

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 1 日現在

機関番号：34310

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22540413

研究課題名（和文）高磁場中における分子プラズマの構造とダイナミクス

研究課題名（英文）Energy structure and reaction dynamics of molecular plasmas in a high magnetic field.

研究代表者

木村 恭之 (KIMURA YASUYUKI)

同志社大学・理工学部・助教

研究者番号：10399412

研究成果の概要（和文）：高磁場中(3-7 T)において、分子のリドベルグ電子が核の周りをサイクロトロン回転することにより生成されるランダウ準位を経由した光電離断面積を、レーザー分光の手法で測定した。光電離断面積の構造の解析により、高磁場の作用により、ランダウ準位においては、電子の軌道角運動量と核の回転の角運動量とのカップリングが切断されていることが確認された。

研究成果の概要（英文）：In a high magnetic field, the motion of a high Rydberg electron becomes similar to cyclotron motion around the core, and thus, Landau levels are formed. In a field of 3-7 T, the photoionization cross section through the Landau levels of NO molecules are measured using laser spectroscopy. The electron's orbital angular momentum is confirmed to be decoupled from the core rotation in the Landau levels.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：原子分子物理学

科研費の分科・細目：原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：原子分子、高磁場、レーザー分光

1. 研究開始当初の背景

原子と磁場の相互作用の研究は低磁場中の Zeeman 効果に始まり、Paschen-Back 効果、2 次の Zeeman 効果の観測を経て、4.7 T の高磁場中において、磁場から受ける強いローレンツ力により電子の運動が支配され、電子が核の周りをサイクロトロン回転する運動に対応する量子準位であるランダウ準位の発見に至る。高磁場と原子との相互作用に関し

て、これを契機に多数の実験、理論的研究が報告された。一方、分子では核の振動、回転のため、エネルギー構造や反応ダイナミクスが複雑であるため、高磁場と分子との相互作用に関する研究は皆無で、1 T 程度以下の低磁場と主として 2 原子分子との相互作用程度が研究されていただけであった。当然、分子のランダウ準位の観測の報告は無かった。

2. 研究の目的

分子の核の周りを電子がサイクロトロン回転して生成されるランダウ準位には原子では期待できない物理現象が存在する。一般に、高励起状態の2原子分子では、電子の軌道角運動量と核の回転の角運動量がカップリングして全角運動量が生成される Hund's case (d) カップリングが成立している。分子のランダウ準位にある電子のサイクロトロン回転に伴う角運動量と核の回転の角運動量との間に、同様のカップリングが成立するか興味深い。また、電子のサイクロトロン回転の軌道が核の近傍を通過することを、我々は古典軌道計算により確認した。この事実は電子が核と衝突して、核の回転が励起される「 N^+ チャンネル相互作用」が起り得ることを示唆する。分子のランダウ準位にこの相互作用があることを確認することも目的のひとつである。

3. 研究の方法

最大磁場 10T の超伝導電磁石中に真空槽を組み込み、1 電子系の電子構造を持つ NO 分子の分子線を磁場中に導入した。磁場中で波長可変レーザー光を分子線に直交させ、NO 分子を基底準位 $X^2\Pi_{1/2}(v=0, J=3/2, M_J=-1/2)$ から中間準位 $A^2\Sigma^+(v=0, J=1/2 (N=0), M_J=-1/2)$ に励起した (v, N, J, M_J は振動、電子スピンを除く全角運動量、全角運動量、および磁気量子数)。もうひとつの波長可変レーザー光をこれに反並行に導入し、励起 NO 分子をさらに $NO^+ X^1\Sigma^+(v^+=0, N^+=0, M^+_N=0)$ 状態への零場中の電離極限以上のエネルギー領域に励起した (v^+, N^+, M^+_N は振動、電子スピンを除く全角運動量、および磁気量子数)。直接電離、およびランダウ準位を経由して生成された NO^+ イオンを電場により加速し MCP に導入し、イオン電流量 (\propto 光電離断面積) を第 2 のレーザー光波長の関数として測定した。

