

国際リニアコライダー（ILC）に関する有識者会議
これまでの議論のまとめ（案）

平成27年6月 日

国際リニアコライダー（ILC）に関する有識者会議

目 次

1. 検討経緯と本まとめの位置付け	1
2. これまでの検討結果の概要	2
3. 提言	6
4. 建設及び運転期において必要となる人材の確保・育成に関する検討	8
5. 今後の検討の進め方	8
別添資料 自然法則の統一的理解のための課題と研究動向	9
作業部会報告	16
・ 素粒子原子核物理作業部会報告（平成27年3月）	
・ 技術設計報告書（TDR）検証作業部会報告（平成27年3月）	
参考資料	32

1. 検討経緯と本まとめの位置付け

(1) 背景

- 国際リニアコライダー（International Linear Collider、以下「ILC」という）計画は、全長約30kmの線形加速器により、高エネルギーで電子と陽電子の衝突実験を行う計画で、質量の起源とされる「ヒッグス粒子」の性質の詳細な解明や、標準理論を超える新たな粒子の発見により、素粒子物理学が新たな段階に進展することで宇宙創成の謎の解明につながると期待されている。
- ILC計画については、素粒子物理学分野の国際コミュニティにより、グローバル・プロジェクトとして設計活動が進められ、2013年6月に技術設計報告書（Technical Design Report、以下「TDR」という）が発表された。ILCに関する国際コミュニティにおいては、ILCを日本に建設することを提案しているほか、国内においても、ILCの建設により国際的な学術研究都市を生み出すことを期待し、ILCの我が国への誘致を推進する動きがある。
- このような背景を踏まえ、文部科学省において、ILC計画に関する検討を行うこととなった。

(2) 日本学術会議の所見（平成25年9月）を受けた文部科学省における検討経緯

- 平成25年5月、文部科学省からILC計画の学術的意義や課題等について日本学術会議に審議を依頼した。当該依頼への回答として日本学術会議がまとめた「国際リニアコライダー計画に関する所見」（平成25年9月30日日本学術会議）では、「素粒子物理学としての学術的意義は認められる。その一方で、（中略）LHCとの関係も含め、本計画に必要な巨額の投資に見合う、より明確で説得力のある説明がなされることが望まれる」とした上で、「本格実施を現時点において認めることは時期尚早」であり、「ILC計画の実施の可否判断に向けた諸課題の検討を行うために必要な調査等の経費を政府においても措置し、2～3年をかけて当該分野以外の有識者及び関係政府機関を含めて集中的な調査・検討を進めること」と提言された。
- 文部科学省ではこの提言を受け、平成26年5月に省内のタスクフォースの下に国際リニアコライダー（ILC）に関する有識者会議（以下「有識者会議」という）を設置し、ILCに関する諸課題の検討を行うことを決定した。

- 平成26年5月に開催した第1回有識者会議において、二つの作業部会（素粒子原子核物理作業部会、技術設計報告書（TDR）検証作業部会）の設置を決定し、巨額の投資に見合う科学的な意義に関する検討及びTDRについてのコスト面や技術面の課題等の検討を実施した。平成27年3月まで、素粒子原子核物理作業部会については8回、技術設計報告書（TDR）検証作業部会については6回開催し、作業部会としての報告を取りまとめた。
- このほか、文部科学省は、平成26年度の委託調査事業として、「国際リニアコライダー（ILC）計画に関する技術的・経済的波及効果及び世界各国における素粒子・原子核物理学分野における技術面を含む研究動向に関する調査分析」（委託先：株式会社野村総合研究所）を実施した。
- 平成27年4月に開催した第3回有識者会議において、二つの作業部会から報告が行われるとともに、ILC計画に関する技術的・経済的波及効果等に関する委託調査事業の結果について報告された。

（3）本まとめの位置付け

- 上記の経緯を踏まえ、本まとめは二つの作業部会における議論の結果及びILC計画に関する技術的・経済的波及効果等についての調査結果について有識者会議に報告がなされたことを受けて、有識者会議としてこれまでの議論を取りまとめるものである。
- そのほか、本まとめにより今後検討が必要な事項等について整理を行う。

2. これまでの検討結果の概要

（1）ILCの科学的意義

- ヒッグス粒子の発見により、標準理論といわれる理論枠組みを構成する全ての要素が実験的に確認されたが、標準理論では説明できないことも多く、今後の素粒子物理学分野の目的は標準理論を超える物理を探求することである。
- 素粒子物理学における究極の目標は、素粒子・宇宙を支配する自然法則の統一的理解であり、そのためには、力の統一、超対称性、その他の新たな物理について実験的に研究していくことが重要であり、現在、様々なアプローチによる取組がなされている（別添資料参照）。

- ILC¹ は新粒子の探索、ヒッグス粒子及びトップクォークの精密測定という方法により標準理論を超える物理を探索し、新しい物理の解明に貢献しうる点で重要である。また、ILCはLHCでは検出が困難な新粒子を検出する可能性がある。
- 新粒子の探索については、ILCと欧州合同原子核研究機関 (European Organization for Nuclear Research、以下「CERN」という) が設置する大型ハドロン衝突型加速器 (Large Hadron Collider、以下「LHC」という) では異なるタイプの新粒子探索が可能であり、これらの新粒子が共に超対称性粒子であるとする、両者は相補的な関係にある。一方で、ヒッグス粒子等の精密測定については、LHCでの実験結果に関わらず、ILCはより精緻でLHCの実験の限界を超えた測定が可能である。
- 現在実施されているLHCの実験計画では、2015年から2017年までの実験期間において衝突エネルギーを13TeVとした実験を行った後、2022年頃まで継続して実験を行い、2025年頃から2035年までの期間において加速器・検出器をアップグレードし、更に統計精度を高めるための実験を行う予定である。LHCによる実験で新粒子が発見されるとすれば、その実験内容から、現在実施されている13TeV運転による実験で発見される可能性が高い。
- 13TeV LHCにおける実験結果により、ILCに期待される成果は以下の二通りが考えられる。まず第一として、LHCでの実験により新粒子が発見され、発見された新粒子の質量が一定の範囲にあった場合は、ILCにおいてヒッグス粒子等の精密測定のみならず、新粒子の発見が期待される。
- 第二として、13TeV LHCで新粒子が発見されない場合、又は新粒子が発見された場合でも発見された新粒子の質量が一定の範囲にない場合は、ILCに期待される成果は、主にヒッグス粒子等の精密測定により新たな物理を間接的に探索することになると考えられる。ヒッグス粒子等の測定についてはLHCによる実験が先行しているものの、最終的に到達できる測定精度は、ILCがLHCに勝るため、ILCへの期待が高まることも考えられる。
- このように、ILCの性能及び科学的成果については、13TeV LHCでの成果に基づいて見極められると考えられる。

¹ 素粒子原子核物理作業部会及び技術設計報告書 (TDR) 検証作業部会においては、TDRで示された500GeV ILCを意味し、ここでも同様とする。なお、電子ボルト (eV) はエネルギーの単位であり、電子ひとつが1ボルトの電圧で加速されたときに得るエネルギーの量を意味する。 $1\text{eV}=1.6\times 10^{-19}\text{J}$

