

보도일시	즉시/2023. 7. 11.(화)
문의	연구단장/연구책임자: 김기훈 교수(02-880-0768; optopia@snu.ac.kr) (교신저자)
	연구단/연구진: 서예환 연구원(제1저자, 02-880-0768), 김광탁 연구원, 김석호 연구원, 김기훈 교수(서울대학교 물리천문학부)

카고메 격자 구조를 가진 $Cs(V_{1-x}Ti_x)_3Sb_5$ 신초전도체에서 네마틱 양자 임계점 발견

- 카고메 격자 구조를 가진 $Cs(V_{1-x}Ti_x)_3Sb_5$ 신초전도체에서 네마틱 양자 요동이 초전도 특성 향상에 중요한 역할을 한다는 것을 발견 -

■ 요약

연구 필요성	<p>네마틱 상전이란 전자의 상호작용에 의해 결정의 높은 회전 대칭성이 붕괴되는 상전이를 의미하며, 이는 철계 초전도체를 포함한 여러 물질의 초전도 상태를 이해하는 데에 중요한 정렬 현상으로 새롭게 이해되고 있다. 2019년 처음 발견된 카고메 격자구조를 가진 초전도체 CsV_3Sb_5는 약 98K의 온도에서 전하밀도파 상전이, 약 35K의 온도에서 네마틱 상전이를 거친 후, 초전도 전이온도 $T_c = 3.2$ K 아래에서 초전도 현상을 보이는 물질로, 다양한 상전이가 한 물질에서 존재한다. 그러나 이러한 온도에 따른 다양한 상전이의 근원과 이들 상들간의 상호 작용은 아직 명확히 밝혀진 바가 없다. 이 상호작용을 이해하면, 초전도 선재 등의 응용을 위해 초전도 전이 온도를 높이려는 과학적인 단서를 얻을 수 있다.</p>
연구성과/기대효과	<ul style="list-style-type: none"> ○ 본 연구에서는 고품질의 $Cs(V_{1-x}Ti_x)_3Sb_5$ ($x = 0.00-0.06$) 단결정을 합성하고 다양한 온도 범위에서 네마틱 감수율을 측정하여, $Cs(V_{1-x}Ti_x)_3Sb_5$의 $x = \sim 0.009$ 지점에서 네마틱 양자 임계점 (Nematic quantum critical point, NQCP)이 존재함을 세계 최초로 발견하였다. ○ 특히, 네마틱 양자 요동이 최대화되는 $x = 0.0075-0.01$ 범위에서 T_c가 향상되는 초전도 특성 최적화가 됨을 확인하여 초전도 전이온도 T_c 향상에 네마틱 양자 요동이 중요한 역할을 함을 보였다. ○ 이 결과는 다양한 신초전도체에서 네마틱 상을 제어하면 초전도 전이온도를 증가시키고, 초전도 현상 발현의 새로운 원리를 이해할 수 있음을 보여주어, 향후 초전도체 연구 및 응용에 중요한 방법론을 제공하고 있다.

■ 본문

□ 물질 소개

- 2차원에서 삼각형 격자가 삼각형 꼭지로 연결된 카고메 격자 구조를 가진 금속들은 결정 운동량 공간에서 디랙 점 (Dirac point), 평평한 밴드 (flat band) 그리고 안장점 구조 (saddle point)를 가지며, 이러한 독특한 전자 구조로 인해 생겨나는 다양한 현상으로 최근 물리학계의 큰 관심을 받고 있다. 특히 평평한 밴드와 안장점 구조 근방에서는 전자 상태 밀도가 발산하여, 물질의 페르미 면이, 이 구조 근방에 위치하면 여러 정렬상들이 발현할 수 있음이 이론적으로 예측되어 왔다.
- 이러한 카고메 금속들 중, 2019년도에 발견된 바나듐(V) 기반 카고메 금속인 AV_3Sb_5 ($A = K, Rb, Cs$)는 안장점 (saddle point) 근처에 페르미 면이 위치해 있어 이론적으로만 예측되던 다양한 상들이 발현되는 실존 물질로 여겨지는 금속이다. 예를 들어, AV_3Sb_5 물질들은 공통적으로 전하밀도파 (charge density wave) 전이온도 ($T_{CDW} = 80-104$ K) 이하에서 2×2 주기의 전하밀도파 상과, 초전도 전이온도 ($T_c = 0.8-3.2$ K) 이하에서 초전도 상을 지니는 것으로 알려져 있다. 이 중, CsV_3Sb_5 물질에서는 $2 \times 2 \times 2$, $2 \times 2 \times 4$ 과 같은 3차원 주기의 전하밀도파 상, 그리고 네마틱 상 등 추가적인 정렬상을 더 보유하는 것으로 밝혀져 가장 활발히 연구되고 있다.
- 하지만 많은 노력에도 불구하고, CsV_3Sb_5 의 초전도와 관련된 상들의 미시적인 상호작용에 대해서는 아직 명확히 알려진 바가 없다. 이 물질과 관련된 중요한 수수께끼 중 하나는, 최근 $CsV_3(Sb,Sn)_5$ 다결정의 Sn 도핑 연구와 CsV_3Sb_5 단결정의 압력 연구에서 원인을 이해할 수 없는 이중 돔 (double-dome) 초전도 현상이 발견되었다는 사실이다. 특이하게도, CsV_3Sb_5 과 비슷한 구조를 갖는 KV_3Sb_5 와 RbV_3Sb_5 물질에서는 이중돔이 아닌 단일 돔 (single-dome) 초전도 현상만 발견되어 이중 돔의 근원에 대해 학계에서 많은 관심을 보이고 있고, 관련된 연구가 전세계적으로 경쟁적으로 진행되고 있다.

□ 연구결과

- 본 연구에서는 고품질의 $Cs(V_{1-x}Ti_x)_3Sb_5$ ($x = 0.00-0.06$) 단결정을 합성하고 다양한 온도 범위에서 네마틱 감수율을 측정하여, $Cs(V_{1-x}Ti_x)_3Sb_5$ 의 $x = \sim 0.009$ 지점에서 네마틱 양자 임계점 (Nematic quantum critical point, NQCP)이 존재함을 세계 최초로 발견하였다. 또한, 네마틱 양자 요동이 최대화되는 $x = 0.0075-0.01$ 범위에서 T_c 가 향상되는 첫 번째 초전도 돔이 형성됨을 확인하여 T_c 증가가 네마틱 양자 요동과 직접 관련됨을 발견하였다.

○ 이 연구결과는 Ti 비율 $0 \leq x \leq 0.02$ 구간에서 $\text{Cs}(\text{V}_{1-x}\text{Ti}_x)_3\text{Sb}_5$ 의 네마틱 양자 요동이 초전도 특성 향상에 중요한 역할을 한다는 것을 직접적으로 보인 결과로, 2023년 7월 6일 **Nature Communications** 에 출간되었다. (Y. Sur *et al.*, *Nat. Commun.* **14**, 3899 (2023); DOI : 10.1038/s41467-023-39495-1).

□ 용어설명

초전도 현상: 물질의 전기 저항이 0이 되며, 외부 자기장과 반대 방향의 자기장을 형성하는 반자성을 띄게 되는 현상.

양자 임계점: 절대 영도 0 K에서 물질의 상이 연속적으로 다른 상으로 변하는 지점.