

高エネルギー物理学将来計画検討委員会 答申

石塚 正基(幹事)、石野 宏和、石野 雅也(委員長)、大谷 航、
帯名 崇、北口 雅暁、北野 龍一郎、阪井 寛志、佐貫 智行(幹事)、
谷口 七重、戸本 誠、中平 武、南條 創、樋口 岳雄、
松本 重貴、森山 茂栄、吉岡 瑞樹

September 6, 2017

序文

2012 年 2 月、当時の高エネルギー物理学将来計画検討小委員会は、「LHC において 1TeV 程度以下にヒッグスなどの新粒子の存在が確認された場合に電子・陽電子リニアコライダーの早期実現を目指すこと」、及び「大きなニュートリノ混合角 θ_{13} が確認された場合にニュートリノ振動を通した CP 対称性の研究に向けて大型測定器の実現を目指すこと」を答申した。また同年、ヒッグス粒子の発見と、3 世代ニュートリノ混合の確立という 2 つの極めて重要な物理学的進展があった。

本委員会の任務は、この進展にもとづいて 2012 年の答申を更新すると共に、10 年以上先の将来を俯瞰して我が国の高エネルギー物理学分野の将来計画を検討することである。ここで最も重要な課題は、現在稼働中・建設中のプロジェクトに続く大規模な将来計画について、世界中のプロジェクトとの競争関係・協力関係をふまえつつ、答申することである。本委員会は、2012 年以降の物理学的進展を調査し、我が国がリードして実現すべき将来計画をあらためて議論した。

一方、来年度中には実験を開始する Belle II 実験や、J-PARC 加速器を用いた中小規模実験において、如何に持続的・多角的に素粒子物理研究を進めていくべきかは重要な課題である。大規模な将来計画の実現の成否もこれらの実験で得られる成果にかかっている。また近年、宇宙観測や地下素粒子実験の重要性がますます高まっており、分野としての戦略や対応について検討が必要となっている。したがって本答申では、これらの課題についても概観して検討を行った。

将来計画委員会は、高エネルギー委員会によって任命された本委員会固有のメンバーと高エネルギー委員会のメンバーから構成される。この報告書は全委員の議論にもとづき、前者が主体となって作成した。

Contents

1	素粒子物理学の現状と展望	8
1.1	素粒子物理学の現状	8
1.2	素粒子物理学の展望	9
2	エネルギーフロンティア	14
2.1	国際リニアコライダー	14
2.2	LHC アップグレード	19
2.3	将来のエネルギーフロンティア加速器・加速原理	22
3	ニュートリノ振動と陽子崩壊	24
3.1	現状	24
3.2	将来計画	25
4	フレーバー物理	30
4.1	SuperKEKB / Belle II 実験	30
4.2	K 中間子	31
4.3	ミューオン	32
4.4	中性子	33
5	非加速器素粒子実験	35
5.1	地下素粒子実験	35
5.2	宇宙観測	38
6	人材育成, 技術開発について	42

答申

2012年、LHCにおいて質量125 GeVのヒッグス粒子が発見され、3世代ニュートリノ混合が確立された。この期を捉え、本委員会は日本の高エネルギー物理学の基幹となる大規模将来計画に関して、以下の提言をする。

- LHCにおいて質量125 GeVのヒッグス粒子が発見された今、ヒッグス粒子の詳細研究によって標準モデルを超える物理の方向性を示すべく、衝突エネルギーを250 GeVとする国際リニアコライダー (ILC) の日本国内での建設をただちに開始すべきである。並行して、LHCおよびそのアップグレードによる新物理の探究を間断なく続けるべきである。
- 3世代ニュートリノ混合が確立し、レプトンセクターにおけるCP対称性の研究への道筋が示された。今後はT2K実験によるCP対称性の破れの探索とJ-PARCニュートリノビームの増強を継続して進めつつ、陽子崩壊探索にも優れた感度を持つハイパーカミオカンデの早期実現を国際プロジェクトとして推進すべきである。

高エネルギー委員会は、これらの基幹となる大規模計画の早期実現を目指し、あらゆる手段をもって取り組むべきである。

現在建設中のSuperKEKBについては、予定通り完成させて物理結果を出していくことが肝要である。また、現在計画中の中小規模計画の幾つかは、ニュートリノ物理のように重要な研究分野に発展していくポテンシャルを持っている。これらを並行して推進し、多角的に新しい物理を探索していく必要がある。J-PARCでのミューオン実験を始めとするフレーバー物理実験、暗黒物質やニュートリノを伴わない二重 β 崩壊の探索実験、宇宙マイクロ波背景放射偏光のBモード揺らぎ観測や暗黒エネルギー観測は、これに該当する研究と考えられる。

さらに、今後得られる新しい実験結果が、より高いエネルギースケールの新粒子・新現象の存在を示唆した場合に備え、粒子加速エネルギーを飛躍的に向上させるための加速器開発研究を継続しておこなっていく必要がある。

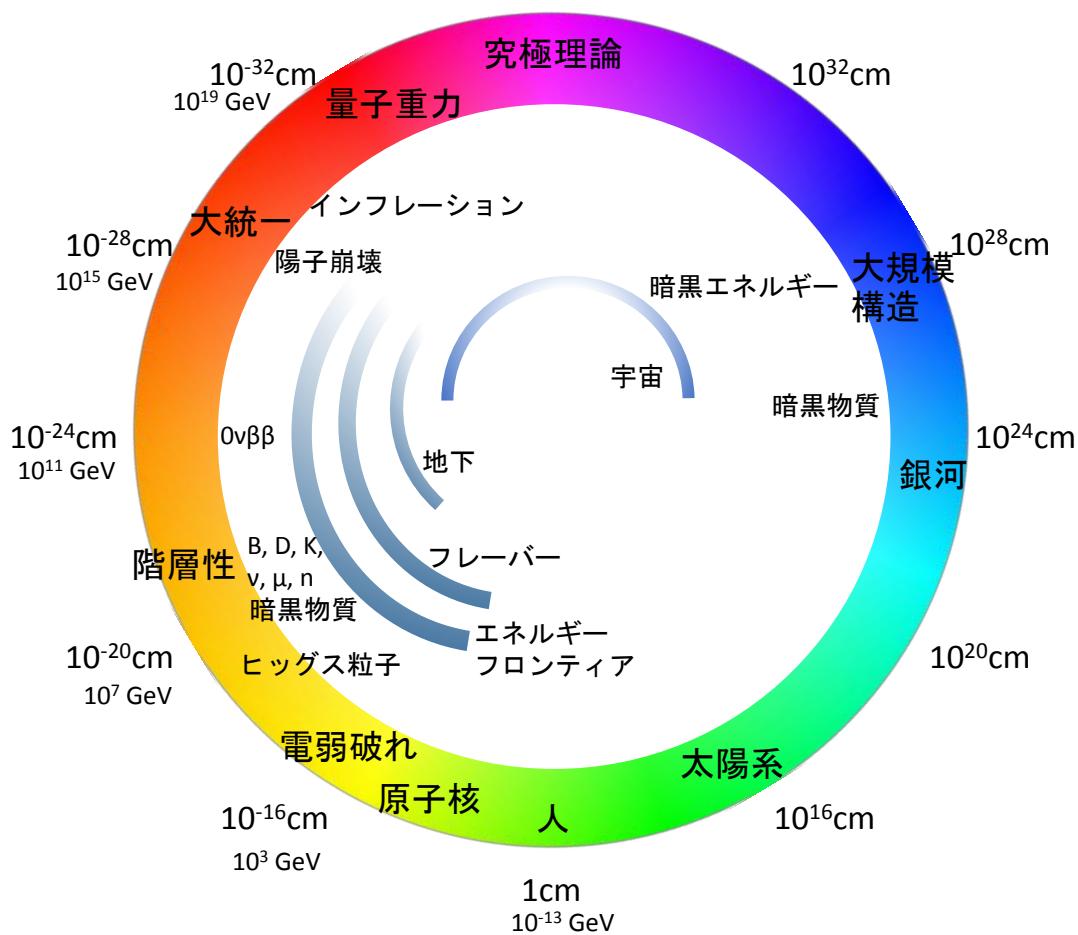


Figure 1: この宇宙に存在する物質・物理現象のエネルギースケールを表した図（アメリカのノーベル物理学賞受賞者のシェルドン・グラショウが「ウロボロスの蛇」で表現した図にヒントを得ている）。広大な宇宙は過去に遡ると小さくしぼみ、究極的には宇宙誕生の瞬間へとたどり着く。極大と極小の世界はつながっており、宇宙誕生時の物理を理解するためにはミクロな世界を記述する素粒子物理学が必要である。極大スケールから極微のスケールを統一的に記述する「究極理論」の構築は、物理学者の夢であり、我々はエネルギーフロンティア・フレーバー物理・地下実験・宇宙実験により様々なスケールでの物理法則を解明し、「究極理論」の正体に迫ろうとしている。

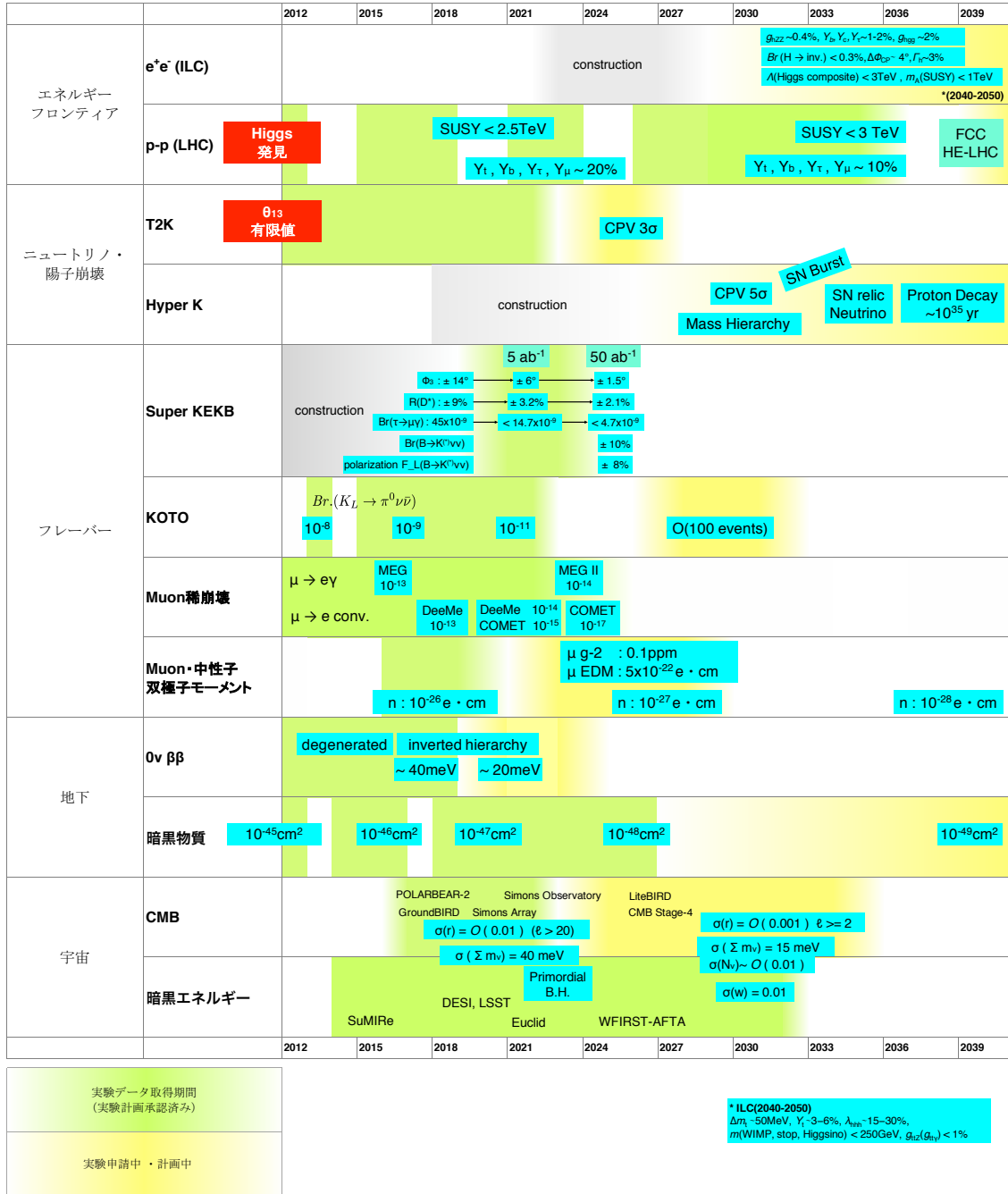


Figure 2: 本答申で記述される将来計画プロジェクト（データ取得中の実験を含む）の到達目標・到達感度、それらが実現するタイミングを表している（2012–2040）。

人類が求める究極の物理像

	素粒子からの宿題								
	Higgsの性質説明 ・ 電弱対称性の破れの 起源	階層性の謎 ・ 電弱対称性の破れの 起源	世代の謎 ・ CPの破れの起源	4つの相互作用の 統一 ・ 相互作用の起源	ニュートリノの 性質説明 ・ ニュートリノ 質量の起源	物質と反物質の 非対称の起源	暗黒物質の正体	インフレーション の正体	宇宙加速膨張 の起源
ILC・LHC	Higgs Coupling ・ additional Higgs	SUSY・新粒子	Higgs CP	Gauge Coupling		Higgs自己結合 ・ extra scalar	直接生成		
ニュートリノ振動 ・ 陽子崩壊			ニュートリノCPV	バリオン数の破れ	ニュートリノ 混合行列	ニュートリノCPV と PMNS行列	間接検出		
B, D, K	崩壊分岐比の異常 (荷電ヒッグス)	崩壊分岐比と 角度分布の異常	CPV ・ 新物理による フレーバーの破れ			新しいCPV	軽い暗黒物質		
μ on, τ au			LFV, μ -EDM, g -2	LFV		μ -EDM	g -2 ・ μ -EDM		
中性子		寿命測定	T-Violation			EDM ・ $n \rightarrow \bar{n}$ 振動			
地下 α O $\nu \beta \beta$		WIMP		マヨラナ性 (see-saw)	マヨラナ性	レプトン数の破れ (レプトジェネシス)	直接検出		
宇宙				インフレーション	トータルマス ・ 世代数		暗黒物質の分布	原始重力波	状態方程式
	Higgsの性質説明 ・ 電弱対称性の破れの 起源	階層性の謎 ・ 電弱対称性の破れの 起源	世代の謎 ・ CPの破れの起源	4つの相互作用の 統一 ・ 相互作用の起源	ニュートリノの 性質説明 ・ ニュートリノ 質量の起源	物質と反物質の 非対称の起源	暗黒物質の正体	インフレーション の正体	宇宙加速膨張 の起源
宇宙からの宿題									

