

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：32601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23654143

研究課題名(和文) 極低温リュードベリガス中における分子生成メカニズムの研究

研究課題名(英文) Research on mechanism for production of molecules from ultra cold Rydberg atoms

研究代表者

高峰 愛子 (Takamine, Aiko)

青山学院大学・理工学部・助教

研究者番号：10462699

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円、(間接経費) 840,000円

研究成果の概要(和文)：ルビジウム原子用の磁気光学トラップおよび波長可変パルス色素レーザーを作製し、冷却ルビジウム高励起原子を生成することに成功した。冷却リューベリ原子の量子制御への準備実験として、密度の比較的薄いリュードベリ原子団に対し、リュードベリ状態への励起後の準位分布の変化をこれまでに報告例のない長さの時間に対して系統的に調べた。この準位分布の原因を黒体輻射と原子-電子間の非弾性散乱・弾性散乱から考察した。

研究成果の概要(英文)：A magneto-optical trap and a pulse dye laser for were developed for rubidium atoms to produce ultra cold Rydberg atoms. As a preparation experiment for quantum control of ultra cold Rydberg atoms, the spectra of several different nd states for cold Rb atoms at a long time delay after laser excitation to the Rydberg states. The results were discussed from the point of view of black body radiation effect and inelastic Rydberg-electron collision effect.

研究分野：数理系科学

科研費の分科・細目：物理学 原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：Rydberg原子 冷却原子 黒体輻射 原子電子間衝突

1. 研究開始当初の背景

高励起リユドベリ原子は、その大きい分極率のために非常に超距離の相互作用が働き、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。近年、リユドベリ原子を含む非常に大きい核間距離をもつ分子の生成が理論的に予想され[Physical Review Letters 88, 133004 (2002)等]、高励起状態のリユドベリルビジウム原子と基底状態のルビジウム原子との2原子分子の生成が報告された[Nature 458, 1005 (2009)]。極低温分子は量子コンピュータや極低温化学、分子時計、精密測定による基礎物理検証など、広い応用が期待されており、様々な分野からの注目を集めている。また、SrF分子の数 mK までのレーザー冷却も報告され[Nature 467, 820 (2010)]、光会合やフェッシュバハ共鳴による極低温分子の生成が盛んに行われはじめつつもあるが、極低温分子の研究は未開拓の状態にあると言える。磁気光学トラップ中に冷却・捕捉した極低温原子から生成される極低温リユドベリ原子ガスでは、トラップ条件を精密に変化させることにより、原子間相互作用に基づく多種多様の物理化学反応の発現が見出されはじめている。冷却粒子同士の反応メカニズムやその制御、もしくは冷却原子・分子の精密分光といった、物理化学的な側面からのアプローチは少なくとも国内ではそれほど盛んには行われていない。特に、冷却原子は理想的な量子多体系としてボース-アインシュタイン凝縮を中心とした研究が盛んに行われているが、その殆どは、例えば原子干渉や量子相転移、量子反射、光格子を用いた量子コンピュータをはじめとする量子デバイスの原理研究等といったテーマを対象としたものが占めている。本研究ではそういった研究とは趣を異にし、物理化学的なアプローチを採り、まだ解決すべき問題が山積する冷却粒子間の反応メカニズムの解明および反応制御をテーマとし、極低温物理化学研究を新たに開始しようと着想に至ったものである。

2. 研究の目的

まず、冷却リユドベリ原子を手に入れるために、冷却原子を生成するための磁気光学トラップおよび励起レーザー装置の開発を行い、冷却リユドベリ原子の生成を確認する。主量子数が大きく異なる、もしくは近い主量子数のリユドベリ原子からの分子生成や異核リユドベリ2原子から生成される分子、高軌道角運動量状態のリユドベリ原子の生成を目的とした。

3. 研究の方法

ルビジウム原子の磁気光学トラップを製作した。リポンプ光・トラップ光のレーザー光源としてDFBレーザーを使用し、トラップ光にはAOM(音響光学素子)を2つ使用することで適度に離調を設定できるようにした。

