February 06

เคมีนิวเคลียร์

สาขาเคมี
คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์

1

Alchemist

- การเล่นแร่แปรธาตุ
- การเปลี่ยนตะกั่วให้เป็นทอง
- การเปลี่ยนธาตุชนิดหนึ่งให้เป็นอีกชนิดหนึ่ง

2

เคมีนิวเคลียร์

- กระบวนการทั่วไปที่ศึกษาสนใจในเคมีเป็นกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงตัวของอะตอม ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเกิดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนของอะตอม แต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นกับนิวเคลียสของแต่ละอะตอม
- **<u>เคมีนิวเคลียร์</u>**เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับ**นิวเคลียส**ของอะตอมโดยตรง
  - จำนวนโปรตอน (เปลี่ยนชนิดของอะตอม)
  - จำนวนนิวตรอน
  - **การเปลี่ยนแปลงจำนวนอิเล็กตรอนในออร์บิทัลเพียงอย่างเดียว ไม่ใช่การเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์**

3

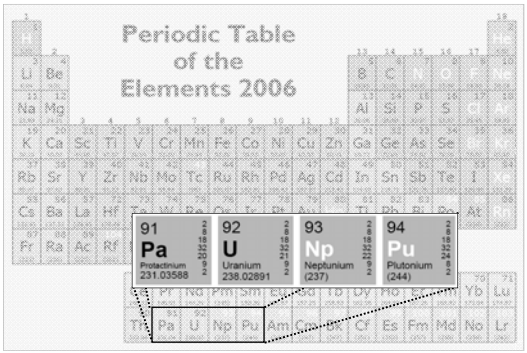
ปฏิกิริยาเคมีและปฏิกิริยานิวเคลียร์

- ความแตกต่างระหว่างปฏิกิริยาเคมีและปฏิกิริยานิวเคลียร์

ปฏิกิริยาเคมี	ปฏิกิริยานิวเคลียร์
อะตอมจัดเรียงตัวใหม่ มีการสลายและสร้างพันธะ	ธาตุเปลี่ยนเป็นธาตุใหม่ หรือไอโซโทปใหม่(ธาตุเดิม)
อิเล็กตรอนในออร์บิทัลเท่านั้นที่เกี่ยวข้องกับการสร้างพันธะ	โปรตอน นิวตรอน และอิเล็กตรอนเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลง
มีการดูดหรือคายพลังงานปริมาณไม่มากนัก	มีการดูดหรือคายพลังงานปริมาณมหาศาล
อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับอุณหภูมิ ความดัน ความเข้มข้น และตัวเร่งปฏิกิริยา	อัตราการเกิดปฏิกิริยาไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ ความดัน และตัวเร่งปฏิกิริยา

4

องค์ประกอบของอะตอม



5

อนุภาคมูลฐานหลัก ๆ

- อนุภาคย่อยๆที่เป็น**องค์ประกอบของนิวเคลียส**
- Nucleon: อนุภาคโปรตอนหรือนิวตรอนในนิวเคลียส

อนุภาค Particles	มวล Mass (grams)	มวล Mass (amu)	ประจุ Charge (amu)
Proton (p)	1.6726×10^{-24}	1.00728	+1
Neutron (n)	1.6749×10^{-24}	1.00866	0
Electron (e^-)	9.1094×10^{-28}	0.0005486	-1
Positron (e^+)	9.1094×10^{-28}	0.0005486	+1

6

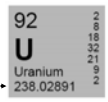
สัญลักษณ์อะตอม (Atomic Symbols)

Mass number → A X ← Element symbol
Atomic number → Z

$^{238}_{92}U$

- **เลขอะตอม** (Z) = 92 ← จำนวนโปรตอน
- **เลขมวล** (A) = 238 ← จำนวนนิวคลีออน
  - จำนวนโปรตอน = Z = 92
  - จำนวนนิวตรอน = A–Z = 146
  - จำนวนอิเล็กตรอน = Z–ประจุ = 92

✱ **Z หรือจำนวนโปรตอนเป็นตัวบ่งชนิดของธาตุ**
✱ **มวลที่ระบุในตารางธาตุเป็นมวลเฉลี่ย ไม่ใช่เลขมวล**



มวลเฉลี่ย →

7

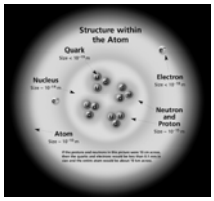
นิวไคล์ด (Nuclide)

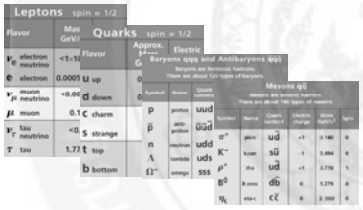
- อะตอมอาจมีจำนวนโปรตอน(Z) และจำนวนนิวตรอน (N)ต่างๆกันไป อะตอมที่ค่า Z และ A (A=N+Z) เฉพาะเรียกว่า nuclide
- ถ้า nuclide มี
  - Z เหมือนกัน: **Isotope** (N ไม่เท่ากัน) $^{12}_{6}C$ $^{13}_{6}C$ $^{14}_{6}C$
  - A เหมือนกัน: **Isobar** (Z และ N ไม่เท่ากัน) $^{12}_{6}C$ $^{12}_{5}B$ $^{12}_{7}N$
  - N เหมือนกัน: **Isotone** (Z และ A ไม่เท่ากัน) $^{12}_{6}C$ $^{11}_{5}B$ $^{13}_{7}N$

