

합동시 γ 스펙트르측정체계의 특성

김지영, 안정도

합동시 γ 스펙트르측정체계는 다른 형태의 γ 스펙트르미터들에 비하여 γ 선스펙트르측정의 분석 및 결과처리를 어렵게 하는 콤프톤산란에 의한 연속분포를 완전히 없애고 에너지 분해능이 좋은것으로 하여 기초핵물리연구와 응용분야에서 효과적으로 쓰이고있다.

세계적으로 합동시 γ 스펙트르측정체계에 대한 연구가 활발히 벌어져 그것의 특성에 대한 연구결과들이 많이 발표되었다.[1-3]

우리는 합동시 γ 스펙트르측정체계를 구성하고 표준방사성원천인 ^{60}Co 의 합동시 γ 스펙트르를 측정하여 이 체계의 구체적인 특성을 밝혔다.

1. 합동시 γ 스펙트르측정체계의 구성

우리는 합동시 γ 스펙트르측정체계를 그림 1과 같이 구성하였다.

그림 1에서 보는바와 같이 합동시 γ 스펙트르측정체계는 검출체계와 분석통로 및 조종통로로 되어있다. 검출체계는 방사성원천, 2개의 검출기, 고압전원으로, 분석통로는 선형임펄스증폭기, 지연회로, 선형문회로, 다통로진폭분석기로, 조종통로는 선형합회로, 선형임펄스증폭기, 미분진폭선별기, 규격화회로들로 구성되어있다.

방사성원천은 ^{60}Co 과 같이 순차적으로 γ 선을 복사하는 방사성핵자를 리용한다. 원천에서 나온 γ_1 과 γ_2 는 각각 섬광검출기 1과 1'에 들어가며 두 섬광검출기에서 나오는 출구신호는 선형합회로에서 진폭이 합해져 선형임펄스증폭기 3'에 의하여 증폭된다. 증폭된 신호는 미분진폭선별기 6에 들어간다. 미분진폭선별기 6은 일정한 진폭의 신호들만 골라내어 직각임펄스로 규격화한 다음 선형문회로 5의 조종신호로 들어간다.

한편 검출기 1에서 나오는 신호는 선형임펄스증폭기 3에서 증폭되고 일정한 시간동안 지연되어 선형문회로 5의 입구에 들어간다. 선형문회로 5는 조종신호와 시간적으로 일치하는 임펄스들만 통과시키며 통과된 임펄스들은 다통로진폭분석기 8에서 분석된다.

미분진폭선별기 6의 턱값을 검출기 1과 1'의 빗전기임펄스합에 맞추면 연속분포가 없는 스펙트르를 얻게 된다. 그것은 검출기 1, 1'에서 나오는 콤프톤산란임펄스의 합이나

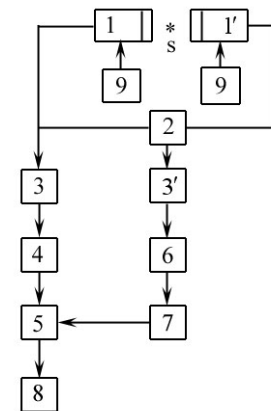


그림 1. 합동시 γ 스펙트르 측정체계의 구성도

- 1, 1'—검출기, 2—선형합회로, 3, 3'—선형임펄스증폭기, 4—지연회로, 5—선형문회로, 6—미분진폭선별기, 7—규격화회로, 8—다통로진폭분석기, 9—고압안정전원, s—원천

검출기 1의 콤프톤산란임펄스와 검출기 1'의 빛전기임펄스의 합 또는 반대과정에 의하여 생긴 임펄스의 합은 진폭이 빛전기임펄스의 합보다 작으므로 미분진폭선별기를 통과하지 못한다. 따라서 콤프톤산란에 의한 임펄스들은 다른 검출기에서 발생한 빛전기임펄스와 동시사건으로 될수 없다.

검출기로는 γ 선측정에 가장 널리 쓰이고있는 NaI(Tl)섬광체를 리용하였다. 측정체제에 리용된 NaI(Tl)섬광체는 크기가 각각 150mm×100mm이다.

2. ^{60}Co 핵의 합동시 γ 스펙트르측정

^{60}Co 은 β 붕괴한 다음 계단 γ 이행하는 대표적인 방사성핵자이다.

그림 1과 같이 구성한 합동시 γ 스펙트르측정체제에서 기록효율을 최대로 높이기 위하여 두 섬광체를 180° 되게 밀착시켰다. 또한 두 검출기에서 나오는 신호는 고압원전압을 세밀조절하여 같은 진폭으로 합회로에 입력하였으며 조종통로와 분석통로의 선형임펄스증폭기들의 증폭결수는 같게 설정하였다.

합동시 γ 스펙트르측정에서 중요한것은 합봉우리의 위치를 정확히 선택하는것이다. 합봉우리를 정확하게 선택하지 못하면 측정된 스펙트르에서 봉우리가 줄어들고 변위된다.

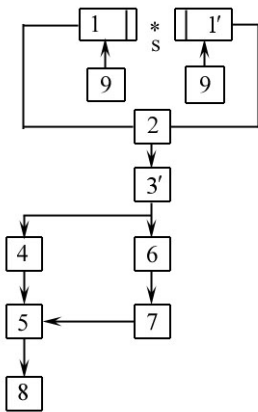


그림 2. 합봉우리 위치를 결정하기 위한 장치구성도

1, 1'—검출기, 2—선형합회로, 3'—선형 임펄스증폭기, 4—지연회로, 5—선형 문회로, 6—미분진폭선별기, 7—규격화 회로, 8—다통로진폭분석기, 9—고압 안정전원, s—원천

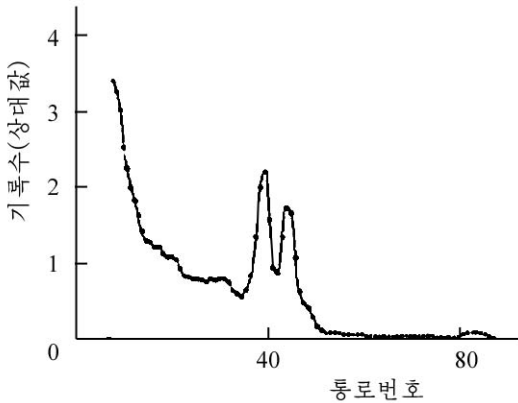
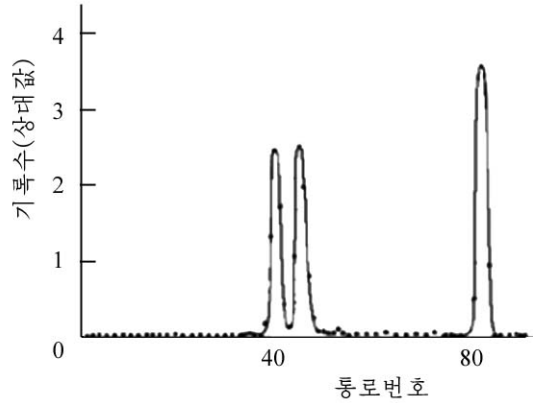
우리는 그림 2와 같은 회로를 구성하여 합봉우리의 위치를 결정하였다.

그림 1에서 분석통로의 입구에 검출기 1의 출구신호대신에 조종통로의 합회로출구임펄스를 입력한 다음 미분진폭선별기 6의 턱값을 조절하면서 합임펄스의 진폭에 해당하는 선별턱값을 찾아내었다.

이 방법으로 2.5MeV의 합봉우리를 미분진폭선별기의 선별턱이 3.05V인 위치에서 찾았다. 이때 선형임펄스증폭기의 증폭결수는 10, 검출기의 고압은 1 530V, 지연회로의 지연시간은 0.7 μ s, 선형문회로의 조종임펄스길이는 2 μ s, 측정시간은 10min이다.

한결정 γ 스펙트르메터로 측정한 ^{60}Co 의 γ 스펙트르와 정확한 동작조건에서 미분진폭선별기의 창문너비가 0.2V 일 때 얻은 ^{60}Co 의 합동시 γ 스펙트르는 각각 그림 3, 4와 같다.

그림 3에서 보는바와 같이 한결정 γ 스펙트르메터로 측정한 ^{60}Co 의 γ 스펙트르에는 연속분포가 많으며 1.17, 1.33MeV에 해당하는 완전흡수봉우리들은 넓이와 높이가 서로 같지 않고 전에너지에 해당하는 2.5MeV의 합봉우리는 매우 작게 나타난다. 그러나 그림 4에서 보는바와 같이 ^{60}Co 의 합동시 γ 스펙트르에는 에너지가 1.17, 1.33MeV인 완전흡수봉우리와 2.5MeV의 합봉우리만 나타나고 연속분포는 전혀 나타나지 않았다. 또한 1.17, 1.33MeV의 완전흡수봉우리들은 넓이와 높이가 서로 같다. 그것은 이행확률이 같은 두 γ 선이 동시사건에 의하여 기록되기때문이다.


 그림 3. ^{60}Co 의 한결정스펙트르

 그림 4. ^{60}Co 의 합동시 γ 스펙트르

에너지분해능은 1.33MeV의 γ 선에 대하여 6.5%로서 한결정스펙트르메터의 에너지분해능 7.9%(1.33MeV)에 비하여 훨씬 좋다.

또한 합동시 γ 스펙트르에서는 합붕우리가 매우 크게 나타난다. 합붕우리는 계단의 전 에너지에 비례하는 임펄스들의 자체동시에 의하여 나타난다. 임펄스들은 분석결정체속에서 계단의 두 γ 양자가 완전히 흡수되든가 또는 러기상태로부터 바닥상태로 직접 이행하는 γ 양자가 완전히 흡수되어 생길수 있다.

측정결과들은 합동시 γ 스펙트르측정체계가 정확히 동작한다는것을 보여준다.

3. 합동시 γ 스펙트르측정체계의 에너지분해능과 기록효률

에너지분해능에 미치는 인자들의 영향 합동시 γ 스펙트르측정체계의 우점은 편속분포가 전혀 나타나지 않는것과 함께 에너지분해능이 매우 좋은것이다.

2개의 γ 이행을 가진 계단에 대한 합동시 γ 스펙트르측정체계의 에너지분해능은 다음과 같이 표시된다.[3]

$$\eta_{1s} = \frac{\eta_1 \sqrt{\eta_2^2 + \eta_s^2}}{\sqrt{\eta_1^2 + \eta_2^2 + \eta_s^2}}, \quad \eta_{2s} = \frac{\eta_2 \sqrt{\eta_1^2 + \eta_s^2}}{\sqrt{\eta_1^2 + \eta_2^2 + \eta_s^2}} \quad (1)$$

여기서 η_1, η_2, η_s 는 한결정 γ 스펙트르메터의 $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_1 + \gamma_2$ 의 완전흡수붕우리들에 대한 에너지분해능이다.

식 (1)은 합동시 γ 스펙트르측정체계의 에너지분해능이 결정체가 1개인 스펙트르메터에서보다 더 좋다는것을 보여준다.

동시기록효률의 손실이 없으면 에너지가 클수록 완전흡수붕우리너비는 좁아진다. 그것은 기록되는 양자의 에너지가 커짐에 따라 에너지분해능이 더 좋아지기때문이다.

합동시 γ 스펙트르메터의 에너지분해능은 조종통로의 미분진폭선별기의 창문너비에 중요하게 관계된다. 미분진폭선별기의 창문너비 ΔV 를 고려하면 합동시 γ 스펙트르측정체계의 에너지분해능은 다음과 같이 표시된다.

$$\eta'_{1s} = \frac{\eta_1 \eta_2}{\sqrt{\eta_1^2 + \eta_2^2}} \sqrt{1 + \frac{\eta_1^2 (\Delta V / 2)^2}{3 \eta_2^2 (\eta_1^2 + \eta_2^2)}}, \quad \eta'_{2s} = \frac{\eta_1 \eta_2}{\sqrt{\eta_1^2 + \eta_2^2}} \sqrt{1 + \frac{\eta_2^2 (\Delta V / 2)^2}{3 \eta_1^2 (\eta_1^2 + \eta_2^2)}} \quad (2)$$

식 (2)로부터 미분진폭선별기의 창문너비가 넓을수록 합동시 γ 스펙트르측정체계의 에너지분해능이 나빠진다는것을 알수 있다.

