หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

อันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับสสาร

2.1 นิวตรอน

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

เนื่องจากนิวตรอนเป็นอนุภาคไม่มีประจุ จึงไม่สามารถวัดได้โดยตรงจากการทำให้ตัวกลางแตกตัวเป็นอิออน(ion) แต่ก็สามารถวัดได้โดยใช้ปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่จะให้อนุภาคมีประจุออกมา เช่นในการวัดนิวตรอนช้าจะทำได้โดยใช้ปฏิกิริยา $^{10}B(n,\alpha)^{7}Li$ โดยให้นิวตรอนช้าผ่านเข้าในหัววัดที่บรรจุสารประกอบพวกโบรอน เช่นในรูปของก๊าซโบรอนไตรฟลูออไรด์ (BF_3, Boron trifluoride) อนุภาคแอลฟาที่เกิดขึ้นทำให้เกิดการแตกตัวเป็นประจุได้ดี ไอโซโทปโบรอน-10 มีค่าภาคตัดขวางสูง(cross section) ถึง 3840 บาร์น จึงมีโอกาสในการเกิดปฏิกิริยาสูง ส่วนนิวตรอนเร็วจะวัดได้โดยการหาค่าการแตกตัวเป็นอิออนที่เกิดจากการชนของนิวตรอนเร็ว กับสารประกอบบางชนิด เช่นสารประกอบของไฮโดรเจน (hydrogeneous material) แล้วเกิดปฏิกิริยา (n,p) เป็นต้น

2.2 ต้นกำเนิดนิวตรอน(1,2)

ตามธรรมชาติมีนิวตรอนพุ่งมาจากอวกาศภายนอกมาสู่โลกบ้าง นิวตรอนอิสระที่ปรากฏอยู่ในบรรยากาศนั้น จะเกิดเนื่องจากอันตรกิริยา (Interaction) ของอนุภาคปฐมภูมิในรังสีคอสมิก(ส่วนใหญ่คือโปรตอนพลังงานสูง) กับนิวเคลียสของธาตุในบรรยากาศ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นออกซิเจนและไนโตรเจน นิวตรอนเหล่านี้ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้

สำหรับต้นกำเนิดนิวตรอนที่สำคัญ ซึ่งสามารถผลิตนิวตรอนออกมาใช้เป็นประโยชน์ ได้แก่

2.2.1 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู (nuclear reactor) ผลิตนิวตรอนออกมาจากปฏิกิริยาแตกตัวของธาตุหนักบางชนิด เช่น ยูเรเนียม-235

2.2.2 เครื่องกำเนิดนิวตรอน (neutron generator) ผลิตนิวตรอนออกมาจากปฏิกิริยารวมตัว (fusion reaction) ของธาตุเบาบางชนิด เช่น ปฏิกิริยารวมตัวระหว่างดิวทีเรียม (deuterium)

กับตริเตียม (tritium) หรืออาจผลิตขึ้นจากการใช้อนุภาคที่ถูกเร่งออกมาจากไซโคลตรอน (cyclotron) ที่มีพลังงานพอเหมาะยิงเข้าไปในเป้า จะได้นิวตรอนพลังงานเดียว ที่มีพลังงานต่างๆกัน เช่น ปฏิกิริยา $^{9}Be(d,n)^{10}B$ และ $^{7}Li(p,n)^{7}Be$

2.2.3 ธาตุกัมมันตรังสีที่แตกตัวได้เอง (self fission) ธาตุหนักบางชนิดสามารถเกิดการแตกตัวได้เอง พร้อมทั้งให้นิวตรอนออกมา ต้นกำเนิดที่สำคัญซึ่งสามารถให้นิวตรอนออกมามากพอที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้ 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)

ตัวอย่างต้นกำเนิดที่นิยมใช้ในงานภาคสนามแสดงไว้ในตารางที่ 2.1(3)

ตาราง 2.1

ต้นกำเนิดนิวตรอนที่นิยมใช้ในงานภาคสนาม

ต้นกำเนิด	ครึ่งชีวิต,ปี	ยีลด์,นิวตรอน/วินาที.คูรี	ปริมาณรังสีที่ปลดปล่อยออกมา
^{210}Po-Be	0.379	3.0×10^{6}	เล็กน้อย
^{239}Pu-Be	24300	1.6×10^{6}	แกมมา=0.13 MeV(100%)
^{226}Ra-Be	1620	1.7×10^{7}	แกมมาปริมาณมาก
^{241}Am-Be	458	2.7×10^{6}	เล็กน้อย
^{124}Sb-Be	0.164	1.0×10^{6}	แกมมา=0.60 MeV(100%)
			แกมมา=1.71 MeV(46%)
			แกมมา=2.11 MeV(10%)
^{252}Cf	2.6	5.0×10^{12} นิวตรอน/วินาที.กรัม	แกมมาจากรุ่นลูก

2.3 <u>อันตรกิริยาของนิวตรอน</u> (Neutron Interaction)(4,5,6)

