

独立行政法人**科学技術振興機構**  
**創造科学技術推進事業**  
**追跡評価用資料**  
**(追跡調査報告書)**

**五神協同励起プロジェクト(1997～2002)**  
**総括責任者 五神 真**

## 目次

1. はじめに.....	1
2. 研究の発展と展開図.....	2
3. プロジェクトの研究成果と継続・発展の状況.....	3
3.1. プロジェクト期間の成果.....	3
3.1.1. プロジェクト期間のねらいと成果の概要.....	3
3.1.2. ストロンチウム原子のスピン禁制遷移による量子縮退領域へのレーザー冷却.....	4
3.1.3. 電子正孔系の量子相関効果と非線形光学応答.....	5
3.1.4. 強相関電子系の分光学と光制御機能の探索.....	7
3.1.5. 微小光学素子のための光波操作法の研究.....	10
3.2. プロジェクト終了後の継続と発展の状況.....	10
3.2.1. プロジェクト後の研究のねらいとテーマ.....	10
3.2.2. 光格子時計と原子チップ.....	11
3.2.3. 多体電子系の励起状態の学理と光機能.....	14
3.2.4. 微小エネルギー(テラヘルツ)領域の分光技術開拓.....	19
3.2.5. 微小領域における光波制御.....	20
4. 研究成果から生み出された科学技術的、社会的、経済的な効果・効用及び波及効果.....	21
4.1. 科学技術の進歩に貢献する成果.....	21
4.1.1. 光格子時計の開発.....	21
4.1.2. 励起子 BEC の実現に向けた研究.....	21
4.1.3. 励起子分子波によるパラメトリック増幅機能.....	22
4.1.4. 励起子ポラリトンの相互作用に関する精密な理論展開.....	22
4.1.5. 微小球やテラヘルツ技術等の応用研究.....	23
4.2. 社会的、経済的な効果・効用及び波及効果.....	23
4.2.1. プロジェクト成果から期待される技術革新・イノベーション.....	23
4.2.2. 大学や研究機関などで行われているプロジェクト成果の応用に向けた取り組み.....	24
4.3. 統計資料に見た科学技術へのインパクト.....	25
4.3.1. 代表的論文と被引用件数の年次推移.....	25
4.3.2. 当該分野における研究の拡大(キーワード検索の結果).....	26
4.3.3. 主な受賞.....	27
4.4. 人材育成から見た参加研究員の活動状況.....	28
4.4.1. 参加研究員の動静.....	28
4.4.2. 参加研究員のファンド獲得状況.....	29
4.4.3. 学位取得.....	29
5. 参考資料.....	30
5.1. 本文中で引用されたプロジェクト関連の文献リスト.....	30
5.2. 光格子時計を取り巻く状況.....	34

## 1. はじめに

1960年代に発明されたレーザーは、その後40年の間に大きく進歩した。特に近年の半導体を用いた周波数制御技術、チタンサファイアレーザーによる超短パルス技術(フェムト秒レーザー)、高出力レーザーの進歩はめざましい。レーザー応用技術は今までも社会に大きなインパクトを与えてきたが、さらに、光を用いて物質を制御する研究には広大な未開拓領域があると考えられる。

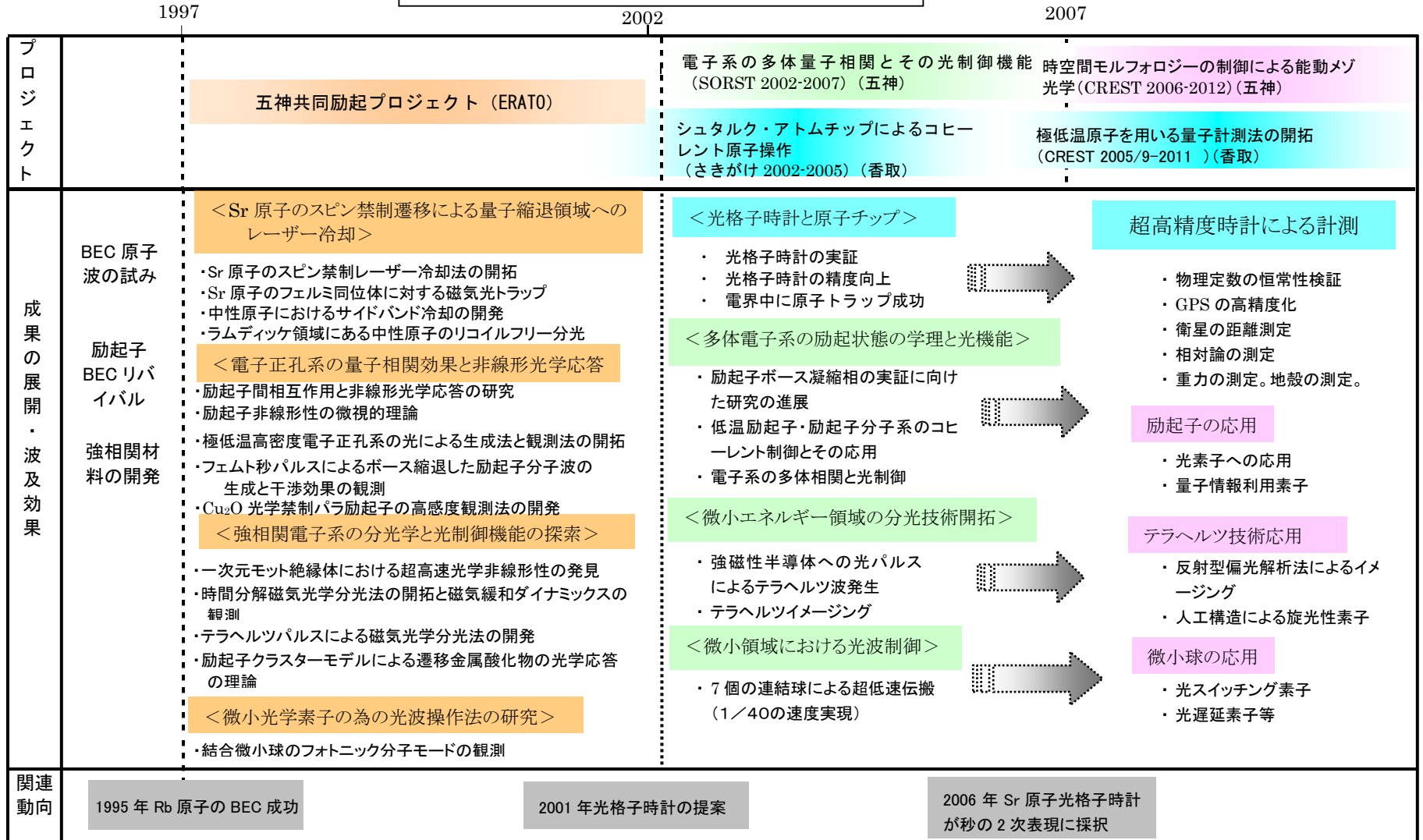
20世紀後半に急成長を遂げた半導体技術を基本とするエレクトロニクス技術は超高速で大容量の情報処理の点で既に限界に達しているとしばしば言われる。この壁を打ち破る技術として、レーザー技術を中心とした光技術が期待されている。しかし光と協調して働く素子は光の利点を引き出す性能面でまだ不十分であり、従来のバンド理論に基づく一体近似の枠を超えて多体効果を積極的に利用するエレクトロニクスの開拓が鍵を握ると考えられる。このような考えから、本プロジェクトでは先端的なレーザー技術を駆使し、光によって生じる協同的な励起現象を追求した。すなわち、光と物質の相互作用を巧みに操ることによって、物質系に集団の量子現象を発現させ、その物性解明と応用開拓を主題として設定した。原子系から固体まで特に制限を設けず対象とした。

本プロジェクトの発足当時、原子系の協同現象の大きな話題は原子の極低温におけるボース・アインシュタイン凝縮(以後BECと略記)であった。発足の2年前(1995年)にアルカリ原子で初めてBECが成功し、原子波レーザーや原子波干渉や原子波ホログラフィ等応用への提案がされている時期であった。当時のBECはレーザー冷却だけではBECに達せず、最後の段階で蒸発冷却という手法を用いざるを得なかった。これは多くの原子を蒸発させ、残った少量の原子がBECを達成する手法であったため、原子波源としては極めて不満足であった。本研究では応用を視野に入れ、アルカリ土類金属をターゲットに、レーザー冷却のみでBECを達成し、圧倒的に原子流束の高いコヒーレント原子波源を得ることを狙った。

固体と光の相互作用は古くから様々な材料で研究されてきた。近年は、光エレクトロニクスへの応用を目指して半導体量子井戸や量子ドットと光の相互作用の研究が盛んである。本プロジェクトでは光をより積極的に利用して、高密度電子正孔状態を制御することや、さらには電子間相互作用が本質的な強相関電子系を従来の光物性の視点だけではなく、光エレクトロニクスの視点で捉えるような新しい研究に挑戦した。テーマとして、光スイッチングや変調素子として実用的に注目されている半導体内での励起子ポラリトンの非線形光学応答の実験と理論の研究、また、40年来懸案であった励起子のBECの実現を念頭においた、極低温高密度電子正孔系の光による生成と観測法の開拓、および電子間の相互作用が強く、光との非線形相互作用が期待されるにもかかわらず、あまり研究されてこなかった強相関材料によって、実用的にも優れた光非線形性材料の開発と現象を説明する理論の研究等を行った。

2. 研究の発展と展開図

五神協同励起プロジェクトの展開状況



### 3. プロジェクトの研究成果と継続・発展の状況

#### 3.1. プロジェクト期間の成果

##### 3.1.1. プロジェクト期間のねらいと成果の概要

研究計画では、まず原子系のテーマとして、全光学的な手法による縮退原子ガスの生成法の開拓を目指した。具体的にはストロンチウム原子をレーザー冷却のみで BEC を生成することを目指して技術開発を行った。その結果、BEC は実現できなかったが、スピン禁制レーザー冷却法やフェルミ同位体に対する磁気光トラップ等、後述の成果を得た。さらに、これらの成果を基にストロンチウム原子を光双極子でトラップし、その遷移周波数を測定する“光格子時計”の提案を行った。

第二に固体の協同励起現象としては、光励起された極低温高密度電子正孔系の物理現象の追求を計画に掲げ、固体の励起子系や高密度電子正孔系の協同現象を探索した。その結果、励起子間の相互作用とそれによる非線形光学応答の実験を微視的理論によって見事に解明した。また、励起子 BEC に繋がるような亜酸化銅  $\text{Cu}_2\text{O}$  のパラ励起子の直接観察法を開拓した。その他、高密度で低温の電子正孔液滴を直接型半導体で初めて生成したり、励起子分子波を生成しその干渉実験から高いコヒーレンス性を実証した。

第三に固体における高密度励起および強相関電子材料によるオプトエレクトロニクスの開拓を計画し、1次元モット絶縁体 ( $\text{Sr}_2\text{CuO}_3$ ) で超高速光学非線形性を発見し、その理論付けも行った。このテーマではその他、光学的手法で磁性を調べる時間分解磁気光学分光法やテラヘルツパルスによる磁気光学分光法を開拓した。このテーマの中で光機能素子としての微小球の研究を行い、微小球間の結合共振等の観測に成功した。

また、協同励起材料としての高品質ガリウム窒素 ( $\text{GaN}$ ) 系結晶の作成を目指したが、プロジェクトの期間中に高移動度試料の作成に成功した。この試料により過渡反射スペクトルを観測した。

プロジェクト期間の成果は次の4項目に分けられる。

- ・ ストロンチウム原子のスピン禁制遷移による量子縮退領域へのレーザー冷却
- ・ 電子正孔系の量子相関効果と非線形光学応答
- ・ 強相関電子系の分光学と光制御機能の探索