1.33MeV의 γ 선(한결정 γ 스펙트르메터의 에너지분해능 7.9%)에 대하여 미분진폭선별기의 창문너비에 따르는 합동시 γ 스펙트르측정체계의 에너지분해능변화는 표 1과 같다.

표 1. 창문너비에 따르는 에너지분해능변화(3.05V)

$\Delta V/V$	실험값/%	계산값/%
0.1	6.1	6.0
0.2	6.5	6.5
0.5	7.2	8.6

표 1에서 보는바와 같이 창문너비가 넓어질수록 에너지분해능이 작아지며 실험값과 계산값은 ΔV 가 각각 0.1, 0.2V일 때 거의 일치한다.

즉 식 (2)는 미분진폭선별기의 창문너비가 그리 크지 않을 때 성립한다.

또한 합동시 γ 스펙트르측정체계의 에너지분해능은 미분진폭선별기의 창문설정에도 관계된다. 미분진폭선별기의 창문을 계단의 전에너지에 정확히 맞추지 못했을 때 완전흡수봉우리들은 변위되며 이치러진다.

만일 미분진폭선별기의 창문을 합봉우리에 정확히 맞추지 못하면 ($E_S = E_1 + E_2$) 합스펙트르에서 이행 γ_1 과 γ_2 에 해당하는 봉우리는 각각 ΔE_1 , ΔE_2 만큼 이동하며 그 변위정도는 맞추기의 부정확성 $\Delta E_S = |E_S - (E_1 + E_2)|$ 에 관계된다.

$$\Delta E_1 = \frac{\eta_1^2}{\eta_1^2 + \eta_2^2 + \eta_S^2} \cdot \Delta E_S, \quad \Delta E_2 = \frac{\eta_2^2}{\eta_1^2 + \eta_2^2 + \eta_S^2} \cdot \Delta E_S \quad (3)$$

여기서 η_S 는 $\gamma_1 + \gamma_2$ 의 합봉우리에 대한 합동시 γ 스펙트르측정체계의 에너지분해능이다.

η_S 는 스펙트르메터의 에너지분해능에 영향을 주는데 그 정도는 맞추기의 부정확성(식 (3))에 관계된다.

미분진폭선별기의 창문을 러기준위의 전에너지(2.5MeV, 3.05V)에 정확히 맞추지 못하였을 때 1.33MeV의 γ 선에 대한 에너지분해능변화는 표 2와 같다.

표 2에서 보는바와 같이 창문설정이 0.2V만큼 차이날 때 에너지분해능은 1%이상 더 작아진다.

표 2. 창문설정에 따르는 에너지분해능변화($\Delta V=0.2V$)

V/V	3.05	2.95	2.85
$\eta_S/\%$	6.5	6.9	7.6

기록효율에 미치는 인자들의 영향 합동시 γ 스펙트르메터의 기록효율은 계단의 개별적인 γ 선들에 대한 진폭분포가운데서 하나를 γ 량자의 에너지로 적분하여 결정할수 있다.

계단의 매개 γ 선들에 대한 기록효율은 다음과 같다.

$$\varepsilon_{1S} = 2\sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \varepsilon_1 \varepsilon_2 \cdot \frac{\eta_1}{\sqrt{\eta_1^2 + \eta_2^2 + \eta_S^2}}, \quad \varepsilon_{2S} = 2\sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \varepsilon_1 \varepsilon_2 \cdot \frac{\eta_2}{\sqrt{\eta_1^2 + \eta_2^2 + \eta_S^2}} \quad (4)$$

여기서 ε_1 , ε_2 는 한결정섬광 γ 스펙트르메터에서 γ_1 , γ_2 의 완전흡수봉우리들에 대한 기록효율이다.

식 (4)는 합동시 γ 스펙트르측정체계의 동작상태를 정확히 설정할 때 동시스펙트르에서 개별적인 γ 선들의 완전흡수봉우리들이 넓이는 같고 γ 량자의 에너지에는 관계되지 않는다는것을 보여준다. 또한 ε_1 및 ε_2 가 클수록 즉 섬광체의 크기가 클수록 기록효율이 높아진다는것을 알수 있다.

섬광체의 크기가 클 때 에너지분해능은 작은 결정체에 비하여 어느 정도 나쁘지만 이것은 합동시상태에 에너지분해능이 좋아지는것으로써 보상된다.

만일 선별기의 창문을 합동로에서 정확히 맞추지 못하면 γ 량자의 기록효율은 달라진다.

계단을 이루는 γ 량자의 에너지합을 정확히 결정하지 못할 때 ($E_{0S} \neq E_{01} + E_{02}$ 일 때) 계단의 매개 γ 량자의 기록효율은 $\exp(-4 \ln 2 (\Delta E_{0S})^2 / (\eta_1^2 + \eta_2^2 + \eta_s^2))$ 배만큼 작아진다. ($\Delta E_{0S} = E_{0S} - (E_{01} + E_{02})$)

창문설정을 합봉우리위치에 정확히 맞추지 못한 경우 1.33MeV봉우리에 대한 기록수변화는 표 3과 같다.

표 3에서 보는바와 같이 창문이 0.2V만큼 차이날 때 기록수는 40%정도 더 작아졌다.

합동시 γ 스펙트럼미터의 기록효율은 미분선별기의 창문너비에도 관계된다.

미분진폭선별기의 창문너비를 좁히면 완전흡수봉우리에 떨어지는 임펄스들의 개수가 작아지므로 기록효율이 작아진다.

창문너비에 따르는 합동시 γ 스펙트럼측정체계의 기록수변화는 표 4와 같다.

표 4. 창문너비에 따르는 기록수변화

γ 선 에너지/MeV	창문너비		
	0.5	0.2	0.1
1.17	2 048	1 874	1 097

표 3. 창문설정에 따르는 기록수변화

창문/V	3.05	2.95	2.85
기록수	1 097	1 004	756

표 4에서 보는바와 같이 창문너비가 0.1V일 때의 기록수는 0.5V에 비해서 거의 2배나 작아졌다.

이상의 실험결과는 미분진폭선별기의 창문너비가 좁을수록 합동시 γ 스펙트럼측

정체계의 에너지분해능은 좋아지는 반면에 기록효율이 떨어진다는것을 보여준다.

이것은 합동시상태에서 γ 량자의 기록효율과 에너지분해능사이에는 부 상관관계가 존재한다는것을 의미한다.

맺 는 말

합동시 γ 스펙트럼측정체계를 구성하고 표준방사성원천인 ^{60}Co 의 합동시 γ 스펙트럼을 측정하여 체계의 기록효율과 에너지분해능 및 그에 미치는 인자들의 영향을 비롯하여 합동시 γ 스펙트럼측정체계의 특성을 구체적으로 밝혔다.

참 고 문 헌

- [1] 김일성종합대학학보(자연과학), 59, 4, 77, 주체102(2013).
- [2] V. A. Bondarenko et al.; X III International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei E3 -2005-48, Dubna, 17, 2005.
- [3] F. Michal et al.; Handbook of Radioactivity Analysis, Academic Press, 411~459, 2003.

주체103(2014)년 9월 5일 원고접수

Characteristics of Sum-Coincidence γ -Ray Spectrometer

Kim Ji Yong, An Jong Do

We have manufactured the sum-coincidence gamma-ray spectrometer and specified its characteristics in detail such as its record efficiency, its energy resolving power and some factor's influence on them, by measuring the sum-coincidence gamma-ray spectrum of ^{60}Co .

Key words: γ -ray, spectrometer