

領域略称名：極限量子

領域番号：2103

平成26年度科学研究費補助金「新学術領域研究
(研究領域提案型)」に係る事後評価報告書

(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-

(領域設定期間)

平成21年度～平成25年度

平成26年6月

領域代表者 (所属研究機関・部局(学部等)・職・氏名)

岡山大学・極限量子研究コア・教授・笹尾 登

目 次

1. 研究領域の目的及び概要	page-2
2. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況	page-4
3. 研究領域の設定目的の達成度	page-6
4. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況	page-9
5. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況	page-10
6. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）	page-11
7. 総括班評価者による評価	page-12
8. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	page-14
9. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）	page-19
10. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度	page-25

1. 研究領域の目的及び概要（2 ページ程度）

研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時に記述した内容を簡潔に記述してください。どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域」であるか、研究の学術的背景（応募領域の着想に至った経緯、これまでの研究成果を進展させる場合にはその内容等）を中心に記述してください。

[研究領域の研究目的・全体構想]

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. 微細構造定数や電子陽子質量比等の時間変化を測定し、暗黒エネルギーが示唆する、新しい物理学に対する糸口を得る。

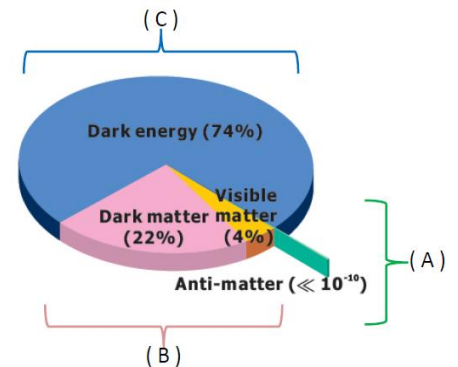


図1：宇宙組成と各計画研究の関連性

本領域は、上記 3 つの課題に対応し、**[A: 原子ニュートリノの検出]**、**[B: 永久電気双極子能率の測定]**及び**[C: 微細構造定数の時間変化測定]**の研究項目及び公募研究から成り立つ。これらの研究を遂行する中で、基礎物理学に対し、大型加速器・大型観測装置に比肩するインパクトのある結果を提供する融合分野の創設を目指す。

[研究の学術的背景及び目標]

以下では、各計画研究についてより具体的な学術的背景とその研究目標を述べる。

[計画研究 A：原子ニュートリノの検出]

本研究では、原子からの光随伴ニュートリノ対生成過程[図 2(a)参照]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・CP 非保存位相の測定等）の道を拓く。この目的のため、我が国発信の新原理「マクロコヒーレント増幅機構」を確立し、利用する。この増幅機構は、励起された原子(または分子、以下同様)が、一光子+ニュートリノ対など複数の粒子を伴って脱励起する際、ある位相条件(運動量保存と等価)が実現されると、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。「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。計画研究[A01]の研究目標は、この新しい増幅機構の原理を二光子対超放射過程により実証すると共にニュートリノ質量分光に向け、様々な研究を進めることを目標としている。また計画研究[A02]の研究目標は、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。

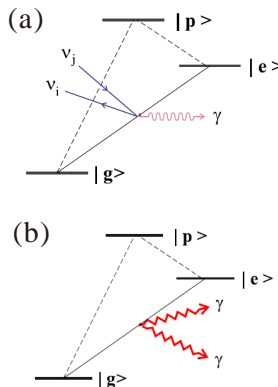


図2：(a) 光随伴ニュートリノ対生成過程 (RENP) (b)二光子対超放射過程 (PSR)

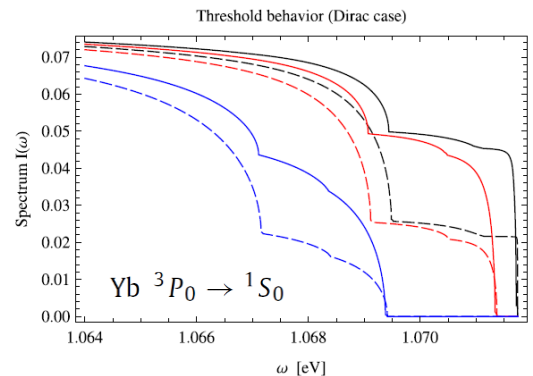


図3：RENP 過程に於けるスペクトル例：横軸は光子エネルギー、縦軸は任意目盛。実線(破線)はニュートリノ質量が順階層(逆階層)、黒赤青線は最小質量が $m_0=2,20,50\text{meV}$ の場合。

[B: 永久電気双極子能率の測定] 素粒子の標準理論が“要求”する最後の粒子、Higgs 粒子の発見により、素粒子物理学は文字通り新しい段階に突入している。即ち、標準理論から逸脱する現象を発見することが焦眉の課題と言って良い。電気双極子能率(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($d(^{129}\text{Xe}) < 4.1 \times 10^{-27} \text{ e} \cdot \text{cm}$)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(~1000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。

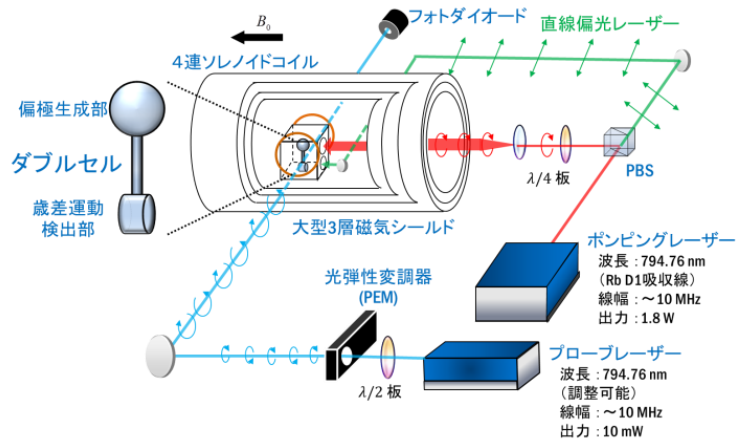


図4(上) B01:スピンメジャー法による原子 EDM の超高精度測定システム
Xe スピン歳差周波数の電場依存性を測定することにより EDM を決定。

Laser cooled Fr factory at CYRIC

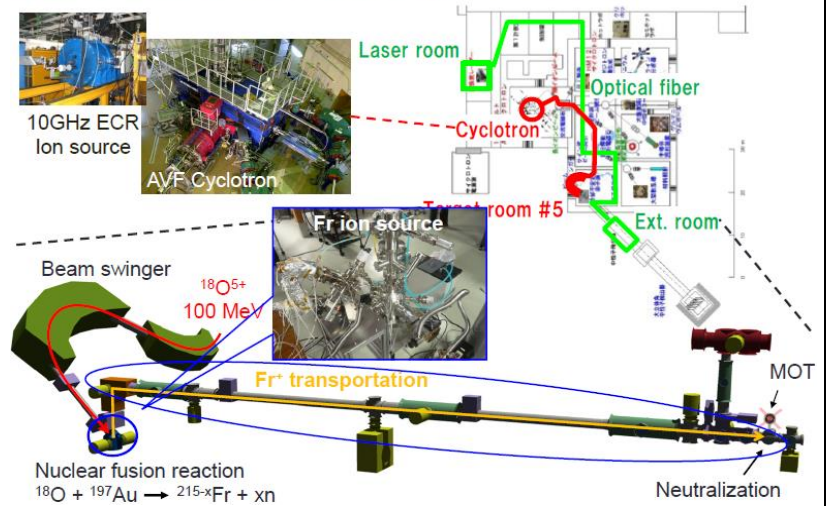


図5(右) B02:冷却不安定原子を用いた電子電気双極子能率探索全体像。核融合反応を用いフランシウムを大量生成。輸送・中性化の後、レーザー冷却技術により磁気光学トラップ(MOT)に捕捉の上、スピン歳差周波数を測定する。

[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 Yb^+ と Ba^+ の時計遷移に対して測定を行う。 α に対する感度が異なる2つの時計遷移をもつ Yb^+ では、同一のイオンで異なる2種類の遷移を比較して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、 Ba^+ を含む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とともに、物理研究や現実生活に大きなインパクトを与えよう。

[公募研究]

領域と関連し 新たな物理学・化学に結びつく提案(極性分子、レーザー冷却等)を推進することとした。また次世代を担う若手研究者の斬新なアイデアを積極的に奨励することとした。

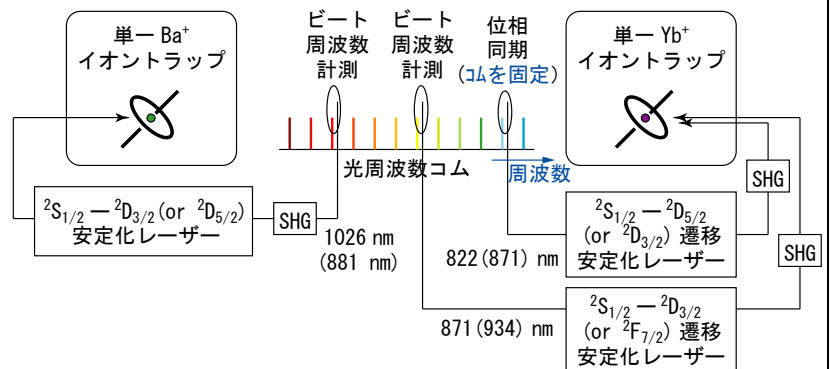


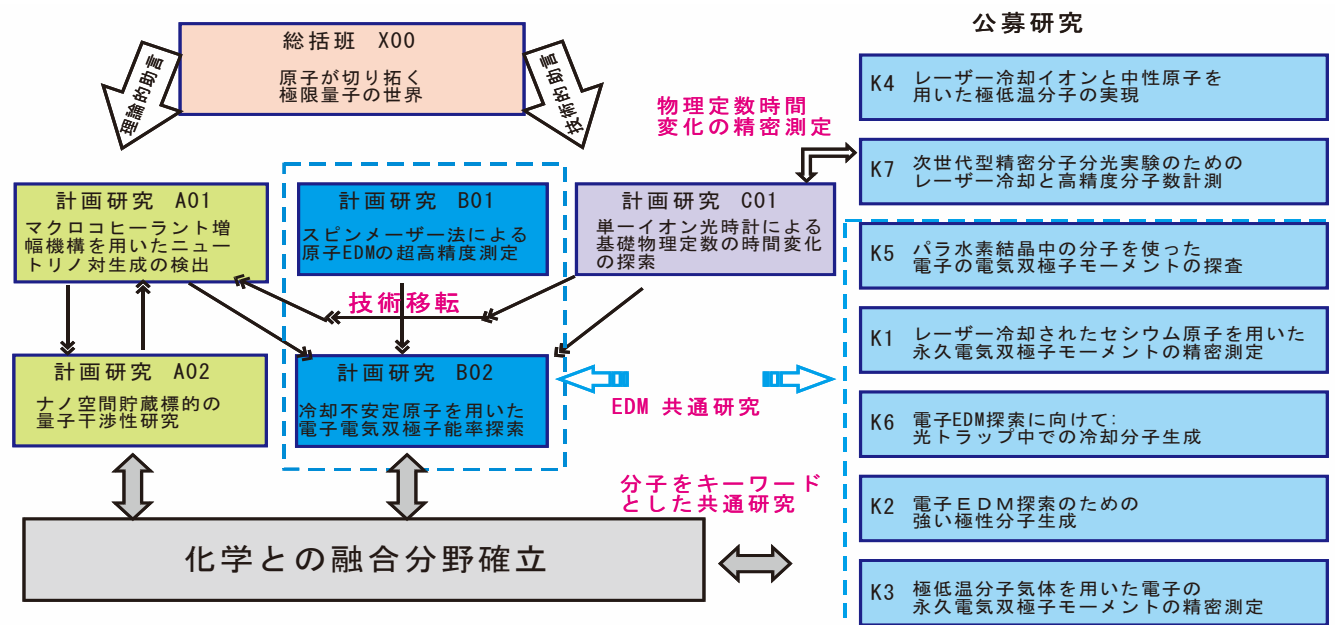
図6 C01: 微細構造定数の測定システム

2. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況（2 ページ程度）

領域内の計画研究及び公募研究を含んだ研究組織と領域において設定している各研究項目との関係を記述し、どのように研究組織間の連携や計画研究と公募研究の調和を図ってきたか、組織図や図表などを用いて具体的かつ明確に記述してください。

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た。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た。例えば、計画研究 B・公募研究ではいずれも 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、共同研究会を開催する、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、有機的連携を保ちつつ遂行された。

(2) の技術面での連携・協力も非常に活発に行われた。まず、計画研究 A01 と A02 はミーティングを定例化し(月一回)、進捗状況を共通の認識とすると共に、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これを成功させた。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、連携が進んだ。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した。②B01 で開発した磁場安定化技術を導入し、B02 における EDM 測定を促進することとした。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 偏極度向上に活用した。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、Sr 原子の波長 689nm 遷移の分光に貢献した。

(3)の化学分野との連携について述べる。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。このような状況から、化学研究者との共同研究を元に共著論文[A1-02]を出版した。計画研究 B01/B02 では、極性分子・冷却分子を使った EDM 研究が脚光を浴びており、今後共 EDM 研究を主導していくと予想される。このような観点から、B02 においては冷却分子の研究を平行して行った。この方向性は、特に公募研究に顕著に表れた。日本に於ける冷却分子や極性分子の研究は、残念ながら諸外国に比較し立ち遅れているが、本領域の計画研究や公募研究は化学界を含めた当該分野進展の原動力[K-06~11]となった。

