

ILCに関する国内外の動き

4月20日から4月24日にかけて、KEK つくば（主会場）、および東京大学本郷キャンパス（4月22日のみ）において、アジア・リニアコライダー・ワークショップ（ALCW2015）が開催された[1]。今回は、新しい試みとして、通常の全体セッション以外のパラレルセッションについては、測定器開発研究のコラボレーションであるCALICE（カロリメータ）、LCTPC（TPC）等のコラボレーション会議、理論・実験合同 ILC 物理セッション、二つの測定器概念グループ（SiD、ILD）のグループミーティング、そして加速器セッションを組み合わせたオムニバス形式での会議運営であった。中日の4月22日は、会場を東京に移し、午前中にALCWの全体セッション、午後には「ILC東京イベント」が開催された（先端加速器科学技術推進協議会（AAA）とリニアコライダー・コラボレーション（LCC）が主催、KEK（LC推進室）は後援）[2]。東京イベントには、ALCWの参加者305人（内半数は外国からの参加者）に加え東京イベントのみの参加者も合流して合計約400人が集まった。東大本郷キャンパス伊藤ホールでILCの実現をテーマにシンポジウムを行い、研究者の意気込みを東京宣言として発表した。当日の夜、ホテル・ニューオータニにてILCに関わる世界48か国の料理を集めたフードフェスタを行った。フードフェスタには、シンポジウム参加者だけでなく国会議員の方々や、10ヶ国以上から大使館関係者にご参加頂き、大変盛況であった。大使や公使ご自身がおいで下さった国も数カ国あったことは特筆される。

会議期間中の4月21日には、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」の第3回会合があり、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」の二つの作業部会がこれまでの検討をまとめた報告書が示された[3]。有識者会議は、6月25日に第4回会合を持ち、これらの報告を受けた有識者会議としての議論の中間取りまとめ等について議論を行った。中間取りまとめは近く文書として発表される予定である。

ILC物理については、リニアコライダー計画推進のための国際組織であるリニアコライダー・コラボレーションの枠組みの中で、ILC加速器の運転シナリオ、それに基づいた物理の成果の評価の観点から検討を行ってきたが、つい先日、その検討結果が公表された[4][5]。前回の運転シナリオ検討では、250 GeV運転から始めるシナリオを中心に検討を行ったが、今回は、TDRで提案されている500 GeVのベースライン設計によるILC加速器を500 GeVから運転し始める案を検討した。この場合、トップクォークの異常結合探索、トップ湯川結合やヒッグス自己結合の測定を運転初期から行えること、WW-fusionによるヒッグス生成の断面積が大きいことから、ヒッグスの崩壊幅への良好な感度が期待できること、新粒子探索の探索領域を最大化できること等の利点がある。一方、ヒッグス結合のモデル非依存な決定には反跳質量法によるZH生成断面積測定が必要であるが、500 GeVは反跳質量法による断面積測定には最適でないため、いずれこの精度がヒッグス結合測定の精度の限界を決めることになる。そこで、推奨シナリ



図1 ALCW2015参加者集合写真（上）、ILC東京イベントでのパネル討論（下）：東大本郷にて

オ (H20) では、500 GeV で 4 年間程度データを収集した後、トップ対生成の閾値領域 (350 GeV) での 1 年程度の比較的短い運転を経て、約 3 年間、反跳質量法に最適な 250 GeV でデータを収集する案となっている。500 GeV 加速器を 250 GeV で運転する場合、加速勾配を 1/2 で運転することになるが、その場合、必要電力が 1/2 で済むため、繰り返し周波数を 5 Hz から 10 Hz に増やすことで、ルミノシティを稼げる点は強調しておきたい。H20 シナリオでは、約 8 年間のベースライン加速器による実験を行った後、約 1 年半をかけ (主としてバンチ数の倍増による) ルミノシティ増強を行う。その後約 7 年間、500 GeV の運転を行い、最後に反跳質量法による ZH 生成断面積とヒッグス質量の精密測定のため 3 年間の 250 GeV 運転を行う。もちろん、運転シナリオは、新粒子の発見等があった場合には、大幅に変更されると予想される。また、物理の展開によって、500 GeV 運転に続くエネルギー増強の期待が高まることも十分ありうるので、あくまで目安という位置付けである。図 2 (下) のプロットは、H20 シナリオについて、モデル非依存解析によるヒッグス結合の精度が時間とともにどう改善していくかを示した例である。分岐比やイベントレートで制限される光子への結合、ミュオン粒子への結合、トップ湯川結合を例外として、最終的には、ほぼ全てのヒッグス結合の精度が 1%あるいはそれを切る精度に到達すると期待できる。ヒッグスの全崩壊幅の精度も 2%を切る。また、最初の数年での精度の著しい改善は注目に価する。これがモデル非依存解析の場合であることを再度強調しておきたい。

