

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 9日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21340069

研究課題名（和文）ハイペロン-陽子散乱実験のための超高速イメージ撮像管システムの完成

研究課題名（英文）High Speed Image Delay Tube for Hyperon-Proton Scattering Experiment

研究代表者

家入 正治 (IEIRI MASAHARU)

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・教授

研究者番号：50192472

研究成果の概要（和文）：原子核・素粒子反応実験において、毎秒 10^7 までの画像事象を選別し処理可能な『超高速イメージ撮像管』の開発を行った。蛍光体の残光に頼らず、撮像管内部の電子の移動を制御する事により、画像保持すなわち“イメージ遅延機能”を有する。試験機は完成し、基本性能試験を行った。

研究成果の概要（英文）：High Speed Image Delay Tube (HSIDT), which could manage images of 10^7 events/sec in nuclear and particle physics experiments, has been developed. HSIDT has an image delay capability by controlling photo-electron drift in the tube. A prototype of HSIDT has been designed and completed. Basic performances were tested.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2010年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
2011年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
総計	14,400,000	4,320,000	18,720,000

研究分野：原子核物理学

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：イメージ撮像管、ハイペロン-陽子散乱、バリオン間相互作用、大強度二次ビーム、J-PARC

1. 研究開始当初の背景

大強度陽子加速器施設(J-PARC)では、加速器のビーム強度が飛躍的に増し、二次ビーム強度が大幅に向上する。「ストレンジネス核物理」の実験に必須のK中間子のビーム強度は、 10^7 /秒が期待される。これはKEKの陽子シンクロトロン実験施設での 10^4 /秒程度の千倍に相当する。このような大強度加速器施設での素粒子・原子核の基礎物理学実験において、画像を記録する手法を用い効果的に実験を遂行するため“ナノ秒の応答特性を有する”『超高速イメージ撮像管』は重要な測定装置となる。

核子（陽子と中性子）の間に働く核力は、“斥力芯”や“スピン・軌道力”、“アイソスピンによる強さの違い”等の非常に特徴的な性質を有する。このような性質の解明には核子同士の散乱実験が大きな役割を担ってきた。この核力は中間子交換で非常に良く記述できているものの、“斥力芯”等は現象論的な理解に留まっている。核子はuクォークとdクォークから構成される。ここに、少し重いsクォークも加えたSU(3)の枠組みの元で、核力をも含むバリオン間相互作用としてより総体的に記述し、現象論に頼る事無くその特質を解き明かす試みが進展している。この

バリオン間相互作用の解明の理論の取り組みに対し、貴重な情報を与える「s クォークを含むバリオン（ハイペロン）と核子の間の散乱データ」は非常に少ない。核子-核子散乱に比肩しうる様な、ハイペロンと核子の散乱データが強く望まれている。ハイペロンは、 π 中間子やK中間子などの加速器施設での二次粒子により生成される。ハイペロンは寿命が 10^{-10} 秒程度なので、相互作用の理解に有用な散乱実験のための数百 MeV/c 運動量領域のビームとしても数 cm 飛ぶと崩壊してしまう。このようなハイペロンと核子との散乱を測定するためには、生成されたハイペロンが散乱や反応を起こし、崩壊するまでの数 cm の間に効率よく測定する装置が鍵を握ることになる。

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の 12GeV 陽子加速器実験施設において、シンチレーティングファイバーを、ハイペロンの生成・散乱の標的として用い、同時に散乱の様子、ハイペロンの崩壊と陽子の反跳を捉える 4π 飛跡検出器として活用する測定器系を構築した。測定の対象となる荷電粒子がその飛跡に沿って検出物質（シンチレータ）との相互作用により微弱光を発生させることを利用している。粒子の通過位置情報を保持したままファイバー束の端面に伝搬する光を射影された二次元画像としてイメージ増幅管 (Image Intensifier Tube [IIT]) により捉え、デジタル化して計算機に送る。2台でステレオ観測する事により三次元に再構成し、散乱の運動学の解析が可能となる。この方法は、数 cm の領域で起こる現象を観測するのに最適で、散乱を一事象毎に記録する事ができる。

多くの事象の中から観測すべき事象のみをあらかじめ設けた基準により選別し、IIT にトリガ制御を行い対象となる事象を画像として記録する。この選別の「判断」には数百ナノ秒を要する。既存の IIT では出力面の蛍光体の残光時間を利用し、その判断終了まで蛍光体面上に保持された画像を取得する手法を用いている。光情報の保持に蛍光体を使用しているため、測定器系に入射するビーム強度が高くなると画像情報としての粒子の飛跡に異なる入射ビームによる事象の飛跡が重なり、解析が困難になる。実際、用いられる蛍光体は数 μ 秒の残光時間を有しているため、重なりを避けるため入射可能なビーム強度は 10^5 秒程度に制限されることになる。これは実験の設計や遂行・解析に際し強い制約となり、最終的に得られる統計精度をも左右していた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、蛍光体の残光に頼らず

に長い画像保持時間を有し露出時間の短い超高速イメージ撮像管本体に、速い撮像素子による技術を融合することにより、事象判断後の外部トリガが可能な真の『超高速カメラシステム』を完成することである。

従来の方法では次の大きな制約がある。

[A]連続する画像の重なりを避けるため撮影速度に限界がある。

[B]蛍光体により残光時間が決まっているのでシステムの最適化はできない。

一方、ファイバー技術は、粒子線検出器として広く使用されているプラスチック・シンチレータのファイバー化を可能にしている。このシンチレーティング・ファイバー検出器自身は、ファイバーの断面が百 μm 程度の細さのものが製作でき、また、元来プラスチック・シンチレータであるから、1ファイバー当たり毎秒 10^7 個程度までの応答特性を有している。『超高速イメージ撮像管』についてシンチレーティング・ファイバーに対応可能な仕様で設計・製作する。

J-PARC でビーム強度が飛躍的に増し、実験に利用可能な二次ビーム強度が大幅に向上する。 10^7 秒までの事象を処理可能な『超高速イメージ撮像管』を開発する事が目的である。

3. 研究の方法

(1) 現在のイメージ撮像管技術では撮影速度に限界があり、連続して取得できる画像数にも制約がある。加速器によるビームを利用する原子核・素粒子反応を画像により観測する場合、イメージ撮像管の「撮影速度」と「露出時間」、カメラとしての画像の「保持時間」のそれぞれが大きな制約要因となり、測定方法を制限していた。これらの制約を取り払うためには、以下の3つの項目について飛躍的な性能向上が不可欠となる。

- ① 長い画像保持時間
- ② 短い画像選択時間（短い露出時間）
- ③ 速い撮影速度

これらの性能を有する超高速イメージ撮像管の設計を行い、試験機を製作する。

(2) 超高速イメージ撮像管から出力されるイメージとしての画像データを取得し計算機に記録するために「高速度カメラ」、及び、必要な事象に対してのみ撮像管に高圧を印加するために短い繰り返し可能な「パルス発生高圧電源」、撮像管内部の移動電子の発散を抑制するための「ソレノイド電磁石」の仕様を検討し機種を選定、あるいは、製作する。

(3) 超高速イメージ撮像管システムを組み上げ、基本性能の試験を行う。

4. 研究成果

(1) 超高速イメージ撮像管本体の設計・製作と完成

超高速イメージ撮像管は、電子の管内の移動を制御することにより『長い画像保持』『短い画像選択』を実現している。

いつ起こるかわからない原子核・素粒子反応等の事象の撮影についての対応は市販の高速カメラ技術では難しい。また、短時間に起こる現象に対しては‘記録すべき’と判断した時点で、画像として観測する事象は既に終焉してしまっていることが想定される。この画像記録可否判断に余裕を持たせるため、画像の「保持」機能を撮像管内の光電子の移動制御により可能にした。

図1は超高速イメージ撮像管の動作原理を説明するため内部の光電子の動きを書き添えたものである。

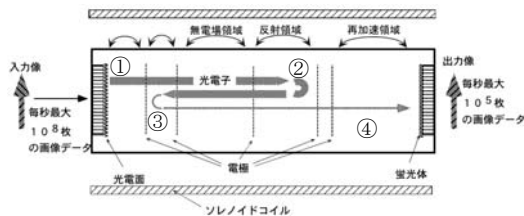


図1 超高速イメージ撮像管の動作原理図

- ① 光情報に変換された散乱現象等の画像データは、入力側の光電面で光電子を叩き出す。
- ② ソレノイド磁場により入力の位置情報を保持しながら出力側に向かう光電子群は、「選別までの時間の確保」や「移動速度の違いによる到達時間差の補償」等の目的のため『反射領域』で進行方向を反転される。
- ③ ‘記録すべき’と判断された事象は、『選別領域』で印加されるパルス高電場により再び出力側へ加速される。
- ④ 選別された事象は十分な速度を持って反射領域を通過し、『再加速領域』でさらにエネルギーを得て出力蛍光面上に画像を作る。

『選別領域』到達までに光電子群は凡そ数百ナノ秒程度をかけて移動するのに対し、印可する選別用パルス電場の時間幅は数ナノ秒であるから、画像データの選択率は $10^{-2} \sim 10^{-3}$ が可能となる。画像の保持を電子のドリフト時間を利用し実現している。この『超高速イメージ撮像管』は、画像保持すなわち“イメージ遅延機能”と、内部電極へのパルス電圧印可による“トリガー機能”を有する。

図2は組み上げた「高速イメージ撮像管」本体写真である。ドリフト長を可変にし、

内部電極を交換可能とするため、解体できる構造としている。入力の光電陰極が左側、出力の蛍光面が右側である。各電極には、電圧を印加用、及び、電位をモニター用のケーブルを配線されている。内部の真空度はイメージ撮像管として動作可能な $7 \times 10^{-4} \text{Pa}$ を達成



図2 超高速イメージ撮像管

した。

(2) 試験

超高速イメージ撮像管をソレノイド電磁石に組み込み試験を開始した。(図3)



図3 超高速イメージ撮像管の試験の様子。撮像管は中央のソレノイド電磁石に組み込んでいる。手前は真空計と電磁石電源。右のラックに制御電源等の回路がある。

(2)-1 出力光の残光時間

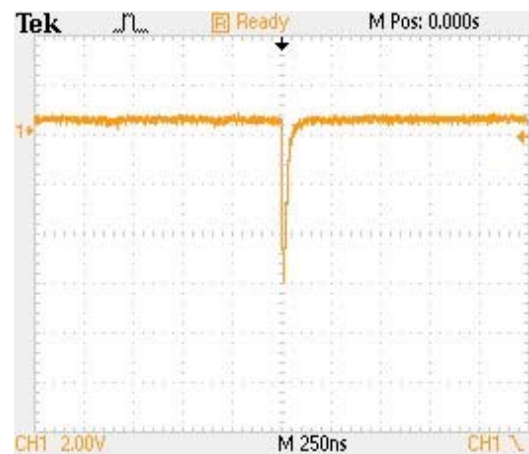


図4 撮像管の出力光を光電子増倍管で捉えた。

光電面に使用する蛍光体は、画像保持の機能は必要としないので、画像の重なりを低減するために残光時間が短い P47 を使用した。図 4 は出力光を光電子増倍管で捉え、オシロスコープで観測したものである。P47 の 10%残光時間の 110ns が確認できる。

(2)-2

放射線源 ^{60}Co による超高速イメージ撮像管の応答を調べた。印加電圧等の条件は次の通りである。

- ・ 光電面電圧 (入力) -6V
- ・ 電極電圧 (制御) +4V
- ・ アノード電圧 (出力) 12kV
- ・ 真空度 4.6×10^{-4} Pa

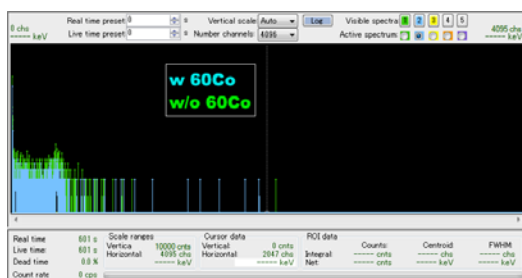


図 5 超高速イメージ撮像管の出力波高分布。放射線源 ^{60}Co 有りとなしの場合の比較。

出力光を光電子増倍管(R9880U :-850V)にてその出力波高を測定した。

線源無しの場合にくらべて、1000 チャネル以上に放射線源 ^{60}Co による入力側の光電子に起因する波高分布 (水色) が観測される。

(3) 読み出し用 SPIROC-A チップ

超高速イメージ撮像管システムに活用し、高ビーム強度下のトラッキング検出器として動作させるため、クロック同期によらない汎用回路の開発のための試験ボードを設計し制作した。ハイペロン散乱実験の検出器の読み出し用回路として使用するために 32 チャネルそれぞれに電圧調整ができ、チャンネル間のゲインをそろえることが可能となる SPIROC-A チップを試験ボードにより評価した。このチップは各チャンネルにプリアンプ、整形アンプ、ディスクリミネーターを有し、エネルギー測定および時間測定が可能である。

