

C-a1

N-メチルホルムアミド-(H₂O)₃ 錯体のフーリエ変換マイクロ波分光

金沢大院自然 梅谷 祐矢, 藤竹 正晴

Fourier transform microwave spectroscopy of the N-methyl formamide-(H₂O)₃ complex

Graduate School of Natural Science & Technology Kanazawa-Univ. Y. Umetani, M. Fujitake

N-メチルホルムアミド(CH₃-CONH₂: NMF)は、ペプチド結合と1つのメチル基を持つ分子で、ペプチド鎖の最小構成単位のモデルとなっている。この分子のメチル基内部回転ポテンシャル障壁の高さ V_3 はペプチド鎖の柔軟性と深く関係している。NMF は、monomer ($V_3 = 56 \text{ cm}^{-1}$) [1] と水錯体の conformer (NMF-H₂O [2], NMF-(H₂O)₂ [3]) の研究が報告されている。そこで、NMF に H₂O を3つ水素結合させた NMF-(H₂O)₃ 錯体の純回転スペクトルの測定、帰属を行った。

量子科学計算より b-type 遷移が強く観測されると予想され、A 対称種は順調に観測されたが、E 対称種では困難であった。その理由は全体の回転と内部回転の相互作用が大きくなり、強度異常を引き起こしていたためだと分かり、最終的に E 対称種も観測することができた。発表では結果とともに他の NMF-H₂O 錯体との比較を交え、 V_3 の変化について議論していく。

[1] Y. Kawashima et al., *Acc. Chem. Res.*, 2006, **39**, 216

[2] W. Caminati et al., *phys. Chem. Chem. Phys.*, 2010, **12**, 0230-10234 [3] 梅谷祐矢, 藤竹正晴 北陸支部 2019 (富山県立大)

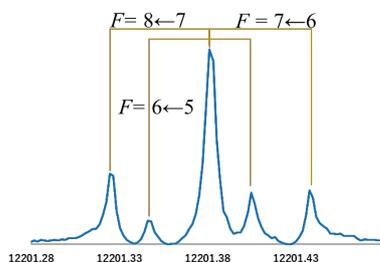


Fig.2 NMF-(H₂O)₃ 錯体
7₀₇-6₁₆ 遷移 A 対称種
実測純回転スペクトル

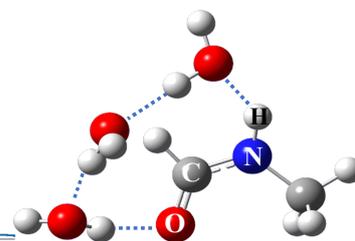


Fig.1 NMF-(H₂O)₃ 錯体

Table1: 決定した分子定数の一部

A /MHz	1832.29937(45)
B /MHz	1329.4881(11)
C /MHz	820.64580(25)
V_3 /MHz	45.046237(36)
r.m.s. /MHz	0.00194
帰属本数	247 本

C-a2

ペプチド分子 - 水錯体系において非共有結合相互作用が メチル基内部回転障壁に与える影響について

金沢大・理工^A, 金沢大院・自然^B 片岡 竜之介^A, 梅谷 祐矢^B, 藤竹 正晴^B

Effect of non-covalent interaction on methyl group internal rotation barrier in peptide molecule-water complex system

College of Science and Engineering^A, Graduate School of Natural and Technology^B, Kanazawa Univ. T. Kataoka^A, Y. Umetani^B, M. Fujitake^B

N-メチルホルムアミド(NMF)や N-メチルアセトアミド(CH₃-CONH-CH₃: NMA)のメチル基内部回転ポテンシャル障壁の高さ V_3 は、水錯体の形成により、単量体の値から大きく上昇することが実験的に確認されている。これは、一般的には立体障害として理解されるがその影響を数値化することは難しい。また、水素結合形成によるペプチド分子自身の電子構造の変化による効果も数値化することが難しい。そこで、本研究では、量子化学計算 Psi4 によって算出した非共有結合相互作用(NCI)と歪みエネルギー(STRAIN)の変化量という観点から、ペプチド分子における、メチル基内部回転ポテンシャル障壁 V_3 の上昇の原因について考察した。図3には、NMF-W-Aの結果が示してある。NCIとSTRAINの両方がポテンシャルの上昇に寄与していることが分かった。NMA系についても併せて報告する。

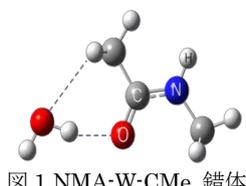


図1 NMA-W-CMe 錯体

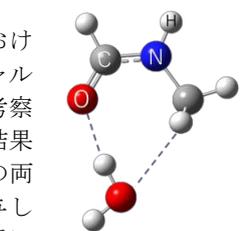


図2 NMF-W-A 錯体

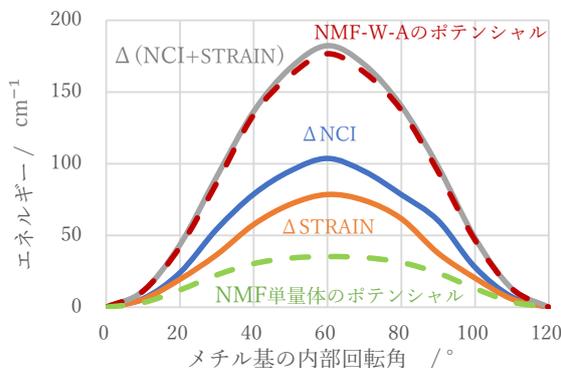


図3 NMF-W-Aにおけるメチル基の内部回転による NCI, STRAIN, および NMF と NMF-W-A の内部回転ポテンシャルの変化量

C-a3

N-メチルホルムアミド-メタノール錯体のフーリエ変換マイクロ波分光

金沢大院 自然 古田 亮, 藤竹 正晴

Fourier transform microwave spectroscopy of the N-methylformamide-methanol complex

Graduate School of Natural Science & Technology Kanazawa-Univ. R. Furuta, M. Fujitake

