บทที่ 10
แรงนิวเคลียร์และรูปแบบของนิวเคลียส
NUCLEAR FORCE AND NUCLEAR MODELS

วัตถุประสงค์

การศึกษาบทนี้เพื่อให้สามารถอธิบาย

1. คุณสมบัติ และต้นกำเนิดของแรงนิวเคลียร์ได้
2. รูปแบบของนิวเคลียสที่จะนำมาใช้อธิบายปรากฏการณ์ต่าง ๆ ได้

10.1 แรงนิวเคลียร์
(Nuclear Force)

เป็นที่ทราบกันแล้วว่า นิวเคลียสประกอบด้วยอนุภาค โปรตอนและนิวตรอน แต่ก็ยังไม่เป็นที่ทราบแน่นอนว่า อนุภาคเหล่านั้นรวมกันอยู่ได้อย่างไร มีแรงอะไรยึดเหนี่ยวอนุภาคเหล่านั้นและโครงสร้างของนิวคลีไอเป็นอย่างไร

10.1.1 ลักษณะของแรงนิวเคลียร์

(Characteristics of the Nuclear Force)

นิวคลีออนอยู่ด้วยกันในนิวเคลียสได้ด้วยแรงดูดทางนิวเคลียร์ เกิดขึ้นจากการสูญเสียพลังงาน เพื่อรวมกันเข้าเป็นนิวเคลียส เรียก พลังงานยึดเหนี่ยว ซึ่งเปลี่ยนรูปมาจากมวลที่หายไป เมื่อนำมวลของนิวไคลด์ ลบออกจากมวลของทุก ๆ นิวคลีออนและอิเล็กตรอนในนิวไคลด์นั้น แรงโน้มถ่วง ก็ถือว่าเป็นแรงดูดระหว่างมวลเหมือนกัน ดังนั้น ถ้าจะนำค่าแรงต่าง ๆ ที่อาจเกิดขึ้นกับนิวคลีออน ซึ่งเป็นอนุภาคที่มีมวลในนิวเคลียสมาพิจารณา ก็อาจทำได้ ดังตัวอย่างต่อไปนี้

ตัวอย่างที่ 10.1

จงเปรียบเทียบแรงไฟฟ้า และแรงโน้มถ่วง ระหว่าง 2 โปรตอน โดยกำหนดให้ อนุภาคทั้งสองอยู่ห่างกัน 10^{-15} เมตร

$$F_e = \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2}$$

เมื่อ ϵ คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant)
ขึ้นอยู่กับตัวกลางระหว่างประจุ,
ประจุมีหน่วยเป็น คูลอมบ์
แรงเป็นนิวตัน,

ϵ มีค่า $= \frac{1}{9 \times 10^9}$

แรงผลักทางไฟฟ้าสถิต $F_e = \frac{(1.6 \times 10^{-19})^2 (9 \times 10^9)}{10^{-30}}$

$= 230$ นิวตัน

และ $F_g = \frac{m_1 m_2}{G r^2}$

แรงโน้มถ่วง $= \frac{(1.66 \times 10^{-27})^2}{1.51 \times 10^{10} \times 10^{-30}}$

$= 1.8 \times 10^{-34}$ นิวตัน

เป็นที่น่าสังเกตว่า แรงนี้มีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับแรงอื่น ๆ และแรงนิวเคลียร์

ในปี 1935 นักฟิสิกส์ชาวญี่ปุ่นชื่อ ยูกาวา (Yukawa) ได้พยายามหาต้นกำเนิดของแรงนิวเคลียร์ พอที่จะสรุปได้ดังนี้

1) แรงนิวเคลียร์ เป็นแรงชนิดดูด น่าจะมีบางส่วนที่กระทำในระยะทางสั้น ๆ เป็นแรงผลัก มิฉะนั้นนิวคลีออนทั้งหมด คงจะรวมกันเป็นอนุภาคเดียว

2) แรงนิวเคลียร์ จะต้องมีค่ามากกว่าแรงคูลอมบ์ ถ้าไม่จริงแล้ว นิวคลีไอจะต้องถูกแยกออกด้วยแรงผลักไฟฟ้าสถิต

3) แรงนิวเคลียร์ ไม่ได้ขึ้นกับธรรมชาติของนิวคลีออนที่ทำกิริยากันมากนัก นั่นคือมีความแตกต่างกันน้อยมากระหว่างแรง n–n, n–p และแรง p–p

4) เป็นแรงที่กระทำในระยะทางสั้นมาก ค่าของแรงนิวเคลียร์ จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อใกล้ระยะรัศมีของนิวเคลียส เร็วยิ่งกว่าส่วนกลับของระยะทางกำลังสอง

5) ใกล้เข้าไปประมาณ 1 เฟอร์มิ ยังไม่มีใครทราบเกี่ยวกับการแปรเปลี่ยนของแรงที่เกิดขึ้น นอกจากว่ามีแรงผลัก แรงนี้จะมีค่ามากขึ้นที่ระยะประมาณ 0.4 เฟอร์มิ เป็นการป้องกันการทะลุทะลวงเข้าไปถึงแก่นของนิวเคลียส

6) ด้วยเหตุผลที่ว่า เป็นแรงกระทำในระยะทางสั้น ๆ แรงนิวเคลียร์ จึงเกิดขึ้นกับนิวคลีออนที่อยู่ใกล้เคียงเท่านั้น

7) เป็นแรงชนิดอิ่มตัว (saturated) กลุ่มของนิวคลีออน 4 ตัว เช่น $_2He^4$ จึงมีเสถียรภาพ แต่ถ้ามีอนุภาค 5 ตัว ในนิวเคลียส เช่น $_2He^5$ เป็นนิวเคลียสที่ไม่มีเสถียรภาพ แสดงว่า ธรรมชาติของแรงนิวเคลียร์นั้นเป็นชนิดอิ่มตัว

8) นิวคลีออนจะอยู่ในวงโคจรได้ครบ (closed shells) เมื่อมีแรงกระทำอย่างอ่อนระหว่างวงโคจร อธิบายได้จากนิวไคลด์ $_4Be^8$ ซึ่งประกอบด้วย $_2He^4$ 2 นิวไคลด์ที่อิ่มตัว

9) แม้ว่า กลุ่มของ 4 นิวคลีออน จะแสดงถึงการอิ่มตัว ก็ยังมีแนวโน้มที่จะจับคู่ของนิวคลีออนได้อีก

ลักษณะบางประการของนิวเคลียส ที่ได้มาจากคุณสมบัติของแรงนิวเคลียร์ คือ

1) นิวคลีไอมีลักษณะเป็นทรงกลม (อัตราส่วนระหว่างปริมาตร ต่อพื้นที่ผิว มีค่ามากที่สุด)

2) อนุภาคที่รวมกันอยู่ในนิวเคลียส มีลักษณะไม่ยืดหยุ่น ด้วยเหตุนี้ รัศมีของนิวเคลียสจึงหาได้จาก

$$R = R_o A^{1/3}$$

เมื่อ R_o มีค่า 1.1 ถึง 1.5 เฟอร์มิ (ขึ้นกับวิธีการวัดรัศมี) โดยถือว่า อนุภาคที่อยู่ในนิวเคลียสนั้นมีความหนาแน่นคงที่

3) ประจุในนิวเคลียส มีการแจกแจงอย่างสม่ำเสมอทั่วปริมาตร แต่การเกิดไฮเปอร์ไฟน์สตรักเจอร์ (hyperfine structure) แสดงว่ามี ควอดรูโพล โมเมนต์ (quadrupole moment) เกิดขึ้น ซึ่งเป็นการแสดงว่า นิวเคลียสมีรูปร่างเป็นรูปไข่ (ellipse) ไม่เป็นทรงกลมอย่างแท้จริง

10.1.2 ต้นกำเนิดของแรงนิวเคลียร์

(Origin of the Nuclear Force)

แรงนิวเคลียร์ เป็นแรงที่มีค่าสูง, กระทำในระยะสั้น และอิ่มตัว

ในปี 1935 ยูกาวา ตั้งข้อสมมติว่า การแลกเปลี่ยนแรงในนิวเคลียส เริ่มจากการแบ่งปันไพ–เมซอน (π – meson) หรือ ไพออน (pions) ให้แก่กัน โดยมีสนามของแรงเกิดขึ้น เขาทำนายว่า อนุภาคนี้มีมวลประมาณ 140 เท่า ของมวลของอิเล็กตรอน สองปีต่อมา แอนเดอสัน (Anderson) และ เนดเดอเมเยอร์ (Neddermeyer) ก็ประกาศการค้นพบอนุภาคนั้นจากรังสีคอสมิก ปัจจุบันพบว่า ไพออนมีมวล 273 เท่า ของมวลของอิเล็กตรอน มีประจุ $-1(\pi^-)$ และประจุ $+1$ (π^+) ไม่มีเสถียรภาพ มีชีวิตเฉลี่ยนอกนิวเคลียส 2.60×10^{-8} วินาที เมื่อสลายแล้วจะได้มิวออน กับ นิวตริโน

$$\pi - \text{meson} \longrightarrow \text{muon} + \nu$$

การแลกเปลี่ยนไพออนระหว่างนิวคลีออน

$$p \rightleftharpoons n + \pi^+ \quad ,$$
$$n \rightleftharpoons p + \pi^-$$

ตามความคิดนี้ โปรตอนและนิวตรอน ก็ไม่ใช่อนุภาคที่ต่างกัน เพียงแต่มีสภาวะต่างกันชั่วขณะหนึ่งเท่านั้น ขึ้นกับเมซอนที่อยู่ด้วยเพียงชั่วครู่ ลักษณะอย่างนี้จะไม่เกิดกับอนุภาคอิสระนอกนิวเคลียส การแลกเปลี่ยนเมซอนนี้ เป็นเพียงส่วนหนึ่งของแรงที่จะเกิดขึ้นในนิวเคลียสเท่านั้น

10.1.3 พลังงานยึดเหนี่ยวทางนิวเคลียร์ และการอิ่มตัวของแรงนิวเคลียร์

(Nuclear binding energies and the saturation of nuclear forces)

ค่าเฉลี่ยของพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนในนิวเคลียส ประมาณได้ว่าเกือบมีค่าคงที่สำหรับนิวคลีไอเบา ๆ อาจพูดได้ว่า พลังงานยึดเหนี่ยวทั้งหมดของนิวเคลียสเกือบจะเป็นสัดส่วนกับจำนวนอนุภาคที่มีอยู่ในนิวเคลียส ถ้าทุก ๆ อนุภาคในนิวเคลียสมีการกระทำซึ่งกันและกันกับอนุภาคในนิวเคลียส พลังงานยึดเหนี่ยวก็ควรจะเป็นสัดส่วนกับจำนวนคู่ที่มีการกระทำ ดังนั้น ถ้าสมมติให้ A คือ จำนวนนิวคลีออนในนิวเคลียส จะมีการกระทำกับนิวคลีออนอื่น (A−1) ครั้ง จำนวนคู่ที่มีการกระทำจะเป็น A(A−1)/2 และพลังงานยึดเหนี่ยวก็ควรเป็นสัดส่วนกับปริมาณนี้ ในนิวคลีไอหนัก จะตัด A ทิ้งได้ เมื่อเทียบกับ A^2 ดังนั้น พลังงานยึดเหนี่ยวจึงเป็นสัดส่วนกับกำลังสองของจำนวนอนุภาคในนิวเคลียส การคำนวณที่ได้มานี้ เป็นการตรงข้ามกับผลที่ได้จากการทดลอง เพราะค่าพลังงานยึดเหนี่ยวเกือบจะเป็นสัดส่วนกับ A เพื่อตัดข้อขัดแย้งนี้จึงสมมติให้ อนุภาคในนิวเคลียสมีการกระทำกับอนุภาคที่อยู่ในขอบเขตหนึ่งเท่านั้น ไม่ได้กระทำกับทุก ๆ อนุภาคภายในนิวเคลียส (เทียบได้กับ พลังงานยึดเหนี่ยวทางเคมี จะเป็นสัดส่วนกับจำนวนอะตอมที่มีอยู่) นิวคลีออนในนิวเคลียสจะกระทำกับนิวคลีออนใกล้เคียงขนาดหนึ่งเท่านั้น แม้จะมีนิวคลีออนอื่นที่อยู่ห่างไกลออกไป ก็จะพ้นจากแรงกระทำทางนิวเคลียร์ ด้วยเหตุนี้ แรงนิวเคลียร์จึงนับว่าเป็นแรงที่อิ่มตัว และกระทำในระยะทางสั้น แสดงว่า เมื่อนำ 2 นิวคลีออน ในนิวเคลียส แยกห่างออกจากกัน พลังงานที่จะเกิดขึ้น เนื่องจากแรงกระทำระหว่าง 2 อนุภาคนั้น จะลดต่ำลงมาทันที แรงกระทำนิวเคลียร์นี้จะเกิดขึ้นภายในระยะทางที่มีค่าน้อยกว่า **รัศมีของนิวคลีไอนั้น**

ในการพิจารณาที่ได้กล่าวมาแล้วนี้ ไม่ได้คำนึงถึงพลังงานผลักไฟฟ้าสถิตระหว่าง 2 โปรตอน ซึ่งจะหาขนาดได้จาก e^2/r, เมื่อ e คือประจุของโปรตอน มีค่าเท่ากับ 1.6×10^{-19} คูลอมบ์ และ r คือ ระยะทางระหว่างโปรตอน ถ้ากำหนดให้เท่ากับ 3×10^{-15} เมตร จะได้

$$\frac{e^2}{r} = \frac{9\times10^{9}\times(1.6\times10^{-19})^2 \text{ จูล เอมอีวี}}{3\times10^{-15}\times1.6\times10^{-13} \text{ จูล}}$$

$$= 0.5 \quad \text{เอมอีวี}$$

พลังงานระหว่าง 2 โปรตอน มีค่าน้อย เมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยของ พลังงานยึดเหนี่ยว/นิวคลีออน แรงผลักไฟฟ้าสถิต จะมีความสำคัญขึ้น สำหรับนิวคลีไอหนัก เนื่องจากแรงดูดนิวเคลียร์เป็นแรงอิ่มตัว มีค่าเพียง 8 เอมอีวี/นิวคลีออน ส่วนแรงคูลอมบ์ เป็นชนิดที่ไม่อิ่มตัว พลังงานทั้งหมดของการกระทำคูลอมบ์ เป็นสัดส่วนกับจำนวนคู่ของโปรตอนในนิวเคลียส คือ ½ Z (Z−1) พลังงานคูลอมบ์ทั้งหมดจะเป็น

$$3/5\ Z\ (Z-1)\ e^2/R\ ,$$

เมื่อ R คือ รัศมีของนิวเคลียส, $R\ \alpha\ A^{1/3}$ และ $Z\ \alpha\ A$

พลังงานคูลอมบ์ จะเป็นสัดส่วนกับ $A^{5/3}$ แต่พลังงานยึดเหนี่ยวทั้งหมด เป็นสัดส่วนกับ A, ดังนั้น พลังงานผลักไฟฟ้าสถิต จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเลขมวลเพิ่มขึ้น ถ้าคิดอย่างหยาบ ๆ จะเพิ่มขึ้นตาม $A^{2/3}$

