บทที่ 5
ปฏิกิริยานิวเคลียร์
NUCLEAR REACTIONS

วัตถุประสงค์

เมื่อศึกษาบทนี้แล้วจะสามารถ

1. อธิบายกระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคเข้าชนนิวเคลียสของเป้าแล้วเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์
2. คำนวณหาพลังงานและเขียนระดับพลังงานที่นิวเคลียสเชิงประกอบถูกกระตุ้นได้
3. คำนวณหาระดับความกว้างของพลังงานที่จะส่งอนุภาคหรือรังสีแกมมาออกมาได้
4. คำนวณหาอัตราการเกิดปฏิกิริยา, ฟลักซ์นิวตรอน, ค่าภาคตัดขวางสำหรับการเกิดปฏิกิริยาในการอาบรังสีได้

การศึกษาปฏิกิริยานิวเคลียร์ในบทที่ 3 เป็นการนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงจากนิวเคลียสหนึ่งไปเป็นอีกนิวเคลียสหนึ่ง มีความสัมพันธ์ระหว่างมวลและพลังงานสมดุล ในบทนี้เป็นการนำไปสู่โครงสร้าง และเป็นพื้นฐานของแรงนิวเคลียร์ การเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์ อาจจะทำให้นิวเคลียสที่เกิดขึ้นอยู่ในสภาวะที่ถูกกระตุ้น (excited state) การสลายจะแสดงระดับพลังงาน และแผนผังการสลาย กระบวนการที่เกิดขึ้นจากการใช้อนุภาคเข้าทำปฏิกิริยา อาจเป็นผลให้เกิดการส่งอนุภาคต่างชนิดออกมา เช่นอาจเป็น โปรตอน, นิวตรอน, ดิวทิรอน, อนุภาคแอลฟาหรือรังสีแกมมา อนุภาคที่ตกกระทบและอนุภาคที่ส่งออกมา อาจเป็นชนิดเดียวกัน เช่น กระบวนการกระเจิง ปฏิกิริยานิวเคลียร์มีอยู่อย่างมากมาย ซึ่งจะได้ศึกษาต่อไป

5.1 ปฏิกิริยานิวเคลียร์ และสภาวะที่ถูกกระตุ้นของนิวคลีไอ

ในบทที่ 3, สมการหนึ่งของปฏิกิริยานิวเคลียร์ คือ

$$x + X \longrightarrow Y + y \qquad \ldots (5.1)$$

อาจเขียนได้ว่า X (x,y) Y หมายความว่า อนุภาค x ชนกับนิวเคลียส X เกิดนิวเคลียส Y และอนุภาค y, อนุภาค x และ y อาจเป็นอนุภาคมูลฐาน (elementary particles) หรือรังสีแกมมา หรืออาจเป็นนิวคลีไอ เช่น อนุภาคแอลฟา หรือ ดิวทิรอน การเปลี่ยนแปลงตามสมการ (5.1) จะไม่ครอบคลุมทุกปฏิกิริยา ในกรณีทั่ว ๆ ไป มักจะมีอนุภาคออกมาหนึ่งหรือมากกว่า หรืออนุภาคที่ส่งออกมาอาจเป็นชนิดเดียวกับอนุภาคที่ใช้ยิงเข้าไป ในบทนี้ จะพิจารณาปฏิกิริยานิวเคลียร์จากสมการ

$$x + X \longrightarrow \begin{cases} X + x \\ X^* + x \\ Y + y \\ z + z, \end{cases} \qquad \ldots (5.2)$$

จะเห็นว่า สองปฏิกิริยาแรก อนุภาคที่ออกมาเป็นชนิดเดียวกับอนุภาคตกกระทบ กระบวนการนี้จึงเรียกว่า **ปฏิกิริยาการกระเจิง** (Scattering) ปฏิกิริยาแรกเป็น **การกระเจิงแบบยืดหยุ่น** (elastic scattering) พลังงานจลน์ทั้งหมดของระบบ คือ พลังงานของอนุภาคที่ใช้ยิง รวมกับเป้า (target) จะมีค่าเหมือนกัน ทั้งก่อนชนและหลังชนกับนิวเคลียส **หลังถูกชน นิวเคลียสยังอยู่ที่สภาวะกราวน์** (ground state) อีกปฏิกิริยาหนึ่งคือ **การกระเจิงแบบไม่**

ยืดหยุ่น (inelastic scattering) **นิวเคลียสของเป้า X หลังถูกชนอยู่ที่สภาวะถูกกระตุ้น X*** และพลังงานจลน์ทั้งหมดของระบบจะลดลงด้วยปริมาณที่เป็น**พลังงานกระตุ้น** (excitation energy) ของนิวเคลียสที่เป็นเป้า ปฏิกิริยาต่อมา เป็นการเปลี่ยนแปลงในปฏิกิริยานิวเคลียร์ อาจทำให้นิวเคลียสใหม่อยู่ที่สภาวะกราวน์ หรืออาจจะเป็นสภาวะที่ถูกกระตุ้น นิวเคลียสใหม่ที่เกิดขึ้นในสภาวะที่ถูกกระตุ้น จะสลายอย่างรวดเร็ว เพื่อกลับสู่สภาวะกราวน์ โดยการส่งรังสีแกมมา

นิวเคลียสใหม่ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลง อาจถูกทิ้งไว้ในสภาวะที่ถูกกระตุ้น พบครั้งแรกโดยการวัดพลังงานของโปรตอนที่ส่งออกมาในปฏิกิริยา เมื่อใช้อนุภาคแอลฟาวิ่งเข้าชนนิวเคลียสของธาตุเบา ๆ แล้วส่งโปรตอนออกมา เรียกปฏิกิริยา (α, p) โดยการใช้อนุภาคแอลฟาพลังงานเดียว ที่เกิดตามธรรมชาติ จากโปโลเนียม อนุภาคแอลฟามีพลังงาน 5.3 เอมอีวี โดยการวัดพิสัย (range) ถ้าอนุภาคแอลฟานี้วิ่งชนนิวเคลียสโบรอน จะมีโปรตอนกลุ่มหนึ่งหรือหลาย ๆ กลุ่มส่งออกมา แต่ละกลุ่ม อนุภาคมีพลังงานเหมือน ๆ กัน กรณีที่ใช้โบรอนเป็นเป้าจะเกิดมีลำแสงโปรตอนออกมา 2 กลุ่ม ในแนวทำมุม 90° กับทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคแอลฟา

กรณีที่ใช้ปฏิกิริยา Al(α, p) พบโปรตอนออกมา 4 กลุ่ม สำหรับแต่ละพลังงานของอนุภาคแอลฟาที่เข้าชน

พลังงานสมดุลของปฏิกิริยา หรือค่าคิว (Q-value) คำนวณได้สำหรับแต่ละกลุ่มของพลังงาน จากสมการ (3.9) **กลุ่มโปรตอนที่ให้พลังงานมากที่สุด จะให้ค่าคิวสูงสุด ค่านี้จะสมมุติว่าตรงกับสภาวะกราวน์ของนิวเคลียสที่เกิดขึ้นใหม่ โปรตอนกลุ่มที่มีพลังงานต่ำลงมาจะให้ค่าคิวมีค่าน้อยลง ค่าแตกต่างระหว่างค่าคิวสูงสุด และค่าต่ำลงมา จะเป็นค่าพลังงานที่ถูกกระตุ้นของนิวเคลียสที่เกิดขึ้นใหม่ หลังจากการส่งโปรตอนออกมา**

พิจารณาปฏิกิริยา

$$ {}_{13}Al^{27} + {}_{2}He^{4} \longrightarrow \left[{}_{15}P^{31} \right] \rightarrow {}_{14}Si^{30} + {}_{1}H^{1} + Q $$

ในการทดลองเพื่อหาระดับพลังงาน จากปฏิกิริยา Al^{27} (α, p) Si^{30} โดยใช้อนุภาคแอลฟาที่เร่งออกมาจากไซโคลตรอน จนมีพลังงาน 7.3 เอมอีวี วิ่งเข้าชนเป้า ทำด้วยแผ่นอะลูมิเนียมบาง ๆ วัดพลังงานของโปรตอน และรังสีแกมมาที่ส่งออกมา โดยการวัดพิสัยได้พลังงานของโปรตอน 4 กลุ่มในแนวทำมุม 0 กับทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่เข้าชน คือพลังงาน 9.34, 6.98, 5.55 และ 4.2 – 4.65 เอมอีวี เมื่อทราบพลังงานของอนุภาคที่เข้าชน และพลังงาน

