

会議報告

ILC の多角的活用

岩下 芳久* (世話人)・山本 樹・河村 成肇・牧村 俊助・野村 大輔・下村 浩一郎
山崎 高幸・柏木 茂・兵頭 俊夫・三島 賢二・早川 岳人・嶋 達志

Diversified ILC

Yoshihisa IWASHITA*, Shigeru YAMAMOTO, Naritoshi KAWAMURA, Shunsuke MAKIMURA
Daisuke NOMURA, Koichiro SHIMOMURA, Takayuki YAMAZAKI, Shigeru KASHIWAGI
Toshio HYODO, Kenji MISHIMA, Takehito HAYAKAWA and Tatsushi SHIMA

Abstract

ILC will be a unique facility when once it has come. While the main purpose of ILC is concentrated on the high-energy physics for the time being, it should be very useful to consider diversified usages of the facility among the wide science fields. In order to reveal variety of ideas towards the diversified applications, a workshop “ILC diversified application” was held on 29-30th, November 2017 at 2 go-kan, KEK.

1. はじめに

2017年11月29日、30日の2日間、KEK 2号館会議室で「ILCの多角的活用を考える会」が開催されました(図1)¹⁾。これは、ILCが建設された場合、その特異なビームを他分野でも活用できないかという観点で、どのような利用があり得

るかを議論し、ブレインストーミングする研究会です。多彩な分野からアイデアを頂戴し、活発な議論で盛り上がり、ピーク時には50名ほどの参加がありました。最初にILC加速器の全容を紹介するセッションから始まり、光子の発生セッションが続きました。以下、それぞれのセッションの方からのまとめを掲載します。



図1 参加者の集合写真

* 京都大学化学研究所 Institute for Chemical Research, Kyoto University
(E-mail: iwashita@kyticr.kuicr.kyoto-u.ac.jp)

2. 光子発生

リニアコライダー開発の歴史では、JLC (Japan Linear Collider) の時代から LC が作る (超) 高品質電子/陽電子ビームを光子生成に活用したいという動機を背景に、LC 研究者と放射光研究者の密接な協力が続いてきた。本研究会・光子生成のセッションでは、近年の放射光科学の進歩に基づいて、LC の高性能電子ビームから効率的に、高性能光子ビームを生成する可能性について二人の講演者が議論した。

最初の話題提供は、理化学研究所・放射光科学総合研究センターの田中隆次氏が行った：タイトル「XFEL の現状と ILC における可能性」。講演では、自身が行った SPring-8/SACLA における挿入光源開発と XFEL の成功に基づいた XFEL 原理の復習とこの分野の世界情勢の紹介の後に、高出力エックス線レーザーおよびガンマ線レーザーとしての可能性に関する検討が報告された。ILC の加速器パラメータを FEL 実現のためにより適切に修正することで、オングストローム領域では 10 TW のパワーと 10^{12} photons/s/0.1% bandwidth のフラックスを実現できる SASE-FEL の可能性が示された。またガンマ線領域では 1.666 MeV において 100 GW を超える特徴あるガンマ線レーザーの可能性が示され、会議参加者の注目を集めた。

引き続いて、KEK・物質構造科学研究所・放射光科学研究施設 (PF) の山本 樹が、PF において開発中の極短周期アンジュレータ (周期長 4 mm) を利用することにより、ILC 開発段階の比較的低エネルギーの電子ビームからも利用価値の高いエックス線およびガンマ線が得られることを報告した：タイトル「開発段階の ILC 加速器と極短周期アンジュレータを利用した高エネルギー光子生成の可能性」。講演では、極短周期アンジュレータの開発状況の紹介の後に、3 GeV 電子ビームを利用して 15-40 keV の高輝度エックス線光子 (1 次光)、20 GeV ビームによって 1-3 MeV のガンマ線 (1 次光) が得られることが示された。さらに、既存加速器における極短周期アンジュレータの実用例として、東北大・電子光センター S-Band Linac (35 MeV) における、このアンジュレータからの最初の放射光 (430 nm) の観測例が報告された。(山本)