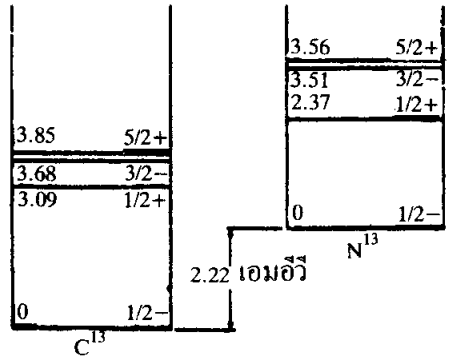
สำหรับนิวคลีไอที่มีค่า Z สูง พลังงานคูลอมบ์จะมีค่าสูง เหมือนกับเป็นการลดพลังงานยึดเหนี่ยว/นิวคลีออน สำหรับธาตุที่มีค่า Z = 50, A = 135, พลังงานยึดเหนี่ยว/นิวคลีออน เริ่มลดลง สำหรับนิวคลีไอหนักที่มี A มากกว่า 200 จะมีผลมาก เป็นเหตุหนึ่งที่ทำให้นิวคลีไอเหล่านั้น ไม่มีเสถียรภาพ มีการสลายโดยการส่งอนุภาคแอลฟา เพื่อต้องการลดประจุทางนิวเคลียร์อย่างรวดเร็ว

นิวคลีไอที่เป็นคล้ายกระจกเงา

(Mirror nuclei)

หมายถึง นิวคลีไอที่เป็นไอโซบาร์ คือ มีจำนวนนิวคลีออนเท่ากัน (A เท่ากัน) แต่มีจำนวนนิวตรอน และโปรตอนต่างกัน กรณีที่เรียกนิวคลีไอที่เป็นคล้ายกระจกเงา จะต้องมีจำนวนโปรตอนและนิวตรอนต่างกัน ±1, นิวคลีไอที่เป็นคล้ายกระจกเงาง่าย ๆ ได้แก่ ${}_1H^3$, ${}_2He^3$ คู่อื่น ๆ ได้แก่ ${}_6C^{13} - {}_7N^{13}$, ${}_3Li^7 - {}_4Be^7$, ${}_5B^{11} - {}_6C^{11}$

นิวคลีไอพวกนี้ มีลักษณะของระดับพลังงานเหมือนกัน จะต่างกันแต่เพียงระดับพลังงานส่วนล่างเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 10.1



รูปที่ 10.1 แผนผังแสดงระดับพลังงานสำหรับคู่ที่เป็นกระจกเงา (mirror pair) ของ C^{13}–N^{13}

พิจารณาพลังงานยึดเหนี่ยวของ $_1H^3$ และ $_2He^3$ ซึ่งเป็นคู่ที่เป็นกระจกเงา

หาพลังงาน ยึดเหนี่ยวของ $_1H^3$

1 อะตอมของ $_1H^3$ ประกอบด้วย

$$1\,M_p + 2\,M_n + 1\,M_e = 1\,M_H1 + 2\,M_n$$

$$= 1.0078252 + 2 \times 1.0086654$$

$$= 3.025156 \quad \text{เอเอมยู}$$

มวลของ 1 อะตอม ของ $_1H^3 = 3.0160494$ เอเอมยู

มวลหายไป $= 9.1066 \times 10^{-3}$ เอเอมยู

พลังงานยึดเหนี่ยวของ $_1H^3$

$$= 931.5 \times 9.1066 \times 10^{-3}$$

$$= 8.48 \quad \text{เอมอีวี}$$

หาพลังงานยึดเหนี่ยวของ $_2He^3$

1 อะตอมของ $_2He^3$ ประกอบด้วย

$$2\,M_p + 1\,M_n + 2\,M_e = 2M_H1 + 1M_n$$

$$= 2 \times 1.0078252 + 1.0086654$$

$$= 3.0243158 \quad \text{เอเอมยู}$$

มวลของ 1 อะตอมของ $_2He^3 = 3.0160299$ เอเอมยู

มวลหายไป $= 8.2859 \times 10^{-3}$ เอเอมยู

พลังงานยึดเหนี่ยวของ $_2He^3$

$= 931.5 \times 8.2859 \times 10^{-3}$

$= 7.72$ เอมอีวี

จากการคำนวณ จะเห็นว่า พลังงานยึดเหนี่ยวของ ${}_2He^3$ น้อยกว่า พลังงานยึดเหนี่ยวของ ${}_1H^3$ เพราะพลังงานคูลอมบ์ ระหว่าง 2 โปรตอน ใน ${}_2He^3$ นั้น ไม่เกิดกับนิวเคลียสของ ${}_1H^3$ ถ้าจะหาค่าพลังงานคูลอมบ์ระหว่างอนุภาค p–p ที่อยู่ห่างกัน 2×10^{-15} ม. (โดยประมาณ) จะได้

$$V = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{q\cdot q'}{r}$$

$$= \frac{9\times10^9\times(1.6\times10^{-19})^2}{2\times10^{-15}} \text{ จูล}$$

$$= \frac{9\times10^9\times(1.6\times10^{-19})^2 \text{ จูล}\cdot\text{เอมอีวี}}{2\times10^{-15}\times1.6\times10^{-13} \text{ จูล}}$$

$= 0.72$ เอมอีวี

ถ้าไม่มีพลังงานผลักไฟฟ้าสถิตของคูลอมบ์ พลังงานยึดเหนี่ยวของ ${}_2He^3$

$= 7.72 + 0.72$

$= 8.44$ เอมอีวี

เป็นการแสดงว่า แรงนิวเคลียร์ไม่ขึ้นกับชนิดของนิวคลีออน

10.1.4 การเสถียรภาพทางนิวเคลียร์ และแรงกระทำระหว่างนิวคลีออน

(Nuclear stability and the forces between nucleons)

นิวไคลด์ที่มีเสถียรภาพ มักเป็นนิวไคลด์ที่ประกอบด้วย จำนวนนิวตรอนและจำนวนโปรตอนเท่ากัน หรือ $N : Z = 1$, ได้แก่นิวไคลด์เบา ๆ เมื่อเลขมวลของนิวเคลียสสูงขึ้น ในนิวเคลียสหนัก จำนวนนิวตรอนจะเพิ่มขึ้นเร็วกว่าจำนวนโปรตอน การที่มีจำนวนนิวตรอนและโปรตอนเท่ากันในนิวเคลียสเบา ๆ ทำให้มีเสถียรภาพ เป็นการแสดงว่ามีแรงดึงดูดอย่างแรง ระหว่างนิวตรอนและโปรตอน ข้อสนับสนุนก็คือ การมีเสถียรภาพของดิวทิรอน ซึ่งประกอบด้วยนิวตรอน 1 ตัว และโปรตอน 1 ตัว

เป็นที่ทราบว่า มีแรงดูดอย่างแรงระหว่างอนุภาคนิวตรอนและโปรตอน น่าจะมีเหตุผลพอที่จะสมมติว่าจะต้องมีแรงที่มีลักษณะคล้ายกันนี้ กระทำระหว่าง 2 นิวตรอน และ 2 โปรตอน โดยไม่คิดถึงแรงไฟฟ้าสถิต แรงกระทำระหว่างอนุภาคแต่ละคู่ ควรจะมีค่าเกือบ