4. 研究成果

測定された光電離断面積には、幅広い周期的構造と微細構造が確認された。断面積のフーリエ解析とリドベルグ電子の古典軌道計算結果との比較から、幅広い構造は磁場に垂直な面内で、 $N^+=0$ (基底状態) の核の周りを、電子が 1 回転する古典軌道に対応するランダウ準位に、微細構造はこの面外で $N^+=2$ (励起状態) の核の周りを、電子がそれぞれ 2 回転、3 回転する古典軌道に対応するランダウ準位に由来することが判明した。電子のサイクロトロン回転と核の回転の角運動量がカップリングした場合と、磁場により両者のカップ

リングが切断された場合の両方を仮定し、磁場と分子との相互作用の行列要素を計算した。これより、ランダウ準位のエネルギー構造を決定し、光電離断面積を再現し、実験結果と比較した。その結果、磁場中において、電子のサイクロトロン回転と核の回転の角運動量は切断されていることが確認された。核が励起された ($N^+=2$) 状態のランダウ準位が確認されたが、これがランダウ準位における N^+ チャンネル相互作用の結果であるかは、現時点では確定に至っていない。複数の核の回転状態をそれぞれのチャンネルとして、多チャンネル量子欠損理論を適用し、ランダウ準位の波動関数を計算し、ランダウ準位への遷移確率を計算し、実験結果と比較することにより、その結論が得られる。これは今後の課題である。中間状態の基底回転準位 ($N=0$) から励起したため、励起の選択則により、ランダウ準位の核の回転状態 (N^+) とランダウ準位の強い部分波の種類が一对一に対応した。先述の実験結果と併せると、これはランダウ準位の種類 (核の周りを何回転するか) に対応して、それぞれ異なる種類の強い部分波が存在することを意味する。こうして決定された強い部分波の角度分布が対応するランダウ準位の古典軌道の方向を良く説明していることが確認された。

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 6 件)

- ① K. Ogino, T. Kasuya, Y. Kimura, M. Nishiura, S. Shimamoto and M. Wada, "Factors affecting VUV emission spectrum near Lyman- α from a hydrogen plasma source", AIP Conference Proceedings, Vol. 1390, pp. 186-191, American Institute of Physics, (2011/9). [Doi:10.1063/1.3637388] 査読有
- ② Y. Kimura and K. Takazawa, "Experimental setup for laser spectroscopy of molecules in a high magnetic field" Review of Scientific Instruments, Vol. 82, No. 1, pp. 013108-1-14, American Institute of Physics, (2011/1). [doi:10.1063/1.3514982] 査読有
- ③ S. Shimamoto, T. Kasuya, Y. Kimura, N. Miyamoto, Y. Matsumoto, and M. Wada, "Study on transport of negative ion plasma using dc laser photodetachment

method”, Review of Scientific Instruments, Vol. 81, No. 2, pp. 02A704-1-4, American Institute of Physics, (2010/10).
[doi:10.1063/1.3258429] 査読有

④ S. Imakita, M. Miyamoto, T. Kasuya, Y. Kimura, and M. Wada, “Ion beam oscillation due to fluctuation of a hot filament driven magnetized plasma”, Review of Scientific Instruments, Vol. 81, No. 2, pp. 02B310-1-3, American Institute of Physics, (2010/10).
[doi:10.1063/1.3266113] 査読有

⑤ M. Yamazaki, J. Adachi, Y. Kimura, M. Stener, P. Declava, and A. Yagishita, “N 1s photoelectron angular distribution from fixed-in-space NO₂ molecules: Stereodynamics and symmetry considerations”, Journal of Chemical Physics, Vol. 133, No. 16, pp. 164301, American Institute of Physics (2010/10).
[doi: 10.1063/1.3505549] 査読有

⑥ M. R. Vasques Jr., T. Kasuya, Y. Kimura, S. Maeno, T. Kenmotsu, and M. Wada, “Sputtering of liquid metal suspended on an insulating reservoir by radio frequency self-bias”, The science and engineering review of Doshisha university, Vol. 51, pp. 1-10 (2010/7).
査読無

[学会発表] (計 15 件)

① 木村恭之、「NO 分子のランダウ準位のエネルギー構造」、「プラズマの素過程研究と分光診断の展望」研究会、2013 年 1 月、岐阜、核融合科学研究所

② 亀田大志、剣持貴弘、粕谷俊郎、木村恭之、和田元、「H₂ プラズマ中の金属表面近傍での H α ドップラーシフト測定」、プラズマ・核融合学会、2012 年 11 月、福岡、九州大学。

③ 竹村浩志、粕谷俊郎、木村恭之、和田元、「水素負イオンの体積生成過程の実験的検討」、プラズマ・核融合学会、2012 年 11 月、福岡、九州大学。

④ 木村恭之、粕谷俊郎、和田元、「NO 分子のランダウ準位のエネルギー構造」、日本物

理学会、秋季大会、2012 年 9 月、神奈川、横浜国立大学。

⑤ 木村恭之、粕谷俊郎、和田元、「NO 分子ランダウ準位のエネルギー構造」、原子衝突学会第 37 回年会、2012 年 7 月、東京、電気通信大学。

⑥ Y. Kimura, T. Kasuya, and M. Wada, “Fine-structure of Landau levels of NO molecules”, 28th Symposium on chemical kinetics and dynamics, 2012 年 6 月, Fukuoka, Japan.

⑦ 小泉嵩、和田元、粕谷俊郎、剣持貴弘、木村恭之、中村浩章、西浦正樹、芦川直子、伊藤篤史、「炭素容器内放電プラズマによる炭素ダスト生成」、プラズマ・核融合学会 (Plasma2011)、2011 年 11 月、金沢、金沢大学。

⑧ 竹村浩志、和田元、粕谷俊郎、木村恭之、「水素放電熱陰極近傍プラズマの VUV 発光スペクトル分布」、プラズマ・核融合学会 (Plasma2011)、2011 年 11 月、金沢、金沢大学。

⑨ 木村恭之、粕谷俊郎、和田元、「NO 分子のランダウ準位の微細構造」、日本物理学会、秋季大会、2011 年 9 月、富山、富山大学。

⑩ 木村恭之、粕谷俊郎、和田元、「NO 分子のランダウ準位の微細構造」、原子衝突研究協会第 36 回研究会、2011 年 8 月、新潟、新潟大学。

⑪ 木村恭之、粕谷俊郎、和田元、“Landau levels of NO molecules”、第 27 回化学反応討論会 2011 年 6 月、東京、東京工業大学。

⑫ K. Ogino, T. Kasuya, Y. Kimura, M. Nishiura, S. Shimamoto and M. Wada, “Factors affecting VUV emission spectrum near Lyman- α from a hydrogen plasma source”, 2nd internal symposium on negative ions, beams and sources, 2010 年 11 月, Gifu, Japan.

⑬ 木村恭之、粕谷俊郎、和田元、「NO 分子のランダウ準位」、原子衝突研究協会第 35 回年会、2010 年 8 月、奈良、奈良女子大学。

⑭ 木村恭之、粕谷俊郎、和田元、“Landau resonances of NO molecules”、第 26 回化学反応討論会、2010 年 6 月、広島、広

島大学。

- ⑮ M. Wada, T. Kenmotsu, T. Kasuya, Y. Kimura,
R. Murakami, and T. Nishimura
"Hydrogen reaction and reflection at
tungsten coated carbon immersed in
hydrogen plasma", 19th internal
conference on plasma surface
interactions, 2010年5月, San
Diego, USA.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木村 恭之 (KIMURA YASUYUKI)
同志社大学・理工学部・助教
研究者番号：10399412

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし