

บรรยาย 20 ปรากฎการณ์นิวเคลียร์  
SCPY152, ฟิสิกส์-คณะวิทยาศาสตร์-มหิดล, ภาคปลาย 2564-65

อุดม รอบคอบ

19 เมษายน 2565

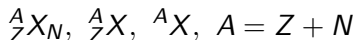
# นิวเคลียสอะตอม

- ▶ จากการทดลองการกระเจิงของอนุภาคอัลฟาจากแผ่นทองคำเปลวของรัทเทอร์ฟอร์ด ทำให้เราทราบว่าอะตอมประกอบด้วยนิวเคลียสที่มีมวลมากและมีประจุบวกที่มาจาก *โปรตอน* (p) ในภายหลังยังพบว่าภายในนิวเคลียสอะตอมยังมี *นิวตรอน* (n) ซึ่งไม่มีประจุไฟฟ้า แต่มีมวลใกล้เคียงกับโปรตอน

อนุภาค	มวล (u)	ประจุไฟฟ้า (e)
p	1.007276	+1
n	1.008665	0

$$1.0u = 1.660540 \times 10^{-27}kg = 931.5MeV/c^2$$

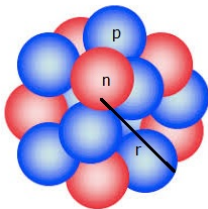
- ▶ สัญลักษณ์นิวเคลียสอะตอม X ที่มีโปรตอนจำนวน Z และมีนิวตรอนจำนวน N คือ



- ▶ การจำแนกนิวเคลียสตามจำนวน  $Z, N, A$  เป็นดังนี้
  - ▶ *isotope* -  $Z$  เท่ากัน ต่างกันที่จำนวน  $N, A$
  - ▶ *isotone* -  $N$  เท่ากัน ต่างกันที่จำนวน  $Z, A$
  - ▶ *isobar* -  $A$  เท่ากัน ต่างกันที่จำนวน  $Z, N$

${}^1_1\text{H} = \text{H} - \text{hydrogen}, {}^2_1\text{H} = \text{d} - \text{deuterium}, {}^3_1\text{H} = \text{t} - \text{tritium}$

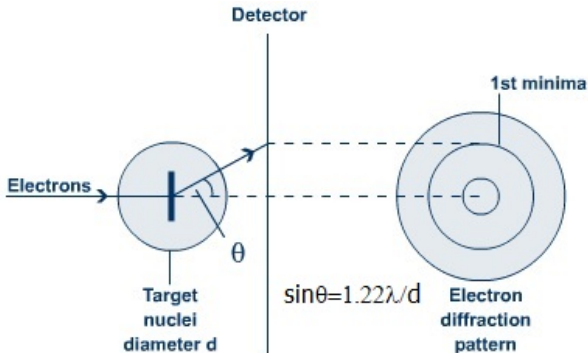
- ▶ โปรตอน และนิวตรอน ยึดโยงต่อกันภายในนิวเคลียสด้วย *แรงนิวเคลียร์อย่างแรง* (nuclear strong force) ซึ่งแรงกว่าแรงคูลอมบ์ แต่มีระยะของแรงสั้นมาก



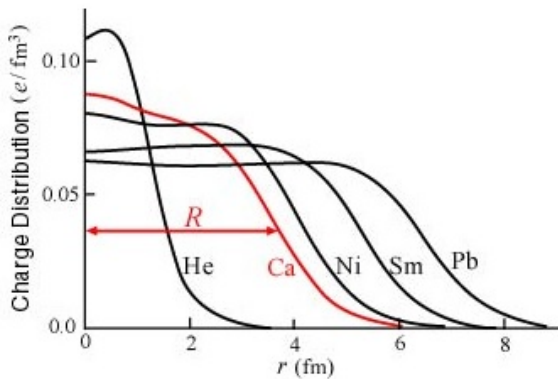
*แบบฝึกหัด* ให้คำนวณขนาดของแรงผลัkcูลอมบ์ระหว่าง 2 โปรตอนที่มีระยะห่างระหว่างกันเท่ากับ 1.2 fm

