

特集：放射光利用の広がり(2)

放射光を使った原子物理と天体物理との接点
～原子イオンの光電離実験～山岡人志¹, 大浦正樹¹, 北本俊二²¹理化学研究所播磨研究所*, ²立教大学理学部物理学科Photoionization Studies of Singly and Multiply Charged Ions Using Synchrotron Radiation for
Atomic Physics and Astrophysics ResearchHitoshi YAMAOKA¹, Masaki OURA¹ and Shunji KITAMOTO²¹Harima Institute, RIKEN (The Institute of Physical and Chemical Research)²Faculty of Science, Rikkyo University

Abstract

We review photoionization studies of singly and multiply charged atomic ions from the viewpoints of not only atomic physics but also astrophysics since photoionization of atomic ions happens commonly in space plasmas. Recent results obtained using a merged-beam apparatus at the SPring-8 are shown as examples of laboratory experiments. Examples of observations of the space plasma by the ASCA and Chandra x-ray satellites are also presented. The importance of experimental data of highly charged ions obtained in a laboratory for the understanding of space plasma is emphasized.

1. はじめに

宇宙空間の大部分は原子が電子とイオンに分離したプラズマで満たされていると言われている¹⁾。この観点から見ると、地球のような中性の存在はまれということになる。天体・宇宙物理学では、遠くからやってくる電波からγ線までのいろいろなエネルギーの光を地上の天体望遠鏡や人工衛星に搭載された望遠鏡で観測している。プラズマ中の様々な原子過程を計算して宇宙や星の状態を議論するとき、プラズマ中のイオンの基本的な原子データ、すなわちエネルギー準位などの電子的構造、イオン化の断面積といった情報が重要になってくる。星の間での粒子密度は低い、そして低い故に、長い宇宙スケールで電離が起きても再結合する確率はきわめて低い。そのため、宇宙空間には1価イオンが多く存在し、また、多価イオンもあることが知られている²⁾。宇宙空間におけるイオン生成は、主として紫外線からX線の光吸収によるもの、主として衝突によるものの二通りが存在する。星の近く、例えば中性子星やブラックホール、白色矮星(わいせい)など重さのわりに小さいいわゆるコンパクト星の近傍では、もっとダイナミックな過程が高い密度のプラズマで起きており、その状態が多価イオンからのX線を観測することにより議論されている^{3,4)}。さらに、X線は長い宇宙空間を通過してきたものであり、星間物質による吸収を受けたあとの強度を計測することになる。しかし、解析は、X線の発生から吸収まで様々な仮定に基づいて行われており、多価イオンに関するデータ、特に吸収に関する情報は計算値にたよっているのが現状である。宇宙物理学は、宇宙の始まりを議論するときは、素粒子物理学や高エネルギー物理学

と深く結びついている。しかし観測結果を解釈するときには、上記のような原子物理学の基礎データが不可欠であり、宇宙物理学と原子物理学は密接なつながりを持っている。

一方、原子を光吸収という原子物理学的観点から見た場合、これまで得られている情報は中性原子に関するものがほとんどで、原子イオン、特に高電離した多価イオンに関する情報は中性原子に比べるとはるかに少ない⁵⁾。中性原子、元素の数は同位体を除けば100種類ちょっとであるが、これを1価から多価のイオンまで拡張すると、数千種類にもなる。地球上では、宇宙空間と違い、自然の状態では孤立した原子イオンは再結合のために安定には存在しない。孤立原子イオンを調べるためには、高真空中でイオンを集めておけば良いが、通常はクーロン斥力で飛び散ってしまう。原子イオンの光吸収を実験的に調べることは特別な技術を要することになる。また、実験結果が少ないため、当然、理論も十分な検証を受けているとは言えない。

我々は最近SPring-8で原子イオンの光電離実験をスタートさせた。この研究では、放射光が強力な武器となる。この実験は原子物理学的観点からだけでなく、上に述べたように天体物理学的観点からも重要である。ここでは、これら、両方の観点から最近の成果をふまえ、なるべくわかりやすい解説を試みたい。最初に原子イオンの光電離のこれまでの実験と理論について述べ、次に宇宙物理学、特にX線天文学の現状について具体例をあげながら原子物理学との接点を説明する。そして、最近のSPring-8での実際の実験例を示して、地上実験の現状を述べる。

* 理化学研究所播磨研究所 〒679-5148 兵庫県佐用郡三日月町光都 1-1-1
TEL: 0791-58-2809 FAX: 0791-58-2810 E-mail: yamaoka@spring8.or.jp

2. これまでの原子イオンの光電離に関する実験的研究

2.1 必要な実験技術

20世紀の初頭の量子力学と相対論の黎明期から物理学の基本は、物質構造や現象の物理的メカニズムの光による解明であった。研究手法である分光は、可視から始まり、X線、そしてはるかに高いエネルギーへと移行してきた。その中で、紫外線からX線領域を使う一価或多価イオンの光吸収分光、光によるイオンの励起や電離の実験が、必要とされながら取り残されてしまった。その大きな理由のひとつは、実験そのものの困難さにある。ターゲットのイオンを集めるにはビーム状にするか電磁場でトラップするしかない。より高い密度を様々なイオン種に対して比較的容易に得られるのはイオン源から引き出されたイオンビームである。しかし、それでも中性粒子のガスの場合と比べて6-7桁も密度が低い。実際、イオンビームの密度は 10^{-8} Pa程度の真空中の残留ガスの密度と同じオーダーである。そこで、希薄なターゲットの数を実効的に増やして信号強度をかせぐために、光のビームとイオンビームとの向きをそろえあわせてしばらく平行に走らせ、その間に反応を起こさせるという「合流ビーム法 (merged beam method)」が考案され、実験に使われるようになった。Figure 1にcrossed beam methodとの概念的な比較を示す。図の斜線の部分が有効相互作用領域である。2つのビームを平行に走らせることで相互作用領域を長くしている。

一様なビームを長い距離安定に重ね合わせるのには容易な技術ではない。鉛筆の芯程度の大きさのふたつのビームを10 cm以上完全に重ね合わせなければならない。そして、残留ガスの影響を少なくする、すなわち、装置を超高真空にせなければならない。光による電離過程を見ようとする、入射する光の強度も強くなければならない。これが放射光を光源として使う理由である。最近、強力な光源の出現によりイオンの光電離の実験が世界のいくつかの場所で実施されるようになった。いろいろな原子のいろいろな価数のイオンを自由に取り出せるイオン源も必要である。これには電

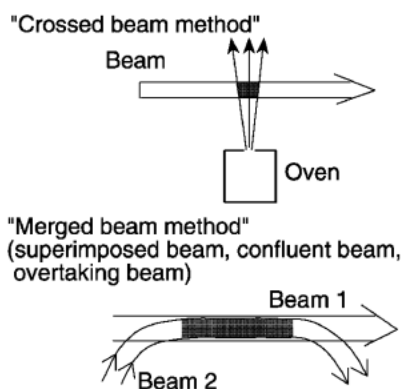


Figure 1. Why merged beam? Comparison between crossed beam and merged beam methods.

子ビームイオン源あるいは電子サイクロトロン共鳴 (Electron Cycrotron Resonance, ECR) イオン源が最適とされている。いろいろなものを組み合わせるために、全体として、実験装置はおおがかりになってしまう。

2.2 原子イオンの光電離実験の推移

1976年頃にパイオニア的実験がアメリカNBSのLucatortoとMcIlrathらによって行われた^{6,7)}。これはレーザーでターゲットイオンを生成し、それに別の光源からの連続光をあてて光吸収を見るという実験であった。その後、上に述べた「合流ビーム法」をイギリスのDolderらが確立し、Daresburyで初めて光源として放射光を用いた実験が行われた^{8,9)}。彼らは1980年代半ば以降一連の実験を行ったが数年で途切れている。

他に、ふたつのレーザーを用いて光源用プラズマと標的プラズマを作る方法がアイルランドのダブリンのグループによりなされてきた^{10,11)}。この方法のメリットは一度にスペクトルが測定でき時間も短くてすむという点であろう。しかし、ターゲットとなるイオンの種が限られること、断面積の測定が困難であること、測定対象がプラズマでいろいろな価数のイオンやその励起状態が同時に混ざっているために解析が難しいことが欠点である。その点、イオンビームをターゲットとして使う方法は、密度は低いがこれらの欠点は無い。何よりも第3世代光源に代表される大きなフォトンフラックスが得られる放射光の出現が、これからの発展性を約束していると言える。

約10年前に、日本でもPhoton Factoryで、小泉哲夫氏と伊藤陽氏らのグループにより、最初は1価、そして後に多価も含めたイオンをターゲットとした光電離実験が開始され現在も続いている¹²⁻¹⁷⁾。これはSPring-8での実験のためのR&D実験として位置づけられていたものである。小泉氏らは、これまで、 Xe^+ 、 Ba^+ 、 Eu^+ 、 Sr^+ 、 Cs^+ などのターゲットに対して実験を行いphotoion yieldの入射光エネルギー依存性の測定を行った。最近は、 Xe^+ の光イオン化断面積の絶対値測定実験なども行われている¹⁸⁾。現在では、各地の放射光施設、Super-ACO (フランス)¹⁹⁻²²⁾、ASTRID (デンマーク)²⁴⁻³⁰⁾、ALS (USA)³¹⁻³³⁾、そして、SPring-8において我々のグループも実験を始めており³⁴⁻³⁹⁾、国際的な競争となっている。しかし、まだまだ中性粒子と比べて得られているデータの数は少ない。しかも、多くは、1価イオンであり、宇宙物理で要求されているような多価でしかも共鳴ラインが数keV以上にあるようなターゲットに対する実験はまだなされていないというのが現状である。現在、唯一、SPring-8でのみこの種の実験が原理的には可能であることをここで強調しておきたい。このようにイオンの光電離実験が複数箇所で行われるようになったのは、放射光の出現によるところが大きい。デンマークのグループは宇宙物理への応用という観点からも実験を進めており、装置はビームラインに常設されていて、理想的な研究環境で次々

Table 1. Summary of the projects for the experiments of photoionization of atomic and molecular ions using synchrotron radiation facilities

SR Facility	Energy region used in the experiments (eV)	Targets	Period of the experiments	Ref.
Daresbury (England)	15-42	Ba ⁺ , K ⁺ , Sr ⁺ , Ga ⁺ , Zn ⁺ , Ca ⁺	1986-1987	8, 9
Super-ACO (France)	40-160	Ca ⁺ , Ba ²⁺ -Ba ³⁺ , Xe ⁴⁺ -Xe ⁷⁺	1991~	19-22
Photon Factory (Japan)	52-200	Xe ⁺ -Xe ³⁺ , Eu ⁺ , Sr ⁺ , Ba ⁺ , Cs ⁺	1994~	12-18
ASTRID (Denmark)	20-160	N ⁺ , O ⁺ , S ⁺ , C ⁺ , I ⁺ , P ²⁺ , Ca ²⁺ , CO ⁺ , K ⁺ , Li ⁻ , Mg ⁺ , Al ⁺ , Xe ⁺ , Xe ²⁺ , K ⁺	1999~	24-30
SPring-8 (Japan)	524-540 840-880	Ne ⁺ -Ne ³⁺ , O ⁺	1999~	34-39
ALS (USA)	30-51	O ⁺ , He ⁻ , Li ⁻ , Na ⁻	2001~	31-33

とデータを生産している。Table 1 にこれまでの放射光を使ったイオンの光電離実験のプロジェクトをまとめた。

イオンの光電離実験において通常測定されるのは、イオン化により価数の進んだ生成イオンである。これに対して、イオンの光電離実験で出てきた電子を測定する光電子分光がフランスの Bizau らによって1991年にCa⁺に対して初めて行われた¹⁹⁾。その後、同じターゲットイオンに対して光電子の角度分布がとられたが²⁰⁾、それ以降、イオンの光電子分光はきわめて難しいためまったく行われていない。また、中性粒子でよく行われているレーザー励起したターゲットに対する実験⁴⁰⁾をイオンに対して行うのも興味深い。

また、新しい実験として最近、負イオンや分子イオンをターゲットとした光電離実験がASTRIDやALSで始まっている^{27,28,31-33)}。自然には負イオンは正イオン以上に少ないが、電子親和力 (electron affinity) がプラスの元素に対して負イオンは比較的容易に作る事ができる。負イオンの場合、励起された光電子は、正イオンの場合と違って中性原子のポテンシャルを感じながら飛び出す。光励起・電離現象の理解という観点からも負イオンをターゲットとすることは興味深い。

3. イオンの光電離と理論

3.1 イオンの光電離

イオン化には、光を吸収すると直接電子が外に飛び出る直接電離と、内殻にある電子を中間励起状態に励起するような共鳴過程を経由する間接電離がある。共鳴状態は電子波動関数の contraction を伴うことが多く、断面積が大きくなり、吸収された後放出される光はラインスペクトルと

して観測される。共鳴状態は電子間の多体相関も深く関係してくるので、多体問題として物理学の重要な研究対象となっている。SPring-8からの放射光のような比較的高いエネルギーの光を使った場合、イオンの内殻電子との相互作用が主となる。内殻に空孔ができて外殻の電子が遷移してこれを埋めるとき、放射を伴う確率を「蛍光収量」というが、この蛍光収量は、重い原子のK殻に空孔ができたときに確率が1に近づく。一方、放射を伴わない過程、すなわちエネルギーを電子に与えて電子が飛び出す過程を「Auger過程」という。原子番号が小さい元素における内殻励起の場合、Auger電子などを出して放射を伴わない「自動電離」が起きる確率が高い。原子番号が小さい場合、共鳴励起でも、光吸収すると自動電離が起きていると考えて良い。後で実験のところで述べるネオンイオンと酸素イオンの光励起の場合でも、自動電離が主な脱励起過程 (de-excitation) と考えてよい。よって、この解説では、光吸収励起と光電離を断らない限り特に区別をしていない。