เท่ากัน ถ้าจะคิดว่า แรงดูดระหว่าง 2 นิวตรอน จะมากกว่าแรงดูดระหว่างนิวตรอนและโปรตอน หรือระหว่าง 2 โปรตอน นิวคลีไอเบา ๆ ส่วนมาก ก็น่าจะมีจำนวนนิวตรอนมากกว่าจำนวนโปรตอน ไม่น่าจะมีจำนวนเท่ากัน เป็นการแสดงว่า แรงระหว่าง 2 โปรตอน จะไม่มากกว่าแรงระหว่างนิวตรอนและโปรตอน หรือระหว่าง 2 นิวตรอน การที่จำนวนนิวตรอนในนิวเคลียสมีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนโปรตอน เป็นการยืนยันได้ว่า มีแรงกระทำระหว่าง 2 นิวตรอน เมื่อพลังงานคูลอมบ์เพิ่มขึ้น (เลขอะตอมเพิ่มขึ้น) อัตราส่วนของจำนวนนิวตรอนต่อโปรตอน ก็จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น จาก 1 สำหรับนิวคลีไอเบา ๆ จนถึง 1.6 สำหรับธาตุยูเรเนียม ซึ่งมี Z = 92 การเพิ่มนี้แสดงว่า มีการเพิ่มจำนวนแรงดูดทั้งหมดในนิวเคลียสด้วย เพื่อเอาชนะแรงผลักไฟฟ้าสถิตที่จะเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากอนุภาคนิวเคลียร์กระทำกับนิวคลีออนอื่นที่อยู่ในขอบเขตจำกัดเท่านั้น จึงเป็นข้อน่าคิดว่า อาจจะมีบางนิวตรอนที่สามารถกระทำกิริยากับนิวตรอนที่อยู่ไกลออกไปได้บ้าง

แรงดูดนิวเคลียร์ เป็นแรงที่กระทำในระยะทางสั้น ๆ ระหว่างนิวคลีออนที่อยู่ในนิวเคลียส ถ้าจะให้ n–p, n–n และ p–p เป็นแรงดูดระหว่างนิวตรอนและโปรตอน, ระหว่าง 2 นิวตรอน และระหว่าง 2 โปรตอน และสมมติให้แรง n–n และแรง p–p มีขนาดเท่ากัน หรือเกือบเท่ากัน และไม่มากกว่าแรง n–p แรงกระทำระหว่างอนุภาคเหมือนกัน ก็ควรมีค่าน้อยกว่าแรง n–p หรือมีขนาดเท่ากัน หรือเกือบเท่ากัน ในการสังเกตค่าอัตราส่วนระหว่างมวลต่อประจุของนิวไคลด์ที่มีเสถียรภาพ ลักษณะของแรงกระทำทางนิวเคลียร์ น่าจะเป็นไปได้ดังนี้

(ก) **n–p ≈ n–n ≈ p–p**
(ข) n – p > > n – n; n – p > > p – p; n – n ≈ p – p

โดยอาศัยระดับพลังงานนิวเคลียร์วิกเนอร์ (Wigner) ได้ตั้งสมมุติฐานตามข้อ (ก) ว่า **เป็นแรงนิวเคลียร์ที่ไม่ขึ้นกับประจุ** (Charge independence of nuclear forces) อธิบายว่า แรงกระทำทางนิวเคลียร์ระหว่างสองนิวคลีออนขึ้นอยู่กับสภาวะควอนตัมอย่างเดียว ไม่ขึ้นอยู่กับประจุคือแรงกระทำทางนิวเคลียร์ระหว่างโปรตอนกับโปรตอน หรือ นิวตรอนกับนิวตรอน จะมีค่าเท่ากันและจากข้อ (ข) เรียก**ประจุสมมาตรของแรงนิวเคลียร์** (Charge symmetry of nuclear force) พบว่า แรงกระทำระหว่าง n – n, p – p และ n – p มีค่าต่างกันเนื่องจากแรงผลักคูลอมบ์ซึ่งกระทำระหว่าง p – p คือถ้าอยู่ห่างกัน 10^{-15} ม. จะเกิดพลังงานศักย์มีค่าประมาณ +1.5 เอมอีวี และเนื่องจากนิวตรอนและโปรตอนมีโมเมนต์แม่เหล็กต่างกันจะมีค่าพลังงานศักย์ต่างกัน เพราะแรงกระทำทางแม่เหล็กแต่มีค่าน้อยกว่าแรงคูลอมบ์

จากการสังเกตคุณสมบัติที่แตกต่างกันของคู่ของนิวคลีไอที่เป็นกระจกเงา (mirror nuclei) เช่น $_{20}Ca^{41}$, $_{21}Sc^{41}$ จะมีพลังงานยึดเหนี่ยวต่างกัน ซึ่งเนื่องมาจากพลังงานคูลอมบ์ ส่วนแรงนิวเคลียร์ที่กระทำระหว่างโปรตอน-โปรตอน จะเหมือนกันกับที่กระทำกับสองนิวตรอนในสภาวะควอนตัมเดียวกัน

10.2 รูปแบบทางนิวเคลียร์
(Nuclear models)

10.2.1 รูปแบบเปลือกหอย
(The shell model)

เป็นรูปแบบที่ตั้งขึ้นจากคุณสมบัติของการเสถียรภาพของนิวเคลียส โดยอาศัยจำนวนเลขโปรตอน และเลขนิวตรอน จากการทดลอง แสดงให้เห็นว่า นิวคลีไอที่ประกอบด้วยจำนวนโปรตอน หรือจำนวนนิวตรอน เป็นตัวเลขใดตัวเลขหนึ่งจากตัวเลขเหล่านี้ คือ 2, 8, 20, 50, 82, 126 จะเป็นนิวคลีไอที่มีเสถียรภาพ จึงเรียกตัวเลขเหล่านี้ว่า**ตัวเลขแมจิก (magic numbers) เป็นตัวเลขที่แสดงว่า มีจำนวนโปรตอน หรือจำนวนนิวตรอนเต็มในแต่ละเชล** จำนวนนิวตรอนเชล และโปรตอนเชล ไม่ขึ้นต่อกัน เปรียบเทียบได้กับ จำนวนอิเล็กตรอนที่มีอยู่เต็มในแต่ละเชล

การศึกษานิวไคลด์ที่มีเสถียรภาพ พบว่า ${}_2He^4$ และ ${}_8O^{16}$ มีเสถียรภาพกว่านิวคลีไอที่มีจำนวน Z และ N ที่มีค่าใกล้เคียงกัน โดยเปรียบเทียบกับค่าพลังงานยึดเหนี่ยวที่เคยแสดงไว้ นอกจากนี้ยังมีตัวเลข 14, 28 และ 40 เรียกว่า**ตัวเลขเซมิแมจิก** (Semimagic numbers)

การมีเสถียรภาพ นอกจากจะเกี่ยวพันกับค่าพลังงานยึดเหนี่ยวที่สูงแล้ว ยังต้องมีเปอร์เซ็นต์อบันแดนซ์ตามธรรมชาติสูงด้วย

