年頃、マックスプランク物理学研究所のローレンツ、ミルズヤンらにより HEGRA にチェレンコフ望遠鏡 CT-1 が設置され、その後5台の望遠鏡からなる HEGRA ステレオシステムへと発展し、いくつかの重要な発見を行っている¹²⁾ (図2下)。また、手嶋は、1990年頃よりステレオ観測による高感度化を提唱し、3 m口径イメージング望遠鏡7台からなるイメージングチェレンコフ望遠鏡ステレオシステム (Telescope Array Prototype) を米国ユタ州ダグウェイに建設し、活動銀河核 Mrk501 の巨大フレアの観測、活動銀河核 1ES 1959+650 の発見などに成功するが、米軍ミサイル事故のためやむなく実験を中断する。¹³⁾

イメージング法による、10 mウィップル望遠鏡¹¹⁾ CANGAROO-I 望遠鏡¹⁰⁾ HEGRA 望遠鏡¹²⁾ は、第二世代のチェレンコフ望遠鏡と呼ばれ超高エネルギーガンマ線天文学を創成するのに極めて重要な役割を果たしたといえるであろう。およそ 100 mCrab ($\sim 10^{-12}$ erg cm⁻² s⁻¹) の感度



図2 上：カンガルー 3.8 m チェレンコフ望遠鏡 (オーストラリア・ウーメラ)¹⁰⁾ JANZOS 実験の後、その発展として、木舟を中心としてオーストラリア・ウーメラにイメージング法による超高エネルギーガンマ線望遠鏡を建設する。下：HEGRA 4 m チェレンコフ望遠鏡 (スペイン領カナリー諸島ラバルマ)¹²⁾ 初めて、ステレオによる高精度、高感度観測を実現し、その有効性を明らかにする。

を持っていた (1 Crab はカニ星雲からのガンマ線強度)。

4. 第三世代チェレンコフ望遠鏡、ガンマ線天文学を確立

2000年半ばより、さらに新しい第三世代の望遠鏡 CANGAROO-III,¹⁷⁾ HESS,¹⁶⁾ MAGIC,¹⁴⁾ VERITAS¹⁵⁾ が稼働を開始する (図3)。これらの特徴は、10-17 m クラスの大型望遠鏡、高分解能カメラ、2-4 台のステレオシステムという第二世代で培われた技術をさらに発展させ高感度化したものであり、HESS, MAGIC, VERITAS は 10 mCrab ($\sim 10^{-13}$ erg cm⁻² s⁻¹) を超える感度を達成している。HESS は南半球で銀河面のサーベイを行い、40 を超える多数のガンマ線源を発見し、大きなインパクトを宇宙線物理・高エネルギー宇宙物理の分野に与えた。¹⁸⁾ また、MAGIC は大口径望遠鏡の強みである低いエネルギー閾値により、遠方の活動銀河核のサーベイを行い、さらにカニパルサー

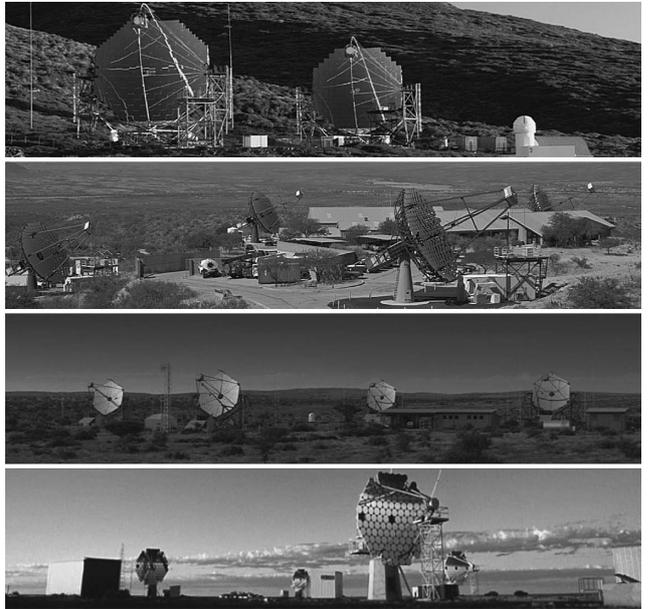


図3 上から、MAGIC (カナリー諸島ラバルマ)¹⁴⁾ VERITAS (米国アリゾナ)¹⁵⁾ HESS (ナミビア)¹⁶⁾ CANGAROO (オーストラリア・ウーメラ)¹⁷⁾ 2011年に、CANGAROOはその観測使命を修了し、シャットダウンする。2012年に、MAGIC, VERITASはカメラをより高感度化、HESSは中央に28 m口径の新たな望遠鏡を設置し HESS-IIへとアップグレードする。(フルカラー口絵参照。)

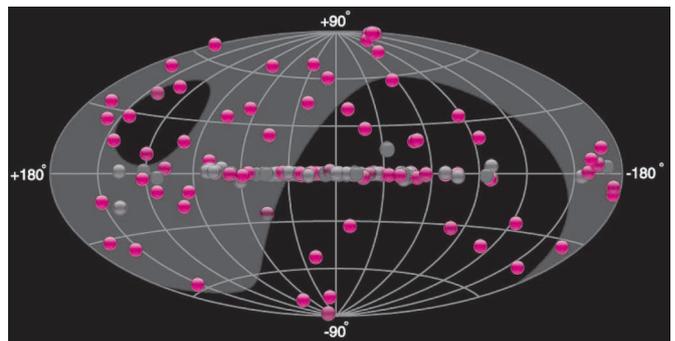


図4 > 100 GeV 天体を銀河座標にて示す。2012年現在、HESS, MAGIC, VERITASにより、およそ150の天体が > 100 GeV ガンマ線天体として検出されている。TeVcatより。¹⁾

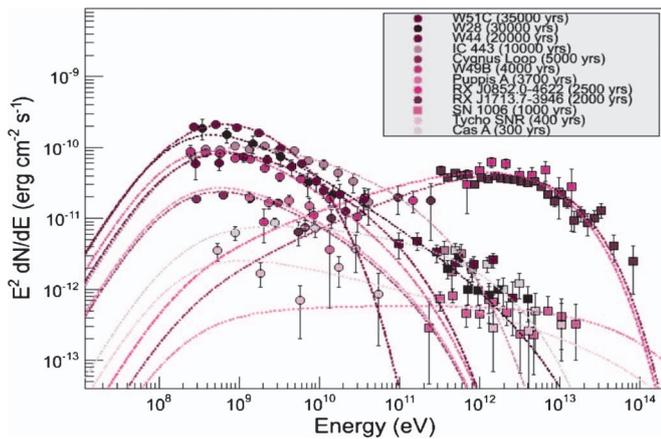


図5 シェル型超新星残骸からのガンマ線エネルギースペクトル。²⁰⁾ フェルミガンマ線衛星, HESS, MAGIC, VERITASによる観測。(フルカラー口絵参照。)

からの信号を検出する。¹⁹⁾ 最初に述べたように、超高エネルギーガンマ線天文学は、第三世代のチェレンコフ望遠鏡群HESS, MAGIC, VERITASにより大きく発展し、現在ではおよそ150のガンマ線天体が検出されている(図4)。

4.1 シェル型超新星残骸は宇宙線源か？

図5にシェル型超新星残骸のエネルギースペクトルを示す。²⁰⁾ 爆発後数100年から数万年のシェル型超新星残骸からガンマ線が観測されている。このグラフから興味深い傾向を読み取ることができる。数100年の超新星残骸では、ガンマ線は超高エネルギーまで伸びているが、フラックスは低く、ガンマ線放射の源である宇宙線の加速効率が高くないことがわかる。その後およそ千年後の自由膨張期からセドフ期に移行する時期に高エネルギー側でのガンマ線放射が最大になり、かつフラックスも高いことから、宇宙線加速効率が最大の時期を迎えているようである。さらに数万年経つとGeV領域にガンマ線放射のピークが移動しており、衝撃波がへたってくると同時に高エネルギー宇宙線がシェルから抜け出していると考えられる。まさにシェル型超新星残骸で宇宙線が加速され、超新星爆発のエネルギーが宇宙線エネルギーに転嫁されていく様子が克明にわかる。さらに多くのシェル型超新星残骸の観測が望まれる。

しかし、RX J1713.7-3946, RX J0852.0-4622はおよそ10 TeVあたりで急速にそのスペクトルを曲げており、これらが宇宙線陽子の源であったとしても、宇宙線を100 TeV付近までしか加速していないことがわかる。一方、宇宙線のスペクトルは 10^{16} eVでkneeと呼ばれる折れ曲がりを見せ、さらには 10^{18} eVあたりまでは銀河内起源であると考えられており、銀河宇宙線の起源に関する謎はさらに深まる。近年、フェルミガンマ線衛星で発見された銀河中心領域の巨大なバブル構造が、 10^{18} eVまで宇宙線を加速する可能性もある。²¹⁾

4.2 活動銀河核

目を銀河系外に移すことにする。50を超える活動銀河核、クエーサー、スターバースト銀河が超高エネルギーガ

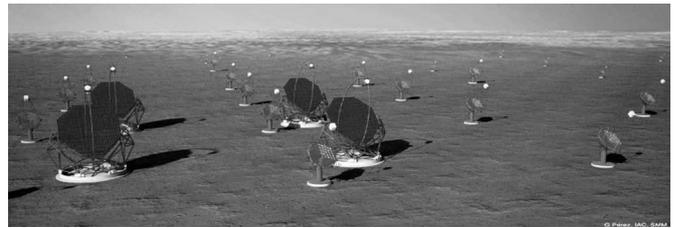


図6 CTA (Cherenkov Telescope Array) の想像図。³⁾ CTAはCTA NorthとCTA Southの2ステーションからなり全天をくまなく観測する。CTA Southでは、中心から23 m口径、12 m口径、6 m口径の望遠鏡が配置され、 3 km^2 の領域をカバーする。系外天体が主体となるCTA Northは23 m、12 m口径望遠鏡を 1 km^2 の領域に配置する。現在稼働中の望遠鏡MAGIC, HESS, VERITASから1桁感度を向上するとともに、広帯域(20 GeVから100 TeV以上)のエネルギー領域をカバーする。

ンマ線源として検出されている。もっとも数の多いものは、ブレイザーと呼ばれる活動銀河核で、噴出するジェットが我々の視線方向を向いており、相対論的ブーストによりガンマ線領域で明るく輝いている。しかし、最近のチェレンコフ望遠鏡の感度の向上に伴い、ジェットが視線方向から大きな角度をもったFR-Iタイプの天体、M87, Cen A等からも超高エネルギーガンマ線が観測されている。またNGC253, M82のようなスターバースト銀河からも超高エネルギーガンマ線が観測されている。²²⁾

10^{20} eVにまで至る最高エネルギー宇宙線は、銀河系外起源であると考えられ、活動銀河核、ガンマ線バーストが、その起源天体の最有力候補である。果たして、現在観測されている活動銀河核の中に最高エネルギー宇宙線の起源を示す証拠が見られるのか、今後のより詳細な観測によって明らかにしていく必要がある。

5. 第四世代チェレンコフ望遠鏡 (国際共同将来計画)、大規模チェレンコフ望遠鏡アレイ CTA

今までの、発展をさらに飛躍的に進めるため、世界で唯一といえる超高エネルギーガンマ線観測施設CTA (Cherenkov Telescope Array) の準備が進んでいる。これまでに確立された技術と経験をもとに、究極的なガンマ線観測装置を建設することを目指す。CTAは、大中小数十のチェレンコフ望遠鏡群の設置により、感度を一桁向上($1 \text{ mCrab} \sim 10^{-14} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)を達成するとともに、観測可能なエネルギー領域を20 GeV-100 TeVと拡大し、超高エネルギーガンマ線天文学を飛躍的に発展させるものである(図7)。このCTAでは、銀河系内外に1,000以上の超高エネルギーガンマ線天体の発見が期待される。単に天体数だけでなく、CTAから得られる科学的成果は銀河系内外の様々な高エネルギー天体、宇宙線や星間物理、可視赤外宇宙背景放射と銀河形成進化、さらには暗黒物質や量子重力理論の検証などの基礎物理にいたるまで広がりをもつ。CTAはそれだけの高いサイエンスポテンシャルと、豊富な経験、実績に裏打ちされた高い技術、そして実現性もちあわせる。

三種類の大中小(23 m, 12 m, 6 m)口径望遠鏡を中央から順に外に向かって設置することにより、20 GeVから

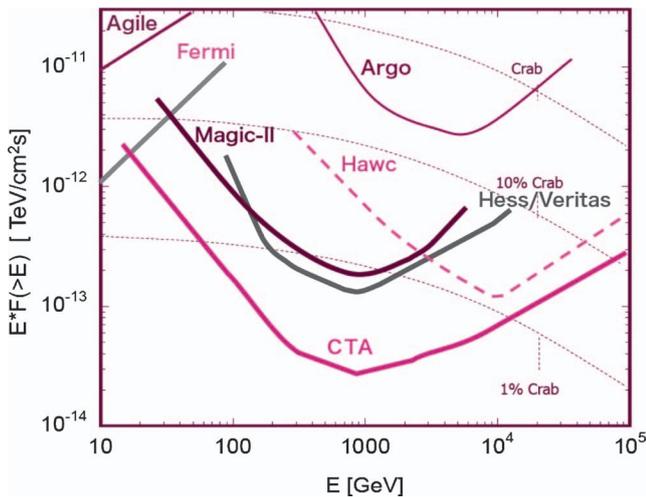


図7 CTA及び現在稼働中、稼働予定の他のガンマ線観測装置の感度曲線。²³⁾ $10^{-12} \text{ TeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ は $1.6 \times 10^{-12} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ に相当する。

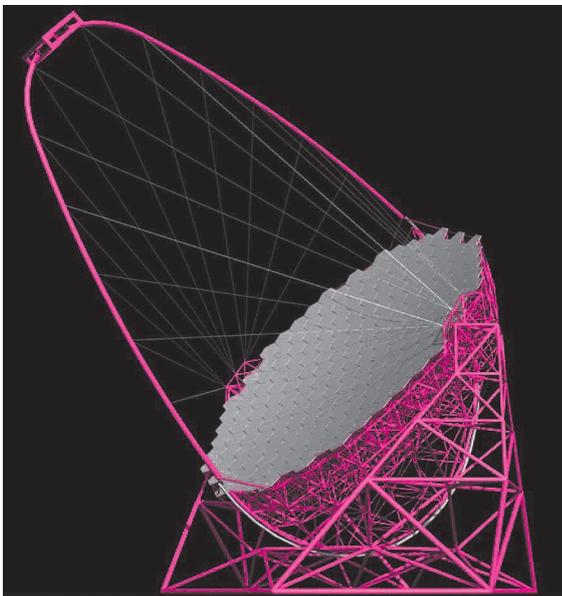


図8 日本が、ドイツ、スペイン、フランスグループと国際共同でプロトタイプを建設している23m口径CTAチェレンコフ望遠鏡。²⁴⁾ 手嶋が大口徑望遠鏡責任者を務める。CADデータから起こした想像図。

100 TeVという4桁にわたる広いエネルギーバンドでの観測が可能となる。さらにフェルミガンマ線衛星のデータと合わせれば、シームレスな6桁を超えるガンマ線エネルギースペクトルを得ることができる。CTAはその観測エネルギーバンドを拡げることにより、銀河内宇宙線源から遠方の活動銀河核、ガンマ線バーストまで、多種多様な天体、物理現象の研究を可能とする。

日本グループは、アレイの中心に配置される大口徑チェレンコフ望遠鏡の準備研究を進めている²⁴⁾(図8)。大口徑望遠鏡は、主に20 GeVから300 GeVの低エネルギー領域をカバーする。鏡の総面積は、十分なチェレンコフ光量を得るために、400 m²以上が必要である。また、それぞれの光学エレメントに、高反射率、高集光効率、高量子効率が要求される。日本グループは、この大口徑望遠鏡に搭載す

る光センサー(光電子増倍管)、²⁴⁾超高速読み出し回路、分割鏡の開発・試作を進めている。²⁴⁾大口徑望遠鏡では、ガンマ線バースト等の様々なトランジェントな現象を捉えるために、高速回転により瞬時に源を視野内に捉えることが要求される。現在、マックスプランク物理学研究所(ミュンヘン)のグループが、MAGIC望遠鏡の経験をもとに23 m大口徑望遠鏡構造の詳細デザインを進めている。構造はカーボンファイバチューブによるスペースフレーム構造であり、軽量でかつ剛性を高めるデザインである。総重量が50トンと軽量で、20秒で180度回転が可能であり、ガンマ線バーストのフォローアップ観測を狙う。

高エネルギー宇宙ガンマ線の研究は凄まじいスピードで進んでいる。いまや全世界的な流れで高エネルギー宇宙ガンマ線の実験規模、装置性能をさらに次のステップへと(CTAへと)高めようとしている。その性能とサイエンスポテンシャルにおいてCTAを超える計画は次の20年存在しないであろう。Victor HESSからはじまる長い宇宙線研究の歴史の中で重要なChapterを作るであろうCTA計画に、日本グループが主要なメンバーとして参加、貢献することを是非支援して頂きたい。

参考文献

- 1) <http://tevcat.uchicago.edu/>
- 2) 釜江常好, 田島宏康, 深澤泰司: 日本物理学会誌 **65** (2010) 163.
- 3) <http://www.cta-observatory.jp/>
- 4) P. A. Cherenkov: C. R. Acad. Sci. U.S.S.R. **8** (1934) 451.
- 5) W. Galbraith and J. V. Jelly: Nature **171** (1953) 349.
- 6) A. E. Chudakov, *et al.*: Transl. Consultants Bureau; P. N. Lebedev Institute **26** (1965) 99.
- 7) H. Sato: Mod. Phys. Lett. A **2** (1987) 801.
- 8) I. A. Bond, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **60** (1988) 1110.
- 9) I. A. Bond, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **61** (1988) 2292.
- 10) T. Hara, *et al.*: Nucl. Instrum. Meth. A **332** (1993) 300.
- 11) T. C. Weekes, *et al.*: Astrophys. J. **342** (1989) 379.
- 12) R. Mirzoyan, R. Kankanian, F. Krennrich, *et al.* (The HEGRA Collaboration): Nucl. Instrum. Meth. A **351** (1994) 513.
- 13) H. Hayashida, *et al.*: Astrophys. J. **504** (1998) L71.
- 14) J. Aleksic, *et al.*: Astropart. Phys. **35** (2012) 435.
- 15) <http://veritas.sao.arizona.edu/>
- 16) <http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/>
- 17) R. Enomoto, *et al.*: Astropart. Phys. **16** (2002) 235.
- 18) HESS Coll.: Science **307** (2005) 1938.
- 19) E. Aliu, *et al.*: Science **322** (2008) 1221.
- 20) private communication.
- 21) M. Su, *et al.*: Astrophys. J. **724** (2010) 1044.
- 22) F. Acero, *et al.*: Science **326** (2009) 1080; VERITAS Coll.: Nature **462** (2009) 770.
- 23) CTA Consortium: Experimental Astronomy **32** (2011) 193.
- 24) CTA Consortium: Proc. of ICRC2011 in China, <http://arxiv.org/abs/1111.2183>.

著者紹介



手嶋政廣氏: 専門はガンマ線天文学、宇宙線物理学。宇宙ガンマ線による宇宙線起源の解明、深宇宙の研究、暗黒物質の探索を目指す。

(2012年8月19日原稿受付)

VHE Gamma Ray Astronomy: Higher and Higher Precision Measurements for Faint Blue Flashes

Masahiro Teshima

abstract: Very High Energy (VHE) Gamma Ray Astronomy is rapidly developing with third generation Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes (IACTs), H.E.S.S., MAGIC and VERITAS. Nowadays,

about 150 VHE galactic, and extragalactic gamma-ray sources have been discovered. We are attacking to solve the long standing problem of the cosmic ray origin with these new tools. In this occasion of the 100th anniversary of the discovery of cosmic rays, we overview the history of VHE Gamma Ray Astronomy, the current status of this field, and the international future project CTA (Cherenkov Telescope Array).

今年で宇宙 X 線も発見 50 年

牧島 一夫[†] (東京大学理学系研究科物理学専攻 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1)

高橋 忠幸 (JAXA 宇宙科学研究所 252-5210 相模原市中央区由野台 3-1-1)

宇宙線の発見から百年を経た今年、偶然、宇宙 X 線の発見から 50 年目にもあたる。初期にはおもに宇宙線研究者により開拓された宇宙 X 線の研究は、この半世紀で爆発的な発展を遂げ、宇宙を探る不可欠の手段としての地歩を固めた。ここでは多種多様な X 線天体のうち、代表として中性子星に焦点を当て、この分野の黎明期の様子と、2014 年に打ち上げ予定の日本の *ASTRO-H* 衛星とを結び、50 年の歴史を往来しよう。以下、エネルギー 0.1 keV~数百 keV 程度の高エネルギー光子を「X 線」と呼び、より高いエネルギーを持つ「ガンマ線」と区別する。人名の敬称は、省略させていただく。

1. 宇宙 X 線の発見

宇宙由来の X 線光子のうち、エネルギー数十 keV 以下のものは地球大気で光電吸収され、より高エネルギーのものもコンプトン散乱され、最終的には吸収されてしまう。そのため信号は地上に届かず、1912 年に宇宙線 (荷電粒子成分) が発見された後も、広義の「宇宙放射線」が高エネルギー光子を含むことを、人類は知らずにいた。これは大気が有害な X 線から生命系を保護してきたことをも意味する。

戦後まもない 1949 年、ドイツから押収した V-2 号ロケットを用いて米国の研究者らが、太陽から X 線を検出した。¹⁾ それを契機として徐々に、太陽 X 線の放射機構を考え、*1 あるいは近傍の高温の星から極端紫外線などが放射される可能性を論じる気運が生じてきた。他方で 1950 年代の末に早川幸男は、「かに星雲」(西暦 1054 年の超新星残骸) が宇宙線の加速源になっており、そこで高エネルギーの 2 次電子が作られ、それらがシンクロトロン過程で出すガンマ線が、地球大気で電磁シャワーを起こすという可能性を指摘し、宇宙ガンマ線研究の口火を切った。²⁾ これが X 線宇宙物理学という、驚きに満ちた学問分野が誕生する、前夜の状況であった。

1962 年 6 月 18 日、その日がやってきた。米国のリカルド・ジャコーニ (Riccardo Giacconi)、宇宙線の泰斗ブルーノ・ロッシ (Bruno Rossi) らは、「太陽 X 線が満月の表面で作ridas 蛍光 X 線を捉える」という名目で、ガイガー計

数管を搭載した小型観測ロケットを深夜に打ち上げた。ロケットは毎秒 2 回スピンしつつ垂直な姿勢を保って大気圏外を 6 分間ほど飛翔し、その間、月と異なる方向から図 1 のように強い信号を検出した。これは「後知恵」では、さそり座にある全天最強の X 線源、「さそり座 X-1」(Sco X-1) に起因するものであった。中性子星の研究は、1967 年の電波パルサーの発見で始まったとされるが、Sco X-1 の発見は、人類が中性子星を目撃した、ほぼ世界初の例だったのである。Physical Review Letters 誌に掲載されたこの発見論文³⁾ では、著者らは想像力に満ちた巧みな科学的推論より、ガイガー計数管が受けた信号が電子ではなく X 線によるもので、その発生源が太陽系外天体であると結論しており、50 年たった今日でも一読の価値がある。さらに彼らは図 1 で、全天から一様に到来する宇宙 X 線背景放射が見えていることも見抜いた。これはペンジアスとウィルソンによる宇宙マイクロ波背景放射の発見 (1964 年) に先立

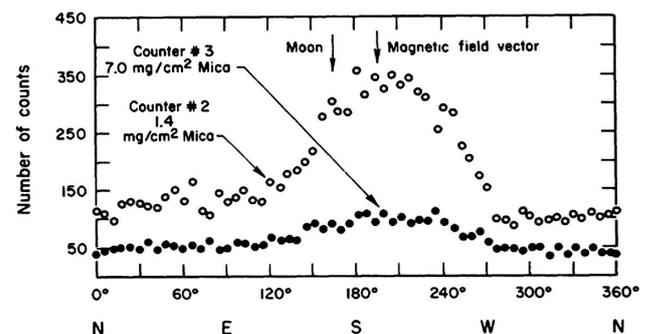


図 1 ジャコーニらが 1962 年のロケット飛行で得た、ガイガー計数管のカウント数を、ロケットのスピンに合わせて折り重ね、方位角分布に直したもの。文献 3 より。

[†] 同ビッグバン宇宙国際研究センターおよび理化学研究所宇宙観測実験連携研究グループ兼務

*1 黒体温度 5,800 K の太陽光球から強い X 線が放射されることはないの
で、この発見は予想外であった。

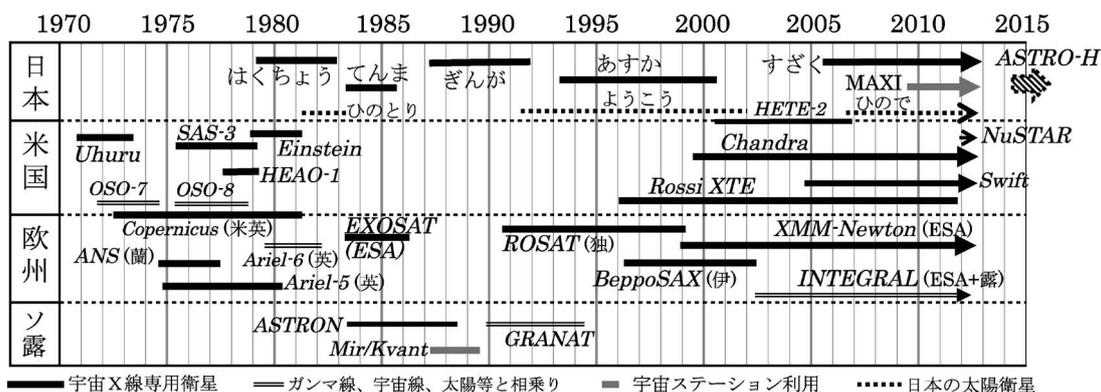


図2 世界の宇宙X線衛星. 必ずしも完全ではなく, おもにガンマ線衛星と見なされるものなどは, 省いたものがある.