3. ミュオン

ミュオンは第 2 世代のレプトンであり、電子の 200 倍の質量を持つ。また強い相互作用をしないで、 $2.2 \mu\text{s}$ の長い寿命を持つなど、他の素粒子にはない特徴を備えている。

これまでのミュオンを用いた研究は、ミュオンそのものの性質を調べる基礎物理分野、ミュオンを微視的プローブとして利用する μSR 法、非破壊分析などの分野が主流であった。最近では、高エネルギー宇宙線ミュオンを用いた火山、原子炉、そしてピラミッドなどの内部透視についても広く関心を集めている。本研究会に際して、当初 ILC のビームダンプから発生する高エネルギーミュオンの利用について検討を開始したが、ILC から得られる陽電子を固定標的に衝突させた際のミュオン対生成 (図 2) とそのミュオンコライダーへの応用可能性に講演者の興味が集中してきたために、その検討内容を報告した。

まず野村氏は素粒子理論家の立場から、ミュオンコライダーの Higgs ファクトリーとして、あるいはマルチ TeV 領域に到達し得るエネルギーフロンティア加速器としての期待を語った。ついで山崎氏から ILC メインビームダンプおよび薄いインターナルターゲットを利用したミュオン対生成量について、Geant4 を用いたシミュレーション結果について報告があった。そののち河村氏から、ミュオンコライダーのルミノシティを増加させるための加速器群についての新提案がなされた。また牧村氏 (河村代理発表) からは過去の実

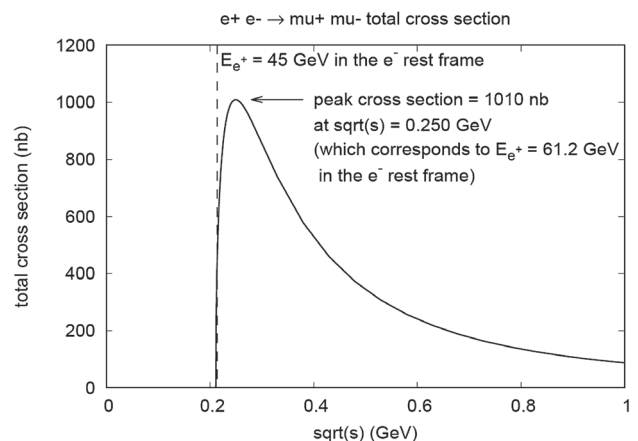


図 2 陽電子を静止系電子に衝突させた際のミュオン生成断面積 (by 野村)

績との比較によってインターナルターゲットの具体的な実現方法について報告がなされた。

(河村・牧村・野村・下村・山崎)

4. 核医学, 放射化学

本セッションは, ILC の陽電子生成に用いられる光子ビームや ILC 超伝導加速器技術が放射化学研究や核医学診断に用いられる放射性同位元素 (RI) 製造へ応用できるかを検討するために設けられた。

最初に, 放射化学を専門とする東北大学電子光理学研究センター (旧核理研) の菊永英寿氏に「電子加速器を用いた放射化学研究」というタイトルで, 電子光センターで行われている大強度電子線形加速器を用いた RI 製造について講演して頂いた。光核反応による RI 製造では, 巨大共鳴領域 (7 ~ 30 MeV) 付近の光子ビームが最も生成効率が低い (反応断面積が大きい) ため広く利用される。一般には加速した電子ビームをタングステンや白金などの重い金属に入射し制動放射線 (光子ビーム) を発生させる。光子ビーム生成に用いる電子ビームのパワーで利用方法を区分すると, ビームパワーが数キロワットの場合は研究用 RI 製造に, 数十キロワットになると商業用 RI 製造に利用できる (図 3)。菊永氏が所属する電子光センターでは放射化学研究用の RI 製造に利用されている電子ビームのパワーは約 6 kW, 巨大共鳴領域付近 (10 ~ 20 MeV) の光子ビームパワーは約 50 ~ 60 W/MeV である。ILC の陽電子生成用の光子ビームは, その 2 次高調波成分だけをとっても約 2 kW/MeV (電子光センターの約 40 倍) もあり, 実際に利用できるかどうかは別として光子ビーム

