제 4 장 원자의 구조

4-1 기본입자 → 2-1장

표 4-1 물질의 기본 입자

입자	질량	전하(상대적 값)
전자 (e^-)	0.00054858 amu	1−
양성자 (p 또는 p^+)	1.0073 amu	1+
중성자 (n 또는 n^0)	1.0087 amu	0

4-2 전자의 발견

1800년대 초 : 데이비(Humphry Davy)

- 원소들은 전기적 힘에 의하여 결합되어 있다고 제안.

1832~1833 : 패러데이 (Michael Faraday)

- 전기 분해에서 전류의 양과 화학 반응의 정도는 정량적 관계가 있음을 발견.

1874년 : 스토니(George Stoney)

- 전하를 가진 단위들이 원자에 결합되어 있다고 제안.

  (1891년 이름을 전자라 제안)

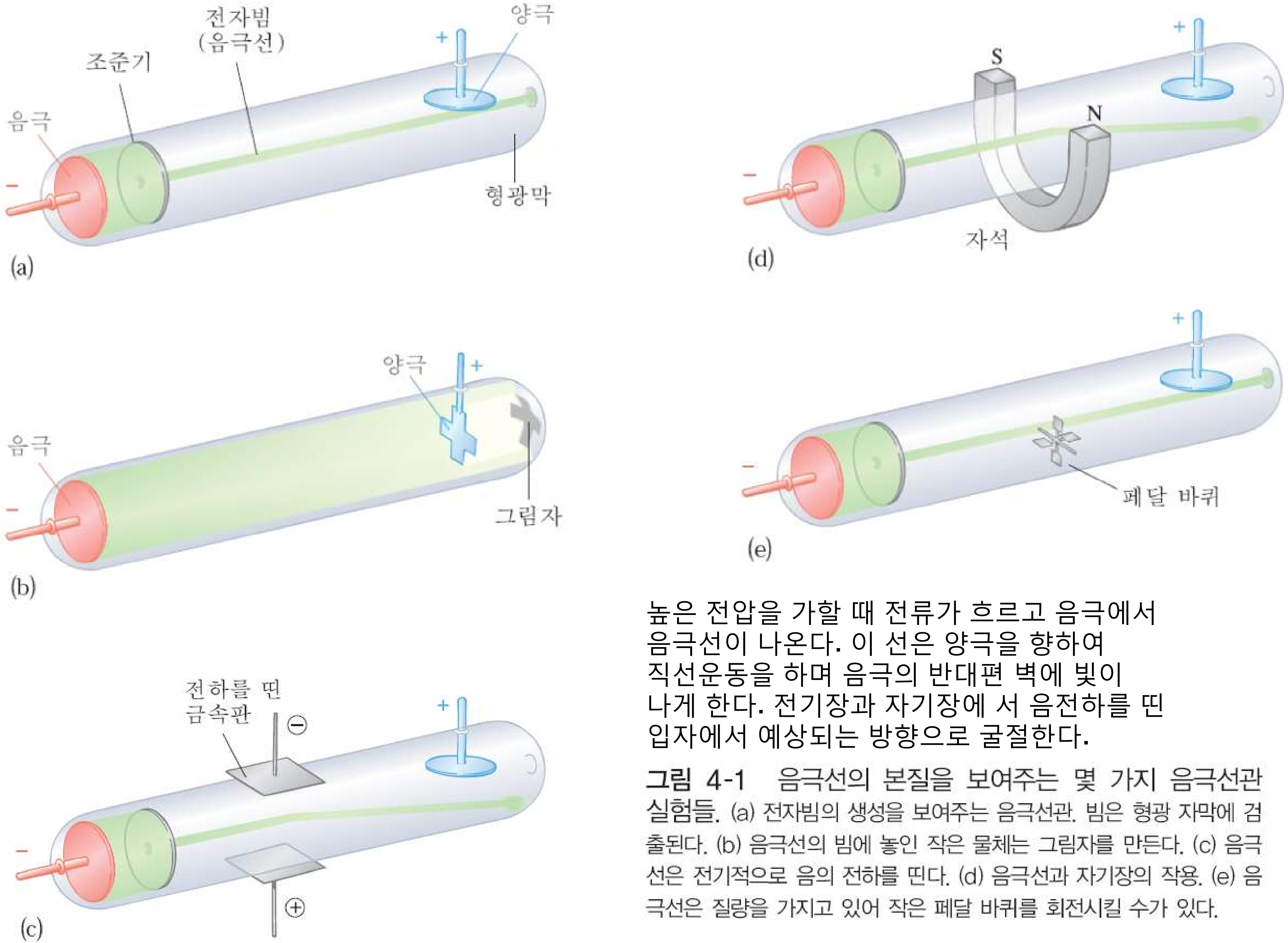
1897년 : 톰슨(J.J.Tomson)

- 전기장과 자기장이 달라짐에 따라 굴절률을 조사하여 전하(e)와 질량(m)의 비율을 결정함. $e/m = 1.75882 \times 10^8$ coulomb (C)/gram

1909년 : 밀리칸(Robert Millikan)

- 기름방울실험을 수행하여 전하 값을 결정. 1.60218 x 10^{-19} coulomb
- 전자의 질량 m (수소 원자질량의 1/1836)

$$m = 1\ \text{g}\ /1.75882 \times 10^8\ \text{C} \times 1.60218 \times 10^{-19}\ \text{C}$$
$$= 9.10940 \times 10^{-28}\ \text{g}$$



높은 전압을 가할 때 전류가 흐르고 음극에서 음극선이 나온다. 이 선은 양극을 향하여 직선운동을 하며 음극의 반대편 벽에 빛이 나게 한다. 전기장과 자기장에 서 음전하를 띤 입자에서 예상되는 방향으로 굴절한다.

그림 4-1 음극선의 본질을 보여주는 몇 가지 음극선관 실험들. (a) 전자빔의 생성을 보여주는 음극선관. 빔은 형광 자막에 검출된다. (b) 음극선의 빔에 놓인 작은 물체는 그림자를 만든다. (c) 음극선은 전기적으로 음의 전하를 띤다. (d) 음극선과 자기장의 작용. (e) 음극선은 질량을 가지고 있어 작은 페달 바퀴를 회전시킬 수가 있다.

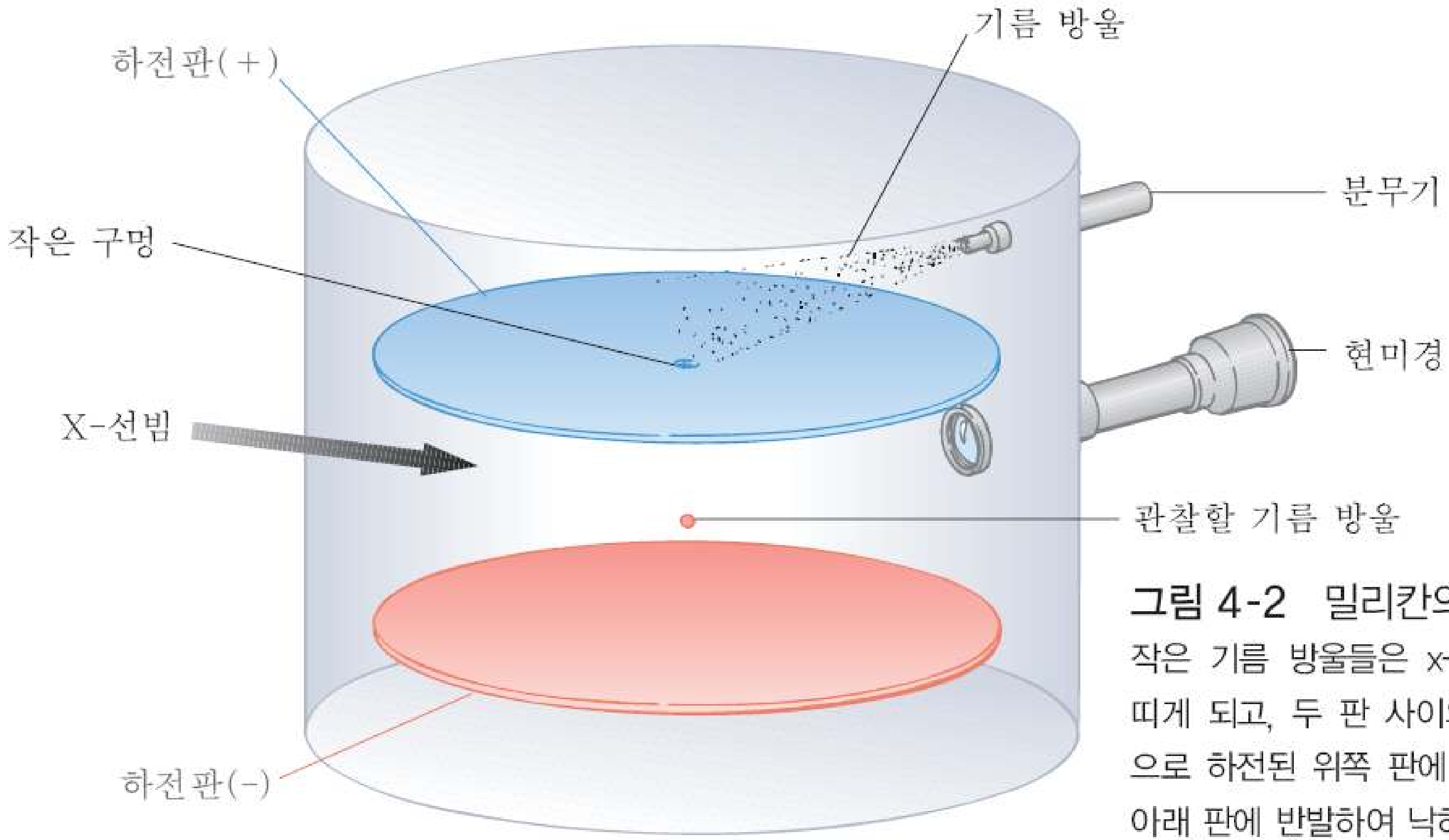


그림 4-2 밀리칸의 기름 방울 실험. 작은 기름 방울들은 x-선에 의하여 음전하를 띠게 되고, 두 판 사이의 전압이 증가하면 양으로 하전된 위쪽 판에 끌리고 음으로 하전된 아래 판에 반발하여 낙하 속도가 감소한다.

작은 기름 방울들이 분무기에 의해서 만들어진다. 공 모양 방울의 질량은 기름의 부피와 밀도에 의해서 계산될 수 있다. 몇 개의 작은 방울들이 상판의 구멍을 통하여 떨어진다. X-선을 쪼여줌으로써 이것들 중에서 일부가 음전하를 띠게 된다. 두 판 사이의 전압을 높여주면, 양으로 하전된 상판에 의한 인력과 음으로 하전된 하판에 의한 반발력 때문에, 음으로 하전된 기름 방울이 더욱 천천히 떨어진다. 어떤 특정한 전압에서 기름 방울에 대한 전기적인 힘(위 방향)과 중력(아래 방향)이 정확히 균형을 이루게 되고, 기름 방울은 정류 상태로 있게 된다. 만일 우리가 전압과 기름 방울의 질량을 안다면, 기름 방울의 전하를 계산할 수 있다.

4-3 양극선과 양성자

1866년 : 골드슈타인(Eugen Goldstein)

- 음극선관에서 양으로 하전된 입자들이 음극 방향으로 흐르는 것을 최초로 관찰.
  (운하처럼 음극쪽으로 흐르는 양극선(canal ray) 관찰)
- 양이온은 기체상에서 전자를 잃을 때 생성. 원자 $\longrightarrow$ 양이온$^{+}$ $+ e^{-}$
- e/m비를 가지고 양성자 (proton) 형성
- 양성자는 전자와 크기는 같고 부호가 다른 입자. 전자 질량의 약 1836배.

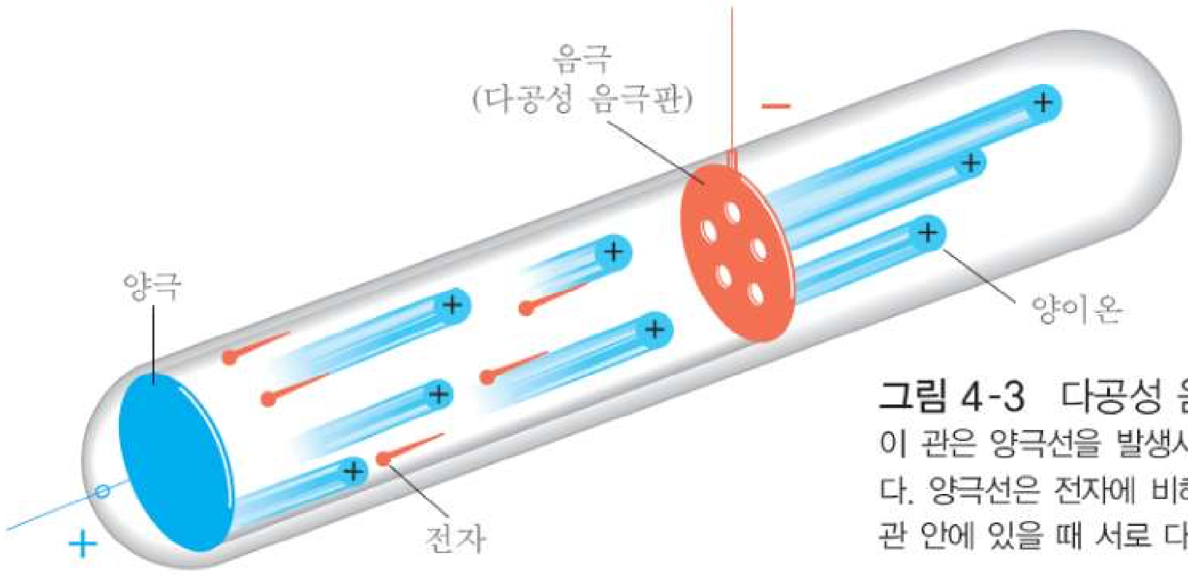


그림 4-3 다공성 음극판을 사용할 수 있는 음극선 관. 이 관은 양극선을 발생시켜 이 선이 음극 방향으로 이동함을 보여준다. 양극선은 전자에 비해 작은 e/m 비를 가지며, 서로 다른 원소가 관 안에 있을 때 서로 다른 e/m 비들이 관찰된다.

