หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

นิวตรอนและรังสีแกมมา

ปัจจุบันเทคนิคนิวเคลียร์ (Nuclear technique) ซึ่งใช้ประโยชน์จากคุณสมบัติเฉพาะตัวของอนุภาคต่าง ๆ ที่ได้จากปฏิกิริยานิวเคลียร์ (Nuclear reaction) หรือจากธาตุที่มีคุณสมบัติเป็นไอโซโทปรังสี (Radioisotope) ถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในด้านการแพทย์ งานวิจัย ทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพและด้านการเกษตร และงานตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เทคนิคนิวเคลียร์ที่นิยมใช้ได้แก่ เทคนิคการถ่ายภาพด้วยรังสี (Radiographic technique) การใช้เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ในการหาชนิดและปริมาณของธาตุ (X-ray fluorescence) เทคนิคการติดตามรังสี การใช้ไอโซโทปรังสีศึกษาคุณสมบัติของยีนและสายพันธุกรรม เทคนิคการวัดระดับของเหลวในภาชนะปิด การหารอยแตกและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคในวัสดุ การหาปริมาณและความเข้มข้นของไฮโดรเจน และวัสดุที่มีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลักโดยใช้เทคนิคนิวตรอน เช่นการหาปริมาณไขมันในเนื้อสัตว์ การหาความชื้นในแป้งมันสำปะหลัง ถ่านหิน ดินและวัสดุก่อสร้างบางชนิด ปัจจัยที่ทำให้เทคนิคนิวเคลียร์ถูกเลือกใช้เนื่องจากมีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่น ๆ หลายประการเช่น สะดวก รวดเร็ว และมีความถูกต้องสูง สามารถประยุกต์ใช้กับงานด้านต่าง ๆ ได้อย่างแพร่หลาย และที่สำคัญที่สุดคือเป็นการตรวจสอบโดยไม่ทำลายตัวอย่างและเป็นเทคนิคที่ไม่ต้องมีส่วนหนึ่งส่วนใดของอุปกรณ์สัมผัสตัวอย่าง

2.1 อนุภาคและรังสี

อนุภาคและรังสีที่สำคัญและสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ประกอบด้วย อนุภาคอัลฟา อนุภาคเบตา อนุภาคโพซิตรอน อนุภาคนิวตรอน อนุภาคโปรตอน และรังสีแกมมา ซึ่งอนุภาคแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันดังนี้

ก) อนุภาคอัลฟา (Alpha particle) หรือรังสีอัลฟา (alpha ray) นิยมเขียนสัญลักษณ์แทนด้วย α หรือ ${}^{4}_{2}\alpha$ อนุภาคอัลฟาก็คือนิวเคลียสของอะตอมของฮีเลียม-4 (He-4: ${}^{4}He$) มีประจุไฟฟ้าเท่ากับ +2 จัดเป็นอนุภาคมีประจุชนิดหนัก (Heavy charged particle) มีอำนาจในการทะลุทะลวงต่ำ เพียงกระดาษแผ่นเดียวก็สามารถกั้นได้ อนุภาคอัลฟาส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากการสลายตัวของธาตุหนักที่มีเลขอะตอมตั้งแต่ 83 คือตั้งแต่บิสมัท (Bismuth) [4] ขึ้นไปเช่น

$$^{211}_{83}Bi \longrightarrow {}^{207}_{81}Tl + {}^{4}_{2}He \qquad (2.1)$$

$$^{226}_{88}Ra \longrightarrow {}^{222}_{86}Rn + {}^{4}_{2}He \qquad (2.2)$$

$$^{238}_{92}U \longrightarrow {}^{234}_{90}Th + {}^{4}_{2}He \qquad (2.3)$$

นอกจากนี้อนุภาคอัลฟายังสามารถเกิดขึ้นจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ได้หลายปฏิกิริยา เช่น ปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคนิวตรอน ($^{1}_{0}n$) หรืออนุภาคโปรตอน ($^{1}_{1}H$ หรือ $^{1}_{1}p$) กับธาตุบางชนิด ปฏิกิริยาที่สำคัญได้แก่

$$^{1}_{0}n + {}^{6}_{3}Li \longrightarrow {}^{3}_{1}H + {}^{4}_{2}He \qquad (2.4)$$

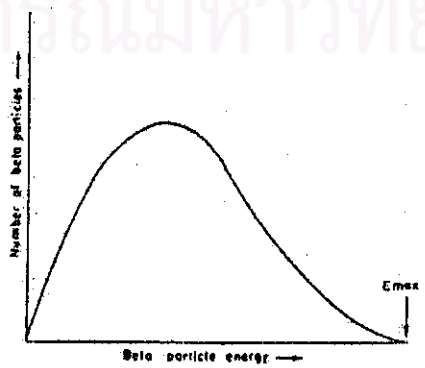
$$^{1}_{0}n + {}^{10}_{5}B \longrightarrow {}^{7}_{3}Li + {}^{4}_{2}He \qquad (2.5)$$

$$^{1}_{1}H + {}^{11}_{5}B \longrightarrow {}^{9}_{4}Be + {}^{4}_{2}He \qquad (2.6)$$

ข) อนุภาคเบตา (Beta particle) หรือรังสีเบตา (beta ray) คืออนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยออกมาจากธาตุกัมมันตรังสี โดยปกติเมื่อกล่าวถึงอนุภาคเบตาจะหมายถึงอนุภาคเบตาลบ (negative beta หรือ negatron) นิวไคลด์ที่มีจำนวนนิวตรอนในนิวเคลียสมากกว่าปกติ (neutron-rich nucleus) จะเกิดการสลายตัวให้อนุภาคเบตาลบและอนุภาคแอนตินิวตริโน (anti-neutrino: $\bar{\nu}$) ดังแสดงไว้ในสมการที่ 2.7 [5]

$$^{64}_{29}Cu \longrightarrow {}^{64}_{30}Zn + {}^{0}_{-1}e + \bar{\nu} \qquad (2.7)$$

เนื่องจากอนุภาคเบตาที่ถูกปล่อยออกมามีลักษณะเป็นกระแสของอิเล็กตรอนลบ พลังงานของอนุภาคเบตาจึงมีลักษณะเป็นแถบพลังงานหรือสเปกตรัม (spectrum) ที่มีค่าตั้งแต่ 0 จนถึงค่าพลังงานสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 2.1 พลังงานเฉลี่ยของอนุภาคเบตามีค่าประมาณ 1 ใน 3 ของพลังงานสูงสุด

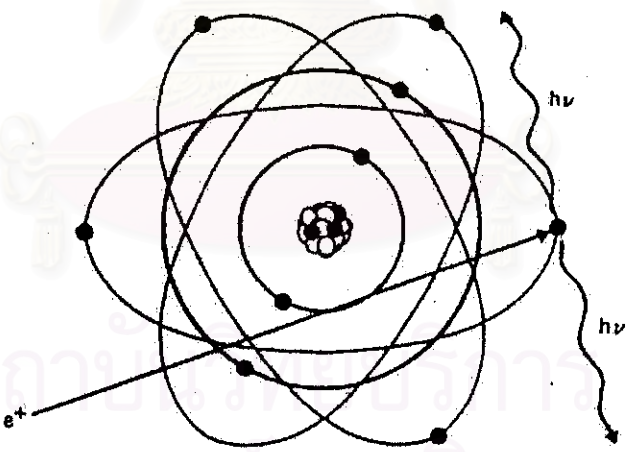


รูปที่ 2.1 แสดงสเปกตรัมของอนุภาคเบตา [6]

ค) อนุภาคเบตาบวก (Positive beta) หรือโพซิตรอน (Positron) เป็นอนุภาคที่มีมวลและประจุเท่ากับอิเล็กตรอน หรืออนุภาคเบตาลบแต่มีประจุเป็นบวก นิวไคลด์ที่มีจำนวนนิวตรอนในนิวเคลียสน้อยกว่าปกติ (proton rich nucleus) จะสลายตัวให้โพซิตรอนออกมา นอกจากการสลายตัวให้โพซิตรอนแล้วยังพบว่ามีอนุภาคนิวตริโนถูกปล่อยออกมาในเวลาเดียวกันด้วย เช่นสมการที่ 2.8 [7]

$$^{64}_{29}Cu \longrightarrow {}^{1}_{7}N + {}^{0}_{+1}e + \nu \qquad (2.8)$$

การกระจายพลังงานของอนุภาคโพซิตรอนมีลักษณะเป็นเช่นเดียวกับของอนุภาคเบตาลบ ค่าพลังงานเฉลี่ยมีค่าประมาณ 0.4 เท่าของค่าพลังงานสูงสุด อนุภาคโพซิตรอนเมื่อผ่านเข้าไปในตัวกลางใด ๆ จะมีพลังงานลดลงจนเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนของตัวกลาง จากนั้นจะเกิดการสลายตัวต่อให้รังสีแกมมา 2 ตัว ที่มีพลังงานตัวละ 0.511 MeV แต่มีทิศทางตรงข้ามกัน กระบวนการรวมตัวกันของอนุภาคโพซิตรอนและอิเล็กตรอนนี้เรียกว่ากระบวนการแอนนิฮิเลชัน (Annihilation) ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงการเกิดกระบวนการแอนนิฮิเลชันของโพซิตรอนกับอิเล็กตรอน

ง) อนุภาคนิวตรอน (Neutron) เป็นอนุภาคที่เป็นกลางมีมวลมากกว่าอนุภาคโปรตอนเล็กน้อย อนุภาคนิวตรอนอิสระเป็นอนุภาคที่ไม่เสถียรจะสลายตัวให้อนุภาคโปรตอน อิเล็กตรอน และอนุภาคแอนตินิวตริโน รายละเอียดของอนุภาคนิวตรอนอธิบายไว้ในหัวข้อ 2.3

จ) อนุภาคโปรตอน (Proton particle) มีประจุเท่ากับ +1 สามารถเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $^{1}_{1}H$ หรือ $^{1}_{1}p$ อนุภาคโปรตอนที่พบส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยานิวเคลียร์เช่น อนุภาคนิวตรอนกับธาตุบางชนิด ปฏิกิริยาที่สำคัญและพบมากที่สุดคือ ปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคนิวตรอน

กับไนโตรเจน-14 (Nitrogen-14: ^{14}N) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดไอโซโทปรังสีคาร์บอน-14 (Carbon-14: ^{14}C) ขึ้นในธรรมชาติ สมการที่ 2.9 [8] แสดงปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่ทำให้เกิดอนุภาค $^{1}_{1}H$

$$^{1}_{0}n + {}^{58}Ni \longrightarrow {}^{58}Co + {}^{1}_{1}H \qquad (2.9)$$

นอกจากนี้ยังพบว่ามีอนุภาคโปรตอนลบด้วย แต่ยังไม่มีความสำคัญในทางนิวเคลียร์จึงไม่กล่าวถึงในที่นี้

ฉ) รังสีแกมมา (Gamma ray) และรังสีเอกซ์ (X-ray) เป็นรังสีที่มีคุณสมบัติเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic radiation) ไม่มีมวล ไม่มีประจุ เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วแสงคือ 2.9979×10^{8} เมตรต่อวินาที รังสีประเภทนี้เรียกอีกอย่างได้ว่าโฟตอน (photon) ข้อแตกต่างของรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์คือ รังสีแกมมาเป็นรังสีที่เกิดขึ้นจากภายในนิวเคลียสในขณะที่รังสีเอกซ์เกิดขึ้นภายนอกนิวเคลียสเช่นเกิดกับอิเล็กตรอนในวงโคจร รายละเอียดของรังสีแกมมาอธิบายไว้ในหัวข้อ 2.4

ช) อนุภาคนิวตริโน (Neutrino) และอนุภาคแอนตินิวตริโน (Anti-neutrino) เป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับอิเล็กตรอนจึงถือว่ามีมวลเป็นศูนย์ เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วแสงและมีอำนาจทะลุทะลวงผ่านตัวกลางได้สูงมาก

อนุภาคและรังสีต่าง ๆ สามารถจำแนกออกได้เป็นหลายกลุ่มขึ้นกับเกณฑ์ที่นำมาพิจารณา เช่น เมื่อแบ่งตามคุณสมบัติว่ามีประจุไฟฟ้าหรือไม่ สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มคือชนิดมีประจุไฟฟ้าได้แก่ อนุภาคอัลฟา อนุภาคเบตา และอนุภาคโปรตอน ชนิดไม่มีประจุไฟฟ้าได้แก่ อนุภาคนิวตรอน รังสีแกมมา และรังสีเอกซ์ ถ้าจำแนกโดยอาศัยมวลของอนุภาคสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มคือชนิดที่มีมวลได้แก่ อนุภาคอัลฟา อนุภาคเบตา อนุภาคนิวตรอน และอนุภาคโปรตอน ชนิดที่ไม่มีมวลได้แก่รังสีแกมมา และรังสีเอกซ์

2.2 ปฏิกิริยานิวเคลียร์ (Nuclear reaction)