- ・ 微小光学素子の為の光波操作法の研究

以下に各項目について詳しく説明する。

### 3.1.2. スロンチウム原子のスピンの禁制遷移による量子縮退領域へのレーザー冷却

#### (1) スロンチウム原子のスピンの禁制レーザー冷却法の開拓

アルカリ土類原子のスロンチウムに対してスピンの禁制遷移でのレーザー冷却及び磁気光学トラップを実現し、常温から 400nK まで 100msec 以内に到達する技術を開発した<sup>1</sup>。さらに、同遷移を用いて、光双極子トラップ中でレーザー冷却を行うスキームを開拓した。光トラップ用の非共鳴レーザー光の周波数をうまく選ぶと、スピンの禁制遷移の上下準位のシュタルクシフトを揃えることができ<sup>2</sup>、自由空間と同様にレーザー冷却が可能であることを見出し、冷却遷移周波数のシュタルクシフトが相殺する光双極子トラップを実現した。この手法により磁気光学トラップに捕獲した原子の 90%以上を効率よく光双極子トラップに導入できることを実証した<sup>3</sup>。このシュタルクシフトフリーな光双極子トラップは、スピンの禁制遷移を周波数標準に利用する上でもきわめて優れた特性をもつことも同時に示した。この結果により、2001 年光格子時計を提案した<sup>4</sup>。

#### (2) スロンチウム原子のフェルミ同位体に対する磁気光学トラップ

従来の磁気トラップ法では不可能とされてきた磁気副準位構造が異なるフェルミ同位体をサブマイクロケルビンに冷却・トラップする方法として、光ポンピング下での磁気光学トラップ法を開拓した。これによりスロンチウムのフェルミ同位体を反跳温度限界の 400nK まで冷却できることを実証した。また、続いて光双極子トラップへの原子の移行もボース粒子と同様の方法で行い、移行した原子に対して偏極及び、さらなるレーザー冷却を施してフェルミ温度の 2 倍まで冷却・高密度化することに成功した<sup>5</sup>。

#### (3) 中性原子におけるサイドバンド冷却の開拓

---

<sup>1</sup> 文献リスト No.1 (5.1 本文中で引用されたプロジェクト関連の文献リスト、以下同じ)

<sup>2</sup> 文献リスト No.2

<sup>3</sup> 文献リスト No.3

<sup>4</sup> 文献リスト No.4

スピン禁制遷移の狭い準位幅と光シュタルクフリーな光双極子トラップの組み合わせにより、トラップ中の振動バンドを利用したサイドバンド冷却を行った。これは中性原子の一光子遷移を利用したものとしては世界初めてである<sup>6</sup>。

#### (4) ラム・ディッケ領域にある中性原子のリコイルフリー分光

光シュタルクシフトフリーな光双極子ポテンシャルを用いて原子を光学遷移の波長以下の狭い領域にトラップして並進運動の自由度を完全に凍結し(ラム・ディッケ束縛)、ドップラーシフトも反跳シフトもない分光を行うことに成功し、kHz スケールの絶対周波数計測を実現した。これはストロンチウムを用いた新しい周波数標準の可能性を示す成果である。光トラップの定在波としては波長 915nm、強度 350mW のビームを 1/e 直径 45mm に絞って用い、定在波の光軸方向に遷移の自然幅 7.1kHz より十分大きい 50kHz 程度の閉じ込め振動周波数を得ることができた。この定在波中の原子に飽和強度程度のプローブ光を定在波と同軸上に入射してその蛍光を観測し、飽和広がりのみで制限された 11kHz という狭線幅を得た。このスペクトルにおいては原子が同一温度 5 $\mu$ K で自由空間中にある場合に生じるドップラー広がり 70kHz を完全に抑制し、またその中心周波数は自由空間中原子の中心周波数よりも 5kHz 赤方にあり、ストロンチウム(Sr)原子がラム・ディッケ領域に閉じ込められてドップラーフリー分光が実現されていることを明瞭に示した。

### 3.1.3. 電子正孔系の量子相関効果と非線形光学応答

#### (1) 励起子間相互作用と非線形光学応答の研究

半導体の励起子準位に共鳴する光をあてると大きな非線形光学応答が生じることが知られていた。この効果の起源を解明するために、励起子を弱く相互作用するボソンとして扱い、励起子の非調和性を偏光の組み合わせで分類した。その結果、半導体微小共振器中の縮退 4 光波混合法による実験結果を、ごく少数のパラメータで説明できた<sup>7</sup>。

より詳しい検討により、励起子間相互作用は励起子分子を形成する偏光の組み合わせに対し

---

<sup>5</sup> 文献リスト No.5

<sup>6</sup> 文献リスト No.6

<sup>7</sup> 文献リスト No.7

て、相関関数が強いメモリー効果を示すことが明らかになった<sup>8</sup>。

## (2) 励起子非線形性の微視的理論

弱く相互作用するボソンモデルの微視的起源を明らかにするために、電子正孔状態を出発点とする微視的モデルに基づく第一原理的計算の方法を開拓した。励起子共鳴での非線形光学応答を励起子散乱として記述した。その結果、励起子間相互作用と電子正孔系の4体の量子相関の関係を明らかにし、実験を再現することができた。実験との比較において、2次元系のクーロン散乱問題の特徴である発散の問題を指摘し、第2ボルン近似の破綻を示し、これらの問題を散乱行列を数値対角化することで解決した<sup>9</sup>。これは、励起子間相互作用をきちんと取り入れるためにはクーロン相互作用を無限次まで取り込むことが必要であることを示している。

## (3) 極低温高密度電子正孔系の光による生成法と観測法の開拓

高密度の光励起キャリアである電子正孔系を極低温にすると、キャリア間の強いクーロン相互作用と量子力学的な交換相互作用が拮抗して様々な量子状態が発現することが理論的に指摘されてきた。しかし、通常半導体を強く光励起すると、キャリアは高温状態となり、冷却が進む前に再結合によって消失してしまう。そこで、極低温の電子正孔系を光で直接作り出すため、フェムト秒パルス光をバンド端よりも低エネルギーの励起子準位に同調して励起する方法に着目した。励起子準位は励起子密度によらずほぼ一定であることから、励起子を最密充填される密度(励起子モット転移密度)まで高密度に作る事が可能である。この密度を超えると励起子は自発的に乖離し電子正孔系が生じると考えられる。このときに生じる電子正孔系は熱エネルギーを持たない低温の状態になるはずである。このアイデアを実証するために、直接遷移型半導体である亜塩化銅(CuCl)の励起子準位を強く共鳴励起する実験を行った。

光励起キャリアの状態を観測する手法として、電子正孔対の内部遷移や集団運動を捉えることができる中赤外領域の電磁応答に着目し、強い励起子励起下で、中赤外領域のプロープ光の過渡反射スペクトルを調べるフェムト秒ポンププローブ分光法を確立した。亜塩化銅(CuCl)単結晶を用いて実験を行ったところ、励起直後に電子正孔のプラズマが発生したことを示す強い金属性の反射が観測されたが、これが10ピコ秒程度で分散型の応答に変化することを見出した。このスペクトル変化を解析したところ、電子正孔系が空間的に凝縮して液滴を形成したものである

---

<sup>8</sup> 文献リスト No.8

<sup>9</sup> 文献リスト No.9



ことが明らかになった<sup>10</sup>。これは従来の準熱平衡過程では実現不可能とされていた直接遷移型半導体の電子正孔液滴の形成をはじめて示したものである。またワイドギャップの間接遷移型半導体であるダイヤモンドにおける電子正孔液滴の観測も行い、液滴の臨界温度が 165K と極めて高温にあることを発見した<sup>11</sup>。また直接遷移型半導体の中でも青色発光素子など応用上重要なガリウム窒素 (GaN) 系の物質におけるモット転移近傍のキャリアダイナミクスに着目し、過渡反射スペクトルからインジウムガリウム窒素 (InGaN) 混晶のようにポテンシャルの極小にキャリアが分布しているような系のダイナミクスの解明に有力な手法となりうる事を示した。

#### (4) フェムト秒パルスによるボース縮退した励起子分子波の生成と干渉効果の観測

2光子遷移を用いると、励起パルスのボース縮重度を増倍して縮重度の高い励起子分子を作ることができることを提案した。この励起子分子波は非常にコヒーレンスのよい波として振る舞うことを独立に用意した 2 つの波の干渉実験から実証した<sup>12</sup>。また縮重度の高い励起子分子波は光との相互作用において高効率なパラメトリック増幅効果を示すことを示し、強いスキューズド光の発生に応用できることを提案した。

#### (5) 亜酸化銅 (Cu<sub>2</sub>O) 光学禁制パラ励起子の高感度観測法の開発

亜酸化銅 (Cu<sub>2</sub>O) 結晶の 1s パラ励起子はバンド間遷移がパリティ禁制でかつスピン禁制であり、非常に長い寿命を持つ。パラ励起子のボース凝縮を示唆する実験がこれまで行われ、励起子ボース凝縮の有力候補として注目されてきた。しかし、パラ励起子は光学的な直接観測が困難なことからその物性は未知な部分が多く、ボース凝縮の議論に決着がつかない原因となっている。パラ励起子の 1s-2p 遷移は中赤外領域であるが、非常に吸収断面積が大きいことに着目し、1s パラ励起子の観測法として有効であることを見出した。その結果オルソ励起子とパラ励起子をスペクトル的に分離して観測することに成功した。

### 3.1.4. 強相関電子系の分光光学と光制御機能の探索

#### (1) 一次元モット絶縁体ストロンチウム銅酸化物 (Sr<sub>2</sub>CuO<sub>3</sub>) における超高速光学非線形性の発見

---

<sup>10</sup> 文献リスト No.10

<sup>11</sup> 文献リスト No.11

<sup>12</sup> 文献リスト No.12

強相関電子系一次元モット絶縁体ストロンチウム銅酸化物 ( $\text{Sr}_2\text{CuO}_3$ ) を取り上げ、近赤外域でポンププローブ分光を行ったところ、非常に大きな誘導吸収効果を観測した。2光子吸収分光法により、この大きな信号がバンド間2光子吸収によることを発見した。また、2光子吸収帯と線形吸収帯がほとんど縮退していること、ピークでの2光子吸収係数  $\beta$  の値は従来のバンド絶縁体のものより一桁程度大きいことがわかった。一光子許容状態と二光子許容状態の縮退はモット絶縁体の特徴であると考えられる。そこで、two-band Hubbard model を用いた数値計算を行い、この起源を明らかにした。その結果、大きな電子相関エネルギーが 1 光子及び2光子状態の縮退と強い光学非線形性の原因であることがわかった。さらに、同時に観測される減衰成分の時定数が 1 ピコ秒程度と非常に速いことを活かして、繰り返しテラビット/秒程度の光スイッチ動作のデモンストレーションを行った<sup>13</sup>。実際の光スイッチを構成する上では非線形屈折率  $n_2$  の利用が望ましいので、 $n_2$  の評価も行った。その値が通信波長帯  $1.5 \mu\text{m}$  近傍で実際に大きいことを確認した。さらに非線形性が大きな物質を探索するため、Cu-O ネットワークが異なる物質、二重鎖一次元系ストロンチウム銅酸化物 ( $\text{SrCuO}_2$ )、二次元系ストロンチウム銅酸化物 ( $\text{Sr}_2\text{CuO}_2\text{Cl}_2$ ) など調べ、一次元系の方が二次元系よりも非線形性が大きいこと、二次元系には数十ピコ秒の遅い緩和成分が存在し光スイッチとしては不利であることを見出した<sup>14</sup>。銅酸化物の非線形性及び緩和ダイナミクスの次元依存性を調べ、特性が Cu-O ネットワークの次元に支配されることを見いだした。これをクラスター計算と比較し、非線形性の次元依存性を定性的に説明することができた<sup>14</sup>。

## (2) 時間分解磁気光学分光の開拓と磁気緩和ダイナミクスの観測

時間分解磁気光学測定系を立ち上げ、超高速スピントロニクスへの展開、光による磁性制御といった応用も見据えてハーフメタル強磁性体 double-ordered Perovskite のモリブデン酸鉄ストロンチウム ( $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ ) の磁気カー効果の測定を行った。その結果、電荷とスピンの自由度が熱的に隔離されていることを見いだした。さらにこの隔離を利用するとスピン系のダイナミクスを抽出できることを指摘し、この物質で磁気相転移における臨界緩和現象をピコ秒からナノ秒の時間スケールで観測することに成功した。熱隔離の原因はこの物質がハーフメタルである、すなわち伝導電子のスピンの完全な偏極していることに起因していると結論した<sup>15</sup>。また、現在の半導体技術と相性が良く非常に注目されている希薄磁性半導体であるマンガンドープのガリウムヒ素

