

令和 2 年 6 月 29 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05477

研究課題名(和文)超高速イメージ撮像管の開発

研究課題名(英文)Development of high speed image delay tube

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：粒子ビームを使用する原子核・素粒子反応を測定する実験において、反応に関与する粒子の軌跡を直接観測し、10MHzまでの画像事象を選別・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。光を光電子に変換する入力側の素材を検討したのち試験機を作成し、性能試験を進めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大強度の粒子ビームを使用する原子核・素粒子反応を測定する実験において、標的とその近傍でおこる粒子の入射・生成・崩壊等の特徴的な軌跡を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。粒子ビームに関わる研究開発等にも応用の道は広がると期待される。

研究成果の概要(英文)：High Speed Image Delay Tube (HSIDT), which could manage images with 10MHz in nuclear and particle physics experiments by using particle beams, 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 made. Basic performances were tested.

研究分野：原子核物理学

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2次ビーム J-PARC

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

バリオン間相互作用を解明する実験ではハイペロンの観測が重要な鍵となる。J-PARC のハドロン実験施設で可能となる大強度 2 次粒子を用いて、ハイペロンの生成と反応、ハイパー核の崩壊などを観測する。KEK-PS などの旧来の施設での実験結果に比して、統計精度を二桁以上改善する試みとなる。ストレンジネス量子数を有するハイペロンやダブルハイパー核は、生成後 10^{-10} 秒程度で崩壊する。従って、大強度環境下にて、注目する現象の反応点近傍の数 cm の領域にて関与する散乱粒子や崩壊粒子を効率よく観測する手法が重要となる。

核子(陽子と中性子)は u クォークと d クォークから構成される。ここに、ストレンジネス量子数を有する少し重い s クォークを加えた SU(3)の枠組みの元で、核子をバリオンの一構成子と捉え、核力をバリオン間相互作用としてより総合的に理解し、その特質の根源に迫る。この枠組みの元で、実験的にバリオン間相互作用を解き明かす試みが進展している。

[ハイペロンと陽子の散乱実験]

核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。このような性質の抽出には核子同士の散乱実験が大きな役割を担ってきた。核力は中間子交換で非常に良く記述できるものの、“斥力芯”等は現象論的な理解に留まっている。この核力をバリオン間相互作用として解明する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る中、J-PARC ではハイペロンと陽子の散乱実験が推進されている。

[ダブルハイパー核の探索と構造研究]

ハイペロン同士の相互作用の強さを決定することは、バリオン間相互作用の統一的な解明に重要な柱となる。ハイペロン同士の散乱実験は困難である。従って、この探求にはハイペロン 2 個を原子核に加えたダブルハイパー核の探索とその構造研究が非常に有効な手段である。J-PARC では原子核乾板を用いたエマルジョン実験によるダブルハイパー核生成実験が進められている。

これらの実験では、ハイペロンの生成と反応やハイパー核の崩壊などの観測が重要な鍵を握る。これまで科研費などで開発試作を続けてきた「超高速イメージ撮像管」は、J-PARC で得られる K 中間子ビームの最高強度(10^7 事象/秒)を処理することを可能とし、シンチレーティングファイバー等を効果的に配置すれば、反応点付近の事象に関わる荷電粒子を精度良く観測する事ができる。高性能画像検出器システムとしての完成は「超高速イメージ撮像管」開発当初の最終目的である。

2. 研究の目的

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。また高速カメラ技術のみでは、いつ起こるかかわからない物理事象の撮影についての対応は難しく、短い時間に起こる現象では‘記録すべき’と判断した時点で、画像として観測する一連の事象は既に終焉してしまっている。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。特に、記録の可否判断に余裕を持たせるため、画像「保持」の目的のため蛍光体の残光時間を長くすると、画像処理システムとしての処理速度は遅くなる。例えば、入射ビーム強度の上限の制約、画像処理に伴う比較的長い不感時間等を余儀なくされていた。これらの制限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

本研究の目的は、蛍光体の残光に頼らず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。これにより外部トリガーが可能な真の『超高速イメージ撮像管』を実現することである。

