

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2006～2008

課題番号：18340076

研究課題名(和文) レーザーパルス蓄積空洞と電子蓄積リングを用いた
高効率偏極ガンマ線生成研究課題名(英文) Efficient generation of polarized gamma-rays by using
a pulse laser beam stacking cavity and an electron
storage ring.

研究代表者

大森 恒彦 (OMORI TSUNEHICO)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・講師

研究者番号：80185389

研究成果の概要：2枚の球面ミラーを使ったパルスレーザー光蓄積空洞を高エネルギー加速器研究機構の先端加速器試験装置(ATF)の電子ストレージリングに挿入しガンマ線の発生実験をおこなった。このレーザー蓄積空洞は入射レーザー光を蓄積し約250倍に増大させる性能を持つ。この実験では電子ストレージリング一周あたり約26個、1秒あたり 10^8 個のガンマ線を生成する事に成功した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
2007年度	6,200,000	1,860,000	8,060,000
2008年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
年度			
年度			
総計	14,700,000	4,410,000	19,110,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：加速器、コンプトン散乱、量子ビーム、レーザー・電子衝突、
国際ニアコライダー、International Linear Collider、ILC、偏極ビーム

1. 研究開始当初の背景

高強度の偏極ガンマ線ビームは物理学の多くの分野で有力な実験手段として期待されている。とくに素粒子物理学の分野で計画中的国際ニアコライダー ILC では、偏極ガンマ線から対生成により作り出した偏極陽電子をビームに使用する事で新現象の発見能力が大幅に向上する

[1]。また高強度の偏極ガンマ線は原子核の研究にも大きな役割を果たす。我々は ILC の為の偏極陽電子生成法として、円偏光レーザービームと電子ビームを衝突させコンプトン散乱により高強度の偏極ガンマ線を作る事を提案している[2]。高強度のガンマ線ビーム生成の為には、レーザーと電子ビームの衝突効率を上げることが必須である。我々

は本研究以前にもコンプトン散乱を用いて偏極ガンマ線／陽電子を作る研究を行ない、偏極ガンマ線／陽電子生成の実証をして来たが[3] [4] [5]、本研究ではそれを格段に進歩させてパルス蓄積型へと発展させ単位時間当りのガンマ線生成量を増大させることを目指した。

[1] The role of polarized positrons and electrons in revealing fundamental interactions at the Linear Collider,
G.Moortgat-Pick, T.Hirose(30番目), T.Omori(50番目) 他計76名, hep-ph/0507011, CERN-PH-TH/2005-036(2005)

[2] Conceptual Design of a Polarised Positron Source Based on Laser Compton Scattering,
S. Araki, Y. Kurihara(4番目), M. Kuriki(5番目), T. Omori(7番目), T. Hirose(24番目), T. Takahashi(31番目), H. Sato(32番目) 他計35名, physics/0509016, KEK Preprint 2005-60 (2005)

[3] Design of a polarized positron source for linear colliders,
T. Omori, T. Aoki, K. Dobashi, T. Hirose, Y. Kurihara, T. Okugi, I. Sakai, A. Tsunemi, J. Urakawa,
M. Washio, K. Yokoya, Nucl. Inst. Meth. **A500** 232-252 (2003).

[4] Polarimetry of Short-Pulse Gamma Rays Produced through Inverse Compton Scattering of Circularly Polarized Laser Beams,
M. Fukuda, T. Aoki, K. Dobashi, T. Hirose, T. Iimura, Y. Kurihara, T. Okugi, T. Omori, I. Sakai, J. Urakawa, and M. Washio,
Phys. Rev. Lett. **91**, 164801 (2003)

[5] Efficient propagation of the polarization from laser photons to positrons through Compton scattering and electron-positron pair creation,
T. Omori, M. Fukuda, T. Hirose, Y. Kurihara, R. Kuroda, M. Nomura, A. Ohashi, T. Okugi, K. Sakaue, T.Saito, J. Urakawa, M. Washio, I. Yamazaki,
Phys. Rev. Lett. **96**, 114801 (2006)

2. 研究の目的

パルスレーザービームを位相をそろえて光共振器空洞中に蓄積する事により、元の強度を何桁も上回る高強度のレーザーパルスを作る事ができる。この光共振蓄積空洞を数 GeV の電子蓄積リング中に設置する事により、効率の良いレーザー・電子衝突を実現し高強度の偏極ガンマ線を生成できる(図1)。本研究ではこの原理を使い、ILCの陽電子源に要求されるものに近い時間構造を有するガンマ線生成の実証実験を行う。

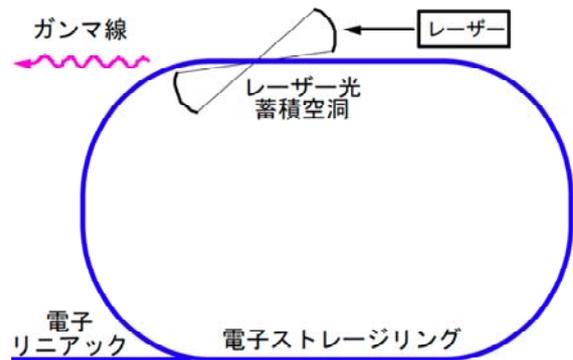


図1

3. 研究の方法

図2にレーザー蓄積空洞の原理を示す。一番上が CWレーザーの場合、下の2つがパルスレーザーの場合である。レーザー蓄積空洞はファブリ-ペロ型光共振器であり、向かい合わせに置かれた2枚のミラーによって構成されている。ミラー間にレーザービームを入射すれば二つのミラー間で反射を繰り返し、レーザー光は閉じ込められる。ミラー間の距離を精度良く制御して、全ての波の位相を揃えてやれば閉じ込められた光の振幅は何倍にも「増大」される。本申請のパルスレーザー光蓄積空洞は、CWでなくパルス化された光を入射して振幅を増大する装置である。位相の共鳴条件が満たされ、かつ蓄積空洞長

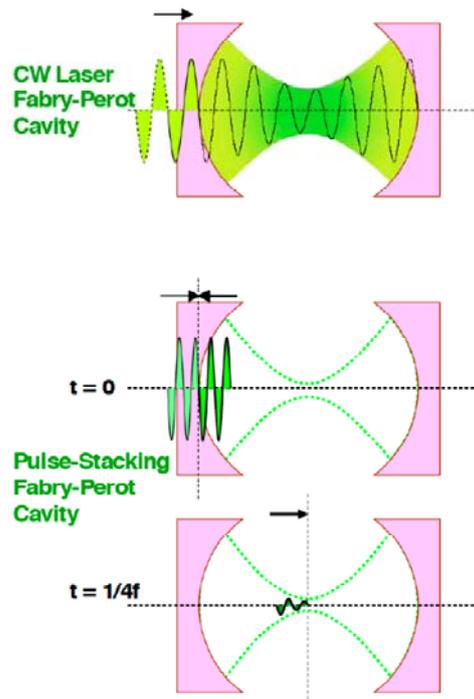


図2

($L_{\text{蓄積空洞}}$) とパルス間隔が一致 (整数倍) すれば、蓄積空洞中心において光の強度の増大が可能である。パルスレーザーとしてはモードロックレーザーを用いる。モードロックレーザーのパルス間隔は、その発信器の空洞長 ($L_{\text{レーザー}}$) で決まる。レーザー波長を λ とすれば、蓄積空洞が満たすべき、(a)位相の共鳴条件と(b)パルス間隔の条件は下記の式で示される。(n, m は適当な整数)

$$(a) L_{\text{蓄積空洞}} = n \lambda / 2$$

$$(b) L_{\text{蓄積空洞}} = m L_{\text{レーザー}}$$

(a) の条件は、CW レーザーを蓄積する場合とパルスレーザーを蓄積する場合の、いずれにおいても満たすべき条件である。(b) はパルスレーザー蓄積に特有の条件である。

この条件(a)(b)を満たす為に、蓄積空洞を構成するミラーはピエゾ素子によってその位置を精密にコントロールできるように設計する。位置決めのためのフィードバックは、空洞の前で反射光位相と透過光強度をモニターする事により行う。このフィードバック技術は、本研究以前にATF で数年にわたり行われてきたレーザーワイヤー・ビームプロファイルモニターの開発の成果により、基本的な部分は完成していた。しかしながら本研究では以下に述べるような理由から過去の技術蓄積を生かしつつ、さらにいっそう精度を向上させる事が必要であった。

