



若 者

# 研究のことなど

田 畑 吉 計\*

Short column of my study

Key Words : heavy fermion, quantum phase transition, spin glass, chirality

## はじめに

さて、私は茨城県東海村(JCOの臨界事故で有名な)にある原子力研究所(原研)に実験のためによく出張しているのですが、今年の8月の始めに原研から戻ってくると、いつの間にやら“若者”というコラムを書くことになっていました。どうやら、本人の了承を全く得ずに教授が勝手に承諾してしまったらしいのです(何てこったい)。愚痴を書いても仕方ありませんので、折角の機会ですから、我々の研究室(理学研究科 宇宙地球科学専攻 河原崎研究室)の最近の研究テーマについて書いてみることにしました\*1。

当研究室では、物質の磁氣的性質について、特に、重い電子系を中心とした強相関電子系及びスピングラス物質などのランダムスピン系についての研究を行っています。以下、重い電子系とスピングラスについての説明し、我々の現在行っている研究についての紹介を非常に簡単ではありますが致します。

## 重い電子系

重い電子系とは希土類元素であるCe(セリウム)やアクチナイド元素であるU(ウラン)を含む金属間化合物等で見られるもので、金属の伝導電子の有効質量が低温で非常に大きくなる物質群のことです。物質中の電子は互いに影響(電子相関)を及ぼしあいながら運動を行うために見かけ上質量が重くなったように見え、このような状態にあるものをフェルミ

表1 通常金属と重い電子系の電子比熱係数

	物質名	電子比熱係数 $\gamma$ (mJ/molK <sup>2</sup> )
通常金属	Cu(銅)	0.694
	Ag(銀)	0.6
	Pd(パラジウム)	9.4
重い電子系	CeCu <sub>6</sub>	1500
	CeAl <sub>3</sub>	1600
	CeRu <sub>2</sub> Si <sub>2</sub>	360

液体と呼びます。重い電子系の場合、非常に電子相関が強く結晶中で良く局在している f 電子が比較的電子相関が弱い伝導電子と互いの磁気モーメントを反並行に向けながら結びつき(近藤効果)、低温になると結晶中を遍歴します。そのとき自由電子の100倍から1000倍もの有効質量をもつことが出来るのです。表1にCu(銅)などの通常金属と代表的な重い電子系の電子比熱係数  $\gamma$ (mJ/molK<sup>2</sup>)を例示しておきます。金属の電子比熱係数はその金属中の電子の有効質量に比例します。これを見ると“重い”電子系と呼ばれる理由が良く分かると思います。

重い電子系の際立った特徴は、f 電子の遍歴性と局在性の二面性にあります。f 電子が各原子に局在

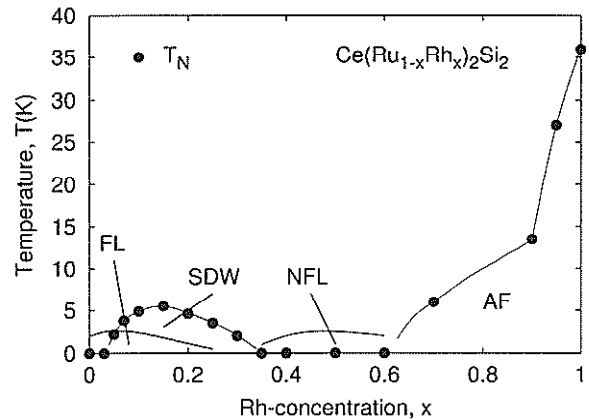


図1 Ce(Ru<sub>1-x</sub>Rh<sub>x</sub>)<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>の磁気相図; FL: フェルミ液体, NFL: 非フェルミ液体, SDW: スピン密度波, AF: 反強磁性

\* Yoshikazu TABATA  
 1973年12月生  
 2001年大阪大学大学院・理学研究科・宇宙地球科学専攻修了  
 現在、大阪大学大学院・理学研究科・宇宙地球科学専攻、助手、理学博士、磁性物理学  
 TEL 06-6850-5486  
 FAX 06-6850-5487  
 E-Mail yang@ltfridge.ess.sci.osaka-u.ac.jp



している場合、f電子はスピンの自由度を持っているので、温度を下げるとそのスピンの整然と並んだ秩序状態(磁気秩序)になります。しかしこの様なf電子が良く局在した物質に僅かな圧力(~数kbar)をかけたり、構成元素を数%置換するだけでf電子が遍歴したフェルミ液体状態になります。圧力をかけたり、構成元素を置換したりすることによって伝導電子とf電子の結合の強さを制御することによって引き起こされる現象です。

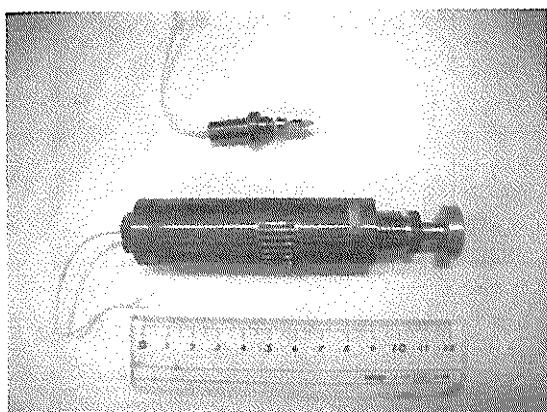


図2 圧力下(≤20kbar)電気抵抗測定用の圧力セル

我々の研究室では様々な重い電子系物質に圧力セル(図2)を用いて実際に圧力をかけたり、元素置換させた物質を作成したりして、フェルミ液体状態から磁気秩序状態(あるいはその逆)への絶対零度での相転移(量子相転移)を引き起こし、この電子相転移に関して詳しく調べています。図1に我々がこの研究のモデル物質として長年研究している擬二元化合物Ce(Ru<sub>1-x</sub>Rh<sub>x</sub>)<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>系の磁気相図を示します。この系は、典型的な重い電子系であるCeRu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>のRuサイトをRhで置換することによって基底状態が様々なに変化する非常に興味深い系です。特に、Rh濃度が35%から60%の間では量子臨界点(上で述べた量子相転移の起こる圧力や濃度のこと)近傍で観測される非フェルミ液体現象<sup>\*2</sup>が観測されました。この非フェルミ液体状態にある系に磁場をかけてやるとフェルミ液体状態が回復していきます。これは磁場によって量子臨界点からの距離を制御しているからである、と一般的には理解されていますが、我々はフランスの理論家のGrepel氏の協力を得て磁場中電気抵抗の詳細な解析を行い、これを示すことに成功しました<sup>\*3</sup>。現在はさらに、中性子散乱実験によりスピンの動的なゆらぎを観測することにより、重

い電子系の量子相転移に関してより深い理解を得ようとしています。

### スピングラス

ここで話はがらっと変わって、スピングラスに話を移ります。まず、スピングラスとは一体どんなものであるのか(実はこれが非常に難しい)、について簡単に説明します。

物質中の原子に局在したスピン間には、

$$H = -J_{ij} \vec{S}_i \cdot \vec{S}_j \quad (1)$$

と言う形の相互作用が働いています。この相互作用の起源は隣り合う原子間の電子の交換(交換相互作用)であったり、金属中の伝導電子による媒介(RKKY相互作用<sup>\*4</sup>)であったりと様々ですが、このような形の相互作用が各スピン間に働いている場合、 $J_{ij} > 0$ であれば隣り合うスピンの同じ方向を向くとエネルギー的に安定になり、スピンの全てが同じ方向を向いた状態(強磁性)が実現します。一方、 $J_{ij} < 0$ であれば隣り合うスピンの逆向きに並んだ状態(反強磁性)が実現します。それでは、 $J_{ij}$ が正負にランダムに分布していた場合はどうなるのでしょうか? この場合、スピンは強磁性や反強磁性のように整然と並んだ状態ではなく、ランダムな方向を向いたまま凍結した状態になります。このような状態がスピングラスです。図3に強磁性、反強磁性、スピングラスのスピン配列を示します。

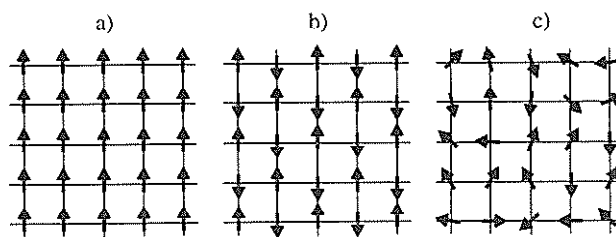


図3 (a)強磁性 (b)反強磁性 (c)スピングラスのスピン配列の概念図

スピングラスはスピン間の相互作用がランダムであることから、ランダムネスとフラストレーションの絡み合った系として非常に複雑で奇妙な性質を数多く示し、所謂“コンプレックス系”の典型例とみなされています<sup>\*5</sup>。スピングラスには未解決の問題が数多くありますが、そのうちの一つに“ハイゼンベルグスピン系におけるスピングラス転移の有無”

があります。ハイゼンベルグスピンとは(1個のスピンに着目した場合に)等方的にどの方向にも向くことの出来るスピンのことです。一方で、ある軸方向の上、下の2方向にしか向けられない様な異方的にスピンをイジングスピンと呼びます\*6。イジングスピン系の場合、実験、理論から、さらに数値計算からも有限温度でスピングラス転移することがほぼ確実視されています。しかしながら、ハイゼンベルグスピン系ではこれまでの理論、数値計算の結果からは有限温度ではスピングラス転移は無い、というのが有力であるにも関わらず、実験では明らかにスピングラス転移が観測されています。(貴金属のAuやAgにFeやMnといった磁性原子を希薄に混ぜた希薄磁性合金はカノニカルスピングラスと呼ばれ最も典型的なスピングラス物質ですが、これらの希薄磁性合金中のスピンはハイゼンベルグ的であることが知られています)この実験と理論の不一致を解消するためのアイデアとして、大阪大学理学部の川村教授らは“カイラリティ仮説”というものを提唱しています。カイラリティは3つのスピン $\vec{S}_i, \vec{S}_j, \vec{S}_k$ を用いて、 $\chi_{ijk} = \vec{S}_i \cdot (\vec{S}_j \times \vec{S}_k)$ と定義される量で、川村らによるカイラリティ仮説では、実際のカノニカルスピングラスではこのカイラリティがランダムに凍結するカイラリティグラスが実現している、とされています。ここでは、観測されているスピングラスは、実際の物質では必ず存在する僅かな磁気異方性によってスピン・カイラリティ混合が起こり、カイラリティグラス転移に引きずられて生じる副次的なものと考えられます。

我々はこのカイラリティ仮説の妥当性を実験的に検証することを目的として、様々な角度から研究を行っています。その一例として、カノニカルスピングラスAg(Mn)にAuを数%混ぜたものをAuの濃度を変えて数種類作成し、各々の磁場中相図を作ったり、臨界指数の変化などを測定しています。詳しい説明は省きますが、これはAuの濃度をかえることによってMnスピンの異方性の強さを制御し、それによる転移温度等の変化がカイラリティ仮説に沿うものであるか、といったことを検討しています。現在のところ、少なくともカイラリティ仮説に矛盾する結果は得られていません。また、現在、何とかカイラリティグラスを直接実験によって見ようと、実験方法を模索中です。

## あ と が き

最後に少し私自身の近況について少し書かせていただきます。

私は昨年(2001年)の10月から阪大の助手になったわけですが、学生時代からかぞえると11年ほど阪大にいますので、その延長線上という気がしないわけでもありません。ただやはり助手ということで学生実験(今年は前期に共通教育の物理実験を週2回担当しました)などのdutyがあることなど、学生のとくとは違うなあ、と感じます。学生実験などは最初の30分ほど説明をしてあとは学生の実験の進み具合をみながら少し助言をしてやる、と言う感じで普通の講義に比べるとかなり楽なはずなのですが、初めてやる身としては、レポートの採点なども含めて結構大変でした。

また、学生時代は私は専ら大学の研究室で極低温下での比熱等の測定をしていたのですが、今は中性子散乱実験や放射光を使ったX線散乱実験を主に行っており、そのため毎月大体1~2週間くらいは茨城県東海村の原研や兵庫県三日月町のSPRING-8などに行っています。この様な大型施設での実験はマシンタイムなどがきっちり決まっていて、実験スケジュールの調整などが大学で実験するのに比べるとかなり厳しく、追われるような感じで実験しています。ただ、この様な施設で実験をやっていると、色々な大学や研究所の人と知り合いになれ、様々な情報をインプット出来たり、これまでとは異なるテーマでの共同研究を始めたりと良い点も多々あり、今はこの状況を結構楽しんでます。

- \*1 この原稿は締め切りを大幅に遅れて書いています。編集者の方、誠に申し訳ありません。
- \*2 様々な物理量(比熱、電気抵抗等)がフェルミ液体とは異なる温度依存性を示す現象。例えば、電気抵抗 $\rho$ はフェルミ液体の場合、 $\rho = AT^2$ という温度依存性を示しますが、非フェルミ液体では、 $\rho = A'T^{1+\delta}$  ( $\delta < 1$ )となります。
- \*3 Y. Tabata *et al.*, Phys. Rev. Lett. 86(2001) 524; ちなみにこれは私の博士論文の一部をpublishしたものです。
- \*4 この相互作用を理論的に導いた4人、Ruderman, Kittel, Kasuya(糟谷), Yoshida(芳田)の頭文字からこう呼びます。前述の重い電子系

で磁気秩序を形成するのはこの相互作用によるものです。

\*5 ここでそれらを説明するには紙面が足りなさ過ぎるので、参考文献として、「スピングラス」高山一著、パリティ物理学コース(丸善)を挙げておきます。

\*6 このような異方性は通常、結晶中の原子の周りにどの様に他の原子が配置されているかが電子の軌道状態に反映され、それがスピン・軌道相互作用によってスピンの異方性となって現れるものです。

