

立教大学学術推進特別重点資金（立教 S F R）
プロジェクト研究（共同研究科プロジェクト研究）
2003年度研究（経過・成果）報告書

研究科名	立教大学大学院 理学研究科		
共同研究科名等	理化学研究所 応用原子核物理研究室		
研究課題	時間反転対称性の破れ探索実験用 β 線飛跡検出器の開発		
研究代表者	所属・職名	氏名	
	理学部・講師	村田 次郎 印	
研究組織	所属大学名等・職名	氏名	
	立教大学理学部・助教授	栗田 和好	
	理化学研究所応用原子核物理研究室・主任研究員 兼 東京工業大学理工学研究科・教授	旭 耕一郎	
	理化学研究所応用原子核物理研究室・研究員	上野 秀樹	
	理化学研究所応用原子核物理研究室・基礎科学特別研究員	長谷山 智仁	
	理化学研究所応用原子核物理研究室・研究員	吉見 彰洋	
	理化学研究所応用原子核物理研究室・協力研究員	渡辺 寛	
研究期間	2003 年度	～	年度
研究経費	2003 年度	年度	総計
	6000 千円	千円	千円

研究の概要 (200～300字で記入、図・グラフ等は使用しないこと。)

理化学研究所応用原子核物理研究室にて開発・建設の進められている、加速器で生成される不安定核ビームをガスを捕集体として停止・輸送させ超低速偏極原子線を生成する装置を利用した、時間反転対称性の破れの検証実験に使用する β 線飛跡検出器の開発及び建設を行った。2003年度一年間で、大型の平面型ドリフトチェンバーの計算機シミュレーションから設計、プロトタイプではなく実機の製作及び運転試験まで達成し、2004年度中にも実際にビームを用いた実験を実現できることが期待される。主に立教が担当したドリフトチェンバーを用いると、RI 停止・輸送装置の開発にも非常に有利になることなど、本プロジェクト以外からも理化学研究所の実験に於いてドリフトチェンバーの登場が切望されており、共同研究科プロジェクト研究として大きな相乗効果を達成、また今後の多くの実験での活躍を期待されている。

キーワード (研究内容をよく表しているものを3項目以内で記入。)

[ドリフトチェンバー] [飛跡検出器] [ベータ崩壊]

研究【経過・成果】の概要 (図・グラフ等は使用しないこと。)

本年度はまず、予算承認を受けて予算規模に適した最大規模の検出器を製作すべく、検出器シミュレーションを行った。低予算、かつ短期間での確実な建設を考慮し、3次元飛跡検出の標準技術が確立しておらずリスクの伴うシリンドリカル・ドリフトチェンバーは採用せず、申請通りの平面型ドリフトチェンバーの設計を行った。通常のドリフトチェンバーではセンスワイヤーとフィールドワイヤー間の距離に比してセンス・フィールド面とそれを挟むカソード面との距離であるギャップを小さく設計する。これはセンス面上での2次元位置情報にも関心がある様な、ビームライン構成要素としての検出器に特化している為である。一方、本実験はノズルから発生する細い原子ビームからの崩壊事象を捉えるものである為、平面型チェンバーを用いると入射角度が面に対し大きくなり通常の設計では斜め入射によるドリフト時間と位置との相関関係に大きな誤差が生じる様になり、位置分解能、そして3次元飛跡決定分解能に悪影響を及ぼす。この様な場合、近年ハニカム構造と呼ばれる、カソードとセンス・フィールドワイヤーを半セルずつずらしたセンスワイヤーまわりの軸対称性のよい構造を採用する場面が出てきた。この配置は電位分布を美しくとれる一方で高製作コストに結びつく、ワイヤー構造が多少複雑になる面がある。そこで本研究では正方形格子に近い単純なコンフィグレーションで軸対称性とワイヤー中心からのドリフト時間の分布の一様性を同時に満たす可能性を探った。ドリフトチェンバーの標準的シミュレーションコードである Garfield を用いて電位分布、ドリフト速度分布、そしてセンスワイヤー上での信号の大きさ及び時間構造のチェンバーガス及び印加電圧依存性を探った。本実験ではレートが低い為、ドリフト速度などはあまり重要でなく、高位置分解能を得る為にドリフト分布の一様性が最も重要な要請項目である。又、実験環境の安全管理の観点から可燃性ガスの使用を避けるという条件も課した。信号の大きさについては実際の読み出し時には直接前置増幅器に入力するのではなく、ひとつのセンス面に配置されたセンスワイヤーをディレイラインに接続させ、ディレイラインの両側に達した時間差と外部トリガーとの時間から位置を特定する方針である為、実際のディレイラインを用いたテストが評価には必要である。その為、幾つかの可能なガス混合比や印加電圧のパターンを探り、いずれも実現出来るワイヤーの幾何学的配置を決定した。

