양자 잡음의 이해와 활용

DOI: 10.3938/PhiT.20.041

정 윤 철

Quantum Shot Noise

Yunchul CHUNG

Shot noise in a mesoscopic system is not just an obstacle that hinders electrical measurements but a valuable tool that provides access much hidden physical information. In this report, some important discoveries, including the charge of the Laughlin quasi-particle, fermionic statistics of an electron and the two-particle interference effect, probed by using shot-noise measurements are reviewed.

서 론

전자소자의 가장 중요한 특성 중 하나는 전도도이다. 전도도는 비저항의 역수로 정의되며 소자에 전류가 어느 정도 잘 흐를 수 있는지를 나타내는 척도이다. 일반적으로 전도도는 소자에 일정한 전압을 걸어준 후 소자를 통해 흐르는 전류의 양을 측정하여 알 수 있다. 이때 소자를 통해 흐르는 전류의 양은 시간에 따라 요동하므로 시간에 대한 전류의 평균값을 구하여 전도도를 측정한다. 전류의 양이 시간에 대해 일정하지 않고 요동을 하는 이유는 소자에서 다양한 잡음이 발생하기 때문이다. 일상생활에서도 전기잡음은 흔히 접할 수 있다. 라디오, 핸드폰, CD 플레이어 등 각종 음향장비의 경우 제품의 품질이 좋지 않거나 신호가 약한 경우에는 흔히 잡음을 들을 수 있다. 이러한 잡음은 대부분의 경우 필요 없거나 원

치 않는 불청객으로 취급된다. 마찬가지로 전도도 측정에서도 이러한 잡음을 불필요하거나 혹은 전도도 측정에 방해되는 것으로 취급한다. 하지만 이러한 잡음에는 매우 귀중한 물리적 정보들이 포함되어 있다. 중시계의 아버지라 불리는 볼프 란다우어는 일찍이 “잡음이 신호이다”라고 지적하였으며 잡음에 많은 물리학적 정보가 담겨져 있음을 지적하였다. 특히 소자 내에서 일어나는 전자-전자 상호작용, 전자-자기선속(magnet-flux) 상호작용, 양자역학적 특성, 얽힘 상태(entanglement) 등 지금까지는 측정하기 힘들었던 중요한 정보를 잡음을 통해 측정할 수 있음에 따라 잡음연구가 새로운 분야로 각광받고 있다.

잡음의 종류

잡음의 종류는 매우 다양하다. 여기서 취급하고자 하는 잡음은 잘못된 측정 장치 혹은 외부 영향 등에 의해 발생하는 인위적인 잡음이 아니라 소자에서 발생하는 피할 수 없는 원천적인 잡음이다. 전자 소자에서 발생하는 주요 잡음은 산탄잡음(shot noise), 열잡음(thermal noise), $1/f$ 잡음 그리고 랜덤 텔리그래프 잡음(random telegraph noise) 등이 있으며 이중에 특히 산탄잡음과 열잡음은 많은 물리학적 정보를 포함하고 있다.

산탄잡음은 전류가 연속적인 흐름이 아니라 양자화된 전하량을 가지고 있는 전자 입자의 불연속적인 흐름이기 때문에 발생하는 잡음이다. 이러한 산탄잡음은 1918년 쇼트키(Schottky)가 진공관을 통해 흐르는 전류에 포함된 잡음을 관측함으로써 발견되었다. 쇼트키는 진공관을 통해 흐르는 전류와 전류에 포함된 산탄잡음이 서로 비례하며, 이때 비례상수는 기본 전하량 e 의 두 배임을 발견하였다.^[1] 쇼트키는 실험을 통해

저자약력

정윤철 교수는 고려대학교에서 박사학위를 취득(1995)하고, 옥스퍼드대학교 연구원(1996-2000), 와이즈만연구소 연구원(2000-2003)을 거쳐 2003년부터 부산대학교 물리학과에서 조교수를 거쳐 부교수로 재직 중이다. (ycchung@pusan.ac.kr)

REFERENCES

- [1] W. Schottky, Ann. Phys. (Leipzig) **57**, 541 (1918).

Fig. 1. A cartoon picture demonstrating the shot noise of rain. Courtesy of Prof. Moty Heiblum at Weizmann Institute.

진공관을 통해 흐르는 전류량과 이에 포함된 산탄잡음을 측정하여 비례상수를 구함으로써 전자의 전하량을 수 퍼센트 내의 정확도로 알아낼 수 있었다. 이는 밀리칸(Millikan)의 유적실험에 의한 결과보다 훨씬 더 정확한 값으로 전하량 측정에 중요한 역할을 하였다.

그림 1은 산탄잡음에 관한 직관적인 이해를 돕기 위한 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 양철 지붕에 크기가 다른 빗방울이 내리고 있다고 가정하자. 이때 내리는 비의 양은 동일하다고 하자. 따라서 내리는 비의 양을 측정할 경우에는 빗방울의 크기에 관한 정보는 얻을 수 없다. 하지만 빗방울이 지붕에 부딪히며 내는 소리는 빗방울의 크기에 따라 달라지므로 소리의 크기(잡음)를 측정하여 빗방울의 크기를 짐작할 수 있을 것이다. 전기 잡음의 경우도 마찬가지이다. 같은 양의 전류에 대해서 잡음이 크다는 의미는 전류의 운반자(carrier)가 전달하는 전하량이 크다는 것을 의미하여 따라서 잡음을 측정하여 전하량의 크기를 알 수 있다. 이러한 원리를 이용하여 쇼트키는 전자의 기본전하량을 산탄잡음을 이용하여 측정할 수 있었다.

또 다른 중요한 물리적 의미를 가지는 잡음으로는 열적잡음이 있다. 산탄잡음은 전하가 양자화되어 있기 때문에 생기는 잡음이므로 전류가 흐르지 않는 경우에는 관측되지 않는다. 반면 열적잡음은 전류가 흐르지 않는 경우에도 발생한다. 열적잡음이 생기는 원인은 유한한 온도에서 페르미준위(Fermi level) 부근에서 전자의 상태 점유도가 페르미-디랙 분포(Fermi-Dirac distribution)에 의해 확률적으로 주어지기 때문이다. 그림 2는 열적잡음을 보다 쉽게 설명하기 위한 그림이다. 그림에서와 같이 두 개의 양동이 사이를 호스로 연결한다. 바람이 없는 경우에는 양동이의 물 높이가 항상 일정하게 유지될 것이다. 하지만 바람이 부는 경우 양동이의 물높이는 순간적으로 높아졌다 낮아졌다 할 것이며 따라서 수면이 높

Fig. 2. A cartoon picture showing the origin of thermal noise. The water level of two reservoirs are fluctuating due to wind. The water is flowing back and forth between two reservoirs while there is no net flow between reservoirs.

은 양동이에서 낮은 양동으로 물이 흘러갈 것이다. 바람에 의해 물의 수면이 요동하더라도 평균 수면의 높이는 두 양동이 모두에서 동일하게 유지되어야 한다. 따라서 순간적으로 물은 양동이 사이를 왔다 갔다 할 수 있으나 물 흐름의 시간 평균을 구하면 알짜 흐름(net flow)은 없다. 비록 물의 알짜 흐름은 없지만 호스를 통해 흐르는 물을 관측하면 물은 두 양동이 사이를 왔다 갔다 하면서 요동침을 관측할 수 있을 것이다. 만약 바람이 불지 않는다면 두 양동이의 수면은 항상 일정하게 유지되고 따라서 호스를 통한 물의 요동은 관측되지 않을 것이다. 전자 소자의 경우도 마찬가지이다. 만약 우리가 저항의 양단에 전압을 걸지 않고 저항을 통해 흐르는 전류를 관측하면 저항 양단 접점의 페르미 준위가 유한한 온도에서는 요동치게 되므로 전자가 페르미 준위가 높은 곳에서 낮은 곳으로 순간적으로 왔다 갔다 함에 따라 전류의 요동이 관측된다. 절대 온도 영도에서는 페르미 준위가 항상 일정하게 유지되기 때문에 전류의 잡음은 관측되지 않는다. 이러한 열적잡음은 온도에 선형적으로 비례하며 비례계수는 $4k_B G$ 이다. 이때 k_B 는 볼츠만 상수(Boltzmann Constant), G 는 소자의 전도도이다. 따라서 열적 잡음을 측정하여 비례상수를 구하면 전자의 온도를 직접적으로 정확하게 측정할 수 있다. 이는 현재까지 알려진 온도 측정 방법 중 보정(calibration)이 필요한 방법 중 하나이며 거의 모든 온도 영역에서 사용가능한 방법이다. 따라서 열적잡음을 이용한 온도측정 방법은 온도에 관한 1차 표준으로 사용되어지고 있다.^[2]

전하량의 측정

일반적인 전자 소자 내에서 전류를 전도하는 입자는 전자

REFERENCES

- [2] D. R. White *et al.*, Metrologia **33**, 325 (1996).

