전자 간섭계

DOI: 10.3938/PhiT.20.039

강기천·심흥선

Electronic Interferometry

Kicheon KANG and Heung-Sun SIM

Quantum interference is at the heart of quantum mechanics. Owing to the recent remarkable progress in fabricating and controlling electronic systems on a mesoscopic scale, it is now possible to directly observe quantum interference of electrons in a systematic way by constructing an electronic interferometer, which opens the door to uncharted research areas from the fundamental issues of quantum mechanics to the wave nature of exotic quantum matter originating from electron-electron interactions and topological effects. In this article, we review several topics of current research on electronic interferometry.

들어가는 말

양자역학은 자연현상을 체계적으로 정확하게 기술하는, 현존하는 최고의 이론이다. 그 성공적인 경우를 일일이 나열하기도 불가능하다. 가령 저녁노을은 왜 붉은지, 불의 색깔과 온도는 어떤 연관성이 있는지, 왜 어떤 물질은 전기를 잘 통하고 다른 것은 안 그러한지 등의 일상적으로 접하는 현상으

저자약력

강기천 교수는 포항공대에서 박사학위를 취득(1996)하고, 막스플랑크 연구소 연구원(1998-1999), 전북대 연구교수(2000-2001), 한국전자통신연구원 선임연구원(2001-2003) 등을 거쳐 2003년부터 전남대학교 물리학과 조교수, 부교수로 재직 중이다. 현재 독일 하이델베르크 대학 이론물리연구소에 연구원으로 방문 중이다. (kicheon.kang@gmail.com)

심흥선 교수는 카이스트에서 박사학위를 취득(2001)한 후, 막스플랑크 연구소 연구원(2001-2002), 고등과학원 연구원(2002-2004)을 거쳐 2004년부터 카이스트 물리학과 조교수, 부교수로 재직 중이다. (hssim@kaist.ac.kr)

Fig. 1. A skier in the quantum world.

로부터, 반입자의 예측과 발견, 초전도체의 발견과 이해, 그리고 진공은 텅 빈 공간이 아니라는 사실의 발견 등, 우리의 사고의 틀을 뒤집어 놓은 놀라운 현상들도 양자역학의 체계 안에서 이해된다. 이러한 대단한 성공에도 불구하고, 양자역학은 Fig. 1^[1]과 같은 터무니없는 일이 일어난다는 기본적인 ‘사실’을 우리에게 가르친다(많은 학생들이 파동의 “중첩” 혹은 “간섭”이란 용어를 써서 학생들에게 이 ‘사실’을 주입하지만, 깊이 생각해 보면 그리 간단한 문제가 아니다). 스키어(skier)가 나무를 지나 내려가는 동안, (1) 만약 자연계의 그 무엇도 스키어의 움직임을 감지할 수가 없다면, 스키자국은 중앙의 나무 양쪽에 자국(파동함수)을 남긴다. 반면, (2) 자연계의 어떤 것이 그의 움직임을 완전히 감지할 수 있다면, 스키어는 나무의 왼쪽, 혹은 오른쪽에만 자국을 남긴다. (1)은 ‘일어날 수 있는 사건’의 양자 간섭(quantum interference) 현상에 대한 비유이다. (2)는 우리가 일상에서 보는 ‘당연한’

REFERENCES

- [1] We acknowledge Y. S. Kee (기영석) at Chonnam National University for redrawing this cartoon. The original one is from: C. Addams, in *The New Yorker Magazine* (1940).

사실이다. (1)과 (2)의 연결을 이해하는 것은 간단한 문제가 아니며 학계에서도 이견이 존재한다.

Fig. 1에서 보이는 기이함은 양자역학이 갖는 근본적으로 기이한 특성에 대한 핵심적인 질문과 연결된다. 상보성(complementarity), 양자 얽힘(quantum entanglement), 양자 측정(quantum measurement) 등을 둘러싼 학계의 논의들은 결국 Fig. 1이 보여주는 반사실성(counterfactuality) (Fig. 1의 스키자국은 사실적이지 않다!) 그리고/또는 양자 비국소성(quantum nonlocality) 등에 귀착된다. 알버트 아인슈타인의 “당신은 정말로 달을 쳐다볼 때만 달이 존재한다고 생각하는가?”하는 닐스 보어에게 한 유명한 질문도 이런 맥락에서 이해할 수 있다. 얽힘이나 비국소성을 포함한 이 모든 것에 대한 실험적인 논의는 양자 간섭 또는 양자 결맞음(quantum coherence) 현상으로 환원된다.

비교적 많은 개수의 전자가 관여하는 중시계에서의 양자 결맞음 현상은 물리학계의 오랜 연구주제이다.^[2] 최근의 중시 물리학의 발전은 고체 내의 한 두 개의 전자를 제어하는 수준에까지 이르고 있다. 이러한 발전으로, 위에서 언급한 바와 같은 양자역학의 근본을 전자 간섭계를 구현하여 탐구하고 있다. 또한, 기존의 광학 간섭계로는 연구할 수 없는 새로운 주제를 전자 간섭계를 이용하여 연구하고 있다. 예를 들어, 페르미온(fermion)의 특성(빛의 양자역학적 입자인 광광자(photon)와는 달리, 전자는 페르미온이다), 전자들 사이의 쿨롱 상호작용에 의한 다체(many-body) 현상 등을 연구하고 있다.

