

บรรยาย 14 สัมพัทธภาพ และฟิสิกส์นิวเคลียร์

Physics 122, รร.ช่างทันตกรรม, ปีการศึกษา 2564-65/1

อุดม รอบคอบ

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ ม.มหิดล

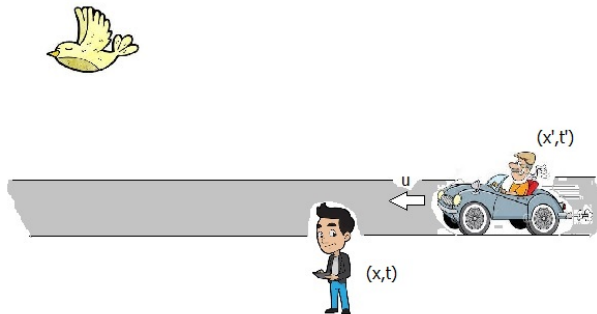
11 กุมภาพันธ์ 2565

หัวข้อ

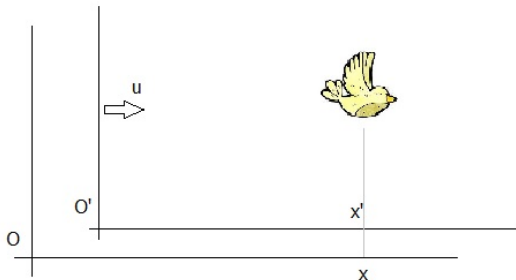
1. การเคลื่อนที่สัมพัทธ์
2. สมมติฐานของไอน์สไตน์ และสัมพัทธ์ภาพพิเศษ
3. โมเมนตัม และพลังงานเชิงสัมพัทธ์
4. นิวเคลียสของอะตอม
5. การสลายตัว และกัมมันตรังสี
6. ปฏิกิริยานิวเคลียร์
7. รังสีนิวเคลียร์
8. นิวเคลียร์ประยุกต์

การเคลื่อนที่สัมพัทธ์

กฎของนิวตัน ซึ่งเป็นรากฐานของกลศาสตร์ มีพื้นฐานอยู่บนการสังเกตจากกรอบอ้างอิงแบบเฉื่อย (inertial frame) ซึ่งหมายถึงกรอบอ้างอิงที่หยุดนิ่ง หรือเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงตัว สัมพัทธ์ภาพ คือการเปรียบเทียบข้อมูลของผู้สังเกตสองคน ที่ใช้กรอบอ้างอิงต่างกัน ซึ่งหมายถึงมีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ซึ่งกันและกัน



สัมพัทธภาพแบบกาลิเลโอ



เวลาสมบูรณ์ (absolute time) $t = t'$

$$x = x' + ut', \quad x' = x - ut \quad v = v' + u, \quad v' = v - u \quad (1)$$

$$\mapsto a' = a \quad (2)$$

ดังนั้น กฎของนิวตัน $F = ma$ เหมือนกันทั้งสองกรอบอ้างอิง

สัมพัทธภาพแบบไอน์สไตน์

ข้อบกพร่องของสัมพัทธภาพแบบกาลิเลโอ คือ ไม่จำกัดอัตราเร็วสัมพัทธ์ แต่การสังเกตของเราถูกจำกัดด้วยอัตราเร็วแสง ไอน์สไตน์เลยเพิ่มข้อจำกัดเข้าไป โดยตั้งสมมติฐานสองข้อ ดังนี้

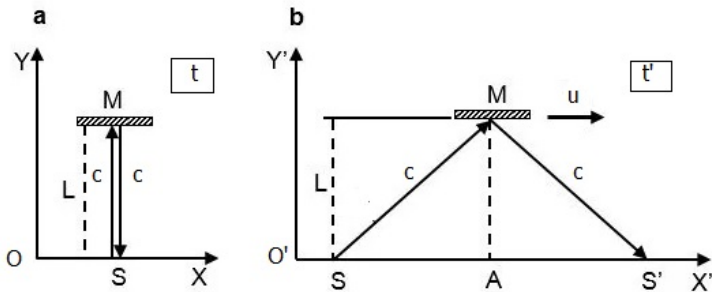
1. กฎของนิวตันยังเป็นจริงในทุกกรอบอ้างอิงแบบเฉื่อย
2. ผู้สังเกตทุกคน เป็นแสงเดินทางด้วยความเร็ว $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ เท่ากัน จากทุกกรอบอ้างอิงเฉื่อย