Fig. 3. Longitudinal and Hall resistance of a two-dimensional electron gas measured as a function of magnetic field, Hall resistance shows plateaus of integer quantum Hall effect(IQHE) and fractional quantum Hall effect(FQHE). Courtesy of Moty Heiblum group at Weizmann Institute.

혹은 정공이며 이들의 전하량은 $\pm e$ 의 기본전하량(elementary charge)을 가진다. 하지만 특수한 경우, 예를 들면 초전도체, 혹은 분수 양자 홀효과 영역에서는 전류 운반자의 전하량이 기본 전하량과 다르다. 초전도체의 경우 잘 알려진 바와 같이 두 개의 전자가 결합한 쿠퍼쌍(Cooper pair)에 의해 전류가 흐르므로 운반자의 전하량은 e 가 아니라 $2e$ 가 된다. 쿠퍼쌍의 존재를 증명하기 위한 다양한 실험들이 있었는데 산탄잡음을 측정하여 운반자의 전하가 $2e$ 임을 밝힌 실험이 가장 직접적인 실험 중 하나이다. 초전도-반도체 접합 혹은 초전도-금속 접합을 통해 터널링하는 운반자에 의해 발생하는 산탄잡음을 측정하여 운반자의 전하량이 $2e$ 임을 실험적으로 관측하였으며 이를 통해 쿠퍼쌍이 존재함을 직접적으로 증명하였다.^[3,4]

밀리칸에 의해 기본 전하량 e 가 발견된 이래 많은 연구자들이 기본 전하량 외의 다른 기본 전하량이 존재하는지에 관한 연구를 해왔다. 쿼크의 경우 전하량이 $1/3e$ 의 정수배로 양자화되어 있다는 것이 이론적으로 밝혀졌으나 쿼크는 단독으로 존재하지 않기 때문에 실험적으로 관측하는 것이 용이하지 않았다. 최근에 와서 기본입자는 아니지만 이차원 전자계에 강한 자기장을 걸어줄 경우 자기장과 전자 상호작용에 의해 생겨나는 가상입자의 경우 유효전하량이 e 가 아님에 밝혀졌으며, 이러한 가상입자의 존재가 산탄잡음 측정을 통하여 실험적으로 밝혀졌다. 그림 3은 정수양자홀효과^[5] 및 분수양자홀효과^[6]를 보여주는 그림이다. 아주 낮은 온도에서 이차원 전자계(2-dimensional electron gas system)에 수직으로 강한 자기장을 걸어주면 그림에서 보는 바와 같이 특정한 자기장영역에서 홀저항(Hall resistance)이 일정한 값으로 양자화되는 현상을 보이며 이를 양자홀효과(quantum Hall effect)

Fig. 4. Quantum shot noise as a function of the backscattered current, I_B , in the FQH regime at $\nu=1/3$. The solid lines correspond to the shot noise for $1/3e$ electron charge for the appropriate transmission t . For comparison the expected behaviour of the noise for $Q=e$ and for $t=0.82$ is shown by the dashed line. Courtesy of Prof. Moty Heiblum at Weizmann Institute.

