การทดลองที่ 8
การสลายตัวให้อนุภาคอัลฟาและเบตา
(Lab 8: Alpha/Beta Radioactive Decay)

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี
2. เรียนรู้วิธีหาค่าคงที่การสลายตัวของสารกัมมันตรังสี

อุปกรณ์

1. โปรแกรมจำลองการสายตัวของสารกัมมันตรังสีให้อนุภาคอัลฟา

ที่มา http://phet.colorado.edu/simulations/sims.php?sim=Alpha_Decay

2. โปรแกรมจำลองการสายตัวของสารกัมมันตรังสีให้อนุภาคเบตา

ที่มา http://phet.colorado.edu/simulations/sims.php?sim=Beta_Decay

ทฤษฎี

นิวเคลียสของธาตุบางชนิดเสถียรขณะที่บางนิวเคลียสไม่เสถียร เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงตัวเองเพื่อแยกออกเป็นสองส่วนหรือมากกว่านั้น การเปลี่ยนแปลงในลักษณะเช่นนี้เรียกว่า การสลายตัว (Decay) การพิจารณาความเสถียรหรือความไม่เสถียรของนิวเคลียสใดๆ จะพิจารณาจากแรงดึงดูดของแรงนิวเคลียร์ ซึ่งมีศักย์เป็นลบ และแรงผลักระหว่างโปรตอนซึ่งมีศักย์เป็นบวก พบว่าสำหรับนิวเคลียสที่เสถียรพลังงานศักย์รวมต้องมีค่าเป็นลบ นิวเคลียสจะต้องมีพลังงานรวมต่ำกว่าเมื่อเป็นนิวคลีออนแยกกันและพลังงานยึดเหนี่ยวจะถูกกำหนดให้เป็นลบของพลังงศักย์ค่านี้ ดังนั้นพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียสที่เสถียรต้องเป็นบวก มิฉะนั้นแล้วมันจะสามารถสลายตัวได้

นิวเคลียสของธาตุหนักที่มี $Z \geq 84$ หรือ $A \geq 210$ จะไม่เสถียรเช่น ยูเรเนียม ธอเลียม และเรเดียมเป็นต้น ประวัติของการค้นพบสารกัมมันตรังสี เริ่มในปี ค.ศ. 1896 เมื่อ เฮนรี เบคเคอเรล (Henri Becquerel) ค้นพบโดยบังเอิญว่าเกลือของยูเรเนียมสามารถแผ่รังสีออกมาได้เอง รังสีนี้มีคุณสมบัติในการทะลุทะลวงได้คล้ายๆ กับรังสีเอ็กซ์ นอกจากนี้ยังสามารถทำปฏิกิริยากับแผ่นฟิลม์ และทำให้อากาศมีประจุไฟฟ้าได้ด้วย หลังจากนั้นมีนักฟิสิกส์หลายท่านที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับปรากฏการ์ณของกัมมันตภาพรังสี เช่น รัทเธอร์ฟอร์ด ปิแอร์ (Pierre) และ แมรี คูรี (Marie Curie) เป็นต้น

รังสีที่แผ่ออกมาจากสารกัมมันตรังสี แบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ รังสีอัลฟา (α) รังสีเบตา (β) และรังสีแกมมา (γ) ซึ่งมีคุณลักษณะและสมบัติที่แตกต่างกันของกัมมันตภาพรังสีทั้ง 3 ชนิด ดังนี้

รังสีอัลฟา กัมมันตภาพรังสีชนิดนี้ประกอบด้วยอนุภาค ซึ่งแทนด้วยนิวเคลียสของธาตุฮีเลียม คือ ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$ (ดังนั้น อัลฟาจึงเป็นอนุภาคที่มีประจุบวก) รังสีอัลฟาเบี่ยงเบนได้ในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า พลังงานของรังสีหรืออนุภาคอัลฟาที่ถูกปล่อยออกมามีค่าประมาณระหว่าง 4 MeV ถึง 9 MeV อนุภาคอัลฟาสามารถทะลุทะลวงผ่านอากาศได้ในระยะทางหลายเซนติเมตร โดยการสูญเสียพลังงานจลน์เพื่อทำให้ก๊าซที่อนุภาคอัลฟาเดินทางผ่านแตกตัวเป็นไอออน แต่อย่างไรก็ตามอำนาจทะลุทะลวงนี้อาจถูกหยุดยั้งหรือทำให้หมดสิ้นไปได้ โดยการใช้แผ่นโลหะบางๆ กั้นไว้

