

## ILCに関する国内外の動き

文科省が設置した「国際リニアコライダー (ILC) に関する有識者会議」は、各国の将来加速器構想を踏まえ ILC 物理等を検討する「素粒子原子核物理作業部会」と ILC 技術設計報告書 (TDR) の検証等を技術的専門的観点から行う「TDR 検証作業部会」の二つの作業部会からの報告書を受け、2015年8月、有識者会議として「これまでの議論のまとめ」をその正式英訳とともに公表した[1]。まとめは、(1)新粒子発見の可能性についての見通し、(2)欧米等の具体的な参画および国際経費分担についての見通し、(3)技術課題の解決やコスト面でのリスク低減、(4)LHC13TeV 実験の動向の注視と分析・評価、(5)国民および科学コミュニティの理解、(6)建設および運転に必要な人材の確保・育成等、ILC 国内誘致の可否判断に向けた課題を明確にしたものと言える。(1)、(3)については、ICFA が有識者会議への手紙を用意し、ICFA としての見解を有識者会議に伝えた。(2)については、現在、日米を中心に、議連、文科省、大使館、産学それぞれのレベルでの会合が開かれ国際連携の強化が進んでいる[2]。(5)については、広報室、リニアコライダー・コラボレーション(LCC)、先端加速器科学技術推進協議会(AAA)等と連携しアウトリーチ活動の強化を進めている。また、(6)については、有識者会議の下に新たに「人材の確保・育成方策検証作業部会」が設置され、これまで既に3回の作業部会の会合が開かれているが、KEK では、機構長の発案で、文科省が ILC 実施を前提に諸外国との交渉を始めることを決定した場合の KEK の対応をまとめた「KEK-ILC アクションプラン」を策定、公表している[3]。(4)については、物理の検討の所で述べる。こうした動きの中、2015年11月、カナダのウイスラーに220人が集結し LCWS 会議が開催された[4]。会議では ILC の物理や測定器、加速器に関する250を超える講演に加え、国際情勢やそれを受けた活動方針について活発な議論がなされた(図1)。



図1 カナダ・ウイスラーでの LCWS2016 会議出席者

一方、素核研 ILC グループが中心メンバーの一つとして参加している International Large Detector (ILD) コンセプトグループは、ILC 建設に向け大きな動きがあることに備え、正式な実験コラボレーション形成を視野に入れた組織再編を進めており、2016年3月には、ILD 代表(spokesperson)、副代表(deputy spokesperson)、物理コーディネーター、ソフトウェア・コーディネーター、テクニカル・コーディネーターに ILD Institute Assembly メンバー研究機関の代表による選挙で選ばれた4名を加えた9名からなる執行部(Executive Team: ET)が固まり、新体制による活動が始まった。ETには、日本から3名、うち素核研から2名が名を連ねている。2016年5月31日から6月5日にかけて、スペインの Santander で、ECFA 主催のリニアコライダーワークショップが予定されており、ここでは、加速器、物理、CALICE、

LCTPC 等の測定器要素開発グループのコラボレーションミーティング、ILD、SiD、CLICPD の測定器コンセプトグループの会合が、中間の共通セッションを挟んでオムニバス形式で開かれることになっている。

## ILC 物理の検討

上記有識者会議の中間まとめを受け、LCC と連携を取りつつ、ヒッグス粒子およびトップクォークの精密測定、新粒子／新現象探索の 3 本柱について物理の強化を進めている。ヒッグス粒子の精密測定に関しては、まず、ヒッグスの結合定数測定のカギとなる、 $e^+e^- \rightarrow Zh$  反応の断面積の反跳質量法による測定モデル非依存性の精密検証が進み、Z 粒子のレプトニック崩壊を用いた反跳質量法のモデル非依存性が初めて高い精度で定量的に証明された。これは論文誌に投稿予定である。これと並行し、超対称性の場合に標準模型からのズレが相対的に大きいと期待される  $h \rightarrow \tau + \tau$  崩壊の測定についてのフルシミュレーション結果を論文誌に発表した[5]。一方、ILC 物理の中心課題である電弱対称性の破れの背後にある新しい物理の解明には、その根幹にあるヒッグス自己結合の測定が極めて重要であるが、その測定は

