

14

빛의 이중성

아무리 뛰어난 이론이라도 어린아이가 이해할 수 있는 수준으로
설명하지 못하면 아무 짝에도 쓸모없다.
- 알베르트 아인슈타인 -

■ 드브로이 물질파

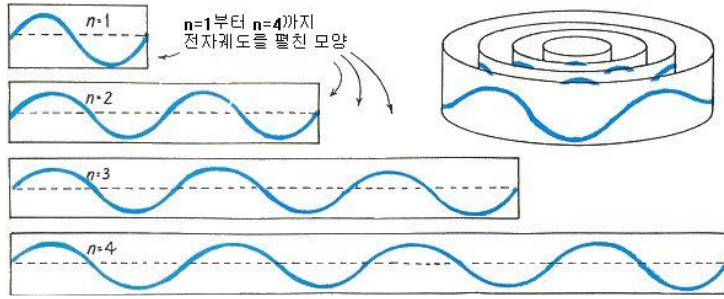
주기율표, 수소회선, 파울리 배타원리 등은 보어 모델을 기반으로 하였으며, 이 모델이 성공한 데에는 모두 드브로이 공작의 정상파와 물질파 개념이 있었기에 가능했다. 그는 역사학으로 학위한 뒤 재미삼아 3년간 배운 물리학을 바탕으로 정립한, 물질파에 관한 학위논문(1924년)으로 노벨 물리학상(1929년)을 수상하였다. 빛이 파동성과 입자성을 지니고 있다는 것에 착안하여, 아인슈타인의 파동의 입자성과 대응되는 입자의 파동성을 물질파로 주장하였다. 즉 전자나 소립자, 심지어는 야구공과 같이 명백하게 입자라고 이해되는 물질도 파동의 성질, 또는 파동이 될 수 있다는 것을 제안하였다. 아인슈타인의 광양자설이 나온 뒤 20년 후이니 물질파의 개념이 상당히 늦게 도출되었다고 할 수 있다.

파동이 가질 수 있는 성질로는 파장, 진동수, 진폭 등이 있으며, 입자로서의 성질로는 운동량, 위치, 속도, 가속도, 에너지 등이 있다. 드브로이는 이 상반된 두 성질사이에 광자라는 매개를 통해 파동이 곧 입자가 될 수 있음을 생각하고, 파동으로서의 파장과 입자로서의 $1/p$ 이 서로 상등한다고 가정하였다. 상대성 원리에 의해 운동량과 에너지 관계식에서 광자의 경우 정지질량(m_0)이 영임을 이용하여, 광전자효과의 관계식과 결합시켜 광자의 파장과 운동량과의 관계식을 도출하였다. 드브로이는 광자에서만 적용된다고 보았던 기존 관점에서 더 나아가 전자 뿐만 아니라 모든 입자에서도 λ 는 h/p 라고 생각하였다.

■ 드브로이 물질파 관계식	
Relativity	Photoelectric effect
$E = mc^2 = \sqrt{p^2c^2 + (m_0c^2)^2} = pc$	$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$
Momentum of photon $\rightarrow \frac{E}{c} = p$	$\frac{E}{c} = \frac{h}{\lambda}$ ← Wavelength-energy relation
For photon $\rightarrow \lambda = \frac{h}{p}$	de Broglie hypothesis for electron $\rightarrow \lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$

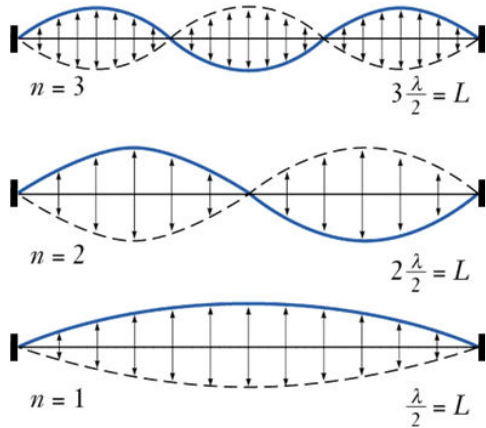
물질파는 다른 종류의 파동과 동일하게 행동한다. 물질파의 간섭으로부터 드브로이는 보어의 궤도는 전자파동의 정상파로부터 자연스럽게 도출된다고 보았다. 즉 보어의 전자 궤도는 전자파동의 파장이 원궤도 둘레의 정수배와 같을 때 존재해야 한다. 이러한 과정을 통해 보강간섭이 발생하며, 이 경우만 정상궤도를 유지할 수 있다는

