

ฟลูออรีนและวิธีการวิเคราะห์

2.1 ฟลูออรีน (Fluorine)

ฟลูออรีน เป็นคำที่มาจากภาษาลาตินว่า "ฟลูเออร์ (Fluere)" ซึ่งแปลว่า "ไหล (Flow)" พบมากในธรรมชาติเป็นอันดับที่ 13 ของเนื้อผิวโลก (Earth's crust) หรือประมาณ 0.065 เปอร์เซ็นต์ของพื้นผิวโลกทั้งหมด (Simons, 1964) หรือเท่ากับ 0.055 เปอร์เซ็นต์ของคลอรีน ค้นพบโดย Scheele ในปี ค.ศ.1771 แต่สามารถแยกสกัดออกมาได้โดย Henri Moissan ในปี ค.ศ.1886 (Horton, 1961)

ในธรรมชาติ มีไอโซโทปของฟลูออรีนที่เสถียรเพียงไอโซโทปเดียว หรือที่เรียกว่าเป็น "โมโนไอโซโทปิก (Monoisotopic)" คือ F^{19} เท่านั้น แต่สามารถที่จะสังเคราะห์ไอโซโทปกัมมันตรังสี (Radioactive isotope) อื่นๆ ขึ้นได้ เช่น F^{17} , F^{18} , F^{20} เป็นต้น [ดังแสดงในตารางที่ 2.1] โดยทั่ว ๆ ไปแล้วจะพบฟลูออรีนอยู่ในรูปของฟลูออไรด์และสารประกอบต่าง ๆ เช่น แคลเซียมฟลูออไรด์ (Calcium fluoride) ไฮโดรเจน-ฟลูออไรด์ (Hydrogen fluoride) โพแทสเซียมฟลูออไรด์ (Potassium fluoride) ฟลูออโรคาร์บอน (Fluorocarbon) เป็นต้น แร่ที่มีฟลูออรีนมากที่สุด คือ แร่ฟลูออไรต์ (Fluorite) หรือที่เรียกว่าฟลูออรัสปาร์ (Fluorspar) รองลงมาคือ แร่ไครโอไลต์ (Cryolite) และแร่ฟลูออโรอะพาไทต์ (Fluorapatite) นอกจากนี้ยังพบอยู่บ้างในน้ำทะเล กระดูก เล็บ และเคลือบฟัน (Dental enamel) ในปัจจุบันสามารถผลิตฟลูออรีนได้ด้วยวิธีอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) โพแทสเซียมไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (KHF_2) ที่ละลายในแอนไฮดรัสไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (Anhydrous HF) ที่เป็นของเหลว หรือใช้ KHF_2 ที่หลอมเหลวก็ได้ ในเครื่องมือที่ทำด้วยเหล็กกล้า หรือ Monel metal (*) ซึ่งใช้คาร์บอน (Graphite) เป็นแอโนด ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความต่างศักย์ 7-10 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 4000 แอมแปร์ (สุภาพ บุญยรัตเวช, 2522)

(*) เป็นชื่อการค้าของโลหะผสม ซึ่งส่วนใหญ่เป็นนิกเกิลและทองแดง ส่วนน้อยเป็นคาร์บอน แมงกานีส เหล็ก ซัลเฟอร์ และซิลิกอน

ตารางที่ 2.1 ไอโซโทปของฟลูออรีน (Simons, 1964)

Nuclide	Particle emitted	Product nuclide	Half-life
F ¹⁷	β ⁺	O ¹⁷	60-72 sec
F ¹⁸	β ⁺ 97 % , Orbital EC. 3 %	O ¹⁸	107-112 min
F ¹⁹	Stable	-	-
F ²⁰	β ⁻	Ne ²⁰	10-12 sec
F ²¹	β ⁻	Ne ²¹	5 sec

2.1.1 ชื่อภาษาอื่น ๆ ที่ใช้เรียกฟลูออรีน (Sax and Lewis, 1989)

ภาษาฮอลันดา เรียกว่า Bifluoriden , Fluor
ภาษาฝรั่งเศส " Fluorores acid , Fluor
ภาษาเยอรมัน " Saeure fluoride , Fluor
ภาษาอิตาลี " Fluoruri acid , Fluor

2.1.2 คุณสมบัติของฟลูออรีน (Fluorine properties) แบ่งเป็น

2.1.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical properties)

แสดงในตารางที่ 2.2

2.1.2.2 คุณสมบัติทางเคมี (Chemical properties)

- มีขนาดอะตอมเล็ก
- มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (Electronegativity) สูงที่สุด
- มีสภาพไฟฟ้าเป็นลบมากที่สุด
- ทำปฏิกิริยาเคมีได้ไวที่สุด
- มีความเป็นพิษสูง
- เป็นตัวออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) ที่แรงที่สุด
- ติดไฟได้เมื่อทำปฏิกิริยากับสารที่เป็นตัวออกซิไดซ์
- เกิดสารประกอบฟลูออไรด์กับธาตุและโลหะได้เกือบทุกชนิด

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของฟลูออรีน (ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์, 2525)

คุณสมบัติ	ค่า / ลักษณะ
สูตรโมเลกุล	F_2
เลขมวล	9
เลขอะตอม	18.99840
สี	เหลืองแกมเขียว
จุดเดือด	$-188.13\text{ }^{\circ}C$
จุดหลอมเหลว	$-219.61\text{ }^{\circ}C$
ความหนาแน่น (ของเหลวที่จุดเดือด)	1.108 g/cc
ความหนาแน่นไอ (ที่ $0\text{ }^{\circ}C$, 1 atm)	1.696 g/l
ความดันไอ	$> 1\text{ bar}$
ความถ่วงจำเพาะ	1.11 (Liquid)
รัศมีโควาเลนต์	0.72 \AA
รัศมีผลึก	1.36 \AA
เส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุล	1.435 \AA
ความหนืด (แก๊ส $0\text{ }^{\circ}C$, 1 atm)	$2.18 \times 10^{-4}\text{ g/cm.sec}$
พลังงานไอออไนเซชัน	101.8 kcal/mol
อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี	79.5 kcal/mol
พลังงานสลายพันธะ	$37.7 \pm 0.2\text{ kcal/mol}$
ความร้อนของการหลอมเหลวที่จุดหลอมเหลว	372 cal/mol
ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอที่จุดเดือด	$1564 \pm 3\text{ kcal/mol}$
ศักย์ไฟฟ้าแบบรีดักชันมาตรฐาน	
$F_2 + 2e^- \rightarrow 2F^-$	+ 2.87 V

2.1.2.3 คุณสมบัติทางนิวเคลียร์ (Nuclear properties)
แสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางนิวเคลียร์ของฟลูออรีน (Horton, 1961)

Isotope Z A	Half-life (%Abundance)	Type of Decay	Energy of Radiation in MeV	Disintegration Energy and Scheme
${}^9\text{F}^{17}$	60-74 s (-)	β^+	1.748	$Q_{EC} 2.767$ (5/2+) F^{17} (66s) β^+ 5/2+ ${}^8\text{O}^{17}$ 0
${}^9\text{F}^{18}$	107-115 m (-)	β^+ 97 % EC 3 %	0.649	$Q_{EC} 1.671$ (1+) F^{18} (112m) β^+, EC 0+ ${}^8\text{O}^{18}$ 0
${}^9\text{F}^{19}$	- (100)	δ	Coulomb excitation 0.109-0.113	5/2+ $\frac{8.7 \times 10^{-8} \text{ s}}{7 \times 10^{-10} \text{ s}}$ 0.197 1/2- $\frac{7 \times 10^{-10} \text{ s}}$ 0.110 1/2+ F^{19} 0
${}^9\text{F}^{20}$	10-12 s (-)	β^-	5.410	(1+) F^{20} (11 s) $Q_{\beta^-} 7.052$ β^- 2+ $\frac{5 \times 10^{-13} \text{ s}}$ 1.632 0+ Ne^{20} 0
${}^9\text{F}^{21}$	5 s (-)	*	*	*

* ไม่มีข้อมูล

2.1.2.4 คุณสมบัติอื่น ๆ (Other properties)

- คุณสมบัติที่เกี่ยวกับแสง (Optical properties) เช่น มีค่า UV absorption เท่ากับ $180 \mu\text{m}$, Refraction index เท่ากับ 0.95 เป็นต้น
- คุณสมบัติทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical properties) เช่น มีค่าความนำไฟฟ้าจำเพาะ 54.4 S/cm^{-1} ที่อุณหภูมิ -248 องศาเซลเซียส เป็นต้น

