

論文の要旨

氏名 赤木 智哉

論文題目 Development of a 3D 4-mirror optical cavity for the ILC polarized positron source

(ILC 偏極陽電子源の為の 3次元 4 枚鏡光共振器の開発)

本研究では国際リニアコライダー (ILC) の偏極陽電子源開発のため、レーザー光と電子ビームの衝突 (レーザーコンプトン散乱) を利用したガンマ線生成実験を行った。ILC は全長約 30 km の線形加速器を建設し、電子と陽電子を非常に高いエネルギーで反応させる事により、素粒子物理学上の未発見現象の探求や、宇宙誕生の謎にせまる研究を行う計画である。電子・陽電子反応では、電子や陽電子のスピンの方向をそろえた偏極ビームを利用することによって、その測定精度を飛躍的に向上させることができる。ILC では初期段階から偏極電子ビームを利用するが、さらに陽電子ビームを偏極させることによって、その精度向上を目指している。

一般に偏極陽電子は偏極したガンマ線を標的に入射して、対生成により生成する。そのため、高強度の偏極ガンマ線の生成が鍵となる。レーザーコンプトン散乱は、レーザー光を加速器からの電子線に照射することによって、逆コンプトン散乱過程を通じてガンマ線を生成する方法である。この方法の利点はシンクロトロン放射に比べて格段に低いエネルギーの電子によってガンマ線を得ることができること、またレーザーの偏極を制御することによって容易に生成ガンマ線の偏極を制御できることである。ILC の基本計画では、エネルギー 150 GeV 以上の高エネルギー電子ビームラインにアンジュレータ (挿入光源) を設置してガンマ線を生成する。この方式は強度の高いガンマ線を生成しやすいが、150 GeV という高エネルギー電子ビームを必要とすること、偏極の制御が容易でないことなどの難点がある。レーザーコンプトン散乱による陽電子生成のために必要な電子のエネルギーは約 1 GeV であり、大型の加速器施設を必要としないため、その実現は実験計画にとって非常に有用である。その一方で、レーザー光と電子の散乱断面積が小さく、ILC の陽電子源として十分な強度のガンマ線を生成することが技術的に困難であり、その技術の開発が鍵となる。

本研究ではレーザーコンプトン散乱により生成されるガンマ線の強度を上げるために、光蓄積共振器を用いることに着目した。レーザー光を共振器に蓄積することによってレーザー光強度を増大させると同時に、レーザー光を集光する。そうすることで電子ビームとの衝突点においてレーザー光の密度を上昇させ、輝度の高いガンマ線を生成することが可能になる。これまでの研究で 2 枚の凹面鏡で構成された Fabry-Perot 型共振器にモードロックパルスレーザーからの光を蓄積し、電子ビームと衝突させてガンマ線を生成することに成功している。このとき共振器内におけるレーザー光強度の増大率は 760、ウエストサイズ $30 \mu\text{m}$ (σ) であった。レーザー光の密度を向上し、レーザーコンプトン散乱によって生成されるガンマ線数をさらに増やす

ためには、より高反射率の鏡を使用して共振器の蓄積強度増大率を上げる事、レーザー光のウエストサイズをより小さく絞り込む事が必要となる。しかし2枚の鏡を用いた Fabry-Perot 型共振器では、増大率の向上と集光性能の向上を同時に達成することが原理的に困難である。そこで本研究ではその2つを安定に達成することができる3次元4枚鏡共振器の開発を行った。

4枚鏡共振器は2枚鏡共振器に比べて鏡の横方向のずれの光路への影響が小さいという利点がある。しかし平面4枚鏡共振器では、レーザーの入射・反射が起こる面とそれに垂直な面における実効的な焦点距離が異なることに起因する非点収差がある。これを抑えるため、4枚の鏡を立体的に配置した3次元構成の共振器を設計した。その結果、非点収差の問題は解決することが可能となった。その一方、3次元4枚鏡共振器は3次元的に構成された光路をレーザー光が通過することによる円偏光状態の位相の変化や、レーザー光の形状が楕円になるという特性をもつ。円偏光状態の位相変化は、共振器が円偏光レーザーのみに共振するという結果をもたらす。したがって、直線偏光レーザーを入射しても、共振器中では右円偏光成分と左円偏光成分が分離しそれぞれ異なる共振器長で共鳴する。また、共振器内に蓄積されるレーザー光の形状も共振器の3次元的な構造、具体的には共振器中の光路のねじれ、に依存するため、これらの効果を考慮してレーザーコンプトン散乱の効率が最大となるように3次元4枚鏡共振器を設計した。

共振器は2枚の平面鏡と2枚の凹面鏡で構成され、凹面鏡間でレーザー光を集光し、電子ビームと衝突させる。レーザー光を入射する鏡の反射率は99.9%でその他3枚の鏡の反射率が99.99%である。共振器の性能はフィネス (F) というパラメータで表すことができる。フィネスは鏡の反射率によって定義され、フィネスが高いほど共振器の増大率は大きくなり共鳴幅が狭くなる。すなわちフィネスが高くなるほど、共振器の共鳴状態を維持するために要求される共振器長の制御精度は厳しくなる。3次元4枚鏡共振器のフィネスの実測値は $F=4000$ であった。これは共振器の周長(1680 mm)を 270 pm (FWHM) より十分小さな範囲で制御する必要があることを意味する。この時、フィネスとレーザー光入射鏡の透過率から推定される共振器の強度増大率は1200倍である。一方、非共鳴時と共鳴時における共振器の各鏡からの透過光強度と、入射鏡からの反射光強度を測定することで共振器内の蓄積強度を見積もることができる。この方法で得た共振器の強度増大率が1200倍であり、フィネスと透過率から得た値との一致をみた。

ガンマ線生成実験を行うため、製作した3次元4枚鏡共振器を KEK-ATF 加速器に設置した。ATF の電子ビームは、エネルギーが 1.28 GeV、バンチ間隔が 5.6 ns、1トレインあたり最大10バンチの運転が可能である。ガンマ線生成実験は1トレインあたり1バンチと5バンチの運転で行った。使用したレーザーは10 W のモードロックレーザーで、波長が 1064 nm、繰り返し周波数は 357 MHz である。レーザーと電子ビームの衝突角は14度であり、最大 28 MeV のガンマ線が生成される。ガンマ線検出器はレーザー光と電子の衝突点の 18 m 下流に設置されている。衝突点と、検出器の間にはコリメータが設置されており、検出器に到達するガンマ線の角度は電子線の軸から 0.26 mrad 以下に制限されている。それによって検出されるガンマ線のエネルギーは 19–28 MeV で平均 24 MeV となる。

実験では、共振器中に平均 2.6 kW のレーザー強度を安定に蓄積することに成功した。測定された蓄積強度の揺らぎは 1.5% であり、これは共振器長を 4 pm の精度で制

御できたことを意味している。レーザー光の衝突点における形状は、透過光の形状と共振器内におけるレーザー伝搬の計算から、楕円の長軸と短軸でそれぞれ $27\ \mu\text{m}$ (σ) と $10\ \mu\text{m}$ (σ) と見積られる。また、ガンマ線生成実験中にレーザーの位置を垂直方向に変化させた時のガンマ線量の位置依存性から、レーザー光の垂直方向の幅は $13\ \mu\text{m}$ (σ) と算出された。これは透過光形状からの見積もりと矛盾しない。生成したガンマ線数については、5 バンチ運転モードで 1 回の衝突あたり平均 124 ± 1 個のガンマ線を検出した。電子バンチはダンピングリングを $2.16\ \text{MHz}$ で周回しているため、これは 1 秒間あたりでは 2.7×10^8 個のガンマ線に相当する。実験で検出したガンマ線数はレーザー電子散乱シミュレーションプログラム (CAIN) による計算値と一致した。

ILC の陽電子源のためにはさらにガンマ線の生成効率を向上させる必要がある。レーザーコンプトン散乱による陽電子源として要求される共振器の増大率は 10^4 である。現状の 10 倍以上の向上が必要であるが、そのために共振器の鏡をさらに高反射率なものに替えてフィネス 30000 以上とすることを計画している。本研究で達成した共振器長の制御精度 $4\ \text{pm}$ は、目標とするフィネスが制御制度の観点からは可能であることを示している。一方、実験中に鏡上の熱損失による鏡の変形に起因すると考えられる蓄積強度の低下がみられた。より高い強度の蓄積のためには、超低損失の鏡の利用などが不可欠となる。そのためには、個々の鏡の散乱吸収特性の測定と適切な選択、クリーンルームなどの光学環境とは異なる加速器環境下における精密工学部品の取り扱い方法の確率などが課題となる。

本研究では 3 次元 4 枚鏡共振器を用いてレーザーコンプトン散乱実験を行い、ガンマ線生成効率の向上を実証した。同時に、共振器制御技術の観点からの強度増大率向上の展望、鏡の熱変形の影響をみだし、今後の開発研究の方向性を明確にした。