มีหลายทฤษฎีที่เสนอข้อสมมุติขึ้นว่า แต่ละนิวคลีออนเคลื่อนที่ในวงโคจรภายในนิวเคลียสโดยไม่ขึ้นแก่กัน แต่ละวงโคจร จะพิจารณาเป็นฟังก์ชันของพลังงานศักย์ V(r) เป็นการแทนค่าเฉลี่ยของทุก ๆ กิริยา ที่กระทำกับนิวคลีออนอื่น และมีค่าเหมือน ๆ กันทุกนิวคลีออน โดยไม่คำนึงถึงอนุภาคแต่ละตัว และกิริยาระหว่างนิวคลีออนถือว่าเป็นการรบกวนเพียงเล็กน้อยที่เกิดขึ้นจากการกระทำระหว่างนิวคลีออนและสนามศักย์ รูปแบบนี้เรียกรูปแบบที่ไม่ขึ้นกับอนุภาค (independent particle model) รูปแบบนี้ก็คล้ายกับเชลโมเดลเช่นกัน โดยการเปรียบเทียบนิวคลีออนในนิวเคลียสกับอิเล็กตรอนในวงโคจรในอะตอม พลังงานศักย์เปรียบเทียบได้กับพลังงานคูลอมบ์ สภาวะควอนตัมของนิวคลีออน (quantum state) เทียบได้กับสภาวะควอนตัมของอิเล็กตรอน, การเต็มเชลของนิวคลีออนก็เทียบได้กับการเต็มเชลของอิเล็กตรอนในอะตอม การเปรียบเทียบไปไม่ได้ไกล ด้วยเหตุผลที่ว่า ศักย์ที่แสดงการดูดทางนิวเคลียร์นั้น แตกต่างจากศักย์คูลอมบ์ เรียกศักย์ออสซิลเลเตอร์ (oscillator potential) อีกข้อหนึ่งก็คือ เมื่อพิจารณาอนุภาคโปรตอนและนิวตรอน ย่อมมีความแตกต่างจากอิเล็กตรอนที่มีอยู่เพียงชนิดเดียว

10.2.2 รูปแบบหยดของเหลว และสูตรพลังงานยึดเหนี่ยวแบบเซมิเอมไพริคัล (Liquid drop model and the Semiempirical binding energy formula.)

เป็นรูปแบบที่เปรียบเทียบแรงนิวเคลียร์ กับแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของของเหลว โดยสมมุติว่านิวเคลียสควรมีลักษณะเหมือนหยดของเหลว คือ เป็นรูปทรงกลม เพราะเป็นรูปที่ให้ค่าแรงตึงผิวมากที่สุด การเคลื่อนที่ของโมเลกุลในหยดของเหลวเทียบได้กับการเคลื่อนที่ของนิวคลีออนในนิวเคลียส เมื่อมีแรงตึงผิวทำให้เกิดพลังงานตึงผิว เพื่อป้องกันไม่ให้โมเลกุลเคลื่อนที่พ้นจากผิวของเหลวได้ เช่นเดียวกับพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียส ทฤษฎีนี้สามารถอธิบายผลที่เกิดขึ้นจากการทดลองได้เช่น

1) ปริมาตรของนิวเคลียส เป็นปฏิภาคกับมวลของนิวเคลียสนั้น โดยถือว่า ความหนาแน่นของนิวเคลียสมีค่าคงที่ ถ้า

D = ความหนาแน่นของนิวเคลียส

m = มวลของนิวเคลียส เป็นปฏิภาคโดยตรงกับเลขมวล (A)

V = ปริมาตรของนิวเคลียส เป็นปฏิภาคโดยตรงกับรัศมีกำลังสาม (R^3)

$$V \propto R^3$$

เมื่อ $V \propto M$, และ $M \propto A$

ดังนั้น $R^3 \propto A$

หรือ $R \propto A^{1/3}$

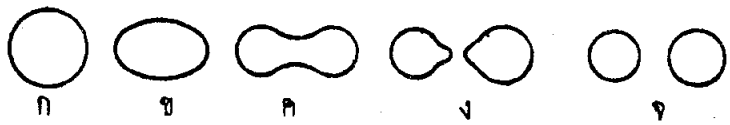
นั่นคือ $R = R_0 A^{1/3}$

เมื่อ R_0 เป็นค่าที่ได้จากการทดลอง $\simeq$ 1.2 เฟอร์มิ

2) พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนมีค่าลดลง เมื่อนิวเคลียสมีขนาดใหญ่ขึ้น (เลขมวลสูงขึ้น) เปรียบเทียบได้กับหยดของเหลวที่มีขนาดใหญ่ พลังงานตึงผิวจะลดน้อยลง

3) การเปรียบเทียบนิวเคลียสกับหยดของเหลวสามารถอธิบายปรากฏการณ์การแบ่งแยกตัวทางนิวเคลียร์ได้ดี

เนื่องจากนิวคลีออนในนิวเคลียสมีการสั่นอยู่เสมอ เดิมเป็นรูปทรงกลม (รูป ก) ต่อมายาวขึ้นเป็นรูปไข่ (รูป ข) โดยมีปริมาตรคงที่ แต่พื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดพลังงานตึงผิวเพิ่มขึ้น เพื่อจะดึงให้กลับสู่สภาพเดิม



รูปที่ 10.2 แสดงลักษณะการเกิดการแบ่งแยกตัวตามรูปแบบหยดของเหลว

อย่างไรก็ดี ถ้าแรงที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมีค่ามากพอ จะทำให้หยดของเหลวมีรูปคล้ายดัมเบล (รูป ค.) ขณะนี้พลังงานตึงผิวจะมีค่าเท่ากับพลังงานทั่วปริมาตร ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของของเหลวในหยดของเหลวนั้น แทนที่จะทำให้หยดของเหลวนั้นกลับมีรูปร่างเหมือนเดิม, จะกลายเป็นแยกออก 2 หยด ดังรูป (ง) และในที่สุด ก็จะเป็นรูปทรงกลมตามเดิม

รูปแบบหยดของเหลว ยังใช้ในการหาค่ามวล และพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียส เรียกสูตรหามวลและพลังงานยึดเหนี่ยว (semiempirical mass formula and the semiempirical binding energy formula) โดยใช้ค่าที่ได้จากกฎเกณฑ์ และจากการทดลองด้วย สูตรนี้ได้มาโดยอาศัยรูปแบบของนิวเคลียสเป็นแบบหยดของเหลว เปรียบนิวเคลียสเหมือนกับหยดของเหลวที่ถูกอัดไว้ด้วยกัน มีความหนาแน่นสูง (ประมาณ 10^{17} กก./ม.^{3})

โดยการใช้หลักการทางฟิสิกส์แผนเดิม เช่นแรงผลักทางไฟฟ้าสถิตและแรงตึงผิว จะสามารถตั้งสูตรสำหรับการหาค่ามวลและพลังงานยึดเหนี่ยวสำหรับนิวเคลียสที่สภาวะกราวน์ได้

ในการหาพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียส จะต้องรวมเทอมต่าง ๆ เข้าด้วยกัน ส่วนค่าคงที่นั้นจะได้จากการใช้ทฤษฎีและผลจากการทดลอง เทอมที่ต้องนำมาพิจารณา คือ

