บทที่ 2

ทฤษฎี

การวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคพรอมต์แกมมาแอกติเวชัน (Das, 1989; Ehmann,1991)

การวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคพรอมต์แกมมา เป็นเทคนิคในการวิเคราะห์ด้วยวิธีแอกติเวชัน (activation analysis) ที่อาศัยปฏิกิริยาทางนิวเคลียร์ในการทำให้เกิดนิวไคลด์กัมมันตรังสี (radioactive nuclides) หรือมีการเปลี่ยนแปลงภายในนิวเคลียสและมีการยกระดับพลังงานขึ้นไปอยู่ในสถานะกระตุ้น (excited state) โดยนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นจะมีคุณสมบัติเฉพาะตัวอันได้แก่ ค่าครึ่งชีวิต ชนิดของรังสี และพลังงานของรังสีที่ปลดปล่อยออกมา จากคุณสมบัติเฉพาะที่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ได้ว่านิวไคลด์กัมมันตรังสีนั้นเป็นของธาตุใด ซึ่งเรียกว่าเป็นการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (qualitative analysis) และเมื่อนำไปวัดปริมาณรังสีเทียบกับปริมาณรังสีของสารมาตรฐานที่ทราบน้ำหนักแน่นอน จะสามารถคำนวณหาปริมาณของธาตุที่วิเคราะห์ได้เรียกว่าเป็นการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (quantitative analysis)

สำหรับนิวไคลด์ ที่ยกระดับพลังงานขึ้นไปอยู่ในสถานกระตุ้น (excited state) จะมีการลดระดับพลังงานอย่างรวดเร็วเพื่อกลับสู่สถานะปรกติ (ground state) โดยการปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมาในช่วงระยะเวลาสั้นมาก คือ ประมาณ 10^{-14} วินาที และเรียกรังสีแกมมาที่ปลดปล่อยออกมานี้ว่า "รังสีพรอมต์แกมมา"

เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยวิธีพรอมต์แกมมาแอกติเวชัน สามารถแบ่งได้ 3 ประเภท ดังนี้

1. Particle induced prompt photon spectroscopy (PIPPS) เป็นเทคนิคที่ใช้อนุภาคที่มีประจุ (charged particles) เช่น อนุภาคโปรตอน ดิวเทอรอน และอนุภาคอัลฟา เป็นต้น เป็นตัวที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาทางนิวเคลียร์ซึ่งส่วนใหญ่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุเบา (light elements) เช่น Li, F, H, O และ Na ซึ่งบางทีอาจเรียกวิธีวิเคราะห์นี้ว่า"Gamma-Ray Analysis of Light Elements (GRALE)"

2. Photon induced prompt gamma spectrometry (PIPGS) เป็นเทคนิคที่ใช้โฟตอนที่มีพลังงานสูง (energetic photon) เป็นตัวที่ทำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์

3. Prompt gamma neutron activation analysis (PGNAA) เป็นเทคนิคที่ใช้อนุภาคนิวตรอน เป็นตัวที่ทำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์โดยอนุภาคนิวตรอนที่ใช้แบ่งออกได้เป็นนิวตรอนช้าหรือเทอร์มัลนิวตรอน ซึ่งอนุภาคนิวตรอนนี้จะมีระดับพลังงานประมาณ 0.0253 eV หรืออิพิเทอร์มัล-นิวตรอน ซึ่งจะมีพลังงานอยู่ในช่วง 0.05-1 eV และนิวตรอนเร็ว ซึ่งมีพลังงานในช่วง keV-MeV

<u>ต้นกำเนิดนิวตรอน</u> (Neutron sources) (แม้น อมรสิทธิ์ 2534) (Chilton, 1984; Ehmann,1991)

ต้นกำเนิดนิวตรอน แบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (Nuclear reactor) เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เป็นแหล่งผลิตนิวตรอนที่สำคัญ โดยอาศัยกระบวนการฟิสชัน (fission process) ของธาตุยูเรเนียม (^{235}U) ดังปฏิกิริยา

$$_{92}U^{235} + {}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{Z1}X^{A} + {}_{Z2}Y^{B} + k({}_{0}n^{1}) + Q \qquad (2.1)$$

เมื่อ $A + B + k = 236$

$Z1 + Z2 = 92$

ซึ่งค่าเฉลี่ยของการเกิดอนุภาคนิวตรอนต่อฟิสชัน = 2.5 (k = 2.5) และมีระดับพลังงานต่างๆ กัน ตั้งแต่ 1-10 MeV ซึ่งเป็นนิวตรอนเร็ว และมีระดับพลังงานเฉลี่ยประมาณ 2.5 MeV แต่หลังจากผ่านตัวหน่วงพลังงาน ซึ่งเป็นวัตถุที่ใช้สำหรับทำให้พลังงานของนิวตรอนลดลงจากนิวตรอนเร็วสู่เทอร์มัลนิวตรอน โดยการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic collision) กับ H_2O, D_2O หรือ แกรไฟต์ ซึ่งมีค่า neutron absorption cross section ต่ำ แต่มีค่า neutron scattering cross section สูง

สำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่ใช้ส่วนใหญ่ เป็นแบบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัย (nuclear research reactor) ซึ่งให้ความเข้มนิวตรอน อยู่ในช่วง 10^8 - 10^{14} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที และเป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่นิยมใช้กันมากที่สุด

2. ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทป (Isotopic neutron source) ต้นกำเนิดแบบไอโซโทปนี้สามารถแบ่งได้ 3 ประเภท คือ

2.1 α-emitter source เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่ได้จากการผสมธาตุกัมมันตรังสีหนักซึ่งสลายตัวให้อนุภาคอัลฟา (alpha particles) เช่น ^{226}Ra , ^{238}U , ^{241}Am กับธาตุซึ่งมีพลังงานยึดเหนี่ยวของอนุภาคนิวตรอนต่ำหรือธาตุเบา เช่น ^{9}Be, ^{10}B และ ^{2}D (deuterium) เป็นต้น ทำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ (α,n) โดยอนุภาคนิวตรอนที่ได้จะมีพลังงานเฉลี่ยประมาณ 3-4 MeV และมีความเข้มนิวตรอน อยู่ในช่วง 10^5 - 10^7 นิวตรอนต่อวินาทีต่อคูรี (ดังตารางที่ 2.1)

ตารางที่ 2.1 แสดงต้นกำเนิดนิวตรอนแบบ α-emitter source (Ehmann, 1991)

ต้นกำเนิด	ค่าครึ่งชีวิต	พลังงานของนิวตรอน (MeV)	ความเข้มของนิวตรอน ($n\ s^{-1}Ci^{-1}$)
^{239}Pu-^{9}Be	$2.4x10^4$ yr.	3-5	$\approx 10^7$
^{226}Ra-^{9}Be	1600 yr.	3.6	1.1×10^7
^{241}Am-^{9}Be	433 yr.	3-5	2.2×10^7

2.2 Photonuclear Sources เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่ได้จากการผสมธาตุกัมมันตรังสีหนักซึ่งสลายตัวให้โฟตอน หรือรังสีแกมมา เช่น ^{124}Sb , ^{88}Y เป็นต้น กับธาตุเบา เช่น ^{9}Be เป็นต้น ทำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ (γ,n) โดยนิวตรอนที่ได้จะมีพลังงานต่ำกว่า และมีความเข้มนิวตรอน ประมาณ 10^5 นิวตรอนต่อวินาทีต่อคูรี (ดังตารางที่ 2.2)

ตารางที่ 2.2 แสดงต้นกำเนิดนิวตรอน แบบ Photonuclear sources (Ehmann, 1991)

ต้นกำเนิด	ค่าครึ่งชีวิต	พลังงานของนิวตรอน (MeV)	ความเข้มของนิวตรอน ($ns^{-1}Ci^{-1}$)
^{88}Y-^{9}Be	106.6 days	0.16	$1x10^{5}$
^{124}Sb-^{9}Be	60.2 days	0.02	$1.9x10^{5}$

2.3 Spontaneous fission of ^{252}Cf เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยาแตกตัวเอง (self fission หรือ spontaneous fission) โดยนิวตรอนที่ได้มีพลังงานอยู่ในช่วง 1-3 MeV และมีความเข้มนิวตรอน ประมาณ $2.3x10^{12}$ นิวตรอนต่อวินาทีต่อกรัม

3. เครื่องกำเนิดนิวตรอน (Neutron generator) เป็นเครื่องผลิตอนุภาคนิวตรอนพลังงานสูงจากการเร่งอนุภาคที่มีประจุ เช่น ดิวเทอรอน หรือ โปรตอน ให้มีพลังงานสูงขึ้น และวิ่งเข้าชนเป้าซึ่งมักจะเป็นธาตุเบา โดยใช้เครื่องเร่งอนุภาค (particle accelerator) ซึ่งอาจจะเป็น Linear accelerator หรือ Cyclotron เป็นต้น ทำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์และได้อนุภาคนิวตรอนออกมาปฏิกิริยาที่นิยมใช้กันมากคือ

