

LED를 리용한 외부빛전기효과실험장치에서 플랑크상수의 결정가능성

안광철, 최윤필

플랑크상수는 밀리켄(Millikan)에 의해 처음으로 정확히 결정되었는데 플랑크상수의 결정에서는 주로 구형콘덴사실험장치가 많이 리용되어왔다.[2] 그리고 수십W급의 수은등과 빛거르개나 빛세기감쇠판과 같은 질높은 광학요소들을 리용하는 외부빛전기효과실험장치에서 제동전압을 재는 방식으로 플랑크상수를 결정하고있다.[3, 4, 6]

론문에서는 상품화된 1W급 LED를 리용하여 제작한 외부빛전기효과실험장치에서 기본물리상수들중의 하나인 플랑크상수를 결정하기 위한 가능성을 고찰하였다.

1. LED를 리용한 실험장치에서 플랑크상수의 결정가능성해석

외부빛전기효과에 의하면 충분히 큰 에너지를 가진 주파수가 ν 인 포톤이 빛소자의 음극에 부딪치면 그 금속결면으로부터 전자가 떨어져나올수 있다. 이런 전자들중에서 입사빛의 주파수와 관련되어있는 최대운동에너지를 가지는 일부 전자들이 양극과 음극 사이에 걸어준 전압 U 의 전기마당에 의해서 양극에 도달할수 있다. 이때 아인슈타인관계식은 다음과 같이 표시된다.

$$h\nu = \frac{1}{2}m_e v^2 + W \quad (1)$$

여기서 ν 는 빛소자의 음극결면에 입사하는 빛의 주파수, m_e 는 튀어나오는 전자의 질량, v 는 빛전자의 속도, W 는 음극재료의 일함수(즉 방출일)이다.

결국 전자들이 전기마당에서 얻는 에너지가 그것들의 운동에너지와 같아지는 경우에 양극에 도달할수 있다. 즉

$$eU = \frac{1}{2}m_e v^2$$

여기서 e 는 전기소량이다. ($e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{C}$)

일함수는 금속밖으로 전자들이 튀어나오지 못하도록 빛소자의 전극들에 걸어준 부의 제동전압(한계전압)을 측정하여 결정한다. 그런데 제동전압을 정확히 측정하는것은 매우 어렵다. 그 리유는 우선 전압-전류특성곡선이 전압축에 가깝게 접근하며 또한 항상 접촉전위차가 존재하기때문에 전압-전류특성곡선의 이동이 나타나는것으로 설명된다.[2]

접촉전위차에 의한 측정오차를 피하기 위하여 접촉전위차 Φ 를 고려하여 식 (1)을 다시 표시하면 다음과 같다.[4]

$$h\nu = \frac{1}{2}m_e v^2 + W + \Phi \quad (2)$$

접촉전위차 Φ 는 양극과 음극의 결면들이 꼭같지 않고 회로연결부분들에 접촉포텐

살이 존재하는것 등의 요인들에 의하여 나타난다.[4]

만일 W 와 Φ 가 입사빛의 주파수에 관계되지 않는다고 가정하면 제동전압과 빛주파수사이에는 선형관계가 존재한다. 전자의 최대운동에너지가 제동전압에 의한 일 $eU_{\text{제}}$ 와 같을 때 전자들은 양극에 도달할수 없으며 따라서 빛전류가 0으로 되어야 한다. 즉

$$U_{\text{제}} = \frac{h}{e} \nu - \frac{W + \Phi}{e} \quad (3)$$

파장이 다른 두 단색빛으로 각각 빛소자를 비추준다면 식 (3)으로부터 다음과 같이 표시할수 있다.

$$h(\nu_2 - \nu_1) = e(U_{\text{제}, 2} - U_{\text{제}, 1}) \quad (4)$$

결국 입사빛의 주파수와 제동전압사이의 그래프의 경사도를 구하면 플랑크상수를 결정할수 있다.

질 좋은 간섭거르개와 고압수은등을 리용한 외부빛전기효과실험장치로 결정된 플랑크상수의 크기는 다음과 같다.[4]

$$h = (6.7 \pm 0.3) \cdot 10^{-34} (\text{J} \cdot \text{s})$$

이 값은 겨우 2개의 유효숫자범위에서 기준값 $h = 6.626 \cdot 10^{-34} (\text{J} \cdot \text{s})$ [3, 5]와 일치할 뿐이며 상대측정오차는 약 4.5%로서 비교적 큰 편이다.