平面型ワイヤーチェンバーの構成方法には2種類ある。巻線機を用いて薄いワイヤー面を一面ずつ構成し、重ね合わせて作成する方法と、ワイヤーフィードスルーを用いる方法である。前者は構造に多少の制約があり、後者はワイヤー配置が自由になる利点がある事からフィードスルー方式を採用した。センスワイヤーは20ミクロンの Gold Plated Tungsten Wire を用いた。これはディレイラインでの信号減衰の対策として、可能な限り径の細いワイヤーを用いる必要があった為である。構造は $XX' - UU' - VV'$ のセンス面をカソード面で交互に挟み込む、13面+前後にスクリーン面で構成する。3次元直線飛跡決定には $YXYX$ の4面情報が通常必要であるが、 X 面に対し垂直に Y 面を設定する代わりに斜め方向の面を U, V の2面用意する事で3面での飛跡決定が可能となる。実際には、センスワイヤーからの動径距離情報だけが得られる為方向の不定性があり、これを取り除く為に各面には半セルずつ位置をずらせたもう一面を配置する必要がある。従って、最終的には上記の $XX' - UU' - VV'$ という6面が必要となる。各センス面は、センスワイヤーとフィールドワイヤーを交互に平行に並べた構造で、ワイヤー間隔は1cmである。ワイヤー間隔が小さいほどドリフト距離が短い為、検出器としての動作速度はワイヤー間隔にほぼ逆比例して速くなる。これは高レートでの測定にも耐えられるようになることを意味する一方で、製作コストもかさむ。本実験ではカウントレートは比較的低い為、低コストを実現する為に可能な限り間隔を大きくとることにした。フィールドワイヤーの電圧は負側の高電圧に設定し、電離電子をグラウンドレベルのセンスワイヤーまでガス中をドリフトさせて、そのドリフトに要した時間からドリフト距離を求める事がドリフトチェンバーの動作原理であるが、その為にはドリフト速度をドリフト領域全体でほぼ一定に保つ必要がある。今回は単純な正方形セルを並べた形で一様ドリフト速度分布を得られるよう、シミュレーションに基づいた設計を行った。その際に、考慮すべきは上述の通り通常の平面型ドリフトチェンバーの用途と異なり、大角度での入射イベントが多い事であり、ドリフト時間分布をセンスワイヤーのまわりにはほぼ軸対称に実現する必要があった。その為、フィールドワイヤーとほぼ同じ電位に設定するカソード面をセンス・フィールド間隔とほぼ同じ距離離してとることが自然な設計である。結果として、かなりZ方向の高さの高いチェンバーとなった。この大きなギャップ高を実現するにはワイヤーフィードスルーを用いるのが最も効率的である為、フィードスルー方式のチェンバー作成技術を持つ林栄精器に部材の製作からワイヤー張り作業等までを依頼した。ワイヤーフレームの製作及びワイヤー張りは林栄精器に発注した。製作は筑波の作業所で行い、全627本のワイヤー張り作業を依頼した。ワイヤーは約150gWの張力でフィードスルーに半田付けで固定し、張力の測定を行った。ワイヤー張力は電磁波を照射した際の振動から決定した。ほぼ全てのワイヤーが0.5gW以内の精度で一様張力を持っていることを確認した。

研究【経過・成果】の概要 つづき

ワイヤー張り作業終了後、25 ミクロン厚のアルミニウム蒸着マイラー膜をガス封じの為のウインドー素材として用い、ガスのリーク検査、続いて高圧印加試験を行った。ガスチェンバーは所定の高電圧を印加出来るまでに、内部に付着したほこりなどによる放電を抑える為徐々に高圧を印加するトレーニングが必要であるが、今回はかなりクリーンな環境に気を使った結果、殆どトレーニング期間を設ける事無く、環境湿度 60%にて必要な高圧印加に成功した。

高圧試験後、Ar 50% + ethane 50% 混合ガスを用いた信号チェックを行った。55Fe 線源を用いた所、印加電圧 2kV にて信号が観測され始め、約 3.0kV にて連続放電状態となる直前で、波高約 70mV の生信号の生成が観測された。全てのアノードワイヤーからの信号の確認までを筑波工場にて行い、続いて理化学研究所に移動させた。安全性とプレミックスの扱いやすさを考え、P10 ガス (Ar 90% + methane 10%の混合ガス) を用いたガスフローシステムを構築した。入射膜の保護の為、内圧を常に 5mmH₂O 以下に保ちつつ、100cc/min でガスをフローさせるシステムを製作し、約 1 週間かけて大気との置換を行った。続いて P10 ガスを用いた高圧印加試験、信号生成確認試験を行い、約 1600V 付近から十分な波高の信号が観測可能ながわかった。約 2.5kV 付近から連続放電状態となり、ドリフト時間分布のシミュレーション結果を踏まえて、最適な印加電圧の選定及びドリフト時間と位置との関係の計算を現在進めている。

チェンバー本体の試験と合わせて、読み出し回路系の構築も進めている。P10 ガスを用いた試験運転で十分な波高が得られることが確認できたので、前述のディレイライン方式が信号のディレイライン中での減衰を考慮しても十分採用可能であることがわかった。プリント基板上にディレイラインパターンを作成したテスト機を用いて信号の遅延、減衰及びクロストークなどを試験している。十分にディレイライン両端での波高が期待できる為、プリアンプは一面 2 チャンネルを用意すればよい。プリアンプには現在ドリフトチェンバーの時定数に合わせて開発の進められている ADS チップを搭載した 16ch プリアンプカードを試用している。新型の ADS チップ搭載機は 2004 年 5 月頃に完成する予定であるが、それまでは時定数の短い ADS チップを用いて試験を行っているが、収集可能な電荷が少ないにも関わらず十分な性能を確認出来ている。ディレイライン読み出し部分の開発をプリアンプを含めて 2004 年 5 月中にも終了し、CAMAC-TDC を用いた小型データ収集系の全システムを 7 月頃までに完了させてチェンバーの分解能測定などの性能評価の後、ビームを用いた実際の実験に用いていく予定である。

とりわけ、時間反転対称性の破れの実験に必要な、RI ビームの捕集装置の開発実験にまず使用する。これは主に理化学研究所側が担当しているガスを捕集体とした不安定核ビームの停止、及び静電場を用いた停止 RI イオンの引き出し装置の最適化の為に、 β 崩壊する RI の位置を特定する目的で精確な β 線飛跡検出器がこの時間反転対称性の本番実験以前に必要とされている為である。ヘリウムガスを捕集体とした場合、入射ビーム総量の約 0.1%が真空の崩壊観測空間に原子線として放出されたことが 2003 年度に進めたテスト実験で確認出来た。しかし、さらに効率を上げて実験の統計精度を上げる為、停止装置内部での電極へのイオンの吸着や空間電荷効果によるロスなどを調査することが現在最も重要となっている。より阻止能力が高く、イオンの中性化率の低いネオンガスの使用が最も期待できる為、こちらは現在プラスチックシンチレータテレスコープを用いた RI 引き出しの開発実験を進めているが、検出器自身の位置分解能が数 cm しかない為、十分な調査が難しい状況にある。そこで、本プロジェクトで開発したドリフトチェンバーを用いて、位置分解能 100 ミクロンでの測定が出来れば具体的にどの内部電極をどのように変更すればよいか、などの非常に重要な情報が簡単に得られる為、ドリフトチェンバーの始動が大きく期待されている状況である。

以上の様に、本プロジェクトの目標である、時間反転対称性の破れの為のドリフトチェンバーの開発は、本実験の鍵となる技術である RI ビームの停止・輸送技術の開発においても欠かせない役割を期待されており、なおかつ 2003 年度中にシミュレーション、設計から製作、信号確認まで達成した開発速度を踏まえると、検出器系と停止・輸送系両技術の融合による世界初の停止 RI の自由空間での β 崩壊の観測が 2004 年度中に可能であると期待される。

