

高エネルギー加速器研究機構における 2008年以降の素粒子・原子核研究の進め方

素粒子原子核研究計画委員会

飯嶋 徹(名古屋大)、受川 史彦(筑波大)、榎本 良治(東京大)、神谷 幸秀(KEK)、
熊野 俊三(KEK)、蔵重 久弥(神戸大)、黒川 真一(KEK)、小松原 健(KEK)、
近藤 健次郎(KEK)、齊藤 直人(京都大)、杉山 直(天文台)、田村 裕和(東北大)、
徳宿 克夫(KEK、委員長)、中野 貴志(大阪大)、中家 剛(京都大)、橋本 省二(KEK)、
羽澄 昌史(KEK、幹事)、山口 昌弘(東北大)、山下 了(東京大)

2006年3月14日

目 次

第I部 素粒子・原子核研究の進め方	4
1 素粒子・原子核物理の現状と将来への展望	4
1.1 物理の現状と到達点	5
1.2 将来の研究の方向	5
1.3 KEK の将来計画と世界の情勢	8
2 素粒子・原子核研究のシナリオの提言	10
2.1 提言	10
2.2 J-PARC	10
2.3 SuperKEKB	11
2.4 ILC	13
2.5 三計画の時期について	13
2.6 素核研の取り組みかた	14
第II部 各計画における研究プログラム	16
1 J-PARC	16
1.1 J-PARC と原子核素粒子実験施設	16
1.2 2008 年度までに建設される加速器・実験施設	16
1.3 J-PARC での素粒子原子核実験	18
1.3.1 ニュートリノ振動実験	18
1.3.2 K 中間子稀崩壊実験	20
1.3.3 ストレンジネス核物理の実験	21
1.3.4 ハドロン核物理の実験	23
1.3.5 大強度ミューオンビームによる実験	26
1.3.6 反陽子科学実験	27
1.4 評価・意見	29
2 SuperKEKB	33
2.1 物理的意義	33
2.2 実験の説明	35
2.2.1 実験の概要	35
2.2.2 測定原理	36
2.2.3 実験装置	36
2.2.4 測定項目と測定精度	36
2.2.5 積分ルミノシティに応じた目標	38
2.2.6 國際コラボレーション	39

2.2.7	スケジュールとコスト	39
2.3	海外の計画との比較	39
2.4	評価・意見	41
3	ILC	43
3.1	物理的意義	43
3.2	実験の説明	45
3.3	海外の計画との比較	47
3.4	評価・意見	48

第I部

素粒子・原子核研究の進め方

はじめに

本委員会は、素粒子原子核研究所（素核研）の所長より J-PARC 第一期完成後の高エネルギー加速器研究機構（KEK）における素粒子原子核分野の研究の進め方について検討するよう諮問を受けた。第一回委員会が 2004 年 12 月 1 日に招集され、検討し報告する内容として、特に

1. J-PARC 第二期計画、SuperKEKB、ILC における物理の意義と予想される到達点
2. 考えうる本機構としてのシナリオ

を含むことが要請された。

本委員会ではこの諮問を受け、合計 12 回の会合を持ち、上記三計画およびそれと関連するプロジェクトに関してヒアリングを行ない議論を進めた。この過程で、J-PARC の検討事項については、2008 年の J-PARC 加速器運転開始を区切りとし、それ以降の J-PARC での研究の進め方について提言を行うことにした。これにより、答申の題名も「高エネルギー加速器研究機構における 2008 年以降の素粒子・原子核研究の進め方」とした。

答申は二部構成とした。第一部では、素粒子原子核物理の現状を俯瞰した上で、三つの計画相互の進め方と素核研の取り組み方についての提言を述べた。答申の骨子となる部分である。第二部では、それぞれの計画について、個別に物理の意義と予想される到達点をまとめた。ここでは三計画間の相互関係にとらわれないで、それぞれの計画についての評価と意見を独立に述べている。第二部は、第一部の提言をまとめるまでの基礎となった部分である。

1 素粒子・原子核物理の現状と将来への展望

「物質を構成する基本的要素は何か？」

「その間に働く力は何か？」

「それらがどのように組み合わさって物質が構成されているか？」

人類は長きに亘りこの問いに答えるべく探求を続けてきた。20 世紀後半の加速器実験を中心とする研究により、この問い合わせに対する探求は著しい発展を遂げた。物質の基本要素と相互作用に関する統一的描像とハドロンや原子核構造の基礎が確立した。我が国の研究者も理論と実験の両面でこうした発展に大きく寄与してきた。とりわけ、ニュートリノ実験や KEK B ファクトリーにおける Belle 実験、原子核分野ではストレンジネス核物理や不安定核の実験などにおいて、近年輝かしい成果をあげている。また、諸外国で行われた多くの国際共同実験においても、我が国の研究者が大きな役割を果たしてきた。21 世紀初頭の現在、素粒子原子核物理学ではこれまで確立してきた理論的枠組みを更に超える現象が予測されつつあり、新たなパラダイムの扉が開かれようとしている。

1.1 物理の現状と到達点

物質の基本要素とその相互作用を探求する素粒子物理学では、ゲージ対称性、3世代のフレーバー構造、電弱対称性の自発的破れによる質量獲得機構（ヒッグス機構）の三つを基盤とする標準模型により多くの現象が説明され、この模型の妥当性が確立してきた。LEPにおける精密測定をはじめとする実験によってゲージ粒子の相互作用が精査され、またK中間子・B中間子に関する実験などによってクォークのフレーバー構造の大枠が小林益川理論によって記述されることが明らかになった。しかし、標準模型の柱の一つである電弱対称性の自発的破れの機構は未だ実験的に検証されておらず、素粒子物理学の焦眉の課題となっている。これと関連し、標準模型は電弱スケールと重力のスケールとの階層性の問題（ゲージ階層性問題）を内包し、その解として電弱スケールに超対称性や余剰次元模型などのより基礎的な物理理論が存在することが期待されている。一方、実験・観測的にも標準模型を超える物理の存在が明らかになりつつある。暗黒物質や暗黒エネルギー、宇宙のバリオン数などの宇宙の組成とその起源や、ニュートリノ振動現象は、素粒子の標準模型では説明できず、標準模型を超える枠組みが必要である。

原子核物理学は、強い相互作用で束縛される多体系の構造と多様性を追求する分野である。従来、原子核は陽子と中性子を構成粒子とし、それらの間の中間子交換による相互作用で記述されてきた。しかし、ハドロンのクォーク構造に関する理解が進展し、原子核物理学をクォーク核物理学として新しい視点から研究する段階にきている。また、自然界には通常存在しない、ストレンジネスなどの新しい自由度を含む原子核や中性子過剰な不安定核の研究が発展しようとしている。これらはいわば極限状態の物質構造の研究であり、温度や密度を変化させて広範囲のハドロン・クォーク物質の相構造を研究し、フレーバーやアイソスピンを変化させた新たな原子核を作り出すことにより、物質の多様性を追求する分野である。これら多方面の研究により、クォークによるハドロンと原子核の統一描像を確立し、クォーク多体系である物質世界の全体像についての理解を深めることができると期待されている。さらにこれらの研究は、ビッグバン、元素合成、超新星爆発、中性子星生成などによる宇宙での物質進化を理解することにも繋がる。

この様な素粒子原子核物理学の発展状況から、標準模型を超える新たな物理現象や、自然界に通常存在しない極限の物質像を探索する時期が到来していると考えられる。

1.2 将来の研究の方向

このように現在素粒子原子核物理学は大きな転換期を迎えており、多岐のエネルギー・スケールにわたって、新たな自然像の構築に向けた扉が大きく開かれようとしている。2007年から欧州合同原子核研究機関（CERN）で始まる大型ハドロン衝突加速器（LHC）実験では、ヒッグス粒子の発見が期待されている。また標準模型を超える新しい物理の発見、高温高密度クォーク物質の発見も期待され、素粒子原子核物理学の新たな展開が予想される。これらを踏まえ、今後の素粒子原子核物理学は、こうした多岐のエネルギー・スケールにおける研究を更に推し進め、それぞれの階層における理解を深化させるとともに、宇宙開闢以来の宇宙進化史の理解を含めた統一的な物質像の構築に向けて邁進すべきである。

その目的のために、素粒子分野では、とりわけ次のことが重要になる。

1. 標準模型の更なる確立

標準模型の基盤をなすもののうち未だ解明されていない電弱対称性の自発的破れの機構を実験的に確立することが急務となる。そのためにヒッグス粒子の発見にとどまらず、高エネルギー・フロンティアでの精密測定

によってヒッグス粒子の性質を同定し、さらに結合定数と自己結合定数を高い精度で測定することでヒッグス機構を解明し、質量獲得の機構と真空構造の関係を確立する。また、トップクォークやゲージ粒子の質量・相互作用の測定の精度を向上させ、標準模型の基礎的なパラメータをさらに詳細に決定する。一方、CKM 行列の詳細決定やユニタリティ三角形の詳細測定を通してクォークのフレーバーセクターの構造を確立する。これらの精密測定を通じて標準模型の更なる確立を目指すとともに、その予想と異なる現象により新しい物理を探索する。

2. TeV スケールの新たな物理原理の解明

電弱スケールと重力のスケールの階層性の問題の解として、超対称性や余剰次元などの標準模型を超える物理が TeV スケールに存在すると期待される。この新たな物理に現れる新粒子群を発見するのみならず、その性質を精査し、その背後にある新たな物理原理を探ることを目指す。この目的のために、

- (a) LHC 実験で開拓されるであろうエネルギー領域において、高エネルギー フロンティアでのより精密な測定実験により新粒子の質量やその性質を詳細に調べることで新たな物理の構造を明らかにする

と同時に

- (b) 高輝度フロンティア実験により新たな物理のフレーバー構造（クォークセクター、荷電レプトンセクター）を明らかにする

ことが必要である。こうした二つの相補的なアプローチが果たした役割は標準模型の構築・確立に際しても本質的であった。標準模型を超える新たな物理のパラダイムの全貌を明らかにするにも、この二つのアプローチの両方が重要であろう。こうした総合的なアプローチによって、単に TeV スケールの新たな物理の性質が解明できるだけでなく、その基礎となる物理原理や、より高いエネルギーにおける物理について多くの知見が得られると期待される。

3. ニュートリノ物理の展開

標準模型ではニュートリノは質量を持たないため、ニュートリノ振動現象は標準模型を超える物理の存在を示している。これまでのニュートリノ振動実験の成果を発展させ、未測定のニュートリノ混合角 θ_{13} を測定し、さらにニュートリノセクターでの CP 非保存の測定の可能性を探ることが重要である。これらの研究により、ニュートリノ質量の起源を明らかにすることを目指す。また、ニュートリノ振動の知見は、他のフレーバー物理実験の結果と相俟って、大統一スケールに近い超高エネルギーの物理を探る上で重要なと考えられる。

一方、原子核分野では以下の課題が重要である。

1. ハドロン多体系物理の展開

自然界に通常存在する原子核は、陽子と中性子で構成される。ストレンジネスを持つハドロンを含む、通常の原子核とは異なるハドロン多体系を人工的に生成しその構造を研究することで、フレーバーを拡張した新しいハドロン多体系の物理を開拓することができる。K 中間子と核子の強い引力相互作用による高密度の K 中間子原子核の存在が報告され、今後この構造の研究から、低温高密度ハドロン物質の理解が進展する。また、全質量領域にわたるハイパー核の詳細な研究により、核力を拡張したバリオン間相互作用の性質とそれによって作られる多体系の構造を明らかにすると期待される。

質量数の大きい原子核を除けば、安定な原子核では陽子数と中性子数がほぼ等しい。不安定核と呼ばれる短寿命の原子核ではその比が極端に異なっている。自然に通常存在しない不安定核を人工的に生成しその構造を調べることは、アイソスピンを極端に変化させた原子核の構造を探る意味で重要であるだけではなく、宇宙における重い元素の合成過程の解明にも必要である。最近の不安定核の研究では、中性子が周辺に広がっている中性子ハローや皮のように周辺部に局在する中性子スキンの様な従来の原子核にない構造が見つかっており、不安定核の構造と反応の研究の進展が期待される。

2. ハドロン構造の解明

ハドロンの構造は、基本的には3つのクォークからなるバリオンとクォーク・反クォークからなる中間子で記述してきた。しかし、最近これらの構造を超えるハドロンの研究が盛んに行われている。ペンタクォーク、グルーボール、テトラクォーク、ダイバリオン、中間子分子などのエキゾチックハドロンが提案されたが実験的に確定するには至っていない。これら新種のハドロンの有無を明らかにすることは、ハドロン物理学に新しい知見をもたらす重要な課題である。

核子のスピンはクォークの単純なスピンの組み合わせによって説明できないことが偏極構造関数の測定で実験的に明らかになっている。グルーオンのスピンの寄与や軌道角運動量の寄与も特定されではおらず、早期の解明が待たれる。また、非偏極のパートン分布関数の研究も、パートンが担う核子の運動量比の小さい領域と大きい領域で進んでおり、LHC や高エネルギー宇宙線の実験結果を解釈する際に重要となる。

3. クォーク・ハドロン物質の相構造の研究

高エネルギー重イオン反応によって人工的に高密度状態を作り出すことで、ハドロン物質からクォーク・グルーオンプラズマ状態への相転移の研究がなされてきた。最近、RHIC の重イオン衝突実験において、ジェット抑制などの結果が得られ、クォーク・グルーオンプラズマの生成が示唆されている。また、流体的な振る舞いを示す新しい物質状態は興味ある現象である。これから着実にクォーク・グルーオンプラズマ生成の証拠を積み上げ、クォーク物質の物性を解明していくことが求められる。さらに、RHIC や LHC と異なる低温高密度領域においてはカラー超伝導やカイラル対称性の研究が進んでおり、この領域の解明も物質の極限状態としてのハドロン・クォーク物質の性質を相図の広い範囲で理解する上で重要である。

こうした素粒子原子核物理学の研究は宇宙物理学の課題とも深く関連している。宇宙の組成や初期宇宙の進化史を解明する上で、素粒子物理学とりわけ標準模型を超える物理の理解が重要である。特に、宇宙の暗黒物質の同定は重要な課題である。暗黒物質の直接的、間接的探索を進めると同時に、暗黒物質が WIMP の場合には TeV スケールの新しい物理が暗黒物質を提供すると考えられるため、高エネルギーフロンティアの実験により暗黒物質の性質を調べることができる。また、ヒッグスセクターの詳細や、標準模型を超える物理を解明することにより、宇宙の創成、インフレーション、ダークエネルギーの問題、さらには宇宙のバリオン数生成機構等に対する手がかりが得られると期待される。一方、ハイパー核や K 中間子原子核のスペクトロスコピーから得られる情報やカラー超伝導の研究は、中性子星の内部構造を理解する上で重要である。超新星爆発の様に多くの重い元素が生成される過程では、不安定核が重要な役割を果たすため、不安定核を人工的に作りそれらの構造と反応を解明することが必要となる。さらに、高エネルギー宇宙線と地球大気との反応を正確に記述するためには、パートンの運動量比が小さい領域の核子や原子核反応を理解することが必要である。以上に述べたように、素粒子原子核物理学と宇宙物理学の関連は今後さらに深まるであろう。

計画	J-PARC	SuperKEKB	ILC
標準模型の更なる確立		CKM 行列の精密測定	ヒッグス機構の解明
TeV スケールの 新たな物理原理	フレーバー構造 (K, μ)	フレーバー構造 (B, τ)	新粒子の性質の決定
ニュートリノ物理	ニュートリノ混合		
ハドロン多体系物理の 展開	ハイパー核 K 中間子原子核		
ハドロン構造の解明	エキゾチックハドロン パートン構造		
クォーク・ハドロン物質 の相構造の研究	ハドロンの質量 低温高密度物質		

表 1: KEK の将来計画と素粒子原子核物理学の重要な課題との関係。

1.3 KEK の将来計画と世界の情勢

KEK は、12GeV 陽子シンクロトロン (PS) による素粒子原子核実験、トリスタンによる当時最高エネルギーでの電子・陽電子衝突実験、KEKB 加速器による Belle 実験と、加速器を使った実験を通して物理学の発展にこれまで大きく貢献してきた。大学共同利用機関として国内大学の研究の核としての役割を維持しつつ、近年の Belle 実験や 12GeV-PS での実験では、海外からの研究者を広く集め、KEK は国際的な研究センターとなっている。一方で、海外の研究所で行う実験にも日本の研究者が積極的に参加しており、素粒子原子核の研究においては国境を越えた協力が日常となっている。

2006 年の時点で、KEK は 12GeV-PS での実験を停止し、新たに世界最高強度の陽子シンクロトロン J-PARC の建設を進めている。電子・陽電子衝突の KEKB 加速器は世界最高のルミノシティを達成し、B 中間子の研究拠点となっている。この研究をさらに飛躍させるのが、SuperKEKB 計画である。現在建設中で 2007 年から実験が始まる CERN の LHC 実験はヒッグス粒子の探索と TeV 領域の物理の開拓を主目的とするが、加速器と測定器の両面で、日本は開発・建設に大きく貢献している。さらに電子・陽電子衝突でエネルギー・フロンティアを目指すリニアコライダー加速器の R&D でも、KEK は世界の一大拠点となっている。このように、KEK には今後の素粒子原子核物理の研究を進める上での多くの可能性があり、研究実現に向けた準備も進んでいる。このような多くの可能性を持つ研究所は世界を見渡しても稀有である。KEK の将来計画の進め方は、素粒子原子核物理学の発展において重要な意味を持つ。

KEK が検討を進めている三計画の中でリニアコライダーは建設予算が最も大きく、International Linear Collider (ILC) として国際的に進める計画であり、現時点でどこに建設されるかは未定である。SuperKEKB はつくばキャンパスにおいて、J-PARC は東海キャンパスにおいて進める計画となる。

KEK の将来計画を決めるにあたり、前節で掲げた今後の素粒子原子核の研究をいかに強く推進していくかを考えることが重要である。これらをまとめたものを表 1 に示し、世界の情勢も考慮しながら、以下に簡潔に述べる。各計画の詳しい研究目的は次章及び第二部で記述する。

素粒子物理学の課題に関しては、LHC 実験の結果が今後の物理の進展を考える上で重要な端緒となる。LHC によって発見可能性の高いヒッグス粒子や TeV 領域の新粒子に関して、その性質をさらに詳しく調べることが重要であるし、LHC で新粒子の発見がなかった場合にも別の側面から重要課題に取り組める計画を持つことが望ましい。この点で、ILC、SuperKEKB、J-PARC の三計画は、それぞれが独立に別な側面から重要な役割を担う計画になっている。ILC 実験は、LHC の開拓する高エネルギー領域で、ヒッグス粒子や新粒子を直接生成して研究を進める。SuperKEKB は第三世代のクォーク・レプトンの高統計・精密実験により、間接的に高いエネルギーの領域を探り、特にそのフレーバー構造を明らかにする。J-PARC では第二世代のクォーク・レプトンにより同様の研究を進める。

ニュートリノ実験の重要性は近年さらに増しており、J-PARC での実験は各国の実験との厳しい競争になりつつある。CERN-Gran Sasso 間での長基線ニュートリノ実験に加えて、米国フェルミ国立加速器研究所 (FNAL) でもニュートリノのビーム強度を上げた実験の計画が進んでいる。一方原子炉からのニュートリノを使ったニュートリノ振動実験も世界各地で多くの実験提案がなされている。

B 中間子の研究では、KEKB 加速器と激しい競争をしてきた米国スタンフォード線形加速器センター (SLAC) の B ファクトリー実験はあと数年で終了する。LHC で、B に特化した LHCb 実験が始まり、主に B_s 中間子の研究が進み、KEKB/Belle 実験と相補的な情報をもたらす。

原子核の研究では、J-PARC において多種・多様な研究を進めることができる。ハイパー核やエキゾチックハドロンの研究では、当面 J-PARC でしか実施できないユニークな研究もある一方、加速器運転当初に米国の JLab やイタリアの Frascati 研究所で現在進行中の研究と競争関係になるものもある。高温高密度の核物質の研究では、米国のブルックヘブン国立研究所 (BNL) での重イオンコライダー実験 (RHIC) でクォーク・グルーオンプラスマの研究が進んでおり、CERN の LHC でもさらに高いエネルギーでの重イオン衝突が始まっている。J-PARC は、逆に低温高密度状態の研究の場として重要となる。ドイツの GSI 研究所が重イオンを中心としながらも、反陽子ビーム等も含んだ総合的な新しい施設を計画しており、建設が実現すれば、J-PARC での研究と競合するものも多い。

海外施設とのさらに詳しい比較は第二部で個別に論ずるが、KEK の将来計画はいずれも、このような国際競争の中で最先端の研究を展開できるものである。

2 素粒子・原子核研究のシナリオの提言

2.1 提言

本委員会は三つの計画の重要性を認め、それらをすべて実現することで素粒子原子核研究所から生み出される物理成果を最大とする方策をとるべきと考える。それぞれの計画は予算規模も大きく異なり、実験開始に向けてのタイムスケールも異なる。したがって、適切なタイミングで最優先課題を柔軟に移行できる計画を考えるべきである。本委員会は、以下に述べる提言を実現することにより、素粒子原子核の研究に関して多くの成果を途切れなく出すことができると考える。

1. 現在建設中の J-PARC において前委員会の答申で示した最優先の課題（ニュートリノ実験、K 中間子による素粒子原子核実験）が着実に行われるようせよ。このためには、本来の大強度ビームを 2010 年までに回復させることが重要である。また、多彩な研究を進められるよう複数のビームラインの設置を進めよ。
2. KEKB から SuperKEKB への転換をおこない、2010 年代初期には実験を開始せよ。
3. 現時点から積極的に ILC の R&D を行い、2010 年代後半からの実験を国際協力の枠組みの中で実現せよ。

これらのプロジェクトをすべて進めるにあたっては、多額の建設経費・運転経費そして人的資源を必要とする。したがって、

4. 計画を横断した開発・研究チームを組織し対処せよ。また海外からの参加を積極的に呼びかけるとともに、海外からの貢献を受け入れやすい体制を整備せよ。

以下にそれぞれの計画の評価の概要を述べた上で、上記の時期設定の理由を説明する。

2.2 J-PARC

前委員会において、J-PARC について物理の評価と優先度が議論された。その答申 [1] は多くの点で現在でも有効であると判断する。さらに、今までの物理の進展と J-PARC の建設の進行と共に情勢の変化が見られる。

物理成果の点では、ここ数年ニュートリノ実験及びストレンジネス核物理・ハドロン核物理に大きな進展があった。

1. スーパーカミオカンデ、K2K、KamLAND、SNO 等の一連の実験の結果により、ニュートリノ振動が確立した。クォーク混合を説明する CKM 行列とニュートリノ混合の MNS 行列ではその構造が大きく違っている。MNS 行列の要素の中で未だ測定されていない混合角 θ_{13} の測定が、ニュートリノ実験の重要な課題となつた。
2. 軽い原子核と K^- 中間子との強い束縛状態の存在が KEK の実験で報告され、ハイパー核の物理と共に高密度ハドロン多体系の研究への重要な情報が出てきた。また SPring-8 の LEPS 実験で、反ストレンジクォークを含むバリオン（ペンタクォーク）の存在を示唆する実験結果が得られ、新しいハドロンスペクトロスコピーが始まりつつある。

また、J-PARC での実験に向けた K 中間子稀崩壊や大強度ミューオンビームなどの実験技術・測定器の開発にも着実な進展が見られる。

一方で、予算状況が厳しいため、2008年には前委員会が想定していた性能に及ばない状況で運転が始まることが明らかになった。

前段のリニアックが縮小されたため、ビームパワーとほぼ比例するニュートリノのビーム強度は前委員会の想定値の約半分になる。ニュートリノ実験成功の鍵はビーム強度であり、大強度ビームが実現することこそがJ-PARCでの実験の最大の特徴である。加速器実験、非加速器実験をふくめて競合するニュートリノ実験が世界中で多数計画されつつある状況で、ビームパワーの早期回復は最重要課題である。

一方遅い取り出しビームでのハドロン実験施設は、運転開始時には二次ビームラインが一本しか建設できない見込みである。J-PARCは、ハイパー核のスペクトロスコピー等、K中間子を使った素粒子原子核実験において世界をリードする施設であり、また現実に世界中から実験参加の希望が出ている状況である。一本のビームラインしかない実験施設で加速器の運転を長期間行うことになれば、上記のニュートリノ実験とも競合し、J-PARC全体の効率を下げるうことになる。ターゲットから取出すビームラインの増設は、J-PARC全体の予算規模からすると少ない費用で実現できることである。複数のビームラインを設置することができれば、一次ビームの大強度化を早期に実現する利点がさらに増え、実験成果を多くあげることができると考える。

J-PARCが2008年に実験を開始するにあたって、ビームパワーの回復と複数のビームラインの建設を達成して初めて、J-PARCの第一期計画を本格的に始められると判断する。

この本来のJ-PARCからは、以下のような物理成果が期待できる。ニュートリノ振動の混合角 θ_{13} の測定自体の重要性に加えて、その測定値によってはニュートリノ混合行列の複素位相の測定へ将来発展できる可能性がある。この場合B中間子の実験と合わせてクォークとレプトンの両方でのCP非保存の大きさが明らかにできる。二次ビームラインの増強によって、沢山の核種でのハイパー核スペクトロスコピーと共に、K中間子原子核の束縛状態、ペンタクォークの検証を併行して進めることができ、原子核物理学を進める上で質的にも量的にも転換をもたらす。また、K中間子稀崩壊の精密実験に向けた最初のステップの実験を進めることができる。

以上のような状況を考えて、本委員会は、建設が進んでいるJ-PARCの当初規模の施設への復帰を現時点の最優先事項と考える。このためには、前段のリニアックを400MeVへ回復させて、本来の大強度ビームを2010年までに実現することが重要である。また、多彩な研究を進められるよう複数のビームラインを設置することが重要であると考える。

J-PARCでの物理は、上記提言に限定されるものではない。一次ビームを使ったハドロン物理、K中間子の稀崩壊精密実験、大強度ミューオンビーム、そして反陽子を使った実験など、多彩な研究が既に提案されている。大強度陽子加速器のもつ多様性を最大限有効に活用できる施設を実現することはプロジェクト成功の重要な指標ともなる。したがって、第二期の多様な実験に向けた準備を早くから進めることは重要である。上記提言の実現状況や、物理のインパクトに鑑みて総合的に進めていく必要がある。

2.3 SuperKEKB

KEKBでのBelle実験は、B中間子のCP非保存を発見し、小林益川位相がその主要な起源であることを明らかにした。B中間子のさまざまな崩壊モードの測定も含めて高精度のデータを与え、CKM行列の測定精度をこれまでより格段に向上させてきた。これらクォークフレーバー物理の多くの成果は、小林益川理論をはじめとして、理論と実験の両面において、わが国の研究者の独創性が中核となり切り拓いたものである。

KEKB加速器の性能は年々向上し、実験を進める上で理想的な環境を提供してきた。SLACのBABAR実験との熾烈な競争の中で、現在SLACの加速器(PEPII)を凌駕している。2006年にはクラブ空洞の設置によりルミ

ノシティーのさらなる向上が期待され、当面は KEKB が B 中間子の物理で世界をリードし続けると予想される。

これまでの B ファクトリー実験の中心課題は、クォークの CP の破れの源が主に小林益川理論の位相なのか、それとも別の何かなのかを明らかにすることであった。しかし、これからの中間子実験は、新しい混合と CP の破れによる標準模型からのずれを探索することに移行していく。SuperKEKB は、KEKB 加速器の性能の大幅な向上により、TeV 領域の新しい素粒子のループ効果を検出することを可能にする。そして、小林益川位相では説明できない新しい CP の破れの有無を確かめ、LHCb や K 中間子実験のフレーバー物理と合わせて CP の破れの起源、および宇宙のバリオン数生成機構を探求する上で重要な情報を与えると期待される。

SuperKEKB をはじめとするフレーバー物理実験は、高エネルギーでの新粒子の直接探索実験と相補的な情報を与える。TeV 領域において新しい素粒子が発見された場合、LHC 実験における質量測定と同時に、SuperKEKB における $b \rightarrow s$ 遷移の精密測定および $\tau \rightarrow \mu$ 遷移を含む複数のチャンネルでの標準模型からのずれの探索を進めることは、TeV 領域の相互作用の基本構造を理解するうえで重要になる。又、SuperKEKB ではループの効果を通して LHC で直接到達できるエネルギー・スケールより高いスケールにおける新しい物理の効果を検出することも可能である。

LHC では、B 中間子物理に的を絞った実験（LHCb 実験）が 2007 年に始まる。この実験ではこれまであまり研究されていない B_s 中間子の測定が可能となるが、上記の物理的目標を達成する上で重要な精密測定を実行するには、電子・陽電子衝突による Super B ファクトリーが必要となる。

現 KEKB 加速器でのクラブ空洞実証が 2006 年に予定されており、また、高計数率に対応した各検出器要素や読み出し技術の R&D も進んでいることから、SuperKEKB は技術的な点から早期に実現が可能な計画と考えられる。本委員会は KEK の B ファクトリー実験がこれまで世界をリードしていることを高く評価し、SuperKEKB への転換を行って今後も KEK が B 中間子とタウレプトンの研究に関して世界の研究センターとしての場を提供することが重要と考える。

2010 年代初期に SuperKEKB 実験を開始すれば、最初の約 5 年間は短期間でデータ量を倍にし、統計精度をあげていける。これにより、LHC の測定結果と時期を同じくして相乗的な成果を上げることが可能となる。増強を行わない場合、現在の KEKB 加速器を今後長期間運転し続けると、2015 年の時点で統計を倍にするのに 10 年かかるようになってしまい、対コスト効率も低下してしまう。更に、SuperKEKB で数年間に得られるデータ量と同量のデータをアップグレードなしで収集することは不可能である。

B 中間子の重要な崩壊の研究の実験精度を、理論の不定性に迫るまでに向上させるためには積算ルミノシティーで 50 ab^{-1} 程度が必要であると考えられている。ここに到達するには SuperKEKB でも約十年間のデータ収集となる。この長期のデータ収集が必要かどうかは、実際に得られた測定結果や LHC をはじめとする他の実験結果にも依存する。このため後半の運転は、それまでの実験結果や、さらには ILC 建設の進行状況に応じて柔軟に判断すべきである。また、KEKB 加速器の運転で見られたように、絶えざる改善を行い、現在の目標値を上回るルミノシティを目指すことが肝要となる。

以上に述べたように、SuperKEKB は技術的に早期実現可能で、データ倍増に要する時間が少なくて効率のよいデータ収集ができ、LHC との同時進行により相乗効果を期待できる。本委員会は、KEKB から SuperKEKB への転換をおこない、2010 年代初期には実験を開始することが重要であると考える。

2.4 ILC

ILC は電子・陽電子衝突のきれいな環境下での高エネルギーフロンティア実験であり、新たな粒子の発見にとどまらず、その性質を詳細に研究することができる。素粒子物理学における焦眉の課題のひとつである、電弱ゲージ対称性の自発的破れを実験的に明らかにし、さらに素粒子の質量の起源を解明するうえでは、ILC と LHC が決定的な役割を果たす。標準模型が抱える階層性の問題を解決するために、超対称理論や、大きな余剰次元理論などの新しいアイデアも提唱されており、それぞれの理論に伴い新粒子が予言されている。これらの新粒子は LHC 実験での発見が期待されているが、新たな物理の原理を解明するには ILC でその粒子の性質を精密測定することが重要である。本委員会は ILC で行う物理の可能性と意義を高く評価する。

この実現に向けて、国際的な枠組み（GDE）が作られ、世界規模で加速器・測定器の両面での R&D が進んでいる。素核研も加速器施設と綿密な協力のもとに、現時点から積極的に R&D を進め、ILC 実験の実現に向けて世界をリードする役割を担うことが重要である。ただし、LHC でヒッグス粒子や新粒子がどの質量領域に見つかるか、あるいは全く見つからないか、という結果によって、最高衝突エネルギーの設定等、ILC 加速器の最適なパラメータは変化しうる。このため、ILC 加速器の最終設計は LHC 初期の結果を見て最適化するべきであると考える。

ILC 建設場所の決定・誘致に関して現時点では不確定な要素が多い。目指す加速器パラメータが明らかになったところで、立地条件や技術条件に建設費・運転費等の経済的な側面も含めた総合的な判断から、国際的な枠組みで決定される。このような状況の中で ILC を推進するためには、国際協力による R&D において加速器・測定器共に日本の独自性を出していくことが肝要であり、これによって、優位に研究を進めることが可能となる。

以上のような観点から、本委員会は、ILC の実験を 2010 年代後半できるだけ早く開始できるよう、現時点から加速器・測定器の R&D を積極的に進め、日本独自の技術の確立を目指すことが重要であると考える。

2.5 三計画の時期について

三計画の中で最も規模が大きい ILC の建設スケジュールは、素核研の研究の進め方を大きく左右する。現在 GDE を中心に、ILC の早期の実現を目指して、世界的な協力のもとに計画が推進されている。本委員会は ILC が目指す物理の重要性を高く評価する。LHC の結果に対応して ILC が即座に立ち上がるよう加速器・測定器の R&D を今から進めることが重要である。

しかしながら、大規模国際協力として推進する ILC 実験の開始時期は早くとも 2015 年であり、技術開発の必要性、政府間交渉、用地選定の交渉等によってはさらに時間を要する可能性も高い。さらに、本委員会は、LHC の結果が出た上で、最高到達衝突エネルギーの設定等、ILC 加速器のパラメータの最適化を行うことが合理的であると考える。このような点を考慮すると現時点で他の計画を止めてまで ILC に専心することは得策ではない。

米国は逆の方針を取っており、ILC の開発に集中するため、ニュートリノ振動実験を例外として、ほとんどの高エネルギー加速器の運転を 2010 年以前に停止する方針を出している。このため、2010 年以降に運転する高エネルギー加速器は世界中で非常に限られてくる。J-PARC と SuperKEKB はともに輝度（強度、ルミノシティー）に関して世界最高の性能を持つ加速器となり、世界の素粒子原子核物理分野をリードするとともに LHC の物理と相補的な実験を展開できる。

J-PARC を充分なビーム強度で早期に立ち上げ、熾烈な国際競争が予想されるニュートリノ振動実験で優位に立ち、さらに素粒子原子核実験を複数のビームラインによって推進することができれば、建設した J-PARC 施設を効率よく運用でき、着実に成果が得られる。

SuperKEKB に関しては、現 KEKB 加速器でのクラブ空洞実証が 2006 年に予定されており、SuperKEKB は技術的な点から早期に実現が可能な計画と考えられる。SuperKEKB への転換によるルミノシティー増強を早期に行えば、引き続きデータ倍増に要する時間が少なくて効率のよいデータ収集ができる。B 中間子とタウレプトンの崩壊データにより LHC 実験との相乗効果を高めることも可能となる。

J-PARC 建設後、即座に SuperKEKB 建設に進み、2010 年代後半に ILC 実験を開始するというシナリオは、KEK が現有する施設と研究環境を有効に使える上に、2010-2020 年代の長い期間世界をリードする研究環境が得られる。LHC からの成果と合わせて、自然界の成立ちの理解に大きく貢献することができる。また、次のプロジェクトの建設を行いながら加速器を使った研究を切れ目なく続けていくことができ、大学院の教育や次世代の研究者の養成に対する効果も大きい。

2.6 素核研の取り組みかた

三計画を併進させることは、予算的にも人的資源的にも困難が予想される。ここで提言した時間優先度についても、今後得られる成果によっては大きな見直しが必要となる可能性もある。このような状況で柔軟にかつ効率よく研究を進めるために、素核研の取り組みかたについていくつかの提言を行いたい。

個々の計画の枠を越えた研究体制の確立 いずれの計画も実験規模が大きくなり、新しい測定器やそのデータ収集を実現するには多くの開発研究が必須となる。データ解析の手法、事象シミュレーションの開発、計算機資源の運用法等でも、多くの共通の課題をもつ。LHC 実験の結果も含めて、目指す物理も競争的かつ相補的であり、互いの結果を合わせることにより理解が深まると考えられる。このため、各計画に専心する部隊がみずからプロジェクトの枠の中にとどまること無く、計画を横断した形での開拓チームを組織し、より深い協力関係の下に開発研究を進めることが重要である。この意味で、素核研が最近設置した測定器開発室などの施策は重要であり、今後も発展させることが望ましい。

素核研は異なる複数のキャンパスや実験サイトで研究活動を行うようになる。研究所や分野としての一体感を保ちながら研究のアクティビティと協力関係を高めていくために、プロジェクトの枠を越えた研究を進める必要がある。

国際化の推進 三計画ともに、今後 10 年以上にわたって素粒子原子核研究をリードする計画であり、外国の研究者にとっても魅力のあるものである。このため、各プロジェクトともさらに国際色をより強め、国内外の大学・研究所との共同研究を進めるとともに、外国の研究者をさらに取り込み、必要なら資金面での協力を国際的に進める必要がある。KEK はこれまでにも多くの国際協力の実績を持つが、特に海外からの資金の受入とその運用方法には多くの課題が残っている。法人化に伴い自由度が大きくなっていることを有効に捉え、海外の研究所の運用法を研究し、国際化をこれまで以上に推進することが重要である。

最後に、広報活動のさらなる重要性について強調したい。素粒子原子核の研究は、根源的な謎を解こうという知的欲求のもとに、私たちの世界の要素とそこに働く力を探求し、それがどのように構成されていくかを理解しようとするものである。その研究成果は必ずしも日常生活に直ちに反映できるわけではないが、貴重な知的財産を築きあげていることや新しいものの見方を生み出すことで社会に貢献している。そのことを積極的に主張し説明していく必要がある。また、高度で大型の加速器・測定器を建設運転する上では多くの技術開発が必要であり、その技術革新が社会の発展を支えるという事実も、より強調すべきである。多額な建設運転経費を使って研究を

進めていることを肝に銘じ、この研究の魅力と成果を常にわかりやすく公表することが重要となる。近年の広報室の設置、コミュニケーションプラザの開設等、KEK の広報活動は非常に改善されているが、知的情報をオープンにかつ魅力的に公開することで社会貢献を進めるよう、個々の研究者としてまた分野全体としても常に努力をしていく必要がある。

第II部

各計画における研究プログラム

1 J-PARC

1.1 J-PARC と原子核素粒子実験施設

J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex)^[2] は、KEK と日本原子力研究開発機構 (JAEA)¹ が共同で JAEA 東海研究開発センター・原子力科学研究所の南敷地に建設を進めている大強度陽子加速器施設である。加速器 [4] は 400 MeV リニアック、速い繰り返しの 3 GeV シンクロトロン、主リング 50 GeV シンクロトロンで構成される。主リングの最大ビーム強度は陽子数で 300×10^{12} protons per spill、平均ビーム電流で $16 \mu\text{A}$ 、ビームパワーで 0.75 MW であり、デザイン値達成時には世界最大級のビームパワーをもつ陽子加速器となる。素核研は主リングからの速い取り出しビームを用いる“ニュートリノ実験施設”と遅い取り出しビームを用いる“ハドロン実験施設”（両者を総称して“原子核素粒子実験施設”と呼ぶ）の建設を担い、12GeV-PS の限られたビームパワーの中でこれまで世界に先駆けて進めてきた数々の素粒子原子核実験のプログラムを飛躍的に発展させることを目指している。

前回の素粒子原子核研究計画委員会 (2001 年 10 月～2002 年 9 月) は、「50GeV 陽子加速器における実験を素核研としてどう進めるべきか」を検討課題として取上げ、提言を行った [1]。今回の報告書では、前回以降の J-PARC 施設と物理をめぐる情勢の推移に重点を置いて述べることにする。

1.2 2008 年度までに建設される加速器・実験施設

J-PARC の建設は 2001 年から行われている。主リングは 2008 年始めにビーム調整を開始し、それに続く実験施設へのビーム受け入れにより現在行われている加速器・施設の建設を完成させることを目指している。やや遅れて完成するニュートリノ実験施設へのビーム取り出しは 2009 年に予定されている。最初に行う実験のプロポーザルが 2006 年 4 月末を締切りとして募集されている [5]。

2008 年度までに建設される加速器では;

- リニアックのエネルギーは 181 MeV で
- 主リングは速い取り出しでは 40 GeV、遅い取り出しでは 30 GeV で運転される²。

そのため、陽子ビームパワーは速い取り出しの場合で、特に対策が施されない場合、デザイン値の 0.75 MW ではなく 0.4 MW 程度になる。これは、特にニュートリノ振動実験にとって重大な問題である。また、

- ハドロン実験施設³ の一次ビームラインは一本、二次粒子生成ターゲットは一つで、設置できるビームラインの数が限られている。建設の本予算では二次ビームラインについては殆ど考慮されておらず、実験装置は

¹日本原子力研究所と核燃料サイクル開発機構が 2005 年 10 月 1 日に統合し、独立行政法人日本原子力研究開発機構 [3] となった。

²主リングのライホイールシステムが予算化されず、ハドロン実験施設のインフラストラクチャーが予算上の制約を受けたため。

³実験室の大きさは幅 60 m × 長さ 56 m で、当初のデザイン（長さ 100 m）の約半分の広さである。参考までに、12GeV-PS の実験が行われた東カウンターホールは幅 50 m × 長さ 100 m、北カウンターホールは幅 48 m × 長さ 56 m である。

一切手当されていない。また、インフラストラクチャー（電力、冷却水）は本予算では二次ビームライン一本、実験装置一台分しか手当がされていない⁴。

J-PARC のこのような状況は、前回の委員会が報告書を作成するにあたって想定していた加速器・実験施設の性能に及ばないものである。当初予定されていた項目の幾つかが、2008 年の運転開始時点で積み残しとなっていることに注意が必要である。この状況で、素核研は J-PARC での共同利用実験を始めなくてはならない。