라 한다. 양자화되는 홀저항 값을 $R_H = h/ve^2$ 이라 할 때 채우기 인자(filling factor) ν 가 정수($\nu=1, 2, 3, 4, \dots$)로 양자화되면 정수양자홀효과, ν 가 분수($\nu=1/3, 2/5, 3/7, 2/3, 3/5, 1/5, 2/9, \dots$)로 양자화되면 분수양자홀효과라 한다. 정수양자홀효과는 자기장하에서 전자의 란다우 양자화(Landau quantization)로 쉽게 설명할 수 있다. 하지만 분수양자홀효과는 단일 전자만의 효과로는 설명할 수 없다. 강한 자기장하에서는 전자와 자속(magnetic flux)이 상호작용하여 전자와 자속이 결합된 새로운 형태의 가상입자(quasi-particle)를 형성한다. 이렇게 형성된 가상입자에 대한 정수양자홀효과를 분수양자홀효과로 볼 수 있다. 즉 정수 양자홀효과는 전자의 란다우 양자화 결과이고, 분수 양자홀효과는 전자와 자속이 결합된 새로운 가상입자의 란다우 양자화 결과로 볼 수 있다. 이러한 가상입자의 기본 전하량은 이론적으로 e 가 아니라 $\nu=1/3, 2/3$ 등의 분수양자상태에서는 $1/3e$, $\nu=1/5, 2/5, 3/5$ 등의 분수양자상태에서는 $1/5e$ 의 값을 가지는 것으로

REFERENCES

- [3] F. Lefloch, C. Hoffmann, M. Sanquer and D. Quirion, Phys. Rev. Lett. **90**, 067002 (2003).
- [4] X. Jehl, M. Sanquer, R. Calemczuk and D. Mailly, Nature **405**, 50 (2000).
- [5] K. v. Klitzing, G. Dorda and M. Pepper, Phys. Rev. Lett. **45**, 494 (1980).
- [6] D. C. Tsui, H. L. Stormer and A. C. Qosard, Phys. Rev. Lett. **48**, 1559 (1982).

알려졌다. 이러한 분수양자홀효과 영역에서 존재하는 가상입자의 전하량은 이스라엘 와이즈만 연구소의 Heiblum 그룹과 프랑스 Center d'Etudes de Scalay의 Glattli 그룹에서 산탄잡음 실험을 통해 이론과 일치함이 밝혀졌다.^[7,8] 그림 4는 $\nu = 1/3$ 영역에서 존재하는 가상입자의 전하량을 측정한 실험 결과이다. 실험은 이차원 전자계 위에 분할게이트(Spit gate)를 설치한 후 분할게이트 사이를 투과해 나가는 과정에서 발생하는 전류에 의한 산탄잡음을 측정하였다. 앞에서 언급한 바와 같이 전류성분에 포함된 산탄잡음은 투과된 전류에 비례한다. 이때 비례상수는 전류 운반자의 전하량이 된다. 분할게이트의 전압을 적절히 조절하여 일정한 투과도를 유지한 후 산탄잡음을 측정하였다. 두 개의 투과도($t=0.82, 0.73$)에 대하여 산탄잡음을 측정하였고 그림에서 보는 것과 같이 두 개의 투과도에 대해 모두 $1/3e$ 의 기본전하량에 의한 산탄잡음이 관측되었다. 참고로 그림에서 점선으로 나타낸 것은 운반자의 전하량이 e 인 경우 예상되는 산탄잡음이다. 상기의 실험 결과를 통해 실제로 전자와 자속이 결합한 가상입자가 존재함을 증명하였다. (이러한 결과는 $\nu=1/3$ 영역에서 전도도가 $\sigma_H=1/3 \times e^2/h$ 로 정의된다는 사실과 잘 일치하는 결과이다.)

전자의 통계역학적 성질

세상에 존재하는 모든 입자는 그들의 통계적인 특성에 따라 보존(boson) 혹은 페르미온(fermion)으로 분류할 수 있다. 보존의 경우 하나의 양자상태에 무한개의 입자가 존재할 수 있고, 페르미온의 경우에는 하나의 양자상태에 오직 한 개의 입자만이 존재할 수 있다. 이러한 입자의 통계적 특성은 입자의 파동함수에 의해 결정되어진다. 양자역학적으로 구별 불가능한 두 개의 입자에 대한 파동함수를 기술할 때 파동함수가 두 입자의 교환에 대하여 대칭적인(symmetric) 경우에는 보존이 되며, 반대칭(antisymmetric)인 경우에는 페르미온이 된다. 이러한 입자의 통계적인 성질은 20세기 초반 이론적으로 잘 알려져 있었으나 실제로 그들의 성질을 실험적으로 확인한 것은 최근의 일이다. 특히 전자는 대표적인 페르미온임에도 불구하고 전자가 페르미온임을 실험적으로 확인한 것은 20세기 후반에 산탄잡음 실험을 통해서이다. 스위스 바젤(Basel) 대학의 Schoenenberger 그룹과 미국 스탠포드 대학의 Yamamoto 그룹은 전자에 대한 Hanbury-Brown Twiss (HBT) 실험을 통하여 전자들이 페르미온임을 실험적으로 확인하였다.^[9,10] 그림 5의 위쪽 그림은 왼쪽의 광원에서 출발한 광자(보존)가 중앙에 있는 빔분할기(beam splitter)에 입사된 후 두 개의 보존 빔(beam)으로 갈라지는 것을 도식화한 그림

