

領域略称名：極限量子
領域番号：2103

平成23年度科学研究費補助金「新学術領域研究
(研究領域提案型)」に係る研究経過等の報告書

「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—」

(領域設定期間)
平成21年度～平成25年度

平成23年6月

領域代表者 岡山大学・極限量子研究コア・教授・笹尾登

目次

[3] 研究領域の目的及び概要	Page-1
[4] 研究の進展状況	Page-2
[5] 研究を推進する上での問題点と今後の対応策	Page-3
[6] 主な研究成果	Page-4
[7] 研究成果の公表の状況	Page-21
[8] 研究組織と各研究項目の連携状況	Page-25
[9] 研究費の使用状況	Page-27
[10] 今後の研究領域の推進方策	Page-28
[11] 総括班評価者による評価の状況	Page-30

[3] 研究領域の目的及び概要

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

領域代表者所属・職・氏名：岡山大学極限量子研究コア・教授・笹尾 登

補助金交付金額：（年度別、研究領域全体の直接経費の額）

平成21年度：130,700,000円

平成22年度：226,800,000円

平成23年度：238,800,000円

平成24年度：221,600,000円

平成25年度：166,700,000円

本研究領域の目的は、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、(i) 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、レプトジェネシス理論の根幹部を検証する。(ii) 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。(iii) 微細構造定数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。本領域は、上記3つの課題に対応し、[原子ニュートリノの検出]、[永久電気双極子能率の測定]及び[微細構造定数の時間変化測定]の研究項目から成り立つ。

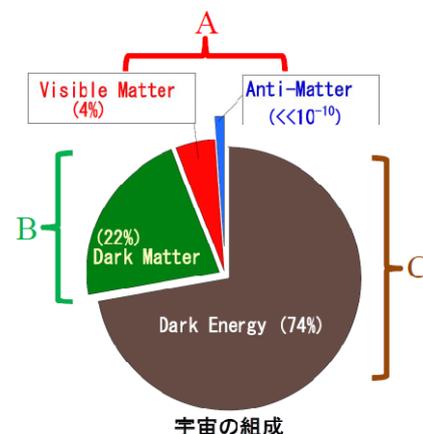


図1 宇宙組成と各計画研究

[A: 原子ニュートリノの検出] 本研究では、原子からのニュートリノ対生成過程を利用し、組織的なニュートリノ質量分光（即ち、質量絶対値の決定・マヨナラ/ディラック質量形式の弁別・マヨラナ位相角の測定等）の道を拓く。この目的のため、我が国発信の新原理「マクロコヒーレンス増幅機構(*)」を確立し、利用する。計画研究(A01)では、「二光子対超放射過程(PSR)(*)」を発見し、「マクロコヒーレンス増幅機構」の原理を実証する。また計画研究(A02)では、ナノ空間に貯蔵され、量子干渉性に優れた原子または分子標的集団の開発研究を行う。その後、両者の成果を合わせ、世界初の原子ニュートリノ対検出を実現する。

(*) これらの用語については、page-4-を参照。

[B: 永久電気双極子能率の測定] 電子やクォーク等の基本粒子が永久電気双極子モーメント

(EDM)を持てば、それは時間反転対称性(T)またはCP対称性の破れを意味する。EDMは、標準理論において極めて小さな値しかもち得ないため、近未来に有限な値が確立すれば、それは直ちに標準模型を超える物理の直接的存在証拠となる。計画研究(B01)では、 ^{129}Xe 原子のEDMを現在の実験的上限值($d(^{129}\text{Xe}) < 4.1 \times 10^{-27} \text{ ecm}$)の2桁下の領域まで探索することを目指す。これにより、実験感度は超対称性理論の予想領域に大きく侵入し、その意義は極めて大きい。また計画研究(B02)では、電子EDM増幅度が最大(1150倍)である放射性元素フランシウムを用いて、現在の実験的上限值($< 10^{-26} \text{ e} \cdot \text{cm}$)を1桁上回る測定技術の確立をめざす。電子(B02)およびクォーク(B01)の結果を合わせることで、大統一理論や超対称性模型の具体を詳細に規定することも可能となる。

[C: 微細構造定数の時間変化測定] 計画研究(C01)では、元素や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して微細構造定数 α の時間変化を探索する。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。Yb⁺では同一のイオンで異なる2つの遷移を比較することにより重力場の周波数シフトを除外し、精度 10^{-18} 位の測定を目指す。また、3種類の遷移の比較によって他の物理定数の時間変化についても探索を可能にする。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(例えば、GPS等)に大きなインパクトを与えよう。

[4] 研究の進展状況

[計画研究A01] 本研究は、ニュートリノの諸性質を解明することを通し、物質優勢宇宙を説明する有力な理論、レプトジェネシス理論の根幹部を直接的に検証することを目指す。このため本研究では、我が国発信の新しい原理「マクロコヒーラント増幅機構」を用い、原子からのニュートリノ対放射を観測する。この方法は、原子準位のエネルギースケールが対象とする質量スケールと同程度であり原理的に小質量(絶対質量)に感度が良いこと、質量起源がマヨナラ型かディラック型かを決定することが可能な事、またCP非保存に関連するマヨナラ位相の決定に道を拓く可能性がある事など、従来型測定法にない特徴を持つ。本領域発足後の研究成果は次のように纏めることが出来る。(1) 理論的研究を進め、マヨナラ位相(α, β)に感度の高い方法や標的を発見した。また二光子対超放射の理論を進展させる中で、ソリトン解等非常に興味深い現象の存在を解明した。(2) Ba/Rb原子を用い、超放射過程自身の基礎的理解を深めると共に、二光子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。(3) パラ水素自身を標的として用い、二光子対超放射の観測が可能であることを明確にし、基礎実験を開始した。コヒーラントラマン散乱過程を使い、 $v=1/v=2$ の振動モードに励起することに成功した。(A02と協同)(4) 更にマトリックス中に各種の標的原子(Xe, Bi等)を埋め込み、その分光的性質を解明した。本研究は、今後①二光子超放射過程を用いて「マクロコヒーラント増幅機構」を実験的に確立する、②計画研究(A02)で開発された「ナノ空間貯蔵標的」を用い、世界初の原子ニュートリノ対検出を実現する、③大まかな質量分光を行い、質量絶対値のエネルギースケールを確定する、等を目指す。

[計画研究A02] 本研究では、計画研究A01の目的とするニュートリノ質量分光法の開発を容易にするために、標的原子・分子のナノ空間への大量貯蔵法を開発し、量子干渉性に優れた標的集団の励起法を確立する。特に、希ガスまたはパラ水素固体マトリックスに各種標的を高濃度で埋め込み、ニュートリノ質量分光で必要とされる赤外から紫外全領域を含む電子状態励起の研究を行う。開発した低温マトリックスを用いマクロコヒーランスの要求する高度な量子干渉性を検証する。領域発足後現在まで、パラ水素マトリックスを中心に研究を進めてきた。その結果、(1) パラ水素固体中にHFガスを注入し、それを単離貯蔵することに成功した。また分光的性質を解明した。(2) パラ水素自身を上位振動モード($v=1/v=2$ 等)に励起することにより、二光子対超放射を観測する良い環境を与えることを明確にし、コヒーラントラマン散乱過程で励起することに成功した。(3) 更にFID(Free Induction Decay)やフォトンエコー現象の手法を用いた緩和時間測定の基礎的研究を行い、 CH_3F ガスについてはエコー信号の観測に成功した。現在までの成果を基礎に、今後は、(1) パラ水素固体中HF分子については超放射現象の観測により標的原子の量子干渉性を計測する、(2) パラ水素固体自身による二光子対超放射実験をA01グループと共同して行い、ナノ貯蔵標的として確立する、(3) 対象分子の種類を拡大し、ニュートリノ質量分光に有利な固体分子標的を開発する、等々を目指す。

[計画研究B01] 素粒子の標準理論の綻びが最も確かな仕方で現れると考えられている物理量、電気双極子モーメント(EDM)の存在を反磁性原子 ^{129}Xe において探索することを目的として、光検出・外部帰還型核スピンメーザーを使ったEDM検出装置の開発を進めている。これまでに、スピン歳差周波数の時間的振舞いを詳細測定し、周波数変動の要因として1) 静磁場用コイルの電流のドリフト、 ^{129}Xe セルの温度変動、磁気シールドを超えて及ぼされる環境磁場の影響、が重要な寄与をしていることを突き止めた。これらの要因を除去するために、まずコイル電流源に高精度標準抵抗を使ったフィードバック制御を導入して長時間変動の1桁以上の低減を実現した。次いでセルの設定温度を、光ポンピングを損なわずかつ周波数の温度依存性を抑える温度に最適化($\sim 50^\circ\text{C}$)、さらに実験室に環境磁場打ち消しコイルを設置して環境磁場変動の影響低減を行った。これらの結果、現在までに周波数精度 5.2 nHz を得ている。また、EDM実測定に必要な電場印加のために、セルへの電極導入の技術開発を行った。現在までに、セルに接着部をつくって透明電極を導入、漏えい電流の低減と高真空度シールドの実現の目途を得ているが、今後の課題として漏えい電流のもう一桁の改善と、接着剤由来の不純物が原因とみられるスピン偏極劣化の解決が残っている。EDM測定の際の

磁場モニターとして、NMOR 型高精度磁力計の開発を進め、プローブとなる Rb セルの内壁処理法につき進展がみられた。今後は、これら進展で浮かび上がった課題の解決を目差すと同時に、各部を統合して EDM の実測定に向けての準備を進める。

[計画研究B02] レーザー冷却不安定原子を用いた次世代高精度EDM（電気双極子能率）探索技術を確立し、放射性元素・フランシウム（Fr）のEDM測定を世界に先駆けて着手することがB02班の目的である。前半3年間でEDM探索装置の心臓部であるFr生成・輸送・中性化・冷却・トラップ各構成装置の開発を進めている。研究は計画どおり進んでおり、融解標的による新しい表面電離型イオン源の開発に成功し、EDM測定感度向上の鍵となるFr生成収量は、融合反応を用いた方法では世界最高収量に肩を並べ（ $\sim 10^6$ Fr/s）、さらにイオン源増強による一次ビーム大強度化によりCERN・ISOLDEのもつ世界最高収量に近づく予定である。Frを冷却・トラップするレーザー光源、そしてシングルアトム測定可能な磁気光学トラップ（MOT）装置の開発も完了し、現在、Rbを用いてFr/Rbの輸送・中性化・トラップ効率の向上に向けた運転パラメータ最適化を進めている。後半2年間で最終段に配置するレーザートラップを開発し、光格子中にトラップしたFrによるEDM測定を実施する。

[計画研究C01] 本研究の目的を達成するためにまず必要なことは、単一イオン光時計を構築することである。ここまで比較的操作が簡単な偶数同位体を用いて、光時計のシステム構築を目指した。Yb⁺、Ba⁺とも、1次のドップラーシフトがなくなる光の波長サイズに、単一イオンを冷却し閉じこめる技術を確認した。優れたイオン操作技術をもつ阪大Gとの情報交換により効率的に進めた。¹⁷⁴Yb⁺では量子跳躍信号を利用した²S_{1/2}–²D_{5/2} 時計遷移の基準スペクトル線の獲得まで、¹³⁸Ba⁺では差周波混合で発生させた赤外光を用いて時計遷移の量子跳躍信号の観測まで進捗した。超微細構造をもつために操作が難しい奇数同位体のレーザー冷却法を、¹⁷¹Yb⁺で確立した。今後Yb⁺の研究は次第にこの同位体に集中させ、不確かさの小さい光時計を開発する。阪大Gは、蛍光の集光効率の1桁向上が見込める2次元型トラップを設計し、イオンのトラップを確認した。この形状では従来できなかった、平面電極に垂直方向の不要静電場を除去する方法を開発した。東理大Gでは時計遷移励起用レーザーの線幅狭窄化に取り組み、まず光共振器の共鳴への制御を線幅Hz以下に改良した。両グループの成果も取り入れながら、不確かさ 10^{-18} 台の光周波数比計測を目指す。

[計画研究X00] 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。また、本領域が統一的・有機的に研究を遂行することを担保する「要」となる組織として、1) 各計画研究の進行状況を監督し、あるいは必要に応じて助言した、2) 理論・技術面から領域全体の方向づけを行った、3) 学会及び社会からの要望を受取り、また逆に成果を発信する等の活動を継続した。

[5] 研究を推進する上での問題点と今後の対応策

計画研究B02においては、2011年・3月に生じた東日本大震災により、Fr生成に必要な重イオンビームを供給する加速器が大きく破損した。復旧・運転再開には1年を要するため、その期間はFrを用いた開発実験を実施することが不可能である。そこで、当初の計画から整備している安定原子Rbビーム供給装置を最大限活用し、Frと化学的性質が似ているRbを用いて、Fr生成・輸送・中性化・冷却・トラップ装置で構成されるEDM探索装置全系の開発、運転パラメータの最適化を「予定通り」進める。さらに東北大学・CYRICと学術交流協定を締結しているオランダ・フローニンゲン大学・KVI研究所、およびイタリア・LNL研究所における加速器を用いて、Fr生成・トラップ実験を実施し、加速器による開発が必要な部分を補強する。すでにKVI研究所での実験提案を行っており、この秋以降に実験実施予定である。2012年以降、加速器運転再開次第、FrのEDM探索精度を評価するためのテスト実験を実施し、その後すみやかにEDM測定に着手することで、当初計画どおり研究を推進する。

[6] 主な研究成果

[6.1] A01研究成果 (研究課題名：マクロコヒーレント増幅機構を用いたニュートリノ対生成の検出)

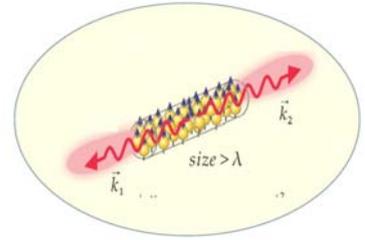


図1 二光子対超放射イメージ図

[研究の目標(用語解説を兼ねて)] 「マクロコヒーレント増幅機構」は、原子を用いたニュートリノ質量分光の研究を進めるに当たり、鍵を握るコンセプトである[1]。この増幅機構は、励起された原子(または分子、以下同様)が、二光子あるいは一光子+ニュートリノ対などの粒子を伴って脱励起する際、ある運動量配位(運動量保存)が実現されると、原子集団で超放射に似た、しかしより巨大な協同現象が生じ、単位時間当たりの強度が協同現象に関係する原子数(N)の二乗(N²)に比例する現象を言う。N²効果により巨大な増幅率が期待される。本研究の前半期(2-3年)の目標は、この新しい増幅機構の原理を二光子対超放射過程[2] (エネルギーのほぼ等しい光子がback-to-backに大量放射される現象(図1参照)、PSRと略称)を用いて実証することにある。また、ニュートリノ質量分光に向け、様々な基礎研究を平行して進めることを目標としている。

[理論および数値シミュレーションの進展] (1) ニュートリノは他の荷電フェルミオンと同様ディラック型質量を有するのか、それとも大方の理論研究者の予想通りマヨラナ型質量を有するのかは、今後の素粒子物理や宇宙論にとり極めて重要な「問い掛け」である。この中で、CP非保存を司るマヨラナ位相については、ニュートリノレス二重ベータ崩壊実験が僅かな手掛かりを与える可能性を除き、いかなる実験も手に届かない「高嶺の花」であった。最近の理論研究の結果[2,3]、原子からの対ニュートリノ放射過程においては、そのレートはマヨラナ/ディラックの判別のみならず、マヨラナ位相(α , β)に極めて鋭敏であり、系統的にこれを測定することが可能になることが判明した。結果の一部を図2に表す。(2) 二光子対超放射過程(PSR)を詳細に調べると、実は「soliton解」が存在することが判明した[2,3]。これは現象自体が興味深い研究対象であるだけでなく、ニュートリノ対超放射の観測にとり背景事象となる二光子対超放射を抑制する重要な方法を提供する。(3) その他ニュートリノ質量分光に有利な分子の検討、二光子対超放射のダイナミクスに関する数値シミュレーション、等々が進展した。

文献：

- [1] M. Yoshimura, C. Ohae, A. Fukumi, K. Nakajima, I. Nakano, H. Nanjo, and N. Sasao, "Macro-coherent two photon and radiative neutrino pair emission", arXiv:0805.1970v1 [hep-ph] 14 May 2008
- [2] M. Yoshimura, "Light Propagation and Paired Superradiance in Coherent Medium", Phys.Theor.Phys. **125**,149-186, 2011
- [3] M. Yoshimura, "Solitons and Precision Neutrino Mass Spectroscopy", Phys.Lett. **B699**, 123-128, 2011

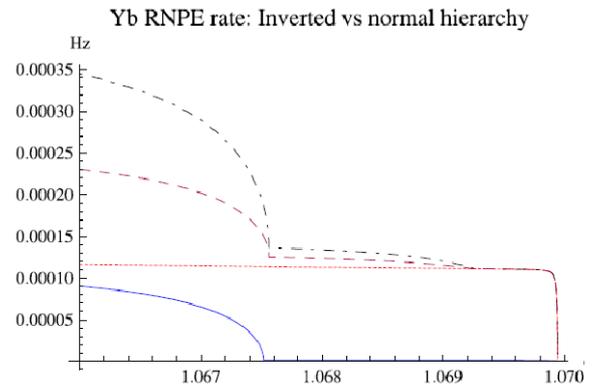


図2 Ybよりの対ニュートリノ放射レート vs 放出光エネルギー[eV]； 曲線群は異なるマヨラナ位相(α , β)を表す。正常階層(0,0):青線、逆階層(0,0):赤点線、逆階層($\pi/2$, 0):黒破線、逆階層($\pi/4$, $-\pi/4$):紫破線、最軽量ニュートリノ質量を $m_1 = 5 \text{ meV}$ と仮定し、他は振動実験より定まる質量二乗差を使用。その他のパラメータ： $n = 10^{21} \text{ cm}^{-3}$, $V = 1 \text{ cm}^3$, $\eta = 10^3$ 文献[3]より

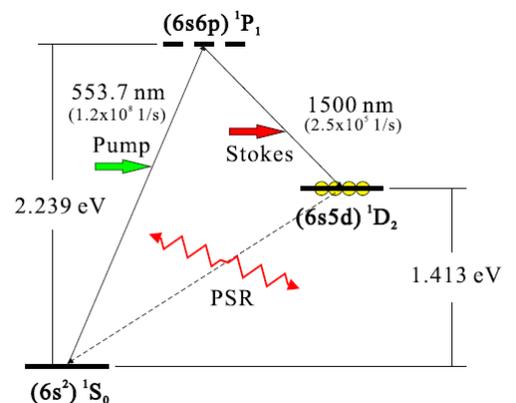


図3 バリウム原子(気相)のエネルギー準位

[Ba気体を使ったPSR観測へ向けての基礎実験]

Ba原子は気体状態で二光子対超放射を観測するに適した系である。前頁図3にBaの関連するエネルギー準位を表す。図中、 $6s5d^1D_2$ (以下では、D状態と略記)は、寿命1/8秒程度の準安定状態である。D状態からの二光子対超放射を観測し、その性質を調べるのが本研究の最終的な目標である。この目的のために、D状態を素早く、大量に準備しようとするのが基礎実験の眼目である。手法として、ポンプレーザー光により一旦基底状態 $6s^21S_0$ (S状態) から $6s6p^1P_1$ (P状態) に励起し、そこから超放射を通してD状態に移行する方法を選択した。具体的な実験のセットアップを図4に示す。この結果、ポンプレーザー照射後約2-5nsec以内に高効率(~100%)で準安定状態を作り出すことに成功した。標的総数は温度やポンプレーザー強度に依存するが、最高で 10^{15} 個程度である。次に本研究で超放射自身を準安定状態の生成に使用する特徴を生かし、超放射の諸性質を調べた。図5は超放射遅延時間を原子密度の関数として表示したグラフである。予想通り超放射理論とほぼ一致した。また励起用レーザーと共に超放射過程を加速するストークスレーザー(1500nm)を入射したところ、角分布が先鋭化し同時に強度が増大することが確認できた(図6)。更に縦緩和時間を測定するため、D状態に共鳴するモニターレーザー(937nm)を入射し、吸収曲線を測定した。この結果、縦緩和時間は予想通り μ 秒以上であることが判明した。なお横緩和時間はドップラー効果(5nsec)により支配されていると考えられる。既にPSRトリガーレーザーの差周波の発振に成功しており、PSR実証実験に向けての準備は整いつつある。

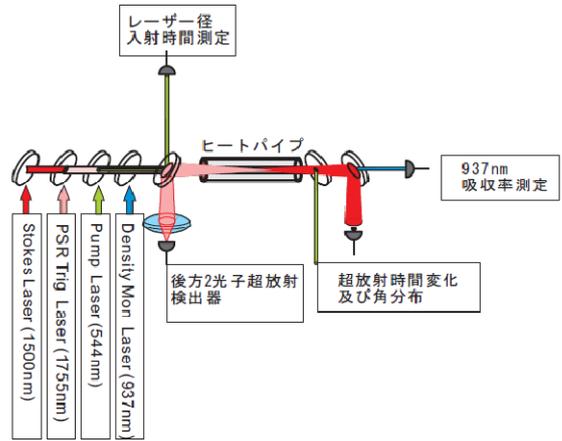


図4 気体バリウム実験セットアップ概念図

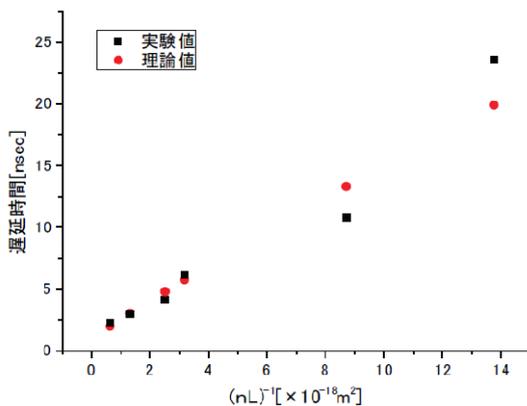


図5 遅延時間 vs 原子密度 (実験値：黒、理論値：赤)

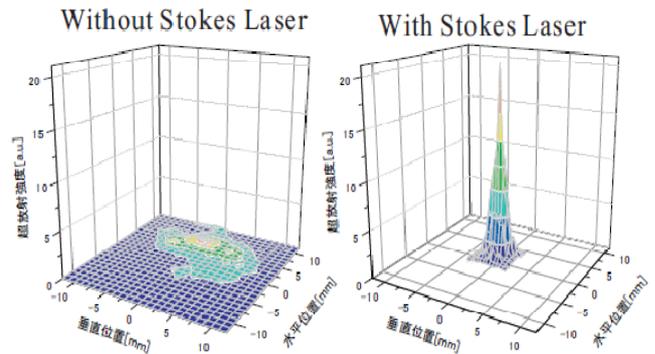


図6 Stokes Laser 照射の影響

[窒素内包フラーレンの高純度濃縮と光励起]

窒素原子内包フラーレンN@C₆₀は、中性の窒素原子がフラーレンC₆₀のケージに内包された特異な系であり、C₆₀を構成する炭素原子との有効な化学結合を持たないという意味で、金属内包フラーレンなど、他の原子内包フラーレンとも一線を画す[4]。その特徴は、電子常磁性吸収(EPR)における驚異的に長い緩和時間に象徴されるように、電子スピンに対する周囲の化学環境の影響が小さいことである[5]。(図7参照) このことは励起原子集団の緩和過程におけるコヒーレントな時間発展を実現するうえで重要な要素となる。本研究では、N@C₆₀の窒素原子の電子励起状態を利用した超放射現象の観測を試みた。まず始めに、高周波プラズマ装置を用いたイオン照射実験によってN@C₆₀を作製後、高速

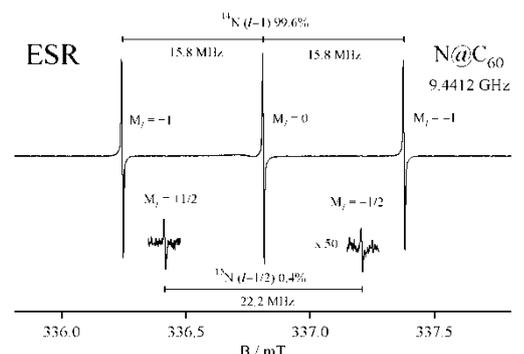


図7 N@C60 ESR スペクトル

液体クロマトグラフィーを用いた未反応のC₆₀分子との分離・濃縮を行った。その結果、90%以上の高濃度試料(N@C₆₀の1 μg相当)を得ることができた。この試料により、N@C₆₀の光学吸収スペクトルを測定することが可能になり、内包された窒素原子NによるC₆₀分子の電子状態への影響は非常に小さいことが確認された。N@C₆₀を用いた超放射実験や二光子対超放射実験に当り、内包された窒素原子の電子状態を正確に知る必要があり、可視光・真空紫外光を用いた励起状態特定実験が進行中である。

[4] T. Almeida Murphy, Th. Pawlik, A. Weidinger, M. Höhne, R. Alcalá, and J.-M. Spaeth, Phys. Rev. Lett. 77, 1075-1078 (1996)

[5] J. J. L. Morton, A. M. Tyryshkin, A. Ardavan, S. C. Benjamin, K. Porfyraakis, S. A. Lyon, and G. A. D. Briggs, Nature Physics 2, 40-43 (2006).

[Rb競合超放射過程の研究] 超放射は競合する脱励起遷移が複数存在する場合においても起こり得ることが知られている。超放射自身の基礎的理解、特に競合過程の詳細を規定する機構を理解することを目的として、ルビジウム原子を用いた実験を行っている。具体的には、図8に示されるように、6P_{1/2}→6S_{1/2}(波長2.27 μm、分岐比47%)と6P_{1/2}→4D_{3/2}(2.29 μm、26%)における放射強度、遅延時間などを同時測定する。但し、基底準位5S_{1/2}から励起準位6P_{1/2}(寿命110ns)への励起にはパルスレーザー光(421.5nm、0.1mJ/pulse)を用いている。これまでに、2分岐・前後方計4成分の超放射光を同時検出するシステムを構築し、各成分が角度分布10-20mrad(半値角)に局在すること、放射強度が原子数密度に2乗比例すること、および遅延時間が原子数密度に逆比例すること(原子数密度10¹²/cm³以下の領域)という超放射で予想される振る舞いを確認した。4成分の放射光の相関及び系統誤差を測定後、論文にまとめる計画である。

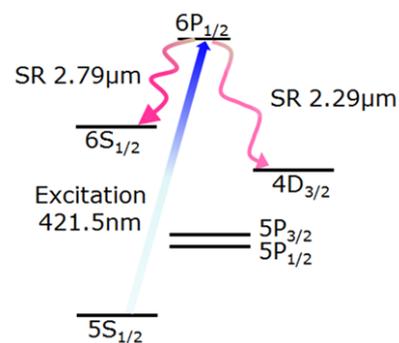


図8 Rb原子 エネルギー準位図

[Bi原子マトリックス分離分光] 量子状態間のコヒーレントな時間発展を実現するには、熱的な揺らぎの影響を抑制した極低温の実験が有利であると考えられる。マトリックス分離分光法は、ネオンやアルゴン等の希ガス固体に反応性の高い原子やイオンを閉じ込めてその電子状態や分子構造を調べる目的で発展してきた手法である[6]。我々は、低温かつ原子との相互作用が比較的小さいネオンマトリックスに着目し、固体ネオン中に捕捉された原子について、超放射観測のターゲットとしての可能性を検証してきた。ビスマスは窒素と同じ15族に属する最も重い元素である。同じp³の電子配置をもちながら、大きなスピン軌道相互作用によって基底状態と励起状態とが混合する。その結果、スピンの異なる状態間の遷移が可能になる。実際、気相中ではミリ秒程度の発光寿命をもつ励起状態が2~4 eVにあることが報告されている[7]。我々はビスマス原子を固体ネオン中に高密度に捕捉し、その原子集団の励起後の振る舞いを精査するための実験に着手した。まず低温マトリックス作製装置に、原子オープンと四重極質量分析計を設置し、ビスマス蒸気の発生量をモニタしながら3 Kのネオン固体を作製する実験系を組んだ。さらに、生成したビスマス原子を含むネオンマトリックスを用いて、紫外吸収スペクトルおよびレーザー誘起発光スペクトルの測定を行った。ビスマス原子の励起状態は、吸収スペクトルから>4 eVの領域に光許容の遷移[8]がいくつか確認され、発光スペクトルからより低エネルギー領域に気相とほぼ同様の準位を確認することができた。発光寿命の測定から後者の励起状態は1 ms程度の寿命をもつ準安定状態であることがわかった(図10参照)。2光子対超放射の実験に向けた準備を

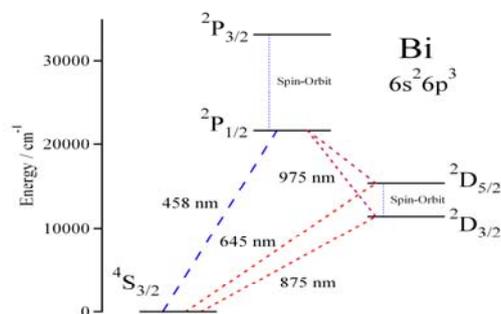


図9 Bi原子 エネルギー準位図

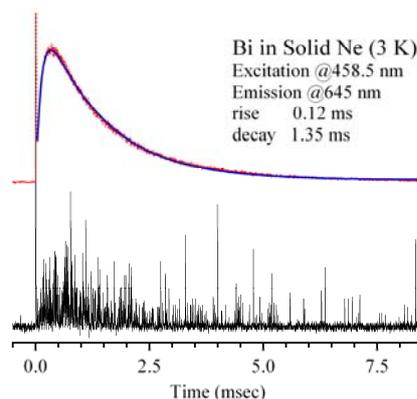


図10 Time spectrum of 645nm emission

進めている。

[6] W. W. Weltner and R. J. Van Zee, Chem. Rev. 89, 1713 (1989).

[7] E. Biémont and P. Quinet, Phys. Scr. 54, 36 (1996).

[8] L. Caiyan, U. Berzins, R. Zerne, and S. Svanberg, Phys. Rev. A 52, 1936 (1995).

[6.2] A02研究成果 (研究課題名：ナノ空間貯蔵標的の量子干渉性研究)

[研究の目標と戦略] 本研究の目標は、量子干渉性の優れたナノ空間貯蔵標的を開発することにある。前者の性質は「マクロコヒーレント増幅」を実現する上で本質的であり、また後者の要請はニュートリノ対放射を観測する上でアボガドロ数に迫る標的数が必須となることから生ずる。このために、標的原子・分子のナノ空間への大量貯蔵法を開発し、量子干渉性に優れた標的集団の励起法を確立する。特に、希ガスまたはパラ水素固体マトリックスに各種標的を高濃度で埋め込み、ニュートリノ質量分光で必要とされる赤外から紫外全領域を含む電子状態励起の研究を行う。また開発したマトリックスを用いマクロコヒーレンスの要求する高度な量子干渉性を検証する。

[固体パラ水素中に単離されたフッ化水素標的の作成および赤外吸収スペクトルの観測]

超放射の強度は原子・分子数の二乗に比例することから、気相に比べ数密度の大きな凝縮相では大きな増幅が期待される。しかしその一方で、凝縮相では周囲との相互作用により一般にコヒーレント時間が短く、超放射が起こりにくい。そこで我々は量子固体である固体パラ水素[1]を用いて、標的分子を高密度かつコヒーレンスの良い状態で捕捉することを目的とした。

フッ化水素は気相において初めて超放射が観測された分子である[2]。そこで我々はフッ化水素を標的分子として用いた。二原子分子であるフッ化水素は単純な振動回転構造を持ち、また電気双極子能率が大きいことから大きな放射強度が見込まれるため、超放射の観測に適していると言える。

図1に実験装置の外観を示す。パラ水素固体を作成するには14 K以下の極低温が必要であるため、試料は極低温保持装置中に作成した。

電気触媒により3.5 Kに冷却された光学結晶基板に、磁性触媒により純度99.95%程度に調整されたパラ水素ガスとフッ化水素ガスを同時に吹き付けて試料を作成した。試料中のフッ化水素の状態を調べるためにフーリエ変換型分光器を用いて赤外吸収スペクトルを測定した。

測定されたスペクトルを図2に示す。3500 cm^{-1} から4000 cm^{-1} の領域に多くの吸収線が観測された。固体パラ水素中のフッ化水素の分光学的研究はこれまでほとんどなされていないため、各吸収線の帰属を行った。各帰属を図2中に示している。単離されたフッ化水素分子のほかに、残留大気分子とのクラスターやフッ化水素の多量体が観測された。単離されたフッ化水素の振動回転線の線幅は4 cm^{-1} であり、この値は他のハロゲン化水素の固体パラ水素中での線幅に比べて大きい。一方で二量体や多種分子とのクラスターの吸収線幅は、およそ0.1 cm^{-1} と小さいことが分かった。単離フッ化水素の大きな線幅は回転緩和に由来し、回転エネルギーと固体パラ水素のフォノン状態密度分布の一致が良いために、緩和が促進されていると説明することができる。クラスターで線幅が細いのは回転が阻害されているために回転緩和が起こらないためである。固体パラ水素の振動とフッ化水素の純回転の同時遷移と考えられる吸収が4189 cm^{-1} に観測された。この遷移からフッ化水素の固体パラ水素中での回転定数はおよそ19 cm^{-1} と見積られる。この値は気相での値の90%であることから、フッ化水素は自由回転に近い状態にあると言える。パラ水素と同様に量

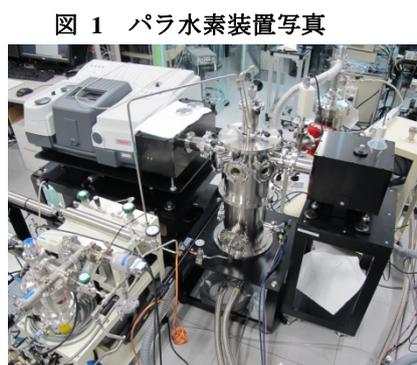


図1 パラ水素装置写真

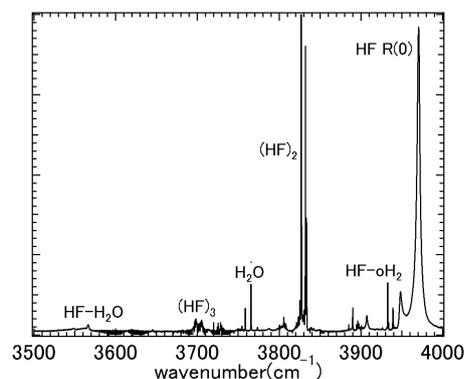


図2 HF 赤外吸収スペクトル

子凝縮相として知られるヘリウム液滴中では、フッ化水素に電場をかけることで線幅が二桁程度小さくなるという報告がある[3]。今後、固体パラ水素中でも同様の手法を用いて系のコヒーレンスを向上させ、超放射の観測を試みる予定である。また他の分子でニュートリノ質量分光に適した系がないか探索してゆく。

- [1] T. Oka, Annu. Rev. Phys. Chem. 44, 299 (1993).
- [2] N. Skribanowitz, I. P. Herman, J. C. MacGillivray, M. S. Feld, Phys. Rev. Lett. 30, 309 (1973).
- [3] K. Nauta, R. E. Miller J. Chem. Phys. 113, 9466 (2000)

[固体パラ水素を標的とする PSR の実現に向けたコヒーレンス測定]

この研究ではナノ空間貯蔵標的として、固体パラ水素マトリックスそのものを用いる。その構成要素である水素分子の振動励起回転状態間[4]の二光子遷移を利用して固体標的からの PSR 観測を目指す。この系の特徴は、室温気体の千倍にも及ぶ高密度でありながらも、コヒーレンスの緩和が 100 ナノ秒オーダーと他の凝縮相と比較して非常にゆるやかな点である[5]。それゆえ大量の分子を量子干渉性を保ちつつ励起する、という PSR にとり必須の条件を満たしうる。また振動・回転遷移を用いるならば、水素分子は等核二原子分子であるという理由により、背景事象となる一光子遷移は禁止され、注目する二光子遷移が観測しやすくなるという特徴がある。この系で用いる PSR スキームを図 3 に示す。系の初期状態である基底状態から、誘導ラマン散乱を用いて、PSR の始状態である振動励起状態へコヒーレンスをもたせつつ励起する。終状態としては始状態よりエネルギーが低い位置にある他の振動あるいは回転励起状態を用いる。PSR を効率よく起こすために必要であるトリガーレーザーは、分子の振動エネルギーのスケールに対応して中赤外領域の波長をもつ。

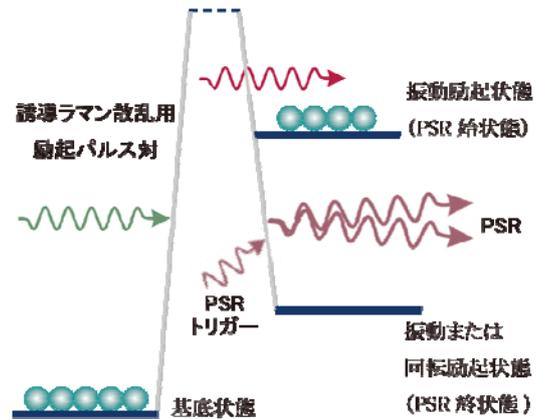


図3：水素分子固体を用いたPSRスキーム

これまでの取り組みの中で主に以下の3つの成果をあげた：

【1】 光学的に透明な固体パラ水素を極低温光学セル内に作成する技術を確認した。現在およそ体積 1 立方 cm の透明な結晶を得ることに成功している（図 4）。PSR を支配するマクロコヒーレント増幅機構に立脚すれば、最大 10^{22} 個の水素分子が協同現象に寄与する可能性を示唆する。また不純物として含まれる系の量子干渉性を乱す原因となるオルソ水素濃度は 500 ppm 以下と非常に小さい。

【2】 誘導ラマン散乱による PSR の始状態への励起スキームを確認した。同期した 2 台の波長可変ナノ秒レーザーをラマン光源として用いた。振動状態が励起されたことの確認には、CARS（コヒーレント反ストークスラマン散乱、プローブパルスを用いて励起状態からのコヒーレントな散乱光を検出する）を利用した。これまでに第一および第二振動励起状態の生成に成功しており、これらを PSR の始状態として用いる。なお、CARS による第二振動励起状態の研究は先行研究が存在せず、今回の実験により得られた新たな知見を公表するべく準備中である。

【3】 さらに時間分解 CARS 測定を行うことで、励起状態の量子干渉性の直接観測に成功した。これまでに第一振動励起状態については、励起直後から数マイクロ秒後までのコヒーレンス減衰曲線を得た（図 4）。ここから、ナノ秒パルスによる PSR 始状態準備後も、予想通り十分な量のコヒーレンスが存在す

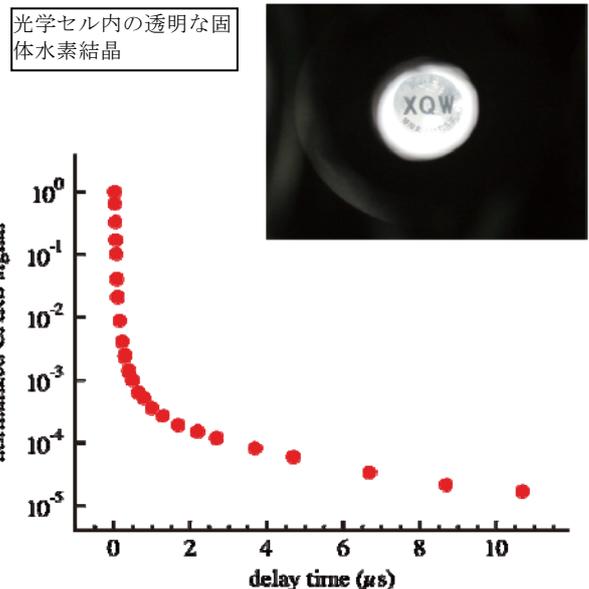


図 4：（上）固体水素結晶（下） $\nu = 1$ ラマン励起後のコヒーレンスの減衰（CARS測定）

ることが確かめられた。さらに第二励起状態についても同様の測定を行っている。

ここまでの研究ですでに PSR の始状態の準備はほぼ整っている。さらに並行して PSR に必要な中赤外トリガーレーザーと検出器システムの準備を整えつつある。これらが準備出来次第 PSR 本測定に着手する。また高密度という利点を持つ固体水素は、最近理論的に解明されたソリトン形成に伴う PSR の制御可能性[6]を検証する上でふさわしい標的である。この研究における最終目的は、固体標的からの PSR の観測を通じてマクロコヒーレント増幅機構の原理を実証することである。一旦固体水素を用いて上記原理の証明に成功すれば、水素分子以外の分子性結晶もニュートリノ質量分光の標的として極めて有望になると考えられる。

[4] 固体水素の振動回転状態の性質に関して： J. Van Kranendonk, *Solid Hydrogen* (Plenum, New York, 1983)

[5] T. Momose, D. P. Weliky, and T. Oka, *J. Mol. Spectrosc.* **153**, 760 (1992); J. Z. Li, M. Katsuragawa, M. Suzuki, and K. Hakuta, *Phys. Rev. A* **58**, R58 (1998).

[6] M. Yoshimura, *Progr. Theor. Phys.* **125**, 149 (2011); M. Yoshimura, *Phys. Lett. B* **699**, 123 (2011).

[CH₃F分子を用いたコヒーレント過渡現象の観測] 量子干渉性の検証のために、コヒーレント過渡現象の観測を行った。具体的にはCH₃F分子のシュタルク効果を利用して高速スイッチングを行い、FID(Free Induction Decay), フォトンエコー信号を観測することにより、緩和過程に関する知見を得た。本実験は、超放射を起こしやすい条件を探すためには必要でコヒーレンシーを壊す緩和過程の理解に貢献する。実験では連続発振赤外OPOレーザーシステムの整備から始めた。シュタルク効果によるCH₃F分子のエネルギー準位のシフトを利用し、2つのシュタルクパルスを生成し、シュタルク効果によってレーザーと共鳴したある速度成分を持った分子集団からのフォトンエコーを観測した。CH₃Fの圧力を様々に変化させることにより分子の均一横緩和時間を測定した。

実験配置を図5に示す。連続発振OPOレーザーは出力~200mWで、発振周波数はCH₃F分子のν₄バンド^rR₀(0)遷移3010.751cm⁻¹に合わせた。焦点距離100cmのレンズを使いシュタルクセルの中心で焦点を結ぶようにした。シュタルクセルの内部には2枚のアルミ板(20cm×3cm)が平行に間隔0.5cmで置かれており、パルス発生器によってシュタルク電場を印加した。得られた信号はresponse time 15nsの検出器で検出され、AC ampで100倍に増幅し、オシロスコープでデータ収録をした。シュタルク電場として20 V/cm, 最初のπ/2パルスを80ns印加し、400 ns後にπパルスを印加した。図6に観測された信号を示す。0.8 μsの時間に観測されているのがphoton echo信号である。様々な圧力でフォトンエコー信号強度を測定して理論式にフィットし、均一横緩和時間を決定できた。このようなコヒーレント過渡現象の観測はこれまで主に炭酸ガスレーザーを用いて行われてきたが[7]、本研究では、波長可変OPO赤外レーザーを用いて、任意の波長での実験が可能になったのが特徴で、用いた^rR₀(0)および^pP₁(1)遷移では、一つのシュタルク成分からのFID信号が観測できた。本研究の成果は投稿準備中である。

[7] Richard G. Brewer and R. L. Shoemaker *Phys. Rev. Lett* **27** 631 (1971)

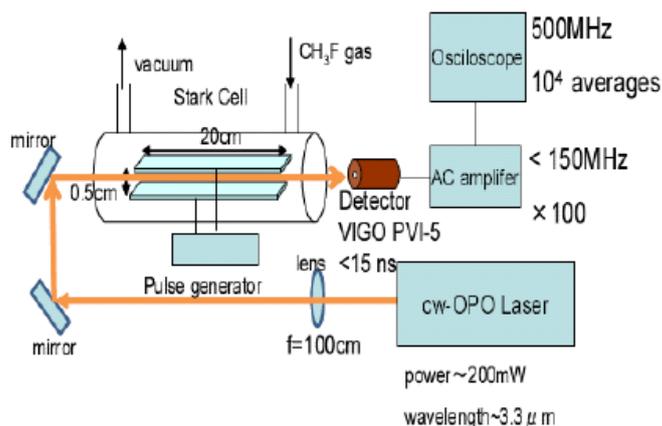


図5. フォトンエコーの実験配置図

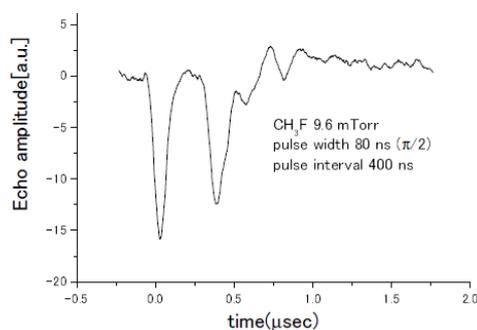


図6. CH₃F ^rR(0,0)で観測されたフォトンエコー

[6.3] B01研究成果 研究課題名: スピンメーザー法による原子EDMの超高精度測定

宇宙で観測される物質/反物質非対称性は現在の素粒子標準理論では説明できず、その枠組みを超える物理の存在が強く示唆される。粒子の永久電気双極子モーメント(EDM)は、標準理論では小さい一方、超対称性など新しく提唱されている枠組みでは測定可能なほどに大きな値をとるため、その動かぬ証拠となりえる。本研究は、光検出・外部帰還型核スピンメーザーという新しい方法を用いて、反磁性原子 ^{129}Xe のEDMを現在の実験上限値から2-3桁下の領域まで探索することを目指している。図1に実験装置の基本構成を示す。スピンメーザー動作実証実験の結果を土台として、本研究では、メーザー周波数精度が測定時間の延伸とともに一定の改善を示したのち頭打ちとなる現象を詳細に調査し、これまでにいくつかの要因を明らかにした。またそれらを除くいくつかの手法を導入し、現在までに周波数精度 5.2 nHzを得た。さらに電場印加のための電極つきセルの開発と NMOR型高精度磁力計の開発を進め、EDM測定に向けた一定の見通しを得るに至っている。

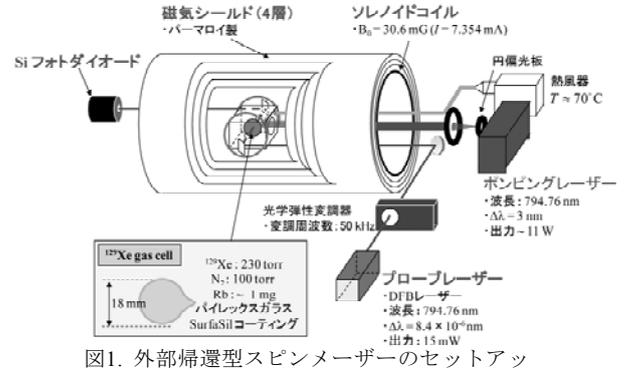


図1. 外部帰還型スピンメーザーのセットアップ

(1)メーザー周波数の精度及び安定性の向上

(1-a) ソレノイド電流源の高安定化

メーザー周波数の安定性はラーモア歳差運動を誘起する印加磁場の安定性に直接影響されるため、印加磁場の安定性を左右する静磁場コイル電流の安定制御系を開発した。これまで我々が用いてきた電流源はその安定性が典型的に10~100 ppm/day程度で、特に長時間の連続運転において大きなドリフトが生じ、我々の測定において最も大きな精度悪化の原因となっている。そこで、電流源に比べ格段に精度が高い標準抵抗と電圧計 (< 1 ppm/day程度の安定度)を用いて電流値を随時測定し、その値から電流源の印加電流値に対しフィードバックを行うコイル電流安定化システムを開発・導入した(図2)。

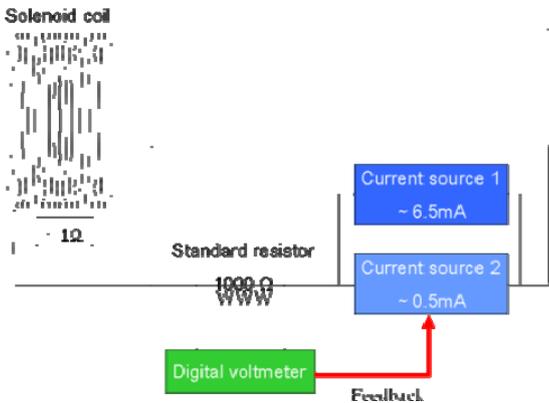
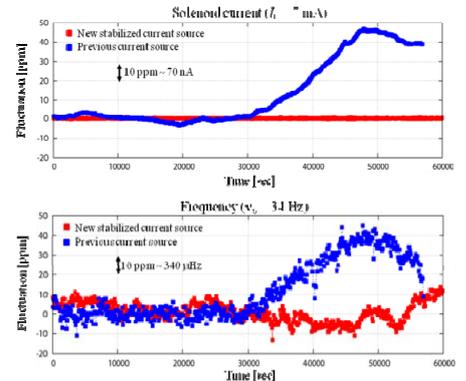


図2. フィードバックによる電流安定化システムの概念図

図3. 新旧電流印加システムによる電流安定性(上)とそれぞれを用いた際のメーザー発振安定性(下)。青点・赤点がそれぞれ既存の電流源、新電流源でのデータ。



本システムにより、これまでの長時間運転における大きな電流ドリフト(図3上、青点)を抑え、外部制御によるコイル電流の安定化に成功した(図3上、赤点)。電流値の安定度は原理的に電流値の測定精度と同じ < 1 ppm/day と見積もられる。本システムを用いて静磁場を印加し、長時間にわたるメーザー発振周波数の安定化に成功した(図3下)。

(1-b) 周波数変動要因の定量的説明

上述のように新電流源の導入によって電流 I_0 及びメーザー周波数 ν_0 の変動は劇的に改善された。この結果、残る変動要因の特定とその解消が次々と可能になった。まず、 ν_0 と ^{129}Xe セル温度 T_{cell} との相関が浮き彫りになった(図4)。これは T_{cell} 変動が Rb 数密度変化を引き起こすことで Rb 磁化の変動が生じるためと考えられる。そこで、Rb 数密度変動を抑えるべくセル温度を下

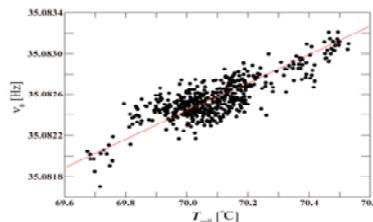


図4. ν_0 と T_{cell} の相関。 $T_{\text{cell}} \sim 70^\circ\text{C}$ の高温域では ν_0 は Rb 数密度変動を通じて T_{cell} 変動に影響される。

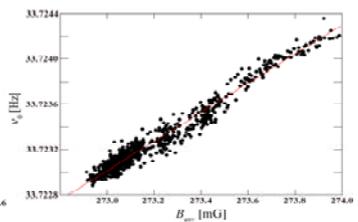


図5. ν_0 と B_{env} の相関。相関はほぼ線形で、周波数変動が環境磁場変動に支配されていることがわかる。

げたと、 v_0 と環境磁場 B_{env} 間の明確な相関が明らかになった(図5)。図5のデータを線形フィットして求めた傾き dv_0/dB_{env} を用いて、位相データに B_{env} 変動の効果を補正することにより、測定時間 45,000 s で周波数精度 $\delta v = 5.2$ nHz を得た。これは印加静電場 $E_0 = 10$ kV/cm のとき EDM の値に換算すると $\delta d \sim 5 \times 10^{-28}$ ecm に相当する。なお、現在の世界最高の上限値は、これより1ケタ大きい $d(^{129}\text{Xe}) < 4.1 \times 10^{-27}$ ecm である。

(1-c) セル温度制御・維持機構

T_{cell} 変動による v_0 変動を抑制するために、液体循環による温度コントロールシステムの開発に着手した。これまでの ^{129}Xe セルに直接熱風を当てる方法から、オープン壁内に温度制御した液体を循環させる方式に変えた。純水を循環させたテストでは、図6に示す通り長時間にわたり $\Delta T_{cell} \leq 0.1$ °C が達成された(熱風方式では $\Delta T_{cell} = 0.2$ °C)。50,000s 以降の温度変化は体積の大きい循環液体に対する冷却能力不足のためと考えられる。この結果をふまえ、冷却能力の増強をはじめ、さらなる改善を試みている。

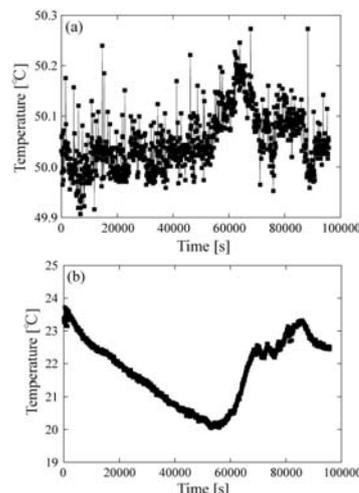


図6. オープン温度変動(a)と実験室温度変動(b)

(1-d) 光ポンピング系、プローブレーザー系のレーザーの強化

スピン交換光ポンピングにおける ^{129}Xe 核スピン偏極の増強とポンピング光照射起因の発熱による Xe セル温度変化の抑制をめざし、光源性能に関する検討を行なった。効率よい偏極生成のためには、光源自体の持つ線幅を自然線幅(この場合は圧力広がりによる線幅~GHz)よりも狭窄化したうえで、必要な偏極度が生成されるレーザー強度を見極めねばならない。そこで、cw Ti:Sレーザー(線幅10 MHz)を用いたRb偏極生成テスト実験を行った。Rb偏極度 P_{Rb} は、円偏光/直線偏光のレーザー照射時(レーザーの円偏光度: P_{laser})に原子から放出されるレーザー誘起蛍光強度 I_{on}/I_{off} との関係 $P_{Rb} = (1 - I_{on}/I_{off})/P_{laser}$ から導出した。

図7にRb原子の偏極度を光源強度の関数として示す。縦軸が1に到達しないのは、照射したポンピングレーザーの円偏光が崩れているためと考えられる。この測定結果から $P_{Rb} \geq 0.9$ を達成するには、線幅10 MHzのレーザーで 2.5 W/cm² の強度が必要であることがわかり、新たなポンピング光源として線幅狭窄化高出力分布帰還レーザー(線幅 ~ 4 MHz、出力 ~ 4 W/cm²)の導入を行なった。これを用いて断熱高速通過型核磁気共鳴(AFP-NMR)法に基づく偏極度測定を行い、 ^{129}Xe 核スピンの偏極を示すAFP-NMRシグナルを得た(図8)。今後、実験条件の最適化を図り、最大到達偏極度の議論・向上を目指す。

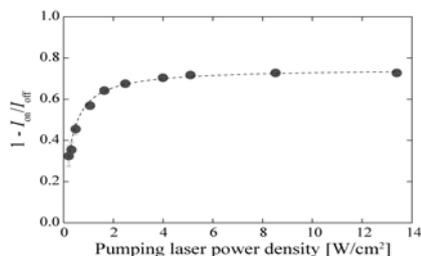


図7. $1 - I_{on}/I_{off}$ のレーザー強度依存性。点線はRb原子の偏極緩和時間を考慮したときのフィッティング結果。

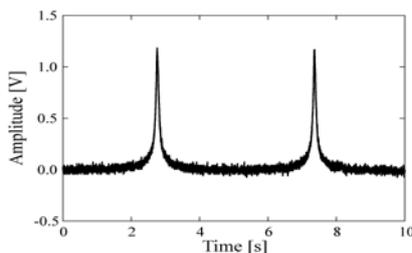


図8. 得られたAFP-NMRシグナル。 ^{129}Xe 核スピン偏極度が振幅に比例する。

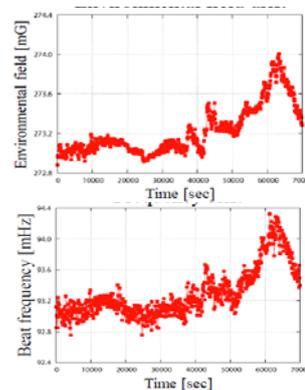


図9. 実験室内の環境磁場(上)とその時のレーザー発振周波数(下)

(1-e) 環境磁場の能動打ち消しコイルの設置

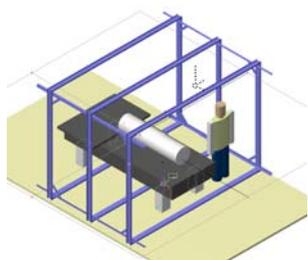


図10. 実験室内の環境磁場変動打ち消しコイルの概略図(左)と設置したコイルの写真(右)

印加静電場の安定度が向上した結果、地磁気など環境磁場の変動がレーザー歳差周波数を変動させることが明確に観測された(図9)。そこで、レーザー発振のさらなる長時間安定化を目指し、実験室全体を覆う環境磁場打ち消し用コイルによる環境磁場変動の抑制を行った(図10)。本システムでは、磁気シールドの脇に設置したフラックスゲート磁力計で環境磁場を測定し、変動を打ち消すようコイル電流をフィードバックして印加している。これにより、今まで存在し

ていた1mG程度の遅く、大きな変動(図11上)を打ち消し、ドリフトなく磁場を安定化することに成功した(図11下)。午前1時から5時までの間でデータのばらつきが小さいのは、環境磁場変動の大きな要因となる電車の運行が停止しているためと考えられる。本システムにより、これまで発振周波数の安定性に大きな影響を与えていた磁場変動を大きく低減することに成功した。今後、安定磁場環境下でさらにメーザー発振の周波数の変動要因の有無を調査する予定である。

(2) 電場印加に向けた開発

EDM 測定に向けて、電場生成のための電極を付加したセルの開発を進めている。高電圧印加時の放電の有無をテストするために1辺10mmの立方体型セル(空気封入)に直径30mm、厚さ1.75mmの酸化インジウムスズ(ITO)を蒸着した透明電極を接着してサンプルセルを製作し、10kV ($E = 10 \text{ kV/cm}$) まで放電することなく電圧印加が可能になった(図12)。但し、6kVまでは電極間のリーク電流が $I_{\text{leak}} < 10 \text{ pA}$ に収まっているもののそれ以上の電圧で顕著な増加がみられ、リーク電流起因の磁場 B_{leak} による偽の EDM 効果が問題となってくる。現在、電極部の構造に関する検討を行っている。併せて、磁場変動の補正を行うための ^3He co-magnetometer 導入にも着手している。

電極装着に伴う第2の問題として、ITO電極とセル本体間の接着剤からの放出ガスとRbの反応によるとみられるRb原子の歳差シグナル消失が生じた。この問題は、EDMセル製作時に高真空下で1日間焼きだすことによって図13下に示す通り歳差シグナルが正常に観測されるようになり、解決を得ている。

(3) 高感度磁力計の開発

電場反転に同期した歳差周波数変化からEDMを導出する際に侵入する恐れのある、磁場変動に由来する疑似シグナルを除去するために、最終的には ^{129}Xe スピン歳差と共存 ^3He スピン(^3He co-magnetometer)歳差との位相差を指標とする観測方法を採用するが、その方法を信頼度の高いものにするためにも、co-magnetometer 以前の段階で磁場変動を他の方法で可能な限り小さく(目標のEDM感度の1~2桁上、10~100pGレベルを想定)押さえておくことが有効と考えられる。そのため我々はRb原子の非線形磁気光学回転現象(NMOR)を利用した高感度原子磁力計の開発をすすめている。図14に示す実験装置を構築し、試料セルの内壁をパラフィン剤(Parafint)でコーティングすることにより、スペクトル微分 $\partial\phi / \partial B_z = 15 \text{ mrad/mG}$ を実現した(図15)。これは、併せて進めている2桁の信号ノイズ低減によって磁場感度300pG/√Hzを実現できることに相当する。さらに今後セル内壁コーティングの材料・方法の改良で壁緩和時間の1-2桁改善を見込んでいる。

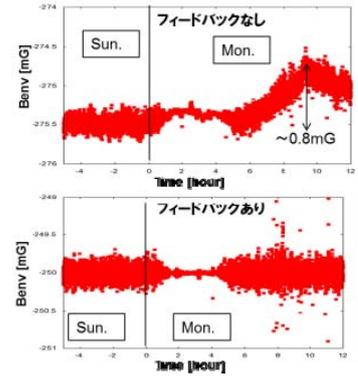


図11. 打ち消しコイル非動作時/動作時の一日間での環境磁場変動

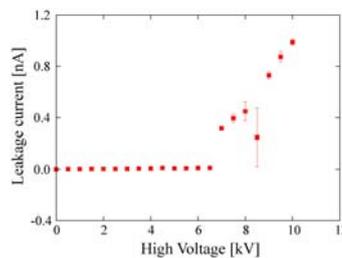
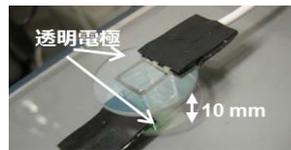


図12. 電場印加テストセルの写真(上)とリーク電流測定の印加高電圧依存性(下)。

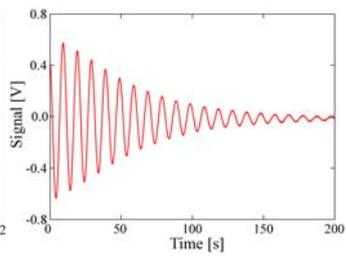
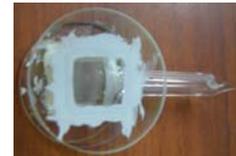


図13. ^{129}Xe ガスとRb原子を封入したEDMセル(上)と得られた自由歳差減衰シグナル(下)。

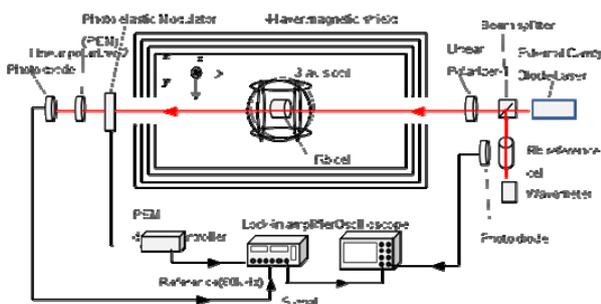


図14. NMOR測定のための実験装置。

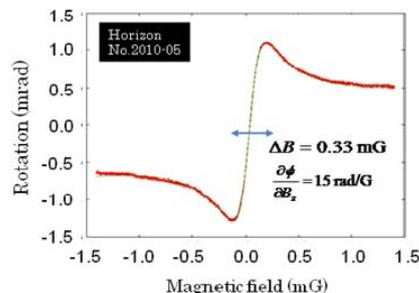


図15. 残留磁場の抑制・打ち消しを行い観測された NMOR スペクトル。

[6. 4] 計画研究B02 (研究課題名：冷却不安定原子を用いた電子電気双極子能率探索)

物質優勢の宇宙はどのようにして生じたのか、CP非保存の機構解明を目指して「冷却不安定原子」を用いた電子の電気双極子能率 (EDM) 探索技術を確認し、EDM測定を世界に先駆けて行うことが計画研究B02の目的である。アルカリ原子では相対論効果により原子電荷の3乗に比例して最外殻電子のEDMが増幅されることに着目し、原子量最大のアルカリ原子・フランシウム (Fr) の世界最高精度EDM探索 ($\sim 10^{-29} \text{e} \cdot \text{cm}$) を行う。本研究の特徴は、①電子EDM増幅度最大 ($\sim 10^3$) のFrを核反応で生成し、②レーザー冷却により極低温Frを実現し、③光格子に冷却Frを閉じ込めてEDMを測定することであり、世界でも冷却原子に対するEDM探索は初めての試みとなる。今回、融解標的による新しい表面電離型イオン源の開発に成功し、融合反応による方式で世界最高収量 ($\sim 10^6 \text{Fr/s}$) のFr生成を実現した。さらに1原子でも高感度観測可能な磁気光学トラップ (MOT) を開発した。また相対論的結合クラスターによるEDM増幅度計算手法を確認し、スパコンによる計算で精度をあげている。現在、装置整備の段階であり、以下に開発成果を報告する。

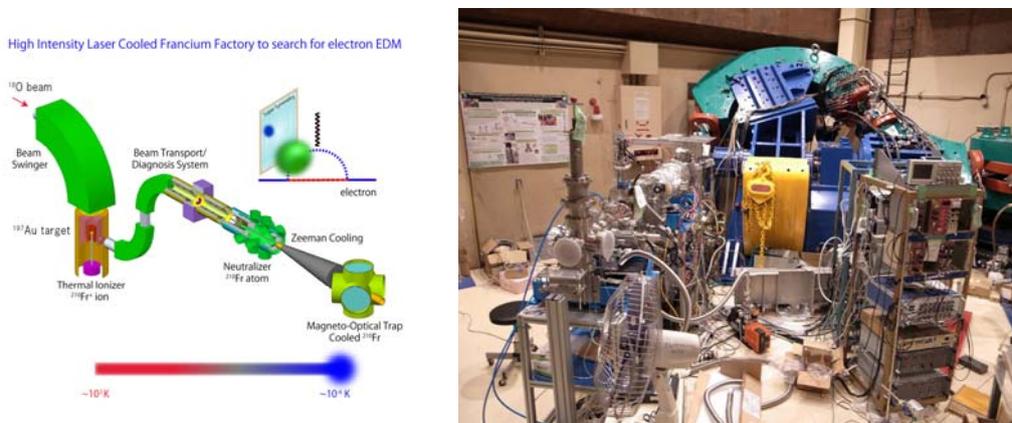


図1：左図はEDM探索装置の全体構成。Swinger磁石により上方から一次ビームが標的に入射され、表面電離型イオン源により生成されたFrは、中性化装置・ゼーマン冷却を輸送されてMOTに導入される。右は完成したFr生成装置。奥がSwinger磁石。

[大強度Frイオン源の開発]

EDM実験装置は図1に示すように、①大強度重イオンビーム、②大強度Fr源、③低速Fr原子ビーム、④冷却Frトラップ、⑤光格子EDM測定系の5つから構成され、現在、①～④までの開発を終えつつある。放射性元素・Frは、加速器からの ^{18}O ビームと ^{197}Au 標的による融合反応： $^{18}\text{O} + ^{197}\text{Au} \rightarrow ^{210}\text{Fr} + 5n$ により生成するが、統計精度に直結する収量は、Fr源 (②) の性能が鍵となる。第一の成果として、今回、融解標的による新しい表面電離型イオン源の開発に成功し、 $\sim 10^6 \text{Fr/s}$ の生成および50%という高効率かつ短い引き出し時間を達成した。この収量は測定精度 $\sim 10^{-29} \text{e} \cdot \text{cm}$ を実現するのに十分な個数であり、融合反応を用いたイタリア・LNL研究所の世界最高収量に並び、効率では世界最高性能を実現した。本研究で、融解標的からのFr収量が著しく増加することに着目し、 ^{197}Au を融点以上で維持し、融解した標的が真空容器中に落ちないように標的・一次ビーム・Fr引き出し方向を工夫した新しい方式である (図2参照)。理研から移設した10GHz ECRイオン源による一次ビーム増強により (①)、10倍以上 (10^7Fr/s 以上) の収量を見込んでおり、CERN・ISOLDEの $\sim 10^8 \text{Fr/s}$ に匹敵する大強度Fr源を実現する。この研究の成果は、3つの国際会議 (内2件、招待講演) で報告し、現在、論文投稿準備中である。

(2010年11月・イタリア・国際会議 (招待講演) 「Violations of Discrete Symmetries in Atoms and Nuclei」、2011年1月・東京・国際会議 (招待講演) 「International symposium nanoPHYS'11 "Nanoscience and Quantum Physics 2011"」、2011年6月・ベルギー・国際会議 「Advances in Radioactive Isotope Science」で報告)

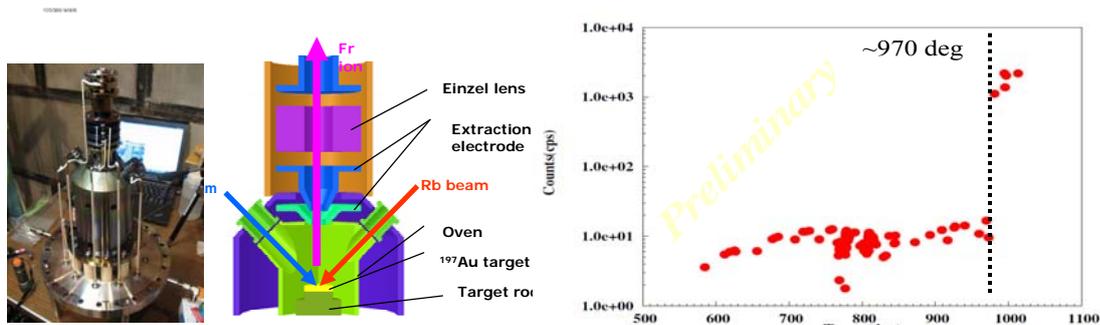


図2：左は開発しFrイオン源。45度上方からビームが入射され、垂直上方にFrが引き出される。右はFrビーム強度の標的溫度依存性。標的の融点付近で著しく収量が増加する。

[高輝度低速Frビーム生成の開発]

融合反応により表面電離型イオン源で生成されたFrは、中性子やガンマ線等によるバックグラウンドが多いFr源周辺から低BG測定領域までイオンビームとして移送され、中性化装置により中性Fr原子とするが、ここでMOTに高効率に導入するため ~ 0.1 eV程度の低速Fr原子ビーム (③) が重要となる。本研究ではイオン・電子再結合と2次元レーザー冷却によるビーム収束を組み合わせた高輝度低速Frビーム装置の開発を進めている。第二の成果として、高温タングステンフィラメントによって形成した電子プラズマにFrイオンビームを入射させ、イオン・電子再結合による中性化装置の開発を行った。その結果、中性化効率20%という高効率を実現し (図3参照)、この方式の原理を実証した。現在、小エミッタンス低速原子ビームを実現するために、RFQ等の導入を検討している。

(2010年・阪大・国際ワークショップ(招待講演)「UCN and Fundamental Neutron Physics : UCN2010」、カナダ・TRIUMF・国際ワークショップ「FunSym2010」で報告)

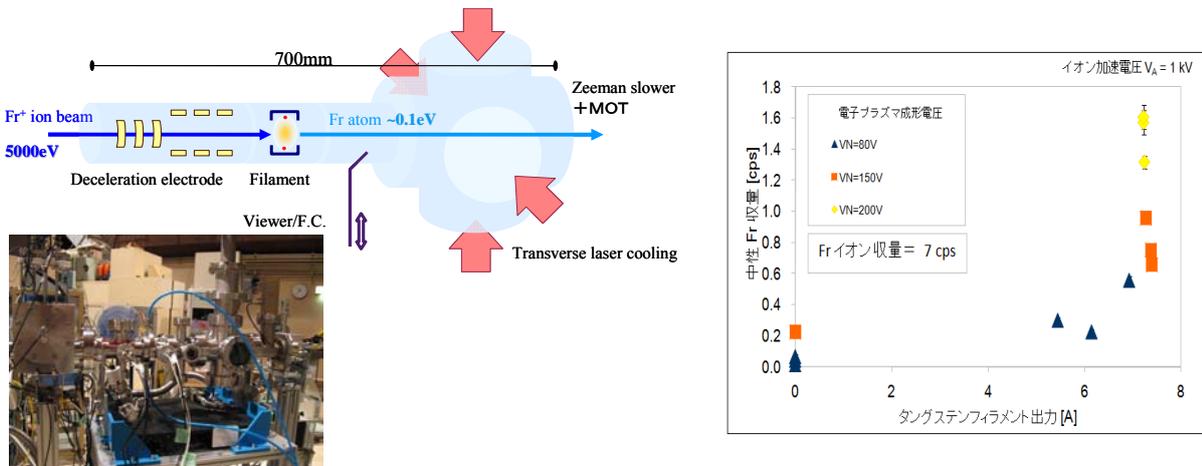


図3：左は中性化器の構造と輸送系最下流にインストールした装置。右はFrによる中性化効率の実験結果。横軸は電子プラズマの密度を反映し、密度とともにFr収量が増加する。

[シングルアトム観測可能な冷却Frトラップ装置の開発]

第三の成果は、冷却Frトラップ装置の開発である。EDM測定における系統誤差の主要な要因は、電場中を原子が運動することによって生じる磁場や外場の非一様性による偽EDM信号である。そこで冷却Frトラップ (④) により、極低温Frを光格子に局所的に閉じ込め、外場の非一様性や他原子からの相互作用による誤差を減らす事が鍵となる。これまでFrトラップ用718 nm光源はチタンサファイアレーザー、Frリポンプ用817 nmとRb用780nm光源として外部共振器型半導体レーザーとテーパーアンプを開発し、Fr/Rb冷却・トラップに必要な強度 (1~3.5 W) を実現した (図4参照)。第三の成果として、これらの高強度レーザーをトラップ光源として、捕獲Fr原子数が少ない場合も対応できるよう、冷却原子に接近させた光学系とAPDとを組み合わせ、10倍以上の蛍光観測感度を持つ1原子観測可能なMOTを開発した。現在、Fr用光源の周波数安定化のためヨウ素セルを用いた周波数変調分

光を進めている。

(2011年・東北大学・国際会議:

「Weaving Science Web beyond Particle-Matter Hierarchy」 報告)

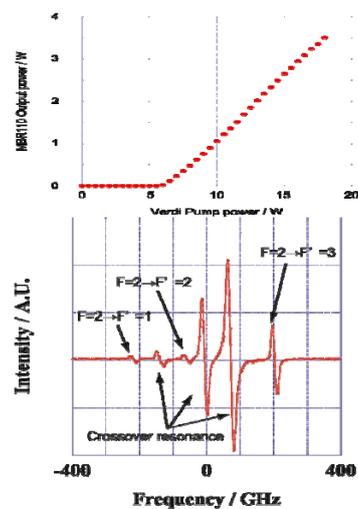


図4： 左図の奥は開発完了したFr/Rb用レーザー光源。奥にFr用Ti:Sレーザー、手前に製作したRb用ECLD+Taperと周波数安定化のための光学系を配置。手前は1原子観測可能なMOT。右上がFr用光源の光強度。下が測定したRb周波数変調分光。

[Fr-EDMの理論研究の進展]

原子EDMから、電子EDMを高精度に抽出するには、各原子における電子EDMの増幅度の高精度理論計算が重要である。今回、シンプルな原子構造をもつアルカリ原子・Frを測定対象としているため、最外殻の対電子のEDMが主な寄与となるが、電子EDM高精度抽出には、他の電子との相関、閉殻電子の励起状態の考慮、さらに電子と核子とのCPを破る相互作用の寄与を考慮する必要がある。本研究では、Fr-EDM測定に先だって、相対論的結合クラスターモデルによる原子構造の第1原理理論計算を、大阪大学・核物理研究センターのスーパーコンピュータを用いて進めている。この計算の特徴は、高次の任意の励起状態の効果を取り込んで波動関数を精度よく計算することであり、弱い相互作用の中性カレントやヒッグス粒子の伝搬によるスカラー・擬スカラー結合等による電子・原子核相互作用の寄与も計算可能なことである。Frの計算を始めるにあたって、現在、世界最高精度のEDM測定結果を出しているタリウムに対して計算を進め、世界最高精度の電子EDM増幅度の結果を得て、協同研究者のJSPS外国人特別研究員H.S.Nataraj氏（東北大学・CYRIC在籍）が、Phys.Rev.Lett. 106, 200403 (2011) H.S.Nataraj et al. に論文発表を行った。現在、Fr-EDMの理論計算を進めている。

[領域研究の深化を目指した次世代EDM測定の基礎研究]

後半2年間のFr-EDM測定に先立ち、領域の深化を目指した次世代EDM測定の基礎研究を進めている。EDM測定は、冷却Frを光双極子/光格子 (5) にトラップし、ラムゼー共鳴を用いてFrの歳差運動を高精度測定する事によって行う。そこで超高真空下(10^{-11} Pa領域)で原子の散逸過程である残留ガスとの衝突を低減させ、かつ高電圧印加(>100kV/cm)可能な蓄積セルの開発を進めている。また捕獲原子数をあげるため、セル壁に吸着したFrを光で追い出す方法を研究している。これまで石英ガラス基板にRb原子10-100層程度堆積させたとき、波長290 nmにおいて 10^{11} 個/($\text{cm}^2 \text{ s mW}$)程度の光誘起脱離レートを得て、原子数増加に有効である事を確認しつつある。さらに次世代EDM探索にむけて、新学術領域研究の趣旨でもある異分野融合による研究領域開拓を推進し、フェッシュバハ共鳴を用いた冷却極性分子・Fr-Sr生成の基礎研究を進めた。Fr-Srの内部電場は極めて高く、電子EDM測定感度をさらに2-3桁向上させる可能性を持つ。これまでSr原子レーザー冷却・MOTに成功した。捕獲原子数は $\sim 10^7$ 個であり、冷却Fr-Sr生成に十分な数である。以上、装置開発は順調に進み、光格子による世界最高感度Fr-EDM測定に着手するための基盤整備は完了しつつある。

[6.5] 計画研究C01 研究課題名：単一イオン光時計による基礎物理定数の時間変化の探索

[研究の目標と戦略] 計画研究 C01 では、図 1 に実験系の概略を示すように、 Yb^+ と Ba^+ の単一イオン光時計を構築し、それらの周波数比の時間変化を計測することによって、微細構造定数 α の時間変化の検出を目指す。 Yb^+ ではトラップした同一のイオンの異なる遷移を用いて重力場の周波数シフトの影響を除外する。さらに各遷移は以下の特徴をもつ。 $^2\text{S}_{1/2}-^2\text{F}_{7/2}$ 遷移を比較の一方に用いると、研究開始時に上限値 $-1.6(2.3) \times 10^{-17}/\text{yr}$ が得られていた Hg^+ と Al^+ の組み合わせ*)よりも、 α の時間変化に対する感度が2倍以上となる。 $^2\text{S}_{1/2}-^2\text{D}_{3/2}$ 遷移と $^2\text{S}_{1/2}-^2\text{D}_{5/2}$ 遷移は感度がほぼ等しく、両者の比較は α の時間変化以外の効果の有無の検証になる。不確かさ 10^{-17} 以下の光時計を構築するためには、超微細構造をもつために操作が難しいが、磁場による周波数シフトが小さい奇数同位体の利用が重要である。とくに $^{135,137}\text{Ba}^+$ は電場によるシフトも小さく、不確かさの極めて小さな光時計を構築できる。ここまでの研究では両イオンとも、周波数シフトは大きい、超微細構造をもたないため操作が比較的簡単な偶数同位体を用いて、光時計のシステムの構築を目指してきた。単一 $^{174}\text{Yb}^+$ を用いて $^2\text{S}_{1/2}-^2\text{D}_{5/2}$ 時計遷移の基準スペクトル検出まで進捗した。これと平行して奇数同位体のレーザー冷却を進め、 $^{171}\text{Yb}^+$ ではその技術をほぼ獲得した。

*) T. Rosenband *et al.*, Science 319, 1808 (2008).

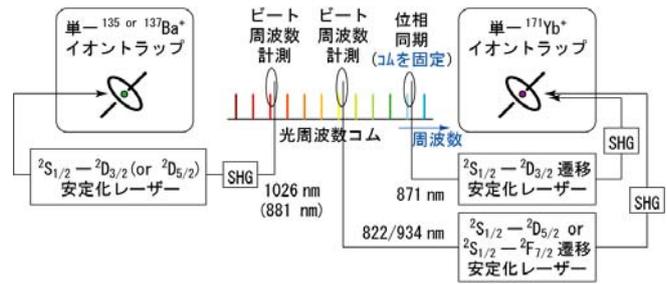


図1 単一イオン時計の周波数比計測による微細構造定数 α の時間変化探索の実験系

[単一イオンのレーザー冷却、ラムーディック領域閉じ込めの達成] 単一イオン光時計構築には、まず、1次ドップラーシフトを取り除くために、波長サイズ以下の領域 (ラムーディック領域) に単一イオンを閉じ込める必要がある。より狭い領域にイオンを閉じ込めるため、1 mmサイズの小型のトラップに単一イオンを閉じ込めてレーザー冷却する技術を確立した。光の波長に対するラムーディック領域閉じ込めの達成が推定される。 Yb^+ は通常型のRFトラップ、 Ba^+ は阪大Gの形状を元に設計したリニア型RFトラップを用いた。 Ba^+ でリニアトラップを用いる理由は、 Ba^+ の奇数同位体は電場に対する周波数シフトが極めて小さい時計遷移をもつことに着目し、イオンを複数個トラップして信号強度を上げて周波数安定度を高める可能性を追求するためである。

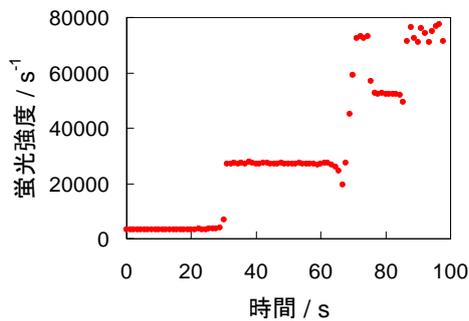


図2 光イオン化を用いて $^{174}\text{Yb}^+$ を1個ずつ3個まで導入。フォトンカウンティングで検出した蛍光強度、1イオンあたり毎秒20000カウントは設計の2/3。

レーザー冷却が滞る問題は、3次元のヘルムホルツコイルを作製して適切な磁場を印加し、レーザーの偏光の向きを適切に設定して解決した。これらを行った後に観測した単一イオン導入の様子を図2に、冷却レーザーの周波数を掃引して観測した単一 $^{174}\text{Yb}^+$ のスペクトルを図3に示す。飽和広がり进行评估

し残留ドップラー幅から評価した温度は20 mKで、ほぼラムーディック領域閉じ込めが達成される温度に到達した。 $^{138}\text{Ba}^+$ でも同様にレーザー冷却の改良を進めた。到達温度は6 mKと評価され、ラムーディック領域閉じ込め達成が推定される。また、図4に示すように、最大16個の $^{138}\text{Ba}^+$ をトラップ軸上に並べてほぼ静止させる結晶化を達成した。

ここまでの研究のなかで独自性のある要素技術、2台の半導体レーザーの和周波を両波長に共鳴する外部共振器で発生させた Yb^+ のレーザー冷却光源、 Yb^+ の光イオン化の基本的な特性を詳細に調べた結果、及び存在比の小さい同位体の飽和吸収信号を選択的に検出する方法(特定の同位体を選択的に光イオン化しトラップに導入する際、イオン化レーザーの周波数の設定に用いる)、を論文化した。今後とも研究の加速に有効な要素技術を開発し論文化するとともに、以下にも述べる重要なステップをひとつずつ完成させて着実に論文としてまとめていく。また、本研究の中で博士取得者が1名確定し(2011年3月予備検討合格。10月までに取得予定)、さらに今年度、博士課程進学者を新たに2名迎えた。研究の進捗と人材育成のバランスをとりながら、今後も進めていきたい。

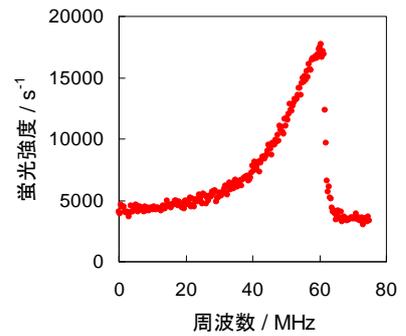


図3 単一 $^{174}\text{Yb}^+$ の冷却遷移のスペクトル。幅は自然幅10 MHzと飽和幅でほぼ決まっている。

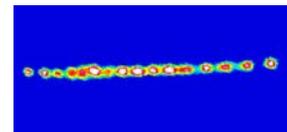


図4 トラップ軸上に配列した $^{138}\text{Ba}^+$ (クーロン結晶)の蛍光像

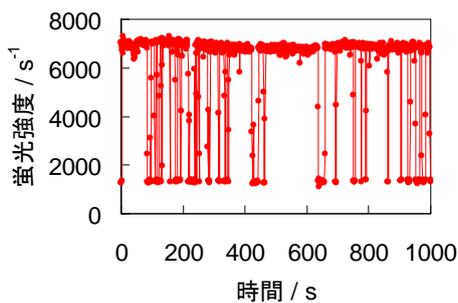


図5 単一 $^{174}\text{Yb}^+$ の量子跳躍信号

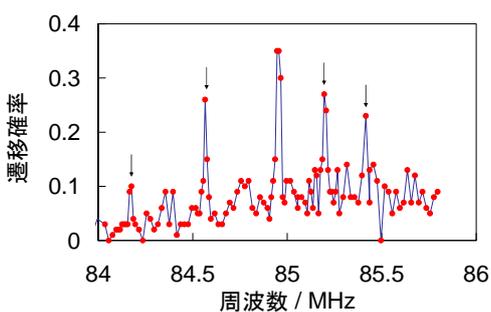


図6 単一 $^{174}\text{Yb}^+$ $^2\text{S}_{1/2}-^2\text{D}_{5/2}$ 遷移のスペクトル。20 kHz間隔で掃引。矢印は永年運動によるサイドバンド。

[単一 $^{174}\text{Yb}^+$ の基準スペクトル検出] ラムーディック領域閉じ込め達成を受けて、線幅狭窄化レーザーを作製し時計遷移の単一イオン分光に着手した。単一イオン分光は、時計遷移の励起の有無を、レーザーを一定時間照射したときの量子跳躍信号の有無から検出し、この試行を繰り返して遷移確率を測定する。そして、時計レーザーの周波数を掃引しながら励起確率を測定しスペクトルを得る。半導体レーザーの第2高調波で励起できる、波長411 nm Yb^+ $^2\text{S}_{1/2}-^2\text{D}_{5/2}$ 時計遷移で先行して進めている。作成した時計用レーザーの線幅は、独立なシステム2台のビート信号から1 kHz以下と評価した。単一 $^{174}\text{Yb}^+$ の量子跳躍信号を図5に示す。図6が得られた単一イオンのスペクトルである。磁気副準位によるゼーマン分裂を観測し、分解能約20 kHzまで進捗した。 Ba^+ の時計遷移 $^2\text{S}_{1/2}-^2\text{D}_{5/2}$ 、及び $^2\text{S}_{1/2}-^2\text{D}_{3/2}$ は、それぞれ波長1.76 μm と2.05 μm と直接発振するレーザーが得にくい。そこで、前者は半導体レーザー、後者はTi:Sapphireレーザーと、波長1.06 μm のNd:YAGレーザーとの差周波光で数100 μW 発生させた。波長1.76 μm 光を用いて、単一 $^{138}\text{Ba}^+$ で $^2\text{S}_{1/2}-^2\text{D}_{5/2}$ 時計遷移の量子跳躍信号を検出した。

[奇数同位体のレーザー冷却] 平行して進めた奇数同位体のレーザー冷却は、 $^{171}\text{Yb}^+$ では偶数同位体のときよりも2台多くレーザーを準備して超微細構造間に生じる光ポンピングを防いだ。図7に示すように、偶数同位体とほぼ同程度まで単一イオンの冷却を実現し、 Yb^+ で不確かさの小さい光時計を構築する第1段階を突破した。今後の Yb^+ の実験は次第に $^{171}\text{Yb}^+$ へ集中して光時計を構築していく。 Ba^+ では、光イオン化で利用する遷移の同位体シフトを利用して、奇数同位体の選択的トラップを確認した。 $^{171}\text{Yb}^+$ よりも準位構造が複雑でレーザー冷却はさらに難しいが、光時計としての不確かさは今回の計画で最良であり、必要なレーザー光源を着実に準

備して対応していく。

[2次元トラップによる蛍光強度増強] 蛍光強度は、時計遷移のスペクトルを検出しレーザーの周波数制御を開始するまでにかかる時間を決め、光時計の周波数安定度を制限する。阪大Gとの情報交換により、京大Gでも通常のトラップでは最大限に近い強度で蛍光を検出できるようになった。阪大Gではさらにこれを改善させるべく、電極が平面状でイオンの蛍光を大きな立体角で集光できる2次元型トラップの開発を進めた。図8に示すように、トラップポテンシャルの数値解析を行い、 Ca^+ を用いて冷却実験を行った。光学レンズのような誘電体をシールドするために、イオンと光学素子との間に導電性のある透明な電極（以後トップ電極）を配置して光学素子を近づける方法を提案した。適切な電圧を印加すれば、ポテンシャルの深さを十分保ちながらトップ電極を3.5 mmまで近づけられることが数値解析でわかった。これによって集光効率、すなわち蛍光強度は1桁以上の向上が見込まれる。第一段階としてイオン観測用の穴を加工した金属製のトップ電極を使用し冷却実験を行い、設計どおりにイオンを観測した。

