

다강체 BiMn_2O_5 에서 나타나는 자기장으로 조절되는 강유전체 양자 상전이

김재욱¹, 함소영¹, 오윤석¹, 박순용², 정상욱², P. Sharma³, M. Jaime³, N. Harrison³, 한정훈⁴,
P. Coleman², 김기훈^{1*}

¹극한다기능물리연구실(XMPL), 물리·천문학부, 서울대학교

²물리·천문학부, Rutgers 대학교, 미국

³국립고자기장연구소, Los Alamos, 미국

⁴물리학과, 성균관대학교

1. 서론

최근 고체 물리학계는 고체 물질이 절대 영도에서 상전이를 일으키는 현상, 소위 양자 임계 현상 (quantum criticality)에 주목하고 있다. 양자 임계 현상은 절대 영도 상전이 점인 양자 임계점 (quantum critical point) 부근에서 일어나는 물리 현상을 말하며, 초전도나 새로운 형태의 상전이에 중요한 역할을 하는 것으로 인식되고 있다. 강유전체의 경우, 양자 임계 현상은 흔히 물질의 치환, 압력 등의 방법으로 일어날 수 있으며, 실험적으로 양자 상유전현상 (quantum paraelectric) 이 양자 임계점 근처에서 나타날 수 있다. 대표적인 양자 상유전 물질로는 SrTiO_3 를 들 수 있으며 이 물질은 절대 영도까지 전기 쌍극자가 정렬하지 않고 상유전체 상태를 그대로 유지하면서 유전율이 10000 % 이상 증가 한다 [1]. 이렇듯 저온으로 온도를 내릴수록 유전율이 점진적으로 증가하는 것은 이러한 양자 상유전상의 한 특징이라고 할 수 있다.

2. 실험방법

미국 Tallahassee 와 Los Alamos 에 있는 국립고자기장 연구소의 33T 전자석과 60T 펄스자석에서 최저 0.5K 극저온 환경까지 온도를 낮추어 가며, 단결정 BiMn_2O_5 의 유전율, 전기분극, 자화, 그리고 비열을 측정하였다. BiMn_2O_5 강유전성의 경우 방향성을 가지고 있으므로, a 축 방향으로 가해진 자기장에 대한 b 축 방향의 전기분극 변화를 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

