

国際リニアコライダー（ILC）に関する有識者会議
素粒子原子核物理作業部会 報告書（案）

当作業部会は、平成26年6月以降8回に渡り、国際リニアコライダー（ILC）計画の目指す研究内容と、その内容が巨額の投資に見合った科学的意義を有するかについて検証・議論し、平成27年3月に報告書をまとめた（以下、「前回報告書」という。）。同報告書を踏まえて、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。）は、平成27年6月に「これまでの議論のまとめ」を公表した。その際は、ILCは初期衝突エネルギー500GeV（GeV=10億電子ボルト¹）の電子・陽電子衝突型加速器と想定して議論を行った。

その後、ILCに関する国際的な研究者組織の一つであるリニアコライダー・コラボレーション（以下、「LCC」という。）でまとめられたILC計画の見直し案が、リニアコライダー国際推進委員会（以下、「LCB」という。）における審議を経て、国際将来加速器委員会（以下、「ICFA」という。）において承認され、平成29年11月に公表された²。この見直しにより、ILC計画は初期衝突エネルギーを250GeVとする提案（以下、「250GeV ILC」という。）に変更された³。この公表を受けて平成29年12月に開催された有識者会議において、250GeV ILCの科学的意義について検証し、留意すべき点について専門的見地から検討を行うため、当作業部会が再度設置された。今回の当作業部会では、特に前回報告書において最新の知見を踏まえて再度検証が必要となった部分について、平成30年1月以降全●回に渡り議論し、検証を行った。本報告書は、その結果について示すものである。

1. 欧州合同原子核研究機関（CERN）における実験結果について

- 前回報告書及び「これまでの議論のまとめ」においては、ILCの性能、得られる成果等については、欧州合同原子核研究機関（以下、「CERN」という。）が設置する大型ハドロン衝突型加速器（以下、「LHC」という。）におけるエネルギー増強後の13TeV LHCによるⅡ期実験の結果に基づき見極めることが必要とされている。
- LHCの実験スケジュールについて、13TeVによるⅡ期実験は当初2015年か

¹ 電子ボルト(eV)：エネルギーの単位。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。1eVは、質量 1.782×10^{-33} gに相当する。

² 「The International Linear Collider Machine Staging Report 2017」(Linear Collider Collaboration / October, 2017), 「Physics Case for the 250 GeV Stage of the International Linear Collider」(LCC Physics Working Group / October, 2017)

³ 当該見直しは、ILC計画を250GeVの初期衝突エネルギーからスタートし、将来的にアップグレードするものとしているが、今回の当作業部会では、250GeV ILCのみを対象として検証した。その後の計画については、将来的な不確定要素が多いことから、検証の対象に含めていない。

ら2017年とされてきたが、その後2018年まで延長されている。当作業部会において2017年末までのLHCにおける実験結果を確認したところ、様々な成果はあるものの、標準理論を超える新粒子（強い相互作用をする超対称性粒子の可能性のある粒子）・新現象（暗黒物質や余剰次元）の兆候は捉えられていない。

- さらに、これまでの実験結果から、LHCにおいて、Ⅱ期実験が続く2018年末までに新粒子や新現象が観測される可能性は低いことが判明しており、前回報告書において示されている以下のシナリオについては、(3)となる。ただし、250GeV ILCは、当初計画の500GeV ILCから衝突エネルギーが半減したことから、内容については修正を要する。(→3.)

前回報告書(6.(1)～(3)の表題のみ抜粋)

6. 13TeV LHCの成果を踏まえたILC等のシナリオ

- (1) 13TeV LHCで新粒子（強い相互作用をする超対称性粒子の可能性のある粒子）が発見された場合
- (2) 上記以外の新現象（暗黒物質や余剰次元）と思われる事象の兆候が観測（発見）された場合
- (3) 13TeV LHCで新粒子や新現象が観測されない場合

2. 250GeV ILCの科学的意義について

- LCCは、ILC計画を段階的に実施することを前提とするものとして再定義し、その第一段階の衝突エネルギーを250GeVとする計画と定めた。これにより、加速器の初期建設コストを大幅に引き下げ、ILC計画の当面の目標をより焦点を絞ったものにする事ができる、としている。

- 前回報告書においては、ILCの目指す科学的意義を以下のとおり整理していた。

- (1) ヒッグス粒子やトップクォークの詳細研究によるヒッグス機構の全容解明で標準理論を超える物理を探索
- (2) 超対称性粒子などの新物理の探索、及び発見された場合その詳細研究⁴
- (3) その他（暗黒物質や余剰次元）

- (1) について、計画見直し後の250GeV ILCでは、350GeVの衝突エネルギーを必要とするトップクォークは生成できないが、ヒッグス粒子の生成断面積が最

⁴ LHCで新たな物理が発見される場合、それがILCのエネルギー範囲や測定精度でどの程度まで解明し得るか等の点にも留意が必要。

大化されることに加え、 13 TeV LHC で新粒子の兆候が観測されず 250 GeV ILC でのヒッグス粒子の精密測定に有効場理論が利用できることが明らかになった⁵ことから、ヒッグス粒子の精密測定の実現可能性が明確になったといえる。

