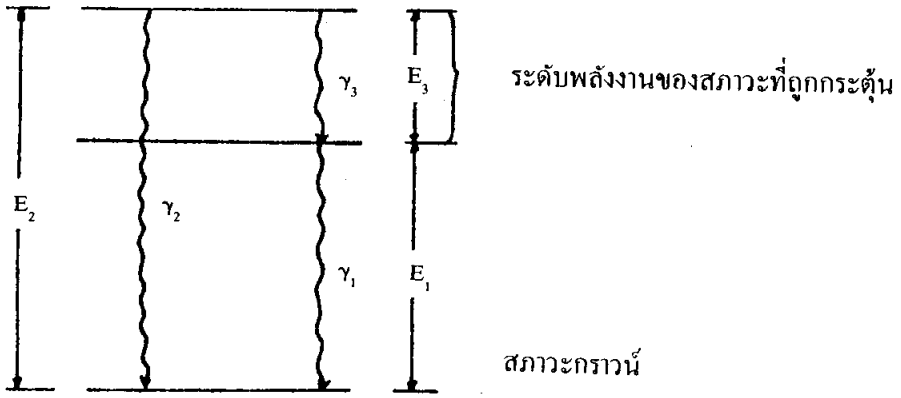
บทที่ 8
รังสีแกมมาและการสลายโดยการส่งรังสีแกมมา
GAMMA – RAYS AND GAMMA – DECAY

วัตถุประสงค์

เมื่อศึกษาบทนี้แล้วจะสามารถ

1. อธิบายคุณสมบัติของรังสีแกมมา และสามารถจัดเครื่องมือแบบต่าง ๆ ได้
2. สามารถเลือกวัตถุที่เหมาะสมที่จะนำมากั้นรังสีที่มีความเข้มต่าง ๆ กันได้
3. คำนวณหาความหนาของวัตถุที่จะนำมากั้นรังสีแกมมาได้
4. อธิบายปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเมื่อรังสีแกมมากระทบสารได้

รังสีแกมมา เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์ (nuclear transitions) พลังงานของรังสีแกมมามีลักษณะเป็นโฟตอน มีพลังงานสูง เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานในนิวเคลียส ดังรูปที่ 8.1 เป็นการส่งโฟตอนพลังงาน E_1 และ E_2 ในการเปลี่ยนแปลงจากสภาวะที่ถูกกระตุ้นต่าง ๆ มายังสภาวะกราวน์



รูปที่ 8.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงระหว่างระดับพลังงานต่างกัน 2 ระดับ ในนิวเคลียส

ตามสมการของแพลงค์

$$E = h\nu = \frac{hC}{\lambda}$$

เมื่อ h เป็นค่าคงที่ของแพลงค์ มีค่าเท่ากับ 6.62×10^{-34} จูล-วินาที และ

ν เป็นความถี่ของคลื่นรังสี (radiation frequency) (วินาที$^{-1}$)

λ คือความยาวคลื่น (ม.)

C เป็นความเร็วของแสง (เท่ากับ 3×10^{8} ม./วินาที) พลังงานที่ได้ออกมามีหน่วยเป็นจูล

ถ้า E มีหน่วยเป็น เอมอีวี จะได้ว่า

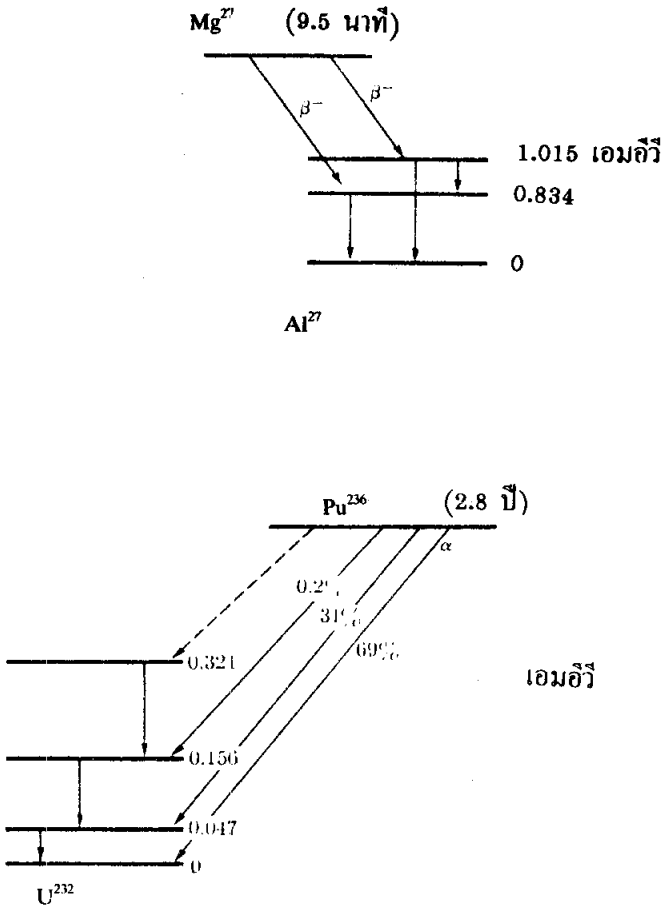
$$\lambda = \frac{1.25\times10^{-12}}{E}$$

λ มีหน่วยเป็น เมตร

รังสีแกมมาพลังงาน 1 เอมอีวี คือรังสีที่ประกอบด้วยโฟตอนพลังงาน 1 เอมอีวี พลังงานที่ถูกกระตุ้นทางนิวเคลียร์ (Nuclear excitation energy) มักมีขนาดอยู่ในช่วง 0.1 จนถึง 10 เอมอีวี ดังนั้นรังสีแกมมาที่ส่งออกมา จึงมีขนาดต่าง ๆ กัน ความยาวช่วงคลื่นของรังสี มีขนาดตั้งแต่ 10^{-11} จนถึง 10^{-13} เมตร บางทีโอกาสที่จะส่งรังสีแกมมาออกมามีน้อย เป็นสภาวะที่ไม่สามารถจะเปลี่ยนระดับพลังงานจากสภาวะหนึ่งไปเป็นอีกสภาวะหนึ่ง เรียกแถบต้องห้าม (forbidden band)