当研究室ではN-メチルホルムアミド ($\text{CH}_3\text{-CONH}_2$ 以下NMF) - $(\text{H}_2\text{O})_n$ ($n=2, 3$) 錯体の回転遷移の帰属と解析を行ない、NMFのメチル基の内部回転障壁の高さの変化を調査している[1]。本研究では水錯体と類似の水素結合ネットワークを形成するメタノール (以下MeOH) 錯体の測定と帰属を行なった。一般的にMeOH錯体ではMeOHの内部回転ポテンシャルの高さ V_3 が単量体から大きく下がることが知られており、その値を量子化学計算では予測することは難しい。実験は十字スリットーパルス混合ノズルを用いた超音速ジェット・フーリエ変換マイクロ波分光器を用いて、8-25GHz の純回転スペクトルを測定した。発表では、NMF-MeOHの純回転スペクトルに見られたメチル基内部回転分裂線の帰属とその解析結果について報告する。

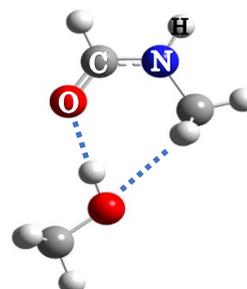


図 1: NMF - MeOH 錯体

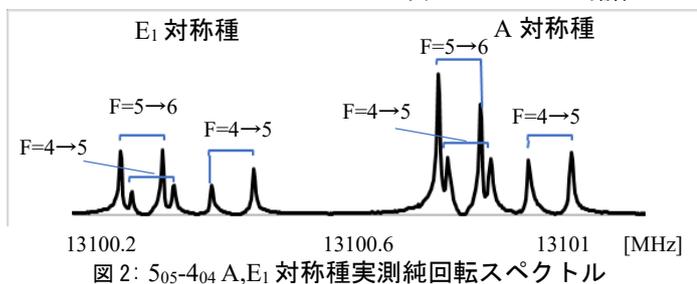


図 2: $5_{05}\text{-}4_{04}$ A, E_1 対称種実測純回転スペクトル

[1]梅谷祐矢, 藤竹正晴 北陸支部 2019 (富山県立大)

C-a4

N-メチルホルムアミド-メタノール錯体のメチル基内部回転ポテンシャル障壁に対する非共有結合相互作用の影響について

金沢大・理工^A, 金沢大院・自然^B 篠田 知樹^A, 古田 亮^B, 藤竹 正晴^B

The Effect of Non-Covalent Interactions on Internal Rotation Potential Barrier of Methyl Groups in N-Methylformamide-Methanol Complex

College of Science and Engineering^A, Graduate School of Natural and Technology^B, Kanazawa-Univ. T. Shinoda^A, M. Fujitake^B, R. Furuta^B

N-メチルホルムアミド (NMF) やホルムアミド (CH_3NO) はメタノール (MEOH) との水素結合錯体を生成し、安定化には分子間の非共有結合相互作用が大きく関わっている。更にメタノールのメチル基の内部回転ポテンシャル障壁が単量体のポテンシャルよりも低下することが知られている[1]。これに関しては librational motion による見かけ上の低下を引き起こしているという報告がある[2]。しかし高精度の量子化学計算を用いて、 V_3 を見積もると 120 cm^{-1} 単量体から下がるという結果が得られる。そこで、その原因を探るために非共有結合相互作用エネルギー(NCI)を計算した。

図 1 には今回の研究で得られた NCI とひずみエネルギー (STRAIN)の変化を示した。更にメタノール単量体のポテンシャルが示してあり、 ΔSTRAIN とほぼ同じである。このことから、この下がる理由は量子化学計算のメチル基の内部回転による非共有結合相互作用エネルギー(NCI)の変化と考えられる。

関連するメタノールの結果についても併せて報告する。

[1] J. Chem Phys. **88**(2), 15~ (1988)

[2] J. Mol. Spectrosc. **167**, 231-235(1994)

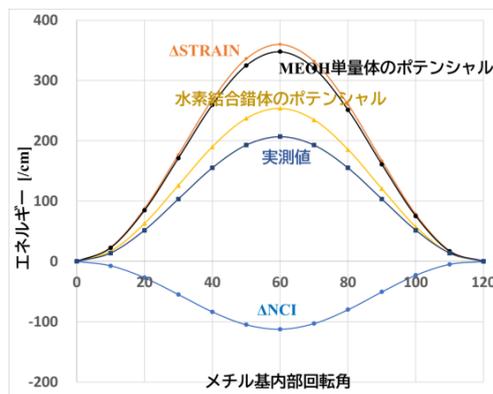


図 1: NMF-MeOH の種々のエネルギー

C-a5

LT-GaAs 基板光伝導アンテナの 1.03 μm と 1.56 μm 帯 サブバンドギャップ励起でのテラヘルツ波の発生・検出効率評価

福井大工, 福井大遠赤セ^A 友永景介, 北原英明^A, 谷正彦^A

Evaluation of THz waves generation and detection efficiency of LT-GaAs photoconductive antenna with 1.03 μm and 1.56 μm sub-bandgap excitations

Sch Eng, UF, FIR UF^A Keisuke Tomonaga, Hideaki Kitahara^A, Masahiko Tani^A

通常の GaAs のバンドギャップは、室温で約 1.43 eV であるので、870nm 以上のサブバンド波長では光励起ができないが、低温成長 GaAs(LT-GaAs)は中間準位を介したサブバンドギャップ励起が可能である[1]。そのため安価で高安定な 1.03 μm と 1.56 μm 帯のフェムト秒レーザーを利用して LT-GaAs 基板を用いた光伝導アンテナによるテラヘルツ(THz)波発生が可能である。図はテラヘルツ時間領域分光装置で励起パワー、バイアス等を同じ条件にして、1.03 μm と 1.56 μm 帯のフェムト秒レーザーで LT-GaAs 基板の光伝導アンテナを励起して得られた THz 波の時間領域波形である。1.03 μm 励起の場合の THz 波の主ピークの大きさは 1.56 μm 帯励起の場合の約 1/6 であることが分かる。このことは振幅ベースで 1.03 μm 励起による THz 波の発生もしくは

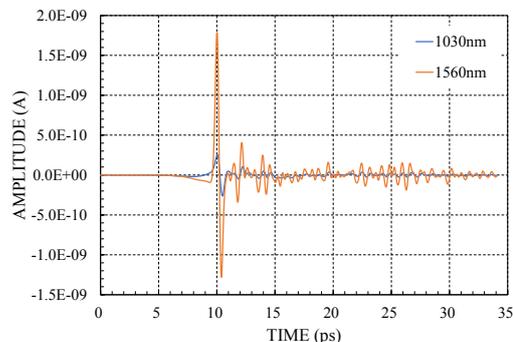


図 1. 1.03 μm および 1.56 μm 励起で得られた LT-GaAs 基板光伝導アンテナによる THz 波形

は検出効率は 1.56 μm 励起に対して約 40% (～1/6 の平方根) であることを意味している。講演では、780 nm 帯励起の場合との比較、励起パワー依存性、中間準位との関連性などについて議論する。

[1] M. Tani, *et al*, Appl. Phys. Lett., 77, 1396 (2000)

C-a6

金属スピントロニック素子によるテラヘルツ波放射の基板表面依存性

福井大工, 遠赤セ^A, NIMS 構造材料研究拠点^B

高市 誠和, Miezal Talara^A, Dmitry Bulgarevich^B, Joselito Muldera^A, 北原 英明^A, 渡邊 誠^B, 谷 正彦^A

Substrate Surface Dependence of THz Emission from Metallic Spintronic Device

Sch. of Eng., Univ. of Fukui, FIR UF^A, Res. Center for Structural Materials, NIMS^B

S. Takaichi, M. Talara^A, D. Bulgarevich^B, J. Muldera^A, H. Kitahara^A, M. Watanabe^B and M. Tani^A

我々の研究グループでは強磁性/非磁性金属ヘテロ構造(金属スピントロニック素子)からのテラヘルツ(THz)波放射についての研究を行っている。金属スピントロニック素子からのテラヘルツ(THz)波放射効率は、素子の形状・構造等に依存する[1]。本研究では、素子作成に用いる基板の表面処理が THz 波発生にどのように影響するかを確かめるために、異なる表面処理を施した基板上に作成したスピントロニック素子を用いてその放射効率の比較を行った。へき開面および光学研磨した(100)面 MgO 基板の上に Fe/Pt 薄膜(膜厚は Fe:2nm, Pt:3nm)を蒸着したものを THz 時間領域分光装置を用いて、それぞれの THz 波放射特性を調べた。波長 815nm、パルス幅 100 fs、繰り返し周波数 82 MHz のフェムト秒レーザー5 mW を素子に照射し、発生した THz 波を光伝導アンテナで検出した。図 1 は、へき開面 MgO 基板および光学研磨面 MgO 基板を用いた素子からの THz 波の時間領域波形である。光学研磨面の素子の方が、へき開面の素子よりも放射効率が高いことが分かる。またへき開面基板を用いた素子は励起レーザー照射位置によって放射強度が大きく変動した。講演では基板表面状態に依存した放射効率についての考察を述べる。

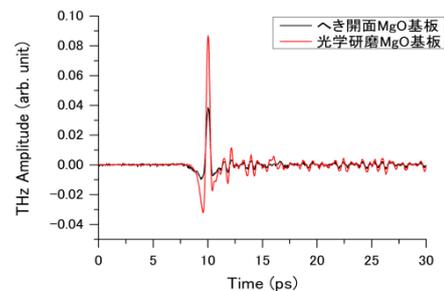


図 1. へき開面と両面研磨面の THz 波発生効率の比較

[1] Torosyan, *et al*, Scientific Reports, 8, 1311 (2018)

C-a7

スピントロニック素子を適用した MLD-TDS に向けたレーザーカオス光発生

福井大院工, 福井大遠赤セ^A, 福井工大^B,
上遠野 修大, 北原 英明^A, 谷 正彦^A, 桑島 史欣^B, 熊倉 光孝, 守安 毅
Generation of Laser Chaos toward MLD-TDS with Spintronic Emitter
Grad. Sch. of Eng., Univ. of Fukui; FIR Univ. of Fukui^A; Fukui Univ. of Technology^B
S. Katono, H. Kitahara^A, M. Tani^A, F. Kuwashima^B, M. Kumakura, and T. Moriyasu

周波数 0.1 THz から 10 THz の領域は, テラヘルツ周波数領域と呼ばれ, 生物や医療, 工業などの様々な分野において研究開発が盛んに行われている。テラヘルツ波周波数領域の分光装置におけるテラヘルツ波の発生と検出には高価格かつ大型な超短パルスレーザーが主として利用されているが, はるかに安価で小型な半導体レーザーを用いても可能である (MLD-TDS)。近年新奇的なテラヘルツ波発生素子として注目されているスピントロニック素子は, 現在 MLD-TDS の実用化の妨げになっているアライメントや帯域, 強度などの問題を解決できる可能性がある。

我々は, スピントロニック素子を適用した MLD-TDS の実現に向けて, MLD-TDS の光源として有力なレーザーカオスの利用を検討している。レーザーカオスを用いると, 半導体レーザーの空間的コヒーレンスを保ったままスペクトルを広げることができる。本研究では, 半導体レーザーに外部鏡からの戻り光による光学的遅延を加えることでレーザーカオスの発生を試みた。現在, スペクトルのモニターに使用している分光器のスペクトル分解能が低いため, スペクトルの詳細な構造は分解できていないが, 図のように戻り光の存在によってスペクトルの広がり観測されている。