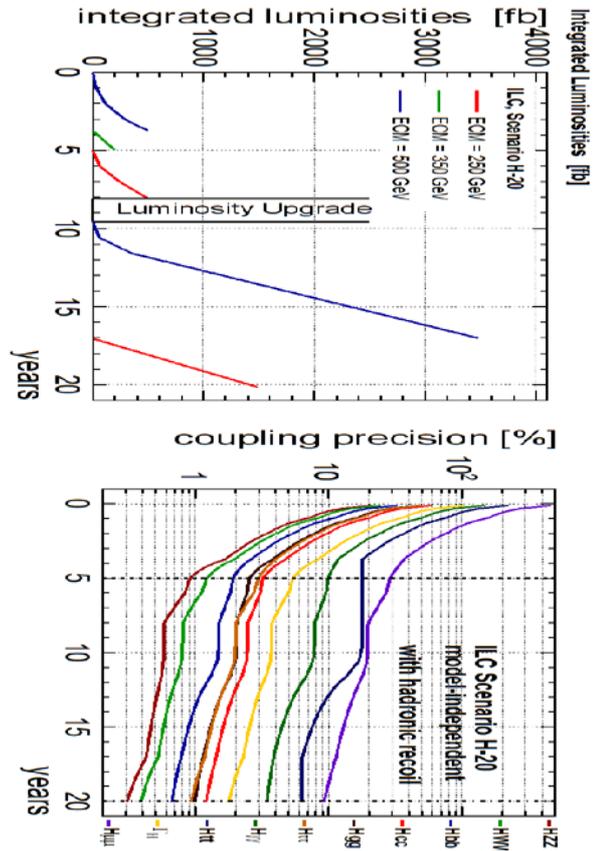


図 2 ILC 運転シナリオ (H20) : 積分ルミノシティの年次変化 (上)、対応するヒッグス結合精度の時間発展 (下) [5]

これらの検討の進展と並行して、素核研 ILC グループが主要メンバーとして参加している ILD 測定器グループでは、物理検討とともに ILD 測定器設計の最適化作業が進んでいる。上述のように ALCWS 2015 では、ILD グループのミーティングが開かれた (後半の二日間、KEK にて開催)。このミーティングには 60 人を超えるメンバーが参加し、ILD 測定器の設計の最適化やグループの組織の再編に関する活発な議論が行われた。組織再編にともない、グループの代表として Spokes Person が置かれることになり、参加研究機関の代表者によって構成される Institute Assembly によって DESY の Ties Behke 氏が初代の Spokes Person に選出された。現在、グループの執行部の人選が進められている。



図 3 ILD ミーティング集合写真 (小林ホール)

ILD 測定器による ILC 物理の検討と ILD 測定器設計の再最適化

ILD 測定器の設計理念は、ILC TDR の測定器の巻に収録されている詳細基本設計 (DBD) に記載されている通り[6]、超細密カロリメータと、高いパターン認識能力を持つタイム・プロジェクション・チェンバー (TPC) を主飛跡検出器とし、その内外に高位置分解能シリコン飛跡検出器とバーテックス検出器を組み合わせた、いわゆる粒子流解析 (Particle Flow Analysis: PFA) に最適化された大型検出器システムである。上述のように、この基本概念を維持しつつ、物理探索能力を落とさず、また ILD 測定器の基本的構成には大きな変更を加えずに、測定器コストを下げるための測定器設計の見直し作業を進めている。同時に、ILC 物理のさらなる検討、測定器本来の性能を最大限に引き出すための解析手法の改善の努力が続いている。

