บทที่ 2

อันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับสสาร

2.1 นิวตรอน

นิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุไฟฟ้า มีมวลเท่ากับ 1.67492×10^{-24} กรัม นิวตรอนอิสระเป็นอนุภาคไม่เสถียรสลายตัวให้อนุภาคโปรตรอน (proton) อิเล็กตรอน (electron) และแอนตินิวตริโน (antineutrino) พร้อมทั้งปล่อยพลังงานออกมาประมาณ 0.78 MeV นิวตรอนมีค่าครึ่งชีวิตประมาณ 12 วินาที ถ้าพิจารณาคุณสมบัติของนิวตรอนตามลักษณะของคลื่น นิวตรอนที่มีพลังงานประมาณ 1 eV จะมีความยาวคลื่นเดอบรอย(de Broglie)ขนาดเดียวกับขนาดของช่องว่างระหว่างอะตอมของผลึก สามารถหักเห (diffract) เมื่อผ่านผลึกคล้ายรังสีเอ็กซ์ จึงมีการสร้างนิวตรอนสเปกโตรมิเตอร์เพื่อประโยชน์ในการศึกษาโครงสร้างของผลึก

เนื่องจากนิวตรอนเป็นอนุภาคไม่มีประจุ จึงไม่สามารถวัดได้โดยตรงจากการทำให้ตัวกลางแตกตัวเป็นอิออน (ion) แต่ก็สามารถวัดได้โดยอาศัยปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่จะให้อนุภาคมีประจุออกมา เช่น ในการวัดนิวตรอนช้าจะทำได้โดยอาศัยปฏิกิริยา ^{10}B (n, α) ^{7}Li โดยให้นิวตรอนช้าผ่านเข้าในหัววัดที่บรรจุสารประกอบพวกโบรอน เช่น ในรูปของก๊าซโบรอนไตรฟลูออไรด์ (BF_3,boron trifluoride) อนุภาคแอลฟาที่เกิดขึ้นทำให้เกิดการแตกตัวเป็นประจุได้ดี ไอโซโทปโบรอน-10 มีค่าภาคตัดขวาง (cross section) สูงถึง 3840 บาร์น จึงมีโอกาสในการเกิดปฏิกิริยาสูง ส่วนนิวตรอนเร็วจะวัดได้โดยอาศัยปฏิกิริยาอื่น ๆ ที่มีผลผลิตของปฏิกิริยาเป็นอนุภาคมีประจุ เช่น ปฏิกิริยา (n,p), (n,f) เป็นต้น

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2 ต้นกำเนิดนิวตรอน [6,7,17]

ตามธรรมชาติมีนิวตรอนหนุ่งมาจากอวกาศภายนอกมาสู่โลก นิวตรอนอิสระที่ปรากฏอยู่ในบรรยากาศนั้น จะเกิดเนื่องจากอันตรกิริยา (interaction) ของอนุภาคปฐมภูมิในรังสีคอสมิก (ส่วนใหญ่คือโปรตรอนพลังงานสูง) กับนิวเคลียสของธาตุในบรรยากาศ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นออกซิเจนและไนโตรเจน นิวตรอนเหล่านี้ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้

สำหรับต้นกำเนิดนิวตรอนที่สำคัญซึ่งสามารถผลิตนิวตรอนออกมาใช้ประโยชน์ได้แก่

2.2.1 เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (nuclear reactor) ผลิตนิวตรอนออกมาจากปฏิกิริยาแตกตัวของธาตุหนักบางชนิด เช่น ยูเรเนียม-235

2.2.2 เครื่องกำเนิดนิวตรอน (neutron generator) ผลิตนิวตรอนออกมาจากปฏิกิริยารวมตัว (fusion reaction) กับตริเตียม (tritium) หรืออาจผลิตขึ้นจากการใช้อนุภาคที่ถูกเร่งออกมาจากไซโคลตรอน (Cyclotron) ที่มีพลังงานพอเหมาะยิงเข้าไปในเป้าจะได้นิวตรอนพลังงานเดียว ที่มีพลังงานต่างๆกัน เช่น ปฏิกิริยา $^{9}Be(d,n)^{10}B$ และ $^{7}Li(p,n)^{7}Be$

2.2.3 ธาตุกัมมันตรังสีที่แตกตัวได้เอง (self-fission) ธาตุหนักบางชนิดสามารถเกิดการแตกตัวได้เอง พร้อมทั้งให้นิวตรอนออกมา 2-3 ตัว ต้นกำเนิดที่สำคัญซึ่งสามารถให้นิวตรอนออกมามากพอที่จะนำไปใช้ประโยชน์ ได้แก่ แคลิฟอร์เนียม -252 (Californium-252, ^{252}Cf)

2.2.4 ต้นกำเนิดที่ผลิตนิวตรอนออกมาจากปฏิกิริยา (α,n) หรือ (γ,n) ต้นกำเนิดประเภทนี้ประกอบด้วย ต้นกำเนิดรังสีแอลฟา เช่น อเมอริเซียม -241 (Americium -241, ^{241}Am) โปโลเนียม -210 (Polonium -210, ^{210}Po) เรเดียม -226 (Radium -226, ^{226}Ra) หรือต้นกำเนิดรังสีแกมมาพลังงานสูง เช่น พลวง -124 (Antimony -124, ^{124}Sb) ผสมกับธาตุที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวตรอนตัวสุดท้ายในนิวเคลียสต่ำ เช่น เบอริลเลียม (Beryllium, Be)

ตัวอย่างต้นกำเนิดรังสีที่นิยมใช้ในการวัดนิวตรอนแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 [2,5]

ตารางที่ 2.1

ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนที่นิยมใช้กัน [2, 5]

