หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

บทที่ 2

อนุภาคนิวตรอน

2.1 การค้นพบนิวตรอน

ในปี ค.ศ. 1920 Rutherford ได้ให้แนวความคิดว่า โปรตอนที่อยู่ในนิวเคลียสของอะตอมอาจจะมีอิเลคตรอนติดอยู่ในระยะใกล้ชิดจนเกิดเป็นอนุภาคที่เป็นกลางขึ้น และได้ให้ชื่ออนุภาคที่คิดว่ามีนั้นว่า นิวตรอน ต่อมาในปี ค.ศ. 1930 W.G. Bothe และ H. Becker ได้พบว่าเมื่อใช้อนุภาคแอลฟายิงถูกนิวเคลียสของโบรอน หรือ เบอริลเลียมจะได้รังสีชนิดหนึ่งออกมา ซึ่งคล้ายกับรังสีแกมมา คือไม่มีประจุไฟฟ้า แต่มีอำนาจทะลุทะลวง ดีกว่ารังสีแกมมา และพบว่ามีพลังงานประมาณ 10 MeV ซึ่งเป็นพลังงานที่มากกว่าที่เคยพบมาในรังสีแกมมา

นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศส ชื่อ Frédéric Joliot Curie และภรรยาชื่อ Irène Curie ได้ศึกษาการดูดกลืนของรังสีนี้ในชั้นซึ่งมีไฮโดรเจนมาก พบว่ารังสีนี้ทำให้โปรตอนซึ่งเป็นนิวเคลียสของอะตอมไฮโดรเจนหลุดออกมาจำนวนมาก โปรตอนเหล่านี้มีพลังงาน โดยเฉลี่ย 5 MeV จากการคำนวนหาพลังงานของรังสีแกมมาที่จะทำให้โปรตอนที่หลุดออกมามีพลังงาน 5 MeV ดังกล่าวจะต้องใช้รังสีแกมมาพลังงานสูงถึง 50MeV ซึ่งแตกต่าง ออกไปอย่างมากจากพลังงาน 10 MeV ของรังสีนั้น อีกทั้งจำนวนโปรตอนที่หลุดออกมายังมากกว่าที่คาดว่าจะเกิดจากรังสีแกมมา

ความแตกต่างของผลที่ได้จากการทดลองกับผลจากการคำนวณที่อาศัยหลักสำคัญทางฟิสิกส์ คือ กฎคงตัวของโมเมนตัมและพลังงาน จึงทำให้มีความเชื่อมั่นว่ารังสีนั้นน่าจะไม่ใช่รังสีแกมมา

ในปี ค.ศ. 1932 Chadwick ได้ตั้งสมมุติฐานขึ้นว่ารังสีนั้นควรเป็นอนุภาคที่มีมวลเกือบเท่ามวลของโปรตอน ซึ่งสามารถอธิบายเกี่ยวกับพลังงานในการชนได้ดี และการที่มีอำนาจในการทะลุทะลวงสูงเช่นเพราะการไม่มีประจุไฟฟ้า คือน่าจะเป็น โปรตอนและอิเลกตรอนอยู่ใกล้ชิดกันตามที่ Rutherford ได้เคยกล่าวถึงในปี ค.ศ. 1920 นั่นเอง

ตามสมมุติฐานของ Chadwick เมื่อเบอริลเลียมถูกยิงด้วยอนุภาคแอลฟาจะเกิดปฏิกริยาที่ได้นิวตรอนออกมาดังนี้

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

การที่นิวตรอนไม่มีประจุไฟฟ้าจึงสามารถทะลุทะลวงผ่านสารที่มีความหนาแน่นมากๆเช่น ตะกั่วไปได้ดีโดยไม่หมดพลังงาน แต่เมื่อผ่านขี้ผึ้ง จะเกิดการชนกับนิวเคลียสของไฮโดรเจน คือ โปรตอน และตามสมมุติฐานที่ว่ามีมวลใกล้เคียงกัน เมื่อเกิดการชนกันอย่างจัง (head on collision) พลังงานเกือบทั้งหมดจะถูกถ่ายเทให้โปรตอนแต่ถ้าเป็นการชนแบบเฉียง (oblique collision)พลังงานเพียงบางส่วนจะถูกถ่ายทอดให้ ดังนั้นค่าเฉลี่ยของพลังงานจลน์ของโปรตอนที่หลุดออกมาจากอะตอมของธาตุไฮโดรเจนในขี้ผึ้งเนื่องจากถูกชนโดยนิวตรอน จึงมีค่าเฉลี่ย 5 MeV เมื่อนิวตรอนที่เข้าชนมีพลังงานประมาณ 10 MeV

2.2 อนุภาคนิวตรอน

นิวตรอนเป็นอนุภาคที่มีอยู่ในนิวเคลียสของอะตอม ไม่มีประจุไฟฟ้า มีมวลนิ่ง (rest mass) 1.00898 a.m.u. หรือ 1.675×10^{-24} กรัม เป็นอนุภาคกัมมันตรังสี คือเมื่ออยู่เป็นอิสระจะสลายตัวเป็น โปรตอน และ อิเลคตรอน พร้อมกับปล่อยพลังงานออกมาประมาณ 0.782 MeV มีครึ่งชีวิตประมาณ 12.8 นาที

นิวตรอนมีความเร็วและพลังงานแตกต่างกันสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

1. นิวตรอนช้า (slow neutron) มีพลังงานตั้งแต่ 0-1000 eV
2. นิวตรอนเร็วปานกลาง (intermediat neutron) มีพลังงานตั้งแต่ $10^3 - 5 \times 10^5$ eV
3. นิวตรอนเร็ว (fast neutron) มีพลังงานตั้งแต่ 0.5 - 10 MeV
4. นิวตรอนเร็วมาก (very fast neutron) มีพลังงานตั้งแต่ 10 - 50 MeV.