国内外の高エネルギー陽子加速器のパラメータを表 2 に示す。J-PARC は現在建設が行われている唯一の陽子加速器施設である。ビーム強度のデザイン値が達成されれば、ビーム電流、パワーともに海外の加速器を大きく凌ぎ、世界最大級のニュートリノ・K 中間子・ハドロン・ミューオン・反陽子のビームによる素粒子原子核実験が可能になる。また、将来ビームパワー数 MW の施設を実現するための最短距離に位置することになる。その一方、新しい加速器を新しい敷地に建設することにより生じている困難があり、海外の各施設が検討している増強計画との競争もある。研究環境や外国からの研究者の受け入れも含めた各種インフラストラクチャーの整備も課題となっている。

研究所	加速器	エネルギー (GeV)	サイクル当たり 陽子数 ($\times 10^{12}$)	繰り返し (秒)	ビーム		コメント
					電流 (μA)	パワー MW	
KEK	12GeV-PS	12	6	2.2	0.5	0.006	2005 年度まで運転
J-PARC	50GeV-PS	50	300	2.9	16.	0.75	(デザイン値)
		40	200	2.9	11.	0.4	速い取出し
		30	200	3.4	10.	0.3	遅い取出し
米・BNL	AGS	24	65	6.4	1.6	0.04	遅い取出し
米・FNAL	MI	120	40	1.9	3.4	0.40	2009 年以降 0.7 MW が可能
欧・CERN	SPS	400	6×24	36.0	0.6	0.26	
独・GSI	FAIR	29	25	≤ 0.5	8.0	0.23	(未承認)

表 2: 主要な高エネルギー陽子加速器のパラメータ。明記していない場合は速い取出しのパラメータを示す。

リニアックのエネルギーは 3 GeV シンクロトロンの設計変更に伴い変更された⁵。そのエネルギーを当初のデザインの 400 MeV へ早急に回復させることは、J-PARC のビームパワーのデザイン値を達成するために不可欠である⁶。400 MeV リニアックの建設を 181 MeV リニアックの完成直後に開始し、夏季休止期間を利用して 2008 年度から 2010 年度にかけて行うというコミッショニングシナリオが立てられている。

J-PARC 加速器・実験施設の 2008 年度以降の増強計画（原子核素粒子実験施設以外の実験施設の増強も含む）、いわゆる“第二期計画⁷”については、素核研を含めた J-PARC の運営体制の中で議論され、実験審査委員会 (PAC)、国際諮問委員会 (IAC) などで決定していくことになる。

⁴このような状況を補うために、12GeV-PS の機器の改造と移設などによるビームラインと実験装置の整備が推進されようとしている。

⁵リニアックの建屋は 400 MeV 対応となっている。

⁶低いエネルギーでの入射では、空間電荷効果が大きく、ビーム強度を低くしてしまう。

⁷2008 年度までに執行される予定総額 1527 億円による建設を J-PARC の第一期計画とし、それ以降の建設を総称して J-PARC 第二期計画と呼んでいる。J-PARC は建設開始の時点で、二期の予算を合わせて総額 1890 億円のプロジェクトとされた。

1.3 J-PARC での素粒子原子核実験

J-PARC での素粒子原子核実験が目指す物理とテーマを表 3 にまとめる。

研究プログラム	物理	テーマ
ニュートリノ振動	レプトンフレーバー	ニュートリノ質量、MNS 行列、CP 対称性
K 中間子稀崩壊	クォークフレーバー	CP 対称性、時間反転対称性、CKM 行列
ストレンジネス核物理	クォーク・ハドロン多体系	バリオン間相互作用、低温高密度核物質
ハドロン核物理	クォーク・ハドロン多体系	ハドロン質量の起源、QCD の相構造、パートン構造、エキゾチックハドロン
大強度ミューオンビーム 反陽子科学	レプトンフレーバー 反物質	フレーバーの破れ、荷電レプトン行列 CPT 対称性、精密分光

表 3: J-PARC での素粒子原子核実験のキーワード。

実験の概要と物理的意義、2008 年度までに建設される施設で可能な到達点と施設増強への展望、および海外の計画との比較について、前回の委員会以降になされた研究の進展を中心に述べる。

1.3.1 ニュートリノ振動実験

ニュートリノ振動研究の現状は

- スーパーカミオカンデ (SK) の大気ニュートリノ観測で発見されたニュートリノ振動が、長基線加速器実験 (K2K) でも追試・確認された。大気ニュートリノ振動におけるパラメータが精密に測定され、SK と K2K における最新結果は、 $|\Delta m_{23}^2| = 2.5(1.9 \sim 3.0) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ 、 $\sin^2 2\theta_{23} = 1(> 0.9)$ である。
- SK とカナダのSNO 実験で太陽ニュートリノ振動が観測され、更に原子炉反ニュートリノを使った KamLAND 実験でニュートリノ振動が追試・確認された。太陽ニュートリノ振動におけるパラメータが精密に測定され、SK、SNO、KamLAND からの最新結果は、 $\Delta m_{12}^2 = 7.9_{-0.5}^{+0.6} \times 10^{-5} \text{ eV}^2$ 、 $\sin^2 2\theta_{12} = 0.82 \pm 0.07$ である。

これらの成果によりニュートリノ振動が確立し、次世代ニュートリノ振動実験の目標がより明確となった。

3 世代間のニュートリノ振動は牧・中川・坂田ニュートリノ混合行列 (MNS 行列) で記述できる。ニュートリノ振動現象を通じ、ニュートリノ質量の二乗差 (Δm_{12}^2 、 Δm_{23}^2) と MNS 行列中の 3 つの混合角 (θ_{12} 、 θ_{23} 、 θ_{13}) と一つの複素位相 (δ) が測定できる。現時点では Δm_{23}^2 の符号、第 3 の混合角 θ_{13} 、CP 非保存を引き起こす δ はまだ決定されていない。これらのパラメータを決定するためにはまず、第 3 の混合角 θ_{13} を測定することが必要不可欠である。

J-PARC における長基線ニュートリノ振動実験 (T2K) の目標は

1. ニュートリノ振動による ν_e 出現現象により、未発見の第 3 の混合角 θ_{13} を世界最高感度で $\sin^2 2\theta_{13} < 0.008$ まで探索する。この測定精度は、現在原子炉反ニュートリノ消滅実験で測定されている感度よりも 20 倍高感度である。
2. ニュートリノ振動パラメータ $\sin^2 2\theta_{23}$ と Δm_{23}^2 を精密に決定する。測定精度は現在の 20 倍、 $\delta \Delta m_{23}^2 < 1.0 \times 10^{-4} \text{ eV}^2$ 、 $\delta \sin^2 2\theta_{23} = 1\%$ を目指す。

3. θ_{13} が有限値の場合、ニュートリノ振動で CP 非保存が観測できる可能性が大きい。例として、 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.01$ の場合、ニュートリノ振動での CP 非対称度 $\{ \frac{P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) - P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)}{P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) + P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)} \}$ は最大 60% となる。この場合は実験期間を延長するか、加速器の強度が上れば CP 非保存の研究が可能となる。

T2K は、大強度低エネルギー ニュートリノビームを使い、295km 遠方に位置する SK の検出器でニュートリノ振動を測定する。T2K では非ビーム軸 (Off-axis) ニュートリノ生成法を採用することで、ニュートリノ振動に高感度で且つ低バックグラウンドの測定が行える。

2008 年度までの施設で可能な到達点 T2K 実験成功の鍵はビームパワーであり、J-PARC のデザインビームパワー 0.75 MW を達成するためにリニアックのエネルギーを 400 MeV に回復することが最優先事項である。T2K 実験の探索感度 $\sin^2 2\theta_{13} < 0.008$ (90% C.L.) は、0.75 MW によるニュートリノビームが達成されれば 5 年間で到達できる。競合する実験が世界に多数存在する状況で、ビームパワーの早期回復は急務である。また、ビームパワーが更に 2 倍（もしくは実験期間が 2 倍）になれば、T2K で CP 非保存の徴候を発見できる可能性もある [6]。

施設増強への展望 ν_e 出現事象に対し最良の探索感度を達成するために T2K では、ビーム標的から 2km の地点に水チェレンコフ検出器を設置することを考案している。また、将来の CP 非保存の研究のためにビームパワーの数 MW への増強、反ニュートリノビーム生成、メガトン水チェレンコフ検出器（ハイパーカミオカンデ）の建設も検討中である。

海外の計画との比較 FNAL では、新しい長基線ニュートリノ振動実験 NO ν A が 2005 年に PAC で採択された。FNAL メインインジェクター (MI) のニュートリノビームを使い、新たに 30 キロトンの全感知型液体シンチレータ検出器を約 900km 離れた Off-axis 地点に建設する。2009 年以降は全陽子ビームをニュートリノ実験に使用することで、NO ν A は 0.7 MW 強のビームパワーを達成する。実験感度 (ν_e 出現の探索感度) は T2K とほぼ同等で、 $\sin^2 2\theta_{13} < 0.01$ となる。FNAL では既に MI によるニュートリノビームラインが運転中であり、NO ν A は T2K に対してビームにおいては優位な立場にある。もしも NO ν A に 2007 年度から予算が執行された場合は、2009 年度には半分 (15 キロトン) の検出器で実験を開始し、2011 年には全検出器が完成する。このため、T2K の開始が遅れたり予想したビームパワーが早期に達成されない場合は、NO ν A の後塵を拝する可能性もある。加速器を用いる長基線実験では他に、感度は落ちるが FNAL-MINOS 実験、CERN からのニュートリノビームを用いる OPERA 実験と ICARUS 実験がある⁸。

NO ν A 実験の特徴は、900km の長基線のおかげで Δm_{23}^2 の符号に感度が高いことである。逆に T2K の距離では Δm_{23}^2 の符号に感度が低い分、CP 非保存の効果がはっきりと見える。よって、第 3 の混合角 θ_{13} の発見に対しては NO ν A 実験は強力なライバルであるが、その後のニュートリノ物理の進展においては相補的な役割を担う。

加速器実験以外に、原子炉反ニュートリノを使った θ_{13} 測定実験：国内での KASKA 実験、フランス Double Chooz 実験、米国 Braidwood 実験、中国 Daya-Bay 実験、韓国 RENO 実験がある。Double Chooz 実験は T2K と同じく 2009 年にデータ収集を開始する予定であり競合する。また、RENO 実験には建設予算が最近認められた。しかし、原子炉 θ_{13} 実験で観測するニュートリノ振動は純粋に θ_{13} による寄与のみであり、CP 非保存や Δm_{23}^2 の符号による効果は現れない。このため、原子炉反ニュートリノ実験で決めた θ_{13} を使い T2K のデータから CP 非保存項の効果を引き出すことが可能となり、原子炉反ニュートリノ実験は加速器実験と相補的ともなる。ただし、

⁸ 実験感度は $\sin^2 2\theta_{13} < 0.05$ 程度である。

原子炉反ニュートリノ実験は数%以下の僅かなニュートリノ事象の減少を探索する実験であるため、系統誤差の制御が格段に難しく、一般的には加速器実験よりも θ_{13} に対する感度が低い⁹ ($\sin^2 2\theta_{13} < 0.02 \sim 0.03$)。

上記以外にも、 β ピーム、ニュートリノファクトリーといった先進的なニュートリノプロジェクトも世界では計画されている。しかしあくまで基本原理を実証するための基礎研究の段階であり、当面は T2K 実験と比較する段階ではない。

1.3.2 K 中間子稀崩壊実験

既存の陽子加速器を用いた実験 (KEK-E391a, BNL-E949/E787, KEK-E246) をもとに、J-PARC での実験にむけた手法の確立と最適化が進められている。

- KEK-E391a はビームラインと測定器を完成させ、 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊に特化した初めての実験として 2004 年春、2005 年春、2005 年秋の三回のデータ収集を行った。最初のデータの一部（ビームタイム一週間分）を先行して解析し、上限値 2.9×10^{-7} を得て¹⁰、2005 年夏に国際会議で発表した [7]。全データを合わせて、分岐比感度 2×10^{-9} に到達することを目指している。
- BNL-E949 は 2002 年に最初のデータ収集を行い、 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 崩壊の新たな信号イベント (BNL-E787 のデータと合わせて 3 イベント) を観測して分岐比 $(1.47^{+1.30}_{-0.89}) \times 10^{-10}$ を測定した [8]¹¹。
- KEK-E246 は $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$ ($K_{\mu 3}$) 崩壊による時間反転対称性の破れの最終結果：ミューオン横偏極度 $P_T = -0.0017 \pm 0.0023(\text{stat}) \pm 0.0011(\text{syst})$ ($|P_T| < 0.0050$) を 2004 年に報告し [9]、マルチ Higgs モデルに対するより厳しい制限を与えた。

J-PARC での K 中間子稀崩壊実験の目標は、稀崩壊 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 、 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ の分岐比の測定や $K_{\mu 3}$ 崩壊・ $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \gamma$ ($K_{\mu 2\gamma}$) 崩壊による時間反転対称性の破れの探索によって、新しい物理で生じる CP 非保存とフレーバーの構造を解明することである。これらのプロセスは、標準模型の効果が抑制されており、理論的不定性が小さくてかつよくコントロールされているという特色がある¹²。標準模型の予想値より大きい現象が観測された場合はもとより、上限値によっても新しい物理として可能な様々なモデルに制限を与えることができる。稀崩壊 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 、 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ を各々 100 イベント以上集めて分岐比を $\leq 10\%$ の精度で測定し CKM 行列のパラメータ η と ρ (そしてユニタリティ三角形の面積にあたる Jarlskog 不変量) を K 中間子 ($s \rightarrow d$ 遷移) のみで決定すること¹³、 $K_{\mu 3}$ 崩壊・ $K_{\mu 2\gamma}$ 崩壊のミューオン横偏極度を 10^{-5} の感度まで探索することを目指している。J-PARC での実験の手法 (ペンシル K_L^0 ピーム、静止 K^+ 崩壊) はこれまでの実験で用いられてきたものである。

2008 年度までの施設で可能な到達点 前回の報告書 [1] で述べられているように、特に $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の精密測定を達成するための開発研究は容易でないため、KEK-PS での実験をステップにしてそれを J-PARC におい

⁹ 感度の系統誤差を現在最高感度にある Chooz 実験の 2.7% よりも 5 倍以上、0.5% 程度まで改善できれば、加速器実験と同程度の感度を持つことも可能である。

¹⁰ KEK-E391a は終状態 $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ で探索を行う。この値は、FNAL-KTeV 実験が終状態 $\pi^0 \rightarrow e^+ e^- \gamma$ で探索を行って得た上限値 5.9×10^{-7} を既に更新している。

¹¹ 米国 DOE の方針の転換により、BNL-E949 はこの時点 (実験承認時に認められたビームタイムの 20% を実施) で実験を停止させられた。

¹² 標準模型は $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の分岐比を 3×10^{-11} 、 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 崩壊の分岐比を 8×10^{-11} 、 $K_{\mu 3}$ 崩壊でのミューオン横偏極度を $\leq 10^{-5}$ と予想している。理論の不定性は数%以下である。

¹³ この場合の (ρ, η) 領域の決定精度は、現時点での global な CKM parameter fit の精度と同程度 (η の精度は ± 0.02) になる。K 中間子による $\sin 2\phi_1$ を (ρ, η) 領域から求める ($\equiv S_{\pi\nu\bar{\nu}}$) $\Delta S_{\pi\nu\bar{\nu}} \equiv S_{\pi\nu\bar{\nu}} - S_{J/\psi K_S^0}$ の精度は ± 0.05 である。

て発展させ、精密実験にむけた段階的な開発を行う必要がある。J-PARC の大強度ビームを用いた究極の実験が feasible であることを示すため、J-PARC の初期の段階から KEK-E391a 実験や KEK-E246 実験の装置を生かしてビームラインなどのスタディを開始し、実験装置の建設に入る。初期の実験では、良い S/N で標準模型レベルの $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊を数イベント捉えて世界初の観測を行うこと、 $K_{\mu 3}$ 崩壊・ $K_{\mu 2\gamma}$ 崩壊のミューオン横偏極度を 10^{-4} の感度まで探索することが目標になる。 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 崩壊については、BNL-E949 実験を上回る感度に達するにはビームの最適化と新しい実験装置が必要であるため、長期的なプロジェクトになる。

施設増強への展望 低運動量の荷電 K 中間子のための K1.1 ビームラインは、 $1.1 \text{GeV}/c$ の K^- を想定してデザインされており、静止 K^+ 崩壊実験を行うには適していない。また、 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の最初の実験のために用意されている 16 度方向、長さ 20m のエリアでつくる中性ビームでは K_L^0 のフラックスが不足するため、分岐比の精密測定を将来行うことが出来ない。ハドロン実験施設の実験室の拡張によって、静止 K^+ 崩壊実験のための K^+ ビーム、 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 測定実験用の中性ビームなどを建設することが可能になる。リニアックと主リングのエネルギーの回復によって、J-PARC での K 中間子稀崩壊実験のための大強度ビームが実現できる。

K 中間子稀崩壊の精密測定の実験では、ビームライン・測定器の建設とエンジニアリングランを約 3 年で行った後、物理データの収集を 2 ~ 3 年かけて行うことになると予想される。

海外の計画との比較 BNL での “Rare Symmetry Violating Processes (RSVP) 計画” ($K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊測定のための KOPIO 実験を含む) が中止されたため、現時点では $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊について海外で競合する実験は無い。CERN では、これまで K_L^0/K_S^0 や K^+/K^- の CP 非保存を研究してきた NA48 実験の検出器をもとに、 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 崩壊を測定する実験 (NA48/3 ≡ P326) が計画されている。75 GeV/c の unseparated K^+ ビームからの decay in flight で $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 崩壊を測定する実験で、2 年間のランで 80 イベント測定することを目指している¹⁴。 $K_{\mu 3}$ 崩壊・ $K_{\mu 2\gamma}$ 崩壊でのミューオン横偏極度の探索実験は、J-PARC 以外では計画されていない。

1.3.3 ストレンジネス核物理の実験

J-PARC での原子核物理の柱の一つは、ハイパー核、K 中間子原子核、ハイペロン・核子二体系などのストレンジネスをもつハドロン多体系を研究するストレンジネス核物理である [10]。J-PARC では、これまで KEK-PS や BNL-AGS において日本人研究者が中心となって開発し発展させてきた研究手法をさらに発展させて、ストレンジネス -2 の原子核 (Ξ ハイパー核、ダブル Λ ハイパー核) の本格的な研究、 Λ ハイパー核の精密ガンマ線分光による全質量数領域でのハイパー核構造の決定、中性子過剰 Λ ハイパー核や Σ ハイパー核の分光、 Λ ハイパー核の弱崩壊の研究、 Λ , Σ , Ξ と核子の散乱実験、K 中間子原子核の系統的研究などが行われる [11]。これらのデータをもとに、バリオン間相互作用が明らかになり、クォーク描像に裏打されたバリオン多体系の本質的・統一的な理解が進むとともに、低温高密度状態での QCD 相転移の手がかりが初めて得られる。

これらの研究の詳細は前回の報告書 [1] に述べられているので、前回の報告以降の研究の経緯のみ述べる。

- K 中間子原子核の発見

KEK-E471 実験で、 K^- と ${}^3\text{He}$ の深い束縛状態 (束縛エネルギー 180 MeV) の存在を強く示唆するデータが得られた [12]。この状態では、K 中間子が核子を強く引き付けることで核子密度が通常の原子核の 8 倍に

¹⁴P326 実験はまだ承認されていない。J-PARC では静止 K^+ 崩壊で実験を行うのに対して、P326 は $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ にはこれまで用いられたことのない decay in flight による方法を採用しているため、実験手法の確立と最適化に要する年数は未知である。

なっていると予想され、ハドロン相からクォーク相への相転移に相当する変化が起こっている可能性がある。Frascati 研究所の DAΦNE での実験データからも $K^- pp$ の強い束縛状態の存在が示唆されている [13]。このような K 中間子原子核を通して、これまで実験的手がかりのなかった低温高密度領域のハドロン物質の研究が進展すると期待される。

J-PARC では、質量数依存性、励起状態、崩壊様式などの系統的研究により、K 中間子原子核の大きさ(密度)、アイソスピン依存性、構造(ハドロン多体系なのか、それともクォーク多体系と解釈されるべきものなのか)が解明できる。また、K 中間子を 2 つ含むさらに高密度の状態も研究可能となる。

- 中性子過剰ハイパー核の発見

KEK-E521 実験では、 $^{10}\text{B}(\pi^-, K^+)_{\Lambda}^{10}\text{Li}$ 反応を用いて初めて中性子過剰なハイパー $_{\Lambda}^{10}\text{Li}$ が生成された [14]。J-PARC では、このような中性子過剰ハイパー核の系統的研究によって、核内で重要な役割を果たす $\Lambda N - \Sigma N$ coupling 相互作用の解明を進める。その情報は、中性子星の内部構造を理解する上で重要である。

