

大型研究計画に関する評価について(報告)

「大型低温重力波望遠鏡(LCGT)計画」

「Bファクトリー加速器の高度化による新しい物理法則の探求」

平成22年7月23日

科学技術・学術審議会 学術分科会 研究環境基盤部会
学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会

目 次

はじめに	1
I. 「大型低温重力波望遠鏡（LCGT）計画」の推進について	
1. 計画の概要	2
①概要	
②内容	
③実施体制	
④国内における検討経緯	
⑤国際的な動向	
⑥年次計画	
⑦予算規模	
2. 計画の評価	8
①研究者コミュニティの合意	
②計画の実施主体	
③共同利用体制	
④計画の妥当性	
⑤緊急性	
⑥戦略性	
⑦社会や国民の理解	
3. まとめ	10
①総合評価	
②計画推進に当たっての留意点	
II. 「Bファクトリー加速器の高度化による新しい物理法則の探求」の推進について	
1. 計画の概要	16
①概要	
②内容	
③実施体制	
④国内における検討経緯	
⑤国際的な動向	
⑥年次計画	
⑦予算規模	
2. 計画の評価	22
①研究者コミュニティの合意	
②計画の実施主体	
③共同利用体制	
④計画の妥当性	
⑤緊急性	
⑥戦略性	
⑦社会や国民の理解	
3. まとめ	25
①総合評価	
②計画推進に当たっての留意点	
参考	28

はじめに

日本学術会議が、平成22年3月に提言した「マスタープラン」^aに盛り込まれた「大型低温重力波望遠鏡（LCGT）計画」及び「Bファクトリー加速器の高度化による新しい物理法則の探求」については、平成22年6月に、その研究計画の一部が、文部科学省の「最先端研究基盤事業」^bに選定された。

この事業により、研究計画の一部が開始されることとなるが、これまで、建設費が概ね100億円以上の大型研究計画については、学術分科会で事前評価を行ってきたことから、本作業部会において、両計画全体の事業計画について事前評価を行った。

評価に当たっては、両分野の専門家にアドバイザーとして加わっていただき、ヒアリング及び審議を実施した。また、評価の観点として、①研究者コミュニティの合意、②計画の実施主体、③共同利用体制、④計画の妥当性、⑤緊急性、⑥戦略性、⑦社会や国民の理解を設定し、観点別の評価を踏まえて総合的な評価結果をとりまとめた。

^a 「学術の大型施設計画・大規模研究計画－企画・推進策の在り方とマスタープラン策定について－」（平成22年3月17日 日本学術会議 科学者委員会 学術の大型研究計画検討分科会）
URL：（要旨・本文）<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-21-t90-2.pdf>
（資料）<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-21-t90-2-2.pdf>

^b 国際的な頭脳循環の実現に向け、国内外の若手研究者を惹きつける研究基盤の整備を強化・加速するため、研究ポテンシャルが高い研究拠点において、最先端の研究成果の創出が期待できる設備を整備するとともに、運用に必要な支援を行う事業。

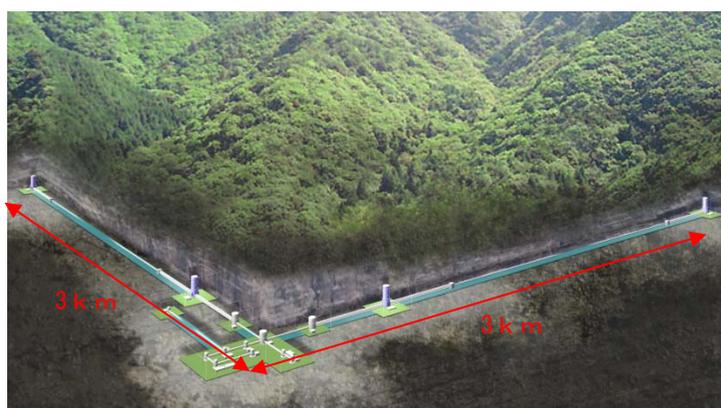
I. 「大型低温重力波望遠鏡（LCGT）計画」の推進について

1. 計画の概要

①概要

本計画は、世界に先駆けて重力波^{※1}を直接検出することを目指し、一辺3kmのL字型の大型レーザー干渉計^{※2}を神岡鉱山地下に建設するものである。この大型低温重力波望遠鏡（LCGT: Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope）は先進的なレーザー干渉計であり、連星中性子星^{※3}の合体現象を7億光年先まで検出できる感度を持つ。地面振動雑音を避けるために地下設置とし、かつ、日本独自の開発技術である世界初の低温鏡^{※4}（20K）を採用して超高感度化する。

重力波の初検出後は、米国の次期LIGO^{※5}や欧州の次期Virgo^{※6}など、LCGTと同程度の感度を目指して改造中の重力波望遠鏡と共同して、国際観測ネットワークを構成する。これにより、国際的共同観測におけるアジア・オセアニア地域の拠点として、重力波による全く新しい天文学の創成に貢献する。

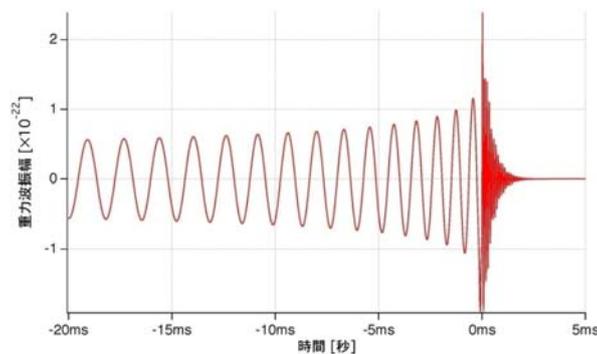


神岡地下に設置されるLCGTのイメージ図

②内容

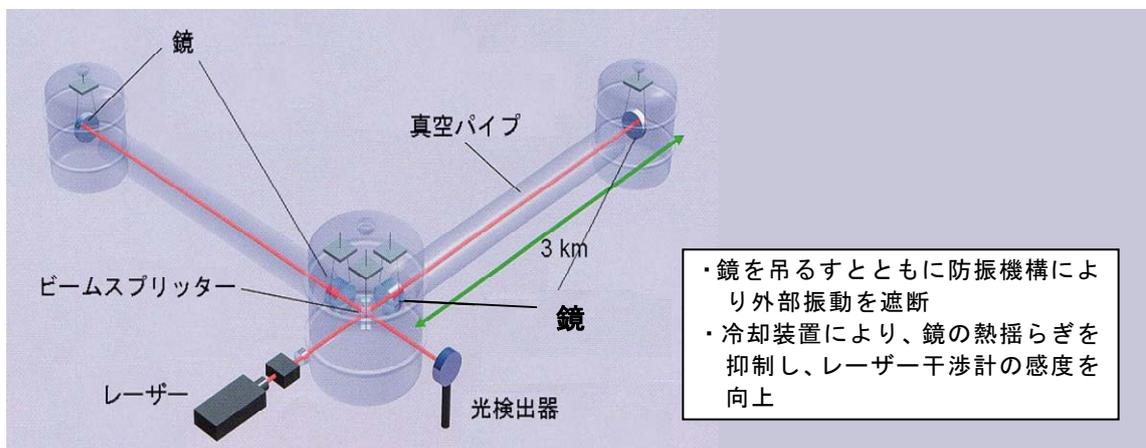
アインシュタインが一般相対性理論で予言した重力波は、その存在は確実と考えられているものの、まだ人類が検出していない重力の波動である。これまで宇宙はほとんど電磁波の情報によって解明されてきたが、それとは独立な情報が重力波によって得られる。従って、重力波の観測は一般相対性理論に確証を与えるとともに、新たな天文学を創成することを意味している。重力波は、中性子星やブラックホール^{※7}などが関係する強い重力場で発生し、2つの偏波モードを持ち光速で伝播する。重力波が直接検出されれば、中性子星やブラックホールなどの運動が時間を追って観測することができ、動的時空の概念が検証されることになる。