ILC 物理の中心課題は電弱対称性の破れの背後にある新しい物理の解明である。ヒッグス自己結合は、電弱対称性の破れの根幹にあり、その測定は極めて重要であるが、その測定の難しさでも良く知られている。これは、自己結合測定に必要な2ヒッグス生成過程の断面積が非常に小さいことに加え、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ることによって。

500 GeV では、ZHH 生成反応を使って測定することになるが、上記 H20 シナリオでは、標準模型の場合、ヒッグス自己結合の測定精度として 28%の精度が期待されている。電弱対称性の破れが強い一次相転移である場合、バリオン数生成が電弱スケールで起こった可能性が出てくる。例えば、2 ヒッグス二重項模型による電弱スケールでのバリオン生成シナリオでは、ヒッグス3点自己結合に少なくとも 20%程度、場合によっては 100%の上向きのずれが生じると期待されている。一方、ヒッグス自己結合に対する感度は自己結合の大きさとともに向上し(図4)、100%上向きのずれがある場合、2 倍以上の精度向上が期待できる。ちなみに、LHC での HH 生成では、バックグラウンド振幅と信号振幅の干渉効果が逆符号となるため、ヒッグス自己結合に上向きのずれがあると、断面積が減少し、さらに測定が難しくなる。

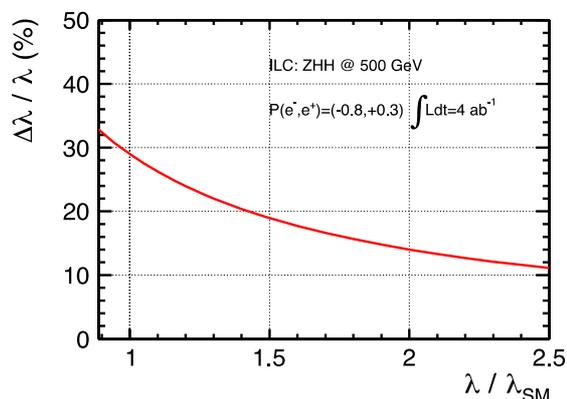


図4 ヒッグス自己結合の測定精度の自己結合の大きさに対する依存性

ILD 測定器再最適化に関しては、設計パラメータ変更に伴い物理の結果がどう変化するかをシミュレーションで明らかにすることが中心課題である。特に、コスト・ドライバーである電磁カロリメータ、構造体の大きさに対する応答を、鍵となる測定 ($e^+e^- \rightarrow ZH$ 反応を用いたヒッグス反跳質量法による断面積およびヒッグス質量測定、ヒッグスの不可視崩壊分岐比測定、圧縮スペクトルの場合の超対称粒子探索、一光子過程を使った暗黒物質探索等) について、DBD 以降の物理解析や測定器開発研究で得られた知見を加味し、フル・シミュレーションにより再検討している。素核研 ILC グループでの検討の一例をあげると、電磁カロリメータの縮小により、TPC の外径が DBD 記載の 1.8m から 1.4m になる場合について、反跳質量法によるヒッグス質量精度の変化を検討した結果、相対的に 12%の精度低下が起こることが分かった。これは運転時間に換算して約 25%の増加に対応する。運転経費も最適化の際に無視できない重要なファクターである。

