

## 2021/4/9 物理化学特論 II 出席者からのコメントと回答

チャージカレントに対照しながら、スピントロニクス理論モデルの構成に対して、個人的に印象が強いです。 $\alpha$ の時間依存性の下での導出によって、スピン wave とその 0 抵抗の本質を理解できました。自分がパソコンのパーツについて興味を持っていますので、その 0 抵抗の特徴は特に gpu 業界に新たな可能性をもたらすと思います。また、現在の業界 cpu、gpu 業界の生産ラインはまだマクロからきりわりの手法に留まっています。マイクロから合成するプロセスが表に出ることこそが化学者の達すべき目標の 1 つではないかと思っています。

スピン波(マグノン)を用いた情報伝送は、低消費電力動作を実現させます。マグノニクスという研究分野も進展しています。微細加工技術によるデバイス作製が top down 式であれば、分子設計からの bottom up アプローチは正に化学の強みが活きる部分だと思います。

In today's lecture, I feel interested in Spin-Hall Effect (SHE). It's quite interesting that the spin distribution would change when there is no magnetic field with spin orbit interaction. In that case, the electron spin can be controlled electrically.

Spin Hall effect without magnetic field is one of the innovative technologies. Chemistry becomes important to the material design and development to enhance SHE and related spintronics performance.

スピン流の概念は理解できたのですが、それがどうして記憶媒体になるのかよくわかりませんでした。材料化学をやりたいと思っていますので、記憶媒体の仕組みについて学び直そうと思いました。磁化をコントロールするということや Slater-Pauling curves のあたりもよくわかりませんでした。さまざまな合金で性能を見るということや、磁化の評価ということは、材料化学的であり、非常に興味がわきました。磁化やメモリーに関するおすすめの文献があれば教えていただきたいです。

効率的にスピン流を生成する材料、高記録密度材料など、化学のセンスが必要な段階です。磁気メモリーの最前線については、ネットなどで検索して調べてみてください。

授業後質問もさせていただき、とても興味深く聞かせていただきました。磁気円二色性についてはおぼろげに知ってはいたのですが、元素別の対称性を反映したデータが取れる点について初めて知りました。わたしはしばらく扱わないと思うのですが、複雑な金属結晶などを扱いたいときに強力な手法だと感じました。最近結晶学の基礎的な勉強をしているのですが、fundamental な回折実験以外にも様々な面白い手法があるのは楽しみに感じました。

内殻分光の利点は、元素別に調べられることを強調しました。今回は話せませんでしたが、局所構造を決定する EXAFS も重要です。また、放射光の偏光を使って、対称性の議論ができます。

グラフェンやフラーレンがスピントロニクスに利用されていることに興味が湧いた。炭素の構造の選択性が巡り巡って磁性の分野で役立つところに科学の醍醐味を感じた。また、分子磁性では M-H プロットが綺麗な曲線にならないことが強く印象に残った。小型化を極めた次には一つのユニットで記録できる情報量を増やす方向に切り替えるというのは量子コンピュータ等にも通じる現代らしいアプローチであると思う。

炭素系の長所(軽い)を使って高速情報伝送に応用し、スピントロニクスと融合させる戦略はとても面白いです。異分野融合による研究がいろいろ進んでいます。分子を扱うケミストの出番ですね。

本日の授業について、電子の移動を伴わないスピン流を用いることで無駄な熱の発生を防げることや、量子化された磁化を用いた多段階のスวิตチングなど、興味深い点がいくつかありましたが、特に興味を持ったのはある分子(クラスター)について元素別に磁気モーメントを測定できるという点についてでした。

MCD についてあまり詳しくは無かったのですが、あるクラスターについてそれぞれの元素の磁性を測定できるというのはとても便利だと思ったので、自分でもまた詳しく調べてみようと思います。内殻分光を使って、元素別に電子状態、磁性、構造を調べられることを強調しました。是非、自身の研究にも関連するものを調べてみてください。

MRAM の開発、高集積化に興味を持ちました。

不揮発メモリは年々発展していると思っていましたが、ある程度頭打ちだと聞いて驚きました。

MRAM の欠点が、磁荷を反転させるときに隣に影響を与えてしまうとのことですがそれが対策されれば他の方法よりも優れた不揮発メモリの素材として期待できる、夢のある技術だと思いました。

Moore の法則により微細化が進み、原子サイズにまで到達しました。今後は核スピン操作まで進むでしょう。

It was interesting to learn that manipulating the spin state could enable the development of much better recording devices. My research also involves investigating the spin states of molecules, and maybe be applied to solid semiconductors, so I might do similar research. In that case, I would like to refer to this when I do so.