Figure 3: 「人類が求める究極の物理像」へアプローチするプロジェクトの一覧表。横軸にゴールへ至るために追求する物理学上の課題を並べ、縦軸に本答申で記述されるプロジェクトを並べた。各セルには測定する対象・物理量等を記入した。

1 素粒子物理学の現状と展望

1.1 素粒子物理学の現状

素粒子物理学は物質の構成要素の理解と、その間の相互作用の基本原則、法則を明らかにすることを目的として発展してきた。ゲージ対称性 $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ に基づく素粒子標準模型は、少なくとも電弱エネルギースケール（約 100 GeV）以下の物理現象を正しく記述することが多くの実験結果によって検証されている。更に LHC 実験でヒッグス粒子を発見した結果、電弱ゲージ対称性の自発的破れはヒッグス場の凝縮によって引き起こされたことが明らかになった。

この様に素粒子標準模型は一定の成功を収めている一方で、プランクスケールに至るまでのすべての物理現象を正しく記述しているとは考えられていない。例えばヒッグス粒子質量の輻射補正において不自然に大きな差し引きが必要になってしまう問題があるが、電弱エネルギースケールよりも僅かに高いところに標準模型を超えた新たな素粒子が存在すれば、この問題は自然な形で解決できる。このため、新しい粒子を内包した理論として超対称模型・余剰次元模型といった様々な模型が提案されており、こうした新粒子を直接発見することが高エネルギー加速器実験における最重要課題のひとつである。このため、LHC 加速器の輝度を上昇させ続けて探索範囲を更に押し広げること、ILC のクリーンな実験環境で探索感度を限界まで向上させることで、新粒子発見という目標を達成しようとしている。

ヒッグス粒子が発見された今、もうひとつの重要課題はヒッグス粒子とゲージボソン・フェルミオンとの結合定数を精密に測定し、ヒッグス場の性質を明らかにすることにある。LHC の輝度をあげて測定精度を現在も逐次向上させつつ、High-Luminosity LHC、更には ILC の運転開始と共に測定精度を一気にあげ、標準模型におけるヒッグス場の性質との差異を発見する、そして、その背後にある物理像に対するヒントを得ていこうとしている。

一方、クォークやレプトンのフレーバーおよび CP 対称性の破れの研究は、宇宙に存在する物質の起源、クォーク間のフレーバー混合の起源を解明することを目指して発展してきた。特に KEKB と J-PARC という世界最高性能の加速器を有する日本は、このフレーバー物理を世界的にリードしてきており、今後もその役割を果たすことが期待されている。TeV スケールに新物理があれば、それが稀崩壊過程の分岐比に素粒子標準模型からの差異をもたらす可能性があり、また、新しい CP 対称性の破れの存在も期待される。このため、 B, D, K, τ, μ 等、多くの粒子の多様な崩壊モードを精密測定して差異を探索している。昨今、標準模型の予言値からの差異を示唆するいくつかの実験結果が報告されており、今後それらの異常の真偽を確定すると同時に、広く他の過程でも検証をおこない、その機構の解明、背景となる物理像のヒントを得ようとしている。その実現のため、加速器・測定器とも測定精度を究極まで高めるための努力が行われている。

ニュートリノ振動の発見により、非常に小さなニュートリノの質量の存在が明らかとなった。これは、素粒子標準模型の枠内では説明が不可能であり、何らかの新しい物理が存在することを意味している。さらにクォークとレプトンのフレーバー混合のパターンは大きく異なっている。これらは、ニュートリノの質量の起源がクォークとは全く異なっており、もしニュートリノがシーソー機構から予言されるようなマヨラナ粒子であれば大きなエネルギースケールの物理が存在することを示唆している。近年の T2K 実験および原子炉ニュートリノ実験の測定によりニュートリノ混合角 θ_{13} が測定され、3つの混合角が全て有限であることが明らかになった。一方で、CP 対称性の破れ、質量がディラック型かマヨラナ型かの決定、質量の絶対値の測定、質量階層が標準階層構造か逆階層構造かといった問題がニュートリノの物理には残されている。大統一理論の検証となる陽子崩壊探索はスーパーカミオカンデが世界最高感度で測定を続けており、例えば $p \rightarrow e^+ + \pi^0$ 崩壊モードに対して約 10^{34} 年という寿命の下限値を得ているが、現在までのところ陽子崩壊の信号は得られていない。

素粒子物理学は宇宙物理学との密接さを増してきている。近年の宇宙観測の向上により、宇宙物理学は精密科学の一分野と言えるレベルに達し、Planck をはじめとする様々な実験や観測の結果から、我々は様々な宇宙パラメータを高い精度で理解するに至った。特に現在の宇宙の質量密度については、暗黒エネルギーが 69%、暗黒物質が 26% であり、バリオンの占める割合は、高々 5% であることが明らかとなった。さらに宇宙密度揺らぎは（ほとんど）スケール不変であり、インフレーションシナリオがきわめて強く示唆されるという結果も得られている。これらの情報は標準宇宙模型を構築する上で重要な役割を果たす一方で、素粒子物理学の分野に新たな課題を与えることともなった。特に、バリオン-反バリオン非対称生成の機構、暗黒物質の正体、インフレーションの機構、暗黒エネルギーの性質などについて素粒子標準模型の枠内で理解することは不可能であり、宇宙の進化において何らかの標準模型を超える物理が重要な役割を果たしたことは明らかである。これら宇宙論的諸問題の解決のためには、LHC をはじめとする現在・将来の高エネルギー実験によって得られるであろう素粒子標準模型を超える物理に関する知見が必須となっている。

1.2 素粒子物理学の展望

2012 年に LHC 実験でヒッグス粒子を発見し、その質量、スピン、パリティを明らかにしたことで、電弱エネルギースケールにおける優れた有効理論としての素粒子標準模型が完成したのと同時に、それを超えた物理現象・新粒子を発見してより高いエネルギースケールの物理を解明するための道筋が明らかになった。エネルギーフロンティア実験によるアプローチとしては、新粒子を直接的に発見すること、そして存在するとわかったヒッグス粒子の生成・崩壊を徹底的に測定して真空構造の詳細を解明することが特に有効である。

新粒子を直接的に発見することは、エネルギーフロンティア加速器を使って追求

すべき最も重要なアプローチである。LHC 加速器のルミノシティを向上させることで、大きな運動量を担ったパートンの衝突頻度が上昇し超対称粒子などの新粒子を発見できるリーチを拡大していく。カラーを持った新粒子の探索については LHC 実験が高い感度を持つが、カラーを持たない新粒子の発見感度についてはクリーンな環境で衝突事象を観測できる ILC プロジェクトが優れており、両者を用いて可能な限り広いパラメータスペースを余すところなく探索し尽くす必要がある。

そして新粒子が発見された際はその粒子が持つ相互作用や量子数を決定し、背後にある物理法則を明らかにするとともに、その枠組から存在が予言される未発見の粒子を探索して、その全容を明らかにする必要がある。もちろん、ILC 加速器、High-Luminosity LHC を使って可能な限りの物理成果を引き出すと共に、それを極限まで追求するためには次世代の加速器が必要であるならば、どのエネルギー領域まで到達可能な、どのタイプのマシンが必要であるかを見極め、それを実現するための技術的な準備を推進していく。

もうひとつの重要なアプローチは、質量 125 GeV のヒッグス粒子が持つ多様な崩壊過程と、ヒッグス粒子の生成過程を観測することで、 W ボソン、 Z ボソン、 t クォーク、 b クォーク、 c クォーク、 τ レプトン、ミューオンとヒッグス粒子の結合定数を測定することである。これにより、素粒子の質量と結合定数の間に普遍的な関係があるのか、あるいは、ボソン・フェルミオン、アップ・ダウNTタイプフェルミオン、第 2 世代・第 3 世代フェルミオンの間に異なる関係があるのか、明らかにすることができる。ヒッグス真空の性質が後者の様な性質を示したならば、その詳細から標準模型を超えた物理を解明する道を拓いていく。

現行の LHC は世界で唯一ヒッグス粒子を直接生成できる加速器であり、High-Luminosity LHC プロジェクトに至るまで輝度を向上させ続け、結合定数の測定精度を向上させていく。一方、ILC 計画は、電子・陽電子を衝突させて生成したヒッグス粒子の崩壊を圧倒的にクリーンな環境で測定し結合定数の精度を極限まで高める。ヒッグス粒子の質量が明らかになった今、最速で ILC 加速器を実現し、この精密測定からテラスケールの物理法則・素粒子標準模型を超える物理モデルを構築することが強く求められている。

上記に述べたエネルギーフロンティア実験では、高いエネルギースケールでの新しい物理現象を新粒子の生成により直接探索する。これに対する相補的なアプローチとして、新粒子の質量が加速器で到達できるエネルギーを超える場合でも、加速器のビーム衝突輝度を上げて標準模型で説明できない稀な現象を探索することにより、間接的に高いエネルギーでの新物理による量子効果の検証が可能である。Belle II 実験・LHCb 実験では、 B 中間子、 D 中間子、 τ レプトンなどの崩壊過程や CKM 行列の精密測定により、10 TeV 程度までの広いエネルギー領域で新物理の検証ができる。さらに KOTO 実験・NA62 実験で測定する K 中間子の稀崩壊過程の測定からも同様の検証が可能であり、これらの結果を総合して新物理へアプローチしていく。

さらに高エネルギーでの新物理を探るプローブとして、対称性の破れの探索は有

効な実験的手法である。フレーバー対称性は自然の持つ厳密な対称性ではないが、標準模型ではレプトンフレーバー量子数は保存量とされている。荷電レプトンフレーバー非保存過程の分岐比は軽いニュートリノ質量を考慮しても非常に小さい。荷電レプトンフレーバー非保存過程のひとつである $\mu \rightarrow e\gamma$ については、MEG 実験により最も強い制限が与えられている。将来計画では、 $\mu \rightarrow e\gamma$ 過程 (MEG-II 実験)、 $\mu \rightarrow e$ 転換過程 (COMET 実験、Mu2e 実験)、 τ レプトンの稀崩壊過程 (Belle II、LHCb) など感度を上げた探索が進むことにより、高いエネルギースケールの新物理に起因してフレーバー対称性を破る物理過程の発見が期待される。CP 対称性も同様に厳密な理論的背景を持たないが、実験事実として小林益川理論による CP 対称性の破れは非常に小さく、宇宙における物質・反物質の非対称性を説明できない。また、標準模型は非常に小さな中性子の電気双極子能率を预言する。一方、高いエネルギースケールの新物理においても CP 対称性の破れが小さいと考える理由はなく、Belle II 実験による B 中間子崩壊の精密測定、KOTO 実験による K 中間子の稀崩壊過程探索、TRIUMF、PSI、J-PARC での中性子の電気双極子能率の精密測定などから、CP 対称性を破る新しい物理の兆候を発見できる可能性がある。大統一理論が预言する、さらに高いエネルギースケール (10^{15} GeV 以上) でのバリオン数非保存過程については、超大型ニュートリノ検出器での陽子崩壊探索実験から重要な情報が得られるであろう。超対称性を仮定した統一理論の预言する $p \rightarrow \nu + K^+$ 崩壊については、ハイパーカミオカンデおよび DUNE により、スーパーカミオカンデを大きく上回る感度での探索が可能である。さらにハイパーカミオカンデでは、一般的な大統一理論の预言する $p \rightarrow e^+ + \pi^0$ 崩壊に対して、現在の上限より一桁大きい寿命までの探索が可能であり、大統一理論の多くのモデルを検証できる。

ニュートリノ振動は素粒子標準模型を超える物理の存在を強く示唆する現象であり、ニュートリノの性質に関してはさらに詳しい研究が必要である。近年の T2K 実験および原子炉ニュートリノ実験での研究により 3 世代ニュートリノ混合が確立し、さらに T2K 実験からはニュートリノセクターにおける CP 対称性の破れの兆候が示された。今後は J-PARC ニュートリノビームのさらなる大強度化と T2K 実験の期間延長 (T2K-II) により、CP 対称性の破れをはじめとするニュートリノ振動の研究を継続し、ハイパーカミオカンデに繋げていくことが重要である。ハイパーカミオカンデと J-PARC ニュートリノビームによる将来計画、および競争関係にあるアメリカでの DUNE 実験計画では、CP 位相の精密測定と質量階層性の決定が期待される。これらの知見により、レプトンセクターでの世代間混合の全容が解明されることになる。ハイパーカミオカンデは DUNE と比較して CP 位相の測定感度に勝る上、超新星爆発からのニュートリノ観測など幅広い研究が可能であり、早期実現が期待される。J-PARC ニュートリノビームについては現行実験で実績を上げつつ、ハイパーカミオカンデに向けたさらなる大強度化を着実に進めていくことが重要である。今後得られるレプトンセクターの質量行列に関する情報をクォークセクターの情報と合わせ、フレーバー構造や CP 対称性の破れの起源についての統一的な理解を得るこ

とは、今後の素粒子物理学の重要な課題の一つである。一方、カムランド禅実験等におけるニュートリノを伴わない二重 β 崩壊 ($0\nu\beta\beta$) の探索は、ニュートリノ質量がマヨラナ型かディラック型かという問いに答える上で重要となる。ニュートリノ質量がマヨラナ型であることが分かれば、それはシーソー機構によってニュートリノ質量が生成されると共に、宇宙のバリオン-反バリオン非対称性生成の機構がレプトジェネシスシナリオであるということのサポートになると考えられる。

