

原子核・放射線物理学研究室

スタッフ

教授 家城和夫、小泉哲夫
助教授 栗田和好、平山孝人、村田次郎
客員教員 本林透（理化学研究所）、上野秀樹（理化学研究所）
実験技術員 村上浩之、須賀一治

学生

博士後期課程 梅野泰宏
博士前期課程 伊藤裕章、加藤春明、川村広和、窪寺隼人、藤田慎也、町田智大
石井健一、川島基敬、堺 聡史、筒井亮丞、成田圭吾、橋本公瑛、谷内勇仁

【研究室の概要】

当研究室では、原子核から原子、クラスター、結晶にいたるマイクロな世界の物理を実験的に研究しています。放射線は原子核・原子の情報をになって放出されるため、その測定は有力な実験手段ですし、放射線そのものの研究も重要となります。大型の実験装置として、Cockcroft-Walton型加速器、重イオン衝突実験装置、微小反応断面積測定装置、ECR型多価イオン源などを備え、またGe(HP) γ 線分析器など高性能な測定器も活用しています。

研究領域は、原子物理、原子核物理、放射線物理、放射線計測、表面物理などにまたがっており、各グループは独自の研究テーマをもちつつ協力しています。特に、放射線測定器、計測法、データ処理など共通性の高い課題については共同開発も行っています。また、毎週行っているコロキウムでは、全メンバー参加のもとで活発に討議をしています。これらの研究の遂行にあたっては、物理学科実験技術員の村上が電子回路の設計・製作で、須賀はCockcroft-Walton型加速器の維持管理で貢献をしています。

具体的な研究テーマは以下に詳しく述べますが、扱う現象のエネルギーはmeVから100GeVまでと大きく広がっていますし、 α 線、 β 線、 γ 線、中性子、イオンなど、あらゆる放射線を様々な測定器で測定します。また、高速なデータ処理の研究も行われ、それらを組み合わせた大がかりな実験も行われます。実験研究は、高エネルギー加速器研究機構、岡崎分子科学研究所、東大CNS、理化学研究所、放射線医学総合研究所などの学外の研究施設も利用して行い、近年では海外の研究所での研究もさかんになってきました。国内・外の研究者との共同実験も活発です。



不安定原子核の核反応

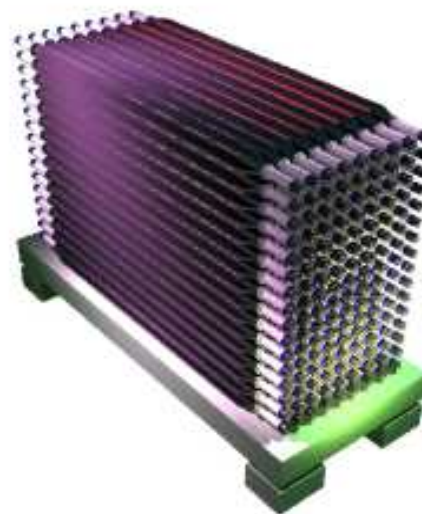
家城 和夫

物質の世界は分子－原子－原子核－核子－クォークという階層性をもっており、それぞれの階層に多様性があります。陽子と中性子の多体系としての原子核は現在では 6000～7000 種類あるとされていますが、そのうち安定なものは 250 種類ほどしかなく、大部分は β 崩壊や α 崩壊ですぐに壊れてしまう不安定な原子核です。最近、加速器を用いて人工的に作り出した不安定原子核をビームの形で利用し、壊れるまでの短い時間に他の標的に照射して反応を起こさせその性質を調べるといった手法が確立しています。2006 年には不安定核研究のための強力な実験施設 (RIBF) が理化学研究所で完成の予定であり、原子核物理の一つのフロンティアとして大きな進展が期待されています。我々は不安定原子核ビームを用いたいくつかの実験研究を進めてきています。

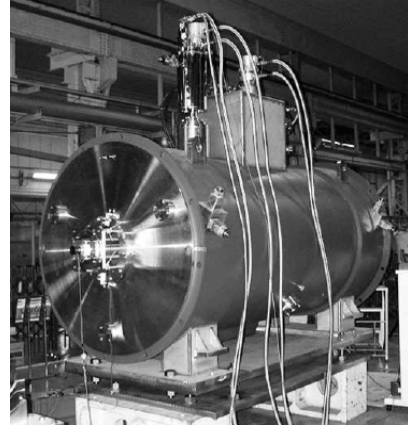
中性子過剰核の構造

安定な軽い原子核では陽子数と中性子数はほぼ同じです。不安定核のなかには ^{11}Li のように中性子数(8)が陽子数(3)の倍以上ある原子核があります。このような原子核では中性子が非常に弱く結合しているため中性子だけが核の外側に大きく広がったハロー構造をもつことが知られており、通常の原子核にはない運動状態をもつことが期待されます。それを調べるには原子番号の大きな他の原子核(鉛など)との衝突によりクーロン場で励起して分解させ、中性子(2 個)と残りの核(^9Li)のエネルギーと方向を測定します。そこから励起状態や ^{11}Li の構造についての情報が得られます。(これをクーロン分解反応法と呼びます。) 中性子を効率よく測定できる大面積の中性子検出器 (<http://www.nsl.msui.edu/tech/devices/neutronwalls/index.html>) をミシガン州立大(米国)やエトベシュ大(ハンガリー)らのグループと協力してミシガン州立大に建設し、これまでハロー核とされる ^{11}Li 、 ^6He 、 ^8He などについて研究を行なって中性子 2 個が緩く束縛されている系の振動モードや崩壊様式についての情報を得ました。

2005 年度にはミシガン州立大で新たに建設された大型中性子検出器 MoNA(<http://www.nsl.msui.edu/tech/devices/mona/index.html>、右図)を用いて須合君らと ^8Li のクーロン分解反応の実験を行い、入射エネルギーについての依存性を詳しく調べました。結果の一部は須合君の修士論文(2005 年度)にまとめられています。2006 年度からは理化学研究所でも東京工業大学のグループと協同して同種の実験を進める予定となっています。



原子核にも原子と同じように殻構造があります。つまり、希ガス原子が安定で不活性であるのと同じように、ある陽子数や中性子数の核ではまわりの核よりも安定性が高くなります。ところが、中性子数が 40 程度の中性子過剰核では安定核でみられる殻構造が変化していることが予想されています。しかし、このような重い中性子過剰核では反応後の粒子を精度よく識別することが難しく、粒子のエネルギー分解能を向上させる必要がありました。そのために連携大学院の青井



助教授や竹下さんらを中心に理化学研究所において TOF スペクトロメータという装置(写真)が開発され、飛行時間と Si 半導体検出器によって測定するエネルギーとを組み合わせることによって大きな立体角で高い質量分解能を得ることができるようになりました。 ^{64}Cr などの不安定核について陽子非弾性散乱の実験を行ない励起状態からの γ 線を系統的に測定しました。その結果は竹下さんの博士論文としてまとめられる予定です。

