

04

현대의 원자 모형

학습 목표 | 현대의 원자 모형을 불확정성 원리와 확률을 바탕으로 하여 설명하고, 보어 원자 모형과 비교할 수 있다.

그림과 같이 운동하는 물체를 나타낸 모습에서 물체의 위치를 어떻게 표현할 수 있을까?



불확정성 원리

그림 III-16과 같이 현미경으로 서로 가까이 놓인 작은 입자를 관찰하려면 입자로부터 반사되어 온 빛을 보아야 한다. 이때 파장이 긴 빛을 사용하면 두 입자를 구별하기 어렵지만, 파장이 짧은 빛을 사용하면 두 입자를 구별할 수 있다. 즉, 빛의 파장이 짧을수록 가까이 놓인 두 입자를 선명하게 구별할 수 있다.

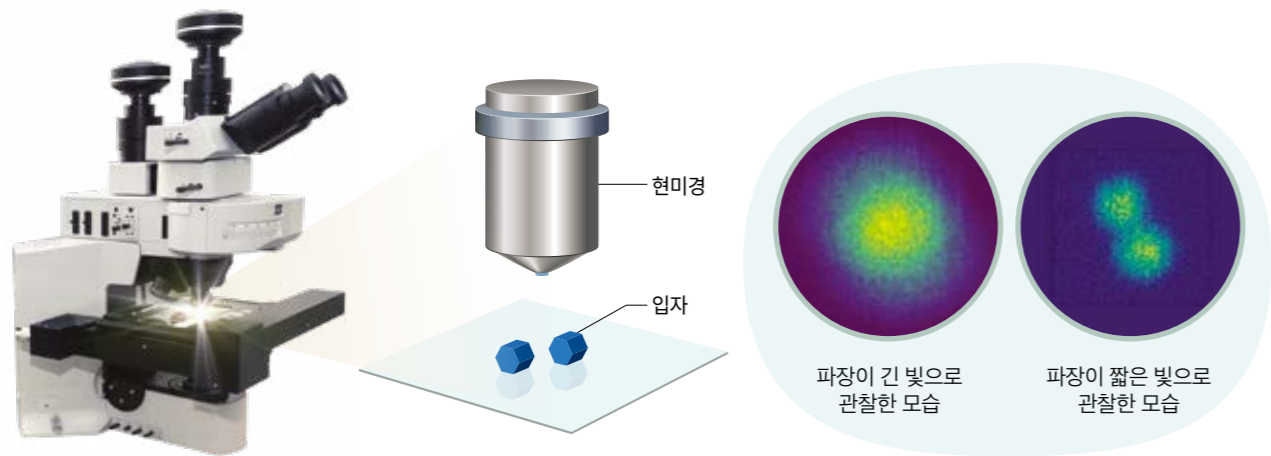


그림 III-16 파장이 다른 빛으로 입자를 관찰한 모습

하이젠베르크
(Heisenberg, W. K., 1901~1976)
독일의 물리학자. 불확정성 원리에 관한 연구로 20세기 초 양자 역학의 발전에 중요한 역할을 했다.

하이젠베르크는 현미경으로 전자를 관찰하는 사고 실험을 했다. 운동량이 p_e 인 전자의 위치 x 를 측정하기 위해 파장이 λ 인 빛을 전자에 입사한 뒤 전자에 충돌한 광자가 현미경으로 들어오는 상황을 가정했다.

전자의 위치는 최소 빛의 파장 λ 만큼의 오차를 갖기 때문에 전자의 위치 불확정성 Δx 는 $\Delta x \geq \lambda$ 이다. 따라서 전자의 위치를 정확하게 측정하기 위해서는 λ 가 짧을수록 좋다.

한편 운동량이 $\frac{h}{\lambda}$ 인 광자와 충돌한 전자는 운동량이 달라지므로, 전자의 운동량 불확정성 Δp 는 $\Delta p \approx \frac{h}{\lambda}$ 이다.

따라서 그림 III-17과 같이 전자의 위치를 정확히 측정하려고 λ 가 짧은 빛을 사용하면 Δp 가 커지고, 전자의 운동량 불확정성을 줄이기 위해 λ 가 긴 빛을 사용하면 Δx 가 커진다.