5. นิวตรอนเร็วมากๆ (Ultra fast neutron) มีพลังงานตั้งแต่ 50 MeV ขึ้นไป

สำหรับนิวตรอนช้ายังแบ่งย่อยออกเป็น 3 พวกคือ

1. นิวตรอนเย็น (Cold neutron) มีพลังงานน้อยกว่า 0.002 eV มีอำนาจในการทะลุทะลวงผลึกของสารได้ดี
2. เทอร์มาลนิวตรอน (Thermal neutron) มีพลังงานเฉลี่ยเท่ากับพลังงานเฉลี่ยของอะตอมของตัวกลางซึ่งนิวตรอนเคลื่อนที่อยู่ ซึ่งพลังงานนี้ขึ้นกับอุณหภูมิของตัวกลางดังนี้

พลังงานของเทอร์มาลนิวตรอน = 8.6×10^{-5} T_k eV.....(2.1)

= 4.8×10^{-5} T_r eV.....(2.2)

เมื่อ T_k และ T_r เป็นอุณหภูมิสัมบูรณ์ของตัวกลางในมาตรา เคลวิล และ แรงกิน (Kelvin and Rankine ตามลำดับ เช่นที่อุณหภูมิปกติ 22 °C หรือ 295 °K (72 ° F หรือ 532 ° R พลังงานของเทอร์มาลนิวตรอนจะประมาณ 0.025 eV และจะมีความเร็วที่หาได้จากสูตร

ความเร็วเทอร์มาลนิวตรอน = $1.3 \times 10^{4} \sqrt{T_k}$ cm/sec..(2.3)

= $9.97 \times 10^{4} \sqrt{T_r}$ cm/sec..(2,4)

ที่อุณหภูมิปกติ 22 °C จะมีความเร็วประมาณ 2.2×10^{5} cm/sec

3. เอพิเทอร์มาลนิวตรอน (Epithermal neutron) เป็นนิวตรอนที่มีพลังงานสูงกว่าเทอร์มาลนิวตรอนเล็กน้อย

2.3 ต้นกำเนิดนิวตรอน

นอกจากฟิชชั่นแฟรกเมนต์ (fission fragment) ที่มีครึ่งชีวิตสั้นมากแล้ว ไม่มี เรดิโอไอโซโทปใดที่ปล่อยนิวตรอนออกมา ดังนั้นต้นกำเนิดนิวตรอน ทั้งหมดจึงต้องมาจากปฏิกริยานิวเคลียร์ ต้นกำเนิดนิวตรอนที่ให้นิวตรอนได้มากที่สุดคือ

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู นิวตรอนอาจผลิตขึ้นได้ด้วยเครื่องเร่งอนุภาคโดยปฏิกริยาต่างๆ กัน เช่น การยิง เบอริลเลียม ด้วย ดิวทีรอน พลังงานสูงใน ไซโคลตรอน จะได้ นิวตรอนจากปฏิกริยา

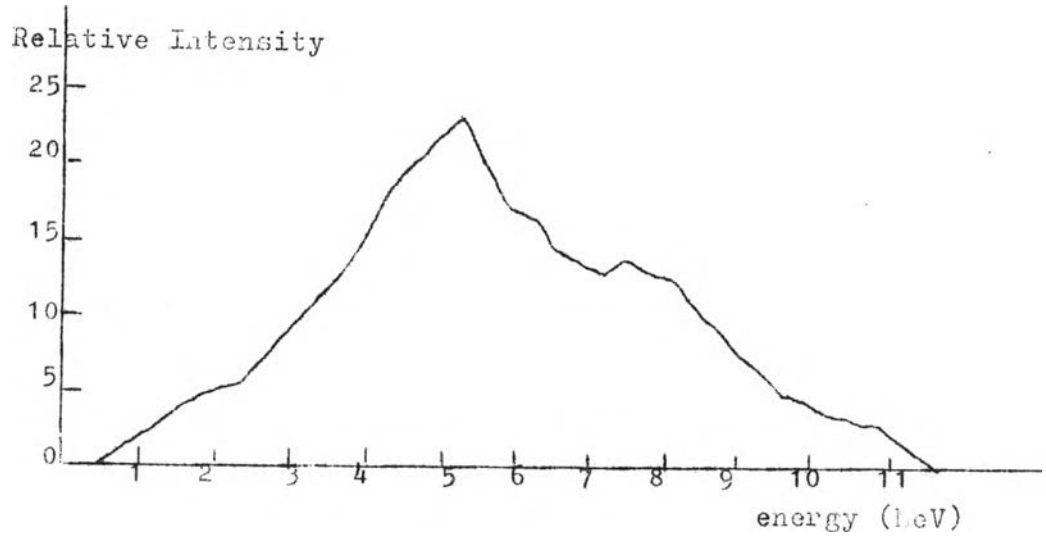
$$^{9}_{4}Be + ^{2}_{1}D \longrightarrow (^{11}_{5}B)^{*} \longrightarrow ^{10}_{5}B + ^{1}_{0}n$$

สำหรับต้นกำเนิดนิวตรอนในห้องปฏิบัติการเล็กๆ อาจจะใช้ โฟโตดิสอินทีเกรชั่น (photointegration) ของ เบอริลเลียม หรือที่ใช้กันโดยทั่วไป โดยการ ยอมบาร์ด เบอริลเลียม ด้วยอนุภาคแอลฟา ซึ่งปฏิกริยาเป็นดังนี้

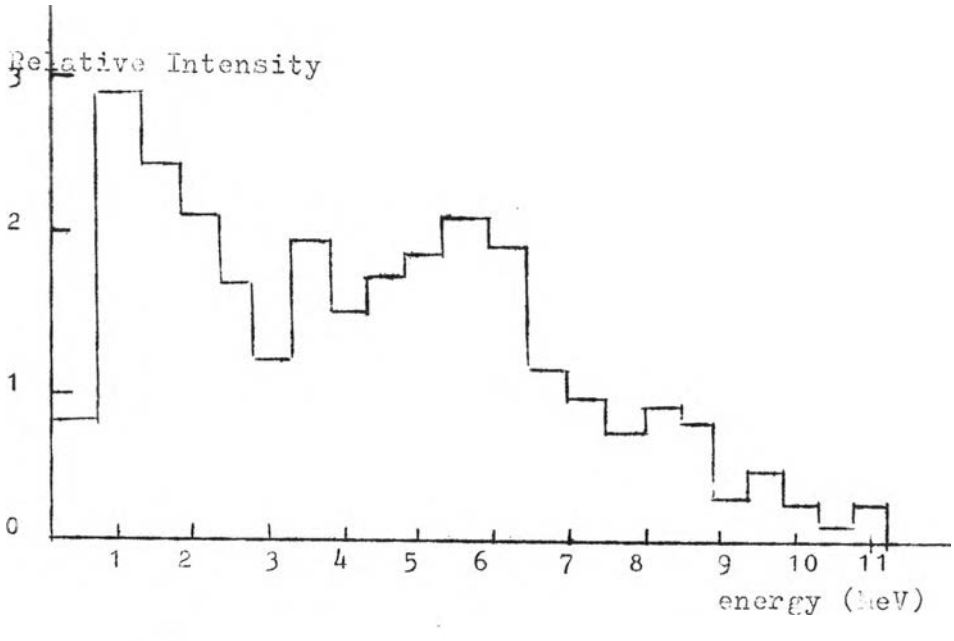
$$^{9}_{4}Be + ^{4}_{2}He \longrightarrow (^{13}_{6}C)^{*} \longrightarrow ^{12}_{6}C + ^{1}_{0}n$$

ต้นกำเนิดของอนุภาคแอลฟาได้แก่ เรเดียม โปโลเนียม พลูโตเนียม โดยการใช้ ต้นกำเนิดอนุภาคแอลฟาซึ่งเป็นผง คลุกเคล้าปนเข้ากับผงละเอียดของ เบอริลเลียม แล้วนำของผสมนั้นบรรจุลงใน แคปซูล นิวตรอนที่ผลิตออกมาโดยวิธีนี้จะมีพลังงานสูง และพลังงานของนิวตรอนจะแผ่กระจายออกเป็นสเปคตรัมกว้างแตกต่างออกไปจากนิวตรอนพลังงานเดียวที่ได้จากต้นกำเนิดแบบ โฟโตดิสอินทีเกรชั่น ซึ่งใช้ โฟตอนพลังงานเดียว ในปฏิกริยา (α,n) พลังงานสมดุลย์ของมวลที่แตกต่างกันระหว่างตัวที่ทำปฏิกริยา กับผลผลิต รวมกับพลังงานของตัวอนุภาคที่ใช้บอมบาร์ด จะแบ่งกันระหว่าง นิวตรอน กับ รีคอยด์นิวเคลียส (recoil nucleus) ในทางปฏิบัติแล้ว พลังงานบางส่วนของอนุภาคแอลฟาจะใช้ไปในการเกิด self absorption ในต้นกำเนิด ผลก็คือ จะได้อนุภาคแอลฟาพลังงานในช่วงกว้างที่ไปก่อให้เกิดปฏิกริยา พลังงานของนิวตรอนที่ได้จึงแผ่กระจายออกเป็นสเปคตรัมกว้างดังกล่าวมาแล้ว

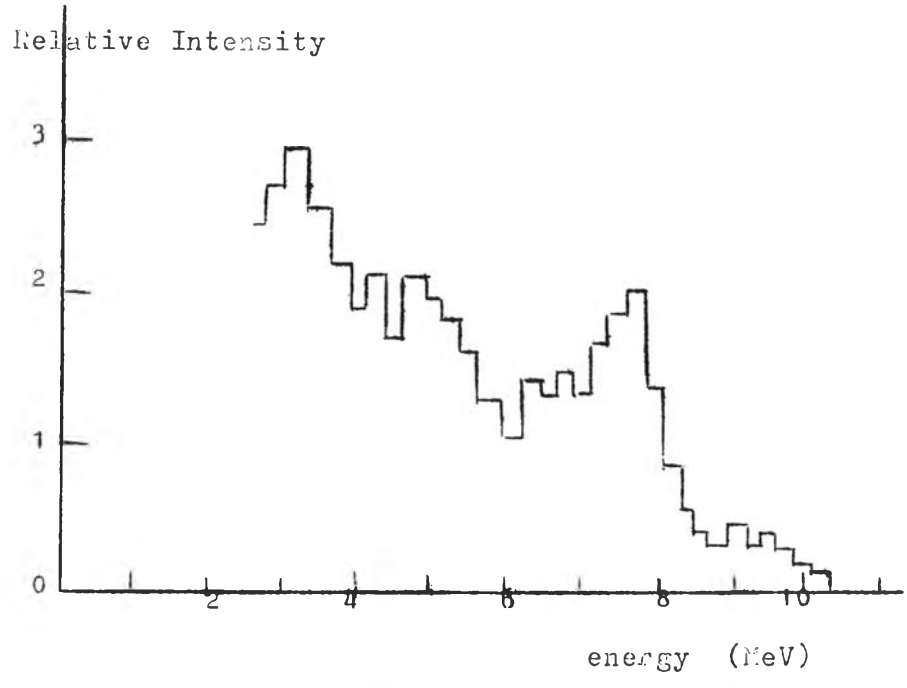
นิวตรอนยีลด์ (neutron yield) จากต้นกำเนิดแบบ (α,n) จะเพิ่มขึ้นตามพลังงานของอนุภาคแอลฟาที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก อนุภาคแอลฟาพลังงานสูง ย่อมสามารถทะลวงผ่าน คูลอมบ์ แบริเออร์ (Coulomb barrier) ไปสู่นิวเคลียสได้ดีกว่าอนุภาคแอลฟาที่มีพลังงานต่ำ