研究計画名	氏名	所属	備考	氏名	所属	備考	氏名	所属	備考
A01 班	笹尾 登	岡山大学	代表	川口建太郎	岡山大学	連携	吉見 彰洋	岡山大学	連携
「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」	吉村 大彦	岡山大学	分担	唐 健	岡山大学	連携	植竹 智	岡山大学	連携
	福見 敦	川崎医療短期大学	分担	久保園芳博	岡山大学	連携	中野逸夫	岡山大学	他
	若林 知成	近畿大学	分担	谷垣 勝己	東北大学	連携	*1 谷口 敬	岡山大学	他
	田中 実	大阪大学	分担	百瀬 孝昌	UBC	連携	*2 中嶋 享	岡山大学	他
	南條 創	京都大学	連携	吉村 浩司	岡山大学	連携	*3 久間 晋	岡山大学	他
A01 班計	18								
A02 班	川口建太郎	岡山大学	代表	平原 靖大	名古屋大学	分担	百瀬 孝昌	UBC	連携
「ナノ空間貯蔵標的の量子干渉性研究」	唐 健	岡山大学	分担	久保園芳博	岡山大学	連携	宮本 祐樹	岡山大学	他
	中川 幸子	岡山理科大学	分担	若林 知成	近畿大学	連携			
A02 班計	8								
B01 班	旭 耕一郎	東京工業大学	代表	内田 誠	東京工業大学	連携	吉見 彰洋	岡山大学	連携
「スピンメーザーによる原子 EDM の超高精度測定」	福山 武志	大阪大学	分担	古川 武	首都大学東京	連携	*4 市川雄一	東京工業大学	他
	上野 秀樹	理化学研究所	分担	酒見 泰寛	東北大学	連携			
	松尾由賀利	法政大学	分担	藪崎 努	京都大学	連携			
B01 班計	10								
B02 班	酒見 泰寛	東北大学	代表	畑中 吉治	大阪大学	分担	村上 哲也	京都大学	連携
「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	分担	若狭 智嗣	九州大学	分担	原田 健一	東北大学	他
	吉田 英智	東北大学	分担	清水 康弘	東北大学	連携	川村 広和	東北大学	他
	青木 貴稔	東京大学	分担	内田 誠	東京工業大学	連携			
	畠山 温	東京農工大学	分担	今井 憲一	京都大学	連携			
B02 班計	13								
C01 班	杉山 和彦	京都大学	代表	北野 正雄	京都大学	連携			
「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」	田中 歌子	大阪大学	分担	*5 赤塚友哉	東京理科大学	連携			
	盛永 篤郎	東京理科大学	分担						
C01 班計	5								
総括班 (X00)	笹尾 登	岡山大学	代表	杉山 和彦	京都大学	分担	志田 忠正	京都大学	連携
「原子が切り拓く極限量子の世界」	川口建太郎	岡山大学	分担	藪崎 努	京都大学	連携	梶田 雅稔	情報通信研究機構	連携
	旭 耕一郎	東京工業大学	分担	福山 武志	大阪大学	連携			
	酒見 泰寛	東北大学	分担	田中 実	大阪大学	連携			
総括班計	10								

他・・・新学術領域雇用など

(備考欄) *1 逝去 *2 現：高エネルギー加速器研究機構 *3 現：理化学研究所 *4 現：理化学研究所
*5 現：理化学研究所

記号	所属	職	研究代表者	研究計画名	期間
K1	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	H22-23
K2	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	H22-23
K3	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	H22-23
K4	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	H22-23
K5	東京工業大学	准教授	金森 英人	パラ水素結晶中の分子を使った電子の電気双極子モーメントの探索	H24-25
K6	東京大学	准教授	鳥井 寿夫	電子 EDM 探索に向けて：光トラップ中での冷却分子生成	H24-25
K7	東京大学	助教	小林 淳	次世代型精密分子分光実験のためのレーザー冷却と高精度分子数計測	H24-25

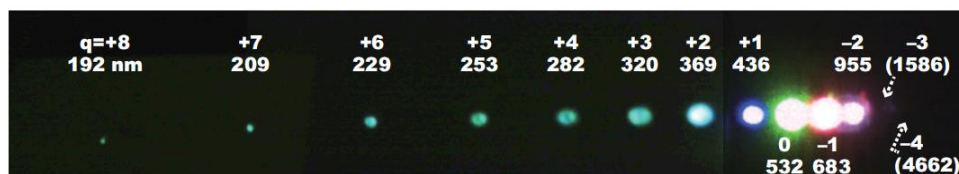
3. 研究領域の設定目的の達成度（3ページ程度）

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか、また、応募時に研究領域として設定した研究の対象に照らしての達成度合いについて、具体的に記載してください。必要に応じ、公募研究を含めた研究項目毎の状況も記述してください。

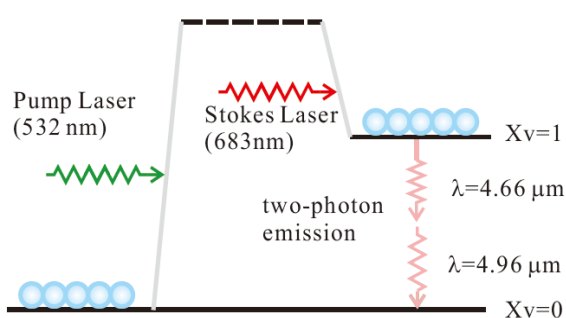
記号[A1-xx]等は公表論文(page19-24)参照

【計画研究 A01】

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計画を進めるに当り鍵を握るコンセプトである。一般に N 個の原子（あるいは分子、以下同様）が脱励起過程に関与し、これらの原子間にコヒーレンスが存在すると、その過程は振幅段階で N 倍され、放射過程の単位時間当り頻度(反応レート)は N^2 に加速される。マクロコヒーレント増幅機構は放出粒子が一定の位相条件(運動量保存に等価)を満足するとき、コヒーレント体積が巨視的になることに起因する。この増幅機構を二光子脱励起過程(QED 過程)に適用するとき、超放射光(強度が強いビーム状の光)が対となって現れること(二光子対超放射)が予言されていた[A1-08,09]。



(図 A-2) 断熱ラマン過程における高次光の観測：プリズムで分散し蛍光紙に投影した像を CCD カメラで撮影。数値はラマン過程の次数(q)及び波長(nm)を表わす。

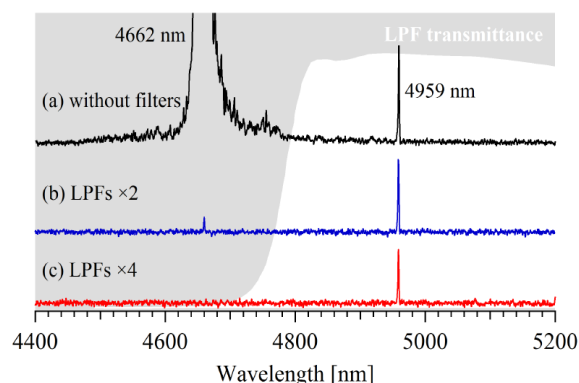


(図 A-1) 水素分子振動励起準位とラマン過程(波長 532nm/683nm のレーザーを同時照射)による励起方法及び観測した二光子放射過程。

計画研究 A01/A02 の最大の成果は、パラ水素分子を標的とした二光子対超放射実験を行い、その存在を確認しマクロコヒーレント増幅機構を実験により立証した点にある[A1-11]。実験はパラ水素の振動準位($Xv=1$)を断熱ラマン過程により励起することにより行われた(図 A-1 参照)。励起水素分子のコヒーレンスが大きいことは高次ラマン光の強度測定により確認した(図 A-2 参照)。また 4 次のストークス光($4.66 \mu m$)をトリガーとして用い、対になる光($4.96 \mu m$)を観測した。図 A-3 は二光子対のスペクトルを表わす。観測された二光子過程のレートは自然放出過程に比べ 10^{15} も大きく、コヒーレンスによる増幅以外には理解することは不可能である。逆に二光子対超放射の理論予想とは良く一致する。この結果(及び項目 8 で記述する他の理論及び実験研究の進展)により原子を用いたニュートリノ質量分光計画は大きく前進した。

【計画研究 A02】

本研究においては、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ことを目標とした。より具体的には計画研究 A01 を実現するため、(i)アボガドロ数に近い標的数が得られ、(ii)標的原子(分子)が孤立系に近い環境を有し、(iii)量子干渉性に優れた原子または分子標的の開発を目標とした。計画研究 A01/A02 における最大の成果は、水素振動準位からのコヒーレント二光子過程の発見であり、これにより「マクロコヒーレント増幅機構」の原理を確立した点にある。



(図 A-3) モノクロメータで観測された二光子スペクトル：上から Long-pass filter なし、2 枚、4 枚挿入。白抜きは LPF の透過度(85% at $4.96 \mu m$)を表わす。

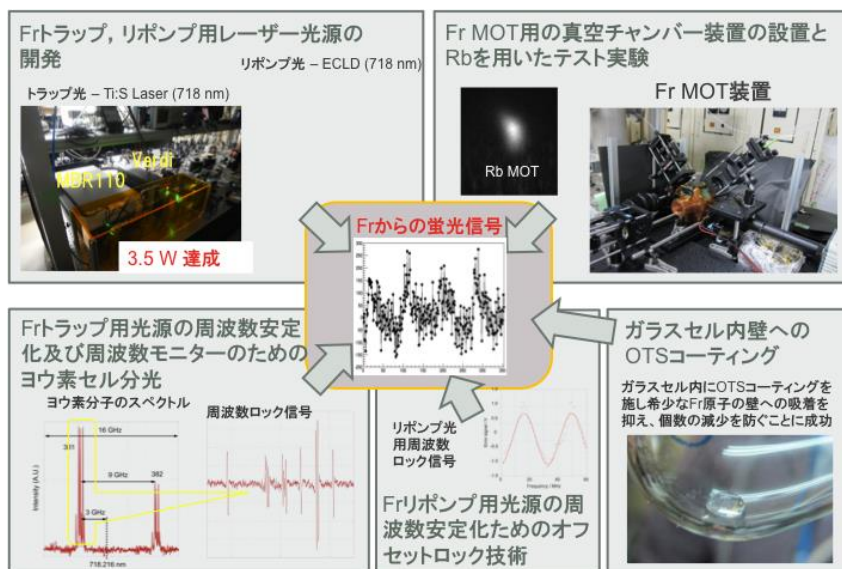
これに関連し、固体水素が上記した条件をほぼ満足する二光子対超放射実験に適した標的である事実的に確かめた[A2-06]。量子干渉性についても、(1) 低温マトリックス分光による分子の電子状態の寿命、線幅の研究(2) 赤外レーザーを用いた過渡現象の実験・解析(非線形現象)(3) 緩和現象の理解のための赤外・赤外二重共鳴分光等で成果を得た(項目8で詳述)。要約すると、二光子対超放射過程を用いたマクロコヒーレント増幅機構の原理確立に関する標的開発について本計画研究は中心的役割を果たした。またニュートリノ質量分光に適した標的開発についても、その基礎実験を遂行し数多くの成果を得た。

【計画研究 B01】

新しい原理により ^{129}Xe スピンの歳差運動を無制限の長さの時間維持する、能動帰還型核スピンメーザーを組み立ててその発振を実現し、歳差シグナルおよびその周波数変動について詳細な検討・改良実験を行なった。その結果、理論的な予測通り周波数決定精度 $\Delta\nu$ が歳差観測時間 T の $3/2$ 乗に反比例して改善していくことを初めて明らかにすることができた。また観測時間が長くなるにつれこの $T^{-3/2}$ 則から T^{-1} 則、 $T^{-1/2}$ 則へと移り、 $T \sim 3 \times 10^4$ s で $\Delta\nu \sim 8$ nHz (現在の ^{129}Xe EDM の実験上限値を $1/5$ まで改善することが可能な周波数精度) を達成した。この到達精度を制限する要因は磁場の変動であり、これを抑制すればさらにこの $1 \sim 2$ 桁下まで改善することが可能であることも明らかになった。この結果に基づき磁場変動効果を打ち消すために、 ^3He を参照スピン系として ^{129}Xe と混在させてメーザー発振させる ^3He 共存磁力計を導入し、その動作 ($^{129}\text{Xe}/^3\text{He}$ 同時メーザー発振) にも成功した。さらに、電場印加のための電極の設置を行い、電場 $E = 7.0$ kV/cm 印加が実現された。こうして、EDM 計測に必要なすべての要素技術・装置が個別的に確立し、現在の実験上限値 (4×10^{-27} e·cm) の 1 桁下まで到達する見通しが得られた。現在これらの技術を用いてデータ収集実験を進めている。本研究の当初の目標は、現在の上限値を 2 桁程度改善することである。これについても現在の技術における限界が ^{129}Xe 原子と ^3He 原子に対する Rb 原子の接触相互作用定数の違いに由来すること、したがって ^{129}Xe と同種原子の ^{131}Xe を参照スピン系とすることによりさらに $2 \sim 3$ 桁の上限改善も可能であることを明らかにした。

【計画研究 B02】

電子 EDM 増幅度最大の放射性元素・フランシウム (Fr) を生成・輸送・冷却・トラップしてオンラインで EDM を測定する装置を東北大学・サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター (CYRIC) において開発する。Fr は核融合反応により生成し、レーザー冷却技術を用いてトラップし、そのスピン歳差周期を測定する。このスピン歳差周期の電場の向きに対する変位から EDM を抽出し、SUSY 粒子の質量や CP 位相に関する情報を得る。本計画では、従来のビーム実験による測定精度限界を破るために、原子のスピン歳差時間 (相互作用時間) 延伸を目標とした。ビーム実験はミリ秒程度であるが、 1000 倍程度の相互作用時間の増倍 (~ 1 秒) が可能な「冷却原子」に着目し、トラップ可能な寿命の長いアイソトープ・ ^{210}Fr (寿命 ~ 3 分) を選択した。レーザー冷却 Fr 原子による EDM 測定装置の開発を進め、上流から、Fr 生成装置、中性化装置、磁気光学トラップ装置、光双極子トラップ装置、磁力計等、全ての構成要素の開発を完了し、所定の性能を得ている。「Fr 生成装置」は、融解標的を用いることで、固体中より拡散



