

話題

ILC の多角的活用の可能性

森川 祐^{*1}・山本 樹^{*2}・島田 美帆^{*1}・下村 浩一郎^{*2}・河村 成肇^{*2}・山崎 高幸^{*2}・
牧村 俊助^{*2}・野村 大輔^{*2}・川島 祥孝^{*3}・早川 岳人^{*4}・丸山 智幸^{*5}・三島 賢二^{*2}

Potential of Multilateral Utilization of ILC

Yu MORIKAWA^{*1}, Shigeru YAMAMOTO^{*2}, Miho SHIMADA^{*1}, Koichiro SHIMOMURA^{*2},
Naritoshi KAWAMURA^{*2}, Takayuki YAMAZAKI^{*2}, Shunsuke MAKIMURA^{*2}, Daisuke NOMURA^{*2},
Yoshitaka KAWASHIMA^{*3}, Takehito HAYAKAWA^{*4}, Tomoyuki MARUYAMA^{*5} and Kenji MISHIMA^{*2}

Abstract

ILC will be a unique facility when 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 usage of facility among the wide science fields. In order to reveal variety of ideas towards the diversified applications, workshop "ILC diversified application" was held twice. As results of workshop, we report potential of multilateral use of the ILC.

1. はじめに

2018年7月5日、6日の2日間、京都大学化学研究所の碧水舎にて「ILCの多角的活用を考える会II」が開催された(図1)。これは2017年11月に開催された第1回「ILCの多角的活用を考える会」に引き続き行われた研究会であり、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うるかブレインストーミングする会となっている。

研究会では多彩な分野からの参加者があり、光子やミュオン、中性子、陽電子、核医学からプラズマ利用加速など様々な情報、アイデアが披露された。基礎物理や物性研究、産業利用などの可能性も検討されるなど、活発な議論があった。

これまでの成果として、以下に本研究会で検討された「ILCの多角的利用の可能性」を報告する。

2. 極短周期アンジュレータによる短波長光の生成

山本 樹

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 開発者と放射光光源開発者の密接な協力が継続している。ここでは、近年の放射光科学の進歩に基づいて、ILC 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紹介する。

KEK・物質構造科学研究所(IMSS)・放射光科学研究施設(PF)では、極短周期アンジュレータの研究開発を推進している。ここで、「極短周期」とは通常型アンジュレータの周期長(数cm)の

*1 高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設 Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization

*2 高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所 Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization

*3 大阪大学核物理研究センター Research Center for Nuclear Physics, Osaka University

*4 量子科学技術研究開発機構 東海量子ビーム応用研究センター Tokai Quantum Beam Science Center, National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

*5 日本大学生物資源科学部 College of Bioresource Sciences, Nihon University

(Yu Morikawa E-mail: yu.morikawa@kek.jp)



図1 ILCの多角的活用を考える会II参加者の集合写真.

約1/10の周期長とする. 本研究では周期長4 mmを目標に設定し, 幅20 mm×厚さ2 mm×長さ100 mm (25周期) (または152 mm (38周期))の板状のNdFeB製磁性素材に, 周期的交番磁気回路を高精度・高強度で書き込む方式の開発を行った. 着磁後に対向させた一对の磁石板の間の隙間(磁石ギャップ)にアンジュレータ磁場を生成することができる. 現在1.6 mmの狭小ギャップに約3 kGの極短周期磁場(周期長4 mm)を生成することが可能になった. また, これらの素材長さを超える数百 mm長の長尺アンジュレータ磁場を生成するためには, 複数の磁石板を長手方向に接続する方法の開発が重要な課題になる. このための適切な接続方法の開発にも成功し, 非常に良好な長尺アンジュレータ磁場の生成が可能になった. 実測磁場に基づく評価は, このアンジュレータ磁場からの放射光が優れた輝度特性を持つことを示している.

