

고온초전도체의 비밀 풀었다

글_방윤규 전남대학교 물리학과 교수 ykbang@chonnam.ac.kr

지난 3월 31일, '네이처' 지에 발표된 '플루토늄 화합물의 비일반적 초전도 현상'은 두 가지 점에서 세계적인 이목을 집중시켰다. 그 첫번째는 이번 연구 결과가 고온초전도체 현상을 밝히는 데 결정적인 단서를 제공했다는 점이고, 두 번째는 플루토늄이 포함된 화합물이 초전도 현상을, 그것도 꽤 높은 온도에서 보였다는 점이다. 이 두 가지 이유는 둘 다 매우 중요한 학문적·기술적 의미를 지닌다.

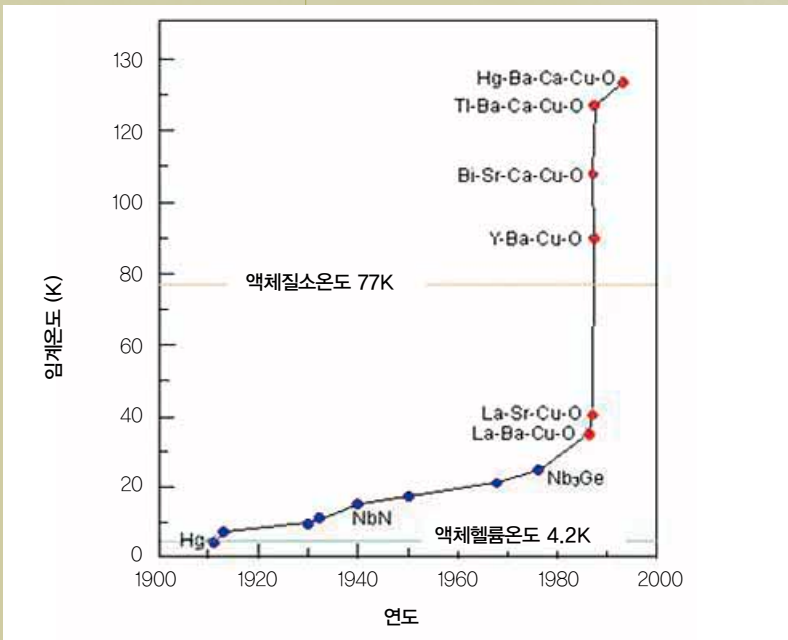
신기술 혁명 이끌 '0' 순위, 고온초전도체

고온초전도체란 1986년에 독일과 스위스의 두 물리학자인 베드노르츠와 뮐러가 발견한 구리산화물 계열의 화합물(LaBaCuO)을 말한다.

이 신물질은 전세계를 흥분의 도가니로 몰아넣었고, 선진국을 포함한 많은 나라들이 이 새로운 물질에 대한 즉각적이고 국가적인 연구지원을 아끼지 않았다. 지금까지도 물리학 역사상 이처럼 뜨거운 연구 열기를 몰고 온 이슈는 전무후무한 사건이었는데, 1986년부터 2000년까지 고온초전도체에 대하여 전세계에서 발표된 연구논문 수는 10만 편이 훨씬 넘는다. 그렇다면, 왜 이처럼 고온초전도체 연구 열기가 뜨거운 것일까? 그것은 반도체라는 물질이 20세기 사회에 미친 영향을 생각해 보면 자명해진다.

1950년대에 시작된 반도체의 발명과 그 발전사는 20세기의 거의 모든 기술문화를 바꾸어 놓았다. 예를 들면, 트랜지스터 라디오를 시작으로 오늘날의 컴퓨터 CPU, 메모리, 반도체 레이저, 태양전지 등에 이르기까지 거의 모든 전자통신 소자 등이 반도체 기술의 응용이다. 이는 하나의 특수한 기능을 갖는 신물질의 개발이 얼마나 중요한가를 단적으로 보여주는 예이다. 따라서 모든 선진국들은 반도체의 발전과 함께 항상 한편으로는 새로운 신물질의 개발에 대하여 국가적인 명운을 걸고 경쟁하고 있는 것이며, 이러한 새로운 신물질의 대상목록 중에 첫번째가 초전도 물질인 것이다.

초전도 물질이란 저항이 0이 되는 물질로 수많은 기술적 응용이 가능한 물질이다. 다만, 현재까지 초전도 물질의 기술적 응용에 한 가지 큰 걸림돌이 있다. 그것은 모든 초전도 물질은 특정 온도 이하로 온도를 낮춘 상태에서만 초전도 성질을 갖는다는 것이다. 이 특정 온도를 초전도



초전도체의 임계온도의 변천과정

임계온도라고 한다. 1986년 이전까지 발견된 여러 종류의 초전도 물질 중에 Nb₃S_n이라는 물질이 초전도 임계온도가 가장 높은 물질인데 이것이 절대온도로 약 20도(섭씨 -257℃)이다. 절대온도는 과학자들이 쓰는 온도로 물질이 존재할 수 있는 가장 낮은 온도를 0K로 정의한 온도체계이고, 우리가 일상생활에서 사용하는 섭씨온도는 물이 어는 온도를 0℃로 정의한 온도체계이다. 절대온도를 섭씨온도로 바꾸려면, 절대온도 xK = 섭씨(X-273)C 이다. 따라서 초전도물질을 이용한 여러 기술을 개발할 때, 경제적으로 가장 어려운 점이 냉각장치가 되는 셈이다. 만약, PC를 사용하기 위해서 항상 영하 253℃로 온도를 낮추어야 한다면, 집이나 사무실은 대부분의 공간을 냉각장치로 꽉 채워야 할 것이다.

베드노르츠와 뮐러가 발견한 구리산화물 초전도체는 임계온도 30K인 LaBaCuO에서 시작하여 새로운 변종의 구리산화물이 계속 합성되어서 수운을 포함한 'HgBaCaCuO' 라는 복잡한 화합물은 임계온도가 150K까지 이르게 되었다. 이제, 임계온도를 100K만 더 끌어 올린다면 영하 25℃ 정도에서 작동하는 초전도 물질로서 새로운 기술문명의 서막이 열리게 되는 것이다. 그러나 HgBaCaCuO 이후 임계온도는 더 이상 올라가지 않고 답보 상태에 있으며, 이론적으로도 아직 구리산화물 고온초전도체 현상의 원인이 밝혀지지 않고 있는 상황이었다.

전자들이 쿠퍼쌍 이룰 때 초전도현상 일어나

보통 금속이란 전류가 잘 통하는 물질을 말한다. 전기적인 성질만 말할 때는 도체라고 부르기도 한다. 이 때, 전류가 잘 흐르는 이유는 금속내에 자유롭게 움직일 수 있는 전자들이 많이 있기 때문이다. 보통 금속에는 자유전자가 10²²~10²³ 개/cm³가 있다. 그러나 아무리 좋은 도체라고 하더라도 저항이라는 것이 있으며, 이는 전류가 흐를 때 에너지 손실을 가져온다. 저항의 원인은

전자들의 충돌 때문에 생기는데, 이러한 충돌은 제 각각 움직이는 전자들 상호간 또는 전자와 금속내부에 있는 원자들간에 생긴다.

초전도체내에서는 전자들이 무질서하게 움직이는 것이 아니라, 모든 전자들이 전체적으로 완벽한 하나의 질서 있는 집단을 이루어 움직인다. 그러나 이러한 질서 있는 집단을 이루기 위해서는 필수조건이 있는데, 그것은 먼저 모든 전자가 두 개씩 쌍을 이루어야 한다. 이러한 전자쌍을 발견자의 이름을 따서 '쿠퍼쌍' 이라고 부른다. 일단 전자들이 쿠퍼쌍을 이루면, 그 다음은 쿠퍼쌍의 양자역학적 성질 때문에 자동적으로 모든 쿠퍼쌍이 전체적으로 하나의 질서 있는 집단을 형성하며, 이러한 상태에서는 모든 전자들이 집단으로 움직이므로 충돌이 발생하지 않는, 즉 저항이 없는 초전도 상태가 된다.

따라서 초전도현상의 필요충분조건은 전자들의 쿠퍼쌍을 형성하는 것이다. 그런데, 이 쿠퍼쌍의 형성은 전자들의 성질을 생각하면 그리 쉬운 일이 아니다. 즉, 전자들은 모두 마이너스 전하를 띠고 있으며, 따라서 모든 전자들은 서로 매우 강력한 힘(쿨롱힘)으로 밀어내려 하고 있다. 이러한 상태에서 두 개씩의 전자를 쿠퍼쌍으로 묶으려면 다른 종류의 끌어당기는 힘이 필요하다. 1986년 이전의 일반적인 초전도체에서는 이 전자들을 두 개씩 쿠퍼쌍으로 묶어주는 힘의 원인이 원자들의 진동이라는 사실이 이론과 실험적 연구에 의하여 밝혀져 있다. 그러나 1986년에 발견된 구리산화물 계열의 고온초전도체에 있어서는 지난 20년간의 연구에도 불구하고 쿠퍼쌍의 원인이 밝혀지지 않고 있었으며, 다만 일반적인 초전도체에서와 같은 원자들의 진동이 원인이 아니라는 사실만 알려져 있었다. 따라서



고온초전도체 연구에 있어 가장 중요한 문제는 쿠퍼쌍을 묶어주는 힘을 찾아내는 것이었다.

‘원자 자기모멘트의 진동’이 쿠퍼쌍의 비밀

플루토늄 초전도체 화합물은 초전도 임계온도가 약 20K가 되는 물질로서 그다지 높은 임계온도를 갖는 물질은 아니지만, 이번 연구에서 두 가지 중요한 점을 밝혀냈는데, 고온초전도체의 비밀, 즉 쿠퍼쌍의 원인을 밝히는 중요한 단서를 제공했다는 점이다. 첫번째는, 플루토늄 화합물의 초전도 특성이 고온초전도체의 초전도 특성과 정확히 같다는 것을 밝혀냈다. 여기서, 초전도 특성이란 저항이 0으로 떨어지는 것 이외에 초전도 임계온도 아래에서 초전도 물질마다 조금씩 다른 열역학적·전자기적 성질을 갖는 것을 말한다. 예를 들면, 초전도상태에서의 비열이나 열전도성 등의 특성이 다를 수 있다. 이렇게 초전도 상태에서 다른 특성을 나타내는 원인은 다시 쿠퍼쌍의 구조에 그 원인이 있다.

두 개의 전자가 묶이는 것은 마치 두 개의 전자가 서로 가까운 거리를 유지하며 춤을 추는 것과 같은데, 이 때 여러 종류의 춤의 스텝을 밟을 수 있다고 생각할 수 있는데, 어떤 종류의 춤 스텝을 밟느냐 하는 것은 어떤 종류의 힘이 쿠퍼쌍을 만드느냐에 따라 결정되며, 춤의 스텝이 다른 것에 따라 초전도 상태에서의 여러 초전도 특성들이 달라지는 것이다. 원자의 진동에 의해 만들어지는 쿠퍼쌍은 가장 단순한 스텝을 취하는데, 두 개의 원자가 일정 거리를 유지하며 단순히 둥글게 돈다고 생각하면 된다. 이를 s-파동 쿠퍼쌍이라고 한다.

고온초전도체에서는 초전도 상태에서의 물리적 특성들을 측정하여 분석한 결과 쿠퍼쌍의 구조가 양자 역학적으로 소위 d-파동 함수 모양(d-파동 쿠퍼쌍)을 형성함이 알려져 있었다. s-파동 쿠퍼쌍으로 이루어지는 초전도체를 일반적 초전도체라고 하며, 이와 대비하여 s-파동이 아

닌 쿠퍼쌍으로 만들어지는 초전도체를 비일반적 초전도체라고 한다. 그런데 이번에 연구한 플루토늄 초전도체의 초전도 특성을 분석한 결과 이것이 고온초전도체의 특성과 정확히 같음을 밝혀냄으로써, 고온초전도체와 플루토늄 초전도체의 쿠퍼쌍의 구조가 같음을 입증한 것이다.

두 번째로 이번 연구의 중요한 결과는, 플루토늄 초전도체에서 쿠퍼쌍을 형성하는 힘이 원자의 진동이 아니라 원자의 자기모멘트의 진동이 원인임을 추가로 밝혀냈다. 이러한, 사실은 고온초전도체의 쿠퍼쌍의 원인이 되는 힘도 원자 자기모멘트의 진동이라는 사실을 간접적으로 밝혀낸 것이다. 이로써 고온초전도체 현상의 최대의 비밀이었던 쿠퍼쌍을 매개하는 힘의 정체를 밝힌 것이다.

이번 연구결과는 고온초전도체의 쿠퍼쌍의 원인을 밝혀낸 것 이외에도 몇 가지 중요한 부산물들이 있다. 이제까지 알려진 d-파동 쿠퍼쌍으로 만들어진 초전도 물질 중에는 1970년대부터 발견되어 연구되고 있는 중페르미온 초전도물질들이 있는데, 이들 중페르미온 초전도체의 쿠퍼쌍도 원자 자기모멘트라는 것이 알려져 있었다. 다만, 중페르미온 초전도체들은 초전도 임계온도가 보통 1K 보다 낮은 극저온에서 나타나므로 학문적 흥미 이외에는 그다지 큰 주목을 받지 못하였다. 따라서 이번 연구 결과는 원자 자기모멘트의 진동에 의해서 매개되는 초전도 현상이 초



PuCoGa5의 사진

전도 임계온도가 1K 이하인 중페르미온 초전도 물질에서부터 플루토늄 초전도체의 약 20K, 그리고 고온초전도체인 경우에 약 150K까지의 폭 넓은 온도 영역의 초전도 현상을 설명할 수 있는 보편적 이론으로 확립되었다는 사실이다. 이러한 사실은 꿈의 상온 초전도물질의 탐색을 보다 체계적으로 수행할 수 있는 귀중한 지침이 될 것이다.

중페르미온 화합물은 응집물질물리학에서 가장 흥미 있는 문제 중의 하나로 금속상태에서 이 화합물들의 자유전자의 유효질량을 측정하면 일반 금속의 자유전자에 비하여 그 무게가 수백 배에서 수천 배까지 무거워지는 물질이다. 아직까지 그 정확한 원인은 밝혀지지 않고 있다

‘핵자기모멘트 이완율’로 쿠퍼쌍 구조 알 수 있어

초전도 상태의 쿠퍼쌍의 구조를 알아내는 실험방법에는 여러 가지가 있지만, 이번 연구에서 사용한 방법은 핵자기공명 측정법이었다. 이 방법은 원자핵이 가지고 있는 핵자기 모멘트의 운동을 이용한다. 쿠퍼쌍을 매개하는 원인으로서 원자 자기모멘트와 핵자기모멘트는 전혀 다른 것이다.

먼저 원자는 양성자와 중성자로 이루어져 있는 중심(원자핵)이 있고, 그 주위를 핵을 이루는 양성자의 개수만큼의 전자가 둘러싸고 있다. 핵자기모멘트란 원자핵이 가지고 있는 자기모멘트를 말하며, 원자 자기모멘트란 원자핵 주위의 전자들이 만들어내는 자기모멘트이다. 일반적으로 핵자기모멘트의 크기는 원자 자기모멘트에 비하여 수백분의 1밖에 되지 않으며, 일상생활에서 접하는 자성물질들은 원자 자기모멘트의 집단적인 현상이다. 그러나 이렇게 작은 핵자기모멘트를 외부에서 자기장을 걸어서 한쪽 방향으로 정렬시킨 후 외부 자기장을 끈다면, 열적 요동에 의해서 정렬되었던 핵자기 모멘트가 다시 흐트러지는 상태로 돌아가는데, 이 때 이 이완율이

플루토늄(Pu)

플루토늄은 1941년에 인간에 의해서 최초로 합성된 원자이다. 원자핵(Pu239)의 불안정성 때문에 핵무기의 연료로 쓰이는 전략물질로 최근의 북핵 문제 등과 관련하여 언론에도 자주 보도되어 우리에게도 그 이름이 잘 알려진 원자이다. 그러나 이 Pu은 합성된 초기부터 지금까지 복잡하며 불안정한 물성 때문에 과학자와 공학자들을 괴롭히기도 하고, 또한 끊임없는 도전의 대상이기도 한 신비의 물질이다.

이는 Pu의 핵분열 성질과 전혀 관계없는 Pu 원자를 둘러싸고 있는 전자들에 의한 특성인데, 이 때문에 Pu 덩어리자체는 아주 작은 온도나 압력의 변화에 따라 거의 액체 같은 상태에서부터 세라믹처럼 잘 부서지는 상태, 또 금속처럼 단단하면서 연성이 있는 상태 등 적어도 5~6가지의 다른 물질상태가 된다. 이러한 특성은 일정한 안정적 모양을 유지할 필요가 있는 핵폭탄의 탄두를 만들 때부터 매우 심각한 기술적 문제를 제공하였다.

이러한 Pu의 매우 이상한 성질은 Pu 원자의 최외각 전자인 소위 f-궤도 전자의 특성 때문인데, PuCoGa5 초전도체 원인으로 밝혀진 원자 자기모멘트의 진동의 근원도 바로 이 Pu의 f-궤도 전자로부터 기인하는 성질이다.

온도에 따라 변하며 이는 핵주위의 전자들의 상태, 특히 자유전자들의 상태에 따라 민감하게 다르게 나타난다. 따라서 이 핵자기모멘트의 이완율을 측정하여, 금속의 전자 상태가 보통 금속상태인지 또는 초전도 상태인지는 물론이고, 초전도 상태에서의 쿠퍼쌍의 자세한 구조까지도 알아낼 수 있는 매우 뛰어난 실험방법이다. 이 원리를 이용하여 만들어진 의료장비가 바로 MRI 장치이다.

이번 연구에서는 PuCoGa5 화합물의 초전도 상태에서의 코발트와 갈륨의 핵자기모멘트의 이완율을 온도에 따라 측정하여 이를 이론계산과 면밀히 비교 분석한 결과 PuCoGa5 초전도체의 쿠퍼쌍의 구조가 d-파동 쿠퍼쌍이라는 것을 확인하였다. 또한 PuCoGa5 초전도체의 쿠퍼쌍의 원인이 원자 자기모멘트의 진동이라는 사실도 실험과 이론계산을 통하여 밝혀냈던 것이다.



글쓴이는 미국 레트거스대 물리학과에서 박사학위를 받은 후, 독일 막스 플랑크 연구소 연구원, 이탈리아 트리에스테 국제이론물리연구소 연구원을 지냈다.