ガンマ線発生量を増大させる為に、本研究では蓄積されたレーザービームと電子ビームを小角度 (10度程度) で衝突させる設計を採用した。光蓄積空洞を構成するミラーと電子ビームの干渉を避け、この小角度を実現する為に、レーザー蓄積空洞の長さは 420 mm と長くとした。長い蓄積空洞はそのままでは外部からの振動に対して弱い。蓄積によるレーザーパルス増強効果は数百倍から出来れば1000倍程度を目標にしたが、加速器室内という振動や電気ノイズのきびしい環境下で、この増大率を目指す事は大きな挑戦であった。

長い蓄積空洞を出来るだけ外部からの振動に強いように設計すること、レーザービームと電子ビームの小角度衝突を実現出来るようなミラーマウント部の設計、電子ビームの品質 (エミッタンス) を悪化させる事のないように光蓄積空洞とビームパイプを工夫する事、同じくビーム品質維持のための高真空の実現、そして長い蓄積空洞を精度良くフィードバックできる技術の開発などを目標とした。

4. 研究成果

研究は(1) レーザー光蓄積空洞の開発、(2) 2枚のミラーの間隔を正確に一定に保つためのフィードバックシステムの開発、(3) レーザー光蓄積空洞の電子ストレージリングへの組み込み、(4) 蓄積されたレーザー光と電子ビームを衝突させてのガンマ線生成実験、の4つの部分に分かれる。

(1) レーザー光蓄積空洞の開発



図3

図3に開発されたレーザー光蓄積空洞の写真を示す。2枚の鏡の間隔を正確に一定に保つために空洞本体は高い強度を持つステンレス製の円筒と肉厚のアルミ製の端板で構成される。円筒の側面に多数穴があいている理由は(3)で後述する。端板の内側にレーザー光を閉じ込める為の高反射率(99.6%)のミラーを取り付けられている。ミラーはその間隔を高精度で制御する為にピエゾ素子により位置決めされ、このピエゾ素子が後述するフィードバックシステムによりミラーを動かし2枚のミラーの間隔を正確に保つ。ピエゾ素子は写真左端の端板から突き出している小さな円筒の中に収まっている。なお反対側の端板も同様の構造を持つ。両端のミラーは凹面 (球面) 鏡であり、この空洞の中に蓄積されたレーザー光は空洞中央部で極めて小さく絞られており、その大きさは約30ミクロン (シグマ) である。

(2) 2枚のミラーの間隔を正確に一定に保つためのフィードバックシステムの開発

レーザー光が空洞中に蓄積される為には「3. 研究の方法」で前述した、(a)位相の共鳴条件と(b)パルス間隔の条件が満たされなければならない。

- (a) $L_{\text{蓄積空洞}} = n \lambda / 2$
- (b) $L_{\text{蓄積空洞}} = m L_{\text{レーザー}}$

さらに蓄積されたレーザー光が電子ビームと衝突する為には、(c) 電子ビームバンチの間隔と、レーザー光の往復が正確に一致する必要がある。

- (c) レーザー繰り返し = 電子加速 RF 周期

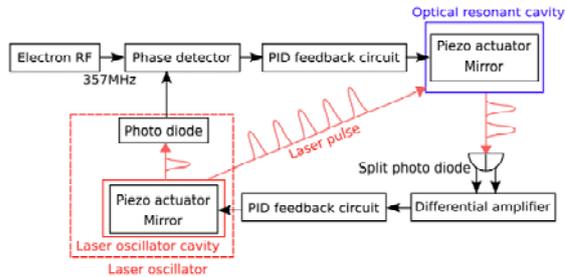


図4

この3つの条件を満足する為に図4で示すような、蓄積空洞、レーザー装置、加速器の3つを繋ぐフィードバックシステムを開発した。このシステムと前述した強固な空洞の構造により、2枚のミラーの間隔を 0.7 nm 程度の精度で一定に保持する事に成功し (a)(b) の条件を満たした。またこのシステムは同時に(c)の条件を満たし、蓄積空洞内のレーザー光パルスと電子ビームバンチの間のタイミングのズレを常に 5 ps 程度以下に保つことに成功した。

- (3) レーザー光蓄積空洞の電子ストレージリングへの組み込み



図5

図5 に電子ストレージリングへ組み込まれる前の装置の主要部の写真を示す。四角いものが真空容器、中に入っている円筒状のものがレーザー光蓄積空洞の本体である。全体を斜めに貫いているパイプは電子ビームの走るビームパイプである。真空容器の側面にある大きな丸穴に真

空ポンプが取り付けられ中を高真空にする。レーザー光蓄積空洞の円筒の側面に多数あけられた穴により、蓄積空洞内も高真空になる。ビームパイプの側面にはレーザーの光路にそってスリットが開けられ、レーザー光が通過できる様になっている。真空容器、蓄積空洞、ビームパイプは一続きの空間として高真空になる。一方、ビームパイプに開けられたスリットは十分に狭いので、ビームパイプ中を走る電子ビームからは、電気的にはビームパイプの外の複雑な構造は見えない。この事により電子蓄積リング中の電子ビームの品質（エミッタンス）の悪化を防ぎながら、レーザー光蓄積空洞を電子ストレージリングへ組み込む事に成功した。またレーザー光蓄積空洞のミラー固定部は強度を損なわない範囲で小型化され、電子ビームとレーザービームの交差角を12度と小さく保ち、効率の良い衝突の実現に貢献している。

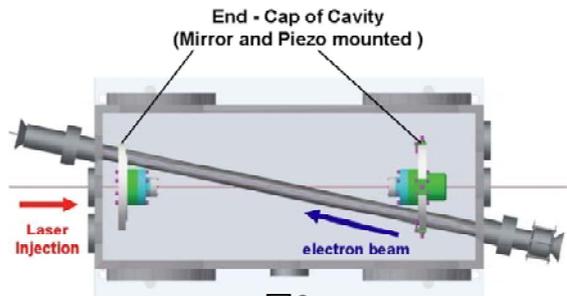


図6

図6 にレーザー光蓄積空洞、真空容器、ビームパイプの相互の関係を示す。ただし図6では相互の関係が分かるようにレーザー光蓄積空洞の円筒部は省略している。

- (4) 蓄積されたレーザー光と電子ビームを衝突させてのガンマ線生成実験

レーザー光蓄積空洞は高エネルギー加速器研究機構の先端加速器試験施設 ATF の 1.3 GeV 電子蓄積リングの直線部に挿入された (図7)。

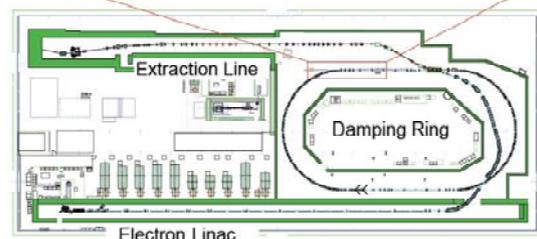
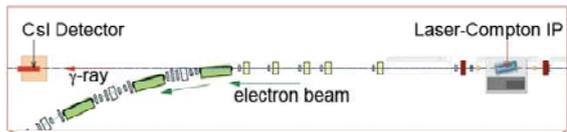


図7

レーザー光蓄積空洞は真空容器に納められ、レーザー装置と共に精密に可動する架台の上に設置された。この部分と電子リング本体の通常のビームパイプ部分はベローズで接続され、レーザー光蓄積空洞装置一式は上下左右に1ミクロンの精度で可動する。この可動架台によりレーザービームと電子ビームの位置決めを正確に行なった。両者のタイミングは図2のフィードバックシステムにより電子とレーザーの繰り返しの位相差を調整する事で一致させた。電子とレーザー光の衝突で発生したガンマ線は下流に設置された CsI 検出器で測定された。