4-4 러더포드와 원자 핵

1900년대 초 : 원자는 양전하가 원자 전체에 고르게 분포 여기에 음전하가 박혀있다.

톰슨의 모형 (건포도-푸딩 모형, plum pudding model)

1910년 : 러더포드(Rtherford) - 원자모형 설정.

알파 입자의 산란은 양전하를 띤 매우 밀도가 높은 부분과의 반발에 의한것.

(양전하를 띤 아주 작고 무거운 부분 제안, 원자핵(atomic nucleus))

원자는 밀도가 높고 매우 작은 양으로 하전된 핵과 이를 둘러싸고 있는 상대적으로 넓은 전자 구름으로 이루어 져 있다.

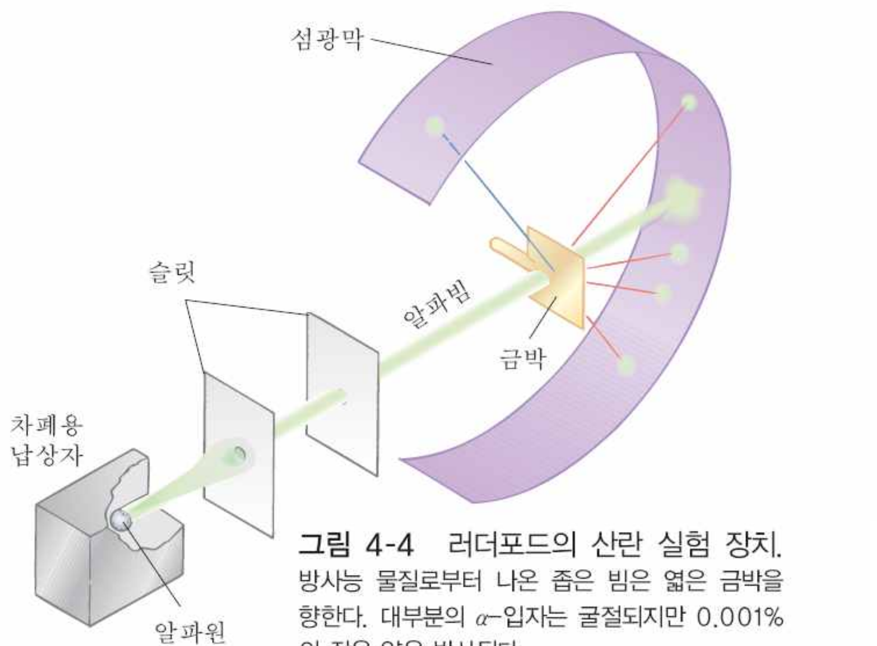


그림 4-4 러더포드의 산란 실험 장치.
방사능 물질로부터 나온 좁은 빔은 얇은 금박을 향한다. 대부분의 α-입자는 굴절되지만 0.001%의 작은 양은 반사된다.

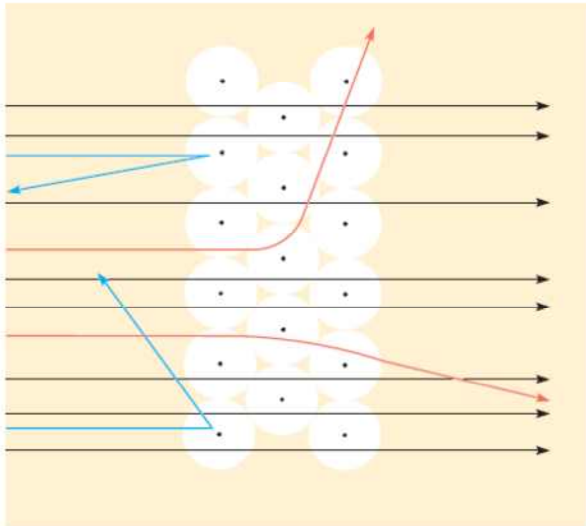


그림 4-5 러더포드의 산란 실험의 해석.
핵과 멀리 떨어진 α-입자는 통과되고, 핵에 가까이 있는 입자는 정도에 따라 굴절된다. 핵과 충돌한 입자는 반사된다.

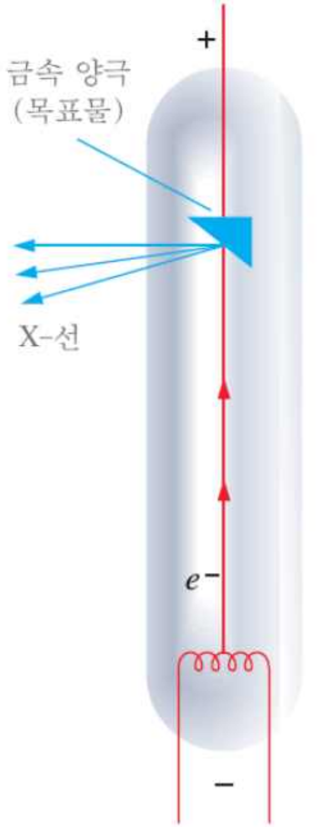
4-5 원자 번호

모즐리(H.G. J. Moseley), 라우(Max von Laue) – X 선 연구

: X-선도 결정들에 의하여 회절할 수 있음을 보여줌.

: 각 원소는 핵에 하나의 양전하를 더 가짐으로써 앞 원소와 구분된다.

:모든 원소는 핵의 전하 증가순으로 배열한다. (원자번호)



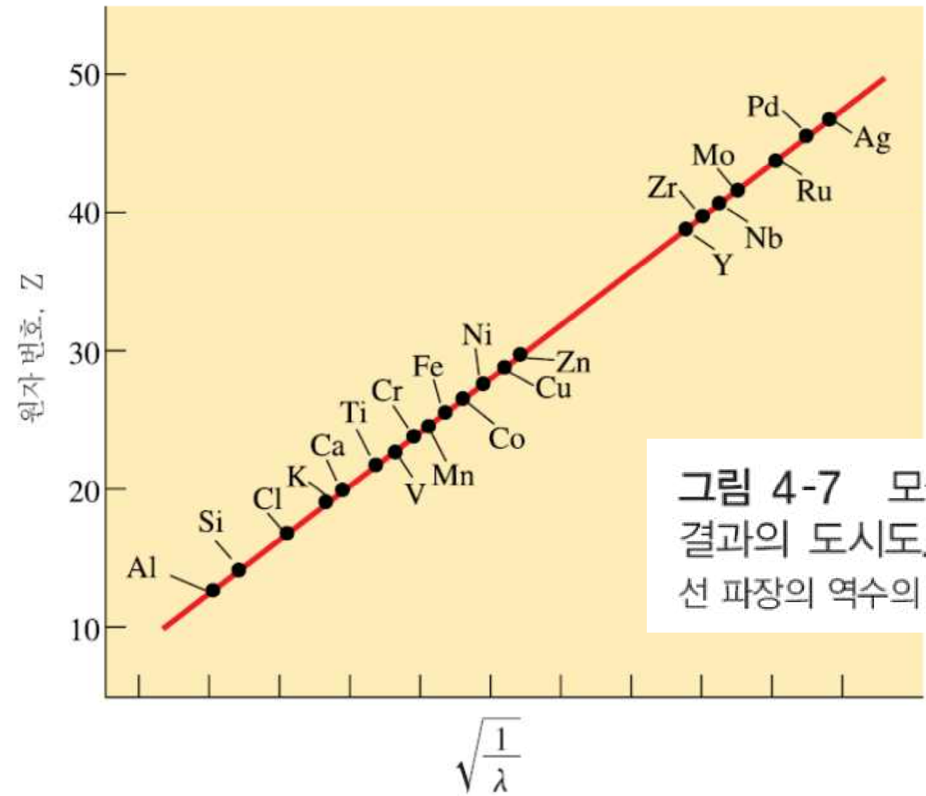


그림 4-7 모즐리의 X-선 실험 결과의 도시도. 원소의 원자량은 X-선 파장의 역수의 제곱근에 비례한다.

그림 4-6 높은 에너지의 전자빔을 고체 과녁에 가격하여 X-선을 발생시키는 개요도.

4-6 중성자

1932년 : 채드윅 (James Chadwick)

- 알파 입자로 베릴륨(Be), 칼륨(K) 충격 실험에 의해 중성자 방출 확인.

  (중성자 (neutron)는 양성자 보다 약간 무겁고 전하를 띠지 않는 입자.)

원자는 상대적으로 아주 먼 거리에 분포된 전자 구름으로 둘러싸인 매우 밀도가 높고 아주 작은 핵으로 이루어져 있다. 수소 원자를 제외한 모든 원소의 핵은 양성자와 중성자를 가지고 있다.

-핵의 반지름 10^{-5} nm, 원자 반지름 10^{-1} nm

(야구공을 핵이라고 생각하면 원자 지름은 거의 6마일에 해당)

4-7 질량 수와 동위 원소

동위 원소들은 질량이 서로 다른, 동일한 원소의 원자들이다. 그들은 양성자 수는 같으나 중성자 수가 서로 다른 원자들이다.

표 4-2 수소의 세 동위 원소

이름	기호	핵종 기호	질량(amu)	자연에서의 존재 비	양성자 수	중성자 수	전자 수
수소	H	$^{1}_{1}H$	1.007825	99.985%	1	0	1
중수소	D	$^{2}_{1}H$	2.01400	0.015%	1	1	1
삼중수소	T	$^{3}_{1}H$	3.01605	0.000%	1	2	1

질량 수 = 양성자 수 + 중성자 수
= 원자 번호 + 중성자 수

양성자 수 = 전자 수

표 4-3 몇 가지 동위 원소들의 자연 존재 비

원소	원자량(amu)	동위 원소	% 자연 존재 비	질량(amu)
boron	10.811	${}^{10}_{5}B$	19.91	10.01294
		${}^{11}_{5}B$	80.09	11.00931
oxygen	15.9994	${}^{16}_{8}O$	99.762	15.99492
		${}^{17}_{8}O$	0.038	16.99913
		${}^{18}_{8}O$	0.200	17.99916
chlorine	35.4527	${}^{35}_{17}Cl$	75.770	34.96885
		${}^{37}_{17}Cl$	24.230	36.96590
uranium	238.0289	${}^{234}_{92}U$	0.0055	234.0409
		${}^{235}_{92}U$	0.720	235.0439
		${}^{238}_{92}U$	99.2745	238.0508

자연에서 단 한가지 동위 원소로만 존재하는 20개의 원소는 ${}^{9}_{4}Be$, ${}^{19}_{9}F$, ${}^{23}_{11}Na$, ${}^{27}_{13}Al$, ${}^{31}_{15}P$, ${}^{45}_{21}Sc$, ${}^{55}_{25}Mn$, ${}^{59}_{27}Co$, ${}^{75}_{33}As$, ${}^{89}_{39}Y$, ${}^{93}_{41}Nb$, ${}^{103}_{45}Rh$, ${}^{127}_{53}I$, ${}^{133}_{55}Cs$, ${}^{141}_{59}Pr$, ${}^{159}_{65}Tb$, ${}^{165}_{67}Ho$, ${}^{169}_{69}Tm$, ${}^{197}_{79}Au$ *그리고* ${}^{209}_{83}Bi$*이다.*

예제 4-1 *원자 구성의 결정*

다음 원소들의 양성자, 중성자 그리고 전자 수를 구하여라.

(a) $^{35}_{17}Cl$ 그리고 $^{37}_{17}Cl$ (b) $^{63}_{29}Cu$ 그리고 $^{65}_{29}Cu$

계획

핵종 기호 왼쪽 아래첨자의 수를 알면 원자 번호, 즉 양성자 수를 알 수 있다. 왼쪽 위첨자인 질량 수로부터 양성자와 중성자의 합을 알 수 있다. 양성자 수(원자 번호)에서 전자 수를 뺀 값이 오른쪽 위첨자로 표시되는 전하 수이다. 이 자료들로부터 두 핵종이 같은 수의 양성자를 가지고 있으면 같은 원소라고 정의할 수 있고 그들의 질량 수가 다르면 서로 동위 원소이다.

예제 4-1 *원자 구성의 결정*

다음 원소들의 양성자, 중성자 그리고 전자 수를 구하여라.

(a) $^{35}_{17}Cl$ 그리고 $^{35}_{17}Cl$ (b) $^{63}_{29}Cu$ 그리고 $^{65}_{29}Cu$

계획

핵종 기호 왼쪽 아래첨자의 수를 알면 원자 번호, 즉 양성자 수를 알 수 있다. 왼쪽 위첨자인 질량 수로부터 양성자와 중성자의 합을 알 수 있다. 양성자 수(원자 번호)에서 전자 수를 뺀 값이 오른쪽 위첨자로 표시되는 전하 수이다. 이 자료들로부터 두 핵종이 같은 수의 양성자를 가지고 있으면 같은 원소라고 정의할 수 있고 그들의 질량 수가 다르면 서로 동위 원소이다.

