

17. 불확정성의 원리

화공과 김영훈 교수

korea1@kw.ac.kr

하이젠베르그의 두번째 업적

2

- 1927년, 실증주의 신념 파괴하는 사고
 - ▣ 오직 측정 가능한 양만 이론으로 삼는다?
 - ▣ 어떤 물리량은 동시에 정확히 측정 불가
 - ▣ “위치와 운동량”

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\partial H}{\partial p} = -\frac{2\pi i}{h}(qH - Hq)$$

$$pq - qp = \frac{h}{2\pi i}$$

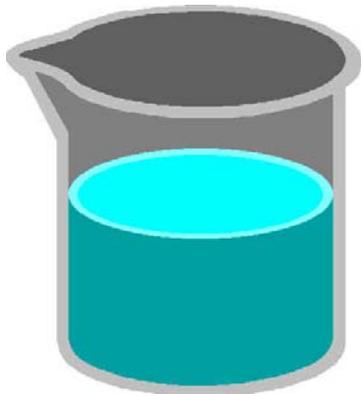
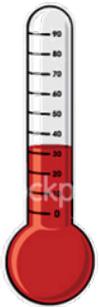
$$\frac{dp}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial q} = -\frac{2\pi i}{h}(pH - Hp)$$

- 불확실성의 원리
 - ▣ 전자 위치 관찰을 위해서는 외부의 빛 필요(현미경)
 - ▣ → 전자 전이 유발, 즉 관찰하는 순간 변함

측정에 의한 물리량 변화

3

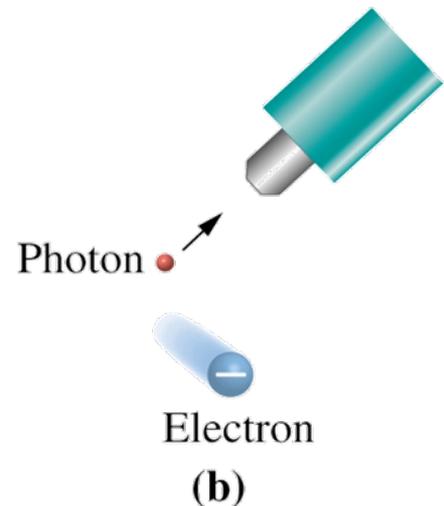
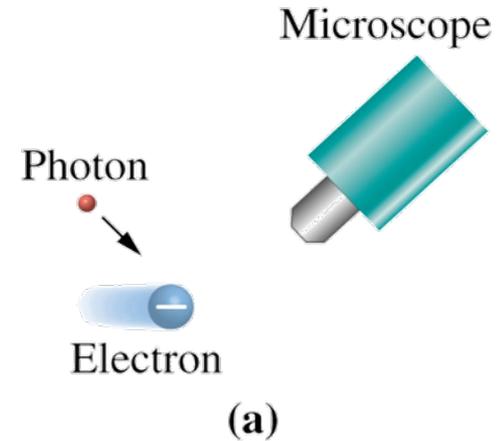
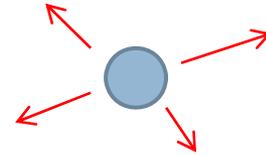
- 정확한 측정은 가능한가?
 - ▣ 측정하려는 순간, 대상물의 상태가 변하여 측정전의 물리량은 아무데도 없다
 - ▣ 예) 온도측정: 온도계로 인한 온도변화
 - ▣ 예) 전류측정: 서로 다른 저항으로 인한 전류변화
 - ▣ 예) 남 앞에서 발표: 혼자서는 발표 잘한다



하이젠베르크의 가상실험

4

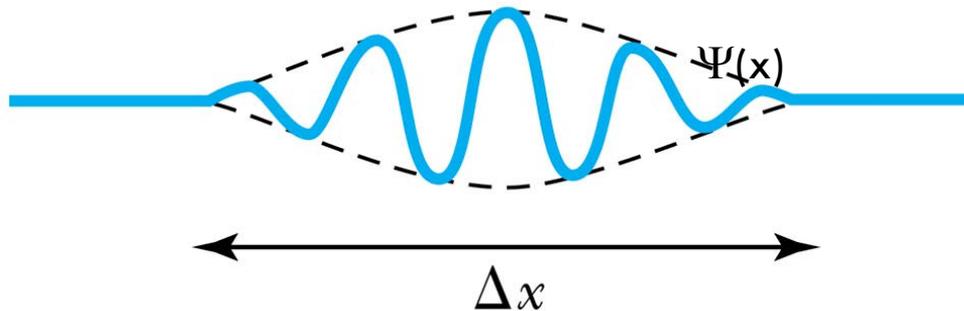
- 감마선 분석 가상 현미경
 - 상자내 전자의 운동량과 위치 측정
 - 운동량? ●
 - 위치?
- 불확실성의 곱
 - 운동량의 불확실성, $\Delta p \sim h/\lambda$
 - 위치의 불확실성, $\Delta q \sim \lambda$
 - 측정상의 불확실성, $\Delta p \Delta q \sim h$
 - → Heisenberg's uncertainty principle