- ▶ ขนาดของนิวเคลียส (รัศมี  $r$ ) วัดจากการกระเจิงของอิเล็กตรอนพลังงานสูง จากการชนกับนิวเคลียสด้วยแรงคูลอมบ์

$$r = r_0 A^{1/3}, \quad r_0 = 1.2 \text{ fm}$$



► การกระจายประจุไฟฟ้า (มวลสาร) ภายในนิวเคลียส

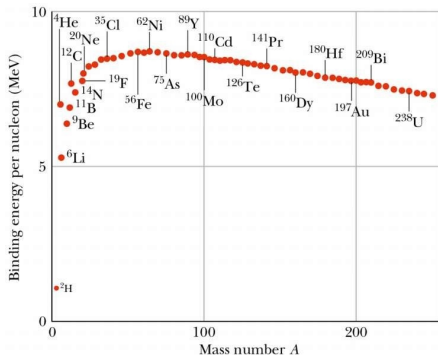


# พลังงานยึดเหนี่ยวและเสถียรภาพของนิวเคลียส

- ▶ พลังงานยึดเหนี่ยว ถูกพิจารณาจากความแตกต่างของมวลสาร (mass defect  $\Delta M$ ) ขององค์ประกอบอนุภาค ก่อนและหลัง เป็นนิวเคลียส

$$\Delta M({}_Z^A X_N) = ZM({}^1H) + Nm_n - M(X)$$

$$E_b(\text{MeV}) = \Delta M(X)c^2 \rightarrow e_b(\text{MeV}/\text{nucleon}) = \frac{E_b}{A}$$



- ▶ พลังงานยึดเหนี่ยวของ deuterium-d ( ${}^2_1H$ )  
(<https://www.ndc.jaea.go.jp/NuC/index.html>)

$$M({}^1H) = 1.007841u, M(d) = 2.014102u, m_n = 1.008665u$$

$$\Delta M = 1.007841 + 1.008665 - 2.014102 = 0.002404u$$

$$\mapsto E_b = \Delta Mc^2 = (0.002404u)(931.5MeV/u) = 2.1393MeV \quad (1)$$

- ▶ พลังงานยึดเหนี่ยวของ  ${}^4He$  ( $M({}^4He) = 4.002603u$ )

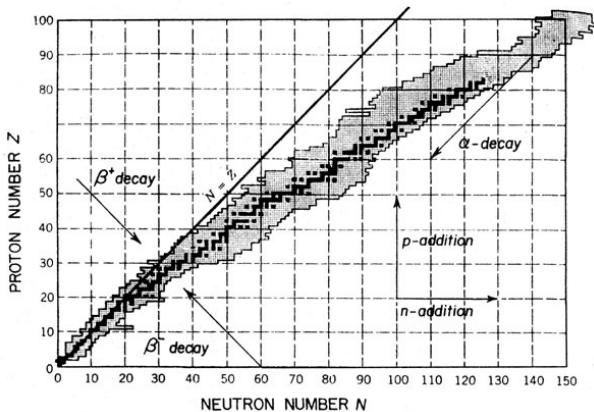
$$\Delta M = 2(1.007841) + 2(1.008665) - 4.002603 = 0.030409u$$

$$\mapsto E_b = (0.030409u)(931.5MeV/u) = 28.3240MeV$$

$$\mapsto e_b = \frac{28.3240MeV}{4} = 7.0815MeV/nucleon$$

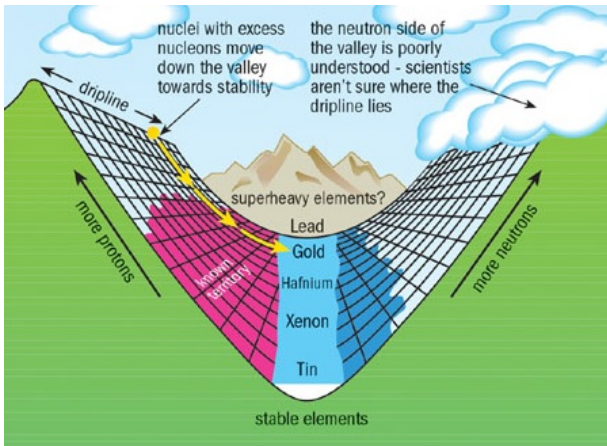
แบบฝึกหัด ให้คำนวณพลังงานยึดเหนี่ยวต่อหน่วยอนุภาคนิวเคลียสของธาตุต่อไปนี้ ก)  ${}^{12}C$  ข)  ${}^{40}Ca$  และ ค)  ${}^{56}Fe$

► การปรากฏของนิวเคลียสในธรรมชาติ





▶ หุบเหวแห่งเสถียรภาพ



# การสลายตัว

- ▶ การสลายตัวของนิวเคลียสไม่เสถียร เป็นไปตามกฎการสลายตัว ดังนี้

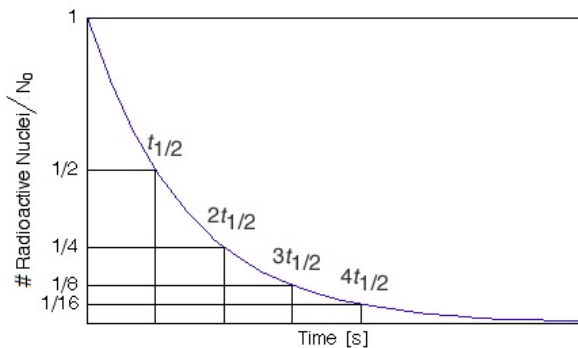
$$dN(t) \propto -N(t)dt \mapsto \frac{dN}{N} = -\lambda dt \mapsto N(t) = N(0)e^{-\lambda t}$$