것이다. 파동이 정수배의 파장으로 원통을 완전히 감싸지 못하면 소멸간섭이 일어나 존재하지



[보강간섭이 존재할 수 있는 정상파 궤도]

않는 궤도가 된다. 따라서 원자 궤도가 띄엄띄엄 있는 이유가 물질파의 보강간섭을 일으키는 정상파만이 존재하기 때문이라고 보았다.



[1차원 모델내 정상파]

핵의 원궤도를 돌고 있는 전자는 닫혀있는 경로에 존재하는 파장은 정상파의 형태로 유지된다고 하였다. 이를 다시

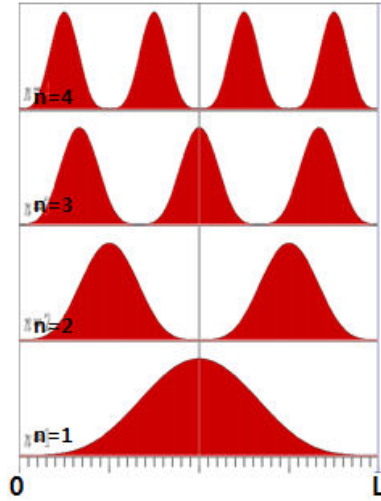
입자의 형태로 재해석할 수 있으며, 이를 1차원 상자속의 입자 모델로 볼 수 있다. 좁은 통로에 공을 집어넣고 양쪽 끝에서는 완전탄성을 하여 왕복운동을 한다고 볼 때, 마찰력이 없다면 처음 굴러준 속도 그대로 끝없이 왕복운동을 할 것이다. 이 과정에서 양끝을 연결해주면 연속된 궤도를 조화 진동운동하는 것과 같은 결과를 얻을 수 있다.

1차원 상자의 길이를 L 이라고 할 때, 해당 상자내에서 존재할 수 있는 정상파의 파장(λ_n)은 $2L/n$ 이 된다. 여기서 운동량($p_n = h/\lambda$)

$$P(x) = \frac{2}{L} \sin^2 \frac{n\pi x}{L}$$

n)과 해당 속도
 $(v_n=p_n/m)$ 는 각
 각 $hn/(2L)$ 과
 $hn/(2Lm)$ 이 된
 |확률밀도함수|

다. 따라서 에너지 준위는 수소원자의 경우와는 다르게 n^2 에 비례하는 형태인, $E_n=mv_n^2/2=h^2n^2/(8mL^2)$ 이 된다. 또한 해당 구간내에서 입자를 발견할 확률은 확률밀도함수(probability density function)에 의존하게 된다.