難しいことでもよく知られている。これは単に生成断面積が小さいだけでなく、自己結合を含まないバックグラウンド振幅によって自己結合を含む信号振幅の寄与が薄まってしまうことによっている(図 2)。それでも、ILC では、標準理論の場合、重心系エネルギー 500GeV で ZHH 生成反応を測定することにより、28%の精度で測定できると期待されている。また、前回報告したように、電弱バリオン数生成のシナリオなどでは、自己結合が標準理論より大きくなるのが期待されており、例えば、自己結合が標準模型の 2 倍であれば、断面積が増え、また信号振幅の寄与が相対的に増大することにより、15%を切る自己結合精度が期待できる。これは、LHC でのダブルヒッグス生成断面積が、自己結合の増大とともに減少し、自己結合生成がますます困難になることと対照的である。また、電弱対称性の破れに対する古典的コンフォーマル対称性を持つモデルでは、一般にツリーレベルでヒッグス 3 点自己結合が標準理論の 5/3 倍になることが最近明らかになり、ILC での 500GeV における ZHH 生成測定の重要性が再認識されている。一方、図 2 から分かるように、バックグラウンド振幅には、ZZHH 結合という、HHH 自己結合とともに未測定の結合が含まれる。現在、これらを、Effective Field Theory の枠組みの中で他の精密測定の結果と総合して解析することにより同時決定する手法の開発を、SLAC の Tim Barklow 氏等とともに進めている (Tim Barklow 氏は昨年 12 月に KEK に滞在、本年 5 月にも KEK 滞在予定)。

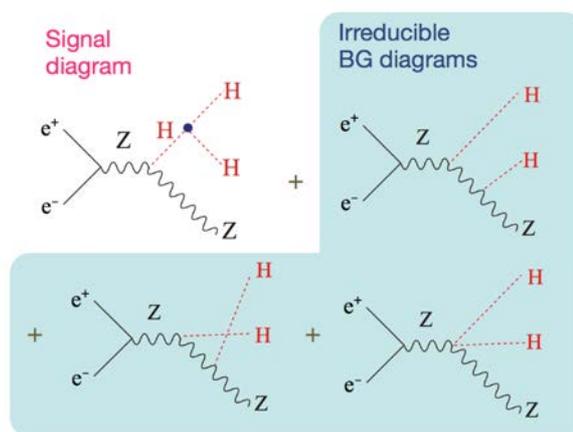


図 2 ZHH 生成反応の散乱振幅

難しいことでもよく知られている。これは単に生成断面積が小さいだけでなく、自己結合を含まないバックグラウンド振幅によって自己結合を含む信号振幅の寄与が薄まってしまうことによっている(図 2)。それでも、ILC では、標準理論の場合、重心系エネルギー 500GeV で ZHH 生成反応を測定することにより、28%の精度で測定できると期待されている。また、前回報告したように、電弱バリオン数生成のシナリオなどでは、自己結合が標準理論より大きくなるのが期待されており、例えば、自己結合が標準模型の 2 倍であれば、断面積が増え、また信号振幅の寄与が相対的に増大することにより、15%を切る自己結合精度が期待できる。これは、LHC でのダブルヒッグス生成断面積が、自己結合の増大とともに減少し、自己結合生成がますます困難になることと対照的である。また、電弱対称性の破れに対する古典的コンフォーマル対称性を持つモデルでは、一般にツリーレベルでヒッグス 3 点自己結合が標準理論の 5/3 倍になることが最近明らかになり、ILC での 500GeV における ZHH 生成測定の重要性が再認識されている。一方、図 2 から分かるように、バックグラウンド振幅には、ZZHH 結合という、HHH 自己結合とともに未測定の結合が含まれる。現在、これらを、Effective Field Theory の枠組みの中で他の精密測定の結果と総合して解析することにより同時決定する手法の開発を、SLAC の Tim Barklow 氏等とともに進めている (Tim Barklow 氏は昨年 12 月に KEK に滞在、本年 5 月にも KEK 滞在予定)。

トップクォークについては、 $t\bar{t}$  対生成のしきい値領域スキャンによるトップクォーク質量についての最近の理論的な進展を指摘しておきたい。生成断面積の NNLO 計算が、日本の理論家を含むグループにより完成し、また、PS 質量、1S 質量等のしきい値領域で定義された質量と短距離質量である  $\overline{MS}$  質量の 4-loop レベルでの関係が与えられ、さらに、直接  $\overline{MS}$  質量をパラメータとするしきい値断面積フィットを行うことで、トップクォークの  $\overline{MS}$  質量に対して 50MeV を切る精度を達成できる見通しがあったことである。また、トップクォークの異常結合測定については、現在、日仏を中核とする国際共同研究を精力的に進めている。