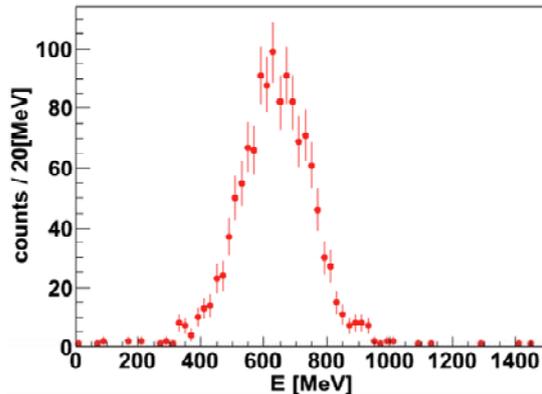


図8

図8に測定されたガンマ線のスペクトラムを示す。この時、電子ビームは15バンチモードによる運転(約11 mA)、レーザー蓄積洞内には約500 Wのレーザー光が蓄積されている。この状態でのガンマ線生成数は、レーザー光と電子ビームが一回交差する毎に(電子ストレージリング一周毎に)約26個、1秒当り 10^8 個を達成した。検出器に入るガンマ線の平均エネルギーは約24 MeVである。なお上述のガンマ線の個数は検出器に入ったものである。実際には検出器の置かれていない部分にもガンマ線は放出されており、ガンマ線生成の総数は上記の約2倍となる。蓄積空洞によるレーザー光の増大率は約250であった。我々の実験では一回交差毎に生成する平均26個のガンマ線が検出器にほぼ同時に入る。図8のスペクトラムはこの同時に入るガンマ線の合計エネルギーを測定したものである。電子ビームのサイズはレーザーとの衝突点で幅約100ミクロン x 高さ約10ミクロン(いずれもシグマ)であった。実験結果は予想値とほぼ一致し装置が設計通り働いている事が確認された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

① H. Shimizu, S. Araki, Y. Funahashi, Y. Honda, T. Okugi, T. Omori, N. Terunuma, J. Urakawa, M. Kuriki, S. Miyoshi, T. Takahashi, Y. Ushio, T. Hirose, K. Sakaue, M. Washio, G. Pei and X. Li Photon Generation by Laser-Compton Scattering Using an Optical Resonant Cavity at the KEK ATF Electron Ring

J. Phys. Soc. Jpn. 78 (2009) 074501

査読有り

② S. MIYOSHI, T. AKAGI, S. ARAKI, Y. FUNAHASHI, T. HIROSE, Y. HONDA, M. KURIKI, X. LI, T. OKUGI, T. OMORI, G. PEI, K. SAKAUE, H. SHIMIZU, T. TAKAHASHI, N. TERUNUMA, J. URAKAWA, Y. USHIO, M. WASHIO

Photon generation by laser-Compton scattering at the KEK-ATF

Nucl.Instrum.Meth. A, accepted, 掲載号未定、ページ未定、査読有り

[学会発表] (計9件)

① Shuhei Miyoshi, Tomoya Akagi, Yasuaki Ushio, Masao Kuriki, Tohru Takahashi, Sakae Araki, Junji Urakawa, Tsunehiko Omori, Toshiyuki Okugi, Hiroataka Shimizu, Nobuhiro Terunuma, Yoshisato Funahashi, Yosuke Honda, Kazuyuki Sakaue, Tachishige Hirose, Masakazu Washio, Guoxi Pei, XiaoPing Li

Gamma ray generation by laser-Compton scattering at the KEK-ATF. Technology and Instrumentation in Particle Physics 2009 (TIPP09), Mar.12-17, 2009, Tsukuba, Japan

② 赤木智哉, 荒木栄, 牛尾恭章, 浦川順治, 大森恒彦, 奥木敏行, 栗木雅夫, 坂上和之, 清水洋孝, 高橋徹, 照沼信浩, 広瀬立成, 舟橋義聖, Pei Guoxi, 本田洋介, 三好修平, Li XiaoPing, 鷺尾方一

KEK-ATFにおける ILC 偏極陽電子源の為のレーザー共振器を用いた高輝度ガンマ線生成実験 II

日本物理学会 第64回年次大会(2009年春)

