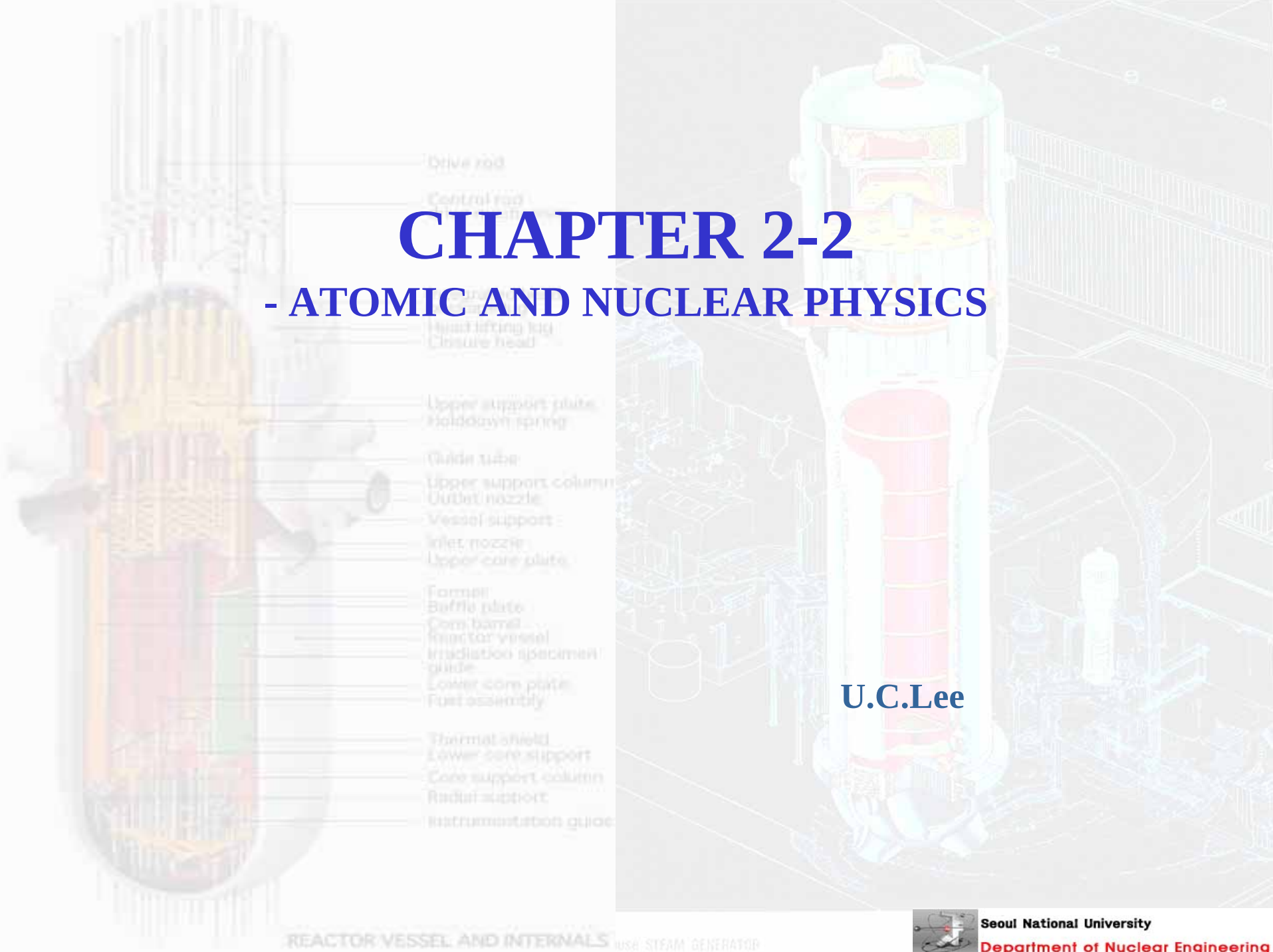


CHAPTER 2-2

- ATOMIC AND NUCLEAR PHYSICS

U.C.Lee

Seoul National University
Department of Nuclear Engineering

목 차

Chapter 2. Atomic and Nuclear Physics

- Atomic and nuclear structure
- Fundamental particles
  - Electron
  - Proton
  - Neutron
  - Photon
  - Classification of Nuclides
- Atomic and molecular weight
- Atomic and nuclear radii
  - 원자의 크기
  - 핵 반경
- Mass and energy
  - 결합에너지
  - Relativistic Velocities
- Particle wavelengths
  - Wavelength
- Excited states and radiation
  - 원자의 에너지 준위
  - 파동 역학 (Schrodinger의 wave mechanics)
  - X-ray 와 Bremsstrahlung
  - 원자 결합 (atomic bonding)
  - 핵 구조 및 결합력
  - 불안전한 원자핵과 방사선
- Nuclear stability and radioactive decay
  - Classification of Radioactive Decay
- Radioactivity
  - Radioactivity
- Nuclear Reaction
  - 핵반응이란
  - 반응의 Q value