นิวคลีไอที่มีเลขมวลต่ำ สภาวะที่ถูกกระตุ้นระดับแรก จะมีพลังงานสูงกว่าสภาวะกราวน์ประมาณ 1 เอมอีวี สำหรับนิวคลีไอที่มีเลขมวลสูงขึ้น พลังงานที่ถูกกระตุ้น อย่างต่ำมีค่าน้อยกว่า 1 เอมอีวี นิวคลีไอที่หนักที่สุด สภาวะที่ถูกกระตุ้นสภาวะแรก มีพลังงานสูงกว่าสภาวะกราวน์เพียง 0.1 เอมอีวี มีข้อยกเว้นสำหรับนิวคลีไอที่มีตัวเลขแมจิก เช่น Bi^{209} ซึ่งมีนิวตรอนในนิวเคลียส 126 ตัว จะทำตัวเหมือนกับธาตุเบา โดยมีพลังงานต่างกันระหว่างระดับมีขนาดเพียง 1 เอมอีวี

เนื่องจากรังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และไม่มีประจุ จึงไม่สามารถจะวัดได้โดยการเบนในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า รังสีแกมมามีอำนาจทะลุทะลวงสูง จึงมักวัดพลังงานโดยให้รังสีแกมมาผ่านสาร



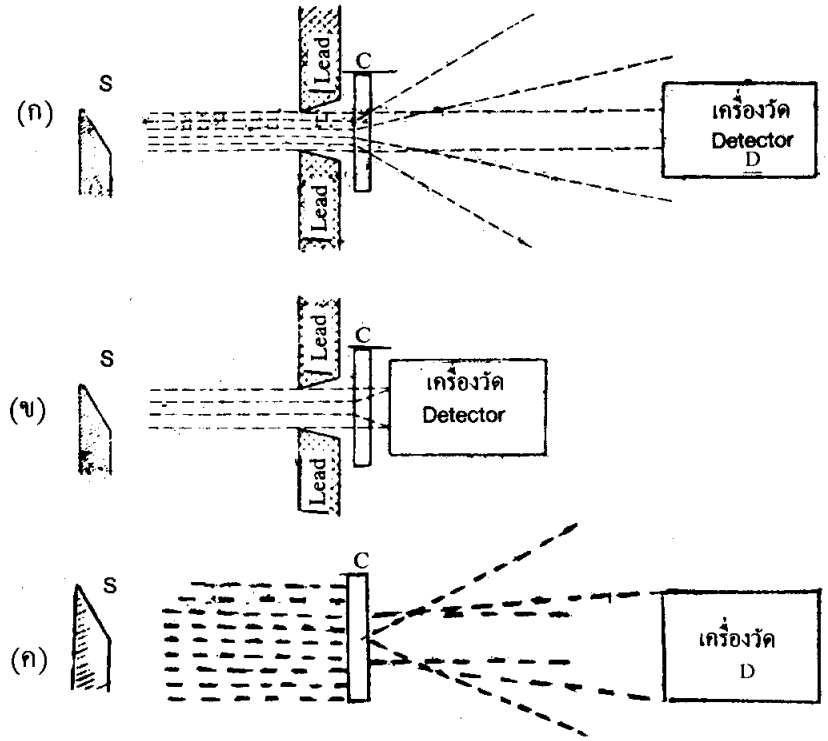
รูปที่ 8.2 แสดงระดับพลังงานและรูปแบบของการสลาย โดยการส่งรังสีแกมมา จากการกระตุ้นให้พลังงานสูงกว่าระดับต่ำสุด เพียงชั่วเวลาเพียงเล็กน้อย

8.1 การดูดกลืนโฟตอน

(Attenuation of gamma rays photon)

รังสีเอกซ์ หรือรังสีแกมมา เมื่อผ่านสาร บางส่วนจะถูกดูดกลืน บางส่วนก็ผ่านออกมาได้โดยไม่มีการกระทำปฏิกิริยา การกระเจิงจะเกิดโฟตอนใหม่วิ่งออกมาในทิศทางต่าง ๆ กัน

จากทิศทางของโฟตอนเดิม ในการศึกษาการดูดกลืนโฟตอน ควรจะทราบถึงการจัดเครื่องมือที่จะใช้ในการทดลอง ดังรูปที่ 8.3



รูปที่ 8.3 แสดงการจัดเครื่องมือที่ใช้ในการดูดกลืนโฟตอน

ตัวกำเนิดโฟตอน S ส่งอนุภาคผ่านตะกั่ว เกิดลำแสงแคบ ๆ (narrow beam) ผ่านไปยังตัวดูดกลืน C และเครื่องมือที่ใช้วัด D การจัดตามรูป (8.3 ก) เรียก **การจัดโดยมีลักษณะทางเรขาคณิตที่ดี** (good geometry) เพราะส่วนที่กระเจิงออกไป จะไม่เข้าเครื่องวัด จึงใช้ในการวัดจำนวนโฟตอนที่หายไปจากลำแสง หรือเป็น**การดูดกลืนทั้งหมด** (total absorption) รูปที่ (8.3 ข) เป็นการจัดที่เรียก **ลักษณะทางเรขาคณิตที่ไม่สมบูรณ์** (poor geometry) จำนวนที่วัดได้ จะรวมจำนวนโฟตอนที่กระเจิงออกมาด้วย มักใช้ในการวัดพลังงานที่หายไปในตัวดูดกลืน เรียก **การดูดกลืนที่แท้จริง** (true absorption)

บางทีการดูดกลืน จะวัดโดยใช้ลำแสงที่ผ่านเข้ามาทั้งหมด (broad beam) **รูปที่** 8.3 (ค) เป็นการจัดโดยมีลักษณะทางเรขาคณิตที่ดี แต่เครื่องวัดจะวัดรังสีโฟตอนที่กระเจิงออกมาด้วย **ซึ่งจะวัดไม่ได้เมื่อใช้ลำแสงแคบ ๆ การวัดความเข้มของโฟตอนโดยวิธีนี้ จึงได้ค่ามากกว่าการวัดโดยจัดแบบให้ลำแสงแคบ ๆ ผ่านตัวดูดกลืน ค่านเตกต่างนี้ เรียก แฟกเตอร์ที่สร้างขึ้น** (build up factor) **เป็นค่าที่ขึ้นกับขนาดของลำแสง, พลังงานของโฟตอน, การจัดเครื่องมือ และคุณสมบัติของตัวดูดกลืน**

8.2 การดูดกลืนรังสีแกมมาเมื่อผ่านสาร

(The absorption of gamma−rays by matter)

การดูดกลืนรังสีแกมมาเมื่อลำแสงผ่านสาร ทำให้ความเข้มของรังสีลดลง

กำหนดให้ลำรังสีแกมมาความเข้ม I ตกกระทบบนแผ่นที่มีความหนา x

ความเข้มของลำแสงเปลี่ยนแปลง เป็นสัดส่วนกับความหนา, ความเข้มของลำแสง และคุณสมบัติของสารที่จะดูดกลืนรังสีที่พลังงานนั้น เขียนได้ว่า

$$
\begin{aligned}
-dI &\ \alpha\ I \\
&\ \alpha\ dx \\
dI &= -\mu I\, dx \qquad \ldots (8.1)
\end{aligned}
$$

μ **เรียก สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืน**

ขึ้นกับค่าพลังงานของลำแสง และชนิดของตัวดูดกลืน มีหน่วยเป็นเซนติเมตร$^{-1}$

โดยการอินทิเกรตสมการ (8.1) จะได้

$$
\left.\ln I\right]_{I=I_0}^{I=I} = \left.-\mu x\right]_{x=0}^{x=x}
$$

$$
I = I_0 e^{-\mu x} \qquad \ldots (8.2)
$$

สมการ (8.2) **ได้ค่า** I **เป็นค่าความเข้มที่ผ่านออกมาจากตัวดูดกลืน ความหนา** x, เมื่อ I_0 เป็นความเข้มเดิม

ถ้า $\varnothing$ เป็นจำนวนโฟตอน ต่อ 1 หน่วยพื้นที่ ต่อ 1 หน่วยเวลา

$h\nu$ เป็นพลังงานต่อ 1 โฟตอน จะเขียนได้ว่า

$$I_0 = \varnothing h\nu \quad \ldots (8.3)$$

I_0 ในสมการ (8.3) มีหน่วยเป็นเอมอีวี ต่อเซนติเมตร^2 ต่อวินาที มักเรียก $\varnothing$ ว่าเป็นฟลักซ์แกมมา มีหน่วยเป็นจำนวนโฟตอน ต่อ เซนติเมตร^2 ต่อวินาที

$h\nu$ คือพลังงาน (E) นั่นคือ

$$I_0 = \varnothing E \quad \ldots (8.4)$$

เมื่อ E มีหน่วยเป็น เอมอีวีต่อโฟตอน

ถ้า A เป็นพื้นที่ของตัวดูดกลืน มีหน่วยเป็น เซนติเมตร^2

พลังงานของรังสีแกมมาที่ได้รับก่อนผ่านตัวดูดกลืน = $\varnothing$ EA เอมอีวีต่อวินาที

สมการการดูดกลืน มีลักษณะเช่นเดียวกับการดูดกลืนรังสีเอกซ์ เพราะเป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเช่นเดียวกัน แต่จะต่างกันที่ต้นกำเนิด รังสีแกมมาเกิดจากนิวเคลียส ส่วนรังสีเอกซ์เกิดจากการกระโดดของอิเล็กตรอนที่อยู่รอบนิวเคลียสของอะตอม หรืออาจเกิดจาก ต้นกำเนิดที่ประดิษฐ์ขึ้น เช่นจากหลอดคูลิดจ์ พลังงานต่ำกว่าพลังงานของรังสีแกมมามาก

จากสมการ (8.2) μ เป็นค่า**สัมประสิทธิ์การดูดกลืนทั้งหมด** (total attenuation coefficient) เนื่องจากการกระเจิงคือ โฟโตอิเล็กตริกเอฟเฟค (photoelectric effect), คอมป์ตันเอฟเฟค (Compton effect), แพร์ โพรดักชัน (pair production)

สมการ (8.2) เป็นสมการที่ใช้หาความเข้มของโฟตอน ที่ผ่านออกมาเข้าเครื่องวัด โดยจัดแบบให้ลำแสงแคบ ๆ ผ่านตัวดูดกลืน (narrow collimated beam) ถ้าไม่มีการกระเจิงของโฟตอน ก็จะใช้ลำแสงทั้งหมดผ่านตัวดูดกลืน (broad collimated beam) ค่า μ จะแทนค่าสัมประสิทธิ์สำหรับการดูดกลืนเท่านั้น

8.3 ความหนาครึ่งชั้น

(Half value thickness.)

ความหนาที่ทำให้ความเข้มของลำแสงที่ผ่านออกมาลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของความเข้มของลำแสงเดิม เรียก ความหนาครึ่งชั้น $x_{1/2}$ หรืออาจเรียก half value layer โดยใช้สมการ (8.2)

เมื่อ $I = \frac{I_0}{2}$, $x = x_{1/2}$

$$\frac{I_0}{2} = I_0 e^{-\mu x_{1/2}}$$

$$x_{1/2} = \frac{0.693}{\mu} \quad \ldots (8.5)$$

8.4 ค่าความหนาที่สิบ
(Tenth value thickness)

คือ **ความหนาที่ทำให้ความเข้มของลำแสงที่ผ่านออกมาลดลงจนเหลือเพียง 1/10 ของความเข้มเดิม**

โดยใช้สมการ (8.2) เช่นกัน เมื่อ $I = I_0/10$, $x = x_{1/10}$ จะได้

$$x_{1/10} = \frac{2.3}{\mu} \qquad \ldots (8.6)$$

อาจให้ความหมายของ μ ว่า เป็นส่วนของลำแสงตกกระทบที่หายไปโดยตัวดูดกลืนที่มีความหนา 1 หน่วย

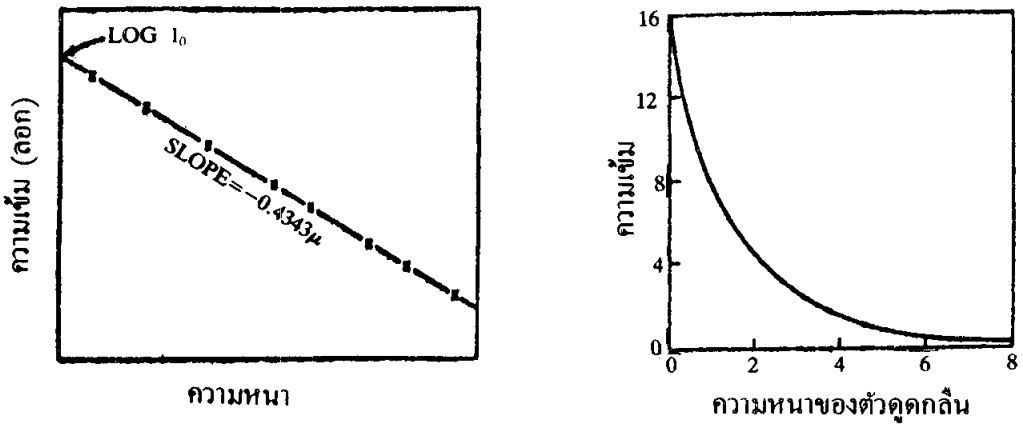
ถ้ากำหนดให้ทางเดินเฉลี่ย (mean free path) คือระยะทางเฉลี่ยที่โฟตอนเคลื่อนที่ไปจนกระทั่งถูกดูดกลืน

$$\text{ทางเดินเฉลี่ย} = \frac{1}{\mu} \quad \text{ซม.} \qquad \ldots (8.7)$$

8.5 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนโดยวิธีกราฟ
(Attenuation coefficient)

