

原子衝突学会誌「しょうとつ」
2019年11月15日発行
第16巻第6号

原 子 衝 突 学 会 誌

しょうとつ

Journal of Atomic Collision Research

Vol.16 Issue6

2019

新しい風

反水素原子過程の4体計算

山下琢磨

原子衝突学会賛助会員（五十音順）

アイオーピー・パブリッシング・リミテッド（IOP 英国物理学会出版局）

Institute *of* **Physics**

<http://journals.iop.org/>

アドキャップバキュームテクノロジー株式会社



<http://www.adcap-vacuum.com>

有限会社イーオーアール



Electronics Optics Research Ltd.

<http://www.eor.jp/>

イノベーションサイエンス株式会社



<http://www.innovation-science.co.jp/>

株式会社オプティマ

Optima Corp.

<http://www.optimacorp.co.jp/>

クリムゾン インタラクティブ プライベート リミテッド

enago™

<http://www.enago.jp/>

<http://ulatus.jp/>

<http://www.voxtab.jp/>

コスモ・テック株式会社



<https://www.cosmotec-co.jp/>

株式会社サイエンス ラボラトリーズ



株式会社 サイエンス ラボラトリーズ

<http://www.scilab.co.jp/>

真空光学株式会社

真空光学株式会社 - Vacuum & Optical Instruments -

<http://www.shinku-kogaku.co.jp/>

スウェージロック・ジャパン

Swagelok

<http://www.swagelok.co.jp>

スペクトラ・フィジックス株式会社



A Newport Company

<http://www.spectra-physics.jp/>

ソーラボジャパン株式会社



<http://www.thorlabs.jp/>

ツジ電子株式会社



ツジ電子株式会社

<http://www.tsujicon.jp/>

株式会社東京インスツルメンツ



<http://www.tokyoinst.co.jp/>

株式会社ナバテック

真空機器の未来と歩む



<http://www.navatec.co.jp/>

仁木工芸株式会社



仁木工芸株式会社



<http://www.nikiglass.co.jp/>

伯東株式会社



<http://www.g5-hakuto.jp/>

丸善雄松堂株式会社



<https://kw.maruzen.co.jp/kousei-honyaku/>

株式会社ラボラトリ・イクイップメント・コーポレーション



<http://www.labo-eq.co.jp/>

原 子 衝 突 学 会 誌

しょうとつ

第 16 卷 第 6 号



THE ATOMIC COLLISION
SOCIETY OF JAPAN

目 次

原子衝突の新しい風 反水素原子過程の4体計算	山下琢磨 ... 92
佐々木泰三先生のご逝去を悼む	籾野嘉彦 ... 98
恩師・佐々木泰三先生を偲んで	繁政英治 ... 100
原子衝突学会第44回年会報告	行事委員会委員長 ... 102
第44回年会優秀ポスター賞の選考結果	顕彰委員会委員長 ... 105
2019年度第4回運営委員会報告	庶務委員会委員長 ... 105
第46回定期総会報告	庶務委員会委員長 ... 106
2019年度 原子衝突学会 会長選挙・運営委員選挙について	2019年度選挙管理委員会 ... 106
第21回 原子衝突学会 若手奨励賞 募集要項	顕彰委員会委員長 ... 106
「しょうとつ」原稿募集	編集委員会事務局 ... 107
ユーザー名とパスワード	... 107

反水素原子過程の4体計算

山下琢磨

東北大学 高度教養教育・学生支援機構 〒980-8576 宮城県仙台市青葉区川内 41

東北大学 理学研究科化学専攻 〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3

tyamashita@tohoku.ac.jp

令和元年 11 月 3 日原稿受付

本稿では、著者がこれまで取り組んできた、反水素原子過程の計算について、自己紹介を兼ねて紹介する。修士・博士課程の学生の参考にわずかばかりでもなれば幸いと思い、海外の研究者と共同研究する中での体験も紹介する。