ของโปรตอนที่วิ่งออกมาแต่ละกลุ่ม ทราบค่าเลขมวลของเป้า และนิวคลีไอที่เกิดขึ้น การคำนวณค่าคิวจะหาได้โดยใช้สมการ (3.9) หรือ (3.10) แล้วแต่มุมที่อนุภาควิ่งออกมา จากการคำนวณพบว่าโปรตอนที่มีพลังงานมากที่สุดให้ค่าคิว 2.22 เอมอีวี ตรงกับการเกิด Si^{30} ที่สภาวะกราวน์ พลังงานโปรตอนต่ำลงมาอีก 3 กลุ่ม ให้ค่าคิว = -0.06, -1.44 และประมาณ −2.4 เอมอีวีตามลำดับ จึงมี 3 สภาวะถูกกระตุ้นของ Si^{30} คือพลังงานเหนือสภาวะกราวน์ = 2.28, 3.66 และประมาณ 4.6 เอมอีวี ตามตารางที่ 5.1

จากการทดลองแสดงว่า ในการส่งโปรตอน พวกที่มีพลังงานสูงสุดนั้น ไม่มีรังสีแกมมาออกมา แต่ถ้าโปรตอนที่ส่งออกมา มีพลังงานน้อยลง จะมีรังสีแกมมาออกมาด้วย เป็นการแสดงว่า โปรตอนที่มีพลังงานต่ำลงมานั้น ได้ทิ้งนิวเคลียสของ Si^{30} ไว้ในสภาวะที่ถูกกระตุ้น

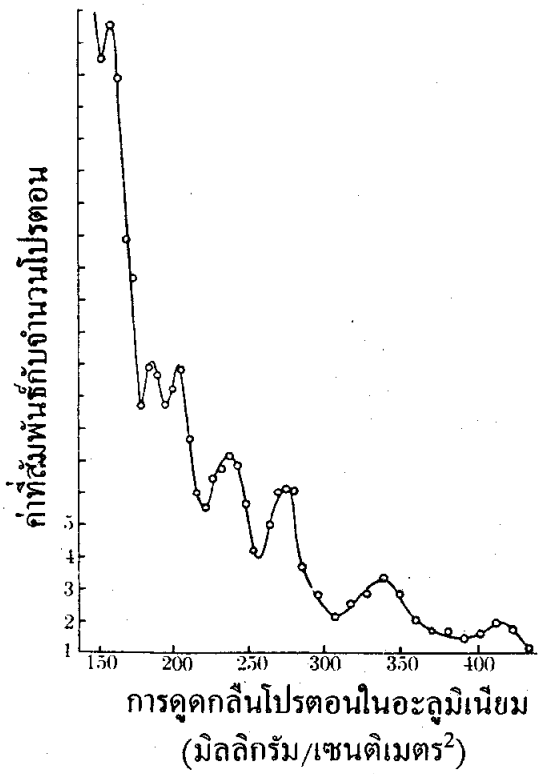
ตารางที่ 5.1 แสดงสภาวะที่ถูกกระตุ้นของ Si^{30} จากปฏิกิริยา $Al^{27}(\alpha, p)Si^{30}$

การทดลองที่ 1 เมื่ออนุภาคแอลฟามีพลังงาน 7.3 เอมอีวี

พลังงานของโปรตอน (เอมอีวี) ที่ส่งออกมาทำมุม 0 กับทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคแอลฟา	ค่าคิว (Q − value)	ระดับพลังงาน (เอมอีวี) ของสภาวะที่ถูกกระตุ้น
9.34	2.22	0
6.98	-0.06	2.28
5.55	-1.44	3.66
4.2 − 4.65	-2.4	4.6

การทดลองที่ 2 เมื่ออนุภาคแอลฟามีพลังงาน 21.54 เอมอีวี

พลังงานของโปรตอน (เอมอีวี) ที่ส่งออกมาทำมุม 90° กับทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคแอลฟา	ค่าคิว (Q-value)	ระดับพลังงาน (เอมอีวี) ของสภาวะที่ถูกกระตุ้น
.....	2.22	0
.....	.....	.....
16.85	− 1.27	3.49
14.96	-3.22	5.44
13.28	-4.96	7.18
12.29	− 5.98	8.20
11.27	-7.04	9.26
10.68	− 7.65	9.87
9.72	− 8.64	10.86



รูปที่ 5.1 แสดงกลุ่มของโปรตอน ที่เกิดจากปฏิกิริยา $Al^{27}(\alpha, p)Si^{30}$

จากรูปที่ 5.1 เป็นกราฟแสดงพิสัยที่โปรตอนผ่านไปได้ ในอะลูมิเนียม ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพลังงาน กับจำนวนโปรตอนที่นับได้ ตามแนวทำมุม 90° กับทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคแอลฟา จำนวนโปรตอนที่นับได้แต่ละกลุ่ม มีค่าสูงสุดที่ยอด (peak) ซึ่งตรงกับพิสัย หรือพลังงานของโปรตอนแต่ละกลุ่ม ค่าคิวหาได้จากสมการ (3.9) ในการทดลองนี้จะหาพิสัยที่โปรตอนวิ่งผ่านไปได้สำหรับกลุ่มที่มีพลังงานมากไม่ได้แน่ชัด เพราะอัตราการนับมีค่าต่ำมาก ค่าคิวที่ทำให้ Si^{30} อยู่ที่สภาวะกราวน์จึงใช้ค่าเท่ากับ 2.2 เอมอีวี

การส่งกลุ่มอนุภาคดังกล่าวมาแล้วนี้ ไม่ได้จำกัดว่า จะต้องเป็นปฏิกิริยา (α, p) ยังพบในปฏิกิริยาอื่น ๆ อีก ในแต่ละกรณีพลังงานแต่ละกลุ่มที่ต่างกัน จะทำให้หาสภาวะที่ต่างกันของนิวเคลียสที่เกิดขึ้นได้ นิวเคลียสที่มีพลังงานสูงกว่าสภาวะกราวน์เล็กน้อย จะตรงกับสภาวะที่ถูกกระตุ้น ที่มีการสลายโดยการส่งรังสีแกมมา

ยังพบอีกว่า เมื่อพลังงานของอนุภาคที่ตกกระทบเป้าเปลี่ยนแปลงไป เช่น ถ้าอนุภาคแอลฟามีพลังงานสูงขึ้น จำนวนโปรตอนที่เกิดขึ้น จะไม่สูงตามไปด้วย แต่จะแสดงยอดแหลม

เป็นค่าสูงสุดที่แต่ละพลังงาน ในปฏิกิริยา Al(α, p) จะเกิดยอด (คือโปรตอนที่เกิดขึ้นมีจำนวนมากที่สุด) เมื่ออนุภาคแอลฟา มีพลังงาน 4.0, 4.49, 4.86, 5.25, 5.75 และ 6.61 เอมอีวี และมีค่าต่ำระหว่างแต่ละคู่ของยอด การเกิดค่าสูงสุด เมื่ออนุภาคมีพลังงานต่าง ๆ กัน เรียก **เรโซแนนซ์** (resonance) พลังงานที่เป็นค่าเฉพาะที่ทำให้เกิดค่าสูงสุด เรียก**พลังงานเรโซแนนซ์** (resonance energies) แต่ละค่าพลังงานเรโซแนนซ์ของอนุภาคแอลฟาที่ใช้ยิง จะได้กลุ่มโปรตอนพลังงานต่าง ๆ กัน ค่าคิว คำนวณได้เช่นเดียวกับการหาค่าคิวเมื่ออนุภาคแอลฟามีพลังงานอื่น ๆ ที่ไม่เป็นพลังงานเรโซแนนซ์ ทำให้หาค่าพลังงานที่ถูกกระตุ้นของนิวเคลียสที่เกิดใหม่ได้ ผลการทดลองที่เกิดขึ้นเมื่อใช้พลังงานเรโซแนนซ์เป็นประโยชน์กว่าเมื่อใช้พลังงานอื่น ๆ เพราะหลายปรากฏการณ์เกิดขึ้นที่พลังงานนี้ ทำให้ทราบเรื่องราวเกี่ยวกับการเกิดนิวเคลียสเชิงประกอบ (Compound nucleus) และสามารถหาระดับพลังงานของนิวเคลียสเชิงประกอบได้

5.2 นิวเคลียสเชิงประกอบ (Compound nucleus)

บอร์ (Bohr) ได้ตั้งทฤษฎีนิวเคลียสเชิงประกอบ เพื่อใช้ทำนายปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดขึ้น บอร์ได้ตั้งข้อสมมุติไว้ 2 ข้อ เมื่อเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ ดังนี้

1) เมื่ออนุภาคตกกระทบเป้า จะถูกดูดกลืนเข้าไปในนิวเคลียส เพื่อเกิดเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบ

อนุภาคตกกระทบ + นิวเคลียสของเป้า $\longrightarrow$ นิวเคลียสเชิงประกอบ

2) การสลายของนิวเคลียสเชิงประกอบ อาจส่งอนุภาค (โปรตอน, นิวตรอน, อนุภาคแอลฟา) หรือรังสีแกมมา โดยเหลือนิวเคลียสที่เกิดใหม่ไว้

