

Ⅲ. 放射線 物理

Radiation Physics

연세대학교 치과대학 치과방사선학교실

김 한 평

방사선과학의 기본적인 4 가지 영역을 진단방사선학, 방사선치료학, 핵의학, 및 방사선안전물리학으로 볼 수 있으며 최근에 와서는 이들 각기의 영역은 상당한 발전을 거듭하여 각 분야별로 세분화된 학문적계통을 이미 수립하였다고 본다. 그러나 필자는 이들 각 분야에 공통적으로 이용되며 임상에서의 응용에 필요한 기초 방사선물리학의 개념에 대하여 주요한 항목중 일부를 기술하고자 한다. 그 내용을 2 가지로 분류하여 방사선및 방사선장발생장치와 방사선과 물질과의 상호작용에 관한 것이다.

I. 방사선및 방사선장 발생장치(MACHINES FOR PRODUCING RADIATION AND RADIATION FIELD)

방사선이 1895년 렌트겐교수에 의해 처음으로 관찰되었을 그 당시, 그는 가스관을 사용한 음극선의 특성에 관하여 연구중이었다. 형광작용과 사진작용을 할 수 있으며 빛이 투과하지 못하는 물체를 투과할 수 있는 성질을 가진 이 방사선을 그 당시에 X 선이라고 명명했다. 오늘날에 와서는 X 선이란 단지 전자기방사선 (electromagnetic radiation) 의 한가지 형태라는 것이 알려져 있다. 여기서는 X-ray beam을 발생시키는데 필요한 전기적장치를 다루고 X-ray발생에 연관된 물리적인 측면은 다음항에서 다루고자 한다.

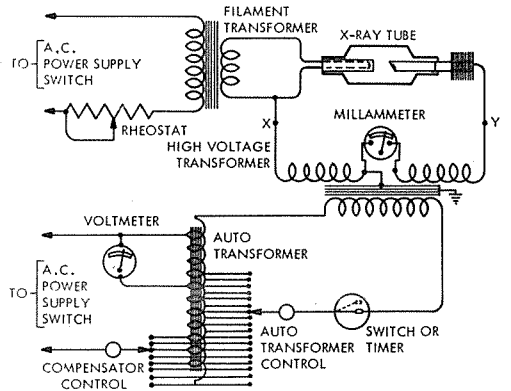
Rutherford의 실험에 의해서 원자의 핵속에 양전하를 띤 모든 입자들이 들어 있으며 알파입자들연구하므로서 nucleon의 결합에너지가 수 MeV이상

되는 것을 알아냈다. 그러므로 subnuclear구조물내에 어떤 영향력을 미치기 위해서는 극히 높은 에너지를 가진 입자가 필요해지는데 이를 많은 경제적, 시간적인 노력을 기울여 각국에서 가속장치 (accelerator)를 만들어냄으로써 가능하여졌다. 여기서 또한 가속장치의 몇가지 전형적인 유형을 고찰해 보고자 한다.

1) Conventional X-ray Machines

현재쓰이고 있는 X 선기체는 여러가지 전자장치의 복합체로써, 여러개의 safeguards, stabilizing circuits, 및 automatic control circuits가 복합되어 있다.

기본적인 X 선 기계회로는 도해 1 - 1 과 같으며



도해 1 - 1. 전형적인 치과용 X 선기체의 회로도 : X 선발생을 위한 자기 정류회로를 가지고 있다.

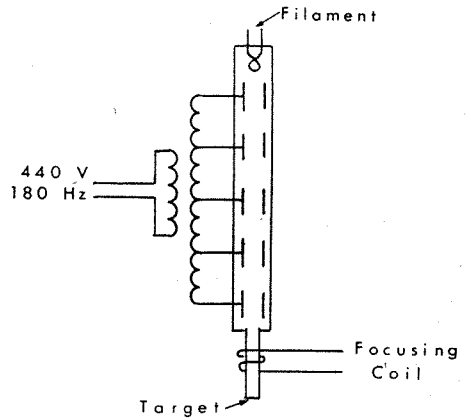
이는 크게 2 가지로 구분된다. 즉 고압부분에서는 X 선관(X-ray tube) 내의 전자를 가속시키는데 필요한 고전위 (high potential)를 공급하고 저압부분에서는 X-선관내의 필라멘트에 쓰이는 저압 전류를 공급한다. 고압변압기의 기능은 원래의 입력전압보다 약 500배 이상을 승압시킨다. 그 전위차는 전자를 가속시켜서 우리가 필요로 하는 X 선을 발생시키는 역할을 하게된다. 현재 치과진료실에서 사용되고 있는 간편한 형태의 X선기계장치는 자기정류 (self-rectified) 형식인데, 이때의 진공관전류는 양극에 양전위가 될때에만, 즉 교류전압의 변화에 따른 시간상의 절반동안만 흐른다. 흔히 쓰이는 시간조정기(timer)는 단순히 synchronous clock으로 되어 있으나 이것은 $\frac{1}{10}$ 초까지의 짧은 노출이 가능하며 일반 진단이나 치료용으로 충분하다. 보다 짧은 노출을 위해서는 impulse timer가 자주 사용된다. 이 장치는 X 선관에 걸리는 전위의 pulse 수를 세어서 미리 조정된 숫자만큼의 pulse동안만 노출이 되며 1/120초까지 가능하다. 더욱 진보된 것으로 진단용 X 선장치에 부착사용할 수 있는 phototimer가 있는데 이는 photoelectric cell을 증감판에 조사된 X선에 의해 발생하는 빛에 작용시켜서 어느 적정량의 X 선이 조사되면 자동으로 노출이 정지되게끔 고안된 장치이다. 이와 유사한 응용방법으로 ionizing chamber가 이용될 수도 있다.

