

13. 파울리 배타 원리

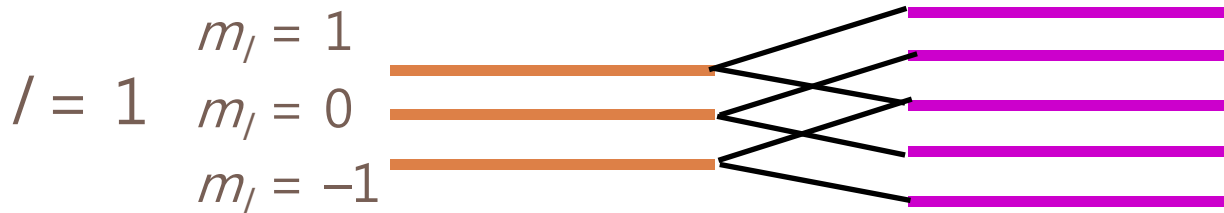
화공과 김영훈 교수

korea1@kw.ac.kr

스핀 개념 도출

2

- Stern-Gerlach의 Zeeman 효과 증명
 - ▣ 제만 효과: 보어-좀머펠트 궤도 이론의 성공사례
 - ▣ 추가적이 자기장 하에서 더 많은 스펙트럼 분리
 - ▣ 비정상 제만 효과: 파울리가 설명 시도

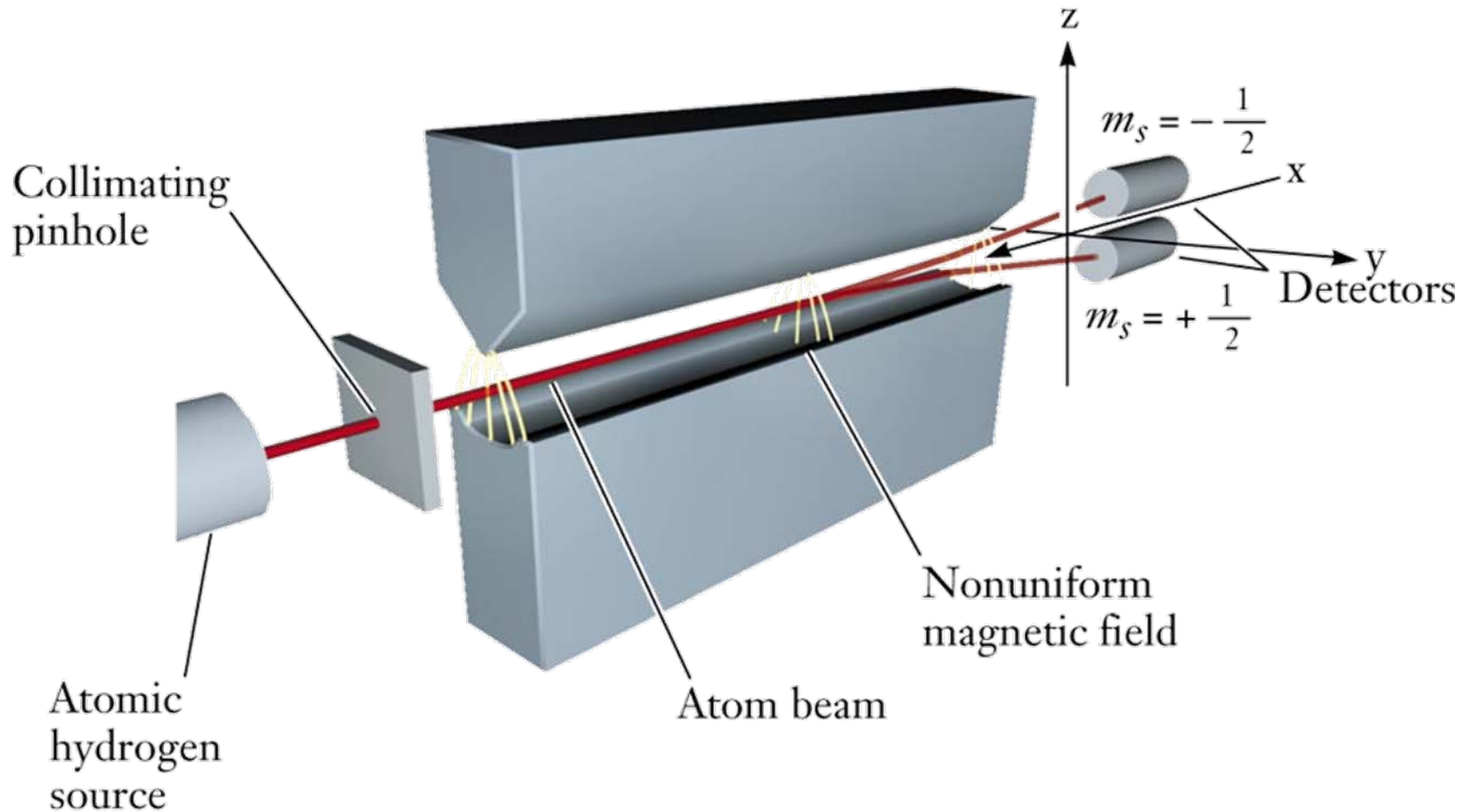


Add external
magnetic field



스핀 양자 실험

3



Pauli의 가설

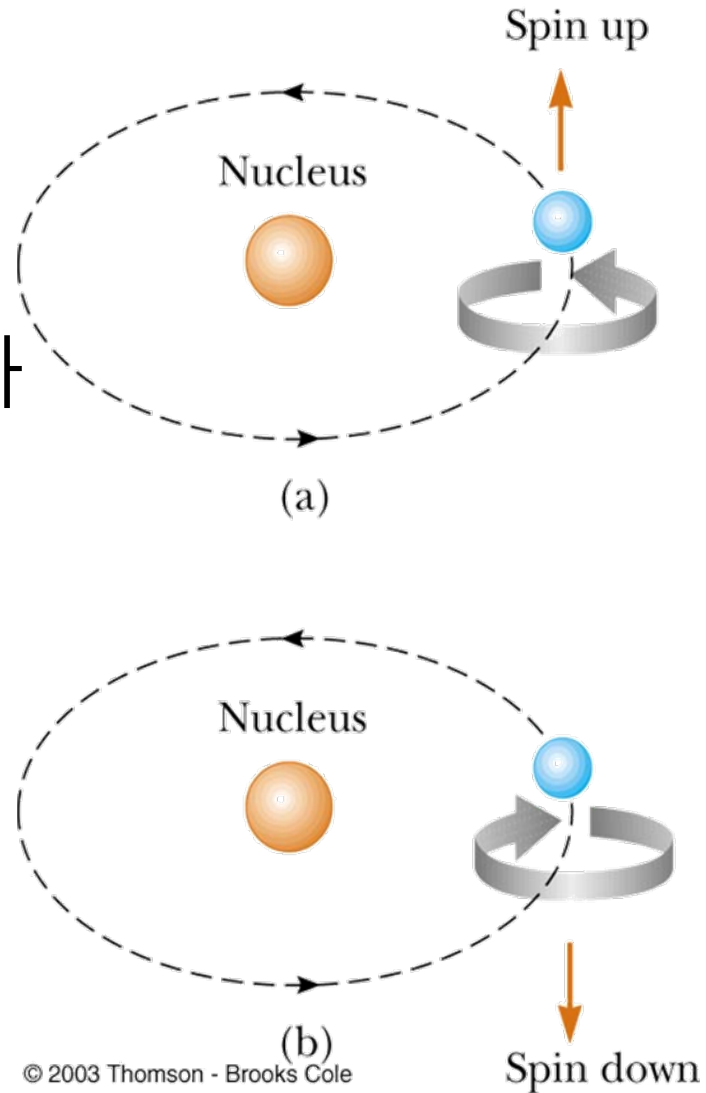
4

- 파울리의 생각
 - ▣ Stern-Gerlach 실험은, magnetic moment와 orbital angular momentum 관계 설명 불가
 - ▣ Additional internal source of angular momentum 존재 예언
 - ▣ 즉, 숨어 있는 어떤 회전(rotation, not motion)이 비정상 제만을 일으키는 여분의 각운동량을 만든다
 - ▣ → 제4의 양자수(electron rotation)
 - ▣ → Spin 명명: Goudsmit-Uhlenbeck(1925년) 노벨상

스핀 양자수

5

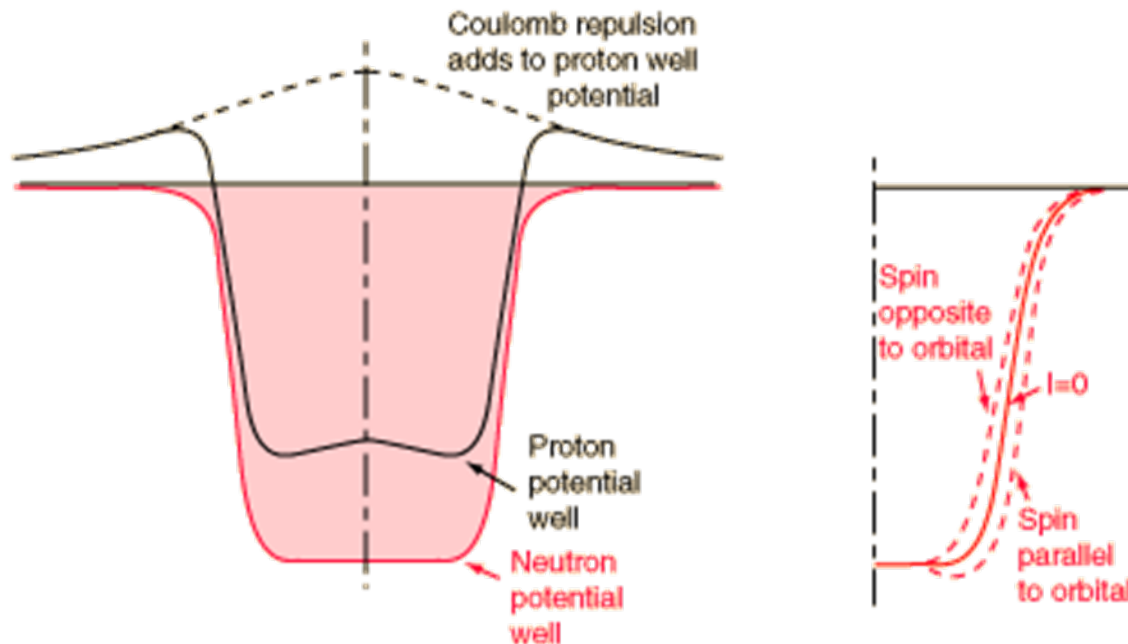
- 2가지 스핀 회전
 - ▣ Spin-up, $m_s=1/2$
 - ▣ Spin-down, $m_s=-1/2$
- 두 스핀간의 약간의 에너지차 존재
 - ▣ 비정상 제만 효과의 원인
- 회전하는 전자의 각운동량
 - ▣ 원자궤도의 정상적인 값의 절반
 - ▣ $1/2\hbar$



두 스핀의 미소한 에너지 차이

6

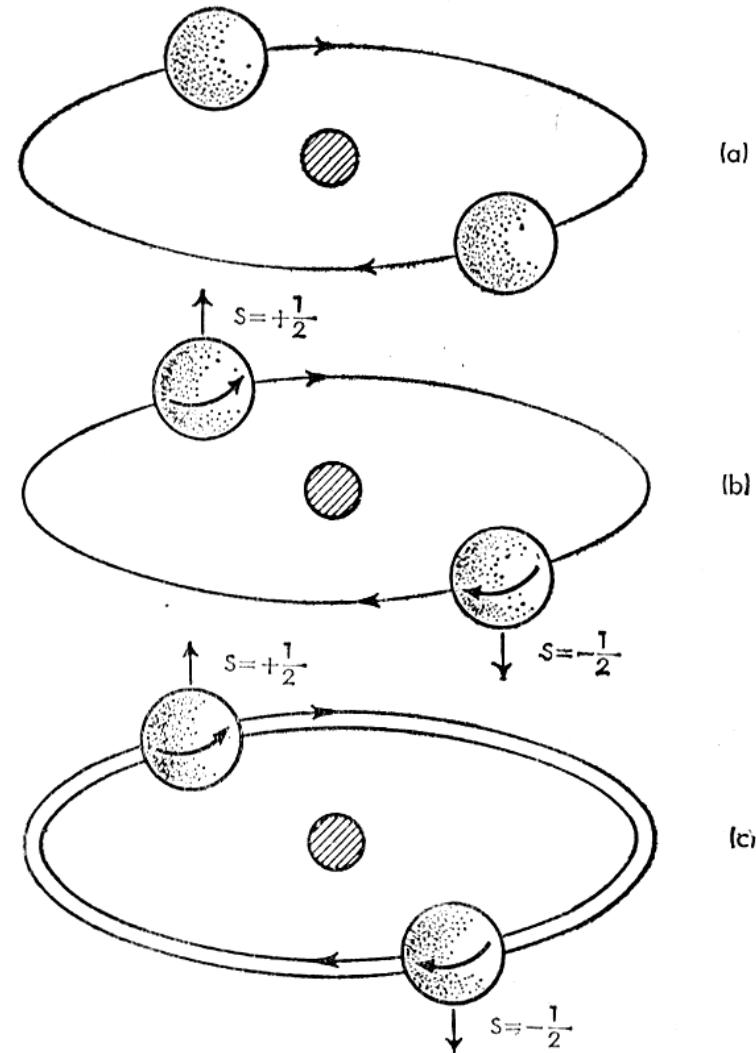
- Shell model with potential energy
 - ▣ Spin-orbit interaction 보정
 - ▣ Spin opposite to orbital
 - Narrow potential well



스핀 궤도 모형의 변화


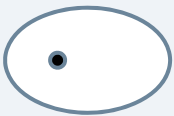
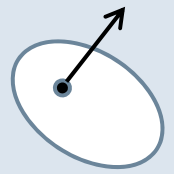

7

- (a) 최초의 파울리의 원리
 - ▣ 3개 이상의 전자는 동일 궤도상에 있을 수 없다
- (b) 수정된 파울리의 원리
 - ▣ 동일 궤도 상의 두 전자는 반드시 서로 반대되는 스핀을 갖는다. 즉 서로 역방향으로 자전해야 한다
- (c) 재차 수정된 파울리의 원리
 - ▣ 전자의 자기모멘트에 의해서 생기는 자기력에 의해서 두 궤도는 동일하지 않고, 각 궤도에는 한개의 전자만이 허용된다



4대 양자수 요약

8

Quantum number	Notation	Range	Remarks	Energy	Note
Principle	n	1, 2, 3, ...	Radius of orbit	Atomic energy level	
Orbital (Azimuthal)	l	0, 1, 2, ..., (n-1)	Shape of orbit	Angular momentum	
Magnetic	m_l, m	0, ± 1 , ± 2 , ..., $\pm l$	Orientation of orbit	Z component of l	
Spin	m_s, s	$+1/2$ or $-1/2$	Rotation of electron	Spin angular momentum	

Electron # in filled shells

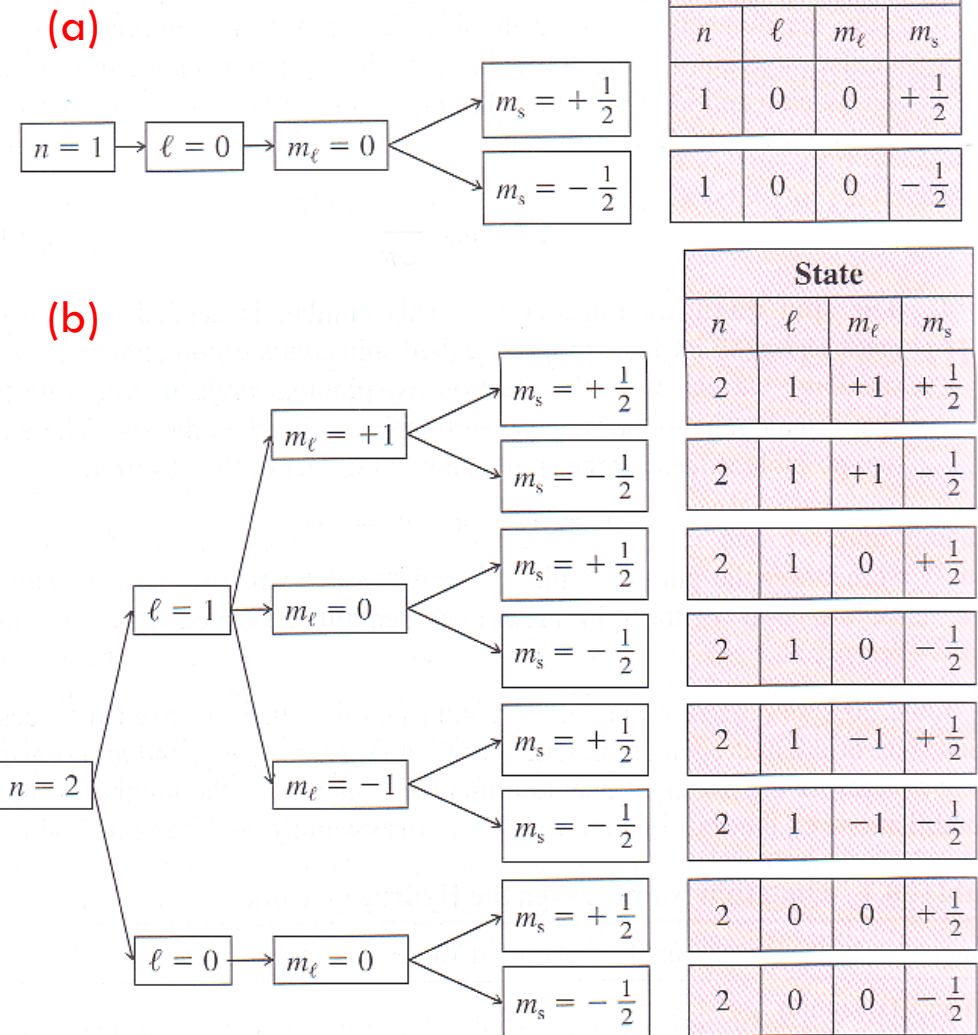
- Sharp, s
- Principal, p
- Diffuse, d
- Fundamental, f
- g
- h
- ...

Shell	Subshell	Number of Electrons in Filled Subshell	Number of Electrons in Filled Shell
K ($n = 1$)	$s(\ell = 0)$	2	2
L ($n = 2$)	$s(\ell = 0)$	2	8
	$p(\ell = 1)$	6	
M ($n = 3$)	$s(\ell = 0)$	2	18
	$p(\ell = 1)$	6	
	$d(\ell = 2)$	10	
N ($n = 4$)	$s(\ell = 0)$	2	32
	$p(\ell = 1)$	6	
	$d(\ell = 2)$	10	
	$f(\ell = 3)$	14	

양자수 채움 예시

10

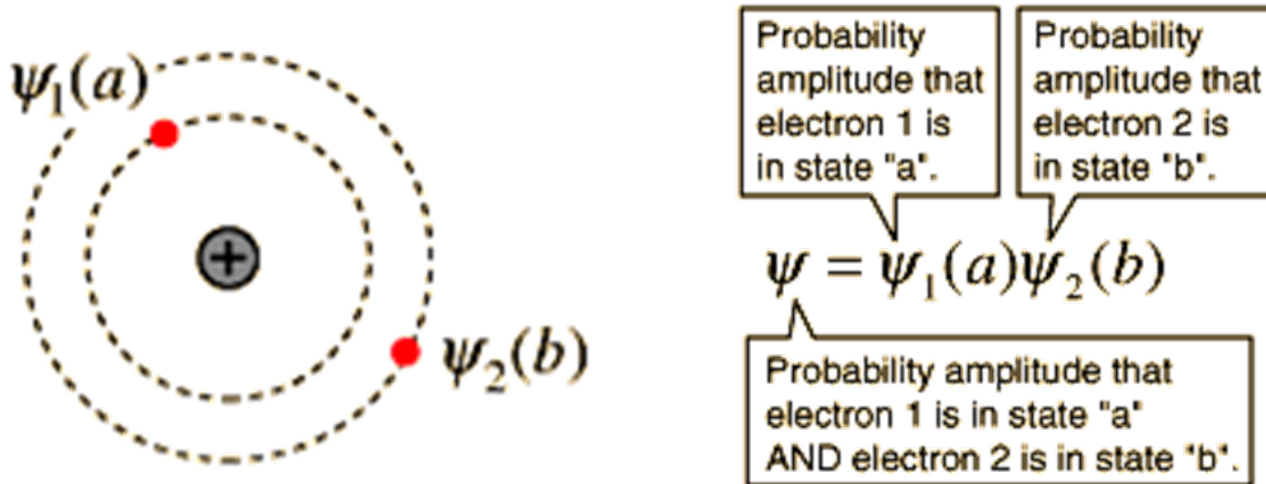
- Determine the number of possible states for the hydrogen atom when the principal number is (a) $n=1$ and (b) $n=2$.



두 전자의 위치, 시간 의존성

11

- 두개의 전자에 관하여
 - ▣ 기본적인 파동함수(Ψ)는 시간과 각 전자의 위치에 의존
 - ▣ 하이젠베르크의 불확정성의 원리에 의해 어떤 전자가 상태 a, 상태 b인지 파악 불가
 - ▣ $\Psi = X_a(x_1, y_1, z_1) * X_b(x_2, y_2, z_2) * T(t)$



Bosons vs. Fermions 1

12

- 분리 불가능한 현상에 관한 두가지 해
 - Symmetric wavefunction
 - $\Psi_{\text{sym}} = [X_a(r_1)X_b(r_2) + X_b(r_1)X_a(r_2)]^* T(t)$
 - → Bosons: integer spin
 - 두 전자가 모두 boson이면, $\Psi > 0$
 - 두 입자는 동시에 같은 위치, 같은 시각에 같은 상태로 있을 수 있다
 - Ex) photon, alpha particle (2 neutron+2 proton)

Bosons vs. Fermions 2

13

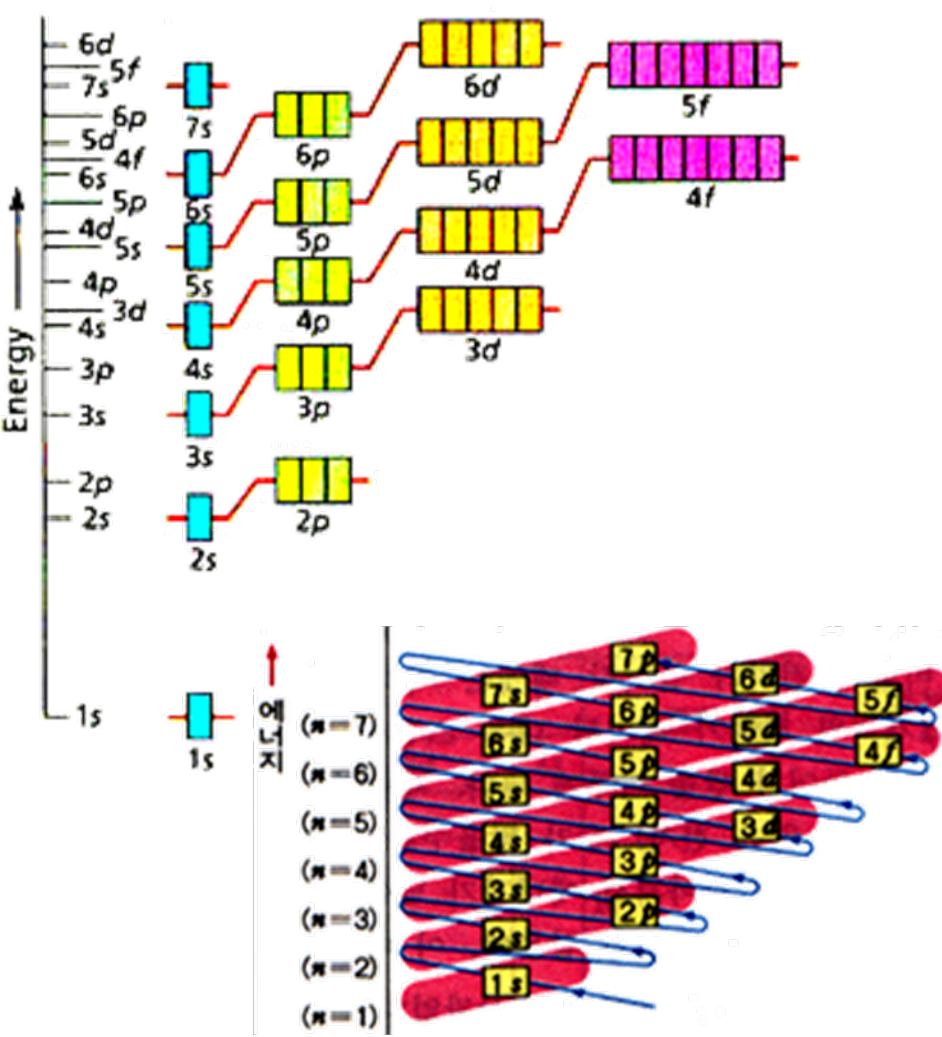
- 분리 불가능한 현상에 관한 두가지 해
 - Anti-symmetric wavefunction
 - $\Psi_{\text{anti}} = [X_a(r_1)X_b(r_2) - X_b(r_1)X_a(r_2)]^* T(t)$
 - → Fermions: half-integer spin
 - 두 전자가 모두 fermion이면, $\Psi=0$
 - 두 입자는 동시에 같은 위치, 같은 시각에 같은 상태로 있을 수 없다
 - → **Pauli Exclusion Principle**
 - Ex) electron, proton, neutron

전자배치 3대 원리

14

- Aufbau (building-up) principle
 - ▣ 전자는 하나의 한번씩 낮은 에너지의 오비탈을 먼저 채운다
- Pauli exclusion principle
 - ▣ 한 오비탈에는 최대 두개 전자만 채울 수 있다
 - ▣ 한 오비탈내 두 전자의 스핀은 서로 반대 방향
- Hund's rule
 - ▣ 동일 에너지의 오비탈을 모두 채운 후에, 즉 최대 비공유전자를 만든 후에 반대 스핀 전자를 채운다

