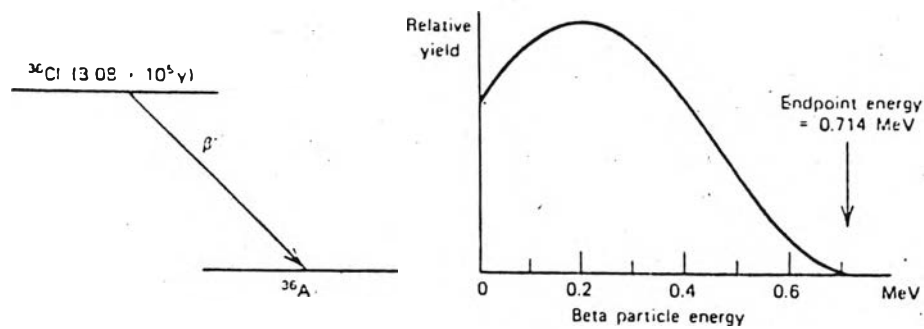


ผลของการสลายตัวให้อนุภาคเบตาก็คือ เกิดนิวเคลียสใหม่ที่มีเลขอะตอมเพิ่มขึ้น 1 มีเลขมวลคงเดิม และมีพลังงานก่อกอง (recoil energy) ต่ำมาก ดังนั้น ค่า Q (Q-Value) ของการสลายตัวทั้งหมดจึงเป็นพลังงานจลน์ของอนุภาคเบตาและแอนตินิวตริโนรวมกัน แต่ในการสลายตัวแต่ละครั้ง อนุภาคทั้งสองจะมีพลังงานจลน์แตกต่างกันไป (แต่มีพลังงานจลน์รวมเท่ากับ ค่า Q เสมอ) จึงเป็นผลให้รังสีเบตามีพลังงานแบบต่อเนื่องตั้งแต่ 0 ถึงค่า Q ดังตัวอย่างสเปกตรัมของคลอรีน-36 ในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างแผนผังการสลายตัวและสเปกตรัมรังสีเบตาของคลอรีน-36 (4)

เมื่ออนุภาคเบตาเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางจะสูญเสียพลังงานส่วนใหญ่ไปจากการเกิดอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนของตัวกลาง ทำให้พลังงานลดลงอย่างและทิศทางการเคลื่อนที่เปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ อนุภาคเบตาอาจชนกับนิวเคลียสของอะตอม เป็นผลให้ทิศทางการเคลื่อนที่เปลี่ยนแปลงไป แต่จะสูญเสียพลังงานไปในการชนแต่ละครั้งเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการชนกับอิเล็กตรอนของอะตอม

การชนของอนุภาคเบตากับอิเล็กตรอนของอะตอม ทำให้อิเล็กตรอนสูญเสียพลังงานไปในรูปแบบการเกิด 2 กระบวนการ คือ กระบวนการเกิดคือไอออไนเซชัน (ionization) และ การเกิด

รังสีเอกซ์ต่อเนื่อง (Continuous x-ray) หรือเบรมส์สตราห์ลุง (bremsstrahlung)

ถ้าให้ $(dE/dX)_{\text{coll}}$ เป็นสัดต่อปึงเพาเวอร์เชิงเส้นรวม (total stopping power)

ของอนุภาคเบตา

$(dE/dX)_{\text{coll}}$ เป็นสัดต่อปึงเพาเวอร์เชิงเส้น เนื่องมาจากกระบวนการชน (collision)

แล้วเกิดอไอเนเซชันและเอกไซเคชัน

$(dE/dX)_{\text{rad}}$ เป็นสัดต่อปึงเพาเวอร์เชิงเส้น เนื่องมาจากกระบวนการเกิดรังสีเอกซ์

ต่อเนื่องหรือ เบรมส์สตราห์ลุง

$$\text{จะได้ } (dE/dX)_{\text{total}} = (dE/dX)_{\text{coll}} + (dE/dX)_{\text{rad}} \quad (2.1)$$