2.1.3 ประโยชน์ของฟลูออรีน

- ใช้ในการเตรียมสารประกอบต่างๆ อาทิเช่น ยูเรเนียมเฮกซะฟลูออไรด์ (UF_6) โคบอลต์ไตรฟลูออไรด์ (CoF_3) โบรอนไตรฟลูออไรด์ (BF_3) และฟลูออโรคาร์บอน (Fluorocarbon) เป็นต้น
- ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวทำละลาย (Catalyst and solvent) ในปฏิกิริยาเคมีอินทรีย์ เช่น ไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (HF) โบรอนไตรฟลูออไรด์ (BF_3) กรดไตรฟลูออโรอะซีติก (CF_3COOH) เป็นต้น
- ใช้เป็นสารทำความเย็น (Refrigerants) และสารขับเคลื่อน (Propellants) ในกระสุนปืนหรือจรวด เช่น ฟรีออน (ไดคลอโรไดฟลูออโรมีเทน: CCl_2F_2) โซเดียมฟลูออโรอะซีเตต ($CH_2FCOONa$) โมโนโบรโมไตรฟลูออโรมีเทน ($CBrF_3$) เป็นต้น
- ใช้เป็นสารประกอบของก๊าซฉนวน (Gaseous Dielectrics) เช่น ซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6) คาร์บอนเตตระฟลูออไรด์ (CF_4) เป็นต้น
- ใช้เป็นฟลักซ์ (Flux) ในอุตสาหกรรมเซรามิกส์ ในสารบัดกรี ในงานเชื่อมโลหะ ในของผสมที่ใช้เป็นโลหะเคลือบ (Enamel fritz) เช่น โซเดียมฟลูออไรด์ (NaF) ไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (HF) คิวปริกฟลูออไรด์ (CuF_2) แบเรียมฟลูออไรด์ (BaF_2) แคลเซียมฟลูออไรด์ (CaF_2) เป็นต้น
- ใช้เป็นยาฆ่าเชื้อโรค (Antiseptics) และเป็นยาล้าง เช่น เงินฟลูออไรด์ (AgF) โซเดียมฟลูออโรอะซีเตต ($CH_2FCOONa$) เป็นต้น
- ใช้เป็นสารที่ดับเพลิง (Fire extinguishing agents) เช่น โมโนโบรโมไตรฟลูออโรมีเทน ($CBrF_3$) ไดโบรโมไดฟลูออโรมีเทน (CBr_2F_2) เป็นต้น
- ใช้เป็นสารหล่อลื่น (Lubricants) ที่กันไอน้ำและน้ำมัน เช่น ไตรฟลูออโรคลอโรเอทิลีน (CF_2CClF) ไวนิลฟลูออไรด์ (CH_2CHF) เป็นต้น
- ใช้เป็นสารถ่ายเทความร้อน (Heat transfer media) เช่น ซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6) ออกตะฟลูออโรโพรเพน (C_3F_8) ไตรคลอโรโมโนฟลูออโรมีเทน (CCl_3F) เป็นต้น
- ใช้เป็นเรซิน (Resin) เช่น Teflon (C_2F_4)_n เป็นต้น

2.1.4 พิษและอันตรายของฟลูออรีน (Toxicity of fluorine) (WHO)

2.1.4.1 ผลต่อพืช พืชจะได้รับฟลูออรีนทางรูปากใบและทางราก ซึ่งถ้าได้รับในปริมาณที่มากกว่า $0.2 \mu g/m^3$ แล้วจะทำให้พืชมีการเจริญเติบโตลดลง เกิดการตายของเซลล์ชั้นนอก (Peripheral necrosis) ใบไม้มีลักษณะบิดเบี้ยว (Leaf distortion) มีความต้านทาน (Resistance) ลดลง และเกิด Chlorosis

2.1.4.2 ผลต่อสัตว์ ฟลูออรีนจะเข้าสู่สัตว์ได้ 3 ทาง คือ ระบบทางเดินหายใจ ทางปาก และทางผิวหนัง ซึ่งสัตว์แต่ละชนิดจะเกิดผลอันตรายที่แตกต่างกัน แบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

2.1.4.2.1 ผลที่เกิดขึ้นทันทีทันใด (Acute toxic effects) จะทำให้มีอาการ เบื่ออาหาร อาเจียน ท้องเสีย น้ำตาไหล มีน้ำเมือกหรือน้ำลายมากกว่าปกติ อ่อนเพลีย น้ำหนักลด เกิดเลือดคั่ง (Congestion) เส้นใยกล้ามเนื้อ (Muscular fibrillation) การทำงานของระบบหายใจ หัวใจ และอวัยวะอื่นๆ ถูกกด (Depression) เกิดการระคายเคืองที่ระบบทางเดินหายใจ ผิวหนัง และเนื้อเยื่อของตา จมูก และเนื้อเยื่อของไซกระดุกเพิ่มขึ้นจนผิดปกติ

2.1.4.2.2 ผลที่เกิดขึ้นเรื้อรัง (Chronic toxic effects) จะทำให้การเจริญเติบโตช้าลง ปัสสาวะมีผลึก (Crystalluria) เกิดนิ่วในท่อทางเดินปัสสาวะ (Urolithiasis) เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงกระดูกและฟันอันเนื่องมาจากได้รับฟลูออรีนเข้าไปมากเกินไปจนอย่างเรื้อรัง (Osteofluorosis and Dental fluorosis) ขาพิการ (Lameness) ประสิทธิภาพการทำงานลดลง เกิดความผิดปกติที่ยีนส์ มะเร็ง

2.1.4.3 ผลต่อมนุษย์ ฟลูออรีนจะเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ได้ 3 ทางเช่นเดียวกันคือ ระบบทางเดินหายใจ ทางปาก และทางผิวหนัง ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

2.1.4.3.1 ผลที่เกิดขึ้นทันทีทันใด (Acute toxic effects) จะทำให้อวัยวะและระบบการทำงานต่าง ๆ ผิดปกติไป มีอาการคลื่นไส้ อาเจียน ปวดท้อง ท้องเสีย เกิดภาวะที่ผิวหนังเป็นสีเขียวหรือสีน้ำเงิน (Cyanosis) อ่อนเพลีย หายใจลำบาก (Dyspnoea) กล้ามเนื้อหดเกร็ง (Muscular spasm) หัวใจและหลอดเลือดทำงานไม่เป็นระบบ (Cardio-vascular disorders) อัมพาต ชัก และหมดสติ

2.1.4.3.2 ผลที่เกิดขึ้นเรื้อรัง (Chronic toxic effects) จะทำให้เกิด Skeletal fluorosis และ Dental fluorosis ผลที่เกิดขึ้นกับไต มะเร็งทารกในครรภ์มีการพัฒนาทางกายบกพร่อง (Teratogenicity) ผลต่อรูปแบบการตาย โรคภูมิแพ้ เกิดปฏิกิริยาที่มีความไวผิดปกติต่อสิ่งกระตุ้น และผลที่เกี่ยวกับชีวเคมี

2.2 วิธีการวิเคราะห์ฟลูออรีนที่ใช้กันทั่วไป สามารถแบ่งได้ดังต่อไปนี้ (Scott, 1939; Horton, 1961; Furman, 1962)

2.2.1 วิธีทางเคมี (Chemical methods) แบ่งเป็น

2.2.1.1 วิธี Gravimetric เช่น

- การทำให้ตกตะกอนด้วย Lead chlorofluoride
- การทำให้ตกตะกอนด้วย Triphenyltin fluoride

- การทำให้ตกตะกอนด้วย Calcium fluoride
- 2.2.1.2 วิธี Titrimetric เช่น
 - การไตเตรตด้วย Thorium
 - การไตเตรตด้วย Zirconium
 - การไตเตรตด้วย Calcium acetate
 - การไตเตรตทางอ้อมด้วย Lead chlorofluoride
 - การไตเตรตทางอ้อมด้วย Calcium fluoride
- 2.2.1.3 วิธี Photometric เช่น
 - วิธี Fluorometric
 - วิธี Spectrographic
 - วิธี Nephelometric and Turbidimetric
- 2.2.2 วิธีทางกายภาพ (Physical methods) เช่น
 - วิธี Polarography & Amperometric technique
 - วิธี Spontaneous technique
- 2.2.3 วิธีอื่น ๆ (Other methods) เช่น
 - วิธี Inhibition of enzymatic activity
 - วิธี Etching
 - วิธี Nuclear magnetic resonance

2.3 เทคนิคการวิเคราะห์ฟลูออรีนด้วยวิธีฟอสฟอรัสนิวตรอนแอกติเวชัน (Bowen and Gibbon, 1963; Taylor, 1964; Lenihan and Thomson, 1965; Csikai and other, 1969; Kolthoft and Elving, 1971; Nargolwalla, 1973; Tolgyessy and Varga, 1974; Pinta, 1978; Laul, 1979; Csikai, 1987)

หลักการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน เป็นการวิเคราะห์ธาตุด้วยอนุภาคนิวตรอนที่มาจากต้นกำเนิดนิวตรอน (Neutron source) ยิง (Bombard) เข้าไปทำปฏิกิริยากับนิวเคลียสของอะตอมของธาตุที่วิเคราะห์ ทำให้อะตอมนั้นมีการเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์ เกิดเป็นธาตุกัมมันตรังสีหรือเรดิโอไอโซโทป (Radioisotope) ที่มีคุณสมบัติเฉพาะตัวขึ้น ซึ่งจากคุณสมบัติเฉพาะตัว อันได้แก่ ค่าครึ่งชีวิต ชนิดของรังสี และพลังงานของรังสีที่ปล่อย



ออกมา จะทำให้ทราบได้ว่าเรดิโอไอโซโทปนั้นเป็นเรดิโอไอโซโทปของธาตุใด ซึ่งอาจเรียกว่าเป็นการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (Qualitative analysis) และเมื่อนำไปวัดปริมาณรังสีเทียบกับปริมาณรังสีของสารมาตรฐานที่ทราบน้ำหนักแน่นอนแล้ว จะสามารถคำนวณหาปริมาณของธาตุที่วิเคราะห์ได้ เรียกว่าเป็นการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Quantitative analysis)

สำหรับการวิเคราะห์ด้วยฟาสต์นิวตรอนแอกติเวชันนี้ จะใช้นิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ในช่วง 0.10–20 MeV หรือที่เรียกว่า "นิวตรอนเร็ว (Fast neutron)" เข้าไปทำปฏิกิริยากับนิวเคลียสของอะตอมของธาตุนั้นๆ วิธีนี้มักจะใช้วิเคราะห์ธาตุที่เป็นธาตุเบา ($Z < 17$) หรือธาตุที่มีค่าครึ่งชีวิตสั้นๆ ($T_{1/2} < 10$ sec) เช่น ออกซิเจน ฟลูออรีน ไนโตรเจน เป็นต้น และถ้าต้องการให้ได้ผลข้อมูลที่มีความถูกต้อง แม่นยำ และเชื่อถือได้มากยิ่งขึ้น จะต้องวัดปริมาณรังสีเป็นแบบสะสมต่อเนื่องกันภายในระยะเวลาที่เหมาะสม ด้วยการอาบรังสีและวัดปริมาณรังสีสารนั้นซ้ำหลาย ๆ ครั้ง (Cyclic) โดยใช้ระบบ Pneumatic transfer