2.7 Excited States and Radiation

➢ 원자의 에너지 준위

❑ 원자핵 주변을 돌고 있는 전자가 가질 수 있는 에너지 상태

❑ Nilse Bohr 이론

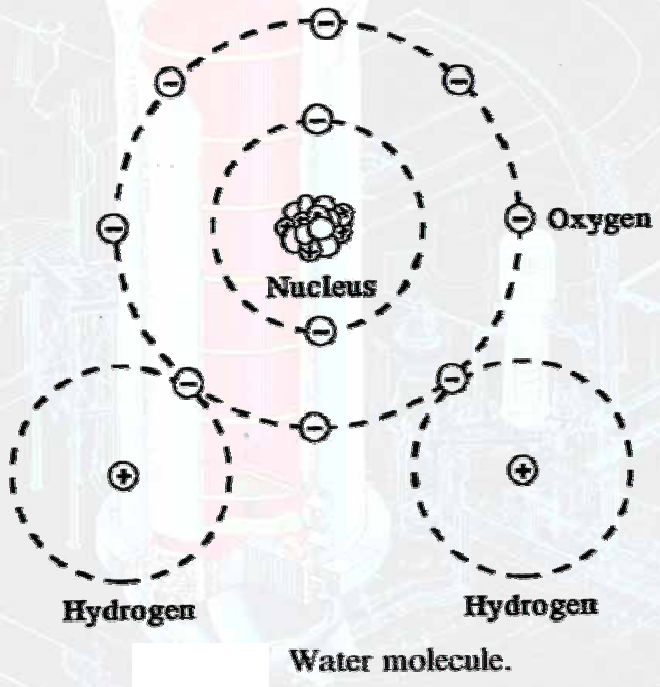
- 최초의 시도로서 원자 내 전자가 discrete한 에너지 상태에 있음을 밝혀 내고 이로부터 특정 파장의 X선 발생을 규명해 냄

- 보어의 수소원자 모형
  - 수소원자는 양전하를 띈 핵과 그 주위에 원 궤도를 도는 한 개의 전자로 구성
  - 원자핵 주위의 전자는 **어느 특정한 에너지 준위의 궤도**에서만 운행
  - 전자가 한 궤도에서 다음 궤도로 옮겨질 때는 에너지를 흡수하거나 방출하고, 두 궤도의 에너지 차는 흡수, 방출되는 에너지와 같음
  - 주어진 궤도에서 돌고 있는 전자의 각운동량 값은 일정함

2.7 Excited States and Radiation

❑ Bohr 모형

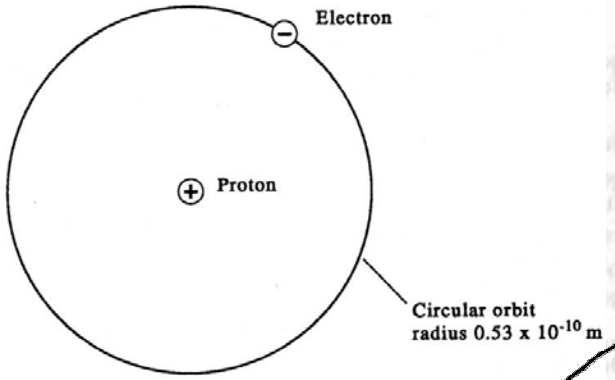
- 특정 에너지 준위는 전자 궤도 (전자껍질(electron shell))를 말함
- 원자핵에 가까운 껍질을 K전자 껍질(n=1), 핵에서 멀어질수록 L,M,N … (또는 n=2, n=3, n=4 …)
  - K,L,M 등은 분광학적 기호
  - n의 값 1,2,3등의 정수를 주양자수라고 함
- 전자 껍질의 에너지 준위는 K<L<M 순으로 증가
- 각 껍질의 전자수 = $2n^2$



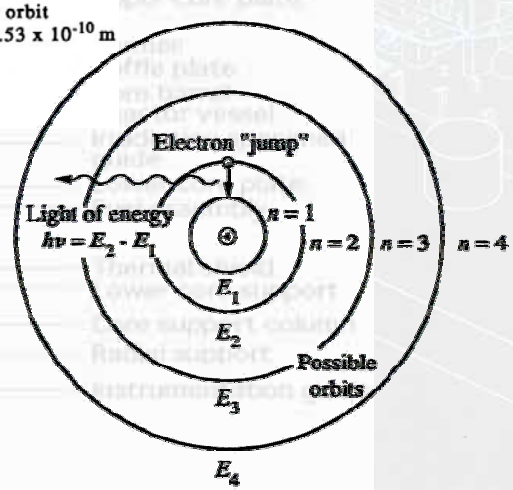
2.7 Excited States and Radiation

❑ 원자와 빛

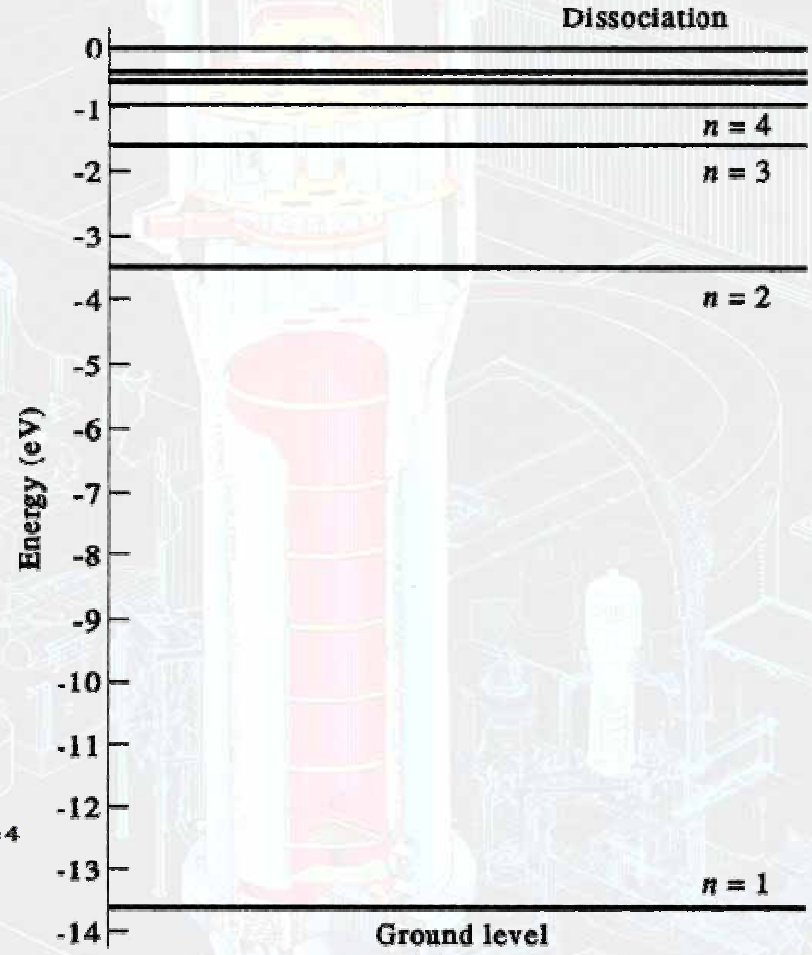
- 파동의 에너지 $E = h\nu$
- h : Planck's Constant. $6.63 \times 10^{-34}\ J \cdot s$



Hydrogen atom.



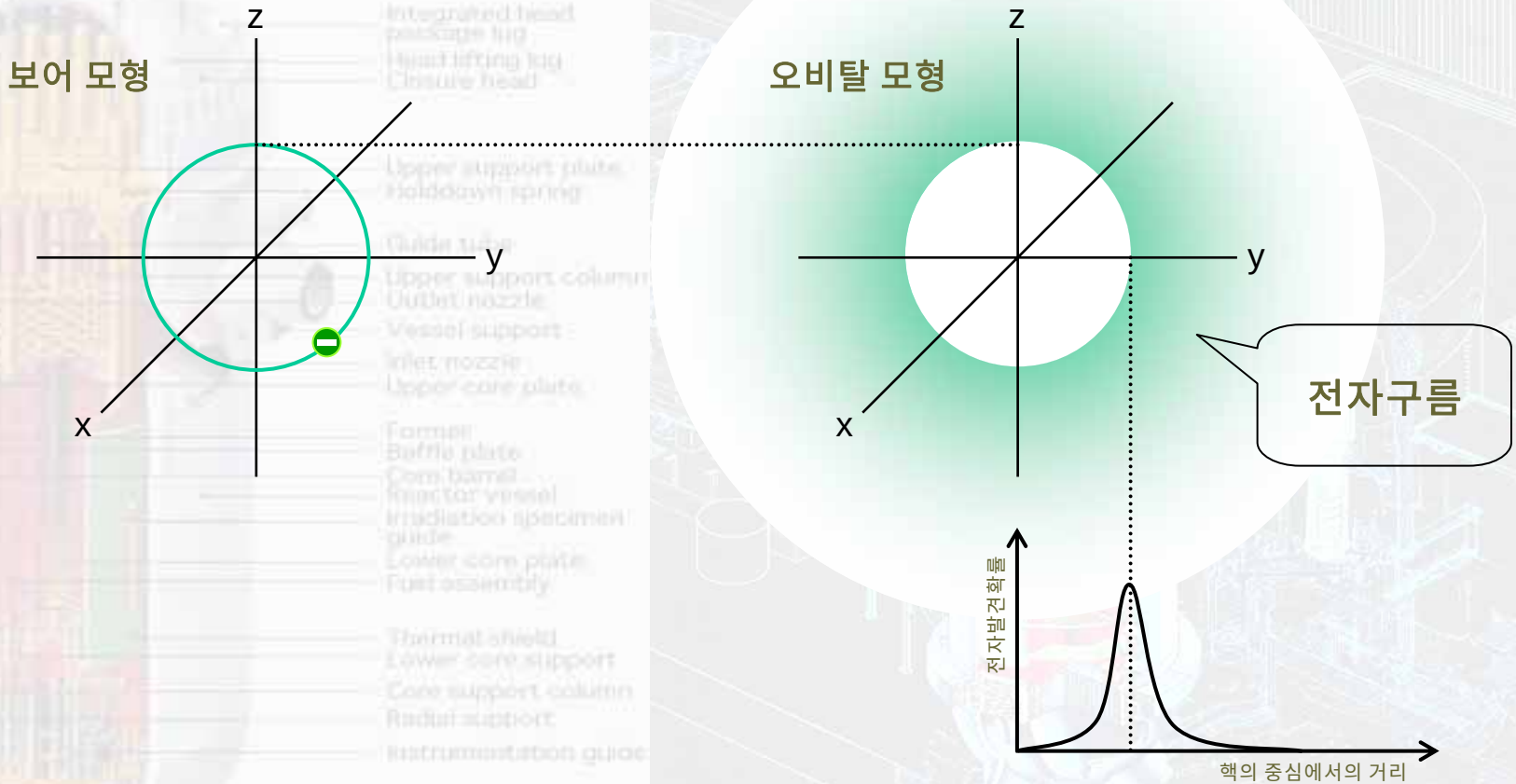
Electron orbits in hydrogen (Bohr theory).



