

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 4 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26800215

研究課題名(和文)新しいテラヘルツ波源としての冷却リュードベリ原子からの超放射の研究

研究課題名(英文)Superradiance from cold Rydberg atoms as a new THz wave source

## 研究代表者

高峰 愛子(Takamine, Aiko)

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・研究員

研究者番号：10462699

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：高励起リュードベリ原子はある条件下では隣接準位への遷移確率が高いため超放射を起こし、近年注目を浴びているテラヘルツ波領域の電磁波パルスが発生する。密度分布が一様でない磁気光学トラップ中の冷却リュードベリ原子サンプルでは、冷却リュードベリ原子で支配的に働く原子間相互作用作用のために超放射を観測することが原理的に難しい。しかし、先行研究でDicke条件を満たしていない条件下でのリュードベリ原子サンプルからの超放射が観測されており、これを決めるモードマッチング条件をより広く系統的に測定するために、光学系に改良を加え冷却Rb原子雲を拡大するとともに、リュードベリ励起用の高強度光源系を設計した。

研究成果の概要(英文)：Due to the high transition probabilities to the neighboring states, highly excited Rydberg atoms emit a superradiant radiation including a THz wave which has recently attracted much attention. Superradiance has been hard to observe in a cold Rydberg atoms, due to the mode-matching within a nonuniformly distributed atomic sample and strong atomic interactions. However, in the preceding study, the researchers observed the evidence of superradiance in a cold Rydberg Rb gas under the conditions which did not satisfy the Dicke condition. In order to systematically study a wide range of the mode-matching conditions, the improved optical system for laser trapping made larger cold Rb atoms than the previous ones and the optical system for the Rydberg excitation laser of a much higher power was designed.

研究分野：原子・原子核物理

キーワード：リュードベリ原子 超放射 テラヘルツ波 冷却原子

### 1. 研究開始当初の背景

高励起リュードベリ原子は(主量子数)<sup>2</sup>に比例する巨大な双極子モーメントを有し非常に長距離の相互作用が働く。特に冷却リュードベリ原子は典型的な実験時間(< ms)内には殆ど動かないので、そのダイナミクスを決める要因は原子間に働く相互作用が支配的となり、ブロッケード効果や多体効果など、近年最もホットなトピックを提供している研究対象の一つとして挙げられる。

Dickeによって超放射が1954年に提唱されて以来、超放射現象は様々な分野で盛んに研究されてきた。室温 Rydberg 原子の超放射実験研究は1970年代から報告され始めたが、冷却リュードベリ原子を用いた超放射に関する研究は近年になってやっと世界中でも数えるほどの研究室で行われるようになってきた程度で、少なくとも国内では全く行われていないという状況である。

高励起リュードベリ原子の超放射で放射される波長はテラヘルツ波領域であり、リュードベリ準位は少しずつ間隔を変えたラダー構造で存在しているので、リュードベリ原子を使うとかなり広い周波数範囲のテラヘルツ波・マイクロ波を生成することができる(例えばルビジウム原子の  $n=20-60$  では 20 GHz-2 THz)。更に、超放射カスケードやマルチモード超放射はテラヘルツイメージングに有用なテラヘルツ波を提供する。

冷却原子を使う利点は、ドップラー効果を室温原子の 1/1000 倍小さくすることが可能であり、加えて原子の運動を抑制できるので原子間の位相緩和を劇的に抑制することができるという点である。ただし、室温のリュードベリガスは超放射の波長(～mm)程度の範囲内ではほぼ一様に分布するが、密度分布が一様でない磁気光学トラップ中の冷却リュードベリ原子サンプルでは、冷却リュードベリ原子で支配的に働く原子間相互作用のために、超放射を観測することが原理的には難しくなる。一方、Dicke は電磁波の伝搬を考慮するとペンシル型の大きな体積中でも超放射が起こるとも予測しており、レーザー冷却されたルビジウム原子の葉巻型サンプルから  $5D \rightarrow 6P \rightarrow 5S$  の超放射カスケードが観測された。また最近、いわゆる Dicke 条件: 原子雲体積  $\ll (\text{波長}/2\pi)^3$  を満たしていない状況での  $22d$  状態での冷却リュードベリ原子からの超放射カスケードとマルチモードの同時超放射が観測された。これはリュードベリ原子サンプルの大きさが超放射波長の半整数倍の時に超放射が起こっており(モードマッチング)、 $570 \mu\text{m}$  と  $212 \mu\text{m}$  の 2 波長の超放射が半値全幅  $300 \mu\text{m}$  のリュードベリ原子雲からそれぞれ  $(1/2) \times \lambda$  ( $22d \rightarrow 20f$ ) と  $(3/2) \times \lambda$  ( $22d \rightarrow 19f$ ) として超放射が起こったとしている。

