이색성 각분해 광전자 분석 실험을 통한 디랙 물질 연구

DOI: 10.3938/PhiT.21.024

정원식·김창영

Studies on Dirac Materials by Using Dichroism Angle-resolved Photoemission Spectroscopy

Won Sig JUNG and Changyoung KIM

In this article, we discuss how various polarizations of light can be exploited in extracting information on pseudo-spins of Dirac electrons in solids. Starting from the matrix element in Fermi's golden rule, we derive relevant expressions for the polarization-dependent angle-resolved photoemission cross-sections of Dirac electrons with pseudo-spins. Representative examples for the cases of linear and circular polarizations are discussed.

고체물리는 양자역학이 작용하는 미시적인 이론을 바탕으로 거시적인 고체물질의 특성을 연구하는 학문이다. 고체를 이루는 각각의 입자들(전자, 원자핵)의 운동은 기본적으로 슈뢰딩거 방정식으로 잘 설명이 된다. 슈뢰딩거 방정식이 수학적으로 완벽하게 입자의 운동을 기술할 수 있지만, 아보가드로 수에 가까운 수의 입자에 대한 수식을 푸는 것은 불가능에 가까운 일이다. 직접적으로 슈뢰딩거 방정식을 풀 수 없다는 것은 고체 내부를 이론이 알려지지 않은 우주로 가정해야 한다는 것을 의미한다. 이런 가정을 바탕으로 실험으로부터 귀납적인 추론을 통해 현상학적인 이론들을 하나씩 만들어 가는 것이다. 이러한 연구의 과정은 20세기 중반 이후의 입자물리연구와 거의 흡사하다고 할 수 있다. 다만 입자물리학이 실제 진공을 다룬다면 고체물리학은 고체내부의 바닥상태를 가상 진공으로 가정한다는 점이 다를 뿐이다.

쉬운 예로 낮은 온도에서 고체 내부의 온도 및 열전도와

깊은 관련이 있는 원자핵의 진동을 살펴보면, 격자구조 내에서 원자핵들은 양자화된 집단 운동의 들뜸 상태를 갖고 있다. 이런 집단 운동은 음파로 양자역학에서 양자화된 파동이 입자와 대응되어 있다는 것을 고려하면 하나의 새로운 입자로 생각할 수 있다. 우리는 이 새로운 준입자를 포논(phonon)이라고 부른다. 이런 방법을 통해 셀 수 없이 많은 원자핵의 진동은 바닥상태라는 진공 속에서 움직이는 포논의 운동으로 간단하게 설명할 수 있다. 포논 이외에도 자기격자의 진동인 마그논(magnon), 전자와 정공(hole)의 결합으로 생성되는 엑시톤(exciton) 등 많은 준입자가 발견되었고, 우리는 이런 준입자의 성질과 준입자간의 상호작용에 관한 연구를 통해 바닥상태에 대한 깊은 이해가 가능하였다.

특히 최근에는 한 장의 흑연 층으로 이루어진 그래핀 물질에서 디랙-페르미온이 실험적으로 발견되어 큰 관심을 끌었다. 그 후 그래핀은 특이한 물성과 많은 활용 가능성으로 인하여 분리방법을 처음으로 발견한 가임과 노보셀로프에 노벨상을 안겨주었다.^[1] 그래핀의 특이한 물성은 페르미 준위에 있는 준입자인 디랙-페르미온에 의해서 결정된다. 실제의 디랙-페르미온은 디랙이 제시한 물질로 빛의 속도에 가깝게 움직이는 페르미온을 의미한다. 입자의 속도가 빨라지면 특수상대론을 고려한 양자역학을 통해 입자의 운동을 설명할 수 있는데, 페르미온이 광속에 가까워질 경우 입자의 에너지가 입자의 속도에 비례하게 되고 입자의 스핀이 입자의 진행방향과 정렬되는 특이한 상태가 된다. 최근 그래핀 내부의 특수한 퍼텐셜에 의해 실제 디랙-페르미온과 유사한 준입자가 존재하는 것이 보고되었다. 이 준입자는 그대로 디랙-페르미온으로 이름이 붙여졌고, 위상학적 부도체, 철 기반 초전도체 등 여러 물질에서 다양한 형태로의 존재가 확인되면서 활발한 연구가 진행 중이다.^[2,3]

그림 1은 그래핀에 존재하는 디랙-페르미온의 밴드구조 모식도이고, 다음의 식은 그래핀 디랙-페르미온의 일반적인 해밀토니안이다.