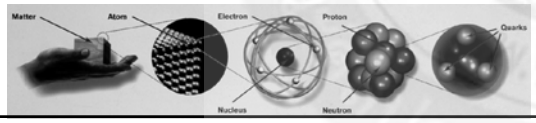
8

อนุภาคมูลฐานชนิดอื่นๆ

- นอกจากอนุภาคมูลฐานหลักๆในนิวเคลียส ยังมีอนุภาคมูลฐานชนิดอื่นที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมีอีกมากมาย



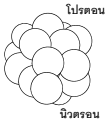




9

เสถียรภาพของนิวเคลียส

- **นิวเคลียส⟶ โปรตอน + นิวตรอน**
  - เพิ่มจำนวนโปรตอน เพิ่มแรงผลักระหว่างประจุบวก
  - แรงผลักระหว่างประจุบวกของโปรตอนมีค่ามหาศาล
  - เพิ่มจำนวนนิวตรอน ลดแรงผลักระหว่างประจุบวก
  - นิวตรอนมีความหนาแน่นประมาณ 2×10^{14} g/cm^3
- แรงทางนิวเคลียร์อย่างแรงเป็นแรงระยะสั้น (≈1.4 fm)
  - ยึดโปรตอนเข้าไว้ด้วยกัน
  - ยึดนิวตรอนเข้าไว้ด้วยกัน
  - ยึดโปรตอนกับนิวตรอนไว้ด้วยกัน



10

แรงพื้นฐานในธรรมชาติ

- Strong interaction
- Weak interaction
- Electrostatic interaction
- Gravitation interaction

What characterizes a force ? Strength, range and source charge of the field.

Interaction	Exchanged quantum (source ch)	Range (m)	Relative Strength	Examples in nature
Strong	gluon colour	10^{-15}	1	proton (quarks)
Electromagnetic	photon electric		$<10^{-2}$	atoms
Weak	W, Z hypercharge	$<10^{-17}$	10^{-6}	radioactivity
Gravity	graviton ? mass		10^{-38}	solar system

Ratio of electrical to gravitational force between two protons is ~ 10^{38} !!
Can such different forces have the same origin ??

11

เสถียรภาพของนิวเคลียส

- นิวเคลียสที่มีจำนวนโปรตอนเป็น 2, 8, 20, 50, 82 หรือ 152 จะเสถียรมากเป็นพิเศษและมีจำนวนไอโซโทปจำนวนมาก เช่น ดีบุก (Sn) มี 10 ไอโซโทปที่เสถียร
- นิวไคลด์ที่มีจำนวนโปรตอนหรือนิวตรอนเป็นเลขคู่มักจะเสถียร
- **จำนวนนิวไคลด์ที่เสถียรในธรรมชาติ**

# Neutron	# Proton	Number	Example
even	even	168	^{12}C
even	odd	57	^{9}Be
odd	even	53	^{7}Li
odd	odd	9	^{14}N
Total		287	

12

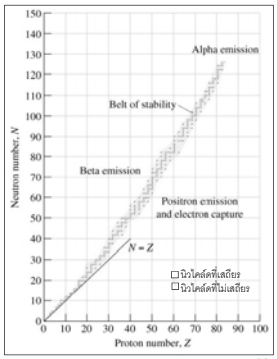
เสถียรภาพของนิวเคลียส

- ความเสถียรของธาตุเกี่ยวพันกันกับ**อัตราส่วนระหว่างจำนวนโปรตอนและนิวตรอน** (n:p)
- ไอโซโทปที่เสถียร
  - ธาตุที่มี Z ≤ 20 (Ca) จะมี n:p ≈1
  - ธาตุที่มี 20 > Z ≥ 83 (Bi) จะมี 1.52 ≥ n:p > 1
  - ไอโซโทปของธาตุที่มี Z ≥ 84 (Po) ไม่เสถียร

13

แถบเสถียรภาพ (Belt of Stability)

- **<u>แถบเสถียรภาพ</u>** แสดงนิวไคล์ดที่เสถียรในธรรมชาติ
- นิวไคล์ดที่อยู่เหนือแถบเสถียรภาพจะมี n:p **สูงเกิน**ทำให้ไม่เสถียร
- นิวไคล์ดที่อยู่ใต้แถบเสถียรภาพจะมี n:p **ต่ำเกิน**ทำให้ไม่เสถียร
- **นิวไคล์ดที่ไม่เสถียรจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์เพื่อให้เสถียรขึ้น**



14

พลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียส

- เมื่อนำอนุภาคมูลฐาน (โปรตอน นิวตรอน และอิเล็กตรอน) มารวมกันเพื่อสร้างนิวเคลียส จะมีมวลบางส่วนหายไป หรือเรียกว่า**มวลพร่อง** (mass defect)

$$\Delta m = m_{atom} - \left(n_p m_p + n_e m_e + n_n m_n\right)$$

- มวลที่หายไปเนื่องจากเปลี่ยนเป็นพลังงาน และมีค่าเท่ากับพลังงานที่ปลดปล่อยเมื่ออนุภาคมารวมตัวกันเป็นนิวเคลียสหรือเรียกว่า**พลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียส** (nucleus binding energy)

$$E_{nb} = -(\Delta m)c^2$$

- **พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออน** (binding energy per nucleons) จะบอกให้ทราบความเสถียรของนิวเคลียส (ยิ่งมาก ยิ่งเสถียร)

$$E_{b/n} = \frac{(\Delta m)c^2}{n_p + n_n} = \frac{E_{nb}}{n_{nuclides}}$$

15

การคำนวณพลังงานยึดเหนี่ยว

- **อะตอม $^{19}_{9}F$ หนัก 18.9984 amu จงคำนวณหาพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออน**
  - $^{19}_{9}F$ ประกอบด้วย 9 p + 9 e + 10 n
  - น้ำหนักของอนุภาค
    - p หนัก 1.00728 amu
    - n หนัก 1.00866 amu
    - e หนัก 0.0005486 amu
  - มวลพร่องเท่ากับ

$$\Delta m = m_{atom} - \left(n_p m_p + n_e m_e + n_n m_n\right)$$
$$= 18.9984 - \left(9\times1.00728 + 9\times0.0005486 + 10\times1.00866\right)\text{amu}$$
$$= 18.9984 - 19.15708 = -0.1587 \text{ amu}$$