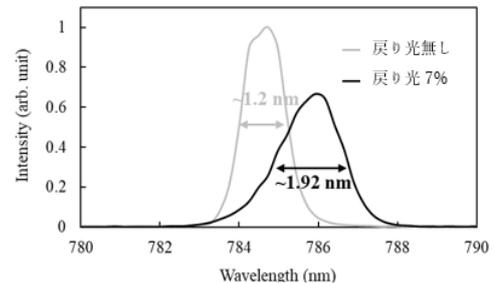


図 戻り光の有無によるスペクトルの変化。

C-a8

有機非線形光学結晶 DSTMS からのテラヘルツ波放射特性の評価

福井大工, 福井大遠赤セ^A, 摂南大理工^B
山本大智, 中川弥, 中村響, 北原英明^A, 古屋岳^A, 谷正彦^A, 長島健^B
Evaluation of Terahertz Wave Emission Properties of Organic Non-linear Optical Crystal
DSTMS
Sch Eng, UF, FIR UF^A, Fac Sci Eng, Setsunan Univ^B
T. Yamamoto, W. Nakagawa, H. Nakamura, H. Kitahara^A, T. Furuya^A, M. Tani^A,
T. Nagashima^B

我々の研究グループでは, より高強度のテラヘルツ (THz) 波を発生することを目標として, 非線形光学係数の高い DSTMS 結晶[1], DAST 結晶のような有機非線形光学結晶を用いたテラヘルツ波発生法について研究を行っている。

今回は DSTMS 結晶をフェムト秒レーザーで励起したときのテラヘルツ波発生について, その励起波長依存性を調べた。800nm 帯の再生増幅フェムト秒

レーザーの出力を光パラメトリック増幅による

波長変換装置に入射させ, 励起波長

1200~1500nm の範囲で変化させ DSTMS 結晶

を励起し, 発生した THz 波を

電気光学サンプリングで検出した。ポンプ光、

プローブ光のパワーはそれぞれ 3.9mW、1.0mW

で実験を行った。観測されたテラヘルツ波の

波形ピークの励起波長依存性は図 1 のように

なった。講演では各波長でのテラヘルツ波形や、

DAST 結晶を用いた場合との比較について議論する。ピーク信号の励起波長依存性

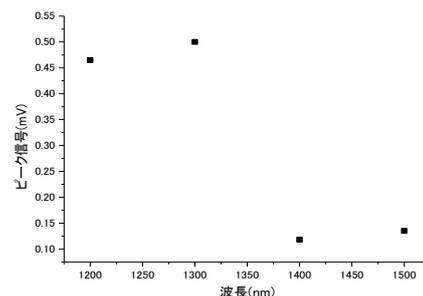


図 1. DSTMS 結晶で発生した THz 波の波形

[1] M. Jazbinsek, *et al*, Applied Sciences, 9, 882, (2019).

C-a9

GaP を用いた電気光学サンプリングによる THz 波の広帯域検出

福井大工, 福井大遠赤セ^A, 千葉大^B

坂本篤哉, 守安毅, 北原英明^A, 古屋岳^A, 谷正彦^A, 石谷善博^B

Broadband detection of THz waves by electro-optic sampling using GaP

Sch Eng, UF, FIR UF^A, Chiba Univ^B

A. Sakamoto, T. Moriyasu, H. Kitahara^A, T. Furuya^A, M. Tani^A, Y. Ishitani^B

我々のグループでは、テラヘルツ (THz) 波の広帯域検出を目標として、GaP 結晶を用いた電気光学 (EO) サンプリング (EOS) を行っている。EO 結晶に GaP を選択している理由は、GaP が他の EO 結晶の中でも広帯域性に優れているからである [1]。光源には、中心波長 800 nm、繰り返し周波数 1 kHz、パルス幅 40 fs のフェムト秒レーザーを用いた。THz 波の発生には、広帯域な THz 波を発生できる空気プラズマによる THz 放射を用いた。

本研究では、結晶方位 (111)、厚さ 100 μm の GaP を用いた。一般的な EO 結晶である厚さ 1 mm の ZnTe (110) との EOS スペクトルの比較を図に示す。観測された THz 波のパワースペクトルは、ZnTe に比べて帯域が広く、プローブ波長 800 nm において 6 THz 程度の帯域を持っていることが確認できた。

[1] Q. Wu, and X.-C. Zhang, Appl. Phys. Lett., **70**, 1784 (1997)

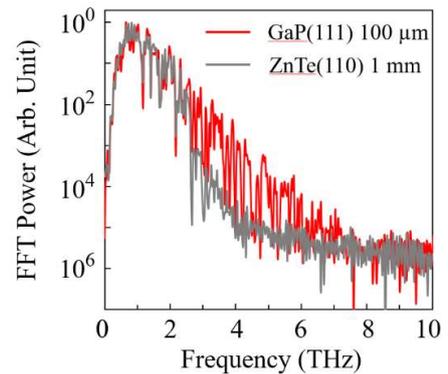


図. GaP と ZnTe による THz 波の規格化 EOS スペクトル

C-a10

第一原理計算を用いた低温成長 GaAs の点欠陥の直接同定の研究

福井大工, 福井大遠赤セ^A 理研^B 泉明宏, Mary Clare Escaño^A, Maria Herminia Balgos^B,

Rafael Jacubia^B, 早澤 紀彦^B, Yousoo Kim^B, 谷正彦^A

Direct identification of point defects in low-temperature-grown GaAs using first-principles calculations

Sch Eng UF, FIR-UF^A, RIKEN^B, Akhiro Izumi, Mary Clare Escaño^A,

Maria Herminia Balgos^B, Rafael Jacubia^B, 早澤 紀彦^B, Yousoo Kim^B, Masahiko Tani^A

低温成長 GaAs(LT-GaAs)はテラヘルツ波発生／検出のための光伝導アンテナ(PCA)の基板材料としてよく使われている。低温成長 GaAs 中の欠陥制御は PCA の性能、特にミッドギャップ準位を介した 2 段階光子吸収を利用した 1.55 μm などのサブバンドギャップ励起[1]におけるテラヘルツ波発生／検出の高効率化にとって非常に重要である。密度汎関数理論を用いた第一原理計算でそのミッドギャップ準位の生成は主として As の

