

2012年4月23日

私立大学戦略的研究基盤形成支援事業中間評価報告書
「ピコスケール計測技術の開発とその基礎科学への応用」

外部評価委員
京都大学教授 伊藤秋男
J-PARC センター長 永宮正治
KEK/JAEA
名古屋大学名誉教授 山下廣順
(独)科学技術振興機構

1. 研究の目的

本事業は、科学計測法の開発に重点を置き、2001年度～2005年度に第1期計画、1) 光・イオン計測法の研究及び可搬型測定器の開発、2) 高度関連データ処理、その継続事業として2006年度～2008年度に第2期計画、「光・粒子精密測定法の新展開」のテーマのもと、A. 光精密計測法と基礎科学への応用、B. 表面精密計測法、C. 粒子計測法の新展開が3つの課題が実施され、それを更に発展させるために2009年度～2013年度に第3期計画「ピコスケール計測技術の開発とその基礎科学への応用」として進められている。

科学計測技術を更に飛躍させるために、ナノスケールからピコスケールへと超精密・高精度化を目指して計測法の開発を進め、それによって基礎科学の先端的課題である「時空の構造」および「物質の構造」を解明することを目的としている。

本事業は、研究目的に適合したものであるが、タイトルの付け方には、やや無理があるところは否めない。立教大学として、まとまって事業を推進する折には、タイトルから多少外れるところもやむを得ない。むしろ、このようにまとまって目的を遂行するというポジティブな面を評価したい。

2. 研究組織

本事業の推進に当たっては、「先端科学計測研究センター」に所属する立教大学理学研究科物理学専攻の教員15名が中心となり、2つのテーマ「A. ピコス

ケール計測技術で探る時空の構造」、「B. ピコスケール計測技術で探る物質の構造」のもとに、粒子精密計測法・高速データ処理など共通する計測技術開発を相互に活用して研究プロジェクトの効率的な推進をはかる体制となっている。実験的研究だけでなく、理論的研究も含めて、基礎科学の推進を図っている。また、ポスト・ドクトラル・フェロー (PD) を採用するとともに、大学院生 (20 数名) も積極的に研究に参加している。

研究組織は主に理学系の研究者で構成されているため、工学系の研究者、企業の技術者等との互いの利点を活かした相補的連携・協力により、多様な視点から研究の展開を図る必要があるのではないかとと思われる。

立教大学は、歴史的には、私立大としては珍しく原子炉を保有していた。その頃からの伝統であろうか、組織的には、まとまった研究をするのにふさわしい環境が整っていると思われる。一方、大学にある自由な雰囲気も感じられ、まとまりを呈しつつ、各自ほぼ独立に研究を進めているのには感心した。このようなバックグラウンドがあるため、長年、こういった組織が続いているのではないかと思う。

3. 研究内容と成果

本研究は、2つのテーマ「A. ピコスケール計測技術で探る時空の構造」、「B. ピコスケール計測技術で探る物質の構造」と4つの研究項目からなり、それぞれの研究成果と評価について述べる。

A. ピコスケール計測技術で探る時空の構造

A-1. 宇宙ブラックホールの探求

1) X線干渉計の開発

ピコラディアン (マイクロ秒角) の角分解能での宇宙観測を実現するために、多層膜と用いたX線半透膜によるX線干渉計の開発を進めている。その基礎実験として、Al-KX線発生装置を利用したコヒーレント光源による回折像の観測を目指している。目標達成には、多くの時間と経費が必要であるが、意欲的な研究を評価したい。

2) 衛星搭載用可半搬型計測器の開発

真空紫外領域の大気光の撮像観測のために、回折限界の性能を有するシュミットカメラの開発は、技術的な問題の解決を図り、将来のロケット、衛星搭載機器の基礎開発として評価できる。

3) シリコン半導体検出器による高エネルギー宇宙線粒子の観測

GEOTAIL衛星に搭載したシリコン半導体検出器で得られたデータの解析において、入射粒子の核種とエネルギーを効率よく求める解析法を導出した。今後の宇宙観測で得られる粒子線の解析に有効である。

