หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

บทที่ ๒

รังสีเบต้า

รังสีเบต้า คือ อนุภาคอีเลคตรอนบวก (positron, สัญญลักษณ์ β^+) หรือของอนุภาคอีเลคตรอนลบ (negatron, สัญญลักษณ์ β^-) ที่แผ่กระจายออกมาจากนิวเคลียสของสารกัมมันตรังสี แต่ในนิวเคลียสไม่มีอีเลคตรอน การสลายตัวให้รังสี β^+ เกิดจากโปรตอนในนิวเคลียสเปลี่ยนเป็นนิวตรอนกับอีเลคตรอนบวกทำให้จำนวนเลขอะตอม(Z) ลดลง ๑ แต่ในนิวเคลียสโปรตอนจะหายไป ๑ ตัว จำนวนเลขมวล (A) คงที่

การสลายตัวให้รังสี β^- เกิดจากนิวตรอนในนิวเคลียสเปลี่ยนเป็นโปรตอนกับอีเลคตรอนลบ ซึ่งจากการเปลี่ยนแปลงจะทำให้ค่า Z เพิ่มขึ้น ๑ ในนิวเคลียสมีโปรตอนเพิ่มขึ้น ๑ ตัว ส่วนค่า A ยังคงที่ ดังสมการ

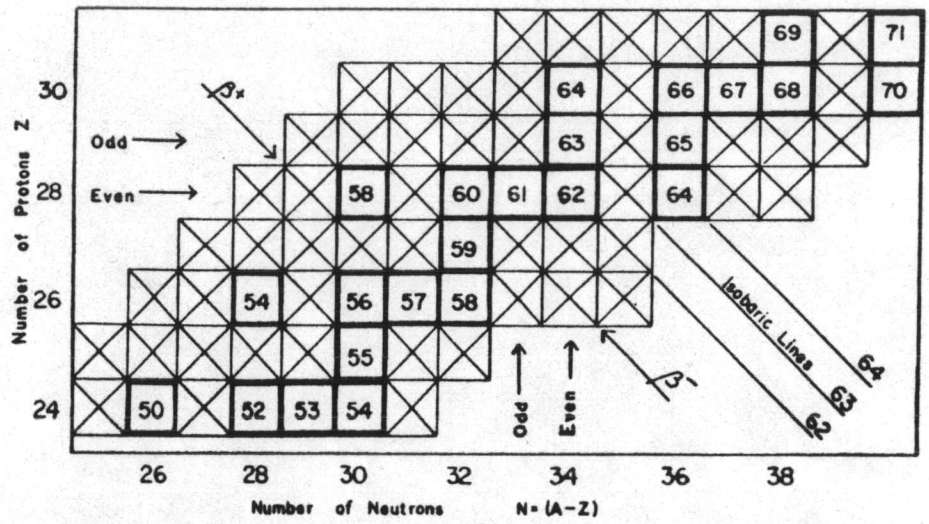
การสลายแบบ β^+ : $P \longrightarrow n + \beta^+ + \nu$ Z ลดลง ๑ (๔)

$$_{Z}X^{A} \longrightarrow {}_{Z-1}X^{A} + \beta^+ + \nu$$

การสลายแบบ β^- : $n \longrightarrow P + \beta^- + \nu$ Z เพิ่มขึ้น ๑ (๔)

$$_{Z}X^{A} \longrightarrow {}_{Z+1}X^{A} + \beta^- + \nu$$

การสลายตัวให้อนุภาค β^+ และ β^- นี้ จะทำให้ได้ไอโซโทปที่เป็นไอโซบาร์ซึ่งกันและกัน คือ ไอโซโทปที่มี A เท่ากัน แต่ Z ต่างกัน จากรูปที่ ๒.๑ พิจารณาเส้นไอโซบาร์(Isobaric line) อนุภาค β^+ จะเกิดจากทางด้านบนมุมซ้ายของตารางธาตุทะแยงลงมา ส่วน β^- เกิดจากธาตุทางด้านล่างขวาทะแยงขึ้นทางด้านบน



