

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H02136

研究課題名(和文)重イオンを用いた新奇光子ビーム生成機構の検証実験

研究課題名(英文) Experimental studies on generation mechanism of novel photon beams using heavy ions

研究代表者

上垣外 修一 (Kamigaito, Osamu)

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・部長

研究者番号：00260191

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では重イオン及びコヒーランスをキーワードとして、これらによりもたらされる新しい特徴を備えた光子ビーム(ガンマ線源)の生成法の開発を目的に研究を行った。具体的には、Baイオンを用い高輝度ガンマ線源の基礎実験を行った。この結果、共鳴散乱の断面積や幅等を測定し理論と概ね一致することを確認するとともに、今後の課題を明らかにした。また重イオンを用い、軌道角運動量を有するガンマ線源の生成方法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ガンマ線は原子核や素粒子物理学を始めとする基礎物理学の進展に貢献するだけでなく、非破壊検査やイメージングなど医療や産業面でも応用範囲が広く、それ故極めて重要な役割を果たしてきた。本研究は重イオン及びコヒーランスをキーワードとして、これらによってもたらされる新しい特徴を備えたガンマ線源生成法の開発を目的としている。実験面では、従来よりも数桁も輝度の高いガンマ線源を念頭にバリウムイオンを用いた開発実験を行い、今後の基礎となる成果を得た。また理論面では軌道角運動量を有するガンマ線源の生成法を新たに提案した。

研究成果の概要(英文)：研究成果の概要(英文)：This research was conducted with an aim to develop a method which generates photon beams (gamma-rays) with novel features rendered by heavy ions and/or quantum coherence. Actually, we carried out some basic studies with Ba ions as a first step toward a bright gamma-ray source. We confirmed that the measured resonant cross section and its width etc. basically agree with theoretical expectations, and pointed out several issues to be clarified in future. In addition to these experimental studies, we proposed new methods of generating gamma-rays with orbital angular momentum.

研究分野：加速器科学

キーワード：重イオンビーム コヒーランス シンクロトロン放射 レーザー 量子ビーム 原子・分子物理 加速器 実験核物理

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

(1) 高輝度ガンマ線源

ガンマ線は原子核・素粒子物理学を始めとする基礎物理学の進展に貢献するだけでなく、非破壊検査やイメージングなど医療や産業面でも応用範囲が広く、それ故極めて重要な役割を果たしてきた。ガンマ線を生み出すソースについては、古くは放射性同位元素 (例えば ^{60}Co など) が使われてきたが、現在ではこれに加え電子加速器を用いたガンマ線源が存在する。一般に加速器を用いるガンマ線源は、強度が大きい、エネルギーを自由に選べるなど放射性同位元素に比べ優れた特徴を有する。電子加速器を用いたガンマ線源では、超相対論的速度まで加速された電子に対し、進行方向とは逆方向からレーザーを照射し、電子進行方向に散乱される光をガンマ線源として用いる (逆コンプトンガンマ線源)。電子のローレンツ因子 (エネルギーを質量で割った比) を γ とすると、得られるガンマ線の最高エネルギーは入射レーザーのエネルギーに $4\gamma^2$ を掛けた値に増幅され、またビーム角度拡がり θ は $1/\gamma$ 程度に前方集中する。

最近になり電子の代わりに、一部に電子が残ったイオン (PSI, Partially Stripped Ion) を高速加速し、これに対しレーザーを照射する方法が提案された [1]-[2]。逆コンプトンガンマ線源と同じく、この方法においても照射レーザーエネルギーは $4\gamma^2$ 倍され、ビーム角度拡がり θ は $1/\gamma$ 程度になる。大きな違いはその散乱断面積にある。即ち、電子では電子の古典半径の二乗 (トムソン散乱断面積) が基礎になるのに対し、イオンではイオン半径の二乗が散乱断面積を支配し、これ故高輝度化が期待される。文献 [3] や CERN “Gamma Factory” 計画 [2] などでは毎秒 $10^{16} - 10^{17}$ の強度を持つガンマ線源の可能性が議論されている。

(2) 軌道角運動量を有するガンマ線

光 (あるいは光子) は平面波の場合、運動量とヘリシティにより特徴付けることができる。これと共に光子のもつ場を多重極に展開し、エネルギーと角運動量 (全角運動量 J_γ と量子軸への射影 M_γ) により識別することも可能である。もし $J_\gamma \geq 2$ ならば、光はスピン角運動量と共に軌道角運動量を有する。軌道角運動量を有する光は、等位相面がらせん状でありビーム軸中央に完全暗点を持つことから、しばしば “光渦” とも呼ばれる。1992 年に光渦がラゲール-ガウス光として実現できることが判明し、にわかに活発な領域に変貌した。光渦は基礎物理は勿論のこと、情報科学・イメージング・物質操作・天文学等、広範囲の応用が期待されている。一方、光渦の生成法についてもこの間研究が進んだ。可視光領域では、フォークホログラムや螺旋位相板など既に多数の技術が存在し、その利用も盛んである。また X 線領域では螺旋アンジュレータからの高調波や螺旋状にバンチした電子ビームからの輻射などが有望であり、実験的にも光渦の生成に成功している。ガンマ線光渦は実験的には未開拓の領域であるが、理論的には線形あるいは非線形の逆コンプトン散乱法により生成可能であることが指摘されている。

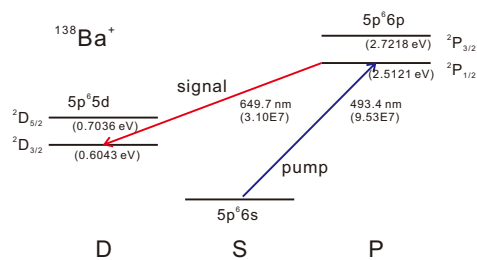


図 1: ^{138}Ba イオンのエネルギー準位. 実験では、 ^{138}Ba イオンに波長 493 nm のレーザーを照射して $^2P_{1/2}$ 状態に励起し、 $^2P_{1/2} \rightarrow ^2D_{3/2}$ 遷移により生まれる 650 nm の信号を測定した.

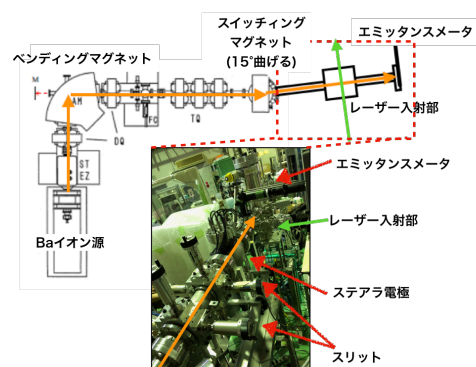


図 2: 実験装置概略図および写真.

2. 研究の目的

新しい加速器 (加速原理・エネルギー) や新しいビーム (生成機構・種類) は、常に新しい物理学を創造する起爆剤となってきた。本研究は重イオン及びコヒーランス (量子力学的重ね合わせ状態) をキーワードとして、これらによりもたらされる新しい特徴を備えた光子ビーム (ガンマ線源) の生成法を開発することを目的としている。よ

り具体的には、重イオンを使った高輝度ガンマ線源の基礎実験を行い、発展の可能性を探索する。また重イオンを用い、軌道角運動量を有するガンマ線源の生成方法を研究する。

3. 研究の方法

(1) 高輝度ガンマ線源の基礎実験

ガンマ線を得るためにはローレンツ因子が $\gamma > 1000$ を超えるような高エネルギー領域までイオン (PSI) を加速する必要がある。本研究においてはバリウム (Ba) イオンに対しレーザーを照射し、共鳴吸収あるいは散乱過程の性質 (効率やバックグラウンド等) を実験的に研究することとした。図 1 に Ba イオンのエネルギー準位を示す。実験では波長 493 nm のレーザーを照射してイオンを $^2P_{1/2}$ 状態に励起し、 $^2D_{3/2}$ 状態に脱励起するラマン散乱光 (波長 650 nm) を測定した。

(2) 軌道角運動量を有するガンマ線源

本研究は理論的研究である。第一の方法では水素様イオンに軌道角運動量を有するレーザー光を照射する [4]。また第二の方法では、ヘリウム様イオンに二本のレーザー光を照射する [5]。

4. 研究成果

(1) 高輝度ガンマ線源の実現に向けた基礎実験

① 実験装置

図 2 に実験装置の概略を示す。装置はイオンビームの生成部およびレーザーシステム/測定部に大別される。前者は Ba イオン源、質量分析用電磁石 (AM)、ビーム電流測定用ファラディカップ (FC)、ビームの収束整形のための一連のビーム光学要素 (四重極電磁石 (DQ,TQ) ・スイッチング電磁石 ・スリット対 ・ステアラ電極など) から成り立つ。また後者はレーザーシステム、検出用光電子増倍管、エミッタンス測定器で構成されている。以下では主要な装置についてより詳しく説明する。

[イオン源] 熱表面電離型と呼ばれるイオン源を用いた。これは、Ba 原子を高温に熱されたレニウムに吹き付けるとその表面でイオン化されるが、これを電場で引き出すことによりイオンビームを生成する。本実験における引き出し電圧は 3.5 kV である。

[レーザーシステム] 本研究では波長 493 nm と波長 650 nm のレーザーを自作した (実験では 493 nm のみ使用)。まず外部共振器型半導体レーザー (ECLD) を用いて 987 nm 生成し、Yb ドープファイバーを用いた増幅器によりこれを増幅する。その後、非線形光学結晶 (PPLN) により第 2 高調波である 493 nm を生成した。図 3 にレーザーシステムの外観写真を掲げる。

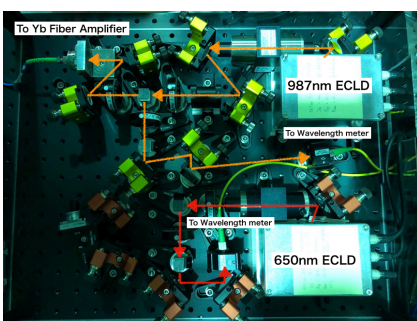


図 3: レーザーシステム写真

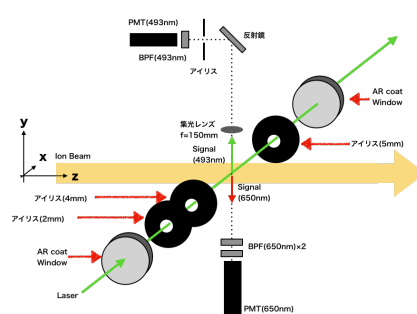


図 4: 検出装置概念図

[測定システム] 図 4 に示されるように、散乱光 (650 nm) の測定は光電子増倍管 (PMT) を用いて行われた。バックグラウンド光の影響あるいはドップラー効果の影響を軽減するため、PMT はイオンビームおよびレーザー光の両方に垂直な方向に配置されている。またバックグラウンド光削減のため、PMT の直前には検出する波長に対応した光学バンドパスフィルターを設置した。図 4 では上下に PMT が置かれているが、本報告では下に置かれた PMT のみ使用した。

[エミッタンス測定器] エミッタンス測定のため、ベッパポット・エミッタンスメータと呼ばれる測定器を開

発導入した。これは等間隔で小さな孔の空いた板(マスク)の下流に蛍光板を配置した装置である。これにイオンビームを照射すると、離散的に蛍光スポットが現れる。それら蛍光スポットを画像解析することにより、ビーム強度や角度拡がりやを再構築し、エミッタンス情報が得られた。蛍光板とマスクの間にマイクロチャンネルプレートを導入し、蛍光強度を調整可能とした。

② 実験結果

[ビーム強度及びエミッタンス] 使用したイオン源のビーム質量スペクトルを図5に示す。本報告書では、自然存在比が最も大きい質量数138の1価のBaイオンの結果を報告する。このとき0.5~1.0 μ A程度のイオン電流が得られる。次にエミッタンス測定器を用いてビームエミッタンスの測定を行った。図6に測定結果の例を示す。これからも分かるように、今回使用したイオン源ではビームが2つに分離していることが判明した。

