

機関番号：82118

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20340061

研究課題名 (和文) 軌道電子遷移による原子核励起メカニズムの解明とその応用

研究課題名 (英文) Investigation of the mechanism on nuclear excitation by electron transition and its application

研究代表者

岸本 俊二 (KISHIMOTO SHUNJI)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・准教授

研究者番号：00195231

研究成果の概要 (和文)：軌道電子遷移による原子核励起 (NEET) のメカニズムと応用の可能性を明らかにすることを目的に、シリコン・アバランシェダイオード (Si-AD) アレイ電子検出器と不感領域のない時間分光法により、NEET 測定用時間分光装置の検出効率を向上させ、 $^{197}\text{Au}$  について金 K 吸収端周辺エネルギーで NEET 確率を精密に測定、さらに  $^{193}\text{Ir}$  の NEET 微細構造も観測した。これらにより入射 X 線エネルギーに依存した核励起事象を説明する NEET モデルを検証できた。

研究成果の概要 (英文)：We have precisely observed nuclear excitation by electron transition (NEET) on  $^{197}\text{Au}$  and  $^{193}\text{Ir}$  to investigate the NEET mechanism and its application. New fast silicon avalanche diode (Si-AD) array detectors and a time spectroscopy system without a dead time region were developed for the NEET experiments. The system improved the efficiency for taking the NEET events. From the experimental results, we then confirmed our NEET model depending on the incident X-ray energy.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	8,500,000	2,550,000	11,050,000
2009年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
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：原子核 (実験)

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 本研究課題に至るまでの研究により軌道電子遷移による核励起現象 (NEET) の存在は確認できたが、電離と比べ  $10^{-7}$  以下の微弱な現象であることから NEET 実験はなお困難で理論モデルも十分でなかった。

(2) その一方で NEET は核外電子と原子核の双方が関わる現象であるため、応用として原子核 (同位体) を特定した原子構造解析につながる可能性があると考えた。

## 2. 研究の目的

(1) 検出器の高速化 (サブナノ秒パルス) と不感領域のない時間分光法により、NEET 測定用時間分光装置の検出効率を向上させる。分光装置の評価を兼ねて、まだ誰も成功していないオスミウム 189 の NEET 測定を試みる。

(2) NEET 確率が最も高い金 197 について金 K 吸収端周辺エネルギーで NEET 確率を精密に測定し、入射 X 線エネルギーに依存した核励起事象の微細構造を説明する NEET モデルを検証する。

(3) 金 197 に続きイリジウム 193 の NEET 微

細構造を観測し、同位体を特定した原子構造解析の可能性を調べるため、イリジウム 193 濃縮、非濃縮試料を使って同位体組成の NEET 微細構造への影響を調べる。

### 3. 研究の方法

(1) シリコン・アバランシェダイオード (Si-AD) アレイ改良および MSM 素子による検出器高速化と不感時間領域のない時間分光測定を試みる。

① Si-AD アレイ素子を改良 (ピクセルサイズを  $1/2: {}^6\mu\text{m} \times {}^1\text{mm}$  から  ${}^3\mu\text{m} \times {}^1\text{mm}$  として静電容量を下げる。垂直方向にピッチ:  $1.1\text{mm}$  で 3 段-2/3/2 個を配置、アレイ全体の立体角を拡大。浜松ホトニクス ㈱ に特注。)

② MSM (metal-semiconductor-metal) 素子の高速電子線検出器としての可能性を試す。装置の評価は高エネルギー加速器研究機構・放射光科学研究施設・垂直ウィグラービームライン BL-14A にて行う。X 線ビームによって  $0\text{s}$  粉末 (金属) から放出される L 光電子 (L-内部転換電子のエネルギー分布を模擬) を使って NEET 実験に適した作動条件を確認、これまでの装置での結果と検出効率、時間領域などについて比較する。X 線への応答についても電子線とあわせて評価する。

(2)  $0\text{s}$ -189 の NEET 観測実験による時間分光システム性能の検証

オスミウム 189 (励起準位:  $69.54\text{keV}$ , 半減期:  $1.6\text{ns}$ ) を試料 (濃縮度 80%) として (1) の装置 (特性が良好な装置を選択する) による NEET 観測を試みる。SPring-8 ビームライン BL09XU にて実施する。核共鳴エネルギーを計数値のピークとして確認のうえ、バンチ間隔  $23\text{ns}$  以上の運転モードを利用し入射 X 線エネルギーを核共鳴エネルギーに固定、表面から放出される核共鳴散乱電子線 (主に L-内部転換電子) の時間スペクトル (MCS) 測定を行う。透過型シリコン製 PIN フォトダイオード (PIN-PD、厚さ  $0.5\text{mm}$ 、試料前後に 2 つ配置する) を使って入射ビーム強度を測定しながら試料後方の PIN-PD による吸収測定を行い、K 吸収端エネルギー ( $73.86\text{keV}$ ) を確認する。時間ゲートを設定して、その時間領域について K 吸収端周辺で入射 X 線エネルギーを変化させながら原子核脱励起イベント計数測定を行う。

(3) Au-197 の NEET 吸収端微細構造の観測および核励起エネルギー精密測定

NEET 核種のうちもっとも NEET 確率の高い Au-197 と検出効率を向上させた計測系を使って K 吸収端近傍で微細構造を統計精度よく記録する。シリコン標準分光結晶による精密角度測定を採用して金 197 励起エネルギー、K 吸収端の絶対観測を産総研・藤本弘之氏の

協力を得て試みる。

(4) イリジウム 193 による NEET 微細構造分析およびエネルギー測定  
イリジウムの K 吸収端付近においてイリジウム 193 の NEET を観測する。実験は SPring-8 のビームライン BL09XU において実施、検出効率を向上させ NEET 微細構造を観測すること、また分光結晶の回折角度が精密に求められる装置を使って第 1 励起準位と NEET 現象の立ち上がり (NEET 端) エネルギーの絶対値を決定する。

### 4. 研究成果

(1) 主な成果

① 原子核励起エネルギーの絶対値測定による NEET モデルの検証  
金 197 とイリジウム 193 について検出効率を高めた測定系を使って NEET 測定を実施した。同時に原子核励起エネルギー精密測定をシリコン標準結晶 (Si (220) を使ったボンド法) によって行った。入射 X 線ビームの回折角度を自己校正型エンコーダーにより精密に測定することで絶対値を求めた。この方法により金 197 の第 1 励起準位は、文献値  $77351 \pm 2\text{eV}$  よりも  $14\text{eV}$  低い  $77336.6 \pm 0.3\text{eV}$  であることが精度  $4\text{ppm}$  以下で精密に求められた。NEET 現象が最大に達する NEET 端のエネルギー値は Phys. Rev. C74, 0301304 (2006) に発表したように、K 吸収端に対して  $+(40 \pm 2)\text{eV}$ 、あるいは  $+(35 \pm 4)\text{eV}$  に現れると求められており、本研究で求められた励起準位のエネルギー絶対値からは、 $37\text{eV}$  となり我々の NEET モデル:  $M_1$  殻電子が特定のエネルギーの K 空孔へ遷移することによって原子核が励起され入射 X 線エネルギーが保存される、を説明する。イリジウム 193 では、第 1 励起準位が  $73044.7 \pm 0.6\text{eV}$  と測定され、文献値  $73044 \pm 5\text{eV}$  と誤差の範囲内で一致、本研究で明確となった NEET 端エネルギー値の K 吸収端からの値:  $+(109 \pm 2)\text{eV}$  (予想値:  $+107\text{eV}$ ) とあわせて NEET モデルを証明する結果を得た。

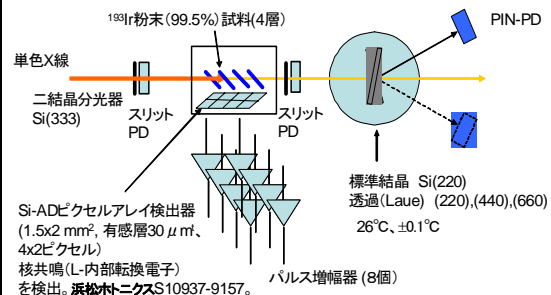


図 1 NEET 観測と同時に行った入射 X 線エネルギー測定 (イリジウム 193 実験)

②シリコン・アバランシェダイオード (Si-AD) アレイ電子線検出器の改良  
 7ピクセルアレイ：ピクセルサイズを ${}^H6 \times {}^V1\text{mm}$ から ${}^H3 \times {}^V1\text{mm}$ として静電容量を二分の一に下げる。垂直方向にピッチ：1.1mmで3段-2/3/2個を配置、アレイ全体の立体角を拡大。  
 8ピクセルアレイ：4x2配列ピクセルサイズ： ${}^H2 \times {}^V1.5\text{mm}$ として静電容量は上記7ピクセルと同じ。入射ビームに対して垂直方向にピッチ：2.0mm(gap:0.5mm)で2段、水平方向にピッチ2.5mmで4列をピクセル配置したものを製作。

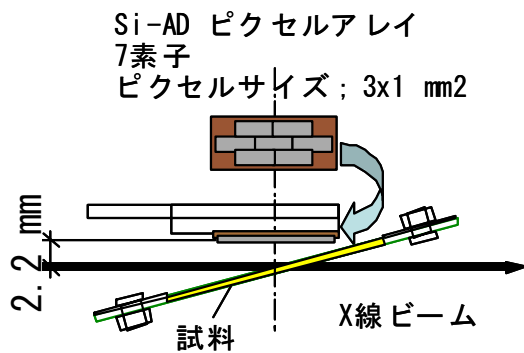


図2 Si-ADアレイ検出器 (7素子タイプ)