<sup>13</sup> 文献リスト No.13

<sup>14</sup> 文献リスト No.14

<sup>15</sup> 文献リスト No.15

GaAs:Mn(6%)を同じ手法で調べた。この物質はキャリア(正孔)誘起強磁性体として知られ、強磁性を示す半導体の中で最も高い強磁性転移温度を持つ。通常の半導体では正孔のスピンの緩和は数ピコ秒の時間スケールで起きる事が知られており、磁化の緩和が電荷系と比較して遅れるという結果は極めて異常なことである。この物質は第一原理計算からハーフメタル的なバンド構造をもっていると推定されていたが、直接証拠は得られていなかった。この実験結果はマンガンドープのガリウムヒ素 GaAs:Mn がハーフメタル的であることを示唆するものと考えられることができる。また時間分解磁気光学分光がスピントロニクス応用上重要な磁性体のバンド構造に関する重要な知見を得る手段として有効であることを示している。

### (3) テラヘルツパルスによる磁気光学分光法の開発

フェムト秒パルス光を用いて光整流によってテラヘルツ電磁波パルスを発生させ、それを用いたテラヘルツ領域の反射型偏光解析法を開発した。磁場中での斜入射反射係数の表式を導出し、テラヘルツパルスの時間波形から複素誘電応答関数の対角成分と非対角成分を精度よく評価する測定法と解析アルゴリズムを開発した。この手法を用いて n 型インジウムヒ素 (n-InAs) において 10 度以上の偏光回転を観測し、これが磁気プラズマ共鳴による巨大磁気光学効果によるものであることを見いだした<sup>16</sup>。

### (4) 励起子クラスターモデルによる遷移金属酸化物の光学応答理論

遷移金属酸化物の光吸収スペクトルと 2 マグノンラマン散乱共鳴スペクトルでの問題を解決するため励起子クラスターモデルを提唱した。このモデルは 3d 電子の強相関効果と素励起の伝播効果と同じ土俵の上で記述できる点に特長がある。その結果、線形および非線形光学応答とそのスペクトルを定量的に記述する事に成功した。まず、4 つの物質は最近接酸素イオンの 2p 軌道間の電荷移動行列  $t_p$  と電子正孔間の引力  $V$  と、さらには銅(3d)軌道とその最近接酸素(2p)軌道間の電荷移動行列  $t_o$  とが相異なり、その事実が光スペクトルを決定している。さらにそれらの値の違いを与える物理的背景も理解できた。

---

<sup>16</sup> 文献リスト No.16

### 3.1.5. 微小光学素子のための光波操作法の研究

#### (1) 結合微小球のフォトニック分子モード

波長の数倍のサイズの誘電体微小球は、3次元的な光共振器として作用することが知られている。この光閉じこめモードの周波数は微小球のサイズに依存する。そこで、直径4マイクロンから5マイクロンの誘電体微小球のサイズを0.05%の精度で制御する技術を開拓し、サイズの制御された2つの微小球を連結させ、それぞれの閉じこめモードである **Whispering Gallery Mode (WGM** (略記) を共鳴的に結合させることを試みた。蛍光色素をドープしたポリマー微小球を連結させたところ、結合モードと反結合モードを明瞭に観測した。これは **WGM** を用いて **Tight binding** 近似による微小領域での光波操作の可能性を拓くものである<sup>17</sup>。この他にも微小球を用いた新機能素子を開発しつつある<sup>18</sup>。

## 3.2. プロジェクト終了後の継続と発展の状況

### 3.2.1. プロジェクト後の研究のねらいとテーマ

本プロジェクトが終了後、研究員の移動や資金の縮小等から、テーマを絞って研究を進めた。その大きな流れを以下に説明し、特に注目されるテーマを次項以下で詳述した。

レーザー冷却法による極低温ストロンチウム(**Sr**)原子の生成とその分光学的研究からの成果は香取のさきがけ「光と制御」研究領域の課題「シュタルクアトムチップによるコヒーレント原子操作」(2002~2005)と **CREST**「量子情報処理システムの実現を目指した新技術の創出」研究領域の課題「極低温原子を用いる量子計測法の開拓」(2005~2010)によって、光格子時計と原子チップの研究へと発展した。その成果は国際的に注目されており、香取の提案に沿った光格子時計の研究が各国で行われている。

光による固体中の多体量子現象の発現方法の探求と、それによる特異な光機能の研究は総括責任者の五神によって、**SORST** の課題「電子系の多体量子相関とその光制御機能」(2002-2007)とそれに続く **CREST** 研究領域「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」の課題「時空間モルフォロジーの制御による能動メゾ光学」(2006-2011)によって展開している。**SORST**

---

<sup>17</sup> 文献リスト No.17

<sup>18</sup> 文献リスト No.18

の中では主に①多体電子系の励起状態の学理と光機能、②微小エネルギー領域の分光技術開拓、③微小領域における光制御の研究、の3つのテーマで行われた。CREST では主に、④モルフォロジー制御による光機能発現、⑤巨大光応答物質相の制御と探索の2つのテーマで現在も行われている。

ERATO の成果との関連は次のように考えられる。

- ① 多体電子系の励起状態の学理と光機能 ← 「極低温高密度電子正孔系の光による生成法と観測法の開拓」、「フェムト秒パルスによるボース縮退した励起子分子波の生成と干渉効果の観測」、「亜酸化銅(Cu<sub>2</sub>O)光学禁制パラ励起子の高感度観測法の開発」
- ② 微小エネルギー領域の分光技術開拓 ← 「時間分解磁気光学分光の開拓と磁気緩和ダイナミクスの観測」、「テラヘルツパルスによる磁気光学分光法の開発」
- ③ 微小領域における光制御の研究 ← 「結合微小球のフォトニック分子モード」
- ④ モルフォロジー制御による光機能発現←「時間分解磁気光学分光の開拓と磁気緩和ダイナミクスの観測」、「テラヘルツパルスによる磁気光学分光法の開発」、
- ⑤ 巨大光応答物質相の制御と探索←「極低温高密度電子正孔系の光による生成法と観測法の開拓」、「亜酸化銅(Cu<sub>2</sub>O)光学禁制パラ励起子の高感度観測法の開発」

強相関材料関連の研究の継続した展開は見られなかった。

GaN の電子正孔系の協同励起現象探求のために結晶高品質化を目指すテーマは担当していた大川によって ERATO の「中村不均一プロジェクト」に移された。

### 3.2.2. 光格子時計と原子チップ

#### (1) 光格子時計

レーザー冷却法による極低温ストロンチウム原子の生成とその分光学的研究の成果から、2001年に香取が光格子時計を提案した(光格子時計の開発の状況については4.5を参照)。現在の時間標準はセシウム 133(Cs133)の超微細遷移のマイクロ波を用いる。振動周波数がマイクロ波から光の振動数になれば時間精度<sup>19</sup>の飛躍的な向上が期待できるため、光を使った高精度な時間測定の研究が行われていた。従来の技術は、電場と磁場によってトラップされたレーザー冷却単一イオンのス

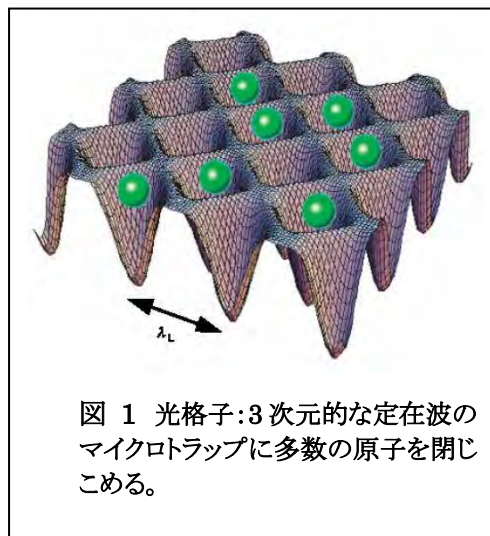


図 1 光格子:3次元的な定在波のマイクロトラップに多数の原子を閉じこめる。

<sup>19</sup> 「精度」とは計測の再現性を意味する。一方、「不確かさ」とは測定値からどの程度のばらつきの範囲内に「真の値」があるかを示す。

ペクトルを使うものであった。この方式は 20 年以上掛かって米国の National Institute of Standards and Technology (NIST と略記)、英国の National Physical Laboratories (NPL と略記) 等がセシウムの標準方式の精度に迫っており、秒の二次表現として公式に認知されていた。しかし、この方式は技術的に難しいだけでなく、使っているイオンが 1 個のため得られる信号が小さいという欠点があった。

この状況に新しい方式として本プロジェクトのグループリーダーであった香取によって提案されたのがストロンチウム (Sr) 光格子

時計である (2001 年)<sup>4</sup>。この提案では、光格子レーザーが作る電場、すなわち光格子ポテンシャルに強く束縛された  $10^6$  個の極低温ストロンチウム原子を同時にプローブすることにより、ドップラーシフトと衝突シフトの除去と、S/N 比の向上を同時に実現することができる (図 1)。これには、光格子の電場の極大点に束縛された原子について、基底準位と励起準位のシュタルクシフトがキャンセルして時計遷移周波数には電場の影響が現れないという、光格子レーザーの特異的な波長「魔法波長」の発見が重要な鍵になっている (図 2)。

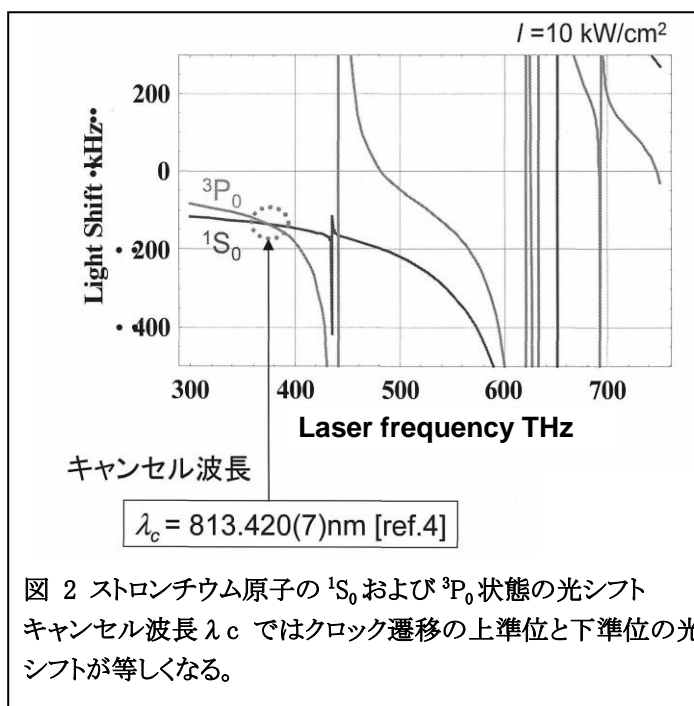


図 2 ストロンチウム原子の  $1S_0$  および  $3P_0$  状態の光シフト  
キャンセル波長  $\lambda_c$  ではクロック遷移の上準位と下準位の光シフトが等しくなる。

その後、2003 年に光格子時計の原理的な実証に成功した<sup>20</sup>。さらに、従来のイオントラップ方式に追いつく精度へと研究を継続し、2006 年にフェルミ粒子のストロンチウム ( $^{87}\text{Sr}$ ) を使ってスピンの偏極により原子の衝突の影響を取り除いた 1 次元偏極光格子時計の考案・実証により、 $3 \times 10^{-15}$  の精度を実現した。これらの成果により、ストロンチウム (Sr) 原子の光格子時計は 2006 年に秒の二次表現における候補 5 つの一つとして、国際度量衡委員会の時間・周波数委員会に正式に認められた。現在光格子時計の研究が各国で進行中である<sup>21</sup>。

研究の方向は 2 つあり、一つは時間標準への採用を目的に、精度と安定性の向上を目指す方向である。これは日本では (独) 産業技術総合研究所 (以後、産総研と略記) や (独) 通信総合研

<sup>20</sup> 文献リスト No.19, No.20, No.21

<sup>21</sup> Barber Z.W. et al, Phys. Rev. Lett., 96, 083001 (2006) : NIST, Lemonde P, et al, Phys. Rev. A 72, 033409 (2005) : SYRTE, Andrew D. et al., PRL 96, 033003 (2006) : GILA

究所(以後、通総研と略記)、米国では GILA<sup>22</sup>、NIST やフランスの Laboratoire national de métrologie et d'essais - Système de Références Temps-Espace (SYRTE と略記) 等である。もう一つは、高精度の時間測定技術を使って学術的な計測を行う方向である。これら二つの方向はお互いに関係しており、日本では香取と産総研が互いに協力しながら研究を展開している。

香取の光格子時計の研究は JST の戦略的創造研究推進事業の課題(CREST 2006-2011)として取り上げられ現在も研究が進行中である。その中で、ストロンチウム(Sr)から他の原子、水銀(Hg)、イットリビウム(Yb)へと拡張し、これら質量の異なる原子から得られた時間が完全に一致するかどうかの同時比較を行っている。その目的は、一つは既に限界に近づいている従来の時間標準との比較によらず精度の評価ができること、もう一つは異種原子の周波数比較によって微細構造定数<sup>23</sup>の恒常性の検証を行うことである。

また、技術的に容易なため初めに実現した 1 次元の光格子時計と、技術的には難しいが究極の光格子である 3 次元光格子時計の比較を行っている。

香取が光格子時計の提案をしたのが本プロジェクト期間中の 2001 年であった。その後の展開は次の通りである。

2003 年:基礎実験に成功。ストロンチウム原子(ボース粒子である <sup>88</sup>Sr)の一次元の光格子時計により原理的に光格子時計が可能であることを実証( $\sim 10^{-12}$ )。

2005 年:現時点で最高精度を誇るセシウム原子時計の 1 桁落ちの精度に到達( $\sim 10^{-14}$ )。

2006 年:フェルミ粒子であるストロンチウム原子同位体(<sup>87</sup>Sr)によってスピン偏極した一次元光格子時計(偏極光格子時計と呼ぶ)を実現した結果、絶対周波数を  $9 \times 10^{-15}$  の不確かさで決定した<sup>24</sup>。日本、米国、フランスの光格子時計が整合性のある結果を得たことにより、国際度量衡委員会の時間・周波数委員会が秒の再定義に向けた作業の候補の一つとして採択した。

現在は <sup>88</sup>Sr の 3 次元光格子時計を立ち上げ、前記偏極光格子時計との精度比較や異なる原子種の Yb または Hg による光格子時計を新たに構築し、ストロンチウム光格子時計との同時運転を行い、相対精度  $10^{-16} \sim 10^{-17}$  で光格子時計の不確かさを評価している。さらに微細構造定数の恒常性の検証を行っている。

これらの成果により、香取は国内外の多くの受賞を受けている(4.3.4 に記載)。国際的には米国 GILA、フランス SYRTE 等各国の時間標準研究機関が光格子時計を取り上げ、精度競争になっ

<sup>22</sup> JILA: コロラド大学(University of Colorado) (CU)と NIST の共同研究組織。

<sup>23</sup> 微細構造定数とは普通  $\alpha$  で表される無次元量。 $\alpha = e^2/2hc \epsilon_0$  で表される(e は素電荷量、h はプランクの定数、c は光速、 $\epsilon_0$  は真空の誘電率)で表され、 $\alpha^{-1}$  が 137.036...。電磁相互作用の強さを左右する e および  $\epsilon_0$  に対して量子論的な定数 h と相対論的な定数 c を関連付けている値。クォーサーの光の観測から定数ではないとの説がある。

<sup>24</sup> 文献リスト No.22

ている。光格子時計を取り巻く状況の詳細を参考資料 5.4 にまとめた。

## (2) 原子チップ<sup>25</sup>

量子計算機の実現には、量子の長いコヒーレンス時間を持つ、重ね合わせ状態と粒子間の相互作用に基づくもつれ合い状態の生成が不可欠である。これを実現する素子として原子の電子状態を使う原子チップが研究されており、原子をトラップする技術として、イオンを高周波電場でトラップする技術、磁気モーメントを持つ原子を磁場で制御する技術等が使われている。しかし、イオンによるトラップはローレンツ力による外乱があり、磁気モーメントによるトラップは磁気回路に流す電流の発熱という欠点がある。これらの欠点は原子チップ回路を集積する際には特に問題となる。香取はレーザー冷却によって極低温にした中性原子を高周波電場で動的にトラップする構造のチップ(シュタルクアトムチップ)を考案した。真空中で金原子を光による進行する共鳴電界を使って、トラップ電極(図 3)へと運び、 $50\mu\text{m}$  の電極構造に 1 個の原子をトラップすることができた。提案の方式によれば、発熱

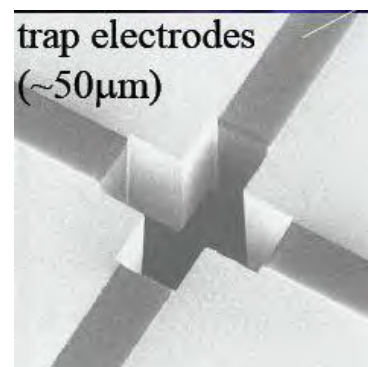


図 3 トラップ電極の構成:電極への高周波電場印加により原子をトラップする

しにくいだけでなく、電極構造が微細になる程低い電圧になり、既存の集積回路とインターフェイスが取りやすいと思われる。この研究は JST の「さきがけ」研究(2002-2005 年)で実施され、さらに CREST(2005-2010 年)で電極構造の微細化研究に継続している。

### 3.2.3. 多体電子系の励起状態の学理と光機能

本プロジェクトの集団の量子現象を物質系に発現するというテーマ、すなわち、「電子正孔系の量子相関効果と非線形光学応答」、「強相関電子系の分光学と光制御機能の探索」、「微小光学素子の為の光波操作法の研究」については、この中から研究テーマを抽出し、集中化して、総括責任者の五神が JST の SORST(2002-2007)「電子系の多体量子相関とその光制御機能」で実施した。そのテーマと展開は以下の通りである。

#### (1) 励起子ボース凝縮相の実証に向けた研究の進展

<sup>25</sup> 文献リスト No.23、No.24



1960年代励起子がボース凝縮するとの予言がなされ、1970年代にはレーザー励起による高密度励起現象が観測され、電子正孔プラズマや電子正孔液滴の観測等が行われたが、励起子あるいは励起子分子のボース凝縮の実現については否定的であった。1980年代から90年代にかけて、時間分解分光法の発展により、電子正孔の励起後の時間変化を観測できるようになった。さらに酸化物高温超伝導体の発見や励起子超流動の観測を主張する論文などにより、2000年以降多体量子系の物理学としてリバイバルした。このように励起子 BEC は光物性・物性物理学の40年来の懸案であるといえ、現代的な解決を求められている。

SORST の中で亜酸化銅(Cu<sub>2</sub>O)を取り上げ、励起子 BEC に向けて研究を進めた。亜酸化銅には励起電子と正孔のスピンの反並行のオルソ励起子と並行のパラの励起子があり、パラ励起子は禁制遷移のため、通常オルソ励起子が励起される。オルソ励起子はその密度を上げて行くと、オルソ励起子から

パラ励起子への転換による消失が起こり、BEC にはならないことが知られていた。

一方、スピン禁制である 1s パラ励起子は、非常に長い寿

命を持つ。パラ励起子のボース凝縮を示唆する実験がこれまで行われ、励起子ボース凝縮の有力候補として注目されてきた。しかし、パラ励起子はスピン禁制のためその発光スペクトル強度が小さく、直接的な観測が難しく励起子 BEC の検証の決め手に欠いていた。本プロジェクトは、時間分解ライマン系列の分光法(励起子ライマン分光法)を開発し<sup>26</sup>(図4)、パラ励起子の直接観測を可能にした。この分光法では、光励起によって作られた 1s 励起子を 1s 状態から 2p 状態へ遷移させ、その誘導吸収スペクトルから励起子の密度と分布関数を決定する。オルソ励起子とパラ励起子を分離して観測できるのみでなく、その時間的な変化を追うことができる。さらに、炭酸ガスレーザーによる中赤外領域の透過率変化によるライマン系列の測定からパラ励起子の波動関数を導き、その有効質量を決定すると共にマイクロ秒の寿命を観測した<sup>27</sup>。

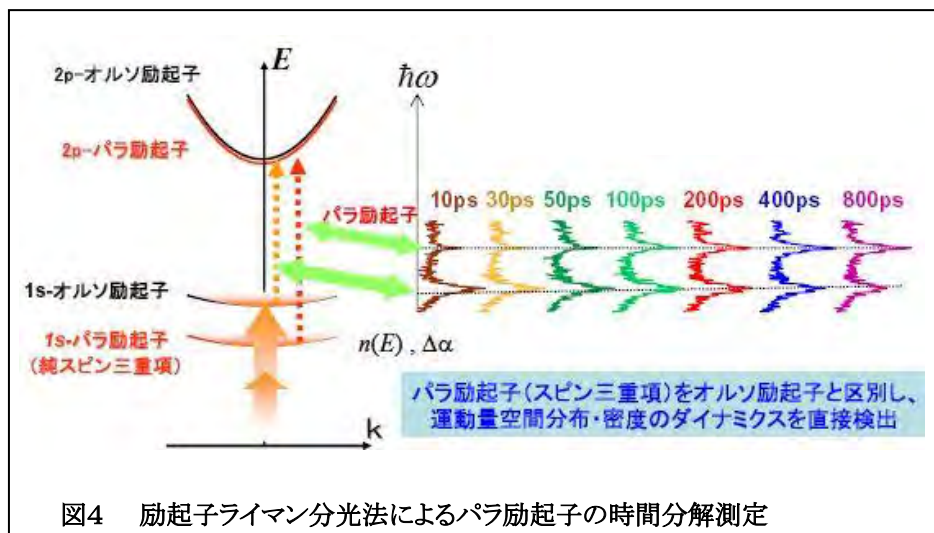


図4 励起子ライマン分光法によるパラ励起子の時間分解測定

<sup>26</sup> 文献リスト No.25、No.26

<sup>27</sup> 文献リスト No.26

励起子のボース凝縮の実現にはその寿命の間に、低温でかつ高密度の励起子を蓄積する必要がある。励起子 BEC の可能性について否定的な説としては、一つは励起子 2 個の非弾性衝突 (Auger 再結合) の断面積が非常に大きいため、オルソ 1s 励起子の密度を上げると Auger 再結合により粒子数の急激な減少と急激な加熱が起こり、パラ励起子の蓄積が不可能であるとする説であり、もう一つはフォノンを仲介とするオルソ励起子からパラ励起子の変換効率が低く、パラ励起子が充分蓄積できないという説であった。一方、励起子 BEC を支持する実験として、励起子の超流動を示唆する実験結果が報告されていた。

このような状況において、超短パルスを使った共鳴二光子吸収によって熱の発生を抑制した位相空間圧縮法を開発した(図5)<sup>28</sup>。バンドギャップの半分のエネルギーを持つ光子を照射すると、励起子は共鳴的に二光子励起され、光子のエネルギーと運動量が保存されるため狭いエネルギー範囲と狭い運動量(波数)範囲、すなわち狭い位相空間に多数の励起子が効率よく励起されることがこの手法の特長である。

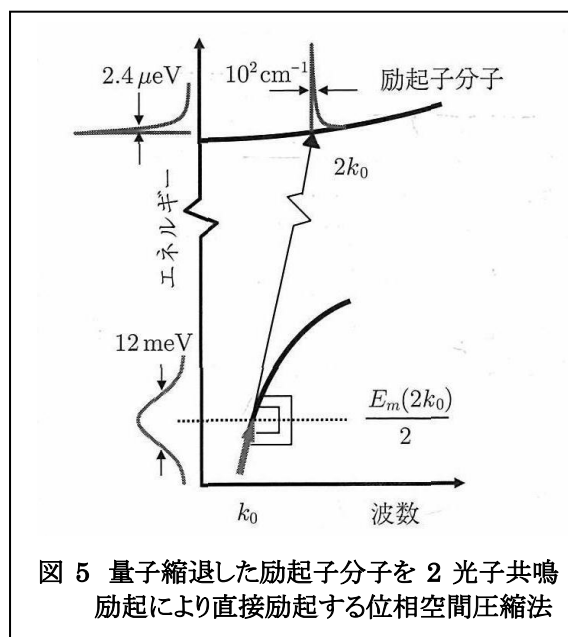


図 5 量子縮退した励起子分子を 2 光子共鳴励起により直接励起する位相空間圧縮法

この手法によって励起されたオルソ励起子が光子温度より低温の過冷却状態にあること、低温のオルソ励起子が衝突によって高効率にパラ励起子に転換すること、この転換効率は Auger 効果による損失を上回ることを確認した<sup>29</sup>。その結果、パラ励起子の BEC 実現の否定的な見方を覆し、実現の可能性を示した。

前述の位相空間圧縮法による低温・高密度のパラ励起子の生成技術とヘリウム3による冷却 (0.3 度 K)、さらに結晶に与えた歪み部分に励起子がトラップされる性質を利用した歪トラップ技術<sup>30</sup>、および 1s 状態から 2p 状態への遷移光を与えたとき生じるシュタルクシフトを利用した光トラップ技術等の励起子の拡散を防ぐ技術を合わせて、近い将来パラ励起子の BEC 実現が期待できる段階に到達した。

## (2) 低温励起子・励起子分子系のコヒーレント制御とその応用

<sup>28</sup> 文献リスト No.12

<sup>29</sup> 文献リスト No.27

<sup>30</sup> Naka, N et al, Phys. Rev. B70, 155205, (2004)

(この研究を行った中嶋子(現京大准教授)はその後五神研究室の特任講師として研究に参画した。)

フェムト秒レーザーを使った上記の位相空間圧縮法によって、BEC 凝縮で自発的に作り出される状態(すなわち多数の励起子が位相空間の同じ単位セルに存在する状態)と同様の状態を瞬時に作り出した。この技術はコヒーレント制御や非古典光の発生など量子情報処理に必須の技術に利用できる。

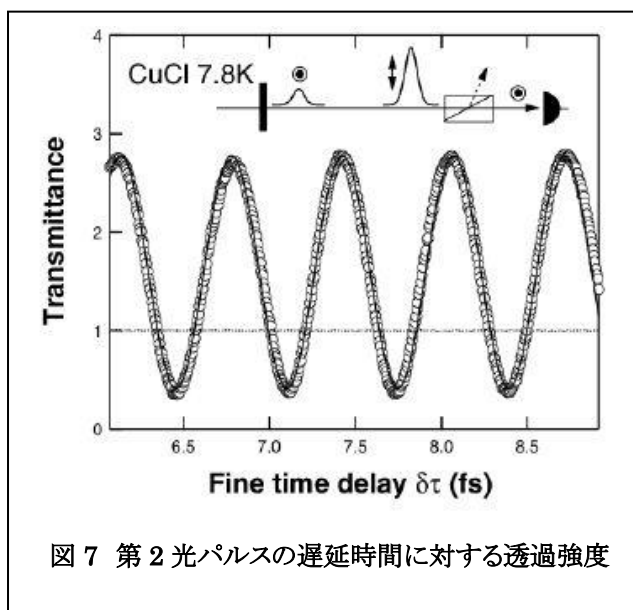
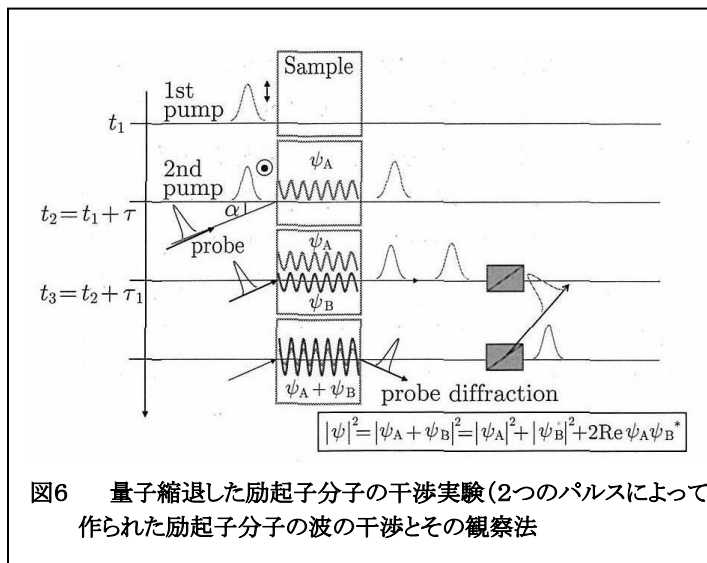
励起子分子の束縛エネルギーが大きい亜塩化銅 (CuCl) においては、2

光子共鳴励起により励起子分子が、位相空間の単位セルあたり  $4 \times 10^6$  以上の非常に高い密度で生成される。入射した超短パルス光がピコ秒程度で通り抜けた後、励起子分子の集団波が数十ピコ秒停留することが確かめられた。

この停留する励起子分子波は高いコヒーレンスを持つことが次のようにして実証された。すなわち、わずかに遅れて入射させた第 2 の超短パルス光による励起子分子波と干渉し、これら 2 つの励起子分子波の合成波の振幅は 2 つのパルスの

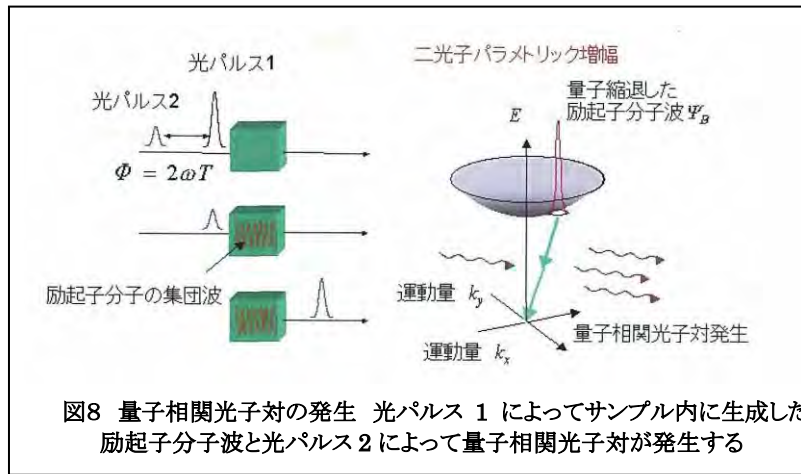
間隔を変えることで制御できる(コヒーレント制御: 図 6)。合成波の振幅が第 1 と第 2 の超短パルスポンプ光の間の遅延時間  $\tau$  によって正弦的に変化する現象を、第 3 のパルスを入射してその 4 波混合信号から見いだした(図 6,)。

光のコヒーレンスを持つ励起子分子波は光とパラメトリックな相互作用をするため、高効率パラメトリック増幅媒体としての応用が可能である。2 光子共鳴励起によって生成した強い励起子分子波の存在の下で、新たな超短パルス光を入射すると、励起子分子波との相対的な位相に応じて透過光に増幅減衰が起こる(図 7)。このとき 2 光子共鳴励起のパルスとはほぼ同じエネルギー光を入射させると、量子相関光子対を放射することができ、高効率量子相関光子対発生源となることが示された



(図 8)<sup>31</sup>、

この手法は亜酸化銅 ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) の1sオルソ励起子にも適用された。すなわち、ピコ秒パルス光源を用いて、位相空間圧縮法により、2光子許容のオルソ励起子を生成した。この場合も励起子分子波と同様に、ダブルパルス法によって励起子波の干渉を明瞭



に実証できた。レーザー光の 2光子コヒーレンスを250ピコ秒という長時間にわたり保持できることを見いだした<sup>32</sup>。

また、共鳴二光子励起も強励起すると、3光子の励起も起こることが分かった。3光子励起は熱い励起子を生成し、位相空間圧縮法の特性を損なう。3光子励起は時間領域でのパルス尖頭値を下げればバンド間の遷移確率が小さくなり、抑制できることが分かった。このことを実現するために、励起パルスの位相を $\pi$ だけ移相した $\pi$ ステップパルスを使うと、2光子励起の効率を変えずに、3光子励起を抑制するという技術を開発した<sup>33</sup>。

### (3) 電子系の多体相関と光制御

① 五神プロジェクトにおいて、一次元強相関電子系の巨大非線形応答がストロンチウムの銅酸化物  $\text{Sr}_2\text{CuO}_3$  の単結晶で見いだされた<sup>34</sup>。非線形材料として有名なポリジアセチレンは有機一次元ポリマーとして類似の電子構造を持っている。加工性や各種デバイス化が容易なことからこの材料のオリゴマーを作成する研究を行い、波長 755nm のフェムト秒レーザーを 10 秒間照射することにより、長いポリマー鎖を正確に切断し、分子量分布の狭い、モノマー単位が同じ6量体を得ることができた<sup>35</sup>。光導波路や微小球への応用が見込まれる。

② 多体の電子相関によって電荷や分極の自由度と磁性が強く結合する例として、磁性半導体に

<sup>31</sup> 文献リスト No.28

<sup>32</sup> 文献リスト No.29

<sup>33</sup> 文献リスト No.30

<sup>34</sup> 文献リスト No.31

注目し、その磁性の超高速ダイナミクスや光による磁性の制御の研究を進めた。強磁性半導体ガリウムマンガンヒ素 (GaMnAs) に磁場を与えつつ光パルス照射するとテラヘルツ領域の電磁波が放射されることを見いだした。放射されるテラヘルツ波の波形は与えた外部磁場の微小変化 (ミリテスラ) によって敏感に変化する。そのメカニズムを解明した<sup>36</sup>。また、中赤外領域での時間分解分光法と時間分解磁気光学分光法を組み合わせることにより、磁性半導体 GaMnAs において磁化消失に起因した吸収率変化を観測し、系の強磁性が磁気ポーラロンを媒介として発現していることを示唆するものであることを示した<sup>37</sup>。

### 3.2.4. 微小エネルギー (テラヘルツ) 領域の分光技術開拓

強相関物質に特徴的な低エネルギー領域の分光を目指して、テラヘルツの分光計測技術を開拓した。テラヘルツ電磁波パルスを用いた反射型偏光解析法を開発し、非接触でホール効果の測定ができた。偏光の検出感度は約  $3 \times 10^{-4}$  ラジアン (0.02 度) と世界最高の感度を得た<sup>38</sup>。

また、テラヘルツパルス波の時間領域における反射測定におい

て、測定する試料と基準となる参照試料の相対的な位置のずれが、反射パルス波の応答関数の位相に系統的な成分として現れることに着目した。試料での物理現象に伴うインパルス応答の波形が満たすべき普遍的な条件に注目し、この系統的な成分を試料の誘電応答から分離するアルゴリズムを開発した<sup>39</sup>。またこのアルゴリズムを用いて半導体試料における反射測定の結果を解析し、試料の相対位置を評価した。更にこのアルゴリズムをイメージング測定に応用し、不均一試料において表面形状と物質分布を同時に測定するイメージング測定手法を開発した<sup>40</sup>。図9の左図が磁気光学効果によるホール効果の測定を示し、右図がテラヘルツ反射波の位相変化による表面形状測定の原理を示している。

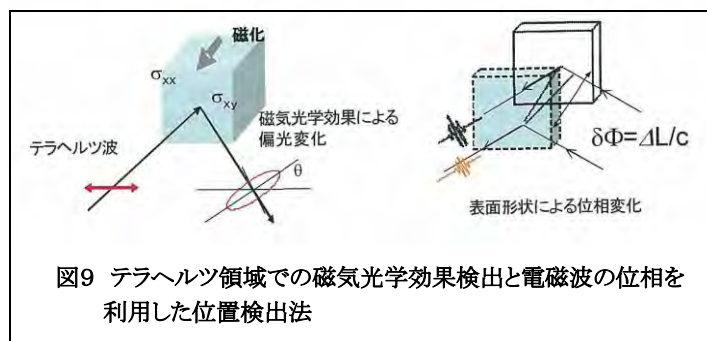


図9 テラヘルツ領域での磁気光学効果検出と電磁波の位相を利用した位置検出法

<sup>35</sup> 文献リスト No.32

<sup>36</sup> 文献リスト No.33

<sup>37</sup> Physical Review B (印刷中)

<sup>38</sup> 文献リスト No.16

<sup>39</sup> 文献リスト No.34

<sup>40</sup> 文献リスト No.35

### 3.2.5. 微小領域における光波制御

高度な光技術をナノテクノロジーやそれを用いた量子情報とつなぐためには、波長以下のスケールで光学応答を制御する技術が必要となる。その目的のために「連結共振器導波路」が提案されているが、現在の技術精度では実現は困難である。そこで本研究ではサイズ制御されたポリマー微小球共振器の連結構造の導波路構造に注目した。微小球に入射した光は球の外径に沿って周回するモード (Whispering Gallery Mode: WGM と呼ぶ) によって伝搬するが、図 10 に示すように、伝搬する光は限られた波長の光だけになる。複数の微小球を 1 列に並べ、点で接触させた連結微小球では共鳴的に伝搬する、フォトニックバンドと呼ばれるモードに分裂する。サイズを 0.05% の精度で選別した直径 4 ミクロンから 5 ミクロンの誘電体 (ポリスチレン) 微小球を一列に並べた連結微小球を作成し、共鳴散乱による連結球導波モードを観測した。その結果、7 個の連結球内を伝搬する特定の光で、その伝搬速度が真空中の 1/40 と遅くなること

