

Polarization Measurement of Short-Pulse Gamma Rays Produced through Inverse Compton Scattering of Circularly Polarized Laser Beams¹

東京都立大学 理学研究科 物理学専攻

福田 将史²

mfukuda@post.kek.jp

2004年8月11日

1. はじめに

現在、世界各地でエネルギーフロンティアの電子陽電子衝突型直線加速器を建設する計画があり、日本では global linear collider (GLC) が計画されている[1]。GLC では 1TeV の重心系エネルギーを想定しており、トップクォークの詳細な研究、ヒッグス粒子の精密測定、新しい粒子、新しい物理現象を発見することなどが期待されている。これらの研究において、偏極ビームの利用は深刻なバックグラウンドとなる W 粒子の生成を抑制することができ、より高精度の測定を可能とする。われわれのグループは、電子とともに陽電子も偏極させることが GLC の目指す研究に重要な役割を果たすことを指摘し、1996 年に偏極陽電子生成の新しい方法、逆コンプトン散乱を用いた偏極陽電子ビームの生成を提案した[2]。図 1 に示すように、この方法は二つのプロセスから成る。第一に円偏光レーザーと電子ビームを衝突させ、逆コンプトン散乱により偏極ガンマ線を生成する。第二に、この生成された偏極ガンマ線を薄いタングステン板に入射し、対生成により陽電子を生成する。このとき、生成されるガンマ線、および陽電子は高エネルギー領域で高い偏極度を持ち、この高エネルギー側だけを取り出してやれば、偏極陽電子ビームを得ることができる。

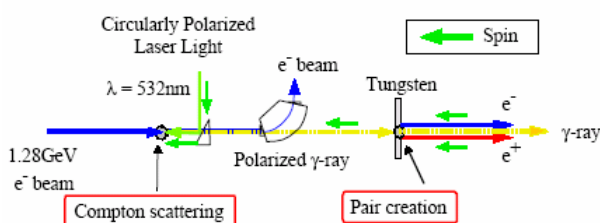


図 1 偏極陽電子生成の概念図

われわれはこの方法を用いて偏極陽電子を生成し、その偏極度測定を行うことを目的とした検証実験や、GLC のための偏極陽電子源の概念設計を進めてきた[3-6]。現在、われわれは高エネルギー加速器研究機構の試験加速器 (ATF : Accelerator Test Facility) [7] において、偏極陽電子生成と、その偏極度測定を最終目標とした検証実験を行っており、2002 年 3 月にその前段階の実験として、第一プロセスにあたる偏極ガンマ線生成と、その偏極度の測定を行った。この実験では、円偏光させた波長 532nm のレーザー光 (Nd:YAG レーザーの 2 倍高調波) とエネルギー 1.28GeV の電子ビームとの逆コンプトン散乱により、最高エネルギー 56MeV の偏極ガンマ線が生成される。図 2 にそのエネルギー分布を示す。高エネルギー側では左巻き (L) に高偏極しているのが分かる。また、生成されるガンマ線は高強度 ($1 \times 10^6 \gamma/\text{bunch}$) であり、かつ、そのパルス長は電子ビームと同じ 30ps と短パルスのガンマ線となっている。

