

実空間—運動量空間—秩序パラメーター空間におけるゲージ構造

東京大学 工学系研究科 永長 直人¹

1 はじめに

固体中の電子がどのような環境で運動しているのか？ これは固体物理学において、最も基本的な問題である。この問題を考える上で、重要な手掛かりを与えるのがゲージ理論である。固体電子論におけるゲージ構造は今まで体系的に扱われることがなかったが、良く考えて見てみると実は至る所で顔を出しているのである。本稿では、そのいくつかの側面を概観することで今後の発展の方向を考えてみたい。

2 ゲージ場とは

ゲージとは本来”もの指し”、あるいは”秤”を意味する言葉である。物理量を観測するためには、必ずそれを測定する器械が必要である。古典物理学（ニュートン力学）においては、このもの指しが時空の点に依らない絶対的なものであると考えるのに対し、特殊相対性理論においてはそれが慣性系に依るものであること、さらに一般相対論では慣性系と加速度系の区別もなくなって、局所的な座標系が各点で定義されることは良く知られている。このように各点で異なった座標が定義されている時には、それらの間を関係つける必要が生じる。これが”接続”の概念であり、この接続が重力を表す時空の曲率と結びついているというのがアインシュタインが見出した物理原理であった。ワイルはこのアイデアをスケール変換の自由度を持ち込むことで拡張し、電磁場をも含む統一理論の建設を試みたが、これを廃棄し当時勃興した量子力学に現れる波動関数の位相に関する変換に置き換えた。[1] これが現在我々が日常的に使っている”ゲージ変換”である。しかし同時に、電磁場と時空とのつながりも失われてしまった。

3 固体電子に対するゲージ場

一方、固体中の電子はもちろん電磁場と結合しているが、そればかりでなくしばしば物質内部の”場”をあたかも電磁場のように感じるようになってきた。例えば、良く知られた例としてスピンの自由度が存在するモット絶縁体に電荷担体をドーピングした場合は、複数のスピンの作るスピンのカイラリティというものがゲージ場として電荷担体に働くことが知られており、これが高温超伝導／スピン液体のゲージ場理論 [2] の基本的アイデアである。つまり実空間において、秩序変

¹ E-mail: nagaosa@appi.t.u-tokyo.ac.jp

数の時間的、空間的揺らぎが電子にとってゲージ場として働くわけである。一方で、スピンの秩序状態でその向きが定まってしまった場合にも、スピナー軌道相互作用や、静的なスピнкаイラリティーが存在する時には単位胞で積分するとゼロになってしまうが、やはり実効的なゲージ場が現われる。結晶の並進対称性が保存されている場合、結晶運動量空間でブロッホ波動関数のベリー位相接続つまりゲージ場を定義することができる。しかも、バンド交差点がこのゲージ場の湧き出し、または吸い込みとして働き、その分布を決定している。つまり運動量空間における磁気モノポールに対応するわけである。[3] この運動量空間におけるゲージ場はホール伝導度と直接関係しているが[4, 5]、さらに運動量空間を外部パラメーターを含んで拡張することで電気分極を始めとする、多くの物理的性質を記述することができる。その例としては、各種のピエゾ効果[6]、電気・磁気効果[7]などが挙げられる。また、磁気モノポールの存在下では一つのゲージで波動関数の位相を決めることが出来ず、“パッチ構造”を導入する必要がある。この非自明な位相幾何学的構造が、超伝導の秩序パラメーターにノード構造をもたらすことなどを示すことが出来る。[8]

4 固体電子論の統一理論 ?

このように考えてくると、固体電子論において、実空間—運動量空間—秩序パラメーター空間におけるゲージ構造が電子の(少なくとも散逸を伴わない)応答を決定していることがわかる。物理学をすべて幾何学化しようとしたアインシュタインの夢が固体において実現できるのではないかと考えるのは妄想であろうか? 将来の研究の発展に期待したい。

参考文献

- [1] 内山 龍雄 “一般ゲージ場論序説” (岩波書店、1987).
- [2] N.Nagaosa and P.A.Lee, Phys.Rev.Lett.**64**, (1990) 2450.
- [3] M.Onoda and N.Nagaosa, J. Phys. Soc. Jpn. **71**, (2002) 19.
- [4] Y.Taguchi, Y.Ohhara, H.Yoshizawa, N.Nagaosa, and Y.Tokura, Science **291** (2001), 2573.
- [5] S.Onoda and N.Nagaosa. to appear in Phys. Rev. Lett. (2003).
- [6] R. Shindou and N. Nagaosa, Phys. Rev. Lett. **87** (2001), 6801.
- [7] R.Shindou and N.Nagaosa, cond-mat/0301414.
- [8] S.Murakami and N.Nagaosa, Phys. Rev. Lett. **90**, (2003) 057002.