2.3.1 เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอกติเวชัน แบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ

2.3.1.1 การวิเคราะห์ที่ใช้เฉพาะเครื่องมือวัดรังสี หรือแบบไม่ทำลายตัวอย่าง (Non-destructive analysis) เป็นวิธีวิเคราะห์ที่กระทำโดยการนำสารตัวอย่างและสารมาตรฐานเข้าอาบรังสีนิวตรอนพร้อมกัน แล้วปล่อยให้ทิ้งไว้ในช่วงเวลาที่เหมาะสม จากนั้นจึงทำการวัดความแรงรังสีของเรดิโอไอโซโทปของธาตุที่จะวิเคราะห์ เปรียบเทียบกับสารมาตรฐานโดยตรง วิธีการนี้จะไม่มีการสูญเสียสารตัวอย่างทั้งรูปร่างและลักษณะ

2.3.1.2 การวิเคราะห์ที่อาศัยกรรมวิธีทางเคมีประกอบ หรือแบบทำลายตัวอย่าง (Destructive analysis) เป็นวิธีการวิเคราะห์ที่ต้องใช้กระบวนการทางเคมี เช่น การกลั่น การทำละลาย การสกัด และการตกตะกอน เป็นต้น เข้ามาช่วยในการแยกวิเคราะห์ธาตุที่ต้องการก่อนหรือหลังการอาบรังสีนิวตรอน เพื่อป้องกันการรบกวนจากเรดิโอไอโซโทปตัวอื่น ๆ แล้วจึงนำไปเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน วิธีการนี้จะทำให้สูญเสียรูปร่างและลักษณะของสารตัวอย่าง

2.3.2 องค์ประกอบสำคัญของการวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอกติเวชัน

2.3.2.1 ต้นกำเนิดนิวตรอน (Neutron source) แบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

2.3.2.1.1 ต้นกำเนิดนิวตรอนที่เป็นสารกัมมันตรังสี (Radioisotopic neutron source) เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่ผลิตขึ้นจากการผสมธาตุกัมมันตรังสีที่

ให้อนุภาคแอลฟา (α) หรือรังสีแกมมา (γ) เช่น Po-210, Ra-226, Pu-239, และ Sb-124 เป็นต้น เข้ากับธาตุซึ่งมีพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy) ของอนุภาคนิวตรอนต่ำหรือธาตุเบา เช่น Be-9, B-11 และ D-2 (Deuterium) เป็นต้น ทำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ ซึ่งจะให้นิวตรอนอยู่ในช่วงประมาณ 10^3 - 10^7 นิวตรอนต่อวินาทีต่อคูรี และเป็นนิวตรอนเร็ว แหล่งกำเนิดนิวตรอนที่ได้จากปฏิกิริยา (α, n) และ (γ, n) แสดงอยู่ในตารางที่ 2.4 นอกจากนี้ยังมีต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนชนิดที่เกิดปฏิกิริยาฟิชชันตัวเอง (Self fission) ได้แก่ Cf-252 ซึ่งให้นิวตรอนออกมาประมาณ 9×10^9 นิวตรอนต่อวินาทีต่อคูรี หรือประมาณ 5×10^{12} นิวตรอนต่อวินาทีต่อกรัม

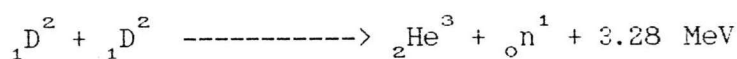
ตารางที่ 2.4 ต้นกำเนิดนิวตรอนที่เป็นสารกัมมันตรังสี

ต้นกำเนิด	ครึ่งชีวิต	ปริมาณนิวตรอนที่ให้ (นิวตรอนต่อวินาที- ต่อคูรี ($\text{ns}^{-1}\text{Ci}^{-1}$))	ปริมาณรังสีแกมมาที่ระยะห่าง 1 เมตร จากต้นกำเนิด (มิลลิเรินเกนท์ต่อชั่วโมง ต่อคูรี) ($\text{mR h}^{-1}\text{Ci}^{-1}$)
$^{226}\text{Ra}+\text{Be}$	1620 ปี	13×10^6	850
$^{239}\text{Pu}+\text{Be}$	24400 ปี	9×10^6	4
$^{241}\text{Am}+\text{Be}$	458 ปี	2.5×10^6	2.5
$^{210}\text{Po}+\text{Be}$	138 วัน	2.5×10^6	< 0.3
$^{124}\text{Sb}+\text{Be}$	60 วัน	$\sim 0.2 \times 10^6$	1000
^{252}Cf	2.6 ปี	$\sim 9 \times 10^9$	เพิ่มขึ้นตามเวลาเนื่องจากการเกิดของ γ -emitting daughters

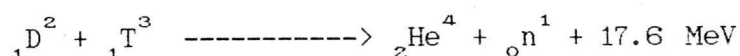
2.3.2.1.2 เครื่องกำเนิดนิวตรอน (Neutron generator)

เป็นเครื่องผลิตรังสีนิวตรอนจากการเร่งอนุภาคที่มีประจุ เช่น ดิวเทอรอน หรือโปรตอน ให้มีพลังงานสูงชัน และวิ่งเข้าชนเป้าซึ่งมักจะเป็นธาตุเบาโดยใช้เครื่องเร่งอนุภาค (Particle accelerator) ซึ่งอาจจะเป็น Linear accelerator หรือ Cyclotron เป็นต้น ทำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์และได้จำนวนนิวตรอนออกมา ปฏิกิริยาที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ

- ปฏิกิริยา D-D (DD Reaction)



- ปฏิกิริยา D-T (DT Reaction)



ปฏิกิริยา DD และ DT ที่เกิดขึ้น จะได้นิวตรอนที่มีพลังงานเท่ากับ 2.46 และ 14.08 MeV ตามลำดับ และสามารถให้ความเข้มของนิวตรอนออกมาในช่วง $10^9 - 10^{12}$ นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที

2.3.2.1.3 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู (Nuclear reactor) เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่ผลิตนิวตรอนออกมามากที่สุด เกิดจากปฏิกิริยาฟิชชัน (Fission reaction) ของนิวเคลียสของไอโซโทปที่สามารถแตกตัวได้ (Fissile materials) อาทิเช่น U-235, U-238 และ Pu-239 เป็นต้น หรือที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ความเข้มของนิวตรอนที่ได้อยู่ในช่วง $10^8 - 10^{14}$ นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที ต้นกำเนิดนิวตรอนชนิดนี้เป็นที่นิยมใช้กันมากที่สุด

2.3.3 พลังงานของนิวตรอน (Gibson, 1971) รังสีนิวตรอนสามารถแบ่งออกตามค่าพลังงานได้ดังนี้คือ

2.3.3.1 นิวตรอนช้า (Slow neutron) หมายถึง นิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง 0-1 keV แบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มย่อยๆ ดังนี้

2.3.3.1.1 เทอร์มัลนิวตรอน (Thermal neutron) เป็นนิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง 0.01-0.3 eV ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของตัวกลาง แต่ส่วนใหญ่จะมีพลังงานอยู่ที่ 0.025 eV ที่อุณหภูมิ 20 °C การกระจายของพลังงานชนิดนี้ จะเป็นไปตามการกระจายแบบแมกซ์เวลล์ (Maxwellian distribution) ดังนี้

$$N(E) = \frac{2\pi N}{(\pi kT)^{3/2}} E^{1/2} e^{-E/kT} \quad \text{----- (2.1)}$$

เมื่อ $N(E)$ = จำนวนนิวตรอนที่พลังงานใด ๆ ต่อหน่วยปริมาตร
 N = จำนวนนิวตรอนรวมทั้งหมดต่อหน่วยปริมาตร
 k = ค่า Boltzman's constant = 8.617×10^{-5} eV/K
 T = อุณหภูมิของตัวกลางเป็นเคลวิน (K)

2.3.3.1.2 อีพิเทอร์มัลนิวตรอน (Epithermal neutron)

เป็นนิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง 0.05-1 eV

2.3.3.1.3 รีโซแนนซ์นิวตรอน (Resonance neutron) เป็น

นิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง 1-1000 eV นิวเคลียสของธาตุหลายชนิดจะมีการจับนิวตรอนอยู่ในพลังงานช่วงนี้ได้ดีซึ่งเรียกว่า มี "Resonance absorption"

2.3.3.2 อินเตอร์มีเดียตนิวตรอน (Intermediate neutron) หมายถึง

นิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง 0.1 - 1 MeV

2.3.3.3 นิวตรอนเร็ว (Fast neutron) หมายถึง นิวตรอนที่มีพลังงาน

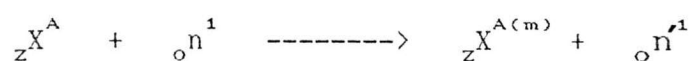
สูงตั้งแต่ 1 keV ขึ้นไป

2.3.4 ปฏิกิริยานิวเคลียร์ของนิวตรอน (Nuclear reaction of neutron)

การที่นิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุไฟฟ้า เมื่อวิ่งชนสสารใด ๆ จะไม่มีแรงกระทำต่อสนามประจุทางไฟฟ้า ทำให้มีอำนาจทะลุทะลวงสูง ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดกับนิวเคลียสของอะตอมโดยตรงไม่ได้เกิดกับอิเล็กตรอนของอะตอมอย่างอนุภาคมีประจุ (Charged particles) อื่น ๆ ปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดขึ้นมีดังต่อไปนี้ คือ