③MSM素子によるX線および電子線検出の試み  
 市販MSM素子(浜松ホトニクス(株) G4176-04)を使って30keV以上のX線、電子線への応答特性を評価し、57.6keVのX線に対して $54 \pm 8$  ps (FWHM)の時間分解能を確認した。

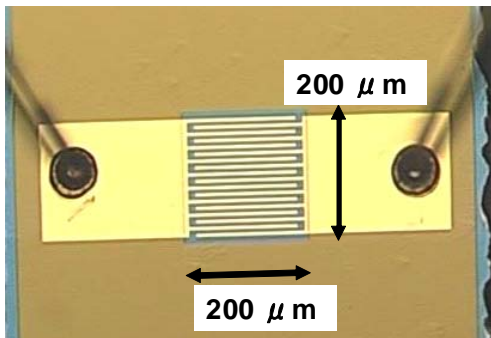


図3 MSMフォトディテクタ (浜松ホトニクス G4176-04)

## (2) 成果の意義

①NEETモデルのエネルギーによる検証について  
 我々の実験以前はNEET確率を定量的に議論できる結果はなかった。本研究では理論モデルと比較して、さらに詳細な検討を行うため

にNEET事象をより高い検出効率で捉え、またエネルギー絶対値をeVオーダーで測定することが目標となった。この目標はとくにエネルギー絶対値の測定によるNEETモデルの検証について成功したと考える。いまだに同レベルのNEET実験は世界のどこでも行われていないので、今後も我々自身が先頭に立ってNEETの物理とその理解に基づく応用の可能性を明らかにしていく必要がある。

## ②微弱な原子核励起事象を捉える測定システム開発

成果の③：MSM素子の高速電子線検出器への応用の可能性について、時間分解能はすぐれていたものの検出効率(吸収と立体角)確保の可能性の点で困難が大きく、本研究期間内での実用化は断念した。しかし②のSi-ADアレイ検出器の改良は、より精細なピクセルによる高速化の可能性を実証し、後段のパルス処理回路開発を進めればSi-ADアレイによる高速電子線検出器が高計数率に耐えて微細な信号も検出可能な精密測定に適したものであることを確認できた。

## (3) 今後の展望

### ①NEET微細構造の精密観測と解析

本研究の期間内に実施したNEET実験ではビームライン(SP-8 BL09XU)でのトラブルもあって一定の入射X線エネルギーの範囲内でNEET事象の微細構造を議論できるような統計精度の高いデータを得ることが困難であった。検出系の改良を継続しながらビームライン側システムの改善をはかり引き続き観測実験を行い、同位体を特定した原子構造解析の応用の可能性を検討したい。

### ②オスミウム189のNEET観測

2009年3月にNEET観測実験を実施し(Spring-8 課題番号：2008B1419)、予想される入射エネルギー付近でNEET事象の増加を観測した。しかし残念ながら他のエネルギー領域でのバックグラウンドと明瞭に区別できる結果ではなかった。試料および検出器系の改良を進め、再度試みる予定である。

### ③Si-ADアレイ検出器用高速回路系の開発

Si-ADアレイの内部転換電子線検出の有効性は実証できたが、予算の制約もありパルス処理回路は従来の市販品(パルスアンプ、波高弁別器など)を使用せざるをえなかった。より高速な多チャンネル検出器に適したパルス処理回路系を開発して検出器の改良の成果を十分に確保したいと考えている。

## 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1件)

①S. Kishimoto, T. Taniguchi, F. Nishikido,

R. Haruki, "Timing measurements with a MSM photodetector sensitive to a single X-ray photon", KEK Proceedings (2011), 査読有, accepted.

他、研究成果(1)の①について2件を執筆中。

〔学会発表〕(計5件)

①岸本 俊二、「イリジウム193のK-NEET端観測と励起準位精密測定」、日本物理学会第66回年次大会(震災のため中止、講演は成立の扱い)、2011年3月26日(講演予定日)、新潟大学。

②岸本 俊二、「金197のK-NEET端観測と励起準位精密測定」、日本物理学会第65回年次大会、2010年3月21日、岡山大学津島キャンパス。

③S. Kishimoto, "Observation of Nuclear Excitation by Electron Transition using Synchrotron X-rays" (invited), Workshop on Atomic Effects in Nuclear Excitation and Decay, June 15, 2009, European Center for Theoretical Studies in Nuclear Physics and Related Areas, Trento, Italy.

④岸本 俊二、「MSM フォトディテクタによる単一 X 線のタイミング検出」、第64回日本物理学会年次大会、2009年3月28日、立教大学。

⑤岸本 俊二、「MSM フォトディテクタによる単一 X 線・電子線のタイミング検出と NEET 実験への応用」、日本物理学会2008年秋季大会、2008年9月21日、山形大学小白川キャンパス。

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

岸本 俊二 (KISHIMOTO SHUNJI)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・准教授

研究者番号：00195231

### (2) 連携研究者

藤本 弘之 (FUJIMOTO HIROYUKI)

独立行政法人 産業技術総合研究所  
計測標準研究部門・主任研究員

研究者番号：30357917