전자 간섭계의 구성은 사실 개념적으로 간단한 전자회로이다. 기본적인 두 경로 간섭계(two-path interferometer)^[3]는 저항 두 개를 병렬로 연결해 놓은 회로와 동일하다(Fig. 2). 다만 우리가 익히 알고 있는 저항의 합의 법칙을 만족하지 않는다. 양자 얽힘이나 양자 측정에 대한 논의를 위한 간섭계도 두 경로 간섭계 두 개를 결합시켜 놓은 회로이다. 이러한 간단한 회로에서 물리적으로 상상이 불가능한 일들이(가령 Fig. 1의 스키어처럼 반사실적인 일들이) 벌어진다. 반사실성과 병렬 연결된 저항이 잘 알려진 옴의 법칙을 만족하지 않는다는 사실 간에는 긴밀한 연관성이 있다.

본 글에서는 고체 기반의 중시 전자계를 이용한 양자 간섭계의 최근 연구현황을 소개한다. 전자를 이용한 양자 간섭계는 대체로 아하로노프-봄(Aharonov-Bohm) 현상^[4]을 이용한다(고체 기반이 아닌 아하로노프-봄 간섭에 대해서는 참고문헌 [5]를 참조). 글은 다음과 같이 구성된다. 두 번째 절에서는 고체 전자회로를 이용하여 구현된 양자 간섭계를 소개하고, 이를 이용하여 양자역학의 원리인 상보성, 얽힘 및 비국소성 등을 연구하는 간단한 예를 서술한다(이에 대한 상세한

Fig. 2. (a) A typical two-path electronic interferometer,^[3] and (b) a schematic of parallel resistances.

논의는 참고문헌 [6]을 참조). 세 번째 절에서는 전자들 사이의 쿨롱 상호작용에 의한 다체 양자 상태의 파동성을 전자 간섭계를 이용하여 어떻게 연구하고 있는지 소개한다. 특히, 전자 간섭계를 구성하는 1차원 전자계의 상호작용 현상과 분수 전하를 띤 애니온(anyon)의 간섭 현상을 소개한다. 네 번째 절에서는 향후 전자 간섭계가 유용하게 사용될 연구 방향을 언급하며 글을 마무리한다.

전자 간섭계와 양자역학의 근본 원리

고체 기반의 전자 간섭계를 구현하기에 가장 이상적인 물질은 GaAs/AlGaAs 화합물의 이종접합(heterojunction)을 이용한 2차원 전자계이다. 이 계에서는 전자의 결맞음 길이(coherence length)와 평균 자유 거리(mean free path)가 길

REFERENCES

- [2] Y. Imry, *Introduction to Mesoscopic Physics*, 2nd ed. (Oxford University Press, Oxford, 2002).
- [3] R. Schuster *et al.*, *Nature* (London) **385**, 417 (1997).
- [4] Y. Aharonov and D. Bohm, *Phys. Rev.* **115**, 485 (1959).
- [5] S. Olariu and I. I. Popescu, *Rev. Mod. Phys.* **57**, 339 (1985).
- [6] K. Kang, *Optical Science and Technology* **3**(3), 39 (2009) (In Korean) [강기천, *광학과 기술* **3**(3), 39 (2009)].

Fig. 3. (a) Two-path Aharonov-Bohm interferometer coupled to a which-path detector.^[8] The path detector is based on electron-electron interactions between a quantum dot (QD) and a quantum point contact (QPC). (b) Wave-particle duality of electrons verified in the output current of the interferometer.

어서, 정수/분수 양자 홀 효과(integer/fractional quantum Hall effects), 탄도 양자 수송(ballistic quantum transport) 및 양자 간섭을 연구하기에 유용하다.^[7] Fig. 2(a)는 2차원 전자계 위에 금속 게이트를 얹어 전자 간섭계를 구현한 예를 보여주고 있다.^[3] 전자 간섭계를 이용하여, 파동-입자 이중성, 양자역학적 상보성 등이 어떻게 연구되었는지 아래에 소개한다.