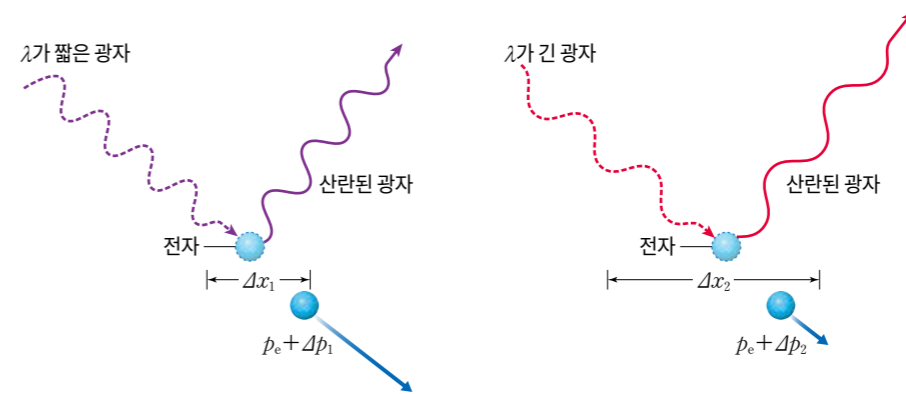


그림 III-17 빛의 파장에 따른 전자의 위치 측정과 운동량 변화

즉, 전자와 같이 매우 작은 입자의 위치와 운동량을 동시에 정확히 측정하는 것은 불가능하다. 이것을 불확정성 원리라고 하며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

위 식에서 \hbar (에이치바)는 $\frac{h}{2\pi}$ 이며, h 는 플랑크 상수이다. \hbar 는 매우 작은 값이기 때문에 우리가 일상생활에서 접하는 운동에서는 이를 무시할 수 있다. 따라서 고전 역학에서는 불확정성 원리를 고려하지 않지만, 전자와 같은 입자의 운동을 다룰 때에는 불확정성 원리를 고려해야 한다.

즉, 미시세계에서 위치와 운동량을 동시에 정확하게 측정할 수 없는 것은 측정 기술이 아무리 발달해도 피할 수 없는 자연의 본성이다. 따라서 미시세계 입자의 운동은 확률적으로 다뤄야 한다.

스스로 확인

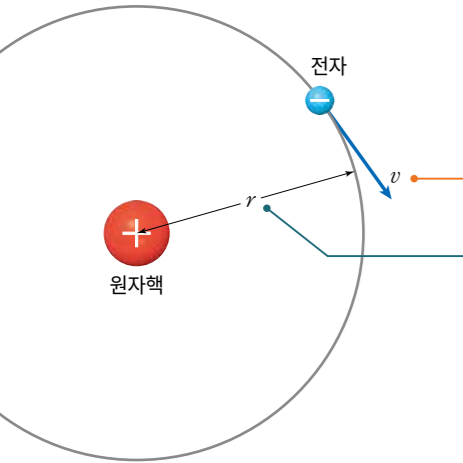
- 1 전자의 위치를 측정할 때 파장이 긴 빛을 사용하면 위치 불확정성은 (작아진다, 커진다).
- 2 전자의 위치 불확정성이 작을수록 운동량 불확정성도 작아진다. (O, X)

광자의 운동량
진공에서 빛의 속력을 c , 빛의 진동수를 f 라고 할 때, 광자의 운동량 $p = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}$ 이다.

* 고전 역학
뉴턴 운동 법칙에 따라 만든 역학 체계이다.

보어 원자 모형을 '빛과 물질' 단원에서 배웠다.

*** 전자볼트(eV)**
에너지의 단위이다. 1 eV는 전자 1 개가 1 V의 전위차에서 가속될 때 얻는 에너지로, 약 1.602×10^{-19} J이다.



현대의 원자 모형

불확정성 원리가 발표되기 전에는 보어가 제시한 원자 모형이 큰 지지를 받았다. 보어 원자 모형에 따르면 원자 내의 전자는 특정한 궤도에서만 존재한다. 수소 원자의 경우 이 궤도의 반지름은 양자수 $n(n=1, 2, 3, \dots)$ 의 제곱에 비례하고, 각 궤도의 에너지 준위 E_n 은 다음과 같다.

$$E_n = -\frac{13.6}{n^2} \text{ [단위: eV(전자볼트)]}$$

원 중심 방향 운동량 불확정성 Δp_r 가 0이다.
전자가 원자핵으로부터 떨어진 거리에 대한 위치 불확정성 Δr 가 0이다.

하지만 보어 원자 모형은 그림 III-18과 같이 원 궤도 중심 방향으로의 위치 불확정성 Δr 와 운동량 불확정성 Δp_r 가 모두 0이어서 불확정성 원리에 위배된다.