のパワーだけを見れば ILC の光子ビームダンプにおいて商業レベルの RI 製造ができる可能性があることが示された。ただ, 基本波付近の 7.5 MeV 以下の光子ビームはターゲットの大きな熱負荷になるとコメントが付け加えられた。

続いて, KEK の設楽哲夫氏からは, ILC の超伝導加速器技術のスピノフとして SPECT 診断に用いられる ^{99m}Tc の親核種である ^{99}Mo 製造の可能性について講演があった。日本では核医学診断に用いられる ^{99}Mo を 100% 輸入に頼っており, 加速器を用いた ^{99}Mo の製造が以前から期待されている。設楽氏の講演の中では, ^{99}Mo 製造用の cERL のデザインをベースにした超伝導加速器の設計案などが示された。平均ビーム電流が 1 mA を超える場合には超伝導加速器を選択するメリットが高く, cERL における 1 mA の CW 運転の実績から 10 mA までのアップグレードは僅かな改良で実現可能だという説明であった。現在行われている ILC 用超伝導加速空洞の高 Q 値および高加速勾配に関する開発や空洞内表面のコーティングによる 4 K 運転が実現すれば, システム全体の小型化を図ることができ超伝導加速器を用いた ^{99}Mo 製造の実現性も高まると思われる。ILC の副次粒子の利用や ILC 超伝導高周波技術のスピノフによる, 将来的に加速器を使った商業ベースの RI 製造が展開されていくことを予感させる講演であった。(柏木)

5. 低速陽電子

このセッションでは, まず, 兵頭俊夫 (KEK 物構研) が KEK つくばキャンパス電子・陽電子入射器棟に設置されている低速陽電子実験施設の装置と成果の概要²⁾を述べ, 望月出海氏 (同) が, 特に TRHEPD (全反射高速陽電子回折) による触媒表面の原子配列解明³⁾の詳細を説明した。

同施設は, 専用の 45 MeV リニアックによって生成されたエネルギー可変 (50 eV ~ 35 keV) の低速陽電子ビームを使用する専用施設である²⁾。短パルス (幅 1 ~ 12 ns, 可変, $5 \times 10^6 \text{ e}^+/\text{s}$) と長パルス (幅 1.2 μs , $5 \times 10^7 \text{ e}^+/\text{s}$) のモードがあり, くり返し 50 Hz で動作している。

45 MeV 電子ビームを厚さ 4 mm の Ta 板に当たったときの制動放射を経て対生成で生じる高エネルギー陽電子は, -3 eV の負の陽電子仕事関数

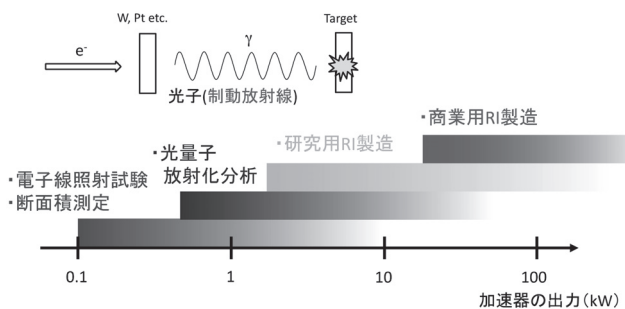


図 3 電子加速器の出力と利用法。一般に, 加速した電子を物質に入射したときに発生する制動放射線を利用

を有するW薄膜に入射され、そこで熱化後に3 eVのそろったエネルギーで再放出される。それをその場で、個々の実験の要件に応じて、50 eVから35 keVまで変化する所望のエネルギーまで静電的に加速し、そのエネルギーで磁気的に輸送する。

ビームラインの途中にパルスストレッチ部が設置されている。これは、幅1.2 μsの低速陽電子パルスを、5 keVのビームエネルギーで200 μsから20 msまでの可変幅に伸長させる。伸長されたビームは、位置検出遅延線検出器(DLD)を用いたLEPD(低速陽電子回折)システムに使用される。

ビームラインは下流の実験エリアでSPF-A3, SPF-A4, SPF-B1, SPF-B2の4分岐に分かれ、それぞれに測定ステーションが繋がれている。

(1) SPF-A3: TRHEPD(全反射高速陽電子回折)ステーション。TRHEPDは、RHEED(反射高速陽電子回折)の陽電子版である。すべての物質内の静電ポテンシャルが正なので、陽電子はすすりすりの視射角で入射すると全反射されるという特徴を持ち、他の手段に比べて、最表面および表面直下の原子配列に対する感度が格段に高い(図4)。しかも日本発の手法であって、現在KEKの独壇場である²⁾。長い間確定していなかったGe(001)(4×2)Ptナノワイヤ構造や、ルチル型TiO₂(110)(1×2)表面構造を決定したり³⁾、最近次々に合成されている固体基板上でのグラフェン、シリセン、ゲルマネン⁴⁾などの原子シート材料の構造の詳細を解明している。

(2) SPF-A4:LEPD(低速陽電子回折)ステーション。LEPDは、LEED(低速電子回折)の陽電子版である。最近完成し、共同利用が始まった。

(3) SPF-B1:汎用分岐で、最近までPs⁻(ポジトロニウム負イオン)ステーションが接続されていた。Ps⁻は3個のレプトン(1陽電子と2電子)の結合系である。一原子層以下のアルカリ金属で被覆したW表面からPs⁻が効率よく放出されることが発見されて以来、短時間の実験が可能になり、Ps⁻の電子の1個をレーザー光で脱離させる光脱離の研究と、それを利用したエネルギー可変Ps(ポジトロニウム)ビーム生成が可能になった⁵⁾。光脱離過程の分光学的研究は、理論的に予言された形状共鳴を検証した⁶⁾。今後、この分岐で

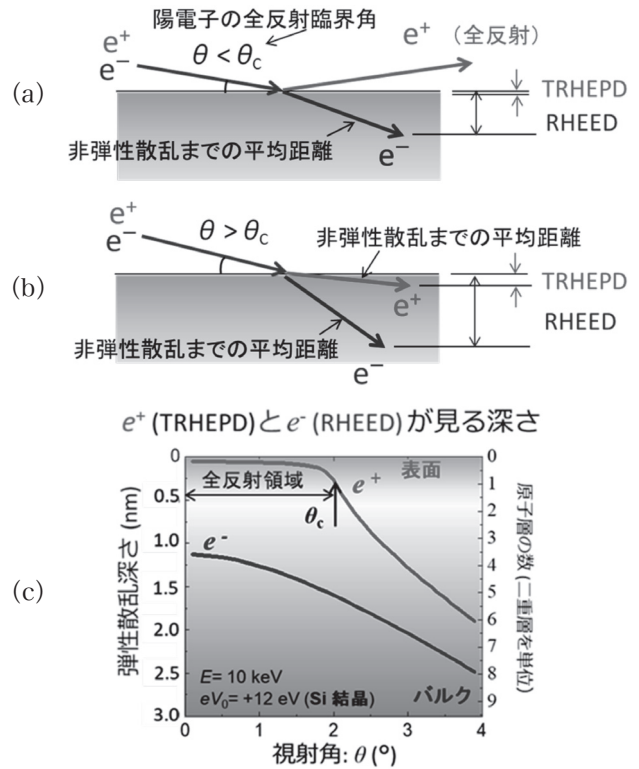


図4 (a) 全反射の臨界角 θ_c 以下の視射角で入射した陽電子は全反射される。(b) 臨界角 θ_c 以上の視射角で入射した陽電子は結晶中に入るが、表面に近くように屈折する。(c) 10 keVの陽電子と電子をSiに入射したときに陽電子と電子がプローブする深さの視射角依存性

