

密度波のダイナミクス

— Review —

東京大学大学院総合文化研究科 前田 京剛¹

無機擬一次元物質遷移金属トリカルコゲナイド MX_3 やモリブデンブルーブロンズ $\text{K}_{0.3}\text{MoO}_3$ においては、電荷密度波 (CDW) の、また、有機擬一次元物質 TMTSF 塩では、スピン密度波 (SDW) の滑り運動が観測される。本講演では、それらの研究の歴史、理解の現状をレビューし、いくつかの未解決の問題点を指摘し、さらに、現在盛んに研究されている強相関電子系における類似現象との関連について議論した。

1 電荷密度波の集団運動

低次元金属は、低温で様々な秩序状態を形成する。その代表的なものが電荷密度波 (CDW) [1] やスピン密度波 (SDW) である。とくに、擬一次元物質では、それらの密度波 (DW) が集団的に電気伝導に寄与することが知られている。[2, 3, 4, 5]

それらの現象としての特徴を列挙すると、

- (a) 小さなしきい電場 E_T をもつ非線形電気伝導
- (b) マイクロ波程度に共鳴構造をもつ交流伝導度と巨大誘電率
- (c) 洗濯板振動や巨大ノイズの発生、それらとの干渉効果、カオス
- (d) 準安定の諸現象

などである。これらの集団運動のスケールは、準巨視的であると考えられる。

CDW の集団運動の理論的理解に関しては、

- (a) 荷電物体の古典的運動
- (b) 巨視的量子トンネル

の二つの立場があったが、100 GHz 程度までの交流伝導度測定から、前者の立場が適当であることがほぼ確立している。

CDW の運動で特に面白いのは、フェルミ面のネスティングがほぼ完全におこる半導体ベースの物質 (TaS_3 , $\text{K}_{0.3}\text{MoO}_3$ など) が低温で示す裸の CDW の運動である [6, 7]。このような物質では、準粒子による CDW の変形の遮蔽が十分でなくなるため、スイッチングを始めとする多彩な現象が観測される。このような状態では、準粒子がないため、CDW のダイナミクスの運動の詳細に関して、多くの具体的イメージを構築することが可能である。[8, 9]

¹E-mail: maeda@maildbs.c.u-tokyo.ac.jp

2 スピン密度波の集団運動

CDW が電子格子相互作用によって主に引き起こされていたのに対して、クーロン相関がやや強まると、交換相互作用によって、SDW が実現する。特に、Bechgaard 塩 $(\text{TMTSF})_2\text{A}_x$ では、SDW の集団運動が観測される [4]。理論的には、SDW は格子変形を引きずっていないのでその集団運動の有効質量はバンド質量程度と考えられているので、巨視的量子効果が期待できる。また、秩序パラメーターが電荷でなく、スピンであることから、SDW 状態でのみ存在する新たなモードがある。とくに、前者の巨視的量子効果の観測の可能性は興味深い。

TMTSF 塩に対して行われた交流伝導度測定によれば、予想に反して、集団モードの振動子強度は非常に小さく、これをモードの有効質量で表現すると、バンド質量の 100 倍程度になり、CDW の場合とさほど変わらない値が得られている [4]。

なぜ SDW の集団モードに対して、このような小さな振動子強度が得られるのかは今に至っても未解決である。福山は、この問題を、TMTSF 塩の電子状態を、TMTSF 分子の二量体化を仮定し、出発点を $1/4$ フィリングでなく、 $1/2$ フィリングとすることによって解決できる可能性を提案している [10]。すなわち、 $1/2$ フィリングの電子相関のある系では、モットギャップがあいた絶縁体であるが、フィリングが $1/2$ よりわずかにずれることにより、そのずれに比例したドルーデ成分が出現することが理論的には知られている [11, 12, 13, 14]。従って、振動子強度が小さいことを必ずしもモードの有効質量と捕らえなくとも、解決の道が見出せるというのである。この解釈は、強相関電子系の一見異なる異なる現象とのあいだにも類似性が成り立つことを示唆するものである。