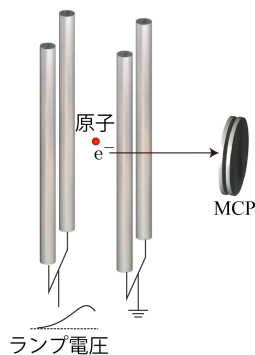


図1: トラップチャンバー内の電極とMCPの配置

トラップ光・リポンプ光共に室温ガラスセル中ルビジウム原子の偏光分光スペクトルを利用して周波数をロックした。冷却原子をリユドベリ状態へ励起する際にゼーマン効果によるシフトを避けるため、真空チャンバー側面に取り付けたアンチヘルムホルツコイルの電流(~5 A)をスイッチングする回路を製作し、500 ns で電流を切ることができたことを確認した。磁気光学トラップ中に捕捉された冷却ルビジウム原子は CCD カメラで蛍光を観測することで確認した。また、リユドベリ原子を準位選択的イオン化によってその生成の検出を行うため、真空チャンバー内に4本のロッド電極を設置した(図1)。また、リユドベリ状態への励起のために必要な480 nm レーザー光源を得るためにNd:YAG レーザー励起 Littman 型共振器波長可変パルス色素レーザー、もしくはLittrow 型外部共振器型半導体レーザーからの第二次高調波発生によるシングルモードレーザーを使用する。実験の流れは図2のように、磁気光学トラップの磁場をリユドベリ状態へ励起する4 ms 前に切っており、時間幅~10 ns の色素レーザーパルスでリユドベリ状態へ励起し、その後適当な遅延時間を設けた後(例えばマイクロ波分光を行うならばこの間にマイクロ波を照射する)、準位選択的イオン化の電場を印加し、リユドベリ原子をイオン化することで、イオン化電子もしくはイオンをMCP(マイクロチャンネルプレート)で検出してリユドベリ原子がどの状態にいたかを観測することができる。色素レーザーパルスの繰り返し

返し周波数は20 Hz であり、MCP で観測した後にも磁場を印加し、46 ms 程度冷却原子をトラップするというサイクルを繰り返す。

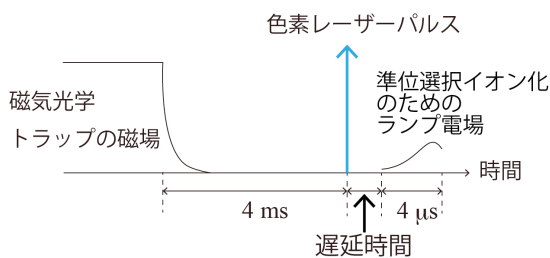


図2: 実験のタイミング図

し、イオン化信号を平均化する。以上のセットアップでまた、準位選択的イオン化により冷却リユードベリ原子の生成・状態を調べる。また、真空チャンバー外からマイクロ波アンテナで冷却原子にマイクロ波を照射することにより冷却リユードベリ原子の状態変化を観測する。

4. 研究成果

磁気光学トラップを完成させ冷却ルビジウム原子の生成に成功し、更に自作のパルスレーザーを照射することで冷却リユードベリ原子生成に成功した。シングルモードレーザー開発に必要な部品全てを本研究期間内には揃えられなかったため完成しなかったが、近々完成するよう進めている。本研究室のセットアップで得られるパルスレーザーの出力が約 $100 \mu\text{J/pulse}$ 程度で線幅が数十 GHz あるために共鳴波長のパワー密度が低く、このレーザーでは原子間相互作用が顕著に現れるようなリユードベリ原子密度を得ることは難しかった。また、マイクロ波遷移の観測にも挑戦したが、所有するマイクロ波装置では強度が足りず、本研究費でも高強度装置を賄うには足りなかったため断念した。そこで、将来的にシングルモードレーザーを使用して高密度冷却リユードベリ原子を生成し、分子生成や原子間相互作用が発現する領域での量子制御実験研究に向けての予備的な実験として、低密度リユードベリ原子の準位分布がリユードベリ準位への励起後、時間 ($< 2 \text{ ms}$) が経つとどのように変化するかを詳細に調べた。一例として 35d 状態に励起した場合の結果を図 3 に示す (t_D は遅延時間である)。)。多くの原子は主量子数の低い ($n \sim 5$) 準位に自然放射により遷移するが、高励起準位に残っている原子は多くが 35d 状態よりも高い準位に遷移し、更に時間が経つと広い幅のピーク (高角運動量状態と考えられる) へと移っていることを観測した。このように長い遅延時間においても観測できるのは冷却原子を使っているからであり、またミリ秒程度という長い遅延時間での観測はこれまでに

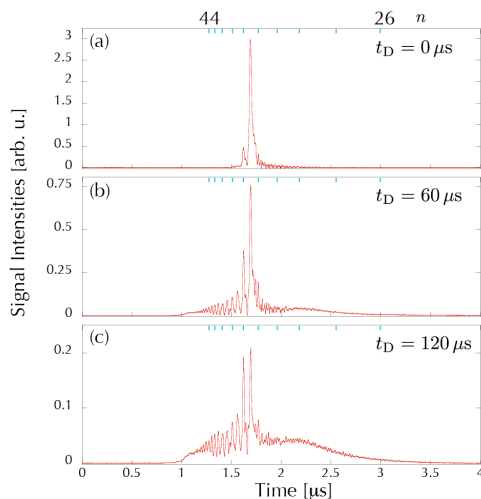


図3: 35dリユードベリ原子励起後の準位分布変化

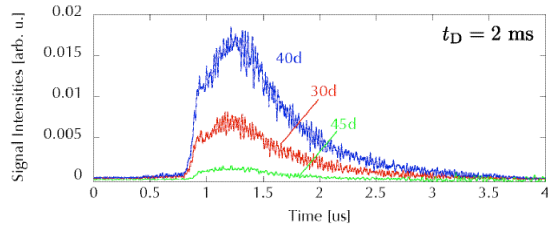


図4: 2 ms経過後のリユードベリ原子状態分布

報告されていない。これらの遷移のメカニズムを黒体輻射と原子-電子間の非弾性散乱・弾性散乱の観点から議論し、Physical Review A 誌に投稿した。リユードベリ原子は水素様原子として扱われることが多いが、黒体輻射誘導遷移確率は水素原子に対しては始状態を中心にほぼ対称に分布するが、ルビジウム原子は量子欠損のために $d \rightarrow f$ 遷移は上準位ばかりへ、 $d \rightarrow p$ 遷移は下準位にばかり遷移することを電気双極子モーメントを Numerove 法 [Physical Review A 20, 2251 (1979)] で計算することより見出した。一方、原子-電子間非弾性散乱によっても細かいピーク類への遷移が起こると考えられるが、本研究における原子密度ではその確率は黒体輻射遷移よりも小さいこと、さらにその確率の主量子数依存性が本研究における準位スペクトルと定性的に合わないことから、主に黒体輻射がこの遷移の原因であると結論づけた。また、 $d \rightarrow f$ 遷移と $d \rightarrow p$ 遷移への比は始状態の主量子数によって変わることも見出したが、その理由はまだ謎のままである。一方、広いピークが現れる理由は原子-電子間の弾性散乱によるものと考え、簡単なレート方程式を立て、スペクトルにおける分解ピークと広いピークの面積比の時間変化にフィッティングすることで、この弾性散乱遷移レートを実験的に見積もることができた。更に、励起後 2 ms 経過後のリユードベリ原子の状態分布は 30d-45d の範囲では始状態にかかわらず同じ分布へ行き着くことを見出した。リユードベリ原子のスペクトルから逆に黒体輻射スペクトルを導出することができれば、周波数標準測定において黒体輻射シフトの見積もり精度向上へと役立てることができると、これは今後も引き続き進めて行く意義が多いにある。

また、この本科学研究費を使用して米国ヴァージニア大学 Gallagher 研究室へ一ヶ月赴き共同研究を行った結果、 $n=41-44$ の冷却ルビジウム原子に対し、マイクロ波の強度を上げることで分子状態 $nd5/2 \leftrightarrow nd5/2 \leftrightarrow (n+1)dj(n-2)f$ 間のマイクロ波遷移の観測されることが報告された [Physical Review Letters 111, 173001 (2013)] (本研究代表者は滞在期間が短かったため論文の著者には含めていない)。

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)

[学会発表] (計 3 件)

①“ハロー中性子の光学分光と MOT を使ったレーザー核分光の可能性”, 高峰愛子, 第 7 回「停止・低速不安定核ビームを用いた核分光研究」研究会, 3-4 March, 2014.

②“冷却原子の量子制御へ向けた極低温 Rydberg 原子の生成”, 高峰愛子, 塩塚梨貴, 前田はるか, 原子衝突学会第 38 回年会, 16-17 November, 2013.

③“Production of ultra cold Rydberg gases for cold atom engineering”, R. Shiozuka, A. Takamine, and H. Maeda, APPC 12 The 12th Asia Pacific Conference of AAPPS, 14-19 July, 2013.

[その他]

ホームページ等

<http://phys.aoyama.ac.jp/~maeda/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

高峰 愛子 (TAKAMINE, Aiko)

青山学院大学・理工学部・助教

研究者番号 : 1 0 4 6 2 6 9 9