2) High energy X-ray and Electron Beam generator.

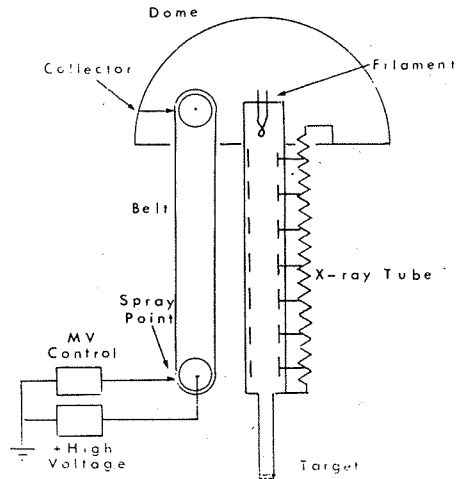
일반변압기로 발생시킬 수 있는 승압의 배율에는 한도가 있기 마련인데 즉 절연성이 실제적인 문제가 된다. 그래서 변압기를 사용한 승압방법은 250 KVP 이상에서는 별로 사용되지 않는다. 그러나 높은 에너지 및 더욱 센 투과력을 가진 X 선속 (beam) 이 치료용으로 필요하므로써 이에 대한 고압이 몇 가지 형태로 이루어졌다. 이러한 기계장치들 통괄하여 high energy electron accelerator 라고 하며 자에 에너지를 부여시키는 방법의 물리적 원리에 따라 그 형태가 달라진다.

Resonant Transformer Units;

resonant transformer X-ray 장치의 도해는 1-2 와 같다. 전기적에너지는 magnetic field of solenoid나 capacitor의 electric field안에 저장될 수 있으며 이때 capacitor 와 coil이 평행하게 연결되면, 그 결합은 어떤 특정한 주파수에서의 공명현상을 나타낸다. 이 주파수에서 그 에너지는 magnetic field와 electric field사이에서 주기적으로 전환된다.



도해 1-2. Resonance transformer의 원리를 이용한 전자가속장치의 도형.



도해 1-3. Van de Graaff고압발생장치 및 전자 가속 장치.

이 현상을 oscillation이라 하며 공명주파수와 꼭 일치할때의 에너지의 전달은 매우 효과적이고 증폭되는데, 이로써 oscillatory potential이 매우 높아진다. 이 장치의 tank안에는 절연을 위하여 약 4 기압의 freon gas가 채워져 있으며, X 선발생을 위한 peak energy는 1 MeV내지 2 MeV에 해당하도록 설계되어 있다.

Electrostatic Accelerators;

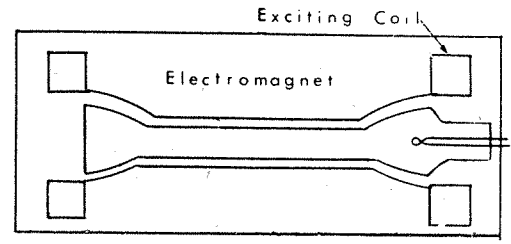
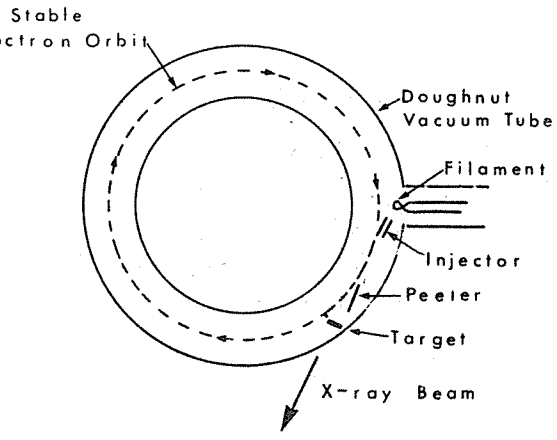
이는 통상 Van de Graff장치라고도 하며 핵연구를 위하여 positive ion을 가속시킬때 널리 사용된다. 의료장치에서는 X 선발생용 전자장치를 주로 이용하며 전형적인 기계는 2 MV일때 250μ A의 beam current로 작동한다. 이 장치의 도해는 1-3 과

□ 특집 ⑤ : 치과방사선 촬영과 방어 □

같다. 이 장치에는 절연체로된 무한belt가 밑부분의 모터와 윗부분의 pulley사이에 설치되어 있다. 보조동력공급장치에 의한 전자가 밑부분의 벨트위에 spray된다. 이 전자들은 반원형의 dome 내부에 도달될때까지 벨트에 의해서 운반된다 이런 방법에 의해 potentials은 6 million volts까지 도달되나 실제적으로는 이 기계의 고압절연성및 실용적인 부피가 문제가 된다. 절연gas로서 CO₂ 및 N₂를 1 : 4의 비율로 25기압의 압력으로 채워졌을때, 의료용 2 MV짜리 장치는 실제 3feet 정도의 직경에 8 feet 정도의 높이를 갖는다.

