

# 高エネルギー物理学将来計画検討小委員会

## 答申

2012年2月11日

### 委員

浅井祥仁（東京大学）、飯嶋徹（名古屋大学）、石井恒次（KEK）、  
井上邦雄（東北大学）、後田裕（KEK）、大西幸喜（KEK）、栗木雅夫（広島大学）、  
小林隆（KEK）、田窪洋介（KEK）、中家剛（京都大学）、野尻美保子（KEK）、  
野村正（KEK、幹事）、羽澄昌史（KEK）、花垣和則（大阪大学、幹事）、  
久野純治（名古屋大学）、村山斉（東京大学／UC Berkeley）、  
森俊則（東京大学、委員長）、諸井健夫（東京大学）、山下了（東京大学）

## 序文

本小委員会の任務は、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将来計画について答申することである。大規模将来計画を実現するためには、長期間に亘る膨大な準備が必要とされる。一方で、LHCやニュートリノ実験などにおいて今後数年間に極めて重要な発見があるだろうという大きな期待が現在高まっている。欧州および米国は、それぞれLHCのアップグレードと大強度ハドロン加速器をベースとした将来戦略を描いている。こうした状況で、今後新たな発見・知見があった場合には、日本が世界をリードして、将来の高エネルギー物理学研究の方向性を物理の観点から正しく迅速に再検討して指し示すべきである。そして機動的にILCなどの大規模将来計画を策定し、提案・牽引していくことが求められている。

一方、現在建設中のSuperKEKBや、J-PARCなどでの中小規模実験において、如何に継続的・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。大規模将来計画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。

# 目次

答申	4
1 素粒子物理学の現状と展望	6
1.1 素粒子物理学の現状	6
1.2 素粒子物理学の展望	8
2 エネルギーフロンティア	11
2.1 概要	11
2.2 国際リニアコライダー	11
2.3 LHCアップグレード	14
2.4 その他の計画	15
3 ニュートリノ振動	17
3.1 ニュートリノ振動と陽子崩壊	17
3.2 現状	17
3.3 将来計画	17
4 フレーバー物理	23
4.1 Super B-factory	23
4.2 ミューオン	24
4.3 Kaon 実験	25
4.4 中性子	25
5 非加速器素粒子実験	26
5.1 地下素粒子実験	26
5.2 宇宙観測	28
6 人材育成、技術開発について	30

## 答申

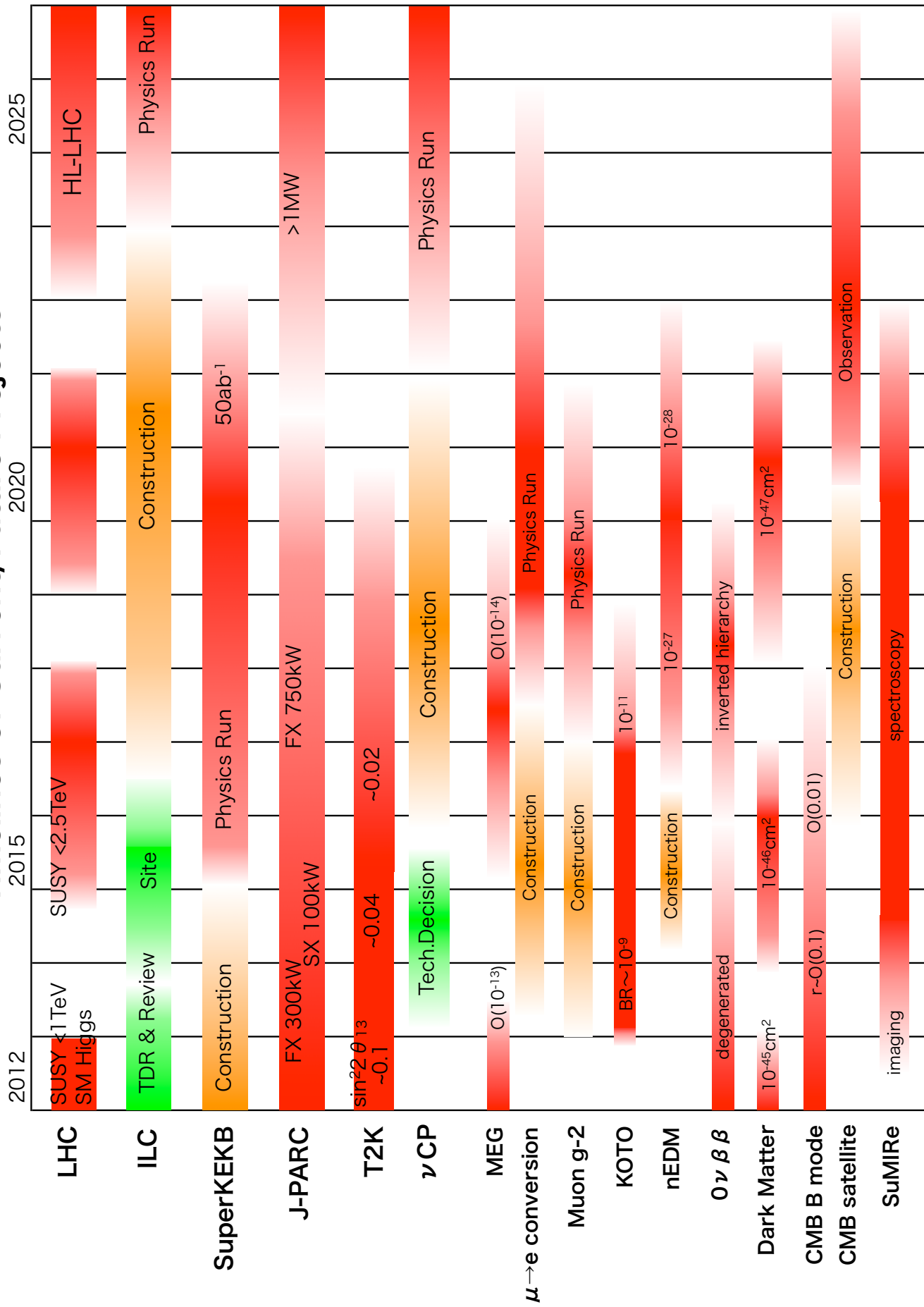
本小委員会は日本の高エネルギー物理学の基幹となる大規模将来計画に関して、以下の提言をする。

- 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、日本が主導して電子・陽電子リニアコライダーの早期実現を目指す。特に新粒子が軽い場合、低い衝突エネルギーでの実験を早急に実現すべきである。一方でLHCおよびそのアップグレードによって間断なく新物理の探究を続けていく。新粒子・新現象のエネルギースケールがより高い場合には、必要とされる衝突エネルギーを実現するための加速器開発研究を重点強化する。
- 大きなニュートリノ混合角  $\theta_{13}$  が確認された場合、ニュートリノ振動を通じたCP対称性の研究に向けて、必要とされる加速器の増強と共に、国際協力で大型ニュートリノ測定器の実現を目指す。大型ニュートリノ測定器は、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ようにすべきである。

これら基幹となる大規模計画については、高エネルギー委員を核とする将来計画委員会が、今後LHC等によって得られる新たな知見に応じて素早く機動的に対応していくことを期待する。

現在建設中のSuperKEKBについては、測定器も含め、予定通り完成させて遂行することが肝要である。また、現在計画中の中小規模計画の幾つかは、将来ニュートリノ物理のように重要な研究分野に発展するポテンシャルを持っており、並行して推進することにより多角的に新しい物理を探求していくことが必要である。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 $\beta$ 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。

# Timelines of Current/Future Projects



# 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間の相互作用の基本原則を解明し、その法則を明らかにすることを目的として発展してきた。そして現在、 $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ ゲージ対称性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100GeV）以下の実験現象を正しく記述する理論として大きな成功を取めている。

電弱エネルギースケールを記述する素粒子模型を確立する上での最大の課題は、電弱ゲージ対称性の破れの機構の理解にある。理論の整合性から、電弱ゲージ対称性の破れは自発的に起こる必要がある。特に、素粒子標準模型をはじめとする多くの模型においては、電弱ゲージ対称性はヒッグス場の凝縮により自発的に破れ、ヒッグス粒子と呼ばれるスカラー粒子が物理的スペクトルに現れる。この粒子はLHC実験をはじめとする高エネルギー加速器実験の最も重要なターゲットであるが、現在のところまだ発見されていない。このため、標準模型構築において根幹となる電弱ゲージ対称性の自発的破れの機構については未知の部分が多く残されており、その詳細の理解は現在の素粒子物理学に課せられた第一の課題となっている。電弱ゲージ対称性の破れの物理を理解するためには、ヒッグス粒子が存在するかどうかを明らかにするとともに、もしも存在した場合にはその性質を詳しく調べることが必要である。