イオンを用いた研究をすると、同じ原子番号の原子に対して、イオン化の価数を変えながら実験ができる (等核系列)。また、違う原子番号の元素に対して、同じ電子数をもつイオンに対して比べることができる (等電子系列)。このようなことは、中性原子に対する実験では不可能であり、中性原子ではできなかった系統的な研究が、光と原子の相互作用のメカニズムに関してできる。イオンの光電離実験は原子物理研究に新たな側面を開くものであると言える。

3.2 イオンの光電離を扱う理論

多電子原子の理論的取り扱いには、電子間相互作用を1電子に対する平均場として取り扱うHartree-Fock (HF) 近似が使われてきた。しかし、これには自分以外の電子の位置を平均化しているので多体問題で重要な電子相関がはいっていない。そのため、通常、電子状態を適当な電子配置関数 (Configuration State Function) の線形結合で表し展開係数を最適化する、Configuration Interaction (CI, 配置間相互作用) 法が広く使われるようになった。それらの違いが最初に端的に示されたのは、1963年に発表されたMaddenとCodlingのヘリウムの2電子励起実験であろう^{41,42)}。これは、放射光 (NBS) 利用の初期の実験としても有名である。さらに、電子配置で展開した展開係数だけでなく、個々の軌道関数も変分計算の対象とするMulti-Configuration (MC, 多重電子配置) HFや、HF法の相対論版といえるDirac-Fock (DF) 法、これに上に述べた方法を加えたMCDF法、そしてこれにCI法を加えたものもある⁴³⁻⁴⁵⁾。重い元素の内殻電子を対象としたとき、クーロン力以外の相互作用で、電子同士が光子をやりとりすることによって生じる効果であるブライト相互作用などの相対論的效果、自己エネルギー (電子自身が作り出した場との相互作用)・真空偏極 (電子と真空のゆらぎとの相互作用) などの量子電磁気学 (Quantum Electromag-

netic Dynamics, QED) 的効果を MCDF 計算に加えてエネルギーや波動関数が決定される。すなわち、内殻電子や重い元素の光電離実験を精密に行えば、これら、多体問題効果、相対論的效果、量子電磁気学の効果の理論に対する実験的検証にもなる。但し、QED 効果の計算では、多電子系においても水素様原子に対する波動関数を使っている場合が多いので計算がどこまで正しいかという問題もある。通常、相対論効果はおおむね原子番号の2乗に比例して大きくなる。多価イオンの場合、最外殻電子の軌道速度が中性原子のそれに比べてはるかに大きいことが多いので、原子番号が小さくても相対論効果は無視できない。電子相関効果は、原子番号の増大とともにゆっくり増大する傾向があるが、一般には、原子番号依存性は殆ど無いと考えて良い。したがって、重い原子では電子相関効果より相対論効果が重要な役割を果たす事が多い。

他にも変分法でなく摂動を扱う多体摂動論 (Many Body Perturbation Theory, MBPT), それに、クラスター展開法, Random Phase Approximation (RPA) 法, 量子欠損理論 (Quantum Defect Theory, QDT), Multichannel QDT (MQDT), R-matrix 法, Local Density Approximation 法 (LDA), time-dependent LDA (TDLDA), などいろいろな方法がある。詳細は参考文献5とその中の references を見て欲しい。現在 MCDF 法あるいは MCHF 法が実験データの解析にもっとも広く使われている。すべての実験結果を説明する完全な理論はない。実験結果のより深い物理的な理解のために場合に応じて違った理論計算がなされているのが現状である。

一方、天体物理のために系統的な計算がプロジェクト研究として行われた。OPAL Project⁴⁶⁾, OPACITY Project⁴⁷⁾, そして最近では相対論的效果も取り入れた IRON Project^{48,49)}である。これらは R-matrix theory に基づいて計算が行われ、実験的な意味でのテストが ASTRID のグループによりなされつつある。

多体問題を理論的に扱うのは一般に容易ではない。最近、解析に1998年のノーベル賞受賞の対象となった密度汎関数理論 (Functional density theory) が使われ始めている⁵⁰⁾。これは、波動関数を扱うシュレディンガー方程式ではなく、電子密度だけを扱う方法で、多電子系のエネルギーを厳密に与える。これまで、基底状態に対してしか適用できなかったが、シュレディンガー方程式と組み合わせることにより、これを励起状態にまで拡張した理論的扱いが最近進められて比較的原子番号の大きな原子に対して成功を収めており、これからの発展が期待されている^{51,52)}。

4. 宇宙 X 線の観測

天文学の世界は、可視光の観測から始まって、赤外から電波、そして X 線、 γ 線まで観測の範囲を広げてきた。最近では人工衛星を使った観測により宇宙に対する理解が深まってきている。そのなかで、X 線を出す天体を調べる

ことは、天体現象の研究という意味で重要なだけでなく、地上では到底達成できないような、超高温、超高密度、強い重力の場のなかにある極限状態を研究することにもなる。これらの観測結果の解釈には原子データの充実が不可欠である。

4.1 宇宙高温プラズマの観測

1993年2月に打ち上げられ2001年3月まで観測を続けた日本の X 線天文衛星「あすか」は X 線用 CCD カメラと位置検出型蛍光比例計数管を搭載しており、X 線の撮像分光観測の先駆けを行った。「あすか」の成果は最近の物理学会誌⁵³⁾にまとめられている。そして、「あすか」の研究は1999年7月に打ち上げられた米国の衛星「チャンドラ」と1999年12月に打ち上げられた欧州の衛星「XMM ニュートン」へと引き継がれている。これら二つの衛星は「あすか」に続いて CCD カメラを搭載している。さらに、回折格子を搭載し優れた分光能力 (6 keV あたりで $E/dE > 100$, 1 keV あたりでは1000近く) を持つ。これらの回折格子は有効面積を稼ぐのが難しい (1.5 keV でおよそ30 cm^2) ので比較的明るい天体で成果をあげている。2005年に打ち上げ予定の日本の X 線天文衛星 Astro-E2 にはマイクロカロリメーターが搭載される予定で、6 keV あたりでの分解能が E/dE で500以上が期待できる。しかもマイクロカロリメーターは分散系ではないので X 線望遠鏡で集光した X 線を効率よく検出でき有効面積が格段に大きくなる。7 keV あたりでは有効面積が250 cm^2 , 1.5 keV あたりでは450 cm^2 が見積もられている⁵⁴⁾。まさに X 線天文学も精密科学へと進化しつつある。

宇宙には、いろいろなところで高温プラズマが存在する。一般に、密度はたいへん薄いのが、星の近く等では 10^{12} 個/ cm^3 程度の密度を持つこともある。温度も多種多様で一概には言い切ることはできない。大きな銀河団等では一億度 (~ 10 keV) 程度にもなるし、星間空間は数十度から数百万度 (\sim 数100 eV) 程度の成分が混在していると考えられている。さらには、ブラックホール近傍では MeV を越える高温プラズマがあり、電子陽電子対も重要な役割を演じているようである。さて、これらのプラズマを観測することには二つの重要な目的がある。一つはもちろん宇宙を解明することである。もう一つは、物理の実験現場ととらえ、極限状態の物理学を研究することである。後者の立場は、比較的簡単な系では可能であるが一般に天体は複雑系であるので、たいへん難しい。普通は、実験室で既知の物理学を使って天体の構造を探るのである。