新粒子探索については、LHC での探索が困難な圧縮スペクトルを持つ Natural Radiative SUSY 等のシナリオにおけるヒグシーノ探索のシミュレーション研究を、LHC での探索結果と矛盾しない複数のパラメータポイントにおいて行い、質量測定、質量差測定、ビーム偏極毎の生成断面積測定を組み合わせることで理論パラメータを決める戦略を策定中である。

## ソフト開発および GRID 環境整備

物理検討および物理を最大限に引き出すための測定器設計の最適化には、イベントジェネレータから、Geant4 に基づく測定器のフルシミュレーション、イベント再構成、物理解析に近いハイレベル解析ツールの整備が不可欠である。ILD グループの中で、KEK グループは GRID を活用したモンテカルロ (MC) イベント生成を分担している。測定器の詳細基本設計 (DBD) 研究以降、ILD は Dirac を用いた MC 生成ツールへの移行作業行ってきた。これが完成し、2015 年夏以降 ILD 標準 MC サンプルの生成を進めている。2015 年夏にはデータ量が不足していた 500GeV の 6 体反応のデータ生成を行い、約 3 週間で 50TB 程度の MC データを作成した。このデータは世界中の ILD の研究者に提供されている。その後も解析の深化とともに必要になった MC データを適宜作成している。

測定器 DBD を完成させて以降、ILD では測定器の更なる最適化が課題となっている。これを進めるため(1)これまでの個別の物理解析で解析ユーザーが新たに開発あるいは更新した高レベル解析ツールを ILD 標準の枠組みに組み込みむこと、(2) DBD と Snowmass 研究に使用した旧来の基盤ソフトウェアをよりフレキシブルで最新の枠組みに更新すること、(3) DBD 時には不十分であった Whizard プログラムを始めとするイベントジェネレータプログラムの改善等に取り組んでいる。2015 年夏以降、(1)に関しては、7 月に DESY にて高レベル解析ワークショップを開催し、高レベル解析ツールを標準の枠組みに組み込むための検討作業を行った。日本からもバーテックス ID プログラムでの  $dE/dx$  と Particle ID 情報の活用や、再構成した粒子情報に誤差情報を組み込む手法などについて報告した。ワークショップでは標準枠組みへの組み込みのための作業分担を行い作業を進めた。(2)に関しては主にヨーロッパグループが担当していた基幹部分(DD4Hep)の開発がほぼ完成し、各測定器要素の検証作業を進めている。DD4hep では測定器構成情報が従来の ILD 独自の Gear システムによるものから、ROOT によるものに変更になる。これは、シミュレーションやデータ解析のあらゆる場所で使用されるものなので、多方面にわたる変更と修正が必要になった。2 月末に DESY にて現状確認のための ILD ソフトウェアワークショップが開かれ、本格的に最適化作業を進めるにあたり残された課題についての検討が行われた。(3)に関しては、従来の研究に使用されてきた Whizard1 イベントジェネレータが DBD 以降に Whizard2 として大幅に書き換えられたので、そのツールの検証作業を SiD・CLIC および Whizard の著者らと協力しながら進めている。特に、Whizard1 では欠けていた Beamstrahlung 効果、最新のパラメータによるジェットのハドロン化、偏極  $\tau$  の崩壊、LC グループ標準のファイルフォーマットのサポートなどについては、ユーザーによる検証が不可欠な項目である。今までのところ Whizard2 には不十分などころがあり、Whizard1 を置き換えるところに至っていないが、Shower matching 機能 や 8 体イベント生成が可能であることなど魅力的な機能が備わっているので、早急に検証を進め物理解析に活用したいと考えている。