Fig. 5. The correlation between two partial beams generated by a beam splitter. Boson is splitted by a beam splitter (upper figure) and fermion is splitted by a beam splitter (lower figure). Due to the bunching of bosons a positive correlation is expected between two partial beams while anticorrelation is expected for fermions since fermions expel each other (antibunching) due to Pauli exclusion principle.^[9]

이다. 그림에서 볼 수 있듯이 광원으로부터 나오는 광자는 보존이므로 하나의 양자상태에 복수개의 입자들이 존재할 수 있다. 따라서 이들을 빔분할기를 이용하여 두 개의 빔으로 나누면 그림에서와 같이 입사한 입자 개수의 반만큼씩 각각 나누어질 것이다. 따라서 나누어진 두 빔 사이의 상관관계를 측정하면 그림에서 보는 바와 같이 같은 위상 혹은 양의 상관관계(positive correlation)를 가질 것이다. 즉 두 개의 관측기(detector)를 이용하여 나누어진 빔을 관측할 때 한쪽의 관측기에서 입자가 관측되면 다른 관측기에서도 동시에 입자가 관측될 것이다. 반면 아래쪽 그림과 같이 페르미온이 입사하는 경우에는 한 상태에 하나의 입자만 존재할 수 있으므로 빔분할기에 의해 두 개의 빔으로 나누어질 때 한쪽 빔으로 입자가 투과될 경우 다른 빔에는 입자가 존재할 수 없으므로 음의 상관관계(negative correlation)를 가지게 된다. 즉 두 개의 관측기에서 동시에 입자가 관측이 되지 않는다. 상기의 실험을 통해 빔분할기에 입사하는 입자가 보존인지 페르미온인지를 구별할 수 있다. 이와 같은 방법은 광학에서 광검출기를 이용 널리 쓰여지며 이를 동시성측정(coincidence measurement) 방법이라 한다. 광검출기의 경우, 단일개의 광자를 어렵지 않게 검출해 낼 수 있다. 하지만 단일개의 전자를 검출하는 것은 현재의 기술로는 거의 불가능하다. 따라서 검출기

REFERENCES

- [7] R. de-Picciotto, M. Reznikov, M. Heiblum, V. Umansky, G. Bunin and D. Mahalu, *Nature* **389**, 162 (1997).
- [8] L. Saminadayar, D. C. Glattli, Y. Jin and B. Etienne, *Phys. Rev. Lett.* **79**, 2526 (1997).
- [9] M. Henny *et al.*, *Science* **284**, 296 (1999).
- [10] W. D. Oliver, J. Kim, R. C. Liu and Y. Yamamoto, *Science* **284**, 299 (1999).

Fig. 6. The intensity correlation experiment for a beam of electrons realized in an integer quantum Hall effect regime to observe anti-bunching of electrons.^[9]

Fig. 7. Scattering and collisions at a beam splitter. (a) No collision (b) bosons (c) fermions collide at a beam splitter.^[11]

를 이용하여 전자의 동시성측정 실험을 하는 것은 불가능하다. 대신 전자소자에서는 두 개의 다른 드레인(drain)으로 들어오는 전류의 산탄잡음을 측정하여 이들의 잡음간의 상호연관성(cross-correlation)을 측정하면 광학에서 사용하는 동시성측정과 유사한 결과를 얻을 수 있다. 즉 측정된 두 산탄잡음 사이의 위상이 동위상이면 보손, 역위상이면 페르미온이 된다. 그림 6은 정수양자홀효과 영역에서 전자의 통계적 특성을 측정한 실험이다. 그림에서 보는 바와 같이 소스(source) 1에서 전류를 흘린 후 빔분할기에서 분할된 빔을 드레인 2번과 3번에서 관측하여 산탄잡음의 상호연관성을 측정하였다. 측정 결과 산탄잡음의 상호 연관성은 정확히 역위상을 가짐을 측정함으로써 전자가 페르미온임을 실험적으로 관측하였다.

