

Gamma-rays generation experiment using the 3D 4-mirror optical cavity : Generation of multi-bunch gamma-rays

Tomoya Akagi*^{A)}, Masao Kuriki^{A)}, Tohru Takahashi^{A)}, Ryuta Tanaka^{A)}, Hitoshi Yoshitama^{A)}
Sakae Araki^{B)}, Junji Urakawa^{B)}, Tsunehiko Omori^{B)}, Toshiyuki Okugi^{B)}, Hiroataka Shimizu^{B)}
Nobuhiro Terunuma^{B)}, Yoshisato Funahashi^{B)}, Yosuke Honda^{B)}, Kazuyuki Sakaue^{C)}, Masakazu Washio^{C)}

^{A)}Graduate School of Advanced Science of Matter, Hiroshima University
Higashi-Hiroshima, Hiroshima, 739-8530

^{B)}High Energy Accelerator Research Organization
Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{C)}Research Institute for Science and Engineering, Waseda University
Shinjuku-ku, Tokyo, 180-8633

Abstract

We installed a 3D 4-mirror optical cavity to perform laser-Compton scattering experiment at the KEK-ATF. In the optical cavity, laser pulses are accumulated and focused at collision point for intense gamma-rays generation. The designed laser spot size of the optical cavity at focal point is $15\mu\text{m}(1\sigma)$ and the finesse is 4800. As a result of laser-Compton scattering with multi-bunch electron beam of the ATF, we detected $\sim 120\gamma$ per train.

3次元4枚鏡レーザー蓄積共振器を用いたガンマ線生成実験 -マルチバンチガンマ線生成-

1. はじめに

国際リニアコライダー (ILC) の偏極陽電子源開発として、レーザーコンプトン散乱によるガンマ線生成実験を行なっている。この方式の利点として対生成によって陽電子を生成するために必要な 10MeV 程度のガンマ線生成に要求される電子ビームのエネルギーが約 1GeV と既存の電子加速器で開発を行うことが出来る程度であるということ、生成されるガンマ線の偏極をレーザーの偏光によって容易に調整できることがある。レーザーコンプトン散乱による偏極陽電子生成の原理検証実験は既に行われている [2], [3]。

レーザーコンプトン方式による偏極陽電子生成の課題は ILC が要求する大強度陽電子ビーム生成のために必要な強度のガンマ線を生成することである。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増やすために、我々はレーザー蓄積共振器にレーザーパルスを蓄積し、レーザー強度を増幅すると同時に衝突点において集光し光子密度を上昇させるという方法を採用している。

我々は既に 2 枚鏡 Fabry-Perot 型共振器を用いたガンマ線の生成に成功している [1]。この時の 2 枚鏡共振器の性能は衝突点におけるレーザーのスポットサイズが $30\mu\text{m}(1\sigma)$ 、フィネス 1500 であった。さらにガンマ線生成効率を向上させるためには、高反射率な鏡を使用して増大率を上げることとレーザーのスポットサイズをより小さくすることが必要であるが、2 枚鏡 Fabry-Perot 型共振器では高い増大率と集光性能を同時に達成することが原理的に困難である。そこで我々は新たに 3 次元 4 枚鏡共振器の開発を行なった。

2. 4 枚鏡共振器

4 枚鏡共振器は平面鏡 2 枚と凹面鏡 2 枚で構成され凹面鏡間でレーザーパルスを集光し電子ビームと衝突させる。4 枚鏡共振器は 2 枚鏡共振器に比べて横方向の鏡のずれの光路への影響が小さく、そのため小さなレーザーサイズと高増大率という 2 つの要求を同時に満足させることができる。

2 枚鏡共振器でレーザーのウエストサイズを小さく絞る場合、共心型 ($\rho \sim L/2$) にする必要がある。ここで ρ は鏡の曲率半径、 L は共振器長である。この場合、共振条件は横方向の鏡のずれに非常に敏感であり、ウエストサイズを小さくしようとするほど共振器としては不安定になる。一方 4 枚鏡共振器の場合、共焦点型 ($\rho \sim L$) でウエストサイズを小さくすることができ、共振器として安定な状態を保ちながらレーザーのサイズを小さくすることが可能である。

しかし、4 枚鏡共振器ではレーザーの入射と反射が起こる面 (tangential) とそれに垂直な面 (sagittal) における実効的な焦点距離 (f_t, f_s) が異なるため非点収差がある。そのため 4 枚鏡共振器では原理的に共振器内でのレーザーの形状が楕円形となる。そこで非点収差の効果を抑えるために平面 4 枚鏡共振器を約 90 度捻った 3 次元 4 枚鏡共振器を設計した。共振器の実物を図 1 に示す。

2.1 偏光特性

3 次元 4 枚鏡共振器では内部を周回するレーザー光に幾何学的位相変化が生じ、その結果として、円偏光のみ蓄積が可能である。直線偏光のレーザーをこの共振器に入射した場合、右回り左回り円偏光成分に自然に分離して共鳴する。我々は 4 枚鏡共振器の共鳴状態を維持するために、この円偏光を利用したフィードバック制御を行なっている [4]。この制御法の利点は共振器内に蓄積す

* tomoya-akagi@hiroshima-u.ac.jp

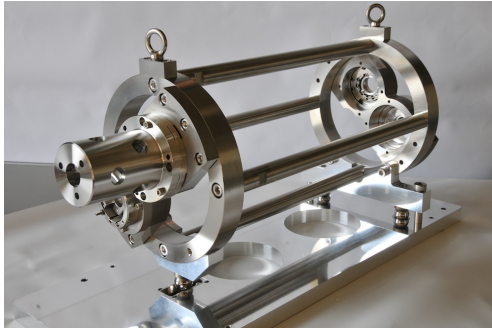


図 1: 3次元4枚鏡共振器

る円偏光を切り替えることで、生成されるガンマ線の偏極を高速に切り替えることが可能となることである。

2.2 集光特性

3次元4枚鏡共振器の集光特性は鏡の幾何学的配置に依存する。制作した4枚鏡共振器の構造は図2の通りである。この共振器では図に示す、鏡のひねり角を91.2度としている。これは、幾何学的位相を調整し、集光点において、レーザー光をできるだけ真円に近いプロファイルをもたせることによって、電子ビームとの衝突効率を上げるためである。

実験用に製作した共振器について衝突点におけるレーザーのスポットサイズを計算したものが図3である。この計算では鏡の曲率半径 ρ は420mmとしている。この計算結果が示すように凹面鏡の間隔を小さくしていくことでレーザーのスポットサイズを小さくすることができるが、曲率半径の値に非常に近くなると共振器が不安定になりレーザーを蓄積することができなくなり、それ以上スポットサイズを小さくすることができない。この4枚鏡共振器はレーザーの集光点で計算上ほぼ円形のプロファイルであり、スポットサイズ $15\mu\text{m}(1\sigma)$ となるように設計した。

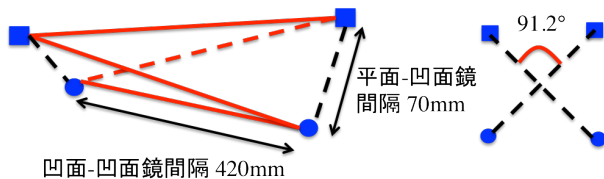


図 2: ガンマ線生成実験用3次元4枚鏡共振器の構造

2.3 フィネス

3次元4枚鏡共振器に使用している鏡の反射率とそれによって決まるフィネスについて述べる。レーザーを入射する平面鏡は反射率99.9%、透過率0.08%のものを使用しその他の3枚の鏡は反射率99.99%、透過率0.007%のものを使用している。これらの鏡の反射率から計算されるフィネスは4800となりこの共振器によるレーザー強度の増大率は1900と計算される。増大率とは共振器に入射したレーザー強度が共振器に蓄積されて何倍になるかという値である。フィネスに関しては測定によって 4000 ± 400 とほぼ計算値を満足していることを確認している。

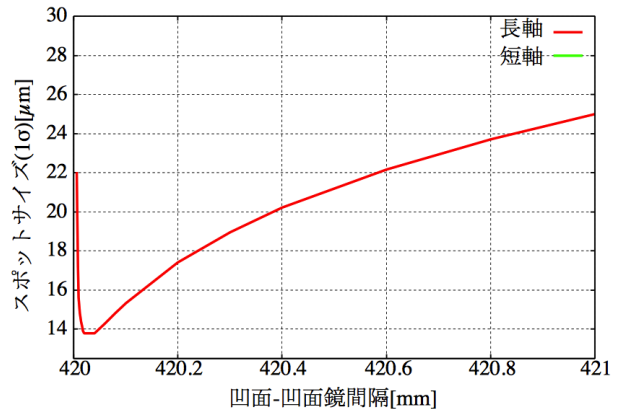


図 3: 衝突点におけるレーザーのスポットサイズ

3. ガンマ線生成実験

2011年の夏にKEKのATFダンピングリングの北直線部に、3次元4枚鏡共振器を設置した。レーザーと電子ビームの衝突角は 14° であり、これは生成されるガンマ線の最大エネルギー28MeVに対応する。この実験で検出されるガンマ線のエネルギーは衝突点と検出器の間にあるスリットによって19-28MeVに制限され、平均で24.5MeVである。ATF加速器のパラメータを表1に示す。

表 1: ATF 加速器の性能

ビームエネルギー	1.28 GeV
ビーム強度	1×10^{10} e/bunch
バンチ間隔	5.6 ns
ビームサイズ (σ_x / σ_y)	100 / 10 μm
バンチ長	25 ps
DRの周回	2.16 MHz

レーザー、光学系、共振器はすべて位置可変架台の上に置かれており、レーザーの位置を垂直と水平方向に動かすことで最適な電子ビームとの衝突位置を探ることが可能である。また、レーザーのタイミングについてもATFの周波数とレーザー周波数を位相同期させた上でスキャンし最適化する。レーザーに関するパラメータを表2に示す。

表 2: レーザーのパラメータ

波長	1064 nm
繰り返し周波数	357 MHz
レーザー強度	10 W (28 nJ/pulse)
パルス幅	5 ps
フィネス (設計値)	4800
共振器内のレーザー強度	2.6 kW
衝突角	14 deg.

本実験ではガンマ線検出器として2種類の結晶を使用している。一つは純CsIシンチレータでレーザーと電子ビームの位置合わせ及びタイミング合わせに使用する。もう一つはBaF2シンチレータでマルチバンチ電子

ビームとの衝突時にバンチ毎に生成されたガンマ線の信号を取得するために使用する。どちらのシンチレータも減衰時間の短い光と長い光があるため、減衰時間の短い光を透過する光学バンドパスフィルターを結晶と光電子増倍管の間に挿入して使用している。BaF2 の場合は波長 195nm で減衰時間 0.9ns の光を透過させるようにフィルターを選択した。

4. 結果

ATF 電子ビームとのレーザーコンプトン散乱によるガンマ線生成実験では電子 1 バンチと 5 バンチ運転の状況でガンマ線のデータを取得した。ここでは電子 5 バンチとの衝突時のデータを示す。

検出されたガンマ線数とレーザーの垂直方向の位置依存性を図 4 に示す。図 4 の信号の幅は $\sigma = 16\mu\text{m}$ である。これはレーザーと電子ビームの垂直方向のサイズを反映した値で、このとき電子ビームのサイズは $10 \pm 1\mu\text{m}$ より、レーザーの垂直方向サイズは $13\mu\text{m}$ と換算できる。このことからレーザーのスポットサイズに関しては共振器の設計から期待される通り小さく集光できていることが確認された。

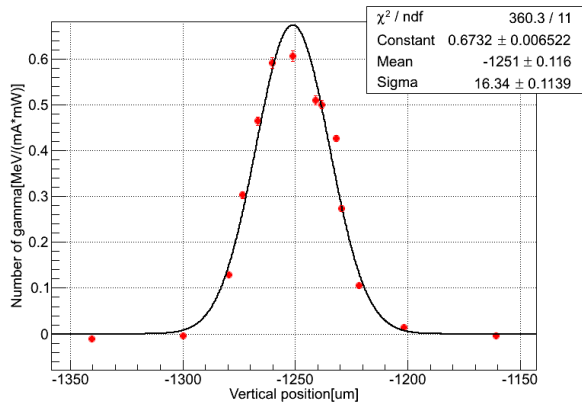


図 4: レーザーの垂直位置スキャン

図 5 は検出したガンマ線のエネルギー分布である。電子 5 バンチとの衝突で 1 トレインあたり検出されたガンマ線の合計エネルギーは $2970 \pm 20\text{MeV}$ である。1 γ の平均エネルギーは 24.5MeV なので 1 トレインあたり $\sim 120\gamma$ 検出したことになる。ATF ダンピングリングの周回は 2.16MHz より、 $\sim 2.6 \times 10^8$ 個のガンマ線に相当する。

図 6 は BaF2 シンチレータで取得したガンマ線の波形データである。図は電子ビーム 1000 周分の信号を平均化している。各バンチ毎にガンマ線が生成されていることがはっきり確認できる。

5. まとめ

レーザーコンプトン散乱によるガンマ線生成効率向上のために KEK の ATF 加速器に 3 次元 4 枚鏡共振器を設置しガンマ線生成実験を行い、電子 5 バンチ運転で 1 トレインあたり $\sim 120\gamma$ を検出した。

レーザーの衝突点におけるスポットサイズは設計値を達成し垂直方向で $13\mu\text{m}(1\sigma)$ を達成している。

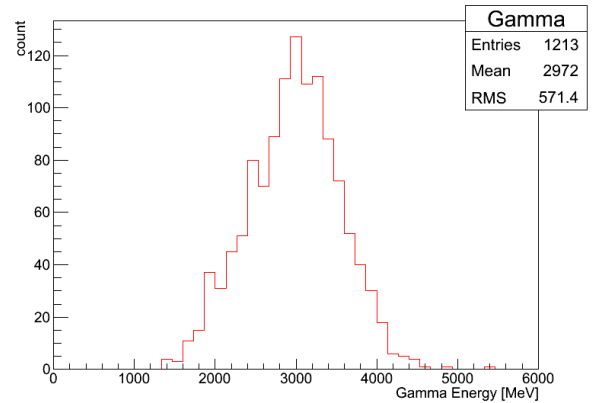


図 5: 電子 5 バンチとの衝突時のガンマ線エネルギー分布

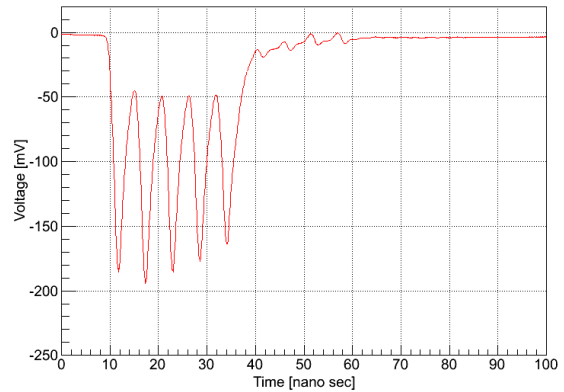


図 6: 電子 5 バンチとの衝突時のガンマ線信号

参考文献

- [1] S. Miyoshi et al., Nucl. Inst. Meth. A 623 (2010) 576.
- [2] M.Fukuda et al., Phys. Rev. Lett. 91, 164801(2003)
- [3] T.Omori et al., Phys. Rev. Lett. 96, 114801(2006)
- [4] Y. Honda et al., Opt. Commun. 282 (2009) 3108.