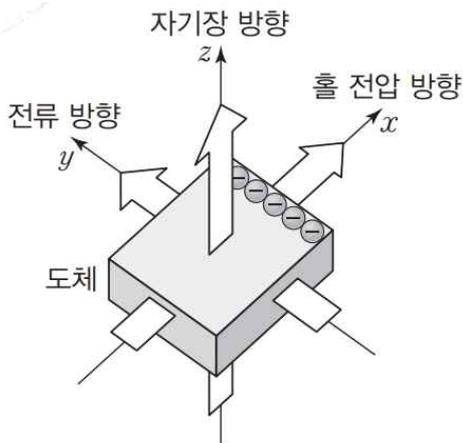


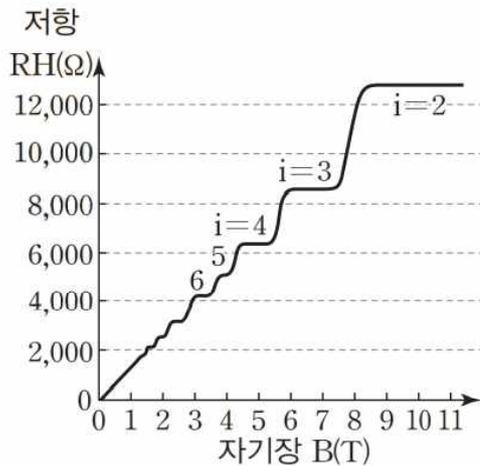
우리가 실생활에서 사용하는 많은 전자 제품들에는 트랜지스터와 같은 전자 소자가 들어 있다. 전자 소자에서 전자의 움직임을 제어하는 일은 매우 중요하다. ①**전자의 질량은 매우 작기 때문에 전자의 세계에서 중력은 전자의 운동에 영향을 거의 미치지 못한다.** 과학자들은 ②**전자를 제어하기 위한 수단으로 자기장에 관심을** 갖고 관련 연구들을 수행해 왔다. 에드윈 홀이 1879년에 논문으로 발표한 '홀 효과'도 ③**그에 관한 것이다.** 홀은 자기장이 전자의 운동에 미치는 영향을 실험으로 증명했다. 홀은 <그림 1>과 같이 ④**도체인** 금속판에 $+y$ 축 방향으로 전류를 흐르게 하고 그 판에 수직인 $+z$ 축 방향으로 자기장을 걸어 주었을 때, y 축과 z 축에 모두 수직인 $+x$ 축 방향으로 전자가 쏠리는 것을 전압계로 확인했다. 이는 ④**전류와** ⑤**자기장** 모두에 수직인 방향으로 ⑥**전위차**가 형성됨을 나타낸다. 이 현상은 전자나 정공이 이동하던 중 자기장의 영향을 받으면 로런츠 힘에 의해 힘이 작용하는 방향 쪽에는 전자나 정공이 증가하게 되고 반대편 쪽에는 전자나 정공이 상대적으로 적어지기 때문에 나타나는 것이다. 이렇게 전위가 발생하는 현상을 홀 효과라고 하며, 전류와 자기장 모두에 수직인 방향으로 쏠리는 전자의 양은 자기장에 비례해서 커진다. 홀 효과는 전류와 자기장이 수직인 방향으로 형성되었을 때 전자나 정공이 어떤 방향으로 힘을 받는지를 알 수 있게 해 준다. 그리고 홀 효과로 초래된 전위차는 홀 전압, 전기 저항은 홀 저항이라고 하는데, ⑦**이 값들의 부호와 크기는 소재의 물성을 알게 해 준다.** 가령 반도체의 경우, 홀 효과 때문에 전류와 자기장 모두에 수직인 방향으로 ⑧**주로 전자가 쏠려 있어 홀 전압의 측정값이 음수이면 n형 반도체로, 주로 정공이 쏠려 있어 홀 전압의 측정값이 양수이면 p형 반도체로 판별할 수 있다.**



<그림 1>

동일한 재료로 크기와 길이를 같게 해 만든 도선들이라도 저항을 측정하면 값이 조금씩 다를 수 있다. 홀 저항도 ⑨**조금씩 값이 달라지는 것이 상식이었다.** 그런데 1980년에 클리칭은 ⑩**종래의 지식으로는 설명하기 어려운** ⑪**새로운 연구 결과**를 얻었다. 절대 온도 1K 이하의 극저온 상태에서 이차원 전자계인 반도체 양자 우물 구조의 홀 저항을 측정하던 클리칭은 홀 저항이 자기장의 세기에 따라 어떤 특정한 값들만을 나타낸다는 '정수 양자 홀 효과'를 발견했다. 클리칭이 측정한 홀 저항값(RH)은 처음에는 자기장에 비례해 그 값이 계속 변화했다. 그런데 자기장의 세기를 계속 강하게 하자 가파르게 증

가하던 홀 저항값이 특정 구간에서 평지처럼 일정한 값을 유지했다. 이러한 홀 평지 현상은 <그림 2>에서 확인할 수 있듯이 자기장의 여러 구간에서 나타났다. 측정 결과 ⑫ **홀 평지 현상은 정확히 홀 저항값이 25,812Ω일 때와 이 값의 1/2, 1/3일 때 등에서 일어났다.** 이에 클리칭은 자연의 기본 상수들인 전자의 전하량(e)과 플랑크 상수(h)로 25,812란 수의 의미를 알고자 했다. 그가 h/e^2 로 계산해 보니 그 값은 정확히 25,812였다. 이와 같은 사실은 ⑬ **홀 저항값의 역수인 홀 전도율이 자연의 기본 상수들의 조합과 정수의 곱으로 표현될 수 있음**을 의미하며, 저항이 양자화되어 특정 조건에서 홀 저항이 물질에 무관하게 일정한 값을 나타낼 수 있음을 의미한다.



<그림 2>

⑭ **1980년대 초까지 물리학자들은 불순물이 포함된 이차원 소재에서는 전자의 운동이 불순물에 의해 구속되어 절대 영도에서 결국 부도체가 만들어진다고 믿어 왔다.** 그러나 로플린은 강한 자기장이 가해지면 전자는 특정한 전도띠들을 형성하기 때문에 전기 전도를 할 수 있으며, 이를 통하여 홀 저항의 양자화를 적절히 설명할 수 있다는 것을 보여 주었다. 몇 년 후 더욱 정교한 실험을 통하여 양자 홀 효과를 검증하는 과정에서 벨 연구소의 추이, 슈퇴르머, 고사드는 특이한 사실을 발견하게 되었다. 기존의 실험 결과에 의하면 전기 전도율은 특정한 값의 정수배만 존재해야 하는데, 그들의 실험 결과는 전기 전도율이 1/3, 1/5 등과 같은 분수값의 곱으로 나타나는 것이었다. ⑮ **이러한 물리 현상을 '분수 양자 홀 효과'라고 부른다.**

분수 양자 홀 효과는 분수값을 가진 전하 상태가 존재함을 나타낸다. 그런데 전자가 기본 입자로 더 이상 쪼개지지 않는 것임을 고려하면 전자들로 이루어진 물리계에서 분수값을 가진 전하 상태의 존재를 생각하는 것은 어렵다. ⑯ **이에 대해 명쾌한 해석을 제시한 학자는 로플린이었다.** 그는 극저온에서 이차원 전자계에 강한 자기장이 가해지면 전자들이 새로운 양자 유체를 형성한다는 것을 밝혔다. 분수 양자 홀 효과에서 양자 유체에 존재하는 기본 입자들은 분수 전하, 즉 전자 전하의 1/3, 1/5 등의 값을 가진다는 사실을 밝힌 것이다. 이는 양자 현상의 불확정성과 관련이 있다. 양자 현상에서 불확정성의 정도는 플랑크 상수로 주어진다. 플랑크 상수는 절대 영도에서도 전자계에는 양자적 떨림이 있음을 의미한다. 양자적 떨림은 결합력이 약한 고체를 녹여 액체 상태를 만드는데, 이 액체가 전기 저항이 사라지는 초액체성을 지닌 양자 유체이다. 전자의 존재는 전

자구름으로 표현할 수 있다. 양자 유체 내에서는 '양자 춤'이라는 조화로운 운동에 의해 공간에 퍼져 있는 전자구름이 적절히 분할된다. 이 때문에 분수 전하가 나타나는 것이다.

1. ①을 통해 '중력'과 '질량'에 대해 알 수 있는 내용을 서술하세요.

질량이 일정 수준 이하로 작은 대상은 중력의 영향을 받지 않는다.

2. ②의 이유를 서술하세요.

중력은 전자의 움직임에 영향을 미치지 못한다.

3. ③이 가리키는 대상을 서술하세요.

자기장을 통한 전자의 제어

4. ④의 사전적 의미를 서술하세요.

열 또는 전기의 전도율이 비교적 큰 물체를 통틀어 이르는 말.

5. ④~⑥을 보고 다음 물음에 답하세요.

(1) ④~⑥에 해당하는 축 방향을 쓰세요.

④	+y축
⑤	+z축
⑥	+x축

(2) ④~⑥중 원인에 해당하는 것과 결과에 해당하는 것의 기호를 쓰세요.

원인	④, ⑤
결과	⑥

6. ⑦이 가리키는 대상을 서술하세요.

홀 전압, 홀 저항

7. ⑧을 보고 다음 표의 빈 칸을 채우세요.

반도체의 종류	반도체의 내부 환경(원인)	홀 전압의 값(결과)
n형 반도체	주로 전자가 쏠려 있음	음수
p형 반도체	주로 정공이 쏠려 있음	양수

8. ⑨에 들어갈 말로 알맞은 것을 서술하세요.

측정할 때마다

9. ⑪이 ⑩인 이유를 서술하세요.

종래의 지식에 따르면 홀 저항의 값은 측정할 때마다 달라진다. 그런데 ⑪에 따르면 홀 저항의 값은 자기장의 세기에 의해 일정하게 결정된다.

10. ⑫와 <그림 2>를 보고 다음 물음에 답하세요.

(1) 자기장의 세기를 아무리 강하게 해도 홀 저항의 값은 $25,812\Omega$ 보다 높아지지 않는다. (O)

(2) <그림 2>의 i 와 '홀 평지 현상'의 관계를 서술하세요.

홀 평지 현상이 일어나는 경우 홀 저항값은 $(25,812/i)\Omega$ 가 된다(i : 자연수).

11. 다음은 ⑬에 대해 설명한 것입니다. 빈 칸을 채우세요.

홀 평지 현상이 일어나는 경우 홀 저항값은 다음과 같다.
$$\frac{25,812}{(i)}\Omega$$

그런데 $25,812 = \frac{(h)}{(e^2)}$ 이므로 홀 저항값은 $\frac{(h)}{(e^2i)}$ 가 되고, 홀 저항값의 역수인 홀 전도율은 $\frac{(e^2i)}{(h)}$ 가 된다.
이 때 (e)는 전자의 전하량이고 (h)는 플랑크 상수이고 (i)는 정수이므로, 홀 전도율은 자연의 기본 상수들의 조합에 정수를 곱한 값으로 나타낼 수 있다.

12. ⑭를 보고 다음 물음에 답하세요.

(1) '부도체'의 사전적 의미를 서술하세요.

전도체나 소자로부터 전기적으로 분리되어 있어 열이나 전기를 잘 전달하지 아니하는 물체.

(2) (1)의 답을 참고하여 ⑭를 통해 알 수 있는 '전자의 운동'과 관련된 내용을 서술하세요.

전기가 잘 전달되려면 전자의 운동이 자유로워야 한다.

(3) ⑭를 통해 알 수 있는 '1980년대 초 이후'에 대한 내용을 서술하세요.

불순물이 포함된 이차원 소재에서는 전자의 운동이 불순물에 의해 구속되어 절대 영도에서 결국 부도체가 만들어진다는 믿음은 1980년대 초 이후 받아들여지지 않게 되었다.

13. ⑮의 내용을 서술하세요.

전기 전도율이 분숫값의 곱으로 나타나는 현상

14. ㉞의 내용을 서술하세요.

전자가 더 이상 쪼개지지 않음에도 불구하고 전자들로 이루어진 물리계에서 분숫값을 가진 전하 상태가 존재하는 것