그림 III-18 불확정성 원리와 보어 원자 모형

슈뢰딩거는 입자의 운동을 설명하기 위해 슈뢰딩거 방정식을 제안했다. 슈뢰딩거 방정식을 이용하면 입자의 운동을 양자 역학적 관점으로 설명할 수 있는데, 이 방정식의 해를 파동 함수라고 한다. 파동 함수 자체는 직접 측정할 수 없는 양이지만 파동 함수의 절댓값을 제곱한 값은 입자를 발견할 확률을 나타내며, 측정을 통해 확인할 수 있다. 이를 바탕으로 한 현대의 원자 모형에서는 보어 원자 모형과는 다르게 전자의 파동 입자 이중성으로 원자에서 나타나는 여러 가지 관찰 사실을 설명한다.

수소 원자의 $n=1$ 인 상태에서 전자를 발견할 확률은 그림 III-19의 (가)와 같다. a_0 은 전자를 발견할 확률이 가장 높은 위치로, 보어의 측정값과 일치한다. 전자를 발견할 확률은 원자핵 주변에 고르게 분포하므로 이를 나타낸 원자 모형의 단면은 그림 (나)와 같다. 색이 진할수록 전자를 발견할 확률이 높은 곳이다.

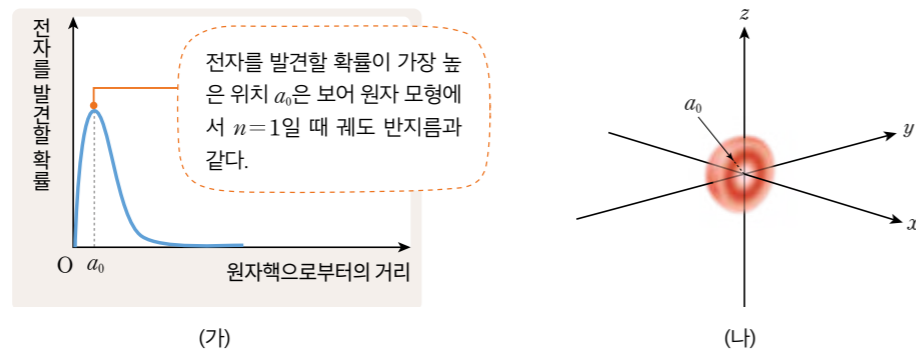


그림 III-19 $n=1$ 일 때 전자를 발견할 확률과 원자 모형

슈뢰딩거
(Schrödinger, E., 1887~1961)
오스트리아의 물리학자. 양자 역학의 발전에 큰 공헌을 했다. 그가 정립한 슈뢰딩거 방정식을 원자에 적용해 풀면 양자 역학적 관점으로 현대의 원자 모형에 대한 해를 구할 수 있다.

수소 원자의 $n=2$ 인 상태에서 전자를 발견할 확률은 그림 III-20의 (가)와 같으며, 이를 나타낸 원자 모형의 단면은 그림 (나)와 같다.

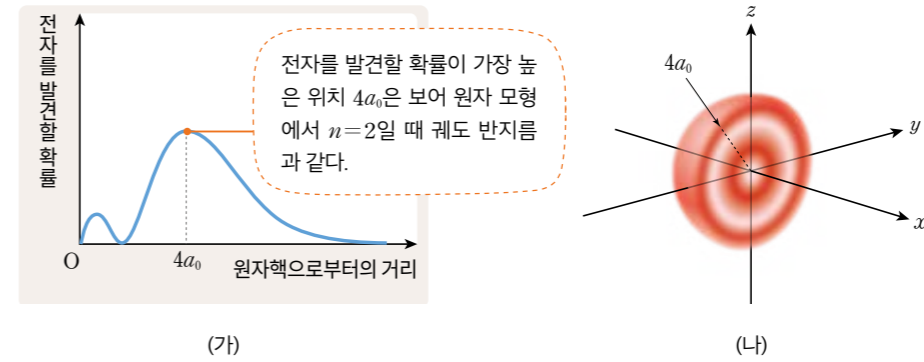


그림 III-20 $n=2$ 일 때 전자를 발견할 확률과 원자 모형

보어 원자 모형에서는 원자핵으로부터 거리와 에너지를 나타내는 양자수 n 만 다뤘지만, 현대의 원자 모형을 설명하기 위해서는 n 외에도 l, m, s 라는 양자수가 필요하다.