นิวตรอนเป็นอนุภาคที่เป็นกลาง อันตรกิริยาของนิวตรอนเกิดขึ้นกับนิวเคลียสของอะตอม เพราะสามารถวิ่งผ่านอิเล็กตรอนที่อยู่รอบนอกนิวเคลียสได้ เมื่อนิวตรอนวิ่งผ่านตัวกลางจะเกิดอันตรกิริยาได้หลายแบบดังต่อไปนี้

2.3.1 การชนแบบยืดหยุ่น (elastic scattering) การชนกับนิวเคลียสของอะตอมตัวกลางแบบนี้ เป็นเพียงการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมกันเท่านั้น นิวเคลียสที่ถูกชนยังคงอยู่ในสภาวะปกติ(ground state) ส่วนนิวตรอนจะกระเจิง (scatter) ออกมา โดยเปลี่ยนทิศทางและความเร็วไป พลังงานจลน์รวมของนิวตรอนและนิวเคลียสมีค่าคงเดิม กล่าวคือ พลังงานรวมของนิวตรอนกับนิวเคลียสก่อน และหลังการชนมีค่าเท่ากัน บางครั้งเรียกการชนแบบนี้ว่า "potential scattering" ใช้สัญญลักษณ์ของปฏิกิริยาคือ (n,n)

2.3.2 การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic scattering) การชนแบบนี้นิวตรอนจะรวมกับนิวเคลียสที่ถูกชนเป็นนิวเคลียสรวม (compound nucleus) แล้วนิวตรอนตัวหนึ่งจะถูกปลดปล่อยออกมาโดยที่นิวเคลียสอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้น (excited state) เมื่อกลับสู่สภาวะปรกติก็จะปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมา ดังนั้นพลังงานจลน์ก่อนและหลังชนมีค่าต่างกัน คือพลังงานจลน์รวมภายหลังการชนมีค่าลดลงเนื่องจากสูญเสียพลังงานจลน์ส่วนหนึ่งไปในรูปการปลดปล่อยรังสีแกมมา การชนแบบนี้เป็นแบบเทรชโฮลด์ (threshold reaction) คือนิวตรอนจะต้องมีพลังงานมากพอที่จะทำให้นิวเคลียสอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นได้ ปฏิกิริยาแบบนี้มักเกิดกับนิวตรอนพลังงานสูงประมาณ 1 MeV ขึ้นไป และเป็นปฏิกิริยาชนิดดูดกลืนพลังงาน (endothermic reaction) ใช้สัญญลักษณ์ของปฏิกิริยาเป็น (n,n')

2.3.3 การจับนิวตรอน (neutron capture) หรือเรียกว่า "radiative capture" หรือปฏิกิริยาดูดกลืนนิวตรอน(neutron absorption reaction) เมื่อนิวตรอนวิ่งชนนิวเคลียสจะถูกนิวเคลียสจับไว้ ทำให้นิวเคลียสมีเลขมวลเพิ่มขึ้น 1 การรวมตัวของนิวตรอนกับนิวเคลียสจะมีรังสีแกมมาปลดปล่อยออกมา (capture gamma-rays หรือ neutron capture gamma) ปฏิกิริยาจะเป็นแบบปลดปล่อยพลังงาน (exothermic reaction) สัญญลักษณ์ของปฏิกิริยาเป็น (n,ɣ) เช่น $^{1}H(n,\gamma)^{2}H$; $^{59}Co(n,\gamma)^{60}Co$

2.3.4 ปฏิกิริยาฟิชชัน หรือปฏิกิริยาแตกตัว (fission reaction) เมื่อนิวตรอนไปรวมกับนิวเคลียสของธาตุหนักบางชนิดเกิดเป็นนิวเคลียสรวม จากนั้นจะแบ่งตัวเป็น 2 ส่วนแตกออกมาได้นิวเคลียสที่มีเลขมวลประมาณครึ่งหนึ่งของนิวเคลียสเดิม พร้อมกับมีอนุภาคนิวตรอน 2-3 ตัวหลุดออกมาด้วยซึ่งเป็นปฏิกิริยาให้พลังงานสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู สัญญลักษณ์ของปฏิกิริยาเป็น (n,f) ธาตุหนักที่เกิดปฏิกิริยาฟิชชันได้กับนิวตรอนได้แก่ ยูเรเนียม-235 ยูเรเนียม-238 และพลูโตเนียม-239 เป็นต้น

2.3.5 ปฏิกิริยาปลดปล่อยอนุภาคมีประจุ(charged particle emission) เมื่อนิวตรอนชนกับนิวเคลียสของธาตุบางชนิด ภายหลังการเกิดนิวเคลียสรวมแล้วจะปล่อยอนุภาคที่มีประจุออกมา 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) ปฏิกิริยาแบบนี้เกิดกับนิวตรอนพลังงานสูงและเป็นชนิดดูดกลืนพลังงาน ผลของปฏิกิริยาก็คือจะได้นิวตรอนออกมามากกว่า 1 ตัวเช่น ปฏิกิริยา (n,2n) ; (n,3n) ปฏิกิริยา (n,2n) นับว่าเป็นปฏิกิริยาที่สำคัญในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูชนิดที่ใช้น้ำชนิดหนัก (heavy water) หรือเบอริลเลียม เป็นส่วนประกอบเพราะ ^{2}H และ ^{9}Be มีนิวตรอนที่ถูกยึดเหนี่ยวอยู่อย่างหลวมๆ (loosely bound) ในนิวเคลียส กล่าวคือพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวตรอนตัวสุดท้ายมีค่าต่ำ จึงเกิดปฏิกิริยาให้นิวตรอนหลุดออกมาได้ง่าย ปฏิกิริยาอื่นเช่น $^{27}Al(n,2n)^{26}Al$

อันตรกิริยาแบบต่างๆของนิวตรอน แสดงไว้ในรูป 2.1 (6)

2.4 <u>ภาคตัดขวาง</u> (cross section) (6,8,9)

ภาคตัดขวางจุลภาค (σ, microscopic cross section) คือ โอกาส (probability) ที่นิวเคลียสจะเกิดปฏิกิริยากับอนุภาคที่วิ่งเข้าชน มีหน่วยเป็น บาร์น(barn) โดยที่ 1 บาร์น = 10^{-24} ตร.ซม.

ภาคตัดขวางจุลภาคของนิวเคลียสประกอบด้วย 2 ส่วนคือ

$$\sigma = \sigma_s + \sigma_a$$

เมื่อ σ_s = ภาคตัดขวางจุลภาคของการกระเจิง

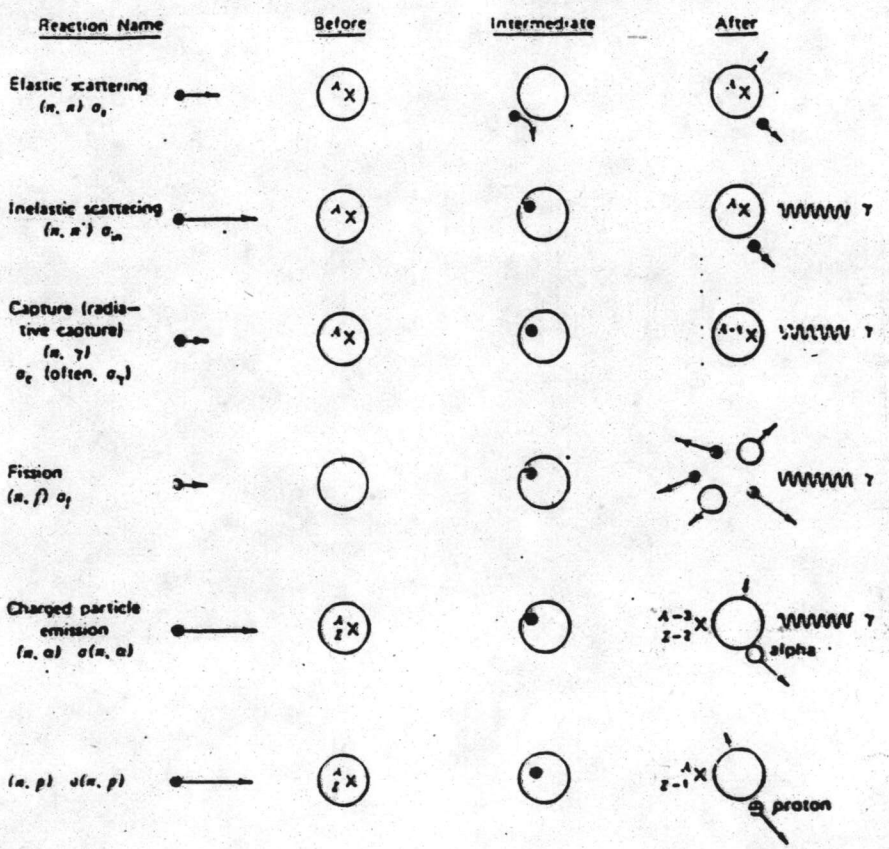
(microscopic scattering cross section)

= ผลรวมของภาคตัดขวางจุลภาคของปฏิกิริยาการชนแบบยืดหยุ่นและไม่ยืดหยุ่น

σ_a = ภาคตัดขวางจุลภาคของการดูดกลืน

(microscopic absorption cross section)

= ผลรวมของภาคตัดขวางจุลภาคของปฏิกิริยาการจับนิวตรอน การแตกตัว การปลดปล่อยอนุภาคมีประจุและการผลิตนิวตรอน



