

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25600141

研究課題名(和文) 最新光子検出器とチェレンコフ放射を利用した超高分解能粒子時間速度検出器の開発

研究課題名(英文) Latest photon detectors and development of super high resolution TOF detector using Cherenkov radiation

研究代表者

福田 光順 (Fukuda, Mitsunori)

大阪大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50218939

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)： 高速光電子増倍管を用いた重イオン計測用チェレンコフ飛行時間検出器を製作し、放射線医学総合研究所のHIMAC重粒子シンクロトロン施設において、ビーム粒子種やエネルギーを変えることにより、チェレンコフ放射の光子量が様々な条件での系統的なテスト測定を行った。その結果、初期の目標であった時間分解能 10 ps を達成することに成功した。さらに様々な改良を加えた結果、400A MeV  $^{132}\text{Xe}$  ビームに対し、最高記録 =  $\sim 5$  ps (システムの分解能込み) を達成できた。今後、検出器の大型化・汎用化のための開発とテストを目指す。

研究成果の概要(英文)： By using new-type fast photomultiplier tubes, a new Cherenkov Time-of-Flight detector has been developed for measurements of heavy ions. It has been tested at the heavy-ion synchrotron facility HIMAC in National Institute of Radiological Sciences, Japan, under various conditions of number of Cherenkov photons by changing beam species and energies. As a result, we achieved the initial target value of the resolution 10 ps. Furthermore, applying various improvements, we have accomplished the best value of the time resolution =  $\sim 5$  ps (including system resolution) for 400A MeV  $^{132}\text{Xe}$  beam. After this, we will improve this detector on the points of larger sizes and versatility.

研究分野：原子核物理学

キーワード：チェレンコフ光 高時間分解能 飛行時間検出器 粒子識別

### 1. 研究開始当初の背景

重イオンビームを用いた原子核物理学・生物学・医学・材料など様々な分野の研究が、高エネルギー重イオン加速器施設(国内で言えば理研・放射線医学総合研究所など)の発展に伴い、ますます盛んになってきている。そのような重イオン科学の分野では、重イオンの粒子識別能力向上は、研究の範囲・質ともに左右する重要因子であるため、常に切望されている。

通常、重イオン粒子識別のための飛行時間測定に用いられるのは、時間分解能に有利なプラスチック・シンチレーション検出器であるが、これとてシンチレーション発光には崩壊時間の分、光子放出時間にばらつきが生じてしまう。これに対し、チェレンコフ光は重イオンが物質を通過した瞬間に放出されるので、十分に薄い物質をラジエーターとして用いれば、限りなく瞬間的で精度の良い時間基準として利用できると考え、これを利用した飛行時間(TOF)検出器を開発することにした。

### 2. 研究の目的

さまざまな分野で、粒子の通過時刻や飛行速度の精密な測定は重要な役割を持っており、常にその精度の向上が望まれている。

本研究では、Multi-Pixel Photon Counter (MMPC) や金属チャンネル型光電子増倍管(MC-PMT)などの新しいタイプの高速光子検出器とチェレンコフ放射を組み合わせ、特に原子核実験における重イオンビームに最適化された、全反射型の超高分解能な時間・速度検出器を開発する。目標とする時間分解能は、 $\sigma_t = 10$  ps 以下、速度分解能は飛行距離わずか 2 m で、 $\delta\beta/\beta \sim 0.1\%$  (300 MeV/u) であり、世界最高レベルの性能である。

これにより、飛躍的な核種識別能力の向上と、さらには非弾性励起・ $\Delta$ 粒子励起など原子核における内部励起構造の分光学的研究等も可能となる。今まで重イオン核種識別用の飛行時間測定器としてチェレンコフ放射や新型光子検出器が使われたことはなく、本研究の成果が出れば世界初となる。

### 3. 研究の方法

#### (1) チェレンコフ TOF 検出器の製作

核子当たり数 100MeV-1GeV の重イオンビームにより生成された不安定核ビームを用いる原子核物理学実験では、通常、時間特性の良いプラスチック・シンチレーターと光電子増倍管の組み合わせで、飛行経路に沿って 2カ所に配置した 2組の検出器による飛行時間測定から粒子速度を導出する。ところが、プラスチック・シンチレーターの蛍光放出寿命が有限であることや従来型光電子増倍管の時間分解能の限界から、この方法では、飛躍的な時間分解能の向上は望めない。そこで、本研究では粒子が通過したその瞬間に放

出される(蛍光寿命のない)チェレンコフ放射と、最近開発された 1光子あたりの時間分解能が 200 ps を切る高速光子検出器(MPPC[1] や MC-PMT[2])を組み合わせ、発生したチェレンコフ光子をラジエーター内全反射によって光子検出器へ入射させることにより、超高速時間・速度検出器を開発する(図1参照)。これにより、飛躍的な核種識別能力の向上と、核種識別を超えた、大立体角・超高分解能エネルギー-運動量測定器としての利用が期待できる。

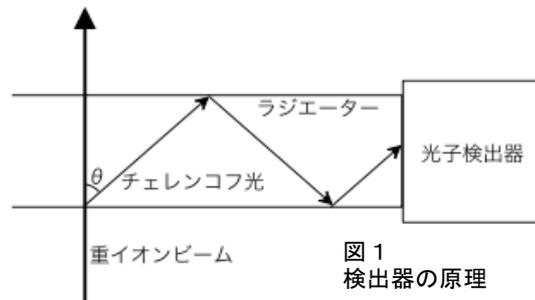


図1 検出器の原理

[1] MPPC は、複数のガイガーモード・アバランシェ・フォトダイオードの微細なピクセルからなるカウンターで、電子が増倍される過程で走る距離は 1mm 以下と極めて短いため、時間分解能も優れている。

[2] MC-PMT は、微細加工により作られた金属チャンネルをダイノードとし、光電面からアノードまでの距離が 10 数 mm 程度と、通常の光電子増倍管に比べて極めて短く、また電子の経路も平行直線であるため、時間分解能に優れている。

#### (2) ラジエーター／光子検出器の最適化

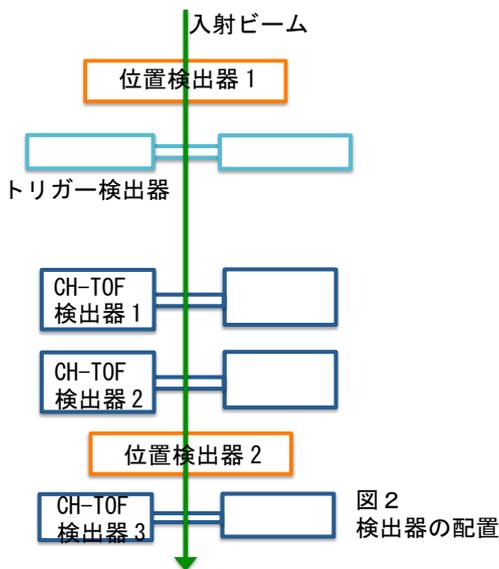
製作したチェレンコフ TOF 検出器をテストするために、放射線医学総合研究所(放医研)の重イオンシンクロトロン施設 HIMAC の加速器からのビームを利用した。まず、チェレンコフ光のラジエーターとしては、屈折率が 1.8-2.1 程度の非常に大きなもので、かつ蛍光・リン光の発生が無いものが必要である。本研究では、(株)HOYA や(株)オハラの高屈折率ガラスをはじめとしていくつかの材質についてテストした。

#### (3) ビーム種・エネルギー依存性

チェレンコフ放射の光子数とその波長分布は、ビームの電荷(原子番号)と速度に大きく依存する。そこで、ビーム核種を  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{86}\text{Kr}$ ,  $^{132}\text{Xe}$  など何種類か変化させ、それに対する依存性を調べる。また、エネルギーも 300A-500A MeV の範囲で変化させ、依存性を調べる。

### 4. 研究成果

まず、以降も含めた放医研におけるテスト測定の典型的な検出器の配置(セットアップ)を図2に示す。位置検出器としては Parallel Plate Avalanche Counter (PPAC)と呼ばれる実行厚さが極めて薄く、ビーム自身に影響



を与えにくい検出器を用い、複数のチェレンコフ TOF 検出器(CH-TOF)におけるビーム通過位置を求め、位置依存性等を補正する。CH-TOF 検出器は複数個用いることにより、複数ペア間の時間差スペクトルから得られるペア間時間分解能を連立させて、各検出器固有の時間分解能を求めるという方法を用いた。この方法により、3 個以上の CH-TOF を同時に用いれば、各検出器の分解能を知ることが可能となる。

#### (1) ラジエーターについて

チェレンコフ光のラジエーターについては、高屈折率ガラス((株)オハラ S-LAH55V; 屈折率 1.89, (株)HOYA TAFD45; 屈折率 1.95)と高屈折率プラスチック(三菱ガス化学(株): ルミプラス LPB-1102; 屈折率 1.74, TiO<sub>2</sub>ルチル単結晶; 屈折率 2.72)をテストした。その結果、高屈折率プラスチックに関しては屈折率が他より小さいため、十分な波高値が得られず、時間分解能ではやや劣っていた。最良の時間分解能が得られたのは(株)オハラの高屈折率ガラスであった。(株)HOYA のガラスはやや劣っていたが、これは屈折率が大きすぎて、(4)に述べるようにラジエーターから光検出器への光の入射効率が落ちてしまったためと考えられる。同様の理由で、屈折率の極めて大きい TiO<sub>2</sub>ルチル単結晶も発光量は極めて多いが、ラジエーター中に光が閉じ込められ光検出器に入って行かないため、性能は今ひとつであった。

#### (2) 光検出器

光検出器としてはメタル・チャンネル型光電子増倍管(R11934-200 浜松ホトニクス製), ラインフォーカス型光電子増倍管(H6533 浜松ホトニクス製)と Multi-Pixel Photon Counter (MPPC S10931-100P, 浜松ホトニクス製)の 3 種を比較テストしてみた。その結果、まず MPPC は波高が小さく、よい結果を得るのが難しいことがわかった。さらに、ラ

インフォーカス型の H6533 は、カタログ性能ではこれらのうち最高の Transit Time Spread をもつが、何故か時間分解能は上がらなかった。増幅率の問題かも知れない。結局、ベストの結果を出したのは、メタル・チャンネル型光電子増倍管(MC-PMT)の H11934 であった(図 3)。

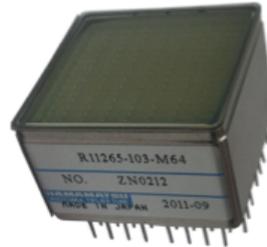


図 3  
使用した MC-PMT

#### (3) 光電子増倍管の本数

ラジエーターとしては前述のオハラ S-LAH55V 30×30×1 (mm<sup>3</sup>) を用い、両側に 1 本ずつ付ける 2 面型と、上下にも付ける 4 面型の 2 種類を試した。その結果、光電子増倍管の本数に対する分解能の依存性は図 4 のようになった。当然であるが 4 面型の配置でベストの結果が得られた。

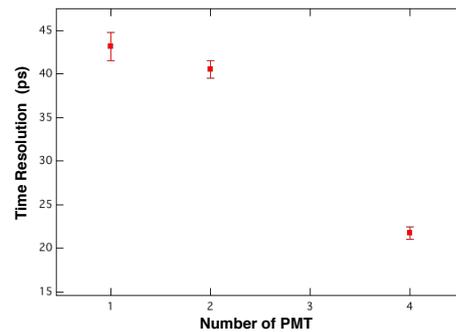


図 4 時間分解能の PMT 本数依存性

#### (4) 接着の方法について

(1)で述べたように、屈折率が大きくなるとチェレンコフ光の発光という面では有利になるが、同時に発光した光がラジエーターから出にくくなるという点で不利となる。そこで考案されたのが、ラジエーター接着面の角の部分、ラジエーターと光電面ガラス(通常ホウケイ酸ガラス)のそれぞれの屈折率の中間程度の屈折率をもつ接着剤で盛ってなだらかにする方法である。この方法により、チェレンコフ光の入射効率は約 1.8 倍に改善された。

#### (5) ビーム種依存性

チェレンコフ光の放射確率は次式で表されるように、入射核種の原子番号  $Z$  の 2 乗に比

$$\frac{d^2 N_{\text{photon}}}{d\lambda dL} = \frac{2\pi\alpha Z^2}{\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{n^2\beta^2}\right)$$

例し、ビームの速度  $\beta$  にもラジエーター屈折率と相関しながら強く依存する。これに対し、一般的なプラスチック・シンチレーターなど

はクエンチングの効果により発光量は原子番号の1乗程度にしか依存しない。このため、 $Z$ が大きくなったときには、プラスチック検出器より本研究のチェレンコフ TOF 検出器の方が大幅に有利になる可能性がある。そこで、放医研 HIMAC の2次ビームラインを利用し、2次ビームとして得られる多様な核種を本検出器に入射させたときの波高値と  $Z^2$  との関係プロットしたものが図5である。非常によい比例性を示していることがわかる。

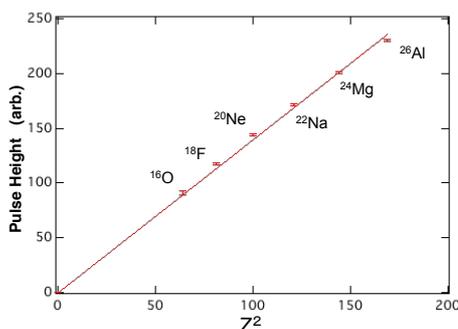


図5 チェレンコフ光波高値の  $Z^2$  に対する比例性

#### (6) 時間分解能

これまでのテスト測定で最も良い時間分解能を得られたのが、 $^{132}\text{Xe}$  420A MeV のビームを用いたときで、テストした中では最も  $Z$  が大きく、エネルギー(速度)も大きな条件であった。その条件下で、1つの検出器に対して最高記録時間分解能  $\sigma \sim 4$  ps という超高分解能を達成することに成功した。その典型的な時間差スペクトルを図6に示す。

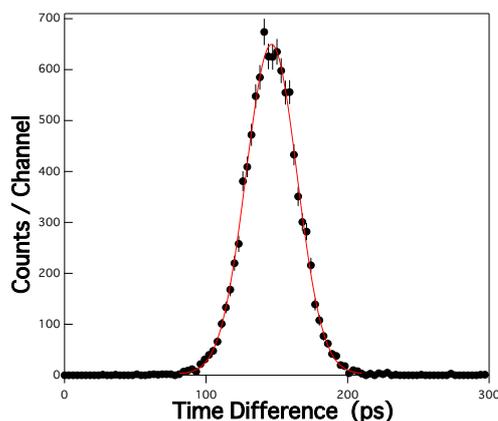


図6 最高分解能を達成したときの典型的な時間差スペクトル

#### (7) 今後の課題

ある条件下で極めて良い時間分解能を得ることに成功したので、今後は、この超高分解能をより広い条件下で達成できるための工夫をすることが開発の課題である。より具体的には、①大面積化、②より小さい  $Z$  での利用、③より小さいエネルギーでの利用、④それぞれの条件に適したラジエーター、光子検出器の組み合わせ選定、などである。ま

た、これまでの成果をまとめ、近日中に学術雑誌にて公表する予定である。

#### 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 5件)

① 神戸峻輔 不安定核ビーム粒子識別のためのチェレンコフ検出器の開発, 日本物理学会秋季大会, 2013年9月22日, 高知大学(高知県・高知市)

② 渡邊浩太 不安定核ビーム粒子識別のためのチェレンコフ TOF 検出器の開発, 日本物理学会第69回年次大会, 2014年3月28日, 東海大学(神奈川県・平塚市)

③ S. Yamaoka, RICH counter for heavy-ion particle identification using multi-anode photomultipliers, 4th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan, 9 Oct 2014, Waikoloa (USA)

④ 宮田恵理 チェレンコフ光を利用した不安定核ビーム高時間分解能検出器の開発, 日本物理学会秋季大会, 2015年9月26日, 大阪市立大学(大阪府・大阪市)

⑤ 宮田恵理 チェレンコフ放射を利用した不安定核ビーム高時間分解能検出器の研究 II, 日本物理学会第71回年次大会, 2016年3月20日, 東北学院大学(宮城県・仙台市)

〔図書〕(計 1件)

福田光順 他, 放医研重粒子医科学センター, HIMAC 20年の歩み, 2015, 66-72

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

福田 光順 (FUKUDA, Mitsunori)  
大阪大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号: 50218939

##### (2) 研究分担者

なし

##### (3) 連携研究者

西村 太樹 (NISHIMURA, Daiki)  
東京理科大学・理工学部・助教  
研究者番号: 30612147

(4)研究協力者

武智 麻耶 (TAKECHI, Maya)

新潟大学・大学院自然科学研究科・助教

田中 聖臣 (TANAKA, Masaomi)

大阪大学・大学院理学研究科・大学院生