

RIKEN ニュース

理化学研究所

「帰ってきた中間子」——ミュオンの科学

21世紀を担う粒子ともよばれている不安定素粒子ミュオンの創り出す科学の面白さ重要さについて紹介します。とくに、理研とミュオンとのかわり合いと、これからの研究の展望についてふれます。

§ 1 ミュオンと理研

数年前、ミュオン（別名：ミュ粒子、ミュ中間子）に関する講義や書き物をすにあたり、宇宙線の中のミュオンを見たことを報告した論文をたどった際に、1938年頃に（私の生まれる前に）理研の仁科芳雄先生のグループの実験が、先陣争いの1つであったことに驚かされました。

実は、私事で恐縮ですが、私が子供の頃、海軍の技術将校をしたことのあった父から、理研の仁科先生が横須賀の海軍工廠に度々来られていた、という話を聞いていました。後日、自分自身が物理屋になるにつれ、一体何をしていたのだろうと疑問に思うことがありましたが、長らくほっておきました。ごく最近、その研究が先に述べたミュオンの実験であることを知り大変驚いた次第です。

この宇宙線の中のミュオンの発生を理研の中間子物理研究のスタートとするならば、その後湯川・朝永両巨人に代表される理論研究が、理研で、ま

た我が国で展開されたことは周知の通りです。しかしながら理研におけるミュオンに関する実験研究は、その後約半世紀に亘って何も行われてきておりませんでした。一方外国では、1950年代に加速器でパイオン（パイ中間子、湯川中間子）を生みそのパイオンが死滅してミュオンを生むことが出来て以来、急速に実験研究が進みました。特に、1970年代後半に完成した「中間子工場」と呼ばれる、高強度陽子加速器は、ミュオンの基礎および応用研究を飛躍的に進展させました。我が国でも、私が兼務しております東京大学理学部・中間子科学研究センターでは、1980年に世界に先駆けて、ミュオンをパルス状に発生することに成功し、ミュエスアール法による物質科学やミュオン核融合などのミュオン科学を発展させてきています。

ミュオン（質量：電子の207倍）を発生させるには、先ずパイオン（別名：パイ中間子又は湯川中

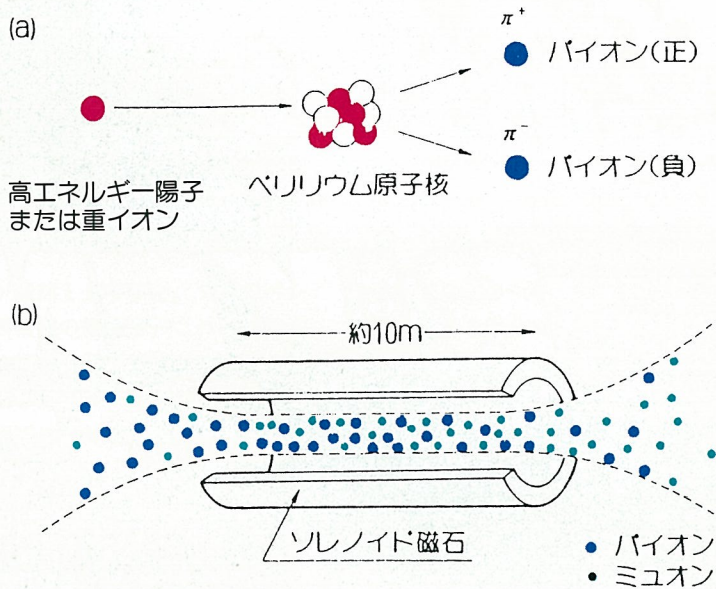


図1 ミュオンを創る。

加速器からの原子核ビームを標的核にあて、パイオンを生む(a)。そのパイオンをとじこめながら長い距離飛行させ、ミュオンにかえる(b)。

間子、質量:電子の280倍)を発生しなければならず、このパイオンを生むにはそれ相当の高エネルギーの加速粒子で原子核反応を行う必要があります。一昨年理研に完成した世界最大の重イオンサイクロトロン、リングサイクロトロンはミュオンを発生することを主目的とはしておりませんでした。大口径の超電導組合せコイルを使うことにより、ミュオンを引き出すことに成功しています。この実験は当研究室の石田勝彦君と松崎禎市郎君を中心に行われたものです。

