

招待講演要旨

高強度レーザーで駆動される非線形スカラーQED プラズマの輸送理論

瀬戸慧大 日本原子力研究開発機構

G. Mourou と D. Strickland によるチャープパルス増幅法 (CPA, 2028 年のノーベル物理学賞) によって, 高強度レーザーを建造できるようになった. 現在では $10^{22}\text{-}23\text{ W/cm}^2$ というレーザー強度をチャンバー内に提供できるようになってきた. CPA により相対論的なプラズマ物理学研究や, レーザー電子航跡場加速器の開発などへの道が切り拓かれた. 登壇者はその中で, 高強度レーザーを用いた非線形量子電磁力学(QED)効果について研究してきた. QED は電子・陽電子・光子の素粒子論的模型である. QED 系の背景に高強度レーザー電磁場を置くことで, 非線形光学のように電子と陽電子がレーザー光子を超多光子吸収しながら素粒子散乱すると考えられる. このような散乱を扱う体系が非線形 QED である.

ところで, Chen による有名なプラズマの教科書には「プラズマとは, 荷電粒子と中性粒子によって構成され, 集団的なふるまいをする準中性気体のことである」との記載がある. 素粒子物理学的な目線では, これら荷電粒子や中性粒子は量子場の模型で記述され, その集団現象をプラズマと呼んでいる, と翻訳できる. この解釈自体には難は無いだろう.

実際に量子場で記述される粒子を数え上げて分布関数を構成し, その輸送方程式を見出すことはできるだろうか? レーザープラズマ・磁場閉じ込めプラズマともに Lorentz 力を外部から与えてプラズマを駆動する. 輸送方程式の移流項にもその考えが反映された項が含まれる. しかしながら, Lorentz 力に代表される力の概念は量子論には通常不要である. Lorentz 力は量子場の理論ではどのように見出されるのだろうか? また, 輸送方程式の移流項は古典的描像であるが, 衝突項には非線形 QED から導いた衝突断面積を代入するのが定石である. ここで, 両辺の物理階層のズレを許容してしまってもよいのだろうか? 登壇者は非線形 QED を利用すればこれらが解決できると考えて, この問題に挑んでいる. 今回の発表では簡単のためにスピンを考慮しない非線形 QED である非線形スカラーQED を用いて, 輸送方程式導出の研究進捗についてご紹介する.

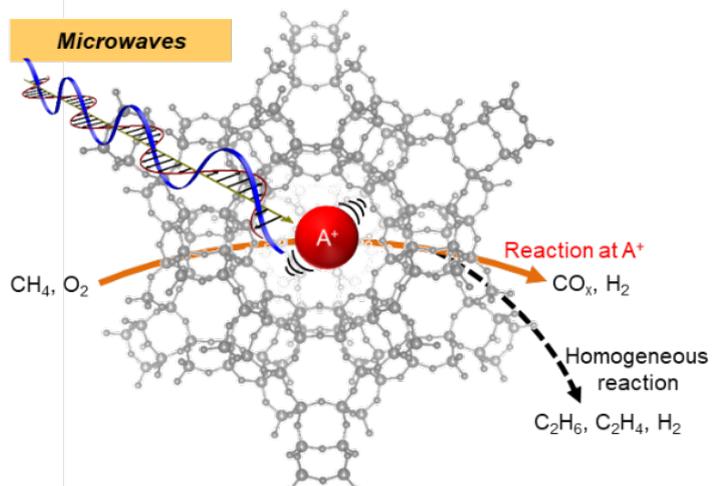
マイクロ波照射下での原子レベル局所高温場が拓く触媒化学.

岸本 史直

東京大学 化学システム工学専攻 講師

マイクロ波駆動触媒システムは, 化学産業の積極的な電化戦略としてだけでなく, 従来の平衡加熱法では実現できない新たな触媒反応場を創出する手法として注目を集めている. 本講演では, 発表者が近年見出してきたマイクロ波下でのゼオライトの細孔内の単一アルカリ金属カチオンの原子レベル選択加熱, およびその触媒作用について概説する. カチオンが選択的に加熱されることで, メタン酸化反応の選択率制御や, 二酸化炭素水素化反応のエネルギー効率向上を報告してきた.