Combining the technologies of both semiconductors and spins is a challenging subject for the development of future devices. Ideas mixing chemistry, physics, and electronics are essential.

現在使われているデバイスに用いられている巨大磁気抵抗効果、トンネル磁気抵抗効果の概要が理解でき、スピントロニクスの展望について知ることができた。

例として単分子磁石(Mn12)によるトランジスタや C-60-Co の物性などが挙げられていて、バルクと同様に巨大磁気抵抗効果を示すことや磁化が量子化することなど、現在のナノデバイスをさらに小さくしたような効果と分子磁性体独自の効果の双方が現れることが興味深かったです。分子磁性体独自の効果を用いたデバイスも研究されているということで、応用も楽しみだと思いました。分子を操るケミストの出番ですね。

とても面白く、興味深い内容でした。私は生物ばかりに興味があり、物理化学全般の知識は乏しいのですが、この講義を聞いて、こちら側にも興味を持ちました。もらった資料を参考にしながら、勉強なおしたいと思います。

生物系を専門にしても、異分野の考え方を知っていると役に立つことが高確率であると思うので、とても大切です。広くアンテナ張って勉強していきましょう。

$\Delta E_B = k \Delta q + \Delta V - \Delta E_R$  という化学シフトについての式を始めて見て、これが、 $^1\text{H NMR}$  の原理にもつながっているという点に興味を持った。結合状態によって、化学シフト値が変化するのは知っていたが、その具体的な原理に関しては理解していなかったからである。また、例として、XPS による PET の測定結果や、グラフェンの ARPES などの有機化合物や炭素化合物の物理化学的な測定結果を見ることで、物理化学的な観点から見ることでどのような物性がわかるのかについて学ぶことができた。

その通り！ プロトン NMR のようにピークシフトから構造を推定できます。内殻分光では水素以外全元素できます。相補的に使って研究を進めるのがいいと思います。

スピン流により電気を伝えることができ、従来の電流を流すことによる熱エネルギーの消費を抑え、八割の省エネを達成できることは画期的だと思い、驚きを感じた。

省エネ技術は、SGDs にも貢献しますね。

電流にかわってスピン流が使われた場合にジュール熱の損失がなくなって実用的に大きな意味を持つことをお聞きしたときに、数式上では非常に単純であまりまえのことにように思えました。しかし現象として実際に実現するのがどれだけ大変なことかと考えたときに、自分の専攻する有機合成の分野と同じだと似たものを感じました。分子の構造式や反応式を書くことは簡単なのに実際にその反応を起こすのは非常に難しいからです。プロトン NMR でスピンを利用していることなどもあり、スピンは有機化学にも大事なものだと思います。自分は理解に困難がありますが、今回の授業でこの分野の研究に少し魅力を感じることができました。

確かに、実証するにはいろいろ困難がつきものです。それを考えていくのが研究であって、うまくいったときは嬉しいものです。

なかなか難しく理解が及ばない部分もあったのですが、Pt クラスターの誘発磁化の話が興味深かったです。クラスターは特異な物性を示しますが、磁性方面での応用は自分の将来の研究の 1 つの参考にさせていただきます。

非磁性体に誘起される磁性を調べるには、元素別に磁性をしらべる XMCD が有力です。是非、将来 XMCD を使って研究をして、論文にしていくとよいと思います。

メモリに使われる新素材の開発に興味を持ちました。他のメモリと比較して MRAM の利点が多いこと、汎用性が高いこと、またデータ容量を大きくするためには特殊な磁気構造を持つ物質が必要であることを学びました。こうした利点の多い MRAM が開発されて耐久性などに懸念がなければ近い将来広く普及するのではないかと思います。

日々研究が進んでいくので、今後も技術革新があると思います。化学のセンスも必要になります。

I am interested in controlling spin orbits since spintronics is very useful in data storage and memory designing. Previous research has revealed tunnel magnetoresistance based on magnetic tunnel junction, where electrons can tunnel from one ferromagnet into the other. The resistance is large when spin states are different in two ferromagnets, which forms the basis of nonvolatile memory. Like an electric current, spin also generates current and has Hall effect, from which by

setting the reading line and writing line perpendicular, powerful memory (MRAM) can form. The speed and writing times increase from simple flash memory to memories based on strong magnetic hysteresis. Because of the spin Hall effect, spin distribution can be achieved without a magnetic field but with an electric field. If I have the chance in the future, I want to discover more about how to modify and control the spin distribution and even its deeper mechanism, like the coupling effect and other quantum mechanics.

I hope your future challenges to discover novel spin controlling and to clarify the operation mechanisms.

spin current によって今までとは比較にならないほどの高効率で電気信号の伝達ができたり高耐久なメモリを作れる可能性があることに驚きました。また化合物全体ではなくそれぞれの原子の種類ごとのスピンのわかるのは色々なことに応用できそうだと思います。とても面白い内容でよかったです。

今回はスピントロニクスを切り口に材料開発の重要性を話しました。機能性材料開発とその精密な評価(元素別)の面白さが少しでも伝わればありがたいです。

興味を持った部分:スピン流を用いたデバイス開発については、電流を用いる必要がないためにジュール熱が発生しない。今日我々が使っている PC やスマートフォンといったデバイスではバッテリーが重量の多くの部分を占めるが、この「ジュール熱が発生しない」という特性は、現在のデバイスでジュール熱として失われているエネルギーを減らすことにつながる。研究室では電池に関する研究を行なっていることから、こういった研究との組み合わせにより、将来的にはバッテリーの重量削減や使用時間の延長などにつながりうるものであり、興味深い。

融合研究により更なる進展が期待できる分野なので、今後考えてみてください。

スピン流・分子磁性の生成について研究が進展していることがわかり、それらが回路上の熱といった物性面での進展に寄与していることがわかりました。ところで、スピン流を利用した化学反応の制御は可能か、あるいはそういった研究はあるのかどうか気になります。スピン流を用いて酸化還元反応等を起こせば生成する分子の電子状態は(少なくとも統計的には)制御できると思われるので、特定の電子状態を生成し他の分子との反応を制御できるのではないかと思います。スピントロニクスと化学の融合はこれから必要な研究分野です。スピン流による反応制御など、最先端であり世界的に未発達です。是非、いろいろ考えてみてください。

垂直磁化は実用化の点で外せないということで、興味深かった。多量にある物質が使えるのか、レアメタルなどが必要になるのか、原理が解明されていくのが楽しみです。

どうしたら垂直磁化の物質を作れるか、化学がどうしても必要な段階です。原理の解明には、内殻(磁気)分光を用いています。

より効率の良い M-RAM の材料として、垂直にスピンが向く物質が探されているというお話に興味を持ちました。例えば、磁性金属の部分を磁性を持つ金属のクラスターなどに置き換えることはできるのでしょうか。超原子の軌道を考えることでスピンの状態をある程度デザインすることができれば、クラスターの場合、ひとつの原子単位の大きさを制御することもでき、spin diffusion の距離

との関係を考えても何か違う特性を持つ記憶媒体を作る材料になるのではないかと思います。磁性分子と本質は同じなのかもしれませんが。また、この授業を受けて、クラスターを作成するにあたって、スピンをデザインするという目的も考えられるようになりました。

内殻吸収分光のお話も非常に興味深かったです。しかし、磁性の紀元をあくまで元素に求めるように感じられたのは意外でした。単原子での磁性を持たない Pt がクラスターとして磁性を持つようになるのは、超原子としての軌道に電子が再配置されたことによると自分では解釈していたので、その磁性が Pt という元素由来のものだと判別できるというのは興味深いと思いました。

超原子の軌道とスピン状態のデザインは世界的にも全く進んでいないのではないかと思います。全く新しい innovation になる可能性があります！是非、研究を進めてみてください！

今日の授業では、シンクロトロン放射が興味深かったです。研究室ではレーザーを用いた研究を行っているので、その研究につながることもあるかもしれないと考えました。

今回は光の話はあまりできませんでしたが、放射光とレーザーの関係性は深いです。理想の光で精密に計測することは科学に必須ですね。

本日の物理化学特論の授業についてですが TMR においてスピンを変えることで抵抗を制御できるのが非常に面白いと感じました。また電荷ではなくスピンを用いて情報を伝えるというのは聞いたことがなく興味深かったです。

スピンによる情報伝送の話をしました。10 年後には全く違う発想のものもあるかもしれないので、研究を進めていきましょう。