ค่าสัดต่อปึงเพาเวอร์เชิงเส้น หมายถึง อัตราการสูญเสียพลังงานต่อระยะของซึ่งเรียกว่า "การสูญเสียพลังงานจำเพาะ (specific energy loss)" สำหรับอนุภาคเบตาหรืออิเล็กตรอน พลังงานสูง Bethe ได้ให้สมการคำนวณการสูญเสียพลังงานจำเพาะของกระบวนการเกิดอไอเนเซชัน-เอกไซเคชัน และกระบวนการเกิดรังสีเอกซ์ต่อเนื่องไว้ดังนี้

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{coll}} = \frac{2\pi e^4 NZ}{m_0 v^2} \left[\ln \frac{m_0 v^2 E}{2I^2(1-\beta^2)} - \ln 2(2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2) + (1-\beta^2) + \frac{1}{8}(1-\sqrt{1-\beta^2})^2 \right] \quad (2.2)$$

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{rad}} = \frac{NEZ(Z+1)e^4}{137m_0^2c^4} \left(4 \ln \frac{2E}{m_0c^2} - \frac{4}{3} \right) \quad (2.3)$$

เมื่อ v = เป็นความเร็วของอนุภาคเบตา

e = เป็นประจุของอิเล็กตรอน

m_0 = เป็นมวลพัก (rest mass) ของอิเล็กตรอน

c = เป็นความเร็วของแสงในสุญญากาศ

$\beta = v/c$

N = เป็นความหนาแน่นอะตอมของตัวกลาง

Z = เป็นเลขอะตอมของตัวกลาง

E = เป็นพลังงานของอนุภาคเบตา

I = เป็นค่าเฉลี่ยของ Excitation and Ionization Potential
ของตัวกลาง

อัตราส่วนการสูญเสียพลังงานต่อระยะทางของรังสีเบตา จากสองกระบวนการข้างต้น
สามารถประมาณได้จาก

$$\frac{(dE/dx)_{\text{rad}}}{(dE/dx)_{\text{col}}} = \frac{EZ}{700} \quad (2.4)$$

เมื่อ E เป็นพลังงานของอนุภาคเบตาในหน่วย MeV

เมื่อรังสีเบตาเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง ความเข้มรังสีที่ตัวกลางความหนาแน่นค่าหนึ่ง ๆ จะลดลงแบบ
เอกซ์โพเนนเชียล (exponential) เช่นเดียวกับรังสีแกมมา (แต่มีหลักการทางทฤษฎีต่างกัน) ถ้าให้
 I_0 และ $I_{(x)}$ เป็นความเข้มรังสีเบตา ก่อนและหลังผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นเท่ากับ x จะได้

$$I_{(x)} = I_0 e^{-(\mu/\rho)(\rho x)} \quad (2.5)$$

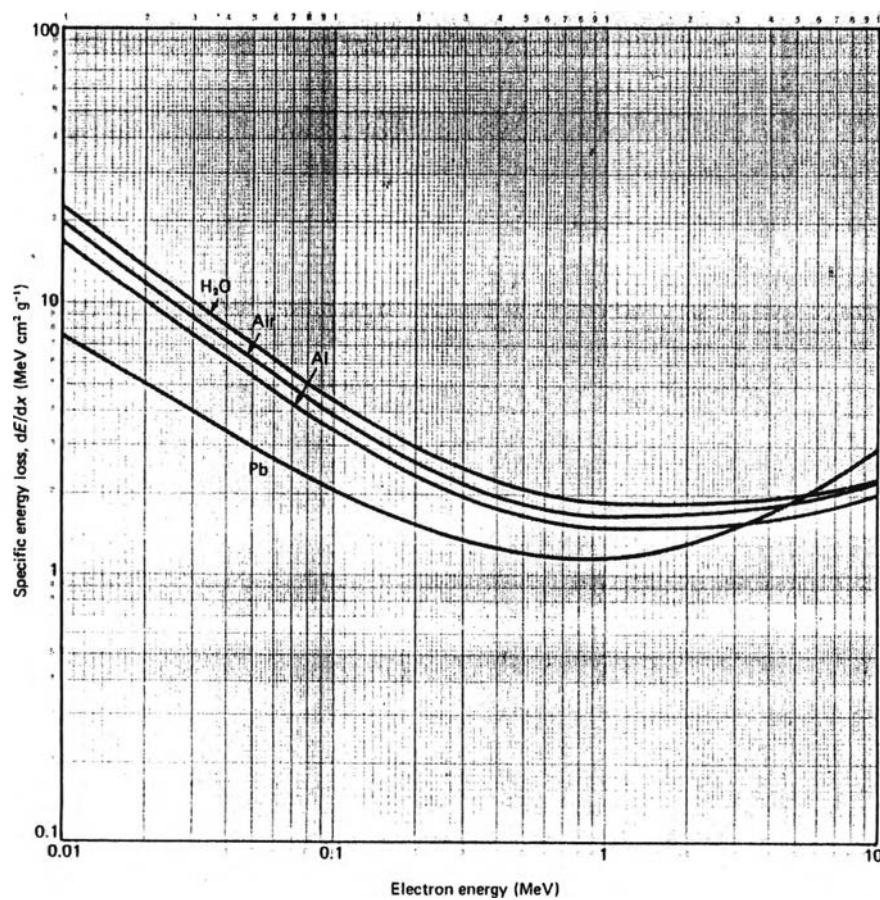
เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นเบตาตัวกลาง

μ/ρ คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (mass attenuation
coefficient) ของตัวกลาง

ตารางที่ 2.1 ค่าเฉลี่ยของ Excitation and Ionization Potential

ของตัวกลางบางชนิด(6)

Material	I (eV)	Material	I (eV)
C	78	Ag	469*
N	85	Au	771*
O	89	Pb	773
Mg	156	U	839*
Al	160*	H ₂ O	65.1
Cr	258*	CO ₂	85.9
Mn	273*	NaI	433
Fe	281*	Lucite	65.6
Ni	303*	Methane	44.6
Cu	321*	Muscle	66.2
Zn	323*	Air	86.8



รูปที่ 2.2 การสูญเสียพลังงานจำเพาะของอนุภาคเบตาและอิเล็กตรอนที่พลังงานต่าง ๆ (7)

ค่า μ/p มีผลต่อน้ำหนักอะตอมของตัวกลางน้อยมากและมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามเลขอะตอมของตัวกลาง จากการทดลองโดยใช้อะลูมิเนียม ค่า μ/p สามารถหาได้จาก

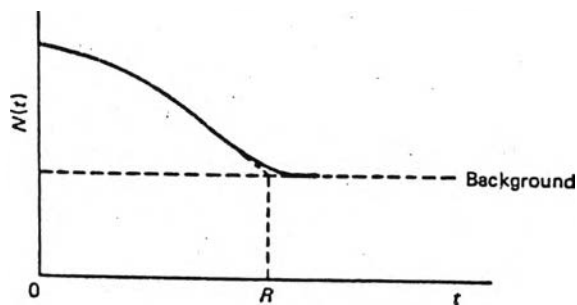
$$\mu/p = 17E^{-1.14} \quad (2.6)$$

เมื่อ E_{max} คือพลังงานสูงสุดของรังสีเบตาในหน่วย MeV และ μ/p มีหน่วยเป็น ตารางเซนติเมตรต่อกรัม

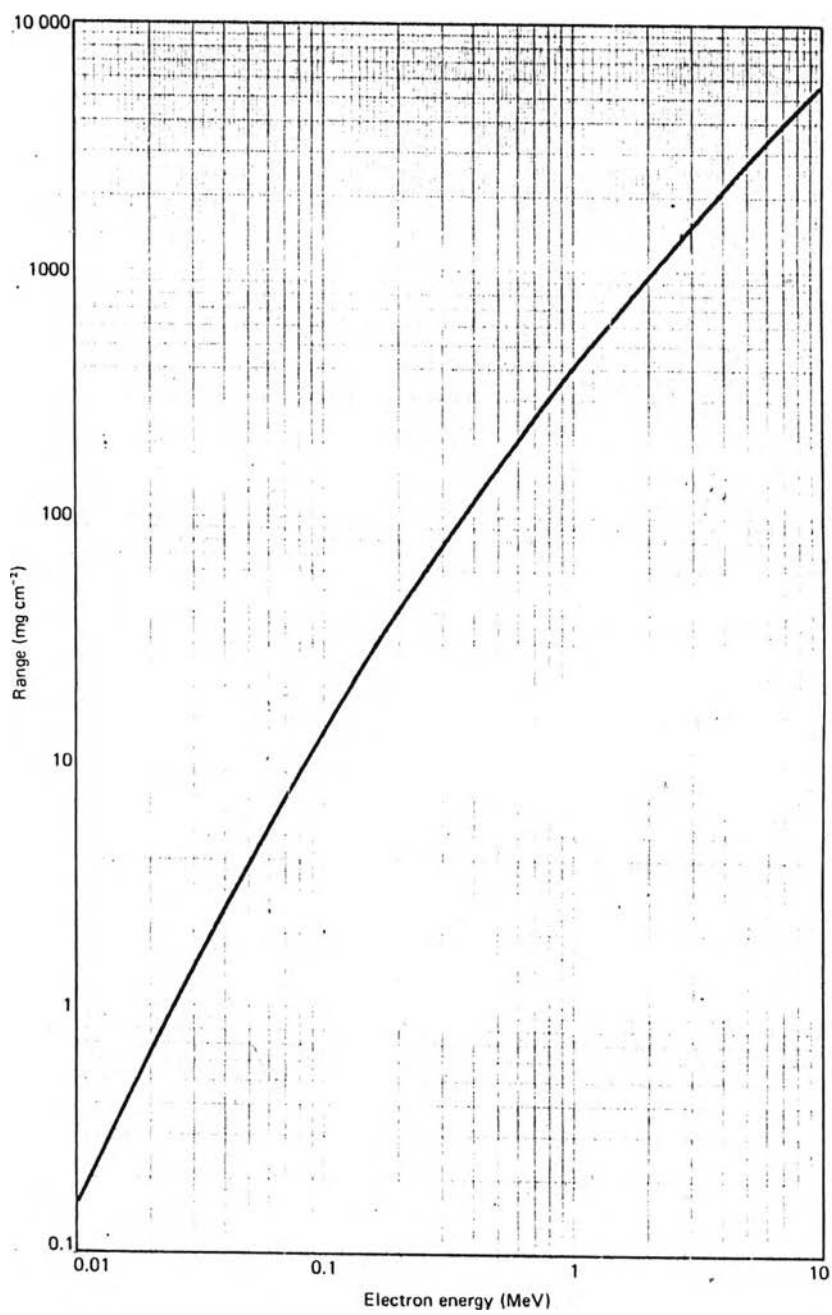
เมื่อความหนาของตัวกลางเพิ่มขึ้นจนถึงค่าหนึ่งรังสีเบตาจะถูกดูดกลืนหมด ระยะทางไกลสุดที่รังสีเบตาสามารถเคลื่อนที่ไปได้ในตัวกลาง เรียกว่า "พิสัยสูงสุด (maximum range, R_{max})" สามารถคำนวณได้จากสูตรต่อไปนี้

สำหรับรังสีเบตาที่มีพลังงานสูงสุด (E_{max}) น้อยกว่า 2.5 MeV

$$R_{max} \text{ (cm)} = 0.412 E_{max}^{(1.265 - 0.0954 \ln E_{max})} \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.3 กราฟแสดงการลดทอนความเข้มของรังสีเบตาเมื่อผ่านตัวกลางความหนาต่าง ๆ (6)



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างพิสัยสูงสุดของรังสีเบตาและอิเล็กตรอนกับพลังงาน ในวัสดุ
ทุกชนิด (ยกเว้นไฮโดรเจนกับฮาตุหนัก) (7)

สำหรับรังสีเบตาที่มีพลังงานสูงสุดมากกว่า 2.5 MeV

$$R_{\max} \mu = 0.530 E_{\max} - 0.016 \quad (2.8)$$

เมื่อ $R_{\max} \mu$ มีหน่วยเป็น กรัมต่อตารางเซนติเมตร และ E_{\max} มีหน่วยเป็น MeV

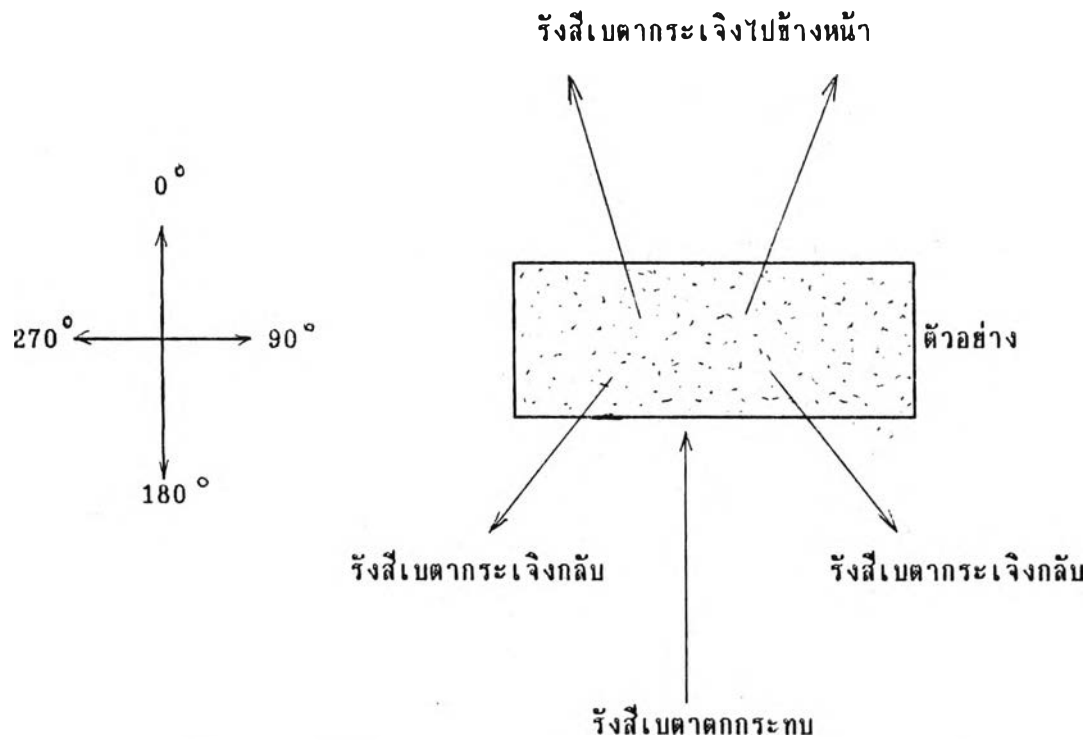
ตามมาตรฐานของ International Organization for Standardization

ISO/DIS6980 พลังงานสูงสุดของรังสีเบตาสามารถคำนวณได้จาก พิสัยสูงสุดโดยใช้ความสัมพันธ์ต่อไปนี้ (8)

$$E_{\max} = \{[(9.1R_{\max} + 1)^2 - 11/22.4]\}^{1/2} \quad (2.9)$$

2.2 เทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีเบตา

เมื่ออนุภาควิ่งผ่านตัวกลางอาจชนกับอิเล็กตรอน หรือนิวเคลียสของอะตอมแล้วทำให้อนุภาคเบตากระเจิงออกไปหรือเปลี่ยนทิศทางไปจากแนวเดิม เลขอะตอมของตัวกลางมีผลน้อยมากต่อการชนของอนุภาคเบตากับอิเล็กตรอน แต่มีผลมากเมื่ออนุภาคเบตาชนกับนิวเคลียส การกระเจิงกลับของรังสีเบตาหมายถึงการที่รังสีเบตาตกกระทบวัตถุแล้ว ทำให้อ่อนรังสีเบตาวิ่งกระเจิงออกมาเปลี่ยนทิศทางไปจากแนวเดิมเป็นมุมระหว่าง 90 องศาถึง 270 องศา



รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงการกระเจิงของรังสีเบตา

ความเข้มของรังสีเบตากระเจิงกลับขึ้นอยู่กับปัจจัย 3 ประการ คือ

- ก. ความหนาของตัวอย่าง
- ข. เลขอะตอมของตัวอย่าง
- ค. พลังงานของรังสีเบตา

สำหรับตัวอย่างชนิดหนึ่ง และต้นกำเนิดรังสีเบตาชนิดหนึ่ง ถ้าให้

I_m = ความเข้มของรังสีเบตากระเจิงกลับที่ความหนาใด ๆ

I_∞ = ความเข้มสูงสุดของรังสีเบตากระเจิงกลับ เมื่อความหนาตัวอย่างมีค่าอนันต์

μ = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของรังสีเบตาตกกระทบ

λ = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของรังสีเบตากระเจิงกลับ

m = ความหนาของตัวอย่าง

จะได้

$$I_m = I_{\infty} [1 - e^{-(\mu + \lambda)m}] \quad (2.10)$$

จากสมการ (2.10) แสดงให้เห็นว่า เมื่อความหนาตัวอย่างเพิ่มขึ้น ความเข้มของรังสีเบตากระเจิงกลับจะเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงจุดอิ่มตัว ต่อจากนั้นจะมีค่าคงที่ (ดังรูปที่ 2.6) ถ้าให้ $m_{1/2}$ เป็น half-thickness ของการทะลุผ่านของรังสีเบตา และ m มีค่าใกล้เคียงหรือมากกว่า $m_{1/2}$ แล้วจะเขียน empirical formular ได้ดังนี้

ตารางที่ 2.2 ต้นกำเนิดรังสีเบตาบางชนิดที่ใช้สำหรับเทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีเบตา(9)

Isotope	Half-life (yr)	Maximum beta energy (MeV)	Half-thickness (mg/cm ²)	Maximum available specific activity for beta sources
⁹⁰ Sr + ⁹⁰ Y	29	2.25	120	25 Ci/g of solids
⁸⁵ Kr	10.6	0.67 ^a	25	30-70 mCi/ml
²⁰⁴ Tl	3.9	0.77 ^b	25	1 Ci/g of Tl
¹⁴⁷ Pm	2.6	0.22	4.5	100 Ci/g of solids
¹⁴ C	5730	0.155	2.7	2.75 Ci/g of C

^a Also emits 520-keV gamma rays (0.43%).

^b Also emits 70-keV X-rays (25%).

$$I_m = I_{\infty} [1 - e^{-2m/m_{1/2}}] \quad (2.11)$$

ถ้าให้ I_m มีค่าประมาณ 95% ของ I_{∞} จะได้

$$\text{ดังนั้น} \quad m = 1.5 m_{1/2} \quad (2.12)$$

สำหรับต้นกำเนิดรังสีสตรอนเชียม-90/อิตเทรียม-90 จากตารางที่ 2.2 ได้ค่า

$m_{1/2} = 120$ มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ดังนั้นที่ความหนา $1.5 \times 120 = 180$ มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร จะให้ความเข้มของรังสีเบตากระเจิงกลับเท่ากับ 95 % ของความเข้มรังสีเบตาสูงสุด (ที่ตัวอย่างมีความหนานั้น)

ความเข้มสูงสุดของรังสีเบตากระเจิงกลับ (I_{∞}) ขึ้นอยู่กับเลขอะตอม (Z) ตาม Tittle's formular(1)ดังนี้

$$G = 1 - e^{-Z/40} \quad (2.13)$$

เมื่อ

G = ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับสูงสุด (saturation backscatter coefficient) ของรังสีเบตา

Z = เลขอะตอมของตัวอย่าง

กรณีที่ตัวอย่างประกอบด้วยธาตุมากกว่า 1 ธาตุสามารถคำนวณเลขอะตอมเฉลี่ยได้จาก (6)

$$Z_{ef} = \frac{\sum_{i=1}^L (w_i/A_i) Z_i^2}{\sum_{i=1}^L (w_i/A_i) Z_i} \quad (2.14)$$

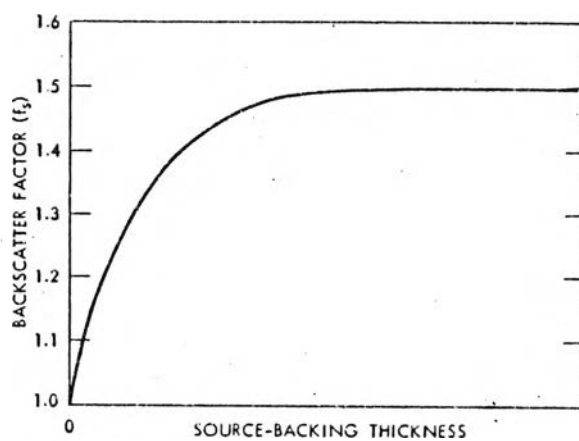
เมื่อ Z_{eff} = เลขอะตอมประสิทธิผล (effective atomic number)

w_i = สัดส่วนโดยน้ำหนัก (weight fraction)

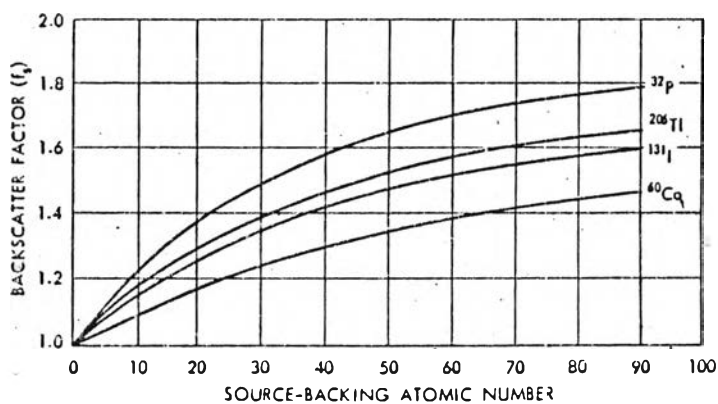
Z_i = เลขอะตอมของ

A_i = น้ำหนักอะตอม

n = จำนวนธาตุ



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มของรังสีเบตากระเจิงกลับกับความหนาของตัวอย่าง (5)



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มสูงสุดของรังสีเบตากระเจิงกลับเลขอะตอม (5)

การกระเจิงกลับของรังสีเบตาสูงขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีเบตา การกระเจิงกลับของรังสีเบตาพลังงานสูงจะมากกว่ารังสีเบตาพลังงานต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.7

เลขอะตอมนอกจากจะมีผลต่อความเข้มของรังสีเบตากระเจิงกลับแล้ว ยังมีผลต่อการเลื่อน (shift) ของสเปกตรัมพลังงานของรังสีเบตาด้วย (ดังรูปที่ 2.8) กล่าวคือ สเปกตรัมพลังงานของรังสีเบตากระเจิงกลับจากธาตุที่มีเลขอะตอมสูง จะมีพลังงานเฉลี่ยสูงกว่าธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำ เพราะฉะนั้น ถ้าเลือกวัดรังสีในช่วงสเปกตรัมพลังงานที่เหมาะสม หรือใช้แผ่นกรองรังสี จะทำให้ความไวในการวัดเพิ่มขึ้น (2)

ตารางที่ 2.3 ค่า saturation backscatter coefficient (G) สำหรับธาตุที่มี

เลขอะตอม 1-100 (คำนวณจาก Tittle's formular) (2)

Atomic No. (Z)	saturation backscatter coefficient, G	atomic No. (Z)	saturation backscatter coefficient, G
1	0.024690	8	0.181269
2	0.048771	9	0.201484
3	0.072257	10	0.221199
4	0.095163	11	0.240428
5	0.117503	12	0.259182
6	0.139292	13	0.277473
7	0.160543	14	0.295312

ตารางที่ 2.3 (ต่อ)

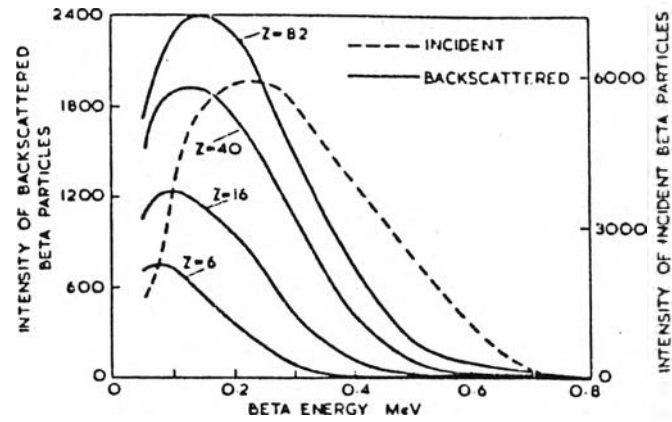
Atomic No. (Z)	saturation backscatter coefficient, G	atomic No. (Z)	saturation backscatter coefficient, G
15	0.312711	32	0.550671
16	0.329680	33	0.561785
17	0.346230	34	0.572585
18	0.362372	35	0.583138
19	0.378115	36	0.593430
20	0.393469	37	0.603469
21	0.408445	38	0.613259
22	0.423050	39	0.622808
23	0.437295	40	0.632121
24	0.451188	41	0.641204
25	0.464739	42	0.650062
26	0.477954	43	0.658702
27	0.490844	44	0.667129
28	0.503415	45	0.675348
29	0.515675	46	0.683363
30	0.527633	47	0.691181
31	0.539296	48	0.698806

ตารางที่ 2.3 (ต่อ)

Atomic No. (Z)	saturation backscatter coefficient, G	atomic No. (Z)	saturation backscatter coefficient, G
49	0.706242	65	0.803088
50	0.713495	66	0.807950
51	0.720569	67	0.812692
52	0.727468	68	0.817316
53	0.734197	69	0.821827
54	0.740760	70	0.826226
55	0.747160	71	0.830517
56	0.753403	72	0.834701
57	0.759492	73	0.838782
58	0.765430	74	0.842763
59	0.771221	75	0.846645
60	0.776870	76	0.850431
61	0.782379	77	0.854124
62	0.787752	78	0.857726
63	0.792992	79	0.861239
64	0.798103	80	0.864665

ตารางที่ 2.3 (ต่า)

Atomic No. (Z)	saturation backscatter coefficient, G	atomic No. (Z)	saturation backscatter coefficient, G
81	0.868006	91	0.897203
82	0.871265	92	0.899741
83	0.874444	93	0.902217
84	0.877544	94	0.904631
85	0.880567	95	0.906986
86	0.883516	96	0.909282
87	0.886392	97	0.911522
88	0.889197	98	0.913706
89	0.891933	99	0.915837
90	0.897601	100	0.917915



รูปที่ 2.8 อิทธิพลของเลขอะตอมต่อการเคลื่อนของสเปกตรัมพลังงานของรังสีเบตากระเจิงกลับ
(ต้นกำเนิดรังสี Tl-204) (9)