(4) 展望

本基盤研究の経費で開発に必要な試験機の製作を行い、測定装置や回路などの試験環境を整備することができた。

今後、性能試験は継続して実施する。印加する電界強度と遅延時間の相関を測定し、遅延時間の最適化を図る。また、解像

度のソレノイド磁場強度との相関、および、入射位置依存性、出力画像の歪みを測定する。さらに将来は、出力側の撮像素子によるカメラの撮影速度を、イメージ撮像管のパルス電圧に対応できるように設計製作等を行い、性能向上と評価を行う予定である。

本研究の『超高速イメージ撮像管システム』を実験への導入に着手する。大強度の環境下で、標的とその近傍でおこるハイペロンの特徴的な軌跡を確実に認識できるようになり、統計精度の向上、及び、測定限界の開拓などが可能となると期待される。特に、数 cm の領域でハイペロンの生成・反応・崩壊が起こるハイペロン-陽子散乱実験 (Λp , Σp の微分断面積や偏極分解能、 Ξp 散乱等) への適用はもちろんのこと、J-PARC の二次粒子の入射ビーム強度でも制約がなくなるので、ハイパー核やダブルハイパー核の分光等の実験に際し標的に起こる弱崩壊現象などを観測することで、事象の同定やその解釈などにも有効な手段となると考えられる。

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 3 件)

- ① K. Miwa, R. Honda, Y. Matsumoto, H. Kanda, H. Tamura, M. Ieiri, Proceedings of Handon Nuclear Physics 2011, EPJ Web of Conferences, Vol20 (2012) 05001, <http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20122005001>、査読有
- ② R. Honda, S. Callier, S. Hasegawa, M. Ieiri, Y. Matsumoto, K. Miwa, I. Nakamura, L. Raux, C. De La Taille, M. Tanaka, T. Uchida, K. Yoshimura, Proceedings of 6th International Conference on New Development in Photodetection 2011, will be appeared on Nucl. Instrum. Meth. A、査読有
- ③ M. Tomizawa, T. Adachi, Y. Arakaki, A. Kiyomichi, S. Murasugi, R. Muto, H. Nakagawa, K. Niki, K. Okamura, Y. Sato, S. Sawada, Y. Shirakabe, H. Someya, K. H. Tanaka, T. Toyama, E. Yanaoka, A. Ando, Y. Hashimoto, T. Koseki, J. Takano, D. Horikawa, I. Sakai, K. Mochiki, S. Onuma, H. Sato and A. Schnasea, Proc. of the 2010 International Particle Accelerator Conference, 23-28 May 2010, Kyoto, Japan, pp. 3912-3914、査読無

[学会発表] (計 2 件)

- ① “超高速イメージ撮像管の開発”、家入正治、日本物理学会、平成 24 年 3 月 27 日、

関西学院大学（兵庫）

- ② “Experimental plan of Σ p scatterings at J-PARC”、三輪浩司、国際会議 Hadron Nuclear Physics 2011、平成 23 年 2 月 21 日-24 日、Pohang（韓国）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

家入 正治 (IEIRI MASA HARU)
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授
研究者番号：5 0 1 9 2 4 7 2

(2) 研究分担者

高橋 仁 (TAKAHASHI HITOSHI)
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教
研究者番号：6 0 3 5 3 3 7 2
皆川 道文 (MINAKAWA MICHIFUMI)
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・技師
研究者番号：5 0 3 9 1 7 4 3
澤田 真也 (SAWADA SHIN'YA)
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授
研究者番号：7 0 3 1 1 1 2 3
成木 恵 (NARUKI MEGUMI)
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教
研究者番号：0 0 4 1 5 2 5 9

(3) 連携研究者

佐藤 皓 (SATO HIKARU)
高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・加速器第一研究系・研究員
研究者番号：8 0 1 0 0 8 1 6
三輪 浩司 (MIWA KOZI)
東北大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：5 0 4 4 3 9 8 2
黒澤 真城 (KUROSAWA MAKI)
理化学研究所・延興放射線研究室・協力研究員
研究者番号：1 0 4 6 2 6 8 1