อนุภาคนิวตรอนและโปรตอนอยู่รวมกันภายในนิวเคลียสเป็นนิวคลีออนได้ด้วยแรงยึดเหนี่ยวที่เรียกว่าแรงนิวเคลียร์ (Nuclear force) ซึ่งเป็นแรงยึดเหนี่ยวที่มีค่าสูงมาก ตามปกตินิวเคลียสจะอยู่ในสภาวะเสถียรแต่ถ้ามีสิ่งรบกวนในนิวเคลียสที่ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นกับนิวตรอนและโปรตอน นิวเคลียสจะปล่อยพลังงานออกมาโดยพลังงานที่ปล่อยออกมานั้นมีระดับสูงมากอยู่ในช่วงมากกว่าล้านอิเล็กตรอนโวลต์ (Megaelectron volt: MeV) เรียกว่าพลังงานนิวเคลียร์ (Nuclear energy) ดังนั้นปฏิกิริยานิวเคลียร์ก็คือปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาค หรือ

รังสีต่าง ๆ กับนิวเคลียส หรือระหว่างนิวเคลียสกับนิวเคลียสเอง ซึ่งแตกต่างไปจากปฏิกิริยาเคมี (Chemical reaction) ที่เกิดปฏิกิริยาขึ้นเฉพาะในส่วนของอิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอมเท่านั้น ปฏิกิริยานิวเคลียร์สามารถเกิดได้ทั้งจากการกระเจิงของอนุภาคหรือรังสีที่เข้าทำปฏิกิริยา การถูกกระตุ้นของนิวเคลียสที่เป็นเป้า หรือการถูกกระตุ้นของนิวเคลียสที่เป็นเป้าแล้วตามด้วยการเปลี่ยนแปลงภายในนิวเคลียสให้กลายเป็นนิวไคลด์อื่นโดยการรับหรือปล่อยอนุภาคหรือรังสีชนิดใดชนิดหนึ่งออกมา ถ้าให้ A และ B ทำปฏิกิริยากันแล้วได้ผลผลิตเป็น C และ D สามารถเขียนปฏิกิริยานิวเคลียร์ได้ดังนี้

$$A + B \longrightarrow C + D \qquad (2.10)$$

กฎพื้นฐานของการเขียนสมการแสดงปฏิกิริยานิวเคลียร์มีดังนี้

ก) conservation of nucleons คือจำนวนของนิวคลีออนรวมก่อนและหลังปฏิกิริยาต้องมีจำนวนเท่ากัน

ข) conservation of charge คือ ผลรวมของประจุของอนุภาคก่อนและหลังปฏิกิริยาต้องเท่ากัน

ค) conservation of momentum คือ ผลรวมของโมเมนตัมของอนุภาคก่อนและหลังปฏิกิริยามีค่าเท่ากัน

ง) conservation of energy คือพลังงานรวมของปฏิกิริยานิวเคลียร์ก่อนปฏิกิริยากับหลังปฏิกิริยาต้องมีค่าเท่ากัน ทั้งนี้รวมถึงพลังงานจลน์ และ rest mass energy ด้วย ในกรณีที่มีมวลหายไปมวลจะถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงาน ในทางตรงกันข้ามพลังงานก็สามารถเปลี่ยนเป็นมวลได้เช่นกันตามกฎของไอน์สไตน์

สมการที่ 2.11 ถึง 2.15 แสดงตัวอย่างของปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่สำคัญบางปฏิกิริยา

$$^{2}_{1}H + {}^{2}_{1}H \longrightarrow {}^{1}_{1}H + {}^{3}_{1}H \qquad (2.11)$$

$$^{3}_{1}H + {}^{3}_{1}H \longrightarrow {}^{1}_{0}n + {}^{4}_{2}He \qquad (2.12)$$

$$^{1}_{0}n + {}^{10}_{5}B \longrightarrow {}^{7}_{3}Li + {}^{4}_{2}He \qquad (2.13)$$

$$^{4}_{2}He + {}^{9}_{4}Be \longrightarrow {}^{12}_{6}C + {}^{1}_{0}n \qquad (2.14)$$

$$^{16}_{8}O + {}^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{16}_{7}N + {}^{1}_{1}H \qquad (2.15)$$

ในกรณีที่อนุภาคตัวหนึ่งทำปฏิกิริยากับนิวเคลียสแล้วได้ผลผลิตเป็นนิวเคลียสหนึ่งกับอนุภาคอีกตัวหนึ่ง สามารถเขียนปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบย่อได้ดังนี้

ก) ปฏิกิริยาดังสมการที่ 2.13 สามารถเขียนได้เป็น $^{10}B(n,\alpha)^{7}Li$

ข) ปฏิกิริยาดังสมการที่ 2.14 สามารถเขียนได้เป็น $^{9}Be(\alpha,n)^{12}C$

ค) ปฏิกิริยาดังสมการที่ 2.15 สามารถเขียนได้เป็น $^{16}O(n,p)^{16}N$

2.3 นิวตรอน (Neutron)

นิวตรอนเป็นอนุภาคที่เป็นกลางที่อยู่ในนิวเคลียสของอะตอมโดยอยู่รวมตัวกับโปรตอน เรียกว่านิวคลีออน นิวตรอนและโปรตอนในนิวคลีออนอยู่ร่วมกันได้ด้วยแรงยึดเหนี่ยวที่เรียกว่าแรงนิวเคลียร์ นิวตรอนสามารถหลุดออกจากนิวเคลียสได้ในบางสภาวะ นิวเคลียสที่หลุดออกมาเรียกว่าอนุภาคนิวตรอนอิสระ อนุภาคนิวตรอนอิสระจะมีคุณสมบัติบางประการที่แตกต่างไปจากอนุภาคนิวตรอนที่อยู่ในนิวเคลียส

2.3.1 คุณสมบัติบางประการของนิวตรอน

คุณสมบัติของนิวตรอนที่กล่าวถึงในส่วนนี้เป็นคุณสมบัติของนิวตรอนอิสระซึ่งแตกต่างจากอนุภาคนิวตรอนที่อยู่ในนิวเคลียสและมีประโยชน์ในทางนิวเคลียร์เท่านั้น

ก) อนุภาคนิวตรอนอิสระเป็นอนุภาคที่เป็นกลางไม่มีประจุไฟฟ้า ทำให้สามารถเดินทางผ่านตัวกลาง เช่น ผ่านไปในอากาศได้หลายเมตรโดยไม่ทำให้เกิดคู่อิออนหรืออิออนแพร์ (ion pair) และสามารถเดินทางผ่านในวัตถุได้เป็นระยะทางไกลกว่าอนุภาคที่มีประจุอื่นๆ เนื่องจากไม่ถูกแรงคูลอมป์ (Coulomb force) ขัดขวางระหว่างการเดินทาง

ข) การสลายตัวให้กัมมันตรังสี (Radioactive decay) อนุภาคนิวตรอนมีมวลมากกว่าโปรตอนเล็กน้อยคือมวลของนิวตรอนเท่ากับ 1.008665U ในขณะที่มวลของโปรตอนเท่ากับ 1.007825U เมื่อนิวตรอนมีพลังงานสูงถึงระดับหนึ่งอนุภาคนิวตรอนอิสระจะแตกตัวให้โปรตอน อิเล็กตรอน และแอนตินิวตริโน พร้อมทั้งปล่อยพลังงานออกมาประมาณ 0.78 MeV ดังสมการที่ 2.16 [9]

$$ {}^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{1}_{1}H + {}^{0}_{-1}e + \bar{\nu} \qquad (2.16) $$

จากสมการที่ 2.16 จะพบว่ามวลของนิวตรอนที่มากกว่าโปรตอนนั้นก็คือมวลของอิเล็กตรอนและแอนตินิวตริโนนั่นเอง อนุภาคนิวตรอนอิสระแตกตัวให้กัมมันตรังสีด้วยค่าครึ่งชีวิต ประมาณ 12 นาที

ค) สปินและโมเมนต์แม่เหล็ก (Spin and magnetic moment) นิวตรอนมีสปินหรือโมเมนต์เชิงมุมเท่ากับ $\frac{1}{2}$ h และมีโมเมนต์แม่เหล็กเท่ากับ −1.9135 นิวเคลียร์แมกเนตรอน (Nuclear magnetron)

ง) คลื่นและคุณสมบัติโพราไรเซชัน นิวตรอนแสดงคุณสมบัติความเป็นคลื่นเช่นเดียวกับอนุภาคเบาอื่น ๆ โดยมีความยาวคลื่นสัมพันธ์กับความเร็วดังสมการที่ 2.17

$$\lambda = \frac{h}{mv} \qquad (2.17)$$

โดย λ = ความยาวคลื่น

h = ค่าคงที่ของแพลงค์ (6.62559×10^{-34} Js)

m = มวลของนิวตรอน

v = ความเร็วของนิวตรอน

คุณสมบัติความเป็นคลื่นของนิวตรอนแสดงให้เห็นจากปรากฏการณ์การหักเหของนิวตรอน (Neutron diffraction) คุณสมบัติเฉพาะที่สำคัญของนิวตรอนอีกประการหนึ่งคือโพราไรเซชัน (poralization) ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นเมื่อนิวตรอนวิ่งผ่านสนามแม่เหล็กแรงสูง (strong magnetized field) เนื่องจากนิวตรอนไม่มีประจุแต่มีโมเมนต์แม่เหล็ก

2.3.2 ต้นกำเนิดนิวตรอน

ในธรรมชาติจะมีนิวตรอนที่เกิดจากรังสีคอสมิก (Cosmic ray) ในอวกาศที่ผ่านชั้นบรรยากาศเข้าสู่โลกอยู่บ้าง โดยอนุภาคนิวตรอนอิสระที่เกิดขึ้นในบรรยากาศนั้นส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างอนุภาคโปรตอนพลังงานสูงซึ่งเป็นอนุภาคปฐมภูมิในรังสีคอสมิกกับนิวเคลียสของธาตุต่าง ๆ ในบรรยากาศ เช่น ไนโตรเจน และออกซิเจน อนุภาคนิวตรอนเหล่านี้จะพบได้มากแต่มีความเข้มและพลังงานที่ไม่เหมาะสมจึงไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ สำหรับต้นกำเนิดนิวตรอนที่สำคัญและนิยมใช้ในการผลิตนิวตรอนเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ซึ่งแตกต่างกันตามความเหมาะสมของความเข้มและพลังงานแบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้ดังนี้

ประเภทที่ 1 อนุภาคนิวตรอนที่ผลิตขึ้นจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ ปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่ใช้ในการผลิตนิวตรอนมีหลายปฏิกิริยาด้วยกันซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

ก) นิวตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยาฟิชชันในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (Nuclear reactor) เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่ให้นิวตรอนฟลักซ์ประมาณ $10^{10} - 10^{15}$ นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที [10] ซึ่งสูงกว่าการผลิตนิวตรอนด้วยวิธีอื่นๆ อนุภาคนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ถูกผลิตขึ้นจากปฏิกิริยาการแตกตัวหรือปฏิกิริยาฟิชชัน (Fission reaction) ของไอโซโทปของธาตุหนักบางตัวที่สามารถเกิดปฏิกิริยาฟิชชันได้เช่น ยูเรเนียม-235 ยูเรเนียม-238 และพลูโทเนียม-239 นิวเคลียสของธาตุเหล่านี้จะจับนิวตรอนหนึ่งตัวจากนั้นนิวเคลียสจะแตกเป็นสองส่วนพร้อมกับให้นิวตรอนออกมามากกว่า 1 ตัว นิวตรอนที่เกิดขึ้นมานี้จะทำให้เกิดปฏิกิริยาฟิชชันขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ต่อไปเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ (Chain reaction) พลังงานของนิวตรอนที่เกิดขึ้นมีค่าตั้งแต่เป็นเทอร์มาลนิวตรอน (0.00253 eV) จนถึง 18 MeV ค่าเฉลี่ยของนิวตรอนประเภทนี้มีค่าประมาณ 2 MeV

ข) นิวตรอนที่ได้จากเครื่องเร่งอนุภาค (Particle Accelerator) หรือเครื่องกำเนิดนิวตรอน (Neutron Generator) นิวตรอนประเภทนี้ได้จากปฏิกิริยาการรวมตัว (Fusion reaction) ของธาตุเบาบางชนิดเช่น ปฏิกิริยารวมตัวระหว่างดิวทิเรียม (deuterium) กับดิวทีเรียม หรือดิวทีเรียมกับตริเตียม (tritium) ดังสมการที่ 2.18 และ 2.19

$$ {}^{2}_{1}H + {}^{2}_{1}H \longrightarrow {}^{3}_{1}H + {}^{1}_{0}n \qquad (2.18) $$

$$ {}^{3}_{1}H + {}^{2}_{1}H \longrightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{0}n \qquad (2.19) $$

นิวตรอนที่ได้จากปฏิกิริยาดังสมการทั้งสองจะเป็นนิวตรอนที่มีฟลักซ์สูงสม่ำเสมอ และพลังงานสูงคือประมาณ 3 และ 14 MeV ตามลำดับ อีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการผลิตนิวตรอนคือใช้เครื่องเร่งอนุภาคไซโคลตรอน (Cyclotron) เร่งอนุภาคโปรตอนหรือดิวทีรอนที่มีพลังงานเหมาะสมยิงให้กระทบกับเป้า (target) ที่ทำด้วยธาตุที่เหมาะสมบางตัวเช่น ลิเธียม หรือเบริลเลียม ดังสมการที่ 2.20 และ 2.21

$$ {}^{9}_{4}Be + {}^{2}_{1}H \longrightarrow {}^{10}_{5}Be + {}^{1}_{0}n \qquad (2.20) $$

$$ {}^{7}_{3}Li + {}^{1}_{1}H \longrightarrow {}^{7}_{4}B + {}^{1}_{0}n \qquad (2.21) $$

นิวตรอนที่ได้จากเครื่องเร่งอนุภาคไซโคลตรอนจะมีฟลักซ์สูง แต่มีพลังงานเดียวขึ้นกับชนิดของธาตุที่นำมาทำเป็นเป้า

ตารางที่ 2.1 แสดงลักษณะเฉพาะของเครื่องเร่งอนุภาคบางชนิดที่ใช้ผลิตนิวตรอน [11]

Reaction	Particle	Target	Energy (MeV)	Neutron Yield Output/sec.
T(d,n)	Deuterium	Tritium	2 to 4	1 to 4 $\times 10^{11}$
Be(d,n)	Deuterium	Beryllium	1.6	1×10^{10}
Be(γ,n)	Gamma	Beryllium	1.4	2×10^{11}

ค) นิวตรอนที่ได้จากปฏิกิริยาอัลฟา-นิวตรอน เป็นนิวตรอนที่เกิดจากการยิงอนุภาคอัลฟาไปที่เป้าซึ่งเป็นธาตุเบาแล้วปล่อยนิวตรอนออกมา ต้นกำเนิดอนุภาคอัลฟาที่นิยมใช้ได้แก่ เรเดียม (Radium: Ra) พลูโทเนียม (Plutomium: Pu) ส่วนธาตุเบาที่นิยมนำมาทำเป็นเป้าได้แก่ ลิเธียม ฟลูออรีน (Fluorine: F) โบรอน และเบริลเลียม สมการที่ 2.22 แสดงการเกิดนิวตรอนจากปฏิกิริยาอัลฟา-นิวตรอนของเบริลเลียม

$$ {}^{9}_{4}\mathrm{Be} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \longrightarrow {}^{12}_{6}\mathrm{C} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \qquad (2.22) $$

ง) นิวตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยาโฟโตดิสอินตริเกชัน (Photodisintegration reaction) เป็นนิวตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยาแกมมา-นิวตรอน เช่นปฏิกิริยา ${}^{9}_{4}\mathrm{Be}(\gamma,n){}^{8}_{4}\mathrm{Be}$ และ ${}^{2}_{1}\mathrm{H}(\gamma,n){}^{1}_{1}\mathrm{H}$ ปฏิกิริยาการเกิดนิวตรอนชนิดนี้มักจะมีพลังงานเทรชโฮลด์ (Threshold energy) เช่นปฏิกิรยาการเกิดนิวตรอนข้างต้นมีพลังงานเทรชโฮลด์เท่ากับ 1.67 และ 2.23 MeV ตามลำดับ นิวตรอนที่ได้จากปฏิกิริยาโฟโตดิสอินตริเกชันนี้จะมีความเป็นนิวตรอนพลังงานเดียว (Monoenergetic neutron) มากกว่านิวตรอนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาอัลฟา-นิวตรอน

จ) นิวตรอนที่เกิดจากโปรตอนพลังงานสูงใช้สำหรับการผลิตนิวตรอนที่มีพลังงานสูง โดยให้โปรตอนที่มีพลังงานสูงวิ่งเข้าชนนิวตรอนเดี่ยวของนิวเคลียสของเป้า นิวตรอนซึ่งมีพลังงานยึดเหนี่ยวไม่สูงมากนักจะรับพลังงานเกือบทั้งหมดของโปรตอน และวิ่งไปในทิศทางตรงกันข้าม ด้วยปฏิกิริยานี้นิวตรอนที่ได้อาจมีพลังงานสูงถึง 2-3 MeV

ฉ) นิวตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยาสตริพปิง (Stripping reaction) ใช้สำหรับผลิตนิวตรอนที่มีพลังงานสูงมาก ๆ (สูงกว่าระดับ MeV) นิวตรอนประเภทนี้เกิดจากการสตริพปิงดิวเทอรอน (${}^{2}_{1}\mathrm{H}$) โดยที่ภายในดิวเทอรอนโมเลกุลหนึ่ง ๆ ประกอบด้วยนิวตรอนและโปรตอนที่ยึดกันอยู่ด้วยพลังงานยึดเหนี่ยวประมาณ 2.2 MeV ถ้าดิวเทอรอนถูกทำให้มีพลังงานสูงมาก ๆ และวิ่งเข้าชนเป้าดิวเทอรอนจะแตกออกเป็น 2 ส่วน โดยนิวตรอนจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าในขณะที่โปรตอนจะถูกจับโดยนิวเคลียสของเป้า และแต่ละส่วนมีพลังงานเท่ากับครึ่งหนึ่งของดิวเทอรอน

ประเภทที่ 2 ต้นกำเนิดนิวตรอนชนิดที่เป็นแบบไอโซโทป (Isotopic neutron source) สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทคือ

ก)นิวตรอนจากไอโซโทปของธาตุหนักที่เกิดปฏิกิริยาฟิชชันได้ด้วยตัวเอง (Spontaneous fission source) เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่ได้จากปฏิกิริยาฟิชชัน พร้อมทั้งให้นิวตรอนออกมาของธาตุหนักบางชนิดเช่น คาร์ลิฟอร์เนียม-252 (Californium-252: ^{252}Cf) ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาฟิชชันได้ด้วยตนเองพร้อมทั้งให้นิวตรอนโดยเฉลี่ย 3.75 นิวตรอนต่อการเกิดฟิชชัน 1 ครั้ง ความเข้มของนิวตรอนประมาณ 2.34×10^{12} นิวตรอนต่อวินาทีต่อกรัม [12] นิวตรอนที่ได้จากต้นกำเนิดชนิดนี้มีพลังงานเฉลี่ยประมาณ 2.3 MeV ต้นกำเนิดนิวตรอนชนิดนี้มีข้อดีคือ มีขนาดเล็ก ให้นิวตรอนที่มีฟลักซ์สูง และราคาถูกที่สุดเมื่อเทียบกับต้นกำเนิดนิวตรอนชนิดอื่น แต่มีข้อเสียคือมีอายุการใช้งานสั้นเนื่องจากถูกจำกัดด้วยค่าครึ่งชีวิตของต้นกำเนิดนิวตรอน เช่น ^{252}Cf มีค่าครึ่งชีวิตประมาณ 2.65 ปี

ข) นิวตรอนที่ได้จากปฏิกิริยาแกมมา-นิวตรอน (γ, n) เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่ได้จากการใช้ไอโซโทปที่สลายตัวให้รังสีแกมมา (Gamma emitter source) เช่น ^{124}Sb, ^{88}Y ผสมกับเป้าที่ทำด้วยธาตุเบาเช่น ^{9}Be แต่นิวตรอนที่ได้จากไอโซโทปชนิดนี้มักจะมีพลังงานต่ำดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติของต้นกำเนิดนิวตรอนแบบสลายตัวให้รังสีแกมมา

ต้นกำเนิด	ครึ่งชีวิต	พลังงานของนิวตรอน (MeV)	ความเข้มของนิวตรอน ($n.s^{-1}Ci^{-1}$)
^{88}Y – ^{9}Be	106.6 d	0.16	1.0×10^{5}
^{124}Sb – ^{9}Be	60.2 d	0.22	3.0×10^{6}

ค) นิวตรอนที่ได้จากไอโซโทปสลายตัวให้อนุภาคอัลฟา (Alpha emitter source) เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่ผลิตนิวตรอนจากปฏิกิริยาอัลฟา-นิวตรอน (α,n) โดยการผสมธาตุหนักที่สลายตัวให้อนุภาคอัลฟา เช่น ^{226}Ra, ^{238}Pu, ^{241}Am กับเป้าที่ทำด้วยธาตุเบาซึ่งมีพลังงานยึดเหนี่ยวของอนุภาคนิวตรอนตัวสุดท้ายต่ำเช่น ^{9}Be, ^{10}B และ ^{2}D (deuterium) เป็นต้น ธาตุที่นำมาทำเป็นเป้าที่นิยมใช้คือ ^{9}Be เนื่องจากเป็นธาตุที่ให้ปริมาณนิวตรอนออกมาสูงที่สุดคือประมาณ 80 นิวตรอนต่อจำนวนอัลฟาที่วิ่งเข้าไป 1 ล้านตัว นิวตรอนที่ได้จากปฏิกิริยา (α,n) มีพลังงานเฉลี่ยประมาณ 3-4 MeV และมีความเข้มนิวตรอนในช่วง 10^{5}-10^{7} นิวตรอนต่อคูรีต่อวินาทีคุณสมบัติของไอโซโทปชนิดที่ใช้เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนแสดงไว้ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติของกำเนิดนิวตรอนแบบสลายตัวให้อนุภาคอัลฟา [11]

นิวไคลด์	พลังงานของอนุภาคอัลฟา (MeV)	ครึ่งชีวิต	พลังงานของนิวตรอน (MeV)	ความเข้มของนิวตรอน ($n.s^{-1}Ci^{-1}$)
^{238}Pu	5.50	89 a	4.00	2.8×10^6
^{239}Pu	5.14	24.36 a	4.59	1.6×10^6
^{210}Po	5.30	138 d	4.54	2.5×10^6
^{241}Am	5.48	458 a	4.46	2.2×10^6
^{244}Cm	5.79	18.1 a	4.31	3.0×10^6
^{226}Ra	7.69	1620 a	3.94	1.1×10^7
^{277}Ac	7.36	22 a	3.87	1.5×10^7

2.3.3 พลังงานของนิวตรอน

เมื่อพิจารณาถึงผลของการเกิดอันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับตัวกลางพบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะแบ่งประเภทของนิวตรอนตามระดับของพลังงานของนิวตรอนเนื่องจากนิวตรอนจะเกิดอันตรกิริยากับตัวกลางแบบใดขึ้นอยู่กับพลังงานจลน์ของนิวตรอนด้วยเช่นกัน ในบางกรณีการแบ่งประเภทของอนุภาคนิวตรอนอาจจะกลมกลืนหรือแตกต่างกันได้ ทั้งนี้ตามความเหมาะสมเพื่อให้สะดวกและง่ายต่อการทำความเข้าใจในรายละเอียดของชนิดของอันตรกิริยาที่เกิดขึ้น โดยสรุปแล้วนิวตรอนสามารถแบ่งออกเป็นประเภทต่าง ๆ ตามระดับพลังงานได้ดังนี้

ก) นิวตรอนช้า (Slow neutron) อนุภาคนิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 keV ถูกเรียกรวมกันว่านิวตรอนช้า ซึ่งสามารถแบ่งเป็นกลุ่มย่อยได้อีก 3 กลุ่มคือ

- โคลด์นิวตรอน (Cold neutron) หมายถึงนิวตรอนที่มีพลังงานเฉลี่ยต่ำกว่าเทอร์มาลนิวตรอน โคลด์นิวตรอนเกิดจากการกระเจิงติดต่อกันของเทอร์มาลนิวตรอนจากกฎของแบรก (Bragg's law) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$n\lambda = 2d \sin\theta \qquad (2.23)$$

โคลด์นิวตรอนจะพบเมื่อ ความยาวคลื่นของนิวตรอน (λ) มากกว่า 2d เมื่อ d คือระยะห่างระหว่างผลึก จากสมมติฐานนี้ทำให้ค่าของ $\sin\theta$ มีค่าสูงมากและไม่สามารถคำนวณทางคณิตศาสตร์ได้ เป็นผลให้ไม่เกิดการสะท้อนของนิวตรอน เมื่อลำเทอร์มาลนิวตรอนวิ่งผ่านคอลัมน์ที่ทำด้วยกราไฟต์หลายผลึก (Polycrystalline graphite) นิวตรอนที่มีความยาวคลื่น

น้อยกว่า 2d จะสะท้อนออกจากคอลัมน์ นิวตรอนที่มีพลังงานสูงจะไม่สามารถผ่านไปได้ เนื่องจากค่า 2d ของกราไฟต์ = 6.7^{0} A และจากการคำนวณพลังงานของนิวตรอนที่ผ่านออกมาได้จะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.002 eV

- เทอร์มาลนิวตรอน (Thermal neutron) หมายถึงนิวตรอนที่มีพลังงานเฉลี่ยเท่ากับพลังงานความร้อนเฉลี่ยของอะตอมของตัวกลาง พลังงานและความเร็วสัมพัทธ์ของนิวตรอนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของตัวกลางที่นิวตรอนวิ่งผ่าน การกระจายตัวของความเร็วของนิวตรอนสามารถอธิบายได้ด้วยกฎการกระจายตัวของแมกซ์เวล (Maxwell distribution) ดังนี้

$$dn(v) = Av^{2}e \quad dv \qquad (2.24)$$

โดยที่ v และ M คือความเร็วและมวลของนิวตรอนตามลำดับ T คืออุณหภูมิสมบูรณ์ และ k คือค่าคงที่ของโบลซ์มานน์ (Boltzmann' s constant) เทอร์มาลนิวตรอนที่พบมากที่สุดมีพลังงานเท่ากับ kT หรือเท่ากับ 0.0253 eV ที่อุณหภูมิ 20^{0} C [13]

- เอพิเทอร์มาลนิวตรอน (Epithermal neutron) หมายถึงนิวตรอนที่มีพลังงานสูงกว่าเทอร์มาลนิวตรอนอยู่ในช่วง 0.3 – 10 keV

- เรโซแนนซ์นิวตรอน (Resonance neutron) หมายถึงนิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ในช่วง 1~100 eV ซึ่งจะถูกจับได้ดีโดยนิวเคลียสของธาตุหลายชนิด การจับนิวตรอนของนิวเคลียสในช่วงนี้เรียกว่า "Resonance absorption" [14]

ข) อินเตอร์มีเดียตนิวตรอน (Intermediate neutron) หรือนิวตรอนพลังงานปานกลาง หมายถึงนิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง 1 keV ถึง 0.5 MeV

ค) นิวตรอนเร็ว (Fast neutron) หมายถึงนิวตรอนที่มีพลังงานสูงตั้งแต่ 0.5 MeV ขึ้นไป [13]

2.3.4 อันตรกิริยาของนิวตรอนกับตัวกลาง (Neutron interaction with matter)

อนุภาคนิวตรอนอิสระสามารถทำอันตรกิริยากับนิวเคลียสของอะตอมได้โดยตรง เนื่องจากนิวตรอนเป็นอนุภาคที่เป็นกลางไม่มีประจุไฟฟ้า เมื่อนิวตรอนวิ่งผ่านเข้าไปในตัวกลางจึงไม่เกิดอันตรกิริยาใด ๆ กับอิเล็กตรอนที่อยู่รอบนิวเคลียส นิวตรอนสามารถเกิดอันตรกิริยากับตัวกลางได้หลายแบบโดยขึ้นอยู่กับพลังงานจลน์ของนิวตรอน และชนิดของตัวกลางเป็นสำคัญ โดยสรุปนิวตรอนสามารถเกิดอันตรกิริยากับตัวกลางต่าง ๆ ได้หลายแบบดังนี้

ก) การกระเจิงแบบยืดหยุ่น (Elastic scattering) อันตรกิริยาแบบนี้จะเป็นเพียงการถ่ายเทพลังงานจลน์ของนิวตรอนให้กับนิวเคลียส หรือเป็นการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมกันระหว่างนิวตรอนกับนิวเคลียสเท่านั้น ระดับพลังงานของนิวเคลียสที่ถูกชนยังคงอยู่ในสภาวะปกติ (ground state) นิวตรอนตัวที่เข้าทำอันตรกิริยาจะกระเจิงออกมาด้วยความเร็วและทิศทางที่

เปลี่ยนแปลงไป พลังงานจลน์ของนิวตรอนที่กระเจิงออกมาจะมีค่าลดลง ในขณะที่พลังงานจลน์รวมของนิวตรอนกับนิวเคลียสก่อนและหลังชนมีค่าคงเดิม บางครั้งเรียกอันตรกิริยาแบบนี้ว่าการกระเจิงแบบโพเทนเชียล (potential scattering) อันตรกิริยาชนิดนี้มีความสำคัญอย่างมากในการหน่วงพลังงานของนิวตรอนเร็วให้กลายเป็นเอพิเทอร์มาลนิวตรอนหรือเทอร์มาลนิวตรอน สัญลักษณ์ของการเกิดอันตรกิริยาแบบนี้คือ (n,n)

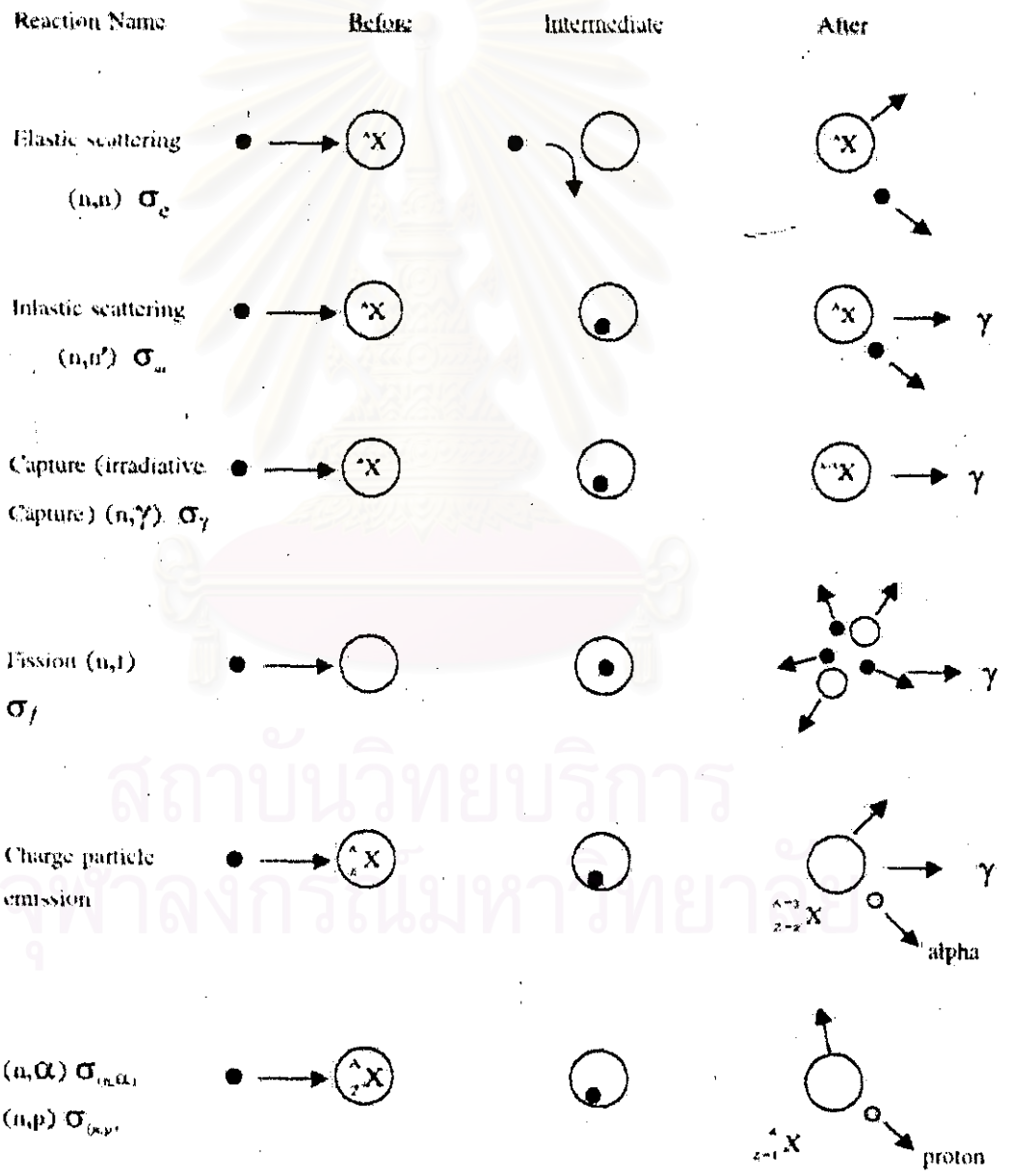
ข) การกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic Scattering) การเกิดอันตรกิริยาแบบนี้จะมีการรวมตัวกันของนิวตรอนกับนิวเคลียสของตัวกลางเป็นนิวเคลียสรวม (compound nucleus) แล้วเกิดนิวตรอนตัวใหม่ขึ้นทำให้นิวเคลียสถูกกระตุ้นให้อยู่ในสภาวะกระตุ้น (excited state) เมื่อจะกลับสู่สภาวะปกติก็จะมีการปล่อยรังสีแกมมาออกมา ทำให้พลังงานจลน์รวมของระบบลดลง การเกิดอันตรกิริยาอย่างนี้มักจะต้องมีพลังงานเทรชโฮลด์ (threshold energy) คือนิวตรอนที่เข้าทำอันตรกิริยาต้องมีพลังงานสูงมากพอที่จะกระตุ้นนิวเคลียสให้อยู่ในสภาวะกระตุ้นได้ อันตรกิริยาแบบนี้จึงมักจะเกิดกับนิวตรอนที่มีพลังงานตั้งแต่ 1 MeV ขึ้นไป การกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นเป็นอันตรกิริยาแบบดูดพลังงาน (endothermic interaction) และสัญลักษณ์ของการเกิดอันตรกิริยาแบบนี้คือ (n,n′)

ค) อันตรกิริยาการจับนิวตรอน (Neutron capture) หรืออันตรกิริยาการดูดกลืนนิวตรอน (Neutron absorption reaction) หรือเรียกว่าเรดิเอทิฟแคปเจอร์ (Radiative capture) เมื่อนิวตรอนวิ่งเข้าชนนิวเคลียสของตัวกลางจะถูกจับไว้ทำให้นิวเคลียสมีเลขมวลเพิ่มขึ้น 1 และมีการปล่อยรังสีแกมมาออกมา หรือเรียกว่าการจับนิวตรอนแล้วให้รังสีแกมมา (Neutron capture gamma) การรวมตัวกันของนิวตรอนกับนิวเคลียสเป็นแบบคายพลังงาน (exothermic reaction) สัญลักษณ์ของปฏิกิริยานี้คือ (n,γ)

ง) ปฏิกิริยาฟิชชัน (Fission reaction) หรือปฏิกิริยาการแตกตัว เมื่อนิวตรอนรวมกับนิวเคลียสของธาตุหนักบางชนิด เช่น ยูเรเนียม-235 ยูเรเนียม-238 และพลูโทเนียม-238 เป็นนิวเคลียสรวม จากนั้นนิวเคลียสรวมจะเกิดการแตกตัวออกเป็น 2 ส่วน ได้นิวเคลียสที่มีเลขมวลประมาณครึ่งหนึ่งของนิวเคลียสเดิม พร้อมกับมีนิวตรอนใหม่ออกมา 2-3 ตัว สัญลักษณ์ของอันตรกิริยาแบบนี้คือ (n,f) อันตรกิริยาแบบนี้สำคัญมากในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู เนื่องจากอนุภาคนิวตรอนที่เกิดขึ้น จะกลับเข้าไปทำอันตรกิริยากับยูเรเนียมอย่างทวีคูณ เรียกว่าปฏิกิริยาลูกโซ่ (chain reaction) สามารถผลิตพลังงานความร้อนออกมาได้อย่างมหาศาล

จ) อันตรกิริยาการปลดปล่อยอนุภาคมีประจุ (Charged particle emission) เมื่อนิวตรอนที่มีพลังงานสูงกว่า 10 MeV ชนกับนิวเคลียสของตัวกลางและถูกนิวเคลียสจับไว้เป็นนิวเคลียสรวม ต่อจากนั้นนิวเคลียสรวมจะปล่อยอนุภาคที่มีประจุเช่น อนุภาคอัลฟา หรืออนุภาคโปรตอนออกมา สัญลักษณ์ของอันตรกิริยาแบบนี้คือ (n,α) หรือ (n,p) ตัวอย่างของอันตรกิริยาแบบนี้ได้แก่ $^{10}B(n,\alpha)^{7}Li$; $^{16}O(n,p)^{16}N$

ฉ) ปฏิกิริยาผลิตนิวตรอน (Neutron-producing reaction) อันตรกิริยาแบบนี้มักจะเกิดกับนิวตรอนพลังงานสูงและเป็นชนิดดูดพลังงาน ผลของอันตรกิริยาแบบนี้จะได้นิวตรอนออกมามากกว่า 1 ตัว สัญลักษณ์ของอันตรกิริยาแบบนี้คือ (n,2n) หรือ (n,3n) โดยที่อันตรกิริยา (n,2n) นับว่าเป็นอันตรกิริยาที่สำคัญอย่างมากในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่ใช้น้ำชนิดหนัก (Heavy water reactor: D_2O) หรือใช้เบริลเลียมเป็นส่วนประกอบเพราะ ^2H และ ^9Be มีพลังงานยึดเหนี่ยวนิวตรอนตัวสุดท้ายในนิวเคลียสต่ำ จึงเกิดปฏิกิริยาที่ทำให้นิวตรอนหลุดออกมาได้ง่าย



รูปที่ 2.3 แสดงการเกิดอันตรกิริยาแบบต่าง ๆ ของนิวตรอนกับตัวกลาง

2.3.5 ภาคตัดขวางนิวตรอน (Neutron cross section)

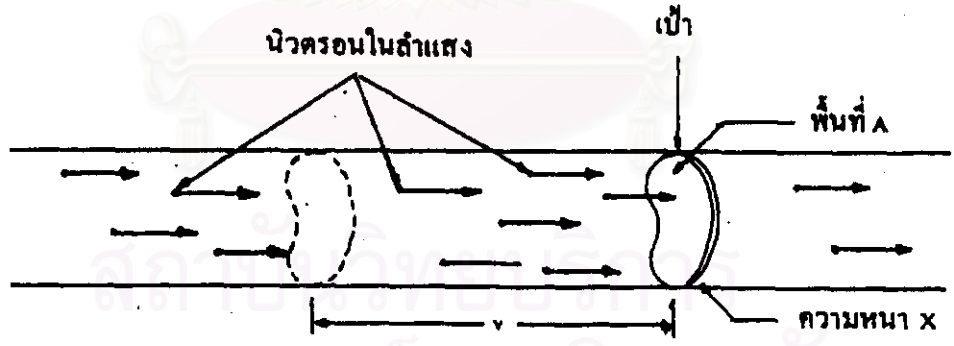
การที่นิวตรอนจะเกิดอันตรกิริยากับตัวกลางได้ดีหรือไม่และจะเกิดอันตรกิริยาแบบใดนิยมอธิบายในเทอมของ "ภาคตัดขวาง (cross section)" ซึ่งแบ่งออกได้ดังนี้

ก) ภาคตัดขวางจุลภาค (Microscopic cross section; σ) นิยมใช้เทอมนี้เมื่อ ตัวอย่างมีลักษณะเป็นเป้าบาง ภาคตัดขวางจุลภาคหมายถึงโอกาสที่นิวตรอนจะเกิดอันตรกิริยากับนิวเคลียสของตัวกลางต่อพื้นที่ มีหน่วยเป็นบาร์น (barn) โดย 1 บาร์น เท่ากับ 10^{-24} ตารางเซนติเมตร

ภาคตัดขวางจุลภาคสามารถคำนวณได้จากการทดลอง โดยพิจารณาถึงตัวกลางที่เป็นแผ่นวัสดุบางมีพื้นที่หน้าตัด A มีความหนา x และมีความหนาแน่นอะตอม (atom density) เท่ากับ N อะตอมต่อหน่วยปริมาตร วางอยู่โดยมีลำนิวตรอน (neutron beam) ซึ่งมีพลังงานเดียว (monoenergy หรือ single energy) ตกกระทบตามรูปที่ 2.4 ถ้านิวตรอนมีความเร็ว v และความหนาแน่นนิวตรอนในลำนิวตรอนเท่ากับ n นิวตรอนต่อหน่วยปริมาตร ดังนั้น

$$I = nv \qquad (2.25)$$

เมื่อ I คือความเข้มของลำนิวตรอนมีหน่วยเป็น นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตร



รูปที่ 2.4 แสดงลำนิวตรอนที่ตกกระทบเป้า

จำนวนนิวตรอนที่วิ่งผ่านเป้าพื้นที่ A ต่อวินาที เท่ากับ IA แต่จำนวนนิวตรอนที่วิ่งผ่านเป้าไม่ได้เกิดอันตรกิริยากับอะตอมของเป้าทุกตัวทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอะตอม ความหนา และภาคตัดขวางของตัวกลาง ดังนั้นจำนวนอันตรกิริยาที่เกิดขึ้น (number of interaction) ทั้งหมดคำนวณได้จาก

$$\text{Number of interaction} = IN\sigma Ax \qquad (2.26)$$

เนื่องจาก Ax คือปริมาตรของเป้าดังนั้นเทอมของ INσ จึงเป็นจำนวนของอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นต่อปริมาตรของเป้าต่อวินาที

ภาคตัดขวางจุลภาคของนิวเคลียสเป็นค่าที่แสดงถึงโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาของนิวตรอนกับนิวเคลียสของธาตุนั้น ๆ ประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ ภาคตัดขวางจุลภาคของการกระเจิง (Microscopic scattering cross section: σ_s) และภาคตัวขวางจุลภาคของการดูดกลืน (Microscopic absorption cross section: σ_a) ดังนั้นภาคตัดขวางจุลภาคของนิวเคลียสใด ๆ ก็คือผลรวมของภาคตัดขวางจุลภาคทั้งสองดังสมการ

$$\sigma = \sigma_s + \sigma_a \qquad (2.27)$$

เมื่อ σ_s = ผลรวมของภาคตัดขวางจุลภาคของปฏิกิริยาการชนแบบยืดหยุ่น และไม่ยืดหยุ่น

σ_a = ผลรวมของภาคตัดขวางจุลภาคของปฏิกิริยาการจับนิวตรอน การแตกตัว การปล่อยอนุภาคที่มีประจุ และการผลิตนิวตรอน

ข) ภาคตัดขวางมหภาค (Macroscopic corss section: Σ) หมายถึงโอกาสที่นิวตรอนจะเกิดอันตรกิริยากับนิวเคลียสของตัวกลางต่อระยะทาง มีหน่วยเป็นต่อเซนติเมตร (cm^{-1}) นิยมใช้เมื่อตัวอย่างมีความหนา ค่าภาคตัดขวางมหภาคของตัวกลางต่อนิวตรอน เทียบได้กับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวกลางต่อรังสีแกมมา

ค่าภาคตัดขวางมหภาคคำนวณได้จากผลคูณระหว่างจำนวนนิวเคลียสของตัวกลางต่อลบ.ซม. กับ ค่าภาคตัดขวางจุลภาคดังสมการ

$$\Sigma = N\sigma \qquad (2.28)$$

สำหรับตัวกลางที่เป็นของผสมหรือสารประกอบ ค่าภาคตัดขวางมหภาคจะเท่ากับผลรวมของภาคตัดขวางของธาตุแต่ละตัวที่เป็นองค์ประกอบเช่น ในไขมันที่มีธาตุหลักที่เป็นองค์ประกอบคือ คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ดังนั้นค่าภาคตัดขวางมหภาคของไขมันคือ

$$\Sigma_{total} = \Sigma_C + \Sigma_H + \Sigma_O \qquad (2.29)$$

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคตัดขวางสำหรับธาตุหนึ่ง ๆ จะเปลี่ยนไปตามพลังงานของนิวตรอนที่เข้าทำอันตรกิริยา

2.3.6 นิวตรอนฟลักซ์ (Neutron flux)

ฟลักซ์ของนิวตรอนหมายถึงจำนวนนิวตรอนซึ่งเคลื่อนที่ในทิศทางต่าง ๆ กันผ่านพื้นที่ 1 ตารางเซนติเมตรในเวลา 1 วินาที ถ้านิวตรอนเหล่านี้มีความเร็วเท่ากันทุกตัว ค่าฟลักซ์ของนิวตรอนจะมีค่าเท่ากับผลคูณระหว่างความหนาแน่นของนิวตรอนที่ตำแหน่งนั้นกับความเร็วของนิวตรอน ค่าฟลักซ์ของนิวตรอนที่ได้นี้เรียกว่า ค่าฟลักซ์รวม (total flux)

ในกรณีที่นิวตรอนมีความเร็วไม่เท่ากันทุกตัว ให้ N(v) คือความหนาแน่นของนิวตรอนที่ช่วงความเร็ว v ดังนั้นฟลักซ์ของนิวตรอนที่ความเร็ว v เท่ากับ

$$\phi(v) = N(v)v \qquad (2.30)$$

จากสมการที่ 2.17 สรุปได้ว่า $\phi(v)dv$ คือฟลักซ์ของนิวตรอนที่มีความเร็วอยู่ในช่วง v และ v+dv ค่าฟลักซ์รวมของนิวตรอนที่มีความเร็วไม่เท่ากันคือ

$$\phi_{total} = \phi(v)dv \qquad (2.31)$$

เนื่องจากความเร็วเฉลี่ยของนิวตรอนมีค่าเท่ากับ

$$\bar{v} = \frac{vN(v)dv}{N(v)dv} \qquad (2.32)$$

ดังนั้นค่าฟลักซ์รวมของนิวตรอนจึงมีค่าเท่ากับ

$$\phi_{total} = Nv \qquad (2.33)$$

เมื่อ N = N(v)dv = ความหนาแน่นของนิวตรอนทุกค่าความเร็ว นั่นคือฟลักซ์ของนิวตรอนมีค่าเท่ากับความหนาแน่นของนิวตรอนคูณกับความเร็วเฉลี่ยของนิวตรอนนั่นเอง

2.3.7 การลดทอนความเข้มนิวตรอน (Neutron attenuation)

ความเข้ม (Intensity) ของนิวตรอนจะถูกลดทอนลงเมื่อเข้าชนกับนิวเคลียสของตัวกลางที่มีความหนา เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.5 ซึ่งแสดงการชนของลำนิวตรอนแบบขนาน และมีพลังงานเดียวกับเป้าซึ่งมีขนาดเล็กมาก และมีความหนา x อีกด้านหนึ่งของเป้าเป็นหัววัดนิวตรอนขนาดเล็กเพื่อป้องกันไม่ให้นิวตรอนที่ชน (collided neutron) หรือเกิดอันตรกิริยากับเป้ามีโอกาสวิ่งเข้าสู่หัววัด ดังนั้นนิวตรอนที่จะวิ่งเข้าสู่หัววัดได้ต้องเป็นนิวตรอนที่ไม่ได้เกิดการชน (uncollided neutron) หรือไม่เกิดอันตรกิริยากับเป้าเท่านั้น

ถ้าให้ I(x) คือความเข้มของนิวตรอนที่ไม่เกิดการชนกับนิวเคลียสของตัวกลางหลังจากที่วิ่งผ่านเป้าที่มีความหนา x ใดๆ ความเข้มของนิวตรอนที่ลดลงเมื่อวิ่งผ่านเป้าที่ช่วงความหนาเท่ากับ dx สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.35

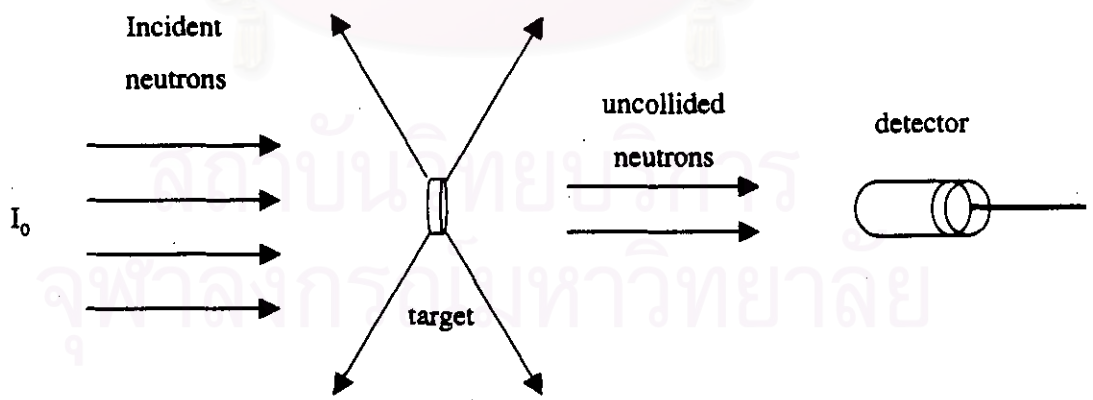
$$-dI(x) = N\sigma_t I(x)dx \qquad (2.34)$$

อินติเกรตสมการที่ 2.34 จะได้ว่า

$$I(x) = I_0 \exp(-N\sigma_t x) \qquad (2.35)$$

หรือ

$$I(x) = I_0 \exp(-\Sigma_t x) \qquad (2.36)$$



รูปที่ 2.5 แสดงการวัดนิวตรอนที่ไม่เกิดการชนกับนิวเคลียสของตัวกลาง

สำหรับเป้าที่มีความหนา X ความเข้มของนิวตรอนที่ไม่เกิดการชนกับนิวเคลียสของตัวกลางสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.37

$$I(x) = I_0 \exp(-\Sigma_t X) \qquad (2.37)$$

เมื่อ I_0 คือความเข้มของนิวตรอนก่อนชนกับเป้า

$I(x)$ คือความเข้มของนิวตรอนเมื่อผ่านเป้าที่ความหนา X โดยไม่เกิดการชนกับนิวเคลียสของเป้า

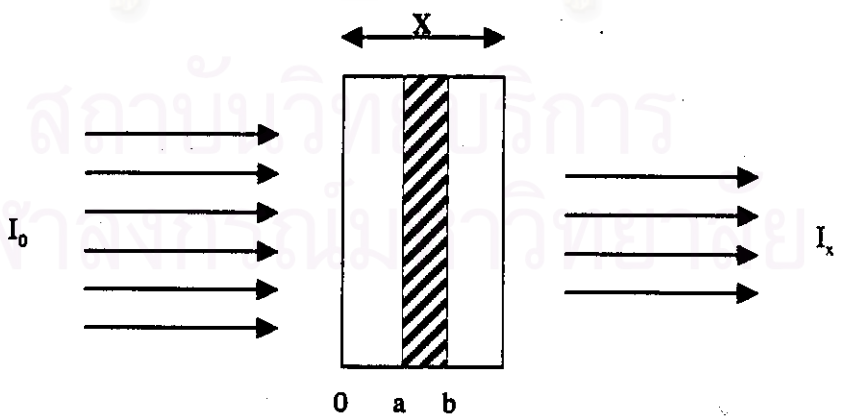
Σ_t คือค่าภาคตัดขวางรวมของตัวกลาง

X คือความหนาของตัวกลาง

สมการที่ 2.34 สามารถนำมาเขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{-dI(x)}{I(x)} = \Sigma_t dx \qquad (2.38)$$

เมื่อ $\frac{-dI(x)}{I(x)}$ คือความน่าจะเป็นที่นิวตรอนจะวิ่งผ่านตัวกลางที่ความหนา x โดยไม่เกิดอันตรกิริยาใด ๆ และเกิดอันตรกิริยากับตัวกลางในช่วงความหนา dx เท่านั้น โดยความน่าจะเป็นในการเกิดมีค่าเท่ากับ $\Sigma_t dx$ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเทอม $\Sigma_t dx$ หมายถึงความน่าจะเป็นต่อหนึ่งหน่วยความหนาของตัวกลางที่นิวตรอนตัวหนึ่งจะเกิดอันตรกิริยากับเป้าที่นิวตรอนวิ่งผ่าน ในทางตรงกันข้ามจากสมการที่ 2.37 อันตราส่วนระหว่าง $\frac{I(x)}{I_0}$ จึงหมายถึงความน่าจะเป็นที่นิวตรอนจะวิ่งผ่านตัวกลางที่มีความหนา X โดยไม่เกิดอันตรกิริยาใด ๆ



รูปที่ 2.6 แสดงการคำนวนหาความน่าจะเป็นที่นิวตรอนจะวิ่งผ่านตัวกลางโดยไม่เกิดอันตรกิริยา

จากรูปที่ 2.6 ถ้าให้ $P(x)dx$ คือความน่าจะเป็นที่เกิดอันตรกิริยาครั้งแรกในช่วงความหนา dx ค่าของ $P(x)dx$ คำนวณได้จากผลคูณระหว่างความน่าจะเป็นในการเกิดอันตรกิริยา

ของนิวตรอนกับตัวกลางในช่วงความหนา dx และความน่าจะเป็นที่นิวตรอนจะไม่เกิดอันตรกิริยาใด ๆ กับตัวกลางในช่วงความหนา x ดังสมการที่ 2.39

$$P(x)dx = \exp(-\Sigma_t x)\,(\Sigma_t dx) \qquad (2.39)$$

$$= \Sigma_t \exp(-\Sigma_t x)dx \qquad (2.40)$$

ความน่าจะเป็นที่นิวตรอนจะเกิดอันตรกิริยากับตัวกลางในช่วงความหนาตั้งแต่ a ถึง b คำนวณได้จากสมการที่ 2.41

$$P(a,b) = \Sigma_t \exp(-\Sigma_t x)dx \qquad (2.41)$$

$$= \exp(-\Sigma_t a) - \exp(-\Sigma_t b) \qquad (2.42)$$

ความน่าจะเป็นที่นิวตรอนจะเกิดอันตรกิริยากับตัวกลางที่มีความหนาอนันต์ คำนวนได้จากสมการที่ 2.42 โดยแทนค่าให้ a = 0 และ b = ∞ ซึ่งจะได้ดังสมการ 2.43

$$P(0,\infty) = P(x)dx \qquad (2.43)$$

$$= 1$$

ระยะทางที่นิวตรอนสามารถเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางไปได้โดยไม่เกิดอันตรกิริยาเรียกว่าระยะทางอิสระเฉลี่ย (mean free path: λ) ค่าของระยะทางอิสระเฉลี่ยคำนวณได้จากระยะทางเฉลี่ยที่นิวตรอนสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปในตัวกลางได้โดยไม่เกิดอันตรกิริยา ดังสมการที่ 2.44

$$\lambda = x\,P(x)dx \qquad (2.44)$$

$$= \Sigma_t\, x \exp(-\Sigma_t x)dx$$

$$= \frac{1}{\Sigma_t}$$

ดังนั้น

$$\lambda_t = \frac{1}{(\Sigma_a + \Sigma_s)} \qquad (2.45)$$

และ

$$\lambda_a = \frac{1}{\Sigma_a}$$

$$\lambda_s = \frac{1}{\Sigma_s}$$

2.3.8 การหน่วงพลังงานของนิวตรอน (Neutron moderation)

การลดความเร็วหรือพลังงานของนิวตรอนทำได้โดยให้นิวตรอนชนกับนิวเคลียสของธาตุเบาบางชนิด ธาตุที่มีคุณสมบัติในการลดพลังงานของนิวตรอนได้ดีคือธาตุที่มีเลขอะตอมน้อย ๆ และมีค่าภาคตัดขวางของการดูดกลืนนิวตรอนน้อยด้วยเช่น ไฮโดรเจน หรือวัสดุอื่น ๆ ที่มีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลักเช่น น้ำ พาราฟิน โพลิเอธิลีน และเบริลเลียม

ตัวอย่างของวัสดุที่ใช้สำหรับลดความเร็วของนิวตรอนที่ดีตัวหนึ่งคือ น้ำ (water: H_2O) ซึ่งประกอบด้วยไฮโดรเจนและออกซิเจนในอัตราส่วน 2:1 ไฮโดรเจนเป็นธาตุที่มีเลขมวลน้อยที่สุดคือเท่ากับ 1 ซึ่งใกล้เคียงกับมวลของนิวตรอนจึงเป็นธาตุสำคัญในการลดพลังงานของนิวตรอนเมื่อนิวตรอนวิ่งเข้าชนกับนิวเคลียสของไฮโดรเจน นิวตรอนจะสูญเสียพลังงานให้กับนิวเคลียสของไฮโดรเจนที่ถูกชนจำนวนมากและบางครั้งอาจสูญเสียพลังงานที่มีอยู่เกือบทั้งหมดถ้าเกิดการชนโดยตรง (head-on collision) ส่วนการชนระหว่างนิวตรอนกับนิวเคลียสของออกซิเจนมีความสำคัญน้อยมากในการลดพลังงานของนิวตรอนเพราะว่าในการชนแต่ละครั้งนิวตรอนจะสูญเสียพลังงานให้นิวเคลียสของออกซิเจนน้อยมากเมื่อเทียบกับการสูญเสียพลังงานให้กับนิวเคลียสของไฮโดรเจน เนื่องจากนิวเคลียสของออกซิเจนมีค่าภาคตัดขวางต่อการดูดกลืนนิวตรอนต่ำ

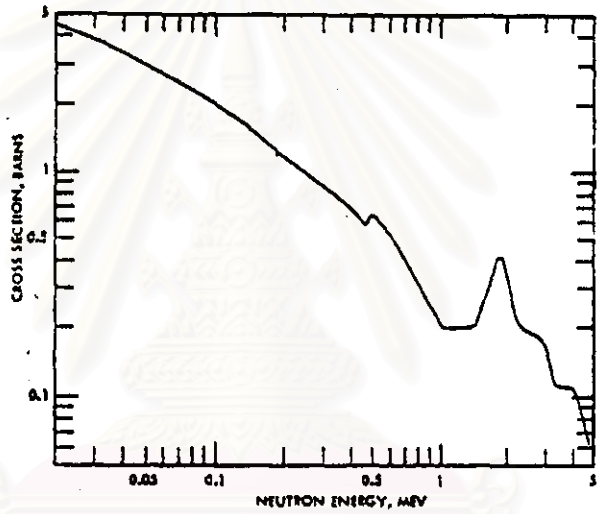
2.3.9 หัววัดนิวตรอน (Neutron detector)

อนุภาคนิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุดังนั้นการวัดนิวตรอนจึงไม่สามารถทำการวัดได้โดยตรงจากการทำให้ตัวกลางเกิดการไอออไนเซชัน หรือเกิดการแตกตัวเป็นอิออน แต่การวัดนิวตรอนสามารถทำได้โดยอ้อมโดยอาศัยการเกิดอันตรกิริยาแบบต่าง ๆ ของนิวตรอนกับตัวกลางดังนี้

ก) หัววัดนิวตรอนพรอพอร์ชันนัลชนิดบรรจุก๊าซโบรอนไตรฟลูออไรด์ (Boron-trifluoride proportional detector: BF_3-proportional detector) เป็นหัววัดนิวตรอนที่ใช้สำหรับวัดเทอร์มาลนิวตรอน เรียกโดยทั่วไปว่าหัววัด BF_3 เนื่องจากเป็นหัววัดที่บรรจุก๊าซโบรอนไตรฟลูออไรด์ ที่มีไอโซโทปของโบรอน-10 สูง ประมาณ 98% (Enriched boron-10 [15]) หัววัด BF_3 อาศัยปฏิกิริยาการจับเทอร์มาลนิวตรอนของนิวเคลียสของโบรอน-10 แล้วเกิดอนุภาคอัลฟาขึ้น จากนั้นอนุภาคอัลฟาจะทำให้เกิดการไอออไนเซชันขึ้นในหัววัด คู่อิออนจากการไอออไนเซชันจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น จากนั้นทำการวัดประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการไอออไนเซชันภายในหัววัด ทำให้สามารถเทียบหาปริมาณของเทอร์มาลนิวตรอนที่เข้าสู่หัววัดได้ สมการที่ 2.46 แสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในหัววัด BF_3 ขณะทำการวัดเทอร์มาลนิวตรอน

$$ {}^{10}_{5}B + {}^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{7}_{3}Li + {}^{4}_{2}He \qquad (2.46) $$

จากสมการอนุภาคอัลฟาที่เกิดขึ้นจะทำให้ก๊าซเกิดการแตกตัวเป็นอิออน เมื่ออิออนบวกและอิออนลบที่เกิดขึ้นเคลื่อนที่ไปยังขั้วบวก และขั้วลบของหัววัดก็จะเกิดเป็นสัญญาณพัลส์ (pulse) ขึ้น ค่าภาคตัดขวางของปฏิกิริยานี้เป็นไปตามส่วนกลับของความเร็วของนิวตรอน ดังนั้นจึงทำให้หัววัด BF_3 มีคุณสมบัติเหมาะสมในการวัดนิวตรอนช้าที่มีพลังงานต่ำ หรือเทอร์มาลนิวตรอน ค่าภาคตัดขวางของโบรอนสำหรับนิวตรอนช้าที่มีพลังงาน 0.0253 eV เท่ากับ 3840 บาร์น [16] รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างภาคตัดขวางกับพลังงานของนิวตรอนสำหรับการเกิดปฏิกิริยา $^{10}B(n,\alpha)\ ^{7}Li$ ซึ่งพบว่าค่าภาคตัดขวางจะลดลงอย่างเร็วเมื่อพลังงานเพิ่มขึ้นโดยเป็นสัดส่วน $1/v$



รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างภาคตัดขวางกับพลังงานของนิวตรอนสำหรับการเกิดปฏิกิริยา $^{10}B(n,\alpha)^{7}Li$

หัววัดนิวตรอนที่ใช้โบรอนเป็นตัวจับนิวตรอนนั้นนอกจากการใช้ก๊าซโบรอนไตรฟลูออไรด์แล้วยังมีชนิดที่ใช้การเคลือบสารประกอบโบรอนไว้ที่ผนังด้านในหัววัด (Boron lined detector) หัววัดนิวตรอนชนิดนี้มีลักษณะการทำงานและปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่ใช้เหมือนกับหัววัด BF_3

ข) หัววัดนิวตรอนชนิดฮีเลียม-3 (He-3 detector) เป็นหัววัดเทอร์มาลนิวตรอนที่บรรจุก๊าซฮีเลียม โดยเมื่อนิวตรอนเข้าสู่หัววัดจะทำปฏิกิริยากับฮีเลียมเกิดเป็นอนุภาคโปรตอนกับไฮโดรเจน-3 หรือตริเตียม (tritium) อนุภาคโปรตอนที่เกิดขึ้นจะทำให้ก๊าซภายในหัววัดเกิดการไอออไนเซชันและเกิดเป็นประจุไฟฟ้าเกิดขึ้น ทำให้สามารถวัดจำนวนของนิวตรอนได้ หัววัดนิวตรอนชนิดนี้มีข้อจำกัดในเรื่องของขนาดที่ต้องมีขนาดใหญ่ และวัสดุที่นำมาใช้ต้องอยู่ในรูปของก๊าซเท่านั้นเนื่องจากฮีเลียม-3 เป็นก๊าซเฉื่อยจึงไม่สามารถทำให้อยู่ในรูปของแข็งได้

ค) หัววัดนิวตรอนชนิดเรืองแสง (Scintillation detector) หัววัดชนิดนี้มีได้หลายแบบขึ้นอยู่กับสารที่นำมาใช้เป็นซินทิลเลเตอร์ ส่วนใหญ่นิยมใช้คือสารประกอบของโบรอน หรือลิเทียม เป็นตัวทำปฏิกิริยากับนิวตรอนแล้วให้อนุภาคที่มีประจุเช่นอนุภาคอัลฟา จากนั้นอนุภาคอัลฟาจะทำปฏิกิริยากับสารซินทิลเลเตอร์เช่น ลิเทียมไอโอไดด์ (LiI) กับ Eu หรือลิเทียมฟลูออไรด์ (LiF) กับ ซิงค์ซัลไฟด์(เงิน) (ZnS(Ag)) เป็นต้น ดังสมการที่ 2.47 และ 2.48

$$^{1}_{3}Li + ^{1}_{0}n \longrightarrow ^{3}_{1}H + ^{4}_{2}He \qquad (2.47)$$

$$^{4}_{2}He + ZnS \longrightarrow ZnS^{*}(Ag) \qquad (2.48)$$

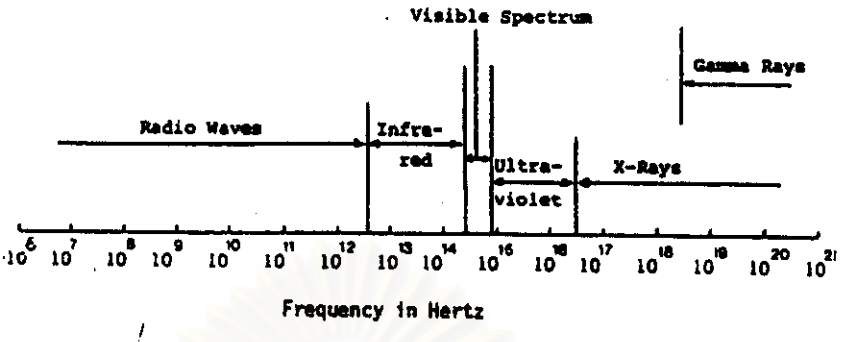
$$ZnS^{*}(Ag) \downarrow$$

$$h\nu$$

จากนั้นสารที่เป็นซินทิลเลเตอร์จะเกิดการเรืองแสงออกมา และแสงที่เกิดขึ้นจะถูกส่งต่อไปยังหลอดทวีคูณแสง (photomultiplier tube) ซึ่งทำหน้าที่ในการเปลี่ยนแสงให้เป็นอิเล็กตรอนเพื่อนำไปใช้ในการวัดปริมาณของนิวตรอนต่อไป หัววัดชนิดซินทิลเลเตอร์เป็นหัววัดที่ใช้สำหรับเทอร์มาลนิวตรอน ที่ประสิทธิภาพสูงและมีกระบวนการในการวัดน้อย ทำให้ใช้เวลาในการวัดน้อย

2.4 รังสีแกมมา (Gamma ray)

รังสีแกมมาเป็นรังสีที่ไม่มีประจุไฟฟ้า ไม่มีมวล มีคุณสมบัติเป็นรังสีประเภทคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic radiation) เคลื่อนที่ไปในอากาศด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วแสงคือ 2.9979×10^{8} เมตรต่อวินาที เช่นเดียวกับคลื่นวิทยุ ไมโครเวฟ และแสงขาว คำว่ารังสีแกมมาในที่นี้จะหมายรวมถึงรังสีเอกซ์ (X-ray) ด้วย เนื่องจากรังสีแกมมา และรังสีเอกซ์มีคุณสมบัติทางฟิสิกส์เหมือนกันทุกประการ ถ้ารังสีแกมมาและรังสีเอกซ์มีพลังงานเท่ากันจะไม่สามารถแยกออกจากกันได้ คุณสมบัติที่แตกต่างกันเพียงอย่างเดียวของรังสีทั้ง 2 ชนิดคือแหล่งกำเนิดเท่านั้น โดยรังสีแกมมาเกิดจากภายในนิวเคลียส ในขณะที่รังสีเอกซ์เกิดขึ้นจากภายนอกนิวเคลียส จากรูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่ารังสีแกมมาจัดอยู่ในคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าประเภทที่มีพลังงานสูง ความยาวคลื่นสั้น



รูปที่ 2.8 แสดงสเปกตรัมพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [17]

ความยาวคลื่น (Wavelength: λ) และความถี่ (Frequency: ν) สามารถที่จะใช้แบ่งชนิดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีเช่นเดียวกับการแบ่งโดยใช้ช่วงพลังงาน สมการที่ 2.49 และ 2.50 แสดงถึง ความสัมพันธ์ของปริมาณทั้ง 3 ชนิด

$$E = h\nu \qquad (2.49)$$

และ

$$\lambda\nu = c \qquad (2.50)$$

โดยที่ h = Plank's constant = 4.165669×10^{-15} eV.Hz^{-1}

c = ความเร็วแสงหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า = 2.997926×10^{8} m sec^{-1}

2.4.1 อันตรกิริยาที่สำคัญของรังสีแกมมา มีด้วยกัน 3 แบบดังนี้

ก) ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริคเอฟเฟค (Photoelectric effect) เป็นปรากฏการณ์ที่รังสีแกมมาเกิดอันตรกิริยากับอะตอมของตัวกลางแล้วรังสีแกมมาถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนตัวกลางจนหมดและสลายตัวไป อิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานจากรังสีแกมมาจะหลุดออกจากอะตอมเรียกว่า "โฟโตอิเล็กตรอน (photoelectron)" เนื่องจากอะตอมจะมีพลังงานหลงเหลือ (recoil energy) อยู่น้อยมาก พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนตัวที่หลุดออกมาจึงมีค่าเท่ากับพลังงานของรังสีแกมมาลบด้วยพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน (ionization energy) นั่นเอง

ถ้าปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริคเอฟเฟคเกิดขึ้นกับอิเล็กตรอนวงใน ๆ เมื่ออิเล็กตรอนหลุดออกมาจากวงโคจร อิเล็กตรอนจากวงโคจรนอกจะเข้าไปแทนที่โดยจะปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของรังสีเอกซ์เฉพาะตัว (Characteristic X-ray) และผลที่ตามมาก็คือการเกิดปรากฏการณ์โอเจ (Auger effect) ถ้าให้ σ_{PE} เป็นภาคตัดขวางของการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟคของตัวกลาง เมื่อมีรังสีแกมมาความเข้ม I ตกกระทบเป้าซึ่งมีความ

หนาแน่นอะตอมเท่ากับ N อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อัตราการเกิดโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟค ต่อปริมาตรของเป้าคำนวณได้จาก

$$F_{PE} = IN\sigma_{PE} \qquad (2.51)$$

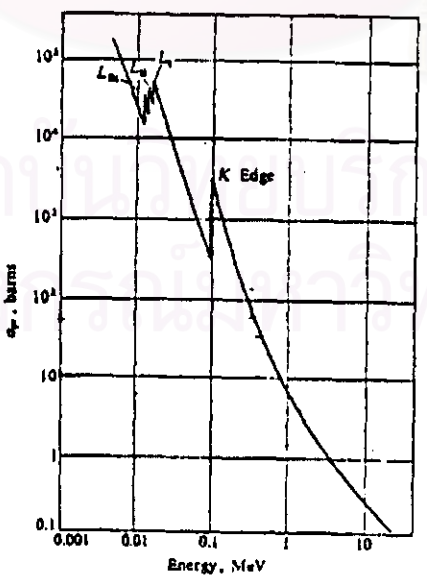
เมื่อ F_{PE} = อัตราการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟคต่อหน่วยปริมาตร มีหน่วยเป็น ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร.วินาที

I = ความเข้มของรังสีแกมมา มีหน่วยเป็น แกมมาต่อตารางเซนติเมตร·วินาที

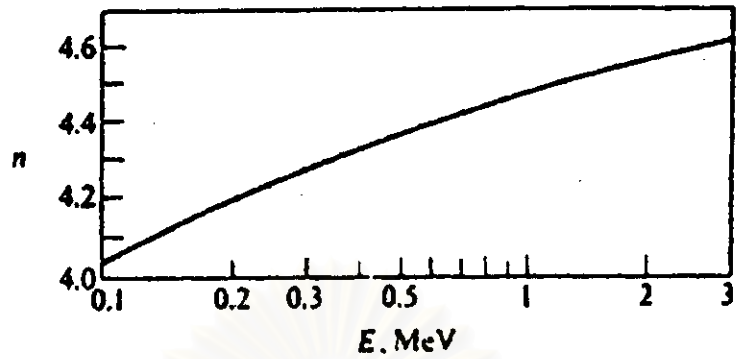
ค่าของ σ_{PE} ขึ้นกับเลขอะตอมของตัวกลาง และพลังงานของรังสีแกมมา σ_{PE} จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อพลังงานของรังสีแกมมาสูงขึ้น รูปที่ 2.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ σ_{PE} ในตะกั่วเมื่อแกมมามีพลังงานสูงขึ้น นอกจากนี้ค่าของ σ_{PE} ยังขึ้นกับเลขอะตอมของตัวกลางด้วยเช่นกันดังความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.52

$$\sigma_{PE} = Z^n \qquad (2.52)$$

ค่า n จะแปรผันตามพลังงานของรังสีแกมมาดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นในการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริคเอฟเฟคกับพลังงานของรังสีแกมมาในตะกั่ว



รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า n กับ พลังงานของรังสีแกมมา

จากการที่ค่าของ σ_{PE} ขึ้นกับเลขอะตอมของตัวกลางอย่างมากดังนั้นธาตุที่มีเลขอะตอมสูงเช่นตะกั่วจึงสามารถนำมาใช้ในการกำบังรังสีได้ดี

ข) ปรากฏการณ์ผลิตคู่อิเล็กตรอน (Pair production effect) รังสีแกมมาที่จะทำให้เกิดปรากฏการณ์นี้ได้จะต้องมีพลังงานไม่น้อยกว่า 1.022 MeV เนื่องจากเมื่อรังสีแกมมาวิ่งผ่านสนามไฟฟ้าของอะตอมบริเวณใกล้ๆ กับนิวเคลียส แกมมาจะถูกเหนี่ยวนำให้สลายตัวเป็นคู่อิเล็กตรอนที่มีประจุบวกหนึ่งตัวและประจุลบหนึ่งตัว (โพซิตรอนและอิเล็กตรอน) ที่มีพลังงานตัวละ 0.511 MeV วิ่งไปในทิศทางตรงกันข้าม

โอกาสในการเกิดปรากฏการณ์นี้จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อพลังงานของรังสีแกมมาสูงขึ้นดังสมการที่ 2.53

$$\sigma_{PP} = Z^2 \qquad (2.53)$$

เมื่อ σ_{PP} หมายถึงภาคตัดขวางในการเกิดปรากฏการ์ผลิตคู่อิเล็กตรอนต่ออะตอมของตัวกลาง

ค) ปรากฏการณ์คอมพ์ตัน (compton effect) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยาการชนแบบยืดหยุ่นของรังสีแกมมากับอะตอมของตัวกลางพลังงานและโมเมนตัมก่อนและหลังการชนจะเท่ากัน ในการเกิดปรากฏการณ์คอมพ์ตันนั้นรังสีแกมมาเข้าชนกับอิเล็กตรอนของอะตอมโดยตรงจึงสามารถที่จะคิดค่าภาคตัดขวางต่อการการเกิดปรากฏการณ์คอมพ์ตันของตัวกลาง (σ_C) เป็นค่าภาคตัดขวางต่อการการเกิดปรากฏการณ์คอมพ์ตันของตัวกลางต่ออิเล็กตรอน ($e\sigma_C$) ได้ดังสมการที่ 2.54

$$\sigma_c = Z\,e\sigma_c \qquad (2.54)$$

2.4.2 การลดทอนรังสีแกมมา (Gamma attenuation)

รังสีแกมมามีคุณสมบัติเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไม่มีมวล ไม่มีประจุ จึงสามารถทะลุผ่านตัวกลางไปได้มากกว่าอนุภาคอัลฟาหรือรังสีเบตา วัสดุที่จะใช้กำบังรังสีแกมมาได้ดีจึงต้องมีความหนาแน่นสูง รังสีแกมมาจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางไปได้มากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับความเข้ม (Intensity) ของรังสีแกมมา ชนิดและความหนาของตัวกลาง สมการที่ 2.55 แสดงความสัมพันธ์ของความเข้มของรังสีแกมมาที่ผ่านตัวกลางกับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนต่อตัวกลางของรังสีแกมมา (Attenuation coefficient: μ)

$$\frac{dI}{dx} = -\mu I \qquad (2.55)$$

โดย I คือความเข้มของรังสีแกมมา

x คือความหนาของตัวกลาง

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของตัวกลางต่อรังสีแกมมาเป็นค่าคงที่ และขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกลางและพลังงานของรังสีแกมมาที่เข้าทำอันตรกิริยา เมื่ออินติเกรตสมการที่ 2.55 ในช่วงความหนาของตัวกลางตั้งแต่ 0 ถึง ความหนา x และให้ I_0 คือความเข้มของรังสีแกมมาก่อนผ่านตัวกลาง และ I คือความเข้มของรังสีแกมมาหลังจากผ่านตัวกลาง จะได้ว่า

$$\ln I - \ln I_0 = -\mu x$$

$$\ln \frac{I}{I_0} = -\mu x$$

$$I = I_0 e^{-\mu x} \qquad (2.56)$$

จากสมการที่ 2.57 พบว่าการลดทอนของรังสีแกมมาในตัวกลางใดๆ มีลักษณะเป็นเอกโพเนนเชียล การบอกถึงคุณสมบัติในการป้องกันรังสีแกมมาของตัวกลางใดๆ มักจะใช้เทอม "ความหนาของตัวกลางที่ทำให้ความเข้มของรังสีแกมมาลดลงครึ่งหนึ่ง" ($X_{1/2}$: half value thickness) ซึ่งหมายถึงความหนาของตัวกลางที่ต้องใช้เพื่อลดความเข้มของรังสีแกมมาลงครึ่งหนึ่ง ค่าของ $X_{1/2}$ จะมีค่าแตกต่างกันโดยขึ้นอยู่กับชนิดและพลังงานของรังสีแกมมา จากสมการที่ 2.57 เมื่อความเข้มของรังสีแกมมาหลังผ่านตัวกลางลดลงครึ่งหนึ่งจะได้ว่า

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1}{2} = e^{-\mu x}$$

$$\ln 2 = \mu X_{1/2}$$

$$X_{1/2} = \frac{0.693}{\mu} \qquad (2.57)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของรังสีแกมมาเป็นส่วนกลับของความหนาจึงมีหน่วยเป็น ซม.$^{-1}$ และขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของตัวกลางด้วยเช่นกัน ดังนั้นถ้าให้ μ_m เป็นสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (Mass attenuation coefficient) ซึ่งไม่ขึ้นกับคุณสมบัติของตัวกลาง และสัมพันธ์กับค่า μ ดังนี้

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \qquad (2.58)$$

เมื่อ ρ คือความหนาแน่นของตัวกลางในหน่วย กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ดังนั้น μ_m มีหน่วยเป็น ตารางเซนติเมตรต่อกรัม และสมการที่ 2.56 เขียนได้ใหม่เป็น

$$I = I_0 e^{-\mu_m \rho x} \qquad (2.59)$$

ความเข้มของรังสีแกมมาเมื่อผ่านตัวกลางมีค่าลดลงเนื่องการเกิดอันตรกิริยาได้ทั้ง 3 อันตรกิริยาดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนที่กล่าวถึงจึงหมายถึงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลรวมสำหรับการเกิดอันตรกิริยาทั้ง 3 ประเภท ถ้า μ_{PE}, μ_{CE}, และ μ_{PP} คือสัมประสิทธิ์การลดทอนเนื่องจากอันตรกิริยาโฟโตอิเลคทริคเอฟเฟค คอมพ์ตันเอฟเฟค และ แพร์โปรดักชัน ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรวม คำนวณได้จากสมการที่ 2.60

$$\mu_T = \mu_{PE} + \mu_{CE} + \mu_{PP} \qquad (2.60)$$

และ สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลรวมคำนวณได้จาก

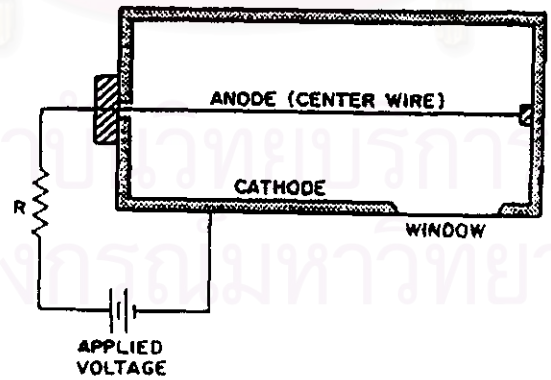
$$(\mu_m)_T = \frac{\mu_{PE}}{\rho} + \frac{\mu_{CE}}{\rho} + \frac{\mu_{PP}}{\rho} \qquad (2.61)$$

2.4.3 หัววัดรังสีแกมมา

หัววัดรังสีแกมมาที่นิยมใช้อยู่ในปัจจุบันมีหลายชนิดเช่น หัววัดรังสีชนิดบรรจุก๊าซ หัววัดรังสีชนิดซินทิลเลชัน และหัววัดรังสีชนิดสารกึ่งตัวนำ ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงหลักการทำงานโดยสังเขปของหัววัดรังสีที่สำคัญและนิยมใช้ในปัจจุบัน

ก) หัววัดรังสีชนิดบรรจุก๊าซ (Gas-filled detector)

เป็นหัววัดรังสีที่นิยมใช้งานมานาน เนื่องจากเป็นหัววัดที่ระบบการทำงานง่ายที่สุด ราคาค่อนข้างต่ำ บำรุงรักษาง่าย สามารถใช้วัดรังสีต่างๆ ได้หลายชนิด และเหมาะสำหรับใช้ในงานทั่วไป ลักษณะทั่วไปของหัววัดชนิดนี้จะประกอบด้วยส่วนที่ทำหน้าที่เป็นส่วนวัดรังสีซึ่งทำด้วยโลหะรูปทรงกระบอก ด้านหน้าหรือด้านข้างถูกออกแบบให้เป็นช่อง (window) แล้วปิดด้วยแผ่นเบริลเลียมบางๆ สำหรับให้รังสีผ่านเข้าสู่หัววัด ภายในหัววัดบรรจุก๊าซและมีเส้นลวดอยู่ตรงกลาง ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงจะต่ออยู่กับเส้นลวดและผนังของกระบอกโลหะ โดยให้เส้นลวดทำหน้าที่เป็นขั้วบวกและผนังหัววัดเป็นขั้วลบดังแสดงในรูปที่ 2.12 เมื่อรังสีเข้าสู่หัววัดจะทำให้ก๊าซเกิดการไอออไนเซชันเกิดเป็นคู่ไอออน เนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าจะทำให้ไอออนบวกและอิออนลบที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วลบและขั้วบวกตามลำดับ และทำให้เกิดเป็นสัญญาณไฟฟ้าขึ้นโดยปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะสัมพันธ์กับปริมาณรังสีที่เข้าสู่หัววัด ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของหัววัดชนิดนี้คือ ชนิดของก๊าซที่ใช้ภายในหัววัด ความดันภายในหัววัด ความเข้มของสนามไฟฟ้าหรือความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับหัววัด ข้อจำกัดของหัววัดชนิดนี้คือไม่สามารถแยกพลังงานของรังสีที่เข้าสู่หัววัดได้ หัววัดชนิดนี้ที่นิยมใช้ในการวัดรังสีแกมมาคือหัววัดไกเกอร์-มูลเลอร์ (Geiger-Muller detector)

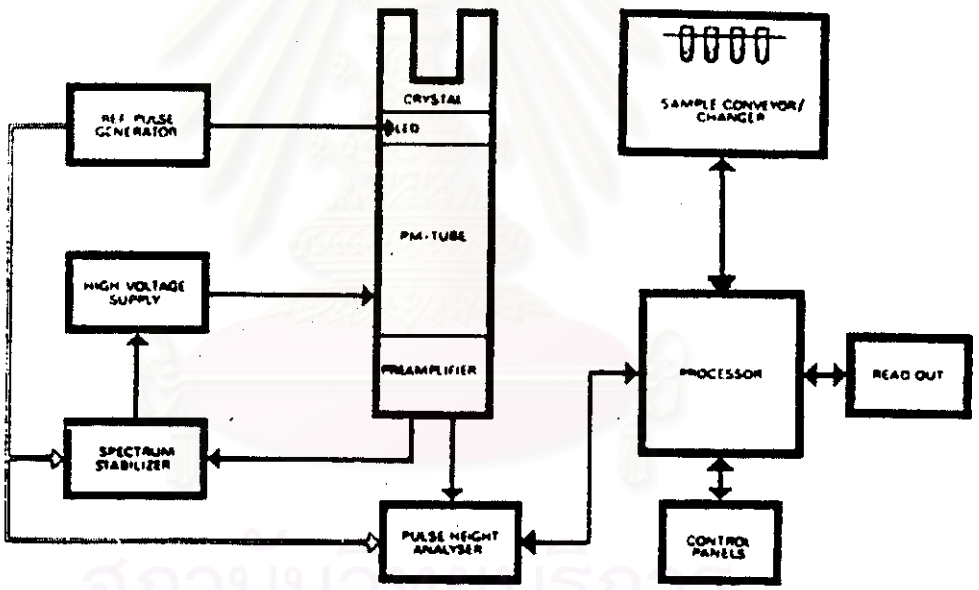


รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะทั่วไปของหัววัดรังสีชนิดบรรจุก๊าซ

ข) หัววัดรังสีชนิดซินทิลเลชัน (Scintillation detector)

หัววัดรังสีชนิดนี้ทำจากสารประกอบที่เรืองแสงได้เรียกว่า ซินทิลเลเตอร์ (scintillator) ซึ่งอาจจะอยู่ในสภาพที่เป็นของแข็งหรือของเหลวก็ได้ เมื่อรังสีแกมมาตกกระทบกับ

สารซินทิลเลเตอร์จะทำให้อะตอมอยู่ในสภาวะกระตุ้น เมื่อทำให้อะตอมกลับสู่สภาวะปกติจึงต้องมีการปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของโฟตอน จำนวนของโฟตอนที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนกับปริมาณและพลังงานของรังสีที่เข้าสู่หัววัด โฟตอนที่เกิดขึ้นจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าโดยหลอดทวีคูณแสง (photomultiplier tube) ซึ่งลักษณะทั่วไปประกอบด้วยโฟโตคาโทด (photocathod) ซึ่งจะให้อิเล็กตรอนออกมาเมื่อมีโฟตอนมาตกกระทบ อิเล็กตรอนจะถูกเพิ่มจำนวนขึ้นโดยการถูกเหนี่ยวนำให้ไปตกกระทบกับชุดของไดโนด (dynode) ดังแสดงในรูปที่ 2.13 สุดท้ายอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะถูกรวบรวมที่แอโนด (anode) และถูกแปลงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า ขนาดของสัญญาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานของรังสีที่ตกกระทบ ทำให้สามารถแยกพลังงานของรังสีที่เข้าสู่หัววัดได้ หัววัดซินทิลเลเตอร์ที่นิยมใช้ในการวัดรังสีแกมมาคือหัววัดชนิดโซเดียมไอโอไดด์(ทัลเลียม) (NaI(Tl))



รูปที่ 2.12 แสดงองค์ประกอบของการจัดระบบวัดรังสีโดยหัววัดซินทิลเลชัน

ค) หัววัดชนิดสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor detector)

ผลึกของสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิคอน และเจอร์มาเนียม ในอะตอมจะมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 4 ตัวเท่ากัน โครงสร้างของผลึกจะเกิดขึ้นจากการยึดกันของอิเล็กตรอนโดยพันธะโควาเลนซ์ ผลึกของสารกึ่งตัวนำที่เจือปนธาตุที่มีอิเล็กตรอน 5 ตัว เช่นฟอสฟอรัส เรียกว่าสารกึ่งตัวนำแบบเอ็น (N-type semiconductor) ส่วนสารกึ่งตัวนำที่เจือปนธาตุที่มีอิเล็กตรอน 3

ตัว เช่นโบรอนจะเรียกว่า สารกึ่งตัวนำแบบพี (P-type semiconductor) หัววัดรังสีชนิดสารกึ่งตัวนำมีหลายประเภทแตกต่างกันตามการออกแบบ เมื่อรังสีตกกระทบส่วนที่เป็นหัววัดจะทำให้เกิดการไอออไนซ์ขึ้นทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล (hole pair electron) ซึ่งจะถูกเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าที่มีขนาดเป็นสัดส่วนกับพลังงานของรังสี ข้อดีของหัววัดรังสีชนิดนี้คือสามารถใช้แยกพลังงานของรังสีได้เช่นเดียวกับชนิดซินทิลเลชัน และยังใช้วัดรังสีได้หลายชนิดและยังให้ประสิทธิภาพในการวัดสูงอีกด้วย หัววัดชนิดนี้ที่สำคัญในการวัดรังสีแกมมาคือ หัววัดเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูง (Hyper pure Germanium detector)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย