

국민에게 신뢰받는 안전 최우선의 KINS

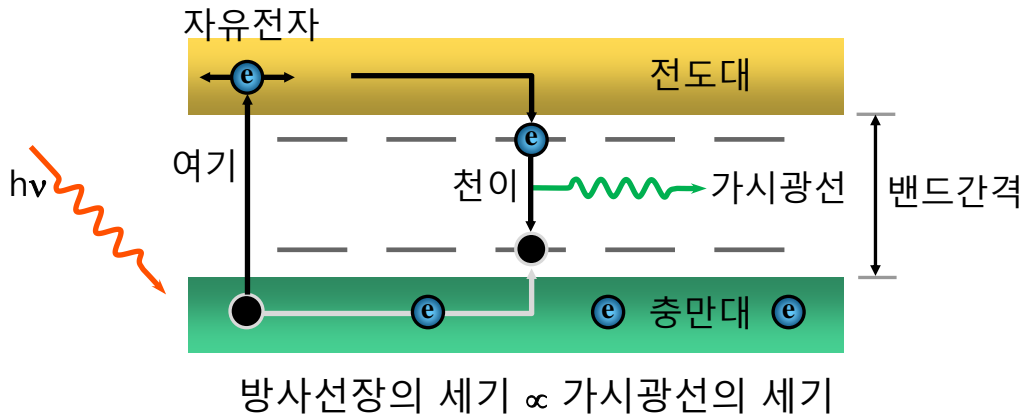
## II. 검출기별 특성

섬광 검출기



## 섬광체 (Scintillator)

- 방사선 에너지로 인해 **충만대에 있던 전자가 전도대로 여기**하였다가 다시 **천이**하면서 **가시광선을 방출(섬광)**하는 원리 이용



- 방사선 입사 시 이온화 + 여기 발생(들뜬 분자)
- 섬광, 자외선, 진동, 회전 운동에너지, 온도상승
- **섬광**으로의 변환비율이 높은 물질이 **섬광체**
  - ↳ 열을 동반하지 않는 발광현상

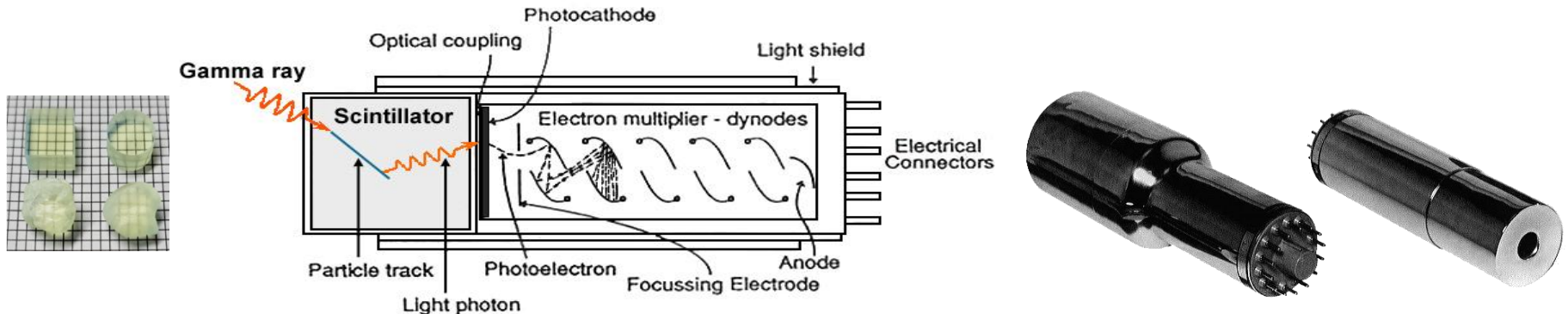
## ■ 섬광체(Scintillator)의 주요 특성

- 방사선에너지의 섬광효율이 높을 것 : 발광량 증가
- 빛의 투과성(투명도)이 높을 것 : 자체 흡수 감소 → 광전자증배관(PMT)로의 도달량 증가
- 발광의 감쇠시간이 짧을 것 : 분해시간이 짧아져 고선량률에서 계수 가능
- 파장분포가 광전자증배관(PMT) 분광감도에 적합할 것 : 높은 광전자 증배 효율
- 고에너지 감마선용인 경우 원자번호, 밀도가 높고 대용량 제작이 용이할 것 : 반응률 증가



## 광전자증배관 (PMT; Photomultiplier Tube)

- 섬광 검출기는 일반적으로 섬광체(Scintillator)와 광전자증배관(PMT)로 구성
  - 섬광체에서 방출되는 빛의 양은 매우 미약하므로 측정 가능한 형태로 증배 필요



### ■ 광전자증배관(PMT)의 구성

- 광음극(Photocathode): 빛을 광전자로 변환하는 역할, 일함수 낮은 알칼리 토금속 혼합물(K, Sb, Cs)
- 다이노드(Dynode): 광전자 증배 역할, 다단계(10 ~ 14단)로 설계, BeO, MgO, Cs<sub>3</sub>Sb, GaP(Cs) 등
- 양극(Anode): 증배된 전자 수집
- 자기 차폐: 외부 자계에 의한 영향을 최소화하기 위해  $\mu$ 메탈(철-니켈 합금)로 차폐



## 광전자증배관 (PMT; Photomultiplier Tube)

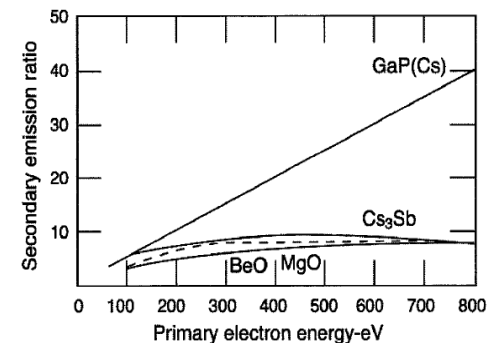
- 광전자증배관(PMT)의 증배율: 약  $10^6 \sim 10^7$ 
  - 다이노드 마다 걸리는 저항을 조절하여 약 100 ~ 200V 전압차 발생
  - 전압차에 의해 가속되어 다음 단 다이노드에서 단계적으로 증배
  - 증배율  $\propto$  인가전압(V) $^{0.7N}$ , N: 다이노드 수  $\rightarrow$  안정적인 고전압(1,000 ~ 2,000V) 공급 필요

## ■ NEA(Negative electron affinity) 물질(GaP(Cs) 등)을 사용한 다이노드

- 각 단의 증배율 증가, 6~7단으로 다이노드 구성 가능
- 고전압을 요하지 않아 전기적 Shock 예방에 효과적

## ■ 암전류(Dark current)에 의한 잡음(Noise) 신호 발생

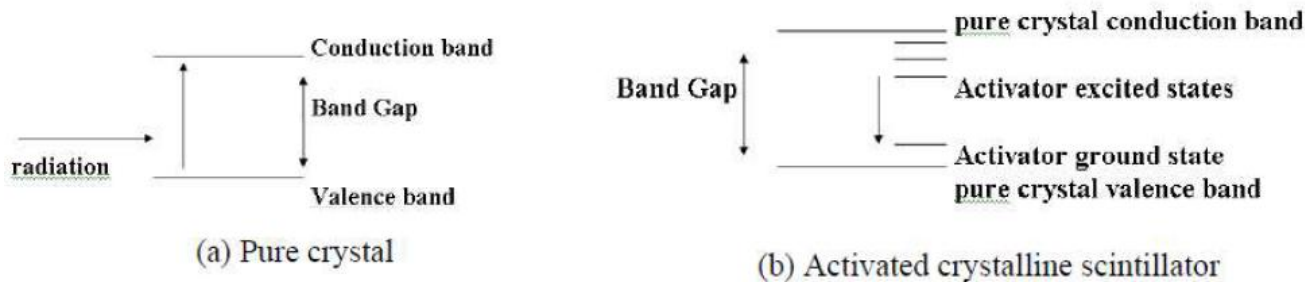
- 열잡음, 직사광선, 광음극 구성물질 등에 의해 발생한 전자가 증배되어 암전류 발생
- 외부 빛 차광 필요, 적정 온도 동작 필요



## 무기(Inorganic) 섬광체

### ■ 무기섬광체의 섬광 방출

- 순수 결정(주로 할로겐원소(I)의 무기염 사용)에서는 충만대, 전도대 간격이 넓음
- 천이 과정에서 방출되는 빛 에너지가 높아 PMT가 응답하기 위한 범위를 벗어남.
- 흡수하는 빛의 파장 영역과 방출하는 빛의 파장 영역이 겹쳐 자체 흡수가 쉽게 발생
- **활성제(Activator):** 발광중심 역할을 하는 불순물에 해당



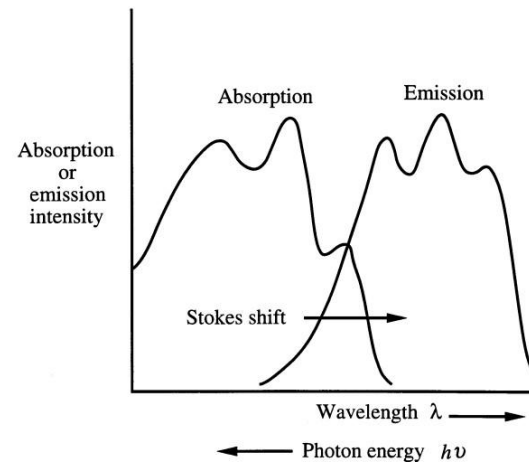
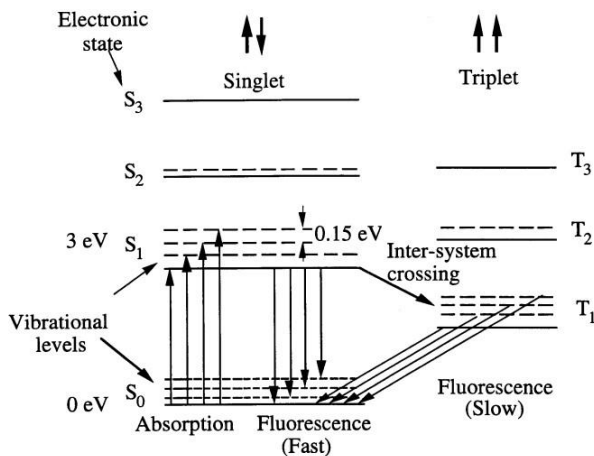
- 활성제의 에너지 밴드가 작아 원하는 영역의 섬광 발생
- 활성제에 의해 생성된 빛은 에너지가 낮아 자체 흡수 감소
- 무기섬광체의 섬광은 결정의 격자구조와 활성제의 에너지 준위에 따라 결정