สมการการสลายตัวให้กัมมันตภาพรังสีอัลฟาคือ

$$ {}^{A}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\mathrm{Y} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \qquad (1) $$

รังสีเบตา เป็นอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงแทนด้วยสัญลักษณ์ ${}^{0}_{-1}\mathrm{e}$ (หรือ β^{-}) บางทีเรียกว่าอนุภาคเบตา ต่อมาพบว่ารังสีเบตาไม่เพียงแต่มีประจุลบและมวลเท่าอิเล็กตรอนเท่านั้น ยังมีอนุภาคอีกชนิดหนึ่งที่มีประจุบวกกและมวลเท่าอิเล็กตรอนด้วย ซึ่งเรียกว่า โปซิตรอน แทนด้วยสัญลักษณ์ ${}^{0}_{+1}\mathrm{e}$ (หรือ β^{+}) รังสีเบตาเป็นอนุภาคที่มีประจุจึงสามารถเบี่ยงเบนได้ใน

สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า อนุภาคเบตามีอำนาจทะลุทะลวงสูงกว่าอนุภาคอัลฟา กล่าวคือ สามารถทะลุผ่านแผ่นโลหะบางๆ ได้

ในขบวนการสลายตัวอย่างหนึ่งของรังสีเบตาจากนิวเคลียส เช่น นิวตรอนเปลี่ยนไปเป็นโปรตอน (ซึ่งยังคงอยู่ในนิวเคลียส) พบว่ามวลของนิวตรอนมากกว่ามวลของโปรตอน $0.00134u$ ในขณะที่มวลของอิเล็กตรอนเพียงแค่ $0.00055u$ พลังงานที่ได้จากผลต่างของมวลก่อนและหลังปฏิกิริยาการสลายตัวนี้หายไปไหน และยังพบว่าสเปกตรัมของรังสีเบตาเป็นสเปกตรัมต่อเนื่อง นอกจากนี้ทั้งโปรตอน นิวตรอนและอิเล็กตรอน ต่างมีสปิน ½ ดังนั้น เพื่อให้เป็นไปตามกฎการคงที่ของพลังงาน โมเมนตัม และโมเมนตัมเชิงมุม ในปี ค.ศ. 1930 เพาลีได้เสนอว่ามีอนุภาคไม่มีประจุ มวลนิ่งเป็นศูนย์ และมีสปิน ½ ซึ่งเรียกว่า นิวตริโน (ν) หรือแอนตีนิวตรีโน ถูกปล่อยออกมาในขบวนการสลายเบตาด้วย สำหรับแอนตีนิวตรีโนมีสมบัติทั่วไปเหมือนนิวตรีโน แตกต่างกันเพียงมีสปินในทิศตรงข้าม

สมการการสลายตัวให้กัมมันตภาพรังสีเบตาคือ

$$\text{กรณี } \beta^-;\ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + {}^{0}_{-1}e \qquad (2)$$

$$\text{กรณี } \beta+;\ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + {}^{0}_{+1}e \qquad (3)$$

รังสีแกมมา มีสมบัติคล้ายรังสีเอ็กซ์ แต่มีอำนาจทะลุทะลวงมากกว่ารังสีเอกซ์ แหล่งกำเนิดรังสีแกมมาที่สำคัญคือจากสารกัมมันตรังสีและรังสีคอสมิก สมบัติทั่วไปของรังสีแกมมาคือ ไม่มีประจุไฟฟ้า จึงไม่เบี่ยงเบนในสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้า พบว่ารังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ความยาวคลื่นสั้น (ประมาณ 10^{-10} เมตร) มีอำนาจทะลุทะลวงสูงกว่ารังสีอัลฟาและเบตามาก กล่าวคือสามารถทะลุผ่านแผ่นตะกั่วได้หลายเซ็นติเมตร

รังสีแกมมา (หรือโฟตอนพลังงานสูง) เกิดขึ้นหลังจากนิวเคลียสของสารกัมมันตรังสีปล่อยอนุภาคอัลฟาหรือเบตาออกมา แล้วปรากฏว่านิวเคลียสใหม่ไม่เสถียร กล่าวคือจะอยู่ในสถานะกระตุ้น การกลับสู่สถานะพื้นของนิวเคลียสใหม่ กระทำได้โดยการปล่อยรังสีแกมมาออกมา หลังการสลายตัวแบบนี้นิวเคลียสของสารกัมมันตรังสีก็จะเป็นนิวเคลียสของธาตุเดิม จะมีแต่เพียงพลังงานของนิวเคลียสที่ลดลงไปเท่านั้น