上記の成果を利用することにより, ILC加速器から取り出し可能な電子ビームを用いて(ILC開発段階の比較的低エネルギーの電子ビームも含めて)非常に利用価値の高いX線および γ 線が得られる. 6 mmから2 mmの磁場周期長を用いることで, 3 GeV電子ビームを利用して15~40 keVの高輝度X線光子(1次光), および20 GeVビームによって1~3 MeVの γ 線(1次光)の生成が可能である. さらに, ILC実験に於いて不可欠な陽電子発生のために, 周期長10 mmの磁気回路を応用すればgap=4 mmにおいて円偏光磁場の発生を期待することができる. この場合, 現計画の終

端エネルギーに近い107 GeVの電子ビームを用いて, 10 MeVの円偏光放射を生成することができる. この時のピーク輝度の見積りは, 6×10^{28} photons/s/mm²/mrad²/0.1%bandwidthである(磁場強度3 kG, アンジュレータ長1 mの場合).

3. 陽電子源と放射光源の同時運転

島田美帆

CW超電導加速空洞を用いた陽電子源が実現できれば, まだ余力のある超電導空洞を放射光源として利用することもでき, 多角的な利用につながる. この提案は, 新しい陽電子源のデザイン, 放射光源との同時運転, という2つの提案を組み合わせたものである.

新しい陽電子源の提案として, CW超電導空洞を選んだ目的は, 陽電子生成のためのターゲットの熱負荷を軽減するためである. ベースラインの設計では, 150 GeV電子からアンジュレータで10 MeV以上のエネルギーの γ 線を生成し, それをターゲットに照射し陽電子を得る. 電子のエネルギーが高いため, 超電導空洞の運転コストを考慮すると, パルス長が1 msに制限される. そこで, バックアップとして, KEKB陽電子源と同様の電子駆動型も提案されている. これは電子エネルギーが数GeVと低いため, およそ60倍のパルス長で運転可能であり, 熱負荷を低減できると期待されている. このバックアップ案では常電導空洞を特殊なパルス構造で運転しており, マクロパルス長は長いものの, ミクロパルス長が短く, そ

の平均電流が高い。一方で、CW超電導空洞を使えば、マイクロパルスの構造をもたない均一なロングパルス運転が可能のため、さらに低い熱負荷が可能となる。また、オプティカルキャビティに放射光を蓄積し、逆コンプトン散乱によって γ 線を出すことも検討している。これが可能になれば、ロングパルスの γ 線光源によって、さらに熱負荷が低減できると期待される。

もう一つの提案は放射光源との同時運転であり、同じCW超電導空洞を利用する。ビーム繰り返し5 Hz・パルス長60 msの陽電子源の運転では140 msのブランクの時間があるため、それを有効利用するものである。このブランクはダンピングリングでエミッタンスを小さくするために必要であり、この間は陽電子を生成しない。そのため、ILCと放射光源はパルス切り替えを行うことによって、ほぼ独立に運転することが可能である。それらのパルスの間には数msをもうけ、その間にLLRFのfeedbackをすることにより、加速空洞内の加速電圧や位相をそれぞれのビームに最適化して運転することが可能である。高輝度の放射光源では、高いエネルギー安定度の電子ビームが要求されるが、この方法で陽電子ビームによるビームローディングの影響を受けずに済む。放射光源としては、X線領域の自由電子レーザー(XFEL)や多くのビームラインを設置可能なエネルギー回収型線形加速器(ERL)を検討しており、ERLでは最大 10^{23} phs./s/mm²/mrad²/0.1%b.w.の輝度を目指している。

4. ILCによるミュオン生成および利用

下村浩一郎, 河村成肇, 山崎高幸,
牧村俊助, 野村大輔, 川島祥孝

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、 $2.2\ \mu\text{s}$ と長寿命であるなど、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。また最近では、高エネルギー宇宙線ミュオンを用いた、火山・原子炉・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。そこでILCの多角的利用を考える際にミュオンの利用を考えることは重要なテーマとなりうる。