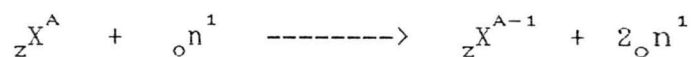
2.3.4.1 ปฏิกิริยา (n, n') เกิดขึ้นเมื่อนิวตรอนพลังงานสูงเข้าชนแล้วถ่าย

เทพลังงานบางส่วนให้กับนิวเคลียส ทำให้นิวเคลียสนั้นอยู่ในสภาวะ Isomeric state และกลับสู่สภาวะเดิมโดยการให้รังสีแกมมาออกมา ดังสมการ



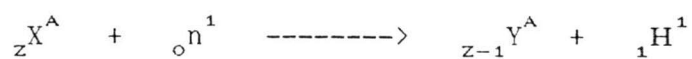
2.3.4.2 ปฏิกิริยา (n, 2n) ปฏิกิริยานี้จะให้นิวตรอนออกมาอีก 1 ตัวเนื่อง

จากนิวตรอนที่เข้าชนนั้น มีพลังงานสูงมากพอที่จะทำให้นิวตรอนในนิวเคลียสที่ถูกชนหลุดออกมา เรายังได้ไอโซโทปที่เกิดขึ้นจะเป็นของธาตุเดิม ดังสมการ

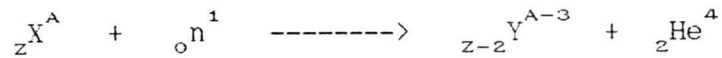


2.3.4.3 ปฏิกิริยา (n, p) เกิดขึ้นเมื่อนิวตรอนพลังงานสูงเข้าชนนิวเคลียส

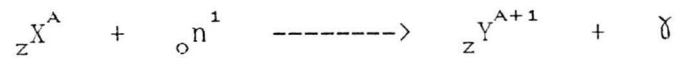
แล้วถูกจับหายไปนิวเคลียส พร้อมทั้งให้อนุภาคโปรตรอนออกมา จะได้เรดิโอไอโซโทปของธาตุใหม่ดังสมการ



2.3.4.4 ปฏิกิริยา (n, α) คล้ายกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในข้อ 2.3.4.3 แต่ต่างกันที่อนุภาคที่ให้ออกมานั้นเป็นอนุภาคอัลฟา ดังสมการ



2.3.4.5 ปฏิกิริยา (n, γ) จะเกิดขึ้นเมื่อนิวตรอนที่มีพลังงานต่ำหรือเทอร์มัลนิวตรอนเข้าชนนิวเคลียสแล้วถูกจับหายไป พร้อมทั้งให้รังสีแกมมาออกมา 1 ตัวหรือมากกว่า เรดิโอไอโซโทปที่เกิดขึ้นจะเป็นของธาตุเดิม เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมากที่สุด ดังสมการ



เมื่อ ${}_Z X^A$ คือ เรดิโอไอโซโทปเสถียรของธาตุ X มีเลขอะตอม Z และมีเลขมวล A
 ${}_0 n^1$ คือ อนุภาคนิวตรอน
 ${}_Z X^{A(m)}$, ${}_Z X^{A+1}$, ${}_Z X^{A-1}$, ${}_Z Y^A$ และ ${}_Z Y^{A-3}$ คือ เรดิโอไอโซโทปของธาตุเดิม (X) และธาตุใหม่ (Y) ซึ่ง m จะแสดงว่าเป็น Metastable state
 ${}_1 H^1$, ${}_2 He^4$ และ γ คือ อนุภาคโปรตรอน อนุภาคอัลฟา และรังสีแกมมา

2.3.5 การเกิดเรดิโอไอโซโทปและการสลายตัวของเรดิโอไอโซโทป (Radioisotope Production and Decay)

อัตราการเกิดของเรดิโอไอโซโทป ขึ้นอยู่กับจำนวนอะตอมของไอโซโทปของธาตุ ภาคตัดขวางของนิวตรอน และความเข้มของนิวตรอนที่ใช้ ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$P = N\sigma\phi \quad \text{----- (2.2)}$$

เมื่อ P = อัตราการเกิดของเรดิโอไอโซโทป
 N = จำนวนอะตอมของไอโซโทปของธาตุที่เกิดอันตรกิริยากับนิวตรอน แล้วเกิดเป็นเรดิโอไอโซโทป
 σ = ภาคตัดขวางนิวตรอนของไอโซโทป (Neutron cross-section) มีหน่วยเป็น บาร์น (Barn)
 ϕ = ความเข้มของนิวตรอน (Neutron flux) มีหน่วยเป็น นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที ($n/cm^2/sec$)

ส่วนอัตราการสลายของเรดิโอไอโซโทปที่เกิดขึ้น จะมีค่าดังสมการต่อไปนี้ คือ

$$D = - \lambda N_{(t)} \quad \text{----- (2.3)}$$

เมื่อ D = อัตราการสลายของเรดิโอไอโซโทป
 λ = ค่าคงที่ของการสลายตัวของเรดิโอไอโซโทปที่เกิดขึ้น
 (Decay constant) มีค่าเท่ากับ $0.693/T_{1/2}$
 $T_{1/2}$ = ค่าครึ่งชีวิต (Half-life) ของเรดิโอไอโซโทปที่เกิดขึ้น
 $N_{(t)}$ = จำนวนอะตอมของเรดิโอไอโซโทป ณ เวลาใด ๆ

ถ้าอัตราการเกิดของเรดิโอไอโซโทปมีค่าคงที่ อัตราการเพิ่มหรืออัตราการเปลี่ยนแปลงของจำนวนอะตอมของเรดิโอไอโซโทปที่เกิดขึ้น ($dN_{(t)}/dt$) หลังจากการอาบด้วยรังสีนิวตรอน จะมีค่าดังสมการ

$$\frac{dN_{(t)}}{dt} = P - \lambda N_{(t)} \quad \text{----- (2.4)}$$

เมื่ออินทิเกรตสมการ (2.4) จะได้ว่า

$$\lambda N_{(t)} = P (1 - e^{-\lambda t}) + N_0 e^{-\lambda t} \quad \text{----- (2.5)}$$

เมื่อ N_0 = จำนวนอะตอมของเรดิโอไอโซโทปที่มีอยู่เริ่มแรก
 t = ระยะเวลาในการอาบรังสี

กำหนดให้ : เมื่อเวลาเริ่มต้นของการเอกติเวชัน ($t = 0$) จำนวน $N_0 = 0$
 ดังนั้น สมการ (2.5) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$\lambda N_{(t)} = P (1 - e^{-\lambda t}) \quad \text{----- (2.6)}$$

เนื่องจากความแรงรังสี ($A_{(t)}$) ที่เกิดขึ้นที่เวลา t ใด ๆ มีค่าเท่ากับ $\lambda N_{(t)}$ ดังนั้น

$$A_{(t)} = P (1 - e^{-\lambda t}) \quad \text{----- (2.7)}$$

แทนค่า P จากสมการ (2.2) ในสมการที่ (2.8) จะได้ว่า

$$A_{(t)} = N\phi (1 - e^{-\lambda t}) \quad \text{----- (2.8)}$$

เนื่องจากความแรงรังสีของเรดิโอไอโซโทปที่เกิดขึ้นหลังจากการอาบรังสีนิวตรอนที่เวลา T ใด ๆ จะเกิดการสลายตัวด้วยอัตรา $e^{-\lambda T}$ สมการ (2.8) จึงเขียนใหม่ได้ว่า

$$\begin{aligned} A_{(t)} &= N\phi (1 - e^{-\lambda t}) \cdot e^{-\lambda T} \quad \text{----- (2.9)} \\ \text{เมื่อ} \quad N &= \frac{WN_A f}{M} \end{aligned}$$

W = น้ำหนักของธาตุ มีหน่วยเป็น กรัม (g)

N_A = Avogadro's number = 6.02×10^{23} โมเลกุล/กรัม-โมล

f = สัดส่วนเป็นร้อยละของไอโซโทปเสถียรของธาตุนั้นในธรรมชาติ

M = น้ำหนักอะตอมของธาตุ

T = ระยะเวลาที่ใช้ในการนำตัวอย่างมาวัดปริมาณรังสี

ดังนั้น จากสมการ (2.9) เขียนใหม่ได้ว่า

$$A_{(t)} = \frac{WN_A f \phi}{M} (1 - e^{-\lambda t}) \cdot e^{-\lambda T} \quad \text{----- (2.10)}$$

$$W = \frac{A_{(t)} M \cdot e^{\lambda T}}{6.02 \times 10^{23} f \phi (1 - e^{-\lambda t})} \quad \text{----- (2.11)}$$

จากความแรงรังสีที่ได้ จะสามารถคำนวณหาปริมาณของธาตุที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้ตามสมการ (2.11) แต่ในทางปฏิบัติแล้วต้องนำสารตัวอย่างที่วิเคราะห์ได้ไปเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานที่ถูกอาบรังสีนิวตรอนที่ตำแหน่งเดียวกัน และใช้เวลาในการอาบเท่ากัน แล้วนำมาวัดความแรงรังสีเพื่อคำนวณหาปริมาณธาตุโดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$W_x = \frac{W_s \times R_x}{R_s} \quad \text{----- (2.12)}$$

เมื่อ	W_x	=	น้ำหนักของธาตุ x ในสารตัวอย่าง
	W_s	=	น้ำหนักของธาตุ x ในสารมาตรฐาน
	R_x	=	ความแรงรังสีของสารตัวอย่าง
	R_s	=	ความแรงรังสีของสารมาตรฐาน