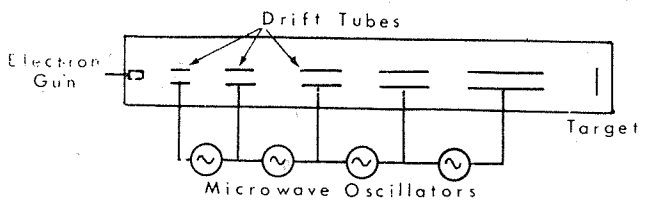
The Betatron;

아직까지도 보다 높은 전자에너지를 얻기 위해서는 betatron이라는 장치가 사용되는데 그 도해는 1-4와 같다. 이미 알고 있는바와 같이 changing

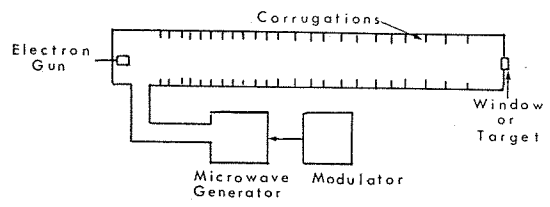


도해 1-4. Betatron의 작동을 나타내는 도형.

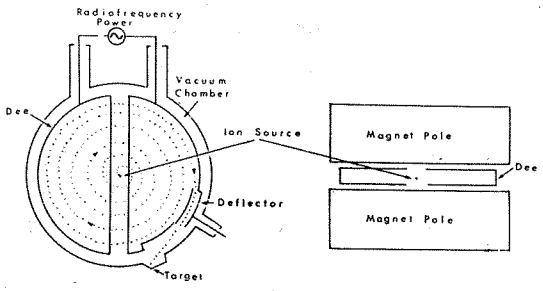
magnetic field안에 있는 전자는 circular direction으로 가속되는데 이러한 물리적사실은 변압기의 작동원리를 설명할 수 있게하여 주며 또한 betatron을 설계하는데 응용되었다. betatron 같은 cyclic machine에서는 고압절연체가 문제되지 않는다. 전자는 각 orbital cycle에서 단지 90electron Volt의 에너지만을 얻지만 수십만바퀴를 회전하는 가운데 35MeV라는 높은 에너지를 얻을수 있다.



도해 1-5. multiple cavity linear electron accelerator의 도형



도해 1-6. Travelling wave linear electron accelerator.



도해 1-7. Cyclotron의 작동원리를 나타낸 도형.

Linear Accelerator;

이 장치는 현재 방사선치료에서 널리이용되고 있는 전자가속장치이며 설계에 따라 몇가지 유형으로 나뉜다. 이중 multiple cavity type이 이해하기 가장 쉽다. 도해 1-5에서 볼수 있듯이 일련의 hollow tubes가 accelerator tube안에 장치되어 있고 그 사이를 전자가 electron source로부터 target 까지 통과한다. 그동안 alternate rings는 very high frequency oscillator에 의해 생성된 전압에 의해 작동된다.

linear accelerator의 또다른 주요한 원리는 microwave generator 및 modulator로써 그 도해는 1-6과 같다. linear accelerator도 다른것과 마찬가지로 electron beam therapy를 위해서 target를 제거할 수도 있다. 의료용으로서는 대개 4 내지 8 MeV영역이 사용되지만 최고 50MeV정도 이상의 electron energy를 발생시킬 수 있다.

기타 입자가속기; (Other Particle accelerators)

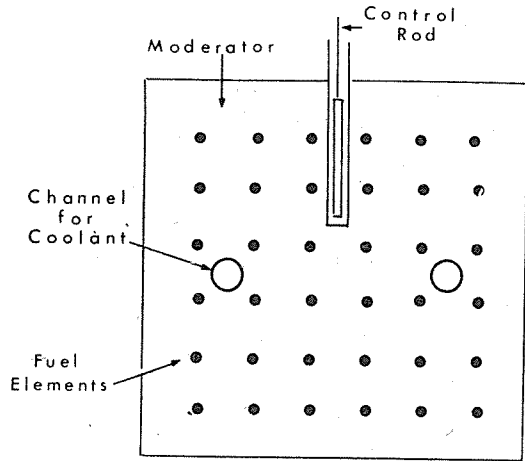
heavy particle accelerator의 한 유형으로 cyclotron의 도해를 1-7에서 볼 수 있다. vacuum chamber가 electromagnetic poles 가운데 위치하며 이 장치에서 magnetic field는 일정하게 유지된다. alternating potential이 dees라고 불리는 두개의 구조물사이에 걸리게 된다. particle이 이 자장내에 존재하게 되면 원궤도를 이루며 회전운동하게 되는데 이때 alternating potential의 frequency가 한쪽 dee에서 다른쪽 dee로 바뀌면서 입자는 에너지의 증가를 얻게 된다. 입자에너지가 증가함에 따라 원형궤도의 반경도 점차커져서 입자는 나선형 진로를 갖게된다. 이 입자가 수많은 바퀴를 회전하므로서 얻게되는 운동에너지는 중양성자(deuteron)의 경우 30MeV이상 높게 다다른다. cyclotrons은 의학에서 proton beam therapy를 위한 proton beam의 생성을 위해 사용되어 왔다. cyclotron에 있어서 에너지 증가의 제한은 입자가 에너지를 얻게 됨에 따라 질량이 늘어나게 된다는 점에 있다. 입자가 많은 에너지를 갖게 되면 원래의 궤도를 이탈하려는 성향이 생기게 되며, 요즘은 이런 기본적인 난점을 해결하여 synchrotron을 만들어서 많은 에너지를 가진 입자의 감소된 velocity를 상쇄시켜준다. 이렇게 하여 얻어진 매우 높은 에너지장치의 응용은 핵물리학연구에 이용되어 오고 있다.