### 2. 研究の目的

上述の冷却リュードベリ原子よりも高い

準位のリュードベリ原子を用いれば、より長い波長の超放射が起こるはずだが、通常の磁気光学トラップ中の原子サンプルの径が小さいことにより上記のようなモードマッチングが得られない。本研究ではよりサイズの大きい冷却リュードベリ原子サンプルを生成することで、モードマッチングを取りやすい条件を整え、冷却リュードベリ原子から広範かつ狭線幅の波長の超放射を発生させることを目的とする。これは上記の研究と比べても原子数の 1-2 桁増加が見込まれるために、よりパワーの大きいテラヘルツ波の発生が見込まれる。本研究では、新しいテラヘルツ波源としての応用を目指し、冷却リュードベリ原子の超放射を用いた、広範な波長に及ぶ狭線幅のテラヘルツ波発生現象の観測と発生機構の詳細な調査を目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究では、

1. 超高真空下の磁気光学トラップ中にルビジウム原子(<sup>85</sup>Rb)を冷却・捕獲する。
2. 冷却ルビジウム原子に～480 nm のパルスレーザーを照射することによりリュードベリ準位 nd/ns 状態へ励起する。
3. 冷却リュードベリ原子を準位選択的イオン化[6]によりイオン化電子をマイクロチャンネルプレート(MCP)で検出する。

という手法を採る。2 と 3 の間には任意の遅延時間をおくことができるので、超放射が起こる前と後とで信号を比較することができる。

異なるリュードベリ準位に対してイオン化電圧のしきい値が変化するため、図1のように磁気光学トラップチェンバー内に設置してある4本の電極ロッドのうち2本に立ち上がり時間が数  $\mu\text{s}$  のランプ電圧を印加することにより、時間的に分解された準位選択的イオン化信号が観測される(図2)。

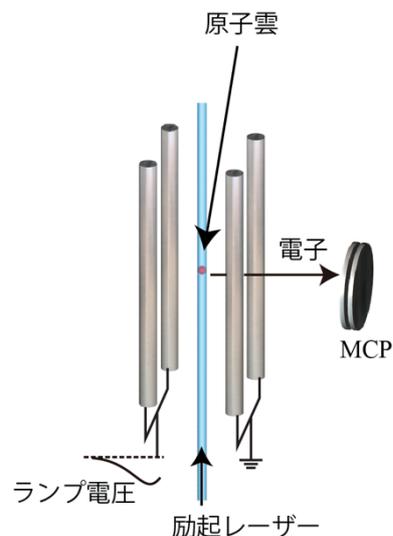


図1: リュードベリ原子検出系

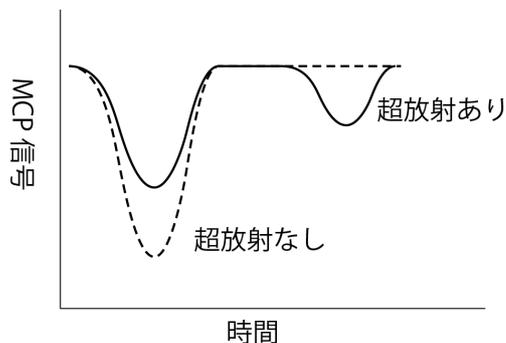


図2: 準位選択的イオン化信号

異なるリュードベリ準位に対してイオン化電圧のしきい値が変化するため、図1のように磁気光学トラップチェンバー内に設置してある4本の電極ロッドのうち2本に立ち上がり時間が数 $\mu$ sのランプ電圧を印加することにより、時間的に分解された準位選択的イオン化信号が観測される(図2)。超放射が起これば、図2のように励起した準位よりも低いエネルギー準位からのイオン化信号が観測されるはずである(図2実線)。信号全体を積算すると当初励起した原子数を見積もることができ、新しいピークの位置の信号だけを取り出して積算すると超放射を起こした原子数を見積もることができるので、超放射を起こした原子数がはじめに励起した原子数の2乗になることが確認できれば超放射の発生を確認したことに相当する。もしくは、超放射はごく短時間に放射を終えるので、自然放出または黒体放射による寿命時間よりも速い時間で大きな割合のポピュレーションの移動が観測できれば、これも超放射発生の証拠となる。