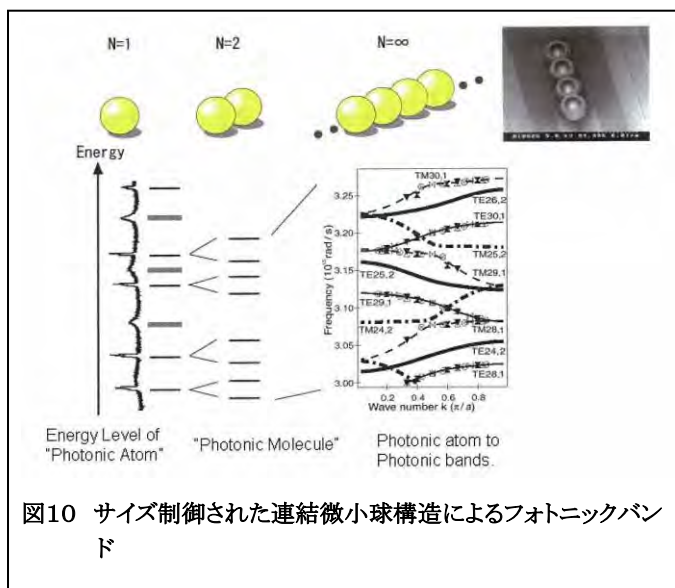


図10 サイズ制御された連結微小球構造によるフォトニックバンド

が分かった<sup>41</sup>。0.05% (5ミクロンで 2nm) の精度を得るために、微小球からの蛍光スペクトルの観測によって選別する新しい技術を開発したことが、連結微小球の導波モードの実現につながった。

近年、周期構造体の単位構造にカイラリティ(系の秩序構造が局所的に「右手系」か「左手系」かを表す量)を持った構造を用いることにより、光の透過率や偏光が変化する可能性が注目されている。CREST 研究領域「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」(2006-2011)において、「時空間モルフォロジーの制御による能動メゾ光学」のテーマで、人工キラル周期構造体の様々な光学特性を調べ、透過率・偏光に異常が生じる原因の解明を目指している。その中で、単位構造にカイラリティを有する金属薄膜キラルナノ格子が巨大旋光性を発現することを見だした。また、シリカの基板上に金属の薄膜で光の波長より小さい左向きに円を作る大きな左向きの旋光性を示した。旋光性の大きさは 10,000 度/mm に達する<sup>42</sup>。このように空間的に隔たった 2 つの面とねじれた方向の電場、形状のカイラリティによって旋光性を発現することは、光と表面プラズモンの相互作用に

<sup>41</sup> 文献リスト No.36

<sup>42</sup> 文献リスト No.37

よって説明されることを見出した<sup>43</sup>。この技術によって、良い旋光素子が無かったテラヘルツ領域の電磁波に対して旋光操作ができるようになった。

#### 4. 研究成果から生み出された科学技術的、社会的、経済的な効果・効用及び波及効果

##### 4.1. 科学技術の進歩に貢献する成果

###### 4.1.1. 光格子時計の開発

光格子時計は光時計の主流となる方式となり、不確かさ  $10^{-18}$  に向けて現在最も有望な方式となっている。本プロジェクトはその流れを創り出した。光格子時計のさらなる高精度化と時間標準実現への取り組みが日本のみならず、米国 (GILA、NIST) やフランス (SYRTE)、英国 (NPL)、ロシア、韓国等の時間標準の研究機関や大学で行われ、激しい競争になっている。

論文数も香取の 2001 年の提案以来、急速に増加している。「香取氏の業績は、独創性、基礎応用両面での波及効果、他の研究グループに与えたインパクトどれをとっても原子物理学、量子エレクトロニクス、極限物理計測の分野でここ 10 数年間の成果として世界的なレベルで傑出している」との評もある(日本 IBM 科学賞受賞理由から)。

###### 4.1.2. 励起子 BEC の実現に向けた研究

励起子の BEC 実現はその可否を含めて、40 年来の懸案であった。亜酸化銅 ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) のパラ・オルソ 2 種類の励起子について BEC の可能性を追求する過程で、励起子ライマン分光法を開発してパラ励起子を直接定量検出することを可能にし、オルソ励起子からパラ励起子への変換のメカニズムを明らかにした。このことは固体励起子 BEC の可能性についての大きな疑念を取り払い、その実現への方針を明らかにしただけでなく、BEC 実現の際の直接的検証に不可欠の手段を与えた。また、パラ励起子はその寿命の間に、低温のまま直接生成し、高密度で蓄積するために、共鳴 2 光子パルス励起による位相空間圧縮法を開発し、さらに励起子の拡散を防ぐ技術として光トラップや歪みトラップを適用した。このように、本研究グループは着実に困難を一つずつ解決することによって、励起子 BEC の実現に後一步のところまでに迫っている。

---

<sup>43</sup> 文献リスト No.38

#### 4.1.3. 励起子分子波によるパラメトリック増幅機能

位相空間圧縮法では、亜塩化銅(CuCl)に対する超短パルス光の2光子励起によって、光源の周波数広がりに対して狭い分布の励起子分子が瞬時に生成されることが見いだされた。これはボース縮退したコヒーレントな励起子分子を直接励起する方法であり、この手法を用いて2つのパルスで独立に励起した励起子分子波が干渉することを示した。さらにこのように量子縮退した励起子分子波は、光との相互作用において高効率の2光子パラメトリック増幅機能を示すことを実証した。この事実に基づいた量子相関(エンタングル)光子発生の実証が行われている<sup>44</sup>。固体の協同励起現象の具体的な展開例と位置付けられる。同じ手法は亜酸化銅(Cu<sub>2</sub>O)の1sオルソ励起子にも適用された。

#### 4.1.4. 励起子ポラリトンの相互作用に関する精密な理論展開

本プロジェクトの成果として、多体の励起子を扱う上で最も単純な構成である2つの励起子を、2つのボソンとして扱うモデルによって、光共振器中の半導体における励起子ポラリトンの相互作用を縮退4光波混合法の実験結果を通して説明した。その後、さらに励起子を二つのフェルミオン、すなわちフェルミオンの4体問題として励起子間の相互作用を扱う微視的で厳密な理論を展開し、クーロン力を無限項まで取り込んだ散乱行列(T行列)の対角化に成功し、実験結果とのたいへん良い一致をみた。本プロジェクトの終了後、得られた散乱行列の結果を使った研究がアリゾナ大学で継続して行われたばかりでなく、ドイツやイタリアからも同様な理論による論文が発表された。

共振器ポラリトンは半導体微小光共振器中での強い励起子-光子結合状態が作り出す新しい量子状態である。近年特にこの共振器ポラリトン密度が十分小さいときに現れるボース粒子性に興味が集まっている。この性質を利用するとポラリトンレーザと呼ばれるような閾値の無い(反転分布を必要としない)レーザ等、全く新しい光デバイスへの応用が可能となると言われており、研究が盛んになりつつある<sup>45</sup>。また、励起子ポラリトンによってBEC状態が起こったという報告が最近発表された<sup>46</sup>。

このように注目される励起子ポラリトンの相互作用について、理論展開の方向性を示した点で今

<sup>44</sup> Edamatsu, K., et al., Nature 431, 167-170, 2004

<sup>45</sup> 4.3.2のキーワード検索の結果参照

<sup>46</sup> Lai, C.W., et al., Nature 450, 529-532, 2007



後、重要性を増すと考えられる。

#### 4.1.5. 微小球やテラヘルツ技術等の応用研究

サイズの揃った微小球を連結した連結微小球は特定の波長に対して、光の群速度を 1/40 に減速させ、光メモリーや光スイッチ、光の情報バッファ等の応用が期待されている。現在、微小球の研究は北海道大学、名古屋大学等、様々な大学で進められている。

テラヘルツ波が注目されており、テラヘルツ波の発生、受信やその分光学への利用等多方面で開発が進んでいる。本研究の中でも、強相関物質に特徴的な低エネルギー領域の分光を目指したテラヘルツ電磁波パルスを用いた反射型偏光解析法を開発し、非接触でホール効果を測定する技術を実現した。偏光の検出感度は 0.02 度と世界最高の感度を得た。さらに、時間領域の反射測定において、試料と参照試料の相対的な位置のずれが、測定した応答関数の位相に系統的な成分として現れることを使って、イメージング測定法を開発した。

テラヘルツ領域の光学素子も開発した。絶縁基板上に金属の薄膜で光の波長より小さい左向き円を作ると左向きの旋光性を示した。旋光性の大きさは 10,000 度/mm に達した。

## 4.2. 社会的、経済的な効果・効用及び波及効果

### 4.2.1. プロジェクト成果から期待される技術革新・イノベーション

光格子時計は現在、1 秒で 14 桁の精度、100 秒で 15 桁の精度が実現している。1 秒で 16 桁が実現できれば数時間かければ 18 桁の精度の測定が出来る。理論的な限界精度は  $10^{-18}$  と考えられている。この精度の測定が実現すれば、大きな応用上の成果が期待できる。現在予想されている応用は次の通りである<sup>47</sup>。実際に高精度の時計が実現された時はさらに様々な応用が広がる事が期待される。

- (1) GPS の高精度化により GPS を使った飛行機の自動着陸が可能になる。また、宇宙空間における探査衛星のトラッキング(追跡)に有効。

---

<sup>47</sup> Gill P, et al., Physics World, May 4, 2005

- (2) 2つの大陸を光ファイバあるいは衛星で結んで、周波数を伝送しようとする、 $10^{-18}$ 位の精度では大陸移動に伴うドップラーシフトが見える。その結果、高精度光格子時計の周波数のドップラーシフトを観測すれば、リアルタイムで大陸の移動速度が、速度から距離が測定可能になる。
- (3) 物理定数の恒常性の検証。例えば、微細構造定数  $\alpha$  (電磁相互作用の強度を決めている定数) が本当に定数かどうか疑われており、宇宙の経過時間と共に変化していると予想している観測もある。各種定数の非恒常性が実証されると、宇宙論や統一理論に重要な結果を与える。
- (4) 相対論の測定。日常的な速度で相対論的な効果が検証できる。
- (5) 重力の測定。1cmの高さの重力差が光の周波数に影響する。そのため重力の場所による違いと変化が高精度に測定でき、地殻変動を検知できる。その結果、地震予知に繋がる可能性がある。同じように地殻の変化から地下資源の探査に使える可能性がある。

#### 4.2.2. 大学や研究機関などで行われているプロジェクト成果の応用に向けた取り組み

- 本プロジェクトの香取の研究はJSTの「さきがけ」研究(2002-2005)として、原子チップの研究へと発展した。強い電場にトラップされた冷却原子を電子のように情報の担い手として使う研究を推進した。
- さらに、JSTのCREST(2005-2010)に取り上げられ、光格子時計の展開として、ストロンチウム以外の原子(水銀やイットリビウム)との比較による精度向上や物理定数の研究を行っている。
- 光格子時計の高精度化に向けて産総研と東大の香取研が共同研究を行っている。
- 産総研、東大・香取研、電通大レーザー研との共同研究により、産総研のつくば市と香取研の本郷を結ぶ光ファイバリンクの研究も行っている。これは将来の高精度の光時計を光ファイバで配信する時間標準ネットワークを目的としており、 $10^{-15}$ の安定度、100Kmの伝送距離を実現した。
- 通総研でも光格子時計の高精度化に向けた研究を行っている。五神プロジェクトの研究者であった井戸と李が主任研究者として参加している。
- 2008年8月より、10年間の予定でスタートした文科省の「最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラム」の中の課題「先端光量子科学アライアンス」(参加機関: 東京大学、理化学研究所、電気通信大学、慶応大学、東京工業大学、および産総研)は、ネットワーク拠点を

形成して光科学の基盤的研究を行い、その中で産学に向けた人材を育成してグローバルな競争における競争力強化を図るとの構想で提案された。東京大学はその幹事機関であり五神が拠点リーダーである。この中でも、光格子時計の研究と超標準光源のファイバー網による配信実証実験の準備研究をサポートすることが計画されている。