本研究は, 複合材料システムにおいて議論されてきたナノスケールのマイクロ波局所加熱効果を超えて, 原子レベルでの局所加熱効果の実験的証拠を提供するものである. 将来展望として, これらの熱エネルギーの局所化によって実現可能な次世代型の省エネ・高選択率触媒システムについて議論する.



シンクロトロン放射のアト秒位相制御とその応用

金安達夫 九州シンクロトロン光研究センター, 分子科学研究所

シンクロトロン放射の波形は相対論的電子の加速度運動を反映する。このことは加速器中の電子の運動を磁場で上手く操作すれば、シンクロトロン光源が得意とする真空紫外から X 線までの広い波長域で、光パルスの波形を自在に制御できることを意味する。我々は最近、二台の光源を直列配置する方法で極紫外ダブルパルスを生成し、その位相差をアト秒レベルで制御する技術を開発した。そして量子波束の干渉を光パルスの位相差で操作することで、原子分子の量子状態を制御・計測することに成功した[1-3]。本手法の短波長化や短パルス化には原理的な制約はなく、近い将来には X 線パルスの位相制御が実現する可能性もあるだろう。講演では極紫外光を用いた原子分子物理の研究に加えて、ダブルパルスを利用した放射光計測手法の開発やシンクロトロン放射による光渦ビームの生成についても紹介する。

[1] Y. Hikosaka et al., Nat. Commun. 10, 4988 (2019); 12, 3782 (2021).

[2] T. Kaneyasu et al., Phys. Rev. Lett. 123, 233401 (2019).

[3] T. Kaneyasu et al., Phys. Rev. Lett. 126, 113202 (2021).

高強度レーザー場中の原子・分子のアト秒ダイナミクス

電通大 森下亨

分子内のクーロン電場に匹敵する電場強度の高強度のレーザーを原子や分子に照射すると、レーザー電場強度がピークとなる極短時間にトンネルイオン化し、アト秒領域の時間幅を持った電子パルスが生成される。イオン化電子は電場によって加速され、その後、電場の位相の反転に伴って逆向きに加速され、元の分子まで戻ってきて弾性および様々な非弾性散乱を引き起こす。このレーザーの 1 周期内で起きる超短時間の物理過程は再散乱過程と呼ばれる。再散乱過程に対応する観測量は、再散乱時の分子の情報を含んでおり、これら进行分析することによって分子状態を決定する、分子イメージングの研究が盛んに行われている。我々は、再散乱過程の実験で扱われる近赤外から赤外領域の波長のレーザー電場の時間変化のスケールが、分子内の電子の運動の時間スケールに比べて十分小さいという事実に着目し、ゆっくりと変化する外場に追従する電子状態の変化を断熱的に取り扱う、断熱理論を構築し、様々な原子・分子アト秒ダイナミクスの研究を行っている。本講演では、この断熱理論について概説し、いくつかの数値計算や実験データの解析結果、および分子イメージングの応用について発表する。

