

複合極限状態の生成と量子物性研究



研究室紹介

清水克哉*

Experimental research for quantum science and technology at extreme condition

Key Words : High pressure, Phase transition, Superconductivity, Magnetism

1. まえがき

我々の研究室は18年度に改組によって「量子」をその名に付した極限量子科学研究センターに属し、超高圧量子物性部門を担当している。同時に基礎工学研究科 物質創成専攻 未来物質領域の極限量子物性講座として、また基礎工学部 電子物理科学科 物性物理科学コースの1研究室として学部・大学院の教育研究を担当している。研究室が発足して近く4年目を迎え、やっと一通りの学年の学生がそろうことになった研究室の人員構成は、教授1, 助教授1, 技術専門職員1, 博士研究員2, 博士後期過程2, 同前期過程7名, 学部4年生6名。学生数はすでに学部・学科で定められた定員いっぱいの陣容となっている。このほかに極限センターの非常勤スタッフとして国内客員教授1, 海外客員教授1, 招聘教員2が所属している。最近は学内外との共同研究も幅が広がり、他大学・他研究科の学生や博士研究員が実験のために頻繁に出入りするようになった。前身の研究室からの伝統である「よく学び、よく遊ぶ」のモットーを継承しているが、外国人研究員が常駐しているため、実験中はもとよりレクリエーションでも英語によるコミュニケーションが欠かせなくなっている。このような交流が我々の教育・研究を研究室内や学科内に収まることなく、国際的また学界的に一層価値あるものにおし進めてくれる

ものと期待している。人的にも物的にも陣容が揃いつつある現在、研究室紹介の機会を得て研究の現状を紹介したい。

2. 研究の概要

研究室のテーマは本稿の表題でうまく表現できていると思う。高圧・低温・強磁場といった「複合極限状態」を生成して、その下での「物性研究」を行う。その2つを基に様々なテーマに研究を展開している。

物理パラメータの中でも圧力が物質研究にもたらす効果は顕著である。物質が示す多様な物性は、電子の運動エネルギー、電子間相互作用エネルギー、電子と核の相互作用エネルギーの競合から生れるわけであるから、圧力を加えることがこれらの相対的強度を変化させる最も有効な手段といえる。例えば最も単純な元素である水素の超高圧の究極の姿はどのようなものだろうか。高密度では木星の内部構造に予測されているように金属状態になり、この金属は室温程度の温度で超伝導を示すと考えられている。しかし未だ実験的検証はされていない。水素だけでなく、すべての物質においてその究極の姿を求め、その中に潜む普遍性を見いだすことこそ物理研



* Katsuya SHIMIZU
1965年4月生
1994年大阪大学・大学院基礎工学研究科
現在、大阪大学、極限量子科学研究センター、教授、博士(理学)、超高圧物性
TEL 06-6850-6675
FAX 06-6850-6662
E-mail : shimizu@cqst.osaka-u.ac.jp



図1 ダイヤモンドアンビルセル

究の本質といえるだろう。また近年の圧力によって誘起される現象 - 絶縁体金属転移や圧力誘起超伝導体の発見, また高温超伝導体や強相関電子系の研究に代表される様に, 圧力下で起こる量子相転移は近代物理学の中心的課題ともいえると考えている。

本研究室の研究手法は「極限」状態の中でも高圧力発生技術に特徴があるといえる。高圧発生にはダイヤモンドアンビルセル(DAC, 図1)を主に使う。金属板を対向したダイヤモンド単結晶(宝石用や人工のものを用途に合わせて用いている)ではさんで加圧するもので, これによって2百万気圧以上の発生を可能にしている。これは地球の中心部に匹敵する圧力であり, 我々以前には高温技術と組み合わせて地球・惑星科学の分野でも多く使用されてきている。このDACを絶対温度0.01度まで冷却可能な希釈冷凍機(図2)に装着すれば, 「高圧低温」環境のできあがりであるが, さらに希釈冷凍機には最大10Tの超伝導マグネットが取り付けられており, 強磁場を含めた複合極限環境を実現することが可能である。これらは世界的に類を見ない研究環境であり, 以下に示す先端的な研究の基盤をなしている。

このような複合極限を可能にしているのは, 冷凍機等との組合せが可能にほどDACがコンパクトであるためであるが, 試料空間が $10^{-5} \sim 10^{-9}$ cc程度であるため物性測定は, 様々な困難が生じることになる。つまりDAC中の試料はダイヤモンドの窓に挟まれているため光学測定には(X線回折測定をふくみ)都合がよいが, 「物性測定」に不可欠な電気伝導, 磁気測定, 比熱測定などはほとんど行われてい

なかった。当研究室では複合極限状態の生成だけではなく, 同時にその環境下での測定を可能にすることで, 高圧下の物性測定に新たに可能性を広げてきたといえる。限られた紙面のため, 以下に元素の超伝導の探索実験について記述する。他のアクティビティはホームページを参考にしてください。

(<http://www.hpr.cqst.osaka-u.ac.jp>)

一般に超伝導は限られた物質においてかつ低温下で発現する稀な



図2 希釈冷凍機に取り付けたDAC

現象と考えられているが, 果たしてそうであろうか。いまや多くの化合物で超伝導が観測され150Kに迫る転移温度を示す高温超伝導物質も発見されている。ここで, 超伝導現象はすべての物質に共通する普遍的な現象であり, その発現機構に豊富なバリエーションがあると考えられないだろうか。このような観点をもって新しい機構の超伝導を探る立場に立てば, 物質の状態を大きく変えることのできる“圧力”を用いた高圧力条件下の超伝導探索は手っ取り早い方法といえる。物質の構成要素である元素すべては超伝導を示す, という仮説を立てた上で, 未だ超伝

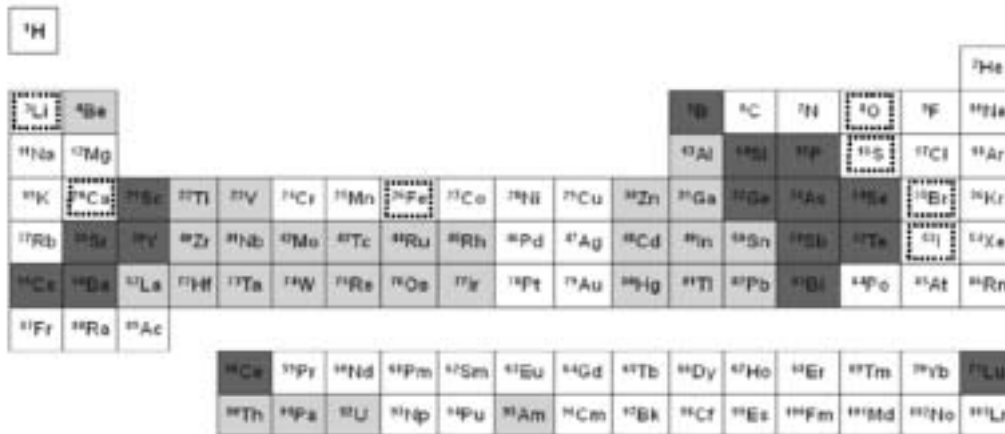


図3 超伝導を示す元素。薄い灰色: 常圧力下で超伝導を示す。濃い灰色: 圧力下で超伝導。点線: 本研究室で圧力下超伝導を発見したもの。

導を示していない元素の超伝導性を圧力条件下で探索している。そこには必ず新しい超伝導の仕組みが潜んでいると信じている。図3に超伝導を示すことがわかっている元素を色分けして整理した周期律表を示す。常圧下で超伝導を示す元素は薄い灰色を塗ってある。圧力を印加して初めて超伝導になる元素には暗い灰色が塗ってある。点線で囲まれている元素は以降に紹介する通り、1996年以降に本研究室で圧力下超伝導を示すことが発見された元素であり、現在では暗い灰色を塗るべきものであるがここでは塗っていない。色が塗られていない元素は未だ超伝導の発見されていない元素である。これを見ると、色が塗っていない元素はおおよそ4つのグループに分けることができるように見える。右から非金属元素群、貴金属元素群、磁性金属元素群、アルカリ金属元素群の4つである。この中で貴金属元素(金、銀、銅)の超伝導は本来は常圧下で発現するが、転移温度が極めて低いのが原因で観測に至っていないと理解されている。そのほかの3つの元素群には超高压下超伝導を示す元素 - すなわち点線で囲んだ代表選手(元素)がある。したがってすべてのグループ - すべての元素で超伝導が発現する可能性が高い。以上のように、単体元素が圧力下で示す超伝導について研究を進めると、超伝導を示さない物質も圧力下においては超伝導を示す傾向が読み取れる。超伝導現象は元素には一般的な(普遍的な)現象に思えてくる。つまり高压誘起超伝導という、その環境がエキゾチックと思われがちであるが、ありふれた単体元素を舞台に起こる超伝導現象には、そこには様々な(エキゾチックな)発現機構が隠されており、超伝導現象の機構解明の鍵があるようにも思われる。

究極のターゲットは最も軽い元素である水素であ

ろう。前述したとおり水素の金属状態には室温超伝導が予言されているが、400GPa以上が必要とされており現在の実験技術では非常に困難であり、実験的にも究極の目標といえる。現在、本研究室でもその目標に向けて研究を推進しているが未だ成果を得ることはできていない。

3. おわりに

複合極限環境下の超伝導・磁性研究は未だ発展途上にあるといえる。さらなる極限環境を達成させる一方で様々な物性測定を行えるようにすることにより、多彩な物性の発見につなげたいと考えている。最後に現在進行中の研究課題を列挙してまとめにかえたい。

(研究テーマ一覧)

- (1) 単体物質の圧力誘起絶縁体-金属転移と超伝導 (分子性結晶, 軽元素単体, 金属水素化物...)
- (2) 磁性金属の超伝導 (鉄, マンガン, クロム...)
- (3) 炭素同素体 (グラファイト, ナノチューブ, ダイヤモンド...)
- (4) 圧力下量子臨界現象と超伝導 (セリウムおよびビッテルピウム系強相関電子系化合物, スクッテルダイト化合物)
- (5) 光触媒酸化物
- (6) 水素吸蔵合金
- (7) 高圧力技術開発 (発生圧力の追求, 精密測定技術, 弾性特性測定, リソグラフィー技術, 新方式の超高压発生)

本稿によってより多くの方々に「極限」をキーワードに展開する物質科学に興味を持っていただければ幸いです。

この記事をお読みになり、著者の研究室の訪問見学をご希望の方は、当協会事務局へご連絡ください。事務局で著者と日程を調整して、おしらせいたします。

申し込み期限：本誌発行から2か月後の月末日

申し込み先：生産技術振興協会 tel 06-6944-0604 E-mail seisan@maple.ocn.ne.jp

必要事項：お名前、ご所属、希望日時(選択の幅をもたせてください)、複数人の場合はそれぞれのお名前、ご所属、代表者の連絡先

著者の都合でご希望に沿えない場合もありますので、予めご了承ください。