

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 26 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26390115

研究課題名(和文)超高速時間分解吸収分光用X線源の試作

研究課題名(英文)Trial production of ultra-fast time resolution X-ray source

研究代表者

林 由紀雄 (HAYASHI, Yukio)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・関西光科学研究所 光量子科学研究部・主幹研究員(定常)

研究者番号：20360430

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：超短パルス高出力レーザーを数MPaの高密度ガス中に集光照射すると、生成されたプラズマ中の電子の一部は数10MeVまで加速される。研究代表者はこの高エネルギー電子を用いてエネルギー可変でかつ単色性を有するX線生成法を着想した。パラメトリックX線生成法と呼ばれる方法で、相対論的電子を結晶に入射すると電子と結晶中の周期的電場の相互作用により、ある条件に従ったX線が生成できる。レーザーで生成された電子は数fsの短パルス性を有しているため極短パルスX線の性質を兼ね備えている。本研究では超短パルス高出力レーザーを利用して生成した相対論的電子を単結晶に入射し、パラメトリックX線の生成を目指した。

研究成果の概要(英文)：When the ultra-short pulse high power laser is focused on MPa class high density gas, part of laser plasma electrons inside plasma is accelerated into a few 10 MeV. The authors get an idea to obtain the monochromatic and arbitrary energetic X-ray. If we inject the laser plasma electrons into the single crystal, such X-rays are generated by the interaction between the electrons and the electric field of crystal. This method is called parametric X-ray method. The pulse duration of the X-rays is less than 100 fs because of short pulse duration of laser plasma electrons. In this study, the authors produced the laser plasma electrons and tried the parametric X-ray generation.

研究分野：量子ビーム科学

キーワード：レーザープラズマ X線計測

1. 研究開始当初の背景

物質の化学変化は、fs 秒オーダーと極めて短い時間内に起きる事が知られている。このような超高速現象中で生じる過渡状態を見る手段として「超高速時間分解吸収分光」が提案されている¹⁾。この分光法では試料に含有している特定原子種に注目し、吸収端近傍での吸収特性(例えば吸収端の数 eV 程度のエネルギーシフト)から過渡状態における原子種の状態を知る事が出来る。過渡状態の観察には fs オーダーの極短パルスかつ任意のエネルギーが選択可能な単色 X 線源が不可欠である。しかし、「超高速時間分解吸収分光」に応用可能な X 線源は X 線 FEL (SACLA¹⁾) 等、世界でも数えるほどしか存在しないため、「超高速時間分解吸収分光」の研究の機会が限られていた。

2. 研究の目的

「超高速時間分解吸収分光」につながる極短パルス連続エネルギー可変 X 線源を試作し、その基礎特性を評価する事が目的である。極短パルスのエネルギー連続可変単色 X 線を用いて「超高速時間分解吸収分光」を試みれば、極めて短い時間内(fs 秒オーダー)におきる物質の化学変化の過渡状態を観察することが出来る。しかしこのような X 線源は、X 線 FEL (SACLA などごく少数の施設にしか存在しなかった。ここで研究代表者はレーザープラズマ電子のパンチ幅は数 fs である事実に注目し、数 fs のレーザープラズマ電子とパラメトリック X 線生成法を組み合わせる方法を提案する。この方法でエネルギー連続可変単色 X 線源を試作し、「吸収分光」実験を行う。また将来の「超高速時間分解吸収分光」が可能な X 線開発に向けて、課題や問題点についても明らかにする。

3. 研究の方法

超短パルス高出力レーザーとガスターゲットの相互作用で生成されるレーザープラズマ電子をパラメトリック X 線生成用の電子ビームに使用する。数 TW クラスの超短パルス高出力レーザーを利用すれば、数 10MeV の相対論エネルギーのレーザープラズマ電子が生成出来ることが知られている。この相対論的電子を単結晶中に入射すると、電子と結晶中の周期的電場の相互作用により単色エネルギーのパラメトリック X 線が生成される。入射電子(及び制動放射 X 線)の進行方向と異なる方向に放射されるので、制動放射 X 線等のノイズ成分が少ないという特徴を有している。この X 線のエネルギー E は以下のように記述できる。

$$E = (2\pi\hbar c \sin \theta_0) / \{d \cdot (1 - \cos \theta_D + 1/2\gamma^2)\}$$

θ_0 : 結晶表面に対する電子の入射角

θ_D : 結晶表面からの X 線出射角

γ : ローレンツ因子

d: 結晶の面間距離

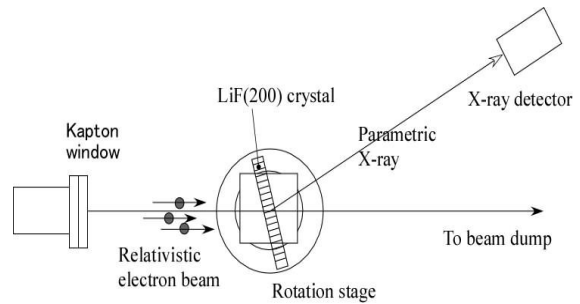


図 1. X 線生成のジオメトリ

この式は X 線回折条件(Bragg 条件)と類似している。式から明らかなように電子の入射角をコントロールする事で任意の単色 X 線を容易に生成可能である。

パラメトリック X 線生成実験の概要を以下に示す。まず超短パルス高出力レーザーとターゲットガスの条件を変えて、数 10MeV 電子生成の最適条件を調べる。次にレーザープラズマ電子を薄い LiF(200)単結晶に対して 20 度の角度で入射する。すると 9 keV の単色性を有するパラメトリック X 線が電子の進行方向に対して 40 度の方向に放射される。放射された X 線の空間分布を 2 次元アレイ X 線計測器で計測する。パラメトリック X 線が指向性を有している事から、X 線の強度分布が X 線計測器で確認出来るはずである。さらに X 線計測器の前に X 線フィルターを設置し、X 線の減衰率からパラメトリック X 線の単色エネルギーの確認を目指す。

4. 研究成果

(1) 2 次元アレイ X 線計測器の製作と応答特性評価



図 2. 2 次元アレイ光電子増倍管の画像

パラメトリック X 線の指向性(空間分布)を確認する目的で、2 次元アレイ X 線計測器を製作した。この計測器では CaF₂(Eu)シンチレータ(厚さ 1mm)と光電子増倍管(PMT)を一組として縦に 8 個、横方向に 8 個配列されているので、計 64 個の信号を出力することが

可能である(図2参照)。

この計測器の性能確認のため、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 線源(約3 MBq)を用いて計測器の応答試験を行った。測定結果を図3に示す。横軸は計測器

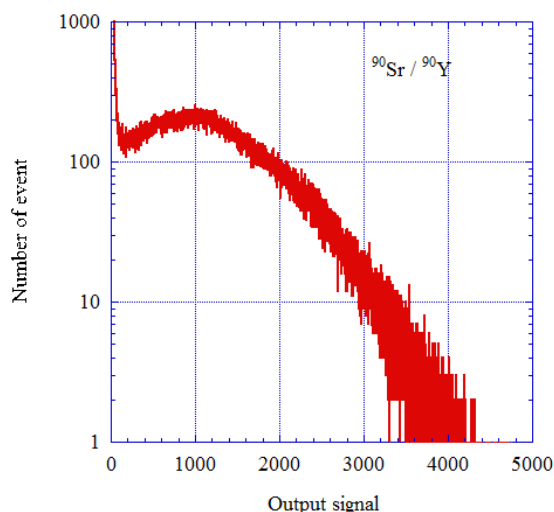


図3. $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 線源のエネルギー分布

に付与されたエネルギー、縦軸はイベント数を意味している。ブロードなエネルギースペクトルであるのは、線源が連続的なエネルギー分布を有する電子線(最大2.28 MeVのベータ線)を放射しているからと考えられる。電磁カスケードモンテカルロ計算(EGS5.0)で $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 線源に対する2次元アレイX線計測器の応答特性を計算した所、本結果と凡そ一致している事が確認出来た。その他に印加電圧-800Vで64個の各PMTの増幅率について調べた所、増幅率は一定で無く、最大2倍程度の違いがある事が判明した。

(2) 2次元計測器を用いたイメージング試験

2次元アレイX線計測器でX線の空間分布を計測可能な事を確認する目的で、2次元画像取得の実験を試みた。まずアルファベット文字「J」をくり抜いた鉛シートを用意し、2次元アレイX線計測器の検出面に被せた。次に大気中で計測器から15cm上流に約2.5MBqの校正用線源 ^{241}Am を設置した。この ^{241}Am 線源からは約60keVの単色X線が等方的に放射される。2次元アレイX線計測器で計測されたアナログ信号は多チャンネルデジタルでデジタル信号に変換された後、パソコンでデータ保存される。

5分間 ^{241}Am 線源を計測器に照射し、上図のようなイメージ像を取得した。X線フルエンスが高い場所は明るい色、低い場所は暗い色で表示している。予想していた通りイメージ像からはアルファベット文字「J」を確認される。このようにX線照射による2次元画像を取得可能である事が確認出来たので、パラメトリックX線の空間分布計測に利用する計画である。

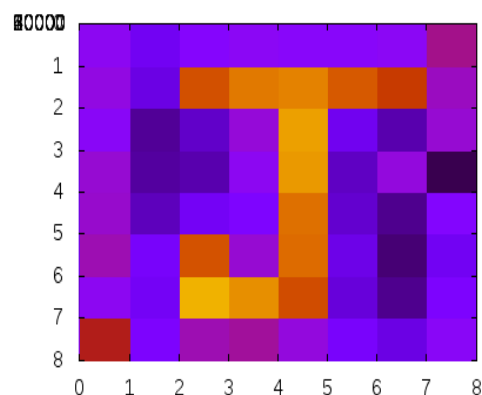


図4. ^{241}Am 線源での2次元イメージング

(3) レーザープラズマ電子の生成

パラメトリックX線生成に必要な電子ビームの発生研究を実施している。実験では小型の超短パルス高出力チタンサファイアレーザーJLITE-X(300mJ, 30fs, 800nm)を直径40um程度にターゲットに集光照射している。発生したレーザープラズマ電子に対し、この電子のエネルギースペクトルを図5のような方法で計測した。コリメータ内を通過し、磁石に入射した電子は磁石の磁場によって電子軌道を曲げられる。軌道を曲げられた電子は飛行を続けて蛍光板に入射する。この電子の飛跡は電子の運動エネルギーに依存する事から、蛍光板の発光位置(電子の入射位置)から電子の運動エネルギーを求める事が可能になる。

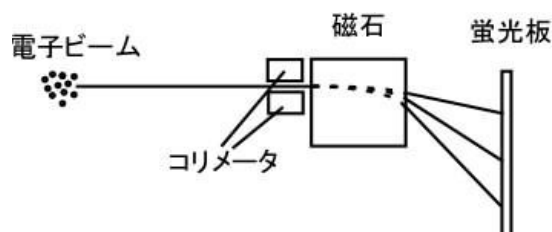


図5. 電子のエネルギー分布計測法

図6が計測結果の一例である。ターゲットには N_2 ガス(0.2MPa)を使用した。横軸は電子のエネルギー、縦軸は電子の発散角(ビームサイズ)を表している。発生した電子は広いエネルギー分布を有しているものの、30MeV近傍に電子が集中している様子が見て取れる。また一般にレーザープラズマ電子の場合、発散角が大きい事が知られているが、今回の実験では電子の発散角は $\pm 1^\circ$ 程度と比較的小さい事が判った。ただしレーザーショット毎に電子のエネルギー分布や発散角が変化する事も確認されている。そこでターゲットガスを噴出するためのガスノズルの種類やガス種(He, N_2 , Ar等)を変えて、安定な電子生成条件を現在、実験により詳細に調査している。

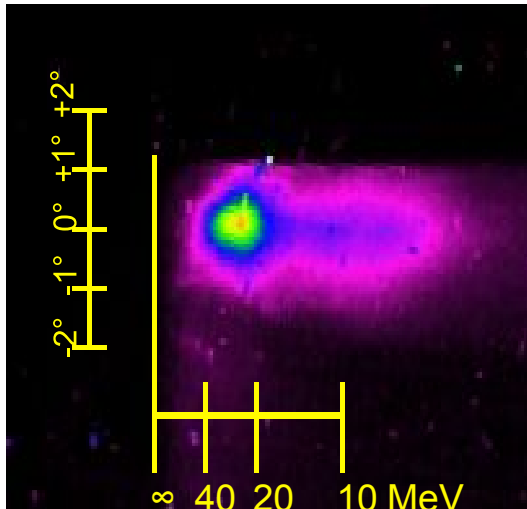


図6 レーザープラズマ電子の計測結果

(4) レーザープラズマ電子生成実験時の線量計測

レーザープラズマ電子を安全に利用する上で、放射線線量の確認も重要である。そこでレーザープラズマ電子を生成させているターゲット・チャンバ付近に線量計を設置し、線量の確認を試みている。まず能動型線量計の電離箱モニターと半導体型線量計で線量計測を試みた。すると電離箱モニターでは線量が確認されたのにも関わらず、半導体型線量計では線量が確認出来なかった。レーザープラズマ放射線の場合、大量の放射線（今回の実験は数 uSv 程度）が 1ps 以下の時間内に放射される。半導体型検出器の場合、数 uSv 程度の短パルス X 線に対し、この計測器の出力信号が飽和してしまい、線量を過少評価してしまったと理解している。一方、電離箱とは電離箱内で生成された電離電子の総電荷を計測して線量値に換算する原理の計測器である。数 uSv 程度の短パルス X 線が電離箱に入射しても、電離電子の総電荷は nC 程度の微弱な信号であり出力信号は飽和しない。それ故電離箱では有意な線量を表示したと理解している。

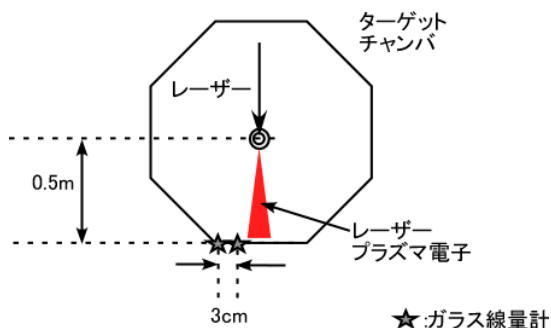


図7 線量計の設置場所

さらに受動型線量計も用いて線量計測を試みている。レーザープラズマ電子はチャンバ壁面と相互作用し、制動放射 X 線を放射する。この制動放射線の線量を蛍光ガラス線量計で計測する計画である。実際には図7の配置で電子生成実験を実施し、受動型線量計の蛍光ガラス線量計（幅 3 cm）をターゲット・チャンバ壁面に 2 個横に並べて設置した。1 か月間のレーザープラズマ電子生成実験の後、2 つの線量計の指示値の確認を行った。二つの線量計は非常に近い位置（僅か 3 cm 離れた位置）に設置しているため、ほぼ同じ線量値を示すと予想していた。しかし予想と違い、一方の線量計の指示値はもう一方の約 1.5 倍であった（一方は 233 uSv, 残りは 151 uSv）。そこで現在は、イメージングプレートを蛍光ガラス線量計と同じ場所に設置し、線量分布を確認している最中である。

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 0 件)

〔学会発表〕(計 3 件)

林 由紀雄 他、High energy X-ray detector generated by laser-plasma interaction、HEDS2017、2017 年 4 月 20 日、パシフィコ横浜（神奈川県横浜市）

林 由紀雄、Construction of 1D and 2D array detectors for high-energy X-ray measurement、HEDS2016、2016 年 5 月 20 日、パシフィコ横浜（神奈川県横浜市）

林 由紀雄、Emission of Parametric X-ray by Interaction between Laser-plasma electrons and a Single Crystal、HEDS2015、2015 年 4 月 24 日、パシフィコ横浜（神奈川県横浜市）

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

6. 研究組織

(1) 研究代表者

林 由紀雄(HAYASHI Yukio)

国立研究開発法人 量子技術研究開発機構・関西光科学研究所 光量子科学研究部・主幹研究員

研究者番号：20360430

(2)研究分担者

小瀧 秀行(KOTAKI Hideyuki)

国立研究開発法人 量子技術研究開発機構・関西光科学研究所 光量子科学研究部・上席研究員

研究者番号：60354974

(3)連携研究者

神門 正城(KANDO Masaki)

国立研究開発法人 量子技術研究開発機構・関西光科学研究所 光量子科学研究部・上席研究員

研究者番号：50343942