รูปที่ ๒.๑[๔] แสดงเส้นไอโซบาร์ (Isobaric line) การสลายตัวให้ β^+ และ β^- ของธาตุ

๒.๑ พลังงานและความเร็วของอนุภาคเบต้า

การหาความเร็ว และพลังงานของอนุภาคเบต้า หาได้ ๒ วิธี คือ

๒.๑.๑ การคำนวณหาพลังงานจากสูตรการสลายตัว โดยอาศัยกฎการอนุรักษ์ของมวลและพลังงาน เช่น การสลายตัวของ $_{15}P^{32}$ ให้ $_{16}S^{32}$ ได้รังสี β^- ดังสมการ

$$_{15}P^{32} \longrightarrow {}_{16}S^{32} + \beta^- + \nu + \text{พลังงาน}$$

เมื่อทราบมวลของอะตอม มวลของแต่ละนิวเคลียส ก็สามารถคำนวณหาพลังงานเป็นหน่วยอะตอมมิคแมส หรือหน่วย MeV ได้ เช่น

มวลของอะตอมของ $_{15}P^{32}$ = 31.98403 amu

มวลของอีเลคตรอนของ $_{15}P^{32}$ = $15\ m_o$ amu

(m_o = มวลของ ๑ อีเลคตรอน)

มวลของนิวเคลียสของ $_{15}P^{32}$ = $31.98403 - 15\ m_o$ amu

มวลของนิวเคลียสของ $_{16}S^{32}$ = $31.98220 - 16\ m_o$ amu

มวลของ β^- = 1 m_o amu

มวลของนิวตรีโน = 0

มวลของนิวเคลียสของ $_{16}S^{32}$ + β^- + ν = 31.98220-15 m_o amu

พลังงานที่ปลดปล่อยออกมา = (31.98403-15 m_o)-
(31.98220-15 m_o)
= 0.00183 amu
= 0.00183 x (931.2) MeV
= 1.70 MeV

(1 amu = 931.2 MeV)

ในทำนองเดียวกัน การสลายตัวที่ให้รังสีเบต้าบวก เช่น กรณีของ $_7N^{12}$ ก็สามารถคำนวณหาพลังงานสูงสุดของเบต้าบวกได้

$$_7N^{12} \longrightarrow {}_6C^{12} + \beta^+ + \nu + \text{พลังงาน}$$

มวลของนิวเคลียสของ $_7N^{12}$ = 12.02278-7 m_o amu

มวลของนิวเคลียสของ $_6C^{12}$ = 12.003803-6 m_o amu

มวลของ β^+ = 1 m_o amu

มวลของนิวตรีโน = 0

มวลของนิวเคลียสของ $_6C^{12}$ + β^+ + ν = 12.003803-5 m_o amu

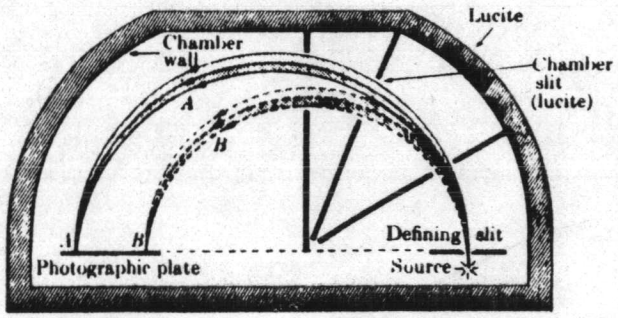
พลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมา = (12.02278-7 m_o)-
(12.003803-5 m_o)
= 0.018977-2 m_o amu

พลังงานในหน่วย MeV = 0.018977x931.2 -
2(0.00054876)x931.2
= 16.65 MeV

(มวลของ ๑ อีเลคตรอน m_o = 0.000548763 amu)

๒.๑.๒ การทดลองหาพลังงานและความเร็วของอนุภาคเบต้า

ความเร็วของอนุภาคเบต้า วัดได้โดยการหักเหของอนุภาคในสนามแม่เหล็ก เครื่องมือที่ใช้เป็นรูปครึ่งวงกลม เรียกว่า แมกนีติคสเปคโตรกราฟ ตัวเครื่องทำด้วยลูไซต์ (lucite) ซึ่งเป็นฉนวนป้องกันการดูดกลืนอนุภาค ภายในมีที่ใส่ต้นกำเนิดรังสีเบต้า มีช่องสำหรับปืนลำรังสีเบต้า และกั้นรังสีสะท้อนจากผนังด้านต่าง ๆ ของเครื่อง มีแผ่นฟิล์ม หรือหัววัดสำหรับวัดปริมาณรังสีเบต้า ภายในเครื่องสามารถปรับความแรงของสนามแม่เหล็กได้



รูปที่ ๒.๒[๖] แสดงไดอะแกรมของเครื่องมือวัดความเร็วของอนุภาคเบต้า

005788

อนุภาคเบต้าจากต้นกำเนิด ผ่านช่องเป็นลำรังสีแคบ วิ่งไปในสนามแม่เหล็ก ซึ่งทราบความแรง ทำให้ลำรังสีเบต้าเบนไปเป็นมุม ๑๘๐ องศา อนุภาคที่มีพลังงานต่ำจะถูกเบนไปมาก จะตกกระทบแผ่นฟิล์มแถว ๆ จุด B ส่วนอนุภาคที่มีพลังงานสูงกว่าจะตกแถวจุด A เมื่อทราบรัศมีทางเดิน r เป็นเซนติเมตร ของอนุภาคภายในเครื่อง . ความแรงของสนามแม่เหล็ก H มีหน่วยเป็นเกาส์ ประจุของอีเลคตรอน e เป็น emu น้ำหนักของอีเลคตรอน m เป็นกรัม จะหาความเร็ว v ของอีเลคตรอนเป็นเซนติเมตร ต่อวินาทีได้จากสูตร

$$v = Hr \frac{e}{m_o}\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \qquad \text{----------(2.1)}$$

เมื่อ v เป็นความเร็วของอนุภาคเบต้า

m_o เป็นมวลของอนุภาคเบต้าขณะหยุดนิ่ง

c เป็นความเร็วแสง

สูตรสำหรับหาพลังงาน

$$T = m_o c^2 \left[\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right] \text{----------(2.2)}$$

T เป็นพลังงานจลน์

จาก (๒.๑) สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{v}{c} = Hr \cdot \frac{e}{m_o c} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \text{----------(2.3)}$$

ประจุของอีเลคตรอน $e = 1.60206 \times 10^{-20}$ emu

มวลของอีเลคตรอน $m_o = 9.1083 \times 10^{-28}$ กรัม

$e/m_o = 1.75888 \times 10^{7}$ emu/กรัม

ความเร็วแสง $= 2.99793 \times 10^{10}$ ซม/วินาที

Hr (gauss-cm) $= \frac{m_o c}{e} \cdot \frac{v}{c} \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}}$

$= 1704.5 \frac{v}{c} \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}}$ ------(2.4)

$m_o c^2 = 9.1083 \times 10^{-28} \times (2.99793 \times 10^{10})^2$

$= 8.18616139 \times 10^{-7}$ เอิร์ก

$= \frac{8.18616139 \times 10^{-7}}{1.6 \times 10^{-6}}$ MeV

$= 0.511$ MeV

จาก (๒.๒) $$T = 0.511 \left[\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right] \text{-------(2.5)}$$

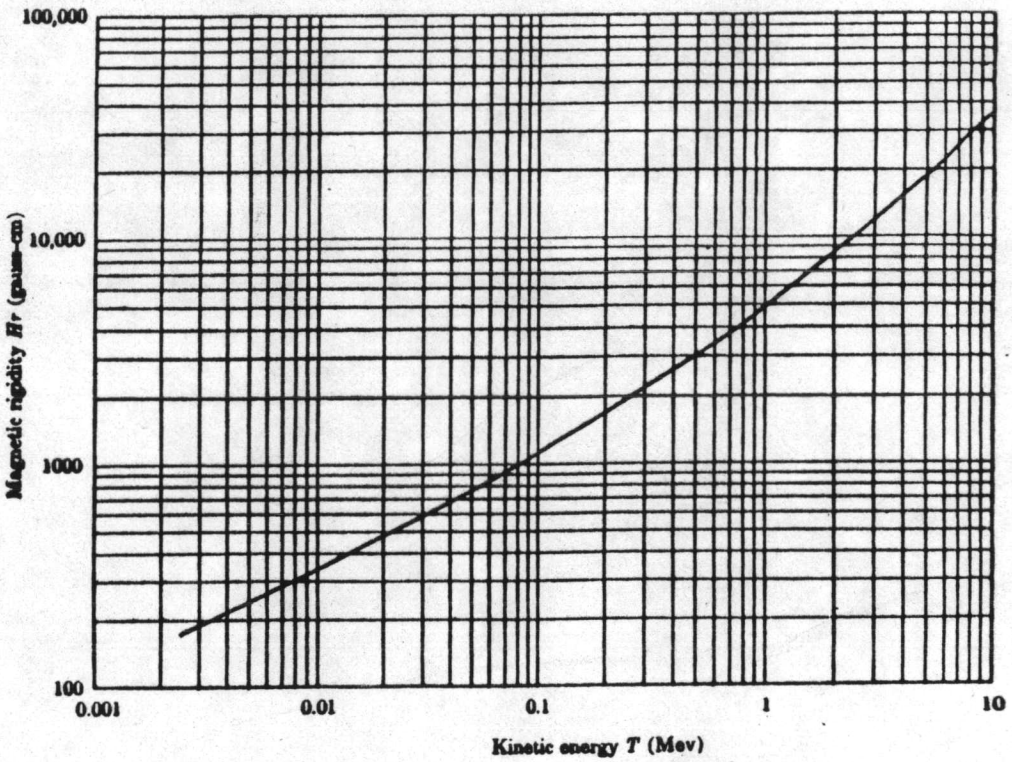
จากสมการ (๒.๔) เมื่อทราบค่า Hr ก็สามารถหาค่า $\frac{v}{c}$ หรือค่า v ได้