Energy levels in hydrogen atom.

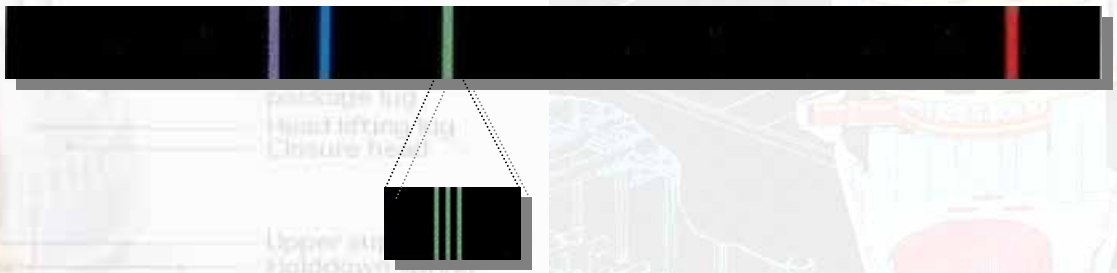
2.7 Excited States and Radiation

- 파동 역학 (Schrodinger의 wave mechanics)
  - 물질과 파동의 이중성을 바탕으로 전자의 위치를 **확률**을 통해 기술



2.7 Excited States and Radiation

- 분광학의 발달과 더불어 수소 선 스펙트럼이 미세한 다른 스펙트럼으로 다시 나누어짐을 발견



▷ 같은 껍질(shell)에 속해 있는 전자들이 2개 이상의 조금씩 다른 에너지 상태에 존재

- 전자의 에너지 상태는 4개의 양자수에 의해 완전 기술
  - **n** : principal quantum number (주양자수)
  - **l** : **a**ngular momentum quantum number (방위양자수)
  - **m** : magnetic orbital quantum number (자기양자수)
  - **s** : spin quantum number (스핀양자수)

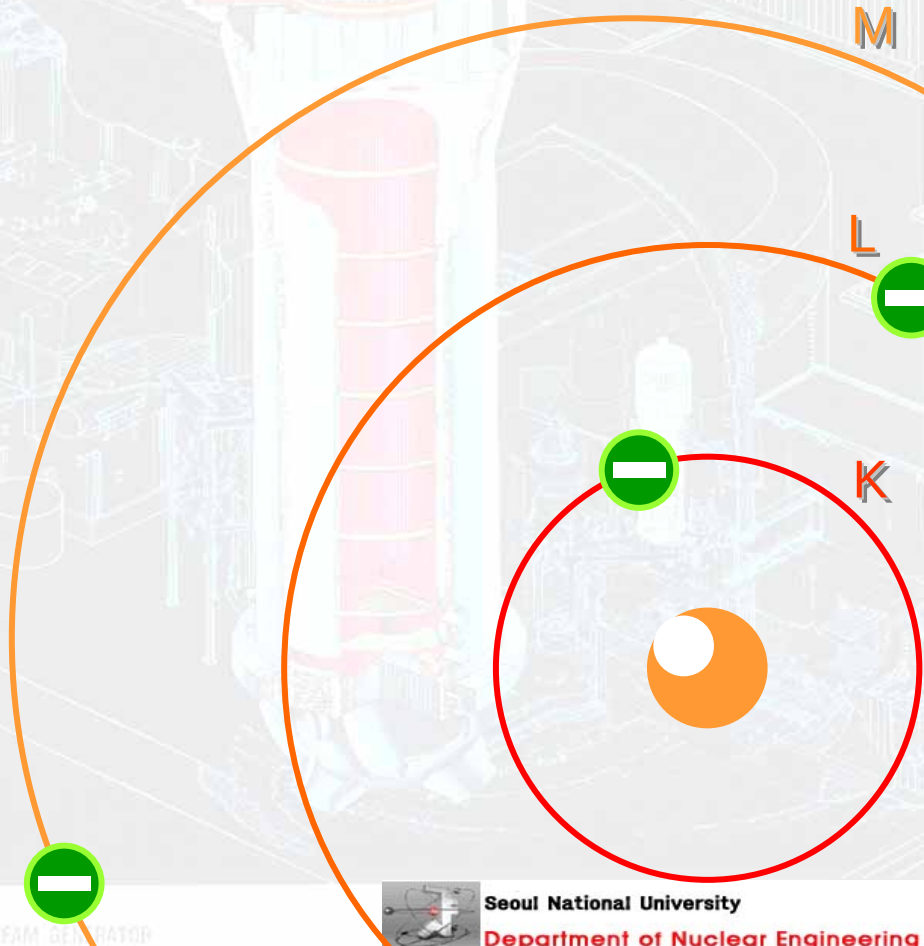
2.7 Excited States and Radiation

- 주양자수
  - 보어 모형에서 설명하는 특정에너지 준위로써, 전자껍질이라고 부름
  - 자연수를 그 값으로 가지며, K, L, M 등의 분광학적 기호로 나타냄

