

Geant4 へのレーザー・コンプトン散乱ガンマ線源の実装 IMPLEMENTATION OF A LASER COMPTON SCATTERED GAMMA-RAY SOURCE IN Geant4

羽島良一*

Ryoichi Hajima*

National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST)

Abstract

Laser Compton scattered (LCS) gamma-ray sources have been utilized in broad range of applications from fundamental science to industrial applications. Precise simulations of LCS gamma-ray generation, transportation, interaction with matters and detection are necessary to pursue further advancement of LCS gamma-ray sources and their applications. For this purpose, we have implemented a LCS gamma-ray source to Geant4, a Monte Carlo simulation code. With this code, we can make consistent Monte Carlo simulations to cover the entire experimental setup: the generation of LCS gamma-ray photons, the nuclear reaction at the target, and the detection of the reactions by detectors.

1. はじめに

相対論的電子ビームによるレーザー光子の散乱、レーザー・コンプトン散乱 (Laser Compton Scattering; LCS) では、電子ビームエネルギー、レーザー波長を選ぶことで、keV の X 線から GeV のガンマ線まで発生が可能である。ビームライン上にコリメータを設置して下流に到達するガンマ線の散乱角を制限すれば、準単色のガンマ線が得られ、さらに、直線偏光、円偏光のレーザーを用いれば、直線偏光、円偏光のガンマ線の生成が可能という利点もある。電子加速器、レーザー技術の進展と歩調を合わせて、強度、輝度の大きな LCS ガンマ線源の開発が進んでいる [1,2]。

シンクロトロン放射で発生困難な 1 MeV 以上のエネルギー領域では、エネルギー可変、偏光、準単色の特長をもつ LCS の優位性が際立っており、原子核物理の分野を中心に幅広い利用がなされている。LCS ガンマ線を使った原子核実験では、ガンマ線ビームライン上に設置したコリメータによりエネルギーを切り出した後、ガンマ線を試料に照射し、試料から放出されるガンマ線、中性子を測定することで、試料中での原子核反応を調べることができる。特に、直線偏光したガンマ線と原子核の相互作用では、原子核の磁氣的、電氣的特性を反映して、非等方的にガンマ線、中性子を放出する反応が存在することが知られている。原子核共鳴蛍光散乱の測定から原子核のエネルギー準位のスピン、パリティを同定する実験がその代表である [3]。最近では、直線偏光ガンマ線の弾性散乱を用いて、量子電磁力学が予言する光子・光子散乱の検証実験が提案されている [4]。

これらの実験では、LCS ガンマ線のフラックス、スペクトル密度といった諸量が実験の成立性や精度を決定する。このため、LCS ガンマ線のフラックス、スペクトル密度が、電子ビームのエミッタンス、エネルギー広がり、衝突点でのエンベロープパラメー

タなどによってどのように影響されるか、理論的な研究が行われ、また、多くのシミュレーションで確認されてきた [5-8]。

一方で、実験を具体的に計画立案し、実施するにあたっては、LCS ガンマ線の特性に加えて、実験の要請に応じてコリメータのサイズと位置、検出器、試料、放射線遮蔽材などの配置を最適化しなければならない。これらの作業には放射線の輸送、物質との相互作用を計算するモンテカルロコードが用いられる。しかしながら、これまでの LCS ガンマ線発生シミュレーションコードは、放射線輸送のモンテカルロコードと一体になっておらず、使いづらい状況であった。

そこで、本研究では、Geant4 に LCS ガンマ線発生シミュレーションコード (クラス) を実装し、LCS ガンマ線の発生からコリメータによるエネルギースペクトルの整形、試料との核反応、検出器での信号取得までの一貫したシミュレーション環境の実現を目的とした。

Geant4 は、物質中における粒子の飛跡をシミュレーションできる汎用のモンテカルロコードであり、国際協力のもとオープンソースとして開発が続いている [9]。われわれは、これまでに、LCS ガンマ線を使った核種の非破壊測定技術開発の一環として、Geant4 への原子核共鳴蛍光散乱 (Nuclear Resonance Fluorescence; NRF) の実装を行った [10]。Geant4-NRF は、使用済核燃料集合体中に含まれる Pu 同位体の非破壊測定システム [11]、コンテナ貨物中に隠蔽された核物質の非破壊検知システム [12] の評価に用いられている。さらに、NRF の競合過程である弾性散乱を計算するためのモデルを Geant4 に実装し [13,14]、LCS ガンマ線の発生と利用の高度化に資するためのモンテカルロコードの整備を進めてきた。

本稿では、Geant4 の一次ビーム生成クラスとして、LCS ガンマ線源の実装を行った結果について報告する。実装したクラスを用いれば、入力マクロファイルで指定した電子ビーム、レーザービームのパラメータに基づいた LCS 光子を一次ビームとして生成し、LCS ビームライン、試料、測定器を含む実験体系において、LCS 光子から始まる一連の粒子と物質の相

* hajima.ryoichi@qst.go.jp

相互作用をシミュレーションすることができる。LCSガンマ線利用の実験計画、実験データの解析、また、今後開発される高輝度ガンマ線源の性能評価にも有用となる。

2. シミュレーションモデル

LCSで発生するガンマ線のエネルギー、運動量は、入射電子とレーザー光子のエネルギーと運動量が決まれば、Klein-Nishinaの式に従うコンプトン散乱の計算から求めることができる。電子、レーザーの運動量と位置に分布がある場合は、分布に従う多数の電子とレーザー光子を用意したうえで、電子ビームとレーザーパルスの時間的、空間的重なりを考慮しつつ、微分散乱断面積で与えられるコンプトン散乱の確率にしたがって散乱ガンマ線の生成を行えばよい。

Geant4では数百万以上の多数の一次粒子を生成し、一次粒子と物質の相互作用、カスケード的に繰り返される二次粒子の生成と輸送がモンテカルロシミュレーションの手法で計算される。したがって、シミュレーションの出発点である一次粒子生成に多くの計算リソースを費やすのは現実的でない。本研究では、LCSガンマ線の本質的特徴を失わない範囲で、なるべく簡便な計算でLCSガンマ線を生成する方法を採用する。具体的には、以下の前提条件をおいた。

- レーザーは電子ビームの軸上に入射される。
- 入射電子、レーザーともに3つの空間軸に対してそれぞれ2次元のGaussianで定義される位置と運動量分布をもつ。
- 電子の時間座標とエネルギーに相関がない。
- レーザーは単色である。
- レーザーは無偏光、または、直線偏光とする。
- レーザー強度は十分小さく、ポンデラモティブパラメータ、 $a \simeq 0$ と近似し、非線形コンプトン散乱は起こらない。
- 入射電子、レーザー光子は、2回以上の散乱をしない。
- 入射電子とレーザーパルスは、それぞれの中心が設計上の衝突点で一致し、時間、空間ジッターのない衝突を行う。

これらは、蓄積リングの電子ビームにレーザーを入射する場合に一般的に妥当な仮定である。以上の条件のもとで、次の手順に従ってLCSガンマ線の生成を行う。

1. 設計衝突点を挟んだ電子ビームの軌道上に点Aをランダムに選び、実際の衝突点とする。ただし、点Aを選ぶ範囲は電子とレーザーのパルス幅、それぞれのエンベロープで制限される。
2. 電子ビームのエンベロープから計算した点Aにおける電子の6次元位相空間の密度に従って、1個の電子をランダムサンプリングする。
3. 選んだ電子の位置における電子とレーザーの密度の積を計算し、密度積の最大値（設計衝突点で電子とレーザーの中心が一致する時）との比率を求め、この比率に従った棄却サンプリング

を行う。棄却されない場合は手順4.に進む。棄却された場合は手順1.に戻る。

4. 選んだ電子の位置における光子の運動量をレーザー分布に従ってランダムサンプリングする。
5. 選んだ電子、光子によるコンプトン散乱について、微分散乱断面積に従った棄却サンプリングを行い、散乱光子を生成する。
6. コリメータを模擬した散乱角の制限を与える場合は、散乱光子がコリメータ立体角より小さい場合のみ許容し、そうでない場合は棄却し手順1.に戻る。