4) 一般相対性理論によるブラックホールの研究

ブラックホール物理学、特に高速回転するブラックホールに関する優れた理論的研究であり、実験的研究に示唆を与え、方向付けをするものと評価できる。

A-2. 時空対称性の探究

1) 時間反転対称性の実験および近距離重力実験

偏極原子核よりのベータ崩壊の精密測定により、時間反転性を検証するのが第一番目の実験。TRIUMFで実験進行中。第二番目の実験は、ピコ精度変位計測システムによる重力の逆二乗則からのずれを測定する研究。どちらも重要な研究であるが、結果を得るためにはかなり頑張らなくてはならない。努力が逸散しないよう、集中すべきところを十分に理解して、頑張ってもらいたい。

2) 弦理論による余剰次元の理論的研究

超弦理論において「超弦の場の理論」は重要である。この場の理論が成立しているかどうかの考察を深めた。さらに、自発的超対称性の破れ等も研究を深めた。研究成果は、International Journal of Modern Physics 等に長い論文として発表されている。

B. ピコスケール計測技術で探る物質の構造

B-1. 原子・分子・クラスター・固体表面の構造の解明

1) 原子・分子クラスターの構造の実験的研究-カイラル分子クラスターイオン移動度におけるカイラリティ依存性-

移動管を用いたイオン移動度測定法は立教大学が得意とする技術で、この手法によりカイラル分子クラスターイオンを選別しカイラル分子標的との間の衝突反応のカイラリティ依存性に関する研究である。この種の実験的研究は世界的にも例が無く独創的な研究課題である。特に熱エネルギー領域における運動量移行断面積測定は他の計測法では困難であり、多原子分子粒子間の相互作用ポテンシャルに関する詳細な情報が得られることが期待される。新しいイオン源として開発したLiイオン付着型クラスターイオンビームの強度は従来の10倍以上あり、He気体中の移動度測定に成功しており今後とも継続すべき課題であると評価できる。また、関連技術として検出効率90%（従来60%）のテーパ

一型 MCP を率先して採用するなど、分子解離研究の実験分野への波及効果は大きいと考えられる。

2) 希ガスクラスタールおよび希ガス固体表面の実験的研究

極めて弱いファンデルワールス力により結合した希ガスクラスタール・希ガス固体に対する電子的励起効果の解明を目的とした研究で、他の類似研究と比較して高い研究成果を得ている。希ガスクラスタールについては入射電子エネルギー及びクラスタールサイズに対する系統的な実験を電子エネルギー損失法により行い、クラスタール粒子のバルク励起に加え表面原子のみの電子的励起の観測に成功している。

希ガス固体に関しては低エネルギー多価イオンによる表面スパッタリング過程を研究対象としており、表面脱離したクラスタールイオンの運動エネルギー分布やその試料温度依存性および膜厚依存性等を測定し、固体内でのクラスタールイオン成長機構についての新しいモデルを提唱している。更に、極低温 (~5K) 領域での固体内ホール移動度を測定することに成功しており、今後の新しい移動度測定法として注目される。特に、数 keV 程度のイオン 1 個で数千個の原子脱離を観測したことは高く評価できる。入射イオンの価数を変化させることで所謂ポテンシャルスパッタリングによる脱離イオンの観測に成功しており、研究論文は英国物理学会の IOP Select に選ばれたことは特筆に値する。

現在、新たに低エネルギー (10 eV - 100 eV) 真空紫外光ビームラインを設置し、シンクロトロン放射光に匹敵する光子強度を得ており、Ne 固体からのイオン脱離のしきい値を初めて決定することに成功しており、今後更に推進すべき研究課題であると評価できる。

3) 光電子分光による表面選択的二次元電子状態の計測

この研究で特筆されることは、Si 基板上に金ナノ粒子 (粒径 5~20nm) を自己組織化的に直鎖状に配列させることに成功している事で、応用上大きな波及効果のある研究成果である。関係する研究員が移籍するために本研究課題は中止するとの事であるが、本プロジェクトに密接に関連するものであり、方策を考えて頂きたい。