น.น.ของอะตอม F น.น.รวมของ 9 p, 9 e⁻, 10 n

16

- พลังงานยึดเหนี่ยวนิวเคลียร์เท่ากับ

$$E_{nb} = -(\Delta m)c^2$$
$$= -(-0.1587 \text{ amu})\times(3.00\times108 \text{ m/s})^2$$
$$= 1.43\times10^{16} \text{ amu m}^2/\text{s}^2$$
$$= 2.37\times10^{-11} \text{ J}$$

- พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนเท่ากับ

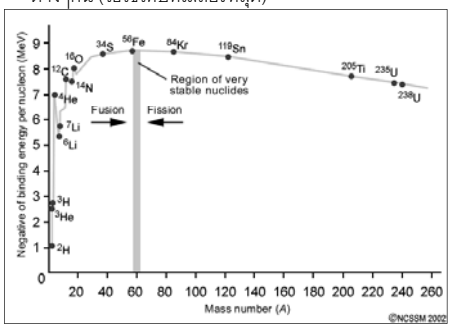
$$E_{nb/p} = \frac{E_{nb}}{n_n + n_p}$$
$$= -\frac{2.37\times10^{-11} \text{ J}}{10+9} = 1.2474\times10^{-12} \text{ J/nucleon}$$

* การสร้างฟลูออรีน 1 อะตอม จากอนุภาคพื้นฐานจะ**คายพลังงาน** 2.37 x 10^{-11} J ในการสร้างฟลูออรีนอะตอม 1 โมล (19.9984 g) จะคายพลังงานเท่ากับ 2.37 x 10^{-11} J x6.022x10^{23} /mol =1.43x10^{10} kJ

17

ความเสถียรของธาตุขึ้นกับเลขมวล

- กราฟระหว่างพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนของธาตุที่เลขมวลต่างๆกัน (ไอโซโทปที่เสถียรที่สุด)



18

ปฏิกิริยานิวเคลียร์

ปฏิกิริยานิวเคลียร์อาจแบ่งออกได้เป็น

- **การแผ่กัมมันตภาพรังสี** (radioactivity) เกิดขึ้นได้เอง(spontaneous)กับนิวไคล์ดที่ไม่เสถียร
- **การแปรนิวเคลียส**(nuclear transmutation) การเปลี่ยนจากนิวไคล์ดชนิดหนึ่งเป็นนิวไคล์ดชนิดอื่น โดยการกระตุ้นด้วยการระดมยิง(bombarding)ด้วยอนุภาคหรือใส่พลังงาน

19

สมการเคมีนิวเคลียร์

(Nuclear reaction) คือสมการที่แสดงปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดขึ้น โดยมีเงื่อนไขคือ

- **เลขมวล**(A)**และเลขอะตอม**(Z)ของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ต้องดุล***
- **ประจุรวม**ของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ต้องดุล
- กฎอนุรักษ์พลังงาน
- *จำนวนอะตอมของธาตุแต่ละชนิดไม่จำเป็นต้องดุล*

$$^{238}_{92}U \rightarrow ^{234}_{90}Th + ^{4}_{2}He$$

20

ชนิดของอนุภาคที่เกิดในปฏิกิริยานิวเคลียร์

- **อนุภาค alpha** (α, $^{2}_{4}He$)
  คือ**นิวเคลียส**ของ Helium มีประจุ+2 และมีมวลสูง สามารถทำให้อนุภาคหลุดออกจากนิวเคลียสได้ดี อำนาจทะลุทะลวงต่ำ
- **อนุภาค beta** (β^-, $^{0}_{-1}e$)
  คืออิเล็กตรอน มีประจุ–1และมีมวลต่ำ(≈0) อำนาจทะลุทะลวงปานกลาง
- **รังสี gamma** (γ, $^{0}_{0}\gamma$)
  เป็นพลังงาน ไม่มีมวล อำนาจทะลุทะลวงสูง เกิดจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของนิวคลีออนในนิวเคลียส มักเกิดควบคู่กับกระบวนการแผ่รังสีชนิดอื่น
- **อนุภาคนิวตรอน** (n, $^{1}_{0}n$)
  มีมวลสูง แต่ไม่มีประจุทำให้สามารถเข้าใกล้นิวเคลียสได้ดี
- **อนุภาค positron** (β^+, $^{0}_{+1}e$) **ไม่ใช่โปรตอน ($^{1}_{1}p$)
  เป็นอนุภาคต่อต้าน (antiparticle)ของอิเล็กตรอน มีประจุ +1 และมีมวลเท่ากับอิเล็กตรอน (≈0) เมื่อรวมตัวกับอิเล็กตรอนจะเกิดพลังงาน

