양자물질 초전도연구

박 두 선
성균관대학교

1. 서 론

고체의 특성을 이해하고 그리고 한걸음 더 나아가 예측하기 위해서는 전자에 대한 이해가 중요하다. 고체 내에서 상호작용하는 약 10^{23}개나 되는 천문학적인 수의 전자들을 일일이 기술하는 것은 현대의 발달된 슈퍼컴퓨터를 사용한다 해도 불가능한 작업이다.

1950년대 페르미와 란다우는 약하게 상호작용하는 전자계에서 준입자라는 개념을 사용하여 금속의 물성을 설명할 수 있었다. 준입자는 마치 상호작용이 전혀 없는 독립된 전자처럼 행동하고 그리고 독립전자가 가지는 양자수를 갖는다. 약한 상호작용은 준입자의 유효질량에 포함되어 설명된다. 준입자로 대표되는 란다우-페르미 액체는 약한 상호작용을 하는 전자계뿐만 아니라 강하게 상호작용하는 계에서도 잘 설명될 수 있음이 실험적으로 보고되었다. 즉, 일반 금속의 특성을 설명하는 혹은 일반금속에 있는 전자들이 어떻게 움직여야 되는지를 알려주는 물질의 조직 원리로서 받아들여져 왔다.

준입자의 유효질량(effective mass)이 맨질량(bare mass)보다 최고 1000배까지 무거운 페르미온계는 70년대 중반 H. R. Ott에 의해 발견된 이후 응집물리계에 지속적인 새로운 현상들을 제공한 물리학의 높은 관심의 대상이 되어왔다. 80년대 초반 독일의 F. Steglich 와 미국의 Z. Fisk에 의해 주도되었던 무거운 페르미온계에서의 초전도 발견은 BCS 이론에 의해 설명되었던 고전 초전도체(conventional superconductor)와는 전혀 다른 비정상 초전도체(unconventional superconductor)의 도래를 예고하고 있었다. 페르미 표면에 초전도 갭이 일정하게 열려있는 저온초전도체와 달리 무거운 페르미온계의 초전도 갭은 이방성을 보인다. 즉, 페르미 표면의 특정방향에서는 갭의 크기가 영으로 사라지며 그리고 이 점을 통과할 때 위상이 180도 바뀌는 특이한 현상이 보고되었다.

1986년 Bednorz 와 Muller에 의해 발견된 구리산화물 고온 초전도체는 무거운 페르미온계와 유사한 비정상 초전도체일 뿐만 아니라 초전도 온도가 이론에 의해 제시된 한계온도인 38K를 뛰어넘어 최고온도가 100 K를 넘어섰다. 액체 질소온도가 77 K임을 감안할 때 고온 초전도의 발견은 초전도체의 보다 폭넓은 적용가능성을 열어놓은 획기적인 과학의 약진으로 평가되어왔다. 그러나 지난 20년이 넘는 세계적인 노력에도 불구하고 고온초전도체를 포함한 비정상 초전도의 이해는 여전히 미스테리로 남아있다.

거시적 양자현상인 초전도는 자유전자들이 쌍을 이루어서 페르미 표면에 초전도 갭을 열었을 때 그 자유에너지가 표준상태에 비해 낮은 페르미 표면의 불안정성으로 설명되어진다. 따라서 초전도와 경쟁상이 되는 표준상태에 대한 정확한 이해는 초전도 메커니즘과 직접적인 관련이 있다. 란다우--페르미 액체로 설명되는 고전 초전도체의 표준상태와 전혀 다른 표준상태가 비정상 초전도체에서 나타난

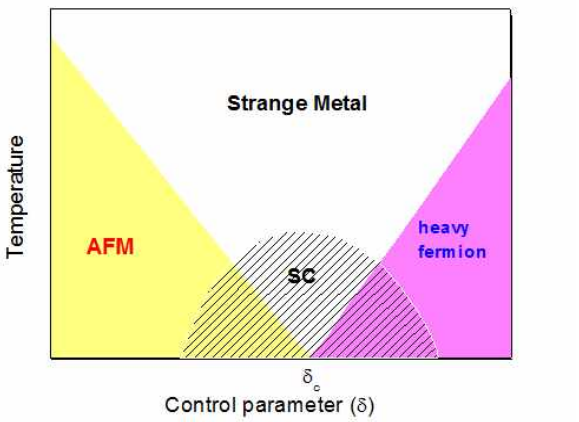

그림 1. 외부제어변수와 온도에 따른 상전이 도형. 반강자성(AFM) 온도가 영으로 가는 임계점 δc에서 비-페르미현상(Strange Metal)과 양자물질 고온초전도현상(SC)이 동시에 나타난다.

