

記 録

文書番号	SCJ 第 20 期 200909-20510400-016
委員会等名	日本学術会議物理学委員会 素粒子物理学・原子核物理学分科会
標題	基礎物理学の展望 —素粒子原子核研究の立場から—
作成日	平成 20 年（2008 年）9 月 9 日

※ 本資料は、日本学術会議会則第二条に定める意志の表出ではない。掲載されたデータ等には確認を要するものが含まれる可能性がある。

この「記録」は、第20期 日本学術会議 物理学委員会 素粒子物理学・原子核物理学分科会が、9回に亘る分科会審議の議論の後まとめたものである。提言等も含むが、今回は「記録」として残し、広く配布するとともに、第21期の分科会活動に繋げたい。

日本学術会議 物理学委員会
素粒子物理学・原子核物理学分科会

	(氏名)	(職名)
委員長	永宮 正治	(第三部会員) J-PARCセンター センター長
幹事	相原 博昭	(連携会員) 東京大学大学院理学系研究科 教授
幹事	二宮 正夫	(連携会員) 京都大学基礎物理学研究所 教授
	石原 正泰	(連携会員) 理化学研究所仁科加速器研究センター特別顧問
	今井 憲一	(連携会員) 京都大学大学院理学研究科 教授
	生出 勝宣	(連携会員) 高エネルギー加速器研究機構 教授
	岡 眞	(連携会員) 東京工業大学理学研究科 学科長
	川合 光	(連携会員) 京都大学大学院理学研究科 教授
	酒井 英行	(連携会員) 東京大学大学院理学系研究科 教授
	櫻井 博儀	(連携会員) 理化学研究所仁科加速器研究センター 主任研究員
	笹尾 登	(連携会員) 京都大学大学院理学研究科 教授
	三田 一郎	(第三部会員) 神奈川大学工学部 教授
	柴田 徳思	(連携会員) 日本原子力研究開発機構 特別研究員
	鈴木 厚人	(連携会員) 高エネルギー加速器研究機構 機構長
	鈴木 洋一郎	(連携会員) 東京大学宇宙線研究所 教授
	高崎 史彦	(連携会員) 高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 所長
	武田 廣	(連携会員) 神戸大学大学院理学研究科 教授
	田村 裕和	(特任会員) 東北大学大学院理学研究科 教授
	長島 順清	(連携会員) 大阪大学 名誉教授
	野崎 光昭	(特任会員) 高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 副所長
	橋本 治	(連携会員) 東北大学 副学長
	坂東 昌子	(連携会員) 愛知大学 名誉教授
	藤川 和男	(連携会員) 日本大学理工学部 教授

目 次

1. はじめに	1
2. 素粒子原子核物理学研究の理念	1
3. 素粒子原子核物理学の現状	2
3. 1. 素粒子物理	3
3. 2. 原子核物理	5
3. 3. 天文学・宇宙物理学とのつながり	8
3. 4. 加速器と宇宙線	9
4. 展開と展望	11
4. 1. 新粒子と新現象の直接探査：素粒子の高エネルギーフロンティア	13
4. 2. 精密測定と稀現象の探索：素粒子の大強度フロンティア	15
4. 3. クォーク・ハドロン多体系の物理：原子核フロンティア	16
4. 4. 観測的素粒子原子核物理	18
5. 社会への波及	22
5. 1. 加速器技術・測定器技術	23
5. 2. コミュニケーション技術	24
5. 3. 人材育成	24
6. 素粒子原子核分野の特色	25
6. 1. 産業界との連携	25
6. 2. 大型施設運営と研究者コミュニティ	26
6. 3. 研究のグローバル化	26
7. 学術行政システムの課題	27
7. 1. 加速器技術・加速器科学への投資	27
7. 2. アジア・世界の拠点形成	28
7. 3. 国家規模・世界規模の基礎科学戦略	28
7. 4. 長期ビジョンの策定と発信	29
7. 5. さらなる国際化に向けた課題	29
8. おわりに	30
9. 付録	32
9. 1. 加速器学の発展	32
9. 2. 宇宙線フロンティア	34

1. はじめに

素粒子原子核物理学は、物質を構成する究極の要素は何か、その究極の要素を支配する物理法則は何か、そして、その物理法則と時空とはどう関係するのかを解明する科学であり、基礎物理学さらには基礎科学を代表する重要な研究分野のひとつである。本記録は、第 20 期日本学術会議物理学委員会素粒子原子核分科会委員が、本学問分野研究の意味と意義、現状の分析、さらに将来展望を記したものである。また、将来構想実現の観点から、現行学術行政システムの課題と改革への提言も含んでいる。

第 2 章で、素粒子原子核物理学研究の中心理念を述べ、第 3 章において、当分野の現状を記述し、第 4 章において、当分野研究の将来の展開と展望を述べる。第 5 章で、素粒子原子核物理の推進が社会に対して基礎科学の発展以上に何を貢献することができるのか、この学問からの波及効果は何かを明らかにする。また、第 6 章では、当該分野の特記すべき特徴を述べる。そして、第 7 章で、現行の学術行政システムの課題を指摘し、当分野の将来構想を実現するために必要と思われる学術行政システムの改革についての提言を行う。第 8 章で結論する。

2. 素粒子原子核物理学研究の理念

自然を支配する基本法則はどのようなものか。物質を構成する究極の要素は何か。宇宙はなぜ現在の姿になっているのか。宇宙にはどのような物質が存在し、それはどのようにして作られたのか。2000 年以上も前から人類の探究心を駆り立ててやまないこれらの問いに答えること、これが素粒子原子核物理学の究極の目標である。その探求によって得られる自然の根本原理は、人類共通の知的財産であり、宇宙・物質や生命のあり方に関する深い洞察を与え、科学および技術全般の礎となる。

自然観・宇宙像の構築は、古代においては哲学・神学などの純粋な思索によってなされたが、17 世紀以降は観測と実験に裏付けられた実証科学として発展してきた。19 世紀末までに完成したかに見えた壮大な古典物理学の体系は、いくつもの説明できない現象に直面して行き詰まり、相対性理論・量子論という 20 世紀初頭の「革命」を経て新たな現代物理学のパラダイムが構築された。古代デモクリトスに始まった究極の物質構

成要素「アトム」を求める探究の旅は、原子・分子、原子核を経て、20 世紀後半にはクォークと電子にたどり着いた。この過程で花開いた数々の学問分野、物性物理学・分子生物学等々は人類の知の地平を大きく切り拓き、現代では、ナノテクノロジー・バイオテクノロジーなどを通じて社会へ還元されている。

これらの成果は、研究者のあくなき好奇心と想像力の結果として得られた自然科学の宝である。自然そして科学へのひたむきな探究心が自然科学を発展させ、現代社会の根幹をなす科学・技術を支えているのである¹。

3. 素粒子原子核物理学の現状

現代物理学の2つの柱である量子力学と相対性理論を融合させた「場の量子論」が完成し、これを土台として、核力理論と原子核構造理論が作られ、さらに素粒子間相互作用をゲージ原理から導き出す理論（素粒子の「標準理論」と呼ばれる理論）が完成した。また、ビッグバン宇宙論と一般相対論・素粒子標準理論に基づく理論が、宇宙の基準理論（Concordance Model）として結実している。これらは数々の実験・観測によって検証され、宇宙の進化と現在の姿を記述する基礎理論としての地位を確立しつつある。

しかし、その一方で、宇宙の大半を占める暗黒物質（ダークマター）、暗黒エネルギー（ダークエネルギー）の正体は何か、宇宙から反物質が消えたのはなぜか、といった現在の素粒子原子核物理学では説明できない新たな謎がつぎつぎに我々に突きつけられている。これらの謎の解明には新しい物理法則の構築が求められており、それは時空の概念をも一新する大変革をもたらす可能性すらある。また、宇宙に存在する多様な物

¹ 米国フェルミ国立研究所(Fermilab)の初代所長ロバート・ウィルソン(Robert Rathbun Wilson)が1969年に上院下院合同委員会による、研究所の提案している当時世界最高エネルギーのシンクロトロン建設に関するヒアリングにおいて、この加速器がなぜアメリカに必要なのかという質問に対して述べた答えは、素粒子原子核物理研究の基本姿勢を顕著に示す例として有名である。“*It has only to do with the respect with which we regard one another, the dignity of men, our love of culture. It has to do with: Are we good painters, good sculptors, great poets? I mean all the things we really venerate in our country and are patriotic about. It has nothing to do directly with defending our country except to make it worth defending.* (我が国の国防には直接役には立ちませんが、我が国を守るに値する国にしましょう。)”

質の全体像を「強い力²」の支配する粒子多体系として統一的に理解することもいまだ実現していない。

3. 1. 素粒子物理

20 世紀後半の素粒子物理学は、次々と建設された高エネルギー加速器による新しい粒子・現象の発見、精密測定に基づく素粒子の性質と相互作用の解明が行われ、それらは「標準理論」という形に結実した。標準理論は、6 種類のクォークと 6 種類のレプトン³ (3 種類の電荷を持つレプトンと 3 種類の(電荷を持たない)ニュートリノ) を内部構造のない基本粒子、素粒子とする。これら、合わせて 12 種類の素粒子は、すべて、その存在を加速器による実験で確認されている。標準理論は、これらの素粒子間に働く電磁力、弱い力、そして、強い力の 3 種類の力を素粒子の持つ内部対称性とゲージ原理とから導き出すことに成功し、数々の実験的検証を経て、3 種類の力の性質を精密に予言できる理論に成長した。

一方で、ゲージ原理はこれら 3 種類の力を媒介する粒子 (ゲージ粒子) 及び素粒子の質量がすべてゼロであることを要求し、弱い力を媒介する W 粒子および Z 粒子ならびにすべての素粒子が質量を持つという実験事実と矛盾する。この困難を解決するために導入された仮説がヒッグス機構である。電磁力と弱い力を統一する電弱力においては、ヒッグス機構によってゲージ対称性が見かけ上破れ (これを自発的対称性の破れという)、その結果、W 粒子、Z 粒子、および素粒子に質量が発現する。また、同時にヒッグス粒子とよばれる粒子の存在を予言する。ヒッグス機構は、素粒子の質量の起源であり、標準理論を矛盾のない理論として完結させるための重要な柱である。次世代加速器において、ヒッグス粒子を発見し質量の起源を解明することが、21 世紀初頭の素粒子物理の最重要課題の一つである。

標準理論では、素粒子の種類をフレーバー(flavor)と呼ぶ。素粒子に働く弱い力は素粒子のフレーバーを変える力であり、よって、ビッグバン直後の素粒子とゲージ粒子の混沌から現在の物質宇宙に至る宇宙の進化に深く関係していると考えられている。素粒子が (一種類でなく) いくつもの種類を持つことによって起こる物理現象 (フレーバー