プラズマ中多価イオンのレーザー分光実験：出来たこと、出来なかったこと、出来るかもしれないこと

木村 直樹 核融合科学研究所

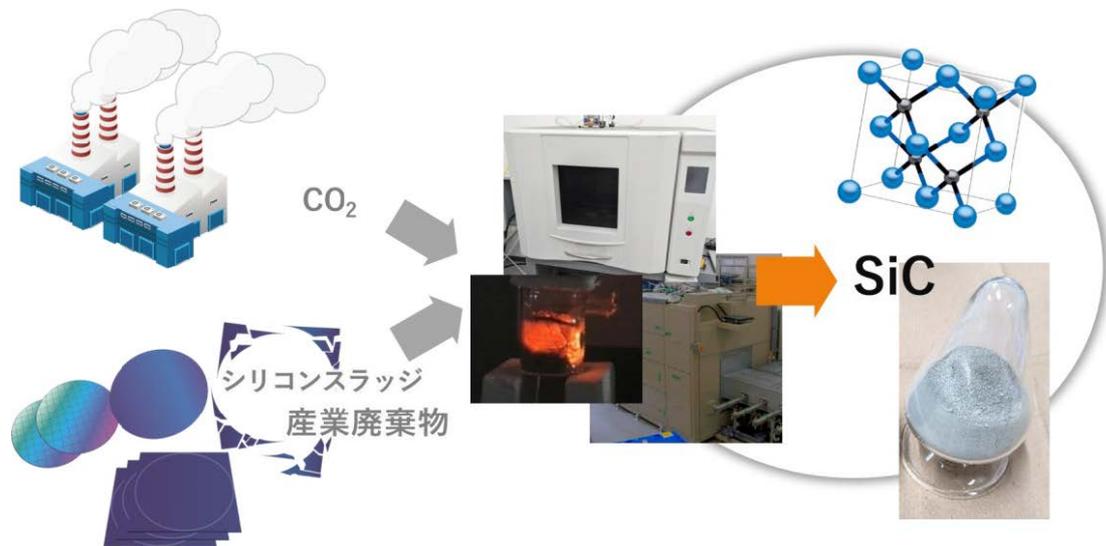
多価イオンの分光研究は、基礎物理としての有用性のみならず、天文学から産業用途まで、幅広い応用分野の興味に支えられて発展してきた原子物理学の一大分野である。20 世紀後半から 21 世紀前半にかけて長い歴史を持つ分野ではあるが、その研究活動の傾向は時代によって少々異なる。多価イオンレーザー分光は、本分野で近年注目されている方向性の一つであり、関連研究も多い。本講演では、まずその研究背景を紹介する。加えて、我々がこれまでプラズマ中多価イオンを対象に行ってきたレーザー分光実験を説明し、時間が許せば今後実施したい実験についても議論する。

一般講演要旨

マイクロ波燃焼合成によるカーボンリサイクル型 SiC の合成

東北大学工学研究科応用化学専攻 福島潤

マイクロ波プロセッシングでは、急速加熱、内部加熱、選択的加熱などの熱効果、および非熱的效果と呼ばれる現象を利用し、機能性材料などを創出することができる。特に、急速加熱や内部加熱は、座量の短時間加熱や、断熱の自由度向上など工学的に有利な点が多々あるため、材料合成法として魅力的である。本研究では、マイクロ波を燃焼合成反応の着火エネルギーとして利用し、シリコンと CO₂ から炭化ケイ素 (SiC) を製造するプロセスについて紹介する (図 1)。本討論会では、先行研究 (従来型の燃焼合成炉における実験結果) との比較を通じ、マイクロ波燃焼合成法による SiC 合成反応の特異性などについて議論できれば幸いである。



磁場変調による強磁性共鳴の検出とマイクロ波磁気損失

東北大学大学院工学研究科、国際共同大学院 吉川 昇

要旨

核融合発電の実現により脱炭素化社会が到来すると、電熱を利用して種々の工業生産、生活活動を行うことが考えられるが、その中でマイクロ波加熱は一つの重要な発熱手段となる。このため種々の物質のマイクロ波損失機構について基礎的な理解を得ることには意義がある。一般的にマイクロ波加熱は水の誘電損失、金属の誘導電流損失などが考えやすいが、物質の磁性が関係する磁気損失については十分知られているとは言い難い。

電源の電圧変換器(トランス)における低周波磁気損失(鉄損)も交流磁場における磁気損失の一部であるが、マイクロ波周波数領域の磁気損失としては、高周波フェライトにおける自然共鳴などのように、磁気共鳴がその一因であることは確かである。我々は、意図的に磁気共鳴(強磁性共鳴)を起こすことにより試料の温度上昇を起こすことを報告した[1]。また種々の強磁性体における外部磁場の変化速度の影響などを調べている[2]。

この結果、あるマイクロ波周波数(5.8GHz)において、発熱を起こす外部磁場の値が、ほぼ強磁性共鳴の理論式で予想されることが確かめられているが、温度ピークが強磁性共鳴によるものであるか検証するため、別の検出手段を併用して確認を得る必要があった。そこで、磁気共鳴の検出法として一般的に用いられている外部磁場の振幅変調を利用することにより、強磁性共鳴の検出を行い、温度上昇との関係を調べた。

1: N. Yoshikawa and T. Kato, J. Phys. D: Appl. Phys., 43 (2010) 425403.

2: N. Yoshikawa and M. Goto, J. Magn. Magn. Mater. submitted.

