The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	スピン流で観る物性物理
Author(s)	新見, 康洋
Citation	大阪大学低温センターだより. 2016, 166, p. 2-6
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/62129
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

談話室

スピン流で観る物性物理

理学研究科　新見康洋
E-mail: niimi@phys.sci.osaka-u.ac.jp

１．はじめに

2015年4月に理学研究科物理学専攻・小林研究室の准教授に着任致しました新見康洋と申します。この場をお借りして、自分がこれまで行ってきた研究と今後行っていきたい研究について、低温センターで扱う寒剤（特に液体ヘリウム）を交えながら、紹介させて頂きたいと思います。

２．液体ヘリウムとの出会い

私が初めて液体ヘリウムに出会ったのは、学部3年生の時です。「フィルムフローのビデオ撮影をするので、興味のある人は集まって下さい」という案内があり、福山寛先生が主宰されたゼミに何となく参加したことがきっかけでした。私は当時、自分が物理学科で何をやりたいのか（素粒子・宇宙か物性か、理論か実験か)、あまり明確ではありませんでした。しかしこれをきっかけに、低温物理に興味を引かれました。最近ではあまり見かけなくなった、ガラスデュワーに液体ヘリウムを汲んで減圧すると、超流動転移を実際に目で見ることができます。突沸が超流動転移温度の2.1 Kで突然消え、ものすごくきれいな状態の液体になった時には本当に感動しました。さらにデュワーの中に用意した小さい容器に超流動ヘリウムを入れると、穴も開いていないのに液体がぽたぽた垂れる！さらに外から白熱電球でデュワーを照らすと、輻射熱で液体ヘリウムは常流動状態に戻り、ぽたぽた垂れるのが止まる！詳細をご覧になりたい方は、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻・福山研究室のホームページをご覧下さい：http://kelvin.phys.s.u-tokyo.ac.jp/fukuyama_lab/japanese/research/helium.html（動画では、液体ヘリウムが淡い青色っぽく見えますが、これは液体ヘリウムを見やすくするように硫酸銅水溶液が撮影するガラスデュワーの奥に置かれているからで、実際の液体ヘリウムは無色透明です！)。

３．希釈冷凍機を用いた極低温研究

低温に興味を引かれた私は、福山研究室で学位を取ることにしました。そこではいろんな研究に携わらせて頂いたのですが、私が最も力を入れたのは、グラファイト表面での量子ホール状態の実空間観測です。2005年にグラフェン（グラファイトシート1枚）の量子ホール効果に関する研究が報告され、2010年にはノーベル物理学賞の受賞対象となりましたが、実は我々も薄いグラファイトの研究をほぼ同時期に行っていました。天然にできる単結晶グラファイトに比べ、人工的に作った結晶には、多数の積層欠陥が存在するため、電子の感じる有効的な厚みが20層程度と比較的薄い状況が実現します。その最表面の電子状態を、希釈冷凍機温度で作動する走査トンネル顕微鏡で調べるという研究を博士課程で行いました。その結果、教科書で見る絵と同じように、ランダウ準位の

谷のエネルギーでは不純物にトラップされた電子状態、またランダウ準位のピークのエネルギーでは試料全体に広がった電子状態を、実空間でマッピングすることに成功しました[1,2]。

さらに学位を取得後、日本学術振興会の博士研究員時代には、フランス・グルノーブルにあるネール研究所で極低温度における量子コヒーレンスの研究に携わってきました。この研究では、「フェルミ液体論が温度ゼロの極限まで本当に正しいのか？」という低温物理の根幹に関わる問題に取り組みました。この問題は1990年代後半に行われたMohantyら[3]によるフェルミ液体論の破れを示唆する実験に端を発して、低温メゾスコピック物理の分野では大きな論争となっていましたが、我々はそれまでに使われていた金属細線ではなく、GaAs/AlGaAsヘテロ構造に形成される2次元電子ガスという通常の金属よりも圧倒的にクリーンな系を用いて実験を行った結果、フェルミ液体論がやはり正しいことを支持する結果を得ることができました[4]。

4．応用を重視したスピントロニクス分野での研究

その後、私は東京大学物性研究所の大谷研究室で助教となり、スピントロニクス研究を開始しました。実は大谷研究室に入るまでスピントロニクスのことをほとんど知りませんでした。しかし、フランスで博士研究員をやっていた2007年に、パリ南大のAlbert Fert教授が巨大磁気抵抗効果[5]の発見でノーベル物理学賞を受賞され、その研究内容を同僚と議論していたこと、また大谷先生の行われている研究がかなり基礎寄りで、メゾスコピック物理の範疇で議論できるような内容だったので、これまで自分のやってきた研究から外れているという感じもしませんでした。

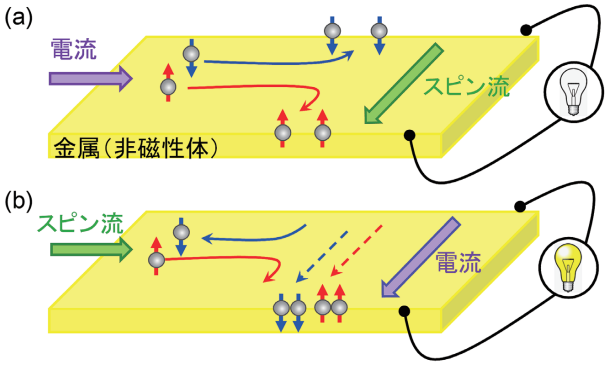

図1. スピンホール効果を用いることで(a)に示すように、電流からスピン流への変換が可能となる。しかし非磁性体中では、スピンアップとスピンダウンの電子は同数個存在するので、電圧信号としては取り出せない。逆に(b)に示すように、スピン流を注入すれば、スピンホール効果の逆変換が生じ、電圧信号として取り出せる。

ただ、まさか着任後すぐにFert先生と共同研究をさせて頂けるとは思ってもいなかったので、それが分かった時にはとてもうれしかったのを今でもよく覚えています。共同研究の目的は、スピン軌道相互作用の弱い銅に、添加物を入れることで、スピンホール効果を生み出す、というものでした。

歴史的に、電流からスピン角運動量の流れである「スピン流」を生み出すスピンホール効果（図1）は、1971年にDyakonov-Perel[6]によって提唱されていましたが、およそ30年もの間、忘れられていました。1999年にHirsch[7]によって再びスピンホール効果が理論的に提唱されると、2004年に半導体GaAs[8]で、2006年には金属[9]でも観測され、特に白金を用いたスピンホール効果[10]が発表されて以降、多くの研究で白金が用いられています。しかし、白金は高価で将来のデバイス応用を見据えた時、量産化が困難であること、また白金は単体金属なので、スピンホール効果の大きさを増強することはできないことなどの問題がありました。

これらの問題を解決できるのが、銅合金で発現するスピンホール効果です。銅自体は、スピン

軌道相互作用が弱いので、スピンホール効果は発現しませんが、そこにさまざまな種類の不純物を添加することで、その大きさや符号までを制御できます。実は似たような研究は1981年にFertら[11]によって行われておりましたが、彼らの研究はスピン偏極電流を作り出すため、磁性不純物であるマンガンがさらに添加されており、純粋な意味でのスピンホール効果ではありませんでした。そこで、マンガンを取り除いた銅合金でスピンホール効果の測定を行ったところ、銅Cuにイリジウム Irを混ぜたCuIr合金では白金Ptと同程度の大きさのスピンホール効果を得ることができました[12]。さらに、Irの代わりにスピン軌道相互作用の大きなビスマスBiを微量加えたCuBi合金を用いると、図2に示す通り、スピンホール効果の大きさをさらに増強することに成功しました[13]。またスピンホール効果を定量的に評価する、という他のスピントロニクス研究者があまりやらないことにこだわって研究を進めてきました[14-16]。

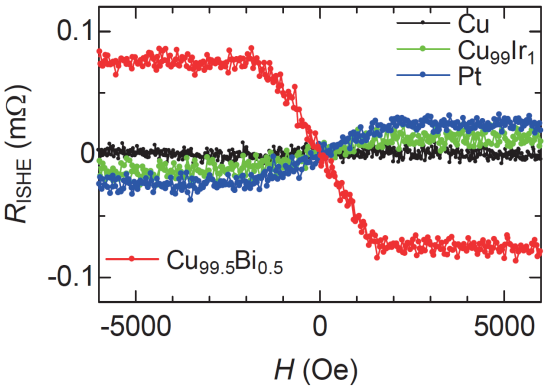

図2. さまざまな金属のスピンホール効果。

上記の研究成果を学会などで発表すると、「どうして測定を低温でやっているのか？」、「室温で役立つデバイスはできるのか？」、という質問をよく受けました。確かに上述したスピンホール効果は、量子ホール効果や量子コヒーレンスの研究と違って、室温でも発現する現象ですが、今まで低温物理の分野で生きてきた私にとって、低温で実験することはごく普通だったこと、またスピンホール効果の発現機構を詳細に調べる目的もあって、常に冷凍機を使って測定を行っていました。さらに、スピントロニクス分野の大多数の人が考える「室温で役立つデバイス」ということにもあまり興味のベクトルが向きませんでした。それらの要因で、何かスピンホール効果やスピン流という概念を使って、工学的にではなく理学的に面白いことができないかと、考えるようになりました。そうして思いついたのが、次節で詳細を述べる「低温でしか発現しない面白い物理現象を、スピン流という手法で観測する」という方向性です。

5．スピン流をプローブとした新たな研究を目指して

スピン角運動量の流れであるスピン流をプローブとして新しいスピン物性を開拓する、という方向性を導いたきっかけとなった研究が、図3に示す、強磁性体転移温度T_C近傍でのスピン揺らぎを、スピンホール効果を通して電気的に検出した実験[17]です。通常の磁化測定では微小な磁性体に対して、高次の磁化率を精度よく検出することは難しいですが、この研究ではスピンホール効果を用いて、ナノメートルスケールの磁性体の2次の磁化率を検出することに成功しました。また最近では、上記の研究を発展させて複雑な磁化ダイナミクスをもつ「スピングラス」でも同様の実験を行い、通常の磁化測定では検出できないスピングラス温度（磁気モーメントが固化し始める温度）以上での磁気揺らぎを、スピンホール効果を用いて観測しました[18]。現在、上記の研究をさらに深く掘り下げ、一般的なスピン揺らぎとスピン流との相関を詳しく調べ、学理を構築するような研究に取り組もうとしています。

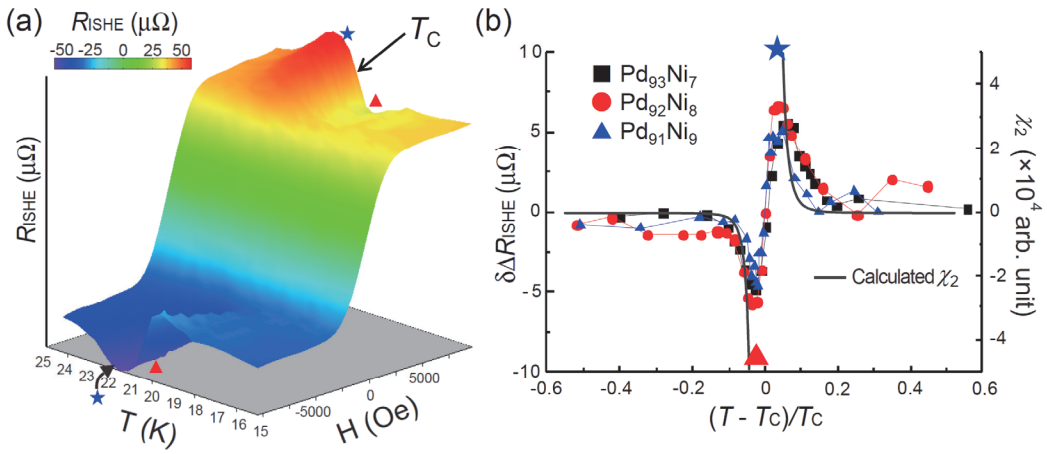

図3. (a) 強磁性体PdNi合金のスピンホール効果。強磁性体転移温度TC近傍でのみスピンホール効果の信号に異常が現れている。(b) 異常部分のみをT_Cで規格化した温度でプロットすると、Ni濃度に依らず、異常が普遍的であることが分かる。理論計算と比較すると、この異常が2次の磁化率で定性的に説明できる。

またもう1つの方向性が、スピン流と超伝導体の研究です。一般に、スピン流の基となる磁性とs波スピン1重項超伝導体は互いに相容れない特性を持ちます。しかし近年の微細加工技術の発展より、超伝導体と強磁性体の接合をナノメートルスケールで制御した素子を作製することができるようになり、これまで理論的にしか扱われてこなかった特異な現象を、実験的に調べることが可能になり始めています。例えば最近我々は、スピン軌道相互作用の強い超伝導体とスピン流の関係を調べ、スピン緩和時間が超伝導体中では数倍にわたって増大すること[19]、さらにはクーパー対が壊れた状態である「準粒子」を介した新しいタイプのスピンホール効果を観測し、常伝導状態に比べて超伝導状態では信号が1000倍以上に増強することを見出しています[20]。さらにこれらの研究を、エキゾチック超伝導体と呼ばれる、通常のBCS理論では理解されない超伝導体に応用して、実験を行うことを計画しているところです。

上述したように、これからさらに寒剤が必要となる新規な低温スピン量子物性実験を行っていきますので、今後とも宜しくお願い致します。

文献

1. Y. Niimi, H. Kambara, T. Matsui, D. Yoshioka, and H. Fukuyama, Phys. Rev. Lett. **97**, 236804 (2006).
2. Y. Niimi, H. Kambara, and H. Fukuyama, Phys. Rev. Lett. **102**, 026803 (2009).
3. P. Mohanty, E. M. Q. Jariwala, and R. A. Webb, Phys. Rev. Lett. **78**, 3366 (1997).
4. Y. Niimi, Y. Baines, T. Capron, D. Mailly, F.-Y. Lo, A. D. Wieck, T. Meunier, L. Saminadayar, and C. Bäuerle, Phys. Rev. Lett. **102**, 226801 (2009).
5. M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, P. Etienne, G. Creuzet, A. Friederich, and J. Chazelas, Phys. Rev. Lett. **61**, 2472 (1988).
6. M. I. Dyakonov and V. I. Perel, JETP Lett. **13**, 467 (1971).
7. J. E. Hirsch, Phys. Rev. Lett. **83**, 1834 (1999).

8. Y. K. Kato, R. C. Myers, A. C. Gossard, and D. D. Awschalom, Science **306**, 1910 (2004).
9. S. O. Valenzuela and M. Tinkham, Nature **442**, 176 (2006).
10. E. Saitoh, M. Ueda, H. Miyajima, and G. Tatara, Appl. Phys. Lett. **88**, 182509 (2006).
11. A. Fert, A. Friederich, and A. Hamzic, J. Magn. Magn. Mater. **24**, 231 (1981).
12. Y. Niimi, M. Morota, D. H. Wei, C. Deranlot, M. Basletic, A. Hamzic, A. Fert, and Y. Otani, Phys. Rev. Lett. **106**, 126601 (2011).
13. Y. Niimi, Y. Kawanishi, D. H. Wei, C. Deranlot, H. X. Yang, M. Chshiev, T. Valet, A. Fert, and Y. Otani, Phys. Rev. Lett. **109**, 156602 (2012).
14. Y. Niimi, D. H. Wei, H. Idzuchi, T. Wakamura, T. Kato, and Y. Otani, Phys. Rev. Lett. **110**, 016805 (2013).
15. Y. Niimi and Y. Otani, Rep. Prog. Phys. **78**, 124501 (2015).
16. 大谷義近，新見康洋，固体物理 **50**, 575 (2015).
17. D. H. Wei, Y. Niimi, B. Gu, T. Ziman, S. Maekawa, and Y. Otani, Nat. Commun. **3**, 1058 (2012).
18. Y. Niimi, M. Kimata, Y. Omori, B. Gu, T. Ziman, S. Maekawa, A. Fert, and Y. Otani, Phys. Rev. Lett. **115**, 196602 (2015).
19. T. Wakamura, N. Hasegawa, K. Ohnishi, Y. Niimi, and Y. Otani, Phys. Rev. Lett. **112**, 036602 (2014).
20. T. Wakamura, H. Akaike, Y. Omori, Y. Niimi, S. Takahashi, A. Fujimaki, S. Maekawa, and Y. Otani, Nat. Mater. **14**, 675 (2015).