저자약력

정원식 연구원은 2008년 연세대학교 물리학과를 졸업하고, 현재 연세대학교 첨단 전자구조 연구실에서 각분해 광전자 분석법을 이용하여 다양한 디랙 물질에 대한 연구를 진행 중이다.

김창영 교수는 스탠포드 대학교 응용 물리학 박사(1995)로서 스탠포드 방사광 가속기 연구소 연구원을 거쳐(1995-2001) 현재 연세대학교 물리학과 교수(2001-현재)로 재직 중이다. (changyoung@yonsei.ac.kr)

REFERENCES

- [1] K. S. Novoselov, Rev. Mod. Phys. **83**, 837 (2011).
- [2] M. Z. Hasan, Rev. Mod. Phys. **82**, 3045 (2010).
- [3] Ying Ran, Phys. Rev. B **79**, 014505 (2009).

Fig. 1. Band structures of Dirac fermions in graphene and topological insulators.^[4]

$$H_K = \hbar v \vec{\sigma} \cdot \vec{k} = \hbar v \begin{pmatrix} 0 & k_x - ik_y \\ k_x + ik_y & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

위 식을 자세히 살펴보면 디랙-페르미온의 에너지는 운동량에 비례하게 되고, 위와 같이 에너지에 따라 직선의 형태인 디랙콘 형태를 가진다. 또한 중간에 있는 $\vec{\sigma}$ 는 스핀을 나타내는 항으로 $\vec{\sigma} \cdot \vec{k}$ 값이 작아지는 것이 안정된 상태이다. 디랙-페르미온은 디랙콘이라고 불리는 밴드구조를 고려하면 스핀이 디랙콘을 따라 나선으로 정렬되는 것이 안정된 상태이다. 실제 입자가 아닌 고체에서의 디랙-페르미온은 준입자이기 때문에 실제 스핀이 아닌 유사 스핀(pseudo spin)을 갖는다. 그래핀의 경우 단위격자 내부에 존재하는 두 탄소원자의 p_z -오비탈간의 위상 차이가 유사 스핀으로 작용하고, 철 기반 초전도체의 디랙-페르미온 역시 단위 격자 내부에 존재하는 철 원자의 t_{2g} -오비탈간의 패리티(parity) 차이가 유사 스핀으로 작용한다. 유일하게 위상학적 부도체의 디랙-페르미온은 실제 스핀이 나선 정렬을 하고 있지만, 최근 실험을 통해 오비탈 각운동량도 나선 정렬을 하고 있는 것으로 밝혀졌다. 실제로 디랙-페르미온을 만드는 것에 대한 기여도는 오비탈 각운동량이 높은 것으로 알려져 있다.^[5] 유사 스핀의 나선 정렬은 준입자의 충돌을 줄여 높은 전자 이동도와 특별한 홀 특성을 부여하는 등 각 물질의 특이한 물성에 핵심적인 역할을 하기 때문에 유사 스핀의 나선정렬을 분석하는 것이 중요한 일이다.

다. 지금부터 소개할 빛의 이색성을 이용한 각분해 광전자 분석 실험은 유사 스핀을 직접적으로 관측할 수 있는 중요한 실험이다.

각분해 광전자 분석 실험(angle resolved photoemission spectroscopy, ARPES)은 기본적으로 광전효과를 이용하여 고체의 전자구조를 직접적으로 볼 수 있는 실험 방법이다. 이 실험에서는 고체내부 전자의 저 에너지 들뜸에 대한 분광학적 분석을 하는데 운동량 공간의 밴드에 대한 직접적인 정보를 제공한다. 1990년대 이후 전자 분광기의 현대화에 성공하며, 중성자 비탄성 산란(inelastic neutron spectroscopy, INS), 주사터널분광학(scanning tunneling spectroscopy, STS) 등과 더불어 고체의 성질을 이해하기 위한 가장 중요한 실험 방법으로 받아들여지고 있다. 이에 대한 자세한 설명은 본 저널의 이전 기사에 수록되어 있다.^[6] 이번 기사에서 중점적으로 다룰 부분은 빛의 여러 편광을 이용한 이색성 각분해 광전자 분석 실험이다. 빛의 편광이라는 새로운 자유도를 부여해서 기존의 각분해 광전자 분석으로는 알 수 없는 위상에 관한 정보를 얻는 방법이다. 오래전부터 이론이 잘 알려져 있고, 실험 결과 역시 꾸준히 보고가 되었지만, 최근 디랙 물질의 발견과 광원 장비의 현대화로 다시 각광받고 있다.

실험 방법에 대한 설명에 앞서서 각 편광의 빛을 얻는 방법에 대해 간략히 소개할 것이다. 일반적으로 광전자 분석 실험에서 주로 사용하는 7 전자볼트(eV)에서 수백 전자볼트 에너지의 편광된 빛을 얻기 위해서, 타원 편광 연동레이터(EPU)를 사용한다. 연동레이터는 가속기 궤도를 돌고 있는 전자에 자기장을 통한 주기적인 궤도요동을 일으키는 장비로, 전자가 자기장에 의해 주기적으로 궤도가 바뀔 때 강한 세기의 빛을 얻을 수 있는 장비이다. 이 장비는 네 개의 서로 떨어진 주기적으로 배열된 자석막대로 이루어져 있는데 그림 2에서처럼 네 부분의 자석의 상대적인 위치를 바꾸어서 전자 궤도 요동의 방향을 조절하고 이를 통해 모든 편광의 빛을 얻을 수 있다. 그리고 그림에서 표시된 네 개의 특별한 위치에서는 각각 수직, 수평, 오른손 원형, 왼손 원형 편광의 빛을 얻을 수 있다. 따라서 낮은 에너지의 빛을 사용하는 몇몇 특별한 경우를 제외하고는 방사광 가속기를 기반으로 한 장비가 필수적이다.

각분해 광전자 분석 실험의 데이터는 쌍극자 근사이론(dipole approximation)으로 잘 설명이 된다. 아래는 행렬요

REFERENCES

- [4] Eli Rotenberg, Nature Physics **7**, 8 (2011).
- [5] Seung Ryong Park, Phys. Rev. Lett. **108**, 046805 (2012).
- [6] http://www.kps.or.kr/storage/webzine_uploadfiles/1349_article.pdf.

Fig. 2. Schematic of an undulator and generation of light with various polarizations.

소(matrix element)를 구하는 식으로 각분해 광전자 분석 실험 데이터의 세기는 행렬요소의 제곱에 비례한다.

$$M = \langle f | \vec{A} \cdot \vec{p} | i \rangle \quad (2)$$

$|i\rangle$ 는 전자의 초기상태로 고체내부의 상태이고, $|f\rangle$ 는 전자의 나중상태로 일반적으로 자유전자의 상태로 생각한다. $\vec{A}$ 는 빛의 편광과 관련된 연산자이고, $\vec{p}$ 는 광전자의 운동량 연산자이다. 방출된 광전자의 세기는 에너지 보존 법칙과 각 함수에 따른 선택 법칙(selection rule)에 따라 결정된다.^[7]

따라서 빛의 편광방향을 수직 편광(p)과 수평(s) 편광으로 나누어서 실험을 한다면, 초기상태가 가지고 있는 실공간에서의 대칭성에 따라 행렬요소의 값이 달라질 수 있을 것이다. 그림 3과 같은 구조의 각분해 광전자 분석 실험 장비를 예로 들어보자. s-오비탈은 원형 대칭성이 있기 때문에 직선편광에 따른 차이가 없지만, 초기상태로 p-오비탈과 d-오비탈을 가지고 있는 물질의 경우 큰 차이가 생기게 된다. 빛이 xz-평면으로 입사되고 빛의 편광방향이 p 방향이라고 가정할 경우, x-축을 기준으로 빛은 짝함수이고 나중상태는 자유전자이므로 짝함수이다. 먼저 p-오비탈을 고려하면 p_x , p_z -오비탈은 x-축을 기준으로 짝함수이므로 행렬요소는 세 짝함수의 곱이 되어 0이 아닌 값을 가지게 된다. 반면에 p_y -오비탈의 경우 x-축을 기준으로 홀함수가 되어 행렬요소가 두 짝함수와 하나의 홀함수의 곱이 되어 전체 값이 0이 된다. 반대로 빛의 편광 방향을 s 방향으로 가정하면, p_x , p_z -오비탈은 두 짝함수와 하나의 홀함수의 곱이 되어 0이 된다. 그리고 p_y -오비탈의 경우 두 홀함수와 하나의 짝함수의 곱으로 0이 아닌 값을 가지게 된다. 들어오는 빛의 편광 방향과 찍는 시료의 결정 방향을 알고 있다면 위의 방식을 통해 p_x , p_z -와 p_y -오비탈을 구분할 수 있는 것이다.

