



Title	液体ヘリウムで花開いた物性科学
Author(s)	都, 福仁
Citation	大阪大学低温センター 50周年記念誌. 2025, p. 6-9
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/102091
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

液体ヘリウムで花開いた物性科学

大阪大学名誉教授 都 福仁

低温センター長: 1993年4月～1995年3月, 1997年4月～1999年3月

副センター長: 1992年4月～1993年3月, 1995年4月～1997年3月, 1999年4月～2000年3月

極低温研究の回想

「低温センターだより」に原稿を書くのは退職以来、24年ぶりのことで懐かしい気持ち先立ちます。阪大に最初にヘリウム液化機が設置されたのは1959年とのことで、私が理学部を卒業した年です。以来私が停年になる2000年迄の低温センターは液体ヘリウムを必要とする研究者に供給するのが主な任務でした。この原稿を執筆するために低温センターの現状を教えて戴いたところ研究部門との共同研究が出来るよう低温センターの組織替えがされていることを知りました。必要な機器や極低温等の支援組織として外部の組織と共同研究が出来る「大阪大学コアファシリティ機構」の存在です。低温センター設立以来の素晴らしい発展として感心しているしだいです。低温科学技術の歴史を見ると「大阪大学コアファシリティ機構」の中にも低温科学支援部門として研究者を集め組織を拡充し萌芽的な研究を主導する機関として更なる発展が出来ると思われれます。これから月や火星での人類の活躍が期待されますし、ナノサイズの半導体の開発や量子コンピューター更には高速のコンピューターや各分野に特化した AI 等の開発も期待されています。極限環境下での科学技術の発展は今世紀以降益々重要になってくると思われれます。これまで明らかになった科学の知識を如何に上手く応用するか時代になっています。20世紀は基礎科学を応用した電子機器に代表される技術開発の歴史でした。21世紀は機器の開発というより科学技術に名を借りた人工知能の開発の世紀に思えます。既に人知を越えた人工

知能の世界が出来つつあるように思えます。このような観点から私が辿った身近な基礎科学の発展の歴史を簡単に述べてみたいと思います。

当時、阪大理学部で物理学科ではマイクロ波の発振管の研究で文化勲章を授与された岡部金治郎名誉教授の後任として新進気鋭の伊藤順吉教授が就任しておられました。伊藤先生は核磁気共鳴(NMR)を利用した物性研究をしておられ、ESR の研究者として東北大学から伊達宗行氏を講師として招聘していました。当時の若い研究者は量子現象を目で見ることが出来ると感激し夢中になって磁気共鳴の研究をしたものです。

阪大に最初のヘリウム液化機が設置された1959年に、私は NEC の中央研究所に就職し、電子スピン共鳴(ESR)を応用した宇宙からの微弱信号を受信するための MASER(Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation の略)の開発をすることになりました。東北大学通信研究所の稲葉文男先生の指導を仰ぎ NEC の塩谷先輩と協力してアメリカの特許を2編取得しましたが、もう少し基礎研究がしたいと思い NEC を退社し、伊藤研究室の伊達先生の指導を仰ぐことになりました。3K の温度に相当するマイクロ波の宇宙の全方位からの微弱信号をアメリカ・ベル研究所の研究者が受信に成功し、ビッグバンによる背景放射として知られています。背景放射はビッグバンの証拠としてノーベル賞を受賞しました。その後、MASER は江崎ダイオードのような非線形効果を利用した増幅器に簡便さで負けましたが、周

波数の非常に高い光の発信器及び増幅器 (LASER) として発展しています。簡単な物は建設現場や講演で使用するポインターとして、高度な応用はナノサイズの最先端半導体の制作に欠かせない装置等多様な利用がされています。NMR は医学の世界で癌検査等に使用される MRI 装置 (Magnetic Resonance Imaging) として応用されています。このような開発が可能になったのはヘリウムが液化され電子や原子の量子現象が観測出来るようになったお陰です。量子効果の基礎的及び応用技術の研究が20世紀以後の特徴と言って良いでしょう。20世紀以後の科学技術を発展させ、それを支えているのが低温科学であり低温技術です。極低温の存在が20世紀以後の文明に如何に大事であったかを歴史的に辿って見ることにします。

気体のヘリウムが大量に液化され1K 程の低温を安定的に維持出来るようになって何が変わったかを考えて見ることにします。ヘリウムガスの液化は1908年にオランダのライデン大学で成功しました。その少し前の1897年にはイギリスのケンブリッジ大学キャベンディッシュ研究所で J.J.トムソンによって電子が発見されました。トムソンの下にはニュージーランドから来た、後に原子核の存在を発見するアーネスト・ラザフォードが居ました。この頃物質の構成要素である原子に構造があり原子核と電子から出来ていることが1911年に明らかになったのです。物質を構成しているのは原子で有り、その物質の性質、金属、半導体、磁性体など様々な性質は電子の状態で決まっています。20世紀の物性物理学は固体内電子の世界を研究する事でした。それには格子の熱振動を低温にして減少し電子が固体内で比較的自由に軌道を描ける必要があったのです。極低温で始めて電子の性質を研究出来るようになったのです。

1900年に産業革命で発展した製鉄所の溶鉱炉の温度制御に溶鉱炉内から出る光の波長と温度との関係式を使っていましたが、その関係式を理論的に解析し光のエネルギーが不連続に変化することを Max Planck が示しました。現在マックス・プランク定数がエネルギーの最小単位を表す定数として知られています。先に磁気共鳴が如何に産業に応用されているかを示しましたが、20世紀初期の Max Planck の全く基礎的な研究も、基礎科学と工業が如何に関連しているかを端的に示す良い例です。20世紀に発展した量子論が物質中の電子の振る舞いを明らかにし、半導体産業が発展しました。半導体は日常生活の隅々に使われており、電子計算機には勿論のことあらゆる分野に使われる部品になっています。AI の開発には勿論のこと、生命科学の各種機器にも使用されています。半導体の発明が人類の文明を大きく変える原動力になっています (1950年代に真空管を使用した電子計算機が試作されたが、動作しなかった)。これからの宇宙開発には極低温の科学技術は欠かせないでしょう。「大阪大学コアファシリティ機構」の更なる充実の為に是非極低温等の極限科学の基礎的研究部門の創設及び発展を期待しています。

昭和時代の物性研究

1966年大学院博士課程を中退し北海道大学理学部極低温研究室の助手として勤務し、25年後に北大教授から阪大教授に異動しました。当時の北海道の鉄道はジゼル機関車と蒸気機関車の時代で電化されていませんでした。文化の違いに最初は戸惑いましたが、次第に慣れ北国の広大な自然を楽しむようになりました。物性研究は研究目的に相応しい試料、酸化物の単結晶や金属合金の単結晶、を調達する事につけると言って過言ではありません。そのため実に多くの実験のための実験をして

明け暮れる生活で日曜、祭日も関係なく私生活を犠牲にしていました。夜の9時頃から液体ヘリウムを汲み実験を始めるなど妻には迷惑をかけ、子供が生まれていたのも後になって知るありさまでした。電気炉や簡単な電氣的な測定器は自作して低温センターや工作センターの技官の方達と仲良くなり海釣りを楽しんだのは数少ない楽しい思い出です。学位取得は遅れましたが、物理教室の教授の方々が暖かく見守って戴き、学位取得すると直ぐに独立した私の研究室を創設して戴きました。助手時代の物性の予備的な基礎実験で得た知識(幅広い雑学)が研究室を持って役立つことになりました。若いときに一見無駄に見える実験を自由に出来たことが後で役に立つことになりました。物性研究では近藤効果の研究の後、スピングラスの研究に注目が集まっていました。鉄などの磁気相転移は鉄原子同士がお互いに磁氣的な力で結ばれ、磁氣的な力が熱エネルギーによる乱す力に打ち勝つ低温になると磁気相転移をおこして強磁性体になります。スピングラスは非磁性のホスト原子の格子を不規則に不純物の磁性原子で置換したときの磁気相転移の研究です。磁性原子間の相互作用は磁性原子間の距離や方向により相互作用の符号と力の大きさが異なります。ある不純物磁性原子が受ける力が周囲の不純物磁性原子からの力を全て加算するとゼロになる。この場合に相転移が有るかということです。この場合の相転移はリアクションの力、満員電車の中で動こうとすると反動的な力で押し返され、動けない状態になることに似ています。熱振動では磁性体はエネルギーの低いところに落ち込み、熱励起で又高いエネルギー状態になる事を繰り返しています。ある温度で低いエネルギーに落ち込んだときに、熱エネルギーが十分ないと励起できず、相転移を起こすのがスピングラスの相転移です。リアクション的な力での相転移ですから線

形磁化率での発散はありません。高次の2次以上の磁化率の発散を観測する必要があります。この場合も観測に使用する試料の選択が実験の成否を決めることになります。当時の希薄磁性合金の研究では CuMn の希薄合金が ESR 信号が観測出来最もよく研究されていた物質です。しかし、Mn原子間の相互作用は反強磁性相互作用が支配的で有り相転移点での磁化率の発散は非常に小さく、非線形磁化率の発散の観測には不向きです。強磁性的相互作用が反強磁性相互作用に勝っている合金の非線形磁化率の発散の観測に挑戦するには適した磁性希薄合金が必要です。このような知識が物性研究では非常に重要です。当時ミリ波 ESR の研究用に用意していた強磁性体の鉄合金の磁化率に匹敵する大きな線形磁化率を持ち金属の性質を持つ $(\text{Ti}_{0.9}\text{V}_{0.1})_2\text{O}_3$ で非線形磁化率の発散の観測に成功しました。その後、AuFe 希薄合金や様々な合金で観測に成功しています。当時一番よく研究されていた CuMn を試料として用いていたら、非線形磁化率の発散の観測には成功していませんでした。次の経験は異方的スピングラスの2段階相転移の観測の成功です。磁気異方性のある希薄磁性合金では磁気容易軸方向のスピン成分が相転移し、更に低温で磁気容易軸方向に垂直なスピン成分が相転移する2段階相転移が生じます。これは理想的な単結晶の希薄磁性合金でのみ起こりうることです。通常はホストの非磁性原子の単結晶のマクロな結晶軸と希薄された原子半径の異なる磁性原子の局所的な結晶場の磁気異方性の軸はマクロな結晶軸と少し傾く傾向があります(最初の LASER の研究で使用された Al_2O_3 に Cr^{3+} が0.1%程度添加されたサファイヤ単結晶を改良する過程で ESR の線幅の変化から知られた)。この知識から酸化物単結晶で異方的スピングラスの2段階相転移の観測は難しい事が推測されました。実際にフ

ランスのパリ南大学で実験を試みましたが成功しませんでした。(局所的な結晶場の軸が希薄磁性原子のサイト毎に少し異なるとマクロな結晶の容易軸方向のスピ成分には磁性不純物サイトのミクロな磁気容易軸の方向に垂直成分も含まれ、マクロな結晶での結晶場エネルギーは磁性不純物サイトの座標で表すとスピ成分間のクロス成分が作用して独立ではなくなる)。ESR 実験の時の経験から、Zn 単結晶は経験から液体窒素温度に冷やすことによりカタナイフの刃を当てたたくと容易に劈開することを知っていました。劈開面は鏡面のようになめらかです。Zn 金属は非常に綺麗な大き

い単結晶が容易に作れます。ただし、不純物原子は単結晶の成長過程で排除され、磁性不純物を排除される前に固化すると小さな単結晶しか出来ません。電気炉の温度勾配の設計と制作、試料の炉内の降下スピードの調整など気の長い努力が必要になります。このような調整作業は高温の炉が必要な酸化物単結晶では非常に難しい。これらは全て実際に経験して得られる知識です。1980年ごろから既製の実験装置での研究が主流になり、日曜、祭日に働くことはなくなりました。



阪大で第1号機のADLコリンズ社製ヘリウム液化装置。(豊中分室所蔵)



中之島低温実験室。(豊中に移転前)