(2) 技術設計報告書（TDR）の検証

- TDRを踏まえた総コストの全容について、本体建設費は9,907億円、測定器関係経費は1,005億円（計1兆912億円）、年間運転経費は491億円と算定された²。
- TDRにおいては不定性相当経費として建設経費の約25%が見込まれているが、これはコスト見積りの精度に関するもののみが対象であり、技術リスク、工事期間の延長リスク、市場リスク等に伴うコスト増加分は含まれないことに留意が必要である。
- コスト増加のリスクとしては、現時点での最適な状況を選択した場合の見積りとなっており、結果として見積りに余裕が少ないこと、建設等における不測の事態や人材の雇用等に関する検討が不足しており、コスト増の要因になりうること、等が挙げられる。
- また、技術上の課題としては、過去の実績値により必要な性能が達成されるという前提での設計となっており、設計に尤度が少ないこと、まだ大規模システムとしての性能確認についての検討がなされていないこと、複数の拠点で分散して同じ品質のコンポーネントを製作するための性能再現化技術の確立に向けた見通しを得ることが必要であること、等が挙げられる。
- 過去の事例からの教訓として、特定材料の供給源が限られることによるコストアップへの対応、量産化に伴うさらなる製作コストの低減、トンネルへの環境水の流入などインフラ工事における不測の事態発生リスクの検討、対応策、TDRの見積りでは考慮されていない項目及び想定外項目のリストアップとコスト増への対応策の検討が必要。
- ILC計画は建設・運転等が長期間にわたるものであり、想定される地震の規模に応じた耐震設計及びそれに伴ったコスト検討等のリスクの検討、対応策等の検討を詳細に行うことが必要。
- ILC計画の特徴は、加速空洞や高周波加速装置等の構成品を非常に多数必要とすることであり、国際的に複数の拠点で同品質の構成品を製作した上で、組み上げた後の加速器等の性能について信頼性を確保することが重要である。このため、個々の構成品の性能再現化技術の確立及びシステムとして組み上げる際の課題の解決について見通しを得ることが必要。

² 国際入札を考慮して1ユーロ=115円、1ドル=100円と仮定して日本円へ換算し算出。

(3) 国際協力

- I L Cは巨額の経費を要する大規模な国際共同研究計画であり、一国のみで実現することはできず、国際的な協力により実施することが必要不可欠である。国際協力においては参加国による費用分担を前提とすべきであることから、I L C計画に対して応分の負担をする意思があるのかを見極めることが重要である。
- 新たな国際研究機関を設置する場合人材の確保、人件費にも留意が必要であり、国際協力の在り方に関する十分な検討が必要。
- また、欧米の素粒子物理学分野の戦略においても、日本がI L C計画を進めることに対する期待が記載されているが、世界各国における素粒子・原子核物理学分野の将来構想等の調査・分析の結果、各国の現行の計画や予算はI L Cについては明確な位置づけはまだほとんどなされていないため、I L Cを巡る国際動向を踏まえて検討を進めることが必要。
- I L C計画実施について、時宜を得た判断が行われない場合には、国際的な求心力が失われる可能性があることに留意が必要。

(4) I L C計画の社会的影響

- 前出の「国際リニアコライダー（I L C）計画に関する技術的・経済的波及効果及び世界各国における素粒子・原子核物理学分野における技術面を含む研究動向に関する調査分析」では、分析の結果、最終需要額約2兆1,000億円の発生に対して、生産誘発額は約4兆4,600億円であるとされた³。
- 同分析の結果、この生産誘発効果は経済分析で用いられる最終需要項目毎の生産誘発効果と同程度の値であることから、他のプロジェクトに比して突出した経済的波及効果が見込まれるものではないといえる。
- また、同分析によると、I L C計画による技術的な波及効果について、過去の実績から一定程度の波及効果を生むと期待されるものの、I L C固有の技術による一般民生用の技術への応用や、製品開発への見通しが得られている訳ではない⁴。
- 実施の可否を判断する際には、国民及び科学コミュニティの理解・協力を得ることが重要。

³ 建設期間10年間及び運用期間10年間の計20年間に発生すると推測されるI L C固有の効果。

⁴ 過去の事例においては、CERNにおける大規模な素粒子原子核実験により、ワールドワイドウェブ（WWW）の普及に寄与するなど、当初予期しない波及効果を生んだ例がある。

(5) 過去の大型加速器施設の事例

- 国内において過去に整備された加速器施設において、最も経費を要した大強度陽子加速器施設（Japan Proton Accelerator Research Complex、J-PARC）の建設費は約1,500億円であった。その他の事例では、大型放射光施設（Super Photon ring-8 GeV、SPRING-8）が約1,100億円、電子・陽電子衝突型加速器（KEKB）が約378億円であった。これらに対してILCの建設経費は1兆円を超えるものであり、より精緻なコスト見積もりと、投資に見合う科学的意義の確認が必要である。

- 海外における大型加速器施設として、現時点で世界最大の加速器はCERNのLHCであり、LHC建設のために追加が必要となった費用は約5,000億円であった（既存のトンネルを活用、人件費は含まれていない）。

- LHCと同時期に米国で計画されたが中止となった大型加速器として超伝導超大型衝突型加速器（Superconducting Super Collider、SSC）がある。本計画に携わった研究者の述懐によれば、中止となった主な要因として以下が挙げられており、ILC計画のような大型の計画を検討する上で参考になると考えられる。
 - ① 米国内の予算が緊縮財政に転換されたこと
 - ② 設計変更等により経費が増加したこと（45億ドルから110億ドルへ増加）
 - ③ 波及効果が誇張されており、反発を招いたこと
 - ④ 何も無いグリーンフィールドが建設地とされたこと等、建設地の選定が後に様々な問題を生じさせたこと

3. 提言

これまでの作業部会での検討・報告、有識者会議での議論を踏まえ、ILC計画に関して有識者会議として以下を提言する。

提言1 ILC計画は巨額の投資が必要であり、一国のみで実現することはできず、国際的な経費分担が必要不可欠な計画である。巨額の投資に見合う科学的成果が得られるべきであるとの観点から、標準理論を超える新展開のために、ヒッグス粒子及びトップクォークの精密測定のみならず、新粒子の発見の可能性についても見通しを得るべき

- ILC計画はヒッグス粒子、トップクォークの精密測定及び新粒子の探索により標準理論を超える物理を探索する計画であり、標準理論を超える物理の発見があった場合、素粒子物理学上の科学的意義は大きい。
- ILC計画が巨額の投資が必要な計画であることに鑑み、その実施の前提として、欧米等の具体的な参画及び経費分担について明確な見通しを得ることが必要不可欠。
- 巨額の投資に見合う科学的成果が得られるべきとの観点から、標準理論を超える素粒子物理学の新展開のために、ヒッグス粒子及びトップクォークの精密測定のみではなく、暗黒物質の候補となる超対称性粒子などの標準理論を超える新粒子の探索についても、見通しを得ることが必要。
- 国際協力における経費負担の在り方については、従前のCERNの方式だけでなく、国際熱核融合実験炉（ITER）、国際宇宙ステーション（International Space Station、ISS）等のこれまでの国際大型プロジェクトの事例及びILCを巡る国際動向を踏まえて検討を進めることが適当。

提言2 ILCの性能、得られる成果等については、2017年末までの計画として実施されているLHCでの実験結果に基づき見極めることが必要であることから、LHCの動向を注視し、分析・評価すべき。併せて、技術面での課題の解決やコスト面でのリスクの低減について、明確にすることが必要

- ILCの性能や得られる成果等については、2017年末を目途として実施されている13TeV運転によるLHC実験の結果によって異なってくる。特に、新粒子が発見されるか否か、また新粒子が発見された場合はその質量が重要な判断材料となる。
- 作業部会等で指摘された技術面及びコスト面での課題については、その解決に向けた取組により、より明確な見通しを得ることが必要。
- また、加速器性能の高度化につながる技術開発の成果を最大限取り入れる努力を強化すべき。

提言3 提言1及び提言2に関する事項を含めて計画の全体像を明確に示しつつ、国民及び科学コミュニティの理解を得ることが重要

4. 建設及び運転期において必要となる人材の確保・育成に関する検討

- ILC計画は、非常に多くの部品を国際協力により製作し、一つのシステムに組み上げる計画であることから、複数の拠点を製作された個々の部品について、所定の性能を有する装置に組み上げることができる高い技術力を有する人材を多数確保することが必要である。
- 作業部会における議論では、大量の構成品の製造に対応可能な多くの人材を確保する見通し、建設監督を行う人材の確保及び育成方策についての見通しのほか、国際協力により研究を推進する際のマネジメントを行う人材を確保する方策について見通しを得ることが重要であると指摘されたところである。
- これらを踏まえ、我が国を中心とした建設・運転・マネジメントにおける人材の確保・育成の見通しについては、別途作業部会を設置して検証を行うことが適切である。

5. 今後の検討の進め方

- 人材の確保・育成方策については新たな作業部会を設置して議論する。
- 技術的実現可能性、加速器製作における技術的課題、加速器製造コスト削減に向けた取組について、各国の状況を踏まえた現状を把握することが望ましいことから、外部の専門調査機関に委託し調査分析を実施する。

(謝辞)

これまでの有識者会議及び作業部会の運営にあたり、ヒアリングの実施や資料作成等について多くの方から貴重なご意見やご協力を頂きました。ご協力頂いた皆様に感謝申し上げます。

自然法則の統一的理解のための課題と研究動向

大型加速器を使った素粒子実験

加速器実験

大強度加速器等による超精密測定
(SuperKEKB, J-PARC, MEG 実験 等)

未踏のエネルギー領域の探索
(陽子加速器 LHC 電子加速器 ILC)

ニュートリノ・陽子崩壊実験
(Hyper-Kamiokande, KamLAND-Zen 等)

宇宙線実験

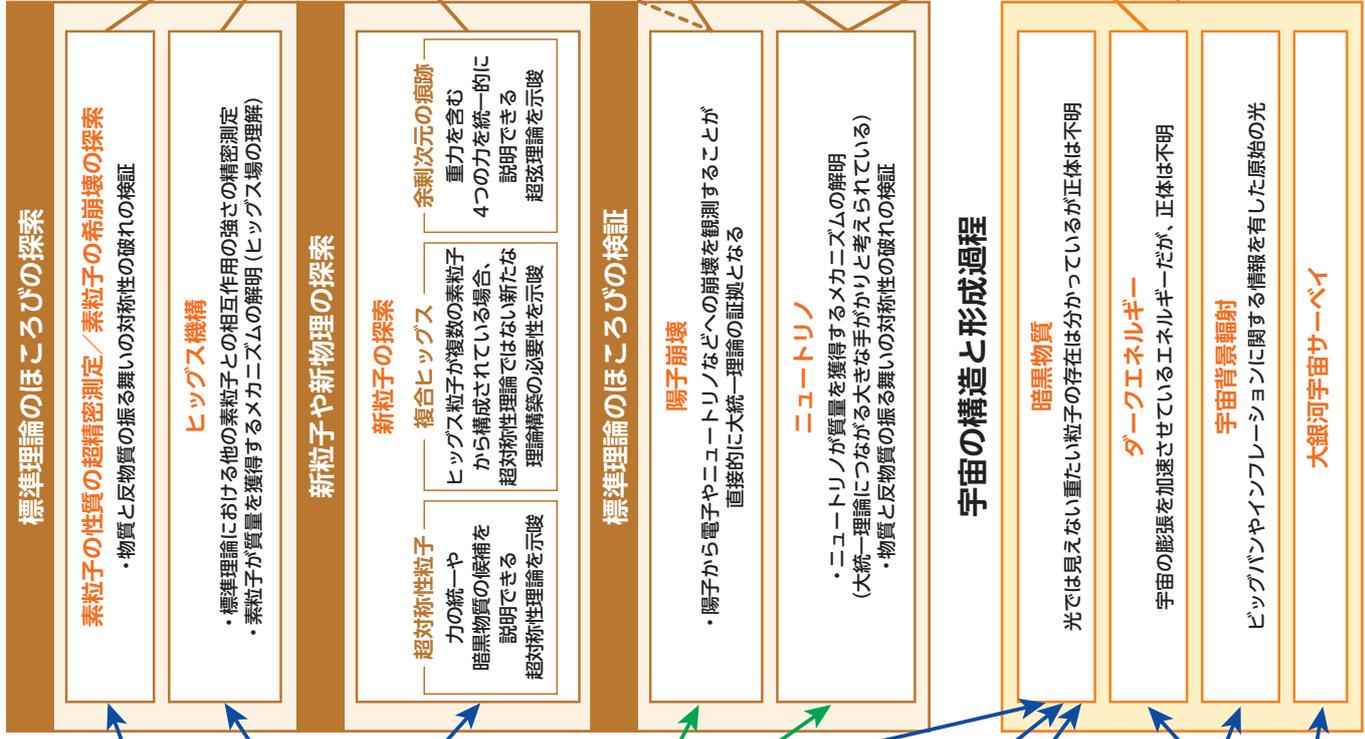
暗黒物質直接探索 (XMASS 実験 等)

宇宙ガンマ線観測 (CTA 実験 等)

宇宙観測

宇宙背景放射観測 (Bモード偏光観測) (LiteBIRD 等)

大規模銀河サーベイ (SuMIRe 等)



加速器施設以外での素粒子・宇宙線実験

素粒子・宇宙を支配する自然法則の統一的理解

究極の理論 (例: 超弦理論)

4つの力の統一

- 重力を含む力の統一
- 自発的対称性の破れにより力が分化する過程の理解

反物質がほとんどなくなっている理由

- 物質と反物質の振る舞いの違いの解明

宇宙の構成

- 標準理論で説明できない物質の量はたったの5%
- 残りを構成する暗黒物質やダークエネルギーの解明

宇宙の形成過程

- 宇宙初期のインフレーションやビッグバンがどのように起こったのかの解明

超対称性 (または) 他の新物理 (余剰次元など)

大統一理論

重力理論

宇宙論

自然法則の統一的理解のための課題と研究動向

各実験装置概要

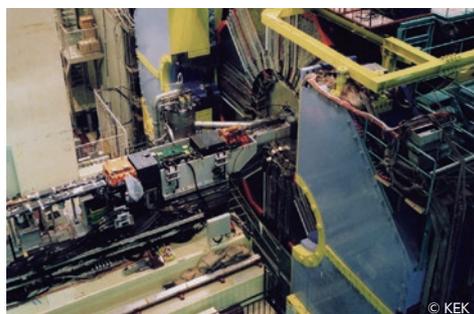
大強度加速器等による超精密測定

KEKB 加速器・SuperKEKB 加速器 | 高エネルギー加速器研究機構 (KEK)

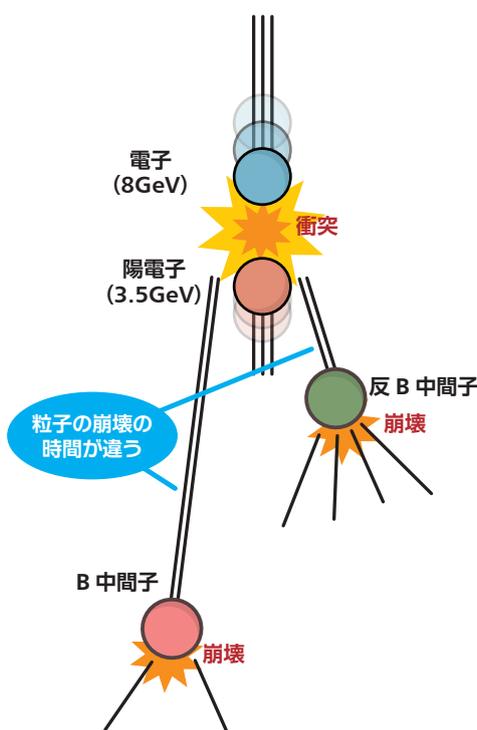
建設費 約380億円 (KEKB) / 約314億円 (SuperKEKB)



KEK上空写真 (写真中央よりやや下よりの円形に見える部分の地下に加速器が埋設されている)



Belle検出器



電子と陽電子との衝突によって生成されるB中間子、反B中間子の崩壊時間の分布の違いを測定し、「CP対称性の破れ」の検証に貢献した。

■製作期間

5年 (KEKB)。1999年6月に最初の素粒子反応を確認。

■大きさ

周長約3km、茨城県つくば市のKEKの敷地内の地下10mのトンネル内に設置されている。

■科学者の人数

KEKBのBelle実験: 約400名 (運転終了時)
SuperKEKBの Belle II 実験: 約600名

■概要

KEKB加速器では陽電子と電子を2つのリングを利用してそれぞれ3.5GeV、8GeVに加速し、その衝突点に設置されたBelle検出器で衝突の様子を観測するという実験を行っていた。この加速器はルミノシティと呼ばれる衝突回数に関する大切な指標が世界で最も高かったことで知られる。2010年にKEKB加速器は運転を終了し、現在ではルミノシティなどのアップグレードを行ったSuperKEKB、Belle IIの建設しており、2015年度の運用開始を目指している。

■成果

衝突によって生成されるB中間子・反B中間子の崩壊するまでの時間を調べることで、B中間子の粒子・反粒子の対称性の破れ (CP対称性の破れ) を発見した。

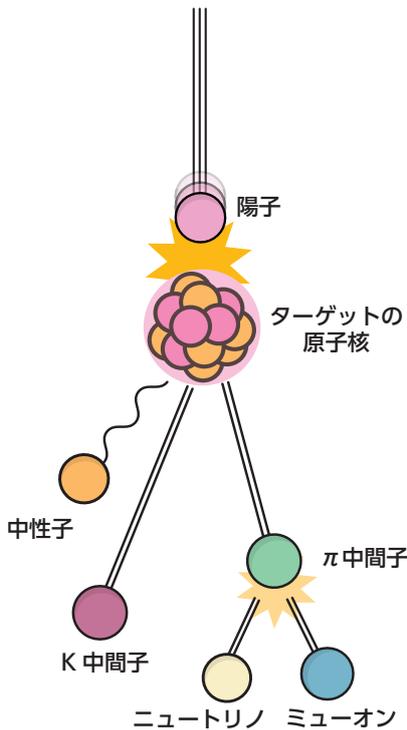
大強度加速器等による超精密測定

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) | 日本原子力研究開発機構、高エネルギー加速器研究機構

建設費 約1,524億円



J-PARC上空写真



陽子と原子核の衝突によって生じる中間子、中性子、ミューオン、ニュートリノなどを様々な実験を行う。

■製作期間

2001年建設開始。2009年に第一期施設が完成。

■大きさ

330mの直線型加速器、次段に周長350mの円形加速器、さらに周長1.6kmの円形加速器の3つの加速器からできている。

■科学者の人数

T2K実験: 約500人、ハドロン実験: 約500人 (2015年時点、コラボレータ数)

MLF: 約1000人 (2014年度、施設利用者数)

■概要

J-PARCでは多段の加速器を用い、陽子を30GeVまで加速することができる。必要な速度まで加速した陽子を物質・生命科学実験施設 (MLF)、ハドロン実験施設、ニュートリノ実験施設の各施設に輸送し、各施設でターゲットとなる原子核に衝突させ、生じる中間子や中性子、ミューオンやニュートリノなどを利用して様々な実験を行う。

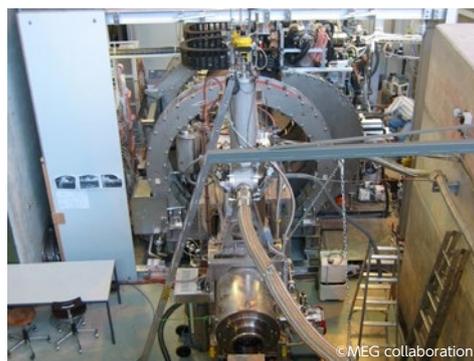
■成果

Super-Kamiokandeと行っているT2K実験により、ニュートリノ振動の解明などの成果を上げている。また、K中間子の稀な崩壊の精密実験、ミューオンの(g-2)因子の精密測定、原子核に束縛されたミューオンが原子核との相互作用で電子に変換する過程の探索などの実験が実施・計画されており、標準理論では説明できない事象の発見が期待されている。

大強度加速器等による超精密測定

MEG / MEG II 実験 | 東京大学、高エネルギー加速器研究機構

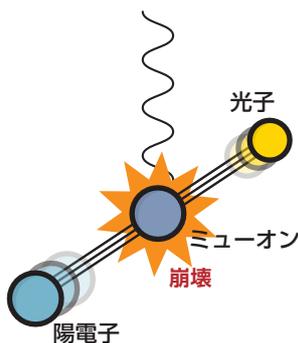
建設費 約10億円 (MEG測定器)



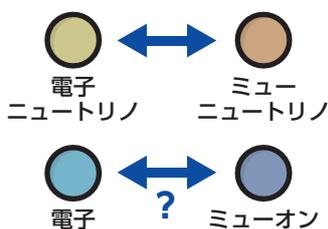
世界最大強度の陽子ビームから作った大強度ミューオンビームが通過するMEG実験ビームライン。



液体キセノンガンマ線検出器。側面の円盤がガンマ線が入ったときに生じる光を検出する装置になっている。



陽子ビームから作ったミューオンを減速させて、MEG実験装置の中心に置かれた厚さおよそ200μmのプラスチックの薄膜に導き、崩壊を観測する。



ニュートリノの世代間の移り変わりである「ニュートリノ振動」と同様に、レプトンである電子とミューオンでも同様の現象が起こることを大統一理論などが予想しており「 $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊」が探索されている。

■製作期間

2002年建設開始、2008年実験開始。現在アップグレード中。

■大きさ

5m (幅) × 15m (奥行) × 5m (高さ)。

■科学者の人数

約60名。

■概要

MEG実験ではミューオンが電子とガンマ線 (光) の2つに崩壊する「 $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊」の検出を目的として、スイスのポールシェラー研究所 (PSI)の円形加速器で加速された世界最大強度の陽子ビームから作った大強度ミューオンビームに、陽電子スペクトロメータ (陽電子検出器)、液体キセノンによるガンマ線検出器を組み合わせて実験を行っている。

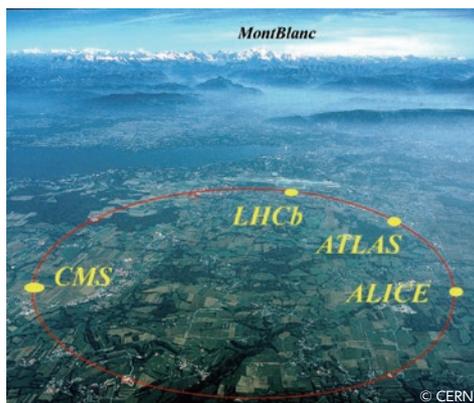
■成果

「 $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊」は第2世代のミューオンから第1世代の電子への変換であり標準理論では起こらない現象であるが、標準理論を超えた理論、例えば超対称性理論では起こり得る。現在までに「 $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊」は検出されてはいないが、これまでの実験結果によって、標準理論を超える新しい物理モデルに対して厳しい制限をつけることに成功している。

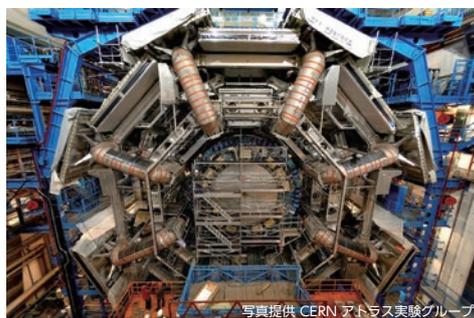
未踏のエネルギー領域の探索

LHC (Large Hadron Collider) : 大型ハドロン衝突型加速器 | 欧州原子核研究機構 (CERN)

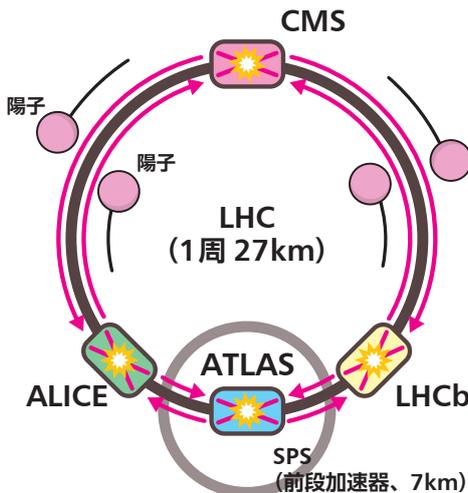
建設費 約5,000億円 (トンネル工事費用除く)



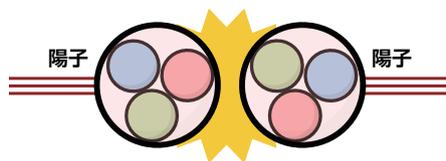
LHC上空写真 (赤線地下部に加速器、黄色い円の部分に検出器が設置されている)



ALIAS検出器



円周の各所で衝突させてその様子を観察するための検出器が設置されている。



クォーク3つから構成される陽子同士の衝突から引き起こされる物理現象を観測する。

■製作期間

14年。2008年9月運転開始。

■大きさ

メインの加速器部分の周長で27km、スイスとフランスの国境をまたがって深さ50mから175mに埋設されている。

■科学者の人数

CERNにはヨーロッパだけでなく、アメリカ、日本をはじめとした71カ国から、1万人以上のユーザーが集まっている。

■概要

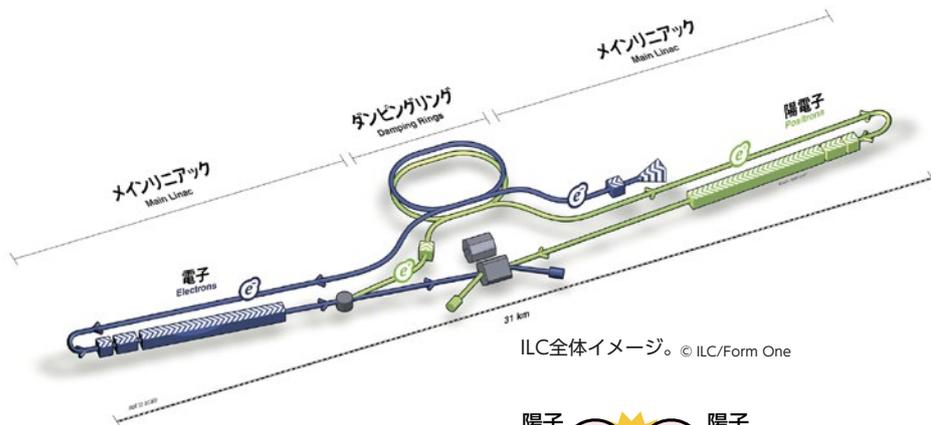
クォーク3つで構成される陽子を用いた加速器実験が行われている。予備加速した陽子を円周27kmの円型加速器で加速し、その陽子同士の衝突から引き起こされる物理現象の観測を行う。現在までに6.5TeVの陽子同士の衝突を実現しているが、2017年には陽子に7TeV (光の速さの99.9999991%) を与えて、合計14TeVのエネルギーでの衝突に到達できる予定である。

■成果

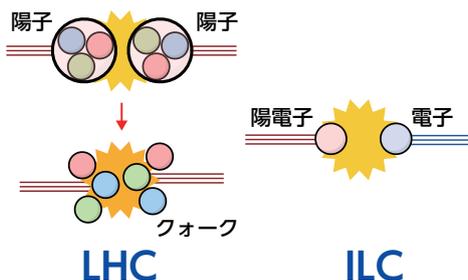
すでにヒッグス粒子を発見、同定するなどの成果を上げており、現在も標準理論に枠に収まらない新粒子の発見やヒッグス粒子の詳細測定など、標準理論を超える物理の発見に向けて実験を行っている。

未踏のエネルギー領域の探索

ILC (International Linear Collider) : 国際リニアコライダー計画 | 国際プロジェクト



ILC全体イメージ。© ILC/Form One



ILCでは電子と陽電子を加速させて衝突させるため、陽子同士の反応と比べて、いろいろな探索や精密測定の障害となるバックグラウンド事象が少ない。また陽子を構成しているクォーク同士の衝突 (LHC) と、レプトンである電子陽電子の同士衝突 (ILC) では、異なるタイプの新粒子の探索を行うことができる。

■製作期間

建設と調整に約10年を計画。

■大きさ

地下トンネル中に長さ31km (初期計画) の直線加速器を設置する。

■科学者の人数

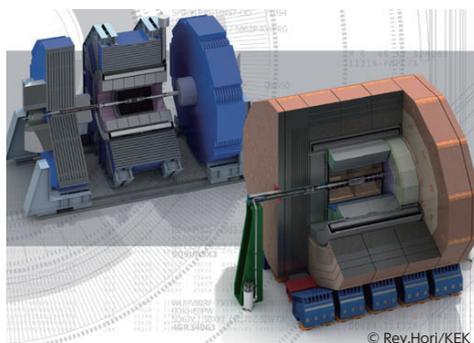
建設に必要な研究者・技術者が約500人必要と試算されている。

■概要

ILCではLHCと違い、陽子ではなく電子と陽電子を用いて衝突実験を行う。LHCが用いる陽子はハドロンであるのでクォーク3つからできているため、多数のクォークの反応を考えないといけないことに比べ、ILCで用いる電子と陽電子であればどちらもレプトン、素粒子であり、反応が起こる状態がとてもはっきりしているという利点がある。電子と陽電子それぞれ11km直線型加速器でそれぞれ250GeVに加速させ、中央の検出器部で衝突させる。

■成果

LHCがこれからどのような発見をするかによってILCに求められる成果は変わってくるが、新粒子の探索やヒッグス粒子の精密測定による標準理論を超える新しい大きな枠組みの発見、ダークマター探索などが考えられる。

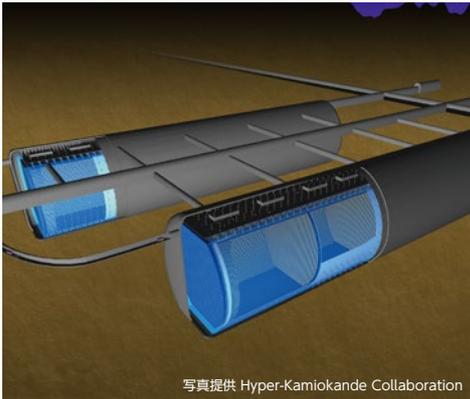


ILCで使われる2種類の検出器 (イメージ)。

ニュートリノ・陽子崩壊実験

Super-Kamiokande, Hyper-Kamiokande | 東京大学 宇宙線研究所

建設費 約104億円 (Super-K)、約800億円 (Hyper-K、計画段階)



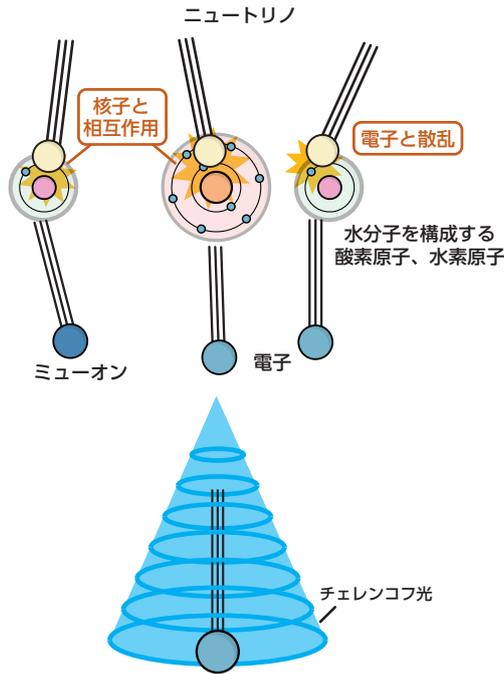
写真提供 Hyper-Kamiokande Collaboration

Hyper-Kamiokande外観イメージ



写真提供 東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙線粒子研究施設

内部から見たSuper-Kamiokande



純水の詰まったタンクに入射したニュートリノが、核子と相互作用して電子やミューオンを生成、あるいは電子と散乱して電子を弾き飛ばす。その電子やミューオンが水中を走ることによってチェレンコフ光が発生する。

■製作期間

1991年建設開始、1996年4月運転開始 (SK)。

■大きさ

岐阜県飛騨市神岡町にある神岡鉱山の地下1000mに、直径39.3m高さ41.4mの円筒形の水タンクが設置されている。

■科学者の人数

約130名。

■概要

Super-Kamiokande (SK) のタンクには純水が約5万トン詰まっており、入射したニュートリノが核子と相互作用してミューオンや電子を生成、あるいは電子と散乱して電子を弾き飛ばす。それがチェレンコフ光を発生させ、タンク壁面に設置されている光電子増倍管で検出する。宇宙線や太陽が作るニュートリノを捉えるとともに、J-PARCで生成したニュートリノの検出実験も行っている。今後、その20倍のサイズのHyper-Kamiokandeの建設も計画されている。

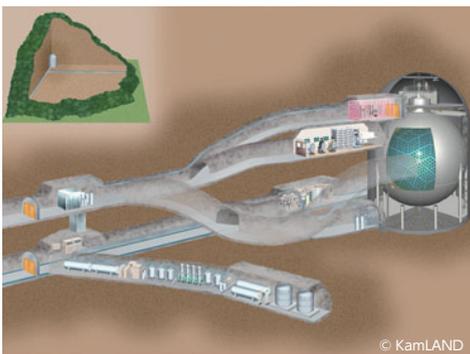
■成果

宇宙線が大気に入射する際に生じる大気ニュートリノの観測によって、ニュートリノの種類が変わる「ニュートリノ振動」を発見した。また陽子崩壊の探索によって、大統一理論構築への貢献を目指している。

ニュートリノ実験

KamLAND (Kamioka Liquid Scintillator Anti-Neutrino Detector) | 東北大学 KamLAND-Zen (KamLAND Zero Neutrino Double Beta Decay Experiment)

建設費 約25億円 (KamLAND)



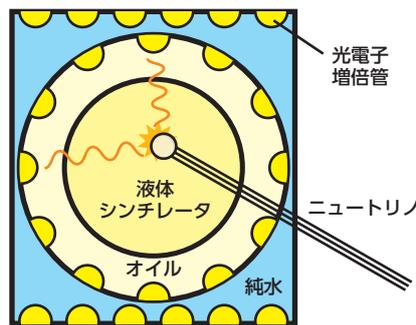
© KamLAND

神岡鉱山、Kamiokande検出器の跡地・装置を再利用して建設された。

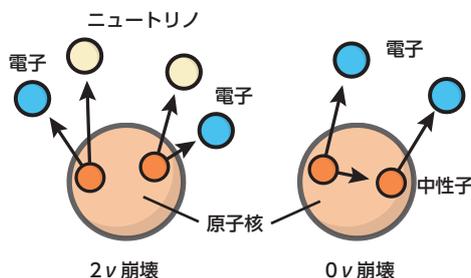


© KamLAND

ステンレス球の内面に設置された光電子増倍管。



KamLANDの構造イメージ。液体シンチレータに入射したニュートリノが発光を引き起こし、それを検出。



二重ベータ崩壊にはニュートリノを出さないモード (0ν 崩壊) があり、それは標準理論を超えた反応となる。

■製作期間

1998年建設開始、2002年実験開始 (KamLAND)。

■大きさ

高さ20m直径18mの水タンクの中心部に1000トンの液体シンチレータが設置されている。神岡のKamiokande実験の装置と場所を譲り受け、建設された。

■科学者の人数

現在のグループメンバーの数は約80名。

■概要

Super-Kamiokandeでは見ることが難しいエネルギーの低いニュートリノの観測、標準理論の枠組みを超えた二重ベータ崩壊の探索等を目的として建設された。装置は純水、透明なオイル、液体シンチレータの3層構造。液体シンチレータ内部でニュートリノが反応を起こすと発光し、直径18mのステンレス球体タンクの内面に取り付けられた光電子増倍管でその光を検出する。またKamLAND-Zenでは液体シンチレータにキセノン136を添加することで、二重ベータ崩壊の観測を可能としている。

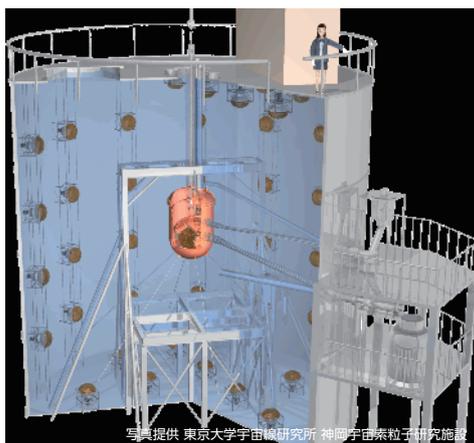
■成果

原子炉で生成されるニュートリノの検出からニュートリノ振動の発見・解明につながった。また地球内部で生成されているニュートリノの観測にも成功し、地球内部のダイナミクスの解明に貢献している。

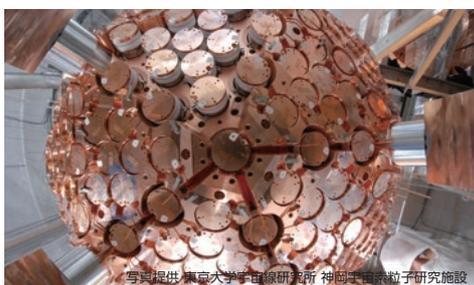
暗黒物質直接探査

XMASS (Xenon MASSive detector for dark matter) | 東京大学 宇宙線研究所

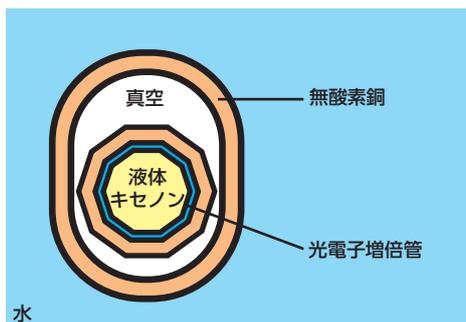
建設費 約7億円



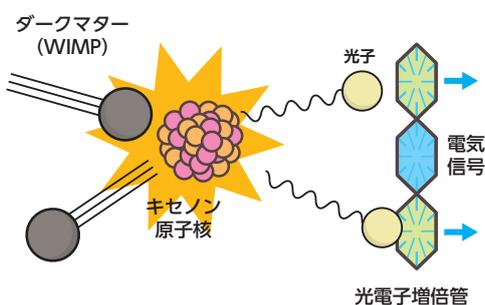
XMASS全体イメージ。



液体キセノンが入っている検出器の中心部分。円盤一つ一つが光電子増倍管とつながっている。



検出器の中心となる液体キセノンは-100℃で冷却されている必要があるので、真空断熱されている。



ダークマターがキセノン原子核と衝突するとそのエネルギーで発光するので、それを光電子増倍管で検出する。

■製作期間

2007年建設開始、2010年試験観測開始。

■大きさ

直径10m高さ10mの水タンクの中心部に、800kgの液体キセノンを使った検出器が設置されている。岐阜県飛騨市神岡町にある神岡鉱山の地下1000mに建設された。

■科学者の人数

約40名。

■概要

液体キセノンを用いたダークマター検出を目的とする実験装置。外部からの放射線バックグラウンドを遮蔽するための水層、断熱のための真空層、ダークマター検出のための液体キセノン800kgの3層構造となっている。キセノン原子核とダークマターが衝突することで液体キセノンがそのエネルギーに比例して発光するため、それをまわりに多数設置した光電子増倍管で検出するという方法でダークマターの探索を行っている。

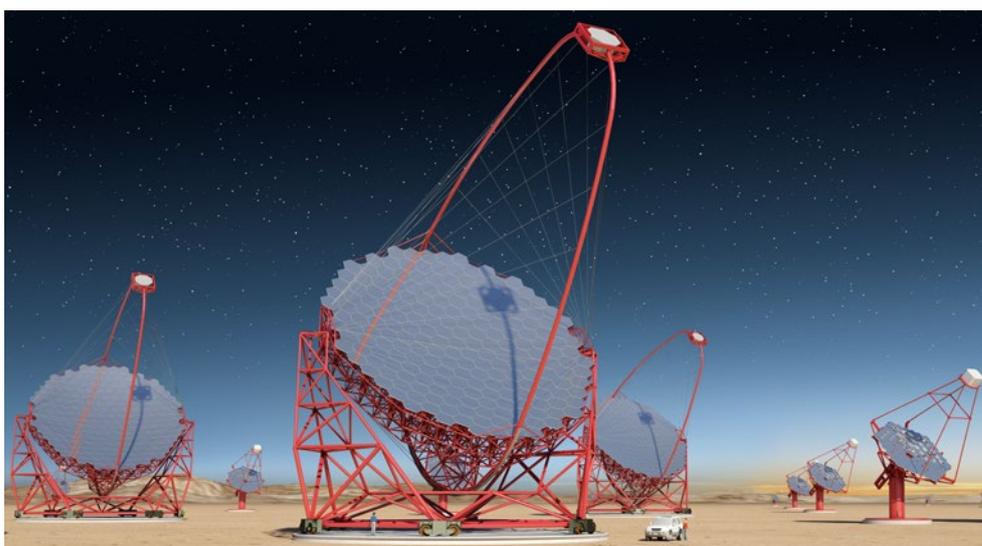
■成果

現在までに様々な暗黒物質の候補の探索を世界最高感度で行い、それらがダークマターであるというシナリオを否定するなどの成果をあげている。今後も装置の増強や改良などで、ダークマターの直接検出を目指す。

宇宙ガンマ線観測

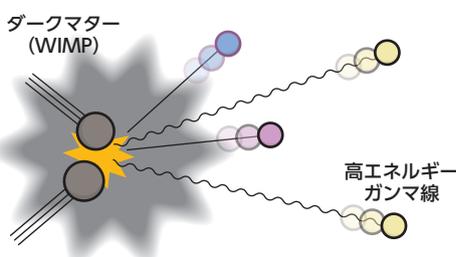
CTA (Cherenkov Telescope Array) | CTAコンソーシアム (国際プロジェクト)

建設費 約280億円 (約2億ユーロ、うち日本負担分約42億円 (予定))



CTAイメージ。北半球には23m大口径望遠鏡4台、12m中口径望遠鏡15台が、南半球には23m大口径望遠鏡4台、12m中口径望遠鏡25台、4m小口径望遠鏡70台が設置される。