1. 파동-입자 이중성

두 경로 간섭계에서의 파동-입자 이중성은 양자역학적 상보성을 가장 잘 보여주는 예이다. 상보성에 따르면, 입자는 그 입자가 가질 수 있는 경로가 (원칙적으로) 구별 불가능할 경우에만 파동성을 갖는다. 고체 전자 간섭계에서의 상보성에 관한 최초의 실험은 두 경로 아하로노프-봄 간섭계(Fig. 3(a))를 이용하여 1998년에 보고되었다.^[8] 이 간섭계에는 전자의 경로를 측정할 수 있는 검출기가 한 쪽 경로에 부착되어 있다. 이 검출기는 양자점(quantum dot)과 양자점접촉(quantum point contact)이 결합된 구조이다. 양자점은 전자를 하나씩 통과시키도록 설계되어 있는데, 이는 양자점을 통과하는 전자가 양자점접촉 검출기의 전자들과 상호작용을 할 수 있도록 한다. 양자점을 전자 한 개가 통과할 때마다, 양자점접촉의

전기적 포텐셜이 달라지고, 결과적으로 검출기의 출력전류가 달라져서, 전자가 간섭계의 어떤 경로를 통해 이동했는가를 알 수 있다.

측정 결과는 전자의 파동-입자 이중성을 잘 보여준다(Fig. 3(b)). 양자점접촉에 바이어스 전압을 가하지 않았을 때, 즉 검출기를 작동하지 않을 경우 간섭계의 출력 전류는 간섭무늬를 보인다. 반면, 검출기를 작동하면 간섭무늬의 진폭이 줄어든다. 이러한 “조절가능한 결잃음”의 특성은 양자점접촉의 바이어스 전압 및 전기전도도의 함수 등으로 다각도로 분석되어, 이론적인 예측^[9]과 정성적으로 잘 들어맞는다.^[8]

2. 양자역학적 상보성

양자역학적 상보성은 전통적으로 경로 감지 시도에 따른 운동량의 전달에 의한 것이라는 견해가 지배적이었다. 즉 두 경로 간섭계에서의 입자가 지나간 경로를 알아내려 시도하면, 바로 그러한 시도에 의해 입자가 힘을 받아 그 파동의 위상에 불확정성이 생기고, 바로 이 불확정성 때문에 간섭이 사라지게 된다는 원리이다(R. Feynman의 광량자와 충돌하는 두 경로 전자 간섭계에 대한 사고실험 참조^[10]). 이러한 견해는 20세기 후반에 이르러 도전을 받게 된다. 즉 어떤 경우에는 운동량의 전달 없이도 단지 양자 얽힘에 의해서 경로에 대한 ‘정보’를 얻을 수 있으며, 이로 인해 양자 간섭이 사라진다는 것이다(여기에서 한 가지 재미있는 점은, 이러한 견해가 상당 부분 “운동량 전달”의 정의가 무엇이나에 따라 다른 결론에 이르게 된다는 점이다).

전자 간섭계를 이용한 상보성에서의 ‘정보’의 역할에 대한 검증은 국내 연구진에 의해 주도적으로 수행되었다.^[11,12] 이 연구에서는 닫힌 고리(loop) 구조의 간섭계가 이용되었다(Fig. 4). 실험 [8]의 두 경로 간섭계와는 달리, 이 간섭계는 고리 구조를 갖고 있어서, 보다 다양한 종류의 전자 경로를 허용한

REFERENCES

- [7] S. Datta, *Electronic Transport in Mesoscopic Systems* (Cambridge University Press, Cambridge, 1995).
- [8] E. Buks *et al.*, *Nature* (London) **391**, 871 (1998).
- [9] I. L. Aleiner, N. S. Wingreen and Y. Meir, *Phys. Rev. Lett.* **79**, 3740 (1997).
- [10] R. Feynman, R. Leighton and M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics III* (Addison-Wesley, Reading, MA, 1965).
- [11] G. L. Khym and K. Kang, *Phys. Rev. B* **74**, 153309 (2006).
- [12] D.-I. Chang, G. L. Khym, K. Kang, Y. Chung, H. J. Lee, M. Seo, M. Heiblum, D. Mahalu and V. Umansky, *Nat. Phys.* **4**, 205 (2008).

Fig. 4. (a) Closed-loop Aharonov-Bohm interferometry coupled to a charge detector.^[12] Electron paths corresponding to (b) the first- and (c) the second-harmonic Aharonov-Bohm oscillations of the interferometry. (d) Amplitudes of the first and second harmonic interference as a function of the detector bias voltage.

다. 두 경로 간섭계의 경우, 전하 검출에 의한 간섭의 줄어들 현상이 과연 운동량의 전달에 의한 것인지, 아니면 양자 얽힘에 의한 것인지 구분이 불가능하다. 반면 닫힌 고리 구조에서는 전자가 택하는 경로의 종류에 따라 전하 검출이 경로를 구별할 수 있는 경우도 있고 그렇지 못한 경우도 있다. 즉, Fig. 4(b)의 경우는 빨간색 경로를 통한 전자만이 검출기와 상호작용하므로 전하 검출이 경로를 구별할 수 있다. 그러나 Fig. 4(c)의 경우에는 빨간색 경로와 파란색 경로 모두 양자점을 한 번씩 지나가므로 전하 검출로 경로를 구별할 수 없다. Fig. 4(b,c)의 경로들은 각각 1차, 2차의 조화간섭을 보이므로 아하로노프-봄 간섭의 푸리에 변환을 통하여 그 특성을 구분하여 분석할 수 있다.

실험에서는 전하검출기의 바이어스 전압에 따라서 1차 및 2차 조화진동의 간섭무늬의 크기가 어떻게 변화하는지를 관측하였다(Fig. 4(d)). 1차 조화진동은 바이어스 전압에 따라 선형적으로 줄어든다. 반면 2차 진동의 크기는 전압이 작은 영역에서 전압에 거의 무관하다. 이와 같은 관측 결과는 상보성에 있어서 정보의 역할이 필수적이라는 것을 입증한다. 즉

전하 검출이 간섭계 경로에 대한 정보를 갖고 있는가에 대한 것이 전자의 입자성 혹은 파동성을 결정짓는 핵심적인 요소라는 점을 보여준다.

3. 전자 마흐-젠더 간섭계

이와 같은 성과와는 별도로, 앞에서 기술한 아하로노프-봄 간섭계는 다음과 같은 단점을 갖고 있어서, 새로운 전자 간섭계가 요구되었다. (i) 두 경로 간섭계(Fig. 3)의 경우, 전류에 손실이 많다. (ii) 얽힘, 혹은 측정을 위해 양자점을 도입할 경우 결맞음을 많이 (90% 이상) 잃는다. (iii) 닫힌 고리 간섭계의 경우, 고차의 조화간섭으로 인해 간섭의 성분 분석이 복잡해진다. 이러한 단점들이 양자 홀 계(quantum Hall system)의 가장자리 상태(edge state)를 이용하여 구현된 전자 마흐-젠더(Mach-Zhender) 간섭계^[13]에서 극복되었다(마흐-젠더 광학 간섭계는 참고문헌 [14]를 참조). 전자 마흐-젠더 간섭계에서는 두 개의 경로만 가지면서도 전류의 손실이 없고, 결맞음의 손실도 상대적으로 적다(Fig. 5(a)).

전자 마흐-젠더 간섭계의 원리는 다음과 같다. 고자기장 하에서 전자는 로렌츠(Lorentz) 자기력을 받는다. 이 때문에, 양자 홀 계의 중앙은 부도체(insulator) 상태가, 가장자리에는 가장자리 상태라는 일차원 도체 상태가 형성된다. 흥미롭게도, 주어진 가장자리 상태에서는 전자가 한 방향으로만 진행할 수 있다(chirality). 이 가장자리 상태가 간섭계의 경로 역할을 한다(Fig. 5(a)). 경로에는 게이트 전압(MG)을 추가로 걸어서 전자의 경로 길이를 조절한다. 한편, 마흐-젠더 간섭계를 구현하기 위한 빔 가르기(splitter)는 다음과 같이 구현된다. 양자점접촉(QPC)을 이용하여 서로 다른 방향으로 진행되는 두 가장자리 상태들을 만나게 한다. 이 경우, 한 가장자리 상태를 따라 흐르던 전자 빔이 QPC에 도달하면 두 경로로 나뉜다. 자기장이나 게이트 전압의 세기를 조절하여, 간섭계의 두 경로 사이의 위상 차이를 조절할 수 있게 되고, 결과적으로 간섭무늬를 얻게 된다.

전자 마흐-젠더 간섭계의 전류는 간단한 사인(sine) 곡선의 간섭무늬를 보인다(Fig. 5(b)). 이에 대한 최초의 실험^[13]에서 이미 간섭무늬의 선명도(visibility)는 60%를 넘어 매우 정밀한 간섭계로 사용될 수 있음을 보였다. 최근의 실험 결과에 의하면 간섭무늬 선명도는 90%까지 도달한다는 것이 확인되었다.^[15] 이와 같이 높은 선명도는 전자 간섭계를 이용한 두

REFERENCES

- [13] Y. Ji *et al.*, Nature (London) **422**, 415 (2003).
- [14] J. R. Meyer-Arendt, *Introduction to Classical and Modern Optics*, 2nd ed. (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1984).

Fig. 5. (a) Schematic of the electronic Mach-Zehnder interferometry.^[13] It utilizes quantum Hall edge states (red arrows), which provide one-dimensional electron paths. Electronic waves are injected from source S, propagate along the arrows, split into two paths at QPC1, combined at QPC2, and end in one of the two detectors, D1 or D2. The length of the paths is tuned by gate voltages MG1 and MG2, which is able to modulate the relative phase of the two paths. (b) Typical interference pattern shown in the detector current.

입자 간섭(two-particle interference),^[15,16] 양자 얽힘 및 양자 비국소성,^[16-18] 양자 지우개^[19] 등 양자역학의 근본적인 문제에 대한 접근을 가능하게 하여, 앞으로의 발전적인 연구가 기대된다.