และจาก (๒.๕) สามารถหาพลังงานจลน์ T ของอนุภาคเบต้าได้

ตารางที่ ๒.๑[๖] แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Hr (magnetic rigidity) และพลังงานจลน์(T) เป็นฟังชั่นของความเร็ว. $(\frac{v}{c})$

Velocity, v/c	Magnetic rigidity, Hr: gauss-cm	Kinetic energy, T: Mev
0	0	0
0.10	171.3	0.00258
0.15	258.6	0.00585
0.20	347.9	0.01054
0.25	440.1	0.01676
0.30	536.0	0.02468
0.35	636.9	0.03450
0.40	743.9	0.04655
0.45	858.9	0.06121
0.50	984.1	0.07905
0.55	1122	0.10085
0.60	1278	0.1278
0.65	1458	0.1614
0.70	1671	0.2045
0.75	1933	0.2616
0.80	2273	0.3407
0.85	2750	0.4590
0.90	3519	0.6613
0.92	4001	0.7928
0.94	4696	0.9868
0.96	5844	1.314
0.98	8394	2.057
0.99	11,960	3.111
0.995	16,980	4.605
0.996	19,000	5.208
0.997	21,960	6.901
0.998	26,910	7.573
0.999	38,085	10.92

การใช้แมกนีติคสเปคโตรกราฟ สำหรับวัดความเร็ว หรือพลังงานของอนุภาคเบต้า โดยการถ่ายภาพด้วยฟิล์ม จะมีความยุ่งยาก เนื่องจากอนุภาคเบต้าให้พลังงานแบบต่อเนื่อง ไม่สามารถที่จะนับจุดดำบนฟิล์มได้ จึงต้องใช้หัววัดรังสีแบบไกเกอร์ วางไว้ที่จุด ๆ หนึ่ง (ระยะ r คงที่) เปลี่ยนค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กไปเรื่อย ๆ นับจำนวนอนุภาคเบต้าสำหรับแต่ละค่าของ H เมื่อได้ค่า Hr จะสามารถคำนวณหาค่า v ได้ตามสมการ (๒.๑) และหาค่า T ได้ตามสมการ (๒.๒)



รูปที่ ๒.๓[๖] แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์ของอนุภาคเบต้ากับ magnetic rigidity (Hr)

๒.๒ สเปคตรัมของอนุภาคเบต้า

การสลายตัวให้อนุภาคเบต้า เป็นการสลายตัวที่ให้พลังงานแบบต่อเนื่อง ตั้งแต่พลังงานต่ำสุด คือศูนย์ จนถึงค่าพลังงานสูงสุดค่าหนึ่ง ซึ่งค่าสูงสุดนี้เป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของสารกัมมันตรังสีแต่ละชนิด สารกัมมันตรังสีบางชนิดสลายตัวให้เฉพาะอนุภาคเบต้าบวก บางชนิดให้เฉพาะอนุภาคเบต้าลบ และบางชนิดให้ทั้งอนุภาคเบต้าบวก และอนุภาคเบต้าลบพร้อมกัน ตัวอย่างสารกัมมันตรังสีที่สลายตัวให้อนุภาคเบต้า เช่น (๗)

การสลายแบบ β^+ :

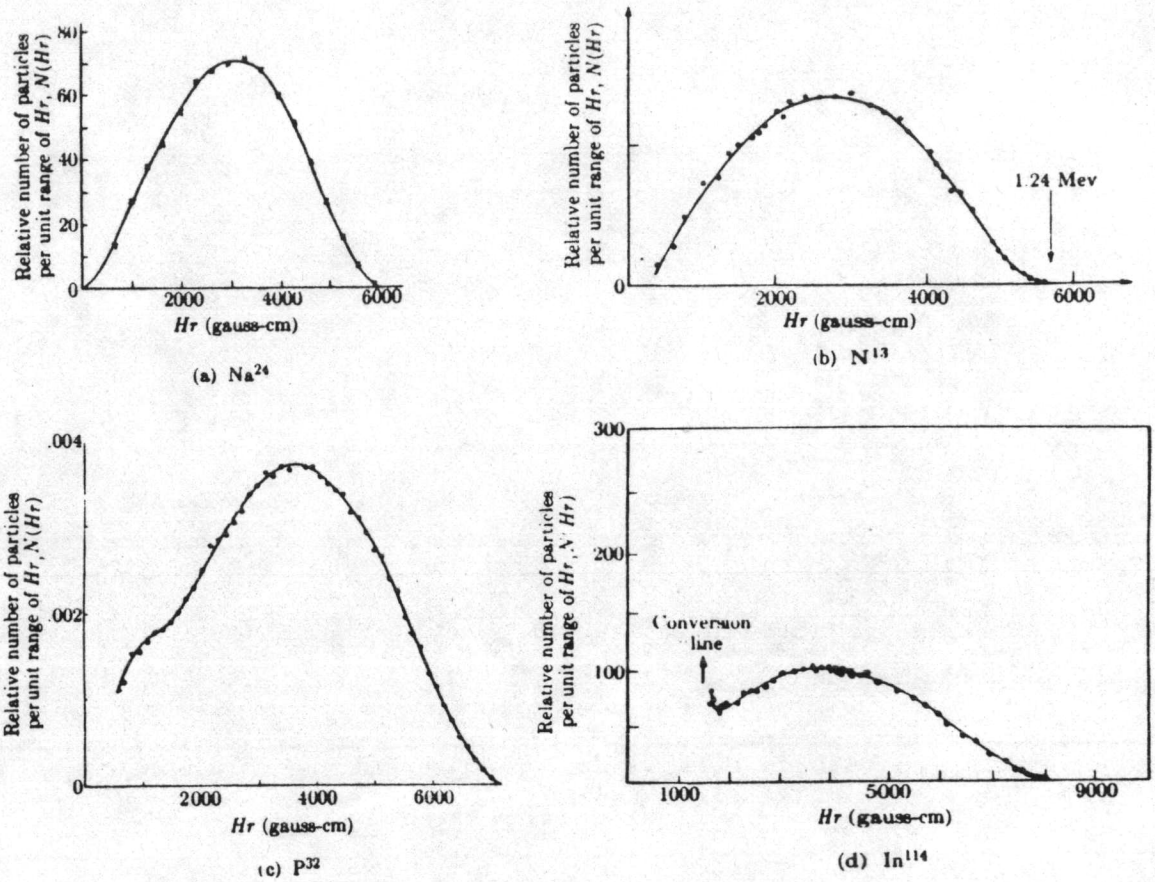
Na-22	พลังงานสูงสุด	0.54 MeV
Mn-52	พลังงานสูงสุด	0.58 MeV
N-13	พลังงานสูงสุด	1.20 MeV
O-15	พลังงานสูงสุด	1.74 MeV
I-131	พลังงานสูงสุด	0.606 และ 0.806 MeV

การสลายแบบ β^- :

Cl-36	พลังงานสูงสุด	0.714 MeV
Tl-204	พลังงานสูงสุด	0.764 MeV
P-32	พลังงานสูงสุด	1.710 MeV
Na-24	พลังงานสูงสุด	1.389 MeV

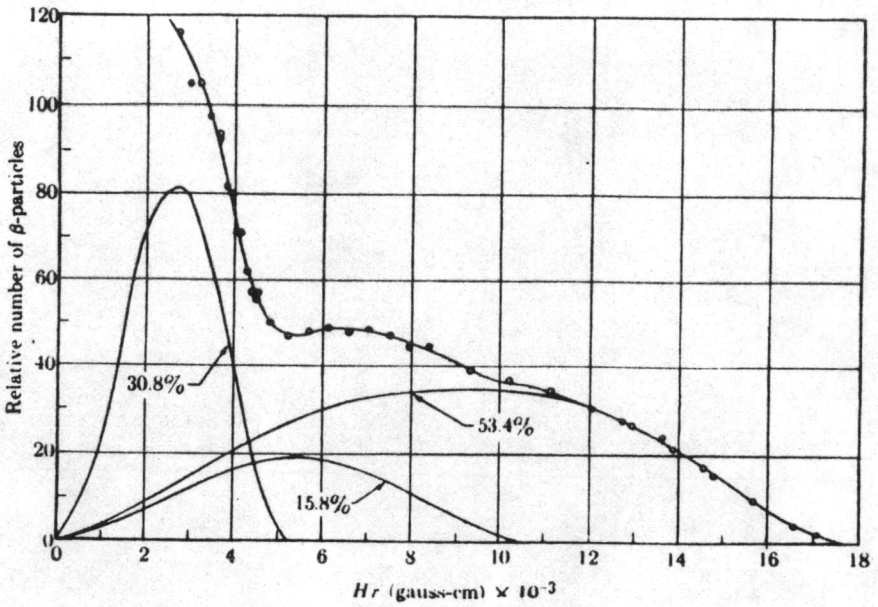
การสลายแบบ β^+ และ β^- :

As-74	พลังงานสูงสุดของ β^+	0.95 และ 1.54 MeV
	พลังงานสูงสุดของ β^-	1.36 MeV
In-114	พลังงานสูงสุดของ β^+	0.42 MeV
	พลังงานสูงสุดของ β^-	1.988 MeV



รูปที่ ๒.๔[๖] แสดงสเปคตรัมแบบธรรมดา (simple spectrum) ของอนุภาคเบต้า จากสารกัมมันตรังสีชนิดต่าง ๆ

นอกจากนี้ มีสารกัมมันตรังสีหลายชนิด ที่สลายตัวให้อนุภาคเบต้าหลาย ๆ พลังงานออกมาพร้อมกัน ได้สเปคตรัมซับซ้อน ซึ่งสเปคตรัมเหล่านี้สามารถแยกได้ด้วย แมกนีติคสเปคโตรมิเตอร์ เช่น กรณีของคลอรีน-๓๘ สลายตัวให้รังสีเบต้าลบมีพลังงานสูงสุด 1.11, 2.77, 4.81 MeV และมีปริมาณของแต่ละพลังงานคิดเป็นเปอร์เซนต์ได้ ๓๑, ๑๖ และ ๕๓ เปอร์เซนต์ ตามลำดับ[๖] ขณะเดียวกันคลอรีน-๓๘ ก็ยังสลายตัวให้รังสีแกมม่า ๒ ตัว มีพลังงาน 2.15 และ 1.60 MeV



รูปที่ ๒.๕[๖] แสดงสเปคตรัมแบบซับซ้อน (complex spectrum) ของอนุภาคเบต้า

๒.๓ <u>อันตรกริยา</u>ของรังสีเบต้ากับสสาร (Interaction of β-particle with matter)

อนุภาคเบต้าเป็นอนุภาคชนิดมีประจุที่มีมวลน้อยที่สุด จึงทำให้เคลื่อนที่ได้เร็วกว่ามีอำนาจทะลุทะลวงสูงกว่าอนุภาคที่มีประจุตัวอื่น ๆ เช่น อนุภาคเบต้าพลังงาน 3 MeV สามารถเคลื่อนที่ไปในอากาศได้ไกลกว่า ๑๐๐๐ เซนติเมตร ในขณะที่อนุภาคแอลฟ่า พลังงาน 3 MeV เหมือนกัน เคลื่อนที่ไปในอากาศได้เพียง ๒.๔ เซนติเมตร[๖] ในขณะที่อนุภาคเบต้าวิ่งผ่านอะตอมของวัตถุจะทำให้เกิดไอออนไนเซชั่น หรือเอ็กซ์ไซเทชั่นในอะตอมของวัตถุ และพลังงานของอนุภาคเบต้าจะลดลง ถ้าใช้ไกเกอร์เคาน์เตอร์วัดปริมาณของอนุภาคในขณะที่ไม่มีแผ่นกั้นรังสี และขณะที่มีแผ่นกั้นความหนาต่าง ๆ กัน เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเคาน์ กับความหนาของแผ่นกั้นบนกระดาษกราฟ จะได้กราฟเป็นรูปประมาณเอ็กซ์โปแนนเชียล จึงเขียนความสัมพันธ์เป็นสมการดังนี้

$$I(x) = Ioe^{-\mu x} = Ioe^{-\frac{\mu}{\rho}(\rho x)} \qquad \text{----------(2.6)}$$

เมื่อ Io เป็นจำนวนเคานท์เมื่อไม่มีแผ่นกั้น

I(x) เป็นจำนวนเคานท์เมื่อแผ่นกั้นหนา x

ρ เป็นความหนาแน่นของแผ่นกั้น

μ เป็นสัมประสิทธิ์การลดรังสีเบต้าของแผ่นกั้น

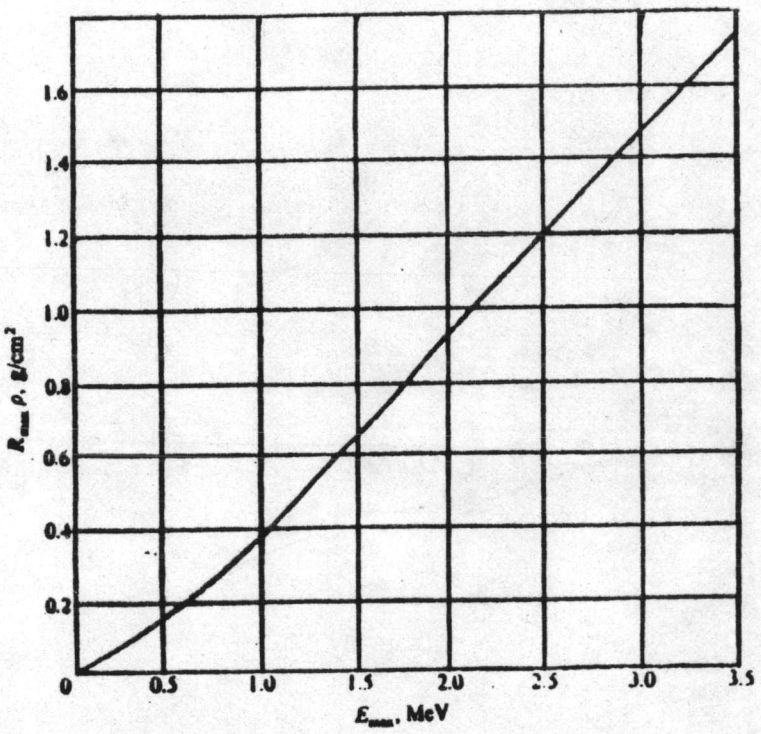
ไม่ว่าจะเพิ่มความหนาของแผ่นกั้นไปเท่าไร จำนวนเคานท์จะไม่ลดลงเป็นศูนย์ แต่จะไปถึงค่าคงที่ ซึ่งเรียกว่า แบคกราวน์ ความหนาของแผ่นกั้นตรงจุดที่พบแบคกราวน์เรียกว่า พิสัยสูงสุด (range,สัญญลักษณ์ R_{max}) ของอนุภาคเบต้าในแผ่นกั้นนั้น; R_{max} คือความหนาของแผ่นกั้น (เมตร, เซนติเมตร, มิลลิเมตร ฯลฯ) ที่สามารถกั้นอนุภาคเบต้าพลังงานสูงสุด; $R_{max}\rho$ เป็นพิสัยในหน่วย กรัม/ตารางเมตร, มิลลิกรัม/ตารางเซนติเมตร ฯลฯ เป็นความหนาซึ่งสามารถวัดได้ง่ายกว่า R_{max} ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานสูงสุด (E_{max}) กับพิสัยสูงสุด (R_{max}) ของอนุภาคเบต้า ดังสูตรเอ็มไพริกัล (empirical formula)

$$R_{max}\rho = 0.412\ E_{max}^{(1.265-0.0954\ \ln E_{max})} \quad \text{เมื่อ } E_{max} \leq 2.5 \text{ MeV}$$

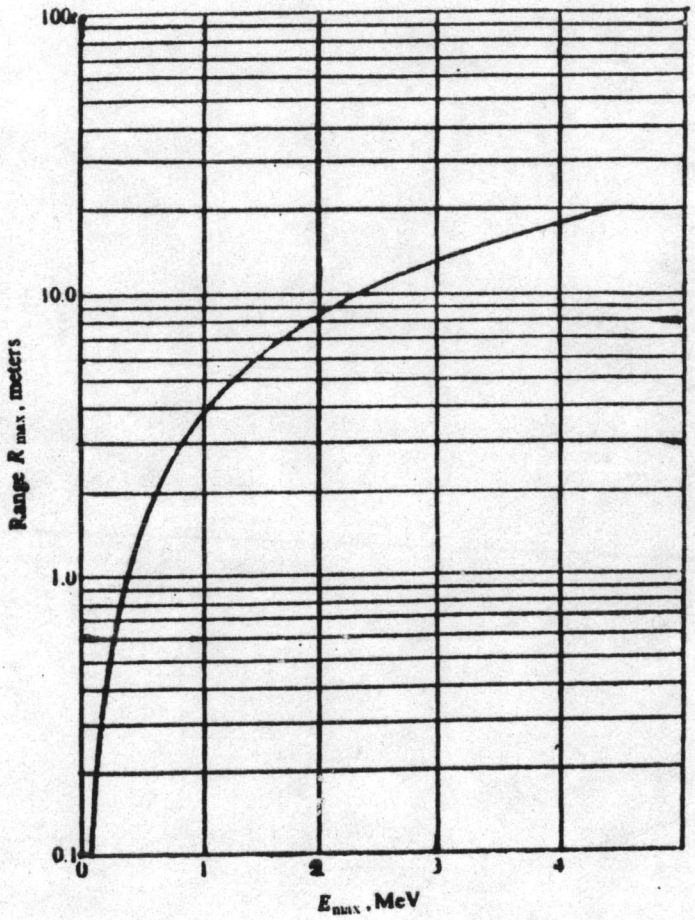
$$R_{max}\rho = 0.530\ E_{max} - 0.106 \quad E_{max} > 2.5 \text{ MeV}$$

เมื่อ $R_{max}\rho$ คือความหนาในหน่วย กรัม/ตารางเซนติเมตร

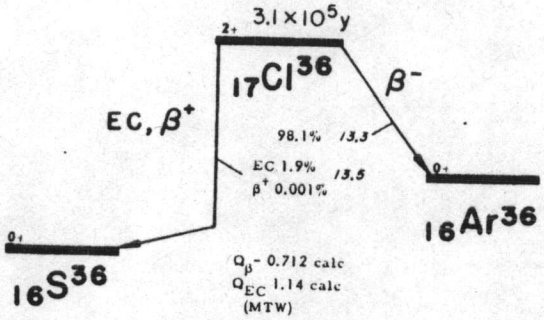
E_{max} เป็นพลังงานสูงสุดในหน่วย MeV

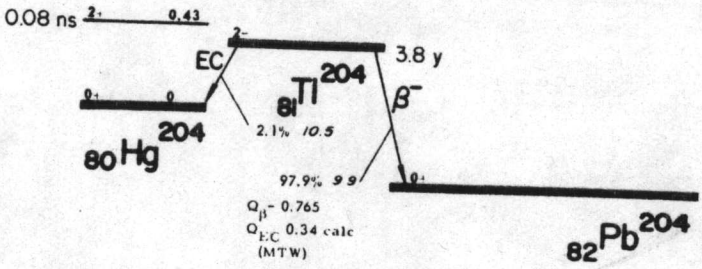


รูปที่ ๒.๖[๔] แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพิสัยของอนุภาคเบต้ากับพลังงานสูงสุด (ไม่รวมอากาศ)



รูปที่ ๒.๗[๘] แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพิสัยของอนุภาคเบต้าในอากาศ 15 °c กับพลังงานสูงสุด





รูปที่ ๒.๘[๑๕] แผนภูมิแสดงการสลายตัวของคลอรีน-๓๖ และทัลเลี่ยม-๒๐๔