多価イオン電磁波スペクトルを用いた核融合・天体プラズマ診断への取り組み

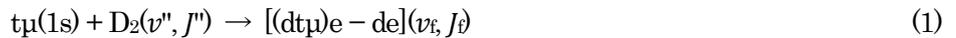
加藤太治 NIFS

重元素多価イオンからの発光線は、核融合・天体プラズマの温度・密度、およびダイナミクスを明らかにするユニークな診断法の基礎を与える。本講演では、核融合プラズマのタングステン多価イオン、太陽コロナの鉄多価イオンの発光線を、大型ヘリカル装置でのタングステン密度診断、太陽コロナの電子密度診断に応用した例をそれぞれ紹介する。また、プラズマ診断の基礎データを取得するための小型電子ビームイオントラップ (CoBIT) による測定や、重元素多価イオンの原子構造理論計算とプラズマ中での衝突・輻射モデルの開発についても説明する。

ミュオン触媒核融合と精密 X 線分光

山下琢磨 東北大・高教機構, 東北大・理

電子の 207 倍の質量をもつ素粒子「ミュオン (μ)」を、重水素・三重水素標的に入射すると、三重水素分子 (T_2) の電子と置き換わり、ミュオン三重水素原子 $t\mu$ を形成する。 $t\mu$ は高励起状態で生成し、脱励起を繰り返してやがて基底状態 $t\mu(1s)$ へ至る。 $t\mu(1s)$ と D_2 分子が衝突すると



の反応によりミュオン分子 $dt\mu$ を形成する。 $dt\mu$ は電子雲の広がり比べて小さいため、 $[(dt\mu)e - de]$ は $dt\mu$ を擬似核とした二原子分子である。このとき、 $dt\mu$ の束縛エネルギーと $t\mu$ の衝突エネルギーの和を $dt\mu-d$ 間の振動回転励起に用いることで効率よく生成する。 $dt\mu$ は核間距離が短く、分子内で核融合反応



を起こす。核融合後の μ は再び $dt\mu$ 形成・核融合を繰り返すため、この一連の過程をミュオン触媒核融合 (μ CF) とよぶ。これまでの実験で、一つの μ が 120 回から 150 回 [1] 程度の核融合を媒介することが報告されているが、実用的には 2 倍以上の核融合回数を達成することが望ましい。

μ CF は高励起状態のミュオン原子のカスケード、低速衝突によるミュオン分子の形成、核融合後の μ が α 粒子に付着し失活する過程など、多様な原子分子過程を内包する。 μ CF の効率向上にはこれらの素過程の理解を理論・実験の両面で深める必要がある。最近、X 線分光器のエネルギー分解能が格段に向上したことで、ミュオン原子の脱励起過程についても詳細な解析が可能になった [2]。本発表では、 μ CF 研究における精密 X 線分光の重要性を議論する。

(A) ミュオン原子カスケード過程

高励起状態で生成したミュオン原子は、輻射遷移の他、周囲の水素分子との衝突によりクーロン脱励起、外部オーグジュ遷移を起こし、脱励起を繰り返す。輻射遷移と無輻射遷移、衝突時に軌道角運動量を変える Stark 遷移の競合関係は KX 線の系列の強度比に影響を与えるため、これを測定することで無輻射遷移速度に対して実験的に制限を与えることができる。

(B) ミュオン分子の共鳴状態の形成

$t\mu(2s)$ が低速で D_2 分子と衝突した際、(1) と同様に反応によりミュオン分子の共鳴状態を形成する。この共鳴状態は解離時に特徴的な X 線を放出する [3]。この過程は $t\mu(2s)$, $t\mu(2p)$ 間の Stark 遷移と競合し、 $t\mu(2s)$ の運動エネルギー分布とも密接に関連するため、KX 線との強度比を測定することで脱励起ダイナミクスを解析可能である。

参考文献

[1] L. I. Ponomarev, Contemporary Physics 31, 219 (1990).

[2] T. Okumura et al., Phys. Rev. Lett. 127, 053001 (2021).

[3] T. Yamashita, K. Yasuda, Y. Kino, Phys. Rev. A 111, 012811 (2025).