ปฏิกิริยา D - D (DD reaction)

$$_1D^2 + {}_1D^2 \rightarrow {}_2He^3 + {}_0n^1 + 3.28\ MeV \qquad (2.2)$$

ปฏิกิริยา D - T (DT reaction)

$$_1D^2 + {}_1T^3 \rightarrow {}_2He^4 + {}_0n^1 + 17.6\ MeV \qquad (2.3)$$

ปฏิกิริยา DD และ DT ที่เกิดขึ้น จะได้นิวตรอนที่มีพลังงานประมาณ 2.46 และ 14.08 MeV ตามลำดับ และสามารถให้ความเข้มนิวตรอน ออกมาในช่วง 10^8 - 10^{12} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที โดยส่วนใหญ่จะใช้ที่ 10^9 นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที

ตารางที่ 2.3 ปฏิกิริยาผลิตนิวตรอนของเครื่องเร่งอนุภาค (แม้น อมรสิทธิ์, 2534)

ปฏิกิริยานิวเคลียร์	พลังงานของนิวตรอน (MeV)
^{2}H (d,n) ^{3}H	2.46
^{3}H (d,n) ^{4}He	14.08
^{9}Be (α,n) ^{12}C	5.3
^{12}C (d,n) ^{13}N	3.4×10^{-3}
^{13}C (α,n) ^{3}H	2.07
^{7}Li (p,n) ^{7}Be	29.9×10^{-3}

<u>พลังงานของนิวตรอน</u> (Energy of neutron) (Curtiss, 1969; Das et al., 1989)

อนุภาคนิวตรอนสามารถแบ่งออกตามระดับพลังงานได้ดังนี้

1. นิวตรอนช้า (Slow neutron) หมายถึง นิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง 0 - 1 KeV แบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มย่อยๆ ดังนี้

1.1 เทอร์มัลนิ วตรอน (Thermal neutron) เป็นนิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง 0.01-0.3 eV ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของตัวกลาง พลังงานที่พบมากที่สุด (most probable energy) ของนิวตรอน ณ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส คือ 0.0253 eV การกระจายของพลังงานชนิดนี้จะเป็นไปตามการกระจายแบบแม็กเวลล์ (Maxwellian distribution) ดังนี้

$$N(E) = \frac{2\pi N}{(\pi k T)^{3/2}} E^{1/2} e^{-E/kT} \qquad (2.4)$$

เมื่อ $N(E)$: จำนวนนิวตรอนที่พลังงานใดๆต่อหน่วยปริมาตร

N : จำนวนนิวตรอนรวมทั้งหมดต่อหน่วยปริมาตร

k : ค่า Boltzman's constant = 8.617×10^{-5} eV/K

T : อุณหภูมิของตัวกลาง เป็นเคลวิน (K)

1.2 อิพิเทอร์มัลนิวตรอน (Epithermal neutron) เป็นนิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง 0.05 - 1.0 eV.

1.3 รีโซแนนซ์นิวตรอน (Resonance neutron) เป็นนิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง 1.0 - 1000 eV นิวเคลียสของธาตุหลายชนิดจะมีการจับนิวตรอนที่อยู่ในช่วงพลังงานนี้ได้ดี ซึ่งเรียกว่ามี "resonance absorption"

2. อินเตอร์มีเดียตนิวตรอน (Intermediate neutron) หมายถึง นิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง 0.1 - 1.0 MeV.

3. นิวตรอนเร็ว (Fast neutron) หมายถึง นิวตรอนที่มีพลังงานสูงตั้งแต่ 1 keV ขึ้นไป

<u>ปฏิกิริยานิวเคลียร์ของนิวตรอน</u> (Nuclear reaction of neutron) (Chilton , 1984 Foster , 1983 ; Kaplan , 1962; Lamarsh, 1983)

เนื่องจากอนุภาคนิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุไฟฟ้า และมีมวลใกล้เคียงกับอนุภาคโปรตอน คือ 1.6747×10^{-24} กรัม การเกิดอันตรกิริยากับสสารจึงแตกต่างจากอนุภาคที่มีประจุ (Charged particle) อื่นๆ โดยอนุภาคนิวตรอนจะไม่มีผลต่อแรงคูลอมบ์ (Coulombic force) และมีอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนน้อยมาก ซึ่งถือได้ว่าไม่ก่อให้เกิดการไอออไนเซชัน แต่จะเกิดการชนกับนิวเคลียสมากที่สุด ทำให้มีอำนาจทะลุทะลวงสูงการเกิดอันตรกิริยาของนิวตรอนกับสสารอาจแบ่งออกได้ 3 ประเภท ดังนี้

1. การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic collision) เป็นอันตรกิริยาที่นิวตรอนชนกับนิวเคลียสของธาตุนั้นๆ แล้วพลังงานของนิวตรอนจะลดลง ส่วนนิวเคลียสที่ถูกชนจะรับพลังงานไป โดยที่นิวเคลียสนั้นยังอยู่ในสถานะปรกติ พลังงานและโมเมนตัมรวมของนิวตรอนกับนิวเคลียสก่อนและหลังชนจะมีค่าเท่าเดิม ในการเกิดการชนแบบยืดหยุ่นนี้ เมื่อเกิดกับอนุภาคที่มีมวลใกล้เคียงกับอนุภาคนิวตรอน เช่น โปรตอน ดิวเทอรอน นิวตรอนจะเสียพลังงานมาก ทำให้พลังงานลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว สารประกอบของธาตุเบา โดยเฉพาะอย่างยิ่งไฮโดรเจน ซึ่งถูกนำมาใช้เป็นตัวหน่วงพลังงานนิวตรอน

ถ้าให้ E_1 : เป็นพลังงานก่อนการชน

E_2 : เป็นพลังงานหลังการชนหนึ่งครั้ง

ξ : เป็นการเสียพลังงานโดยเฉลี่ยต่อการชน 1 ครั้งในรูปลอการิทึม (logarithm)

จะได้

$$\xi = ln\left(\frac{E_1}{E_2}\right) \qquad (2.5)$$

$$\frac{E_1}{E_2} = exp(-\xi) \qquad (2.6)$$

ξ มีความสัมพันธ์กับเลขมวล (mass number) ของนิวเคลียสที่ถูกชนดังนี้

$$\xi = 1 - \left(\frac{(A-1)^2}{2A}\right)\cdot\left(\frac{ln(A+1)}{(A-1)}\right) \qquad (2.7)$$

เมื่อ A : เป็นเลขมวลของตัวหน่วงพลังงานนิวตรอน

ถ้า n : เป็นจำนวนการชนเฉลี่ยเพื่อลดพลังงานจาก E_0 เป็น E

$$n = \left(\frac{1}{\xi}\right)\cdot ln\left(\frac{E_0}{E}\right) \qquad (2.8)$$

โดยที่ E_0 : เป็นพลังงานของนิวตรอนก่อนการชน

E : เป็นพลังงานที่ระดับเทอร์มัลนิวตรอน

จำนวนการชนเฉลี่ยในการลดพลังงานนิวตรอนจาก 2 MeV ลงเหลือ 0.0253 eV โดยใช้ตัวหน่วงพลังงานต่าง ๆ กัน แสดงดังในตารางที่ 2.4

ถึงแม้ว่าค่า ξ และ n จะแสดงถึงความสามารถในการหน่วงพลังงานของนิวตรอนของธาตุต่างๆ แต่ก็ไม่สามารถบอกได้ว่าธาตุใดเป็นตัวหน่วงพลังงานที่ดี จากตารางที่ 2.4 พบว่าจะต้องพิจารณาถึง ค่าโอกาสในการกระเจิงของนิวตรอน (macroscopic slowing down power; MSDP) และค่าโอกาสในการจับนิวตรอน (moderation ratio; MR) ร่วมด้วย

ถ้าให้ MSDP : เป็นโอกาสในการกระเจิงของนิวตรอน

จะได้ว่า $$\text{MSDP} = \xi \sum_s^{epi} \tag{2.9}$$

โดยที่ $\sum_s^{epi}$: เป็นโอกาสที่อิพิเทอร์มัลนิวตรอนจะเกิดการกระเจิง ต่อ เซ็นติเมตร

และ MR : เป็นโอกาสในการจับนิวตรอน

จะได้ว่า $$\text{MR} = \frac{\xi \sigma_s^{epi}}{\sigma_a^{th}} \tag{2.10}$$

โดยที่ $\sum_a^{th}$: เป็นโอกาสที่เทอร์มัลนิวตรอนจะถูกจับ ต่อ เซ็นติเมตร

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของธาตุในการลดพลังงานของนิวตรอน (Kaplan, 1962)