- 방위양자수
  - 주양자수의 부껍질(subshell)
  - 0, 1, 2 … (n - 1)의 정수값을 가짐

- 자기양자수
  - 방위양자수의 부껍질(subshell)
  - -l 에서 +l 사이의 정수값을 가짐

- 스핀양자수
  - 전자의 회전방향에 따라 결정
  - +1/2(↑), - 1/2(↓) 중 하나의 값을 가짐



2.7 Excited States and Radiation

➢ X-ray 와 Bremsstrahlung

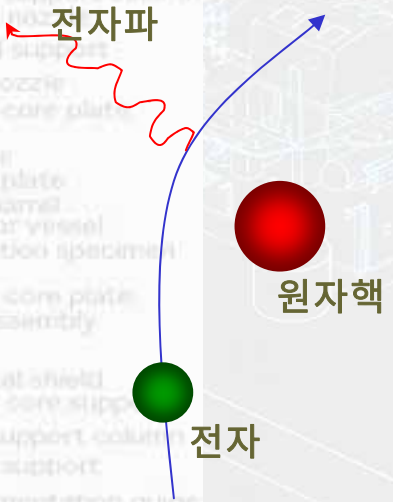
❑ X-ray

- 고속전자의 흐름을 물질에 충돌시켰을 때 생기는 파장이 짧은 전자기파
- 원자 내 전자의 에너지 준위가 달라질 때 발생
- 즉 전자가 고 에너지 준위에서 저 에너지 준위로 천이할 때 발생하는 Electro Magnetic radiation
- Discrete spectrum
- Energetic electrons이 물질과 작용할 때

2.7 Excited States and Radiation

❑ Bremsstrahlung (제동복사)

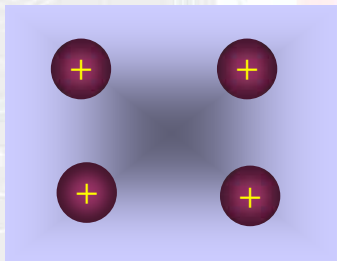
- Continuous spectrum
- 하전입자가 주변의 강한 전기장에 의해서 가속도를 받았을 때 발생하는 전자기파.
- 가벼운 하전입자 일수록, 하전입자가 지나가는 원자핵이 무거울수록 제동복사가 크게 일어남.



2.7 Excited States and Radiation

➢ 원자 결합 (atomic bonding)

- ❑ Condensed matter, 특히 고체의 rigidity는 원자 상호간을 결속시키는 힘에 의해 결정되며 일반적으로 다음 4가지 결속 형태를 가짐
  - Ionic bonding (이온 결합) : exchange of electrons where the donor becomes positively charged and recipient is negatively charged
    - Ex) MgO, NaCl
  - Covalent bonding (공유 결합) : electrons shared by the bound nuclei
    - Ex) H_2
  - Metallic bonding (금속 결합) : valance electrons are free to move through the lattice
    - Electron cloud
    - 전자와 +이온 사이에 인력이 작용



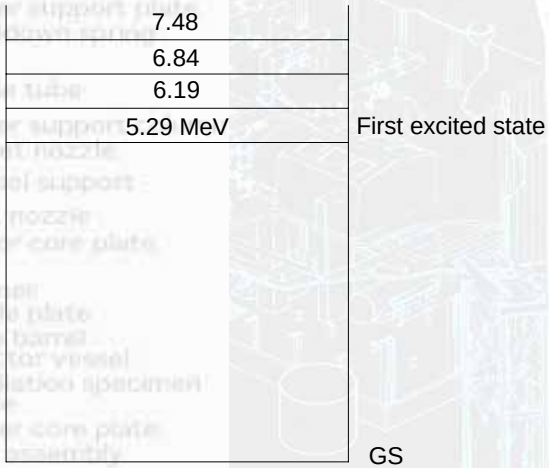
  - Van der Waals bond : Weak bond due to the non-symmetric distribution of electrons in atoms or molecules (dipole-dipole interaction)
    - He, Ar (inert gas)

2.7 Excited States and Radiation

➢ 핵 구조 및 결합력

❑ 원자핵 내 결합력에 대한 정확한 성질은 규명되어 있지 않음

- 명백한 것은 양성자 간 반발력보다는 단거리성 (short-ranged)인력이 작용하고 있고, 힘은 핵자를 한 덩어리로 합쳐 버리는 성질의 것은 아니다라는 것
- 원자핵 내 양성자나 중성자도 원자 내 전자와 마찬가지로 discrete한 에너지 상태로 존재하며, 이들도 또한 각기 4개의 양자수 (즉, 양성자는 양성자대로, 중성자는 중성자대로)에 의해 특정 에너지 상태를 나타낼 수 있음



O^{15} 원자핵의 에너지 준위

- 감마선 : 고준위에서 저준위로의 원자핵 상태의 천이가 생겨 날 때 발생하는 EM wave(전자파)
- Level width : neutron width or radiation width

2.7 Excited States and Radiation

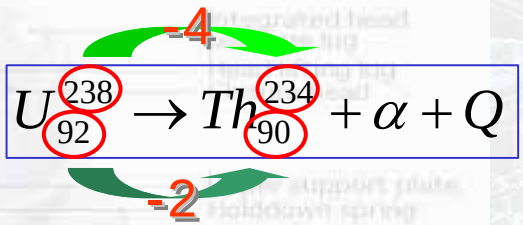
- 불안전한 원자핵과 방사선
  - 원자핵(혹은 동위원소)은 핵 내 중성자 및 양성자의 수 및 그 비율에 따라서 안정하기도 하고 불안정하기도 함
  - 불안정한 동위원소는 양성자에 비해 많거나 적은 수의 중성자를 가지고 있음
    - 동위원소는 영구히 불안정한 상태에 있을 수 없으며 실제로는 방사선(알파,베타,감마선)을 내면서 안정한 원자핵종으로 천이해 감
  - 동위원소는 천연에 존재하기도 하고 연구실에서 만들어지기도 함
    - 현 104개의 기지의 원소 중 80개 원소는 적어도 하나의 안정한 동위원소를 가짐
    - 현재까지 279개 가량의 안정한 동위원소가 발견됨
  - 불안정한 동위원소는 방사성 동위원소라 불리며 이들이 안정핵종으로 천이하는 방법은 여러 가지가 있으며 특정 천이 유형에 따라 원자번호의 변화가 수반될 수 있음
  - 방사능(radioactivity)은 방사성 동위원소의 자발적인 천이(spontaneous disintegration)를 말함
    - 개개의 방사성 동위원소가 방사천이 중 방출하는 방사선의 종류와 방사선이 갖는 에너지는 상이함

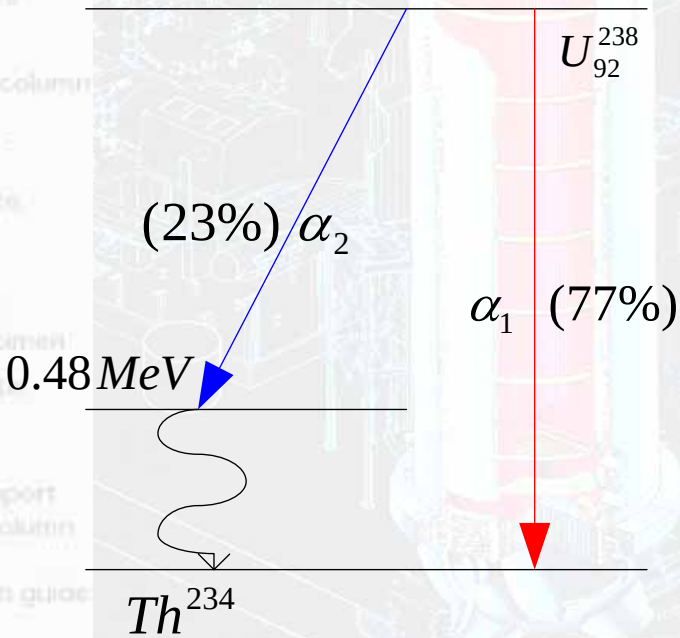
2.8 Radioactive Decay

➢ Classification of Radioactive Decay

❑ Alpha Decay

- Alpha-ray는 2개의 양자와 2개의 중성자를 가진 양전기를 띈 He 원자핵
- 원래의 핵종보다 원자번호가 2, 질량수가 4만큼 감소
- Ex)

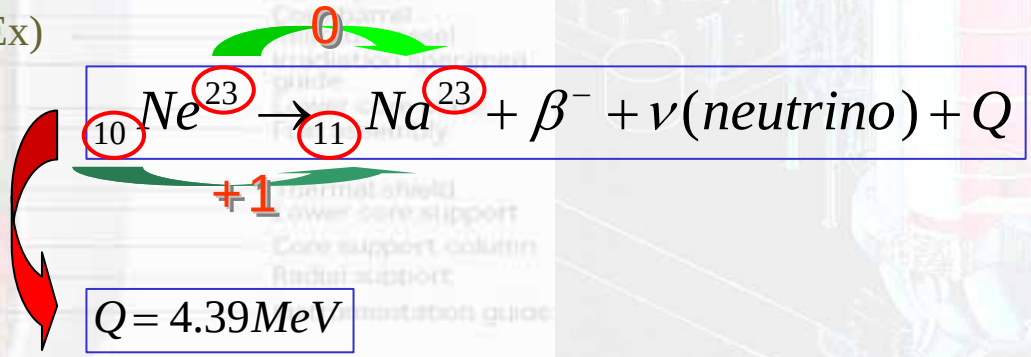




2.8 Radioactive Decay

❑ β^- Decay

- β^- Deacy는 원자핵의 방사붕괴에서 가장 많이 발생
  - β^- 입자는 하전량이 양자의 하전량과 같으나 음의 전하를 띠고 있으며 질량수는 제로임
- 중성인 중성자에서 (-) 전하가 방출되고, 이 중성자는 양성자로 전환됨
- 모핵에 비하여 중성자수가 1개 적고 양자수가 1개 많은 자핵이 생성됨
- 따라서 **원자번호 1증가, 질량수 불변의 동위원소로 변함**
- Ex)



2.8 Radioactive Decay

❑ β^+ Decay

- 원자핵에서 양전자(β^+)가 방출되면 양성자 (+) 전하 1개를 잃게 되어 양성자 1개가 중성자로 전환
- 따라서 **양성자를 방출하면 원자번호는 1이 감소하고 , 질량수는 변하지 않는 동위원소로 변함**
- Ex)

$$C^{11}_{6} \rightarrow B^{11}_{5} + \beta^{+}_{0} + \nu(neutrino) + Q$$

$$Q = 0.960$$

2.8 Radioactive Decay

❑ Orbital Electron Capture (EC) (전자 포획)