## 유기(organic) 섬광체

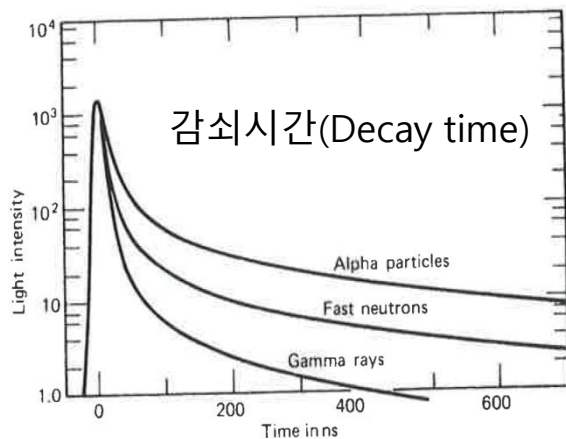
### ■ 유기섬광체의 섬광 방출

- 유기화합물에서 모든 전자는 일반적으로  $S_0$ 에 위치
- $S_1$  에너지 준위를 초과하는 입사 방사선에 의해 여기되며 천이하면서 즉발 섬광 방출
- $S_1$  에서 Triplet 에너지 준위로 천이, 느린 섬광(인광) 방출
- Triplet 에너지 준위에서 방출되는 섬광은 에너지가 낮아 자체흡수가 적음
  - 유기섬광체의 투명도가 높은 이유
- 단일 분자에서 섬광이 발생하므로 물질의 상태(고체, 액체, 기체) 무관



## 무기 섬광체 vs 유기 섬광체

특성	무기 섬광체	유기 섬광체
발광 효율	높음	낮음
천이속도, 감쇠시간	느림	빠름
선형성	좋음	좋지않음
종류	NaI(Tl), CsI(Tl), LiI(Eu)	안트라센, LSC, 플라스틱 섬광체



- 방사선 종류별 감쇠시간 차이를 이용하여 방사선을 구분할 수 있음.
- PSD; Pulse shape discrimination



## NaI(Tl)

- 밀도가 높고 원자번호가 높은 I( $Z=53$ )을 함유하여  $\gamma$ , 중·경질 X 측정에 용이
  - 기체충전형 검출기에 비해 검출효율이 매우 높음
- 조해성이 높아 AI 등으로 밀봉하여 공기와의 접촉 차단
  - 밀폐되어 있으므로 투과력이 약한 알파, 베타, 연질 x선 측정에 부적절
- 기계적, 열적 충격에 약함
- 발광효율이 높아 에너지 분해능 우수 → 감마 분광분석에 이용



## CsI(Tl), CsI(Na)

- NaI(Tl) 보다 밀도가 높아 검출효율이 높음
- NaI(Tl) 보다 발광효율이 낮아 에너지 분해능 떨어짐
- 내습성(CsI(Tl)), 기계적 강도가 좋음
- 감쇠시간이 김(높은 계수율 측정 부적합), 입사 입자별로 상이하여 방사선 구분 가능

- ◆ 검출효율: 계수율/방사능
- ◆ 발광효율: 섬광의 수 / 방사선의 단위에너지 흡수

## BGO ( $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{13}$ )

- 밀도가 높고 원자번호가 높은 Bi( $Z=83$ )을 함유하여  $\gamma$  검출효율 높음
- 발광효율이 좋지 않아 에너지 분해능 떨어짐
- 기계적, 화학적 특성 우수
- 감쇠시간이 매우 짧음  $\rightarrow$  신속하게 감응해야하는 X선 CT, PET 등에 사용

## ZnS(Ag)

- 큰 단결정을 얻을 수 없어 분말형태로 도포하여 적용
  - 검출영역이  $20\mu\text{m}$  미만으로 감마 방사선장에서 알파선만 측정 가능  $\rightarrow$  알파선 측정용
- 조해성이 없으므로 알파선 투과 가능하도록 검출기를 구성 가능

## LiI(Eu)

- ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$  반응을 이용하여 중성자 측정에 사용

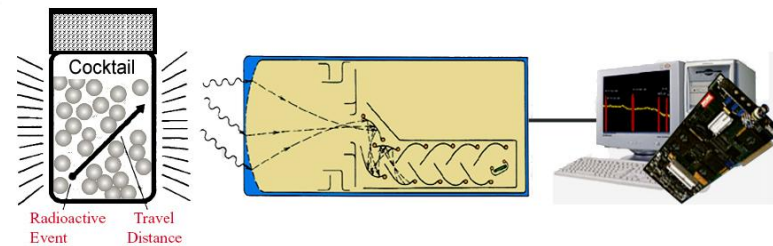


## 주요 특성

- C, H, O, N 등 원자번호가 낮은 물질로 구성, 감마 측정효율이 낮음
  - 감마선 광전효과보다는 콤프턴 산란이 주요 반응이므로 에너지 분광분석 어려움
- 안트라센, 스틸벤 등이 주요 섬광물질이나 결정을 키우기 어려움
- 감쇠시간이 무기 섬광체에 비해 짧음

## 액체 섬광체

- 유기섬광물질을 유기용매에 녹여 제작
- 시료 자체의 흡수, 입사창에 의한 감쇠 없음
- 저 에너지  $\alpha$ ,  $\beta$  측정 가능,  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$  등



## 플라스틱 섬광체

- 액체섬광체를 중합반응을 통해 플라스틱 형태로 제작 → 대면적 제작 가능
- 기계적 강도 높음 → 대면적, 여러 형태 제작 가능
- 공항, 항만 감시기, 재활용 고철 감시기 등에 사용



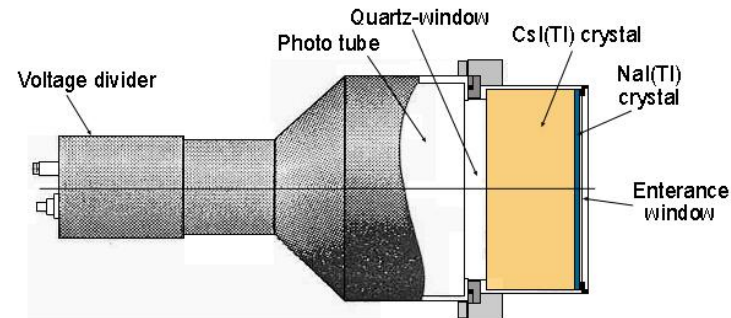
## Loaded scintillator

- 감마선 광전효과 확률을 높이기 위해 높은 원자번호를 갖는 물질(Pb, Sn) 첨가
  - 광전 피크를 통해 감마선 핵종분석 가능
- 불순물로 인해 발광효율 낮고 무기 섬광체에 비해 에너지 분해능 매우 낮음
- 중성자 측정을 위해  $^{10}\text{B}$ ,  $^6\text{Li}$  등을 첨가한 형태도 있음



## Phoswich Detector 또는 Phosphor Sandwich Detector

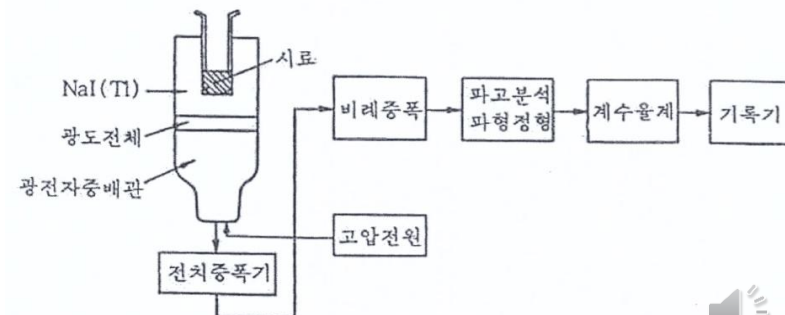
- PMT에 서로 다른 감쇠시간을 갖는 섬광체 2종 적용
- 통상 감마선이 존재하는 환경에서 저에너지 광자 등을 측정하기 위한 목적
- 전단의 얇은 섬광체에서만 저에너지 방사선 측정
- 펄스 파형 분석기를 통해 원하는 신호만 추출
  - 고감마, 저광자: NaI(Tl) + CsI(Tl)
  - 감마, 베타: NaI(Tl) + CaF<sub>2</sub>(Eu)