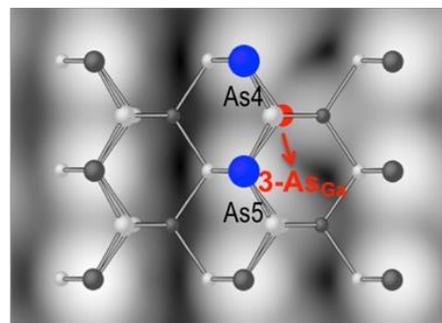


図: GaAs 結晶中の As_{Ga} の STM の輝点

アンチサイト点欠陥(As_{Ga})によるものということがわかっている。今回我々は、第一原理計算を用いた走査型トンネル顕微鏡 (STM) のシミュレーションによる GaAs(110)表面上の As_{Ga} の直接同定について報告する [2]。本研究は、LT-GaAs を用いた高効率なテラヘルツ発生および検出のための光伝導アンテナ素子の原子スケール設計に貢献することが期待される。

C-a11

低出力ミリ波励起による気相分子からの自由誘導減衰の放射特性評価

福井大工, 福井大遠赤セ^A 下野望, 古屋岳^A, 谷正彦^A

Radiative Characterization of Free Induction Decay from Gas-phase Molecules by Excitation with Low Power Millimeter Sources

Sch Eng, UF, FIR UF^A

N. Shimono, T. Furuya^A, M. Tani^A

我々の研究グループでは高強度テラヘルツパルスを励起光源としたガス分子からの自由誘導減衰 (FID) を測定する高分解能分光装置の開発を行っている。これまでに、高出力光源であるジャイロトロンを励起光源としたガス分子からの FID 測定について、励起効率向上を目的に、長光路セルとの組み合わせなどを試みたが、FID の計測には至っていない。この結果を受け、まず、励起パルスに要求される周波数やパルス幅などの諸条件を明らかにすることとした。

FID の特性評価には、励起光源としてパルス幅や周波数の制御が容易なアクティブ・マルチプレイヤー・チェーンを用いた。長光路セルに導入したアセトニトリルを励起し、FID を測定、放射特性を評価した。図は励起周波数 90 GHz、パルス幅 75 ns で励起した際の FID 信号のガス圧力依存性を示す。励起パルスによってプリアンプが飽和し、ベースラインの歪みが生じているものの、時間経過と共に緩和する信号が得られた。信号はガス圧力の上昇に伴い、緩和時間が減少する典型的な FID の特性を示した。講演では共鳴周波数と励起周波数の差による FID 信号の変化などについて報告を行う。

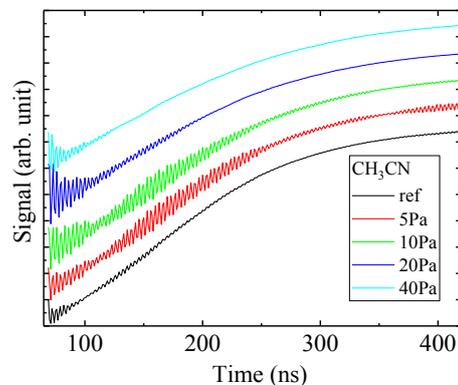


図 FID 信号のガス圧力依存性

C-a12

光励起と電場を組み合わせた CdSe / ZnS 半導体量子ドットの運動操作法の検討

福井大院工, 福井大工 右馬 健太郎, 稲葉 勇人, 山本 将平, 守安 毅, 熊倉 光孝

数 nm サイズの粒子に対する常温液体中での運動操作は、粒子体積が小さいことや熱ゆらぎが大きいことから実験的には困難であるとされてきたが、近年、我々は、直径 6 nm 程度の CdSe / ZnS 半導体量子ドットの運動を、光励起と不均一電場を用いて操作できることを示唆する実験結果を得ることに成功した。しかし、この実験では、光励起時に生じる溶液の対流などにより、定量的な議論や理論との整合性の確認が困難であった。そこで今回、対流に勝るような強い力を発生させるため、電場の 3 次元数値計算を利用して、より強い電場を印加できる実験装置の検討を行った。

我々のこれまでの実験では、図 1 のように、空气中で対向する電極間にガラスキャピラリーを配置し、キャピラリー内に封入した量子ドット溶液に不均一電場を印加していた。これに対して今回は、図 2 のようにキャピラリーの周囲の媒質にも有機溶媒を用い、より高い電場をキャピラリー内の溶液に印加することを計画した。キャピラリー内外の溶媒の組み合わせや電極配置などを変化させて電場の計算を行い、最も強い電場を印加できる条件を比較・検討した。講演では、これらの計算結果から得られた電場印加や運動操作に適した溶媒の組み合わせや、電極配置の影響などについて紹介する。

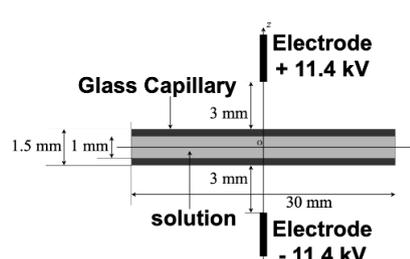


図 1: 従来の実験配置

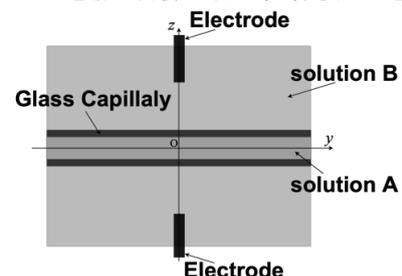


図 2: 新たな実験配置

C-p1

重力波望遠鏡 KAGRA におけるレーザー強度安定化システムの開発Ⅲ

富山大理 山下 堪太, KAGRA Collaboration

Development of laser intensity stabilization system for gravitational wave telescope KAGRA

Univ. of Toyama; Fac. of Sci. K. Yamashita, for the KAGRA Collaboration

1916年に Albert Einstein によって一般相対性理論から重力波が予言され、約 100 年後の 2015 年 9 月にアメリカの重力波望遠鏡 LIGO で初の直接観測に成功している。重力波望遠鏡 KAGRA は日本における重力波の観測を目指して建設されており、2020 年 4 月にドイツの GEO と初の国際共同観測(O3GK)が行われた。