전자 간섭과 전자 상호작용

전자들은 서로 쿨롱(Coulomb) 상호작용을 하고 있다. 고전 역학으로 기술되는 거시계에서의 쿨롱 상호작용 현상은 잘 알려져 있으며, 일상생활에 사용되는 전기 기기들의 작동 원리에 응용되어 우리의 삶을 윤택하게 하고 있다. 미시 고체계에서는 쿨롱 상호작용이 전자들의 양자역학적인 성질과 결합되어 계의 전기적 특성을 좌우하게 되는데, 그 결합된 효과로부터 신기한 현상들이 종종 나타난다. 대표적인 예로 초전도 현상, 분수 양자 홀 현상 등을 들 수 있다. 이러한 현상들에 대한 연구는 자연을 보는 새로운 시야, 다체(many-body) 양자 상태에 대한 근본적인 이해, 다양한 응용 가능성 등의 파급 효과를 낳으며, 현대 물리학의 핵심 연구 분야로 자리 잡고 있다.

전자 간섭계는 기본적으로 전자들의 다체 양자 상태를 기

반으로 하고 있기 때문에, 전자 상호작용에 의해서 그 특성(간섭무늬 크기, 주기, 모양, 온도 의존성 등)이 영향을 받는다. 전자의 간섭을 관찰하고자 할 때, 전자 상호작용은 경우에 따라 필수적인 사항이 될 수도 있고 방해꾼이 될 수도 있다. 필수적인 경우는 관찰자가 다체 양자 상태의 파동성을 관찰하고자 할 때인데, 이는 전자 상호작용이 전자들의 다체 상태의 특성을 결정하는 주요 인자이기 때문이다. 다체 상태의 다양한 특성들 중에서 양자역학적인 파동성과 관련된 특성은 간섭계를 통해서만 직접 관찰될 수 있어서, 전자 간섭계는 전자들의 다체 양자 상태를 연구하기 위한 주요 도구로 최근 자리매김하고 있다.

한편, 상호작용이 방해꾼이 되는 경우는 관찰자가 전자 한 개의 결맞음을 관찰하고자 할 경우이다. 빛의 경우에는 한 개의 광광자의 간섭이 잘 관찰되며, 이러한 관찰은 양자광학(quantum optics) 및 양자정보학(quantum information science)의 태동으로 이어졌다. 하지만, 광광자인 경우와는 달리, 전자의 경우에는 전자 한 개에 의한 간섭을 관찰하는 것이 쉽지 않다. 이에 대한 여러 가지 방해 요인이 존재하는데, 온도가 충분히 낮은 경우에는 전자 상호작용이 주요 방해꾼이다. 이는 특정 단일 전자 상태가 전자 상호작용으로 연결된 다체 상태의 일부로서 다른 전자들의 상태와 얽혀 있기 때문이다. 보통 상호작용은 단일 전자 상태에 의한 간섭을 약화시킨다. 최근, 상호작용이 단일 전자에 의한 간섭에 미치는 영향이 전자 간섭계의 활용으로 체계적으로 연구되고 있다. 이러한 연구 방향은 다체 양자 상태의 특성을 이해하고, 다양한 양자광학 소자들에 대응되는 새로운 전자 소자를 구현하기 위함이다. 이에 대한 흥미로운 연구 결과들을 아래에 소개 하겠다.

1. 전자들의 간섭현상은 빛의 간섭과 어떻게 다른가?

전자와 광광자는 각각 자연의 기본 입자 형태인 페르미온과 보손을 대표하며, 서로 다른 성질을 갖는다. 특히, 광광자와는 달리, 전자들은 상호작용을 통해 기묘한 집단 행동(collective behavior)을 보이기도 한다. 이 때문에, 전자 간섭계에서 얻어지는 간섭무늬는 광학 간섭계의 그것과 매우 다

REFERENCES

- [15] I. Neder *et al.*, Nature **448**, 333 (2007).
- [16] P. Samuelsson, E. V. Sukhorukov and M. Buttiker, Phys. Rev. Lett. **92**, 026805 (2004).
- [17] H.-S. Sim and E. V. Sukhorukov, Phys. Rev. Lett. **96**, 020407 (2006).
- [18] K. Kang and K. H. Lee, Physica E **40**, 1395 (2008).
- [19] K. Kang, Phys. Rev. B **75**, 125326 (2007).

Fig. 6. Source-drain voltage dependence of interference visibility of an electronic Mach-Zhender interferometry.^[20]

를 수 있으며, 종종 예측하지 못한 형태를 보인다. 이러한 특이한 간섭무늬로부터 다체 양자 상태에 대한 새로운 이해를 얻는다.

전자 간섭계를 광학 간섭계와 구체적으로 비교해보자. 예를 들어, 마흐-젠더 간섭계에서는 파동이 두 경로로 나뉘어졌다가 다시 만나서 간섭을 하게 된다. 광학 간섭인 경우에는 빛의 파동이 경로를 지날 때 경로 길이에 비례하는 위상(phase)을 얻게 되는데, 두 경로에서 각각 얻는 위상의 차이가 간섭무늬를 결정한다. 광학 간섭계와는 달리, 전자 간섭계에서는 전자가 간섭계 경로를 지날 때, 다른 전자들과 상호작용을 하여 전자 파동의 위상이 변형된다. 이 특성을 보여주는 극저온 (< 1 K) 실험 결과^[20]가 Fig. 6에 있다. 이 실험에서는 간섭계에 인가된 전압의 세기를 바꾸면서 간섭무늬 크기를 관찰하였다. 간섭무늬 크기가 전압 세기에 따라 진동하는데, 어떤 특정한 전압 값들에서 간섭무늬가 완전히 사라졌다가 다시 나타나는 기묘한 행동을 보인다. 이는 단일 전자 간섭으로는 설명되지 않으며, 광학 간섭계에서 나타나는 것과 크게 다르다.