3 強相関係での関連する現象

2DEG 系では、強磁場下でウィグナー結晶が実現していると考えられているが、この二次元系のウィグナー結晶が、前節、前々節で議論したのと同様の集団運動を示すことが実験的に示唆されている [15, 16, 17, 18, 19, 20]。理論的解析もいくつかあるが、細部では、実験との一致が見られていない [21, 22]。いずれにしても、二次元の固体電子系で、「密度波」の集団運動が観測されるのは、珍しい。

いわゆる「ストライプ秩序」の形成が提唱されている、高温超伝導体 $\text{La}_{2-x-y}\text{Nd}_y\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ 系で、ストライプ秩序の集団運動が捕らえられないかについて実験が行われたが、結果は否定的である [23, 24]。

銅酸化物高温超伝導体の親戚物質である擬一次元スピンラダー系 $\text{Sr}_{14-x}\text{Ca}_x\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$ では、Ca 濃度 x の小さいところのみで、同様の集団モードが観測される [25, 26, 27]。この集団モードは、同物質にたいして可能性が示唆されている電荷秩序によるものと考えられるが、このモードについても、SDW 系同様、振動子強度が非常に小さいことがわかり、その原因については未解決である。

希望的観測としては、近い将来、これらの現象が、強相関の電子物性の視点から統一的に理解されることにより、新しいコレクティブモードの概念が形成されるのではないだろうか。

参考文献

- [1] R. E. Peirels: Quantum Theory of Solids, Oxford University Press (1955) chap. 5.
- [2] H. Frohlich: Proc. R. Soc. London Ser A223 (1954) 296.
- [3] G. Gruner: Rev. Mod. Phys. 60 (1988) 1129.
- [4] G. Gruner: Rev. Mod. Phys. 66 (1994) 1.
- [5] 内野倉國光, 前田京剛, 「擬一次元物質の物性」(物理学最前線 28) (共立出版, 1991).
- [6] W. Folge and J. H. Perlstein: Phys. Rev. B6 (1972) 1402.
- [7] A. Maeda, T. Furuyama and S. Tanaka: Solid State Commun. 55 (1985) 951.
- [8] A. Maeda *et al.*: Phys. Rev. B36 (1987) 7709.
- [9] M. Notomi *et al.*: Phys. Rev. B42 (1990) 3302.
- [10] H. Fukuyama: private communication.
- [11] V. Emery *et al.*: Phys. Rev. Lett. 48 (1982) 1039.
- [12] T. Giamarchi: Phys. Rev. B44 (1991) 2905.
- [13] V. Emery and T. Giamarchi: Phys. Rev. B.
- [14] M. Mori, H. Fukuyama and M. Imada: J. Phys. Soc. Jpn. 63 (1994) 1639, 65 (1996) 3604.
- [15] 吉岡大二郎, 本研究会の報告
- [16] A. Goldman *et al.*: Phys. Rev. Lett. 65 (1990) 2189.
- [17] Y. P. Li *et al.*: Phys. Rev. Lett. 67 (1991) 1630.
- [18] Y. P. Li *et al.*: Solid State Commun. 99 (1996) 255.
- [19] C. C. Li *et al.*: Phys. Rev. Lett. 79 (1997) 1353.
- [20] L. W. Engel *et al.*: Solid State Commun. 104 (1997) 167.
- [21] H. Fukuyama and P. A. Lee: Phys. Rev. B18 (1978) 6245.
- [22] R. Chitra *et al.*: Phys. Rev. Lett. 80 (1988) 3827.
- [23] T. Adachi and Y. Koike: unpublished.
- [24] S. Tajima *et al.*: Europhys. Lett. 47 (1999) 715.
- [25] H. Kitano *et al.*, *submitted*.
- [26] 北野晴久, 本研究会の報告.
- [27] 井上亮太郎, 本研究会の報告.