d-오비탈의 경우는 조금 더 복잡하다. 같은 방식으로 빛이 xz-평면으로 입사하고 빛이 p 편광을 갖는다고 가정해보자. 위와 동일하게 빛과 나중상태의 함수는 x-축을 기준으로 짝함수이다. 이 경우 위에서와 같이 초기상태가 짝함수인 경우는 행렬요소가 0이 아닌 값을 가지게 되고, 홀함수인 경우 0

Fig. 3. Schematic of linear dichroism and symmetries in d-orbitals.^[8]

이 된다. x-축을 기준으로 d_{xz} , d_z^2 , $d_{x^2-y^2}$ 은 짝함수로 살아남고, d_{xy} , d_{yz} 는 홀함수로 0의 값을 갖는다. s 편광의 빛을 사용하면 자연스럽게 반대의 결과를 얻을 수 있다. 하지만 p-오비탈과 달리 d-오비탈은 종류가 5개이기 때문에 이 한 가지 방식으로는 각각의 오비탈을 구분할 수가 없기 때문에 일반적으로 다른 조건 하나를 더 고려한다.

빛의 입사방향을 z-축을 기준으로 45도 돌리면 상당히 다른 결과를 얻을 수 있다. 빛이 p 편광이라고 가정하면 빛과 나중상태는 여전히 모두 짝함수이다. 하지만 d-오비탈의 경우 대칭축이 x-축에서 $x=y$ 선으로 바뀌었기 때문에 짝함수와 홀함수가 달라지게 된다. 이 경우 d_z^2 , d_{xy} -오비탈은 짝함수로 0이 아닌 값을 가지게 되고, $d_{x^2-y^2}$ -오비탈은 홀함수로 0이 된

REFERENCES

- [7] Andrea Damascelli, Rev. Mod. Phys. **75**, 473 (2003).

Fig. 4. Schematic of dichroism ARPES and experimental results taken with various polarizations.^[10]

Fig. 5. Theoretically predicted band dispersion (left) and experimental results (middle) for Dirac fermions in iron-based superconductors. Analysis on the direction of the pseudo-spin based on dichroism experiment.^[11]

다. 하지만 나머지 d_{xz^-} , d_{yz^-} 오비탈의 경우 $x=y$ 선을 기준으로 짝함수도 홀함수도 아니기 때문에 0이 아닌 값을 가지게 된다. 반대로 들어오는 빛이 s 편광이면 d_z^2 - 및 d_{xy^-} 오비탈은 짝함수로 0이 되고, $d_{x^2-y^2}$ 오비탈은 홀함수로 0이 아닌 값을 갖는다. 이 경우에도 d_{xz^-} , d_{yz^-} 오비탈은 같은 이유로 0이 아닌 값을 가지게 된다. 이렇게 총 네 가지의 상황(빛의 입사방향, 편광방향)을 모두 고려하면 그림 3의 표에 나온 결과와 같이 5개 오비탈 모두를 구분할 수 있다.^[8] 이렇게 수직, 수평의 편광 방향에 따라 보이는 차이를 선형 이색성이라고 하며, 이를 이용하면 위에서와 같이 초기상태의 오비탈을 알 수 있는 선형 이색성 각분해 광전자 분석 실험을 할 수 있다. 그리고 이 실험을 통해 그래핀과 철기반초전도체에 존재하는 디랙-페르미온의 유사 스핀을 측정할 수 있다.

그래핀의 유사 스핀은 위에서 설명한 바와 같이 서로 다른

두 원자의 p_z 오비탈로 이루어진 π -결합의 위상으로 결합의 위상과 빛의 편광 방향에 따라 행렬요소를 이루는 함수의 대칭성이 달라지게 된다. 아래의 식은 빛의 편광과 그래핀의 유사 스핀을 고려한 경우 광전자의 세기 차이에 관한 식이다. 이 식을 통해 선형 편광 빛을 사용했을 때 유사 스핀의 방향에 따라 광전자의 세기가 달라지는 것을 확인할 수 있다.^[9,10]

$$I = 2|\xi_x|^2 A_0^2 [1 \pm \cos(\theta - 2\chi)] \quad (3)$$

우변의 첫 두 항은 상수이고, θ 는 유사스핀의 방향을 의미

REFERENCES

- [8] Y. Zhang, Phys. Rev. B **83**, 054510 (2011).
- [9] E. L. Shirley, Phys. Rev. B **51**, 13614 (1995).
- [10] Y. Liu, PRL **107**, 166803 (2011).