Wave packet (파속)

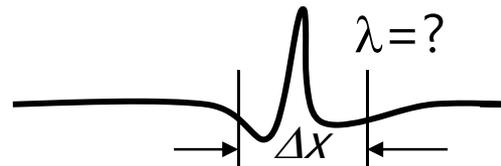
5

□ 파속의 형태에 따른 불확실성



□ Narrow wave

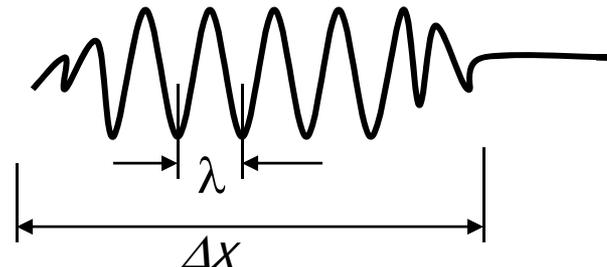
- Unclearly defined λ



Δx small
 Δp large

□ Wide wave

- Clearly defined λ



Δx large
 Δp small

빛, 입자의 이중성과 일치

6

- 이중성
 - ▣ 파동론: 파장을 알고 있음 $\rightarrow p=h/\lambda$ 분명함
 - ▣ 입자론: q 는 확실하지만, 그 후 행방 모름

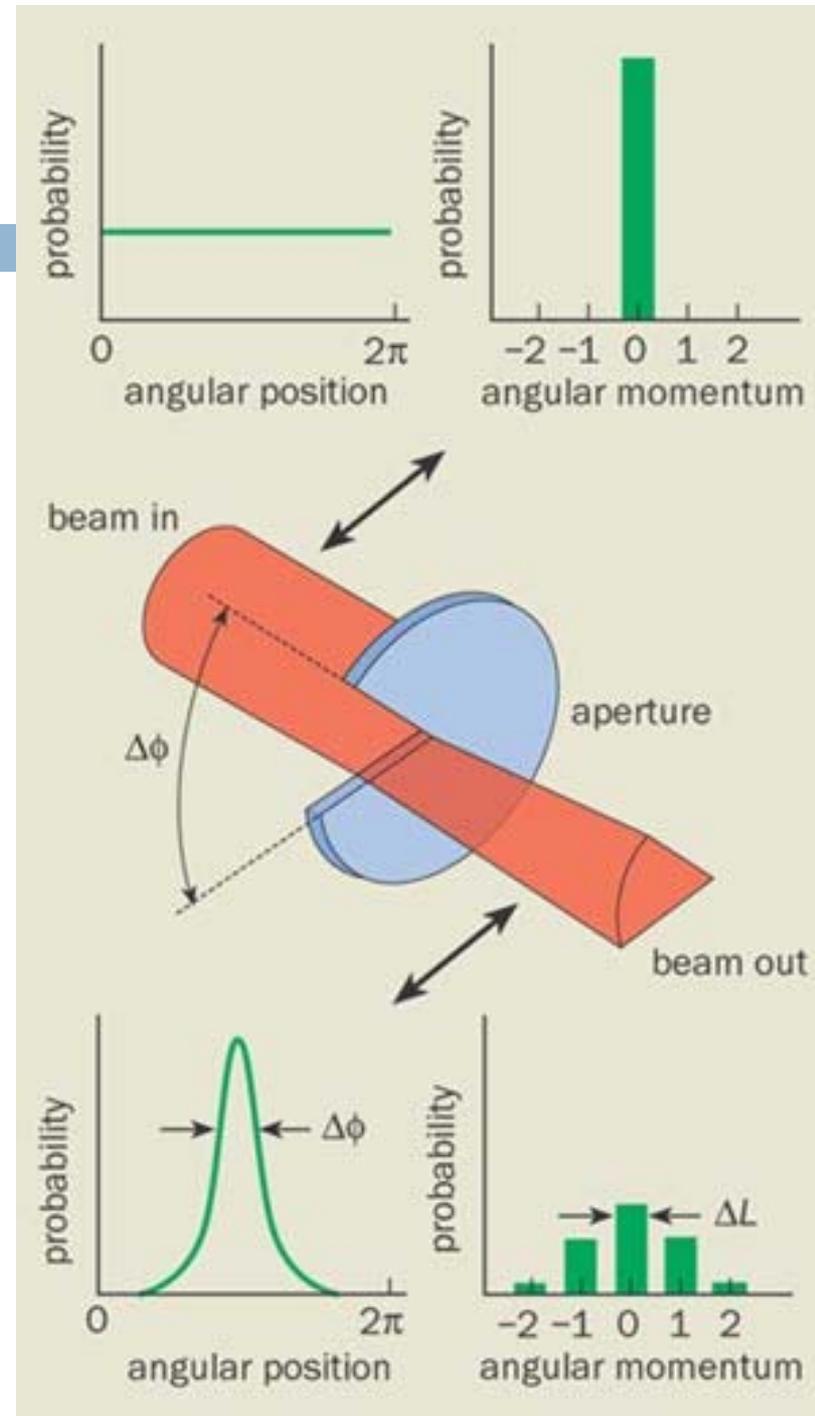
 - ▣ $\Delta p \Delta q \sim h$

- 관찰하기 전에는 p, q 성질 공존 \rightarrow 관찰하는 순간, p 관찰시 q 소멸/ q 관찰시 p 소멸

불확실성원리 실험

7

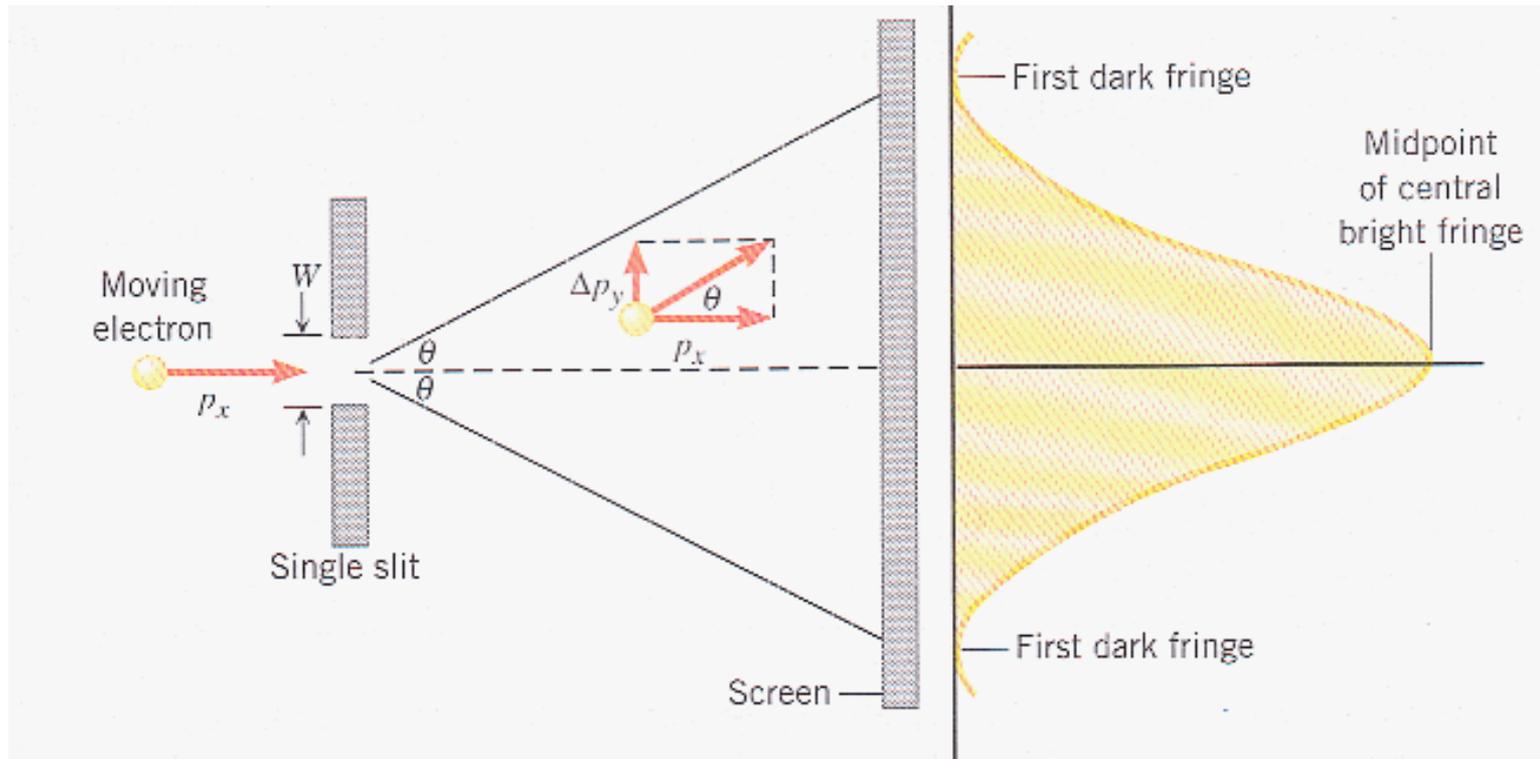
- Shedding light on uncertainty
 - ▣ Input light beam with a flat angular-position distribution passes through an aperture that cuts out a certain range of angular positions.
 - ▣ Output beam has a narrow angular-position distribution and a broad angular-momentum distribution



전자회절에서의 불확실성

8

- For single slit diffraction with de Broglie wavelength



Particle in box (영점 에너지)

Confinement in atom

Assume atomic size = $1 \text{ \AA} = \Delta x$

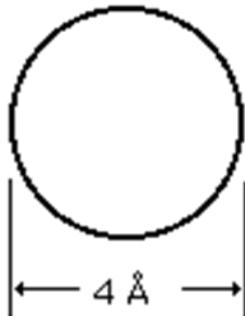
$$\Delta p = \frac{h}{\Delta x} = 1.66 \times 10^{-24} \text{ kg m/s}$$

$$\Delta p = p; E = \frac{p^2}{2m};$$

For electron:

$$E = \frac{(1.66 \times 10^{-24} \text{ kg m/s})^2}{2(9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})(1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV})}$$

$$E = 9.4 \text{ eV}$$



Confinement in nucleus

Nuclear size = $\frac{1}{20,000} \times 1 \text{ \AA} = \Delta x$

$$\Delta p = \frac{h}{\Delta x} = 3.31 \times 10^{-20} \text{ kg m/s}$$

For electron:

$$E = \frac{(3.31 \times 10^{-20} \text{ kg m/s})^2}{2(9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})(1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV})}$$

$$E = 3.77 \times 10^9 \text{ eV} = 3.77 \text{ GeV}$$

For proton, divide by $m_p/m_e = 1836$:

$$E = 2.05 \times 10^6 \text{ eV} = 2.05 \text{ MeV}$$

Assume $\Delta p = p$

$$\text{and } E = \frac{p^2}{2m}$$

Energy to:

Confine electron in atom: 9.4 eV

Confine proton in nucleus: 2.05 MeV

Confine electron in nucleus: 3.77 GeV

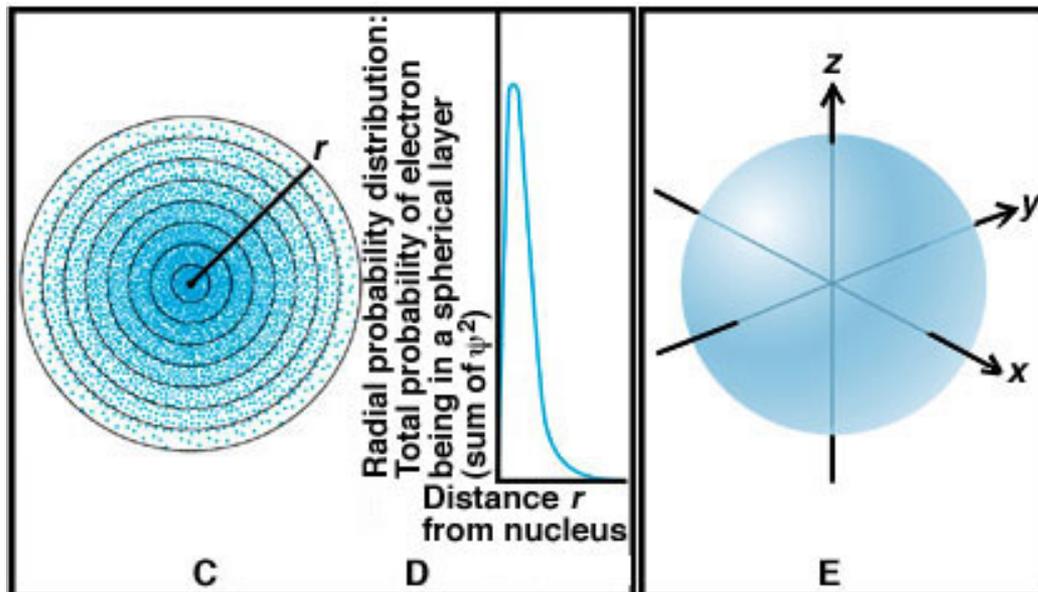
These are in the range of observed atomic and nuclear processes.

This is about a factor of a thousand above the observed energies of nuclear processes, indicating that the electron cannot be confined in the nucleus.

Electron cloud

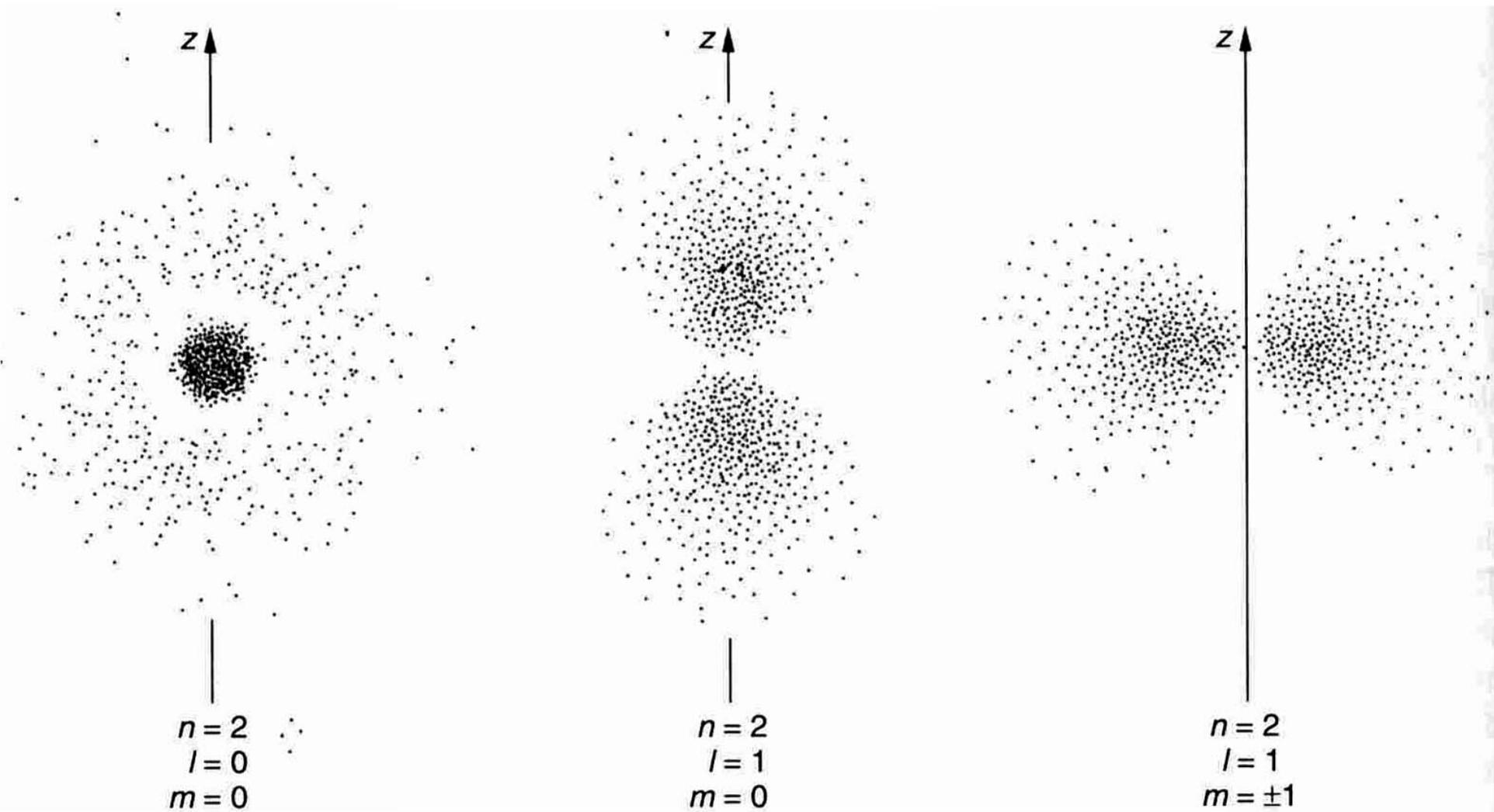
10

- 원자내 전자의 위치와 운동량?
 - ▣ 동시 측정 불가능: 전자의 위치도 희미해 짐
 - ▣ 확정된 궤도가 아닌 존재 확률(전자 구름)로 표현
- Ground state 수소의 전자확률



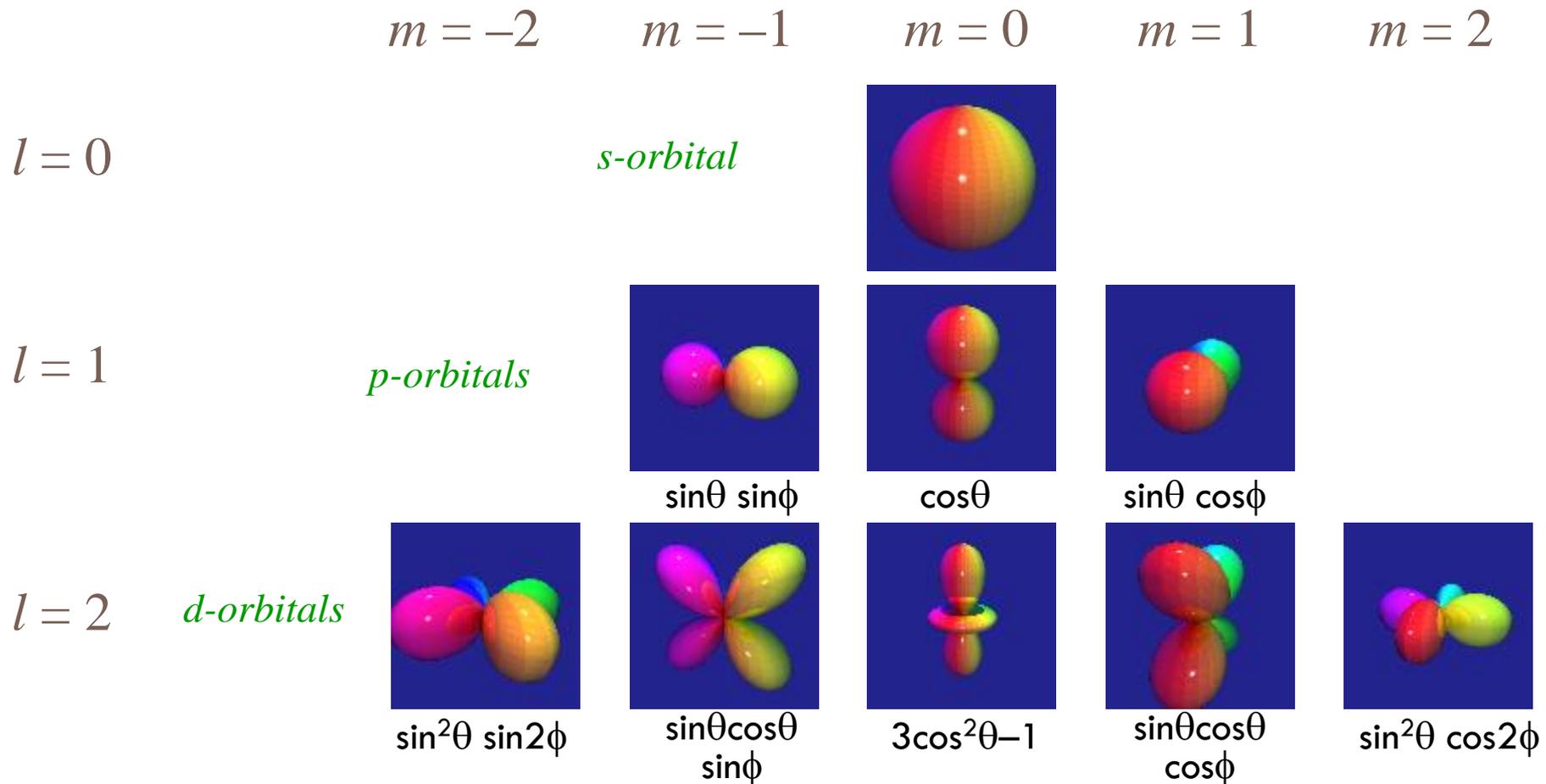
확률밀도 표현

11



오비탈에 따른 전자확률 분포

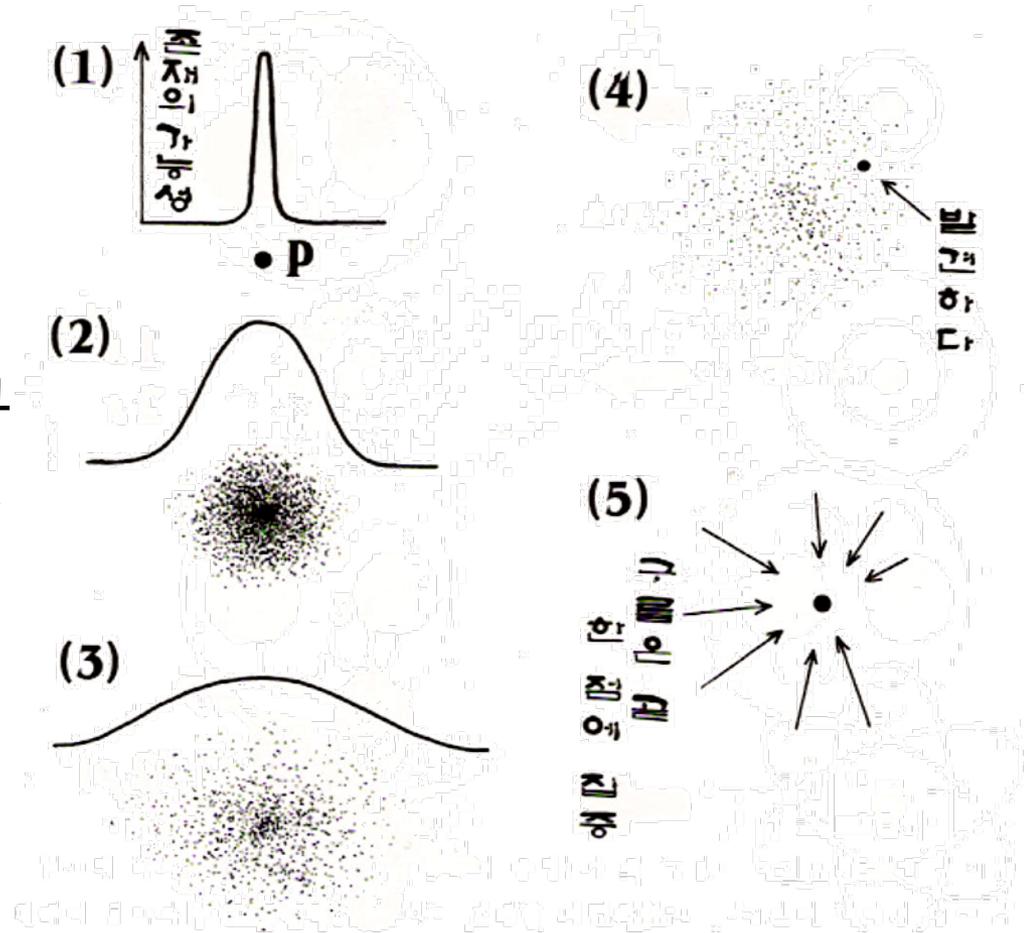
12



전자구름 해석

13

- 존재 → 구름 → 점
 - ▣ 어떤 시각에 어떤 위치에 있던, 입자는 시간이 지남에 따라 존재 확률이 구름처럼 넓어지지만, 어디선가 관찰되면 구름은 곧 점으로 집중된다



양자역학의 두 갈래

14

- 보어 이후의 양자역학
 - ▣ 하이젠베르크: 행렬역학 (1932년 노벨상)
 - ▣ 슈뢰딩거: 파동역학 (1933년 노벨상)
 - ▣ 디랙: 둘을 받아 들임