3) The Nuclear Reactor:

원자로란 중성자의 steady radiation field를 생성시키기 위해 고안된 장치이다. 이미 알고있는 바와 같이 분열반응이 한개 이상의 중성자를 방출하는 까닭에 지속적인 분열과정이 이론상 가능하다는 것이다. 또한 분열은 매우 많은 량의 에너지를 방출하며 이것을 동력원으로 사용할 수도 있으나, 만약 분열반응이 제어를 받지 않게되면 그 에너지는 폭발력으로 방출될 수 있다. 여기서는 주로 조절되는 분열반응에 대하여 생각할 필요가 있으며 그 도해는 1-8과 같다. 원자로는 가끔 실험적으로 중양치료를 위한 neutron beam source로서 사용되어 왔으며, 의학분야에 사용되는 원칙은 주로 radionuclides를 만드는 데에 우선 기인된다.

4) Machines using Radionuclide for the Radiation source :

X선장치물에서는 전자와 타겟물질의 원자와의 사이에 생기는 상호작용(interaction)에 의해서 photon beam이 생성되었다. 그러나 photon beam은 또한 radioactive disintegration을 하므로써 gamma



도해 1-8. 원자로의 구조도형.

rays를 방출하는 radionuclides로 부터 얻어질 수도 있다. 우선 목적에 적합하게 radiation source로서 쓰일수 있으려면 radionuclides는 몇가지 조건에 적합해야 한다. 먼저 상당히 긴 half-life를 가지고 있어야 하며 알맞게 부피가 작아야 하며, 또한 suitable energy characteristics를 가지고 있어야 한다. 이러한 면에서 볼때 두가지 radionuclides가 치료목적에 적합함을 우선 알게되었는, 그것은 ⁶⁰Co와 ¹³⁷Cs이다.

Cobalt 60은 가장 흔히 사용되는 것중에 하나로서 5.3년의 반감기를 갖고 1.17과 1.33MeV의 에너지를 나타낸다. 이정도 에너지의 photons은 깊이 위치한 종양의 치료에 적합하다.

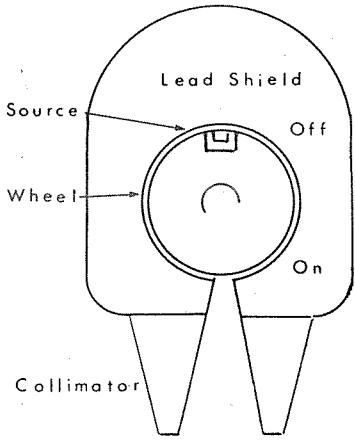
Cesium-137은 30년의 반감기 및 0.662MeV의 single gamma rays를 방출한다.

최근에는 진단용 영역에서의 장치물에 대한 photon source로서 radionuclides의 사용가능성에 대하여도 주의를 기울여 왔다.

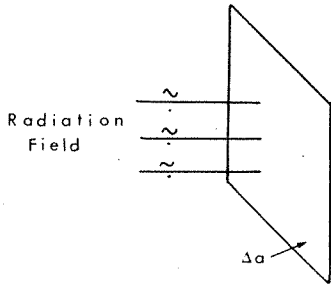
이러한 장치는 전기공급을 받을수 없는 야외작업시에 특히 유용할 것이다 전형적인 multicurie teletherapy apparatus의 단면도는 도해 1-9와 같다.

5) 방사선장(The Radiation Field)

이는 한지점에서 다른지점까지 공간을 통과하는 에너지의 전달을 서술하는데 사용되는 개념으로, 이것을 한눈에 가장 쉽게 이해할수 있는 상태로서는 방사선의 오직 한쪽 방향으로만 그리고 평행하게 진행하고 있을때이다. 이러한 예로서 X선장치에서발생된 X선속(bean)을 생각할 수 있는데, 이 경우△a



도해 1-9. Cobalt-60 teletherapy unit의 구조도형



도해 1-10. Δa 면적을 통과하는 방사선장의 개념을 나타내는 도형.

의 면적을 가진 한면이 X 선에 수직방향으로 위치한다면 그면을 통과하는 photons의 수를 정확하게 추산할 수 있게 된다(도해 1-10참조). 그러나 물론 방사선장은 한 방향에서만 생각되어질 수는 없으며 공간변화의 여러 경우를 응용하여야 한다.