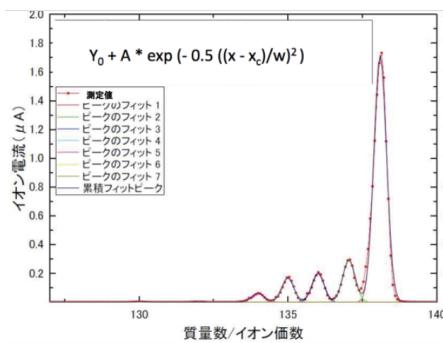


図5: イオン電流 vs Ba 同位体質量数。

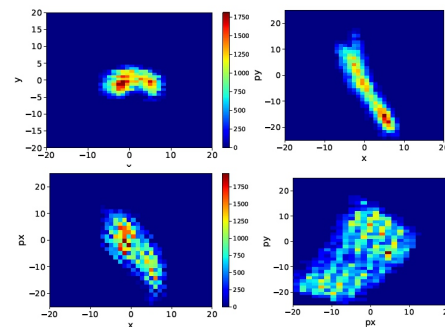


図6: エミッタンス測定例。 $x-y$ (左上)、 $x-x'$ (左下)、 $x-y'$ (右上)、 $x'-y'$ (右下)。単位は mm あるいは mrad。

図7に共鳴分光実験の結果例を示す。赤線はレーザー周波数の時間変化であり、共鳴点を中心にスキャンされていることを示している。また黒色は650 nmの遷移信号を測定するPMTカウント数の時間変化である。こうした共鳴信号を多数回測定し平均した。

[共鳴分光] 得られた共鳴曲線(中心値、幅や高さ)およびビームパラメータ測定値から共鳴に関する様々な物理量を引き出すことができる。紙幅の関係で詳細は割愛するが、共鳴中心値は予想とおりであるものの、高さや幅に予想値とやや食い違うことが確認された。なお共鳴曲線の形状はビームが二成分から成り立つ事実と関連している。概ね当初目指した成果が得られたものの、細かな齟齬についてはより精細なビーム調整やビームパラメータの測定が必要であるとの結論を得た。

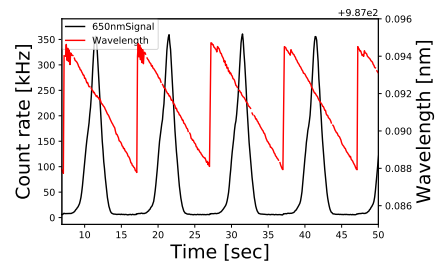


図7: レーザー波長(赤線)および信号光カウント数(黒線)の時間スペクトル。

(2) 軌道角運動量を有するガンマ線源

① 水素様イオンを用いた光渦ガンマ線の生成

本研究においては水素様イオン(例えば Pb^+)に軌道角運動量を有するレーザー光を照射するときの吸収断面積、及び励起されたイオンが多重極光子(特にE2遷移)を放出するときの確率を計算した。計算はいずれも相対論的量子力学に基づいて行われた。実際の光渦ガンマ線は加速器側のパラメータに大きく依存するが、十分に実用的な強度が得られることを確認した。但し軌道角運動量を持たない“通常光”もバックグラウンドとして存在することも判明した。この方法の特徴は非常に大きい軌道角運動量を有するガンマ線の生成が可能となることである。

② ヘリウム様イオンを用いた光渦ガンマ線の生成

ヘリウム様イオンは図8に示すようなエネルギー準位を有する。円偏光した二本のレーザー光(以下、ポンプ及び

ストークスと呼ぶ) により $0^+ \rightarrow 1^+ \rightarrow 2^-$ の遷移を誘起すれば最終状態は $J = 2, M = 2$ とすることができる。この状態から基底状態への脱励起は M2 遷移であり、必然的に軌道角運動を有する光となる。本研究では光学ブロッホ方程式を用いて、信号及びバックグラウンド過程となる遷移の確率を計算した。なおバックグラウンドは $2^- \rightarrow 0^+$ 以外の全ての遷移によりもたらされる。また光電効果によりイオン化する確率も同時に計算した。計算結果の一例を図9に示す。用いたパラメータは以下の通りである。Kr のローレンツ因子 ($\gamma = 2500$)、パルスレーザー使用、その波長 (ポンプ $\lambda = 403$ nm, ストークス $\lambda = 2690$ nm)、同ピーク強度 (ストークスに対し 400 MW/mm^2)、パルス幅 (FWHM=2 nsec)。結果からも分かるようにバックグラウンドは 5-6%程度、イオン化率はポンプ強度 400 MW/mm^2 の点ならば、 10^{-9} 以下であり十分低いことが判明した。この方法は既存のレーザー技術で、クリーンな光渦ガンマ線を提供する有望な方法であるとの結論を得た。

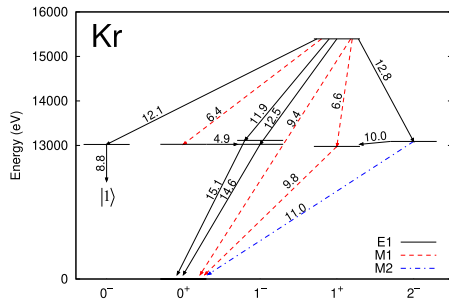


図 8: ヘリウム様 Kr イオンエネルギー準位。数値は A 係数 (10 の幂) を表す。

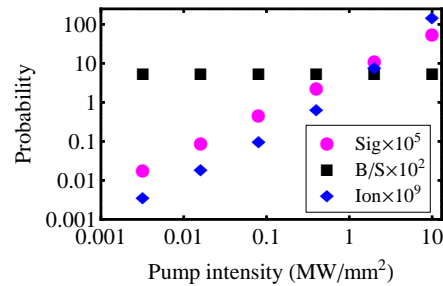


図 9: イオン当たりの遷移確率 vs ポンプレーザー強度。丸印は信号、四角はバックグラウンド信号比、ひし形はイオン化確率。

(3) 研究のまとめと今後の展望

本研究では、重イオンを使った高輝度ガンマ線源の実現に向けた第一歩として、Ba イオンの生成とレーザー光との衝突による分光実験を遂行した。より具体的には、イオン源の構築・レーザーシステムの製作・エミッタンス測定器の開発導入等を行い、Ba イオンをレーザー励起し脱励起光を観測することができた。共鳴蛍光スペクトルは概ね理論の予想と一致したが、詳細については不一致も観られた (共鳴幅やそのピーク)。Ba イオン源の性能としては $0.5 \mu\text{A}$ の Ba イオンビーム (質量数 138) が得られた。本文では割愛したが、質量数 137 の Ba イオンビームについても、同様の実験を行い、励起状態の超微細分裂の観測にも成功した。この結果は大きな成果であるが、当初の目標に照らすとコロナ禍の影響もあり、必ずしも十分ではない。今後は当初の目標に向けて実験を継続する。具体的な計画としては、(i) イオン源の改良やエミッタンス測定器の高度化 (実施済) を図りより詳細な実験を行い、理論実験の不一致を理解する、(ii) 二本のレーザーによる $^2D_{3/2}$ や $^2D_{5/2}$ 状態の直接励起とコヒーレンスの確認、(iii) 直線ではなく円運動からの脱励起光の測定等、が挙げられよう。

一方理論面においては、軌道角運動量を有するガンマ線源の研究を行った。この結果各々特徴をもつ 2 つの方法を提案することができた。この点では大きな成果であろう。

< 引用文献 >

- [1] M. Yoshimura and N. Sasao, Phys. Rev. D 92, 073015 (2015)
- [2] E. G. Bessonov, Nucl. Instrum. Methods B 309 (2013) 92 ; M.W. Krasny, "Gamma Factory, Proof-of-Principle Experiment", CERN-SPSC-2019-031; SPSC-I-253; D. Budker et al., Ann. Phys. (Berlin) 532 (2020) 2000204; D. Budker et al., Ann. Phys. (Berlin) 534 (2022) 2100284.
- [3] 本田洋介他, "相対論的量子イオンビームによる高強度ガンマ線源", 日本加速器学会年会プロシーディングス, 14 (2017)
- [4] M. Tanaka and N. Sasao, Int. J. Mod. Phys. E 30, (2021) 2150040.
- [5] M. Tashiro et. al., Ann. Phys. (Berlin) 534 (2022) 2200168, DOI:10.1002/andp.202200168