定数が変化し、短時間で高効率イオン引き出しが可能であることに着想を得て、金標的と ^{18}O ビームによる融合反応を用いた標的融解型表面電離 Fr イオン源の開発・運用に成功した。国際的にも最高レベルの引き出し効率 (35%) を実現し、 ^{18}O ビーム強度 $\sim 2\text{euA}$ で、3kV の Fr 収量 $\sim 10^6\text{Fr}^+/\text{s}$ を得た。「中性化装置」は、白金をコーティングした高温オープン壁面でビームを停止、低速イオンとして再放出させ、イットリウム (Y) 電極へ収束させ、Y 表面で中性化して、高輝度 Fr ビーム生成に成功した。「磁気光学トラップ (MOT)」は、2つの MOT を連結したダブル MOT システムを開発した。前段の MOT で Fr 原子をトラップ・予備冷却して、後段のサイエンスチェンバーに移送し、磁場を切って光双極子トラップへ移行し、EDM を測定する構成とした。トラップ領域に光学系を近づけて大立体角で集光できる構造とし、かつ水冷コイルで高磁場勾配を実現しトラップ位置を固定できるようにした。その結果、1原子の蛍光から観測する事に成功し、またその寿命も 10 秒程度であることを確認した。長時間安定したトラップを行うために、ヨウ素分子の回転振動準位を基準にして、718nm の Fr 共鳴波長光の周波数安定化を開発した。サイエンスチェンバーでは、「光双極子トラップ (ODT)」により、光のみで原子を捕捉し、電場・磁場を印加して、Fr のスピン歳差周期を測定する機能を持たせた。これらの技術を統合し、Fr-EDM 測定の心臓部であるオンライン Fr 生成・輸送・冷却・トラップ技術を国内で初めて確立した (図)。以上、これらの構成要素が所定の性能を実現していることをふまえて、現状の EDM 測定感度を評価し、 $\sim 10^{-26}\text{e}\cdot\text{cm}$ を実現すると評価した。

【計画研究 C01】

異なる単一イオン光時計を複数構築してそれらの周波数比を測定し、その時間変化から、微細構造定数 α の時間変化を現在の制限値 $2.3 \times 10^{-17}/\text{yr}$ を超えて探索する。これを目標に研究を進めた。前半は、技術的に最も簡単な $^{174}\text{Yb}^+$ 波長 411 nm $^2\text{S}_{1/2}-^2\text{D}_{5/2}$ 遷移で光時計構築の技術確立を目指した。トラップ技術に優れた阪大 G の手法を参考にできたことが大きく、単一イオンを波長サイズ以下の領域へレーザー冷却し閉じ込める技術、さらに、単一イオンでスペクトルを獲得する技術をおおむね予定通り確立した。

後半の課題は、(1) 光時計の構築、(2) 複数遷移化、および (3) 周波数比計測システムの確立、であった。

(1) はより小さな不確かさが見込める、磁場に対して周波数シフトが鈍感な $^{171}\text{Yb}^+$ への移行を進めた。超微細構造をもつ困難さを克服し、波長 435 nm $^2\text{S}_{1/2}-^2\text{D}_{3/2}$ 遷移の単一イオン分光に成功した。これにより、(2) 複数遷移化にも目処が立った。Ba⁺は単一イオンでの時計遷移の励起確認まで進捗した。

時計レーザーの線幅は、周波数ゆらぎの低減、ひいては測定時間の短縮に重要である。東京理科大 G で線幅 1 Hz 以下のレーザーを、当初目標どおり実現した。 α の変化に対して最も感度の高いがスペクトル幅が極めて狭い、Yb⁺ 波長 467 nm $^2\text{S}_{1/2}-^2\text{F}_{7/2}$ 遷移の光時計構築に向けて、この成果の京大 G への技術移転を進めている。測定時間の短縮にはスペクトル取得の高速化も重要である。阪大 G はイオンの発する蛍光の集光効率が同 G 比で約 4 倍の平面型トラップを開発し、時計遷移の励起を高速で検出した。(3) は自作のモード同期 Ti:Sapphire レーザーを用いたコムで、分解能はゲート時間の逆数に制限されるものの、周波数比計測システムを実現した。当初目標であった、長時間連続運転可能なシステムも Yb:KYW レーザーで実現しつつある。

以上のように、計画研究全体として情報交換と技術移転も順調に進み、重要な要素技術の開発をほぼ達成した。不確かさを測定し光時計として完成するところまでもう 1 歩のところまで到達していて、 α の時間変化探索の開始も近いと考える。

記号[K-xx]等は公表論文(page19-24)参照

【公募研究】

レーザ冷却の手法を用い極低温分子(KRb; $<1\mu\text{K}$)の生成に成功した[K-11]。生成した KRb 分子の超精密マイクロ波分光を行い、電子陽子質量比 (μ) の恒常性検証実験を遂行し、 $\delta\mu/\mu=1.0 \times 10^{-14}$ の精度(世界記録更新)を達成した。また、極低温のイオンと中性原子を結合し極低温分子イオン混合系 (^6Li 原子と $^{40}\text{Ca}^+$ イオン) 生成し、極低温下での化学反応を研究した。特に弾性散乱のエネルギー依存性(mK から数 K 領域)の測定[K-07]及び非弾性散乱が電荷交換由来であることの解明[arXiv:1403.5091]に成功した。また電気能率測定(EDM)測定を目指して冷却分子、冷却原子、ラディカル等を使った実験手法の開発研究を遂行し、多くの成果を上げた。若手研究者の独創的な着想に基づく提案が多く、この点においても領域の当初目標を達成した。

4. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況（1ページ程度）

研究推進時に問題が生じた場合には、その問題点とそれを解決するために講じた対応策等について具体的に記述してください。また、組織変更を行った場合は、変更による効果についても記述してください。

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、放射性元素・フランシウム (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2年近く要し、その期間、研究対象である Fr を使った実験が行えない事態に陥った。そこで、新領域立ち上げ当初から整備している安定原子ルビジウム (Rb) ビーム供給装置を最大限活用し、Fr と化学的性質が類似している Rb により、Fr 生成・輸送・中性化・冷却・トラップ装置で構成される EDM 探索装置の開発・運転パラメータの最適化を「予定通り」進めた。さらに、東北大学と学术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、そしてスイス・PSI 研究所において、学内留学プログラムを用いて若手学生を3ヶ月～半年程度、7名を派遣し、加速器による開発が必要な Fr 生成イオン源、Fr トラップ、磁力計の研究開発を補強した。

5. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況（1 ページ程度）

研究領域内での若手研究者育成の取組及び参画した若手研究者の研究終了後の動向等を記述してください。

[若手研究者育成方針]

本領域では「新たな実験に取り組むことは、既存の手法の利用とは異なる困難の克服を求められ、問題解決の能力の高い人材養成となる」との考えの下に、以下の方針で若手研究者の育成に取り組んだ。(i) 人材交流を進め、広い視野をもつ研究者を養成する。(ii) 若手研究者の国内・国際発表の機会を増やし発表能力を養う。(iii) 海外短期留学や交流実験への派遣等とおして、国際的に活躍しうる人材を育てる。このような方針は各研究計画グループに浸透し、若手研究者(院生及びポスドク)の国際会議発表は総数 57、国内発表は総数 125 に及んでいる。この点では多いに成果があったとすることができる。

[修士並びに博士課程大学院生の育成]

本領域に関連する研究に数多くの大学院生が関与し、学位論文を仕上げ育って行った。博士論文を取得した者は 5 名、修士論文を取得したものは 62 名である。この中に「専攻賞」等を受賞した者が含まれる。修士と博士の比率がややアンバランスであるが、これは近年顕著になった基礎物理分野の”job market”事情が反映していると考えられる。なお博士の学位を取得した者は、ほぼ全員が研究者の道へ進んでいる。

[若手研究者のステップアップ]

本領域の開始時期(あるいはその途中)にはポスドクであり、本領域の研究を遂行する中で、他の職を得た者は 8 名である。このうち 4 名が期間の定めのない正規職員となった。

[人事交流]

領域内での人事交流が数多くなされた。具体的には B01 から A01 へ、A02 から A01 へ、B02 から B01 へ、B01 から B02 へ等が挙げられる。人事交流は、新しい技術や視野を持ち込みことにより研究グループに刺激を与え、同時に研究者自身も視野が広がるという効果が期待できる。

[国際交流・海外派遣]

全ての計画研究ではないものの、領域として国際交流・共同実験や海外派遣事業も活発に展開した。B02 においてはインドより若手研究者を招聘（1 年間）し共同研究を行った。またオランダ・フローニンゲン大学・KVI 研究所、およびイタリア・LNL 研究所、そしてスイス・PSI 研究所において、若手学生 7 名を（3 ヶ月～半年程度）派遣し、加速器による開発が必要な Fr 生成イオン源、Fr トラップ、磁力計の研究開発を補強した。又イタリア及びカナダより若手研究者を招聘し、共同実験を開始している。A01 においても、インド若手研究者との共同研究を始めている。

	氏名	大学名	年度	論文タイトル
A01	大饗千彰	岡山大学	H25	超放射過程を用いたバリウム原子準安定状態の生成
A02	藤森 隆彰	岡山大学	H24	星間化学・大気化学で重要なイオン・ラジカル種の振動・回転スペクトル研究
B01	井上 壮志	東京工業大学	H23	Study of nuclear spin maser toward 129Xe atomic EDM measurement
C01	小野田 有吾	京都大学	H22	Trapping of Yb+ loaded trough photoionization in RF ion Trap
K6	大坪望	東京大学	H24	極低温ルビジウムーリチウム極性分子生成のための装置開発

6. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）（1ページ程度）

領域研究を行う上で設備等（研究領域内で共有する設備・装置の購入・開発・運用・実験資料・資材の提供など）の活用状況や研究費の効果的使用について総括班研究課題の活動状況と併せて記述してください。

研究目標遂行のため、有効に活用している。主要な設備等を下表に纏めた(100万円以上)。A01では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、DFBダイオードレーザー等)、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、パルスチューブ冷凍機等)、各種測定計器(波長計、イメージング分光器、リークディテクター等)等を購入し、実験に供した。A02においても励起用のレーザー等を購入し実験に使用した。B01では防振台、磁気シールド、ヘリウムガス等を購入した。いずれも核スピナーの動作に必要な装置及びその関連消耗品である。B02では、フランシウムイオン源、中性化装置、トラップ用レーザーシステムなどを購入した。全て実験で活用している。C01においてはレーザー、波長計、光共振器などの光学装置を購入し使用した。以上いずれも研究目的に合致したものである。一方、総括班における主要な経費は、旅費、会議開催費、印刷費、人件費などである。これらは総括班の活動を支える基盤的な経費として使用された。即ち、人件費は研究支援職員の雇用、旅費及び会議費は定期的総括班会議や国際会議「Fundamental Physics Using Atoms」あるいはその他の研究会開催のために支出された。いずれも総括班活動には必要不可欠である。

班	年度	物品名	金額 (千円)	設置場所	班	年度	物品名	金額 (千円)	設置場所
A01	H21	単一周波数 CWYbファイバーレーザー	8,115	岡山大	A01	H21	レーザー波長計	1,669	岡山大
A01	H21	パケットカメラ	1,512	岡山大	A01	H21	レーザー波長計	3,150	岡山大
A01	H21	300mm 焦点距離イメージング分光器	1,965	岡山大	A01	H22	超真空型ターボ分子ポンプ	1,050	岡山大
A01	H22	高出力 Nd:YAG レーザー	4,822	岡山大	A01	H22	パルス色素レーザー	9,345	岡山大
A01	H22	Complete System DL L DFB	2,578	岡山大	A01	H22	四重極マスフィルタ	2,516	近畿大
A01	H22	マスフィルタ制御用電源	3,409	近畿大	A01	H22	Merlin オートメーションデータシステムコントローラ	3,207	近畿大
A01	H22	分離用カメラ	1,050	近畿大	A01	H23	除振台	1,822	岡山大
A01	H23	CW-MHFsystem	5,595	岡山大	A01	H23	パルスチューブ冷凍機	6,819	岡山大
A01	H23	Nd:YAG レーザーシステム	9,448	岡山大	A01	H24	Heリークディテクタ	1,586	岡山大
A01	H24	微量送液ポンプ	1,396	近畿大	A01	H25	ナノ秒パルスレーザー	4,200	近畿大
A02	H23	NIPXTe-5122	1,188	岡山大	A02	H24	ターボ分子ポンプ	2,730	岡山大
A02	H24	色素レーザー	6,872	岡山大	A02	H24	波長可変赤外 OP0 レーザー	5,126	岡山大
A02	H24	YAG グリーンレーザーシステム	5,800	岡山大	B01	H21	高出力チューブパルスダイオードレーザー	8,375	東京工業大
B01	H21	多機能交流安定化電源	2,442	東京工業大	B01	H21	磁気シールド	2,152	東京工業大
B01	H23	安定同位体 3ヘリウムガス	2,992	東京工業大	B01	H23	安定同位体 3ヘリウムガス	2,992	東京工業大
B01	H23	円筒磁気シールド	3,900	東京工業大	B01	H23	高性能大型防振台	1,969	東京工業大
B01	H24	安定同位体 3ヘリウムガス	2,394	東京工業大	B02	H21	レーザー	9,954	東北大
B02	H21	フランシウム中性化装置	2,835	東北大	B02	H21	レーザー波長計	3,217	東北大
B02	H22	光学台	2,568	東北大	B02	H22	Fr イオン源	12,127	東北大
B02	H22	レーザー	11,770	東北大	B02	H22	光検出器	1,044	東北大
B02	H22	偏向電極	2,520	東北大	B02	H22	ビーム診断装置	1,462	東北大
B02	H23	高真空 MOT チェンバー	1,486	東北大	B02	H23	超音波光変調器	1,367	東北大
B02	H23	ターボポンプ	1,165	東北大	B02	H23	モリブデン付きるつぼ	1,485	東北大
B02	H23	ゲートバルブ	1,105	東北大	B02	H23	中性原子ビーム生成装置	4,494	東北大
B02	H23	光学台	2,212	東北大	B02	H23	レーザー	10,274	東北大
B02	H24	波長板等	1,998	東北大	B02	H24	駆動装置	1,081	東北大
B02	H24	ミラー	1,207	東北大	B02	H24	架台	1,029	東北大
B02	H25	CCD カメラ	2,044	東北大	B02	H25	中性化装置	1,890	東北大
C01	H21	極狭線幅 IR 単一周波数レーザー	5,250	京都大	C01	H21	高フィネス光共振器	1,890	東京理科大
C01	H22	光アイソレータ一式	1,402	京都大	C01	H23	シングルアナライザ	1,537	京都大
C01	H22	ミクスト・シグナル・オシロスコープ	1,365	大阪大	C01	H23	Analog signal generator	3,065	京都大
C01	H23	波長可変半導体レーザーシステム	1,415	大阪大	C01	H23	波長計	4,266	大阪大
C01	H23	縦振動アト型高フィネス基準共振器	2,572	東京理科大	C01	H24	高安定外部共振器型チューブシステム	3,189	大阪大
C01	H25	標準信号源	2,488	京都大	C01	H25	電磁界解析ソフト	1,680	大阪大
C01	H25	シングル・アナライザ	1,852	東京理科大					