이러한 양자수를 적용해 수소 원자에 대한 슈뢰딩거 방정식을 풀면 에너지 준위는 $E_n = -\frac{13.6}{n^2}$ 으로 보어 원자 모형과 같다. 하지만 양자수 n, l, m, s 를 적용하면 보어 원자 모형으로는 설명할 수 없는 외부 자기장이나 전기장에 따라 나타나는 여러 특성을 설명할 수 있다.

현대의 원자 모형에서 양자수

- n : 원자핵으로부터 거리와 에너지를 나타내는 주양자수
- l : 궤도의 모양과 관련한 각운동량 양자수
- m : 공간적 방향과 관련한 자기양자수
- s : 전자가 가진 고유한 성질과 관련한 스핀 양자수

잠깐 활동

보어 원자 모형과 현대의 원자 모형의 공통점과 차이점을 다음 표를 완성하여 비교해 보자.

구분	보어 원자 모형	현대의 원자 모형
에너지 준위	양자화되어 있다. ($E_n = -\frac{13.6}{n^2}$)	
전자를 발견할 확률	정해진 궤도에서만 발견할 수 있다.	
불확정성 원리 만족 여부		

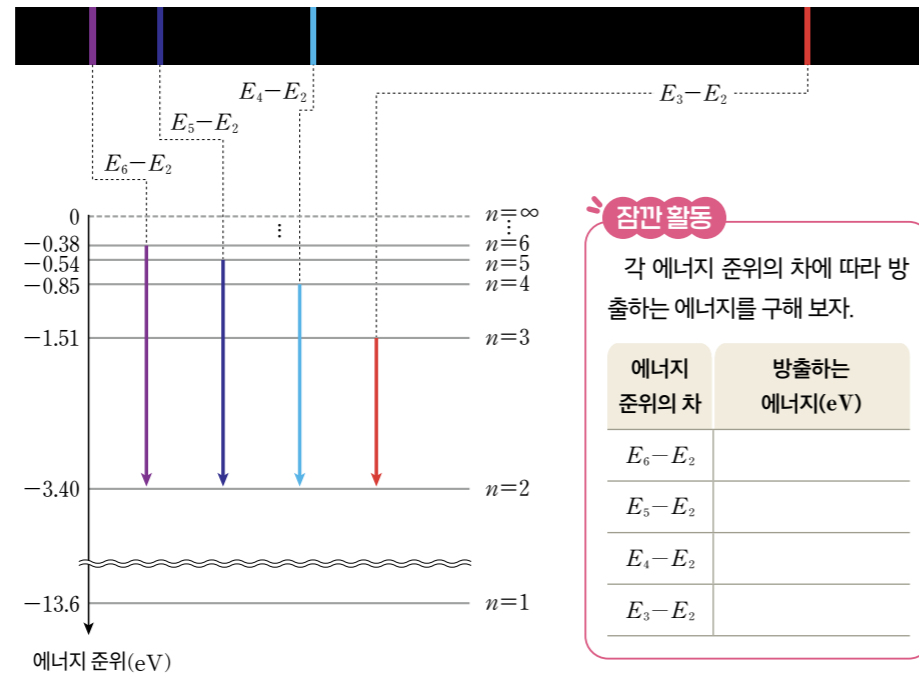
스스로 확인

- 수소 원자 내 전자의 위치는 정확히 측정할 수 있다. (○, ×)
- 현대의 원자 모형에서 수소 원자 내 전자의 에너지 준위 값과 보어 원자 모형에서 에너지 준위 값은 다르다. (○, ×)

연계 **물리학**

스펙트럼의 각 선은 수소 원자 내 전자가 높은 에너지 준위에서 낮은 에너지 준위로 전이할 때 방출하는 빛이며, 이는 수소 원자 내 전자가 불연속적인 에너지 준위를 갖기 때문에 나타나는 결과라는 것을 '빛과 물질' 단원에서 배웠다.

현대의 원자 모형에서도 보어 원자 모형에서와 같이 수소 원자 내 전자의 에너지 준위는 양자화되어 있다. 이는 스펙트럼 관찰을 통해서도 알 수 있다. 수소 기체에 높은 전압을 걸어 주었을 때 방출하는 전자기파의 선 스펙트럼 중 가시광선 영역에 해당하는 것은 그림 III-21과 같다.



잠깐 활동

각 에너지 준위의 차에 따라 방출하는 에너지를 구해 보자.

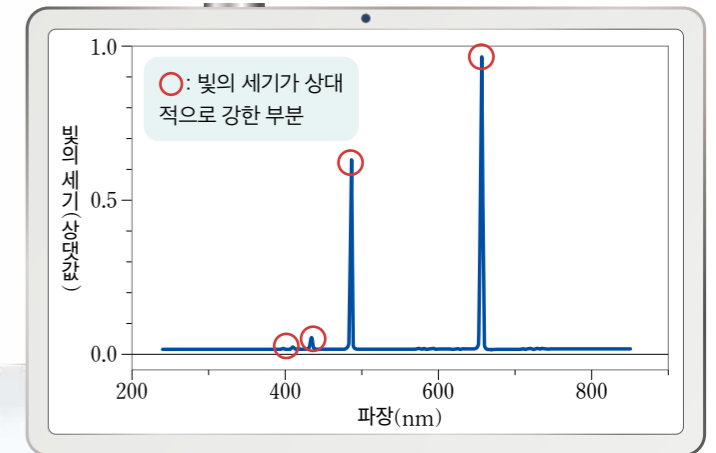
에너지 준위의 차	방출하는 에너지(eV)
$E_6 - E_2$	
$E_5 - E_2$	
$E_4 - E_2$	
$E_3 - E_2$	

그림 III-21 n=3, 4, 5, 6에서 n=2인 상태로 전이할 때 방출하는 전자기파(가시광선)

다음 활동을 하면서 수소 기체 방전관에서 나온 빛의 스펙트럼을 관찰해 현대의 원자 모형에서 제시한 에너지 준위를 확인해 보자.

3. 데이터 분석 애플리케이션에서 선 스펙트럼에 나타난 빛의 파장 λ 가 몇 nm인지 **결과 및 정리 1**의 표에 기록한다.

실험 영상



결과 및 정리

- 기록한 λ 를 통해 스펙트럼의 각 선에 해당하는 빛의 에너지 E 를 구해 보자. (단, $E = \frac{1241.14}{\lambda}$ eV로 계산한다.)
- 116 쪽 **잠깐 활동**에서 구한 방출하는 에너지와 **결과 및 정리 1**에서 구한 E 가 일치하는지 확인해 보자.

λ (nm)	E (eV)

💡 탐구 길잡이
 $E = hf = \frac{hc}{\lambda}$ 이다. 이 식에 다음 값을 대입하여 얻은 식이 $E = \frac{1241.14}{\lambda}$ eV이다.
 • $h = 6.63 \times 10^{-34}$ J·s
 • $c = 3.00 \times 10^8$ m/s
 • $1 \text{ J} = 6.24 \times 10^{18}$ eV
 • $1 \text{ nm} = 10^{-9}$ m

탐구

다양한 도구 활용 / 수학적 사고 활용

스펙트럼 관찰을 통해 에너지 준위 확인하기

목표

수소 기체 방전관의 스펙트럼 관찰을 통해 에너지 준위를 확인할 수 있다.

과정

- 데이터 분석 애플리케이션을 이용해 MBL 분광기를 스마트 기기와 무선으로 연결한다.
- 수소 기체 방전관의 전원을 켜 뒤, 분광기로 방전관에서 나온 빛의 데이터를 수집한다.

- ⚠️ 안전**
- 선생님의 지시에 따라 수소 기체 방전관의 전원을 켜다.
 - 반드시 실험복과 레이저 보안경, 면장갑을 착용하고 실험한다.
 - 방전관에서 나오는 빛을 맨눈으로 보지 않는다.

탐구 능력 | 문제 해결 능력

스스로 평가

- | 지식·이해 | 선 스펙트럼에 나타난 빛의 에너지를 구했는가? ☆☆☆
- | 과정·기능 | MBL 분광기를 통해 선 스펙트럼에 나타난 빛의 파장을 찾았는가? ☆☆☆
- | 가치·태도 | 실험 결과를 있는 그대로 기록하고 해석했는가? ☆☆☆

탐구 후기

스스로 확인

- 수소 기체 방전관에서 나온 빛의 선 스펙트럼은 수소 원자 내 전자의 에너지 준위가 ()되어 있다는 증거이다.
- 수소 기체 방전관에서 나온 빛의 에너지는 수소 원자 내 전자의 (에너지 준위, 에너지 준위의 차)와 같다.

스스로 정리

공유 불확정성 원리에 관한 자신의 생각을 그림이나 음악과 같은 예술 작품으로 자유롭게 표현하고, 공유 플랫폼에 공유해 보자.