หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
อันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับสสาร

2.1 นิวตรอน

นิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุไฟฟ้ามีมวลเท่ากับ 1.67492 x10^{-24} กรัม นิวตรอนอิสระเป็นอนุภาคไม่เสถียรสลายตัวให้อนุภาคโปรตอน (proton) อิเล็กตรอน (electron) และแอนตินิวตริโน (antineutrino) พร้อมทั้งปล่อยพลังงานออกมาประมาณ 0.78 MeV นิวตรอนมีค่าครึ่งชีวิตประมาณ 12 วินาที ถ้าพิจารณาคุณสมบัติของนิวตรอนตามลักษณะของคลื่น นิวตรอนที่มีพลังงานประมาณ 1 eV จะมีความยาวคลื่น de Broglie ขนาดเดียวกับขนาดของช่องว่างระหว่างอะตอมของผลึก เลี้ยวเบน (diffract) เมื่อผ่านผลึก ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่คล้ายกับรังสีเอกซ์ จึงมีการสร้างนิวตรอนสเปกโตรมิเตอร์เพื่อประโยชน์ในการศึกษาโครงสร้างของผลึก

เนื่องจากนิวตรอนเป็นอนุภาคไม่มีประจุ จึงไม่สามารถวัดได้โดยตรงจากการทำให้ตัวกลางแตกตัวเป็นอิออน (ion) แต่ก็สามารถวัดได้โดยใช้ปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่จะให้อนุภาคมีประจุออกมา เช่นในการวัดเทอร์มาลนิวตรอนจะทำได้โดยใช้ปฏิกิริยา $^{10}B(n,\alpha)\,^{7}Li$ โดยให้เทอร์มาลนิวตรอนผ่านเข้าในหัววัดที่บรรจุสารประกอบพวกโบรอนเช่นในรูปของก๊าซโบรอนไตรฟลูออไรด์ (BF_3,Boron-trifluoride) อนุภาคแอลฟาที่เกิดขึ้นทำให้เกิดการแตกตัวเป็นประจุได้ดี ไอโซโทปโบรอน-10 มีค่าภาคตัดขวางสูง (cross section) ถึง 3840 บาร์น จึงมีโอกาสในการเกิดปฏิกิริยาสูง ส่วนนิวตรอนเร็วจะวัดได้โดยการหาค่าการแตกตัวเป็นอิออนที่เกิดจากการชนของนิวตรอนเร็วกับสารประกอบบางชนิด เช่น สารประกอบของไฮโดรเจน (hydrogeneous material) แล้วเกิดปฏิกิริยา (n, p) เป็นต้น

2.2 ต้นกำเนิดนิวตรอน [3,10]

ตามธรรมชาติมีนิวตรอนพุ่งออกมาจากอวกาศภายนอกมาสู่โลกบ้าง นิวตรอนอิสระที่ปรากฏอยู่ในบรรยากาศนั้นเนื่องจากอันตรกิริยา (Interaction) ของอนุภาคปฐมภูมิในรังสีคอสมิก (ส่วนใหญ่คือโปรตอนพลังงานสูง)กับนิวเคลียสของธาตุในบรรยากาศ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นออกซิเจนและไนโตรเจน นิวตรอนเหล่านี้ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ สำหรับต้นกำเนิดนิวตรอนที่สำคัญซึ่งสามารถผลิตนิวตรอนออกมาใช้ประโยชน์ 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) หรืออาจผลิตขึ้นจากการใช้อนุภาคที่ถูกเร่งออกมาจาก ไซโคลตรอน (cyclotron) ที่มีพลังงานพอเหมาะยิงเข้าไปในเป้า จะได้นิวตรอนพลังงานเดียว ที่มีพลังงานต่าง ๆ กัน เช่น ปฏิกิริยา $^{9}Be(d,n)^{10}B$ และ $^{7}Li(p,n)^{7}Be$

2.2.3 ธาตุกัมมันตรังสีที่แตกตัวได้เอง (self fission) ธาตุหนักบางชนิดสามารถเกิดการแตกตัวได้เองพร้อมทั้งให้นิวตรอนออกมา ต้นกำเนิดที่สำคัญซึ่งสามารถให้นิวตรอนออกมามากพอที่จะนำไปใช้ประโยชน์ ได้แก่ แคลิฟอร์เนียม-252 (californium-252, ^{252}Cf)

2.2.4 ต้นกำเนิดที่ผลิตนิวตรอนออกมาจากปฏิกิริยา (α,n) หรือ (γ,n) ต้นกำเนิดประเภทนี้ประกอบด้วย ต้นกำเนิดรังสีแอลฟา เช่น อะเมริเซียม-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 (berylium, Be)

ตัวอย่างต้นกำเนิดที่นิยมใช้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

2.3 อันตรกิริยาของนิวตรอน (Neutron Interaction) [4,11,15]

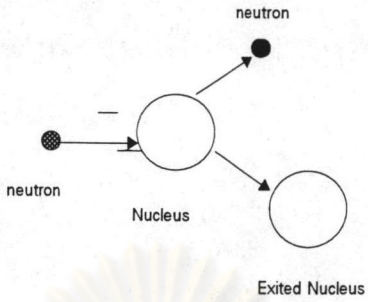
นิวตรอนเป็นอนุภาคที่เป็นกลางอันตรกิริยาของนิวตรอนเกิดขึ้นกับนิวเคลียสของอะตอมเพราะสามารถวิ่งผ่านอิเล็กตรอนที่อยู่รอบนอกนิวเคลียสได้ เมื่อนิวตรอนวิ่งผ่านตัวกลางจะเกิดอันตรกิริยาได้หลายแบบดังต่อไปนี้