超高速イメージ撮像管の画像保持は、撮像管中の光電子の移動を利用する。出力部での蛍光体の残光利用の方法と異なり、引き続き事象同士の画像としての重なりは小さい。また、移動している光電子群の一部にパルス電圧を印加して出力側に蹴り出すことにより、対象とする画像の選択を行っている。従って、パルス電圧の数ナノ秒の時間幅が露出時間に相当し、撮像管としての撮影速度を決める。この性能と撮影速度をレーザー光などと光電子増倍管等により評価する。

3. 研究の方法

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。

原子核・素粒子反応等の測定したい事象がいつ起こるかかわからない対象の撮影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。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。この撮像管は、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。

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。

ソレノイド磁場により入力的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。

‘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。

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。

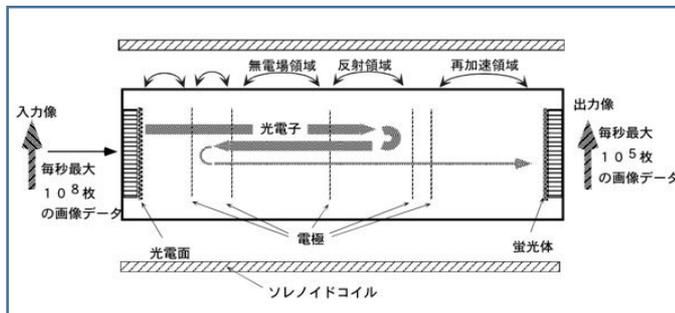


図1 超高速イメージ撮像管の動作原理図

試験機により、撮像管としての①～④の要素を確認しながら性能を調べる。出力側の輝度と位置分解能を測りながら、印加電圧や外部トリガー信号幅との相関を評価する。必要な事象に対してのみ撮像管にパルス電圧を印加する為に、短い繰り返し可能なパルス発生電源を用いて試験する。主要パラメータの設定、細部寸法の決定等を平行して進めながら、撮像素子の仕様を詰める作成したイメージ撮像管の撮影速度をレーザー光と光電子増倍管等により評価する。

イメージ撮像管の各部の長さ、電子発散を抑制するソレノイド磁場強度などの最適化を行うとともに、撮像素子の選定とデータ取得方式の設計を行う。撮影速度に対応する撮像素子をイメージ撮像管本体に組み込み画像としてデータ収集可能とする。

システムを構築し、解像度と撮影速度等の総合性能を評価する。テストの解析結果を踏まえて、実用機としてのシステムの設計を行なう。

4. 研究成果

(1) 撮像管試作機

撮像管内の電子移動時間、および、入力光電材料の特性等を調べるために、全長が 332mm の試作機を全長 123mm まで短くできるように改造し組み上げた。これにより、撮像管の全長を変えて試験を行うことが可能になる。旧試作機では、真空引口は本体中央部に動径方向に取り付けていた。この取り付け方では撮像管本体が横方向に大きくなる。真空引口を入力部側に設けて、撮像管本体をソレノイド磁石の内部に納め易いように改善を行った。これにより、より均一な磁場での試験が可能になる。

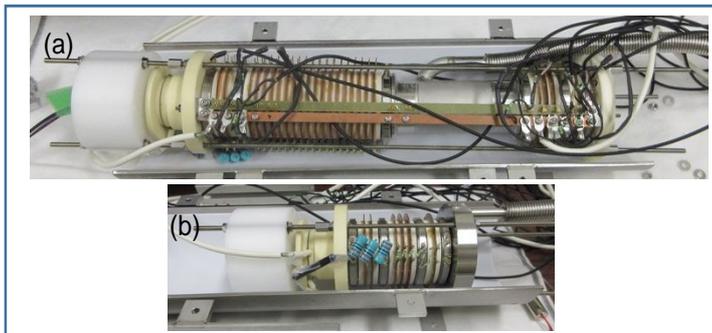


図2 撮像管本体：(a)332mm に組み上げた状態と(b)123mm に短くした状態。どちらも右が入力側で左が出力側。

(2) 光電面材料選択

撮像管は入射光子と入力窓に塗布または蒸着された物質との光電効果により電子に変換する。この入力側の光電面材料に光電効果の仕事関数が 2.3eV との報告がある酸化ネオジムを蒸着した窓材を採用した。この酸化金属は他の金属などに比べて仕事関数が低く、青色より短い波長のレーザー光などを使用すれば光電子を発生できる。また、通常の撮像管や増倍管で使用されている光電材質に比べ、空气中に曝しても安定であり、かつ、潮解性はない。試験において撮像管本体の解体・各部の改良・組み上げを幾度も試みる本開発には、最適な素材となる。開発試作機において、クォーツとファイバースプレイト(FFP)の2種類の窓材に、酸