21

สารกัมมันตภาพ

- นิวไคล์ดที่ไม่เสถียร (อยู่นอกแถบเสถียรภาพ หรือมี Z > 83) จะเรียกว่า**สารกัมมันตภาพ** (radioactive หรือ radionuclide) สารเหล่านี้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์เพื่อให้มีความเสถียรเพิ่มขึ้น
- การเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์ที่เป็นไปได้
  - เปลี่ยนแปลง**จำนวนโปรตอน**, **จำนวนนิวตรอน** หรือ**เลขมวล**(ทั้งนิวตรอนและโปรตอน)
  - มีการคายพลังงานเนื่องจากกระบวนการทางนิวเคลียร์

22

การแผ่กัมมันตภาพรังสี

- **การแผ่กัมมันตภาพรังสี** (Radioactivity) คือการปลดปล่อยสสารหรือพลังงานออกจากนิวเคลียสที่ไม่เสถียร (radioactive)
- กระบวนการแผ่กัมมันตภาพรังสีที่พบบ่อยคือ

A Summary of Radioactive Decay Processes

Process	Symbol	Change in Atomic Number	Change in Mass Number	Change in Neutron Number
α emission	$^{4}_{2}$He or α	−2	−4	−2
β emission	$^{0}_{-1}$e or β⁻	+1	0	−1
γ emission	$^{0}_{0}$γ or γ	0	0	0
Positron emission	$^{0}_{+1}$e or β⁺	−1	0	+1
Electron capture	E. C.	−1	0	+1

23

สมการเคมีของการแผ่กัมมันตภาพรังสี

- Alpha decay
  - สลายตัวให้นิวเคลียสของ helium
  - Z–2; N–2; A–4

$$^{238}_{92}U \rightarrow ^{234}_{90}Th + ^{4}_{2}He$$ α particle

- Beta decay
  - ให้อิเล็กตรอนซึ่งเกิดจากการสลายตัวของนิวตรอนเป็นโปรตอน
  - Z+1; N–1; A

$$^{234}_{90}Th \rightarrow ^{234}_{91}Pa + ^{0}_{-1}e$$ β⁻ particle

- Positron emission
  - ให้โพสิตรอนซึ่งเกิดจากการสลายตัวของโปรตอนเป็นนิวตรอน
  - Z–1; N+1; A

$$^{8}_{5}B \rightarrow ^{8}_{4}Pa + ^{0}_{+1}e$$ β⁺ particle

24

สมการเคมีของการแผ่กัมมันตภาพรังสี

- Gamma decay
  - เป็นการคายพลังงานในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (นิวคลีออนเปลี่ยนระดับพลังงาน)
  - มักจะเกิดควบคู่กับปฏิกิริยานิวเคลียร์อื่นๆ
  - มักจะไม่แสดงในปฏิกิริยาเคมีนอกจากในปฏิกิริยา annihilation
- Electron capture
  - อิเล็กตรอนในออร์บิทัลวงในสุดถูกดึงเข้าไปในนิวเคลียสและรวมตัวกับโปรตอนกลายเป็นนิวตรอน
  - Z–1; N+1; A

$$^{7}_{4}Be + ^{0}_{-1}e \rightarrow ^{7}_{3}Li$$

25

สมการเคมีของการแผ่กัมมันตภาพรังสี

- Neutron emission
  - นิวตรอนหลุดออกจากนิวเคลียส
  - เกิดน้อยมาก เฉพาะกับนิวไคล์ดที่มี Z≥56

$$^{8}_{2}He \rightarrow ^{7}_{2}He + ^{1}_{0}n$$

- Spontaneous fission
  - นิวเคลียสที่มี Z≥94 อาจเกิดการแตกตัวเป็นนิวเคลียสสองนิวเคลียสที่มีขนาดใกล้เคียงกัน (fission)

$$^{250}_{96}Cm \rightarrow ^{148}_{58}Ce + ^{98}_{38}Sr + 4^{1}_{0}n$$

- Annihilation
  - โพสิตรอนรวมตัวกับอิเล็กตรอนแล้วสลายตัวให้พลังงานอย่างเดียว
  - เป็นปฏิกิริยาระหว่าง matter(อิเล็กตรอน) และ antimatter(โพสิตรอน)

$$^{0}_{-1}e + ^{0}_{+1}e \rightarrow 2^{0}_{0}\gamma$$

26

อิเล็กตรอนและโพสิตรอน

- อิเล็กตรอนและโพสิตรอนเกิดจากการสลายตัวของนิวตรอนและโปรตอนในนิวเคลียส

$$^{1}_{0}n \rightarrow ^{1}_{1}p + ^{0}_{-1}e$$

$$^{1}_{1}p \rightarrow ^{1}_{0}n + ^{0}_{+1}e$$

- มวลของอิเล็กตรอนและโพสิตรอนน้อยมากเมื่อเทียบกับนิวคลีออน

27

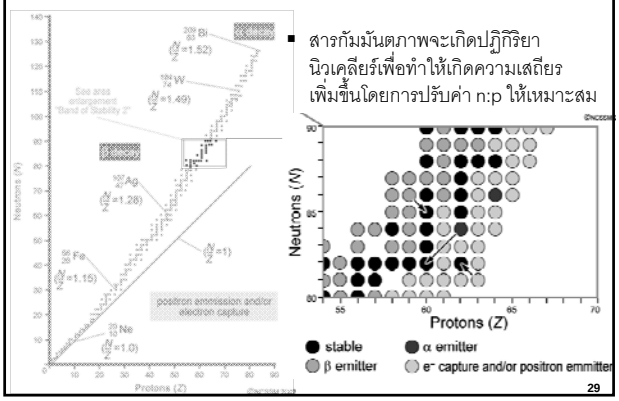
กฎอนุรักษ์พลังงานและปฏิกิริยานิวเคลียร์

- ในปฏิกิริยานิวเคลียร์จำเป็นจะต้องดุลพลังงานด้วย
- จากการทดลองพบว่า
  - การแผ่รังสีอัลฟ่า อนุภาคอัลฟ่าจะมีพลังงานที่แน่นอน
  - การแผ่รังสีเบต้า อนุภาคเบต้ามีพลังงานแบบต่อเนื่อง(เป็นได้หลายค่า) ทำให้สันนิษฐานว่ากระบวนการแผ่รังสีเบต้าควรจะมีการปลดปล่อยอนุภาคอื่นออกมาด้วย ซึ่งอนุภาคนี้ไม่มีมวล ไม่มีประจุ ต่อมาอนุภาคนี้ถูกค้นพบและเรียกว่า antineutrino ($\bar{\nu}$)
  - กระบวนการแผ่รังสีเบต้าและโพสิตรอนอาจเขียนให้สมบูรณ์ได้โดยการใส่อนุภาค antineutrino ในสมการเคมี (โดยทั่วไปไม่จำเป็น)

$$^{234}_{90}Th \rightarrow ^{234}_{91}Pa + ^{0}_{-1}e + \bar{\nu}$$

28

แนวโน้มการเกิดปฏิกิริยาแผ่รังสี



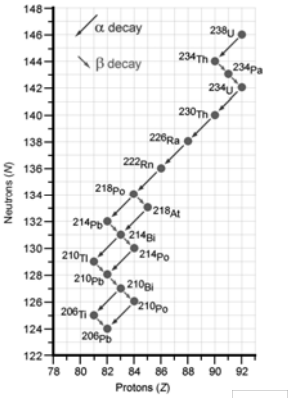
- สารกัมมันตภาพจะเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์เพื่อทำให้เกิดความเสถียรเพิ่มขึ้นโดยการปรับค่า n:p ให้เหมาะสม

29

กัมมันตภาพรังสีในธรรมชาติ

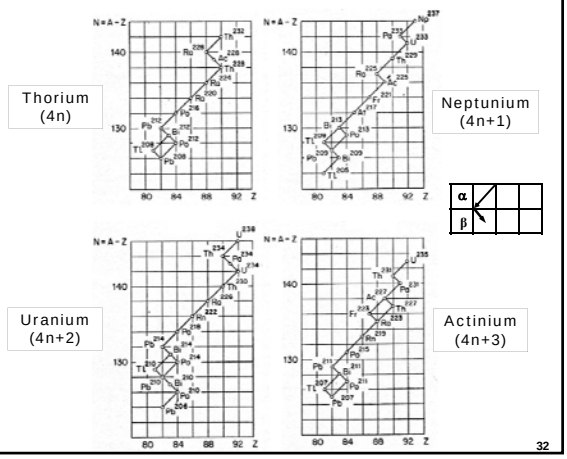
- เมื่อสารกัมมันตภาพสลายตัว ผลที่ได้อาจไม่เสถียรและสามารถสลายตัวต่อไปได้อีก การสลายตัวจะดำเนินไปจนกว่าจะได้ผลิตภัณฑ์ที่เสถียร การสลายตัวแบบนี้เรียกว่า **อนุกรมของการสลายตัว** (decay series)
  - อนุกรมยูเรเนียม (4n+2) $^{238}U \rightarrow ^{206}Pb$
  - อนุกรมทอเรียม (4n) $^{232}Th \rightarrow ^{208}Pb$
  - อนุกรมเนปทูเนียม (4n+1) $^{237}Np \rightarrow ^{205}Tl$
  - อนุกรมแอกทิเนียม (4n+3) $^{235}U \rightarrow ^{207}Pb$

30



Uranium decay series

31



32

จลนศาสตร์ของกัมมันตภาพรังสี

- การสลายตัวของสารกัมมันตภาพเป็น**ปฏิกิริยาอันดับ** 1
  - อัตราการสลายตัวไม่ขึ้นกับความดันหรืออุณหภูมิและไม่ขึ้นกับว่าสารกัมมันตภาพรังสีอยู่ในสารประกอบหรืออยู่ในสภาพบริสุทธิ์
  - แอกทิวตี(a) คือจำนวนอนุภาคที่สลายตัวไปต่อวินาที

$$activity = r = -\frac{dN}{dt} = kN \text{ bq}$$

N = จำนวนนิวเคลียสของสาร
k = ค่าคงที่อัตราอันดับ 1

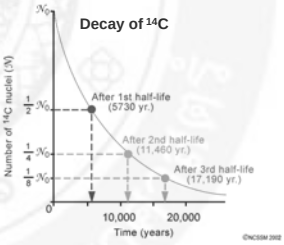
  - หน่วย bq (becquerel) คือจำนวนอนุภาคที่สลายตัวต่อวินาที
  - โดยทั่วไปหน่วยที่ใช้มากกว่าคือ Ci (curie)

1 Ci = 3.7×10^{10} Bq

33

ครึ่งชีวิต

- เราสามารถหาครึ่งชีวิตได้เช่นเดียวกันกับปฏิกิริยาอันดับ 1 อื่นๆ
- ค่าครึ่งชีวิตแตกต่างตามชนิดของนิวไคลด์ (ขึ้นกับค่า k)



$$activity = r = -\frac{dN}{dt} = kN$$

$$\frac{activity_0}{activity} = \frac{N_0}{N}$$

$$\ln\frac{N_0}{N_t} = kt$$

$$t_{1/2} = \frac{0.693}{k}$$

34

การคำนวณการสลายตัว

- จงคำนวณหา activity ของ Plutonium dioxide (PuO_2) 2.7 g ซึ่งประกอบด้วย ^{238}U โดยครึ่งชีวิตของ ^{238}U คือ 87.8 ปี
  - 2.7 g PuO_2 → mol PuO_2 → mol Pu → atoms Pu

$$2.7 \text{ g } PuO_2 = \frac{2.7 \text{ g}}{270 \text{ g/mol}} = 10^{-2} \text{ mol}$$

$$10^{-2} \text{ mol } PuO_2 = 10^{-2} \text{ mol } Pu = 10^{-2}\times(6.02\times10^{23}) = 6.02\times10^{21} \text{ atoms}$$

  - ครึ่งชีวิต 87.8 ปี = 2.77×10^{9} s

$$k = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \Rightarrow k = \frac{0.693}{2.77\times10^{9} \text{ s}} = 2.50\times10^{-10} \text{ s}^{-1}$$

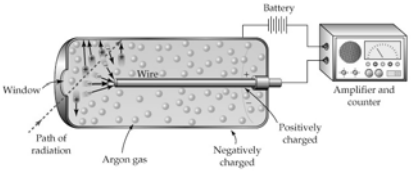
  - Activity

$$activity = kN = (2.50\times10^{-10} \text{ s}^{-1})\times(6.02\times10^{21} \text{ atom})$$
$$= 1.5\times10^{12} \text{ atoms Pu/s}$$

35

การตรวจวัดกัมมันตภาพรังสี

- Geiger counter อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดปริมาณกัมมันตภาพรังสี (activity)
- กัมมันตภาพรังสีที่ถูกแผ่ออกมาจะทำให้โมเลกุลของแก๊สอาร์กอนในกระบอกวัดแตกตัวเป็นไอออนและอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งสามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ และทำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้าซึ่งตรวจวัดได้



36

Carbon-14 Dating

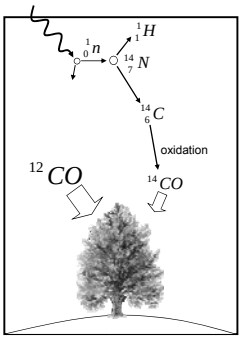
- Carbon-14 dating คือเทคนิคในการบอกอายุของวัตถุโบราณโดยอาศัยการตรวจวัดอัตราส่วนของคาร์บอน 14 (^{14}C) ต่อคาร์บอน 12 (^{12}C) ที่เหลืออยู่ในวัตถุนั้นๆ
- ^{14}C เกิดในสภาพบรรยากาศชั้นบนเนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างไนโตรเจนกับนิวตรอนอิสระซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างรังสีคอสมิกกับอนุภาคของอากาศ

$$^{14}_{7}N + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{14}_{6}C + ^{1}_{1}H$$

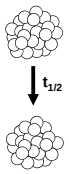
- ^{14}C มี half-life เท่ากับ 5730 ปี
- เมื่อ^{14}C ในบรรยากาศเข้าสู่สิ่งมีชีวิตโดยกระบวนการสังเคราะห์แสง มันจะเริ่มสลายตัว ถ้าเราทราบปริมาณ^{14}C ที่สลายตัวไปเราจะทราบระยะเวลาได้

37

Carbon-14 Dating



- ^{14}C ถูกดูดซึมเข้าไปในต้นไม้จากกระบวนการสังเคราะห์แสง และอัตราส่วน $^{14}C/^{12}C$ จะสมดุล
- เมื่อต้นไม้ตาย ^{14}C จะไม่ถูกดูดซึมเพิ่ม ^{14}C และที่มีอยู่จะสลายตัวไป อัตราส่วน $^{14}C/^{12}C$ จะลดลง



$$\frac{^{14}C}{^{12}C} \approx 10^{-12}$$

$$^{14}_{6}C \rightarrow ^{14}_{7}N + ^{0}_{-2}e$$

$$\frac{^{14}C}{^{12}C} << 10^{-12}$$

38

การคำนวณ Carbon-14 Dating

- ^{14}C ในพืชที่มีชีวิตจะมีค่า activity = 15.3 atom min^{-1} g^{-1} หมายความว่า ในคาร์บอน 1 กรัมในธรรมชาติจะมี ^{14}C ในปริมาณที่แตกตัวได้ 15.3 อนุภาคต่อนาที

$$\frac{activity_0}{activity} = \frac{N_0}{N}$$

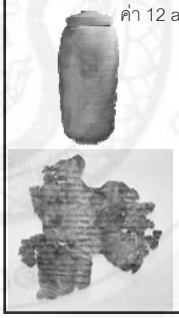
$$\ln\frac{N_0}{N_t} = \ln\frac{activity_0}{activity} = kt$$

$$k = \frac{0.693}{t_{1/2}}$$

39

ตัวอย่างการใช้ Carbon-14

- Dead Sea scroll ถูกค้นพบในปี 1947 ผ้าลินินที่ใช้ห่อได้รับการตรวจสอบโดยใช้ carbon-14 dating พบว่า activity ของ C-14 มีค่า 12 atom min^{-1} g^{-1} จงคำนวณอายุของผ้าที่ใช้ห่อ



$$k = \frac{0.693}{t_{1/2}} = \frac{0.693}{5.73\times10^{3}\ \text{yr}} = 1.21\times10^{-4}\ \text{yr}^{-1}$$

$$\ln\frac{activity_0}{activity} = kt$$

$$\ln\left(\frac{15.3\ \text{atom min}^{-1}\ \text{g}^{-1}}{12\ \text{atom min}^{-1}\ \text{g}^{-1}}\right) = \left(1.21\times10^{-4}\ \text{yr}^{-1}\right)\times t$$

$$t = \frac{0.24}{1.21\times10^{-4}\ \text{yr}^{-1}} = 2.0\times10^{3}\ \text{yr}$$