สมการการสลายตัวให้กัมมันตภาพรังสีแกมมา คือ

$$\left({}^{A}_{Z}X\right)_{\text{excited}} \rightarrow {}^{A}_{Z}X + \gamma \qquad (4)$$

อัตราการสลายตัว

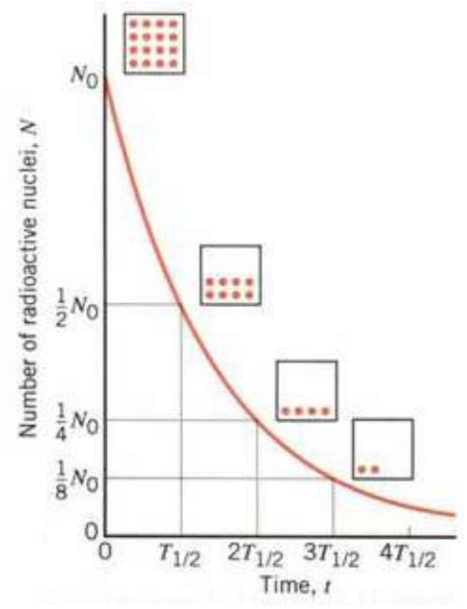
ในนิวเคลียสของธาตุประกอบด้วยโปรตอนซึ่งมีประจุบวกและนิวตรอนซึ่งเป็นกลางทางไฟฟ้า สัดส่วนของจำนวนโปรตอนต่อจำนวนนิวตรอนไม่เหมาะสมจนทำให้ธาตุนั้นไม่เสถียร ธาตุนั้นจึงปล่อยรังสีออกมาเพื่อปรับตัวเองให้เสถียร ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ดังนั้นเมื่อธาตุกัมมันตรังสีชนิดหนึ่งสลายตัวเกิดธาตุใหม่ หากธาตุใหม่เป็นธาตุกัมมันตรังสี (นิวเคลียสไม่เสถียร) ก็จะสลายตัวต่อไปอีกเรื่อย ๆ จนกว่าจะเกิดธาตุใหม่ที่มีนิวเคลียสที่เสถียร พลังงานในอัตรกิริยานิวเคลียร์มีค่ามากเมื่อเทียบกับการกระตุ้นด้วยความร้อนและโฟตอนของแสงที่สามารถมองเห็นได้ รวมถึงพันธะทางเคมีและการกระตุ้นอื่นๆ ดังนั้นการสลายตัวของนิวเคลียสของธาตุกัมมันตรังสี จึงไม่ขึ้นกับสภาพแวดล้อมภายนอกนิวเคลียส เป็นต้นว่า อุณหภูมิ ความดัน ทุกนิวเคลียสมีโอกาสสลายได้เท่า ๆ กัน แต่บอกไม่ได้ว่านิวเคลียสใดสลายก่อนหรือหลัง

ถ้าที่เวลา t มี N นิวเคลียสของสารกัมมันตรังสี อัตราการสลายตัวของนิวเคลียสของสารกัมมันตรังสีจะขึ้นกับจำนวนนิวเคลียสที่มีอยู่เดิมของสารนั้น อาจเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$-\frac{dN}{dt} \propto N \quad \text{หรือ} \quad \frac{dN}{dt} = -\lambda N \qquad (5)$$

(เครื่องหมายลบ (-) แสดงถึงการลดลงของจำนวนนิวเคลียส dN เมื่อเวลาผ่านไป dt)

โดย λ แทนค่าคงที่เฉพาะของการสลายตัวสำหรับนิวเคลียสที่กำหนดให้ ซึ่งเรียกว่า **ค่าคงที่การสลายตัว** (decay constant) มีหน่วยเป็น (เวลา)$^{-1}$ เช่น [s^{-1}]



ถ้าให้ N_0 เป็นจำนวนนิวเคลียสเริ่มต้นที่เวลา t = 0 และ N เป็นจำนวนนิวเคลียสที่เหลือ เมื่อเวลาผ่านไป t

จะได้ว่า $$\int_{N_0}^{N} \frac{dN}{N} = -\int_0^t \lambda dt$$

$$ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = -\lambda t$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \qquad (6)$$

รูปที่ 1 การสลายตัวของสารกัมมันตรังสีที่เวลาต่างๆ

อัตราการสลายตัวของนิวเคลียสของสารกัมมันตรังสี สามารถอธิบายได้ด้วยลักษณะเฉพาะคือ **ครึ่งชีวิต (half-life)** $T_{1/2}$ ซึ่งกำหนดว่าเป็นช่วงเวลาที่จำนวนนิวเคลียสเริ่มแรกสลายตัวจนกระทั่งเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของจำนวนแรก ความสัมพันธ์ระหว่าง กับค่าคงที่การสลายตัว อาจอาศัยสมการที่ (6) ถ้า N มีค่าเท่ากับ $\frac{1}{2}N_0$ เวลาในการสลายตัวคือ $T_{1/2}$ ดังนั้น

$$\frac{1}{2}N_0 = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$

$$e^{\lambda T_{1/2}} = 2$$

$$\lambda T_{1/2} = ln\,2 = 0.693$$

$$T_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda} \qquad (7)$$

จากสมการข้างต้นถ้าทราบค่าคงที่การสลายตัวของสารกัมมันตรังสี ก็จะทราบครึ่งชีวิตของสารนั้นด้วย หรือในทางกลับกันถ้าทราบค่าครึ่งชีวิตก็สามารถหาค่าคงที่การสลายตัวได้

ชีวิตเฉลี่ย (mean-life) $\overline{T}$ กำหนดว่าเป็นช่วงเวลาเฉลี่ยของการสลายตัวของกัมมันตรังสีทั้งหมด ค่า $\overline{T}$ นี้หาได้จากการรวมเวลาการสลายตัวทั้งหมดของสารแล้วหารด้วยจำนวนนิวเคลียสเริ่มแรก เมื่อเวลาเป็นศูนย์ ดังนี้

$$\overline{T} = \frac{\int_0^{N_0} t\,dN}{N_0}$$

แทนค่า $dN = -\lambda N_0 e^{-\lambda t} dt$ ลงในสมการข้างต้นจะได้

$$\overline{T} = \frac{\int_{\infty}^{0} -\lambda t N_0 e^{-\lambda t}\,dt}{N_0}$$

$$= \int_{\infty}^{0} \lambda t\, e^{-\lambda t}\,dt$$

$$\overline{T} = \frac{1}{\lambda} \qquad (8)$$

สมการข้างต้นแสดงว่าชีวิตเฉลี่ยของสารกัมมันตรังสีเป็นส่วนกลับของค่าคงที่การสลายตัวของสารนั้น ความสัมพันธ์ระหว่าง $\overline{T}$ และ $T_{1/2}$ อาจหาได้ดังนี้

$$\text{จาก } \overline{T} = \frac{1}{\lambda} \text{ และ } T_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda} \text{ จะได้ } \overline{T} = \frac{T_{1/2}}{0.693} \text{ ดังนั้น}$$

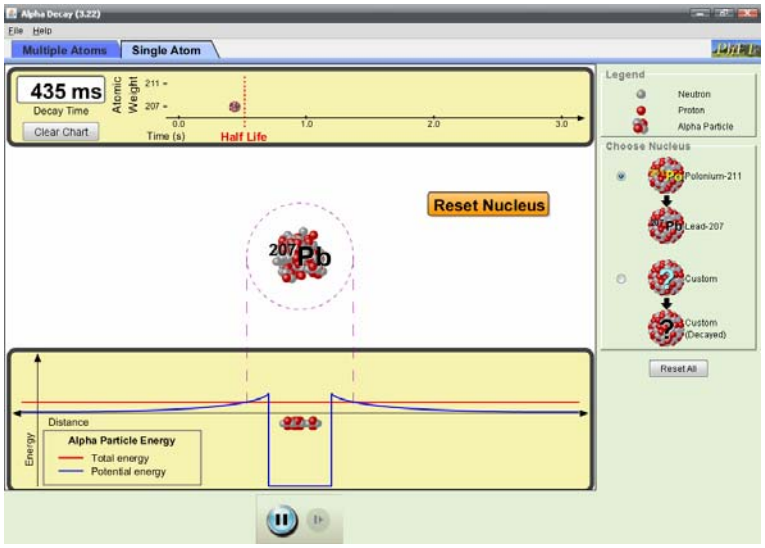
$$\overline{T} = 1.44\,T_{1/2} \qquad (9)$$

จะเห็นว่าชีวิตเฉลี่ยมีค่ามากกว่าครึ่งชีวิต กล่าวคือ $\overline{T}$ เท่ากับ 1.44 เท่าของ $T_{1/2}$ ของสารกัมมันตรังสีนั้น

วิธีทดลอง ตอนที่ 1 การหาค่าคงที่การสลายตัวของสารกัมมันตรังสีให้อนุภาคอัลฟา

ตอนที่ 1.1 หาค่าคงที่การสลายตัว กรณีนิวเคลียสอะตอมเดี่ยว

1.1 เปิดโปรแกรมจำลองการสายตัวของสารกัมมันตรังสีให้อนุภาคอัลฟา



รูปที่ 3 โปรแกรมจำลองการสายตัวของสารกัมมันตรังสีให้อนุภาคอัลฟา

1.2 เลือกแถบ Single Atom และชนิดของสารกัมมัตรังสีเป็น Polonium-211 (^{211}Po)

1.3 กดปุ่ม Reset Nucleus รอจนกว่าสารกัมมันตรังสีจะสลายตัวแล้วบันทึกค่าเวลา (Decay Time)

1.4 ทำการทดลองข้อ 1.3 ซ้ำ จำนวน 10 ครั้ง แล้วกดปุ่ม Clear Chart

1.5 ทำการทดลองในข้อ 1.3 – 1.4 ซ้ำ จำนวน 3 ครังและบันทึกผลการทดลองที่ได้ลงในตารางบันทึกผลการทดลอง

1.6 ทำการหาค่าเฉลี่ยเวลาการสลายตัวหรือค่าชีวิตเฉลี่ย ($\overline{T}$)

1.7 เมื่อได้ค่าชีวิตเฉลี่ย ($\overline{T}$) แล้วให้หาค่าคงที่การสลายตัวจากสมการที่ (8)

ตอนที่ 1.2 หาค่าคงที่การสลายตัว กรณีนิวเคลียสหลายอะตอม

1.1 เลือกแถบ Multiple Atom และชนิดของสารกัมมัตรังสีเป็น Polonium-211 (^{211}Po)

1.2 สังเกตจำนวน Nucleus ของทั้ง Polonium-211 (^{211}Po) และ Lead (^{207}Pb) ที่มุมบนขวาของแถบเวลา ขณะนี้ต้องเป็น 0

1.3 กดปุ่ม Add 10 ที่ตะกร้าใส่ Nucleus ของ ^{211}Po จะกระทั่งไม่มี Nucleus ของ ^{211}Po เหลืออยู่ในตะกร้า สังเกตจำนวน Nucleus ของ ^{211}Po และ ^{207}Pb ที่มุมบนขวาของแถบเวลา ที่เวลาต่างๆ จำนวน Nucleus ทั้งสองต้องรวมกันได้เท่ากับ 99

1.4 บันทึกค่าจำนวน Nucleus ของ ^{211}Po และ ^{207}Pb ที่เวลา 0.5, 1.0, 1.5,…, 3.0s ลงในตารางบันทึกผลการทดลอง (หมายเหตุ สามารถกดปุ่ม Pause เพื่อบันทึกจำนวน Nucleus ของ ^{211}Po และ ^{207}Pb)

1.5 กดปุ่ม Reset All Nucli และทดลองในข้อ 1.4 ซ้ำ จำนวน 3 ครั้ง พร้อมทั้งหาค่าเฉลี่ยจำนวน Nucleus ของ ^{211}Po

1.6 เขียนกราฟระหว่างเวลาที่ใช้ในการสลายตัว (แกน x) กับจำนวน Nucleus ของ ^{211}Po (แกน y)

1.7 ทำการหาค่าครึ่งชีวิต ($T_{1/2}$) ของ ^{211}Po จากกราฟ

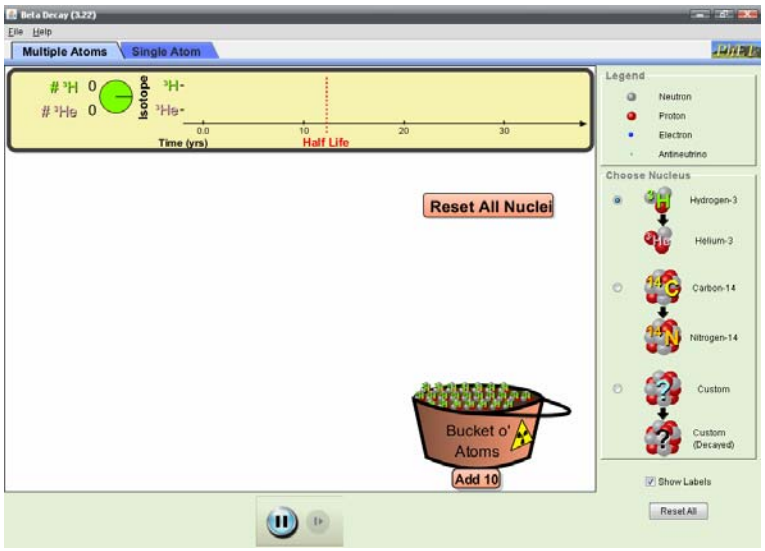
1.8 เมื่อได้ค่าครึ่งชีวิต ($T_{1/2}$) แล้วให้หาค่าคงที่การสลายตัวจากสมการที่ (7)

1.9 เปรียบเทียบค่าคงที่การสลายตัวจากการทดลองตอนที่ 1.1 และ 1.2

ตอนที่ 2 การหาค่าคงที่การสลายตัวของสารกัมมันตรังสีให้อนุภาคเบตา

ตอนที่ 2.1 หาค่าคงที่การสลายตัว กรณีนิวเคลียสอะตอมเดี่ยว

ทำการทดลองซ้ำเหมือนตอนที่ 1.1 แต่เปลี่ยนชนิดของสารกัมมันตรังสีเป็น Hydrogen-3 (^{3}H) และ Carbon-14 (^{14}C) ตามลำดับ



รูปที่ 4 โปรแกรมจำลองการสายตัวของสารกัมมันตรังสีให้อนุภาคเบตา

<u>หมายเหตุ</u> ค่าเวลาที่ใช้ในการสลายตัวให้อนุภาคเบตา มีหน่วยเป็น ปี (year)

ตอนที่ 2.2 หาค่าคงที่การสลายตัว กรณีนิวเคลียสหลายอะตอม

ทำการทดลองซ้ำเหมือนตอนที่ 1.2 แต่เปลี่ยนชนิดของสารกัมมันตรังสีเป็น Hydrogen-3 (^{3}H) และ Carbon-14 (^{14}C) ตามลำดับ

<u>หมายเหตุ</u> ค่าเวลาที่ใช้ในการบันทึกค่าการสลายตัวให้อนุภาคเบตา สำหรับ Hydrogen-3 (^{3}H) คือ 5, 10, 15,…, 30 years และสำหรับ Carbon-14 (^{14}C) คือ 2500, 5000, 7500, 10000, 12500, 15000 years)

ตารางบันทึกผลการทดลอง

ตอนที่ 1.1 และ 2.1 หาค่าคงที่การสลายตัว กรณีนิวเคลียสอะตอมเดี่ยวของ .....

	Iteration no. 1	Iteration no. 2	Iteration no. 3	
No.	Decay time (s)	Decay time (s)	Decay time (s)	
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				Mean-Time Average ($\overline{T}$) $\overline{T} = \frac{\overline{T}_1 + \overline{T}_2 + \overline{T}_3}{3}$
10				
	Mean-Time ($\overline{T}_1$)	Mean-Time ($\overline{T}_2$)	Mean-Time ($\overline{T}_3$)	

ตอนที่ 1.2 และ 2.2 หาค่าคงที่การสลายตัว กรณีนิวเคลียสหลายอะตอมของ .....

	Iteration no. 1		Iteration no. 2		Iteration no. 3		Average Number of ^{211}Po
Time (s)	Number of ^{211}Po	Number of ^{207}Pb	Number of ^{211}Po	Number of ^{207}Pb	Number of ^{211}Po	Number of ^{207}Pb	
0.0							
0.5							
1.0							
1.5							
2.0							
2.5							
3.0							

เอกสารอ้างอิง

1. http://phet.colorado.edu/simulations/sims.php?sim=Alpha_Decay
2. http://phet.colorado.edu/simulations/sims.php?sim=Beta_Decay