Fig. 6. Schematic for circular dichroism ARPES and its principle.^[12]

한다. 빛의 편광은 χ 로 표시되어 있는데 수직(HP), 왼쪽 원형(LCP), 수평(VP), 오른쪽 원형(RCP)의 편광 방향에 따라 각각 $0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4$ 의 값을 갖게 된다. 이 식에 따르면 편광방향은 행렬요소의 세기에 직접적인 영향을 주게 되고, 디락 콘을 따라서 밴드의 세기가 다른 데이터를 얻게 된다. 그림 4의 오른쪽에서 두 번째 밴드 그림은 각 편광 방향으로 받은 밴드로 식으로, 예측한 바와 같이 $\pi/4$ 만큼의 위상 차이를 가진 밴드를 보여준다. 이렇게 이론과 실험의 비교를 통해 유사 스핀을 실험적으로 확인할 수 있다.

철기반 초전도체의 디락콘은 그래핀의 경우보다 좀더 복잡한 형태를 띠고 있다.^[8] 철기반 초전도체는 최근 밝혀진 새로운 종류의 초전도체로, 기본 물질은 낮은 온도에서 스핀밀도파를 가지고 있으며 도핑에 따라 낮은 온도에서 초전도성이 나타나는 특성을 가진 물질이다. 이 물질은 내부구조에 공통적으로 FeAs의 층을 가지고 있는데, 스핀밀도파의 생성에 크게 기여하는 오비탈은 d_{xz}, d_{yz} 이다. As의 4p-오비탈과 Fe의 3d-오비탈이 결합하는 것이 안정된 상태라고 한다면, d_{xz}, d_{yz} 오비탈이 합성된 새로운 두 개의 준위로 바닥상태를 기술할 수 있다. 이를 기반으로 스핀밀도파 상태를 기술하면 두 준위의 비율을 유사 스핀으로 갖는 디락콘의 해를 가질 수 있다. 그림 5는 이론으로 예측된 디락콘과 각분해 광전자 분석 실험으로 증명된 디락콘의 그림이다. 철기반 초전도체는 운동량 공간의 감마 포인트 근처에서 4개의 디락 콘을 갖는다. BaFe_2As_2 의 물질에서 디락콘이 존재하는 것이 처음으로 발견되었고, 이후 CaFe_2As_2 선형 이색성을 이용하여 디락-페르미온의 유사 스핀이 측정된 연구 결과가 보고되었다.^[11]

$$\begin{aligned} I_v &\propto -\cos 2\theta \\ I_h &\propto -\cos 2(\theta - \Omega) \end{aligned} \quad (4)$$

d_{xz}, d_{yz} 오비탈로 이루어진 준위의 비율차이가 유사 스핀의 역할을 한다. 위의 식은 $+k_x, -k_x$ 방향의 디락-페르미온밴드에 관한 식으로, 수직방향(I_v)과 수평방향(I_h)의 빛으로 받은 데이터가 디락콘을 따라 $\pi/2$ 만큼의 위상차이를 갖게 된다. 그림 5의 오른쪽 데이터는 k_x 방향을 기준으로 디락콘을 따라서 데이터의 세기를 나타낸 것으로 두 데이터가 예측된 위상차이를 갖는 것이 확인되었다. 이를 통해 디락콘을 따라서 두 오비탈의 기여도가 어떻게 변하는지를 알 수 있고, 그로부터 유사 스핀의 방향을 알 수 있다.