이로부터 플랑크상수의 결정을 위한 구형콘덴샤방법[2]이나 수소원자스펙트르에 기초한 실험방법[3]의 우월성을 더 명백히 판단할수 있다.

만일 플랑크상수의 결정에서 LED의 단색특성이 큰 영향을 주지 않는다면 능히 그것을 리용한 실험장치[1]를 가지고 플랑크상수를 결정할수 있다.

2. 실험결과와 분석

입사빛의 단색특성이 플랑크상수의 결정에 미치는 영향을 평가하기 위하여 리드베르 그상수와 발마공식을 리용한 실험에서 파장측정값의 영향에 대한 예측결과는 표 1과 같다. 계산에 리용된 물리상수들은 선행연구[3]의 값을 그대로 택한것들이다.

표 1. 플랑크상수의 결정에 미치는 파장측정값의 영향에 대한 예측결과

측정 값/nm	656.3	486.1	434.1
	$\bar{h} \approx 6.626 \cdot 10^{-34} (\text{J} \cdot \text{s})$		
예측값	656	486	434
	$\bar{h} = 6.625 \cdot 10^{-34} (\text{J} \cdot \text{s}), \varepsilon < 1\%$		
예측값	651	481	429
	$\bar{h} = 6.60 \cdot 10^{-34} (\text{J} \cdot \text{s}), \varepsilon < 1\%$		

표 1에서 보는것처럼 만일 수소원자가 내보내는 발마계열의 스펙트르파장들을 3개의 유효숫자(즉 434, 486, 656nm)로 측정한다고 가정하면 플랑크상수는 기준값과 3개의 자리수에서 일치한다. 그리고 단색특성이 나빠서 그 스펙트르들의 파장을 약 5nm정도로 틀리게 켜다고 보는 경우에는 결정된 플랑크상수가 기준값과 2개의 자리수에서 일치된다는것을 알수 있다.

이로부터 외부빛전기효과를 리용하여 플랑크상수를 결정하는데서 입사빛의 단색정보

다도 그것의 중심파장을 정확히 재는것이 더 중요하다는것을 알수 있다. 때문에 실험장치에 리용된 LED등의 중심파장을 보다 정밀한 분광기(《CARL ZEISS JENA 248615》)로 측정하여 중심주파수를 결정하였다. 그리고 실험장치를 가지고 필요한 특성량들을 결정하였다. 상품화된 LED등을 리용한 장치에서의 측정결과는 표 2와 같다.

표 2. 상품화된 LED등을 리용한 장치에서의 측정결과

LED등	주파수/($\cdot 10^{12}$ Hz)	소비전력/W	포화전류세기/ μ A	제동전압/V
적색	479	0.6	~ 120	0.52
등색	512	0.6	120	0.67
록색	585	0.6	130	0.95
청색	666	0.6	610	1.23

표 2의 측정결과들과 식 (4)를 리용하여 결정한 플랑크상수값들은 표 3과 같다.

표 3. 표 2의 측정결과들과 식 (4)를 리용하여 결정한 플랑크상수값

	적/등	적/록	적/청	등/록	등/청	록/청
$h/(\times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s})$	7.28	6.50	6.08	6.14	5.82	5.54

결정된 플랑크상수값들은 기준값의 근방에 분포되는데 특히 파장차가 작은 LED등을 선택하여 구한 그 값들이 기준값과 크게 차이난다. 때문에 외부빛전기효과실험에서 플랑크상수를 정확히 결정하려면 가능한껏 파장차가 큰 LED등을 선택하는것이 더 좋다고 볼수 있다.

결국 실험에서 결정한 플랑크상수값은 $h = (6.2 \pm 0.6) \cdot 10^{-34} (\text{J} \cdot \text{s})$ 이다. 이때 측정상대오차는 9.7%로서 선행연구[4]의 경우보다 2배정도 더 크다. 그러나 선행연구[4]의 결과처럼 기준값과 2개의 유효수자범위에서 잘 일치한다고 볼수 있다. 이것은 상품화된 LED를 리용한 외부빛전기효과실험장치로도 능히 플랑크상수를 이런 정도에서 결정할수 있다는것을 의미한다.

측정된 LED의 중심파장값들의 유효수자가 3개이지만 제동전압들의 유효수자는 2개이다. 이것은 제동전압을 재는데 리용된 수자식만능재개의 측정한계와 관련되어있다. 사실 선행연구[4]의 경우에도 역시 수자식만능재개가 리용되었다.

측정오차리론에 의하면 어떤 측정값의 유효수자가 2개일 때 최대상대오차는 10%정도, 3개일 때에는 1%정도에 달한다. 그러므로 파장측정의 상대오차가 1%이하로 주어지는 조건에서 제동전압을 2개이상의 유효수자를 가지도록 측정하여야만 플랑크상수를 보다 더 정확히 결정할수 있다.

실험에서 빛전류의 세기가 사용된 μA 계의 정해진 측정감도아래로 내려가는 경우에 빛소자의 전극들에 걸린 부의 전압이 제동전압이라고 보았다. 그런데 빛소자에 서로 다른 파장의 빛들을 쏘여줄 때 단위시간동안에 튀어나오는 전자들의 개수와 포화전류는 달라지게 되어있다. 이때 빛전류의 세기를 보다 정확히 재서 제동전압의 측정정확도를 높이려고 μA 계의 측정대역을 바꾼다면 측정조건이 동시에 변하므로 얻어진 결과들을 호상 비교할수 없다.

선행연구[2, 3]에서는 거르개들을 리용하여 서로 다른 파장의 입사빛조건에서 포화전류의 세기들이 비교적 같아지도록 실험조건을 보장하여야 한다고 하였다. 사실 아인슈타인의 관계식 (1)에서 전자의 속도는 평균속도를 의미하지 않는다. 입사빛의 파장이 짧으면 더 많은 전자들이 더 큰 속도로 튀어나올것이며 포화전류의 세기도 동시에 커질것이다. 그러므로

μA 계의 측정대역을 여러 파장의 빛들에 대하여 똑같이 정해놓은 실험조건에서 제동전압을 정확히 재는데는 일정한 한계가 존재하게 된다.

결국 외부빛전기효과를 리용하여 플랑크상수를 보다 정확히 결정하자면 모든 입사빛들에 대하여 포화전류의 세기들을 비슷이 일치시키는것과 함께 빛전류의 세기를 정확히 잴수 있는 매우 넓은 측정대역의 μA 계와 유효수자가 2개이상인 되도록 제동전압을 잴수 있는 전압계가 리용되어야 한다.

맺 는 말

상품화된 1W급 LED를 리용한 외부빛전기효과실험장치로 결정된 플랑크상수는 $h = (6.2 \pm 0.6) \cdot 10^{-34} (\text{J} \cdot \text{s})$ 이다. 이 값은 상대오차한계내에서 수십W급의 수은등과 질높은 간섭거르개들을 리용하는 장치에서 얻은 결과 $h = (6.7 \pm 0.3) \cdot 10^{-34} (\text{J} \cdot \text{s})$ [4]와 유효수자의 측면에서 큰 차이를 가지지 않는다.

플랑크상수를 더 정확하게 결정하자면 각이한 파장의 입사빛조건에서 비슷한 포화전류의 세기를 보장하도록 빛감쇠를 실현하며 측정대역이 매우 넓은 μA 계와 제동전압을 2개이상의 유효수자로 잴수 있는 전압계가 리용되어야 한다. 그리고 중심파장의 결정에서 측정오차가 $\pm 5\text{nm}$ 를 넘어서지 않도록 하여야 한다.

참 고 문 헌

- [1] 김일성종합대학학보(자연과학), 61, 11, 43, 주체104(2015).
- [2] E. Schpoliski; Atomphysik, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, 349~354, 1983.
- [3] W. Ilberg; Physikalisches Praktikum für Anfänger, BSB B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, 248~249, 259~261, 279~281, 1985.
- [4] R. von Alvensleben; PHYWE Experimental Literature Physics, Phywe Systeme GmbH & Co. KG, LEP 5.1.04, 2008.
- [5] D. Mende u. a.; PHYSIK Gleichungen und Tabellen, VEB Fachverlag Leipzig, 392~394, 1986.
- [6] TESS expert PHYWE, Phywe Systeme GmbH & Co. KG, 196, 2015.

주체107(2018)년 9월 5일 원고접수

On the Possibility to Determine the Planck's Constant by Means of a Laboratory Equipment for the External Photoelectric Effect Using LED

An Kwang Chol, Choe Un Phil

We have studied the possibility to determine the Planck's constant by means of a laboratory equipment for the external photoelectric effect using commercial 1W LED.

The Planck's constant which have been determined with our equipment using LED is as follows:

$$h = (6.2 \pm 0.6) \cdot 10^{-34} (\text{J} \cdot \text{s}) .$$

Key word: Planck's constant