

전기저항 제로에 관한 이론적 연구

Theoretical study of zero electrical resistance in superconductor

DaeHyeon KANG
samplemoon@korea.kr

초 록(Abstract)

Why? electrical resistance is zero in superconductor under critical temperature T_c . I think that can be explained by the raman scattering data, conduction band, electronic band full filled by electrons, bandgap($\Delta\epsilon$), fermi's golden rule and statistical mechanics. this works takes the electrical resistance is proportional to $\exp(-\frac{\Delta\epsilon}{kT})$, approximately.

서 론

전기저항이란 도체에 전류가 흐르는 것을 방해하는 작용이라고 말하는데 낮익은 수식 전압(V)= 전류(I) 곱하기 저항(R) 에서 전기저항의 의미를 볼 수 있다.

1900년대 초에 제안된 드루드-로렌츠의 전기저항 이론은 이러하다.

금속원자의 최외각 전자만이 전기전도에 관여한다. 원자핵에 약하게 묶인 전자만이 자유롭게 운동한다. 전류는 이러한 전자들의 유동에 의해 생긴다.

외부에서 걸어 준 전위차가 없을 때는 결정격자의 열진동 때문에 전자는 모든 방향으로 운동하는데, 이러한 운동을 평균하면 알짜 변위는 0(Zero)이 된다는 것이다.

도선에 전위차가 걸려있을 때 전자는 음극에서 양극으로 움직이는 데 전자들은 여전히 모든방향으로 활발히 움직이지만 알짜속도는 전기력을 걸어 준 방향으로 생긴다.

전기저항은 전자가 도선 안의 포논(이온)과 충돌한 결과를 계산하면 좀 어렵지만 얻을 수 있다.

사실, 이 모델은 매우 단순하면서도 많은 관찰결과를 설명하는데 훌륭한 성공을 거두었고. 이것을 고전적 모델이라고 부른다. 수식으로 표현하면 아래와 같다. [1]

$$I = \frac{ne^2\tau}{m} E_o \tag{1}$$

I 전류, n 전도전자밀도, e 전하량, τ 충돌시간, m 전자질량, E_0 전기장세기

양자역학을 이용하여 에너지 양자로 원자세계의 특성을 설명하여 이론이 좀 더 발전하였으며 전자가 전자가 금속 안에서 어떻게 움직이고 불순물의 영향은 무엇인지 온도에 의한 원자의 무질서와 진동 등을 계산할 수 있게 되어 대체적으로 다음과 같이 전기저항의 원인을 설명한다.

OK 일때 완전한 결정 내에서는 원자의 진동이 전자의 운동을 방해하지 않지만 불순물이 있거나 OK 이상일 때는 원자의 진동이 전자의 운동을 방해한다고 본다.

요약하면 현재 학자들은 위에 밑줄 그은 글 내용대로 전기저항 개념을 가지고 있다.

본 론

양자역학을 이해했다면 전기저항을 그런 방식으로 이해하는 것은 문제가 있다는 것을 알 수 있다. 양자역학의 양자상태 개념을 적용하면 우리는 흥미로운 사실을 알게된다. 양자역학은 입자의 위치나 운동에는 관심을 두지 않는다. 단순히 에너지양자상태에 관심이 있다.

가령, 도체의 포논과 전자가 충돌했다고 하자. 충돌할 때마다 전자가 포논에 에너지를 주거나 포논으로부터 에너지를 받을 수 있을까?

양자역학에 따르면 답은 "절대 그렇지 않다"이다. 전자와 포논의 충돌이 언제나 상호간의 에너지의 전달을 수반하는 것은 아니다. 그러면 상호간에 에너지의 전달이 없다면 그 충돌이 전기저항이 될 수 있는가? 충돌 전후에 아무런 변화가 없으므로 당연히 전기저항이 될 수는 없다.

이해를 돕기 위해 가령 수소원자에 빨간색 광자를 쬐었다고 하면 수소원자의 전자는 어떤 반응을 할까? 아무 반응이 없다. 1s 상태의 전자는 빨간색 광자와 충돌해도 아무런 변화가 없다. 이 전자는 하던 일을 계속하는 것이다.

왜냐하면 수소원자의 1s 상태와 2s 또는 2p상태 사이의 에너지 차이가 빨간색 광자의 에너지보다 크기 때문이다. 대신 수소원자 전체와 충돌을 거쳐 컴프턴 산란만을 할 뿐이다.

도체의 전도대의 전자도 이와 똑같은 행동을 한다. 어느 밴드의 전자가 현상태보다 바로 위의 에너지 준위와의 에너지차 $\Delta\varepsilon$ 가 있을 때 $\Delta\varepsilon$ 보다 작은 에너지를 갖는 포논이나 광자가 와서 충돌할 때 전자는 아무런 변화를 격지 않는다.

포논은 그저 지나가는 것이다. 광자도 역시 그 상태의 전자를 그냥 지나칠 뿐이다.

그리고 전자가 현 상태보다 낮은 에너지 준위에 빈 상태가 없다면 포논에 에너지를 주거나 광자를 방출할 수 없다. 전기저항을 받지 않는 것이다. 이런 내용은 양자역학이 암시하는 것이다.

나는 이 부분이 고체의 초전도 현상의 핵심이고 전기저항이 제로가 되는 이유라 본다.

현상보다 낮은 에너지 상태가 존재한다면 광자나 포논형태로 에너지를 방출하고 낮은 에너지 상태로 즉, 전류를 형성하지 않았던 상태로 변화함을 의미한다. 그러므로 비록 도체가 완전결정이고 0K 온도상태라도 전기저항은 반드시 존재한다

초전도 = 전기저항 제로

전기 초전도 상태란 고체의 전자가 전기장이나 기타의 방법으로 얻어진 에너지 상태를 아주 오랜기간 유지한다고 보면 된다. 그런 조건을 가진 도체의 전자상태는 어떤 모습일까?

고체의 전자의 밴드이론에서 보면 하나의 전도대가 빈 상태가 없이 전자로 거의 채워진 상태이다.

실제로 자연에는 0 K 상태가 없어 빈자리가 얼마간은 있게 된다. 전도대가 거의 채워지면 전기장에 의해 전도대 내의 모든 전자가 에너지를 얻어 그 전도대에 존재할 수 있다. 하지만, 이 상태에서 전자가 에너지를 버릴려면 자신의 준위보다 낮은 준위가 비어 있어야하기 때문에 제약이 따른다.

즉, 에너지를 포논이나 광자의 형태로 방출하고 상태를 바꾸려해도 방출되는 에너지의 크기가 아주 작아 원래 상태로 환원되는데 지나간시간이 걸린다. 그리고 이와같은 전도대의 형성은 이 전도대 위에 에너지 갭이 존재해야 가능하다. 이러한 밴드모델을 가정하고 페르미의 골덴룰과 통계규칙을 이용하여 적절히 결합하면 전기저항이 온도에 따라 지수함수적으로 감소함을 알 수 있다.

수식으로 표시하면 이러하다.

전자가 페르미입자이고 위아래 전도대사이에 에너지 갭($\Delta\epsilon$)이 있으며 전자는 아래 전도대를 꼭 채울 수 있는 양이며 페르미준위가 갭안에 있다면 아래 전도대에 단위체적당 빈상태의 수치 $N(T)$ 는 다음과 같다. [2]

$$N(T) = 2 \left(\frac{2\pi mkT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{\Delta\epsilon}{kT}\right) \quad (2)$$

그리고, 전자가 상호작용(M)을 통하여 단위시간동안 천이하는 확률 R(by Fermi's golden rule) [3]

$$R = \frac{2\pi}{h} |M|^2 \rho(E) \quad (3)$$

여기서 식(3)의 $\rho(E)$ 는 전자의 말기상태의 상태밀도이며 (2)식의 $N(T)$ 와 같은 의미인데. 에너지 갭 아래 전도대의 빈상태보다 클 수는 없다. $\rho(E) \leq N(T)$ 이다

(2),(3)식을 결합하면 전자와의 상호작용 매트릭스 M에 관계없이 온도가 내려감에 따라 하나의 전자가

단위시간 동안 천이하는 확률이 지수함수적으로 감소함을 보여준다. 따라서 (1)식의 충돌시간 τ 가 온도가 내려가면 커진다는 의미가 되므로 초전도현상을 설명하게 되는 것이다.

(3)식의 M은 전도전자가 포논, 불순물, 결정불규칙성, 광자, 기타 어느 물질과의 상호작용 중 아무거나 가능하다.

결론

초전도체의 전기저항 제로가 나타나는 원인은 하나의 전도대가 전자로 전부 채워지고 전도대 바로 위에 에너지갭($\Delta\varepsilon$) 존재해야 가능하다. 여기에 풀어야 할 문제가 있다. 전도대가 전자로 꽉 채워지면 전류가 흐를 수 있는가이다. 초전도체의 라만산란실험에 의하면 초전도상태에서 초전도 갭아래 양자상태는 전자로 채워져 빈상태가 없는 것으로 나타난다. 보통 고체물리에서 밴드가 전자로 채워지면 전류가 흐르지 않는다고 말하는데, 이런 주장은 초전도체의 라만산란실험과는 합치되지 않는 것이다.

또 하나, 2개의 전자가 짝을 지어 갭을 만들고 같이 행동한다면 라만산란실험과 같이 초전도갭 아래 상태가 전자로 채워진 것으로 나타날까 하는 점이다. 예를 들어, 수소원자 2개가 하나의 수소분자를 이루면 수소분자는 하나의 물체로서 나름의 양자상태를 갖게된다. 2개의 수소원자의 결합에너지보다 작은 에너지 상태를 갖게된다. 초전도상태의 라만산란실험에서 초전도 갭이하의 라만산란은 급격히 줄어드는데 실제로 2개의 전자가 결합을 해서 초전도갭을 만드는 것이라면 갭이하의 라만산란이 줄어들면 안된다고 보여진다. 초전도현상에서 전자쌍 개념이 라만산란실험과 합치되지 않는 문제가 남아 있다. 아울러, 초전도갭은 “전자쌍의 결합에너지”보다는 결정격자에 의해 결정되는 전자밴드의 에너지 갭이라고 나는 추측하고 있다.

References

- [1] *Solid state and semiconductor physics*, John P. Mckelvey, harper&row, pp186-188
- [2] *Solid state and semiconductor physics*, John P. Mckelvey, harper&row, p266
- [3] *Quantum physics*, Stephin Gasiorowicz, john wiely&sons,inc , p 350