#### 4. 研究成果

既に所有していたDFBレーザー(eagleyard社: EYP-DFB-0780-00080-1500-SIT102-0000)から得られる光を一部周波数ロックのための偏光分光系へ分け、残りをテーパーアンプ(Thorlabs社: TPA780P20)で増幅した後、磁気光学トラップチャンバーへと送る。この時、テーパーアンプが発生する自然放射増幅光を除去するために1mの偏光保持シングルモードファイバーを通してている。DFBレーザーとテーパーアンプ間のアイソレータによる戻り光の除去率が足りなかったためテーパーアンプに定格最大電流2Aまで注入できなかったが、1.4Aまで注入することで、従来

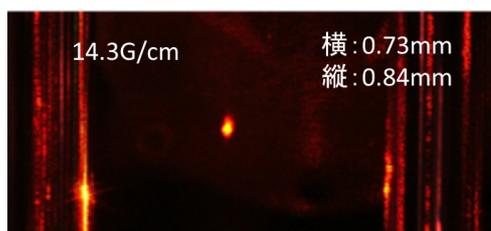


図3: 以前の冷却Rb原子雲

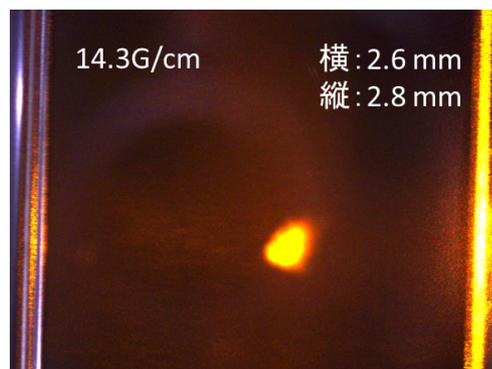


図4: 新たな光学系による冷却Rb原子雲

は $\phi$ 6mmであったトラップレーザーを $\phi$ 12mmへと拡大することができた。これにより、従来は図3のような冷却原子雲を観測していたものが、図4のような大きな原子雲を観測することができた。また、磁場を変えることで原子雲の大きさが変化すること確認した。

大きなリュードベリ原子雲を生成するためにはこれだけでは不十分で、リュードベリ状態励起用レーザーのスポットサイズの拡大のために480nmレーザーの高強度化も必要となる。そのためにまず960nmの外部共振器型半導体レーザーを作製し、その発振を確認し、テーパーアンプへと通し1.5W(ASE含む)の960nm光を得た。これからPPKTP結晶を用いた第二次高調波発生により480nmを得るためのボウタイ型共振器の設計を終え、その道具を揃えた。あとは発振およびロックをするだけである。

以上により、超放射発生のためのモードマッチング条件を系統的に探索する準備ができたと言える。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 3 件)

① Aiko Takamine, Riki Shiozuka, Haruka Maeda, “Population Redistribution of Cold Rydberg Atoms”, 2016年3月6日-11日, 金沢歌劇座(石川県金沢市下本多町)

② 高峰愛子、塩塚梨貴、高野将之、前田はるか “極低温Rydberg原子の準位再分布”、日本物理学会 第70回年次大会、2015年3月22日、早稲田大学(東京都新宿区西早稲田)

③ A. Takamine, R. Shiozuka, H. Maeda, “Prolonged observation of redistributing populations for cold Rydberg atoms”, 11th Asian International Seminar on Atomic and Molecular Physics (AISAMP11), 2014年10月6日-10日, 東北大学(宮城県仙台市青葉区片平)

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

高峰 愛子 ( TAKAMINE, Aiko )

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器  
研究センター・研究員

研究者番号：10462699

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

前田 はるか ( MAEDA, Haruka )

青山学院大学・理工学部・教授

研究者番号：80260199

塩塚 梨貴 ( SHIOZUKA, Riki )

高野 将之 ( TAKANO, Masayuki )