ダークマターが集積していると考えられる様々な場所に対して、ダークマターの対消滅によって生成されるガンマ線の探索を行う。



■製作期間

2016年建設開始、2020年フルアレイ観測開始予定。

■大きさ

南半球に99台、北半球に19台の望遠鏡を、それぞれ6km²、1km²の領域に敷きつめた天文台。

■科学者の人数

29か国1200名以上の国際協力による。

■概要

CTA計画とは、地球大気に入射してきた高エネルギーガンマ線が大気中で生成する大量の電子と陽電子(電磁シャワー)が引き起こすチェレンコフ光を、南半球99台、北半球19台の反射望遠鏡を敷き詰めた大規模な天文台で観測するというもの。現在稼働している望遠鏡の10倍の感度を持ち、エネルギー領域を20GeV-100TeVまでカバーして観測を行うことができる予定である。

■成果

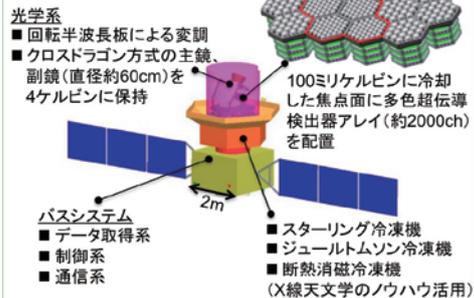
CTA計画によって宇宙線の起源や高エネルギー天体の研究ができるなど様々な成果が期待されるが、素粒子物理学に対するインパクトとしては暗黒物質が対消滅することによって発生するガンマ線の探索や一般相対性理論の高精度検証などがある。

宇宙背景輻射観測 (Bモード偏光観測)

LiteBIRD | Kavli IPMU、宇宙航空研究開発機構 (JAXA)、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 等

開発費 約50億円 (初期投資・打ち上げ費用等を除く、計画段階)

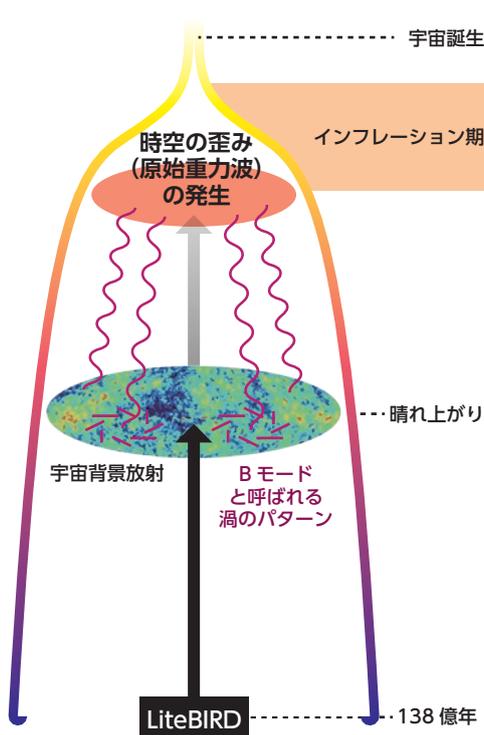
衛星システム



LiteBIRDイメージ。



【参考】チリに設置された、CMB偏光を地上で観測しようとするPOLARBEAR望遠鏡。



LiteBIRDでは宇宙背景放射の偏光を調べることによって、その向う側にあるインフレーション期の原始重力波 (時空の歪み) の痕跡を探し出す。

■製作期間

2020年代前半打ち上げを目指す。

■大きさ

人工衛星。

■科学者の人数

約70名。

■概要

LiteBIRDは宇宙誕生直後に起きたとされているインフレーションの際に生成された原始重力波を、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の偏光の全天精密観測を行うことで探索する、代表的なインフレーションモデルの検証を目的とした観測衛星である。CMB偏光のうち、渦状のパターンを持つBモードと呼ばれる偏光が原始重力波の痕跡とされており、LiteBIRDはその検出に焦点を絞った設計になっている。そのために解像度など妥協できる点では妥協を行って、軽量化・小型化を図っている。

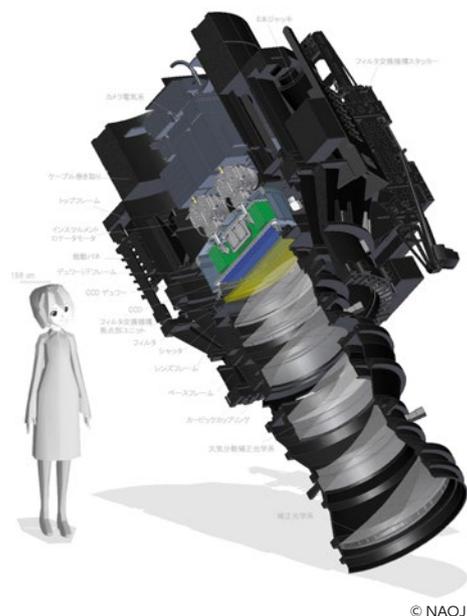
■成果

LiteBIRDの測定に要求する精度をこれまでで最も感度の高いCMB観測衛星Planckと比べて約100倍の感度に相当するものとしている。原始重力波の検出による代表的なインフレーションモデルの検証を行うことができる予定である。

大規模銀河サーベイ

SuMIRe (Subaru Measurement of Images and Redshifts) | Kavli IPMU、国立天文台

建設費 約140億円 (HSC 約60億円 / PFS 約80億円 (予定))



すばる望遠鏡の主焦点に設置されている、広視野CCDカメラ、Hyper Suprime-Cam (HSC)。



ハワイ、すばる望遠鏡。

■製作期間

HSC : 2002年-12年、

PFS : 2010年-17年 (予定)

■大きさ

高さ3メートル, 重さ3トン。

■科学者の人数

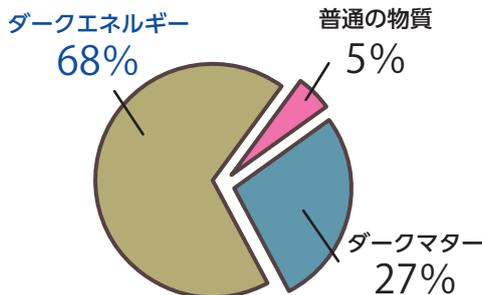
6カ国200名 (日本は約半数)。

■概要

ハワイ島のマウナケア山上にある国立天文台のすばる望遠鏡の主焦点に設置する約9億ピクセルの超広視野カメラ (HSC) と銀河の光のスペクトルを測る超広視野分光器 (Prime Focus Spectrograph, PFS) によって、約400万個の遠方銀河の分布を正確に調べるといふもの。この観測によって、本来見ることができないはずのダークマターの3次元分布図の制作、宇宙膨張の加速の原因とされているダークエネルギーや、宇宙膨張の歴史と運命の解明を目指している。

■成果

本プロジェクトの観測結果によって宇宙膨張の歴史が解明されることにより、宇宙のエネルギーの68%を占めるとされているダークエネルギーの正体に迫ること、そして膨張していく宇宙の将来、宇宙の終わりの予測ができることと期待されている。



宇宙のエネルギーの組成のうち、理解が進んでいるものは約5%にすぎず、残りのダークマターとダークエネルギーが宇宙の歴史と運命を解く鍵を握っている。