#### 4.3. 統計資料に見た科学技術へのインパクト

##### 4.3.1. 代表的論文と被引用件数の年次推移

図 11 は主要論文(番号は表4の文献リスト中の番号)の被引用件数の年次推移である。本プロジェクトから 5 年から 10 年が経過しているにもかかわらず、代表的論文の殆どにおいて今なお引用件数が増加している。これは本研究が基礎的で重要な成果を挙げたことを示しているように思われる。

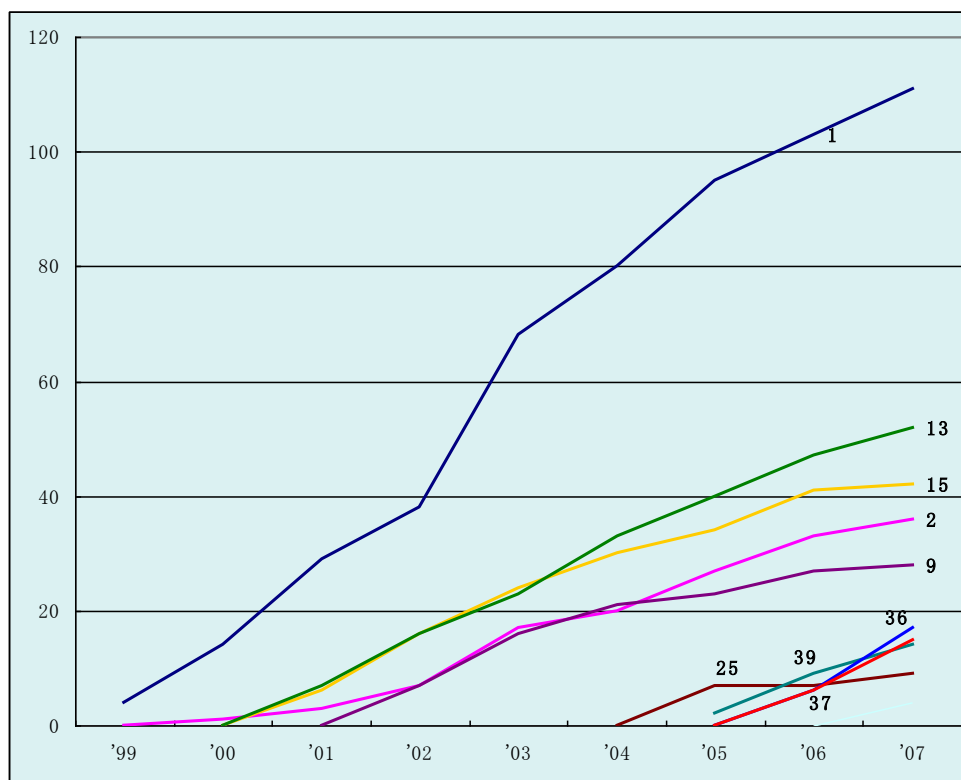


図 11 主要論文の被引用件数年次推移(2008年2月29日検索)

#### 4.3.2. 当該分野における研究の拡大(キーワード検索の結果)

キーワード“光格子時計”、“Optical Lattice Clock”の検索では 40 件が検出されたが、その中 36 件に香取の論文が引用されていた。また、香取の造語である“魔法波長”、“Magic Wavelength”は 16 件検出され、12 件で引用されていた。引用されていなかった 4 件も内容は香取の概念と同じであった。これら香取の造語はこの分野では一般的になりつつあると云える。

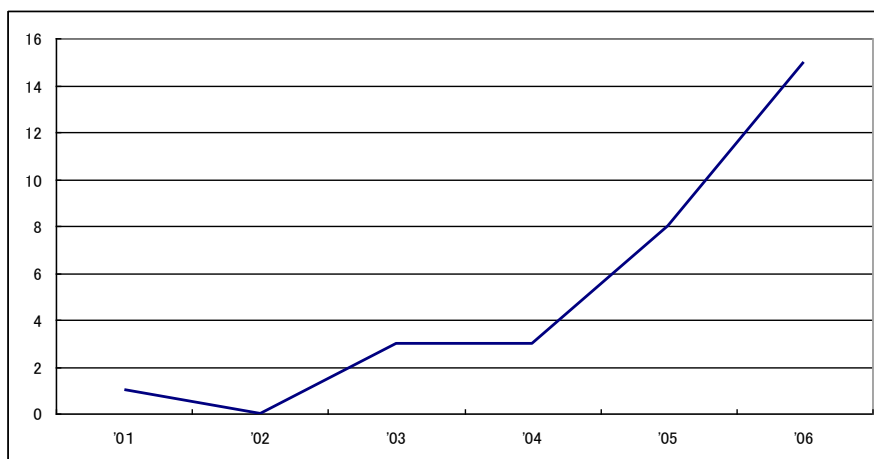


図 12 Optical Lattice Clock をキーワードとしている論文数の年次発表推移  
web of science で検索 (2008/2/26 検索)

励起子と BEC の組み合わせによるキーワード検索の結果、1996 年頃から急激に論文数が増加している。励起子の BEC が近年注目されていることが分かる。

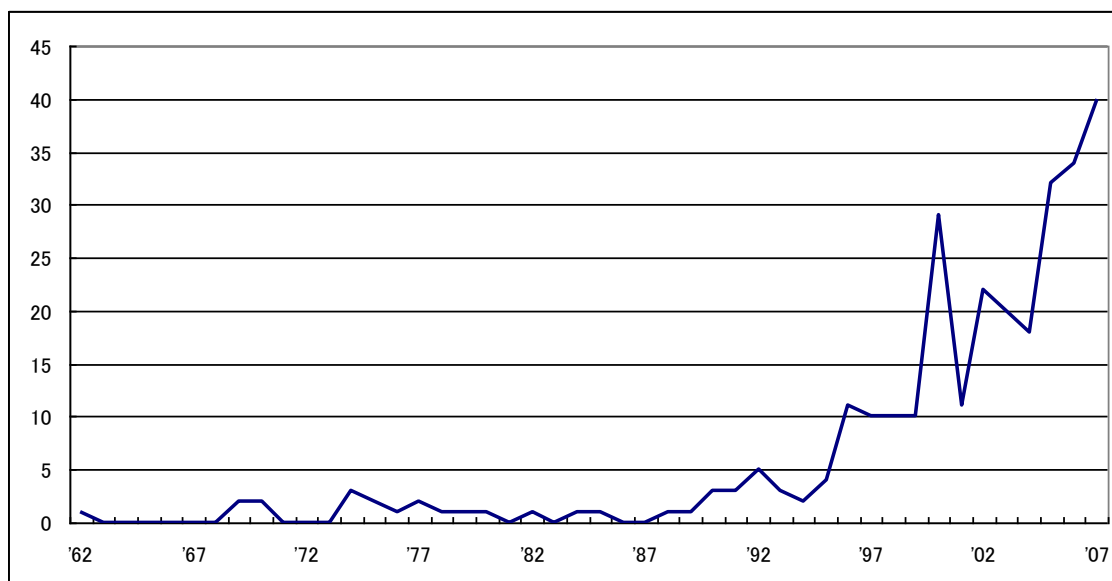


図 13 exiton(s) and (“bose einstein condensation” or BEC)を web of science で検索 (2008/2/29)

#### 4.3.3. 主な受賞

表 2 受賞リスト

受賞年	受賞者	名称	授与機関
2001	五神 真	日本 IBM 科学賞	日本 IBM
2001	香取秀俊	日本物理学会 第 6 回論文賞	日本物理学会
2001	香取秀俊	丸文研究奨励賞	財団法人 丸文研究交流財団
2005	香取秀俊	European Frequency and Time Award	European Frequency and Time Forum
2005	香取秀俊	第 1 回日本学術振興会賞	日本学術振興会
2005	香取秀俊	Julius Springer Prize	シュプリンガー
2006	香取秀俊	日本 IBM 科学賞	日本 IBM
2007	井戸哲也	日本物理学会 若手奨励賞	(社)日本物理学会
2008	香取秀俊	ラビ賞	IEEE
2008	井戸哲也	平成 20 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞	文部科学省

#### 4.4. 人材育成から見た参加研究員の活動状況

本プロジェクトの大きな特長は、参加研究員がプロジェクト後に活躍していることである。成果が認められ香取はJSTの2つの研究ファンド(「さきがけ」とCREST)を続けて得ているばかりでなく、光格子時計の開発に対して各種の賞を受賞している。香取以外にも、芦田、井戸、島野<sup>48</sup>、永井、青木<sup>49</sup>の5氏が競争的な資金である、JSTの「さきがけ」研究ファンドを得ている。同一プロジェクトの参加研究員(または関係者)がプロジェクト後に難関で知られる「さきがけ」ファンドを6人も得ていることは希有のことである。

##### 4.4.1. 参加研究員の動静

表3は参加研究員の現職を所属種類別にまとめたもので(但し、当初から教授職にあった理論設計グループのグループリーダーは除く)、プロジェクト終了後、多くは大学あるいは研究機関などに適職を得て活躍している。このことは本プロジェクトが人材育成上大きな役割を果たしたことを示す。これは総括責任者が卓越したリーダーシップを持ち、優れた教育者であるためと考えられる。人材育成は総括責任者のプロジェクト運営上の重要な幹であって、それが実際に実ったものと言える。

表3 参加研究員の活動状況

所 属	人 数	内 訳
大学	16名	教授3名、准教授6名、講師1名、助教3名、リサーチフェロー2名、その他1名
独立法人研究機関	3名	主任研究員2名、研究員1名
JST 専任研究員	1名	さきがけ研究員1名
企業	4名	研究員4名

<sup>48</sup> ERATO のメンバーではなかったが、同時期の五神研究室の助手としてプロジェクトに協力

<sup>49</sup> ERATO プロジェクトには非常勤補佐員として参加

#### 4.4.2. 参加研究員のファンド獲得状況

1. 五神 真: SORST「電子系の多体量子相関とその光制御機能」(研究代表者、2002-2007)
2. 五神 真: CREST「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」研究領域の課題「時空間モルフロジーの制御による能動メゾ光学」(研究代表者、2006-2011)
3. 香取秀俊: さきがけ「光と制御」研究領域の課題「シュタルクアトムチップによるコヒーレント原子操作」(研究者、2002-2005)
4. 香取秀俊: CREST「量子情報処理システムの実現を目指した新技術の創出」研究領域の課題「極低温原子を用いる量子計測法の開拓」(研究代表者、2005-2010)
5. 芦田昌明: さきがけ「光の創成・操作と展開」研究領域の課題「光伝導アンテナによる光電場の直接検出」(研究者、2005-2008)
6. 井戸哲也: さきがけ「光の創成・操作と展開」研究領域の課題「位相コヒーレント真空紫外パルスによる精密原子分光」(研究者、2005-2008)
7. 島野 亮: さきがけ「構造機能と計測分析」研究領域の課題「高感度テラヘルツ光学活性計測技術の開発」(研究者、2004-2007)
8. 大川和宏: ERATO「中村不均一結晶プロジェクト」(グループリーダー、2002-2006)
9. 永井正也: さきがけ「光の創成・操作と展開」研究領域の課題「テラヘルツ電磁波による高速電子スピン操作」(研究者、2007-2010)
10. 青木隆朗: さきがけ「光の創成・操作と展開」研究領域の課題「キャビティ QED による原子と光子の量子操作」(研究者、2006-2009)

#### 4.4.3. 学位取得

小笠原 剛	1999 年 「遷移金属酸化物における光誘起過渡光学現象」
永井 正也	2001 年 「半導体における高密度光励起キャリアの超高速分光」
青木 隆朗	2001 年 「半導体における励起子間相互作用と非線形光学応答の研究」
向山 敬	2002 年 「ストロンチウム・フェルミ同位体のレーザー冷却、トラッピングに関する研究」
小嶋 映二	2004 年 「超高速時間分解分光法によるキャリア媒介強磁性体の研究」