LCGTの主要な観測対象となる重力波源は、7億光年先までの連星中性子星の合体であるが、その頻度は1年に数回から数十回と予想されており、重力波形（チャープ波形）を解析することにより、合体した中性子星の質量の決定が可能である。また、大質量星の進化の最終段階で起きる超新星爆発では、物質をほとんど通過するニュートリノ^{※8}でさえも通過せず、直接情報を得ることができない中性子星コアの振動が直接観測されると期待され、超高密度物質の情報から原子核物理学に大きな進展をもたらす。更には、ブラックホールの準固有振動^{※9}、連星ブラックホールの合体やブラックホールへの星の落下などの事象の観測が期待され、特異天体の物理学と天文学に大きな進展が期待される。また、究極的には、宇宙初期のインフレーション^{※10}などを起源とする宇宙背景重力波^{※11}も観測対象である。



連星中性子星合体に伴う重力波形（チャープ波形）

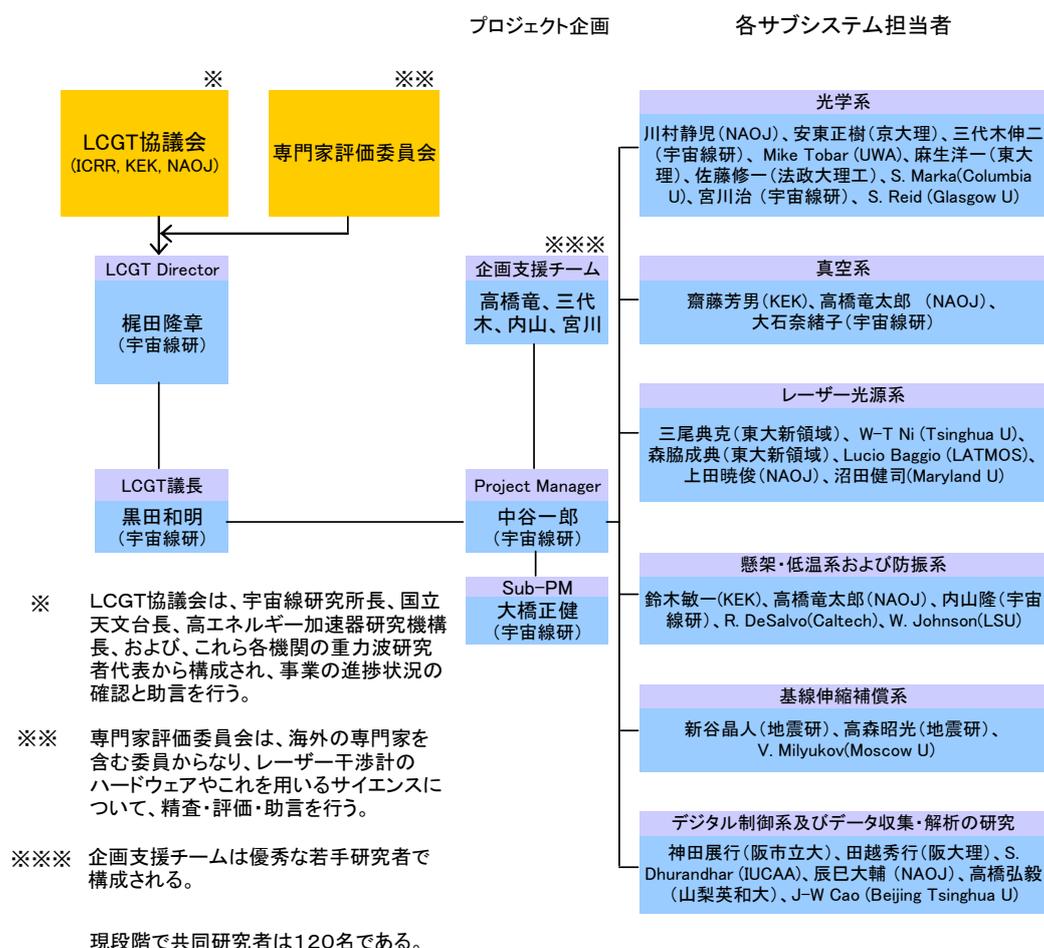
本装置を地下に設置することにより、地面振動や温度変化などの外部雑音から隔離し、レーザーを反射する鏡を吊るすとともに防振機構を施すことにより、さらに外部振動を遮断する。また、冷却装置は、鏡の熱揺らぎを抑制し、レーザー干渉計の感度を向上させる。データ解析は、重力波のみならず地殻変動データの解析も行うため、地球中心核の振動解明など地球物理学の進展にも大きく寄与する。



レーザー干渉計の構造

③実施体制

多数の研究機関・大学に所属する重力波研究者が分担して研究開発を推進するために、平成6年、国立天文台、高エネルギー物理学研究所（現・高エネルギー加速器研究機構）、東京大学宇宙線研究所の3所長間で重力波研究の推進に関する覚え書きが交わされた。これにより、重力波検出器の高感度化と観測技術の開発を行ったTAMA計画及びそれ以後の研究が遂行されてきたが、本計画ではこの枠組みで形成された研究者ネットワークを活用して、上記の3研究機関のみならず、国内（京都大学、大阪大学、大阪市立大学、法政大学、山梨英和大学）や海外（米国：Columbia University、Maryland University、Caltech、LSU、英国：Glasgow University、フランス：LATMOS、オーストラリア：UWA、インド：IUCAA、ロシア：Moscow University、中国：Beijing Tsinghua University）から研究者が参画し、下図に示すような組織を構築して推進する。計画が承認された段階で、国立天文台の重力波研究者が宇宙線研究所に出向し、プロジェクトの核となって計画をけん引するという合意がなされている。（既に研究者1名が国立天文台から宇宙線研究所に出向している。）



④国内における検討経緯

本計画については、国内外のコミュニティや国際的な委員会等において検討が行われている。

- 平成 5 年 宇宙線研究所の将来計画検討小委員会の報告で、「重力波望遠鏡」が研究所将来計画の2本柱の1つとして選定された。
- 平成 6 年 日本学術会議の天文学研究連絡委員会長期計画小委員会で、「天文学に全く新しい展開をもたらさしめる装置として、ぜひ実現すべき」とされた。
- 平成12年 学術審議会宇宙科学部会の報告で、「当面は技術開発を強化しつつ、早期の着手を目指す計画として位置づける」とされた。
- 平成17年 LCGTに関する技術諮問委員会のレビューを受け、「計画が速やかにスタートすれば世界をリードできる」と評価された。
- 平成20年 各国の物理学会や学術アカデミーによる連合組織である国際純粋・応用物理学連合の重力波国際委員会（GWIC）^{※12}は、「本計画はアジア・オセアニア地域に早急に整備すべき重要計画である」との声明を発表した。
- 平成22年 日本学術会議の天文学・宇宙物理学分科会の記録「天文学・宇宙物理学の展望と長期計画」で、「本計画は国家レベルで推進すべき特に重要な大型研究の1つとして、我が国が責任を持って早急に推進すべき重要計画」とされた。
- 同年 日本学術会議「学術の大型施設計画・大規模研究計画－企画・推進策の在り方とマスタープラン策定について－」に採択された。

要素技術の研究開発は、昭和63年に開催された基研モレキュール型研究会^{※13}「重力波天文学」に全国の重力波研究者が集まり、レーザー干渉計による重力波の直接検出の議論が開始されると、平成元年にレーザー干渉計重力波検出器の概念設計が進められ、平成3年に、国立天文台に20mファブリーペロー型レーザー干渉計プロトタイプが設置され、本格的な実験研究が開始された。

平成7年からは、国立天文台に中規模レーザー干渉計TAMA300^{※14}が建設され、重力波検出器の高感度化と観測技術の開発が行われた。平成15年には、世界初となるレーザー干渉計による重力波観測（1,000時間）を実行し、世界から高く評価された。

その後、平成14年に建設された神岡低温レーザー干渉計プロトタイプCLIOによって、LCGTの基礎技術のうち、特に低温鏡の実証研究が行われた。平成20年には、常温における理論限界感度を世界で初めて達成して地下環境の優位性を実証し、平成22年3月に世界で初めて低温鏡による感度向上を示して、LCGTの先進性を確かなものにした。

⑤国際的な動向

重力波を検出するため、世界では、米国のL I G O計画、仏伊合同のV i r g o計画の両大型計画に加えて、英独合同のG E O計画や日本のT A M A計画など中規模の計画が進められてきた。しかし、これらの装置はいずれも感度不足でまだ重力波の検出には至っていない。このため、米国では、2008年度に次期L I G O計画の建設予算が承認され、現在、その改造作業が進められている。平成28年（2016年）頃に運転を開始して、最終的には初期L I G Oより一桁高い感度での観測を目指している。フランスとイタリアが合同で策定した次期V i r g o計画も予算化が確定している。これらの計画とL C G Tは同等の感度をめざしており、L C G Tが重力波を世界で初めて検出するためには、熾烈な競争を勝ち抜く必要がある。



世界の重力波望遠鏡計画

⑥年次計画

建設開始からおよそ2年かけて、大型レーザー干渉計を設置するためのトンネルの掘削工事を行い、その直後から真空系を設置し、順次、基線伸縮補償系、デジタル制御系、レーザー光源系、懸架・低温系、常温防振系等を設置し、レーザー干渉計の設置・調整を行う。建設着手から3年で、レーザー干渉計として動作する状態を実現し、その後2年をめどに低温鏡を設置することで本装置の高感度化を進め、感度出し工程を経て、目標感度を達成する。

なお、大型レーザー干渉計の開発については、「最先端研究基盤事業」による整備が予定されている。

2. 計画の評価

①研究者コミュニティの合意

平成6年以降、日本学術会議天文学研究連絡委員会等において、本計画に関する検討が行われている。平成22年3月には、同会議天文学・宇宙物理学分科会で、本計画は国家レベルで推進すべき特に重要な大型研究の1つとして、我が国が責任を持って早急に推進すべき重要計画とされている。

また、日本学術会議科学者委員会学術の大型研究計画検討分科会の提言「学術の大型施設計画・大規模研究計画－企画・推進策の在り方とマスタープラン策定について－」（平成22年3月17日）において、研究者コミュニティの十分な検討と議論を経て合意が形成された計画として位置付けられている。

さらに国際的にも、各国の物理学会や学術アカデミーによる連合組織である国際純粋・応用物理学連合の重力波国際委員会から、本計画はアジア・オセアニア地域に早急に整備すべき重要計画との声明が出されている。

以上から、本計画に着手するに当たっての研究者コミュニティの合意は国内外を通じて十分に得られている。

②計画の実施主体

本計画は、東京大学宇宙線研究所を中心的な実施主体として位置付け、高エネルギー加速器研究機構及び自然科学研究機構国立天文台が協力する体制をとっている。

計画の推進に当たっては、進捗状況の確認と助言を行うLCGT協議会が設置されており、また、国内外の専門家から構成され、レーザー干渉計のハードウェアやこれを用いるサイエンスについて精査・評価・助言を行う専門家評価委員会も設置することとしている。

また、我が国を含む8ヶ国の大学等15機関の研究者の参画が予定されているなど、東京大学宇宙線研究所を中核とした、国際的な実施体制が構築されると判断される。

③共同利用体制

実施主体の東京大学宇宙線研究所は、全国共同利用型の附置研究所として、昭和51年から活動を開始し、平成22年4月からは、共同利用・共同研究拠点として、引き続き活動を行っている。また、現在、同研究所が行っている「スーパーカミオカンデ」^{※15}を利用したニュートリノ研究において数多くの共同研究の実績があり、共同利用体制は十分に確立していると判断される。

④計画の妥当性

本計画のために、平成7年から国立天文台に設置された中規模レーザー干渉計TAMA300や神岡低温レーザー干渉計プロトタイプCLIOにより、重

力波望遠鏡の地下設置や低温鏡の有効性について検証が行われてきた。低温鏡を導入することにより、常温に比べ、検出感度が向上することが確認されるとともに、地下設置とすることで熱雑音^{※16}等を理論値まで抑制することが可能となるなど、重力波検出器の基本技術は確立されている。このため、今年度から建設に着手するという計画のスケジュールは、実施可能であると判断される。

また、欧米の重力波望遠鏡（V i r g o及びL I G O）の建設期間が、最短で3年程度であったことと比較して、本計画は建設期間が約2年半となっているが、基本技術が既に確立されていることから、実施可能であると判断される。

さらに、本計画と同規模の一辺3kmのレーザー干渉計を設置しているV i r g oの建設費（約111億円）及び運用費（約10.6億円／年）と比較して、本計画の建設費及び運用費は概ね妥当なものと判断される。

一方で、多額の国費を投入して建設・運用を行うという性質に鑑み、一層の経費効率化に向けた検討を行うことが望まれる。

⑤緊急性

欧米のV i r g o及びL I G Oは、検出感度を10倍にする高度化を実施する予定であり、双方とも平成29年（2017年）頃から本格的な観測を再開することが見込まれている。

世界初の重力波の直接検出は、日米欧の熾烈な競争状態にあり、欧米の後塵を拝することになれば、現在、本計画に参画が見込まれている約100名の海外研究者ばかりでなく、国内の優秀な人材が欧米に流出することが危惧される。

また、重力波の直接検出が達成された後の課題である、重力波の発生場所の特定を行うためには、日米欧の連携による三極での観測が不可欠であることから、国際協調の観点からも欧米に後れを取ることなく、本計画を速やかに着手することが必要である。

これらのことから、本計画の緊急性は高いと判断される。

⑥戦略性

重力波望遠鏡を地下に設置すること及び低温鏡を整備することにより、重力波検出の妨げになる熱雑音等を可能な限り排除することは、我が国独自のアイデアである。このアイデアと技術的な知見を基に、欧米の先行装置の10倍の感度を有する装置を早期に開発することにより、日本独自の技術を世界に示すとともに、当該分野における我が国の圧倒的な存在感を示すことが期待できる。

また、中長期的には、日米欧が連携することにより「重力波天文学」を創成し、物理や天文分野全体に大きな波及効果をもたらすと同時に、本装置は、アジア・オセアニア地域の拠点として、国際的な頭脳循環に貢献することが見込まれる。本計画においては、国内外から200名の研究者の参加が見込まれているが、世界の三極の1つとして欧米の最新の研究成果も吸収しながら共同研

究を実施することを通じて、グローバルな視野を持った若手研究者の育成が期待できる。

このほか、本計画により得られるレーザー干渉計の基線伸縮補償の技術は、地殻歪の測定にも応用でき、地球物理学への貢献が期待できる。

⑦社会や国民の理解

実施主体である東京大学宇宙線研究所では、これまでも一般講演会等の開催や学生・一般向けの図書の刊行により、社会や国民に対する重力波の理解増進に努めてきている。

一方、「重力波」の概念は一般にはなじみが薄く理解も難しいこと、また本計画の推進には多額の予算を要することから、これまで以上に幅広く社会の理解を得る取組が必要である。

3. まとめ

①総合評価

本計画により整備する装置は、先行する欧米の現行装置と比較して、地下に設置し低温鏡を導入するという特徴を有し、これにより熱雑音等を理論値までに抑制することで、10倍の感度を持つ重力波望遠鏡である。10倍の感度を持つということは、10倍遠くの距離で発生した重力波の検出が可能になることに等しい。この距離における検出可能な重力波発生源の数は $10^3 = 1000$ 倍となり、欧米の現行装置と比較して、検出可能性が飛躍的に高まる。この空間内で、重力波の発生原因である連星中性子星の合体は、年に数回から数十回の頻度で起こると予想されている。アインシュタインの一般相対性理論で予言される重力波は、これまで間接的な証拠はあったものの、直接検出はされておらず、計画どおりに装置が整備され観測が開始されれば、我が国が世界に先駆けて重力波を検出することが期待できる。

中性子星やブラックホールなどが関係する強い重力場で発生する重力波が直接検出されれば、アインシュタインの一般相対性理論の詳細な検証が可能となるばかりでなく、ブラックホール生成の瞬間を観測できるなどの大きな学術的な意義を有する。

重力波の直接検出が達成された後の課題である、重力波の発生場所の特定を行うためには、欧米と連携した世界三極での観測が不可欠である。また、重力波の検出を通じて宇宙を観測するという天文学の新たな分野である「重力波天文学」を創成することで、連星ブラックホールや連星中性子星の合体などの観測により、特異天体の極限状態に関する物理学をはじめとする幅広い分野への波及効果が期待されるとともに、我が国が、アジア・オセアニア地域の拠点として、当該分野の国際的研究拠点の一翼を担うことで、国際的な頭脳循環に貢

献することも期待される。

本計画の推進に当たっては、東京大学宇宙線研究所を中心的な実施主体として位置付け、高エネルギー加速器研究機構、自然科学研究機構国立天文台をはじめ、国内外の大学等15機関の研究者の参画が予定されており、国際的な実施体制が構築される見込である。また、同研究所では、現在、「スーパーカミオカンデ」によるニュートリノ研究を行っており、共同利用体制は十分に確立している。さらに、本計画は、欧米の装置と比較して、短い建設期間となっているが、基本技術が既に確立されていることから、実施可能な計画であると判断される。

現在、欧米においても、各現行装置の感度を10倍に高度化する計画が予定されており、双方とも平成29年（2017年）頃から、本計画による大型低温重力波望遠鏡と同程度の感度を持つ装置による本格的な観測を再開することが見込まれている。我が国が、世界初の重力波の直接検出を達成し、国内外から当該分野の多数の研究者を集結させ、国際的研究拠点としての地位を確固たるものにするとともに、日米欧の三極が連携して「重力波天文学」を創成するためには、欧米に後れを取ることなく、本計画を推進する必要があることから、緊急性が高い。

以上を総合的に勘案し、本計画は積極的に進めるべきであり、早急に着手すべきであると評価する。

②計画推進に当たっての留意点

今後、長期的に「重力波天文学」が大きく発展することを見通して、実施主体である東京大学宇宙線研究所を中心とした本計画の推進体制の強化やアジアを中心とする国際共同体制の構築を図るとともに、関連分野の研究者コミュニティが一体となって若手研究者の育成を推進していくことが望まれる。

また、重力波は「ブラックホール」や「アインシュタインの一般相対性理論」といった、社会や国民が比較的関心を寄せやすい事柄と密接に関連することから、その関連性等を分かりやすく説明していくことなどを通して、本計画や科学的重要性について、社会・国民の理解を深めていくことが望まれる。

用語解説

※1 重力波

アインシュタインの一般相対性理論により予言された、光速で伝播する時空の歪み。超新星爆発、連星中性子星などの合体時に放出される。未だ直接検出されていない。

※2 レーザー干渉計

レーザー光の波の干渉を利用して微小な変位を計測する装置であり、高感度に計測するためのさまざまな工夫が加えられている。

※3 連星中性子星

2つの中性子星が互いの周りを公転運動している連星系である。公転運動に伴う重力波放出により次第にエネルギーを失うことは観測的にわかっており、最終的には合体してブラックホールになると考えられている。

※4 低温鏡

レーザー干渉計に使用する反射鏡は熱雑音^{※11}を持つが、その振動を冷却することで低減し、雑音を小さくできる。このために、鏡を絶対温度で20 K (−253℃)にまで冷却する。

※5 L I G O

アメリカの東西両海岸に建設された2台の基線長4 kmのレーザー干渉計。平成17年に開始した観測では、重力波は発見されなかった。現在は、一桁の感度向上を目指す次期L I G Oへの改造作業を進めている。

※6 V i r g o

仏伊共同計画によりイタリアに建設された基線長3 kmのレーザー干渉計。低周波域で高感度である特長を持ち、平成21年にはL I G Oと国際共同観測を実行した。現在は、次期V i r g oに向けて改造中である。

※7 ブラックホール

中性子星の質量は太陽質量の約1.4倍であるが、これよりも重くなると中性子星自身が重力に耐えられずに崩壊することが予見されている。これがブラックホールである。

※8 ニュートリノ

電荷を持たず、物質とほとんど相互作用しない素粒子。近年ニュートリノに他の素粒子に比べて極度に小さい質量があることが日本のスーパーカミオカンデ^{※15}実験で発見された。

※9 ブラックホールの準固有振動

ブラックホールが星を吸い込んだりすると、硬いゴムボールをハンマーで叩いた時のように、固有振動数を持った振動モードが励起される。この振動は、重力波を放出して減衰し、元の静かな状態に戻る。これをブラックホールの準固有振動という。

※10 インフレーション

この宇宙が誕生した直後に宇宙の膨張が急激におこり、宇宙のサイズが一瞬のうちに大きくなって現在の宇宙に進化したとする理論。観測された3 K (−270℃)の宇宙背景放射の揺らぎがインフレーション理論でうまく説明できるなどの証拠によりインフレーション理論は現在では初期宇宙の標準理論となっている。

※11 宇宙背景重力波

インフレーション直後の超高温の宇宙では、エネルギー密度が揺らいでいたとされる。この揺らぎは重力波として放出され、3 K (−270℃)の宇宙背景放射と同様に、現在の宇宙にもそのなごりが宇宙背景重力波として存在すると考えられている。

※12 重力波国際委員会 (GWIC)

国際純粋・応用物理学連合 (IUPAP) の下部委員会である素粒子及び原子核宇宙物理・重力国際委員会 (PANAGIC) のもとにある委員会の一つで各国の重力波プロジェクトの代表者クラスのメンバーで構成されている。

※13 基研モレキュール型研究会

京都大学基礎物理学研究所で行われる研究会の形態のひとつ。一人で行うものをアトム型と呼び、それに対して少人数が滞在して議論するものがモレキュール型研究会である。

※14 TAMA300

国立天文台三鷹キャンパス内に設置された基線長300mのレーザー干渉計型重力波望遠鏡である。学術創成研究費「高感度レーザー干渉計を用いた『重力波天文学』の研究」(平成7～13年)で推進され、平成15年に世界初となる本格的重力波観測を実行した。

※15 スーパーカミオカンデ

宇宙ニュートリノの観測研究のための水チェレンコフ測定器である。総重量は5万トンの測定器で、岐阜県神岡の地下に設置してある。平成10年にニュートリノの質量を発見し、現在も様々なニュートリノ研究が行われている。

※16 鏡の熱雑音

すべてのものは熱を持っており、そのエネルギーで運動をしている。自由に動き回れる粒子はブラウン運動と呼ばれるランダムな運動を行うが、拘束すると、エネルギーは重心周りの回転や振動に向かう。これが熱雑音であり、鏡も例外ではなく振動する。

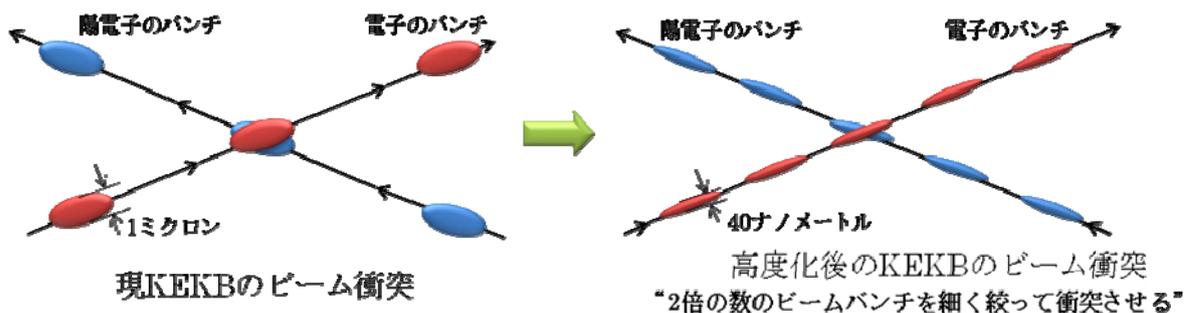
Ⅱ. 「Bファクトリー加速器の高度化による新しい物理法則の探求」の推進について

1. 計画の概要

①概要

本計画は、高エネルギー加速器研究機構（KEK）の電子・陽電子衝突型加速器^{※1}（KEKB）を高度化することにより、宇宙の初期にしか起こらなかった極めて稀な現象を多数測定し、新しい物理法則の発見・解明を目指すとともに、宇宙から反物質^{※2}が消え去った理由などの解明を目指すものである。

本計画では、電子と陽電子を衝突させることにより作り出されるB中間子と反B中間子の反応の中から極めて稀な崩壊現象を精密に測定する。そのため、現在のKEKBの高度化を図り、電子ビームと陽電子ビームのサイズをナノ・サイズに小さく絞り、ルミノシティ^{※3}を現在の40倍に高める。



②内容

加速器を用いる研究において、新しい物理法則の解明を目指すアプローチは2つある。1つは、加速器により大きなエネルギーを粒子に与え、新しい物理法則に現れる非常に重い新粒子を直接作り出して調べる「エネルギーフロンティア」の方法であり、欧州合同原子核研究機関（CERN）にあるラージ・ハドロン・コライダー（LHC）における実験はこの方法による。もう1つは、エネルギーは低いがビームの強度を高めてより多くの事象を測定し、新しい物理法則の性質を調べる「ビーム強度フロンティア」の方法であり、本計画はこの方法による。

研究対象となる新粒子は非常に質量が重く、反応が極めて稀にしか起こらないため、その解明には、これまでよりはるかに多くの実験データが必要となる。本計画では、現状の50倍の実験データを取得してB中間子などの極めて稀な崩壊現象を精密に測定し、新しい物理法則の存在を明らかにするとともに、そこに現れる新粒子の混合現象^{※4}やCP非対称性^{※5}などを世界に先駆けて解明す

ることを目指す。この解明は、宇宙誕生のごく初期段階において、粒子・反粒子の非対称性がどのように起こったかを明らかにすることでもあり、現在の標準理論^{※6}では説明できない宇宙の発展過程で反物質が消え去った謎の解明に迫ることができる。さらに、新しい物理法則から、現在宇宙最大の謎とされる暗黒物質^{※7}の正体・起源を明らかにし、素粒子の大統一理論^{※8}の構築へとつながることも考えられる。

本計画では、このような目的を達成するため、次の二段階にわたって研究計画を遂行する。

第一段階：装置の高度化（平成22年度－平成26年度）

KEKBの各装置の高度化後、試運転を行い、関連機器の精密調整を行う。

（次の1）～7）は、「⑥年次計画」にある表中の番号と対応）

1) リング真空システム関係

ビームを取り巻く電子雲^{※9}を除去する機能を持つビームパイプへの交換を行う。これにより、ビームサイズの増大を防ぐことができる。また、ビーム電流を高めるため、真空機器の改造を行う。

2) リング電磁石システム関係

リングを構成する電磁石の増設と配置の変更を行う。これにより、ビームの均一性を極限まで高めた、超低エミッタンスビーム^{※10}を実現する。

3) 高周波システム関係

ビーム電流を高めるため高周波システムの増強を行う。これにより、大電流ビームを安定して加速することができる。

4) ビームモニタ・制御システム関係

パイプ中のビームの位置やサイズ等を観測・制御するシステムの高度化を行う。これにより、ビームサイズの増大を防ぎながら、ビームの周回・衝突を安定させることができる。

5) 衝突点機器関係

衝突点におけるビームを極限まで絞り込む装置の改良を行う。これにより、衝突点におけるビームサイズを40ナノ・メートルまで絞り込み、ナノ・サイズのビーム衝突を実現する。

6) Belle測定器^{※11}関係

衝突によって生成される粒子の測定を行うBelle測定器の改造を行う。これにより、粒子測定精度を向上させることができる。

7) 入射器関係

強度を上げて高品質なビームを得るための入射器の改造等を行う。これにより、広がり少なく、エネルギーの整った大強度のビームを得ることができる。

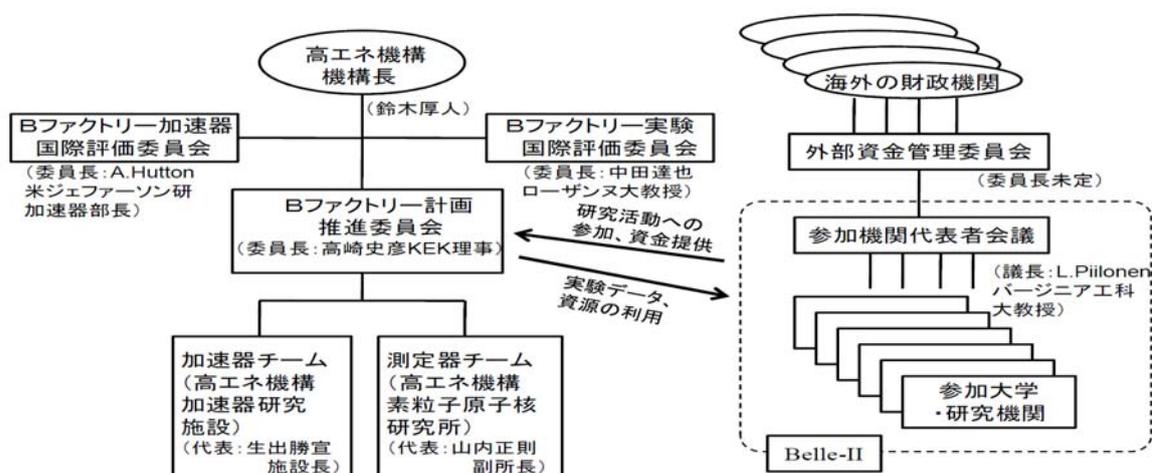
第二段階：新しい物理法則の発見・解明を目指す（平成27年度一）

高度化したKEKBの運転を行い、その性能向上のための調整を図りつつ、ビーム衝突実験を行う。最終的には、これまでのKEKB実験の50倍の量の実験データを取得する。このデータを用いて、B中間子のほか、タウ・レプトン^{※12}などの重い粒子の崩壊現象に新しい物理法則がどのように関与しているかを網羅的に精密測定するとともに、新しい物理法則におけるCP非対称性、粒子の混合現象、粒子間に働く力の性質などを明らかにし、宇宙の発展過程で反物質が消え去った謎の解明を目指す。

③実施体制

これまで実施してきたKEKB実験の体制をもとに、新たな体制を構築する。主な組織と担当する内容は以下のとおり。

- ・「Bファクトリー計画推進委員会」：計画全体に関する意思決定
- ・「Bファクトリー加速器国際評価委員会」：主に加速器に関する技術的評価及び研究の方向性に関する評価
- ・「Bファクトリー実験国際評価委員会」：主に測定器に関する技術的評価及び物理学的成果や研究の方向性に関する評価
- ・「加速器チーム（加速器研究施設）」：加速器の高度化とその後の維持・運転
- ・「測定器チーム（素粒子原子核研究所）」：Belle測定器の維持・運転・データ収集
- ・「Belle-II」：国内外の参加大学・研究機関からなる研究者組織であり、共同実験に参画しBelle測定器の高度化及びデータの解析を実施
- ・「参加機関代表者会議」：参加機関の代表者組織であり、研究活動への参加と資金提供を実施
- ・「外部資金管理委員会」：海外の財政機関等の参加者組織であり、資金を管理



本計画は、国内外の研究者に広く門戸を開いた国際共同研究である。国内外の参加大学・研究機関からなる研究者組織として、従来はBeIIe実験グループ（通称「BeIIe」）が組織されていたが、この後継として、新しい実験グループ「BeIIe-II」の設置が予定されている。「BeIIe」は、世界15ヶ国・地域の62大学・研究機関から参加する約400名の研究者で構成されているが、新しい「BeIIe-II」は、国内の大学に加え、米・欧・アジア・豪州などから多くの参加が見込まれ、最終的に600名を超える見込みである。「BeIIe-II」は、BeIIe測定器の高度化・実験の遂行・データ解析などを分担することとなる。また、「BeIIe-II」は財政的貢献にも対応するため、海外の財政機関等の参加者からなる「外部資金管理委員会」の監督の下に意思決定を行う「参加機関代表者会議」を設置し、研究活動への参加と資金提供を行う。参加機関は、実験データへの自由なアクセスや計算機資源などの利用が認められ、研究を進めることとなる。「素粒子原子核研究所」に所属する研究者も測定器の維持・運転と運転開始後のデータ収集を担当するほか、研究機関としてこの枠組みで研究活動に参加することとなる。

④国内における検討経緯

本計画については、以下に示すとおり国内外のコミュニティや国際的な委員会等において検討が行われている。

- 平成11年 KEKBによる本格実験開始。
- 平成18年 「高エネルギー物理学研究者会議」（加盟者数約800名）は、大強度陽子加速器施設（J-PARC）と高度化したKEKBにおける研究を当面推進すべき研究として結論付けた。
- 平成19年 KEKはこれを受け、今後5カ年における研究計画「ロードマップ」を策定し、KEKBの高度化を高い優先度で実施することとした。
- 平成20年 「国際ロードマップ評価委員会」（KEK機構長の諮問会議。国内委員3名、国外委員11名で構成）において、当該「ロードマップ」の内容が高く評価された。
「高エネルギー物理学研究者会議」がこの「ロードマップ」に対して詳細な検討を加え、これを了承することを決定した。
- 平成22年 日本学術会議科学者委員会学術の大型研究計画検討分科会提言「学術の大型施設計画・大規模研究計画－企画・推進策の在り方とマスタープラン策定について－」に採択された。

⑤国際的な動向

現在、素粒子物理学の分野では、新しい物理法則の発見と解明を目指す研究が競争状態にある。

CERNのLHCは、平成25年から本格運転が予定されており、ヒッグス粒子の発見等の成果が期待されている。しかし、「エネルギーフロンティア」であるLHCにおける実験では、新しい物理法則におけるCP非対称性や粒子の混合現象を明らかにすることは困難であり、宇宙の発展過程で反物質が消え去った謎の全容の解明を目指すためには、「ビーム強度フロンティア」である本計画が必要である。したがって、今後、方法の異なるLHCにおける実験と本計画は競争しながら相補的に新しい物理法則の解明を進めていくと考えられる。

また、イタリア・フラスカッティ研究所では、本計画と同様の高性能Bファクトリー計画が平成28年の実験開始を目標に検討されている。

⑥年次計画

本計画は、次の二段階に分かれる。

第一段階では、装置の高度化を行う（平成22年度－平成26年度）。具体的には、リング真空システム関係、リング電磁石システム関係、高周波システム関係、ビームモニタ・制御システム関係、衝突点機器関係、BeIle測定器関係及び入射器関係等について、高度化する。

第二段階は、高度化したKEKBの運転を行い、その性能向上のための調整を図りつつ、ビーム衝突実験を行う（平成27年度－）。最終的には、これまでのKEKB実験の50倍の量の実験データを取得し、新しい物理法則の発見・解明等に挑む。

なお、陽電子リングに係る高度化（リング真空システム関係及びリング電磁石システム関係）については、「最先端研究基盤事業」による整備が予定されている。

項 目	第 一 段 階					第二段階
	平成22年度	平成23年度	平成24年度	平成25年度	平成26年度	平成27年度
1)	陽電子リング 真空システム	←-----→		↔		<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> ←-----→ 設計・製作 ↔ 設置・調整 </div>
	電子リング 真空システム	←-----→			↔	
2)	陽電子リング 電磁石システム	←-----→		↔		
	電子リング 電磁石システム	←-----→			↔	
3)	高周波システム	←-----→			↔	
4)	ビームモニタ・ 制御システム	←-----→			↔	
5)	衝突点機器	←-----→			↔	
6)	Belle 測定器	←-----→			↔	
7)	入射器	←-----→		↔		
施設関連		←-----→				
調整運転・本格運転					←-----→	←-----→

⑦ 予算規模

※ 実施主体の見積りに基づく

- ・ 建設 予算総額 314 億円（設備費：290 億円、施設費：24 億円）
- ・ 運 転 年間 70 億円

2. 計画の評価

①研究者コミュニティの合意

平成18年以降、「高エネルギー物理学研究者会議」等において、本計画は優先的に実施する計画として位置付けられている。これを受けて、KEKにおいても「ロードマップ」を策定し、国外委員が約8割を占める機構長諮問会議である「国際ロードマップ評価委員会」においても、高く評価されている。

さらに、日本学術会議科学者委員会学術の大型研究計画検討分科会の提言「学術の大型施設計画・大規模研究計画－企画・推進策の在り方とマスタープラン策定について－」（平成22年3月17日）において、研究者コミュニティの十分な検討と議論を経て合意が形成された計画として位置付けられている。

以上から、本計画に着手することについて、研究者コミュニティの合意は十分に得られていると判断される。

②計画の実施主体

本計画は、KEKを中心的な実施主体として位置付け、国内外の大学・研究機関から研究者が参画する国際共同研究として実施される。実施体制は、これまでのKEKB実験の体制を基盤とする。

具体的には、計画全体に関する意思決定を行う「Bファクトリー計画推進委員会」、主に加速器に関する技術的評価及び研究の方向性に関する評価を行う「Bファクトリー加速器国際評価委員会」、主に測定器に関する技術的評価及び物理学的成果や研究の方向性に関する評価を行う「Bファクトリー実験国際評価委員会」、加速器の高度化とその後の維持・運転を行う「加速器チーム（加速器研究施設）」及びBeIIe測定器の維持・運転・データ収集を行う「測定器チーム（素粒子原子核研究所）」をそれぞれ設置することとしている。

また、国内外の参加大学・研究機関から構成される実験グループ「BeIIe-II」も新たに置かれることとされており、機能的な実施体制が構築されると判断される。

③共同利用体制

実施主体のKEKは、大学共同利用機関として昭和46年から活動を行っている（当時は高エネルギー物理学研究所）。KEKB実験をはじめ、KEKでは数多くの共同研究の実績があり、共同利用の体制は十分確立していると判断される。

④計画の妥当性

本計画は、電子・陽電子ビームをナノ・サイズに小さく絞り、ルミノシティを現在の40倍に高めるものであり、加速器・測定装置等の高度化には高度な技術が求められるが、それに必要な真空システム技術やビームを超低エミッタ

ンス化する技術などは、既にKEKに蓄積・確立されており、本計画の実施は可能と判断される。

さらに、本計画では、既存の電磁石や高周波加速空洞等について可能な限り有効活用することとしており、現在のKEKBの建設経費約380億円と比較しても、本計画の建設費は概ね妥当なものと判断される。また、運転・実験経費についても、現在のKEKBが運転を開始したときの85億円／年と比較して、70億円／年は概ね妥当なものと判断される。

一方で、多額の国費を投入して建設・運用を行うという性質に鑑み、一層の経費効率化に向けた検討を行うことが望まれる。

⑤緊急性

素粒子物理学の分野において、KEKはCERN、米国フェルミ国立加速器研究所（FNAL）とともに世界の三極の一つとして国際研究拠点としての地位を築いているが、現在、当該分野は、新しい物理法則の発見と解明に向けて世界的な競争状態にあると言える。

CERNのLHCは、平成25年からの本格運転が予定されているが、本計画は、LHCにおける実験では困難なCP非対称性や粒子の混合現象の解明に有利な実験であることから、今後、新しい物理法則の解明を目指し、競争しつつ相補的な役割を果たすことが期待されており、早急な計画の着手が必要である。

また、イタリアでは、本計画と同様の高性能Bファクトリー計画が検討されており、国際競争の観点からも早期の着手が必要である。

さらに、現在のKEKB実験に参加している約400名の研究者のうち半数以上が海外からの研究者であり、他の計画が先行した場合、これらの人材の流出が危惧される。

以上を総合的に勘案し、本計画の緊急性は高いと判断される。

⑥戦略性

現在、電子・陽電子を用いたB中間子実験ができるのは世界ではKEKBのみであり、世界のトップを走り続けている。本計画は、このようなKEKBの性能の飛躍的向上を図るものであり、国際的地位を揺るぎないものとするのが期待できる。

現在のKEKB実験では、世界15ヶ国・地域の62大学・研究機関から約400名の研究者が参画しているが、本計画により更に大規模な国際共同プロジェクトへと発展し、国内外から約600名の研究者の参加が見込まれ、国際的な頭脳循環の拠点として多大な貢献が期待できる。また、約600名のうち約半数が35歳以下の若手研究者の見込みであるが、本計画に参画する若手研究者は、CERNやFNALなどの最新の研究成果も吸収しながら研究を実施

することができ、グローバルな視野を持った若手研究者の育成が期待される。

このほか、本計画による成果は、天文学や原子核物理学などの他分野の研究への波及が見込まれることから、新たな学術研究の展開につながることを期待される。また、本計画によって得られる加速器や粒子測定器等の新しい技術は、医療用加速器等への応用が可能であり、学術研究のみならず、産業などへの波及も期待できる。

⑦社会や国民の理解

KEKでは、これまでも大型プロジェクトに対して広く国民の理解と支持を得るために、若者に対する科学啓蒙活動、施設の公開、一般向け講演会などを行ってきた。

一方、素粒子物理学の分野や本計画の内容については、一般にはなじみが薄く、理解も難しいこと、また、本計画の推進には多額の国費を要することから、これまで以上に幅広く国民の理解と支持を得る取組を積極的に推進することが必要である。

3. まとめ

①総合評価

素粒子物理学の分野においては、ほとんどの実験結果は現在の標準理論によって説明できるが、宇宙から反物質が消え去った理由や暗黒物質の正体など、人類の自然科学の理解の根幹に関わる謎は標準理論では説明できず、未解決のまま残されている。これまでKEKB実験では、標準理論では説明が困難な新しい物理法則の存在を示唆する現象を多数発見しており、世界的に注目されている。

本計画は、KEKBの高度化により、現在のルミノシティを40倍に高め、標準理論では説明が困難な極めて稀な現象を精密に測定し、新しい物理法則の発見と解明を目指すとともに、宇宙の発展過程で反物質が消え去った謎を明らかにすることを目指すものであり、世界に先駆けてこの謎を明らかにすることの学術的意義は極めて大きいといえる。

また、素粒子物理学の分野において、KEKがCERN、FNLととともに世界の三極の一つとして国際研究拠点の地位にあることは、既に世界の認めるところであり、本計画が実現すれば、KEKの地位を更に高めることになる。また、国内外から約600名の研究者が参加し、国際的な頭脳循環に貢献することも期待できる。

本計画の推進に当たっては、KEKが実施主体となり、国内外の60以上の大学・研究機関からの研究者の参画が見込まれており、これまでのKEKB実験での体制を基盤とすることからも、既に実施体制は十分整っていると判断される。また、KEKBの高度化に必要な技術も既に確立されていることから、実施可能な計画であると判断される。

CERNのLHCにおける新しい物理法則の発見・解明を目指す実験とは、競争しつつ相補的な役割を果たすことが期待されているとともに、国内外から研究者を多数結集させ、国際研究拠点としての地位を確固たるものにする観点からも、本計画の緊急性は高い。

以上を総合的に勘案し、本計画は積極的に進めるべきであり、早急に着手すべきであると評価する。

②計画推進に当たっての留意点

今後、本計画の実施に当たっては、世界の研究者に開かれた国際的な頭脳循環の拠点として、若手研究者を含む幅広い研究者が活躍できる環境と研究支援体制を充実させることが望まれる。

また、社会・国民への積極的なアウトリーチ活動を推進し、本計画や科学的な重要性についての理解を深めていくことが望まれる。

用語解説

※1 加速器

電子や陽子などの粒子を光速近くまで加速する装置。加速した粒子や、粒子から発生する光は、物理学、化学など幅広い分野の研究に利用されており、近年では医療、非破壊検査などにも利用されている。KEKBは、電子と陽電子を逆向きに加速して衝突させ、効率的に素粒子反応を起こす電子・陽電子衝突型加速器である。

※2 反物質

物理法則において、すべての物質には対応する反物質が存在する。例として、陽子の反物質は反陽子、電子の反物質は陽電子である。物質と反物質が出会うと両者は消滅してエネルギーだけが残る（対消滅）、他方、エネルギーからは物質と反物質が生成される（対生成）。現在の宇宙では存在が確認されていない。

※3 ルミノシティ

加速器で、電子・陽電子などを衝突させて毎秒当たりいかに多くの反応を起こせるかという指標。この値が大きいほど多くの反応を起こして稀な現象を詳しく調べることができる。

※4 新粒子の混合現象

質量やスピンなどの性質の似た粒子がある場合、それらが混じり合って別の粒子として観測される現象を粒子の混合と呼ぶ。超対称性粒子などの新粒子にも同様なことが起こると考えられる。

※5 CP非対称性

粒子と反粒子でそれらが従う自然法則が異なる場合、CP非対称であると呼ぶ。小林・益川理論はこれを説明する理論。

※6 標準理論

素粒子とその反応を記述する理論であり、2000年代初めまでに様々な実験的検証を経て構築された。現在、知られているほとんどの素粒子反応を説明することが可能であるが、理論としては未だ完全ではなく、この理論では説明ができない1000 GeV以上の現象を記述する未知の物理法則が存在すると考えられている。

※7 暗黒物質

宇宙の物質やエネルギーのうち、星など知られているものはわずか4%に過ぎず、残りは見えない物質やエネルギーであると考えられている。このうち光や他の物質とほとんど反応しないために観測できない物質を暗黒物質という。宇宙の全エネルギーの23%は暗黒物質が担っているとされる。

※8 素粒子の大統一理論

素粒子に働く力は現在 3 種類が知られているが、これらは本来一つの力が低いエネルギーの現象で 3 つに見えているという考え方があり、その場合の根源にある法則が大統一理論である。

※9 電子雲

リングを周回するビームから放出される放射光がビームパイプに当たると、表面から電子（光電子）が飛び出し、それが更に別の場所に当たると、二次電子を発生する。陽電子ビームや陽子ビームなど、プラスの電荷をもつビームの場合には、これらの電子がビームの周囲に電氣的に引き寄せられ、集団を形成する。これが「電子雲」である。電子雲の密度が高いと、ビームの不安定やビームサイズの増大を引き起こす。

※10 超低エミッタンスビーム

エミッタンスとは、ビームを構成する粒子の向きがいかに揃っているかを表す指標。例えば、光の場合、完全な平行光線はレンズで一点に絞ることができるが、これと同様に、エミッタンスの低いビームは小さく絞ることができる。

※11 B e l l e 測定器

KEKBで加速された電子と陽電子が衝突して起こる反応から生じる粒子について、その種別や運動量などを測定するための測定装置。縦横高さ 8 m、重さ 1 4 0 0 トン。

※12 タウ・レプトン

電子とよく似た性質をもつ 3 種類の粒子のうち最も重いものをタウ・レプトンと呼ぶ。重さは電子の約 3 5 0 0 倍で、0. 3 ピコ秒の寿命でニュートリノなどに崩壊する。

科学技術・学術審議会 学術分科会 研究環境基盤部会
学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会

委員等名簿

(◎：主査)

〔臨時委員：4名〕

岡田 清孝	自然科学研究機構基礎生物学研究所長
瀧澤美奈子	科学ジャーナリスト
中西 重忠	財団法人大阪バイオサイエンス研究所長
西尾章治郎	大阪大学理事・副学長

〔専門委員：8名〕

◎ 飯吉 厚夫	中部大学総長
海部 宣男	放送大学教授
川合 知二	大阪大学産業科学研究所教授
佐藤 勝彦	自然科学研究機構長
平 朝彦	独立行政法人海洋研究開発機構理事
塚本 桓世	東京理科大学理事長、山口東京理科大学学長
永宮 正治	J-PARCセンター長
横山 広美	東京大学大学院理学系研究科准教授

※評価にご協力いただいた専門家

植田 憲一	電気通信大学レーザー新世代研究センター長
杉山 直	名古屋大学大学院理学研究科教授
武田 廣	神戸大学理事・副学長
観山 正見	自然科学研究機構国立天文台長
山中 卓	大阪大学大学院理学研究科教授
林 青司	神戸大学大学院理学研究科教授