2.3.6 ข้อดีของการวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอกติเวชัน

2.3.6.1 ความไวของการวิเคราะห์สูง (Sensitivity) ความไวในที่นี้หมายถึงความสามารถที่จะวิเคราะห์ธาตุใดธาตุหนึ่งในปริมาณที่ต่ำสุดได้เพียงใด ภายใต้สภาวะที่กำหนด ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความเข้มของนิวตรอน ภาคตัดขวางของนิวตรอน ลັດล่วนที่มีอยู่ในธรรมชาติของไอโซโทปเสถียรของธาตุนั้น และน้ำหนักอะตอมของธาตุนั้น ๆ จึงเห็นได้ว่าความไวในการวิเคราะห์ธาตุต่างชนิดกันจะไม่เท่ากัน เช่น ธาตุที่มีน้ำหนักอะตอมน้อยจะมีความไวในการวิเคราะห์สูงกว่าธาตุที่มีน้ำหนักอะตอมมากเมื่ออยู่ในสภาวะเดียวกัน นอกจากนี้ความไวของการวิเคราะห์ยังขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของเครื่องมือวัดรังสีด้วย

$$\% \text{ ประสิทธิภาพของเครื่องมือวัดรังสี} = \frac{\text{ความแรงรังสีที่วัดได้}}{\text{ความแรงรังสีจริง}} \times 100 \quad \text{---- (2.13)}$$

ถ้าเครื่องมือมีประสิทธิภาพสูง ย่อมจะทำให้วัดความแรงรังสีได้ใกล้เคียงกับความแรงรังสีจริง ซึ่งจะทำให้ความไวของการวิเคราะห์สูงขึ้นด้วย

2.3.6.2 เป็นวิธีวิเคราะห์ที่ไม่ต้องกังวลต่อข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากสิ่งเจือปน (Impurity) ในระหว่างการปฏิบัติงานภายหลังจากการอาบรังสีแล้ว เนื่องจากธาตุที่จะวิเคราะห์ได้กลายเป็นเรดิโอไอโซโทปที่มีความแตกต่างไปจากสิ่งเจือปนอื่น ๆ แล้ว

2.3.6.3 เป็นวิธีวิเคราะห์ที่สามารถใช้กับธาตุที่มีปริมาณน้อย ซึ่งไม่สามารถจะวิเคราะห์ได้ด้วยวิธีทางเคมีธรรมดา (Conventional chemical technique) เช่น การตกตะกอน เนื่องจากวิธีวิเคราะห์แบบนี้จะคำนึงเฉพาะความแรงรังสีที่เกิดขึ้นเท่านั้น และถ้าต้องการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมี ก็สามารถเติมไอโซโทปเสถียรของธาตุนั้นลงไปเป็นตัวพา (Carrier) เพื่อป้องกันการสูญหายของเรดิโอไอโซโทปได้

2.3.6.4 เป็นวิธีวิเคราะห์ที่ไม่จำเป็นต้องแยกธาตุ ที่จะวิเคราะห์ออกมาให้ได้สมบูรณ์ เพียงแต่แยกออกให้บริสุทธิ์และมีปริมาณมากพอที่จะวัดความแรงรังสีได้เท่านั้น เนื่องจากสามารถปรับค่าเคมีคัลยิลด์ (Chemical yield) ของขบวนการแยกให้เป็น 100 เปอร์เซ็นต์ ได้โดยคิดเทียบจากน้ำหนักของตัวพาที่เติมลงไปในการตัวอย่างภายหลังจากการอาบรังสี

2.3.6.5 ในการวิเคราะห์ โดยใช้เฉพาะเครื่องมือวัดรังสี จะสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยไม่มีการสูญเสียสารตัวอย่างทั้งรูปร่างและลักษณะ และถ้าเลือกสภาวะให้เหมาะสมแล้ว จะสามารถทำการวิเคราะห์ได้หลายธาตุในคราวเดียวกัน

2.3.7 ข้อเสียของการวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอคติเวชัน

2.3.7.1 เป็นวิธีวิเคราะห์ที่ไม่สามารถระบุได้ว่าธาตุที่วิเคราะห์นั้นอยู่ในรูปใดในสารตัวอย่าง เนื่องจากผลการวิเคราะห์จะแสดงถึงปริมาณทั้งหมดของธาตุนั้นที่มีในสารตัวอย่าง (Total content) ไม่ใช่ของสารประกอบของธาตุชนิดหนึ่งชนิดใดโดยเฉพาะ

2.3.7.2 เป็นวิธีวิเคราะห์ที่ไม่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ธาตุได้ทุกตัวในตารางธาตุ เพราะธาตุบางตัวไม่เหมาะสมที่จะใช้วิธีนี้

2.3.7.3 เป็นวิธีวิเคราะห์ที่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์สำหรับป้องกันและตรวจสอบรังสีชนิดต่างๆ อย่างพร้อมมูล และผู้ปฏิบัติงานจะต้องได้รับการฝึกอบรมให้มีความรู้ ความเข้าใจในการปฏิบัติงานเกี่ยวกับกัมมันตรังสีเป็นอย่างดี

2.3.8 ข้อผิดพลาดในการวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอคติเวชัน แบ่งได้เป็น

2.3.8.1 ข้อผิดพลาดทางฟิสิกส์ (Physical error) ถ้าตัดปัญหาความผิดพลาดเนื่องจากความแปรปรวนทางสถิติของการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี (Statistical fluctuation of the radioactive decay) ออกไปแล้ว ข้อผิดพลาดทางฟิสิกส์ที่อาจเกิดขึ้นได้ที่สำคัญๆ มีดังนี้ คือ

2.3.8.1.1 ความผิดพลาดในการเตรียมสารตัวอย่าง (Error in sample preparation) เนื่องจากสารตัวอย่างบางชนิดจะต้องนำไปผสมกับสารอื่นก่อน ทำให้ตัวอย่างที่ใช้มีส่วนผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) ผลการวิเคราะห์ที่ได้จึงอาจผิดพลาดไป การแก้ไขข้อผิดพลาดเหล่านี้จึงควรเตรียมสารตัวอย่างด้วยความระมัดระวังทุกขั้นตอน และใช้ภาชนะ อุปกรณ์ที่สะอาด

2.3.8.1.2 การกำบังตัวเองของสารตัวอย่าง ขณะอาบรังสี (Self-Shielding) ข้อผิดพลาดเช่นนี้เกิดขึ้นเมื่อใช้สารตัวอย่างที่มีปริมาณมากเข้าไปอาบรังสีนิวตรอน ทำให้สารตัวอย่างบริเวณใน ๆ ได้รับรังสีนิวตรอนที่มีความเข้มข้นน้อยกว่าบริเวณนอกและทำให้เรดิโอไอโซโทปของธาตุบางตัวเกิดขึ้นได้ไม่เต็มที่ มีผลทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการวิเคราะห์ได้ การแก้ไขข้อผิดพลาดนี้ก็ต้องใช้สารตัวอย่างในปริมาณน้อยแทน ในกรณีที่ทำได้ก็จำเป็นต้องหาข้อมูลประกอบ (Factor) สำหรับแก้ไขข้อผิดพลาดนี้ หรือต้องเตรียมสารมาตรฐานให้มีลักษณะและเนื้อสารตลอดจนความเข้มข้นของธาตุใกล้เคียงกับสารตัวอย่างให้มาก

ที่สุดเท่าที่จะทำได้เพื่อให้สารมาตรฐานและสารตัวอย่างมีค่าการกัมมันต์ตัวเองพอๆ กัน นอกจากนี้ อาจจะใช้วิธีที่ทำให้สารตัวอย่างนั้นเจือจางลง หรือการเติมสารมาตรฐานลงในสารตัวอย่าง ก็ได้ ข้อผิดพลาดนี้มักเกิดขึ้นกับสารตัวอย่างที่มีความสามารถในการจับอนุภาคนิวตรอนได้ดี

ปรากฏการณ์อีกอย่างหนึ่งที่มีลักษณะคล้ายกับการกัมมันต์ตัวเอง ในขณะที่อาบรังสีนิวตรอน คือ "Self-Shadowing" ซึ่งหมายถึง การกัมมันต์ตัวเองในขณะที่ทำการวัดรังสีเกิดขึ้นได้เมื่อสารตัวอย่างที่จะวัดความแรงรังสีมีปริมาณมาก หรือมีการดูดกลืนรังสีที่จะทำการวัดได้ดี การวัดรังสีอัลฟา เบตา และรังสีเอกซ์ ต้องคำนึงปรากฏการณ์ลักษณะนี้เป็นอย่างมาก แต่ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นการวัดรังสีแกมมาซึ่งมีอำนาจทะลุทะลวงสูง ปัญหาข้อนี้จะเกิดขึ้นมากเฉพาะในกรณีที่ตัวอย่างประกอบด้วยธาตุหนักและตัวอย่างมีปริมาณมาก

2.3.8.1.3 ความไม่สม่ำเสมอของความเข้มรังสีนิวตรอน (Heterogeneity of neutron flux) เนื่องจากความเข้มของรังสีนิวตรอนในตำแหน่งต่างๆมีค่าไม่เท่ากัน และถึงแม้จะเป็นตำแหน่งเดียวกัน แต่ในช่วงเวลาต่างกันความเข้มของรังสีนิวตรอนอาจมีการเปลี่ยนแปลงได้ ทำให้สารตัวอย่างแต่ละตัวและสารมาตรฐานได้รับความเข้มของรังสีนิวตรอนต่างกัน การวัดรังสีตลอดจนการคำนวณหาปริมาณเปรียบเทียบกันจึงผิดพลาดไป ข้อผิดพลาดแบบนี้สามารถแก้ไขได้โดยการนำสารตัวอย่าง และสารมาตรฐานเข้าอาบรังสีพร้อมกันในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกันมากที่สุด และในกรณีที่ไม่สามารถจะจัดตำแหน่งดังกล่าวได้จะต้องมีการปรับค่าความแรงรังสีของสารตัวอย่างกับของสารมาตรฐาน ให้อยู่ในความเข้มของนิวตรอนเดียวกัน โดยใช้สารเปรียบเทียบ (Comparator) เป็นหลัก

2.3.8.1.4 ปฏิกริยานิวเคลียร์แทรกซ้อน (Interfering nuclear reaction) ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภท คือ

(1) การแทรกซ้อนจากปฏิกริยานิวเคลียร์ที่ให้เรดิโอไอโซโทปตัวเดียวกับที่ต้องการวิเคราะห์ ซึ่งเกิดขึ้นได้เนื่องจากมีธาตุที่มีเลขอะตอมใกล้เคียงกับธาตุที่จะวิเคราะห์เกิดปฏิกริยากับนิวตรอนแบบต่างๆแล้ว ผลสุดท้ายให้เรดิโอไอโซโทปตัวเดียวกัน การแทรกซ้อนกรณีเช่นนี้อาจแบ่งได้เป็นแบบต่างๆ ดังนี้ [แสดงในตารางที่ 2.5]

แบบที่ 1 : การแทรกซ้อนจากเรดิโอไอโซโทปที่เกิดขึ้นโดยตรง

แบบที่ 2 : การแทรกซ้อนของเรดิโอไอโซโทป ซึ่งเกิดขึ้นจากการสลายตัวของเรดิโอไอโซโทปที่เกิดขึ้นจากปฏิกริยากับนิวตรอนโดยตรง

แบบที่ 3 : การแทรกซ้อนแบบอื่น ๆ ตัวอย่างเช่น ในกรณีที่มีอนุภาคโปรตรอนเกิดขึ้นจากปฏิกริยาระหว่างนิวตรอนเร็วกับธาตุบางชนิด แล้วอนุภาคโปรตรอนนั้นไปทำให้เกิดปฏิกริยานิวเคลียร์แทรกซ้อน ได้เรดิโอไอโซโทปตัวเดียวกับที่ต้องการวิเคราะห์



ตารางที่ 2.5 การแทรกซ้อนแบบต่าง ๆ

แบบที่	ปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่ต้องการ	ปฏิกิริยานิวเคลียร์แทรกซ้อน
1	$^{23}\text{Na}(n, \gamma) ^{24}\text{Na}$	$^{24}\text{Mg}(n, p) ^{24}\text{Na}$ $^{27}\text{Al}(n, \alpha) ^{24}\text{Na}$
	$^{68}\text{Zn}(n, \gamma) ^{69m}\text{Zn}$	$^{69}\text{Ga}(n, p) ^{69m}\text{Zn}$ $^{72}\text{Ge}(n, \alpha) ^{69m}\text{Zn}$
2	$^{203}\text{Tl}(n, 2n) ^{202}\text{Tl}$ $^{55}\text{Mn}(n, \gamma) ^{56}\text{Mn}$ $^{75}\text{As}(n, \gamma) ^{76}\text{As}$	$^{204}\text{Pb}(n, 3n) ^{202m}\text{Pb} \xrightarrow{\text{K}} ^{202}\text{Tl}$ $^{54}\text{Cr}(n, \gamma) ^{55}\text{Cr} \xrightarrow{\beta} ^{55}\text{Mn}(n, \gamma) ^{56}\text{Mn}$ $^{74}\text{Ge}(n, \gamma) ^{75}\text{Ge} \xrightarrow{\beta} ^{75}\text{As}(n, \gamma) ^{76}\text{As}$
3	$^{19}\text{F}(n, 2n) ^{18}\text{F}$ $^{49}\text{Ti}(n, p) ^{48}\text{Sc}$	$^{17}\text{O}(p, \gamma) ^{18}\text{F}; ^{21}\text{Ne}(p, \alpha) ^{18}\text{F}$ $^{48}\text{Ca}(p, n) ^{48}\text{Sc}$

(2) การแทรกซ้อนจากเรดิโอไอโซโทปตัวอื่นซึ่งให้พลังงานของรังสีเท่ากับหรือใกล้เคียงกับตัวที่ต้องการวิเคราะห์ ทำให้เกิดการผิดพลาดในการวัดรังสีซึ่งอาจจะหลีกเลี่ยงไปวัดรังสีที่พลังงานอื่น (ถ้ามี) ที่ไม่ถูกรบกวน นอกจากนี้อาจแก้ไขได้โดยการพิจารณาครึ่งชีวิตของตัวแทรกซ้อนกับตัวที่สนใจ เพื่อที่จะกำหนดเวลาที่ใช้ในการอาบรังสีนิวตรอนหรือเวลาที่ทิ้งให้สลายตัว เป็นการตัดปัญหาหรือลดปัญหาการรบกวนดังกล่าว ในปัจจุบันหัววัดรังสีแบบกึ่งตัวนำ เช่น หัววัดรังสีแกมมาชนิดเจอร์เมเนียมลิเทียม : Ge(Li), หัววัดรังสีเอกซ์ชนิดซิลิคอน-ลิเทียม : Si(Li), High Purity Germanium และหัววัดรังสีพวกอนุภาคมีประจุแบบ Surface barrier มีความสามารถในการแยกพลังงานได้ดีมาก จึงช่วยลดปัญหาการแทรกซ้อนแบบนี้ได้อย่างมาก

2.3.8.1.5 ความผิดพลาดเกี่ยวกับเทคนิคการวัดรังสี ประการแรกที่ต้องพิจารณาคือสารตัวอย่างและสารมาตรฐานที่จะนำเข้าวัดรังสีจะต้องให้มีลักษณะเหมือนกันให้มากที่สุดเท่าที่จะกระทำได้ ทั้งชนิดและขนาดของภาชนะที่ใช้บรรจุสาร สภาวะ รูปร่าง

ปริมาณ ตลอดจนลักษณะและคุณสมบัติของเนื้อสาร รวมทั้งการจัดวางสารบนหัววัดในลักษณะและตำแหน่งเดียวกัน ประการที่สอง คือ เวลาที่ใช้ในการวัดรังสี (Counting time) ถ้าจำนวนนับ (Counts) ที่ได้มีค่าน้อย ผลการวิเคราะห์จะมีข้อผิดพลาดมากทางสถิติ (Statistical error) ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการวัดรังสีจะต้องมากพอเพื่อให้จำนวนนับที่ได้มีค่ามาก เป็นการลดข้อผิดพลาดที่เกิดจากการวัดรังสี นอกจากนี้ในกรณีของเรดิโอไอโซโทปที่มีครึ่งชีวิตสั้น ช่วงเวลาที่ทิ้งให้สารตัวอย่างและสารมาตรฐานสลายตัว ก่อนนำมาวัดรังสีจะมีผลต่อความแรงรังสีที่วัดได้เป็นอย่างมาก จะต้องทำการปรับค่าปริมาณรังสีให้อยู่ในเวลาที่เริ่มวัดรังสีพร้อมกัน (แก้ Decay time factor) แล้วจึงนำค่ามาเปรียบเทียบกันได้ และประการสุดท้ายคือประสิทธิภาพของเครื่องมือวัดรังสี เนื่องจากการทำงานของเครื่องมือวัดรังสีซึ่งเป็นระบบอิเล็กทรอนิกส์เกิดการเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพแวดล้อมได้ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น เป็นต้น ประสิทธิภาพในการวัดรังสีจึงอาจเปลี่ยนแปลง และมีผลให้การวิเคราะห์ผิดพลาดไปได้บ้าง

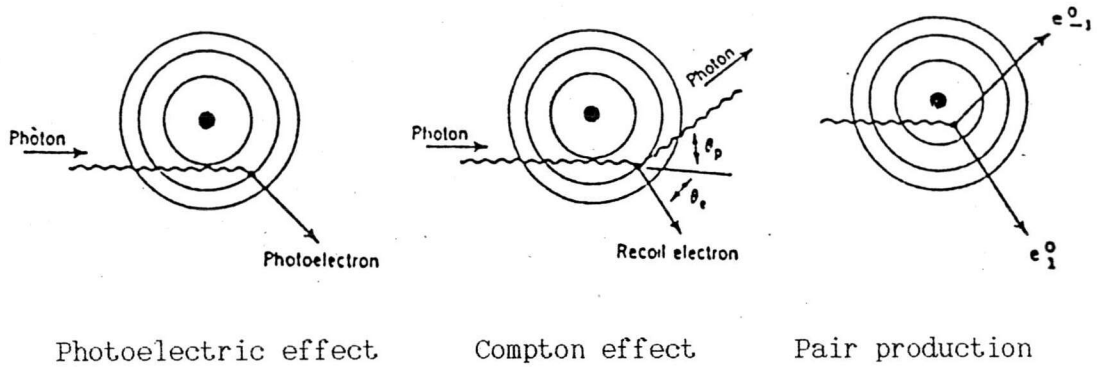
2.3.8.2 ข้อผิดพลาดทางเคมี (Chemical error) ในการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชันแบบที่ต้องอาศัยกรรมวิธีทางเคมี จะต้องระมัดระวังข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้ด้วยกรรมวิธีทางเคมีต่างๆที่ใช้กับสารตัวอย่างและสารมาตรฐานจะต้องให้สมบูรณ์เหมือนกันหมด เป็นต้นว่า การแยก การทำละลาย การตกตะกอน และการล้างตะกอนการวิเคราะห์ตัวอย่างเดียวกันซ้ำกันหลายๆ ครั้ง จะช่วยให้ผลการวิเคราะห์ถูกต้องมากยิ่งขึ้น

2.4 การวัดรังสีแกมมา (ชาญชัย อัครวินิจกุลชัย, 2529; Chase and Rabinowitz, 1965; Adams and Doms, 1970; Knoll, 1979)

เนื่องจากการสลายตัวของเรดิโอไอโซโทป (Radioactive decay) แต่ละตัวจะมีรูปแบบของการสลาย (Decay mode) ที่แตกต่างกัน เช่น การสลายตัวโดยให้อนุภาคอัลฟา (α -decay) การสลายตัวโดยให้เบตา (β -decay) การสลายตัวโดยให้อนุภาคโพซิตรอน (β^+ -decay) และการสลายตัวโดยให้รังสีแกมมา (γ -decay) เป็นต้น จึงสามารถที่จะเลือกรูปแบบของการสลายของเรดิโอไอโซโทปที่เกิดขึ้นไปใช้ในการวิเคราะห์ได้ ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วเรดิโอไอโซโทปที่เกิดขึ้นมักจะมีรูปแบบการสลายตัวโดยให้รังสีแกมมา ดังนั้นในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟอสฟอโรเมตริกนิวตรอนแอคติเวชันนี้ จึงวัดรังสีแกมมาจากเรดิโอไอโซโทปที่เกิดขึ้น

2.4.1 อันตรกิริยาของรังสีแกมมากับสสาร (Interaction of gamma with matter) ที่สำคัญมีอยู่ 3 แบบด้วยกัน คือ [ดังแสดงในรูปที่ 2.1]

2.4.1.1 กระบวนการเกิดโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟค (Photoelectric effect: γ) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อรังสีแกมมาวิ่งเข้าชนอิเล็กตรอน แล้วถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้กับอิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนที่ถูกชนนั้นหลุดออกมาจากวงโคจรและอิเล็กตรอน



รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงการเกิดอันตรกิริยาของรังสีแกมมา

ที่อยู่ในวงโคจรถัดไปจะเคลื่อนที่เข้ามาแทน สำหรับอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะเรียกว่า "โฟโตอิเล็กตรอน (photoelectron)" โดยที่

พลังงานรังสีแกมมา = พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน + พลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน

$$\text{หรือ } h\nu = E_e + E_b \quad \text{----- (2.14)}$$

$$\text{โอกาสที่จะเกิด } \gamma = N Z^5 (E^{-3.5}) \quad \text{----- (2.15)}$$

- โดยที่ E = พลังงานของรังสี
- N = ความหนาแน่นของอะตอม
- Z = เลขอะตอมของตัวกลาง

กระบวนการนี้เกิดได้ดีกับรังสีแกมมาที่มีพลังงานต่ำ เข้าชนธาตุที่มีเลขอะตอมสูง ส่วนที่วัดได้จากกระบวนการนี้โดยหวัตรังสี และเครื่องวัดรังสีที่ให้สเปกตรัมรังสีแกมมาออกมาจะเรียกว่า "โฟโตพีค (photo peak)" ดังรูปที่ 2.2

2.4.1.2 กระบวนการกระเจิงคอมป์ตัน (Compton scattering)

: θ เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อรังสีแกมมาชนกับอิเล็กตรอน แล้วถ่ายเทพลังงาน (E) ให้เพียงบางส่วนเท่านั้น ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาในขณะที่เดียวกับที่รังสีแกมมาเคลื่อนที่เปลี่ยนทิศทางไปเป็นมุม θ กับทิศทางเดิมด้วยพลังงานที่เหลืออยู่ (E')

$$\text{โดยที่ } E' = \frac{E}{1 + (E/m_0 c^2)(1 - \cos \theta)} \quad \text{----- (2.16)}$$

$$\text{โอกาสที่จะเกิด } \theta = N Z (\ln 2h\nu / mc^2 + 0.5) / h\nu \quad \text{----- (2.17)}$$

- เมื่อ m = มวลของอิเล็กตรอน
- c = ความเร็วแสง

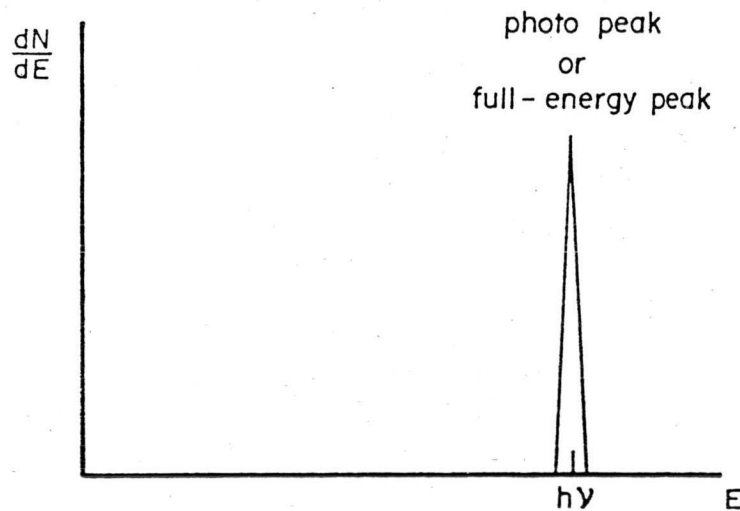
กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นได้กับรังสีแกมมาที่มีพลังงานค่อนข้างสูง ส่วนที่วัดได้ก็คือ Compton continuum และ Compton edge ดังรูปที่ 2.3

2.4.1.3 กระบวนการเกิดอิเล็กตรอนคู่ (Pair production:k) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อรังสีแกมมามีพลังงานมากกว่า 1.02 MeV วิ่งผ่านเข้าไปในสนามไฟฟ้าของนิวเคลียสแล้วหายไป เกิดเป็นอิเล็กตรอนและโพสิตรอน

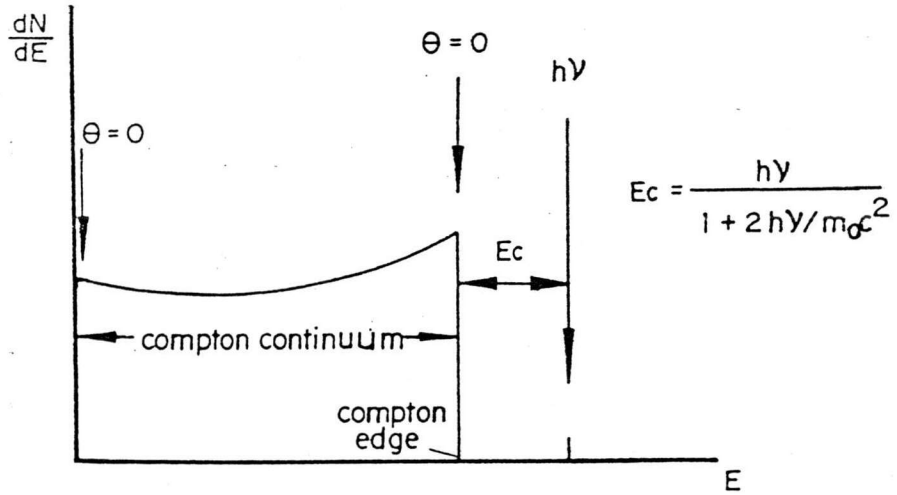
$$\text{โดยที่} \quad h\nu - 2m_0c^2 = E_{e^-} + E_{e^+} \quad \text{----- (2.18)}$$

$$\text{และ} \quad k = N Z^2 (h\nu - 1.02) \quad \text{----- (2.19)}$$

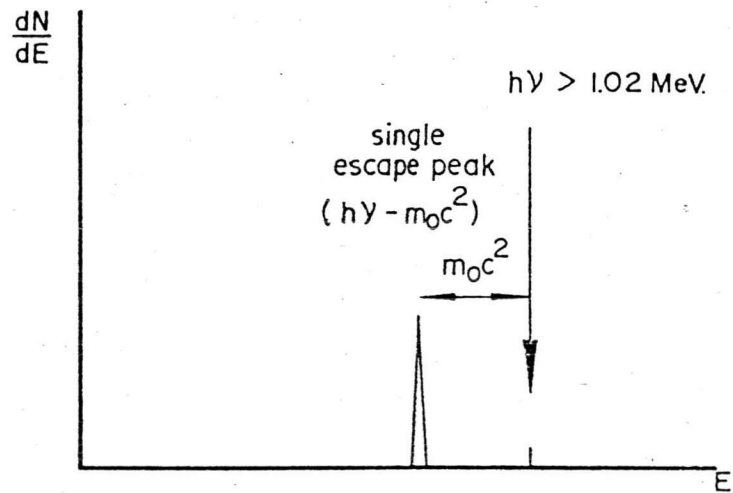
โพสิตรอนที่เกิดขึ้นจะเกิด Annihilation กับอิเล็กตรอนอิสระของอะตอมข้างเคียง เกิดเป็นรังสีแกมมาพลังงาน 0.511 MeV (m_0c^2) 2 โฟตอน วิ่งออกไปในทิศตรงกันข้าม ส่วนที่วัดได้ก็คือ Peak ของ 0.511 MeV (Annihilation peak) Single escape peak และ Double escape peak อันเนื่องมาจาก Annihilation และการหลุดหายไปจากหัววัดรังสีของรังสีแกมมาพลังงาน 0.511 MeV 1 ตัว และ 2 ตัว ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.4 และรูปที่ 2.5



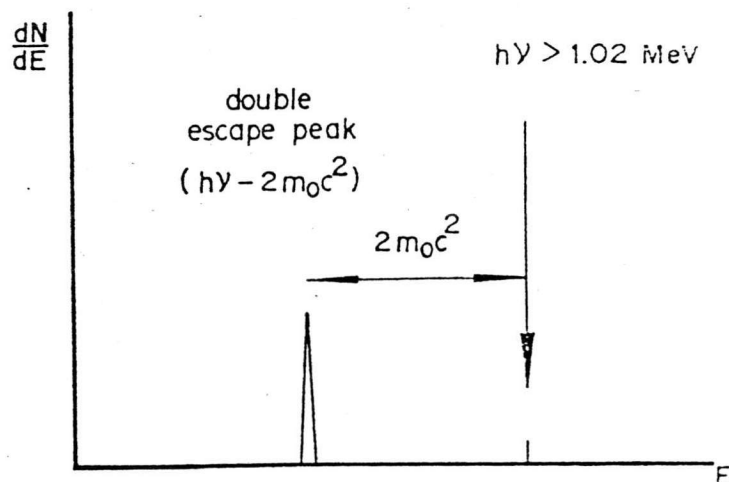
รูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นถึงส่วนที่วัดได้จากการเกิดกระบวนการโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟค



รูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นถึงส่วนต่าง ๆ ที่วัดได้จากการเกิดกระบวนการกระเจิงคอมป์ตัน



รูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นถึง Single escape peak ของรังสีแกมมา

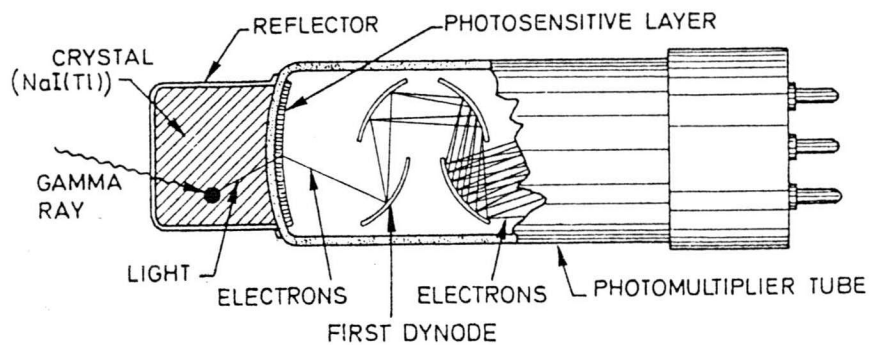


รูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นถึง Double escape peak ของรังสีแกมมา

2.4.2 อุปกรณ์การวัดรังสีแกมมา ประกอบด้วย

2.4.2.1 หัววัดรังสีแกมมาชนิดผลึกโซเดียมไอโอไดต์ เป็นหัววัดรังสีแบบเรืองแสง (Scintillation detector) ชนิดหนึ่ง ประกอบด้วย ผลึก NaI(Tl) และหลอดทวีคูณอิเล็กตรอน (Photomultiplier tube) เมื่อรังสีแกมมาตกกระทบผลึก NaI(Tl) จะทำให้โมเลกุลของผลึกถูกกระตุ้นไปอยู่ในสถานะ Exited state แล้วกลับสู่สถานะ Ground state อย่างรวดเร็ว พร้อมกับปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปโฟตอนของแสง แสงที่เกิดขึ้นนี้จะไปกระทบโฟโตคาโทดในหลอดทวีคูณอิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดกระเด็นออกไปชนกับแผ่นโลหะที่เรียกว่า "ไดโนด (Dynode)" และจะได้อิเล็กตรอนออกมาประมาณ 4-5 ตัวต่อการชนไดโนด 1 แผ่น หลังจากผ่านแผ่นไดโนด 10-15 แผ่นแล้วจะวิ่งเข้าชนแผ่นแอนโนด เกิดเป็นกระแสไฟฟ้า (Current pulse) ที่มีความแรงมากขึ้น

สำหรับการวัดรังสีแกมมายังนิยมใช้ หัววัดรังสีแบบเรืองแสงชนิดซีเซียมไอโอไดต์ : CsI(Tl) เนื่องจากผลึกวัดมีความหนาแน่นสูงจึงมีโอกาสที่จะเกิดอันตรกิริยาต่อพลังงานรังสีในช่วงกว้างได้ดีแต่ราคาค่อนข้างสูง ในการใช้งานจึงมักพบการใช้หัววัดรังสีแบบเรืองแสงชนิดโซเดียมไอโอไดต์มากกว่า อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้หัววัดรังสีประเภทใดนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของงานว่าต้องการความไวและรายละเอียดในการวัดมากน้อยเพียงใด



รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงโครงสร้างของหัววัดรังสีแบบเรืองแสง (IAEA : Technical Reports Series No.193, 1979)

2.4.2.2 แหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าสูง (High voltage power supply) เป็นอุปกรณ์ที่ให้ศักดาไฟฟ้าสูงแก่หัววัดรังสี เพื่อสร้างไบอัส (bias) แก่ขั้วไฟฟ้าของหลอดทวิคูณอิเล็กตรอน ทำให้เกิดกระบวนการทวีคูณอิเล็กตรอนขึ้น ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงที่จ่ายให้หัววัดรังสีแบบต่าง ๆ แสดงในตาราง 2.6

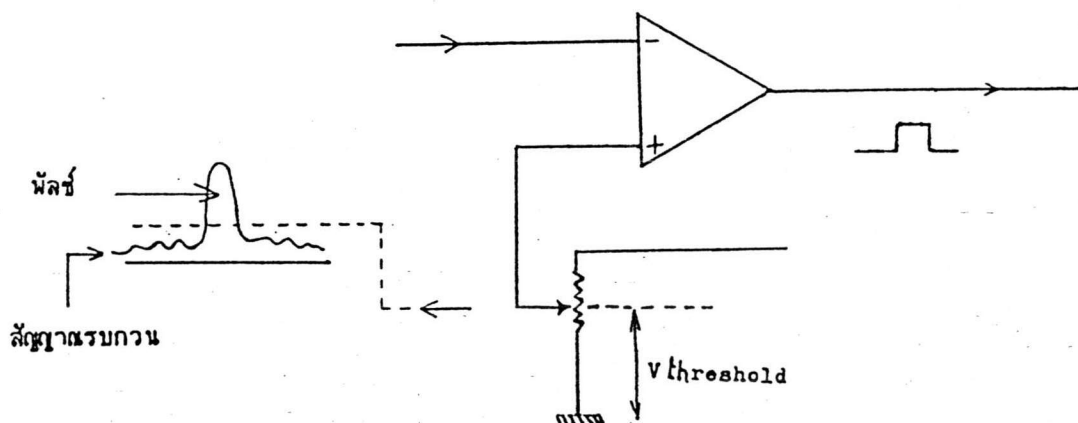
2.4.2.3 ภาคขยายสัญญาณส่วนหน้า (Preamplifier) เพื่อขยายสัญญาณจากหัววัดรังสีที่มีระดับต่ำในอันดับมิลลิโวลต์ ให้สูงพอสำหรับการส่งสัญญาณไปยังส่วนอื่น ๆ ที่อยู่ห่างจากหัววัดรังสี นอกจากนี้ยังจัดรูปสัญญาณให้เหมาะสมสำหรับวงจรภาคต่อไป

ตารางที่ 2.6 ศักย์ไฟฟ้าทำงานของหัววัดรังสี

Detector	High voltage (Volts)
Ionization counters	HV < 1000
Proportional counters	500 < HV < 1500
GM counters	800 < HV < 2400
Semiconductor detectors	
Surface-barrier	HV < 100
Li-drifted	100 < HV < 3000

2.4.2.4 ภาคขยายสัญญาณ (Amplifier) ทำการขยายขนาดสัญญาณจากหัววัดรังสี หรือจากภาคขยายสัญญาณล่วงหน้าให้สูงขึ้นประมาณ 1000 เท่า หรือมากกว่านั้น ทำให้สัญญาณมีขนาดในช่วง 0-10 โวลต์ ที่มีความแรงพอที่จะวิเคราะห์หรือบันทึกผล นอกจากนี้ยังแต่งรูปสัญญาณเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการนับสัญญาณพัลส์ที่เกิดจากหัววัดรังสี

2.4.2.5 ภาคตัดสัญญาณรบกวน (Discriminator) ทำหน้าที่ตัดสัญญาณรบกวนที่ปนมากับสัญญาณพัลส์ ด้วยการเปรียบเทียบความสูงของสัญญาณไฟฟ้า ระดับสัญญาณที่มากกว่าระดับต่ำสุด (Threshold) ที่ตั้งไว้เท่านั้น จะผ่านกระบวนการแต่งรูปเป็นสัญญาณลอจิกเพื่อส่ง ไปบันทึกผล



รูปที่ 2.7 การตัดสัญญาณรบกวน

2.4.2.6 ส่วนแสดงผล (Display unit) ทำหน้าที่แสดงข้อมูลจำนวนนับต่อหน่วยเวลาของการนับรังสี ในทางปฏิบัติเมื่อต้องการบันทึกค่าวัดเฉพาะจุดเพื่อหาค่าความแปรปรวนจะใช้สเกลเลอร์ และเมื่อต้องการวัดปริมาณความเข้มรังสีเฉลี่ยต่อเนื่อง เช่น ในระบบควบคุมระดับความหนา หรือระดับน้ำ จะใช้เรทมิเตอร์ เป็นต้น

2.4.2.6.1 สเกลเลอร์ (Scaler) เป็นอุปกรณ์วัดความแรงรังสีแสดงผลเชิงเลข เวลาในการนับรังสีควบคุมโดยภาคตั้งเวลา (Timer) เพื่อให้ข้อมูลที่แสดงผล มีหน่วยเป็น จำนวนนับต่อหน่วยเวลา

2.4.2.6.2 เรทมิเตอร์ (Rate meter) เป็นอุปกรณ์แสดงผลเป็นค่าเฉลี่ยจำนวนนับต่อหน่วยเวลา ด้วยการเปลี่ยนความถี่ของการนับรังสีเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับความถี่ หรืออัตราที่นับได้จากระบบวัดรังสี