입자의 통계적인 성질을 측정할 수 있는 또 다른 방법으로는 그림 7과 같이 빔분할기에서 입자를 충돌시킨 후 산란된 입자에 의한 산탄잡음의 크기를 측정하는 방법이 있다. 그림 (b)는 보손이 빔분할기에서 충돌한 후 산란하는 과정을 도식화한 것이다. 보손의 경우 두 입자-파동함수(two particle wavefunction)가 대칭적이므로 충돌 후 두 개의 입자가 항상 같은 방향으로 산란된다. 따라서 산란된 입자들의 산탄잡음을

측정하면 그림 (a)와 같이 독립적인 입자가 단순히 빔분할기에서 산란되는 경우에 비해 두 배에 해당하는 산탄잡음을 가지게 된다. 반면 그림 (c)의 경우와 같이 페르미온이 충돌 후 산란하게 되면 페르미온의 파동함수는 반대칭적이므로 파울리 배타원리에 의해 각각 따로따로 산란이 이루어진다. 따라서 산란된 입자들의 산탄잡음은 영이 된다. Liu 등은 이차원 전자계에서 전자들을 충돌시킨 후 산란된 전자들의 산탄잡음을 측정하여 전자가 페르미온임을 실험적으로 증명하였다.^[11]

두 입자에 의한 간섭 현상

전자는 양자역학적으로 입자 혹은 파동으로 취급할 수 있다. 따라서 전자의 파동성을 이용할 경우 전자의 간섭현상을 관측할 수 있다. 이러한 전자의 간섭현상은 진공, 금속 그리고 반도체 내부의 전자를 이용하여 관측되었다. 우리가 흔히 알고 있는 간섭 현상은 단일 입자에 의한 현상이다. 즉 단일 입자에서 출발한 파동(wave)이 나누어진 후 다시 합쳐질 때 나타나는 현상이다. 이론적으로는 두 개의 전혀 상관없는 입자들에 의한 간섭 또한 가능하다. Hanbury-Brown과 Twiss는 두 개의 독립적인 광자간의 간섭이 가능함을 실험적으로 보였다. 일반적인 간섭 현상은 파동의 진폭(intensity)을 측정하면 관측할 수 있는 반면 두 입자간의 간섭은 진폭의 상관관계(intensity correlation)를 측정하여 관측할 수 있다.^[12] 이러한 효과를 Hanbury-Brown Twiss 효과라 한다.

전자의 간섭현상은 여러 가지 방법으로 측정할 수 있는데 그 중 가장 흔한 방법은 그림 8(a)과 같이 이중 슬릿을 이용하는 것이다. S에서 갈라진 전자가 D에서 만날 때 전자의 경로차에 의해 위상차가 생겨나고 따라서 간섭현상을 관측할 수 있다. 광자의 경우와는 달리 전자의 경우 아하로노프-봄(Aharonov-Bohm) 효과를 이용하여서도 간섭현상을 관측할 수 있다. 즉 간섭계에 자기장을 걸어주게 되면 전자의 닫힌 경로가 둘러싼 면적을 통과하는 자기선속에 비례하여 위상차가 생기고 따라서 이에 해당하는 간섭현상을 관측할 수 있다. 즉 그림에서와 같이 D에 도달하는 전류 값이 자기장의 변화에 따라 간섭 무늬를 보인다. 그림 (b)는 두 개의 독립적인 전자간의 간섭을 도식화하여 나타낸 그림이다. 그림에서와 같이 S₁과 S₂에서 독립적인 전자들이 출발하여 D₁과 D₂에서 간섭하게 한다. 이때 단일전자 간섭계와는 달리 S₁과 S₂에서

REFERENCES

- [11] R. C. Liu, B. Odom, Y. Yamamoto and S. Tarucha, *Nature* **391**, 263 (1998).
- [12] R. Hanbury Brown and R. Q. Twiss, *Nature* **177**, 27 (1956).