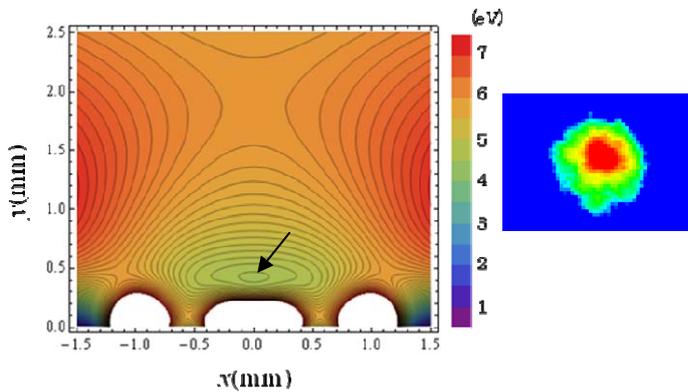


図8 2次元型トラップのポテンシャル。電極に垂直方向。y=0が電極表面。7.5 eV以上は白く表してある。ポテンシャルの最小点を矢印に示す。右はこの最小点に捕獲された単一 Ca^+ の蛍光像。

[時計遷移励起用レーザーの線幅狭窄化] 時計遷移のスペクトル幅は今回予定している遷移では広くても20 Hzで、線幅の狭い時計遷移励起用レーザーの利用は本質的である。東理大Gでは線幅1 Hz以下の半導体レーザーを実現する手法を確立すべく研究を進めている。これまでに、低熱膨張ガラス製光共振器のフィネス30万というきわめて鋭い共鳴に半導体レーザーの周波数を高速制御し、その共鳴に対して1 Hz以下の線幅に制御した。今後は光共振器の振動や音響ノイズによるゆらぎを除去する方法を工夫して実線幅1 Hzのレーザーを開発し、光時計構築へむけて重要な技術を京大Gへ提供する。また、東理大Gでは原子干渉計を用いてレーザーの位相ゆらぎを測定し、線幅を評価する方法を開発している。図9は原子干渉計の干渉距離を変えて測定した鮮明度で、線幅狭窄化により位相ゆらぎがこれまでの1/100に減少し、図の赤から青へ可干渉距離が大きく改善された。この成果と原子干渉計そのものに関する研究を複数の論文にまとめた。

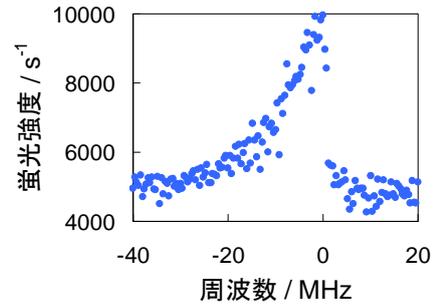


図7 単一 $^{171}\text{Yb}^+$ の冷却遷移のスペクトル。図3と比べて、幅は $^{174}\text{Yb}^+$ とほぼ同じ。蛍光強度約1/3は理論どおり。

冷却を進めるためにはマイクロ運動を最小化する必要がある。上述した従来のRF光子相互相関法ではレーザー光に垂直方向の運動には感度がないため、2次元型トラップでは電極に垂直方向の検出が不可能だった。阪大Gはパラメトリック共鳴を利用して、1方向からのレーザー光で3次元ともマイクロ運動を検出する新しい方法を開発した。2次元型トラップでこれを実証し、さらに、従来の方法よりも高感度で広く応用可能であることも分かった。2次元型トラップの作製、および上述した新しいマイクロ運動検出の提案について論文化した。

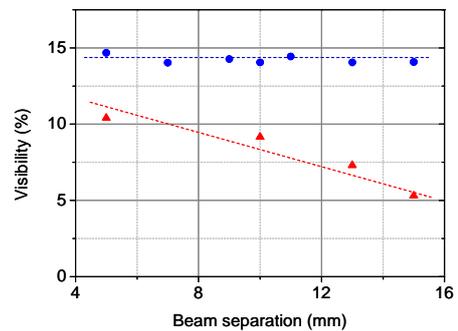


図9 原子干渉計の干渉距離と鮮明度

[6.6] 計画研究 X00研究成果 (研究課題：原子が切り拓く極限量子の世界)

【研究の目標と戦略】 総括班は、計画研究の代表者・分担者と計画研究には参加しない評価・助言者から構成されており、本領域が統一的・有機的に研究を遂行することを担保する「要」となる組織である。特に、(i) 標準理論を越える新たな素粒子的宇宙像の創出、(ii) 量子光学が切り拓いた実験技術の融合と進化、(iii) 異分野(特に化学分野)との融合による各計画研究の進展と新しい分野の開拓などの視点に配慮しつつ、領域全体の目標達成を促進することを目標としている。より具体的には、次の3つの視点から活動を行っている。

- 1) 各計画研究の進行状況を監督し、必要に応じて評価・助言をする。
- 2) 特に、理論・技術面から領域全体の方向づけを図る。
- 3) 学会及び社会からの要望を受取り、また逆に成果を発信する。

【定期的総括班会合】 総括班は、表1に示す通り、この間10回の会合を定期的に開催してきた。全ての会議で各計画研究から進捗状況が発表され、活発に質疑応答、批判、助言が交わされた。特筆すべきこととしては、各研究サイトを順次開催場所として選び、実験現場を見学することにより、進捗状況を直接的に把握したことである。今まで全ての研究現場を巡回した。これにより、



写真：総括班会議の様子

研究計画のより高度で肌理の細かい監督・助言が可能になると共に、研究計画グループ間の技術交流が進展した。レーザー技術・トラップ技術・検出器技術等、この点では枚挙に暇がない。詳細については、項目[8]の連携状況の項に記す。また、2010年3月には領域の紹介を兼ねて公募研究責任者を招待し、研究の交流を行った。

表1：総括班会議の開催場所と日時

回	日時	場所	備考	回	日時	場所	備考
第1回	2009/8/5	東工大		第6回	2010/9/21	東北大	
第2回	2009/10/23	岡山大	公募研究方針議論	第7回	2010/12/14	東京大	B0グループ研究サイト
第3回	2009/12/12	東工大		第8回	2011/3/11	京都大	公募研究責任者招待
第4回	2010/3/24	京都大	FPUA方針の方針審議	第9回	2011/5/18	岡山大	FPUA方針の方針審議
第5回	2010/5/18	岡山大		第10回	2011/7/13	岡山大	(予定)

【国内シンポジウム・国際シンポジウムの開催】

本領域では総括班が主催することにより、国際シンポジウム

「Fundamental Physics Using Atoms」を毎年開催している。過去のシンポジウムの開催日時や場所等を、本年度計画と合わせて表2に記載した。但し第3回以前は財政事情もあり、国内会議である。原子を利用した基礎物理の研究は、海外ではより活発に展開されており、本領域(及び本国際シンポジウム)が果たす役割の大きさを痛感する。

上記した国際シンポジウム以外に、国内シンポジウム「Chemistry And



「Fundamental Science」を立ち上げた。このシンポジウムは、近年になり分子や原子を利用した基礎的科学研究が大きく発展している中で、化学研究者と当該分野の実験的研究者が一堂に会し、研究自身の進展を図ると共に、研究者間のネットワークを構築することを目的としている。因みに、本領域の公募研究の4つのうち3つにまでその研究題目に「分子」という言葉が含まれている。これら公募研究責任者が全て物理関連出身であることを考え合わせると境界融合型研究の典型例と言えよう。この種のシンポジウムは、今まで例になく、化学研究者・物理研究者の双方にとり刺激を与えたのではないだろうか？シンポジウム自身は、東京大学・駒場キャンパスにおいて、2011/5/6-7に約50名程度の参加で開催された。

表2：「Fundamental Physics Using Atoms」

回	開催日時	開催場所	参加者数	備考
第3回	2009/8/4-5	東京工業大学	～80	登録人数以外も含む
第4回	2010/8/7-9	大阪大学・豊中キャンパス	～100	登録人数以外も含む
第5回	2011/10/8-10	岡山大学・津島キャンパス	-----	本年度計画

【有機的連携に配慮した活動】 領域内の各研究計画の有機的連携については、発足当初より、これを意識的に追求してきた。即ち、(i) 素粒子論・宇宙論を軸に据えた理論的連携、(ii) レーザー技術を中心とする技術的連携である。具体については、項目[8]において詳述するが、当初の目論見通りまたはそれ以上の成果を挙げている。化学との分野融合・連携は、当初の予想を遥かに凌駕した。今後ともこの視点を維持するために、総括班に化学研究者(志田忠正京都大学名誉教授)の参加を要請し、総括班としての活動を強化した。

【若手研究者の育成を目指して】 若手研究者の国内・国際発表の機会を増やす等、総括班として若手研究者の育成を意識的に追求している。現在までに、関連大学院生の学会発表は、国内発表56件、国際発表25件に上る。また本領域に関連する研究主題で修士論文をまとめ上げた者は25人に達する。また近々に博士の学位取得も予定されている。

【総括班後半期の重点】 総括班は、前半期の活動からの継続と共に、後半期においては次の点に一層の努力を払いたい。1) 領域内外関連研究分野の連携研究を一層強化する。2) 研究成果の発信に関し、後半期は更にこの活動を強化する。3) 若手研究者の育成・発掘に努力する。各項目における、具体的な方策は以下の通りである。

1) は本領域の最大の特徴の一つである。原子物理と基礎物理の境界分野の確立や化学分野と基礎科学の融合などは、個別研究プロジェクトの推進では得られず、領域の”raison d’etre”であると自負する。この点では、研究会「Fundamental Physics Using Atoms」を軸に原子物理と基礎物理の融合分野形成を継続して追求すると共に、レーザー技術を中心とする技術連携及び実用工学への応用も研究会レベルにまで発展させ、全国にその成果を還元する。また、分子をキーワードとした化学研究者との連携活動を継続強化する。理論については、実用的EDM理論などについてより肌理の細かい研究の組織化を図りたい。これらの観点からは、公募研究の役割は重大である。宣伝活動を強化するなどして、公募研究の充実に取り組む。

2) については、具体的な研究成果が期待される後半期で大きな前進があると考えている。総括班として、より詳細に状況を把握し、論文発表数を増やしていきたい。海外での発表では若手研究者(大学院生やPD)の海外発表を一層奨励したい。

3) では、博士前期課程学生(修士)と後期課程学生(博士)の構成比が問題の一つである。個別分野の事情や大学の事情、更には博士取得後の”Job Market”の問題もあり事情は複雑であるが、領域として最大限努力を払っていきたい。研究を活発にする中で、若手研究者が研究者としての力量を増し、成長することが基本となろう。その点を踏まえた上で、宣伝活動なども強化したい。

[7] 研究成果の公表の状況

[7.1] 公表論文

公表論文 51編 (<http://xqw.hep.okayama-u.ac.jp/kakenhi/>) 以下主要論文リスト

- [1] Motohiko Yoshimura*, Atsushi Fukumi, Noboru Sasao and Takuya Yamaguchi, “Parity violating observables in radiative neutrino pair emission from metastable atoms”, *Progress of Theoretical Physics* **123**, 523-532, 2010
- [2] M. Yoshimura*, “Light Propagation and Paired Superradiance in Coherent Medium”, *Phys.Theor.Phys.* **125**,149-186, 2011
- [3] M. Yoshimura*, “Solitons and Precision Neutrino Mass Spectroscopy”, *Phys.Lett.* **B699**, 123-128, 2011
- [4] Ishiwata, Y.Nakano, K.Kawaguchi, E.Hirota, and I.Tanaka, “Analyses of the infrared absorption bands of $^{15}\text{N}_2$ in the 1850~3150 cm^{-1} region”, *J. Phys.chem.* **A 114**, 980-986, 2010
- [5] S.Civis, I.Matulkova, J.Cihelka, K.Kawaguchi, V.E.Chernov, and E.Yu.Buslov, “Time-resolved Fourier-transform infrared emission spectroscopy of Au in the 1800-4000- cm^{-1} region: Rydberg transitions”, *Phys.Rev.* **A 81**, 012510-1-7, 2010
- [6] S Civiš, I Matulková, J Cihelka, P Kubelík, K Kawaguchi and V E Chernov, “Time-resolved FTIR emission spectroscopy of Cu in the 1800–3800 cm^{-1} region: transitions involving f and g states and oscillator strengths”, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **44**, 25002, 2011
- [7] M.Ferus, P. Kubelik, K. Kawaguchi, K. Dseniya, P. Spanel, S. Civis, “HNC/HCN Ratio in Acetonitrile, Formamide, and BrCN Discharge”, *J. Phys. Chem.* **A 115**, 1885-1899, 2011
- [8] A. Yoshimi*, K. Asahi, T. Inoue, M. Uchida, N. Hatakeyama, and S. Kagami, Nuclear spin maser at highly stabilized low magnetic field and search for an atomic EDM, *AIP Conf. Proc.* **1149** (2009) 249-252.
- [9] T. Inoue*, M. Tsuchiya, T. Furukawa, H. Hayashi, T. Nanao, A. Yoshimi, M. Uchida, Y. Matsuo and K. Asahi, “Frequency characteristics of a nuclear spin maser for the search for the electric dipole moment of ^{129}Xe atom”, *Physica E* **43** (2011) 847-850.
- [10] K. Asahi*, T. Furukawa, T. Inoue, A. Yoshimi, T. Nanao, M. Chikamori, K. Suzuki, M. Tsuchiya, H. Hayashi, M. Uchida, H. Ueno, Y. Matsuo, and T. Fukuyama, “Search for an Electric Dipole Moment in ^{129}Xe Atom with Nuclear Spin Oscillator Technique”, *J. Phys. Conf. Ser.*, accepted.
- [11] T. Inoue, M. Tsuchiya, H. Hayashi, T. Nanao, K. Suzuki, A. Yoshimi, T. Furukawa, M. Uchida, and K. Asahi, “Search for an EDM in diamagnetic atom ^{129}Xe with nuclear spin maser technique”, *J. Phys. Conf. Ser.*, accepted.
- [12] T. Furukawa*, T. Inoue, T. Nanao, A. Yoshimi, M. Tsuchiya, H. Hayashi, M. Uchida and K. Asahi, ”Magnetic Field Stabilization for ^{129}Xe EDM search Experiment”, *J. Phys. Conf. Ser.*, accepted.
- [13] T. Nanao*, A. Yoshimi, T. Inoue, T. Furukawa, M. Tsuchiya, H. Hayashi, M. Uchida, K. Asahi, “Development of highly sensitive NMOR magnetometry for an EDM experiment”, *J. Phys. Conf. Ser.*
- [14] T. Inoue*, T. Furukawa, T. Nanao, A. Yoshimi, K. Suzuki, M. Chikamori, M. Tsuchiya, H. Hayashi, M. Uchida, and K. Asahi, ”Experimental search for ^{129}Xe atomic EDM with nuclear spin maser technique”, *Physics Procedia*, accepted.
- [15] A. Yoshimi*, T. Nanao, T. Inoue, T. Furukawa, M. Uchida, M. Tsuchiya, H. Hayashi, M.Chikamori and K. Asahi, “Development of NMOR magnetometer for spin-maser EDM experiment”, *Physics Procedia*, accepted.
- [16] Y.Sakemi, K.Harada, T.Hayamiazu, M.Itoh, H.Kawamura, S.Liu, H.S.Nataraj, A.Oikawa, M.Saito, T.Sato, H.P.Yoshida, T.Aoki, A.Hatakeyama, T.Murakami, K.Imai, K.Hatanaka, T.Wakasa, Y.Shimizu, M.Uchida, “Search for a permanent EDM using laser cooled radioactive atom”, *Journal of Physics: Conference Series - Proceedings of International Symposium "Nanoscience and Quantum Physics 2011"*

(nanoPHYS'11)

- [17] *Atsuo Morinaga, Koichi Toriyama, Hirotaka Narui, Takatoshi Aoki, and Hiromitsu Imai, “Dependence of Berry’s phase on the sign of the g factor for conical rotation of a magnetic field, measured without any dynamical phase shift”, Phys. Rev. **A 83**, 052109 (2011).
- [18] Y.Yasuda et al. 22名中12番目 (Y.Sakemi) , “Spectroscopic factors and strength distributions for the deeply bound orbitals in Ca-40 obtained from the (p [\leftarrow COMBINING RIGHT ARROW ABOVE], 2p) reaction at 392 MeV.”, Phys. Rev. **C81** (2010) 044315-1 – 044315-11
- [19] M.Itoh et al. 6名中5番目 (Y.Sakemi) , “Search for the alpha condensed state in O-16.”, Mod. Phys. Lett. **A25** (2010) 1935-1938
- [20] H.P.Yoshida et al. 18名中18番目(Y.Sakemi), “Present status of search for EDM of francium atom at CYRIC ”, Proceedings of 4th International workshop on Fundamental Physics using Atoms **2010**, 2010, 29-33
- [21] *Takatoshi Aoki, Kotaro Umezawa, Yuki Yamanaka, Naotomo Takemura, Yasuhiro Sakemi, and Yoshio Torii, “461 nm laser system and hollow-cathode lamp spectroscopy for magneto-optical trap of Sr atoms”, J. Phys. Soc. Jap. (投稿中).
- [22] Kazuhiko Sugiyama*, Sho Kawajiri, Nobuhiko Yabu, Kanehiro Matsumoto, and Masao Kitano, “Sum-frequency mixing of radiation from two extended-cavity laser diodes using doubly resonant external cavity for laser cooling of trapped ytterbium ions”, Appl. Opt. **49**, 5510-5516, 2010.
- [23] Yugo Onoda, Kazuhiko Sugiyama, Michihiko Ikeda, and Masao Kitano, “Loading rate of Yb+ loaded through photoionization into radiofrequency ion trap”, Appl. Phys. B (in press, online first on May 21, 2011)
- [24] Yugo Onoda, Kazuhiko Sugiyama, and Masao Kitano, “Selective detection of minor isotope lines in saturated absorption spectra by absorption filtering of major isotope lines”, Optical Review, Vol. **18**, No. 4, 2011 (in press).
- [25] U Tanaka*, R Naka, F Iwata, T Ujimarui, K R Brown, I L Chuang, and S Urabe, “Design and characterization of a planer trap”, J. Phys. B **42**, 154006-1-5, 2009.
- [26] Y. Ibaraki, U Tanaka*, and S Urabe, “Detection of parametric resonance of trapped ions for micromotion compensation”, Applied Physics B, Appl. Phys. B (in press, online first on March 15, 2011).
- [27] A. Takahashi, H. Imai, K. Numazaki, and A. Morinaga*, “Phase shift of an adiabatic rotating magnetic field in Ramsey atom interferometry for m=0 sodium spin states”, Phys. Rev. A **80**, 050102(R)-1-4, 2009.
- [28] K. Numazaki, H. Imai, and A. Morinaga, “Measurement of the second-order Zeeman effect on the sodium clock transition in the weak-magnetic-field region using the scalar Aharonov-Bohm phase”, Phys. Rev. A **81**, 032124-1-7, 2010.
- [29] A. Takahashi and A. Morinaga*, “Interference fringes of m=0 spin states under the Majorana transition caused by rapid half-rotation of a magnetic field”, Phys. Rev. **A 81**, 042111(2010)
- [30] Tomoya Akatsuka, Yoshihiro Mori, Nobuhiko Sone, Yurie Ohtake, Mamoru Machiya, and Atsuo Morinaga, “A thermal calcium atom interferometer with a phase resolution of a few milliradians based on a narrow-linewidth diode laser”, to be published in Phys. Rev. A
- [31] H. Kobayashi, S. Tamate, T. Nakanishi, K. Sugiyama, and M. Kitano, “Direct observation of geometric phases using a three-pinhole interferometer”, Physical Review A, Vol. **81**, 012104-1~4, 2010.
- [32] H. Kobayashi, S. Tamate, T. Nakanishi, K. Sugiyama, and M. Kitano, “Observation of geometric phases in quantum erasers”, Journal of Physical Society of Japan, Vol. **80**, 034401 – 1~6, 2011.
- [33] Hiroyuki Nishiura, Takeshi Fukuyama, Measuring the lower bound of neutrino mass at LHC in Higgs Triplet Model, Phys.Rev.**D 80**, 017302, 2009
- [34] Takeshi Fukuyama and Nobuchika Okada, “Non-thermal Leptogenesis in a simple 5D SO(10) GUT”, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, **2010**, 2010

[7. 2] ホームページ

本領域のホームページは下記のURLの下に運用されている。

<http://xqw.hep.okayama-u.ac.jp/kakenhi/>

トップページのイメージを図1に示した。本領域の目指す物理目標や活動内容を出来る限り非専門家に平易な言葉で説明すると共に、研究者に向けても、公表論文の紹介、研究会のお知らせ、人事公募のお知らせなどに活用している。また領域内構成員のみがアクセス可能なページを設け、領域内の意思疎通に活用している。現在までのアクセス数は図2に示すとおりであり、平均すると月々に800-900のアクセスとなっている。

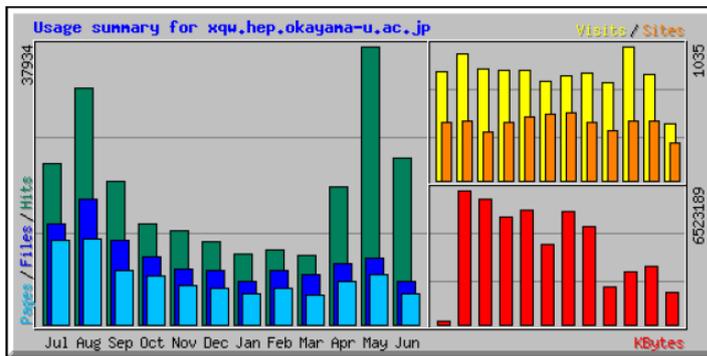


図 1 本領域ホームページ(表紙部)



図 2 ホームページアクセス状況：

過去一年間の月別統計：

(左) Page(空色)/Files(青)/Hits(緑)、

(右上)Visits(黄)/Sites(橙)、(右下)Kbytes(赤)

[7. 3] 公開発表

1. 国内外のシンポジウムやセミナー(主要なもの)

- 研究会名：“Fundamental Physics Using Atoms” 2009
開催日時：2009年8月4日(火)～8月5日(水)
場所：東京工業大学 大岡山キャンパス、参加者数等：77名 (登録者のみ)
- 研究会名：“Fundamental Physics Using Atoms” 2010
開催日時：2010年8月7日(土)～8月9日(月)
場所：大阪大学豊中キャンパス、参加者数等：91名 (登録者のみ)
- 研究会名：“Chemistry and Fundamental Science” 2010
開催日時：2011年5月6日(金)～5月7日(土)
場所：東京大学駒場キャンパス、参加者数等：48名 (登録者のみ)
- 研究会名：“Atomic Magnetometry and Fundamental Physics”
開催日時：2011年1月31日(月)
場所：東工大大岡山キャンパス 本館H345会議室、参加者数等：45名

2. 国内外の会議等での招待講演(主要なもの)

次頁一覧表参照。

[7. 4] 国民との科学・技術対話

- 岡山大学第22回サイエンスカフェ「素粒子と宇宙 ～原子を利用して宇宙の謎に挑む～」(2011年2月24日) 50名参加、アンケート回収39名
- 岡山大学「第1回楽しむ量子の教室」(2009年10月30日) 21名参加、アンケート回収7名
- 東北大学「科学者の卵」(2010年8月2日) 参加
- その他 5件



図 1 サイエンスカフェポスター

主たる研究発表

発表者名	発表標題	学会等名称	発表年月日	発表場所等
M. Yoshimura	Yet another symmetry breaking to be discovered	Workshop on Symmetry Breaking in honor of Professor Nambu	2009.10.30	京都
N. Sasao	原子を用いたニュートリノ質量分光の展望	KEK原子核素粒子研究所セミナー(金茶会)	2009.12.11	高エネルギー加速器研究機構
Y. Sakemi	冷却不安定原子を用いた電子の電気双極子能率探索	KEK原子核素粒子研究所セミナー(金茶会)	2010.2.19	高エネルギー加速器研究機構
T. Aoki, et al	Quantum Degenerate Fermi-Fermi-Bose Mixture	The International Workshop on Ultracold Fermi Gas: Superfluidity and Strong-Correlation (USS 2010)	2010.3.13-15	Japan Atomic Energy Agency, Tokyo
Y. Sakemi	Search for permanent electric dipole moment in Francium	International workshop on UCN and Fundamental Neutron Physics : UCN2010	2010.4.8-9	CNP, Osaka, Japan
旭耕一郎, et al	光学結合フィードバックによる核スピナーを用いた ^{129}Xe 原子 EDMの探索	第7回AMO討論会	2010.6.11-12	つくば市
K. Asahi, et al	A planned search for an atomic EDM in ^{129}Xe with spin maser technique	International Workshop on Variation of Constants and Violation of Symmetries	2010.7.24-25	Cairns, Australia
K. Asahi, et al	Search for an electric dipole moment in ^{129}Xe atom using a nuclear spin oscillator	4th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms 2010 (Osaka)	2010.8.7-9	OSAKA UNIVERSITY
H. P. Yoshida, et al	Present Status of Search for EDM of Francium atom at CYRIC	4th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms 2010 (Osaka)	2010.8.8-10	Toyonaka, Osaka, Japan
N. Sasao, et al	Toward Neutrino Spectroscopy using Atoms	4th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms 2010 (Osaka)	2010.8.8-10	Toyonaka, Osaka, Japan
K. Sugiyama	Development of trapped Yb+ and Ba+ optical clocks towards search for temporal variation of fine structure constant	4th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms 2010 (Osaka)	2010.8.8-10	Toyonaka, Osaka, Japan
J. Tang	Observation of Quantum Coherence for Gaseous Molecules	4th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms 2010 (Osaka)	2010.8.8-10	Toyonaka, Osaka, Japan
K. Nakajima	Search for Quantum Coherence in Nanometer-scale targets	4th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms 2010 (Osaka)	2010.8.8-10	Toyonaka, Osaka, Japan
A. Oikawa, et al	Development of the Beam Transport system for the study on atomic Parity Non Conservation	4th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms 2010 (Osaka)	2010.8.8-10	Toyonaka, Osaka, Japan
Y. Sakemi	フランシウムEDM探索実験計画	研究会「Fundamental Physics using Atoms」	2009.8.4	東京工業大学
N. Sasao	マクロコヒーラント増幅機構を用いたニュートリノ対生成の検出	研究会「Fundamental Physics using Atoms」	2009.8.4	東京工業大学
K. Asahi, et al	Search for an EDM in the Xe-129 atom	ECT Workshop on Violations of Discrete Symmetries in Atoms and Nuclei	2010.11.15-19	Trento, Italy
Y. Sakemi	Searches for a permanent EDM in Francium	International workshop on Violation of discrete symmetries in atoms and nuclei ECT*	2010.11.15-19	Trento, Italy
K. Asahi, et al	Search for an electric dipole moment in ^{129}Xe atom with nuclear spin oscillator technique	International Symposium on Nanoscience and Quantum Physics (nanoPHYS' 11)	2011.1.26-28	The International House of Japan
Y. Sakemi	Search for a permanent EDM using laser cooled radioactive atoms	International symposium nanoPHYS' 11 "Nanoscience and Quantum Physics 2011"	2011.1.26-28	The International House of Japan
宮本 祐樹	Spectroscopy of HF and HF-containing clusters in solid parahydrogen	MATRIX2011	2011.7.12	The University of British Columbia
久間 晋	Overtone vibrational Raman spectroscopy of solid parahydrogen for the realization of two-photon paired superradiance	MATRIX2011	2011.7.13	The University of British Columbia
若林 知成	Spectroscopy of bismuth atoms in neon matrices at 3 K	MATRIX2011	2011.7.13	The University of British Columbia

[8] 研究組織と各研究項目の連携状況

本領域の計画研究並びに公募研究の研究体制・研究組織に関しては、次頁以降に一覧として示した。

本領域の連携は、次のような複数の視点から考えることが出来る。即ち、(1) 素粒子的宇宙像の解明を目指した理論面における連携。(2) レーザー技術・トラップ技術に象徴される技術面での連携。(3) 以上に加えて、領域発足後、急速に活発になった化学分野との連携である。

(1) の理論連携については、総括班の理論グループを中心に、研究会を通して、あるいは総括班会議において、理論の現状や進展が報告され、これに基づいて領域の方向性を決定している。これに加えて、本領域ではより個別的・具体的なレベルでの理論連携が必須となっている。例えば、計画研究BではいずれもEDMの測定を目指している。この場合、素粒子や素過程レベルのCP非保存と実験に顕在化するパラメータは、原子や原子核の理論を通じてのみ結び付けることが出来る。これらの理論研究については、例えば、JPSP外国人特別研究員を受け入れ(B02)集中的に計算を進めるなど、計画研究B01とB02が連携を保ちつつ遂行されている。この点については、今後より組織的な研究体制を構築したい。また、計画研究Aにおいては、マクロコヒーランス理論や量子干渉性をキーワードとして共通の理論体系を構築する努力が継続している。

(2) の技術面での連携・協力も非常に活発である。まず、計画研究A01とA02はミーティングを定例化し(月一回)、進捗状況を逐一報告すると共に、問題点の洗い出しやそれに対する対応策等を協議している。またパラ水素自身を標的とするPSR探索実験については、要素実験に分割するのが不適切であることから、共同実験として取り組んでいる。次に、研究計画Bについては、レーザー、磁場安定化、スピン歳差検出法等、共通開発項目を持ち、以下のような連携が進んでいる。①Rb光検出技術の開発を共同で行い、B01では原子スピン偏極度、B02では原子ビーム強度の測定に活用する。②B01で開発した磁場安定化技術を導入し、B02におけるEDM測定を促進する。③B02の高強度狭帯域半導体レーザー等の製作技術はB01でRb偏極度向上に活用する。領域内のその他の技術的クロスオーバーを述べると、計画研究A01は計画研究C01より、トラップ技術やECLDレーザー技術について技術提供を受けた。逆にヒートパイプ技術をB02に提供し、波長安定化に向けたヨウ素セル製作に貢献した。更に、B02ではEDM測定用高電場電極の技術をC01より導入し、震災で中断した開発の遅れを取り戻す計画である。

(3)の化学分野との連携について述べる。計画研究B02では、極性分子を冷却することでEDMの超高感度測定を行う計画であるが、化学研究者との連携が重要になりつつある。また計画研究A01/A02では、量子干渉性の優れた分子標的がニュートリノ質量分光用標的となる。このような研究状況から、化学研究者との連携も活発に行われており、領域に関連しない化学研究者または研究グループとも連携を強化している。さらに言えば、公募研究採択4課題のうち、実に3課題まで

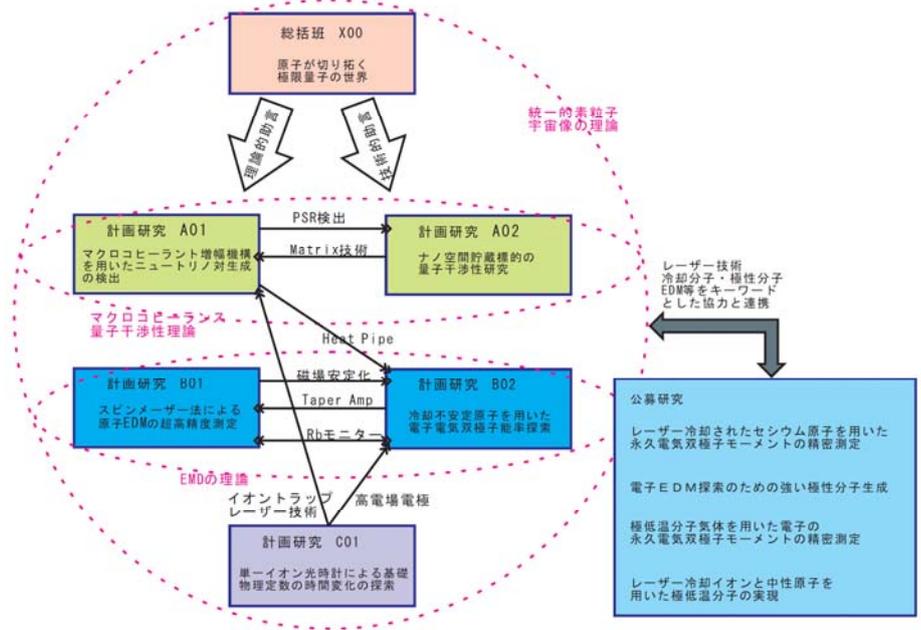


図 1 領域の連携状況模式図。理論的連携は赤のサークルで、技術連携は黒矢印で示されている。冷却分子・極性分子等をキーワードとした化学研究者との連携を構築している。

が「分子」をキーワードにした課題となっている。公募研究グループとは、今後とも、総括班会議に公募研究責任者を招待するなどし、連携の強化を図りたい。また今後も領域として新しい融合分野「化学と基礎物理」の創設に努力する。

[研究組織]

研究計画名	氏名	所属	備考	氏名	所属	備考
総括班(X00)	笹尾 登	岡山大学	研究代表者	中野 逸夫	岡山大学	研究分担者
研究科題名: 「原子が切り拓く極限量子の世界」	川口 建太郎	岡山大学	研究分担者	藪崎 努	京都大学	連携研究者
	旭 耕一郎	東京工業大学	研究分担者	福山 武志	立命館大学	連携研究者
	酒見 泰寛	東北大学	研究分担者	田中 実	大阪大学	連携研究者
	杉山 和彦	京都大学	研究分担者	志田 忠正	京都大学	連携研究者
	吉村 太彦	岡山大学	研究分担者			
総括班計	11					
A01班	笹尾 登	岡山大学	研究代表者	唐 健	岡山大学	連携研究者
研究科題名: 「マクロコヒーラント増幅機構を用いたニュートリノ対生成の検出」	中野 逸夫	岡山大学	研究分担者	久保園 芳博	岡山大学	連携研究者
	吉村 太彦	岡山大学	研究分担者	谷垣 勝己	東北大学	連携研究者
	福見 敦	川崎医療短期大学	研究分担者	百瀬 孝昌	UBC	連携研究者
	若林 知成	近畿大学	研究分担者	谷口 敬	岡山大学	新学術領域雇用
	田中 実	大阪大学	研究分担者	中嶋 享	岡山大学	新学術領域雇用
	南條 創	京都大学	連携研究者	久間 晋	岡山大学	新学術領域雇用
川口 建太郎	岡山大学	連携研究者				
A01班計	15					
A02班	川口 建太郎	岡山大学	研究代表者	久保園 芳博	岡山大学	連携研究者
研究課題名: 「ナノ空間貯蔵標的の量子干渉性研究」	唐 健	岡山大学	研究分担者	若林 知成	近畿大学	連携研究者
	中川 幸子	岡山理科大学	研究分担者	百瀬 孝昌	UBC	連携研究者
	平原 靖大	名古屋大学	研究分担者	宮本 祐樹	岡山大学	新学術領域雇用
A02班計	8					
B01	旭 耕一郎	東京工業大学	研究代表者	松尾 由賀利	理化学研究所	研究分担者
研究課題名: 「スピンメーザー法による原子EDMの超高精度測定」	福山 武志	立命館大学	研究分担者	古川 武	東北大学	連携研究者
	吉見 彰洋	理化学研究所	研究分担者	酒見 泰寛	東北大学	連携研究者
	上野 秀樹	理化学研究所	研究分担者	藪崎 努	京都大学	連携研究者
B01班計	8					
B02	酒見 泰寛	東北大学	研究代表者	畠山 温	東京農工大学	研究分担者
研究課題名: 「冷却不安定原子を用いた電子電気双極子能率探索」	伊藤 正俊	東北大学	研究分担者	畑中 吉治	大阪大学	研究分担者
	原田 健一	東北大学	新学術領域雇用	若狭 智嗣	九州大学	研究分担者
	古川 武	東北大学	研究分担者	清水 康弘	東北大学	連携研究者
	吉田 英智	東北大学	研究分担者	内田 誠	東京工業大学	連携研究者
	川村 広和	東北大学	新学術領域雇用	今井 憲一	京都大学	連携研究者
	青木 貴稔	東京大学	研究分担者	村上 哲也	京都大学	連携研究者
B02班計	14					
C01	杉山 和彦	京都大学	研究代表者			
研究課題名: 「単一イオン光時計により基礎物理定数の時間変化の探索」	田中 歌子	大阪大学	研究分担者			
	盛永 篤郎	東京理科大学	研究分担者			
	北野 正雄	京都大学	連携研究者			
	赤塚 友哉	東京理科大学	連携研究者			
C01班計	5					

[公募研究] (所属・職は公募研究採択時のもの)

所属	職	研究代表者氏名	研究計画名
東京工業大学	助教	本多 和仁	レーザー冷却されたセシウム原子を用いた永久電気双極子モーメントの精密測定
東京大学	准教授	鳥井 寿夫	電子EDM探索のための強い極性分子生成
富山大学	助教	榎本 勝成	極低温分子気体を用いた電子の永久電気双極子モーメントの精密測定
電気通信大学	特任准教授	向山 敬	レーザー冷却イオンと中性原子を用いた極低温分子の実現

[9] 研究費の使用状況

[A01] 研究目標遂行のため、有効に活用している。主たる用途は以下のとおりである。まず研究を加速し、新たな視点を有する研究者を育成するために准教授1名と助教2名(1名は2011年度より)を雇用している。本計画研究は新しい境界領域の創造であるため、予算の観点からは基本備品の整備も前半期の重要な課題となった。具体的には、i) レーザーを始めとする原子・分子励起光源(パルス色素レーザー、ファイバーレーザー、Nd:YAG励起レーザー、ダイオードレーザー等)、ii) 固体マトリックス周辺機器(四重極質量分析器、ドライ真空ポンプ、ターボ分子真空ポンプ等)、iii) 各種光学測定計器(波長計、イメージング分光器等)、iv) その他、計算機電源装置等である。以上のほか、光学部品や電子部品を始めとする消耗品、研究打ち合わせや研究発表のための旅費、ソフトウェア・書籍等に使用した。

[A02] 予定通り執行している。水素マトリックス装置に関連し、姿勢自在型複合分子ポンプ、空冷電子冷却軟X線CCD検出器、サイドオン光電子倍增管など周辺装置を購入した。また赤外連続発振OP0レーザーのためLiNbO₃結晶温度制御装置、OP0レーザーの周波数安定化のためのエタロン、フォトンエコー観測のための吸収セル、真空システムの製作に窓板、ミラーホルダー、真空関連部品、オシロスコープ等を購入した。研究促進のため助教1名を雇用している。

[B01] B01班の平成 21~22 年度研究はスピナーの周波数安定化を中心とした EDM 測定に向けての基盤整備に注力した。このため研究費の主要な用途は i) 高安定度電流源(高性能安定化電源、高精度マルチメーター、標準抵抗、校正電源など)、ii) 安定発振を実現するための光ポンピング増強(高出力挟帯域ダイオードレーザーなど)、iii) 高性能セル作成のための真空排気装置増強及び残留ガス分析器の導入(ターボ分子ポンプ、四重極残留ガス分析装置など)、iv) 環境磁場能動打消し装置の構築(磁場キャンセル用コイル作成、磁束計整備など)、v) メーザー本体の機械振動の除去、vi) 高感度マグネトメトリ技術の開発(防振台、小型磁気シールドなど)、vii) これらの研究の成果を公表するための海外・国内会議へのスタッフ・大学院生の派遣、等である。vii) では国際会議で 20 件、国内会議で 21 件の発表を行うことができた。以上のほか、消耗品として組み立て材料等を購入した。

[B02] 予定通り執行している。1年目は主にFrを冷却・トラップするためのレーザー光源の整備を行い、2年目・3年目でEDM探索装置の心臓部であるFrイオン源、高輝度低速中性原子ビーム生成装置、磁気光学トラップ装置の開発に研究費を使用している。また、2年目からは研究を加速させるため1名の助教と1名のPDの雇用を行い、それぞれレーザー冷却・トラップと高輝度中性原子ビーム実現に向けて計画を促進している。また研究成果公表のため、主に国際会議等での発表(5件)のための海外出張費に使用している。2011年3月の東日本大震災により、多くの装置が損壊の被害を受けた。他の外部資金獲得の努力を行いながら、装置建設を予定通り進めているが、不測の事態に対する配慮をぜひ検討していただければ幸いである。

[C01] 京大Gでは必要なレーザー光源が多いため、研究費の効果的使用は重要である。たとえば電気光学変調器用結晶、ミラーなど、コーティングを共通化して複数発注するなどして、研究費の有効活用を図っている。また、レーザー装置などは可能な限りパーツを購入、あるいは設計・試作し、電子回路やパソコンによる制御も含めて、我々の手で組み上げる方針で臨んでいる。ここまで1台100万円以上の大型のレーザーは、差周波混合用のNd:YAGレーザーのみである。一方で半導体レーザー部品や光学部品を潤沢に購入できることで、計画通りに研究を行うことができている。なお、このような方針は、研究室の技術力を向上させ、物作りに慣れた卒業生を輩出するという観点から、単に予算節約以上の利点があるものと考えている。研究は立ち上がっているため、後半は大学院生の海外発表も積極的に行って、人材育成にも役立たせたい。阪大Gと東理大Gも、2次元型トラップの改良や半導体レーザーの線幅狭窄化に必要なパーツや測定器を効果的に購入している。

[X00] 研究目標遂行のため、有効に活用している。主たる用途は以下のとおりである。まず領域の研究活動を円滑にし、効率化するため研究支援員を雇用している。その他予算の大部分は研究会の開催(Fundamental Physics using Atoms, Chemistry and Fundamental Science)、総括班会議開催を始めとする研究打ち合わせ旅費、文具や計算機等事務体制維持のための経費である。

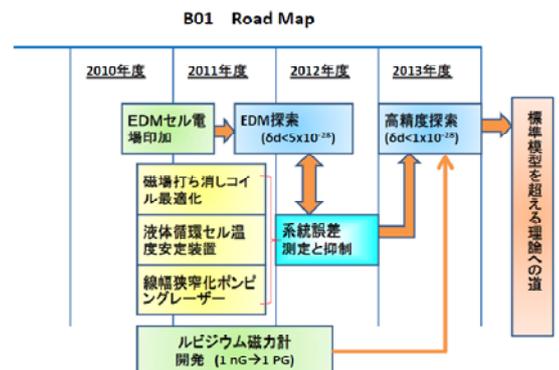
[10] 今後の研究領域の推進方策

本項目では、まず各計画研究の今後の方針と計画をまず述べ、領域全体の推進方策は最後尾に記す。

[A01及びA02] 計画研究Aの最終的目標は、量子コヒーランスに優れたナノ空間貯蔵標的を開発し、原子からのニュートリノ対放射過程を検出することにある。これによりニュートリノ質量分光の道を拓く。この最終目標に到達する重要な一里塚は、二光子対超放射過程(PSR)を発見し、このプロジェクトの要となる原理「マクロコヒーランス増幅機構」を実証することにある。この間、研究計画A01及びA02は、PSR探索に焦点を当て研究活動を集中してきた。この結果、標的の準備は整ったと結論できる。(詳細については、研究成果[6.1]Ba気体及び研究成果[6.2]のパラ水素の項を参照)。PSR過程自身が世界的に初めての発見であるので、応用面も含めそのインパクトは大きい。今後一年程度を費やし、PSRを探索・発見し、理論との比較を行う。ソリトンの生成はそれ自身興味深い現象であると共に、その制御はニュートリノ対生成過程に対して重要な技術となろう。その後、ニュートリノ対超放射過程の発見に移行する。なおこの点での準備研究、特に標的製作については、A02グループを中心に行われてきた。この結果、p-H₂固体に埋め込まれた原子または分子が有力であることが判明した。今後は一年程度を掛け、最良の標的選択と製作を行う。最終的には、A01とA02の成果を合流し、目標である原子からのニュートリノ対放射過程の検出を実現する。



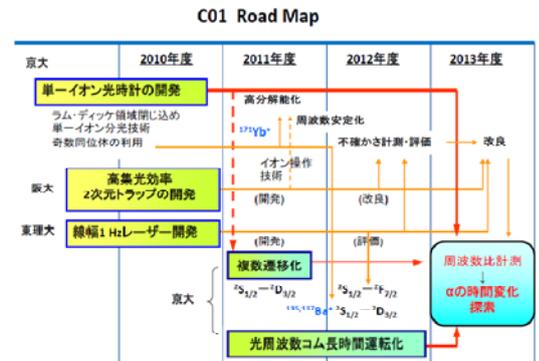
[B01] まず核スピン偏極維持が達成されている電極付き EDM セルの寿命調査を行い、EDM セルへの電場印加試験を行なった後、メーザー発振実験に移る。これにより EDM 測定実験の開始に至り、EDM 測定における現時点での系統誤差が明らかになる。そこでは環境磁場変動の影響が現れてくると予想されるが、並行して研究を進めている環境磁場変動打ち消しコイル系のパラメータ最適化を行い、系統誤差の抑制を目指す。同時に測定時間と得られる精度の関係を調査し、印加電場の極性切り替えの時間の最適化も行う。その他、セル温度変動起因の歳差周波数変動も現れると考えられる。そこで開発進行中の液体循環によるセル温度安定化システムを EDM 装置に組み込み、これによる系統誤差の抑制も目指す。それに加え、導入準備が進んでいる線幅狭窄化ポンピングレーザーを使うことにより、光照射がセルに与える熱変動も低減させる。以上の総合的な EDM 測定精度向上と平行して、電場印加によるリーク電流に関する改善も進める。また、開発中の Rb 磁力計を EDM 装置に組み込み、磁力計の達成感度によって段階的にシールド内残留磁場・印加ソレノイド磁場をさらに安定化させていく(1 nG → 1 pG)。そのための磁力計に関するセル製作・ノイズ研究を並行して推し進める。磁力計に関しては、EDM セル内での動作が理想的なため、³He 磁力計も含めて comagnetometer の導入も検討し、10⁻²⁸ ecm 以下の EDM 精度を目指す。



[B02] 前半3年間でFr-EDM探索装置の心臓部であるFr生成・輸送・冷却・トラップ装置の開発を完了し、世界最高収量を達成したFr源の性能を最大限発揮して、MOT中における冷却Fr原子の世界最大蓄積数 $\sim 10^6$ 個以上の実現を目指す。この実現がEDM探索の統計精度向上の鍵となる。後半2年間で、最終段に配置するレーザートラップ装置の開発を進め、光格子中に配置したFrに対してEDM測定を行う技術を確立し、EDM探索に着手する。光格子に閉じ込めた冷却不安定原子に対するEDM測定は世界初の試みであり、系統誤差を小さくする上で実現すべき最重要項目である。また電子EDMの決定精度向上に必要な電子EDM増幅度の高精度計算は、相対論的結合チャンネル手法を用いた第1原理理論計算をスパコンにより遂行する。さらに、新学術領域研究の趣旨・特徴を活かして、異分野融合と領域の広がりを目指し、Fr-Sr極性分子を用いた次世代EDM探索技術の基礎研究を、核物理、素粒子物理、量子光学、原子物理、化学分野の研究分担者とともに推進する。



[C01] C01では今後も着実に光時計の構築を目指し研究を進め、異なる光時計の周波数比計測を実現する。単一イオンの基準スペクトル観測まで達成した偶数同位体 Yb^+ を用いて、時計遷移励起用レーザーの周波数安定化、及び周波数の不確かさ測定技術を確立し、光時計のシステム構築を図る。冷却が完了した奇数同位体 $^{171}Yb^+$ へ次第に研究を移行し、不確かさ 10^{-17} 以下の光時計を構築する。さらに小さな不確かさが見込める奇数同位体 $^{135,137}Ba^+$ でも、複雑な準位構造を克服し光時計を実現していく。不確かさの評価を短時間で高分解能に行うには、基準スペクトルの取得をできる限り高速にする必要がある。このようなイオン操作技術に関しては阪大Gとの連携を継続して進捗を加速し、また、阪大Gで行っている蛍光検出の高効率化により、単一イオンでの理論限界に迫る周波数安定度を実現する。 α の時間変化検出には、感度をもっとも高い $^2S_{1/2}-^2F_{7/2}$ 遷移の光時計が重要である。この遷移は寿命10年とスペクトルが極めて狭くレーザーの線幅に対する要求が高い。東理大Gが光共振器の支持方法などで有効な線幅狭窄技術を開発し提供できることも重要となる。平行して、現在モード同期発振を確認した半導体レーザーで直接発振する固体レーザーで、長時間連続動作可能な光周波数コム、そして光周波数比計測システムを実現させる。



[X00] 総括班自身の個別活動、特に後半期の活動重点目標については、紙幅の関係でpage-20に記した。ここでは本領域の今後の推進方策を中心に述べる。本領域の目的は、前述したように、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。この意味をより具体化すると、各計画研究を推進する中で、i) 標準模型を超える理論構築の糸口を与える、ii) 原子あるいは分子をキーワードとする基礎物理の新たな研究領域を開拓する、の二点になる。前者の視点では、実験と理論の合同小研究会やワークショップを肌理細かく開催し、不断に実験的成果を基礎理論開拓に結びつける。これと共に、最終年度には国際会議を開催し、全体の成果を取りまとめる。また後者については研究会「Fundamental Physics Using Atoms」や「Chemistry and Fundamental Science」を軸に、研究者ネットワークを充実強化し、新たな人材や研究を創出する。この点では公募研究も活用する。以上を統合し、将来的には領域の更なる発展を期したい。

[11] 総括班評価者による評価の状況

評価者：藪崎努(京都大学名誉教授)、志田忠正(京都大学名誉教授)

領域の目標と総括班の役割

本研究領域の目的は、以下に示す3つの計画研究を遂行し、宇宙に残された謎の解明に挑戦することにある。計画Aでは、我が国発信の新しい原理「マクロコヒーランス増幅機構」を用い、ニュートリノ絶対質量の決定やマヨラナ性を検証する。計画Bでは、クォーク(B01)と電子(B02)の永久電気双極子能率(EDM)を世界の最高感度で測定する。計画Cでは最新技術を駆使して不確かさ 10^{-17} 以下の光時計を構築し、微細構造定数の時間変化を測定する。以上を踏まえ、総括班は領域としての有機的連携および統一性に留意しつつ、次の3つの視点から活動を行う。(1) 各計画研究の進行状況を監督し、必要に応じて評価・助言をする。(2) 理論・技術面から領域全体の方向づけを図る。(3) 学会及び社会からの要望を受取り、また逆に成果を発信する。

総括班の開催状況

総括班会議は年間四、五回のペースで定期化されており、開催場所は計画研究を進める各大学を循環している。総括班会議では、必ず各計画研究の進捗状況が発表され、それに基づいた質疑応答がある。出席者は総括班メンバーも含め、各計画から平均四、五名である。この間、互いの計画に対する理解が深まり、活発でレベルの高い討論も可能になってきた。また定期会合時に各計画研究の実験現場を公開することを義務づけ、実験の具体的進捗状況が直接的に把握されるよう工夫されている。この方法は、研究を監督・助言をするのに効果的であると同時に、実験技術の双方向的レベルアップに役立っていると言えよう。

国際会議「Fundamental Physics Using Atoms」と「Chemistry and Fundamental Science」

前者の「Fundamental Physics Using Atoms」は、領域の発足前から開催されているもので2011年10月にも第5回の会合が岡山で開催される予定である。参加者は昨年の場合、外国からの招待者も含め100名程度であり、会議の知名度も上がってきた。日本での様々な研究活動の交流の起点となるばかりでなく、外国への発信と逆に外国での活動を知る良い機会となっている。財源の問題もあろうが、より多くの外国人参加者を期待したい。一方、後者の「Chemistry and Fundamental Science」は今年度に初めて開催された。評価者の一人はかねてより日本の化学者のサイエンス全般を俯瞰する視野に憾みを覚えているが今回、開催された「Chemistry and Fundamental Science」によって本領域が境界融合の範を示すものであることを実感した。本領域の目標設定とその達成への取り組みが日本の化学界にも好ましい刺激となることを願う。

本領域への提言

最後に二、三の提言を行いたい。(1)本領域の成果は現在までも「Fundamental Physics Using Atoms」等の国際会議を通じ、海外に発信されている。今後は具体的な成果の出る時期であり、この点についてはより一層の努力を期待したい。(2) 基本粒子のEDM測定は本領域の柱の一つである。報告書でも述べられている通り、測定値と素過程レベルのCP非保存を結び付けるには、原子核や原子レベルの理論が必要となる。この点では、領域全体の努力により、理論的前進を保証されたい。(3) 上記したポイントとも関連し、公募研究は重要であろう。聞くところによると「公募研究予算枠及び枠の取り方」に制約があるとのことであるが、様々な工夫を行うことで公募研究を領域の発展に有効活用されたい。(4) 若手の研究者が、総括班会議等でも活発に発表し、領域として若手育成に力を入れていることは良く読み取れる。より積極的に若手研究者(特に博士課程の大学院生)を呼び込み、この新しい融合領域を将来に渡り支える人材育成に努力されたい。