다. 전자의 상호작용이 약한 금속에서는 준입자들 사이의 비탄성 산란이 파울리 베타원리에 의해 조절되어져 전기저항의 온도의존성은 온도의 제곱 즉 T^2에 비례하며 그리고 온도로 나눠준 비열 값은 전자의 상태밀도에 비례하는 Sommerfeld 상수로 주어진다. 이 두 가지 물리적 관측은 전자의 상호작용이 강한 전자계에서도 유효하다는 것이 입증된 페르미-란다우 양자액체의 표징이 되어왔다. 표준상태에서 전기저항이 온도의 1승에 비례하는 ($\propto T$) 고온 초전도체는 입자의 저-에너지 들뜸이 란다우-페르미 준입자가 아닌 전혀 새로운 전자상태가 될 수 있음을 시사한다. 비정상 초전도체에 속하는 무거운 페르미온계 초전도체에서도 표준상태가 일반 금속의 특성을 따르지 않는다. 즉, 비정상 초전도체의 초전도메커니즘에 대한 이해는 바로 란다우-페르미 조직원리가 붕괴된 표준 상태를 이해하는 것과 밀접하게 연결되어 있음을 시사한다. 본 논고에서는 표준상태가 일반금속의 특성을 따르지 않는 특이한 금속상태에서 나타나는 초전도 현상을 양자물질 초전도라고 부르고 현재 연구 진행 상황 및 앞으로의 연구방향에 대하여 간략하게 논의하고자 한다.

2. 양자물질연구

지난 반세기동안 물질의 조직 원리로 여겨진 란다우-페르미 액체로 더 이상 설명할 수 없는 새로운 양자상태가 최근에 발견되었다. 페르미-란다우 파괴현상에 대한 연구는 자성체에 화학적 치환을 통해서 상전이 온도를 억제하는 것을 위주로 이루어졌다. 화학적 치환 방법은 효율적으로 비 페르미 현상을 유도하기 쉬운 반면 이 파괴 현상이 불순물에 의한 효과라는 의심을 피할 수 없었다. 그러나 최근 화학적 치환을 사용하지 않은 순수 화합물에 무질서를 유도하지 않는 제어변수인 압력이나 자기장 등의 다중극한환경을 사용해 상전이 온도를 영으로 억제했을 때 비-페르미 현상을 유도했으며 이는 란다우-페르미 원리의 파괴가 물질의 근저에 나타나는 양자임계현상과 밀접한 관련이 있음을 암시한다 [1].

양자임계현상에 대한 연구는 대칭성을 깨는 상전이 현상 개개에 대한 이해로 요약할 수 있다. 반강자성 상전이 온도를 영으로 억제했을 때 나타나는 반강자성 양자임계영역 혹은 초전도 상전이 온도가 영으로 억제된 초전도 양자임계영역 등에서 나타나는 비-페르미 액체 현상에 대한 연구가 개별적으로 이루어졌다. 그러나 그림1에서 보여주듯이 고전초전도를 따르지 않는 새로운 초전도현상은 종종 경쟁하는 상태와 근접한 위상공간에서 발견된다. 즉 새로운 초전도의 올바른 이해는 비-페르미 액체의 원인이 되는 양자임계요동과의 관계성 속에서 통합적 이해를 통해 가능하다는 것이다.

양자물질 초전도(quantum critical superconductors)에 나타나는 새로운 표준상태는 전통적인 실험적 그리고 이론적 접근방식으로는 설명이 불가능하다. 이러한 물질들에서는 경쟁하는 상호작용 (competing interactions)으로 인해서 스핀, 전하, 그리고 격자의 자유도가 비선형적으로 결합되어 중첩된 전자상태 및 복식의 길이 및 시간단위에 대한 다기능 반응이 나타난다. 시료의 구성비, 차원성 (dimensionality), 온도, 압력, 혹은 자기장과 같은 외부적 건드림을 약간만 가해도 경쟁 상호작용들의 역학관계를 급격하게 바꿀 수 있으며 깨진 대칭성을 갖는 바닥상태들 사이의 전이가 나타난다. 이러한 복잡한 전자적 성질은 자기/비자기 및 금속/비금속 전이 경계에서 가장 뚜렷이 나타나며 이러한 상전이점을 절대영도로 억제한 불안정점 (instability point) 또는 양자점 (quantum critical point)에서의 전자적 거동은 특히나 잘 이해되지 못한 상태이다. 양자요동이 물질의 특성을 결정하는 양자임계물질계에 나타나는 고온 초전도 (high temperature superconductivity), 무거운 페르미온 (heavy fermion), 다기능 복합 (multifunctional compexity) 현상 등에 대한 연구가 매우 활발하게 수행되고 있다.