研究発表 (研究によって得られた研究経過・成果を発表した①～④について、該当するものを記入してください。該当するものが多い場合は主要なものを抜粋してください。)

- ①雑誌論文 (著者名、論文標題、雑誌名、巻号、発行年、ページ)
- ②図書 (著者名、出版者、書名、発行年、総ページ数)
- ③シンポジウム・公開講演会等の開催 (会名、開催日、開催場所)
- ④その他 (学会発表、研究報告書の印刷等)

論文

J. Murata, "Fundamental Beta Decay Experiments at RIKEN-RIBF", Czech. J. Phys. Vol. 54, 2004 (in press)

A. Yoshimi et al., "Nuclear Spin Oscillator and Search for Atomic EDM of ^{129}Xe ", Czech. J. Phys. Vol. 54, 2004 (in press)

J. Murata "Nano-Precision Optical Alignment System for Muon Tracking Chambers", *Progress in Muon Research*, Nova Science, 2004 (in press)

H. Ogawa et al., "Electric Quadrupole Moment of B-17 and Anomalous E2 Effective Charges for Neutron Rich Nuclei", Phys. Rev. C67, 064308, 2003

J. Murata et al., "Optical Alignment System for the PHENIX Muon Tracking Chambers", Nucl. Instrum. Meth. A500, 309, 2003

H. Miyatake et al., "Spin-parity assignments in $^{15}\text{C}^*$ by a new method: beta-delayed spectroscopy for a spin-polarized nucleus", Phys. Rev. C67, 014306-1-9, 2003

W. Sato et al., "On-line TDPAC studies with the 190 beam", J. Radioanalytical and Nuclear Chemistry 255, 183, 2003

H. Watanabe et al., "g-Factor of the high-spin isomer in ^{149}Dy and a multi-quasiparticle configuration caused by the N=82 core excitations", Nucl. Phys. A728, 365, 2003

H. Watanabe et al., "Lifetime of a new high-spin isomer in ^{150}Dy ", Euro. Phys. J. A19, 164, 2004

Y. Kobayashi et al., "Valence Status of ^{57}Fe Decayed From ^{57}Mn Implanted into KMnO_4 ", J. Radioanal. Nucl. Chem. 255, 403, 2003

学会発表

H. Miyoshi et al., "Atomic Beam Method for the Fragmentation-Based Radioactive Beams", Spin and Quantum Structure in Hadrons, Nuclei and Atoms (SQS04), Feb. 19-21, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, 2004

J. Murata, "Fundamental Beta Decay Experiments at RIKEN-RIBF", SPIN-Praha-2003 SYMMETRIES and SPIN, Prague, July 12 - 19, 2003

A. Yoshimi, "Nuclear Spin Oscillator and Search for Atomic EDM of ^{129}Xe ", SPIN-Praha-2003, SYMMETRIES and SPIN, Prague, July 12 - 19, 2003

J. Murata, "Fundamental Physics using Slow RI Beam", Slow RI-Beam Workshop, RIKEN, Wako, May 16, 2003

K. Asahi "Neutral RI Beams for ABMR", Slow RI-Beam Workshop, RIKEN, Wako, May 16, 2003

K. Asahi "Nuclear moments and condensed matter studies with polarized RI beams", Exploratory Workshop on Polarized Radioactive Beams and Polarized Targets, Strasbourg, France, March 6-7, 2003

K. Asahi "Measurements of Nuclear Moments for Light Unstable Nuclei", Gordon Research Conf., June 15-20, New London, NH, USA, 2003