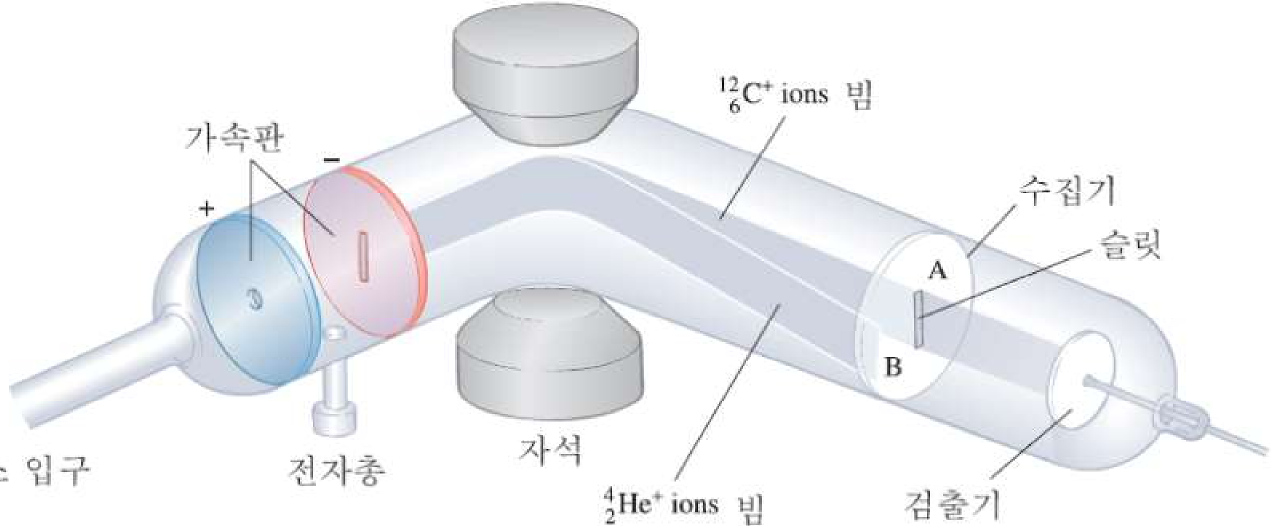
풀이

(a) 각각 17 양성자, 18 중성자, 17 전자 그리고 17, 20, 17

(b) 각각 29 양성자, 34 중성자, 29 전자 그리고 29, 36, 29

4-8 질량분석계와 동위원소

그림 4-8 질량 분석계. 질량 분석계에서 기체 분자들은 낮은 압력에서 이온화되고 전기장에 의하여 가속된다.



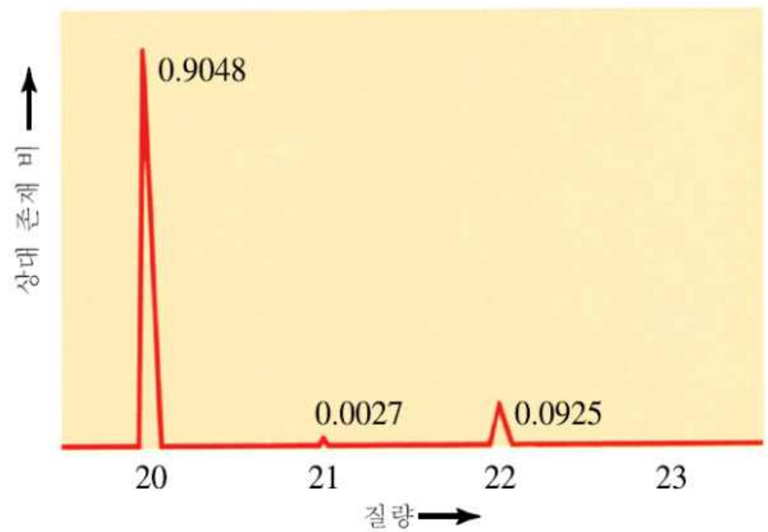


그림 4-9 네온의 질량 스펙트럼. 네온은 세 가지 동위 원소로 구성되어 있고 네온-20의 존재 비(90.48%)가 가장 높다.

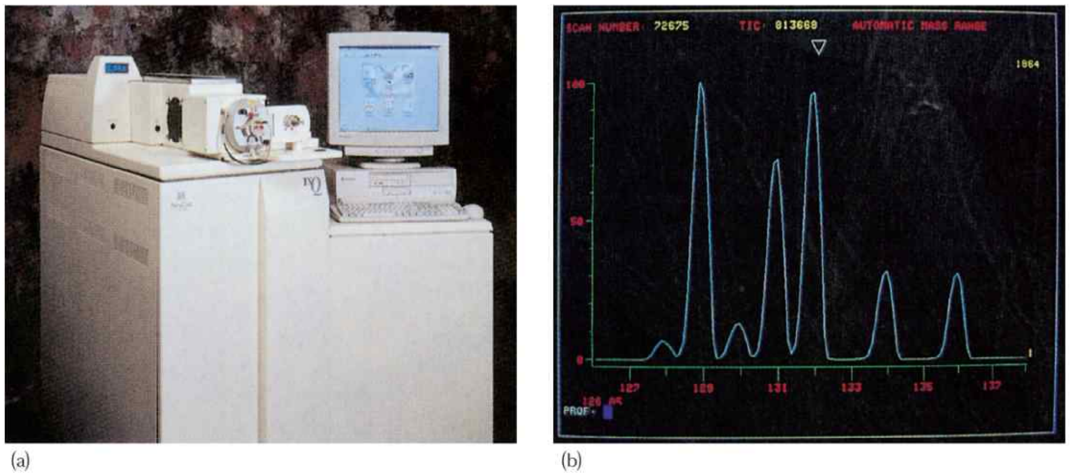


그림 4-10 (a) 최근의 질량 분석계. (b) Xe^{+} 이온의 질량 스펙트럼.

4-9 원자량의 단위와 원자량

원자량 단위 - 탄소-12 동위 원소기준.

1962년 IUPAC(International Union of Pure and Applied Chemistry)에서 결정

: 1 **amu**는 정확히 탄소-12의 1/12이다.

탄소-12 원자, 질량 = 12 amu

1몰의 무게 = 12 g

$$\underline{?}\ \text{amu} = 1.000\ \text{g}\ {}^{12}_{6}\text{C atoms} \times \frac{1\ \text{mol}\ {}^{12}_{6}\text{C}}{12\ \text{g}\ {}^{12}_{6}\text{C atoms}} \times \frac{6.022\times10^{23}\ {}^{12}_{6}\text{C atoms}}{1\ \text{mol}\ {}^{12}_{6}\text{C atoms}} \times \frac{12\ \text{amu}}{{}^{12}_{6}\text{C atoms}}$$

$$= 6.022 \times 10^{23}\ \text{amu}\ (1\ \text{g 속에})$$

$$1\ \text{g} = 6.022 \times 10^{23}\ \text{amu} \quad \text{또는} \quad 1\ \text{amu} = 1.660 \times 10^{-24}\ \text{g}$$

❖ 두 개 이상의 동위 원소로 존재하는 원자의 무게는 각 동위 원소들의 존재 비에 따라 원자량을 계산한다.

예제 4-2 *원자량의 계산*

마그네슘의 세 동위 원소의 존재 비와 질량을 질량 분석계로 측정한 결과가 다음 표에 있다. 이 결과를 이용하여 마그네슘의 원자량을 계산하여 보라.

동위 원소	% 존재 비	질량(amu)
$^{24}_{12}Mg$	78.99	23.98504
$^{25}_{12}Mg$	10.00	24.98584
$^{26}_{12}Mg$	11.01	25.98259

계획

각 동위 원소들의 질량과 분율을 곱하여 모두 더하면 마그네슘의 원자량을 얻을 수 있다.

풀이

$$\begin{aligned}\text{원자량} &= 0.7899(23.98504\ \text{amu}) + 0.1000(24.98584\ \text{amu}) + 0.1101(25.98259\ \text{amu}) \\ &= 18.946\ \text{amu} + 2.4986\ \text{amu} + 2.8607\ \text{amu} \\ &= 24.30\ \text{amu}\ \text{(유효 숫자 4자리)}\end{aligned}$$

예제 4-3 동위 원소의 존재 비 계산

갈륨 원자의 질량은 69.72 amu이다. 자연계에는 68.9257 amu의 $^{69}_{31}Ga$와 70.9249 amu의 $^{71}_{31}Ga$이 존재한다. 이들의 존재 비를 구하여라.

계획

각 동위 원소들의 분율을 표시하였다. 원자량은 구성하는 동위 원소들의 질량들의 가중 평균치이다. 따라서 각 동위 원소들의 질량과 분율을 곱하여 모두 더하면 원자량과 같다.

예제 4-3 동위 원소의 존재 비 계산

갈륨 원자의 질량은 69.72 amu이다. 자연계에는 68.9257 amu의 $^{69}_{31}Ga$와 70.9249 amu의 $^{71}_{31}Ga$이 존재한다. 이들의 존재 비를 구하여라.

계획

각 동위 원소들의 분율을 표시하였다. 원자량은 구성하는 동위 원소들의 질량들의 가중 평균치이다. 따라서 각 동위 원소들의 질량과 분율을 곱하여 모두 더하면 원자량과 같다.

풀이

x = $^{69}_{31}Ga$ 의 분율로 놓자. $1-x$ = $^{71}_{31}Ga$의 분율이 된다.

$$x(68.9257\ \text{amu}) + (1-x)(70.9249\ \text{amu}) = 69.72\ \text{amu}$$

$$68.9257x + 70.9249 - 70.9249x = 69.72$$

$$-1.9992x = -1.20$$

$$x = 0.600$$

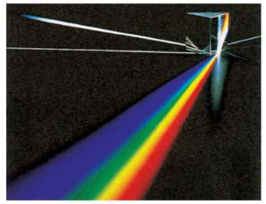
$$x = 0.600 = \text{fraction of } ^{69}_{31}Ga \qquad \therefore\ \boxed{60.0\%\ ^{69}_{31}Ga}$$

$$(1-x) = 0.400 = \text{fraction of } ^{71}_{31}Ga \qquad \therefore\ \boxed{40.0\%\ ^{71}_{31}Ga}$$

Αα...Ωω

Greek alphabet			
Αα	Alpha	Νν	Nu
Ββ	Beta	Ξξ	Xi
Γγ	Gamma	Οο	Omicron
Δδ	Delta	Ππ	Pi
Εε	Epsilon	Ρρ	Rho
Ζζ	Zeta	Σσς	Sigma
Ηη	Eta	Ττ	Tau
Θθ	Theta	Υυ	Upsilon
Ιι	Iota	Φφ	Phi
Κκ	Kappa	Χχ	Chi
Λλ	Lambda	Ψψ	Psi
Μμ	Mu	Ωω	Omega

4-10 전자기 복사



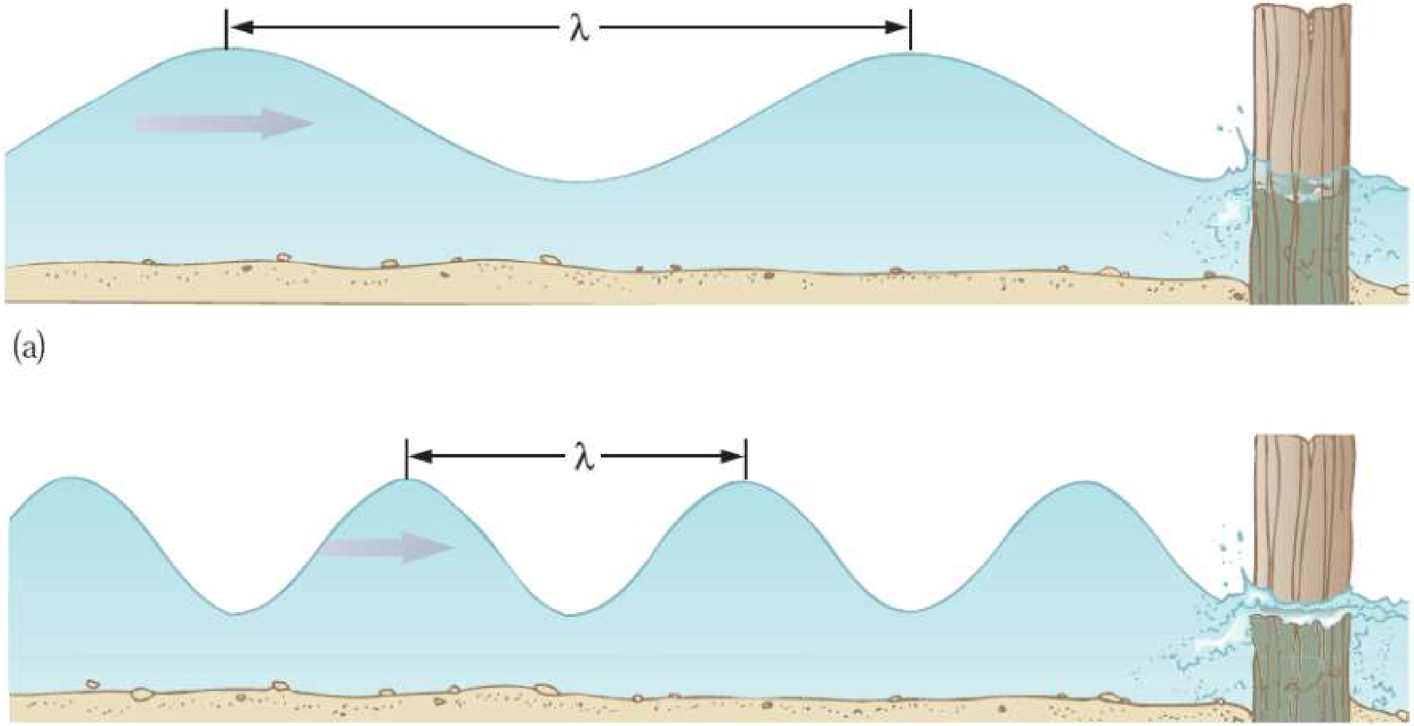
파장(wavelength, λ) : 파의 모양이 같은 두 점, 두 물마루 사이의 거리.
m, nm