- 250 GeV ILC による実験が最も優位性を有するのは、ヒッグス粒子と素粒子の結合定数の精密測定である。ヒッグス粒子は潜在的に標準理論に含まれる通常の相互作用をしない新粒子と結合し得る性質があり、暗黒物質や通常の実験では検出不可能なものとも相互作用すると考えられる。結合定数を高い精度で測定し、標準理論からずれのパターンが見出されれば、新しい物理の性質に関する情報が得られる。その結果が、今後の素粒子物理学が進む方向性に示唆を与える可能性がある。例えば、暗黒物質の正体やヒッグス粒子が真の素粒子かどうかなど、現在の標準理論では説明が困難な課題に対し、ヒッグス粒子の結合定数の精密測定が、その解明の端緒を与える可能性がある。
- 一方、 500 GeV ILC から 250 GeV ILC と規模を縮小することにより、前回報告書において、 ILC 計画における重要な課題の一つとして挙げていたトップクォークの精密測定は、衝突エネルギー 350 GeV が必要であることから、 250 GeV ILC では実験が不可能となる。同様に、ヒッグス粒子の三点結合（一つのヒッグス粒子から二つのヒッグス粒子が出来る反応）の測定は衝突エネルギー 500 GeV が必要であり、 250 GeV ILC では実験が不可能となる。
- (2)については、前述の2017年末までの LHC における実験結果から、当初計画の 500 GeV ILC では到達可能なエネルギー領域で新粒子を発見できる可能性は低く、見直し後の 250 GeV ILC では新粒子を発見できる可能性は更に低くなる。
- 500 GeV ILC において期待されていた強い相互作用をする超対称性粒子については、 LHC での実験結果から、 $1.5\text{ TeV} \sim 2\text{ TeV}$ 以下に存在する可能性は極めて低いと考えられ、ステージングも含めた ILC 計画における科学的意義の範囲には入らないと考えることが妥当である。
- したがって、新粒子の直接探索については、 TDR において採用されている超伝導加速技術では、衝突エネルギーが明らかに不足するため、新しい技術開発も視野に入れて将来的に検討していくべき課題である。

⁵ 実験を行うエネルギースケール E (250 GeV) に対して、 LHC 実験で新粒子の発見がないことから新しい物理が存在する可能性があるエネルギースケール Λ が十分大きい事が判明し、 250 GeV ILC では直接測定できない W 粒子との結合定数との決定に標準理論に基づく近似計算が有効であることが判明した。

- (3) については、質量欠損法⁶という間接的な探索方法をとるため、250 GeV ILCにおいてもその意義は変わらないといえる。

3. 250 GeV ILCのシナリオ (13 TeV LHCの結果を踏まえて)

前回報告書における500 GeV ILCのシナリオ (科学的意義の観点)

(3) 13 TeV LHC で新粒子や新現象が観測されない場合 (抜粋)

方針：ヒッグス粒子やトップクォークの精密測定から標準理論を超える物理 (超対称性理論、複合ヒッグス理論等) を探索する。また ILC は LHC では検出が困難なタイプの新粒子にも感度があるため、これらの新粒子の探索も行う。LHC で未発見の原因を精査し、ILC で発見できる新粒子を探索するとともに、将来のエネルギーアップグレードの必要性を検討する。

効果：標準理論からのズレが観測された場合は、そのズレの大きさとパターンから、標準理論を超える物理の方向性と関連する新物理のエネルギースケールが明らかになる。新粒子が発見された場合にも、大きな研究の進展が期待される。

- この前回報告書における(3)のシナリオについては、13 TeV LHCの結果を踏まえた当作業部会の議論を踏まえ、250 GeV ILCの科学的意義の観点からのシナリオについて、以下のように修正される。

13 TeV LHCの結果を踏まえた250 GeV ILCのシナリオ (科学的意義の観点)

方針：ヒッグス粒子を精密測定し、標準理論を超える物理の解明の端緒となる事象が観測されれば、その結果が今後の素粒子物理学が進む方向性に示唆を与える可能性がある。また、LHCでは標準理論を超える新粒子の兆候を捉えられていないことから、ILCにおける新粒子の直接探索による発見の可能性は低い。なお、トップクォークの精密測定を行うためには350 GeV以上の電子・陽電子衝突エネルギーが必要であり、250 GeV ILCでは実施しない。

効果：標準理論からのズレが観測された場合は、そのズレの大きさとパターンから、標準理論を超える物理の方向性と関連する新物理のエネルギースケールが明らかになる。

⁶ 電子・陽電子衝突では衝突のエネルギーが正確に決まっているため、暗黒物質や余剰次元に関連する粒子に関しては、生成された側と反対側に放出された粒子を計測することで欠損エネルギーと欠損運動量を算出し、その粒子の質量等の性質を決めることができる。

4. 欧州XFEL、FAIRの実例

(第4回の議論を踏まえて検討)

- 国際的な経費分担の例として、平成29年11月に公表されたLCB及びICFAの声明⁷では、ILCと近い分野の最近の同様の国際プロジェクトとして、ドイツにある欧州X線自由電子レーザー（以下、「欧州XFEL」という。）と反陽子・イオン研究施設（以下、「FAIR」という。）が挙げられている。

- 欧州XFEL

- FAIR

⁷ 「Conclusions on the 250 GeV ILC as a Higgs Factory proposed by the Japanese HEP community」 (Linear Collider Board, 8 November 2017, Rev 1), 「ICFA Statement on the ILC Operating at 250 GeV as a Higgs Boson Factory」 (Ottawa, November 2017)