KAGRA は Michelson 干渉計を基調とし、両腕に Fabry-Perot 共振器を持つ重力波望遠鏡である。重力波の到来により両腕の長さが差動的に変化し、光検出器の受ける光量が変わることによって重力波を観測する。重力波の振幅は非常に小さいため、検出には様々な雑音を取り除く必要がある。その雑音源の 1 つとして、レーザーの強度揺らぎがあり、我々はこの強度揺らぎを低減させるシステムの開発を行っている。レーザー強度安定化システムは干渉計に入る光の一部を、光検出器において電圧信号に変換して取り出し、Servo 回路によるフィルタを通して音響光学素子にネガティブフィードバックする制御システムである[1]。

O3GK の期間中に強度雑音は重力波の感度を制限していなかったが、次回参加予定の観測運転(O4)では更なる感度向上に向けて強度雑音の要求値が設定されている。また、干渉計に入射するレーザーパワーが上げられるため、それに伴った高パワー対応のシステム開発を行う必要がある。現在、我々は O4 に向けたシステムに用いられる高パワー対応の光学系を設計しており、ビームの散乱光や光軸揺らぎの除去などを検討している。また、光軸揺らぎによる強度雑音への影響についてもモデルを立てて実験しており、様々な条件下での効果を調べることで KAGRA で用いられる光検出器に対するビーム位置や光軸揺らぎの大きさに関する要求値を出す試みも行っている。今回はこれらの取り組みの現状を報告する。

[1] 黒宮勇樹, KAGRA collaboration 『重力波望遠鏡 KAGRA におけるレーザー強度安定化システムの開発』
日本物理学会北陸支部定例学術講演会 2019

C-p2

重力波望遠鏡 KAGRA における高出力レーザーの性能評価

富山大理 佐古 大誌, KAGRA Collaboration

Performance evaluation of high-power laser for gravitational wave telescope KAGRA

Univ. of Toyama; Fac. of Sci. T. Sako, for the KAGRA Collaboration

重力波は Albert Einstein の一般相対性理論から導かれる空間のゆがみの伝播であり、2015 年にアメリカの重力波望遠鏡 LIGO で初の直接観測に成功している。重力波望遠鏡 KAGRA は日本での重力波観測を目的として建設されており、2020 年にはドイツの GEO との国際共同観測が行われた。KAGRA は 2 本の 3km の腕を持つ Fabry-Perot Michelson 干渉計である。重力波によって各腕の長さが変わると光の位相差として現れ、その光を干渉させることで光検出器の受ける光量が変わり、重力波を検知している。

重力波の振幅は非常に小さいため、検出には様々な雑音を取り除く必要がある。雑音源としては、レーザー自身の強度と周波数の揺らぎの他に、量子的な性質によるショットノイズがある。ショットノイズはレーザーの出力を上げることで信号と比較して低減できるため、マスターレーザーとアンプを用いた高出力なレーザーの使用が予定されており、すでに富山大学で強度と周波数のノイズの測定が行われている。強度ノイズは主にアンプの性能に左右され、LIGO の物と同程度の性能を有していることがわかった。周波数ノイズはマスターレーザーの周波数特性に依存しており、従来のレーザーと同程度であると測定された。しかしながら、ビームの断面方向の強度分布が不均一で効率が良くない事もわかっておりマスターレーザーを交換することで改善することが期待されている。そのため交換前後の性能を評価するために測定を行っている。

本講演では、マスターレーザー交換前後の性能を評価するための測定について、その方法の詳細と現状を発表する。

C-p3

大型低温重力波望遠鏡 KAGRA におけるパラメトリック不安定性

富山大理 山本将之, KAGRA Collaboration

Parametric Instability of KAGRA large scale cryogenic gravitational wave telescope

Univ. of Toyama ;Fac. of Sci M.Yamamoto, for the KAGRA Collaboration

重力波とは時空の歪みが波として光速で伝播するものである。1916年に Albert Einstein が理論的にその存在を予言したものの、微弱なために検出は非常に困難だった。しかし、2015年アメリカの重力波望遠鏡 Advanced LIGO が初の重力波検出に成功した。それ以降多くの重力波が検出され重力波天文学の時代が始まった。

日本においても岐阜県飛騨市に大型低温重力波望遠鏡 KAGRA が建設され、すでに 2020 年春に観測運転を行った。KAGRA は他の重力波望遠鏡と同じく Michelson 干渉計を基本とし、その両腕には Fabry-Perot 共振器を内蔵している。他の干渉計と大きく異なる点として地面振動を抑えるために神岡地下に建設されたこと、熱雑音を抑えるため 20K に冷却したサファイアを鏡として使用していることが挙げられる。

重力波を捉えるために高パワーレーザーが必要になるが、その際にパラメトリック不安定性が問題となってくる。熱雑音によるわずかな鏡の弾性振動によって入射した光とは異なる Fabry-Perot 共振器の光学モードが励起される。このモードが共振器内で増幅され、鏡に輻射圧を与え、鏡の弾性振動を更に励起させる。このような正のフィードバックにより鏡の揺れと不必要な光学モードを増幅し、干渉計の状態は不安定になる。LIGO はこの問題を解決することで重力波の初検出を成し遂げた。昨年までに報告したシミュレーションによると KAGRA のパラメトリック不安定性は LIGO より軽微であるが、今後対策は必要となってくる。

このシミュレーションが明らかにした不安定な弾性モードに関する実験的検証を行っている。本講演では検証実験の状況と今後の展望について紹介する。

C-p4

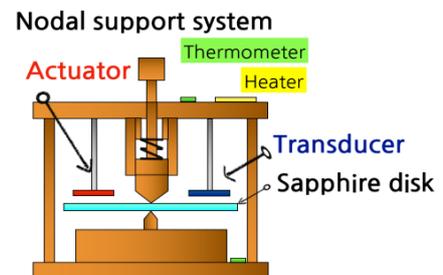
大型低温重力波望遠鏡 KAGRA における鏡の反射膜の機械的散逸測定-2

富山大理 中山 遥太, KAGRA Collaboration

Mechanical loss measurement of the mirror reflection coating for Large-scale Cryogenic Gravitational-wave Telescope KAGRA-2