B-2. 原子核の構造の解明

1) 高バックグラウンド環境における 100keV-1MeV 領域イオンの検出技術開発

SCRIT という装置は、理研 RI ビームファクトリー内に設置された「電子とイオンの小型衝突装置」である。特に、イオンとして、RI ビームファクトリーで

作り出された中性子過剰のイオンを用いると、今まで測定不可能とされていた不安定原子核の電荷分布が測定できる。本装置のユニークな点は、イオンを静止させ、そこに電子を照射する点にある。この場合、反跳イオンを捉えることが重要である。本研究は、この反跳イオンの製作と性能テストに重点が置かれている。すでにテスト実験は始まっている。

2) 3次元位置検出器型シンチレーターの開発

理研 RI ビームファクトリーで作られる中性子過剰のイオンからは、二つの中性子が近接して放射される。入射核が分裂して中性子過剰核が形成されるため、そこから放出される中性子も入射核とほぼ同じ速度を持つためである。このように近接した二つの中性子を分離するために、シンチレーターの側面の溝にファイバーを埋め込み、ファイバーの両端から光読み出しを行なう装置を開発した。光検出には、Multi-Pixel Photon Counter (MPPC) を用いた。もっか性能評価中で、今後、実験に用いる。

3) 不安定核の構造

このグループは、主として、ガンマ線カンターを用いて多くの原子核の構造を研究している。特に、原子核がまん丸くなる $N=28$ や 40 という魔法数が、中性子過剰核でも正しいかどうかを検証した。その目的のために、 $4+ \rightarrow 2+$ と $2+ \rightarrow 0+$ のガンマ線エネルギー比を系統的に測定した。その結果、中性子過剰核では、核子数 $N=28$ では、変形核に相当するガンマ線エネルギー比が観測され、中性子過剰になると $N=28$ や 40 という魔法数が正しくないことが判明した。今後もこのような測定を続け、より体系的に魔法数の存在を研究する。

4) クォーク・グルーオン系の基本相互作用からのアプローチ

理論計算のグループで、量子色力学 (QCD) において、摂動論で扱える領域とそうでない領域とを区別して扱い、理論的研究を進めている。陽子・反陽子散乱実験に始まり、ニュートリノの質量、有限温度や有限密度系の相転移、等、多くの課題を手がけている。

4. 総合評価

本事業が3年を経過した時点での中間評価であり、4つの研究項目について以下のように評価した。

・A-1 は、今後の計測技術の開発に重点が置かれていたため、現在の基礎科学研究との繋がりが明確でなかった。衛星観測データの解析による顕著な成果をもっと強調すれば、技術開発の意義が理解しやすい。

・A-2 は、重要な課題の追及という側面は認めるが、研究テーマをもう少し絞るべきだと思う。

・B-1 は、立教大学が有する複数の特長的な設備であるイオンビーム・電子ビーム照射装置を複合的に利用することで、孤立原子から固体表面までの表面構造を電子状態および電子的励起過程というキーワードで解明する事を目的としたプロジェクト研究である。我が国の大学の中では設備が比較的良く整っている事と、当該分野における研究者は他大学を見渡しても少ないことから独創的な研究成果を今後とも期待したい。

・B-2 は、データ収集が進行中の「不安定核構造」グループ、将来の長期の実験を企画している「SCRIPT」グループ、そして、検出器開発を行なっている「MPPC」グループが存在する。これらのグループが一体化して研究を進めると、さらに研究効率が上がると期待される。

理論と実験の結びつきに関しては、理論の方の興味を実験に強制的に結び付ける必要はないが、もう少しお互いに議論をして、理論・実験両面からの課題の解決という側面を開拓すべきであろう。

総合的には、本事業の研究成果は評価できる。共通の手段で異なった研究対象を1つの組織の中で研究することは、それぞれの研究を広い視野から位置付けることができ、教育にも有効に働き、益々推進されるべきである。ここで得られた研究成果を活かし、立教大学独自の先端的な計測技術の創出と、新たな研究プロジェクトへの発展を期待する。