2.3.1 การชนแบบยืดหยุ่น (elastic scattering) การชนกับนิวเคลียสของอะตอมตัวกลางแบบนี้เป็นเพียงการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมกันเท่านั้นนิวเคลียสที่ถูกชนยังคงอยู่ในสภาวะปกติ (ground state) ส่วนนิวตรอนจะกระเจิง (scatter) ออกมา โดยเปลี่ยนทิศทางและ ความเร็วไป พลังงานจลน์รวมของนิวตรอนและนิวเคลียสมีค่าคงเดิม กล่าวคือ พลังงานรวมของนิวตรอนกับนิวเคลียสก่อน และหลังการชนมีค่าเท่ากัน บางครั้งเรียกการชนแบบนี้ว่า "potential scattering" ใช้สัญญลักษณ์ของปฏิกิริยาคือ (n,n′)

ตาราง 2.1 ต้นกำเนิดนิวตรอนที่นิยมใช้ [19]

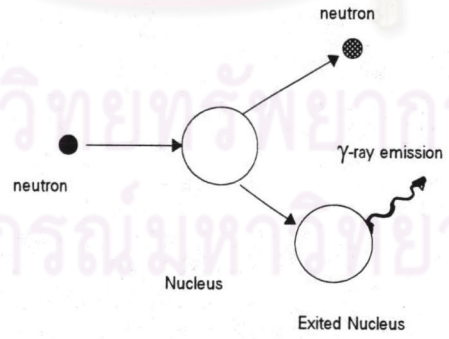
ต้นกำเนิด	ครึ่งชีวิต (ปี)	ยีลด์ (นิวตรอน/วินาที.คูรี)	รังสีแกมมาที่ปลดปล่อยออกมา
^{210}Po-Be	0.379	3.0×10^{6}	เล็กน้อย
^{239}Pu-Be	24300	1.6×10^{6}	รังสีแกมมา 0.13 MeV(100%)
^{226}Ra-Be	1620	1.7×10^{7}	รังสีแกมมาปริมาณมาก
^{241}Am-Be	458	2.7×10^{6}	เล็กน้อย
^{124}Sb-Be	0.164	1.0×10^{6}	รังสีแกมมา 0.60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

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.1 การชนแบบยืดหยุ่นของนิวตรอน

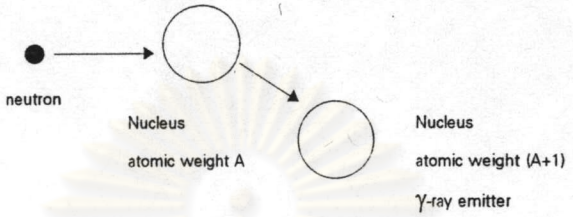
2.3.2 การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic scattering) การชนแบบนี้นิวตรอนจะรวมกับนิวเคลียสที่ถูกชนเป็นนิวเคลียสรวม (compound nucleus) แล้วนิวตรอนตัวหนึ่งจะถูกปลดปล่อยออกมาโดยที่นิวเคลียสอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้น(excited state) เมื่อกลับสู่สภาวะปกติก็จะปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมา ดังนั้นพลังงานจลน์ก่อนและหลังชนมีค่าต่างกันคือพลังงานจลน์รวมภายหลังการชนมีค่าลดลงเนื่องจากสูญเสียพลังงานจลน์ส่วนหนึ่งไปในรูปการปลดปล่อยรังสีแกมมา การชนแบบนี้เป็นแบบเทรซโฮลด์ (threshold reaction) คือนิวตรอนจะต้องมีพลังงานมากพอที่จะทำให้นิวเคลียสอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นได้ปฏิกิริยาแบบนี้มักเกิดขึ้นกับนิวตรอนพลังงานสูงประมาณ 1 MeV ขึ้นไป และเป็นปฏิกิริยาชนิดดูดกลืนพลังงาน (endothermic reaction) ใช้สัญญลักษณ์ของปฏิกิริยาเป็น (n, n')



รูปที่ 2.2 การชนแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน

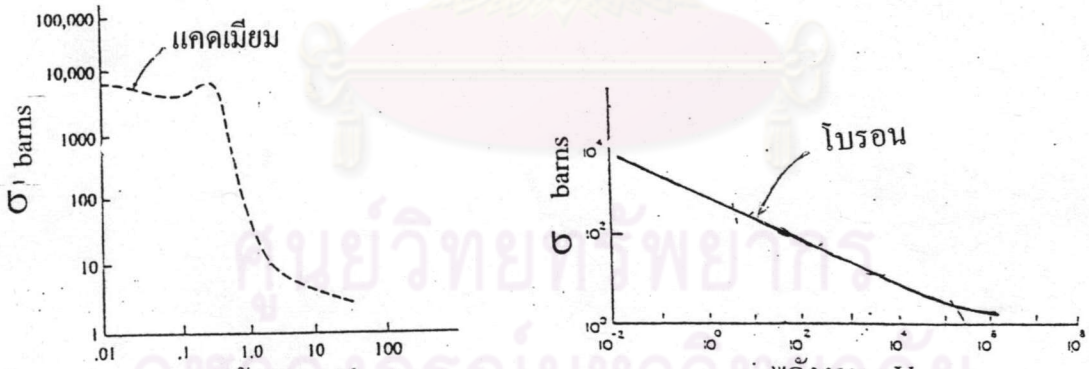
2.3.3 การจับนิวตรอน (neutron capture) หรือเรียกว่า "radiative capture" หรือปฏิกิริยาดูดกลืนนิวตรอน (neutron absorption reaction) เมื่อนิวตรอนวิ่งชนนิวเคลียสจะถูกนิวเคลียสจับไว้ทำให้นิวเคลียสมีเลขมวลเพิ่มขึ้น 1 การรวมตัวของนิวตรอนกับนิวเคลียสจะมี

รังสีแกมมาปล่อยออกมา (capture gamma-rays หรือ neutron capture gamma) ปฏิกิริยาจะเป็นแบบปลดปล่อยพลังงาน (exothermic reaction) สัญญลักษณ์ของปฏิกิริยาเป็น (n, γ) เช่น $^{1}H(n,\gamma)^{2}H$; $^{59}Co(n,\gamma)^{60}Co$