40

การแปรนิวเคลียส

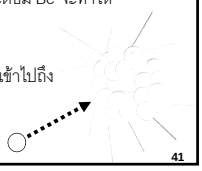
- Nuclear transmutation คือการเปลี่ยนจากนิวไคล์ดหนึ่งไปเป็นนิวไคล์ดชนิดอื่น
  - จากการปล่อยกัมมันตภาพรังสี
  - จากการระดมยิงนิวเคลียสเป้าหมายด้วยอนุภาคหรือพลังงาน
- Rutherford พบว่าเมื่อใช้อนุภาคอัลฟายิงใส่อะตอม N จะทำให้โปรตอนหลุดออกมาจากนิวเคลียสของอะตอมนั้น

$$^{4}_{2}He + ^{14}_{7}N \rightarrow ^{18}_{9}F^{*} \rightarrow ^{17}_{8}O + ^{1}_{1}p$$

- Chadwick พบว่าเมื่อใช้อนุภาคอัลฟายิงใส่อะตอม Be จะทำให้นิวตรอนหลุดออกมา

$$^{4}_{2}He + ^{9}_{4}Be \rightarrow ^{13}_{6}C^{*} \rightarrow ^{12}_{6}C + ^{1}_{0}n$$

- อนุภาคที่ใช้ยิงต้องมีพลังงานสูงเพื่อให้สามารถเข้าไปถึงนิวเคลียสได้



41

Bombarding Particles

- อนุภาคหลายชนิดสามารถใช้ยิงนิวเคลียสของอะตอมเป้าหมาย (target atom)เพื่อกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์

$$^{4}_{2}He + ^{14}_{7}N \rightarrow ^{17}_{8}O + ^{1}_{1}p$$

$$^{1}_{0}n + ^{239}_{94}Pu \rightarrow ^{240}_{94}Pu$$

$$^{1}_{1}p + ^{26}_{12}Mg \rightarrow ^{27}_{13}Al^{*} \rightarrow ^{27}_{13}Al + ^{0}_{0}\gamma$$

$$^{64}_{28}Ni + ^{209}_{83}Bi \rightarrow ^{272}_{111}Ds + ^{1}_{0}n$$

- อนุภาคที่ใช้ในการยิงจะได้จากการสลายตัวของธาตุกัมมันตภาพรังสีหรือการกระตุ้นอะตอมเพื่อให้เกิดการ ionize

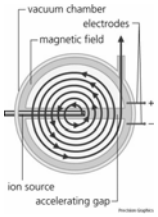
<u>การเลือกอนุภาคที่ใช้ในการยิงต้องคำนึงถึง</u>

- **มวล** ประสิทธิภาพในการชน
- **พลังงาน** อำนาจทะลุทะลวง
- **ประจุ** แรงทางไฟฟ้า

42

เครื่องเร่งอนุภาค

- **Cyclotron**: A circular particle accelerator in which charged subatomic particles generated at a central source are accelerated spirally outward in a plane perpendicular to a fixed magnetic field by an alternating electric field.



- **Synchrotron**: A synchrotron is a particular type of cyclic particle accelerator in which the magnetic field (to turn the particles so they circulate) and the electric field (to accelerate the particles) are carefully synchronized with the traveling particle beam.

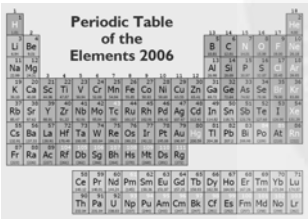
43

Synchrotron

44

Artificial Transmutation

- ธาตุที่มีเลขอะตอมตั้งแต่ 92 (U) ลงมาสามารถพบได้ในธรรมชาติ (ยกเว้น $_{43}$Tc และ $_{61}$Pm)
- ธาตุที่มีเลขอะตอมมากกว่า 92 เกิดจากการสังเคราะห์โดยมนุษย์ทั้งสิ้น และเราเรียนธาตุเหล่านี้ (Z>92) ว่า Transuranium elements



$$^{1}_{0}n + ^{238}_{92}U \rightarrow ^{239}_{94}Pu + 2^{0}_{-1}e$$

$$^{239}_{94}Pu + 2^{1}_{0}n \rightarrow ^{241}_{94}Pu \rightarrow ^{241}_{95}Am + ^{0}_{-1}e$$

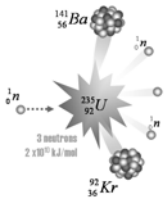
45

Nuclear Fission

- Otto Hahn & Fritz Strassman ตรวจพบ ^{141}Ba เมื่อยิง ^{235}U ด้วยนิวตรอน ต่อมาได้มีการสรุปว่า เมื่อยูเรเนียมถูกยิงด้วยนิวตรอน (neutron capture) มันจะแตกตัวออกเป็นนิวไคลด์สองชนิดและพลังงานปริมาณมหาศาล และเราเรียกกระบวนการลักษณะนี้ว่า Nuclear Fission

