

보존도 페르미온도 아닌 준입자 신호 입증

연구책임자 심홍선 |
 소속학과 물리학과 |
 참여연구원 - |
 연구실 홈페이지 <http://qet.kaist.ac.kr>

알려진 자연의 모든 기본 입자들은 보존(boson)이나 페르미온(fermion)으로 분류된다. 하지만, 2차원에서는 이러한 분류를 따르지 않는 (준)입자가 존재할 수 있다고 예측되어왔다. 애니온(anion)이라고 불리는 이들 준입자들의 핵심 특성은 가환(Abelian) 또는 비가환(non-Abelian) 분수 통계(fractional braiding statistics)이다. 본 연구에서는 분수 양자 홀 영역(fractional quantum Hall regime)의 가환 애니온의 분수 통계 신호를 관측하였다. 본 연구에서 확립된 애니온 관측법은 보다 기묘한 비가환 애니온 검출에 활용될 것이다.

연구배경

양자역학의 기본 지식에 따르면, 자연계의 모든 기본 입자들은 보존(boson)이나 페르미온(fermion)으로 분류된다. 하지만 이러한 분류를 따르지 않는 (준)입자들이 2차원에 있을 것으로 예측되었고, 이들은 애니온(anion)으로 통칭된다. 애니온들의 존재 입증은 현대 물리의 미해결 과제로, 입자물리, 고체물리, 원자물리 등 물리학 여러 분야에서 애니온 발견을 위한 노력이 진행 중이다.

애니온 발견에 있어 핵심은 애니온의 "braiding" 또는 분수 통계(fractional statistics) 현상을 관측하는 것으로 [그림(a)]. 세계 최선도 그룹들이 braiding 관측을 위해 지난 30여년 간 경주해오고 있었다. 2020년 프랑스 소르본 대학 Gwendal Feve 교수팀이 애니온 신호를 처음으로 측정하였다[Science 368, 173 (2020)]. 입자 물리학자이자 노벨상 수상자인 Frank Wilczek 교수는 이 실험에 대해 "It's absolutely a milestone"이라고 평한 바 있다. 학계의 통설에 따라, Feve 교수팀은 실험결과를 두 애니온의 충돌 현상으로 해석하였다.

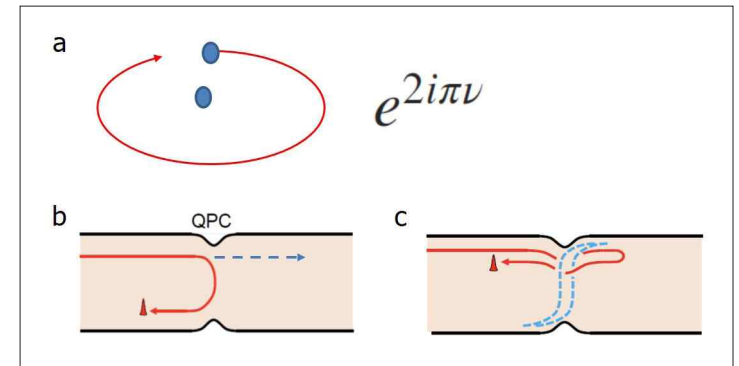
연구내용

하지만, 심홍선 교수팀은 선행연구에서 학계의 통설이 틀렸음을 보였다. 심홍선 교수팀은 Feve의 실험이 (애니온 충돌이 아니라) braiding 현상으로 해석되어야 함을 보이고, 나아가 braiding 관측 방법을 제시하였다 [논문2]. 이에 이스라엘 와이즈만 연구소 Moty Heiblum 교수가 공동연구를 제의해왔다. 심홍선 교수가 제시한 방법에 따라 Heiblum 교수팀이 분수 양자 홀 영역의 2차원 전자계에서 나타나는 전기 신호를 측정하였고, 얻어진 실험 데이터를 심홍선 교수팀이 분석하여 데이터가 가환 애니온(Abelian anyons)의 braiding 신호임을 보였다. [논문1].

심홍선 교수팀이 제안하여 본 연구에서 확립된 애니온 braiding 관측법에서는 희석된 입자 빔(diluted particle beam)을 빔 분할기(beam splitter)에 입사시켜서 빔 분할(partitioning)에 따른 양자 노이즈(quantum noise)를 측정한다. 보존이나 페르미온의 경우와는 달리 애니온인 경우에는, 입사된 애니온이 빔 분할기에서 여기된 애니온과 braiding을 하여 기묘한 양자 노이즈를 생성한다 [그림(b)].

기대효과

심홍선 교수팀이 예측하고 발견한 braiding 현상은 가환 애니온 존재 신호로 학계에 받아들여지고 있다. 심홍선 교수팀이 제안한 관측법은 아직 발견되지 않은 좀 더 기묘한 비가환 애니온(non-Abelian anyons)의 존재를 입증하는데 사용될 것이다.



(a) 가환 애니온 braiding 특성을 나타내는 모식도. 2차원에서 가환 애니온이 동일한 종류의 가환 애니온 주위를 한바퀴 천천히 돌고나서 제자리로 돌아온다. 한바퀴 돌고 나면, 두 애니온의 위치가 원래 위치와 같음에도 불구하고, 두 가환 애니온의 양자역학 파동함수가 독특한 복소수 위상 $e^{i2\pi\nu}$ 만큼 달라진다 (여기서 ν 는 $1/3$ 과 같은 특정 분수). 이러한 특성은 braiding이라고 불린다. (b) 보존이나 페르미온 입자 빔의 분할(beam partitioning). 빔이 빔 분할기(QPC)를 통과하거나 반사된다. (c) 심홍선 교수팀이 예측하고 발견한 애니온 빔 분할 현상. 기존의 빔 분할과는 달리, 입사된 애니온 빔(붉은색)은 빔 분할기에서 여기된 애니온(파란색)과 braiding하여 기묘한 빔 분할 신호를 발생시킨다.

연구성과	[논문1] June-Young M. Lee, Changki Hong, Tomer Alkalay, Noam Schiller, Vladimir Umansky, Moty Heiblum, Yuval Oreg, and H.-S. Sim, Partitioning of diluted anyons reveals their braiding statistics, Nature 617, 277 (2023). [논문2] June-Young M. Lee and H.-S. Sim, Non-Abelian anyon collider, Nature Communications, 13, 6660 (2022).
연구비 지원	한국연구재단, 선도연구센터지원사업, 과제명: 응집상 양자결맞음 SRC 연구센터 (2016-2025, 총 124.6억)