さらに、電弱対称性の破れの起源を理解する上で、電弱エネルギースケールの輻射補正に対する安定性は、重要な指針を与えると考えられている。標準模型においてスカラー場の質量補正がコントロールできないため、ヒッグス粒子は一見素粒子現象を正しく記述している標準模型の矛盾を担っている粒子であるとも言える。（階層性問題と呼ばれる。）このことから、電弱エネルギースケールにおいて階層性問題を解決する（素粒子標準模型を超えた）新たな素粒子模型が現れることが示唆される。理論的には、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いるが、そこに現れる新粒子の発見もまた、高エネルギー加速器実験の重要な課題である。また、それら新粒子はフレーバー物理や宇宙物理に対しても重要な影響を与え得るため、高エネルギー加速器実験以外においても新粒子の影響を検証していく必要がある。

LHC実験では標準模型のヒッグス粒子の発見は確実視されている。2011年にはLEP等での精密電弱測定と整合する軽いヒッグス粒子の可能性が指摘されて、2012年の実験に大きな期待が寄せられている。また、カラーを持つ新粒子は超対称模型や余剰次元模型をはじめとする多くの素粒子模型において予言されているが、それらの粒子はLHCで大量に生成可能である。LHC実験によって現在既に1TeV以下のスクォークやグルイーノについては厳しい制限がついており、さらに今後5年ほどで素粒子標準模型を超えた新たな素粒子模型に含まれる新粒子の直接探索は飛躍的に進むと期待される。ヒッグス粒子にまつわる階層性問題を解決するためには、トップセクターやゲージセクターの相互作用を拡張する必要があり、必然的にこれらのセクターに新粒子が予言される。LHC実験はこれらの粒子の探索で素粒子物理を牽引する存在であり、素粒子物理の将来計画を考える上でLHC実験で期待される成果を織り込んだ計画を立てることが必須であることは論を待たない。

一方日本を中心に推進されているクォークやニュートリノのフレーバーCP構造の研究は、宇宙に存在する物質の起源、クォーク間の質量混合の起源というLHC実験ではアクセスできないフロンティアを牽引してきた。

クォークや荷電レプトンの質量についても、ヒッグス場との湯川相互作用を起源とすることが強く示唆されている。このことは特に、Bファクトリー実験による小林-益川機構の高精度の検証をはじめ、レプトンフレーバー非保存過程の探索、電子や中性子などの電気双極子能率測定などから極めて強くサポートされている。電弱エネルギースケールに新物理があるのであれば、そこには新しい世代構造や新しいCP対称性の破れの存在が期待される一方、それらは現在までの実験において有意に見えていない。このことは新物理がフレーバーおよびCP対称性の破れを抑制する非自明な構造をもつことを意味しており、今後より高い精度での探索が求められる。ミュオンの異常磁気能率の精密測定により標準模型を超える物理の兆候が報告されて以降、現在も精度を高める努力がなされている。

一方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。現在、T2K実験などによりニュートリノ混合角 $\theta_{13}$ の測定が進められているが、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。

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、WMAP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、暗黒エネルギーが約73%、暗黒物質が23%であり、バリオンの占める割合は、高々4~5%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

LHC実験やそのアップグレード実験は、ヒッグス粒子や超対称粒子などの新粒子の直接探索を通してエネルギーフロンティアを開拓し、今後素粒子物理を牽引していくと考えられる。直接探索によって、ヒッグス粒子や、新粒子の質量スケールを決定することは、様々な素粒子実験の将来計画を策定する上で特に重要である。

電弱ゲージ対称性の破れの機構を解明し、ゲージ粒子やクォーク、レプトンがいかにして質量を獲得したかを理解するためには、ヒッグス粒子の質量に加え、ヒッグス粒子の持つ量子数や相互作用を明らかにする必要がある。現在軽いヒッグス粒子の兆候と思われる事象が125GeV近辺にあるが、この質量領域ではヒッグス粒子は多彩な崩壊過程を持っている。さらにそのうちの幾つかの過程はループ補正を通じて標準模型以外の粒子に対しても感度がある。ヒッグス粒子の崩壊分岐比などの測定で標準模型の予言からのずれが見つければ、標準模型を超える理論を探す際の加速器の重心エネルギーを決める重要な指針となる。軽いヒッグス粒子はILCの到達感度内にあり、LHC実験に比べてより詳細な研究が可能である。

今後LHCのエネルギーおよびルミノシティが上がることで、超対称粒子などの新粒子が発見される可能性が高まる。新粒子が発見された際には、その粒子が持つ相互作用や量子数を測定する必要がある。それにより超対称性などの新たな対称性の存在が明らかになれば、まだ見つかっていない新粒子の存在を予言できるとともに、階層性問題の背景にある電弱エネルギースケールを記述する素粒子模型の詳細を明らかにできる。新粒子の質量がILCなどのレプトンコライダーで到達可能な範囲にあれば、それらの粒子の性質を低バックグラウンド環境で詳細に調べることが可能となる。カラーを持った新粒子の発見に対してLHC実験は高い能力を発揮することが期待される一方で、カラーを持たない粒子の発見に対する能力は限定的である。さらに、LHC実験でカラーを持った新粒子が発見された場合、その新粒子の研究はLHC実験によってまずはなされることとなるが、新粒子の性質を詳細に理解するにはその崩壊で生成されるカラーを持たない新粒子の理解が不可欠であると予想される。よって、新粒子が発見された際、その背後にある新物理の解明にはLHCとともにレプトンコライダーによる研究が必須であると考えられる。

ハドロンやレプトンのフレーバー転換過程や電気双極子能率の精密測定は、標準模型の歴史において、理論の構築のフェーズからその確立に至るまで重要な役割を果たした。電弱エネルギースケールにあると期待されている標準模型を超える新物理においても同様の働きをすると期待する。

重いクォークは電弱対称性の破れにより強く結合していることから、新物理に対してより感度があるかもしれない。一方、クォークのフレーバー混合は小林・益川行列によってよく記述できていることから、B中間子のフレーバー転換過程に対する新物理の寄与は10~20%以下であると考えられる。このため、B中間子の様々な崩壊モードについて、今後さらに精度の良い実験を行い、フレーバー転換過程やそこに現れるCP対称性の破れの詳細を理解する必要がある。LHCb実験とSuperKEKB実験等は異なる崩壊モードに対して高い感度を持っており、相補的な役割を果たすと期待される。フレーバー物理を通じた新



物理の間接的な探索はLHC等における直接的な新物理探索とは独立に重要であると共に、LHC実験において新物理が発見された際には、フレーバー物理に関する情報とLHCの結果とを合わせることで電弱エネルギースケールを超える理論に対して知見が得られるであろう。

レプトンフレーバー対称性やCP対称性は自然の持つ厳密な対称性ではないことが分かっているが、標準模型や軽いニュートリノ質量が予言する荷電レプトンフレーバー非保存過程の分岐比やレプトンやハドロンの電気双極子能率は非常に小さい。一方、電弱エネルギースケールの新物理においてそれらの対称性の破れが小さいと考える理由はなく、よって荷電レプトンフレーバー非保存過程や電気双極子能率は電弱エネルギースケールの物理に対して高い感度を持つ。したがって、J-PARCでのフレーバー物理実験やMEG実験等においてフレーバー対称性やCP対称性の破れを探索することにより、新しい物理の兆候を発見できる可能性がある。さらに高いスケールの物理（例えば大統一理論）によって破れている可能性があるバリオン数やレプトン数については、陽子崩壊事象を探索することにより重要な情報が得られるであろう。

また、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。T2K実験などにより $\theta_{13}$ が求められその値があまり小さくないことが明らかになれば、ニュートリノセクターでもCP対称性の破れを発見できる可能性が高まる。これまで発見されたCP対称性の破れは小林・益川行列にある位相が唯一であった。もしニュートリノ振動においてCP対称性の破れが見つかれば、それはクォークセクター以外で初めての観測である。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 $\beta$ 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強いサポートとなると考えられる。また、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。

