

論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称	博 士 (理 学)	氏名	田北 仁志
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 ①・② 項該当		
論文題目			
<p>Accurate Angle-Resolved Photoemission Study of FeSe and Ba(Fe_{1-x}Co_x)₂As₂ Across Phase Boundaries (FeSe と Ba(Fe_{1-x}Co_x)₂As₂ の相境界を横断する高精度角度分解光電子分光研究)</p>			
論文審査担当者			
主 査	教 授	木村 昭夫	
審査委員	教 授	井野 明洋	
審査委員	教 授	島田 賢也	
審査委員	教 授	森吉 千佳子	
審査委員	准教授	田中 新	
〔論文審査の要旨〕			
<p>二十世紀の後半より、電荷の自由度を操るエレクトロニクス技術が急速に発展し、現代人の生活は一変した。二十一世紀に入り、スピンの自由度を活用するスピントロニクスが勃興し、一定の成功を収めた。しかしまだ、固体内には電子の軌道の自由度が残されている。2008年に発見された鉄系超伝導物質では、軌道自由度の役割が注目されてきている。具体的には軌道ゆらぎの超伝導発現機構への関与が示唆されており、軌道が秩序化した反強磁性金属相では無質量ディラック電子が観測された。つまり、鉄系物質には、応用が期待される最先端物理のうち、(1)電気抵抗が消失する超伝導現象、(2)止まることのできない無質量ディラック電子、(3)オービトロニクスと称される軌道量子工学、の三つの要素が集結している。しかし、軌道自由度の高さを反映して、多数のバンド分散が波数空間で近接しており、相転移における変化を追跡するのが難しい。角度分解光電子分光は、電子状態を波数空間で分解して直接観測する強力な手法であるが、より一層高い精度が求められている。</p> <p>本論文では、角度分解光電子分光実験における測定位置の保持の精度を格段に向上させている。角度分解光電子分光では、測定する波数に応じた試料回転が必要不可欠であるが、回転による試料位置のずれが、測定精度を下げる致命的な原因となっていた。光電子分光実験は超高真空測定槽内で行われるため、試料配置の微調整には制約が多く、この問題を解決することは容易ではない。申請者は、試料回転機構の回転軸の座標を実験的に決定し、回転行列を用いて位置を補正することにより、位置のずれの問題の解決に取り組んだ。まず、実際の実験条件下で真空槽外に設置した光学顕微鏡により入射光の位置を精密に観測し、回転中心を 10 μm 以下の精度で決定した。そして、決定した回転中心を用いて、不均一性を持つ試料において位置補正を加えながら角度走査の試験を行い、異なるドメインからの寄与を抑制できることを示した。ここで開発された高精度角度走査の手法は、μm の精度で電子状態を精密観測する角度分解光電子顕微分光の基礎になると考えられる。</p>			

本論文では、 μm サイズのレーザー励起光を用いた高分解能角度分解光電子分光により、FeSe の構造相転移を横断する軌道秩序電子状態の発達過程を精密に決定している。まず劈開試料表面 $200 \times 200 \mu\text{m}$ の範囲で光電子スペクトルを $4 \mu\text{m}$ ステップで収集することで、試料の不均一性を徹底的に明らかにした上で測定位置の最適化を行っており、さらに、励起光の偏光を調整することで、他軌道バンドの全てを明瞭に観測できる条件を見出している。その結果、構造相転移温度 $T_s = 90 \text{ K}$ を横断して d_{xz} , d_{yz} 軌道バンドの分裂幅が増大することが観測され、 Γ 点において軌道秩序の秩序変数が有限であることが示された。この精密観測により得られた秩序変数における制約条件は、FeSe における構造相転移、超伝導現象を理解する上で重要であると考えられる。

本論文では、反強磁性相から超伝導相に至る鉄ヒ素系物質 $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ ($x = 0.02, 0.04, 0.05, 0.06$) のディラック電子の発達過程と異方性についても精密な研究を進められている。これまで、ディラック電子に特徴的な円錐型のバンド分散の観測は母物質 BaFe_2As_2 に限られていたが、本論文において、反強磁性相境界近傍試料 $x = 0.04$ までディラック円錐が存続し、超伝導相に入ると消失することが明らかとなった。また、偏光依存角度分解光電子測定から、ディラック円錐が偶奇軌道成分バンドの混成により形成され、ディラック点が鏡映対称性により守られていることが明らかとなった。さらに、バンド分散の傾きからディラック速度の方向依存性が精密に決定され、偶奇バンドの異方性が約 2 倍にも達することを明らかにした。これらの結果から、鉄ヒ素系物質におけるディラック電子の発現において、軌道の自由度が主要な役割を果たしていることが結論された。

上記のように、申請者は、角度分解光電子分光研究における精度の追求を徹底的に行い、鉄系物質の相境界を横断する電子構造の変化を多角的に研究している。得られた知見は、鉄系物質の多彩な物性における軌道自由度の役割についての理解を前進させるものとして、高く評価できる。また、本論文に示された研究成果は複数の研究者との共同研究によるものであるが、研究の全段階において申請者の主体的・中心的な寄与が十分に認められる。

以上、審査の結果、本論文の著者は博士（理学）の学位を授与される十分な資格があるものと認める。

公表論文

(1) Shift and Splitting of the Hole Bands in the Nematic Phase of FeSe

M.D. Watson, A.A. Haghighirad, H. Takita, W. Mansuer, H. Iwasawa, E.F. Schvier, A. Ino, and M. Hoesch

Journal of the Physical Society of Japan **86**, 053703 (2017).

(2) Accurate and efficient data acquisition methods for high-resolution angle-resolved photoemission microscopy

H. Iwasawa, H. Takita, K. Goto, W. Mansuer, T. Miyashita, E.F. Schvier, A. Ino K. Shimada, and Y. Aiura

Scientific reports **8.1**, 17431 (2018).

参考論文

Applications for ultimate spatial resolution in LASER based μ -ARPES: A FeSe case study

E.F. Schvier, H. Takita, W. Mansuer, A. Ino, M. Hoesch, M.D. Watson, A.A. Haghighirad, and K. Shimada

AIP Conference Proceedings **2054**, 040017 (2019).