一方、物理の結果は事象再構成プログラム、解析手法にも大きく左右される。現在、測定器ジオメトリの扱いを一新する、シミュレーションおよび事象再構成ソフトの大規模な改良が進行中で、最終的な最適化は新しいソフトの枠組みで行われる予定である。いずれにせよ、最適化においては MC サンプルを大量に系統的に作成する必要がある。ILD では GRID を用いた計算機資源とデータの国際共有を進めているが、DBD 以降分担体制の変更があり、現在は素核研 ILC グループが ILD の MC プロダクションを主に担当することになっている。また MC データ生成ツールとしては SiD や CLIC が使用している ILCDirac システムに移行し、人的資源の有効利用を図っている。ILCDirac はファイルを DIRAC カタログで統一的に管理する。このカタログはファイル毎のビームエネルギーなどのメタ情報も一括して管理しており、従来のプロダクションデータベースの役割をも担っている。ユーザは CERN に設置された ILCDirac サーバーにジョブを投入し、DIRAC サーバーは ILC VO GRID に参加する KEKCC を含む世界中の GRID サーバーから適当なも

のを選択しジョブを投入し、ジョブ終了後結果をユーザに返送する。また、グループが行う標準プロダクションジョブ用の専用のマネージャシステムがあり多数のジョブの投入とそのクォリティーの管理を行う。ILD 用には同一サーバー上で動く専用のスクリプトがあり、昨年来 ILD 固有の計算機環境へ適用するための開発と検証を進めてきた。ILD では特に KEKCC に対する需要が多いので、KEK とヨーロッパとの距離によるネットワーク遅延などによる問題が顕著になり、その対策を進めている。既に旧来の DBD ソフトを使った検証をかねてヒッグス事象や 6-fermion サンプルの作成を行い物理グループへの提供を始めた。間もなく前述の新しい測定器シミュレーションが完成する。これを用いた MC プロダクションを今年の秋から冬にかけて始める計画である。

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 CO₂ 冷却システム (2PCO₂) 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。MDI に関しては、実験室アクセスや、ILD と SiD での L* 統一のための変更提案 (Change Request) が ALCW2015 で合意されたことは特筆される。TPC 開発の進展については前回詳しく報告したので、以下、前回報告しなかった、VTX、2PCO₂、陽電子源開発について報告する。

バーテックス検出器 (VTX)

ILD 測定器のバーテックス検出器に用いられるピクセルセンサーの候補の一つである Fine Pixel CCD (FPCCD) の放射線耐性を調べるため、2014 年 10 月中旬に東北大学 CYRIC で CCD サンプルに対する中性子照射を行った。CCD は、放射線損傷により、暗電流の増加、トラップレベルの増加による信号電荷に対する電荷転送効率の低下という影響を受けることが知られている。今回の試験ではピクセルサイズが 6 ミクロンの CCD と、6-12 ミクロンの 4 種のピクセルサイズを持った CCD の 2 個の CCD に対して 65 MeV にピークを持った準単色の中性子を約 4×10^9 n/cm² まで照射し、照射後の CCD の特性を詳しく調べた。図 5 に照射後の CCD で測定した Fe55 の X 線のピーク位置の分布を示す。転送効率の悪化によって、転送回数の少ない読み出しノードに近いピクセルに比べて転送回数の多い読み出しノードから離れたピクセルからの信号が小さくなっていることが分かる。一連の解析の結果、サンプル CCD は ILC における中性子バックグラウンドに対しては十分な耐性を持つことが分かったが、低エネルギーの電子・陽電子からなる、いわゆるペアバックグラウンドに対しては、転送効率に関してあと 1 桁高い耐性が必要ながことが判明した。この改善は電荷転送チャンネルの幅を小さくすることと、前もって電荷を注入してトラップを埋めておく、Fat-zero charge injection と呼ばれる方法で可能であると考えられる。