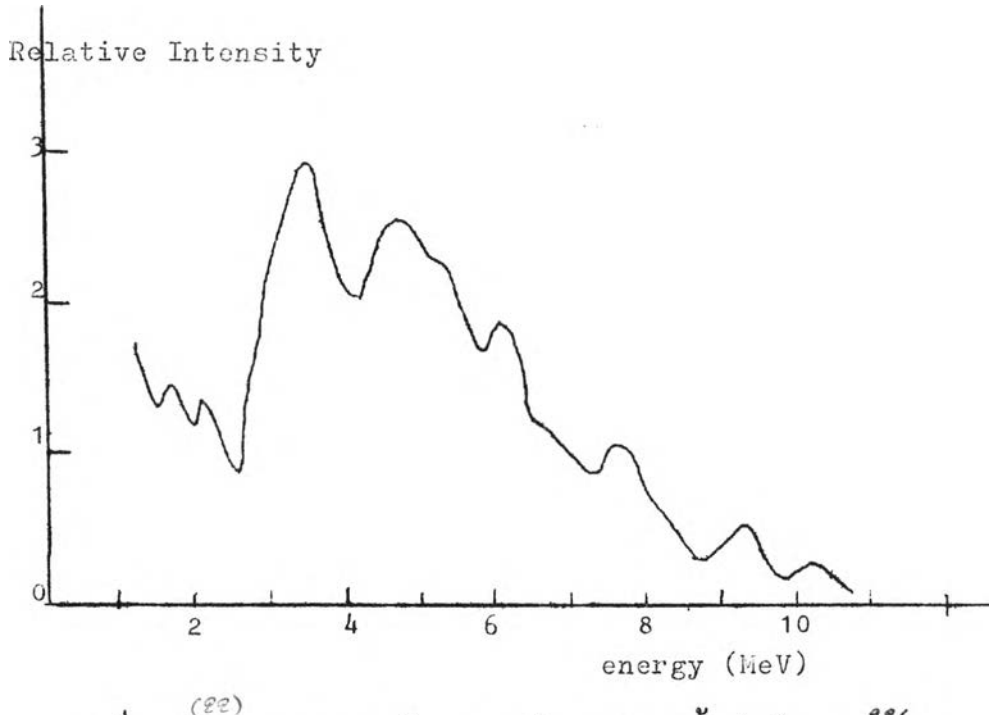
รูปที่ 2.1 การกระจายพลังงานของนิวตรอนจากต้นกำเนิด Po^{210} Be [21]



รูปที่ 2.2 การกระจายพลังงานของนิวตรอนจากต้นกำเนิด Pu^{238} Be [22]



รูปที่ 2.3 การกระจายพลังงานของนิวตรอนจากต้นกำเนิด $Am^{241}-Be$ (22)



รูปที่ 2.4 การกระจายพลังงานของนิวตรอนจากต้นกำเนิด $Ra^{226}-Be$ (22)

Source	Halflife	Avcrage neutron energy MeV	Yield n/sec/Ci
$^{24}Na + Be$	15 hr.	0.83	1.3×10^5
$^{24}Na + D_2O$	15 hr.	0.22	2.7×10^5
$^{56}Mn + Be$	2.58 hr.	0.1(90%),0.3(10%)	2.9×10^4
$^{56}Mn + D_2O$	2.58 hr.	0.22	3.1×10^3
$^{72}Ga + Be$	14.2 hr.	0.78	5×10^4
$^{72}Ga + D_2O$	14.2 hr.	0.13	6×10^4
$^{88}Y + Be$	88 d.	0.16	1×10^5
$^{88}Y + D_2O$	88 d.	0.31	3×10^3
$^{116}In + Be$	54 min.	0.30	8.2×10^3
$^{124}Sb + Be$	60 d.	0.024	1.9×10^5
$^{140}La + Be$	40 hr.	0.62	3×10^3
$^{140}La + D_2O$	40 hr.	0.15	8×10^3
$Ra + D_2O$	1600 yr.	0.12	1×10^3

ตารางที่ 2.1 [21] ตนกำเนิดนิวตรอนชนิด (γ, n)

Source	Halflife	Average neutron energy MeV	Yield n/sec/Ci
$Ra + Be$	1600 yr.	5	1.7×10^7
$Ra + B$	3.8 d.	3	6.8×10^6
$^{222}Rn + Be$	3.8 d.	5	1.3×10^7
$^{210}Po + B$	138 d.	4	3×10^6
$^{210}Po + Be$	138 d.	2.5	9×10^5
$^{210}Po + F$	138 d.	1.4	4×10^5
$^{210}Po + Li$	138 d.	0.42	9×10^4
$^{239}Pu + Be$	24000 yr.	4	10^6

ตารางที่ 2.2 [21] ตนกำเนิดนิวตรอนชนิด (α, n)

ต้นกำเนิดนิวตรอนที่ใช้ในการทดลอง

1.ต้นกำเนิดนิวตรอนชนิด พลูโตเนียม-เบอริลเลียม(Pu-Be source) พลูโตเนียม-เบอริลเลียมที่ใช้เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนในการทดลอง อยู่ในรูปสารประกอบกึ่งโลหะ มีความหนาแน่น 3.78 กรัม/ลบ.ซม. พลูโตเนียมให้อนุภาคแอลฟาพลังงาน 5.14MeV และต้นกำเนิดนิวตรอนชนิดนี้ให้นิวตรอนได้สูงสุดประมาณ 6×10^6 นิวตรอน/วินาที พลังงานของนิวตรอนเริ่มจาก 0 จนถึงประมาณ 10.6 MeV พลังงานเฉลี่ยประมาณ 4.2 MeV รูปร่างของพลูโตเนียม-เบอริลเลียม เป็นทรงกระบอก พลูโตเนียมอยู่ในรูปออกไซด์ (PuO_2) หนัก 0.311 กรัม และเบอริลเลียมหนัก 7.0 กรัม มีความแรง 5.34 คูรี ปล่อยนิวตรอน 1.11×10^7 นิวตรอน/วินาที และมีนิวตรอนเอจ (Ages of neutron) ในน้ำประมาณ 52.8 ตารางเซ็นติเมตร

2.เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู แบบ TRIGA MARK III ที่ใช้ในสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ บางเขน โดยทำการทดลองวัดนิวตรอนฟลักซ์ ขณะที่เดินเครื่องกำลัง 500 วัตต์ โดยอาบแผ่นฟิล์มและแผ่นไอยในท่อลำที่มีนิวตรอนประมาณ 3.126×10^7 นิวตรอน/ซม.^{2}/วินาที สำหรับเทอร์มาลนิวตรอน และ 1.588×10^6 นิวตรอน/ซม^2./วินาที สำหรับเอพิเทอร์มาลนิวตรอน

2.4 อันตรกริยาระหว่างนิวตรอนกับสสาร

นิวตรอนทุกตัวเมื่อเริ่มเกิดจะเป็นนิวตรอนเร็ว และนิวตรอนเร็วนี้จะสูญเสียพลังงานไปโดยการชนแบบยืดหยุ่นกับอะตอมที่อยู่รอบๆตัว จนความเร็วลดลงกลายเป็นเทอร์มาลนิวตรอนหรือใกล้เคียง จากนั้นจะถูกจับโดย นิวคลีไอ ของสารที่ดูดกลืนนิวตรอน ถึงแม้ว่านิวตรอนจะสามารถเกิดปฏิกริยาได้หลายแบบก็ตาม แต่สำหรับนักฟิสิกส์สุขภาพ ปฏิกริยาที่น่าสนใจคือ การชนแบบยืดหยุ่น และการจับนิวตรอน ซึ่งติดตามมาด้วยการปล่อยโฟตอน หรืออนุภาคอื่นออกมาจากนิวเคลียสของตัวที่ดูดกลืนนิวตรอน

เมื่อนำตัวดูดกลืนนิวตรอนวางขวางลำของนิวตรอน และวัดความเข้มของนิวตรอนที่ผ่านออกมา พบว่านิวตรอนจะถูกจับลดลงเป็น แบบเอกโปเนนเชียล แทนที่จะใช้ ลีเนีย หรือแมสแอบซอบชัน โคเอฟฟิเชียล (mass absorption coefficient) หรืออธิบายความสามารถในการจับนิวตรอนของตัวดูดกลืนนิวตรอน กลับนิยมที่จะใช้ภาคตัดขวางไมโครสโคปิค (micro

scopic crossection)(σ) สำหรับสารที่ดูดกลืนนิวตรอน และ σN เมื่อ N เป็นจำนวนอะตอมของตัวดูดกลืน/ลบ.ซม. จะเป็นภาคตัดขวาง แมคโครสโคปิก (macroscopic crossection) นิวตรอนที่ถูกจับออกไปจากลำของนิวตรอนจะหาได้จากสูตร

$$I = I_0 e^{-\sigma Nt} \quad \text{.....} \quad (2.5)$$

ภาคตัดขวางของนิวตรอนจะขึ้นอยู่กับพลังงานของนิวตรอน และถ้านิวตรอนถูกจับออกจากลำของนิวตรอนด้วยกลไกอย่างอื่นแล้ว ภาคตัดขวางทั้งหมดจะเป็นผลรวมของภาคตัดขวางของแต่ละปฏิกริยาที่เกิดขึ้นได้

2.4.1 การกระเจิงของนิวตรอน

นิวตรอนเมื่อเกิดการชนกับนิวไคล อาจเกิดการกระเจิงแบบยืดหยุ่น หรือ ไม่ยืดหยุ่นก็ได้ สำหรับกรณีไม่ยืดหยุ่น พลังงานจลน์บางส่วนของนิวตรอนจะถูกถ่ายทอดไปให้นิวเคลียสของเป้า ทำให้อยู่ในภาวะโลด และพลังงานของภาวะโลดจะถูกปลดปล่อยออกมาในรูป โฟตอนของรังสีแกมมา อันตรกริยาแบบนี้จะอธิบายได้ดีด้วย นิวเคลียสประกอบ โมเดล (compound nucleus model) คือเมื่อนิวตรอนถูกจับและต่อมาจะถูกปล่อยออกมาพร้อมกับโฟตอนของรังสีแกมมา นี่คือปรากฏการณ์ขีดเริ่ม พลังงานของนิวตรอนขีดเริ่ม จะเริ่มจากค่าอนันต์ สำหรับไฮโดรเจน ซึ่งการชนแบบไม่ยืดหยุ่นไม่อาจเกิดขึ้นได้ จนถึงประมาณ 6MeV สำหรับออกซิเจน และน้อยกว่า 1MeV สำหรับ ยูเรเนียม โดยทั่วไปแล้วภาคตัดขวางสำหรับการชนแบบไม่ยืดหยุ่นจะน้อย ในขนาดประมาณ 1 บาร์น หรือน้อยกว่า สำหรับนิวตรอนเร็วที่มีพลังงานต่ำ แต่จะเพิ่มเมื่อพลังงานของนิวตรอนเพิ่มขึ้นและเข้าใกล้ขนาดที่สัมพันธ์กับภาคตัดขวางเรขาคณิตของเป้าที่นิวตรอนเข้าชน

การกระเจิงแบบยืดหยุ่นเป็นอันตรกริยาที่เกิดขึ้นมากที่สุดระหว่างนิวตรอนเร็ว กับตัวดูดกลืนที่มีเลขอะตอม(atomic number)ต่ำๆ ในอันตรกริยาแบบนี้ พลังงานจลน์ และ โมเมนตัมจะคงที่ และเมื่อใช้กฎคงตัว จะได้ว่า พลังงาน E ของนิวตรอน ที่กระเจิงออกมา

หลังการชนอย่างจังจะเป็น

$$E = E_o \left[\frac{M - m}{M + m}\right]^2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2.6)$$

เมื่อ E_o = พลังงานของนิวตรอนที่ตกกระทบ

m = มวลของนิวตรอนที่ตกกระทบ

M = มวลของนิวเคลียสที่กระเจิงออกไป

พลังงานที่ถ่ายทอดไปให้นิวเคลียสของเป้า คือ $E_o - E$

ซึ่งจะได้ว่า $$E_o - E = E_o \left[1 - \left[\frac{M - m}{M + m}\right]^2\right] \quad \ldots(2.7)$$

จากสมการ (2.6) และ (2.7) จะเห็นได้ว่า เมื่อนิวตรอนชนอย่างจังกับนิวเคลียสของไฮโดรเจน นิวตรอนจะถ่ายทอดพลังงานทั้งหมดให้นิวเคลียสของไฮโดรเจน สำหรับนิวไคลขนาดใหญ่ พลังงานทั้งหมดของนิวตรอนจะไม่สามารถถ่ายเทให้ได้ในการชนเพียงครั้งเดียว เช่นในกรณีชนกับนิวเคลียสของออกซิเจน สมการ (2.7) จะแสดงว่าเศษส่วนที่มากที่สุดของ $\frac{E_o - E}{E}$ ของพลังงานจลน์ของนิวตรอนที่จะถ่ายทอดให้ในการชนครั้งเดียวจะเป็น 22.2 % ซึ่งแสดงว่า นิวไคลที่มีเลขมวลน้อยจะสามารถลดความเร็วของนิวตรอนในการชนครั้งเดียวได้ดีกว่า นิวไคลที่มีเลขมวลมาก ๆ