はPsのレーザー冷却の実験が行われる。

(4) SPF-B2:Ps-TOF(ポジトロニウム飛行時間)ステーション。陽電子パルスが入射した時刻を時刻0として、放出されたPsが固定位置の鉛スリットの前を通過するまでの時刻の分布を測定すれば、Psの運動エネルギーの分布が分かる。この手法で、アルカリ金属を被覆したW表面や、半導体表面などからのPs放出が研究されている。

(兵頭)

6. 中性子関連

中性子は強い力、弱い力、電磁気力、重力それらにすべて敏感であり、良いプローブとして原子核・素粒子・物性研究から産業用イメージングまで広く利用されている(図5)。広田克也氏(名古屋大学)から“中性子を用いた物理と応用”というタイトルでJ-PARCで行われている研究として中性子寿命の測定、中性子散乱を用いた短距離力探索、およびCP対称性の破れの研究が紹介さ

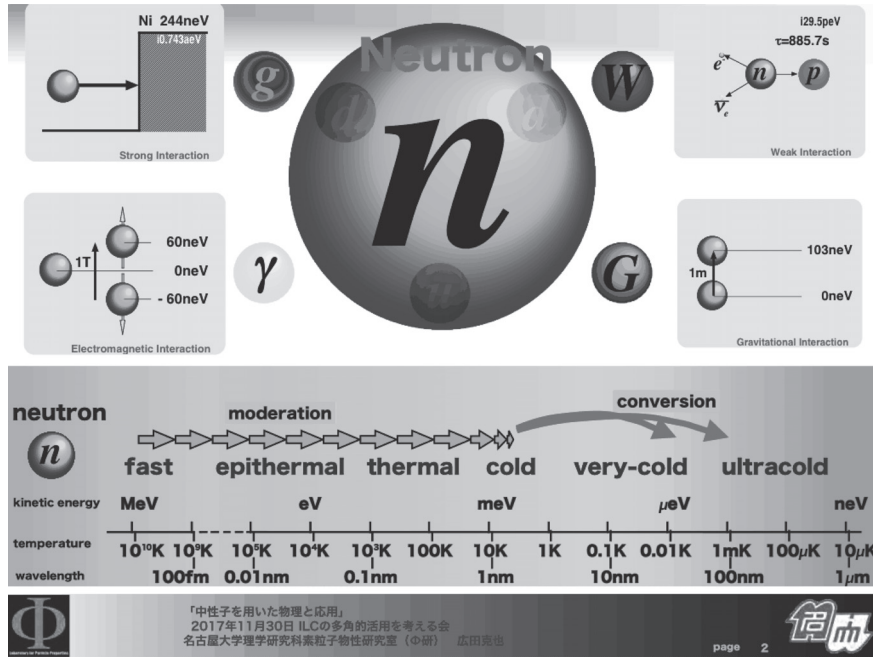


図5 中性子の特徴と生成過程. 一般に核反応で原子核から出てくる中性子は数 MeV のエネルギーをもつが, 通常利用されるのは熱中性子以下であるため, 数桁の減速が必要になり, 利用効率を大きく制限している

れた. また, 近年注目されている産業応用として結晶のブラッグエッジを利用したパルス中性子イメージングとソフトエラー評価の現状が発表された. 中性子源は原子炉, J-PARC のような大型パルス装置から小型加速器を用いたもの, レーザーを使った瞬間パルスなど様々なものが開発・検討されており, 用途によって使い分けられるべきである.

ILC への応用として三島 (KEK) から “Photon を使った中性子源” というタイトルで発表が行われた. 中性子を発生させる方式としては

- 1) p, d (数 MeV) と軽核 (${}^7\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$) の核反応
- 2) ${}^{235}\text{U}$ を用いた核分裂反応
- 3) d, t の核融合
- 4) 数百 MeV に加速した p と重元素 (W, Hg) による核破碎
- 5) ガンマ線による光核分解反応

などが存在する. 発表では電子 Linac を用いる ILC を利用する方法として 5) のガンマ線光核分解による中性子発生が議論された.

光核分解による中性子発生には大きく 2 通りの反応がある. 一つは ${}^9\text{Be}$ や d などの軽核の分解反応を利用するもので反応断面積は数 mbarn と小さいが, ガンマ線のエネルギーが ~ 2 MeV と

小さくガンマ線の有効長が長く取れるというメリットがある. また放射化核が発生しないという点でも有利である. もう一つは重元素の巨大双極子共鳴を利用したもので, 断面積は数百 mbarn と大きいガンマ線の減衰長が短く, 複数の放射化核ができるため取扱が難しくなる. 中性子の発生効率はガンマ線一個あたり 0.6 \sim 3% であった. いずれの場合も中性子一個を取り出すための必要エネルギーは 300-400 MeV/neutron で J-PARC などの核破碎反応の ~ 50 MeV/neutron と比較すると 6-8 倍大きな値である. したがって中性子の発生を最大化しようとするターゲットが律速となることが予想される.

ガンマ線光核分解によって発生する中性子はガンマ線 (電子線) と同程度の時間構造となるため時間特性が良い (\sim ns) ことが予想される. 軽核による光分解は数十 keV のエネルギーをもつショートパルス中性子を直接発生させることができる. これは現存しない非常にユニークな中性子源でありいろいろな応用が考えられる. 応用として time of flight による詳細な断面積測定などが提案された. また, keV 中性子ビームの BNCT 利用についても議論がなされた. (三島)

7. 光子利用

ILC で開発される高輝度・低エミッタンス電子ビームと高輝度レーザーによるレーザーコンプトン散乱ガンマ線や大型アンジュレータによるガンマ線は、量子力学の基礎にかかわる新しい研究機会を提供するものと期待される。本セッションでは、最初に国内外におけるレーザーコンプトン散乱ガンマ線源のこれまでおよび現状が報告され、さらに KEK、量研を中心に検討されていたエネルギー回収型リニアックにおける MeV 領域のレーザーコンプトン散乱ガンマ線の生成と利用研究について紹介があった。特に、原子核物理学、宇宙核物理学等の基礎研究、核セキュリティ等の応用研究などについて説明がなされた。

続いて、最近話題となっている光子-光子散乱および光渦に関する研究が紹介された。また巨視的な高強度場の下で起こる量子反応にかかわる理論的課題が取り上げられた。

2 個の光子の相互作用としては、光子同士の直接散乱、1 個の光子が 2 個に分裂する光子分裂などが知られている。2017 年に、LHC における鉛と鉛の散乱実験において、仮想光子と仮想光子の散乱によって 2 本の 5 TeV のガンマ線が発生する事象が 13 イベント観測された⁷⁾。これは世界初の光子-光子散乱の測定であるが、反応率が極めて小さいため LHC でもさらなる精度の向上が期待できない。一方、光子・光子相互作用には、上記以外に“デルブリュック散乱”がある(図 6)。デルブリュック散乱は、ガンマ線が原子核近傍で電子・陽電子の対生成と対消滅によって再びガンマ線を生成する弾性散乱であり、他の光子・光子相互作用と比較して、極めて大きな反応率を持つ

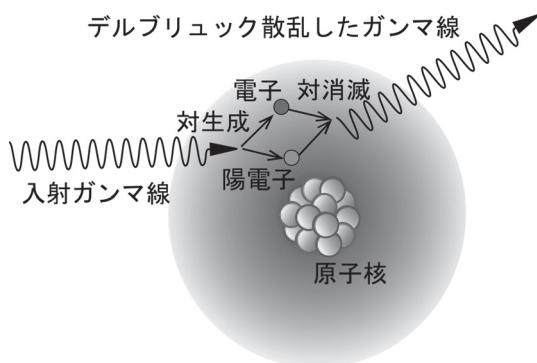


図 6 デルブリュック散乱の概念図

ため 20 世紀から研究されてきた。しかし、実験的にレイリー散乱等の他の弾性散乱と区別ができないために研究は停滞していた。2017 年、量研グループが、直線偏光ガンマ線を用いることでデルブリュック散乱を選択的に計測できる条件を理論的に見出した⁸⁾。この手法で他の実験手法と比較して格段に高い精度で光子・光子相互作用を研究できると期待できる。

光渦は平面波ではなくラゲール・ガウシアン関数で表される電磁波であり、渦状の波面を持つ光である⁹⁾。また 1 より大きい軌道角運動量を持ち、渦状の波面を持つという特性を有する。すでにレーザーなどのマクロの光では光渦が実際に生成され、金属やポリマーなどの材料物質に照射し、謂わば「捻る」ことでネジ状の構造を作るなど、ナノテクノロジーの観点からも注目されている。角運動量の観点では、平面波の場合でも、ゼロから無限大までの軌道角運動量を持つ部分波で展開可能であることから 1 より大きい軌道角運動量成分は含まれている。量子化して得られる光子も 1 より大きい軌道角運動量成分を含む。しかし光渦は、エネルギーと運動量の同時固有状態である平面波ではなく全角運動量の固有状態として現れるため、最初から特定の角運動量成分だけをビームとして取り出すことができる点が重要である。現在、エックス線領域まで渦光の生成が実現しているが、ガンマ線領域で光渦を生成できれば、原子核との相互作用においては特定のスピン・パリティ変化を伴う遷移だけを選択的にピックアップすることができ、原子核研究における新しい実験手法となることが期待されている。具体的な例として、軌道角運動量 2 を担うガンマ線と偶偶核との反応では、巨大双極子共鳴が角運動量保存則から禁止されるため、より高次の遷移を調べることが容易となる。最近、円偏光した大強度レーザーと電子との非線形コンプトン散乱によってガンマ線渦を生成する手法が提案されている¹⁰⁾。

ガンマ線領域では、可視光領域での回折に基づく光学素子が使えないため、ガンマ線渦生成の確認自体も重要な問題である。これについては最近、ガンマ線渦のコンプトン散乱に関する理論計算が行われており、ガンマ線渦の波動関数の角運動量やノード数など、平面波光子の場合とは異なる観測可能量を実験的に測定できれば、光渦の光子と

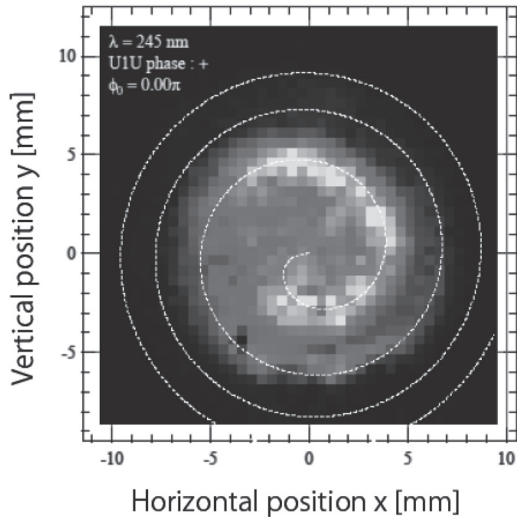


図7 アンジュレータによって生成した渦光 (UVSOR での実験結果)