暗黒物質の性質に関しても、さらに進んだ知見が得られるであろう。暗黒物質としては、極めて弱い相互作用しか持たない素粒子である可能性や、スカラー場凝縮の振動である可能性など、様々な議論がある。多くの可能性の中の一つとして、宇宙初期に熱浴中にあった粒子のうちで対消滅しきれずに残ったものが現在の暗黒物質となるというシナリオがある。この場合、現在観測されている暗黒物質量を正しく説明するには、暗黒物質粒子の対消滅断面積が約 1pb 程度である必要があるが、これは 100GeV から 1TeV 程度の質量の粒子を交換して得られる程度の断面積である。このため、標準模型の階層性問題を解決する素粒子模型が暗黒物質粒子を内包するという極めて魅力的な可能性がある。実際、超対称模型暗黒物質粒子と核子との散乱断面積は将来の暗黒物質直接検出実験で検出可能な大きさとなり得る。将来計画では、XMASS 実験、LZ 実験、XENONnT 実験、PANDA-X 実験などの大規模検出器を用いた直接検出実験により、粒子としての暗黒物質の存在の確認が期待されている。

また、LHC 実験においては、横方向運動量の欠損という形で暗黒物質粒子の発見が期待されている。暗黒物質粒子の候補が LHC 実験で発見された場合は、さらにその粒子の性質を詳しく調べ、それが本当に暗黒物質として適当な性質を持っているかを明らかにする必要がある。弱い相互作用をすると期待される暗黒物質は、もしも生成断面積が十分にあれば ILC 実験で更に詳細にその性質を調べることができる。そこからの情報は、暗黒物質生成・探索に重要な対生成断面積や核子との散乱断面積を決定する上で重要な役割を果たすと共に、暗黒物質の宇宙の熱的な歴史を解明する上での重要な情報を与える。

インフレーションから始まる宇宙の進化の理解に関しても、主に宇宙マイクロ波背景放射観測により様々な発展が期待されている。特に CMB 偏光の B モードはインフレーションで時空が振動した際の原始重力波から生じると予測されており、観測されればインフレーションシナリオの極めて重要なサポートとなるだけでなく、インフレーションのエネルギースケールについての情報が与えられる。原始重力波の強度を表すテンソル・スカラー比が 0.03 以上であれば、地上に設置された Simons Array により偏光の B モード揺らぎが発見されると期待されている。将来計画としては、全天を大気の影響なしで観測し、テンソル・スカラー比を 0.001 程度まで探索し、主なインフレーション模型をより詳細に検証する科学衛星が国内外で幾つか検討されている。国内では LiteBIRD 計画が、目的を絞って早期実現を目指す。また、すばる望遠鏡で現在既に稼働している SuMIRe プロジェクトや、将来の地上・衛星を用いた

広天域宇宙サーベイにより、宇宙の加速膨張の担い手である暗黒エネルギーについての知見がより深まると期待される。

2 エネルギーフロンティア

概要

エネルギーフロンティアにおける研究の目的は、高エネルギー加速器を使って新粒子・新現象を発見し、さらにその性質と背後にある物理法則を決定することにある。これまでもクォーク・レプトンとゲージ粒子の発見、その量子数と結合力の決定、相互作用の対称性や世代数の決定など、数々の大きな成果をあげてきた。LEP/SLC/Tevatronでの精密測定によって標準模型の基盤となるゲージセクターの物理を深く理解した。LHCで質量 125 GeV のヒッグスボソンを発見（2012）して以来、そのスピン・パリティ (0^+) を決定し、ヒッグスボソンとゲージボソン・フェルミオンとの結合定数の測定精度を向上させ続けており、素粒子の質量獲得機構・真空構造の理解を進めている。今後のエネルギーフロンティア実験の目指すところは、最高エネルギーでの粒子衝突によって生成される新粒子・新現象を直接観測することと、ヒッグスボソンと素粒子の結合定数をより精密に測定して標準模型との差異を捉えて新物理を探索することにある。

LHC に代表されるハドロンコライダーでは、ビームを周回軌道にのせるための磁場を強くしてビームエネルギーを高くする、ないしは、高いエネルギーを担うパートンの反応頻度を増やすためにルミノシティを高くすることで、より高いエネルギーの物理現象を観測する。レプトンコライダーでは、電子・陽電子からの放射光放出のないリニアコライダーでビームエネルギーを高くする、あるいは、重いレプトンであるため放射光放出の少ないミュオンを周回させたコライダーで衝突エネルギーを向上させる。

ハドロンコライダーにおいてビームを構成する陽子や反陽子は複合粒子であるため、衝突するパートンが担うエネルギーに応じた多様な物理現象（標準模型、トップクォーク、ヒッグス粒子の生成・崩壊、新粒子探索）を俯瞰的に研究できる特徴を持つが、同一バンチ内での衝突（パイルアップ）や信号生成に寄与しないパートンを起源とするバックグラウンドが多く発生する。一方、レプトンコライダーではすべてのビームエネルギーが反応に用いられるためクリーンな終状態が得られる。このため、終状態の精密測定をおこないやすく、発見した新粒子の性質をより詳細に研究できる。また、ビームのエネルギーと偏極を変えて中間状態・終状態の相互作用を分離し、反応の対称性や新粒子の量子数を決定することも可能である。

2.1 国際リニアコライダー

ヒッグス粒子の研究をさらに進展させるために必須の装置と考えられているのが、国際リニアコライダー (International Linear Collider; ILC) である。ILC は、直線型の加速器を地下トンネルに配置して電子と陽電子を逆方向から加速して正面衝突さ

せる。円形加速器とは異なり、研究対象となる物理に対応するエネルギーに合わせた長さの加速器でスタートし、結果を見ながら順次延伸してエネルギーを上げていくことができる。全長約 20 km の加速器で重心系エネルギー約 250 GeV で実験が可能であり、30 km まで延伸すれば約 500 GeV に到達する。将来は、延伸するだけでなく、新たに開発されているであろう高性能化された加速器技術を投入することで 1 TeV、もしくはさらに高いエネルギーへ到達する可能性も視野に入れている。

ヒッグス粒子が LHC で発見されたことにより、ILC が最初に取り組むべき課題は極めて明確になった。すなわち、重心系エネルギー 250 GeV 付近で実験を行いヒッグス粒子の性質の詳細な研究を実施する。ヒッグス粒子と他の素粒子の結合の強さを測ることによって、素粒子物理学が現在の標準理論を超えて向かうべき方向を示す。

重心系エネルギー 250 GeV 付近では $e^+e^- \rightarrow Zh$ 反応によるヒッグス粒子生成断面積が最大となり、積分ルミノシティ 2 ab^{-1} でおよそ 5×10^5 個のヒッグス粒子を S/N 比のよい環境で生成観測できる。 $e^+e^- \rightarrow Zh$ 反応における Z 粒子の反跳を解析する、いわゆる反跳質量測定により、モデル非依存なヒッグス結合定数を測定できる。ゲージ結合は 1% 以内の精度で、ボトムクォークやチャームクォーク、タウレプトンとの湯川結合は 1-2% の精度で決定可能である。LHC の結果と組み合わせることで $h\gamma\gamma$ 結合についても 1-2% で決定できる。ヒッグス粒子が暗黒物質粒子など測定器で検出できない粒子に崩壊する場合についても 0.3% 以下の分岐比感度で探索できる。また、ヒッグス粒子の質量を 15 MeV の精度、全崩壊幅を 3% の精度、CP 位相を 4° の精度で測定することができる。ヒッグス結合定数の精密測定結果に標準理論からのずれが発見された場合には、標準理論を超える新物理の発見となる。さらにそのずれのパターンから標準理論を越える物理モデルの特定も可能である。たとえば、ヒッグス粒子が複合粒子であるとするモデルではそのエネルギースケールについておよそ 3 TeV まで、SUSY モデルでは重いヒッグス粒子の質量についておよそ 1 TeV まで検証することが可能である。

ILC では、LHC で直接的な発見が難しい新粒子であっても直接生成して発見できる可能性がある。質量ピークを作らない超対称粒子などカラーを持たない軽い暗黒物質の探索について、LHC では新粒子を直接生成してもバックグラウンドに埋もれて発見しづらい場合がある。一方、ILC では衝突エネルギーが生成エネルギーの閾値を超えていれば、その発見は確実である。カラーを持たない新粒子もその崩壊生成物や初期状態放射から発見することが可能であり、その詳細測定から暗黒物質粒子などの性質を決定できる。もちろん現在予想されていない新粒子や新現象を発見する可能性もある。さらに、高精度な測定結果と精密な理論計算との比較により、10 TeV を超える Z' など衝突エネルギーより遥かに高いエネルギースケールの物理を間接測定で探ることも可能である。ハドロンコライダー実験での測定結果と合わせることで、極初期宇宙において重要な大統一理論などの物理法則を実験的に検証する可能性も検討されている。

衝突エネルギーの拡張性は円形加速器にはない ILC の大きな優位性である。重心

系エネルギー 250 GeV におけるヒッグス粒子の詳細研究の後、順次エネルギーを上げ、350 GeV 付近でのトップ対生成、500 GeV 付近での $e^+e^- \rightarrow Zh\bar{h}$ 、 $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}h$ 等、到達エネルギーの向上と共に観測が可能になる様々な過程を利用してより多くの重要な物理を研究することが可能となる。主に二重ヒッグス放射過程 $e^+e^- \rightarrow Zh\bar{h}$ を用いて研究するヒッグス自己結合 (3 点結合 λ_{hhh}) は電弱対称性の破れの起源と直接関係していると考えられ、その測定は ILC の最も重要な目的の 1 つである。重心系エネルギー 500 GeV 程度、 4 ab^{-1} の積分ルミノシティで 15–30% 程度の精度で λ_{hhh} を測定することができる。また $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}h$ 反応によりトップ湯川結合の測定が可能となり、500(550) GeV の重心系エネルギーで 6(3)% の精度でトップ湯川結合を決定することができる。

計画全体・組織・予算とスケジュール

ILC は、素粒子・宇宙の研究に大きな飛躍的發展をもたらすだけでなく、超伝導技術をはじめとする多くの先端技術の開発と実用化を促進し、さらに学術・教育・技術の集積する新たな国際研究拠点の構築につながるものである。

2000 年から 2002 年にかけて、アジア・欧州・米国の 3 極を中心とする全世界の素粒子物理研究者コミュニティは、次期大型基幹計画として協力して電子・陽電子リニアコライダーの実現を目指す、というコンセンサスを確立した。これを受けて、ILC での物理研究、加速器および測定器の設計開発は、全世界的な国際協力により行ってきた。特に 2005 年からは、世界の大型加速器を持つ素粒子物理研究拠点 (KEK、DESY、Fermilab) を中心とした国際加速器設計チーム (GDE) を結成し、具体的な技術設計を目指してグローバルな形での開発研究を進めてきた。2013 年 6 月、その成果を技術設計書 (TDR) として公開した。これらの開発研究には千人以上の研究者と技術者、300 を越える研究機関 (国内約 40 機関) と多くの企業が参加している。日本は、アジアの開発拠点として KEK を中核に主導的な役割を担っている。ここで開発された超伝導加速技術を用いた放射光施設 (X 線自由電子レーザー施設) がドイツと米国で建設中であり、ドイツでは 2017 年 7 月に運転を開始した。一方測定器についても、大型国際協力によって 2 つの実験提案に沿った開発研究を進めている。

TDR を公開した GDE はその使命を終え、次世代直線型衝突加速器計画を推進する新組織「リニアコライダー・コラボレーション (LCC)」及び、LCC を監督する新しい組織「リニアコライダー国際推進委員会 (LCB: Linear Collider Board)」が 2013 年に発足した。同年には、日本の研究者による ILC 立地評価会議によって、ILC の国内候補地として北上サイトを最適とする評価結果が発表された。LCC はこの評価結果を受け、北上サイトに特化した詳細設計を開始した。ILC を日本に建設することについては、ヨーロッパ、アジア、米国での戦略においても支持が表明されている。

スケジュールとしては、予備準備期間、本準備期間、本建設期間の 3 段階を経て、2020 年代後半から 2030 年代初頭に稼働することを目指している。予備準備期間に相当する現在は、文科省有識者会議の提言で示された課題への取り組み、加速器及び

測定器の詳細設計、候補地の地形に合わせた施設の詳細設計、ビーム加速試験、建設計画の策定、更なる性能向上とコスト削減を目指した技術開発等を進めている。ILC が承認されるのに必須となるこれらの事項を 2017 年あるいは 2018 年までに完了する。その後、ILC 計画が正式承認された時点で本建設期間に入り、9 年程の建設期間を経て、2020 年代後半から 2030 年代初頭から ILC の運転・データ解析という年次計画である。

2013 年に公開した TDR では、重心系エネルギー約 500 GeV に合わせた設計を示した。TDR における建設総額見積もりは、500 GeV の ILC に対して 77.8 億 US ドル、運転経費は年間 3.9 億 US ドルとされた。その後の技術開発の進展、設計の更なる改良などにより、コスト低減の努力を続けている。

LHC で 125 GeV のヒッグス粒子が発見されたことによって、ヒッグス粒子の詳細研究が今取り組むべき最重要課題となった。これを受けて、重心系エネルギー 250 GeV に合わせた全長で建設を開始することとし、到達エネルギーを徐々に高くする段階的实施シナリオを検討している。これは、初期コストを大幅に削減することも意味しており、早期に ILC を実現するためにも有効であると考えられる。

なお、重心系エネルギー 250 GeV からの ILC の段階的な実施シナリオについては、2012 年 10 月に高エネルギー研究者会議が提案している。また、同じく高エネルギー研究者会議は LHC Run-2 前半の結果を踏まえ、ILC を 250 GeV のヒッグスファクトリーとして早期に建設することを 2017 年 7 月に改めて提案した。

他のヒッグスファクトリー計画

Higgs 粒子の発見により重心エネルギー 250 GeV が重要なターゲットとなった。このため、ILC よりも更に高いマルチ TeV での電子・陽電子衝突を目指して CERN を中心とした国際協力プロジェクトとして開発が進められている Compact Linear Collider (CLIC) を全長を短くして早期に建設することが検討されている。この場合には、CLIC の特徴である「2 ビーム加速方式」ではなく、常伝導の X バンド加速器を用いた従来方式の採用も検討されている。

また、現在 CERN で検討されている周長 100 km の FCC トンネルを利用した電子・陽電子衝突型加速器 FCC-ee の実現可能性が議論されている。その重心系エネルギーは 250 GeV から 350 GeV が想定されている。中国でも同様に、周長 54 km の円形衝突型加速器 (CEPC-SppC) が検討されている。電子・陽電子衝突では重心系エネルギー 240 GeV、陽子衝突では 100 TeV が想定されている。

円形加速器においてはビームエネルギーが上がるほど、放射光によるエネルギーロスが大きくなるため、円形電子・陽電子衝突型加速器では重心系エネルギーの大幅な向上は不可能である。ILC は 250 GeV の “ヒッグスファクトリー” として実験を開始した場合であっても、その後の延伸によって到達エネルギーを順次高くしながらヒッグス粒子の自己結合の研究や未知粒子・未知現象の探索が続けられる点で、円形加速器を用いた他のヒッグスファクトリー計画にはない特徴と利点を持つ。しかしながら、“ヒッグスファクトリー” として最大限の意義を有するためにも、円

形電子・陽電子衝突型加速器計画の進捗状況に注意を払い、ILC 計画を遅滞なく実現することが重要である。

ILC 測定器技術開発

ILC での測定器技術の開発は、ILD と SiD という二つの概念設計チームが国際的に協力して進めている。LEP で発案・実装されたハドロンジェットの再構成法 (Particle Flow Algorithm) の精度をさらに高めるため、ピクセルバーテックス検出器、大立体角飛跡検出器、各シャワー粒子の飛跡を捕えられるほど細密なカロリメータを開発中である。国内では、衝突点近傍のバーテックス検出器、カロリメータ、大型 TPC 飛跡検出器の開発を行っており、また理論研究グループと連携して物理研究とそれに適した測定器構成の最適化を進めている。日本のグループは主に ILC 概念設計を中心として検討を進めており、アジアでの物理・測定器研究をリードして、欧米との国際協力をまとめている。ILC 測定器で重要なセンサー部分などは、Belle II 実験、ATLAS 実験、T2K 実験前置検出器などでの実用・実装経験が大きく活かされている。

ILC 加速器開発

ILC の加速器開発では、偏極電子、陽電子ビーム、偏平超低エミッタンスビーム、高勾配超伝導加速、ナノメートルビーム収束など、多くの重要基幹技術の開発が行われている。ILC は 1.2m 長の 9 セルからなるニオブ製の超伝導空洞を 2K に冷却し、加速勾配 31.5MV/m で運転する。ILC 全体では 1700 個のクライオモジュール、15,000 本の空洞が必要となる。このような大量の空洞を製造し、妥当な納期とコストで要求性能を引き出すためには、品質管理の向上が欠かせない。2012 年までに 35MV/m の加速勾配を満たす空洞製造の歩留まり 90%以上という目標値を設定し、現在までにほぼ達成した。また、ILC と同じ超伝導加速空洞技術を用いてドイツで建設中の放射光施設 (X 線自由電子レーザー施設) のクライオモジュールでは 23.6MV/m の仕様に対して、800 台の大量生産後に 27.5MV/m を達成している。現在はコスト低減を目的として、空洞およびクライオモジュール製造ラインの検討、製造技術や効率化のためのパイロットプラントの設置など、ILC 実機製作にむけた工業化をすすめている。

KEK は Accelerator Test Facility (ATF) と Super-conducting Test Facility (STF) という ILC のための試験施設を有している。STF の目的は ILC の主線形加速器クライオモジュール (超伝導加速器を内蔵した冷凍容器) の性能実証である。STF では 12 台の 9 セル超伝導加速空洞の大電力 RF 試験を行い、12 台のうち 8 台の空洞において ILC の要求性能である 31.5MV/m を超える性能を達成した。さらに 4 台においては 35MV/m を超える性能を示した。現在は、性能を安定して達成するために必要なクライオモジュール製造工程の検討等を進めている。

一方 ATF の役割は、放射減衰による偏平超低エミッタンスビームの生成と、そのビームを用いたビーム計測技術、最終収束系の研究開発と実証である。ATF はすでに ILC の垂直方向規格化エミッタンスを下回る $0.015 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ という値を実現した。さらに、この超低エミッタンスビームを用いた ILC の最終収束系のプロトタイプ (ATF2) では、目標とする 37nm に迫る 41nm のビーム径を実現した。また、確実なビーム衝突を実現するためにはビーム軌道の精密な制御が欠かせない。ATF2 ではビーム軌道のふらつきをフィードバックシステムによって 410nm から 67nm へ低減することに成功した。現状のビーム軌道制御の精度は、ビーム軌道の測定精度によって制限されている。

偏極電子源は SLAC および名古屋大学により開発研究が進められ、90% という高い偏極度を実現した。1ms という長大パルストレインをつくるためのレーザー開発とビーム生成の実証が課題である。陽電子生成では、超伝導ヘリカルアンジュレーター開発、生成標的のプロトタイプ試験等を行っている。また、代替方式として電子ビームを用いる陽電子生成が提案されている。

2.2 LHC アップグレード

背景

ヒッグス粒子の発見、ならびに、TeV スケールにおける標準模型を超えた新しい物理の解明を目指して、2つの大型測定器 ATLAS と CMS が LHC 加速器の衝突点に建設された。LHC 加速器は $\sqrt{s}=7\text{TeV}$ の陽子衝突に成功した 2010 年以降、順調に運転を続け、2012 年には 125GeV のヒッグス粒子を発見し、その後スピン・パリティ (0^+) も決定した。現在、LHC 加速器はビームエネルギーとルミノシティを継続的に上昇させ、実験グループは新粒子探索のリーチを拡大し、ヒッグス粒子とゲージボソン・フェルミオンとの結合定数の測定精度を向上させ、エネルギーフロンティアの物理を牽引し続けている。

加速器の建設に関して日本からは、KEK がビームの最終収束用超伝導磁石のデザインと建設をおこなった (Fermilab との共同プログラム)。2016 年、LHC の瞬間ルミノシティは当初のデザイン値 ($1.0\times 10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) よりも 4 割以上高い値まで到達した。最終収束磁石が予定通りの性能を発揮し安定に稼働することは積分ルミノシティを向上させるための必要条件であるが、これを十分に満たす貢献を果たした。また、ATLAS 測定器の建設に関して日本からは、17 の大学・研究機関が実験グループに加わり、荷電粒子スペクトロメータ用ソレノイド磁石、シリコンストリップ検出器、ミューオントリガーシステムのデザイン、建設、コミッショニングを主導した。そして実験開始後もシステムの運転、性能評価・改善にいたるまで一貫して取り組み、成果をあげている。現代の大型実験で物理成果を出すために、グリッド・コンピューティングシステムは一種の「実験装置」として極めて重要な意味を持つようになったが、日本グループはこのフレームワークに大規模計算機群を組み込ん

で ATLAS 実験データの処理に大きく貢献している。

以上の貢献に加えて物理解析においても日本グループは多くの成果をあげている。現在までの最大の成果としてひとつだけ具体例をあげるならば、2 光子崩壊の解析を主導してヒッグスボソンを発見したことがあげられる。現在も、様々な生成崩壊過程を用いたヒッグスボソンの解析、超対称性粒子に代表される新物理の探索、標準模型の精密検証など、LHC がカバーすべき全ての物理課題において日本グループの若手研究者、博士課程学生たちが中心となって解析を主導している。

LHC アップグレード物理課題

ヒッグスボソンを発見したことで、我々は素粒子の標準模型を超える現象、新粒子を発見するためのスタートラインに立った。ここで有効なアプローチは2つある。ひとつは新粒子を直接的に発見すること、もうひとつはヒッグスボソンを徹底的に調べるあげることである。

ヒッグスボソンの精密測定では、積分ルミノシティが 3000 fb^{-1} まで増えれば、 W ボゾン、 Z ボゾン、トップクォーク、ボトムクォーク、 τ 、 μ の結合定数を数%から10%の精度で測定することができる。これらの測定により、標準模型のように質量と結合定数の比に普遍的な関係があるのか、あるいは、ボソンとフェルミオン、up タイプのフェルミオンと down タイプのフェルミオン、第2世代フェルミオンと第3世代フェルミオンなどの間で質量と結合定数の比の関係が異なるのか、検証することができるようになる。

新粒子の直接的発見は、エネルギーフロンティア実験を牽引する LHC に課された課題であり、ルミノシティ増強により探索領域をより高いエネルギースケールにまで拡げることは、推進すべき最重要課題の一つである。LHC では、カラーを持った超対称性粒子、Naturalness を仮定すれば軽いと期待できる第3世代のスクォーク、Electro-Weak 超対称性粒子、余剰次元、 Z' 粒子などの探索が主要なターゲットになる。こうした新粒子の発見は、共鳴状態や、なだらかな標準模型による背景事象の分布に対してブロードなイベントの超過をみつけることにより実現される。超対称性粒子(例えばグルイーノ)探索のリーチを例にとれば、現在までのデータ (13 TeV , 10 fb^{-1}) で 2 TeV 以下には存在しないという結果を得ているが、積分ルミノシティを大幅に増やすことで探索範囲を大きく押し広げていく。具体的には、衝突エネルギー 14 TeV で 300 fb^{-1} の積分ルミノシティを蓄積して 2.5 TeV まで、さらに 3000 fb^{-1} まで蓄積して 3.0 TeV まで探索範囲が拡がる。

High-Luminosity LHC 加速器開発

これらの目的実現のため、今後20年に渡り LHC 加速器を次のように運用していく。2015年から続いている Run-2 を2018年まで継続して $\sqrt{s} = 13\text{--}14 \text{ TeV}$ で 100 fb^{-1} 以上のデータを取得する。次の2年間のシャットダウン期間に、(1) 初段のリニアックを刷新 (LINAC4 の導入) (2) PS ブースターの増強 (エネルギーを 500 MeV から 2 GeV にあげてエミッタンスを小さくする) (3) SPS におけるボトルネックの解消

(RF 増強、electron cloud 対策、等) をおこないバンチカレントを現在の 2 倍程度に増加する。Run-3 では瞬間ルミノシティーを $2.0 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以上にあげて、3 年間 (2021–2023) で 300fb^{-1} のデータを取得する。次の 2 年間のシャットダウン期間に、衝突点近傍の最終収束四極磁石とビーム分離双極磁石の交換、主要なコリメーターのアップグレード、クラブ空洞の導入など加速器システムに大きな変更を加えて High-Luminosity LHC プロジェクト (HL-LHC) を 2026 年からスタートさせる (Run-4)。瞬間ルミノシティーを $5.0 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ で固定するルミノシティーレベリングを導入し、ビーム寿命を延ばすことで積分ルミノシティーを最大化して 10 年間で $3,000 \text{fb}^{-1}$ を蓄積する。この HL-LHC プロジェクトは 2016 年 6 月の CERN 理事会で正式に承認されている。

HL-LHC のルミノシティー増強を成功させる鍵は、ビーム衝突点付近に設置する電磁石 (最終収束四極磁石・ビーム分離双極磁石) とクラブ空洞が想定どおりのパフォーマンスを発揮することにある。最終収束電磁石については、磁石の口径を大きくしてビームを defocus させた後、衝突点でビームをより強く収束 ($\beta^* = 0.55 \text{m}$ (現在値) から 0.15m に変更) させて瞬間輝度をあげるため、磁場強度を現行の 8.6 テスラから 11.4 テスラへあげる必要がある。このため、加速器への応用としては初の例となる Nb_3Sn 超伝導線材を使用する。CERN とアメリカの共同研究で最終収束四極磁石のプロトタイプ (長さが量産型の 1/4 のもの) を開発し、励磁性能の受け入れ基準となる 18kA を超える通電に成功した。(定格電流 16.47kA の 108% に相当する 18kA が基準値として設定されている。) また、 NbTi を超伝導線材として使ったビーム分離用双極磁石は KEK がプロトタイプ (長さが量産型の 1/3 のもの) を開発し、定格磁場 5.6 テスラに到達した。クラブ空洞は、衝突点でのビーム交差角が大きくなり geometrical loss factor が悪化するのを回復するために必須の装置である。陽子衝突型加速器への応用は初の試みであり、KEKB で世界唯一の成功実績をもつ日本の加速器技術に高い期待が寄せられている。

HL-LHC 検出器開発

一方、ATLAS 測定器に関しては、内部飛跡検出器の総入れ替え、大幅なトリガー・DAQ システムの刷新が大きな 2 つの変更点である。内部飛跡検出器は、より高い放射線耐性を持つこと、ならびにセンサーのヒット占有率を下げて高いトラッキング性能を保つことを目指して、最内層 5 層にシリコンピクセル検出器、続く 4 層にシリコンストリップ検出器を新たに配置し、レート耐性を向上させる。日本グループは現行アトラスのシリコンストリップ検出器を製作した実績をもち、加えて国内にセンサーの有力なベンダーがあることで、大きな貢献が期待されている。特にピクセル検出器に焦点を絞って現在、センサーの開発を進めており、実機製作・インストール・運用へとつなげていく。トリガー・DAQ の観点では、ルミノシティー向上によって増加する発見の対象の物理事象を最大限記録するために、より長いトリガー判定時間 ($2.5 \mu\text{s} \rightarrow 10 \mu\text{s}$)、かつ、高いトリガーレート ($100 \text{kHz} \rightarrow 1 \text{MHz}$) で動作する読み出しシステムを開発する。同時に、低エネルギーでの QCD 事象などの背景事象を

強力に排除する、複雑で洗練されたトリガーアルゴリズムを初段トリガー回路に導入する。日本グループも、まさにこの2つの点に焦点を絞り、内部飛跡検出器開発、およびそれを使ったトリガーの検討、ミューオン検出器の読み出し回路やトリガーシステムの開発を精力的に行っている。

LHC エネルギーアップグレード計画

これらの HL-LHC のための技術開発はさらに、LHC のエネルギーアップグレード計画の実現につながる。CERN は 2030 年以降に LHC の重心エネルギーを 33TeV まで上げるエネルギー増強計画 (HE-LHC)、あるいは LHC よりも更に大きなトンネルを作り重心エネルギー 100TeV の新しいコライダー (FCC) の建設構想をもっている。

これを実現するための最重要技術は加速器磁石の高磁場化である。HL-LHC で初めて導入する Nb₃Sn 線材の性能（臨界電流密度）を向上させて 16 テスラ以上の磁場を発生可能にするのと同時に、高品質な超伝導磁石を大量生産できるようにする必要がある。これと並行して、ReBCO などの先端超伝導線材の高磁場加速器磁石への応用研究も必要である。HL-LHC での超伝導磁石開発は、将来のエネルギーフロンティア加速器につながる重要なマイルストーンと位置付けられており、あわせて線材の高性能化や高磁場加速器磁石の基盤技術開発など、広い視野で取り組んでいく必要がある。

2.3 将来のエネルギーフロンティア加速器・加速原理

Compact Linear Collider (CLIC)

ILC よりも更に高いマルチ TeV での電子・陽電子衝突を可能にする Compact Linear Collider (CLIC) 計画があり、CERN を中心とした国際協力プロジェクトとして開発が進められている。CLIC は全長が 50 km 程度、加速勾配が 100MV/m の直線型加速器であり、粒子加速のための高周波源としてクライストロンを直接利用するのではなく、低エネルギー・大電流の電子ビーム（ドライヴビーム）を加速した後、減速する時に発生するマイクロ波を使って小電流ビームを加速する、「2 ビーム加速方式」を採用している。加速管の周波数は 12GHz (X バンド) である。

CLIC 方式の技術的な困難は、ドライヴビームのパルス圧縮とマイクロ波を高効率で輸送すること、100 MV/m の電場勾配でも放電しない加速管の製作、加速管を 10 μ m の精度でアラインすること、等にある。2012 年に Conceptual Design Report (CDR) が出版され、現在も R&D が続けられている。

Muon Collider

ミューオンは電子と比較して 200 倍の質量を持つため、円形加速器において周回軌道を描いてもシンクロトロン放射が抑制される。このため、原理的に TeV 領域の衝突エネルギーに到達することが可能であり、かつ、電子・陽電子コライダーの場合と同様クリーンな実験環境で衝突事象を観測できる。

しかしながら、ミューオンを生成・加速して電子・陽電子コライダーと同等の輝度で実験をおこなうには、大量のミューオンの生成、冷却、加速のすべてをミューオンの寿命の範囲で行う必要があり、多くの技術的課題を克服する必要がある。

レーザープラズマ加速、他、新しい加速器技術

プラズマ加速技術は従来の技術に較べて遥かに高い加速勾配を実現するポテンシャルを持っており、レーザープラズマ加速方式は数 GV/m の加速を実現している。陽子ビーム駆動によるプラズマ加速方式は、そのビーム効率の良さから今後の開発が期待されている。しかしながら高エネルギー物理実験に応用するためには、はるかに大電流のビームを、多段階で安定加速する必要があり、その実現には多くの技術的課題の克服が必要となる。

また、超伝導加速空洞技術が成熟してきたことで、Nb よりも転移温度の高い超伝導素材や、多層膜による高勾配空洞の開発も芽生えている。

これらの技術が実用化すれば、今よりも遥かに高いエネルギースケールの物理を直接的に探索することができ、新粒子の発見・新しい現象の発見を通じて究極の物理の姿を解明する可能性が飛躍的に高まっていく。

3 ニュートリノ振動と陽子崩壊

概要

ニュートリノ研究の現在の目標は、ニュートリノの質量および世代間混合の全貌を解明し、素粒子の標準模型を超えた超高エネルギーの物理へのヒントを得ることにある。特に、レプトンセクターでの CP 位相の測定は、強い力の CP 対称性およびクォークセクターでの CP の破れとの比較により、背後のメカニズムを推察し、素粒子物理の全体像を捉える目的において重要な研究課題である。近年の測定から 3 つのニュートリノ混合角がすべて有限であることが明らかになり、CP 位相の測定の展望が拓けた。ニュートリノセクターにおける CP 対称性の破れは、宇宙における物質・反物質の非対称性の起源を理解するための鍵を握る可能性も指摘されており、将来計画による研究の進展が期待されている。また、大統一理論の検証とバリオン数非保存反応の解明も、将来計画による重要な研究課題であるが、超大型ニュートリノ検出器ではスーパーカミオカンデを大幅に上回る測定感度で、大統一理論の直接の証拠となる陽子崩壊の探索が可能である。

3.1 現状

ニュートリノ振動

ニュートリノの性質の理解は、スーパーカミオカンデによるニュートリノ振動現象の発見以降、飛躍的に進展し、現在ではニュートリノ世代間混合の全体像が明らかになりつつある。三つの質量固有状態 (m_1, m_2, m_3) の二乗差は $|\Delta m_{32}^2| \sim 2.4 \times 10^{-3} \text{eV}^2$ 、 $\Delta m_{21}^2 \sim 7.5 \times 10^{-5} \text{eV}^2$ 、フレーバー・質量間の混合角は $\theta_{23} \sim 45$ 度、 $\theta_{12} \sim 34$ 度という値が得られている。混合角 θ_{13} については、2012 年の T2K 実験および原子炉ニュートリノ実験 (Double Chooz, Daya Bay, RENO) による観測から、 $\theta_{13} \sim 9$ 度という測定結果が得られ、3 つの混合角がすべて有限であることが明らかになった。一方で、三世代混合中の位相 δ_{CP} に起因するニュートリノセクターにおける CP 対称性の破れは、T2K 実験によりその兆候が報告されているが、未だ決定的な測定結果は得られていない。仮に θ_{23} や δ_{CP} がそれぞれ 45 度や 90 度に近い場合や、ニュートリノ混合行列のユニタリティーが保たれていない実験結果が出てきた場合には、超高エネルギーの物理へのヒントになる可能性がある。また、質量二乗差に関しても、 $\Delta m_{32}^2 = m_3^2 - m_2^2$ の符号が未知であり、 $m_3 \gg m_2 > m_1$ (順階層) であるか、 $m_2 > m_1 \gg m_3$ (逆階層) であるかの質量階層性問題が未解決である。ニュートリノの質量階層性は、クォークや荷電レプトンとの比較により質量の起源を理解するための糸口となる重要な知見である。

陽子崩壊

陽子崩壊の探索は世界最大の検出器であるスーパーカミオカンデが世界をリードしており、陽子の寿命について各崩壊モードで、 $p \rightarrow e^+ + \pi^0 : 1.6 \times 10^{34}$ 年、 $p \rightarrow \nu + K^+ : 5.9 \times 10^{33}$ 年、といった下限値（90% C.L.）が得られている。一般的な大統一理論では $p \rightarrow e^+ + \pi^0$ が、超対称を仮定した大統一理論では $p \rightarrow \nu + K^+$ が主要な崩壊形式であり、 $10^{34} \sim 10^{35}$ 年程度の寿命が予想されている。

3.2 将来計画

測定で得られた3つの混合角から、加速器ニュートリノ振動実験による観測で最大27%¹のCP非対称が生じ得ることが明らかになった。大型水チェレンコフ検出器であるハイパーカミオカンデの建設とJ-PARC加速器の増強により δ_{CP} の広い範囲でCP対称性の破れを見つけられる状況であり、この2つの計画を推進すべきである。J-PARC加速器ではハイパーカミオカンデに向けた1.3MWまでの増強計画が示され、KEK Project Implementation Plan（KEK-PIP）により最優先課題と結論された。測定器に関しては、ハイパーカミオカンデ国際共同研究グループにより基礎設計が提案されている。提案された設計は大統一理論の直接の証拠となる陽子崩壊探索に対しても十分な感度を持つ。現在、アメリカではDUNE計画が進行中であり、国際競争が予測されるため、実験の早期実現が重要である。

CP位相の測定

δ_{CP} は、ニュートリノと反ニュートリノで $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動による ν_e 出現確率の非対称性を測定することにより決定される。 δ_{CP} による効果は小さい ν_e 出現確率の「ずれ」として現れるため、高統計で $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 出現モードを測定する必要がある。すでに、T2K実験ではJ-PARCニュートリノビームを用いたニュートリノ振動確率の測定により、CP対称性の破れの兆候を観測している。この結果を踏まえ、CP対称性の破れの存在を決定的なものにするためには、J-PARC加速器を大強度化しT2K実験の期間を延長して測定を継続することが必要である（T2K-II）。T2K-IIでは δ_{CP} の値にもよるが、 3σ の有意さでCP対称性の破れを測定できる可能性がある。

一方、T2K実験でCP対称性の破れが見つからない場合は、次世代大型ニュートリノ検出器で確実に発見することが最重要課題となる。T2K実験でCP対称性の破れが見つかった場合にも、次世代ニュートリノ検出器による混合行列のユニタリティーの精密測定により、3世代混合からのずれを探ることが可能となる。このような展望のもと、国内では、将来計画を大型水チェレンコフ検出器ハイパーカミオカンデに一本化し、建設の準備を進めている。

J-PARC加速器とニュートリノビーム

¹PMNS行列で表される3世代混合の場合の予測であり、新しい物理によりそれを超える可能性もあり得る

J-PARC は Main Ring (MR) で 30GeV まで加速された陽子ビームを用いてニュートリノビームを生成している。2009 年にニュートリノビーム生成施設も含めて完成してビーム運転を開始し、2010 年 1 月からは T2K 実験のために安定ビーム供給が始まった。その後東日本大震災により中断されたが、2011 年 12 月に運転が再開され、2016 年には約 500kW 以上のビーム強度が達成されている。

以下に述べる J-PARC 加速器のアップグレード計画が、KEK-PIP により最優先課題と結論され、すでに大強度化への取り組みがなされている。MR は高繰り返し化と大電流化により、当初の設計強度の 750kW を超えて、1.3MW の実現を目指す。まずは、主電磁石電源のアップグレードと RF の高勾配化により、現在 2.5 秒の繰り返し周期を約半分にして 750kW 以上のビーム強度を達成する。さらに、RF 電源、速い取り出しのキッカー、ビームモニターなどのアップグレードにより、ビームの安定化・最適化を進めてスパイルあたりの陽子数を増やし、最終的には 2026 年ごろまでに 1.3MW を達成する計画である。J-PARC ニュートリノビームラインについては、交換不可な部分（崩壊トンネル・ビームダンプ）は 3MW 以上を想定した設計になっているが、1.3MW に対応するためにはターゲット・ホーンの冷却能力増強や放射化された水処理能力の増強などが必要である。

さらに長期的な将来計画としては、数 MW 加速器の実現も検討されている。可能性のひとつとして、Rapid Cycling Synchrotron (RCS) と MR の間に 8GeV booster ring を建設することにより、小さいエミッタンスのビームを MR に入射し、より多くの陽子を加速することができる。また、運用面での改善案として、現在の MR に加えて遅い取り出し用の Stretcher ring を建設すれば、速い取り出しによるニュートリノ実験と遅い取り出しによるハドロン実験を並行して行うことができる。さらなる高度化のために、SuperKEKB の後の計画として、KEKB トンネルにリニアックを直列に並べて 10MW 級のプロトンドライバーを建設するアイデアがある。

ハイパーカミオカンデ

ハイパーカミオカンデ (HK) は、スーパーカミオカンデ (SK) で確立した基幹技術をもとに、そのサイズと測定器性能を改良した超大型次世代水チェレンコフ検出器である。HK の物理目標は、J-PARC からのニュートリノビームを用いた δ_{CP} の測定、陽子崩壊の探索、大気ニュートリノ観測によるニュートリノ質量階層の決定、宇宙起源ニュートリノの観測と多岐にわたる。

測定器は、直径 74m、高さ 60m の円筒形構造を持ち、有効質量は約 20 万トン (SK の約 10 倍) に達する。HK は予算化から 10 年以内に建設を完了し測定開始できる見通しである。さらに段階的に 2 基の検出器を建設し、最終的には SK の約 20 倍の有効体積で測定を行う計画が提案されている。HK 実験グループでは浜松ホトニクスと共同で測定性能と水圧耐性が大幅に改善された新しい光センサーの開発に成功している。新しい光センサーの開発により、検出器構造が見直され、測定感度を保ちつつ大幅なコスト削減が達成された。

HK では、J-PARC ニュートリノビームを用いた高統計・高精度でのニュートリノ振動の測定が可能であり、 δ_{CP} に対して非常に高い感度を有する。J-PARC 加速器のアップグレード計画により、1.3MW まで大強度化された陽子ビームによって生成されるニュートリノビームを 10 年間測定することにより、 δ_{CP} を 21 度以下の精度 ($\delta_{CP} = 0$ の場合は 7 度の精度) で決定することが可能である。

ニュートリノ質量階層の決定も HK の主要な目的のひとつである。ニュートリノ質量階層はニュートリノの極端に軽い質量の起源を探る手がかりとなるだけでなく、二重ベータ崩壊探索によるマヨラナ性の検証実験とも関連する重要な研究課題である。例えば、ニュートリノ質量が逆階層と決定された場合、二重ベータ崩壊探索実験の感度向上により、比較的早い段階でマヨラナもしくはディラックと決定できる可能性がある。HK では、大気ニュートリノ観測と J-PARC ニュートリノビームの測定により、観測開始から 3 年程度で 3σ の有意性で質量階層を決定できる感度を持つ。

HK は陽子崩壊に対しても非常に高い感度を有している。有効体積の増加だけでなく、測定器性能の向上によりバックグラウンドも大幅に削減され、 $p \rightarrow e^+ + \pi^0$ に対して 1×10^{35} 年以上、 $p \rightarrow \nu + K^+$ に対して 4×10^{34} 年以上の感度 (3σ) を有する。これはそれぞれ、現在の上限よりも一桁大きい値であり、大統一理論の多くのモデルの検証が可能となる。

HK はその巨大有効体積により、太陽ニュートリノ観測、超新星ニュートリノ観測、暗黒物質探索など、宇宙起源のニュートリノ観測でも発見が期待できる。太陽ニュートリノ観測では、物質効果によるニュートリノ振動確率の変動を高精度で測定可能である。この測定によりニュートリノ振動以外の新しい物理による太陽ニュートリノ欠損の可能性を検証することができる。超新星ニュートリノ観測では、銀河内もしくは近傍での超新星爆発によるニュートリノ観測だけでなく、未発見である超新星背景ニュートリノを観測することが可能である。超新星背景ニュートリノのフラックスは宇宙初期からの超新星爆発の頻度により決定されるため、HK の観測により宇宙の進化についての研究が進むと期待される。

現在はハイパーカミオカンデ国際共同研究グループによる設計報告書が提出され、予算化されれば建設を開始できる状況にある。HK は既存の技術で実現可能な検出器設計、現実的な予算の見積もり、国際協力体制を確立し、CP 対称性の破れ、陽子崩壊などの重要な発見が期待できる世界で最も現実的なニュートリノ将来計画である。