รูปที่ 2.3 การจับนิวตรอน

แผ่นแคดเมียมมีความสำคัญต่อการวัดสเปกตรัมและความเข้มของนิวตรอนเพราะภาคตัดขวางการจับนิวตรอนมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วหรือเรียกว่า ช่วง cut-off จากรูป 2.4 เกิดจากอันตรกิริยาการจับนิวตรอนของ $^{115}Cd(n,\gamma)^{116}Cd$ ค่าภาคตัดขวางของแผ่นแคดเมียมเริ่มมีค่าลดลงที่พลังงาน 0.144 eV ถ้านิวตรอนมีพลังงานต่ำกว่า 0.144 eV จะสามารถใช้แผ่นแคดเมียมหนาเป็นไมครอน ก็สามารถดูดกลืนเทอร์มาลนิวตรอนได้หมดเพราะแผ่นแคดเมียมมีค่า σ_{th} = 2440 barns

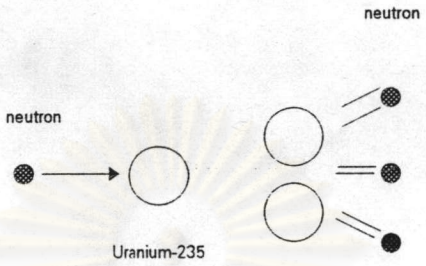


รูปที่ 2.4 กราฟแสดงค่าภาคตัดขวาง
ก. แคดเมียม ข. โบรอน

2.3.4 ปฏิกิริยาฟิชชันหรือปฏิกิริยาแตกตัว (fission reaction) เมื่อนิวตรอนไปรวมกับนิวเคลียสของธาตุหนักบางชนิดเกิดเป็นนิวเคลียสรวมจากนั้นจะแบ่งตัวเป็น 2 ส่วนแตกออกมาได้นิวเคลียสที่มีเลขมวลประมาณครึ่งหนึ่งของนิวเคลียสเดิมพร้อมกับมีอนุภาคนิวตรอน 2-3 ตัว

หลุดออกมาด้วยซึ่งเป็นปฏิกิริยาให้พลังงานสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู สัญญลักษณ์ของปฏิกิริยาเป็น (n, f) ธาตุหนักที่เกิดปฏิกิริยาฟิชชันกับนิวตรอนได้แก่ ยูเรเนียม - 235 ยูเรเนียม 238 และพลูโตเนียม -239 เป็นต้น

ปฏิกิริยาการแตกตัว



รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาการแตกตัว

$$n + U^{235} \longrightarrow (FF)_1 + (FF)_2 + 2\text{-}3\ {}^{1}_{0}n$$

$$n + U^{238} \longrightarrow Pu^{239}$$

FF = (fission product)

อนุภาคนิวตรอนที่เกิดขึ้นใหม่นี้ จะกลับเข้าไปทำปฏิกิริยากับยูเรเนียมอย่างต่อเนื่องแบบทวีคูณ เรียกว่า ปฏิกิริยาลูกโซ่ สามารถผลิตพลังงานความร้อนออกมาได้อย่างมหาศาล

2.3.5 ปฏิกิริยาปลดปล่อยอนุภาคมีประจุ (charged particle emission reaction) เมื่อนิวตรอนชนกับนิวเคลียสของธาตุบางชนิด ภายหลังการเกิดนิวเคลียสรวมแล้วจะปล่อยอนุภาคที่มีประจุออกมา เช่นอนุภาคแอลฟา โปรตอน ปฏิกิริยานี้ส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาดูดกลืนพลังงาน(endothermic reaction) จึงเกิดกับนิวตรอนพลังงานสูง เช่นปฏิกิริยา ${}^{16}O\ (n,p)\ {}^{16}N$ แต่ปฏิกิริยา ${}^{10}B(n, \alpha)\ {}^{7}Li$ และ ${}^{6}Li\ (n,\alpha)\ {}^{3}H$ เป็นปฏิกิริยาที่ให้พลังงาน (exothermic reaction)

charge particle
emission
$(n, \alpha)\ \sigma(n,\alpha)$

รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาปลดปล่อยอนุภาคมีประจุ

2.3.6 ปฏิกิริยาผลิตนิวตรอน (neutron-producing reaction) ปฏิกิริยาแบบนี้เกิดกับนิวตรอนพลังงานสูงและเป็นชนิดดูดกลืนพลังงาน ผลของปฏิกิริยาก็คือจะได้นิวตรอนออกมามากกว่า 1 ตัว เช่น ปฏิกิริยา (n, 2n) ; (n,3n) นับว่าเป็นปฏิกิริยาที่สำคัญในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูชนิดที่ใช้น้ำชนิดหนัก (heavy water) หรือเบริลเลียม เป็นส่วนประกอบเพราะ ^{3}H และ ^{9}Be มีนิวตรอนที่ถูกยึดเหนี่ยวอยู่อย่างหลวมๆ (losely bound) ในนิวเคลียส กล่าวคือพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวตรอนตัวสุดท้ายมีค่าต่ำ จึงเกิดปฏิกิริยาให้นิวตรอนหลุดออกมาได้ง่าย ปฏิกิริยาอื่นเช่น $^{27}Al\ (n,2n)\ ^{26}Al$

รูปที่ 2.7 ปฏิกิริยาผลิตนิวตรอน

2.4 ภาคตัดขวาง (cross section) [8,14,20]

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

ภาคตัดขวางจุลภาคของนิวเคลียสประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ

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

เมื่อ σ_s = ภาคตัดขวางจุลภาคของการกระเจิง (microscopic scattering cross section)

= ผลรวมของภาคตัดขวางจุลภาคของปฏิกิริยาการชนแบบยืดหยุ่นและไม่ยืดหยุ่น

σ_a = ภาคตัดขวางจุลภาคของการดูดกลืน (microscopic absorption cross section)

= ผลรวมของภาคตัดขวางจุลภาคของปฏิกิริยาการจับนิวตรอน การแตกตัว การปลดปล่อยอนุภาคมีประจุและการผลิตนิวตรอน