7. 総括班評価者による評価（2ページ程度）

総括班評価者による評価体制や研究領域に対する評価コメントを記述してください。

1. 領域の目標と総括班・評価者の役割

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、ニュートリノ質量分光（ニュートリノの絶対質量測定など）への道を拓く。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し、素粒子標準理論を超える物理学への糸口を見つける。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(α)の時間変化を測定する。いずれの課題も現代物理学の根幹に関連する野心的な課題である。また領域として、日本発の新しい着想・原理・技術に基き、異分野融合領域を創設することを目指すこととしている。こうした目標を遂行すべく、総括班は領域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ってきた。(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。評価者は各計画研究から独立した立場から、研究の進行状況を監督し、必要に応じて助言をしてきた。

2. 総括班の開催状況

まず評価者が評価をする上でその判断の基礎となる総括班の開催状況について述べる。下表(表1)は中間評価以降の総括班会議の開催状況を示している。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行われた。評価者は全10回(中間評価以降)の会議の内、各々8回(藪崎)、8回(志田)、6回(梶田)に出席した。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、実験の具体的な進捗状況が直接的に把握されるよう工夫されている。この方針は、研究を監督・助言を行う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きた。

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11回	2011/7/13	岡山大	FPUA方針	第16回	2012/9/30	東北大	
第12回	2011/10/25	東北大	中間評価対応	第17回	2012/12/27	東工大	FPUA総括
第13回	2012/1/10	東工大	FPUA総括	第18回	2013/3/30	京都大	
第14回	2012/3/28	京都大		第19回	2013/9/3-4	熱海	一泊集中審議
第15回	2012/6/30	岡山大	FPUA方針	第20回	2013/12/19	岡山大	FPUA方針

3. 評価の視点

本領域に対する評価を行うに当り次の様な視点が重要であろう。

- (1) 本領域が掲げた目標に対する成果、達成度
- (2) 境界・融合領域としての役割
- (3) 若手研究者育成からの視点
- (4) その他およびまとめ

(視点1) 目標に対する成果、達成度

研究計画Aにおいては、新原理「マクロコヒーラント増幅機構」の立証に成功した。この点は大きな進展として評価できよう。この立証実験で使われた二光子対超放射過程は、テラヘルツ光源等への応用も可能で、研究の発展を期待したい。この成果により「ニュートリノ質量分光」の土台が構築されたと言えよう。研究計画Bでは、クォーク及び電子の電子双極子モーメント(EDM)を世界最高レベルで測定することを目指した。いずれもグループが有する独自の着想や技術を使っている。B01ではXeスピン歳差運動周波数測定精度が8nHzまで向上し、現在の実験上限値(4×10^{-27} e·cm)の1桁下まで到達する見通しが得られている。現在データ収集中であり、目標通りの成果を期待したい。

B02 では Fr-EDM 測定 of Fr 生成・輸送・冷却・トラップ技術を確立し 10^{-26} e·cm を実現可能レベルが達成される見通しを得ている。「上限値更新に必要な実験技術を確立する」と言う当初の目標にはやや及ばないが、2 桁向上のプログラムを有すること、あるいは東北大震災の影響を加味すると概ね順調に進展したと言えよう。研究計画 C01 では、イオン光時計を複数構築してそれらの周波数比を測定し、その時間変化を 10^{-17} の精度で観測することを目指した。S-D 遷移を測定する重要な要素技術の開発をほぼ達成しているので、S-F 遷移をも観測して α の時間変化探索を実際に開始することを期待したい。前にも述べたように、本領域の各計画研究が掲げた目標は、いずれも基礎物理学に対する多大なインパクトをもつ野心的な課題であり、それが故に当初目標の達成にはやや時間が掛かっている。この視点での最終的な評価については現在進行中の実験結果を見極めたい。

(視点 2) 境界・融合領域としての役割

「Fundamental Physics Using Atoms」(下表参照) は、領域の発足前から開催されているもので、2014 年 3 月には第 7 回の会合が東京で開催された。参加者は外国からの招待者も含め 120 名程度であり、会議の知名度もこの間大幅に上った。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。この点では高く評価し、本領域終了後も継続することを期待したい。

新しい融合分野の創設という視点からも、本領域の果たした役割は大きい。原子物理学と素粒子原子核物理学の融合は、最も象徴的に計画研究 A(原子物理と素粒子物理)や計画研究 B(原子核と量子光学)に現れている。同時に化学と基礎物理学の融合分野を開拓したという点でも評価したい。EDM 測定については、現在冷却分子や極性分子をキーワードにした研究が急速に進展している。日本の化学分野では、冷却分子や極性分子の研究が諸外国に比較し立ち後れていると言う現状の中で、本領域の果たした役割は大きいと言えよう。現在は、EDM 測定に於ける理論化学者との共同研究、あるいはニュートリノ質量分光に於ける量子干渉性の高い標的に於ける共同研究に限定されているが、実験化学者を巻き込む大きな力になることを期待したい。

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	~100	登録人数以外も含む
第 6 回	2012/9/28-30	東北大学・青葉山キャンパス	~90	登録人数以外も含む
第 7 回	2014/3/14-16	東京・科学未来館	~120	登録人数以外も含む

(視点 3) 若手研究者育成からの視点

本領域では、「(i) 人材交流を進め、広い視野をもつ研究者を養成する。(ii) 若手研究者の国内・国際発表の機会を増やし発表能力を養う。(iii) 海外短期留学や交流実験への派遣等とおして、国際的に活躍しうる人材を育てる。」との観点から若手人材の育成に注力してきた。項目 5 から分かるように、領域として、又総括班として意識的に追求されてきている。修士論文は 60 名を超えており十分だが、博士学位取得者が 5 名と必ずしも多くない。基礎科学分野に於ける将来への不安(研究者として自立できるか否か)の要因も大きいと思われる。総括班の努力が必ずしも反映はしていない。人材交流が進んだことや、国際会議や短期留学により国際的視野を持つ人材の育成に成功している点は成果として挙げるができるだろう。

(視点 4) その他およびまとめ

本領域は、原子物理学、量子エレクトロニクス、素粒子原子核物理学さらには化学分野を含む新しい融合分野を創設する観点で大きな成果をもたらした。若手育成についても概ね順調に目的を達成したと結論することが出来る。また直接的な科学成果については、「マクロコヒーランス増幅機構」の二光子対超放射過程を用いた実験的立証あるいは電子陽子質量比の恒常性検証における世界記録更新など多くの成果をもたらした。但しより多くの成果を刈り取るのは、今後の課題であり、その点では長期的な観点から評価したい。

(総括班評価者：藪崎努、志田忠正、梶田雅稔)

8. 主な研究成果（発明及び特許を含む）【研究項目毎または計画研究毎に整理する】

（3 ページ程度）

新学術領域研究（公募研究含む）の研究課題を元に発表した研究成果（発明及び特許を含む）について、現在から順に発表年次をさかのぼり、図表などを用いて研究項目毎に計画研究・公募研究の順に整理し、具体的に記述してください。なお、領域内の共同研究等による研究成果についてはその旨を記述してください。

記号[A1-xx] 等は公表論文(page19-24)参照

【計画研究 A01】

「マクロコヒーラント増幅機構」は、原子を用いたニュートリノ質量分光計画の成否の鍵を握る増幅原理である。この増幅機構は我々グループからの新しい発案であり、原理検証実験が必要とされていた。計画研究 A01(及び A02)の最大の成果は、パラ水素分子を標的とした二光子対超放射実験を行い、マクロコヒーラント増幅機構を実験により立証した点にある[A1-11]。この成果については、既に項目3で説明したので、以下ではこれ以外の成果を列記する。(1) バリウムからの一光子超放射(Dicke 型)を用いて、光を媒介としたコヒーランスの研究を進めた。この結果、トリガー光がコヒーランスの発展を促進するとの理論予想を立証することが出来た。図 A1 参照。二光子対超放射ではトリガー光が極めて重要な役割を果たすので、実験で確かめることの意義は大きい[A1-01]。(2) 固体パラ水素の第二振動励起準位の位相緩和時間を測定し、固体としては異常に長い緩和時間(10ns 以上)を持つことを実証した[A1-06]。図 A2 参照。これによりパラ水素の振動励起状態が二光子対超放射の立証に適していることが判明した。(3) その他マトリックス中の様々な原子、分子の振る舞いを研究した[A1-07, A1-10]。(4) 理論面に於いても、本研究がニュートリノの質量様式(マヨラナ・ディラック型) 識別やマヨラナ位相にも感度があること[A1-05, A1-09]、緩和項の存在する二準位系原子においても巨視的偏極に支えられたソリトン解が存在すること[A1-00]、分子振動準位を用いるとニュートリノ過程同定に有利なこと[A1-02]、原子核からのニュートリノ放出がコヒーラント過程であり、更に大きな増幅因子が見込めること[A1-03]などを発見し、顕著な前進があった。

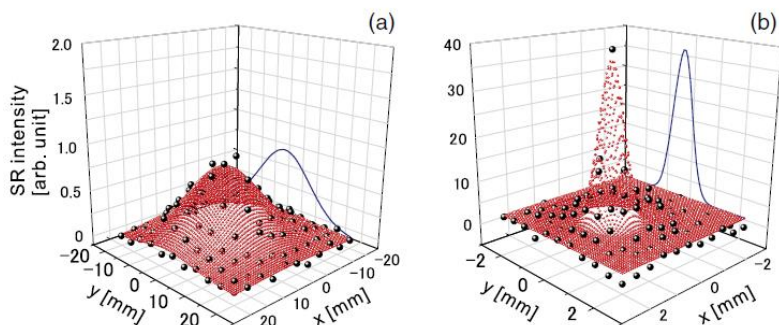


図 A1 バリウム超放射実験におけるトリガー光有無の効果：トリガー光無し(a)に比較し、有り(b)ではコヒーランスの成長が単一モードモードに限定され、角分布が先鋭化し輝度が増す。縦横スケールの差に注意。

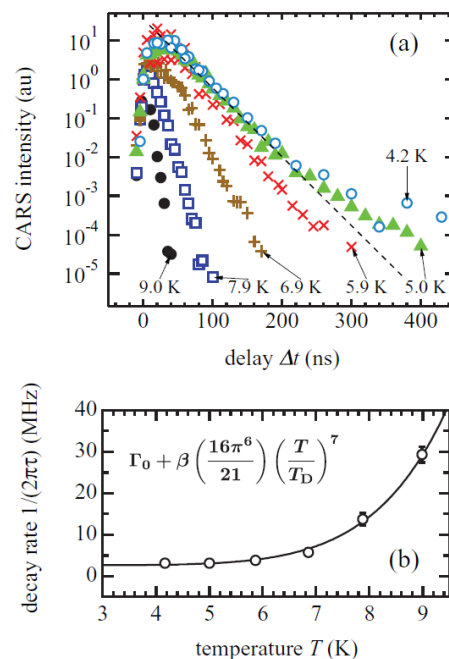


図 A2 (a) 固体パラ水素の位相緩和時間測定。横軸はプローブレーザー照射遅延時間（コヒーランス時間と等価）(b)コヒーランス消失幅 vs 温度。図中の式及び曲線はフォノン模型と定数によるフィット。

【計画研究 A02】

本研究は研究計画 A01「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」と直接的に関連する。増幅機構の発現にはニュートリノ対生成過程観測に適した準位構造を見出すことと、アボガドロ数に迫る標的数が用意できること、それらの標的原子が量子干渉性を破壊しない孤立系に近い環境中にあること等が要求される。量子干渉性の検証のために、以下の実験を行ってきた。

- (1) 低温マトリックス分光による分子の電子状態の寿命、線幅の研究
- (2) 赤外レーザーを用いた過渡現象の実験・解析（非線形現象）
- (3) 緩和現象の理解のための赤外・赤外二重共鳴分光

(1) ではナノ空間への原子・分子貯蔵の系として、最初に超放射が観測された分子である HF およびその重水素化物 DF を固体パラ水素中に捕捉し、その赤外吸収スペクトルを得ることに成功した。HF 単量体の吸収スペクトルの線幅および構造から、HF 分子の固体パラ水素中でのダイナミクスについて以下の知見が得られた。HF 分子の回転運動は周囲の格子振動により緩和が促進されている。また回転運動は HF 分子のサイト中での運動とも結合しており、スペクトルに特有の構造を生じている。これらの情報は系のコヒーレンスを考慮する上で非常に重要である。

(2) では CH_3F 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スを壊す緩和過程の理解に貢献する。実験では整備した連続発振赤外 OPO レーザーシステムを用い、シュタルク効果による CH_3F 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。 CH_3F 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。

(3) では新たに設置したパルス OPO レーザーと連続発振 OPO レーザーを組み合わせ CH_3F 分子の基底状態および v_4 振動励起状態における緩和時間の測定を行った。図 A6 は 2 種類の pump-probe 方式で観測された時間分解 2 重共鳴信号を示す。解析により縦緩和時間 T_1 を得ることができた。これにより赤外領域における様々な系での縦および横緩和時間の測定ができるようになった。

【計画研究 B01】

電気双極子モーメント (Electric dipole moment, EDM) は時間反転、ないしは CP 変換に対する不変性を破っており、標準理論では観測にかからないほど小さい一方、標準理論を超えて提唱されている有力な理論の多くは、現在の測定限界からもう一歩で届く領域に EDM を予言する。したがって測定感度を上げた新たな実験手法の導入によって、標準理論を超える物理の明確な証拠を提示できる可能性がある。本研究では反磁性原子である ^{129}Xe 原子を対象として、現在の実験上限値である $10^{-27} \text{ e} \cdot \text{cm}$ の領域から 1 桁の精度を改善し、 $10^{-28} \text{ e} \cdot \text{cm}$ の領域での EDM 測定を目指している [B1-03]。

EDM は、静電場に対して平行・反平行に静電場を印加したときの ^{129}Xe 原子の核スピン歳差周波数に生じるわずかな差異から決定される。本研究において目標としている $10^{-28} \text{ e} \cdot \text{cm}$ の領域の EDM 測定のためには、静電場を 10 kV/cm の大きさに印加した場合、 ^{129}Xe 原子の核スピン歳差周波数を 1 nHz 以下の精度で測定する必要がある。そこで本研究での EDM 探索には、これまでの研究で開発してきた能動帰還型核スピンメーザーの手法を用いた。核スピンメーザーの手法を用いることで、偏極した ^{129}Xe の磁化を維持したまま無制限の長さ核スピン運動を計測することが可能になり、急速な統計精度の向上が期待できる。

能動核スピンメーザーは核スピンの歳差運動をレーザーによって光学的に検出し、外部フィードバック機構を通じて磁化維持のための帰還磁場を生成する新しいタイプのスピンメーザーであり、mG 程度の超低磁場でも動作

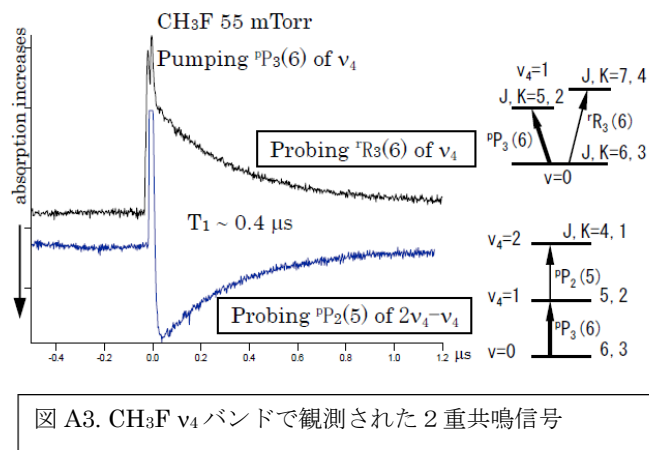


図 A3. CH_3F v_4 バンドで観測された 2 重共鳴信号

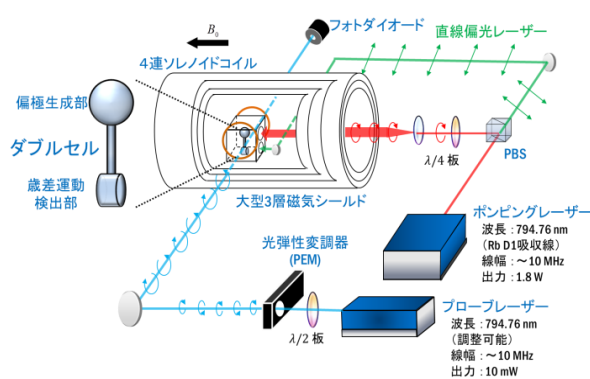


図 B1. ^3He 共存磁気計を導入した能動帰還型 ^{129}Xe メーザーの測定セットアップ

可能なため印加静磁場の変動に起因する周波数変動を抑制できるという特徴、さらに発振の安定性に優れるという特徴を持つ[B1-05]。この特徴を最大限に発揮するため、静磁場発生用のコイルへの電流安定化機構の導入[B1-07, B1-13]、および実験室内の環境磁場補正コイルの導入を行い、30,000 秒のメーザー発振に対してその間の平均周波数を 7.9 nHz という高精度で決定する性能を得た[B1-04]。

EDM 測定のように周波数の超高精度測定をする際には、上記の平均周波数決定精度向上に加えて、磁場の変動に起因する擬似信号[B1-06, B1-08, B1-11, B1-12]を打ち消すための磁場計測が本質的な役割を担う。そこで本研究では磁場グラジオメータとしての Rb NMOR 磁束系の開発[B1-09, B1-10]に加えて ^3He 共存磁力計を能動帰還型 ^{129}Xe 核スピンメーザーシステムに導入した。 ^3He 原子は原子番号が小さいことからその EDM は ^{129}Xe に比べてはるかに小さいと予想される。 ^3He ガスを ^{129}Xe ガスと同じガラスセルに封入すると、両者は同じ磁場を感じるため、磁場変動の影響を直接受ける絶対周波数測定ではなく、両者の歳差フェーズの相対的ずれから EDM の効果を磁場変動の影響を受けずに引き出すことが可能である。

^{129}Xe の歳差周波数変動には直接作用する磁場変動の他に、 ^{129}Xe ガス封入セルの温度変化に伴うセル内 Rb 原子の数密度変化も大きく影響する。これは偏極 Rb との衝突シフトによって ^{129}Xe の周波数が変化するためである。この効果を抑制するためにセルの形状として偏極生成部と歳差運動検出部を空間的に分離したダブルセル型を採用した。衝突シフトの大きさは Rb 原子の偏極度と数密度の積に比例するが、空間的分離によりプローブ部分での Rb 原子の偏極度を抑制し、衝突シフトの低減が可能になる。

本研究では、ダブルセル形状のガラスセルに対して ^3He 共存磁力計の導入を行った。特に ^3He を用いる場合、その偏極生成の際にはガラスセル表面との衝突や混入不純物との衝突による偏極緩和を避けなければならない。そこで、ガラスセル素材の選定や、 $^{129}\text{Xe} \cdot ^3\text{He}$ ガスの分圧値の最適化、偏極生成のための光学系強化等の開発を行った。その結果、温度を 80°C とした測定で、約 1% の ^3He 偏極度、約 10 時間の ^3He 縦偏極緩和時間を達成した。 ^{129}Xe に関しても約 40% の偏極度を達成している。さらにメーザー発振の成否に決定的な役割を担う横偏極緩和時間には測定環境の磁場の一様性が直接的に影響するため、磁場一様性に優れる実験セットアップを開発した。磁気遮断率 10^4 の大型三層磁気シールド、および短いソレノイド形状のコイルが 4 つ連なった形の静磁場発生用コイルも新たに設計製作し、ダブルセル全体が磁場勾配にして $5 \mu\text{G}/\text{cm}$ 以内の範囲に収まる測定環境を得た。その結果、 ^3He の横緩和時間として 2,000 秒以上を達成し、これは新セットアップ導入前に比べて 2 桁以上の改善となった。これらの開発によりダブルセルを用いた測定系で初めて ^{129}Xe 、 ^3He の同時メーザー発振、すなわち ^3He 共存磁力計を導入した能動帰還型 ^{129}Xe 核スピンメーザーの実現に成功した。本測定システムにおいては偏極 Rb

原子との衝突による周波数偏移をさらに抑制するために、ダブルセルの歳差運動測定部に直線偏光レーザーを入射させ強制的に Rb の縦偏極を破壊するという新たな試みも実装している。最終的な実験セットアップを図 B1 に、同時メーザー発振の様子を図 B2 に示す。ダブルセルに対して ^3He 共存磁力計を導入したことで、偏極 Rb 原子による周波数変動が抑制でき、 ^3He 共存磁力計の本来の性能が発揮できるようになった[B1-01, B1-02]。

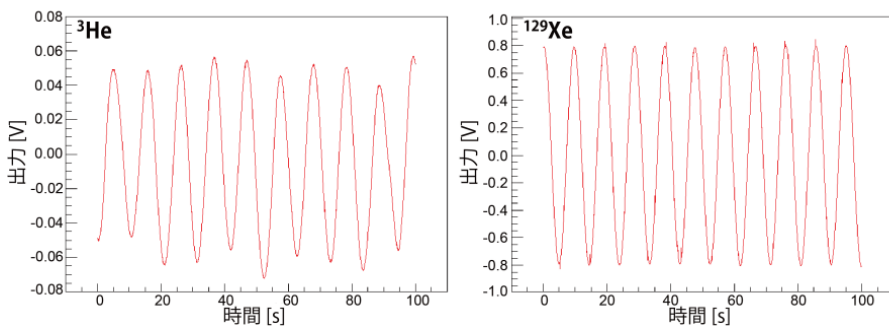


図 B2. ^3He と ^{129}Xe の同時メーザー発振の様子

さらに、実際の EDM 測定において使用する電極を接着したダブルセルを用いた測定を行い、 $7.0 \text{ kV}/\text{cm}$ までの電場を印加することに成功した。また実際に電場印加した状態で、 ^{129}Xe のメーザー発振および ^3He の自由歳差運動の同時観測を行い、共存磁力計を用いた初の EDM 測定データを試行的に取得した[B1-01]。

以上のように、 ^{129}Xe と ^3He の 2 核種スピン同時メーザー発振が基礎セットアップで達成され、EDM 計測実験に必要な実験技術・装置の要素はすべて個別的に確立した。現在これらを統合して、測定条件を変えた測定を継続的に行い周波数決定精度と疑似シグナル除去についての最適条件を探るために系統的な評価を進めており、これを経て、電場印加下において ^{129}Xe 、 ^3He の同時メーザー発振を行い、目標とする $10^{-28} \text{ e} \cdot \text{cm}$ の決定精度を目指した EDM 測定実験を開始する。

【計画研究 B02】

LHC によりヒッグズ粒子の質量が 126GeV と評価され、SUSY 粒子がこれまでの予想 (universality : 全ての SUSY 粒子の質量が同じスケールで存在) と異なり、ゲージ粒子のパートナー粒子・ゲージノ、squark、slepton 等で、各々、異なる質量階層構造を持つ可能性が示唆されている。シンプルな超対称性理論 (Split SUSY) では、EDM と SUSY 粒子質量には相関があり、 $10^{-27} \text{ e} \cdot \text{cm}$ では $\sim 10 \text{ TeV}$ 程度の質量スケール探査に該当する。本研究では、電子 EDM 測定精度 $\sim 10^{-27} \text{ e} \cdot \text{cm}$ の実験技術の確立を目指し、原子系で電子 EDM 増幅度が最大 (895 倍) の放射性元素・フランシウム (Fr) に着目した。特に、従来の外場との相互作用時間が短いビーム実験による精度向上の限界を打破するために、レーザー冷却技術を駆使して、世界に先駆けてオンラインレーザー冷却放射性元素 (Fr) EDM 測定装置の開発を進めた。

固体中とは異なる融解標的の拡散係数に着目して、短い引出し時間と高い引出し効率を実現する融解標的型 Fr 生成イオン源の開発・運用に成功し、 $10^6 \text{ Fr}^+/\text{s}$ の Fr ビーム強度を実現した [B2-03]。中性化用イットリウム電極を配置したオープン内で、繰り返して Fr イオンの停止・放出をさせることで高い中性化効率を持つ高輝度中性 Fr 原子ビーム生成装置の開発に成功した [B2-02, B2-06]。さらに、予備冷却と光双極子トラップ (ODT) へ切り替え可能な 2 種類の磁気光学トラップ (MOT) 連結システム (ダブル MOT) を実現した。ヨウ素分子の回転振動準位を基準にした周波数安定化の開発に成功し、安定した長時間トラップを可能にした [B2-05]。MOT から ODT へ原子集団を損失することなく高効率で移行するために、偏光勾配冷却による予備冷却を導入し、 $\sim 60 \mu\text{K}$ 程度まで冷却した [B2-04]。また単原子からの光検出にも成功し、その寿命が 10 秒程度であることも確認した。これらのレーザー冷却・トラップ技術は、今後、光格子を用いた共存磁力計の基礎研究になっており、電子 EDM 測定において、最大の系統誤差要因となりうる印加磁場変動をモニターするため、 $3 \times 10^{-16} \text{ T}/\sqrt{\text{Hz}}$ の感度の実績を持つ NMOR 型磁力計の開発を開始した。これらの構成要素を組み合わせ、オンライン Fr-EDM 測定の本拠部である Fr-MOT の技術を国内で初めて確立し、その測定精度は $10^{-25} \text{ e} \cdot \text{cm}$ と評価している [B2-01]。

2011 年の大震災の影響で、サイクロトロンが破損し、復旧作業に 2 年近く要したため、研究期間の後半は Fr 実験が限られたが、類似の化学的性質を有する Rb を用いて性能向上の見通しをたてており、 $10^{-26} \text{ e} \cdot \text{cm}$ の精度を実現すると評価している。現在、精度を抑制している主な要因は、セルに蓄積される Fr 収量である。収量は、MOT セルでのトラップ効率で決まるが、これはビーム輸送系にウィーンフィルターを導入し、Fr の純度を向上させることで、所定の Fr 収量 ($\sim 10^6/\text{s}$) を達成し、 $10^{-27} \text{ e} \cdot \text{cm}$ を実現することができる [B2-09, B2-10]。さらに系統誤差の最大の要因である電子 EDM 増幅度に関して、相対論的結合クラスター理論により全ての電子の配位を考慮した第 1 原理計算をスパコンにより進め、1%以内の精度で計算値を進めている。また極性分子による EDM 測定の基礎研究も進めた。独自のアイデアとして、レーザー冷却原子からフェッシュバッハ共鳴により極性分子を生成することで、冷却・トラップ分子を用いた EDM 探索を提案した。この系を実現するため、Sr のレーザー冷却光源を立ち上げ、Fr-Sr 系の予備段階として、Rb と Sr の同時トラップを世界で初めて実現した [B2-07, B2-08]。

【計画研究 C01】

京大 G で単一イオン光時計の複数構築とそれらの周波数比計測を目指して研究を進めた。京大 G へ技術移転を念頭に、スペクトル検出の高速化、および時計遷移励起用レーザー

の線幅狭窄化を、それぞれ阪大 G、および東京理科大 G で進めた。

【平成 25 年度】 Yb⁺では、磁場に対する周波数シフトが鈍感な ¹⁷¹Yb⁺を用いて不確かさ低減を図る。超微細構造をもつため複雑になる、レーザー冷却と分光手段の問題を解決し、波長 435 nm ²S_{1/2} - ²D_{3/2} 遷移の単一イオ

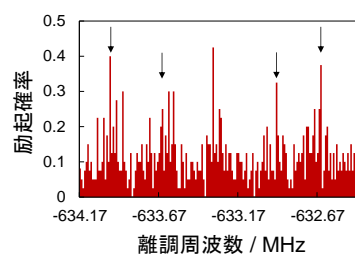


図 C-1 単一 ¹⁷¹Yb⁺ 波長 435 nm ²S_{1/2} - ²D_{3/2} 遷移のスペクトル (↓はイオンの運動によるサイドバンド)

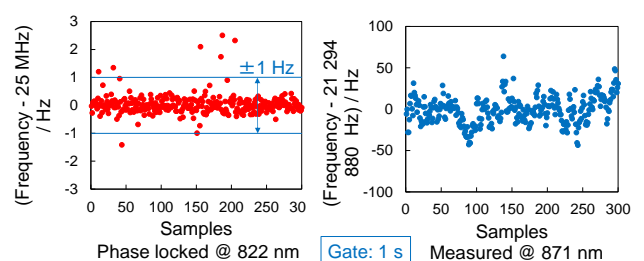


図 C-2 光周波数比計測システムで、(左) 時計レーザー 1 へのコム同期、(右) 同時測定した時計レーザー 2 とのビート周波数。

ン分光に成功した (図 C-1)。これにより、光時計の複数遷移化に目処が立った。周波数比計測は、光周波数コムを 1 方の光時計に位相同期させ、コム別のモードともう 1 台の光時計のビート周波数を測定し行う。自作のモード同期 Ti:Sapphire レーザーを用いたコムで、位相同期は緩いものの、ゲート時間の逆数以下にコム周波数ゆらぎを安定化し、システムを実現した (図 C-2)。長時間連続運転を目指して半導体レーザー直接励起 Yb:KYW レーザーの開発を続けた。共振器の温度安定化により 1 週間連続したモード同期発振を達成し、たびたび直面した Ti:Sa レーザーとは異なる問題を解決し、オフセット周波数が位相同期された光コムを実現した。そのほか、 $\text{Yb}^+ \text{}^2\text{S}_{1/2} - \text{}^2\text{F}_{7/2}$ 遷移の励起に望まれる高出力光を、テーパ半導体増幅素子をレーザー発振させ、線幅狭窄化レーザーに位相同期させて実現した。Ba⁺は、時計レーザーの線幅狭窄化と単一イオンでの時計遷移の励起確認まで進捗した。以上の成果は平成 26 年 3 月に 7th FPUA で発表した[C1-13]。東京理科大 G では熱膨張 0 となる温度に光共振器を制御し、振動や音響ノイズ対策を工夫して線幅 0.8 Hz 以下のレーザーを実現した (図 C-3) [C1-2]。阪大 G では、平面型トラップでイオンの発する蛍光の集光効率を同 G 比で約 4 倍高め、時計遷移の励起を高速で検出した[C1-14]。トラップ領域を 2 列に拡大し個数を増加させる、新しいトラップを考案し実証した[C1-1 (編集者による research highlight に選定)]

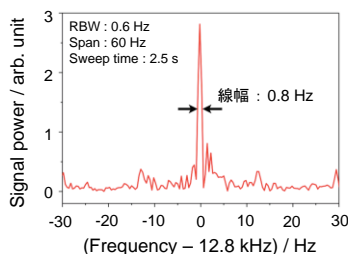


図 C-3 2 台の狭線幅レーザーのビートによる線幅評価

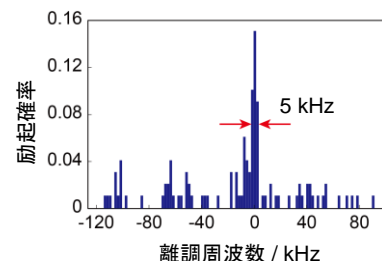


図 C-4 単一 $^{174}\text{Yb}^+$ 波長 411 nm $\text{}^2\text{S}_{1/2} - \text{}^2\text{D}_{5/2}$ 遷移のスペクトル

【平成 24 年度】 技術的にもっとも易しい $^{174}\text{Yb}^+$ 波長 411 nm $\text{}^2\text{S}_{1/2} - \text{}^2\text{D}_{5/2}$ 遷移で単一イオン分光法を確立した。分解能を 5 kHz まで高め、国際会議で発表した (図 C-4) [C1-3]。

【平成 23 年度まで】 京大 G は、不要静電場によりイオンがトラップ中心から外れて発生する加熱効果の抑制など、単一イオンを波長サイズ以下の領域へレーザー冷却して閉じ込める技術を確認した。これにより、1 次のドップラーシフトが除去される。Ba⁺ではイオン数を増やす可能性を調べるためにリニアトラップを導入し、16 個のイオンを冷却し配列させた。独自性のある要素技術、レーザー冷却光源[C1-11]、Yb⁺光イオン化特性[C1-8]、少数同位体へのレーザー同調方法[C1-7]について論文発表した。阪大 G は、蛍光検出効率の高い平面型トラップを設計し[C1-12]、従来困難であった平面型トラップでの不要静電場による加熱効果の抑制方法を、提案し実証した[C1-6, C1-10]。東京理科大 G は、半導体レーザーを光共振器の鋭い共鳴に高速制御して線幅狭窄化し、原子干渉計で線幅を評価した[C1-9]。

【公募研究】 (研究組織記号<K1>-<K7>については page-5 下表参照)

<K7> レーザ冷却の手法を用い極低温分子 (KRb; <1uK) の生成に成功した [K-11]。生成した KRb 分子の超精密マイクロ波分光を行い、電子陽子質量比 (μ) の恒常性検証実験を遂行した。この結果 $\delta\mu/\mu = 1.0 \times 10^{-14}$ の精度を得て世界記録を更新した。<K4> 極低温のイオンと中性原子を結合し極低温分子イオン混合系 (^6Li 原子と $^{40}\text{Ca}^+$ イオン) 生成し、極低温下での化学反応を研究した。特に弾性散乱のエネルギー依存性 (mK から数 K 領域) の測定に成功した [K-07]。また非弾性散乱が電荷交換由来であることを解明した [arXiv:1403.5091]。<K2, K6> 電子 EDM 探索に向け、光トラップ中での冷却分子 (LiSr) 生成実験を行った。この結果 Li と Sr の各々につき個別に冷却することに成功した。この結果を踏まえ、光トラップ及び分子生成実験に移行する予定である。<K3> 低速分子ビーム (YbF や Pb0) の生成を目的に「マイクロ波シュタルク減速」法及びバッファガス冷却法の開発研究を行った。この結果、後者の方法で、 $10^{10} \sim 10^{11}$ 個の Pb0 分子気体 (速度約 140 m/s) の生成に成功した。また前者のために超伝導共振器を開発した (18 GHz に対して Q 値は約 10^6) [K-04]。<K5> 量子固体パラ水素 ($p\text{-H}_2$) 結晶中に捕捉した BiO ラジカル基底電子・振動・回転準位を用いた eEDM 探査のために理論及び実験の両面から研究を行った。理論計算により BiO の内部電場が 118 GV/cm と大きいことを見いだした。また実験では、BiO ラジカルを生成する手段とその内部量子状態を定量的にモニターできる分光学的検出手段の確立を行った。<K1> 共振器を用いた 3 次元青方離調光格子トラップにルビジウム原子を捕捉することに成功した (捕捉数 1.3×10^6 個、捕捉時間 0.2 秒程度)。EDM 測定には捕捉数増大と捕捉時間の伸延が必要である。

9. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）（5ページ程度）

新学術領域研究（公募研究含む）の研究課題を元に発表した研究成果（主な論文、書籍、ホームページ、主催シンポジウム等の状況）について具体的に記述してください。論文の場合、現在から順に発表年次をさかのぼり、計画研究・公募研究毎に順に記載し、研究代表者には二重下線、研究分担者には一重下線、連携研究者には点線の下線を付し、corresponding author には左に*印を付してください。また、一般向けのアウトリーチ活動を行った場合はその内容についても記述してください。

ホームページ：<http://xqw.hep.okayama-u.ac.jp/kakenhi/>

国際シンポジウム：page-13 表2参照

[A01] 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

公表論文（査読付）合計17件（以下主要論文）

[A1-00] *M. Yoshimura and N. Sasao “Two-photon paired solitons supported by medium polarization” arXiv:1403.5048 [quant-ph], Accepted for publication in Prog. Theor. Exp. Phys.

[A1-01] C. Ohae, A. Fukumi, S. Kuma, Y. Miyamoto, K. Nakajima, I. Nakano, H. Nanjo, *N. Sasao, S. Uetake, T. Wakabayashi, A. Yoshimi, K. Yoshimura, M. Yoshimura “Production of Ba Metastable State via Super-Radiance” Journal of the Physical Society of Japan, **83**(2014) 044301(1-9) DOI:http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.83.044301

[A1-02] *M. Tashiro, M. Ehara, S. Kuma, Y. Miyamoto, N. Sasao, S. Uetake, *M. Yoshimura “Iodine molecule for neutrino mass spectroscopy: ab initio calculation of spectral rate” Progress of Theoretical and Experimental Physics, **2014**(2014)013B02(1-21) DOI:10.1093/ptep/ptt118

[A1-03] *M. Yoshimura and N. Sasao “Radiative emission of neutrino pair from nucleus and inner core electrons in heavy atoms” Physical Review D, **89**(2014) 053013(1-8) DOI: 10.1103/PhysRevD.89.053013

[A1-04] *S. Kuma, Y. Miyamoto, K. Tsutsumi, N. Sasao and S. Uetake “4.8 μ m difference-frequency generation using a waveguide-PPLN crystal and its application to mid-infrared Lamb-dip spectroscopy” Opt. Lett., **38**(2013)2825-2828 DOI:10.1364/OL.38.002825

[A1-05] *D. N. Dinh, S. T. Petcov, N. Sasao, M. Tanaka and M. Yoshimura “Observables in Neutrino Mass Spectroscopy Using Atoms” Physics Letters B, **719** (2013) 154-163 DOI: 10.1016/j.physletb.2013.01.015

[A1-06] *S. Kuma, Y. Miyamoto, K. Nakajima, A. Fukumi, K. Kawaguchi, I. Nakano, N. Sasao, M. Tanaka, J. Tang, T. Taniguchi, S. Uetake, T. Wakabayashi, A. Yoshimi and M. Yoshimura. “Coherence decay measurement of $v = 2$ vibrons in solid parahydrogen” J. Chem. Phys., **138** (2013) 024507(1-6) DOI: 10.1063/1.4773893

[A1-07] *T. Wakabayashi, M. Tomioka, Y. Wada, Y. Miyamoto, J. Tang, K. Kawaguchi, S. Kuma, N. Sasao, H. Nanjo, S. Uetake, M. Yoshimura and I. Nakano “Observation of new near infrared emission band systems of small bismuth clusters in solid neon matrix” The European Physical Journal D, **67**(2013) 36(1-7) DOI:10.1140/epjd/e2012-30529-x

[A1-08] *M. Yoshimura, N. Sasao and M. Tanaka “Dynamics of two-photon paired superradiance” Phys Rev A., **86** (2012) 013812(1-14), DOI: 10.1103/PhysRevA.86.013812

[A1-09] A. Fukumi, S. Kuma, Y. Miyamoto, K. Nakajima, I. Nakano, H. Nanjo, C. Ohae, *N. Sasao, M. Tanaka, T. Taniguchi, S. Uetake, T. Wakabayashi, T. Yamaguchi, A. Yoshimi and M. Yoshimura “Neutrino Spectroscopy with Atoms and Molecules” Prog. Theor. Exp. Phys, **2012** (2012) 04D002(1-79) DOI: 10.1093/ptep/pts066

[A1-10] *Y. Miyamoto, H. Ooe, S. Kuma, K. Kawaguchi, K. Nakajima, I. Nakano, N. Sasao, J. Tang, T. Taniguchi and M. Yoshimura “Spectroscopy of HF and HF containing clusters in solid parahydrogen” J. Phys. Chem. A, **115**(2011)14254-14261, DOI:10.1021/jp207419m

投稿中の論文合計1件

[A1-11] Y. Miyamoto, H. Hara, S. Kuma, T. Masuda, M. Katuragawa, I. Nakano, C. ohae, *N. Sasao, M. Tanaka, *S. Uetake, A. Yohimi, K. Yoshimura, M. Yoshimura, “Observation of coherent two-photon emission from the first vibrationally-excited state of hydrogen molecules” ; arXiv:1406.2198v1 <http://www.xqw.okayama-u.ac.jp/>

国際学会発表 合計29件（以下主要なもの）国内学会発表 合計47件

N. Sasao “Neutrino spectroscopy with atoms and molecules-A general overview-”（招待講演）Interdisciplinary Workshop on Quantum Device-through Mathematical Structure- 2013年01月15日 国立情報学研究所（東京都）

N. Sasao “Neutrino spectroscopy with atoms”（招待講演）2012年6月8日 The 25th International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics（京都テルサ（京都府））

【A02】 ナノ空間貯蔵標的の量子干渉性研究

公表論文 (査読付) 合計22件 (以下主要論文)

[A2-01] *K. Kawaguchi, R. Fujimori, J. Tang, and T. Ishiwata, “FTIR Spectroscopy of NO₃: Perturbation Analysis of the $\nu_3+\nu_4$ State, J. Phys. Chem. A., **117**, 13732-42 (2013)

[A2-02] R. Fujimori, Y. Hirata, I. Morino, and *K. Kawaguchi “FTIR spectroscopy of three fundamental bands of H₂F⁺” J. Phys. Chem. A, **117**, 9882-9888 (2013)

[A2-03] H. Ooe, *Y. Miyamoto, S. Kuma, K. Kawaguchi, K. Nakajima, I. Nakano, N. Sasao, J. Tang, T. Taniguchi, M. Yoshimura “Diffusion of hydrogen fluoride in solid parahydrogen”, J. Chem. Phys., **138**, 214309-1-6 (2013).

[A2-04] P. Sebald, R. Oswald, *P. Botschwina and K. Kawaguchi, Rovibrational states of ClHCl⁻ isotopologues up to high J: a joint theoretical and spectroscopic investigation”, Phys. Chem. Chem. Phys., **15**, 6737-6748 (2013)

[A2-05] R. Fujimori, N. Shimizu, J. Tang, T. Ishiwata, and *K. Kawaguchi “Fourier transform infrared spectroscopy of the ν_2 and ν_4 bands of NO₃, J. Mol. Spectrosc., **283**, 10-17 (2013).