그림 2는 무거운 페르미온 초전도체인 $CeRhIn_5$에 압력과 자기장을 동시에 가해준 상태에서 연구한 결과를 3차원 상도형으로 그린 것으로서 배경색은 전자의 산란에 비례하는 전기전도도의 값을 나타낸다. 예상과 전혀 다르게 초전도 온도가 가장 큰 압력에서 전자산란이 가장 크게 일어나며 그리고 깔때기 모양의 형태를 보인다. 이러한 전기전도도 형태는 양자요동이 물질의 특성을 결정짓는 양자임계물질에서 나타난다. 이것은 초전도돔이 반강자성 상전이 온도가 영으로 간 양자

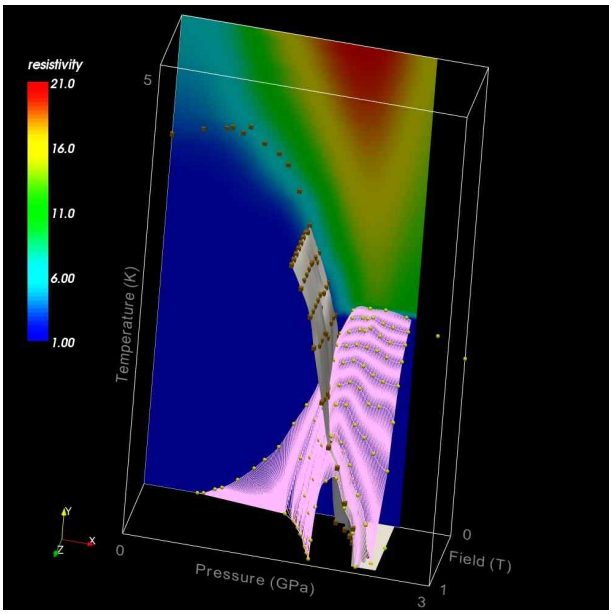

그림 2. 복잡한 전자계인 CeRhIn5에 나타나는 비-페르미 현상과(붉은색 영역) 비정상 초전도 (분홍색 영역) [2]. 압력(x-축)과 외부 자기장(z-축)을 사용하여 반강자성 물질인 CeRhIn5를 양자임계점 근처로 제어했을 때 고전이론으로 설명할 수 없는 비정상 초전도 현상과 비-페르미 현상이 나타난다. 초전도 돔 위에 나타나는 깔때기 형태의 전기비저항은 초전도 돔 안에 숨어있는 양자임계점 때문에 나타난다. 푸른색 영역은 반강자성 상태를 표현한다.

임계점을 가리고 있는 것으로 해석할 수 있으며 초전도 현상이 양자요동으로 인한 새로운 양자상태임을 강력하게 증거한다. 양자임계영역은 경쟁하는 상태들의 에너지준위가 거의 겹치기 때문에 약간의 외부적 건드림에도 바닥상태가 급격하게 바뀐다. 1998년 노벨상을 수상한 R. Laughlin 등은 이러한 민감성으로 인해서 양자임계현상을 연구하는 것의 어려움을 지적하여 "Quantum Critical Conundrum (양자임계 수수께끼)"을 주장하기도 했다 [3]. 이러한 어려움으로 인해서 그동안 접근이 어려웠던 미지의 영역이었던 양자임계영역을 탐구하기 위해 불순물의 효과를 최소화 할 수 있으며 그리고 물체의 바닥상태를 정밀하게 연속적으로 조절할 수 있는 다중 극한환경 즉, 특 압력, 고자기장, 극저온 하에서 체계적인 연구를 수행되고 있다.

3. 초전도연구

대부분의 초전도체들은 전통적으로 행동한다. 예를 들면 초전도 온도 아래서 전자적 들뜸은 BCS (Bardeen-Cooper-Schrieffer) 에너지 갭에 의해 조절되며 그리고 전자적 비열은 온도가 감소함에 따라서 지수 함수적으로 변화한다. 최근 구리 산화물과 무거운 페르미온계를 포함한 다수의 초전도체에서 초전도 갭이 영으로 가는 마디점 (nodes)이 운동량 공간의 페르미 표면의 특정한 방향에 나타남이 보고되었다. 전자적 들뜸 혹은 마디점 준입자들은 낮은 온도에서 나타나고 그리고 전자적 비열은 정상초전도체들과는 달리 온도에 대해 멱함수로 감소한다. 마디점 준입자들은 갭이 없는 정상 초전도체들의 준입자와 달리 페르미 표면의 마디점 들에 한정되어서 다양한 물리적 성질들에 강한 방향의존성을 일으킨다.

초전도체의 소용돌이 상태 (vortex state)에 나타나는 준입자들은 소용돌이 주위로 흐르는 초전도전류로 인하여 도플러효과 (Doppler effects)를 겪게되며 따라서 상태밀도 (density of states) 및 평균자유길이에 변조가 일어난다. 열전도도는 이 두 가지 물리적 양들이 영향을 미치므로 도플러효과를 깨끗하게 분리하는 것이 어렵다. 그러나 저온 비열 값은 상태밀도를 직접적으로 측정하므로 도플러효과의 분리가 가능하다. 저온 정상초전도체들은 저온에서 비열이 온도에 비례하며 그리고 그 비례상수인 γ는 자기장의 크기에 비례한다. 즉, 소용돌이의 밀도가 자기장의 크기에 비례하므로 그 상태밀도에 비례하는 비례상수 또한 자기장의 세기에 비례한다 ($C/T \propto H$). 비정상초전도체에서는 비열의 비례상수인 γ가 외부자기장이 영일 때에도 유한한 값을 가지며 그리고 자기장을 증기시킬 때 도플러효과가 현저한 영향을 미쳐 H1/2에 따라서 변화한다. 여러 초전도체들에서 관측된 자기장의 제곱근에 비례하는 특징은 비정상 초전도를 암시하는 중요한 요소로서 간주되었다. 그러나 초전도 갭에 대한 구체적인 정보, 즉 대칭성에 대한 정보는 여전히 잘 알려지지 않은 어려운 실험적 과제로 남아있었다. 2003년 일리노이대의 M. B. Salamon 교수는 자기장의 방향에 따른 비열을 측정하여 비정상 초전도체인 YNi2B2C의 초전도

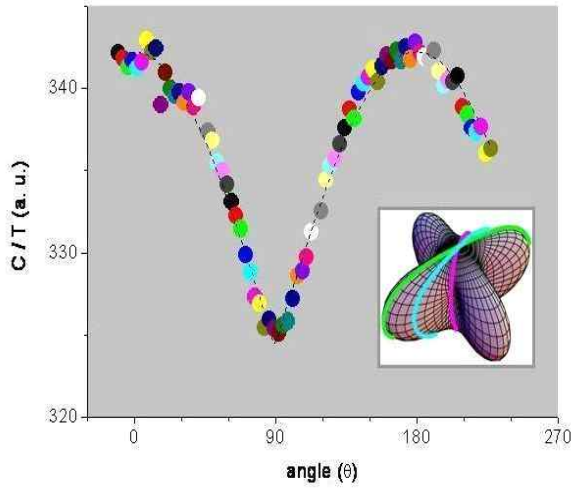

그림 3. 자기장 방향에 따른 비열의 변화. 초전도 갭이 영으로 가는 마디점 (nodes)의 위치에 따라서 초전도 쌍들이 겪는 도플러 효과는 자기장방향 의존성을 가지며 준입자들의 밀도상태의 크기가 변화한다. 즉 비열의 값들이 자기장의 방향에 따라서 변화한다. 그림의 데이터는 방위각을 고정시키고 극점을 통과하는 방향으로 자기장의 방향을 변화시킬 때 얻어진 초전도 상태의 CeRhIn5 결과이다.

갭 대칭성을 밝혔다 [4]. 이 실험은 초전도체의 표면상태에 민감하지 않은 체적효과 (bulk effect)를 통해 초전도 갭의 대칭성을 연구하는 방법을 제시해 주었으며 그리고 여러 다른 그룹들에 의해 그 유효성이 확인되었다.

도플러 효과의 자기장 방향에 따른 상태밀도의 변화는 일반적으로 전기적 비열의 3~4% 이내로 아주 작다. 화학적 치환과 같은 도핑의 효과는 전자적 상태를 변화시키는 것과 더불어서 불순물 효과를 일으킨다. 이와 같은 무질서는 초전도 갭의 이방성을 감소시켜 자기장 방향에 따른 상태밀도의 변화를 감소시킨다. 양자임계점 근방에 나타나는 초전도 상태에 대한 연구는 학문적 그리고 실용적 중요성에도 불구하고 여전히 어려운 난제로 남아있다. 위에서 언급한 바와 같이 화학적 치환에 의한 양자임계점의 조율은 불순물 효과로 인하여 측정가능한 특성들의 값들이 영향을 받는다. 반면에 무질서 효과가 없는 압력을 사용하는 경우에는 사용가능한 측정기술의 부족으로 연구가 불가능하였다. 최근에 출시된 3-축 초전도 자석은 압력셀을 사용할 수 있도록 그 중심의 크기가 커서 양자임계점에 나타나는 초전도를 연구하는 것을 가능하게 할 것으로 예상 된다 [5, 6]. 즉, 자기장방향에 따른 비열 측정방법과 압력셀의 기술을 동시에 복합해서 사용할 때 압력에 의해 유도된 양자임계 초전도체들의 대칭성 연구가 가능할 것으로 예측된다.

4. 양자물질 초전도연구 전망

약 100여년 전 다이아몬드의 비열을 낮은 온도에서 측정했을 때 예상했던 값보다 작게 나왔으며 그리고 온도 의존성도 있다는 것이 드러났다. 그 당시 이 결과를 설명하기 위해 다양한 해석을 내놓았다. 그때까지 알려진 이론과 실험에 따르면 물질의 비열 값은 물체의 구성 성분에 관계없이 일정하다는 것이었다. 예상치 못했던 다이아몬드에 대한 결과에 대해 많은 석학들은 기존의 이론에 약간의 수정을 가했을 때 설명할 수 있다는 입장이었다. 다른 보다 급진적 해석은 이 실험 결과가 기존의 이론으로는 설명이 불가능한 물리학에 있어서 심각한 위기에 봉착해 있다는 것이었다. 1906년 아인슈타인은 플랑크의 양자이론을 고체물리에 적용하여 다이아몬드의 작은 비열 값뿐만 아니라 온도 의존성 까지 설명할 수 있었으며 이 이론은 물리학의 새로운 분야인 양자 고체물리의 태동을 선언하고 있었다.

100년이 지난 현재 물리학에 있어서 새로운 난제가 제시되고 있다. 제1 원리로서 설명이 불가능하며 그리고 지난 50년 이상 고체의 조직원리로 불려온 란다우-페르미 액체가 파괴되는 새로운 양자상태가 관측되었다. 이 파괴현상을 두 가지 전혀 다른 측면에서 바라볼 수 있다. 첫째는 기존의 이론을 고수하며 여기에 보완 되는 여러 가지 물리적 상호작용을 첨가하는 것이다. 다른 관점은 이 실험결과가 근본적인 것이며 아인슈타인이 사고의 전환을 했던 것처럼 우리도 생각의 전환을 통해 새로운 패러다임을 정립하는 것이다. 현재 이 새로운 패러다임의 중요한 컨셉으로서 양자임계성(quantum criticality)과 새롭게 나타나는 양자상태(emergent quantum states)가 대두 되고 있다. 다중 극한물성

환경 및 입자의 다중자유도를 활용하여 지금까지 접근이 용이하지 못했던 미지의 양자 위상공간(uncharted quantum phase space)을 체계적으로 탐구해 나가는 작업이 현재 이루어지고 있으며 앞으로의 연구에 있어서 화두가 될 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] G. R. Stewart, "Non-Fermi-liquid behavior in d- and f-electron metals," Rev. Mod. Phys. 73, 797 (2001).

[2] T. Park et al., "Unconventional quantum criticality in the pressure-induced heavy-fermion superconductor CeRhIn5', J. Phys: Condens. Matter 23, 094218 (2011).

[3] R. B. Laughlin et al., "The quantum criticality conundrum", Adv. Phys. 50, 361-365 (2001).

[4] T. Park et al., "Direct observation of nodal quasiparticles in an unconventional superconductor: field-angle dependent heat capacity of YNi2B2C," Phys. Rev. Lett. 90, 177001 (2003).

[5] T. Park et al., "Probing the nodal gap in the pressure-induced heavy fermion suuperconductor CeRhIn5," Phys. Rev. Lett. 101, 177002 (2008).

[6] X. Lu et al., "Heat-capacity measurements of energy-gap nodes of the heavy-fermion superconductor CeIrIn5 deep inside the pressure-dependent dome structure of its superconducting phase diagram," Phys. Rev. Lett. 108, 027001 (2012).

저자이력

박두선(朴斗先)

1987-1994년 성균관대학교 물리학 학사, 1994-1996년 성균관대학교 물리학 석사, 1997-2003년 일리노이대 물리학 박사, 2003-2008년 미국 로스알라모스 국립연구소 박사후연구원, 2008-현재 성균관대학교 물리학과 부교수, 2012-현재 미래창조과학부 지정 양자물질 초전도 창의단 단장.