รูป 2.1 อันตรกิริยาของนิวตรอนแบบต่างๆ

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

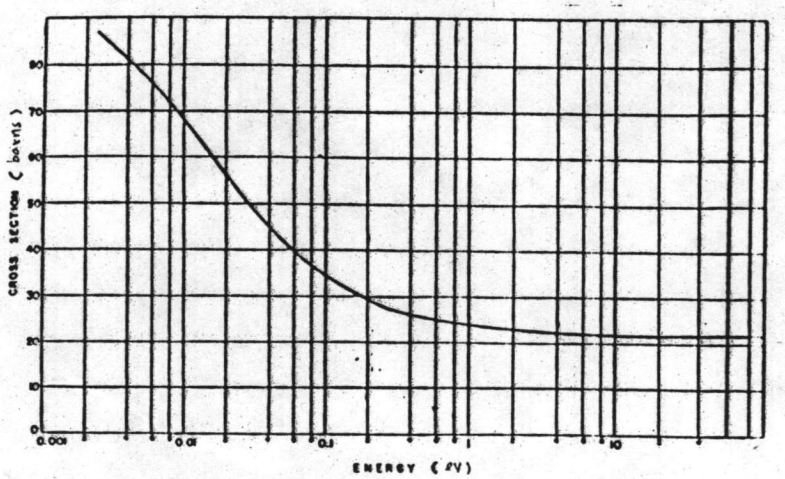
$$\Sigma = N\sigma$$

หรือกล่าวได้ว่าภาคตัดขวางมหภาคก็คือ โอกาสต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของนิวเคลียสที่จะเกิดปฏิกิริยาเมื่อมีอนุภาควิ่งเข้าไปชน

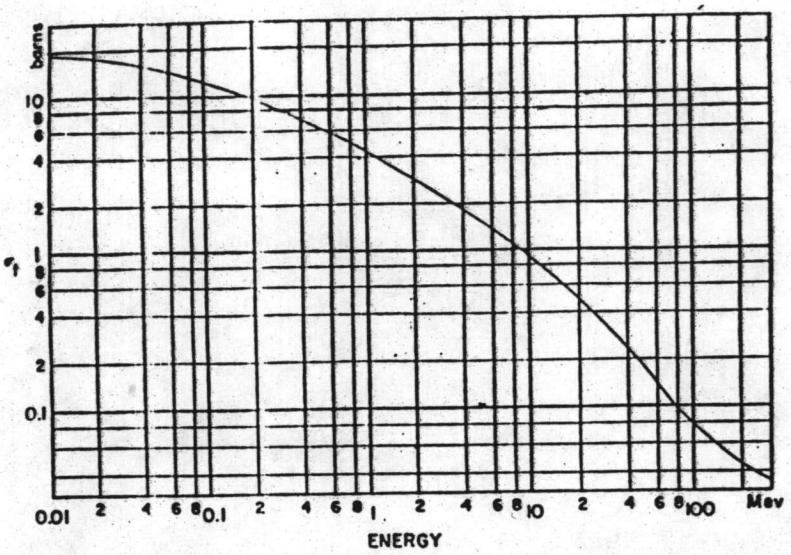
ภาคตัดขวางนี้สำหรับธาตุหนึ่งๆ จะมีค่าเปลี่ยนไปตามพลังงานของอนุภาคที่วิ่งเข้าชน ดังนั้นสำหรับอนุภาคที่มีพลังงานค่าหนึ่ง ก็จะมีภาคตัดขวางค่าหนึ่งสำหรับธาตุหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า differential cross section ($\sigma(E)$) ค่าเฉลี่ยของภาคตัดขวางมีค่าเท่ากับ

$$\bar{\sigma} = \int_0^\infty \phi(E)\,\sigma(E)\,dE \;/\; \int_0^\infty \phi(E)\,dE$$

ภาคตัดขวางรวมต่ออะตอมไฮโดรเจนของน้ำในช่วงพลังงาน ๐.๐๐๒-๑๐๐ eV. และภาคตัดขวางรวมของนิวตรอนสำหรับไฮโดรเจนในช่วงพลังงาน ๐.๐๑-๑๐๐ MeV. แสดงในกราฟรูป 2.2 และ 2.3 (7)



รูป 2.2 ภาคตัดขวางรวมต่ออะตอมไฮโดรเจนของน้ำ
สำหรับพลังงานของนิวตรอนในช่วง ๐.๐๐๒ ถึง ๑๐๐ eV



รูป 2.3 ภาคตัดขวางรวมของนิวตรอนสำหรับไฮโดรเจน
ในช่วงพลังงาน 0.01 ถึง 100 eV

2.5 <u>วัสดุสำหรับลดความเร็ว</u> (moderator) (8,10)

การลดความเร็วหรือพลังงานของนิวตรอน ทำได้โดยให้นิวเคลียสทำอันตรกิริยาหรือชนกับวัสดุบางชนิด วัสดุสำหรับลดความเร็วที่ดี ได้แก่วัสดุพวกที่ประกอบด้วยอะตอมของธาตุที่มีเลขมวลน้อยๆ และมีค่าภาคตัดขวางของการดูดกลืนนิวตรอนน้อยด้วย วัสดุสำหรับลดความเร็วที่ดีได้แก่น้ำธรรมดา(H_2O) น้ำชนิดหนัก (D_2O) เบอริลเลียม คาร์บอน พาราฟิน โพลิเอธิลีน ฯลฯ