以上、関連研究のものを抜粋

研究【経過・成果】の詳細**<申請当初の計画・目的の達成度>**

申請当初は本年度は平面型ドリフトチェンバー1号機の設計、製作、性能評価を行いかつディレイライン基板の開発を行う予定であった。円筒型に比して安価で比較的取り扱いの容易な平面型のチェンバーを用いる際に欠点となる、大入射角度のイベントに対する分解能の確保の為にワイヤーコンフィグレーション及びガス、電圧配置のシミュレーションを行い、ほぼ全角度に対して十分な飛跡決定分解能を確保できる設計を行った。また限られた予算枠内での最大効果を上げる為、分離発注及び作業の自己負担を検討し、可能な限り最大の検出器を製作する事が可能となった。その結果を受けて実機1号機を製作し、ガスリーク試験、高圧印加試験、生信号試験を行った。高圧配線、試験などを林栄精器の工場に出向いて申請者自ら作業を行う事でコストの削減、及び低予算での大型化が可能となった。プロトタイプではなく実機の建設、試験まで完了させ、非常に高水準で目的を達成出来た。

<優れた成果があがった点>

本実験は観測対象である不安定核原子線生成装置であるRIKEN-ABSが平行して開発中であることから、生成されるガスジェットの性質に対応して実験遂行可能な柔軟なセットアップを考案する必要がある。飛跡検出器としては幾何学形状として円筒型が適しているが上記の柔軟性に大きく欠ける為、大入射角度を通常不得手とする平面型を採用した。その欠点である大入射角イベントに対応できる設計を考案することで柔軟性と必要性能の確保という、ここでは相矛盾するかの要求を達成することに成功した。また、平面型の採用により低予算で大型のものを実現させることも出来た。Garfieldを用いた詳細なシミュレーション検討を行い実現可能なコンフィグレーションを発見し、その結果を受けて仕様の決定、具体的な設計、実機の製作から試験、信号確認までを単年度で遂行しえた開発速度自身、優れた成果と言える。また、開発に際し理研側との協力関係、林栄精器とのコラボレーションをうまく利用し、開発時間の短縮に成功したことも成果を支えていると言え、今後の研究開発の上での大きな足がかりが出来たと言える。

<問題点>

本研究プロジェクトに掲げているドリフトチェンバーの開発に関して、特に問題点はなかった。一方、ドリフトチェンバーを用いて行う、時間反転対称性の破れ、あるいはベータ・ニュートリノ相関実験の遂行に必要な一方の検出器である低エネルギーイオン検出器、及び観測対象である超低速RI線生成装置であるRIKEN-ABSの開発を平行して進めているが、こちらには若干問題があった。まず、低エネルギーイオン検出器については、2次元位置測定の為のヘリカルディレイラインアノードの試作機を製作し、性能評価を行ったが、位置分解能を必要以上に追求すると検出効率が落ちることが判明した。本実験に際しては必要十分な位置分解能をもつものに留め、必要な検出効率を確保するよう、注意する必要があることを学んだ。また、RIKEN-ABSの開発に際して、開発手段として現在用いているベータ線の飛跡検出器の分解能が必要値に及ばず、開発の足かせとなった。この問題に関しては本プロジェクトの主眼であるドリフトチェンバー自身をRIKEN-ABSの開発に参加させることで解決でき、ドリフトチェンバー使用のトレーニングとRIKEN-ABSの開発と、両者にとって非常に好都合な方向を見出すことが出来た。

<研究期間終了後（最終年度終了後）の展望>

大型外部資金の獲得が本予算の目標である為、検出器の製作だけでなく、ある程度の小規模のプロトタイプを用いた加速器実験を実施し、ベータ・ニュートリノ相関が見えたことをアピールすべく、プロトタイプ実験のセットアップの構築を進めている。具体的にはSF6 Gas Catcherを用いてRI原子線を製造し、位置情報を持たないマイクロチャネルプレート、及び本予算で製作しているドリフトチェンバーを組み合わせたセットアップを組み上げ、理化学研究所の重イオン加速器を用いた開発実験を2004年度中に行う。2004年度も予算継続が承認された場合は上記の物理の実験が実行可能となる。その結果を受けて大型科研費を獲得、或いは理化学研究所の大型プロジェクトとして理研からの予算獲得を目指し、全イオン検出器の2次元位置読み出しを含めた本番実験を実現させる事が将来の展望である。

<その他（該当する事柄があれば記入してください。）>

事業の取組状況（500字以内でどのような研究の取組を行ったかを簡潔に記入してください。）

本年度不要

事業の成果（500字以内でどのような成果があったかを簡潔に記入してください。研究の成果物があれば、その概要についても記入してください。）

本年度不要