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 M. Tanaka and N. Sasao	4. 巻 30
2. 論文標題 Alternative method of generating gamma rays with orbital angular momentum	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Int. J. Mod. Phys. E	6. 最初と最後の頁 2150040
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1142/S0218301321500403	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 N. Sasao	4. 巻 -
2. 論文標題 Intense Gamma Radiation by Accelerated Quantum Ion	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Particle Physics at the Year of 25th Anniversary of the Lomonosov Conference	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 本田洋介 他	4. 巻 -
2. 論文標題 相対論的量子イオンビームによる高強度ガンマ線源	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 第14回日本加速器学会年会プロシーディングス	6. 最初と最後の頁 1303-1305
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Yoshimura M., Sasao N.	4. 巻 753
2. 論文標題 Determination of CP violation parameter using neutrino pair beam	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 465 ~ 469
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.physletb.2015.12.040	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M. Tashiro, N. Sasao and M. Tanaka	4. 巻 534
2. 論文標題 Generation of Twisted Gamma-Rays via Two-Photon Transition	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Ann. Phys. (Berlin)	6. 最初と最後の頁 2200168
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/andp.202200168	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 藤枝亮
2. 発表標題 量子イオンビーム(QIB)のためのBaイオン源開発II
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今井康貴
2. 発表標題 量子イオンビーム(QIB)分光に向けたYbドープファイバーを用いた987nm光の増幅
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中実
2. 発表標題 重イオン加速器を用いた高エネルギー光洞の生成
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中実
2. 発表標題 加速された水素様重イオンからの高エネルギー光渦の放射
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 笹尾登
2. 発表標題 軌道角運動量をもつガンマ線の新たな生成法
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 A. Fujieda
2. 発表標題 Ba-ion spectroscopy experiment for high-intensity gamma-ray source using heavy ions
3. 学会等名 The 12th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms January 6-7, 2020 (RIKEN in Saitama) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤枝亮
2. 発表標題 量子イオンビーム(QIB)へ向けたBaイオン源の開発
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 本田洋介
2. 発表標題 相対論的量子イオンビームによる高強度ガンマ線源
3. 学会等名 第14回日本加速器学会年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Noboru Sasao
2. 発表標題 Intense gamma radiation by accelerated quantum ions
3. 学会等名 18th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Noboru Sasao
2. 発表標題 Intense gamma radiation by accelerated quantum ions
3. 学会等名 Light driven Nuclear-Particle physics and Cosmology 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Noboru Sasao
2. 発表標題 Photon and neutrino emission from quantum ions in circular motion
3. 学会等名 25th International Conference on Atomic Physics (ICAP 2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	金井 保之 (Kanai Yasuyuki) (00177487)	国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・特別嘱託研究員 (82401)	
研究分担者	中川 孝秀 (Nakagawa Takahide) (00360602)	国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・チームリーダー (82401)	
研究分担者	笹尾 登 (Sasao Noboru) (10115850)	岡山大学・異分野基礎科学研究所・特任教授 (15301)	
研究分担者	市川 雄一 (Ichikawa Yuichi) (20532089)	国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・専任研究員 (82401)	
研究分担者	吉見 彰洋 (Yoshimi Akihiro) (40333314)	岡山大学・異分野基礎科学研究所・准教授 (15301)	
研究分担者	長友 傑 (Nagatomo Takashi) (60418621)	国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・専任技師 (82401)	
研究分担者	吉村 太彦 (Yoshimura Motohiko) (70108447)	岡山大学・異分野基礎科学研究所・教授 (15301)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	原 秀明 (Hara Hideaki) (70737311)	岡山大学・異分野基礎科学研究所・特別契約職員（助教） (15301)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	田中 実 (Tanaka Minoru) (70273729)	大阪大学・理学研究科・助教 (14401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関