지금까지 선형편광빛을 이용한 선형 이색성에 대하여 알아보았다. 두 번째로 원형 편광 빛을 이용한 원형 이색성 실험에 대하여 자세히 알아보자. 결론부터 얘기하면 원형편광 각분해 광전자 분석 실험을 통해 초기상태의 오비탈각운동량을 측정할 수 있다. 원형 편광된 빛이 현상학적으로 각운동량을 가지고 있는 것은 X-선 자성 원편광 이색성 실험(XMCD, X-ray magnetic circular dichroism) 등을 통해서 매우 잘 알려진 사실이다. 거울 대칭에 의해 오른손 원형편광 빛은 초기상태의 오비탈각운동량 m 값을 $m+1$ 의 나중상태로 여기하고 왼손 원형편광빛은 $m-1$ 의 나중상태로 여기한다. 원형 편광의 빛이 실제로 각운동량을 가지고 있는 것은 아니지만 초기상태와 나중상태의 오비탈각운동량이 차이가 나기 때문에 각운동량 보존을 고려해서 현상학적으로 각운동량이 있다고 생각할 수 있는 것이다. 그림 6을 보면 왼쪽은 초기상태이고 오른쪽은 나중상태이다. 나중상태에서 m 값을 나타내는 선분의 길이 차이는 자유전자를 구획화표계에서 풀었을 때 각

REFERENCES

- [11] Y. K. Kim (unpublished).
- [12] Wonsig Jung, Phys. Rev. B **84**, 245435 (2011).

Fig. 7. Circular dichroism ARPES data from topological insulator and evidence for chiral spin alignment.^[6,12]

오비탈 성분의 기여도를 나타내고 있다.

초기상태가 $m=1$ 인 상태를 가지고 있다고 가정하고 오른손, 왼손 원형편광 빛을 이용하여 실험을 한다고 가정하면, 그림 6과 같이 오른손 원형 편광의 경우 $m=2$ 인 나중상태로 여기되고, 왼손 원형편광의 경우 $m=0$ 인 나중상태로 여기된다. 위의 설명과 같이 자유전자는 $m=0$ 인 상태의 기여도가 높기 때문에 왼손원형 편광의 빛으로 측정할 때 데이터의 세

기가 더욱 커지게 된다. 반대로 초기상태가 $m=-1$ 인 상태로 가정하면, 이번에는 반대로 오른손 원형 편광의 빛으로 측정할 때 데이터의 세기가 더욱 커진다. 마지막으로 $m=0$ 인 경우를 생각하면 두 방향의 원형편광 빛에서 같은 세기의 데이터를 얻을 수 있다. 따라서 오른손 원형 편광으로 받은 데이터에서 왼손 원형편광으로 받은 데이터를 빼면 밴드에 따라 0, 음수, 양수의 값을 갖는 결과를 얻을 수 있다. 여기서 양수는 m 이 -1 인, 음수는 m 이 $+1$ 인 초기상태를 의미하고 0인 부분은 $m=0$ 인 초기상태를 의미한다.

그림 7은 오른손, 왼손 원형편광으로 받은 데이터와 두 데이터를 뺀 차이를 나타내고 있다. 앞에서 설명한 바와 같이 위상학적 부도체는 유사 스핀으로 오비탈각운동량을 가진다. 예측한 바와 같이 오비탈 각운동량이 나선 정렬을 가지고 있다면, 두 데이터의 차이에서 디락 콘을 따라 $\sin$ 또는 $-\sin$ 함수로 나타나야 한다. 그림 7의 아래 그래프는 디락콘을 따라 데이터의 세기를 나타낸 값으로 $\sin$ 함수로 보이는 것을 알 수 있다. 특히 그림 1을 보면 디락 콘의 경우 위쪽과 아래쪽의 나선정렬 방향이 반대인데, 위쪽과 아래쪽의 데이터 세기가 $\sin$ 과 $-\sin$ 으로 예측과 잘 맞는 것을 알 수 있다.^[5]

지금까지 선형과 원형 편광의 빛을 이용하여 여러 물질에서 다양한 양상으로 존재하는 디락-페르미온의 유사 스핀을 측정하는 방법에 관하여 설명하였다. 특히 그래핀의 디락-페르미온의 물성을 이용하여 새로운 고속 반도체의 재료로 각광 받고 있으며, 위상학적 부도체의 경우 스핀트로닉스 소자의 가능성이 점점 구체화되고 있다. 특히 유사스핀의 나선 정렬은 특별한 물성의 핵심적인 부분이지만, 일반적인 실험에서는 위상의 정보가 측정과정에서 소멸되기 때문에 직접적으로 보기가 어려웠다. 이론적 예측과 이색성 각분해 광전자 분석실험 결과의 비교를 통해 유사스핀의 근원을 밝히고 그 방향을 측정한 결과들은 그런 점에서 실험의 한계를 극복하려는 노력의 결과라 할 수 있다.