ธาตุที่ใช้เป็นตัวหน่วงความเร็วหรือพลังงาน	ξ	จำนวนครั้งในการชนสำหรับการลดพลังงานนิวตรอนจาก 2 MeV ลงเหลือ 0.0253 MeV	MSDP	MR
^{1}H	1.000	18	20.4	61
^{2}D	0.725	25	2.465	5350
^{4}He	0.427	42	8.87×10^{-6}	51
^{9}Be	0.207	86	0.1538	126
^{10}B	0.171	105	0.092	0.00086
^{12}C	0.158	114	0.083	216
H_2O	0.927	19	1.425	62
D_2O	0.510	35	0.177	4830

จากตารางที่ 2.4 จะเห็นได้ว่าไฮโดรเจนมีคุณสมบัติในการหน่วงพลังงานของนิวตรอนได้ดีที่สุด รองลงมาได้แก่ ดิวเทอเรียม แต่เนื่องจากไฮโดรเจนและดิวเทอเรียมเป็นก๊าซ โอกาสที่นิวตรอนจะชนจึงมีน้อยมาก เพราะก๊าซมีความหนาแน่นของอะตอมน้อยกว่าของแข็ง และของเหลว ในทางปฏิบัติการใช้ไฮโดรเจน และดิวเทอเรียม เป็นตัวหน่วงพลังงานของนิวตรอน จึงใช้ในรูปของ น้ำ (H_2O) และน้ำชนิดหนัก (D_2O) ตามลำดับ การพิจารณาคุณสมบัติของตัวหน่วงพลังงานของนิวตรอนจึงต้องพิจารณาค่า MSDP และ MR ด้วย

2. การชนกันแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic collision) โดยที่พลังงานของนิวตรอนบางส่วนถูกถ่ายเทให้กับสสาร โดยสสารนั้นจะอยู่ในสถานะกระตุ้น ส่วนอนุภาคนิวตรอนก็จะเกิดการเบี่ยงเบนไปเป็นมุม θ การชนกันแบบนี้อนุภาคนิวตรอนจะถูกหน่วงพลังงานลงไปเรื่อย ๆ พลังงานที่เหลืออยู่ของอนุภาคนิวตรอนสามารถคำนวณได้จาก

$$E = E_o \frac{[(A+1) + 2A(1-\cos\phi)]}{(A+1)^2} \qquad (2.11)$$

เมื่อ E : พลังงานที่เหลือของอนุภาคนิวตรอน

E_o : พลังงานเริ่มต้นของอนุภาคนิวตรอน

A : เลขมวลของนิวเคลียส

θ : เป็นมุมที่อนุภาคนิวตรอนเบี่ยงเบนไป

ϕ : เป็นมุมที่นิวเคลียสเบี่ยงเบนไป

และ $$\cos\theta = \frac{A\cos\phi + 1}{[(A+1)^2 + 2A(1-\cos\phi)]^{1/2}} \qquad (2.12)$$

ระดับพลังงานของนิวตรอนจะเหลือน้อยที่สุด ถ้า $\phi = 180^o$

ดังนั้น $$E_{min} = E_0 \left[\frac{A-1}{A+1}\right]^2 \qquad (2.13)$$

จะเห็นว่าถ้าเป็นการชนกับนิวเคลียสของธาตุหนัก $E_{min}=E_o$ นั้นคือ ในการชนแต่ละครั้งอนุภาคนิวตรอนเสียพลังงานน้อยมาก แต่ถ้า A=1 (ธาตุไฮโดรเจน) $E_{min} = 0$ แสดงว่าอนุภาคนิวตรอนเมื่อชนกับนิวเคลียสของธาตุไฮโดรเจนจะลดพลังงานลงได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นโดยทั่วไปจึงนิยมใช้ พาราฟิน และ น้ำ ซึ่งมีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบอยู่มากเป็นตัวหน่วงพลังงานของนิวตรอน

3. การชนแบบจับนิวตรอน (neutron captured) ในนิวเคลียส เมื่ออนุภาคนิวตรอนมีพลังงานต่ำ หรือเทอร์มัลนิวตรอนเข้าชนนิวเคลียสแล้วถูกจับหายไป พร้อมทั้งให้รังสีแกมมาออกมา 1 ตัว หรือมากกว่า ไอโซโทปที่เกิดขึ้นจะเป็นของธาตุเดิม เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่า '(n,γ) reaction' เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมากที่สุด ดังสมการ

$$_ZX^A + {}_0n^1 \rightarrow {}_ZX^{A+1} + \gamma \qquad (2.14)$$

เมื่อ $_{Z}X^{A}$ คือ ไอโซโทปเสถียรของธาตุ X มีเลขอะตอม Z และมีเลขมวล A

$_{0}n^{1}$ คือ อนุภาคนิวตรอน

$_{Z}X^{A(m)}$, $_{Z}X^{A+1}$, $_{Z}X^{A-1}$, $_{Z-1}Y^{A}$, $_{Z-2}Y^{A-3}$ คือ ไอโซโทปของธาตุเดิม (X) และธาตุใหม่ (Y) ซึ่ง m จะแสดงว่าเป็น Metastable state

$_{1}H^{1}$, $_{2}He^{4}$ และ γ คือ อนุภาคโปรตอน อนุภาคอัลฟา และรังสีแกมมา

สำหรับอนุภาคนิวตรอนมีพลังงานสูงอาจเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ได้ดังนี้

3.1 ปฏิกิริยา (n,2n) ปฏิกิริยานี้จะให้นิวตรอนออกมาอีก 1 ตัว เนื่องจากนิวตรอนที่เข้าชนนั้น มีพลังงานสูงมากพอที่จะทำให้นิวตรอนในนิวเคลียสที่ถูกชนหลุดออกมาไอโซโทปกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นจะเป็นของธาตุเดิม ดังสมการ

$$_{Z}X^{A} + {}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{Z}X^{A-1} + 2({}_{0}n'^{1}) \qquad (2.15)$$

3.2 ปฏิกิริยา (n,p) เกิดขึ้นเมื่อนิวตรอนพลังงานสูงเข้าชนนิวเคลียส แล้วถูกจับหายไปในนิวเคลียส พร้อมทั้งให้อนุภาคโปรตอนออกมา จะได้เรดิโอไอโซโทปของธาตุใหม่ดังสมการ

$$_{Z}X^{A} + {}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{Z-1}Y^{A} + {}_{1}H^{1} \qquad (2.16)$$

3.3 ปฏิกิริยา (n,α) คล้ายกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในข้อ 3 แต่ต่างกันที่อนุภาคที่ให้ออกมานั้นเป็นอนุภาคแอลฟา ดังสมการ

$$_{Z}X^{A} + {}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{Z-2}Y^{A-3} + {}_{2}He^{4} \qquad (2.17)$$

<u>การเกิดไอโซโทปกัมมันตรังสีและการสลายตัวของไอโซโทปกัมมันตรังสี</u> (Radioisotope production and decay) (แม้น อมรสิทธิ์ , 2534) (Ehmann, 1991)

อัตราการเกิดของไอโซโทปกัมมันตรังสี ขึ้นอยู่กับจำนวนอะตอมของไอโซโทปของธาตุ ภาคตัดขวางของนิวตรอน และความเข้มของนิวตรอนที่ใช้ ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$R_f = N \phi \sigma \qquad (2.18)$$

$$= \frac{(\phi \sigma w N_A f)}{M} \qquad (2.19)$$

เมื่อ R_f : อัตราการเกิดของไอโซโทปกัมมันตรังสี

N : จำนวนอะตอมของไอโซโทปของธาตุที่เกิดอันตรกิริยากับนิวตรอน แล้วเกิดเป็นโอไอโซโทปรังสี

σ : ภาคตัดขวางนิวตรอน (Neutron cross section) ของไอโซโทป มีหน่วยเป็น บาร์น (Barn)

ϕ : ความเข้มของนิวตรอน มีหน่วยเป็น นิวตรอนต่อตารางเซ็นติเมตรต่อวินาที ($n/cm^2/sec$)

w : น้ำหนักของธาตุที่วิเคราะห์ มีหน่วยเป็น กรัม

N_A : Avogadro's number = 6.02×10^{23} โมเลกุลต่อกรัม-โมล

M : มวลอะตอมของธาตุที่จะวิเคราะห์

f : % abundance ของไอโซโทป

ส่วนอัตราการสลายของโอไอโซโทปรังสีที่เกิดขึ้น จะเป็นไปตามสมการต่อไปนี้ คือ

$$D = -\lambda N_t \qquad (2.20)$$

เมื่อ D : อัตราการสลายตัวของไอโซโทปกัมมันตรังสี

λ : ค่าคงที่ของการสลายตัวของไอโซโทปกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น (decay constant) มีค่าเท่ากับ $(0.693) / T_{1/2}$

$T_{1/2}$: ค่าครึ่งชีวิต (half-life) ของไอโซโทปกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น

N_t : จำนวนอะตอมของไอโซโทปกัมมันตรังสี ณ เวลาใดๆ

ถ้าอัตราการเกิดของไอโซโทปกัมมันตรังสีมีค่าคงที่ อัตราการเพิ่มหรืออัตราการเปลี่ยนแปลงของจำนวนอะตอมของไอโซโทปกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น $(d N_t / d t)$ หลังจากการอาบด้วยรังสีนิวตรอนจะมีค่าดังสมการ

$$\frac{dN_t}{dt} = \phi \sigma N - \lambda N_t \qquad (2.21)$$

จากการอินทิเกรต จะได้

$$\lambda N_t = \phi \sigma N \left(1-e^{-\lambda t} \right) \qquad (2.22)$$

ดังนั้นจะได้

$$cos\ \theta = \frac{A cos\ \phi + 1}{\left[(A+1)^2 + 2A \left(1-cos\phi \right) \right]^{1/2}} \qquad (2.23)$$

เมื่อ A_t : ความแรงรังสีของไอโซโทปกัมมันตรังสี ณ เวลาใดๆ

แต่ถ้ามีการทิ้งไอโซโทปกัมมันตรังสี ที่ได้จากการอาบรังสีไว้ระยะหนึ่ง จะได้

$$A_t = \frac{\phi \sigma w N_A f \left(1- e^{-\lambda t} \right) \left(e^{-\lambda t_w} \right)}{M} \qquad (2.24)$$

เมื่อ t_a : ระยะเวลาในการอาบรังสี (activation time)

t_w : ระยะเวลาที่ทิ้งไว้ (waiting time)

หรือ $$w = \frac{\left(M A_t e^{-\lambda t_w}\right)}{\left[\phi \sigma N_0 f \left(1 - e^{-\lambda t_a}\right)\right]} \qquad (2.25)$$

ในกรณีที่สารตัวอย่างที่จะวิเคราะห์เป็นธาตุกัมมันตรังสี ดังนั้น อัตราการลดลงของไอโซโทปกัมมันตรังสีในสารตัวอย่างจำเป็นจะต้องคิดทั้งส่วนที่เกิดการสลายตัว (decay) และส่วนที่เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์นั้นคือ อัตราการลดลงของไอโซโทปกัมมันตรังสีในสารตัวอย่าง

$$-\frac{dN_t}{dt} = \lambda N + \phi\sigma N \qquad (2.26)$$

$$= N(\lambda + \phi\sigma) \qquad (2.27)$$

$$= N\Lambda \qquad (2.28)$$

ดังนั้น $$N_t = N_0 e^{-\lambda t} \qquad (2.29)$$

เมื่อ $$\Lambda = (\lambda + \phi\sigma) \qquad (2.30)$$

จากความแรงรังสีที่ได้ จะสามารถคำนวณหาปริมาณของธาตุที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้ตามสมการ (2.25) แต่ในทางปฏิบัติแล้วต้องนำสารตัวอย่างที่วิเคราะห์ได้เปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน (comparasion method) ที่ถูกอาบรังสีนิวตรอนที่ตำแหน่งเดียวกัน และใช้เวลาในการอาบเท่ากัน แล้วนำมาวัดความแรงรังสีเพื่อคำนวณหาปริมาณธาตุโดยใช้สมการ

$$W_x = \frac{W_s R_x}{R_s} \qquad (2.31)$$

เมื่อ W_x : น้ำหนักของธาตุ ในสารตัวอย่าง

W_s : น้ำหนักของธาตุ ในสารมาตรฐาน

R_x : ความแรงรังสีของสารตัวอย่าง

R_s : ความแรงรังสีของสารมาตรฐาน

<u>ภาคตัดขวาง</u> (cross section) (Curtiss, 1959; Foster ,1983 ; Lamarsh, 1983)

ภาคตัดขวางจุลภาค (microscopic cross section : σ) คือ ค่าที่บอกถึงโอกาส (probability) ที่นิวเคลียสจะเกิดปฏิกิริยากับอนุภาคนิวตรอนที่วิ่งเข้าชน มีหน่วยเป็น บาร์น (barn)

โดยที่ 1 barn = 10^{-24} ตร.ซม.

ภาคตัดขวางจุลภาคของนิวเคลียส ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

$$\sigma = \sigma_s + \sigma_a \qquad (2.32)$$

เมื่อ σ : ผลรวมของภาคตัดขวางจุลภาคของปฏิกิริยาการชนแบบยืดหยุ่น (elastic collision) และการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic collision)

σ_s : ภาคตัดขวางจุลภาคของการกระเจิง (microscopic scattering cross section)

σ_a : ภาคตัดขวางจุลภาคของการดูดกลืน (microscopic absorption cross section)

: ผลรวมของภาคตัดขวางจุลภาคของปฏิกิริยาการจับนิวตรอนที่ทำให้เกิดการแตกตัว การปลดปล่อยอนุภาคที่มีประจุ และการผลิตนิวตรอน

ถ้าวัสดุที่ใช้เป็นเป้ามีจำนวนนิวเคลียส N ตัวต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ผลคูณของ N กับ σ เรียกว่า ภาคตัดขวางมหภาค (Σ ; macroscopic cross section) มีหน่วยเป็น cm^{-1}

$$\Sigma = N\sigma \qquad (2.33)$$

หรือกล่าวได้ว่าภาคตัดขวางมหภาคก็คือ โอกาสต่อหนึ่งหน่วยระยะทางที่จะเกิดปฏิกิริยาเมื่อมีอนุภาควิ่งเข้าไป

ภาคตัดขวางนี้สำหรับธาตุหนึ่งๆ จะมีค่าเปลี่ยนไปตามพลังงานของอนุภาคนิวตรอนที่วิ่งเข้าชนดังนั้นสำหรับอนุภาคนิวตรอนที่มีพลังงานค่าหนึ่ง ก็จะมีภาคตัดขวางค่าหนึ่งสำหรับธาตุหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า differential cross section ($\sigma(E)$) ค่าเฉลี่ยของภาคตัดขวาง ($\bar{\sigma}$) มีค่าเท่ากับ

$$\bar{\sigma} = \frac{\int_0^\infty \phi(E)\,\sigma(E)\,dE}{\int_0^\infty \phi(E)\,dE} \qquad (2.34)$$

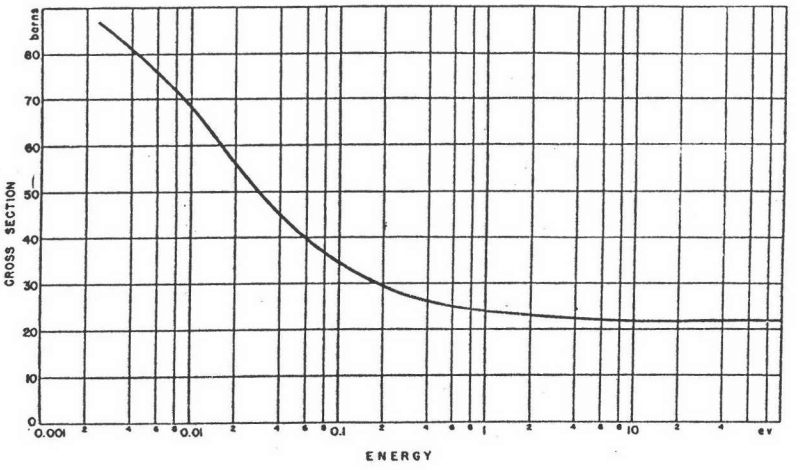
ภาคตัดขวางรวมต่ออะตอมไฮโดรเจนของน้ำในช่วงพลังงาน 0.002 - 100 eV และภาคตัดขวางรวมของนิวตรอนสำหรับไฮโดรเจนในช่วงพลังงาน 0.01-100 MeV แสดงไว้ในกราฟรูปที่ 2.1 และรูปที่ 2.2 สำหรับค่าของภาคตัดขวางรวมของวัสดุดูดกลืนนิวตรอน (neutron absorber) บางชนิดที่จะใช้เป็นตัวกรอง (filter) นิวตรอนช้าแสดงไว้ในรูปที่ 2.3

เมื่อนิวตรอนวิ่งผ่านตัวกลางที่มีความหนา X มีค่าภาคตัดขวางต่อนิวตรอนเท่ากับ σ และมีความหนาแน่นอะตอม (atom density) เท่ากับ N อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความเข้มของนิวตรอนที่ทะลุผ่านออกไปโดยไม่เกิดอันตรกิริยาใดๆ สามารถคำนวณได้จาก

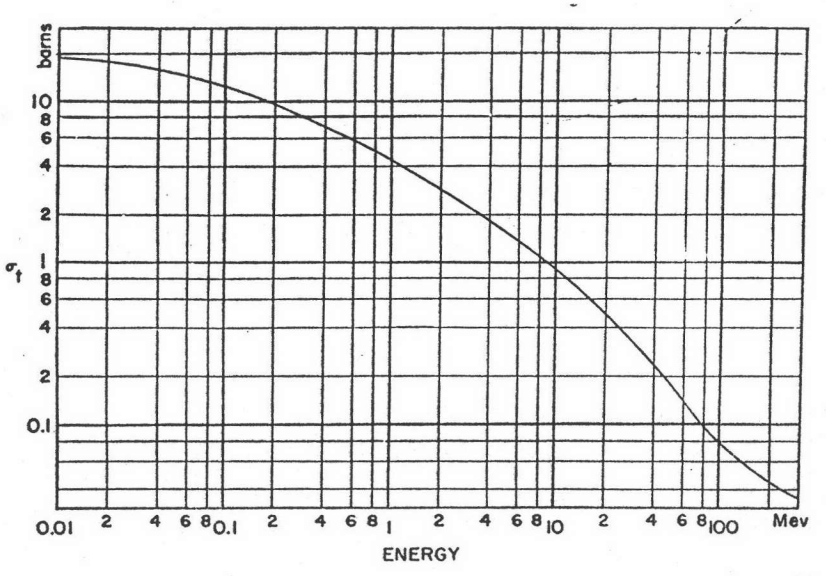
$$I_X = I_O\, e^{(-N\sigma X)} \qquad (2.35)$$

เมื่อ I_x : ความเข้มของนิวตรอนที่ทะลุผ่านไปได้โดยไม่เกิดอันตรกิริยาใดๆ เลย

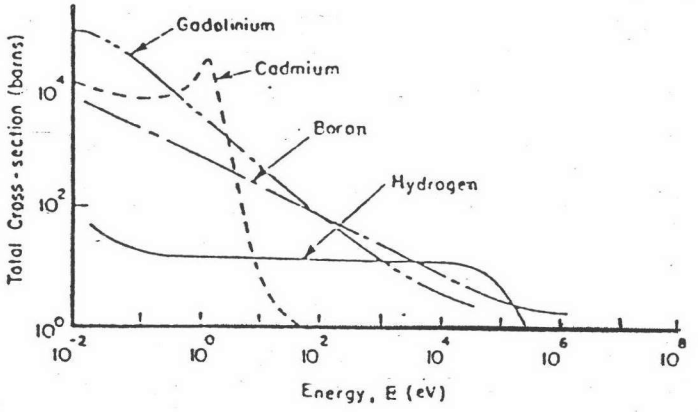
I_o : ความเข้มของนิวตรอนที่ตกกระทบตัวกลาง



รูปที่ 2.1 แสดงภาคตัดขวางรวมต่ออะตอมไฮโดรเจนของน้ำสำหรับพลังงานของนิวตรอน ในช่วง 0.002 ถึง 100 eV.



รูปที่ 2.2 แสดงภาคตัดขวางรวมของนิวตรอนสำหรับไฮโดรเจนในช่วง 0.01 ถึง 100 MeV.



รูปที่ 2.3 แสดงภาคตัดขวางรวมของวัสดุดูดกลืนนิวตรอนบางชนิด ที่พลังงานต่างๆ ของนิวตรอน

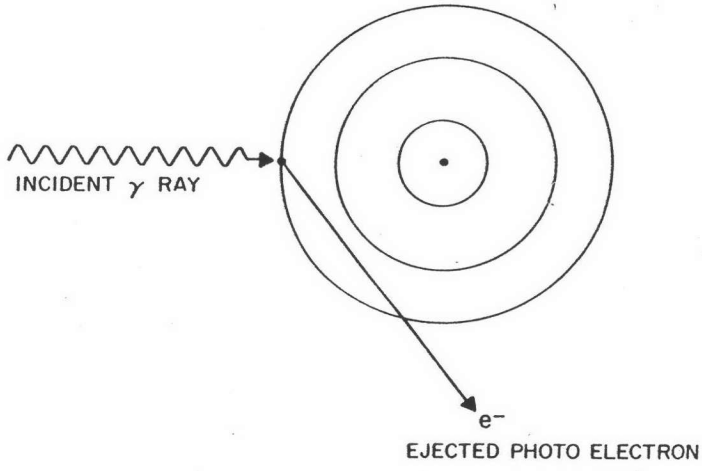
<u>อันตรกิริยาของรังสีแกมมากับสสาร</u> (Interaction of gamma-ray with material)
(ศลักษณ์ ทรรพนันทน์ , 2527 ; แม้น อมรสิทธิ์ , 2534) (Foster , 1983 ; Knoll , 1989 ; Lamarsh, 1983)

เนื่องจากรังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นจึงไม่มีประจุ และมวล การเกิดอันตรกิริยาของรังสีแกมมาจึงแตกต่างไปจากอนุภาคที่มีประจุ เช่น รังสีเบตา และอนุภาคอัลฟา เป็นต้น สำหรับรังสีแกมมาจะเกิดอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนเป็นส่วนใหญ่ โดยความเข้มของรังสีแกมมาจะลดลงอย่างต่อเนื่องขณะที่ผ่านตัวกลาง และมีลักษณะการลดลงเป็นแบบ exponential absorption law

รูปแบบในการเกิดอันตรกิริยาของรังสีแกมมากับสสารที่สำคัญมีอยู่ 3 แบบ คือ

1. กระบวนการเกิดโฟโตอิเล็กตริกเอฟเฟคท์ (Photoelectric effect)

เป็นกระบวนการที่รังสีแกมมาชนกับอิเล็กตรอนในวงโคจร แล้วถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนทั้งหมด ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากวงโคจร โดยอิเล็กตรอนที่หลุดออกมานี้ เรียกว่า "โฟโตอิเล็กตรอน (photoelectron)" ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงกระบวนการเกิดโฟโตอิเล็กตริกเอฟเฟคท์

อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาพบว่าจะเกิดขึ้นกับอิเล็กตรอนใน K-shell มากกว่าใน L-shell โดยกระบวนการเกิดโฟโตอิเล็กตริกเอฟเฟคท์ จะเกิดขึ้นทันทีเมื่อพลังงานของรังสีแกมมามีค่าสูงกว่าพลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy) ของอิเล็กตรอน โดยที่

พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน = พลังงานของรังสีแกมมา - พลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน

หรือ $$E_e, \text{PE} = E_\gamma - E_b \qquad (2.36)$$

โดยที่ E_e, PE : พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน

E_γ : พลังงานของรังสีแกมมา

E_b : พลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน

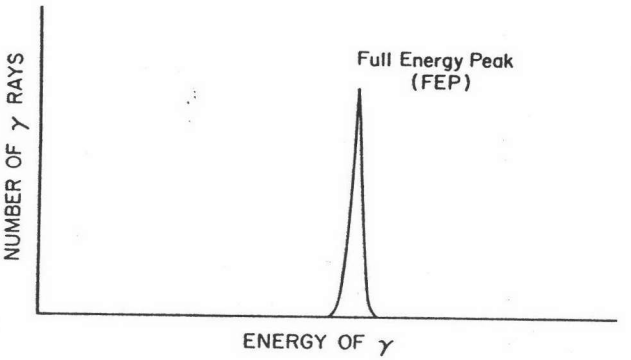
การเกิดกระบวนการโฟโตอิเล็กตริกเอฟเฟคท์จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อรังสีแกมมามีพลังงานเพิ่มขึ้น แต่จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ตามเลขอะตอมของตัวกลาง โดย

$$\text{โอกาสในการเกิดโฟโตอิเล็กตริกเอฟเฟคท์} \propto \frac{Z^5}{E_\gamma^{2/7}} \qquad (2.37)$$

โดยที่ Z = เลขอะตอมของตัวดูดกลืน

ดังนั้นสำหรับกระบวนการเกิดโฟโตอิเล็กตริกเอฟเฟคท์ จะเกิดได้ดีกับรังสีแกมมาพลังงานต่ำ โดยมีพลังงานน้อยกว่า 1 MeV และตัวกลางที่มีเลขอะตอมสูง

จากรูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรังสีแกมมากับพลังงานของรังสีแกมมาที่มีเพียงปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริกเอฟเฟคท์เกิดขึ้นเท่านั้น หัววัดรังสีดูดกลืนพลังงานของโฟโต-อิเล็กตรอนที่ปลดปล่อยออกมาได้ทั้งหมด จึงมีเพียงพีคเดียวที่ปรากฏขึ้น เนื่องจากรังสีแกมมานั้นสูญเสียพลังงานทั้งหมดในกระบวนการเกิดโฟโตอิเล็กตริกเอฟเฟคท์ และเรียกพีคในสเปกตรัมของรังสีแกมมาที่ได้นี้ว่า "โฟโตพีค (photo peak หรือ full energy peak)"



รูปที่ 2.5 แสดงสเปกตรัมที่วัดได้จากกระบวนการเกิดโฟโตอิเล็กตริกเอฟเฟคท์

2. กระบวนการเกิดการกระเจิงคอมป์ตัน (Compton scattering)

เป็นกระบวนการที่รังสีแกมมาที่มีพลังงานปานกลางชนกับอิเล็กตรอนแล้วถ่ายเทพลังงานบางส่วนให้อิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมา และรังสีแกมมาจะเกิดการกระเจิงออกไปจากทิศทางเดิมด้วยพลังงานที่เหลือ ดังรูปที่ 2.6 โดยที่

$$E'_{\gamma} = \frac{E_{\gamma}}{1+\left(\frac{E_{\gamma}}{E_e}\right)(1-\cos\theta)} \qquad (2.38)$$

เมื่อ E'_{γ} : พลังงานของรังสีแกมมาที่เหลือ หลังจากการชนกับอิเล็กตรอน

E_{γ} : พลังงานของรังสีแกมมาที่เข้าชนกับอิเล็กตรอน

E_e : พลังงานของอิเล็กตรอน

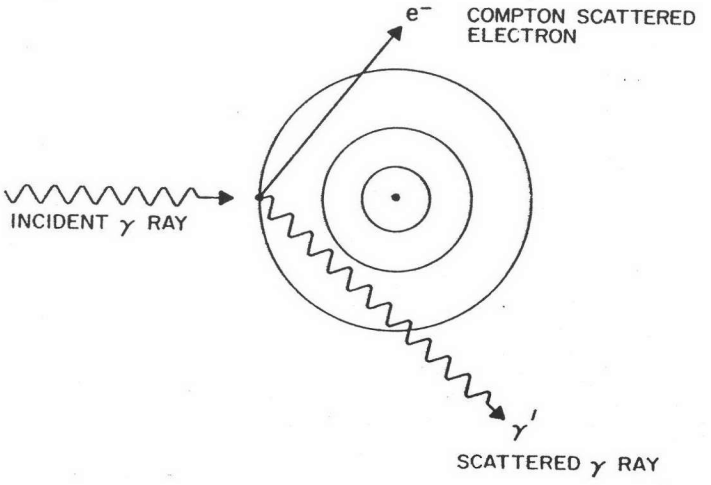
E_e $= m_0c^2 = 0.511$ MeV

θ : มุมที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของรังสีแกมมาออกจากทิศทางเดิม

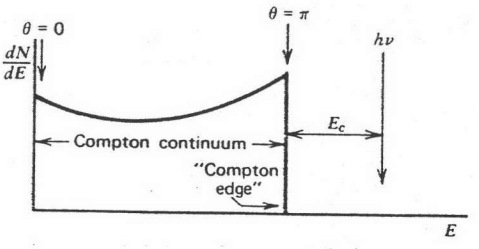
โดยโอกาสในการเกิดกระบวนการกระเจิงคอมป์ตันนั้น จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับจำนวนอิเล็กตรอนภายในอะตอมของตัวกลางดูดกลืน และเป็นปฏิภาคผกผันกับพลังงานของรังสีแกมมา

โดยที่ Probability (cs) $= \frac{kZ_{abs}}{E_\gamma}$ (2.39)

กระบวนการเกิดการกระเจิงคอมป์ตัน จะเกิดได้ดีกับรังสีแกมมาพลังงานปานกลางอยู่ในช่วง 0.6 - 4.0 MeV และในตัวกลางดูดกลืนที่มีเลขอะตอมสูง



รูปที่ 2.6 แสดงกระบวนการเกิดการกระเจิงคอมป์ตัน



รูปที่ 2.7 แสดงสเปกตรัมของรังสีแกมมาที่วัดได้จากกระบวนการเกิดการกระเจิงคอมป์ตัน

จากรูปที่ 2.7 แสดงผลของกระบวนการเกิดการกระเจิงคอมป์ตันที่มีต่อสเปกตรัมของรังสีแกมมาที่วัดได้ เนื่องจากรังสีแกมมาที่กระเจิงออกไปจะมีบางส่วนที่หลุดออกจากหัววัดรังสี โดยมีพลังงานตั้งแต่ค่าต่ำสุดที่มุม $\theta = 180^{\circ}$ จนถึงที่ระดับพลังงานใกล้เคียงกับพลังงานของรังสีแกมมาก่อนชนอิเล็กตรอน ซึ่งเราเรียกช่วงระดับพลังงานนี้ว่า "compton continuum"

อย่างไรก็ตามการเกิดการกระเจิงคอมป์ตันหลายๆ ครั้งติดต่อกัน ก็สามารถทำให้หัววัดรังสีดูดกลืนพลังงานจากโฟตอนไว้ได้หมดเหมือนกัน ดังนั้นการเกิดการกระเจิงคอมป์ตันก็สามารถทำให้เกิดโฟโตพีค หรือ พีคเต็มพลังงาน (Full-energy peak) ได้

3. กระบวนการเกิดอิเล็กตรอนคู่ (Pair production)

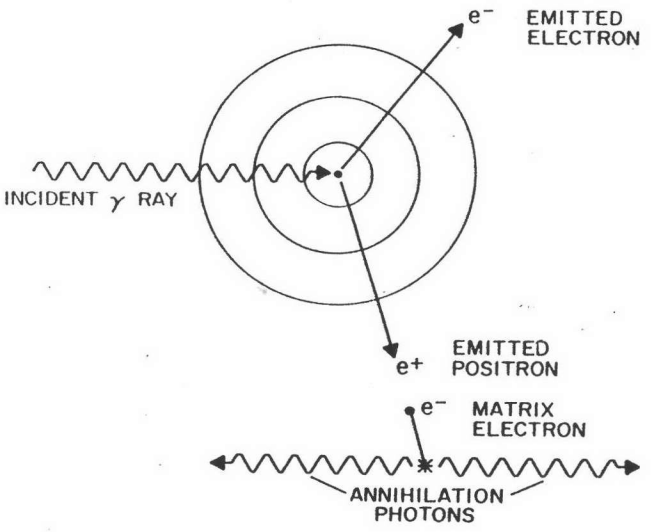
เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อรังสีแกมมาที่พลังงานสูงเกิน 1.022 MeV วิ่งเข้าใกล้นิวเคลียสของอะตอมของตัวกลางดูดกลืน และรังสีแกมมามีการเปลี่ยนรูปเป็น อิเล็กตรอน และโพซิตรอนเนื่องจากอิเล็กตรอนมีพลังงาน 0.511 MeV ดังนั้นในการเกิดอิเล็กตรอนคู่ รังสีแกมมา จึงต้องมีพลังงานตั้งแต่ 1.022 MeV โดย

$$E_{e^-} + E_{e^+} = E\gamma - 2m_0c^2 \qquad (2.40)$$

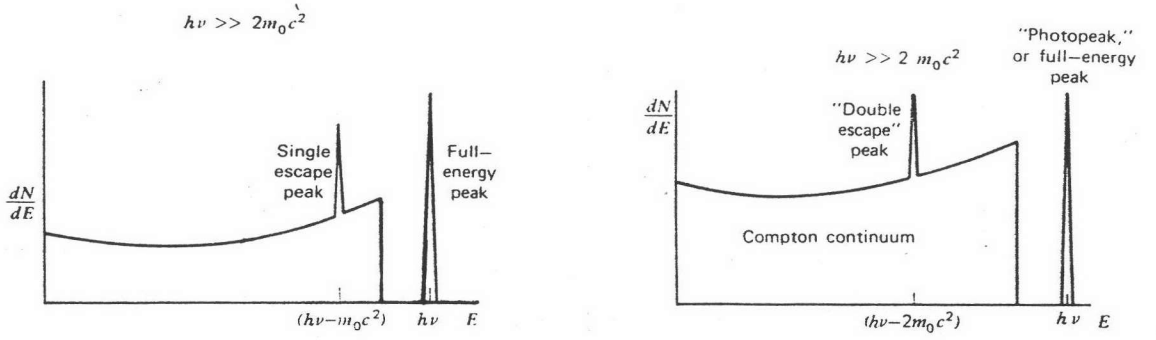
สำหรับอิเล็กตรอนและโพซิตรอน มีการเคลื่อนที่ได้เพียงเล็กน้อยก่อนที่จะสูญเสียพลังงานจลน์ทั้งหมดให้แก่ตัวกลางดูดกลืน จากนั้นโพซิตรอนจะรวมตัวกับอิเล็กตรอนปกติของตัวกลางดูดกลืน และให้โฟตอนที่พลังงาน 0.511 MeV ออกมา 2 ตัว ซึ่งวิ่งออกในทิศทางตรงข้ามกัน และเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า "Annihilation"

กระบวนการในการเกิดอิเล็กตรอนคู่ จะมีความสัมพันธ์กับพลังงานของรังสีแกมมา และเลขอะตอมของตัวกลางดูดกลืน

โดย $$\text{Probability(pp)} = k\,(log\,E_\gamma)(Z_{abs})^2 \qquad (2.41)$$



รูปที่ 2.8 แสดงกระบวนการเกิดอิเล็กตรอนคู่ และ ปรากฏการณ์ Annihilation



(ก) (ข)

