

トポロジカル絶縁体の表面電子構造

松 田 巖

東京大学物性研究所 ☎ 277-8581 千葉県柏市柏の葉 5-1-5

(2011年1月6日受理)

Surface Electronic Structure of a Topological Insulator

Iwao MATSUDA

Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo
5-1-5 Kashiwanoha, Chiba 277-8581

(Received January 6, 2011)

The present article systematically describes surface electronic structure of the topological insulator through a comparison with various types of surface states. Followed by explanations of the state-of-the-art spin- and momentum-resolved photoemission experiments, recent reports of spin-polarized band dispersion of the edge-state (surface state) of the three-dimensional topological insulators are presented.

KEYWORDS : quantum spin Hall effect, Rashba effect, topological insulator

1. はじめに

単結晶を切断するとバルクと真空の境界面として“表面”が生まれる¹⁾。表面の電子状態（表面状態）は2次元電子系を成し、さらに新しい化学結合の形成（表面再構成）や表面垂直方向の非対称ポテンシャルによって表面特有の電子・スピン状態を形成する。最近、世界中で研究が行われている（3次元）トポロジカル絶縁体も、この表面状態が重要な役割を果たしている。トポロジカル絶縁体とは量子スピンホール系の物質で、内部（バルク）は絶縁体である（バンドギャップがある）が、表面はギャップレス（バンドギャップがない）で、その表面状態（エッジ状態）は Fig. 1 のようにスピン流を運んでいる。この（純粋な）スピン流はクラマース対（Kramers pair）と呼ばれ、Fig. 1 のように上向きスピンと下向きスピンとが互いに逆向きに同じ量流れていて電流を伴わない。トポロジカル絶縁体ではこのスピン流はトポロジーで定義される量により、非磁性不純物等による散乱から保護されている。すなわちトポロジカル絶縁体と言う名称の「絶縁体」はバルクのことであり、通常

の絶縁体と区別されるのはその物質の端にトポロジカルに保護されたギャップレス状態が存在するからである。量子スピンホール効果におけるトポロジー理論や量子ホール効果との関係などを含めた解説としてすでにわかりやすいものがあるので、詳細はそちらを参照していただきたい²⁻⁴⁾。本稿では（3次元）トポロジカル絶縁体について従来の表面状態と比較しながらその表面電子構造を説明し、また3次元トポロジカル絶縁体の実証実験となったスピン分解光電子分光実験を紹介する。

2. ディラック方程式

物質の電子状態を記述するのに一般的にシュレディンガー（Schrödinger）方程式が用いられるが、スピン偏極した電子状態を系統的に理解するにはディラック（Dirac）方程式から出発した方がわかりやすい。自由粒子系ではそれぞれの方程式は以下ようになる。 \mathbf{p} を運動量ベクトルとすると、

シュレディンガー方程式：

$$\frac{\mathbf{p}^2}{2m}\Psi = i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}$$

ディラック方程式：