Fig. 8. One- and Two-particle Interferometers. (a) Interferometer for single particle source. (b) Interferometer for two independent particle sources.^[14]

출발한 전자는 닫힌 경로를 형성하지 않는다. 즉 전자의 파동이 갈라진 후 다시 결합하지 않으므로 일반적인 진폭(전류)의 간섭현상은 나타나지 않는다. 하지만 D_1 과 D_2 에서 관측되는 전자 진폭(전류)의 상관관계를 측정할 경우 간섭계가 감싸고 있는 면적을 통과하는 자속에 대하여 간섭무늬를 관측할 수 있다. 이렇게 두 개의 독립적인 전자간의 간섭 현상이 일어나는 이유는 두 개의 전자가 궤도-얽힘상태(orbital-entanglement)를 이루고 있기 때문이다. 이러한 독립된 두 전자간의 간섭현상은 산탄잡음의 상호상관관계(cross-correlation) 측정을 통하여 이스라엘 와이즈만 연구소의 Moty Heiblum 그룹에서 실험적으로 관측하였다. 그림 9는 실험에 사용된 소자의 도식도와 전자현미경 사진이다. 실험에서는 정수양자홀효과와 가장자리상태(edge state)를 사용하였다. 이차원 전자계에 수직인 방향으로 자기장을 인가하면 이차원 전자계 평면에서 움직이는 전자들은 자기장에 의해 운동방향에 수직인 방향으로 편향 받게 된다. 그림의 경우 전자는 진행방향의 왼쪽으로 편향되고 전자들이 이차원 전자계의 가장자리에 도달하게 되면 계속 벽면을 따라서 이동하게 되는데 이러한 상태를 가장자리상태라 부른다. 따라서 전자들은 도식도에서 보는 바와 같이 흐르게 되고 S_1 과 S_2 에서 출발한 전자들은 QPC₁과 QPC₂에서 충돌하여 앞에서 설명한 것과 같은 두 입자 간섭계를 구성하게 된다. 이들은 실험을 통해서 D_2 와 D_4 에서 전류를 측정할 경우 자속에 대한 변화가 관측이 되지 않고 D_2 와 D_4 에서 관측되는 산탄잡음의 상호상관관계를 측정할 경우 상호상관관계 신호가 자속에 대해 간섭무늬를 보임을 증명하였다. 이를 통해 일반적으로 생각하는 것과는 달리 서로 독립적인 두 개의 전자간의 간섭이 일어남을 보였다.

Fig. 9. The two-particle Aharonov-Bohm interferometer. (a) Diagram of the interferometer. Sources S_1 and S_2 inject streams of particles, which are split by beam splitters A and B, later to recombine at beam splitters C and D. (b) The SEM picture of the device. Courtesy of Moty Heiblum group at Weizmann Institute.

결론

전자소자의 특성은 다양한 방법으로 평가할 수 있다. 하지만 기존 측정방법으로는 전자의 동역학적 특성, 양자역학적 성질 등에 관한 정보를 측정하기 쉽지 않다. 최근에 많이 연구되고 있는 산탄잡음 측정결과들은 우리가 지금까지 측정할 수 없었던 입자의 통계적 성질, 전하량, 양자역학적 얽힘상태, 입자간의 상호작용 등 다양한 물리적 특성을 측정할 수 있음을 보여준다. 지금까지 생각해왔던 것과는 달리 잡음은 단순히 실험에 방해되는 요소가 아니라 그 안에 많은 유용한 물리학적 정보를 담고 있다. 특히 산탄잡음의 경우 양자소자 및 나노소자 내부 전자의 양자역학적 특성 측정에 매우 유용하며 더불어 양자역학적 얽힘상태 측정, 보존과 페르미온의 중간 형태 입자인 아니온(anyon) 입자 연구에 매우 유용하게 사용될 수 있다.

REFERENCES

- [13] I. Neder, N. Ofek, Y. Chung, M. Heiblum, D. Mahalu and V. Umansky, *Nature* **448**, 333 (2007).
- [14] M. Kindermann, *Nature* **448**, 262 (2007).