II. 방사선과 물질과의 상호작용(Interaction of radiation with matter)

이미 언급했듯이 radiation field가 공간을 통한 에너지의 진행현상을 표시한 개념이라면, 또한 radiation field가 물질을 통과할때에 방사선장과 물질간에 상호작용이 야기될 수 있는데 이때 방사선장으로부터 물질로 에너지가 이동하게 된다. 여기서는 이러한 상호작용에 포함되어지는 물리적 원리들을 고찰해보고자 한다. 방사선학 분야에 있어서 모든 방사선효과는 방사선장이 물질에 에너지를 전달할 수 있다는 능력과 직접 연관된다. 예를 들면, 진단용 X 선장치로부터 나온 photon field는 환자의

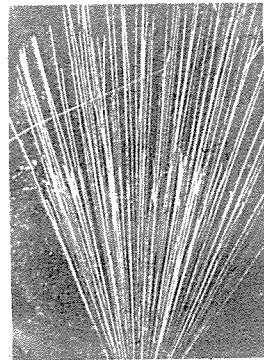
연조직보다 골조직에 보다 강력하게 상호작용하므로서 골밀부위의 photon field는 연조직밀 부위보다 약하다. 환자를 투과한 photon field는 photographic emulsion을 이루고 있는 화학물질로 에너지를 전달한다. 이로써 환자의 내부조직의 방사선사진이 형성되는 것이다.

방사선은 또한 생물학적효과를 나타내는데 방사선장으로부터 많은 에너지를 받게 되면 세포는 생식력보전에 위협을 받게되고, 이것이 방사선치료의 물리학적 기본이 된다.

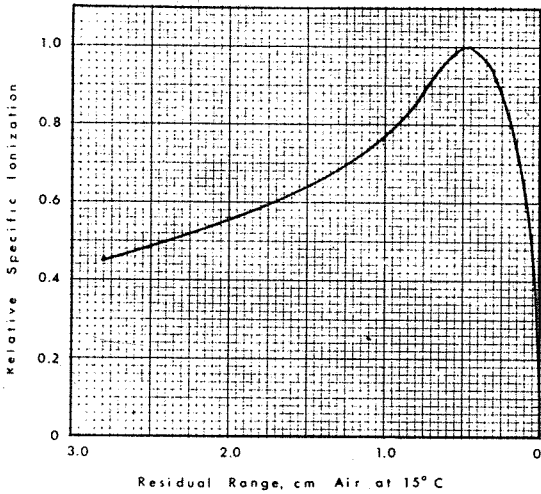
1) 무거운입자와 물질과의 상호작용

현재 물리학분야에서는 다수의 heavy particles이 발견되었으나 여기에서는 의학분야에 주요한 heavy particle으로써 proton과 alpha particle을 생각하여보자, 한에로써 알파입자와 물질과의 상호작용을 들 수 있는데 알파입자는 물질을 통과하면서 ionization과 excitation과정을 통하여 본래 가지고 있던 에너지를 점차 빼앗기게 된다. 도해 1-11에 thorium B and C의 혼합물로부터 방출된 알파입자에 의해 생성된 ionization의 사진을 볼 수 있다. 도해 1-12는 또한 Bragg curve라 불리우는데 여기서 볼때 높은 운동에너지를 가진 알파입자는 ionization을 야기시켜 그 자신의 에너지를 잃어가고 있으나 그비율은 갖고 있는 에너지에 정비례하지 않는다.

linear energy transfer(L)은 ΔE_L 을 거리 Δl 만큼을 통과하는데 charged particle에 의해 전달된 에너지라고 한다면 $L = \Delta E_L / \Delta l$ 이 된다 한에로써 1-12에서 보여주듯이 5.3MeV의 알파입자는 공기중에서 3.8cm의 평균한계치를 갖는데 이때의 공기중에서의 평균치 L_{air} 는 $5.3 \times 10^3 \text{keV} / 3.8 \times 10^4 \text{cm} =$



도해 1-11. 알파입자의 지나간 자국을 보여주는 cloud chamber의 사진



도해 1-12. A specific ionization curve for 5.30 MeV alpha particles from ^{210}Po .

$0.14 \text{ keV}/\mu\text{m}$, 또한 $L_{\text{water}} = 5.3 \times 10^{-3} \text{ keV}/24 \mu\text{m} = 210 \text{ keV}/\mu\text{m}$ 로 표시될 수 있다 ($R_{\text{water}} = 24 \mu\text{m}$).

2) 전자와 물질과의 상호작용

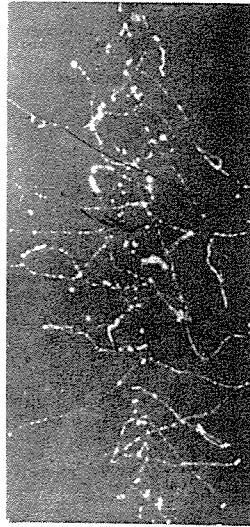
가속전자(swift electron)는 여러가지 장치로부터 얻어질 수 있는데, 예로서 monoenergetic electron beams은 oscilloscope와 같은 electron guns이나, 직류전압을 사용한 X 선관이나, 또는 방사성핵종(radionuclides)의 방사성 붕괴시에 전환전자로서, 또한 betatrons이나 linear accelerator와 같은 가속 장치등으로부터 얻어질 수 있다. 여기서는 가속전자와 물질간에 에너지를 전달하는데 관여되는 기초 물리개념에 대하여 고찰하고자하며, 에너지전달형태에는 (a)ionization and excitation of atoms in the matter, (b)the production of electromagnetic radiation의 두가지가 있을 수 있다.