ผลกระทบ ที่เกิดขึ้นถูกพิจารณา จากการทดลองในความคิด (though experiment) เนื่องจาก ผลกระทบนี้จะ เกิดขึ้นที่อัตราเร็วสัมพัทธ์ใกล้ความเร็วแสง ซึ่งปฏิบัติไม่ได้ด้วยเทคโนโลยี ปัจจุบัน



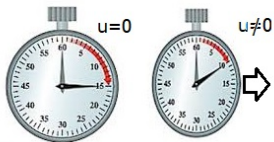
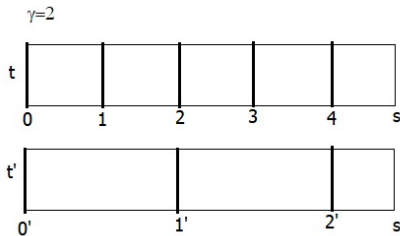
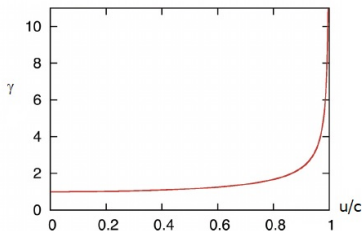
ทาคิออน (Tachyon) คืออนุภาคที่ถูกจินตนาการว่าวิ่งเร็วกว่าแสง

การยืดยาวของระยะเวลา (time dilation)



$$\begin{aligned} O : t &= \frac{2L}{c} & O' : t'/2 &= \frac{\sqrt{L^2 + (ut'/2)^2}}{c} \\ & & &= \sqrt{1 - (u/c)^2} t' = \frac{2L}{c} = t \\ \mapsto t' &= \frac{t}{\sqrt{1 - (u/c)^2}} \end{aligned} \quad (3)$$

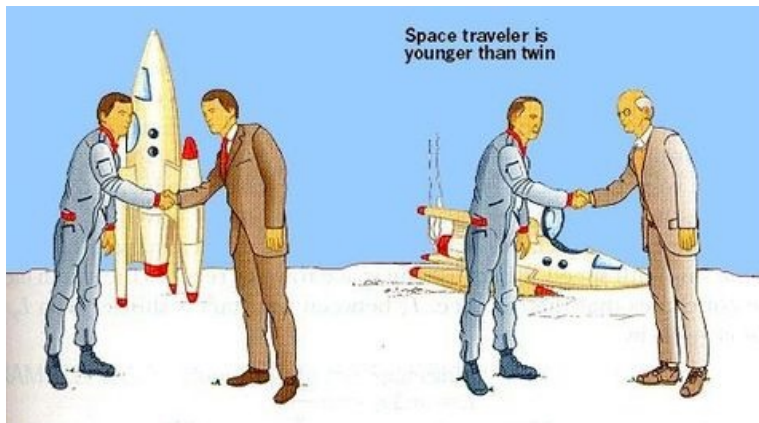
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (u/c)^2}} \geq 1 \text{ (always)} \mapsto t' \leq t \text{ (always)} \quad (4)$$



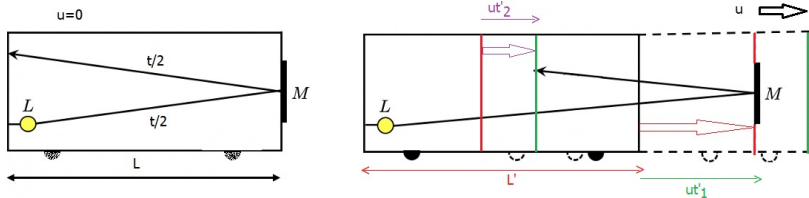
$$\gamma = 2 = \frac{1}{\sqrt{1 - (u/c)^2}} \mapsto u/c = \sqrt{1 - (1/2)^2} = \sqrt{3/4} = 0.87$$

$$u = 0.87c = 0.87 \times 10^8 \text{ m/s} = 2.6 \times 10^8 \text{ m/s} = 9.35 \times 10^8 \text{ km/hr}$$

Twin paradox



การหดสั้นของระยะทาง (length contraction)



$$O : ct = 2L$$

$$O' : ct'_1 = L' + ut'_1, \quad ct'_2 = L' - ut'_2$$

$$ct'_1 = \frac{L'}{1 - u/c}, \quad ct'_2 = \frac{L'}{1 + u/c}$$

$$\mapsto ct' = c(t'_1 + t'_2) = \frac{2L'}{1 - (u/c)^2} = \gamma^2(2L')$$

$$t' = \gamma t \quad \mapsto L = \gamma L' \text{ or } L' = \frac{L}{\gamma} \quad (5)$$



$$v = 0$$



$$v = 0.87c$$

$$\gamma = 2$$



$$v = 0.995c$$



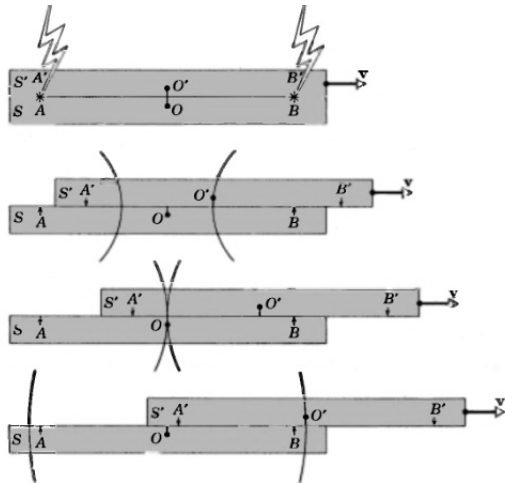
$$v = 0.999c$$



$$v = c (?)$$



การเห็นเหตุการณ์พร้อมกัน (simultaneity)



เฉพาะผู้สังเกตที่เคลื่อนที่สัมพัทธ์ จะสามารถสังเกตสองเหตุการณ์เกิดขึ้นพร้อมกันได้

what are other
words for
simultaneity?

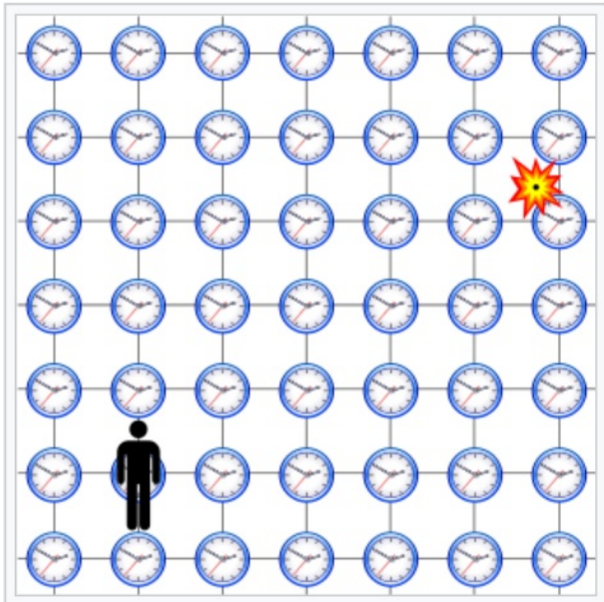


simultaneousness, synchronism,
concurrence, coincidence,
coexistence, concomitance,
contemporaneity, conjunction

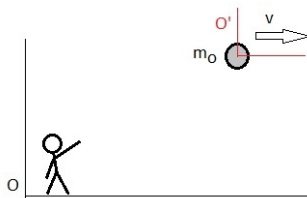


 Thesaurus.plus

เวลาเดียวกัน (synchronous time)



โมเมนตัม และพลังงานเชิงสัมพัทธ์



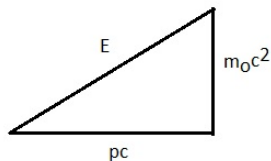
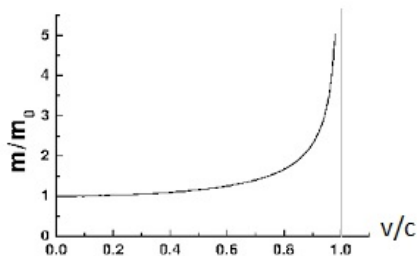
โมเมนตัมเชิงสัมพัทธ์

$$p = m_0 \frac{\Delta x}{\Delta t} = m_0 \frac{\Delta x}{\Delta t' / \gamma} = \gamma m_0 \frac{\Delta x}{\Delta t'} = \gamma m_0 v \equiv mv \quad (6)$$

$$m = \gamma m_0 \text{ relativistic mass} \quad (7)$$

พลังงานเชิงสัมพัทธ์

$$E = \gamma m_0 c^2 = K + m_0 c^2, \quad E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4 \quad (8)$$



โฟตอน (γ) คืออนุภาคคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ไม่มีมวล ($m_0 = 0$) ดังนั้น

$$E_\gamma = p_\gamma c \mapsto p_\gamma = E_\gamma / c, \text{ i.e., } E_\gamma = 20 \text{ MeV}, \quad p_\gamma = 20 \text{ MeV} / c$$

อิเล็กตรอน มีมวล $m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$

$$\begin{aligned} m_e c^2 &= 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg} (3 \times 10^8 \text{ m/s})^2 = 8.19 \times 10^{-14} \text{ J} \\ &= \frac{8.19 \times 10^{-14} \text{ J}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV}} = 0.512 \times 10^6 \text{ eV} = 0.512 \text{ MeV} \end{aligned}$$

แบบฝึกหัด: โปรตอน (p) และ นิวตรอน (n) มีมวลเท่ากับ

$$m_p = 1.673 \times 10^{-27} \text{kg} \text{ และ } m_n = 1.675 \times 10^{-27} \text{kg}$$

ให้คำนวณพลังงานมวลสารหยุดนิ่ง ของอนุภาคทั้งสอง ในหน่วย MeV

กรณีตัวอย่าง: อิเล็กตรอนมีพลังงานรวม $E = 1.0 \text{MeV}$ จะมีโมเมนตัม (เชิงสัมพัทธ์) (p) เท่าใด?

$$E > m_0 c^2 \mapsto (1 \text{MeV})^2 = (pc)^2 + (0.512 \text{MeV})^2$$

$$\mapsto pc = \sqrt{1 - (0.512)^2} = 0.86 \text{MeV} \mapsto p = 0.86 \text{MeV}/c$$

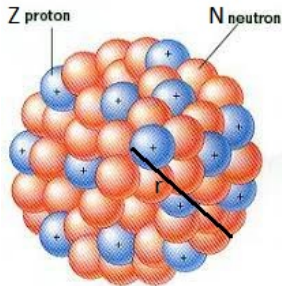
กรณีตัวอย่าง: อิเล็กตรอนที่มีพลังงานรวม $E = 50 \text{eV}$ จะมีโมเมนตัม (ไม่เชิงสัมพัทธ์) เท่าใด?

$$E < m_0 c^2 \mapsto E = \frac{p^2}{2m} = \frac{(pc)^2}{2mc^2}$$

$$pc = \sqrt{2mc^2 E} = \sqrt{2(0.512 \text{MeV})(50 \text{eV})} = 7.16 \times 10^3 \text{eV}$$

$$pc = 7.16 \text{keV} \mapsto p = 7.16 \text{keV}/c \quad (9)$$

ฟิสิกส์นิวเคลียร์



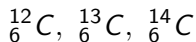
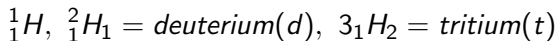
นิวเคลียสของอะตอม X ที่มีจำนวน Z โปรตอน และ N นิวตรอน จะมีสัญลักษณ์นิวเคลียร์ (nuclear symbol) เป็น

$${}^A_ZX_N, {}^A_ZX, {}^AX$$

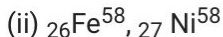
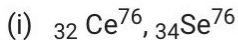
เมื่อ $A = Z + N$ คือ เลขมวลอะตอม (atomic mass number)

การจัดกลุ่มนิวเคลียส

- ▶ isotope คือนิวเคลียสที่มี Z เท่ากัน แต่มี N, A ต่างกัน เช่น



- ▶ isotone คือนิวเคลียสที่มี N เท่ากัน แต่มี Z, A ต่างกัน
- ▶ isobar คือนิวเคลียสที่มี A เท่ากัน แต่มี Z, N ต่างกัน



อนุภาคในนิวเคลียส (p,n) ถูกเรียกรวมกันว่า นิวคลีออน (nucleon) นิวคลีออนยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงนิวเคลียร์แบบแรง (nuclear strong force) ซึ่งมีความแรงมากกว่าแรงคูลอมบ์ แต่มีระยะของแรงสั้น (ไม่เกินรัศมีของนิวเคลียส)

ขนาด (รัศมี r) ของนิวเคลียส คือ

$$r = r_0 A^{1/3}, \quad r_0 = 1.2 \times 10^{-15} m = 1.2 fm$$

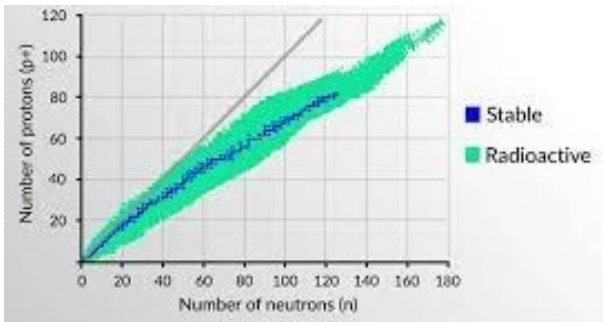
เช่น รัศมีนิวเคลียสของ ${}^{27}_{13}Al$ มีค่าเท่ากับ

$$r = 1.2 fm (27)^{1/3} = 3.6 fm$$

ขนาดของแรงผลัkcูลอมบ์ระหว่างโปรตอน-โปรตรอนที่ระยะ 1.2fm มีค่าเท่ากับ

$$F_c = \frac{Ke^2}{r^2} = (9 \times 10^9 N \cdot m^2 / C^2) \frac{(1.6 \times 10^{-19} C)^2}{(1.2 \times 10^{-15} m)^2} = 160 N$$

เสถียรภาพของนิวเคลียส



พลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy)

$$E_b = (\Delta M)c^2, \quad \Delta M = \text{mass defect} \quad (10)$$

$$\Delta M({}_Z^AX_N) = Z({}^1H) + Nm_n - M(X) \quad (11)$$

มวลนิวเคลียสจะถูกวัดในหน่วยของ amu (atomic mass unit) หรือ u โดยที่

$$1.0u = 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg} = 931.46 \text{ MeV}/c$$

พลังงานยึดเหนี่ยวของ ${}^4_2\text{He}$

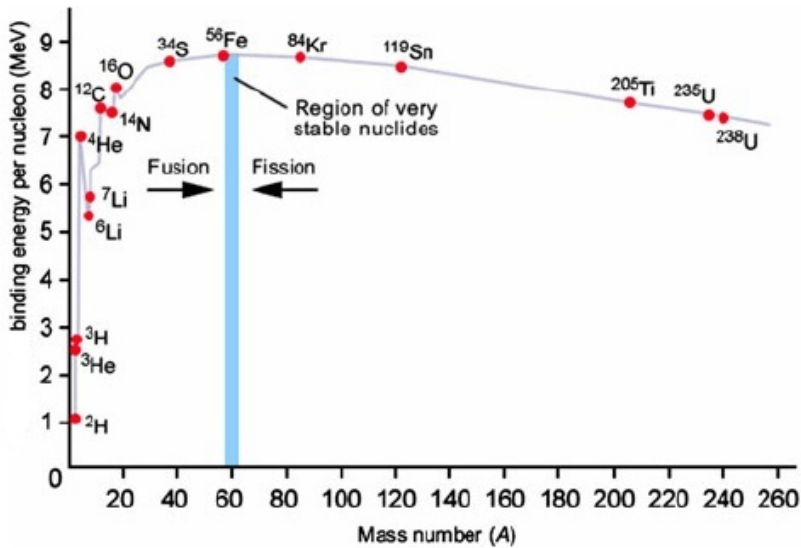
$$M({}^1\text{H}) = 1.00797u, \quad m_n = 1.00866u, \quad M({}^4_2\text{He}) = 4.00260u$$

$$\Delta M = 2(1.00797) + 2(1.00866) - 4.00260u = 0.03066u$$

$$E_b = (0.03066u)c^2(931.46\text{MeV}/c)^2 = 28.56\text{MeV}$$

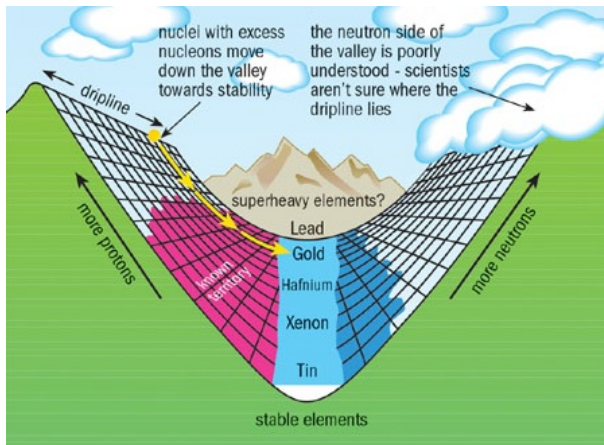
พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออน

$$e_b = \frac{E_b}{A}, \text{ i.e., } e_b({}^4_2\text{He}) = \frac{28.56\text{MeV}}{4} = 7.14\text{MeV}$$



การสลายตัว

นิวเคลียสที่มีเสถียรภาพน้อย จะสลายตัว (decay) ไปสู่นิวเคลียสที่มีเสถียรภาพมากกว่า



กฎการสลายตัว (decay law)

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

เมื่อ λ คือค่าคงตัวของการสลายตัว (เฉพาะสำหรับแต่ละนิวไคลด์)

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

Decay constant of selected Nuclei (yr-1)

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

$$N(T_{1/2}) = \frac{1}{2}N(0) = N(0)e^{-\lambda T_{1/2}}$$
$$\mapsto \ln 2 = \lambda T_{1/2} \text{ or } T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (12)$$

ตัวอย่าง $T_{1/2}({}^{60}\text{Co})$

$$\lambda = 0.13\text{yr}^{-1} \mapsto T_{1/2} = \frac{0.693}{0.13} = 5.33(5.272)\text{yr}$$

เวลาชั่วชีวิต (life time: τ)

$$N(\tau) = \frac{1}{e}N(0) = N(0)e^{-\lambda\tau} \mapsto \tau = \frac{1}{\lambda}$$

ตัวอย่าง $\tau({}^{60}\text{Co})$

$$\tau = \frac{1}{0.13} = 7.69\text{yr}$$

กัมมันตรังสี

กัมมันตรังสี (radio activity:R) ถูกนิยามให้เท่ากับอัตราการสลายตัว (decay/s)

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

หน่วยของกัมมันตรังสี คือ

$$1 \text{ decay/s} = 1 \text{ becquerel : bq}, \quad 3.7 \times 10^7 \text{ bq} = 1 \text{ Ci (Curie)}$$

ตัวอย่าง กัมมันตรังสีจาก ^{131}I (Iodine, $T_{1/2} = 8 \text{ days}$) จำนวน $0.01 \mu\text{g}$

$$N(^{131}\text{I}) = \frac{0.01 \times 10^{-6}}{131} \times 6.02 \times 10^{23} = 4.60 \times 10^{13} \text{ nucleus}$$

$$T_{1/2} = 8 \text{ day} = 8 \text{ d} \times 24 \text{ hr/d} \times 3600 \text{ s/hr} = 6.91 \times 10^5 \text{ s}$$

$$\lambda = \frac{0.693}{6.91 \times 10^5 \text{ s}} = 1.00 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} \mapsto R = 4.60 \times 10^7 \text{ bq}$$

$$\mapsto R = 1.24 \text{ Ci}$$

กระบวนการสลายตัว (decay processes)

Name	Decay process	Intermediate process
β^+ decay	${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-1}^AX + e^+ + \nu_e$	$p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$
β^- decay	${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z+1}^AX + e^- + \bar{\nu}_e$	$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$
electron capture (EC)	$e^- + {}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-1}^AX + \nu_e$	$p + e \rightarrow n + \nu_e$
α decay	${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4}X + \alpha$	$\alpha = {}_2^4\text{He}^{(+2)}$
gamma emission (γ)	${}_Z^AX^* \rightarrow {}_Z^AX + \gamma$	nucleus de-excitation

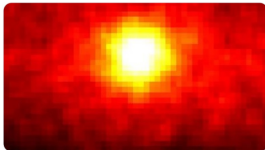
นิวตริโน / นิวตริโนปฏิภาค (neutrino / anti-neutrino) เป็นอนุภาคมีมวลน้อยมาก ถูกปลดปล่อยจากนิวเคลียส ในกระบวนการสลายตัวเบต้า และการจับอิเล็กตรอน สิ่งนี้เป็นตัวบ่งชี้ว่า การสลายตัวเบต้า เป็นการทำงานของแรงนิวเคลียร์ แบบอ่อน (weak nuclear force) ซึ่งแตกต่างจากแรงนิวเคลียร์ แบบแรง



Prof. Paul Byrne @ThePlanetaryGuy · Feb 9

This is an image of the Sun.

Taken at night. With neutrinos. Which travelled through Earth to reach a detector one thousand metres underground.



"ONE HUNDRED MILLION NEUTRINOS ARE PASSING THROUGH OUR BODIES EVERY SECOND, AND WE'RE WORRIED ABOUT THE PRICE OF COFFEE."