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

$$\Sigma = N\sigma$$

หรือกล่าวได้ว่าภาคตัดขวางมหภาคก็คือ โอกาสต่อหนึ่งหน่วยระยะทางของนิวตรอนที่จะเกิดปฏิกิริยาเมื่อวิ่งผ่านวัสดุ

ภาคตัดขวางนี้สำหรับธาตุหนึ่งๆจะมีค่าเปลี่ยนไปตามพลังงานของอนุภาคที่วิ่งเข้าชน ดังนั้นสำหรับอนุภาคที่มีพลังงานค่าหนึ่งก็จะมีภาคตัดขวางค่าหนึ่งสำหรับธาตุหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า differential cross section (σ (E)) ค่าเฉลี่ยของภาคตัดขวางมีค่าเท่ากับ

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

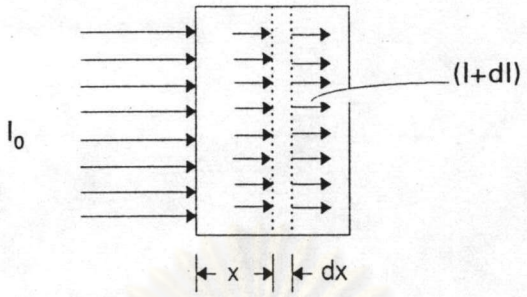
2.5 การลดทอนของนิวตรอน

เมื่อนิวตรอนวิ่งเข้าชนวัสดุที่มีพื้นที่หน้าตัด A

A	=	พื้นที่หน้าตัด, cm^2
x	=	ระยะความหนาจากพื้นผิว, cm
I_0	=	ความเข้มของนิวตรอนก่อนผ่านวัสดุ, neutrons/cm^{2}s
I_x	=	ความเข้มของนิวตรอนหลังจากผ่านวัสดุหนา x , neutrons/cm^{2}s
σ	=	ภาคตัดขวางจุลภาค, cm^2 / nucleus
N	=	ความหนาแน่นอะตอมของเป้า, nuclei / cm^3
NAdx	=	จำนวนอะตอมของเป้าที่มีความหนา dx
σNAdx	=	พื้นที่รวมที่มีผลต่อการส่งผ่านนิวตรอน, cm^2

ความเข้มของนิวตรอนลดลง dI เมื่อผ่านวัสดุหนา dx คือ ความเข้มของนิวตรอนที่มีโอกาสเกิดอันตรกิริยา

$$dI = -I\sigma N dx$$



รูปที่ 2.8 นิวตรอนวิ่งเข้าชนวัสดุที่มีพื้นที่ ภาคตัดขวาง A (cm^2)

เมื่ออินทิเกรตสมการที่ผ่านมาจะได้

$$dI / I_0 = -\sigma N dx$$

$$\int_{I_0}^{I} dI / I_0 = -\sigma N \int_0^x dx$$

$$\ln I / I_0 = -\sigma N x$$

$$I = I_0 e^{-\sigma N x}$$

$$I = I_0 e^{-\sum x}$$

ค่า $\sum$ = σN คือค่าภาคตัดขวางมหภาค , cm^{-1}

N = ρ (g/cm^2) x 6.02 x 10^{23} (atom/g atom)/A(g/g atom)

= ρ x 6.02 x 10^{23}/A

A = ค่าอะตอมมิคนัมเบอร์

ρ = ความหนาแน่นของอะตอมที่เป็นเป้า

2.6 วัสดุสำหรับหน่วงพลังงานนิวตรอน(neutron moderator) [4,8]

การลดความเร็วหรือพลังงานของนิวตรอนทำได้โดยให้นิวเคลียสทำอันตรกิริยาหรือชนกับวัสดุบางชนิด วัสดุสำหรับลดความเร็วที่ดี ได้แก่ วัสดุพวกที่ประกอบด้วยอะตอมของธาตุที่มีเลขมวลน้อยๆ และมีค่าภาคตัดขวางของการดูดกลืนนิวตรอนน้อยด้วย วัสดุสำหรับลดความเร็ว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ที่ดี ได้แก่ น้ำธรรมดา (H_2O) น้ำชนิดหนัก (D_2O) เบอริลเลียม คาร์บอน พาราฟีน โพลิเอธิลีน ฯลฯ

น้ำชนิดหนักเป็นวัสดุสำหรับหน่วงความเร็วนิวตรอนที่ดีที่สุด ประกอบขึ้นด้วยดิวทีเรียม และออกซิเจนโดยมีจำนวนของอะตอมดิวทีเรียมมากกว่าออกซิเจนอยู่ในอัตราส่วน 2 : 1 ดิวทีเรียมเป็นธาตุที่มีเลขมวลน้อยคือเท่ากับ 2 เป็นตัวการสำคัญในการลดความเร็วของนิวตรอน เมื่อนิวตรอนวิ่งไปชนกับนิวเคลียสของดิวทีเรียมนิวตรอนจะสูญเสียพลังงานให้กับนิวเคลียสของดิวทีเรียมที่ถูกชนเป็นจำนวนมาก และบางครั้งอาจจะสูญเสียพลังงานที่มีอยู่เกือบทั้งหมดให้กับนิวเคลียสของดิวทีเรียมถ้าเกิดการชนกันอย่างจัง (head-on collision) นอกจากนี้ดิวทีเรียมยังมีภาคตัดขวางการดูดกลืนนิวตรอนต่ำมากซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ดีของตัวหน่วงนิวตรอน ส่วนการชนกันระหว่างนิวตรอนกับนิวเคลียสของออกซิเจนมีความสำคัญน้อยในการลดความเร็วนิวตรอน เพราะว่าในการชนกันแต่ละครั้งนิวตรอนจะสูญเสียพลังงานให้กับนิวเคลียสของออกซิเจนไม่มากนักและออกซิเจนยังเป็นธาตุที่มีค่าภาคตัดขวางของการดูดกลืนนิวตรอนสูงเมื่อเทียบกับดิวทีเรียม