1) ปริมาตรของนิวเคลียส เป็นสัดส่วนกับมวลของอะตอม (A) และค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียสก็มาจากเทอมที่เป็นสัดส่วนกับเลขมวล A จึงอาจพิจารณาได้ในเทอมของพลังงานทั่วทั้งปริมาตร เขียนได้ว่า

$$E_v = a_v A \qquad \ldots (10.1)$$

2) พลังงานคูลอมบ์ระหว่างโปรตอน ทำให้ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียสลดลง จึงใช้เครื่องหมายลบ ถ้าจะพิจารณาพลังงานคูลอมบ์ทั้งหมดที่เกิดกับนิวเคลียสที่มีประจุ Z จะเขียนได้ว่า

$$E_c = -a_c' \frac{3}{5} \frac{Z(Z-1)e^2}{R}$$

$$= -4a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} \quad \ldots (10.2)$$

$$a_c = 3/20 \frac{e^2}{R_0 \times 10^{-13}} \quad \ldots (10.3)$$

ในสมการ (10.2) เป็นการแทนค่า R ซึ่งแปรตาม $A^{1/3}$

3) พลังงานยึดเหนี่ยวจะมีค่าลดลง เนื่องจากนิวเคลียสมีผิว อนุภาคที่ผิวมีการกระทำเฉลี่ยแล้วประมาณครึ่งหนึ่งของอนุภาคที่อยู่ในนิวเคลียส ในสมการ (10.1) เป็นการสมมุติว่า ทุก ๆ นิวคลีออน มีการกระทำเท่ากัน ดังนั้น จึงต้องเอาค่าที่เป็นสัดส่วนกับพื้นที่ผิวของนิวเคลียสลบออก ค่าพลังงานตึงผิวนี้แทนได้ด้วย

$$E_s = -a_s A^{2/3} \quad \ldots (10.4)$$

เทอมนี้เทียบได้กับแรงตึงผิวของของเหลว

4) พลังงานยึดเหนี่ยวยังเกี่ยวพันกับผลของการสมมาตร (symmetry effect) จะพบว่า สำหรับ A ค่าหนึ่ง จะต้องมีค่า Z ที่เป็นค่าเฉพาะ เพื่อให้นิวไคลด์นั้นมีเสถียรภาพมากที่สุด สำหรับนิวไคลด์เบา ๆ แรงคูลอมบ์มีค่าน้อย ค่านี้คือ A/2, นั่นคือผลจากแรงคูลอมบ์จะหายไป เมื่อ Z = A/2, ดังนั้น เทอมที่เป็นสัดส่วนกับจำนวนนิวตรอนที่มากเกินไป คือ (A−2Z) จำเป็นต้องใช้เป็นกำลังสอง มิฉะนั้น ค่านี้จะหายไปเมื่อ Z = A/2 จากการศึกษาเกี่ยวกับผลของการสมมาตร

แสดงว่า เป็นส่วนกลับกับ A ด้วย พลังงานที่เป็นผลมาจากการสมมาตร จึงอาจเขียนได้ดังนี้

$$E_\tau = -a_\tau \frac{(A-2Z)^2}{A} \quad \ldots (10.5)$$

5) ในการศึกษานิวไคลด์ที่มีเสถียรภาพ พบว่าถ้ามีจำนวนนิวตรอนและโปรตอนเป็นเลขคู่ จะมีเสถียรภาพมากที่สุด นิวคลีไอที่มีจำนวนโปรตอนและนิวตรอนเป็นเลขคี่ทั้งคู่มีเสถียรภาพน้อยที่สุด ลักษณะดังกล่าวเรียก ผลของคี่–คู่ (odd-even effect) แทนได้ด้วยเทอม E_δ ค่านี้ขึ้นกับจำนวนโปรตอน (Z) และจำนวนนิวตรอน (N) ในนิวเคลียสว่าจะเป็นเลขคี่หรือเลขคู่ ดังตัวอย่าง

A	Z	N	E_δ
คู่	คู่	คู่	$\frac{+\delta}{2A}$
คี่	คู่	คี่	0
คี่	คี่	คู่	0
คู่	คี่	คี่	$\frac{-\delta}{2A}$

... (10.6)

สูตรพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียส หาได้จากการรวมเทอมต่าง ๆ ดังกล่าวแล้ว จะได้ว่า

$$BE. = a_v A - 4\, a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - a_s A^{2/3} - a_\tau \frac{(A-2Z)^2}{A} + E_\delta \qquad \ldots (10.7)$$

สมการนี้อาจเขียนได้ดังที่เคยเรียนมาแล้ว คือ

$$BE. = \left[Z\, M_{{}_1H}1 + (A-Z)M_n - M_{Z,A} \right] C^2$$

$$M_{Z,A} = Z\, M_{{}_1H}1 + (A-Z)M_n - \frac{BE.}{C^2}$$

เมื่อ $M_{{}_1H}1$, M_n และ $M_{Z,A}$ เป็นมวลของไฮโดรเจน, นิวตรอน, และนิวไคลด์ ตามลำดับ

สูตรมวลแบบเซมิเอมไพริคัล คือ

$$M_{Z,A} = Z\, M_{{}_1H}1 + (A-Z)M_n - \frac{a_v A}{C^2} + \frac{4a_c}{C^2}\frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} + \frac{a_s}{C^2}A^{2/3} + \frac{a_\tau}{C^2}\frac{(A-2Z)^2}{A} - \frac{\delta}{2C^2A} \qquad \ldots (10.8)$$

สมการ (10.7), (10.8) แทนพลังงานยึดเหนี่ยว และมวลอะตอมของนิวไคลด์ เป็นฟังก์ชันของ A และ Z ค่าคงที่หาได้จากการรวบรวมผลที่ได้จากการคำนวณโดยทฤษฎี มีการปรับปรุงเพื่อให้ตรงกับการทดลองที่ใช้หาค่ามวล (หรือพลังงานยึดเหนี่ยว) ค่าคงที่ที่ได้ มีดังนี้

a_v = 14.0 เอมอีวี, a_c = 0.146 เอมอีวี

a_τ = 19.4 เอมอีวี, a_s = 13.1 เอมอีวี

δ มีค่า = 270 เอมอีวี, สำหรับนิวไคลด์ที่มี A และ Z เป็นเลขคู่

= 0 สำหรับนิวไคลด์ที่มี A เป็นเลขคี่

= −270 เอมอีวี, สำหรับนิวไคลด์ที่มี A เป็นเลขคู่, Z เป็นเลขคี่

ในทางปฏิบัติ จะวัดมวลของอะตอมได้ เมื่อทราบ M_n และ $M_{^1H}$ แทนค่าลงในสมการ (10.8) จะได้

$$M_{Z,A} = 0.99395\,A - 0.00084\,Z + 0.0141\,A^{2/3} + 0.021\,\frac{(A-2Z)^2}{A} + \frac{0.00063\,Z(Z-1)}{A^{1/3}} - \frac{\delta'}{A} \qquad \ldots (10.9)$$

เมื่อ δ' = 0.145 เอเอมยู, A คู่, Z คู่

= 0, A คี่, Z คู่; A คี่, Z คี่

= −0.145 เอเอมยู, A คู่, Z คี่

$$\ldots (10.10)$$

$$BE. = 14.0\,A - 0.584\,\frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - 13.1\,A^{2/3} - 19.4\,\frac{(A-2Z)^2}{A} + E_\delta \qquad \ldots (10.11)$$

และ

$$E_\delta \begin{cases} = \dfrac{135}{A}, & \text{A คู่, Z คู่} \\ = 0, & \text{A คี่, Z คู่; Z คี่, A คี่} \\ = -\dfrac{135}{A}, & \text{A คู่, Z คี่} \end{cases} \qquad \ldots (10.12)$$

ในการทดลองหาค่าคงที่ จะใช้นิวไคลด์ที่มีค่า Z, A ต่าง ๆ กัน (ประมาณ 5000 คู่) ก็นับว่าได้ผลดี แต่ก็ยังไม่ถูกต้องดีนัก

สูตรพลังงานยึดเหนี่ยวนี้ ชี้ให้เห็นถึงคุณสมบัติของการเสถียรภาพของนิวไคลด์ โดยเฉพาะพวกที่ส่งรังสีเบตา

ถ้าให้ Z_A เป็นเลขอะตอมของธาตุที่มีเสถียรภาพ

กรณีที่เป็นการเปลี่ยนแปลงแบบไอโซบาร์ จะหาพลังงานยึดเหนี่ยว เมื่อ A คงที่

$$BE = \text{ค่าคงที่} - \frac{0.6\,Z^2}{A^{1/3}} - 20\,\frac{(A-2Z)^2}{A} + E_\delta \qquad \ldots (10.13)$$

ค่าคงที่ คือ $14.0A - 13.1\, A^{2/3}$, E_δ เป็นค่าคงที่ตามลักษณะ คี่-คู่

สำหรับนิวไคลด์ที่มีเลขมวล A , นิวไคลด์ที่มีเสถียรภาพที่สุด จะมี Z_A เป็นเลขอะตอม หาได้โดยการหาอนุพันธ์สมการ (10.13) แล้วให้เท่ากับศูนย์, Z_A จะเป็นจุดต่ำสุดของกราฟรูปพาราโบลา

$$0 = 0 - \frac{0.6 \times 2Z}{A^{1/3}} - \frac{20}{A}\frac{d}{dz}(A^2 - 4AZ + 4Z^2) + 0$$

$$= -\frac{0.6 \times 2Z}{A^{1/3}} - \frac{20}{A}(0 - 4A + 8Z)$$

$$= -\frac{0.6 \times 2Z}{A^{1/3}} + 80 - \frac{160\,Z}{A}$$

$$= -0.6 \times 2Z\, A^{2/3} + 80\, A - 160\, Z$$

$$= -0.6\, Z\, A^{2/3} + 40\, A - 80\, Z$$

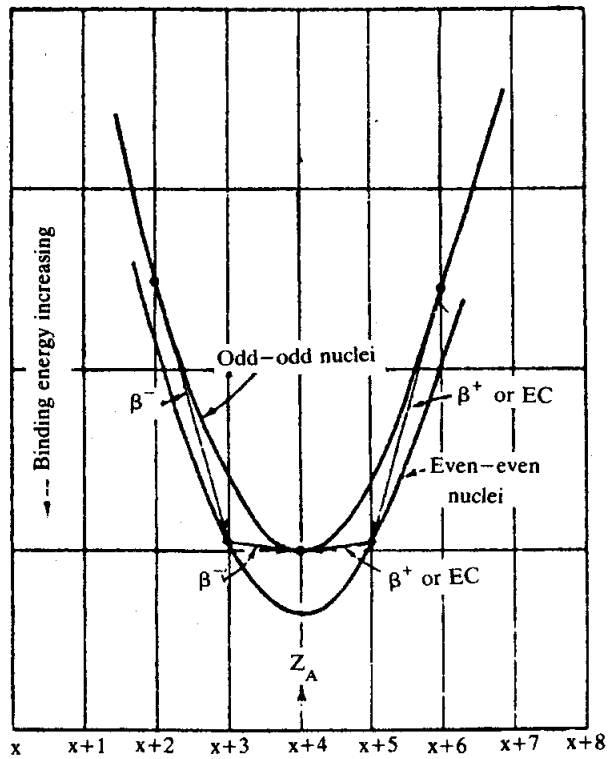
$$Z_A\,(0.6\, A^{2/3} + 80) = 40\, A$$

$$* \quad Z_A = \frac{40\, A}{80 + 0.6\, A^{2/3}}$$

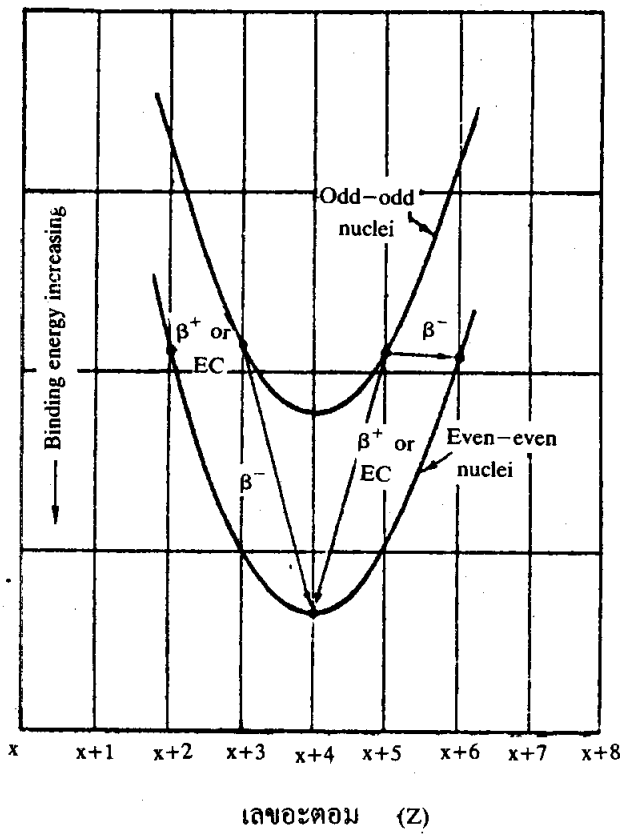
ถ้า A เป็นเลขคี่ , $E = 0$, จะเกิดรูปพาราโบลารูปเดียว

ถ้า A เป็นเลขคู่ , $E = \pm \frac{135}{A}$ จะเกิดรูปพาราโบลาขึ้น 2 รูป ห่างกัน

$= \frac{2\,\delta}{A}$ ตามแกนที่แทนพลังงาน



รูปที่ 10.3 แสดงพาราโบลาของพลังงานยึดเหนี่ยว สำหรับ A ที่เป็นคู่ กับธาตุที่เป็นไอโซบาร์ คี่ – คี่ ที่มีเสถียรภาพ



รูปที่ 10.4 แสดงพาราโบลาของพลังงานยึดเหนี่ยวสำหรับ A คู่ กับธาตุที่เป็นไอโซบาร์ คู่–คู่ ที่มีเสถียรภาพต่อการสลายโดยการส่งอนุภาคเบตา 3 ธาตุ

10.2.3 รูปแบบที่ใช้กับปฏิกิริยานิวเคลียร์

รูปแบบออพติคัล (Optical model)

กล่าวถึงการกระทำของอนุภาคที่ตกกระทบกับนิวคลีออนในนิวเคลียส กำหนดว่าอนุภาคที่ตกกระทบจะกระทำกับหลุมพลังงานศักย์ (potential-energy well) ผลจากการเกิดกิริยาทางนิวเคลียร์ จะเบนอนุภาคตกกระทบออกไปจากทิศทางเดิม อนุภาควิ่งไปเป็นระยะทางเดินเฉลี่ยค่าหนึ่งแล้วจึงถูกดูดกลืนในหลุมพลังงานศักย์ของนิวเคลียสที่เป็นเป้า เป็นการเปลี่ยนสภาวะของอนุภาคที่ตกกระทบ จากสภาวะอิสระเพื่อรวมเข้าเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบ รูปแบบนี้สามารถใช้ในการคำนวณ

1) ภาคตัดขวางสำหรับการสะท้อนของอนุภาคตกกระทบ

2) การแจกแจงเชิงมุมของการสะท้อนนี้

3) ภาคตัดขวางสำหรับการดูดกลืนอนุภาคตกกระทบ

รูปแบบนิวเคลียสเชิงประกอบ
(Compound–nucleus model)

เป็นรูปแบบหนึ่งที่ใช้ทำนายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น เมื่อนิวเคลียสดูดกลืนอนุภาคตกกระทบ โดยสมมติว่าพลังงานที่มากับอนุภาคตกกระทบ มีการแจกแจงแบบสุ่ม ๆ ระหว่างทุก ๆ นิวคลีออนในนิวเคลียสเชิงประกอบนั้น จึงไม่มีอนุภาคใดที่มีพลังงานมากพอ เพื่อหนีออกไปได้ในทันใดนั้น ทำให้นิวเคลียสเชิงประกอบมีอายุยาวประมาณ $10^{-14} - 10^{-18}$ วินาที นับว่านาน เมื่อเทียบกับเวลาที่นิวคลีออนวิ่งผ่านนิวเคลียส ($10^{-20} - 10^{-23}$ วินาที) เวลาที่มีชีวิตอยู่จะเป็นค่าเฉพาะ เพราะถือว่าเป็นลักษณะทางสถิติในการแจกแจงพลังงาน แล้วพลังงานนั้นจะไปรวมกันอยู่กับนิวคลีออนหนึ่ง หรือกลุ่มนิวคลีออน เพื่อจะหนีออกไป โอกาสที่เป็นไปได้ส่วนมากนั้น มักจะใช้พลังงานเพียงส่วนหนึ่งของพลังงานที่ถูกกระตุ้น เพื่อใช้ในการหลุดพ้นออกไปจากนิวเคลียสเชิงประกอบ ทำให้นิวเคลียสที่เหลือยังคงอยู่ในสภาวะที่ถูกกระตุ้น ถ้าพลังงานกระตุ้นของนิวเคลียสเชิงประกอบมากพอ อาจส่งอนุภาคออกมาหลาย ๆ อนุภาคก็ได้ รูปแบบนี้คล้ายกับโมเลกุลหนีออกไปจากหยดของเหลวที่ร้อน เป็นการส่งอนุภาคออกจากนิวคลีไอที่ถูกกระตุ้น ที่เรียก การระเหย (evaporation)

รูปแบบนี้ได้แสดงว่าปฏิกิริยานิวเคลียร์เกิดขึ้นเป็น 2 ขั้น โดยไม่ขึ้นแก่กัน คือ

1) จับอนุภาคที่ตกกระทบเข้าไป แล้วแบ่งพลังงานอย่างสุ่ม ๆ ให้กับนิวคลีออนในนิวเคลียสเชิงประกอบนั้น

2) มีการส่งอนุภาคออกจากนิวเคลียสเชิงประกอบที่ถูกกระตุ้น

ปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยตรง
(Direct interaction)

เป็นรูปแบบหนึ่งที่พยายามอธิบายถึงการดูดกลืนอนุภาคตกกระทบ ต่างจากรูปแบบนิวเคลียสเชิงประกอบ คือ ไม่ได้สมมติว่า พลังงานของอนุภาคตกกระทบมีการแบ่งปันให้กับทุก ๆ นิวคลีออนในนิวเคลียสแบบสุ่มในนิวเคลียสที่เป็นเป้า แต่สมมติว่า อนุภาคตกกระทบ

เข้าชนกับนิวคลีออนหนึ่งหรือสองสามนิวคลีออนในนิวเคลียสที่เป็นเป้า บางตัวอาจจะกระเด็นออกมาโดยตรง และก็มีทางเป็นไปได้ ที่อนุภาคตกกระทบนั้น จะหลุดออกมาจากนิวเคลียสหลังจากที่สูญเสียส่วนหนึ่งของพลังงานไปในการชน ดังนั้น ปฏิกิริยาจึงไม่เกิดขึ้นทันทีที่เกิดเป็นนิวเคลียสที่ถูกกระตุ้น และคิดว่าพลังงานจลน์ของอนุภาคที่ส่งออกมา จะมีค่าสูงกว่าพลังงานของอนุภาคที่ส่งออกมาจากนิวเคลียสเชิงประกอบที่ถูกกระตุ้นโดยตรง

สรุป

1. ลักษณะของแรงนิวเคลียร์นั้นนับว่าเป็นแรงที่มีความแรงสูง, กระทำในระยะทางสั้น และมีค่าอิ่มตัวคือไม่เกินประมาณ 8 เอมอีวีต่อนิวคลีออน ส่วนต้นกำเนิดนั้นยังต้องศึกษากันต่อไป

2. รูปแบบของนิวเคลียสที่น่าสนใจก็คือ
   (ก) รูปแบบเปลือกหอย
   (ข) รูปแบบหยดของเหลว
   (ค) รูปแบบนิวเคลียสเชิงประกอบ

แบบฝึกหัดบทที่ 10

10.1 (ก) จงอธิบายถึงลักษณะของแรงนิวเคลียร์ตามที่ยูกาวาได้สรุปไว้มาสัก 5 ข้อ

(ข) ให้ความหมายของนิวคลีไอที่เป็นกระจกเงากัน (mirror nuclei) พร้อมทั้งยกตัวอย่าง

(ค) อธิบายลักษณะของนิวเคลียสโดยใช้รูปแบบเปลือกหอย (shell model) และตัวเลขแมจิก (magic number)

(ง) อธิบายลักษณะของรูปแบบหยดของเหลว (liquid drop model) และรูปแบบนี้สามารถอธิบายผลที่เกิดขึ้นจากการทดลองได้อย่างไรบ้าง

10.2 แสดงการคำนวณให้เห็นจริงว่าเป็นปฏิกิริยาที่ให้ความร้อนหรือดูดกลืนความร้อน

$$ {}_7N^{14} + {}_0n^1 \longrightarrow {}_6C^{14} + {}_1H^1 $$

10.3 ในการศึกษา Segrè chart,

ก) มีกี่นิวไคลด์ที่เป็นพวกขาดนิวตรอน แล้วสลายโดยการส่ง β^-

ข) Ho^{155} กับ Dy^{155} ธาตุไหนจะหนักกว่ากัน

ค) มีกี่กรณีที่ท่านเคยพบว่า สำหรับ A ค่าหนึ่ง จะมีถึง 3 β – stable isobars

10.4 ดาวดวงหนึ่ง มีชื่อว่า "The red giant stars" เชื่อกันว่า เย็นกว่าดวงอาทิตย์ มีการผลิตพลังงานขึ้นมาจากปฏิกิริยา

$Be^9 + H^1 \longrightarrow Li^6 + He^4 +$ พลังงาน

จากค่ามวลที่กำหนดให้ จงคำนวณหา

ก) พลังงานที่ปล่อยออกมาจากปฏิกิริยานี้ (เอมอีวี)

ข) จำนวนเปอร์เซ็นต์ที่มวลเดิมถูกเปลี่ยนให้เป็นพลังงาน

10.5 จงแสดงว่า พลังงานยึดเหนี่ยว ต่อนิวคลีออน จะเขียนได้ดังนี้

$$ -\frac{B}{A} = 0.0082 - P + 0.0004\,\frac{A-2Z}{A} $$

เมื่อ P คือ แพกกิง แฟรกชัน (packing fraction)

10.6 โบรอนไนไตรด์ (BN) เป็นสารประกอบทางเคมีที่มีเสถียรภาพ แต่อย่างไรก็ตาม ระบบทางนิวเคลียร์ที่เกิดจาก B^{10} และ N^{14} ไม่มีเสถียรภาพเลย ตามปฏิกิริยา

$B^{10} + N^{14} \longrightarrow Mg^{24}$

จงคำนวณหาพลังงานที่ปล่อยออกมาจากปฏิกิริยานี้ ในหน่วยเอมอีวี

10.7 จงแสดงว่า ธาตุที่เป็นไอโซบาร์ ที่อยู่ต่ำสุดของรูปพาราโบลา มีพลังงานยึดเหนี่ยวมากที่สุด

$$_{30}Zn^{73} \xrightarrow{\beta^-} {}_{31}Ga^{73} \xrightarrow{\beta^-} {}_{32}Ge^{73} \quad \text{(stable)}$$

10.8 จงหาลักษณะที่ต่างกันของระดับพลังงาน ของ $Be^9 - B^9$