[A2-06] *S. Kuma, Y. Miyamoto, K. Nakajima, A. Fukumi, K. Kawaguchi, I. Nakano, N. Sasao, M. Tanaka, J. Tang, T. Taniguchi, S. Uetake, T. Wakabayashi, A. Yoshimi and M. Yoshimura. “Coherence decay measurement of $v = 2$ vibrons in solid parahydrogen” J. Chem. Phys., **138** (2013) 024507(1-6,) DOI:10.1063/1.4773893

[A2-07] *T. Amano, *F. Matsushima, T. Shiraishi, C. Schnozuka, *R. Fujimori and *K. Kawaguchi “THz rotational spectrum of H₂F⁺” J. Chem. Phys., **137**(2012) 134308(1-6), DOI:10.1063/1.4757018

[A2-08] P. R. Varadwaj, R. Fujimori and *K. Kawaguchi “High-resolution Fourier transform infrared absorption spectroscopic study of the ν_6 band of c-C₃H₂” J. Phys. Chem. A, **115** (2011)8458-8463, DOI:10.1021/jp204068w

[A2-09] *K. Kawaguchi, N. Shimizu, R. Fujimori, J. Tang, T. Ishiwata and I. Tanaka “Fourier Transform Infrared spectroscopy of the ν_3 hot band of NO₃” J. Mol. Spectrosc., **268** (2011)85-92, DOI:10.1016/j.jms.2011.04.003

[A2-10] *Y. Miyamoto, H. Ooe, S. Kuma, K. Kawaguchi, K. Nakajima, I. Nakano, N. Sasao, J. Tang, T. Taniguchi and M. Yoshimura “Spectroscopy of HF and HF containing clusters in solid parahydrogen” J. Phys. Chem. A, **115**(2011) 14254-14261, DOI:10.1021/jp207419m

国際学会発表 合計14件 (以下主要なもの) 国内学会発表 合計42件

S. T. Nakagawa “The phonon dynamics during the post-annealing in a diamond crystal” (招待講演) Int. Conf. Swift Heavy ions in Material Engineering and Characterization (SHIMEC) 2012年10月10日 Inter-University Accelerator Centre (New Dehli, India)

【B01】 スピンメーザー法による原子 EDM の超高精度測定

公表論文 (査読付) 合計 26 編 (以下主要論文)

[B1-01] *Y. Ichikawa, M. Chikamori, Y. Ohtomo, E. Hikota, Y. Sakamoto, T. Suzuki, C. P. Bidinosti, T. Inoue, T. Furukawa, A. Yoshimi, K. Suzuki, T. Nanao, H. Miyatake, M. Tsuchiya, N. Yoshida, H. Shirai, T. Ino, H. Ueno, Y. Matsuo, T. Fukuyama, K. Asahi “Search for electric dipole moment in ¹²⁹Xe atom using active nuclear spin maser” European Physics Journal : Web of Conferences, **66**, 05007 (2014) DOI: 10.1051/epjconf/20146605007

[B1-02] *H. Hikota, M. Chikamori, Y. Ichikawa, Y. Ohtomo, Y. Sakamoto, T. Suzuki, C. P. Bidinosti, T. Inoue, T. Furukawa, A. Yoshimi, K. Suzuki, T. Nanao, H. Miyatake, M. Tsuchiya, N. Yoshida, H. Shirai, T. Ino, H. Ueno, Y. Matsuo, T. Fukuyama, K. Asahi “Active nuclear spin maser oscillation with double cell” European Physics Journal : Web of Conferences, **66**, 05005 (2014) DOI: 10.1051/epjconf/20146605005

[B1-03] *K. Asahi, Y. Ichikawa, M. Chikamori, Y. Ohtomo, E. Hikota, T. Suzuki, T. Inoue, T. Furukawa, A. Yoshimi, K. Suzuki, T. Nanao, H. Miyatake, M. Tsuchiya, N. Yoshida, H. Shirai, T. Ino, H. Ueno, Y. Matsuo and T. Fukuyama “Search for Electric Dipole Moment in ¹²⁹Xe atom Using a Nuclear Spin Oscillator” Physics of Particles and Nuclei, **45**, 199-201 (2014) DOI: 10.1134/S1063779614 010080

[B1-04] T. Inoue, T. Furukawa, A. Yoshimi, Y. Ichikawa, M. Chikamori, Y. Ohtomo, M. Tsuchiya, N. Yoshida, H. Shirai, M. Uchida, K. Suzuki, T. Nanao, H. Miyatake, H. Ueno, Y. Matsuo, T. Fukuyama, K. Asahi “Nuclear spin maser and experimental search for ¹²⁹Xe atomic EDM” Hyperfine Interactions, **220** (2013)59-63, DOI: 10.1007/s10751-012-0751-z

[B1-05]*A. Yoshimi, T. Inoue, T. Furukawa, T. Nanao, K. Suzuki, M. Chikamori, M. Tsuchiya, H. Hayashi, M. Uchida, N. Hatakeyama, S. Kagami, Y. Ichikawa, H. Miyatake and K. Asahi “Low-frequency ^{129}Xe nuclear spin oscillator with optical spin detection” *Physics Letters A.*, **376** (2012) pp. 1924–1929, DOI: 10.1016/j.physleta.2012.04.043

[B1-06]*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.*, **302**(2011)pp. 012039(1–6) DOI:10.1088/1742-6596/302/1/012039

[B1-07]*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.*, **312** (2011), 102005(1–5) DOI: 10.1088/1742-6596/312/10/102005

[B1-08]*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.*, **312**(2011) 102008(1–4) DOI: 0.1088/1742-6596/312/10/102008

[B1-09] *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.*, **312**(2011)102015(1–5) DOI:10.1088/1742-6596/312/10/102015

[B1-10] *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*, **17** (2011)245–250 DOI:10.1016/j.phpro.2011.06.043

[B1-11]*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*, **17** (2011) 100–103 DOI:10.1016/j.phpro.2011.06.024

[B1-12]*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

[B1-13]*A. Yoshimi, K. Asahi, T. Inoue, M. Uchida, N. Hatakeyama, M. Tsuchiya and S. Kagami “Nuclear Spin Maser at Highly Stabilized Low Magnetic Field and Search for Atomic EDM” *AIP Conf. Proc.*, **1149**(2009)249–252 DOI:10.1063/1.3215639

国際学会発表 合計45件 (以下主要なもの) 国内学会発表 合計40件

K. Asahi “Experimental search for EDM in a diamagnetic atom ^{129}Xe with spin oscillator techniques” (招待講演) Advanced Studies Institute on Symmetries and Spin (Spin-Praha-2012) 2012年07月05日 Prague, Czech

A. Yoshimi, T. Nanao, T. Inoue, M. Chikamori, T. Furukawa, M. Chikamori, M. Tsuchiya, H. Hayashi, H. Miyatake, Y. Ichikawa, M. Uchida and K. Asahi “Development of high-sensitivity magnetometer for EDM experiment with ^{129}Xe spin oscillator” (招待講演) 5th International conference on Fundamental Physics Using Atoms, October 10, 2011, Okayama University, Okayama, Japan

T. Inoue, T. Nanao, M. Chikamori, T. Furukawa, A. Yoshimi, Y. Ichikawa, H. Hayashi, M. Tsuchiya, H. Miyatake, Y. Ishii, N. Yoshida, H. Shirai, M. Uchida, H. Ueno, Y. Matsuo, T. Fukuyama and K. Asahi “ ^{129}Xe atomic EDM search with nuclear spin maser technique” (招待講演) 5th International conference on Fundamental Physics Using Atoms October 10, 2011, Okayama University, Okayama, Japan

K. Asahi, T. Inoue, T. Nanao, M. Chikamori, H. Miyatake *et al.* “Search for an electric dipole moment in ^{129}Xe atom with nuclear spin oscillator technique” (招待講演) Cold Antimatter and High Precision Physics (Pbar11), November 28, 2011, Kunibiki Messe, Shimane, Japan

[B02] 冷却不安定原子を用いた電子電気双極子能率探索

公表論文 (査読付) 合計14編 (以下主要論文)

[B2-01]*T. Inoue, Y. Sakemi et al. “Development of the Measurement System for the Search of an Electric Dipole Moment of the Electron with Laser-Cooled Francium Atoms”, *EPJ Web of Conferences*, **66**, 05008 (2014) <http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20146605008>

[B2-02]*H. Kawamura, Y. Sakemi et al. “Search for a permanent EDM using laser cooled radioactive atom” *EPJ Web of Conferences*, **66**, 05009 (2014) <http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20146605009>

[B2-03]*H. Arikawa, Y. Sakemi et al. “Radioactive ion beam transportation for the fundamental symmetry study with laser trapped atoms” *Rev. Sci. Instrum.*, **85**, 02A732 (2014); <http://dx.doi.org/10.1063/1.4852218>

- [B2-04]*T. Hayamizu, Y. Sakemi et al., "Laser cooled francium factory for the electron electric dipole moment search", JPS conf. proc., **1**, 031065 (2014) <http://journals.jps.jp/doi/abs/10.7566/JSPC.1.013065>
- [B2-05]*H. Kawamura, Y. Sakemi et al. "Laser-cooled radioactive francium factory at CYRIC", Nucl. Instr. Meth. B, **317**, 582-585 (2013) <http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2013.07.038>
- [B2-06]*H. Kawamura, Y. Sakemi et al. "Search for permanent EDM using laser cooled Fr atoms" Hyperfine Interactions, **214**(2012)133-139, 10.1007/s10751-013-0788-7
- [B2-07]*T. Aoki, Y. Sakemi et al. "Photoionization loss in simultaneous magneto-optical trapping of Rb and Sr" Phys. Rev. A, **87**(2013)0632426-1-5, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.87.063426>
- [B2-08]*T. Aoki, Y. Sakemi et al. "A 461 nm laser system and hollow-cathode lamp spectroscopy for magneto-optical trapping of Sr atoms" J. Phys. Soc. Jpn., **81** (2012) 34401 10.1143/JPSJ.81.034401
- [B2-09]*Y. Sakemi et al., Search for a permanent EDM using laser cooled radioactive atom, J. Phys. Conf. Ser., **302** (2011) 012051-012056, doi:10.1088/1742-6596/302/1/012051

解説 合計1編

[B2-10]酒見泰寛、電子の電気双極子能率の上限値をついに更新、パリティ(丸善出版株式会社)**27**(2012)19-23

国際学会発表 合計13件 (以下主要なもの) 国内学会発表 合計46件

Y. Sakemi, Search for a permanent EDM with radioactive atoms, 3rd workshop on the physics of fundamental symmetries and interactions at low energies and the precision frontier: PSI2013 (招待講演)、2013年9月9日~13日、スイス・Paul Scherrer Institute

T. Inoue, Search for electron EDM with laser cooled radioactive atom, The 8th China-Japan joint nuclear physics symposium(招待講演)、2012年10月15日~19日、中国・北京

K. Harada, Development of a double MOT system and spectroscopy of iodine molecule at 718 nm toward the electron EDM measurement, The 23rd International conference on Atomic Physics ICAP2012, 2012年7月23日

[C01] 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

公表論文 (査読付) 合計 21 報 (以下主要論文)

[C1-1] *U. Tanaka, K. Suzuki, Y. Ibaraki, and S. Urabe, "Design of a surface electrode trap for parallel ion strings", Journal of Physics B, Vol.47 (2014) pp. 035301(1-7). DOI: 10.1088/0953-4075/47/3/035301.

[C1-2] S. Hirata, T. Akatsuka, Y. Ohtake, and *A. Morinaga, "Sub-hertz-linewidth diode laser stabilized to an ultralow-drift high-finesse optical cavity", Applied Physics Express, Vol.7 (2014) pp. 022705(1-4). DOI: 10.7567/APEX.7.022705

[C1-3] *Y. Imai, K. Sugiyama, T. Nishi, S. Higashitani, T. Momiyama, and M. Kitano, "Single-ion spectroscopy of the $^2S_{1/2} - ^2D_{5/2}$ clock transitions in Yb^+ towards search for temporal variation of the fine structure constant", Abstract of the 12th Asia Pacific Physics Conference (2013) p. 246.

[C1-4] T. Akatsuka, K. Tanihara, K. Komito, K. Ooi, and *A. Morinaga "Dispersion-shaped ac Stark phase shift of Ca intercombination transitions with a time-domain atom interferometer", Physical Review A, Vol.86 (2012) pp. 023418(1-5). DOI: 10.1103/PhysRevA.86.023418.

[C1-5] *T. Uehara, K. Sugiyama, and M. Kitano, "Frequency stabilization of laser diode to the 6S-8S two-photon transitions in cesium atoms in a vapor cell placed in an external cavity", Digest of 2012 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (2012) pp.268-269. DOI: 10.1109/cpem.2012.6250905.

[C1-6] *U. Tanaka, K. Masuda, Y. Akimoto, K. Koda, Y. Ibaraki, and S. Urabe, "Micromotion compensation in a surface electrode trap by parametric excitation of trapped ions", Applied Physics B, Vol.107 (2012) pp.907-912. DOI: 10.1007/s00340-011-4762-2.

[C1-7] *Y. Onoda, K. Sugiyama and M. Kitano, "Selective detection of minor isotope lines in saturated absorption spectra by absorption filtering of major isotope lines", Optical Review, Vol.18 (2011) pp.365-366. DOI: 10.1007/s10043-011-0070-7.

[C1-8] *Y. Onoda, K. Sugiyama, M. Ikeda, and M. Kitano, "Loading rate of Yb^+ loaded through photoionization in radiofrequency ion trap", Applied Physics B, Vol.105 (2011) pp.729-740. DOI: 10.1007/s00340-011-4576-2.

[C1-9] T. Akatsuka, Y. Mori, N. Sone, Y. Ohtake, M. Machiya, and *A. Morinaga, "Thermal calcium atom interferometer with a phase resolution of a few milliradians based on a narrow-linewidth diode laser", Physical Review A, Vol.84 (2011) pp. 023633(1-6). DOI: 10.1103/PhysRevA.84.023633.

[C1-10] Y. Ibaraki, *U. Tanaka, and S. Urabe “Detection of parametric resonance of trapped ions for micromotion compensation”, Applied Physics B, Vol.105 (2011) pp.219-223. DOI: 10.1007/s00340-011-4463-x.

[C1-11] *K. Sugiyama, S. Kawajiri, N. Yabu, K. Matsumoto, and M. Kitano, “Sum-frequency mixing of radiation from two extended-cavity laser diodes using a doubly resonant external cavity for laser cooling of trapped ytterbium ions”, Applied Optics, Vol.49 (2010) pp.5510-5516. DOI: 10.1364/AO.49.005510.

[C1-12] *U. Tanaka, R. Naka, F. Iwata, T. Ujimar, K. R. Brown, I. L. Chuang, and S. Urabe, “Design and characterization of a planer trap”, Journal of Physics B, Vol.42 (2009) pp. 154006(1-5). DOI: 10.1088/0953-4075/42/15/154006.

学会発表 (計 111 件。うち国際学会 合計9件、国内学会 合計102件。招待講演 合計8件)

[C1-13] K. Sugiyama, “Development of single ytterbium- and barium-ion optical clocks towards search for temporal variation of the fine constant” (招待講演), 7th International Conference on Fundamental Physics Using Atoms, March 16, 2014, 日本科学未来館(東京都).

[C1-14] U. Tanaka, K. Shimizu, K. Matsui, and S. Urabe, “Spectroscopy of single Ca⁺ confined in a planar trap”, 7th International Conference on Fundamental Physics Using Atoms, March 16, 2014, 日本科学未来館(東京都).

[C1-15] 田中歌子, “量子インターフェースとしてのイオントラップの展望” (招待講演), FIRST-QIPP夏期研修会 2012, August 10, 2012, 宮古島 (沖縄県).

[C1-16] 杉山和彦, “原子分子を使った基礎物理” (Discussion Leader), 第7回AMO討論会, June 6, 2010, つくば国際会議場, つくば (茨城県).

アウトリーチ

[C1-17] 杉山和彦, “単一イオン原子時計と基礎物理”, ポスター前で立ち話, 京都大学アカデミックデーみんなで対話する京都大学の日-(2012. 3. 10).

【X00】原子が切り拓く極限量子の世界

公表論文 (査読付) 合計7件 (以下主要論文)

[X-01] G. Gopakumar, M. Abe, M. Hada and M. Kajita “Dipole Polarizability of Alkaline-Earth-Metal (Ca, Sr)-Alkali-Metal (Na, K, Rb) Polar Molecules: Prospects for Alignment” J. Chem. Phys. accepted

[X-02] *M. Kajita, G. Gopakumar, M. Abe and M. Hada, “Characterizing of variation in the proton-to-electron mass ratio via precise measurements of molecular vibrational transition frequencies”, J. Mol. Spectrosc., **300** (2014) 99-107

[X-03] *M. Kajita, G. Gopakumar, M. Abe, M. Hada and M. Keller “Test of mp/me changes using vibrational transitions in N₂⁺” Phys. Rev. A, **89**(2014) 032509 1-6

[X-04] *H. Ito, S. Nagano, M. Kumagai, M. Kajita and Y. Hanado “Terahertz frequency counter with uncertainty at the 10⁻¹⁷ level, Appl. Phys. Exp., **6** (2013) 102202 1-3

[X-05] *S. Nagano, H. Ito, M. Kumagai, M. Kajita and Y. Hanado “Microwave Synthesis From a Continuous-wave Terahertz Oscillator Using a Photocarrier Terahertz Frequency Comb”, Opt. Lett., **30** (2013) 2137-2139

[X-06] *G. Gopakumar, M. Abe, M. Hada and M. Kajita “Ab initio study of ground and excited states of ⁶Li⁴⁰Ca and ⁶Li⁸⁸Sr molecules” J. Chem. Phys. **138** (2013) 194307 1-14

【公募研究】

公表論文 (査読付) 合計 11 編

[K-01] *Y. Torii, H. Tashiro, N. Ohtsubo and T. Aoki “Laser-phase and frequency stabilization using atomic coherence” Phys. Rev. A, **86**, 033805-1-7 (2012) <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.86.033805>

[K-02] *N. Ohtsubo, T. Aoki and Y. Torii “Buffer gas-assisted polarization spectroscopy of Li6” Opt. Lett., **37**, 2865-2867 (2012) <http://dx.doi.org/10.1364/OL.37.002865>

[K-03] Y. Shimada, Y. Chida, N. Ohtsubo, T. Aoki, M. Takeuchi, T. Kuga and *Y. Torii “A simplified 461-nm laser system using blue laser diodes and a hollow cathode lamp for laser cooling of Sr”, Rev Sci. Instrum., **84**, 063101-1-7 (2013) <http://dx.doi.org/10.1063/1.4808246>

[K-04] *K. Enomoto, P. Djuricanin, I. Gerhardt, O. Nourbakhsh, Y. Moriwaki, W. Hardy and T. Momose

"Superconducting microwave cavity towards controlling the motion of polar molecules"
Appl. Phys. B, **109**, 149-157 (2012)

[K-05] S. Spieler, W. Zhong, P. Djuricanin, O. Nourbakhsh, I. Gerhardt, K. Enomoto, F. Stienkemeier and *T. Momose "Microwave lens effect for the $J = 0$ rotational state of CH_3CN " Molecular Physics, **111**, 1823-1834 (2013)

[K-06] T. Nakasuji, J. Yoshida and *T. Mukaiyama "Experimental Determination of p-wave Scattering Parameters in ultracold 6Li atoms", Physical Review A, **88**, (2013) 012710, DOI:10.1103/PhysRevA.88.012710

[K-07] S. Haze, S. Hata, M. Fujinaga and *T. Mukaiyama, "Observation of elastic collisions between lithium atoms and calcium ions", Physical Review A, **87**, (2013) 052715, DOI: 10.1103/PhysRevA.87.052715

[K-08] S. Haze, S. Hata, M. Fujinaga and *T. Mukaiyama, "Auto-relock system for a bow-tie cavity for second harmonic generation", Review of Scientific Instruments, **84**, (2013) 026111, DOI: 10.1063/1.4793613

[K-09] S. Nakajima, M. Horikoshi, *T. Mukaiyama, P. Naidon and M. Ueda "Measurement of an Efimov Trimer Binding Energy in a Three-Component Mixture of 6Li ", Physical Review Letters, **106**, (2011) 143201, DOI:10.1103/PhysRevLett.106.143201

[K-10] S. Nakajima, M. Horikoshi, *T. Mukaiyama, P. Naidon and M. Ueda "Nonuniversal Efimov Atom-Dimer Resonances in a Three-Component Mixture of 6Li " Physical Review Letters, **105**, (2010) 023201, DOI:10.1103/PhysRevLett.105.023201

[K-11] *J. Kobayashi, K. Aikawa, K. Oasa and S. Inouye: "Prospects for narrow-line cooling of KRb molecules in the rovibrational ground state", Phys. Rev. A, **89**, 021401(R) (2014) [Editors' suggestion]

国際学会発表 合計 29 件 (以下主要なもの) 国内学会発表 合計 30 件

K. Honda, S. Nagatsuka, M. Kozuma, Proposal: Measurement of permanent electric dipole moment with laser-cooled cesium atoms, ERATO Macroscopic Quantum Control Conference on Ultra cold Atoms and Molecules 2011年1月24日 東京大学小柴ホール

K. Honda, S. Nagatsuka and M. Kozuma "A Rb magnetometer with a 3D blue-detuned optical lattice" Fundamental Physics Using Atoms 2011, October 8, 2011 Okayama University, Tsushima Campus

N. Ohtsubo, D. Ikoma, T. Aoki and Y. Torii "High-performance apparatus for simultaneously laser cooling of 87Rb and 6Li " ICAP2012 (Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, 23-27 July 2012.) Mo-181, 23th July 2012

Y. Torii, H. Tashiro, N. Ohtsubo and T. Aoki "Laser Phase and Frequency Stabilization Using Atomic Coherence" Workshop on the Optical Frequency Standards (NICT, Tokyo, 7-8 February 2013) 7th February 2013

K. Enomoto "Collimated cold molecular beams towards the measurement of the electron electric dipole moment" Fundamental Physics Using Atoms 2011 (Okayama Univ.) 2011年10月10日

K. Enomoto "Superconducting microwave cavity towards controlling the motion of polar molecules" The 72nd Okazaki Conference on "Ultimate Control of Coherence" (Okazaki Conference Center) 2013年1月8日

【招待講演】 T. Mukaiyama "Ultracold three-body recombination of identical fermions near a p-wave Feshbach resonance" International Conference on Few-body physics in cold atomic gases, 2013年4月11日 Yunhu hotel (中国、北京市)

【招待講演】 T. Mukaiyama "Measurement of a Universal Thermodynamic Functions for a Unitary Fermi gas", Asian International Seminar on Atomic and Molecular Physics, 2012年10月24日、Academia Sinica (台湾、台北市)

M. Ehara, R. Fukuda, H. Kanamori and T. Momose "Four component relativistic calculations for the spectroscopic properties of BiO molecule" FPUA2014, Tokyo, March. 2014

S. Yamaguchi, Y. Suematsu, H. Kanamori "Supersonic jet laser spectroscopy of BiO radicals for eEDM measurement" FPUA2014, Tokyo, March. 2014

T. Ohono, A. Mizoguchi, H. Kanamori "Preparation of HgH in solid para-hydrogen for eEDM measurement" FPUA2014, Tokyo, March. 2014

J. Kobayashi and S. Inouye "Toward the laser cooling of photoassociated KRb molecules using the $1\Sigma^+ - 3\Pi_0$ intercombination transition", 5th International Workshop on Ultracold Group II Atoms, 東京, (2012.10),

J. Kobayashi, M. Ueda and S. Inouye "Toward laser cooling of photoassociated KRb molecules", 23rd International Conference on Atomic Physics (ICAP2012), France, (2012.7)

10. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度（1 ページ程度）

研究領域の研究成果が、当該学問分野や関連分野に与えたインパクトや波及効果などについて記述してください。

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、ニュートリノ質量分光、素粒子の電気双極子能率、物理基礎定数の時間変化測定を進める事を目標とした。同時に、本領域は原子物理学、量子エレクトロニクス、原子核・素粒子物理学及び化学の融合分野を創設することを目的としている。

1. ニュートリノ物理学に残された究極課題は、質量絶対値の測定、質量様式 (Majorana vs Dirac) の確定、質量階層 (Normal vs Inverted Hierarchy) の弁別、そしてマヨラナ位相を含む CP 非保存位相の決定に要約される。振動実験や二重ベータ崩壊(ニュートリノを伴わない)実験に代表される既存の実験手法が、上記した課題の一部にしか感度を持たず、また必要感度を上げるためにますます巨大化している中で、原子を用いたニュートリノ質量分光は全ての課題に対しコンパクトで組織的な手段を提供する。計画研究 A の成果は、二光子対超放射の観測により我国発信の新原理「マクロコヒーランス増幅機構」を実験により立証したことにある。鍵を握る増幅原理の確立により、ニュートリノ質量分光計画の展望を切り開いた意義は大きい。

また二光子対超放射過程は現象自体が新しく、原子物理の分野に置いてもその意義は小さくない。即ち、媒質に二光子過程が媒介する巨視的なコヒーランスを作り出したという点で、超放射や誘導ラマン現象とは異なる視点と新しい可能性 (例えば巨視的偏極が支えるソリトン状態等) を与えた。さらに、二光子対超放射は、高輝度テラヘルツの発生や entangled 光子の高効率生成などの応用が展望され、他分野への波及効果も大きいと考えられる。

2. Higgs 粒子の発見により、素粒子物理学は文字通り新しい段階に突入している。即ち、標準理論から逸脱する現象を発見することが焦眉の課題と言って良い。この中にあり電気双極子能率(EDM)の測定の重要性はますます増加している。本領域では、クォーク及び電子の EDM を世界最高レベルで測定することを目指した。B01 では Xe スピン歳差運動周波数測定精度が 8 nHz まで向上し、現在の実験上限値 (4×10^{-27} e·cm) の 1 桁下まで到達する見通しが得られた。また B02 に於いても要素技術の開発は終了し、更にいくつかの技術改良を加えれば当初の目標通り 10^{-27} e·cm 台を実現することができるとの見通しを得ている。これらの実験が終了し、もし有限値が確定すればその意義は計ることが出来ない。またその結果がたとえ上限値であったとしても多くの物理模型の検証が可能となり、標準模型を超える物理を探索する上で貴重な手がかりとなる。

3. 微細構造定数や電子陽子質量比などの基礎物理定数の恒常性検証実験は、もし定数の変化が実証されれば、物理学の根幹を揺るがす”大事件”である。本領域では、計画研究 C 及び公募研究(一部)において、この課題に挑戦した。この結果、前者については目標実現にもう一步のところにおり、また後者については世界で最も感度の良い測定結果を与える事が出来た。これらの結果を用い、様々な物理模型に対し新たな制限を与える事になる。

4. 分子は複雑な内部構造を持つために一般にレーザーを用いた冷却は困難とされていた。そのため原子に比較し研究が遅れていたが、新しい境界分野を切り開く可能性を秘めており、欧米を始めとする諸外国で研究が進んでいる。本領域により冷却分子研究は大きく進展した。特に、KRb 分子のレーザー冷却を行うことで、分子の温度を $1 \mu\text{K}$ 以下へと冷却することが可能となり、線幅 1Hz 以下の超精密分子分光の道を切り開いた。生成した KRb 分子の超精密マイクロ波分光を行い、電子陽子質量比(μ)の恒常性検証実験を遂行し、 $\delta\mu/\mu=1.0 \times 10^{-14}$ の精度(世界記録更新)を達成した。また ${}^6\text{Li}$ 原子と ${}^{40}\text{Ca}^+$ イオンの極低温下での分子反応研究を行い、その詳細の解明に成功した。冷却分子の研究は、基礎物理学への応用は言うに及ばず、量子化学(分子反応など)や量子情報等の分野の進展にも影響を与えると予想される。