이 기묘한 행동은 전자 상호작용에 의한 다체 양자 상태의 간섭 결과인 것으로 해석되고 있다.^[21,22] 전압이 커질수록, 간섭계 경로에 있는 전자들의 수가 많아지게 되고, 상호작용 효과가 점점 중요해진다. 이때, 입력 전극(source)으로부터 주입된 전자들 간의 상호작용^[21]과 주입된 전자와 간섭계를 구성하는 전자들 사이의 상호작용^[22] 모두 커지는데, 둘 중에서 어떤 상호작용이 좀 더 직접적으로 간섭무늬의 기묘한 행동을 결정하는지는 아직 밝혀지지 않은 상태이다. 관련 연구가 지속되고 있다.

Fig. 7. (a) Charge fractionalization and electron interference.^[25] (b) Recombination of charge fractions.

2. 1차원 전자 상태와 간섭현상

전자 간섭계 구현에 있어서 가장 중요한 것은 간섭계의 경로를 깨끗하게(임의의 불순물이 없도록) 만드는 것이다. 깨끗한 경로는 양자 홀 계의 가장자리 상태나 고품질의 탄소 나노튜브를 이용해서 얻어진다. 이 경로의 전자들은 1차원 전자계로 간주된다.

1차원 전자계의 특성을 결정하는 주요 인자는 전자 상호작용이다. 참고로, 상호작용은 차원이 낮을수록, 계의 크기가 작을수록, 전자 밀도가 낮을수록 더 중요해진다. 상호작용 때문에, 1차원 전자계는 루틴저 액상(Luttinger liquid)이라고 불리는 특이한 다체 양자 상태에 있게 된다.^[23] 루틴저 액상에서는 전하 밀도(charge density)가 공간적으로 진동하는 기묘한 집단 행동을 보인다. 이 행동은 보존의 특성을 보이며(루틴저 액상을 구성하는 것은 페르미온인 전자임을 상기하자), 전하밀도와 스핀밀도가 공간적으로 분리되어 따로 움직이는 스핀-전하 분리 현상(단일 전자의 전하와 스핀은 분리되지 않는다는 것을 상기하자), 루틴저 액상에 단일 전자를 주입하면 전하가 둘로 쪼개져서 반대방향으로 움직이는 전하 분수화(charge fractionalization) 현상^[24] (단일 전자의 전하

REFERENCES

- [20] I. Neder *et al.*, Phys. Rev. Lett. **96**, 016804 (2006).
- [21] S.-C. Youn, H.-W. Lee and H.-S. Sim, Phys. Rev. Lett. **100**, 196807 (2008).
- [22] I. Levkivskyi and E. V. Sukhorukov, Phys. Rev. B **78**, 045322 (2008).
- [23] J. von Delft and H. Schoeller, Annalen Phys. **7**, 225 (1998).
- [24] H. Steinberg *et al.*, Nat. Phys. **4**, 116 (2008).

는 쪼개지지 않는다는 것을 상기하자) 등의 기묘한 특성을 보인다.

이 기묘한 집단 행동은 전자 간섭에 특이한 영향을 준다. Fig. 7(a)의 두 개의 1차원 경로를 갖는 간섭계를 보자. 전극으로부터 입사된 전자의 파동은 위쪽 경로를 따라서 움직이다가, 위치 O에서 전자 터널링(tunneling)에 의해 두 경로로 나뉘지고, 위치 P에서 터널링에 의해 다시 합쳐진다. 위치 O에서 터널링한 전자의 전하(전하량=1)는 루틴저 액상의 전하 분수화 현상에 의해 둘로 쪼개져서(각각 전하량 q 와 q') 서로 반대 방향으로 움직인다. 두 전하 q 와 q' 이 공간적으로 서로 멀어질수록, 단일 전자의 특성을 잃어버리게 된다. 위치 O와 P 사이의 거리가 멀수록, P에서 터널링하는 전자와 O에서 터널링했던 전자는 서로 점점 더 관련이 없게 되고, 결과적으로 간섭무늬가 점점 사라진다. 이와 같이, 극저온에서는 전하 분수화가 간섭을 방해하는 주요 현상이다.^[25] 한편, 경우에 따라, Fig. 7(b)에서와 같이 쪼개진 분수 전하들이 공간상의 어떤 점에서 재결합할 수 있는데, 이 경우에는 간섭무늬가 재생된다.^[26] 상호작용이 매우 강하더라도, 경우에 따라서 단일 전자의 간섭을 관찰할 수 있다

3. 분수 전하 준입자의 관찰을 향해서

자연에 존재하는 기본 입자의 형태는 보손 또는 페르미온으로 알려져 있다. 보손이나 페르미온이냐에 따라, 양자 상태는 서로 다른 교환 통계(exchange statistics)를 따른다. 이를 이해하기 위해, 공간상에 서로 다른 위치에 있는 동일한 두 입자들의 어떤 양자 상태와 두 입자의 위치가 서로 교환된 상태를 비교하자. Fig. 8(a)의 파란색과 붉은색 화살은 입자 교환을 나타낸다. 얼핏 생각하면, 두 입자가 동일하므로, 교환 전 후의 두 상태들은 같을 것으로 기대된다. 하지만, 두 상태들의 양자역학적 파동함수는 위상계수 $e^{i\theta}$ 만큼 달라진다! 보손인 경우에는 $\theta=0$ 으로 두 상태들이 완전히 같고, 페르미온은 $\theta=\pi$ 로 위상 계수 -1 만큼 다르다. 교환 통계는 양자역학의 기묘함을 보여주는 대표적인 성질이다.

자연계의 기본 입자의 θ 의 값은 0이나 π 로 그 중간 값들은 허용되지 않는다고 알려져 있다. 하지만, 이차원 계에서 전자 상호작용의 결과로 생기는 준입자(quasi-particle)는 중간 값의 θ 를 가질 수 있다.^[27] 이러한 준입자를 애니온(anyon)이라고 부르며, 이 준입자가 지니는 전하량은 전자 전하의 분수(fraction) 값이어서 분수 전하 준입자라고 불리기도 한다. 애니온이 나타날 것으로 기대되는 계의 예로는 분수 양자 홀계가 있다. 어떤 특정한 애니온은 외부로부터 영향을 잘 받지 않는 안정적인 위상 양자 컴퓨팅(topological quantum computing)을 가능하게 해서, 학계의 관심이 집중되고 있

$$(a) \quad |\psi(1,2)\rangle = e^{i\theta} |\psi(2,1)\rangle \quad \begin{array}{l} \theta = 0 \text{ (boson)} \\ \theta = \pi \text{ (fermion)} \end{array}$$

Fig. 8. Particle-exchange statistics and anyon interferometry.^[29]

다.^[28]

애니온의 특성을 직접적으로 관찰하기 위한 시도가 계속되고 있는데, 이는 애니온 양자 컴퓨터 연구의 출발점이다. 이를 위한 학계의 대표적 연구 방향은 Fig. 8(b)와 같이 애니온 간섭계를 구현하는 것이다.^[29] 이 간섭계의 두 경로(녹색, 붉은색)를 주목하자. 붉은색 경로를 따라 움직이는 애니온은 간섭계 내부에 생성된 애니온 주위를 한바퀴 돌고 나와서, Fig. 8(a)의 붉은색 궤도에서처럼 $e^{2i\theta}$ 의 위상 계수를 얻게 된다(두 애니온들의 위치 교환이 두 번 이뤄진 것과 같아서, 2θ 의 위상각을 얻는다). 반면 녹색 경로는 간섭계 내부의 애니온과는 상관없다. 두 경로의 간섭을 통해서, 애니온의 교환 통계 위상 θ 와 분수 전하량이 측정될 가능성이 있다. 현재는 가능성만 확인한 상태로,^[30,31] 애니온 간섭을 보기 위해서는 좀 더 고품질의 이차원 전자계, 애니온 제어 기술, 이론 및 실험 기반 연구가 요구되고 있는 상황이다.

REFERENCES

- [25] K. Le Hur, Phys. Rev. Lett. **95**, 076801 (2005).
- [26] J. U. Kim, W.-R. Lee and H.-S. Sim, Phys. Rev. Lett. **102**, 076401 (2009).
- [27] J. M. Leinaas and J. Myrheim, Nuovo Cimento **37B**, 1 (1977).
- [28] C. Nayak *et al.*, Rev. Mod. Phys. **80**, 1083 (2008).
- [29] P. Bonderson, A. Kitaev and K. Shtengel, Phys. Rev. Lett. **96**, 016803 (2006).
- [30] R. L. Willett, L. N. Pfeiffer and K. W. West, PNAS **106**, 8853 (2009).
- [31] N. Ofek *et al.*, PNAS **107**, 5276 (2010).

Fig. 9. Structures with different topology.