学生発表要旨

Spectroscopic Characteristics of Ce- to Gd-like Highly Charged Ions in the Water Window range **Dingbao Song (a), Hayato Ohashi (b), Hiroyuki A. Sakaue (c), Nobuyuki Nakamura (d), Daiji Kato (c,a)**

a) Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University

b) Institute of Liberal Arts and Sciences, University of Toyama

c) National Institute for Fusion Science

d) Institute for Laser Science, The University of Electro-Communications

The water window emission lines (20 - 40 Å) of highly charged bismuth (Bi) ions in laser produced plasmas are useful as light sources for biological microscopy of living cells. However, broad distributions of charge states and overlapping of transition arrays in the laser produced high density plasmas make precise line identification difficult. In this paper, we identified strong emission lines in the water window from Bi ions decomposing to each charge state with a compact-electron-beam-ion-trap (CoBIT). To this end, we constructed a collisional radiative model accounting for detail atomic processes of the Bi ions interacting with mono-energetic electron beams. Moreover, strong line emissions mediated by the existence of meta-stable excited states are found by the present study.

機械学習ポテンシャルを用いたタングステン中水素-空孔相互作用の解明

野口湧喜¹、加藤太治^{2,1}

¹ 九大総理工, ² 核融合研

タングステンは比較的高い熱伝導率、高いスパッタリング耐性、および高温での機械的強度を持つ。これらの優れた特性により、タングステンは核融合炉実験炉 ITER や原型炉 DEMO のダイバータにおけるプラズマ対向材として使用されている。また、タングステンは比較的低いトリチウム保持特性を持つが、いくつかの照射実験により、欠陥構造の形成が重水素の保持を増加させることが示されている。これまで、タングステン中の水素同位体と欠陥の相互作用を計算するため、さまざまな原子間ポテンシャルが開発され、分子動力学計算に用いられてきた。しかし、これらの経験的ポテンシャルの間には、水素の結合エネルギーに大きな不定性があり、汎用的なものは現時点で存在しない。そこで我々は、近年注目されている、第一原理計算を教師データとする機械学習型アプローチを用いて、空孔と水素原子を含むタングステン結晶の機械学習ポテンシャルを構築した。本討論会では、この手法を紹介するとともに、これまでに得られた結果について報告する。

高強度磁場中の水素原子波動関数の断熱展開法の開発

山田和善¹、加藤太治^{2,1}

¹ 九大総理工, ² 核融合研

本研究では、非摂動論的な外部磁場の効果、いわゆる反磁性ケプラー運動を高精度かつ完全に量子論的に計算する手法を開発するため、断熱展開法を用いた新たな理論手法を開発した。非摂動的な外部磁場の影響下では、高励起状態の電子はクーロン場の影響が相対的に弱くなるため、磁場誘起遷移や準ランダウ共鳴構造による複雑な電磁波吸収スペクトルが得られる。また、水素原子の場合、束縛電子は古典力学的にカオスを示すことが知られている。このような状況における電子波動関数を正確に記述することは、強磁場下での原子スペクトルや強磁場天体の研究に重要である。

研究では、円筒座標系と球座標系の 2 つのアプローチを比較し、それぞれの断熱展開法の有効性を検証した。円筒座標系では、磁場方向の座標 z を断熱パラメータとし、断熱状態の波動関数(断熱チャンネル関数)の展開に Coulomb-Sturmian 基底関数を用いた。この方法では、計算パラメータの調節が困難であり、加えて断熱状態のエネルギー固有値(断熱ポテンシャルエネルギー)の物理的解釈が困難であることが判明した。次に、球座標系では、動径座標 r を断熱パラメータとし、断熱チャンネル関数の展開に球面調和関数を用いた。この方法では、計

算パラメータの調節が容易となり、断熱ポテンシャルエネルギーから明瞭な物理的描像が得られた。断熱チャンネル関数と断熱ポテンシャルエネルギーの構造からは、古典力学的に予想できる電子の運動を適切に再現できることが示された。また、断熱ポテンシャルエネルギーには、ポテンシャル曲線が接近するが交差しないという擬交差列が見られ、これを境に運動状態が移行していること、 $z=0$ 平面上の電子が感じる有効ポテンシャルの曲線に沿っていることを発見した。

結論として、球座標系を用いた断熱展開法が強磁場中の水素原子の解析に適していることが明らかとなった。今後は、この手法を基に強磁場中の原子スペクトルの非摂動論的計算コードの完成を目指す。