2008 年度までの施設で可能な到達点　　ストレンジネス核物理では、(a) Ξ ハイパー核・ダブル Λ ハイパー核の分光および Λ ハイパー核の精密ガンマ線分光、(b) K 中間子原子核研究の二つの Letter of Intent が、稼働当初に行うべき Day-1 実験であると実験施設委員会¹⁵によって評価された。これらの実験だけでも K1.8(最大運動量 1.8 GeV/c), K1.1(最大運動量 1.1 GeV/c) の二本の二次ビームラインが必要である¹⁶ が、現状では一本(K1.8)のみ設置される予定である。その場合、一つの実験しか走れないために効率が悪い上、もしもガンマ線分光や K 中間子原子核の実験を K1.8 ラインでの 1.1 GeV/c のビームを使って行うとなれば、K ビーム強度が K1.1 に比べて一桁以上低くなるので、極めて長いビームタイムが必要になる。

施設増強への展望　　2008 年度までに建設されるハドロン実験施設でターゲット一つから複数のビームを引き出すことは可能ではあるが、他の実験で必要なビームラインや実験場所のスペースを考えると自由度が少なく、将来の大きな発展が期待できない。実験室を拡張してターゲットを増やしビームラインを増設することが強く望まれるのはそのためである。実験室の拡張によって、高分解能 π 中間子ビームライン¹⁷などを建設することが可能になり、J-PARC 提案時に考えられていた多種・多様な実験の目標を達成することができる。

リニアックと主リングのエネルギーの回復によって、二次ビーム強度を当初想定されていたレベルに早急に回復する必要がある。また、主リングビームエネルギーの 50 GeV への回復により K 中間子・ π 中間子の生成量は 2-3 倍に増え、実験側の要請に最適化された大強度ビームラインを建設することが容易になる。

ストレンジネス核物理の実験では、充分な二次ビーム強度があれば、一つの実験課題は短期間(数週間から数カ月のビームタイム)で完了する。ハドロン実験施設が、多数の実験課題を効率よくかつ柔軟に進めることができる設備環境にあることが望まれる。

海外の計画との比較　　J-PARC で計画されているこれらの実験は、海外で進行中・計画中の類似の研究のほとんどを凌駕するが、ビームライン不足による実験の効率低下が解消しない場合や高分解能 π 中間子ビームラインの新設が遅れる場合には、他施設に先に結果を出されることにもなりかねない。

¹⁵2002 年末までに提出された Letter of Intent を評価し実験施設の設計を定めるために、2003-2004 年に作業を行った。

¹⁶他にもストレンジネス核物理では、K1.8, K1.1 を用いるハイペロン核子散乱、中性子過剰ハイパー核や Σ ハイパー核の分光、ハイパー核弱崩壊の研究などの多数の実験が提案されている。

¹⁷ Σ ハイパー核や中性子過剰 Λ ハイパー核を含む様々なハイパー核の高分解能(200 keV FWHM) 分光が初めてできるようになり、世界的に極めてユニークである。

JLab で推進している $(e, e' K^+)$ 反応による高分解能 (400 keV FWHM) Λ ハイパー核分光は、J-PARC でのハイパー核の高分解能 (200 keV) 分光と類似した研究であるが、生成する状態や実験上の制約の違いのため、相補的である。DAΦNE および GSI(重イオンビーム) では現在 K 中間子原子核の研究を進めており、J-PARC 稼働前にある程度のデータを出される可能性がある。また、この両施設では中性子過剰ハイパー核の研究も予定されており、J-PARC の実験に先行してデータを出されるかも知れない。GSI で計画されている FAIR 加速器では、反陽子を用いたダブル Λ 核の研究が提案されており、J-PARC のハイパー核プログラムの中心課題である $S = -2$ の系の研究にとって競争相手となる可能性がある。

1.3.4 ハドロン核物理の実験

強い相互作用をする物質をその基本的構成要素であるクォークの相互作用から理解しようとするのがハドロン核物理である [15]。クォークとグルーオンのダイナミクスを記述する量子色力学 (QCD) における中心的な課題に対して、J-PARC では大強度ビームを用いた高精度実験により解答を見出していく。

- エキゾチックハドロンの探索

従来のハドロン ($q\bar{q}$, qqq の束縛状態) としては解釈できないエキゾチックハドロンの存否は、クォーク閉じ込めの機構解明そして低エネルギー QCD をより深く理解するための重要な手がかりである。前回の委員会以降、2002 年に SPring-8/LEPS で最初に報告された $S = +1$ のエキゾチックバリオン Θ^+ や B ファクトリー実験で報告された新種類のハドロンにより、ハドロンスペクトロスコピーは素粒子原子核物理のホットトピックスとして新しい展開を見せている。

Θ^+ は当初多くの実験で肯定的な結果が得られ存在が確立したかに思われたが、2004 年以降否定的な報告が相次ぎ、混沌とした状況にある。これを打開するため様々な実験が進行中であるが、統計が限られているうえに結果の解釈にモデルが介在するため、簡単には結論が出ない可能性がある。 Θ^+ のみならず理論的に存在可能なエキゾチックバリオンを探査するためには、運動量分解能に優れたハドロンビームによる系統的な実験が必要となる。エキゾチックバリオンを構成するフレーバーを核内に直接持ち込んで共鳴の有無を調べるとともに、ハドロンと原子核の様々な組み合わせによる散乱データの解析から生成機構の解明を進めることができる。特に Θ^+ に関しては、低エネルギー K^+ ビームを用いることにより、崩壊の逆反応で探索することが可能で、その存否に決定的な結論を出すことができる。

- ハドロン・原子核のパートン構造

ハドロン構造研究はこれまで、レプトン・核子間の深非弾性散乱を中心に行われてあり、核子内部のクォーク、反クォークやグルーオンの発見等、標準模型の確立に大きな成果をあげてきた。近年では、ドイツ DESY 研究所の衝突型加速器 HERA での実験によって、陽子の構造関数の測定をパートンの担う運動量比 x の非常に小さい領域まで精度よく行うことができた。ハドロン構造研究の成果の一つとして、LHC での陽子陽子反応の全断面積が数パーセントの精度で予測できるようになっている。

核子の構造は非常に広い運動学領域で測られてきたが、未だに解明できていない大きな謎が残っている。その一つは運動量比 x が大きくて 1 に近い領域でのパートンの振る舞いであり、もう一つは核子のスピンをパートンがどのように担っているかという問題である。J-PARC ではこれらの謎に、衝突・散乱実験を通して挑戦できる。

- 核子や原子核のパートン構造（特に反クォークの寄与）を x の大きな領域で調べるために、ハドロン・ハドロン衝突からのレプトン対生成（Drell-Yan 過程）を用いる。 $x \sim 0.3$ までの \bar{u}/\bar{d} は FNAL での Drell-Yan 実験で測定され、その比が大きく 1 からずれていたため話題になった [16]。QCD による第一原理からの計算は高い x でのクォークの分布を種類別に求めるまでには至っておらず、現象論的な模型を構築する上で精度よい実験が重要となる。J-PARC で 50GeV の一次ビームを使って実験を行えば、FNAL の実験の 10 倍以上の精度で、更に大きな x 領域まで測定を広げることができる。原子核標的を使うことで、核内での反クォークの振る舞について従来には無い知見を得ることができる。

x の大きな領域でのグルーオンの分布は、ハドロン・ハドロン衝突によるハドロンや光子の生成を研究することによって決めることができるものである。グルーオン分布は特に $x \geq 0.3$ では大きな不定性（50–100%）を持っているので [18]、この領域のデータは貴重である。

- 核子のスピンに関しては 1988 年に CERN の EMC 実験が、偏極ミューオン・偏極核子散乱のデータとともに、核子のスピンには内部のクォークがほとんど寄与していないという指摘を行った（「スピン危機」）。HERMES、RHIC-Spin、COMPASS 等の実験が現在も行われており、グルーオンの寄与や軌道角運動量の寄与等の測定を行っているが、はっきりした結論はまだ出っていない。予想に反してグルーオンの寄与もあまり大きくなことが示唆されている [17]。スピンの問題でも、 x の大きな領域のクォークからのスピンの寄与を調べることが重要になっている。上記の J-PARC の Drell-Yan 実験を偏極電子ビームで行うことができれば、他の計画では測定不可能な $x \geq 0.4$ の領域を探索できる [19]。

スピンの問題に対する別なアプローチとして、ニュートリノと核子の弾性散乱の構造因子の精密測定がある。深非弾性散乱や Drell-Yan 過程での測定は、偏極パートン分布を測定しその後に x について積分を行う方法である。これに対して構造因子は、その値自体を、核子の中でのストレンジクォークの偏極度 Δs の積分値（一次モーメント）と関係づけることができる [20]。この実験は理論的不定性が少なく実現が待たれているが、中性カレントの事象を原子核効果を排除して非常に低い Q^2 まで測定するという難しさがあり、そのためには何種類かの異なる標的を用いて実験をする必要がある。J-PARC の大強度のニュートリノビームでは精度のよい測定が可能になるので、ニュートリノによる弾性散乱実験は J-PARC での構造研究の大きな柱となりうる。

以上のような実験を進めることで、ほぼ 20 年にわたるスピン問題に、J-PARC からのデータで決着をつけることができる可能性が高い。

• ハドロン質量の起源・QCD の相構造

素粒子の質量の起源はヒッグス機構にあると考えられるが、クォークの束縛系であるハドロン特に核子の質量はそれだけで説明ができず、クォークのカイラル対称性が真空中で自発的に破れることによるものと考えられている。この対称性は初期宇宙では存在していたもので、現在の宇宙でも高温高密度の状態で部分的に回復されると予測されている。

宇宙初期に対応する高温状態の研究のために高エネルギーの原子核・原子核衝突実験が進められてきた。最近の RHIC の実験結果によると、高エネルギー原子核衝突の中央領域では非常に強い相関を持つ流体的な振る舞いが見られる。この現象では、ハドロンの新しい相が見えている可能性がある。LHC での重イオン衝突により、この研究はさらに進展すると考えられる。

高密度状態の研究は中性子星やクォーク星などの天体现象と密接な関係にある。この領域でのカイラル対称性の部分的回復の兆候は、 ρ 、 ω 、 ϕ 等のベクター中間子の質量変化に現れると考えられている。KEK-PS で

の 12GeV 陽子と原子核との反応の実験や重イオン反応の実験において、ベクトル中間子のスペクトル変化を示唆するデータも存在する [21, 22]。J-PARC の大強度一次ビームを用いることでこの現象を飛躍的に向上した統計精度で系統的に調べることができれば、カイラル対称性の破れ・回復の理解を深めることができる。

2008 年度までの施設で可能な到達点

- エキゾチックハドロンの探索

低運動量の荷電 K 中間子のための K1.1 ビームラインは $1.1\text{GeV}/c$ の K^- を想定してデザインされており、この実験には適していない。

- ハドロン・原子核のパートン構造

Drell-Yan 過程の測定、および偏極ビームによる実験は一次ビームラインの整備、および主リングビームエネルギーの 50 GeV への回復が必須であり、現状では実現できない。

ニュートリノ・核子の弹性散乱実験については、現在のニュートリノ実験施設の中に T2K 実験と併設する形で新測定器を設置できるかどうかを慎重に検討する必要がある。散乱標的工夫することにより原子核効果を分離できれば、以前の実験ではきちんと見積もられていない系統誤差を縮小できる可能性があり、統計誤差 $\delta(\Delta s) = 0.03$ に迫る実験ができる可能性がある。

- ハドロン質量の起源・QCD の相構造

本実験には一次ビームラインの整備が必須であり、現状では実現できない。

施設増強への展望

- エキゾチックハドロンの探索

低運動量の K^+ ビームラインなどが建設できれば、大強度のハドロン二次ビームによる高統計実験で、ハドロンスペクトロスコピーを系統的に押し進めることができる。特にエキゾチックバリオンの存否については決定的な結論を出すことが出来、もしこれらの粒子が存在する場合には、崩壊幅やスピン・パリティなど重要な量子数を決定することができる。

- ハドロン・原子核のパートン構造

Drell-Yan 過程の測定は、一次ビームラインが整備されれば、30 GeV でもコミッショニングをはじめられる。しかし、摂動論的 QCD の適用可能な領域で実験データを得ることが重要であり高いエネルギーが望ましい。 $x \geq 0.3$ での反クォーク分布は、新しい情報であり、ハドロンのパートン構造の理解が大きく進展する。

偏極標的と偏極ビームが得られれば、スピン構造の研究も始めることが出来る。偏極ビームについては技術検討中で、現時点できな問題点は見つかっていないが、現在建設中の施設の完成を妨げない範囲でまず検討を進める必要がある。

- ハドロン質量の起源・QCD の相構造

1 次ビームラインが整備されれば、主リングビームエネルギーが 30 GeV でも、ベクター中間子の質量変化を探る実験が始まられる。統計精度に制限されているこれまでの実験の結果を高統計で再現し、また原子核依存性、 p_T, x_F などの力学変数とともにどのように変化するのかを系統的に調べることで、カイラル対称性の破れ・回復の機構の理解に迫ることが出来る。

ハドロン核物理の実験（エキゾチックハドロンの研究を除く）においては、一次ビームラインの整備が重要である。これが達成できれば、一つの実験課題は短期間（数週間から数ヵ月のビームタイム）で完了でき、多数の実験課題を効率よくかつ柔軟に進めることができる。

海外の計画との比較

- エキゾチックハドロンの探索

ハドロンビームによる Θ^+ の実験は、 $H(K^+, \pi^+)X$ 反応による探索が、E559 実験として KEK-PS で 2005 年に行われたのみである。 $K^+ n \rightarrow \Theta^+ \rightarrow K^0 p$ 反応による Θ^+ 探索は BNL-AGS で可能であり検討もされているが、BNL での RSVP 計画の中止に伴ない AGS で実験が行われる見通しは無い。

- ハドロン・原子核のパートン構造

FNAL がこれまで実験の拠点となってきた。ニュートリノビームによる FINeSSE 実験 [23] が提案されたが認められず、BNL で行う可能性も RSVP 計画の中止によりなくなつた。FNAL への再申請を検討しているが、採択の見通しは不透明である。Drell-Yan 過程の測定を大きな x 領域に拡張できるのは将来 J-PARC においてのみである。

DESY の HERMES 実験が偏極標的による準非弾性散乱の測定をしているが、精度が限られている。BNL の RHIC では W の生成を用いた研究が予定されているが、測定にはまだ数年の時間がかかる見込みで、また大きな x 領域には到達できない。HERMES 実験は原子核標的のデータも持っているが、 x の大きい領域の測定は J-PARC を待つしかない。

- ハドロン質量の起源・QCD の相構造

RHIC や CERN-SPS での実験が進行中で、将来の LHC での高温状態の研究が非常に重要となる。標的領域のパリオンの高密度領域は、数年前に終わった AGS での実験以降は手付かずの状態で、J-PARC での研究は非常にユニークなものとなる。

重イオン加速については GSI の将来計画には盛り込まれている。J-PARC で実現するには比較的大きな施設増強¹⁸を必要とするので、分野の進捗状況を見つめながら検討を続ける必要がある。

1.3.5 大強度ミューオンビームによる実験

ミューオンの素粒子物理を J-PARC で推進するには、大強度のパルス状ミューオン源を建設する必要がある。そのために、PRISM (Phase Rotated Intense Slow Muon source) の開発が進められている。標的で生成したパイオニアを大立体角で捕獲した後、パイオニアの崩壊で生成された低エネルギーミューオンを輸送し、FFAG 加速器によって位相空間で回転させエネルギーをそろえる。PRISM-FFAG リングの建設は、大阪大学で 2003 年から科研費を使って開始されている [24]。

大強度ミューオンビームを使い、

- レプトンフレーバーの破れ (LFV) の探求

- 異常磁気モーメント ($g - 2$) の精密測定 (0.05 ppm の精度)

¹⁸入射器から変更を要するというのが現在の理解である。

- 電気双極子モーメント (EDM) の探索 ($10^{-24} e \cdot cm$ の精度)

などにより標準理論を超える新しい物理を探求する実験ができる。PRISM からのミューオンを使って $\mu^- N \rightarrow e^- N$ 転換過程を $< 10^{-18}$ の感度まで探索する実験 (PRIME 実験) が検討されている。LHC で超対称性粒子が発見された場合には、特にミューオン LFV の探求実験から、超対称性標準理論 (MSSM) だけでなく超対称性大統一理論や超対称性シーソー理論などのより進展した研究ができる。LHC で超対称性粒子が発見されない場合でも、LHC で到達できない高いエネルギー・スケールでの超対称性粒子の探索、または余剰次元などの別の物理シナリオを探求することができる。

2008 年度までの施設で可能な到達点 大強度ミューオンビームのための施設は、2008 年度までに建設される施設には含まれていない。

施設増強への展望 大強度ミューオンビームのためには将来、第二の速い陽子ビーム取り出し施設と実験施設を建設する必要がある¹⁹。ミューオン源の技術的開発は、将来のニュートリノファクトリー計画、さらにはミューオンコライダーの実現に向けた素粒子物理の重要なステップにもなりうる。

大強度ミューオンビームを使った実験では、ビームライン・測定器の建設とエンジニアリングランを約 4 年で行った後、物理データの収集を 5 年かけて行うことになると予想される。

海外の計画との比較 BNL での RSVP 計画 ($\mu^- N \rightarrow e^- N$ 転換探索のための MECO 実験を含む) が中止されたため、現時点では $\mu^- N \rightarrow e^- N$ 転換過程について海外で競合する実験は無い。PSI では、DC ミューオンビームを用いて $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 崩壊 を探索する MEG 実験が 2006 年から行われる予定で、 $< 10^{-13}$ の分岐比感度を目標としている。 $\mu^- N \rightarrow e^- N$ 転換には $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 崩壊には無い Higgs mediated diagram などの寄与もあり、より豊富な物理がある。

ミューオン $g - 2$ の実験は、更に 2.5 倍の精度向上を狙う BNL-E969 実験が採択されているが、実施されるかどうかは不明である²⁰。ミューオン EDM 実験は採択されていない。

1.3.6 反陽子科学実験

反陽子ビームを用いた実験は、2000 年以降 CERN の Antiproton Decelerator (AD) からの低速 (運動エネルギー 5.3 MeV) 反陽子ビームを用いて行われており、日本人研究グループが先導的役割を担っている [25]。最近の実験成果として、

- 冷たい反水素原子の生成の成功 (ATHENA 実験、ATRAP 実験)
- 反陽子原子 $\bar{p}(He)^+$ のスペクトロスコピー (ASACUSA 実験)

が挙げられる。これらは、反水素原子の精密レーザー分光による CPT 対称性の高精度検証実験や反陽子を用いた様々な基礎・応用研究への道を開くものである。AD における実験は 2010 年まで予定されている。

2008 年度までの施設で可能な到達点 反陽子科学のための施設は、2008 年度までに建設される施設には含まれていない。

¹⁹そのためのスペースの検討は行われてあり、予定されている場所が放射化しないようシールドを設置する手当てがすでにされている。

²⁰米国の Particle Physics Project Prioritization Panel (P5) で議論される予定である。

施設増強への展望 第二の速い陽子ビーム取り出し施設と実験施設を建設する必要がある。施設の整備が行われれば、短時間のビームタイムを使う多数の実験課題が行われることになる。

海外の計画との比較 GSI で計画されている FAIR 加速器の実験施設の一つとして、低速反陽子の実験を行う “A Facility for Low-energy Antiproton and Ion Research(FLAIR)” が検討されている。FLAIR が実現すれば、AD の百倍の強度を持つ超低速 (20keV) 反陽子ビームによる実験が速い取出しと遅い取出しの両方のモードで可能になり、反陽子科学のより一層の発展が期待される。J-PARC における反陽子実験プログラムは、CERN の AD と GSI の FAIR-FLAIR の今後の動向によるところが大きい。

1.4 評価・意見

J-PARC は、大強度で多様な粒子ビームにより素粒子・原子核物理の重要課題を解明する実験を多数行うことのできる、世界的にもユニークな“高輝度フロンティア”と位置づけられ、国内外のエネルギー・フロンティア実験などと補完しあうことで、わが国の素粒子・原子核研究にバランスのとれた発展を促すと期待される。前回の素粒子原子核研究計画委員会(2001年10月～2002年9月)における“実験プログラムを進めるための基本方針”“各研究プログラムに対する評価と提言”“研究プログラム全体の進め方についての提言”は、現在でも有効である。むしろ、国内外の他の将来計画の動向から、高エネルギーの陽子ビームによる実験を行うことができる加速器施設としての重要性が更に増してきている。J-PARC におけるユニークなアプローチによる多様な実験から、2010 年代前半に日本発の多くの物理成果が得られると期待でき、人材育成を行う国内拠点として大きな役割を果たすことが期待できる。

ニュートリノ振動実験 J-PARC におけるニュートリノ振動実験(T2K) は、現在のところ唯一測られていない混合角 θ_{13} を $\sin^2 2\theta_{13} < 0.008$ (90% CL) まで探索しようとするものである。これによって、レプトンセクターのフレーバー混合の全体像を明らかにすることができるだけでなく、レプトンセクターでの CP の破れを測定できる可能性もあり、物理的意義は非常に大きい。実験計画は、これまで成果をあげてきたスーパー・カミオカンデ実験と K2K 実験での経験にもとづいており、当初予定されていたビーム強度が得られれば、実現可能性も高い。

前回の研究計画委員会の答申の時点からの大きな変化は、実験開始時のビームパワーが当初計画の 0.75 MW から 0.4 MW に削減されたことである。これにより、5 年間で達成できる測定感度は 0.011 程度にまで落ちる。一方、米国では FNAL で NO_νA 実験が採択された。メインインジェクターのビーム強度は実証済みであり、計画通りに進めば $\sin^2 2\theta_{13}$ の測定に関して T2K 実験が後塵を拝する可能性もある。ニュートリノ実験は、わが国が先頭を切って切り開いてきた分野であり、その将来計画である T2K 実験は J-PARC の中心的な実験である。この分野の国際競争を制することは、J-PARC 計画全体にとっても最優先の課題であり、そのためには、ライナックのエネルギーを回復する等、必要な措置を速やかに講じなければならない。

K 中間子稀崩壊実験 K 中間子の稀崩壊は、ループ効果を通じて標準模型を越える物理を探査する実験の一つとして、物理的意義は大きい。特に $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊は、分岐比に対する理論的不定性が非常に小さく標準理論の予想を正確に行えるので、新しい物理の寄与を同定しやすい。また、研究グループは、現行の E391a 実験によりバックグラウンドの除去に関する経験を積み重ねてきており、このモードの測定の実現に世界で最も近い位置にいる。したがって、前回の研究計画委員会の答申にあった通り、この崩壊モードを優先的に進めることが適切である。実験計画としては、最初のステップとして E391a 測定器を J-PARC に移設してバックグラウンドを理解し制御する研究をさらに進め、次の段階での精密実験に進む戦略は現実的なものとして評価できる。

ストレンジネス核物理の実験 ストレンジネス核物理に関する実験計画は、斥力芯や LS 力で特徴づけられる短距離での核力の性質を調べるもので、QCD で直接理解すべきクォーク間力と、パイ中間子交換で記述できる長距離の核力との間のギャップを埋める情報をあたえる点で興味深い。これらの実験で得られるハイペロン-核子(YN)、ハイペロン-ハイペロン(YY) 相互作用に関する情報は、中性子星の性質の解明にも重要な役割を果たす。

すでに J-PARC 実験施設委員会によって Day-1 実験として認められた (a) Ξ ハイパー核・ダブル Λ ハイパー

核の分光および Λ ハイパー核の精密ガンマ線分光、(b) K 中間子原子核研究、その他にも、比較的低いコストで短期間で実行可能ないいくつかの実験計画が提案されている。この分野では、様々な実験をいかに効率的に進めるかが鍵になるため、ビームラインの増設が望まれる。これはJ-PARC全体の予算規模からすると少ない予算で実現できることであり、施設全体を効率よく利用するという観点に立てば、早期に実現すべき課題である。

得られた実験結果からQCDと核力に関する知見を引き出すには、精密な理論的解析が必要になる。その意味で、国内のハドロン、原子核理論研究者とのより緊密な協力体制の構築が望まれる。将来においては格子QCDによる第一原理計算の結果との比較も重要になるであろう。

ハドロン核物理の実験 ハドロン核物理の実験は、QCDのより深い理解を得るために計画されているもので、エキゾチックハドロンの探索、ハドロン・原子核のパートン構造の研究、ハドロン質量の起源・QCDの相構造の研究、が提案されている。

様々なエキゾチックハドロンの探索とそれらの性質の解明は、近年のハドロン物理における新たな展開である。J-PARCは、他では得られない高統計実験でそれらの存否や量子数の決定に重要な役割を果たすことが期待できる。

ハドロンのパートン構造は、大きい x の領域ではパートン分布関数の不定性が未だに非常に大きく、陽子のスピン構造の研究など、パートン分布関数のモーメントが重要になる場合には問題になる。J-PARCでこの領域をカバーできるようになれば、この問題に大きな進展をもたらすことが期待できる。ただし、比較的低いエネルギーでのQCDの摂動展開の収束性が問題となりうる。主リングのエネルギーが30 GeVでの実験と50 GeVでの実験の、それぞれの場合における理論的不定性に関して充分な検討が必要である。一方でニュートリノと核子の弹性散乱は、核子内でのストレンジクォークの偏極を直接測定でき、理論的不定性も小さいため、実現できればその意義は大きい。ニュートリノ振動実験のための強力でよくコントロールされたニュートリノ源を使えるという特色もあり、J-PARCの特徴を活かした実験と言える。難しい実験ではあるが、実現可能性をより詳細に検討していくべきである。

ハドロン質量の起源はカイラル対称性の自発的破れによるものと理解されている。QCDの有効理論的解析によれば、高密度状態においてはカイラル対称性が部分的に回復していると予想されており、その様子を調べることでカイラル対称性の自発的破れに関する新たな実験的情報が得られるものと期待できる。KEK-PSなどの実験で、すでにベクトル中間子の質量変化を示唆するデータが得られており、より詳細なデータを集めることでこれまでの理論的予想との比較が可能になる。一方、有限密度下でのハドロン質量を理論的に精度良く計算する手法は確立しておらず、現状では実験結果の解釈には大きな理論的不定性が避けられない。また、カイラル対称性の部分的回復と複雑な原子核構造の影響を分離することも自明ではない。したがって、実験計画を立てる際にはできるだけ理論的不定性が小さくなるようなセットアップを考えるなど、より詳細な理論的検討が重要である。

ストレンジネス核物理の実験と同様、これらの実験においても、理論研究者とのより緊密な協力体制が重要なことを強調しておきたい。ハドロン物理の現象論的解析、摂動的QCDはもちろん、格子QCD計算もこれらの研究に重要な寄与をすると考えられる。

大強度ミューオンビームによる実験 大強度陽子ビームを用いて質の高いミューオンを大量に生成することにより、レプトンフレーバーの破れの探索実験を行い、超対称標準理論、超対称性大統一理論等のより進展した

研究が可能となる。J-PARCにおいても、標準模型を越える物理により現時点で予想されている $\mu - e$ 転換の分岐比を射程内に収めることができる実験を行う可能性を真剣に検討していくべきである。その実現のためには、建設が行われている PRISM-FFAG リングにおいて、大強度のパルス状ミューオン源に関する技術を検討・実証することが焦眉の課題である。ミューオン源の技術的開発は、将来のニュートリノファクトリー計画や、さらにはミューオンコライダーの実現に向けた素粒子物理の重要なステップにもなりうると考えられおり、その実証実験の成果が待ち望まれている。

反陽子科学実験 J-PARC では、反陽子ビームの大強度化により、CPT の精密検証や不安定核の中性子分布の測定、また、反陽子の医学応用など、基礎から応用に至る幅広い研究をさらに発展させることが可能となる。反陽子を用いた物理は CERN を拠点に日本人研究者が先導的に推進している。反陽子施設での実験プロジェクトは海外研究施設の動向によるところが大きいが、J-PARC での低エネルギー大強度ビームを生かした戦略を練り上げることが望まれる。

J-PARCにおいては、最優先の課題（ニュートリノ実験、K 中間子による素粒子原子核実験）が、2008年から着実に実行される事が肝要である。更に、将来にわたって多様な実験を遂行し、わが国の素粒子・原子核研究のバランスのとれた発展を促す為には、J-PARC の当初規模の施設への復帰を、当委員会は現時点の最優先事項と考える。

ニュートリノ研究は、日本がこれまで世界をリードしてきた。第3の混合角 θ_{13} を世界最高感度で探索を行い、第一線での熾烈な国際競争に勝利するためには、T2K 実験の予定通りの開始と J-PARC 加速器のデザインビームパワーの早期達成が非常に重要である。その為には、

- リニアックエネルギーの 400 MeV への回復によるビームパワーのデザイン値の達成

が達成急務である。

ストレンジネス核物理と K 稀崩壊実験等の K 中間子による素粒子原子核実験についても、着実な成果が期待できる。しかし、現在 2008 年度までにハドロン実験施設で整備が予定されているビームラインは K1.8 一本のみである。ハドロン実験施設においては、複数のビームラインを設置し J-PARC の大強度陽子ビームを複数の実験で効率的に共有することで実効的にマシンタイムを倍増化することができる。

ターゲットから取出すビームラインを増設するための費用は、J-PARC 全体の予算規模からすると少ないと予算で実現できることである。一本のビームラインしかない実験施設で加速器の運転を長期間行うよりも、実験施設に複数のビームラインを設置することを優先するほうが加速器の効果的な利用になり、実験成果を多くあげることができるであろう。そこで、実験開始時または開始後早期に、

- ハドロン実験施設の整備と複数の 2 次ビームラインの設置

が行われることが望ましいと考える。

特に実験の開始時における測定器のコミッショニングでは、ビーム強度は必ずしも重要ではないので、複数の実験が同時に準備を進められるように二次ビームラインの本数を増やしておくことが必須である。

J-PARC では、2008 年実験開始からの第一期で予定されている実験以外にも多くの実験が提案されている。また、J-PARC のようなハドロン実験施設では、多様なアプローチによる多くの実験を並行して行うことで事がなによりも重要である。これらの実験計画の立案・建設及びそれに必要な施設の増強は、物理に対する要求、第一

期の進行状況特に加速器の運転状況、及び J-PARC 以外で行われる実験の進行状況等、総合的に判断を行い、必要ならば進め方の見直しを図ることも考えたうえで、計画を進めていかなければならないことは言うまでもない。現時点での提案されている発展の可能性を、以下に個別に列挙する。

実験開始時のハドロン実験施設において、ターゲット一つから複数のビームを引き出すことは可能であるが、他の実験で必要なビームラインや実験場所のスペースを考えると自由度が少なく、将来の大きな発展への障害となる。2008 年度の J-PARC 運転開始後、ハドロン実験施設の整備・拡充が望まれる。特に、ハドロン実験施設実験室の拡張、ターゲット及び B-line/C-line を含む 2 次ビームラインの増設、プライマリービームラインの設置を実現する事が重要となってくる。これによって、K 中間子による稀崩壊実験、ストレンジネス核物理、及びハドロン核物理の多様な実験を行い、2010 年代に於いて J-PARC 原子核素粒子実験施設から多彩な物理を展開できる。一方、ニュートリノ研究のさらなる発展の為には、 ν_e 出現事象に対し最良の探索感度を達成するための 2km 地点のニュートリノ前置検出器の設置の実現が大きな意味を持ってくる。また加速器の本体について、J-PARC の当初からの計画に盛り込まれている主リングのビームエネルギーの 50 GeV への回復を行うことは、2 次粒子の生成量を倍増させ大強度ビームラインの建設を可能にするだけでなく、ハドロン QCD 物理に対して実験の成否を握る大きなファクターともなっている。

さらに将来においては、ミューオン実験・反陽子実験等新しい施設の建設も視野にいれ、多様で柔軟性をもった加速器・実験計画の策定が求められる。具体的には、ミューオン・反陽子実験のための第二速い取り出し施設の設置、CP 非保存等ニュートリノ実験のさらなる展開の為のビームパワーの数 MW への増強、ハドロン物理のための偏極陽子ビームの加速・重イオン加速についても検討を進めて行く必要がある。大強度ミューオン・ビームについては、物理的目標に即した技術的課題の検討を行う事が当面の課題であるが、PRISM-FFAG リングでの実証実験の成果を見極めたうえで、J-PARC での施設・実験計画の具体的検討が行なわれる事と期待する。反陽子科学の実験については、海外の情勢を見極めた上で、我が国の取り組みを考えていく必要がある。

これらの多様なアプローチを順次推進・発展させていくことで、J-PARC が素粒子・原子核研究における“高輝度フロンティア”としてのその役割を果たして行くことが期待される。

2 SuperKEKB

2.1 物理的意義

1973 年に小林誠と益川敏英は K 中間子系における CP 対称性の破れを説明する理論として、3 世代 6 クォーク模型を提唱した [26]。クォークが 3 種類しか発見されていなかった当時としては非常に大胆な提案であったが、その後チャーム、ボトム、トップという重いクォークが順次発見され、小林益川理論は今日では素粒子の標準理論の一部となった。この理論ではクォークに関する様々な CP 非保存現象は全て一つの複素位相から生まれる。1981 年に三田、Bigi、Carter は、 K 中間子系と B 中間子系での CP 非保存効果が一つの小林益川位相のみで説明されるのなら、 B 中間子系において大きな「時間に依存する CP 対称性の破れ」($tCPV$) が観測できることを指摘した [27]。この検証のため KEKB ファクトリー (Belle 実験) [28] が建設され、1999 年に実験を開始した。2001 年には SLAC の B ファクトリー (BABAR 実験) [29] とともに三田等の予想に一致する大きな $tCPV$ を発見し、クォークセクターにおける CP 非保存の主な原因が小林益川位相にあることを明らかにした。その後も B ファクトリーは着実に実験を遂行し、 B 中間子における直接的 CP 非保存の発見、ユニタリティ三角形の他の角度や辺の長さの測定、ループ効果による崩壊 ($b \rightarrow s, b \rightarrow d$) における標準模型を超えた新しい物理の探索などを通して、クォークセクターにおける標準理論の多角的な検証を続けている。KEKB 加速器は 2003 年 5 月に歴史上はじめて $1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ を超えるルミノシティ (衝突の輝度) を達成した。その後も改良を続け、目標値を上回る世界最高のルミノシティ ($1.6 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、2006 年 2 月現在) に到達している [30]。このように、 B 中間子の研究で、理論と実験の両面において日本がこれまで世界をリードし画期的な成果をあげてきたことは世界に誇る独創的な成果といえる。KEK の B ファクトリーは、現在クォークフレーバー物理の世界的なセンターとなっている。

標準理論に基づくクォークフレーバー物理は、今まで大きな成功を収めてきた。しかし、標準理論では、クォーク・レプトンが何故 3 世代あるのか、何故 CKM 行列は階層構造を持つのか、 CP の破れの起源は何か、というフレーバー物理のより根本的な問い合わせていない。また、標準理論の枠内では、反物質に対し物質が優勢な宇宙の起源を説明することが出来ない。新しい素粒子基礎理論を求める動機はこれにとどまらない。フレーバー物理の外に目を向ければ、例えば暗黒物質の存在は標準理論を超えた新しい物理を強く示唆している。更に、ヒッグス粒子の輻射補正が二次発散を起こす困難を解決するためには、新しい基礎理論が TeV スケールに存在するという仮説が有力である。TeV スケールの基礎理論の仮説として、超対称性 (SUSY)、余剰次元の存在などが提案されている。これらの理論で導入される新しい素粒子により、新しいフレーバー混合と多くの新たな CP 非保存位相の導入が可能となる。何らかの理由によって強く抑制されない限り、これらの標準理論にない新しい要素は、 B 中間子等の崩壊現象に小林益川理論からのずれをつくりだす。

これまでのクォークフレーバー物理の中心課題は、クォークの混合と CP の破れの主たる原因を説明するものは小林益川理論なのか、それとも別の理論なのかを明らかにすることであった。一方、これからの中間子の中心課題は、新しい混合と CP の破れによる標準理論からのずれを探索すること、さらに、ずれの探索を通して、新しい基礎理論の種類を絞り込むことに移行していくであろう²¹。新しい混合と CP の破れの研究は、エネルギー・フロンティア実験で新粒子の崩壊過程を詳しく見ることによっても原理的には可能であるが、むしろルミノシティ・フロンティア実験で B 中間子等の崩壊過程におけるループ効果を精密に測定する方がより有効である。

SuperKEKB 計画 [31] は、上に述べたクォークフレーバー物理の新しい中心課題に取り組む計画である。そのルミノシティ目標値は $4 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ であり、これは現在の KEKB 加速器の設計値 (達成値) の 40(25) 倍に

²¹ 新しい基礎理論の種類を絞り込むためには、LHC 等のエネルギー・フロンティア実験での新しい粒子の質量測定と SuperKEKB 等のルミノシティ・フロンティア実験におけるループ効果の測定とを組み合わせることが最も効果的である。

相当する。SuperKEKB の年間積分ルミノシティの目標は 5 ab^{-1} であり、 5×10^9 個の B - \bar{B} ペアを生成できる。最終目標としている 50 ab^{-1} を達成すれば、Belle 実験が 2006 年 2 月までに蓄積したデータの約 100 倍の統計量となる。高い統計精度により、TeV 領域の新しい粒子の量子効果（ループダイアグラムによる効果）を検出することが可能になる。特に $b \rightarrow s$ 遷移における第 3 世代と第 2 世代間の新しいクォーク混合と CP の破れの探索は、これまでの実験の統計精度では不十分である。SuperKEKB がこれを改善することは、フレーバー構造の全貌を把握し TeV スケールの物理学を決定する上で重要である。

測定出来る物理量は多岐にわたるため詳細は Sec.2.2.4 に詳しく述べることとし、ここではまず $b \rightarrow s$ 遷移の物理の代表例として $B^0 \rightarrow \phi K_S^0$ の tCPV をとり、SuperKEKB で期待される成果を説明する。この崩壊は、ほぼ純粋にループダイアグラムで記述される $b \rightarrow s\bar{s}s$ 遷移により起こり、新しい CP 非保存位相への感度が非常に高い。標準理論では時間に依存する CP 非対称度が $B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$ の場合と同じになり $\mathcal{S}_{\phi K_S^0} \simeq \sin 2\phi_1 = \mathcal{S}_{J/\psi K_S^0} = 0.69 \pm 0.03$ となる。2005 年 8 月時点での測定結果（Belle と BABAR の平均）は $\mathcal{S}_{\phi K^0} - \sin 2\phi_1 = \Delta \mathcal{S}_{\phi K^0} = -0.22 \pm 0.19$ であり、統計誤差が大きいが、ずれの兆候がある²²。現在の中心値を仮定すれば、SuperKEKB では数年のデータ取得により 5σ の有意度でずれの存在を確立できる。最終目標としている 50 ab^{-1} （Belle 実験が 2006 年 2 月までに蓄積したデータの約 100 倍の統計量）を達成すれば、実験誤差として 0.03 を達成でき、0.15 程度のずれを 5σ の有意度で検出できる。ずれの検出は標準理論を越えた新しい CP 非保存位相の存在を意味するため、素粒子物理のみならず、物質が優勢な宇宙の起源を理解する上でも重要な意味を持つ。

以上では $B^0 \rightarrow \phi K_S^0$ を例にあげたが $b \rightarrow s$ 遷移に関するその他の物理量についても、新しい物理による $\mathcal{O}(10)\%$ の効果が期待され、SuperKEKB により $\mathcal{O}(1)\%$ の精度で測定できるという図式は同様である（Sec.2.2.4 を参照）。多くの TeV 領域の新しい基礎理論で自然に導入出来る標準理論からのずれの大きさは $\mathcal{O}(10)\%$ 程度である²³。従って SuperKEKB の統計精度で効果の有無を調べることが重要となる。

SuperKEKB では、 B 中間子とほぼ同数の τ レプトンを生成できるため、SuperKEKB は、同時にスーパー τ ファクトリーでもあり、 τ に関する最高感度の実験となる。レプトン数の破れ (LFV) をともなう $\tau \rightarrow \mu\gamma$ 崩壊等の探索は SuperKEKB の重要なテーマである。 $\tau \rightarrow \mu$ 遷移は $b \rightarrow s$ 遷移と同じく第 3 世代から第 2 世代への遷移である。大統一理論ではクォークとレプトンが統一されるため、クォークとレプトンの同じ世代間の遷移について、相関が生じることが期待される。従って、 $b \rightarrow s$ 遷移と $\tau \rightarrow \mu$ 遷移の両者を精査することは、大統一理論の効果を探索する有力な方法であり、ループ効果によって直接到達できない高いエネルギーの物理を探る例となっている。

CKM 行列とユニタリティ三角形についても、より精密な測定を行うことは依然として重要な意義を持つ。特に、現在測定精度が十分とはいえない ϕ_2 や ϕ_3 、また LHC では測定が出来ない V_{ub} の精密測定を着実に推進することが SuperKEKB では可能となる。現在測定誤差が 10% を超えているこれらのパラメータが数%以下の測定誤差で決定される。CKM 行列のパラメータがより高精度で決定されることにより、新しい物理仮説の検証の、より確かな土台を与えることが出来る。

現時点では、数多くの仮説提案にもかかわらず、フレーバー物理のより根本的な問い合わせ（何故 3 世代あるのか、何故 CKM 行列は階層構造を持つのか、 CP の破れの起源は何か）の確かな解決の糸口はつかめていない状況である。従って、有力な実験的手段がかりを増やすことが肝心である。SuperKEKB では、フレーバー混合と CP の破れに関する測定から、これらの問い合わせに対する実験的な手段がかりを複数得ることができる。それらの相関を武器として、

²² $B^0 \rightarrow \eta' K_S^0$ 、 $K_S^0 \pi^0$ などの $b \rightarrow s$ により起こるその他の崩壊でも、統計誤差が大きいが同様なずれの兆候が見えている。

²³ 新しい物理による $\Delta \mathcal{S}_{\phi K_S^0}$ の大きさを具体的に示すために、例として SUSY のスクォーク混合をとる。 $\Delta \mathcal{S}_{\phi K_S^0}$ は、スクウォーク質量行列の非対角項に起因する新しい $b \rightarrow s$ 遷移の大きさ（新しい結合定数の大きさ）にほぼ比例する。SUSY の質量スケールが 500 GeV、 CP 非保存位相が $-\pi/2$ の場合、SUSY の結合定数が 2×10^{-3} という小さな値でも、 $|\Delta \mathcal{S}_{\phi K_S^0}| \simeq 0.15$ となる（より詳しくは Sec.2.2.4 を参照）。実験誤差が 0.03 以下であれば、このずれは確実に検出できる。SUSY の質量スケールが数 TeV 程度と非常に大きい場合や、新しい CP 非保存位相が小さい場合でも結合定数がその分大きくなれば、同程度のずれが期待できる。

背後にひそむフレーバー対称性とその破れに関するブレークスルーが得られることが期待される。更に、Sec.2.3で説明する通り、LHCb 等の他のフレーバー物理実験は SuperKEKB に対し相補的な情報を与えるため、他実験の結果との相乗効果も期待できる。

LHC でのエネルギーフロンティア実験との関係について述べる。LHC で新しい素粒子が発見された場合に、それに伴うフレーバー混合の実験的検証を SuperKEKB でおこなう事は、標準理論からのずれの有無にかかわらず大きな意義を持つ。LHC で新しい粒子が見つかり、かつ SuperKEKB で標準理論からのずれが検出された場合はその両者を組み合わせて、新しい混合行列のパラメータに制限を加えることが出来る。これはエネルギー フロンティアとルミノシティ フロンティアの相乗効果の一例である。

LHC との相乗効果の具体例として、TeV スケールの物理理論として最も有力な SUSY を考える。SUSY 粒子が LHC で発見された場合、SUSY の破れの起源が素粒子物理学における主要なテーマとなる。SUSY を破るメカニズムは複数提案されており、それらのフレーバー構造は一般に異なる。したがって SuperKEKB でループ効果を精査し、LHC での新しい粒子の質量測定の情報を用いれば SUSY の破れの起源を探究できる [32]。

SuperKEKB で標準理論からのずれが検出されない場合でも、それは新しい素粒子の結合定数や CP 非保存位相が小さいことを意味するため、何故それらが抑制されているかという新たな問題提起となる。LHC で（標準理論のヒッグス粒子を除いて）何も新しい素粒子が発見されない場合は、新しい物理のエネルギー スケールが高い（およそ 2TeV 以上）ことが示唆される。その場合でも SuperKEKB では広いパラメータ領域において、新しい混合の有無を 5σ 以上の有意度で探索できる。

以上をまとめると、SuperKEKB 計画は、 b クォークと τ レプトン²⁴を用いて

- 標準理論の枠を超えた新しいフレーバー混合を探索する
- 小林益川位相とは異なる、新しい CP 対称性の破れの起源を探索する

これらの探索を複数の崩壊過程を用いておこない、それらの相関を用いて、TeV 領域の新しい物理仮説が予言するフレーバー構造を検証する。特に SUSY に関しては、スクォーク / スレプトンの質量行列の測定を通して、SUSY の破れの起源を研究する。更に、標準理論の範囲の精密測定として

- CKM 行列のパラメータを高精度で決定し、新しい物理仮説の検証の土台を与える

ことを主な目的とする。

SuperKEKB の目標ルミノシティは、KEKB の目標値（達成値）の 40(25) 倍である。この高い統計精度により、Belle 実験では出来ない TeV 領域のフレーバー物理を開拓する。したがって、TeV 領域の新粒子発見を大きな目的とする LHC のエネルギー フロンティア実験との優れた相乗効果が期待できる。SuperKEKB では複数の物理量を用いた包括的な探求が出来るため b クォークとタウレプトンに関する次世代の中心プロジェクトと位置付けることが出来る。

2.2 実験の説明

2.2.1 実験の概要

非対称なエネルギーを持つ大電流の電子（3.5GeV、9.4 アンペア）と陽電子（8.0GeV、4.1 アンペア）を蓄積し衝突させる。SuperKEKB で目標とするルミノシティは $4 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ である。これは、現在の KEKB 加速器

²⁴ここでは詳しく触れなかったが D 中間子も大量生成されるため c クォークについても同様の探索が可能である。

の設計値 ($1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$) の 40 倍、かつ、KEKB で実際に達成された世界記録 ($1.6 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、2006 年 2 月現在) の 25 倍である。この目標値を達成するために、現在の KEKB 加速器と比べて、ビーム電流を約 4 倍、クラブ空洞の導入によりビームビームパラメータを約 3 倍、新しい衝突点のデザインにより $1/\beta_y^*$ を約 2 倍にする。これらの目標値は現在までの KEKB における運転の経験と詳細なシミュレーション結果をもとに設定されている。一年間に積分ルミノシティにして約 5 ab^{-1} を蓄積し、約 5×10^9 回の $e^+e^- \rightarrow \Upsilon(4S) \rightarrow B\bar{B}$ 反応、および約 4×10^9 回の $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ 反応を記録することができる。

2.2.2 測定原理

二つの B 中間子の崩壊の時間差を、ビームのエネルギーが非対称であることと $\Upsilon(4S) \rightarrow B\bar{B}$ 崩壊におけるエネルギー差が小さいことを利用して、崩壊点間距離をもとに約 1 ピコ秒の精度で求めることができる。これを用いて tCPV の測定を行う。 e^+e^- 衝突は陽子衝突実験より実験環境がはるかにきれいであるため、終状態に光子、 π^0 、 K_L^0 等を含むような崩壊も、高い S/N 比で検出することが出来る。 $B \rightarrow \tau\nu$ 、 $D\tau\nu$ 、 $K^{(*)}\nu\bar{\nu}$ のようにニュートリノを終状態に含むモードの検出では、片側の B 中間子を完全に再構成することにより反対側の B 中間子の 4 元運動量を決定し、実効的に「 B 中間子ビーム」を作る。この方法により、ニュートリノを直接検出できなくても崩壊モードの再構成と同定が行える。これは、 $e^+e^- B$ ファクトリー独自の測定方法である。

2.2.3 実験装置

目標とするルミノシティを達成するために、現在稼働中の KEKB ファクトリー加速器を大幅に増強する。ビーム電流を増やすために、主リングの高周波空洞の数を倍にすること、C バンドの入射用線形加速器を用いること、陽電子ビームのエミッタスを小さくするためにダンピングリングを導入することなどが計画されている。電子雲が陽電子ビームを不安定にする問題を克服するため、現在の KEKB 加速器とは反対に、高いエネルギーのビームとして陽電子を選ぶ。又、衝突点でのビームサイズを小さくするために、衝突点近傍の電磁石のデザインを改良する。更にクラブ空洞の設置により衝突バンチを回転させ、蟹交差による正面衝突を実現する。測定器についても、現在の Belle 検出器のほとんど全ての部分を大幅に作り変える。新しい測定器として現在検討されているのは、内側から外側に向かい、2 層のピクセルまたは短いストリップ検出器、4 層の大面積両面シリコンストリップ検出器、小セルドリフトチェンバー、Time-of-Propagation (TOP) カウンター (バレル部) と RICH カウンター (エンドキャップ部) CsI 電磁カロリメータ、シリコンフォトマルチプライヤー読み出しのシンチレーターテイル等である。ビームに起因するバックグラウンドが現在の KEKB ファクトリーと比べて約 20 倍に増えることを想定して R&D が行われている。又、新しいパイプライン読み出しの DAQ・トリガーシステムと GRID を活用した計算機システムの導入が予定されている。

2.2.4 測定項目と測定精度

SuperKEKB 計画の大きな利点は、 e^+e^- のきれいな環境下でのみ測定が可能な物理量が複数存在することである。新しいフレーバー混合や CP の破れに対する感度が高く、かつハドロン不定性が小さい代表的な物理量とそれを用いた物理トピックについて以下に説明する。測定誤差は積分ルミノシティの平方根にほぼ反比例する。以下では積分ルミノシティ 50 ab^{-1} での究極の測定精度を示す。

- $b \rightarrow s$ 遷移における新しい CP の破れ

$B^0 \rightarrow \phi K_S^0$ 崩壊はほぼ純粋な $b \rightarrow s\bar{s}s$ 遷移により起こり、新しい物理への感度が非常に高い。時間に依存する CP 非対称度は $(\mathcal{S} \sin \Delta m_d \Delta t + \mathcal{A} \cos \Delta m_d \Delta t)$ と表せる。ここで Δm_d は B_d - \bar{B}_d 混合パラメータ、 Δt は $\Upsilon(4S) \rightarrow B\bar{B}$ における二つの B 中間子の崩壊時間差である。標準理論では $B^0 \rightarrow \phi K_S^0$ 崩壊と $B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$ 崩壊では \mathcal{S} の値が等しく、 $\mathcal{S}_{\phi K_S^0} \simeq \sin 2\phi_1 = \mathcal{S}_{J/\psi K_S^0} = 0.69 \pm 0.03$ となる。50 ab^{-1} の積分ルミノシティで、 \mathcal{S} の統計誤差の大きさは 0.03、系統誤差の大きさは 0.01 程度と予想される。ハドロン不定性の理論的見積もりは複数の方法でなされており、いずれも 0.04 以下である。この測定は、MSSM (Minimal SUSY Standard Model) ではスクォークの質量行列の非対角項に起因する新しい混合パラメータ $(\delta_{23}^d)_{AB}$ に感度を持つ。ここで A と B はそれぞれ s クォークと b クォークのカイラリティであり、 L (左巻き) 又は R (右巻き) のどちらかをとる。 $\Delta \mathcal{S}_{\phi K_S^0} \equiv \mathcal{S}_{\phi K_S^0} - \mathcal{S}_{J/\psi K_S^0}$ は、 $|(\delta_{23}^d)_{LR}| m_{\tilde{g}} / \bar{M}_{\tilde{q}}^2$ にほぼ比例する。スクォークの平均質量 ($\bar{M}_{\tilde{q}}$) およびグルイーノの質量 ($m_{\tilde{g}}$) が 500GeV、 CP 非保存位相が $-\pi/2$ の場合、 $|(\delta_{23}^d)_{LR}| \simeq 0.002$ であれば $\Delta \mathcal{S}_{\phi K_S^0} \simeq -0.15$ となる。従って、 5σ の発見の可能性がある。この場合、上の式からわかる通り、超対称粒子の質量が LHC での直接探索領域より重い場合でも、 $|(\delta_{23}^d)_{LR}|$ がより大きければ同程度のずれが生じる。また、SUSY 粒子がより軽い場合、あるいは結合定数がより大きい場合には、より小さい CP 非保存位相に対しても発見が可能となる。

- $b \rightarrow s\gamma$ 遷移における右巻きカレント

$B^0 \rightarrow K^{*0} (\rightarrow K_S^0 \pi^0) \gamma$ 崩壊は、標準理論のループダイアグラムでは終状態の光子がほぼ偏極しており、tCPV の大きさ $|\mathcal{S}|$ は s クォークと b クォークの質量比の二倍で 0.04 程度である。一方、 $SU(2)_L \times SU(2)_R \times U(1)$ 対称性を持つ Left-Right Symmetric Model (LRSM)、SUSY、Randall-Sundrum (warped extra dimension) モデル等、多くの新しい基礎理論の仮説では、右巻きカレントが導入されるため、このモードでの tCPV が大きくなる。 $b \rightarrow s\bar{s}s$ の例と異なり、新しい CP 非保存位相がない場合でも、右巻きカレントがあるせいで tCPV が大きくなるのが特徴である。LRSM を例にとると、右巻きウィークボソン W_R の質量の現在の実験的下限値 (1.4TeV) と W_R - W_L 混合の上限値 (0.003) を考慮しても $|\mathcal{S}| \sim 0.5$ という大きな tCPV が許容されている。 \mathcal{S} の測定精度は 50 ab^{-1} の積分ルミノシティで 0.04 が予想されるので、十分な発見能力をもつ。

- $b \rightarrow s$ におけるその他の新しい反応

$B \rightarrow X_s \gamma$ の崩壊分岐比および直接的 CP の破れは標準理論を越える荷電ヒッグス粒子に対する感度が高い。現在の崩壊分岐比測定は荷電ヒッグスの質量に関してすでに約 300GeV という最も厳しい下限値を与えていく。又 $b \rightarrow s$ 遷移の tCPV 測定との相關もフレーバー構造の検証に有用である。直接的 CP の破れは、標準理論では 0.006 程度と見積もられている一方、SUSY 等では、その 10 倍程度大きくなる可能性がある。50 ab^{-1} での測定精度は崩壊分岐比で 5%、直接的 CP の破れでは 0.005 と予想される。従って、SuperKEKB は十分高い発見能力をもつ。

$b \rightarrow s\ell^+\ell^-$ の前後非対称度 A_{FB} の測定、特に $A_{FB} = 0$ となる q^2 の値の測定は、理論不定性が小さい (数 %)。Z ボソンを介するダイアグラムの寄与を含み、 $b \rightarrow s\gamma$ だけでは探れない新しい物理の寄与 (Wilson 係数の C_9 と C_{10} への寄与) に敏感である。50 ab^{-1} で、ほぼ理論不定性と同程度の測定精度に到達できる。

$B^+ \rightarrow K^+ \nu \bar{\nu}$ 崩壊は理論的不定性の小さい稀崩壊である。崩壊分岐比を測定し理論予想と比較することにより、新しい物理の寄与を精度よく見積もることができる。標準理論の崩壊分岐比を仮定した場合、50 ab^{-1} で 5.1σ の初観測が可能となる。

B 中間子のハドロニックな崩壊 $B \rightarrow K\pi$ の数種の崩壊分岐比と CP の破れを組み合わせて $b \rightarrow s\bar{q}q$ 崩

壊に潜む新しい物理の振幅を抽出する方法、 $B \rightarrow \phi K^*$ などのベクトル粒子への 2 体崩壊の偏極度測定や triple-product correlation を用いる方法なども提案されている。いずれも SuperKEKB での精密測定が必要となる。

- τ レプトンの LFV 崩壊

例としては、 $\tau \rightarrow \mu\gamma$ 、 $\tau \rightarrow \mu\eta$ などがある。 $O(10^{-8})$ - $O(10^{-9})$ の崩壊分岐比まで探索が可能であり、TeV 領域の SUSY に感度がある。 $b \rightarrow s$ 遷移と同じく第 3 世代から第 2 世代への遷移なので、両者の相関を探ることは、GUT の予言を検証する効果的な方法である。

- 荷電ヒッグスの効果

$B \rightarrow D\tau\nu$ と $B \rightarrow D\mu\nu$ の崩壊分岐比の比では荷電ヒッグスがツリーダイアグラムに寄与するため、質量の大きい τ レプトンへの崩壊分岐比が μ への崩壊分岐比より大きな影響を受ける。SuperKEKB 実験開始後、比較的早い時期に、これらの崩壊の初観測が期待される。50 ab^{-1} のデータを用いた場合、 $B \rightarrow D\tau\nu$ 崩壊分岐比の測定精度は、荷電 B 中間子で 2.5%、中性 B 中間子で 9% と見積もられている。これらを用いると、荷電ヒッグスに対して LHC での積分ルミノシティ 100 fb^{-1} の結果とほぼ同等の感度が得られる。 $B \rightarrow \tau\nu$ レプトニック崩壊も荷電ヒッグスに感度をもち、 $B^+ \rightarrow K^+\nu\bar{\nu}$ の場合と同様の方法で再構成できる。

- ユニタリティ三角形の超精密測定と第 3 世代、第 1 世代間の新しい混合

50 ab^{-1} での測定精度は、 $\sin 2\phi_1$ が 0.014、 ϕ_2 が 0.9° 、 ϕ_3 が 1.2° 、 V_{ub} が 4.4% と見積もられている。 $b \rightarrow d\gamma$ 、 $B^0 \rightarrow K_S^0 K_S^0$ などの $b \rightarrow d$ ペンギンが支配的な崩壊も併用し、第 3 世代と第 1 世代間の新しい混合を探索できる。

SuperKEKB では、上記のテーマに加え、 B 中間子の稀崩壊と直接的 CP 非保存の測定、3 体崩壊における時間反転対称性の破れ [33]、 $\sin^2 \theta_W$ の精密測定、新しい共鳴粒子の探索と強い相互作用の研究、等の多彩な研究が展開できる。Belle 実験では、 $X(3872)$ に代表される新しい共鳴粒子の発見が多数報告されている。これらは予期せぬ結果であったため、驚きを持って迎えられ、現在活発な研究が行われている。SuperKEKB においても、標準理論の枠内での予期せぬ新粒子や新現象の発見が期待される。軽い暗黒物質候補のような標準理論を超える新しい軽い素粒子も、現在の実験的制限を越えて探索を行える。

2.2.5 積分ルミノシティに応じた目標

SuperKEKB では実験期間のそれぞれの段階で、異なる発見が期待される。以下に代表例を挙げる。

積分ルミノシティ 5 ab^{-1} (約 1 年間のデータ取得) では $B \rightarrow \tau\nu$ 、 $B \rightarrow D\tau\nu$ 崩壊の初観測ができる。 $e^+e^- B$ ファクトリー以外の実験では不可能なユニークな発見となる。崩壊分岐比が標準理論の予言どおりの場合は、5 ab^{-1} までに 5σ 以上の観測が達成される。これらの崩壊は荷電ヒッグスに対する感度が高いので、発見の後もより精密に分岐比を測定していくことにより、荷電ヒッグスの質量と SUSY パラメータ $\tan \beta$ に関するユニークな測定を続行できる。

積分ルミノシティ 15 ab^{-1} (実験開始後数年間のデータ取得) までに期待される発見として $b \rightarrow s\bar{s}s$ 遷移の tCPV が挙げられる。現在の $\Delta S_{\phi K_S^0}$ の中心値を仮定すると、15 ab^{-1} では、 5σ の有意度で $B^0 \rightarrow \phi K_S^0$ 崩壊において新しい CP 非保存位相を発見できる。同様に、 $B^0 \rightarrow \eta' K_S^0$ に関しては、10 ab^{-1} で 5σ の有意度となる。

積分ルミノシティ 50 ab^{-1} (最終目標) までに期待される発見の代表例として $B \rightarrow K\nu\bar{\nu}$ 崩壊の初観測が挙げられる。また、 $(\delta_{23}^d)_{LR} = 10^{-2}$ を仮定した場合、50 ab^{-1} における $B^0 \rightarrow \phi K_S^0$ による 5σ の発見領域はスクォーク

とグルイーノの質量にして約 4TeV に達する。

2.2.6 国際コラボレーション

Belle 実験には現在 13ヶ国から 300 人を超える研究者が参加しており、海外の研究者数が、わが国の研究者数を上回っている。2005 年 7 月現在、KEKB ファクトリーは、141 本の論文（引用総数 4812）、国際会議での講演数 488、博士論文数 58 を達成している。これらに対する海外からの参加者の寄与は非常に大きい。Belle 実験は、基礎科学分野においてわが国でこれまでに行われた最大規模の国際協力実験である。

2004 年に発表された SuperKEKB の物理、測定器、加速器に関する Letter of Intent (LoI) には 14 力国 62 機関に属する 276 名の研究者が共同署名している。KEKB ファクトリー Belle 実験の実績をふまえ、SuperKEKB は着実に実現可能な大規模国際実験である。スーパー B ファクトリーは世界で一箇所を選んで建設すべきだという共通認識が形成されつつある。後述するように、米国でも PEPII/BABAR 実験に参加している欧米の研究者を中心にしてスーパー B ファクトリー計画が検討されていたが、PEPII/BABAR 側の研究者が SuperKEKB に合流する可能性もある。すでに合同ワークショップを開催したり、ビームバックグラウンドの研究に関する合同ワーキンググループをつくるなど、活発な交流が行われている。

2.2.7 スケジュールとコスト

2006 年に最初のクラブ空洞を KEKB 衝突型加速器に設置し、蟹交差による正面衝突を試験することが決定している。現在提案されているスケジュール [34] では、その後適当な時期²⁵に約 14 ヶ月のシャットダウン期間を作り、ここで SuperKEKB 加速器と測定器の建設を行う。その後 SuperKEKB の運転を開始し、2-3 年かけて設計値のルミノシティに到達する。運転開始後約 5 年間は 2 年以内に総データ量を倍にしていくことができるため、毎年新しい重要な結果を得ることが期待できる。SuperKEKB と KEKB（アップグレードを行わない場合）について、積分ルミノシティ、および、各時点でのデータ倍増に要する時間の予想を図 1 に示す。建設コストは、R&D の費用まで含めて約 450 億円と見積もられている。

以上のスケジュールにより、わが国で世界的な衝突実験を継続的に遂行し、独創性が高い物理を発信し続けることができる。また、LHC で新しい素粒子が発見された場合の相乗効果を最大にするよう考慮されている。更に後進の育成という観点からも、素粒子原子核分野全体にとって大きな寄与となる。

2.3 海外の計画との比較

米国では PEPII/BABAR グループの研究者を中心に、PEPII のデザインを基礎としたスーパー B ファクトリー [35] の検討が行われていたが、予算上の制約により実現は困難である。また、ごく最近 Frascati のグループが新しいデザインのスーパー B ファクトリー [36] を検討はじめたが、まだ概念設計の段階である。現時点では、SuperKEKB が世界で唯一の実現可能なスーパー B ファクトリー計画である。

B の物理に特化した実験として、LHCb [37] があり、2007 年の実験開始に向けて建設中である。LHCb の利点は、 B_s の測定が可能であることである。特に $B_s - \bar{B}_s$ 混合の測定、 $B_s \rightarrow J/\psi\phi$ と類似のモードにおける $tCPV$ の測定、等により SuperKEKB の B^0 、 B^\pm の測定と相補的な情報が得られる。両者の情報を組み合わせることにより、

²⁵2009 年が提案されている。

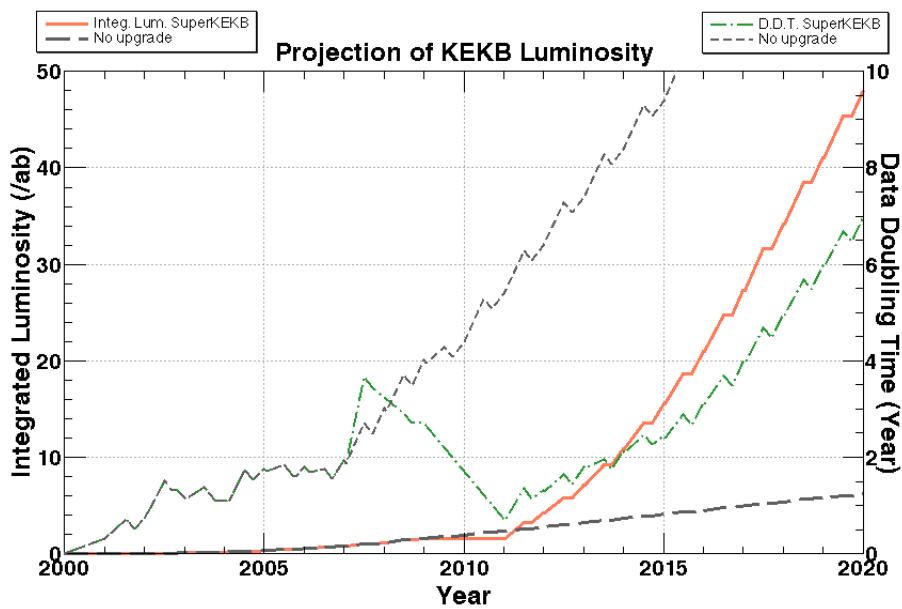


図 1: 期待される積分ルミノシティと各時点からデータ倍増に要する時間 (Data doubling time、DDT) について、SuperKEKB と KEKB (アップグレードを行わない場合) を比較した図。実線(赤色)は SuperKEKB の積分ルミノシティ、長い破線は KEKB の積分ルミノシティ、一点鎖線(緑色)は SuperKEKB の DDT、短い破線は KEKB の DDT を表す。

新しいフレーバー構造をよりはっきりと決定できるようになる。ユニタリティ三角形の測定についても、異なる測定方法により相補的な情報が得られることが期待される。又、稀崩壊 $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$ は LHCb に加えて、ATLAS、CMS においても探索を行うことができる。

一方、LHCb はハドロン衝突の環境下であるため再構成できる崩壊モードが限られており、再構成の効率やフレーバー同定の効率も低い。また、SuperKEKB の測定精度の見積もりが Belle 実験の実績に基づいたものであるのに対し、LHCb での測定精度の見積もりはバックグラウンドの仮定に依存し、現時点では不定性が大きい。上記の B_s の例を除けば、 $b \rightarrow s$ 遷移に関しては SuperKEKB で重要となるモードの大部分 ($B^0 \rightarrow \phi K_S^0$ 、 $\eta' K_S^0$ 、 $K_S^0 K_S^0 K_S^0$ 、 $K^{*0} \gamma$ 、 $K^+ \nu \bar{\nu}$ 、 $D \tau \nu$ 、 $\tau \nu$ 、inclusive $b \rightarrow s \gamma$ 、inclusive $b \rightarrow s \ell \ell$ 等) について LHCb では感度がない。ただし $B \rightarrow K^{(*)} \mu^+ \mu^-$ モードに関しては、SuperKEKB と競合関係にある。

τ の LFV 探索についても、SuperKEKB で重要となる $\tau \rightarrow \mu \gamma$ 、 $\mu \eta$ 等に関しては、LHC 実験は SuperKEKB と競合できない。 $\tau \rightarrow \mu \mu \mu$ モードについてのみ、特殊なトリガーを採用するなどして SuperKEKB と競合できる可能性はある。

結論として、測定の精度と包括度の両面から考えて、SuperKEKB 計画は B 中間子と τ レプトンの研究で中心的な役割を果たすといえる。SuperKEKB の測定を中心に、LHCb 等他の実験結果を組み合わせることにより、最も効果的に新しいフレーバー構造の研究ができる。

2.4 評価・意見

KEKB ファクトリー (Belle 実験) は、クォークフレーバー物理のセンターとして、CP 非保存の主な原因がクォーク混合の小林益川位相にあることを示す等、世界をリードする画期的な成果をあげてきた。SuperKEKB 計画は、その輝かしい実績を引き継ぎ、KEKB の加速器性能を大幅に向上させ、理論の不定性に迫る精度で CKM 行列要素等を精密測定することにより、クォークフレーバーセクターの標準模型を確立する。さらには理論からのずれを発見することにより、標準模型を越える新しいクォークフレーバー混合と CP の破れ、特にこれまで実験的検証が充分になされていない $b \rightarrow s$ 遷移における新しい物理を探索することを目的とする。

LHC で新粒子が発見された場合、新粒子に伴う新しいフレーバー混合と CP の破れの有無を確認することが、物質優勢宇宙の起源を解き明かす上で鍵となるため、SuperKEKB の物理的意義は高い。もしも LHC で新粒子が発見されず SuperKEKB で標準理論からのズレがいち早く確認された場合は、LHC では到達できないエネルギー領域に新粒子が存在する証拠を初めて示すことができ、物理的意義はさらに高くなる。その一方で、新粒子の質量や新しい混合の大きさは現時点では理論的な不定性が大きく、LHC と SuperKEKB の両方の感度で標準理論を越える発見が得られない可能性もある。SLAC の B ファクトリー (BaBar 実験) という好敵手があった KEKB とは違い、単独で走る SuperKEKB は、標準理論からのズレの兆候が見られても、その確立のためには統計をさらに高めて検証する以外方法がない。計画を進めるにあたっては、短い Data doubling time を維持すること。また当初に最終目標ルミノシティを設定するのではなく、他の実験 (特に LHC 実験) の結果も見ながら、柔軟な運転計画を立てることができる体制をつくることが重要である。

標準模型を越える新たな物理現象を発見し検証する能力は、SuperKEKB が KEKB を遥かに凌駕し、また費用対効果の面からも効率的である。SuperKEKB は技術的な点から早期に実現が可能な計画と考えられる。それゆえ KEKB の今後の運転は、SuperKEKB 実現に向けて最適化されるべきである。加速器に関しては 2006 年に導入されるクラブ空洞の性能を確かめること、物理の面では、 $b \rightarrow s$ のアノマリー等により、標準模型からのズレの兆候の有無を 1 ab^{-1} 以上のルミノシティーで見定めることが、KEKB に課せられた使命である。

また、B ファクトリー実験でフレーバー物理を探求しようという研究者、研究チームを国内外から広く吸収し、国際的な枠組みで建設・運転資金の分担を確立し、プロジェクトを推進することが望ましい。

3 ILC

3.1 物理的意義

ILC 計画の主として目指す研究は以下の通りである。

- 電弱対称性の自発的破れの機構を解明し、質量の起源と真空構造の関係を明らかにする。
- 素粒子標準理論に内包するエネルギー・スケールの階層性の問題を解決する機構を解明し、自然の新たな基本法則の確立を目指す。
- トップクォークの質量や、ゲージ結合定数の精密測定を行い、標準理論の基本的かつ重要なパラメータを高精度で決定する。また、これにより、大統一理論などのより基本的な理論の検証を行う。
- 真空の相転移や、暗黒物質の正体の解明等により、宇宙の進化史を明らかにする。

ILC は、電子陽電子衝突 (e^+e^-) のきれいな実験環境下での高エネルギー・フロンティア実験であり、新粒子の発見にとどまらず、その性質を詳細に研究することができる [38][39][40]。

前世紀末までの高エネルギー・フロンティア実験によって、ゲージ場とクォーク・レプトンとの相互作用が精査され、素粒子標準理論の根幹である $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ のゲージ対称性が確立した。素粒子物理学における焦眉の課題のひとつは、電弱ゲージ対称性の自発的破れの機構を実験的に明らかにし、さらに素粒子の質量の起源を解明することである。標準理論では、ヒッグス場は一つしかなく、ヒッグス場が凝縮した真空において、ゲージ対称性の自発的破れによりゲージ場が質量を獲得する。それと同時に、ヒッグス場とクォーク・レプトンとの湯川相互作用を通じて、これらの粒子が質量を獲得する。このヒッグス機構はまだ仮説の段階で、正しいか否かは実験的に検証されるべきものである。ILC では、ヒッグス粒子のスピン・CP の同定、湯川結合の測定、自己相互作用の測定などを通じて、この仮説を検証できる。

ヒッグス粒子は、それが内部構造を持たなければ、はじめてのスピン 0 (スカラー) の素粒子である。宇宙論においては宇宙初期のインフレーションや暗黒エネルギーの問題などと関連し、スカラー場のダイナミクスが重要な役割を果たすことがある。ヒッグス粒子の性質の研究は、そうした他のスカラー場のダイナミクスの理解の端緒になると期待される。さらに、電弱相転移の際に宇宙のバリオン数を生成するシナリオが提案されており、ILC ではその可否を実験的に明らかにできる。ILC でのヒッグス粒子の精査はこうした観点からも重要である。

標準理論はさらに、エネルギーの階層性のために電弱対称性の破れのスケールが量子補正に対して不安定化するという問題を内包する。この問題は「階層性の問題」ないし「自然さの問題」とよばれ、さまざまな解決方法が提案してきた。これらの中で最も有望視されているものが超対称理論であるが、最近、大きな余剰次元理論やリトルヒッグス理論などの新しいアイデアも提唱されている。こうした標準理論を超える物理を発見し新たな基礎理論を解明することがきわめて重要であり、ILC は LHC とともに重要な役割を果たす。

宇宙の暗黒物質の有力候補のひとつとして、WIMP (weakly interacting massive particle) がある。超対称理論における最も軽い超対称粒子がよく知られた例である。これらの粒子は、高エネルギー・フロンティア実験で直接生成できる可能性があり、ILC では、その性質を詳細に研究することができる。これにより暗黒物質を同定し、同時に宇宙開闢 10^{-11} 秒程度までの宇宙進化を遡ることが出来ると期待される。

ILC 計画は重心系エネルギー 500GeV 程度から始め (第一期) その後 1TeV 程度までのエネルギーのアップグレードを行う。

第一期 500GeV

第一期 500GeV の ILC の最も重要なミッションは、宇宙初期に起ったであろう真空の自発的対称性の破れの解明、言い換えれば、素粒子の質量の発現機構を同定することにある。標準理論に基づく電弱相互作用の測定データから、比較的軽い質量を持つヒッグス粒子の存在が予想され、500GeV の ILC で探索可能であると期待される。ILC 実験では、ヒッグス粒子の性質を詳細に決定することができる。スピンと CP を同定し、それが真空のそれと同じであることを検証することは、ヒッグス機構の実験的確立にむけた重要なステップとなる。また、ヒッグス粒子と他の粒子との相互作用を測定することによって、素粒子の質量の起源を明らかにすることができます。ILC では、未踏の力であるクォーク・レプトンの湯川相互作用を結合定数の大きさに応じて 1-10% の精度で測定することができる。LHC と異なり、崩壊比と生成断面積から絶対値を決められることに留意すべきである。また、W, Z 粒子とのゲージ結合は生成断面積から直接に 2% 以下の精度で決まる。これらの測定を通じて、ヒッグス機構という標準理論の基本的な枠組みを確立するだけでなく、ミニマルな標準模型からのずれの有無を調べることによって、ヒッグスセクターが拡張されたものかどうかを知ることができる。

また、特定の崩壊モードを仮定せずに（モデルに依存することなく）ヒッグス粒子の発見、詳細な研究が可能であるのも ILC の利点である。たとえば、LHC ではヒッグス粒子が見えない粒子に崩壊する場合には発見できないが、ILC では、 $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^- X$ モードの $\mu^+\mu^-$ 対の反跳質量を測ることで発見が可能である。

ゲージ結合定数の精密測定、トップクォークの質量測定なども第一期で可能である。 α_s を 1% の精度で測定することができ、トップクォークの質量は 100MeV (LHC などの 1/10 以下) まで精度が向上する。 α_s の精密測定は、ゲージ相互作用の統一を通じて、大統一理論を検証するのに重要である。また、トップクォークの質量の精密測定により、電弱相互作用に関する包括的理説ができる、LHC や ILC での W ポソンの質量の精密測定とあわせて、標準理論の更に精密な検証が可能になり、ひいては TeV エネルギー領域に存在するかもしれない未知の物理を探すことにつながる。

また、ILC では、高い輝度を用い、衝突エネルギーを調整することで、大量の Z ポソンや W ポソンを生成することが可能である。このオプションを用いることにより、標準理論の基本的なパラメータを非常に高い精度で決定することができる。たとえば電弱混合角 (Weinberg 角) の測定精度を一桁上回る精度で決定でき、W ポソンの質量は 6-7MeV の精度で測定できる。こうした精密なパラメータの決定は、たとえ LHC で新しい発見が何もない場合でも、ILC 実験が確実に達成できる成果の一つである。こうした精密測定を通じて、標準理論からのずれを調べ、新たな物理を探すことができる。

ILC500GeV では LHC と比べて新粒子を直接生成するための閾値が低いため、LHC でヒッグスを超える新しい物理現象が見えたときに ILC 第一期でこれを必ず研究できるかは定かではない。もしこれが可能なときには ILC の能力を発揮することができる。LHC は常にカスケード事象を観測することになるため、同じような事象をもたらしうる様々なモデルの中から物理モデルを確定するのは難しいとされているが、ILC では新粒子群の中の一つでも生成可能であれば、そこからその背後に潜む物理を理解することができる。特に、超対称理論における最も軽い超対称粒子 (LSP) は、500GeV の ILC で生成される可能性も高い。その場合、ILC 実験では、結合定数の測定とスピンの同定から超対称性を確立することができる。さらに、超対称粒子の質量やニュートラリーノ・チャージノセクターの混合などの性質を精密に決定することができる。ILC 実験と LHC 実験の双方で得られるデータを組み合わせた解析が行われて初めて超対称粒子群の質量スペクトルが明らかになり、超対称性の破れとその伝播の機構に対する大きなヒントを得ることができる。また、超対称粒子の質量スペクトルを新たなプローブとして非常に高いエネルギー スケールでの物理を窺うことができる。最も軽い超対称粒子が宇宙の暗黒物質となっている場合には、超対称粒子の性質の詳細な研究を通じて、暗黒物質の性質を知ることが可能になる。LSP の質量と混合、結合を決めてことで、残留密度を数% の精度で計算できる。これと宇宙観測から測定される暗黒物質の密

度を比較することで、暗黒物質が LSP かどうかについて有力な知見を得ることが出来る。

アップグレード 1TeV

e^+e^- コライダーでは、新粒子の直接生成の閾値が重心系エネルギーによって決定されている。1TeVまでのエネルギー・アップグレードは、ILCで可能な物理を飛躍的に増大させる。

ヒッグスセクターの物理に関しては、1TeVまでアップグレードすることにより、ヒッグス粒子のトップクォークへの湯川相互作用の精密測定や、ヒッグス粒子の自己相互作用の測定が可能になる。これは電弱対称性の破れの機構を解明する上で非常に重要なステップである。また、ヒッグス粒子の質量が、電弱相互作用の測定データから予測される質量から大きく外れ 400GeV よりも大きい場合には、1TeV の ILC 実験によりその性質を詳しく決めることが出来る。また LHC においてヒッグス粒子が発見されない場合には、高エネルギーで W ポソンの縦波成分の相互作用が強くなることが予想され、1TeV の ILC でこのような現象が観測されることが期待できる。

エネルギーのアップグレードにより、標準模型を超える新しい物理に対する感度も飛躍的に増大する。たとえば、超対称理論の場合には、500GeV の第一期で既に最も軽い超対称粒子が生成される可能性も高いが、1TeVまでのエネルギー増強で生成可能領域が増大する。直接生成のエネルギー閾値よりも軽い超対称粒子の性質をひとつずつ精密に調べていくことが可能で、それにより超対称粒子の質量スペクトルとその性質についてのより精緻な情報が得られ、ひいては超対称性の破れおよび超対称大統一理論に関するより精密で確度の高い情報が得られることになる。

1TeVへのエネルギー・アップグレードは、他の標準理論を超えるシナリオにおいても決定的に重要である。大きな余剰次元理論について ILC 実験では、重力子のカルツァークライン励起状態が中間状態として介在する量子効果が観測できる。その到達領域は、LHC のそれを凌駕する。また、リトルヒッグス理論は、標準理論には存在しない新たな重い粒子を予言する。その質量が大きく直接生成できない場合でも、ILC では新粒子とヒッグス粒子との結合力を量子効果により測定できる。

3.2 実験の説明

ILC 計画は第一期、その後の第二期におけるアップグレードに分かれる [41]。

- 「第一期」最高エネルギーは 500GeV。エネルギーは可変であり、90GeV 付近と 210GeV から 500GeV の範囲をカバーする。当初は輝度が設計値に到達するのに時間がかかることを考慮し、積分ルミノシティーは始めの 4 年で 500fb^{-1} を目指す。電子ビームは 80%以上の偏極率をもつ。2005 年末にまとめた設計骨子では、ルミノシティーの設計値は $2.0 \times 10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ であり（高輝度オプションは $4.9 \times 10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ）、複数の運転モードでこの輝度を維持できるように設計が進められている。
- 「第二期」1TeVまでのアップグレードを行う。
第一期の物理成果と LHC での結果を合わせることで、第二期の方針は決する。1TeV へ行くよりも高輝度化がまず必要となればそちらを優先する。更に、陽電子の偏極、電子・電子衝突、 γ コライダーモードなどのオプションもあり得る。

2007 年から始まる LHC 実験で得られる結果が、今後の素粒子物理学のパラダイムを大きく決定していくであろうことは想像に難くない。ILC 実験計画は、今から準備を進めながらも、一方で LHC の結果をうけて第一期および第二期の増強方針の選択に関して柔軟性を持つスケジュールとなっている。現在推定されるヒッグス粒子の質量範囲においてそれを確実に生成し、量子数決定、ゲージ結合と湯川結合を調べるには 330GeV 程度あればよい。

このエネルギーは、トップクォークの質量と結合力の精密測定を行うためのエネルギー走査実験（トップクォークの質量によるが、330~370GeV程度）とほぼ同じである。第一期の最高エネルギー 500GeV という設定は、まず、二つのヒッグス粒子と Z を同時に創る過程を用いてヒッグスの自己結合を測定することを大きな目標としているためである。このエネルギーの設定値は、LHC 初期におけるヒッグス粒子の質量の測定結果などにより更に最適化できる。そして、LHC の結果と ILC の第一期の結果で第二期の方針が定まる。新しい物理の様相にもよるが、1TeVまでのアップグレードはヒッグスの自己結合の更に詳細な研究やトップクォークとの結合など重要な研究があるため、いずれにしても必須となると考えられる。このため、ILC の国際協力では計画の準備・提案、コストの算出、技術開発においては、1TeVへのアップグレードの方法とそれによるコスト概算まで含めたものを基本設計書 (Reference Design Document) として提案することにしている [42]。基本設計書は 2006 年度末までに完成させる予定である。

リニアコライダー ILC は、電子・陽電子の最高エネルギー加速器を世界で共同して建設することを目指す大型の国際協力実験計画である [43]。その実現にむけた R&D は現在国際的な協力・競争の下で進められている。これまで 20 年近く蓄積された研究を集約し、世界の主な高エネルギー研究施設が協力して 2005 年に国際設計グループ (GDE) [42] を立ち上げた。この GDE の中で加速器の開発はアジア、欧州、北米のそれぞれの地域グループ (Regional Groups) を中心に進められることになり、KEK はアジア地域グループの中心拠点 [44] となっている。KEK、中国の IHEP、韓国の PAL、CHEP、インドの CAT、TIFR の主要研究所を結んだ MoU を基に ILC-Asia グループが結成され、ILC の R&D を推進している。

ILC の最重要基幹技術は二つある。ひとつは必要なルミノシティーを確保するための高品質ビームの生成・制御技術、もうひとつは高い加速勾配を作るための超伝導加速空洞の製作技術である。日本はこの両者において世界最高性能を達成している。欧州は DESY を中心に加速空洞を組み込む加速モジュールのシステムを TESLA Test Facility (TTF) [45] で長年研究しており、安定なシステム作りをリードしている。米国は SLAC を中心にビームダイナミックスの計算や全体レイアウトの設計で中心的な役割を果たしている。超伝導加速システムの設計には世界の多くの企業も参加するため、DESY の TTF と並行して KEK と FNAL に試験施設を建設中である [46]。

KEK の加速器試験施設 ATF [47] では、世界最高品質の超低エミッタスビームの生成に成功し、既に ILC で必要なエミッタスを達成している。更に、京都大学や早稲田大学、東京大学などと共に行っているビーム制御技術の開発は世界最先端である。中国・韓国を中心としたアジアからのポスドクや英国と米国を中心とした欧米研究者が多数滞在中であり、世界でも唯一の施設として確立した。これまでの日米共同研究から大きく発展し、CERN、SLAC、IHEP など 20 近い研究所・大学から構成される ATF 国際共同研究が 2005 年に正式に発足した。

トリスタン以来、世界最高の技術をもつ超電導空洞の表面処理技術も、ILC の超伝導加速の基幹技術として国際協力の中核をなしている。超伝導加速器の技術で最も重要な部分は加速空洞内面の研磨技術（電界研磨技術）であり、KEK の技術は世界最高である。単セル空洞で 2005 年 9 月に 52MV/m の加速勾配を達成し、これは世界記録である。現在、KEK には超伝導加速器試験施設 (STF) [46] が整備中であり、ここで超伝導加速器の研究が進行中である。

GDE を中心として、2005 年末に設計の様々な基本的パラメーターが設定され、設計の骨子 (Baseline-Design Configuration) が決まった [48]。基本的なビーム・パラメーター、それを実現するためのダンピングリングのタイプ、直線加速器の加速勾配、陽電子生成方法などに関してベースラインとする設計を決定した。更に性能があがる可能性のあるものを明示し、今後の R&D への指標ともなっている。2006 年度にベースラインの基本設計が行われる。2007-2008 年度において工学設計を完成させることをめざしている。500GeV, 1TeV における建設 / 運転コストもその段階までに明らかになる。想定される予算規模から、サイト、コストの分担などは国のレベルでの決

定によることになる。2015年頃に物理実験を開始することを目指している。

ILCでの物理と測定器の研究も、これまでの日本、アジア地域の研究協力から世界的な国際共同研究に移行した。日本の研究者はリニアコライダーでの物理の研究において、これまで世界をリードしてきた。測定器の研究は3つの測定器コンセプトのグループと多彩なサブシステムの開発グループにより国際協力で行っている[49][50]。共通な開発要素が多いため、3つのコンセプトグループを横断した検出器技術開発のグループが多数あり、各コンセプトグループもそれぞれ亞欧米が参加した協力で勧められている。これらは全体として、World Wide Studyグループ[51]として活動している。

3つの測定器コンセプトは(1)ジェットエネルギーの測定に最適化した大きな体積を持つ測定器GLD、(2)シリコントラッカーを用いるコンパクトなSiD、(3)中間の大きさを持つLDCである。それぞれのグループをまとめるため、亞欧米からコンタクトパーソンが選ばれ、日本(上記のそれぞれに対して東大、東北大、KEKより)から任にあたっている。3つのコンセプトのうちGLDは日本の研究者が中心となって提案しているものである。GLD測定器を基本に韓国・インド・米国・欧州の研究者と共同で、シミュレーションを中心とした全体設計、従来よりも数倍小さいピクセルをもつFine Pixel CCD(FPCCD)によるSiVTX、MPGD(Micro Pattern Gas Detector)を用いたTPC、MPPC(Multi-Pixel-Photon-Counter)をセンサーとしタングステンとシンチレーターを用いた高い空間分解能をもつカロリメーターの研究を進めている。バーテックス検出器はKEK・東北大・新潟大学・韓国などが中心となり、FPCCDとシリコンストリップ検出器の設計を進めている。佐賀大学・KEK・東京農工大・近畿大学などを中心とする日本のTPCグループは欧州のTPCグループと共同で特にガス増幅部分の研究を進めている。カロリメーターはGLD測定器の特徴を生かすために最も力を入れているところもあり、筑波大学・信州大学・新潟大学・神戸大学などを中心とする多くのスタッフ・学生が参加している[52]。全体設計に関わる特に重要なジェット事象のエネルギーの測定技術(Particle Flow Algorithm:PFA)に関しては、東京大学、東北大、KEKなどを中心に研究を進めてきた。2006年春までに測定器コンセプトの概要をまとめたため、現在シミュレーションを中心に研究を進めている。これまでのシミュレーションと要素技術の開発を中心とした研究から、これからは実際のハードウェアの設計を進める段階に入っている。

3.3 海外の計画との比較

高エネルギーフロンティアの実験として、ILCと比較されるべきものは、Large Hadron Collider(LHC)である。LHCは重心系エネルギーが14TeVの陽子・陽子コライダーでヒッグス粒子や超対称粒子などの新粒子を発見することを目指す。ILCよりも早く2007年から稼動予定である。LHCがエネルギー到達点の高いハドロンコライダーであるのに対して、ILCはレプトンコライダーであり、そのクリーンな環境と、エネルギーの可動性、入射電子・陽電子ビームの偏極を生かして、バックグラウンドの少ないきれいな信号を捕まえることができ、また、精度の高い測定を行うことができるのが特徴である。LHCとILCの関係は[39][53]参照。

多くのシナリオにおいてLHCが最初に新現象・新粒子を発見する可能性が高い。一方ILCは、新粒子の性質を詳細に調べることで新現象の本質を明らかにし、背後にある物理的原理を解明することができる。より基本的な物理原理を確立するという観点から、ILCの果たす役目はLHCに勝るとも劣らない。さらに、ILC実験による粒子発見・精密測定は、LHC実験で観測された新しい物理の様々な解釈の中から真の理論を峻別することを可能にする。

以下に見るよう、LHC実験とILC実験は相補的であり、標準理論を検証しその先にあるTeV領域の新たな物理のパラダイムを確立するためには、LHCに加えてILCが必要である。

標準模型の根幹を成すヒッグス機構の確立のためには、スピンと CP の同定、他の粒子との結合の強さの測定、ヒッグス粒子の自己結合の測定によるヒッグスボテンシャルの再構成が必要となる。またヒッグス粒子の精密測定によりミニマルな標準模型からのずれを探ることができる。LHC だけではこれらの目的を果たすことができず、ILC が必要である。この観点から ILC の物理的価値は高く評価される。また、トップクォーク、結合定数の精密測定は LHC の結果如何にかかわらず、ILC が圧倒しているところである。

標準模型を超える新たな物理原理の確立にあたっても ILC は LHC に対して相補的な役割を果たす。たとえば、超対称理論については、超対称粒子の相互作用やスピンを同定するには ILC が必要で、それによりはじめて超対称性を確立することができる。更に超対称性の破れの機構を峻別するためにも LHC では不十分で、ILC の精密測定の情報が必要とされる。

また、シナリオによっては、LHC での発見は困難で、ILC によりはじめて新現象が発見される場合もある。ヒッグス粒子が見えない粒子に崩壊する場合が好例である。他にもたとえば、大きな余剰次元理論でも、LHC の到達領域よりも 1TeV の ILC の到達領域のほうが高い。更に、角分布、エネルギー依存性の研究からその新現象の物理を決定できる。

もしも LHC でなんら新たな現象が発見されなかった場合でも、ILC では電弱相互作用のセクターについて現在よりも格段に精度の高い測定を行うことで標準理論からのずれを探り、新たな物理のエネルギー・スケールとその種類を知ることができる。それは、次の高エネルギー・フロンティアの実験を進める上で、不可欠な道標を与えるであろう。

LHC においては、ルミノシティーを更に上げる計画やエネルギーを増強する計画などの議論も既に始まっている。ILC のエネルギーを超える数 TeV 領域のレプトンコライダーを目指す計画としては、新しいタイプ (two-beam-accelerator) の電子・陽電子加速器 CLIC と、放射光によるエネルギー・ロスの問題のないミューオンコライダーが挙げられる。CLIC は CERN の試験施設で 2010 年頃の技術実証を目指している [54]。また、LHC を遙かにしのぐエネルギーの陽子コライダー VLHC の検討も行われている。

3.4 評価・意見

リニアコライダー実験は、高エネルギーの電子・陽電子衝突によって、トップクォークと W/Z ボゾン、ヒッグス粒子、さらには未知の新粒子を直接生成し、これらの生成反応の精密測定を行うことを目的とする。特に、電弱対称性の破れの機構を解明し質量の起源を明らかにすることは、素粒子物理学の最優先課題のひとつであり、予言どおりにヒッグス粒子が存在すれば、ILC 実験における、スピンや CP の同定、湯川結合定数や自己結合定数の詳細な測定が、ヒッグス粒子の本性を明らかにし、質量の起源を解明するうえで重要となるため、ILC 実験の物理的意義は高い。ヒッグスの精密測定は、トップクォーク質量やゲージ結合定数の精密測定とともに、ILC 計画で確実に達成可能なミッションと考えられる。さらに、新粒子の生成が可能となれば、超対称性を始めとする標準理論を超える新しい物理の原理の発見とモデルの検証、さらには暗黒物質の解明といった宇宙論への波及効果をも含めた広範な研究成果が期待され、ILC 実験の物理的意義はさらに高まる。こうした物理学的重要性から、素核研においても現時点より積極的な R&D を推進し、国際協力計画に貢献してゆくことが望まれる。

上記の ILC 実験の物理の豊富さは加速器エネルギーによるため、計画の推進にあたっては、2007 年に始まる LHC 実験の結果によって、ヒッグス生成、トップ湯川結合と自己結合定数の測定、さらには標準理論を超える新粒子生成に必要なエネルギーを明らかにし、初期とアップグレード後の加速器エネルギーを最適化することが重要である。LHC 実験の結果を踏まえた加速器エネルギーの最適化は、コストとサイト選択の最適化のためにも重

要となる。LHC 実験において新粒子の手がかりが得られない場合には、加速器エネルギーをヒッグス生成に最適化すべきである。

実験の feasibility は、加速器技術の進捗による。2005 年夏の Snowmass 会議で baseline となった $35\text{MeV}/\text{m}$ (運転 $31.5\text{MeV}/\text{m}$) の実証が急務である。また、LHC と比した ILC の物理的意義の重点は精密測定にあり、そのために必要となる $10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 以上のルミノシティーの達成可能性の実証も必要である。KEK で開発中のより高い加速勾配を目指した加速空洞の開発は、ILC 加速器のエネルギー最適化における柔軟性とコスト削減のためにも依然として重要である。加速器 R&D 推進の重要性から、素核研としても加速器開発に参加する素核研プロパー並びに大学研究者を支援すべきである。サイト選択については、目指す加速器パラメーターが明らかになったところで、立地条件、技術条件、建設費用などの経済的側面も含めた総合的な見地から、国際的な枠組で決定されるべきである。

ILC 計画は、長期的に国際協力で進める巨大プロジェクトである。その建設地は判断できず、技術的側面、予算獲得、エネルギー最適化などのプロセスを考慮すると、2015 年の実験開始にも不定性があり、現時点では、他計画を実行しつつ ILC 計画を推進する必要がある。このような状況下で ILC 計画推進に貢献するためには、ILC に専念する加速器・測定器の先鋭 R&D 部隊を持ちながらも、他計画チームとの協力のもとに R&D を進めることが肝要である。この意味で、最近設置された測定器開発室などの施策を素核研はサポートすべきである。また、R&D において、日本が加速器・測定器の両面で独自の貢献をすることが重要である。

参考文献

- [1] 素粒子原子核研究計画委員会、「JHF 50GeV 陽子加速器における素粒子・原子核研究の進め方」(2002年11月) KEK Report 2002-11.
- [2] J-PARC 大強度陽子加速器計画: <http://j-parc.jp/>.
- [3] 独立行政法人 日本原子力研究開発機構: <http://www.jaea.go.jp/index.html>.
- [4] 山崎良成 他、“J-PARC 加速器”(2005年6月) 高エネルギーニュース 24-1、pp.11-24.
- [5] J-PARC 原子核素粒子実験施設 実験課題の公募:
http://j-parc.jp/NuclPart/Call_for_Proposals.html.
- [6] H. Minakata *et. al.*, hep-ph/0402197.
- [7] K. Sakashita, talk given at the Kaon2005 International Workshop; E. Blucher, talk given at the Lepton-Photon 2005 International Symposium.
- [8] V.V. Anisimovsky *et al.* [E949 Collaboration], Phys. Rev. Lett. **93** (2004) 031801.
- [9] M. Abe *et al.* [E246 Collaboration], Phys. Rev. Lett. **93** (2004) 131601.
- [10] ストレンジネス核物理のこれまでの成果については、[1] の第5章の参考文献および [11] の各 LOI の参考文献を参照。
- [11] Letters of Intent for Nuclear and Particle Physics Experiments at the J-PARC (L06, L07, L08, L09, L10, L21), <http://www-ps.kek.jp/jhf-np/LOIlist/LOIlist.html>.
- [12] T. Suzuki *et al.*, Phys. Lett. **B598** (2004) 263.
- [13] M. Agnello *et al.*, Phys. Rev. Lett. **94** (2005) 212303.
- [14] P.K. Saha *et al.*, Phys. Rev. Lett. **94** (2005) 052502.
- [15] Proceedings of the 2nd theory workshop on JHF nuclear physics, edited by Y. Akaishi, T. Hatsuda, M. Oka, KEK Proceedings 2002-13.
- [16] R.S. Towell *et al.* (E866/NuSea Collaboration), Phys. Rev. **D64** (2001) 052002.
- [17] G. Bunce *et al.*, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. **50** (2000) 525.
- [18] J. Pumplin *et al.*, JHEP **0207** (2002) 012.
- [19] RHIC Spin Plan Report: <http://spin.riken.bnl.gov/rsc/report/masterspin.pdf>.
- [20] G.T. Garvey *et al.*, Phys. Rev. **C48** (1993) 761.
- [21] K. Ozawa *et al.* (E325 Collaboration), Phys. Rev. Lett. **86** (2001) 5019.

- [22] G. Agakichiev *et al.* (CERES Collaboration), Eur. Phys. J. **C41** (2005) 475.
- [23] S. Brice *et al.*, FINeSSE Collaboration, “A Proposal for a Near Detector Experiment on the Booster Neutrino Beamline: FINeSSE: Fermilab Intense Neutrino Scattering Scintillator Experiment, hep-ex/0402007.
- [24] PRISM/PRIME: <http://www-kuno.phys.sci.osaka-u.ac.jp/~prism/ja/index.html>;
 学術創成研究 ミューオン物理学の新展開を狙うスーパー・ミューオン・ビームの研究:
<http://www-kuno.phys.sci.osaka-u.ac.jp/~supermuons/index.html>.
- [25] R.S. Hayano, “Physics using trapped antiprotons”, in the Proceedings of the International School of Physics “Enrico Fermi”, Course CLVIII, 2004, on Hadron Physics.
- [26] M. Kobayashi and T. Maskawa, Prog. Theor. Phys. **49**, 652 (1973).
- [27] A. B. Carter and A. I. Sanda, Phys. Rev. D **23**, 1567 (1981); I. I. Bigi and A. I. Sanda, Nucl. Phys. **B193**, 85 (1981).
- [28] Belle web page, <http://belle.kek.jp/>.
- [29] BABAR web page, <http://www.slac.stanford.edu/BFROOT/>.
- [30] KEKB web page, <http://www-acc.kek.jp/KEKB/>.
- [31] “SuperKEKB Letter of Intent”, KEK Report 04-4, <http://belle.kek.jp/superb/loi>;
 A. G. Akeroyd *et al.*, “Physics at super B factory”, hep-ex/0406071;
 Super B Factory Workshop in Hawaii (2005), <http://www.phys.hawaii.edu/superb/>.
- [32] T. Goto, Y. Okada, Y. Shimizu, T. Shindou and M. Tanaka, Phys. Rev. D **70**, 035012 (2004) [arXiv:hep-ph/0306093].
- [33] C. Q. Geng and Y. K. Hsiao, Phys. Rev. D **72**, 037901 (2005);
 A. Datta and D. London, eConf **C0304052**, WG403 (2003) [arXiv:hep-ph/0307065].
- [34] 提案されているスケジュールと建設コストの詳細は第 2 回素粒子原子核研究計画委員会における資料 (<http://agenda.kek.jp/fullAgenda.php?ida=a0542>) を参照のこと。
- [35] J. Hewett, (ed.) et al., “The discovery potential of a super B factory”, hep-ph/0503261.
- [36] J. Albert et al., physics/0512235.
- [37] LHCb web page, <http://lhcb.web.cern.ch/lhcb/>.
- [38] “Understanding Matter, Energy, Space and Time: the Case for the Linear Collider”,
 Linear Collider Report from Worldwide Study Group, April 2003,
http://sbhepnt.physics.sunysb.edu/~grannis/ilcsc/lc_consensus.pdf.
- [39] “The Linear Collider Physics Case”, K. Desch, J. Hewett, A. Miyamoto, Y. Okada, M. Oreglia, G. Weiglein, S. Yamashita, Nov. 2004, hep-ph/0411159.

- [40] アジア・欧州・米国で行われてきたリニアコライダーでの物理と測定器の研究に関しては、例えば以下のもの参照：
- Linear Collider Workshop homepage, Apr. 2005, <http://www-conf.slac.stanford.edu/lcws05/>;
 “Global Linear Collider Road Map Report”, May, 2003, KEK-Report 2003-7,
<http://lcdev.kek.jp/ProjReport/PDF/GLCReport.pdf>;
 “Linear Collider Physics – Resource Book for Snowmass 2001”, May. 2001, SLAC-R-570;
 “TESLA Technical Design Report”, Mar. 2001, <http://tesla.desy.de/tdr/>;
 “Particle Physics Experiments at JLC”, K.Abe et. al.(ACFA Linear Collider Working Group), KEK Report 2001-11, hep-ph/0109166.
- [41] ICFA - Parameters of the linear collider, 30 September, 2003
http://www.fnal.gov/directorate/icfa/LC_parameters.pdf.
- [42] GDE の活動に関しては例えば <http://www.linearcollider.org/cms/> を参照。
- [43] ICFA statement on linear colliders, Feb. 2004,
http://www.fnal.gov/directorate/icfa/icfa_LCstatement0204.html.
- [44] ILC Asia Regional Team homepage, <http://lcdev.kek.jp/>.
- [45] TESLA Technology Collaboration; http://tesla-new.desy.de/content/index_eng.html.
- [46] Super-conducting accelerator Test Facility at KEK, <http://lcdev.kek.jp/STF/>.
- [47] Accelerator Test Facility at KEK, <http://atf.kek.jp/>.
- [48] “here are we with the BCD”, K.Yokoya, talk presented at GDE meeting, Dec. 2005, Frascati, Italy,
http://www.linearcollider.org/files/gde_infn/Yokoya-BCDnow.pdf;
最新の設計骨子 (Baseline Configuration Document) は
http://www.linearcollider.org/wiki/doku.php?id=bcd:bcd_home から見られる。
- [49] 3 つの測定器コンセプトの研究に関してはそれぞれ以下を参照：
 GLD Detector Concept: <http://ilcphys.kek.jp/>;
 SiD Detector Concept: <http://www-sid.slac.stanford.edu/>;
 LDC Detector Concept: <http://www.ilcldc.org/>;
 また各検出器開発に関しては、
<https://wiki.lepp.cornell.edu/wws/bin/view/Projects/WebHome> にまとまっている。
- [50] “Linear Collider Detector R&D”, J.Brau, C.Damerell, G.Fisk, Y.Fujii, R-D.Heuer, H.Park, K.Riles, R.Settles, H.Yamamoto, August 28, 2002, <http://blueox.uoregon.edu/~lc/randd.pdf>
 “Detector R&D for the International Linear Collider”, Prepared for the EPP2010 Committee by the World-wide Study for the Physics and Detectors for the ILC”, 25 August 2005,
http://www7.nationalacademies.org/bpa/EPP2010_Feedback_Richard.pdf.
- [51] <http://physics.uoregon.edu/~lc/wwstudy/>.

- [52] <http://ppwww.phys.sci.kobe-u.ac.jp/~kawagoe/gldcal/>.
- [53] “Physics Interplay of the LHC and the ILC”, The LHC/ILC Study Group, hep-ph/0410364.
“Response of the LHC/ILC Study Group to the Questions posed by the EPP2010 Panel”, submitted to the panel members on May 17, 2005. <http://www.ippp.dur.ac.uk/~georg/lheilc/epp.pdf>.
- [54] CLIC homepage: <http://clic-study.web.cern.ch/CLIC-Study/>.