これら一連の手順は、Geant4がサポートするマルチスレッド環境での計算実行に対応している。

コンプトン散乱のサンプリングでは、電子とレーザーのエネルギーと運動量を静止系にローレンツ変換した後、以下の微分散乱断面積を用いて計算を行う [5]。

$$\frac{d^2\sigma}{dE'_g d\phi'} = \frac{mc^2 r_e^2}{2E_p'^2} \left\{ [1 + P_t \cos(2\tau' - 2\phi')] \times \left[\left(\frac{mc^2}{E'_p} - \frac{mc^2}{E'_g} \right)^2 + 2 \left(\frac{mc^2}{E'_p} - \frac{mc^2}{E'_g} \right) \right] + \frac{E'_p}{E'_g} + \frac{E'_g}{E'_p} \right\} \quad (1)$$

ここで、 E'_g 、 E'_p は静止系での散乱光子、入射光子のエネルギー、 τ' は入射レーザーの偏光方位角、 ϕ' は散乱光子の方位角、 P_t は入射レーザーの偏光度である。

E'_g が決まれば、静止系における散乱角 (θ') は以下の式で与えられる。

$$\frac{1}{E'_g} = \frac{1}{E'_p} + \frac{1}{mc^2} (1 - \cos \theta') \quad (2)$$

3. 入射電子、レーザーパラメータの設定と計算例

3.1 NewSUBARUガンマ線ビームラインの例

入射電子とレーザーのパラメータは、Geant4のコマンドラインからの入力、または、マクロファイルから読み取ることとした。表1は、NewSUBARUのLCSガンマ線ビームライン [15]にてCO₂レーザーを用いた場合のLCSガンマ線を計算するためのマクロファイルの例である。コリメータの大きさはsolidangleとして指定する。

Table 1を入力パラメータとした時の計算結果を以下に示す。Figure 1はコリメータがない場合のLCSガンマ線の空間分布について、レーザーが無偏光の場合、直線偏光(x平面)の場合を示したものである。直線偏光の場合、偏光面と垂直な方向でLCSガンマ線の発生量が大きくなっているのは、コンプトン散乱の微分散面積を反映している。Figure 2は、コリメータ散乱角を0.1127 mradとした場合に、下流で

Table 1: Example of Geant4 Macro File for LCS Gamma-ray Generation

```

/lcsgs/ebeam/energy 974 MeV
/lcsgs/ebeam/espread 4e-4
/lcsgs/ebeam/emitx 7.6e-5 m
/lcsgs/ebeam/emity 7.6e-6 m
/lcsgs/ebeam/alphax 2.1
/lcsgs/ebeam/alphay 2.9
/lcsgs/ebeam/betax 3.4 m
/lcsgs/ebeam/betay 30 m
/lcsgs/ebeam/sigmaz 0.01 m
/lcsgs/laser/wavelength 10.6 micrometer
/lcsgs/laser/Zr 0.43 m
/lcsgs/laser/sigmaz 100 m
/lcsgs/laser/polphi 0
/lcsgs/laser/poldeg 1
/lcsgs/solidangle 1.127e-4
/lcsgs/position 0 0 0 cm
/lcsgs/zlim1 -1 m
/lcsgs/zlim2 0.52 m
/lcsgs/zcut 0.01
/lcsgs/list
    
```

観測されるガンマ線の散乱角とエネルギーをプロットしたものである。垂直方向には、LCS ガンマ線の特長である散乱角とエネルギーの相関が明確に見えているが、水平方向では散乱角とエネルギーの相関が見えない。これは、蓄積リングのエミッタンスが水平方向で大きな値を持つためである。

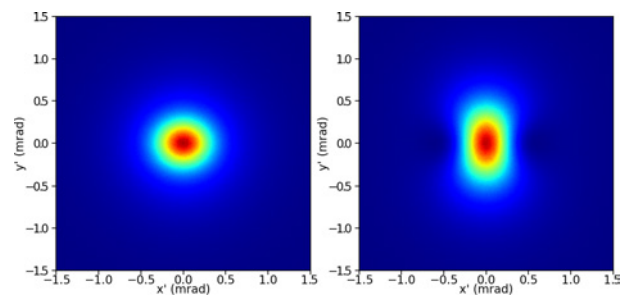


Figure 1: The simulated spatial distributions of LCS gamma-ray photons for the NewSUBARU beam line with unpolarized (left) and polarized lasers (right). The polarization is linear in the horizontal plane (x).

LCS ガンマ線を生成するのに必要な計算時間を測定し、Fig. 3 にプロットした。Table 1 のパラメータを入力とし、コリメータがない場合の例である。計算は、Xeon Gold 6152 を 2 基搭載したラックマウント計算機を使い、88 スレッド並列で実行した。 10^8 個の LCS ガンマ線を約 4 分で生成できており、LCS ガンマ線と物質の相互作用のモンテカルロ計算を実用的な速度で実施できることがわかる。なお、コリメータで散乱角度を制限する場合は、コリメータを

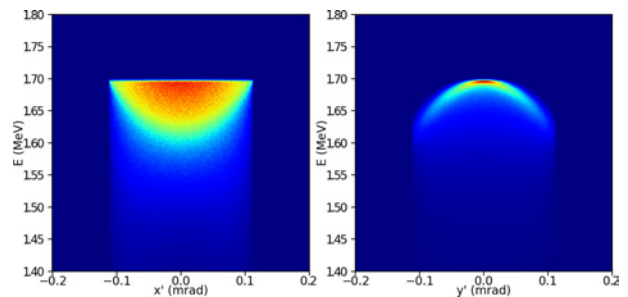


Figure 2: The simulated energy-angle correlations of LCS gamma-ray photons for the NewSUBARU beam line with an unpolarized laser. The correlation for the horizontal plane (left) and the vertical plane (right).

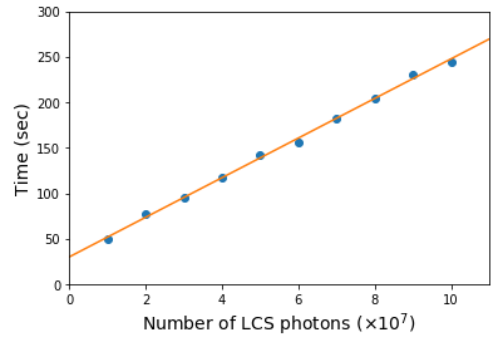


Figure 3: Calculation time for generating LCS gamma photons with a rack-mount computer (88-threads parallel).

小さくするほど棄却されるガンマ線が増えるので計算時間が長くなる。Table 1 のパラメータでコリメータの開口を 0.1127 mrad とした場合は、コンプトン散乱ガンマ線のうち 6.3% がコリメータを通過し、散乱角に含まれる LCS ガンマ線を 10^8 個生成するのに必要な計算時間は 40 分であった。

3.2 Geant4 と CAIN の比較

作成した Geant4 クラスの計算が正しいことを確認するため、CAIN [16] との比較を行った。CAIN は、高エネルギーの電子、陽子、光子の相互作用を計算するモンテカルロコードであり、コンプトン散乱を含む多くの物理現象を扱うことができる。これまでに開発された LCS ガンマ線の計算コードの多くが、CAIN との比較をベンチマークとしている [5,6]。

Table 2 にベンチマークに用いたパラメータを示す。電子、レーザーともに設計衝突点をウェストとするエンベロープとした。ここでは、一つのマクロ粒子が複数回の散乱をしないような条件を選び、 10^7 個のマクロ粒子から 643882 個のガンマ線光子を発生した。なお、CAIN はマルチスレッドに対応していないため、この計算に 49 分かかっている。

コリメータを変えた場合のガンマ線スペクトルについて、Geant4 と CAIN の計算結果を Fig.4 に示す。ここでは、コリメータがない場合、コリメータの開

口 (half opening-angle) が 1 mrad, 0.5 mrad, 0.3 mrad, 0.1 mrad, 0.05 mrad の場合を重ねてプロットしている。ガンマ線の発生数が Geant4 で 10^8 個、CAIN で 6.4×10^5 と 150 倍違うので、統計誤差の大きさが両者で異なっているが、この点を除けば両者のスペクトルは完全に一致しており、Geant4 の計算結果が妥当であることが確認できる。

