

しょうとつ



**THE ATOMIC COLLISION
SOCIETY OF JAPAN**

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

Institute *of* Physics

アステック株式会社

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

ASTECH
CORPORATION

有限会社 イーオーアール

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

 **Electronics Optics Research Ltd.**

株式会社 オプティマ

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

Optima Corp.

キャンベラジャパン株式会社

<http://www.canberra.com/jp/>


CANBERRA

クリムゾン インタラクティブ プライベート リミテッド

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

<http://ulatus.jp/>

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

 **enago™**

株式会社 サイエンス ラボラトリーズ

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

 **株式会社 サイエンス ラボラトリーズ**

真空光学株式会社

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

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

スペクトラ・フィジックス株式会社

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

 **Spectra-Physics.**
A Newport Corporation Brand

ソーラボジャパン株式会社

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



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/>



株式会社東和計測

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



株式会社トヤマ

<http://www.toyama-jp.com/>



株式会社 ナバテック

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



仁木工芸株式会社

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



伯東株式会社

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



丸菱実業株式会社

<http://www.ec-marubishi.co.jp/>

丸菱実業株式会社

MARUBISHI CORPORATION

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/>



しょうとつ

第9巻 第3号

目次

(巻頭言) 会長挨拶	高橋 正彦	… 5
(シリーズ) 宇宙と原子 シリーズ序文	市川 行和	… 7
(シリーズ) 宇宙と原子 第一回 ヘリウムの発見 –先に宇宙で見つかった原子–	市川 行和	… 8
(原子衝突のキーワード) イオンのクーロン結晶	岡田 邦宏	… 10
(原子衝突のキーワード) 解離性再結合	高木 秀一	… 11
(原子衝突のキーワード) 振動子強度	酒井 康弘	… 12
(書評) 「原子分子物理学ハンドブック」	土田 秀次	… 13
第 19 回原子衝突セミナー報告	高口 博志	… 14
第 19 回原子衝突セミナー参加報告	南雲 一章	… 15
「原子衝突学会」改称記念式典 および第 37 回原子衝突学会年会のお知らせ	行事委員会	… 16
第 52 回(2012 年度)真空夏季大学のご案内	庶務幹事	… 17
2012 年度 第 1 回運営委員会(文書持回)報告	庶務幹事	… 17
2012 年度 第 2 回運営委員会(新旧合同)報告	庶務幹事	… 18
第 13 回原子衝突学会若手奨励賞の受賞者決定	庶務幹事	… 18
国際会議発表奨励事業に関するお知らせ	庶務幹事	… 18
広報渉外委員会からのお知らせ	広報渉外委員会	… 19
編集委員会からのお知らせ	編集委員会	… 19
「しょうとつ」原稿募集	編集委員会	… 20
今月のユーザー名とパスワード		… 20

シリーズ

「宇宙と原子」(10 話) シリーズ序文

市川行和
yukitikawa@nifty.com

原子物理, 特に原子衝突の論文を書いていてその研究の意義を説明する際, 「本研究は宇宙の研究にとって重要である」と書いた経験のある人は多いのではないのでしょうか. 「宇宙の研究」と「原子分子の研究」が密接に関係していることは大雑把にはよく知られていることです. しかし, 具体的にどこでどのように関係しているかは, 各自の興味の対象に限っては知っていても, その他の分野についてはよく知らないのではないのでしょうか. そこでここでは宇宙と原子の関係を 10 件ほどの例をあげて説明してみようと思います.

筆者は以前, 宇宙科学の研究所に勤務していました. そのようなところで何故原子物理の研究をしているのかをひとに説明するために, 「宇宙と原子」についていろいろ考えました. また, いくつかの大学や夏の学校で講義をする際, 「宇宙と原子」をテーマとしたことがあります. 原子物理については興味を示さない学生も, 宇宙となると俄然乗り出してくることが多いからです. 宇宙の話を通じて原子物理に関心をもってもらうのがねらいで, それはしばしばうまくいきました.

以上のような経験を踏まえて原子と宇宙の話をしたいと思います. これは決してしっかりした解説ではありません. これからの研究のきっかけとなることを目的とします. 宇宙そのものの研究は筆者の専門ではないので細かいところでは誤解しているところがあるかもしれません. すこしでも変だと思われた方は参考文献を読んでください. 宇宙の研究は大型の道具(望遠鏡や, 人工衛星, 大型計算機など)の発達で急速に進んでいます. それに伴い関係する原子分子の研究がますます必要となっています. その辺の様子的一端をお伝えするのも本シリーズの目的の一つです.

「宇宙と原子」 第一回 ヘリウムの発見 ー先に宇宙で見つかった原子ー

市川行和

yukitikawa@nifty.com

平成 24 年 2 月 24 日原稿受付

1868 年 8 月に皆既日食があり、各国の天文学者が観測に参加した。特に今回はプロミネンス（紅炎。太陽表面の上、コロナ中に浮かぶプラズマの雲）の分光観測が初めて行われた。そのスペクトルの中に未知の黄線が見つかり、それがヘリウムの存在が世の中に知られた最初となった。しかし、日食直後の観測報告では特に注目されなかった。後にヘリウムの発見者の一人となるフランスの天文学者 P. J. C. Janssen の報告にもその黄線について特別の注意はなかった。しかし、彼はその後、日食時でなくてもプロミネンスが観測できる方法を開発し、ナトリウムの D 線の近くに未知の黄線があることを見出して発表した。これはナトリウムの D_1 , D_2 線の近くにあるので、しばしば D_3 線と呼ばれる。

一方、英国のアマチュア天文家 N. Lockyer は日食時でなくてもプロミネンスを観測する手法を独自に開発し、Janssen とまったく同時に黄線の観測を発表した。そこでヘリウムの発見者としては Janssen と Lockyer の二人の名前が挙げられることが多い（どちらか一人のこともある）。なおこのような「発見物語」につきものであるが、これら二人と同時に（あるいはそれ以前に）この黄線を見たという人が複数いるようである。（ヘリウム発見の経緯、とくに太陽での発見以後、地上での発見までの間の物語については Kragh の文献 [1] に詳しい。）

問題の黄線については、その起源をめぐってさまざまな研究が行われた。特に Lockyer は水素の何か特別な状態が関与しているのではないかと考え、実験を行った。しかし、問題の黄線を再現することはできず、最終的に新しい元素に由来すると考え、その名前をギリシャ神話の太陽

神 Helios に因んで Helium とした。しかし、Lockyer の論文を詳しく調べた人によると、彼の書いたもの (Ramsey による地上での発見以前) には、どこにもヘリウムという言葉は出てこないそうである。ヘリウムという言葉が文献に現れるのは、W. Thomson の British Association for the Advancement of Science の会長講演 (1871 年) を記録したものが最初である。その中で Thomson は、Lockyer がプロミネンスで発見した黄線は未知の元素によるもので、彼はその元素をヘリウムと呼ぶことを提案している、と述べている。おそらく Lockyer はヘリウム説を公に主張することに慎重で、周囲の者に非公式に語っただけなのであろう。なお問題の黄線はその後他の天体（星や星雲）でも発見された。

偶然のことから地上でヘリウムが見つかったのは 1895 年である。前年 (1894 年) にアルゴンを発見した W. Ramsey はその後もアルゴンの研究を続けていた。あるウラン鉱物から不活性気体が発生するということをきいて、それを分光してみたところ、ヘリウムの黄線が見つかったのである。一連の希ガスの研究で、Ramsey は 1904 年にノーベル化学賞をもらっている。

宇宙の元素組成をみると、ヘリウムは水素に次いで 2 番目に多く、全原子数の約 10 % を占める。それなのになぜ地上でなかなか発見されなかったのであろうか。ヘリウムは不活性でほとんど化合物を作らない。おまけにとっても軽いので、地球創生時にあったヘリウムはすべて宇宙へ逃げてしまったのである。（水素はヘリウムより軽い、さまざまな元素と化合物（特に、水）をつくっており地上にとどまっている。）現在地球大気中のヘリウム含有率は 5 ppm (0.0005 %) である。これは

放射性鉱物から出るアルファ線により供給されている。なおちなみに放射線の発見は 1896 年であり、Rutherford によりアルファ線がヘリウムの原子核であると確認されたのは 1908 年である。

図 1 はヘリウムのグロトリアン図である。図の右側、 $2p\ ^3P \rightarrow 3d\ ^3D$ の遷移に伴う放射(587.6 nm)が太陽で見つかった黄線に相当する。ヘリウムの励起状態はかなり高いところにあり(約 20 eV 以上)、したがって可視光の放出・吸収は高い励起状態間の遷移に限られる。太陽の光球は 5800 度なので、高い状態を励起することはほとんど不可能であり、可視光で太陽を見たのではヘリウムは見つからない。高温の領域(プロミネンス)を見る必要があったわけである。ついでに述べると、このことから太陽(光球)中のヘリウムの組成を決めるには通常の分光学的手法は使えず、太陽振動(日震)の解析から決まる密度構造から比 He/H が求まるのを利用する。

宇宙からやってくる電磁波のスペクトルを解析して未知の線が見つかり、それを新しい原子に帰する試みはこのほかにもあった。やはり日食の際の観測で得られた太陽コロナのスペクトルに未知の緑線(530.3 nm)があった。この起源がわからず、コロナウムという新しい元素に由来するとされた。しかし、1930 年代になって Grotrian と Edlen によって、これが鉄の多価イオン Fe^{13+} のものであることがわかった。なお、多価イオンの存在が実験室で確認されたのは 1920 年代である。また惑星状星雲からの輝線がネブリウムのものだということが言われたが、これについては次回に述べる。

参考文献

- [1] H. Kragh, Ann. Sci. **66**, 157 (2009).
- [2] B. H. Bransden and C. J. Joachain, Physics of Atoms and Molecules (Pearson Education Limited, 2003).

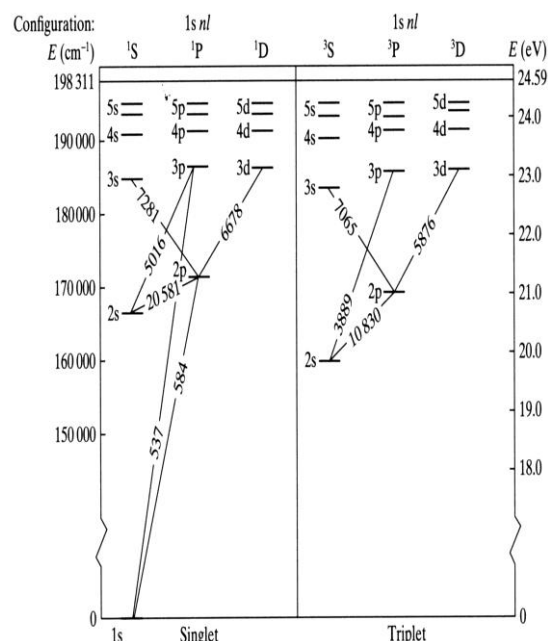


図 1: ヘリウムのグロトリアン図. 斜線は遷移を表し, 付記の数字は対応する波長(オングストローム単位). (文献 [2] より転載)

「原子衝突のキーワード」

イオンのクーロン結晶 (Ionic Coulomb crystal)

イオントラップに閉じ込められ、レーザー冷却によって極低温に冷却された多数のイオンは非中性プラズマと考えることができ、その性質はイオンの熱運動エネルギーに対するイオン-イオン間のクーロンポテンシャルエネルギーの比で定義されたクーロン結合係数 $\Gamma = q^2 / (4\pi\epsilon_0 a k_B T)$ によって特徴付けられる[1, 2]. ここで、 q はイオンの電荷、 a はイオン-イオン間の平均距離である。トラップイオンの数密度 n_0 が一定であれば $a = \sqrt[3]{3 / (4\pi n_0)}$ で与えられる。高周波四重極型イオントラップ中のレーザー冷却イオンの場合、数密度 n_0 はトラップ条件で決まる定数(ゼロ温度数密度)によって近似的に表わせる。 T はトラップされたイオンの平均永年振動エネルギーを温度に換算した値である。非中性プラズマでは、 Γ の値に従って粒子が自由に運動する気体状態 ($\Gamma \ll 1$) から液体・固体状態 ($\Gamma > 1$) に相転移する。このとき、固体状態にある非中性プラズマを“クーロン結晶”と呼ぶ。原子イオンのクーロン結晶はポールトラップ中の Mg^+ イオンのレーザー冷却実験で初めて実現された[3].

モンテカルロシミュレーションの結果によれば、無限に広がった非中性プラズマの場合、 $\Gamma \sim 2$ で液体状態となり、およそ $\Gamma > 170$ でクーロン結晶化することが明らかにされている[4, 5]. 一方、ポールトラップに閉じ込められたイオンと物理的状況がよく似ている、円柱対称 3 次元調和ポテンシャル $\phi(r, z)$ 中の非中性プラズマの理論的研究も行われており、粒子数と r, z 方向の調和ポテンシャルの比 ($\alpha = \omega_z^2 / \omega_r^2$, ω_i : i 方向の永年角振動数) をパラメータとするクーロン結晶構造の相図が求められている[6]. その結果によると、 α が小さく ($\alpha < 0.1$), 粒子数が少なければ z 軸に沿って粒子が数珠状に並び、粒子数の増加に伴いジグザグ構造、らせん構造、シェル構造へと変化していく。

図 1 は線形ポールトラップ内で実験的に生成された Ca^+ のクーロン結晶の蛍光画像である。図(a) はトラップ軸 (z 軸) 方向に沿った調和ポテンシ

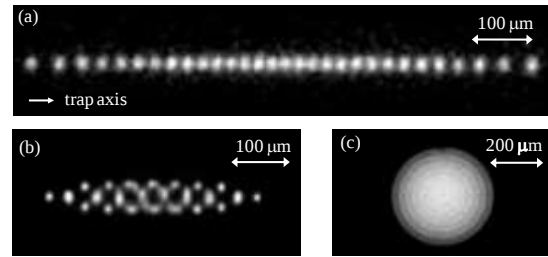


図 1: Ca^+ クーロン結晶の蛍光画像. (a) 30 個 ($\alpha \approx 0.005$), (b) 34 個 ($\alpha \approx 0.04$), (c) 約 1400 個 ($\alpha \approx 0.42$). 平均永年振動エネルギーはいずれも 10 mK 以下である(著者らによる実験結果).

ル上に数珠状に並んだクーロン結晶の例であり、それぞれの蛍光スポットに Ca^+ がほぼ局在化している。これは正にイオンが“結晶化”した状態である。図(b)は(a)よりも大きな α で測定した 34 個の Ca^+ の蛍光画像である。中心部がらせん状になっており、その部分ではイオンが拡散できているを示している。また、図(c)は約 1400 個の Ca^+ イオンの蛍光画像であり、同心球状シェル構造が見られる。異なるシェルの間はイオンが移動できないため固体状態と見なせるが、シェル内はイオンが拡散できる液体状態である。イオンのレーザー冷却の分野では、図(a), (b), (c)のような相状態について、ひと括りに“クーロン結晶”と呼んでいるので、注意されたい。レーザー冷却法によって生成されるイオンのクーロン結晶は、レーザー冷却法が適用できない原子・分子イオンを、クーロン相互作用を介して極低温に冷却するための“冷媒”として利用することが可能である(sympathetic cooling). 今後、原子・分子イオンの精密分光をはじめとする様々な研究への応用が期待される。

(上智大学 岡田邦宏)

参考文献

- [1] プラズマ物理学, 東辻浩夫(朝倉); プラズマ物理学, 後藤健一(共立).
- [2] ダストプラズマのクーロン結晶については以下の文献を参照: 林, 橘, プラズマ核融合学会誌 72 (1996) 70.
- [3] F. Diedrich *et al.*, Phys. Rev. Lett. 59 (1987) 2931.
- [4] J. P. Hansen, Phys. Rev. A 8 (1973) 3096.
- [5] W. L. Slattery *et al.*, Phys. Rev. A 21 (1980) 2087.
- [6] D. H. E. Dubin *et al.*, Phys. Rev. Lett. 71 (1993) 2753.

「原子衝突のキーワード」

解離性再結合 (dissociative recombination)

表題にある再結合とはイオン化の逆過程のこと。電離層や H II 領域の宇宙科学,あるいは放射線化学では,イオン化と再結合は重要な課題であり,解離性再結合の研究はこのような分野から始まった。原子分子過程として表現すれば,「分子イオンが電子と結合し解離する過程」ということになる。ちなみに,中性分子が電子と結合し解離する過程は,解離性付着 (dissociative attachment) といい,分子イオンとは別名である。「解離性再結合」を冠した国際会議が 1988 年以来 8 回開かれており,ここ 20 年余りで実験,理論,応用いずれの研究も大きく変貌した。ここでは最近の解説 [1, 2] を挙げるに留め,低エネルギーでの解離性再結合の機構を概観する。

入射電子がイオンと結合するには,(1) エネルギーを失い束縛状態に入り,再イオン化する前に,(2) 他のチャンネルに逃げ安定化する必要がある。(2) の安定化機構として光を放出するのが輻射再結合であるが,軽い分子では時間がかかり過ぎる($\sim \mu\text{s}$)。分子イオンでは分子解離という速いチャンネルがあり($\sim \text{ps}$)、解離にエネルギーが使われ電子エネルギーがイオン化敷居値より低くなれば,解離性再結合となる。

(1) で電子が結合するには,入射電子が標的イオンを励起しエネルギーを失えば良いのだが,その機構として,(e) 電子励起,(v) 振動励起,(r) 回転励起が挙げられる。 (e) が起これば二電子励起状態への入射電子の捕捉であるが,どの分子でも解離にともないイオン化敷居値の下にもぐってくれる二電子励起状態があるわけではない。イオンとのポテンシャル曲線交差の有無は分子種による。例えば,電子との衝突エネルギーが 1eV 以下に,このような二電子励起状態があるのは H_2^+ で,ないのは HeH^+ , H_3^+ , 微妙なのは CH^+ といった具合である。 (e) と異なり,回転励起(r) は励起エネルギーが小さいので,入射電子は主量子数の大きな Rydberg 状態

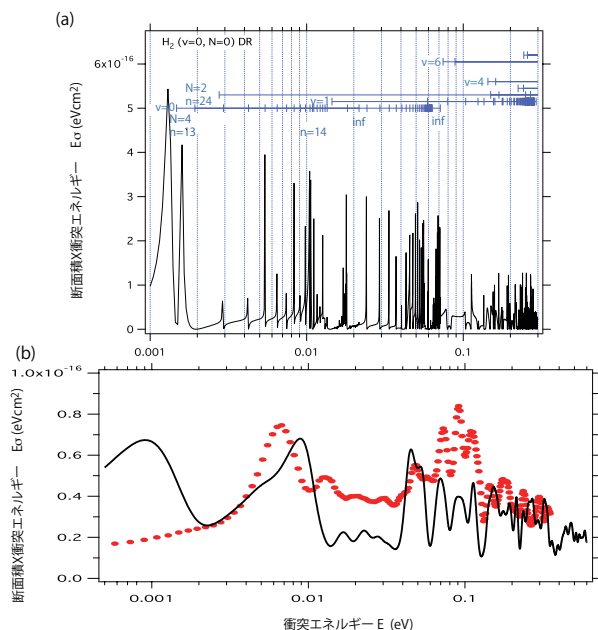


図 1: 振動回転基底状態の H_2^+ 解離性再結合還元断面積 (a) 計算値と共鳴準位 (b) 赤点: 実験値, 実線: なました計算値. [2] 参照

に捕捉され,かつそのような状態は状態密度が大きく,分子種によらず存在する。Rydberg 状態は低い電子状態と比べ非断熱相互作用が強く,電子状態と振動状態の間で速やかにエネルギーの再分配が起こる場合がある。主量子数が低下し振動運動が励起され解離エネルギーを超えれば解離性再結合となる。振動回転励起 Rydberg 状態を経由して(e) の二電子励起状態に解離する機構も知られており間接過程と呼ばれる。

量子欠損理論は無限個ある Rydberg 状態を解析的に表現し,強い非断熱相互作用による散乱過程を計算可能にする。図 1 に H_2^+ の解離性再結合の還元断面積 (= 断面積 $\times$ 衝突エネルギー) の計算値を示す。回転励起した Rydberg 状態のエネルギーに鋭い共鳴構造がみられる。下段の図 (b) は実験値 (絶対値) との比較である [2]。

(北里大学 高木秀一)

参考文献

- [1] A. I. Florescu-Mitchell and J. B. A. Mitchell, Phys. Rep. **430** (2006) 277.
- [2] 市川, 大谷編集, 原子分子物理学ハンドブック (2012) 3.4 章 (朝倉書店)

「原子衝突のキーワード」

振動子強度 (oscillator strength)

振動子強度をひとことで述べるとすれば、それは振動子の個数のことである。それは個数を表すものである。次元をもたず、光吸収断面積から求められることから、別に説明する一般化振動子強度 (generalized oscillator strength) と区別するために光学的振動子強度とも呼ばれる。振動子の個数と言っておきながら、その値は整数だけに限らないばかりでなく、負の値を取ることもあるので直観と異なる部分は少なからずある。しかし、後で述べる総和則により振動子の個数という概念が正しい描像であったことに気づかされる。振動子強度についてはすでにいくつかの本でも説明されている[1, 2]が、多くの場合、その定義から説明されている。ここでは少し別の方向から、誤解を恐れずにできるだけ平易な言葉で説明しようと思う。

まず簡単のために原子を考え、原子の中の n 番目の電子(質量 m , 電荷 e)がその平衡位置のまわりで角振動数 ω_n で振動する振動子(振動する系のこと=バネでつながれた質点であるとしてよい)であるとしよう。そうすると、原子内の電子は f_n 個の振動子の集まりであると考えられる。この原子の x 方向に角振動数 ω の弱い電場を与えたとき、各振動子はそれぞれ独立に応答する。この応答を3次元的なものとして量子力学的に扱い、双極子近似の範囲内で誘起される分極率 $\alpha(\omega)$ を求めてみる。角振動数 ω_n と f_n をそれぞれ、

$$\omega_n = (E_n - E_0)/\hbar$$

$$f_n = f_{0n} = 2m(E_n - E_0) \frac{| \langle n | \sum_j x_j | 0 \rangle |^2}{\hbar^2}$$

とすると、分極率 $\alpha(\omega)$ は、

$$\alpha(\omega) = \frac{e^2}{m} \sum_n \frac{f_n}{\omega_n^2 - \omega^2}$$

で書くことができる。 E_0 , E_n は、それぞれ原子の始状態0および終状態 n のエネルギー固有値であり、 $(E_n - E_0)$ は励起エネルギーに相当する。 x_j は、原子内電子のデカルト座標 $\mathbf{r}_j$ の x 成分を表し、 $| \langle n | \sum_j x_j | 0 \rangle |$ はその和の行列要素である。始状態を基底状態と考えた場合(光吸収による励起等に相当)には特に問題はないが、始状態を励起

状態(光放出等の脱励起過程)である場合、 $(E_n - E_0)$ の値は負になることがある。ただし、 f_{0n} と f_{n0} はそれぞれの縮重度までを考慮すればその絶対値は等しい。そこで一般には、例えば光吸収の振動子強度、などと記述することになる。

さて、終状態が連続状態にある場合も考えよう。この場合は、終状態の波動関数 ϕ_E を

$$\int \phi_E^* \phi_{E'} d\mathbf{r} = \delta(E - E')$$

とエネルギー E で規格化し、 $\omega = (E - E_0)/\hbar$ として振動子強度密度 $df/dE = \hbar^{-1} df/d\omega$ を考える。すると、 E と $E + dE$ の間の振動子強度は $(df/dE)dE$ で与えられる。前述の f_n の式の和は、これら連続状態をも含めてのすべてであると考え。そこで、原子についての振動子強度密度 df/dE を離散的な状態に関して、 $df/dE = \sum_n f_n \delta(E - E_n)$ として含めた全体を原子の振動子強度分布という。つまり、離散準位に対しては振動子強度、連続状態に対しては振動子強度密度、すべてを一括で考えるときには振動子強度分布が使われるといてよいであろう。振動子強度分布は、原子についての光の吸収や放出等についての性質を双極子近似の範囲内で記述する。

ところで、振動子強度分布は、光吸収断面積の測定から実験的に決定できる。(理論的に求めることも可能であるが、きわめて正確な波動関数が必要ときいている。)詳細は省くが、角振動数 ω の光吸収断面積 $\sigma_{ph}(\omega)$ は、

$$\sigma_{ph}(\omega) = \frac{2\pi^2 e^2 \hbar}{mc} \frac{df}{dE}$$

と表される。ただし、実際にこれらの式を使用するときには、単位系に留意する必要がある。

なお、振動子強度分布には重要な総和則がある。詳細は次号「一般化振動子強度」の項に譲るが、振動子強度分布をすべての励起エネルギーにわたって積分するとその値は原子内電子の個数に等しくなる。これが、振動子強度を直観的に振動子の個数と考えてよい理由である。

(東邦大学 酒井康弘)

参考文献

- [1] 金子洋三郎, [化学のための]原子衝突入門, 培風館 (1999).
- [2] 高柳和夫, 原子分子物理学, 朝倉書店 (2000).

2012 年度 役員・委員会等

会長

高橋正彦（東北大学）

幹事

渡部直樹（北海道大学）（副会長） 森下 亨（電気通信大学）

足立純一（高エネルギー加速器研究機構） 星野正光（上智大学）

運営委員

石井邦和（奈良女子大学）

高口博志（広島大学）

星野正光（上智大学）

間嶋拓也（京都大学）

美齊津文典（東北大学）

本橋健次（東洋大学）

森下 亨（電気通信大学）

渡辺信一（電気通信大学）

足立純一（高エネルギー加速器研究機構） 岸本直樹（東北大学）

小島隆夫（理化学研究所）

富田成夫（筑波大学）

日高 宏（北海道大学）

渡部直樹（北海道大学）

渡辺 昇（東北大学）

会計監事

鵜飼正敏（東京農工大学） 2012 年度総会にて新規監事に交代予定

中村義春

常置委員会等

編集委員会

委員長： 渡部直樹（北海道大学）

行事委員会

委員長： 森下 亨（電気通信大学）

広報渉外委員会

委員長： 足立純一（高エネルギー加速器研究機構）

若手奨励賞選考委員会

委員長： 大野公一（豊田理化学研究所）

国際会議発表奨励者選考委員会

委員長： 高橋正彦（東北大学）

学会事務局

担当幹事：星野正光（上智大学）

編集委員会

足立純一，岸本直樹，長嶋泰之，中井陽一，羽馬哲也，早川滋雄，日高 宏

森林健悟，渡部直樹

しょうとつ 第9巻 第3号 （通巻46号）

Journal of Atomic Collision Research

©原子衝突学会 2012

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

発行: 2012 年 5 月 15 日

配信: 原子衝突学会 事務局

<acr-post@bunken.co.jp>