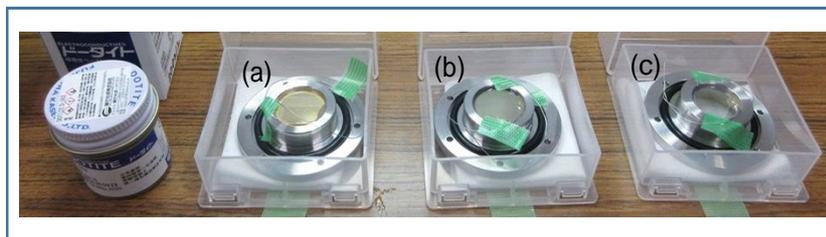


図3 入力側の窓：(a)クォーツ窓に金を蒸着、(b)FFP 窓に酸化ネオジウムを蒸着、(c)クォーツ窓に酸化ネオジウムを蒸着。光陰極への電圧設定リード線は導電性接着剤にて蒸着面に固定

化ネオジウムを蒸着した新しい窓と、比較のために仕事関数が 5.3eV の金を蒸着した窓を用意した。入力側の枠に固着したのちに、撮像管に組み込んだ。当初は目的とする高真空になかなか到達する事ができなかった。各部の洗浄、真空排気装置から撮像管本体までの真空配管経路の短縮などを試み、目標とする真空に到達し、所定の高電圧まで印加できる状態になった。

(3)電圧印加と出力

撮像管の真空を 7×10^{-4} Pa 程度に維持し、陽極側に 8kV までの高電圧を印加し試験を行った。

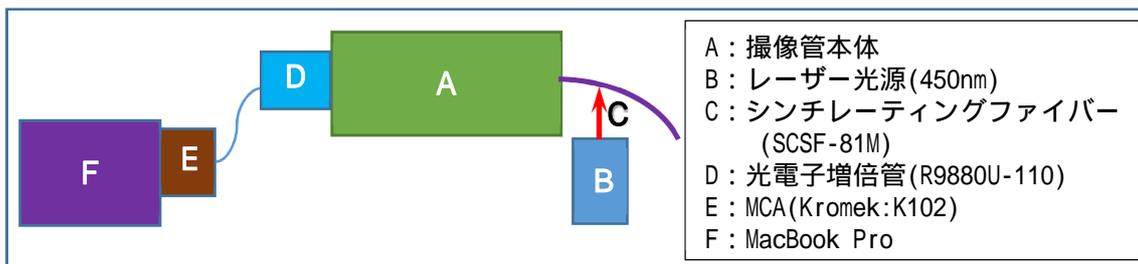


図 4 試験用セットアップ模式図



図 5 試験の様子。撮像管は黒布で遮光された暗箱にある。

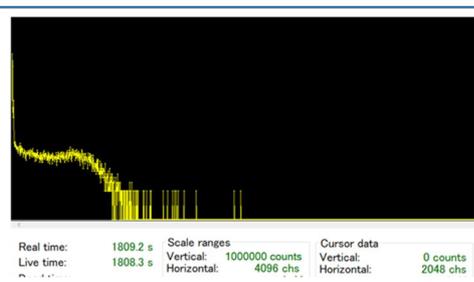


図 6 出力波高分布

現在、レーザー光やシンチレーティングファイバー光などによる試験を継続して行っている。

(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、入力窓の光電素材や撮像管本体、高電圧電源、パルス電源、高速カメラ、データ収集用システムの試験環境を整備することができた。しかし、期間内に本来の高性能画像検出器システムとしての完成には至っていない。試験すべき項目は、まだ山積している。

今後、性能試験を継続して実施する。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、イメージ撮像管をパルス電圧に対応できるよう調整等を行い、性能向上と評価を行う予定である。テストビームが使用できる加速器施設にて、最終的な総合性能の評価と大強度陽子加速器施設(J-PARC)でのハイペロン-陽子散乱実験などへの実用化の検討を行なう。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----