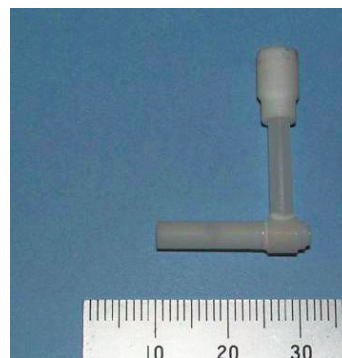


SPring-8 NEWS

2007.11
No.35



供用開始10周年



左はSPring-8のビームラインBL28B2に取り付けられた高温・高圧用実験装置（黄色の装置）。
右は水銀を入れるサファイヤ製容器。

研究成果・トピックス 2～4
～SPring-8で水銀が金属から絶縁体になる瞬間を観測～

SPring-8 Flash 5
富澤研究員が第3回日本加速器学会賞 学会奨励賞を受賞
日本物理学会第62回年次大会で4名が受賞

行事報告 6
第1回アジアオセアニア放射光科学フォーラム 夏の学校
ーケイロンスクール2007ー
第4回SPring-8産業利用報告会開催

SPring-8ホームページアドレス

▼
<http://www.spring8.or.jp/>

財団法人 高輝度光科学研究センター (JASRI)

研究成果 トピックス

SPring-8で水銀が金属から 絶縁体になる瞬間を観測

金属が電気を通さなくなる瞬間

鉄（Fe）やアルミニウム（Al）に銅（Cu）。これらは一般に「金属」と言われています。電化製品を中心に私たちの身近にあり、生活していく上で欠かせないものです。

金属の最大の特徴は、電気が流れることです。しかし、これは常温で固体の場合であって、高温で溶かして液体にしたり、さらに温度を上げて気体になったら、それでも電気は流れるのでしょうか。

半世紀ほど前、ロシアの理論物理学者ランダウ*は液体金属の水銀（Hg）に着目し、温度と圧力をかけて体積を膨張させていくと金属から絶縁体への転移が起ると予想しました。しかも、その転移は液体から気体への転移とは別ものであり、さらに、転移の瞬間に一気に体積が増えることも予想の中にありました。

電気を通す金属が電気を通さない絶縁体になる瞬間、原子レベルのミクロの世界ではいったい何が起っているのでしょうか。京都大学の田村剛三郎教授

をリーダーとする研究グループは、その瞬間の様子を世界で初めて実験的に明らかにしました。

転移はいつ起こるのか

実験では、圧力をかけた状態で温度を徐々に上げて水銀の体積を膨張させていき、ある時点で起こる金属－絶縁体転移の様子を、SPring-8の放射光を使って観測します。原子レベルの精密な測定には、高輝度の放射光が欠かせないからです。

図1は水銀の「相図」と呼ばれるものです。図中の左側、つまり温度が低いと水銀は液体であり、右側の温度が高い領域では気体となります。その境界を越える瞬間、液体は気体に、または気体は液体に変わる「相転移」を起こします。また、境界線の右上の白丸は臨界点と呼ばれ、この点から右上の領域に明らかな転移は存在しません。ただ、臨界点の上に向かう薄い線の辺りでは、「臨界密度ゆら

ぎ」といわれる、液体と気体の間を揺れ動く状態が現れます。

では、問題の金属－絶縁体転移はこの相図のなかのどこにあるのでしょうか。ランダウは、この転移は相転移境界付近の液体側にあると予想しました（図1 赤線）。そこで田村教授は「液体と気体の境界線をまわり込むよう青の矢印にそって温度と圧力を操作し、原子の振る舞いを観測することにしました」。

ファイヤをくりぬいて容器を作る

田村教授は、「この実験は高温・高圧で行わなければなりません。目標とする1800℃、2000気圧に耐えられる実験装

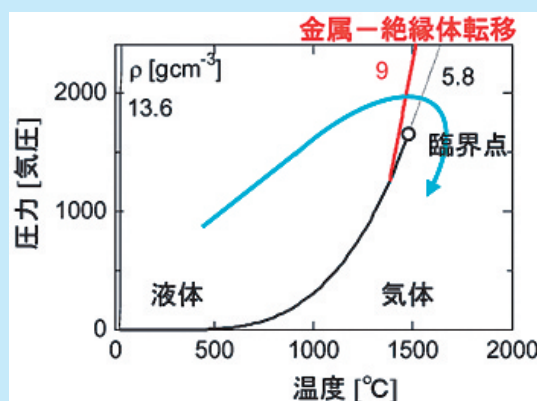


図1. 水銀の相図。数値が付記された3本の直線は、密度が一定となる等密度線。密度9g/cm³の等密度線（赤い直線）付近で、金属－絶縁体転移が起こる。

この記事は、京都大学大学院工学研究科材料工学教室の田村剛三郎教授にインタビューをして構成しました。

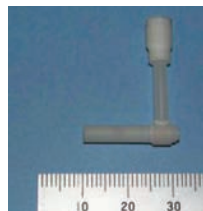


図2. 左はSPring-8のビームラインBL28B2に取り付けられた高温・高圧用実験装置（黄色の装置）。右は水銀を入れるサファイヤ製容器。

置はなく、自分で作らなければなりませんでした。」といいます。とくに問題だったのは、高温の水銀を保持でき、しかもX線を透過させる容器の製作です。

田村教授はその材料としてサファイヤを選びました。直径6 mm、長さ2 cmの円柱状の人工サファイヤを入手し、自分で中をくりぬき、細長い試験管のような形の容器を作りました。こうして高温・高圧に耐える実験装置（図2右）を完成させ、それをSPring-8のビームラインに取り付けました（図2左）。

いよいよ観測ですが、やみくもに水銀にX線を当てるだけでは金属－絶縁体転移のとき何が起きているのかわかりません。田村教授は次のように考えました。まず、体積の膨張が原子レベルではどうなっているのか予想する。それは、原子どうしが均等に離れていく、ある程度のかたまりを残しつつ広がっていく、の2つ（図3）。どちらが正しいかを決めるには、隣り合う原子間の距離と、原子が均一に分布しているかどうかを測定すればよい。これで方針が定まりました。

3 つのビームラインを駆使する

田村教授らは、3つのビームラインを用いて実験を行いました。

原子間距離の測定は、「X線回折」（BL28B2）で行いました。図4は実験から求めた二体分布関数と呼ばれるもので、このグラフから原子の並び方がわかります。常温（図4下）では0.3nm（ナノメートル：1ナノメートルは10億分の1メートル）に大きな山と0.6nmに小さな山があり、すぐ隣とその隣に原子があることがわかります。一方、金属－絶縁体転移が起こる条件（図4上）では山がなだらかになっていきますが、一つめの山は相変わらず0.3nmのところにあります。つまり、原子間の距離は変わっていないことがわかりました。

さらに山の面積（青い部分）に注目すると、上の方が下に比べて小さくなっています。これは、一つの原子を取り囲む他の原子数が少なくなっていることを意味します。このことは、2つの予想（図3）のうちの1つが起きている（かたまりを残しつつ体積が膨張している）こと

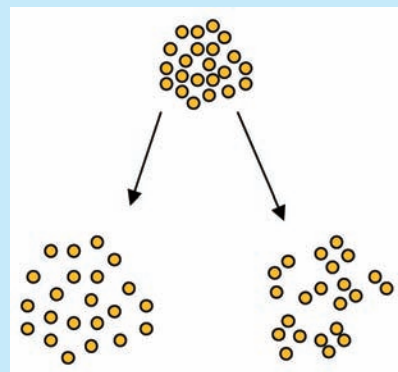


図3. 体積膨張のときの原子の広がり方の予想。均一に広がる（左）か、ある程度かたまりながら広がる（右）。

を示しています（図3右）。

次に、原子の分布の様子を詳しく見るために、「X線小角散乱」（BL04B2）を使って観測しました。分布の様子は、「密度ゆらぎ」という指標であらわします。この密度ゆらぎが小さければ原子が均一に分布していることになり、大きければある程度かたまりながら広がっていることになります。観測結果から、大きなゆらぎが存在し、原子が密集した部分の金属領域と、そうでない絶縁体領域に分かれていることがわかりました。さらにこの「金属－絶縁体転移ゆらぎ」は、臨界密度ゆらぎとは異なることもわかったのです。

最後に、「X線非弾性散乱」（BL35XU）を用いることで、このゆらぎが1ピコ秒（1兆分の1秒）程度で時々刻々と入れ替わっていることがわかりました。

金属と絶縁体の間を揺れ動く

3つの実験から、水銀の金属－絶縁体転移では、原子は図5左のようになっていることがわかりました。「破線の円で囲

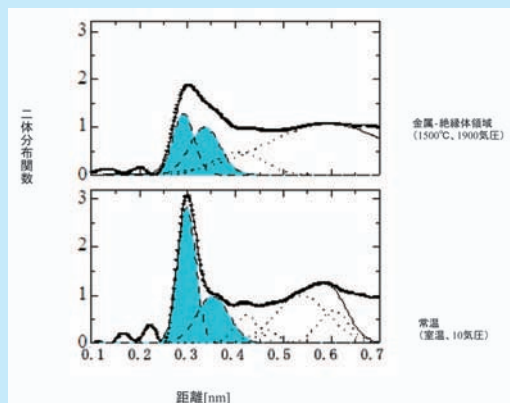


図4. X線回折から求めた二体分布関数。このグラフから原子間の距離など、原子の並び方がわかる。上は金属-絶縁体転移が起こるとき、下は常温のとき。

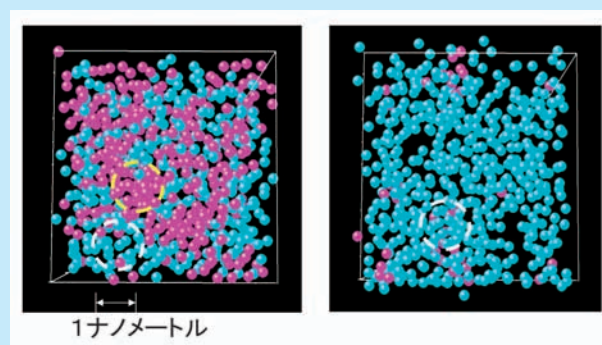


図5. 左は金属-絶縁体転移のある瞬間の原子分布。赤い原子が集まったところは金属的、青は絶縁体的な領域をあらわす。右は液体-気体臨界点付近のある瞬間の原子分布。どの部分も青い原子で埋められ、絶縁体的である。

まれたおよそ1 nmの領域に、原子が120個程度密集しているところと、80個程度しかないところがあります」と田村教授。「原子が密集している赤い部分は金属の性質を、散在している青い部分は絶縁体の性質を持っています」。比較のため載せた超臨界（図5右）での原子のほとんどが絶縁体的性質を示していることから、金属-絶縁体転移は液体-気体相転移と全く違うものだということがわかります。

また、安定してこのような状態を維持しているのではなく、1ピコ秒程度の周期で離合集散を繰り返し、金属と絶縁体の間をゆらいでいることも重要な結果です。ランダウの体積膨張に跳びがあるという予言が、現実には、ミクロの世界での「ゆらぎ」として起こっていることが明らかになりました。ランダウの予言は基本において正しかっ

たのです。

科学に対する興味は尽きない

田村教授は、「金属が膨張してどのように絶縁体になっていくかは物質の根幹に関わる非常に重要な問題で、このような基礎科学の研究は誰かがやらなければなりません」と言います。解明には時間がかかり、多くの困難が待ち受けていますが、「約20年前、私がこの研究を始めたのは助教授のときで、ほとんど研究費がなく実験装置も買えませんでした。しかし工夫を重ね、企業の方々に支援をもらい、研究を進めることができました」と、創意工夫と人の縁で道は開けると教授は強調します。

さらに、短期的成果ばかりを求める日本の科学研究のあり方についても触れ、「若い人が勇気を持って未知の分野に飛び込

み、息の長い研究ができる土壌作りが今必要なのではないのでしょうか。それには、今すぐ役に立たないように見える研究でも、一人一人がその価値を認めて後押しすることが大切で、それが研究者にとっても大きな励みになります」と締めくくりました。

田村教授は今、水銀だけでなくルビジウム (Rb) の金属-絶縁体転移の研究にも取り組んでいます。そして、これらの研究が高温超電導開発につながるのではないかと考えています。物質の根幹に対する田村教授の興味は尽きないようです。

取材・文：サイテック・コミュニケーションズ

用語解説

●ランダウ

旧ソビエト連邦（現ロシア）の理論物理学者。多くの顕著な業績の中でも、ヘリウムの超流動の研究やフェルミ液体理論は有名。1962年ノーベル物理学賞受賞。研究業績に加えて、ランダウとリフシッツにより執筆された理論物理学教程は、物理学者のバイブルと言われている。

富澤研究員が第3回日本加速器学会賞 学会奨励賞を受賞

(財)高輝度光科学研究センター加速器部門の富澤宏光副主幹研究員が、第3回日本加速器学会にて学会奨励賞を受賞しました。この賞は、主として若手研究者を対象とし、特に主体性、意欲が顕著な優れた研究に対して授与されるもので、同研究員の業績「フォトカソードRF電子銃の高安定化・高性能化に関わる技術開発」が高く評価されました。

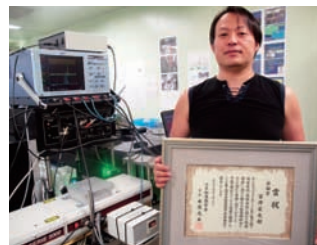
フォトカソードとは、光を照射すると電子を放出する陰極のことです。フォトカソードRF電子銃は、ブラウン管用電子銃のように熱電子を放出する熱陰極を持たず、代わりに金属などのフォトカソードにレーザー光を照射して電子を生成させ、その電子を高周波(RF)が作る強い電界で加速します。この電子銃は、原理的に、レーザービームのように平行性の大変優れた大電流電子ビームを生成できるのが特徴です。

実は、エネルギーの低い電子ビームは電子間のクーロン力(静電気力)による反発のために拡散するのですが、電子ビームの拡散を均一にしつつ、強い高周波電界で一気に加速して拡散を最小に留めると、磁気レンズを用いて平行性のよい電子ビームを作ることができます。従って、技術的課題は二つ。まず、カソードから発射された電子ビームの拡散が均一になるように電子ビームの形状と電子の分布を整えること、そして高周波電界を出来るだけ強力にすることです。

富澤研究員は、電子ビームパルスを整形するために、フォトカソードに照射するレーザーパルスの形状と強度分布を整える技術を開発し、ほぼ均一な強度分布を持つ円筒形状のレーザーパルスを実現しました。さらに、大強度レーザー源の安定化に努め、何ヶ月も無調整で安定に発振を続けさせることに成功しました。

一方、強力な高周波を真空の空洞に投入すると、空洞内でしばしば放電を起こします。富澤研究員は、放電に伴う発光現象や空洞内壁表面の原子・分子の分析から、銅表面付近に存在する不純物が放電原因の一つであると推測し、空洞内壁を化学エッチングして清浄な表面を露出させました。その結果、容易には放電なくなり、190MV/mというRF電子銃としては世界最強の電界強度を達成したのです。

これらの技術開発により、電子ビームの平行性は大きく改善され、さらに大強度レーザー源を実用的な加速器用機器として組み込む見通しも立ちました。その結果、将来の放射光光源などに求められる、超高品質電子ビーム源実現の可能性は、大きく広がったといえるでしょう。



テラワット・フェムト秒レーザー環境試験室(マシン実験棟)にて

日本物理学会第62回年次大会で論文賞1名、若手奨励賞3名が受賞

9月21日～24日に札幌で開催された日本物理学会第62回年次大会で、SPring-8を利用した研究が表彰されました。(独)日本原子力研究開発機構から3名、(財)高輝度光科学研究センターから1名が表彰されました。最後に若手奨励賞を受賞した鈴木研究員の研究を紹介します。

「第12回日本物理学会論文賞」

野村拓司 / (独)日本原子力研究開発機構

論文:「Perturbation Theory of Spin-Triplet Superconductivity for Sr_2RuO_4 」

「第1回日本物理学会若手奨励賞」

妹尾仁嗣 / (独)日本原子力研究開発機構

テーマ:「分子性導体における電荷秩序の理論研究およびその物性の系統的理解の探求」

服部高典 / (独)日本原子力研究開発機構

テーマ:「放射光を用いた高圧下におけるX線回折手法の開発および液体・結晶の精密構造解析」

鈴木基寛 / (財)高輝度光科学研究センター

テーマ:「X線円偏光変調法による磁気分光法の開発とナノスケール磁性体への応用」

私たちの身の回りにある磁石(=磁性体)は、含まれる元素によって性質や用途が異なります。放射光X線による磁気分光測定は、磁性体を元素別に解析できる実験法です。しかし、信号自体がとても小さいため、強力な放射光を使ったとしてもノイズの少ないデータを得ることは困難でした。鈴木主幹研究員は、可視光実験で使われている円偏光変調法をX線に対して初めて適用することで、極めて高い精度の磁気分光法を開発しました。従来方法では感度が不足した、ナノサイズの微粒子や貴金属元素を含む磁性薄膜などの精密な観測を可能にしました。鈴木主幹研究員の手法は、SPring-8のBL39XU(磁性材料ビームライン)で年間30以上の研究グループに利用されています。この手法の優秀さは海外でも認められており、アメリカやフランスの放射光施設でも同等の装置が導入されています。



論文賞: 野村研究員



若手奨励賞: 妹尾研究員(左)、服部研究員(右)



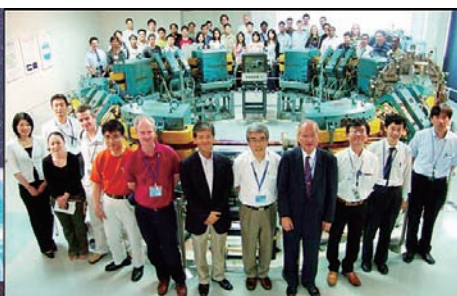
若手奨励賞: 鈴木研究員(右)

行事 報告

第1回アジアオセアニア放射光科学フォーラム夏の学校 -ケイロンスクール2007-

9月10日～20日アジア・オセアニア放射光科学フォーラム（AOFSRR：会長 雨宮慶幸 東大教授）のサマースクールであるCheiron School（ケイロンスクール）がSPRING-8で開催されました。このスクールはAOFSRR、理化学研究所、KEK、JASRIの共催により7か国50人の若手研究者、大学院生が参加しました。昨年11月に筑波にてオーストラリア、中国、インド、韓国、シンガポール、台湾、タイ、日本の8か国により放射光科学分野での研究協力、施設の高度化、人材養成を目的として発足したものです。

ケイロンとは、ギリシャ神話に出てくるケンタウロスの事で、あらゆる事をそれぞれの適材の神に教えたと言う話が、このスクールの目的と一致する事からスクールの名称に使われる事になりました。開校式は、文部科学省大型放射光施設利用推進室の林孝浩室長をお迎えして行いました。生徒は各国5名づつ選抜された英才です。内容は加盟各国とヨーロッパ、アメリカから迎えた講師陣による講義とビームライン実習、“ミート・ザ・エキスパート”と銘打った懇談形式のクラスから構成され、姫路・京都への遠足も行われ、有意義な人材育成・交流の10日間となりました。本スクールは、AOFSRRの基幹事業として毎年開催される予定です。



第4回SPRING-8産業利用報告会開催

9月11、12日の2日間にわたって、産業用専用ビームライン建設利用共同体（SUNBEAM CONSORTIUM）、（財）ひょうご科学技術協会（HSTA）及び（財）高輝度光科学研究センター（JASRI）の主催による第4回SPRING-8産業利用報告会ならびに交流会が総評会館（東京都千代田区）で開催されました。参加者は、2日間で347名でした。招待講演が2題、そして口頭発表として、産業用専用ビームライン建設利用共同体から6題、高輝度光科学研究センターから6題、ひょうご科学技術協会から4題の報告が行われました。



また、54題のポスター発表も行われました。産業分野における放射光利用者相互の交流や情報交換を促進するために、エレクトロニクス、金属・高分子素材、触媒やヘルスケア製品など幅広い産業分野での放射光利用の成果が口頭発表ならびにポスターで報告され、所属する組織の枠を超えて活発な議論が行われました。9月11、12日の両日も雨天で天候に恵まれませんでしたでしたが、多数の参加者による多彩な発表と活発な議論のもと報告会は盛会のうちに幕を閉じました。

お知らせ

SPRING-8のホームページに「キッズコーナー」がオープンしました。キッズコーナーでは「エイトハカセ」がSPRING-8をわかりやすく説明してくれます。エイトハカセと一緒にSPRING-8を勉強してみよう！

http://www.spring8.or.jp/ja/for_kids/

施設見学の申し込み方法

見学のお申し込みについては、電話で広報室までお問い合わせ下さい。また、以下ホームページからお申し込みいただけます。

（財）高輝度光科学研究センター 広報室

電話番号：0791-58-2785

ファックス番号：0791-58-2786

URL：http://www.spring8.or.jp/ja/support/contact/site_tour/

編集 SPRING-8 News 編集委員会

発行 財団法人 高輝度光科学研究センター
Japan Synchrotron Radiation Research Institute
〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都1丁目1番1号
TEL (0791) 58-2785 FAX (0791) 58-2786 E-mail: kouhou@spring8.or.jp

広報室

ホームページアドレス

<http://www.spring8.or.jp/>