น้ำเป็นวัสดุสำหรับลดความเร็วนิวตรอนที่ดีตัวหนึ่ง ประกอบขึ้นด้วยไฮโดรเจนและออกซิเจน โดยมีปริมาณของอะตอมของไฮโดรเจนมากกว่าออกซิเจนอยู่ในอัตราส่วน 2:1 ไฮโดรเจนเป็นธาตุที่มีเลขมวลน้อยที่สุดคือเท่ากับ 1 เป็นตัวการสำคัญในการลดความเร็วของนิวตรอน เมื่อนิวตรอนวิ่งไปชนกับนิวเคลียสของไฮโดรเจน นิวตรอนจะสูญเสียพลังงานให้กับนิวเคลียสของไฮโดรเจนที่ถูกชนเป็นจำนวนมาก และบางครั้งอาจจะสูญเสียพลังงานที่มีอยู่เกือบทั้งหมดให้กับนิวเคลียสของไฮโดรเจน ถ้าเกิดการชนกันอย่างจัง (head-on collision) ส่วนการชนกันระหว่างนิวตรอนกับนิวเคลียสของออกซิเจนมีความสำคัญน้อยในการลดความเร็วนิวตรอน เพราะว่าในการชนกันแต่ละครั้งนิวตรอนจะสูญเสียพลังงานให้กับนิวเคลียสของออกซิเจนเป็นจำนวนน้อยมาก ออกซิเจนยังเป็นธาตุที่มีค่าภาคตัดขวางของการดูดกลืนนิวตรอนต่ำด้วย

2.6 <u>นิวตรอนฟลักซ์</u> (neutron flux) (4,5)

หมายถึงจำนวนนิวตรอนซึ่งเคลื่อนที่ในทิศทางต่างๆกัน และผ่านพื้นที่ 1 ตร.ซม. ในเวลา 1 วินาที ถ้านิวตรอนเหล่านี้มีความเร็วเท่ากันหมดทุกตัว นิวตรอนฟลักซ์จะมีค่าเท่ากับความหนาแน่นของนิวตรอน ณ ตำแหน่งหนึ่งคูณด้วยความเร็วของนิวตรอน ค่าฟลักซ์อันนี้เรียกว่า ฟลักซ์ทั้งหมด (total flux)

ในกรณีที่นิวตรอนมีความเร็วไม่เท่ากันทุกตัว และ N(v) เป็นความหนาแน่นของนิวตรอนในหนึ่งช่วงความเร็วที่ v นิวตรอนฟลักซ์ในหนึ่งหน่วยช่วงความเร็วที่ v นั้นมีค่าเป็น

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

ดังนั้น $\phi(v)dv$ จะเป็นฟลักซ์ของนิวตรอนที่มีความเร็วอยู่ในช่วง v และ v+dv

ฟลักซ์ทั้งหมดของนิวตรอนที่มีความเร็วต่างๆกันมีค่าเท่ากับ

$$\phi_{tot} = \int_0^\infty \phi(v)dv$$

ความเร็วเฉลี่ยของนิวตรอนมีค่าเท่ากับ

$$\bar{v} = \int_0^\infty vN(v)dv \Big/ \int_0^\infty N(v)dv$$

ฟลักซ์ทั้งหมดมีค่าเป็น $\phi_{tot} = N\bar{v}$

เมื่อ $N = \int_0^\infty N(v)dv$ = ความหนาแน่นของนิวตรอนทุกค่าความเร็ว

นั่นคือนิวตรอนฟลักซ์มีค่าเท่ากับความหนาแน่นของนิวตรอน ณ ตำแหน่งหนึ่ง คูณด้วยความเร็วเฉลี่ยของนิวตรอน

2.7 การกระเจิงของนิวตรอน (6,7,8,11)

ในการหาปริมาณความชื้นในวัสดุโดยใช้รังสีนิวตรอนนั้น หลักในการหาและอธิบายวิธีการคือการกระเจิง(scattering) ของนิวตรอน เมื่อชนกับนิวเคลียสของไฮโดรเจนในน้ำ

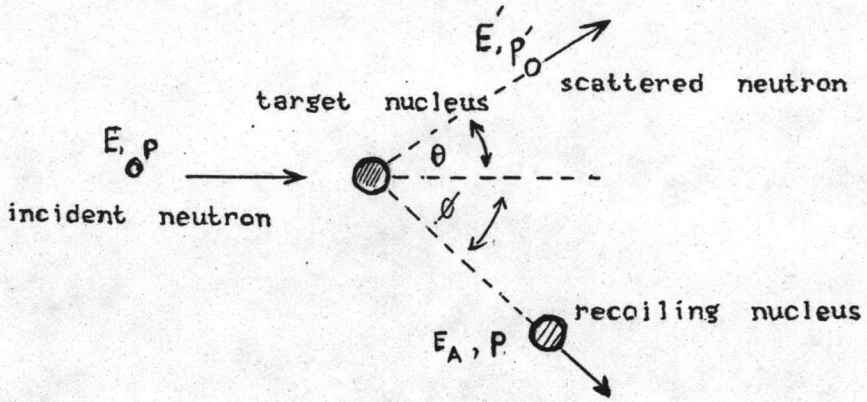
การกระเจิงของนิวตรอน

เมื่อนิวตรอนชนแบบยืดหยุ่นกับนิวเคลียสที่หยุดนิ่ง นิวตรอนจะกระเจิงออกมา พลังงานจลน์ของนิวตรอนจะลดลงส่วนนิวเคลียสจะกระเจิงออกไป พลังงานจลน์ของนิวตรอน และ นิวเคลียสภายหลังการชนสามารถคำนวณได้จากกฎอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัม

ถ้าให้ E , P และ E', p' เป็นพลังงานจลน์ และ โมเมนตัมของนิวตรอนก่อนและภายหลังการชนตามลำดับ

และ $E_\wedge$, p เป็นพลังงานจลน์ และ โมเมนตัมของนิวเคลียสที่กระเจิงไป ภายหลังถูกนิวตรอนชน

Ø และ ø เป็นมุมที่นิวตรอน และ นิวเคลียสกระเจิงออกไปจากแนวเดิม ดังในรูป 2.4



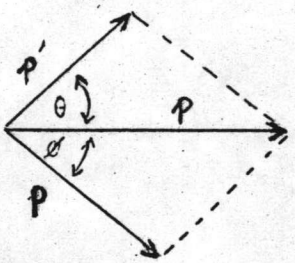
รูป 2.4 การชนแบบยืดหยุ่นของนิวตรอน

จากกฎอนุรักษ์พลังงานจะได้

$$E = E' + E_A \qquad \text{.....(2.1)}$$

และจากกฎอนุรักษ์โมเมนตัมได้

$$p = p' + P \qquad \text{.....(2.2)}$$



รูป 2.5 เวคเตอร์ของโมเมนตัม

จากรูป 2.5 จะได้

$$P^2 = p^2+(p')^2-2pp'\cos\phi \qquad \text{.....(2.3)}$$

เพราะว่า $P = MV = M\sqrt{\frac{2E_A}{M}}$

ดังนั้น $P^2 = 2ME_A$

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

(เมื่อ M,m เป็นมวลของนิวเคลียสและนิวตรอนตามลำดับ)

แทนค่า P,p,p' ในสมการ (2.3) ได้

$$ME_{\Lambda} = mE+mE'-2m\sqrt{EE'}\cos\theta \qquad \text{.....(2.4)}$$

$$M/m(E_{\Lambda}) = E+E'-2\sqrt{EE'}\cos\theta \qquad \text{.....(2.5)}$$

เนื่องจากค่า $M/m \simeq A$ (เลขมวลของนิวเคลียส)
ดังนั้น

$$AE_{\Lambda} = E+E'-2\sqrt{EE'}\cos\theta \qquad \text{.....(2.6)}$$

แทนค่า $E_{\Lambda} = E-E'$ ลงในสมการ (2.6) จะได้

$$(A+1)E'-2\sqrt{EE'}\cos\theta-(A-1)E = 0$$

ดังนั้น

$$E' = \frac{E}{(A+1)^2}\left[\cos\theta + \sqrt{A^2-\sin^2\theta}\right]^2 \qquad \text{.....(2.7)}$$

พิจารณาสมการ (2.7) ถ้า $\theta = 0$ จะได้ $E = E'$ หมายถึงไม่มีการสูญเสียพลังงานของนิวตรอนให้แก่นิวเคลียส ถ้า $\theta = \pi$ หรือ 180° ค่า E' มีค่าต่ำสุด(E'_{min}) (ยกเว้นกรณีที่นิวตรอนชนกับอะตอมไฮโดรเจนซึ่งจะกล่าวโดยเฉพาะต่อไป)

เมื่อ $\theta = \pi$; $(E'_{min}) = \left(\frac{A-1}{A+1}\right)^2 E = \alpha E$ .....(2.8)

เมื่อ $\alpha = \left(\frac{A-1}{A+1}\right)^2$ .....(2.9)

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

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

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

ปรากฏว่าผลที่ได้มีค่าเท่ากับการแทนค่า A = 1 ลงในสมการ (2.8) ดังนั้นสมการที่ (2.8) จึงสามารถใช้ได้กับนิวเคลียสทุกชนิดรวมทั้งไฮโดรเจนด้วย

ค่าพลังงานเฉลี่ยของนิวตรอนที่กระเจิงออกมาจากการชนกับพวกนิวเคลียสเบา รวมทั้งไฮโดรเจนสามารถประมาณได้จาก

$$\overline{E'} = \frac{1}{2}(1+\alpha)E \qquad \text{.....(2.10)}$$

เมื่อ $\overline{E'}$ เป็นพลังงานเฉลี่ยของนิวตรอนที่กระเจิงออกมาจากนิวเคลียส ดังนั้นค่าการสูญเสียพลังงานเฉลี่ย (ΔE) เป็น

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

$$= \frac{1}{2}(1-\alpha)E \qquad \text{.....(2.11)}$$

และ

$$\frac{\overline{\Delta E}}{E} = \frac{1}{2}(1-\alpha) \qquad \text{.....(2.12)}$$

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

สมการ (2.10) ถึง (2.12) นั้นสามารถใช้ได้กับนิวเคลียสหนัก แต่ใช้ได้ในช่วงที่นิวตรอนมีพลังงานต่ำ ตัวอย่างเช่นในการชนของนิวตรอนกับนิวเคลียส ^{238}U สามารถใช้สมการ (2.10) ถึง (2.12) ได้ในช่วงพลังงานของนิวตรอนไม่เกิน 100 keV ถ้านิวตรอนพลังงานสูงขึ้นค่าพลังงานที่สูญเสียไปของนิวตรอนจะมีค่าน้อยกว่าที่คำนวณได้จากสมการ (2.11)

ถ้าพิจารณาค่า α จะเห็นว่ามีค่าตั้งแต่ 0 สำหรับไฮโดรเจน แล้วเพิ่มขึ้นตามลำดับเมื่อค่าเลขมวลเพิ่มขึ้นจนถึงค่าใกล้เคียง 1 ถ้าแทนค่า α ลงในสมการ(2.12) จะเห็นว่า $\overline{\Delta E}/E = 1/2$ หมายความว่าในการชนระหว่างนิวตรอนกับไฮโดรเจนนั้น พลังงานของนิวตรอนจะลดลงประมาณครึ่งหนึ่งโดยเฉลี่ย เมื่อเลขมวลของนิวเคลียสมีค่าเพิ่มขึ้นค่า $\overline{\Delta E}/E$ จะลดลงจาก 1/2 ตัวอย่างเช่น สำหรับคาร์บอน (A=12), $\overline{\Delta E}/E$ = 0.14 และ ยูเรเนียม (A=238), $\overline{\Delta E}/E$ = 0.01 หมายความว่าในการชนนิวตรอนจะสูญเสียพลังงานไป 14% และ 1% ตามลำดับ สำหรับคาร์บอนและยูเรเนียม ด้วยเหตุนี้ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูจึงใช้สารประกอบของธาตุที่มีเลขมวลต่ำเป็นตัวหน่วงพลังงานนิวตรอน (moderator) เช่น น้ำ (H_2O) น้ำชนิดหนัก (D_2O) เป็นต้น

นิวตรอนอาจสูญเสียพลังงานไปโดยการชนแบบไม่ยืดหยุ่น แต่สำหรับการชนกับธาตุเบาพลังงานเทรชโฮลด์ (threshold energy) สำหรับการชนแบบไม่ยืดหยุ่นมีค่าสูงมาก(หลาย MeV) และจะไม่เกิดขึ้นกับไฮโดรเจน ดังนั้นการลดพลังงานของนิวตรอนโดยการชนแบบไม่ยืดหยุ่นกับนิวเคลียสที่มีเลขมวลต่ำจึงไม่ค่อยสำคัญ สำหรับนิวเคลียสที่มีเลขมวลสูงๆ พลังงานเทรชโฮลด์ของการชนแบบไม่ยืดหยุ่นมีค่าต่ำ การชนแบบไม่ยืดหยุ่นจึงเป็นอันตรกิริยาที่สำคัญในการลดพลังงานของนิวตรอน

ในการคำนวณเกี่ยวกับการลดพลังงานของนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ มักจะคำนวณพลังงานในเทอมของเลทาร์จี (lethargy) ซึ่งใช้สัญญลักษณ์แทนเป็น u โดยที่

$$u = \ln(E_M/E) \qquad \text{.....(2.13)}$$

เมื่อ E_M เป็นพลังงานสูงสุดของนิวตรอนในระบบ

E เป็นพลังงานของนิวตรอน

จากสมการ (2.13) จะเห็นว่าเมื่อนิวตรอนพลังงานสูงค่าเลทาร์จีจะต่ำ และเมื่อนิวตรอนลดพลังงานลงค่าเลทาร์จีจะสูงขึ้น

ค่าเลทาร์จีที่เปลี่ยนไปโดยเฉลี่ย($\overline{\Delta u}$) มักจะพบในการคำนวณซึ่งจะใช้สัญญลักษณ์เป็น ξ ค่า ξ ของนิวเคลียสบางชนิดแสดงไว้ในตาราง 2.2 ค่า ξ สามารถคำนวณได้จาก

$$\overline{\Delta u} = \xi = 1-\frac{(A-1)^2}{2A}\ln\left(\frac{A+1}{A-1}\right) \qquad \text{.....(2.14)}$$

เมื่อ A เป็นเลขมวลของนิวเคลียส สำหรับนิวเคลียสที่มี A>10 ค่า ξ สามารถคำนวณได้สะดวกขึ้นจาก

$$\xi = \frac{2}{A+2/3} \qquad \text{.....(2.15)}$$

ถ้าให้ n เป็นจำนวนครั้งที่นิวตรอนชนกับนิวเคลียสชนิดหนึ่งเพื่อลดพลังงานจาก Eo จนเหลือ Ef ดังนั้น

$$n = \frac{\ln(Eo/Ef)}{\xi} \qquad \text{.....(2.16)}$$

ตาราง 2.2 Collision Parameters ของนิวเคลียสบางชนิด(3,6)

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

* ค่าประมาณ

** จำนวนครั้งที่นิวตรอนชนกับธาตุและสารประกอบบางชนิดในการลดพลังงาน จาก 1 MeV ลงเหลือ 0.0253 eV

2.8 <u>หลักการวัดความชื้นด้วยนิวตรอน</u> (6,12)

เมื่อนิวตรอนเร็วถูกปล่อยออกจากต้นกำเนิด แล้วเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางสามารถเกิดอันตรกิริยากับอะตอมของตัวกลางได้หลายแบบดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.3 นิวตรอนเร็วจะสูญเสียพลังงานไปโดยการชนแบบยืดหยุ่น และการชนแบบไม่ยืดหยุ่นกับอะตอมของตัวกลาง นิวตรอนเร็วจะสูญเสียพลังงานไปในการชนแบบไม่ยืดหยุ่นได้มาก โดยเฉพาะการชนกับนิวเคลียสของธาตุหนัก แต่จะเป็นเฉพาะในช่วงพลังงานปานกลาง และไม่ได้ทำให้เกิดนิวตรอนช้า แต่จะสูญเสียพลังงานส่วนใหญ่ไปในการชนแบบยืดหยุ่น การชนในลักษณะนี้ ถ้าอะตอมของตัวกลางมีมวลใกล้เคียงกับมวลของนิวตรอน นิวตรอนจะสูญเสียพลังงานมาก

พิจารณาสมการ 2.14 พบว่า ξ มีค่าสูงสุดเท่ากับ 1 (โดยที่ A = 1) นั่นคือไฮโดรเจนจะลดพลังงานของนิวตรอนได้ดีที่สุด ด้วยเหตุนี้สารประกอบที่มีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ จึงใช้เป็นตัวลดพลังงานของนิวตรอน (neutron moderator) เช่น น้ำ พาราฟิน เป็นต้น

เมื่อนิวตรอนเร็วชนกับอะตอมของตัวกลาง ในที่สุดจะมีพลังงานลดลงจนเป็นนิวตรอนช้า ซึ่งจะมีพลังงานต่ำที่สุดเท่ากับพลังงานของอนุภาคหรืออะตอมของตัวกลางที่อุณหภูมินั้นๆ จึงเรียกว่า "เทอร์มัลนิวตรอน (thermal neutron)" พลังงานของเทอร์มัลนิวตรอนมีการกระจายแบบแมกซ์เวลล์ (Maxwellian distribution) เช่นเดียวกับพลังงานจลน์ของอนุภาคอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซ ตามสมการดังนี้ คือ (1)

$$N(E) = \frac{2\pi N E^{1/2} e^{-E/kT}}{(\pi kT)^{3/2}} \qquad \text{.....(2.17)}$$

เมื่อ N(E) เป็นจำนวนนิวตรอนที่พลังงานใดๆต่อหน่วยปริมาตร

N เป็นจำนวนนิวตรอนรวมทั้งหมดต่อหน่วยปริมาตร

k เป็น Boltzmann's constant มีค่าเท่ากับ 8.617×10^{-5} eV/K

T เป็นอุณหภูมิของตัวกลางเป็นองศาเคลวิน (Kelvin,K)

ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส หรือเท่ากับ 293 เคลวิน เทอร์มัลนิวตรอนมีพลังงานที่พบมากที่สุด (most probable energy) เท่ากับ 0.0253 อิเล็กตรอนโวลต์ (electron volt , eV)

ดังที่กล่าวมาแล้วหลังจากที่นิวตรอนเร็วสูญเสียพลังงานส่วนใหญ่ไปในการชนแบบยืดหยุ่นกับอะตอมของไฮโดรเจน ผลที่เกิดขึ้นก็คือ จำนวนนิวตรอนช้าที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ก็เกิดจากการที่นิวตรอนเร็วชนกับไฮโดรเจน ต้นกำเนิดจะปลดปล่อยนิวตรอนออกมาทุกทิศทางอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา ดังนั้นการวัดความเข้มของนิวตรอนช้าที่เกิดขึ้น หรือความเข้มของนิวตรอนเร็วที่ลดลง สามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดความชื้นของวัสดุต่างๆ ได้

013799