

【研究領域名】 「原子が切り拓く極限量子の世界—素粒子的宇宙像の確立を目指して—」

【研究期間】 平成21年度～平成25年度

【領域代表者】 ささ お のぼる 笹尾 登（岡山大学・極限量子研究コア・教授）

## 【領域代表者からの報告】

### （1）研究領域の目的及び意義

本領域の目的は、原子物理・量子光学の発展を、宇宙・素粒子物理学に融合させ、新たな基礎物理学を創出することにある。具体的には、[A] ニュートリノ質量分光を進め、物質優勢宇宙を説明する有力理論（レプトジェネシス）の根幹部を検証する。[B] クォーク・レプトンの電気双極子能率(EDM)を測定し、暗黒物質を説明する最有力理論である超対称性理論、あるいは、より一般的に標準模型を超える理論の実験的証拠を提供する。[C] 微細構造定数( $\alpha$ )の時間変化を測定し、暗黒エネルギーが示唆する、全く新しい物理学に対する糸口を得る。[A]では、組織的なニュートリノ質量分光（質量絶対値の決定やマヨラナ性の検証等）の道を開拓することを目指す。このため、まず「二光子対超放射過程」を発見し、我が国発信の新原理「マクロコヒーラント増幅機構」の実証を行う。また量子干渉性に優れたナノ貯蔵標的の開発を行い、新原理を利用した世界初の原子ニュートリノ対検出を目指す。[B]では $^{129}\text{Xe}$  原子の EDM を、そして放射性元素フランシウム(Fr)を用い電子 EDM を現在の実験的上限值より2桁あるいは1桁高感度で探索する。EDM は時間反転対称性/CP 対称性の破れを意味すると同時に、もし有限な値が確立すれば標準模型を超える物理の証拠となる。[C]では、種類の異なる単一イオン光時計を3種類構築し、それらの周波数比の時間変化を測定することにより、 $\alpha$ の時間変化を精度 $10^{-18}$  台を目標に探索する。具体的には $^{171}\text{Yb}^+ \ ^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{3/2}$ 、 $^{2}\text{S}_{1/2} - ^2\text{F}_{7/2}$ 、及び $^{135,137}\text{Ba}^+ \ ^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{3/2}$ 等の遷移に対し測定を行う。時間標準の精密化は暗黒エネルギー解明の糸口となる共に、物理研究や現実生活に大きなインパクトを与えよう。

### （2）研究成果の概要

[A] では、理論的研究を進めマヨラナ位相( $\alpha, \beta$ )に感度の高い方法や二光子対超放射中のソリトン解等非常に興味深い現象を発見した。実験的研究を進め、超放射過程自身の理解を深めると共に、複数の原子や分子で二光子対超放射実験に不可欠な準安定状態を生成することに成功した。「マクロコヒーラント増幅機構」の実証実験を遂行し、更には世界初の原子ニュートリノ対検出を目指す。[B]では、 $^{129}\text{Xe}$  原子 EDM 測定に向け系統誤差の要因を精力的に改良し、周波数精度 5.2 nHz に到達した。これは印加静電場  $E_0 = 10$  kV/cm のとき EDM 値に換算し、現在の実験的上限值より1桁高感度であることを意味する。EDM セルに電場印加し実測定を行うと共に、より高精度な測定に向け系統誤差制御の技術開発を行う。一方、Frについては、新たな融解標的型表面電離イオン源の開発に成功し、同型イオン源での世界最高収量( $\sim 10^6$ Fr/s)を実現した。Frを冷却・トラップするためのレーザー光源、磁気光学トラップ(MOT)の開発を完了し、Frの輸送・中性化・トラップの各効率向上に向けた運転パラメータ最適化を進めた。[C]では、光時計のシステム構築を目指し、単一イオンを冷却し光の波長サイズに閉じこめる技術を確認した。 $^{171}\text{Yb}^+$ では量子跳躍信号を利用した $^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{5/2}$  時計遷移の基準スペクトル線の獲得、 $^{138}\text{Ba}^+$ ではレーザー光が得にくい赤外領域の時計遷移の量子跳躍信号の観測まで進捗した。不確かさがより小さい奇数同位体に対し、 $^{171}\text{Yb}^+$ でレーザー冷却法を確認した。今後はこれらの技術を統合し、不確かさ $10^{-18}$  台の光周波数比計測を目指す。総括班が中心になり、原子物理と基礎物理の境界分野の確立や化学と基礎科学の融合分野の開拓を主導した。

## 【審査部会における評価結果及び所見】

### A（研究領域の設定目的に照らして、期待どおりの進展が認められる）

#### （1）総合所見

本研究領域は、素粒子の問題を量子エレクトロニクスや原子分子の手法で取り組むという、非常に挑戦的課題を掲げた領域である。各研究グループ間が有機的連携を保った良い研究体制が構築されており、かつ、研究は概ね順

調に進展していると評価できる。これまでのところ、各要素技術の開発は着実に進捗している。東日本大震災のために研究計画の一部を修正する必要があるが、これをカバーする努力は十分に成されていると思われる。最終目標である大きな成果を出すにはまだ越えるべき多くのハードルが残されている。さらに、異分野との連携に関する具体的な方針もまだ明確とは言えない。研究期間の後半では、目標に向かって着実な成果をあげるとともに、異分野融合による新たな展開も期待したい。

## (2) 評価に当たっての着目点ごとの所見

### (a) 研究の進展状況

「既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域の創成を目指すもの」とする当該領域においては、基礎物理学、原子物理学、量子光学、化学の異分野の融合によって、我が国発の新しい研究領域を創成する挑戦的試みとして評価できる。目標が高く難しい取り組みではあるが、ここまでのところ準備・進捗状況を含めて上手く進んでいる。

「異なる学問分野の研究者が連携して行う共同研究等の推進により、当該研究領域の発展を目指すもの」という観点からは、総括班が中心となって各研究分野の連携を図り、要素技術の共同開発等が順調に進捗していることから、異分野融合の努力がなされていると判断できる。

「多様な研究者による新たな視点や手法による共同研究等の推進により、当該研究領域の新たな展開を目指すもの」としては、当初の目論見通り、各分野の一線の研究成果の共有によって、新たな視点手法による共同研究が順調に立ち上がっている。

### (b) 研究成果

「既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域の創成を目指すもの」とした当該領域においては、研究グループ間は良く連携して活動しているといえる。

「異なる学問分野の研究者が連携して行う共同研究等の推進により、当該研究領域の発展を目指すもの」という観点からは、異分野連携による種々の要素技術の開発に伴う新しい成果が出てきており、共同研究として順調に進んでいると評価できる。震災の影響はあるが、十分な努力がなされていると判断する。それをさらなる成果に繋げてほしい。

「多様な研究者による新たな視点や手法による共同研究等の推進により、当該研究領域の新たな展開を目指すもの」という観点からは、異分野連携による種々の要素技術の開発に伴う新しい成果が出てきており、共同研究として順調に進んでいる。加えて、海外との共同研究の努力がなされていることも評価できる。

「当該領域の研究の進展が他の研究領域の研究の発展に大きな波及効果をもたらすもの」という点では、異分野融合へのさらなる努力を期待する。

### (c) 研究組織

研究グループ間は良く連携して活動しており、特に、総括班により異分野融合の努力がなされている。各グループの協力をさらに進めるよう、今後に期待する。

### (d) 研究費の使用

特に問題点を指摘する意見はなかった。

### (e) 今後の研究領域の推進方策

「当該領域の研究の進展が他の研究領域の研究の発展に大きな波及効果をもたらすもの」とした当該領域においては、本領域の研究が順調に進展すれば、大きなインパクトがある成果につながり、他領域への波及効果も大きい。ここまでの要素技術開発は概ね順調である。ただ、新領域の創成に繋がるような大きな成果はこれからという段階ともいえるので、今後、他領域へ波及するような大きなインパクトをもつ成果の発信を期待したい。

また、「当該領域の研究の進展が他の研究領域の研究の発展に大きな波及効果をもたらすもの」として、異分野の成果を取りこむだけではなく、異分野に対するより積極的な貢献を望みたい。東日本大震災により一部の実験について計画変更を必要としているが、海外との共同研究等で、この状況を切り抜けていただきたい。