ハロー核のアイソバリックアナログ状態

^6He は中性子ハロー核の一つであり、 ^4He の周りに 2 つのハロー中性子があると考えられています。この核は ^4He と中性子 1 つ、あるいは中性子同士では安定な結合状態ができないのに 3 体となる ^4He と 2 つの中性子では結合するという面白い性質をもっています。そこで、ハローの中性子の一つを玉突きのように陽子によってたたきだして置きかえるとどうなるか、という実験を 2003 年度に千葉市の放射線医学総合研究所で行ないました。このような状態をアイソバリックアナログ状態といいます。統計精度が悪いためはまだ確定的な結果は得られていませんが、アイソバリックアナログ状態がある程度できていることがわかり、山口君の修士論文(2004 年度)にまとめました。

元素合成過程

不安定核はそのほとんどが 1 秒以下で壊れてしましますが、宇宙の初期や超新星爆発の際には不安定核は中性子や陽子と反応を起こします。元素合成過程、即ち、現在ある安定な原子核がビッグバン以降にどのようにしてできてきたのかを理解するためにはこのような不安定核を含む核反応の情報が不可欠です。不安定核のクーロン分解反応を利用すると、逆反応を利用してこのような核の反応断面積を求めることができ、いくつかの測定が行われてきました。特に、中性子を吸収して元素合成の反応が起こる過程についてはこれまで実験データがほとんどありませんでしたが、ミシガン州立大学でこれまで ^8Li や ^{14}C などの (n,γ) 反応について測定し断面積を求めてきました。

測定器・データ収集システムの開発

上にも述べたように、不安定核ビームの実験は安定核に比べて強度、純度等の点で不利であり、放出される中性子などのエネルギーや方向を精度よく、かつ効率よく測定する必要があります。これまでも位置検出ができ中性子/ γ 線の識別が可能な大型の中性子検出器を作ってきましたが、さらに位置や時間精度の向上をめざしてシンチレーションファイバーを用いた新しいタイプの中性子検出器の開発を続けています。

また、このような検出器からは多数の信号を高速に処理して収集し、オンラインで実時間処理のモニターをすることが必要ですが、これをネットワークで分散処理できるようなシステムの開発なども卒業研究を通じて行なってきました。

究極の物質を求めて

栗田和好

1. 究極のQCDマシンRHICでの物理

ビッグバン直後の高エネルギー密度状態ではクォークとグルオンはハドロンの閉じ込めから放たれて自由に飛び交っているような状態(QGP)であったという。この新しい究極の物質状態を実験室で作ろうという試みが米国ニューヨーク州にあるブルックヘブン国立研究所のRHIC（リック）プロジェクトである。我々は PHENIX 実験に参加して QGP 生成の可否と陽子スピン構造の解明に力を注いでいる。その目的はハドロンとその間に働く強い相互作用の基礎理論である量子色力学（QCD）を通して宇宙の成り立ちを理解することである。大学院生には米国で生の英語と異文化に接しその中で科学をする態度を学ぶよいチャンスを提供できるものと信じる。

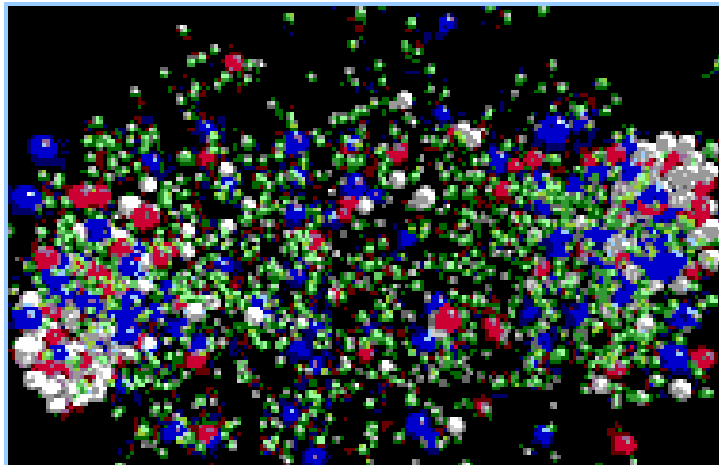


図1：核子あたり 100GeV の金原子核の正面衝突から生成されるおびただしい数の粒子群イメージ

2. 安定な原子核からかけ離れた中性子数を持つ不安定原子核の特性を探る RIBFでの物理国内プロジェクト

QGP が冷えていくとクォークとグルオンは多数のハドロンと呼ばれる強い相互作用をする粒子に崩壊していく。このハドロンのうち3つのクォークとそれらをつなぎとめるグルオンでできている粒子群はバリオンと呼ばれる。さらに、このバリオンの主要なメンバーである陽子と中性子が結合してさまざまな元素を形成し現在の宇宙が成り立っていると考えられている。しかし、現在の宇宙に分布する元素の存在比がどのようにして作り出されてきたのかは

完全に理解されてはいない。この元素合成のプロセスをより深く理解するには様々な原子核同士の反応断面積を正確に測定する必要がある。我々は連携大学院を結んでいる理化学研究所の本林グループとともに同研究所の不安定核ビームを用いた反応実験を行っている。理化学研究所は世界でも有数の不安定核ビームを用いた実験が可能な研究所である。これらの実験は世界をリードしておりその実験から数々の博士も誕生している。なお、理化学研究所の地理的な好条件から学部4年生の実験参加も可能である。

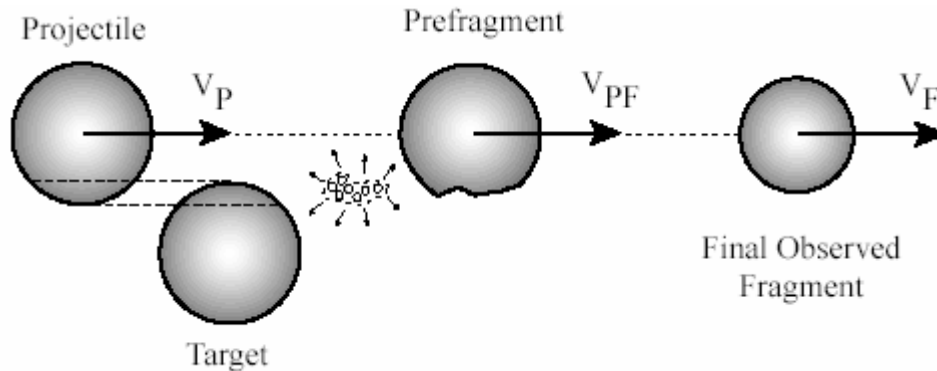


図2：原子核反応を用いて安定原子核からかけ離れた中性子数を持つ不安定原子核ビームを作るイメージ。

3. 不安定核の大きさを測る SCRIT 実験

原子核の大きさを知るには理論的な不確定性のない電子散乱を用いるのが常套手段であるが不安定核については固定標的を作ることができないために適用されたことは無い。そこで考えだされたのが電子蓄積リング中にイオンをトラップして浮遊固定ターゲットとして電子散乱を行うという手法 (**Self Confining Radioactive Ion Target**) である。そのプロトタイプはすでに製作され京都大学化学研究所の電子蓄積リング **KSR** に設置されている。2004年9月のテストですでにイオンがトラップされていることが確認され、現在は将来の電子散乱実験に必要な検出器の開発に重心が移っているところである。

理化学研究所の共同研究者たちは **SCRIT** と散乱電子の検出器を担当しているが、我々は電子の反対側にはじき出される非常に運動エネルギーの低い (50keV ~ 1MeV) 反跳核検出器の開発を担当している。世界で初めて不安定核の電子散乱を測定する大きなチャンスであるが技術的な問題も山積している。若い皆さんのアイディアとパワーをぶつけるには絶好のテーマであろう。

4. その他

現在日本の原子核分野では理化学研究所の RIBF 計画と K E K + 原研の統合計画である J-PARC の二つの大きな加速器（一台数百億円もする）が建設中である。 J-PARC での実験を見据えた準備ももうそろそろ始めようと考えている。 その一つの可能性が偏極ガスジェットターゲットである。

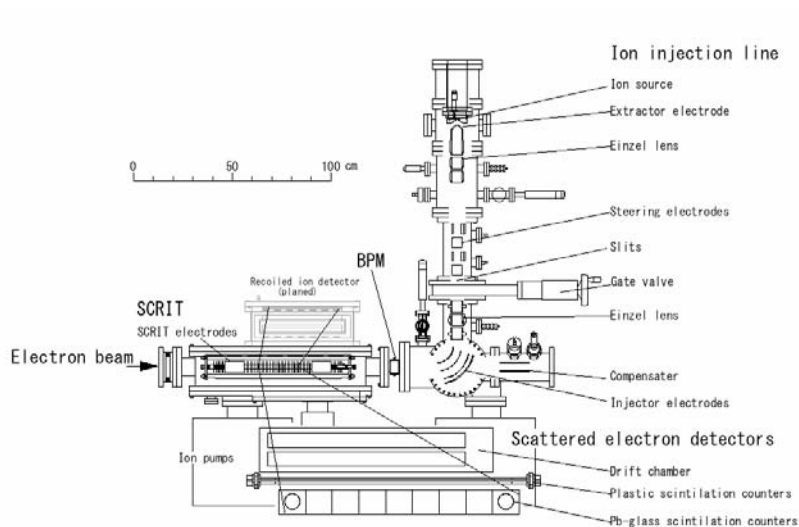


図 3 : KSR のテスト実験用セットアップ。図中の反跳核検出器は現在開発中。

教育面においては前期に物理計測論と原子核・放射線物理学講究 1、後期に物理入門ゼミナールを担当しており物理実験の根本となる物理的理解と実験にすぐに役立つ知識、測定器をブラックボックスではなく動作原理を理解して使えるようになることを目標に講義をしている。3年実験、特別実験では現在行っている実験研究に使用する検出器の開発を主たるテーマとしている。これらの開発は上述した世界第一線の実験に直接応用できるものを目指す。また、検出器性能の理解のためにコンピューターシミュレーションも行う。

大学生、大学院生へのメッセージ

物理学は自然の普遍的な真実を理解する学問であるためその進歩は実験を行いその結果とあわない理論を淘汰していくことによって正しい理論にたどり着くという過程を積み重ねていくことによってなされる。よって、実験物理学者には実験の物理的な意義をよく理解することとそのような議論に足るだけの信頼できるデータを提供していける実験技術と伝達能力が要求される。我々の研究室の基本的考えは学部時代には専門分野に移る前に物理の基礎をしっかりと学ぶこと。大学院の前期課程では実験の原理の理解とその技術力を磨くこと。博士課程後期課程では実際に実験を行いデータから普遍的な真実を引き出しそれを学術雑誌に投稿して正確に世界に伝えることを目標とする。

伝達の部分では全世界の科学者とのコミュニケーションが必須であり世界の共通言語としての役割を果たしている英語の習得は特に大切である。語学の習得は若いうちほど効率がよいので早い時期から英語力をつける努力をすることを勧める。

ベータ崩壊による標準模型の精密検証、近距離重力の実験研究

村田次郎

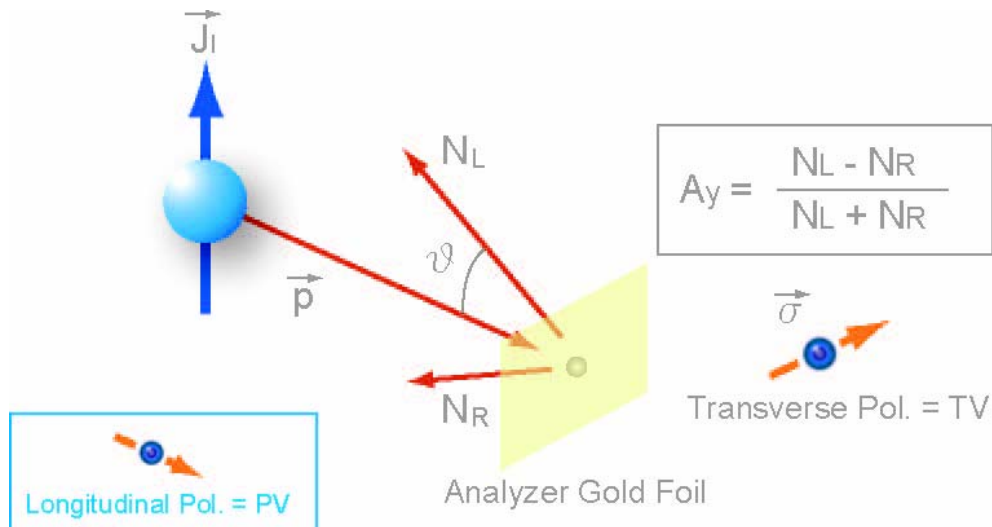
大学院生 M2 川村広和, M1 成田圭吾, 筒井亮丞

卒研究生 末廣徹, 豊田健司, 下山拓也, 佐藤俊昭, 矢澤和正

原子核崩壊を利用した低エネルギーでの超精密実験による素粒子の基本相互作用の研究を行っています。加速器で作り出した不安定な原子核のベータ崩壊の精密観測を通して、右巻きゲージボゾンや時間反転対称性の破れなどの素粒子標準理論を超える現象の発見を目指しています。また、ニュートンの万有引力の法則をミリメートル以下のスケールで精密検証する事で、我々の4次元時空を超える、高次元の世界の存在を検証しようという加速器を用いない実験研究も進めています。

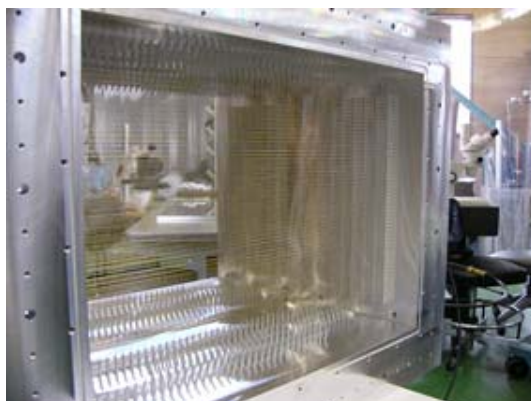
1. 弱い相互作用の精密観測実験（川村広和, 成田圭吾, 末廣徹, 豊田健司, 下山拓也）

素粒子標準理論の確立から20年以上の年月が経過しました。その後の大統一理論、超対称性理論や超弦理論など素粒子論の発展の一方で、実験は超巨大加速器を建設しその猛烈な攻撃にも関わらず今だ標準理論から先の物理を発見出来ずにいます。本研究室では比較的小規模実験を行う事で超標準理論物理の発見を目指しています。現在建設が進められているヨーロッパのLHCに代表される超高エネルギー衝突型加速器による巨大実験は正攻法と考えると、我々のアプローチはゲリラ戦法です。高エネルギー実験はエネルギーをより大きく与える事で「シグナル」を増幅する方法だと言えますが、シグナルを発見出来るか否かはバックグラウンド現象との区別が出来るかどうかだけにかかっています。そこで巨大加速器を用いずとも、わずかなシグナルを非常に精密な測定をする事でバックグラウンドから抽出しようと、中性子や原子核の崩壊の超精密観測を目指しています。



自然界に存在する原子核はその多くが安定ですが、加速器などで人工的に作り出した原子核はより安定な原子核に壊変します。その崩壊様式のうち、ベータ崩壊は標準理論の弱い相互作用で非常に精密に記述され、構造をもたない素粒子である電子を放出する為、精密な弱い相互作用の研究を行うのに適しています。例えば、標準理論では時間の向きを反転させても物理法則は変わらない、「時間反転対称性」がほぼ成立していますが、原子核のベータ崩壊を利用するとこの対称性を検証する事が出来ます。スピン偏極した原子核の崩壊を考えましょう。ベータ崩壊では電子とニュートリノ、及び壊変後の娘核が生成されます。偏極ベクトルと運動量ベクトルの外積と内積で組まれるある量は、時間反転を行うと符号を逆転させる事から、偏極核から放出される電子は横方向に偏極してはならない、というのが時間反転対称性の要求となります。この横方向偏極は実験で測定可能な量である為、例えば崩壊確率がこの量に依存するかどうかを調べる事で、時間反転対称性を検証する事が出来ます。

下図は、ベータ線の 3 次元飛跡検出器である、ドリフトチェンバーです。卒研究生が読み出し回路や飛跡再構成のプログラム開発を行いました。現在、M2 の川村君がこのドリフトチェンバーを世界で初めて、電子の横方向偏極度計として動作させるための開発を進めています。横方向偏極度を測定するには Mott 散乱を利用します。2006 年度は卒業研究としてこの Mott 散乱の研究自身も進めています。また、検出器の開発と平行して時間反転対称性の破れの実験を遂行する為、傾斜薄膜法という手法を用いて、偏極した ^8Li 核を大量に生成する装置を高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の加速器施設に共同で開発するプロジェクトも進めていく予定です。



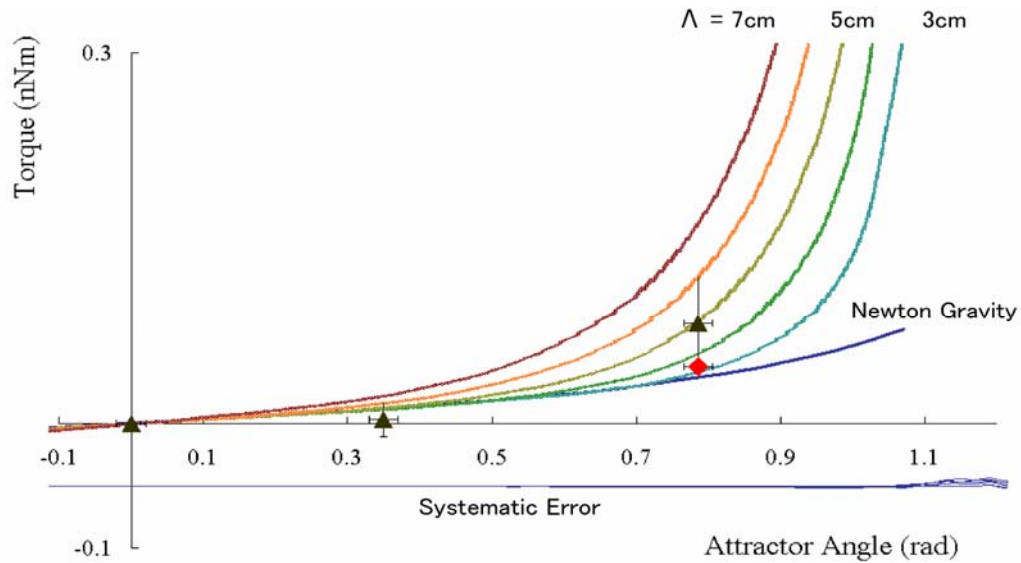
2. 近距離重力の実験的検証、我々の4次元を超える余剰次元の探索

(筒井亮丞, 佐藤俊昭, 矢澤和正, 大森健宏)

超対称性理論や超弦理論は世界が10次元や11次元であると预言しています。一方で素粒子の反応から熱力学まで、我々の知っている全ての現象は厳密に3次元空間を支持しています。しかし、盲点がありました。重力は他の3つの力に比べてあまりに弱く、素粒子のスケールはおろか実験室の大きさでもその基本である万有引力の法則は検証されていません。しかも重力だけは他の力と違って我々の4次元時空に束縛されずに自由に高次元時空全体を伝播する事が出来、その為に見かけの力の大きさが小さくなっているというシナリオがあり、万有引力の法則の検証により高次元の証拠が見つかる可能性が指摘されているのです。驚くべきことに、そのズレはミクロのスケールではなく、ミリメートル近辺で既に生じている可能性があります。

そこで、ミリメートルスケールでの重力の法則の検証をする、とてもわかりやすい実験を進めています。物体間の重力による、例えば振り子の変位を顕微鏡で観測する事で行います。簡単な顕微鏡を用いても、振り子のワイヤーの位置は特殊な統計画像処理を行う事でピコメータの精度で決めることが可能になる事が我々の研究でわかりました。この技術は特許を取得しています。我々は高精度の振り子の製作、統計的画像処理技術の開発により万有引力の法則を限界まで小さいスケールで検証する研究をゼロからスタートさせ、ノイズの中から重力によるシグナルを確認出来る所までこぎつけました。3年目にあたる2005年度には重力の逆2乗則の定量的な検証を行う事について成功しました。下図はその結果です。得られた結果は、もし余剰次元が存在するとしても、その方向の大きさは6cm以上ではありえない、という上限値をつける事に成功した事を示しています。

ある理論のモデルではNewtonの法則からのズレが1mmあたりから始まる可能性を指摘しており、今後はさらに高精度化を進めてより近距離での重力の逆二乗則の検証を進めて行く予定です。このプロジェクトは卒業研究としてスタートしましたが、2006年度からは大学院生の研究としても本格的に進めています。



以上の様なテーマを柱にして、活動しています。以下は、これまでの卒研のテーマです。

2003 年度 「実験室スケールでの万有引力の法則の検証」

「位置検出型低エネルギーイオン検出器の開発」

2004 年度 「ねじれ秤による近距離重力の検証」

「ドリフトチェンバーの3次元トラッキングシステムの構築」

2005 年度 「センチメートルスケールでの重力の検証」

「飛跡検出器等のための多チャンネル読み出しシステムの構築」

「面白いことは何でもやる」をキーワードに、いつも新しいアイデアを探しています。何かを実際に実験でやってやろう！という気構えの学生が、我々の部屋に入ってきて一緒に頑張ってくれることを期待しています。

研究室の URL: <http://www.rikkyo.ac.jp/~jiro/>

連絡先など: jiro@rikkyo.ac.jp



DoCoMo



au / vodafone

低エネルギー原子衝突実験

小泉哲夫

(M2 : 伊藤裕章、M1 : 橋本公瑛)

我々の世界は原子分子からできている。世の中で起こる様々な現象もミクロにみれば、原子や分子がお互いに接近してきて相互作用を起こすということの積み重ねである。この様な一つ一つの原子分子の”衝突”過程を素過程というが、原子衝突の研究とは素過程を通して世の中で起こっていることを理解しようとするものといえるだろう。原子衝突の研究で取り扱う衝突エネルギーは上は数MeVから、下は熱エネルギー領域までと非常に広い範囲にわたっている。対象となる粒子も、電子・光子・原子・分子・それらのイオンと多彩である。これらの粒子が衝突すると相手から電子を奪ってしまうとか、相手とくっついてしまうとか、実に様々な現象が起こる。これは我々の世界の多様性を反映しているのだが、この多様性が原子衝突研究の魅力の一つである。さらに原子衝突の研究成果は広い分野に応用されている。宇宙空間での分子形成、核融合プラズマ、レーザー発振、化学反応、生体への放射線作用などの分野で原子衝突のデータが必要とされている。我々はその中でも低エネルギー領域(数十meV~数keV)でのイオンと原子・分子・クラスターとの衝突過程に興味を持って実験を行っている。低エネルギー原子衝突の実験は比較的小型の装置で行えるものが多い。そのため、学部4年や修士課程の学生でも、実験の全体を把握でき、中心になって実験を進めることが可能である。研究に興味のある方の参加を期待している。以下に我々の研究室で行われている研究を紹介する。

1) イオンと原子・分子の衝突過程

1-1) 多価イオンと原子分子の衝突

中性原子から電子を多数取った多価イオンはクーロンエネルギーとして大きな内部エネルギーを持っている。そのため多価イオンが原子・分子に衝突すると、たとえ衝突エネルギーが低くても標的原子・分子に大きな影響をあたえる。我々はハイテクリサーチセンタープロジェクトで導入した多価イオンビームラインを用いて、多価イオンと原子・分子の衝突過程の実験を行っている。高い内部エネルギーの影響が顕著に出るとされる低エネルギー領域(数keV以下)での測定を中心とする。昨年度は多価イオンと分子が衝突したときに生成される分子多価イオンを研究するための測定装置の開発を行った。多価イオンと標的原子が

衝突すると、電荷移行や標的の電離がおこり標的原子が電離されるだけでなく、入射イオンの価数も変化する。衝突過程を詳細に理解するために、入射イオンが荷電変換したイオンと標的原子が電離してできた生成イオンを同時計測できる計測システムを開発し予備測定を行った。この装置では、イオンエネルギー損失分光法により、電子捕獲したイオンの電子状態を同定し、同時計測法により生成イオンも検出することで電荷移行反応機構の解明を目指している。

1-2) 二電子移行分光法

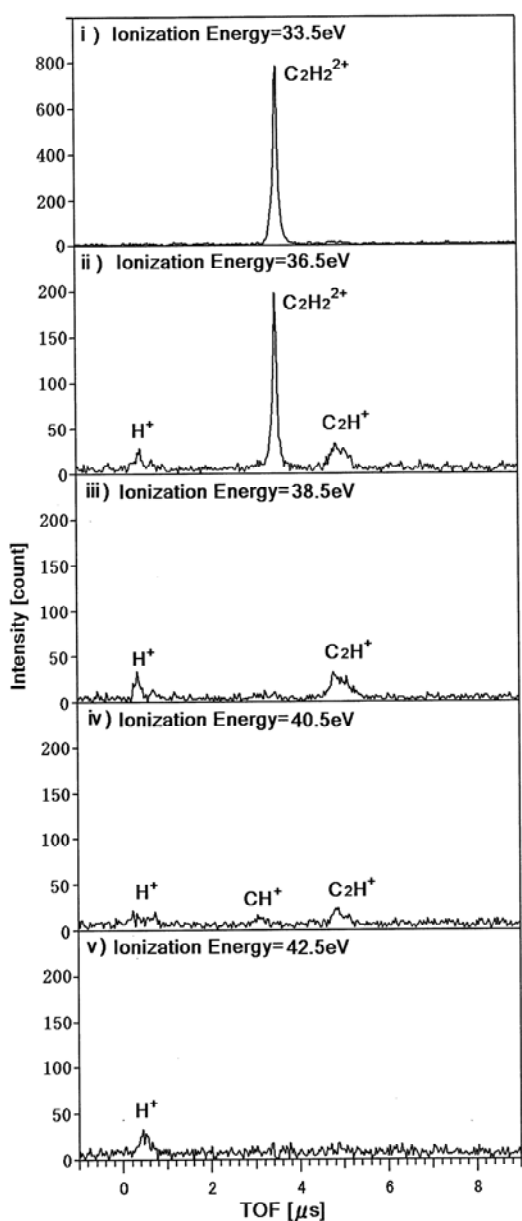
分子の2価イオンに関する情報をえるため二電子移行分光法を用いた測定を行っている。これは入射H⁺イオンを標的分子に衝突させ、2電子移

行で生成したH⁺イオンの運動エネルギーを精密に測定することによって2価分子イオンの電子状態を知ることができる。この方法を用いてNOやO₂分子の2価イオンの電子状態について知見を得た。さらに装置を改良し分子2価イオンが解離してできるイオンとH⁺イオンとの同時計測を計画している。これにより分子2価イオンの始状態を指定した解離過程の解明が可能となる。

我々はアセチレン分子標的で同時計測を行い、アセチレン2価イオンの初期状態を指定した解離

図1. 同時計測による生成イオンスペクトル過程の解明に成功した。

測定結果を図1に示す。図中の“Ionization Energy”はアセチレン2価分子イオンの内部エネルギーに相当する。H⁺イオンのエネルギー分析によりこの状態を特定し、同時計測によりアセチレン分子からの生成イオンを分析したスペクトルである。図に見る通り初期アセチレン2価分子イオンの状態により解離過程が異なることが明瞭に示されている。



2) クラスターイオンの衝突過程

孤立原子分子が無数に集まって液体・固体になることはよく知られている。では何個ぐらいの原子分子が集まると孤立状態と違って液体・固体としての性質を示すようになるだろうか。これはたいへん面白い問題である。原子分子が数個から数百個結合してできる分子はクラスター分子と呼ばれ、孤立原子と液体・固体の中間の物質として注目を集めている。うまく条件を設定してやるとクラスター分子をたくさん作ることができる。このような条件では普通では結合しない希ガス原子でも結合をはじめ、He原子が10個も結合した分子などが見つかる。我々はクラスターイオンを大量に造るクラスターイオン源の開発を行い、クラスターイオンと原子分子との衝突解離過程を通してクラスターの性質を実験的に研究している。クラスターイオンの衝突解離断面積から、クラスターの構造、クラスターの反応機構などの解明を目指している。

3) 低エネルギー領域のイオン分子反応

最近、宇宙空間にかなり大きな分子が存在することが分かってきた。これらの分子の生成過程と

してイオン分子反応が重要だと言われている。また宇宙初期の星の形成過程においてもイオン分子反応断面積の知識が必要とされている、星間雲の温度は 10–100 K (1–10meV) と言われているから、このようなエネルギー領域でのイオン分子反応断面積の測定が重要になる。ところが低エネルギー領域の実験というのはそれほど簡単ではない。それは低エネルギービームには空間電荷効果という原理的制約があるため作るのが大変難しいためである。そのためいろいろな実験手法が工夫されている。移動管法はその一つで、冷却した気体の中にイオンを打ち込み気体分子との衝突で低エネルギーになったイオンを用いて実験を行う。我々は衝突エネルギー1eV 以下の領域（特に 10meV 程度の領域）でのイオン分子反応断面積をこの移動管法を用いて測定している。

移動管で断面積測定を行うには、同時にイオン移動度という物理量を測定しなくてはならない。イオン移動度は気体中でのイオンの動きやすさを表す量で、イオンと気体原子の相互作用ポテンシャルに敏感な物理量である。2005 年度の卒業研究では酸素原子イオンの励起状態の移動度の測定を行った。

現在はカイラル分子の鏡像異性体をイオンの移動度で識別することを目指し、装置を改造中である。カイラル分子の識別は生体反応などでは重要で、移動度を用いて行うのは我々独自のユニークな手法である。

4) 光子を用いた原子分子の電離過程

ある程度のエネルギーを持ったイオンや光子が原子分子と衝突すると相手の電子をはぎ取る電離がおこる。単色の光を入射粒子とした場合には、原子の特定の準位にある電子を選択的に電離でき

るので、電離機構解明には好都合である。このような測定は、シンクロトロン放射光を利用することによって可能となった。我々は、高エネルギー加速器研究機構フォトンファクトリーや姫路にある放射光施設 SPring-8 で、光子による原子分子の電離の研究を行っている。最近は、ほとんど測定例がない金属原子のK殻光吸収による原子の多重電離過程の研究を行っている。今年度導入予定のレーザープラズマ光源を用いれば立教大学においてこのような測定が可能となる。

5) 放射線検出器の基礎的研究

原子衝突実験や原子核実験を行うには高性能の検出器は必要不可欠なものである。我々の研究室ではその検出器の基礎的な性質の測定を行い、実験への応用や新しい検出器開発を目指している。

そのひとつとして低エネルギー粒子検出によく使用される二次電子増倍管の検出効率測定をおこなった。この測定は断面積の絶対値測定には不可欠なものである。もうひとつは日立化成工業との共同研究で「放射線検出器及び検出器素子に関する基礎的研究」を行っている（実験技術員村上氏との共同研究）。ここでは主に固体シンチレータの評価や物性に関する基礎的研究を行い、新しいシンチレータの開発を推進している。

希ガス固体および希ガスクラスタにおける 電子的励起および崩壊過程の実験的研究

平山孝人*

1 はじめに

私は以前からさまざまな様態の「希ガス」を対象とした研究を行ってきた。希ガス原子は「不活性ガス」と呼ばれることが示す通り、それ自身単体で安定に存在する単原子分子である。希ガス原子中の電子は許されている全ての軌道を占めていて、他の原子などと結合するための余っている手（結合手）を持たず、原子や固体といった全く違う様態でもその電子的性質はかなり似通っている事が知られている。そのため、原子数が最小の極限である孤立した原子、および最大の極限である固体、またその中間であるクラスターという3つの状態を「電子的励起過程」という一つのキーワードで統一的に理解することが可能であると考えている。

私の研究室では、希ガスクラスタ・固体の二つの相について「電子的励起過程」がどのように起こるのか、また励起状態がどのように移り変わっていくのかを明らかにするための実験的研究を行っている。

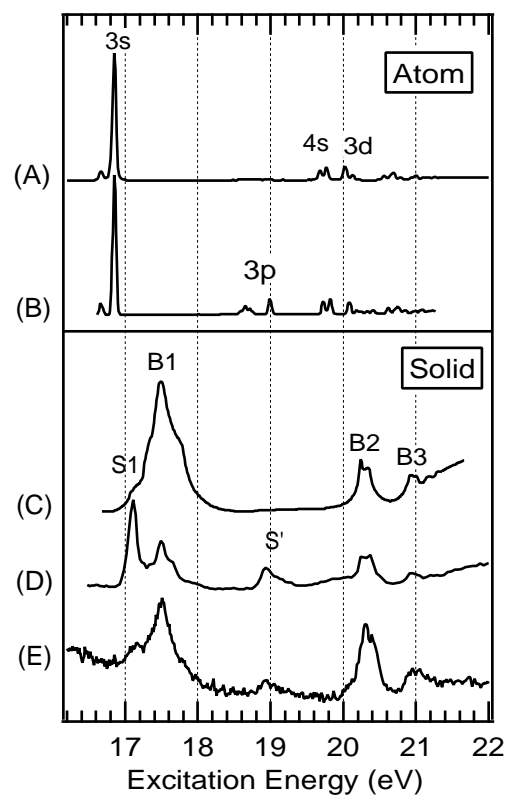


図 1: Ne を標的とした電子的励起状態の生成スペクトル。(A) Ne 原子の光励起。(B) Ne 原子の電子励起。(C) Ne 固体の光励起。(D) 光励起による Ne 固体表面からの励起原子脱離収率。(E) 光励起による Ne 固体表面からの全脱離収率。(D) と (E) の結果のみ私の研究結果である。

2 希ガス原子

希ガス原子に電子や光などを衝突させることにより、電子的な状態を変化させることができる。例として、Ne の場合の電子的励起状態の生成スペクトルを図 1 に示す。スペクトル (A) と (B) は Ne 原子を標的とした場合である。例えば 2p 軌道の電子を 3s 軌道に励起して $2p^5 3s$ 状態の原子を作るのに必要なエネルギーは、約 16.8eV であることがこの結果から解る。ま

*hirayama@rikkyo.ac.jp, <http://www.rikkyo.ac.jp/~hirayama/>

た、ピークの高さがその励起状態の生成しやすさに対応する。光子で励起した場合 (A) と電子で励起した場合 (B) のスペクトルは良く似てはいるが、例えばスペクトル (B) で 18.6 – 19.0 eV に現れる $2p^5 3p$ 状態のピークは (A) には観測されていない。これは量子力学的な角運動量保存則である「選択規則」により、 $2p^5 3p$ 状態は光衝撃では生成できないためである。

希ガス原子を標的とした実験は古くからいろいろな手法を用いて行われ、また理論的にも数多くの研究例があるため、原子の電子的励起状態はかなり良く解ってきている。後述する希ガス固体と希ガスクラスターの研究を行うにあたっては、原子で得られている情報が役に立つことが多い。

3 希ガス固体

前述した通り、希ガス原子は結合手を持たないために通常的环境下では他の原子と結合せず、結合エネルギーが非常に小さい。Ne, Ar, Kr, Xe 固体の結合エネルギーはそれぞれ 0.02eV, 0.08eV, 0.12eV, 0.17eV であり他の物質（例えば鉄：4.3 eV, 塩：7.9 eV）と比べて極端に小さいため、固体（氷）を作るためには極低温にする必要がある。固体を作るために必要な温度は、Ne の場合は 7K 程度以下、Xe の場合は 50K 程度である。

Ne 固体を標的とした場合の電子的励起状態の生成スペクトルを図 1(C) に示す。原子を標的とした場合とはピークの位置・太さが大きく異なっていることがわかる。しかし、その違いを詳しく調べてみると、原子の場合に観測されているピークが全て少しずつ高エネルギー側にずれ、かつ太さが太くなっていると考えようまく説明ができることが知られている。希ガス原子は安定であり周囲の粒子と反応を起こさないため、原子の場合でも固体の場合でも（多少の違いはあるが）電子的励起に関してはほぼ同様の過程が起きていると考えて良く、このことは、さまざまな状態の希ガスを研究するうえでの利点の一つとなっている。

Ne 固体中に Ne 原子の最外殻電子を一つ励起してできる $1s^2 2s^2 2p^5 3s$ 状態を生成した場合について考えてみる。この励起状態は約 10^{-8} 秒程度の寿命を持ち、その後光を放出して基底状態 ($1s^2 2s^2 2p^6$) に落ちる。孤立した原子の場合にはその時間内に他の原子と出会う確率は非常に低いですが、固体のようにすぐそば（固体 Ne の場合は隣の原子との距離は 0.32nm）に原子が存在するような環境では、 10^{-8} 秒という時間でも相互作用を起こすには十分な時間である。 $1s^2 2s^2 2p^5 3s$ という励起状態は、 $1s^2 2s^2 2p^5$ という状態の正イオンの外側に電子が 1 個存在している状態であり、アルカリ金属である Na 原子（電子配置： $1s^2 2s^2 2p^6 3s$ ）と似た状態になる。また、電子を一つはぎ取った（電離した）場合（電子配置： $1s^2 2s^2 2p^5$ ）は、ハロゲン元素である F 原子と同じ電子配置である。アルカリ金属元素もハロゲン元素も非常に反応性が高いことが知られている。すなわち、基底状態では「おとなしい」希ガス原子も、励起状態やイオンになった途端に非常に反応性が高くなり、周囲の原子と様々な反応を起こす。孤立した原子を標的として実験を行った場合とは違い、固体を標的とした場合にはこのような励起原子と周囲との相互作用を効率的に観測することが可能となる。

図 1 のスペクトル (D) と (E) は、それぞれ固体 Ne を光で励起した時に脱離する励起原子と全原子の脱離強度の入射光エネルギー依存性である。固体中に生成した励起原子の量はスペクトル (C) のピークの高さで知ることができるが、「励起後の脱離」という現象を通してみると、たくさん励起させたからと言ってたくさん脱離するとは限らないことが解る。また、同じ「脱離」という現象を見ても、脱離する原子の種類によってその様子が全く違うことが (D) と (E) の比較から明らかである。これらの結果を解析することにより、固体を構成する原子が励起後に周囲の原子とどのような相互作用を起こすのかなど、原子レベルでの詳細な情報を得ることができる。

3.1 低エネルギー電子衝撃による希ガス固体からの脱離現象の観測

低エネルギー (10 eV ~ 50 eV) 電子衝撃による固体 Ne からの脱離励起原子の脱離収率・脱離エネルギー分布・脱離角度分布の試料温度依存性を測定している (試料温度範囲: 4.5 ~ 7 K)。固体表面の結晶構造が脱離角度分布に影響を及ぼすことが明らかになり、現在、より詳細な測定および解析を行っている。

3.2 低速多価イオンと希ガス固体の相互作用

2001 年度にハイテクリサーチセンター整備事業により購入した電子サイクロトロン共鳴 (ECR) 型多価イオン源を使用して、多価イオンと希ガス固体相互作用に関する実験を行っている (図 2)。多価イオンとは価数が 2 価以上のイオンのことで、それ自身の持つ内部 (静電) エネルギー (= イオン化エネルギーの総和) が大きいため、多価イオンが固体表面に衝突した際には、固体を構成する原子の電子状態やそれらの幾何学的構造に大きな影響を及ぼす。現在、主に脱離粒子の観測を通して、非常にもろい希ガス固体の表面および固体中で、多価イオンの持つ巨大な静電エネルギーがどのように消費されるのかを定量的に明らかにすることを目的とする実験を行っている。

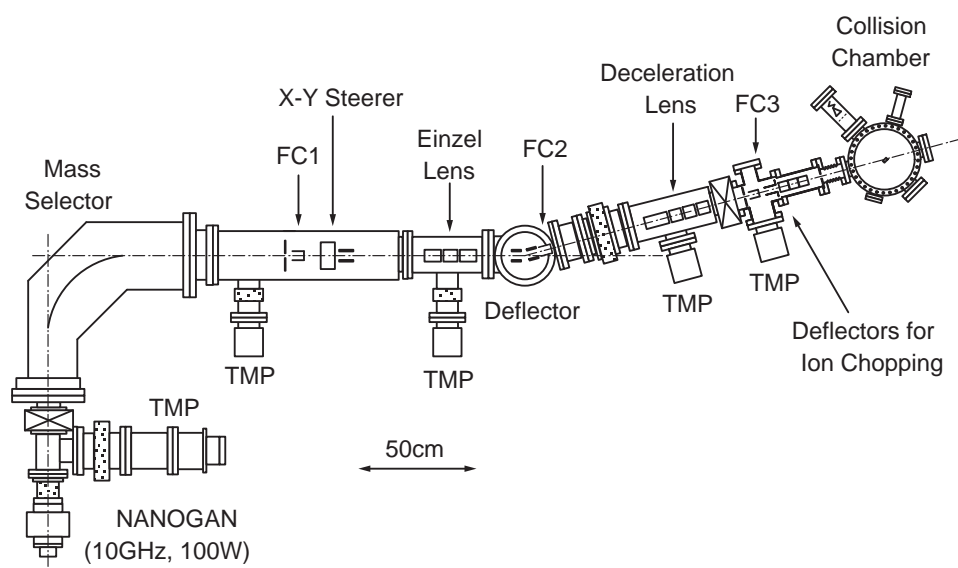


図 2: 希ガス固体 - 多価イオン衝突実験装置全体図。

2005 年度は主に 1 価、2 価程度の低価数のイオン衝撃による希ガス固体からの脱離粒子の観測を行った。He⁺ 衝撃により固体 Ne 表面から脱離するイオンの飛行時間スペクトルを図 3 に示す。入射イオンのエネルギーを高くすると、大きなクラスターイオン (Ne_n⁺) の脱離が観測され、クラスターイオン脱離のしきい値は 100~150eV 程度であることがわかった。このエネルギーは全粒子の絶対脱離収率 (図 4) の急激な立ち上がりにはほぼ一致した。この結果は中性粒子 (主に原子) の脱離過程とクラスターイオンの脱離には密接な関係があることを示唆しており、現在希ガス固体中でのイオンの運動学的効果を考慮に入れた解析を行っている。

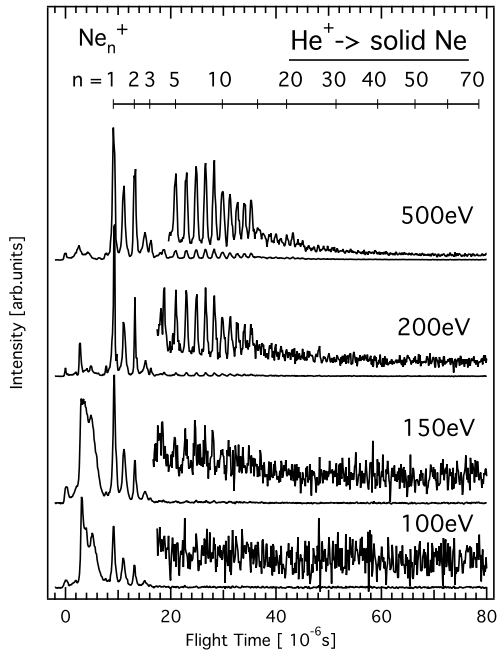


図 3: He^+ 衝撃による固体 Ne 表面からの脱離イオンの飛行時間スペクトル。入射 He^+ イオンのエネルギーは 100, 150, 200, 500eV。

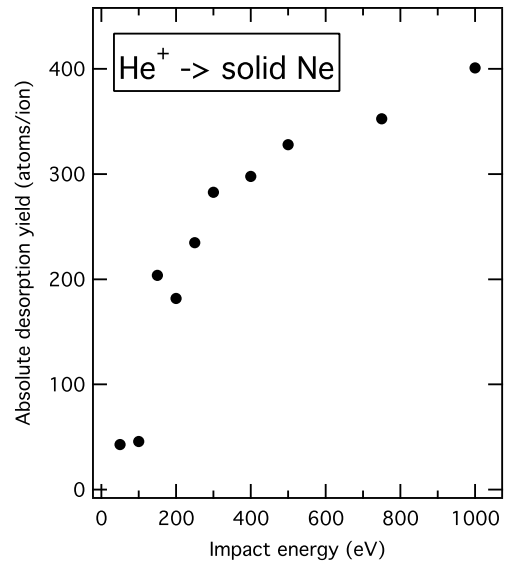


図 4: He^+ 衝撃による固体 Ne 表面からの絶対全脱離収率。

4 希ガスクラスター

クラスターとは原子が有限個集まったものである。実験的に生成可能なクラスターの大きさ（原子数）は、2～数百万個程度であるが、その大きさにより「物理」が変わってくる。原子数が10個程度以下では「原子」としての性質を強く示すが、例えば100万個（直径が原子数約100個分）程度になるとそれはほぼ「固体」としての物性を示す。その中間の状態を観測すると、物質の性質が「原子」から「固体」へどう変化していくのかを知ることができる。

4.1 電子エネルギー損失分光法を用いた希ガスクラスターの電子的励起過程の研究

この研究では、断熱膨張法を用いて希ガスクラスタービームを作り、そこに低エネルギー電子を衝突させることにより励起状態原子を生成し、その生成エネルギーおよび生成確率のクラスターサイズ依存性を広い範囲のサイズ（原子数数十～数十万）で測定する計画である。特に、電子的励起過程という観点から、どれくらいの数の原子が集まったときに「固体」としての性質を持つのか、という点に興味を持っている。また、クラスターはほぼ球形をしているので、固体と比べると表面を構成する原子数の割合が高い。そのために固体を標的とした場合には観測が難しい表面第1層目のみで起こる励起（表面励起子）を感度良く測定することが可能である。

この研究のために製作した電子エネルギー損失分光装置を図5に示す。標的とする希ガスクラスタービームは粒子密度が低いいため、観測される信号も非常に弱いことが予想される。この困難

を克服するために電子ビームとクラスタービームを合流して衝突させる，合流ビーム法を採用した。現在 Ar クラスターを標的とした電子エネルギー損失分光実験を行っている。

昨年度，クラスターサイズが数 100 個程度の Ar クラスターを標的として実験を行い，クラスター起源の信号の観測に成功した。現在統計精度を向上させた測定を行っている。

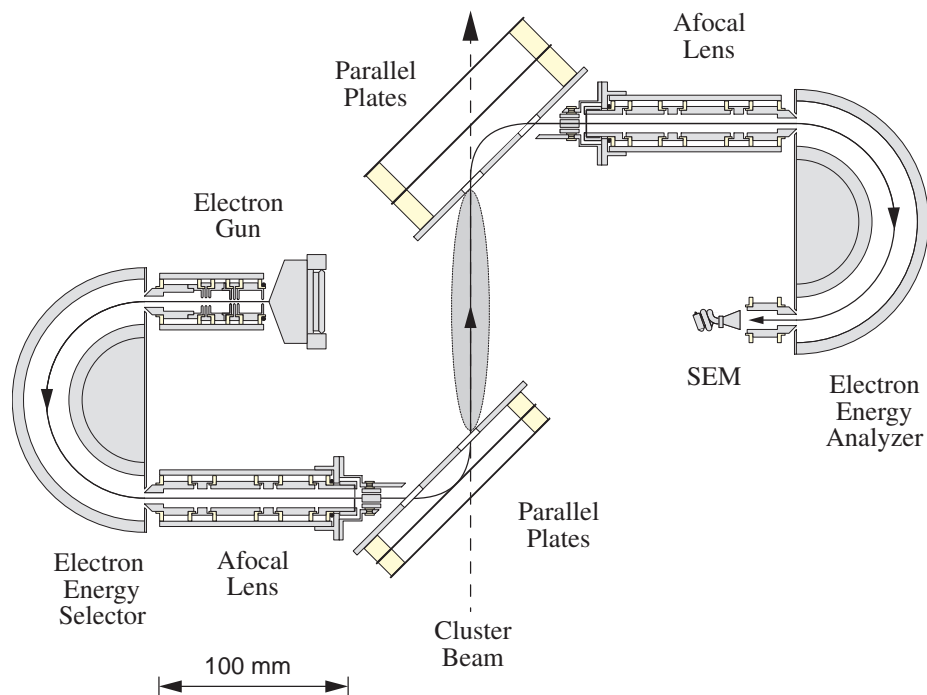


図 5: 合流ビーム法を用いた希ガスクラスターの電子エネルギー損失分光装置。実線は電子ビームの軌道，破線はクラスタービームの軌道を表わしている。