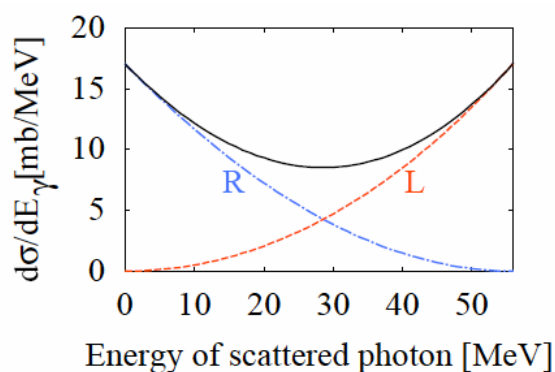


図 2 逆コンプトン散乱によって生成されたガンマ線のエネルギー分布

レーザーの円偏光が右巻き (R) の場合。

¹ 第 6 回 (2004 年度) 高エネルギー物理学奨励賞受賞論文の解説

² Present Address : 放射線医学総合研究所

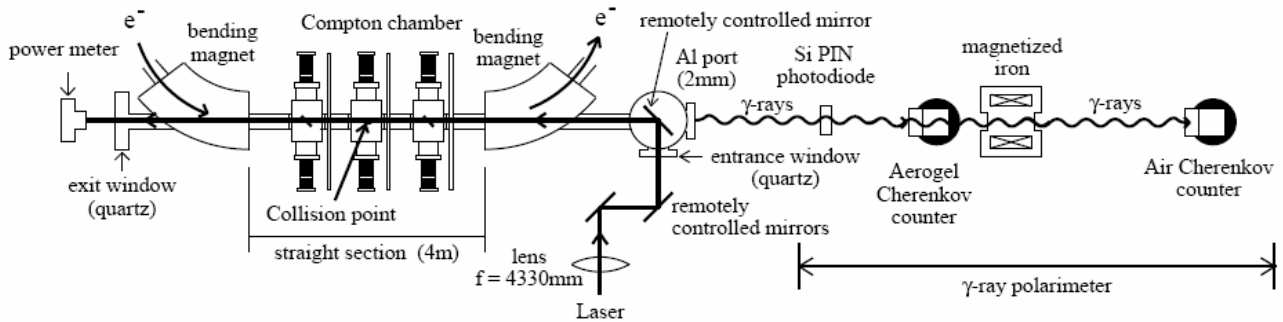


図3 実験装置の概略図

このように、非常に短い時間に大量のガンマ線が来るような場合、ターゲット物質に入射する個々のガンマ線を同定するような従来の同時測定法では、偏極度の測定は非常に困難である。そこでわれわれはガンマ線の時間構造に依存せずに偏極度の測定が可能な方法として、磁化鉄に対する透過率を測定する方法を採用し、初めて信頼ある偏極度測定に成功した。ここでは、偏極ガンマ線の生成とその偏極度測定について報告する。

2. 高強度偏極ガンマ線生成

われわれの実験は ATF において行われている。ATF は 1.28GeV の線形加速器とダンプリングからなり、ここでは高品質な電子ビームを作り出す研究と共に、その電子ビームを使って様々なビーム技術の研究・開発が行われている。われわれの実験装置は、電子ビームがダンプリングから取り出されるビームラインの途中に設置されている。図3が実験装置がある衝突点付近の概略図である。電子ビームとレーザービームの衝突点は偏向電磁石で挟まれた4mほどの直線部にあり、そこには両ビームを正面衝突させるためのビーム診断装置を組みこんだ3つのチェンバーから成るコンプトンチェンバーが設置されている。レーザービームは下流側の偏向磁石のところから電子ビームラインに送り込まれ、電子ビームと完全な正面衝突をした後、上流側の偏向磁石のところから取り出され、最後はパワーメータでダンプされる。このパワーメータで実験中のレーザー強度を常にモニタしている。逆コンプトン散乱により生成されたガンマ線は下流の偏向電磁石で電子ビームと分離され、その先の厚さ3mmの最終ミラーと厚さ2mmのアルミポートを貫いて大気中に取り出される。その後、さらに生成ガンマ線数を測定するためのSi PIN photodiode、エアロジェルチェレンコフカウンター、そしてガンマ線偏極度測定のための磁化鉄、空気チェレンコフカウンターを貫通する。発生したガンマ線は強い指向性を持ち、電子ビームの進行方向から1.5mradの範囲に全体の約90%のガンマ線(エネルギーは3.9MeV以上)が集中しており、生成された

ガンマ線のほとんどが検出器の有効感度領域に入っている。

衝突点にあるコンプトンチェンバーは3つのチェンバーから成っており、遠隔操作で様々な診断装置をビームラインに挿入し、電子ビームとレーザービーム双方の位置・サイズを測定することができる。中央のチェンバーには、電子ビームのサイズを測定するためのワイヤスキャナー、レーザーのビームサイズを測定するためのナイフエッジスキャナー、両ビームの位置を測定するためのスクリーンプロファイルモニターが一体化したものがマウントされており、これらはステッピングモーターでビームラインに出し入れできる。ワイヤー(タングステン $\phi 10\mu\text{m}$)とナイフエッジ(遮光板、SUS $500\mu\text{m}$)とスクリーンは、チェンバー内の全長10cmほどのマウントにコンパクトに取り付けられている(図4)。