น้ำธรรมดาประกอบด้วยไฮโดรเจน-1 กับออกซิเจน ในอัตราส่วนโดยอะตอมเท่ากับ 2 : 1 เช่นเดียวกับ ดิวทีเรียมกับออกซิเจนในน้ำชนิดหนัก ไฮโดรเจน -1 สามารถลดพลังงานของนิวตรอนเร็วได้ดีกว่าดิวทีเรียม แต่มีค่าภาคตัดขวางการดูดกลืนนิวตรอนสูงกว่าดิวทีเรียมมาก

2.7 นิวตรอนฟลักซ์ (neutron flux) [4,11]

หมายถึงจำนวนนิวตรอนซึ่งเคลื่อนที่ในทิศทางต่าง ๆ กัน และผ่านพื้นที่ 1 ตร.ซม. ในเวลา 1 วินาที ถ้านิวตรอนเหล่านี้มีความเร็วเท่ากันหมดทุกตัว นิวตรอนฟลักซ์จะมีค่าเท่ากับความหนาแน่นของนิวตรอน ณ ตำแหน่งหนึ่งคูณด้วยความเร็วของนิวตรอน ค่าฟลักซ์อันนี้เรียกว่าฟลักซ์ทั้งหมด (total flux)

ในกรณีที่นิวตรอนมีความเร็วไม่เท่ากันทุกตัว และ N(v) เป็นความหนาแน่นของนิวตรอนในหนึ่งช่วงความเร็วที่ v นิวตรอนฟลักซ์ในหนึ่งหน่วยช่วงความเร็วที่ v นั้นมีค่าเป็น

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

ดังนั้น ϕ (v)dv จะเป็นฟลักซ์ของนิวตรอนที่มีความเร็วอยู่ในช่วง v และ v+dv ฟลักซ์ทั้งหมดของนิวตรอนที่มีความเร็วต่าง ๆ กันมีค่าเท่ากับ

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

ความเร็วเฉลี่ยของนิวตรอนมีค่าเท่ากับ

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

ฟลักซ์ทั้งหมดมีค่าเป็น $\phi_{tot} = Nv$

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

นั่นคือนิวตรอนฟลักซ์มีค่าเท่ากับความหนาแน่นของนิวตรอน ณ ตำแหน่งหนึ่งคูณด้วยความเร็วเฉลี่ยของนิวตรอน

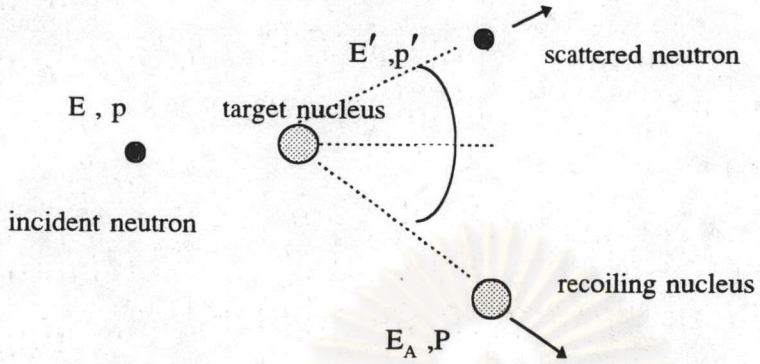
2.8 การกระเจิงของนิวตรอน [9,14,15,16]

ในการหาปริมาณความเข้มข้นของน้ำชนิดหนักโดยวิธีการส่งผ่านเอพิเทอร์มาลนิวตรอน อาศัยหลักการกระเจิง (scattering) ของนิวตรอนเมื่อชนกับนิวเคลียสของดิวทีเรียมในน้ำชนิดหนัก

เมื่อนิวตรอนชนแบบยืดหยุ่นกับนิวเคลียสที่หยุดนิ่ง นิวตรอนจะกระเจิงออกมา พลังงานจลน์ของนิวตรอนจะลดลง ส่วนนิวเคลียสจะกระเจิงออกไป พลังงานจลน์ของนิวตรอนและนิวเคลียสภายหลังการชนสามารถคำนวณได้จากกฎอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัม

ถ้าให้ E , p และ E' , p' เป็นพลังงานจลน์ และโมเมนตัมของนิวตรอนก่อนและภายหลังการชนตามลำดับ และ

E_A , P เป็นพลังงานจลน์และโมเมนตัมของนิวเคลียสที่กระเจิงไป ภายหลังถูกนิวตรอนชน ϑ และ φ เป็นมุมที่นิวตรอนและนิวเคลียสกระเจิงออกไปจากแนวเดิมดังในรูป 2.9



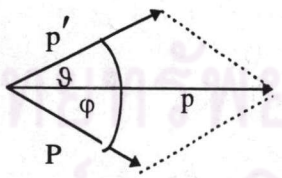
รูปที่ 2.9 การชนแบบยืดหยุ่นของนิวตรอน

จากกฎอนุรักษ์พลังงานจะได้

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

และจากกฎอนุรักษ์โมเมนตัมได้

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



รูป 2.10 เวคเตอร์ของโมเมนตัม

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

เพราะว่า

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

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

$$ME_A = mE + mE' - 2m\sqrt{EE'}\cos\vartheta \qquad ....(2.4)$$

$$M / m(E_A) = E + E' - 2\sqrt{EE'}\cos\vartheta \qquad ....(2.5)$$

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

ดังนั้น

$$AE_A = E + E' - 2\sqrt{EE'}\cos\vartheta \qquad ....(2.6)$$

แทนค่า $E_A = E - E'$ ลงในสมการ (2.6) จะได้

ดังนั้น

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

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

พิจารณาสมการ (2.7) ถ้า $\vartheta = 0$ จะได้ $E = E'$ หมายถึงไม่มีการสูญเสียพลังงานของนิวตรอนให้แก่นิวเคลียส ถ้า $\vartheta = \pi$ หรือ 180^o ค่า E' มีค่าต่ำสุด (E'_{min})

