

レーザー駆動超高速スピントロニクスとフロケエンジニアリング



佐藤 正寛

茨城大学理学部物理領域及び
理工学研究科量子線科学専攻
masahiro.sato.phys@vc.ibaraki.ac.jp



高吉 慎太郎

ジュネーブ大学
shintaro.takayoshi@unige.ch



岡 隆史

マックスプランク研究所
oka@pks.mpg.de

「磁性体の磁化の向きを限界まで素早く変えたい。」これは次世代情報素子のコアとなりうるスピントロニクス技術であるのみならず、多数スピンの非平衡統計力学として基礎物理学的にも重要な概念である。近年この問題に対して、光を用いた戦略が盛んに議論されている。レーザーパルスの整形・変調、メタマテリアルやプラズモニクスなど光科学分野の実験の進展は目覚ましい。そのような最先端の光技術を上手に使えば、スピンの集団運動にとっての量子力学的な限界速度であるピコ (10^{-12}) 秒という時間スケールで磁化を制御できるのだ。

この「超高速スピントロニクス」の実現には、磁性体と光との結合様式（光・物質結合）や時間変化する外場中における量子系の時間発展（量子ダイナミクス）を理解する必要がある。しかし、多自由度を取り扱う固体物理分野では量子ダイナミクス研究の進歩が遅れていた。その一因として、多自由度の協調現象を扱う基本的な枠組みが整備途上であり、平衡系で慣れ親しんだエネルギーや固有状態などの議論の足がかりを失うことが挙げられる。レーザー中の多体系の解析では「非平衡系の相転移とは何か？ それをどう特徴付けるべきか？」などの疑問の解消が望まれる訳である。

実はこの問題は、磁気共鳴、量子化学、量子光学などのダイナミクスとの関わりが避けて通れない分野においては限定的ながら解決されている。レーザー電磁場を時間について周期的な外場とみなすと、系は離散的な時間並進対称性を持つ。このときエネルギーや固有状態といった概念が復活するのだ。この「フロケ理論」、そして回転枠などへの「ユニタリ変換の方法」を使う

と、時間依存ハミルトニアンが駆動する多体系ダイナミクスを静的な有効ハミルトニアンで理解できるのである。望みの物性が実現するような動的状況を与える外場をフロケ理論の有効モデルからさかのぼって設計することを、物性を操るという意味を込めて「フロケエンジニアリング」と呼ぶ。

多体系のフロケエンジニアリングは、冷却原子系や電子系で発展してきたが、近年磁性体の制御にも適用されはじめている。例えば、標準的な磁性絶縁体に円偏光レーザーを照射し磁化を生成・成長させる方法が提案されている。これはレーザー周波数のエネルギースケールに対応する大きな静磁場が有効モデルに現れることに由来する。

レーザーによるスピン流生成は超高速スピントロニクスの主要テーマの一つであり、特異な光・物質結合を持つマルチフェロイクス（強誘電磁性体）が注目されている。この系ではスピンはレーザーの磁場成分だけでなく電場にも応答する。あるクラスのマルチフェロイクスに円偏光レーザーを照射するとベクトルスピカイラリティ（またはジャロシンスキー・守谷相互作用）が生じることが有効モデル・数値計算から示唆される。これを利用したスピン流の生成、およびその検出方法について、現実的な実験セットアップの理論提案もなされている。

レーザーを用いた物性制御は従来型秩序にとどまらず、系のトポロジカル秩序をも変化させられる。その具体例としてキタエフモデルへの円偏光レーザー印加の研究がある。有効モデルに生じるホッピング項がスピン液体基底状態にギャップをもたらし、系をエッジ状態を持つトポロジカルな状態へと変化させることが予言される。

—Keywords—

フロケエンジニアリング：
フロケの定理はプロックホの定理の時間版で、周期外場中の量子系の波動関数が時間周期関数と動的な位相項の積で書けることを主張する。これを用いると周期外場系を定常系に写像することが可能で、平衡統計力学や固有値問題で確立している戦略が適用できるようになる。特に望ましい性質を持つ有効ハミルトニアンが得られるような周期外場系を考案することをフロケエンジニアリングと呼ぶ。

スピントロニクス：
エレクトロニクスが電子の電荷やその流れ（電流）を活用するのに対し、電荷だけでなくスピン自由度もうまく活用した高速高効率情報処理法の開発を目指す学問分野。この分野で重要な概念の一つがスピン流、すなわちスピン角運動量（より広く角運動量全般）の流れである。電流を伴わないスピン流はジュール発熱の抑制が期待されるので、その生成・制御方法が活発に研究されている。

テラヘルツレーザー：
テラヘルツ周波数帯のレーザーの波形制御・強度増強技術が発展している。この周波数帯に対応するエネルギーは磁気励起、フォノン、超伝導ギャップなどのエネルギーに相当するため、これらの自由度に関する光物性研究が活発に行われている。

ジャロシンスキー・守谷相互作用：
スピン軌道相互作用に由来する磁性絶縁体の磁気異方的相互作用の一つ。隣接スピン同士の外積で定義され、対称性の低い磁性結晶でしばしば現れる。本記事で解説するように、このような磁気異方的相互作用をレーザーで制御することが可能である。