## ILC のための測定器開発研究の進捗

物理の検討や、それを実現する測定器の全体設計の最適化は、要素測定器のハードウェア開発研究に裏打ちされたものでなければならない。日本の ILC 物理/測定器グループは ILD グループの主要メンバーとして、特に、ILD 測定器の設計原理である PFA の要となる主要測定器要素、すなわち、バーテックス検出器 (VTX)、主飛跡検出器 (TPC)、および精細カロリメーター (CAL) に力を入れ、このうち、素核研 ILC グループは VTX および TPC の国内開発拠点となっている。また、素粒子原子核研究所の低温グループと協力して超伝導ソレノイドの設計や 2 相 CO<sub>2</sub> 冷却システム (2PCO<sub>2</sub>) 開発を行っている。更には、ILC 物理測定器グループにおいても、加速器と関連の深い Machine Detector Interface (MDI) 部分、ILC 加速器のための ATF・ATF2 による研究や陽電子源の開発等の ILC 加速器研究にも関わっている。以下、TPC、VTX、2PCO<sub>2</sub>、MDI、陽電子源開発について最近の進展を報告する。

### バーテックス検出器 (VTX)

ILC の測定器に用いられるバーテックス検出器には 1 層あたり 0.1% $X_0$  以下という、究極の低物質質量が要求される。この要求を満たすための低物質質量ラダーの開発を開始した。我々が検討しているラダーは、薄い (100 ミクロン以下) CFRP で構成された厚さ 2mm の箱状のコアの両面にカプトン FPC、さらに 50 ミクロンまで薄くした CCD センサーを貼り付けた構造のものである。100 ミクロン厚の CFRP 板とラダー

用 FPC (ケーブル部分を含む) を図 3 に示す。小さい穴が多くあいているのは、薄い CCD センサーを接着する際に、反ったセンサーを真空吸着してフラットにするためである。



図 3 ラダー用 CFRP 板 (上) および FPC (下)

## 2 相 CO<sub>2</sub> 冷却システム(2PCO<sub>2</sub>)

ILC 測定器のバーテックス検出器ならびに TPC の冷却に使用することを念頭に 2 相 CO<sub>2</sub> を冷媒として用いた冷却システムの開発研究が KEK で進展している。ガス化した CO<sub>2</sub> を圧縮、凝縮する液化ユニットと気化熱を用いて冷媒の温度を下げる冷却ユニットとの間を 20m のフレキシブルチューブで接続したシステムの動作試験を行った。長いフレキシブルチューブによる圧損の影響も小さく、冷却温度 -40°C から +15°C の範囲で問題なく動作することを確認した。また、この冷却システムを用いて、TPG と呼ばれる非常に熱伝導率の高い素材をヒートスプレッダーに用いた TPC の読み出しエレキ部のモックアップ (図 4) の冷却試験を行った。



図 4 TPC 読み出しモックアップ冷却試験

## 主飛跡検出器 (MPGD)読み出し TPC

ILD 測定器の主飛跡検出器は端部検出器としてマイクロパターン・ガスディテクター (MPGD) を備えたタイムプロジェクション・チャンバー (MPGD TPC) であり、DESY、KEK や Saclay 等の主要研究所と多くの大学チームからなる国際研究組織 LCTPC コラボレーションのもと、研究開発が進んでいる。その中核グループの一つとして、KEK と佐賀大学や広島大学等の大学チームからなる国内グループは清華大学 (北京) とも協力して LCTPC アジア・グループとして開発研究を進めている。TPC では、端部検出器ガス増幅領域で発生する陽イオンが TPC ドリフト領域に帰還し、加速器バックグラウンドが高い場合にドリフト領域中の陽イオン濃度が高くなってドリフト電場を乱し、測定される 3 次元飛跡が歪む古典的な問題がある。この歪みをなくするためには陽イオンの帰還を阻止する陽イオンゲートを設置する必要があるが、陽イオンゲートとして古典的なワイヤーゲートの代わりに光学的開口度の高い GEM をゲートとして使用することが提案されている。しかし、従来の GEM ゲートの場合、陽イオンを 100% 止めることはできるが、ドリフト電子の透過度が最大でも 50% 程度で、位置分解能に劣化が見られた。この状況を打開するため、日本グループでは 80% 以上の開口