สมการที่ (2.6) และ (2.7) จะใช้ได้กับการชนอย่างจัง แต่การชนโดยมากจะไม่เป็นการชนอย่างจัง ดังนั้นพลังงานที่เกิดถ่ายทอดไปให้นิวไคลของเป้า จะต้องน้อยกว่าค่าสูงสุดที่ได้จากสมการทั้งสอง

เมื่อนิวตรอนวิ่งผ่านไปในตัวกลางที่ทำให้ความเร็วของนิวตรอนลดลงโดยการชนของนิวตรอนเร็วกับนิวไคลของตัวกลางนั้น พลังงานที่ลดลงเฉลี่ยต่อการชน 1 ครั้ง ในรูปล็อกการิธึม (logarithmic energy decrement) จะมีค่าคงที่ ซึ่งมันไม่เกี่ยวข้องกับพลังงานของนิวตรอน แต่จะขึ้นอยู่กับมวลของนิวไคลของตัวกลางเท่านั้น ซึ่ง ค่าของพลังงานที่ลดลงโดยเฉลี่ยกำหนดว่า

$$\xi = \overline{\Delta \ln E} = \overline{\ln E_0 - \ln E}$$

$$= \overline{\ln \frac{E_0}{E}} = -\overline{\ln \frac{E}{E_0}} \qquad \text{.....(2.8)}$$

ซึ่งอาจเขียนได้เป็น $$\xi = \frac{1 + \alpha \ln \alpha}{1 - \alpha} \qquad \text{.....(2.9)}$$

เมื่อ $\alpha = \left((M-m)/(M+m)\right)^2$ ดังที่ใช้ในสมการ (2.5)

และถ้านิวไคลของตัวกลางที่ลดความเร็วของนิวตรอนมี n ชนิด และแต่ละชนิดมีภาคตัดขวางไมโครสโคปิคแห่งการกระเจิง σ_s และค่า ลอก ของพลังงานที่ลดลง ξ ดังนั้นค่า ξ สำหรับ n ชนิด จะเป็น

$$\frac{\sum_{i=1}^{n} \sigma_{s_i} N_i \xi_i}{\sum_{i=1}^{n} \sigma_{s_i} N_i} \qquad \text{.....(2.10)}$$

แต่โดยที่ $$\overline{\ln \frac{E}{E_0}} = -\xi$$

ดังนั้น $$\frac{E}{E_0} = e^{-\xi}$$

ซึ่งเศษส่วนของพลังงานของนิวตรอนที่ตกกระทบจะถ่ายทอดให้นิวเคลียสของเป้าระหว่างการชนกับตัวกลาง จะเป็น

$$f = 1 - \frac{\overline{E}}{E_0} = 1 - e^{-\xi} \qquad \text{.....(2.11)}$$

สำหรับไฮโดรเจนแล้ว ค่า $\xi = 1$ และพลังงานเฉลี่ยที่ถ่ายทอดระหว่างการชนกับนิวตรอนเร็วจะเป็น 63 % ของพลังงานจลน์ของนิวตรอน ในกรณีของคาร์บอน $\xi = 0.159$ พลังงานเฉลี่ยในการถ่ายทอดพลังงานจลน์ของนิวตรอนให้กับนิวเคลียสระหว่างการชนจะเป็นเพียง 14.7 % นิวเคลียสที่ถูกชน เมื่อได้รับพลังงานจากนิวตรอนแล้ว จะกลายเป็นอนุภาคที่ถูกทำให้เป็นไอออน และถ่ายทอดพลังงานในตัวกลางที่ถูกกลืนโดยการทำให้เกิดภาวะโลด และการเกิดออน

ระยะทางที่นิวตรอนเร็วเคลื่อนที่ไปในตัวกลางจนกระทั่งพลังงานลดลงกลายเป็นเทอร์มาลนิวตรอนจะขึ้นอยู่กับจำนวนครั้งของการชน และระยะทางระหว่างการชน ถึงแม้ว่าระยะทางที่แท้จริงในการเดินทางของนิวตรอนจะหักเหไปมาเนื่องจากการเลี้ยวเบนระหว่างการชน ระยะทางเฉลี่ยตามแนวเส้นตรงที่นิวตรอนเคลื่อนที่ได้ก็สามารถหาได้ และเรียกกันว่า "ระยะฟุ้งของนิวตรอนเร็ว" (fast diffusion length) หรือระยะทางที่ทำให้ช้าลง (slowing-down length)(กำลังสองของระยะฟุ้งของนิวตรอนเร็วเรียกว่า เฟอร์มิเอจ (Fermi age) ของนิวตรอน) ระยะทางที่เทอร์มาลนิวตรอนเคลื่อนที่ไปได้จนถูกจับ หรือดูดกลืน จะวัดด้วย "ระยะฟุ้งของเทอร์มาลนิวตรอน" (thermal diffusion length)ซึ่งกำหนดด้วยความหนาของตัวกลางที่ทำให้นิวตรอนช้าลง และจับนิวตรอนให้เหลือน้อยลงเป็นฟังชันของเอกโปเนนเชียล ดังนั้นการทำให้ช้าของนิวตรอนลดลงโดยสสารความหนา t ซึ่งมีระยะฟุ้งของเทอร์มาลนิวตรอนเป็น L ซม. จะหาได้จาก

$$n = n_0 e^{-t/L} \quad \text{.....(2.12)}$$

เมื่อ n_0 คือปริมาณนิวตรอนเมื่อเริ่มต้น

005137

substance	fast diffusion length (cm.)	thermal diffusion length (cm.)
H_2O	5.75	2.88
D_2O	11	171
Be	9.9	24
C (graphite)	17.3	50

ตารางที่ 2.3 (๒๑) แสดงระยะฟุ้งของนิวตรอนเร็ว และเทอร์มาลนิวตรอนในสารบางชนิด

i 17645372

ในกรณีที่ตำแหน่งเกิดนิวตรอนเป็นจุดที่ให้เทอร์มาลนิวตรอน n_o ต่อวินาที ในหัวกลางทรงกลม ที่ไม่มีสารที่จะแตกตัวได้ รัศมี R และระยะสูงของเทอร์มาลนิวตรอนเป็น L นิวตรอนฟลักซ์ที่หลุดรอดออกจากผิวจะเป็น

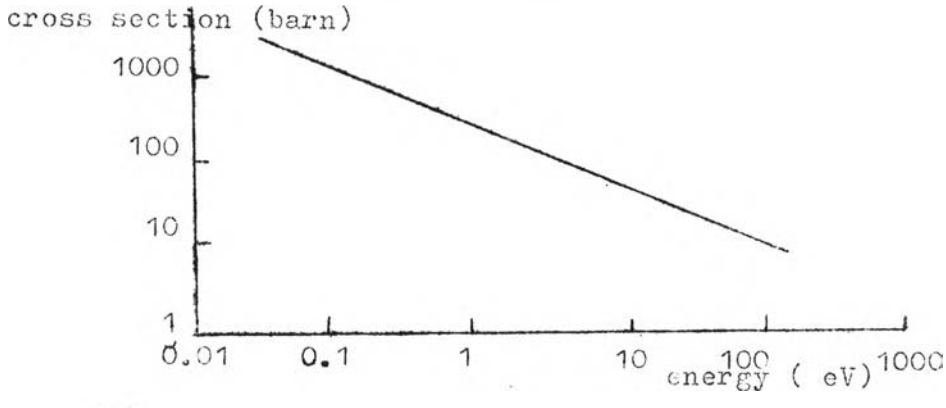
$$\phi = \frac{n_o}{4\pi Rl \sinh R/L} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (2.13)$$

และสำหรับ $L < R$

$$\phi = \frac{n_o}{2\pi Rl} e^{-R/L} \quad \ldots\ldots\ldots (2.14)$$

2.4.2 การดูดกลืนนิวตรอน

นิวตรอนเร็วจะลดพลังงานลงอย่างรวดเร็วโดยการชนแบบยืดหยุ่น ถ้าเกิดอันตรกริยากับสารที่มีเลขอะตอมต่ำ และเนื่อกลายมาเป็นเทอร์มาลนิวตรอนหรือใกล้เคียง ก็จะถูกจับโดยนิวเคลียสของตัวดูดกลืน ภาคตัดขวางแห่งการดูดกลืนสำหรับนิวไกล หลายชนิดพบว่าเป็นสัดส่วนผกผันกับรากที่สองของพลังงานจลน์ของนิวตรอนที่มีพลังงานต่ำนั้น $\sigma \propto \frac{1}{\sqrt{E}} \propto \frac{1}{v}$ .....(2.15)



รูปที่ 2.5 (ev) ภาคตัดขวางแห่งการดูดกลืนนิวตรอนของโบรอน แสดงความเที่ยงตรงของกฎการแปรผกผัน ระหว่างภาคตัดขวางกับความเร็ว สำหรับนิวตรอนพลังงานจาก 0.02 ถึง 1000 eV สมการของกราฟคือ $\sigma = 116 \sqrt{eV}$

2.5 นิวตรอนฟลักซ์

นิวตรอนฟลักซ์หมายถึง จำนวนนิวตรอนซึ่งเคลื่อนที่ในทิศทางต่างๆกัน วิ่งผ่านพื้นที่ 1 ตารางเซ็นติเมตร ในเวลา 1 วินาที

การหาค่านิวตรอนฟลักซ์ทำได้หลายวิธี สำหรับการทดลองครั้งนี้ใช้วิธี Neutron Activation

การหานิวตรอนฟลักซ์โดยวิธี Activation

ดังได้กล่าวแล้วว่า นิวตรอนนั้นครั้งแรกที่เกิดมาจะเป็นนิวตรอนเร็ว แต่เมื่อได้เคลื่อนที่ไปในตัวกลาง จะเกิดการชนกับอะตอมของตัวกลางทำให้ลดความเร็วลง จนในที่สุดกลายเป็นเทอร์มาลนิวตรอน ซึ่งมีพลังงานเฉลี่ยเท่ากับพลังงานของอะตอมของตัวกลาง ดังนั้นในตัวกลางใดๆก็ตามจะมีนิวตรอนพลังงานต่างๆกัน ตั้งแต่ นิวตรอนเร็ว จนถึงเทอร์มาลนิวตรอน

ถ้า ϕ = นิวตรอนฟลักซ์ทั้งหมดที่ทุกพลังงาน

$\phi(E)$ = นิวตรอนฟลักซ์ที่พลังงาน E

$\phi = \int \phi(E)\ dE$

$\sigma_a(E)$ = ภาคตัดขวางจุลภาคของการดูดกลืน (microscopic absorption cross section) ที่พลังงาน E

σ_a = ภาคตัดขวางจุลภาคของการดูดกลืนเฉลี่ย

N = จำนวนอะตอมของวัตถุที่อาบรังสี

ดังนั้นจะได้ว่า อัตราการเกิดปฏิกริยาดูดกลืนที่ทุกพลังงาน $= N\int \phi(E)\,\sigma_a(E)\ dE$ ..(2.16)

$$\sigma_a = \frac{\int \phi(E)\,\sigma_a(E)\ dE}{\int \phi(E)\ dE}$$

$$\phi\,\sigma_a = \int \phi(E)\,\sigma_a(E)\ dE \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2.17)$$

จาก (2.16) และ (2.17)

อัตราการเกิด ปฏิกริยาดูดกลืนที่ทุกพลังงาน $= N \phi \sigma_a = A_O$

นิวตรอนฟลักซ์ $\phi = \frac{A_O}{N \sigma_a}$

ในกรณีที่วัตถุอาบรังสีนิวตรอนเป็นเวลานานๆ จะเกิดการสมดุลย์ระหว่าง การเกิดกัมมันตรังสี และ การสลายตัวของกัมมันตรังสี

ให้ อัตราการแผ่รังสีของวัตถุเมื่ออาบนิวตรอนจนอิ่มตัว $= A_C$

เวลาที่อาบนิวตรอน $= t$

ค่าคงที่ของการสลายตัวของวัตถุ $= \lambda$

อัตราการแผ่รังสีเมื่ออาบนิวตรอนเป็นเวลา T $= A_T$

จะหาความสัมพันธ์ระหว่าง A_O กับ A_T ได้คือ

$$A_T = A_O (1 - e^{-\lambda T})$$

ในระหว่างที่นำวัตถุออกจากที่อาบรังสีมายังเครื่องวัด รังสีบางส่วนได้สลายตัวไป ดังนั้นค่าที่วัดได้จะน้อยกว่าค่าที่เป็นจริง ถ้าใช้เวลาไป t จะได้ว่า

$$A_T = A_O e^{-\lambda t} (1 - e^{-\lambda T})$$

จาก $\phi = \frac{A_O}{N \sigma_a}$

ดังนั้น $\phi = \frac{A_T}{N \sigma_a e^{-\lambda t} (1 - e^{-\lambda T})}$

เนื่องจากเครื่องมือที่ใช้วัดรังสีไม่สามารถวัดรังสีทุกตัวที่แผ่ออกมาจากสารกัมมันตรังสีได้ จึงต้องพิจารณาประสิทธิภาพของเครื่องวัดด้วย

ให้ E = ประสิทธิภาพของเครื่องวัดรังสี $= \frac{cps}{dps} \times 100$

cps. คือ จำนวนที่นับได้ต่อวินาที

dps. คือ จำนวนการสลายตัวต่อวินาที

$$dps = \frac{cps}{E} \times 100$$

ดังนั้น

$$\phi = \frac{cps \times 100}{E \; N \sigma_a \; e^{-\lambda t} \; (1 - e^{-\lambda T})}$$

ในธรรมชาติธาตุบางชนิดมีหลาย ไอโซโทป และจะมีบางไอโซโทปเท่านั้นที่เกิดปฏิกริยากับนิวตรอน ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึง percent abundance (E) ของไอโซโทปของวัตถุที่ทำปฏิกริยากับนิวตรอนด้วย

$$\phi = \frac{cps \times 100 \times 100}{E \; N \; B \; \sigma_a \; e^{-\lambda t} \; (1 - e^{-\lambda T})}$$

โดยค่า

$$N = \frac{\text{น้ำหนักเป็นกรัมของธาตุ} \times \text{อาโวกาโดรนัมเบอร์}}{\text{น้ำหนักอะตอมของธาตุ}}$$

2.6 เทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์

นิวตรอนที่มีพลังงานจาก 0 ถึง 1 eV ในช่วงนี้มีคุณสมบัติดังนี้คือ

2.6.1 ภาคตัดขวางแห่งการดูดกลืนของธาตุต่างๆ โดยมากจะเป็นปฏิภาคกลับกับรากที่สองของพลังงาน หรือเป็นปฏิภาคกลับ กับ ความเร็วของนิวตรอน

$$\sigma_a \propto \frac{1}{\sqrt{E}} \propto \frac{1}{V}$$

2.6.2 การกระจายของเทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์เป็นไปแบบ Maxwell Boltzmann distribution คือ

$$\phi(E) \propto E^{1/2} \; e^{-\frac{E}{KT}}$$

T = อุณหภูมิองศาสัมบูรณ์

K = ค่าคงที่

2.6.3 ชนิดของปฏิกริยามักเป็นแบบ (n, γ) ดังเช่น

$$^{103}_{45}Rh + ^{1}_{0}n \longrightarrow ^{104}_{45}Rh + \gamma$$

$$^{115}_{49}In + {}^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{116}_{49}In + \gamma$$

$$^{197}_{79}Au + {}^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{198}_{79}Au + \gamma$$

2.7 การหาค่า เทอร์มาล และ เอพิเทอร์มาล นิวตรอนฟลักซ์

วัตถุประสงค์ในการทดลองจะต้องการหาค่า เทอร์มาล และ เอพิเทอร์มาล นิวตรอนฟลักซ์ เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับรอยของอนุภาคแอลฟา ที่เกิดจากนิวตรอนกระทบกับฟิล์ม เซลลูโลสไนเตรท ที่เคลือบผิวหน้าทั้งสองด้วย ลิเธียมเตราบอเรต เนื่องจากนิวตรอนที่ได้จาก ต้นกำเนิด พลูโตเนียม-เบอริลเลียม แช่ในน้ำ และจากท่อลมของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู จะมีนิวตรอนพลังงานต่างๆ ปนกันอยู่ ตั้งแต่นิวตรอนเร็วจนถึง เทอร์มาลนิวตรอน จึงต้องแยกออกให้ได้ว่ารอยอนุภาคแอลฟา ส่วนใดที่เกิดจากเทอร์มาลนิวตรอน และส่วนใดที่เกิดจากเอพิเทอร์มาลนิวตรอน โดยการใช้แผ่นฟอยของธาตุที่อาบนิวตรอนไปอาบนิวตรอนโดยส่วนหนึ่งหุ้มและอีกส่วนหนึ่งไม่หุ้มแคดเมียม เนื่องจากแคดเมียมจะดูดกลืนเทอร์มาลนิวตรอนไว้ จึงเหลือแต่ เอพิเทอร์มาลนิวตรอนที่เข้าไปทำปฏิกริยากับแผ่นฟอยของธาตุที่อาบนิวตรอน และจากการวัดอัตราการแผ่รังสีของธาตุที่นำไปอาบนิวตรอนชนิดหุ้ม และ ไม่หุ้มด้วยแคดเมียม จะสามารถหา นิวตรอนฟลักซ์ ชนิด เทอร์มาล และ เอพิเทอร์มาลได้

ถ้า A_O = อัตราการแผ่รังสีของแผ่นฟอยที่ไม่หุ้มแคดเมียม

A_{cd} = อัตราการแผ่รังสีของแผ่นฟอยที่หุ้มด้วยแคดเมียม

$A_O - A_{cd}$ = อัตราการแผ่รังสีของแผ่นฟอยที่เกิดจากเทอร์มาลนิวตรอน

และค่า $A_O - A_{cd}$ คือค่า cps ในสมการ (2.18)

ฟลักซ์ที่คำนวณได้จะเป็นของเทอร์มาลนิวตรอน

ค่าอัตราส่วน $\frac{A_O}{A_{Cd}}$ เรียกว่า แคดเมียมเรโช (cadmium ratio)

และจาก แคดเมียมเรโช เมื่อทราบเทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์ จะหาค่า เอพิเทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์ได้จาก

$$\frac{\text{เทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์}}{\text{เอพิเทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์}} = \text{แคดเมียมเรโช}$$