さてILCを利用したミュオン生成法には以下の2種類のものと考えられる。

4.1 45 GeV陽電子ビームの固定標的照射による正負ミュオン対生成

図2に示すように実験室系で45 GeV程度の陽電子ビームをCあるいはLiなどの固体標的に照射した場合、重心系ではミュオン対生成の閾値をわずかに超えた反応が起こり、正負ミュオンの相対的横運動量は小さく抑えることができる。すなわち、実験室系では23 GeV程度の正負ミュオンが前方に集中して発生することとなる。この反応をミュオンコライダーに利用しようという提案がM. Antonelli et al.により提案されている¹⁾。

まずは、この方式をILCに提供した場合ミュオンコライダーとしてどの程度のルミノシティが得られるかを、非常に簡単に評価してみた。

さて電子ビームの有効利用の観点から1バンチを1000回ほど利用したい。このため、固定標的はあまり厚くすることはできず2 mm程度が適切である。この条件下で、ミュオン対生成の効率は 2×10^{-8} 程度であり、ILCのバンチ構造(2820 bunches/train, 4 trains/s, 1 bunch 2×10^{10} positron)を考慮し、加速後のミュオンリングの半径を0.5 kmと仮定すると、正負ミュオンビームが最終的に10 nm程度まで絞り込むことが可能であれば、ルミノシティ 1×10^{29} [cm⁻²s⁻¹]程度と評価される。これは従来のミュオンコライダーで議論されている値より数桁小さいものであるが、ミュオンと電

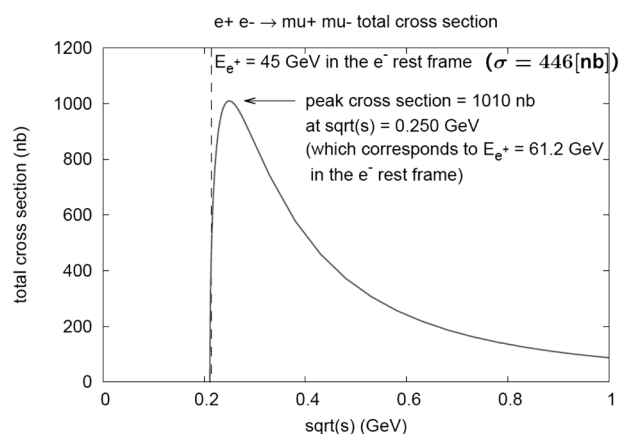


図2 ミュオン対生成断面積。

子ビームとの衝突実験等, 様々な可能性があるわけでもう少し追及する価値のあるテーマだと考えられる。

4.2 レーザーアンチコンプトン γ 線によるミュオン対生成

SPring-8等によく知られているように, 高エネルギー電子ビームにレーザー光を衝突させることで, 高エネルギー γ 線を指向性よく取り出すことが可能となる。この方式を利用して様々な粒子の対生成を行い, 研究に利用しようという案が川島氏らより SPring-8 の将来計画で提案されたとのことである²⁾。

そこで, ILC の場合についてミュオン対生成の収量を評価してみた。この際, ILC ダンプリング出口5 GeV 電子ビームを対象として考え, レーザーとしては100 J, 10 Hz, $\lambda=1 \mu\text{m}$ の水銀レーザーを考える。電子ビームとの衝突点におけるレーザー径100 μm と絞れたとすれば, γ 線のエネルギーは440 MeV 程度, また強度は 8.3×10^{14} photons/s となる。

この γ 線を10 mm 厚のベリウム標的に衝突させた場合 $1.7 \times 10^{11}/\text{s}$ のミュオン対が得られることとなる。なおそのエネルギーは100 MeV 程度である。この場合のレーザー波長, 強度等の様々なことを最適化する必要はあり, また電子ビームも必ずしも最適ではないかもしれないがこの強度は現在の世界最高強度の J-PARC ミュオン施設をおよそ1000 倍上回るものであり大変魅力的である。偏極ミュオンを生成させるためにパイオン対生成を経由する等, さらに詳細な検討を進めていきたい。

5. ラゲールガウシアン光とエルミートガウシアン光のコンプトン散乱

早川岳人, 丸山智幸

近年, 「光渦」という言葉が光学, 量子ビーム, ナノテクノロジー, 量子通信, 量子もつれなどの物理学の広い範囲に亘って話題になっている。光渦は, 軌道角運動量を持つ光と言われている。光渦は平面波ではなく, ビームに垂直面の電磁場がラゲールガウシアン陪関数やベッセル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。この時, 光渦の定義上, ビーム軸が存在し, 光の電磁場の強度が軸対称であるが, 軸の周りに電磁場

の同位相面が渦構造をもつため, 角運動量を運搬することが可能になる。Allen et al.³⁾ は, 光渦の電磁場が光ビームのマクロな電磁場を表すだけではなく, 光子の波動関数であることを提言し, さらに, 個々の光子が軌道角運動量を運ぶ可能性を示した。

エネルギーと運動量の同時固有状態である平面波の光の場合でも, 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。したがって, 1 より大きい軌道角運動量成分は含まれており, それを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, 軌道角運動量のビーム軸への射影成分の固有状態として現れるため, 最初から高い軌道角運動量成分を持つ光を取り出すことができる点が重要である。光子の波動関数としてみた場合, 同じエネルギーや運動量を持つ光子は, スピンの右巻き・左巻きの2つの状態を取りうるが, 光渦の光子は, 軌道角運動量の射影成分や, 波動関数上のノード数などの多数の量子状態を取ることが可能である。そのため, 量子通信や量子もつれなどの分野で大きな可能性を秘めている。さらに, ブラックホールの強い重力中で光渦が発生することが提唱された⁴⁾。また, 磁場等によって回転運動している電子の高次高調波が光渦になっていることが示され, 宇宙で普遍的に生成されている可能性があることが指摘された⁵⁾。

また数百 keV 以上の γ 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 spin・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る。具体的な例として, 軌道角運動量2を担う γ 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⁶⁾。また, 素粒子との相互作用でも角運動量保存則の影響を受ける。

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 γ 線渦を生成する手法が提案されている⁶⁾。また, ヘリカルアンジュレータの高次高調波によって光渦が生成されることが理論⁷⁾ および実験⁸⁾ によって既に示されている。ヘリカルアンジュレータによる数 MeV 以上のエネルギーの光渦生成には数十 GeV 以上の高

品質な電子ビームが必要である。特に、ILCにおける陽電子生成用ヘリカルアンジュレータは陽電子生成のために、MeV領域の γ 線を生成する予定であるが、一定量の高次高調波を含む。そのため、意図せず γ 線渦を生成するはずである。同様に、プラナーアンジュレータの高次高調波がエルミートガウシアン光であることを示されている⁷⁾。

γ 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、 γ 線渦生成の確認自体も重要な問題である。また、 γ 線渦を連続ビームとして作るのは難しく、1光子ずつ観測することになり、一光子波導関数としての性質を可視光領域以上に明らかにできる。これについては最近、 γ 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、 γ 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、光渦の光子としての量子力学的性質を検証することが可能になるかがわかってきた⁹⁾。また、エルミートガウシアン光子のコンプトン散乱においても、その量子状態を探索可能であることを示されている¹⁰⁾。

6. アンジュレータ光子による⁹⁹Mo製造の可能性

森川 祐

ILCの陽電子生成ビームラインではヘリカルアンジュレータにより得られた光子を陽電子標的に入射させ、対生成された陽電子を標的後段のキャプチャーセクションで回収し陽電子ビームとする。ILCのヘリカルアンジュレータから得られる光子は平均6.3 MeVものエネルギーを持ち、その強度は60 kWに及ぶ¹¹⁾。しかし、陽電子標的部分では2 kW程度しか消費されず、大半はビームライン下流に設置されるフォトンダンプにて吸収・冷却される。つまり、陽電子生成後のアンジュレータ光子はILCの運転を阻害せず利用できる。今回、アンジュレータ光子の利用方法として、放射性同位体製造の可能性について検証したので下記に示す。