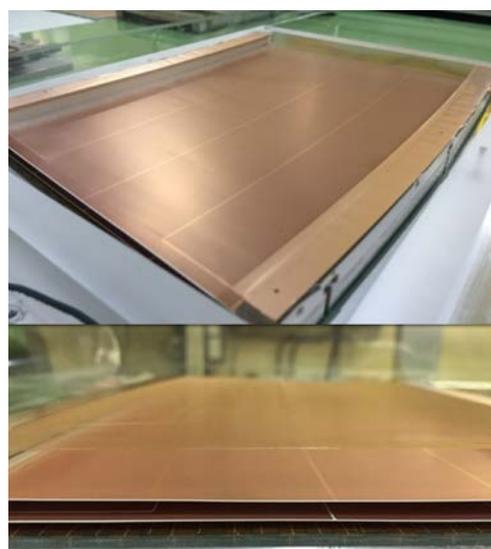


図 5 実機大 GEM ゲート

度を持つ GEM の開発を企業（フジクラ）とともに進め、既に報告したように小規模および中規模のサンプルについて満足できる性能（透過率 80%以上）を得ている。前回報告以降の特筆すべき進展は、実機大の大口径 GEM ゲートの試作に成功したことである（図 5）。開口度が高いためほぼ透明で目視し辛いですが、良く見ると 2mm 間隔で設置された増幅用 GEM 2 枚の上方約 1cm の所に薄っすらと透き通った GEM ゲートの境界が見える。ソースを使った磁場なしでの電子透過率測定の結果は、小規模／中規模サンプルの試験結果を再現している。今後、ビームを使った磁場中での性能試験を行う予定である。

## 加速器・測定器インターフェース(MDI)と測定器インテグレーション

2013 年に ILC の建設候補地として北上サイトが選ばれた。それ以来、このサイトでの電子・陽電子ビーム衝突付近（IR 領域）での地下約 100m の実験ホール、地上施設の詳細設計を行うために必要な測定器の組立方法（インテグレーション）と測定器用の超伝導ソレノイドなどのための冷却システムの概念設計を検討してきた。2015 年度は冷却システムの概念設計とその一部を施設として含んだ実験ホールの 3 次元 CAD 化を行った。これらは素核研・低温グループと ILC 施設・サイト(CFS)グループとの共同研究として行われた。

冷却対象の設備として、温度 4K のヘリウムで冷却される測定器用ソレノイド 2 台、温度 2K の超流動ヘリウムで冷却される 2 組の最終収束電磁石システム（QD0,QF1）とそれぞれのビームの交差点補正用の 2 台のクラブ空洞がある。これらの 2K-4K 複合冷却システムの地上部と地下実験室内の設備と配置が検討された。ヘリウムガスの圧縮機とそのバッファータンクは地上に配置され、ヘリウム温度への冷却機（Cold box）は地下に配置される。衝突点ではビームは垂直方向に 6 ナノメートルに収束されるので電源（ソレノイド用の 20kA PS など）、冷却機などからの振動が最大の関心事となる。また、二つの測定器（ILD, SiD）の入れ替えを行ういわゆるプッシュプル方式に効率的に対応できるように、地上からのヘリウムの供給は直径 18m の垂直シャフトを通じて常温(300K)のガスで行われ、測定器上に設置される冷却機にフレキシブルパイプ(300K Gas-He pipes)で接続される。プッシュプル時には電源ケーブルのみの切断で測定器の衝突点での入れ替えが可能となっている。冷却システムの定常運転時、つまり実験中の主な振動源は 2K 冷却システム(2K refrigerator)の真空ポンプと 20kA 電源の冷却水である。そのため、電源は測定器より離れた実験室側壁上のギャラリー(utility space)に設置される。2K 冷却システムの振動の影響と対策については 2016 年度に検討する予定である。これらの 3 次元 CAD 化の代表例を図 6 に示した。

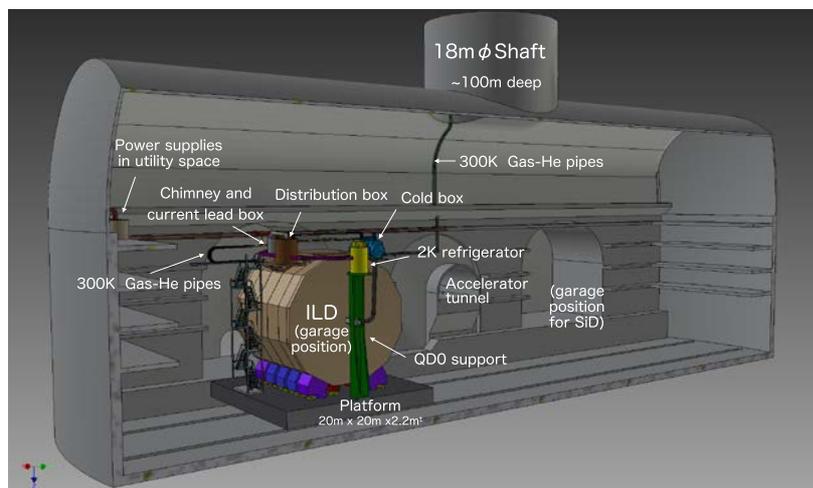


図 6 ILC 実験室

## 陽電子源開発

素核研 ILC グループでは、物理検討や測定器開発に加えて、物理に触発された偏極陽電子源開発や物理屋の得意とする電磁シャワーシミュレーション等の手法を活かした陽電子源開発などを、加速器研究施設、原研、広島大学、ANL、DESY、ハンブルグ大学、CERN、IHEP、BINP などと共同で行なっている。ILC 建設に関する技術的リスクを最小化するために「コンベンショナル陽電子源」が、今、最も急がれる課題の一つとなっているが、そこでは陽電子生成ターゲットの熱ストレスと生成された陽電子の収集と加速が研究開発の重要な課題となる。ターゲットは熱の集中を避けるために回転する。この開発を同様の装置の経験が豊富な(株)リガクと契約して進めた。熱とストレスの解析を進め、それに対応する水冷機構の設計を進めた。それと並行して回転軸を含む中央部分の試作を行った。生成した陽電子を収集し加速するためにはターゲット直下のフラックスコンцентрレーターと呼ばれる強磁場発生部が重要になる。2015年度はこの研究をBINPの協力を得て進め概念設計を行った。またダンピングリング入射直前までの陽電子収集・加速・バンチ長圧縮部などの詳細シミュレーション、電源やクライストロン等のトンネル内配置の検討を行った。

一方、上記と並行して物理に触発された逆コンプトン散乱ベースの偏極陽電子源開発の開発も行なっている。これに関しては「自発発振・光蓄積空洞の原理検証(科研費、基盤A、課題番号25246039、H25-29)」を得て研究を進めた。自発的な発振によって、フィードバック制御を一切行うことなく19万倍という高い増大率でレーザー光を光空洞内に蓄積することに成功した。

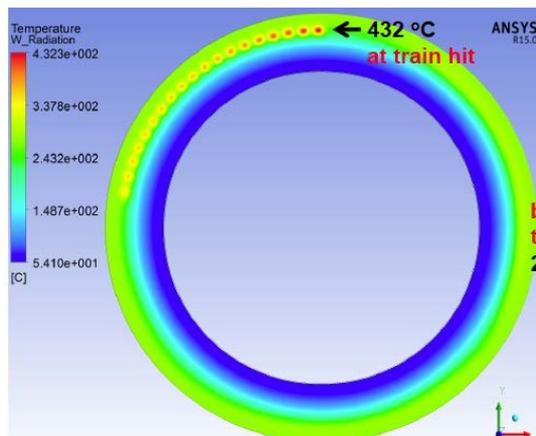


図 ビームによる発熱シミュレーション

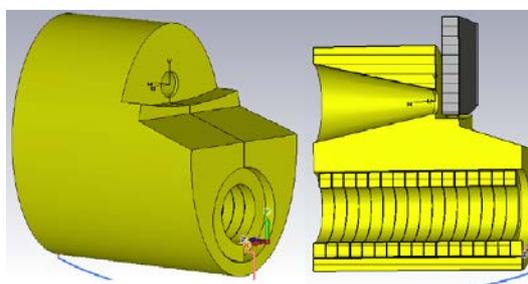


図 フラックスコンцентрレーター

以上

## 参考文献

- [1] ILCに関する有識者会議, [http://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/chousa/shinkou/038/index.htm](http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shinkou/038/index.htm)
- [2] “US-Japan Symposium”, <http://newslines.linearcollider.org/2016/03/03/us-japan-symposium/>
- [3] “KEK-ILC アクションプラン”, <http://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Release/20160106140000/>
- [4] “LCWS 2016”, <http://lcws15.triumf.ca>
- [5] “A study of the measurement precision of the Higgs boson decaying into tau pairs at the ILC”, [Eur. Phys. J. C \(2015\) 75:617, DOI 10.1140/epjc/s10052-015-3854-2](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-015-3854-2)