진동수(frequency, ν) : 단위 시간 당 주어진 점에 통과 하는 물마루의 수.
$1/s$, s^{-1}

$\lambda\nu$ = 파의 속도 또는 $\lambda\nu = c$

$\lambda\nu = c = 3.00 \times 10^{8}\ m/s$

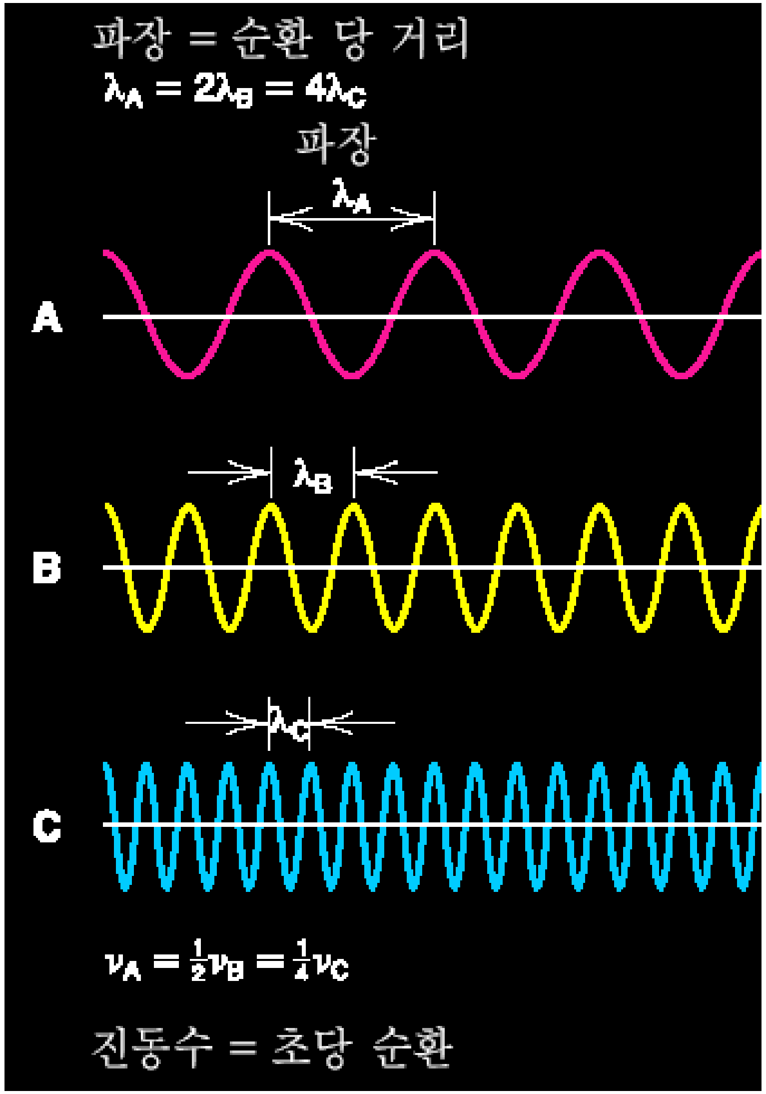
진공 중에서 전자기 복사선의 속도 c는 파장의 길이에 관계 없이 $3.0 \times 10^{8}\ m/s$



(a)

(b)

그림 4-11 물결파의 파장과 진동수에 대한 묘사. (a)와 (b)의 속도는 같고 따라서 (a)는 긴 파장의 낮은 진동수, (b)는 짧은 파장의 높은 진동수를 가진다.



진동수와 파장. 파장(λ)이 서로 달라서 진동수(ν)가 서로 다른 세 파동을 보였다. 파장이 감소함에 따라 진동수가 증가하고, 역도 그러함을 주목하라.

뉴톤 (Isaac Newton) : 햇빛(백색 연속스펙트럼) 을 프리즘을 통과시켜 각각의 색으로 분리.

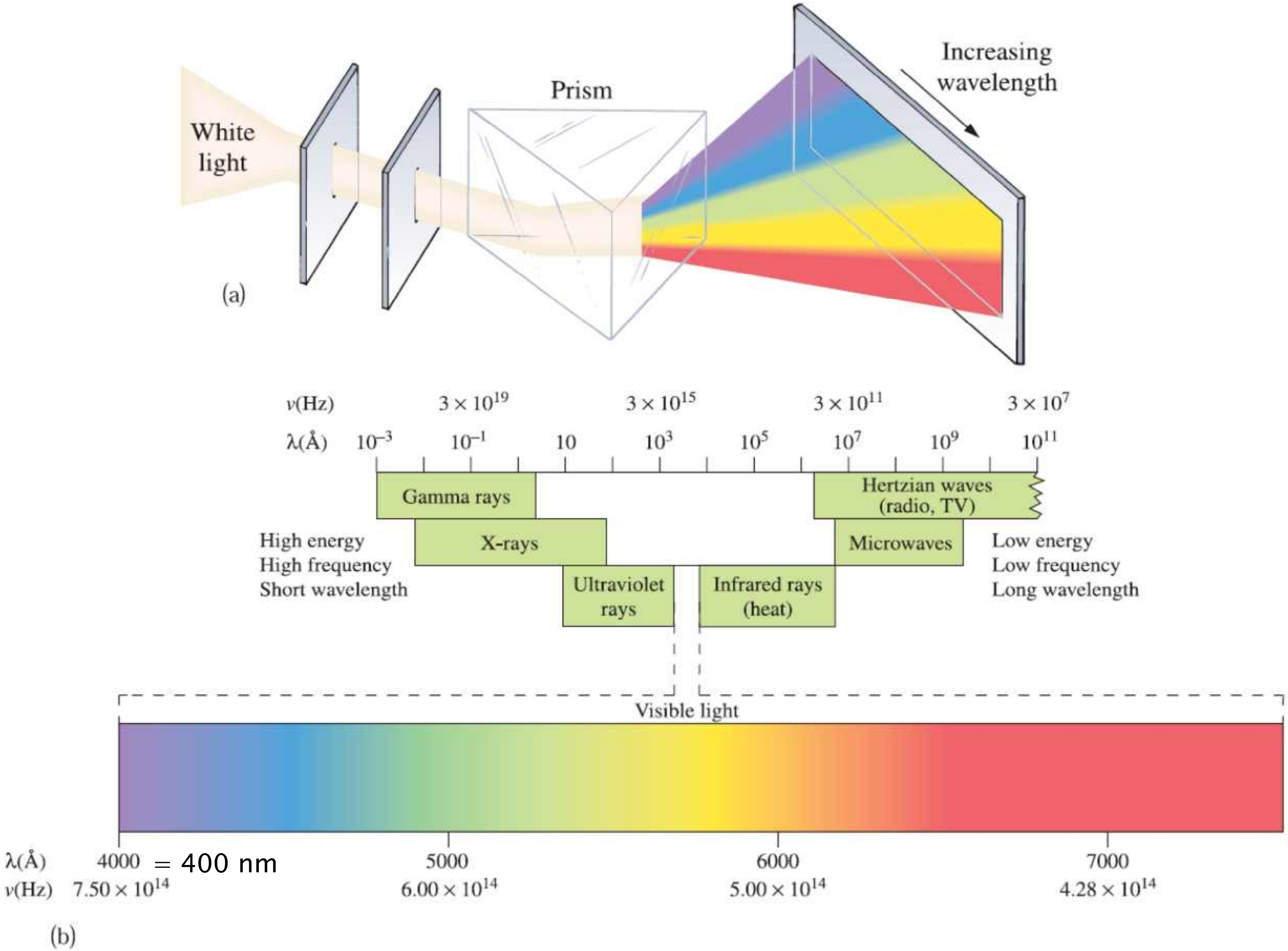


그림 4-12 (a) 프리즘에 의한 가시광선의 분산. (b) 가시광선은 전자기 복사 스펙트럼의 작은 영역에 불과하다.

예제 4-4 빛의 파장

전자기 복사 스펙트럼에서 자외선 중간 영역에 해당되는 빛의 진동수는 $2.73 \times 10^{16}\ s^{-1}$이다. 또 가시광선에서 중간 영역의 빛은 노란색으로 진동수는 $5.26 \times 10^{14}\ s^{-1}$이다. 이들에 해당하는 파장은 각각 얼마인가?

계획

파장과 진동수는 서로 반비례한다. $\lambda\nu = c$.

예제 4-4 빛의 파장

전자기 복사 스펙트럼에서 자외선 중간 영역에 해당되는 빛의 진동수는 $2.73 \times 10^{16}\ s^{-1}$이다. 또 가시광선에서 중간 영역의 빛은 노란색으로 진동수는 $5.26 \times 10^{14}\ s^{-1}$이다. 이들에 해당하는 파장은 각각 얼마인가?

계획

파장과 진동수는 서로 반비례한다, $\lambda\nu = c$.

풀이

파장과 진동수는 서로 반비례한다; $\lambda\nu = c$. 이 식에서 파장 λ를 구할 수 있다.

$$(\text{자외선})\ \lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3.00 \times 10^{8}\ m \cdot s^{-1}}{2.73 \times 10^{16}\ s^{-1}} = \boxed{1.10 \times 10^{-8}\ m(1.10 \times 10^{2}\ \text{Å})}$$

$$(\text{노란색 빛})\ \lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3.00 \times 10^{8}\ m \cdot s^{-1}}{5.26 \times 10^{14}\ s^{-1}} = \boxed{5.70 \times 10^{-7}\ m(5.70 \times 10^{3}\ \text{Å})}$$

빛은 파동과 입자의 이중성을 가지고 있다.

빛은 입자 즉 광자(photon)으로 정의 할 수 있다.

막스 프랑크(Max Plank) : 각각의 빛의 광자는 특정한 양(양자, quantum)

의 에너지를 가진다.

: 광자가 가지는 에너지는 빛의 진동수에 의존한다.

$E = h\nu$ 또는 $E = \dfrac{hc}{\lambda}$ 이다.

광자에너지 (J)= 프랑크 상수 (J·s) x 빛의 진동수 (1/s)

(프랑크 상수, h = 6.6260755 x 10^{-34} J·s)

예제 4-5 *빛의 에너지*

예제 4-4에서, 자외선은 $2.73 \times 10^{16}\ s^{-1}$의 진동수를, 그리고 가시광선은 $5.26 \times 10^{14}\ s^{-1}$의 진동수를 가지고 있다. 각각의 광자에 대하여 에너지를 joule로 나타내어라. 또 에너지의 비를 구하여라.

계획

$E = h\nu$의 관계식에서 광자 에너지를 구할 수 있다.

예제 4-5 빛의 에너지

예제 4-4에서, 자외선은 $2.73 \times 10^{16}\ s^{-1}$의 진동수를, 그리고 가시광선은 $5.26 \times 10^{14}\ s^{-1}$의 진동수를 가지고 있다. 각각의 광자에 대하여 에너지를 joule로 나타내어라. 또 에너지의 비를 구하여라.

계획

$E = h\nu$의 관계식에서 광자 에너지를 구할 수 있다.

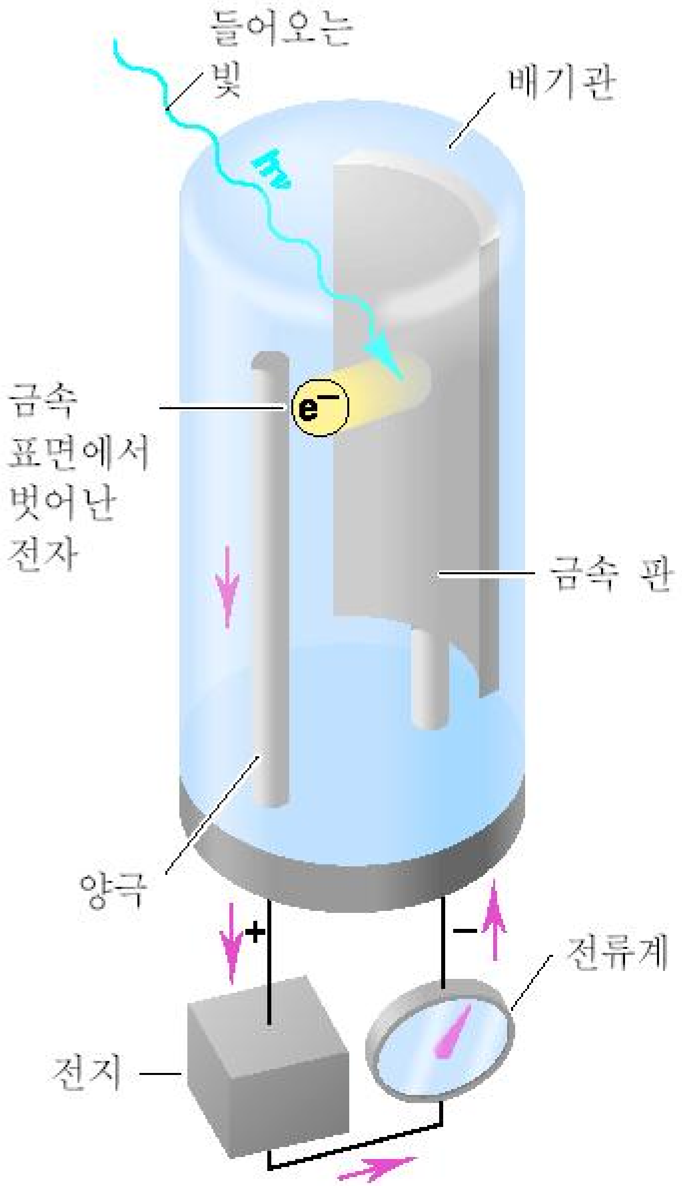
풀이

(자외선) $E = h\nu = (6.626 \times 10^{-34}\ J \cdot s)(2.73 \times 10^{16}\ s^{-1}) = 1.81 \times 10^{-17}\ J$

(노란색) $E = h\nu = (6.626 \times 10^{-34} J \cdot s)(5.26 \times 10^{14}\ s^{-1}) = 3.49 \times 10^{-19}\ J$

두 광자의 에너지 비는 $\dfrac{E_{uv}}{E_{yellow}} = \dfrac{1.81 \times 10^{-17} J}{3.49 \times 10^{-19} J} = 51.9$

4-11 광전 효과



광전 효과의 실연. 진동수가 충분히 높은 단색광이 금속 판에 부딪힐 때, 전자들이 판에서 벗어나 양 전극으로 이동하여 전류를 생성한다.

광전효과 (photoelectric effect)

: 진동수가 충분한 단색광이 금속 판을 비출 때에 생기는 전류의 흐름.