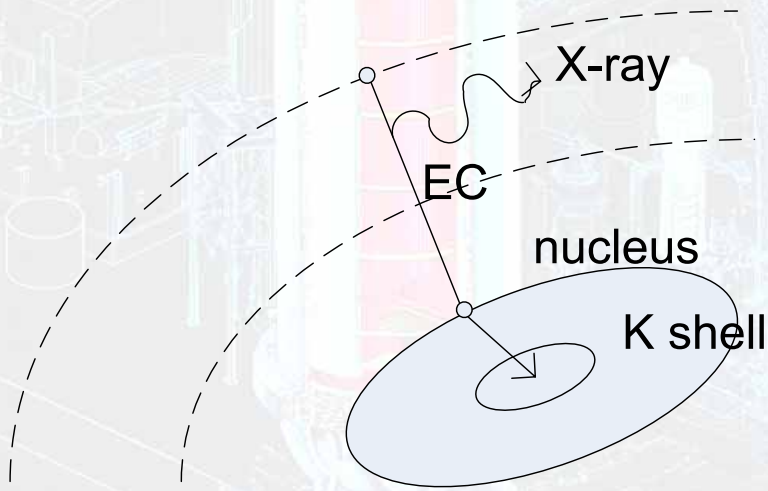
- 전자포획 반응이 일어나면 전자의 (-) 전하가 양성자의 (+) 전하를 중화시킴
- 따라서 **원자 번호 1이 감소하고, 질량수는 변하지 않는 동위 원소로 변함**

0

$$_{20}^{41}Ca + \beta^{-} \rightarrow {}_{19}^{41}K + \nu(neutrino) + Q$$

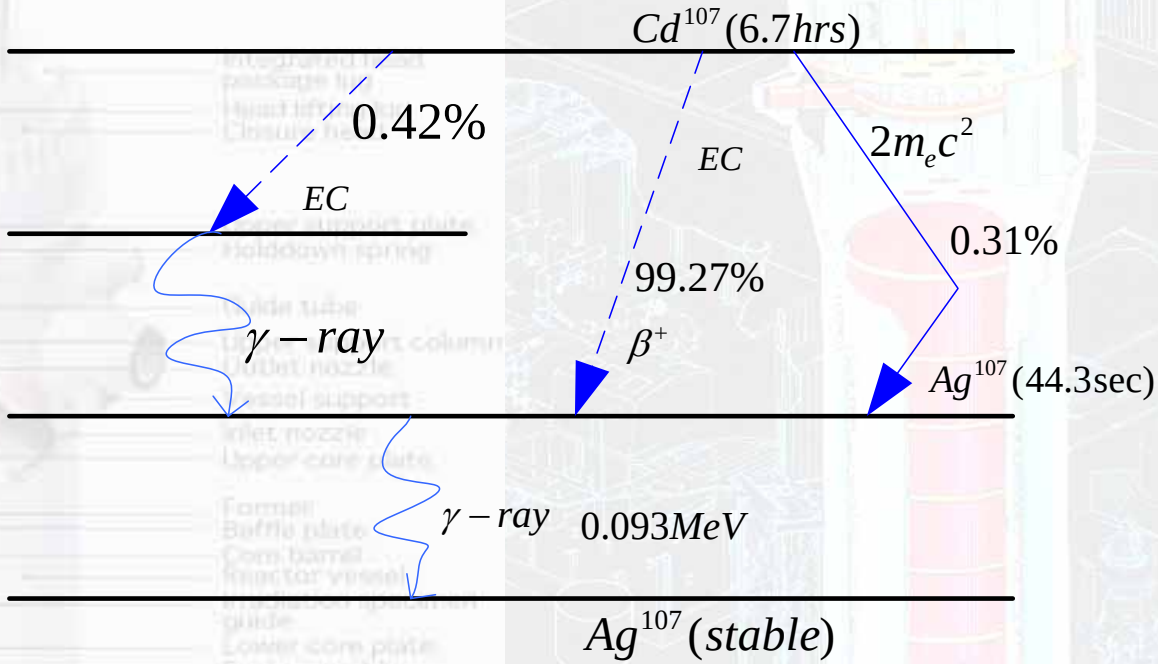
-1

$$Q = 0.426MeV$$



2.8 Radioactive Decay

- Complex decay scheme
  - EC & β^+-decay 등 2가지 이상의 decay가 동시에 일어날 경우
  - Ex)



- Neutron emission
  - 중성자를 방출
  - **원자번호는 변화없으나 질량수가 1 감소**
  - Ex)

$$ {}_{53}I^{137} \xrightarrow{\beta^-} {}_{54}Xe^{137} \xrightarrow{n} {}_{54}Xe^{136} $$

2.8 Radioactive Decay

➢ 붕괴방식 및 방사선 방출 형태 정리

❑ 붕괴 방식

기 호	붕괴방식	기 호	붕괴방식
α	α 붕괴 (α -decay)	γ	γ 선 방출 (γ -ray emission)
β^-	β^- 붕괴 (β^--decay)	E	전자 포획(electron capture)
β^+	β^+ 붕괴 (β^+-decay)	IT	핵이성체 전환(Isomeric Transition)

❑ 방사선 방출 형태

기 호	방출 방사선	기 호	방출방사선
α	α 입자 (α particle)	p	양성자 (Proton)
β^-	β^- 입자 (negatron)	D	지발 방사선(delayed radiation)
β^+	β^+ 붕괴 (β^+decay)	e^-	전환 전자 (conversion electron)
γ	γ 선 (γ -ray)	E	붕괴 에너지 (disintegration energy)
n	중성자 (neutron)		

2.8 Radioactive Decay

➢ 방사성동위원소의 붕괴

Isotope	Half-life	Radiation (type, MeV)	Strontium-90	29.1 y	β, 0.546
Neutron	614 s	β, 0.782	Technetium-99m	6.01 h	β, 0.142
Tritium(H-3)	12.33 y	β, 0.0186	Iodine-129	1.7×10^7 y	β, 0.15
Carbon-14	5715 y	β, 156	Iodine-131	8.021 d	β, 0.606 γ, 0.284, 0.364
Nitrogen-16	7.13 s	β, 4.72 γ, 6.129	Xenon-135	9.10 h	β, 0.91 γ, 0.250
Sodium-24	14.96 h	β, 1.389 γ, 1.369, 2.754	Cesium-137	30.2 y	β, 0.514 γ, 0.662
Phosphorus-32	14.28 d	β, 1.710	Radon-222	3.823 d	α, 5.490 γ, 0.510
Potassium-40	1.25×10^9 y	β, 1.312	Radium-226	1599 y	α, 4.870
Argon-41	1.82 h	β, 1.198 γ, 1.294	Uranium-235	7.04×10^8 y	α, 4.152
Cobalt-60	5.271 y	β, 0.315 γ, 1.173, 1.332	Uranium-238	4.47×10^9 y	α, 4.040
Krypton-85	10.73 y	β, 0.15 γ, 0.514	Plutonium-239	2.410×10^4 y	α, 5.055

2.9 Radioactivity

- **Radioactivity**
  - 붕괴상수(λ) ≡ 한 개의 방사성 동위원소가 단위시간당 붕괴할 확률. $(\sec^{-1})$
  - 방사성 물질의 붕괴율

$$n(t+dt)-n(t)=-\lambda n(t)\Delta t$$

  - 정리하면,

$$\frac{dn(t)}{dt}=-\lambda n(t)$$

  - 만일 g(t)개의 방사성 동위원소가 단위시간당 생겨나면,

$$\frac{dn(t)}{dt}=g(t)-\lambda n(t)$$

  - 식의 해는,

$$n(t)=n_0e^{-\lambda t}$$

$e^{-\lambda t}$: 시간 t까지 방사붕괴하지 않는 핵종의 비율(확률)
$\lambda e^{-\lambda t}dt$: 시간 t와 t+dt 사이에 붕괴할 확률
$\lambda n(t)$: 시간 t에서 1초 동안에 방사 천이하는 원자핵의 수 (Activity라고 함)

2.9 Radioactivity

❑ 반감기

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

❑ 평균 수명

$$\tilde{t} = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{n_0}\int_0^\infty t\lambda n(t)dt = \int_0^\infty t\lambda e^{-\lambda t}dt$$

❑ 방사능(Activity, intensity of source)

$$\lambda n(t)$$

단위: 1 Curie = 3.7 x 10^{10} d/s

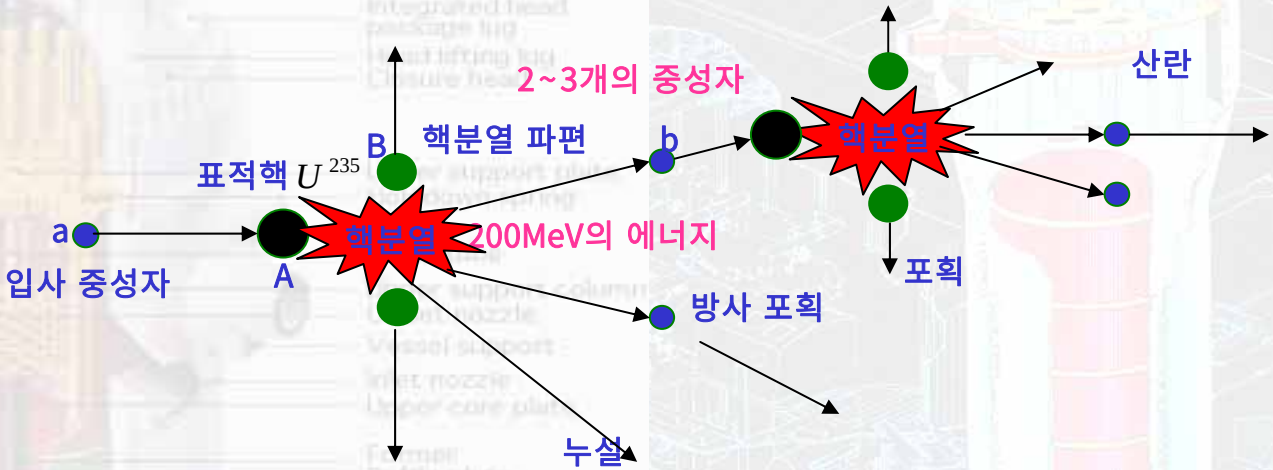
1 mCi = 10^{-3} Ci

$1\ \mu Ci = 10^{-6} Ci$

2.10 Nuclear Reactions

➢ 핵반응

❑ 두 개의 핵입자 (nuclear particles)가 작용(충돌)하여 두 개 이상의 핵종 혹은 감마선을 생성할 때 핵반응이 일어났다고 함



a+A->B+b

핵분열 연쇄반응의 예시

❑ 반응의 Q value

$$Q = M_a + M_A - (M_b + M_B) \qquad M : nuclear \ \ mass$$
$$= T_b + T_B - (T_a + T_B) \qquad T : kinetic \ \ energy$$

$Q > 0$ 발열 반응(exothermic reaction)

$Q < 0$ 흡열 반응(endothermic reaction)