1. はじめに

私は東北大学大学院理学研究科の木野康志先生にご指導いただき、2019年3月に学位を取得した。2019年4月から2019年8月まで理化学研究所仁科加速器科学研究センター・ストレンジネス核物理研究室にて肥山詠美子先生にお世話になり、2019年9月から東北大学に助教として着任し、2019年10月から東北大学高度教養教育・学生支援機構の所属となった。今回新しい風の記事を書くにあたり、著者が取り組んでいる反水素原子過程の計算について、自己紹介を兼ねて紹介する。ただし、博士課程の学生や、修士課程から博士課程への進学を考えている学生にとって幾分身近な話にしたいという意図から、学術的に踏み込んだ内容は別の機会・記事に譲ることにして、研究の背景と著者の興味を簡単に紹介したのち、海外の研究者との共同研究の体験談を紹介させていただきたい。

2. 反水素原子

反水素原子 ($\bar{\text{H}}$) は陽子の反粒子である反陽子 ($\bar{\text{p}}$) と、電子の反粒子である陽電子 (e^+) が結合した水素様原子である。反陽子は高エネルギーイオン衝突によって対生成するが、これを減速し、陽電子と結合させて反水素原子を合成することが最近可能になった。反水素原子研究

の一つの大きな目的は、そのエネルギー準位を水素原子の準位と精密に比較することで、物質と反物質の対称性を検証することである。磁気トラップ中に蓄積された反水素原子の分光では、1S-2S 遷移周波数が 2×10^{-12} の精度で、1S-2P 遷移周波数が 5×10^{-8} の精度で、超微細構造分裂の遷移周波数が 4×10^{-4} の精度で、それぞれ水素原子 (H) のそれと一致することが示された [1-3]。また、反水素原子が電氣的に中性の反物質であることを利用して、地球重力場での振る舞いを測定し、物質・反物質間の重力相互作用を検証する実験も計画されている [4, 5]。こういった素粒子物理学の基礎理論検証プローブとしてだけでなく、低温の反水素原子を扱う実験技術の躍進は、物質と反物質の多体相互作用の理解を軸とする物質・反物質科学の展開、ひいては、クーロン多体系の包括的な理解とその深化にとっても夢があるように思われる。

3. クーロン4体系

著者はこれまで反水素原子を含むクーロン4体系の研究を行ってきた。クーロン4体系とは、クーロン力で相互作用する4つの荷電粒子からなる系であり、水素分子 (H_2) はその最も基本的な例である。 H_2 のような、二つの正電荷粒子と二つの負電荷粒子から構成される系に限定し

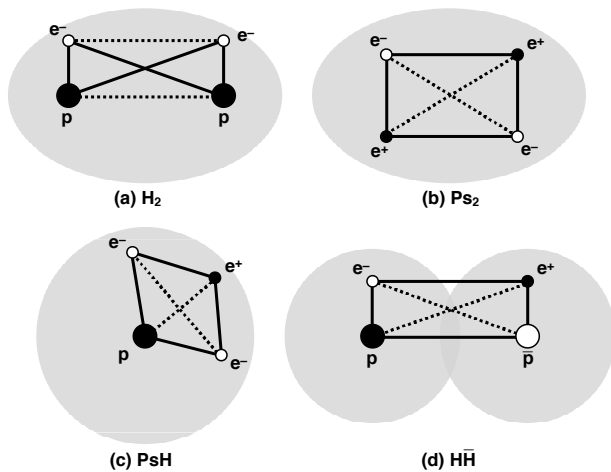


図 1: クーロン 4 体系 H_2 , Ps_2 , PsH , $H\bar{H}$ の模式図. 黒丸は正電荷粒子を, 白丸は負電荷粒子を表す. 実線は引力相互作用を, 破線は斥力相互作用を表す.

てクーロン 4 体系を考えた場合でも, その性質は粒子の質量の組み合わせに応じて大きく変化する.

H_2 を構成する二つの陽子を陽電子で置換した系は電子と陽電子が結合したポジトロニウム (Ps) の二量体とみなせ, ポジトロニウム分子 ($Ps_2 = e^-e^-e^+e^+$) と呼ばれる. Ps_2 は束縛状態と数個の励起状態が理論的に予言されており [6–8], 高強度の陽電子ビームとレーザーを用いた実験により, その存在と光学遷移を経由した解離が確認されている [9, 10]. 電子と陽電子は対消滅を起こし, Ps_2 基底状態の二光子対消滅寿命は 224 ps 程度である. Ps_2 は便宜的に分子と呼ばれるが, 振動回転準位は H_2 に比べると少ない. 例えば, H_2 では回転量子数が 0 の場合に 10 以上の振動準位が存在するが, Ps_2 は回転量子数が 0 の場合に準位は一つしか存在しない. 図 1 (a), (b) に H_2 と Ps_2 の模式的な粒子配置を示した.

H_2 を構成する陽子のうちの一つを陽電子で置換した系は水素化ポジトロニウム ($PsH = pe^-e^-e^+$) と呼ばれる. 図 1 (c) に示すように, 系の重心は陽子の近くに存在し, Ps と H が結合した分子様の系とも, H^- をコアとして e^+ が結合した原子様の系とも捉えられる. PsH は最もエネルギーの低い解離しきい値 $Ps(1s) + H$

($1s$) 下に一つだけ束縛状態が存在することが理論的に示されている [11]. PsH は実験的には, 陽電子をメタンガスに入射した時の対消滅率の変化から間接的に観測されている [12] が, 直接的な観測はまだ達成されていない. PsH を荷電反転した系は反水素化ポジトロニウム $Ps\bar{H}$ と呼ばれ, PsH と基本的には等価である.

図 1 (d) のように, H_2 の一方の H を \bar{H} で置換した系を, $Ps\bar{H}$ になぞらえて $H\bar{H}$ と書く. 重い粒子間が斥力の H_2 や, 軽い粒子のみで構成される Ps_2 と異なり, $H\bar{H}$ は重い粒子 (p, \bar{p}) 間 が引力である. $H\bar{H}$ において $p-\bar{p}$ 間の距離が小さくなると, $p-\bar{p}$ は中性化して電子・陽電子を束縛できなくなる [13]. p と \bar{p} が結合した水素様原子をプロトニウム (Pn) と呼ぶが, $H\bar{H}$ は $Pn + Ps$ への解離に対して安定でない. すなわち, $H\bar{H}$ は H_2 , Ps_2 , PsH と異なり, 束縛状態を持たない.

4. 反水素原子とポジトロニウムの衝突

反水素原子のエネルギー準位の分光実験が進められる一方で, 反水素原子が電氣的に中性な反物質であることを利用して, 物質 (地球) と反物質 (反水素原子) の重力相互作用を検証する計画がある [4, 5]. CERN で計画されている GBAR (Gravitational Behavior of Antihydrogen at Rest) [5] では, Ps と \bar{H} の衝突によって生じる反水素正イオン (\bar{H}^+) を Be^+ と共同レーザー冷却したのち光解離することで極低温の反水素原子を得ることが計画されている. また, \bar{H}^+ を電場で加速したのち陽電子を剥ぎ取れば, エネルギー可変の反水素原子ビームとしても利用できる.

$Ps(nl) + \bar{H}(1s) \rightarrow \bar{H}^+ + e^-$ の反応は, 荷電反転系での反応 $Ps(nl) + H(1s) \rightarrow H^- + e^+$ と等価である. $H^- + e^+$ の解離しきいエネルギーは, $Ps(n=3) + H(1s)$ のしきいエネルギーと近接しており, H^- の生成過程は Ps の励起・脱励起過程と不可分である. $Ps + H$ のしきいエネルギー準位を図 2 左に示した.

著者は $Ps(nl) + \bar{H}(1s)$ の衝突過程を理解する

ことを目標に理論計算の研究を進めている。この衝突過程はクーロン4体系の問題であり、Psが重い核を持たない点、反応の前後で粒子の配置が大きく変わる組替え過程を含む点で有効な近似を立てにくく、精密な取り扱いを必要とする。反応中の4体相関を効率よく取り込むため、有限空間でクーロン4体系の厳密なハミルトニアンを対角化して得た基底関数系を用いて、散乱状態を記述する。図2の右側に示した赤い準位は、ガウス関数展開法 [15] に則って、約6万個の展開関数を用いて厳密なハミルトニアンを対角化した時の固有エネルギー準位である。Ps(1s)+H(1s)のしきいエネルギー下に存在する基底状態(束縛状態)以外は、本来連続状態であるものが、展開関数が有限レンジであるために離散化された状態であり、衝突エネルギー付近での多体相関や共鳴状態の情報を含んでいる。これらの離散化された状態を本来の散乱状態を記述する基底関数系(反応の中間状態)として用い、計算を進めている。

クーロン4体系の散乱問題は、クーロン3体系のそれと大きく質的に異なる。3体問題としては、電子と水素原子の衝突が一つの簡単な例であるが、4体の散乱問題が解けるようになると、水素原子同士の衝突のような、電氣的に中性の構造体同士の衝突・反応を扱うことができるようになる。また、3体問題は「荷電粒子と原子の衝突の雛形」としての側面があるが、4体問題は電子と水素分子イオン(H₂⁺)の衝突のような「荷電粒子と分子の衝突の雛形」としての側面を持つ。Ps+H(H̄)の系は一見特殊に思われるが、構成粒子に軽粒子が多いためにエネルギー準位が疎であり、e⁻+H(e⁻H̄)が束縛状態を持たないので反応後のチャンネルが限定されるなど、精密な理論計算に適している。実験としても定量性が重要な局面にあり、量子力学的な多体散乱問題を検証する上で適した系である。

5. 反水素化水素分子

反水素原子を合成・蓄積する際、真空中に残留する不純物原子との衝突は反水素原子の損失

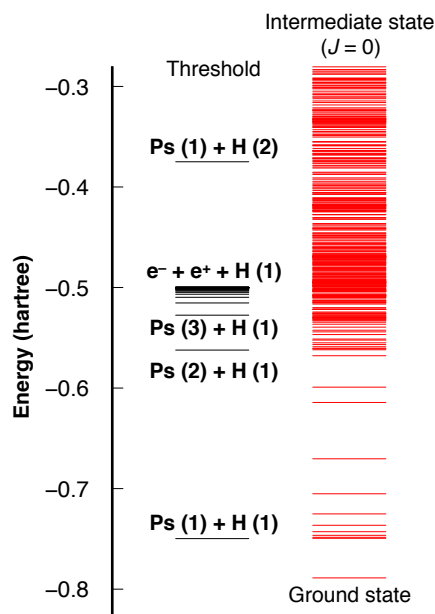


図2: PsH系のしきいエネルギー準位図(左)と、散乱計算に用いる中間状態(離散化された連続状態)の固有エネルギー(右)。Ps(n)+H(N)においてn, NはそれぞれPs, Hの主量子数を示す。

につながる。反水素原子と水素原子の衝突はその代表例である。前述したように、HĪは束縛状態を持たないが、H(1s)+Ī(1s)のしきいエネルギー付近にHとĪが分子的な構造をとる共鳴状態があるのではないかと予想されていた[14]。このような状態をこの記事では反水素化水素分子と呼ぶ。HĪから陽電子を剥奪した3体系Hp̄では、H(1s)+p̄のしきいエネルギーの下に複数の共鳴状態が存在することが理論的に予言されている[16, 17]。Hとp̄の間の相互作用は、遠方では誘起分極による引力($\propto R^{-4}$; Rは陽子・反陽子間距離)であるが、HとĪの間の相互作用は、遠方で分散力による弱い引力($\propto R^{-6}$)である。HĪでは電子と陽電子が結合するPs形成も起こるなど、含まれる過程はHp̄に比べて複雑である。

陽子・反陽子の運動と電子・陽電子の運動を分離して解く断熱近似をHĪに適用すると、断熱ポテンシャル内の束縛状態として複数の状態を計算することができる。すなわち、陽子と反陽子の距離を固定して電子・陽電子の運動を解いて断熱ポテンシャルを作り、この断熱ポテンシャルを

用いて陽子・反陽子の運動を解き直すと、図3中央列に示したような $\text{H}\bar{\text{H}}$ のBorn-Oppenheimer近似のエネルギー準位を得ることができる[18]. 図3左列には、比較として、同様の方法で得られた H_2 のエネルギー準位を共に示している.

図3右列に示した $\text{Pn}(N) + \text{Ps}(n)$ の解離しきいエネルギーと見比べれば分かるように、 $\text{H}\bar{\text{H}}$ の断熱ポテンシャルから予想されるエネルギー準位は $\text{Pn} + \text{Ps}$ の連続状態に埋もれている. 断熱ポテンシャル内の束縛状態は $\text{Pn}(N) + \text{Ps}(n)$ への自動解離の効果が含まれないため、無限の寿命を持つ状態として計算されるが、実際には $\text{Pn} + \text{Ps}$ の連続状態に埋もれた(有限寿命の)共鳴状態として $\text{H}\bar{\text{H}}$ を理解することが望ましい. そのためには、核の運動と軽粒子の運動を分離して解く断熱近似ではない、非断熱での計算が必要である.

著者は $\text{H}\bar{\text{H}}$ の共鳴状態を複素座標回転法[19]を用いて非断熱計算により探索する研究を進めている. 複素座標回転法では、断熱近似のようなハミルトニアンを分割を行わずに、有限の広がりを持つ基底関数を用いて共鳴状態のエネルギー・幅(解離寿命)を計算できる. $\text{H}\bar{\text{H}}$ の共鳴状態が $\text{H}(1s) + \bar{\text{H}}(1s)$ のしきいエネルギー付近に存在すると、低温での $\text{H}(1s) + \bar{\text{H}}(1s)$ 散乱の断面積が大きな影響を受ける可能性がある[20]. 逆に、 $\text{H}(1s) + \bar{\text{H}}(1s)$ の低速散乱断面積から、 $\text{H}\bar{\text{H}}$ の共鳴状態の存在を議論できる可能性がある. そのためには、複数の角運動量状態に対して共鳴状態の探索を行い、断面積に対する影響を理論的に明らかにする必要がある. また、陽子と反陽子は引力であり、分子内で接触するため、核力や対消滅の効果が現れうる. $\text{H}\bar{\text{H}}$ は、原子物理と原子核物理が文字通り「接点」を持つ系でもある.

6. 共同研究と海外での滞在

この記事で紹介した反水素原子過程の研究は、ウプサラ大学のPiotr Froelich先生、ストックホルム大学のSvante Jonsell先生との共同研究である. また、ワルシャワ大学のKonrad Piszczatowski

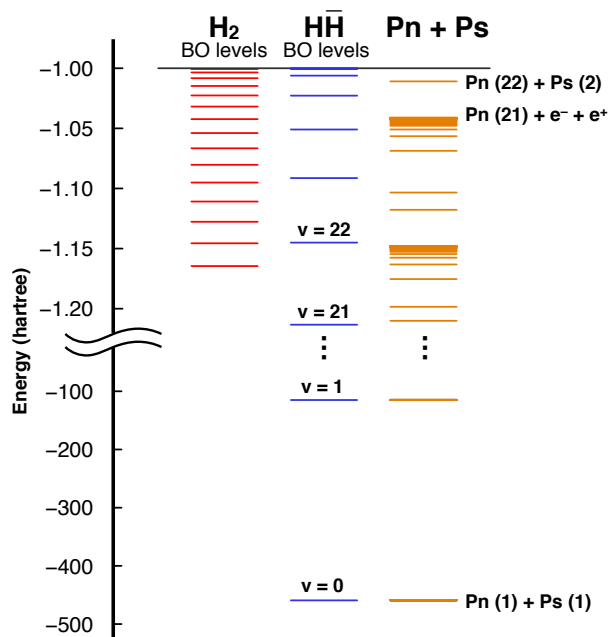


図3: H_2 のBorn-Oppenheimer近似のエネルギー準位、 $\text{H}\bar{\text{H}}$ のBorn-Oppenheimer近似のエネルギー準位、 $\text{Pn}(N) + \text{Ps}(n)$ 解離しきいエネルギーを示した. N , n はそれぞれ Pn , Ps の主量子数を表す. 上段では $\text{H}(1s) + \bar{\text{H}}(1s)$ 付近を、下段では $\text{Pn}(1s) + \text{Ps}(1s)$ 付近を拡大している.

towski博士にも大変お世話になった. 共同研究の始まりは全く偶然で、著者が修士課程の時、国際会議ICPEACに参加した折、列車内で木野先生とFroelich先生が隣席になり、話が盛り上がるうちに暇な学生がいるということになったそうである. 博士課程で共鳴の4体問題や散乱問題を手を出そうと思っていた著者は「渡りに舟」と反水素原子過程について共同研究を始めることにした.

博士課程1年の5月に著者はウプサラ大学のFroelich先生のもとを訪れた. ウプサラはストックホルムの北に位置する街で、ウプサラ大学はスカンディナヴィア最古の大学としても知られている. ウプサラ大学オングストローム研究所のLindh先生率いる量子化学計算の研究室にお世話になり、3週間ほど滞在する中で共同研究をスタートした. 当時ワルシャワ大学にいたPiszczatowski博士、ストックホルム大学のJonsell先生を交えて議論を行った. Piszczatowski博士は以前にFroelich先生と反水素原子過程に

ついて先駆的な計算を進めており、これまで使っていたプログラムについて直接教えていただく機会に恵まれた。論文には直接書かれていない潜在的な課題や、計算コード・結果に触れることができたのは貴重な経験で、計算の技術的な工夫とその意図を開発者から直接学べたことは著者にとって大きな意味があった。

Ps と H の衝突・反応の計算を目標に掲げたものの、4 体問題の計算理論に習熟することや、いままでの三体問題では扱ったことのないような大行列計算のために新たにコードの開発・最適化を進めることが必要であり、必ずしも思うように進んだわけではなかった。PsH の珍妙な構造の理解に苦しみ途方に暮れたことや、メールで表現しにくい込み入った問題にぶつかってやりとりで時間がかかってしまったこと、HH の共鳴計算に熱中して衝突計算の進捗が滞ったことなどもあったが、気長に見守ってくれた諸先生方には大変感謝している。また、メールを中心に議論を進めていたが、なかなかこちらの意図が伝わらなかったり、相手の意図をこちらが汲み取れなかったりと、「対面で、同じ紙を見て、教科書や資料を傍に議論すること」の重要性を実感した。

その後も幾度かウプサラ大学を訪れ、博士 2 年の冬に 3 ヶ月ほど滞在して衝突の計算を進めた。ちなみに、著者はビザの取得に関して大変肝を冷やしたので、渡航される方は早めに行動することを強く勧める。この滞りの時にも Piszczatowski 博士に大変お世話になった。Froelich 先生、Piszczatowski 博士と最初の 2 週間ほど毎日、議論して式を書き、軽いプログラムを組んで数値的な検証を行う、といったことを繰り返していた。Piszczatowski 博士帰国後は、計算に集中する日と議論に時間を割く日を分けて研究を進めた。オングストローム研究所はお茶を飲みながら議論できるオープンスペースがふんだんにあった。ある日学生から何を毎日そんなに議論することがあるのかと尋ねられたが、実際のところ常に前進していた訳では当然なく、ほとんど 1 ヶ月打開策が見えなかったこともあった。

皮肉なことに、イエーテボリに遊びに行こうとした週末ふと試してみた計算が案外うまく動き、最後の 1 ヶ月は幾分研究が進んだように思う。

Froelich 先生、Piszczatowski 博士、Jonsell 先生の他にも、Lindh 研究室のスタッフ・学生や、同じ部屋の材料計算の学生など、様々な人に滞在の間お世話になった。滞在中色々と気を遣ってくださり、全く頭が上がらない。この場を借りてお礼申し上げる。

7. おわりに

本稿では、著者が研究している反水素原子過程として、反水素原子とポジトロニウムの衝突および反水素化水素分子の共鳴状態について背景や著者の関心を紹介した。本稿では取り上げなかったが、陽電子と原子の束縛状態である陽電子原子 [21] や、反陽子の原子過程と共通の側面を持つ負ミューオンの原子過程の少数多体計算にも取り組んでいる。原子衝突をクーロン多体系という少し広い枠組みで捉えてみると、当たり前と思っていたことにも新たな疑問を抱くことがある。4 体の問題に限定しても、本稿で紹介したような反水素化分子の形成や、共鳴状態の解離チャネル、少数多体系の散乱問題など、挑戦的であるとともに原子衝突に普遍の現象は数多くある。色々な寄り道をしつつ少しずつ前に進んで行きたいと思う。

参考文献

- [1] M. Ahmadi *et al.*, *Nature*, **557**, 71 (2018).
- [2] M. Ahmadi *et al.*, *Nature*, **561**, 211 (2018).
- [3] M. Ahmadi *et al.*, *Nature*, **548**, 66 (2017).
- [4] P. Scampoli and J. Storey, *Mod. Phys. Lett. A*, **29**, 1430017 (2014).
- [5] P. Perez and Y. Sacquin, *Class. Quantum Grav.*, **29**, 184008 (2012).
- [6] E. A. Hylleraas and A. Ore, *Phys. Rev.*, **71**, 493 (1947).
- [7] J. Usukura, K. Varga, and Y. Suzuki, *Phys. Rev. A*, **58**, 1918 (1998).

- [8] Y. Suzuki and J. Usukura, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B, **171**, 67 (2000).
- [9] D. B. Cassidy and A. P. Mills Jr, Nature, **449**, 195 (2007).
- [10] D. B. Cassidy, T. H. Hisakado, H.W. K. Tom, and A. P. Mills, Jr., Phys. Rev. Lett., **108**, 133402 (2012).
- [11] A. Ore, Phys. Rev., **83**, 665 (1951).
- [12] D. M. Schrader, F. M. Jacobsen, N.-P. Frandsen and U. Mikkelsen, Phys. Rev. Lett., **69**, 57 (1992).
- [13] K. Strasburger, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., **37**, 4483 (2004).
- [14] B. Zygelman, A. Saenz, P. Froelich, S. Jonsell and A. Dalgarno, Phys. Rev. A, **63**, 052722 (2001).
- [15] E. Hiyama, Y. Kino and M. Kamimura, Prog. Part. Nucl. Phys., **51**, 223 (2003).
- [16] K. Sakimoto, Phys. Rev. A, **90**, 032514 (2014).
- [17] T. Yamashita and Y. Kino, EPJ Web Conf., **181**, 01034 (2018).
- [18] H. Stegeby, K. Piszczatowski, H. O. Karlsson, R. Lindh and P. Froelich, Cent. Eur. J. Phys., **10**, 1038 (2012).
- [19] Y. K. Ho, Phys. Rep., **99**, 1 (1983).
- [20] S. Jonsell, A. Saenz, P. Froelich, B. Zygelman and A. Dalgarno, Phys. Rev. A, **64**, 052712 (2001).
- [21] 木野康志, 山下琢磨, しょうとつ, **13** 卷 **2** 号, 37 (2016).

2019 年度 役員・委員会

会長

城丸春夫（首都大学東京）

幹事

平山孝人（立教大学）〔副会長〕

土田秀次（京都大学）

彦坂泰正（富山大学）

松本淳（首都大学東京）

吉井裕（量子科学技術研究開発機構）

運営委員

東俊行（理化学研究所）

鵜飼正敏（東京農工大学）

加藤大治（核融合科学研究所）

田沼肇（首都大学東京）

土田秀次（京都大学）

彦坂泰正（富山大学）

平山孝人（立教大学）

間嶋拓也（京都大学）

松本淳（首都大学東京）

吉井裕（量子科学技術研究開発機構）

石井邦和（奈良女子大学）

大橋隼人（富山大学）

金安達夫（九州シンクロトロン光研）

歸家令果（東京大学）

木野康志（東北大学）

中井陽一（理化学研究所）

常置委員会

編集委員会 委員長：彦坂泰正（富山大学）

行事委員会 委員長：土田秀次（京都大学）

広報渉外委員会 委員長：吉井裕（量子科学技術研究開発機構）

顕彰委員会 委員長：平山孝人（立教大学）

庶務委員会 委員長：松本淳（首都大学東京）

編集委員 大橋隼人, 岡田邦宏, 金安達夫, 北島昌史,
中井陽一, 彦坂泰正, 松田晃孝, 森下亨



しょうとつ 第16巻 第6号 (通巻91号)

Journal of Atomic Collision Research

©原子衝突学会 2019

<http://www.atomiccollision.jp/>

発行: 2019年11月15日

配信: 原子衝突学会事務局 <acr-post@bunken.co.jp>