

บทที่ 20 ฟิสิกส์นิวเคลียร์

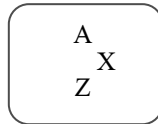
ฟิสิกส์นิวเคลียร์ (Nuclear Physics) เป็นสาขาหนึ่งของวิชาฟิสิกส์ที่ศึกษาสมบัติของนิวเคลียส และกระบวนการเปลี่ยนแปลงที่เกี่ยวข้องกับนิวเคลียสที่เรียกว่า ปฏิกิริยานิวเคลียร์

นิวเคลียสของอะตอม คือ อนุภาคที่อยู่ตรงกลางของอะตอม ประกอบด้วยอนุภาค 2 ชนิด คือ โปรตอน (proton) และนิวตรอน (neutron)

นิวคลีออน (Nucleon) คือ อนุภาคที่เป็นองค์ประกอบของนิวเคลียส = จำนวนโปรตอน + จำนวนนิวตรอน

สัญลักษณ์ของนิวเคลียส X

สัญลักษณ์ของนิวเคลียร์ (nuclear symbol) หรือที่เรียกว่านิวไคลด์ (nuclide) ชนิดหนึ่งของธาตุ จะใช้จำนวนโปรตอนและนิวตรอนในการระบุชนิดของนิวไคลด์ ดังต่อไปนี้



โดย Z แทนเลขอะตอม (atomic number) คือ จำนวนของโปรตอนในนิวเคลียสนั้น

n แทนเลขนิวตรอน (neutron number) คือ จำนวนของนิวตรอนในนิวเคลียสนั้น

A แทนเลขมวล (mass number) คือ จำนวนนิวคลีออนทั้งหมดในนิวเคลียสนั้น

$$\text{หรือ } A = Z + n$$

X แทนสัญลักษณ์ทางเคมี (chemical symbol) คือ สัญลักษณ์ของธาตุทางเคมี

แบบฝึกหัดที่ 20.1

1. อะตอมของธาตุ ยูเรเนียม $^{235}_{92}\text{U}$ จงหา

ก. จำนวนนิวคลีออน ข. จำนวนอิเล็กตรอน ค. จำนวนโปรตอน ง. จำนวนนิวตรอน

2. (มช.) อะตอมของ $^{210}_{84}\text{Po}$ ข้อใดถูกต้อง

ก. มีจำนวนนิวคลีออน = 210 จำนวนนิวตรอน = 84

ข. มีจำนวนอิเล็กตรอน = 84 จำนวนนิวตรอน = 126

ค. มีจำนวนอิเล็กตรอน = 126 จำนวนโปรตอน = 84

ง. มีจำนวนนิวคลีออน = 210 จำนวนอิเล็กตรอน = 126

3. (Ent) จำนวนนิวตรอนในนิวเคลียส $^{27}_{13}\text{Al}$ คือ

ก. 13

ข. 14

ค. 27

ง. 40

4. (มช.) ดินบุกมีเลขอะตอม = 50 และเลขมวล 120 จะมีจำนวนนิวคลีออนเท่าไร

ก. 20

ข. 70

ค. 120

ง. 170

5. (มช.) อะตอมของธาตุ $^{196}_{78}\text{Pt}$ กับ $^{197}_{79}\text{Au}$ จะมีจำนวนอะไรเท่ากัน

ก. นิวคลีออน

ข. นิวตรอน

ค. โปรตอน

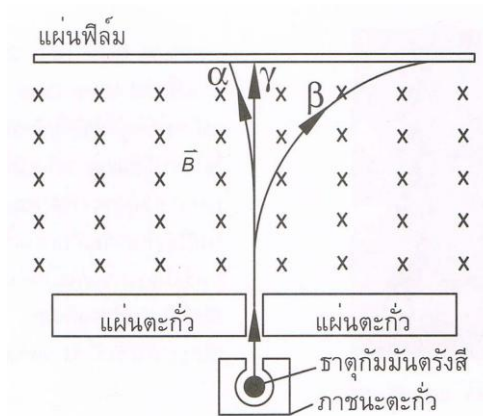
ง. อิเล็กตรอน

การค้นพบกัมมันตภาพรังสี

เบ็กเกอร์ ทดลองพบว่า ธาตุยูเรเนียมจะปล่อยรังสีออกมาจากธาตุยูเรเนียมตลอดเวลาแม้ไม่โดนแสงแดด และพบว่ารังสียังสามารถผ่านวัตถุทึบแสงออกมาภายนอกได้ จากการทดลองพบว่า คุณสมบัติของธาตุยูเรเนียมมีสมบัติเหมือนรังสีเอกซ์ เช่น

1. สามารถวิ่งผ่านวัตถุต่าง ๆ ได้
2. ทำให้อากาศรอบนอกแตกตัวเป็นไอออน
3. เกิดการแผ่รังสีเกิดเองตลอดเวลาแต่รังสีเอกซ์เกิดเองไม่ได้

ปีแอร์และมารี คูรี ได้ทำการทดลองพบว่ายังมีธาตุอื่น เช่น ทอเรียม เรเดียม บอโลเรียม สามารถแผ่รังสีออกมาได้เช่นเดียวกัน



รูป 20.1 แสดงการเคลื่อนที่ของรังสีทั้ง 3 ชนิด ผ่านสนามแม่เหล็ก

รังสีแบ่งออกเป็น 3 ชนิด

1. รังสีแอลฟา สัญลักษณ์ α หรือ ${}^4_2\text{He}$ (ประจุบวก)
2. รังสีบีตา สัญลักษณ์ β หรือ ${}^0_{-1}e$ (ประจุลบ)
3. รังสีแกมมา สัญลักษณ์ γ (เป็นกลางทางไฟฟ้า)

เปรียบเทียบสมบัติของ α , β และ γ

1. มวลและประจุไฟฟ้า $\alpha > \beta > \gamma$
2. พลังงาน $\alpha > \beta > \gamma$
3. การทำให้อากาศแตกตัวเป็นไอออน $\alpha > \beta > \gamma$
4. อำนาจทะลุทะลวงผ่านอากาศ $\gamma > \beta > \alpha$

สัญลักษณ์ของธาตุและอนุภาคบางอย่างที่ควรทราบ

แอลฟา (α) = ${}^4_2\text{He}$	ไฮโดรเจนหรือโปรตอน = ${}^1_1\text{H}$
บีตา (β^-) = ${}^0_{-1}e$	ดิวเทรียม = ${}^2_1\text{H}$
บีตา (β^+) = ${}^0_{+1}e$	ทริตรียม = ${}^3_1\text{H}$
แกมมา (γ) = γ	นิวตรอน = ${}^1_0\text{n}$
ยูเรเนียม = ${}^{235}_{92}\text{U}$	ตะกั่ว = ${}^{206}_{82}\text{Pb}$

ไอโซโทป (Isotope)

ไอโซโทป หมายถึง นิวเคลียสของธาตุชนิดเดียวกัน ที่มีเลขอะตอม Z เท่ากัน แต่เลขมวล A ต่างกัน เช่น ${}^1_1\text{H}$ ${}^2_1\text{H}$ ${}^{235}_{92}\text{U}$ ${}^{238}_{92}\text{U}$ ${}^{239}_{92}\text{U}$ แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

1. ไอโซโทปที่ไม่แผ่รังสี เรียกว่า ไอโซโทปเสถียร
 2. ไอโซโทปที่แผ่รังสีได้ เรียกว่า ไอโซโทปกัมมันตรังสี
- ในธรรมชาติ ส่วนมากเป็นไอโซโทปเสถียร

แบบฝึกหัดที่ 20.2

1. (มข.) ธาตุกัมมันตรังสี หมายถึงธาตุที่มีสมบัติในการแผ่รังสีได้เอง และรังสีที่แผ่ออกมา จะต้องเป็นรังสีต่อไปนี้เสมอ
 - ก. รังสีแอลฟา
 - ข. รังสีบีตา รังสีแกมมา
 - ค. รังสีแอลฟา รังสีบีตา รังสีแกมมา
 - ง. เป็นรังสีชนิดใดก็ได้
2. (มข.) คุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของอนุภาคแอลฟา ก็คือ
 - ก. มีอำนาจทะลุทะลวงสูง
 - ข. มีพลังงานจลน์สูงกว่าอนุภาคตัวอื่น
 - ค. ทำให้สารที่ผ่านแตกตัวเป็นไอออน
 - ง. คล้ายกับรังสีเอกซ์ (X-ray)
3. (Ent) รังสีแอลฟามีอำนาจในการทะลุผ่านน้อยกว่ารังสีชนิดอื่นที่ออกมาจากธาตุกัมมันตรังสีเนื่องจาก
 - ก. รังสีแอลฟามีพลังงานน้อยกว่ารังสีชนิดอื่น
 - ข. รังสีแอลฟามีคุณสมบัติในการทำให้สารที่รังสีผ่าน แตกตัวเป็นไอออนได้ดีกว่า
 - ค. รังสีแอลฟาไม่มีประจุไฟฟ้า
 - ง. ถูกทั้งข้อ ก และ ข
4. (Ent) พิจารณาข้อความต่อไปนี้สำหรับรังสีแอลฟา บีตา และแกมมา
 1. มีความสามารถในการทำให้ก๊าซแตกตัวเป็นไอออนได้ดีกว่า
 2. ต้องใช้วัสดุที่มีความหนาในการกั้นรังสี
 3. เมื่อเคลื่อนที่ผ่านบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก แนวการเคลื่อนที่เป็นแนวโค้ง
 4. อัตราส่วนประจุต่อมวลมีค่ามากที่สุดข้อความใดเป็นสมบัติของรังสีบีตา
 - ก. ข้อ 1 และ 2
 - ข. ข้อ 1 และ 3
 - ค. ข้อ 2 และ 4
 - ง. ข้อ 3 และ 4
5. (มข.) ข้อความต่อไปนี้ข้อใดถูก
 - ก. รังสีบีตามีอำนาจทะลุผ่าน สูงกว่ารังสีแกมมา แต่น้อยกว่ารังสีเอกซ์
 - ข. รังสีบีตามีอำนาจทะลุผ่าน สูงกว่ารังสีเอ็ก แต่น้อยกว่ารังสีแอลฟา
 - ค. รังสีบีตามีอำนาจทะลุผ่าน สูงกว่ารังสีแอลฟา แต่น้อยกว่ารังสีแกมมา
 - ง. รังสีบีตามีอำนาจทะลุผ่าน สูงกว่ารังสีอื่น ๆ ทุกชนิด
6. (มข.) ถ้ารังสีแอลฟา บีตา และแกมมา เคลื่อนที่อยู่ในน้ำ และรังสีทั้งสามชนิดมีพลังงานเท่ากัน เราจะพบว่ารังสีบีตาเคลื่อนที่ได้ระยะทาง
 - ก. สั้นที่สุด
 - ข. ไกลที่สุด
 - ค. ไกลกว่าแกมมาแต่ใกล้กว่าแอลฟา
 - ง. ไกลกว่าแอลฟาแต่ใกล้กว่าแกมมา

3. (Ent) ในการสลายตัวต่อ ๆ กันของธาตุกัมมันตรังสี โดยเริ่มจาก ${}_{92}^{238}\text{U}$ เมื่อสลายให้อนุภาคทั้งหมดเป็น 2α , 2β , และ 2γ จะทำให้ได้นิวเคลียสใหม่ มีจำนวนโปรตอนและนิวตรอนเท่าใด
 ก. จำนวนโปรตอน 88 จำนวนนิวตรอน 140 **ข. จำนวนโปรตอน 90 จำนวนนิวตรอน 140**
 ค. จำนวนโปรตอน 88 จำนวนนิวตรอน 142 ง. จำนวนโปรตอน 90 จำนวนนิวตรอน 142
4. (Ent) เมื่อบิสมัท ${}_{83}^{214}\text{Bi}$ สลายตัวให้รังสีบีตาแลบ นิวเคลียสของธาตุใหม่คือ
 ก. ${}_{82}^{210}\text{Pb}$ ข. ${}_{83}^{210}\text{Bi}$ ค. ${}_{85}^{214}\text{At}$ **ง. ${}_{84}^{214}\text{Po}$**
5. (Ent) นิวเคลียส ${}_{82}^{210}\text{Pb}$ สลายตัวไอโซโทปเสถียรตามลำดับดังนี้

$${}_{82}^{210}\text{Pb} \rightarrow \underset{\beta, \gamma}{\text{X}} \rightarrow \underset{\beta}{\text{Y}} \rightarrow \underset{\alpha, \gamma}{\text{Z}}$$
 จำนวนนิวตรอนในไอโซโทปเสถียร Z เป็นอย่างไร

เวลาครึ่งชีวิต (Half Life)

ตอนแรกมีมวลเริ่มต้น N_0 เมื่อเวลาผ่านไป 1 ช่วงครึ่งชีวิตเหลือ $N = \frac{N_0}{2^1}$

ตอนแรกมีมวลเริ่มต้น N_0 เมื่อเวลาผ่านไป 2 ช่วงครึ่งชีวิตเหลือ $N = \frac{N_0}{2^2}$

ตอนแรกมีมวลเริ่มต้น N_0 เมื่อเวลาผ่านไป n ช่วงครึ่งชีวิตเหลือ $N = \frac{N_0}{2^n}$ (20.1)

เวลาผ่านไป T วินาที คิดเป็น 1 ช่วงครึ่งชีวิต

เวลาผ่านไป t วินาที คิดเป็น $n = \frac{t}{T}$ ช่วงครึ่งชีวิต (20.2)

แทน (20.2) ใน (20.1) จะได้ $\frac{N}{N_0} = \frac{1}{2^n}$

จะได้ $\frac{N}{N_0} = \frac{1}{2^{\frac{t}{T}}}$ (20.3)

เมื่อ N_0 คือ มวลเริ่มต้น N คือ มวลที่เหลือ t คือ เวลาผ่านไป T คือ เวลาครึ่งชีวิต

แบบฝึกหัดที่ 20.4

1. (Ent) ธาตุไอโอดีน - 126 มีครึ่งชีวิต 12 วัน นาย ข ได้รับธาตุไอโอดีน - 126 เข้าไปในร่างกาย 16 กรัม เป็นเวลานานกี่วันไอโอดีน - 126 ในร่างกายของนาย ข จึงลดลงเหลือ 2 กรัม
 ก. 12 วัน ข. 24 วัน **ค. 36 วัน** ง. 48 วัน
2. (Ent) สารกัมมันตรังสีชนิดหนึ่งมีค่ากัมมันตภาพ 256 คูรี พบว่าเวลาผ่านไป 6 นาที กัมมันตภาพลดลงเหลือ 32 คูรี จงหาครึ่งชีวิตและค่ากัมมันตภาพที่เหลืออยู่หลังจากเวลาผ่านไปอีก 8 นาที
ก. 2 นาที 2 คูรี ข. 2 นาที 30 คูรี ค. 4 นาที 8 คูรี ง. 4 นาที 24 คูรี
3. (Ent) ไอโซโทปของโซเดียม ${}_{11}^{24}\text{Na}$ มีครึ่งชีวิต 15 ชั่วโมง จงหาว่าเวลาผ่านไป 75 ชั่วโมง นิวเคลียสของไอโซโทปนี้จะสลายไปแล้วประมาณกี่เปอร์เซ็นต์ของจำนวนสารที่ตั้งต้น ถ้าตอนเริ่มแรกมีนิวเคลียสของไอโซโทปนี้มีค่า 5 คูรี
 ก. 75 % ข. 87 % ค. 94 % **ง. 97 %**

4. (Ent) สารกัมมันตรังสีโคบอลต์ - 60 สลายตัวให้รังสีบีตาและรังสีแกมมา โดยมีครึ่งชีวิต 5.3 ปี จงหาเปอร์เซ็นต์ของสารกัมมันตรังสีที่เหลืออยู่เมื่อเวลาผ่านไป 15.9 ปี
- ก. 6.25 % **ข. 12.5 %** ค. 18.75 % ง. 25 %
5. (Ent) ต้องใช้เวลานานเท่าใด ธาตุกัมมันตรังสีที่มีครึ่งชีวิตเท่ากับ 30 ปี จึงจะมีปริมาณเหลือเพียงร้อยละ 10 ของของเดิม
- ก. 80 ปี **ข. 100 ปี** ค. 120 ปี ง. 240 ปี
6. (Ent) ในการหาอายุของวัตถุโบราณชิ้นหนึ่งโดยการวัดปริมาณของคาร์บอน - 14 ซึ่งมีครึ่งชีวิต 5,570 ปี พบว่ามีปริมาณคาร์บอน - 14 ที่เหลืออยู่ในปัจจุบันเท่ากับ 1/8 เท่าของปริมาณที่มีอยู่ในตอนแรก วัตถุโบราณชิ้นนี้มีอายุเท่าไร
- ก. 11,140 ปี **ข. 16,710 ปี** ค. 22,280 ปี ง. 44,560 ปี

การสลายตัวของนิวเคลียสกับกัมมันตรังสี

รัทเทอร์ฟอร์ดและซอดดีได้ตั้งสมมติฐานเพื่อใช้อธิบายการสลายตัวของธาตุกัมมันตภาพรังสีไว้ดังนี้

1. ธาตุกัมมันตรังสีจะแตกตัวออกให้อนุภาคแอลฟาหรือบีตาได้สารใหม่ และสารใหม่ที่เกิดขึ้นนี้อาจจะมีการแผ่กัมมันตภาพรังสีต่อไปได้อีก
2. ในการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี เราไม่สามารถจะบอกได้ว่านิวเคลียสใดจะสลายก่อนหรือหลังแต่เราสามารถบอกได้เพียงว่านิวเคลียสทุกตัวมีความน่าจะเป็นที่จะสลายตัวเท่ากันหมดและอัตราการสลายจะขึ้นอยู่กับจำนวนนิวเคลียส (นิวเคลียสที่พร้อมจะสลาย) ในขณะนั้น

ถ้าที่เวลา t_1 ให้ธาตุกัมมันตรังสีมีจำนวนนิวเคลียสอยู่ N_1
 และที่เวลา t_2 ให้ธาตุกัมมันตรังสีมีจำนวนนิวเคลียสอยู่ N_2

$$\therefore \text{อัตราการลดของนิวเคลียส} = \frac{\Delta N}{\Delta t} = \frac{N_2 - N_1}{t_2 - t_1}$$

โดย $\Delta N = N_2 - N_1 =$ การเปลี่ยนแปลงของนิวเคลียส

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \text{เวลาที่ผ่านไป}$$

จากสมมติฐานข้อ 2 จะได้อธิบายอัตราการสลายขึ้นอยู่กับจำนวนนิวเคลียสที่มีอยู่ขณะนั้น

$$\therefore -\frac{\Delta N}{\Delta t} \propto N$$

$$-\frac{\Delta N}{\Delta t} = A = \lambda N \dots\dots\dots(20.4)$$

โดย $\lambda =$ ค่าคงที่ของการสลายตัว

$N =$ จำนวนนิวเคลียสของธาตุกัมมันตภาพรังสีที่มีอยู่ขณะนั้น

$-\frac{\Delta N}{\Delta t} = A =$ อัตราการสลายตัวของนิวเคลียส มีเครื่องหมายเป็นลบแสดงว่าเป็นอัตราการลด