전 망

향후 전자 간섭계가 유용하게 사용될 기초 및 응용 연구 방향을 아래에 언급하고 글을 마무리 짓고자 한다. 기초 연구 방향으로는 위상 효과(topological effect) 연구를 언급하고자 한다. 위상(topology)은 기하 구조를 분류하기 위해 도입된 수학적 개념이다. Fig. 9에 있는 것처럼 구와 도넛은 서로 다른 위상 구조로 분류되는데, 이는 구를 잡아 늘리거나 압축하는 변형을 통해서(이때, 구멍을 뚫거나 자르는 변형은 고려하지 않는다) 도넛으로 바꿀 수는 없기 때문이다. 이러한 개념이 물리에도 종종 나타난다. 최근 주목받고 있는 위상 관련 물리 현상으로는 애니온, 베리 위상,^[32] 위상 절연체(topological insulator),^[33] 마요라나 페르미온(Majorana fermion)^[34] 등을 들 수 있다. 애니온에 대해서는 이미 언급하였고, 베리 위상은 헤밀토니안에 내포된 기하학 구조의 위상(topology) 특성과 파동함수의 위상(phase)을 연결해주는 개념이다. 위상 절연체는 계의 내부는 절연체이고 가장자리는 도체인 특이한 물질이다. 이 성질은 위상절연체의 내부와 외부의 에너지 띠(energy band) 기하구조의 위상 특성이 달라서 생긴다(예를 들어 내부의 에너지 띠 구조를 도넛에 대응시키면, 외부의 구에 대응된다). 마요라나 페르미온은 대응되는 반입자(anti-particle)가 자기 자신인 입자이다. 이 입자는 입자물리 분야에서 도입된 것으로 그 존재가 아직 입증되지 않았다. 최근, 마요라나 페르미온이 특정 고체 계(분수 양자 홀 계, 위상절연체-초전도 접합 구조 등)에 나타날 것으로 예측되어 관심이 고조되고 있다. 위상 현상들을 전자 간섭계를 이용하여 관찰할 수 있을 것이라는 이론적 예측들^[35,36]이 발표되고 있는 만큼, 실험 연구도 곧 시작되리라 기대된다.

전자 간섭계 응용 연구의 대표적인 방향은 광학 소자에 대응되는 전자-광학 소자(electro-optics device) 구현이다. 양자 홀 계, 위상절연체, 그래핀, 탄소 나노튜브 등을 이용하면, 전자의 파동성에 기반한 다양한 소자를 구현할 수 있다. 예를 들어, 메타 물질을 이용한 Veselago 렌즈에 대응되는 그래핀 전자 소자를 구현할 수 있다.^[37] 이 렌즈는 메타물질의 음수(negative) 굴절률을 이용하여 만들 수 있는데(Fig. 10), 그래핀 피엔접합(p-n junction) 구조를 이용하면 음수 굴절률을

Fig. 10. Veselago lens.

따르는 전자 파동을 얻을 수 있어 Veselago 전자 렌즈를 구현할 수 있다. 그래핀 접합 구조의 전반사(perfect reflection)를 이용하여 광섬유(optical fiber)에 대응되는 전자 소자를 구현할 수도 있다.^[38] 이러한 전자 소자는 전자 간섭의 결과로 광학 소자와는 다른 특성을 갖는다. 한편, 단일 광광자원(single-photon source)에 대응되는 단전자원(single-electron emitter)이 최근 구현되어 활용이 기대된다.^[39] 이 단전자원에서는 양자점에 주기적으로 시간에 따라 변하는 전압을 걸어 양자점 내부의 전자를 외부로 보낸다. 전자 상호작용 덕분에 한 주기에 전자 한 개씩 외부로 보낼 수 있다. 단전자원을 전자 간섭계와 결합하면, 전자 결맞음 현상을 새로운 영역에서 탐구하는 것이 가능할 것으로 기대된다.

결론적으로, 전자 간섭계는 양자 역학의 기본적 특성(입자의 파동성, 양자역학적 상보성, 양자 얽힘, 양자 측정 등)과 다체 양자 상태의 기묘함을 직접적으로 관찰할 수 있게 해주는 유용한 도구이다. 양자역학의 근본에 관한 탐구에서부터, 새로운 기묘한 입자의 관측까지, 앞으로 전개될 연구의 흐름을 지켜보는 것은 매우 흥미진진한 일이 될 것이다. 유명 컴퓨터 업체인 마이크로소프트(Microsoft)가 프로젝트 Station-Q를 통해 애니온 간섭계 연구를 현재 지원하고 있는 사실은 전자 간섭계가 우리의 일상생활로부터 그리 멀리 있지 않는 것을 보여준다.

REFERENCES

- [32] M. V. Berry, Proc. Roy. Soc. London **A392**, 45 (1984).
- [33] M. Z. Hasan and C. L. Kane, Rev. Mod. Phys. **82**, 3045 (2010).
- [34] F. Wilczek, Nat. Phys. **5**, 614 (2009).
- [35] A. R. Akhmerov, J. Nilsson and C. W. J. Beenakker, Phys. Rev. Lett. **102**, 216404 (2009).
- [36] S. Park and H.-S. Sim, Phys. Rev. Lett. **103**, 196802 (2009).
- [37] V. V. Cheianov *et al.*, Science **315**, 1252 (2007).
- [38] J. R. Williams *et al.*, Nat. Nanotech. **6**, 222 (2011).
- [39] G. Feve *et al.*, Science **316**, 1169 (2007).