このように理研とのかかわりを持つミュオンがどのような新しい科学研究を展開することが出来るか、以下にその一端を述べてみましょう。

§2 ミュオンとは

これまでに数多く発見された素粒子の中で、電子や陽子などの安定なものを除くと、中性子(寿命:約1000秒)の次に寿命の長いものがミュオン(寿命:2.2マイクロ秒)です。このミュオンには正と負の μ^+ 、 μ^- と呼ばれる2種類があり、それぞれ軽い陽子(質量1/9倍)、重い電子(質量207倍)と考えて基本的な性質の大半を理解する事が出来ます。高強度の陽子や重イオンを300MeV以上の

エネルギーでBe(ベリリウム)やLi(リチウム)の原子核にあて、パイオンを生み、それが崩壊してミュオンが生まれます。原理的には1 GeV(10^9 電子ボルト)の重陽子から0.20~0.25個の μ^- が生まれ、それを利用することが出来ます。つまり、1個の μ^- を生むのに4~5ギガ電子ボルトのエネルギーが必要となります。

§3 21世紀のエネルギー源にむけて:

ミュオン核融合

核融合という現象があります。これは、二つの水素同位体核を1兆分の1mm(10^{-13} cm)の距離まで近付けると核力(引力)が働き、自動的に反応が起こる現象です。この際に、二つの水素同位体核が同じ正の電荷を持っているために、電気的な反発力を及ぼし合いクーロン障壁が生じ、なかなか近付くことが出来ません。いわゆる高温(熱)核融合では、二つの水素同位体核(重水素Dや三重水素T)を1億度を越える高い温度に熱することによって、熱エネルギーの助けてこの障壁を乗り越え、核力の到達距離まで二つの核を近付けることをねらいます。これに対して、電子よりも質量の大きい負の電荷を持つ粒子ミュオンを導入して、二

つの水素同位体核の一つにまきつかせたとしよう。このときできる水素原子の1/207のサイズを持つ中性の状態では、電気的反発力が中和され、二つの核が近付くことが出来ます。もし1兆分の1に近い距離まで近付くことが出来れば、核融合反応が起こることが期待されます。

ミュオンを液体水素の密度(4.25×10^{22} 原子核/cm³)に近い高密度の重水素(D)と三重水素(T)の混合気体または液体中に入れたとします。ミュオンは、約 10^{-10} 秒で減速し熱エネルギーとなり、電子と入れ代わり水素原子の1/207のサイズを持つミュオン原子($t\mu$), ($d\mu$)をつくり、その基底状態に至ります。電気的に中性な($t\mu$)は周囲のD₂あるいはDTと衝突する際に電子雲をくぐり抜け、d核に近付き、 μ^- がtとdの周りをまわる($dt\mu$)というかたちの分子状態を作ります。

ミュオン分子($dt\mu$)の大きさは 5×10^{-11} cmで、分子の振動運動の助けを借りて分子内で核融合が急速に起こります。その結果、中性子と α 粒子(⁴Heの原子核)とが発生しますが、ミュオンは置き去りになり、この自由になったミュオンはまた次の反応へと向かいます。

核融合反応を起こした後、自由になったミュオンは次々と連鎖的に核融合を起こしエネルギーが発生します。ミュオンの寿命2.2マイクロ秒の間に、何回核融合が起こるかに付いては、融合反応後に生まれる α 粒子にミュオンが付着する割合、アルファ付着率で決まります。

このアルファ付着率を測る実験が筆者を代表とする東大-理研-原研のグループにより、高エネルギー物理学研究所内東京大学中間子科学研究センターにおいて成功をみまして、0.3%程度と結論されました。

この結果ミュオン核融合によるエネルギー生産の上限が決まります。上限はミュオン1個当り5.8 GeVとなりブレークイーブン条件までゆけることを意味します。但し、この議論には加速器やエネルギー変換機器でのエネルギー消費が考えられておらず、更に2~3倍の効率向上が必要となります。この効率向上をめぐるいろいろなアイデアや実験の提案がなされています。勿論私