หน่วยกัมมันตรังสี

$$1 \text{ คูรี (ci)} = 3.7 \times 10^{10} \text{ เบ็คเคอเรล (Bq)}$$

ความสัมพันธ์ของอัตราการสลายตัวของกัมมันตภาพรังสีกับครึ่งชีวิต

$$\begin{aligned} \text{จาก } \frac{dN}{dt} &= -\lambda N \\ \frac{dN}{dt} &= -\lambda dt \\ \int_{N_0}^N \frac{dN}{N} &= \int_0^t -\lambda dt \dots\dots\dots 1 \end{aligned}$$

จากสมการ Integrate $\frac{dN}{N}$ จะได้ $\ln N$

$$\therefore \text{สมการ 1 เขียนใหม่ได้ } [\ln N] = [-\lambda t]_0^t$$

แทนค่าขีดจำกัดบน Upper Limit และขีดจำกัดล่าง Lower Limit จะได้

$$\ln N - \ln N_0 = -[\lambda t - 0]$$

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t$$

เขียนในรูปเลขชี้กำลังจะได้ $e^{-\lambda t} = \frac{N}{N_0}$

$$\therefore N = N_0 e^{-\lambda t} \dots\dots\dots (20.5)$$

โดย N_0 = จำนวนนิวเคลียสของธาตุกัมมันตภาพรังสีที่เวลา $t = 0$

N = จำนวนนิวเคลียสของธาตุกัมมันตภาพรังสีที่เวลา $t = t$

e = ค่าคงที่ = 2.718

อัตราการสลายตัวของกัมมันตภาพรังสีกับครึ่งชีวิต จากสูตร $N = N_0 e^{-\lambda t}$

เมื่อเวลาผ่านไปครึ่งชีวิต $t = T$ จำนวนนิวเคลียสเหลือ $N = \frac{N_0}{2}$

$$\text{แทนค่า } \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T}$$

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda T}$$

$$2 = e^{\lambda T}$$

เขียนในรูปของ \log จะได้ $\log_e 2 = \lambda T$

$$\therefore \log 2 = \frac{\log 2}{\log_e} = \frac{\log 2}{\log 2.718} = 0.693 = \lambda T$$

$$T = \frac{0.693}{\lambda} \dots\dots\dots (20.6)$$

แบบฝึกหัดที่ 20.5

1. (Ent) ถ้ามี $^{226}_{88}\text{Ra}$ จำนวน N นิวเคลียส มีกัมมันตภาพ A มิลลิวูรี ค่าคงตัวของการสลายตัวต่อวินาทีคือข้อใด (กำหนดให้ 1 วูรีเท่ากับการสลาย 3.7×10^{10} ต่อวินาที)

- ก. $3.7 \times 10^7 \frac{A}{N}$ ข. $3.7 \times 10^7 \frac{N}{A}$ ค. $\frac{A}{3.7 \times 10^7 N}$ ง. $\frac{N}{3.7 \times 10^7 A}$

2. (Ent) ธาตุกัมมันตรังสีจำนวนหนึ่ง มีกัมมันภาพ 1 ไมโครคูรี และมีครึ่งชีวิตเท่ากับ 1,000 วินาที จำนวนนิวเคลียสกัมมันตรังสีขณะนั้นเป็นเท่าใด (1 คูรี = 3.7×10^{10} เบ็กเคอเรล)

ก. 3.7×10^7 ข. 5.3×10^7 ค. 3.7×10^9 ง. 5.3×10^9
3. (Ent) ค่าคงที่ของการสลายตัว ของ $^{232}_{90}\text{Th}$ เท่ากับ 1.6×10^{-18} (วินาที⁻¹) ถ้ามี $^{232}_{90}\text{Th}$ อยู่ 1 กิโลกรัม ให้หาอัตราการสลายตัวเป็นอะตอมต่อวินาที ($N_A = 6 \times 10^{23}$ ต่อโมล)

ก. 4.1×10^3 ข. 9.6×10^5 ค. 4.1×10^6 ง. 9.6×10^8
4. (Ent) ไอโอดีน - 131 มีค่าคงตัวของการสลายตัวเท่ากับ 0.087 ต่อวัน ถ้ามี ไอโอดีน - 131 อยู่ 10 กรัม ตอนเริ่มต้นเมื่อเวลาผ่านไป 24 วัน จะมี ไอโอดีน - 131 เหลืออยู่เท่าใด

ก. 0.63 กรัม ข. 1.25 กรัม ค. 2.50 กรัม ง. 5.00 กรัม
- 5 (Ent) ถ้าธาตุ X มีจำนวนอะตอมเป็น 2 เท่าของธาตุ Y แต่มีกัมมันภาพเป็น 3 เท่าของธาตุ Y ครึ่งชีวิตของธาตุ X จะเป็นกี่เท่าของธาตุ Y

ก. $\frac{1}{6}$ เท่า ข. $\frac{2}{3}$ เท่า ค. $\frac{3}{2}$ เท่า ง. 6 เท่า

การทดลองอุปมาอุปมัย การทอดลูกเต๋ากับการสลายของธาตุกัมมันตรังสี

$$\frac{N}{N_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}}$$

เมื่อ N_0 คือ จำนวนลูกเต๋าดั้งแรก

N คือ จำนวนลูกเต๋าคือเหลือ

t คือ จำนวนครั้งที่ทอดลูกเต๋าคือ

T คือ จำนวนครั้งที่ทอดแล้วลูกเต๋าคือเหลือครึ่งหนึ่งของเดิม

$$T = \frac{0.693}{\lambda}$$

เมื่อ T คือ จำนวนครั้งที่ทอดแล้วลูกเต๋าคือเหลือครึ่งหนึ่ง

λ คือ โอกาสหงายหน้าที่แต้มสี่

โอกาสหงายหน้าที่แต้มสี่ (λ) = จำนวนหน้าที่แต้มสี่ / จำนวนหน้าทั้งหมด

แบบฝึกหัดที่ 20.6

1. (Ent) ลูกเต๋าคือ 16 หน้า แต้มสี่ไว้ที่หน้าหนึ่งจำนวน 100 ลูก นำมาทอดและคัดลูกที่หงายหน้าแต้มสี่ออก ทอดกี่ครั้งจึงจะเหลือลูกเต๋าคือ 50 ลูก

ก. 8 ครั้ง ข. 9 ครั้ง ค. 10 ครั้ง ง. 11 ครั้ง
2. (Ent) ในการทดลองอุปมาอุปมัยของการทอดลูกเต๋ากับการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี โดยการโยนลูกเต๋าคือแล้วคัดหน้าที่ไม่แต้มสี่ออกไป ถ้าลูกเต๋าคือ 6 หน้า มีหน้าที่แต้มสี่ 2 หน้า และมีจำนวน 90 ลูก จงหาว่า ถ้าทำการโยนลูกเต๋าคือทั้ง 2 ครั้ง โดยสถิติจะเหลือจำนวนลูกเต๋าคือเท่าใด

ก. 10 ลูก ข. 30 ลูก ค. 40 ลูก ง. 56 ลูก

รัศมีนิวเคลียส

$$\text{รัศมีนิวเคลียส } R \propto A^{\frac{1}{3}}$$

$$\text{จะได้ } R = r_0 A^{\frac{1}{3}} \dots\dots\dots(20.7)$$

เมื่อ R คือ รัศมีนิวเคลียส A คือ เลขมวล r_0 คือ 1.2×10^{-15} เมตร

แบบฝึกหัดที่ 20.7

- (Ent) ถ้ารัศมีนิวเคลียสของธาตุไฮโดรเจนเป็น 1.4×10^{-15} เมตร รัศมีนิวเคลียสของธาตุ ^{27}Al จะเป็นกี่เมตร
 ก. 4.2×10^{-15} เมตร ข. 5.6×10^{-15} เมตร ค. 12.6×10^{-15} เมตร ง. 27×10^{-15} เมตร
- (Ent) รัศมีนิวเคลียสของ ^{238}U มีค่าประมาณกี่เท่าของรัศมีนิวเคลียสของ ^4He
 ก. 4 เท่า ข. 8 เท่า ค. 16 เท่า ง. 60 เท่า
- (Ent) ไอโซโทปของธาตุ $^{224}_{88}\text{Ra}$ มีรัศมีเป็นกี่เท่าของธาตุไอโซโทปของ $^{28}_{11}\text{Na}$
 ก. 2 เท่า ข. 3 เท่า ค. 4 เท่า ง. 5 เท่า

พลังงานยึดเหนี่ยว (B.E.)

มวลของนิวเคลียส เกิดจากมวลของโปรตอนและนิวตรอนรวมกัน แต่จากการทดลองพบว่า มวลของนิวเคลียส \neq มวลของโปรตอน + มวลของนิวตรอน มีมวลหายไปบางส่วนเรียกว่า **มวลพร่อง** สูตรมวลพร่อง

$$\text{มวลพร่อง } \Delta m = \text{มวลของโปรตอน} + \text{มวลของนิวตรอน} - \text{มวลนิวเคลียส}$$

$$\text{มวลพร่อง } \Delta m = \text{มวลของไฮโดรเจน} + \text{มวลของนิวตรอน} - \text{มวลอะตอม}$$

$$\Delta E = \Delta m \times 931 \text{ หรือ } \Delta E = \Delta m \times 930 \text{ หน่วย MeV}$$

พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออน (พลังงานยึดเหนี่ยวต่อเลขมวล)

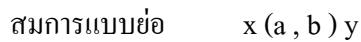
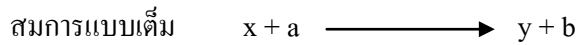
$$\frac{BE}{A} = \frac{\Delta m \times 931}{A} \text{ มีหน่วยเป็น MeV}$$

แบบฝึกหัดที่ 20.8

- (Ent) ถ้านิวเคลียสของธาตุ A มีมวล 4.0020 u และนิวเคลียสของธาตุ A นี้ประกอบขึ้นด้วยโปรตอนและนิวตรอนอย่างละ 2 ตัว (มวลของโปรตอน = 1.0073 U, มวลของนิวตรอน = 1.0087 u มวล 1 u เทียบเท่ากับพลังงาน 930 MeV) พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนของธาตุ A มีค่า
 ก. 2 MeV ข. 7 MeV ค. 14 MeV ง. 28 MeV
- (Ent) ธาตุตรีเทียมซึ่งมีเลขมวลอะตอมเป็น 1 เลขมวลเป็น 3 และมวลอะตอมเท่ากับ 3.016049 u จะมีพลังงานยึดเหนี่ยวเท่ากับเท่าใด กำหนดให้ เลขมวลของไฮโดรเจน = 1.007825 u มวลนิวตรอน = 1.008655 u และ 1 u = 930 MeV

ปฏิกิริยานิวเคลียร์

สำหรับการชนระหว่างนิวเคลียสกับนิวเคลียส หรือนิวเคลียสกับอนุภาคนั้น เขียนเป็นปฏิกิริยานิวเคลียสได้ดังนี้



กำหนดให้ x คือ นิวเคลียสที่ใช้เป็นเป้า

a คือ อนุภาคที่วิ่งเข้ามาชนเป้า

y คือ นิวเคลียสของธาตุใหม่ที่เกิดขึ้นภายหลังการชน

b คือ อนุภาคที่เกิดขึ้นภายหลังการชน

หลักการ Balance สมการ

1. ผลบวกของเลขมวลตอนก่อน = ผลบวกของเลขมวลตอนหลัง

$$\Sigma A_{\text{ตอนก่อน}} = \Sigma A_{\text{ตอนหลัง}}$$

2. ผลบวกของเลขอะตอมตอนก่อน = ผลบวกของเลขอะตอมตอนหลัง

$$\Sigma Z_{\text{ตอนก่อน}} = \Sigma Z_{\text{ตอนหลัง}}$$

แบบฝึกหัดที่ 20.9

1. (Ent) จากปฏิกิริยานิวเคลียร์ ${}^2_1\text{H} + X \longrightarrow {}^4_2\text{He} + n$ X ควรเป็นอนุภาคใด

ก. อิเล็กตรอน ข. โปรตอน ค. ดิวเทรอน ง. ทริทอน

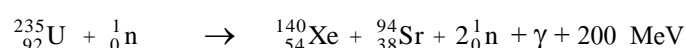
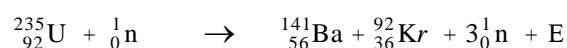
2. (Ent) จากปฏิกิริยานิวเคลียร์ ${}^{14}_7\text{N} + {}^1_1\text{H} \longrightarrow {}^{15}_7\text{N} + X$ X คืออนุภาคใด

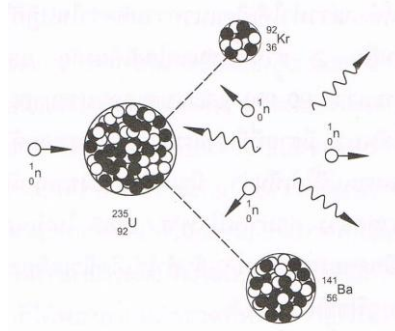
ก. อิเล็กตรอน ข. โปรตอน ค. นิวตรอน ง. โพซิตรอน

3. (Ent) จากปฏิกิริยานิวเคลียร์ ${}^{198}_{80}\text{Hg} (n, y) {}^{197}_{79}\text{Au}$ ถามว่า y คืออนุภาคใด

ก. อนุภาคแอลฟา ข. โปรตอน ค. ดิวเทรอน ง. ทริทอน

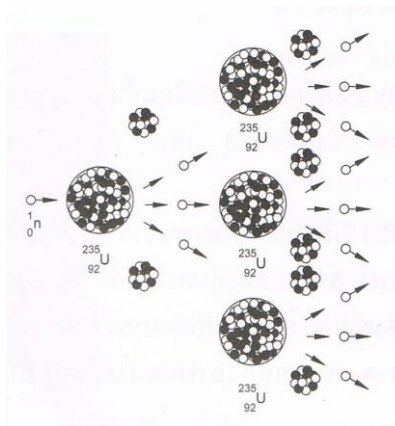
ปฏิกิริยาฟิชชัน (Fission reaction) เกิดจากธาตุหนักถูกยิงด้วยนิวตรอน แล้วแตกเป็นธาตุเบา ปฏิกิริยาฟิชชันเป็นปฏิกิริยาแยกตัวของนิวเคลียส โดยมีนิวตรอนเป็นตัววิ่งเข้าชนนิวเคลียสหนักๆ ($A > 230$) เป็นผลทำให้นิวเคลียสที่มีขนาดปานกลาง และมีนิวตรอนที่มีความเร็วสูงเกิดขึ้นประมาณ 2-3 ตัว ทั้งมีการคายพลังงานออกมาด้วย ดังตัวอย่างปฏิกิริยาต่อไปนี้





รูป 20.2 แสดงการเกิดฟิชชันของยูเรเนียม -235

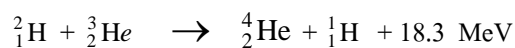
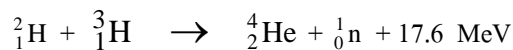
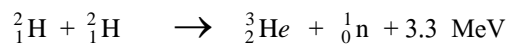
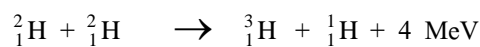
ปฏิกิริยาลูกโซ่ (Chain reaction) เป็นปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบฟิชชันที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยอาศัยนิวตรอนที่เกิดขึ้นเป็นตัวยิงนิวเคลียสของธาตุต่อไป



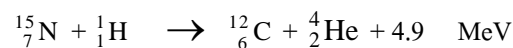
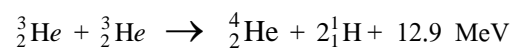
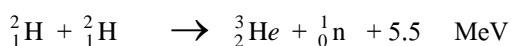
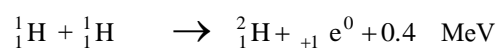
รูป 20.3 การเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่

ปฏิกิริยาฟิวชัน (Fision reaction) เกิดจากธาตุเบาตั้งแต่สองธาตุรวมกันกลายเป็นธาตุหนัก ปฏิกิริยาฟิวชันเป็นปฏิกิริยาหลอมตัวของนิวเคลียสและมีพลังงานคายออกมาด้วย นิวเคลียสที่ใส่หลอมจะต้องเป็นนิวเคลียสเล็กๆ ($A < 20$) หลอมรวมกลายเป็นนิวเคลียสเบาที่ใหญ่กว่าเดิม

ตัวอย่างของปฏิกิริยาฟิวชันที่ทำได้ในห้องปฏิบัติการ



ตัวอย่างของปฏิกิริยาฟิวชันที่เกิดขึ้นบนดาวฤกษ์



ตาราง เปรียบเทียบ Fission และ Fusion

แบบฟิชชัน	แบบฟิวชัน
<ol style="list-style-type: none"> 1. เป็นปฏิกิริยาคายพลังงาน 2. เป็นการแตกตัวนิวเคลียสของธาตุที่มีเลขมวลมากได้ 2 เล็ยง 3. เกิดที่อุณหภูมิปกติได้ 4. ให้พลังงานต่อปฏิกิริยามากกว่าแบบฟิวชัน 5. ให้พลังงานต่อมวลน้อยกว่าแบบฟิวชัน 6. สามารถควบคุมให้เกิดฟิชชันและปฏิกิริยาลูกโซ่ได้ เครื่องมือผลิตพลังงานนิวเคลียร์ที่สามารถควบคุมอัตราการเกิดฟิชชันและปฏิกิริยาลูกโซ่ได้ เรียกว่า เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (Nuclear Reactor) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. เป็นปฏิกิริยาคายพลังงาน 2. เป็นการหลอมรวมนิวเคลียสของธาตุที่มีเลขน้อยสองธาตุ 3. เกิดที่อุณหภูมิสูงมาก เช่น เกิดขึ้นบนดวงอาทิตย์ 4. ให้พลังงานต่อปฏิกิริยาน้อยกว่าแบบฟิชชัน 5. ให้พลังงานต่อมวลมากกว่าแบบฟิชชัน 6. ยังไม่สามารถควบคุมปฏิกิริยาเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ได้

ประโยชน์ของกัมมันตภาพรังสี

1. **ทางอุตสาหกรรม** ใช้หารอยร้าวของท่อ รอยร้าวของแผ่นโลหะ หรือใช้ควบคุมความหนาแน่นของแผ่นโลหะ
2. **ทางการเกษตร** ใช้ปรับปรุงพันธุ์พืช วิจัยปุ๋ย ($^{32}_{15}\text{P}$) วิจัยโคสม ($^{131}_{53}\text{I}$) การถนอมอาหาร หรือศึกษาการปรุงอาหารของพืช
3. **ทางการแพทย์** ใช้รักษาโรคมะเร็ง ($^{60}_{27}\text{Co}$) ตรวจการไหลเวียนของโลหิต ($^{24}_{11}\text{Na}$)
4. **การหาวัตถุโบราณ** หรือการหาอายุโลก จะใช้คาร์บอน - 14 และยูเรเนียม (Uranium-lead dating)

อันตรายจากกัมมันตภาพรังสี

กัมมันตภาพรังสี เมื่อผ่านเข้าไปในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในเนื้อเยื่อ ทำให้เนื้อเยื่อตายทันที หรือมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมทำให้เกิดโรคมะเร็ง

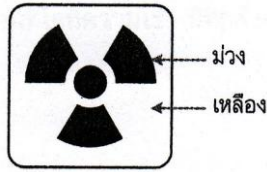
การป้องกันอันตรายจากกัมมันตภาพรังสี

1. เนื่องจากปริมาณกัมมันตภาพรังสีที่เราได้รับขึ้นกับเวลา ดังนั้นถ้าจำเป็นต้องเข้าไปใกล้บริเวณที่มีธาตุกัมมันตรังสี ควรใช้เวลาสั้นที่สุดเท่าที่จะทำได้
2. เนื่องจากปริมาณกัมมันตภาพรังสีจะลดลง ถ้าบริเวณนั้นอยู่ห่างแหล่งกำเนิดกัมมันตภาพรังสีมากขึ้น ดังนั้นจึงควรอยู่ห่างบริเวณที่มีธาตุกัมมันตรังสีให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้
3. เนื่องจากปริมาณกัมมันตภาพรังสีชนิดต่าง ๆ มีอำนาจทะลุผ่านวัตถุได้ต่างกัน ดังนั้นจึงควรใช้วัตถุที่กัมมันตภาพรังสีผ่านได้ยากเป็นเครื่องกำบัง เช่น มักใช้ตะกั่ว คอนกรีต กำบังรังสีแกมมาและรังสีบีตาได้ นิยมใช้น้ำเป็นเครื่องกำบังนิวตรอน เป็นต้น

แบบทดสอบบทที่ 20 เรื่อง ฟิสิกส์นิวเคลียร์ (O-NET)

- (O-NET 49) คาร์บอนเป็นธาตุที่เป็นส่วนสำคัญของสิ่งมีชีวิต สัญลักษณ์นิวเคลียส $^{12}_6\text{C}$ แสดงว่านิวเคลียสของคาร์บอนนี้มีอนุภาคตามข้อใด
 - โปรตอน 12 ตัว นิวตรอน 6 ตัว
 - โปรตอน 6 ตัว นิวตรอน 12 ตัว
 - โปรตอน 6 ตัว อิเล็กตรอน 6 ตัว
 - โปรตอน 6 ตัว นิวตรอน 6 ตัว**
- (O-NET 49) ข้อใดต่อไปนี้เป็นวิธีการกำจัดกากกัมมันตรังสีที่ดีที่สุด
 - เร่งให้เกิดการสลายตัวเร็วขึ้นโดยใช้ความดันสูงมาก ๆ
 - เผาให้สลายตัวที่อุณหภูมิสูง
 - ใช้ปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนให้เป็นสารประกอบอื่น
 - ใช้คอนกรีตเรียงให้แน่นแล้วฝังกลบใต้ภูเขา**
- (O-NET 49) ข้อใดถูกต้องสำหรับไอโซโทปของธาตุหนึ่ง ๆ
 - มีเลขมวลเท่ากัน แต่เลขอะตอมต่างกัน
 - มีจำนวนโปรตอนเท่ากัน แต่จำนวนนิวตรอนต่างกัน**
 - มีจำนวนนิวตรอนเท่ากัน แต่จำนวนโปรตอนต่างกัน
 - มีผลรวมของจำนวนโปรตอนและนิวตรอนเท่ากัน
- (O-NET 49) นักโบราณคดีตรวจพบเรือไม้โบราณลำหนึ่ง ว่ามีอัตราส่วนของปริมาณ C-14 ต่อ C-12 เป็น 25 % ของอัตราส่วนสำหรับสิ่งที่ยังมีชีวิต สันนิษฐานได้ว่าซากเรือนี้มีอายุประมาณกี่ปี กำหนดให้ครึ่งชีวิตของ C-14 เป็น 5,730 ปี
 - 2,865
 - 5,730
 - 11,460**
 - 22,920
- (O-NET 49) รังสีในข้อใดที่มีอำนาจในการทะลุทะลวงผ่านเนื้อสารได้น้อยที่สุด
 - รังสีแอลฟา**
 - รังสีบีตา
 - รังสีแกมมา
 - รังสีเอกซ์
- (O-NET 49) ไอโอดีน-128 มีค่าครึ่งชีวิต 25 นาที ถ้าเริ่มต้นมีไอโอดีน-128 อยู่ 400 มิลลิกรัม ไอโอดีน-128 จะลดลงเหลือ 100 มิลลิกรัม เมื่อเวลาผ่านไปกี่นาที (50 นาที)
- (O-NET 50) อนุภาคแอลฟา อนุภาคบีตา รังสีแกมมา เมื่อเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก ข้อใดไม่เกิดการเบน
 - อนุภาคแอลฟา
 - อนุภาคบีตา
 - รังสีแกมมา**
 - อนุภาคแอลฟาและบีตา
- (O-NET 50) กิจกรรมการศึกษาที่เปรียบเทียบการสลายกัมมันตรังสีกับการทอดลูกเต๋านั้น จำนวนลูกเต๋าคือถูกคัดออกเทียบได้กับปริมาณใด
 - เวลาครึ่งชีวิต
 - จำนวนนิวเคลียสตั้งต้น
 - จำนวนนิวเคลียสที่เหลืออยู่
 - จำนวนนิวเคลียสที่สลาย**
- (O-NET 50) อนุภาคใดในนิวเคลียส $^{236}_{92}\text{U}$ และ $^{234}_{90}\text{Th}$ ที่มีจำนวนเท่ากัน
 - โปรตอน
 - อิเล็กตรอน
 - นิวตรอน**
 - นิวคลีออน

10. (O-NET 50) เครื่องหมายดังรูปแทนอะไร



1. เครื่องกำหนดไฟฟ้าโดยกัมมันตภาพรังสี
 2. การเตือนว่ามีอันตรายจากกัมมันตภาพรังสี
 3. การเตือนว่ามีอันตรายจากสารเคมี
 4. เครื่องกำหนดไฟฟ้าโดยเซลล์แสงอาทิตย์
11. (O-NET 50) นิวเคลียสของเรเดียม-226 ($^{226}_{88}\text{Ra}$) มีการสลายโดยการปล่อยอนุภาคแอลฟา 1 ตัว และรังสีแกมมาออกมาจะทำให้ $^{226}_{88}\text{Ra}$ กลายเป็นธาตุใด
1. $^{218}_{84}\text{Po}$
 2. $^{222}_{86}\text{Rn}$
 3. $^{230}_{90}\text{Th}$
 4. $^{234}_{94}\text{U}$
12. (O-NET 50) ในธรรมชาติธาตุคาร์บอนมี 3 ไอโซโทป คือ $^{12}_6\text{C}$ $^{13}_6\text{C}$ และ $^{14}_6\text{C}$ ข้อใดต่อไปนี้ถูก
1. แต่ละไอโซโทปมีจำนวนอิเล็กตรอนต่างกัน
 2. แต่ละไอโซโทปมีจำนวนโปรตอนต่างกัน
 3. แต่ละไอโซโทปมีจำนวนนิวตรอนต่างกัน
 4. แต่ละไอโซโทปมีจำนวนโปรตอนเท่ากับจำนวนนิวตรอน
13. (O-NET 50) รังสีใดที่นิยมใช้ในการอาบรังสีผลไม้
1. รังสีเอกซ์
 2. รังสีแกมมา
 3. รังสีบีตา
 4. รังสีแอลฟา
14. (O-NET 51) ไอโซโทปกัมมันตรังสีของธาตุไอโอดีน - 128 มีครึ่งชีวิต 25 นาที ถ้ามีไอโอดีน -128 ทั้งหมด 256 กรัม จะใช้เวลาเท่าไรจึงจะเหลือไอโอดีน -128 อยู่ 32 กรัม
1. 50 นาที
 2. 1 ชั่วโมง 15 นาที
 3. 1 ชั่วโมง 40 นาที
 4. 3 ชั่วโมง 20 นาที
15. (O-NET 51) ธาตุกัมมันตรังสีใดที่ใช้ในการคำนวณหาอายุของโบราณวัตถุ
1. I-131
 2. Co-60
 3. C-14
 4. P-32
16. (O-NET 51) ข้อความใดต่อไปนี้ถูกต้องเกี่ยวกับรังสีแอลฟา รังสีบีตาและรังสีแกมมา
1. รังสีแอลฟามีประจุ +4
 2. รังสีแอลฟามีมวลมากที่สุดและอำนาจทะลุทะลวงผ่านสูงที่สุด
 3. รังสีบีตามีมวลน้อยที่สุดและอำนาจทะลุทะลวงผ่านต่ำที่สุด
 4. รังสีแกมมามีอำนาจทะลุทะลวงสูงที่สุด
17. (O-NET 51) ข้อใดถูกต้องเกี่ยวกับปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชัน (fusion)
1. เกิดที่อุณหภูมิต่ำ
 2. ไม่สามารถทำให้เกิดบนโลกได้
 3. เกิดจากนิวเคลียสของธาตุเบาหลอมรวมกันเป็นธาตุหนัก
 4. เกิดจากการที่นิวเคลียสของธาตุหนักแตกตัวออกเป็นธาตุเบา

18. (O-NET 51) ในการสลายตัวของ $^{14}_6\text{C}$ นิวเคลียสของ C-14 ปล่อยอิเล็กตรอนออกหนึ่งตัว นิวเคลียสใหม่จะมีประจุเป็นกี่เท่าของประจุโปรตอน
1. 5
 2. 7
 3. 13
 4. 15
19. (O-NET 51) อัตราการสลายตัวของกลุ่มนิวเคลียสกัมมันตรังสี A ขึ้นกับอะไร
1. อุณหภูมิ
 2. ความดัน
 3. ปริมาณ
 4. จำนวนนิวเคลียส A ที่มีอยู่
20. (O-NET 51) นิวเคลียสของเรเดียม-226 มีการสลายตั้งสมการข้างล่าง x คืออะไร
- $$^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow ^{222}_{86}\text{Rn} + x$$
1. รังสีแกมมา
 2. อนุภาคบีตา
 3. อนุภาคนิวตรอน
 4. อนุภาคแอลฟา
21. (O-NET 52) ข้อใดถูกต้องเกี่ยวกับไอโซโทปสองไอโซโทปของธาตุชนิดเดียวกัน
1. มีจำนวนนิวคลีออนเท่ากัน
 2. มีเลขมวลเท่ากัน
 3. มีเลขอะตอมเท่ากัน
 4. มีจำนวนนิวตรอนเท่ากัน
22. (O-NET 52) ธาตุหรือไอโซโทปในข้อใดที่ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องในปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชันที่เกิดขึ้นที่ดวงอาทิตย์
1. ไฮโดรเจน
 2. ดิวเทอเรียม
 3. ทริเทียม
 4. ฮีเลียม
23. (O-NET 52) รังสีในข้อใดใช้สำหรับฉายฆ่าเชื้อโรคในเครื่องมือทางการแพทย์
1. รังสีแกมมา
 2. รังสีบีตา
 3. รังสีอินฟราเรด
 4. รังสีแอลฟา
24. (O-NET 53) โปรตอนและนิวตรอนสามารถอยู่รวมกันเป็นนิวเคลียสได้ ด้วยแรงใด
1. แรงดึงดูดระหว่างมวล
 2. แรงไฟฟ้า
 3. แรงแม่เหล็ก
 4. แรงแวนเดอร์วาลส์
25. (O-NET 53) ในทางการแพทย์ ไอโอดีน-131 นำมาใช้เพื่อวัตถุประสงค์ตามข้อใด
1. ตรวจสอบการไหลเวียนของโลหิตในร่างกาย
 2. ตรวจสอบการทำงานของต่อมไทรอยด์
 3. รักษาโรคมะเร็ง
 4. รักษาเนื้องอกในสมอง
26. (O-NET 54) ข้อใดเป็นสมบัติของรังสีแอลฟา
1. เป็นอิเล็กตรอน
 2. เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
 3. เป็นนิวเคลียสของอะตอมฮีเลียม
 4. เป็นโปรตอน

27. (O-NET 54) ธาตุที่มีสัญลักษณ์นิวเคลียร์ ${}_{19}^{40}\text{K}$ มักถูกเรียกชื่อย่อว่าอะไร
1. โปแตสเซียม-19
 2. โปแตสเซียม-21
 3. โปแตสเซียม-40
 4. โปแตสเซียม-59
28. (O-NET 54) เหตุใดโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในปัจจุบันจึงต้องสร้างใกล้แหล่งน้ำธรรมชาติ
1. เพื่อให้มีน้ำเพียงพอต่อการดับไฟ กรณีไฟไหม้เตาปฏิกรณ์ปรมาณู
 2. ใช้น้ำปริมาณมากในการถ่ายเทความร้อนจากเตาปฏิกรณ์ไปยังกังหันไอน้ำ
 3. ใช้น้ำปริมาณมากในการทำให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ของปฏิกิริยานิวเคลียร์
 4. ต้องใช้นิวตรอนจำนวนมากจากน้ำในการเริ่มปฏิกิริยานิวเคลียร์