しての性質を探る画期的情報となる。またアンジュレータの高次高調波による光渦の生成が理論¹¹⁾および実験¹²⁾によって既に示されている(図7)。本セッションではエックス線からガンマ線にかけてのエネルギー領域の光渦をプローブとした、物質の磁氣的性質や軌道角運動量による二色性の発現などの新しい物性研究の可能性が示された。数百 keV 領域の光渦生成には 10 GeV 以上の高品質な電子ビームが必要であり、各種アンジュレータを導入することで光子としての光渦の研究が可能になり、光渦の本質的な理解を可能とする。また、ILC における陽電子生成用ヘリカルアンジュレータの高次高調波によって 20 MeV 以上のガンマ線渦が生成可能となり、原子核との相互作用の研究も可能になる。高精細な電子ビームと高強度レーザー光との相互作用は、極端条件下での量子力学的現象を探求するための優れたテストベンチである。たとえば直径 $1\ \mu\text{m}$ に収束された高強度レーザーと GeV 電子との衝突では、電子はレーザー光子と散乱を起こす前からレーザーの電場によって $\sim 100\ \text{MeV}/c$ もの力積を受け、平面波からずれた状態で衝突を起こす。このように外場が巨視的な背景場として無視できない影響を及ぼす場合、それを古典論、量子論のいずれの形式で扱うべきかについては系統的な考察があまりなく、問題ごとに異なる発見的手法が用いられているケースが少なくない(例えば文献 13))。この問

題に関して非相対論的な多粒子系を例に、古典極限(プランク定数ゼロの極限)と巨視的極限(粒子数無限大の極限)の差異が論じられた。また多粒子系に介在する量子揺らぎの検証手段として、ILC の基盤技術である高精細な電子ビームを用いたレーザー逆コンプトン散乱の可能性が議論された。(早川・嶋)(世話人補足:文献 14, 15)に関連記事あります)

8. ま と め

本研究会では、これまで ILC にはなじみの薄かった分野から多くの研究者の参加を得ることができ、光子やミュオン、中性子、低速陽電子、核医学、放射化学の分野から様々な情報、アイデアを披露していただきました。産業利用や基礎物理、物性研究、そしてミュオンコライダーへの発展などができ、活発な議論で大いに盛り上がりました。この稿も皆さんの協力を得てまとめさせていただきました。急な依頼にもかかわらず対応いただき、感謝いたします。

IPAC 2018 での報告も視野に入れつつ、早々の次回開催を検討できればと思います。

参考文献

- 1) <http://wwwal.kuicr.kyoto-u.ac.jp/~iwashita/ilc/index.htmlx>
- 2) T. Hyodo, et al., J. Phys.: Conf. Ser. 791, 012003 (2017).
- 3) I. Mochizuki, et al., Phys. Chem. Chem. Phys. 18, 7085 (2016).
- 4) Y. Fukaya, et al., 2D Materials, 3, 035019 (2016).
- 5) Y. Nagashima, Phys. Rep. 545, 95 (2014).
- 6) K. Michishio, et al., Nature Commun. 7, 11060 (2016).
- 7) ATLAS Coll., Nature Phys. 13, 852 (2017).
- 8) J. Koga and T. Hayakawa, Phys. Rev. Lett. 118, 204801 (2017).
- 9) L. Allen, et al., Phys. Rev. A 45, 8185 (1992).
- 10) T. Taira, et al., Sci. Rep. 7, 5018 (2017).
- 11) S. Sasaki and I. McNulty, Phys. Rev. Lett. 100, 124801 (2008).
- 12) J. Bahrtdt, et al., Phys. Rev. Lett. 111, 034801 (2013).
- 13) I.F. Barna and S. Varró, Laser and Particle Beams 33, 299 (2015).
- 14) 佐々木茂美, 加速器 Vol. 11, No. 4, 221-229 (2014).
- 15) 加藤政博, 加速器 Vol. 14, No. 3, 104-112 (2017).