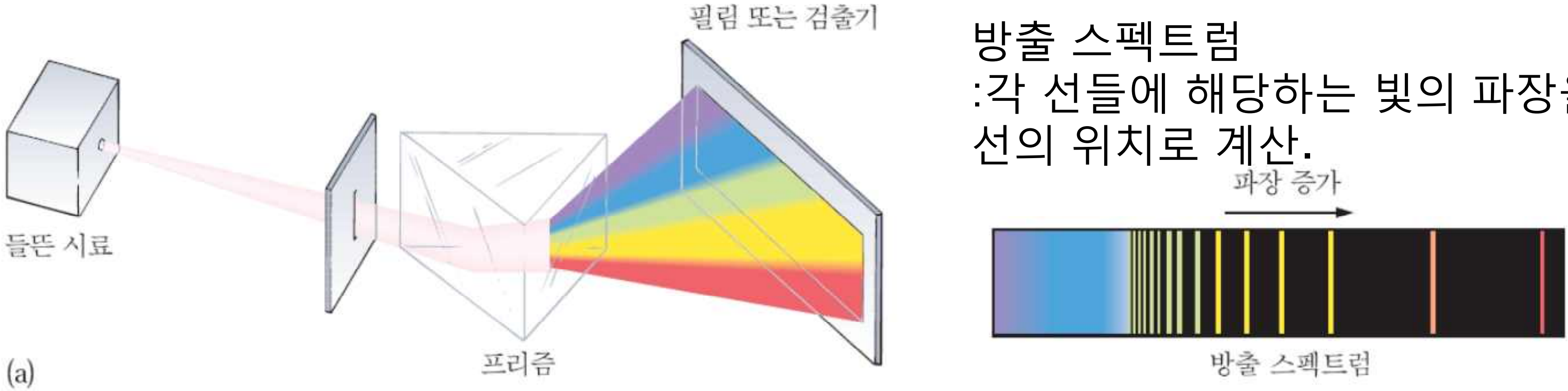
: 아무리 오래 또는 밝게 빛을 쪼이더라도(진폭) 빛이 충분히 짧은 파장일 때만 전자가 방출된다. (파동모형으로 설명이 충분치 않다)

→ 입자성으로 설명

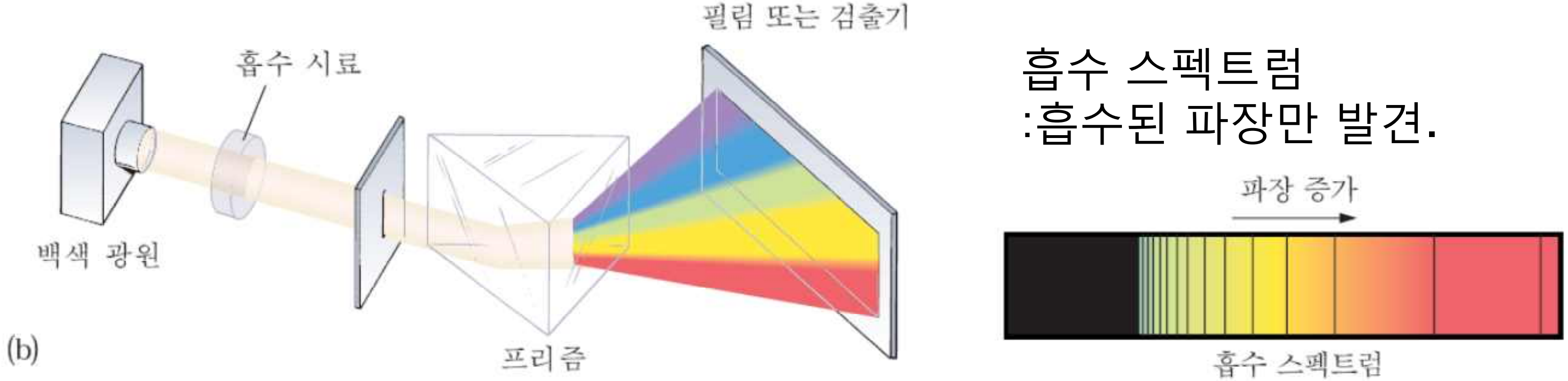
(빛의 세기증가는 광자의 수가 증가를 의미)

4-12 원자 스펙트럼과 보어 원자

- 고온 발광(백열) 고체, 액체, 고압의 기체는 연속 스펙트럼을 만든다. 그러나 전기장을 낮은 압력의 진공관에 통과 시키면 프리즘에 의하여 파장이 분리된다.
- 각 스펙트럼들은 한 시료에 존재하는 서로 다른 원소들을 확인하는 지문의 역할 한다.



방출 스펙트럼
:각 선들에 해당하는 빛의 파장을 선의 위치로 계산.



흡수 스펙트럼
:흡수된 파장만 발견.

그림 4-14 (a) *원자 방출*(atomic emission). 들뜬 수소 원자로부터 방출된 빛은 프리즘을 통과하여 불연속적인 파장으로 분리된다. (b) *원자 흡수*(atomic absorption). 백색광이 바닥 상태의 수소 원자를 지나 슬릿과 프리즘을 통과하면, 전달된 빛은 (a)의 방출 파장에 해당하는 파장의 세기가 감소한다.

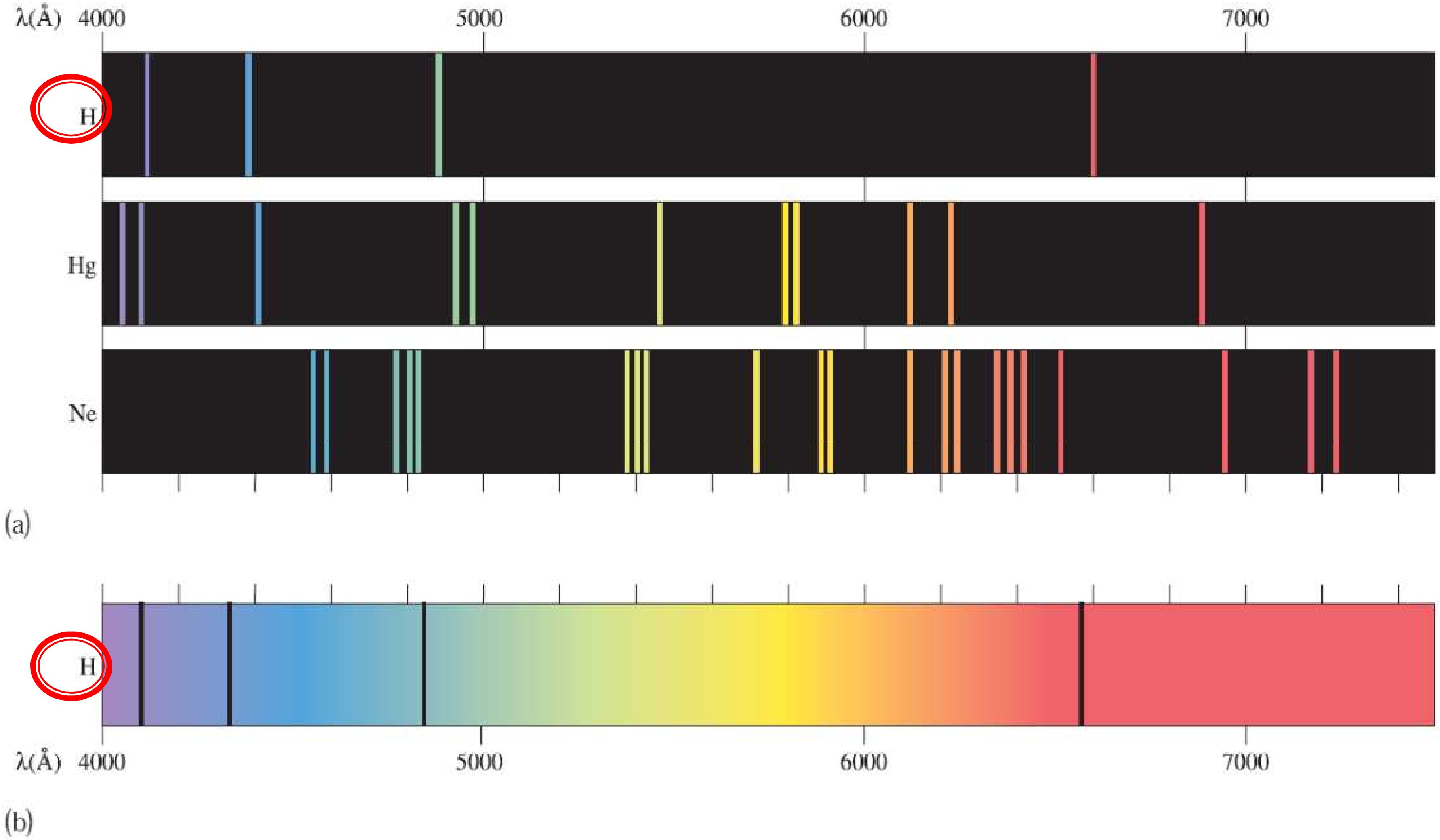


그림 4-15 가시 광선 영역에서 몇 가지 원소들의 원자 스펙트럼. (a) 방출 스펙트럼, (b) 수소의 흡수 스펙트럼.

수소 원자 스펙트럼에서 선의 파장 계산하기

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right)$$

R (리드베르그 상수)

$= 1.096776 \times 10^7 m^{-1}$

n은 양의 정수

$n_2 > n_1$

리드베리 식을 써서 수소 원자가 $n=5$에서 $n=2$로 전이를 일으킬 때에 방출되는 광자의 파장을 (nm로) 계산하라.

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right)$$

R (리드베리 상수)
= $1.096776 \times 10^{7} m^{-1}$
n은 양의 정수
$n_2 > n_1$

$1nm = 10^{-9}m$

Solution:

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right) \qquad R = 1.096776 \text{ x } 10^7 \text{ m}^{-1}$$

$n_1 = 2 \quad n_2 = 5$

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right) = \left(1.096776 \text{ x } 10^7 \text{ m}^{-1}\right)\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{5^2}\right) = 2303229.6 \text{ m}^{-1} \text{ (unrounded)}$$

$$\lambda \text{ (nm)} = \left(\frac{1}{2303229.6 \text{ m}^{-1}}\right)\left(\frac{1 \text{ nm}}{10^{-9} \text{ m}}\right) = 434.1729544 = \mathbf{434.17 \text{ nm}}$$

예제 4-6 *빛의 에너지*

수소의 방출 스펙트럼에서는 녹색 광선은 4.86×10^{-7} m의 파장을 갖는 녹색 광선이 관찰된다. 이 광자의 에너지를 구하여라.

계획

파장에서 진동수를 구하여 광자의 에너지를 구할 수 있다.

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

$$c = \nu \times \lambda$$

예제 4-6 *빛의 에너지*

수소의 방출 스펙트럼에서는 녹색 광선은 4.86×10^{-7} m의 파장을 갖는 녹색 광선이 관찰된다. 이 광자의 에너지를 구하여라.

계획

파장에서 진동수를 구하여 광자의 에너지를 구할 수 있다.

풀이

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6.626 \times 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s})(3.00 \times 10^{8}\ \mathrm{m/s})}{(4.86 \times 10^{-7}\ \mathrm{m})} = \boxed{4.09 \times 10^{-19}\ \mathrm{J}/\text{광자}}$$

보다 이해하기 쉬운 값으로 나타내기 위하여 1 mol의 원자로부터 방출되는 에너지를 kJ로 표시해보자.

$$\frac{\underline{?}\ \mathrm{kJ}}{\mathrm{mol}} = 4.09 \times 10^{-19} \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{atom}} \times \frac{1\ \mathrm{kJ}}{1 \times 10^{3}\ \mathrm{J}} \times \frac{6.02 \times 10^{23}\ \mathrm{atoms}}{\mathrm{mol}} = \boxed{2.46 \times 10^{2}\ \mathrm{kJ/mol}}$$

4-13 전자의 파동성

드브로이 파장(de Broglie wavelength)
-물질은 마치 파동으로 움직이듯이 행동한다
-전자와 같은 매우 작은 입자는 적절한 환경에서
파동의 성질을 가질 수 있다고 제안.
-물질의 파동 계산

드브로이 파장에 관한 식 $$\lambda = \frac{h}{mu}$$

- 에너지는 질량에 비례($E = mc^2$) 과
광자의 에너지에 관한 식 ($E = h\nu = hc/\lambda$) 결합,h = 플랑크상수

$mc^2 = hc/\lambda$
$\lambda = hc/mc^2 = h/mc$

- 질량 m이고 속력 u로 움직이는 모든 입자의
파장에 관한 식
$\lambda = h/mu$: 물질의 파장은 질량에 반비례

6.626×10^{-34} Js

$=6.626 \times 10^{-34}$ kgm^2/s

1J = 1kgm^2/s^2

예제 4-7 드 브로이 식

(a) 1.24×10^{7} m/s의 속도로 운동하는 전자의 파장을 미터로 나타내라. 전자의 질량은 9.11×10^{-28} g.
~~(b)~~ 5.25 온스의 야구공이 시간당 92.5마일로 운동할 때 파장을 구하여라. 1 J = 1 kg · m^2/s^2임을 염두에 두어라.

계획

각 계산에서 드 브로이 식, $\lambda = h/mu$을 이용한다. 여기에서 플랑크 상수 h는 6.626×10^{-34} J · s × 1 kg · m^2/s^2/1 J = 6.626×10^{-34} kg · m^2/s 단위를 만족시키기 위해 질량은 kg으로 나타내야 한다. (b)에서 속도는 m/sec로 나타내야 한다.

풀이

$$\text{(a)}\ m = 9.11 \times 10^{-28}\ \text{g} \times \frac{1\ \text{kg}}{1000\ \text{g}} = 9.11 \times 10^{-31}\ \text{kg}$$

드 브로이 식에 이 값을 넣으면

$$\lambda = \frac{h}{m\mathbf{u}} = \frac{6.626 \times 10^{-34}\ \dfrac{\text{kg}\cdot\text{m}^2}{\text{s}}}{(9.11 \times 10^{-31}\ \text{kg})(1.24 \times 10^{7}\ \dfrac{\text{m}}{\text{s}})} = \boxed{5.87 \times 10^{-11}\ \text{m}}$$

이 파장은 매우 짧은 것처럼 보이나 많은 결정들에서 원자들 사이의 거리와 비슷하다. 이런 운동을 하는 다량의 전자가 결정을 때리면 측정 가능한 회절 양상을 보인다.

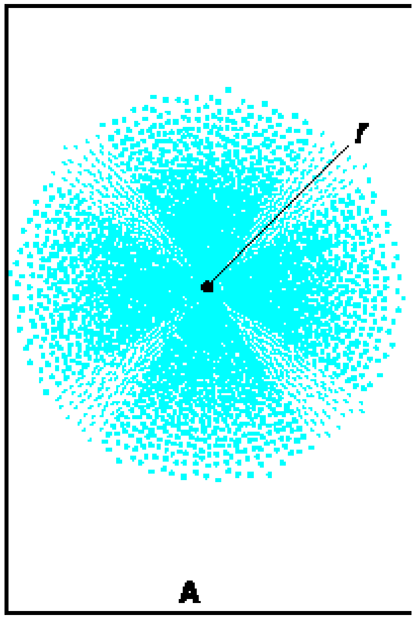
4-14 원자의 양자 역학적 묘사

하이젠베르크의 불확정성 원리

* 움직이는 입지에는 어떤 순간에 뚜렷한 위치가 있는 반면 파동은 공간에 퍼져있다.