¹¹⁾ ビームライン途中のマスク・コリメータで低エネルギー光子は遮蔽されるため、標的に到達する平均光子エネルギーは10 MeV、強度は50 kW。

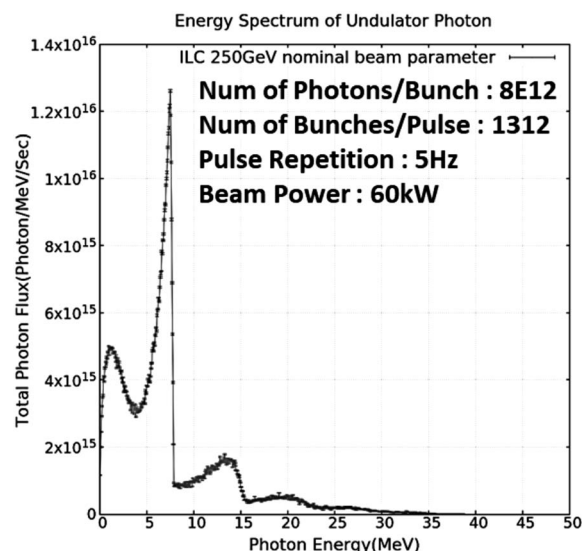


図3 アンジュレータ光子のエネルギースペクトル。

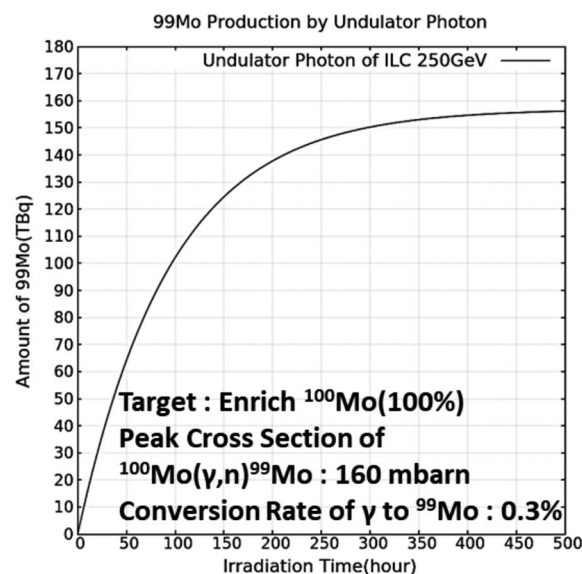


図4 アンジュレータ光子による⁹⁹Mo製造量。

今回の検証では放射性同位体の中でも⁹⁹Mo製造に標的を絞る。核医学検査で最も用いられる核種は^{99m}Tcであり、⁹⁹Moはその親核種である。日本はこの⁹⁹Moを全量輸入に頼っているため、以前から加速器を用いた⁹⁹Moの製造が期待されている。⁹⁹Moを加速器から製造する場合、主には中性子核反応や光核反応を利用する。光核反応による⁹⁹Mo製造では¹⁰⁰Mo(γ, n)⁹⁹Mo反応を利用することになるが、巨大共鳴効果により反応断面積がピークに達する14 MeV付近¹¹⁾の光子が必要になる。図3はアンジュレータ光子のエネルギースペクトルであり、アンジュレータ2次高調波由来

のピークがまさに14 MeVにある。図4はモンテカルロ計算 (FLUKA) による、ILC アンジュレータ光子を高濃縮¹⁰⁰Moに入射させた場合に製造される⁹⁹Moの評価量である。1週間のアンジュレータ光子照射により135 TBqの⁹⁹Mo製造量が見込まれる。この⁹⁹Moの分離・精製に2日かかると仮定すると約500 6day-Ci¹²/週の製造能力になり、日本の需要量1,000 6day-Ci/週¹²の半分程度の製造量が見込まれる。

次にアンジュレータ光子の照射に耐えるMo標的の実現性を検証したい。今回は初段の検証として熱的評価に集中する。まず基本設計としてILC陽電子標的の設計を模倣する。陽電子標的は放射冷却型の回転標的であり、光子入射による発熱密度を下げるために厚み7 mm、直径1mの回転ディスクを2000 rpmで回転させる。Mo標的も直径1mの回転ディスクを2000 rpmで回転させるとする。ただし発熱量を分散させるため、回転ディスクは厚み5 mmで複数枚導入することとする。この基本設計のもと、モンテカルロ計算 (FLUKA) や有限要素解析 (ANSYS) により発熱量・運転温度を評価した。発熱評価では2枚目の回転ディスクの発熱量が6.5 kWと最も大きく、このディスクの1光子パルスごとの最大発熱密度は15 J/gとなった。また、回転ディスクは表面酸化させたとして放射率を0.8と仮定すると、運転時の最高温度は610°C程度と見積もられた。この運転温度はMo融点2640°Cより十分に低い。またパルスごとに誘起される熱応力は150 MPa程度と見積もることができ、これも600°Cでの引張強度500 MPaを十分に下回っている。まだまだ検証すべき課題はあるが、現段階では実現可能性はあるように見える。

ILC アンジュレータ光子はILC運転を阻害することなく利用することが可能であり、放射性同位体製造能力は極めて高い。また検証課題はまだまだあるが、アンジュレータ光子を受けきれぬ標的の設計も現時点の検証では不可能ではないように見える。技術課題の詳細検証やコスト評価などは残るが、ILC アンジュレータ光子を利用しないのは勿体ないように見える。

¹² 6day-Ciは分離・精製施設を出荷してから6日後の放射能 (Ci) を指す。

7. 中性子発生

三島賢二

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。ILCの陽電子生成ビームラインではヘリカルアンジュレータから平均エネルギー10 MeV、強度50 kWのパルス化したγ線が得られる¹³。本稿ではこの大強度パルスγ線による光核分解反応中性子発生について可能性の検討を行う。

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⁹Be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 mb と小さいが、γ線のエネルギーが約2 MeVと小さくγ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 mb と大きいγ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。

ここではアンジュレータγ線と⁹Beを組み合わせたときの中性子発生量を計算する。γ線の仕様¹³の表1に、⁹Beの仕様を表2に示す。

1.7 MeVのγ線の⁹Be (1.85 g/cm³) 中での減衰長は12 cmである。1.7 MeVでの⁹Be (γ, n) ⁸Be反応断面積は1.5 mbであるので、単位γ線あたりの

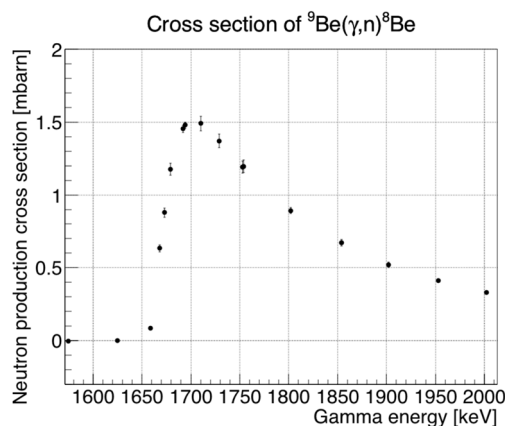


図5 ⁹Beの光核崩壊による中性子発生断面積¹⁴。エネルギー大きい値が1665 keV、ピークが1690 keVにありその反応断面積は1.5 mbarnである。この反応はγ線が単色であれば、単色の中性子が発生する。

表1 陽電子生成用 Undulator からの γ 線.

Parameter	Value
Repetition	5 Hz
Stored bunches	1312
Photons/bunch at 1.7 MeV	8×10^8 /keV
Bunch interval	552 ns

表2 ^9Be ターゲットと発生中性子.