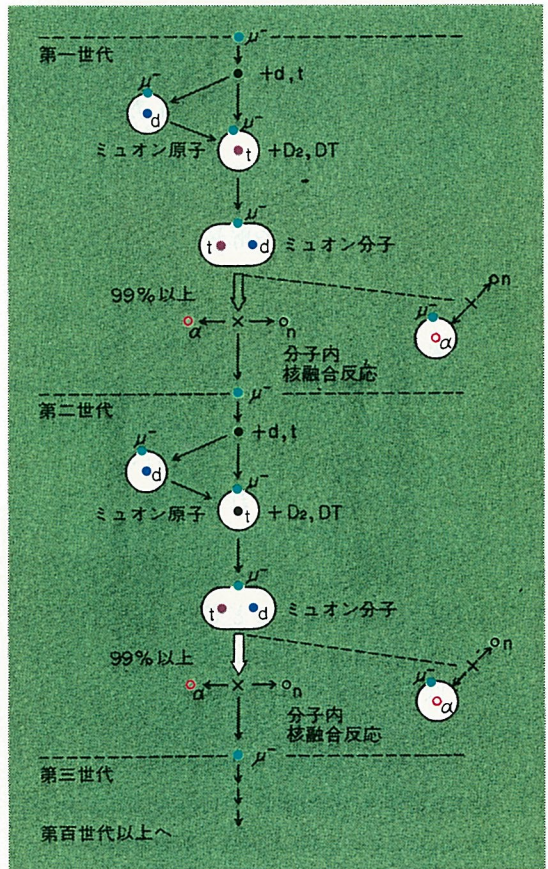
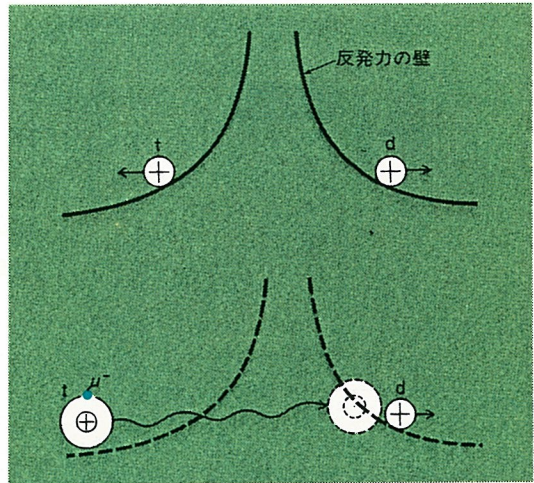


図2 ミュオン核融合の原理
負の電荷をもつ重い粒子ミュオンを用いてクーロン反発力を消す(上)。小さいミュオン分子のなかで核融合が起り、それが100回以上くりかえされる(下)。

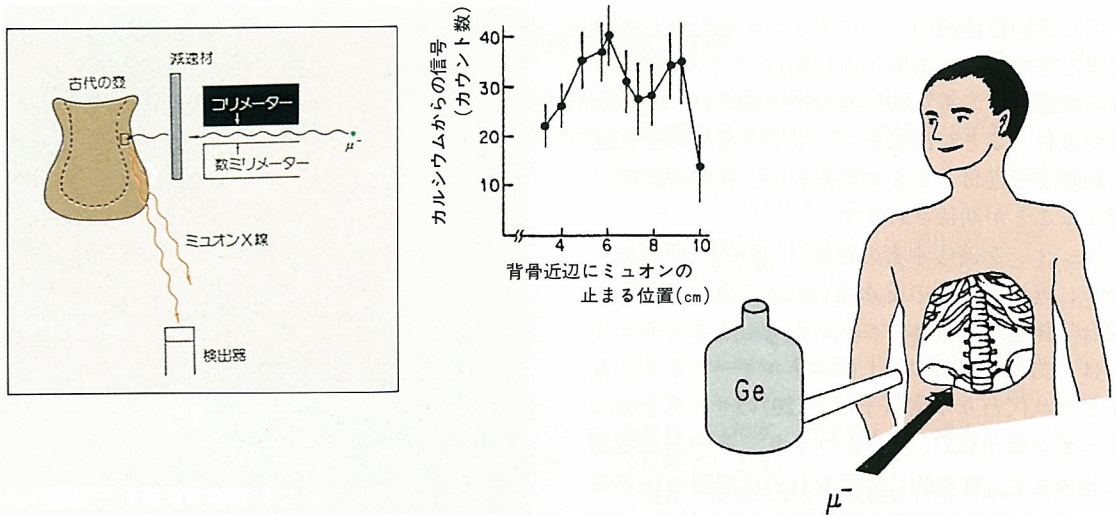


図3 ミュオンによる非破壊元素分析
 原理図。ミュオンビームをしぼり、減速材で止まる場所を調節する(左)。
 骨ソシヨウ症の診断に応用した場合。背骨の断面に沿ってCaの分析を測り、海綿骨部でのCaの濃度を知る(右)。

共も幾つかの方針をたてて進んでおります。今後の実験研究によって必ずや解答が得られることでしょう。

昨年春から大きな話題をよんでいる常温核融合という現象があります。重水の電解液中の金属電極や、加圧重水素ガス中に置かれた金属中あるいは金属表面で重水素核同士が核融合して中性子や熱エネルギーを発生したと報告しています。この現象は物質内核融合と呼ばれるべきものであって、ミュオン核融合と同じ低温核融合の一種と考えるべきでしょう。エネルギー生産はともかくとして、現象自体は大変興味あることです。この物質内核融合研究は、非常にわずかな事象(1週に1回位)を極端に低いバックグラウンドのもとで測定すると云う難しい実験研究ですが、再現性のよい実験がロスアラモス(米国)を中心に報告されています。紙面の関係で省略致しますがミュオン核融合との関連で、私共も関心を持っております。

§4 考古学から医学診断への応用：

ミュオン非破壊分析

ミュオンの作る“小さく固い”原子は、通常の電子原子に比べると207倍高いエネルギーの透過力の強いX線を出します。しかも“水素原子状”の

軌道を取るので、X線のエネルギーから原子の同定が容易です。

このようなミュオン原子からの信号を使って、ミュオンによる非破壊的な元素分析が可能です。ミュオンは数mm以下の精度で試料の奥深くのきまった位置に止めてやる事が出来ます。またそこから出てくるX線は楽々と試料の外に出てくれます。かくして、古代の遺物や宝石のような非常に貴重な試料の内部の分析、さらには生体内の各器官の非破壊的元素分析が可能になります。

医学診断に於いて重要な応用例として、骨ソシヨウ症(背骨の海綿骨部中のCa)や老人性痴呆症(脳中のAl)等、生体各器官での微量な元素の定量化によって診断を行う事が出来ます。この点については私共は、坂本澄彦教授(東北大)のグループと共同研究を行っています。

§5 高温超伝導体などの

キャラクタリゼーション：ミュエスアール法

物質中に打ち込まれたミュオンの感じるマイクロな磁場やその磁場のゆらぎを観測するミュエスアール(μSR)法と云われる実験手法が物性物理の研究に盛んに使用されています。正ミュオンμ⁺は、固体中に打ち込まれると、1ナノ秒程度の時間の

後熱エネルギー化して、物質の状態に応じて原子間位置に止まるか原子間位置内を拡散します。

さて、ミュオンはパイオンの崩壊に依って生まれることは既に述べましたが、その際に進行方向にスピン(ミュオンの持つ磁針)が100%向きを揃えて(偏極をして)生まれます。

このスピン偏極したミュオンを試料中にとめますと、平均寿命 $2.2\mu\text{s}$ の後に死滅する際にミュオンのスピンの方向に沿って陽電子を放出します。この透過力の高い陽電子を測定することによって物質の微視的な環境の下でミュオンのスピンの方向や運動を知り、物質中の微視的な磁場の大きさやゆらぎを測定することが出来ます。これがミュエスアール(μSR)法です。この μSR 法によって、物質・材料の中の微視的な磁場を探り、キャラクターゼーションを行う場合に、次の点が他の如何なる物性実験手法よりも優れていると云えます。