นิวเคลียสเชิงประกอบ $\longrightarrow$ นิวเคลียสใหม่ + อนุภาคที่ถูกส่งออกมา

บอร์ยังได้ตั้งข้อสมมุติอีกว่า การสลายของนิวเคลียสเชิงประกอบ จะไม่ขึ้นกับวิธีการเกิดนิวเคลียสเชิงประกอบนั้น แต่จะขึ้นกับคุณสมบัติของนิวเคลียสเชิงประกอบเอง เช่นพลังงานและโมเมนตัมเชิงมุม (angular momentum) นับว่าเป็นความจริงที่ยืนยันได้จากการทดลอง เมื่อใช้โปรตอนยิงเข้าไปยังเป้า Al^{27} นิวไคลด์ที่เกิดขึ้นใหม่ อาจเป็น Mg^{24}, Si^{27}, Si^{28} หรือ Na^{24} แสดงว่า เมื่อเกิดกิริยาระหว่าง Al^{27} กับ โปรตอน จะเกิดนิวเคลียสเชิงประกอบ $\left[{}_{14}Si^{28}\right]$

ซึ่งจะสลายได้หลายวิธีเช่น เกิดเป็น $Mg^{24} + He^{4}$, $Si^{27} + n^{1}$ หรือ $Si^{28} + \gamma$ หรืออาจเป็น $Na^{24} + 3H^{1} + n^{1}$ ข้อสมมุติของบอร์พอที่จะทำให้เห็นภาพพจน์ว่า **ในนิวเคลียสนั้น มีอนุภาคยึดกันอยู่อย่างเป็นระบบด้วยแรงชนิดแรง** (Strong)

5.2.1 กระบวนการที่เกิดขึ้น เมื่ออนุภาคตกกระทบนิวเคลียสของเป้า

1. เมื่ออนุภาคตกกระทบนิวเคลียสของเป้าจะถูกดูดกลืนเพื่อเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบ
2. พลังงานที่เกิดขึ้นทั้งหมดในระบบ จะถูกเปลี่ยนให้เป็นพลังงานกระตุ้นของนิวเคลียสเชิงประกอบ
3. พลังงานที่เกิดขึ้นทั้งหมดในระบบจะถูกแบ่งปันกันระหว่างอนุภาคในนิวเคลียสอย่างรวดเร็ว อาจจะไปรวมอยู่กับอนุภาคหนึ่งหรือกลุ่มอนุภาคก็ได้ เป็นการแบ่งปันกันแบบสุ่ม จึงทำให้นิวเคลียสเชิงประกอบมีชีวิตอยู่ชั่วระยะเวลาหนึ่ง ก่อนที่จะส่งอนุภาคหรือรังสีแกมมาออกมา
4. **พลังงานจลน์ส่วนหนึ่งของอนุภาคที่เข้าชน จะถูกแบ่งให้เป็นพลังงานจลน์ที่ทำให้นิวเคลียสเชิงประกอบเคลื่อนที่**
5. วิธีการสลายไม่ขึ้นกับวิธีการเกิด ดังนั้นนิวเคลียสเชิงประกอบอาจส่งอนุภาคหรือรังสีแกมมาออกมา โดยเหลือนิวเคลียสที่เกิดใหม่ไว้

ตัวอย่างที่ 5.1

จงคำนวณหาค่าพลังงานที่นิวเคลียสเชิงประกอบถูกกระตุ้น ในปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากนิวตรอนเข้าชน $_{13}Al^{27}$ เกิดนิวเคลียสเชิงประกอบ $\left[{}_{13}Al^{28}\right]$ ดังสมการ

$$_{13}Al^{27} + {}_{0}n^{1} \longrightarrow \left[\ {}_{13}Al^{28}\ \right]$$

วิธีทำ

หาค่าแตกต่างระหว่างมวลของ $_{13}Al^{27}$ และ $_{0}n^{1}$ ในหน่วยเอเอมยู กับมวลของนิวเคลียสเชิงประกอบ ในหน่วยเดียวกัน จะได้ค่ามวลที่แตกต่างกันในหน่วยเอเอมยู เปลี่ยนเป็นค่าพลังงานในหน่วยเอมอีวี โดยคูณด้วย 931.5 นั่นคือ

มวลของนิวตรอนที่เข้าชน	=	1.0086654	**เอเอมยู**
มวลของ Al^{27}	=	26.981535	**เอเอมยู**

ค่ามวลทั้งหมดคือ	=	27.9902004	เอเอมยู
มวลของ $\left[Al^{28}\right]$	=	27.981908	เอเอมยู
มวลที่เกิดขึ้นเพื่อจะเปลี่ยนไปเป็นพลังงาน	=	8.2924×10^{-3}	เอเอมยู
	=	7.72	เอมอีวี
ถ้าพลังงานของนิวตรอน	=	1	เอมอีวี
พลังงานที่ถูกกระตุ้นเหนือสภาวะกราวน์ เมื่อไม่คิดการเคลื่อนที่ของนิวเคลียสเชิงประกอบ	=	7.72 + 1	เอมอีวี

(ถ้าเป็นนิวตรอนช้า พลังงานประมาณ 0.025 อิเล็กตรอนโวลต์ จะไม่คิดพลังงานจลน์ของนิวตรอน เพราะมีค่าน้อยมาก ตัดทิ้งได้)

นั่นคือ พลังงานของนิวเคลียสเชิงประกอบ $\left[_{13}Al^{28}\right]$ ถูกกระตุ้นสูงกว่าพลังงานที่สภาวะกราวน์ = 8.72 เอมอีวี

หลังจากการเกิดนิวเคลียสเชิงประกอบ ในทันใดนั้น จะมีการแจกแจงพลังงานกระตุ้น (เหนือสภาวะกราวน์) ให้อนุภาคในนิวเคลียส แบบสุ่ม (random), ในการแจกแจงอย่างสุ่ม ๆ นี้ อาจจะทำให้พลังงานทั้งหมดที่นิวเคลียสเชิงประกอบได้รับมา ไปรวมกันอยู่ในนิวคลีออนหนึ่งหรือกลุ่มของนิวคลีออน ถ้าพลังงานจำนวนนี้มากพอ จะทำให้อนุภาค หรือกลุ่มอนุภาคนั้นหลุดออกไปจากนิวเคลียสเชิงประกอบได้ พลังงานที่จะทำให้อนุภาคในนิวเคลียสหลุดออกไปจากนิวเคลียสได้ เรียก**พลังงานแยกนิวคลีออน** (Separation หรือ Dissociation energy) มีค่าประมาณ 8 เอมอีวี/นิวคลีออน

ผลจากการแจกแจงพลังงานกระตุ้นในนิวเคลียสเชิงประกอบแบบสุ่ม กว่าจะสิ้นสุดต้องใช้ระยะเวลาหนึ่ง ทำให้นิวเคลียสเชิงประกอบมี**เวลาที่มีชีวิตอยู่** (life time) ค่อนข้างยาว เมื่อเทียบกับ**เวลาทางนิวเคลียร์ตามธรรมชาติ** (Natural nuclear time) หมายถึงเวลาที่อนุภาควิ่งผ่านนิวเคลียสที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 10^{-12} ซม. ถ้าอนุภาคตกกระทบเป็นนิวตรอนพลังงาน 1 เอมอีวี ความเร็วประมาณ 10^{9} ซม./วินาที จะใช้เวลาวิ่งผ่านนิวเคลียสประมาณ 10^{-21} วินาที แม้แต่เทอร์มาลนิวตรอน ซึ่งมีความเร็วประมาณ 2,200 เมตร/วินาที หรือประมาณ 10^{5} ซม./วินาที ก็จะใช้เวลาวิ่งผ่านนิวเคลียสเพียง 10^{-17} วินาที เท่านั้น แต่เวลาที่นิวเคลียสเชิงประกอบมีชีวิตอยู่นี้ อาจจะยาวนานถึง 10^{-15} หรือ 10^{-14} วินาที จึงนับว่าเป็น