## 5. 参考資料

### 5.1. 本文中引用されたプロジェクト関連の文献リスト

表4

No.	書誌事項
1	Katori H, Ido T, Isoya Y, Kuwata-Gonokami M Magneto-optical trapping and cooling of strontium atoms down to the photon recoil temperature Phys Rev Lett, 82, 1116-1119, 1999
2	Katori H, Ido T, Kuwata-Gonokami M Optimal design of dipole potentials for efficient loading of Sr atoms J Phys Soc Jpn, 68, 2479-2482, 1999
3	Ido T, Isoya Y, Katori H Optical-dipole trapping of Sr atoms at a high phase-space density Phys Rev A, 61, 061403, 2000
4	Katori H, Spectroscopy of strontium atoms in the Lamb-Dicke confinement Proceedings of the 6th Symposium on Frequency Standards and Metrology, University of St. Andrews, Scotland, 9~14 September 2001, (ed. Gill P), pp.323-330 (World Scientific Publishing Co., 2002)
5	Mukaiyama T, Katori H, Ido T, Li Y, Kuwata-Gonokami M Recoil-Limited laserCooling of 87Sr Atoms near the Fermi Temperature Phys Rev Lett, 90, 113002, 2003
6	Ido T, Kuwata-Gonokami M, Katori H Sideband cooling and spectroscopy of strontium atoms in the Lamb-Dicke confinement. Proc. XV international conference on laser spectroscopy, edited by Chu S, et al., (World Scientific Publishing Co., Singapore, 2002) pp.337-340.
7	Svirko Yu P, Shirane M, Suzuura H, Kuwata-Gonokami M Four-wave mixing theory at the excitonic resonance: weakly interacting boson model J Phys Soc Jpn, 68, 674-682, 1999
8	Svirko Yu P, Kuwata-Gonokami M Signatures of the excitonic memory effects infour-wave mixing processes in cavity polaritons Phys Rev B, 62, 6912-6915, 2000



9	Kwong N H, Takayama R, Romyantsev I, Kuwata-Gonokami M, Binder R Evidence of nonperturbative continuum correlations in two-dimensional exciton systems in semiconductor microcavities Phys Rev Lett, 87, 027402, 2001
10	Nagai M, Kuwata-Gonokami M Electron-hole droplet formation in direct-gap semiconductors observed by mid-infrared pump-probe spectroscopy Phys Rev Lett, 86, 5795-5798, 2001
11	Shimano R, Nagai M, Horiuchi K, Kuwata-Gonokami M Formation of a high Tc electron-hole liquid in diamond Phys Rev Lett, 88, 057404, 2002
12	Kuwata-Gonokami M, Shimano R, Mysyrowicz A Phase-coherent manipulation of cold biexcitonic waves J Phys Soc Jpn, 71, 1257 -1260, 2002
13	Ogasawara T, Ashida M, Motoyama N, Eisaki H, Uchida S, Tokura Y, Ghosh H, Shukla A, Mazumdar S, Kuwata-Gonokami M Ultrafast optical nonlinearity in the quasi-one-dimensional Mott insulator Sr <sub>2</sub> CuO <sub>3</sub> Phys Rev Lett, 85, 2204-2207, 2000
14	Ashida M, Taguchi Y, Tokura Y, Clay R T, Mazumdar S, Svirko Yu P, Kuwata-Gonokami M Dimensionality dependence of optical nonlinearity and relaxation dynamics in cuprates Europhys Lett, 58, 455-461, 2002
15	Kise T, Ogasawara T, Ashida M, Tomioka Y, Tokura Y, Kuwata-Gonokami M Ultrafast spin dynamics and critical behavior in half-metallic ferromagnet: Sr <sub>2</sub> FeMoO <sub>6</sub> Phys Rev Lett, 85, 1986-1989, 2000
16	Shimano R, Ino Y, Svirko Yu P, Kuwata-Gonokami M Terahertz frequency hall measurement by magneto-optical Kerr spectroscopy in InAs Appl Phys Lett, 81, 199-201, 2002
17	Mukaiyama T, Takeda K, Miyazaki H, Jimba Y, Kuwata-Gonokami M Tight-binding photonic molecule modes of resonant bispheres Phys Rev Lett, 82, 4623-4626, 1999

18	Peng X, Song F, Jiang S, Peyghambarian N, Kuwata-Gonokami M Fiber-taper-coupled L-band Er <sup>3</sup> -doped tellurite glass microsphere laser Appl Phys Lett, 82, 1497-1499, 2003
19	Ido T, Katori H Recoil-free spectroscopy of neutral Sr atoms in the Lamb-Dicke regime Phys Rev Lett, 91, 053001, 2003
20	Katori H, Takamoto M, Pal'chikov V G, Ovsiannikov V D Ultrastable optical clock with neutral atoms in an engineered light shift trap Phys Rev Lett, 91, 173005, 2003
21	Takamoto M, Katori H Spectroscopy of the 1S <sub>0</sub> -3P <sub>0</sub> clock transition of <sup>87</sup> Sr in an optical lattice Phys Rev Lett, 91, 223001-223004, 2003
22	Takamoto M, Hong F-L, Higashi R, Fujii Y, Imae M, Katori H Improved frequency measurement of a one-dimensional optical lattice clock with a spin-polarized fermionic <sup>87</sup> Sr isotope J Phys Soc Jpn, 75, 104302, 2006
23	Katori H, Akatsuka T Electric manipulation of spinless neutral atoms on a surface Jpn J Appl Phys, 43, 358-361, 2004
24	Kishimoto T, Hachisu H, Fijiki J, Nagato K, Yasuda M, Katori H Electrodynamic trapping of spinless neutral atoms with an atom chip Phys Rev Lett, 96, 123001, 2006
25	Kuwata-Gonokami M, Kubouchi M, Shimano R, Mysyrowicz A Time-resolved Excitonic Lyman Spectroscopy of Cu <sub>2</sub> O J Phys Soc Jpn, 73, 1065-1069, 2004
26	Yoshioka K, Ideguchi T, Kuwata-Gonokami M Laser-based continuous-wave excitonic Lyman spectroscopy in Cu <sub>2</sub> O Phys Rev B, 76, 033204, 2007
27	Nagai M, Shimano R, Horiuchi K, Kuwata-Gonokami M Phase diagram of the quantum degenerate electron-hole system in diamond Phys Status Solidi B, 238, 509-512, 2003

28	Shimano R, Svirko Yu P, Mysyrowicz A, Kuwata-Gonokami M Efficient Two-Photon Light Amplification by a Coherent Biexciton Wave Phys Rev Lett, 89, 233601, 2002
29	Yoshioka K, Kuwata-Gonokami M Two-photon coherent control of dark orthoexcitons in Cu <sub>2</sub> O Phys Status Solidi C, 3, 2465-2468, 2006
30	Ideguchi T, Yoshioka K, Mysyrowicz A, Kuwata-Gonokami M Coherent Quantum Control of Excitons at Ultracold and High Density in Cu <sub>2</sub> O with Phase Manipulated Pulses Phys Rev Lett, 100, 233001, 2008
31	Ashida M, Ogasawara T, Tokura Y, Uchida S, Mazumdar S, Kuwata-Gonokami M One-dimensional cuprate as a nonlinear optical material for ultrafast all-optical switching Appl Phys Lett, 78, 2831-2833, 2001
32	特許 3812942 名称: 「1, 4-ジ置換ジアセチレン重合体、及びその製造方法」 発明者: 竹田 研爾、五神 真
33	Heroux J B, Ino Y, Kuwata-Gonokami M, Hashimoto Y, Katsumoto S Terahertz radiation emission from GaMnAs Appl Phys Lett, 88, 221110, 2006
34	Lucarini V, Ino Y, Peiponen K-E, Kuwata-Gonokami M Detection and correction of the misplacement error in terahertz spectroscopy by application of singly subtractive Kramers-Kronig relations Phys Rev B, 72, 125107, 2005
35	Ino Y, Heroux JB, Mukaiyama T, Kuwata-Gonokami M Reflection-type pulsed terahertz imaging with a phase-retrieval algorithm Appl Phys Lett, 88, 041114, 2006
36	Hara Y, Mukaiyama T, Takeda K, Kuwata-Gonokami M Heavy photon states in photonic chains of resonantly coupled cavities with supermonodispersive microspheres Phys Rev Lett, 94, 203905-1-4, 2005

37	Kuwata-Gonokami M, Saito N, Ino Y, Kauranen M, Jefimovs K, Vallius T, Turunen J, Svirko Y Giant optical activity in quasi-two-dimensional planar nanostructures Phys Rev Lett, 95, 227401, 2005
38	Konishi K, Sugimoto T, Bai B, Svirko Y, Kuwata-Gonokami M Effect of surface plasmon resonance on the optical activity of chiral metal nanogratings Opt Express, 15, 9575-9583, 2007
39	Kubouchi M, Yoshioka K, Shimano R, Mysyrowicz A, Kuwata-Gonokami M Study of orthoexciton-to-paraexciton conversion in Cu2O by exciton Lyman spectroscopy Phys Rev Lett, 94, 016403-1-4, 2005

## 5.2. 光格子時計を取り巻く状況

1967年に地球の公転時間から、セシウム 133 の基底状態の超微細構造間マイクロ波遷移(約 9.2GHz)が1秒の定義になった。その後、ファウンテン型セシウム周波数標準が2005年において最も精度の高い時間標準と認められており、 $10^{-15}$ @ $10^5$ 秒の不確かさである。マイクロ波を基準とするため、高精度を実現するためには長時間の平均化が必要である。光はマイクロ波より約5桁高い周波数のため、光を使った高精度時間標準の研究が行われてきた。

一方、2000年頃にモードロックレーザーによる周波数コム技術が実用化された。この光コムと呼ばれる技術によって、光の周波数とマイクロ波を直接比較することが可能になった。セシウム 133 の原子時計と比較すれば、光の周波数を測定する「ものさし」ができたことになり、他の光時計の絶対周波数を決定できる。比較の精度は $10^{-18}$ ~ $10^{-19}$ が達成されている。

このような背景のもとに、2003年の第22回国際度量衡総会において「秒の再定義に関する検討を要請」する決議が行われた。さらに、光領域での周波数標準を扱ってきた「長さ諮問委員会(CCL)」と、秒の定義を扱ってきた「時間周波数諮問委員会(CCTF)」の合同でWGが結成され、「秒の2次的実現法(Secondary Representation of Second)」という名称で高い性能を有する標準器のリストを作成する作業が行われている。2006年の上記委員会でストロンチウム(Sr)原子の光格子時計が採択された。リストに挙げられているのは次の5つである。

1. ルビジウム原子のマイクロ波遷移 ... (セシウム 133 と同様なマイクロ波の超微細遷移)
2. ストロンチウムイオン光遷移 .... (2から4項はトラップされた1個のイオン光遷移)
3. 水銀イオン光遷移

4. イッテルビウムイオン光遷移
5. 中性ストロンチウム原子の光遷移 .....(光格子時計)

1項～4項は20年以上の研究の成果であるが、光格子時計は提案から5年、実証から3年しか経っていない全く新しい技術である。

光格子時計の原理は以下の通りである。

中性原子をレーザー冷却し、光格子レーザーによって作られた定在波中にトラップする。中性原子を光定在波の電場で強く束縛することにより、ドップラーシフトがなく、お互いの相互作用もない原子集団からのスペクトルを得ることができる。しかし、強い電場中では電子状態の摂動が大きく、この摂動によるシフト(シュタルクシフト)を精度良く評価することは至難に思われていた。香取らはある特定の波長の光格子レーザーを使って電場中のシュタルクシフトをキャンセルするアイデアを提案し、その光格子レーザー波長を“魔法波長”と名付けた。

2003年にストロンチウム(Sr)原子の光格子時計の実証実験に成功した後、2006年には同原子で $10^{-15}$ のオーダーでの不確かさでの周波数を得た。2006年の結果は米国 GILA や仏 SYRTE での同じ原理による結果と $10^{-15}$ の桁で一致し、“秒の2次表現”に採択される有力な根拠になった。その後、不確かさ $10^{-18}$ を目指して、水銀原子(Hg)やイットリビウム(Yb)による光格子時計との比較や3次元光格子時計との精度比較などを目指している。

海外では各国の時間標準研究機関が挙って光格子時計の研究を開始している。米国の GILA、NIST、フランスの SYRTE 等からの論文が出ており、精度競争になっている。韓国、ロシア等からの論文も見られる<sup>50</sup>。

以上

---

<sup>50</sup> Taichenachev, A.V, et al., Phys. Rev. A 76, 23806(2007) : ロシア, Yoon, TH, Phys. Rev. A 76, 013422(2007) : 韓国