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。このため、XENON実験やXMASS実験といった直接検出実験で、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であれば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。

さらに、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様々な発展が期待されている。第一には、Planck衛星による宇宙背景放射揺らぎの観測である。特に偏光のBモード揺らぎに関し、テンソル-スカラー比が0.1程度以上であれば発見できるとされている。宇宙背景放射の偏光のBモード揺らぎはインフレーション以外で作られたと考えることは困難であり、その発見は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。さらに、Bモードの振幅は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てくれる。テンソル-スカラー比が0.01程度以上であれば、POLARBEARなど、Planck衛星に続く様々な観測によって偏光のBモード揺らぎが観測されると期待されている。

## 2 エネルギーフロンティア

### 2.1 概要

エネルギーフロンティアにおける研究の目的は、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。標準模型の基盤となるゲージセクターについては、LEP/SLCによる精密測定によって確立されている。残りのヒッグスセクターと湯川セクターは未知の領域であり、ヒッグス粒子の発見とその性質の徹底的な研究によって、ゲージ相互作用とは異なる新しい相互作用の研究を行い、さらに標準模型を超える新物理を探求していくことが期待される。また最高エネルギーにおいては、新粒子・新現象を直接生成することによって新物理の探索を行っていくことになる。

LHCに代表されるハドロンコライダーでは、より高いエネルギーでの反応を観測するために、ビームエネルギーを高くする方法と、高いエネルギーを持った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方法がある。ハドロンコライダーでは、ビームを構成する陽子や反陽子は複合粒子であるため、そのエネルギーの一部だけが反応に使われ、残りは破碎されてバックグラウンドとなる。ヒッグス粒子は、その崩壊で放出される光子やレプトンから質量を再構成することによって発見が可能である。超対称粒子など横方向運動量欠損を伴う新粒子については、強い相互作用で大量に生成される新粒子を、広いエネルギー領域にわたって探索することができる。

一方レプトンコライダーでより高いエネルギー領域に到達するためには、電子・陽電子の放射光放出による加速効率の悪化のないリニアコライダーか、重いレプトンであるミュオンを用いたミュオンコライダーが候補となる。レプトンコライダーではすべてのエネルギーが反応に用いられるため、終状態も正確に測定できる。さらにビームのエネルギーと偏極を変えることで中間状態・終状態の相互作用を分離して、反応の対称性や新粒子の質量と量子数を決定できる。電弱相互作用と強い相互作用のいずれで生成される新粒子も探索が可能で、発見後はバックグラウンドの少ない環境でその性質を詳細に研究することができる。

### 2.2 国際リニアコライダー

LHCでの発見が期待されているヒッグス粒子の徹底的な研究のために最適な装置と考えられているのが、国際リニアコライダー (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。初期は短い加速器で必要最小限のエネルギーからスタートし、ターゲットとなる物理に応じて順次延伸してエネルギーを上げていくことができる。ILCでは衝突エネルギーを第一段階では200GeV~500GeV (直線で約30km) の領域に設定しており、将来は1TeVに拡張する可能性も視野に入れている。

第一の課題であるヒッグス粒子の主な研究項目は、(1) 質量、(2) スピンとパリティ、(3) ゲージ粒子との結合、(4) 崩壊分岐比、(5) 崩壊幅、(6) トップクォーク

との湯川結合、(7) 自己結合、である。ILCでの主なヒッグス粒子生成過程はZ粒子を伴う過程であり、質量が120GeV程度の場合、上記の(1)～(5)の研究には、生成断面積が最大となる重心系エネルギー250GeV付近で実験を行うのが最適である。(6)と(7)はトップクォークや複数のヒッグス生成を伴う過程であるため、500GeV程度の重心系エネルギーが必要となる。10<sup>5</sup>個を超えるヒッグス粒子をS/N比のよい環境で生成観測できるため、質量は数十MeV、ゲージ結合は1%以内で決定できる。また分岐比の測定から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も数%程度で決定できる。ヒッグス粒子が暗黒物質粒子など測定にかからない粒子に崩壊しても、Z粒子の反跳を解析することにより模型に依存しない測定が可能である。質量を数十MeVで決定できると、標準模型により他の観測量を1%以下の精度で予言できるので、測定値との比較により標準模型のヒッグスセクター・湯川セクターの検証が高精度で可能となる。もしひとつでも標準模型の予言値と異なれば、標準模型を超える新物理の発見となる。

また、LHCで直接的な発見ができない暗黒物質粒子などの新粒子を直接生成して発見できる可能性がある。もし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発見は確実である。質量ピークを作らない超対称粒子などの場合、軽い暗黒物質粒子などカラーを持たない新粒子については、LHCで観測することは絶望的である。レプトンコライダーでは、カラーをも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、精密な理論計算との比較により、10TeVを超えるZ'などの新物理にも十分な探索感度を持っている。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。

#### 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われてきた。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)が結成されて、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が進められている。これらの開発研究には千人以上の研究者と技術者、300を超える研究機関(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がドイツで建設中であり、米国でも大強度陽子加速器計画と兼ねた大規模な開発を進めている。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が進められている。また各国政府関係者の情報交換の場(FALC)も設置されて、実現に向けて様々な議論が行われている。

GDEは2007年に基本設計を終了し、その後は設計の最適化と実用化に向けた技術開発を進めており、LHCの初期物理成果も踏まえて、技術設計書（TDR）を2012年に完成する予定である。その後3年程度かけて建設サイトなどについて国際的合意に至ることができれば、2015年頃にILC加速器及び測定器の建設を開始、7年～10年の建設期間を経て、2025年頃からILCの運転・データ解析という年次計画となる。基本設計時における建設総額見積もりは、500GeVのILCに対して約67億USドル、運転経費は年間約2億USドルとされた。その後の技術開発の進展、設計の更なる改良と、LHCの結果を踏まえた衝突エネルギー最適化などにより、コストの低減が期待されている。

### 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られている。LEPで発案・実装されたハドロジェットの新構成法（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ILD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ると期待される。

### 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ていたが、既にほぼ達成したといえる。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がすすめられている。

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2010年から2011年にかけて、欧州から2台、北米から2台、そして日本から4台の空洞をクライオモジュールに格納して運転試験をおこなった結果、平均加速勾配で26MV/mが達成された。また超伝導空洞内面用の特殊カメラを開発して空洞内部の微小な凹凸の観察を行い、空洞性能劣化の原因の一端を明らかにした。

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 $0.015\text{mm}\cdot\text{mrad}$ という値を実現している。現在の課題は、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）による $35\text{nm}$ のビーム径の実現と制御、そして計測技術の確立である。

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%という高い偏極度が実現されている。1msという長大パルス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が行われている。また、代替方式として国内から電子ビームを用いる陽電子生成が提案されている。

## 2.3 LHCアップグレード

現在、CERNで行われているLHCには、電弱エネルギースケールでの物理現象を研究する実験グループが2つ—ATLASとCMS—存在する。ヒッグス粒子や超対称粒子に代表される新現象の探索を主に推進している。日本では16の研究機関がATLAS実験に参画し、ビーム衝突地点のビーム収束用磁石、荷電粒子スペクトロメータ用のソレノイド磁石、シリコンストリップ飛跡検出器、ミュオントリガー用チェンバーの建設を主導的に行い、搬入から現在の運転にいたるまで、重要な役割を果たしてきた。また、GRIDコンピューティングのTier-2として、データプロセスに対しても大きく貢献している。

大きな衝突エネルギーを利用した電弱エネルギースケールでの新粒子・新現象探索は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広げることが、推進すべき最重要課題の一つである。積分ルミノシティを $O(100\text{fb}^{-1})$ から $O(1000\text{fb}^{-1})$ に増やすことにより、たとえば、超対称粒子探索においては、スクォーク質量にして $2.5\text{TeV}$ 程度から $3\text{TeV}$ を超える質量領域にまで感度を上げることができる。余剰次元模型なら探索エネルギースケールを $9\text{TeV}$ を $12\text{TeV}$ 程度にまで押し上げられる。一方、新粒子・新現象が発見された場合、ILCがデータ収集を開始するまではLHCによってその性質を可能な限り詳しく測定し、素粒子物理研究の方向性を探ることが重要である。

LHCの長期計画では、2022年頃までに重心系 $14\text{TeV}$ のエネルギーで積分ルミノシティ $300\text{fb}^{-1}$ 程度のデータを収集する見込みである。その後、大きくデータ収集量を増大するために、また、衝突点付近の加速器コンポーネントが放射線損傷によって寿命を迎えることもあり、ルミノシティ増強計画（HL-LHC）を進める。目標は、2030年前後までに $3000\text{fb}^{-1}$ の積分ルミノシティを達成することである。このためには、単にルミノシティを上げるとビームの寿命が短くなり過ぎて積分ルミノシティを増やせないため、最大ルミノシティよりやや下げた $5\times 10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ で長時間ビームを保持するルミノシティレベリングを行う。そのためにクラブ空洞を使うことが有力視されている。

HL-LHCのルミノシティ増強の鍵を握るのは、強力な収束電磁石の開発、陽子数を増やすための入射系のアップグレード、そしてクラブ交差の導入である。現在の衝突点収束電磁石はKEKとFermilabが共同開発したが、その磁石を含め、衝突点付近の磁石は完全に入れ換える。現在使われている線材では要求される磁場の強さ（13から15T）を達成でき

ず、日本、米国、欧州で新たな線材開発が行われている。衝突点付近のビーム光学設計はすでに始まっており、各国の役割分担に関する議論も始まっている。線材開発においては、広い分野への応用、たとえばLHCのエネルギーアップグレードをも見据えた基礎開発を行っていく。クラブ交差に関しては、日本のKEKBが世界で唯一の成功例であり、超伝導磁石と並んで日本の加速器技術の大きな貢献が期待されている分野である。

一方、検出器に関しては、ATLASでは内部飛跡検出器の総入れ替えが予定されている。より高い放射線耐性、そして、ルミノシティ増大によるチャンネルあたりのヒット占有率を下げるために、検出器の微細化が大きな開発テーマとなっている。レート耐性を上げるため、最内層をシリコンピクセル、その外側をシリコンストリップというように全ての飛跡検出器をシリコン検出器に変更する。センサーの有力なベンダーを国内に持つ日本は、現行ATLASのシリコンストリップ検出器製作時に果たしたと同様の大きな貢献が期待されており、これまでにない高い放射線耐性を持つセンサーの開発等をすでに開始している。内部飛跡検出器以外では、カロリメータとミュオン検出器の読み出し回路とトリガーシステムの改善、前方のシールドの再設計等が主な変更である。日本のグループも、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、ミュオン検出器の読み出し回路やトリガーシステムに関する開発を精力的に行っている。

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へもつながる。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）の構想をもっている。このエネルギーまで上げるには現在使われているNbTiの線材での磁石では不可能で、新しい超伝導材の磁石への総入れ替えが必要となる。2011年からR&Dのためのワークショップが開催され、2013年からは欧州EC-FP7のEuCARD2の研究の中でHTS磁石のプロトタイプ製作が計画されている。日本におけるNb<sub>3</sub>Alなどの線材と、それを加速器磁石に適用する為の基礎開発に、広い視野で取り組んでいくことが重要である。

## 2.4 その他の計画

ILCより更に高い衝突エネルギーを目指すレプトンコライダーとしては、CLIC計画およびミュオンコライダー計画がある。CLICは今後20年、ミュオン加速器は30年という長期のタイムスケールで考える必要がある。その先のレーザー・プラズマ加速器については、セルフ・インジェクションやアフターバーナーなどの方式について原理実証試験が検討されているが、システム全体として完成されたものはない。しかしながら、レーザー技術を含む要素開発の発展は目覚ましいものがあり、何らかのブレークスルーがあれば現実味を帯びることになる。

### CLIC

CLICは、ILCよりも高いマルチTeVのエネルギー領域を目標として開発が続けられている電子・陽電子リニアコライダーである。目標とする重心系エネルギーの最高値は3TeVであり、素粒子物理学による動機づけというよりは加速方式の技術的境界で決められている。CLICは、CERNを中心とする21ヶ国42の研究機関による国際協力プロジェクトである。CLICはILCの次世代リニアコライダーという位置づけであるが、LHCの物理結果次第

では、マルチTeVの必要性が高まる可能性がある。

一般的に、リニアコライダの主構成は、粒子源（電子銃および陽電子生成装置）、減衰リング、加速管、高周波源、衝突領域であり、CLICも同様である。但し、CLICの場合、高周波源は通常の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を減速するときに発生するマイクロ波で小電流ビームを高エネルギーまで加速する2ビーム加速と呼ばれる方式を採用する。2ビーム加速では、1GHzのクライストロンで101Aのビームを2.38GeVまで加速し、遅延ループと多段のコンバイナー・リングによって、加速ビームの構造に適したパルス圧縮が行われる。パルス圧縮されたビームはドライブ・リニアックを通過する際にマイクロ波を発生し240MeVまで減速する。これによって発生したマイクロ波は主リニアックへ移送され、入射器で生成および9GeVまで加速された1 Aの電子・陽電子を500GeVないし3TeVまで加速する。このとき使用する加速管の周波数は12GHz（Xバンド）である。CLIC方式の技術的に難しいところは、コンバイナー・リングを用いたパルス圧縮とドライブ・リニアックから主リニアックへのマイクロ波移送および80～100MV/mという高電場勾配の加速管である。

電力消費量は、重心系エネルギー500GeV（ルミノシティ $1.4 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ）で約240MW、3TeV（ルミノシティ $2 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ）で560MWを要する。2ビーム加速方式の場合、電力的にILCと比較して有利というわけではなく、現在の設計では同程度かそれ以上である。CLICの2ビーム加速方式では、Xバンド・クライストロンの開発という技術的難関を避けることができる一方、加速ビームに対するビーム・パワーの伝達効率を極めて高くできるかどうか電力消費量削減の鍵となる。

### ミューオンコライダ

ミューオンは電子と同様のレプトンであり、質量が重くシンクロトロン放射が抑制されるため、円形加速器によるミューオンコライダは原理的にTeV領域まで到達可能である。また電子に比べ、ヒッグス粒子の生成をs-channelでの共鳴状態として観測する可能性をもたらすなどメリットも多い。しかし2マイクロ秒と有限の寿命を有するミューオンを大量に生成し、加速し、電子・陽電子コライダと同等のルミノシティでの衝突実験を行うには多くの技術的課題を乗り越える必要がある。現在検討されている案では重心系エネルギーは4TeV（2TeV+2TeV）である。ミューオンは16GeV陽子ビームを標的にあてて、発生したパイオンの崩壊から得られる。Skrinsky-Parkhomchuk、Neufferによって提案されたイオン化冷却法によりそのエミッタンスを低減してルミノシティを確保する。得られた100MeV程度のミューオンと反ミューオンは電荷によって分離され、実験室系での寿命を延ばすために多段にわたる加速器により素早く2TeVまで加速される。素早い加速による実験室系寿命の増大、高エネルギーミューオンの崩壊により発生する放射線の遮蔽など課題は多いが、十分な強度のミューオンを生成、冷却する実用的な技術の確立がミューオンコライダ実現へ向けた現時点での第一の課題である。



## 3 ニュートリノ振動

### 3.1 ニュートリノ振動と陽子崩壊

ニュートリノ物理学の目標は、「ニュートリノ質量とその混合の起源」を解明することで、素粒子の標準模型を超えた超高エネルギーの物理（大統一理論など）へのヒントを得ることにある。次世代ニュートリノ実験では、ニュートリノ振動を精密に測定することでCP対称性の検証を含め高精度でニュートリノ混合行列を決定することを目標としている。ニュートリノ振動の研究においては、ニュートリノ混合角  $\theta_{13}$  の大きさがCPの破れの測定実験の可能性を決めるため、現時点では  $\theta_{13}$  の決定が重要な課題となっている。また、ニュートリノ実験の大型測定器で陽子崩壊を探索することで、大統一理論の検証が可能となる。次世代ニュートリノ測定器は、数多くの大統一理論の模型が予言する  $10^{35}$  年程度の寿命に感度を持つことが要求される。

### 3.2 現状

#### フレーバー混合

ニュートリノの性質の理解は、1998年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、この10年余りで飛躍的に進展し、今やニュートリノが有限な質量と世代間混合を持つことは確立したと言える。これまでの実験により、 $\Delta m_{23}^2 = \text{約 } 2.35 \times 10^{-3} \text{eV}^2$ 、 $\theta_{23} = \text{約 } 45$  度、 $\theta_{12} = \text{約 } 33$  度、 $\Delta m_{12}^2 = \text{約 } 7.6 \times 10^{-5} \text{eV}^2$  という値が得られている。混合角  $\theta_{13}$  は、1999年に原子炉ニュートリノ実験Choozにより上限値が与えられて以降大きな進展がなかったが、T2K実験が2011年6月に  $0.03 < \sin^2 2\theta_{13} < 0.28$  (90% C.L. @  $\delta = 0$ ) という有限な  $\theta_{13}$  の兆候 ( $2.5\sigma$ ) を捉え、その後MINOS、Double Chooz実験がこれを支持する結果を発表した。2~3年以内にT2K実験やDouble Chooz実験で更に  $\theta_{13}$  の測定が向上すると期待できる。

#### 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、 $p \rightarrow e^+ \pi^0 : 1.3 \times 10^{34}$  年、 $p \rightarrow \mu^+ \pi^0 : 1.1 \times 10^{34}$  年、 $p \rightarrow \nu K^+ : 4.0 \times 10^{33}$  年、といった下限値が得られている。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。

### 3.3 将来計画

現在進行中のT2K実験やDouble Chooz実験において、ここ1~3年で  $\theta_{13}$  が確定する可能性が高まっている。大きなニュートリノ混合角  $\theta_{13}$  が確認された場合、ニュートリノ振動を通じたCP対称性の研究に向けて、J-PARC加速器の増強と国際協力で大型ニュートリノ測定器の実現を目指すべきである。J-PARC加速器は今後5年程度で設計強度750kWを達成した後、さらに将来の増強可能性を検討していく。測定器に関しては、早急に次期長基線ニュートリノ振動実験の感度と物理ポテンシャルを評価した上で、予算及び建設期間を含めた実現可能性を詳細に検討して、実験計画のプライオリティを明確にすべきであ

る。また、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ようにすべきである。

## CP非保存測定

CP非保存探索に最も適したモードは $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$ 出現である。これは、消失現象にはCP非保存効果は現れないため出現現象である必要があることと、小さな $\theta_{13}$ のおかげでCP保存項が小さく、CP非保存効果が相対的に大きくなることからくる。実験の方法は大きくわけて次の二つがある。方法(1)は、ニュートリノと反ニュートリノで、 $\nu_e$ 出現確率の非対称性を測定し、CPを破る $\sin \delta$ に比例する項を検出する方法である。方法(2)は、 $\delta$ に依存する項のエネルギー依存性が主要項と異なることを利用して $\nu_e$ 出現のエネルギースペクトルを精密に測定し $\delta$ を求める方法である。いずれにおいても、CP非保存効果は、小さい $\nu_e$ 出現確率のさらにそのずれとして現れるため、 $\nu_e$ 出現に対してT2K実験の10~100倍の高い感度を有する必要がある。 $\delta$ の広い範囲に感度を持ち高い確率で発見につなげるためには、MWレベルの加速器大強度化と検出器の飛躍的大型化・高感度化が必要である。国内では、方法(1)を採用する計画としてJ-PARCから295kmの神岡に100万トンクラスの水チェレンコフ検出器ハイパーカミオカンデを建設して行う実験、方法(2)を採用する計画として、J-PARCから658km離れた隠岐の島に10万トンの液体アルゴンTPCを設置する実験が検討されている。

## J-PARC加速器とニュートリノビーム

J-PARCはJAEAとKEKが共同で茨城県東海村に建設した大強度陽子加速器施設で、LINAC、3GeV Rapid Cycle Synchrotron (RCS)、主リング(MR)の加速器群で構成される。長基線ニュートリノ振動実験は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する。MRの設計強度は750kWである。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、2010年1月からはT2K実験のために安定ビーム供給が始まり、2011年3月には145kWが達成された。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ている。

MRは以下に述べる大電流化と高繰り返し化により、今後5年程度で設計強度の750kWの実現を目指す。MR大電流化(バンチ当たり陽子数増強)は、LINACのイオン源、RFQをアップグレードし大電流化すると共に、加速エネルギーを400MeVにアップグレードし空間電荷効果を低減してRCSのパワーを増強することにより実現する。さらに、MRのRF増強と電磁石電源のアップグレードによる高繰り返し化を図る。現在約3秒の繰り返し周期を約1秒にすることを目標としている。現在これらのアップグレードのためのR&Dや製作が進んでいる。

さらに、1MWを超えるビームパワーを実現するための検討も進められており、MR入射エネルギーをあげるための新たなブースターリングの可能性などが議論されている。1MW超の実現のためには、大強度運転の経験を取り込みつつ方法、設計を最適化し、必要なR&Dを進めていく必要がある。

## ハイパーカミオカンデ

ハイパーカミオカンデは、スーパーカミオカンデで確立した基幹技術を使い、そのサイズを全質量100万トンに拡張した超大型次世代水チェレンコフ検出器である。ハイパーカミオカンデの物理目標は、J-PARCからのニュートリノビームによるニュートリノ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とニュートリノCPの測定、宇宙起源ニュートリノの観測と多岐にわたる。

ハイパーカミオカンデは、スーパーカミオカンデより8km南の二十五山地下650m (1750m water equivalent) に幅48m、高さ54m、長さ250mの円柱状の検出器2器で構成される。J-PARCからの距離はスーパーカミオカンデと同じで295kmである。20インチ光電子増倍管を99,000本使用し、内水槽の20%を光電面で覆っている。測定器性能は、500MeVの電子及びミュオンの誤認識率が1%以下、運動量分解能が5.6% (電子)、3.6% (ミュオン)、J-PARCニュートリノビームに対する電子ニュートリノの検出効率が64%、同ニュートリノビーム起源の $\pi^0$ バックグラウンドの除去率95%以上を誇る。

ハイパーカミオカンデは、スーパーカミオカンデに対して25倍の有効体積を有し、J-PARCニュートリノビームを使って高統計・高精度ニュートリノ振動の観測が可能であり、ニュートリノにおけるCP非保存に対して非常に高い感度を有する。J-PARCニュートリノビームデータ $8\text{MW}\cdot\text{年}^1$  (750kWのビーム強度で約10年に対応) を使うと、ニュートリノCP非保存のパラメータ $\delta$ を18度以下の精度で決定することが可能である。また、 $\sin^2 2\theta_{13} > 0.03$ の領域において、ニュートリノ質量階層性が決まっている場合において、 $\delta$ のパラメータ領域の74%でCPの破れを $3\sigma$ の有意性で発見できる。ニュートリノ質量階層性が決まっていない場合は、 $\sin^2 2\theta_{13} \sim 0.1$ の領域でCPへの感度が $\delta$ の領域で46%へと落ちるが、この $\theta_{13}$ の値では10年間の大気ニュートリノ観測で、 $\sin^2 \theta_{23} > 0.4$ の場合に $3\sigma$ の有意性で質量階層性を決定することが可能である。

ハイパーカミオカンデは陽子崩壊に対して高い感度を有しており、 $p \rightarrow e\pi^0$ に対して $1 \times 10^{35}$ 年以上、 $p \rightarrow \nu K^+$ に対して $2 \times 10^{34}$ 年以上の感度を有する。現在、ハイパーカミオカンデが唯一 $10^{35}$ 年以上の陽子崩壊に対する感度を持つ実質的なデザインの測定器である。ハイパーカミオカンデはその巨大有効体積により、精密太陽ニュートリノ観測、高感度超新星ニュートリノ観測、暗黒物質探索、太陽フレアニュートリノ探索等が期待できる。

ハイパーカミオカンデを実現する為の基幹技術はスーパーカミオカンデで実証されているが、より現実的な予算見積もりが今後の課題である。また、低価格の大型光センサー開発とプロトタイプの長期安定試験、低価格で大型空洞を掘削する技術、大型タンク、測定器構造体のデザイン等を確定していく必要がある。光センサーの総読み出し数は10万チャンネルを超え、水中で電気信号を処理するフロントエンド電子回路等の開発も必要である。また開発と並行して、実験感度を定める系統誤差を反ニュートリノビームのオプションも含めT2K実験で評価する必要がある。

<sup>1</sup> ここでは1年= $10^7$ 秒としている。

## 液体アルゴンTPC

この計画ではJ-PARCから658km離れた隠岐の島のoff-axis角0.78度の位置に10万トンの液体アルゴン検出器を設置しCP非保存探索を行う。

液体アルゴン検出器の最大の特徴であり利点は、全ての荷電粒子の飛跡を非常に低閾値で捉えることができることである。この利点により、ニュートリノ反応においては、振動実験で大切なニュートリノエネルギーの再構成が広いエネルギー範囲で可能となる。また、電子ニュートリノ出現検出におけるバックグラウンド事象を小さく抑えることができる。特に水チェレンコフ検出器の場合のおもなバックグラウンドの一つとなっている中性カレント $\pi^0$ 生成はバーテックス付近の形状や、電子と $\gamma$ 起源の電磁シャワーの先頭の $dE/dx$ の違いなどを捉えることで、非常に効率よく除去できることが期待される。

CP非保存は、ミューニュートリノから電子ニュートリノへの振動のエネルギースペクトルを精密に測定することにより検出する。第一振動ピークは1.2~1.4GeV、第2振動ピークは0.4GeVになる。第一ピークはCP非保存効果とマター効果が競合するが、第2ピークはCP非保存効果が支配的であり、広帯域エネルギースペクトルビームを用い、第1、第2ピークのスペクトルを同時に測定することでCP非保存効果に対する感度を高めることができる。8MW・年(750kWで10年)の測定を行った場合、 $\delta$ が30度以上あれば $3\sigma$ 以上の有意性でCP非保存を発見することができる。

陽子崩壊探索では、 $p \rightarrow \nu K$ モードで荷電Kを直接検出できるため高い感度を持つ。10万トンの検出器を10年間稼働させることにより、 $p \rightarrow \nu K$ について陽子崩壊寿命 $6 \times 10^{34}$ 年の下限を得ることが可能である。

10万トン液体アルゴン検出器実現の必要条件是、荷電粒子の粒子識別やエネルギー再構成の性能を確認し、その上でニュートリノ反応の再構成能力を実証すること(物理的性能の実証)と、大型液体アルゴンタンクや高電圧(~MV)、長ドリフト長を実現する純化装置などの技術を確認すること(技術の実証)である。物理的性能の実証のために、現在荷電粒子を用いたビームテストが進められている。すでにJ-PARCで荷電K、 $\pi$ 、陽子、陽電子を総容量約400kgの液体アルゴン飛跡検出器に入射するビームテストが行われ、期待される性能が確認されつつある。検出器実現のための要素技術としては、大型低温容器、超高純度液体アルゴン、高電圧装置、信号読み出し等がある。これらの技術の確立のためには、小さい検出器から段階的に大きな検出器を作ることにより技術を積み上げる必要がある。現在日本では400kg、世界では600トンの液体アルゴン飛跡検出器が実現されている。今後総量100トンから1000トンのプロトタイプを作成する計画である。また、液体アルゴン中のニュートリノ反応断面積などを測定し、物理的なポテンシャルを探る。最終的なプロトタイプで物理的な探索能力と検出器の建設のための技術を確認した後、10万トン検出器の建設を行う。

## 2つの計画の比較

ハイパーカミオカンデを使った実験の長所は、近距離でビームフラックスが高く、更に超大型測定器で、大統計でCP非対称性を測定できることにある。また、近距離では、偽

のCP非保存をおこす物質効果が小さい、ニュートリノ振動が起こるエネルギー領域が1GeV程度で水チェレンコフ検出器が高い検出効率で優れた粒子識別能力を発揮することが上げられる。逆に短所は、断面積の小さな反ニュートリノのビームを必要とすること、数10%程度のCP非対称性を精密に測定する為に、実験の系統誤差を5%以下に抑える必要があることである。液体アルゴンTPCを使った実験の長所は、高い $\pi^0$ バックグラウンドの除去能力と、広いエネルギー領域において高い検出効率と優れた粒子識別能力を有し、エネルギー分布測定からCPパラメータ $\delta$ を決定できることにある。逆に短所は、エネルギーが低いため反応断面積の小さな第2振動ピークを捉える必要があること、測定器がハイパーカミオカンデより小型になり統計が減ることである。また、10万トンクラスの液体アルゴンTPCを建設する技術を確立する必要がある。

### 国内外の他の計画

ニュートリノ振動を通しニュートリノCPの破れやニュートリノ質量階層性を決定するためには、加速器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、欧米でも様々なプロジェクトが検討されている。米国では、T2K実験と同等の感度を持つNOvA実験が建設中であり、更にFermilabで700kW強のニュートリノビームを生成し、1,300km離れたホームステーク鉱山にあるSanford地下実験所で観測するLong Baseline Neutrino Experiment (LBNE) プロジェクトが検討されている。ニュートリノ測定器としては、広いエネルギー領域で優れたバックグラウンド除去能力、高い粒子識別能力、高い検出効率を有する3.3万トンの液体アルゴンTPCが第1候補となっている。そして、検出効率は低い技術的に確立している20万トン有効質量の水チェレンコフ測定器を第2候補としている。ヨーロッパでは、 $\pi$ 崩壊を使った通常のニュートリノビームをCERNで生成し、遠方の地下実験所で観測するシナリオをLAGUNAプロジェクトとして現在検討中である。LAGUNAはヨーロッパの7ヶ所の地下実験所（CERNから最近距離は130kmから、最遠方は2300km）、3つの測定器オプション（水チェレンコフ、液体アルゴン、液体シンチレータ）を検討している。最近、2300km遠方に中型液体アルゴンTPCを置き、物質効果の測定に特化した実験も考えられている。ヨーロッパでは、更に将来の話として、まったく新しいニュートリノビーム生成方法として、 $\beta$ ビーム、ニュートリノファクトリーを検討中である。 $\beta$ ビームは、不安定原子核を加速器で回し、その核のベータ崩壊で出てくるニュートリノをビームとして利用する。 $\beta$ 崩壊のQ値は小さい（MeVレベル）ので、低エミッタンスニュートリノビームが生成可能となる。ニュートリノファクトリーはミューオン崩壊からのニュートリノをビームとして利用するアイデアで、エネルギー分布の良く理解できたビームが生成可能となる。 $\beta$ ビームもニュートリノファクトリーも現時点では実現可能性は定かではなく、その原理実証の試験が進行中である。

加速器ニュートリノ実験と並んで、原子炉反ニュートリノ実験による $\theta_{13}$ の測定もニュートリノCP測定に重要な情報を与える。原子炉反ニュートリノ実験で精密 $\theta_{13}$ の情報を得ることで、加速器ニュートリノ実験における $\theta_{13}$ の不定性を減らしCP非保存の効果抽出することが可能となる。特に $\theta_{13}$ が大きい（ $\sim 10^\circ$ ）場合は、原子炉反ニュートリノ実験で精度の良い $\theta_{13}$ の測定が期待できる。原子炉反ニュートリノ実験としては、Double Chooz実験、RENO実験、DayaBay実験が進行中であり、将来の実験としては日本で

KASKA実験が検討されている。原子炉反ニュートリノ実験の高度化を含めたグローバルなニュートリノプログラムの検討は重要である。

## 4 フレーバー物理

素粒子物理学全体の次の大目標として電弱エネルギースケールの物理の解明を目指す中で、LHCで進められる直接探索と相補的な役割を果たすのがフレーバー物理による間接探索である。実際のエネルギーより高い質量の新素粒子の量子力学的な寄与による、観測量の標準模型の予言からの僅かなずれを判別するのがフレーバー物理の当面の目標であり、そのために、系統誤差を抑えた測定系で、理論誤差の小さい観測量を、大統計により精密測定する必要がある。大統計を得るために、衝突のルミノシティやビーム強度を可能な限り高めるので、強度フロンティアを開拓する実験である。実際のエネルギーが低いために直接探索のエネルギーフロンティア実験よりもプロジェクトの規模は小さいが、大強度に付随する技術的な挑戦がある。近年では、KEK Bファクトリーの成功に代表されるように、フレーバー実験においては我国が世界をリードする立場に立ったといえる。将来にわたりこの立場を堅持していくことが重要である。

現在、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などに新物理の示唆（理論誤差または測定誤差の範囲内の現象であるが、将来の改善により新物理の寄与だと帰結されるかもしれない現象）が指摘されるものの、大きな期待を集めたMEG実験での  $\mu \rightarrow e \gamma$  事象探索や、LHCでの超対称粒子探索のいずれも肯定的な結果を得ていない。この先数年でもう少し状況が明らかになると考えられるが、仮に次のエネルギースケールが思ったよりも高い場合には、間接探索がなおさら重要となる。逆に、ひとたび新物理現象が観測の網にかかり始めたなら、どの物理量に新物理の影響が大きく現れ、どこが抑制されているかを知ることにより、新物理の模型の同定を行い、また、新物理の相互作用を決定することが求められる。よって、将来にわたりプロジェクトの多様性を維持しつつ、様々な実験を遂行していくことが基本姿勢として重要である。次節で個別の実験対象（B中間子、D中間子、K中間子、中性子、タウレプトン、ミューオン）について述べる。

### 4.1 Super B-factory

KEKB/Belle計画の後継であるSuperKEKB / Belle II 計画は、フレーバー物理の中では最大級の実験計画であり、bottom, charm, tauなど測定対象も幅広い。強度フロンティアにおける新物理観測網の最大の担い手として、遅滞なく建設し運転を開始すべきである。

$B \rightarrow K \pi$ の直接的CP対称性の破れ (DCPV) の荷電／中性カレントによる違いの理解、 $B \rightarrow \tau \nu$ ,  $B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu$ ,  $b \rightarrow s \gamma$ の分岐比測定による荷電ヒッグス粒子探索、 $b \rightarrow sqq$ の時間に依存するCP非対称度 (TCPV) 測定による新複素位相探索、 $B \rightarrow K_s \pi^0 \gamma$ のTCPV測定による右巻きカレント探索、 $\tau \rightarrow \mu \gamma$ ,  $\tau \rightarrow \mu \mu \mu$ などのLFV事象探索、 $D^0$ 中間子の大きな混合の理解など、数年から十年程度のデータで新物理に感度を持ちうる測定に注目が集まる。特に 中性粒子 ( $K_s$ ,  $\pi^0$ ,  $\gamma$ ,  $\nu$ など) の測定が重要であり、レプトンコライダーのクリーンな環境が鍵である。ほとんどの測定において精度は統計誤差が支配的であり、大統計に期待が集まる。一方で、形状因子などlattice QCDの計算に負う部分もあり、理論側からの貢献が求められる。また、LHCbから証拠が見つかったとの報告があった $D^0$ 中間子のDCPVの理解も重要であり、 $D^0$ 中間子系の理論的計算手法の開発が望まれる。

海外では、イタリアINFNが中心となってSuperB計画を進めている。SuperKEKB、SuperB双方とも、ビームを極限まで絞ることで高いルミノシティ（それぞれ $8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、 $>10^{36} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ）を達成する設計となっており、SuperBは新規にトンネルを掘削し、SuperKEKBは既存の施設を再利用してこれを実現する。KEKBとPEP-IIの時代と同様、両者が成果を競うことで健全な発展が期待される。

全てが順調に運べば、2021年頃にはSuperKEKBの積分ルミノシティが節目となる $50 \text{ab}^{-1}$ に到達する。それまでに様々な新物理現象の発見ないし制約が期待されているが、新物理のカップリングが想定より小さすぎる場合など、今後の研究の展開によっては更に10倍以上のルミノシティ増強が必要となることも考えられる。現在の所ルミノシティ増強の具体的なアイデアはなく、そのような場合には、SuperKEKBおよびINFN SuperBでの実際の経験を元に、その実現可能性を考察する必要がある。

フレーバー物理の今後の展開によっては、タウレプトンやチャーム中間子崩壊の精査に最適化するために、重心系エネルギーやエネルギー非対称度を変更する可能性もある。実際に、INFN SuperBやBINP Super charm-tau factory においては、目標ルミノシティ $10^{35} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ でタウ・チャーム生成閾値での運転がデザインに組み込まれている。例えば、 $\sqrt{s} \sim 4.2 \text{GeV}$ （対称エネルギー）で $>10^{36} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ の電子・陽電子衝突が実現できれば、初期状態放射バックグラウンドを抑制したより高感度での $\tau \rightarrow \mu \gamma$ 探索が可能となる。

## 4.2 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。

前述のタウ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。進行中のMEG実験では $\mu \rightarrow e \gamma$ の分岐比に対して $2.4 \times 10^{-12}$ の上限値が得られており、今後 $O(10^{-13})$ の感度での探索が続く。MEGはアップグレードして更に高精度で実験を継続する可能性が現在検討されている。一方、 $\mu - e$ 転換事象はnon-photonic過程にも感度があるという意味において包括的である。 $\mu \rightarrow e \gamma$ と $\mu - e$ 転換の分岐比は新物理の模型に依存するが、典型的な超対称模型の場合には両者の比は $O(10^2)$ である。したがって、 $10^{-16}$ 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。実現に向けてBeam extinctionなど達成すべき技術的課題があり、国際協力と競争の中でより強力な研究開発体制を構築することが必要である。COMETについては新しい陽子ビームラインとミューオン生成源の検討が現在進んでおり、実現すればJ-PARCでの素粒子物理研究のフラグシップ実験となり得るものである。

ミューオンの異常磁気能率 ( $g-2$ ) は、BNL-E821実験による0.7ppm精度での測定結果が標準模型の予想から $3.4 \sigma$ 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、超冷ミュオンビームを用いる新しい測定手法が提案されている。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、技術的実現可能性を確立するためのR&Dをより一層速やかに進めていくべきである。

### 4.3 Kaon 実験

Kaon実験は、CP対称性の破れを初めて観測するなど長らくフレーバー物理に多大な貢献を続けてきた。今後は新物理探索を目指した $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$ と $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$ の分岐比の測定が特に重要である。海外では $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$ をO(100)イベント観測して分岐比を測定するCERN NA62実験が準備されている。また、アメリカでも同様の実験が提案されている。一方、国内ではJ-PARCの大強度(100kW)を活かして $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$ を測定するKOTO実験が準備中であり、荷電モードと対をなして新物理探索の一翼を担うことが期待されている。まずはKEK-PSの実験で得られた現在の上限値( $2.6 \times 10^{-8}$ )を更新し、Grossman-Nir limit( $1.5 \times 10^{-9}$ )を超えることで新物理の探索が可能な領域に入る。その後、2010年代後半にかけて標準模型の分岐比( $2.4 \times 10^{-11}$ )に到達する計画である。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。実験ホールの拡張は原子核実験分野の将来計画とも連携して検討すべき課題である。

### 4.4 中性子

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、実験感度が新物理の予言する領域に入り始める(現在の上限値: $2.9 \times 10^{-26}$  ecm、超対称模型: $10^{-27} \sim 10^{-28}$  ecm、標準模型: $10^{-31}$  ecm)ところであり、今後の展開に期待が高まる。現在建設・計画中の主な実験は、加速器による核破碎中性子源を用いて $10^{-27} \sim 10^{-28}$  ecmの感度を目指している。中でもPSIでは今年から $5 \times 10^{-27}$  ecmを目指す測定が開始される。またTRIUMFではKEK/RCNPで開発された極低温UCN源を用いた実験が建設中である。一方J-PARCで計画中の実験は、LINACビームから数%を取り出し小型の専用ターゲットへ輸送して利用するものである。大強度のパルスビームを用いることで、高統計であると同時に系統誤差を抑制し、 $10^{-27} \sim 10^{-28}$  ecmを目指している。短時間で多くの中性子生成を行い、新しく考案された磁気収束装置で貯蔵容器まで導くなど、必要となる要素技術には革新的なアイデアが多い。国際的な競争力を持つために、原理実証から踏み出して実用に向けた研究開発を迅速に進めることが期待される。施設配置やビーム利用に関しては、JAEAおよびKEKとの連携を密にとって進めるべきである。

## 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た安定な観測環境を利用して、様々な稀な現象の探索が行われている。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 $\beta$ 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での発展から神岡地下にプロジェクトが集中しており、神岡を中心とした地下素粒子実験コミュニティが形成されつつある。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、世界と比肩しさらに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。今後も地下素粒子実験の世界的研究拠点として継続的支援が必要である。

現状では個々のプロジェクトは大規模というほどではなく、個性に富んだ複数の手法が共存している。現在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は、既知の物質では説明できない暗黒物質の存在を決定づけた。暗黒物質は地球近傍では $0.3\text{GeV}/\text{cm}^3$ も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の予言する弱く相互作用する重い粒子 (WIMPs) が注目を集めており、WIMPs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、暗黒物質の証拠となる地球公転に相関した信号強度の季節変動を $8.9\sigma$ という高い統計的有意性で観測したのに対し、他の手法に基づく観測がその結果を否定しており、議論が混迷している。DAMA/LIBRAの結果を否定する観測は、50GeV程度のWIMPsに対してDAMA/LIBRAの感度を大きく凌駕しているが、非常に低エネルギーの原子核反跳の測定には、媒質内でのイオン化や発光時のクエンチング効果に未だ議論の余地がある。さらに、10GeV程度の低質量WIMPsの徴候とも解釈できる複数の観測報告があり、議論をより複雑にしている。

超対称模型暗黒物質粒子の発見には、50GeV程度の質量に対する反応断面積で、現在の $10^{-44}\text{cm}^2$ 以下という制限を $10^{-46}\text{cm}^2$ 以下の感度にまで改善することが必要である。そのためには有効質量で1トン程度の大型検出器を実現しなくてはならない。まずは発見を第一要件とし、XMASS1.5のような拡張性のある計画が先行することは望ましい。暗黒物質の信号を捕らえたならば、さらなる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、XMASS2のように有効質量10トンでの反跳スペクトルや季節変動の高統計測

定に加えて、他種原子核あるいは別の手法による測定、TPC技術を使ったNEWAGEや写真乾板を使った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。したがってこれら多様な研究開発が並行して進められることが望ましい。一方 $8.9\sigma$ という高い有意性は無視できるものではなく、DAMA/LIBRAと同じNaIを使った検証実験も必要である。また、LHCで超対称粒子が未だ発見されていない現状から、理論的な先入観に囚われず、より広いパラメータ領域や、アクシオンなどのWIMPs以外の暗黒物質粒子の探索も考慮する必要がある。

## $0\nu\beta\beta$ 探索

ニュートリノのマヨラナ性を検証する現在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にも期待が持てる。ニュートリノ絶対質量の測定では $\beta$ 崩壊を用いたプロジェクトが200meV程度の感度を予定しており、宇宙論的な測定は50meVあるいは究極的には20meV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60meV以上、逆階層構造が20~60meV程度、標準階層構造が20meV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。また、 $^{76}\text{Ge}$ を使った探索で320meV程度の有効質量で $6\sigma$ の有意性の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、非常に高分解能の測定である一方、複数のバックグラウンド候補も知られており、検証が待たれる。

現在のプロジェクトは、KKDCクレームおよび縮退構造を検証できる60meV程度の感度を当初目標とし、逆階層構造を検証できる10~20meV程度の感度への拡張性を考慮している。現状では $0\nu\beta\beta$ 探索の先行が予想されるが、 $\beta$ 崩壊や宇宙論的観測で有限質量が観測された場合や、ニュートリノ振動研究において階層構造が決定された場合には、 $0\nu\beta\beta$ との比較でマヨラナCP位相の決定やマヨラナ性の明確な検証、背景となる物理の特定などの飛躍的な発展が期待できる。

逆階層構造をカバーするには1トン程度の質量が必要で、大型化と低放射能環境の実現が中心課題となる。これらの課題はニュートリノ検出器と通じており、 $^{136}\text{Xe}$ を用いるカムランド禅のようなニュートリノ検出器の活用は拡張性の点でも有効である。このような装置では $0\nu\beta\beta$ 探索に特化せずに汎用性を持たせることで、有意な信号が見えない場合でも物理的対象を広げられるよう考慮されている。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が必須である。未知のバックグラウンドを排除するための粒子識別技術、角分布測定が可能な装置、多種の原子核の測定が可能な汎用装置など、多様な研究開発が必要である。

国内においては、各拠点の独自性や得意な技術を活かした複数のプロジェクトが進行しており、 $^{48}\text{Ca}$ を研究対象とするCANDLES実験では高いQ値からバックグラウンドに対して高い耐性を有する一方、0.2%という自然存在比の小ささから同位体濃縮が重要な課題であり、技術の確立が待たれる。また角分布測定や多核種での測定に有効なドリフトチェ

ンバーや写真乾板を利用した開発も行われているが、国際的な競争力を持った性能と開発スピードの実現が待たれる。

5年以上先の予見は困難であるが、将来プロジェクトの大規模化は避けられず、大規模化に対する早期の構想が必要である。大型ニュートリノ検出器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スーパーカムランド禅は、標準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に対しても高い感度を持っており、各々の観測が100meV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。

### 宇宙背景放射 (CMB) によるインフレーション検証

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) 偏光のBモード揺らぎの発見は、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。

日本のCMB偏光観測グループは国際協力実験QUIETとPOLARBEARに中核として参加している。QUIETはすでに世界トップレベルの観測精度を達成し観測結果を発表している。また、POLARBEAR実験では2012年にチリ・アタカマに望遠鏡を設置し、観測を開始している。POLARBEARは大きな主鏡を持ち、かつ空の広い範囲を観測できることを特徴とする。POLARBEARと競合するプロジェクトとしては、南極点で行われているBICEP2/KECKなどがある。これらのプロジェクトはそれぞれPlanckを上回る感度を持ち、テンソル-スカラー比が0.01程度以上であれば今後5年程度の間に関見が期待される。今後POLARBEAR望遠鏡を複数配備し、次に述べる衛星計画と相補的観測を行う計画が検討されている。

更に発見感度を上げるため、衛星計画が幾つか検討されている。衛星計画のミッションは、全天を大気の影響なく観測してテンソル-スカラー比が0.001程度まで探索することにより、主なインフレーションモデルをより詳細に検証することである。地上観測等で先に発見があった場合も、高精度のBモード揺らぎの観測は、宇宙論モデルを絞り込む上で重要と考えられる。国内では、2020年頃の打ち上げを目指した衛星計画LiteBIRDが検討されている。欧米の将来計画では比較的大きな衛星を時間をかけて打ち上げる計画が主であ

るが、LiteBIRDの場合目的を絞ることにより、小型ではあるが感度は遜色なく、早期の観測・発見を実現する可能性がある。JAXAにワーキンググループが発足し、国内外の高エネルギー物理学、天文学、超伝導デバイス工学、宇宙論の研究者によって共同研究が展開されている。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。

### 暗黒エネルギーの探求

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、観測精度をあげて、宇宙のスケールの関数として状態方程式が変わっていくのかどうかを見極めることが現時点で重要である。そのためには、宇宙の中で、いつ、どこに何がどんな分布をしているか、を見るべきである。暗黒エネルギー測定の手段として、スタンダードキャンドルであるタイプIa超新星、銀河の分布、ウィークレンズ効果、バリオン振動、の四通りが検討されている。

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、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。イメージングでウィークレンズサーベイを行うHyper Suprime Cam (HSC) は2012年に搭載予定である。画素数9億のCCDからなる焦点面で広視野観測を実現し、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二次元分布をしらべ、宇宙膨張の歴史、つまり暗黒エネルギーについての知見が得られる。もう一つの観測装置は2016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。2000平方度、100万個以上の銀河についての赤方偏移を観測する予定である。HSCで空間方向のサーベイ、PFSで奥行き、つまり時間情報を得ることにより、大きな相乗効果が得られる。また、非ガウス性の測定によるインフレーション理論の検証、長距離での一般相対論の検証、暗黒物質の3次元分布の決定などが可能となる。

SuMIReプロジェクトは、他の地上観測計画をしのぐ感度を持ち、高い国際競争力を持つ。2020年頃に観測を開始する予定の衛星プロジェクト (Euclidなど) より前に、暗黒エネルギーに関する新しくかつ決定的な知見を得ることを目指している。

## 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。このような研究分野を継続して発展させていくには、絶え間ない技術開発と、その担い手である若手研究者の育成が不可欠である。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・回路・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一層の努力が必要である。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なども有効であろう。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。