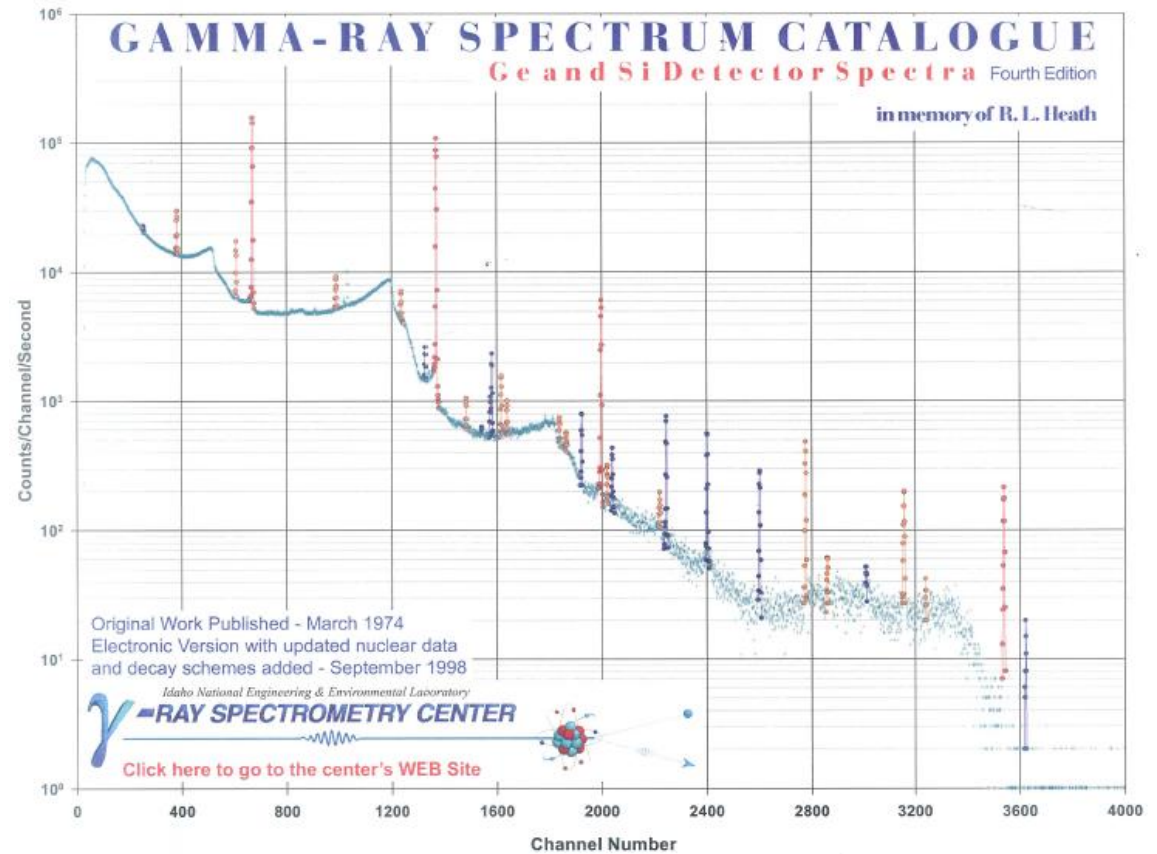
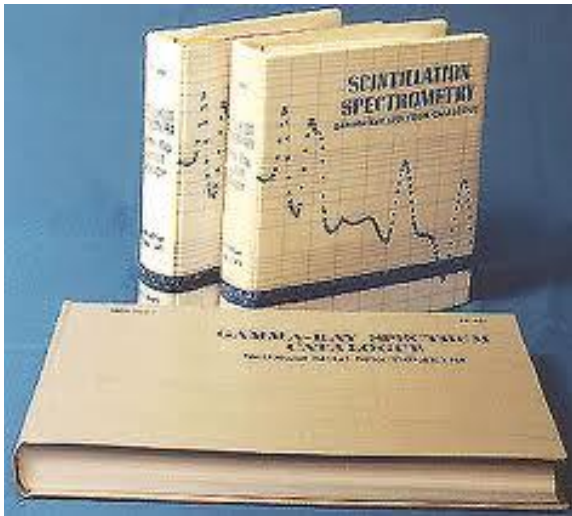


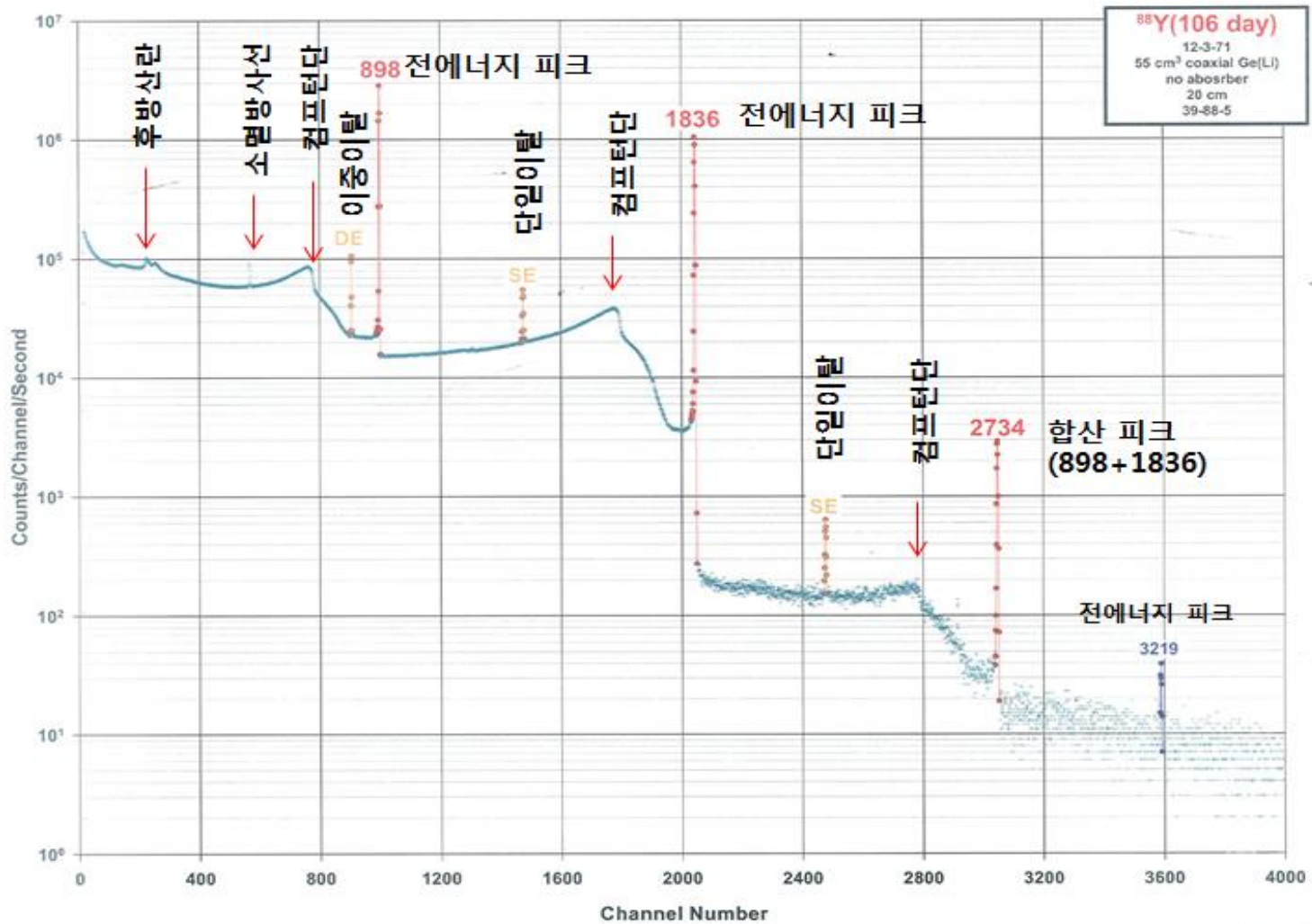
II. 감마선 스펙트럼의 분석

1. 서론



 <http://www.inl.gov/gammaray/catalogs/catalogs.shtml>

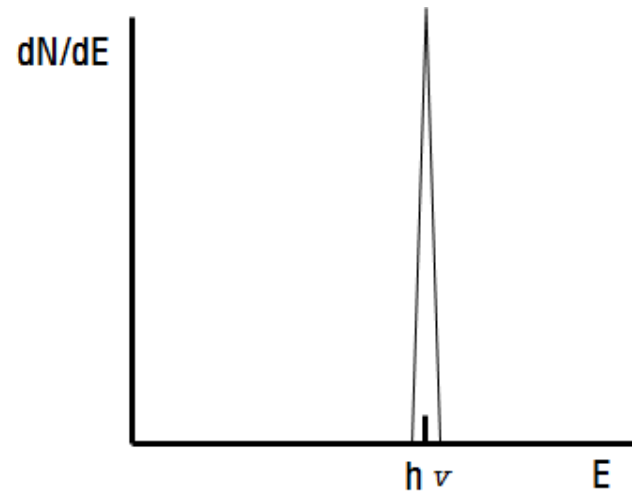
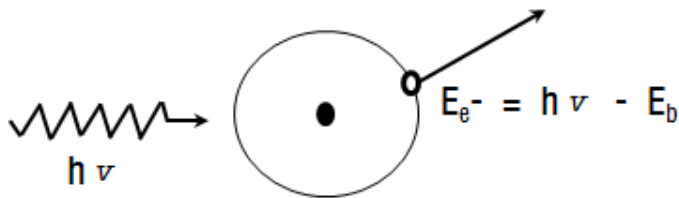
1. 서론



2. 감마선과 검출기와의 상호작용 및 응답함수

(1) 광전흡수(photoelectric absorption)

- Ge원자(Ge검출기 경우)의 궤도전자와 상호작용 ; 광전자
- 입사감마선의 모든 에너지를 궤도전자에 전달 → 입사 감마선은 사라짐
- 특성 X선 또는 auger 전자가 방출
- 입사감마선 에너지($h\nu$)와 똑 같은 에너지의 피크가 스펙트럼상에 생성(단일 피크)
 - full energy peak, photopeak
- 감마선(X선) 에너지스펙트럼 측정에 실질적으로 이용되는 효과



2. 감마선과 검출기와의 상호작용 및 응답함수

(2) 콤프턴 산란(Compton scattering)

- 자유전자나 결합력이 매우 약한 궤도전자와 충돌 상호작용 ; 콤프턴 전자, 산란감마선

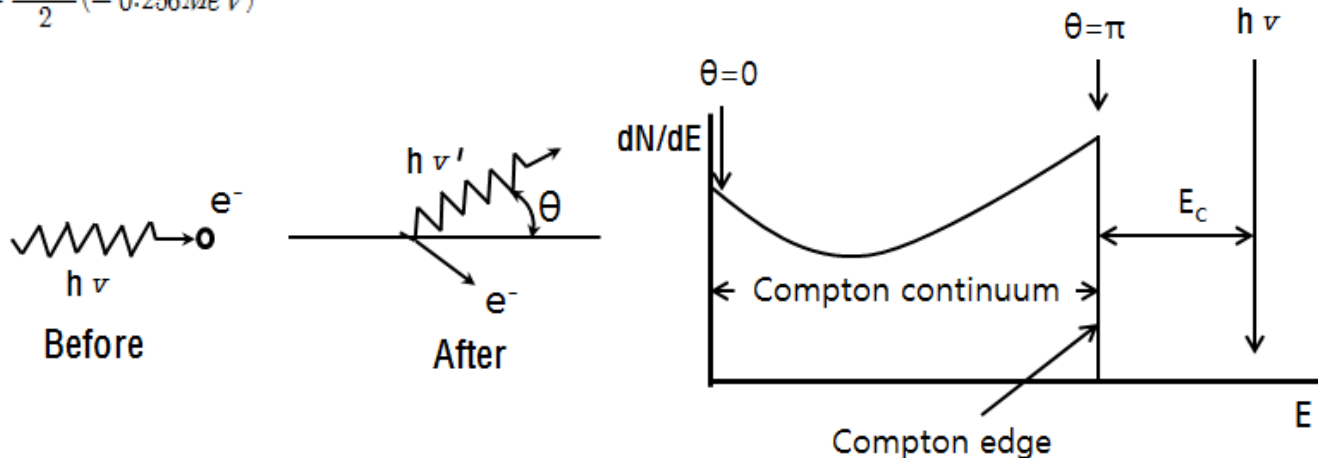
$$(h\nu)' = \frac{(h\nu)}{1 + \frac{(h\nu)}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)} \quad E_c = (h\nu) - (h\nu)' = \frac{(h\nu)}{1 + \frac{m_0c^2}{h\nu}(1 - \cos\theta)}$$

- 정면충돌($\theta = \pi$)의 경우 ; 콤프턴 전자는 감마선 입사방향, 전자에 최대에너지가 전달

$$E_c \equiv h\nu - E_{e^-}|_{\theta=\pi} = \frac{h\nu}{1 + 2h\nu/m_0c^2}$$

입사감마선의 에너지가 큰 경우, 즉 $h\nu \gg m_0c^2/2$ 에서는 이 에너지가 차이가 아래와 같이 일정한 값으로 수렴

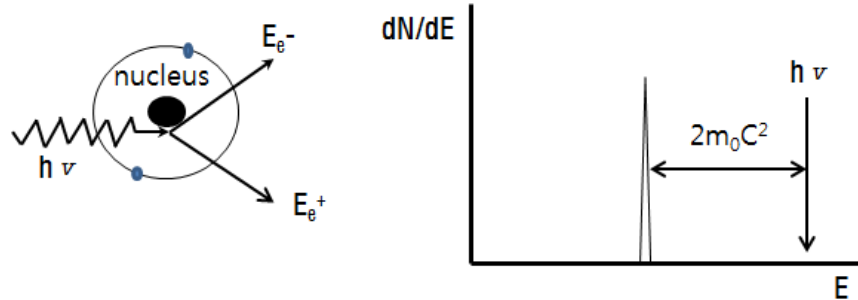
$$E_c = \frac{m_0c^2}{2} (= 0.256 \text{ MeV})$$



2. 감마선과 검출기와의 상호작용 및 응답함수

(3) 쌍생성(pair production)

- 검출기매질 원자핵(Ge원자핵)의 쿨롱장내에서 소멸 ; 전자, 양전자 쌍의 생성
 - 총 운동에너지(전자KE+양전자KE) ; 입사감마선에너지 보다 $2m_0c^2$ 만큼 아래에 위치
- $$E_p^- + E_p^+ = h\nu - 2m_0c^2$$
- 양전자소멸 방사선 ; 0.511MeV 감마선 2개가 발생
 - double escape peak, single escape peak



3. 스펙트럼 구성요소

(1) 전에너지 피크(full energy peak)