*전자의 정확한 위치 그리고 운동량을 동시에 아는 것은 불가능하다.

*전자 확률 밀도로 표현



원자의 양자역학적 모형

원자 궤도함수와 전자의 예상되는 위치

원자의 에너지

$$H\Psi = E\Psi$$

연산자
Hamiltonian

파동함수

슈뢰딩거 방정식

-입자의 정확한 속도와 위치를 동시에 결정할 수 없다.

-원자 궤도함수라고 부르는 일정한 파동함수와 관련 있다.

→파동함수(원자궤도함수)가 명백한 물리적 의미가 파동함수의 제곱 (Ψ^2)은 전자가 원자의 부피 안에서 발견될수 있는 확률의 표준이다.

보충 설명

슈뢰딩거 방정식(Schrödinger Equation)

1926년, 슈뢰딩거(Erwin Schrödinger, 1887~1961)는 드 브로이의 개념에서 얻어진 3차원의 고정파에 대한 식을 수정하여 슈뢰딩거 방정식을 만들었다. 그는 이 수정된 방정식을 이용하여 수소 원자의 에너지 준위를 구할 수 있었다.

$$-\frac{h^2}{8\pi^2 m}\left(\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\psi}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\psi}{\partial z^2}\right)+V\psi=E\psi$$

이 방정식은 수소원자와 He^+, Li^{2+} 같은 1전자 화학종들에 대해서만 정확하게 풀 수 있다. 보다 복잡한 원자나 분자들에서는 이 식을 단순화시켜주는 가정이 필요하다.

A전자밀도 도표 또는 전자구름

B확률밀도 와 핵에서 떨어진 거리

C전자밀도 도표 또는 전자구름을 구형층으로 나눔

D방사 방향 확률분포 도시 와 핵에서 떨어진 거리

E원자를 90% 확률 윤곽선

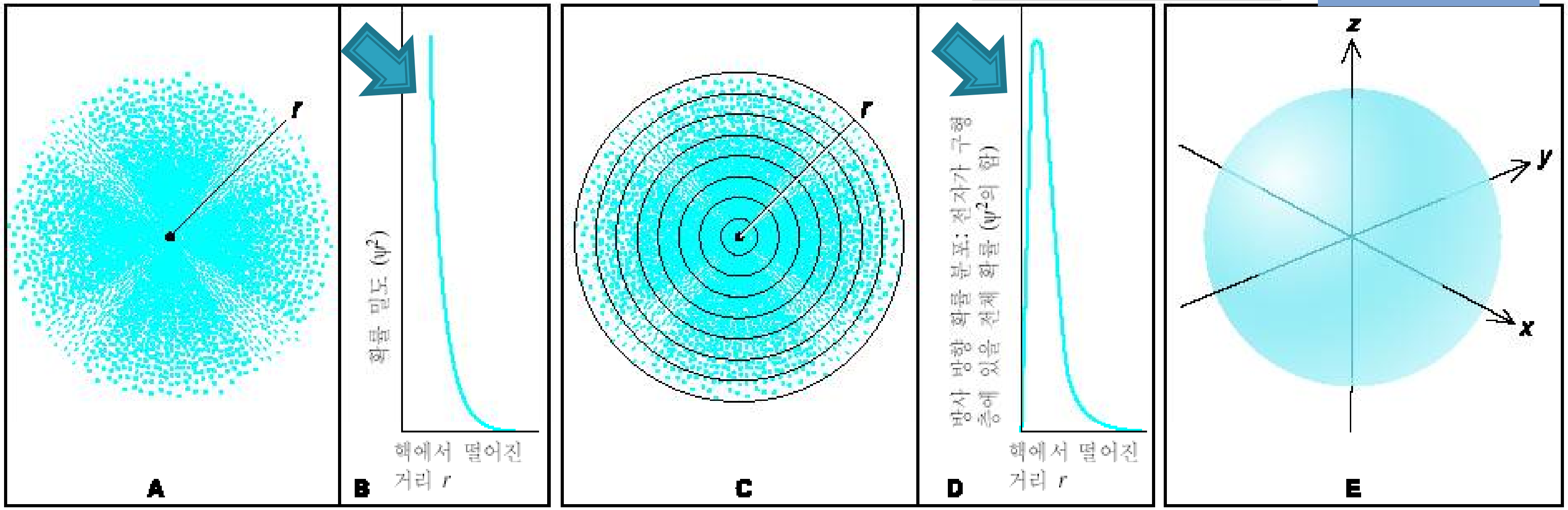


그림 7.16 바닥 상태 H 원자의 전자 확률 밀도. A, 전자 밀도 도표가 H 원자의 단면을 보여준다. 점들은 각각 아주 작은 부피 안에서 전자가 있을 확률을 표시하는데 핵에서 밖으로 가는 선을 따라 감소한다. B, 자료 A에 대한 도시는 확률 밀도(ψ^2)가 핵에서 떨어진 거리에 따라 감소하지만, 영까지 가지는 않음을 보여 준다 (선의 굵기가 그렇게 되는 것처럼 보이게 한다). C, 원자의 부피를 얇고, 중심이 같은, 구형의 층(단면으로 보임)으로 나누고 각 층 안에 있는 점들을 세면 그 층 안에서 전자를 발견할 확률을 얻는다. D, 방사 방향 확률 분포 도시는 각 공 모양의 층 안의 전체 전자 밀도를 r에 대하여 보여 준다. 중심이 같은 각 층의 부피가 늘어나는 것보다 전자 밀도가 더 천천히 줄어들기 때문에 이 도시는 봉우리를 보인다. E, 90% 확률 윤곽선은 H 원자의 바닥 상태(가장 낮은 에너지의 궤도함수)를 보여 주며 전자가 그 시간의 90%를 보내는 부피를 표시한다.

첫째 고리 밀도 는 크지만
둘째 고리 넓이 더 크다

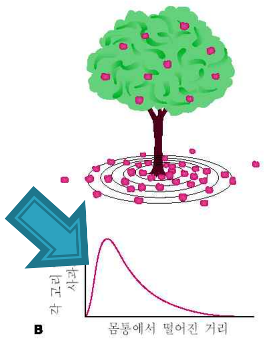


그림 7.17 사과의 방사 방향 확률 분포.

4-15 양자수

하나의 원자 궤도함수는 하나의 전자를 발견할 확률이 높은 공간 영역이다.

원자 궤도함수는 세 양자수를 가진다

1. 주양자수, n – 궤도함수의 크기, 에너지– 원자의 준위 (level) 또는 껍질(shell)

2. 각운동 양자수, l – 궤도함수의 모양 –부준위(sublevel) 또는 부껍질(subshell)

l =0 은 s 부준위, l = 1은 p 부준위, l = 2는 d 부준위 , l=3은 f 부준위

3. 자기 양자수, m_l – 궤도함수의 방위 (에너지는 같으나 공간 배향은 다르다)

- 한 n 값에 대한 궤도함수의 전체 개수는 n^2 이다

4. 스핀 양자수, m_s – 한 전자의 스핀과 스핀에 의하여 생기는 자기장의 배향.

($\uparrow$ +1/2, $\downarrow$ -1/2)

원자에 있는 전자들의 양자수의 요약

이름	기호	허용값	성질
주양자수	n	양의 정수(1, 2, 3, ...)	궤도 에너지(크기)
부양자수 (각운동량양자수)	l	0부터 $n-1$까지의 정수	궤도 모양(l 값 0, 1, 2, 3은 각각 s, p, d, f 궤도에 해당한다.
자기 양자수	m_l	$-l$ 부터 l 까지의 정수	궤도 방향
스핀 양자수	m_s	$+\frac{1}{2}$ 혹은 $-\frac{1}{2}$	e^- 스핀의 방향

표 4-4 n = 4까지에 대한 허용된 양자수

n	ℓ	m_ℓ	m_s	부껍질에 채울 수 있는 총 전자 수 = $4_\ell + 2$	껍질에 채울 수 있는 총 전자 수= $2n^2$
1	0 (1s)	0	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	2	2
2	0 (2s)	0	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	2	8
	1 (2p)	−1, 0, +1	$\pm\frac{1}{2}$ for each value of m_ℓ	6	
3	0 (3s)	0	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	2	18
	1 (3p)	−1, 0, +1	$\pm\frac{1}{2}$ for each value of m_ℓ	6	
	2 (3d)	−2, −1, 0, +1, +2	$\pm\frac{1}{2}$ for each value of m_ℓ	10	
4	0 (4s)	0	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	2	32
	1 (4p)	−1, 0, +1	$\pm\frac{1}{2}$ for each value of m_ℓ	6	
	2 (4d)	−2, −1, 0, +1, +2	$\pm\frac{1}{2}$ for each value of m_ℓ	10	
	3 (4f)	−3, −2, −1, 0, +1, +2, +3	$\pm\frac{1}{2}$ for each value of m_ℓ	14	

에너지 준위에 대한 양자수 결정하기

문제 주양자수(n) 3에 대하여 각운동량 양자수(l) 및 자기 양자수(m_l)의 어떤 값들이 허용되는가? $n = 3$에 대하여 궤도함수가 몇 개 존재하는가?

계획: 본문에 있는 규칙을 써서 허용할 수 있는 양자수를 정한다. l값은 0부터 $n-1$까지의 정수이고, m_l값들은 $-l$부터 0을 지나 $+l$까지의 정수이다. 하나의 m_l값이 각 궤도함수에 지정되므로 m_l값들의 수가 궤도함수의 개수를 결정한다.

풀이 : l값 정하기: $n = 3$에 대하여 $l = 0, 1, 2$

각 l값에 대하여 m_l 정하기:

$l=0$에 대하여, $m_l=0$

$l=1$에 대하여, $m_l= -1, 0, +1$

$l=2$에 대하여, $m_l= -2, -1, 0, +1, +2$

아홉 개의 m_l값들이 있으므로 $n=3$일 때는 아홉 개의 궤도함수가 있다.

점검: 표 7.2는 이 풀이가 옳음을 보여준다. 주어진 n값에 대한 궤도함수의 전체 수는 n^2이므로, $n=3$에 대하여는 $n^2=9$이다.

부준위의 이름과 궤도함수의 양자수 결정하기

문제 다음 양자수들로 된 각 부준위에 대하여 그 이름과 자기 양자수, 그리고 궤도함수의 수를 제시하라.

(a) $n=3,\ l=2$ (b) $n=2,\ l=0$ (c) $n=5,\ l=1$ (d) $n=4,\ l=3$

계획: 부준위(부껍질)를 이름하려면 n값과 l 문자 명칭을 조합한다. l을 알므로 가능한 m_l값들을 알 수 있고 이들의 총 수는 궤도함수의 수와 같다.

$l=0$은 s 부준위
$l=1$은 p 부준위
$l=2$는 d 부준위
$l=3$은 f 부준위

풀이:

	n	l	부준위 이름	가능한 m_l 값들	궤도함수의 수
(a)	3	2	$3d$	$-2, -1, 0, +1, +2$	5
(b)	2	0	$2s$	0	1
(c)	5	1	$5p$	$-1, 0, +1$	3
(d)	4	3	$4f$	$-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3$	7

점검: 다음 식을 써서 각 부준위에 있는 궤도함수들의 수를 점검하라.

$$\text{궤도함수들의 수} = m_l\text{값들의 수} = 2l+1$$

$l=0$은 s 부준위
$l=1$은 p 부준위
$l=2$는 d 부준위
$l=3$은 f 부준위

부정확한 양자수 밝히기

문제 다음 각 양자수 명칭이나 부준위 이름에서 무엇이 잘못되었는가?

	n	l		m_l	이름	
(a)	1	1	$l = 0$	0	1p	1s
(b)	4	3		+1	4d	4f
(c)	3	1		−2	3p	

m_l이 −1, 0, +1

$n > l$

$-l, \ldots 0, \ldots, +l$

$l = 0$은 s 부준위

$l = 1$은 p 부준위

$l = 2$는 d 부준위

$l = 3$은 f 부준위

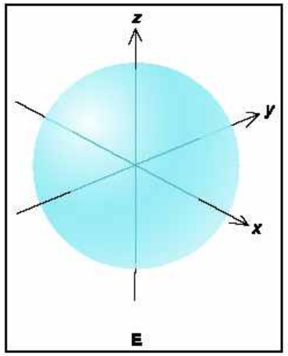
풀이 : (a) $n=1$인 부준위에는 $l=0$ 만 있고 $l=1$은 없다. 유일하게 가능한 부준위 이름은 $1s$ 이다.

(b) $l=3$인 부준위는 f 부준위 이지 d 부준위가 아니다. 그 이름은 $4f$ 여야한다.

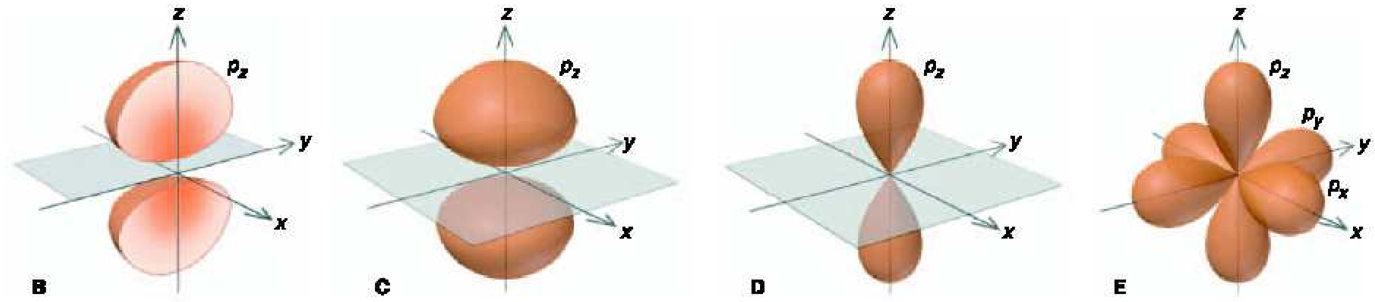
(c) $l=1$인 부준위에서는 m_l이 $-1, 0, +1$ 만 될 수 있고 -2는 아니다.

점검 : l은 언제나 n보다 작고, m_l은 언제나 $-l$보다 크거나 같고 $+l$보다 작거나 같음을 점검하라.

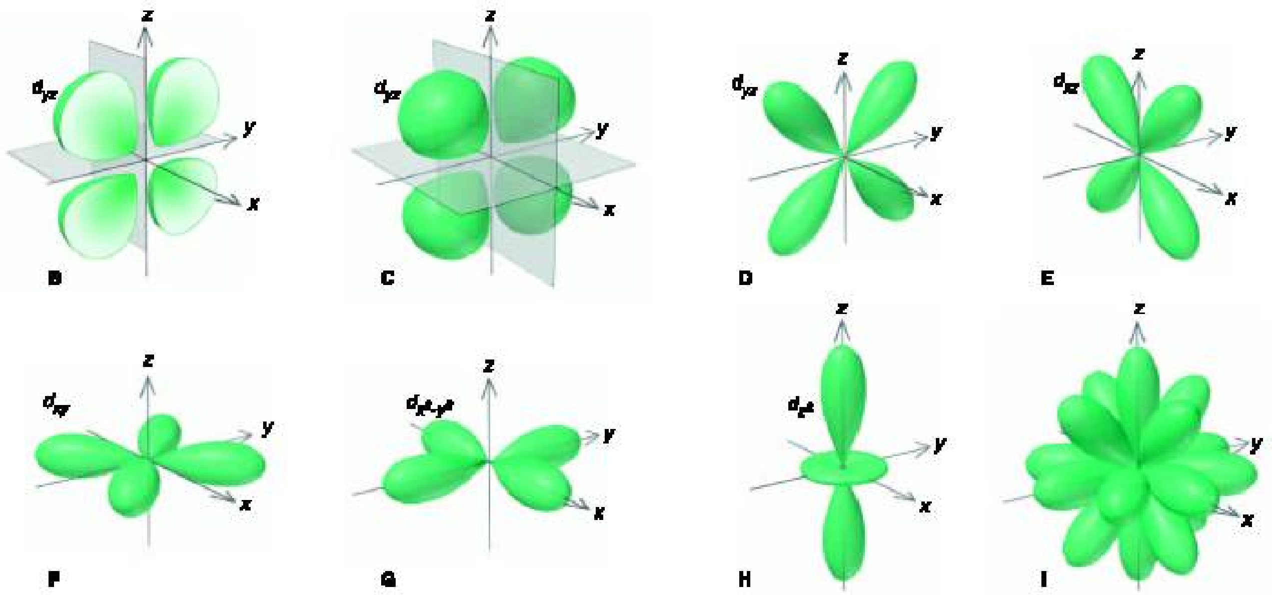
4-16 원자 궤도 함수의 모양



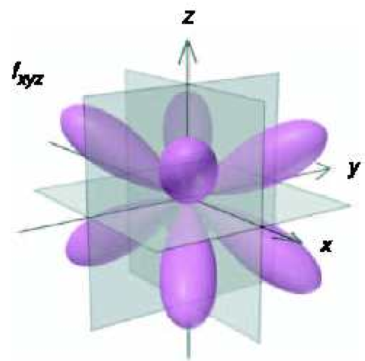
s



p

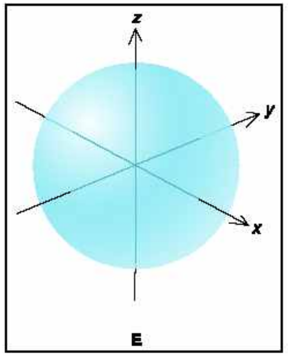


d



f

s



-s 궤도함수라고 한다

-공 모양을 하고 있다

-각운동량 양자수 $l = 0$

-어떠한 s 궤도함수에 대하여도

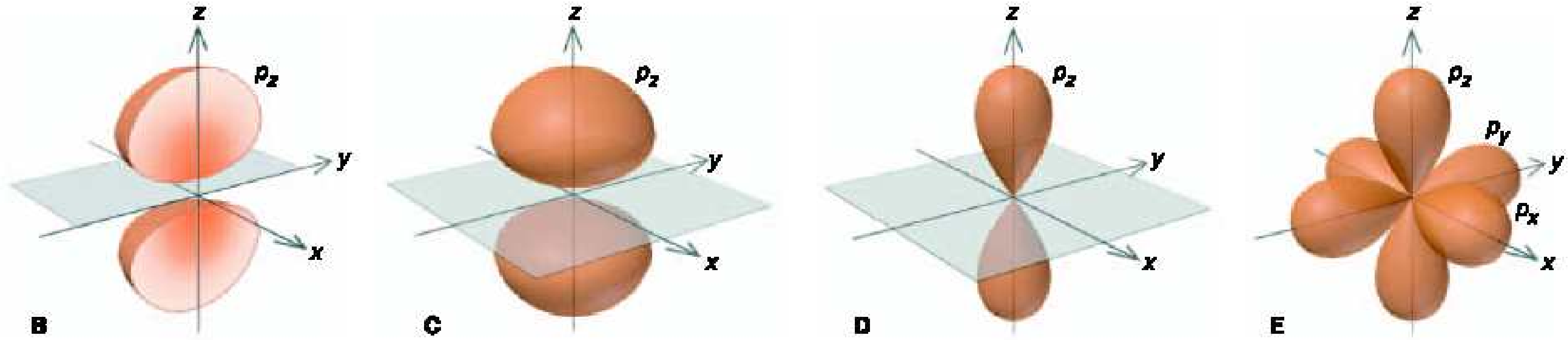
자기 양자수 $m_l = 0$ 이다.

1s – $n=1$, $l = 0$, $m_l = 0$

2s – $n = 2$, $l = 0$, $m_l = 0$

3s – $n=3$, $l = 0$, $m_l = 0$

p



-p 궤도함수라고 한다

-아령 모양을 하고 있다

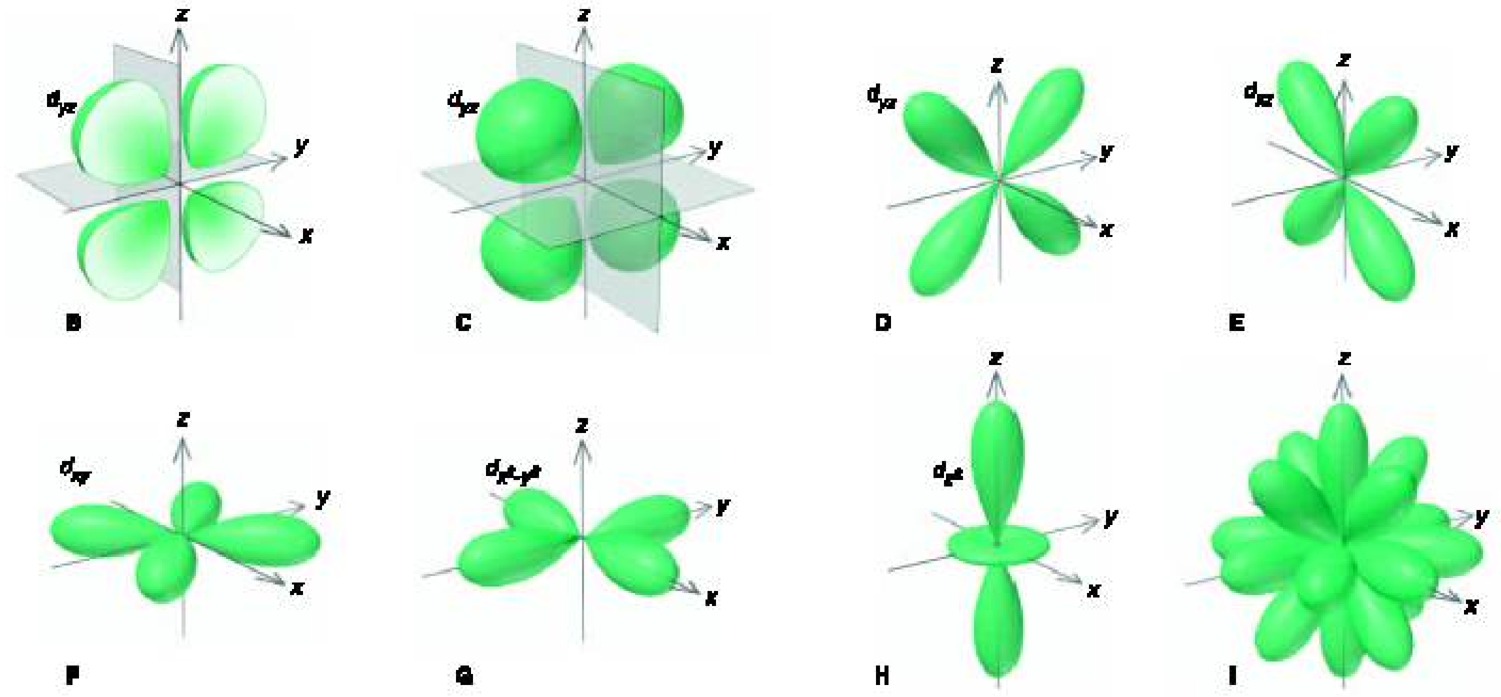
-p_x, p_y, p_z x,y,z 축을 따라 놓여있다

-각운동량 양자수 l = 1

-p 궤도함수에 대하여

자기 양자수 m_l = -1,0,1 셋 이있다.

d



-d 궤도함수라고 한다

-d_{xy}, d_{xz}, d_{yz},$d_{x^2-y^2}$네 잎 클로버 모양을 하고 있다

-d_{z^2} 두지역이 z축을 따라 놓이고 도넛 모양의

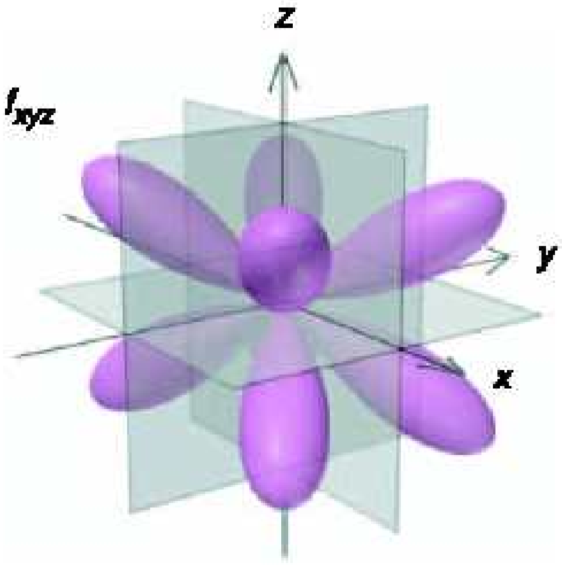
지역이 가운데를 둘러싸고 있다

-각운동량 양자수 $l = 2$

-d 궤도함수에 대하여

자기 양자수 $m_l = -2,-1,0,1,2$ 다섯이있다.

f



–f 궤도함수라고 한다

–각운동량 양자수 $l = 3$

4-17 전자 배치

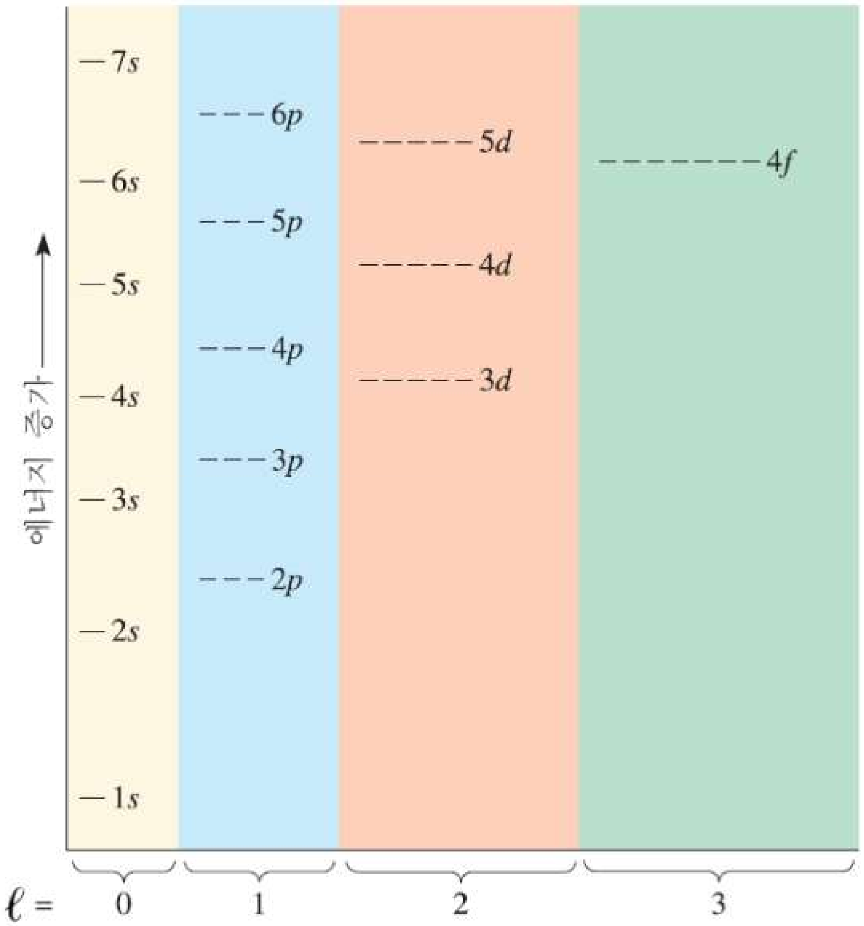


그림 4-27 원자 궤도함수들을 채우는 일반적인 순서(Aufbau 순서).