우리는 양자 상유전현상이 다강체 BiMn_2O_5 에서 자기장의 함수로 생겨남을 발견하였다. 이 물질의 고자기장-상평형도를 살펴보면, 40

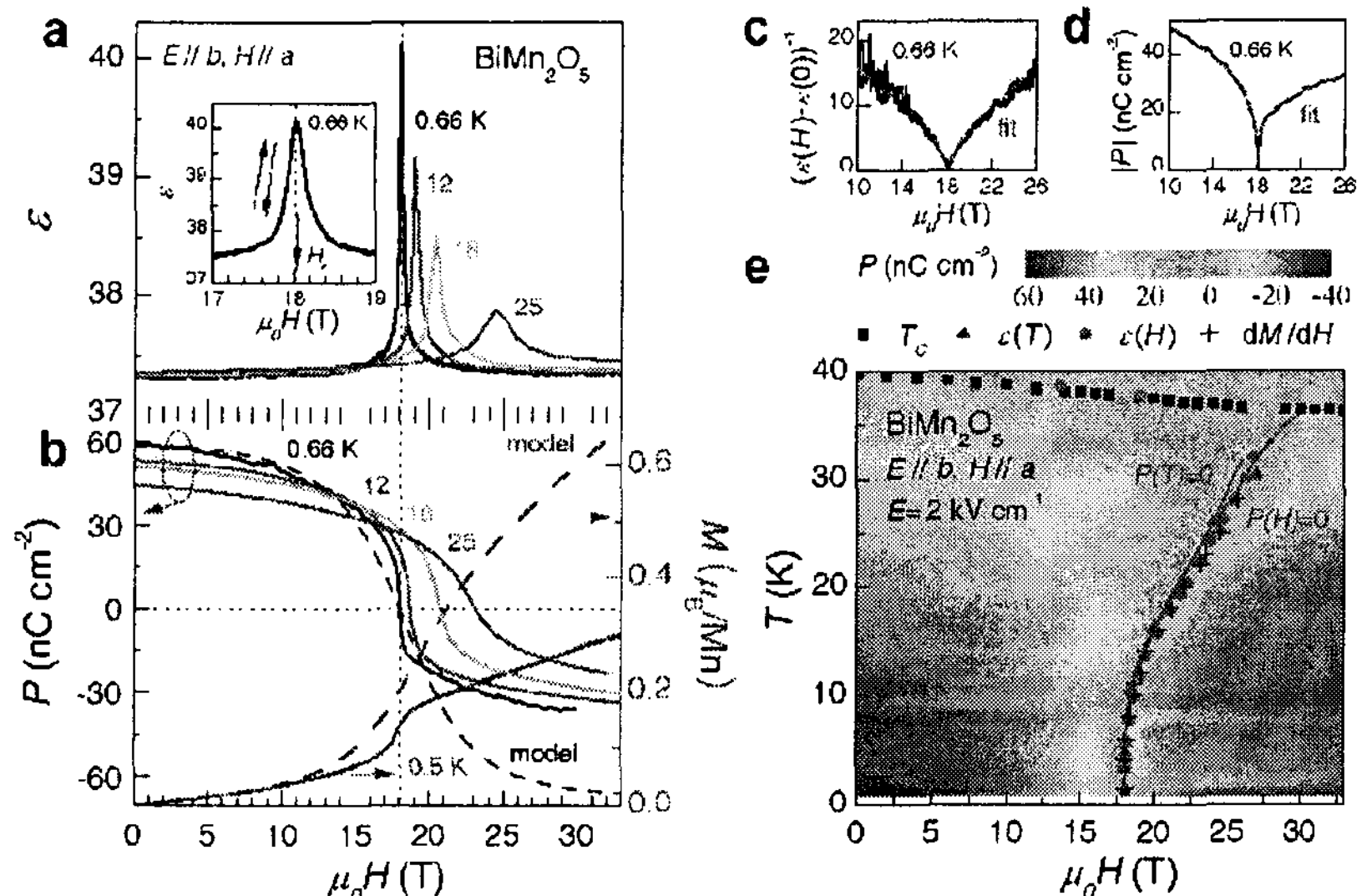


그림 1. BiMn_2O_5 의 자기장에 따른 (a) 유전율, (b) 전기 분극 (왼쪽), 자화 (오른쪽) (c) (d) 0.66 K에서 자유에너지 모델과 실험값의 비교. (e) 전기 분극의 자기 의존성을 통한 자기장-온도 상평형도.

K 이하에서 자성상전이와 함께 강유전체 물질이 동시에 일어나는 다강체임을 알 수 있다. (그림 1(e)). 40K 아래에서 자기장이 상대적으로 작을 때에는 전기 분극이 양의 값을 가지고, 자기장을 증가시키게 되면, 특히 약 18T 근처에서 전기분극이 양에서 음으로 연속적으로 바뀌는 것을 관찰하였다. 이 때의 유전율을 여러 가지 실험을 통해 살펴보면 특이하게도 18 T 부근에서 증가하는 것을 알 수 있다 (그림 1 (a)). 유전율의 최대값은 전기 분극이 0이 되는 지점과 동일하며 이는 BiMn_2O_5 가 상유전현상을 보이는 점에서 유전율이 증가한다는 점에서 기존에 알려진 양자 상유전현상 [1]과 비슷하다. 또한, 유전율의 온도 의존성을 18T부근에서 저온영역을 정밀하게 연구한 결과, 알려진 SrTiO_3 의 그것과 매우 유사함을 발견하였다 [2].

자기장에 따른 자화의 변화를 살펴보면 극저온, 18 T 부근에서 자화율이 증가하는 모습을 보인다 (그림 1 (b)). 그러나 일반적인 반강자성체 물질에서 나타나는 자기장에 대해 불연속적인 spin-flop 현상과는 다르게 그 변화가 부드럽게 연속적이다. 또한, 임계자기장 부근에서 유전율의 증가와 전기분극의 감소가 잘 정의된 멱법칙 (power law)을 따라 일어나므로 (그림 1(c), (d)), 이 상전이가 2차 상전이인 것으로 사료된다. 또한, 비열 실험 결과 및 자기감수율의 거동도 이렇게 발견된 상전이가 2차 상전이임을 지지하는 간접증거를 보여주었다 (그림 2).

이러한 실험 결과를 종합하면, 고자기장에서 발견된 새로운 상전이가 양자 상유전 현상을 수반하는 양자 임계 현상인 것으로 추론된다. 아울러 본 연구에서는 이 같은 현상의 물리적 기작이, 스핀과 결정이 강하게 결합된 BiMn_2O_5 시스템에서 자기 모멘트를 가진 Mn^{3+} 와 Mn^{4+} 사이의 반강자성 정렬이 찢찢땀 (frustration) 구조를 갖고 있으며 그 찢찢땀을 해소하기 위해 교환 수축 (exchange striction) 이 작용하기 때문임을 밝힐 수 있었다. 한편, 보다 더 구체적인 이해를 위해 우리는 이 물질계에서 일어나는 고자기장을 통한 전기 분극의 뒤집힘, 자기장에 따른 자화의 연속적인 변화 등을 설명할 수 있는 스핀회전 모델과 Landau 자유 에너지에 기초한 평균장 모델을 발전시켜, 각각 실험 결과를 잘 설명할 수 있었다.

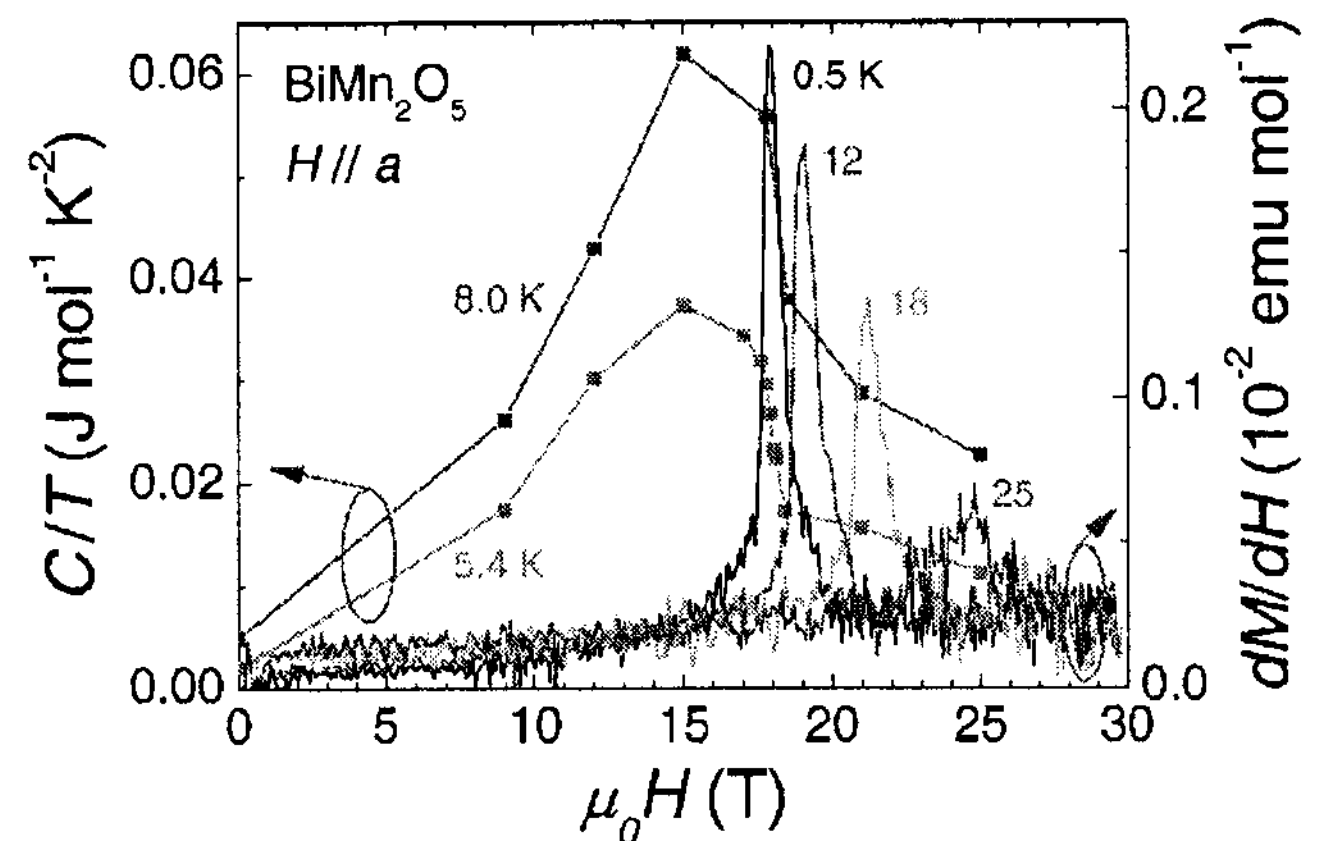


그림 2. 비열을 온도로 나눈 값의 자기장 의존성 (왼쪽). 다양한 일정 온도에서 측정된 자기장의 변화에 따른 자화율 값에서 구한 자기 감수율 거동 (오른쪽).

4. 결론

현재까지 보고된 다강체의 강자성과 강유전성의 결합은 주로 고전적인 스핀 구조의 변화 및 강유전성질 변화등을 통해서 이해하고 있다. 우리의 발견은 다강체 물질계에서 강유전체 양자 상전이 효과를 처음으로 보여주는 것이며, 이로부터 다강체 물리의 다양성과 강유전체 양자 임계 현상을 연구할 수 있는 새로운 계로서 다강체가 이용될 수 있음을 말해 준다.

5. 참고문헌

- [1] K. A. Muller *et al.*, Phys. Rev. B **19**, 3593 (1979).
- [2] J. W. Kim *et al.*, submitted.