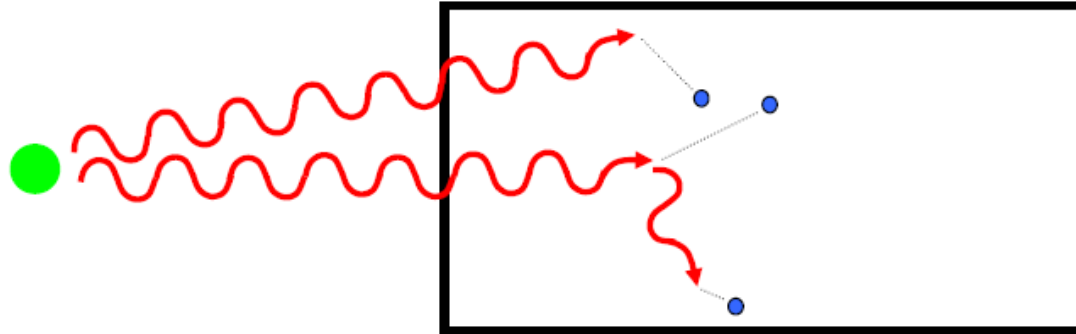
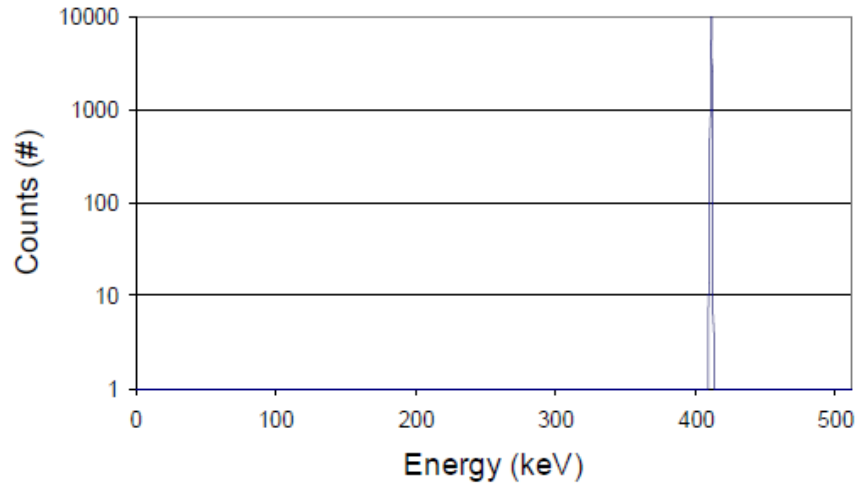


Figure 24 full energy events



3. 스펙트럼 구성요소

(2) 콤프턴 연속부와 단(Compton Continuum and Edge)

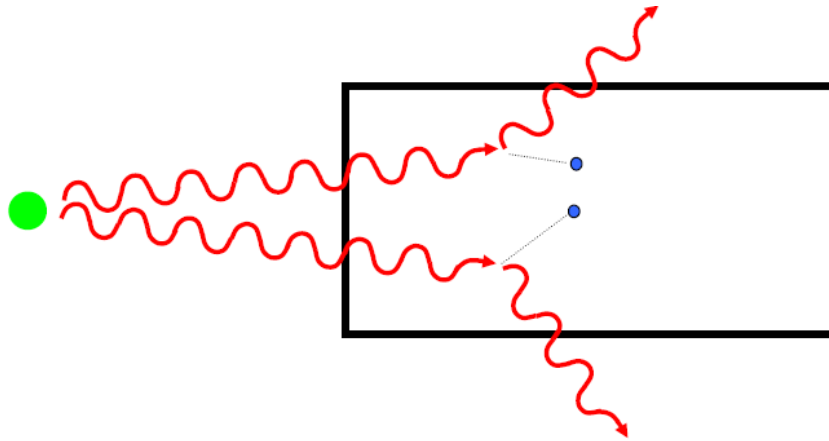
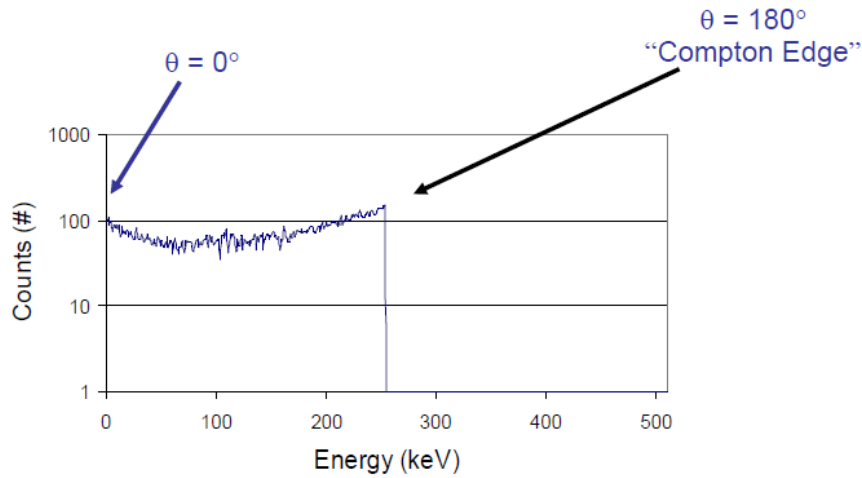


Figure 26 The scattered gamma-rays escape from the detector



3. 스펙트럼 구성요소

(3) 합성 피크(sum peak)

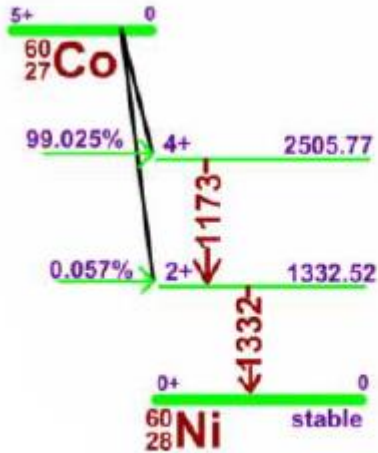


Figure 30 ^{60}Co Decay Scheme

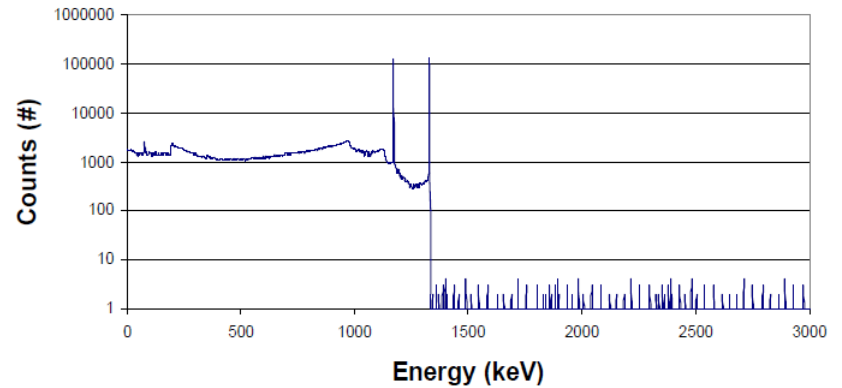


Figure 31 Expected Spectra Based on Decay

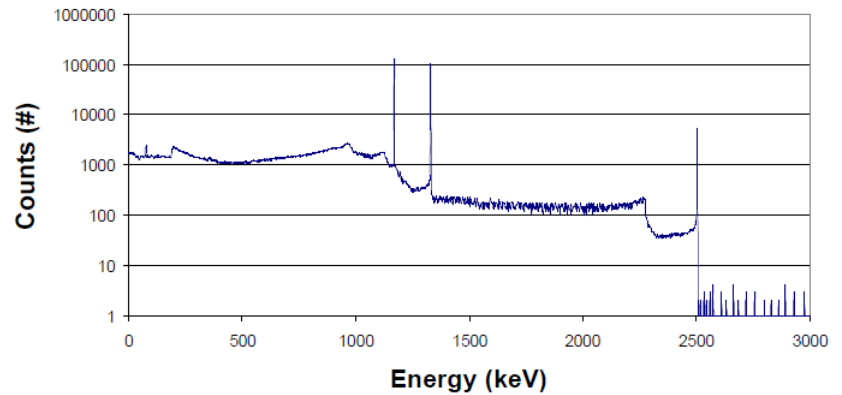


Figure 32 Actual Spectra

3. 스펙트럼 구성요소

(4) 단일 이탈 피크(single escape peak)

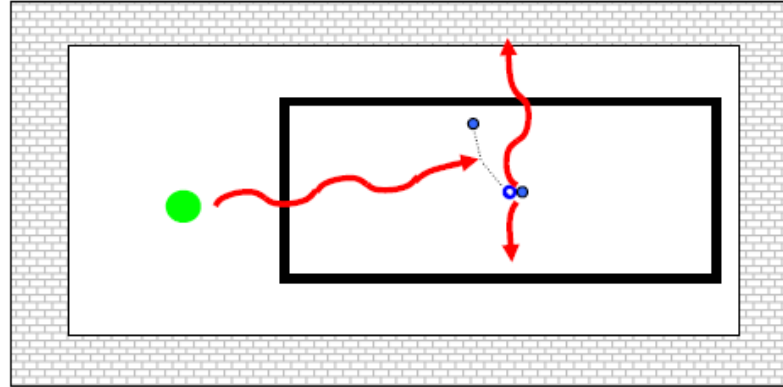


Figure 33

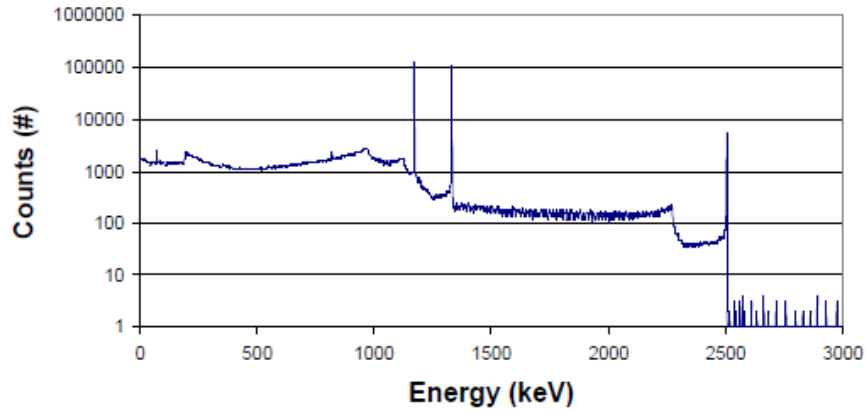


Figure 34 Single Escape Peak

3. 스펙트럼 구성요소

(5) 이중 이탈 피크(double escape peak)

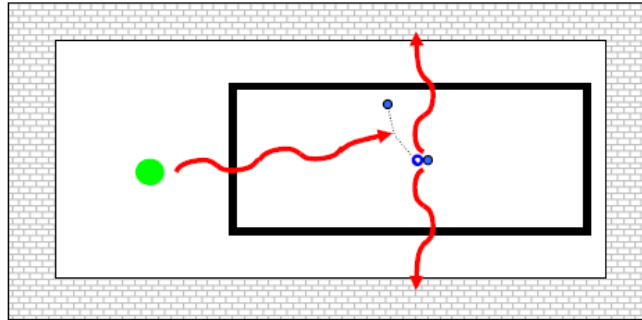


Figure 35

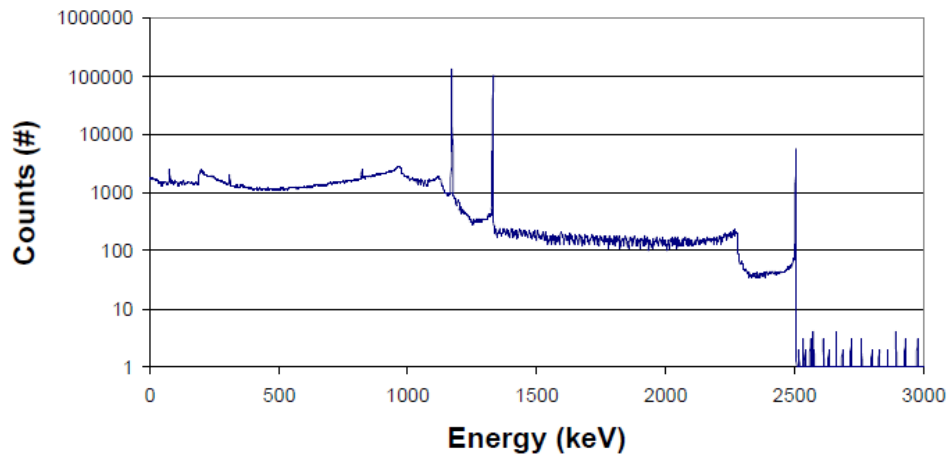
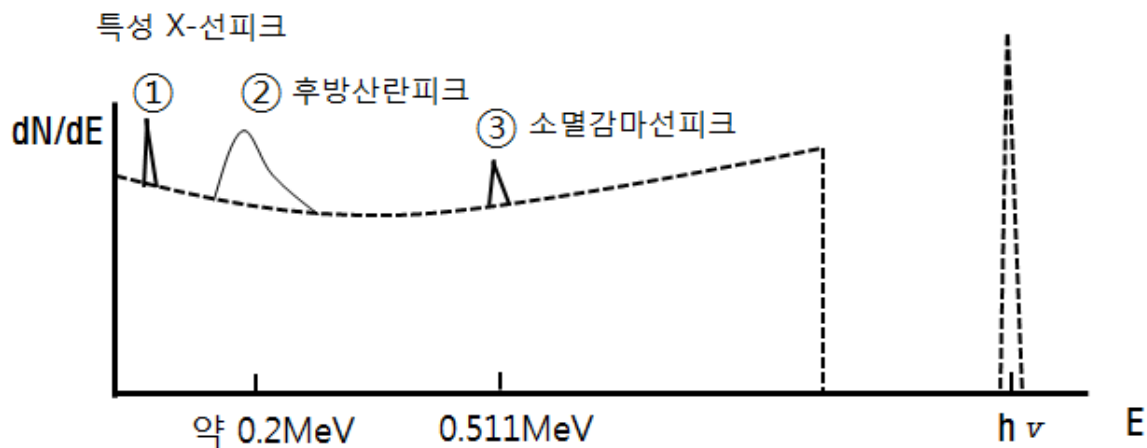
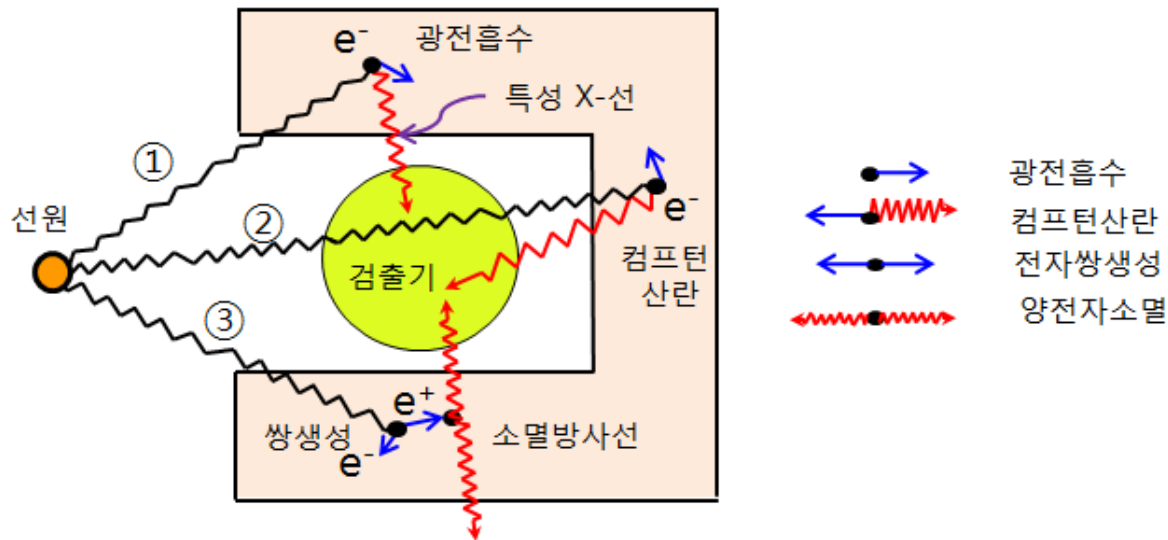


Figure 36 Double Escape Peak

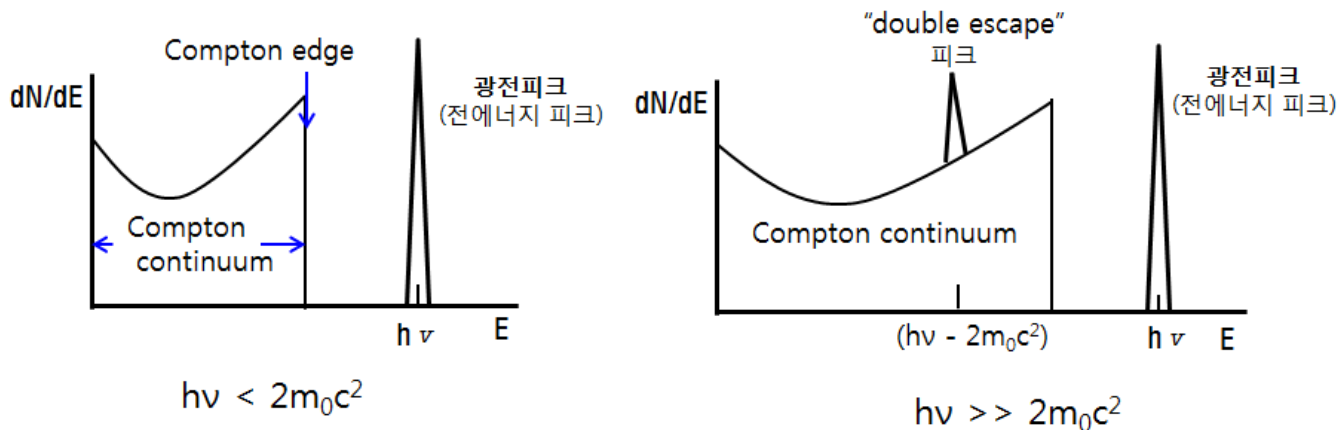
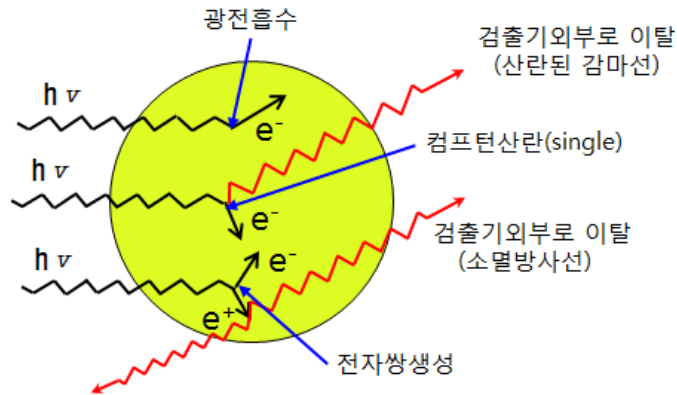
4. 검출기 주변물질의 영향



5. 검출기 크기에 따른 감마선스펙트럼 특성

(1) 소형 검출기(small detectors)

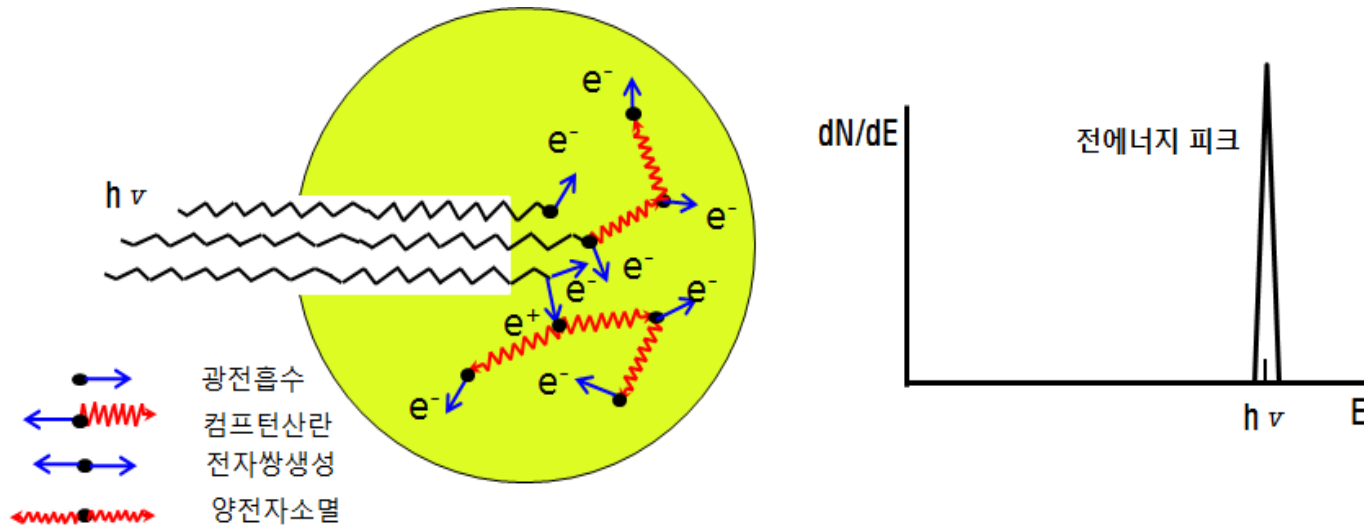
- 2차 감마선의 평균자유행로 보다 작은 크기($<2\text{cm}$) ; 하전입자는 모두 검출기내에서 흡수를 가정



5. 검출기 크기에 따른 감마선스펙트럼 특성

(2) 초대형 검출기(very large detectors)

- 2차 감마선 모두가 검출기 유감체적내에서 상호작용 ; 수십 cm 이상의 검출기 크기
 - 검출기의 응답은 마치 원래의 입사감마선이 단일 단계에서 단순한 광전 흡수를 한 것과 동일한 결과
 - 용어적으로
 - 소형검출기의 경우 광전 피크(photoelectric peak)
 - 대형검출기의 경우 전에너지 피크(full energy peak) 또는 전흡수 피크(full absorption peak) 적절한 표현

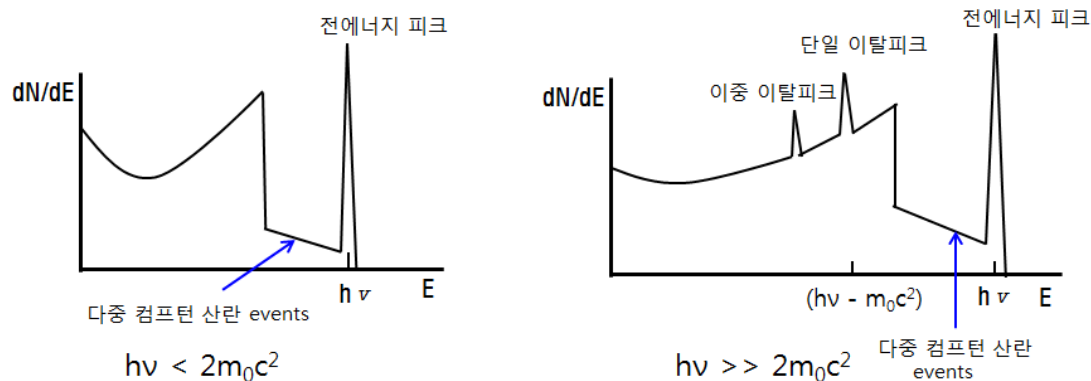
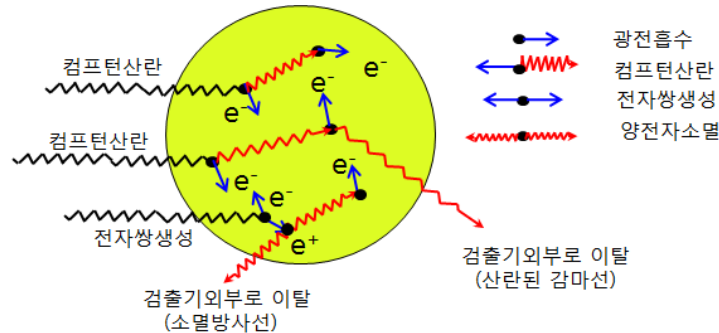


5. 검출기 크기에 따른 감마선스펙트럼 특성

(3) 중간크기 검출기(intermediate size detectors)

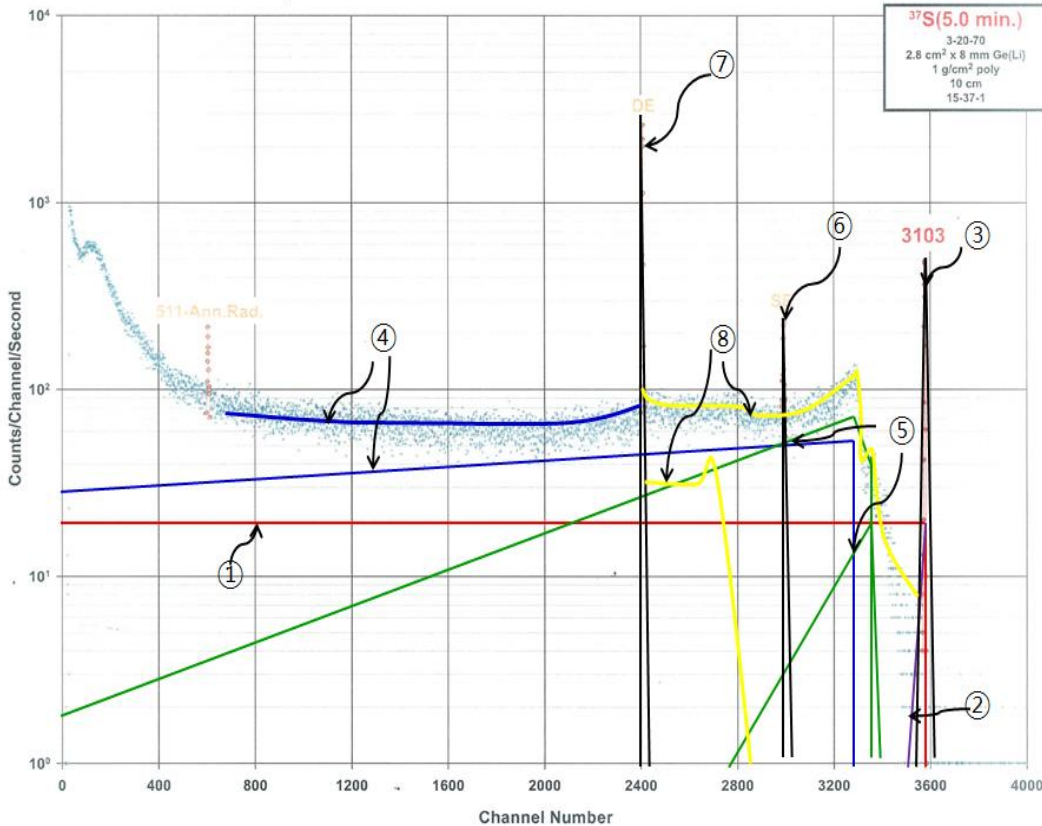
■ 실제 감마선분광학에 이용되는 대부분의 검출기 크기

- 2차 감마선의 일부가 이탈 → 에너지스펙트럼 매우 복잡
- 다중산란 → 컴프턴 단과 광전 피크 사이에 약간 낮은 스펙트럼 분포



6. 스펙트럼과 피크의 모양

(1) 스펙트럼의 모양(shape of spectra)



- ① 제동복사에 의한 손실과 광전자의 검출기 이탈
 - “0” 에서 전에너지에 이르는 연속부 형성
- ② 검출기내에서 전자포획 및 전하수집 손실
 - 피크의 저에너지 쪽에 “tailing” 형성
- ③ 검출기내에서 광전흡수
 - 전에너지 흡수피크의 형성
- ④ 콤프턴산란 영향
 - “0” 에서 콤프턴단에 이르는 연속부 형성
- ⑤ 다중 콤프턴산란 영향
 - 피크아래에 연속부 형성
- ⑥ 단일 이탈(single escape) 피크
 - 피크에서 0.511MeV 아래에 형성
- ⑦ 이중 이탈(double escape) 피크
 - 피크에서 1.02MeV 아래에 형성
- ⑧ 소멸방사선 2개모두 검출기내에서 상호작용
 - 피크와 D.E 피크에 이르는 연속부 형성

6. 스펙트럼과 피크의 모양

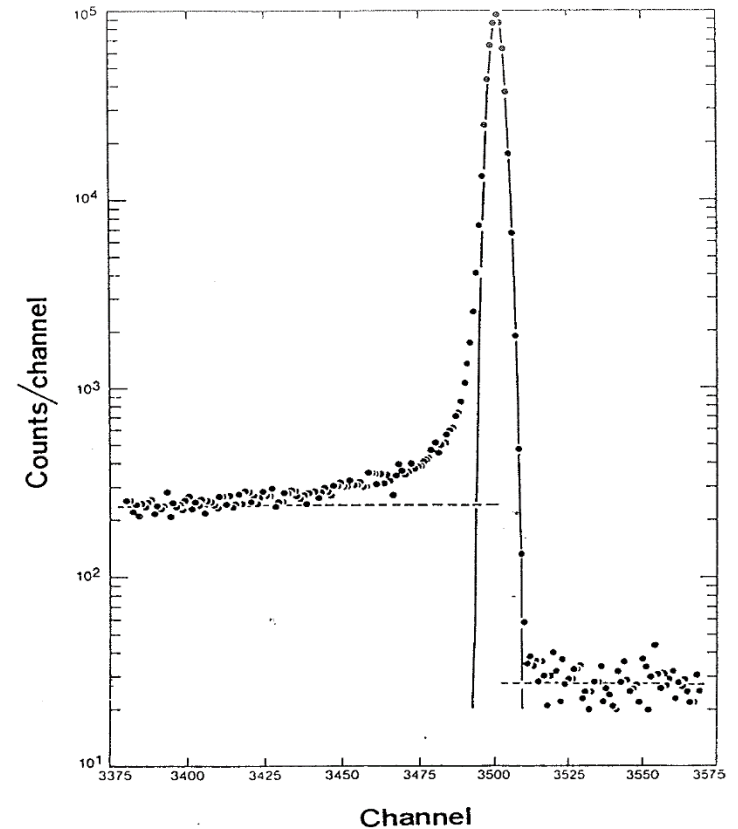
(2) 백그라운드 스펙트럼의 모양(shape of spectral background)

■ 피크영역 데이터해석 ; 피크함수와 백그라운드 함수가 요구

- 피크의 순면적 = 피크 총면적 - 백그라운드 면적
- 백그라운드함수 설정방법에 따라 차이

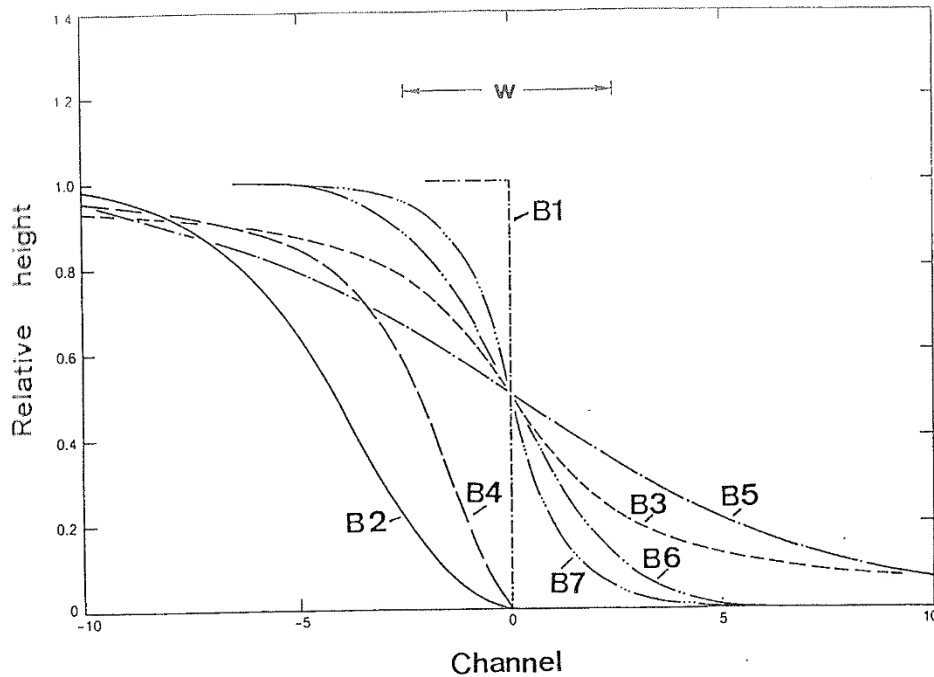
■ 계단형 백그라운드

- 검출기 유감체적을 빠져나간 1차 및 2차전자 때문
- 검출기내에서의 전자포획 및 전하수집 손실
- 계수율이 높을 경우 현저하게 나타남



6. 스펙트럼과 피크의 모양

(3) 계단형 백그라운드 함수



B1 ; step {1 for $x < X$, 0 for $x > X$ }

➤ 피크의 퍼짐을 무시한 가장 단순한 형태

B2 ; $1 - \exp\left[P_1 \frac{(x-X)}{2\sigma^2}\right]$ by Sanders and Holm

➤ 피크의 중심에서 “0”

B3 ; $\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctan\left[\frac{X - P_2\sigma - x}{P_1\sigma}\right]$ by Robinson

➤ 1과 0 사이에서 완만한 접근

B4 ; $1 - \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{x-X}{\sigma}\right)^2\right]}$ by Kern

➤ 피크의 중심에서 “0”

B5 ; $\frac{1}{1 + e^{(x-X)/0.75w}}$ by Teoh

➤ 피크중심에서 기울기가 가장 완만

B6 ; $\frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left[\frac{(x-X)}{\sqrt{2}\sigma}\right]$ by Phillips & Marlow

B7 ; $\frac{1}{2} \left[2 - e^{-\frac{2(x-X)}{\sigma}}\right]$ for $x < X$

$\frac{1}{2} \left[e^{-\frac{2(x-X)}{\sigma}}\right]$ for $x > X$

6. 스펙트럼과 피크의 모양

(4) 피크의 모양(shape of the peaks)

- 피크함수 ; Gauss 함수(idealy)

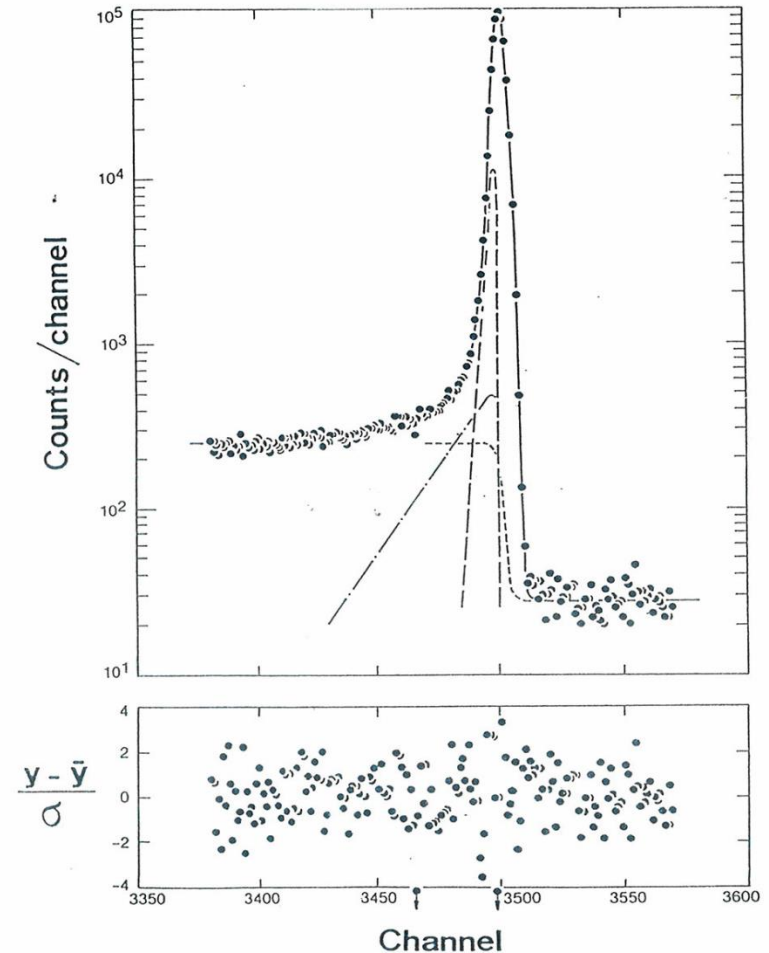
$$f(x) = Y \cdot e^{-(x-X)^2/2\sigma^2}$$

- 실질적인 피크함수 ; Gauss 함수 + 꼬리부분 함수

$$P_1 e^{-P_2(x-X)} \cdot (1 - e^{-P_3(x-X)^2/2\sigma^2}) + P_4 e^{(x-X)/P_5} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x-X}{\sqrt{2}\sigma P_6} + \frac{\sqrt{2}\sigma P_6}{2P_5}\right)$$

- 저에너지 쪽 꼬리부분 함수 ; 단기형 + 장기형

- 단기형 : 불완전한 전하수집이나 불순물에 전자포획 영향
- 장기형 : 검출기의 표면효과(surface effect)



7. 감마선 스펙트럼의 분석

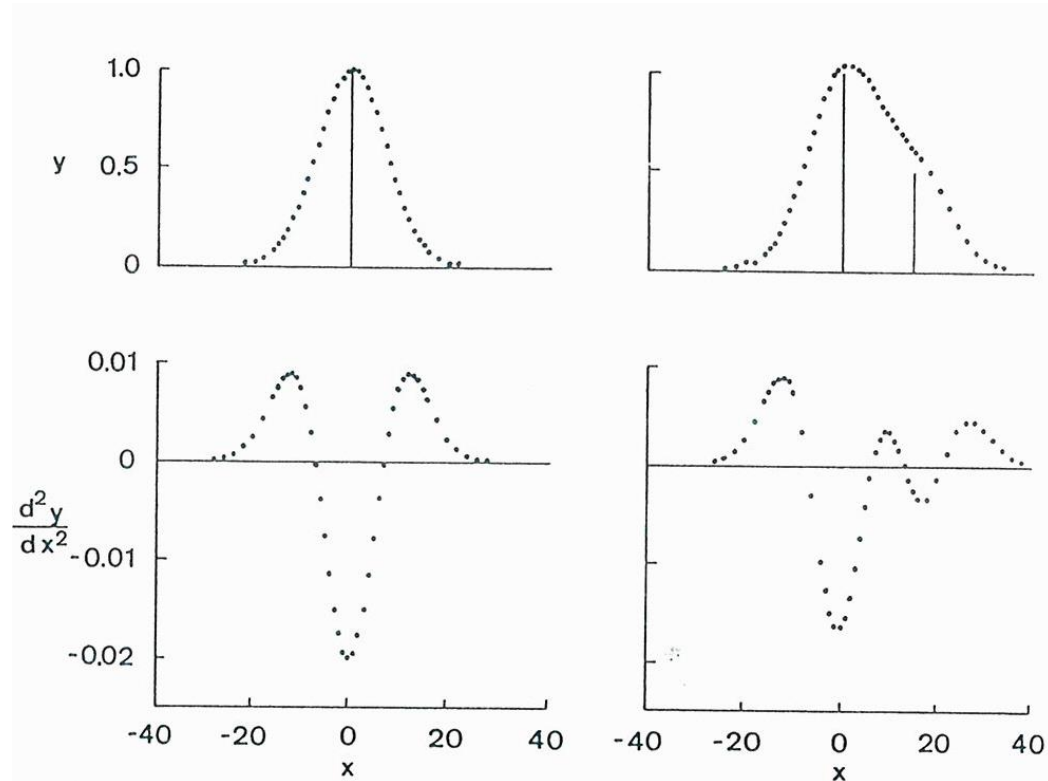
(1) 피크위치의 탐색(peak location)

■ 피크위치 알고리즘

- Library-driven routine ; 탐색할 감마선 list 작성
- Search-driven routine ; 수학적 방법론 적용(0 cross)

■ 상용 S/W(SAMPO, HYPERMET, Genie2000)

- “0” 면적 변환법(digital filter법) 이용
- 스펙트럼 함수를 2차 미분



7. 감마선 스펙트럼의 분석

(2) 피크면적의 계산(peak area calculation)

■ 계산 방법 ; 적산법, 함수 fitting법

- 적산법 ; $Area = \sum_{i=left}^{right} (y_i - b_i)$ for summation method
- Fitting법 ; $Area = \int P(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, x) dx$ for fitting method

■ $P(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, x)$; 피크모양을 모델화한 최적근사(best fit) 함수

- 최적근사 ; 최소자승법을 이용, χ^2 가 최소

$$\chi^2 = \sum_i w_i [y_i - b_i - P(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, x_i)]^2$$

■ 백그라운드 모델 ; 선형 모델, 계단형 모델

- 선형 ; Linear model: $b_i = \frac{B_L}{n} + \frac{B_R - B_L}{n(N+1)} i$
- 계단형 ; Step model: $b_i = \frac{B_L}{n} + \frac{B_R - B_L}{nG} \sum_{i=left}^i y_i$

$$B_L = \sum_{i=left-n}^{left-1} y_i, \quad B_R = \sum_{i=right+1}^{right+n} y_i$$

$$G = \sum_{i=left}^{right} y_i$$

7. 감마선 스펙트럼의 분석

(3) 피크면적의 보정(peak area correction)

■ 주변 환경 백그라운드의 보정

- 빈시료(blank sample)를 측정한 스펙트럼을 빼주는 방법

■ 펄스중첩의 보정

- Pulse pileup Rejector 이용
- 기준피크 보정(S/W적 보정)

■ 우연합산의 보정

- 기준피크 보정 ; $A_c = A_0 \frac{P_{NOM}}{P_0}$
- 여기서 A_0 는 측정된 순 피크면적, P_{NOM} 은 기준피크의 정격 순 계수율, P_0 는 기준피크의 측정된 순 계수율
- 기준피크는 어떤 고정된 위치에서 펄스발생기(pulser)나 혹은 방사선원으로 만들 수 있다.

■ 동시합산의 보정

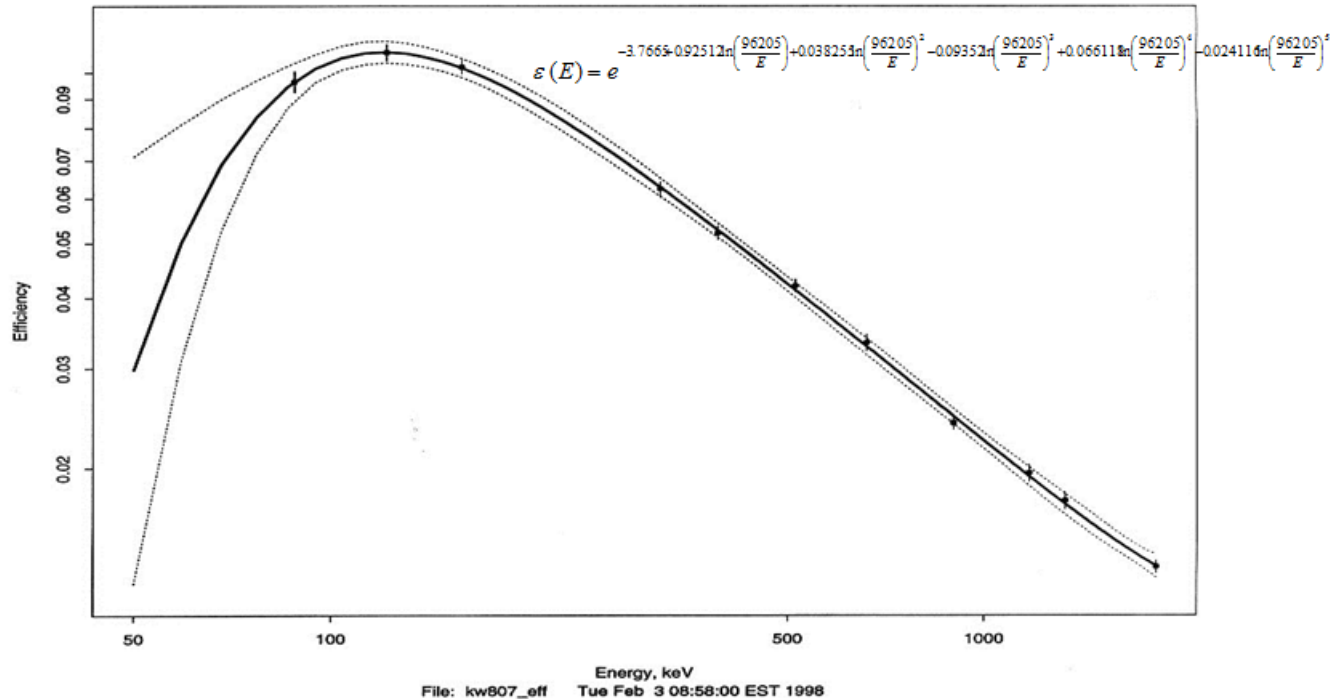
- Line by line 에 기초해서 적용
- 상업용 분석 S/W에 탑재하고 있음(Canberra, Ortec)

■ Live time의 보정

- H/W적으로 clock을 탑재

7. 감마선 스펙트럼의 분석

(4) 효율 계산(Efficiency Calculation)



$$\ln \epsilon = a_1 + a_2 \ln E \quad \text{or} \quad \epsilon = a_1 e^{-a_2 E} + a_3 e^{-a_4 E}$$

7. 감마선 스펙트럼의 분석

(5) 핵종식별 및 방사능계산(nuclear identification)

■ 핵종식별 알고리즘(상업용 S/W 패키지)

- 1) 식별코자 하는 핵종의 Library에 있는 모든 감마선에너지가 스펙트럼상에 모두 존재하는 경우
- 2) 식별코자 하는 핵종의 모든 감마선에너지들 중에서 사용자가 설정한 퍼센트(분율)의 에너지라인들이 존재하는 경우
- 3) 상기 2)와 더불어서 핵종 식별을 확증하기 위해 계산된 방사능이 “0” 이 아닌 경우

■ 방사능 계산

$$Activity(Bq, t = 0) = \frac{A(E)}{T_L \cdot \epsilon(E) \cdot I_\gamma(E)} \cdot \frac{\lambda T_R}{1 - e^{-\lambda T_R}}$$

여기서

$A(E)$; 측정된 에너지가 E 인 감마선의 순피크면적(net peak area)

$I_\gamma(E)$; 그 에너지에서의 감마선방출확률

$\epsilon(E)$; 에너지 E 에서의 전에너지 피크효율

DT ; 불감시간의 분율로서 $T_L = T_R(1 - DT)$

T_L 및 T_R ; 각각 유효계수시간(live time)과 실제계수시간(real time)