つこと2年であった.

2. 50年間の歩みとASTRO-H

予想もしない Sco X-1 の発見に刺激され, 観測ロケットや大気球を用いた観測が繰り返され, X線宇宙の驚くべき姿が, 断片的に人類の眼前に現れてきた. 日本でも, 小田稔の率いる東京大学宇宙航空研究所グループと, 早川幸男の率いる名古屋大学のグループが, 早くから活発な研究を繰り返した. このあたりは, ジャコニーのノーベル物理学賞を記念した本誌2003年6月号の談話室小特集「ジャコニーと日本のX線天文学」を参照されたい. 大きな飛躍をもたらしたのは, ジャコニーの主導でアメリカが1970年にケニア沖のサン・マルコ海上発射基地から打ち上げた, 世界初のX線衛星ウフル (Uhuru)^{*2}で, その成果は *Astrophysical Journal Letter* 誌を席卷した.

飛翔体や放射線計測の技術的進展に支えられ, Uhuru に続き図2のように, 世界で数々のX線衛星が打ち上げられ, 大局的に以下の知見が得られるに至った. (1) 多くの天体が多少ともX線を放射する. 銀河系内では, こうしたX線天体は, 木星の放射線帯から太陽, 星のフレア, 白色矮星, 中性子星, ブラックホール, 超新星残骸, 銀河中心などに及ぶ. 銀河系外に目を転じると, 宇宙の進化を反映する活動銀河核,^{*3} 観測可能なバリオンの大部分を担う, 銀河団の高温プラズマ (暗黒物質の重力により閉じ込められる), 宇宙遠方でのガンマ線バーストなど, X線天体が宇宙の果てまで連なる. (2) 強いX線放射を伴う天体現象では, 強大な重力, 天体の高速回転や高速運動, 原子核エネルギーの爆発的解放, 強磁場など, 強いエネルギーの集中が見られ, 粒子加速やプラズマの選択的加熱など, エネルギー非等分配現象も稀ではない. (3) 多くのX線源が激しい時間変動を示し, その時間スケールはミリ秒~数十年にわたる. 光で見た宇宙が, 人類の歴史の尺度ではほぼ悠久不変に見えることと対照的である. (4) 宇宙X線は, 時間

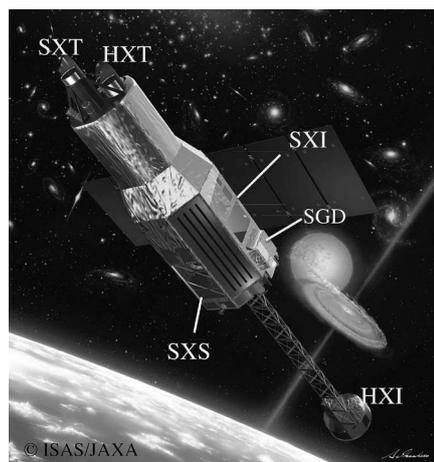


図3 ASTRO-Hの外観図. JAXA HPより. (フルカラー口絵参照.)

変動, スペクトル,^{*4} 空間形状という3つの観測軸を持ち, 第4の軸である偏光計測は未開拓である.

これらの話題のうち, ブラックホール,⁴⁾ 銀河団のプラズマ物理,⁵⁾ 非熱的現象⁶⁾については, すでに本誌に解説があるのでそちらに譲り, 以下では中性子星を代表に, X線天文学の黎明期, 現状, 将来への期待を述べる. それに先立ち, 半世紀の到達点としてこの分野の研究に圧倒的な進展をもたらすと期待されている, JAXA (宇宙航空研究開発機構) 宇宙科学研究所のASTRO-H衛星⁷⁾を紹介しよう. これは日本で6機目となる重量約2.7トンのX線衛星で, それまでの固体式M (ミュー) ロケットに代わり, H2A ロケットで2014年に打ち上げ予定である. 著者の一人である高橋がプロジェクトマネジャーを任せられ, 30を超す日本の大学や研究機関が結束し, さらに米国NASA, 蘭SRON, カナダCSA, 欧州ESAなどの広範な国際協力を得て建造が進んでいる. この衛星の形状を図3に, また搭載装置の概要と主要担当機関を表1にまとめる. 目玉の装置は, 極低温を用いX線エネルギーをフォノンとして計測するマイクロカロリメータ (SXS) で, 半導体に比べ1桁よい0.1%のエネルギー分解能が, 非分散系として初め

^{*2} 打ち上げ日の1970年12月12日が, ケニアの独立記念日だったため, スワヒリ語で「自由」を意味する Uhuru という名称が付けられた.

^{*3} 多くの銀河の中心にある, 太陽の 10^{6-9} 倍の質量を持つ巨大ブラックホールに, ガスが降着しているもの. その成因は今もって謎である.

^{*4} 電子が制動放射やシンクロトロン過程で作る連続成分, 中性もしくは電離した重イオンからの特性X線 (多くは輝線), 中性ガスによる光電吸収などが, スペクトルを形成する要素である.

表1 ASTRO-Hの搭載装置.

装置名	軟X線望遠鏡 (SXT)	硬X線望遠鏡 (HXT)	高精度軟X線分光計 (SXS)	軟X線イメージャー (SXI)	硬X線イメージャー (HXI)	軟ガンマ線検出器 (SGD)
台数	2	2	1	1	2	2
エネルギー範囲	0.3-12 keV	1-80 keV	0.3-12 keV	0.5-10 keV	5-80 keV	40-600 keV
搭載位置	衛星の頭部		SXTの焦点面で衛星中央部		HXT焦点面, 衛星尾部	衛星の両脇
機能	軟X線光子の反射結像	硬X線光子の反射結像	超高精度分光と粗い撮像	軟X線光子の分光と撮像	硬X線光子の分光と撮像	軟ガンマ線の分光と粗撮像
装置技術	多重薄板型のX線の全反射鏡	合成多層膜のBragg反射を用いたスーパーミラー	50 mKの極低温で動作するマイクロカロリメータ	X線CCDを用いたX線カメラ	SiとCdTeの両面strip検出器, BGO結晶シールド	Si/CdTeコンプトンカメラ, BGO結晶シールド
撮像性能	$f=12\text{ m}, \Delta\theta < 1.7'$	$f=5.6\text{ m}, \Delta\theta < 1.3'$	FOV $3' \times 3'$	$38' \times 38'$	$9' \times 9'$	$0.6^\circ \times 0.6^\circ$
エネルギー分解能	—	—	$< 7\text{ eV} (@ 6\text{ keV})$	$< 200\text{ eV} (@ 6\text{ keV})$	$< 2\text{ keV} (@ 60\text{ keV})$	$< 4\text{ keV} (@ 60\text{ keV})$
担当機関	NASA/GSFC, 名大, 愛媛大, 宇宙研ほか	名大, 愛媛大, 宇宙研, 中央大ほか	宇宙研, 首都大, 金沢大, 立教大, 埼玉大, 理研ほか	阪大, 京大, 宇宙研, 工学院大, 宮崎大, 東大ほか	宇宙研, 東大, 広島大, 名大, 早大, ほか	名大, 宇宙研, 広島大, 東大, 早大, Stanford大ほか

(注: f は焦点距離, $\Delta\theta$ は角分解能)

て実現される。^{*5} これを補完し10 keV以下で汎用の撮像と分光を行うのが、多重薄板反射鏡(SXT)とX線CCDカメラ(SXI)の組み合わせである。さらに数keV以上から80 keVでは、ブラッグ反射を援用したスーパーミラー(HXT)の焦点面に、シリコンやテルル化カドミウムの両面ストリップ検出器からなる硬X線イメージャー(HXI)を置くことで、未開拓な硬X線宇宙の撮像を行い、過去の装置を圧倒する高感度で分光を行う。シリコンとテルル化カドミウムのイメージング検出器を多層に段重ねし、コンプトン運動学を利用して40-600 keVの最高エネルギーを受け持つのが、軟ガンマ線検出器(SGD)である。HXIとSGDは、日本独自のコンセプトから生まれた検出器で、優れた国産の半導体技術や実装技術を駆使したものである。両者とも「すざく」に搭載された硬X線検出器(HXD)の流れを汲み、結晶シンチレータによる反同時計数により徹底したバックグラウンドの削減を目指す。検出器開発のほかにも解析ソフトウェアの開発、アーカイブ、そして衛星試験や運用にいたるまで、日本のX線コミュニティの総力を結集してASTRO-Hの開発が進められている。

3. Sco X-1と弱磁場の中性子星：原子核物理学への貢献

話を1960年代に戻すと、Sco X-1は発見されたが、その正体は皆目わからない。そこで米国に滞在していた小田は、ロケットのような不安定な足場でも高いX線の位置決定精度を実現する「すだれコリメータ」を提案し、それを用いてジャコーニらとロケット観測を繰り返した。その結果、Sco X-1の位置が約2分角の精度で決定され、それが恒星

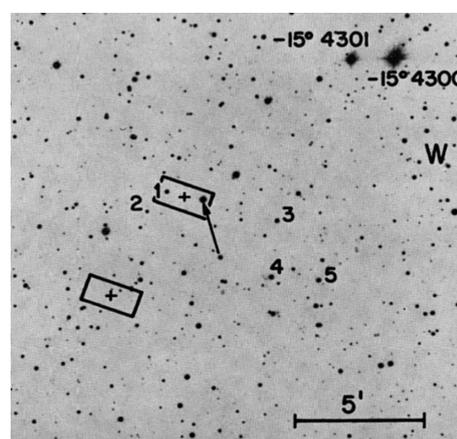


図4 Sco X-1の光学同定の結果. 2つの四角い箱はX線で決めた誤差領域, 矢印が光学対応天体. 文献9より.

状の点源であると判明した。⁸⁾ ここに天文学者の寿岳潤や大沢清輝、宇宙線の和田雅美らに加わり、日米で光学同定の先陣争いが展開された結果、1966年6月、岡山の東京天文台(当時)1.8 m望遠鏡により、通常の恒星より紫外線の強い13等級の変動天体が、図4のようにX線の誤差範囲に発見された。その結果はパロマー山5 m望遠鏡でも追認されるなど、電子メールもファックスも無い時代に、現代に劣らぬスピードで研究が進展した。日米間で確執があったとも聞かすが、結果は天文学の大御所サンデージ(Alan Sandage)を筆頭に公表され、⁹⁾ 研究は宇宙線物理学から天体物理学へと舵を切った。

1974年、著者の一人である牧島は修士1年で、筆記係として陪席した「Sco X-1研究会」の席上、今は亡き寿岳が、「直接の証拠はないがSco X-1は連星だと確信する」と力説したことを覚えている。その直観の通り、その後の研究でSco X-1や類似のX線源は、低質量の星と弱磁場の中性子星(NS)から成る近接連星系であると判明した。そこでは星からNSへと降着するガスが、重力ポテンシャルの深さ

^{*5} ほぼ同じ装置が、稼働中の「すざく」に搭載されたが、冷媒である液体ヘリウムが突沸により失われ、観測に至らなかった。回折格子やブラッグ反射など、光子エネルギーに応じ進行方向を振り分ける分光計を「分散系」と呼ぶのに対し、そうした振り分けを用いずエネルギーを測定する分光方法を、非分散系と呼ぶ。

に応じ、可視光からやがて紫外線、最後にはX線を放射しつつ、NSの表面に落下する。こうした系では、重力エネルギーの解放による定常的なX線放射に加え、数時間～数年に1回ほど、温度およそ 2×10^7 Kに対応した黒体放射のスペクトルを持つX線が、数秒から数分の間に爆発的に放射されることがあり、X線バーストと呼ばれる。これは降着物質がNS表面である臨界値まで蓄積し、水素やヘリウムが不安定な核融合反応を起こす結果である。

1976年2月、日本初のX線天文衛星となるはずだった東大宇宙航空研究所のCORSA^{*6}衛星は、ロケット1段目の不具合で打ち上げに失敗してしましたが、3年後の1979年2月にその再挑戦機「はくちょう」が誕生した。広視野と高い角度精度を両立する「回転すだれコリメータ」を搭載した「はくちょう」は、新発見の天体も含む十数個のX線から多数のX線バーストを検出した。それらのフラックスを理論的なエディントン限界光度^{*7}と比較した結果、太陽系から銀河中心までの距離は当時の定説(10 kpc)より近く、約8.5 kpcであることが示された。¹⁰ また計測された黒体温度から、NSの半径が理論予想通り約10 kmであることも実証された。^{*8} 続く「てんま」(1983年)は電源の故障で短命だったが、田中靖郎らが開発した蛍光比例計数管が優れた分光能力を発揮し、鉄輝線の分光などに多くの成果を挙げた。満田和久らはSco X-1型天体の定常的なX線放射を、降着円盤からの多温度放射と、NS表面からの黒体放射とに分解することに成功した。¹¹

天体では重力と圧力^{*9}が釣り合うので、その質量 M と半径 R の関係を知れば、天体内部の状態方程式(EOS; 密度と圧力の関係)が推定できる。NSは中性子の縮退圧で支えられているので、それらの M と R の測定から原子核物質のEOSを制限でき、原子核物理学に大きな知見となる。ここで問題となるのは、図5に示すように、NSには磁場が $B < 10^9$ Gと弱いもの(Sco X-1もその仲間)と、電波パルサーなど $B \sim 10^{12}$ Gの強磁場を持つものが存在することである。 R を知るには、弱磁場NSで発生する上記のX線バーストの観測などが、ほぼ唯一の手掛かりである。他方 M を測るには、連星をなす強磁場NSを用い、そのパルスの軌道ドップラー効果を知る必要がある。 M は太陽質量の ~ 1.4 倍に集中するという結果が得られてきた^{*10}が、なにぶん M と R が別々のNSで測定されているため、EOS

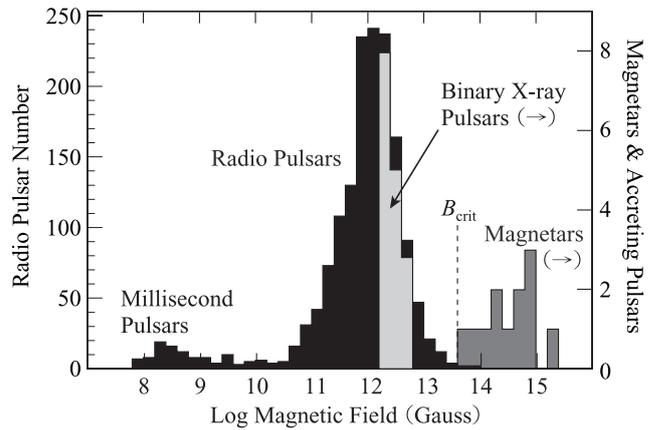


図5 中性子星の表面磁場の分布。黒は電波パルサーで、個数は左軸。薄い灰色は連星X線パルサー、濃い灰色はマグネターで、ともに個数は右軸。連星X線パルサーの磁場は電子サイクロトロン共鳴で、他はパルス周期とその変化率から磁気双極子放射を仮定して、導いている。

に対する制限はまだ緩い。そんな中、稼働中の5代目「すざく」や、国際宇宙ステーション「きぼう」に搭載された全天X線監視装置MAXIの観測を通じ、Sco X-1型の弱磁場NSでも質量降着率が3桁ほど下がると、磁場の影響が現われパルスが発生する可能性が浮上した。そこでASTRO-H HXIを用い、 R のわかった弱磁場NSから微弱で速いパルスを検出できれば、その軌道ドップラー効果から M が推定できる。さらに独立な方法として、SXSにより弱磁場NSにおけるX線バーストのスペクトル中に、電離鉄イオンの吸収線が検出できれば、その重力赤方偏移から M/R 比が精度よく決まる。これらの試みを通じ、同一の弱磁場NSに対して (M, R) 平面上で複数の独立な情報を得ることで、原子核のEOSを絞り込むことが期待される。

4. 強磁場中性子星と核物質の磁性

$B \sim 10^{12}$ Gの強磁場NSが恒星と近接連星をなすと、連星X線パルサーとなる。その第一号はCen X-3と呼ばれるX線源で、Uhuruによりこの天体から4.8秒のX線パルスとその連星運動によるドップラー変調、主星による周期的なX線の「食」などが発見された。¹² X線がパルスするのは、降着ガスがNSの2つの磁極に絞り込まれ、高温(10^{7-8} K)の降着円筒が形成されるためである。

降着円筒のプラズマ中では、電子サイクロトロン共鳴^{*11}がエネルギー $E_c = 11.6 (B/10^{12} \text{ G}) \text{ keV}$ に現われ、スペクトル中に構造を作ると期待される。1978年、ドイツの気球実験により、連星X線パルサーHer X-1からこの構造が初めて検出された。¹³ 牧島らは1987年に打ち上げられた日本3機目のX線衛星「ぎんが」を用い、10個を超す連星X線パルサーから、電子サイクロトロン共鳴を吸収線として検出することに成功し、研究を大きく進展させた。¹⁴ 「ぎんが」は日英協力の下で開発製作された大面積比例計数管を搭載し、他国にX線衛星が乏しかったこの時期(図2)、多くの成果を挙げ、日本の科学衛星が世界の研究を支

^{*11} 量子論的には、電子のランダウ準位間の遷移である。

^{*6} COsmic Radiation SATelliteの略。

^{*7} 球対称な天体の放射の最大光度で、バリオンに働く内向きの重力と電子に働く外向きの放射圧が釣り合った状態。天体の質量を M とすれば、宇宙化学組成の場合、 $1.5 \times 10^{31} (M/M_\odot) \text{ W}$ である。

^{*8} 距離を D 、フラックスを f 、半径を R 、黒体温度を T 、シュテファン・ボルツマン定数を σ とすれば $4\pi D^2 f = 4\pi R^2 \sigma T^4$ である。X線バーストでは、 $T \sim 2 \times 10^7 \text{ K}$ である。

^{*9} 圧力としては、地球型惑星ではイオン間のクーロン反発力、通常の恒星であれば古典的ガス圧、白色矮星では電子の縮退圧、中性子星では中性子の縮退圧が効く。大質量星や進化した星では、中心部で放射圧も無視できない。X線バーストでも放射圧が効く。

^{*10} 2010年にはDemorestらが、電波パルサーを含むある連星系で、相手の星(白色矮星)の重力場による電波パルスの遅れ(シャピロ遅れ)を検出し、連星パラメータを解くことで、このNSは 1.97 ± 0.04 太陽質量を持つことを示し、大きな話題を呼んだ。

える形を作り上げたのである。

図5に示したNSの表面磁場(双極子磁場を仮定)の強度分布は、おもに孤立パルサーの自転周期とその変化率から、磁気双極子放射による自転エネルギー放出を仮定して推定したもので、これから1990年代に、「すべてのNSはほぼ 10^{12} Gの強磁場を持って誕生し、磁場を担う永久電流が電気抵抗で減衰すると次第に磁場が弱まり、 10^{8-10} Gの弱磁場NSになる」という描像が生まれた。しかしサイクロトロン共鳴線による連星X線パルサーでの測定(図5)は、例数は少ないが精度は高く、その結果は磁場が $B=(1.0-4.7) \times 10^{12}$ G ($E_c=12-54$ keV)という狭い範囲に集中することを示唆している。¹⁴⁾ 磁場が減衰するなら、 10^{12} G以下($E_c < 10$ keV)でこのように分布が急に途切れることは考えづらい。では低エネルギーでサイクロトロン共鳴線が見逃されていたのだろうか？

その答えは、1993年に田中の指揮下で誕生し世界の名機と謳われた、「あすか」に持ち越された。この4代目衛星は、米国と名大や宇宙研の協力による多重薄板反射鏡、米国と阪大や京大などの協力に基づく宇宙初の単一光子モードのX線CCD、東大と首都大などが担当した撮像型ガス蛍光比例計数管を搭載し、世界で初めて約10 keVまで^{*12}撮像性能を延ばし、また半導体の分解能で鉄輝線のエネルギー帯域(6-7 keV)の撮像分光観測を実現した。10 keV以下では、「あすか」は「ぎんが」より感度もエネルギー分解能も優れているが、 $B=(0.1-1.0) \times 10^{12}$ Gを持つX線パルサーは、発見されなかった。つまり図5で連星X線パルサーの分布の左側が切れているのはリアルであり、磁場は減衰する徴候は無く、強磁場と弱磁場に二分する傾向が確認された。¹⁴⁾

そもそもNSの強磁場がどのように保持されているか、いまだ明らかではない。図5から示唆される可能性の1つは、NSの内部が何らかの機構(たとえば中性子の核磁気モーメント整列)により部分的に強磁性となり、その領域が温度、NS質量、年齢などで変化するという考えで、原子核物理学や強結合フェルミ系の統計物理学とも、深い関連を持つ課題である。NS全体が強磁性になれば $B \sim 10^{16}$ Gに達するので、体積のごく一部($\sim 10^{-4}$)が強磁性相であれば、 $B \sim 10^{12}$ GのNSが説明でき、ほぼ全体積が常磁性相となれば、弱磁場NSになると想像される。¹⁴⁾ しかも1990年代半ばから注目を集め始め、「すざく」により画期的に研究の進展が得られつつあるマグネター天体は、図5で第3のピークを作っており、それらはこの「全体が強磁性」という描像に合致する天体である。マグネター⁶⁾は、時おりX線やガンマ線を爆発的に連射する特異な中性子星で、超強磁場を持つと考えられ、銀河系とマゼラン雲に25個ほどが知られている。

NSの磁性の起源を理解するには、図5でマグネター(右側のピーク)と $B \sim 10^{12}$ Gの「通常」NS(中央のピーク)が

^{*12} それ以前の反射結像鏡は、およそ3 keVまでしか集光できなかった。

画然と分かれるか滑らかにつながるか、知ることが近道と考えられる。たとえば重力崩壊型の超新星爆発の際、条件の違いにより、「通常」NSとマグネターが分化し、前者はほぼ一定の磁場を保つが、後者は初期に急速にスピンドウンし、かつ磁気エネルギーを消費して輝くため、数千年で検出できなくなるかもしれない。その一部は連星をなし、「通常」NSを含む連星X線パルサーの中に、まぎれ込んでいるかもしれない。ASTRO-Hを用いると、こうした想像を検証すべく多彩な研究計画を立てることができる。(1) SXSによる詳細X線分光を通じ、重力崩壊型の超新星残骸のうち「通常」NSに付随するものとマグネター付随のもので、残骸の元素組成、運動エネルギー、電離度などに違いが無いか調べる。(2) SXIとHXIを用い、銀河面に大量に潜む可能性のある老齢マグネターを探索する。(3) HXIとSGDを用い、50 keV以上のエネルギーでサイクロトロン吸収線を持つNSを探索する。(4) SGDを用い、超強磁場中における量子電磁気学的な効果として、2光子分裂の可能性を探る。⁶⁾

5. SN1006 とかに星雲と

宇宙線100年かつ宇宙X線50年とあれば、中性子星の関連として、超新星残骸(SNR)のうち宇宙線の加速源として重要な2天体、SN1006およびかに星雲に触れることは、必至であろう。

SN1006は典型的なシェル型の形態を持つため、そのX線は、衝撃波で加熱された星間ガスもしくは親星イジェクタからの熱放射と考えるのが自然である。しかしそのX線スペクトル中に重元素輝線がほとんど見られないため、重元素の少ないガスが電離非平衡にあるか、もしくは相対論的電子による非熱的放射^{*13}かなど、1980年代から論じられていた。この議論に決着をつけたのが、「あすか」の2種類の検出器を駆使した小山勝二らの成果(1995年)である。彼らは、熱的放射が円形に薄く広がる一方、東西のリムからの高輝度のX線は、相対論的電子の出すシンクロトロン放射であることを示し、この天体では、衝撃波による激しい電子加速が起きていることを実証した。¹⁵⁾ かくて宇宙線の加速現場で作られる2次的な光子を用いることで、宇宙磁場で曲げられてしまうという荷電粒子の持つ本質的な困難を回避し、長年の謎である宇宙線の起源に肉薄できるようになったのである。さらにこの種の天体では、シンクロトロンX線と、逆コンプトンガンマ線を組み合わせた多波長観測により、電子スペクトルと磁場強度が同時に決定できる。^{6),*14} ただしX線で直接に得られる情報は、電

^{*13} マクスウェル分布に近い分布を持つ電子からの放射で、スペクトル形状に電子温度が明確に現われるものを熱的放射と呼び、マクスウェル分布から大きくはずれた(とくにエネルギーのべき関数型)分布を持つ電子からの放射を、非熱的放射と呼んで区別する。

^{*14} SN1006に関しては、TeV域でCANGAROO望遠鏡が誤った検出値を報告するという不幸があり、磁場と最高電子エネルギーの推定は混乱したが、その後HESSがずっと低いレベルでTeV放射を検出し、 $B=$ 数十 μ G、電子の最高エネルギーは約10 TeVと推定される。

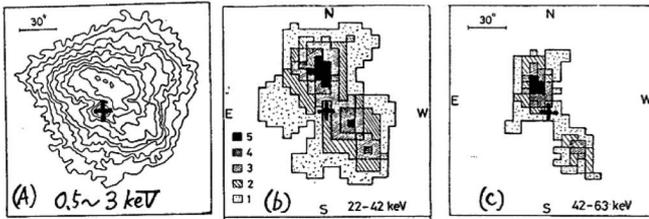


図6 かに星雲のX線画像。(a)は米国インシュタイン衛星の結果、(b)(c)は日米共同実験で得られたもの。牧島、小田、小川原、宮本、Pelling、Petersonによる、1981年日本物理学会秋の分科会、講演概要集1p-SE-11より採録。

子成分に限られることには注意が必要である。

現在、GeV域ではフェルミガンマ線宇宙望遠鏡がすばらしい感度で観測を続けており、¹⁶⁾ TeV領域では大規模国際協力Cerenkov Telescope Arrayが立ち上がろうとしている。X線領域では活躍中の「すざく」の後を継いで、ASTRO-H HXIが2桁近い感度向上を狙い、その撮像により非熱的放射の空間形状が明らかになることから、宇宙線加速に関する研究は大幅に進展が期待される。たとえば、10 keV以下のエネルギー域では熱的X線が卓越する大多数のシェル型SNRからも、非熱的放射が検出できると期待され、そこから、銀河系内のSNRの寄与を総和すると太陽系近傍での宇宙線スペクトルが、knee領域まで説明できるかどうか、定量的な推定が可能となろう。もとよりSXSにより各種重イオン輝線に対し、シェルの膨張によるドップラー偏移に加え、熱的ドップラー広がりからイオンの運動学的温度を初めて計測でき、衝撃波による加速の素過程にも知見が深まることは疑いない。

最後に、かに星雲に触れたい。中心に回転駆動型のパルサーを擁するこの年齢958歳のSNRは、ガンマ線天文学の契機となり(1章)、関戸弥太郎らは、かに星雲から宇宙線の超過が来ているかもしれないと示唆するなど、その高エネルギー宇宙物理学に果たした役割は計り知れない。現在では、その放射はシンクロトロン成分と逆コンプトン成分として良く理解でき、^{6,17)} 電子の最高エネルギーは宇宙線のkneeのすそに匹敵する約 10^{16} eVに達し、これは既知のあらゆる加速天体のうち最高である。X線観測でも、かに星雲は古くからきわめて重要な天体で、とくにその強度が強く(ほぼ)一定なことから、一種の「標準天体」として広く使われてきた。牧島にとって、この天体は忘れられない存在で、1977-1978年に博士課程で参加した日米共同実験では、日本が高精度のすだれコリメータ、米国UCSDが大型のNaI/CsIフォスウィッチ検出器を持ち寄り、テキサスから数回の気球実験を行い、苦勞の末に図6(b)および(c)のように、この天体の硬X線画像を得たのである。そこからパルサー風が作る「空洞」、空洞を囲む衝撃波領域での2次加速、その外側でのシンクロトロン放射という基本描像を導いた。¹⁸⁾ その直後、角分解能を誇る米国のインシュタイン衛星が、図6(a)のような軟X線画像を明らかにしたとき、気球実験の結果は大きな嘘をついてはいなか

ったと、安堵したものである。

小田はよく、「かに星雲は、良くわかっていて、しかも常に新鮮な驚きを与えてくれる、理想の配偶者のような存在」と評していた。まさにその通り、最近あつと驚く事実が判明した。一定と思われていた、かに星雲のX線やガンマ線が、約1年の時間スケールで $\pm 5\%$ も変動しており、しかもフェルミによるGeV観測では、数時間で1桁も明るくなるフレア現象が検出されたのである。¹⁷⁾ その意味するところはまだ確定していないが、「すざく」HXD装置では、強度変動に伴うスペクトルの変化を追求しており、変動をテコにして加速機構をより深く理解できる可能性がある。もちろんASTRO-Hが打ち上げられた暁には、かに星雲を繰り返し(装置の較正も含め)観測することで、この試みの精度が大幅に向上すると期待している。

6. おわりに

ここでは50年前のSco X-1の発見にちなみ、中性子星に焦点を当てた。これ以外にも、ブラックホール、活動銀河核、超新星残骸、銀河団、ブレーザーなどのジェット天体、星のフレア、宇宙の元素計測など、多くの話題があること、そのすべてに対しASTRO-Hがきわめて強力な手段となることは疑いない。X線で見た宇宙の面白さは、一般相対論、原子核物理、宇宙線物理、プラズマ・流体力学、量子電磁気学、非線形物理など、基礎物理学に直結する多彩な現象が発現し、しかも豊かな多様性をもって多くの研究テーマが展開できるところにあると思われる。さらに日本が、アメリカ、欧州、ロシア(ソ連)などの巨大国と並んで、この分野で勝負して来られたのは、継続的で安定した衛星計画の策定、自前の独創的技術の開発、そして自分たちの装置の性能を極限まで駆使したデータ解析という三本柱を、同じコミュニティが担い続けてきたことにあると信じる。その総力を結集した次世代のASTRO-Hが、X線宇宙の面白さを一段と明らかにすることを、ご期待いただきたい。

参考文献

- 1) R. Tousey, K. Watanabe and J. D. Purcell: Phys. Rev. **83** (1951) 792.
- 2) S. Hayakawa: Prog. Theor. Phys. **19** (1958) 219.
- 3) R. Giacconi, H. Gursky, F. R. Paolini and B. B. Rossi: Phys. Rev. Lett. **9** (1962) 439.
- 4) 牧島一夫: 日本物理学会誌 **58** (2003) 888.
- 5) 牧島一夫: 日本物理学会誌 **63** (2008) 595.
- 6) 高橋忠幸, 内山泰伸, 牧島一夫: 日本物理学会誌 **65** (2010) 707.
- 7) T. Takahashi, et al.: Proc. SPIE (INT'L SOC. OPTICS & PHOTONICS) **8443** (2012) in press.
- 8) H. Gursky, R. Giacconi, P. Gorensterin, J. Waters and M. Oda, et al.: Astrophys. J. Lett. **144** (1966) 1249.
- 9) A. Sandage, P. Osmer, R. Giacconi, P. Gorenstein, H. Gursky, J. Waters, H. Bradt, G. Garmire, B. Sreekantan, M. Oda, K. Osawa and J. Jugaku: Astrophys. J. Lett. **146** (1966) 316.
- 10) H. Inoue, K. Koyama, K. Makishima, M. Matsuoka, T. Murakami, M. Oda, Y. Ogawara, T. Ohashi, N. Shibazaki and Y. Tanaka: Astrophys. J. Lett. **247** (1981) 71.
- 11) K. Mitsuda, H. Inoue, K. Koyama and K. Makishima, et al.: Publ. Astron. Soc. Jpn. **36** (1984) 741.
- 12) R. Giacconi, H. Gursky, E. Kellogg, E. Schreier and H. Tananbaum: Astro-

- phys. J. Lett. **167** (1971) 67.
- 13) J. Truemper, W. Pietsch, C. Reppin and W. Voges, *et al.*: *Astrophys. J. Lett.* **219** (1987) 105.
- 14) K. Makishima, T. Mihara, F. Nagase and Y. Tanaka: *Astrophys. J.* **525** (1999) 978.
- 15) K. Koyama, R. Petre, E. Gotthelf, U. Hwang, M. Matsuura, M. Ozaki and S. Holt: *Nature* **378** (1995) 255.
- 16) 釜江常好, 田島宏康, 深沢泰司: *日本物理学会誌* **65** (2010) 163.
- 17) 田中孝明, 内山泰伸: *日本物理学会誌* **67** (2012) 556.
- 18) R. M. Pelling, W. S. Paciesasa, L. E. Peterson, K. Makishima, M. Oda, Y. Ogawara and S. Miyamoto: *Astrophys. J.* **319** (1987) 416.

著者紹介



牧島一夫氏: 専門はX線天体物理学。「はくちょう」以来、8機の宇宙X線および太陽観測衛星に関わってきた。おもにコンパクト天体や銀河団を研究している。



高橋忠幸氏: 専門は高エネルギー宇宙物理学。衛星を用いたX線やガンマ線の観測を通じて、宇宙の極限環境で起こる現象を探ることに興味がある。

(2012年9月2日原稿受付)

Half a Century of Cosmic X-ray Research

Kazuo Makishima and Tadayuki Takahashi

abstract: The year of 2012, which is the centennial of the cosmic-ray discovery, happens to coincide with the 50th anniversary of the discovery of cosmic X-ray sources. First carried by cosmic-ray physicists, the study of cosmic X-rays has made explosive developments over the last half a century, and has established the X-ray wavelength as an indispensable window onto the Universe. Among a variety of X-ray emitting celestial objects, we choose here neutron stars as a representative, and review the 50 years connecting the dawn era of the research and the state-of-the-art *ASTRO-H* satellite to be launched in 2014. In this article, "X-rays" mean energetic photons with energies from 0.1 keV up to a few hundreds keV.

宇宙線研究所の果たしてきた役割

荒船次郎* ◇

梶田隆章 〈東京大学宇宙線研究所 277-8582 柏市柏の葉5-1-5〉

日本の宇宙線研究を語る際、宇宙線研究所の果たしてきた役割を忘れるわけにはいかない。本稿では、宇宙線研究所の前身である宇宙線観測所の時代から現在まで宇宙線研究所の関わってきた宇宙線研究を概観し、宇宙線研究所が日本の宇宙線研究に果たした役割を振り返ってみたい。

1. 初期の宇宙線研究所

東京大学宇宙線研究所(通称、宇宙線研)は1976年に作られ、今年で36歳になる。前身の東京大学宇宙線観測所(通称、乗鞍観測所)から数えて59歳である。乗鞍観測所が作られたのは「大学附置全国共同利用機関」という新しい形態の研究所を認めるよう国立学校設置法の改正が成立した1953年で、京都大学基礎物理学研究所(通称、基研)と同時である。基研が理論系の共同利用研であるのに対し、乗鞍観測所は実験系で初めての共同利用研であった。両者の大きな相違は、基研が湯川秀樹所長他、固有の研究者・研究部門を持つのに対し、乗鞍観測所は固有の研究者は持たず、事務官・技官・雇用人などの研究支援の人員と研究施設を持つのみで運営も共同利用者が行う共同利用に徹し

た機関として発足した点であろう。

観測所設置の発端は、1950年に大阪市大、神戸大、名古屋大、理研の4機関が朝日新聞社からの奨励金を得て作った通称「朝日の小屋」であった。乗鞍岳は3,000 m級の高度があり、宇宙線強度が地上より10倍強いこと、戦時中に陸軍が山頂近くまで自動車道路を建設していたことが利点であった。翌年には東京大学他4機関が共同利用に加わるなど、さらなる拡充の要望が全国的に高まり、矢内原・東大総長を委員長として設置委員会が作られ、菊池正士、朝永振一郎、茅誠司、山内恭彦、平田森三、皆川理(以下敬称略)等を委員として、新観測所の骨格となる諸規程を決め、1953年8月1日に東京大学宇宙線観測所が設置された。

乗鞍観測所(図1)で行われた沢山の実験の中で、当時の研究の雰囲気を知っていただくため、実験の三例のみ挙げると、(ア)水素霧箱による π 中間子多重発生の研究:大

* 元東京大学宇宙線研究所所長、東京大学名誉教授



図1 乗鞍観測所の写真。写真左下の小さな建物が朝日の小屋。(2007年秋撮影。)

阪市立大学が1951~1953年にかけて行い、 pp 反応による $1\pi, 2\pi, 3\pi$ の中間子生成反応が観測された。Cosmotron加速器による多重発生研究の直前であった。(イ)宇宙線中性子の研究：名古屋大学が1957年に、地上と乗鞍岳の宇宙線中性子の強度を比較し、宇宙線中性子の大気中の平均自由行程を測定した。(ウ)宇宙線による高エネルギージェット生成の研究：原子核研究所、早稲田大学など8機関により、1958年から、原子核乾板を用いた多重発生の研究が行われ、原子核乾板とX線フィルムの併用が初めて行われた(この成果は、気球や高山の宇宙線研究に大いに活用された。)等がある。様々な研究が行われたので、夏季は混み合い調整が必要となることが多かったという。中には越冬するグループもあった。1954年から1975年までの20年間の、共同利用研究の年毎延件数は約280件、参加人員の年毎延人数は約1,500名であった。

宇宙線観測所を語る時、同じく共同利用機関の原子核研究所(通称、核研)の宇宙線部に言及する必要がある。戦後、加速器建設の機運が高まり、1955年に学術会議の勧告により核研が設立されたとき、3部門の宇宙線部門が作られた。主に空気シャワーを研究するグループ(通称A部)、原子核乾板を用いて中間子ジェット生成を研究するグループ(通称B部)が作られ、後に、隕石などの宇宙物質を研究するグループ(通称C部)が作られた。

核研の宇宙線に関する著しい成果には、1958年、福井崇時と宮本重徳によって発明されたスパークチェンバーがある。加速器実験でも多用され、例えば、1962年のL. Ledermanらによる「ニュートリノは2種類ある($\nu_e \neq \nu_\mu$)」という大発見もこの装置を用いて行われた。宇宙線B部の成果には、1972年、丹生 潔によるチャーム粒子の発見があり、この4番目のクォーク(c)の存在の発見は5,6番目のクォーク(t, b)を予言する小林・益川模型につながっているのだろう。同じくB部で1957年には西村 純が、多重発生した中間子の運動量は入射粒子に垂直な横向き方向には平均値は一定であるという経験則を発見した。また、1979年、放射化学者の田中重男は、半減期が約140万年の放射性同位元素 ^{10}Be の濃度を海底の泥のコアの深さ毎に測り、これが宇宙線起源であり、泥の深さは時間軸である

ことから、過去250万年の間に宇宙線強度に大きな変化がなかったこと、従って、太陽近傍で超新星爆発は無かったことを示唆した。これは同年、京都で行われた宇宙線国際会議で最も面白い論文と称賛された。このように固有部門のある核研と共同利用に徹した乗鞍観測所は、相補的な役割を果たしていた。

核研の建設後しばらくして、さらに本格的な高エネルギー加速器建設の機運が高まり、仮称「素粒子研究所」と呼ばれる研究所の設置が準備された。宇宙線研究者もこの研究所に参加するかと思われたが、最終的にはそうはならず、参加しなかった。1971年に日本で初めての大学共同利用機関である高エネルギー物理学研究所(通称KEK)が建設されたが、宇宙線分野はそれとは別に、宇宙線観測所を改組し固有の部門と大型の観測装置を持つ研究所とする道が選ばれ、1972年に宇宙線ミュオン観測装置(通称ミュートロン)の建設が認められ、1973年に固有の1部門、1975年にもう1部門が発足し、その後、1976年5月に、更に部門を加えると共に、原子核研究所宇宙線部の2.5部門が移管され、合計6部門および附属の乗鞍観測所を持つ「東京大学宇宙線研究所」に改組された。これが現在の宇宙線研究所の始まりである。

その過程で、1975年に、それまで別途行われていた海外協力による宇宙線研究3件が宇宙線観測所の事業となった。それらは、(1)大阪市立大がインドのKGF金鉱で行う地下実験。この研究では1965年に三宅らにより世界初の大气ニュートリノ観測が行われ、ニュートリノ衝突の断面積が依然としてエネルギーに比例して増大していることを示した。(2)早稲田大学など数機関がボリビア・チャカルタヤ山(標高5,200 m)で行う原子核乾板実験による核相互作用の研究。(3)原子核研究所(後に、東京工業大学)など数機関が同・チャカルタヤ山で行う空気シャワー実験であった。これら海外3件の国内外参加機関は約20機関、参加者は約50名であった。

2. 20世紀後半の宇宙線研究所

宇宙線研が発足以来20世紀末までに行ったやや大型の研究を顧みて、思い浮かぶものを挙げる。(系統的でないことをお許し願いたい)。

(1) ミュートロン装置

1975年に完成した大型のスペクトロメータで、20 TeV付近までの宇宙線ミュオンのエネルギースペクトル、電荷比 μ^+/μ^- 、非弾性衝突などの測定が行われた。その技術を生かし1995年に宇宙線ミュオンを用い、「朝日岳の断層写真」の撮影に成功し、山の密度分布の分析を試みた。参加グループは約5機関、参加者は10数名であった。

(2) 富士山エマルジョンチェンバー実験

1979年から実験が始まり、早稲田大学などの発表したCentaurと呼ばれる異常現象(中性 π 中間子をほとんど伴わず、荷電粒子だけを多数生成する多重発生現象)は見つ

からなかったこと、宇宙線の Knee 領域 (10^{15} – 10^{16} eV) の組成は重い原子核が多いこと、などを発表した。同グループは中国のカンバラ山での同様な実験も共同で行い、それと合わせた結論も同様であった。参加機関は約 10 機関、参加者は約 30 名であった。

(2) チベット空気シャワー実験 (Tibet Asy)

上記 (2) の実験グループは形を変えて、現在の中国チベット高原における Tibet Asy 実験のメンバーに引き継がれた。この実験では原子核乾板は補助的にのみ使い、標高 4,300 メートルの立地を生かした Knee 領域の宇宙線組成、異方性、ガンマ線点源、太陽活動と太陽磁場の研究などが行われている。1993 年に月や太陽の背後から飛来する宇宙線により「月の影」、「太陽の影」を観測し、見かけの影のずれから磁場の影響を見ることで、高エネルギー宇宙線のエネルギーを初めて磁場で直接観測した。Tibet Asy 実験の参加機関は約 23 機関、参加者は約 80 名である。この実験の一つの特徴は実験開始した 1990 年には比較的小さな空気シャワーアレイドで実験を始め、少しずつ拡張を行い現在に至っていることであろう。現在もこの実験の発展が検討されている。

(3) 明野観測所における空気シャワー実験

核研の宇宙線部で行われていた空気シャワー観測は、より高いエネルギー領域への研究の発展を求めて新たな場所を探していた。鎌田甲一らは適地を求めて国内の様々な場所を訪れたという。この結果、地元の理解もあり山梨県の明野村に観測所を設置することが決まった。当初 1979 年に明野観測所に完成したのは 1 km^2 の装置であったが、その後、1991 年に 100 km^2 の AGASA 装置が完成した。これは明野村を含め 6 市町村にまたがる空気シャワー観測装置で、当時は世界最大の観測配列 (アレイド) であり、最高エネルギーのスペクトルの観測や点源探索で世界をリードした。高エネルギー宇宙線が理論的上限 (GZK cutoff と呼ばれる) を超えてまで存在するか、という研究には結果的に勇み足もあったが、高エネルギーの研究者に大きな刺激を与え、J. Cronin らの Pierre Auger 実験、日米の Telescope Array 実験 (共に後述) へとつながっていった。AGASA の実験参加機関は約 10 機関、参加人数は約 30 名であった。詳細は本号特集の永野・福島の記事を参照していただきたい。

(4) JACEE 実験

エマルジョンチェンバーを NASA の気球に搭載して、宇宙線の組成などを直接観測する実験で、数百 TeV までの高エネルギーの陽子、ヘリウムその他の組成を観測した。在米の高橋義幸が核となって日本と NASA 等の米国の研究者をまとめていた。実験参加機関は約 20 機関、参加人数は約 40 名であった。詳細は本号特集の鳥居の記事を参照していただきたい。

(5) Kamiokande 実験

この実験は大統一理論の検証となる「陽子崩壊」の探索を第一の目的とし、副産物として、「ニュートリノ振動」

と「超新星ニュートリノ」の探索を目標に掲げた実験であった。場所は地下 1,000 m なので宇宙線雑音が地上の 10 万分の 1 以下と少なく、稼働中の鉱山なので常に保守点検が行われ安全性が高く、鉱山は大空洞を掘った経験もあり、また、小柴研究室がかつて地下実験をした経験もあった所である。陽子崩壊は観測しなかったが、そのことで単純な SU(5) 大統一理論を否定した。超新星ニュートリノの初観測と大気ニュートリノ異常の発見は大きな成果となった。また難しいと思われた太陽ニュートリノの観測にも成功した (詳細は本号特集、中畑・吉田の記事を参照)。宇宙線研究所が地下施設、KEK がタンクと純水装置、光電子像倍管や電子機器は東大理学部が分担した。この実験は共同利用よりも共同研究の性格が強い。実験参加機関は約 10 機関、実験参加者は約 50 名であった。この実験は Super-Kamiokande (後述) へと大きく発展し、それに伴い旧 Kamiokande の空洞は東北大学へ移管され KamLAND となった。現在神岡の地下は、神岡宇宙素粒子研究施設として、上記の他に、XMASS 実験 (暗黒物質探索)、CANDRES (2 重 β 崩壊探索)、重力波実験 (後述) など、多目的に使われている。

(6) JANZOS 実験、CANGAROO 実験

超新星 SN1987A の出現は、宇宙線研究者が本格的に高エネルギーガンマ線観測を始めるきっかけとなった。「ぎんが」衛星が SN1987A からの X 線観測に成功し、いずれはガンマ線も出てくることが期待され、JANZOS 装置がニュージーランドに作られた。ガンマ線の作る空気シャワーが大気中で作るチェレンコフ光を観測する反射望遠鏡と光電管を組み合わせた装置であった。JANZOS の参加機関は国内外約 10 機関、参加者は国内外約 40 名であった。JANZOS は SN1987A からのガンマ線は検出できなかったが、貴重な経験が得られ、より大規模な同様の装置の建設へ向かった。その結果、オーストラリアに直径 3.8 m の望遠鏡が作られ CANGAROO 装置と呼ばれ、さらに 2004 年までに直径 10 m の望遠鏡を 4 台完成させた。南半球に世界で初めて設置された大型のガンマ線観測装置として活躍した。初期には SN1006 の観測など解析不十分な発表もあったが、小山勝二らの発見した非熱的 X 線源であるガンマ線天体 RXJ1713.7-3946 の観測に 2000 年初めて成功するなど成果を上げた。やがて後発だが精度の高いドイツの H.E.S.S. 実験が追い越していった。CANGAROO 実験の参加機関は国内外 10 数機関、参加者は国内外約 30 名に上っている。詳細は本号特集の手嶋の記事を参照していただきたい。なお、CANGAROO 実験は装置の急激な劣化により 2011 年に運用を終えた。

(7) 乗鞍観測所の太陽宇宙線観測

太陽が時に発生する高エネルギーの宇宙線は太陽磁場活動の研究に重要である。名古屋大学のミュオン望遠鏡が 1989 年 9 月 29 日に太陽フレアに伴う 11.5 GeV 以上の陽子を捉え、名古屋大学と理化学研究所の中性子モニターが独

立に1991年6月4日の太陽からの高エネルギー中性子の異常な高まりを捉えたことは、地道な連続観測の成果であった。

(8) 重力波

一般相対性理論が予言する重力波の存在は、間接的には、1978年のA. HulseとJ. H. Taylor, Jr.による連星パルサーPSR1913+16の重力波放出による公転軌道の変化の発見で証明されたが、未だ直接的な観測はない。重力波の直接観測によって、他の手段では得られない新しい宇宙物理学を切り開きたいという期待は強く、日本では、1995年に基線長300mと小さいながら重力波Laser干渉計「TAMA300」が国立天文台、東大理学部、宇宙線研などの共同で作られた。米国は2002年に基線長4kmのLIGOを、欧州は2003年に基線長3kmのVIRGOを運転開始したが、宇宙線研を中心に日本では深い地下観測所と極低温という特色を持った計画を準備していた。低温鏡による熱雑音低減の技術を世界で初めて開発し、2006年、神岡の地下に、基線長100mのCLIO装置を建設してその技術を実証しつつ、本格実験装置LCGT(後のKAGRA、後述)の建設を準備した。詳細は本号特集の藤本の記事を参照していただきたい。

ところで、海外では1950年代末から人工衛星による宇宙線観測が行われたが、日本では、人工衛星による宇宙線観測の環境は限られ、また大型加速器のエネルギーが上がって宇宙線による素粒子の研究も限られた環境にあり、1980年代からは大きな発想の転換が必要な時期にあった。このような中で、文部省による全国の大学附置研究所の見直しが行われ、宇宙線研究所は、原子核研究所や他の17機関と共に、最悪のA1ランク(このままでは存在意義に乏しく、大幅な改変を必要とする機関)に分類され、存続が危ぶまれる状況になった。この判定は多分、各研究所の上部は1年ほど前から知っていたのであろうが、我々が知ったのは、1987年5月の新聞・赤旗に掲載されてからであった。それ以前に、学会会議の原子核専門委員会に宇宙線研究所の改組を検討するワーキンググループが作られていたのも、前から知られていたことの表れであろう。教授ポスト6つのうち5つが空席だったことも重なって、研究所の周辺で様々な批判が吹き荒れる状況になった。宇宙線研究所としては、今後は「存在意義に乏しい」とは決して言われない研究所になる、という覚悟で、Super-Kamiokandeの建設に命運を懸けることになった(改組検討のワーキンググループはこの宇宙線研究所のSuper-Kamiokande計画を受け解散された)。必要な人員を主に所外から確保して予算要求の体制を整え、幸い1991年に建設が始まり、1996年3月に建設が完了、1998年のニュートリノ振動の発見へつながった。

当時の大学附置共同利用機関は文部省直轄の大学共同利用機関と規則上異なり、共同利用は行っても、共同研究を行うことは明記されていなかった。観測所設置の当初は施設のみを持って共同利用に徹していた。しかし、大型の研

究が必要になるにつれて、固有の研究部門を持って国内外の研究者との共同研究を推進しながら、研究成果を上げることが不可欠になり、研究所の研究サポート及び研究のスタイルが変化していった。

3. 宇宙線研究所の現在の役割

ここでは、現在の宇宙線研究所の研究活動の一部を概観していきたい。研究の大型化に伴い、研究所としてプライオリティをつけて計画の実現を図る必要性が生まれた。そのため1980年代半ばより、宇宙線研究所将来計画検討(小)委員会を設けて研究所全体としての検討がなされるスタイルが確立した。以下はこの委員会で推薦された研究計画のいくつかについて紹介していきたい。

1987年の第1回将来計画検討小委員会の報告で建設を強く推薦されたSuper-Kamiokande(以下SK)は1996年に観測を開始した。観測開始からほぼ2年後の1998年には大気ニュートリノの観測によってニュートリノ振動を発見、また2001年にはカナダのSNO実験の観測とSKの結果から太陽ニュートリノでもニュートリノ振動が起こっていることを発見した。現在SKは7カ国から約120名の研究者が参加する国際共同研究である。これらの結果については、本号特集の中畑・吉田の記事に詳しく書かれているので、そちらを参照していただきたい。

このように画期的な成果を上げたSKであるが、2001年の11月に大きな事故に見舞われた。同年夏、SKは故障した光電子増倍管の交換などの作業のため水槽の水を抜いて補修を行った。補修も終わり純水を再び注入していたとき、どれか1つの光電子増倍管が水中で破損し、それが水圧で一気につぶれた際、衝撃波を放出し、隣の光電子増倍管を破損。その光電子増倍管が、新たな衝撃波を発生するという繰り返しによって、一度に6,000個以上の光電子増倍管が破損してしまった。これは本当に悲惨な事故であったが、当時の吉村太彦所長、戸塚洋二神岡施設長をはじめとする方々の献身的な頑張り、文部科学省などの厚いサポートにより、2002年には事故で破損を免れた光電子増倍管を水槽内に一様に再配置することで、感度は劣るものの観測を再開することができた。そして2006年には完全復旧がなされた。この場を借りて、事故からの復旧を支えて下さった多くの方に心から御礼を申し上げたい。

第2回の将来計画検討小委員会の1993年の報告では最高エネルギー宇宙線の研究と、重力波の研究が強く推薦された。この答申を受け、最高エネルギー宇宙線の観測に向け様々な測定器の案が検討され、最終的に現在のTelescope Array(以下TA)が建設された。TAはシンチレータを使った地上検出器と宇宙線シャワーが発する大気蛍光を観測する大気蛍光望遠鏡からなる装置であるが、明野観測所では、晴天率、大気の透明度、観測装置を設置できる面積が不十分であり、結局アメリカのユタ州の砂漠に装置を設置した。TAは現在までにGZKカットオフで予想される



図2 現在の宇宙線研究所建物。

スペクトルの急激な変化を観測し、この結果は南米に設置された Pierre Auger Observatory の結果とも一致している。また、TA ではこのエネルギー領域での宇宙線粒子が軽い(陽子)か、重い(鉄)かの区別も可能であり、陽子が主な成分との結果を得たが、これについては Pierre Auger Observatory の結果とは合っていない。このことがどう決着つくか、まだわからないが、いずれにしても複数の実験で相互に確認することの大切さを改めて示しているように思われる。なお TA 実験は5カ国約140名の研究者からなる国際共同研究である。詳しくは本号特集の永野・福島の記事を参照していただきたい。

同じく、1993年の第2回将来計画検討小委員会で強く推薦された重力波の観測計画については、地道な技術開発を含め、その実現を努力してきたが、重力波を観測するために必要な装置の大きさが最低で一辺3kmと巨大なこともあり、なかなか実現できなかった。その後の2007年の第3回将来計画検討委員会でもこの実現を強く推薦され、最終的に2010年に文部科学省の最先端研究基盤事業の補助対象事業の一つとして選定され建設が開始された。現在約190名からなる研究グループでは2017年頃の本格観測に向けて準備中である。詳しくは本号特集の藤本の記事を参照していただきたい。

最後に研究とは別に近年研究所が遭遇した環境の変化を記載しておきたい。宇宙線研究所は長い間東京都田無市(現在の西東京市)を本拠地としていたが、2000年に東京大学の柏キャンパスに移転し、新たな発展を目指すこととなった(図2)。引き続き2004年に国立大学が法人化された。これにより各大学は独立な法人として競争していくこととされ、全国共同利用の研究所として研究者コミュニティに研究の場を提供していくという使命と法人化の趣旨が合わないことが問題であった。幸いにもこの問題は文部科学省にも認識してもらうこととなり、2009年に新たな共同利用・共同研究拠点制度のもと、拠点の一つとして認定された。これにより明確な根拠を持って再び共同利用研究を実施できると共に、拠点制度において「共同研究」が認識され、既に述べたように近年の研究の大型化などによる共同

研究化にも制度的な根拠が与えられることになった。

4. 今後の展望—結びにかえて—

本稿の標題は「宇宙線研究所の果たしてきた役割」である。この標題を意識しつつ今まで宇宙線研究所のことを記述した。実に様々なことが起こったことがおわかりになるかと思う。それと共に、この文書を改めて読んで、宇宙線研究所の果たした役割を一言で述べるとすると、全国共同利用研究所として、日本国内の宇宙線研究の発展に幅広く貢献するとともに、ニュートリノや重力波など広い意味の宇宙線物理に関係する新たな観測プロジェクトを実現するなど宇宙線分野の領域の拡大に大きな役割を果たしたと言えよう。

様々な宇宙線の研究を通して光では見えない宇宙の姿、特に非熱的で激しい現象が宇宙の様々なところで起こっていることがわかってきた。宇宙線の発見は100年前ではあるものの、宇宙線に関係する宇宙の姿が深く認識され始めたのは比較的近年であり、これから発見・解明すべき現象は数多く存在する。このようななか宇宙線研究所では現在、第4回将来計画検討委員会を立ち上げて、今後の研究計画について議論を行っている。現在は議論の最中であるが、重要な研究計画を推薦してもらえらるものと期待している。一方で、宇宙線の観測装置も大型化、精密化の一途をたどっており、その実現が世界規模の協力なくしては不可能と思われる時代になってきた。宇宙線研究所は今までは共同利用の大型の装置を設置して、ホスト研究機関として役割を担うことがほとんどであったが、時代は急速に動いており、世界規模の装置の実現にホストとして、あるいは重要なパートナーとして参加を想定することが不可欠となるであろう。我々自身がこの時代の変化を認識することは当然のこととして、国の中型・大型研究のサポートの仕組みにおいても、このような枠組みに柔軟に対応できる必要がある。このような点も含め、今後も日本の宇宙線研究が重要な成果を得、世界の研究をリードできるよう、引き続き皆さまのご支援をお願いしたい。

著者紹介



荒船次郎氏： 専門は素粒子物理学理論、特に大統一理論や宇宙に関係した領域に興味がある。最近はや若い人の物理教育にも関心がある。趣味は将棋。



梶田隆章氏： 専門は宇宙線物理学。特に宇宙線が大気中で生成するニュートリノを研究してきた。最近では重力波プロジェクト KAGRA で研究を行っている。

(2012年8月15日原稿受付)

The Role of the Institute for Cosmic Ray Research

Jiro Arafune and Takaaki Kajita

abstract: When we discuss the history of the cosmic ray research in Japan, the role of the Institute for Cosmic Ray Research (ICRR) of the University of Tokyo cannot be forgotten. In this article, we review the history of the scientific activities of ICRR (1976~present), including

those of the deep underground research facilities (Kamiokande and Super-Kamiokande), the large air shower arrays (AGASA and TA), and the large scale interferometers for gravitational wave, together with the era of the Cosmic Ray Observatory (1953-1976), which was the organization before ICRR. We discuss the role of ICRR in the development of the cosmic ray field in Japan.

日本物理学会誌 第68巻 第1号 (2013年1月号) 予定目次

口絵：今月号の記事から

巻頭言

会長になって良かったこと……………家 泰弘

交流

太陽系外惑星をCTスキャンする……………河原 創, 藤井友香

解説

アンテナ過程を含む交流回路理論と電磁ノイズの削減

……………土岐 博, 佐藤健次

トポロジカル秩序とベリー接続……………初貝安弘

最近の研究から

K中間子水素原子X線精密分光実験の拓く物理

……………岡田信二, 早野龍五, 兵藤哲雄, 池田陽一

単層カーボンナノチューブにおける多重励起子生成

……………小鍋 哲, 岡田 晋

話題

宇宙レーザー干渉計が切り拓く重力波天文学

……………瀬戸直樹, 八木絢外, 安東正樹

JPSJの最近の注目論文から 9月の編集委員会より

……………安藤恒也

学界ニュース

2012年度ノーベル物理学賞：S. Haroche氏, D. J. Wineland氏

一個々の量子系に対する計測と操作を可能にする画期的な

実験的手法……………山本喜久, 占部伸二

第27回西宮湯川記念賞：福嶋健二氏……………初田哲男

談話室

注目論文 (Editors' Choice), その成績は?……………米永一郎

JPSJ編集委員長からのコメント……………安藤恒也

SCOAP³の現状, 課題そして展望……………安達 淳

追悼

追悼：B. D. Serot教授 (1955-2012)……………上地 宏, 松井哲男

杉本健三先生を偲ぶ……………中井浩二

新著紹介

安藤恒也 (JPSJ編集委員長)

日本物理学会が発行している Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ) の論文で2012年7月に掲載可となったものの中から2012年8月の編集委員会を選んだ“Papers of Editors' Choice”(JPSJ注目論文)を以下に紹介します。なお、編集委員会での選考では読者等の論文に対する評価を重要な要素としております。

この紹介記事は国内の新聞社の科学部、科学雑誌の編集部に電子メールで送っている「紹介文」をこの欄のために少し書き直したものです。専門外の読者を想定し、「何が問題で、何が明らかになったのか」を中心にした読み物であるので、参考文献などはなるべく省いています。なお、図に関しては、原図はカラーのものでもモノクロで印刷しているので不鮮明になる場合がありますが、その場合は、物理学会のホームページの「JPSJ注目論文」にカラー版を載せていますので、そちらをご覧ください。

内容の詳細は、末尾に挙げる論文掲載誌、または、JPSJのホームページの「Editors' Choice」の欄から掲載論文をご覧ください(掲載から約1年間は無料公開)。また、関連した話題についての解説やコメントがJPSJホームページの「News and Comments」覧に掲載される場合もありますので、合わせてご覧ください。

JPSJ編集委員会では物理学のあらゆる分野の興味深い論文を「注目論文」としてこの欄で紹介したいと思っています。物理学会会員からのJPSJへの自信作の投稿を期待します。

ヘリウム液面電子が示す巨大な光起電力効果

ヘリウム液面電子は、きわめて清浄な2次元電子系である。液面に平行な(x, y)方向の波動関数は、平面波となり、エネルギーは、 $E = (p_x^2 + p_y^2)/2m$ で与えられる。ここで、 p_x, p_y は x, y 方向の運動量、 m は電子質量で自由電子の質量にきわめて近い。一方、液面と垂直(z)方向には、ヘリウムの分極による鏡像引力ポテンシャルと、液面の近傍にある1 eVのポテンシャル障壁があり、電子はポテンシャル井戸に束縛され、離散的なエネルギー準位をもつ表面電子状態を形成する。その束縛エネルギーは1 meV程度で、 z 方向の波動関数の広がり10 nmほどである。

このように、ヘリウム液面電子は、 z 方向の運動に対して離散化したエネルギー準位をもち、それぞれの準位に対して、面内に連続スペクトルをもつ、サブバンド構造を持つ2次元電子系である。これにマイクロ波を照射してサブバンド間の励起($E_0 \rightarrow E_1$)を起こさせると、図1に示すよ

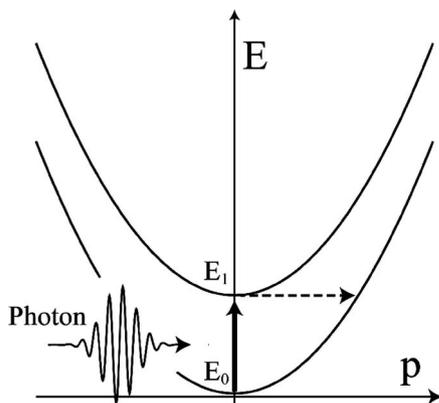


図1 サブバンド構造と電子遷移。

うに、励起された電子は、準弾性的に(破線のように)基底サブバンドに散乱され、その後、強い電子間相互作用によって、効率的に他の電子にエネルギーを渡して、もとの状態に戻る。ここで、電子の散乱体は蒸気中にあるヘリウム原子と量子化された表面張力波、リップロンである。これらの散乱体は電子質量よりもはるかに重く、散乱によるエネルギー移行の効率が悪いために、散乱が準弾性的になる。その結果、容易にホットエレクトロン状態が実現される。¹⁾

磁場が液面に垂直にかかっている場合には面内運動がランダウ量子化されて、さらにエネルギー準位が離散化する(図2(a))。励起サブバンドからの緩和が、準弾性散乱によるとすると、マイクロ波吸収過程への大きな磁場効果が期待される。実際にマイクロ波照射下の磁気抵抗に大きな磁気振動が観測されている。²⁾ σ_{xx} の増大はランダウ量子化に伴う状態密度から定性的に理解できるが、減少はホットエレクトロン効果に関与しているものと推察される。驚くべきことに、ある条件のもとでは、図2(b)に示すように、 σ_{xx} が消失するという、非常に顕著な磁気抵抗効果を発現させる。³⁾

理研のグループは、この σ_{xx} が消失する条件のもとで、50%程度の電子が電子系の縁に移動し、電子系内に大きな電位差が生じることを発見した。まさに、巨大な光起電力効果である。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌 Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ) の2012年9月号に掲載された。

この電子の移動は、条件によって中央に集まる場合も観測されている。また、電子の静的な移動だけではなく、自発的な振動電流を伴う、動的な現象であることがわかっている。一種の散逸構造のようにも見える。発現機構の解明にとどまらず、新しい光電変換の原理となりうるか、ある

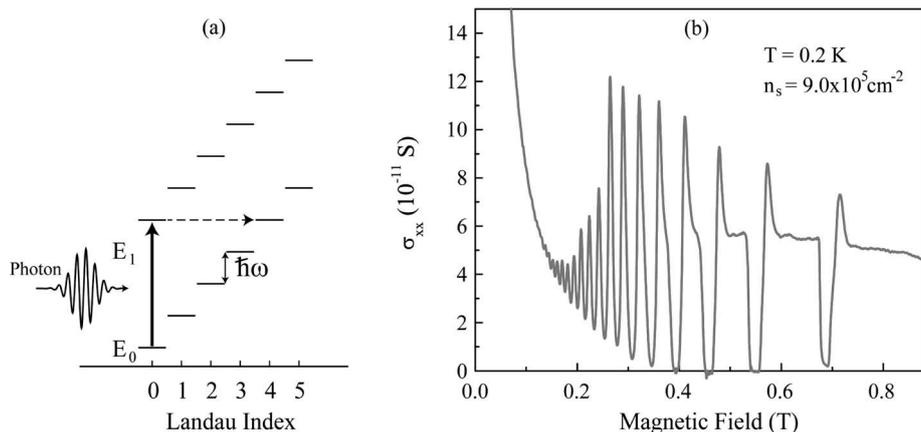


図2 (a) 面直磁場によって各サブバンドの平面方向の運動のエネルギーが $\hbar\omega$ 間隔で離散化したエネルギー準位と、(b) 顕著な磁気伝導度の振動現象(縦軸の単位はジーメンズ).

いは 100 GHz 超帯の検出器や光源などに応用できるかなど、今後の研究の多角的な発展が期待される。

参考文献

- 1) D. Konstantinov, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **98** (2007) 235302.
- 2) D. Konstantinov and K. Kono: Phys. Rev. Lett. **103** (2009) 266808.
- 3) D. Konstantinov and K. Kono: Phys. Rev. Lett. **105** (2010) 226801.

原論文

Resonant Photovoltaic Effect in Surface State Electrons on Liquid Helium

D. Konstantinov, A. Chepelianskii and K. Kono: J. Phys. Soc. Jpn. **81** (2012) 093601.

〈情報提供: D. Konstantinov (現: 沖縄科学技術大学院大学) 河野公俊 (理化学研究所)〉

応用物理 第81巻 第12号 (2012年12月号) 予定目次

特集: ナノエレクトロニクス関連

巻頭言: 広がりを見せるナノエレクトロニクス: ナノ材料・ナノ構造で発現する機能と可能性……………曾根純一

総合報告: 機能性酸化物ナノエレクトロニクスの現状と展望; 半導体デバイスの研究開発を加速する新材料と新原理……………秋永広幸

解説

マイクロ・ナノメカニカル共振器とその応用技術……………山口浩司
 溶液から造る結晶有機トランジスタ……………塚越一仁
 金属酸化物ヘテロ接合の界面伝導……………大友 明
 自己組織化に基づく分子システムの創製とナノマテリアル化学……………君塚信夫

最近の展望

ナノワイヤの堆積プロセスと回路応用……………和保孝夫
 トポロジカル絶縁体入門……………安藤陽一

研究紹介

走査ゲート顕微法を用いた新規FETデバイスのナノスケール局所電気伝導特性評価……………青木伸之, 落合勇一
 超伝導による量子もつれ光子対源の可能性とその展望……………末宗幾夫, 他

有機モットトランジスタの物理と可能性……………川相義高, 山本浩史

基礎講座: デジタル時代の画像入力; 光学系と信号処理の融合……………谷田 純

平成24年度科学研究費補助金（基盤研究等）審査結果報告

青木 健一 〈日本学術振興会学術システム研究センター研究員〉
 杉立 徹 〈日本学術振興会学術システム研究センター研究員〉

1. 平成24年度科研費の状況

日本物理学会誌には毎年、科学研究費補助金（科研費）の審査結果報告の記事が掲載される。平成20年からは日本学術振興会学術システム研究センター研究員が記事を担当している。今回は、科研費予算の推移と物理学関係の応募採択状況の報告を行った後、皆さんにぜひ考えていただきたい、いく

つかのトピックスについて述べる。

科研費予算額の推移を図1に示す。¹⁾平成17年度以降の伸びは間接経費の適用拡大に起因する。平成23年からは複数年度にわたる柔軟な経費利用を可能にするための基金化が一部の種目で開始され、後年度分が前倒し配当された効果で予算額が大きく増えた。実質助成額としては平成23年度が2,204

億円、24年度が2,307億円と順調に伸びて、この15年間で倍増した。

物理学関係の応募採択状況を表1に示す。¹⁾応募総数（基盤・海外を除く）は1,888件で、昨年度の1,997件、一昨年度の1,978件に比べて減少した。この3年間の採択率の推移は、特に基盤（C）、萌芽、若手（B）の小規模種目で大幅に増加して約30%となった。細目間の採択率の差は出ないように調整されているが、平均値には種目毎の差が反映している。

平成25年度募集では10年に一度の細目表の大幅改訂が実行された。各学会や研究者からの意見を集約し、2年近くの議論を経て実行されたものである。物理学関係の改訂の詳細は昨年度の報告に詳しい。²⁾

2. 科研費エビデンス

エビデンスという用語がよく聞かれるようになってきた。それは、使用された予算の効果あるいは実績についての「証拠」という意味で使われている。科研費は研究者の「興味に基づいた」

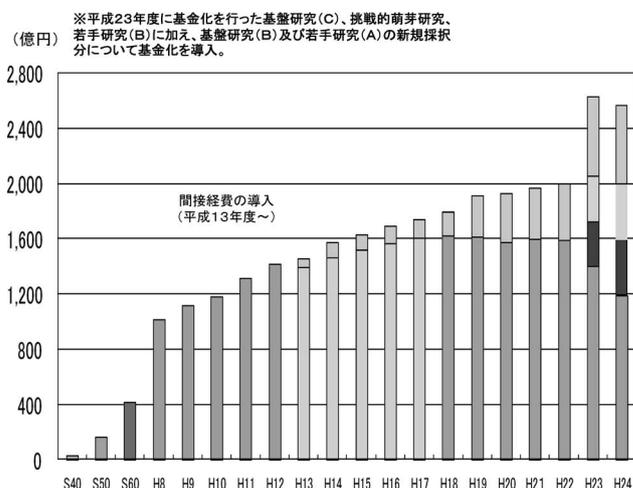


図1 科研費予算額の推移。

表1 平成24年度の物理学関係細目における新規課題の応募・採択状況（平成24年4月現在）。

細目	細目番号	応募採択	基盤(A)一般	基盤(B)一般	基盤(C)一般	挑戦的萌芽	若手(A)	若手(B)	計	採択率(%)
素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理	4301	応募	53	80	221	82	29	173	638	28.1
		採択	13	19	65	25	6	51	179	
物性I	4302	応募	18	41	93	50	19	67	288	26.0
		採択	4	8	26	14	4	19	75	
物性II	4303	応募	30	88	157	72	29	131	507	26.8
		採択	7	20	45	21	6	37	136	
数理物理・物性基礎	4304	応募	5	12	95	36	4	46	198	29.8
		採択	1	3	29	12	0	14	59	
原子・分子・量子エレクトロニクス	4305	応募	9	13	27	22	5	40	116	26.7
		採択	2	3	8	6	1	11	31	
生物物理・化学物理	4306	応募	7	14	48	23	2	47	141	29.1
		採択	2	3	14	7	1	14	41	
種目別採択率(%)			23.8	22.6	29.2	29.8	20.5	29.0	27.6	
種目別採択率(H23)			26.1	23.9	28.0	28.4	22.7	27.3	26.9	
種目別採択率(H22)			21.9	25.8	22.8	10.7	13.6	23.1	21.3	

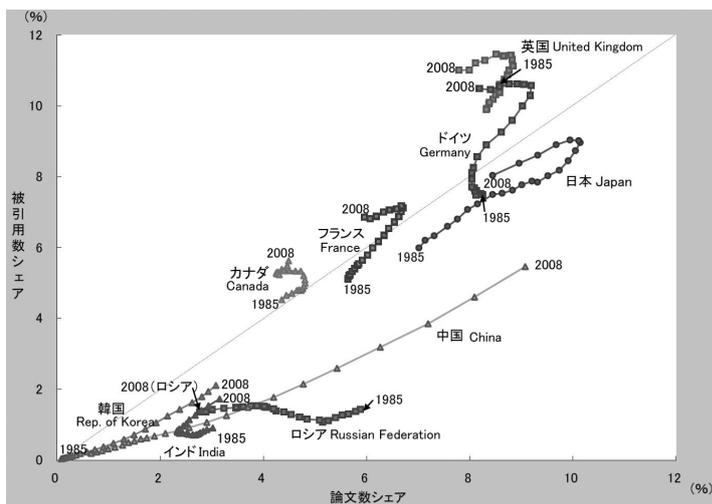


図2 論文数・被引用数シェアの年次推移の国際比較(5年累積値, アメリカは省略)。

研究をサポートする経費であり、ある事業目的に基づいて行われる研究経費とは明確に区別されている。従って、科研費サポートの根拠は、研究者の興味、すなわち学界としての学問的意義で十分であり、審査はその観点から行われている。しかし、政府(予算を支出する側)から見ると、その予算の効果はいか程のものなのか、ということは厳しく点検すべきことであり、納税者の立場からもそれは当然である。

科研費の場合、対予算効果に絶対的な指標を設定できないことは確かであるが、最近、問題にされているのは、相対的な指標である。端的に言えば、この15年間で科研費の予算規模は拡大され続け約2倍になっているのに比して、論文数や被引用数といったマクロなアウトプットの伸びが十分であるようには見えない、という批判である。例えば「科学技術要覧(平成23年版)」³⁾には論文データベースを駆使して作成された論文数と被引用数の世界シェアの国際比較(図2)がある。この比較はシェアであるから、新興国が伸びれば日本のシェアが下がるのは当然だが、ヨーロッパ諸国やアメリカと比較すると「論文生産において低下する日本のポジション」⁴⁾と言われるような状況も読み取れる。最近10年間の論文数及び上位論文数(被引用数上位10%に属する論文数)の伸び率が日本だけ著しく少ないという結果も科学技術政策研究所から出されている。日本の伸び率は、論文数14%(上位論文

数25%)であるのに対して、イギリス31%(63%)、ドイツ41%(77%)、フランス38%(65%)、アメリカ39%(35%)となっている。⁴⁾なお、同じ科学技術政策研究所からは、大学教員の平均研究時間率(エフォート)が2002年の47.5%から2008年には36.1%に激減したという分析も出されており興味深い。⁵⁾

論文データベースによる分析は多岐にわたる事項を分野毎に解析しており、webで公開されているのでぜひ直接ご覧いただきたい。基礎科学のアウトプットの評価指標設定は難しい問題であり、学術システム研究センターでも検討を進めている。いろいろな立場や視点からの議論が必須であり、皆さんの経験や生データに基づく提言を期待する。

3. 審査委員の選出と審査結果の検証

科研費の特徴は、その審査が全て peer review と呼ばれる研究同業者による評価によっていることにある。私たちの学術システム研究センターの活動⁶⁾はあまり知られていないと言えないが、審査委員の選出と審査結果の検証が一つの重要な活動である。科研費審査は2段階に分かれている。1段階審査(書面)では、種目や予算規模によって4名ないし6名の審査委員グループが申請書の同じセットを審査する。評点とコメントが提出されて2段階審査(合議)に付され、採否と予算額が決定される。このシステムの根幹は、peer

review の体制を支える審査委員の集団にある。審査委員の偏りの可能性は徹底的に排除される。例えば、同一グループには同一研究機関から複数の審査委員を入れることはできない。また、審査委員の所属、性別などに最大限の平準性の配慮を行っている。学術振興会には科研費に加えて特別研究員や各種の事業もあり、同様な peer review での採否決定が行われているが、それらも含め審査委員の重複は認められず、連続委嘱は極力さける。審査委員はあらかじめ登録された審査委員候補者データベースから選ぶが、この審査事業を円滑に進めるために十分な登録数にはなっていないのが現状である。科研費システムを今後も信頼度の高い peer review によって発展させるために、ぜひとも審査委員登録という形のご協力をお願いしたい。

審査委員の審査結果は、採否確定後に学術システム研究センターによって検証され、優秀審査委員を表彰する制度が平成20年より始まっている。平成23年度は全分野で約5,000人の1段階審査委員の中から49名が表彰された。⁷⁾優秀審査委員を選ぶ作業は、同時に、適正さを欠いている疑いのある審査結果を拾い出してしまうことにもなる。審査コメントが空白、同じ形式的なフレーズばかり、論文数を数えているだけ、利害関係があるわけではないのに多くの申請の審査を拒否、等である。合議の上、審査委員としての適格性への疑問がある場合には、次年度あるいは長期に審査委員候補者データベースからはずされることになる。審査委員を引き受けていただいた際には、ぜひとも2段階審査での採否決定に有効な丁寧な審査と有意義な審査コメントをお願いしたい。

4. 審査コメント活用の模索

研究計画調書を詳細に読んで書かれた審査委員からの貴重なコメントは、現状では、第2段階合議審査の場で利用されているだけである。これは、誰が考えても「もったいない」。それは審査委員にお願いしている多大なご苦勞と見合わないからだけではなく、この審査コメントを申請者に何らかの形で

戻すことができれば、申請者の研究計画にとって貴重な助言となる場合も多いに違いないからである。学術システム研究センターではこの具体的な方法の可能性について検討している。もちろん、少し想像しただけで、いろいろなデメリットが見えることもあり、これまでに築き上げられた科研費システム全体の整合性、信頼性を失わないように細心の注意をしながら、peer review方式改善への次の一步をどう踏み出せるかが課題である。新方式を一部の分野や種目で試行する可能性も議論されている。これはある意味で、研究者ソサエティ自体の成熟度が試される課題でもあり、物理学会関係分野が

十分に成熟したソサエティであることを期待したい。

今年度、学術システム研究センターの物理学関係研究員は、森 正樹、川上則雄、萩行正憲、青木健一、杉立徹、鹿野田一司である。お近くの研究員に科研費や学術振興会の事業全般についてのご意見やご提案を寄せていただきたい。

参考文献

[Web]とある文献はWebから検索して入手可能です。

- 1) 日本学術振興会：科学研究費助成事業 科研費データ [Web].
- 2) 川上則雄, 萩行正憲：日本物理学会誌 **64** (2011) 705—平成23年度科学研究費助成事業 (科研費, 基盤研究等) 審査結果報告.

- 3) 文部科学省：科学技術要覧 (平成23年版) [Web].
- 4) 阪 彩香, 桑原輝隆：「科学研究のベンチマーキング2011—論文分析でみる世界の研究活動の変化と日本の状況—」(科学技術政策研究所) [Web].
- 5) 神田由美子, 桑原輝隆：「減少する大学教員の研究時間—「大学等におけるフルタイム換算データに関する調査」による2002年と2008年の比較—」(科学技術政策研究所) [Web].
- 6) 日本学術振興会：学術システム研究センター、第一線の研究経験を学術振興に活かす、2012 (リーフレット) [Web].
- 7) 日本学術振興会：科学研究費助成事業 審査委員の表彰 表彰者一覧 [Web].

(2012年10月3日原稿受付)

第12回素粒子メダル：小谷恒之氏，高杉英一氏，土井勝氏，西浦宏幸氏

百武慶文（茨城大理）

素粒子論及びその周辺分野で挙げられた顕著な業績を顕彰し，次世代のさらなる独創的研究が生み出されることを目的として，これに貢献した国内の研究者に贈られる素粒子メダルは，今年度（第12回）は次の方に授与されま

した。

第12回素粒子メダル受賞者：

小谷恒之氏，高杉英一氏，土井勝氏，西浦宏幸氏

受賞業績：マヨラナニュートリノのCP位相に関する研究

M. Doi, T. Kotani, H. Nishiura, K. Okuda and E. Takasugi: "CP violation in Majorana neutrinos" Phys. Lett. B **102** (1981) 323.

(2012年10月2日原稿受付)

歴史の小径

マティアスの法則の成立過程と超伝導体 MgB₂ の発見

溝畑典宏（和歌山市）

金属系における最高超伝導転移温度 $T_c = 39$ K をもつ MgB₂ が，2001 年秋光らにより発見された。¹⁾ この経緯は，磁性元素を含まない強磁性体と言われている CaB₆，²⁾ CaB₂C₂³⁾ の発見が契機となっている。⁴⁾ MgB₂ 発見の驚きは，当時の雑誌から分かる。⁵⁾ 秋光は述べている。「MgB₂ の結晶構造は…AlB₂ 型と呼ばれ，…古くからよく知られており，…Matthias によって組織的に研究されたが，なぜだか MgB₂ だけは，彼は合成しなかった…」⁶⁾ ここではこの謎解きを試みる。これまでマティアス (Bernd Teo Matthias: 1918-80, ベル研) の法則成立過程について考察した文献はあるが，⁷⁾ MgB₂ がマティアスにより見逃された原因を考察しているものはない。

1. マティアスの初期の超伝導研究 (1951-54年)

最初の論文「新しいホウ化と窒化超伝導体」は，⁸⁾ 非超伝導元素が化合物になると超伝導を示すことは重要であるが，これまで実験がわずかなことに端を発する。実験の結果，表1で太字の超伝導体が発見された。化合物記号

の後は T_c (K)，細字は非超伝導体，() は最低実験温度。

当時 Nb は $T_c = 8$ K であり，Mo は 0.3 K まで非超伝導との報告から，⁹⁾ 特に Mo 化合物での超伝導の発見が衝撃的と報告されている。以上より，マティアスが初めて行った超伝導研究で，超伝導でない B と N を使い，特に Mo 化合物での超伝導の発現を見出したことから，B の重要性をマティアスは認識していたといえる。

続いて，約 90 の二元と三元化合物を調べた。¹⁰⁾ 主に遷移金属と N, C, B 素との化合物，そして Bi 化合物で，実験の結果，Mo₂N, MoN, **Mo₂B**, **NbB**, SrBi₂, BaBi₂ を超伝導体として発見している。Mg 化合物については Mg₃Bi₂ と CuMgBi が超伝導にならないことを見出している。注目すべきは，この時

点でマティアスは，B と Mg が手元にあったという点で，MgB₂ の発見に非常に近かったといえる。

1954 年 3 月に掲載 (11 月 23 日受理) されたハーディー (G. Hardy) らの論文には，後年のマティアスの A15 型探索に極めて大きな刺激となった A15 型超伝導体 V₃Si ($T_c = 17.1$ K) の発見が含まれている。¹¹⁾ 一方，ハーディーの論文と同日にジョーンズ (M. Jones) による MgB₂ 合成の論文が受理された。¹²⁾ ここには，MgB₂ は水素中で調合できることと，結晶構造は AlB₂ と同じ C32 型をもつ化合物との報告はあるが，超伝導に関する記述はない。同年 6 月に受理されたマティアスの論文では，先のハーディー発見の V₃Si を上回る当時最高 $T_c = 18$ K の，同じ A15 型の Nb₃Sn の発見を報告している。¹³⁾ A15 型に関しては，その後，1963 年の包括的報告書に示すように約 9 年間で 33 種の超伝導体をほぼ毎年発見している。¹⁴⁾ これらより，マティアスは同時期に合成法が発見された MgB₂ には目を向けず，A15 型を重点的に探索

表1 マティアス最初の超伝導研究の実験結果。

'51	Nb	Ta	Mo
B	NbB 6 K 斜方晶	TaB (1.29 K)	MoB 4.4 K 正方晶
	Nb ₃ B ₄ (1.27 K)	Ta ₃ B ₄ (1.30 K)	Mo ₂ B ₅ (1.32 K)
N	NbN 14.7 K	TaN (1.88 K)	Mo₂N 5 K 面心立方
	Nb ₂ N (9.5 K)	Ta ₂ N (9.5 K)	MoN 12.0 K 六方格子

したことが裏付けられる。

2. マティアスの法則の成立過程の検討 (1953-57年)

マティアスがこの法則に気づき始めたのは1953年である。¹⁵⁾ 超伝導体について、彼が注目したのは R 値(=価電子/原子)であった。これは後のマティアスの法則での ela のことであるが、「以前調査された化合物のほとんどは R 値が小さく真に金属的であった。シューベルト(K. Schubert)によると、¹⁶⁾ 純粋な金属結合を表すよいクライテリアである。」とマティアスは記している。蛍石結晶構造の R 値については、まず超伝導を示す CoSi_2 は R 値 $\gg 3.3$ であること。テキストから、¹⁷⁾ 他の蛍石構造のほとんどの金属間化合物では $R=8/3$ であり、これはブリュアン域を満たすのに必要な電子の数であるので、 R 値が $8/3=(2\times 2+4)/3$ である Mg_2Si が超伝導体ではなく半導体であることが理解できること。よって、蛍石構造では、 $R\gg 8/3$ である化合物で超伝導が期待できるとしている。そしてこの R 値の仮説に基づいて、 Rh_3Ge_2 、 IrGe (R 値 ≈ 7)の超伝導を発見している。この結果からマティアスは既知の超伝導体の R 値を調べると、高い T_c をもつ Nb 、 V_3Si 、*etc.*は R 値が5より少し小さかった。

以上から、1953年に、マティアスがシューベルトの金属結合を表すクライテリアを利用し、超伝導体の R 値を調べていくことでマティアスの法則の端緒をつかみ、 R 値 $\gg 8/3$ で超伝導が期待できると結論づけたことが分かる。

1955年論文では、 Tc (テクネチウム)の T_c が11 Kで、 ela が7であることから、 T_c のピークがひとつ増え、 $ela=6$ の谷を中心に対称となっていることを遷移金属元素について指摘し、遷移金属合金(A15型、 Mo 、 W 合金)についても成り立つことを指摘している。¹⁸⁾ ここでマティアスの法則のグラフ原型が現れた。

そして1957年には、集大成として「周期系における超伝導」を発表した。¹⁹⁾ 目的は、すべての超伝導体の超伝導条件を明らかにすることで、条件 $2 < ela < 8$ を明記している。元素に関

しては、遷移金属だけでなく、閉 d 殻周期元素まで広げた ela と T_c の関係グラフを提示し、A15型に関しては、 T_c のピークが ela で約0.5低い、ふたつのピークを保っていると述べている。

3. マティアスのアルカリ土類系化合物の研究 (1957年)

前節で、実は超伝導が期待できないとした $R=8/3$ が、 $\text{MgB}_2=(2+3\times 2)/3$ との共通点なのである。さらにマティアスが法則集大成の報告書を発表した1957年に MgB_2 を見逃した理由を裏付ける彼のもうひとつの重要な論文が存在する。それは1頁に満たない「アルカリ土類化合物超伝導体」である。²⁰⁾ そこには自ら導いたマティアスの法則を引用し、「 ela が2以下や8以上の金属系は1 K以上の超伝導にならないことは以前から確立されてきた。 ela が2のアルカリ土類は境界にあり、超伝導になっても T_c は低い。」と述べている。 Mg の ela はアルカリ土類と同じであるから、マティアスはこの法則は Mg にも適用できると考えた。そして、自ら研究したアルカリ土類超伝導体である Bi 化合物 CaBi_3 、 SrBi_3 、 BaBi_3 について、「唯一アルカリ土類化合物で超伝導になるのは Bi 系である。 Bi 自体超伝導体であるので、多くの Bi 化合物は超伝導体である。²¹⁾ よって、これらアルカリ土類が化合物となってもあまり超伝導化には役立たない。」と否定的である。

ela が5である Bi のアルカリ土類化合物の ela は $(2+5\times 3)/4=4.25$ である。 B 、 C 、 N の価電子数はそれぞれ3、4、5と Bi 以下である。 MgB_2 は $ela=8/3=2.6$ であり、 Mg と B は超伝導体ではないから、 MgB_2 は期待が薄いとマティアスは考えた。この理由により、マティアスは B 、 C 、 N を化合することなく、アルカリ土類と ela の大きな貴金属の化合物の研究に移行してしまう。その結果、 Ca 、 Sr 、 Ba と Rh 、 Ir との5つの化合物の超伝導($T_c\sim 6$ K)を発見するので、確信を深めていくことになる。

決定的なのは、1963年に至ってマティアスは、¹⁴⁾ B 化合物 OsB_2 を研究したが超伝導体ではなかった。さらに、 Mg 化合物についても調査したが、

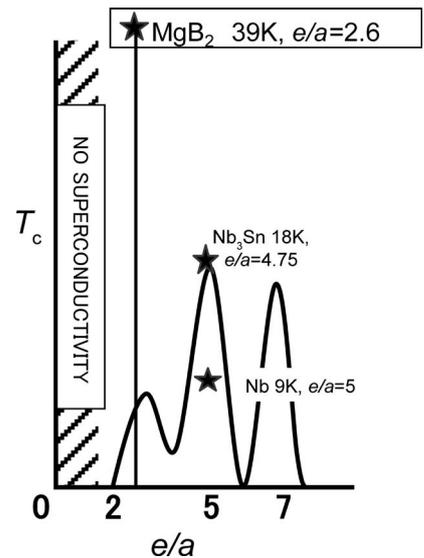


図1 マティアスの法則と MgB_2 の T_c 。B. T. Matthias, 'Superconductivity in the Periodic System', "Progress in Low-Temperature Physics, Vol. II", ed. C. J. Gorter (North-Holland Publishing Co., 1957) p. 140から抜粋し修正。

1957年と同様、貴金属を中心とした次の研究にとどまり、 B 、 C 、 N を化合することはなかった。 MgAu 、 MgAg 、 Mg_2Ca 、 MgCu_2 、 Mg_2Al_3 。この中には $T_c\sim 5$ K以上はなかった。

4. マティアスが MgB_2 を見落とした原因

これまでを整理すると、(1) マティアスは最初の超伝導研究で、 B や N の非超伝導元素が化合物になれば超伝導を示す重要性を認識しながら、合成法が発見された MgB_2 には目を向けず、1952年以降、 Bi やA15型に焦点を合わせた。なお1952年 B と Mg がマティアスの手元にあった点で、 MgB_2 の発見に非常に近かったことは惜しまれる。(2) 1953年は蛍石結晶構造の超伝導体 CoSi_2 と半導体 Mg_2Si から、 $R\gg 8/3$ の化合物で超伝導が期待できると判断した。しかし、実際は同じ R 値 $8/3$ をもつ MgB_2 の T_c は図1の★印となる。(3) 1957~63年の研究では、 $R\gg 8/3$ の思想に基づいて Mg を含むアルカリ土類金属については、 ela の大きな貴金属を中心とした化合物の研究を選択し、 B 、 C 、 N を化合することはなかったので、 MgB_2 の発見には至らなかった。

最後に

彼が従来どおりの順番で B 、 C 、 N 化

化合物を研究していたら、歴史は変わっていた。今後はマティアスの結晶構造別の表¹⁴⁾やこの法則を改良することで、MgB₂を超える物質が発見されるかもしれない。参考に、周期表を活用しての物質探索法に関する文献を紹介しておく。²²⁾

2008年12月、2010年5月日本科学史学会にて助言頂いた皆様、及び加藤勝博士、斎藤憲博士に感謝申し上げます。

参考文献と注

- 1) J. Nagamatsu, *et al.*: *Nature* **410** (2001) 63.
- 2) D. P. Young, D. Hall, M. E. Torelli and Z. Fisk, *et al.*: *Nature* **397** (1999) 412.
- 3) J. Akimitsu, *et al.*: *Science* **293** (2001) 1125.
- 4) 秋光 純共著:『自然の謎と科学のロマン(上)宇宙と物質・編』(新日本出版社, 2003) pp. 89-113, 特に106.
- 5) A. M. Campbell: *Science* **292** (2001) 65; R. J.

- Cava: *Nature* **410** (2001) 23.
- 6) 秋光 純, 銭谷勇磁: *金属* **72** (2002) 5, 特に7.
- 7) T. H. Geballe and J. K. Hulm: *Biographical Memoirs V. 70* (National Academy of Science, 1996) pp. 241-259. http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=5406&page=241 (取得2012.5.1): J. Matricon and G. Waysand: *The Cold Wars* (Rutgers Univ. Press, 2003) p. 184; 齊藤安俊, 北田正弘編:『金属学のルーツ』(内田老鶴圃, 2002) p. 193.
- 8) J. K. Hulm and B. T. Matthias: *Phys. Rev. Lett.* **82** (1951) 273.
- 9) D. Shönberg: *Superconductivity* (Cambridge Univ. Press, 1960) p. 222.
- 10) B. T. Matthias and J. K. Hulm: *Phys. Rev.* **87** (1952) 799.
- 11) G. F. Hardy and J. K. Hulm: *Phys. Rev.* **93** (1954) 1004.
- 12) M. Jones and R. Marsh: *J. Am. Chem. Soc.* **76** (1954) 1434.
- 13) B. T. Matthias and T. H. Geballe, *et al.*: *Phys. Rev.* **97** (1954) 1435.
- 14) B. T. Matthias, T. H. Geballe and V. B. Comp-

- ton: *Rev. Mod. Phys.* **35** (1963) 1, 特に12. 物質406種を結晶構造別に整理した.
- 15) B. T. Matthias: *Phys. Rev.* **92** (1953) 874.
- 16) K. Schubert: *Z. Metallkunde* **41** (1950) 418.
- 17) N. F. Mott and H. Jones: *The Theory of Properties of Metals and Alloys* (Oxford Univ. Press, 1936) pp. 169-170; 邦訳書『金属物性論』(内田老鶴圃, 1988) p. 202 (該当頁は原書未入手のため推定).
- 18) B. T. Matthias: *Phys. Rev.* **97** (1955) 74.
- 19) B. T. Matthias: 'Superconductivity in the Periodic System', *Progress in Low-Temperature Physics, Vol. II*, ed. C. J. Gorter (North-Holland Pub. Co., 1957) p. 138.
- 20) B. T. Matthias and E. Corenzwit: *Phys. Rev.* **107** (1957) 1558.
- 21) 文献14, p. 5右欄~p. 6; Biは0.05 Kまで常伝導であり, 箔は6.0 Kで超伝導となる.
- 22) 北田正弘, 鈴木朝夫, 金子秀夫, 秋葉悦男, 戸叶一正ほか: 金属(アグネ技術センター, 1988年9月) pp. 2-34—特集「材料開発に周期表を使おう」.

(2012年2月19日原稿受付)

『大学の物理教育』誌定期購読のすすめ

『大学の物理教育』は、年3回(3月, 7月, 11月)発行で年間購読料(個人)は1,000円です。購読ご希望の方は、お電話(03-3816-6201)またはFax(03-3816-6208)でご連絡下さい。

また、本誌ホームページのURLは次の通りですので、どうぞご覧下さい。

<http://www.jps.or.jp/book/kyoikushi/>

『大学の物理教育』編集委員会

Vol. 18-3 (11月15日発行) 目次

近頃の学生さん.....家 泰弘
講義室
 高等学校の物理教科書—新学習指導要領のもとでどう変わったのか、高校生たちはどう学ぶのか.....筒井和幸, 下田 正
 大学入試が若者たちの学びに与える影響...下田 正, 筒井和幸
磁性実験とそのためのモーゼ効果の確認.....沢田 功
教育報告
 サイエンス・パートナーシップ・プロジェクト「放射線から見る科学と技術の最先端」実施報告
内田聡子, 小鍛治優, 田村圭介
 作って・測って・判断できる放射線教育システムの構築—国民的素養としての放射線教育をめざして—
中川和道, 川茂唯順, 竹谷 篤, 足利裕人
 国際物理オリンピック引率者としての所感.....村下湧音

物理教育世界会議2012参加報告安田淳一郎
 2011年度IUPAP-ICPEメダルを受賞して—その意味を考える—
川勝 博
 物理学・物理教育の新しい芽をアジア太平洋地域から
 —第12回アジア太平洋物理学会(APPC12)のご案内—
笹尾真実子
 科学リテラシー普及のために—科学普及員研修制度の確立—
廣田誠子
教育に関する一言.....山田弘明/岡村直利/赤羽 明
開催情報
寄贈書リスト
『大学の物理教育』総目次 (vol. 18)
編集後記

宮本梧楼先生ご逝去

浅見 明 ◇

川崎 温 ◇

東京大学名誉教授宮本梧楼先生が平成24年7月20日にお亡くなりになりました。1911年8月のお生まれで、百一歳にあと一か月というご長寿でした。先生は1936年に東大理学部物理学を卒業され、嵯峨根良吉先生のもとで原子(核)物理学の研究を始められました。日本では、特に実験の分野はまだまだ黎明期でした。以降1972年のご退官まで、さらにその後も原子核物理、加速器、核融合制御の広い分野にわたって研究を重ねられ、今日の我が国における研究の隆盛に至るその基礎を築かれました。

先生のご研究は理研のサイクロトロンからの放射性同位元素のベータ線解析に始まりました。ありきたりの測定装置に満足することなく、渦巻き型収束質量分析器を発案されました。二次元ではありますが、すべての方向に放射された同一の元素を同一の円軌道に収束するよう磁場を形成するもので、非常に明るい集イオン能力を持ち、*Handbuch der Physik*にも詳しく記載されています。この研究は後年さらに収束性を極限にまで追求した完全収束質量分析器が創案され、宮本先生の指導下に(故)蟻川達男氏によって完成することに結び付きました。

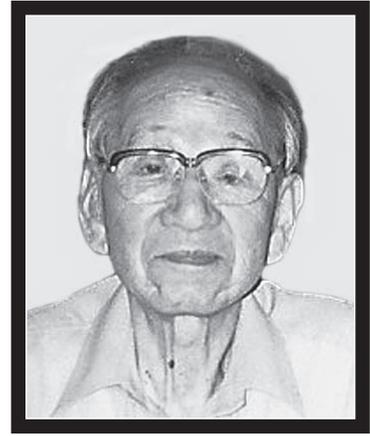
次に先生は敗戦によって世界から大きく立ち遅れた高エネルギー物理学実験、なかんずくその必須の手段としての高エネルギー加速器の研究に着手されました。1953年に文部省機関研究費交付によって東大強収束電子シンクロトロンの建設を始められました。1952年にCourant等によってその原理が提案されたばかりでした。いかに先生の見通しが透徹した先見性に富むものであったかを示すものです。非常に低い磁場で入射し、ベータatron加速の後2 MeVでRF加速に切り替えるなどの工夫を凝らし、国内最初の中間子生成を目指して170 MeVまで加速す

る、当時としては破天荒の計画です。先生の統轄の下、研究室全員で設計、建設に従事しました。1954年4月建設開始、1957年2月、ベータatron加速に成功しました。

この型の加速器が強い粒子収束性を持ち、高エネルギーまで加速するのに必要な電磁石の大きさを大幅に小型化できる、画期的なものであったことは現在周知のことですが、その反面思いもかけなかった問題も起きました。パイオニアの苦しみでした。電磁石ヨークの飽和のためにビームが不安定領域に入り、最終到達エネルギーは中間子生成にわずかに及ばない130 MeV止まりでしたが、先生を先頭にそのビーム力学の解明を安定領域上でのビーム位置の測定、その制御といった、当時世界最先端レベルの技法を駆使して成し遂げました。この経験は東大原子核研究所の1.3 GeV電子シンクロトロンの、さらに高エネルギー物理学研究所(当時)の12 GeV陽子シンクロトロンの建設の礎となりました。

これと並行して先生は原子力の平和利用の究極的手法として提案されたばかりのプラズマによる核融合制御研究にいち早く関心を寄せられました。第一、第二回の原子力平和利用ジュネーブ会議を受けて、核融合反応研究会から核融合専門部会、核融合研究委員会へと続く我が国の研究組織化の過程で常に主導的立場を取られて、現研究体制の確立に大きな役割を果たされ、その結果として今日の、世界をリードする立派な全国的研究体制が形作られるに至りました。

この間に先生に育てられた人材はそれぞれの立場で研究に成果をあげています。加速器分野で東大核研の小林喜幸、高エネ研の(故)富家和雄、プラズマ・核融合では原研の森茂、吉川允二、プリンストンの(故)吉川庄一らの諸氏がその中に含まれます。とりわ



けその両面で活躍され、General Atomicsに研究組織を確立した大河千弘氏が特筆されます。これらの門下生の方々を通じて、先生が日本の学界に寄与されたその貢献の大きさは驚くばかりです。

先生は弟子に何かを押し付けようとはされず、各自が別々の仕事で、自分で努力して立ち立ってゆくのを見守って下さいました。何となくそうさせてしまう、カリスマ的ともいえる影響力をお持ちでした。天性の教育者でいらっしゃるのです。独創的な研究の資質に加えて研究組織の運営、統轄の面でもこれだけの能力を示されましたが、さていったん学界の主流となってしまった方式には背を向けて、いつも新しい、独自の路線を探し求めておいででした。研究室でのプラズマベータatron、プラズマライナック、回転プラズマなどなど数多くの他に類を見ない研究がそれを物語っています。弟子たちはその不思議な魅力にとらえられてついて行きました。先生のスタミナは東大ご退官後も茨城大学、原研(特別研究員)で、不運な交通事故にお会いになった九十歳間近のお歳まで続きました。

今にして思うと、先生は古き良き時代のすぐれた物理学者群像列伝の、最後まで残ったおひとりであったようです。今先生を門下生の悲しみのうちにお送りするに際して、一つの時代が終わった、としみじみ感じます。

(2012年10月2日原稿受付)

丸森壽夫先生を偲ぶ

坂田文彦* ◇

原子核理論物理の発展に大きな足跡を残された丸森壽夫先生は、2012年8月11日に急逝されました。享年82歳でした。奥様のお話によると、亡くなる1週間ほど前には筑波の病院に行かれ、医者から1カ月あとにまた薬を取りに来るようにと指示されたので、急に亡くられるとは思ってもおられなかったようです。

先生が原子核理論の研究を始められたのは、それまでの複合核模型や液滴模型に対して、Mayer-Jensenによって「殻模型」が提起され、更にA. Bohr-Mottelsonによって「統一模型」が確立されていく時代でした。先生は統一模型の理論的検討を、「集団運動の背後にある多体問題の本質を明らかにする」観点から開始され、1955年、液滴模型に基づいた現象論的な表面振動を核子多体系の力学として記述する方法、「補助変数の方法」を、朝永先生とは独立に提起されました。それ以降、核理論研究が素粒子研究から分離して独自の発展を遂げていく時代をリードし続けられ、「原子核の集団運動現象の解明」の業績で1978年度の仁科記念賞を授与され、また2009年秋の叙勲で瑞宝中綬章を受章されました。

先生の研究の特徴や研究者としての特質を幾つか述べれば、まず自然科学全体の発展を見ながら、その中で原子核物理の“存在理由”を明確にしうる基本課題ないし研究テーマを常に設定されてきた点が挙げられます。例えば1950年代後半から60年代前半にかけては、物性理論では超伝導におけるBCS理論や、プラズマ振動におけるRPA理論が華々しく展開された時代でしたが、先生は“量子多体系の物理の展開”という観点から、Belyaevらによる「対相関理論」をいち早く評価し、表面振動を微視的に記述する準粒子RPA理論をArvieu-VeneroniおよびBarangerとは独立に提起され、それ以

降の「集団運動の微視的理論」の発展の端緒を開かれました。また研究課題や研究組織の固定化を嫌われ、1956年に基研に赴任されたのを皮切りに、京大物理、九大、核研理論部、そして筑波大学と研究場所を次々と移されるとともに、其々の場所で新しい研究テーマを掲げ、新しい研究グループを形成され、また多くの後継者を育成されました。特に“其々の研究者には、異なった発想、才能があるので、自らの研究者としての資質を高めるためにも、研究に関する議論、共同研究は重要だ”と言われて、先輩、同僚、後輩の区別なく、多くの人々との共同研究や日々の議論を大切にされ、なかでも基研を中心とした長期研究計画、短期研究計画を利用した共同研究で中心的役割を果たされました。更に、国際交流、国際共同研究にも熱心で、各大学での国際会議開催が困難であった時代から、共同利用研をホストとした小規模国際研究集会やサマースクールの開催、定着化に努められるとともに、ニールス・ボーア研究所と日本の原子核グループとの「高速に回転する原子核の構造」に関する国際共同研究の実現にも重要な貢献を果たされました。

更に特筆すべきは、定職を持たない若手研究者に対する研究場所の提供や、経済的支援を核研理論部の機能として実現され、若手の育成に情熱を傾けられました。また、人間性溢れる若者への激励の言葉や精神的支援は先生の真骨頂で、先生によって勇気づけられ、

元気をもらい、先生から大きな影響を受けた後継者は、分野と時代を越えて、数多くおられたと思います。

このような研究の進め方や研究者としての資質は、先生の天性のものと思われませんが、量子力学建設当時から理論物理研究のメッカであり続けたニールス・ボーア研究所からの招待を受け、コペンハーゲン精神の直接の影響下で過ごされた1964年からの2年間に、その資質をさらに大きく育まれたのだと思います。先生が滞在されていた頃のボーア研究所は、冷戦下で分断されていた東西研究者間の国際交流、ソビエト連邦の研究者の孤立化の解消という先駆的役割を果たし、基礎科学の発展に大きく寄与していた時代でした。当時研究所で中心的役割を果たしていたA. BohrやMottelsonらと楽しい時間を過ごされた研究環境、雰囲気強い感銘を受けられた先生は、コペンハーゲン精神を日本国内に育て定着化するために、上述のような多様な活動を、生涯を通して実践してこられました。

時代は流れ、冷戦の終焉から20年以上の歳月が経過し、経済のグローバル化が進み、更に福島第一原発事故が発生した中で、科学と社会と人間との新しい関係、基礎科学の新しいあり方が求められています。このような新たな状況の中でも、先生は私たちの動きを静かに見守り、現代科学の持つ限界とこれからの基礎科学の在り方、方向性について熱く語り、私達を激励し、勇気づけ続けて下さいました。

今日まで長い間お世話になり、有難う御座いました。心からご冥福をお祈りいたします。

(2012年10月9日原稿受付)



お元気な頃の丸森先生、奥様、御息子とともに。

* 茨城大学名誉教授

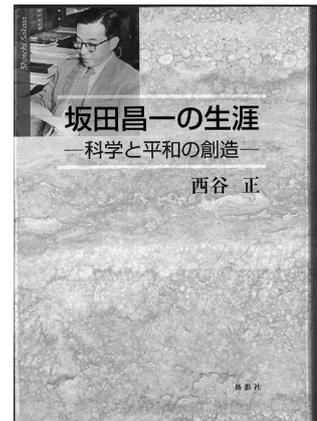
西谷 正

坂田昌一の生涯；科学と平和の創造

鳥影社，長野，2011，477p，22×16 cm，本体3,200円 [一般向]

ISBN 978-4-86265-326-0

植松英穂 〈日大理工〉



没後42年目にして坂田の生涯が出版された。執筆者の西谷は名古屋大学の物理学科の出身であるが、直接坂田から教わったことはないと言う。E研(坂田が率いる研究室)で学んだ益川が序文で「本書は、実に丹念に資料を掘り起こして記述されている。一読に値する。」と書いていることから、弟子からみても違和感のない坂田の生涯が記されていると思われる。

坂田は1911年、ラザフォードによる原子核の発見の年に生まれ、物理の研究を始めたのは、すでに量子力学ができあがり、原子核物理学の革命の年と言われる1932年の頃であった。この年、中性子、陽電子、重水素が発見され、サイクロトロン、コッククロフト-ウォルトンの装置が実用化された。当然のこのように、坂田は最先端の物理として原子核・素粒子の世界へ入り、そしてクォークを提案したゲルマンにノーベル物理学賞が授与された翌年(1970年)に亡くなった。このことから分かるように、坂田は歴史的に大変興味深い素粒子論形成時代の落として子であったと言える。

坂田の名は、'湯川・朝永・坂田'として、あるいは'クォーク模型の先駆者'として知られているが、他の分野の研究者から見ると忘れ去られているように思われる。坂田は研究以外にも、教室の民主的運営改革、講座制廃止と研究グループ制の導入、武谷三段階論の強力な推進者としても知られていて、本書ではこれらのことを詳細に追求しつつ、科学者による平和運動についても記しているところが興味深い。

ここで、坂田の影響力の大きさを示す例をあげさせていただきたい。坂田の教室民主化改革は全国の多くの物理学科の運営に影響を与えたが、特に評者の所属する物理学科は坂田と関係が深い。日大理工の物理学科は湯川の進言により創設され、湯川の指名によりE研助手で坂田の一番弟子であった原治が1957年に創設責任者として赴任したことに始まり、それ以来名古屋大の物理学科を模範として運営してきている。

原は旧制一高出身であったが、東京帝大に行かず、一高教授玉木英彦の強い薦めで坂田のいる名古屋帝大に進学

した。後日彼は、玉木と坂田の共謀であったのではないかと懐古していた。坂田は素粒子論研究を強力に進めるため、E研に優秀な学生を集めようとしていたのであろう。

原は、湯川の研究方法がロマンティック、直感的であるのに反し、坂田はヘーゲル哲学にもとづく方法論を基礎に据え、一步一步論理的につめてゆくというタイプであったと回顧し、坂田と湯川を生きていく上での最後のよりどころとして敬愛していた。本書を読めば原が感じたような坂田の人間像を理解できるのではないと思われる。最期に、坂田がゲルマンのノーベル物理学賞受賞をどのような思いで聞いていたのであろうか、本書で是非扱って欲しかった。

(2012年5月29日原稿受付)

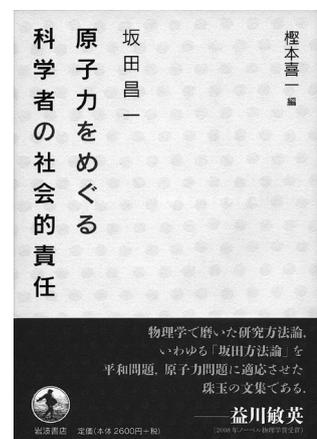
坂田昌一著，櫻本喜一編

原子力をめぐる科学者の社会的責任

岩波書店，東京，2011，x+319p，19×13 cm，本体2,600円 [一般向]

ISBN 978-4-00-005324-2

平田光司 〈総研大融合推進セ〉



本書は坂田昌一博士(1911-1970)の生誕100年にあわせて刊行され、科学と社会をめぐる坂田の論考をほぼ年代順に集めたものだ。

本書に集められた論考の多く(27編中21編)は原子力、原子核研究に関する学会の動きを坂田が解説したものであり、坂田の学会への思いが伺われる。本書冒頭の論考「日本学

術会議第一回総会に出席して(1949)では発足したばかりの学会会議への期待を述べ「何よりもまず学問の政治に対する帮間性をぬぐいさり、その自主性を回復することにつとめなければならない」と結論されている。しかし、現実とは逆の方向に進み、それに抵抗して坂田は同じ主張を何度も繰り返すことになったと思われる。はやくも「科

学者の苦悩(1954)」では「研究費の増額を求めることをのみ急いで学問の魂

ともいうべき学問の自由と独立をまで売り渡すことのないよう、厳にいましめなければならない」と、原子力予算をめぐる研究者の動きを批判した。

学会会議は早い段階で原子力研究の三原則(自主、民主、公開)を勧告した。これは平和利用に徹するためであった(「三原則と濃縮ウラン(1955)」。しかし、原子力の安全性のためにも三原則が重要であり、原子力推進の組織とは独立した民主的な組織が、公開の議論によって安全を保障できるようにすることを要求した(「原子炉の安全審査機構はこれでよいか(1960)」。三原則は原子力にとどまるものでなく、「学会会議そのものの性格」だ、とも述べている(「科学と現代(1968)」。

原子力と三原則に関する論考が本書の中心である。それらの議論の多くが今日でも有効であることには驚くばかりである。

編者の見識の確かさを伺わせるのは、原子力に直接関係しない、基礎研究の大型化に関する論考も取り入れていることだ。「初心忘るべからず」(1967)は素粒子研究を対象としたもので、ここでも施設の大型化にともなう、学会会議の理想が崩されていく可能性を指摘している。ほとんど最後となる論考「科学の論理と政治の論理—学会会議20年」(1968)では学会会議の影が薄れてきたことを指摘し「原因は会員にもある。会員の中にさえ自ら学会会議の墓穴を掘るような行動をとって恥

じないばかりか、そのことを意識すらしていない人がある」と書いている。本書がカバーしている1949年から没年まで、坂田は学問の自主性を確立し社会的責任を果たすべく奮闘したが、逆風は強まるばかりだと感じていたに違いない。

坂田は科学者の平和運動にも積極的に参加した。それに関する重要な論考も数点収録されている。原子力に関する議論の背景には常に核兵器への懸念があったことが伺える。坂田への評価はさまざまにあり得るだろうが、原子力(さらに社会)と科学者について議論する場合、かならず参照すべき論考を本書は集めていると言えるだろう。

(2012年6月9日原稿受付)

坂田昌一著、坂田昌一コペンハーゲン日記刊行会編

坂田昌一コペンハーゲン日記；ボーアとアンデルセンの国で

ナノオプトニクス・エナジー出版局、東京、2011、276p、19×13 cm、本体2,000円[一般向]
ISBN 978-4-7649-5522-6

中村 真 (京大理)

2003年から2005年にかけて、私はニールスボーア研究所にポスドク研究員として在籍した。滞在中に誕生した長女の記念撮影で訪れた写真館の主人から「坂田教授を知っているか」と尋ねられた時には、「もちろん」と答えつつも、私が物心ついた時には既に他界されていた大先生のお話だけに、何か遠い世界の話の話を聞かされている印象を持った。同時に、坂田先生の滞在中のご様子はいかなものだったのか、純粋な興味を感じたのを憶えている。自分が生まれる前に滞在中という時間的隔たりと、全く同じ場所に自分も滞在しているという空間的接点が、坂田先生を遠くて近い不思議な存在にしていた。

本書を手にするうちに、この「遠くて近い」坂田先生が、どんどん私に接近してきた。本書に収められているデンマークの写真の風景は、私が2003年頃に見た風景と全く変わらない。「夕食後ティボリに行く」などの生活の記録は、まるで自分の日記のようであり、思わず頷いてしまう。そして読

み進めるうちに、ある事実に気がついた。先生がコペンハーゲンに滞在された時の年齢は、まさに現在の私の年齢なのだ。どおりで息子さんに宛てた手紙の内容に親近感がわくはずだ。先生の存在が急激に近くなる。

坂田先生から現在の私が学ぶことができるとしたら、どのようなことであろうか。ヨーロッパの実験施設を訪問し、実験の話を積極的に聞かかと思えば、パウリに電話をかけて議論の約束をとりつけている。このような積極性を私も見習いたい。しかし、私が最も感銘を受けたのは、社会における物理学者の役割に関する認識である。当時は日本での原子炉の建設が議論されはじめた時期であり、先生が、物理学者の立場からその是非について真剣に考えておられる様子を、本書から読み取ることができる。「先般来、日本に原子炉をつくらうなどという話がありましたが、あれは子供の火なぶりに似た危険なことだと思います。日本にも仁科博士が丁抹*から持ってかえられ、

* 編集部注：丁抹はデンマークのこと。

坂田昌一 コペンハーゲン日記
—ボーアとアンデルセンの国で—



最良の組織と最高の哲学が在ればよい物理は出来る。
益川・小林のノーベル賞は坂田昌一のこの言葉から生まれた。
湯川・朝永とともに日本の素粒子物理学の基礎を築いた坂田昌一の素顔にさめる日記と書簡。現代物理学隆盛の地、コペンハーゲンのびやかな空気が育んだ、[坂田昌一] 没後直前の記録を初公開。
『編纂会「原子力と国際政治」収録』

湯川・朝永両博士らにより育てられた基礎物理学の貴重な芽があります。この芽を大切に育て上げることこそ日本の原子科学者の正統な使命ではないでしょうか。」という、先生の新聞記事の一節を目にした時、2012年に生きる私は、考え込まずにいらなかった。

本書は、1954年に坂田先生がデンマークに滞在された際の日記を中心とした記録集であり、日記の他に家族への書簡や、新聞に掲載された記事などを含む。これだけの詳細な記録を編纂された関係者に敬意を表したい。本書の大半は先生の日常生活の記録ではあるが、その行間を読み解くうちに、物理学者として様々なことを考えさせられる。我々物理学者は、偉大な先達や異なる視点を持つ同業者との自由闊達

な研究交流から大きな刺激を受けるものだが、坂田模型発表前年のコペンハーゲン滞在が、先生の帰国後の大きな成果に向けた重要な刺激となったのではないか、そんな空想すら可能にして

くれる。本書には、単なる記録集を超えた不思議な味わいがある。

(2012年6月20日原稿受付)

本欄では物理に関する新著を中心に、隠れた良書や学会員にとって有意義な本などを紹介していきます。紹介書籍の表紙画像につきましては、出版社の許可を得られたもののみ掲載しております。



石の上にも3年…

森本安夫*◇

物理学会はこのところえらい人気である。いや、ジョークではない。その根拠は新規入会者数の異常な増大である。図1に入会者数の推移を示してある。これは物理学会誌に発表されるデータからとったものだ。1990年を過ぎると毎年1,000人を超える人たちが学会に入会している。

これは高温超伝導の発見のフィーバーによるものか？ しかしその後も一貫してそれを越し、最近では1,500名を上回るようになった。物理と言った地味な基礎科学にこれだけの新規入会者があるということは喜ばしいことである…

もちろん問題があることを言いたいわけである。1970年から2009年までの入会者数を総計すると41,465人となる。それ以前の会員を合わせると現在実に5万人を超える巨大会になっているはずだ。それが実際には会員数は図2に示す通りで2011年度では17,133名に過ぎない。むしろ1999年から2000年にピークに達し以後漸減している。尤もこれが少ない数だと言うつもりはない。あくまでも5万人に比べて言っているわけだ。この理由をわざわざ筆者が口にする必要はあるまい。会員諸氏には先刻ご承知のことと思うが、要するに発表の必要があるので一度入会はするのだがそれが終わるとすぐ退会してしまうということだ。退会という言い方はあまり相応しくないだろう。要するに1年後に会費を払わないと言うだけのことである。

筆者が問題にしたいのはそれで良いのか？ということだ。もちろんすぐ退会する

にはいろんな理由があるのだろう。就職先が全く物理とは関係の無い分野になってしまった、または不況の煽りで就職先が見つからず会費もろくに払えない状況になってしまったとか。そういえば2008年のリーマンショックの大不況では企業に在籍しておられる会員の方が多く退会されたとも聞いた。リストラで職を失うかもしれない状況では退会も止むを得ないだろう。しかし新入会員にこれだけ大量に退会者がいる状況では全部が全部、そういった止むに止まれぬ状況と考えるのは無理であろう。“発表するため止むを得ず”入会したという事情も充分考えられる。

収入から言えばまあお客さんみたいなもので入場料だけ払ってもらって分儲け！とい

うことになるのだろうか？ それでいいのだろうか？“それでいいのだ！”と赤塚不二夫流に言う人も居るだろう。考え方は人それぞれだ。しかし物理学会とは物理に興味を持ち、好きか嫌いかは別にしてそれに関わらざるを得ない人達によって構成される。そうかどうかを確認するため形式的にせよ入会の審査があるではないか。そしてこの人なら大丈夫と保障してくれる学会員2人の推薦が必要になっている筈だ。物理学会に所属しているということである程度の榮譽もある筈だ（これはちょっとアナクロの気があるが…）。それが発表を終わった途端“ハイさようなら”ではあまりにヒドイ。寂しいではないですか。筆者は何も入会審査を厳しくせよと言っているわけで

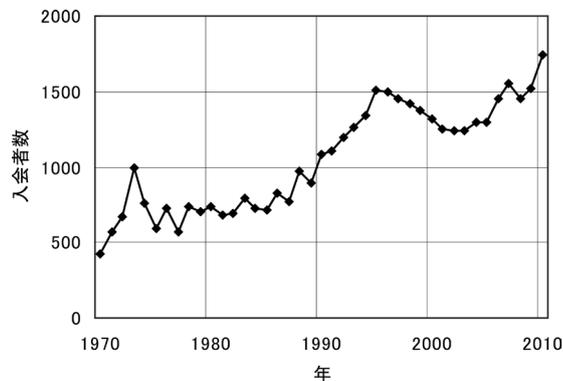


図1 新規入会者数の推移。会誌の各号に発表されている新規入会者名を数えたものである。

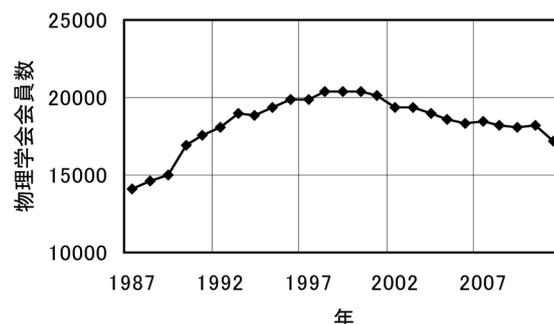


図2 物理学会員総数の年推移。物理学会誌6月号に年次報告の一部として掲載されているものを図にした。

* 明治鍼灸大学名誉教授

はない。しかし何らかの対策を講じた方が
良いとは思っている。

そこで提案だが入会金を廃止したらどう
だろうか？ その替わり入会時には3年か
5年分の会費を納めてもらうのだ。そうす
ると否応無くその期間は物理学会に籍を置
いてもらうことになる。その間に考え方も
変わるだろう。ずっと居ようと思う人も出
てくる筈だ。もちろん辞めてしまう人も居
るだろうがそれは仕方のないことだ。石の
上にも3年、物理学会にも3年というわけ

だ。学生諸氏に適用するのは酷な気はする
が。

常識外れの突飛なアイデアなのであろう
か？ それとも物理学会に愛着をもって
もらう起死回生の妙手なのだろうか？ それ
とも元氣溢れる新入会者に対するシルバー
会員のヤッカミなのか？ 会員諸氏のご意
見を伺いたいものである。

(2012年8月9日原稿受付)

会員の声 投稿規定 (3,000字以内)

- 1) 広く会員にとって関心があると思わ
れる話題についての個人的な意見や
感想を述べた投書を掲載する。
- 2) 採否は編集委員長の判断による。そ
の内容に関する責任は投稿者が負う。
- 3) 毎月15日までに投稿された原稿は原
則として翌々月号掲載とする。

掲示板

毎月1日締切 (17:00 必着)、翌月号掲載。
但し1月号、2月号は前々月の20日締切。
修正等をお願いする場合があります。締切
日よりなるべくお早目にお申込み下さい。
書式は <http://www.jps.or.jp/book/keijiban.html>
にありますので、それに従ってお申
込み下さい。webからのお申込みがで
きない場合は、e-mail: keijiban_jps.or.jp へお
送り下さい。必ず Fax 03-3816-6208 へも
原稿をお送り下さい。Faxがありませんと、
掲載できない場合がございます。HP掲載
をご希望される場合は、上記URLの「2.
ホームページ掲載」をご参照下さい。
本欄の各項目の内容につきましては、本会
は関与致しかねますのでご了解下さい。

人事公募

人事公募の標準書式 (1件500字以内)

1. 公募人員(職名、人数) 2. 所属部門、講座、
研究室等 3. 専門分野、仕事の内容 (1行17
字で7行以内) 4. 着任時期 (西暦年月
日) 5. 任期 6. 応募資格 7. 提出書類 (書類
名の前に○印をつけ簡潔に、1行17字で6
行以内) 8. 公募締切 (西暦年月日、曜日)
9. ①書類送付先(郵便番号、住所、所属、担当
者名) ②問合せ先(郵便番号、住所、所属、担
当者名、電話、Fax、e-mail等、必要と思われ
るもの。①と同じ場合は省略) 10. その他
(1行17字で5行以内)

■高エネルギー加速器研究機構教員

[I]

1. 助教1名(公募番号:素核研12-10)
2. 素粒子原子核研究所
3. 素粒子原子核研究所ハドロングループ
に所属し、J-PARCハドロン実験施設
におけるビームラインの設計・建設に
当たると共に、関連設備維持に従事。
ビームラインを用いたハドロン・原子
核物理研究も行う。
4. 採用決定後早期
5. なし
7. ○履歴書 ○研究歴 ○発表論文リス
ト ○着任後の抱負 ○推薦書又は参
考意見書
8. 2012年12月14日(金)17時必着
9. ①305-0801つくば市大穂1-1 高エネ
ルギー加速器研究機構総務部人事労務
課人事第一係
②素粒子原子核研究所 家入正治 電
話029-284-4452 masaharu.ieiri.kek.jp
10. 封筒に「教員公募関係」「公募番号」を
朱書し郵送の場合は書留で送付。書類
選考の上面接を行う。

[II]

1. 助教1名(公募番号:素核研12-11)
- 2, 4, 5, 7, 8, 9①, 10は [I] に同じ。
3. 素粒子原子核研究所 Belle グループに
所属し、Belle II 実験において実験の
建設・遂行、及びデータ解析に従事。
主にデータ収集システムの開発・運
転に携わる。
9. ②素粒子原子核研究所 堺井義秀 電
話029-864-5335 yoshihide.sakai.kek.jp

[III]

1. 教授1名(公募番号:素核研12-12)
- 2, 4, 5, 7, 8, 9①, 10は [I] に同じ。
3. 素粒子原子核研究所短寿命核グループ
に所属し、理研と連携して進めている

KISS (KEK Isotope Separation System)
プロジェクトにおいて、元素選択型質
量分析器を用いた共同利用実験を推進
する上で中心的役割を担う。

9. ②素粒子原子核研究所 宮武宇也 電
話029-879-6051 hiroari.miyatake.kek.jp

[IV]

1. 准教授1名(公募番号:素核研12-13)
- 2, 4, 5, 7, 8, 9①, 10は [I] に同じ。
3. 素粒子原子核研究所ニュートリノ
グループに所属し、J-PARCニュートリノ
実験において中核的役割を果たす。特
にビーム強度増強を主眼としたニュ
ートリノビーム施設の性能向上を主導。
9. ②素粒子原子核研究所 小林 隆 電
話029-864-5414 takashi.kobayashi.kek.jp

■長崎大学教育学部准教授

1. 准教授1名
2. 数事情報講座
3. 物理学。担当授業科目:小学校理科、
物理学概論、物理学実験Ⅰ・Ⅱ、力学
とエネルギー、電磁気学、中等理科教
育a、科学技術研究A、理科教材開発A、
教養ゼミナール、身のまわりの科学等。
4. 2013年4月1日
5. なし
6. 上記の授業科目を担当でき、実験の指
導ができる者。大学院博士課程修了者
又は同等以上の業績を有する修士課程
修了者。長崎市又はその近郊に居住で
きる者。
7. ○履歴書 ○略歴書 ○応募申請書
○研究業績調書(以上、本学指定様式)
○今迄の教育実績概要(様式自由)
○長崎大学教育学部で研究と教育に携
わることへの抱負(様式自由:2,000
字以内) ○照会可能者2名の所属、

氏名, 連絡先

- 2012年12月17日(月)
- ①852-8521長崎市文教町1-14 長崎大学教育学部 山路裕昭
②教育学部支援課総務係 電話095-819-2263
- 封筒に「数理情報講座 教育職員公募書類在中」と朱書き書留で送付。面接を行う場合あり(旅費等は自己負担)。詳細は<http://www.edu.nagasaki-u.ac.jp/ja/about/recruit/>参照。

■福岡工業大学情報工学部教員

- 教授, 又は准教授, 又は助教1名
- 情報システム工学科
- 数理物理。学科目: 専門基礎科目(物理学)。主要担当科目: 物理基礎科目, プログラミング系基礎科目(Cプログラミング等), 学生実験(物理シミュレーション等)。
- 2013年4月1日
- 65歳定年
- 専門分野の研究業績があり, 博士号取得者, 又は着任時迄の取得可能者。教授, 准教授は大学院の教育, 研究指導の可能な方。助教は, これの可能な方が望ましい。実験や研究で実践的な学生指導ができる方が望ましい。教育歴のあることが望ましい。
- 履歴書(学歴, 職歴, 学会及び社会における活動等, 写真貼付) ○研究業績リスト(査読付論文とその他の論文を区別。外部資金の獲得実績や特許等) ○主要論文別刷又はコピー約5編 ○今迄の研究概要と今後の研究計画 ○教育歴(今迄の担当科目や役職, 教育改善の取組み, オープンキャンパス等での展示, 出前講義等) ○教育に対する抱負(約1,000字) ○紙での提出の他, 電子ファイル等のデジタルデータでも提出(但し, 論文別刷を除く)
- 2012年12月20日(木)必着
- ①811-0295福岡市東区和白東3-30-1福岡工業大学教務課 本行義洋 電話092-606-0647 Fax 092-606-7310
②情報工学部情報システム工学科 木室義彦 電話092-606-4813 Fax 092-606-0754 kimuro_fit.ac.jp
- 封筒に「情報システム工学科教員(数理物理)応募書類在中」と朱書き簡易書留で送付。応募書類原則不返却。助教も独立した研究室を持ち, 研究費が配分される。本学科はJABEEを推進。

■京都大学研究員

- 非常勤研究員 若干名
- 基礎物理学研究所
- 理論物理学の研究
- 2013年4月1日
- 特に問題がなければ2015年3月末迄の2年間
- 2013年4月1日時点で博士号取得者又は取得確実な者
- 応募票 (<http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~yitpsec/H25ptr-form.doc>よりダウンロード) ○履歴書 ○発表論文リスト(共著の場合は共著者名明記, 主要論文3点以内の番号に印) ○研究歴 ○研究計画 ○以上は1つのpdfに纏める ○主要論文(発表論文リストに印, 論文毎のpdf又はアーカイブ番号を指定) ○意見書(1~2通)
- 2012年12月20日(木)必着
- ①posdoc13 yukawa.kyoto-u.ac.jp (意見書のみ郵送可: 606-8502京都市左京区北白川追分町 京都大学基礎物理学研究所 九後太一)
②同研究所 藤田 電話075-753-7009
- e-mail件名は「非常勤研究員応募」と記載。意見書は「非常勤研究員意見書」と朱書き郵送可。詳細は<http://www.yukawa.kyoto-u.ac.jp/contents/info/detail.php?NID=171>参照。

■高エネルギー加速器研究機構研究員

- 博士研究員1名
- 共通基盤研究施設・超伝導低温工学センター
- 機構が推進するJ-PARC, CERN-LHC, KAGRA(低温重力波望遠鏡), ILC計画等における先端的超伝導・低温技術応用の研究開発に取り組む。技術開発の特色を活かし関連する科学実験計画に参加することができる。超伝導・低温技術開発に意欲ある若手研究者を求める。
- 2013年4月1日以降
- 2年。但し, 年度毎の更新
- 博士号取得者, 又は着任時に取得確実な者
- 履歴書 ○研究歴 ○着任後の抱負 ○発表論文リスト(和文, 英文に分類) ○主要論文別刷5編以内 ○推薦書又は参考意見書
- 2012年12月25日(火)
- ①305-0801つくば市大穂1-1 高エネルギー加速器研究機構総務部人事労務課 人事第一係 電話029-864-5118

jinjil ml.post.kek.jp

- ②KEK超伝導低温工学センター 山本 明 電話029-864-5459
akira.yamamoto kek.jp
- 応募の際は, 必ず超伝導低温工学センター長の山本 明に連絡し, 研究内容等について問合せること。

■東北大学多元物質科学研究所教授

- 教授1名
- 計測研究部門
- 最先端計測原理・技術の開発と, その材料・バイオへの応用を目指した研究領域
- 2013年4月1日以降早期
- なし
- 履歴書(形式自由) ○業績リスト(原著論文・総説及び著書・特許・招待講演) ○主要論文10編の別刷と, それぞれの要約等 ○今迄の研究と教育の概要(約2,000字) ○今後の研究と教育に関する抱負(約2,000字) ○外部研究資金の採択状況, 受賞歴, その他参考となる事項 ○照会可能者約2名(国内外不問)の氏名, 所属, 連絡先
- 2012年12月28日(金)
- 980-8577仙台市青葉区片平2-1-1 東北大学多元物質科学研究所第二人事小委員会受付担当 personnel2 tagen.tohoku.ac.jp
- 詳細は<http://www.tagen.tohoku.ac.jp/>参照。

■分子科学研究所教員

[I]

- 若手独立フェロー(特任准教授)若干名
- 独自の着想で新たな分子科学を切り拓く意欲のある若手研究者で, 独立した研究室を主宰するのに十分な能力を有する者。
- できる限り早期
- 5年
- 博士号取得見込, 又は博士号取得後2年以内, 又は海外の博士研究員(帰国後1年以内含)
- 推薦書(自薦の場合不要) ○履歴書(所定書式) ○業績リスト(所定様式) ○主要論文別刷又はプレプリント3編以内各2部 ○主要論文3編以内の業績説明(A4, 2頁以内) ○着任後の研究計画(A4, 2頁以内)
- 2013年1月10日(木)消印有効
- 444-8585岡崎市明大寺町字西郷中38自然科学研究機構岡崎統合事務センター

一総務課人事係 電話0564-55-7113
r7113 orion.ac.jp

10. 封筒に「分子科学研究所若手独立フェロー公募書類在中」と朱書き簡易書留で送付。原則提出書類不返却。詳細は<http://www.ims.ac.jp/jinji/index.cgi>参照。当研究所は男女雇用機会均等法を遵守し男女共同参画に取り組んでいる。

〔Ⅱ〕

1. 助教1名
2. 物質分子科学研究領域電子構造研究部門
3. 表面に主眼を置いた分子機能材料の開拓、又は放射光やレーザーを用いた機能・物性解析法の開発に意欲のある実験研究者。主として当該研究部門の横山利彦教授と協力して研究を行う。
- 4, 8, 9は〔Ⅰ〕に同じ。
5. 6年を目途に転出を推奨
6. 修士課程修了者又は同等以上の学力を有する者
7. ○推薦書(自薦は不要) ○履歴書(所定様式, HP参照) ○研究業績概要(A4, 2頁以内) ○業績リスト(所定様式, HP参照) ○主要論文別刷又はプレプリント5編以内各2部
10. 詳細は<http://www.ims.ac.jp/jinji/index.cgi>参照。当研究所は男女雇用機会均等法を遵守し男女共同参画に取り組んでいる(<http://www.ims.ac.jp/jinji/sankaku.html>)。

■九州工業大学大学院工学研究院准教授

1. 准教授1名
2. 基礎科学研究系量子物理学部門
3. 物質科学における実験的研究(先駆的な研究の開拓に意欲のある方が望ましい)。工学部物理学共通教育、先端機能システム工学専攻及び総合システム工学科の教育・研究指導、入試業務、管理運営業務。(HP参照)
4. 2013年4月1日以降早期
5. なし
6. 博士号取得者
7. ○履歴書(写真貼付) ○研究業績リスト(HP参照) ○今迄の研究概要・教育実績概要(約2,000字) ○主要論文別刷5編以内(コピー可) ○今後の研究計画及び教育に対する抱負(約2,000字) ○照会可能者2名の氏名、連絡先
8. 2013年1月15日(火)必着
9. 804-8550北九州市戸畑区仙水町1-1九州工業大学大学院工学研究院基礎科学研究系 美藤正樹

電話093-884-3286 mitoh tobata.isc.
kyutech.ac.jp

10. 封筒に「基礎科学研究系教員応募書類在中」と朱書き簡易書留で送付。提出書類不返却。面接を行うことがある。女性研究者の応募歓迎。詳細は<http://www.kyutech.ac.jp/information/kyousyokuin/>参照。

■岡山大学教授

1. 教授1名
2. 極限量子研究コア
3. 極限量子研究コアの研究業務(原子を利用したニュートリノ質量分光プロジェクト)に携わると共に、大学院自然科学研究科数理物理学専攻(博士前期課程・博士後期課程)の教育を担当。コア研究業務には、笹尾登教授(2013/3/31定年により退職予定)、吉見彰洋准教授が専任として従事。
4. 採用決定後早期
5. なし
6. 博士号取得者
7. ○履歴書(e-mail明記) ○業績リスト(論文は査読の有無に分類、国際会議報告含) ○業績概要(2,000字以内) ○主要論文別刷5編以内各3部 ○研究や教育に対する計画及び抱負(2,000字以内) ○照会可能者2名の氏名、所属、e-mail、電話 ○着任可能時期
8. 2013年1月15日(火)必着
9. 700-8530岡山市北区津島中3-1-1岡山大学・極限量子研究コア 笹尾 登 電話086-251-7768 sasao fphy.hep.okayama-u.ac.jp
10. 封筒に「教員応募書類在中」と朱書き簡易書留で送付。応募書類不返却。

■国立科学博物館理工学研究部研究員

1. 研究員1名
2. 科学技術史グループ
3. 専門分野: 科学技術史・産業技術史。科学技術史・産業技術史に関する調査研究、標本資料の収集・保管、及び展示・学習支援。
4. 2013年4月1日以降早期
5. なし(常勤)
6. 修士以上の学位を有する者(2012年度内取得見込者含)、又は同等の知識・経験を有する者。
7. 履歴書、研究業績、研究概要等。詳細は<http://www.kahaku.go.jp/disclosure/adoption/index.html>参照。
8. 2013年1月15日(火)
9. 305-0005つくば市天久保4-1-1 国立

科学博物館研究員選考小委員会 石井格 電話029-853-8371 i-ishii kahaku.go.jp

10. 封筒に「研究員応募書類」と朱書き書留で送付。

■核融合科学研究所教授

1. 教授1名
2. ヘリカル研究部基礎物理シミュレーション研究系複合物理シミュレーション研究部門
3. 核融合プラズマ対向壁の損耗挙動、粒子挙動、構造変化による材料劣化等のプラズマが壁と接する領域での現象を、物理学の基本原則に基づいて解明して定量的評価をするとともに、物質とプラズマの相互作用の詳細な物理過程のシミュレーション研究を、数値実験研究プロジェクトのプラズマ壁相互作用グループリーダーとしてとりまとめ、強力に推進する。
4. 採用決定後早期
5. 5年、再任可
6. 博士号取得者等
7. ○履歴書 ○研究歴 ○就任後の抱負 ○推薦書 ○研究業績リスト ○主要論文別刷約5編各6部
8. 2013年1月25日(金)17時必着
9. ①509-5292土岐市下石町322-6 核融合科学研究所 小森彰夫
②核融合科学研究所管理部総務企画課 人事・給与係 電話0572-58-2012
10. 封筒に「ヘリカル研究部基礎物理シミュレーション研究系複合物理シミュレーション研究部門教授公募関係書類」と朱書き書留で送付。詳細は<http://www.nifs.ac.jp/index-j.html>参照。

■東京大学大学院工学系研究科研究員

1. 研究員1名
2. 電気系工学専攻
3. 光学、光物性、光化学等の実験を専門とする分野、又はそれらを基礎としたデバイス作製、評価実験を専門とする方。
4. 2013年4月1日以降
5. 2014年3月31日迄、審査により更新可
6. 博士号取得者又は取得見込者
7. ○履歴書(写真貼付, e-mail明記) ○研究業績リスト ○今迄の研究概要(A4, 約2~3枚) ○着任後の抱負、将来計画等(A4, 約1~2枚) ○推薦・照会可能者2名の連絡先
8. 2013年2月15日(金)必着(但し、適任者が決まり次第締切)

- 113-8656 東京都文京区弥生2-11-16
東京大学工学系研究科 大津元一 電
話 03-5841-1670 Fax 03-5841-1140
ohtsulab_secretary nanophotonics.t.
u-tokyo.ac.jp <http://uuu.t.u-tokyo.ac.jp/>
- 応募書類はe-mail添付か簡易書留で送
付。応募書類不返却。

■弘前大学大学院理工学研究科教授

1. 教授1名
2. 理工学研究科(理工学部物理科学科併
任)
3. 実験物理学。学部と大学院の物理教
育・研究を行う。
4. 2013年7月1日以降早期
5. なし
6. 博士号取得者, 教育経験のある方
7. ○履歴書(写真貼付) ○業績リスト
(研究論文, 著書, 解説等, 主要論文
5編に印) ○主要論文別刷5編(コピ
ー可) ○研究業績概要(A4, 約1枚)
○外部資金獲得状況 ○着任後の研究
計画と教育の抱負(A4, 約1枚) ○照
会可能者2名の氏名, 連絡先(住所,
電話, e-mail)
8. 2013年3月1日(金)必着
9. ①036-8561 弘前市文京町3 弘前大学
大学院理工学研究科教授選考委員会
加藤博雄
②電話0172-39-3654
hiroo cc.hirosaki-u.ac.jp
10. できるだけe-mailで問合せること。封
筒に「教授応募書類在中」と朱筆し簡
易書留で送付。応募書類不返却。書類
選考後面接を行う。

■東北大学原子分子材料科学高等研究機構 博士研究員

1. 博士研究員1名
2. スピントロニクスマテリアルグループ
宮崎・水上研究室
3. 磁性材料に関する実験的研究
4. 2013年4月1日以降
5. 毎年度契約更新, 原則3年迄可
6. 博士号取得者。スパッタや蒸着等によ
る磁性材料薄膜の作製及び基礎的評価,
フォトリソグラフィ等による微細加
工の経験を有することが望ましいが,
将来を見据えたスピントロニクスの実
験研究に意欲的に取り組める方であ
れば考慮。
7. ○履歴書(写真貼付) ○研究歴 ○
論文リスト(査読付とそれ以外に分
類) ○照会可能者1~2名の氏名, 連
絡先 ○主要論文別刷1部

8. 2013年3月31日(日)(採用者が決定次
第締切)
9. 980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1 東
北大学原子分子材料科学高等研究機構
水上成美 電話022-217-6003
sml-koubo wpi-aimr.tohoku.ac.jp
10. 詳細は[http://www.wpi-aimr.tohoku.ac.jp/
modules/staff/koubo121005.html](http://www.wpi-aimr.tohoku.ac.jp/modules/staff/koubo121005.html)参照。

■豊田工業大学教授

1. 主担当教授2名(各分野1名)
2. 大学院工学研究科博士後期課程(情報
援用工学専攻/極限材料専攻)
3. 「次世代エネルギー技術関連分野」「次
世代計測・情報処理分野」
4. 2013年度中, 又はできるだけ早期
6. 博士号取得者(詳細はHP参照)
7. ○履歴書(写真貼付) ○研究業績リ
スト ○主要論文別刷5編(コピー可)
○今迄の研究要約と着任後の研究計画
及び教育についての抱負(各A4, 3枚
以内) ○推薦者2名の氏名, 所属,
連絡先 ○本学指定の応募シート
8. 2013年3月31日(日)消印有効
9. ①468-8511 名古屋市天白区久方2-12-
1 豊田工業大学総務部 平戸 隆
電話052-809-1721 Fax 052-809-1734
②田中周治 電話052-809-1775 Fax
052-809-1721 tanaka_mat toyota-ti.
ac.jp
10. 封筒に「主担当教授公募書類在中」と
朱筆し簡易書留で送付。本学指定の応
募シートの入手及び主担当教授制度に
ついては[http://www.toyota-ti.ac.jp/bosyu/
index.html](http://www.toyota-ti.ac.jp/bosyu/index.html)参照。

学術的会合

学術的会合の標準様式(1件500字以内)

掲載されている例を参考にして, 次の項目
中, 必要なものを簡潔に作成して下さい:
○会合名 ○主催 ○日時(西暦年月日,
曜日) ○場所(会場名の後に括弧して郵便
番号, 住所, 電話) ○内容(1行18字で12行
以内) ○定員 ○参加費(物理学会員, 学生
の参加費) ○申込締切(講演, 参加, 抄録,
原稿提出の別を明記) ○連絡先(郵便番号,
住所, 所属, 担当者名, 電話, Fax, e-mail等)
○その他(1行18字で5行以内)

■情報統計力学の最前線—確率が繋ぐ自然 現象と情報処理の数理—

主催 YSMSPIP準備局
日時 2012年12月14日(金)~16日(日)

場所 東北大学大学院情報科学研究科棟2
階大講義室

内容 情報科学と統計力学との境界領域
(情報統計力学)に軸足を置き, 未だ完
全には解消しきれていない互いの垣根を
越え, 両分野間の更なる融合を図ろうと
の目的の下, 若手研究者が中心となって
組織・実行するものである。「確率」と
「ダイナミクス」というキーワードを中
心に情報科学分野での統計的機械学習理
論・制御理論と非平衡系の物理学さら
には経済情報科学をスコープに入れ, 理論
と応用の両方面からの検討を通じてかつ
てない新しい学際分野へのイノベーション
を模索する。特に若手研究者の自発的
な参加を期待している。

定員 約80名

参加費 無料

参加申込締切 2012年12月12日(水)

連絡先 606-8501 京都市左京区吉田本町
36-1 京都大学大学院情報学研究科シス
テム科学専攻 大関真之 電話075-
753-4940 Fax 075-753-3357
ysmspip_tohoku sys.i.kyoto-u.ac.jp [http://
www.adsys.sys.i.kyoto-u.ac.jp/mohzeki/
YSMSPIP/index.html](http://www.adsys.sys.i.kyoto-u.ac.jp/mohzeki/YSMSPIP/index.html)

■第8回励起ナノプロセス研究会

主催 応用物理学会励起ナノプロセス研究
会

共催 日本物理学会大阪支部, 和歌山大学
独創的研究支援プロジェクト

日時 2012年12月17日(月)~18日(火)

場所 530-0005 大阪大学中之島センター
507室(大阪市北区中之島4-3-53 電話
06-6444-2100)

内容 「最先端の励起ナノプロセス」をテ
ーマに3つのセッション, A【励起プロ
セスによる新規ナノテクノロジー】, B
【最先端の励起法】, C【最先端の時空間
分解測定】を設け, 研究最前線の情報紹
介を基に, 参加者一同で今後の研究開発
の進むべき方向を討論する。若手研究者
を中心としたポスターセッションも設け
る。

定員 約70名

参加費 無料(別途, 要旨集代2,000円)

申込 できるだけ事前にe-mailにて

連絡先 640-8510 和歌山市栄谷930 和歌
山大学システム工学部 篠塚雄三 電話
073-457-8236 Fax 073-457-8237 yuzo
sys.wakayama-u.ac.jp

その他 詳細は[http://annex.jsap.or.jp/excite/
meet-8.html](http://annex.jsap.or.jp/excite/meet-8.html)参照。

■ウインター・サイエンスキャンプ '12-'13

主催 科学技術振興機構

日時 2012年12月23日(日)~2013年1月11日(金)の内、2泊3日~3泊4日

場所 大学、公的研究機関等11会場。詳細はWeb参照。

内容 先進的な研究テーマに取り組んでいる日本各地の大学・公的研究機関等で、第一線の研究者、技術者等から本格的な講義、実験、実習を受けることができる。高校生のための科学技術体験合宿プログラム。

定員 会場毎10~24名(計198名)

参加費 2,000円(食費の一部に充当。交通費は自己負担)

申込 <http://rikai.jst.go.jp/sciencecamp/camp/>より募集要項・参加申込書入手。必要事項を記入の上、事務局宛郵送。

連絡先 102-0091東京都千代田区北の丸公園2-1 日本科学技術振興財団振興事業部内サイエンスキャンプ本部事務局
電話03-3212-2454 Fax 03-3212-0014
camp jsf.or.jp

その他 応募資格は高等学校、中等教育学校後期課程又は高等専門学校(1~3学年)等に在籍する生徒。

■第45回化合物新磁性材料研究会「磁気計測の新展開」

主催 日本磁気学会化合物新磁性材料専門研究会

日時 2012年12月27日(木)

場所 東京大学本郷キャンパス工学部6号館3Fセミナー室A(113-8654東京都文京区本郷7-3-1)

内容 磁気イメージングを始めとする磁気計測技術は磁性研究において必要不可欠なツールであり、長年様々な技術が積み重ねられてきた。光と磁気の相互作用を通じた磁気検出技術を中心に議論を深めることを目的とする。特に空間分解能の極限や高速反転の極限、或いは微弱信号検出の極限等、各方面で技術開発に携わる若手研究者が現場の最新情報を講演する機会を設け、相互の意見交換から更なる技術開発に繋げることを目的とした。講演予定者は鈴木基寛(JASRI/SPRING-8)、大石一城(CROSS)、谷内敏之(東大物性研)、塚本新(日大)、望月伸竜(熊本大)

定員 なし

参加費 無料

申込 当日受付

連絡先 113-0032東京都文京区弥生2-11-

16 武田先端知ビル202号室 東京大学大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター 和達大樹 電話03-5841-0874 Fax 03-5841-0875
wadati ap.t.u-tokyo.ac.jp

■表面科学技術研究会2013「光の常識を覆すものづくり—ナノ表面と光の相互作用—」

主催 日本表面科学会関西支部、表面技術協会関西支部、神戸大学研究基盤センター

協賛 日本物理学会

日時 2013年1月22日(火)

場所 神戸大学瀧川記念学術交流会館(657-8501神戸市灘区六甲台町1-1 電話078-803-5420)

内容 河田 聡(阪大)プラズモニクスが切り拓く世界、秋山 毅(滋賀県立大)プラズモニク・ナノ粒子を用いる光電変換の高効率化、鳥本 司(名大)金属/半導体複合粒子の液相合成と光化学特性制御、平田和也(シグマ光機)光を用いた非接触研磨技術、田中拓男(理研)プラズモニク・メタマテリアルの作り方

定員 100名

参加費 無料

参加申込締切 2013年1月15日(火)

連絡先 619-0237京都府相楽郡精華町光台3-4 パナソニック株式会社先端技術研究所 辻村 歩 電話0774-98-2580
tsujimura.ayumu jp.panasonic.com
<http://www.sssj.org/Kansai/goudou130122.html>

■ゲートスタック研究会—材料・プロセス・評価の物理—(第18回)

主催 応用物理学会 薄膜・表面物理分科会/シリコンテクノロジー分科会

協賛 日本物理学会

日時 2013年1月25日(金)~26日(土)

場所 ニューウェルシティー湯河原(413-0001熱海市泉107 電話0465-63-3721)

内容 2004年まで9回にわたって開催されてきた「超薄シリコン酸化膜の形成・評価・信頼性」研究会の scope を広げて2005年から新たにスタートしたものであり、産官学の第一線の研究者が基礎から応用までを理論と実験の両面から議論し、本分野の発展に貢献することを目的とする。国内外からの招待講演者の他に一般の口頭発表とポスター発表を広く募集。研究会前日にはショートコースを企画。

定員 200名

参加費 13,000円、学生5,000円

参加申込締切 2012年12月15日(土)

連絡先 113-0034東京都文京区湯島2-31-22湯島アーバンビル7階 応用物理学会分科会担当 上村さつき 電話03-5802-0863 Fax 03-5802-6250 kamimura jsap.or.jp <http://home.hiroshima-u.ac.jp/oxide/>

■総研大アジア冬の学校

主催 総合研究大学院大学物理科学研究科 核融合科学専攻

日時 2013年1月29日(火)~2月1日(金)

場所 核融合科学研究所(509-5292土岐市下石町322-6)

内容 日本国内を含むアジア諸国の学生(学部生・大学院生)及び若手研究者を対象に、プラズマ物理の基礎から核融合をめざしたプラズマ実験、核融合プラズマやプラズマの複雑現象のシミュレーションの講義を行う。参加者の現在又は将来の研究に関するポスター発表や参加者と職員の交流の場としての懇親会、大型ヘリカル実験装置LHDや仮想現実装置CompleXcopeの体験実習等も予定。

定員 30名

参加費 無料

参加申込締切 2012年12月10日(月)

連絡先 509-5292土岐市下石町322-6 核融合科学研究所 石黒静児、大谷寛明
aws2012 nifs.ac.jp

その他 詳細は<http://www.nsrp.nifs.ac.jp/aws/>参照。旅費の補助は可能だが、財源に限りがあるので希望に添えない場合がある。旅費の補助を受ける方はポスター発表またレポート提出が義務になる。

■第15回薄膜基礎講座

主催 日本表面科学会

協賛 日本物理学会

日時 2013年2月19日(火)~20日(水)

場所 東京理科大学森戸記念館第2フォーラム(162-0825東京都新宿区神楽坂4-2-2 電話03-5225-1033)

内容 [第1日(2/19)] 深津晋(東京大) 概論:薄膜は人類に何をもたらしたか、他。[第2日(2/20)] 深津晋(東京大) 薄膜とバルクの違い:薄膜だからできる、中村友二(富士通研) 特性改善:目的に応じて異なる膜の良否、他。

定員 80名

参加費 29,500円、学生6,500円(書籍・別冊資料代、消費税込)

参加申込締切 2013年2月13日(水)

連絡先 113-0033東京都文京区本郷2-40-

13本郷コーポレーション402 日本表面
科学会事務局 電話03-3812-0266 Fax
03-3812-2897 shomu sssj.org
その他 詳細は<http://www.sssj.org>参照.

■ニューセラミックス懇話会第40回ニュー
セラミックスセミナー「次世代型蓄電
池にむけた材料革新」

主催 ニューセラミックス懇話会, 大阪府
技術協会

協賛 日本物理学会

日時 2013年2月27日(水)10:00~16:45
(交流会:終了後18:30迄)

場所 大阪市中央公会堂地階大会議室
(530-0005大阪市北区中之島1-1-27 電
話06-6208-2002)

内容 講演題目:1. リチウムイオン電池
の課題とそれを超えて, 2. 革新的蓄電
池にむけた自動車メーカーの取り組み,
3. 次世代型蓄電池材料としての高機能
ガラスセラミックス, 4. 硫化物系ガラ
スセラミック固体電解質を用いた全固体
リチウムイオン二次電池の開発, 5. 高
容量金属硫黄電池にむけた材料創製, 6.
セラミックスによるリチウム電池用セパ
レータの革新

定員 60名

参加費 15,000円

参加申込締切 定員になり次第

連絡先 594-1157和泉市あゆみ野2-7-1 大
阪府立産業技術総合研究所内ニューセラ
ミックス懇話会事務局 電話0725-53-
1919 Fax 0725-53-2332 newceramicsf
dantai.tri-osaka.jp [http://tri-osaka.jp/dantai/
ncf/](http://tri-osaka.jp/dantai/
ncf/)

■MANA International Symposium 2013

主催 物質・材料研究機構, WPI国際ナノ
アーキテクトニクス研究拠点

日時 2013年2月27日(水)~3月1日(金)

場所 つくば国際会議場(305-0032つくば
市竹園2-20-3 電話029-861-0001)

内容 基調講演:ノーベル賞受賞者, 招待
講演:国内外の著名研究者19件予定.
一般講演:MANA PI, 他計16件予定.
ポスター発表:MANA研究者, 他公募有.

定員 300名

参加費 無料

ポスター発表申込締切 2012年12月28日
(金)

参加申込締切 2013年2月20日(水)

連絡先 305-0044つくば市並木1-1 物
質・材料研究機構WPI国際ナノアーキ
テクトニクス研究拠点MANAシンポジ
ウム2013事務局 電話029-860-4709

Fax 029-860-4706
MANA-Symposium nims.go.jp [http://
www.nims.go.jp/mana/2013](http://www.nims.go.jp/mana/2013)

■薄膜トランジスタ国際会議(ITC2013)

主催 ITC2013組織委員会

協賛 日本物理学会, 他

日時 2013年3月1日(金)~2日(土)

場所 東京大学弥生講堂(113-8656東京都
文京区本郷7-3-1)

内容 薄膜トランジスタの研究における材
料やデバイス作製技術からアプリケー
ションまでの幅広い研究者が一堂に会して
議論できる国際的な場を提供し, 薄膜ト
ランジスタ研究の今後の発展に資するこ
とを目的とする. 基調講演者:Min Koo
Han (Seoul National Univ., Korea), Hideo
Hosono (Tokyo Tech, Japan), Georges
Malliaras (Ecole Nationale Sup-rieuredes
Mines, CMP-EMSE, France), James Sturm
(Princeton Univ., USA)

参加費 事前:15,000円, 学生10,000円
2013年2月8日以降:20,000円, 学生
15,000円

アブストラクト締切 2012年12月10日(月)

連絡先 東京大学工学系研究科 染谷隆夫
電話03-5841-0411 Fax 03-5841-6709

itc2013 ntech.t.u-tokyo.ac.jp

その他 アブストラクトは[http://itc2013.
msl.titech.ac.jp/](http://itc2013.
msl.titech.ac.jp/)より投稿.

■第22回コンピュータショナル・マテリア
ルズ・デザイン(CMD)ワークショップ

主催 阪大ナノデザインセンター, 阪大院
物理, 東理大, CMSI, 阪大QEDRI, 他

日時 2013年3月4日(月)~8日(金)

場所 理研AICS(650-0047神戸市中央区
港島南町7-1-26 電話078-940-5555),
ニチイ学館神戸ポートアイランドセンタ
ー(650-0047神戸市中央区港島南町7-
1-5 電話078-304-5991)

内容 効率性, 環境調査性が要求される
21世紀の研究開発で重要な役割を果た
す第一原理計算に基づいた新物質の理論
設計手法に関するチュートリアルを含む
ワークショップ. 密度汎関数理論に基づ
いた第一原理計算手法の理論の講義, 応
用例の紹介とプログラムの実習を行う.

定員 40名

参加費 無料(宿泊費, 食事代, 旅費等は
受講生負担)

参加申込締切 2013年1月27日(日)

連絡先 560-8531豊中市待兼山町1-3 阪
大ナノデザインセンターCMD担当,CMD
ワークショップ実行委員長:赤井久純

(阪大), 実行委員事務局:下司雅章(阪
大ナノデザインセンター) [cmd_insd.
osaka-u.ac.jp](mailto:cmd_insd.
osaka-u.ac.jp) 電話06-6850-6342 Fax
06-6850-6342

その他 学生には旅費, 宿泊費の支援の可
能性あり. 詳細は[http://www.insd.osaka-u.
ac.jp/CMD](http://www.insd.osaka-u.
ac.jp/CMD)参照.

■第44回フラーレン・ナノチューブ・グ
ラフェン総合シンポジウム

主催 フラーレン・ナノチューブ・グラフ
ェン学会

日時 2013年3月11日(月)~13日(水)

場所 東京大学伊藤国際学術研究センター
謝恩ホール(113-0033東京都文京区7-3-
1)

内容 フラーレン, カーボンナノチューブ,
ナノパーティクル, グラフェン等の化学,
物理, 材料, 工学, 応用, 実用等の研究
発表

定員 450名

参加費 10,000円, 学生5,000円

発表申込・原稿提出締切 2013年1月17
日(木)

参加登録締切 当日受付

連絡先 113-8656東京都文京区本郷7-3-1
東京大学大学院工学系研究科機械工学専
攻丸山研究室内フラーレン・ナノチュー
ブ・グラフェン学会事務局 電話/Fax
03-3830-4848 fntg_photon.t.u-tokyo.
ac.jp <http://fullerene-jp.org>

■17th International Symposium on
Intercalation Compounds

主催 ISIC17実行委員会

日時 2013年5月12日(日)~16日(木)

場所 仙台国際センター(980-0856仙台
市青葉区青葉山無番地 電話022-265-
2211)

内容 インターカレーション化合物を中心
として, バッテリー, グラフェン, ナノ
チューブ, 分子性固体, クラスタ固体,
ゼオライト, ダイアモンド, 層状物質等
の物理と化学, 材料科学に関する国際シ
ンポジウム. 2年に1度各国もちまわり
で開催され, 17回目の今回は仙台で開催.
毎回250名以上が参加しており, 今回も
多数のご参加をお待ちする.

定員 300名

参加費 早期料金:65,000円, 学生55,000
円

講演申込締切 2013年1月10日(木)

参加登録締切 当日迄(早期2013年1月31
日(木))

連絡先 980-8578仙台市青葉区片平2-1-1

東北大学原子分子材料科学高等研究機構
谷垣勝己 電話/Fax 022-217-6166
ISIC17 sspns.phys.tohoku.ac.jp http://
sspns.phys.tohoku.ac.jp/isic17/index.html

■第30回希土類討論会

主催 日本希土類学会
協賛 日本物理学会(予定), 他
日時 2013年5月23日(木)~24日(金)
場所 北九州国際会議場(北九州市小倉北区浅野3-9-30)
内容 希土類とその化合物の合成・構造・物性, 希土類の化学(溶液・有機金属・生化学・分離・分析), 希土類金属及び化合物の物理, 希土類金属及び金属間化合物の製造, 希土類の応用(磁性材料・発光材料・固体電解質・その他), 希土類の資源・分離・リサイクル.
参加費 4,000円, 学生2,000円
発表申込締切 2013年1月25日(金)
予稿原稿締切 2013年3月29日(金)
連絡先 565-0871 吹田市山田丘2-1 大阪大学大学院工学研究科応用化学専攻内日本希土類学会事務局 電話06-6879-7352 Fax 06-6879-7354 kidorui chem.eng.osaka-u.ac.jp http://www.kidorui.org/
その他 懇親会: 2013年5月23日(木) 17:30~ リーガロイヤルホテル小倉(会費: 2013年5月10日(金)迄に予約申込6,000円, 当日7,000円).

■The 19th International Conference on Solid State Ionics

主催 国際固体イオニクス学会
日時 2013年6月2日(日)~7日(金)
場所 京都国際会議場(606-0001 京都市左京区岩倉大鷲町422 電話075-705-1234)
内容 固体中のイオン拡散に起因する伝導現象, 高イオン導電体の合成, デバイス

への応用等について, 基礎から応用に至る研究成果について議論する.
定員 800名
参加費 60,000円, 学生30,000円
申込 連絡先HPより
講演申込締切 2012年12月20日(木)
参加申込締切 2013年4月10日(水)
連絡先 770-8506 徳島市南常三島町2-1 徳島大学工学部工学基礎教育センター 中村浩一 電話088-656-7577 koichi pm.tokushima-u.ac.jp http://www.ssi-19.net/

■第8回微粒子磁性国際会議

主催 ICFPM-2013組織委員会
日時 2013年6月24日(月)~27日(木)
場所 Palais des Congrès de Perpignan (ペルピニャン, フランス 電話+33468682626)
内容 前々回のローマ, 前回のアップサラに引き続き微粒子磁性研究における最新のトピックスについて討論を行う.
参加費 Regular: 450 Eur, Student/Retired: 350Eur
講演申込締切 2013年3月15日(金)
連絡先 物質・材料研究機構 間宮広明 電話029-859-2755 Fax 029-859-2801 MAMIYA.Hiroaki nims.go.jp http://www.promes.cnrs.fr/ICFPM2013/home.html

■2013年強相関電子系国際会議(SCES2013)

日時 2013年8月5日(月)~9日(金)
場所 東京大学伊藤国際学術研究センター(113-0033 東京都文京区本郷7-3-1)
内容 強相関電子系に関する最新の研究成果についての学術講演及びポスター講演.
主要トピックス: 1. Heavy fermions, 2. Quantum phase transitions, 3. Kondo physics, 4. Non-Fermi-liquid properties, 5.

Metal-insulator transitions, 6. Quantum magnetism, 7. Multiferroics, 8. Exotic superconductivity, 9. Correlated atoms in optical lattices, 10. Topological aspects of strongly correlated systems, 11. Strong electron-phonon coupling
参加費 事前登録: 45,000円, 当日登録: 50,000円, 学生: 25,000円
連絡先 SCES2013事務局 sces2013 prime-pco.com
その他 詳細は http://www.sces2013.org/ 参照.

その他

助成公募の標準様式(1件500字以内)

○名称 ○対象(1行18字で7行以内)
○助成内容 ○応募方法(1行18字で4行以内) ○応募締切(西暦年月日, 曜日)
○詳細問合せ先(郵便番号, 住所, 所属, 担当者名, 電話, Fax, e-mail等)
その他 ○標題 ○内容 ○連絡先

■会員専用ページ: ユーザ名とパスワード
本会 web site (http://www.jps.or.jp/) の会員専用ページには, 各種変更届, 刊行委員会報告, 過去の大会プログラム等の情報を掲載しています. アクセスするためのユーザ名とパスワード(今月と来月分)は次の通りです. (英数字は半角入力, 大文字小文字は区別されます.)
12月ユーザ名 : 12Dec
パスワード: Bragg664
1月ユーザ名 : 13Jan
パスワード: Henry099

行事予定

[詳しくは表中の右欄記載の会誌各巻号の掲示板欄(*印は会告欄)をご参照下さい.]

開催月日	名 称	開 催 地	会誌巻号または世話人
2012年			
12/3~5	第25回国際超電導シンポジウム (ISS2012)	東京	67-6
12/3~8	The 4th Int. Symp. on Slow Dynamics in Complex Systems—頑張ろう東北—	仙台市	67-5
12/5	第31回法政大学イオンビーム工学研究所シンポジウム	小金井市(東京)	67-9
12/11~13	基研研究会(国際): Resonances and non-Hermitian systems in quantum mechanics	京都市	67-10
12/12~14	The 16th Asia Pacific Symp. on Intelligent and Evolutionary Systems	京都市	67-8
12/14~16	情報統計力学の最前線—確率が繋ぐ自然現象と情報処理の数理—	仙台市	67-12

開催月日	名 称	開 催 地	会誌巻号または世話人
2012年			
12/17~18	第8回励起ナノプロセス研究会	大阪市	67-12
12/17~19	The 20th Int. Colloquium on Scanning Probe Microscopy「走査型プローブ顕微鏡(26)」	那覇市	67-10
12/18~19	東京工業大学原子炉工学研究所研究成果発表・交流会	東京	67-11
12/20~22	太陽電池と量子エレクトロニクスー発光デバイス・光物性の研究実績をどう生かすかー	軽井沢町(長野)	67-9
12/23~1/11	ウインター・サイエンスキャンプ'12-'13	日本各地	67-12
12/27	第45回化合物新磁性材料研究会「磁気計測の新展開」	東京	67-12
2013年			
1/22	表面科学技術研究会2013「光の常識を覆すものづくりーナノ表面と光の相互作用ー」	神戸市	67-12
1/25~26	ゲートスタック研究会ー材料・プロセス・評価の物理ー(第18回)	熱海市(静岡)	67-12
1/29~2/1	総研大アジア冬の学校	土岐市(岐阜)	67-12
2/18~20	国際シンポジウム: Self-organization and Emergent Dynamics in Active Soft Matter	京都市	67-11
2/19~20	第15回薄膜基礎講座	東京	67-12
2/27	ニューセラミックス懇話会第40回ニューセラミックスセミナー「次世代型蓄電池にむけた材料革新」	大阪市	67-12
2/27~3/1	MANA Int. Symp. 2013	つくば市(茨城)	67-12
3/1~2	薄膜トランジスタ国際会議(ITC2013)	東京	67-12
3/4~8	第22回コンピューショナル・マテリアルズ・デザイン(CMD)ワークショップ	神戸市	67-12
3/11~13	第44回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム	東京	67-12
3/26~29	日本物理学会第68回年次大会(広島大)	東広島市(広島)	日本物理学会
4/15~19	第11回国際フェライト会議(ICF11)	宜野湾市(沖縄)	67-10
5/12~16	17th Int. Symp. on Intercalation Compounds	仙台市	67-12
5/23~24	第30回希土類討論会	北九州市(福岡)	67-12
6/2~7	The 19th Int. Conf. on Solid State Ionics	京都市	67-12
6/24~27	第8回微粒子磁性国際会議	Perpignan (フランス)	67-12
8/5~9	2013年強相関電子系国際会議(SCES2013)	東京	67-12
9/20~23	日本物理学会2013年秋季大会(高知大)(素粒子, 核物理, 宇宙線, 宇宙物理)	高知市	日本物理学会
9/25~28	日本物理学会2013年秋季大会(徳島大)(主として物性)	徳島市	日本物理学会

編集後記

この4月より理論核物理領域の編集委員を拝命し、月に1度、賑やかな編集委員会に参加するようになりました。委員会では、どのような記事をお願いするか、お願いした記事がどうなったか等、毎回十数の案件について議論がされます。分野もできるだけ偏らずに、ということで、色々な領域の記事の提案が出て来ます。全然知らない内容のものもあれば、へえこんなにわかってきたのか、と思うこともあります。ここまで他分野のトピックスについての確なまとめを聞く機会はめったになく、私にとっては貴重な時間です。

この号には特集「宇宙線100周年」が掲載されています。昨年のうちに企画、今年の初め頃に執筆陣をお願いをし、夏頃に次々と脱稿され、読みやすいようにと手直しをお願いしたりしてから入稿、12月号に掲載。1年がかりというのは学術誌と比べると長いようですが、編集委員会の様子

を聞いていると、実はとてもとても順調な進行ではないかと思うようになってきました。何ととっても「100周年」にあたる年のうちに掲載できたのですから(素晴らしい!)。ご執筆戴いた皆様、担当編集委員に代わりましてお礼を申し上げます。面白い記事ばかりですので、会員の皆様も是非お読み下さるようお願い申し上げます。

この編集後記が印刷される頃には、(原稿を書いている時点では未だ括弧付きの)「Higgs粒子」について、新情報が発表されているかも知れないですね。7月の発表のときには、勤め先で、文系の教員や事務職の方からも「新しい粒子が見つかったんですってね!」と声をかけられました。やはり物理の話題に興味を持って貰えると嬉しくて、できる限り発見の意義について説明をしたりしました。一方、テレビのニュースででしたか、違和感のある表現も耳にしました。うろ覚えですが、確か「素粒子物理学では、5シグマになったら新粒子発見ということなんだそうです」と。いや、間

違いという訳でないですが、なにか「引換券5枚でプレゼントが貰えるそうです」と同じ口調ではないでしょうか、それは。その後の新聞記事でも、「未知の新粒子が生まれた確率が99.9999%以上とはじきだし」(朝日)たり、「新粒子が99.9999%以上の確率で存在するとの結果を得」(日経)たりと、ちょっと端折った表現がされていました。バックグラウンド事象の標準偏差を 1σ としたとき、信号が 5σ というのは、この質量を持つ粒子が無いにもかかわらず、バックグラウンドの統計的な揺らぎで、偶然にそのようなピーク、もしくはもっと高いピークがそこにできてしまう確率が、ゼロではないけれど300万分の1程度と小さいってことだ、という説明は……長すぎるでしょうか。

統計的な把握というのは、人間の苦手とするところだそうで、確かに 5σ より113番元素の方が周りの人に説明しやすかったです。日常生活でも確率や誤差の話は余り聞かないように思います。例えば、マスコミ

が発表する世論調査の結果を見ると、何人の人に聞いたかは書いてありますが、結果の精度まではなかなか書かれていません。1,000人程度の調査で2,3%の支持率の変動を議論していたりします。合衆国大統領選(再選の報を聞きながらただ今校正中)の世論調査のように「1,089人だからサンプリングによる誤差が±3%ある」(CBS News Poll, これは2σ)といった注意書きがあると、皆に統計の感覚が付いていかないとかなと思うのですが、いかがでしょうか。

まあ、そんなこんなで、Higgs粒子発見という楽しい機会を捉えて、宇宙や物質の謎にわくわくしてもらおうと同時に、確率の

考え方にも慣れてもらえるといいなと思い、授業とか廊下とかで(そして編集後記でも)多分、多少迷惑がられつつ脱線話をしているところです。

竹内幸子〈

編集委員

旭 耕一郎(委員長), 宮下 精二,
有田亮太郎, 板橋 健太, 伊藤 克司,
遠藤 仁, 小川 了, 片沼伊佐夫,
北島 昌史, 小島智恵子, 佐藤 丈,
佐藤 実, 島野 亮, 鈴木 陽子,
竹内 幸子, 田中 秋広, 谷本 久典,
田村 忠久, 樽家 篤史, 西野 晃徳,

長谷川太郎, 平山 博之, 藤谷 洋平,
藤山 茂樹, 古川はづき, 宮本 良之,
加藤 岳生

(支部委員)

朝日 孝尚, 石井 史之, 奥西 巧一,
岸田 英夫, 酒井 彰, 仲野 英司,
野村 清英, 松井 広志, 水野 義之,
山崎 祐司

新著紹介小委員会委員

加藤 岳生(委員長), 雨宮 高久,
木村 元, 榊田 創, 柴田 絢也,
竹延 大志, 多田 司, 多田 朋史,
中川 賢一, 村山 能宏, 森川 雅博,
矢向謙太郎, 吉越 貴紀, 渡邊 紳一

第68期(2012年3月24日~2013年3月31日)理事・監事

会 長	家 泰弘	副会長(次期会長)	斯波 弘行
庶 務 理 事	伊藤好孝・嘉規香織・高野 宏・田村裕和・千葉順成・松川 宏・三沢和彦 本林 透		
会 計 理 事	千葉順成(兼任)・野崎光昭・播磨尚朝・松川 宏(兼任)		
会誌編集委員長	旭 耕一郎	JPSJ 編集委員長	安藤恒也
監 事	鹿兒島誠一・渡邊靖志		刊行委員長 瀧川 仁

本誌を複製される方に(Notice about photocopying)

(参照:本誌47(1992)4号会告)

本誌に掲載された著作物を複製したい方は、(社)日本複製権センターと包括複製許諾契約を締結されている企業の方でない限り、日本物理学会が複製権等の行使の委託をしている次の団体から許諾を受けて下さい。

(In order to photocopy any work from this publication, you or your organization must obtain permission from the following organization which has been delegated for copyright clearance by the copyright owner of this publication.)

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル3F
一般社団法人学術著作権協会
電話 03-3475-5618 Fax 03-3475-5619 info jaacc.jp

アメリカ合衆国における複製については、下記CCC
に連絡して下さい。

Copyright Clearance Center, Inc.
222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA
Phone 1-978-750-8400 Fax 1-978-646-8600

なお、著作物の転載・翻訳のような、複製以外の許諾は、直接日本物理学会へご連絡下さい。

日本物理学会誌 第67巻 第12号 (平成24年12月5日発行) 通巻755号

©日本物理学会 2012

Butsuri

発行者 〒113-0034 東京都文京区湯島2-31-22 湯島アーバンビル 8F

白 勢 祐 次 郎

印刷所 〒169-0075 東京都新宿区高田馬場3-8-8

株式会社 国 際 文 献 社

発行所 〒113-0034 東京都文京区湯島2-31-22 湯島アーバンビル 8F

一般社団法人 日 本 物 理 学 会

電話 03-3816-6201 Fax 03-3816-6208

郵便振替 00120-4-167544 定価 1部2,400円 年額25,000円

本誌に掲載された寄稿等の著作権は一般社団法人日本物理学会が所有しています。