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

และ $$\alpha = [\frac{A-1}{A+1}]^2 \quad .....(2.9)$$

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

การชนของนิวตรอนกับนิวเคลียสดิวทีเรียมนั้น เนื่องจากนิวตรอนมีมวลใกล้เคียงกับนิวเคลียสของดิวทีเรียมมาก ดังนั้นจึงแตกต่างไปจากการชนของนิวตรอนกับนิวเคลียสอื่นๆ นิวตรอนที่กระเจิงออกไปภายหลังการชนกับนิวเคลียสดิวทีเรียมจะกระเจิงออกไปด้วยมุมที่ไม่เกิน $\pi/2$ เรเดียน หรือ 90^o ดังนั้น $(E')_{min}$ ในกรณีนี้จะเกิดขึ้นเมื่อ $\vartheta = \pi/2$

เมื่อ $\vartheta = \pi/2$; $(E')_{min} = E/3$

ปรากฏว่าผลที่ได้มีค่าเท่ากับการแทนค่า A = 2 ลงในสมการ (2.7) ดังนั้นสมการที่ (2.7) จึงสามารถใช้ได้กับนิวเคลียสทุกชนิดรวมทั้งดิวทีเรียมด้วย ค่าพลังงานเฉลี่ยของนิวตรอนที่กระเจิงออกมาจากการชนกับพวกนิวเคลียสเบารวมทั้งดิวทีเรียมสามารถประมาณได้จาก

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

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

$$\overline{\Delta E} = E - \overline{E'} = \frac{1}{2}(1-\alpha)E \quad .....(2.11)$$

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

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

สมการ (2.10) ถึง (2.12) นั้นสามารถใช้ได้กับนิวเคลียสหนัก แต่ใช้ได้ในช่วงที่นิวตรอนมีพลังงานต่ำ ตัวอย่างเช่นในการชนของนิวตรอนกับนิวเคลียส ^{238}U สามารถใช้สมการ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(2.10) ถึง (2.12) ได้ในช่วงพลังงานของนิวตรอนไม่เกิน 100 keV ถ้านิวตรอนพลังงานสูงขึ้นค่าพลังงานที่สูญเสียไปของนิวตรอนจะมีค่าน้อยกว่าที่คำนวณได้จากสมการ

เมื่อพิจารณาค่า α จะเห็นว่ามีค่าตั้งแต่ 0.1 สำหรับดิวทีเรียม ถ้าแทนค่า α ลงในสมการ (2.12) จะเห็นว่า $\overline{\Delta E / E} = 4/9$ หมายความว่าในการชนระหว่างนิวตรอนกับดิวทีเรียมนั้น พลังงานของนิวตรอนจะลดลงประมาณครึ่งหนึ่งโดยเฉลี่ย เมื่อเลขมวลของนิวเคลียสมีค่าเพิ่มขึ้น $\overline{\Delta E / E}$ จะลดลงจาก 4/9 ตัวอย่างเช่น สำหรับคาร์บอน (A=12), $\overline{\Delta E / E} = 0.14$ และยูเรเนียม (A = 238) , $\overline{\Delta E / E} = 0.01$ หมายความว่าในการชนนิวตรอนจะสูญเสียพลังงานไป 14% และ 1% ตามลำดับสำหรับคาร์บอนและยูเรเนียม ด้วยเหตุนี้ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูจึงใช้สารประกอบของธาตุที่มีเลขมวลต่ำเป็นตัวหน่วงพลังงานนิวตรอน (moderator) เช่น น้ำ (H_2O) น้ำชนิดหนัก (D_2O) เป็นต้น

นิวตรอนอาจสูญเสียพลังงานไปโดยการชนแบบไม่ยืดหยุ่นแต่สำหรับการชนกับธาตุเบา พลังงานเทรชโฮลด์ (threshold energy) สำหรับการชนแบบไม่ยืดหยุ่นมีค่าสูงมาก (หลาย MeV) และจะไม่เกิดขึ้นกับดิวทีเรียม ดังนั้นการลดพลังงานของนิวตรอนโดยการชนแบบไม่ยืดหยุ่นกับนิวเคลียสที่มีเลขมวลต่ำจึงไม่ค่อยสำคัญ สำหรับนิวเคลียสที่มีเลขมวลสูงๆพลังงานเทรชโฮลด์ของการชนแบบไม่ยืดหยุ่นมีค่าต่ำ การชนแบบไม่ยืดหยุ่นจึงเป็นอันตรกิริยาที่สำคัญในการลดพลังงานของนิวตรอน

ในการคำนวณเกี่ยวกับการลดพลังงานของนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์มักจะคำนวณพลังงานในเทอมของเลทาร์จี (lethalgy) ซึ่งใช้สัญญลักษณ์แทนเป็น u โดยที่

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

เมื่อ E_M เป็นพลังงานสูงสุดของนิวตรอนในระบบ

E เป็นพลังงานของนิวตรอน

จากสมการ (2.13) จะเห็นว่า เมื่อนิวตรอนพลังงานสูงค่าเลทาร์จีจะต่ำ และเมื่อนิวตรอนลดพลังงานลงค่าเลทาร์จีจะสูงขึ้น

ค่าเลทาร์จีที่เปลี่ยนไปโดยเฉลี่ย (Δu) มักจะพบในการคำนวณซึ่งจะใช้สัญญลักษณ์เป็น ξ ค่า ξ ของนิวเคลียสบางชนิดแสดงไว้ในตาราง 2.2 ค่า (Δu) สามารถคำนวณได้จาก

$$\Delta u = \xi = 1 - (A-1)^2 \ln[(A+1)/(A-1)] / 2A \quad \text{.....(2.14)}$$

เมื่อ A เป็นเลขมวลของนิวเคลียส สำหรับนิวเคลียสที่มี A>10 ค่า ξ สามารถคำนวณได้

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

ถ้าให้ n เป็นจำนวนครั้งที่นิวตรอนกับนิวเคลียสชนิดหนึ่งเพื่อลดพลังงานจาก E_0 จนเหลือ E_f ดังนั้น