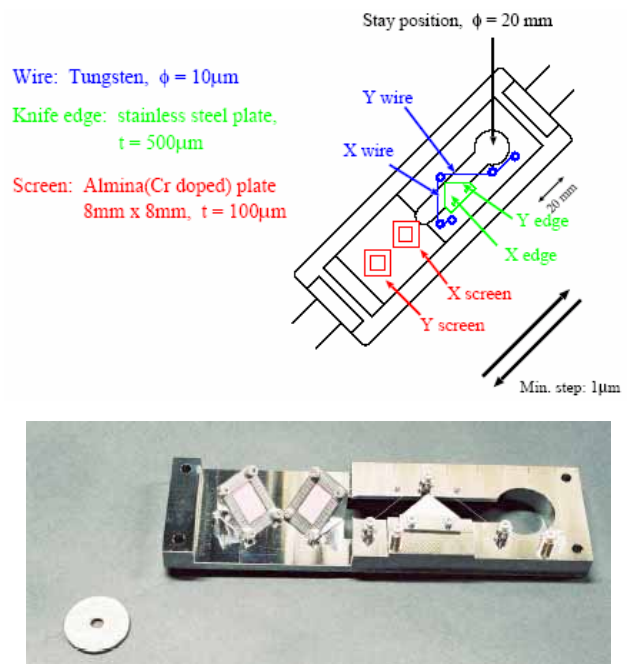


図4 中央のチェンバーのマウント部

タングステンワイヤー($\phi 10\mu\text{m}$)、ナイフエッジ(ステンレス遮光板 $500\mu\text{m}$ 厚)、スクリーン(酸化アルミナ薄板 $100\mu\text{m}$ 厚)がマウントされている。 $1\mu\text{m}$ ステップで動かすことができる。下はマウント部の写真である。

これはステッピングモーターによってビーム軌道に直角に軌道面から 45 度斜めに動く（最小ステップは $1\mu\text{m}$ ）。ワイヤーはこの軸に対して 45 度ずつ傾いた軸、つまりビームに対して水平・垂直の方向に張られている。ナイフエッジ（遮光板）スキャナーにも、やはり水平方向のエッジと垂直方向のエッジがある。枠には何も設置されていない素通しの部分があって、通常はこの穴が電子ビームとレーザービームの通り道になる。ワイヤースキャナーは、次のようにして、電子ビームのサイズを測定することができる。ワイヤーをビームラインに挿入し、ステッピングモーターで少しずつ動かしながら、ワイヤーが電子ビームを横切るようにする。軸に沿って斜めに駆動されると、水平に張られたワイヤーはビームを垂直に横切り、垂直に張られたワイヤーは水平に横切る。ワイヤーが電子ビームに当たるときに制動放射で放出されるガンマ線の量をビームラインの下流に設置したガンマ線検出器で測ることにより、電子ビームのサイズを測定することができる。ナイフエッジもこれと似たように、遮光板でレーザービームを少しずつ遮っていき、減少していく透過光量を位置の関数として測定する。レーザービームがガウス分布をしている場合、この光量の変化は誤差関数となる。このデータをフィットすることにより、レーザーのサイズが分かる。これに加えて Cr をドーピングした酸化アルミナ（商品名デマルケスト）の薄板スクリーンも同じマウントに固定されている。これは、電子ビームが当たるとスクリーンが発光する性質を利用し、それを CCD カメラで撮影することにより電子ビームのプロファイル、位置を測る。レーザービームについてもスクリーン上での散乱光を見ることにより、同じスクリーンで測ることができるので、レーザービームと電子ビームの位置を同時に見ることができる。さらに、両脇のチェンバーにもビームの位置を測定するためのスクリーンモニタが付いており、これらは圧縮空気によって動作する直線導入機によってビームライン上にスクリーンを挿入できるようになっている。また、3 つのチェンバーは 265mm の間隔で並んでいて、ビームライン上の 3 点で両方のビームの位置を見ることが出来るようになっており、遠隔操作可能な 3 枚のミラーによるレーザービームの平行移動や角度の調整によって、3 つのスクリーン上で両ビームの位置が一致するように合わせることで正確に両ビームを正面衝突させることが出来るようになっている。なお、スクリーン上の像にはスクリーンの厚みによる滲みがあり、これは位置の測定に影響はないが、サイズは実際のビームサイズよりずっと大きく見えるので、ビームサイズの正確な測定には使用していない。

この実験では、Continuum 社製の Nd:YAG Q スイッチレーザー（2 倍高調波、532nm、パルス長 FWHM 8ns）を使用している。レーザービームは誘電多層膜ミラーによ

って衝突点まで輸送される。途中、レーザー光は $\lambda/4$ 板によって、円偏光に変えられる。さらにビームエキスパンダーによりビームサイズは 3.8 倍に広げられ、その後レーザービームは、図 3 にあるように、下流側の偏向電磁石付近に設置されたレンズ ($f=4330\text{mm}$) によって集光される。その後、レーザー光は 2 枚組のミラーを通り、クオーツガラス製の窓から真空中に入り、そこで最終ミラーにより 90 度曲げられ電子ビームラインと同一軸上を反対方向に走り、電子ビームと正面衝突する。この構成は、生成されたガンマ線がクオーツガラスとレンズという厚い物質中を通るのを避けるために採用されている。それゆえ、ガンマ線が貫通する最終ミラーは、厚さ 3mm まで薄く削られている。衝突後、レーザー光は上流側の偏向電磁石のところから取り出される。また、2 枚組のミラーと最終ミラーの角度は遠隔操作で微調整できるようになっており、これによりレーザービームの位置を平行移動させたり、角度を変えたりして、電子ビームときちんと正面衝突するように調整することができるようになっている。

生成ガンマ線数を測定するガンマ線検出器として、Si PIN photodiode とエアロジェルチェレンコフカウンターが用いられた。Si photodiode は、有効感度領域が $28\text{mm} \times 28\text{mm}$ 、厚さ $300\mu\text{m}$ のものを使用している（図 5）。



Si photo-diode

Active area $28\text{mm} \times 28\text{mm}$

Thickness $300\mu\text{m}$

図 5 使用している Si PIN photodiode

Hamamatsu S3584-08 にチャージアンプ Hamamatsu H4083 を取り付けている。

エアロジェルチェレンコフカウンター（図 6）は、有効感度領域が $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ あり、その前面には、ガンマ線を荷電粒子に変換するための 3mm 厚のアルミ板が取り付けられており、約 3% のガンマ線が荷電粒子に変換される。頭部には、長さ 50mm のエアロジェル ($n=1.015$ 、エネルギー閾値 2.5MeV)が入っており、発生するチェレンコフ光は、ライトガイドで床面近くにある光電子増倍管に導かれる。この光電子増倍管は、加速器からのバックグラウンドを避けるために床面近くに設置され鉛シールドで覆われている。

衝突点では、効率よく衝突させてルミノシティを増大させるために、電子ビーム、レーザービームとも小さく絞っ

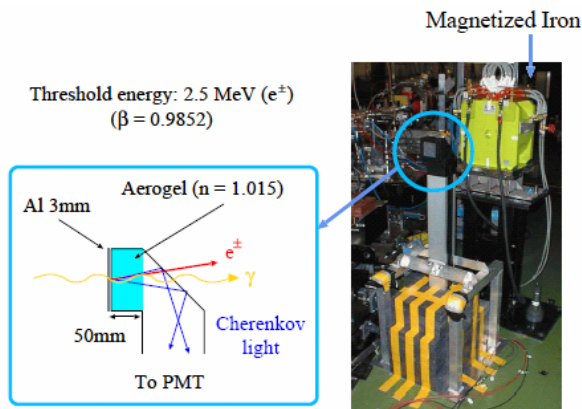


図6 エアロジェルチェレンコフカウンター

エアロジェルのビーム軸方向の厚さは50mm。その前には、ガンマ線を電子・陽電子に変換するためのアルミ板(3mm厚)が取り付けられている。また、このカウンターのすぐ後に磁化鉄が設置されている(右写真)。

て衝突させる。電子ビームのサイズは衝突点およびその前後約200mmの範囲で水平、垂直方向とも70~100 μ m程度に保たれている。一方レーザービームを絞るためのレンズは衝突点からかなり離れた位置に置かれており、レンズの焦点距離は4330mmと長くなっている。このことにより、レーザービームのサイズは衝突点およびその前後約10cmの範囲で水平、垂直方向とも約100~150 μ mに保たれている。一方ビームのパルス幅(rms)は、電子ビームでは30ps(長さ9mm)と大変短いのに対してレーザービームでは3.6ns(長さ1.1m)と長くなっている。これは長くて細い円柱状のレーザービームの中を、短い(水平・垂直にも小さい)電子のかたまりが突き抜けて行くように衝突が行われるということになる。このような構成にすることにより、電子ビームのパルス幅より遙かに長いパルス幅を持つパルスレーザーのビームを有効に生かすことができる。実際の実験ではパンチ(パルス)当たり 0.65×10^{10} 個の電子と、パルスエネルギー400mJのレーザーの衝突から、 $(1.1 \pm 0.2) \times 10^6$ 個のガンマ線を生産させることが出来た。またこの値は設計値と誤差の範囲で一致しており、各種の診断装置がうまく働いてビームが設計どおりの状態で衝突したことが分かる。

3. 短パルスガンマ線の偏極度測定

ガンマ線偏極度を測定するためには、ターゲット物質にガンマ線を入射して起こる反応のうち、コンプトン散乱のような偏極に依存する反応(図7)を利用することが必要となるが、この実験で生成されるような短パルスで高強度のガンマ線をターゲット物質に入射すると、物質中で大量の対生成やコンプトン散乱などの反応が同時に発生し、それらの個々の反応を同定することは非常に困難である。そ

こで、われわれはこのガンマ線を磁化鉄に入射し、透過率を測定するという方法を用いることにした。この方法は元々ミュー粒子崩壊からの電子・陽電子の偏極度をその制動放射によるガンマ線の偏極度の測定[8,9]と、 Eu^{152m} の電子捕獲反応で放出するニュートリノのヘリシティの測定[10]に利用された方法である。この方法は透過率さえ分かればよいので、出力がガンマ線数に比例する検出器を磁化鉄の後ろに置いてシグナルの高さを見ればよく、一個一個の反応を同定する必要がない。つまり、時間構造や強度に依らずガンマ線の偏極度が測定できるということであり、この実験で生成されるような高強度の短パルスガンマ線の偏極度測定にも応用が可能で、われわれの実験状況に適している。

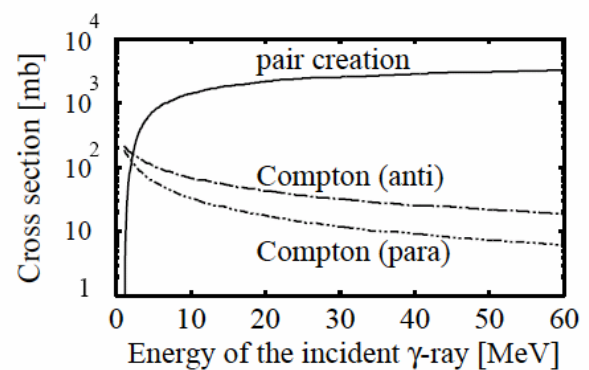


図7 鉄の中で起こる対生成とコンプトン散乱の全断面積

この方法は、コンプトン散乱の断面積が光子と電子の互いのスピンの向きが平行か反平行かで異なることを利用している。コンプトン散乱の断面積は、電子の静止系で見た入射光子のエネルギーが1MeVを超える辺りから大きな偏極依存性を示し始め、56MeVでは平行、反平行で約3倍も異なっている(図7)。鉄は、その原子の持つ26個の電子のうち3d軌道の2つの電子については磁場でそのスピンの向きを揃えてやることのできるため、鉄心をソレノイドコイルでガンマ線の進行軸方向に磁化させ、その方向が進行方向のときとその逆方向のときで、偏極ガンマ線の透過率を測定してやる。すると、その透過率に違いが見られ、この透過率 T の asymmetry $A = (T_+ - T_-) / (T_+ + T_-)$ からガンマ線の偏極度が分かる。

この方法を用いたガンマ線の偏極度測定装置の開発を、シミュレーションコード: GEANT3 を用いて行った。ただし GEANT3 には、スピン相互作用に関する計算は入っていないため、鉄の中でのコンプトン散乱において散乱確率が互いのスピンの向きに依存するように、コードの修正を行った。図3にあるように、偏極度測定装置は生成ガンマ線数の検出器、厚さ15cmの磁化鉄と空気チェレンコフカウンターから成る。偏極ガンマ線は磁化鉄に入射され、そこからの透過ガンマ線量を空気チェレンコフカウンターで測

定する。磁化鉄の厚さは次のようにして決めた。図 8 を見ると分かるように、鉄の厚さが増すと透過率 (T) は下がるが、逆に asymmetry (A) は上がる。一番効率よく (短い測定時間で) 偏極度を測定できるのは、 A^2T が最大となるときであり、そのときの磁化鉄の厚さは約 7cm である。

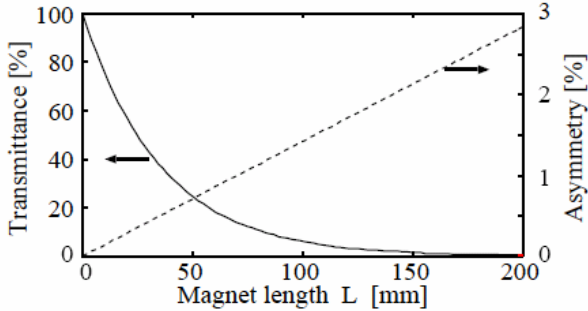


図 8 磁化鉄の厚さに対するガンマ線の透過率とその asymmetry

しかし、われわれは、より厚い 15cm を選んだ。今回の実験ではガンマ線の強度が高く、多少透過率は落ちて鉄を厚くすることで、測定が期待される asymmetry を大きくし、透過ガンマ線と同じタイミングで入り込む予測が困難なバックグラウンドによる誤差をなるべく小さくするためである。透過ガンマ線を測定するための空気チェレンコフカウンターは、磁化鉄から 4.4m 後方の離れたところに設置されている。この理由は以下の通りである。図 7 を見ても分かるように、鉄の内部では対生成やコンプトン散乱が起こり、測定したい透過ガンマ線以外にも、電子や陽電子、反応を起こした後のガンマ線なども磁化鉄の外に出てくる。これらは、鉄中で何も反応を起こさなかった透過ガンマ線よりもずっと大きな角度の広がりを持つので、検出器を磁化鉄から離すことにより、透過ガンマ線のみを検出できるようにするためである。このチェレンコフカウンターの空気は大気になっている。検出器の写真を図 9 に示す。構造はエアロジェルチェレンコフカウンターとほぼ同じであり、飛んで来たガンマ線は、前面に付いている 2mm 厚の鉛板で荷電粒子に変換される。空気チェレンコフカウンターを選んだ理由は、これがエネルギー閾値を持つ検出器であり、

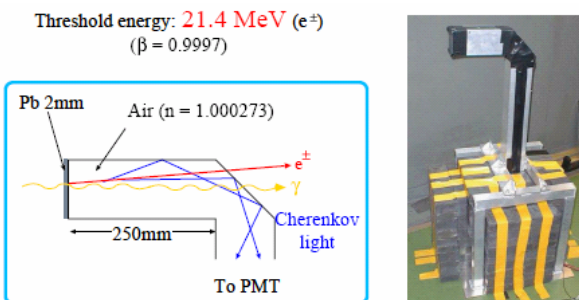


図 9 空気チェレンコフカウンター

頭部の空気部分の長さは 25cm。その前面にガンマ線を電子陽電子に変換するための 2mm 厚の鉛板が付いている。

生成されるガンマ線のうち高偏極している高エネルギー側の部分だけを測定するためである。

レーザー光の円偏光度が 100% である時に、この装置で測定される asymmetry をシミュレーションにより計算した結果、期待される asymmetry は 1.3% になった。また、空気チェレンコフカウンターはガンマ線を直接測定せずに一旦荷電粒子に変換して測定している。したがって、エネルギー閾値以上のガンマ線をすべて検出するわけではなく、ガンマ線のエネルギーに対して図 10 にあるような検出効率を持っている。この検出効率を考慮して、期待される asymmetry が 1.3% のときに、空気チェレンコフカウンターによって測定されたガンマ線の偏極度は 88% と計算された。

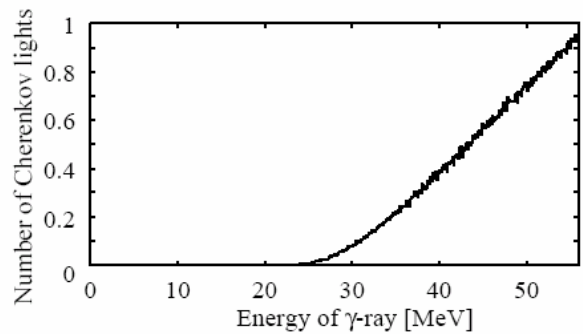


図 10 使用している空気チェレンコフカウンターのガンマ線のエネルギーに対する検出効率

このような偏極度測定装置を用いて、実際にガンマ線の偏極度測定が行われた。この実験では、表 1 にあるように、異なる 5 つのレーザー光の円偏光度の場合におけるガンマ線の偏極度測定が行われた。

表 1 偏極度測定の結果

円偏光度は衝突点でのもの。R(L) は、レーザーの円偏光度が右巻き(左巻き)であることを表している。

Run# (j)	円偏光度	Asymmetry
1	-79 ± 1%(L)	-0.93 ± 0.15%
2	-76 ± 1%(L)	-0.73 ± 0.13%
3	+24 ± 1%(R)	+0.29 ± 0.14%
4	+79 ± 1%(R)	+1.18 ± 0.15%
5	+94 ± 1%(R)	+1.50 ± 0.19%

まず、ガンマ線の進行軸方向に磁場をかけ、磁化鉄に対するガンマ線の透過率を約 10 分間測定する。次に鉄にかかる磁場の向きを反転させてさらに約 10 分間の測定を行う。これらの測定を 1 セットとし、合計 4 セット測定する。1 つの円偏光度につき約 8000 イベントのデータが取得され、その測定時間は約 80 分であった。この測定においては、電子ビームの繰り返し 3.12Hz に対して、レーザーの繰り返し

は半分の 1.56Hz とし、逆コンプトン散乱が起きるイベントと起きないイベントすなわちバックグラウンドイベントを交互に取得するようにした。測定結果を表 1 に示す。

また、図 11 はショット毎の透過率のヒストグラムである。これらのグラフから、ガンマ線と電子のスピンの平行のときのほうが、反平行のときより透過率が高くなっているのが分かる。さらに、図 12 は、横軸を衝突点での円偏光度、縦軸を測定された asymmetry にして、プロットしたものである。これを直線でフィットすることにより、その傾きから円偏光度が 100% ときの asymmetry が計算できる。実際にフィッティングから求められた結果は、 $1.29 \pm 0.12\%$ となり、期待された asymmetry 1.3% と非常によい一致を示した。これにより、円偏光レーザーと電子ビームとの逆コンプトン散乱から偏極ガンマ線が期待通り生成できることが確認できた。また、磁化鉄の透過率を測定する方法によって世界で初めて短パルスガンマ線の偏極測定方法を確認することができた。この結果は論文[11]に公表されている。

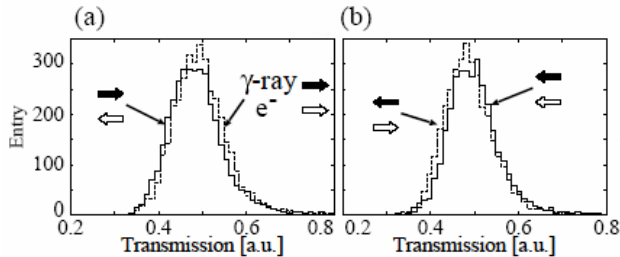


図 11 円偏光度が (a) -79% のとき、(b) +79% のときの、ショット毎の透過率のヒストグラム

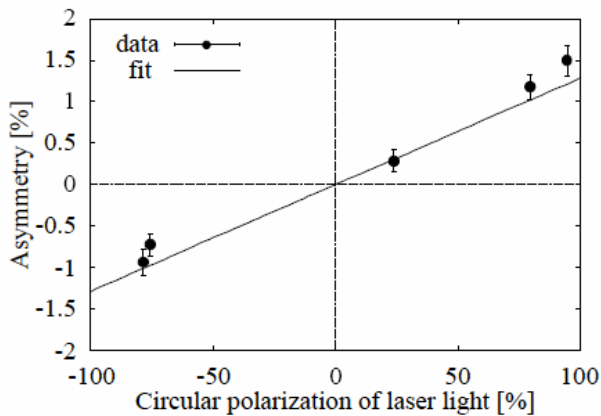


図 12 横軸を衝突点でのレーザーの円偏光度、縦軸を測定された asymmetry として結果をプロットしたグラフ

実線は直線 $y = ax$ (x は円偏光度、 y は asymmetry、 a は傾き) でフィットした結果。このときの reduced χ^2 は 0.89。

4. おわりに

われわれは、電子ビームとレーザー光の衝突により、逆コンプトン散乱を用いて短パルス偏極ガンマ線ビームを作り、その偏極度を測定する実験を行った。現在はパルス幅

30ps、最高エネルギー56MeV のガンマ線が得られており、その強度はパルス当たり $(1.1 \pm 0.2) \times 10^6 [\gamma/\text{bunch}]$ であった。また、この短パルスガンマ線の偏極度を測る手法を確立し、実際に生成したガンマ線の偏極度を測定することが出来た。この方法は一つ一つの反応を同定しないものなので、ガンマ線の強度や時間構造に依らずその偏極度の測定が可能という特徴がある。実際の偏極度測定の結果は円偏光度が 100% の時の期待される asymmetry 1.3% に対して、測定値から計算したその asymmetry は $1.29 \pm 0.12\%$ と、期待値とよい一致を示した。また、この方法は陽電子の偏極度測定にも適用できる。これは、生成した偏極陽電子ビームをターゲット物質に入射して制動放射により偏極ガンマ線に変換し、その偏極度を測定することで陽電子の偏極度を求めるという方法である。現在は、この検証実験の最終目標であるパルス偏極陽電子の生成実験を行っており、この方法を用いた偏極陽電子の偏極度測定の実験を行っている。

本研究は、都立大学、KEK、早稲田大学、成蹊大学の共同研究として進めてきました。本稿は研究グループの青木哲、飯村隆志、浦川順治、大森恒彦、奥木敏行、栗原良将、酒井いずみ、土橋克広、日暮愛子、広瀬立成、鷲尾方一の各氏と共同で行った研究の結果を基にしています。結果の利用を快諾してくれた研究グループの諸氏に感謝します。また KEK の ATF グループの協力に対して深く感謝します。

参考文献

- [1] K. Abe *et al.*, KEK Report 2003-7.
- [2] T. Okugi *et al.*, *Jap. J. Appl. Phys.* **35**, 3677 (1996).
- [3] T. Hirose *et al.*, *Nucl. Instr. and Meth.* **A455**, 15 (2000).
- [4] I. Sakai *et al.*, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **6**, 091001 (2003).
- [5] I. V. Pogorelsky *et al.*, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **3**, 090702 (2000).
- [6] T. Omori *et al.*, *Nucl. Instr. and Meth.* **A500**, 232 (2003).
- [7] K. Kubo *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **88**, 194801 (2002).
- [8] G. Culligan *et al.*, *Nature* **180**, 751 (1957).
- [9] P. C. Macq *et al.*, *Phys. Rev.* **112**, 2061 (1958).
- [10] M. Goldhaber *et al.*, *Phys. Rev.* **109**, 1015 (1958).
- [11] M. Fukuda *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 164801 (2003).