i) 外部磁場ゼロの下での磁気的な性質を調べることが出来る。超伝導性をこわさずに磁気的な性質を探求できる。

ii) 微視的磁場が特性時間 τ_0 でゆらいでいる場合に、他の手法(NMRや中性子散乱など)では調べにくい τ_0 の時間領域に、 μSR 法が敏感である。

iii) 水素状不純物の存在状態や、ミュオンの存在や導入による微視的な原子分子状態の秩序の変化を高感度で調べることが出来る。

これらの特性のおかげで、数々の成果が上がってきています。特筆すべきものとしては以下のようなものがあります。

- 高温超伝導体における超伝導と磁性との共存が見い出された。
- スピングラスなどの磁性体の臨界現象が調べられた。
- 軽粒子正ミュオンの金属中での拡散が、低温になるにつれ量子拡散をすることが明らかになった。
- バイオテクノロジー等で注目されている、巨大分子での放射線効果による電子のソリトン伝播を、直接的に捕らえた。

物質の結晶構造

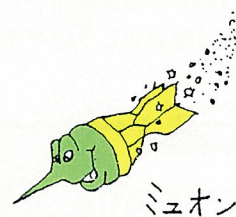
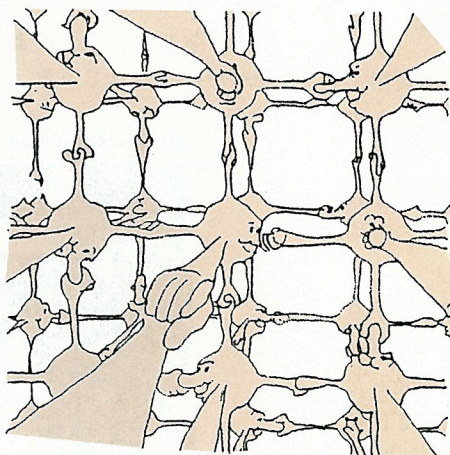


図4 ミュエスアール法
ミュオンの持つ磁針(スピン)で物質のミクロな磁場の大きさやゆらぎを探る。

§ 6 今後の展望：次の飛躍を求めて

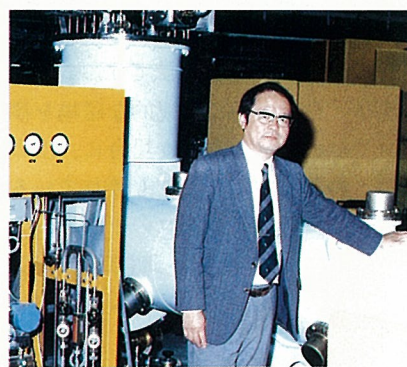
この様に豊かなミュオンの科学をさらに発展させようとする開発研究が進行しています。その内で最も重要なものはミュオンビームの低速化（冷却化とも呼ばれる）で、ミュオン核融合を用いて低速の負ミュオンを生んだり、高温金属から蒸発するミュオニウム(μ^+ と電子でできる原子)をレーザービーム等でイオン化して低速の正ミュオンビームを生むことが出来るはずです。これらのミュオンビームの低速化がうまくゆきますと、原子層のスケールでミュオンを止め、非破壊分析やミュエスアール法の適用が可能となります。

§ 7 おわりに

理研リングサイクロトロンでのミュオン発生の研究が成果をあげています。一方、ミュオンをより大量に生み、色々な科学研究を行うプロジェクトが、関係各位の御努力で日英国際協力という形でスタートしました。この計画では、世界最大の陽子シンクロトロンを有するラザフォード・アップルトン研究所に、理研の手によってミュオン発生用超電導ビームチャネルを製作・設置し、年間のビームタイムの半分を理研専用として使い、ミュオン科学研究を発展させようとするものです。

加速器から始まって、物性、化学、生物医学、エネルギーと広域科学に応用されるミュオンは、その分野の広さといい、基礎と応用とのつながりといい、最も理研的な科学の1つと言えましょう。はじめに述べましたように、ミュオンの研究の歴史が理研からスタートしていることも意義深いことです。必ずや、理研内外の多くの方々の研究と接点を持つことと思います。この文をご覧になって、少しでも興味のある方は私共の所に御連絡下さい。

ミュオンは理研に帰ってまいりました。



金属物理研究室
主任研究員 永嶺 謙忠

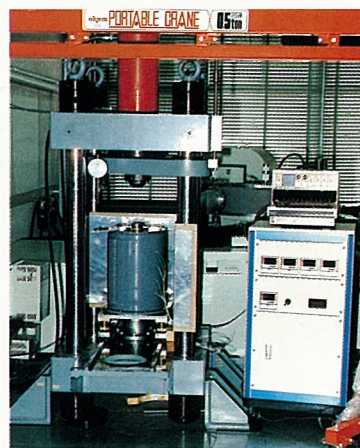
スポットニュース

超高压で新しい化学反応に成功

化学反応の中には、加熱したり触媒を使用するなどの反応条件を如何に設定しても目的とする反応が全く進行しない場合がある。このような反応を進行させ、合成困難であった化合物を合成する手段として超高压が最近注目をあつめている。

このたび、超高压化学反応の研究を推進するために、研究基盤技術部では高性能な超高压反応装置(約1万5千気圧、反応容量40ml)を開発した。この装置を用いて、有機合成化学研究室では抗腫瘍、抗バクテリア性を有し複雑な構造をもつ薬理活性天然物(スウィンホライド、マンザミンなど)の重要中間体の効率的合成に成功した。

現在、装置の性能アップと他分野の実験などを行っており、今後ますます種々の分野での研究推進が期待されている。



企業などから大勢のお客様 第13回科学講演会

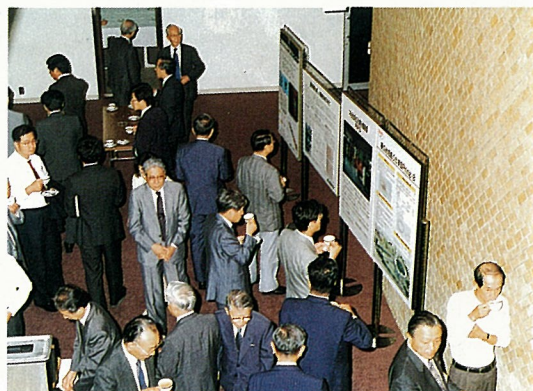
理研恒例の科学講演会は、10月16日東京・大手町の経団連ホールで約400人の聴衆を集めて開かれた。この講演会は最先端の研究を一般の人に分かり易く紹介することを主旨としており、今回は「新しい世界をひらく基礎科学」とうたい、つぎの3テーマの講演が行われた。

一番目は「21世紀を担う粒子、ミュオン」と題し永嶺謙忠主任研究員。最近この研究が新聞に出たこともあり、関心を持たれた方も多いと思われた。原子核物理学は物質の究極をとらえる学問であるとともに原子力に代表される巨大な実用分野を開拓したが、これらは中性子が支えている。そしていま中性子(寿命:1000sec)の次に寿命の長い不安定な素粒子「ミュオン」(2.2 μ sec)が新しい時代の旗手になりそうだという。(本誌研究紹介参照)

二番目の講演は「抗生物質と生命科学」と題し、磯野清主任研究員。講演の主題は「抗生物質が如何にライフサイエンスの基礎科学に役立っているか」である。ペニシリンがフレミングによって発見され病気の化学療法剤として抗生物質の発展

が始まる。日本では戦後農薬としても開発がすすみ、理研では稲の紋枯病用としてポリオキシンの発見にいたる。現在でもポリオキシンは農薬として中国等に大量に輸出されているが、最近では農薬としてだけではなく生化学の試薬としても用いられている。今や抗生物質は細胞のガン化メカニズム解明など生命現象解明の道具として研究が進められているという。

最後の講演は「表面科学が拓く世界」と題し青野正和主任研究員。少し前の材料科学では物質の中身だけを問題にしていたが、最近では物質の表面特有の興味深い性質が研究され新しいデバイスが開発されている。現在では、走査トンネル顕微鏡の発明により表面の原子1個1個の配列を直接的に観察できる。また、その表面を制御することについては、原子1個1個をピンセットで取扱うように構造を制御できるまでになっている。もし、原子1個1個を並べて文字を書くとすると、1cm²の中に普通の雑誌で数億頁を書き込めることになるという。



私の見た日本

Teresa Huck

英国サリーギルフォード大学より科学技術庁招へい外国人研究者としてライフサイエンス培養生物部に所属し「抗生物質を生産する放線菌の日本国内分布」の研究に従事。

「どうして日本で仕事をすることにしたの？」とよく聞かれる。むずかしい質問です。確かに、私の国イギリスでは、日本での生活について多くの誤った情報を受けていました。日本文化についておきまりの固定観念が充満し、テレビでは夜にカプセルホテルに泊まる東京のサラリーマンのライフスタイルが放映される。私の得た日本についての情報の多くは、多分、現実とちがっているだろうと思ったし、日本の友人達に励まされもして、理研で仕事をしようと科学技術庁フェローシップに応募しました。私を待ち受ける日本の文化については確たる知識はありませんでしたが、日本の科学が世界的な名声を得ていることは勿論知っていました。私の専門、「抗生物質の探索と発見」については、日本の研究者たちはかなりの成功を収め世界でも指導的立場に立つようになってきています。1990年は私の研究生活の上でも、かつ個人にとっても興味深くまた胸おどる年になるだろうと楽観して英国を立ちました。

日本に到着するや、ほとんど至る所にみられる生活様式の西欧化に驚いてしまいました。西欧と日本の2つの文化が、一方が他方を補いあって共存している。このような環境の中、同僚達の親切と忍耐強さに支えられて、来日した外国人がよく言うところのカルチャーショックをまだ経験していないと思います。

理研での研究生活以外には、日本語を習ったり美しい田舎へハイキングに出かけます。最近はいけ花も習い始めました。テレビは時々見えますが、テレビ番組やコマーシャルを見ていると日本人が生活の中で何を望みどんな考え方をしているかがわかるような気がします。また、たびたびお目にかかる“新発売”という言葉などは憶えてしまい、テレビは日本語上達の近道です。

私の好きなテレビ番組はサムライドラマ「照姫七変化」です。物語の細かい筋までは分かりませんが、毎週同じようなストーリーが展開し照姫とその一族が悪を倒して勝利します。ドラマの主人公が女性だということにショックを受け、さらに彼女の性格がモダンだと感心します。ドラマの主題はリアリズムではなく、現実逃避かもしれません。サムライの時代に照姫のような女性がいたとは思えませんが、なぜ視聴率の高い時間(8時)に

放映されているのか理由を考えてしまいます。

このドラマは日本で人気があるだけでなく、タイ国にも輸出されて同じく人気が高いと聞いています。照姫と同じようなスーパーウーマンが登場するドラマは世界中にありますが、日本では非常に積極的な表現をしており良いことだと思います。照姫は日本の若い女性を代表しているモデルのような気がします。日本女性の多くが仕事につき、会社員、政治家、科学者として進出していることの反映でしょう。

現在、世界の多くの女性は仕事(キャリアウーマン)を続けていくには2つの障害があります。1つは育児施設を見つける問題、もう1つは男の世界と競争せねばならないことです。日本人は生活に対して実際にアプローチしており、共働き夫婦の育児問題はまず日本において解決されると思います。(英国では多くの女性が出産すると会社をやめています。)日本の経済を脅かす労働力の不足が予想されていることもあり、さらに多くの女性が働くことに勇気づけられる時が、すぐ近くまで来ていると思います。



理研シンポジウム (12、1月)

テ ー マ	担当研究室	開催日
加速器成果発表会 (160cmサイクロトロンによる研究)	加速器運営委員会他	12/3
分子性超薄膜	高分子化学他	12/7
プラズマの基礎過程—環境科学との関連—	プラズマ物理	12/7
X線発光分光法の局所、微量、状態分析への応用	無機化学物理	12/11
宇宙環境と放射線	宇宙放射線	12/18
生物科学とシンクロトロン放射(I)	生物物理他	1/8
生命現象のダイナミクス	生体物理化学他	1/9

理研の主な公開特許

PH02-194110 モリブデン微粒子製造方法

レーザー科学研 大山 俊之 武内 一夫

[概要]モリブデンカルボニルガスにレーザー光を照射して、ガスブレイクダウン現象によりモリブデンの微粒子を生成することにより、その微粒子を球状でしかも均一化し、高硬度、高融点金属として種々の素材に利用可能とする。

PH02-196834 レーザーによるフッ素樹脂の表面改質方法

半導体工学研 村原 正隆 豊田 浩一

[概要]B又はAl化合物のガス雰囲気中で、フッ素樹脂にArFレーザーを照射することにより、フッ素樹脂表面を親水性または親油性に改質して利用分野の拡張を図る。

PH02-197573 レーザー注入堆積法

半導体工学研 杉岡 幸次 豊田 浩一
田代 英夫

[概要]基板表面を反応ガス雰囲気中でレーザー光照射して溶融状態にし、反応ガス中の原子を注入して薄膜を形成することにより、基板表面の各種物理的性質を向上させる。



世紀末を迎えて世間が騒然としてきた。ソ連のペレストロイカに始まる東西緊張の緩和と、これを象徴するドイツ統一。科学・技術の世界では、ハイテクやバイオテクノロジーが隆盛を極める一方、二酸化炭素増加をはじめとする環境問題や、新エネルギー資源開発という全地球規模での重要課題が浮上してきた。

10月3日のドイツ統一を目前にした9月半ば、歴史的な転換期を迎えたベルリンを訪問する機会に恵まれた。昔の在独日本大使館を修復して発足したベルリン日独センター主催の日独高分子コロキウムに招待され、世界史の焦点に降り立つ。西ベルリンはかつて自由大学有機化学研究所の研究生として2年間住んだ懐かしの地、全体の雰囲気は17年間あまり変わらず緑が増しただけの印象だったが、中心街はさすがに活気に溢れ、また東西分断の壁がほとんど壊され、通行が全く自由になっていたのは感無量であった。

友人のドイツ人宅で四方山話を聞いた。西側の経済負担は大きく、また東側市民の流入による混乱のため、もう一度壁を作れという極端もあるが、いずれは4、5年で安定したよい方向に向かうだろうとのこと。ただあまり強くなり過ぎないように、軍備削減をはじめとして慎重に進めるという考え方が大勢を占めている。ベルリンは日一日と変化が急である。壁が消えてから道路の目標が無くなり、よく道に迷うこと、往來を妨げられていた小動物（りす・兎・狐など）が残飯の豊富な西側に大挙入り込み、狂犬病も発生して狐に襲われた婦人が重態であるなどのエピソードも語られた。

ドイツは環境問題に力を入れ、二酸化炭素の排出削減をいち早く打ち出した。省エネルギーのほか、代替エネルギーとして太陽光、地熱、風力、メタン発酵などのソフトパスを考えている。有力候補の太陽光は、

ローカル・小規模な利用以外に、太陽光発電に続いて水を電解する水素燃料生産プラントを計画中である。

さらに、北アフリカの砂漠で太陽光発電・水素生産を行い、パイプラインとタンカーで輸送する計画がある。これらは既存技術の組み合わせで実現可能な新エネルギーシステムであるが、一方ではこの先を目指す研究も行われつつある。筆者も関係する理研の人工光合成研究は後者の範疇に属するもので、生命活動の大部分を支える光合成の人工的シミュレーションという学問的興味も踏まえた上での自然のサイクルに沿った新エネルギー資源開発という課題に挑戦する研究であり、研究協力の意義を痛感した。

ドイツ統一に象徴される国際的激動は、晴天の霹靂であった。しかしその背後には無数の小さな出来事があり、それらが目に見えない力で複雑に結び合わされ、大きな動きを引き起こしたというのが真相であろう。近代科学は観察可能な物質を追求することにより目ざましく進展したが、21世紀を真近にして行き詰まりも見せつつある。無から有が生じた天地創造に思いを馳せると、物質は背後にある“場”に支えられてはじめて存在し得る筈である。それらの場は複雑に絡み合いながらも調和を生み出し、物質を支配する。このような物質の背後に透徹した目を注ぐことにより、21世紀を担うにふさわしい新しい科学が、予想をはるかに越える形で出現する予感がする。理研がその新しい世紀の科学・技術を担う一つの中心となることを期待したい。



反応物理化学研究室

副主任研究員 金子 正夫

RIKEN ニュース No. 113, NOVEMBER 1990 発行日・平成2年11月30日

編集発行・理化学研究所 開発調査室

〒351-01 埼玉県和光市広沢2番1号

電話 (0484) 62-1111(代表)