$$n = \frac{\ln(E_0 / E_f)}{\xi} \quad \text{.....(2.16)}$$

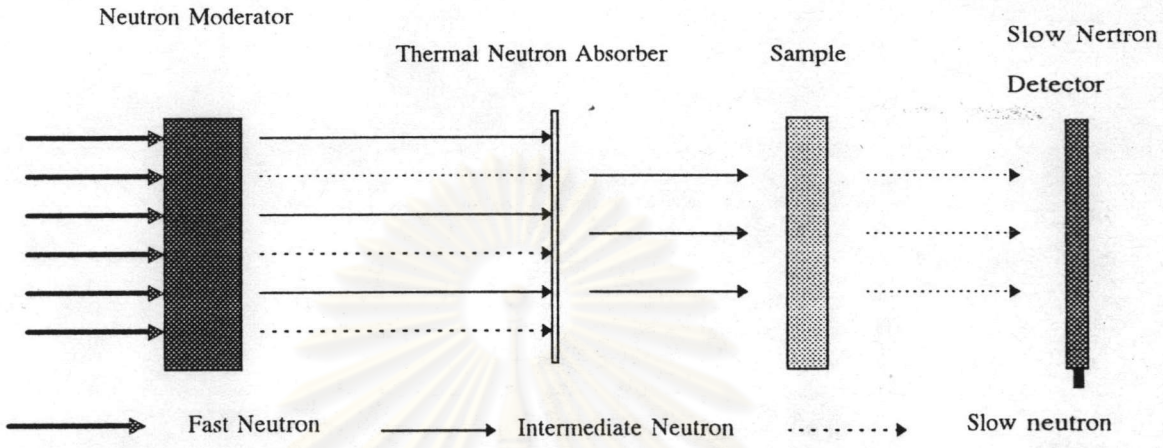
ตาราง 2.2 Collision Parameters ของนิวเคลียสบางชนิด [14,19]

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

** จำนวนครั้งที่นิวตรอนกับธาตุและสารประกอบบางชนิดในการลดพลังงานจาก 1 MeV ลงเหลือ 0.0253 eV

2.8 เทคนิคการส่งผ่านเอพิเทอร์มาลนิวตรอน [7,8,17]



รูปที่ 2.13 แผนภาพแสดงหลักการใช้เทคนิคเอพิเทอร์มาลนิวตรอนในการหาปริมาณน้ำชนิดหนักที่มีความเข้มข้นต่ำ

อนุภาคนิวตรอนจะสูญเสียพลังงานมากที่สุดในการชนกับนิวเคลียสของไฮโดรเจน-1 เนื่องจากมีมวลใกล้เคียงกันคือประมาณ1หน่วยมวลอะตอมรองลงมาคือดิวทีเรียม (ไฮโดรเจน-2) ซึ่งมีมวลประมาณ 2 หน่วยมวลอะตอมค่าสโลวิงดาวน์เพาเวอร์ (slowing down power) ต่อหน่วยมวลของไฮโดรเจน มีค่าสูงกว่าดิวทีเรียมถึง 17 เท่า

เมื่อไฮโดรเจน-1 หรือดิวทีเรียม 2 อะตอมรวมกับออกซิเจนเป็นน้ำธรรมดา (H_2O) หรือน้ำชนิดหนัก (D_2O) ค่าสโลวิงดาวน์เพาเวอร์ต่อหน่วยมวลของน้ำธรรมดาจึงสูงกว่าน้ำชนิดหนักมากคือสูงถึงประมาณ 7.6 เท่า ดังนั้นการชนของนิวตรอนกับโมเลกุลของน้ำธรรมดาจะทำให้นิวตรอนลดพลังงานลงรวดเร็วกว่า จากการคำนวณจำนวนครั้งในการชนของนิวตรอนพลังงาน 2 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์กับน้ำธรรมดาและน้ำชนิดหนัก เพื่อลดพลังงานลงเป็นเทอร์มาลนิวตรอนที่มีพลังงาน 0.025 eV จะได้เท่ากับ 20 และ 36 ครั้งตามลำดับ การใช้นิวตรอนพลังงานเร็วในช่วงพลังงานเป็น MeV นั้น ต้องใช้ตัวอย่างน้ำชนิดหนักปริมาณสูงจึงจะมีความไวมากพอที่จะใช้ประโยชน์ได้สำหรับตัวอย่างปริมาตรน้อยๆ การส่งผ่านนิวตรอนเร็วมีความไวไม่พอที่จะใช้ประโยชน์ได้ ดังนั้นการเพิ่มความไวให้กับเทคนิคนี้นิวตรอนจึงมีพลังงานสูงกว่าเทอร์มาลนิวตรอนไม่มากนักในช่วงเอพิเทอร์มาลนิวตรอน เพราะต้องการจำนวนครั้งในการชนที่น้อยกว่า

จากการคำนวณจำนวนครั้งในการชนของเทอร์มาลนิวตรอนซึ่งใช้นิวตรอนพลังงานเท่ากับ 100 eV กับน้ำธรรมดา และน้ำชนิดหนัก เพื่อลดพลังงานลงเป็นเทอร์มาลนิวตรอนที่มีพลังงาน 0.025 eV จะได้เท่ากับ 9 และ 16 ครั้ง ตามลำดับ การนำเอพิเทอร์มาลนิวตรอนออกมาใช้ ในการวัดปริมาณน้ำชนิดหนักสามารถทำได้โดยการลดพลังงานของนิวตรอน มาทำอันตรกิริยากับสารประกอบไฮโดรเจน เช่น พาราฟิน โพลีเอธาลีน หรือน้ำ ซึ่งจะได้นิวตรอนช้าที่มีเทอร์มาลนิวตรอนปนกับเอพิเทอร์มาลนิวตรอน จากนั้นใช้แผ่นแคดเมียม และ/หรือโบรอนดูดกลืนเทอร์มาลนิวตรอนออกไปให้เหลือเพียงเอพิเทอร์มาลนิวตรอนที่จะผ่านไปยังน้ำชนิดหนัก และเมื่อชนกับดิวทีเรียมในน้ำชนิดหนักแล้วพลังงานจะลดลงเป็นเทอร์มาลนิวตรอน ซึ่งมีปริมาณสัมพันธ์กับความเข้มข้นของน้ำชนิดหนัก การวัดเทอร์มาลนิวตรอนที่เกิดขึ้นก็คือ การวัดความเข้มข้นของน้ำชนิดหนัก