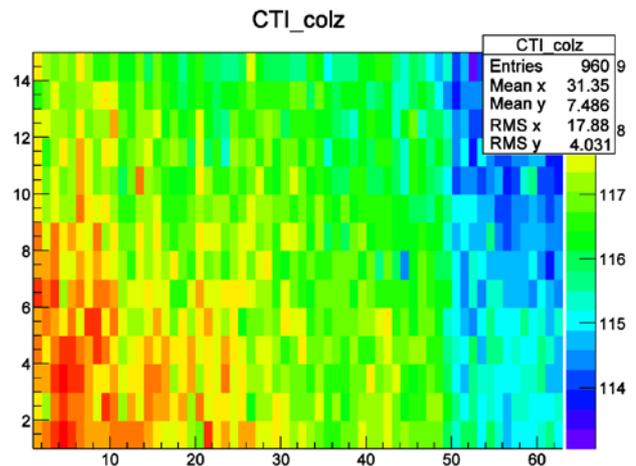


図 5 中性子照射後の CCD により測定された Fe55 の信号ピーク位置の ADC の値の分布。一つのセルは 16×16 ピクセルをまとめた領域に相当する。読み出しノードは左下の角にあたる。

2相 CO2 冷却システム (2PCO2)

ILD 測定器では TPC とバーテックス検出器の冷却に 2 相 CO2 を用いた冷却システムを使用することを計画しており、そのための R&D を KEK で行っている。主にヨーロッパで開発されている 2 相 CO2 冷却システムは 2 相 CO2 の循環に液送ポンプを用いているが、我々が開発しているシステムはガスコンプレッサーを用いたものである。液送ポンプを用いたシステムでは液化器で完全液化した低温の CO2 を、測定器まで長い距離にわたり低温を保ったまま輸送しなければならない。一方、ガスコンプレッサーを用いたシステムでは常温で液化した CO2 を常温で輸送し、測定器の近傍あるいは内部で減圧弁と熱交換器を用いて低温にする。そのため液化部と測定器を結ぶ数十メートルの長さの配管に断熱施工の必要がなく、使い勝手が非常に良くなる。



図 6 液化ユニット (左)、流量計ユニット、冷却ユニット (右のラックに設置) からなる 2 相 CO2 冷却システム

これまで一体物として開発したシステムを、より実際の実験での使用に近い、液化部と冷却部とを分離したシステムに改造した (図 6)。これらの間を 20m のチューブでつなぎ、動作試験を行う予定である。

陽電子源開発

素核研 ILC グループでは、物理検討や測定器研究開発に加えて、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行なっている。

ILC に関する政府による検討が進む中、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。「コンベンショナル陽電子源」は電子ビームを厚いタングステン・ターゲットに打ち込み、電磁シャワーにより陽電子を生成するものである。ILC では単位時間あたり SLC における場合の約 60 倍の陽電子を生成する必要があるため、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安定的な加速の問題が R/D の重要な課題となる。そこで磁性流体真空シールを用いた回転ターゲットの研究を主として進めた。研究は加速器研究施設、機械工学センター、原研、広島大学、ANL、DESY、ハンブルグ大学、CERN、IHEP 等の協力を得て (株) リガクと契約して進めた。また原研高崎にて、磁性流体の放射線耐性試験を行った。リニアコライダー・コラボレーション (LCC) において現在のベースラインになっている「アンジュレーター陽電子源」の利点である偏極陽電子ビームの供給を将来に保証できるように、「コンベンショナル陽電子源」と「アンジュレーター陽電子源」が両立出来るトンネル設計をする方向での議論を進めている。



図 7 原研高崎での磁性流体の放射線耐性試験

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。CW で増倍率の小さな光共鳴蓄積空洞を用いて自発的な発振の確認に成功した。

発振は極めて安定で、大きな外乱でくずれても、すぐに自発的に回復し、何ら制御を要しないことを確認し、「自発発振・光蓄積空洞」というコンセプトの正しさを確認した。

以上

参考文献

- [1] ALCW 2015, <http://www-conf.kek.jp/alcw2015/>
- [2] ILC Tokyo Event, http://aaa-sentan.org/tokyo_event2015/en/index.html
- [3] ILC に関する有識者会議, http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shinkou/038/index.htm
- [4] “Physics Case for the International Linear Collider”, arXiv: 1506.05992 (KEK-Preprint 2015-16)
- [5] “ILC Operating Scenario”, arXiv: 1506.07830 (KEK-Preprint 2015-17)
- [6] “ILC Technical Design Report, vol.4 Detectors”, arXiv:1306.6329