ต้นกำเนิด	ชนิด	พลังงานนิวตรอนเฉลี่ย (MeV)	ครึ่งชีวิต	ยิลด์ นิวตรอน/วินาที.คูรี	คำอธิบาย
^{124}Sb-Be	แกมมา,นิวตรอน	0.024	60 วัน	1.6×10^{6}	-ครึ่งชีวิตสั้น -แกมมาแบคกราวด์สูง -พลังงานนิวตรอนต่ำ ข้อดีสำหรับ Thermalization -ปริมาตรใหญ่
^{124}Cm-Be	แกมมา,นิวตรอน	4	163 วัน	4×10^{6}	
^{244}Cm-Be	แกมมา,นิวตรอน	4	18.1 ปี	3×10^{6}	
^{238}Pu-Be	แกมมา,นิวตรอน	4	89 ปี	2.8×10^{6}	
^{241}Am-Be	แกมมา,นิวตรอน	4	458 ปี	2.0×10^{6}	-ครึ่งชีวิตยาว -การกำบังแกมมาแบคกราวด์ง่าย
^{226}Ra-Be	แกมมา,นิวตรอน	3.6	622 ปี	15×10^{6}	-ยิลด์นิวตรอนสูง -แกมมาแบคกราวด์สูง
^{239}Pu-Be	แกมมา,นิวตรอน	4.5	24360 ปี	2.0×10^{6}	
^{252}Cf	แกมมามาจากรุ่นลูก	2.3	2.65 ปี	4400×10^{6}	-ครึ่งชีวิตปานกลาง -ยิลด์นิวตรอนสูง -พลังงานต่ำและขนาดเล็ก ข้อดีสำหรับ Thermalization.

2.3 อันตรกิริยาของนิวตรอน (Neutron Interaction) [9,10,11]

นิวตรอนเป็นอนุภาคที่เป็นกลาง อันตรกิริยาของนิวตรอนเกิดขึ้นกับนิวเคลียสของอะตอม เพราะสามารถวิ่งผ่านอิเล็กตรอนที่อยู่รอบนอกนิวเคลียสได้ เมื่อนิวตรอนวิ่งผ่านตัวกลางจะเกิดอันตรกิริยาได้หลายแบบดังต่อไปนี้

2.3.1 การชนแบบยืดหยุ่น (elastic scattering) การชนกับนิวเคลียสของอะตอมตัวกลางแบบนี้ เป็นเพียงการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมกันเท่านั้น ระดับพลังงานของนิวเคลียสที่ถูกชนยังคงอยู่ในสภาวะปกติ (ground state) ส่วนนิวตรอนจะกระเจิง (scatter) ออกมา โดยเปลี่ยนทิศทางและความเร็วไป พลังงานจลน์รวมของนิวตรอนและนิวเคลียสมีค่าคงเดิม กล่าวคือ พลังงานรวมของนิวตรอนกับนิวเคลียสก่อนและหลังการชนมีค่าเท่ากัน บางครั้งเรียกการชนแบบนี้ว่า "Potential scattering" ใช้สัญลักษณ์ของปฏิกิริยาคือ (n,n)

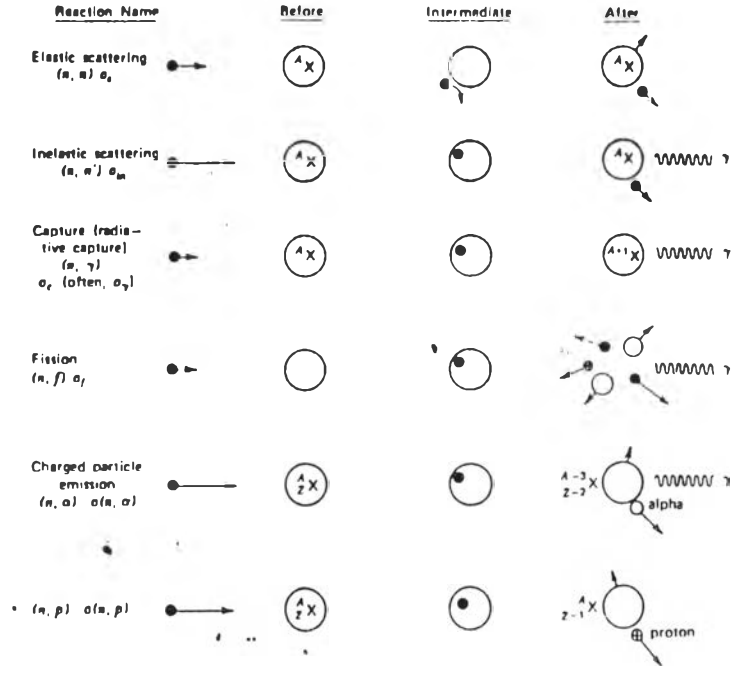
2.3.2 การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic scattering) การชนแบบนี้นิวตรอนจะรวมกับนิวเคลียสที่ถูกชนเป็นนิวเคลียสรวม (compound nucleus) แล้วนิวตรอนตัวใหม่จะถูกปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมา ดังนั้นพลังงานจลน์ส่วนหนึ่งก่อนชนและหลังชนมีค่าต่างกัน คือพลังงานจลน์รวมภายหลังการชนมีค่าลดลงเนื่องจากสูญเสียพลังงานจลน์ส่วนหนึ่งไปในรูปการปลดปล่อยรังสีแกมมา การชนแบบนี้เป็นแบบเทรชโฮลด์ (threshold reaction) คือนิวตรอนจะต้องมีพลังงานมากพอที่จะทำให้นิวเคลียสอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นได้ปฏิกิริยาแบบนี้ มักเกิดกับนิวตรอนพลังงานสูงประมาณ 1 MeV ขึ้นไป และเป็นปฏิกิริยาชนิดดูดกลืนพลังงาน (endothermic reaction) ใช้สัญลักษณ์ของปฏิกิริยาเป็น (n,n′)

2.3.3 การจับนิวตรอน (neutron capture) หรือเรียกว่า เรดิเอทีฟ-แคปเจอร์ (radiative capture) หรือปฏิกิริยาดูดกลืนนิวตรอน (neutron absoption reaction) เมื่อนิวตรอนวิ่งชนนิวเคลียส จะถูกนิวเคลียสจับไว้ ทำให้นิวเคลียสมีเลขมวลเพิ่มขึ้น 1 การรวมตัวของนิวตรอนกับนิวเคลียสจะมีรังสีแกมมาปลดปล่อยออกมาทันที (capture gamma-rays) หรือ neutron capture gamma-rays ปฏิกิริยาจะเป็นแบบปลดปล่อยพลังงาน (exothermic reaction) สัญลักษณ์ของปฏิกิริยาเป็น (n,γ) เช่น $^{1}H(n,\gamma)^{2}H$; $^{59}Co(n,\gamma)^{60}Co$

2.3.4 ปฏิกิริยาฟิชชัน หรือปฏิกิริยาแตกตัว (fission reaction) เมื่อนิวตรอนไปรวมกับนิวเคลียสของธาตุหนักบางชนิด เกิดเป็นนิวเคลียสรวมจากนั้นจะแบ่งตัวเป็น 2 ส่วน แตกออกมาได้นิวเคลียสที่มีเลขมวลประมาณครึ่งหนึ่งของนิวเคลียสเดิม พร้อมกับมีอนุภาคนิวตรอน 2-3 ตัวหลุดออกมาด้วย ซึ่งเป็นปฏิกิริยาให้พลังงานสำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์สัญลักษณ์ของปฏิกิริยาเป็น (n,f) ธาตุหนักที่เกิดปฏิกิริยาฟิชชันกับนิวตรอนได้แก่ ยูเรเนียม-235 ยูเรเนียม-238 พลูโตเนียม-239 เป็นต้น

2.3.5 ปฏิกิริยาปลดปล่ออนุภาคมีประจุ (charge particle emission) เมื่อนิวตรอนชนกับนิวเคลียสของธาตุบางชนิด ภายหลังการเกิดนิวเคลียสรวมแล้วจะปลดปล่ออนุภาคที่มีประจุออกมา เช่น อนุภาคแอลฟา โปรตอน นิวตรอน ดังกล่าวจะต้องมีพลังงานสูงกว่า 10 MeV ตัวอย่างของปฏิกิริยาได้แก่ $^{10}B(n,\alpha)^{7}Li$; $^{16}O(n,p)^{16}N$; $^{6}Li(n,\alpha)^{3}H$ เป็นต้น

2.3.6 ปฏิกิริยาผลิตนิวตรอน (neutron producing reaction) ปฏิกริยาแบบนี้เกิดกับนิวตรอนพลังงานสูงและเป็นชนิดดูดกลืนพลังงาน ผลของปฏิกิริยาก็คือจะได้นิวตรอนออกมามากกว่า 1 ตัว เช่น ปฏิกิริยา (n,2n) ; (n,3n) ปฏิกิริยา (n,2n) นับว่าเป็นปฏิกิริยาที่สำคัญในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูชนิดที่ใช้น้ำชนิดหนัก (heavy water) หรือ เบอริลเลียม เป็นส่วนประกอบเพราะ ^{2}H และ ^{9}Be มีนิวตรอนที่ยึดเกาะกันอย่างหลวมๆ จึงเกิดปฏิกิริยาให้นิวตรอนหลุดมาได้ง่าย ปฏิกิริยาอื่น เช่น $^{27}Al(n,2n)^{26}Al$ แผนภาพแสดงอันตรกิริยาแบบต่าง ๆ ของนิวตรอน แสดงไว้ในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 อันตรกิริยาของนิวตรอนแบบต่าง ๆ [24]

2.4 <u>ภาคตัดขวาง</u> (Cross section)[11,13,24]

ภาคตัดขวางจุลภาค (σ, microscopic cross section) คือโอกาส (probability) ที่นิวเคลียสจะทำอันตรกิริยากับอนุภาคเคลื่อนเข้าชน มีหน่วยเป็นบาร์น (barn) โดยที่ 1 บาร์น = 10^{-24} ตร.ซม.

ภาคตัดขวางจุลภาคของนิวเคลียสประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

$$\sigma = \sigma_s + \sigma_a \quad \text{---------- (2.1)}$$

เมื่อ σ_s = ภาคตัดขวางจุลภาคของการกระเจิง (microscopic scattering cross section)

σ = ผลรวมของภาคตัดขวางจุลภาคของปฏิกิริยาการชนแบบยืดหยุ่นและไม่ยืดหยุ่น

σ_a = ภาคตัดขวางจุลภาคของการดูดกลืน
(microscopic absorption cross section)
= ผลรวมของภาคตัดขวางจุลภาคของปฏิกิริยาการจับนิวตรอน
ที่ทำให้เกิดการแตกตัว การปลดปล่อยอนุภาคมีประจุและ
การผลิตนิวตรอน

ถ้าวัสดุที่ใช้เป็นเป้ามีจำนวนนิวเคลียส N ตัว/ลบ.ซม. ผลคูณของ N กับ σ เรียกว่า "ภาคตัดขวางมหภาค" (Σ, macroscopic cross section) มีหน่วยเป็น ซม.$^{-1}$

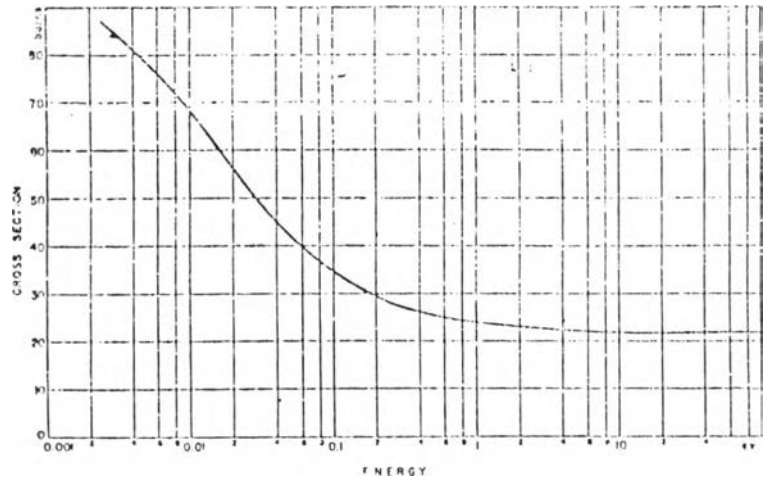
$$\Sigma = N\sigma \text{ ---------- (2.2)}$$

หรือกล่าวได้ว่าภาคตัดขวางมหภาคก็คือ โอกาสต่อหนึ่งหน่วยระยะทางที่จะเกิดปฏิกิริยาเมื่อมีอนุภาควิ่งเข้าไป

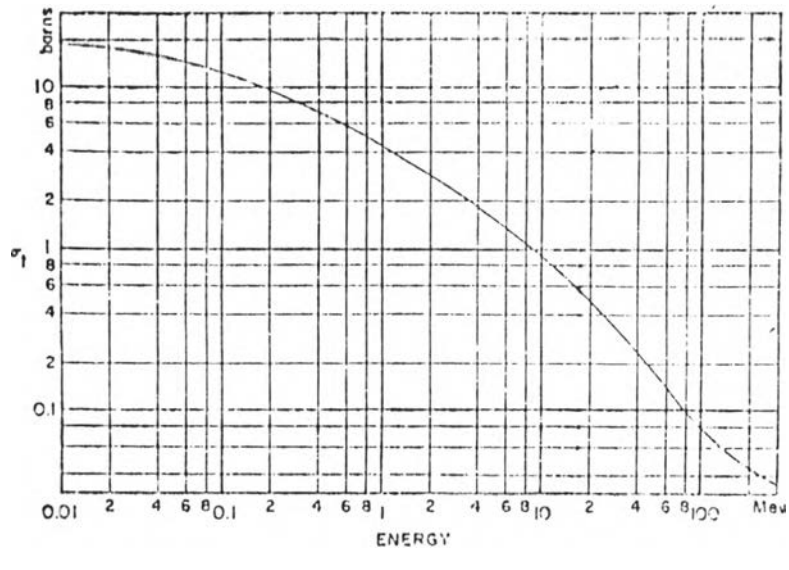
ภาคตัดขวางนี้สำหรับธาตุหนึ่งๆ จะมีค่าเปลี่ยนไปตามพลังงานของอนุภาคนิวตรอนที่วิ่งเข้าชน ดังนั้นสำหรับอนุภาคนิวตรอนที่มีพลังงานค่าหนึ่ง ก็จะมีภาคตัดขวางค่าหนึ่งสำหรับธาตุหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า differential cross section ($\sigma(E)$) ค่าเฉลี่ยของภาคตัดขวาง $\bar{\sigma}$ มีค่าเท่ากับ

$$\bar{\sigma} = \int_0^\infty \phi(E)\sigma(E)dE / \int_0^\infty \phi(E)dE \text{ --------- (2.3)}$$

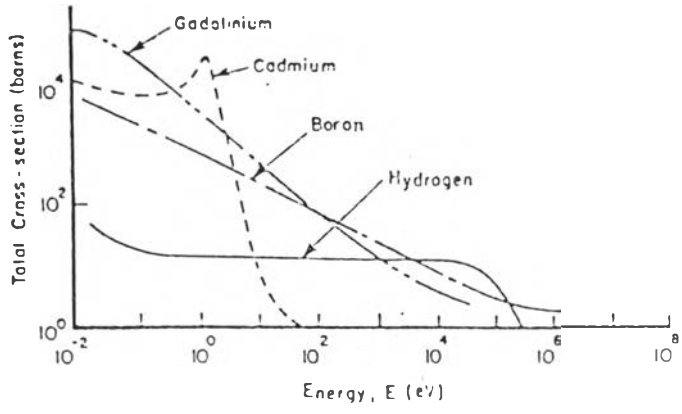
ภาคตัดขวางรวมต่ออะตอมไฮโดรเจนของน้ำในช่วงพลังงาน 0.002- 100 eV. และภาคตัดขวางรวมของนิวตรอนสำหรับไฮโดรเจนในช่วงพลังงาน 0.01 - 100 MeV. แสดงไว้ในกราฟรูปที่ 2.2 และ 2.3 [11] สำหรับค่าของภาคตัดขวางรวมของวัสดุดูดกลืนนิวตรอน (neutron absorber) บางชนิดที่จะใช้เป็นตัวกรอง (filter) นิวตรอนช้าแสดงไว้ในรูปที่ 2.4 [2,5]



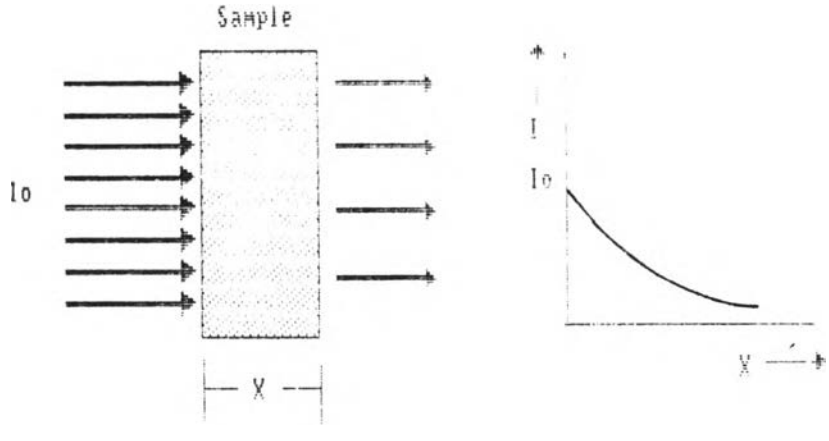
รูปที่ 2.2 ภาคตัดขวางรวมต่ออะตอมไฮโดรเจนของน้ำสำหรับพลังงานของนิวตรอนในช่วง 0.002 ถึง 100 eV [11]



รูปที่ 2.3 ภาคตัดขวางรวมของนิวตรอนสำหรับไฮโดรเจนในช่วงพลังงาน 0.01 ถึง 100 MeV [11]



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงค่าของภาคตัดขวางรวมของ neutron absorber บางชนิดที่จะใช้เป็น filter ที่พลังงานของนิวตรอนต่าง ๆ กัน [2,5]



รูปที่ 2.5 หลักการของวิธีการส่งผ่านรังสี [12,30]

เมื่อนิวตรอนวิ่งผ่านตัวกลางที่มีความหนา X มีค่าภาคตัดขวางต่อนิวตรอนเท่ากับ σ และมีความหนาแน่นอะตอม (atom density) เท่ากับ N อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความเข้มของนิวตรอนที่ทะลุผ่านออกไปโดยไม่เกิดอันตรกิริยาใด ๆ เลยสามารถคำนวนได้จาก

$$I_x = I_o \exp(-N\sigma X) \quad \text{---------- (2.4)}$$

เมื่อ I_x คือ ความเข้มของนิวตรอนที่ทะลุผ่านไปได้โดยไม่เกิดอันตรกิริยาใด ๆเลย

I_o คือ ความเข้มของนิวตรอนที่ตกกระทบตัวกลาง

2.5 การลดพลังงานของนิวตรอน (neutron moderation) [1,2,13,15]

การลดความเร็วหรือพลังงานของนิวตรอน ทำได้โดยให้นิวตรอนชนกับนิวเคลียสวัสดุบางชนิด วัสดุสำหรับลดความเร็วที่ดี ได้แก่วัสดุพวกที่ประกอบด้วยอะตอมของธาตุที่มีเลขมวลน้อย ๆ และมีค่าภาคตัดขวางของการดูดกลืนนิวตรอนน้อยด้วย วัสดุสำหรับลดความเร็วที่ดี ได้แก่ น้ำธรรมดา (H_2O) น้ำชนิดหนัก (D_2O) เบอริลเลียม คาร์บอน พาราฟิน โพลิเอธิลีน ฯลฯ

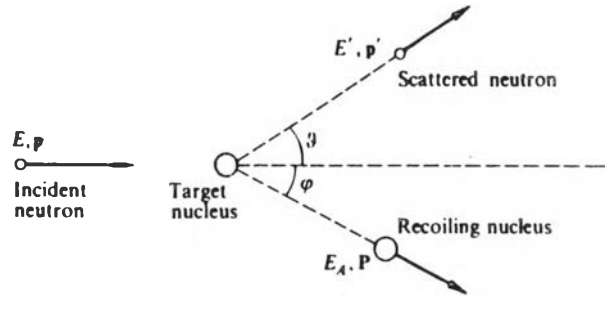
น้ำเป็นวัสดุสำหรับลดความเร็วนิวตรอนที่ดีตัวหนึ่ง ประกอบขึ้นด้วย ไฮโดรเจน และ ออกซิเจน โดยมีปริมาณของอะตอมของไฮโดรเจนมากกว่าออกซิเจนอยู่ในอัตราส่วน 2:1 ไฮโดรเจนเป็นธาตุที่มีเลขมวลน้อยที่สุดคือเท่ากับ 1 เป็นตัวการสำคัญในการลดความเร็วของนิวตรอน เมื่อนิวตรอนวิ่งไปชนกับนิวเคลียสของไฮโดรเจน นิวตรอนจะสูญเสียพลังงานให้กับนิวเคลียสของไฮโดรเจนที่ถูกชนเป็นจำนวนมาก และบางครั้งอาจจะสูญเสียพลังงานที่มีอยู่เกือบทั้งหมดให้กับนิวเคลียสของไฮโดรเจน ถ้าเกิดการชนกันอย่างจัง (head - on collision) ส่วนการชนกันระหว่างนิวตรอนกับนิวเคลียสของออกซิเจนมีความสำคัญน้อยในการลดความเร็วนิวตรอนเพราะว่าในการชนกันแต่ละครั้งนิวตรอนจะสูญเสียพลังงานให้กับนิวเคลียสของออกซิเจนเป็นจำนวนน้อยมาก ออกซิเจนถึงเป็นธาตุที่มีค่าภาคตัดขวางของการดูดกลืนนิวตรอนต่ำด้วย

เมื่อนิวตรอนชนแบบยืดหยุ่นกับนิวเคลียสที่หยุดนิ่ง นิวตรอนจะกระเจิงออกมา หลังงานจลน์ของนิวตรอนจะลดลงส่วนนิวเคลียสจะกระเจิงออกไป หลังงานจลน์ของนิวตรอน และนิวเคลียสภายหลังการชนสามารถคำนวณได้จากกฎอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัม

ถ้าให้ E,P และ E',P' เป็นพลังงานจลน์และโมเมนตัมของนิวตรอนก่อนและภายหลังการชนตามลำดับ

และ E_A , P เป็นพลังงานจลน์และโมเมนตัมของนิวเคลียสที่กระเจิงไปภายหลังถูกนิวตรอนชน

θ และ ϕ เป็นมุมที่นิวตรอนและนิวเคลียสกระเจิงออกไปจากแนวเดิม ดังในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การชนแบบยืดหยุ่นของนิวตรอน [11,12,18]

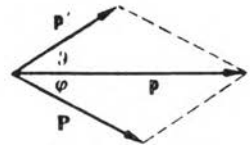
จากกฎอนุรักษ์พลังงานจะได้

$$E = E' + E_A \quad \text{---------- (2.5)}$$

และจากกฎอนุรักษ์โมเมนตัมได้

$$P = P' + P \quad \text{---------- (2.6)}$$

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.7 เวคเตอร์ของโมเมนตัม [11,12,18]

จากรูปที่ 2.5 จะได้

$$P^2 = P^2 + (P')^2 - 2PP' \cos\theta \quad \text{---------- (2.7)}$$

เพราะว่า $P = MV = M(2E_\Lambda/M)^{1/2}$

ดังนั้น $P^2 = 2ME_\Lambda$

ทำนองเดียวกัน $P^2 = 2mE$ และ $P'^2 = 2mE'$

(เมื่อ M,m เป็นมวลของนิวเคลียสและนิวตรอนตามลำดับ)

แทนค่า P ,p,p' ในสมการ (2.4) ได้

$$ME_\Lambda = mE + mE' - 2m(EE')^{1/2} \cos\theta \quad \text{----- (2.8)}$$

$$M/m\,(E_\Lambda) = E + E' - 2(EE')^{1/2} \cos\theta \quad \text{-------- (2.9)}$$

เนื่องจากค่า M/m = A (เลขมวลของนิวเคลียส)

ดังนั้น

019699

$$AE_A = E + E' - 2 (EE')^{1/2} \cos\theta \text{ -------- (2.10)}$$

แทนค่า $E_A = E - E'$ ลงในสมการ (2.10) จะได้

$$(A + 1) E' - 2 (EE')^{1/2} \cos\theta - (A - 1) E = \phi$$

ดังนั้น

$$E' = E/(A + 1)^2 [\cos\theta + (A^2 - \sin^2\theta)^{1/2}]^2 \text{ ---- (2.11)}$$

พิจารณาสมการ (2.10) ถ้า $\theta = \phi$ จะได้ $E = E'$ หมายถึงไม่มีการสูญเสียพลังงานนิวตรอนให้แก่นิวเคลียส ถ้า $\theta = \pi$ หรือ 180° ค่า E' มีค่าต่ำสุด (E'_{min})

(ยกเว้นกรณีที่นิวตรอนชนกับอะตอมไฮโดรเจนซึ่งจะกล่าวโดยเฉพาะต่อไป)

$$\text{เมื่อ } \phi = \pi, (E'_{min}) = [(A - 1)/(A + 1)]^2 E = \alpha E \text{ -- (2.12)}$$

$$\text{เมื่อ } \alpha = [(A - 1)/(A + 1)]^2 \text{ --------- (2.13)}$$

ค่า α เรียกว่า พารามิเตอร์ของการชน (collision parameter) ตารางที่ 2.2 ได้แสดงค่า α ของนิวเคลียสบางชนิดไว้

การชนของนิวตรอนกับนิวเคลียสไฮโดรเจนนั้น เนื่องจากนิวตรอนมีมวลใกล้เคียงกับนิวเคลียสของไฮโดรเจนมาก ดังนั้นจึงแตกต่างไปจากการชนของนิวตรอนกับนิวเคลียสอื่นๆ นิวตรอนที่กระเจิงออกไปภายหลังการชนกับนิวเคลียสไฮโดรเจนจะกระเจิงออกไปด้วยมุมที่ไม่เกิน $\pi/2$ เรเดียน หรือ 90° ดังนั้น $(E')_{min}$ ในกรณีนี้จะเกิดขึ้นเมื่อ $\phi = \pi / 2$

$$\text{เมื่อ } \theta = \pi / 2 \; ; \quad (E')_{min} = 0$$

ปรากฏว่าผลที่ได้มีค่าเท่ากับการแทนค่า $A = 1$ ลงในสมการ (2.11) ดังนั้นสมการที่ (2.12) จึงสามารถใช้ได้กับนิวเคลียสทุกชนิดรวมทั้งไฮโดรเจนด้วย

ค่าพลังงานเฉลี่ยของนิวตรอนที่กระเจิงออกมาจากการชนกับพวกนิวเคลียสเบารวมทั้งไฮโดรเจนสามารถประมาณได้จาก

$$E' = E/2\ (1 + \alpha) \text{ ---------- (2.14)}$$

เมื่อ E' เป็นพลังงานเฉลี่ยของนิวตรอนที่กระเจิงออกมาจากนิวเคลียส ดังนั้นค่าการสูญเสียพลังงานเฉลี่ย ($\Delta\bar{E}$) เป็น

$$\Delta\bar{E} = E - E'$$

$$= E/2\ (1 - \alpha) \text{ ---------- (2.15)}$$

และ $$\Delta\bar{E}/E = (1 - \alpha)/2 \text{ ---------- (2.16)}$$

ค่า $\Delta\bar{E}/E$ เรียกว่า average fractional energy loss

สมการ (2.14) ถึง (2.16) นั้นสามารถใช้ได้กับนิวเคลียสหนัก แต่ใช้ได้ในช่วงที่นิวตรอนมีพลังงานต่ำ ตัวอย่าง เช่น ในการชนของนิวตรอนกับนิวเคลียส ^{238}U สามารถใช้สมการ (2.14) ถึง (2.16) ได้ในช่วงพลังงานของนิวตรอนไม่เกิน 100 keV ถ้านิวตรอนพลังงานสูงขึ้นค่าพลังงานที่สูญเสียไปของนิวตรอนจะมีค่าน้อยกว่าที่คำนวนได้จากสมการ (2.15)

ถ้าพิจารณาค่า α จะเห็นว่ามีค่าตั้งแต่ 0 สำหรับไฮโดรเจน แล้วเพิ่มขึ้นตามลำดับเมื่อค่าเลขมวลเพิ่มขึ้นจนถึงค่าใกล้เคียง 1 แทนค่า α ลงในสมการ (2.16) จะเห็นว่า $\Delta\bar{E}/E = 1$ หมายความว่าในการชนระหว่างนิวตรอนกับไฮโดรเจนนั้นพลังงานของนิวตรอนจะลดลงประมาณครึ่งหนึ่งโดยเฉลี่ย เมื่อเลขมวลของนิวเคลียสมีค่าเพิ่มขึ้นค่า $\Delta\bar{E}/E$ จะลดลงจาก 1 ตัวอย่างเช่น สำหรับคาร์บอน (A = 12), $\Delta E/E = 0.14$ และยูเรเนียม (A = 238), $\Delta\bar{E}/E = 0.01$ หมายความว่า ในการชนนิวตรอนจะสูญเสียพลังงานไป 14% และ 1% ตามลำดับ สำหรับคาร์บอนและยูเรเนียม ด้วยเหตุนี้ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู จึงใช้สารประกอบของธาตุที่มีเลขมวลต่ำเป็นตัวหน่วงพลังงานนิวตรอน (moderator) เช่น น้ำ (H_2O) น้ำชนิดหนัก (D_2O) เป็นต้น

นิวตรอนอาจสูญเสียพลังงานไปโดยการชนแบบไม่ยืดหยุ่น แต่สำหรับการชนกับธาตุเบาพลังงาน เทรชโฮลด์ (threshold energy) สำหรับการชนแบบไม่ยืดหยุ่นมีค่าสูงมากและจะไม่เกิดขึ้นกับไฮโดรเจน ดังนั้นการลดพลังงานของนิวตรอนโดยการชนแบบไม่ยืดหยุ่นกับนิวเคลียสที่มีเลขมวลต่ำจึงไม่ค่อยสำคัญ สำหรับนิวเคลียสที่มีเลขมวลสูงๆ พลังงานเทรชโฮลด์ของการชนแบบไม่ยืดหยุ่นมีค่าต่ำ การชนแบบไม่ยืดหยุ่นจึงเป็นอันตรกิริยาที่สำคัญในการลดพลังงานของนิวตรอน

การลดพลังงานของนิวตรอนจะคำนวณในเทอมของ เลทาร์จี (lethargy) ซึ่งเลทาร์จี คือ เนเจอรัลล็อก (natural log, ln) ของอัตราส่วนพลังงานที่ลดลงเมื่อนิวตรอนวิ่งเข้าชนนิวเคลียสของตัวกลางและเป็นปริมาณที่ไม่มีหน่วยใช้แทนพลังงานของนิวตรอนที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเกิดการชน ซึ่งใช้สัญญลักษณ์ U

$$U = \ln (E_M/E) \text{ ---------- (2.17)}$$

เมื่อ E_M เป็นพลังงานสูงสุดของนิวตรอนในระบบ

E เป็นพลังงานนิวตรอน

จากสมการ (2.17) จะเห็นว่าเมื่อนิวตรอนพลังงานสูง ค่าเลทาร์จีจะต่ำ และเมื่อนิวตรอนลดพลังงานลง ค่าเลทาร์จีจะสูงขึ้น

เลทาร์จีของการชนแบบยืดหยุ่น

$$U = U_2 - U_1 = \ln (E_1/E_2) \text{ ---------- (2.18)}$$

U_1 เป็นเลทาร์จี ที่พลังงาน E_1 ซึ่งเป็นพลังงานของนิวตรอนก่อนที่จะมีการชนแล้วกระเจิงไป

U_2 เป็นเลทาร์จี ที่พลังงาน E_2

จากสมการ (2.16) สามารถเขียนใหม่ได้

$$E = E_M e^{-U} \text{ ---------- (2.19)}$$

จากสมการ (2.19) สามารถสร้างกราฟระหว่างพลังงานและเลทาร์จีได้กราฟรูปเอกซ์โพเนนเชียล (exponential) ตามรูปที่ 2.8

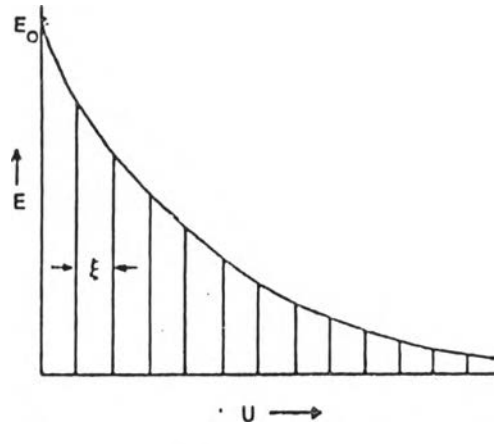
จากรูปที่ 2.8 เส้นตรงตามแนวราบห่างกัน ความสูงของเส้นแทนค่าเฉลี่ยของพลังงานของนิวตรอนที่สูญเสียไปในการชนดังนั้น จะสามารถเขียนในรูปสมการ

$$\xi = \ln (E_1/E_2)\ av \quad \text{---------- (2.20)}$$

เมื่อ E_1 เป็นพลังงานของนิวตรอนก่อนชน

E_2 เป็นพลังงานของนิวตรอนหลังชน

จากรูปที่ 2.8 และสมการ (2.20) จะเห็นว่านิวตรอนจะสูญเสียพลังงานเฉลี่ยเมื่อเริ่มมีการชนมากกว่าที่จะเสียไปในช่วงท้าย แสดงว่าขณะที่ความเร็วลดลง เลทาร์จีจะเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานและเลทาร์จี [11,12]

สำหรับจำนวนครั้งที่นิวตรอนเข้าชนนิวเคลียสแล้วพลังงานลดลง นั้นเมื่อนิวตรอนวิ่งเข้าชนนิวเคลียสของตัวกลาง นิวตรอนจะถูกลดพลังงานลง ดังนั้นถ้าให้ N แทนจำนวนครั้งที่นิวตรอนเข้าชนนิวเคลียสแล้วทำให้พลังงานของนิวตรอนมีพลังงานลดลงจาก E_1 เป็น E_2 ค่า N ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

$$N = [\ln(E_1/E_2)]/[\ln(E_1/E_2)_{av}] \text{ -------- } (2.21)$$

จากสมการ (2.20) และ (2.21) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$N = [\ln(E_1/E_2)]/\xi \text{ ---------- } (2.22)$$

ในการคำนวณหา ξ จะต้องคำนึงถึงโอกาสที่นิวตรอนจะมีพลังงานระหว่าง E_1 และ αE_1 ค่า ξ ของนิวเคลียสบางชนิดแสดงไว้ในตารางที่ 2.2

$$\xi = \int_{\alpha E_1}^{E_1} \ln(E_1/E_2)F(E)dE$$

$$= 1-[(A-1)^2/2A]\ln[(A+1)/(A-1)] \text{ ----- } (2.23)$$

ตารางที่ 2.2 พารามิเตอร์ในการชนกับนิวตรอนของนิวเคลียสบางชนิด [8,11]

นิวเคลียส	เลขมวล (mass no.)	α	ξ	N^{**}
ไฮโดรเจน (H)	1	0	1.000	18
น้ำ (H_2O)		-	0.920*	19
ดิวทิเลียม (D)	2	0.111	0.725	24
น้ำชนิดหนัก (D_2O)		-	0.509*	34
เบอริลเลียม (Be)	9	0.640	0.209	84
คาร์บอน (C)	12	0.716	0.158	111
ออกซิเจน (O)	16	0.779	0.120	146
โซเดียม (Na)	23	0.840	0.0825	-
เหล็ก (Fe)	56	0.931	0.0357	490
ยูเรเนียม (U)	238	0.983	0.00838	2087

* ค่าประมาณ

** จำนวนครั้งที่นิวตรอนชนกับธาตุและสารประกอบบางชนิดในการลดพลังงาน จาก 1 MeV ลงเหลือ 0.0253 eV

ตารางที่ 2.3 Slowing - down power ตัวกลางนิวตรอนสำหรับนิวเคลียสบางชนิด และ collision เฉลี่ยสำหรับ Thermalization [2,3,4,5]

นิวเคลียส	Average Logarithmic energy decrement, ξ	ภาคตัดขวางการดูดกลืนที่ 0.025eV บาร์น	ภาคตัดขวางการกระจายที่ 100eV σ_s, บาร์น	พลังงานความเร็วลดลง, $\xi\sigma_s$	พลังงานความเร็วลดลงต่อหน่วยน้ำหนัก	การชนจำนวนครั้งเฉลี่ยสำหรับ Thermalization	
						ΔMeV--> 0.025eV	100eV-> 0.025eV
ไฮโดรเจน	1.000	0.332	20	20	20	19	8
คาร์บอน	0.158	0.0034	4.6	0.727	0.061	120	53
ออกซิเจน	0.120	<0.0002	3.8	0.456	0.029	159	70
แมกนีเซียม	0.080	0.063	3.5	0.280	0.012	238	105
ซิลิกอน	0.070	0.16	2.5	0.175	0.006	272	120
เหล็ก	0.035	2.53	13	0.455	0.008	545	239
นิเกิล	0.032	4.8	17	0.544	0.009	596	262

2.6 พลังงานของเทอร์มาลนิวตรอน [11,15]

เมื่อนิวตรอนเร็วชนกับอะตอมของตัวกลาง ในที่สุดจะมีพลังงานลดลงจนเป็นนิวตรอนช้า ซึ่งจะมีพลังงานต่ำเท่ากับพลังงานของอนุภาคหรืออะตอมของตัวกลางที่อุณหภูมินั้นๆ จึงเรียกว่า "เทอร์มาลนิวตรอน (thermal neutron)" พลังงานของเทอร์มาลนิวตรอนมีการกระจายแบบแมกซ์เวลล์ (Maxwellian distribution) กับพลังงานจลน์ของอนุภาคอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซ ตามสมการดังนี้ คือ [6]

$$N(E) = \frac{2\pi N E^{1/2} e^{-E/KT}}{(\pi KT)^{3/2}} \quad \text{---------- (2.24)}$$

เมื่อ N (E) เป็นจำนวนนิวตรอนที่พลังงานใด ๆ ต่อหน่วยปริมาตร

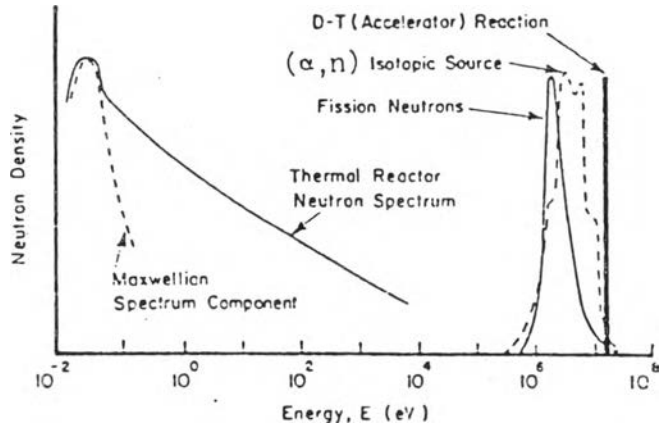
N เป็นจำนวนนิวตรอนรวมทั้งหมดต่อหน่วยปริมาตร

K เป็น Boltzmann's constant มีค่าเท่ากับ 8.617×10^{-6} eV/K

T เป็นอุณภูมิของตัวกลางเป็นเคลวิน (Kelvin,K)

ที่อุณภูมิ 20 องศาเซลเซียส หรือ เท่ากับ 293 เคลวิน เทอร์มาลนิวตรอนมีพลังงานมากที่สุด (most probable energy) เท่ากับ 0.0253 อิเล็กตรอนโวลต์ (electron volt , eV)

ดังที่กล่าวมาแล้วหลังจากที่นิวตรอนเร็วสูญเสียพลังงานส่วนใหญ่ไปในการชนแบบยืดหยุ่นกับอะตอมของไฮโดรเจน ผลที่เกิดขึ้นก็คือ จำนวนนิวตรอนช้าที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ก็เกิดจากการที่นิวตรอนเร็วชนกับไฮโดรเจนต้นกำเนิดจะปลดปล่อยนิวตรอนออกมาทุกทิศทางอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา ดังนั้นการวัดความเข้มของนิวตรอนช้าที่เกิดขึ้น หรือความเข้มของนิวตรอนเร็วที่ลดลง สามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดความชื้นของวัสดุต่าง ๆ ได้



รูปที่ 2.9 กราฟแสดงสเปกตรัม พลังงานของนิวตรอนเร็วที่ปลดปล่อยจากต้นกำเนิดนิวตรอนแบบต่าง ๆ และสเปกตรัมของเทอร์มาลนิวตรอน [2.5]