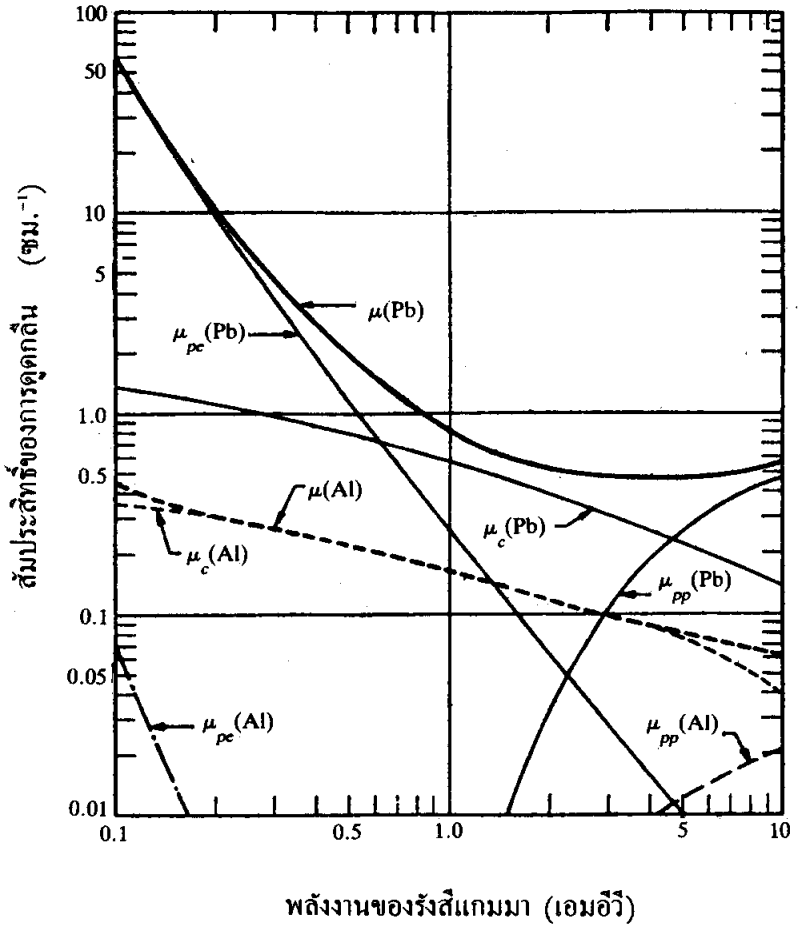
โดยการสร้างกราฟระหว่าง ลอกของความเข้มที่ผ่านออกมา กับความหนา แล้วหาความชัน จะได้

$$\text{ความชัน} = -0.4343\ \mu$$



รูปที่ 8.4 แสดงว่าความเข้มของรังสีแกมมาลดลงเมื่อตัวดูดกลืนมีความหนาเพิ่มขึ้น

ในการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนรังสีแกมมา จะต้องแบ่งพลังงานของรังสีแกมมาออกเป็น 3 ช่วงด้วยกัน ที่บริเวณพลังงานต่ำ ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับการดูดกลืนรังสีแกมมาสำหรับ กิริยาโฟโตอิเล็กตริก (μ_{pe}) มีค่าสูง เมื่อพลังงานสูงขึ้น จะมีคอมป์ตันเอฟเฟค (μ_c) เกิดขึ้น เมื่อพลังงานสูงขึ้นอีกกิริยาส่วนใหญ่จะเป็นแพร์โพรดักชัน (μ_{pp}) ได้แสดงไว้ในรูปที่ 8.5



รูปที่ 8.5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้น (Linear attenuation coefficient) เมื่อรังสีแกมมามีพลังงานต่าง ๆ กัน

ตารางที่ 8.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้น ในหน่วย ซม.$^{-1}$ สำหรับธาตุต่าง ๆ

พลังงาน (เอมอีวี)	น้ำ	คอนกรีต ความหนาแน่น 2.35 กรัม ต่อ ซม.^{3}	อะลูมิเนียม	เหล็ก	ตะกั่ว
0.5	0.0966	0.204	0.227	0.651	1.64
1.0	0.0706	0.149	0.166	0.468	0.776
1.5	0.0575	0.121	0.135	0.381	0.581
2.0	0.0493	0.105	0.117	0.333	0.518
3.0	0.0396	0.0853	0.0953	0.284	0.477
4.0	0.0339	0.0745	0.0837	0.259	0.476
5.0	0.0301	0.0674	0.0761	0.246	0.483
8.0	0.0240	0.0571	0.0651	0.232	0.520
10.0	0.0219	0.0538	0.0618	0.231	0.554

ตารางที่ 8.2
แสดงค่า สัมประสิทธิ์การดูดกลืนที่ขึ้นกับมวล (μ/ρ)
สำหรับธาตุต่าง ๆ ในหน่วย ซม.^{2}/ กรัม

ธาตุ	พลังงานของรังสีแกมมา (เอมอีวี)																
	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0	1.25	1.5	2	3	4	5	6	8	10
H	.295	.265	.243	.212	.189	.173	.160	.140	.126	.113	.103	.0876	.0691	.0579	.0502	.0446	.0371	.0321
Be	.132	.119	.109	.0945	.0847	.0773	.0715	.0628	.0565	.0504	.0459	.0391	.0313	.0266	.0231	.0211	.0180	.0161
C	.139	.134	.122	.106	.0953	.0870	.0805	.0707	.0636	.0568	.0518	.0441	.0356	.0301	.0270	.0245	.0213	.0194
N	.150	.134	.123	.106	.0955	.0869	.0805	.0707	.0636	.0568	.0517	.0445	.0357	.0306	.0273	.0249	.0218	.0200
O	.151	.134	.123	.107	.0953	.0870	.0806	.0708	.0636	.0568	.0518	.0445	.0359	.0309	.0276	.0251	.0221	.0206
Na	.151	.130	.118	.102	.0912	.0833	.0770	.0676	.0608	.0546	.0496	.0427	.0348	.0303	.0271	.0251	.0229	.0215
Mg	.160	.135	.122	.106	.0944	.0860	.0795	.0699	.0627	.0560	.0512	.0442	.0360	.0315	.0286	.0266	.0242	.0228
Al	.161	.134	.120	.103	.0922	.0840	.0777	.0683	.0611	.0548	.0500	.0432	.0353	.0310	.0282	.0264	.0241	.0229
Si	.172	.139	.125	.107	.0954	.0869	.0802	.0706	.0635	.0567	.0517	.0447	.0367	.0323	.0296	.0277	.0251	.0243
P	.171	.137	.122	.104	.0928	.0846	.0780	.0685	.0617	.0551	.0502	.0436	.0358	.0316	.0290	.0273	.0252	.0242
S	.188	.141	.127	.108	.0958	.0874	.0806	.0707	.0635	.0568	.0519	.0448	.0371	.0328	.0302	.0284	.0266	.0255
Ar	.188	.135	.117	.0977	.0867	.0790	.0730	.0638	.0573	.0512	.0468	.0407	.0338	.0301	0.0279	.0266	.0248	.0241
K	.215	.149	.127	.106	.0938	.0852	.0786	.0689	.0618	.0552	.0505	.0438	.0365	.0327	.0305	.0289	.0271	.0267
Ca	.238	.158	.132	.109	.0965	.0876	.0809	.0708	.0634	.0566	.0518	.0451	.0376	.0338	.0316	.0302	.0285	.0280
Fe	.341	.183	.138	.106	.0919	.0828	.0762	.0664	.0595	.0531	.0485	.0424	.0361	.0330	.0313	.0301	.0295	.0291
Cu	.427	.206	.147	.108	.0916	.0820	.0751	.0654	.0585	.0521	.0476	.0418	.0357	.0330	.0316	.0309	.0303	.0305
Mo	1.03	.389	.225	.130	.0998	.0851	.0761	.0648	.0575	.0510	.0467	.0414	.0365	.0339	.0341	.0341	.0339	.0359
Sn	1.58	.563	.303	.153	.109	.0886	.0776	.0647	.0568	.0501	.0459	.0408	.0367	.0355	.0355	.0358	.0368	.0383
I	1.83	.648	.339	.165	.111	.0913	.0792	.0653	.0571	.0502	.0460	.0409	.0370	.0360	.0361	.0365	.0377	.0391
W	4.21	1.41	.708	.293	.171	.125	.101	.0763	.0640	.0544	.0492	.0437	.0405	.0402	.0409	.0418	.0438	.0465
Pt	4.75	1.61	.795	.324	.191	.135	.107	.0800	.0659	0.0554	.0501	.0445	.0414	.0411	.0418	.0427	.0448	.0477
Tl	5.16	1.80	.866	.346	.204	.143	.112	.0824	.0675	.0563	.0508	.0452	.0420	.0416	.0423	.0433	.0451	0.0484
Pb	5.29	1.84	.896	.356	.208	.145	.114	.0836	.0684	.0569	.0512	.0457	.0421	.0420	.0426	.0436	.0459	.0489
U	10.60	2.42	1.17	.452	.259	.176	.136	.0952	.0757	.0615	.0548	.0481	.0445	.0440	.0446	.0455	.0479	.0511
Air	.151	.131	.123	.106	.0953	.0868	.0804	.0706	.0655	.0567	.0517	.0445	.0357	.0307	.0271	.0250	.0220	.0202
NaI	1.57	.568	.305	.155	.111	.0901	.0789	.0657	.0577	.0508	.0465	.0412	.0367	.0351	.0347	.0347	.0351	.0366
H_2O	.167	.119	.136	.118	.106	.0966	.0896	.0786	.0706	.0630	.0575	.0493	.0396	.0339	.0301	.0275	.0240	.0219
Concrete	.169	.139	.121	.107	.0951	.0870	.0801	.0706	.0635	.0567	.0517	.0445	.0363	.0317	.0287	.0268	.0243	.0229
Tissue	.163	.141	.132	.115	.100	.0936	.0867	.0761	.0683	.0600	.0556	.0478	.0384	.0329	.0292	.0267	.0233	.0212

* From L.T. Templin, editor, *Reactor Physics Constants*. ANL-5800, 2nd ed., 1963; based on G.W. Grodstein. National Bureau of Standards Circular 583, 1957.

8.6 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนที่ขึ้นกับมวล μ_m (Mass attenuation coefficient)

มีหน่วยเป็นซม.^{2}/กรัม

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \qquad \ldots (8.8)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของสารที่ใช้ดูดกลืน มีหน่วยเป็น กรัม/ซม.^{3} สมการ (8.2) เขียนใหม่ได้ คือ

$$I = I_o e^{-\mu_m \rho . x} \qquad \ldots (8.9)$$

$\mu_m \rho x$ จะเป็นตัวเลขที่ไม่มีหน่วย

ตัวอย่างที่ 8.1

ตะกั่วหนา 2 นิ้ว ใช้เป็นเครื่องกำบังรังสี (shielding) กำเนิดรังสีแกมมาจากโคบอลต์ -60 มีพลังงาน 1.17 และ 1.33 เอมอีวี จัดแบบให้ลำแสงแคบ ๆ ผ่านตัวดูดกลืน ผ่านเครื่องกำบังรังสีนี้ จงหาส่วนของรังสีที่ผ่านออกมาจากตะกั่วชั้นนี้ กำหนดค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนสำหรับตะกั่วกับรังสีแกมมาที่พลังงาน 1.17 และ 1.33 เอมอีวี มีค่า 0.70 และ 0.62 ซม.$^{-1}$ ตามลำดับ

ในการทำโจทย์ จะต้องแยกพิจารณาดังนี้

สำหรับโฟตอน พลังงาน 1.17 เอมอีวี

$$I = I_o e^{-\mu x}$$

$$\frac{I}{I_o} = e^{-(0.70)(2x2.54)}$$

$$= e^{-3.556} = 0.0285$$

แสดงว่า ความเข้มของลำแสงที่ผ่านออกมาจะมีค่าเท่ากับ 2.85% ของความเข้มของลำแสงเดิม

สำหรับโฟตอน พลังงาน 1.33 เอมอีวี

$$\frac{I}{I_o} = e^{-(0.62)(2x2.54)}$$

$$= e^{-3.1496}$$

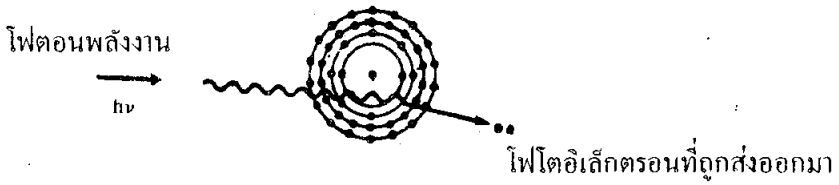
$$= 0.0428$$

แสดงว่า ความเข้มของลำแสงที่ผ่านออกมาจะมีค่าเท่ากับ 4.28% ของความเข้มของลำแสงเดิม

จากการคำนวณแสดงว่า ตะกั่วความหนาเท่ากันจะกั้นรังสีแกมมาที่มีพลังงานต่างกันได้เป็นปริมาณต่างกัน

8.7 ผลที่เกิดขึ้นเมื่อรังสีแกมมากระทบสาร

8.7 1 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก (Photoelectric Effect)



รูปที่ 8.6 แสดงการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก

ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก เกิดกับรังสีแกมมาที่มีพลังงานต่ำ แต่มากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในวงโครจร (orbital electron)

เมื่อโฟตอนวิ่งเข้าชนอะตอม จะ**ถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้กับอิเล็กตรอนในวงโคจร ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมมีพลังงาน**

$$E_e = E_\gamma - E_b \qquad \ldots (8.10)$$

เมื่อ E_e คือพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่ส่งออกมา

E_γ คือพลังงานทั้งหมดของโฟตอน

E_b คือพลังงานที่ใช้ในการทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม (พลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน)

อิเล็กตรอนที่ถูกส่งออกมา เรียกว่า โฟโตอิเล็กตรอน กระบวนการนี้ โฟตอนจะเสียพลังงานทั้งหมดให้กับอิเล็กตรอน แล้วโฟโตอิเล็กตรอนจะเป็นตัวทำให้เกิดกระบวนการแตกตัวเมื่อวิ่งผ่านอะตอมของสาร มีลักษณะเหมือนอนุภาคเบตา ที่มีพลังงานเดียวกัน

ถ้ารังสีแกมมาพลังงานสูง โฟโตอิเล็กตรอนจะถูกผลักไปในทิศทางข้างหน้า ในแนวเดียวกันกับทิศของรังสีแกมมาที่ตกกระทบ แต่ถ้าพลังงานต่ำ มักจะส่งอิเล็กตรอนออกมาในแนวทำมุมตั้งฉาก

กิริยาโฟโตอิเล็กตริกจะเกิดขึ้นมากหรือน้อย ขึ้นกับพลังงานของรังสีแกมมา และเลขอะตอมของธาตุที่ใช้ดูดกลืน ประมาณได้ว่า

โอกาสการเกิดกิริยาโฟโตอิเล็กตริก $\approx$ ค่าคงที่ $\frac{Z^n}{\nu^3}$ ... (8.11)

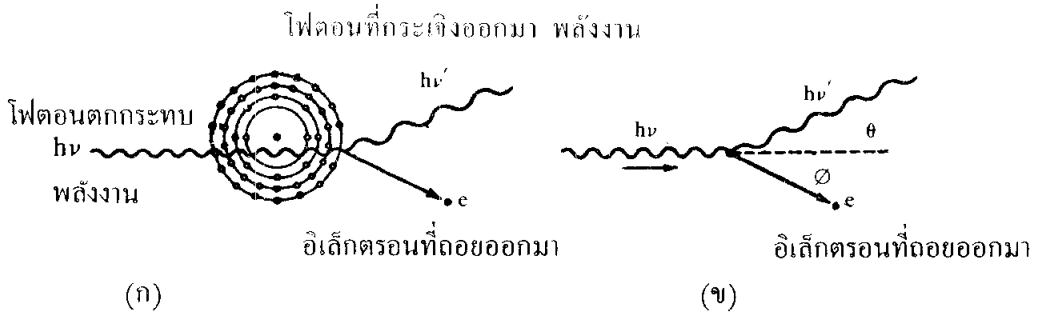
เมื่อ n แปรเปลี่ยนจาก 3 เมื่อรังสีแกมมาพลังงานต่ำ
จนถึง 5 เมื่อรังสีแกมมาพลังงานสูง

จะเห็นได้ว่า กระบวนการนี้ จะเกิดมากขึ้น เมื่อเลขอะตอมของตัวดูดกลืนเพิ่มขึ้น และพลังงานของรังสีแกมมาลดลง กระบวนการนี้ จึงมีความสำคัญสำหรับรังสีแกมมาพลังงานน้อยกว่า 1 เอมอีวี และตัวดูดกลืนที่มีเลขอะตอมสูง

เมื่ออิเล็กตรอนถูกผลักออกจากวงโคจร หลุดออกไปจากอะตอม อิเล็กตรอนในวงนอกกว่าจะเข้ามาแทนที่ ทำให้เกิดคาแรกเทอริสติกเอกซ์-เรย์ (characteristic X-ray) มีพลังงานต่ำเมื่อเทียบกับพลังงานของรังสีแกมมาที่วิ่งผ่านเข้ามา บางทีรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นจะผลักอิเล็กตรอนที่อยู่รอบนอกกว่า ออกไปจากอะตอม เรียก **ออเจอร์ อิเล็กตรอน** ในลักษณะเดียวกับปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก มีพลังงานเท่ากับพลังงานของ คาแรกเทอริสติกเอกซ์-เรย์-พลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในวงโคจรนั้น ออเจอร์อิเล็กตรอน จะทำตัวเหมือนกับอนุภาคเบตา จึงพอสรุปได้ว่า **การเกิดโฟโตอิเล็กตริก เป็นการดูดกลืนรังสีแกมมาทั้งหมด แล้วส่งอิเล็กตรอนและรังสีเอกซ์พลังงานต่ำออกมา**

8.7.2 ปรากฏการณ์คอมป์ตัน (Compton Effect)

เมื่อโฟตอนเข้าชนอะตอมของสาร เกิดกิริยากับอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจร **โฟตอนจะเสียพลังงานบางส่วนให้กับอิเล็กตรอนทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากวงโคจร มีพลังงานจลน์ค่าหนึ่ง** คือ $E_e = E_\gamma - E'_\gamma - E_b$ เช่นเดียวกับการเกิดโฟโตอิเล็กตริก เมื่อ E'_γ คือพลังงานของโฟตอนที่กระเจิง



รูปที่ 8.7 แสดงปรากฏการณ์คอมป์ตัน

อิเล็กตรอนวิ่งออกมาในทิศทางทำมุม $\varnothing$ กับทิศทางการเคลื่อนที่เดิม โฟตอนมีพลังงาน E'_γ ก็จะเคลื่อนที่ไปในทิศทางทำมุม Θ กับทิศทางเดิม โดยมีความยาวคลื่นมากขึ้น $(E'_\gamma < E_\gamma)$ **อิเล็กตรอนที่หลุดออกมา เรียกคอมป์ตัน อิเล็กตรอน** (Compton electron) กิริยาที่เกิดขึ้นเหมือนกับการเกิดการชนแบบยืดหยุ่นระหว่างมวล 2 มวล อิเล็กตรอนในวงโคจร จะทำตัวเหมือนกับอิเล็กตรอนอิสระ เพราะค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในวงโคจร มีค่าน้อยกว่าพลังงานของโฟตอนมาก ส่วนโฟตอนนั้น จะคิดว่าเป็นอนุภาคมวล = $\frac{h\nu}{C^2}$ และมีโมเมนตัม = $\frac{h\nu}{C}$ โดยการใช้หลักการอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัมในการชน ถ้าอิเล็กตรอนมีพลังงานสูงมาก จะต้องใช้ค่าสัมพัทธภาพ (relativistic) ผลที่ได้คือ

$$\lambda - \lambda' = \frac{C}{\nu} - \frac{C}{\nu'}$$
$$= \frac{h}{m_o C} (1 - \cos \Theta)$$

เมื่อ Θ คือมุมระหว่างทิศทางการเคลื่อนที่เดิมของโฟตอน กับทิศทางที่โฟตอนกระเจิงไป โดยการแทนค่า h, m_o และ C จะได้ค่าคงที่เท่ากับ 2.426×10^{-12} ม. เรียกว่า **ความยาวคลื่นคอมป์ตัน (Compton wavelength)** เขียนสมการ ได้ว่า

$\Delta\lambda = 0.0242(1-\cos \Theta)$ อังสตรอม (A° = angstrom)

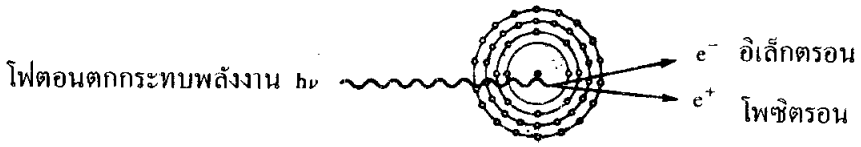
แสดงว่า ความยาวคลื่นที่เปลี่ยนไป ขึ้นกับมุมที่โฟตอนกระเจิง ไม่ขึ้นกับความยาวคลื่นเดิมหรือสารที่เป็นตัวดูดกลืน

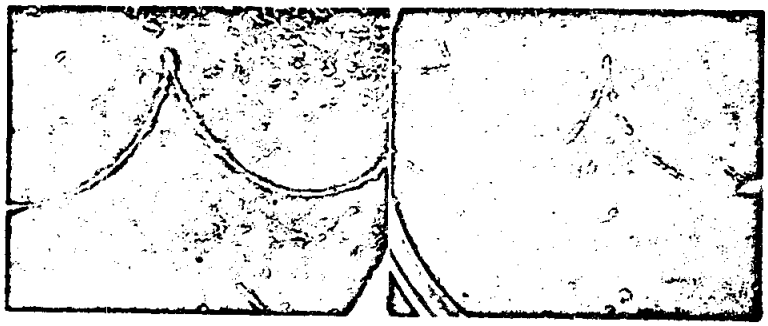
เนื่องจาก คอมป์ตันเอฟเฟค เกิดขึ้นจากการกระทำระหว่างโฟตอนและอิเล็กตรอน ขนาดของคอมป์ตันเอฟเฟคจึงขึ้นกับจำนวนอิเล็กตรอนที่อยู่รอบนอก (orbital electrons) อะตอมของสารที่ใช้ดูดกลืน (Z) จึงเกิดได้ดีกับสารดูดกลืนที่มีเลขอะตอมสูง และกิริยาคอมป์ตัน (Compton interaction) จะลดลงเมื่อพลังงานของแกมมาโฟตอนสูงขึ้น อาจจะประมาณได้ว่า

โอกาสที่จะเกิดกิริยาคอมป์ตัน $\approx$ ค่าคงที่ x $\frac{Z}{E}$

ข้อแตกต่างระหว่างปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก และปรากฏการณ์คอมป์ตัน ก็คือ **ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก เป็นการดูดกลืนโฟตอนทั้งหมดที่ตกกระทบ แต่ในกระบวนการของคอมป์ตันนั้น เพียงแต่ลดขนาดของพลังงานเดิมของโฟตอน เกิดโฟตอนใหม่ที่มีพลังงานลดลง และอิเล็กตรอนที่มีพลังงานค่าหนึ่ง** หลังจากการเกิดกระบวนการคอมป์ตันแล้ว รังสีแกมมาพลังงานลดต่ำลง อาจจะกระทำกับสาร เกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริกอีกก็ได้ และอิเล็กตรอนที่วิ่งออกมา ก็จะทำตัวเหมือนกับอนุภาคที่มีประจุวิ่งผ่านสาร ดังที่กล่าวมาแล้ว

8.7.3 การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โพซิตรอน (Pair production)





รูปที่ 8.8 รูปถ่ายจากห้องหมอก (cloud chamber) แสดงการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โพซิตรอน อนุภาคเดินทาง เป็นเส้นโค้งเนื่องจากสนามแม่เหล็ก

แพร์โพรดักชัน เป็นแบบหนึ่งของกระบวนการดูดกลืนโฟตอน เกิดขึ้น **เมื่อโฟตอนมีพลังงานอย่างน้อย 1.02 เอมอีวี** และจะเกิดขึ้นมากเมื่อโฟตอนมีพลังงานสูงขึ้น

$$h\nu \longrightarrow e^{+} + e^{-} + 2E_k \qquad \ldots (8.12)$$

$2E_k$ คือ พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน และ โพซิตรอน

เมื่อโฟตอนวิ่งเข้ามาในสนามไฟฟ้าของอิเล็กตรอนที่อยู่รอบนอกอะตอม โฟตอนจะหายไป โดยใช้พลังงานไปในการสร้างโพซิตรอน–อิเล็กตรอน ขึ้นมาคู่หนึ่ง เป็นการกระทำระหว่างโฟตอน กับสนามนิวเคลียร์ ถ้าโฟตอนมีพลังงานมากกว่า 1.02 เอมอีวี จะกลายเป็นพลังงานของโพซิตรอน และอิเล็กตรอน วิ่งไปข้างหน้า มีบางส่วนเท่านั้นที่จะให้กับนิวเคลียส

อิเล็กตรอน และโพซิตรอน จะสูญเสียพลังงานโดยการแตกตัว **เมื่อโพซิตรอนมีพลังงานต่ำลง จะรวมกับอิเล็กตรอน เกิดเป็น 2 โฟตอน เรียกรังสีจากการถูกทำลาย (annihilation radiation)**

$$e^{+} + e^{-} \longrightarrow 2h\nu \qquad \ldots (8.13)$$

โฟตอนที่เกิดขึ้น มาจากมวลของโพซิตรอน และอิเล็กตรอน แต่ละอนุภาคมีพลังงาน 0.511 เอมอีวี ($E = m C^2$) ดังนั้น แต่ละโฟตอน จึงมีพลังงาน 0.511 เอมอีวี และวิ่งไปในทิศทางตรงข้าม

โอกาสที่จะเกิดแพร์โพรดักชัน $\approx$ ค่าคงที่ $xZ^2(E-1.02)$
เมื่อ E คือพลังงานของรังสีแกมมา

แสดงว่า **กิริยานี้จะเกิดขึ้นตามเลขอะตอมของตัวดูดกลืน และจะต้องเกิดในสนามไฟฟ้าของนิวเคลียสเท่านั้น**

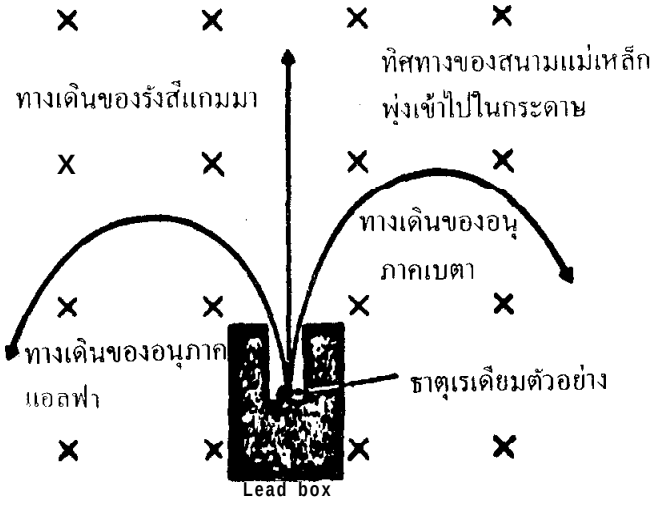
สรุปได้ว่า ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก เกิดขึ้นเมื่อโฟตอนมีพลังงานต่ำ เมื่อโฟตอนมีพลังงานสูงขึ้นจะมีปริมาณลดลง, ปรากฏการณ์คอมป์ตันจะเพิ่มขึ้น และเมื่อพลังงานโฟตอนสูงขึ้นอีกจะเกิด แพร์โพรดักชัน มากขึ้น และปรากฏการณ์คอมป์ตันจะลดลง พบว่าการเกิดแพร์โพรดักชัน แปรตามเลขอะตอม และแปรตามพลังงานด้วย ดังแสดงตามรูปที่ 8.5

จากที่ได้กล่าวมาแล้ว พอที่จะแยกกิริยาระหว่างรังสีกับสารแต่ละชนิดได้เป็น 2 พวก คือ

1) พวกที่มีประจุ ได้แก่ อนุภาคแอลฟา, อนุภาคเบตา, โพซิตรอน, โปรตอน

2) พวกที่ไม่มีประจุ ได้แก่ นิวตรอน, คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น รังสีเอกซ์, รังสีแกมมา

รังสีแต่ละชนิด เมื่อเกิดกิริยากับสาร จะเกิดผลที่มีลักษณะแตกต่างกันไป ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 6, 7, 8 และบทที่ 9



รูปที่ 8.9 แสดงคุณสมบัติที่แตกต่างกันระหว่างอนุภาคที่มีประจุ และไม่มีประจุ

8.8 รังสีเชเรนคอฟ (Cerenkov Radiation)

เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคที่มีประจุ วิ่งด้วยความเร็วสูงมาก สูงกว่าความเร็วของแสงในตัวกลางนั้น จะส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (E.M. radiation) ในช่วงความยาวคลื่นที่มองเห็น เมื่อวิ่งผ่านไปในตัวกลางโปร่งแสง (transparent medium) จะปรากฏเป็นแสงเรือง (bluish glow) เรียกรังสีเชเรนคอฟ มักพบบริเวณแกน (core) ของเครื่องปฏิกรณ์ที่ทำให้เย็นและลดความเร็วด้วยน้ำ เชื่อว่าเกิดจาก คอมป์ตันอิเล็กตรอน จากรังสีแกมมาที่เกิดจากกระบวนการแบ่งแยกตัว

สรุป

1. รังสีแกมมามักจะเกิดขึ้นเสมอเมื่อนิวไคลด์กัมมันตรังสีสลาย ไม่ว่าจะโดยการส่งอนุภาคแอลฟา, เบตา หรืออนุภาคอื่น ๆ รังสีแกมมามีคุณสมบัติในการทะลุทะลวงสูง พบว่าสูงสุดเมื่อเทียบกับรังสีแอลฟาและเบตา จึงนับว่ามีอันตรายมากเมื่อผ่านร่างกาย

2. ในการป้องกันรังสี จำเป็นต้องทราบถึงความแรงของต้นกำเนิดและคุณสมบัติของธาตุที่จะนำมาใช้กั้นรังสี การคำนวณจะใช้สูตรการดูดกลืนรังสีแกมมาเมื่อผ่านความหนา x ตามสมการที่ (8.2) คือ

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

จะหาความเข้มของลำแสงที่ผ่านออกมา เมื่อใช้ความหนาต่าง ๆ กันได้

แบบฝึกหัดบทที่ 8

8.1 ให้ความหมายของ

(ก) สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้น (μ)

(ข) สัมประสิทธิ์การดูดกลืนที่ขึ้นกับมวล (μ_m)

8.2 อธิบายการเกิดกิริยาระหว่างรังสีแกมมา กับสาร สำหรับแต่ละกระบวนการ อย่างย่อ ๆ

8.3 จากปฏิกิริยา ${}_4Be^9$ (γ, n), จงหาค่าคิว และ พลังงานขีดเริ่มเปลี่ยน
กำหนดมวลในหน่วย เอเอมยู ของ

${}_0n^1 = 1.0086654$, $Be^9 = 9.012186$

$Be^8 = 8.005308$

8.4 วัดพลังงานของอนุภาคเบตาที่ส่งออกมาจากการสลายของ Mn^{56} ได้ 2.84 เอมอีวี และมีรังสีแกมมา พลังงาน 0.85 เอมอีวี ออกมาด้วย ถ้ากำหนดมวลของ $Mn^{56} = 55.93891$ เอเอมยู จงหามวลของธาตุใหม่ที่เกิดขึ้น

8.5 ถ้าสาร ก. ให้รังสีแกมมา 400 โฟตอน/ซม.^{2}/วินาที แต่ละโฟตอนมีพลังงาน 100 เคอีวี เมื่อนำตะกั่วขนาดกว้าง 5 ซม. ยาว 10 ซม. หนัก 10 กรัม มาขวางลำรังสีแกมมานี้ กำหนดค่า $\mu_m = 5$ ซม.^{2}/กรัม จงหา

(ก) ความเข้มของลำแสงที่ผ่านออกมามีค่าเท่าไร และมีพลังงานเท่าไร

(ข) ความเข้มของลำแสงที่ถูกดูดกลืนมีค่าเป็นกี่เปอร์เซ็นต์ของความเข้มเดิม