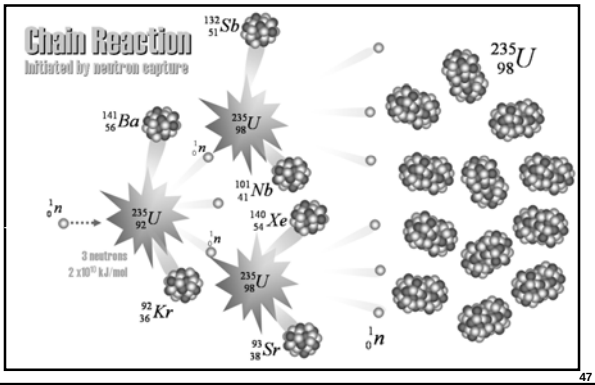
$$^{1}_{0}n + ^{238}_{92}U \rightarrow ^{236}_{92}U \rightarrow ^{141}_{56}Ba + ^{92}_{36}Ba + 3^{1}_{0}n \quad \Delta H = -2\times10^{10}\ kJ$$

- นิวตรอนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการนี้จะอาจถูกจับโดยโมเลกุลอื่น หรืออาจก่อให้เกิดปฏิกิริยา fission กับยูเรเนียมตัวอื่นอีก
- ถ้ากระบวนการฟิชชั่นเกิดต่อเนื่องไปเรื่อยๆ เราจะเรียกกระบวนการนี้ว่า Chain reaction



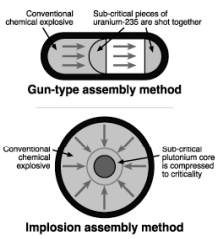
46

ปฏิกิริยาลูกโซ่



47

Atomic Bombs



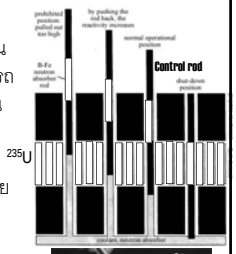
- ถ้าปริมาณ ^{235}U มีน้อยเกินไปจะไม่เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ เนื่องจากโอกาสที่นิวตรอนที่เกิดขึ้นจะไปเจอ ^{235}U มีน้อย และนิวตรอนจะสูญหายเมื่อถูกธาตุอื่นจับ ทำให้ปฏิกิริยา fission เกิดไม่ต่อเนื่อง
- ปริมาณ ^{235}U ที่เพียงพอให้เกิดปฏิกิริยาแบบลูกโซ่ได้ เรียกว่า **มวลวิกฤติ** (critical mass)
- ถ้าเราทำให้กระบวนการฟิชชั่นเกิดอย่างต่อเนื่องแบบไม่ควบคุมจะก่อให้เกิดการปลดปล่อยพลังงานอย่างรุนแรง ซึ่งเป็นหลักในการสร้างระเบิดนิวเคลียร์

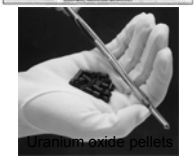
48

Nuclear Reactors

- ถ้าเราสามารถควบคุมปฏิกิริยาฟิชชั่นให้เกิดในอัตราที่เหมาะสม เราสามารถนำพลังงานความร้อนมาใช้ได้ เช่นในโรงงานไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์
- ปฏิกิริยาฟิชชั่นสามารถควบคุมได้โดยการ**ควบคุมปริมาณนิวตรอน**ด้วย**แท่งควบคุม** (control rod)เป็นแท่งโบรอนหรือแคดเมียมซึ่งเป็นตัวจับนิวตรอนที่ดี

$$^{1}_{0}n + ^{10}_{5}B \rightarrow ^{7}_{3}Li + ^{4}_{2}He$$

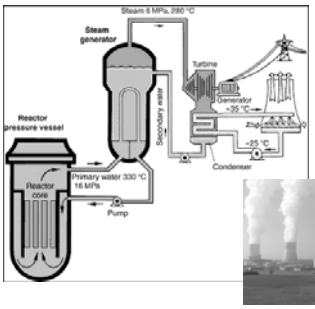




49

Nuclear Power Plants

- โรงไฟฟ้านิวเคลียร์จะใช้ความร้อนจากปฏิกิริยาฟิชชั่นเพื่อต้มน้ำ และนำไอน้ำไปปั่นกังหันเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า



50

Nuclear Fusion

- เมื่อนำนิวเคลียสขนาดเล็กมารวมกันเพื่อให้เกิดนิวเคลียสขนาดใหญ่ขึ้นจะเกิดการปลดปล่อยพลังงานจำนวนมหาศาล (เสถียรภาพเพิ่มขึ้น) เราเรียกกระบวนการนี้ว่า nuclear fusion (การหลอมรวมนิวเคลียส)

$$4\,^{1}_{1}H \rightarrow ^{4}_{2}He + 2\,^{0}_{+1}e \quad \Delta H = -2.5\times10^{9}\ \text{kJ}$$

$$^{1}_{1}He + ^{3}_{2}He \rightarrow ^{4}_{2}He + ^{0}_{+1}e \quad \Delta H = -1.9\times10^{9}\ \text{kJ}$$

- สารตั้งต้นของปฏิกิริยาหาได้ง่าย
- จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูงมากในการเกิดปฏิกิริยา (≥ 1×10^{8} K)
- Cold fusion คือความพยายามที่จะทำให้กระบวนการ fusion เกิดที่อุณหภูมิต่ำ (ยังทำไม่ได้ในปัจจุบัน)

51