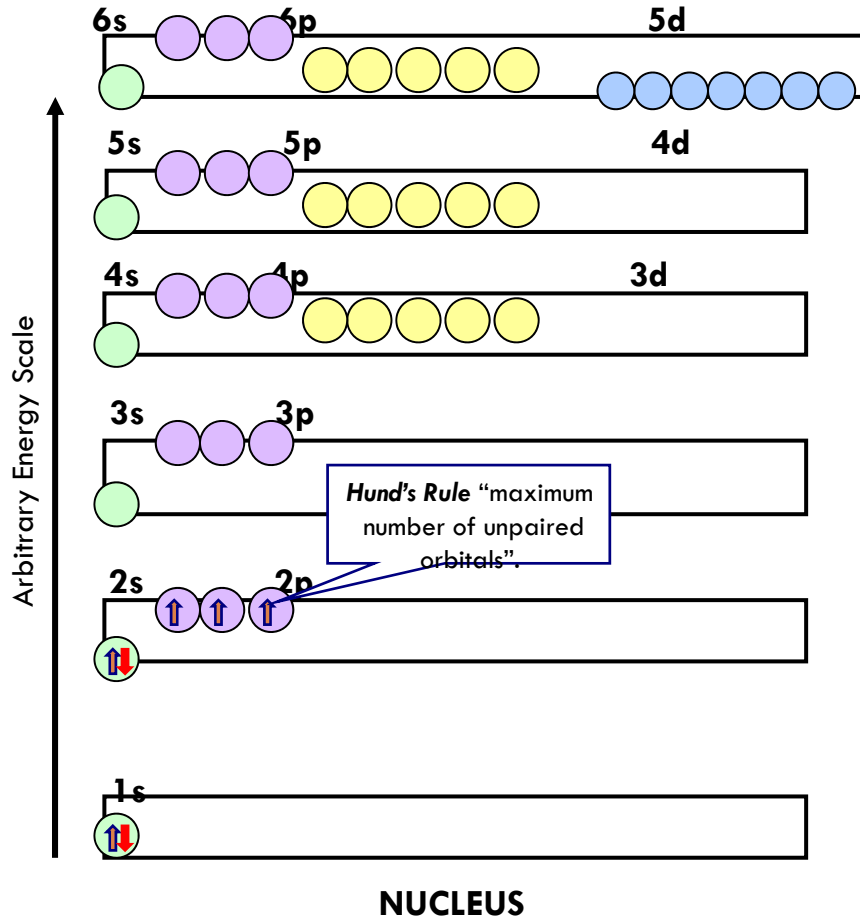
전자배치 예



	1s	2s	2p _x	2p _y	2p _z
H: 1s ¹	↑				
He: 1s ²	↑↓				
Li: 1s ² 2s ¹	↑↓	↑			
Be: 1s ² 2s ²	↑↓	↑↓			
B: 1s ² 2s ² 2p _x ¹	↑↓	↑↓	↑		
C: 1s ² 2s ² 2p _x ¹ 2p _y ¹	↑↓	↑↓	↑	↑	
N: 1s ² 2s ² 2p _x ¹ 2p _y ¹ 2p _z ¹	↑↓	↑↓	↑	↑	↑
O: 1s ² 2s ² 2p _x ² 2p _y ¹ 2p _z ¹	↑↓	↑↓	↑↓	↑	↑
F: 1s ² 2s ² 2p _x ² 2p _y ² 2p _z ¹	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑
Ne: 1s ² 2s ² 2p _x ² 2p _y ² 2p _z ²	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓

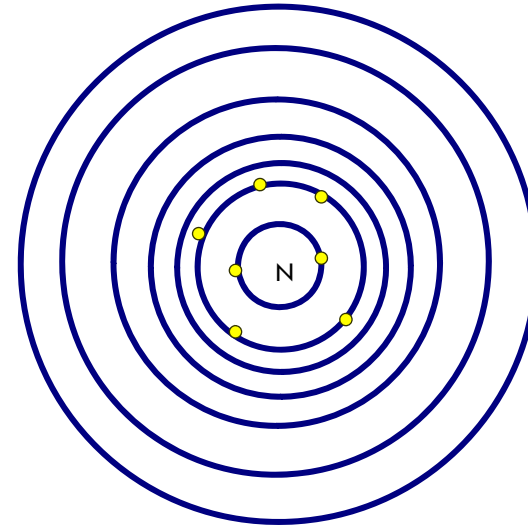
전자배치: ${}^7\text{N}$

16



Nitrogen
4f

Bohr Model

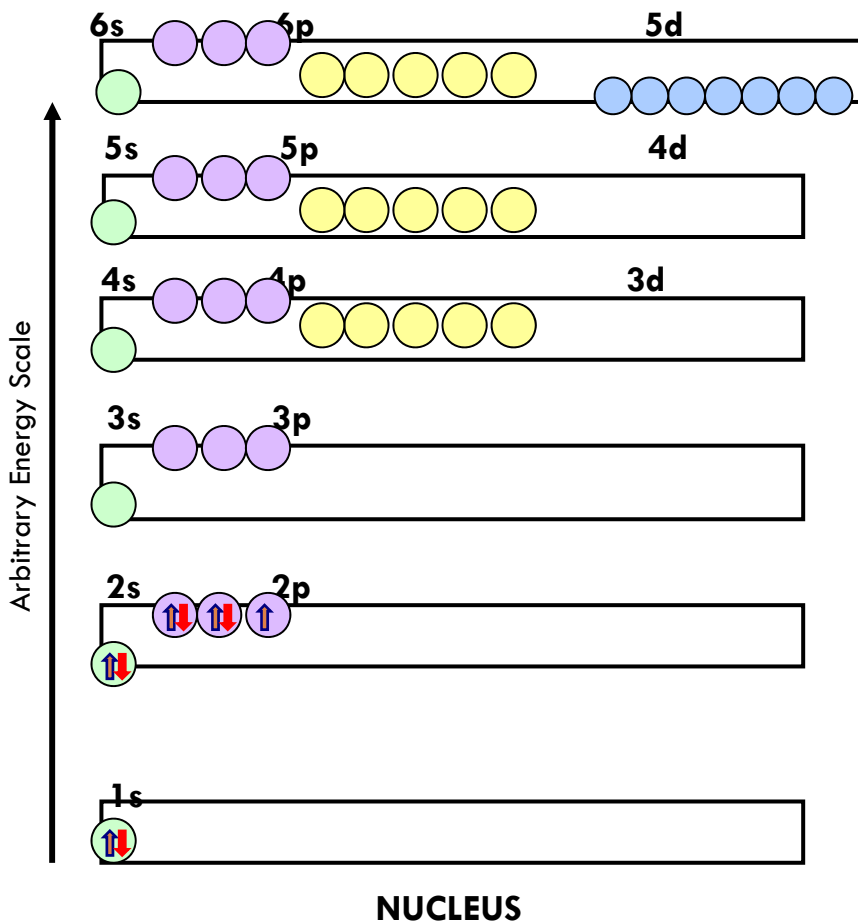


Electron Configuration



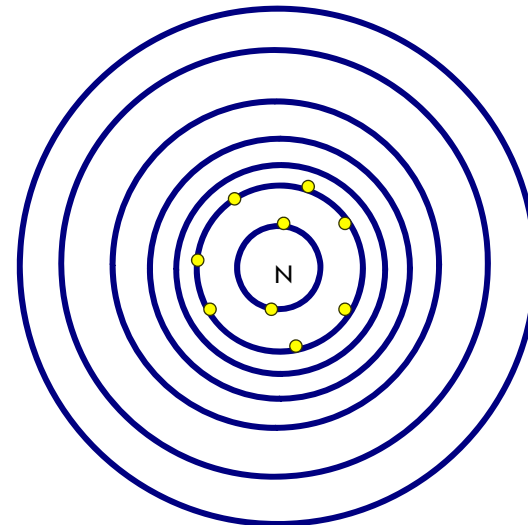
전자배치: ${}^9\text{F}$

17



Fluorine
4f

Bohr Model

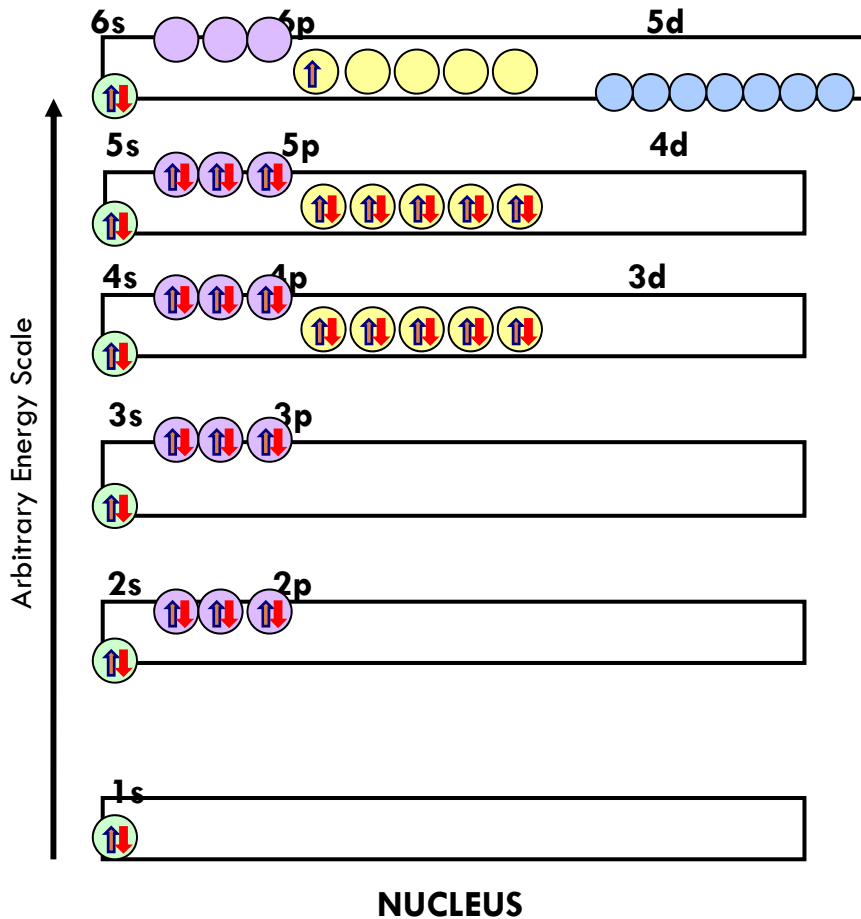


Electron Configuration



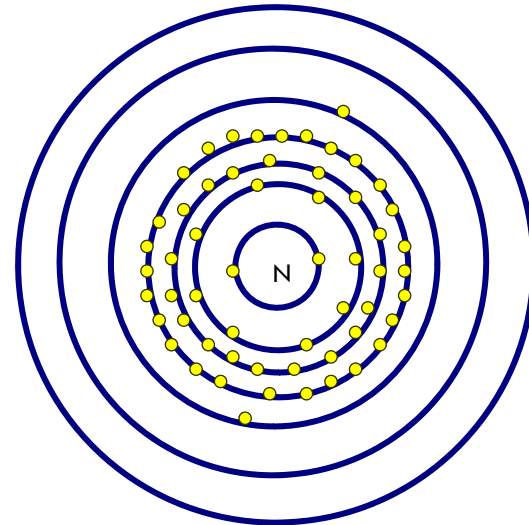
전자배치: ^{57}La

18



Lanthanum
4f

Bohr Model



Electron Configuration