Parameter	Value
$^9\text{Be}(\gamma, n)^8\text{Be}$ cross section at 1.7 MeV	1.5 mb
Photo attenuation length	12 cm
γ to n conversion rate	0.22%
Neutron production/bunch	1.4×10^6 /keV

中性子発生率は0.22%、発生する1バンチあたりの中性子は 1.4×10^6 /keVとなる。1秒あたりでは 9.2×10^9 /keV、全中性子発生数では 2×10^{12} /secが見込める。J-PARCでの発生中性子数が約 10^{17} /secであることを考えるとこの数字は決して大きいものではないが、発生する中性子は γ 線(電子線)と同程度の時間構造となるため、非常に短いパルス特性(\sim ps)を持つ。これは数十keVのエネルギーをもつショートパルス中性子となり、現存しない非常にユニークな中性子源となりえる。エネルギー25 keVの中性子の速さは 2.2×10^6 m/sである。バンチインターバル552 nsでは1.2 m飛行する。このパルス構造を使えば飛行時間法(TOF)によるkeV領域の吸収線ピークを使った同位体分析イメージングといった応用が考えられる。

8. ま と め

ILCが実現した場合、最大125 GeVの低エミッタンス電子/陽電子ビームが実現する。また陽電子生成用のアンジュレータ光子はMeV領域のエネルギーを持ち、光核反応を起こすことができるが、さらに γ 線渦もその成分に含んでいる。これらユニークなILCビームは本稿に示す活用法をはじめ、多くの可能性を秘めているものと思われる。

本研究会は、これまでにILCに馴染みの薄かった分野からも多くの研究者の参加があり、他分野

との交流の場としても機能している。今後も他分野との交流を継続するとともに、協調してILCの付加価値を高めていきたい。

すでに第3回となる本研究会がKEKつくばにて本年11月13日、14日に開催予定である。皆様とのさらなる議論を楽しみにしている。

最後になりましたが、本稿は皆様に協力いただき執筆していただいた。急な依頼にもかかわらず対応いただき感謝いたします。また、本稿に掲載できなかった報告も参考文献^{15, 16)}に公開しているので是非ご覧いただきたい。

参 考 文 献

- 1) M. Antonelli, M. Boscolo, R. Di Nardo and P. Raimondi: Nucl. Instrum. Meth. A **807**, 101 (2016).
- 2) Y. Kawashima: Private Communication
- 3) L. Allen, M. W. Beijersbergen, R. J. Spreeuw and J. P. Woerdman: Phys. Rev. A **45**, 8185 (1992).
- 4) F. Tamburini, B. Thidé, G. Molina-Terriza and G. Anzolin: Nat. Phys. **7**, 195 (2011).
- 5) M. Katoh, M. Fujimoto, H. Kawaguchi, K. Tsuchiya, K. Ohmi, T. Kaneyasu, Y. Taira, M. Hosaka, A. Mochihashi and Y. Takashima: Phys. Rev. Lett. **118**, 094801 (2017).
- 6) Y. Taira, T. Hayakawa and M. Katoh: Sci. Rep. **7**, 5018 (2017).
- 7) S. Sasaki and I. McNulty: Phys. Rev. Lett. **100**, 124801 (2008).
- 8) J. Bahrtdt, K. Holldack, P. Kuske, R. Müller, M. Scheer and P. Schmid: Phys. Rev. Lett. **111**, 034801 (2013).
- 9) T. Maruyama, T. Hayakawa and T. Kajino: arXiv: 1710.09369 [hep-ph]
- 10) T. Maruyama, T. Hayakawa and T. Kajino: arXiv: 1806.0127 [quant-ph]
- 11) H. Beil, R. Bergère, P. Carlos, A. Leprêtre, A. De Miniac and A. Veyssièrre: Nucl. Phys. A. **227**, 427 (1974).
- 12) [我が国のテクネチウム製剤の安定供給]に向けてのアクションプラン、モリブデン-99/テクネチウム-99mの安定供給のための官民検討会、平成23年7月7日。
- 13) K. Yokoya: ILC Positron Working Group meeting, <https://agenda.linearcollider.org/event/7654/>
- 14) C. W. Arnold, T. B. Clegg, C. Iliadis, H. J. Karwowski, G. C. Rich, J. R. Tompkins and C. R. Howell: Phys. Rev. C Nucl. Phys. **85**, 044605 (2012).
- 15) ILCの多角的活用を考える会, <http://wwwal.kuicr.kyoto-u.ac.jp/~iwashita/ilc/>
- 16) ILCの多角的活用を考える会 II, <http://conference-indico.kek.jp/indico/event/52/>