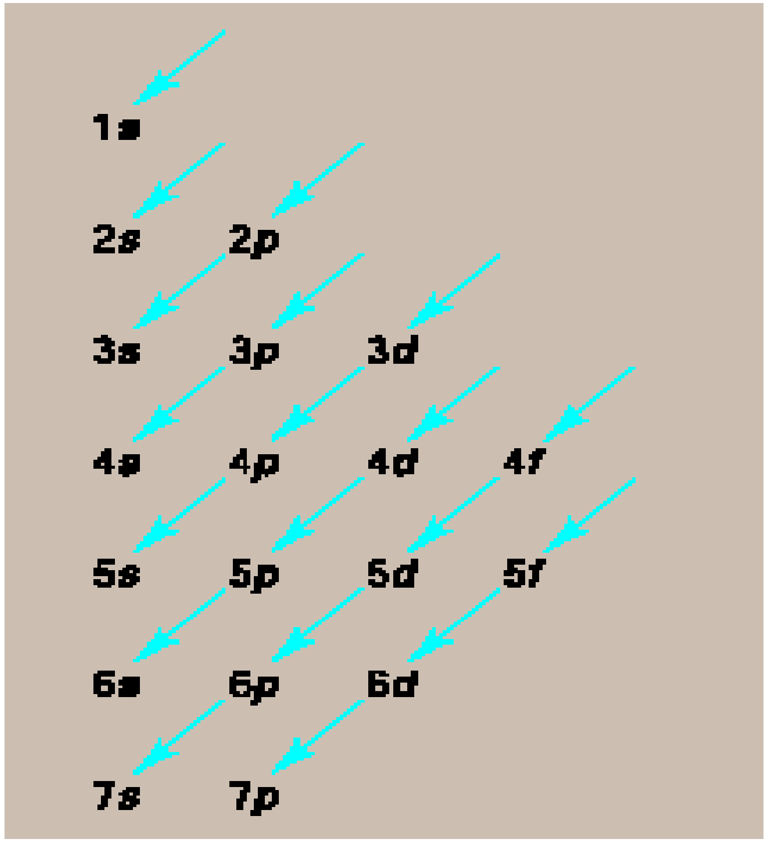


그림 8.7 부준위를 채우는 순서를 외우는 방법. 부준위를 그림처럼 배열하고 1*s*부터 화살표 방향대로 읽는다. 다음을 유념하라.

- *n* 값은 가로방향으로 상수이다.
- *l* 값은 세로방향으로 상수이다.
- *n* + *l* 합은 대각선으로 상수이다

1주기와 2주기 만들기

그림 8.4 처음 세 주기의 요약된 바닥 상태 전자 조성. H부터 Ar 까지의 처음 18개 원소가 2개, 8개, 8개 원소들을 포함하는 세 주기로 배열되었다. 각 상자는 원자 번호, 원자 기호, 요약된 바닥 상태 전자 배치를 보여준다. 한 족 내의 원소들은 유사한 외부 전자 배치(색)를 갖는다.

주기	1A (1)	2A (2)	3A (13)	4A (14)	5A (15)	6A (16)	7A (17)	8A (18)
1	1 H $1s^1$							2 He $1s^2$
2	3 Li [He] $2s^1$	4 Be [He] $2s^2$	5 B [He] $2s^22p^1$	6 C [He] $2s^22p^2$	7 N [He] $2s^22p^3$	8 O [He] $2s^22p^4$	9 F [He] $2s^22p^5$	10 Ne [He] $2s^22p^6$
3	11 Na [Ne] $3s^1$	12 Mg [Ne] $3s^2$	13 Al [Ne] $3s^23p^1$	14 Si [Ne] $3s^23p^2$	15 P [Ne] $3s^23p^3$	16 S [Ne] $3s^23p^4$	17 Cl [Ne] $3s^23p^5$	18 Ar [Ne] $3s^23p^6$

* 쌓음원리(aufbau principle)

- 바닥상태의 전자배치를 만든다.
- 가장 낮은 에너지 궤도에 원소마다 한 개의 전자를 더해 간다.

*궤도와 전자를 지정하는 두가지 일반적방법

1. 전자배치 : n/[#] – 주 에너지 준위(n) 부준위 (*l*)를 지정하는 글자.

위첨자로 쓰인 부준위에 있는 전자 수(#)

2. 궤도그림 : 주어진 에너지를 갖는 각 궤도를 부준위로 묶은 상자와

전자와 그 스핀을 나타내는 화살표로 이루어져 있다

(↑ +1/2, ↓–1/2)

The electron configuration

$n\,l^{\#}$ 부준위에 있는 전자 수

s, p, d, f

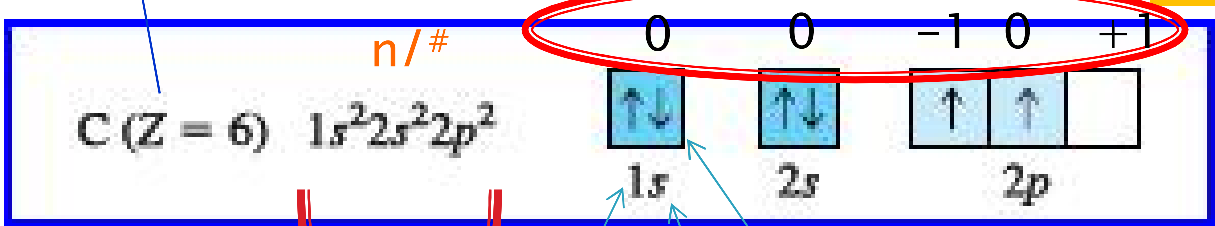
The orbital diagram (box or circle)

전자배치 방법 A.B.C.D

D. 훈트의 규칙:
같은 에너지의 궤도가
비어 있으면 가장
낮은 에너지의 전자배치
는 평행한 스핀을 갖는
홀전자(unpaired electron)
수가 최대를 갖는다

페이지 45, A. 원자번호

m_l



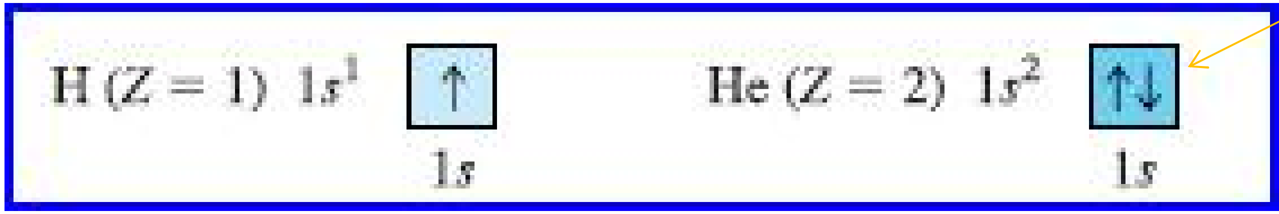
n l

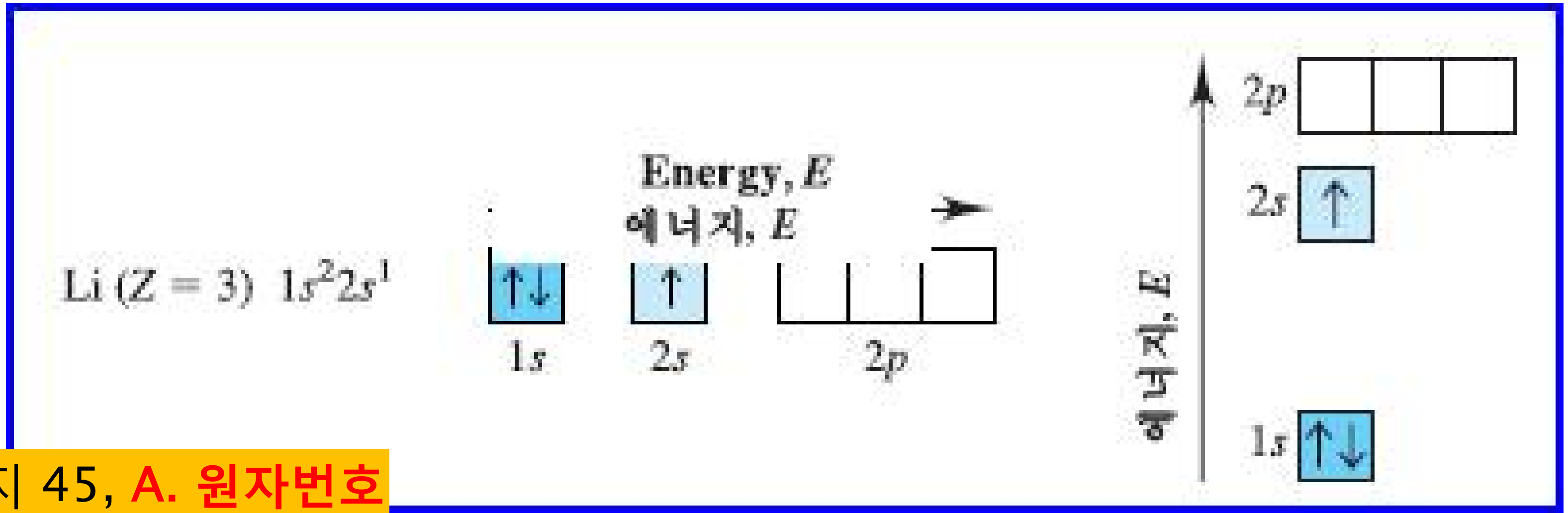
m_s ↑ +1/2, ↓−1/2

B. 쌓음원리(aufbau principle) :
바닥상태의 전자배치를 만든다

C.배타원리:
하나의 궤도는
오직 두 개의 전자
만 가질수 있다

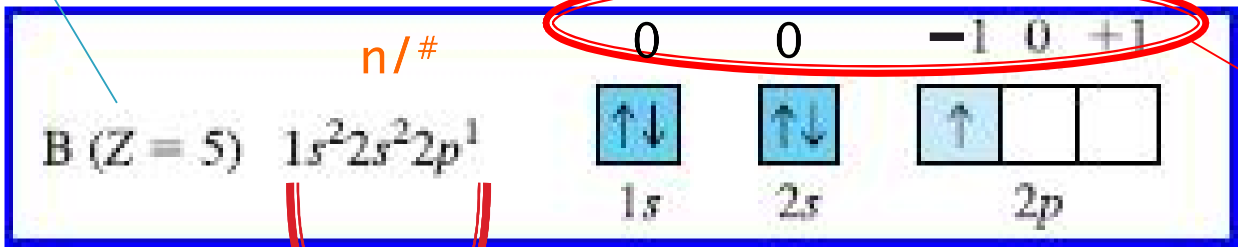
C.배타원리:
하나의 궤도는
오직 두 개의 전자
만 가질수 있다





페이지 45, A. 원자번호

n/#



m_l

m_s ↑ +1/2, ↓−1/2

B. 쌓음원리(aufbau principle) – 바닥상태의 전자배치

C (Z = 6) $1s^2 2s^2 2p^2$

↑↓	↑↓	↑	↑	
1s	2s	2p		

N

O

F

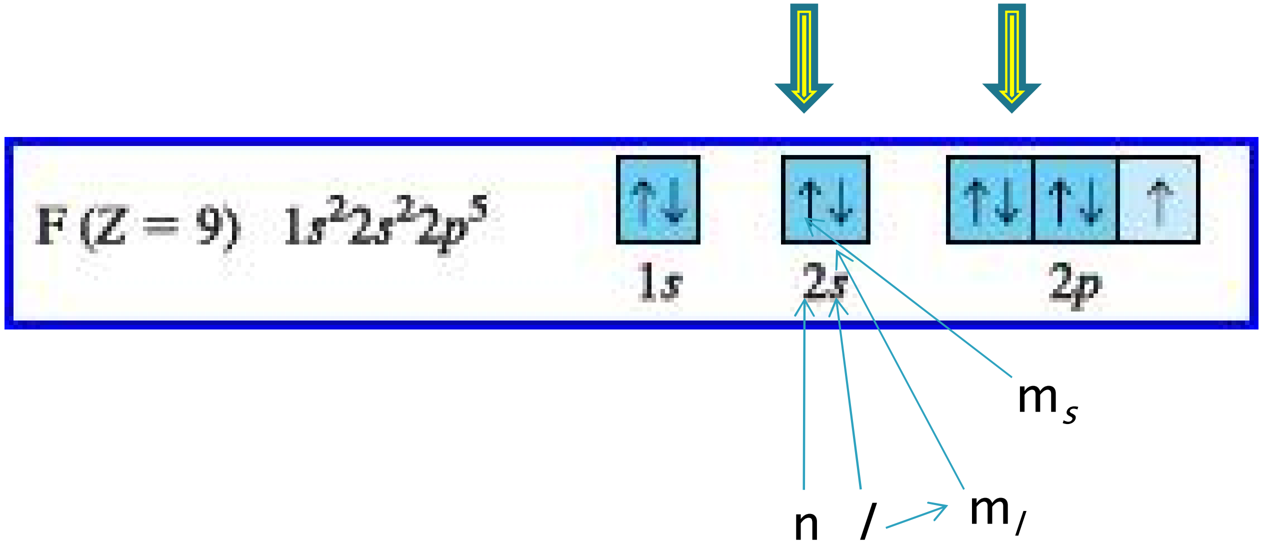
Ne

D. 훈트의 규칙:
같은 에너지의 궤도가
비어 있으면 가장
낮은 에너지의 전자배치
는 평행한 스핀을 갖는
홀전자(unpaired electron
수가 최대를 갖는다

예제 8.1 궤도 그림에서 양자수를 결정하기

문제 F 원자의 세 번째와 여덟 번째 전자의 양자수 집합들을 써라.

계획: 궤도 그림을 보고 주목하는 전자를 헤아려 그 준위(n), 부준위(l), 궤도(m_l), 스핀(m_s) 값들을 쓴다.



풀이: 세 번째 전자는 $2s$ 궤도에 있다. 위쪽 화살표는 $+\frac{1}{2}$의 스핀을 나타낸다.

$$n=2,\ l=0,\ m_l=0,\ m_s=+\frac{1}{2}$$

여덟 번째 전자는 $m_l=-1$로 지정된 첫 번째 $2p$ 궤도에 있고 아래 화살표를 갖는다.

$$n=2,\ l=1,\ m_l=-1,\ m_s=-\frac{1}{2}$$