รูปที่ 2.9 แสดงสเปกตรัมของรังสีแกมมาที่วัดได้ จากกระบวนการเกิดอิเล็กตรอนคู่

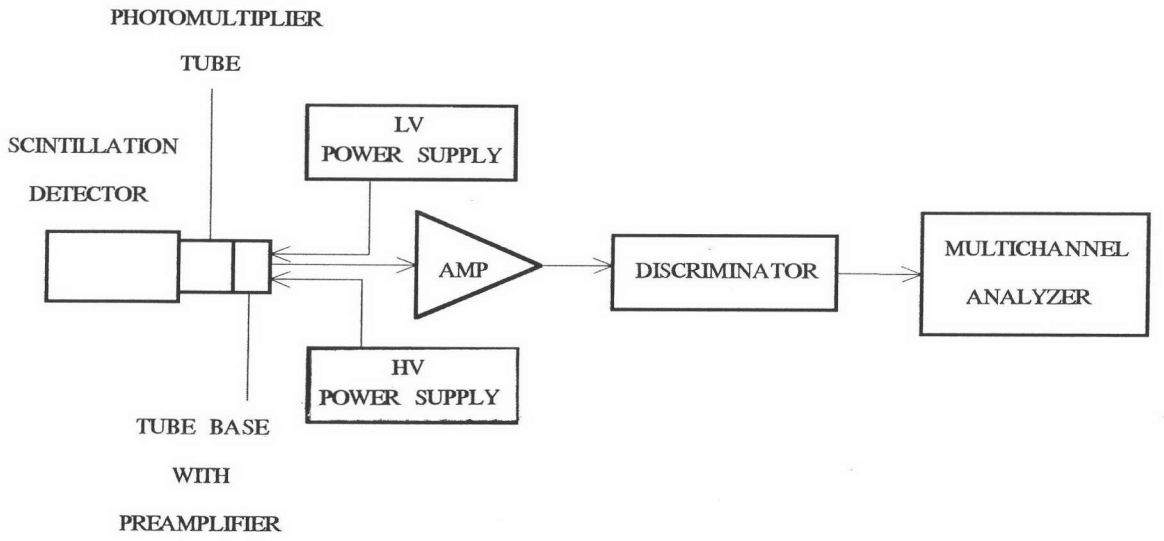
จากรูปที่ 2.9 เมื่อโพซิตรอนรวมกับอิเล็กตรอนของอะตอมตัวกลางดูดกลืน และเกิดปรากฏการณ์ Annihilation ขึ้น โฟตอนที่เกิดขึ้นนี้ ถ้าหนีออกจากหัววัดรังสี 1 ตัว (พลังงาน 0.511 MeV) จะเรียกสเปกตรัมที่เกิดขึ้นนี้ว่า "single escape peak" (ดังรูป 2.9 (ก)) และถ้ามีโฟตอนหนีออกจากหัววัดรังสี 2 ตัว (พลังงาน 1.022 MeV) เรียกสเปกตรัมที่เกิดขึ้นนี้ว่า "double escape peak" (ดังรูป 2.9 (ข)) ถ้าไม่มีโฟตอนพลังงาน 0.511 MeV ตัวใดตัวหนึ่งหนีออกไปจากหัววัดรังสีได้ (คือถูกดูดกลืนไว้หมด) ก็จะได้พีคเต็มพลังงาน เช่นเดียวกับการเกิดโฟโตอิเล็กตริกเอฟเฟคท์

<u>อุปกรณ์การวัดรังสีแกมมา</u> (ศลักษณ์ ทรรพนันทน์, 2527; แม้น อมรสิทธิ์, 2534) (Ehmann , 1991; Foster, 1983; Knoll, 1989; Lamarsh, 1983)

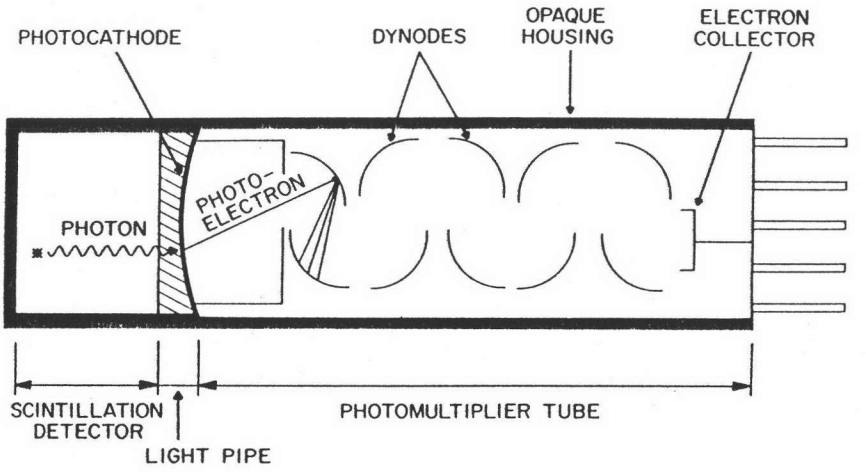
อุปกรณ์การวัดรังสีแกมมา แสดงดังรูปที่ 2.10 ประกอบด้วย

1. หัววัดรังสีแบบซินทิลเลชัน (scintillation detector) เป็นหัววัดรังสีที่อาศัยหลักการที่รังสีถูกดูดกลืนด้วยสารที่เรียกว่า ฟอสเฟอร์ (phosphors) หรือ ฟลูออร์ (fluors) หรือ ซินทิลเลเตอร์ (scintillators) แล้วเกิดโฟตอนขึ้นแล้วผ่านเข้าไปในหลอดทวีคูณอิเล็กตรอน (photomultiplier tube) อีกครั้งหนึ่ง ซินทิลเลเตอร์ มีด้วยกันหลายชนิดทั้งที่เป็นของแข็งและเป็นผลึก เช่น ผลึกโซเดียม-ไอโอไดด์ (NaI) ทัลเลียม (Tl) เป็นต้น และที่เป็นของเหลว เช่น แอนทราซีน (Anthracene) เป็นต้น สำหรับการวัดรังสีแกมมานิยมใช้ หัววัดรังสีชนิดโซเดียมไอโอไดด์ (ทัลเลียม) ซึ่งประกอบด้วยผลึกของโซเดียมไอโอไดด์ และมีทัลเลียม ปนอยู่เล็กน้อย เมื่อรังสีแกมมาตกกระทบผลึกโซเดียมไอโอไดด์ (ทัลเลียม) จะทำให้โมเลกุลของผลึกถูกกระตุ้นให้อยู่ในสภาวะกระตุ้น แล้วกลับสู่สภาวะปกติ อย่างรวดเร็ว พร้อมกับปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปโฟตอนของแสง (light quanta) โดยแสงที่เกิดขึ้นนี้จะถูกรวบรวมให้เข้าไปยังโฟโตคาโทด (photocathode) ของหลอดทวีคูณอิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกไปชนกับแท่งโลหะ เรียกว่า 'ไดโนด (dynode)' แล้วจะได้อิเล็กตรอนออกมา โฟโตอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะถูกขยายขึ้นเป็นแฟกเตอร์ 10^5 ถึง 10^6 หลังจากผ่านแผ่นไดโนดแล้วจะวิ่งเข้าชนแผ่นอาโนด (anode) เกิดเป็นกระแสไฟฟ้า (current pulse) ที่มีความแรงมากขึ้น โดยสัญญาณที่ได้จะเป็นปฏิภาคกับแสงที่เกิดขึ้น และพลังงานของรังสีที่ตกกระทบ (ดังรูปที่ 2.11)

I 16132634



รูปที่ 2.10 รูปภาพแสดงอุปกรณ์ต่าง ๆ ของระบบวัดรังสีแกมมา



รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะของหัววัดรังสีชนิดผลึกโซเดียมไอโอไดด์(ทัลเลียม) พร้อมหลอดทวีคูณอิเล็กตรอน

2. **แหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง** (High voltage power supply) เป็นอุ ปกรณ์ที่ให้ไฟฟ้าศักดาสูงแก่หัววัดรังสี เพื่อสร้างไบอัส (bias) แก่ขั้วไฟฟ้าของหลอดทวีคูณอิเล็กตรอน ทำให้เกิดกระบวนการทวีคูณอิเล็กตรอนขึ้น โดยไบอัสไฟฟ้าศักดาสูงจะเปลี่ยนพลังงานของรังสีที่ตกกระทบหัววัดรังสีให้เป็นสัญญาณพัลส์ขนาดเล็กที่มีสัดส่วนกับระดับพลังงาน

3. ภาคขยายสัญญาณส่วนหน้า (Preamplifier) เป็นอุปกรณ์ในการขยายสัญญาณที่ได้จากหัววัดรังสีที่มีระดับต่ำในอันดับมิลลิโวลต์ ให้สูงพอสำหรับการส่งสัญญาณไปยังเครื่องขยายสัญญาณหลัก ที่อยู่ห่างจากหัววัดรังสี และจัดรูปสัญญาณให้เหมาะสมสำหรับวงจรในเครื่องขยายสัญญาณหลัก

4. ภาคขยายสัญญาณหลัก (Amplifier) เป็นอุปกรณ์ขยายสัญญาณจากภาคขยายสัญญาณส่วนหน้าให้สูงขึ้นประมาณ 1000 เท่าหรือมากกว่า ทำให้สัญญาณมีขนาดในช่วง 0-10 โวลต์ รวมถึงเพิ่มอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน และแต่งรูปสัญญาณเพื่อให้เหมาะสมกับการวิเคราะห์ข้อมูลในระบบต่างๆ เช่น เครื่องวิเคราะห์ข้อมูลแบบช่องเดียว (singlechannel analyzer) และเครื่องวิเคราะห์ข้อมูลแบบหลายช่อง (multichannel analyzer) เป็นต้น

5. ภาคตัดสัญญาณรบกวน (Discriminator) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ตัดสัญญาณรบกวนที่ปนมากับสัญญาณพัลส์ด้วยการปรับเทียบความสูงของสัญญาณไฟฟ้า ระดับสัญญาณที่มากกว่าระดับต่ำสุด (threshold) ที่ตั้งไว้เท่านั้น จึงจะสามารถผ่านไปได้

6. อุปกรณ์วิเคราะห์แบบหลายช่อง (Multichannel analyzer : MCA) หรือ อุปกรณ์วิเคราะห์ความสูงของพัลส์ (Pulse height analyzer :PHA) เป็นเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์นิวเคลียร์ที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์พลังงานของอนุภาคนิวเคลียร์ ที่เกิดจากกระบวนการนิวเคลียร์ต่างๆอันได้แก่ การสลายตัวของสารกัมมันตรังสี (radioactive decay) ปฏิกิริยานิวเคลียร์ (nuclear reaction) และอันตรกิริยานิวเคลียร์ (nuclear interaction) เป็นต้น โดยวิธีการจำแนกความสูงของสัญญาณพัลส์จากระบบวัดนิวเคลียร์ ด้วยการทำงานในระบบเชิงตัวเลขและแสดงผลของสเปกตรัมพร้อมรายละเอียดของตำแหน่งพลังงานและปริมาณของอนุภาคนิวเคลียร์ที่วิเคราะห์ได้ทางจอภาพ ทำให้การแปรผลการวิเคราะห์กระทำได้สะดวกและรวดเร็ว

<u>เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยวิธีนิวตรอนแคปเจอร์พรอมต์แกมมาแอกติเวชัน</u> (Ehmann, 1991; Peisach)

เทคนิคการวิเคราะห์พรอมต์แกมมา จากการอาบรังสีนิวตรอนนี้ เป็นการวัดปริมาณรังสีพรอมต์แกมมาที่ปลดปล่อยออกมา ในขณะที่มีการอาบรังสีนิวตรอน โดยอาศัยปฏิกิริยาจับนิวตรอน (neutron captured reaction ; (n, γ) reaction) กับนิวเคลียสของธาตุที่วิเคราะห์ ดังสมการ

$$ {}_{Z}X^{A} + {}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{Z}X^{A+1} + \gamma \qquad (2.42) $$

เมื่อ $_{Z}X^{A}$: นิวไคลด์ของธาตุที่วิเคราะห์

$_{0}n^{1}$: อนุภาคนิวตรอน

γ : รังสีแกมมาที่ปลดปล่อยออกมาขณะเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์

$_{Z}X^{A+1}$: นิวไคลด์ที่เกิดขึ้นภายหลังปฏิกิริยา

จากกฎของการอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัม สามารถพิจารณาการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ของนิวตรอนได้ดังนี้

$$Q = \left(\left(m_A + m_B\right) - \left(m_{A+1}\right)\right)c^2 \qquad (2.43)$$

เมื่อ Q : Q-value

m : มวลของนิวไคลด์ และอนุภาคนิวตรอน

โดยที่ $$m_A + m_n > m_{A+1} \qquad (2.44)$$

จะได้ว่า จะมีค่ามากกว่า 0 (Q-value มีค่าเป็นบวก) ซึ่งจะทำให้พลังงานจลน์ของนิวไคลด์เพิ่มขึ้น และจะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมา โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาแบบเอกโซเทอร์มิค (Exothermic reaction)

โดยปรกติในการวิเคราะห์ด้วยวิธีนิวตรอนแอกติเวชัน (neutron activation analysis ; NAA) เป็นการวัดปริมาณรังสีแกมมา ที่ปลดปล่อยออกมาจากการสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น ($_{Z}X^{A+1}$) หลังจากการอาบรังสีนิวตรอนในขณะที่การวิเคราะห์ด้วยวิธีนิวตรอนแคปเจอร์พรอมต์แกมมาแอกติเวชัน จะเป็นการวัดรังสีแกมมาที่ปลดปล่อยออกมาในขณะที่มีการอาบรังสีนิวตรอน เนื่องจากรังสีแกมมาที่ปลดปล่อยออกมาเกิดจากการลดระดับพลังงานของนิวเคลียส จากสถานะกระตุ้นมาสู่ระดับปรกติ ในช่วงระยะเวลาสั้นๆ คือ น้อยกว่า 10^{-14} วินาที จึงเรียกรังสีแกมมาที่ปลดปล่อยออกมานี้ว่า “รังสีพรอมต์แกมมา”

1. ปริมาณการให้รังสีพรอมต์แกมมา (Yields of prompt gamma ray)

จำนวนรังสีแกมมาที่ปลดปล่อยออกมา สามารถคำนวณได้จาก

$$Y = N \phi t \sigma (E_n) \qquad (2.45)$$

Y : จำนวนรังสีแกมมาที่ปลดปล่อยออกมา

N : จำนวนอะตอมของธาตุที่วิเคราะห์

ϕ : ความเข้มนิวตรอน (n $cm^{-2}s^{-1}$)

t : เวลาที่ใช้ในการอาบรังสี

$\sigma (E_n)$: ค่าภาคตัดขวางของการเกิดปฏิกิริยา

สำหรับในสารตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่ หรือประกอบด้วยธาตุหลายชนิด พบว่าค่า total neutron cross section $(\sigma_T)_i$ จะมีผลทำให้ความเข้มนิวตรอนลดลง ดังนั้น จำนวนรังสีแกมมาที่ได้จะต้องคูณด้วยแฟกเตอร์ $(1 - e^{-f})$

โดยที่ $$f = \sum_i N_i (\sigma_T)_i \qquad (2.46)$$

2. ข้อดีในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคพรอมต์แกมมา

2.1 เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยวิธีนิวตรอนแคปเจอร์พรอมต์แกมมาแอกติเวชันนี้เป็นการวัดปริมาณรังสีพรอมต์แกมมาที่ปลดปล่อยออกมาทันที ซึ่งไม่ขึ้นกับค่าครึ่งชีวิต(จึงสามารถนำไปใช้กับปฏิกิริยานิวเคลียร์ของนิวตรอนที่ให้นิวไคลด์กัมมันตรังสี ที่มีค่าครึ่งชีวิต สั้นๆ ได้

2.2 รังสีพรอมต์แกมมาที่วัดได้ เกิดจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของนิวไคลด์ของธาตุ จึงสามารถใช้ในการวิเคราะห์ธาตุบางชนิดที่เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์กับนิวตรอน และได้นิวไคลด์เสถียรภาพ เช่น

2.2.1 Hydrogen โดยเกิดปฏิกิริยาดังนี้

$$_1H^1 + {}_0n^1 \rightarrow {}_1H^2 \text{ (Stable nuclide)} + \gamma \text{ (at 2.223 MeV)}$$

2.2.2 Boron โดยเกิดปฏิกิริยาดังนี้

$$_5B^{10} + {}_0n^1 \rightarrow {}_3Li^{7*} \text{ (Excited nuclide)} + {}_2He^4(\alpha)$$

โดยที่ $$_3Li^{7*} \rightarrow {}_3Li^7 \text{ (Stable nuclide)} + \gamma \text{ (at 478 keV)}$$

2.2.3 Nitrogen โดยเกิดปฏิกิริยาดังนี้

$$_7N^{14} + {}_0n^1 \rightarrow {}_7N^{15} \text{ (Stable nuclide)} + \gamma \text{ (at 10.8 MeV)}$$

สำหรับเทคนิคการวิเคราะห์หาปริมาณไฮโดรเจน โดยเทคนิคทางนิวเคลียร์นี้สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งทางตรง และทางอ้อม

โดยทั่วไปในการวิเคราะห์หาปริมาณไฮโดรเจน นิยมใช้เทคนิคการลดพลังงานของนิวตรอน เมื่อชนกับอะตอมของไฮโดรเจน ซึ่งเป็นการวัดทางอ้อม แต่มีข้อเสียคือ อะตอมของธาตุอื่นๆ ก็สามารถลดพลังงงานของนิวตรอนได้เช่นกัน ถึงแม้ไม่ดีเท่าไฮโดรเจน การนำไปใช้งานจำเป็นต้องมีการเปรียบเทียบกับวัตถุตัวอย่างที่เหมาะสมจึงจะได้ผลถูกต้อง

สำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณไฮโดรเจน โดยเทคนิคนิวตรอนแคปเจอร์พรอมต์แกมมาแอกติเวชันนี้ ถือว่าเป็นการวัดทางตรงซึ่งจะวัดปริมาณรังสีพรอมต์แกมมาที่ระดับพลังงาน 2.223 MeV จากปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดขึ้น $^1H\ (n\ \gamma)\ ^2H$