Fac. of Sci., Univ. of Toyama Y. Nakayama, for the KAGRA Collaboration

1916年にアインシュタインによって予言された重力波は 2015年に初検出され、重力波天文学が始まった。日本では岐阜県神岡鉱山地下に大型低温重力波望遠鏡 KAGRA が建設され、2020年春に観測を行った。KAGRA は今後さらなる雑音低減を目指している。その低減対象の一つが鏡内部の弾性モードの熱振動(熱雑音)である。KAGRA の鏡は高い反射率(99.9%以上)を実現するために、鏡の表面に誘電体多層膜(Ta_2O_5/SiO_2)からなる反射膜が施されている。現在、この反射膜が鏡の熱雑音への主な寄与源となっている。反射膜の熱雑音を低減する方法は 2 つあり、鏡を冷却すること及び反射膜として機械的散逸の小さい材質を用いることである。前者は既に KAGRA で取り入れられている。後者に関しては実用的な反射膜の機械的散逸低減は困難で、現在も世界の検出器グループにて研究が行われている。そこで富山大学では、反射膜の機械的散逸低減を目的として、4K から室温までの広い温度領域にて反射膜の機械的散逸を測定する装置を開発した(図 1)。常温では反射膜の機械的散逸は一般的に Ta_2O_5 に Ti をドーブした誘電体多層膜(Ti doped 膜)では小さくなることが報告されている。そこで我々は Ti がドーブされていない誘電体多層膜(Ta_2O_5/SiO_2)をコーティングしたサファイア円板と Ti doped 膜をコーティングしたサファイア円板を用意し、極低温での Ti ドープ効果を確認するための実験を行った。本講演では Ti ありなしの場合の散逸の大きさと Ti をドーブすることの効果の大きさを報告し、今後の見通しを紹介する。



(図 1)実験に使用している装置の概略

C-p5

重力波望遠鏡 KAGRA の較正に用いる積分球の性能評価

富山大理 松永和真, KAGRA collaboration

Performance Evaluation of the Integrating Sphere for the Calibration of the Gravitational Wave Telescope KAGRA

Univ. of Toyama K. Matsunaga and KAGRA Collaboration

重力波とは、質量をもつ物体が加速度運動することで発生する時空の歪みが波として光速で伝播する現象である。日本には重力波望遠鏡 KAGRA が建設されており、2020 年 4 月に GEO と国際共同観測を行った。現在は LIGO、Virgo との共同観測である Observation run 4 に向けて改良が進められている。

重力波の観測には精度良く正確な較正が大切である。KAGRA の較正には、メインレーザーとは別のレーザーを鏡に照射し、その輻射圧で共振器長に変位を与える Photon Calibrator 法 (Pcal) を用いている。このときの鏡の変位はレーザーパワーに依存するため、レーザーパワー測定の精度が重要になる。Pcal ではレーザーパワー測定に積分球を用いている。積分球は、入射光をその内部で拡散させて測定を行うことで、入射光の角度依存性が低いと言われている。しかし実際には、均等拡散反射からのずれや内部の不均一性及び非対称性により、レーザーの入射角度を変えると測定されるパワーが若干異なってしまう可能性がある。今回はそのようなレーザーの入射角度を変えた際の測定値変化が PCal レーザーパワー測定において与える影響について報告する。

C-p6

液体 He 中でアブレーションによって生成された超伝導微粒子の磁気トラップ XIV

富山大理, 福井大院工^A, 阪大院基礎工^B

井口貴裕, 近藤大聖, 熊倉光孝^A, 芦田昌明^B, 森脇喜紀

Magnetic trapping of superconducting particles generated by ablation in liquid He

Univ. of Toyama, Univ. of Fukui, Osaka Univ.

T. Iguchi, D. Kondo, M. Kumakura^A, M. Ashida^B and Y. Moriwaki

レーザーアブレーション法はナノサイズ、マイクロサイズの微粒子を生成する効果的な方法であり、これを液体ヘリウム中で行うことで球形の単結晶微粒子を生成できる。私たちの研究室ではレーザーアブレーション法で生成した微粒子に四重極磁場を用いて超伝導微粒子を空間捕捉し、その性質を研究している。超流動ヘリウム中に捕捉した超伝導微粒子に対してレーザー光を照射することにより微粒子の運動の制御が可能であることが分かった。[1]

本発表では超伝導微粒子の運動について、レーザー強度依存性と温度依存性について議論する。

[1] 高橋佑太, 『超流動ヘリウム中でレーザーアブレーション法によって生成された超伝導微粒子の磁気トラップ』, 2017 年度富山大学修士学位論文

C-p7

一水素化カルシウム分子 CaH の $1^2\Delta$ 状態の精密測定

富山大理

松本 耀介, 八倉巻 翔太, 中川 芽依, 古田 仁, 小林 かつり, 森脇 喜紀

Precise measurement of the $1^2\Delta$ state of the calcium monohydride

Fac. of Sci., Toyama Univ. Y. Matsumoto, S. Yaguramaki, M. Nakagawa, J. Furuta, K. Kobayashi
and Y. Moriwaki

一水素化カルシウム CaH は 1900 年代に観測、測定されて以来 100 年以上にわたる研究の歴史がある。CaH は単純な二原子分子であるが、状態間の相互作用により複雑なポテンシャル曲線を有している(図 1)。我々はこの相互作用が強くはたらく B 状態のスペクトル測定を行い、基底状態 $X, v=0$ から B 状態へのバンドの帰属を明らかにした[2][3]。また、 19000cm^{-1} 付近で $1^2\Delta$ と考えられる新しいバンドを確認し、昨年このバンドの精密測定を行いスペクトルの中心周波数と分子定数を決定した。