• NaI(Tl) : 0.23  $\mu$ sec    • CsI(Tl) : 1.0  $\mu$ sec

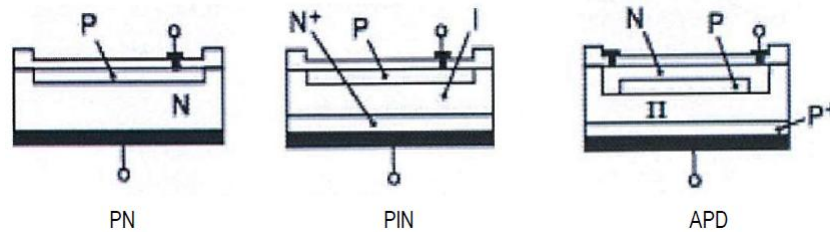
## 우물형 섬광체

- 기하학적 특성으로 인해 검출효율 높음
- 인체 배설물, 혈액 등의 방사능 측정에 적합
- 핵의학, 핵화학 분야에서 주로 사용



## 광다이오드(Photodiode, PD)

- 광전자증배관(PMT)를 대체하여 섬광 검출기 신호처리에 사용
- Si 반도체 다이오드에 빛 입사 시 전자-정공 발생하여 다이오드에 전류 발생
- 종류: PN, PIN, APD, SiPM 등

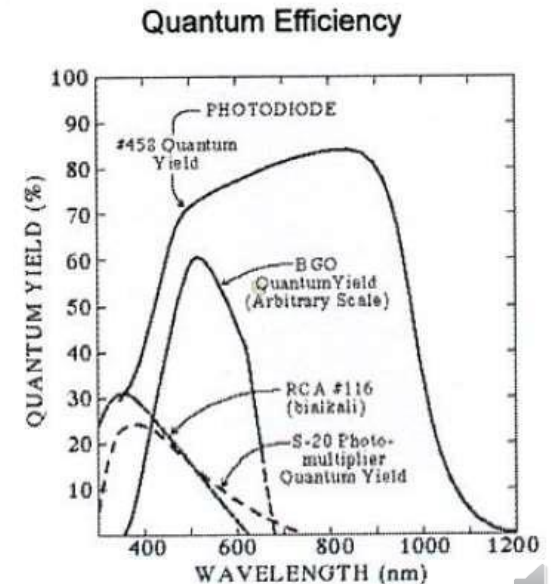


### 장점

- 높은 양자 효율, 에너지 분해능 높음
- 소형화 가능, 소형 섬광체와 결합하여 위치 확인 용이
- 인가전압이 낮음
- 자기장에 영향을 받지 않음.

### 단점

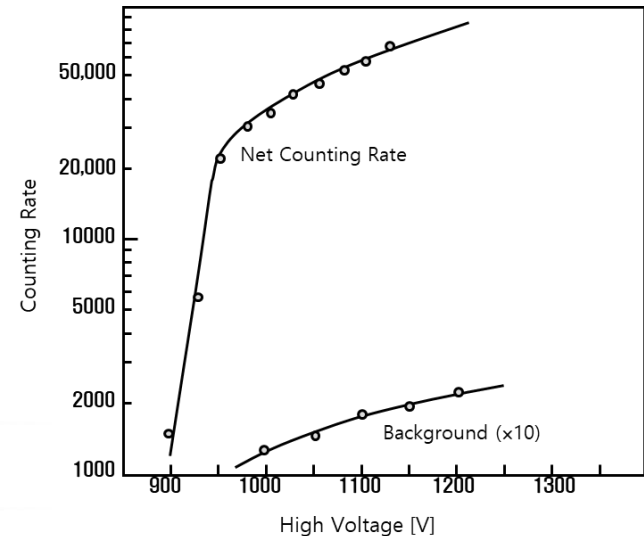
- 표면적에 제한이 있어 섬광체 면적 제한
- 고온에서 잡음 신호 증가



## 동작 전압 결정

- 인가 전압이 증가할수록 계수율 증가
  - 그러나, 열전자에 의한 잡음신호 계수율도 증가

- $\left(\frac{\text{순계수율}}{\text{백그라운드 계수율}}\right)^2$ 의 값이 최대인 지점



## 검출 효율

- 절대섬광효율: 방사선이 섬광체 내에서 잃는 에너지와 섬광으로 변환된 에너지 비율
- 상대섬광효율: 특정 섬광물질에 대한 상대적인 효율
  - 무기섬광체: NaI(Tl)에 대한 상대효율
  - 유기섬광체: 안트라센에 대한 상대효율
- 검출효율 = 섬광효율, 광수집효율, 양자효율, 다이노드 수집효율 등이 모두 고려



## 액체섬광체 + 신호처리부

### ■ 액체섬광물질에 방사성 시료를 혼합한 각테일 형태((Liquid Scintillation Cocktail))

- $4\pi$  계수, 검출기 창에 의한 감쇠 없음
- 액체섬광물질 : 시료 = 5 : 1



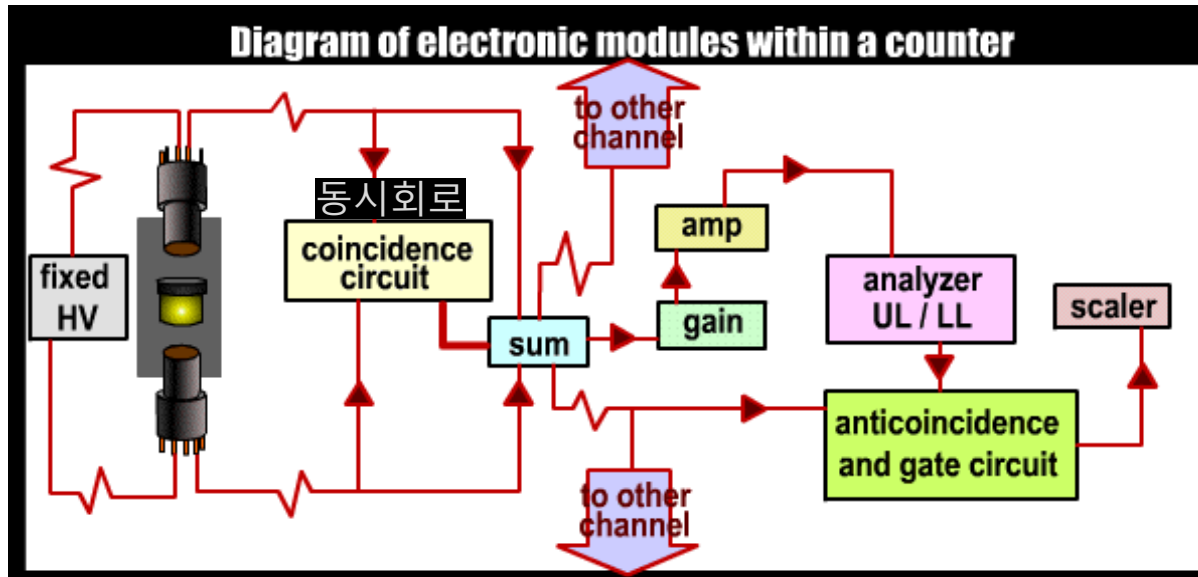
### ■ 액체섬광 각테일: 시료 + 용매(toluene, xylene) + 용질로 구성

- 용매: 유기화합물로 구성, 베타선에 의해 1차적으로 여기되어 에너지 전달
- 제1용질: 에너지를 흡수하여 자외선 방출
  - 주로 PPO (Diphenylacetylene)사용
- 제2용질: 제1용질에서 방출된 단파장의 빛을 장파장으로 전환하여 PMT로 흡수 증가
  - Wavelength Shifter의 역할
  - 주로 POPOP(Phenylloxazole-benzene)사용



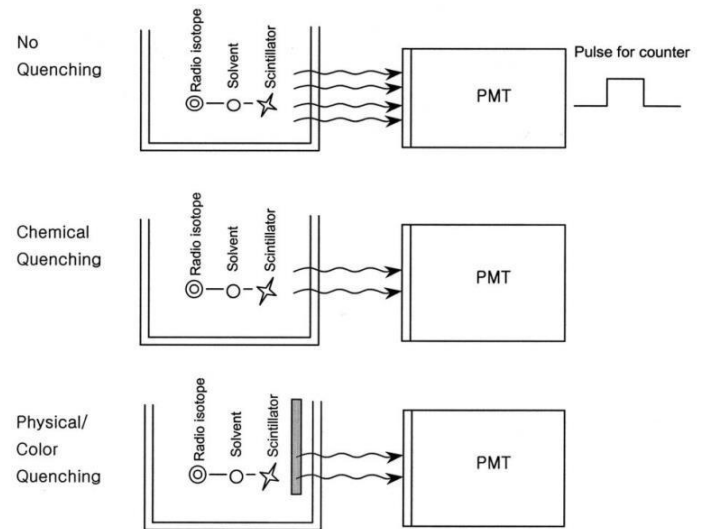
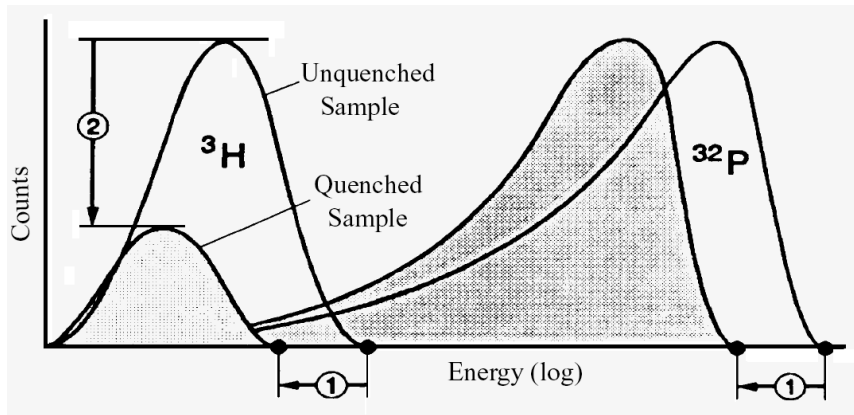
## 액체섬광체 + 신호처리부

- 액체섬광체의 발광효율은 높지 않아 잡음신호 영향 높음
  - 잡음신호 영향 요인: 열전자, 바이알, 각테일의 자연광 등
- 신호처리부 이용: 다중 PMT와 동시회로를 구성하여 잡음신호는 계수하지 않음
- 외부에 차폐체를 두르거나 가드 검출기와 반동시회로를 사용하는 방법도 있음



## 소광현상(Quenching)

### ■ 액체섬광물질에서 발생하는 빛의 에너지와 세기가 약해지는 현상



### ■ 화학소광(Cheical quenching)

- 방사선이 섬광물질이 아닌 불순물과 반응하여 열(적외선)로 소실

### ■ 색소광(Color quenching)

- 각테일의 탁도에 의해 특정 파장의 빛이 흡수되어 소실

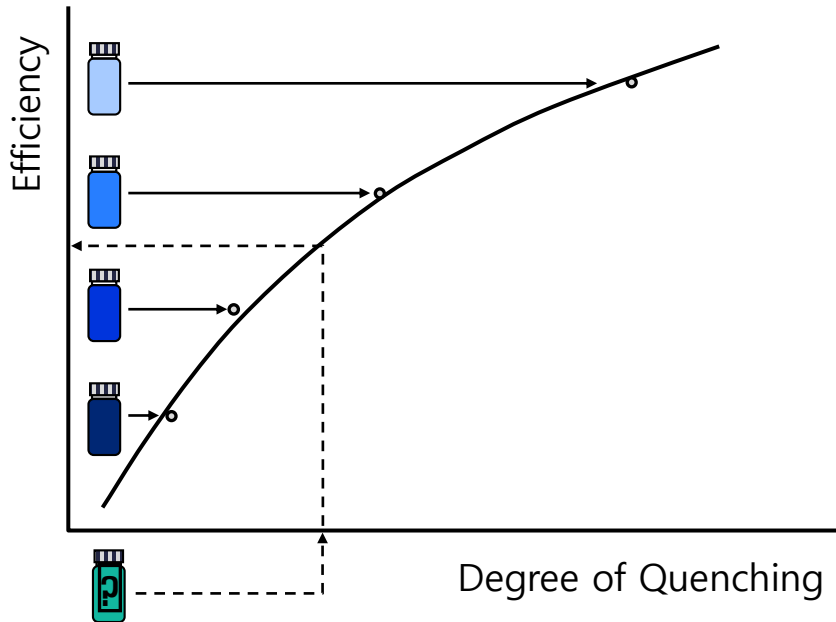
### ■ 물리적 소광, 광소광(Physical quenching, Photon quenching)

- 용매에 녹지 않는 시료 또는 바이알 재질에 의해 굴절되어 빛의 양 소실



## 소광현상(Quenching)의 보정

- 소광의 정도를 나타내는 지표를 만들고 지표와 계측효율과의 관계를 통해 소광 보정
- 방사능이 동일하나 소광 정도가 다른 표준선원을 이용



- ① **Internal Standard(내부표준선원법)**: 방사능을 알고 있는 표준방사선원을 샘플에 첨가한 후 계수효율을 측정
- ② **External Standard(외부표준선원법)**: 감마선 방출 핵종을 바이알 외부에 놓고 측정값을 비교
- ③ **Channel Ratio(채널비법)**: 서로 다른 에너지에 대한 2개의 채널을 설정하고 각 에너지에 대한 측정값을 비교하는 방법



국민에게 신뢰받는 안전 최우선의 KINS

## II. 검출기별 특성

반도체 검출기



# 반도체 검출기의 검출 원리

## ■ 방사선 입사 시 전리작용에 의해 전자, 정공 쌍 생성

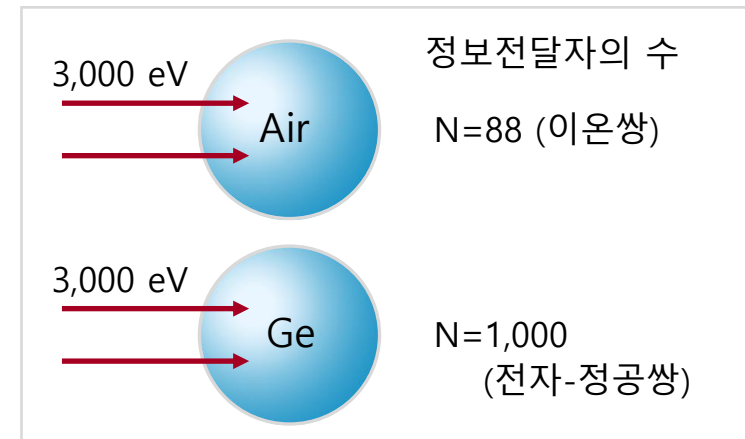
- 생성된 전자는 결정내부를 이동
- 정공은 양전자와 같은 행동으로 결정내부를 이동
- 생성되는 정보전달자의 수(N) =  $\frac{E}{W}$  이므로 에너지 선별가능



물질	원자번호	밴드 간격(eV)	W값(eV)
Si	14	1.106 (300 K)	3.65 (300 K)
Ge	32	0.67 (77 K)	2.96 (77 K)
CdTe	48, 52	1.47 (300 K)	4.43 (300 K)
Hgl <sub>2</sub>	80, 53	2.13 (300 K)	4.22 (300 K)
GaAs	21, 33	1.45 (300 K)	4.51 (300 K)

### ▪ W값

- Ge : 2.96 eV - Si : 3.65 eV - 기체 : 34 eV



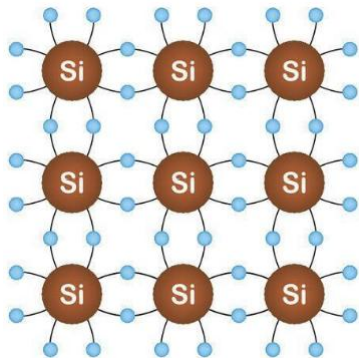
## ■ 기체 충전형 검출기에 비해 밀도가 1,000배 높아 검출 효율 우수

## ■ 생성되는 정보전달자가 많아 출력신호가 크고 에너지 분해능 우수

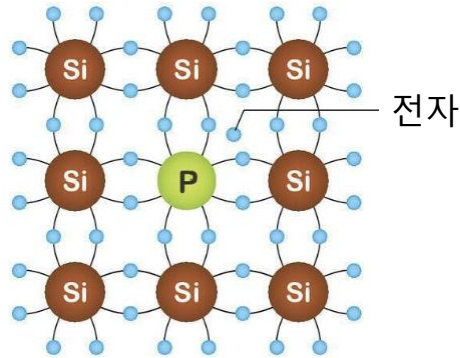


## 신호 생성 원리

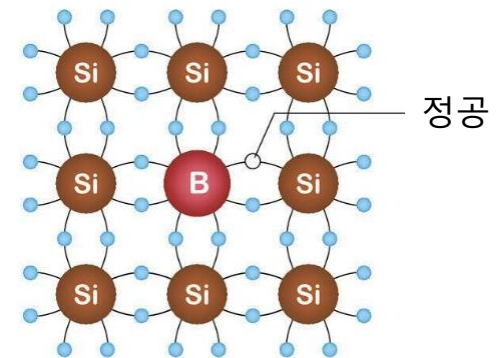
- **n형 반도체:** Si, Ge 등 순수 반도체에 5족 원소(인 등) 도핑
  - 전자 과잉으로 전자가 이동
- **p형 반도체:** Si, Ge 등 순수 반도체에 3족 원소(붕소 등) 도핑
  - 여분의 정공 발생하여 전자를 받아들이면서 정공이 이동



진성반도체



n형 반도체



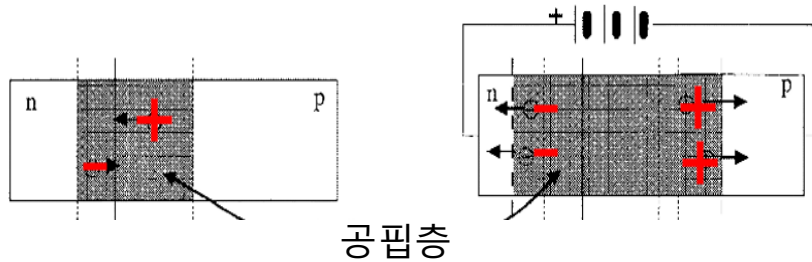
p형 반도체

- **p-n 접합:** n형 반도체와 p형 반도체를 접합
  - 경계면에서 전자와 정공이 상쇄되면서 **공핍층**을 형성, 경계면 전하로 인해 전위차 발생



## 신호 생성 원리

- 역 바이어스: n에 + 전압, p에 - 전압을 인가
  - n층의 전자와 p층의 정공이 전극으로 이동하여 공핍층 확장

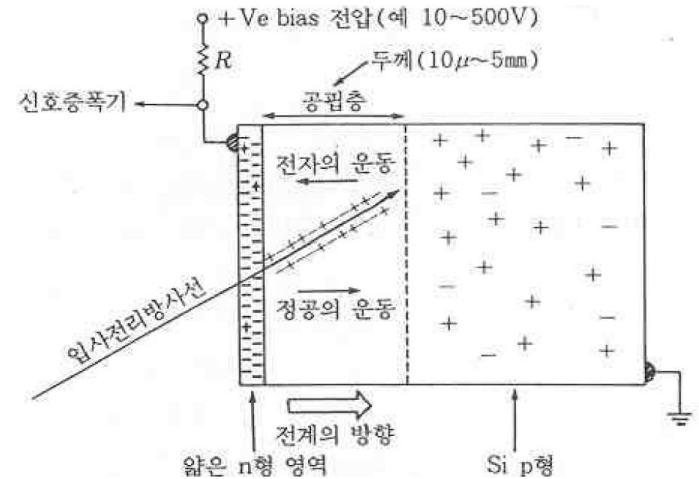


## ■ 공핍층에서 전자-정공 쌍 생성 및 이동

- 전류가 생성됨에 따라 출력펄스 발생

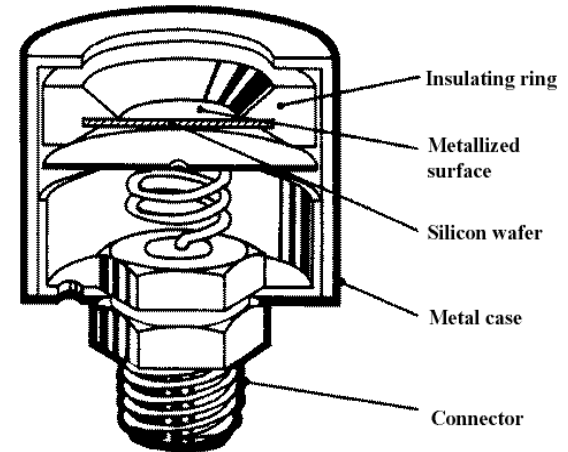
## ■ p-n 접합형의 한계

- 공핍층 두께  $d \propto (V)^{1/2}$  이나 전압 상승에 한계가 있음
- 공핍층 두께가 유효 검출 영역이므로 투과력이 큰 방사선 측정에 불리
- 에너지 분해능 다소 떨어짐



## 표면장벽형(Surface barrier detector)

- n형 반도체 표면에 금속 증착하여 공핍층 형성
  - 일반적으로 Si n형 반도체 표면에 금(Au)막 증착
  - 금속이 p형 반도체 역할
- 공핍층이 매우 얇게 형성
  - $\alpha$  등 중하전입자 검출에 유용
  - 투과력이 높은 방사선에 의한 백그라운드 영향이 적음
- 단점
  - 입사창이 얇아 빛에 대한 민감도가 높음
  - 표면이 물리적으로 매우 약하여 충격에 민감
  - 습기에 의한 노출로 인해 손상될 수 있어 표면 접촉 주의 필요



## Li 드리프트 형

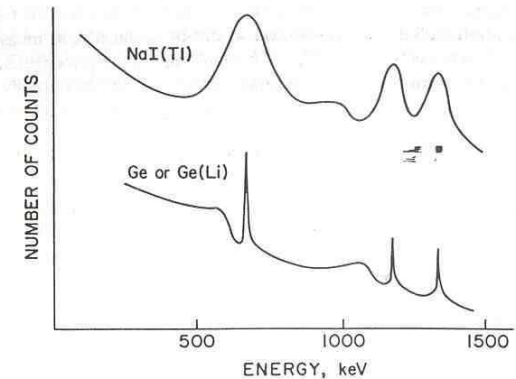
- **p형 Si, Ge 반도체에 Li을 확산시켜 전자를 제공 → 공핍층 확장**
  - 공핍층이 넓어 투과력이 큰 방사선 측정 가능, 에너지 분해능 우수
  - Ge(Li), Si(Li) 등으로 표기
- **Ge(Li)**
  - Si보다 원자번호가 높아 감마선 측정에 유용
  - 상온에서 Li이 이동하여 검출기 특성을 잃게 되므로 액체질소온도(77°K)로 상시 냉각 필요
  - 10 keV 부근에서 K-Edge가 발생해 반응단면적이 급변하여 저에너지 광자 측정에 부적합
- **Si(Li)**
  - 저에너지 광자 및  $\alpha$ ,  $\beta$  측정에 유용
  - 상온에서 Li 이동이 크지 않아 수 주 정도 유지 가능
  - 사용 중에는 열잡음에 의한 신호를 억제하기 위해 냉각 필요



## HPGe(고순도 게르마늄 검출기)

- Li 드리프트형의 단점인 냉각이 필요한 부분을 보완
  - 상온에서 냉각이 불필요하므로 유지 용이
  - 단, Ge의 에너지 밴드 간격이 작아 사용 중 열잡음 억제를 위한 냉각은 필요
- Ge의 장점은 그대로 감마선 검출 용이, 에너지 분해능 매우 우수

NaI(Tl) 섬광검출기	HPGe
가격이 저렴함	고가
감마선 효율이 우수함 (Z=53 포함)	효율이 상대적으로 떨어짐 (Z=32)
크게 제작이 가능함	크기가 작음
상온에서 사용 가능	사용시에만 냉각 필요
Anode의 전압에 민감( $V^{0.7N}$ )	인가전압에 덜 민감
에너지분해능이 저조함 (1.33MeV 기준 6%)	에너지분해능이 우수함 (1.33MeV 기준 0.15%)



# 다양한 형태의 반도체 검출기

## CdTe, CdZnTe, HgI<sub>2</sub>, GaAs

- 에너지 밴드 간격이 넓어 상온에서 냉각없이 사용 가능
- 원자번호가 높아 감마선 검출효율이 좋으나, 에너지 분해능이 좋지 않음
- 결정 크기에 제한이 있어 주로 저에너지 광자 측정

종 류	특 성	용 도
Ge(Li)	- 상시 냉각 필요	감마선
Si(Li)	- 상온에서 수일 보관 가능	저 E 엑스선, $\alpha$ , $\beta$
HPGe	- 사용 시에만 액체질소로 냉각 - 에너지분해능 탁월	엑스선, 감마선
CdTe, CdZnTe, Hgl <sub>2</sub> , GaAs	- 상온에서 사용가능 - HPGe 보다 에너지분해능 저조 - 결정의 크기 제한	감마선
표면장벽형 검출기	- N형 반도체를 산화시켜 검출영역 제작 - 검출영역의 두께가 얇으므로 감마선 백그라운드의 영향이 작다	$\alpha$ , 중하전입자



국민에게 신뢰받는 안전 최우선의 KINS

# Ⅲ. 방사선 측정 및 분석

방사선 측정, 통계



## 정입체각법

- 시료에서 방출된 일부 방사선만 측정, 여러 측정효율을 보정하여 핵종의 방사능 측정

$$A = \frac{r}{f_g \times f_a \times f_b \times f_w \times f_\varepsilon \times f_\tau \times f_m}$$

- A : 방사능
- r : 순계수율
- $f_n$  : 다양한보정인자

- 기하학적 보정인자( $f_g$ ): 검출기의 크기, 모양, 선원간의 거리

- $f_g = 1$  : 기하학적 효율 100 % →  $4\pi$  계수관
- $f_g = 0.5$  : 기하학적 효율 50 % →  $2\pi$  계수관



- 선원 흡수 보정인자( $f_a$ ): 선원의 두께에 기인한 자체의 흡수 보정

- $f_a = \frac{\text{자체흡수가 있을 때 선원의 표면에서 방출되는 입자 수}}{\text{자체흡수가 없을 때 선원의 표면에서 방출되는 입자 수}}$

- 선원의 후방산란 보정인자( $f_b$ ): 선원 지지대에 의한 방사선의 후방산란 보정

- $f_b = \frac{\text{선원 지지대가 있을 때의 계수율}}{\text{선원 지지대가 없을 때의 계수율}}$



## 정입체각법

- 검출기 입사창 흡수 보정인자( $f_w$ ): 입사창 도달 전의 공기와 입사창에 의한 흡수 보정
- 검출기 고유 검출효율 ( $f_\epsilon$ ): 검출물질과의 반응, 출력펄스 크기 등
  - $f_\epsilon = \frac{\text{단위 시간당 검출기에 계수되는 입자 수}}{\text{단위 시간당 검출기로 입사하는 입자 수}}$
- 불감시간 보정인자 ( $f_T$ ): 불감시간에 의한 계수 손실 보정
- 다중계수 보정인자 ( $f_m$ ): GM 계수관의 노화로 인한 방전, 소거능력 저하 보정

## $2\pi$ 또는 $4\pi$ 계수법

- 시료를 검출기 내부에 삽입하여 여러 보정인자를 무시 가능
  - $2\pi$  비례계수관
  - $4\pi$  비례계수관

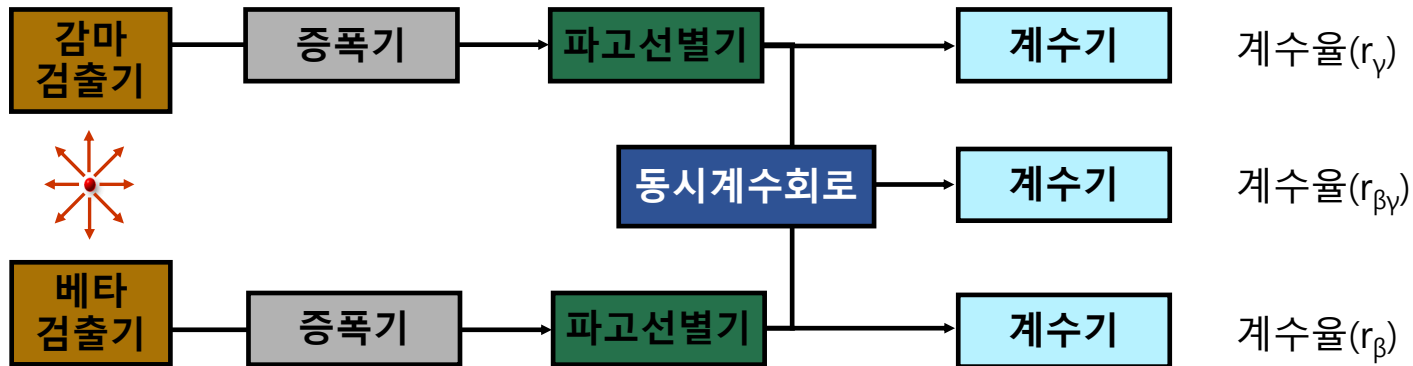
$$A = \frac{r}{0.5 \times f_a \times f_b} \quad \Leftarrow f_g = 0.5$$

$$A = \frac{r}{f_a}$$



## 동시계수법

- $\beta$ , 감마선 동시 방출 핵종의  $\beta$ , 감마선을 동시 측정



$$r_\beta = \varepsilon_\beta A, \quad r_\gamma = \varepsilon_\gamma A, \quad r_{\beta\gamma} = \varepsilon_\beta \varepsilon_\gamma A$$

- $r_\beta$ :  $\beta$ 입자만의 계수율
- $r_\gamma$ :  $\gamma$ 입자만의 계수율  $\varepsilon_\beta \varepsilon_\gamma$
- $\varepsilon_\beta$ :  $\beta$  검출기 검출효율
- $\varepsilon_\gamma$ :  $\gamma$  검출기 검출효율

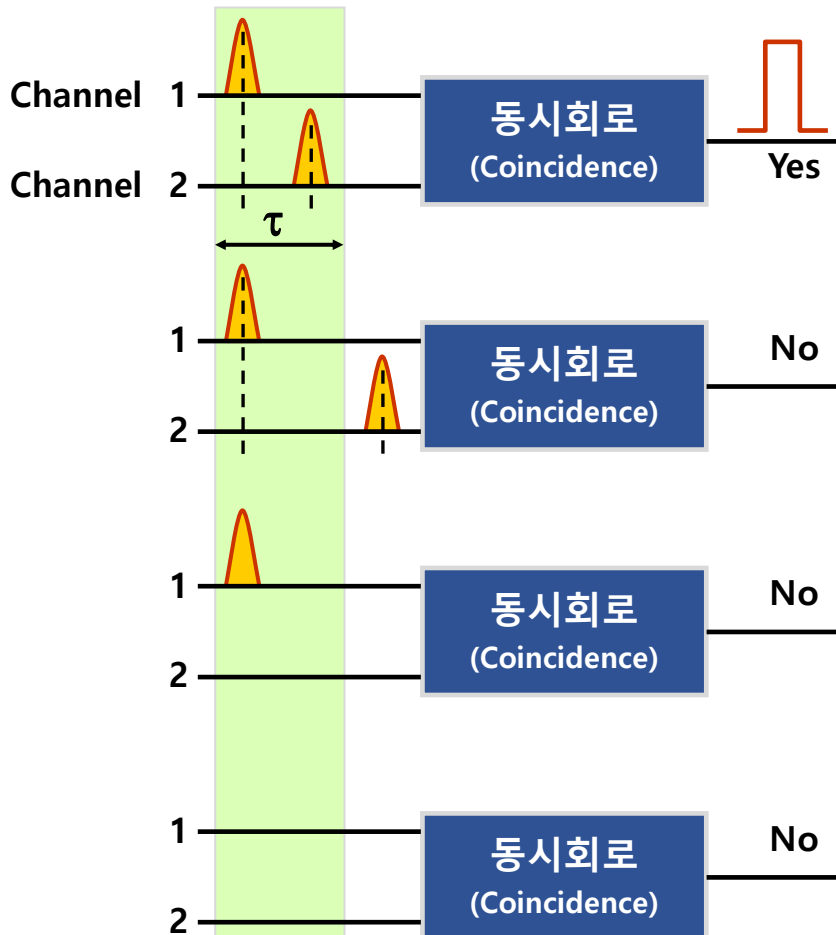
$$A = \frac{r_\beta \cdot r_\gamma}{r_{\beta\gamma}}$$

각 검출기의 검출효율에 관계없이 방사능 절대측정 가능

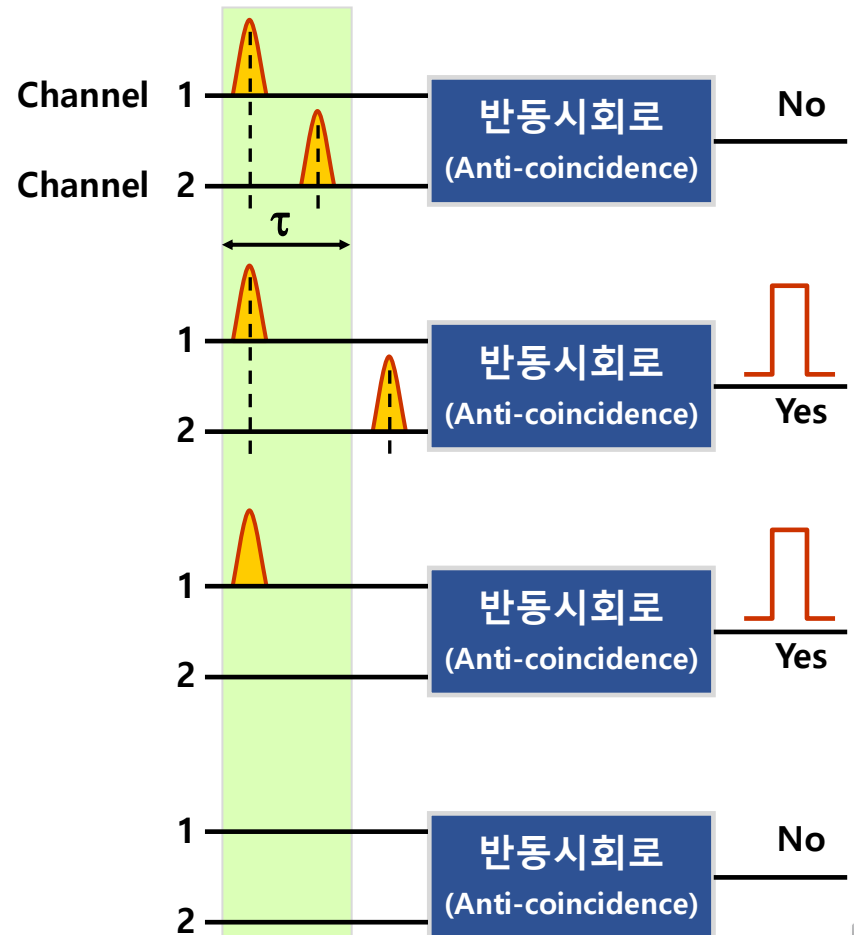


# 동시계수회로와 반동시계수회로

- $\tau$ : 분해시간 또는 동시회로의 폭
- 동시계수회로(Coincidence)



- 반동시계수회로(Anticoincidence)

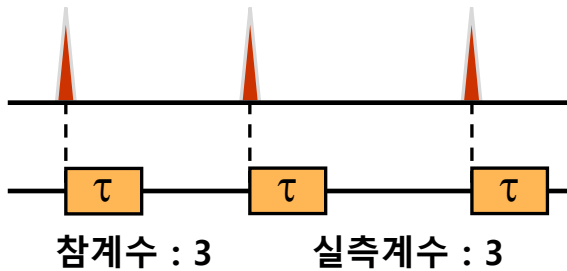


- 방사능을 알고 있는 **표준 선원**을 사용하여 **검출기를 교정**
  - 표준선원과 동일한 형태로 시료를 제작하고 **동일한 조건에서 측정** 수행
- 절대 측정 시 고려해야하는 **여러 보정인자가 상쇄**되므로 쉽게 방사능 정량화 가능
- 방사능  $A_0$ 인 표준선원 측정 시 순계수율  $r_0$ 를 얻은 경우
  - 검출기 전 계수효율:  $\epsilon = \frac{r_0}{A_0}$
- 동일한 형태의 시료, 동일한 측정 조건에서 미지시료 측정 시 순계수율  $r_s$ 
  - 시료의 방사능:  $A_s = \frac{r_s}{\epsilon}$

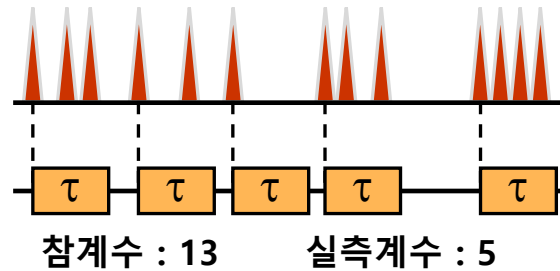


## 불감시간( $\tau$ )에 의한 계수 손실(nonparalyzable)

### ■ 계수율 낮은 경우

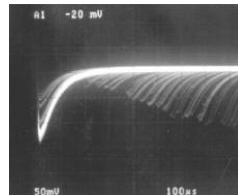


### ■ 계수율 높은 경우



## 불감시간의 측정

### ■ 직접 관찰(오실로스코프 등)

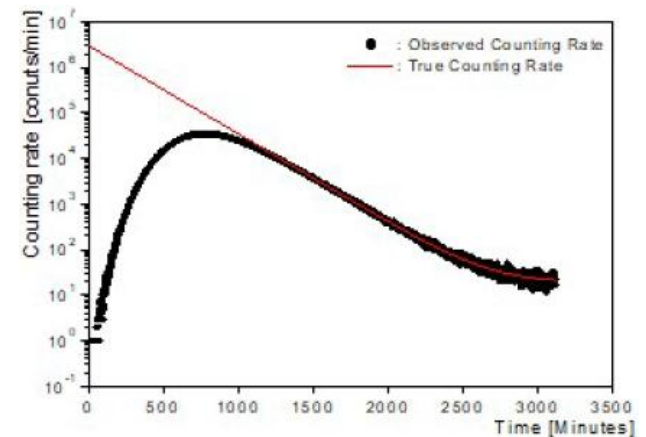


### ■ 붕괴선원법

- 반감기 짧은 동위원소를 이용
- 계수율의 지수 감쇠함수로부터 계산

$$n = n_0 e^{-\lambda t} + n_b$$

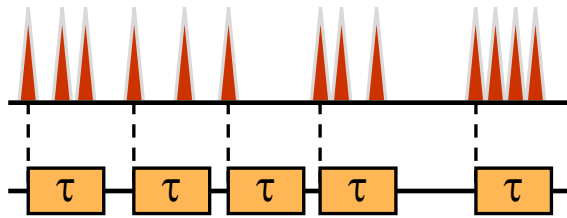
- n: 참값



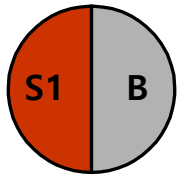
# 불감시간에 의한 계수 보정

## 불감시간의 측정(2선원법)

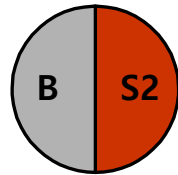
- 계수손실이 계수율에 비례하는 것을 이용



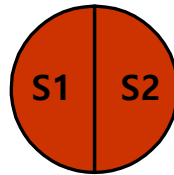
- m: 측정값
- n: 참값
- mτ: 계수손실률



실측계수 :  $m_1$



$m_2$



$m_{12}$



$m_b$



$$n - m = nm\tau, \quad n = \frac{m}{1 - m\tau} = m \left[ 1 + m\tau + (m\tau)^2 + (m\tau)^3 + \dots \right] \cong m(1 + m\tau)$$

$$n_1 = m_1(1 + m_1\tau), \quad n_2 = m_2(1 + m_2\tau), \quad n_{12} = m_{12}(1 + m_{12}\tau), \quad n_b \cong m_b \quad \left\{ \begin{array}{l} \uparrow \\ m\tau \ll 1 \text{ 일 때} \end{array} \right.$$

$$n_1 + n_2 = n_{12} + n_b$$

$$m_1(1 + m_1\tau) + m_2(1 + m_2\tau) = m_{12}(1 + m_{12}\tau) + m_b$$

$$\tau = \frac{m_1 + m_2 - m_{12} - m_b}{m_{12}^2 - m_1^2 - m_2^2}$$



## 이항분포

- 일반적으로 확률( $p$ )에 따라  $n$ 번 중  $x$ 번 사건이 발생할 확률분포는 이항분포를 따름
  - $f(x) = {}_n C_x p^x q^{n-x} = \frac{n!}{(n-x)!x!} p^x (1-p)^{n-x}$     ▪  $q = 1-p$

## 방사성 물질의 붕괴 확률

- 방사성 물질의 붕괴는 **특정 확률**로 이루어지며 통계적 요동을 띠
- 붕괴가 일어날 확률  $p = 1 - e^{-\lambda t}$     ▪  $\lambda$ : 붕괴상수
  - $p \ll 1$  인 특징
- 물질 내 핵의 수는 매우 많으므로  **$n$ 이 큰 특징**



방사성 붕괴는 푸아송(Poisson) 분포에 근사

- $f(x) = \frac{\bar{x}^x e^{-\bar{x}}}{x!}$  ( $x = 0, 1, 2, \dots$ )    ▪  $\bar{x}$ : 기대값(산술평균)



## 푸아송 분포의 평균, 분산

- $\bar{x} = pn$       ■  $\sigma^2 \cong \bar{x}$       ■  $\sigma = \sqrt{\bar{x}}$
- 단일 측정값에 대해서도  $x$ 가 50보다 크다면 그 값을 기대값으로 근사 가능

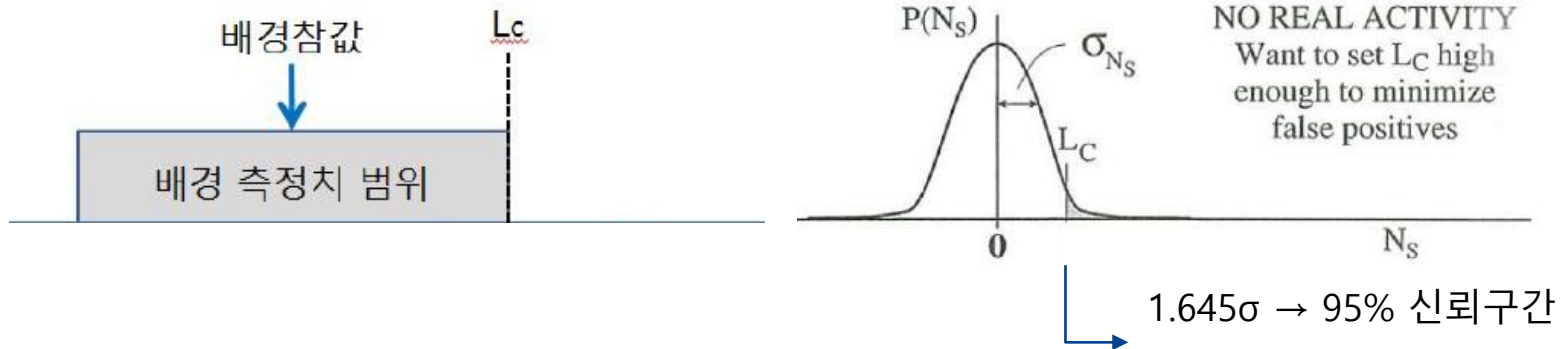
## 오차의 전파(Error propagation)

- $\sigma_u^2 = \left(\frac{\rho u}{\rho x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\rho u}{\rho y}\right)^2 \sigma_y^2 + \left(\frac{\rho u}{\rho z}\right)^2 \sigma_z^2 + \dots$      $u(x, y, z, \dots)$
- $u = x \pm y$  :  $\sigma_u^2 = \left(\frac{\rho u}{\rho x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\rho u}{\rho y}\right)^2 \sigma_y^2 = (1)^2 \sigma_x^2 + (\pm 1)^2 \sigma_y^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2$ 
  - 참값(계수값 - 백그라운드 값)을 구할 때( $N_T - N_b$ ) 적용됨
- $u = x/y$  :  $\sigma_u^2 = \left(\frac{\rho u}{\rho x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\rho u}{\rho y}\right)^2 \sigma_y^2 = \left(\frac{1}{y}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(-\frac{x}{y^2}\right)^2 \sigma_y^2 = \frac{1}{y^2} \sigma_x^2 + \frac{x^2}{y^4} \sigma_y^2$ 
  - 계수 비(또는 방사능 비)를 구할 때( $N_1/N_2$ ) 적용됨
- $u = x/c$  ( $c$ 가 불확도가 없는 상수일 때) :  $\sigma_u^2 = \left(\frac{\rho u}{\rho x}\right)^2 \sigma_x^2 = \left(\frac{1}{c}\right)^2 \sigma_x^2$ 
  - 계수율( $N/t$ )을 구하는 경우  $t$ 는 불확도가 없으므로 적용됨



## $L_c$ (결정한계(Critical Limit) 또는 결정수준(Critical level))

- 방사능이 있다고 판단할 수 있는 최소 측정치



$$N_S = N_T - N_B \quad \sigma_S^2 = \sigma_T^2 + \sigma_B^2$$

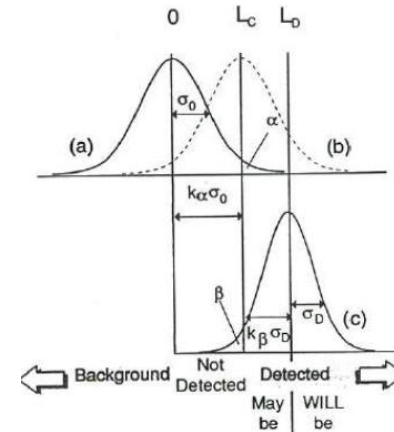
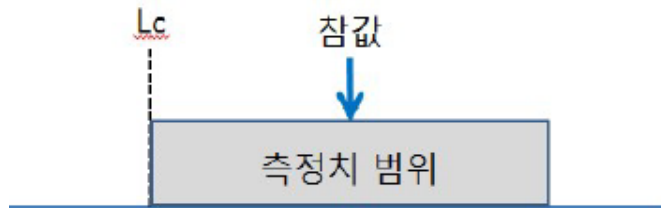
- $N_S$ : 참값
- $N_T$ : 계수값
- $N_B$ : 백그라운드 계수값
- $\sigma_S$ : 참값 편차
- $\sigma_T$ : 계수값 편차
- $\sigma_B$ : 백그라운드 계수값 편차
- $L_c = 1.645 \sigma_S = 1.645\sqrt{2}\sigma_B = 2.33\sigma_B = 2.33\sqrt{N_B}$



# 최소검출한계(MDA)

## $L_d$ (검출한계(Detection Limit) 또는 측정하한(LLD; Lower Level Detection))

- 방사능 유무를 정확히 판단할 수 있는 최소 한도



- 1종 과오(방사능이 없는데 있는 것으로 판단)와 2종 과오(방사능이 있는데 없는 것으로 판단)에 대해 **95% 신뢰도**

- $N_d = L_c + 1.645 \sigma_d = L_c + 1.645\sqrt{N_d + 2N_B} = 1.645(\sqrt{2N_B} + \sqrt{N_d + 2N_B})$
- $N_d = 2.71 + 4.65\sqrt{N_B} \Rightarrow L_d$

## 최소검출한계 (MDA)

- $L_d$ 에 검출효율, 계수시간, 방출율을 고려하여 방사능으로 환산

- $$MDA = \frac{L_d}{y\epsilon t} = \frac{2.71 + 4.65\sqrt{N_B}}{y\epsilon t}$$

- y: 붕괴당 방사선 방출률
- $\epsilon$ : 검출효율
- t: 계수시간



## 카이제곱 시험 ( $\chi^2$ -test)

- 계측 시스템의 통계적 신뢰도를 검사하는 방법
- 반감기가 긴 동일 시료를 반복 측정(N번)할 때 측정 데이터의 통계적 요동이 푸아송 분포와 얼마나 일치하는가를 판단

### ■ $\chi^2$

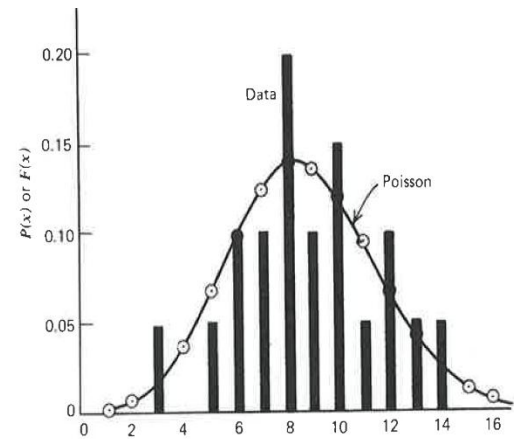
- $\chi^2 = \frac{\sum (x - \bar{x})^2}{\bar{x}}$

- 푸아송 분포를 따를 경우:

- $\chi^2 = \frac{\sum (x - \bar{x})^2}{\bar{x}} \longleftarrow \sigma^2 = \frac{\sum (x - \bar{x})^2}{N-1}$

- $\chi^2 = \frac{(N-1)\sigma^2}{\bar{x}} \longleftarrow \sigma^2 \cong \bar{x}$  (푸아송분포)

- $\chi^2 = N - 1 = f(\text{자유도})$



- 계측시스템의 자유도에서 산출된  $\chi^2$  값이 나타날 확률  $p$ 를  $\chi^2$  분포표에서 확인



## 카이제곱 시험 ( $\chi^2$ -test)의 예

- $\chi^2$  값이 용인 가능한 범위( $0.05 < p < 0.95$ )에 있는지 확인
  - $\chi^2$  값이 큰 경우( $p < 0.05$ ): 분산이 과다
  - $\chi^2$  값이 작은 경우( $p > 0.95$ ): 검출기 감도 부족, 확률적 요동을 적절히 반영하지 못함

[  $\chi^2$  분포표 ]

자유도 (N-1)	확 륜(p)						
	0.99	0.95	0.90	0.50	0.10	0.05	0.01
15	5.23	7.26	8.55	14.34	22.31	25.00	30.58
16	5.81	7.96	9.31	15.34	23.54	26.30	32.00
17	6.41	8.67	10.09	16.34	24.77	27.59	33.41
18	7.02	9.39	10.97	17.34	25.99	28.87	34.81
19	7.63	10.12	11.65	18.34	27.20	30.14	36.19
20	8.26	10.85	12.44	19.34	28.41	31.41	37.57

- 측정 데이터가 한정적일 때 반복 측정횟수를 높이지 않고 현재 계측시스템이 신뢰가능한지 판단 가능



## 백그라운드의 원인

- 검출기 재료, 주변 장치 등에 불순물로 포함된 천연방사성핵종( $^{40}\text{K}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ )
- 측정 환경의 지각, 벽, 구조물에 포함된 천연방사성핵종( $^{40}\text{K}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ )
- 우주방사선(태양방사선, 은하방사선)
- 검출 시스템 회로 자체의 전기적 잡음 등

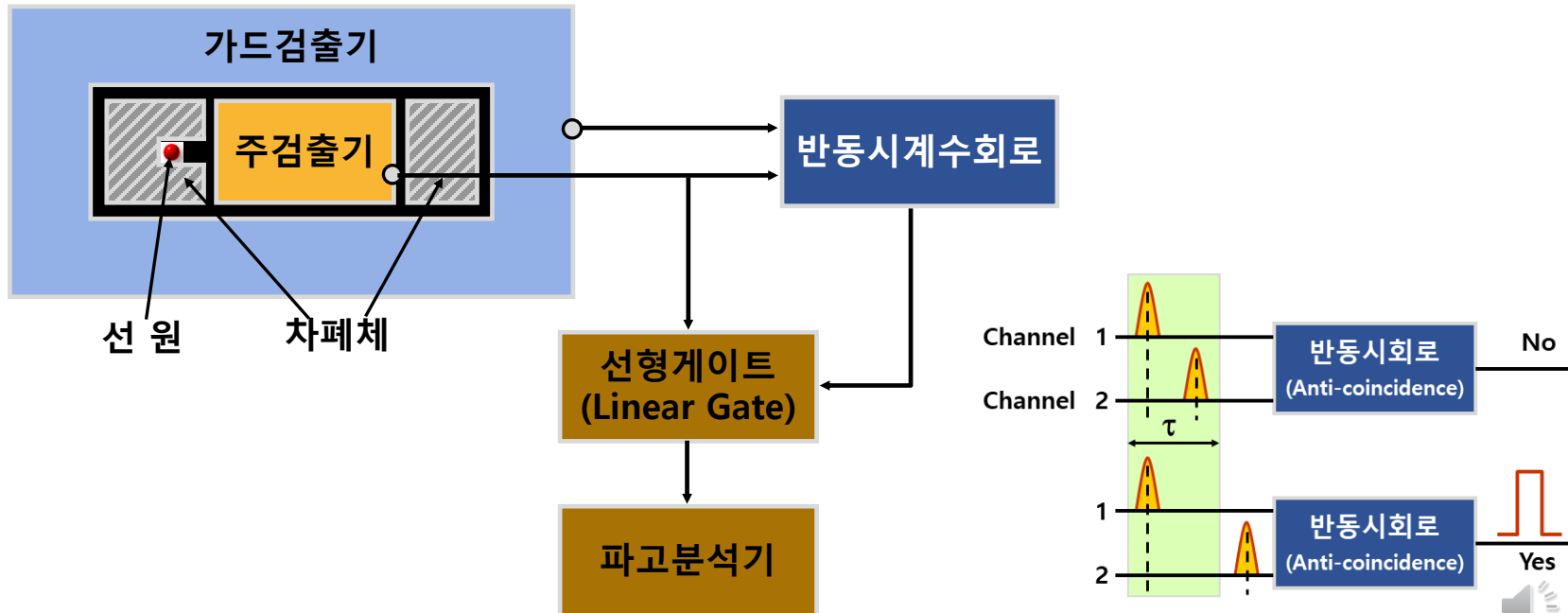
## 백그라운드의 저감

- **피동적 방법:** 방사선 차폐
  - 검출기 주변을 납(Pb) 등 차폐체로 차폐하여 외부에서 입사되는 방사선 영향을 줄임
  - 선원이 차폐체와 반응하여 검출기 저 에너지 피크 형성에 기여
  - 납 차폐체에 함유된  $^{210}\text{Pb}$  딸핵종인  $^{210}\text{Bi}$ 의 베타선에 의한 제동복사선이 발생



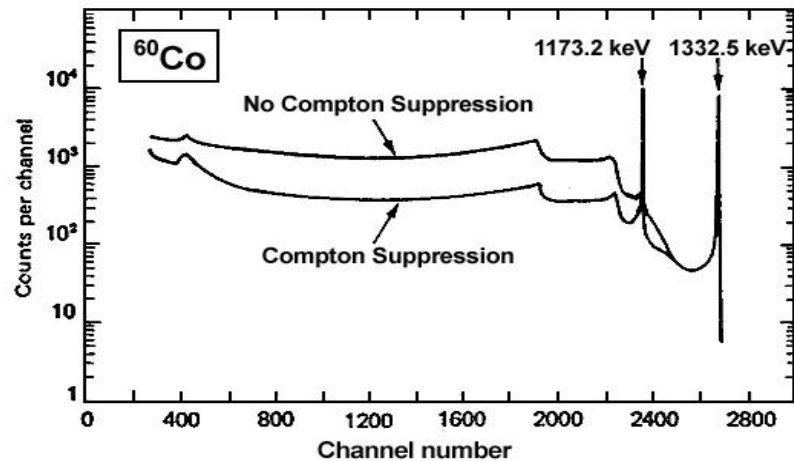
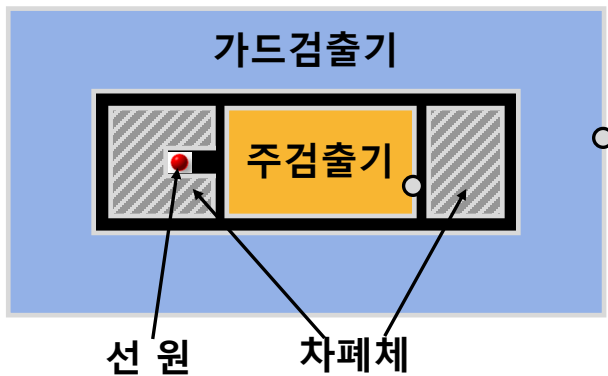
## 백그라운드의 저감

- 능동적 방법: 가드 검출기, 반동시계수회로(Anticoincidence) 이용
  - 선원에 의한 방사선을 주검출기와만 반응하도록 주변을 납(Pb) 등으로 차폐
  - 우주방사선 등 자연방사선은 투과력이 높은 광자이므로 가드검출기와 주검출기에 모두 반응
  - 반동시계수회로를 통해 선원에 의한 반응으로 생성된 신호만 계수



## 백그라운드의 저감

- 능동적 방법: 가드 검출기, 반동시계수회로(Anticoincidence) 이용
  - 부수적인 효과: 주검출기와 컴프턴 산란 후 가드 검출기에서 반응하게 되면 계수되지 않음
  - 에너지스펙트럼에서 컴프턴에 의한 연속구간 계수치가 줄어듦



## 백그라운드의 저감

### ■ 동시계수회로(Coincidence) 이용

- 베타 붕괴 후 감마선을 방출하는 핵종과 같이 동시에 하나 이상의 방사선을 방출하는 선원
- 12.7cm×12.7cm NaI(Tl) 검출기 내벽에 기체유입형 4 $\pi$  비례계수관을 둔 검출시스템
- $\beta$ : 비례계수관 측정, 감마선: NaI(Tl) 측정, 동시 신호 발생 시에만 신호 계수
- 하나의 검출기에서만 생성된 백그라운드 신호 제거