² 強い力は、クォーク同士を束縛して核子 (陽子、中性子) を構成し、さらに核子を束縛して原子核を構成する力のことである。

³ クォークには強い力が働くが、レプトンには強い力は働かない。

物理) について、これまでに多くのことが理論と実験によって明らかになってきた。我が国の素粒子物理学研究は、クォークとレプトン双方のフレーバー物理の研究において多大な貢献をし、世界のトップを走っている。

粒子と反粒子の対称性の破れ (CP 非対称) の発見とその起源の解明は、フレーバー物理研究の典型的な例である。CP 非対称は 1964 年、K 中間子を使った加速器⁴実験で初めて発見され、1973 年に小林と益川⁵が、その起源はクォークが 6 種類のフレーバーを持つことにあるとする理論を提案した。その小林-益川理論が、2001 年に高エネルギー加速器研究機構 (KEK) と米国スタンフォード線形加速器センター (SLAC) のそれぞれの B ファクトリー加速器⁶を使った B 中間子と反 B 中間子の性質を比べる精密実験によって検証されたことは、いまだ記憶に新しい。KEK の B ファクトリーにおいて生成、記録された B 中間子と反 B 中間子の対の数は、10 億にのぼろうとしており、実験のいっそうの精密化によって、B 中間子反応における標準理論の厳密検証が行われている。標準理論の予想からのズレが発見されれば、標準理論の先にある新しい物理探索への道が開けることになる。

1998 年にはスーパーカミオカンデ実験が大気ニュートリノの詳細な観測によってニュートリノのフレーバーが変化する現象 (大気ニュートリノ振動とよぶ) を発見した。これは、宇宙線⁷が大気分子と反応してできたミューオンニュートリノのフレーバーが他のフレーバーに変わることを発見したものである。さらに、太陽から飛来するニュートリノの数の欠損 (太陽ニュートリノ問題) についても、スーパーカミオカンデの観測結果とカナダのスノー (SNO) 実験の結果を組み合わせることで、この欠損が太陽内での電子ニュートリノのフレーバーが他のフレーバーに変化するためであることが明らかになった。その後、カミオカンデの跡地に建設したカムランド実験が、原子炉からの反電子ニュートリノが他の種類のニュートリノに変化することを確認し、電子ニュートリノ振動をさらに確固たるものにした。これら、一連のニュートリノ振動の発見は、ニ

4 加速器とは電荷を持った (電気を帯びた) 粒子を加速して高いエネルギーを持たせる装置の総称。

5 小林誠 (高エネルギー加速器研究機構名誉教授) と益川敏英 (京都大学名誉教授)

6 B 中間子 (反 b クォークと u または d クォークから成る中間子) と反 B 中間子 (b クォークと反 u または反 d クォークから成る中間子) の対を大量に生成することができる加速器。

7 宇宙から地球に入射してくる荷電粒子の総称で、その大部分は陽子である。

ニュートリノに質量はないと仮定する標準理論のほころび⁸を示すだけでなく、レプトンの反応にもクォークの反応と同じような CP 非対称が起こりうることを示し、世界の素粒子物理学界に大きな衝撃を与えた。

大気ニュートリノ振動の発見は、KEK の陽子シンクロトロンによって作り出されたミュオンニュートリノをスーパーカミオカンデに打ち込む K2K 実験に結びつき、ここでも、ミュオンニュートリノ振動の確認がなされた。2009 年からは、J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) 大強度陽子シンクロトロンによって作るニュートリノをスーパーカミオカンデに打ち込む T2K 実験による、ニュートリノのフレーバー物理研究の新たな展開が始まろうとしている。

3.2. 原子核物理

この宇宙に存在する様々な物質は、基本粒子が「強い力」で互いに結びついた複合系である。原子核物理学は、宇宙の物質の全体像とその成り立ちを解明する学問であり、その研究対象は、クォーク・グルーオンの集団、少数のクォークからできているハドロン、そしてハドロンが集まって作られた原子核である。ハドロンは核子（陽子と中性子の総称）の仲間「バリオン（重粒子）」とパイ中間子の仲間「メソン（中間子）」に大別され、核子多体系である原子核はバリオン多体系とみなすこともできる。クォーク間に働く力は、量子色力学（QCD）と呼ばれる強い力の基本理論（素粒子の標準理論の一部）で記述されるが、クォークの多体系、特にハドロンにこの理論を適用して解くことは極めて難しい。一方、核力などのハドロン間に働く強い力は、QCD にさかのぼらなくとも中間子交換モデルによって記述することができる。原子核物理学では、中間子交換モデルに基づく核力を用いて、核子多体系として原子核の多彩な性質を理解することを目的として研究が進められているが、現代では、さらにハドロン自身や、クォーク・グルーオンプラズマ（QGP）のようなクォーク集団系も研究対象に加え、強い力が支配する複合系の統一的理解を目標としている。そのために、QGP、ハドロン、原子核のそれぞれの相で、その構造、性質の解明や多体系でのみ現れる現象の発見を目指すとともに、これらの間の相転移の機構を探る研究が進められている。また、ハドロン間に働く力、およびハドロン内や原子核内での相互作用を解明して、これらの相をつなぐ鍵

⁸ ニュートリノに質量があることは、標準理論の不完全さを表しているが、ゲージ原理に基づく理論そのものの修正を迫るものではない。その意味で「ほころび」である。

となる強い力の複雑な振る舞いを理解すべく研究が進められている。

核子多体系物理の研究は、陽子・中性子で構成された安定核およびその近傍の不安定核の研究から始まり、原子核の描像は核子が密に詰まった集合体（液滴）としての物質観から量子力学が支配するミクロな多体系へと大きく変わった。殻構造、集団運動、対相関、分子状態などの多体系特有の現象についてその理解が進み、これらを含む様々なモデルが提案・構築されている。最近では、加速器と実験技術の発展によって、安定核に比べ陽子数・中性子数が極端に異なる不安定核、ストレンジネス⁹を持ったバリオン（ハイペロン）を注入したハイパー核、陽子番号が 110 を越える超重元素などを作ることができるようになり、研究対象は飛躍的に拡大している。また、特定の量子準位や励起エネルギーを、核反応を用いて制御することも可能になっている。これら研究対象の拡大と実験手法の開拓とともに、「魔法数の喪失・新魔法数の出現」、「中性子ハロー・スキン構造」、「超変形核」、「ラムダ粒子による核収縮」などの新しい現象が見出され、原子核の多体现象の豊かさを示すとともに、新しい原子核モデルが構築され、新しい現象が予想されている。核物質の理解という観点からは、フェルミ液体-気体間の相転移現象の研究などが発展してきている。また、これらの研究によってウランまでの原子核（元素）が宇宙のどこでどのように作られたのか、ストレンジネスをもつといわれる中性子星内部の高密度核物質はどんな姿なのかなどの宇宙における物質進化の過程も理解できるようになりつつある。これらの研究は、国内で最近新設された二大加速器 RIBF (RI Beam Factory) や J-PARC において、さらに急速な展開が期待される。

こうした核子（バリオン）多体系を理解するには、その元となる強い力である核力（バリオン間力）の理解も必要である。最近では、非束縛三体系の散乱問題を通じた核子三体力の研究が進展し、核子間二体力と三体力を含んだ第一原理計算によって、質量数 10 程度の原子核構造を再現できるようになっている。また、核子間の核力を、ハイペロンをも含むバリオン間力へと拡張して理解する研究も進んできた。さらに、バリオン間力と QCD との関係を解明しようという研究も行われている。こうしたバリオン間力の研究は、核物質の状態方程式を研究する際の基盤ともなっており、例えば、中性子星の内部構造の解明にも欠かせない。

⁹ クォークの持つ内部量子数の一つで、この量子数を持つクォークをストレンジクォークと呼ぶ。

ハドロン・QGP 物理の研究は、クォークとグルーオンの発見とともにハドロンをクォークとグルーオンから成る量子多体系として捉えることから始まった。クォーク・グルーオンのダイナミクスとして、強い力の基礎理論である QCD を基盤とする一方、QCD の計算が困難な現象を取り扱うために現象論的な有効模型の構築も行われている。バリオンはクォーク三つから、メソンではクォーク二つからなると理解されているが、この他にも有効模型や QCD の予想に基づき、4 個あるいは 5 個のクォークからなる「エキゾチックハドロン」の探索が行われている。また、ハドロン構造に関わる課題として、「スピン危機」の問題がある。クォークの担うスピン総和では核子スピンの説明できないことが判明し、核子スピンの起源を解明しようという研究が進められている。クォーク多体系は、高温高密度になると QCD 相転移によってハドロン相から QGP 相に転移することが理論的に予想されていたが、最近、QGP 相生成を強く示唆する実験データが得られている。また、低温環境におかれた軽いクォークは南部陽一郎らが提唱したカイラル対称性の自発的破れによって大きな質量を獲得すると考えられているが、この機構を詳しく調べ、現実世界の物質質量の大部分を占めるハドロン質量の起源を理解しようという研究も J-PARC を中心に始まっている。

原子核実験のより高精度化に向けた努力も続けられている。加速器施設について言えば、大阪大学・核物理研究センターは、加速器の安定した運転技術と高分解能磁気分析器の開発とによって、核反応による分光において世界最高のエネルギー分解能を達成している。高分解能化によって原子核の高励起状態に微細構造があることが明らかとなり、理論研究に対する起爆剤ともなっている。さらに原子物理学の手法を取り入れ、イオンを冷却、トラップし、レーザー分光等による精密測定も行われている。欧州の CERN、GSI などの加速器施設では、蓄積リングによる 1 次ビームや 2 次ビーム（反陽子、不安定核ビームなど）の冷却と蓄積により、エネルギー幅が狭く高品質のビームが作られている。これらのビームを使って、諸現象のエネルギー依存性の精密測定、エキゾチック原子生成、精密質量測定などが行われ、原子核物理学だけでなく CPT 対称性などの一般物理に関わる研究も行われている。これらの施設においても、我が国の研究グループが大きな成果を挙げている。

我が国の原子核物理実験研究者は、国内の実験施設（大阪大学核物理研究センター、理化学研究所など）のみならず、国外の実験施設（BNL、JLab、GSI、CERN など）を利用して国際的に研究を展開し、上記のいずれの分野においても世界をリードしている。さらに、小規模加速器でも原子核物理の研究はもとより、学際的かつユニークな研

究が行われている。一方、原子核理論の研究では、有限多体系の量子力学、摂動論の適用できない場の量子論の計算に数値計算が多用されている。そのため、原子核理論研究者は、大型計算機の開発および大学、研究所における共用の計算機センターの整備、標準プログラムの開発とその公開など、計算科学分野の構築に深く関わってきた。特に90年代以降、格子QCDと呼ばれるゲージ理論の非摂動計算手法の研究が進展し、そのシミュレーションを目指すスーパーコンピュータの開発と整備が急速に進んだ。計算機を駆使した相関の強い量子多体系の厳密計算は、原子核理論を含む計算科学の発展を促しただけでなく、世界的に熾烈な競争下にあるスーパーコンピュータ自身の開発にも大きな貢献をしている。