เวลายาวนาน เมื่อเทียบกับเวลาทางนิวเคลียร์ตามธรรมชาติ จนลืมว่าได้เกิดขึ้นมาอย่างไร ด้วยเหตุนี้ วิธีการสลายของนิวเคลียสเชิงประกอบ จึงไม่ขึ้นกับวิธีการเกิด ในระหว่างที่เกิดนิวเคลียสเชิงประกอบ จะเรียกว่าอยู่ใน**สภาวะคเวไซ สเตชันนารี หรือสภาวะกึ่งอยู่นิ่ง** (Quasi-stationary state) ซึ่งนับว่าเป็นเวลานานมากเมื่อเทียบกับเวลาทางนิวเคลียร์ตามธรรมชาติ หลังจากนั้นนิวเคลียสเชิงประกอบจะสลายไป ถ้ามีการส่งนิวคลีออนหนึ่งหรือมากกว่าออกมา จะเรียกว่าเป็น**สภาวะที่แท้จริง** (Virtual states) หรือระดับที่แท้จริง (Virtual levels) แต่ถ้ามีการสลายโดยการส่งรังสีแกมมาออกมา เรียกว่า**สภาวะกระโดด** (Bound states) หรือระดับที่สามารถกระโดดกลับสู่ระดับกราวน์โดยการส่งรังสีแกมมา (Bound levels)

ระดับพลังงานของนิวเคลียสเชิงประกอบที่จะส่งอนุภาคมีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ มีเหตุผลพอที่จะทำนายได้ว่า **ถ้าพลังงานของอนุภาคที่ตกกระทบเป็นผลให้พลังงานทั้งหมดของระบบ** (คือ พลังงานจลน์ของอนุภาคตกกระทบ รวมกับผลต่างระหว่างมวลของอนุภาคที่ตกกระทบ กับมวลของเป้า และมวลของนิวเคลียสเชิงประกอบ) **อยู่ที่ระดับหนึ่งของสภาวะถูกกระตุ้น โอกาสที่จะเกิดนิวเคลียสเชิงประกอบย่อมมีมากกว่าเมื่อพลังงานรวมของระบบอยู่ในเขตระหว่าง 2 ระดับ** เปรียบเทียบได้กับคลื่นวิทยุ ถ้าปรับให้ความถี่ (พลังงาน) ของคลื่นเท่ากับความถี่ในวงจรจะเกิดเรโซแนนซ์ ทำให้รับฟังได้ดี แต่ถ้าความถี่ไม่เท่ากัน การรับจะไม่ดี **การเกิดยอดเรโซแนนซ์ในอัตราส่วนที่เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์เมื่อพลังงานของอนุภาคที่เข้าชนเปลี่ยนแปลง แสดงว่านิวเคลียสเชิงประกอบมีระดับพลังงาน**

ในปฏิกิริยา $Al^{27}(\alpha, p)Si^{30}$ เกิด 18 เรโซแนนซ์ เมื่ออนุภาคแอลฟามีพลังงานตั้งแต่ 3.95 เอมอีวี จนถึง 8.62 เอมอีวี ดังแสดงในตารางที่ 5.2 พลังงานยึดเหนี่ยวของอนุภาคแอลฟาในนิวเคลียสเชิงประกอบ $\left[P^{31}\right]$ เท่ากับ 9.66 เอมอีวี ค่าพลังงานกระตุ้นของระดับไม่ได้หาจากการรวมพลังงานเรโซแนนซ์กับพลังงานยึดเหนี่ยว เพราะ**นิวเคลียสเชิงประกอบมีการเคลื่อนที่ด้วย พลังงานบางส่วนของอนุภาคตกกระทบจะต้องใช้ไปเป็นพลังงานจลน์ของนิวเคลียสเชิงประกอบเพื่อใช้ในการเคลื่อนที่ และพลังงานส่วนนี้จะไม่มีผลต่อการทำให้นิวเคลียสเชิงประกอบเกิดพลังงานกระตุ้น**

5.2.2 การคำนวณหาพลังงานที่ทำให้นิวเคลียสเชิงประกอบถูกกระตุ้นเมื่อคิดการเคลื่อนที่ของนิวเคลียสเชิงประกอบ

เมื่ออนุภาคตกกระทบนิวเคลียสของเป้าซึ่งอยู่นิ่ง เกิดเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบ โมเมนตัมรวมก่อนชนและหลังชนต้องเท่ากัน แสดงว่า นิวเคลียสเชิงประกอบมีการเคลื่อนที่ด้วย

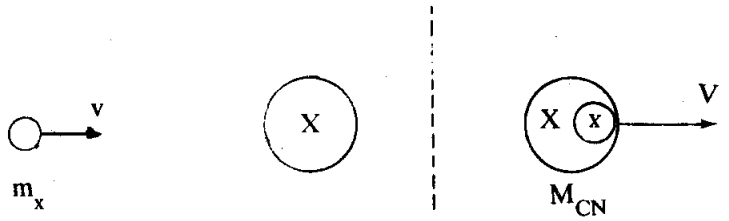
จากหลักการอนุรักษ์โมเมนตัม

$$m_x v = M_{CN} V$$

เมื่อ v, V คือความเร็วของอนุภาคตกกระทบ และ ความเร็วของนิวเคลียสเชิงประกอบ

และ M_{CN} เป็นมวลของนิวเคลียสเชิงประกอบ

การเคลื่อนที่ของนิวเคลียสเชิงประกอบ สังเกตได้ยาก จึงพยายามกำจัดความเร็วของนิวเคลียสเชิงประกอบออกไป นั่นคือ



รูปที่ 5.2 แสดงกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคตกกระทบเป้า

$$V = \frac{m_x v}{M_{CN}}$$

เนื่องจากส่วนหนึ่งของพลังงานจลน์ของอนุภาคที่วิ่งเข้าชน จะต้องนำไปใช้เป็นพลังงานในการเคลื่อนที่ของนิวเคลียสเชิงประกอบ ดังนั้น พลังงานจลน์ส่วนที่ทำให้นิวเคลียสเชิงประกอบถูกกระตุ้น จึงเหลือเพียง E'_x, เขียนได้ว่า

$$E'_x = \tfrac{1}{2} m_x v^2 - \tfrac{1}{2} M_{CN} V^2 \qquad \ldots (5.3)$$

$$= \tfrac{1}{2} m_x v^2 \left(1 - \frac{m_x}{M_{CN}}\right)$$

$$= E_x \left(\frac{M_X}{M_X + m_x}\right) \qquad \ldots (5.4)$$

เมื่อ E_x คือ พลังงานของอนุภาคที่ตกกระทบ และ

M_{CN} คือ มวลของนิวเคลียสเชิงประกอบ $= M_X + m_x$

จะเห็นว่า พลังงานจลน์ของอนุภาคตกกระทบ ส่วนที่จะนำไปใช้ทำให้นิวเคลียสเชิงประกอบถูกกระตุ้น น้อยกว่าพลังงานจลน์ของอนุภาคตกกระทบด้วยเทอม $\frac{M_X}{M_X + m_x}$

ตัวอย่างที่ 5.2

เมื่ออนุภาคแอลฟาพลังงาน 3.95 เอมอีวี เข้าชนนิวเคลียสของเป้าอะลูมิเนียม -27 เกิดนิวเคลียสเชิงประกอบ $\left[P^{31}\right]$ จงคำนวณหาค่าพลังงานของนิวเคลียสเชิงประกอบที่ถูกกระตุ้น

จากปฏิกิริยา $\quad {}_{13}Al^{27} + {}_{2}He^{4} \longrightarrow \left[{}_{15}p^{31} \right]$

$$E'_x = E_x \left[\frac{M_X}{M_X + m_x}\right]$$

$$= 3.95 \times \frac{27}{27 + 4}$$

$$= 3.44 \quad \text{เอมอีวี}$$

พลังงาน 3.44 เอมอีวี เป็นพลังงานที่ได้มาจากพลังงานจลน์ของอนุภาคตกกระทบ เป็นพลังงานส่วนที่ทำให้นิวเคลียสเชิงประกอบมีระดับพลังงานสูงขึ้น

ในการหาพลังงานที่ถูกกระตุ้นของนิวเคลียสเชิงประกอบ จะต้องรวมพลังงานทั้งระบบคือ

$$E = E_0 + E^1_x$$

เมื่อ $E_0 = \left[M_{Al}^{27} + M_{He}^{4} - M_p^{31} \right]$ เอเอมยู $\times$ 931.5 $\frac{\text{เอมอีวี}}{\text{เอเอมยู}}$

$$= (26.981535 + 4.0026036 - 30.973763)931.5$$

$$= 0.0103756 \times 931.5 = 9.66 \text{ เอมอีวี}$$

ดังนั้นนิวเคลียสเชิงประกอบ $\left[p^{31} \right]$ มีพลังงานกระตุ้น คือ

$$9.66 + 3.44 = 13.10 \text{ เอมอีวี}$$

จากการคำนวณสามารถหาระดับพลังงานกระตุ้นของ $\left[P^{31}\right]$ ได้ เมื่อใช้อนุภาคแอลฟาพลังงานเรโซแนนซ์ต่าง ๆ กัน พลังงานกระตุ้นที่คำนวณได้ มีค่ามากกว่าพลังงานที่จะใช้แยกนิวคลีออนที่เรียกพลังงานแยกนิวคลีออน (ประมาณ 8 เอมอีวี สำหรับแต่ละอนุภาค) นิวเคลียสเชิงประกอบจึงสลายโดยการส่งอนุภาค เรียกว่า อยู่ในระดับที่แท้จริง จึงอาจเกิดปฏิกิริยา $Al^{27}(\alpha, p)Si^{30}$ หรือ $Al^{27}(\alpha, n)p^{30}$ แสดงว่า **นิวเคลียสเชิงประกอบมีการสลายได้หลายวิธี**

ตารางที่ 5.2 แสดงระดับพลังงานของ $\left[p^{31} \right]$

พลังงานของอนุภาคแอลฟา (เอมอีวี) (พลังงานที่เรโซแนนซ์)	ระดับที่ถูกกระตุ้น (เอมอีวี) (Excited level) ของ $\left[p^{31} \right]$
3.95	13.10
4.53	13.60
4.70	13.75
------	------
------	------
↓	
8.24	16.83
8.42	16.99
18 ค่า 8.62	17.16

แต่ละสภาวะที่ถูกกระตุ้นของนิวเคลียสเชิงประกอบ ไม่ว่าจะเป็นระดับที่สามารถส่งอนุภาคหรือรังสีแกมมา จะมีเวลาซึ่งเป็น **ชีวิตเฉลี่ย** τ (Mean life time) **เป็นเวลาเฉลี่ยระหว่างที่นิวเคลียสยังอยู่ในสภาวะที่ถูกกระตุ้น ก่อนที่จะสลาย โดยการส่งอนุภาค หรือรังสีแกมมาออกมา ส่วนกลับของค่าชีวิตเฉลี่ย คือ ค่าคงที่ของการสลาย** (λ) **หมายถึง โอกาสที่จะส่งอนุภาค หรือรังสีแกมมาออกมาต่อหนึ่งหน่วยเวลา** ในการศึกษาสภาวะพลังงานที่ถูกกระตุ้นเมื่อเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ มักใช้ชีวิตเฉลี่ยมากกว่าค่าคงที่ของการสลาย ปริมาณที่เป็นสัดส่วนกลับกับค่าชีวิตเฉลี่ย คือ **ระดับความกว้าง** Γ (level width) โดยให้คำจำกัดความว่า

$$\Gamma = \frac{h}{2\pi\tau} \qquad \ldots (5.5)$$

ระดับความกว้าง มีหน่วยเป็นหน่วยของพลังงาน และเป็นไปตามหลักความไม่แน่นอนของไฮเซนเบอร์ก (Heisenberg uncertainty principle) ซึ่งสามารถพิจารณาสำหรับระบบที่เป็นขั้น (quantized system) เช่นในนิวเคลียสของอะตอม มีขอบเขตจำกัดโดยความสัมพันธ์

$$(\Delta E)(\Delta t) \approx \frac{h}{2\pi} \qquad \ldots (5.6)$$

เมื่อ ΔE เป็นความไม่แน่นอนของพลังงาน

Δt เป็นความไม่แน่นอนของเวลา

เวลาที่เป็นชีวิตเฉลี่ยของสภาวะที่ถูกกระตุ้น เทียบได้กับความไม่แน่นอนของเวลา Δt, ส่วนความไม่แน่นอนของพลังงาน ΔE, ให้ความหมายว่า เป็นระดับความกว้าง Γ ของระดับพลังงานที่ถูกกระตุ้น

จากสมการ (5.5), สภาวะที่มีอายุเฉลี่ยสั้น, จึงยากที่จะหาค่าพลังงานได้แน่นอน ระดับความกว้าง Γ จะมีค่ามาก ขณะเมื่อพวกที่มีชีวิตยาว จะได้ค่าพลังงานชัดเจนลงไป ความกว้างจึงมีค่าน้อยสำหรับวิธีการสลายที่เป็นไปได้, แต่ละกรณี จึงมีโอกาสที่จะสลายต่างกันไป ดังนั้น จึงมีค่า**ความกว้างแต่ละส่วน** (partial width) สำหรับแต่ละชนิดของอนุภาคที่จะส่งออกมา

ความกว้างทั้งหมด Γ **(total width) ของระดับพลังงาน จึงเป็นผลรวมของแต่ละความกว้างแต่ละส่วน นั่นคือ**

$$\Gamma = \Gamma_\gamma + \Gamma_\alpha + \Gamma_p + \ldots \qquad \ldots (5.7)$$

เมื่อ Γ_γ **เป็นความกว้างที่จะส่งรังสีแกมมา วัดได้เป็นโอกาสที่จะเกิดการส่งรังสีแกมมา**

ต่อหนึ่งหน่วยเวลา

Γ_α เป็นความกว้างที่จะส่งอนุภาคแอลฟา

Γ_p เป็นความกว้างที่จะส่งโปรตอน

และอื่น ๆ

ข้อคิดเกี่ยวกับระดับความกว้าง นับว่ามีประโยชน์ เพราะจะพิจารณาที่พลังงานเรโซแนนซ์ เมื่อทราบค่าความกว้างทั้งหมด จะคำนวณหาค่าเวลาที่เป็นชีวิตเฉลี่ยได้ ดังนี้

$$\tau \text{ (วินาที)} = \frac{h}{2\pi\Gamma} \quad \frac{(\text{จูล}\cdot\text{วินาที})}{(\text{จูล})}$$

เมื่อ $h = 6.625\times10^{-34}$ จูล.วินาที

$$= \frac{1.06\times10^{-34}}{\Gamma(\text{eV})\times1.60\times10^{-19}}$$

$$\tau = \frac{6.6\times10^{-16}}{\Gamma\ (\text{eV})} \quad \text{วินาที} \qquad \ldots (5.8)$$

ตัวอย่างที่ 5.3

จงหาระดับความกว้างสำหรับการส่งรังสีแอลฟา ซึ่งมีชีวิตเฉลี่ย 4×10^{-7} วินาที จากสมการ (5.8)

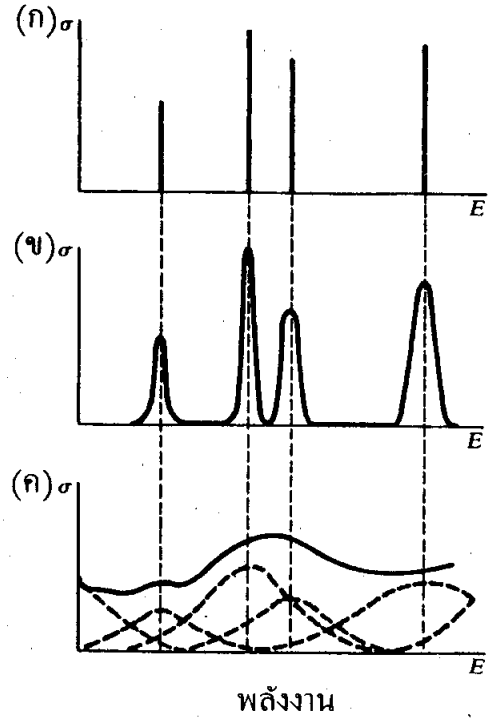
$$\Gamma_\alpha = \frac{6.6\times10^{-16}\ \text{อีวี}\ .\ \text{วินาที}}{4\times10^{-7}\qquad \text{วินาที}}$$

$$\approx 10^{-9} \qquad \text{อีวี}$$

ระดับความกว้าง มีหน่วยเป็นอิเล็กตรอนโวลต์ สำหรับระดับที่กว้าง ๆ, Γ อาจมีขนาดถึง 10^4 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังเช่นในนิวคลีไอเบา ๆ , เวลาที่มีชีวิตอยู่สั้น มีขนาดประมาณ 6.6×10^{-20} วินาที ขณะที่ระดับความกว้างของพลังงาน 0.1 อิเล็กตรอนโวลต์ มีชีวิตเฉลี่ยยาวถึง 6.6×10^{-15} วินาที ในนิวเคลียสเชิงประกอบที่มีระดับพลังงานค่อนข้างแคบ, ชีวิตเฉลี่ยจะยาวถึง $10^{-15} - 10^{-14}$ วินาที

เมื่ออนุภาคตกกระทบนิวเคลียสเกิดเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบ มีสภาวะควอนตัมของระบบเกิดขึ้น แต่ละสภาวะมีพลังงานจำกัดแน่นอน นิวเคลียสเชิงประกอบจึงเกิดขึ้นได้เมื่ออนุภาคตกกระทบต้องมีพลังงานถูกต้องแน่ชัด กรณีนี้ภาคตัดขวางสำหรับปฏิกิริยาจะแสดงไว้ในรูปที่ 5.3 (ก) แต่ก็ไม่เป็นการถูกต้องนัก เพราะพลังงานของนิวเคลียสเชิงประกอบมีระดับความกว้างที่แน่นอน

ในรูป 5.3 (ข) ระดับความกว้างน้อยกว่าค่าแตกต่างระหว่าง 2 สภาวะพลังงานที่เกิดขึ้นได้โดยการวัดที่เรโซแนนซ์เรียกระดับที่ว่าง (level spacing) ใช้สัญลักษณ์ D ส่วนรูปที่ 5.3 (ค) ระดับความกว้างมากกว่าค่าแตกต่างระหว่าง 2 สภาวะพลังงานที่เกิดขึ้นได้โดยการวัดที่เรโซแนนซ์ ค่าภาคตัดขวางจะเรียบ ทั้งรูปที่ 5.3 (ข) และ 5.3 (ค) ค่าภาคตัดขวางเป็นฟังก์ชันของพลังงานตกกระทบ



รูปที่ 5.3 แสดงสภาวะพลังงานที่เรโซแนนซ์และภาคตัดขวาง

(ก) แต่ละสภาวะมีพลังงานจำกัดแน่นอน

(ข) $\Gamma << D$

(ค) $\Gamma >> D$

ตัวอย่างที่ 5.4

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น โดยการใช้นิวตรอนพลังงาน 0.1 เอมอีวี เข้าชนนิวเคลียสของ Fe^{56} ปรากฏว่า พลังงานที่เกิดขึ้นในระบบไม่พอที่นิวเคลียสเชิงประกอบจะสลาย โดยการส่งนิวคลีออนอื่นออกมาด้วยวิธีการใด ๆ ดังนั้น นิวเคลียสเชิงประกอบจึงต้องกลับสู่สภาวะกราวน์ของ Fe^{56} โดยการส่งนิวตรอนเป็นส่วนมาก นั่นคือ $\Gamma \approx \Gamma_n$

จากการศึกษาระดับความกว้างของพลังงานที่จะส่งอนุภาคหรือรังสีแกมมาออกมาจะเกี่ยวข้องกับภาคตัดขวางของการเกิดปฏิกิริยาด้วย การหาโอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยาได้มากที่สุดก็คือการหาค่าภาคตัดขวางที่พลังงานเรโซแนนซ์

ในปฏิกิริยา X (x, y) Y อาจเขียน σ (x, y) ตามหลักการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์

$$\sigma (x, y) = \sigma_C (x) \times \text{โอกาสการส่งอนุภาค } y \qquad \ldots (5.9)$$

เมื่อ $\sigma_C (x)$ คือค่าภาคตัดขวาง สำหรับการเกิดนิวเคลียสเชิงประกอบ ในการชน ระหว่างอนุภาค x และนิวเคลียสของเป้า X

โอกาสการส่งอนุภาค y หรือรังสีแกมมาที่สัมพันธ์กับการส่งอนุภาคหรือรังสีแกมมาออกมาทั้งหมด $= \dfrac{\Gamma_y}{\Gamma}$

เมื่อ Γ_y = ระดับความกว้างส่วนที่จะส่งอนุภาค y ออกมา

และ Γ = ระดับความกว้างทั้งหมด

สมการ (5.9) คือ

$$\sigma (x, y) = \sigma_C (x) \cdot \frac{\Gamma_y}{\Gamma} \qquad \ldots (5.10)$$

โดยปกติแล้ว ค่าภาคตัดขวาง และระดับความกว้างขึ้นกับพลังงานของอนุภาคที่ตกกระทบ และมวลของเป้า

สูตรของเบรทและวิกเนอร์ (Breit and Wigner formula)

กรณีหนึ่งที่ใช้หาค่า $\sigma(x, y)$ ทำได้โดยการใช้สูตรของเบรทและวิกเนอร์แบบง่าย ๆ คือ จะหาที่พลังงานเรโซแนนซ์, สูตรที่ใช้คือ

$$\sigma(x, y) = \frac{\lambda^2 \cdot \Gamma_x \Gamma_y}{4\pi \left[(E - E_0)^2 + \left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2 \right]} \quad \ldots (5.11)$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นเดอร์บรอยของอนุภาคที่ตกกระทบ

E คือพลังงานของอนุภาค

E_0 คือพลังงานที่ยอดของเรโซแนนซ์

Γ คือความกว้าง (ที่เรโซแนนซ์ $E = E_0$)

สูตรนี้เป็นตัวอย่างการใช้กลศาสตร์คลื่น ทางนิวเคลียร์ฟิสิกส์ ความยาวคลื่นเดอร์บรอยสำหรับอนุภาคที่มีโมเมนตัม mv คือ

$$A = \frac{h}{mv} \quad . \quad (5.12)$$

h คือ ค่าคงที่ของแพลงค์

อาจเขียน λ ในเทอมของพลังงานจลน์ E

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2\,mE}} \quad . . \quad (5.13)$$

ถ้า E มีหน่วยเป็นอิเล็กตรอนโวลต์

$$\lambda \ (\text{ซม.}) = \frac{2.87 \times 10^{-9}}{\sqrt{E\,(eV)}} \quad \ldots \quad (5.14)$$

ตัวอย่างที่ 5.5

จงหาโอกาสการเกิดปฏิกิริยาที่สัมพันธ์กันระหว่าง (n, n) และ (n, γ) ในอินเดียม ทราบว่าเกิดการจับนิวตรอนมากที่สุดที่พลังงานเรโซแนนซ์คือที่พลังงาน 1.44 อิเล็กตรอนโวลต์ ด้วยค่า Γ = 0.1 อิเล็กตรอนโวลต์ และค่าภาคตัดขวาง = 28,000 บาร์น

ที่เรโซแนนซ์, $E = E_0$

จากสมการ (5.11),

$$\sigma(n,\gamma) = \frac{\lambda^2}{\pi} \frac{\Gamma_n \Gamma_\gamma}{\Gamma^2} \quad \ldots (5.15)$$

ความยาวคลื่นเดอร์บรอย (λ) สำหรับนิวตรอนเมื่อมีพลังงาน 1.44 อิเล็กตรอนโวลต์ หาได้จาก

$$\lambda = \frac{2.87 \times 10^{-9}}{\sqrt{E\,(eV)}}$$

$$= \frac{0.287 \times 10^{-8}}{\sqrt{1.44}} = 0.24 \times 10^{-8} \text{ เซนติเมตร}$$

จัดสมการ (5.15) และแทนค่าภาคตัดขวาง และความยาวคลื่นจะได้

$$\Gamma_n \Gamma_\gamma = \frac{\pi\,(0.1)^2\,(2.8 \times 10^{-20})}{(0.24)^2 \times 10^{-16}}$$

$$= 1.5 \times 10^{-4}$$

เนื่องจาก $\Gamma_\gamma \approx \Gamma = 0.1$, จะได้

$$\frac{\Gamma_n}{\Gamma_\gamma} = 0.015 = \frac{15}{1000}$$

จากตัวอย่าง แสดงให้เห็นว่า ในกรณีของอินเดียม ขณะเกิดเรโซแนนซ์จะมีนิวตรอนส่งออกมา 15 ตัว ต่อรังสีแกมมา 1,000 ตัว ส่วนมาก ค่า Γ_γ มักจะมากกว่า Γ_n ประมาณ 10 เท่า หรือ 100 เท่า จึงอาจเขียนสมการ (5.15) ได้ดังนี้

$$\sigma_{max} = \frac{\lambda^2 \Gamma_n}{\pi \Gamma_\gamma} \quad \ldots (5.16)$$

โดยคิดว่า $\Gamma_\gamma \approx \Gamma$

5.3 ปฏิกิริยานิวเคลียร์, โอกาสการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์

ปฏิกิริยานิวเคลียร์ จะเกิดขึ้นมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับโอกาสที่อนุภาคที่แต่ละพลังงานจะชนกับนิวเคลียสชนิดใด พื้นที่ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยา ต่อหนึ่งนิวเคลียส เรียก**ภาคตัดขวางจุลภาค** (microscopic cross section) ใช้สัญลักษณ์ σ (E) มีหน่วยเป็นหน่วยพื้นที่ จะหาค่าภาคตัดขวางจุลภาคตามเรขาคณิตได้จาก พื้นที่หน้าตัดของนิวเคลียสนั้น

กรณีของเป้าบาง

$$\sigma = \pi R^2$$

เมื่อ R คือรัศมีของนิวเคลียส, หาได้จาก $R = R_0 A^{1/3}$

R_0 คือค่าคงที่ มีค่าประมาณ 1.5 เฟอร์มิ สำหรับการหารัศมีของนิวคลีไอที่ส่งรังสีแกมมา (1 เฟอร์มิ = 10^{-13} ซม.)

และ A คือ เลขมวลของนิวเคลียสของเป้า

σ มีหน่วยเป็น ตารางเซนติเมตร แต่มักใช้หน่วยเป็นบาร์น

โดยกำหนดว่า

1 บาร์น เท่ากับ 10^{-24} ซม.^{2}

การหาค่าภาคตัดขวาง มักหาจากจำนวนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น โดยกำหนดให้

ลำอนุภาควิ่งไปกระทบเป้า	n	อนุภาค/ซม.^{3}
อนุภาคเหล่านี้วิ่งด้วยความเร็ว	v	ซม./วินาที
จำนวนอนุภาคที่วิ่งผ่านเป้า	nv	อนุภาค/ซม.^{2}/วินาที

เรียก nv ว่าฟลักซ์ของอนุภาค $\varnothing$ (particle flux) คือจำนวนอนุภาคที่วิ่งผ่านพื้นที่ 1 ซม.^{2} ในเวลา 1 วินาที

ถ้านิวเคลียสของเป้ามีจำนวน	N	นิวคลีไอ/ซม.^{3}
เป้าส่วนที่มีโอกาสเกิดปฏิกิริยา	$N\sigma$	ซม.$^{-1}$

เรียก $N\sigma$ ว่า ภาคตัดขวางมหภาค Σ(Macroscopic cross section) มีหน่วยเป็น ซม.$^{-1}$

ถ้าเป้าหนา x ซม.

จำนวนนิวคลีไอของเป้าที่มีโอกาสเกิดปฏิกิริยา คือ $N\sigma x$

ดังนั้น

จำนวนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น/ซม.^{2}/วินาที คือ $N\sigma \cdot nv \cdot x$ ...(5.17)

หรือ

$$\text{ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น} = \Sigma \varnothing x \frac{\text{อะตอม}}{\text{ซม.}^2 \cdot \text{วินาที}} \quad \ldots(5.18)$$

$$\text{นั่นคือ } \sigma = \frac{\text{จำนวนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น}}{nv \cdot N \cdot x} \quad \text{ซม.}^2 \quad \ldots(5.19)$$

จำนวนนิวคลีไอของเป้า หาได้จาก

$$N = \frac{\rho \cdot Na}{A} \quad \ldots (5.20)$$

เมื่อ ρ คือความหนาแน่นของธาตุที่ใช้เป็นเป้า

A คือเลขมวลของธาตุที่ใช้เป็นเป้า

Na คือเลขอาโวกาโดร

ในการอาบลำแสงนิวตรอน (neutron activation), เขียนได้ว่า

จำนวนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น, $R = \Sigma \varnothing \quad \ldots (5.21)$

$\Sigma \varnothing$ **มีหน่วยเป็น อะตอม/ซม.^{3} /วินาที**

เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมากที่สุด เมื่อไม่มีการสลายอีกต่อไป

ภาคตัดขวางสำหรับแต่ละปฏิกิริยาและภาคตัดขวางทั้งหมด

(Partial and total cross section)

ภาคตัดขวาง (σ) จะมีค่าเฉพาะ สำหรับแต่ละปฏิกิริยา เรียก**ภาคตัดขวางสำหรับแต่ละปฏิกิริยา** (partial cross section) เช่น

σ_s = ภาคตัดขวางจุลภาคสำหรับการกระเจิง (scattering cross section)

σ_e = ภาคตัดขวางจุลภาคสำหรับการกระเจิงแบบยืดหยุ่น(elastic scattering cross section)

σ_{ie} = ภาคตัดขวางจุลภาคสำหรับการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic scattering cross section)

$\sigma_s = \sigma_e + \sigma_{ie}$

σ_a = ภาคตัดขวางจุลภาคสำหรับการดูดกลืน (absorption cross section)

ภาคตัดขวางจุลภาคสำหรับทุกกระบวนการที่เกิดขึ้นคือ σ_t (total cross section)

$$\sigma_t = \sigma_a + \sigma_s$$

ถ้าไม่กำหนดว่ามีปฏิกิริยาอื่น ๆ เกิดขึ้น จะคิดว่ามีปฏิกิริยาแต่เพียงที่โจทย์กำหนดให้เท่านั้น

ตัวอย่างที่ 5.6

จงหาค่าภาคตัดขวาง สำหรับลำแสงพลังงานเดียว กับเป้า ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด A หนา x โดยกำหนดว่า ก่อนกระทบเป้า อัตราการเคลื่อนที่ของอนุภาคในลำแสง คือ R_0, แต่เมื่อกระทบเป้า มีอัตราการเคลื่อนที่เป็น R

ถ้าแต่ละนิวเคลียสของเป้า มีพื้นที่ส่วนที่ทำให้เกิดปฏิกิริยา = σ
(คือพื้นที่ส่วนที่ตั้งได้ฉากกับลำแสง)

จำนวนนิวคลีไอทั้งหมดในแผ่นบาง ๆ นี้ คือ $N \times A$
เมื่อ N คือ จำนวนนิวคลีไอ/ซม.^{3}

พื้นที่ทั้งหมดของเป้า ที่ตกกระทบแล้วเกิดปฏิกิริยา = $N x . A . \sigma$

แต่พื้นที่ทั้งหมดของเป้า = A

อัตราส่วนระหว่างอนุภาคที่ตกกระทบแล้วเกิดปฏิกิริยา ต่อ อนุภาคที่ผ่านเข้าไปทั้งหมด เปรียบเทียบได้กับ อัตราส่วนของพื้นที่ทั้งหมดของเป้าส่วนที่ทำให้เกิดปฏิกิริยา ต่อ พื้นที่ทั้งหมดของเป้า

$$\frac{R}{R_0} = \frac{N x . \sigma A.}{A}$$

$$\frac{R}{R_0} = N x \sigma$$

จะได้

$$\sigma = \frac{R}{R_0} \cdot \frac{1}{N x} \qquad \ldots (5.22)$$

5.4 การพิจารณา มวล, พลังงาน ในการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์

แบลทและวิสคอพ (Blatt – Weisskopf) ได้จำแนกปฏิกิริยานิวเคลียร์ไว้ตามคุณสมบัติที่แตกต่างกันของอนุภาคที่ตกกระทบ, พลังงาน, และเลขมวลของนิวเคลียสที่ใช้เป็นเป้า อนุภาคตกกระทบ เช่น นิวตรอน, โปรตอน, อนุภาคแอลฟา ดิวทิรอน หรืออาจเป็นรังสีแกมมา

พลังงานของอนุภาคตกกระทบ แบ่งอย่างหยาบ ๆ ได้เป็น 5 พวกด้วยกัน คือ

1) พลังงานต่ำ	$0 < E < 1000$	อีวี
2) พลังงานปานกลาง	1 เคอีวี $< E < 500$	เคอีวี
3) พลังงานสูง	0.5 เอมอีวี $< E < 10$	เอมอีวี
4) พลังงานสูงมาก	10 เอมอีวี $< E < 50$	เอมอีวี
5) พลังงานสูงที่สุด (Ultrahigh energies)	$E > 50$	เอมอีวี

นิวเคลียสที่ใช้เป็นเป้า แบ่งได้เป็น 3 พวก ตามค่าของเลขมวล

ก) นิวคลีไอชนิดเบา	$1 < A < 25$
ข) นิวคลีไอชนิดปานกลาง	$25 < A < 80$
ค) นิวคลีไอหนัก	$80 < A < 250$

การจำแนกปฏิกิริยานิวเคลียร์ มักจะกระทำตามคุณสมบัติทั่ว ๆ ไป เช่นอนุภาคที่ส่งออกมา การแจกจ่ายพลังงาน และคุณสมบัติอื่น ๆ แม้ว่าจะไม่ชัดแจ้ง แต่ก็พอเป็นที่สังเกตและได้ผลตรงตามแบบที่ได้วางไว้

จะเห็นได้ว่า ปฏิกิริยาที่เกิดจากนิวตรอน มักจะต่างไปจากพวกอนุภาคที่มีประจุ เพราะนิวตรอนไม่มีประจุ สามารถทะลุทะลวงเข้าไปในนิวเคลียสได้ง่าย โอกาสที่จะเกิดนิวเคลียสเชิงประกอบมีได้สูง นิวตรอนสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ แม้พลังงานจลน์มีค่าต่ำ ต่างกับอนุภาคที่มีประจุ อนุภาคที่มีประจุบวก จะต้องเอาชนะแรงผลักคูลอมบ์ที่กระทำโดยประจุบวกในนิวเคลียส ต้องผ่านกำแพงคูลอมบ์ (Coulomb barrier) จึงต้องมีพลังงานมากพอที่จะผ่านพ้นยอดของกำแพง จำเป็นต้องมีพลังงานสูง ด้วยเหตุนี้จึงพบปฏิกิริยา ที่เกิดจากนิวตรอนมากกว่าปฏิกิริยาที่เกิดจากอนุภาคที่มีประจุ

พวกนิวคลีไอเบา ๆ (ก) พวกนี้มักจะเกิดปฏิกิริยาที่มักไม่เป็นไปตามกฎเกณฑ์ มักขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของแต่ละนิวเคลียส, พลังงานที่ใช้แยกนิวคลีออนออกจากกัน และค่าคิวมักจะแตกต่างกันมาก ระหว่างนิวคลีไอในกลุ่มเดียวกัน มากกว่านิวคลีไอในกลุ่มอื่น ๆ ปฏิกิริยาในกลุ่ม (ข) และ (ค) จะมีคุณสมบัติต่างกันไป ในเขตที่มีพลังงานต่างกัน เช่น **อนุภาคที่มีประจุพลังงานน้อยกว่า 500 เคอีวี พลังงานอยู่ในกลุ่ม (1), (2) จะไม่สามารถทะลวงเข้าไปในนิวเคลียสของกลุ่ม (ข) และ (ค) แต่ถ้าเป็นนิวตรอน ก็อาจเข้าไปได้ ในเขตพลังงานต่ำจะเกิดการจับนิวตรอนโดยนิวคลีไอหนักที่พลังงานเรโซแนนซ์ ขณะเมื่อในเขตที่มีพลังงาน** ตามข้อ (2) ปฏิกิริยาที่สำคัญส่วนใหญ่คือ การเกิดปฏิกิริยาการกระเจิงนิวตรอนแบบยืดหยุ่น

ที่พลังงานเรโซแนนซ์ พลังงานเขต (3) ปฏิกิริยาจากอนุภาคที่มีประจุ เริ่มมีความสำคัญ นิวเคลียสที่เหลือ (residual nucleus) จะถูกทิ้งไว้ที่หลาย ๆ สภาวะที่ถูกกระตุ้น และส่งอนุภาคต่าง ๆ ออกมา เกิดเป็นกลุ่มที่มีพลังงานต่าง ๆ ในพลังงานเขต (4) นับว่าสูงพอสำหรับปฏิกิริยาที่จะส่งอนุภาคออกมาหนึ่งหรือมากกว่านั้น ต่ออนุภาคตกกระทบแต่ละครั้ง เช่น (p, 2n), (p, np) และอื่น ๆ ในพลังงานเขตที่ (5) พลังงานของอนุภาคตกกระทบสูงมาก ทำให้มีการส่งหลายนิวคลีออนออกมาทันที จากการตกกระทบเพียงครั้งเดียว และตอนนี้แหละที่ทำให้ทฤษฎีนิวเคลียสเชิงประกอบของบอร์ใช้ไม่ได้

สรุป

1. บทนี้ได้อาศัยทฤษฎีนิวเคลียสเชิงประกอบของบอร์เป็นหลักในการอธิบายปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดขึ้น ทำให้ทราบถึงกระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคตกกระทบเป้าแล้วเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ เป็นผลให้เกิดนิวไคลด์ใหม่ และอนุภาคใหม่แตกต่างกันไป นิวไคลด์ใหม่ที่เกิดขึ้น บางทีก็อยู่ที่ระดับกราวน์ แต่บางทีก็อยู่ในระดับพลังงานที่ถูกกระตุ้นขึ้นไปอยู่เหนือระดับกราวน์ พวกนี้สามารถแสดงได้โดยใช้แผนผังแสดงระดับพลังงาน การกลับสู่ระดับกราวน์นั้นอาจส่งอนุภาคหรือรังสีแกมมาออกมา

2. ระดับความกว้างของพลังงาน มีประโยชน์ในการศึกษาคุณสมบัติของนิวเคลียสเชิงประกอบ สภาวะที่ถูกกระตุ้นทางนิวเคลียร์ทั้งระดับที่จะส่งอนุภาค หรือรังสีแกมมา นำไปใช้ในการศึกษาปฏิกิริยานิวเคลียร์ และยังให้ความสัมพันธ์ของโอกาสที่จะสลาย เพื่อนำไปสู่การศึกษาโครงสร้างทางนิวเคลียร์อีกด้วย

3. อัตราการเกิดปฏิกิริยาเมื่ออาบรังสีนิวตรอน $= \Sigma . \varnothing \ \frac{\text{อะตอม}}{\text{ซม.}^3 . \text{วินาที}}$

เมื่อ $\Sigma = N\sigma$ ซม.$^{-1}$

N = ความหนาแน่นอะตอม $= \frac{\text{อะตอม}}{\text{ซม.}^3}$

σ = ค่าภาคตัดขวางจุลภาคสำหรับแต่ละปฏิกิริยามีหน่วยเป็น ซม.^{2} เป็นค่าที่ขึ้นกับพลังงานของอนุภาค

$\varnothing$ = ฟลักซ์นิวตรอน มีหน่วยเป็น $\frac{\text{นิวตรอน}}{\text{ซม.}^2 . \text{วินาที}}$

4. อัตราส่วนระหว่างอัตราการเคลื่อนที่ของอนุภาคในเป้าและในลำแสงหาได้จาก

$$\frac{R}{R_0} = N\sigma x$$

แบบฝึกหัดบทที่ 5

5.1 ให้ความหมายของ

(1) พลังงานกระตุ้นของนิวเคลียส

(2) สภาวะกึ่งอยู่นิ่ง

(3) สภาวะที่แท้จริง

(4) สภาวะกระโดด

5.2 จงอธิบายกระบวนการที่เกิดขึ้น เมื่ออนุภาคตกกระทบนิวเคลียสของเป้า โดยใช้ทฤษฎีนิวเคลียสเชิงประกอบ ของบอร์

5.3 โดยใช้ทฤษฎีนิวเคลียสเชิงประกอบของบอร์ จงหาพลังงานที่ถูกกระตุ้นของนิวเคลียสเชิงประกอบ ที่เกิดขึ้น เมื่อนิวตรอนพลังงาน 2 เอมอีวี เข้าชนนิวเคลียส $_{13}Al^{27}$

5.4 อนุภาคแอลฟาพลังงาน 6.82 เอมอีวี ยิงเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุอะลูมิเนียม-27 จงหา

(ก) พลังงานของอนุภาคแอลฟาส่วนที่ทำให้นิวเคลียสเชิงประกอบถูกกระตุ้น

(ข) พลังงานที่ทำให้นิวเคลียสเชิงประกอบเคลื่อนที่

5.5 ดิวทิรอนพลังงาน 1.51 เอมอีวี เข้าชนนิวเคลียสของโบรอน -11 จงหาพลังงานที่ทำให้นิวเคลียสเชิงประกอบถูกกระตุ้น

5.6 ในการทดลองโดยใช้อนุภาคแอลฟาที่ถูกเร่งจากไซโคลตรอน จนมีพลังงาน 21.7 เอมอีวี วิ่งเข้าชนเป้า $_4Be^9$ ปรากฏว่า มีโปรตอนออกมา 4 กลุ่ม ค่าคิว $= -6.92, -7.87, -8.57$ และ -10.74 เอมอีวี ตามลำดับ

(ก) จงหาพลังงานของโปรตอน ที่วัดได้ในแนวทำมุม 90° กับลำอนุภาคแอลฟา

(ข) จงหาค่าคิว ที่ทำให้นิวเคลียสที่เกิดขึ้น อยู่ที่สภาวะกราวน์

(ค) จงหาพลังงานของโปรตอนที่ทำให้เกิดสภาวะต่าง ๆ ของนิวเคลียส (เทียบกับสภาวะกราวน์)

(ง) จงหาพลังงานขีดเริ่มเปลี่ยน เพื่อทำให้เกิดนิวเคลียสใหม่อยู่ที่สภาวะกราวน์

5.7 เมื่อใช้ (ก) นิวตรอน, (ข) โปรตอน, (ค) ดิวทิรอน (ง) อนุภาคแอลฟา แต่ละอนุภาค พลังงาน 10 เอมอีวี ยิงเข้าไปในนิวเคลียสของ C^{12} จงหาพลังงานที่ถูกกระตุ้นของนิวเคลียสเชิงประกอบ เมื่อ

(1) ไม่คิดการเคลื่อนที่ของนิวเคลียสเชิงประกอบ

(2) คิดการเคลื่อนที่ของนิวเคลียสเชิงประกอบ

5.8 อนุภาคแอลฟาพลังงาน 7.75 เอมอีวี เข้าชนนิวเคลียสของคาร์บอน −12 จงหาค่าพลังงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาตามทฤษฎีนิวเคลียสเชิงประกอบ

5.9 ฟอล์ยแทนทาลัม (A = 181), มีพื้นที่ทำปฏิกิริยาได้เพียง 1% จงหาความหนาของแผ่นธาตุบาง ๆ นี้ โดยคิดว่านิวคลีไอไม่บังกัน, กำหนดความหนาแน่นของแทนทาลัม = 16 กรัม/ซม.^{3}