③三好修平, 赤木智哉, 荒木栄, 牛尾恭章, 浦川順治, 大森恒彦, 奥木敏行, 栗木雅夫, 坂上和之, 清水洋孝, 高橋徹, 照沼信浩, 広瀬立成, 舟橋義聖, Pei Guoxi, 本田洋介, Li XiaoPing, 鷲尾方一
KEK-ATF における ILC 偏極陽電子源の為のレーザー共振器を用いた高輝度ガンマ線生成実験 I
日本物理学会 第 64 回年次大会(2009 年春)

④KEK-ATF における ILC 偏極陽電子源の為のレーザー蓄積空洞を用いた高輝度ガンマ線生成実験の概要

清水洋孝, 荒木栄, 牛尾恭章, 浦川順治, 大森恒彦, 奥木敏行, 栗木雅夫, 坂上和之, 高橋徹, 照沼信浩, 広瀬立成, 舟橋義聖, Pei Guoxi, 本田洋介, 三好修平, Li XiaoPing, 鷲尾方一
日本物理学会 2008 年秋季大会

⑤牛尾恭章, 荒木栄, 浦川順治, 大森恒彦, 奥木敏行, 栗木雅夫, 坂上和之, 清水洋孝, 高橋徹, 照沼信浩, 広瀬立成, 舟橋義聖, Pei Guoxi, 本田洋介, 三好修平, Li XiaoPing, 鷲尾方一
KEK-ATF における ILC 偏極陽電子源の為のレーザー蓄積空洞を用いた高輝度ガンマ線生成実験の現在までの結果と進展
日本物理学会 2008 年秋季大会

⑥李小平, 荒木栄, 浦川順治, 大森恒彦, 奥木敏行, 栗木雅夫, 坂上和之, 清水洋孝, 高橋徹, 照沼信浩, 広瀬立成, 舟橋義聖, 本田洋介, 裴国玺, 鷲尾方一
Inverse Compton Scattering Based Polarized Gamma-rays Generation Experiment for ILC Positron Source – Polarization-preserving of laser beam in Fabry-Perot Cavity
日本物理学会 第 63 回年次大会(2008 年春)

⑦荒木栄, 浦川順治, 大森恒彦, 奥木敏行, 栗木雅夫, 坂上和之, 清水洋孝, 高橋徹, 照沼信浩, 広瀬立成, 舟橋義聖, Pei Guoxi, 本田洋介, 三好修平, Li XiaoPing, 鷲尾方一
ILC 偏極陽電子源の為のレーザー蓄積空洞を用いた KEK-ATF における高輝度ガンマ線生成実験
日本物理学会 第 63 回年次大会(2008 年春)

⑧荒木栄, 浦川順治, 大森恒彦, 奥木敏行, 栗木雅夫, 坂上和之, 清水洋孝, 高橋徹, 照沼信浩, 広瀬立成, 舟橋義聖, 本田洋介, 李小平, 鷲尾方一
ILC 陽電子源の為のレーザー蓄積空洞を用いた ATF におけるガンマ線生成実験
日本物理学会 第 62 回年次大会(2007 年秋)

⑨荒木栄, 浦川順治, 大森恒彦, 奥木敏行, 栗木雅夫, 坂上和之, 清水洋孝, 高橋徹, 照沼信浩, 広瀬立成, 舟橋義聖, 本田洋介, 李小平, 鷲尾方一
ILC 計画に向けた偏極陽電子源の高強度ガンマ線生成のためのレーザー蓄積空洞開発実験
日本物理学会 2007 年春季大会

6. 研究組織

(1)研究代表者

大森 恒彦 (OMORI TSUNEHIKO)
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・講師
研究者番号: 80185389

(2)研究分担者

栗原 良将 (KURIHARA YOSHIMASA)
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・研究機関講師
研究者番号: 50195559

(3)連携研究者

高橋 徹 (TAKAHASHI TOHRU)
広島大学・大学院先端物質科学研究科・准教授
研究者番号: 50253050

栗木 雅夫 (KURIKI MASAO)
広島大学・大学院先端物質科学研究科・准教授
研究者番号: 80321537

清水 洋孝 (SHIMIZU HIROTAKA)
広島大学・大学院先端物質科学研究科・特別研究員
研究者番号: 10448251

広瀬 立成 (HIROSE TACHISHIGE)
早稲田大学・理工学研究所・教授
研究者番号: 70087162