$\lambda$  คือค่าคงตัวของการสลายตัว  $[\lambda] = s^{-1}$

<u>Nuclide</u>	<u>Constant</u>	<u>Nuclide</u>	<u>Constant</u>
<sup>3</sup> H	5.6E-2	<sup>134</sup> Cs	3.4E-1
<sup>14</sup> C	1.2E-4	<sup>135</sup> Cs	3.4E-7
<sup>36</sup> Cl	2.2E-6	<sup>137</sup> Cs+D	2.3E-2
<sup>57</sup> Co	9.3E-1	<sup>144</sup> Ce	8.9E-1
<sup>60</sup> Co	1.3E-1	<sup>152</sup> Eu	5.2E-2
<sup>55</sup> Fe	2.6E-1	<sup>154</sup> Eu	8.5E-2
<sup>59</sup> Fe	5.6E+0	<sup>226</sup> Ra	4.3E-4
<sup>59</sup> Ni	8.7E-6	<sup>232</sup> Th	5.0E-4
<sup>63</sup> Ni	6.9E-3	<sup>235</sup> U+D	9.8E-10
<sup>90</sup> Sr+D	2.4E-2	<sup>238</sup> U+D	1.6E-10
<sup>93</sup> Mo	2.0E-4	<sup>237</sup> Np+D	3.2E-7
<sup>94</sup> Nb	3.5E-5	<sup>238</sup> Pu	7.9E-3
<sup>99</sup> Tc	3.2E-6	<sup>239</sup> Pu	2.9E-5
<sup>124</sup> Sb	4.2E+0	<sup>241</sup> Am	1.6E-3
<sup>125</sup> Sb+D	2.5E-1		

▶ เวลาครึ่งชีวิต (half-life time  $T_{1/2}$ )

$$N(T_{1/2}) = \frac{1}{2}N(0) = N(0)e^{-\lambda T_{1/2}} \mapsto T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.692}{\lambda}$$



▶ เวลาครึ่งชีวิต - ตาราง

<b>Nuclide</b>	<b>Half-life, <math>t_{1/2}</math></b>
tritium	12.3 a
carbon-14	5.73 ka
carbon-15	2.4 s
potassium-40	1.26 Ga
cobalt-60	5.26 a
strontium-90	28.1 a
iodine-131	8.05 d
cesium-137	30.17 a
radium-226	1.60 ka
uranium-235	0.71 Ga
uranium-238	4.5 Ga
fermium-244	3.3 ms

\*d = day; a = year.

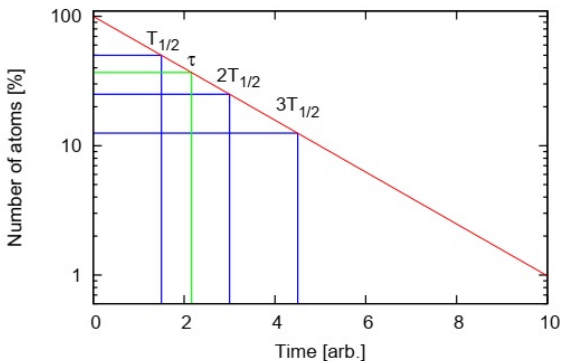
▶ เวลาชั่วชีวิต (life time  $\tau$ )

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \mapsto N(\tau) = \frac{N(0)}{e} \simeq 0.37N(0)$$

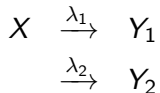
เช่น

$${}^{131}_{53}\text{I}, \lambda = 1.44 \times 10^{-6} \text{s}^{-1} \mapsto T_{1/2} = 8.0252 \text{d} \mapsto \tau = 11.58 \text{d}$$

$$T_{1/2} = 1.5, \tau = T_{1/2} / \ln(2) = 2.16$$

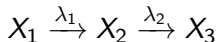


- ▶ การสลายตัวแบบหลายช่องทาง (multi-channels)



$$dN = -\lambda_1 N(0)dt - \lambda_2 N(0)dt \mapsto N(t) = N(0)e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t}$$