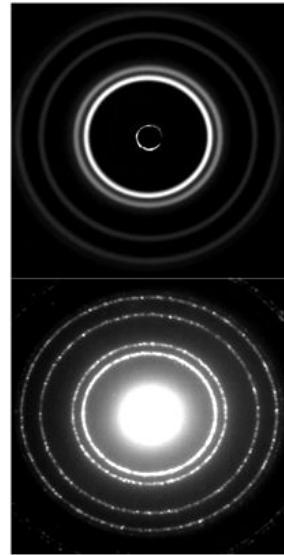


|계도별 확률밀도|

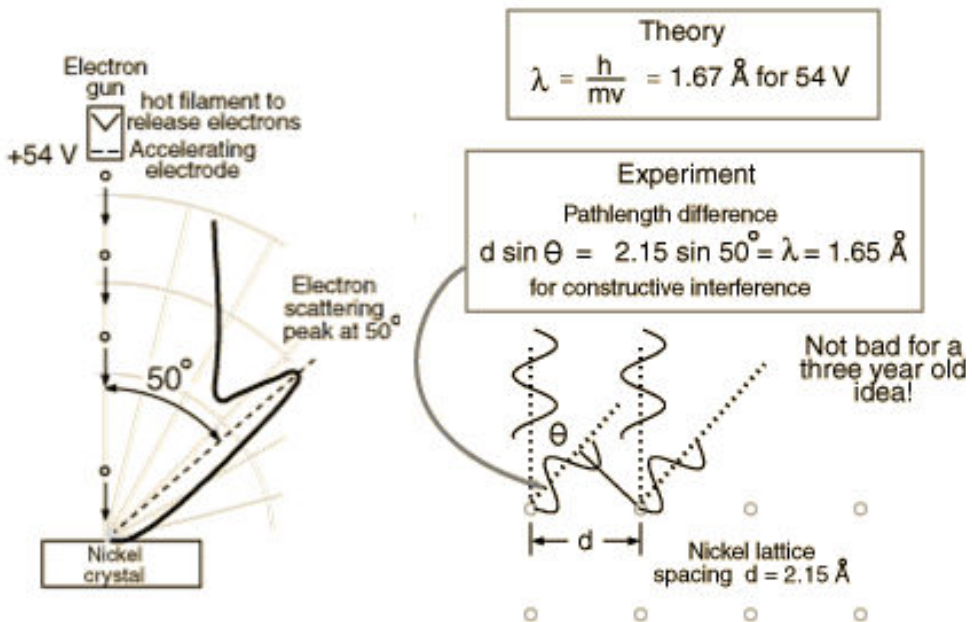
■ 드브로이 가설 실증

드브로이가 예상한 입자를 동반하는 파동인 물질파는 우연한 기회에 발견되었다. 1924년 물질파의 개념이 나왔지만 드브로이의 가설을 전혀 모르는 상태에서 진행한 두 과학자의 실험이 이를 입증하게 되었다. 데이비슨(Clinton Davission, 1881-1958)과 저머(Lester Germer, 1896-1971)는 당시 웨스턴 일렉트릭사(Western Electric Company, 추후에는 Bell Telephone Laboratories)의 진공관에 관한 특허분쟁 문제를 해결하고자 니켈 단결정을 이용한 전자 산란 실험을 실시하였다. 실험결과는 전자가 입자라는 가정을 버리고 파동으로 해석했을 때, 즉 브래그경(William Bragg, 1862-1942) 방정식($n\lambda=2d\sin\theta$)으로 계

산했을 때 실험결과가 제대로 설명된다는 것을 알았다. 그들은 영국과학회에서 드브로이의 물질파 이론을 듣고 그들의 실험결과와 이론적 토대를 찾았으며, 아울러 드브로이의 물질파의 존재를 실험적으로 증명(1927년)하게 되었다. 더불어 1년뒤 톰슨(George Thompson, 1892-1975)은 x선과 동일한 파장을 지닌 전자에 의한 두가지 회절의 모양이 거의 일치한다는 실험을 통해 다시 한번 전자의 물질파 특성을 증명하게 된다.

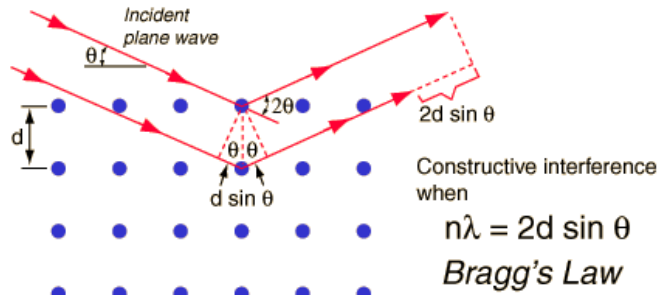


과동-입자 이중성(wave-particle duality)에 관한 데이비슨-저머의 실험을 좀 더 자세히 살펴보면, 금



데이비슨-저머의 물질파 증명실험

속표면에서 산란된 전자의 에너지를 측정할 수 있는 진공 장비를 이용하였다. 가열된 필라멘트에서 튀어나온 열전자는 인가된 전압에



의해 가속되고 니켈금속 표면을 타격하게 된다. 패러데이 상자 (Faraday box)라고 불리는 전자 검출기를 이용하여 산란각에 따른 전자의 에너지를 측정하였다. 이 결과 특정각도에서 산란된 전자의 에

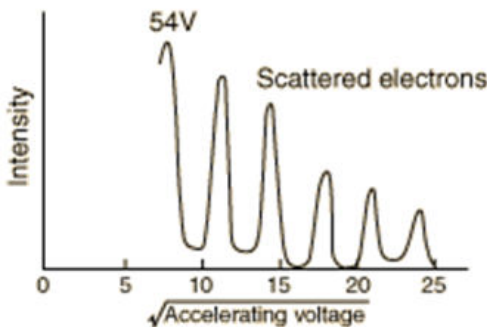
$$\frac{1}{\lambda} = \frac{n}{2d \sin \theta} = \frac{p}{h} = \frac{\sqrt{2mE}}{h} = \frac{\sqrt{2meV}}{h} = 0.815\sqrt{V}$$

Electron wavelength *Bragg law* *deBroglie relationship* *Acceleration through voltage V*

너지가 높게 나타났으며, 50°의 산란각에서 발견된 전자의 파장이 1.67 Å이었다.

|가속전압에 따른 전자의 물질파 파장|

이를 격자간의 간격(lattice spacing, d)을 계산할 수 있는 브래그식을 이용하여 해석하면 정확히 1.65 Å이 나오게 된다. 후자는 x선과 같은



|전자궤도와 일치하는 가속전압-강도 관계|

파동을 이용한 회절 또는 산란 정보 해석을 이용했던 것으로, 전자에 의한 산란 또한 파동 관계식인 브래그식으로 해석되는 놀라운 결과였다. 가속전압에 따른 강도를 나타낸 그래프에서는 n=1, 2, 3일 때를 나타

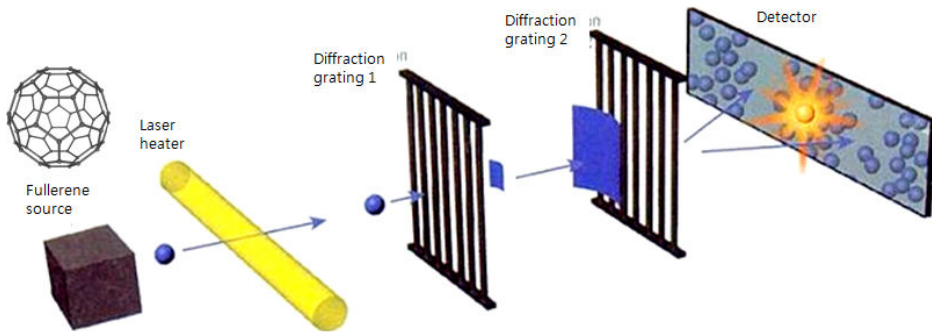
내는 7.36, 14.7, 22에서의 피크가 첫 번째, 세 번째, 다섯 번째 피크로 나타난다.

■ 다양한 물질파

물질파 개념에 의하면 움직이는 모든 입자는 파동의 성질을 지닌다는 것인데, 그렇다면 던져진 야구공도 파동이 될 수 있는가라는 생각을 가져볼 수 있다. 150 g인 야구공을 40 m/s로 던졌을 때 가질 수 있는 물질파의 파장은, h/mv 공식에 의해 1.1×10^{-34} m가 된다. 거시세계에서의 입자는 파장을 인지할 수 없을 정도로 작기 때문에 드브로이의 물질파는 무시된다. 그러나 100 V로 가속된 전자(5.9×10^6 m/s, 9.11×10^{-31} kg)가 지닐 수 있는 파장은 0.12 nm가 된다. 이는 원자수준

Object	Mass (g)	Wavelength (Å)
1-Volt electron	9.11×10^{-28}	12.3
10-Volt electron	9.11×10^{-28}	3.88
100-Volt electron	9.11×10^{-28}	1.23
Helium atom at room temperature	6.65×10^{-24}	0.73
α particle from radium	6.65×10^{-24}	0.000066
Average protein molecule	6.64×10^{-20}	0.0073
Floating chalk dust	$\sim 10^{-6}$	$\sim 6.6 \times 10^{-13}$
Driven golf ball	45	4.9×10^{-24}
Pitched baseball	140	1.9×10^{-24}
Chemistry professor, pacing	8×10^4	8.3×10^{-26}
Car at 30 mph	9×10^5	5.5×10^{-28}
Earth in orbit around sun	6×10^{27}	3.7×10^{-53}

[다양한 물체의 드브로이 물질파 파장 계산]



플러렌을 이용한 물질파 검증 실험

의 크기로 390 nm 정도의 가장 짧은 가시광 보다 더 짧다. 따라서 전자는 파동으로서의 특성을 지닐 수 있게 된다. 따라서 거시세계의 일반적인 물체는 빛의 속도로 달리지 않는 이상 물질파의 특성을 관찰하기 힘들다고 보아야 한다.

거시적으로 볼 수 없는 전자를 파동으로 볼 수 있다고 하는 것은 넘어가더라도, 정말로 입자로 여겨지는 대상에서도 파동의 특성이 그대로 나타날 것인가는 최근 실험결과로 확인되었다. 플러렌(C₆₀)은 약 1 nm 정도의 크기를 지닌 탄소로 된 결정체로, 리틀 레이저히터를 통과시킨 뒤 회절격자 패턴을 통과시켰다. 이때 검출기에 나타난 결과는 영의 이중슬릿 실험과 일치하는 것으로 파동성을 그대로 표현해 주고 있다.

■ 빛의 이중성

양자역학의 태동과 확립이 시작되었던 역사적인 회동은 1927년 5차



피카르, 앙리오트, 에렌페스트, 헤르젠, 드 등데르, 슈뢰딩거, 버샤펠트, 파울리, 하이젠베르크, 파울러, 브릴루앙, 디바이, 크누센, 브레그, 크라머스, 디랙, 콕프턴, 드 브로이, 보른, 보어, 랭뮤어, 플랑크, 퀴리 부인, 로렌츠, 아인슈타인, 랑주뱅, 게이, 윌슨, 리처드슨

[5차 솔베이 회의(1927년, 레오폴드 공원)]

솔베이 회의(Conseils Solvay)였으며, 그동안 거론된 많은 물리학자들이 대거 참석하였다. 참석한 물리학자 29명중 18명이 노벨상을 수상하였으며, 참석자인 퀴리(Maria Curie, 1867-1934) 부인은 노벨 물리학과 화학상을 수상하였다. 이때 토론의 주축이었던 아인슈타인과 보어사이에 오간 유명한 담론인 (아인슈타인) "God does not play dice.", (보어) "Einstein, stop telling God what to do."로도 유명하다. 아인슈타인은 하이젠베르크의 불확실성의 원리(uncertainty principle)를 크게 반대하면서 그와 같은 말을 했었다. 이 회의를 통해 양자역학의 발단이 되기도 했던 빛의 이중성이 더욱 명확해 졌다.

고전물리학(matter vs. energy)에서는 물질은 양적인 입자성을 지니면서, 파동의 특성을 지닌 연속 에너지와 차별화시켰다. 그러다 플랑크에 의한 흑체복사 현상 규명, 아인슈타인의 광전자효과 설명, 보어의 회전 스펙트럼 증명 등으로 인해, 고전물리학에서 설명하지 못하는 내용을 에너지의 양자화라는 개념으로 설명하게 이르렀다. 즉 파동이라고 여겨졌던 빛이 불연속적인 에너지를 지닌 입자로 설명

되었다. 다시 역전된 계기는 드브로이의 물질파의 개념을 데이비슨-저머가 입증하면서 입자가 파동이 되었다. 결국은 아인슈타인-드브로이 이론에 의해 물질과 에너지는 동일하며, 입자는 파동성을 지닐 수 있고 파동도 입자가 지니는 운동량을 가질 수 있다는 이중성을 제시하게 되었다. 그렇다고 두가지 성질이 동시에 나타난다는 것은 아니다. 추후에 다시 다루겠지만, 입자성을 관측하는 수단으로 대상을 바라보면 입자의 성질을 볼 수 있고, 파동의 특성을 관측하는 도구였다면 파동으로 보인다는 것이다. 이것이 광자와 같은 양자가 지닌 이중성이라고 할 수 있다.

■ 등장인물 살펴보기



클린턴 데이비슨(Clinton Davisson, 1881-1958)

미국의 물리학자이다. 저머와 함께 수행한 전자회절에 관한 발견으로 드브로이의 물질파의 가설을 입증하였으며, 1937년 톰슨과 함께 노벨 물리학상을 수상하였다. 밀리컨의 추천으로 프린스턴 대학에서 교수를 지내다가 웨스턴 일렉트릭사에서 퇴직하였다.



레스터 저머(Lester Germer, 1896-1971)

미국의 물리학자이다. 데이비슨과 함께 실험한 물질의 파동-입자 이중성 실험으로 유명하다. 또한 전자현미경을 개발하는 데 크게 일조를 하였다. 금속의 부식, 열전자(thermionic)에 연구를 수행하였다. 벨 연구소에서 근무하였으며, 등산을 좋아했다. 산행중 심장마비사 하였다.



윌리엄 브래그경(William Henry Bragg, 1862-1942)

영국의 물리학자, 화학자이다. 방사 현상을 연구하여 입자가 일정한 방사 거리를 가지고 있다는 사실을 브래그 곡선으로 나타냈다. 그의 제자이자 아들인 브래그와 함께 x선을 이용한 결정 구조 연구 결과로 브래그식을 만들었으며, 1915년 아들과 함께 노벨 물리학상을 수상하였다.



윌리엄 브래그(William Lawrence Bragg, 1890-1971)

오스트렐리아의 물리학자이다. 그의 아버지 브래그와 함께 1915년 노벨 물리학상을 수상하였다. 당시 25세로 역사상 가장 어린 나이에 노벨상을 수상한 것으로 기록되어 있다. 아버지와 조제프 톰슨이 공동 지도교수를 맡았으며, 아버지와 함께 브래그식을 만들었다.



조지 톰슨(Geroge Thomson, 1892-1975)

영국의 물리학자이다. 전자회절에 관한 데이비슨과는 독립적인 실험으로 드브로이의 물질파 가설을 입증하였으며, 데이비슨과 함께 노벨 물리학상을 수상하였다. 노벨상 수상자인 조제프 톰슨의 아들이기도 하다. 그의 아버지는 전자를 입자로 보았다면, 아들은 파동으로 보았다.



마리 퀴리(Maria Curie, 1867-1934)

폴란드의 화학자이다. 여성최초의 노벨상 수상자로서, 방사능(라듐) 분야의 연구로 1903년 남편 피에르 퀴리와 공동으로 노벨 물리학상을 수상하였다. 또한 1911년 노벨 화학상을 수상하였다. 그녀의 공적을 기리기 위해 방사능 단위에 퀴리라는 이름을 쓰며, 화학원소 ^{96}Cm 도 있다.