ステライルニュートリノ探索

1990 年代に米国で行われた LSND 実験は、 $\bar{\nu}_\mu$ が 30 m の距離を飛行する間に $\bar{\nu}_e$ に遷移する現象を報告した。この遷移がニュートリノ振動によるものである場合、振動長に対応する質量差は 1 eV 程度になり、他のニュートリノ振動の測定結果と合わせて、3 つのスケールの質量差が存在することになる。この結果は 3 世代のニュートリノの枠組みでは説明できず、第 4 のニュートリノとしてステライルニュートリノ (強い相互作用、電磁相互作用に加えて弱い相互作用でも反応しない新たなフェルミ

オン)の存在を示唆する。その後、MiniBooNE 実験からも遷移現象を示唆する結果が報告されたが、ともに前置検出器が存在せず、バックグラウンドの可能性も指摘されるなど、未だはっきりした結論が得られていない。

現在、LSND で報告された遷移現象を検証するために、世界各地でニュートリノ実験が計画されており、日本でも J-PARC の物質生命科学実験施設で JSNS² が 2018 年中の実験開始を目指して準備を進めている。将来的には、LSND で示唆される領域を全て検証する計画である。また、T2K や HK の前置検出器として提案されている NuPRISM も、主目的は長基線振動実験での系統誤差の削減であるが、ステライルニュートリノ探索にも感度を持つ。

国外の将来計画

ニュートリノ振動を通し、 δ_{CP} や質量階層を決定するためには、加速器によるニュートリノビームを用いたニュートリノ振動実験が決定的に重要であり、国外でも次期プロジェクトが検討されている。

米国では、Fermilab で 1MW 強の陽子ビームを用いてニュートリノビームを生成し、1,300km 離れた Sanford 地下実験所で観測する DUNE 計画が準備を進めている。ニュートリノ測定器としては、液体アルゴン TPC に決定し、現在は大型化に向けた R&D が進められている。一方で、 θ_{13} が比較的大きな値で測定されたことを受けて β ビーム、ニュートリノファクトリーの緊急性が下がり、また、ヨーロッパで検討されていた LAGUNA 計画も実現が見直されている。このような状況から、現時点での δ_{CP} の測定に向けた将来計画は、ハイパーカミオカンデと DUNE に収束したと言える。同時期に実験が開始された場合、 δ_{CP} や陽子崩壊の主要な崩壊モードである $p \rightarrow e^+ + \pi^0$ の測定感度は、ハイパーカミオカンデに優位性がある。DUNE 計画は実現可能な検出器の設計（特に検出器の大型化）を確立するための R&D の段階にあるが、DUNE に使用される施設の一部はすでに予算化され 2017 年中にも空洞掘削が開始される見込みである。世界に先駆けてこれらの重要な物理結果を得るためには、ハイパーカミオカンデの早期実現が極めて重要である。さらに、ハイパーカミオカンデの 2 基目の検出器を韓国に建設し、異なる距離で J-PARC ニュートリノビームを測定する可能性についても検討が進んでいる。この計画では特に質量階層に対する測定感度の向上が指摘されている。

ニュートリノ質量階層の決定については、様々なアプローチで実現に向けた動きが高まっている。中国では原子炉ニュートリノの振動確率を精密測定する JUNO 実験が開発研究と並行して建設を開始している。また、IceCube の光センサーの高密度化により測定精度を向上した PINGU 計画ではハイパーカミオカンデと同様に大気ニュートリノ観測によりニュートリノ質量階層に感度を持つ。アメリカの DUNE 計画も距離が長いこと物質効果の影響を強く受け、質量階層に感度がある。ハイパーカミオカンデ以外については、新しい測定器技術に依存するため感度が未知数な部分はあるが、開発研究の進み具合により、今後 10 年以内には測定の見通しが明らか

になると考えられる。

ステライルニュートリノ探索については、ニュートリノ線源を使った SOX（イタリア・Gran Sasso）が 2017 年、加速器を使った SBN 計画（米国・Fermilab）が 2018 年のコミッショニングに向けて準備を進めており、JSNS²（日本・J-PARC）との国際競争が予測される。

4 フレーバー物理

概要

ヒッグス粒子の発見後、素粒子物理学が追求すべき課題は TeV 以上の高いエネルギースケールで新しい物理現象を発見し、相互作用の統一、階層性問題の解決、ダークマターの同定など、標準模型では説明のつかない根源的な問いに答えることへと発展してきた。エネルギーフロンティア実験がこれらを直接的に探索するのに対し、間接的に新しい現象を発見しようとするのがフレーバー物理であり、両者は相補的な関係にある。後者の利点は、新粒子の質量が加速器で到達可能なエネルギーより高いところにあっても、それが反応過程に寄与する影響を標準模型の予言値からの差異として間接的に捉えられることにある。

新物理の発見を実験的に確定させるためには、稀におこる信号事象に対して背景事象となる標準模型の過程が十分に抑制されていること、その理論的な予言精度が高いこと、測定の実験誤差を極小に抑えることが必須である。稀な物理過程を信号とするため、加速器のビーム衝突輝度・標的に照射するビーム強度を極限まで高める。このためフレーバー物理は別名、強度フロンティアとも呼ばれる。大強度ビームを実現する加速器と、そのビームに由来する困難な実験環境下で稀にしか起こらない事象を捉える実験、双方の努力により強度フロンティアを開拓しながら新物理を探索している。

KEKB ファクトリーの成功に代表されるように、日本はフレーバー実験において世界をリードする立場にあり、将来にわたってこの立場を堅持していくことが重要である。現時点においてもミューオン異常磁気能率 ($g-2$) や、B ファクトリー、LHCb 実験の測定結果の一部に 2σ から 4σ の差異が観測されており、これが新物理を示唆するものと解釈すべきであるか、議論となっている。

今後は、これらの過程について計算精度を向上させると同時に実験精度を更に高め、その差異が新物理によるものであるかどうかに関着をつけると共に、多様な物理過程で差異の存在、大小を検証していくことが重要になる。差異のあらわれかた、すなわちどの過程では大きく、どの過程では抑制されているかを知ることによって新物理の大きな枠組みを同定できる。これはフレーバー物理の持つ優れた特徴である。従って、プロジェクトの多様性を将来にわたって維持することが基本姿勢として重要である。次節以降、個別の実験対象 (B 中間子、D 中間子、 τ レプトン、ミューオン、K 中間子、中性子) について述べていく。

4.1 SuperKEKB / Belle II 実験

2001 年に Belle 実験 / BaBar 実験が B 中間子系における CP 対称性の破れを発見して以来、フレーバー物理に関する数多くの成果が高輝度レプトン衝突型加速器を

使った B-Factory 実験によってもたらされている。2010 年以降、LHCb 実験が陽子衝突で大量に発生する b -クォークを利用して多くのフレーバー物理の成果をあげており、激しい国際競争が繰り広げられている。

KEKB 加速器は積分ルミノシティ 1 ab^{-1} を超えるデータを蓄積して、2010 年に運転を終了した。その後、最終収束磁石の新設、新しい陽電子ダンピングリングの導入、初段ライナックの増強をおこない、ビームをナノメートルの大きさに収束して瞬間ルミノシティを 40 倍にあげる SuperKEKB 加速器へのアップグレードが進行している。2016 年 2 月には最初のビームが周回し、第一段階の加速器コミッショニングを 6 月まで続けた。2017 年度中には、Belle II 測定器のロールイン、ソレノイド励磁および衝突点用超伝導 4 極電磁石の稼働が行われ、電子-陽電子を衝突させる第二段階の加速器コミッショニングを経て物理データの収集を開始する。2018 年度中には最終段階に入り、崩壊点近傍に設置するシリコン検出器を含む全ての Belle II 検出器を稼働させて物理データを取得する。

Belle II 実験は約 10 年で 50 ab^{-1} のデータを取得し、 b -クォーク、 c -クォーク、 τ レプトンの崩壊を高統計で精密測定することでフレーバー物理の急速な発展を目指している。量子効果による間接探索によって 10 TeV のエネルギー領域までの感度が期待できる。第三世代の b -クォークや τ レプトンの崩壊過程に、未発見粒子である荷電ヒッグス粒子 ($H^\pm$) による量子効果の出現、新粒子に起因する量子効果の検出が期待できるなど、今後の数年間は、超精密測定による新物理探索は新たな段階に入る。また、レプトンユニバーサリティの破れが LHCb の結果で示唆されており ($b \rightarrow s \ell^+ \ell^-$)、SuperKEKB/Belle II 実験の高統計データによって早期に決着をつける。 e^+e^- コライダーのクリーンさを活かした決定的な結果によって、Belle 実験で見えたアノマリーの論争に終止符を打つ。CKM 行列の超精密測定 ($\mathcal{O}(1\%)$) によって、新物理による CP 非保存位相の検出と、そこに現れる新物理のエネルギースケールを見極める。また、 $B \rightarrow D^{0(*)} \tau \nu$, $\tau \nu$, $K_S^0 \pi^0 \gamma$, $K^{(*)} \nu \nu$ 等の崩壊事象の精密測定や、 τ の LFV 事象 ($\tau \rightarrow \ell \gamma$, 3ℓ) の探索、 $B \rightarrow X_s \gamma$ の崩壊分岐比の測定などによって荷電ヒッグス粒子、超対称性粒子、右巻きカレントなど新物理の寄与をプローブし、その背後にある物理構造解明への足がかりとする。実験開始から 10 年で SuperKEKB の積分ルミノシティが 50 ab^{-1} に到達し、それまでに様々な新物理現象の発見や、パラメーター領域の制限が得られることが期待されている。フレーバー物理の展開を注視しつつ、次期プロジェクトの戦略を立てることが重要となる。

4.2 K 中間子

K 中間子をつかった実験は CP 対称性の破れを初めて観測して第 3 世代のクォークの存在を示唆するなど、素粒子物理の標準模型の確立を牽引する役割を果たしてきた。CKM 行列の要素 $|V_{us}|$ は K 中間子崩壊のデータから最も精密に定められており、また $K^0-\bar{K}^0$ mixing から求められるパラメーター ε_K が unitary triangle に制限

を与えるなど、B-Factory の結果とあわせて重要な実験結果を出している。

中性フレーバ遷移過程（Flavor Changing Neutral Current 過程）は標準模型過程が抑制されるため、フレーバー物理の新物理探索において有効なプローブである。なかでも、K 中間子の $s \rightarrow d$ 遷移は最も抑制が強い CKM 行列の積が寄与するために標準模型過程が強く抑制されている。このため CKM 行列特有の抑制に束縛されない包括的な新物理探索において、K 中間子の崩壊過程が最も強力なツールとなる場合がある。

K 中間子の稀崩壊過程を使った新物理探索においては、 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ と $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の分岐比の測定が特に重要である。標準模型では、分岐比が小さく、算出の不定性が少ないため、新粒子の寄与が小さい場合であっても標準模型の予言値からの差異が相対的に大きくなり、新粒子の効果を実験的に捉えやすい。SUSY や Z' などモデルによるが 10-100TeV のエネルギースケールの新物理にも感度があり、数倍から 10 倍の分岐比の変化として検出できる。

国内では J-PARC の大強度陽子ビームを活用して $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ を測定する KOTO 実験が進行中である。KOTO 実験は 2013 年に物理ランを開始した。KEK-PS 実験で得られた現在の上限值 (2.6×10^{-8}) に迫る感度を達成し、 5×10^{-8} の上限値を得た。その後 2015 年に行った長期データ取得で、 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ の測定分岐比からの間接的な制限である Grossman-Nir bound (1.5×10^{-9}) に迫る感度に到達する見込みである。今後は、解析のさらなる改良と検出器の増強により背景事象を削減すると同時に、一次陽子ビームの遅い取り出しの時間変動を小さくしてビーム強度を増し、2020 年代始めにかけて標準模型の分岐比 3×10^{-11} に迫る計画である。海外の情勢は、CERN で $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ を $\mathcal{O}(100)$ イベント観測して分岐比を精密に測定する NA62 実験が進行中である。現行の KOTO 実験に対し、相補的な測定であると同時に、間接的な制限となる Grossman-Nir bound による棄却領域を拡大してくるので、競争ともなっている。

さらに将来、KOTO 実験を超え、標準模型に対して 10% 程度の新物理からの寄与を探索するためには、J-PARC ハドロン実験ホールの拡張を伴う新規ビームラインの建設と測定器の大幅な改造が必要である。CERN に於ても 2026 年を目処に $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の分岐比測定実験を検討しており競争となる。J-PARC ハドロン実験ホールの拡張については、KEK の Project Implementation Plan でもサポートされている。 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の分岐比測定の他に、 K^+ を用いる時間反転対称性の破れの探索や、原子核ハドロン実験を含み、原子核実験分野の将来計画とも連携して実現すべき課題である。

4.3 ミューオン

ニュートリノ振動の発見により、荷電レプトンにおいてもフレーバー保存則は破れていると考えられる。標準模型にニュートリノ振動を考慮した単純な模型では荷電レプトンフレーバー非保存過程は $10^{-40} \sim 10^{-50}$ 程度に抑制されるが、新しい物理

が存在する場合には現在計画中的の実験で観測可能な大きさになり得る。荷電レプトンフレーバー非保存過程の発見は明快な新物理の発見であり、その探索は強く推進すべきである。

前述の τ レプトン崩壊におけるフレーバー非保存過程が第3世代と第1, 2世代の混合であるのに対し、 $\mu \rightarrow e\gamma$ および $\mu - e$ 転換は第2世代と第1世代の混合であり、互いに相補的である。MEG 実験は最終結果を報告し、 $\mu \rightarrow e\gamma$ の分岐比に対して 4.2×10^{-13} という、前実験 (MEGA 実験) を 30 倍更新する上限値を得た。さらに探索感度を 10 倍向上させるアップグレード実験 MEG II が間もなく開始される。

$\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊分岐比と $\mu - e$ 転換分岐比の比は多くの模型で $\mathcal{O}(10^2)$ となるが、一般には新物理の枠組みに依存するため両測定は相補的な関係にある。そこで、 $10^{-14} \sim 10^{-17}$ の感度を目指した $\mu - e$ 転換過程探索実験の準備が国内外で進められている。J-PARC の物質生命科学実験施設では $\mathcal{O}(10^{-14})$ の感度の早期達成を目指した DeeMe 実験が計画されており、現在ビームラインの建設が進んでいる。 $\mathcal{O}(10^{-17})$ の感度を目指して R&D が進行中の J-PARC の COMET 実験と Fermilab の Mu2e 実験は、 $\mu - e$ 転換過程発見への感度を十分持っていると考えられる。実現すれば J-PARC での素粒子物理学研究のフラグシップ実験となり得るものである。COMET 実験は段階的実現計画を採用しており、第1期計画の目標である $\mathcal{O}(10^{-15})$ の感度を目指した実験装置の建設が進行中である。

ミューオンの異常磁気能率 ($g-2$) は、BNL-E821 実験による 0.54ppm 精度での測定結果が標準模型の予想から 3.3σ ずれており、真空偏極に対するハドロンループの寄与の精度を向上させると共に、これをより高精度な実験で検証することが重要である。そのため BNL-E821 のミューオン貯蔵リングを Fermilab に移設して 0.1ppm の精度で測定する実験が計画されている。一方 J-PARC では、超冷ミューオンビームを用いる新しい測定手法で、 $g-2$ と EDM を同時に測定する実験が提案されている。現時点で 0.4ppm の精度までは技術的に実施可能であり、最終的には 0.1ppm までの精度向上を目指している。異なる系統誤差を持つ独立な測定を遂行する意義は高く、早期の実現を目指して速やかに準備を進めていくべきである。

4.4 中性子

J-PARC など大強度加速器中性子源と高性能中性子光学素子の活用は、従来の実験を大きく凌駕する高統計実験を可能にした。中性子による素粒子物理学研究はいよいよ新たな時代に入ったと言える。

超冷中性子 (UCN) を用いた中性子の電気双極子能率 (EDM) の測定は、上限値 ($|d_n| = 3 \times 10^{-26} e \cdot \text{cm}$) が新物理の予言する領域 (超対称模型: $10^{-27} \sim 10^{-28} e \cdot \text{cm}$ 、標準模型: $10^{-32} e \cdot \text{cm}$) に迫ってきており、今後の展開に期待が高まる。実験では UCN を容器内に蓄積しスピン歳差回転周波数を測定するが、系統誤差を抑制するためには一様で安定な磁場環境が必要であり、蓄積容器を大きくできない。統計を増加さ

せ探索感度を向上するには、UCN の空間密度増加が必要である。 $10^{-27} \sim 10^{-28} \text{ e}\cdot\text{cm}$ を目標感度にした高密度 UCN 源の開発が国際的な競争になっている。PSI では、固体重水素コンバーターによる UCN 源を用いた EDM 測定実験が稼働を始めた。技術的な問題により設計強度で中性子を取り出せてはいないが、2016 年現在 $10^{-26} \text{ e}\cdot\text{cm}$ まで測定可能な統計に達している。2020 年にはアップグレードした測定系での測定開始を目指している。TRIUMF では、2017 年の UNC 生成、2018 年の測定開始を目指してビームラインの建設・コミッショニングを行なっている。日本は TRIUMF での UCN 実験計画において、KEK・RCNP の協力体制で超流動ヘリウムコンバーターによる UCN 源を担当している。J-PARC は、平均ビーム強度は小さいがパルスの瞬間輝度は高い。固体重水素コンバーターで瞬間的に生成された UCN を密度を保って輸送するアイデアなどが検討されており、現在は要素技術の研究開発が行われている。発見に結びつけるためには、迅速に設計値の強度を達成することが重要である。同時に、測定系の系統誤差の抑制と評価が極めて重要である。

また、大強度中性子ビームを利用した様々な実験が計画・実行されている。中性子寿命測定はビッグバン元素合成や CKM 行列要素の計算にも用いられる重要なパラメータであるが、現状では測定手法によって値が大きく乖離している。J-PARC を含む世界各地で 1 秒以下の精度での測定が進められている。中性子と原子核の共鳴吸収反応において CP の破れが増幅される可能性が理論的に示唆されており、J-PARC の大強度ビームを利用して高感度で新物理を探索しようという実験が検討されている。また中性子は質量と結合するようなエキゾチックな相互作用の探索にも適しており、各種探索が試みられている。

さらに将来を見据え、革新的な次世代中性子源の開発を検討すべきである。ヨーロッパでは ESS が 2020 年の稼働開始を目指して建設を進めている。長基線ビームによる中性子反中性子振動の探索ではバリオン数非保存の検証が可能である。国内では、J-PARC 第二ターゲットステーションの建設が検討されている。素粒子実験では特に低エネルギー中性子が重要であり、極冷中性子減速体や高効率反射材の開発によって利用できる中性子がさらに一桁増加すれば、将来計画で全く新しい展望が拓ける可能性がある。

5 非加速器素粒子実験

5.1 地下素粒子実験

はじめに

地下では、宇宙線の少ない低放射能環境と年間を通じて安定した観測環境を利用して、新物理により予言される稀な現象の探索が行われている。加速器での直接探索が難しいエネルギー領域を、自然に生じる稀な現象を探索することによって検証できるところに地下素粒子実験の価値がある。特に、暗黒物質の直接探索とニュートリノを伴わない二重 β 崩壊 ($0\nu\beta\beta$) の探索が活発に行われており、世界的な競争状態にある。国内ではニュートリノ観測に端を発し、神岡地下にプロジェクトが集中しており、大小プロジェクトによる地下素粒子実験コミュニティが形成されている。諸外国に比べて若干浅いという不利な環境にもかかわらず、それぞれが連携し既存の研究環境や資産を生かすことで、世界をリードする探索感度を低コストで迅速に実現するプロジェクトが提案されている。近年、さらなる連携と協力を目指して、プロジェクト横断的な学術領域の形成が進められている。今後も地下素粒子実験の世界的研究拠点として、このような継続的支援が必要である。

現状では 10 名から 50 名程度の規模のプロジェクトが進行中であり、個性に富んだ複数の手法が共存している。当面は多様性を重視しつつ、新たな発見を契機に大きなプロジェクトに集約できるよう分野の方向性を共有することが重要である。地下素粒子実験研究者は、高エネルギー分野のみならず宇宙線や原子核コミュニティにもまたがっている。これらのコミュニティと密接に協力・連携して、重要な研究が手薄にならないよう、適切な評価をしつつ推進していく必要がある。

暗黒物質探索

近年の宇宙観測の進展により、既知の物質では説明できない暗黒物質の存在は決定的なものとなり、地球近傍では約 $0.3 \text{ GeV}/\text{cm}^3$ もの暗黒物質が存在すると見積もられている。暗黒物質粒子の質量や相互作用の強さについては、それぞれ数十桁にもおよぶ領域で多くの仮説が提唱されている。このうち、超対称模型をはじめとする電弱相転移に言及する新物理模型で予言される“弱い相互作用をする重い粒子 (WIMP)” が特に注目を集めており、WIMP の直接観測を目標とした活発な研究が世界的に行われている。

これまでの観測では、NaI 結晶シンチレータを使った DAMA/LIBRA が、暗黒物質の証拠として、地球公転に相関した信号強度の季節変動を観測したと報告している。一方それを直接的に検証しようとする XMASS などの液体キセノン検出器では同様の季節変動は観測されていない。また、近年の XENON1T の結果により、 35 GeV 程度の質量の WIMP に対し、散乱断面積で $7.7 \times 10^{-47} \text{ cm}^2$ 以上の領域が否定されている。この値は DAMA/LIBRA の観測した季節変動を自然に説明する散乱断面積を

大きく下回っている。さらに近年の加速器による超対称性粒子の研究や、宇宙線などに基づく間接検出でも明らかな信号は捉えられていない。今後探索感度が 10^{-48} cm^2 台半ばに到達すると、超対称模型で予言される WIMP のパラメーター領域の大半をカバーすることができると考えられている。この段階ではそれまで問題とならなかった太陽ニュートリノがバックグラウンドになりうるが、エネルギースペクトルの違いを利用した探索が可能である。このような状況を踏まえ、将来計画では、より断面積の小さい 10^{-47} cm^2 以下の反応断面積へ着実に WIMP 探索範囲を広げつつ、近年研究開発が進んでいる軽い暗黒物質や WIMP 以外のより広いダークマター候補に対しても網をかけるべく、様々な方向性での R&D を推進していくことが重要である。

暗黒物質探索の将来計画では、まずは発見を第一要件とし、現在の感度を更新して探索を行うための大規模検出器の実現が重要課題となる。現在世界で進められている大規模検出器の代表例としては XENONnT 実験や、LZ 実験が挙げられる。どちらも液体キセノンを用いた検出器であり、それぞれ 2019 年、2020 年に運転開始を予定している。双方ともおよそ 10 トンの液体キセノンを用いて 50 GeV 付近で $3 \times 10^{-48} \text{ cm}^2$ に迫る感度の達成を目標としている。さらにその先には、 10^{-48} cm^2 を超えた究極の感度を達成するために、50 トン近い液体キセノンを用いた DARWIN 実験などが検討されている。この規模の装置になると、スペクトルの違いも利用しづらい大気ニュートリノによる究極のバックグラウンドが見え始める。しかし、暗黒物質の主成分が理論的にも注目されている Wino(超対称模型で予言されるニュートラリーノの一つ)であれば、検出が可能だと考えられている。このように暗黒物質探索の研究においても、世界に唯一の大規模検出器の建設が視野に入ってきている。従って今後は大規模検出器の建設や暗黒物質探索への寄与を始めとし、究極の感度を持つ検出器の実現へ向けた様々な努力が必要である。

大型検出器により暗黒物質の信号を捕らえた場合、次の段階として、さらに確実な証拠や背景となる物理を探る必要がある。そのためには他種原子核あるいは別の手法による測定、暗黒物質粒子の運動方向測定、スピン依存性測定や非弾性散乱測定などが重要となってくる。

PICO-LON 計画では、DAMA/LIBRA と同じ NaI 検出器での直接検証を目的として、極低放射能の NaI(Tl) 結晶の開発を進め、すでに世界第二位のレベルまで到達している。今後はさらに低バックグラウンド化および大型化を進め、DAMA/LIBRA を超える感度を目指す。ANKOK 実験は特に低質量領域での暗黒物質探索を目的として、アルゴン気体・液体 2 相型の検出器の製作を進めている。数年以内には完成した検出器を用いて、地下施設での観測を計画しており、アルゴンによる世界初の DAMA/LIBRA 検証結果が期待される。液体ヘリウムを用いた軽い暗黒物質探索の研究開発も進められている。

暗黒物質粒子の運動方向測定は、暗黒物質のより確実な証拠となるだけでなく、銀河内での暗黒物質の運動や散乱に関わる物理の解明にも繋がる重要な研究課題である。国内では、TPC 技術を使った NEWAGE やエマルジョンを使った NEWSdm

が精力的に測定器開発を進めており、方向に感度を持つシンチレーター結晶の開発も行われている。これら新たな技術の今後の進展が注目される。

これまでに述べた WIMP は数 10 GeV から数 TeV の質量を持つと想定しているが、そういった WIMP 以外の探索も並行して進められている。Axion はその代表候補であり、CARRACK 実験が 50-100 μeV を新たな目標として掲げている。他にも axion のような質量と結合の強さの間に関係を持たない axion-like particle や、hidden photon といった未知粒子をダークマター候補とした探索も、近年の技術を基にした進展が期待されている。また、WIMP 探索用大規模検出器においても、これまで重要視されてこなかった未知の電子散乱現象の高感度探索の推進が必要である。例えば XMASS の電子散乱事象のバックグラウンドの低さとその理解を活かして、Super-WIMP といったより広い種類の暗黒物質候補を探索してきた経緯がある。10 GeV よりも軽い WIMP が電子等を散乱する可能性も広く検討されている。このように今後建設される大規模検出器でも、バックグラウンドの主要成分であるラドンを低く抑え、よく理解することで、これまでより広い種類の暗黒物質探索を推進することが期待されている。

$0\nu\beta\beta$ 探索

現在のところ、ニュートリノのマヨラナ性を検証する唯一現実的な手法は、 $0\nu\beta\beta$ の探索である。 $0\nu\beta\beta$ の発見は、物理的背景にかかわらずニュートリノのマヨラナ性とレプトン数の破れの証拠となる。またその頻度はニュートリノのマヨラナ有効質量の 2 乗に比例することから、ニュートリノ絶対質量の決定も可能である。

ニュートリノ絶対質量の測定では β 崩壊を用いたプロジェクトが 200 meV 程度の感度を予定しており、宇宙論的な測定は 50 meV あるいは将来的には 20 meV 程度の感度達成が期待される。ニュートリノ振動研究から許されるマヨラナ有効質量は、縮退構造が 50 meV 以上、逆階層構造が 20~50 meV 程度、順階層構造が 20 meV 以下であり、各構造の検証がそれぞれマイルストーンとなる。近年の KamLAND-Zen の飛躍的な感度向上により、質量の下限値は 60-170 meV まで更新され、縮退構造はほぼ否定されている（この幅は核行列要素の理論的不定性からくるものであり、今後の研究による改善が期待される）。 ^{76}Ge を使った探索で 320 meV 程度の有効質量に信号を発見したと主張する実験結果（KKDC クレーム）があるが、すでに KamLAND-Zen (^{136}Xe) および GERDA (^{76}Ge) などにより、否定する結果が示されている。

KamLAND-Zen により縮退構造がほぼ否定されたことを受け、現在進行中のプロジェクトは、逆階層を検証できる 20 meV 程度を目標として測定器の改良を進めている。前述のニュートリノ振動の研究により、逆階層と決定された場合、 $0\nu\beta\beta$ がこの領域に発見されない場合は、ニュートリノがマヨラナ粒子ではないと解釈できるため、比較的早い段階でニュートリノのマヨラナ性について結論が得られる可能性がある。同様に、現状では $0\nu\beta\beta$ 探索が先行しているが、 β 崩壊や宇宙論的観測で有限質量が観測された場合でも、 $0\nu\beta\beta$ との比較により飛躍的な発展が期待できる。一方、

順階層で予言される 20 meV 以下の領域では、 $2\nu\beta\beta$ との識別が必須であり、検出器の規模だけでなく、性能面でも大幅な改善が必要になる。

逆階層領域をカバーするには有効質量 1 トン程度までの大型化と低放射能環境の実現が中心課題となる。さらに、この質量領域では $2\nu\beta\beta$ が主要なバックグラウンドとなるため、十分なエネルギー分解能も要求される。KamLAND-Zen では大型化と環境放射線バックグラウンドの低減を実現した上で、高感度光電子増倍管への交換、集光ミラーの使用、シンチレータの改良などによりエネルギー分解能を改善し、逆階層領域の探索を目指している (KamLAND2-Zen)。

一方、核行列要素の不定性や、未知のバックグラウンド排除の難しさ、背景物理特定の必要性から、異なる原子核・異なる手法での検証も重要である。国内においても、異なる検出原理・崩壊核種を用いた複数のプロジェクトが進行しており、中でも ^{48}Ca を測定対象とする CANDLES 実験では高い Q 値から環境放射線によるバックグラウンドに対して高い耐性を有する。 ^{48}Ca を用いる場合、0.2 % という自然存在比の少なさから同位体濃縮が必須であるが、近年の研究により、濃縮手法の原理が検証されている。今後は、濃縮条件の最適化・大量生産方法の確立が技術的課題である。さらに感度を向上させるには検出器の分解能の向上が必要であり、低温技術を用いた研究開発が開始されている。

角分布測定や多核種での検証に有効な飛跡検出器の開発も並行して行われているが、逆階層および順階層領域を探索する場合、検出器の大型化が必須であり、現時点では大質量カロリメータ型検出器に比べて十分な測定感度がでない。飛跡を利用した探索には、今後の大型化・高性能化の技術革新が必要である。

10 年以上先の予見は困難であるが、順階層領域の探索を目指して 100 トン以上の測定器の開発・建設を考えた場合、将来プロジェクトの大規模化は避けられず、その実現に向けた早期の構想が必要である。ハイパーカミオカンデが実現した場合には、例えばスーパーカミオカンデを暗黒物質や $0\nu\beta\beta$ 探索へ有効活用することも考えられる。一例として、スーパーカミオカンデと液体シンチレータを組み合わせた KamLAND-Zen の将来計画は、順階層構造に切り込む感度を目指す提案である。

5.2 宇宙観測

はじめに

素粒子物理学にとって、宇宙観測の重要性が近年ますます高まっている。加速器実験との調和を図りつつ、また、近隣分野との連携を取りながら、宇宙を実験室として使うプロジェクトを今後ますます活発に推進することが期待されている。特に、宇宙観測が主たる手段となるテーマとして、インフレーションと暗黒エネルギーの探求は重要であり、CMB 偏光の観測とすばる望遠鏡による研究が進められている。これらの観測は、どちらもニュートリノ質量和やニュートリノ世代数に対しても高い感度を持っており、各々の観測が 100 meV 以下の誤差でニュートリノ質量和を決

定できると期待されている。これは逆階層構造の下限まで探索出来ることを意味するため、大きな意義がある。また、ニュートリノの世代数を数%の精度で測定することにより、宇宙初期に生成された熱いアキシオンといった軽い相対論的粒子の存在量を測定できると期待される。

宇宙マイクロ波背景放射（CMB）によるインフレーション検証

CMB 偏光の B モード観測は、インフレーション理論の直接的証拠になるとともに、インフレーションのエネルギースケールについての情報を与える。加速器では直接到達できない超高エネルギー物理を開拓できる可能性があるため、その探索は重要である。B モードの強度は、インフレーション時の時空の量子的ゆらぎで生じた原始重力波の強度を表すテンソル・スカラー比 (r) に比例する。 r の値は、インフレーションを引き起こしたと考えられるインフラトンが動く距離 ($\Delta\phi$) と直接関係する。もし $r > 0.002$ であると、 $\Delta\phi$ がプランク質量より大きくなり、場の理論では第一原理からインフラトンのポテンシャルを計算できなくなる²。その場合、プランク質量より高いエネルギースケールを記述する物理フレームワーク（量子重力や弦理論）が必要であるため、物理根本法則を探求する方向を決める大変重要な観測結果となる。

日本の地上 CMB 偏光観測グループは、国際協力実験 POLARBEAR に中核として参加している。POLARBEAR 実験は 2012 年にチリ・アタカマに望遠鏡を設置し、観測を開始した。POLARBEAR と競合するプロジェクトとしては、チリ・アタカマの ACTpol、南極点で行われている BICEP2/KECK や SPTpol がある。これらの地上実験は、限られた一部の空の領域においては Planck を上回る偏光感度を持ち、重力レンズと前景放射（ダスト）による B モード偏光を検出できるようになった。一方、原始重力波起源の B モード偏光はまだ観測されていない。 r の上限が Planck/BICEP2/KECK から $r < 0.07$ (95% C.L.) と得られている。 r の真の値がこの上限に近ければ、今後 5 年程度の間には原始重力波起源の B モード偏光の発見が期待できる。

現在観測中の POLARBEAR と比べて約 6 倍の感度で原始重力波の発見を目指す、POLARBEAR-2 を KEK が中心となって推進し、2017 年度のファーストライトを予定している。2018 年度までにはさらに 2 台の POLARBEAR-2 を建設することで、計 3 台の望遠鏡により、POLARBEAR の約 20 倍の感度を実現する Simons Array 計画が進行している。Simons Array による 3 年間の観測と、Planck や C-BASS の結果を利用して前景放射を分離することにより、 r の誤差 $\sigma(r = 0.1) = 6 \times 10^{-3}$ 、DESI (銀河の 3 次元地図の作成を目的とし 2019 年から開始予定の観測実験) によるバリオン音響振動の結果と組み合わせてニュートリノの質量和の誤差 $\sigma(\sum m_\nu) = 40 \text{ meV}$ が得られると期待される。一方で、日本独自の技術開発も進んでいる。近く観測開始を予定する GroundBIRD 実験は、大角度スケールを測定するための高速回転スキャン方式や日本で開発した超伝導検出器 MKIDs など、独自技術の実証を行う。また、Simons Array

²厳密には単一場インフレーションのときに言える。

グループと ACTpol グループが協力することにより Simons Observatory 計画が誕生した。この計画は既に米国で予算化され、望遠鏡のデザインが始まった。日本の研究者もその一翼を担う。さらに先の計画として、2020 年代半ばに観測開始を目指す CMB Stage-4 が米国 DOE のもとで検討されており、 $\sigma(r) = 0.001$ 、 $\sigma(\sum m_\nu) = 20 \text{ meV}$ の精度が期待されている。日本の研究者も参加の方向で検討中である。

大角度スケールにおいて更に感度を上げるために、国内では 2020 年代半ばの打ち上げを目指した科学衛星計画 LiteBIRD が検討されている。全天を大気の影響を受けることなく観測し、 $\sigma(r) < 0.001$ を達成し、主なインフレーションモデルをより詳細に検証する。地上観測等で先に発見があった場合でも、LiteBIRD による大角度・高精度の B モード偏光の観測は、宇宙論モデルを絞り込む上で重要と考えられる。また、E モード偏光を究極の感度で測定することにより、CMB の光学的厚みを精密測定し、DESI の結果と組み合わせて $\sigma(\sum m_\nu) = 15 \text{ meV}$ が得られると期待される。

LiteBIRD 計画は、これまで日本と米国の国際協力を中心に進展している。日本グループは 2015 年に JAXA の戦略的中型科学衛星計画に応募し、候補として選択された。2016 年 9 月には、JAXA 宇宙科学研の概念設計 (Phase-A1) が始まった。LiteBIRD は現時点 (2017 年 3 月) では、世界で唯一の概念設計段階に進んでいる CMB 偏光 B モード観測衛星計画である。また、アメリカグループについては NASA から LiteBIRD のための技術開発の予算が認められている。主体性と国際協力のバランスをうまく取りつつ推進していくことが期待される。なお、LiteBIRD 計画は日本学術会議マスタープラン 2014 及びマスタープラン 2017 の重点大型計画に採択されており、かつ文部科学省ロードマップ 2014 の 10 計画の一つに、及びロードマップ 2017 の 7 計画の一つに採択されている。

暗黒エネルギーの探求³

インフレーションとは別の加速膨張の存在が超新星のデータから示唆されたことは、20 世紀終わりの驚くべき発見であった。この加速膨張の背後にある物理モデルは分かっておらず、加速の担い手を暗黒エネルギーと呼んでいる。暗黒エネルギーの本質を理解するためには、宇宙観測データから宇宙膨張が時間と共にどのように変化してきたかを調べ、暗黒エネルギーの状態方程式を制限することが重要である。このためには、主に 2 つの手法があり、宇宙膨張を直接測定する手法、また宇宙膨張と重力の引力の競合で起こる宇宙の構造形成の進化史を調べる手法がある。前者については、Ia 型超新星、バリオン音響振動の手法、後者については、銀河のクラスタリング統計、弱重力レンズ効果に基づく手法が検討されている。

日本の暗黒エネルギー探究の次世代プロジェクトは、すばる望遠鏡をアップグレードして、広天域にわたり深宇宙のイメージングと分光を同時に行う SuMIRe プロジェクトである。イメージングデータから弱重力レンズ効果の測定を行う Hyper Suprime-Cam (HSC) プロジェクトは 2014 年に始動した。画素数約 9 億の CCD か

³宇宙観測 – 暗黒エネルギーの探求：Kavli IPMU 高田昌広氏からの寄与。

らなる焦点面で広視野観測を実現し、約 1400 平方度の天域にわたり数十億個の銀河をとらえ、重力レンズ効果の解析から暗黒物質の分布の時間進化を明らかにし、暗黒エネルギーの影響を調べる。もう一つの観測装置は 2019 年頃に搭載予定の Prime Focus Spectrograph (PFS) と呼ばれる新しい分光装置である。2020 年より科学観測を開始し、HSC 天域の 400 万個以上の銀河の赤方偏移を測定し、銀河の 3 次元分布を明らかにする予定である。HSC で暗黒物質の分布、PFS で詳細な 3 次元銀河分布を明らかにするので、銀河バイアスの不定性を観測的に除去できるなど、暗黒エネルギーの性質の探査について大きな相乗効果が期待できる。また、ニュートリノ質量の測定、非ガウス性の測定によるインフレーション理論の検証、宇宙論距離での一般相対論の検証、暗黒物質の性質の検証などが可能となる。暗黒物質の正体の研究についても、宇宙初期に生成され、宇宙空間を占める原始ブラックホールが暗黒物質として振る舞うシナリオを検証できる。HSC でアンドロメダ銀河の星を時間領域で高密度にモニター観測し、原始ブラックホールによるマイクロ重力レンズ効果を探索することにより、TeV スケール以上の初期宇宙で生成され得る $10^{-10} M_{\odot}$ 質量程度の原始ブラックホールの存在個数に厳しい制限を与えることができる。さらに、CMB の小角度スケールの観測と銀河サーベイのバリオン振動実験を組み合わせることにより、宇宙初期に熱的に生成された軽い、相対論粒子の存在量をニュートリノの世代数の単位で数%の精度で観測することにより、インフレーション直後の再加熱後に凍結される熱いアキシオンの存在の有無を決定できる。

このような広天域宇宙サーベイは世界中で進行中、計画中である。2021 年頃には欧州宇宙機関の Euclid 衛星の打ち上げが予定されており、約 6 年間の広天域イメージング、分光サーベイを行う。また、ほぼ同時期に米国がリードする究極的な可視光サーベイ専用地上望遠鏡の LSST が始動し、約 10 年間の広天域イメージングサーベイを行う。さらに、2025 年頃には米国宇宙航空局 (NASA) が高感度、広視野を有する WFIRST-AFTA 衛星を打ち上げ、広天域イメージング、分光サーベイを行う予定である。このように 2020 年代から 2030 年はじめに向けて、広天域宇宙サーベイの宇宙論による基礎物理の研究が進展することは間違いない。SuMIRe プロジェクトは他の観測計画に先駆けて結果を得ることを目指しており、高い国際競争力を持つ。

6 人材育成，技術開発について

高エネルギー物理学実験では、幾つもの最先端技術を結集させて世界最高の結果を目指す。最先端技術の宝庫である高エネルギー物理学実験は、技術開発という観点からも若手にとって魅力的な分野であると考えられる。そのような魅力を伝えて若手研究者を育成することで技術開発は継続され、更にその技術に支えられて研究分野は発展していく。しかし、人材育成と技術開発に関して幾つかの問題点が顕在化してきている。

- 実験スパンの長さ：近年の高エネルギー物理実験は、いかなる分野においてもプロジェクトの大型化が顕著である。そのため、たとえ才能ある学生や若手研究者でも、実験計画の立案、測定器 R&D と建設、実験の立ち上げ、データ収集と物理解析という一連の流れ全てを経験することが難しくなっている。技術に触れる機会のない若手研究者が増えれば、技術の継承が途絶えてしまう。
- 技術の専門化と細分化：高エネルギー物理実験には、加速器技術・測定器技術・アナログ/デジタル回路・ソフトウェア・大規模分散データ処理・超伝導・機械工作等、柱とすべき基幹技術が多くある。一方で、最先端技術は近年ますます専門化され、細分化されている。高度に細分化された現在の高エネルギー物理実験では、幅広く経験を積む機会が少なくなっている。個人が幅広い知識を吸収する機会を失っているだけでなく、人事交流の硬直化という弊害が生じている。
- リソースの不足：経済的状況と昨今の短期成果主義の蔓延により、基礎研究に対する資金削減が著しい。大学における回路室の消滅や大学と研究所双方での技術職員の削減などが顕著な例である。さらに団塊世代の高齢化・退職もあって、学生に対する一般的な技術継承の断絶、研究所での高度な技術開発のための環境の悪化を引き起こしている。

上記の問題の解決には様々なレベルでの人材交流が重要である。これまでもプロジェクト間や研究所・大学間の人材交流などが行われてきたが、今後も人材交流をより活発化させる必要があり、またこれはプロジェクトを効率的に成功に導くために有効なアプローチでもある。研究キャリアの初期において中小規模の実験を経験させたり、最先端技術に興味を持ってチャレンジする若手の積極的な雇用も有効であろう。大規模将来計画を今後実現していくためにも、最先端技術の継続的な開発とその担い手である人材育成に関して、分野全体で根気よく対策を検討し実施していかなくてはならない。