Table 2: Parameters for the Benchmark Simulation

Electron Beam	
Energy	1 GeV
Normalized emittance (x)	10 mm-mrad
Normalized emittance (y)	0.1 mm-mrad
Energy spread (rms)	0.1%
β_x, β_y at the collision	1 m
α_x, α_y at the collision	0
Bunch length (rms)	1 ps
Laser Beam	
Wavelength	10 μm
Rayleigh length	1 m
Pulse length (rms)	1 ps

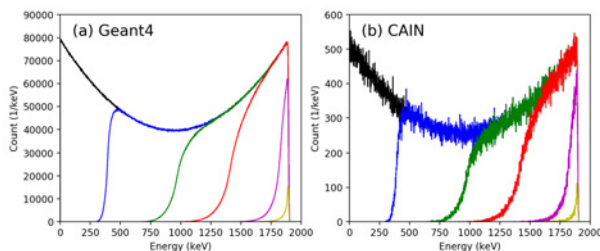


Figure 4: LCS gamma-ray energy spectra calculated by Geant4 and CAIN. Each plot contains 6 spectra corresponding to different collimator settings: no collimator, collimators with half-opening angles of 1 mrad, 0.5 mrad, 0.3 mrad, 0.1 mrad and 0.05 mrad.

4. まとめ

エネルギー可変、偏光、準単色の特長をもつレーザー・コンプトン散乱ガンマ線の発生と利用が拡大しつつある。本研究では、LCSガンマ線の発生からコリメータによるエネルギースペクトルの整形、試料との核反応、検出器での信号取得までの一貫したシミュレーション環境を実現するため、Geant4 に LCSガンマ線発生計算コード (クラス) を実装した。電子ビーム、レーザーのパラメータを入力とし、ガンマ線一次ビームを効率よく生成できることを確認し、計算結果が妥当であることを CAIN とのベンチ

マークによって示した。本成果は、LCSガンマ線利用の実験計画、データ解析だけでなく、今後の高輝度ガンマ線源の開発にも有用となる。

謝辞

本研究は日本学術振興会科学研究費助成事業基盤研究 (B) (課題番号: 17H02818) の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] G.A. Krafft and G. Priebe, Rev. Acc. Sci. and Tech., **3**, 147 (2010).
- [2] T. Akagi *et al.*, Phys. Rev. Acc. Beams, **19**, 114701 (2016).
- [3] T. Shizuma *et al.*, Phys. Rev. C, **100**, 014307 (2019).
- [4] J.K. Koga and T. Hayakawa, Phys. Rev. Lett., **118**, 204801 (2017).
- [5] C. Sun and Y.K. Wu, Phys. Rev. Acc. Beams, **14**, 044701 (2011).
- [6] C. Curatolo, I. Drebot, V. Petrillo and L. Serafini, Phys. Rev. Acc. Beams, **20**, 080701 (2017).
- [7] N. Ranjan *et al.*, Phys. Rev. Acc. and Beams, **21**, 030701 (2018).
- [8] G.A. Krafft *et al.*, Phys. Rev. Acc. Beams, **19**, 121302 (2016).
- [9] S. Agostinelli *et al.*, Nucl. Instr. Meth. **A506**, 250-303 (2003); J. Allison *et al.*, IEEE Trans. Nucl. Sci., **53**, 270-278 (2006).
- [10] N. Kikuzawa, R. Hajima, T. Hayakawa and E. Minehara, Proc. Eighth International Topical Meeting on Nuclear Applications and Utilization of Accelerators (AccApp' 07), pp.1017-1021 (2007).
- [11] T. Hayakawa *et al.*, Nucl. Instr. Meth., **A621**, 695-700 (2010).
- [12] H. Ohgaki *et al.*, IEEE Trans. Nucl. Sci., **64**, 1635-1640 (2017).
- [13] M. Omer and R. Hajima, Nucl. Instr. Meth. **B405**, 43-49 (2017).
- [14] M. Omer and R. Hajima, New J. Phys., **21**, 113006 (2019).
- [15] S. Amano *et al.*, Nucl. Instr. Meth. **A602**, 337-341 (2009).
- [16] P. Chen *et al.*, Nucl. Instr. Meth., **A355**, 107-110 (1995).