

一次元 Mott 絶縁体の非線形輸送

東京大学 理学部 岡 隆史¹

Mott 絶縁体と強電場による絶縁破壊 バンド絶縁体に強い電場をかけると、量子トンネル効果により電子と正孔が対生成し絶縁性が失われる Zener 破壊現象が起きることが古くから知られている。ところが、Mott 絶縁体のように、強い電子相関により絶縁体となっている物質の強電場下での輸送問題の理解はまだ進んでいない。典型的な一次元 Mott 絶縁体である銅酸化物 SrCuO_2 等に対する実験により、実際の絶縁破壊現象が量子効果によるものであり、遅延時間 (delay time) などの興味深い時間依存性を伴うものであることが明らかにされている [1]。我々は多体 Zener 破壊の立場からこの現象を解析した [2]。

強い電場下の一次元 Hubbard モデル 強い電場中の一次元 Hubbard モデルの振る舞いを調べる。電場 F は時間変化する AB 位相 $\Phi(t) = FLt$ を用いて実現した (L はシステムサイズ)。時間依存シュレディンガー方程式 $i\hbar \frac{d}{dt} |\Psi(t)\rangle = H(\Phi(t)) |\Psi(t)\rangle$ を克蘭クニコルソン法により数値積分した結果、系を流れる電流 $J(t)$ の振る舞いが電場の強さにより AB 振動の見える弱電場極限 (断熱過程) から、自由電子と同じ振る舞いを示す強電場極限までクロスオーバーすることが分かった (図 1)。

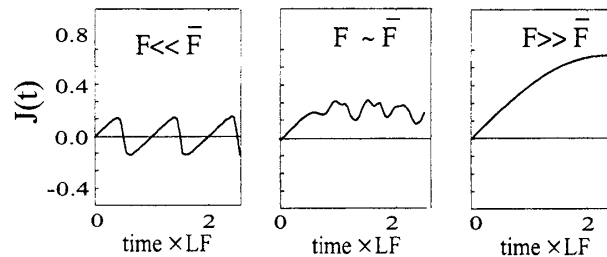


図 1: 電場 F をかけた half-filled Hubbard モデルの電流値の時間変化。(a) 弱電場 (断熱極限); 基底状態の AB 振動が見える。(b) 中電場 (臨界電場 $\bar{F}$ 程度の電場); 連続した非断熱遷移のため細かく振動する。(c) 強電場 (非断熱極限); 自由電子とほとんど同じ時間発展が見える。

非断熱遷移と IV 特性 時間依存シュレディンガー方程式の直接積分で明らかになった絶縁破壊現象は量子非断熱遷移によって定量的に理解できる。電場中の時間発展は断熱スペクトルの固有状態の (1) 動的、幾何学的位相の変化 (2) 状態間の Landau-Zener 遷移、によって理解できる。断熱スペクトルとは AB 位相 Φ を変化させた時の $H(\Phi)$ の固有状態の族のことである。特に基底状

¹E-mail: oka@cms.phys.s.u-tokyo.ac.jp

態から電荷励起状態への遷移の起きやすさは Zener 破壊の目安を与え、臨界電場は Landau-Zener の公式から、 $\bar{F} = \frac{\Delta^2}{D a}$ と見積もられる。ここで Δ は励起ギャップの大きさであり、 D は相互作用がない時の輸送係数、 a は格子定数である。トンネル確率は電場 F と臨界電場 $\bar{F}$ の比 $F/\bar{F}$ のみに依存するため、IV 特性を $F/\bar{F}$ に対してプロットするとユニバーサルな振る舞いが見える (図 2)。

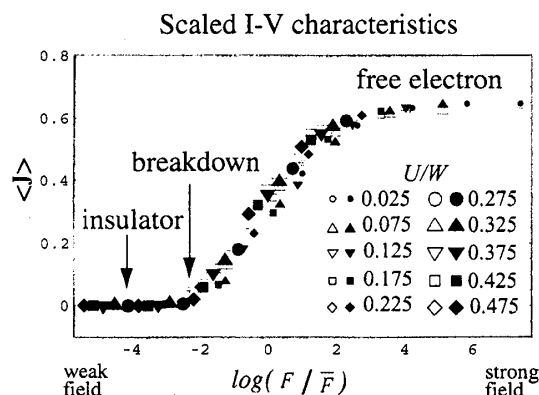


図 2: 電流の積分値 $\langle J \rangle \equiv \frac{1}{T} \int_0^T \langle J(t) \rangle dt$ を臨界電場 $\bar{F}$ で規格化した電場 $F/\bar{F}$ に対してプロットしたもの。 $\langle J \rangle = 0$ の絶縁体 (線形応答領域) から絶縁破壊を経て $\langle J \rangle \neq 0$ という金属的振る舞いまでユニバーサルにクロスオーバーすることが分かる。白印は 6 サイト、黒印は 8 サイト。

バンド絶縁体との違い Mott 絶縁体の断熱スペクトルはギャップが多体効果により生じているため、高励起状態間にも励起ギャップが存在する。ギャップを飛び越える Landau-Zener 遷移は量子論的な分岐過程と解釈できるが、断続的な分岐現象のために孤立量子系であるにもかかわらず散逸効果が誘導される。これは IV 特性の Ohm 則的振る舞いにも見て取れる。

なお、本研究は有田亮太郎氏、青木秀夫先生との共同研究によるものである。

参考文献

- [1] Y.Taguchi T.Matsumoto and Y.Tokura. *Phys. Rev. B*, 62:7015, 2000.
- [2] T.Oka R.Arita and H.Aoki. Breakdown of a mott insulator – non-adiabatic tunneling mechanism. *Phys.Rev.Lett.*, 91:66406, 2003.