今回、 $1^2\Delta$ 準位の寿命の測定を行い、他の状態の寿命との比較をした。その結果について報告する。

[1] A. Shayesteh, S. F. Alavi, M. Rahman and E. Gharib-Nezhad, Chem. Phys. Lett., 667, 345 (2017)

[2] K. Watanabe, N. Yoneyama, K. Uchida, K. Kobayashi, F. Matsushima, Y. Moriwaki and Stephen C. Ross, Chem. Phys. Lett., 657, 1 (2016)

[3] K. Watanabe, I. Tani, K. Kobayashi, Y. Moriwaki and Stephen C. Ross, Chem. Phys. Lett., 710, 11 (2018)

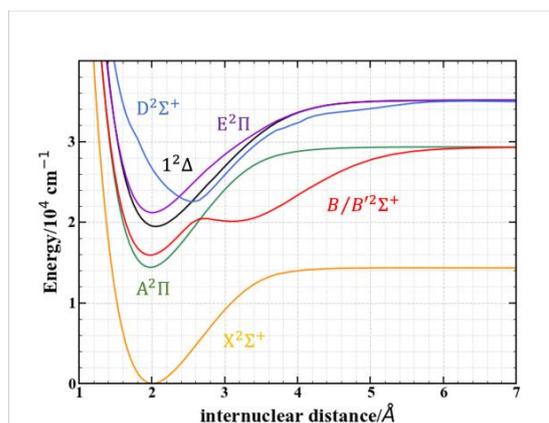


図 1 CaH のポテンシャル曲線[1]

C-p8

PbO 分子の 402 nm 帯の高分解能分光とホットバンドの観測

富山大理 京都大理^A 中野愛・松本仁千翔・草野航・下地巧真・小林かつり・馬場正昭^A・榎本勝成

High resolution spectroscopy of PbO at 402 nm and observation of hot bands

Univ. of Toyama, Kyoto Univ.^A

Ai Nakano, Nichika Matsumoto, Wataru Kusano, Takuma Shimoji, Kaori Kobayashi, Masaaki Baba^A, Katsunari Enomoto

我々は PbO 分子の 400 - 450 nm 帯の高分解能分光を進めている。実験方法はパルスレーザーを固体試料に照射し、出てきた気体分子と冷却された He バッファーガスを衝突させ低温分子を得ている。その分子に励起光をあて励起スペクトルを観測し、超低膨張エタロンの共鳴を参照して 30 MHz 程度の精度で遷移周波数を決定している。402 nm 帯にはさまざまな電子遷移のスペクトルが観測され、 $X(0^+)v'=1,2$ からの遷移であるホットバンドを含む 4 つ以上のバンドが混在する複雑な結果となった。約 700 本以上の遷移を観測し、その中

の $B(1)v'=7$ 状態、 $a(1)v'=21$ 状態、 $C'(1)v'=0$ 状態、 $C'(1)v'=3$ 状態の

4 つの分光定数

を決定した。

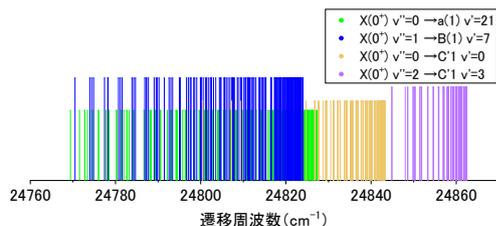


図 1 観測されたスペクトル線

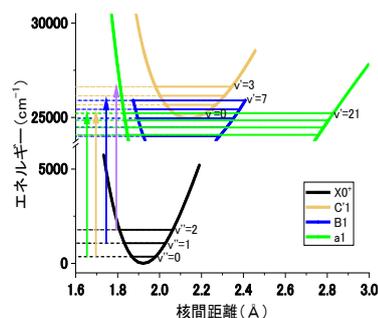


図 2 ポテンシャル曲線と観測した遷移

C-p9

光会合による Yb₂ 分子の生成と前期解離の観測

富山大理, 京都大理^A

草野 航, 下地 巧真, 中野 愛, 松本 仁千翔, 小林 かおり, 馬場 正昭^A, 榎本 勝成

Observation of predissociation of Yb₂ molecules produced by photoassociation

Univ. of Toyama, ^AKyoto Univ.

Wataru Kusano, Takuma Shimoji, Ai Nakano, Nichika Matsumoto, Kaori Kobayashi, Masaaki Baba^A, Katsunari Enomoto

我々の研究グループでは加熱式分子線と波長可変パルスレーザーを用いて Yb₂ 分子の分光実験に取り組んでいる。これまで、¹S₀-³P₁ 原子遷移(556 nm)の蛍光を観測する条件下で連続的な分子の励起スペクトルの発見に成功していた。今回、蛍光の時間分布について解析を進めた結果、⁰_u⁺状態への光会合の後、¹S₀+³D₂ 状態に漸近する状態との前期解離によって解離し、そこから ³P₁ 状態に緩和していることが分かった (図 1)。講演では、さらに、³D₂→³P₁ 状態への遷移 (1479.3nm) の蛍光の直接観測の試みや、Yb₂ 分子の状態で噴出させることを目的に改良したガスラインつきノズル (図 2) を用いた結果についても発表する予定である。

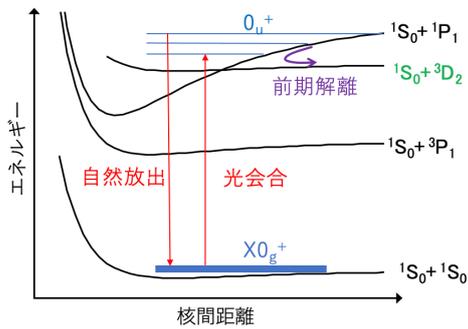


図 1 ¹S₀-³D₂ 状態への解離プロセス

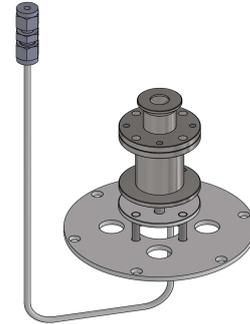


図 2 改良したガスラインつきノズル