

■中性子散乱で 超低温・強磁場・高圧実験に挑戦する



極限環境中性子散乱法研究グループ

森 井 幸 生

1. はじめに

物質の構造と機能の解明は、定常状態における研究だけではなく、むしろ超低温、強磁場、高圧などの極限環境、あるいはそれらが重なった多重極限環境において誘起される新しい物性を研究し、新たな理解に基づいてこれまでの知識を再び評価することによって、完全な解明へと導かれるのが常である。しかも、極限環境において誘起される新しい性質の中から、超伝導や超流動、強磁性や強誘電性などのように、基礎科学において極めて重要であったり社会生活において極めて有用である性質が発見されて来たことは、誰もが認める事実である。したがって、極限環境における物質研究は、物性の理解と新機能（材料）の開発の両面から興味深くかつ科学的に価値が高い。

例えれば、最近の研究によれば、 UGe_2 には1.5GPa程度の高圧、0.4K程度の低温で強磁性秩序と超伝導が共存していることが報告されている。これまで UPd_2Al_3 のように反強磁性秩序と超伝導が共存している例は数多く報告されてきたが、 UGe_2 のような明瞭な強磁性秩序と超伝導の共存に関する報告は類を見ない。この系の基底状態と強磁性・超伝導共存メカニズム、そして自己誘起型磁束の存在などは、物理として極めて興味深く、重要な問題を含んでいる。また、反強磁性秩序と超伝導が共存している UPd_2Al_3 、 URu_2Si_2 の低温高圧下での超伝導異方性や、 UPd_2Al_3 、 UPT_3 の低温強磁場下でのメタ磁性の発現機構についても、大変興味をそそられる。

当研究グループは、これまで実現が極めて困難であ

った極限環境を同時に発生させる中性子散乱用多重極限環境装置を開発して、そこに出現するウラン化合物などの微視的構造、磁性、素励起、エネルギー状態等を中性子プローブで研究することを可能にし、この物質系の多彩で重要な物性の発見と解明を目指している。

2. 中性子プローブ

我々のテーマである多重極限環境は通常、冷凍機、超伝導磁石、高圧セルなどの機器によって生成されるため、その内部に取り付けられた試料を調べるために、プローブは機器の構成要素を通り抜ける必要がある。中性子は物質透過性が大きく、波長0.22nmの中性子の場合、1cmの厚さの炭素鋼を透過してもその強度は約30%も残っている。さらに、中性子は、物質の結晶構造や磁気構造を調べることが出来、格子振動、スピントル波、結晶場などのエネルギー励起を実測することが出来、磁気秩序化や磁気モーメントの観測など磁性の研究が可能である。したがって、我々の研究にとって中性子は、この物質透過性、構造感受性、エネルギー感受性、磁気感受性において、他に代替がきかないプローブである。

中性子をプローブとして使う中性子散乱実験法は、1994年のノーベル物理学賞受賞者のC.G.Shull, B.N.Brookhouse両教授などが1940年代から開発を始め、半世紀が過ぎる間に、物理学はもとより化学、高分子科学、生物学、材料科学、工学などの広範な分野で飛躍的に利用されるようになった。研究用原子炉JRR-3M

を利用した中性子散乱研究では、平成3年度の共同利用開始から10年間で、利用者、発表論文の数が1桁上昇している。この発展は、中性子が物質の構造と機能を微視的に調べるうえで、極めて強力なプローブであるからである。

他方、中性子はその強度がX線に比べて弱いことが最大の欠点として上げられる。極限環境機器下の試料はその体積が小さくなってしまうために、この状況はさらに悪化する。中性子の宿命的困難を少しでも軽減して、得られる情報を最大限まで拡大するためには、中性子の制御技術や検出技術を高め、最後の1個まで中性子を利用する中性子散乱実験法の開発が、最も必要とされている。具体的には、湾曲スーパーミラーシステム、湾曲モノクロメーター、湾曲アナライザーの開発によって微小試料や中性子検出器に中性子を集めし、そのビームの強度を実効的に増強させることや、遮蔽強化などによって、S/N比の改善やバックグラウンド信号の低減を図ることが大切となる。

3. 多重極限環境開発の目標

中性子散乱用単一極限環境としては、先端基礎研究センターで既にヘリウムフリー希釈冷凍機、ヘリウムフリー超伝導マグネット、高圧セルの開発を開始しており、超低温(41mK)、強磁場(10 Tesla)、高圧(6 GPa)を達成している。これらの技術を基に、超低温開発では、焼結微粉末銀熱交換器を作成し、既存のヘリウムフリー希釈冷凍機に追加して15mKを達成する。強磁場開発では、平成13年度に製作が完了する予定の15 Teslaヘリウムフリー超伝導マグネットの試用を行い、必要な改善を加えて使いこなす。高圧開発では、サファイアアンビル型高圧セルの試作を行い、小型化と8GPaを達成したい。

中性子散乱用多重極限環境としては、単一極限環境の組みあわせに起因する空間配置、熱発生、中性子ビーム通路の確保などの困難を克服して、平成16年度までに、8GPa+50mK、15 Tesla+50mK、8 GPa+15 Teslaなどをヘリウムフリーで達成したい。(図1「多重極限環境の開発」参照)

単一極限環境なら世界すでにnK、17 Teslaが実現している。しかし、その方法は液体ヘリウムを大量に消費する従来型の核断熱消磁装置や超伝導マグネット

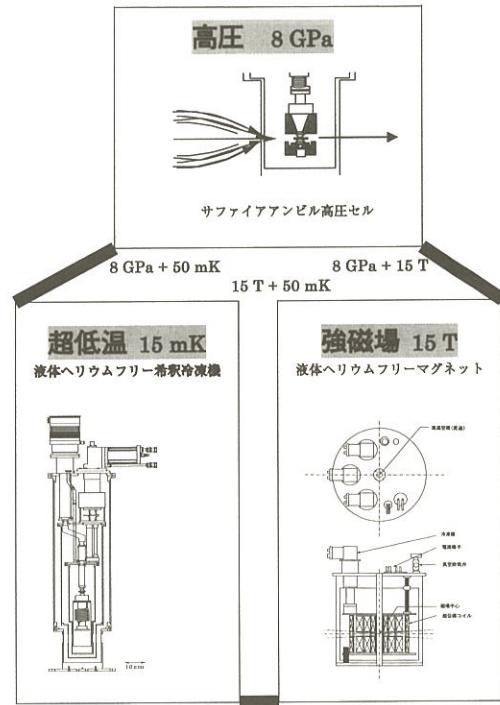


図1. 多重極限環境の開発

中性子散乱実験のための高圧、超低温、高磁場の多重極限環境を開発する。

トを用いるものであり、低温専門家の深い経験や知識と多大な労力が必要である。我々は、むしろ、液体ヘリウムを使わないでmKまでの温度と15 Teslaの磁場を誰もがボタン一つで使いこなせて、かつ小型高圧セルを装填できる装置を開発して、そこに現れる電子系の物性を研究する一助としたい。

4. 中性子散乱実験法の開発目標

極限環境は微小空間でしか達成されないので、試料も必然的に小さくなる、したがって、中性子散乱信号も微弱信号しか得られない。逆に、極限環境装置から発生するバックグラウンド信号やノイズ信号は大きい。これらの実験技術上の困難を解決するために、原子炉から発散的に出てくる中性子ビームを湾曲型モノクロメーター結晶によって単色化するとともに粗く集束させ、次にその単色中性子ビームを数枚の湾曲スーパーミラーによって微小試料に集束させることを計画している。試料で散乱された中性子ビームは再び発散するので、湾曲型アナライザー結晶を使った散乱中性子ビーム集光機構によって中性子検出器に集束させて効率的な測定を実現したい(図2「多重極限環境中性子散乱装置」参照)。湾曲スーパーミラー中性子集束装置は世界で初めての試みであり、集束効率が飛躍的に上がるものと期待されている。これらの中性子ビーム制御

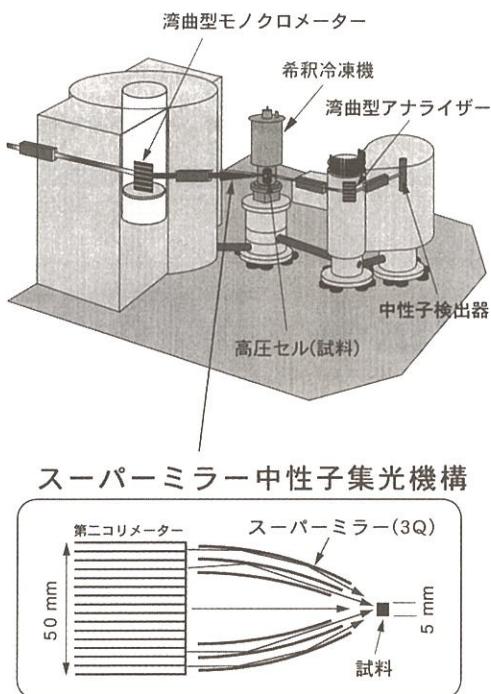


図1. 多重極限環境中性子散乱装置
中性子非弾性散乱装置において超低温・
高圧下の試料へ入射中性子ビームが集束
される様子と散乱中性子ビームが中性子
検出器へ集束される様子を示している。

技術を開発することによって、できるだけ多くの中性子を有効に使い、S/N比を高めて微弱信号の測定を可能にしたい。また極限環境装置から発生するバックグラウンド信号やノイズ信号を断ち切る遮蔽体の改善を実施する。

5. 極限環境中性子散乱法研究の波及効果

極限環境下における物性研究は、定常中性子施設JRR-3Mはもとよりパルス中性子を供給する大強度陽子加速器施設の利用において最も重要な研究テーマの一つと考えられており、その基礎を作る意味においても、当研究の重要性や波及効果が期待される。また、湾曲スーパー・ミラーによる入射中性子ビーム集光機構は、短波長中性子に対しても有効な機構であるため、

パルス中性子源と試料の間に挿入することにより、その強度を格段に増強できると期待される。

重い電子系超伝導体における磁性と超伝導の相関や、量子臨界点近傍の特異な物性については、今後高温超伝導体や有機超伝導体との統一的な理解に進むことが期待される。また5f電子系の多彩な物性においては、軌道の自由度が重要な役割を演じていると期待される。多重極限下の中性子散乱実験は、放射光やNMRそして、軌道の自由度まで取り入れた新しい理論とタイアップすることで、新しくより深い物理が展開されていくと期待される。

6. 終わりに

多重極限環境の開発および中性子散乱実験法の開発は、この実験技術の発展なくして将来の中性子散乱実験の新しい可能性は生まれないと考えられる最も基礎的な研究である。これまでの技術を超える更に先端的な技術が求められ、長期にわたる下積みの努力が必要であると考えられる。しかし、この種の研究は大学の研究室では遂行困難なものであり、是非、我々の手で成し遂げたい。

先端基礎研究センターには高品質ウラン化合物単結晶を育成するウラン電子系研究グループ、ウランNMR研究グループ、多体電子系理論研究グループがあり、ウラン化合物の極限物性研究については世界屈指の研究拠点となっている。我々は、これらのグループおよびもう一つの中性子散乱研究グループであるスピニ格子相関中性子散乱研究グループと協力して、この分野での研究で世界をリードしたいと考えている。そして、数年後には、既に建設が開始された大強度陽子加速器施設での中性子散乱研究にリンクさせたと考えている。