이온화(IONIZATION)와 들뜸(EXCITATION)

가속전자에 의한 전자기장은 가속전자로부터 원자내전자로 에너지가 전달되는 원자내전자의 전자기장과 이에너지는 단지밀접하게 상호작용할 수 있다. 원자를 들뜨게 할 수도 있고, 또는 원자로부터전자를완전히 분리시켜서 이온쌍(ion pair)을 생성시킬 수도 있다.

경우에 따라서는 이차전자가 많은 에너지를 얻어서 계속적으로 이온화현상을 야기시킬 수도 있다. 이런 상태를 cloud chamber techigue에 의해서 볼수 있는데 1-13은 전자에 의해 생성된 이온화진로를 나타내는 cloud chamber의 사진이다. 실험적으로 전자속束(beam)과 흡수체(absorber)와의 관계를 볼것

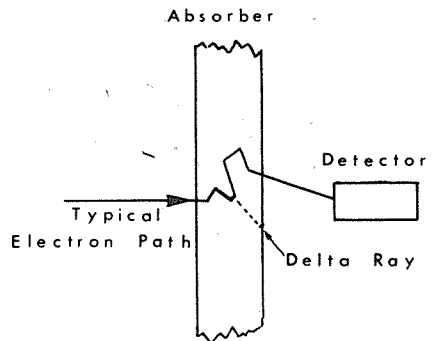
도해 1-13. A cloud chamber photograph of recoil electron tracks showing electrons behaving as particles.



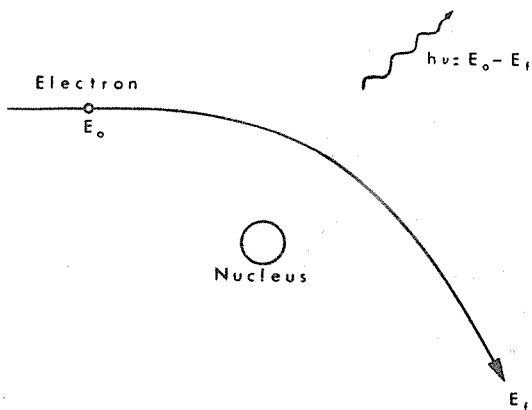
같은 흡수체 두께의 약 1.2배지 4배에 해당하는 총진로길이를 가지는 것을 도해1-14에서 볼 수 있으며 또한 단일이온화상호작용에서 소비되는 에너지의 양은 매우 크기때문에 알파입자의 transmission curve와 비교할때 급격히 떨어지는 attenuation curve를 나타낸다.

Production of X-rays

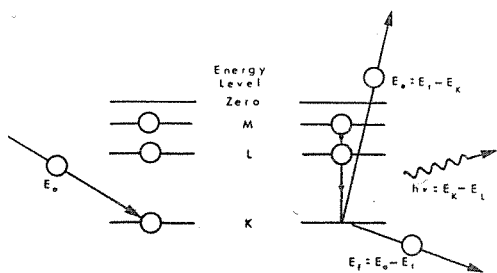
1895년 Roentgen은 타겟물질에 전자를 충돌시킴으로써 투과력을 가진 방사선을 발견하였다. 그후 그가 명명하였던 X-선이 상당히 짧은 파장을 가진 전자기 방사선이라고 정의되었다. X 선에는 bremsstrahlung과 characteristic X선의 두가지 categories로 나누어 생각할 수 있다. bremsstrahlung X-ray발생의 한계로써 Maxwell's general theory of electromagnetic field 들 들 수 있으며, 그는 에너지가 전자기장에 의해 공간을 통하여 전달될 수 있음을 이론적으로 제시하였다. 도해 1-15에



도해 1-14. 흡수물질을 통과하는 전자의 불규칙한 진행로를 나타내는 도해.



도해 1-15. A model to explain the generation of bremsstrahlung.



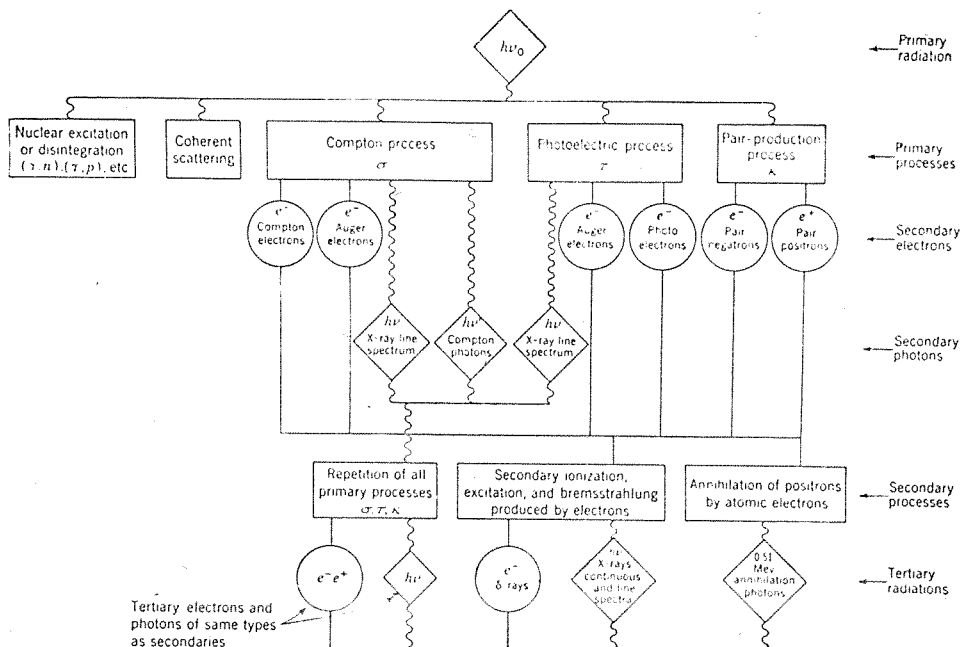
도해 1-16. Energy level diagram to explain the production of characteristic X-rays.

서 볼때 높은운동에너지를 가진 전자 E_0 가 target nucleus에 접근하여, 그것이 nucleus의 근접부를 지나며 따라 전자의 전자기장과 핵의 전자기장간에는 매우 강력한 상호작용이 발생한다. 이 상호작용은 전자진로의 순간적인 반발을 일으켜서 에너지의 일부를 잃게된다. 이때 마지막 남은 에너지를 E_f 라 하면 에너지를 가지고 있는 광자(photon)의 상태로 발산된 전자의 잃은 에너지는 $h\nu = E_0 - E_f$ 이다.

두번째 형태의 X 선원(source)으로는 characteristic X-ray 라고 할 수 있는데 도해 1-16을 참고로 이해할 수 있다. 가장 가능성이 많은 경우중의 하나로 Lenergy level의 전자가 K level로 내려오는 경우인데 이때 L level은 K level보다 높은 에너지의 상태이므로 전자는 이 변위시에 에너지를 방출하게 된다. 이 방출된 에너지는 전자기장의 광자형태로 방사되는데 이때 에너지는 $h\nu = E_L - E_K$ 이다.

3) 전자기장과 물질과의 상호작용

광자속의 내부에 포함되어 있는 에너지가 물질로 전달되는 방법의 개괄적인 도식은 도해 1-17과 같다. 지금까지는 광자흡수의 전체적인 가능성에 대하여 고려하여 왔지만, 이 도식에서 볼때 attenuation of photon beam은 광자와 흡수물질과의 사이에서 생기는 상호작용에 의해 5 가지 기본원리가 있음을 알수 있다. 여기서는 전항에 언급되지 않은 다음 4 가지 과정에 대하여 설명하고자 하는데 이는

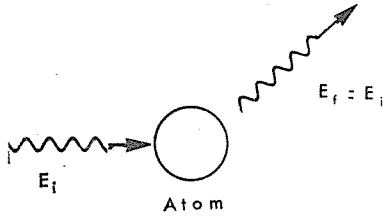


도해 1-17. 방사선과 물질과의 상호작용에 있어서 여러가지 과정을 나타낸 도식.

coherent scattering, the photoelectric process, the Compton process 및 the pair production 이다. 실제로 이들은 흡수 물질내에서 동시에 야기되는데 전체감소계수(total attenuation coefficient)는 이들 여러가지 흡수 및 산란과정의 합계가 된다.

Coherent Scattering

일명 Rayleigh scattering 이라하며 도해 1-18과

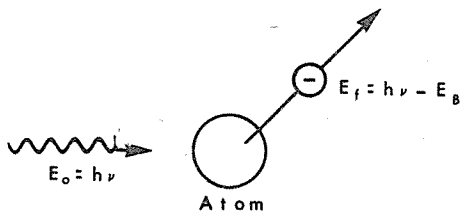


도해 1-18. Model of coherent scattering

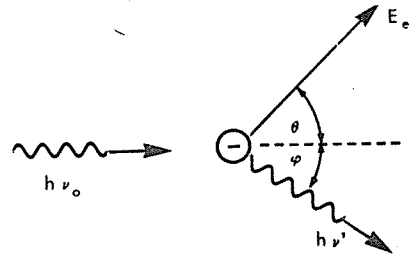
같이 표시된다. 어떤 전자기파(wave)가 흡수물질의 전자에 투사되면 이 투사된 광자는 에너지를 전달하게 되는데 이때 에너지를 얻은 전자는 단지 진동만 할뿐 그 자세의 정상적인 원자위치에서 이탈되지 않는 경우이다. 재방출된 전자기방사선은 원래의 광자의 것과 같은 량의 에너지를 가진 광자로서 출현하며 단지 방사되는 방향만 바뀐다. 결과로 한 광자는 흡수물질내에서 단순히 산란된 것에 불과하다. 이와 같은 현상을 정밀분석하여 볼때 광자는 언제나 극소의 각도만큼이라도 산란되고 있음이 입증되었다. coherent scattering은 높은 원자번호 물질일수록, 그리고 낮은 에너지의 광자에서 보다 많이 발생된다.

The Photoelectric Effect

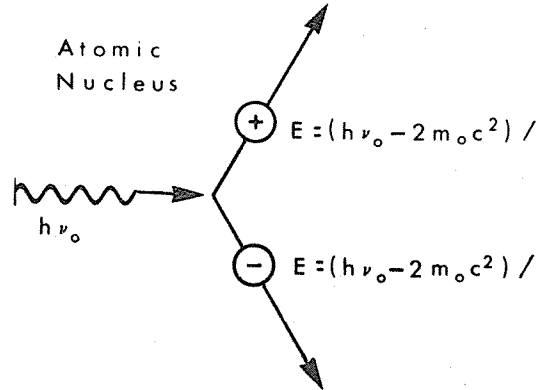
이것은 원래의 광자가 소유하고 있던 전체 에너지가 원자내 전자로 전달된 현상을 말한다. 이 전자는 이 에너지의 일부를 원자로 부터 탈출하는데 필요한 결합에너지로 사용하고, 마지막 남은 전자의 운동 에너지는 $h\nu - E_B$ 가 된다 (도해 1-19참조). 생물학적 측면에서 대부분의 원자들은 Kenergy level electron일지라도 단지 0.5keV정도이다.



도해 1-19. Model of the photoelectric effects.



도해 1-20. Model of the Compton effect.



도해 1-21. Model of the pair production process.

일단 전자가 원자로부터 축출된 후에는 원자는 들뜬 상태로 남게 되는데 그후 characteristic photon을 방출하게 된다.

이러한 광자들은 특히 생물학적 흡수체에서 볼때 매우 낮은에너지로 아주 짧은 순간동안 나타나는데 즉시 생체국소부위에서 흡수될 가능성은 매우 높다.

The Compton Effect;

도해 1-20에서 볼수 있듯이 투사된 광자가 $h\nu$ 에너지를 가지고 전자와 상호작용하여 그자신의 에너지중 일부를 운동에너지, E_e 로 전자에게 주면, 그전자는 θ 각도로 방사된다. 또한 광자는 ϕ 의 각도로서 투사광자의 최초방향으로부터 변화되어 진행하는데 이때 감소된 에너지 $h\nu'$ 을 갖는다.

Pair Production;

쌍생성과정은 질량과 에너지간의 $E=mc^2$ 이라는 Einstein's relation의 꼭맞는 한가지 예가 될 수 있다. 이 과정에서 광자는 핵의 전자기장과 매우 강하게 상호작용하며 이 상호작용은 너무 강력하여 광자는 없어지고 대신 positive and negative electron pair가 생성되는데 이는 도해 1-21과 같다. 이 반응이 일어나기 위해서 광자에너지는 최소한 두개의 새로운 입자의 질량에 해당하는 에너지와 같아야 한다.

그러므로 전자의 질량에 상당하는 에너지는, M_0c^2 , 0.511MeV이고 이 반응의 문턱(threshold)은

특집 ⑤ : 치과방선 촬영과 방어 □

0.22MeV이다.

양전자(positive electron)가 자체의 운동에너지
를 거의 잃게 되면 흡수물질내에서 음전자와 상호
작용하여 소멸방사선(annihilation radiation)을 생
성한다.

쌍생성과정의 가능성은 일단 문턱에너지에 도달
한다면 원자번호의 자승 및 투사된 광자에너지
의 로그에 비례하여 증가함이 증명되었다.

4) 중성자와 물질과의 상호작용

중성자가 물질과 상호작용하는데에는 4 가지 주된
과정을 가지며, 이런 각기 다른 형태의 상호작용의
가능성은 중성자의 에너지와 흡수물질의 본성에 따
라 변화하는데 한편 중성자에너지에 따라 다음과
같이 4 가지 범주로 나눈다.

Thermal neutrons-1 eV미만의 에너지

Epithermal neutrons-1eV에서1000ev 사이의 에
너지.

Intermediate neutrons-1,000eV에서 0.1MeV의

Fast neutrons-0.1MeV보다 큰 에너지.

중성자와 물질과의 상호작용을 4 가지 형태로 나
눈다면, fission, nuclear capture of the neutron,
elastic collision 및 inelastic collision이며, 이중 앞

에서 언급되지 않은 사항을 보면, , elastic colli-
sion에서는 중성자는 자체 운동에너지의 일부를 ta-
rget nucleus에 전달시키고, inelastic collision 에서
는 neutron은 핵에 의해 흡수되지만 원래의 량보
다 작은 운동에너지만을 방출한다. 그 나머지의 에
너지는 감마선의 형태로서 핵에 의해 방사
된다. 생물학적 목적으로 중성자속이 조직에 에
너지를 전달함을 계산하는데 있어서, 중성자는 간
접이온화입자로서, 이는 주로 수소핵에 자체 에너지를
전달하므로써 조직에 영향을 미친다고 생각되어
지고, 나아가서는 직접이온화입자, 양자 및 상당량
의 운동에너지도 발생시킨다.

참 고 문 헌

- 1) O.Glasser, E. H. Quimby, L. S. Taylor : J. L. Wea-
therwax:Physical Foundation of Radiology.
3rd ed. P. B. Hoeber, 1961
- 2) Jhon Hale:The Fundamentals of Radiological
Science. Thomas, 1974
- 3) O. E. Langland. F. H. Sippy:
Textbook of Dental Radiography
2nd ed. Thomas, 1977

아-트齒科技工所

서울 서대문구 옥천동 73의 2
(73) 3452 (72) 4237

대표 文 一

各種 齒科機器 및 材料

清涼齒科材料商社

대표 양 해 수

서울시 동대문구 청량리동 444의 2 (청량리역 앞)

전 화 966-1110·968-4466