ここでは、高エネルギー分解能が達成されて可能になった宇宙プラズマ観測を例にとって説明しよう。

4.2 実際の観測例

「あすか」による、撮像分光観測から最も成果を挙げた分野のひとつは超新星残骸の研究であろう。超新星残骸は、その名のとおりに、かつて大質量星が大爆発し、星の内部で生成した大量の元素を星間空間に撒き散らした名残で

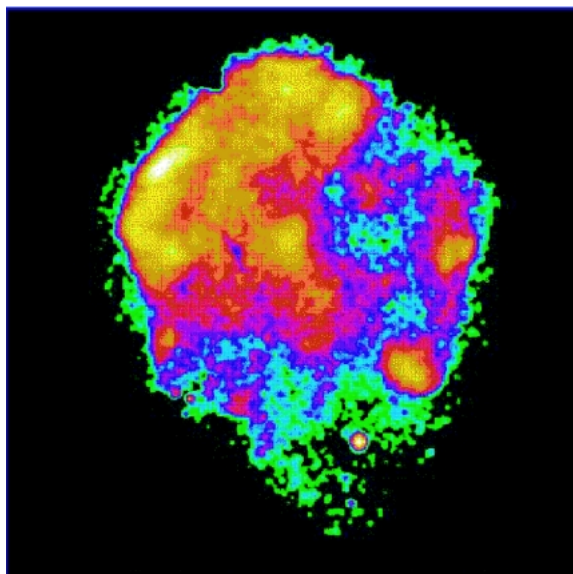


Figure 2. The X-ray Image of Cygnus Loop obtained by ASCA/GIS. The angular diameter of the Cygnus Loop is roughly 3 deg. The color means the X-ray intensity in the energy range 0.7–5.0 keV⁵⁶⁾.

ある。巻き散らかされた元素は爆発の巨大なエネルギーを運動エネルギーとして持ち出し、星間物質と衝突しながら進化する。衝突により、放出ガス側と星間ガス側に衝撃波を形成し、持ち出したエネルギーを熱化する。そして高温プラズマが作られ X 線で輝く。Figure 2 は、超新星残骸の代表である「はくちょう座の網状星雲」(Cygnus Loop)の「あすか」による X 線像を示す。全体的に丸いが、複雑な構造を示している。エネルギースペクトルを調べることにより、かつての星内部で作られた元素の組成比や星間物質の元素組成比の研究が進んでいる。また、密度や温度の半径方向の分布から、星間空間中での爆発の進化過程を実験室と捉えた研究も行われている^{55,56)}。超新星残骸では、近くに強い光源がないし、超新星残骸自身も光学的に薄いので自分自身の放射した X 線はプラズマと相互作用せずにそのまま宇宙空間に放射される。従ってプラズマの電離過程は衝突である。Cygnus Loop の年齢はおよそ 1 万 8 千年と考えられているが、宇宙空間では密度が低いので、いまだに衝突電離平衡には到達していないことが分かった。電離途中のプラズマの進化を研究する絶好の実験場であるといえる。実際のデータから進化を論じるには、各種衝突電離過程と放射過程を時間的に追う必要がある。このとき、いろいろな元素の高電離イオンの原子データが基本となる。

強い X 線を放射している星の多くは中性子星やブラックホールと普通の恒星の連星系である。中性子星やブラックホール近傍からは強い X 線放射があるため、周辺ガスはその X 線に照射される。その結果、X 線による光電離過程がプラズマの状態を決定すると予想される。放射さ

れる X 線は数 keV のものが主成分であるので、軽元素では K 殻電子さえも剥ぎ取られる。電離状態は光電離と再結合の競争で決まる。中性子星やブラックホール近傍からの X 線は時間的にたいへん激しく変動するので、非平衡状態も考慮する必要があるかも知れない。このような状況を解析するために、幾つかのグループが光電離を考慮したプラズマコードを開発している。たとえば NASA_GSFC が研究用に提供している X-star⁵⁷⁾等がある。ここでは、プラズマの形状と、入射 X 線源の位置、入射 X 線のエネルギースペクトルと強度を与え、プラズマ形状に従って区切ったゾーン毎に平衡状態を解いている。いろいろなイオンの各種遷移過程を、自己矛盾なく解く。高電離したイオンに至るまで、広範囲の原子データの集大成である。

実際に観測から、光電離が主の電離過程である天体が見つかっている。最も顕著な星は「はくちょう座 X-3」である。ここでは、完全電離の珪素や硫黄が電子と再結合し、電子が自由束縛遷移により放射する X 線があたかも輝線のように観測された。これから電子の運動エネルギーを表す温度は 50 eV 以下であることが決定された。ここでは、珪素も硫黄も水素様、ヘリウム様のイオンが主成分として存在している。これはまさに光電離が主なプラズマの電離過程であるということの証であると言える。これは「あすか」衛星によりはじめて発見され^{58,59)}、チャンドラ衛星により確認された⁶⁰⁾。

Figures 3 & 4 に、それぞれ「あすか」の CCD カメラによるエネルギースペクトルとチャンドラの回折格子によるエネルギースペクトルを示す。たくさんの輝線が観測されていることがわかる。これらの観測事実から、さらに多くの情報が引き出せるはずである。特に「はくちょう座 X-3」は中性子星とウォルフレイエ星の連星系であると考えられている。ウォルフレイエ星は大質量星の進化した段階で、核融合反応の生成物が表面に剥き出しになっていると考えている。光電離が起っているプラズマはまさにそのウォルフレイエ星からの星風である。この星風の元素組成を調べることは、星の進化や内部構造を研究する決め手になる。そのためには、複雑な原子の遷移過程の理解無くして研究を進めることができない。光電離プラズマが存在することは X 線放射とガスがあれば当然生じるのであるから、あって当たり前と言える。そして、今ではその存在は「はくちょう座 X-3」だけではなく、大質量星と中性子星との連星であるいくつかの X 線パルサーでも、また、活動銀河核の周辺にある物質でも知られている。この現象を調べ、天体の元素組成比やプラズマ状態を研究することが次の問題である。

もう一つ、高エネルギー分解能で可能になったプラズマ診断は、プラズマの密度の推定である。特に質量の重い主系列星(早期型星)からの X 線放射は比較的密度の濃いところから放射されているようであるが、いまだ、どこからどのようにして X 線が放射されているのか議論中であ

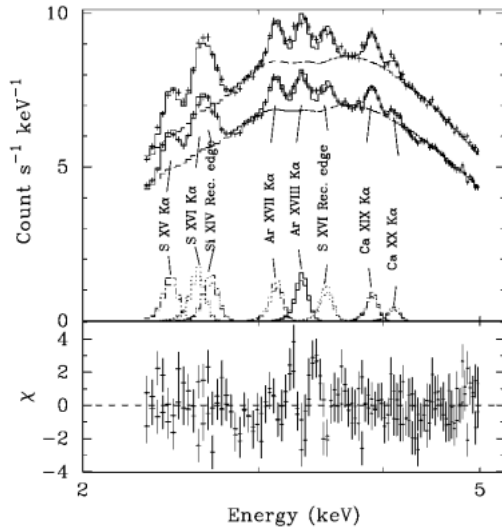


Figure 3. The X-ray energy spectra of Cyg X-3. The upper panel shows two spectral data obtained by the CCD camera onboard ASCA. Two spectra corresponds to the data obtained by two CCD cameras, respectively. The model histograms constructed by a continuum and Gaussian lines are also plotted. The identifications of the lines are indicated. The lower panel shows the residuals normalized by the error⁵⁷⁾.

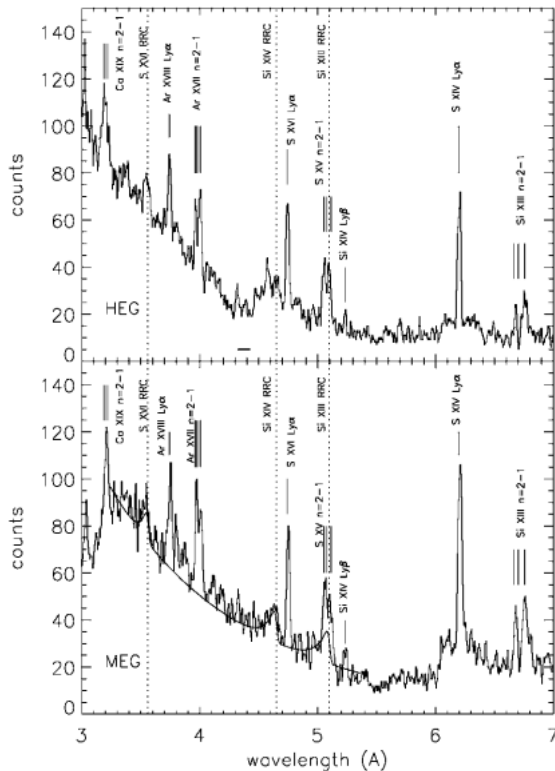


Figure 4. High quality energy spectra of Cyg X-3 obtained by Chandra. Upper panel shows the data obtained by HEG (High energy grating spectrometer) and the lower panel shows that obtained by MEG (Medium energy grating spectrometer). Three dotted lines correspond to the wavelength of the absorption edges of H-like Si, S, and He-like Si. The recombination edges are clearly observed as well as many emission lines⁵⁸⁾.

る。そこで、観測的に密度を求めることは大きな鍵となる。「チャンドラ」衛星は、窒素や酸素等、軽元素のヘリウム様のイオンからの輝線を検出している。希薄なプラズマではヘリウム様のイオンのK殻への遷移は強い3本の明るい輝線がある。 $1s2s$ (3S_1)- $1s^2$ (Forbidden Line, 禁制線), $1s2p$ (1P_1)- $1s^2$ (Resonance Line, 共鳴線), $1s2p$ (3P_1)- $1s^2$ (Intercombination) である。希薄な状態では禁制線が最も強いが、密度が高くなると、禁制線の遷移が起る前に、衝突が起ってしまうので、禁制線の強度は弱くなる。一方、共鳴線は散乱断面積がたいへん高い。そのため、プラズマの柱密度 (X線が進む方向にプラズマの密度を積分した量) がある程度大きくなると飽和状態になり、柱密度が増えても強度は増加しなくなる。そのほかの輝線は断面積が小さく、同じ程度の柱密度では飽和状態には達していないので、柱密度が増加するに従って強度も増加する。従って、3本の輝線から、密度と柱密度が決定できるわけである。しかしながら、現実には、光電離と衝突電離の拮抗があり、どちらが優勢であるかによっても、輝線の強度が変化する。光電離が十分に無視でき、プラズマの乱流過程等がある程度推定できる所では、この3本の輝線によるプラズマ診断はたいへん有効であると考えられる。しかしながら、現在のところ、幾つかの星でX線放射領域の密度が推定されているにすぎない。

4.3 放射光を使った原子物理学実験への期待

以上のように、X線による宇宙観測でかなり複雑なプラズマ過程がまさに観測にかかるようになってきた。そこには天体を解明する多くの情報を含んでいる。この情報を有効に活用するためには、実験室で測定した原子データが必要とするのである。しかも高電離した多価イオンのK殻が関与するX線は観測が比較的やさしいこともあり、これを正確に解釈するための精密な実験データがたいへん重要である。また、光電離は宇宙の多くの場所であって当然と考えられている。光電離の効果を無視してはプラズマの状態の診断を誤ってしまう恐れもある。実験室での信頼できるデータの集積を待ち望んでいる。

5. 地上での実験～SPring-8におけるイオンの光電離実験

宇宙観測で見られているような高電離多価イオンの光電離実験を地上で行うことは、なかなか困難であるが、我々は、それに近づけるべく1歩を踏み出そうとしている。その装置と実験の現状、そして今後の課題について述べる。

5.1 実験装置

Figure 5は我々が実際に使っている実験装置である^{34,35)}。2節で述べた「合流ビーム法」を採用している。装置はSPring-8の共同利用の「多価イオン光吸収実験装置」として立ち上げられた。主に、ECRイオン源、イオンの価電状態を選別して90度曲げるセクター電磁石、光とイオンとを合流させる相互作用領域、そして相互作用領

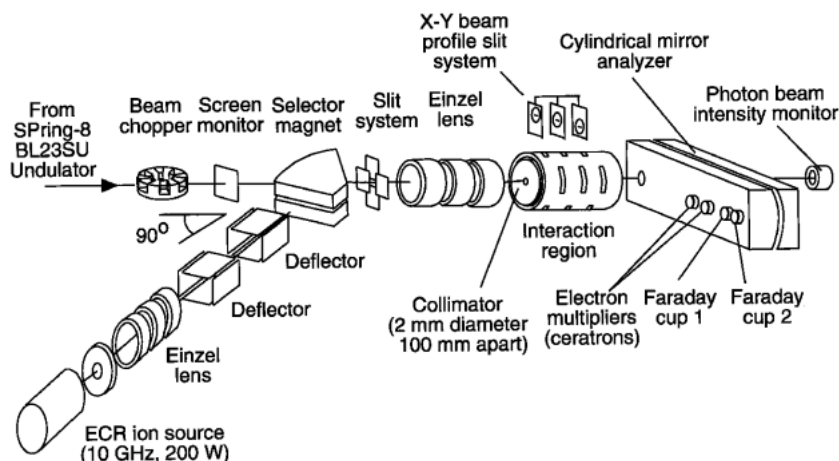


Figure 5. Schematic diagram of the photon-ion merged-beam apparatus^{34,35}. The apparatus mainly consists of an ECR ion source, a selector magnet, an interaction region and an electrostatic analyzer. This was installed on the SPring-8 undulator beamline BL23SU^{61,62}.

域における光電離過程で生成された価数の進んだイオンを分離する2重収束型静電アナライザ等からなっている。いろいろなものを組み合わせているために、どうしても装置が大きく重くなる。重さは装置本体だけで3トン以上、大きさは約3.5 m×2 m程度ある。

ECR イオン源は、10 GHz, 200 W仕様で、多極磁場でプラズマを閉じこめ、希ガスイオンだけでなく金属のイオンも引き出すことができる。引き出されたイオンは10 kVの電圧で加速されて、2重収束型のセクター電磁石で特定のイオン種が選別される。この装置では、放射光とイオンとは、12 cmの長さをもつ相互作用領域で合流する。実際はその前後でも両方のビームが重なっている領域が存在するが、この相互作用領域にだけ、あらかじめバイアス電圧をかけておいて、そこでできた価数の進んだイオンが他の領域で生成されたイオンと違うエネルギーを持つようにし、アナライザで区別できるようにしている。この相互作用領域内では、2次元的にビーム形状が測定できるようにしているが、光もイオンもなるべく一様であり、同程度の大きさであることが信号強度を大きくし信頼性の高いデータを得る観点から望ましい。実際のビームサイズは、相互作用領域の前で直径2 mmのコリメーターを通過するので、1~1.5 mm程度である。この穴に光を通すために、大きな装置全体を光軸に対して精密にアライメントしている。相互作用領域からアナライザの真空チャンバ付近の真空度はビーム入射中でも 6×10^{-8} Pa程度以下に保たれている。イオンの検出にはイオンをコンバータプレートにあてて出てくる2次電子を増幅して測定する電子増倍管、光強度は金蒸着したプレートからの光電子電流を通して測定される。また、シグナルをバックグラウンドと区別するために、装置の前に高真空仕様のメカニカルなビームチョッパーが置かれ、光がOFFのときとONのときの差から信号を読む。イオンビームのON・OFFは

deflectorで行われ、イオンビームの有無によるバックグラウンドの差も考慮できるようにしている。

最初の実験はSPring-8のBL23SU（原研ビームライン）^{61,62}で行われた。装置はRI棟の実験ホール（光源から約110 mの位置）に置かれた。分光器のエネルギー較正は、相互作用領域に希ガスや酸素をいれ、そこに光を通したときにできるイオンを検出して、吸収スペクトルをとり、既知のラインのエネルギーを使って行われた。

5.2 実験結果の例と計算との比較

この装置を使った最初の実験では、ターゲットとしてネオンイオンと酸素イオンが選ばれた³⁶⁻³⁹。イオン源からのビームとして出しやすかったのと、ちょうど、K殻の共鳴ラインがビームラインの出せるエネルギー領域にあっていいたためである。Figure 6にネオンイオンの場合の測定例を示す。ターゲットイオンは、ネオンの1価から3価までの3種類である。

入射エネルギーは、だいたい1s-2pの共鳴ラインが入るように選ばれた。しかし、イオンになると中性粒子のときと比べて共鳴ラインのエネルギーが、電子による核電荷のスクリーニング効果が薄れるために束縛エネルギーが大きくなり、一般に高いほうにずれる。今まで実験データが全くなく、果たして、そこに実際にピークがでるかどうかはやってみないとわからない実験であった。ノイズの主な原因はイオンビームに起因するものであり、しかも、イオンビーム強度に小さなふらつきがあるために、それがノイズに反映され信号が埋もれて困難な実験となっていた。

先に述べたように、イオンビームをターゲットとしてK殻(1s-2p)の共鳴ライン付近に相当する光を入れ、イオンの1s電子を2pに励起させる。励起電子が下の準位に落ちるときにそのエネルギーをもらって電子が飛び出し(Auger効果)、自動的に電離が起きる。測定では、電離により価数の進んだイオンを静電アナライザで曲げて検

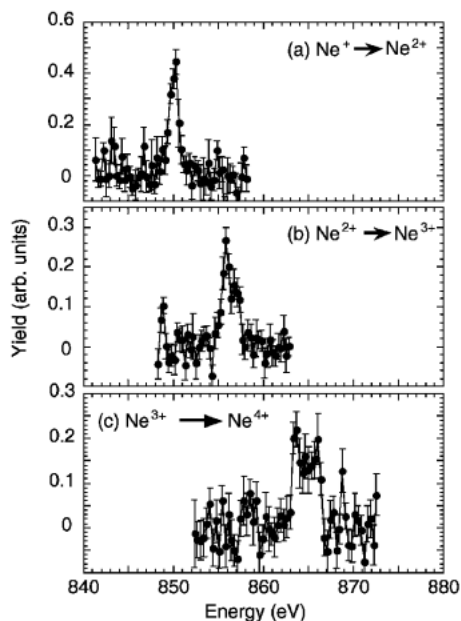


Figure 6. Experimental results of relative photoion yield from (a) Ne^+ to Ne^{2+} , (b) Ne^{2+} to Ne^{3+} , (c) Ne^{3+} to Ne^{4+} ³⁶⁻³⁸).

出する。イベントの個数が少ないために測定はパルスカウンタになる。

我々は MCDF 計算との比較も行った。イギリスのオックスフォードで開発された GRASP (General purpose Relativistic Atomic Structure Program) という計算コードがあり、ここではその version 2 を使った⁴³⁻⁴⁵)。自分達でも簡単な計算はできるように整備されたコードであるが、より正確な計算をということで、理論家である小池文博氏(北里大)にお願いして計算していただいた。ここでの計算は、元素はネオンと酸素のイオンで軽い物質であるが、一応内殻電子を対象にしているということ、ブライト相互作用などの相対論的効果や QED 効果を入れた計算を行った(3.2節参照)。この計算では基底状態と励起状態を別々に計算する。ある状態の波動関数は、いろいろな電子配位の波動関数の重ね合わせでより正確に記述できることが知られている。例えば、 $1s^2$ 基底状態の波動関数は、そのほとんどは $1s$ の波動関数で記述できるが、 $2s^2$, $2p^2$, $3d^2$ などの波動関数も混ざった状態のほうが、電子相関効果が正しく入り実験値を良く再現できる。この一連の計算では、 $4f$ レベルまでが考慮されている。

Figure 7 に実験に対応した計算結果を示す。得られた計算結果は、グラフで振動子強度として示されているが、グラフでは統計重率 (statistical weight) が掛けられている。また、これに、装置分解能を考慮してプロットしたのも同時に示されている。全体として、計算と実験とでエネルギーの絶対値に多少のずれはあるが、良く一致しているのがわかる。**Figure 8** に酸素の一価イオンに対して行った実験と計算の結果を示す。いずれの実験も、フラク

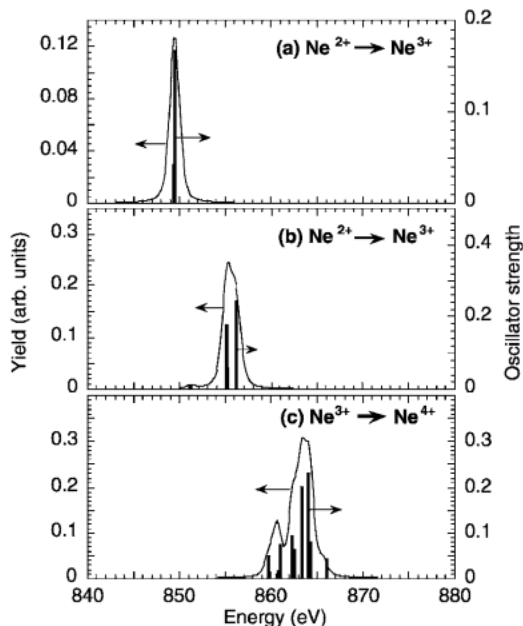


Figure 7. Calculated oscillator strength and convoluted spectrum with the system resolution. Statistical weights are multiplied for the calculated oscillator strength³⁶⁻³⁸).

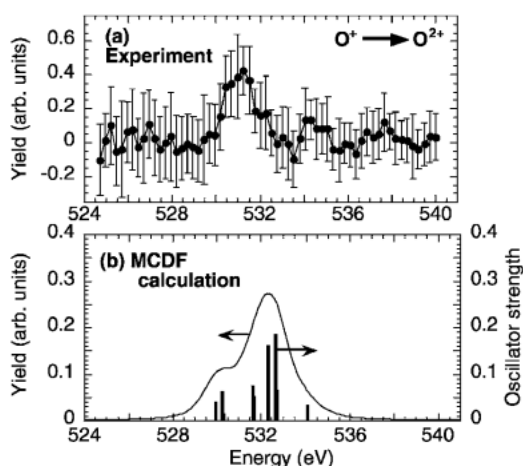


Figure 8. (a) Relative photoion yield from O^+ to O^{2+} . (b) Calculated oscillator strength and convoluted spectrum with the system resolution³⁹).

スを大きくして分解能を犠牲にしたので、細かなスペクトルの構造は残念ながら分離できてない。例えば、ネオン3価のターゲットに対する実験では、分光器の分解能が770程度、光子フラックスが約 10^{11} 個/秒、イオンビーム密度が約 2×10^6 個/cm³であった。将来、より分解能の良い実験を行えば、理論との比較により、実験的に得られたラインがどの遷移によるものかを同定でき、物理的理解が深まってくるだろう。

ここでは、具体的にいくつかの実験例と計算例を示した。SPring-8における光電離の実験はまだ始まったばかりである。多価イオンも対象にした実験を行ったが、まだ、4

節で説明したような宇宙において観測されている高電離の He 様多価イオンの実験に至るには、まだ道は長い。一方、SPring-8 のエネルギー領域は、おおまかには、内殻電子を励起・電離できるエネルギー領域にあり、他の放射光施設、ALS や ASTRID ではなかなか難しい深い内殻電子を対象とした実験を行うことができる。そのため、これからの成果が期待されている。

5.3 実験におけるこれからの課題

幸いなことに、SPring-8 からの放射光のエネルギー領域は、ちょうど、X 線天文学で要請されている高電離した多価イオンの K 殻の共鳴ライン（重要な元素として C, N, O, Ne, Ma, Si, S, Fe, また観測される他の元素として B, F, Na, Al など）のエネルギー領域にある。もし、高電離多価イオンの光電離実験のデータを出せるようになれば、原子物理学的にも、宇宙物理学への応用という観点からも非常に有用なデータとなるであろう。しかし、そこに至るまでにはいくつかの大きな課題を解決していかねばならない。

この種の実験にとって現在必要なのは、まず、分解能よりも入射光のフラックスである。その上で高分解能測定を行えば物理的理解を深めることができるであろう。高いフラックスをもった放射光ビームラインへの実験装置の「常設」が不可欠である。また、同時にこちらの実験装置側の検出感度の下限を下げる努力も必要である。ノイズを低減して検出感度を一桁上げることは、一桁大きなフォトンフラックスを得ることに等しい。現在の装置のアナライザー系を改造すればそれが可能なのかわかっている。

より価数の進んだイオンをターゲットとするためには、強度の大きな多価イオンを安定に生成するイオン源の R & D も必要となる。ECR イオン源は使いやすいが、反面、準安定状態のイオンビームを生成する可能性があり、準安定状態にあるイオンの割合をどう評価するかも問題となる。ターゲットが負イオンに変化したとき、それに対応したイオン源も必要となるであろう。

S/N 比が悪かったために、我々の上記の実験では、光電離断面積の絶対値を測定するまでに至らなかったが、やはり、絶対値測定を目指していくべきであろう。ちょうど、これからの実験領域になる数 keV 付近で正確に入射フォトンフラックスをどうやって測定するかも問題になる。精密なイオンチェンバーを使った光強度モニターの較正や、較正済みのフォトダイオードを使う必要があるだろう。

6. おわりに

原子物理学は常に他の科学への基礎で有り続けたしこれからもそうであろう。Bose-Einstein 凝縮などの例にも見られるようにこれからも新たな発見があるかもしれない。まだ解決してない問題も多い。その中で今回述べた、イオンの光吸収に関しては特に実験データがまだまだ蓄積され

ておらず、実験はこれからである。実際、これまでの実験結果と理論との比較においても、完全には合わないものも多い。強調しておきたい点のひとつは、原子物理学は実験も理論もその応用範囲を広げながら進展し続けているということである。

我々は、SPring-8 においては、幸い、内殻電子の光励起・電離実験という観点からは有利な立場にいる。反面、断面積がエネルギーとともに下がるので、実験がより困難になる。しかし、いままで計算にしかたよれなかったものを実験的にひとつひとつ確認していく意味は大きい。最終的には、例えば、宇宙からの X 線スペクトルにおいてよく観測されている、鉄に代表されるような He 様イオンなどの高電離多価イオンをターゲットとできることが我々の夢である。また、負イオンや分子イオン、その他、環境物質のイオンにまでその範囲を広げていくことも将来は可能だろう。

重要な応用の分野として天体物理の観点からの解説も試みた。ブラックホールなどの天体現象を理解するための重要なキーパラメータとして、高電離多価イオンの情報があることを示した。ここに天体物理学と原子物理学との接点があることが理解いただけたかと思う。また、天体物理屋さんが望むデータと実際に実験できるターゲットと得られるデータの間にはギャップがあることもわかったと思う。我々は、このギャップを埋めていくことが重要なひとつの研究の方向だと考えている。また、多価イオンに関する情報は核融合プラズマの研究においても重要であることを忘れてはならないだろう。今後、宇宙物理学分野を含め様々な分野のひとたちと協力しながら研究を進めていければと思う。

この原稿は、主として4節を宇宙物理学の立場から北本が書き、他の部分を山岡と大浦でまとめた。全体を通して見ていただいた、小泉哲夫氏（立教大）、小池文博氏（北里大情報ネットワークセンター）に感謝いたします。また、ここで示した地上実験は SPring-8 の原研ビームライン BL23SU の立ち上げ直後に行われた。この実験のアレンジをしていただいた、石川哲也氏（理研）、下村理氏（原研）、及び、実験に協力していただいた原研ビームラインの横谷明德氏、安居院あかね氏、吉越章隆氏、他のビームライン関係者の方々、そして、共同研究者の方々にも感謝いたします。

参考文献

- 1) F. F. Chen: *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion: Plasma Physics* (Plenum 1984).
- 2) 市川行和: *パリティ* Vol. 14, No. 12, p. 74 (1999).
- 3) 北本俊二: X 線でさぐるブラックホール-X 線天文学入門一, (裳華房, 1998).
- 4) 小山勝二: X 線でさぐる宇宙, (培風館, 1992).
- 5) J. B. West: *J. Phys. B* **34**, R45 (2001).
- 6) T. B. Lucatorto and T. J. McIlrath: *Phys. Rev. Lett.* **37**, 428 (1977).

- 7) T. B. Lucatorto et al.: Phys. Rev. Lett. **47**, 1124 (1981).
- 8) I. C. Lyon, et al.: J. Phys. B **19**, 4137 (1986); *ibid.* B **20**, 1471 (1987); *ibid.* B **20**, 1925 (1987).
- 9) B. Peart et al.: J. Phys. B **20**, 5403 (1987); *ibid.* B **20**, L673 (1987).
- 10) E. Jannitti et al.: Phys. Rev. A **47**, 4033 (1993).
- 11) G. O'Sullivan et al.: Phys. Rev. A **53**, 3211 (1996).
- 12) T. Koizumi et al.: J. Phys. B **28**, 609 (1995); J. Elec. Spec. Relat. Phen. **79**, 289 (1996); Physica Scripta T **73**, 131 (1997).
- 13) Y. Itoh et al.: J. Phys. B **28**, 4733 (1995).
- 14) M. Sano et al.: J. Phys. B **29**, 5305 (1996).
- 15) 佐野睦, 伊藤陽, 小泉哲夫: 日本物理学会誌 **53**, 278 (1998).
- 16) T. M. Kojima et al.: J. Phys. B **31**, 1463 (1998).
- 17) N. Watanabe et al.: J. Phys. B **29**, 4137 (1998).
- 18) Y. Itoh et al.: J. Phys. B **34**, 3493 (2001).
- 19) J.-M. Bizau et al.: Phys. Rev. Lett. **67**, 576 (1991).
- 20) S. Al Moussalami et al.: Phys. Rev. Lett. **76**, 4496 (1996).
- 21) D. Cubaynes et al.: Phys. Rev. A **57**, 4432 (1998).
- 22) J.-M. Bizau et al.: Phys. Rev. Lett. **84**, 435 (2000); *ibid.* **87**, 273002 (2001).
- 23) D. Cubaynes et al.: Phys. Rev. Lett. **63**, 2460 (1989).
- 24) H. Kjeldsen et al.: J. Phys. B **32**, 4457 (1999); Astrophys. J. Lett. **524**, L143 (1999); Phys. Rev. A **62**, 020702 (2000); J. Phys. B **33**, 1403 (2000); Astrophys. J. Suppl. **135**, 285 (2001); Astrophys. J. Suppl. **138**, 219 (2002).
- 25) J. B. West et al.: Phys. Rev. A **63**, 052719 (2001).
- 26) T. Andersen et al.: J. Phys. B **34**, L327 (2001).
- 27) H. Kjeldsen et al.: J. Phys. B **34**, L353 (2001).
- 28) T. Andersen et al.: J. Phys. B **34**, 2009 (2001).
- 29) J. B. West et al.: J. Phys. B **34**, 4035 (2001).
- 30) B. Kristensen et al.: Phys. Rev. A **65**, 022707 (2002).
- 31) A. M. Covington et al.: Phys. Rev. Lett. **87**, 243002 (2001).
- 32) A. M. Covington et al.: J. Phys. B **34**, L735 (2001).
- 33) N. Berrah et al.: Phys. Rev. Lett. **87**, 253002 (2001); *ibid.* **88**, 093001 (2002).
- 34) M. Oura et al.: J. Synchrotron Radiat. **5**, 1058 (1998).
- 35) M. Oura et al.: Rev. Sci. Instrum. **71**, 1206 (2000).
- 36) M. Oura et al.: Phys. Rev. A **63**, 014704 (2001).
- 37) H. Yamaoka et al.: *Photonic, Electronic and Atomic Collisions* (XXII ICPEAC Proceedings), ed. by C. R. Vane (Rinton Press Inc., 2002).
- 38) H. Yamaoka et al.: Phys. Rev. A **65**, 012709 (2002).
- 39) K. Kawatsura et al.: J. Phys. B 投稿中.
- 40) 例えば, J. M. Bizau et al.: Phys. Rev. Lett. **57**, 306 (1986).
- 41) R. P. Madden and K. Codling: Phys. Rev. Lett. **10**, 516 (1963); J. W. Cooper, U. Fano and F. Prats: *ibid.*, 518 (1963).
- 42) K. Codling: J. Synchrotron Radiation **4**, 316 (1997).
- 43) I. P. Grant et al.: Comp. Phys. Commu. **21**, 207 (1980).
- 44) K. G. Dyall et al.: Comp. Phys. Commu. **55**, 425 (1989).
- 45) F. A. Parpia, C. F. Fischer and I. P. Grant: Comp. Phys. Commu. **94**, 249 (1996).
- 46) 例えば, C. A. Iglesias and F. J. Rogers: Astrophys. J. **443**, 460 (1995).
- 47) *The Opacity Project* 1995, **Vol. 1** (The Institute of Physics, Bristol, 1995); C. Mendoza, Physica Scripta T**65**, 198 (1996); または次のデータベースを参照. Yuri Ralchenko, Plasma Laboratory of Weizmann Institute of Science, Databases for Atomic and Plasma Physics (URL: <http://plasma-gate.weizmann.ac.il/DBfAPP.html>).
- 48) S. N. Nahar and A. K. Pradhan: Phys. Rev. A **49**, 1816 (1994).
- 49) D. G. Hummer et al.: Astron. Astrophys. **279**, 298 (1993).
- 50) 例えば D. Doubert ed.: *Density Functionals, Theory and Applications* (Springer, 1998).
- 51) X. M. Tong and S. Chu: Phys. Rev. A **55**, 3406 (1997).
- 52) X. M. Tong et al.: J. Phys. B **33**, 717 (2000).
- 53) 小特集: X線天文衛星「あすか」, 日本物理学会誌 **56**, 903 (2001).
- 54) Astro-E 実験計画書, 宇宙科学研究所 (2000).
- 55) E. Miyata et al.: Publ. Astron. Soc. Japan **46**, L101 (1994).
- 56) E. Miyata et al.: in "The Hot Universe", edited by K. Koyama, S. Kitamoto, M. Itoh. Dordrecht: Kluwer Academic, p. 254 (1998).
- 57) T. R. Kallman: NASA High Energy Astrophysics Science Archive Research Center, XSTAR Homepage (URL <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/software/xstar/xstar.html>)
- 58) K. Kawashima and S. Kitamoto: Publ. Astron. Soc. Japan **43**, L113 (1996).
- 59) D. A. Liedahl and F. Paerels: Astrophys. J. Lett. **468**, L33 (1996).
- 60) F. Paerels et al.: Astrophys. J. Lett. **533**, L153 (2000).
- 61) A. Yokoya et al.: J. Synchrotron Radiat. **5**, 10 (1998).
- 62) S. Sasaki: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **347**, 83 (1994).