原子核物理学は、他の基礎科学・応用分野とも密接に関わっている。例えば、ベータ崩壊する原子核は有力なニュートリノの発生源の一つであり、ニュートリノ研究において原子核の核構造の情報は基礎的な役割を担っている。ハドロンから原子核にいたる研究は、ビッグバンの1マイクロ秒後から今日に至る宇宙での諸現象を理解する際の基本となる情報を提供する。この他にも原子物理学、物性物理学、化学、生物学、医学、原子力工学などとの接点を持ち、さまざまな応用につながっている。

3.3. 天文学・宇宙物理学とのつながり

物理学と天文学の発展により、ミクロな物理法則と宇宙の進化との間に密接な関係があることが明らかになり、素粒子原子核物理の進歩が、宇宙がどのように進化してきたかを解き明かす上で不可欠であることが認識されている。

近年の観測的宇宙論の急速な進展は、宇宙の進化と素粒子原子核物理学の深い関わりを明らかにし、その結果、宇宙における物質の進化について以下のようなシナリオが書かれつつある。宇宙は、およそ137億年前にビッグバンから始まり、その後、膨張し冷めて行く過程の中で、いくつかの相転移を起こし現在の姿に至ったと考えられる。宇宙はビッグバンの直後、 10^{-36} 秒程度の非常に短い時間で指数関数的に膨張するインフレーション期を経験し、その時の量子論的揺らぎが現在の宇宙の大規模構造のもとになったとされる。2.7Kの宇宙背景放射に残されたわずかな温度揺らぎがその証拠である。その後、クォークとレプトンの数および質量の生成、QGPの生成、クォークの閉じ込めによるハドロンとその質量の生成、宇宙初期の軽元素合成、宇宙の晴れ上がり、原始星形成、恒星中での元素合成および超新星爆発時のウランまでの重元素の合成、中性子

星中の高密度核物質やクォーク物質の生成などを経て、様々な物質が生成されてきたと考えられている。また、この過程の中で反物質が消えたとされるが、その機構は未だに解明されていない。さらに、銀河や宇宙の大規模構造形成に重要な役割を果たしていると考えられている暗黒物質の正体は、未知の素粒子である可能性が高い。

一方で、それぞれの過程の素粒子原子核物理による理解に向けた取り組みが進行中である。LHC によるヒッグス機構の検証、ニュートリノ実験によるレプトンの粒子・反粒子非対称性の解明、重イオン衝突型加速器による QGP の性質とハドロン相転移の理解、不安定核ビームを使った超新星爆発時の中性子捕獲過程 (r -過程) の解明などがその例である。

超新星爆発や太陽からのニュートリノの観測およびニュートリノの質量の発見、B ファクトリーでのクォークと反クォークの非対称性の解明、宇宙背景輻射の量子ゆらぎの発見と宇宙の大規模構造との関係の解明などは、天文・宇宙物理と素粒子物理の双方に大きなインパクトを与えた。一方、遠方超新星の観測や宇宙背景輻射のゆらぎの測定等から明らかになってきた宇宙の大部分を占めている暗黒エネルギーや、さまざまな天文観測から存在が明らかになった暗黒物質の正体の解明は、素粒子物理にとって大きな挑戦となっている。また、素粒子現象から天文現象までを第一原理から導こうとする大統一理論は、理論構築に必要な新しい数学の発展をも促してきた。ビッグバンから始まった宇宙から、どのように物質が生成され、現在我々が住む宇宙に進化してきたかという、基礎科学の根源的課題に取り組む過程の中で、素粒子原子核物理学は天文学・宇宙物理学と共に新しい融合学問分野を形成しつつある。

3. 4. 加速器と宇宙線

人類が手に入れた革新的な「道具」は実証科学を支える大黒柱であり、自然観の構築ばかりでなく、社会に大きな変革をもたらした。望遠鏡、顕微鏡、電池、真空装置等々、その例は枚挙にいとまがない。加速器は素粒子原子核物理学の研究を支える重要な道具であり、加速器を用いない宇宙線の観測や原子核等の観測実験も、加速器による研究と相補的な大きな役割を果たしている。宇宙線は自然が我々に与えてくれた道具と言える。

加速器

素粒子原子核物理学は加速器の発明によって飛躍的に発展した。天然の原子核崩壊で

放出されるアルファ線を用いて行われたラザフォード実験は、今や、加速器によってラザフォード実験の 100 万倍以上の高エネルギーに加速された粒子の衝突実験に取って代わられている。そしてラザフォードが原子の構造を発見したように、高エネルギー加速器の出現によって原子核を構成する陽子や中性子がクォークという素粒子から出来ていることが検証された。

加速器は、素粒子原子核物理研究に必須な研究手段であると同時に、最大の副産物である。我が国に於いては、荒勝文策（台北帝大）・菊池正士（大阪帝大）によるコッククロフト・ウォルトン型加速器の建設に始まり、仁科芳雄（理化学研究所）、菊池正士のサイクロトロン建設が草分けとなった。以後、理化学研究所、東京大学原子核研究所や諸大学での各種サイクロトロン・リニアック・シンクロトロンの草創期、高エネルギー研究所（現高エネルギー加速器研究機構、KEK）の 12GeV 陽子シンクロトロンを経て、電子陽電子衝突型加速器トリスタンによって当時の世界最高エネルギーに到達した。その後 KEK の B ファクトリー（KEKB）における世界最高ルミノシティの達成、K2K による世界初の長基線ニュートリノ振動実験、理研における世界初の超伝導リングサイクロトロンの完成など、我が国の加速器開発は世界の最前線に位置するまでに成長した。世界最高強度を目指す陽子加速器施設 J-PARC の完成によって、この歩みは更に強力に進みつつある。

加速器開発における国際協力は大きく発展し、我が国が果して来た役割は大きい。素粒子原子核分野では CERN の LHC (Large Hadron Collider) の超伝導電磁石の開発・供給、ILC (International Linear Collider) のための試験加速器 (SLAC-FFTB、KEK-ATF) の開発、中国 BEPC-II への超伝導加速空洞・ビーム制御技術の提供など、いくつものプロジェクトで日本発の技術が貢献して来た。また、重イオン・放射光分野でも韓国、中国、台湾、タイ、インド等へ様々な技術協力を行っている。

加速器の先端的開発研究は、素粒子原子核物理や物質・生命・医療分野の研究のための手段の開発というだけでなく、基礎科学さらには科学を支える先端技術の牽引車としての役割を果たしている。我が国は、この先端加速器開発においても世界をリードしている。

宇宙線

宇宙線研究は加速器が出現するまで、素粒子物理研究の唯一の手法であった。パイ中

間子やミュオンが宇宙線の観測によって発見され、その後の加速器による素粒子物理学の進展の端緒となった。チャーム粒子の最初の兆候も宇宙線の研究の中から得られている。スーパーカミオカンデでの大気ニュートリノ観測・太陽ニュートリノ観測はニュートリノ振動の発見をもたらし、今では加速器によるニュートリノ反応の CP 非保存の研究へと発展しつつある。原子炉からのニュートリノを用いた研究や二重ベータ崩壊の研究も加速器によらない研究の典型例である。

天文観測もまた素粒子物理学に深く関わっている。銀河の回転速度の測定から銀河内には光では見えない暗黒物質が存在することは古くから知られていた。また近年重力レンズ効果等により銀河団の中にも暗黒物質の存在が観測されるようになった。さらに、WMAP¹⁰等による詳細な宇宙背景輻射の観測や超新星爆発の研究により宇宙の物質エネルギーの 23%が暗黒物質、73%が暗黒エネルギーであることが明らかになった。暗黒物質は新しい素粒子であるとする説が有力であり、宇宙から飛来する暗黒物質を直接観測するための地下実験が、世界でいくつも提案されている。また、宇宙線分野の研究として成長した重力波検出のための研究は、重力波による新たな宇宙の観測手段（重力波天文学）を創出すると共に、強重力場において一般相対性理論が成り立っているかどうかの検証を行う。このように、宇宙線・非加速器実験は、素粒子研究と宇宙物理・天文学を結ぶ役割を担いつつある。本記録では、これらの分野を「観測的素粒子原子核物理」と総称する。

4. 展開と展望

素粒子原子核物理学のこれまでの著しい進展の結果、当該学問分野が直面する研究課題、そして将来の長期的研究課題は、基礎科学としての意義をいっそう増すとともに、多様性に富んだものとなっている。当学問分野の現在の研究課題は次のようにまとめることができる。

素粒子の質量の起源

なぜ、素粒子が質量を持つのか。

¹⁰ WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe: ウィルキンソン・マイクロ波異方性探査機) は アメリカ航空宇宙局 (NASA) が打ち上げた宇宙探査衛星で、宇宙マイクロ波背景放射の温度とその非一様性を全天にわたって観測した。

素粒子が質量を持つことを禁じている電弱ゲージ対称性が破れるメカニズムは何か。

素粒子の質量の起源であるとされるヒッグス粒子は存在するのか。

自然の最も根源的な法則は何か

超対称性のような新しい量子対称性は存在するのか。

4次元の時間空間を超えた、我々には見えない次元が存在するのか。

電磁力、弱い力、強い力そして重力のすべての力は、一つの統一された力から導き出せるのか。

4つの力以外の新しい種類の力は存在するのか。

フレーバー問題

なぜ、素粒子には3つの世代、12種類のフレーバーが存在するのか。

なぜ、ニュートリノの質量はそんなに小さいのか。

ニュートリノと標準理論を超える根本的物理原理との関係は何か。

なぜ反物質の宇宙（反宇宙）は存在しないのか。

ハドロン・QGP物理の問題

核子やハドロンの質量の起源は何か。

核子のスピンの起源は何か。

クォーク・グルーオンプラズマ（QGP）やクォーク物質のような新しい物質相は存在するのか、またその性質は何か。

クォークの複合体の存在形態はどこまで広がるのか。

核子多体系物理の問題

鉄からウランにいたる元素合成のメカニズムは何か。

低密度から高密度に至る核物質の性質はどうなっているのか。

エキゾチック原子核（ハイパー核、不安定核）の世界はどこまで広がるのか。

超重元素はどこまで安定に存在するのか。

暗黒宇宙の問題

宇宙の23%を占める暗黒物質の正体は何か。

宇宙のエネルギーの73%を占める暗黒エネルギーの正体は何か。

現在の素粒子原子核物理学が置かれた状況は、20世紀初頭の量子論勃興の前夜に似ている。当時の標準理論とも言うべき古典物理学は万能で全ての現象を説明でき、残っていた黒体輻射、原子スペクトルなどの異常現象の解決は時間の問題と信じられていた。しかしながら、これらの異常現象が、現代物理における革命、すなわち、量子論への飛躍の前兆であったのである。場の量子論に基づく標準理論を有する現在の素粒子原子核物理学にも、いくつかの異常な現象あるいは、難解な問題が突きつけられている。しかし当時と異なるのは、我々はすでに次の飛躍を予測し、その実現に向けた理論的実験的な具体的手段を用意していることである。以下では、これらの研究課題への取り組みを4つのフロンティアでの研究にまとめて記述する。

4.1. 新粒子と新現象の直接探査：素粒子の高エネルギーフロンティア

素粒子の質量の起源であるヒッグス粒子の発見は、現在の素粒子物理の最重要課題である。これまでに建設された加速器のエネルギー領域では発見されていないが、その質量はこれまでの多くの実験結果を組み合わせると 114GeV^{11} から 200GeV （陽子の質量の120倍から220倍程度）と予想されている。2008年から稼働を開始するCERNの世界最高エネルギー陽子陽子衝突型加速器(LHC)は 14TeV という重心系エネルギー¹³を持ち、標準理論が正しければヒッグス粒子を必ず発見することができる。素粒子の質量の起源が、標準理論の提案するヒッグス機構であるかどうか、ついに答えが出るのである。

LHCでは、また標準理論の枠におさまらない新粒子や新現象の直接探査によって、標準理論の先にあるより基本的な物理法則についての手がかりを得ることができる。中でも、超対称性理論は、(1) 量子効果によってヒッグス粒子の質量が無限に大きくなってしまおうという標準理論の欠陥を、超対称性という新しい対称性の導入により自然に

¹¹ 粒子の質量 m とエネルギー E の間には、 c を真空中の光速とするとアインシュタイン有名な式、 $E=mc^2$ の関係があるので、質量は、 E/c^2 で表すことができる。さらに、素粒子原子核物理では、定数である c を省略して、質量をエネルギーの単位で表すことが多い。 1GeV は10億（ギガ、 10^9 ）電子ボルトのエネルギーに相当する単位である。 1eV （電子ボルト）は、1個の電子が電位差1ボルトの電極間で得る運動エネルギーの総量である。 $1\text{TeV}=1000\text{GeV}$ 、 $1\text{MeV}=10^6\text{eV}=10^{-3}\text{GeV}$ である。また、 1GeV は、 $1.78 \times 10^{-27}\text{kg}$ に等しい。

¹³ 陽子はクォークとグルーオンから成る複合粒子なので、陽子陽子衝突の重心系エネルギーがそのまま素粒子反応で使われるエネルギーとはならない。

修復できること、(2) 電磁力、弱い力、強い力の3つの力が 10^{16} GeV というエネルギーで一つの力に統一できること、(3) 最も軽い超対称性粒子が暗黒物質の正体であると考えられることなどから、標準理論を超える基礎理論としての期待が高い。さらに、自然が超対称性を持つことが分かれば、重力も含めた究極の統一理論と言われる超弦理論¹²への期待も高まる。LHC では TeV 程度の超対称性粒子があれば必ずその証拠が発見できると予想され、LHC での実験は今後 10 年あるいはそれ以上、世界の高エネルギーフロンティアを切り開く加速器実験となる。我が国からも既に多くの素粒子実験グループが、LHC での実験グループの一つであるアトラス実験に参加し重要な役割を担っているが、今後、一層その研究活動を強化し、世界最高エネルギーでの素粒子物理研究に大きな貢献をすべきである。

LHC は新しい発見をするための加速器であり、そこでの研究は新しい時代を切り拓く第一歩である。しかし、新たな発見がもたらされたとしても、それを物理法則として確立させるためには、その後様々な角度からの検証が必要になる。例えば、ヒッグス粒子は本当に標準理論が予言する属性を持っているのか、一種類のヒッグス粒子しかないのかなどを検証するためには、ヒッグス粒子と他のすべての基本粒子との結合定数をそれぞれ正確に決める必要がある。また、超対称性理論を検証するためには、超対称性粒子をすべて発見し、その性質を詳しく測定しなければならない。LHC においては、これらの新粒子がたくさん他の粒子（これをバックグラウンドとよぶ）とともに非常に複雑な反応の中で生成され、そのために、ヒッグス粒子や超対称性粒子の性質の詳細な研究は難しい。新発見を新理論にまで高めるには、バックグラウンドが少ない「きれいな」実験をすることが可能な加速器が必要である。それが、ILC (International Linear Collider) と呼ばれる新型加速器である。ILC は二つの約 11km の線形加速器から成る電子・陽電子衝突型加速器であり、その重心系エネルギーは 0.5TeV である¹³。

ILC 実現を目指し、国際設計チームが結成され、LHC の結果が出ると期待される 2012

¹²現在活発な研究分野である超弦理論は、アインシュタインの夢であった力の統一をはるかに超え、物質と力と時空の全てを統一する野心的な試みである。素粒子の種類を単一のひもの振動形態として全ての物質の統一をはかると共に、全ての力を、4次元を超える多次元時空の幾何学構造によって統一的に記述する。余剰次元は様々な構造を持つ内容豊かな物理的実体であり、余剰次元空間の構造が、素粒子の種類も決めると考えられている。

¹³最終的には 1TeV の重心系エネルギーに到達できるように設計されている。また、陽子という複合粒子を衝突させる LHC と異なり、電子、陽電子という素粒子を衝突させる ILC では、重心系エネルギーのすべてが素粒子反応のエネルギーに使われる。

年までに加速器及び測定器の技術を確立することを目指している。日本からも多数の研究機関・大学の研究者・技術者が参加してこの国際共同プロジェクトを支えている。LHC と ILC という異なるタイプのエネルギーフロンティア開拓加速器を組み合わせることによって、素粒子の質量の起源の解明、標準理論を超える理論の発見、そして新理論と時空の構造との関係の解明が可能になる。もし、LHC あるいは ILC での物理が現在の予想と全く異なるのであれば、素粒子物理学はより革新的な方向に向かうことになる。どちらの結果が出るにしても、LHC と ILC によって、物理学の新しいパラダイムを切り開くことができる。日本がこの中で主要な役割を担うことは、日本の素粒子物理学・加速器科学の発展、次世代の研究者・技術者の育成に大きく資するばかりでなく、高エネルギー物理学において現在世界のトップに立っている日本が果たすべき責務である。さらには、グローバルな基礎科学プロジェクトの推進を通じて国際貢献するという国際戦略上も大きな意味を持つ。このように、高エネルギーフロンティアでの研究推進は、当該分野の長期展望の中核を成しているのである。

4. 2. 精密測定と稀現象の探索：素粒子の大強度フロンティア

標準理論の枠内にはない新しい粒子や新しい対称性は、量子効果としてクォークやレプトンの崩壊過程に寄与し、標準理論の予想からのズレを発生させ得る。そこには、高エネルギー加速器においても直接作り出せないような重い粒子も寄与するが、その効果は一般に極めて小さい。したがって、クォークやレプトンの崩壊過程の精密測定によって標準理論を越える物理を探るには、クォークを含む中間子（K、D、B 中間子）や重い荷電レプトン（ミューオン、タウ粒子）を大量に生成して、その崩壊過程を詳細に調べる必要がある。また、ニュートリノ振動の測定の精密化やニュートリノにおける CP 非保存の発見を目指すには、既存のニュートリノビームよりもはるかに強度の大きなニュートリノビームが必須である。これらの要求を満たすために必要となるのがファクトリーと呼ばれる大強度加速器であり、そのファクトリー加速器を使って精密フレーバー物理を展開する場が、大強度フロンティアである。

B ファクトリーでは、B 中間子系での大きな CP 非保存が発見され、フレーバーの異なるクォーク間の混合が小林・益川理論で説明できることが精度良く検証された。現在、現行の B ファクトリーの性能を 10 倍以上向上するスーパー B ファクトリーが計画され

ている。このスーパーBファクトリーでは、レプトンコライダー¹⁴というバックグラウンドの少ないクリーンな環境において超精密実験を行うことによって、標準理論からのズレを探索する。このズレが発見されれば、標準理論を越える物理の効果が明らかになり、更に高エネルギーフロンティアでは検出できない新しい物理にも到達できる可能性がある。Bファクトリーはまた、タウ粒子を大量に生成する能力を持ったタウファクトリーでもある。B中間子におけるCP非保存の超精密測定やタウ粒子の標準理論で禁止された崩壊反応の発見などにより、超対称性の効果や標準理論の枠に収まらない現象（右巻きカレント、荷電ヒッグス粒子など）が見つかるかもしれない。スーパーBファクトリーは大強度フロンティアの一つの柱である。

J-PARC においては、50GeV 大強度陽子シンクロトロンを用いたニュートリノ振動実験 T2K が始まる。ニュートリノフレーバー混合の発見は、ニュートリノにも質量があるという事実を明らかにしただけでなく、その質量(差)が非常に小さいことを示し、さらにシーソーモデルと呼ばれる理論を仮定すれば、非常に大きな質量を持った新粒子の存在を示唆した。また、ニュートリノのフレーバー混合のパターンは、クォークのそれと全く異なっている事もわかった。T2K 実験などで最も重いニュートリノと最も軽いニュートリノの混合の大きさを示す混合パラメーターである θ_{13} の精密測定を行う。その値が十分大きければ、クォークの反応と同様に、ニュートリノ反応においてもCP非保存を発見できる可能性が高くなる。ニュートリノの物理は、更に、(1) ニュートリノがディラック粒子かマヨラナ粒子¹⁵かの決定、(2) 質量の最小値の決定、(3) 3つのニュートリノの質量の大きさの順番の決定が重要な物理として残されている。

4.3. クォーク・ハドロン多体系の物理：原子核フロンティア

原子核物理学の加速器を用いた実験研究には、大強度、高エネルギー、高精度の三つの軸がある。原子核物理学は、広範な対象をカバーしており、研究に用いられる実験手

¹⁴ 内部構造のないレプトンどうしを衝突させるので、陽子のような複合粒子どうしを衝突させるハドロンコライダーよりバックグラウンドが圧倒的に少ない。

¹⁵ ニュートリノは電荷を持たないので、電荷を持った素粒子（クォークや電荷をもったレプトン）と異なり、その反粒子が自分自身である（つまり、ニュートリノと反ニュートリノが同一粒子である）としても矛盾のない理論が作れる。このように粒子と反粒子が同一である粒子をマヨラナ粒子とよぶ。それに対して、電子やクォークのような粒子と反粒子が異なる粒子をディラック粒子とよぶ。

法も多種多用である。例えば、ビーム種に関して言えば、1次ビームの電子、陽子、軽イオン、重イオンに加え、2次生成粒子としての光子、ミューオン、中間子、ハイペロン、中性子、反陽子、不安定核などがあり、それぞれの性格もプローブとしての役割から研究対象そのものまで千差万別である。原子核物理学では様々なエネルギー領域で特徴的な現象が現れるため、ビームのエネルギーについても、核子当たり 1 MeV 以下のエネルギーから 100 GeV を越えるエネルギーまで幅広い。また、偏極ビームや粒子のエネルギーのそろった冷却ビームと高分解能検出器・スペクトロメータを用いて、精密測定も行われている。

大強度フロンティアを目指した国内施設としては、KEK と JAEA（日本原子力開発機構）の共同施設である J-PARC と理化学研究所の RIBF がある。いずれも世界最先端施設であり、世界の研究拠点である。これらのもつ潜在能力を最大限に引き出すため、今後の実験装置の整備と拡充が求められている。

J-PARC の最大の特徴は、30-50GeV 大強度陽子ビームから繰り出される大強度ハドロン2次ビームである。J-PARC では、 π 、K 中間子といったハドロン2次ビームが得られ、その強度は、これまでの研究施設をはるかに凌ぐ。この大強度2次ビームで推進される主要な研究は、ストレンジネス核物理研究、およびハドロン分光・構造研究である。ハイパー核に代表されるストレンジネス核物理研究では、(1) ハイパー核構造やハイペロン・核子散乱実験を通じた、ハイペロンを含むバリオン間相互作用の研究、(2) 「ラムダによる核収縮」に代表される、不純物のもたらす特異な核構造の研究、(3) K 中間子核のようなストレンジネスをもつ高密度核物質の研究などが挙げられる。これらの研究を通じて、ストレンジネスという新しい自由度を導入することによる原子核構造、ハドロン物理、強い力の研究の総合的展開を目指す。

J-PARC では、また、陽子エネルギーの特徴を活かした、ハドロン分光・構造の研究も展開できる。例えば、(1) 核内での中間子質量変化によるカイラル対称性の研究、(2) ハドロン分光によるエキゾチックハドロンの探索、(3) ドレル・ヤン過程観測によるハドロン・原子核のパートン構造の解明、などである。偏極した陽子ビームを加速できれば、ハドロン分光の分野で大きな発展が望まれる。また、J-PARC で重イオン加速が実現すると、RHIC や LHC で得られる高温条件での実験とは対照的に、高密度条件下でのクォーク・グルーオンプラズマ相の探査などの核物質研究が展開できる。さらに、高エネルギー不安定核ビーム生成による新たな研究展開も可能になるであろう。

RIBFは核子当たり数100MeVのウランまでの重イオンを大強度で加速し、陽子・中性子の過剰な不安定核や超重元素を大量に生成し、核子多体系物理の研究、および強い力の研究を推進するための加速器である。核子多体系物理研究の主な柱は、(1) 原子核の存在限界に挑戦する研究、(2) 陽子数と中性子数が極端に異なる原子核での殻構造の変化、(3) 励起エネルギー・密度変化に伴う核内核子の凝集と崩壊、(4) 中性子ハロー・スキンの生み出す特異な集団性、などである。これらの有限系の原子核構造研究を通じて、三体力を含む核内有効核力、核子相関のアイソスピン・密度依存性を調べあげ、無限系の核物質についての統一的理解を目指している。これらは、陽子・中性子で構成された原子核の研究対象が大幅に拡大されることによりはじめて可能になる研究である。超新星爆発時の元素合成過程のひとつ、 r -過程に關与する原子核が初めて人工的に生成され、鉄からウランにいたる元素の起源を探る研究が展開できる。超新星爆発のメカニズムを理解するためには陽子・中性子密度が非対称な核物質での状態方程式を解明する必要がある。

さらに、国内加速器施設だけでなく、国外の加速器を使った研究も今後さらに推進されるであろう。例としては、RHICやLHCを使ったQGPの研究、RHICの偏極陽子ビーム衝突によるグルーオンの核子スピンへの寄与などの研究が挙げられる。

4.4. 観測的素粒子原子核物理

これまでに述べた3つの研究フロンティアは、主に加速器を使った研究である。一方で、現在の加速器では到達できないエネルギー領域での物理を、非加速器実験や天文観測などによって探索する、観測的素粒子原子核物理と呼べるような新しい分野が開けつつある。この新分野における代表的な研究として、非加速器(大気、太陽、超新星、原子炉)ニュートリノ研究、陽子崩壊探索実験、暗黒物質の直接探査、ニュートリノ欠損二重ベータ崩壊探索、暗黒エネルギーの研究などがあげられる。また、宇宙線の研究も、たとえば、重力波観測実験は強重力場中での一般相対論の検証に結び付くように、素粒子/原子核の研究に密接に関連している(9.2を参照)。

これらの研究は、他の3つのフロンティアにおける研究と独立ではなく、密接に関わっている。たとえば、陽子崩壊探索のための検出器は、大強度フロンティアにおけるニュートリノ振動でのCP非保存現象の探索に必要となる超大型ニュートリノ検出器と兼

ねることができるように検討が進んでいる。また、宇宙起源の暗黒物質の探索は、LHCでの超対称性粒子探索と表裏一体の課題である。

非加速器ニュートリノ研究

大気、太陽、超新星、原子炉ニュートリノ観測は、これまでニュートリノ研究に関する主導的な成果を上げてきた。今後、体積 100 万トン級の水チェレンコフ測定器や、他の原理による次世代ニュートリノ検出器により、研究のいっそうの展開が期待できる。特に、大気ニュートリノの研究では、加速器による研究と相補的な θ_{13} (前出のニュートリノの質量状態の混合を記述する重要なパラメーターのひとつ) の測定、CP 非保存の研究ができる。また、もし銀河中心付近で起こった超新星爆発からのニュートリノが観測できれば、 θ_{13} に対して加速器による実験では到達不可能なレベルの感度 (10^{-4}) が達成できることも予想されている。さらに、原子炉ニュートリノを用いた研究では、現在の θ_{13} の上限値の 5 分の 1 以下までの感度を持つ実験の実施に向け世界的な競争が展開されている。

陽子崩壊探索

1980 年代の大統一理論の展開によって本格化した陽子崩壊実験は、現在スーパーカミオカンデの独壇場である。単純な SU(5) モデルやミニマル SUSY SU(5) もほぼ否定された。現在、陽子が陽電子 (e^+) と中性パイ中間子 (π^0) に崩壊する反応 ($e^+\pi^0$ モード) の寿命に対しては 6×10^{33} 年程度よりも長いという結果が得られている。陽子の寿命の予想は不確かさが大きい。しかし、その最新の理論的考察によると、主崩壊モードである $e^+\pi^0$ モードに対しては $10^{35} \sim 10^{36}$ 年、陽子がニュートリノ (ν) と荷電 K 中間子 (K^+) に崩壊する νK モードに対しては 10^{35} 年程度以下であるとされている。したがって、次の探索は 10^{36} 年以上の寿命を測ることができる検出感度が必要である。従って、次世代陽子崩壊探索には検出体積が 100 万トン程度の測定器、あるいは、検出感度が高い液体アルゴン検出器などが考えられている。

陽子崩壊の優れた測定器であるスーパーカミオカンデが、K2K、T2K 等の長基線ニュートリノ振動実験の優れた測定器でもあるように、次世代の陽子崩壊測定器もまた次世代の長基線ニュートリノ実験の測定器として重要な役割を果たす可能性は高い。従って、それぞれの次期計画立案において十分な連携が取られることが望まれる。

暗黒物質

暗黒物質(ダークマター)の存在は、天の川銀河から超銀河団に至るまでの宇宙の様々な階層において確認されており、宇宙全体の物質・エネルギーのおよそ4分の1を占めている。初期宇宙の元素合成や宇宙背景放射の非等方性の観測から、バリオン(既知の物質)が占める割合は4%と見積もられているため、宇宙全体の20%程度が暗黒物質とよばれる未知の物質である。

その正体は未だに解明されていないが、弱い相互作用をする質量100 GeV程度の素粒子(Weakly Interacting Massive Particles, WIMP)があれば観測結果を説明することができる。最も有力な候補は、超対称性理論において電弱力のゲージ粒子とヒッグス粒子の超対称性パートナーの混合状態であり、多くの超対称性モデルの中で最も軽く安定であると考えられているスピン1/2の中性粒子、ニュートラリーノである。

暗黒物質の正体を解明するには、高エネルギーフロンティアの加速器による直接生成と並んで、宇宙空間に存在する暗黒物質の直接検出が必要である。反応断面積や質量そして、反応のエネルギー分布などが明らかになれば、正体の解明に必要な感度がより明確になる。

ニュートラリーノの反応断面積は、スピンに依存しない反応の場合 10^{-6} ピコバーン¹⁶よりも小さいことが予想されている。この領域まで感度をもった測定が始まったが、発見のためには、感度をさらに数桁あげてゆく必要があり、測定器の大型化が必要である。これまで、半導体検出器を用いたものが良い感度をあげていたが、大型化にはあまり適していない。したがって、大型化に適する液体アルゴンや液体キセノンなどの液化稀ガス検出器に注目が集まっている。我が国でも2007年から液体キセノンを使った検出器の建設が始まっている。

ニュートリノ欠損二重ベータ崩壊

原子核の二重ベータ崩壊過程において、ニュートリノが放出されない崩壊は「ニュートリノ欠損二重ベータ崩壊($0\nu\beta\beta$)」とよばれ、レプトン数が2だけ変化するレプトン数非保存現象である。現在、世界中で様々な実験グループが $0\nu\beta\beta$ 崩壊の発見を目指しているが、未だに観測されていない。 $0\nu\beta\beta$ はニュートリノがマヨラナ性(粒子と反粒子が同一粒子であるという性質)を持つときに起こる現象である。ニュートリノの質量が

¹⁶ ピコバーン(pb)は、断面積の単位で、1ピコバーン= 10^{-40} m²

他の素粒子に比べて極めて小さいことを説明するシーソーモデルや、宇宙の物質・反物質の非対称性の起源をレプトン数生成にもとめるレプトジェネシス理論もニュートリノのマヨラナ性を要求する。また、 $0\nu\beta\beta$ の崩壊定数（寿命）は、ニュートリノ質量の絶対値（正確には混合の情報を含んだ有効質量）に感度があるため、ニュートリノ振動の測定から得られる質量差の情報と合わせて、ニュートリノ質量行列の全貌を解明する強力な手段となる。

これまでの $0\nu\beta\beta$ 探索は目標値を明確に設定できなかったために、実験の感度を上げて上限値を下げる努力を続けるしかない状況にあったが、最近のニュートリノ振動の研究の成果から、質量差や混合角に関する測定が進み、次世代の実験が狙うべき目標が明らかになっている。即ち、ニュートリノ質量が、順階層¹⁷ ($m_1 < m_2 \ll m_3$) ならば数 meV ¹⁸程度、逆階層 ($m_3 \ll m_1 < m_2$) ならば有効質量は 50 meV 程度であると予想されている。世界では 50 meV を目指した実験計画があり、様々な検出方法について研究開発が進行中であるが、我が国では、国内での独自計画や海外の計画への参加などが検討されているものの、具体的な計画は動いていない。数 meV の目標は現時点では実現性に乏しいため、まずは 50 meV に目標を設定した上で、段階的に研究を進めるべきである。

$0\nu\beta\beta$ の予備的研究には、素粒子、原子核、宇宙線の研究者が取り組んでおり、コミュニティの垣根を越えた共同研究体制を構築することも重要である。

暗黒エネルギー

最近 10 年間の天文観測（遠方の超新星や銀河の分布、宇宙背景放射の非等方性等）により、現在の宇宙が加速膨張していることは確立したとあってよい。一般相対性理論によれば、加速膨張を引き起こす原因は、引力ではなく斥力として働く未知の「エネルギー」である。この正体や性質については多くのモデルが提唱されているが、総称して暗黒エネルギー（ダークエネルギー）とよばれている。

¹⁷ ニュートリノ振動実験からは、ニュートリノの質量の絶対値ではなく、質量の 2 乗の差の情報だけが得られる。その結果、異なるニュートリノの質量 m_1 、 m_2 、 m_3 につ次のふたつの可能性があることがわかっている。 m_1 と m_2 の差が小さく、 m_3 が m_1 、 m_2 に比べて大きい場合（順階層）、それとは逆に、 m_1 、 m_2 が m_3 に比べて非常に大きい場合（逆階層）とがある。

¹⁸ $\text{meV} = 1 \text{ ミリ電子ボルト} = 1 \text{ 電子ボルトの千分の一}$

最終的には、暗黒エネルギーを素粒子の立場から理解することが必要であるが、暗黒エネルギーのエネルギー密度は量子論に基づいて推測される真空の持つエネルギー値に比べてはるかに小さく、既存の素粒子論では説明できない。

一方、暗黒エネルギーの性質（例えば、状態方程式パラメーターの決定や時間依存性等）について測定精度を上げるためのいくつかの観測計画が国内外で進行中である。米国では NASA、NSF、エネルギー省の協力体制が整えられようとしている。これらの計画はいずれもいわゆる天文観測であるが、（１）背景となる物理が根源的かつ素粒子物理と密接に関係している、（２）高エネルギー物理実験で培われた実験技術の応用が期待できる、等により、既に国内でも始まっている両分野の専門家による共同研究が、今後更に発展することが望まれる。

観測的素粒子原子核物理フロンティアは、素粒子、原子核、宇宙にまたがる学際領域であり、将来の大きな発見の可能性を含む分野である。したがって、個々の分野からの新たな研究者の流入、分野間の交流を通じて、新しい強力なコミュニティの創出が必要不可欠である。これまで、このフロンティアの研究は、例えばニュートリノ研究のように、国内の研究者が主導する計画に、外国からの研究者も参加するという形で進んできた。しかし、今後は、実験の規模が巨大化するために、研究計画の初期段階からの国際協力や、研究テーマの集約が必要となってくるであろう。計画あるいは研究テーマの優先順位の設定、選択と集中が重要である。

5. 社会への波及

人類の知への貢献という学問上の成果はもとより、それを達成するという目標のもとに創り上げられた新しい技術やシステムは社会を大きく変えてきた。ここでは素粒子原子核物理研究の過程で得られた技術や研究システムの社会への波及という視点からまとめる。

素粒子原子核分野の発展は、研究の道具として生まれた加速器の急速な発展と進化をもたらした。当該分野だけに収まらず、物質科学、生命科学さらには医療応用といった加速器を用いた科学分野、加速器科学を創出した。KEK のフォトンファクトリー、理化学研究所の SPring-8、放射線医学総合研究所の重粒子線がん治療装置 HIMAC における科学研究はその典型である。今や加速器とその周辺技術は基礎科学の研究に留まらず、

産業創出・推進に不可欠な技術となっている。加速器科学は、イノベーションの萌芽としての役割を担っているのである。

5. 1. 加速器技術・測定器技術

素粒子・原子核の分野の大きな特徴のひとつは、要素技術と基本システムを研究者自らが開発しているということである。新しい法則やより根源的な理解のためには、これまで創り出すことができなかった新しい素粒子、原子核を人工的に創り出すための新しい装置を開発すること、および今まで見るができなかった詳細な情報を捕らえることができる測定装置を作ることが必須である。この最たる物が最先端の加速器技術であり、新しい測定器技術である。

数十年に渡って開発された広範な加速器技術と測定器技術は、物質・生命科学さらに医療における様々な場面で使われている。例として、放射光によるタンパク質や薬剤等の分析、放射線とその検出を使った微細構造検査などがある。小型加速器をつかって人工的に製造された放射性同位元素（RI）は、滅菌・創薬・診断などに使われている。最新の放射線計測技術は、イメージングのセンサー技術の根幹を成しており、CTやPETなどの医療分野で活かされている。核磁気共鳴法は、MRI 診断や蛋白質の構造解析に利用されている。また、観賞用植物、耐塩性イネなどの新しい植物品種がビーム照射による突然変異によって生み出されている。陽子や重イオンを直接癌部位に照射する、放射線癌治療も国民生活に浸透しつつあり、複数の地方自治体が加速器癌治療施設を整備する計画をもっている。

物質科学分野では、加速器施設で得られた、二次粒子の中性子、ミュー粒子、放射光は物質構造解析には不可欠のビーム種である。無反跳共鳴吸収法（メスバウワー法）は物質科学の基本的な解析手法の一つとして定着している。デバイス開発においても、例えば、人工衛星に搭載される電子部品の、宇宙空間での放射線耐性がビームをもちいて調べられている。さらに、加速器をつかった微量質量分析法は、考古学・地球惑星科学分野で広く用いられるようになってきた。

以上のように、最先端の加速器技術、新しい測定器技術は、分野融合をもたらし、学術利用の拡大だけでなく、広く国民生活に浸透している。

5.2. コミュニケーション技術

後述するように、国際化が進んでいる素粒子原子核分野では、世界中に散らばる研究者を結ぶ技術が開発され、既に世界的に普及している。最も有名な例は現在インターネットで広く利用されている World Wide Web (WWW) であろう。WWW は、高エネルギー物理学における世界の中心的な研究拠点で、スイスとフランスにまたがる CERN において開発された。CERN のコンピューター技術者の一人が、世界中に散らばっている高エネルギー物理学実験のチームメンバーの研究者の間で、瞬時に同じ情報を共有するにはどうしたらよいか悩んだ末、1990 年に WWW の発明に至ったものである。

さらに、CERN の世界最高エネルギー陽子-陽子衝突型加速器 LHC においても、波及効果が期待される新しい取り組み「データ・グリッド」が行われている。LHC の4つの実験装置の一つには、日本を含む世界の約 150 の研究機関、3000 人以上の研究者が参加している。そして数ペタバイト¹⁹規模の実験データを世界中に散らばっている研究者が自由に解析することができるようなシステム作りを、グリッド技術の計算機科学者と協力しながら進めている。世界各地に分散した大量の実験データを、ネットワークのバンド幅（回線速度）を気にすることなく自由に移動させることが可能な時代が訪れようとしている。

5.3. 人材育成

素粒子原子核分野においては、研究者は、最先端の実験研究に必須である加速器や測定器を、さらには QCD 理論計算に必要な超高速コンピューターでさえも、自らの手で開発し、作り上げてきた。このため、加速器や測定器の開発にいくつものノーベル物理学賞が贈られていることから分かるように、物理学の研究だけでなく技術開発の能力に優れた研究者をも高く評価する土壌がある。そして、このような研究者は、今日、物質・生命科学から産業利用まで幅広く展開されている加速器科学の様々な分野で、その専門性を活かして活躍している。

素粒子原子核分野のうち特に加速器を使う研究は、我が国の一連の加速器計画（12GeV 陽子シンクロトロン、トリスタン電子陽電子衝突型加速器、KEKB 加速器、

¹⁹ ペタバイトは、約 10^{12} バイト（1 メガバイトの 100 万倍）の情報量のこと

J-PARC) を通して、大型装置を計画、建設、運営、維持することのできる人材を生み出した。大型加速器の研究現場で育った人材は、将来さらに大型化する科学や技術の分野において、そのプロジェクトを円滑に遂行できるプロジェクトマネージャーとして活躍することが期待される。

素粒子原子核分野はまた、基礎科学にとどまらないあらゆる物理科学・技術分野における人材育成の牽引車でもある。湯川秀樹のノーベル賞に刺激されて、基礎科学の分野を目指した若者が現在、産業界を含む様々な分野の指導者となって活躍しているように、今後も、素粒子原子核分野は、第二、第三の「ユカワ」や「コシバ」を目指す若者の目標となり、あらゆる科学技術分野でイノベーションを引き起こす次世代リーダーの供給源となるであろう。

科学技術立国を目指すわが国にとって、子供たちの「理科離れ」は大きな問題となりつつある。子供たちが理科や数学に興味をもつのは、宇宙や生命などの自然の不思議にふれて興味を持つことがその始まりであることが多い。宇宙の進化や物質の根源にせまる素粒子原子核物理学は、子供たちの知的好奇心をわきたたせ、ひいては理数系の学習に興味を向けることに貢献できると考える。「理科好き」の子供たちの多くは、様々な科学や工学の分野に進み、日本の科学技術立国をささえる礎となる。素粒子原子核物理学は、このような形での人材育成にも大いに貢献している。

6. 素粒子原子核分野の特色

6.1. 産業界との連携

加速器・測定器技術開発における日本の独自性は、新しい装置の開発を国内外の企業と一体となって開発していることにある。これは欧米で見られるインハウス型の開発体制と大きく異なる。企業との共同開発により製品の質が高いことが世界的にも評価されており、日本の強みとなっている。一方、R&Dが長期化するにつれて、短期的利益還元を求める民間資金によるR&Dは困難となる傾向が強く、インハウスの技術者の欠乏の問題が顕在化してきている。長期展望に基づいた加速器科学への投資のあり方を検討すべき時である。

6.2. 大型施設の運営体制と研究者コミュニティ

大型装置を擁する研究所は、日本国内においては主として全国大学共同利用機関として位置付けられており、大学の研究者・大学院生が自由に利用できる体制が整えられ、最先端研究と教育活動が推進されてきた。共同利用研究所の考え方は、理論系の京都大学基礎物理学研究所で最初に導入され、ワークショップ・国際会議開催などのソフト面での支援も進められている。これら施設利用の可否決定は学者によるピアレビューによる審査を通じて行われており、徹底的な競争原理・決定プロセスの透明性・決定課題の公開性が確保されている。競争・公開の原則を貫徹することで、国内研究者個々の自由な発想・自主性を啓発し、国際競争力の確保、これに伴う学術発展が大きく進んだことは疑う余地もない。この共同利用研究所の考え方は、物性研究、宇宙天文分野などの施設・研究所にも波及したことを付け加えておく。

6.3. 研究のグローバル化

昨今あらゆる分野でグローバル化が進んでいるが、素粒子原子核分野は国際協力による研究推進が常態化しており、旧来から最も国境のない分野である。国際化が促進されてきた理由は、(1) 研究対象に地域性がなく、研究成果が地域の利害に直接関連せず、人類共通の知的財産を創り出すという大きな目標があるためであり、また(2) 大型かつ先端的な加速器と粒子測定器を建設するためには、国際協力による研究資源の集中が必要だからである。

日本の国際化は、1980年代までとそれ以降でその内容が大きく変化している。日本が世界最高の性能を有する加速器を持たなかった時期においては、国際協力とは専ら欧米の先端的加速器施設を利用した実験に参加することであった。この時期に海外で経験を積み、実力をつけた研究者が、その後の我が国における素粒子原子核研究の指導的役割を担った例は数多い。

一方、当時世界最高エネルギーであったトリスタン加速器時代からは、海外からの共同利用研究者数が増加し、今日では Belle 実験や T2K 実験のように外国人研究者が過半数を占める実験グループも少なくない。彼らは単に完成した日本の施設を利用するのではなく、各研究機関から資金を持ち寄り、日本の実験グループと一緒に測定器やビームラインを建設しているのである。KEK が平成 19 年度に受け入れた外国機関か

らの共同利用研究者数は1000人を超えており、この数はJ-PARCの稼働とともに更に増加すると予想される。国際協力は真にグローバルな形態を取るようになったと言えよう。

J-PARC や RIBF の建設、KEKB の更なる増強等により、我が国は、素粒子原子核研究において世界最高の性能を有する加速器を持ち、世界からトップレベルの研究者が集まる研究拠点としての役割を担うことになる。今や、日本の将来計画には世界中が注目している。

7. 学術行政システムの課題

素粒子原子核物理学は大型かつ先端的な加速器と粒子測定器を必要とし、その建設のために研究資源の集中を必要とする。従って、研究者コミュニティ全体で長期展望に基づいて、加速器・測定器の開発、建設、運転の長期計画を策定する必要がある。また、ひとつのプロジェクトが長期にわたるため、次世代の研究者の育成も考慮したバランスの良い計画を推進し、継続的に優れた研究成果を生み出すことによりコミュニティの健全性を保たなければならない。

7.1. 加速器技術・加速器科学への投資

この分野を支える最も大きな資産は、最新鋭の加速器技術であり、それを開発することのできる人材である。その技術は材料・加工・計算・真空・超伝導と非常に広い分野にわたり、その人材は国内外の研究機関および企業に従事している。加速器の利用は素粒子・原子核の研究にとどまらず、いまや物質構造や生命科学の研究においてなくてはならない手段となっている。さらに放射性物質の核変換など環境やエネルギー問題に直結する課題の解決にも可能性を広げている。これらを進めるのは先端加速器の開発を目指して世界中で活躍する研究者・技術者である。しかし、現状では加速器の研究者・技術者の活動の場は、それぞれの加速器建設や技術開発にとどまり、大学・研究機関や関連する企業においても長期的なビジョンのもとでの人材育成には限界がある。この分野の研究設備、装置の大型化、高精度化が今後ますます顕著になり、基幹技術の技術革新、技術移転、製造管理等において、大学・研究機関と産業界との密接な連携がこれまでに以上に必要になる。このような研究を促進するには、関連省庁を横断する経費・人材等の

研究支援体制の構築が必須である。

7.2. アジア・世界の拠点形成

素粒子原子核研究において世界最高水準の成果を日本から継続的に発信するためには、日本に世界の人材が集まる国際研究拠点を構築することが必須である。世界の研究者は世界トップの研究所に自然に集中する。いまこそ我が国に国際研究拠点を形成し、長期的視点で産学連携と国際研究環境を両立させたモデルケースを形作る時であると考えられる。このような世界的研究拠点の構築は、必ずや日本の基礎科学振興の原動力となる。

アジアはすでに欧米と肩を並べ、いまや人的・経済的な成長力において世界をリードしようというところまで来ている。このような世界情勢を鑑みるに、大規模な研究資源の投入を必要とする大型計画の実現において、アジアの果たす役割は今後益々大きくなるであろう。アジア各国における基礎科学・加速器科学の発展、人材の育成、技術力の向上は、素粒子原子核物理を更に発展させるための原動力となる。このような観点からも、アジアにより優れた研究拠点を作る意義は大きい。

7.3. 国家規模・世界規模の基礎科学戦略

基礎科学研究の推進において、研究者個人あるいは小規模グループの自由な発想による萌芽的研究や多彩な研究が重要であることは論を俟たない。一方、萌芽的研究が大きな流れに発展し、研究資源の集中を必要とする段階に達すると、研究者コミュニティによる学術的コンセンサスを背景に、政府による評価・選択を経て、世界的な拠点形成が必須となる。素粒子原子核物理学に代表される大規模かつ世界水準の設備を必要とする分野の研究を推進するためには、長期ビジョンの策定とそれを実現するシステムの構築が必要である。

基礎科学における研究計画の長期ビジョン策定においては、学術上の意義及び世界の研究動向に関する研究者コミュニティの判断が最も尊重されるべきである。また関連する学術団体（素粒子原子核物理学においては日本物理学会や日本加速器学会など）による精査、更には日本学術会議による総合的かつ長期的な判断が必要となる。今後、我が国の基礎科学における大型計画を適切に推進しかつ評価するために、日本学術会議

を中心とした基礎科学大型計画推進のための組織（計画の選定や進行中プロジェクトの評価を行う組織）を作ることが強く望まれる。

7.4. 長期ビジョンの策定と発信

素粒子原子核物理学の研究、特に大型の加速器と国際協力を必要とするプロジェクトにおいては、最初にアイデアが出されてから最終的な研究成果が得られるまで、20年～30年もの長期に及ぶ例が少なくない。また多くの場合、技術的なチャレンジを伴うため、計画の初期段階での詳細な年次計画やコスト評価、時には実現可能性を見通すことすら困難である。一方、革新的技術の開発には、多くの研究資源を投入する必要がある。従って、計画の承認後に初めて大型の資金が投入されるという現行の意思決定モデルでは対応できない。計画の各段階における目標を明確に設定し、厳格な評価を行い、長期的ビジョンをともなった大型計画を実現すべきである。

人材育成という観点からは、常に優れた研究成果が生み出されるよう、研究分野全体を俯瞰した総合的判断が求められ、複数の研究プロジェクトの開発・建設・実験の各フェーズが噛み合うような調整が必要である。

世界との共同研究体制構築が必要とされる中で、世界の研究者や関連する人々に日本のビジョンを発信し、優秀な人材を日本に引きつけることが求められている。学問上の魅力は大きいですが、計画実現に困難が予想されるような場合でも、その可能性を追求することの明示自体が、研究活動を活発化し、人材の招来をもたらし、計画実現の可能性を高める。欧米ではこのような取り組みが国の指導のもとで始まっている。

7.5. さらなる国際化へ向けた課題

前述のように、日本の素粒子原子核研究は世界のトップレベルにあり、世界最高性能の加速器を利用するために、世界中、特にアジア諸国、から数多くの研究者が訪れている。今やこの分野のトップランナーとして、世界の研究コミュニティを牽引し、また次世代を育てていく中心となることが求められている。

しかしながら、国内の研究支援体制は、このような時代の流れに対応できていないと言え難い状況である。研究機関内での外国語環境（英語だけでなく来訪者の多い中国

語、韓国語での対応も含む)、外国研究者及び家族の生活環境等の整備に加えて、様々な面で研究支援体制を整備しなければならない。例えば、外国から受け入れる資金の運用・管理を容易にする会計システムの構築が必要であろう。また、欧米ではインハウスのエンジニアや技術者から得る技術的支援の多くが、日本では業者への外注で賄われており、外国人研究者が簡単に技術的支援を得るのが難しいという状況もある。このような諸問題を解決するためには、研究者と研究所事務や行政が一体となって取り組まなくてはならない。

8. おわりに

素粒子原子核物理は、研究者の自然に対するあくなき好奇心と想像力を原動力として、物質の究極の構成要素とその要素に働く力を明らかにするために発展してきた。その結果、原子は電子と原子核からなり、原子核は核子（陽子と中性子）から、核子は素粒子（クォーク）からなっていることが明らかになり、これら物質の構成要素間に働く力を記述する理論も完成した。さらに、素粒子原子核物理は、宇宙の進化について深い理解をもたらした。同時に、物質、エネルギー、時間、空間に関するより根源的な研究課題や、宇宙進化のより深い謎の解明が当該分野の研究者に突きつけられている。

これらの研究において、我が国の研究者の果たした役割は極めて大きい。KEK や理研の加速器を使った実験研究やスーパーカミオカンデに代表される我が国の一連のニュートリノ研究における成果はその典型例である。さらにごく最近、日本では世界的に注目される加速器が建設され、世界の中でのこの分野の今後の拠点として、世界の期待が急速に高まっている。すなわち、我が国の素粒子原子核研究は、今や実験、理論ともに世界のトップレベルにあり、世界のコミュニティを牽引して行くことが期待されている。

素粒子原子核物理の発展を語るとき、その研究手段として発生し、その後のめざましい発展によって、基礎科学から応用科学分野までを支える先端技術となった加速器の重要性を強調しすぎることはない。先端加速器開発の現場は、テクノロジーフロンティアとして、我が国の科学レベルの向上を図る最前線でもある。

素粒子原子核物理の今後の研究においては、加速器のみならず加速器を使わない実験

装置も大規模なものになると予想される。また、大規模プロジェクトは必然的に国際的プロジェクトとなり、世界のコミュニティの中で、我が国の独自性を保ちながらいかにプロジェクトを成功させるかは、当該分野にかせられた大きな課題のひとつである。

今期（第 20 期）の当分科会においては、分野の現状分析を中心に今後のサイエンスの進め方を議論した。このサイエンスを実現するための具体的施策（提案されているプロジェクトおよび研究テーマの優先順位の設定を含む）については、引き続き第 21 期以降の素粒子原子核分科会で進めて行くつもりである。

我々は、本記録の中で基礎科学を代表する研究分野である素粒子原子核物理学の現状を分析・評価し、分野の展望を述べた。本学問分野の目標、物質と時空を支配する究極の物理法則の解明をさらに前進させたい。

9. 付 録

9.1. 加速器学の発展

以下粒子加速器そのものに関する科学技術研究を、多少耳慣れない用語ではあるが、「加速器学」と呼び、加速器を利用した学問研究一般を指す広義の「加速器科学」と区別した。

9.1.1. 加速器学の発展の方向

加速器学の特殊性: 加速器学は自己完結的ではなく、素粒子原子核や物質・生命・医療等の実験に貢献することを第一義的な目的としている。

これまでの加速器学の発展を担った中核は物理学出身の研究者であり、とりわけ素粒子原子核分野の出身者の果たした役割は大きかった。その理由は、ひとつには加速器の主たる目的が素粒子原子核などの物理実験であり、加速器の開発において実験目的への理解が大きな動機付けになることである。また各加速器はその時点での極限性能を要求されるので、単に図面を書いて注文すれば手に入るものではなく、科学研究の資質を持つ者が開発の主体にならなければならない。また、加速器学はあらゆる分野の知識・経験を結集・融合した総合技術であるため、自然科学の基礎を担う物理学の出身者が活躍するのは当然のことである。

今後も加速器学の発展は続く。素粒子原子核はもとより、物質・生命・医療等全分野で、より高エネルギー・大強度・高輝度のビームを高効率かつ省資源で達成することが求められている。素粒子原子核分野はこれまでの実績を踏まえ、この加速器学を自らの申し子として、これからも意識的にその発展に努力しなければならない。特に優秀な人材の加速器分野への供給に努めるべきである。もちろん加速器の応用の広がりを考え、他分野の研究者の加速器学への参加も併せて奨励する。また、加速器学独自の人材育成、特に大学・大学院における加速器学講座の設置を推奨する必要がある。

加速器学はこれまでも国際的な共同研究に支えられてきたが、その方向は一層強めなければならない。

9.1.2. 加速器学発展のために留意すべき諸問題

現状で日本の加速器研究者・技術者のかなりの部分（70%）が、高エネルギー加速器研究機構（KEK）に集中しており、人材の移動を通じた活性化がむずかしい。一方、KEKの加速器研究者・技術者の規模は諸外国の同程度の加速器を持つ研究所に比べてもかなり小さい。したがって単にKEKの規模を抑制したり、分散させたりすれば済むという問題ではない。

これまで日本の加速器技術は企業へのアウトソーシングに支えられて来た。しかし、近年各企業においては採算や効率化を重視し、加速器技術部門から撤退する傾向が見える。これまで各企業が蓄積して来た技術力をどのように継承するかは、日本の加速器の発展にとって大きな問題である。

加速器学を系統的に教育する場はまだ不十分である。加速器学の講座をもつ大学・大学院は少ない。一方、加速器研究者は必ずしも加速器専門教育の出身である必要はなく、素粒子原子核をはじめとする他分野の研究経験者であるべきである。加速器学分野と加速器利用分野のバランスのとれた発展が重要である。

加速器研究は実際に加速器を製作し、ビームを長期間運転してはじめて意味をもつ。通常の大型加速器では、理論・設計・製作・運転という全過程を経るには10年以上を要し、各研究者は長期間一つのプロジェクトに打ち込まなければならない。一方でそのような個々のプロジェクトに埋没し、タコ壺化してしまう危険は常に存在する。そのため、ある加速器で経験済みの失敗を別の加速器で最初から繰り返す、といった例がしばしば見られる。いかにプロジェクト間で情報を共有し、活性化を図るかは大きな課題である。

加速器研究の「非自己完結性」のため、加速器学研究者の業績評価は単純ではない。単に論文では業績を評価できず、実際に製作された装置の先進性や運転の実績も考慮されなければならない。また、大規模な加速器では個人と集団両方に対する評価が共に重要である。

9.2. 宇宙線フロンティア

10^{20} 電子ボルト付近に生じると予測されている宇宙線のエネルギー限界（GZK カットオフ）を確認することは大きな課題である。AGASA と HiRes はカットオフの存在について結論を得ることはできなかった。両者の違いが、観測手法の系統的問題によるのか、単純な統計誤差によるのか、解明されていない。AGASA は、約 100 km^2 の地表でのシャワー粒子数を計測し、HiRes は大気中のシャワー軌跡を撮像して、エネルギーを決める。

この問題を解決すべく、地上アレイと望遠鏡の同時運用によって観測の信頼度を高めた Pierre Auger Observatory (Auger) と Telescope Array (TA) が建設された。Auger は南北米・欧の TA は日米韓の国際共同研究である。南半球のアルゼンチン (Auger) と、北半球の米国ユタ州 (TA) で、全天を覆う観測体制がほぼ完成している。Auger は AGASA の 40 倍の検出面積を有し、TA は 13 倍で小さいが、エネルギー決定精度の良い検出器で Auger と拮抗している。GZK カットオフについては、数年のうちに Auger と TA による観測で結論が得られると考えられる。

宇宙線は、あらゆる方向の宇宙から均等に到来し、高い一様性を持っているが、最高エネルギー領域では、宇宙空間磁場による進行方向の偏向が小さくなるため、発生源天体が特定できるようになる。Auger は最近、 $10^{19.6}$ 電子ボルトを超えた宇宙線の到来方向が、銀河系近傍の活動銀河核と相関すると発表した。今後、最高エネルギー宇宙線の発生源が、南北両半球で確定して行くと予想される。個々の発生源天体とそこまでの距離が決まり、観測精度が向上すれば、発生源ごとに到来粒子の種類や加速機構が解明され、地球に至る宇宙空間の状態や、伝播過程における極高エネルギー素粒子反応の研究などが格段に進む。TA、Auger とも、これを可能にすべく、現装置の拡張と性能強化（phase-2 TA、北半球 Auger）を計画している。高エネルギー宇宙ニュートリノの観測は、これら大規模計画における大きな課題のひとつである。同様の目的で、更に大きな感度を持ちうる観測計画として、宇宙ステーションから地球大気の発光を撮像する JEM / EUSO が提案されており、検出器や関連技術の研究が精力的に行われている。

1912 年 Victor Hess による発見以来、高エネルギー宇宙線の起源の問題は天体物理学上の謎であり続けてきたが、近年の観測の進展によりその解明の糸口が見えてきた。高エネルギーガンマ線観測は、解像型チェレンコフ望遠鏡の技術が発展し、日豪共同の

CANGAROO-III (オーストラリア)、ドイツ・フランスなどの HESS (ナミビア)、ドイツ・スペイン・イタリアなどの MAGIC (カナリア諸島)、アメリカなどの VERITAS (アリゾナ) といった口径 10m 以上のチェレンコフ望遠鏡システムが稼働を開始し、すでに発見された TeV 領域ガンマ線天体の数は 70 個に達している。これらは長い間宇宙線の起源として有力視されてきた超新星残骸に限らず、活動銀河核や、他の波長で対応天体の見つからない未同定天体など、粒子加速と放射機構についての新たな問題を提起している。しかし、加速された粒子が電子であるか陽子などの原子核であるかについては、観測エネルギー範囲が限られることなどからまだ確証が得られていない。現在次世代のチェレンコフ望遠鏡システムとして、EU を中心とした Cherenkov Telescope Array (CTA) や、米を中心とした Advanced Gamma-ray Imaging System (AGIS) といった国際協力による大規模チェレンコフ望遠鏡システムの建設が、2010 年代早期の観測開始を目指して提案されており、日本の参加も検討されている。これらの望遠鏡のガンマ線天体に対する検出感度は現在の十倍以上となり、100 GeV 領域から 100 TeV 領域までのガンマ線に感度を持ち、南北両半球に装置を設置して全天をカバーすることにより、発見されるガンマ線天体の数は千個に達すると期待される。2008 年に打ち上げられた GLAST 衛星が数 10MeV から 100 GeV 領域までカバーすることと合わせ、エネルギーで 6 桁をカバーするガンマ線観測が実現すれば、ガンマ線放射が電子起源なのか陽子起源なのかについての識別も可能になると期待される。

高エネルギーニュートリノについては、南極で IceCube の建設が進んでおり、2012 年にも完成して、初めて天体の観測が実現することが期待されている。北半球では、地中海で別々に進められていた ANTARES、NEMO、NESTOR のグループが協力して、EU のプロジェクトとして IceCube と同規模の KM3NeT の R&D を進めている。これらの装置で高エネルギーニュートリノが観測可能になったとしても、天文学研究のためには統計量は十分でない。したがって、高エネルギーニュートリノが大気中で反応し引き起こす超高エネルギーシャワーからの電波を利用し、広域で感度を持つ装置 (ANITA など) による観測も検討されている。

一般相対性理論により予言された重力波の直接検出を目指す重力波研究では、これまで米国の LIGO 計画がもっとも高感度であり、15 メガパーセク²⁰までの距離をカバーで

²⁰ パーセクは、天文学で使われる距離を表す単位で、約 3.26 光年。メガパーセクは、1 パーセクの 100 万倍である。

きる、しかしながら理論的に予測される銀河あたりの二重中性子星合体による重力波発生の確率は、年間 10^{-5} 程度であり、LIGO による検出には約 700 年の観測が必要である。発見するためにはこの感度を 10 倍（カバーする領域は 1000 倍）上げる必要がある。

米国の LIGO の感度を 1 桁向上させる Advanced LIGO は 2012 年完成、2014 年から本格観測開始予定である。一方ヨーロッパの Virgo では、これまでの経験で判明した問題点を改良する Virgo+ が進められ、さらに、Advanced LIGO に対抗できる大幅な改良計画、Advanced Virgo が検討されている。我が国が計画している LCGT は、Advanced LIGO と同程度の感度を持つので、早い完成により重力波発見の一番乗りを成し遂げることも可能である。最初の重力波の発見は、各検出器の競争であるが、重力波天文学を推進するためには、どの検出器も単独では位置を決定できないため、必ず共同観測を遂行する必要がある。このための協力関係は築かれつつある。現時点で km 規模の干渉計は米国に 2 台と南ヨーロッパに 1 台あるが、重力波観測網の効率の観点からは、アジア或いは大洋州にもう一台の干渉計があることが望ましい。このため、世界の重力波プロジェクトのメンバーから構成される重力波国際委員会では、2005 年には LCGT 予算化支持の書簡を送付している。LCGT 計画の早急な着手が望まれる。

さらに、米欧の共同計画 LISA では、惑星軌道上に 500 万 km 基線長のレーザー干渉計を設置し、地上の干渉計とは全く違う 10mHz 領域の重力波をねらう。宇宙の隅々で起こるブラックホール合体のイベントを残らず検出できる宇宙干渉計であるが、現在の計画は無期延期されている。