중시계 상호작용 효과

DOI: 10.3938/PhiT.20.040

이민철·최만수

Many-body Correlations in Mesoscopic Systems

Minchul LEE and Mahn-Soo CHOI

Both classical and quantum principles coexist in the mesoscopic world, something between the microscopic and the macroscopic worlds. More precisely, mesoscopic physics studies how the “coherence”, which governs the wave property and especially the interference effect of matter, disappear gradually as the scale increases from the microscopic to the macroscopic scale. Another important issue in mesoscopic physics is many-body effects, which originate from the interaction among electrons. Many-body effects are a fundamental issue in all modern physics, but mesoscopic physics is particularly well adopted for their study because mesoscopic systems allow for tunability of various parameters, which is not possible in bulk systems. Further, the interplay between coherence and many-body effects leads to rich physical phenomena and will provide an essential clue to a deeper understanding of many-body effects. In this article, we briefly review recent studies and developments of many-body effects in mesoscopic physics, putting some emphasis on mesoscopic Kondo effects.

저자약력

이민철 교수는 서울대학교 이학박사(2003)로서 고려대학교 연구원, 스위스 바젤대학 연구원, 마르세이 이론물리연구소 연구원을 거쳐 현재 경희대학교 응용물리학과 교수로 재직 중이다.
(minchul.lee@khu.ac.kr)

최만수 교수는 포항공과대학교 이학박사(1998)로서, 스위스 바젤대학 연구원, 고등과학원(KIAS) 연구원을 거쳐, 2002년부터 고려대학교 물리학과 교수로 재직 중이다. (choims@korea.ac.kr)

들어가는 글

미시 세계와 거시 세계의 중간에 해당하는 “중시 세계” 혹은 중시계(mesoscopic systems)는 고전역학과 양자역학의 지배원리가 공존한다. 좀 더 정확히 말해, 입자가 파동성 특히 간섭성을 얼마나 잘 보여주는지를 나타내는 “결맞음(coherence)”이 미시 세계에서 온전히 살아 있다가 거시 세계로 가면서 여러 이유로 결맞음이 사라지거나 줄어드는 현상이 나타나기 시작한다. 이러한 “결잃음(de-coherence)” 과정은 물리학에서 뿐만 아니라 자연의 존재 양식을 묻는, 철학적으로도 중요한 주제이다.

중시계 물리학에서 다루는 또 하나의 근본 문제는 전자들 간의 상호작용에 의한 다체효과(many-body effects)이다. 사실 다체효과는 중시계 물리학뿐만 아니라 모든 현대 물리의 근본 문제이기도 하다. 중시계 물리 분야에서 다체효과를 특히 중요하게 다루는 이유는 여러 가지 다체상태를 인위적으로 구현하고 제어할 수 있어서, 다체효과를 체계적으로 연구할 수 있는 장점이 있기 때문이다. 미해결 다체상호작용 효과들을 중시계를 이용하여 연구하려는 움직임이 세계적으로 있으며, 새로운 다체효과들이 중시계를 기반으로 해서 예측되고 있다.

더구나 중시계 물리 분야에서는 결맞음/결잃음 현상과 다체효과의 상호작용(interplay)의 결과 나타나는 여러 현상을 연구함으로써 다체효과에 대한 이해를 넓힐 수 있다.

이 글에서는 중시계 콘도효과(Kondo effect)를 중심으로 중시계 다체효과에 대한 최근 연구 동향을 간략히 살펴보기로 한다.

양자점에서의 콘도효과

콘도 효과가 발생하려면 스핀자유도를 가진 자성 불순물(magnetic impurity)이 존재하여야 한다. 여기서 자성 불순물

Fig. 1. (a) Spin tunneling through a quantum dot with an orbital level ϵ_0 via virtual processes, accompanying the spin flip of the quantum-dot electron. Here the quantum dot is in the Coulomb blockade regime where adding one electron is prohibited by the Coulomb energy U . (b) Appearance of the Kondo resonant level at the Fermi energy.^[1,2]

은 코발트나 철과 같은 원자나, 보다 복잡한 구조의 자성을 띤 분자, 또는 반도체 같은 고체 내에 형성된 양자점(quantum dot)일 수 있다. 이런 자성 불순물이 자유전자를 가진 전도체와 연결되어 둘 사이에 전자의 양자 터널링(quantum tunneling)이 가능해지면 그림 1(a)에 그려진 과정을 통해서 콘도 효과가 일어난다. 전도체는 페르미 준위(Fermi level)까지 전자가 차있기 때문에 불순물에 있는 전자가 전도체로 이동하려면 매우 큰 에너지(ϵ_0)가 필요하기에 고전역학적으로는 에너지 보존법칙에 따라 이런 과정이 불가능하다. 하지만 양자역학에서는 불확정성원리에 의해서 $\hbar/|\epsilon_0|$ (여기서 $\hbar$ 는 플랑크 상수이다)의 매우 짧은 시간 동안에는 에너지 보존의 제한을 받지 않으므로 이 시간 동안에 전자가 불순물로부터 나오고 다른 전자가 불순물로 들어갈 수 있다. 이 과정에서 그림 1(a)와 같이 불순물에 있는 전자의 스핀 상태가 뒤집힐 수 있다. 이런 스핀 교환(spin exchange) 과정이 중첩이 되면 시스템의 전자에너지 구조를 바꾸어 페르미 준위에 콘도 공명 준위를 형성한다(그림 1(b) 참조). 콘도 상태는 불순물의 전자와 자유전자의 스핀 교환 과정에 의해 발생하므로 파동함수가 불순물을 넘어 확장되어 콘도 구름(Kondo cloud)을 형성한다. 또한 자유전자가 불순물의 스핀을 효과적으로 가려(screening) 콘도 상태는 스핀 홀접상태(spin singlet)를 이룬다. 흥미롭게도 불순물의 전자 에너지 준위 ϵ_0 의 위치나, 쿨롱 상호작용의 크기 U 에 상관없이 콘도 공명 준위는 언제나 페르미 준위에 발생하고, 따라서 전 시스템은 항상 공명상태에 있게 된다.^[1,2] 콘도 공명이 발생할 유일한 조건은 열 요동이 콘도 효과를 일으키기 위한 결맞은 스핀 교환 과정을 깨지 않도록 온도가 콘도 온도 T_K 보다 낮아야 한다. 앤더슨 모델(Anderson model)에 눈금잡기 이론(scaling theory)을 적용하면 콘도 온도는 $T_K = (1/2) \sqrt{\Gamma U} \exp[\pi \epsilon_0 (\epsilon_0 + U)/\Gamma U]$ 로 구할 수 있다.^[3] 여기서 Γ 는 불순물과 전도체의 연결로 인한 불순물 에너지 준위의 넓어짐 크기이다. 변수들에 지수적으로 의존하기 때문에 콘도 온도는 넓은 범위에 걸쳐 변화시킬 수

Fig. 2. (a) Conductance as a function of gate voltage, showing the conductance increases as the temperature is lowered from 1 K (orange) to 24 mK (light blue) when the dot is occupied by the odd number of electrons. (b) Conductances as functions of temperature for several gate voltages in the Kondo regime. (c) Scaled conductances as functions of temperature divided by the corresponding Kondo temperature.^[4]

있다. 콘도 온도는 콘도 현상을 기술하는 유일한 물리적 변수로서, 이와 관련된 모든 물리량(예를 들면 저항이나 전도율)은 모두 온도와 콘도 온도의 비율 T/T_K 만의 함수로 결정된다(그림 2(b, c) 참조).^[4]

콘도 공명 준위는 페르미 준위에 형성되기 때문에 낮은 에너지의 자유전자들을 산란시키는 데 매우 큰 기여를 한다. 따라서 금속 내 자성 불순물에 의한 콘도 현상이 발생하면 자유전자들을 산란시켜 전류의 흐름을 방해하여 저항을 증가시킨다. 반대로 양자점 구조에서는 콘도 효과가 양자점에 연결된 전극들 사이의 전자 산란을 도와 오히려 다른 전극 사이의 전도율을 증가시킨다. 그림 2(a)를 보면, 양자점에 전자가 짝수 개 차있을 경우에는 높은 쿨롱 에너지로 인해 전자의

REFERENCES

- [1] L. I. Glazman and M. E. Raikh, *Pis'ma Zh. Eksp. Theor. Fiz.* **47**, 378 (1988).
- [2] T. K. Ng and P. A. Lee, *Phys. Rev. Lett.* **61**, 1768 (1988).
- [3] F. D. M. Haldane, *Phys. Rev. Lett.* **40**, 416 (1978).
- [4] W. G. van der Wiel *et al.*, *Science* **289**, 5487 (2000).

Fig. 3. (a,b) Spin tunneling processes in the presence of the Zeeman splitting without [(a)] and with [(b)] bias between leads. (c) External magnetic field splits the Kondo resonance peak into two peaks separated by Zeeman splitting.^[7]

터널링이 방해받지(쿨롱 가로막힘, Coulomb blockade) 온도를 낮출수록 전도율이 낮아진다. 하지만, 양자점에 전자가 홀수 개 차있어 양자점의 전체 스핀이 1/2로 자성을 띠게 될 경우, 온도를 낮출수록 전도율이 증가하여 $2e^2/h$ 에 도달함을 볼 수 있다. 전도율 $2e^2/h$ 은 전자의 단일 채널이 낼 수 있는 최대 전도율로 페르미 준위에 콘도 공명 준위가 발생하였다는 증거가 된다.^[1,2,4-6]

여러 가지 중시계 상호작용 효과

콘도 효과가 중시계 현상에서 주목을 받는 또 다른 이유는 다른 종류의 다체상호작용과 경쟁하면서 다양한 현상을 일으키기 때문이다. 그림 3에서와 같이 외부자기장이 가해지면 지만 갈라짐(Zeeman splitting)에 의해 전자의 두 스핀 상태의 에너지가 갈라진다. 따라서 에너지 보존을 만족시키면서 스핀 교환 과정을 일으키기 위해서는 지만 갈라짐의 에너지를 외부에서 공급해주어야 한다. 결과적으로 외부자기장이 가해지면 기존의 콘도 공명 현상이 사라지고 대신에 전극 사이의 전압차이가 지만 갈라짐과 같을 때 콘도 효과에 의한 공명현상이 발생한다[그림 3(c) 참조].^[7]

원자나 분자에서와 마찬가지로 양자점 내에서도 쿨롱상호작용과 파울리 배타원리에 의해서 전자 사이에 효과적인 스핀 상호작용이 발생한다. 전자가 짝수 개 차있는 양자점에서는 이런 스핀 상호작용으로 인해 스핀 홀접-삼접(singlet-triplet) 전이가 발생할 수 있음은 최근에 실험으로 검증되었다.^[8,9] 이와 같은 스핀 교환 작용은 양자점 내 전자 사이의 파동함수가 겹쳐져 발생할 수도 있지만 전극의 자유전자를 매개하여 발생할 수도 있고 후자를 RKKY 스핀 결합이라고 부른다. 이러한 양자점 스

Fig. 4. Kondo correlation versus direct spin exchange correlation.

핀 사이 스핀 교환 작용은 강자성 또는 반강자성을 띌 수 있고, 양자점 스핀과 자유전자 사이의 스핀 교환 작용과 경쟁을 하여 콘도 효과를 억제하거나 새로운 종류의 콘도 효과를 발생시키기도 한다. 양자점의 두 전자가 스핀 삼접 상태에 있는 경우에는 자유전자와의 스핀 교환 작용으로 한 전자만이 콘도 효과에 참여하여 가려진다. 남은 한 스핀은 자유로이 요동할 수 있어 기존의 콘도 효과와 다른 상태가 되고 이를 덜 가려진 $S=1$ 콘도 상태라 지칭한다. 반대로 양자점 스핀들이 강력하게 스핀 홀접 상태를 이루면 자유전자와의 스핀 교환이 억제되어 콘도 효과가 발생하지 않는다. 하지만 스핀 홀접 상태가 충분히 약하면 한 스핀은 자유전자에 의해 가려지는 콘도 효과에 참여하고 남은 스핀은 기존의 반강자성 스핀 결합의 도움으로 콘도 공명 준위에 생성된 유도된 자유전자와 스핀 교환을 하여 둘째 콘도 효과를 발생시킨다. 이를 두 과정 콘도 효과(two-stage Kondo effect)라 하고, 이 경우 둘째 콘도 공명이 첫째 콘도 공명과 간섭하여 파노 공명(Fano resonance)을 일으켜 상쇄간섭에 의한 전도 억제 현상을 일으킬 수 있음이 밝혀져 있다.^[10-12]

중시계의 또 다른 대표적인 다체계 상호작용은 바로 초전도성이다. BCS 이론에 따르면 초전도성은 스핀이 반대인 두 전자가 고체 격자를 매개로 한 인력을 받아 맺어진 쿠퍼쌍(Cooper pair)의 응축에 의해 발생하며 이때 물질은 스핀 홀접

REFERENCES

- [5] S. M. Cronenwett, T. H. Oosterkamp and L. P. Kouwenhoven, *Science* **281**, 540 (1998).
- [6] D. Goldhaber-Gordon *et al.*, *Nature* **391**, 156 (1998).
- [7] J. Nygard, D. H. Cobden and P. E. Lindelof, *Nature* **408**, 342 (2000).
- [8] C. H. L. Quay *et al.*, *Phys. Rev. B* **76**, 245311 (2007).
- [9] N. Roch *et al.*, *Nature* **453**, 633 (2008).
- [10] W. Hofstetter and H. Schoeller, *Phys. Rev. Lett.* **88**, 016803 (2001).
- [11] M. Vojta, R. Bulla and W. Hofstetter, *Phys. Rev. B* **65**, 140405 (2002).
- [12] R. Zitko and J. Bonca, *Phys. Rev. B* **73**, 035332 (2006).

Fig. 5. Kondo correlation versus superconductivity.

상태를 이룬다. 중시계 초전도 접합에 대한 이론 및 실험 연구는 최근 양자점 조셉슨 접합(Josephson junction) 실험^[13]으로 더욱 관심을 끌고 있다. 지금까지 알려진 대표적인 현상으로는, 쿠퍼쌍이 양자점의 공명 준위를 통해 터널링할 때는 위상의 변화가 없지만 쿨롱가로막힘 영역에서는 양자점을 통한 터널링 후에 쿠퍼쌍의 전자 순서가 바뀌어 위상이 π 만큼 바뀌는 π -접합을 일으킴이 알려져 있다.^[14] 하지만 쿨롱가로막힘 영역에서도 콘도 공명이 발생하면 쿠퍼쌍이 콘도 공명 준위를 통해 터널링할 수 있게 되어 다시 위상 변화가 없는 0-접합을 이룰 수 있다. 하지만 콘도 공명이 발생하려면 양자점 스핀과 자유전자 사이의 스핀 교환 결합이 전자 사이의 초전도 스핀 결합보다 강하여야 한다. 두 결합 사이의 경쟁은 초전도 틈, 또는 초전도 질서변수의 크기 Δ 와 콘도 온도 T_K 의 상대적 크기에 의해 결정되어, 그림 5에서처럼 초전도 틈이 더 크면 자유전자는 모두 쿠퍼쌍을 맺으려는 경향이 강하여져서 양자점 스핀은 가려지지 않은 채 남아 스핀 두중(spin doublet) 상태가 되고, 반대로 콘도 온도가 더 크면 콘도 효과가 초전도성을 이겨서 전체 시스템이 스핀 홀결 상태가 된다. 따라서 Δ/T_K 비율을 조정하여 시스템의 π -0 전이를 일으킬 수 있다.^[15,16]

대칭성과 중시계 상호작용 효과

앞에서 살펴본 중시계 콘도현상은 주로 전자의 스핀이 큰 역할을 담당하였다. 그러나 사실 이러한 현상은 꼭 스핀이 아니어도 된다. 여기서 중요한 것은 앞 예들의 스핀과 같이 양자화되고 잘 보존되는 물리량만 있으면 된다. 물론 대부분의 중시 물질계에서 발견되는 콘도효과가 스핀에 의해 나타나는 것은 전자의 스핀이 가장 잘 보존되기 때문이다.

그러나 인위적 조작이 가능한 중시계에서는 전자의 스핀 외에도 잘 보존되는 양자화된 물리량을 찾을 수 있다. 어떤 물리량이 보존되기 위해서는 적절한 대칭성이 유지되어야 한다. 따라서 특별한 대칭성이 존재하는 중시계라면 전자의 스핀 대신

(a)

(b)

Fig. 6. (a) Carbon nanotube quantum dot coupled to two electrodes. (b) Ideal electrodes with high symmetry and coupled to carbon nanotube quantum dot.

다른 물리량에 의한 콘도효과를 발견할 수 있을 것이다.

이러한 가능성에 주목한 것이 탄소나노튜브를 이용한 SU(4) 콘도효과이다[그림 6 참조].^[17-20] 그림 6에서 볼 수 있듯이, 두 전극 사이에 놓인 탄소나노튜브는 원통형의 모양을 갖고 있어 튜브의 축을 중심으로 하는 회전에 대해 대칭이다. 따라서 탄소나노튜브를 통과하는 전자의 파동함수는 나노튜브의 축에 대한 각운동량이 보존된다. 즉, 탄소나노튜브를 시계방향으로 돌면서 나사모양으로 전진하는 전자와 반시계방향으로 돌면서 전진하는 전자는 에너지가 같다. 뿐만 아니라 이 각운동량은 전자가 나노튜브에서 전극으로 투과해 들어갈 때에도

REFERENCES

- [13] J.-P. Cleuziou *et al.*, Nature Nanotechnology **1**, 53 (2006).
- [14] B. I. Spivak and S. A. Kivelson, Phys. Rev. B **43**, 3740 (1991).
- [15] M.-S. Choi, M. Lee, K. Kang and W. Belzig, Phys. Rev. B **70**, 020502 (2003).
- [16] C. Karrasch, A. Oguri and V. Meden, Phys. Rev. B **77**, 024517 (2008).
- [17] A. Makarovski, A. Zhukov, J. Liu and G. Finkelstein, Phys. Rev. B **75**, 241407 (2007).
- [18] J. S. Lim, M.-S. Choi, M. Y. Choi, R. Lopez and R. Aguado, Phys. Rev. B **74**, 205119 (2006).
- [19] P. Jarillo-Herrero *et al.*, Nature **434**, 484 (2005).
- [20] M.-S. Choi, R. Lopez and R. Aguado, Phys. Rev. Lett. **95**, 067204 (2005).

Fig. 7. Vertical quantum dot with rotational symmetry.

보존된다.

여기서 어떤 독자는 전극[그림 6(a)]에서도 전자의 각운동량이 보존될 수 있는지 궁금할 수 있다. 그림 6(b)와 같이 전극이 원통형을 띠고 있지도 않는데 말이다. 이것은 사실 실험 결과를 이해하는데 가장 큰 수수께끼였다. 이 수수께끼는 탄소나노튜브에 전극이 결합된 구조를 면밀히 살펴보면 풀 수 있다. 전자는 나노튜브에서 전극으로 직접 투과하는 것이 아니라 전극 밑에 놓인 나노튜브 부분으로 먼저 투과한 다음 마지막으로 전극으로 들어가게 된다. 이때 전극 밑에 놓인 나노튜브 부분은 전극과 강하게 결합되어 있어 마치 전극과 같은 역할을 한다. 따라서 이 부분은 전자의 각운동량을 보존하게 된다.

이제 잘 보존된 각운동량은 시계방향과 반시계방향 두 값을 갖게 되고 이것은 전자의 스핀이 위 혹은 아래를 향하는 두 값을 갖는 것과 같은 양상이다. 따라서 각 운동량도 마치 스핀과 같은 역할을 담당할 수 있으며, 이 계가 갖는 대칭성은 전자의 스핀만 보존될 때의 SU(2) 대칭성에 비하여 훨씬 큰 SU(4) 대칭성을 갖게 되는 것이다.

이렇게 큰 대칭성에 의한 콘도효과는 SU(2) 대칭성에 의한 콘도효과에 비하여 콘도 온도가 훨씬 높게 나타나는 등 여러 가지 다른 특성을 보인다. 여기서는 자세한 차이점은 논하지 않고, 호기심이 많은 독자에게는 참고문헌을 권한다.

이러한 대칭성은 좀 더 많은 중시계에서 발견할 수 있는데, 가령 그림 7과 같은 수직 구조를 갖는 양자점이 그 대표적인 예이다.^[21-25] 도쿄대에서 주로 연구해 온 수직구조 양자점은 삼각형이나 사각형, 또는 원형 등 다양한 기하학적 모양을 갖는 양자점을 디자인할 수 있다는 장점이 있다. 각 기하학적 모양은 나름대로 대칭성을 띠고 있어, 위에서 예로 든 SU(4) 콘도효과 외에도 다양한 강상관 현상을 보일 수 있을 것으로 기대된다.

나오는 글

지금까지 중시계 콘도효과를 중심으로 중시계 물리 분야에서 다체효과 및 다체효과와 결맞음 효과의 상호작용에 대하여 간략하게 살펴보았다. 최근 나노기술의 비약적인 발전으로 긴 거리에 걸쳐 결맞음이 유지되는 양질의 중시계 소자의 제조가 가능해짐에 따라, 계의 특성을 결정하는 수많은 물리 변수(parameters)를 인위적으로 정교하게 제어할 수 있게 되었다. 이것은 중시계를 이용한 연구가 단지 응집물질물리학 분야에만 머물지 않고, 양자 광학, 원자 및 분자 물리학, 입자 물리학 등에서 논쟁이 되고 있는 여러 가지 물리 현상을 폭넓게 실험에 근거하여 연구할 수 있다는 것을 뜻한다. 이 글에서는 주로 전자 간 다체효과, 특히 국소화된 영역에서 작용하는 강한 상호작용의 영향에 초점을 맞추어 살펴보았으나, 중시계 물리학의 잠재력을 가늠하기에 충분하였으리라 생각한다.

REFERENCES

- [21] S. Sasaki and S. Tarucha, J. Phys. Soc. Jpn. **74**, 88 (2004).
- [22] S. Sasaki, S. Amaha, N. Asakawa, M. Eto and S. Tarucha, Phys. Rev. Lett. **93**, 017205 (2004).
- [23] M. Eto, J. Phys. Soc. Jpn. **74**, 95 (2004).
- [24] M. Lee, M.-S. Choi, R. Lopez, R. Aguado, J. Martinek and R. Zitko, Phys. Rev. B **81**, 121311(R) (2010).
- [25] R. Lopez, D. Sanchez, M. Lee, M.-S. Choi, P. Simon and K. Le Hur, Phys. Rev. B **71**, 115312 (2005).