

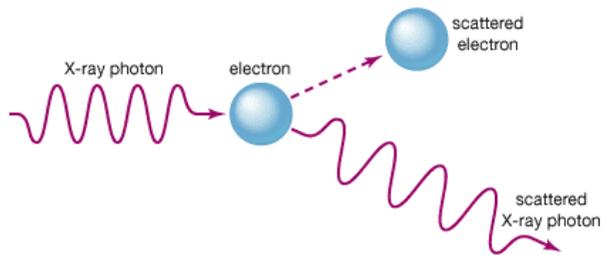
08

CM 실패-컴프턴 효과

만약 당신이 진실로 진리를 추구하는 사람이라면
생애에 적어도 한번은 가능한 모든 것을 깊게 의심해 볼 필요가 있다.
- 데카르트 -

■ 컴프턴 효과 실험

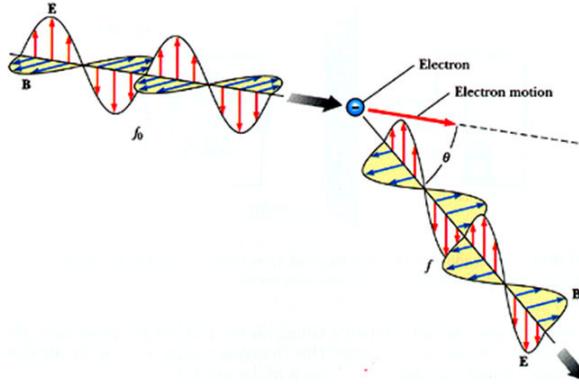
플랑크의 흑체복사 설명과 아인슈타인의 광전효과 설명에 있어 중심은 빛은 입자화된 에너지 양이라는 것이었다. 즉 빛은 입자라는 것이었으나 기존에 고전물리학이 지닌 지독한 고전관념으로 인해 이를 부정하려고 하였다. 플랑크 또한 자신의 양자화 개념을 그다지 중요하게 생각하지 않았었다. 그러다가 컴프턴(Compton, 1892-1962)의 광산란 실험은 ‘빛=입자’ 개념으로만 설명된다는 것을 알고 입자설이 확립되었다. 영의 이중슬릿 실험으로 빛의 파동설이 정립 되었다면, 플



[컴프턴의 광산란 실험]

랑크의 설명은 양자론의 발단이 되었고 콤프턴 효과(Compton effect or scattering)는 빛의 입자설을 유력하게 만들었다.

아인슈타인의 광양자설이 맞다면 빛의 입자, 즉 광자를 충돌시켜 이 운동량 관계가 성립되는지 확인할 수 있을 것이다. 광전효과에서는 광자를 금속에 충돌(흡수)시키는 경우로



[파동일 때 나타나는 현상]

광자의 운동량이 너무 작다. 그러나 광자를 질량이 작은 자유전자와 충돌시키면 운동량을 받은 정도를 쉽게 관측할 수 있다.

1923년 콤프턴은 흑연에 의해 산란된 x선의 파장이 입사광의 파장보다 길어진다는 사실을 발견하였다. 입사광이 파동이라면 고정된 입자와 부딪쳐서 같은 진동수의 구면파를 형성하면서 회절되어야 한다. 따라서 빛이 파동이라는 것으로는 설명되지 않는 현상이었다. 당구공으로 다른 공을 맞췄을 때 정지했던 공과 움직이는 공은 직선 운동방향에서 특정 각도로 휘게 되는 것은 둘 다 입자이기 때문에 가능하다. 산란되어 튕겨나가는 전자를 되튐전자(recoil electron)이라고 한다. 이러한 현상이 콤프턴 효과에서 나타났으며, 이는 빛이 입자라는 가정하에서만 설명될 수 있는 것이었다. 진동수가 매우 큰 x선의 광자가 물질내부의 전자와 충돌하여 전자에게 에너지를 주었기 때문에 산란된 광자의 파장이 길어진다(에너지상실)는 주장이었다. 이 주장이 옳다면 충돌 전후의 운동량은 보존되어야 하며 실험을 통해 증

명되었다. 빛이 입자이기 때문에 양성자(proton)처럼 무거운 입자에 대해서는 콤프턴 효과가 잘 나타나지 않는다.

파장의 변화를 수반하지 않는, 입사파와 산란파의 파장이 같은 산란인 톰슨 산란(Thomson scattering)도 있다. 이는 전하를 띤 입자에 의해 전자기파가 탄성산란(elastic scattering) 되는 현상을 말하며, 플라즈마(plasma) 물리학 분야에서 중요한 현상이다. 빛의 파동성 분증 전기장에 의해 하전된 입자가 움직이는 것으로 파동성에 가깝게 보이지만, 광자의 에너지가 커지면 콤프턴 산란과 동일해 진다.

■ 원자내 산란

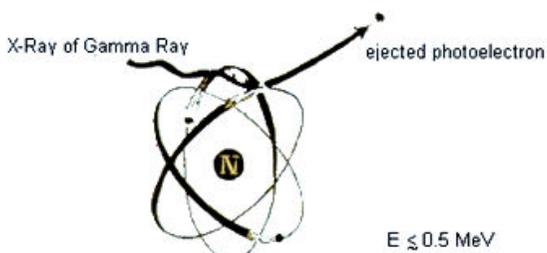
산란은 콤프턴 효과도 만들지만 사실 광전효과도 산란에 의한 특성이 다. 원자내의 전자에 의한 입사광의 산란효과는 크게 3가지로 구분된다. 0.5 MeV이하의 낮은 에너지를 지닌 광자에 의해서는 광전효과를 발생시키며, 0.5~5 MeV의 중간 에너지 입사광은 콤프턴 효과를 발생시킨다.

5 MeV 보다 큰 에너지를 지닌 x-선이나 γ -선은 우선 첫 번째 만나는 원자와 부딪쳐서 음전자(negative electron)과 양전자(positive electron, positron)를 형성한다. 양전자는 전자의 반물질(anti-matter)로, 일단 발생하면 양전자 붕괴(annihilation)을 통해 전자와 쌍결합(pair production)하고 이때 높은 에너지의 광자를 발생시킨다. 사실 콤프턴 효과는 전영역에서 모두 발생할 수 있다. 반물질에

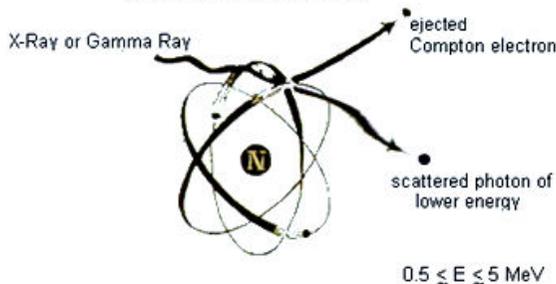
대해서는 추후에 다시 다룬다.

■ 산란을 통한 파장 변화

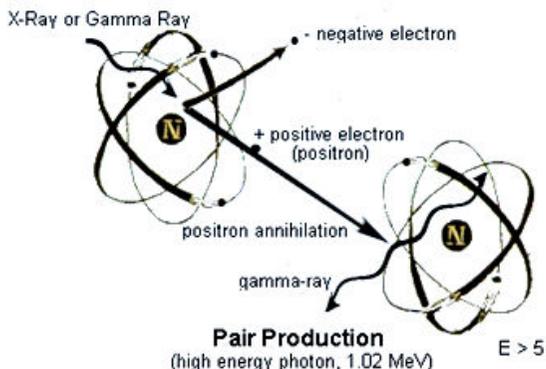
납(Pb) 원자에 412 keV의 x선을 조사하면 에너지가 82 keV로 감소된 산란광이 발생한다. 이러한 콤프턴 효과는 운동량 에너지가 보존되는 것을 증명하면 완벽하게 '빛=입자'가 정립되는 셈이다. 운동량(P)은 mv로 쉽게 나타낼 수 있으며, 산란각을 알면 움직이는 방향과 속도 결정이 가능하다. 그러나 고전물리학에서의 운동량은 모두 정지질량(m)이 있어야 하지만, 빛을 정지시키 그 질량을 측정한다는 것이 불가능하다. 즉 상대성 원리에 의해 빛을 정지시



Photoelectric Effect
(primarily low-energy photon)



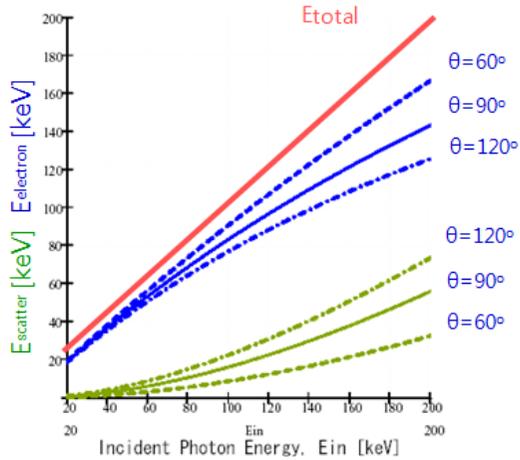
Compton Effect
(primarily medium energy photon)



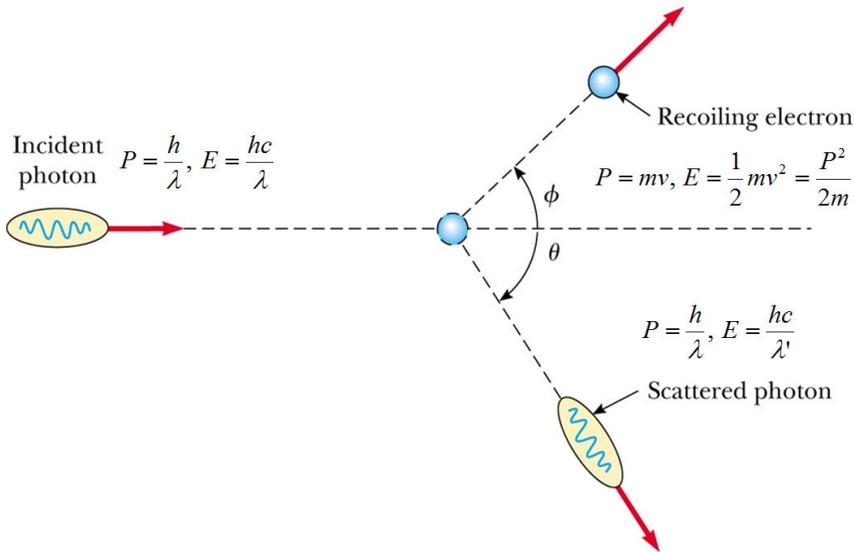
Pair Production
(high energy photon, 1.02 MeV)

[입자광의 세기에 따른 산란 종류]

키려면 빛과 동일한 속도로 움직이면서 관찰해야 하며, 이때 상대적인 정지질량은 0이 된다. 다행히도 아인슈타인은 광전효과를 설명한 광양자설에서 운동량을 파장의 특성으로 변형시켰다. 즉 $P=E/c$ 이고 $E=h\nu=hc/\lambda$ 이므로, 빛의 운동량은 h/λ 가 된



|컴프턴 산란시 에너지 보존|



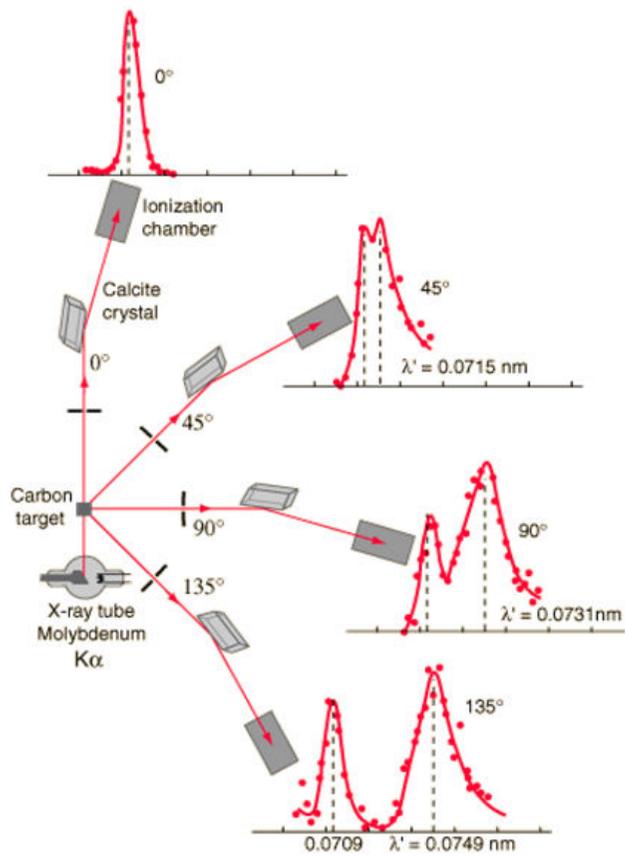
|컴프턴 효과에 관한 에너지 보존|

다. 따라서 운동량에서 질량을 고려하지 않아도 된다. 질량을 알고 있는 전자의 경우는 기존의 질량운동량을 사용해도 된다.

입사광의 세기가 커질수록 되튐전자와 산란광이 지닌 에너지도 증가한다. 반면 일정한 전압에서 산란각이 커질수록 산란광의 세

기는 증가하고 되튐전자의 세기는 감소한다. 그 두 에너지의 증가와 감소의 합은 언제나 입사광의 에너지와 동일하게 되어 에너지 보존 법칙이 성립하게 된다.

x성분과 y성분으로 분해한 운동량 보존과 에너지 보존을 이용하여 진동수의 변화($\Delta \lambda$)를 구할 수 있다. 여기서 콤프턴 상수(λ_c)가 0.024가 됨을 알 수 있고, 진



[산란각도에 따른 파장변화]

동수의 변화는 각도에 따라서 90°이전에서는 전방산란, 그 이상은 후방산란임을 알 수 있다. 산란각이 증가하면 에너지 손실로 인해 산란광의 파장(λ')이 증가하고, $\Delta \lambda$ 도 증가한다. 각도가 점점 커질수록 진동수 변화가 커지며, 최대값은 180°에서 일어나는 전자의 질량 ($m=9.109 \times 10^{-31}$ kg)을 고려하면 $2 \lambda_c=0.048$ 가 된다.

■ 컴프턴 산란의 진동수 변화 증명

Energy conservation

$$\frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda'} + \frac{P^2}{2m} \quad (1)$$

Momentum conservation

$$\frac{h}{\lambda} = \frac{h}{\lambda'} + mv \rightarrow \text{x component} \quad \frac{h}{\lambda} = \frac{h \cos \theta}{\lambda'} + P \cos \phi$$

$$\text{y component} \quad 0 = \frac{h \sin \theta}{\lambda'} - P \sin \phi$$

$$\rightarrow (\text{component})^2 \quad P^2 = \frac{h^2}{\lambda^2} + \frac{h^2}{\lambda'^2} - \frac{2h^2 \cos \theta}{\lambda \lambda'}$$

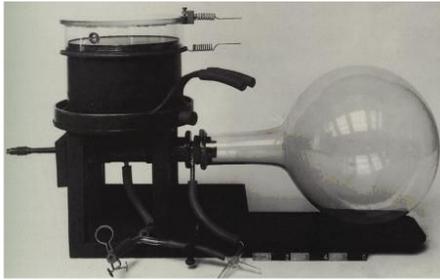
$$\rightarrow (1)+(2) \quad \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda'} = \frac{h}{2mc} \left(\frac{1}{\lambda^2} + \frac{1}{\lambda'^2} - \frac{2 \cos \theta}{\lambda \lambda'} \right)$$

$$\Delta \lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{2mc} \left(\frac{\lambda'}{\lambda} + \frac{\lambda}{\lambda'} - 2 \cos \theta \right) = \frac{h}{mc} (1 - \cos \theta) = \lambda_c (1 - \cos \theta)$$

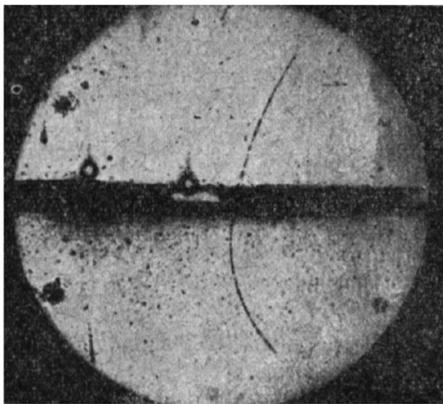
$$\text{Compton constant} \rightarrow \lambda_c = \frac{h}{mc} = 0.024$$

■ 안개상자 실험

컴프턴 효과로 튕겨나간 입자를 직접관찰하기 위해 윌슨(Charles Wilson, 1869-1959)은 안개상자(cloud chamber, Wilson chamber)라는 것을 고안하였다. 대전입자가 지나간 궤적을 미소한 물방울이 줄지어 있는 모습을 통해 입자를 직접 관찰할 수 있는 실험법이다. 원리는 대기속의 수증기가 작은 먼지를 핵으로 하여 응결되고 이것이 모여서 구름이나 안개가 되는 현상과 동일하다. 내부가 보이는 편평한 원통형 상자 안에 압력을 낮춘 수증기나 수증기/아르곤/에탄올의 혼합기체를 채우고 나서, 상자의 밑면을 갑자기 내려 상자내부의 부피를 팽



월슨의 안개상자



안개상자 실험결과

창시키면 수증기가 과포화(과냉각) 상태로 된다. 이 과정을 반복하여 내부의 보이지 않는 먼지로 인해 발생된 응축된 수증기를 제거한다. 급작스런 부피팽창을 유발시키면서, 상자 안으로 대전입자(되튬전자)가 지나가게 되면, 그 경로 부근의 기체분자가 이온화되고, 해당 이온을 핵으로 하여 수증기가 응결하여 비행기 구름과 같은 궤적이 나타난다. 주로 α 입자나 β 입자가 안개상자를 통과시에는 넓고 직선형태의 궤적을 나타내며, 전자는 얇고 더 휘어진 형태의 궤적을 보인다. 자기장을 걸어주게 되면,

양전하와 음전하를 지닌 입자는 서로 반대방향으로 휘는 궤적을 그리게 된다. 안개상자보다 더 자세한 궤적은 기포상자(bubble chamber)를 이용하여 확인할 수 있다.

■ 등장인물 살펴보기



아더 컴프턴(Arthur Compton, 1892-1962)

미국의 물리학자이다. x선을 산란시켰을 때 그 파장이 길어진다는 현상을 발견하고, 이를 빛의 양자론으로 설명하는 계기를 만들었다. 이는 빛이 온전한 입자로 행동한다는 것을 확인한 것으로 이 업적으로 인해 1927년 노벨 물리학상을 받았다.



찰스 윌슨(Charles Wilson, 1869-1959)

스코틀랜드의 물리학자이다. 안개상자를 발명하여 1927년에 노벨 물리학상을 수상하였다. 기상학에 관심이 있던 그는 Ben Nevis 관측소에서 기상관측을 하던 중, 구름 주변의 햇빛이 산란되는 것을 보고 안개상자에 관한 아이디어를 얻었다. 그의 학문적 스승은 톰슨이다.