2.9 หัววัดนิวตรอน [16, 17, 18]

หัววัดนิวตรอนช้าที่ใช้กันโดยทั่วไป ได้แก่หัววัดพรอพอร์ชันนัลบรรจุก๊าซโบรอนไตรฟลูออไรด์ (BF_3-Proportional Counter) ซึ่งมักเรียกย่อ ๆว่า หัววัด BF_3 (BF_3-counter) ซึ่งเป็นหัววัดที่บรรจุก๊าซโบรอน-10ไตรฟลูออไรด์ ($^{10}BF_3$, Boron-10 trifluoride) ที่มีไอโซโทปโบรอน-10 สูง

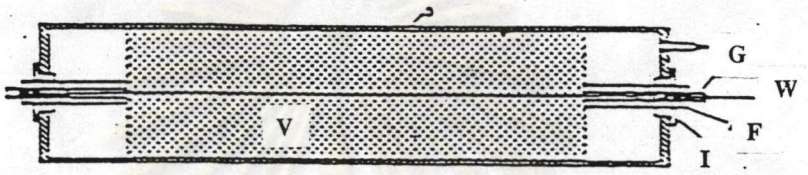
หัววัด BF_3 เป็นหัววัดที่เหมาะกับการวัดนิวตรอนช้าโดยอาศัยปฏิกิริยาแคปเจอร์ของโบรอน-10 ดังสมการ

$$^{10}B + {}^{1}n \;\text{---}> {}_{3}^{7}Li + {}_{2}^{4}He + 2.792\ \text{eV (ground etate)}$$

$$\text{---}> {}_{3}Li^{7*} + {}_{2}He^{4} + 2.310\ \text{eV (exited state)}$$

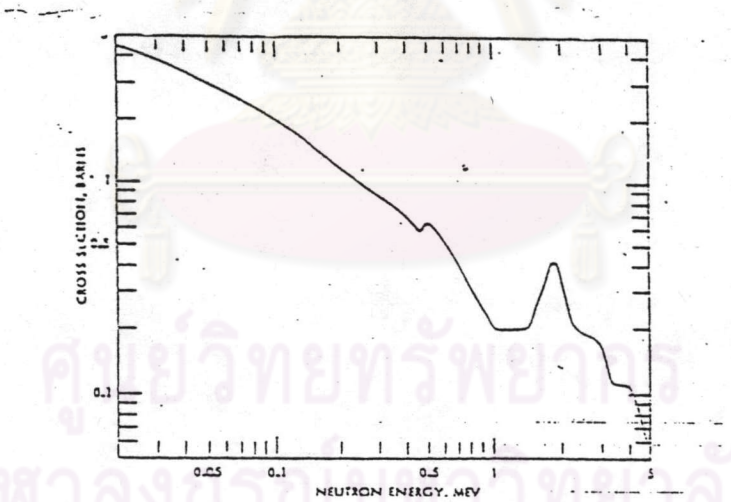
อนุภาคอัลฟาที่เกิดขึ้นจะทำให้ก๊าซเกิดการแตกตัวเป็นไอออน เมื่อไอออนบวกและอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังขั้วลบและขั้วบวกของหัววัดนิวตรอนก็จะได้สัญญาณพัลส์(pulse) เกิดขึ้น

ค่าภาคตัดขวางของปฏิกิริยานี้เป็นไปตามส่วนกลับของความเร็ว 1/v (v เป็นความเร็วของนิวตรอน) ดังนั้นหัววัด BF_3 จึงเหมาะสมสำหรับใช้วัดนิวตรอนช้าที่มีพลังงานต่ำ ค่าภาคตัดขวางสำหรับนิวตรอนช้าที่พลังงาน 0.025 eV มีค่า 3840 บาร์น รูปที่ 2.15 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างภาคตัดขวางกับพลังงานสำหรับปฏิกิริยา $^{10}B(n,\alpha)^{7}Li$ ซึ่งพบว่าค่าภาคตัดขวางจะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อพลังงานเพิ่มขึ้นโดยเป็นสัดส่วนกับ 1/v



รูปที่ 2.14 แผนภาพแสดงส่วนประกอบของหัววัดนิวตรอนช้าชนิด BF_3

(F-field tube. V-sensitive volume. W-center wire. G-guard. I-insulation.)



รูปที่ 2.15 กราฟแสดงระหว่างภาคตัดขวางกับพลังงานของนิวตรอนสำหรับปฏิกิริยา $^{10}B(n,\alpha)^{7}Li$

นอกจากนี้ยังมีหัววัดนิวตรอนชนิดอื่น ๆ ที่นิยมใช้ในการวัดนิวตรอนช้าซึ่งได้แก่

- หัววัดที่มีโบรอนเคลือบภายใน (boron-line detector) เป็นหัววัดนิวตรอนช้าที่เคลือบสารประกอบโบรอนไว้ที่ผนังด้านใน อนุภาคอัลฟาที่เกิดจากปฏิกิริยาของนิวตรอนกับโบรอน-10 จะทำให้ก๊าซที่บรรจุอยู่ในหัววัดเกิดการแตกตัวเป็นประจุ

- หัววัดแบบฮีเลียม-3 (He-3 detector) เป็นหัววัดนิวตรอนช้าที่บรรจุก๊าซ ฮีเลียม-3 โดยนิวตรอนทำปฏิกิริยากับ ฮีเลียม-3 แล้วทำให้เกิดอนุภาคโปรตอนกับ โฮโครเจน-3 (ตริเตรียม: tritium)

- หัววัดแบบแก้วเรืองรังสี (Glass Scintillator Detector) ที่มีลิเทียม-6 ผสมอยู่ หัววัดประเภทนี้เป็นหัววัดที่ได้สัญญาณไฟฟ้าจากการเกิดแสงวาบของแก้วเรืองรังสีเมื่อทำปฏิกิริยากับนิวตรอน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย