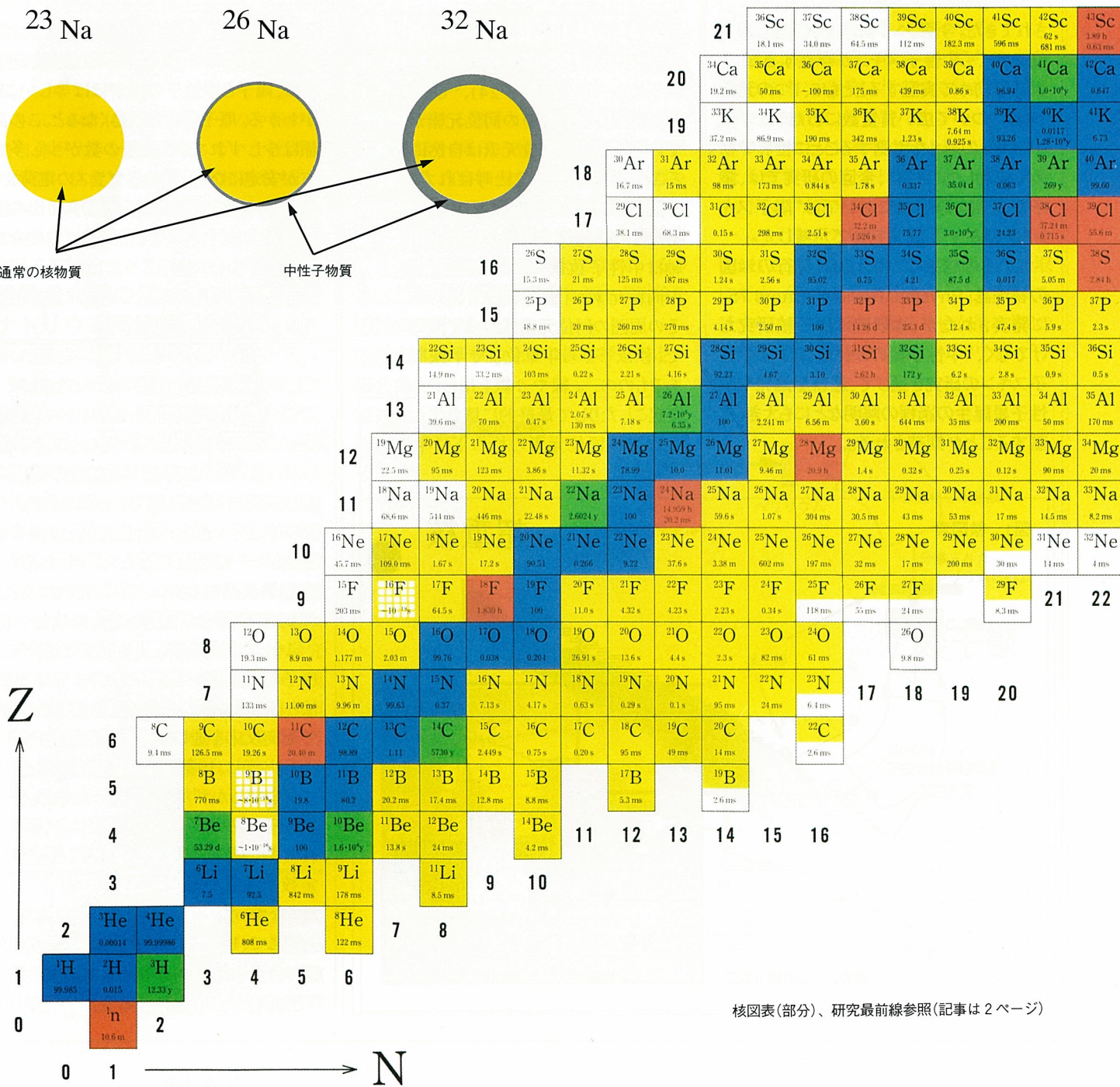
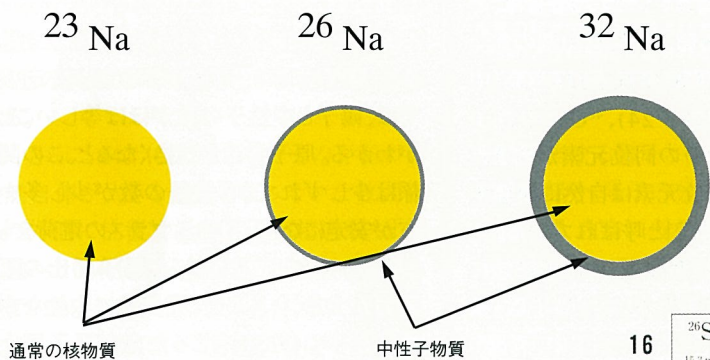


理研ニュース

No.173 November 1995

理化学研究所

- 2 ● 研究最前線
世界で初めてナトリウム同位元素の
“中性子スキン”を発見
- 6 ● SPOT NEWS
神経芽腫細胞の分化誘導物質エポラクタエン
- 7 ● TOPICS
・理研/BNL、「スピン物理」研究協力
いよいよスタート
・科学を楽しむセミナーを開催
- 8 ● 原酒
ドイツ、ダルムシュタット滞在記



核図表(部分)、研究最前線参照(記事は2ページ)

世界で初めてナトリウム同位元素の “中性子スキン”を発見

中性子過剰不安定核に普遍的に中性子スキンが存在することを確認

リニアック研究室は、ドイツ・重イオン研究所およびロシア・クルチャフ研究所との共同研究により、ナトリウム同位元素(アイソトープ)の原子核内における中性子と陽子の分布を系統的に測定する研究を進めてきたが、このほど、中性子が過剰なナトリウム同位元素の原子核表面にできる“中性子スキン”の厚さの決定に成功した。

中性子スキンは、これまで理研によるヘリウム同位元素(^6He , ^8He)の研究で示唆されてきた。今回、ヘリウム以外の元素の同位元素でも中性子スキンが存在することを世界で初めて実証するとともに、1つの元素(Na)について広い質量数にわたって中性子スキンの厚さを実測することに世界で初めて成功した。さらに、今回の研究では、陽子が過剰な原子核においては“陽子スキン”が存在することも初めて示唆した。

これらの成果は、10月30日発行の米国の物理誌「Physical Review Letters 75」に発表されたが、本研究は原子核研究だけでなく、“中性子星のかけら”である中性子スキンの研究を通じて、超新星爆発や中性子星誕生の過程の解明などにも大きく貢献することが期待される。

約6000種の存在が予測される原子核

原子核はすべての物質を構成している原子の中心にあり、陽子と中性子でできている。たとえば海水に含まれるナトリウム(Na)の場合、100%が ^{23}Na 、つまり11個の陽子と12個の中性子で原子核を構成するナトリウム同位元素である。また、海水にはカルシウム(Ca)も溶けている。カルシウムの場合、その96.9%は陽子20個、中性子20個の ^{40}Ca だが、わずかに ^{42}Ca (中性子22)、 ^{43}Ca (中性子23)、 ^{44}Ca (中性子24)、 ^{46}Ca (中性子26)、 ^{48}Ca (中性子28)の同位元素が含まれている。これらの同位元素は自然に崩壊することのない「安定核」と呼ばれている。

図1は、元素の「周期律表」の原子核版にあたる「核図表」である。縦軸は陽子数、横軸は中性子数を示している。図中、青塗りの同位元素が「安定核」で、約270種ある。その周囲の同位元素はすべて「不安定核」で、秒以下から年単位まで半減期に幅はあるものの、 α 線や β 線を出したり核分裂を起こしたりして最終的に壊れてしまう(拡大図の核同位元素の枠の下に半減期が

記載されている)。安定核、不安定核を合わせて、現在、約6000種の原子核の存在が予測されているが、うち着色されている約2000種がすでに発見されている同位元素である。

中性子過剰な原子核の“中性子スキン”と“中性子ハロー”の発見

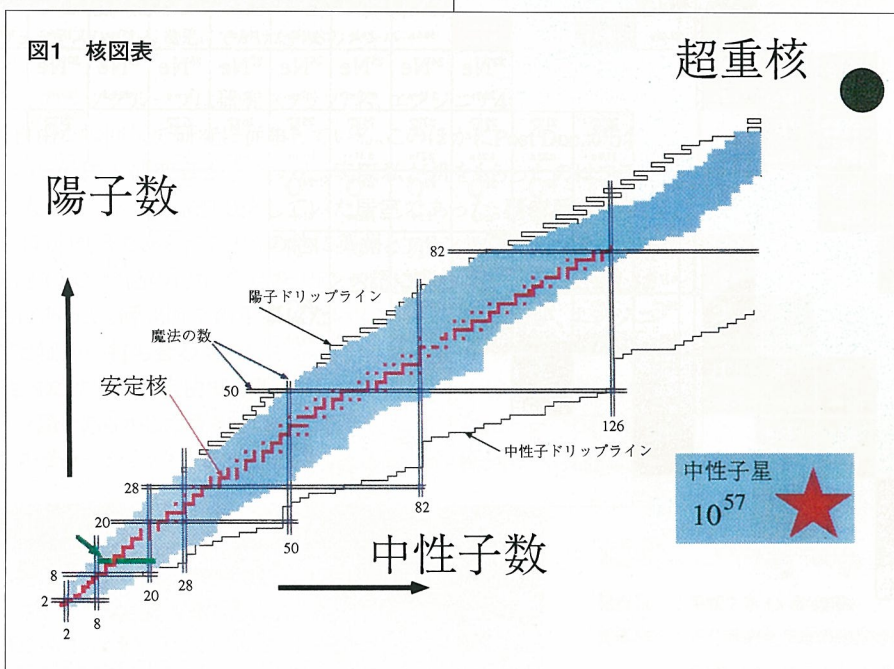
安定核と不安定核との差異は原子核レベルでどこにあるのだろうか。核図表を見ると、原子番号(陽子数)の小さい安定核では、陽子と中性子の数がほぼ等しいことがわかる。原子番号が大きくなると、この関係は少しずつずれて、中性子の数が少し多い方が安定になる。これは、プラスの電荷をもつ陽子の数が増えてくると陽子同士の反発力が大きくなるので、電気的に中性な中性子が少し多めにまじった方が陽子同士の反発を和らげるためと考えられている。

反対に、中性子の数が極端に少ないか過剰な原子核になればなるほど、いっそう不安定になる。中性子数が少ない場合は陽子同士の反発が強くなるためと考えられるが、過剰な場合は、余分な中性子が原子核の表面に出てきて、“中性子スキン”(表面に中性子が集まっている状態)や“中性子ハロー”(原子核の周りに薄く霧のように中性子が広がっている状態)をつくるとこれまで予測されてきた。

こうした原子核の構造を研究することが原子核物理学の重要なテーマである。方法としては、イオン化した原子核を加速して衝突反応を通じて解析するのが有効である。しかし、10年ほど前までは加速イオンに安定核しか利用できなかったため、安定核やその周辺の不安定核はよく研究されてきたが、安定核から遠く離れた超不安定核の性質や構造はあまりよく知ることができなかった。

そこで、リニアック研究室は、1985年に米国ローレンス・バークレー研究所と共同で不安定核を材料として衝突反応を起こす

図1 核図表



手法を開発した。これは、重イオン加速器で光速に近いスピードに加速した重イオンを第1次ターゲットに当てて破碎して不安定核のビームとして取り出し、取り出した不安定核ビームをさらに重水素などの第2次ターゲットに照射して衝突反応を検出する方法である。そして、理研のリングサイクロトロンを用いてこの方法をさらに発展させ、これまでに中性子を過剰にもつ ${}^7\text{Li}$ (リチウム)や ${}^{11}\text{Be}$ (ベリリウム)などの衝突反応実験により“中性子ハロー”を発見し、 ${}^6\text{He}$ や ${}^8\text{He}$ の反応で“中性子スキン”も発見している。

さらに、94年には、これまでその存在の有無自体が大きな論争となっていた核図表の外側に位置する中性子が超過剰な「超重ヘリウム(${}^{10}\text{He}$)」も世界で初めて発見している。

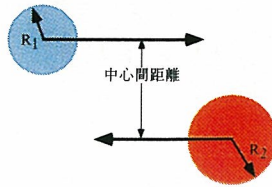
世界最大級の重イオン加速器でナトリウム同位元素を研究

今回はこれらの研究を拡張し、原子番号の大きいナトリウム同位元素を対象として、核半径の測定から中性子スキンの厚さの測定まで系統的に行うことにした。

研究はリニアック研究室と、ドイツの重イオン研究所(GSI)およびロシアのクルチャトフ研究所からなる共同研究チームを編成し、ドイツ・ダルムシュタット市郊外にあるGSIの世界最大級の重イオン加速器を使って行うこととした。1992年よりリニアック研究室の手で全体のプロポーザルをまとめ、現地での装置のオペレーションをGSIが担当、検出器の製作、データ解析は理研が行った。ロシア側は実験の遂行に参加する形をとった。

中性子スキンの厚さの決定

実験準備は1993年から始まった。まず、中性子スキンの厚さの決定がテーマとなった。方法は陽子・中性子込みの全体の核半径を測定し、ゆで卵でいえば黄身の部



中心間距離 $> R_1 + R_2$ 反応は起こらない

中心間距離 $< R_1 + R_2$ 反応が起こる。

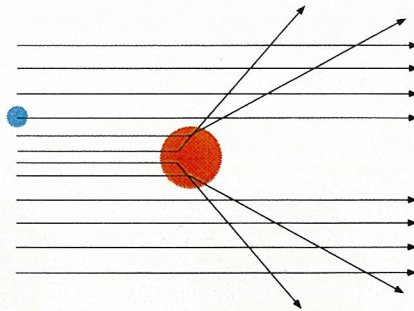


図2

二つの原子核が衝突する場合(上図)半径の和が中心間距離より大きいと反応がおこる。下図のように散乱したものとそうでないものを区別して測定すれば、半径が決定できる。

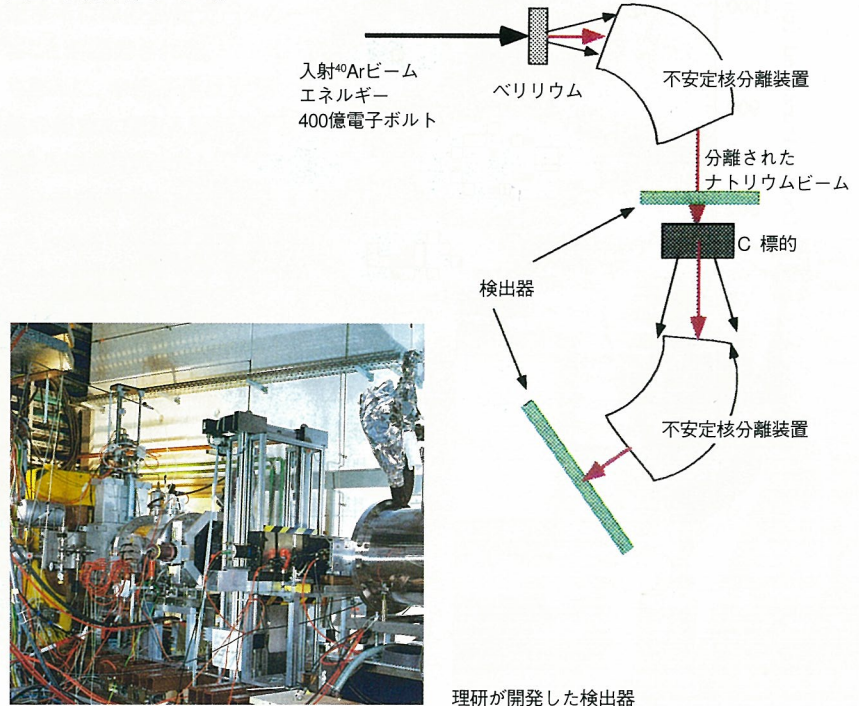
分に相当する陽子と中性子が混在して分布する部分(陽子の分布する範囲)の半径を引けば、自身に当たる中性子スキンの厚みが求められる。ナトリウム同位元素では、すでにレーザー分光法を使って、黄身相当部分の陽子分布半径が測定されているので、全体の核半径を測定できれば結論を出すことができる。

未知の原子核の全体の核半径を測定す

る原理を示したのが図2である。原子核同士が衝突して反応を起こす確率は、図2の上図のように R_1 、 R_2 の2つの原子核の半径によって決まる。逆にいうと、下図のように、核半径が未知の原子核 R_1 (今回でいえばナトリウムの同位元素)を半径が分かっている原子核 R_2 (不安定核ならすでに測定されている)に衝突させ、散乱したものと反応しなかったものを区別して測定し、反応が起こる確率を分析すれば、未知の原子核の核半径 R_1 を求めることができる。

図3は実験装置の概略で、重イオン加速器で光速の0.8倍に相当する約400億電子ボルトに加速した ${}^{40}\text{Ar}$ (アルゴン)をベリリウムのターゲットに衝突させる。ここで発生した多種類の不安定核の中から、電磁石を利用した不安定核分離装置でナトリウムビーム(ナトリウム同位元素 ${}^A\text{Na}$ $A=20,21,22,23,25,26,27,28,29,30,31,32$)を取りだす。(図4)そして、このナトリウムビームをさらに ${}^{12}\text{C}$ (炭素)に衝突させた後に第2の不安定核分離装置でほしいナトリウムビー

図3 実験装置の概略



理研が開発した検出器

ムだけを分離して、図2で示した散乱したものと反応しなかったものを区別して測定する。この時、ターゲット ^{12}C の R_2 はすでに分かっているの、反応確率のデータ分析を通じて、 ^{A}Na の R_1 を求めることができた。

なお、実験では、比較のため、ナトリウムの安定同位元素 ^{23}Na についても同じ測定を行った。

この後、 ^{A}Na の R_1 と陽子分布半径との比較により、表1の結果が得られた。(表は一部、単位の $\text{fm}=\text{フェムト}\cdot\text{メートル}$ は、 10^{10} 分の 1cm)

この表を見ると、安定核 ^{23}Na では、核半

質量数	^{23}Na	^{26}Na	^{32}Na
核半径 [fm]	2.849 ± 0.036	2.940 ± 0.046	3.22 ± 0.11
陽子分布に対する半径	2.829 ± 0.010	2.815 ± 0.010	2.985 ± 0.014
中性子分布に対する半径	2.867 ± 0.068	3.028 ± 0.077	3.37 ± 0.16
中性子スキンの厚さ[fm]	0.04 ± 0.04	0.21 ± 0.08	0.39 ± 0.16
中性子数/陽子数	2.0909	2.3636	2.9090

(注)安定核 ^{23}Na では、誤差も考慮するとスキンが存在しないことがわかる。

図4 分離されたナトリウムビームの像

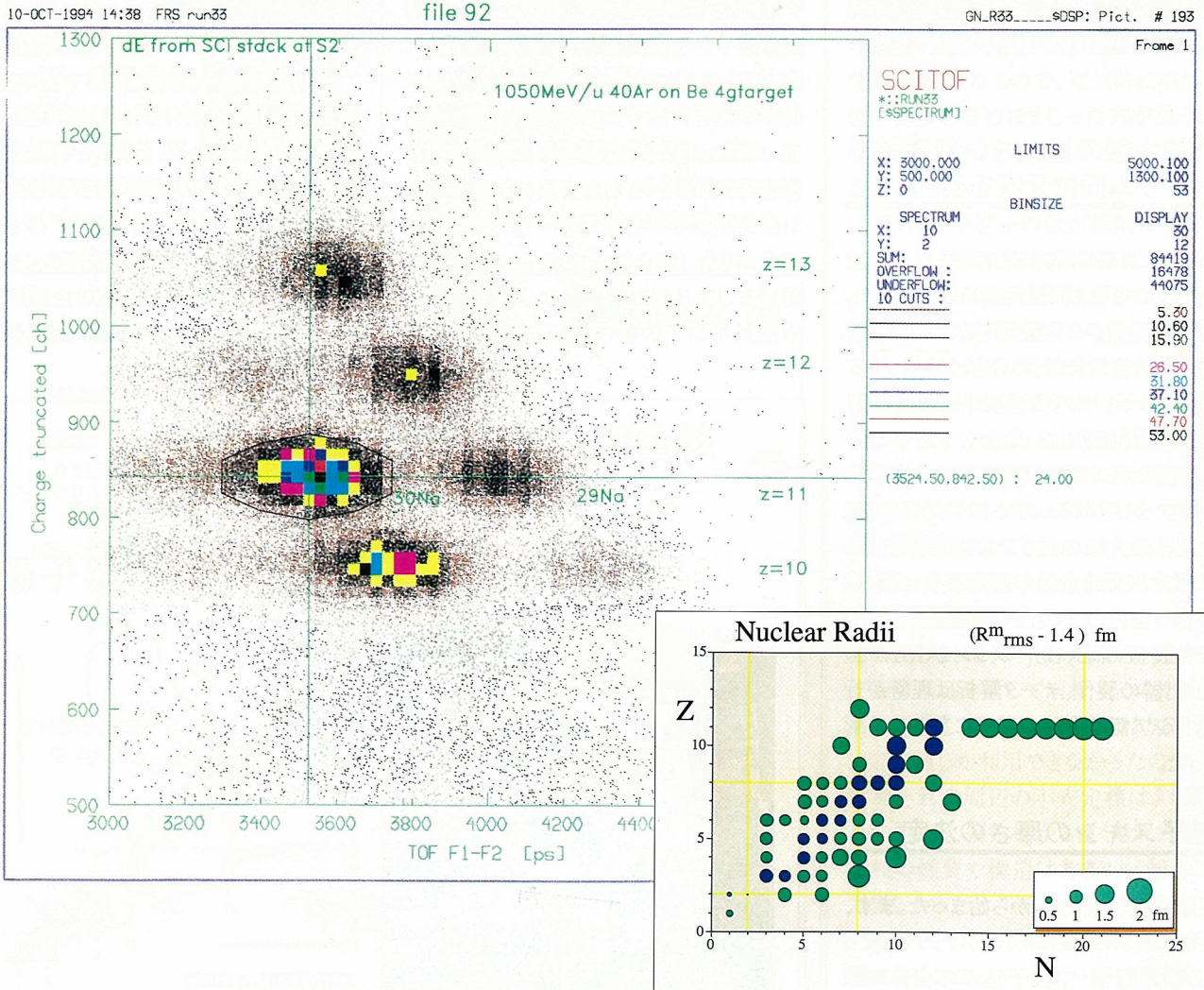
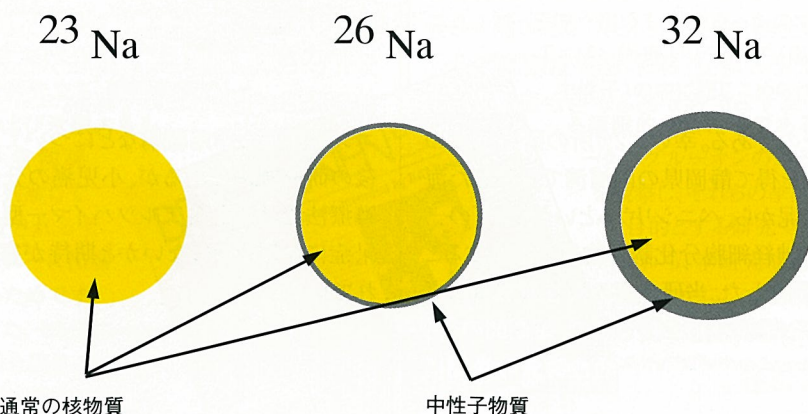


図5 ナトリウム原子核の大きさと物質分布



径、陽子分布半径、中性子分布半径はほぼ同等で、誤差を考慮すると中性子スキンが存在しないことがわかる。これに対して、中性子が過剰な不安定核である ^{26}Na 、 ^{32}Na では、中性子分布半径が陽子分布半径を上回っており、図5で示すように、中性子スキンが存在することが明らかである。

中性子スキンの普遍性

今回の実験を通じて観測された中性子スキンの厚さは、ナトリウム同位元素の中性子数の増加とともに増えることが世界で初めて確認された。とりわけ、 ^{32}Na (陽子数11個、中性子数21個、半減期0.014秒)の中性子スキンは、天然に存在する安定核 ^{23}Na の核半径の15%に相当する分厚いものであった。

そして、ヘリウムに続いて、ナトリウムの中性子過剰な不安定原子核でも中性子スキンが確認されたことから、中性子過剰な不安定原子核では、元素の種類にかかわらず中性子スキンが普遍的に存在するというこれまでの理論的予測を、ほぼ証明することができた。

さらに、新しい知見として、陽子数が中性子数を上回る陽子過剰原子核である ^{20}Na において、陽子スキンの兆候もみられている。核図表の左上に位置する陽子過

剰原子核の構造の解明も今後の研究テーマとして注目されよう。

今後の展望

今回の成果は、中性子星の中にあると考えられる極端な中性子過剰物質の性質を、地上の実験室レベルで調べる方法の緒となるものであり、中性子星の半径や質量を決定するための基礎データの一つを提供することが期待される。

ちなみに、中性子星は太陽の2倍ほどの恒星の終末に起きる超新星爆発で生ずると考えられており、中心部には中性子が過剰な元素が高温高密度で凝集していると考えられている。超新星爆発や中性子星誕生の解明には、高温高密度状態での物質に関する理論モデルをつくる必要があるが、そのためには、中性子過剰物質の半径、陽子や中性子を凝集する束縛エネルギー、陽子と中性子の密度などが基礎データとなる。今回の研究で中性子過剰物質の半径についてのデータを得る道が開けたといえよう。

文責：総務部広報室

監修：リニアック研究室 主任研究員 谷畑勇夫
研究員 鈴木健



谷畑主任研究員

神経芽腫細胞の分化誘導物質エポラクタエン

子供に発生しやすい腫瘍として白血病と神経芽腫が知られている。現在では骨髄移植や化学療法剤の進歩により、白血病を治癒できる確率は高くなっている。しかしながら、神経芽腫の治療は遅れている。神経芽腫とは、本来神経細胞に分化すべき細胞が腫瘍化した固形腫瘍の一種で、悪性度が高く早期から転移しやすいことが特徴である。現時点では、腫瘍化した神経芽腫細胞を殺すのではなく、正常の神経細胞に分化させることを目的とした分化誘導剤の開発に期待がかけられている。(図1)

神経細胞の分化成長を促進する物質として神経成長因子(NGF)が知られているが、残念ながらNGFはタンパク質なので、吸収性や抗原性の点で薬剤として用いるには障害がある。そこで、世界中の多くの研究者によってNGFの合成を促進する低分子化合物の探索が行われている。われ

われの研究室でも、直接NGF様の活性、すなわち神経細胞の分化誘導活性を示す化合物を、微生物が生産する物質の中から探索した。カビや放線菌といった微生物は、これまでも多数の抗生物質や抗ガン剤を生産することが知られているので、きっと神経細胞分化誘導物質も生産しているに違いないと信仰にも似た思いで研究をスタートしたのである。様々な微生物を山野の土壌から分離したり、海底の泥から分離し、その培養液に神経芽腫細胞の分化を誘導する活性があるか否か風漬しに調べたのである。幸いに2カ所の研究機関の協力を得て静岡県の内浦湾で採取した海底の泥から、ペニシリウムという青カビの一種が神経細胞分化誘導物質を生産することを発見した。当研究室の掛谷研究員は卓越した精製技術の持ち主で、短期間のうちに青カビの培養液から活性物質の単離に成功した。得られた化合物は、これまでにだれも単離していない新しい物質であったので、その物質の化学構造に基づいて

エポラクタエンと命名した。(図2)

ヒトの神経芽腫細胞の中でもNGFの受容体を欠失している場合は治療が難しいといわれる。ヒト神経芽腫のSH-SY5Y細胞はNGF受容体を欠失した細胞であり、NGFに対する応答性は極めて乏しいのが特徴であるが、この細胞に対してエポラクタエンは1ミリリットル当たり10マイクログラムの濃度で神経突起伸長を誘導した。しかも、エポラクタエンで分化誘導した細胞には、分化した神経細胞に特徴的なリン酸化型神経線維が見られたのである。エポラクタエンの詳細な作用機構などについては今後の研究課題であるが、小児癌の分化誘導療法だけでなく、アルツハイマー型の痴呆症にも有効ではないかと期待が寄せられている。

抗生物質研究室
主任研究員 長田裕之

図1

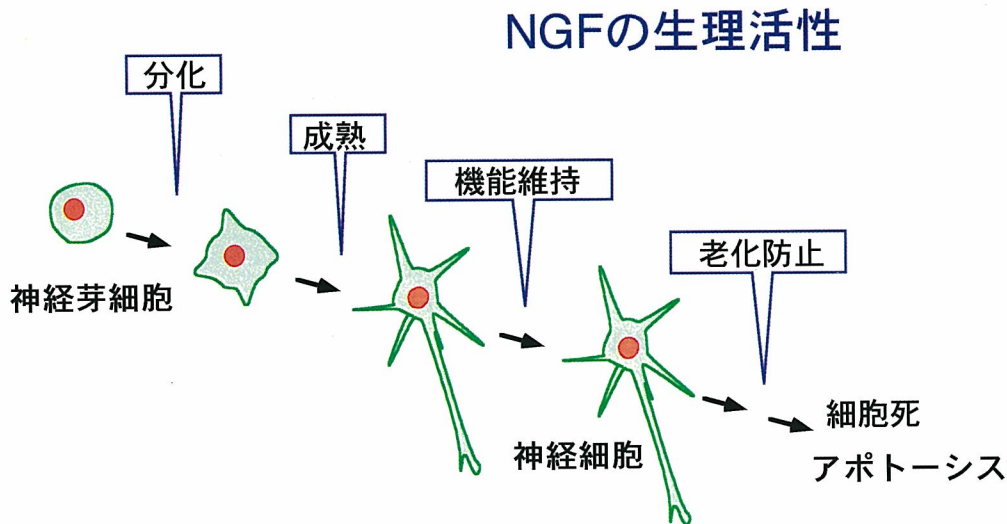
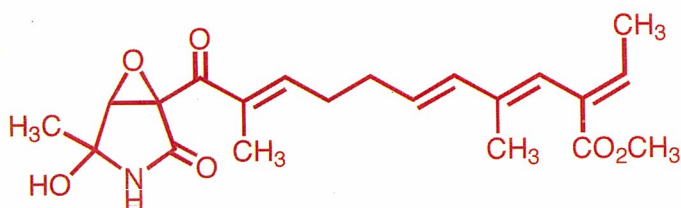


図2



理研／BNL、「スピン物理」研究協力 いよいよスタート

物理学の新たなパラダイムを目指して

本誌158号(1994年8月)のトピックスで紹介しました米国ブルックヘブン国立研究所(BNL)との「スピン物理」に関する国際研究協力がスタートしました。

去る9月25日、有馬理事長を代表とする理研訪問団が、和光より一足先に木の葉が色づき始めた米国ニューヨーク州にあるBNLを訪れました。この訪問の目的は、研究協力の開始に先立ち、両研究所のトップおよび米国エネルギー省関係者も列席して

者も列席して
挙行されるセ
レモニーに出席
するためです。

また、セレモニー
に引き続き、この国際研究協力の理研サイドを担う放射線研究室の石原主任研究員とBNL側尾崎敏RHIC計画ヘッドを始めとした両研究所の現場責任者で構成されるステアリング・コミティーの第1回会議も開催されました。

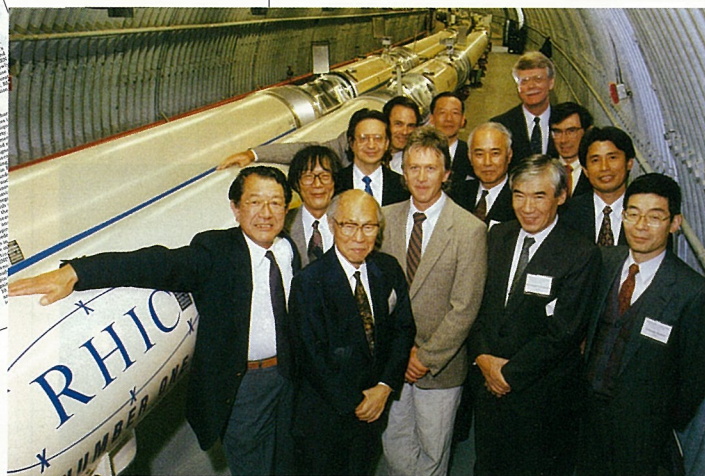
BNLでは、1999年の完成を目指し、RHICという衝突型重イオン加速器の建設を現在急ピッチで進めています。RHICとはRelativistic Heavy Ion Collider (相対論的重イオン衝突型加速器)の略で、直径約

1.24kmの二重の加速リングの中で各々重イオンを100GeV/核子まで加速し、途中設置されたビームラインの交差位置で正面衝突させる世界最高レベル、そして唯一の加速器です。理研はこれまで和光を中心に進めてきた重イオン加速器科学の延長上で、この高い衝突エネルギーに着目し、さらに独自に開発した「スピン偏極制御装置」と「素粒子対検出装置」をRHICに付帯設置(計画総額20億円/5年)して、日米の研究者が中心になり「スピン物理」研究を進めることとなったのです。

「スピン物理」とは、核子(陽子や中性子)の中に閉じこめられている極限的な素粒子であるクォークやグルーオンのふるまいを観察し、それらの挙動解明を目的とする研究です。すなわち、本研究は素粒子がいかんして物質を構成し、ひいては宇宙を

形成しているか?の謎に迫る物理学の根元的テーマといえます。このために必要とされる加速エネルギーは、理研の現有加速器施設の1000倍以上であって不可能なものでした。

クォークやグルーオンを含めた素粒子は独自にスピン(自転)しており、素粒子間に働く相互作用を突きとめるにはスピンを指標としなければなりません。そのため、理研ではスピンに関しての情報を実験から引き出すことを目的に、加速される原子核のスピンを一定の方向にそろえるための「サイベリアン・スネーク」と呼ばれるスピン偏極制御装置をRHICの4地点に設置することとしました。理研がBNLに対して行ったこの「スピン物理」研究協力の提案は、DOEと米国科学財団(NSF)によって組織されている原子核科学諮問委員会(NSAC)において最高レベルの評価と支持を受けています。理研の国際研究協力の、さらに大きな柱が加わりました。



科学を楽しむセミナーを開催

X線発見100年の今年、10月29日(月)午後、「科学を楽しむセミナー」(主催:科学技術庁、協力:理化学研究所)が、青少年を対象に映像と実演をふんだんに取り入れた楽しい催しとして東京北の丸公園の科学技術館・サイエンスホールで開かれました。

約400名の小学5、6年生から中学、高校生に

わたる広い年齢層の青少年が参加しました。セミナー第1部では有馬朗人理事長が「超マイクロへの冒険旅行」と題して、いろいろなスライド、ビデオを使い、私たちの世界を次々に拡大し、参加者を原子核の世界へと案内しました。次に19世紀末から20世紀初めに繰り広げられた放射性元素の発見と原子核物理の研究に貢献した科学者のドラマをエピソードを交えて展開し、原子核分裂、核融合とエネルギー開

題にまで話を進めました。

実験は、人間の五官で感じることのできない放射線をどうやって調べるのか、GMカウンター、霧箱、シンチレーションカウンターを使って身のまわりの放射線を参加者が目と耳で体験しました。最後に有馬理事長が「次世代を担う皆さんは、大きな希望を持って未来を切り拓いて下さい」と参加者に熱く語りかけました。



「科学者のドラマ」の一コマ



自然放射線測定の実演



Q&Aでの活発な質問



ドイツ、ダルムシュタット滞在記

—重イオン科学研究所(GSI)に派遣されて—



筆者近影

ドイツ、ヘッセン州の小都市ダルムシュタット(人口約14万人)は、国際金融都市フランクフルトの南25kmに位置する。ほんの70年前までは、ヘッセンダルムシュタット大公国の首都であったため、数々の建築物が戦災を免れ残っている。

重イオン科学研究所(GSI)はこのダルムシュタットにあり、私は理研から派遣されて1993年3月より2年間ここで働いた。GSIは連邦政府と州政府からの予算で運営されている研究機関で、スタッフ総数は300人の研究者とエンジニアを含めて約700人である。主な施設として、炭素からウラニウムまでの元素を核子あたり20MeVまで加速可能なリニアック(UNILAC)と、2GeVまで加速可能な重イオンシンクロトロン(SIS)からなる複合加速器、800MeVの重イオン蓄積リング、不安定核生成装置(FRS)をもち、これらを用いた研究や関連する分野の研究が原子核物理(実験I-III、理論)、原子物理、核化学、物質科学、生物科学のセクションに分かれて行われている。私が所属したのは核化学セクションのサブグループ(Fragment Separator)で通称FRSと呼ばれている。同種の装置(不安定核生成装置)は理研、GANIL(フランス)、MSU(米国)にあるが、ビームエネルギーが約1桁高いのがその特徴といえる。研究環境は、課題採択が年1回(理研は年3回)なため計画がたてやすい、など細かい点に差はあるものの大きな相違はなかった。



リュエデスハイムに遠足にでかけたFRSのメンバー

このサブグループは研究スタッフ7名、エンジニア4名からなっており自由な雰囲気の中で研究に従事している。このほかにPost Doc.が5名、学生、外国人研究者が多数いた。実際私が机をもらったのはフランス人研究者3名が先住民としていた居室であった。研究所のドイツ人は母国語であるドイツ語の他に英語とフランス語を当然のように話すので、会話の途中で突然フランス語になってしまうことがしばしばあった。研究所での用事はたいてい英語で足りるが、エンジニアと細かい打ち合わせをしたり、街での買い物等の雑用にはやはり英語だけでは不自由であると聞いていたため、わけのわからないドイツ語をあらかじめ習っていったのだが、これは私にとっての第一のカルチャーショックであった。彼らによると、小学校5年から英語もしく

はフランス語で討論をする授業時間があるとのことである。また社会人となってからも外国語の習得には熱心でフォルクスホプシューレ(VHS)というところで勉強するのだという。

VHSは小さな都市には必ず存在する日本でいう文化スクールのようなもので、その中にドイツ人のための外国語講座はもちろん、ドイツ語を母国語としない外国人のためのドイツ語教室が、政府の援助によって運営されている。受講者の負担は半年でたったの600マルク(約4万円)と少ない。おそらく旧ユーゴ、ベトナムなどからの難民、東欧からの移民が多いためであろう。さらに収入に応じこの月謝が半額になる場合もあるということであった。ハード面もさることながら、ソフト面でのインフラが整備されていると感じた一面である。

さて滞在の最初の一年で実験準備を行い、昨年7月に14日間にわたって本実験を行った。実験は理研から私を含め5名、GSI側から12名が参加して行われた。数の上では、少数与党である。FRSメンバーの協力を取り付けるにあたっては問題の本質を議論し、納得してもらうことが重要であった。準備段階からトップダウン方式をとっても、なかなかうまく物事が進捗しない。例えばこの検出器はわれわれの目的には適さないから別のものを用意しなくてはならなくて、それにはあなたの協力が必要であるというて納得してもらうと休暇の予定(ドイツでは週の労働時間が37時間、かつ年間6週間の休暇を取る権利がある)を変更し、手伝ってくれたことが印象深い。一方で、実験中トラブルが発生したとき議論(原因と解決策)に夢中になってなかなか手が動かない場合もあった。ドイツ人は議論好きというのが私の印象である。

この後、磁気テープ上にあるデータ解析に取り組み、今年3月に帰国した。派遣された当初、周りに日本人は皆無でこの先どうなることか?と心配したが、この10月に結果をまとめることができホッとしている。

リアック研究室
研究員 鈴木 健

コーヒータイムの風景



編集後記

研究最前線の「世界で初めてナトリウム同位元素の“中性子スキン”を発見」を推進した鈴木研究員にドイツ(GSI)での研究環境などを紹介してもらいました。また、青少年科学技術離れ対策の一環として、理事長や当所の研究者による講演活動をお伝えしました。

理研ニュース No. 173 November 1995

発行日 : 平成7年11月15日

編集発行 : 理化学研究所総務部広報室

〒351-01 埼玉県和光市広沢2番1号 電話(048) 462-1111(代表)

制作協力 : 株式会社エフビーアイ・コミュニケーションズ