- ▶ การสลายตัวแบบต่อเนื่อง (series)



$$dN_1(t) = -\lambda_1 N_1(t)dt$$

$$dN_2(t) = -\lambda_2 N_2(t)dt + \lambda_1 N_1(t)dt$$

$$dN_3(t) = +\lambda_2 N_2(t)dt$$

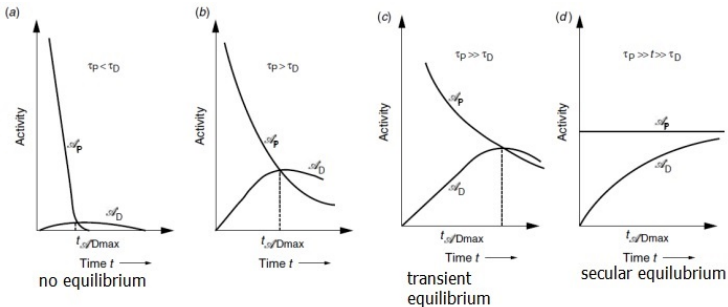
► การสลายตัวแบบต่อเนื่อง (ต่อ)

$$N_1(t) = N_1(0)e^{-\lambda_1 t} \quad (2)$$

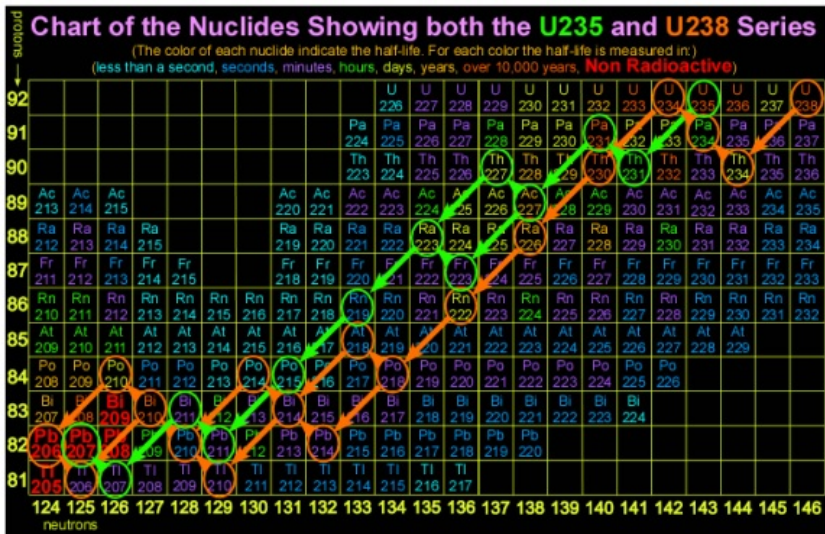
$$N_2(t) = N_1(0) \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \left\{ e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t} \right\} \quad (3)$$

$$N_3(t) = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1(0) \left\{ \frac{1 - e^{-\lambda_1 t}}{\lambda_1} - \frac{1 - e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_2} \right\} \quad (4)$$

โดยมีเงื่อนไขเริ่มต้นว่า  $N_2(0) = 0, N_3(0) = 0$



# U-235, U-238 decay series:





## กัมมันตรังสี

- ▶ นิยาม = อัตราการสลายตัว (ปลดปล่อยรังสี/อนุภาคนิวเคลียร์) ต่อหน่วยเวลา

$$R(t) = \left| \frac{dN(t)}{dt} \right| = \lambda N(t) \quad (5)$$

- ▶ หน่วย

$$[R] = Bq(\text{becquerels}) \mapsto 1Bq = 1dis/s \quad (6)$$

$$= Ci(\text{curie}) \mapsto 1Ci = 3.7 \times 10^{10} Bq \quad (7)$$

$$1Bq = 2.7 \times 10^{-11} Ci \quad (8)$$

- ▶ กัมมันตรังสีของ  $^{131}I$  ปริมาณจำนวน  $0.1\mu g$

$$N = \frac{0.1 \times 10^{-6} g}{131g/mol} \times 6.02 \times 10^{23} \text{ nuclei/mol} = 4.60 \times 10^{14} \text{ nuclei}$$

$$R(t) = 1.44 \times 10^{-6} \times 4.60 \times 10^{14} = 6.62 \times 10^8 Bq = 17.8mCi$$

# Carbon dating

► Dating equation

$$N(t) = N(0)e^{-\lambda t} \mapsto \lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}, \quad T_{1/2} = 5730 \text{yr}$$

$$N(t) = N(0) \exp \left\{ -\ln 2 \frac{t}{T_{1/2}} \right\} \mapsto t = \frac{\ln(N(0)/N(t))}{\ln 2} T_{1/2}$$

$$\mapsto t = 8267 \ln \frac{N(0)}{N(t)} \text{ [yrs]}$$

$$R_m = \text{activity/g}, \quad {}^{14}\text{C} \mapsto R_m(0) = 14 \text{dis/min} \cdot \text{g}$$

$$t = 8267 \ln \frac{R_m(0)}{R_m(t)} \text{ [yrs]} \quad (9)$$

For example of  $R_m(t) = 11 \text{Bq}$

$$t = 8267 \ln \frac{14}{11} = 8267 \times 0.241 = 1993 \text{yrs}$$