บทที่ 4
การกระทำของรังสีกับวัตถุ

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการกระทำของรังสีที่มีต่อวัตถุ
2. ศึกษาขบวนการโฟโตอิเล็กทริก
3. ศึกษาขบวนการคอมป์ตันสแกททเทอริง
4. ศึกษาขบวนการแพร์โปรดักชัน

4.1 บทนำ

สิ่งที่มีชีวิตอาจถูกทำลายด้วยรังสี เมื่อรังสีที่มีพลังงานสูงพุ่งเข้าชน ถ่ายเทพลังงานให้แก่อะตอมที่ถูกชน ทำให้อะตอมเกิดการกระตุ้น (EXCITATION) หรือเกิดการแตกตัว (IONIZATION) ถ้าความเสียหายมีมาก ร่างกายไม่สามารถซ่อมแซมให้กลับคืนสู่สภาพปกติได้ ร่างกายส่วนนั้นก็จะทำหน้าที่ได้ไม่สมบูรณ์เท่าเดิม ก็คือ เกิดความผิดปกติของร่างกายได้ ดังนั้น จึงจำเป็นที่เราจะต้องศึกษาขบวนการกระทำของรังสีที่มีต่อวัตถุ

เราอาจแบ่งรังสีเป็น 2 ชนิด คือ

1. **พวกที่มีมวล** (PARTICULATE RADIATION) เช่น รังสีเบตา, รังสีแอลฟา, โปรตอน หรือ นิวตรอน ฯลฯ

2. **พวกที่ไม่มีมวล** เช่น รังสีแกมมา หรือรังสีเอ็กซ์ ฯลฯ

การกระทำของรังสีแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

1. **การกระทำแบบอีลาสติค** (ELASTIC INTERACTION) พลังงานจลน์ก่อนเกิดการกระทำ เท่ากับพลังงานจลน์หลังเกิดการกระทำ

2. **การกระทำแบบอินอีลาสติค** (INELASTIC INTERACTION) พลังงานไม่เท่าเดิม พลังงานจลน์จำนวนหนึ่งจะสูญเสียแก่นิวเคลียส ทำให้นิวเคลียสอยู่ในภาวะกระตุ้น

4.2 การกระทำของรังสีพวกที่มีมวล

รังสีพวกที่มีมวลหรือเรียกว่าอนุภาค จะกระทำกับวัตถุแตกต่างจากรังสีพวกที่ไม่มีมวล เพราะว่าพวกที่มีมวลจะมีทั้งมวลและประจุ (ยกเว้นนิวตรอน) ทำให้เกิดการกระทำกับวัตถุไม่เพียงแต่กระทำโดยตรง (มวลชนกับมวล) แต่ยังกระทำโดยทางอ้อมกับสนามไฟฟ้าของอะตอมด้วย

การแตกตัวจำเพาะ (SPECIFIC IONIZATION) ใช้สัญญลักษณ์ว่า SI เป็นจำนวนไอออนคู่ (ION PAIRS) ที่เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางเป็นระยะทาง 1 หน่วย

พลังงานถ่ายทอดเชิงเส้น (LINEAR ENERGY TRANSFER) ใช้สัญญลักษณ์ว่า LET เป็นพลังงานเฉลี่ยที่อนุภาคเสียให้แก่ตัวกลาง เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางเป็นระยะทาง 1 หน่วย

เวิร์คฟังก์ชั่น (WORK FÜNCTION) ใช้สัญญลักษณ์ว่า W เป็นอนุภาคที่ทำให้ตัวกลางแตกตัวได้ 1 ไอออนคู่

$$\boxed{LET = (SI)(W)}$$

ตัวอย่างที่ 4.1 อนุภาคแอลฟาเคลื่อนที่ผ่านอากาศ มีค่าการแตกตัวจำเพาะ (SI) เท่ากับ 40,000 ไอออนคู่ต่อเซ็นติเมตร และเวิร์คฟังก์ชั่น (W) เท่ากับ 35 อีเล็คตรอนโวลต์ต่อไอออนคู่ จงหาพลังงานถ่ายทอดเชิงซ้อน (LET)

วิธีทำ

$$
\begin{aligned}
LET &= (SI)(W) \\
&= (40{,}000\ IP/cm)(35\ EeV/IP) \\
&= 1{,}400\ KeV/cm
\end{aligned}
$$

พิสัย (RANGE) ของอนุภาคในตัวกลางใดๆ คือ ระยะทางที่เป็นเส้นตรงจากจุดเริ่มต้นถึงจุดสุดท้ายที่อนุภาคไปหยุดอยู่ หรือ ระยะทางที่ไกลที่สุดจากจุดเริ่มต้น สำหรับอนุภาคที่มีพลังงาน E จะหาค่าพิสัยจากค่าเฉลี่ยของพลังงานถ่ายทอดเชิงเส้นได้จากสูตรต่อไปนี้

$$\text{RANGE} = \frac{E}{\text{LET}}$$

ตัวอย่างที่ 4.2 จงคำนวณพิสัยในอากาศของอนุภาคแอลฟาที่มีพลังงาน 4 เอ็มอีวี (MeV) และมีค่าเฉลี่ยของพลังงานถ่ายทอดเชิงเส้นเท่ากันในตัวอย่างที่ 4.1

วิธีทำ

$$\text{RANGE} = \frac{E}{\text{LET}}$$

$$= \frac{4 \text{ MeV } (10^6 \text{ eV/MeV})}{1400 \text{ KeV/cm } (10^3 \text{ eV/KeV})}$$

$$= 2.9 \text{ เซ็นติเมตรในอากาศ}$$

องค์ประกอบ (FACTOR) ที่มีผลต่อการแตกตัว (IONIZATION) ของตัวกลางมี 2 อย่าง คือ

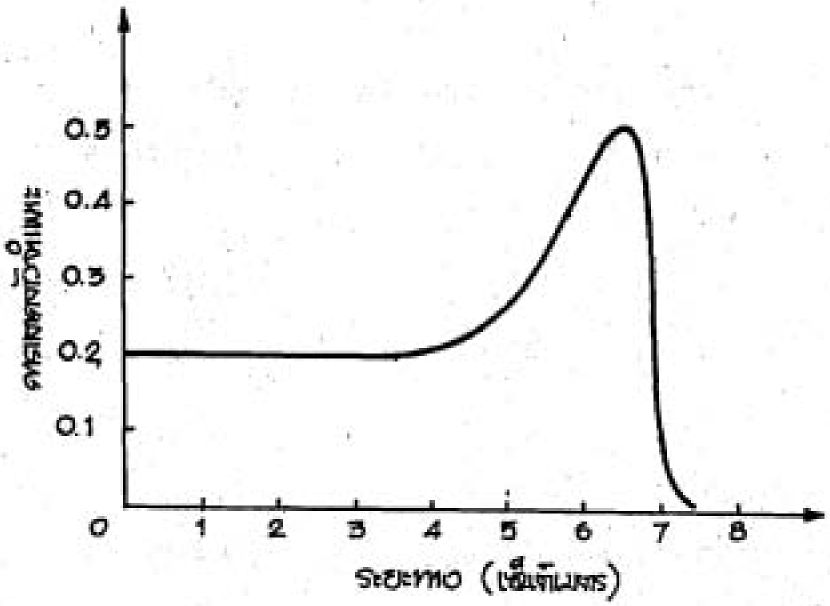
1. ประจุ
2. ความเร็วของอนุภาค

ผลเนื่องจากประจุ อำนาจของประจุมากหรือน้อยขึ้นกับระยะทางระหว่างประจุและจำนวนประจุ ถ้าระยะทางระหว่างประจุทั้งสองมีค่ามากหรืออนุภาคมีประจุน้อย แรงระหว่างประจุทั้งสองจะน้อย อัตราการสูญเสียพลังงานของอนุภาคที่มีประจุจะเป็นอัตราส่วนกับกำลังสองของประจุนั้น อนุภาคที่มีประจุมากจะมีความเข้มของสนามไฟฟ้ามาก ทำให้เกิดการแตกตัวตามทางเดิน (TRACK) มาก ก็คือ เกิดการแตกตัวจำเพาะมาก

ผลเนื่องจากความเร็ว อนุภาคสองตัวที่มีพลังงานเท่ากัน ไม่จำเป็นต้องมีความเร็วเท่ากัน ตัวอย่างเช่น โปรตอนที่มีพลังงานจลน์เท่ากับอีเล็คตรอน จะวิ่งช้ากว่าอีเล็คตรอน เพราะว่า โปรตอนมีมวลมากกว่าอีเล็คตรอนประมาณ 2000 เท่า ความเร็วของอนุภาคทำให้ระยะเวลาที่เกิดแรงกระทำต่างกัน ผลที่เกิดจากแรงกระทำจะขึ้นกับระยะเวลาที่แรงกระทำเกิดด้วย อนุภาคที่วิ่งด้วยความเร็วต่ำ ทำให้เกิดการแตกตัวจำเพาะมากกว่าอนุภาคที่วิ่งด้วยความเร็วสูง อาจจะสรุปได้ว่า การแตกตัวจำเพาะเป็นอัตราส่วนกลับกับความเร็วของอนุภาค

ในการชนแต่ละครั้งอนุภาคจะสูญเสียพลังงานให้แก่ตัวกลาง การสูญเสียพลังงานทำให้ความเร็วลดลง เนื่องจากโอกาสที่จะเกิดการแตกตัวเป็นส่วนกลับกับความเร็ว ดังนั้น เมื่อ

อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง การแตกตัวจำเพาะจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และจะมีค่ามากที่สุดเมื่ออนุภาคเกือบหยุดนิ่งในตัวกลาง



รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการแตกตัวจำเพาะกับระยะทางที่อนุภาคแอลฟา พลังงาน 7.7 เอ็มอีวี (MeV) จากแร่โพโลเนียมวิ่งผ่านเนื้อเยื่อ

ทางเดินของอนุภาคในสสาร (PARTICLE TRACKS IN MATTER) แอลอีที (LET) ของอนุภาคตัวหนึ่งจะเปลี่ยนไปตามทางเดินของอนุภาคที่เป็นเช่นนี้เพราะว่า ถึงแม้ว่าอนุภาคจะมีประจุคงที่ แต่ความเร็วจะเปลี่ยนตลอดเวลาที่เดินทางผ่านวัตถุ เมื่อเกิดการกระทำแต่ละครั้ง (เกิดการกระตุ้นหรือการแตกตัว) อนุภาคจะสูญเสียพลังงานไป ทำให้ความเร็วลดลง ด้วยเหตุนี้แอลอีทีจึงเพิ่มมากเรื่อยๆ จนกว่าอนุภาคจะหยุดนิ่ง เมื่ออนุภาคหยุดนิ่งจะทำตัวเป็นกลาง โดยอนุภาคที่มีประจุบวกต้องการอิเล็คตรอน ตัวอย่างเช่น โปรตอนกลายเป็นอะตอมของไฮโดรเจน อนุภาคกลายเป็นอะตอมฮีเลียม และอิเล็คตรอนที่มีความเร็วสูงจะถูกดึงเข้าสู่วงโคจรรอบนิวเคลียส

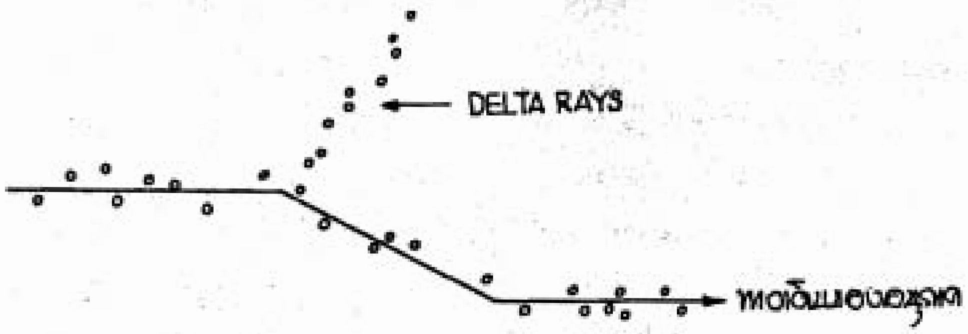
อนุภาคที่มีจำนวนต่างกันจะมีทางเดินไม่เหมือนกัน อนุภาคที่มีประจุมากจะเกิดการกระทำบ่อยครั้ง ทให้เกิดการแตกตัวตามทางเดินมาก เรียกว่า อนุภาคชนิดนี้มีแอลอีทีสูง (high LET) อนุภาคที่มีประจุน้อย ทำให้เกิดการแตกตัวน้อย อนุภาคชนิดนี้มีแอลอีทีต่ำ (low LET)

ทิศทางการเดินทางของอนุภาคที่เกิดการกระทำกับอิเล็คตรอน จะเปลี่ยนแปลงขึ้นกับมวลของอนุภาค อนุภาคที่มีมวลมาก เช่นอนุภาคแอลฟา จะมีทางเดินเกือบเป็นเส้นตรงเพราะว่าอิเล็คตรอนมีมวลน้อยกว่า ทิศทางของอนุภาคแอลฟาจะเปลี่ยนเมื่อกระทำกับนิวเคลียสเท่านั้น

ตรงกันข้ามกับอีเล็คตรอนซึ่งจะเปลี่ยนทิศทางเมื่อเกิดการกระทำแต่ละครั้ง ทางเดินของอีเล็คตรอนจึงเป็นเส้นคดเคี้ยว เพราะว่า เกิดการกระทำกับอีเล็คตรอนที่มีมวลเท่ากัน หรือกับนิวเคลียสซึ่งมีมวลมากกว่า

การกระทำระหว่างอนุภาคกับสสารเป็นไปตามโอกาสที่อำนวยให้ เราไม่ทราบว่าจะเกิดการกระทำเมื่อใด เพราะว่าอะตอมของสสารมีการเคลื่อนไหวอยู่ตลอดเวลา จึงมีช่องว่างที่ไม่เป็นระเบียบและเปลี่ยนแปลง ยิ่งกว่านั้นอีเล็คตรอนก็มีการเคลื่อนไหวรอบนิวเคลียส ดังนั้นอนุภาคจะกระทำกับอีเล็คตรอนได้ก็ขึ้นกับโอกาส อนุภาคที่มีแอลอีทีสูงโอกาสในการกระทำจะมีค่ามาก ส่วนอนุภาคที่มีแอลอีทีต่ำ (อำนาจในการทำให้เกิดการแตกตัวต่ำ) การกระทำจะเกิดขึ้นไม่มากนัก

อนุภาคเสียพลังงานบรการกระทำแต่ละครั้งไม่เท่ากัน อีเล็คตรอนที่ถูกผลักออกมาจึงมีพลังงานจลน์ไม่เท่ากัน อีเล็คตรอนบางตัวแทบจะไม่เคลื่อนจากวงโคจร ขณะที่บางตัวได้รับพลังงานจลน์มากและเคลื่อนที่ผ่านวัตถุเป็นระยะทางมาก อีเล็คตรอนบางตัวมีพลังงานมากพอที่จะทำให้เกิดการแตกตัวตามทางเดินได้จึงดูเหมือนว่าทางเดินของอนุภาค แตกกิ่งออกมาจากทางเดินเดิม ทางเดินของอีเล็คตรอนที่แยกออกมาจากทางเดินอนุภาคนี้มีชื่อเรียกว่า เดลตาเรย์ (DELTA RAYSA หรือ δ - RAYS)



รูปที่ 4.2 แสดงการเกิดการแตกตัวทางเดินของอนุภาคที่มีประจุ จะเห็นเดลตาเรย์แยกออกจากทางเดินของอนุภาค

4.2.1 การกระทำของอนุภาคที่มีประจุมาก

ไปรตรอน (นิวเคลียสของไฮโดรเจน) และดิวเทอรอน (นิวเคลียสของไฮโดรเจนหนัก) ส่วนมากจะถูกสร้างจากเครื่องเร่งอนุภาค ทางเดินของอนุภาคทั้งสองเป็นเส้นตรง เพราะว่าจะไม่เกิดการเบี่ยงเบน เมื่อกระทำกับอีเล็คตรอนที่มีมวลน้อยกว่า แต่บางครั้งอาจเปลี่ยนแปลงทิศทางบ้างเมื่อกระทำกับนิวเคลียส การนำโปรตอนมาใช้งานยังจะต้องศึกษาอีกมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเกี่ยวกับการผลิตโปรตอน

อนุภาคแอลฟา เป็นนิวเคลียสของฮีเลียมมีมวลเท่ากับ 4 และประจุเท่ากับ 2 อนุภาคชนิดนี้ได้มาจากการสลายตัวของธาตุที่มีน้ำหนักอะตอม เช่น เรเดียม เนื่องจากมีประจุเป็น 2 เท่าของโปรตอน และมีมวลค่อนข้างมาก จึงวิ่งช้า ทำให้เสียพลังงานอันรวดเร็วและวิ่งผ่านวัตถุเป็นระยะทางสั้น อนุภาคชนิดนี้จะเสียพลังงานจำนวนมากในระยะน้อย เป็นอนุภาคที่ทำให้เกิดความเสียหายแก่เซลมาก

อนุภาคหนักอื่นๆ เป็นนิวเคลียสของอะตอมทั่วๆ ไป ซึ่งไม่มีอีเล็คตรอนล้อมรอบ เป็นอนุภาคที่มีมวลมากและประจุมาก เนื่องจากมีมวลมากจึงมีโอกาสที่จะกระทำกับนิวเคลียสมาก เป็นผลให้นิวเคลียสได้รับพลังงานเพิ่มขึ้น อนุภาคเหล่านี้มีทางเดินเป็นเส้นตรง และเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในวัตถุเป็นระยะทางสั้นๆ

4.2.2 การกระทำของอีเล็คตรอน

การกระทำของอีเล็คตรอนไม่ว่าจะเป็นอีเล็คตรอนบวกหรืออีเล็คตรอนลบ อาจแบ่งได้เป็น 3 พวก คือ

1. การกระทำกับอีเล็คตรอน
2. การกระทำชนิดอีลาสติคกับนิวเคลียส
3. การกระทำชนิดอินอีลาสติคกับนิวเคลียส

การกระทำกับอีเล็คตรอน

เมื่ออีเล็คตรอนวิ่งผ่านตัวกลาง (MEDIUM) จะถ่ายเทพลังงานให้แก่อีเล็คตรอนของอะตอมของตัวกลาง อีเล็คตรอนเกิดการสูญเสียพลังงาน และมีทิศทางเปลี่ยน อีเล็คตรอนของอะตอมเมื่อได้รับพลังงานจะวิ่งเข้าสู่วงโคจรที่อยู่ไกลจากนิวเคลียสมากกว่า หรือถูกขับหลุดออกจากอะตอม พลังงานจลน์ (E_K) ของอีเล็คตรอนที่ถูกขับออกมาจะมีค่าเท่ากับ ผลต่างของพลังงานที่อีเล็คตรอนได้รับ (E) กับพลังงานยึดเหนี่ยว (BINDING ENERGY, BE) ของอีเล็คตรอน

$$E_K = E - E_b$$

ถ้าหากถือว่าพลังงานยึดเหนี่ยวมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับพลังงานที่อีเล็คตรอนได้รับ อาจคิดว่า การกระทำเป็นแบบอีลาสติกได้

โอกาสที่อีเล็คตรอนจะถูกผลักโดยอีเล็คตรอนของอะตอมของตัวกลาง จะเพิ่มขึ้นในตัวกลางที่มีเลขอะตอมสูง โอกาสที่จะถูกเบี่ยงเบนโดยอีเล็คตรอนของอะตอมของตัวกลาง จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อพลังงานจลน์ของอีเล็คตรอนที่ตกกระทบเพิ่มมากขึ้น

การกระทำชนิดอีลาสติคกับนิวเคลียส

เมื่ออีเล็คตรอนวิ่งผ่านนิวเคลียสจะเปลี่ยนทิศทางและมีความเร็วลดลง การกระทำจะเป็นชนิดอินอีลาสติค ถ้าพลังงานถูกส่งออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (ELECTROMAGNETIC RADIATION) เนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีความสามารถในการวิ่งผ่านเนื้อเยื่อได้มาก จึงทำให้เกิดความเสียหายแก่บริเวณที่อยู่นอกทางเดินของอีเล็คตรอน

พิสัยของอีเล็คตรอน

จากการที่อีเล็คตรอนเดินทางผ่านวัตถุตามเส้นทางคดเคี้ยว ดังนั้น ระยะทางที่สามารถทะลุทะลวงผ่านวัตถุจึงมีค่าน้อยกว่าความยาวของเส้นทางเดิน ระยะทางที่ทะลุผ่านวัตถุเรียกว่า พิสัย (RANGE) เป็นค่าระยะทางจากจุดเริ่มต้นของอนุภาคไปสู่จุดที่อนุภาคหยุดนิ่ง พิสัยจะมีค่าขึ้นอยู่กับพลังงานของอีเล็คตรอน

ตารางที่ 4.1 พิสัยสูงสุดของอนุภาคเบตาในเนื้อเยื่อ

สารกัมมันตรังสี	พลังงานสูงสุด (MeV)	พิสัยในเนื้อเยื่อ
^{3}H	0.018	6 μ
^{14}C	0.115	300 μ
^{95}Sr	0.167	300 μ
^{90}Sr	0.610	0.2 cm
^{32}P	1.700	0.8 cm

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าพิสัยสูงสุด (MAXIMUM RANGE) ของอนุภาคเบตาซึ่งเป็นอีเล็คตรอนที่มีความเร็วสูงในเนื้อเยื่อ พิสัยของอนุภาคเบตาเกือบทั้งหมดจะมีค่าน้อยกว่าค่าที่แสดงไว้นี้

4.2.3 การกระทำของนิวตรอน

นิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุ จึงไม่ทำปฏิกริยากับแรงทางไฟฟ้าของอีเล็คตรอนและนิวเคลียส การกระทำจะเป็นการชนกันโดยตรงซึ่งเรียกว่า การชนแบบลูกบิลเลียด (BILLARD - BALL COLLISION) นิวตรอนมีความสามารถในการทะลุทะลวงผ่านวัตถุมาก การชนระหว่างนิวตรอนกับนิวเคลียสจะเป็นแบบอีลาสติค เมื่อพลังงานจลน์รวมของนิวเคลียสและนิวตรอนไม่เปลี่ยนแปลง และการชนจะเป็นแบบอินอีลาสติค เมื่อพลังงานจลน์บางส่วนถูกใช้ไปในการทำให้นิวเคลียสอยู่ในภาวะกระตุ้น

ตารางที่ 4.2 ชนิดของนิวตรอน

ชนิด	พลังงาน
ช้า (SLOW)	0 - 0.1 KeV
กลาง (INTERMEDIATE)	0.1 - 20 KeV
เร็ว (FAST)	20 KeV - 10 MeV
สูง (HIGH ENERGY)	10 MeV

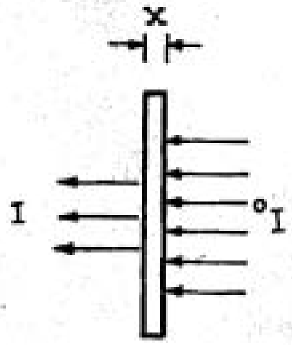
นิวตรอนเร็ว (FAST NEUTRON) เสียพลังงานส่วนใหญ่โดยการชนกับนิวเคลียสทำให้โปรตอนหลุดออกมา ส่วนนิวตรอนช้า (SLOW NEUTRON) ชนกับสสารโดยขบวนการจับตัว (CAPTURE) เป็นส่วนใหญ่ นิวตรอนที่วิ่งช้าจะวิ่งผ่านเข้าไปในนิวเคลียสกลายเป็นนิวตรอนในนิวเคลียส นิวตรอนที่เพิ่มขึ้นนี้จะทำให้นิวเคลียสมีพลังงานมากขึ้น อะตอมจะอยู่ในภาวะไม่เสถียรกลายเป็นอะตอมกัมมันตรังสี สามารถขับรังสีออกมาได้

4.3 การกระทำของรังสีเอ็กซ์และรังสีแกมมา

ปริมาณของรังสีเอ็กซ์และรังสีแกมมาเมื่อเดินทางผ่านตัวกลาง จะมีจำนวนน้อยลงเนื่องจากเกิดการกระทำของอะตอมตัวกลางด้วย ขบวนการต่างๆ หลายขบวนการได้แก่ ขบวนการโฟโตอีเล็คทริค (PHITOELECTRIC INTERACTION) และขบวนการคอมป์ตัน (COMPTON INTERACTION) นอกจากนี้ยังมีขบวนการที่สำคัญรองลงมา คือ ขบวนการแพร์โปรดัก-

ชัน (PAIR PRODUCTION), ขบวนการโคเฮอเรนท์สแกเทอริง (COHERENT SCATTERING) และขบวนการโฟโตดิสอินทีเกรชัน (PHOTODISINTEGRATION) ขบวนการต่างๆ ทั้งห้าขบวนการนี้จะกล่าวถึงในภายหลัง

การลดลงของรังสีเอ็กซ์และรังสีแกมมา



อัตราการลดลงของรังสีเอ็กซ์และรังสีแกมมา (dI/dx) จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนรังสี (I) ที่วิ่งผ่านตัวกลางนั้น

$$-\frac{dI}{dx} \propto I$$

เครื่องหมายลบ แสดงว่า จำนวนรังสีเอ็กซ์และรังสีแกมมาลดลง เมื่อวิ่งผ่านตัวกลาง ซึ่งในที่นี้จะเรียกว่า ตัวดูดกลืน (ABSORBER)

กำหนดให้ μ = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของตัวกลาง (ATTENUATION COEFFICIENT) มีค่าคงที่สำหรับตัวกลางแต่ละชนิด ดังนั้นจะได้ว่า

$$-\frac{dI}{dx} = \mu I$$

ในการแก้สมการหาค่า I ซึ่งเป็นจำนวนโฟตอน (รังสีเอ็กซ์และรังสีแกมมา) ที่วิ่งผ่านวัตถุหนา x ได้ จะต้องมีข้อแม้ 2 ข้อ คือ

1. โฟตอนทั้งหมดที่มีอยู่ในลำรังสี จะต้องมีพลังงานเท่ากัน (MONOENERGETIC BEAM)

2. โฟตอนถูกลดทอน (ATTENUATED) ภายใต้ภาวะที่ถูกต้อง (GOOD GEOMETRY) คือ ลำโฟตอนแคบ และไม่มีโฟตอนสะท้อน (SCATTERED PHOTON)

อินทีเกรทสมการข้างต้น

$$\int_{I_0}^{I} \frac{dI}{I} = \int_{0}^{x} -\mu dx$$

จะได้ว่า

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

เมื่อ I_0 เป็นจำนวนโฟตอนในลำรังสีก่อนที่จะผ่านตัวกลาง

กำหนดให้ I_a เป็นจำนวนโฟตอนที่ถูกลดทอนลง

$$\begin{aligned} I_a &= I_0 - I \\ &= I_0 - I_0 e^{-\mu x} \\ &= I_0(1 - e^{-\mu x}) \end{aligned}$$

ตัวเลขยกกำลังของ e จะต้องไม่มีหน่วย ดังนั้น ถ้าความหนา x เป็นเซ็นติเมตร หน่วยของสัมประสิทธิ์การลดทอน μ จะเป็น 1/ซม. แต่ถ้าความหนา x เป็นนิ้ว หน่วยของ μ จะเป็น 1/นิ้ว μ ที่มีหน่วยเป็น 1/ความยาว นี้มีชื่อเรียกว่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (LINEAR ATTENUATION COEFFICIENT)

เนื่องจาก $e^{-\mu x}$ เป็นจำนวนที่แสดงถึงปริมาณโฟตอนที่วิ่งผ่านออกมาจากตัวกลาง ถ้า $e^{-\mu x}$ มีค่ามาก ปริมาณโฟตอนที่วิ่งผ่านออกมาจากตัวกลางจะมีจำนวนมาก แต่ถ้า $e^{-\mu x}$ มีค่าน้อย ปริมาณโฟตอนที่วิ่งผ่านออกมาจากตัวกลางก็จะมีจำนวนน้อย ดังนั้น $e^{-\mu x}$ จึงเป็นตัวเลขที่แสดงถึงโอกาสในการเกิดการกระทำ ซึ่งก็คือโอกาสในการเกิดขบวนการต่างๆ ทั้งห้าขบวนการ จึงอาจจะเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\begin{aligned} e^{-\mu x} &= (e^{-wx})(e^{-\tau x})(e^{-\sigma x})(e^{-Kx})(e^{-\pi x}) \\ &= (e^{-(w+\tau+\sigma+K+\pi)}) \end{aligned}$$

เมื่อ w, τ, σ, K และ π เป็นสัมประสิทธิ์การลดทอนของขบวนการโคเฮอเรนท์-

สแกรทเทอริง (COHERENT SCATTERING, w), ขบวนการโฟโตอีเล็คตริค (PHOTOELECTRIC, τ), ขบวนการคอมป์ตันสแกรทเทอริง (COMPTON SCATTERING, σ), ขบวนการแพร์โปรดักชัน (PAIR PRODUCTION, K) และขบวนการโฟโตดิสอินทีเกรชัน (PHOTODISINTEGRATION, π) ตามลำดับ

ดังนั้นจะได้ว่า

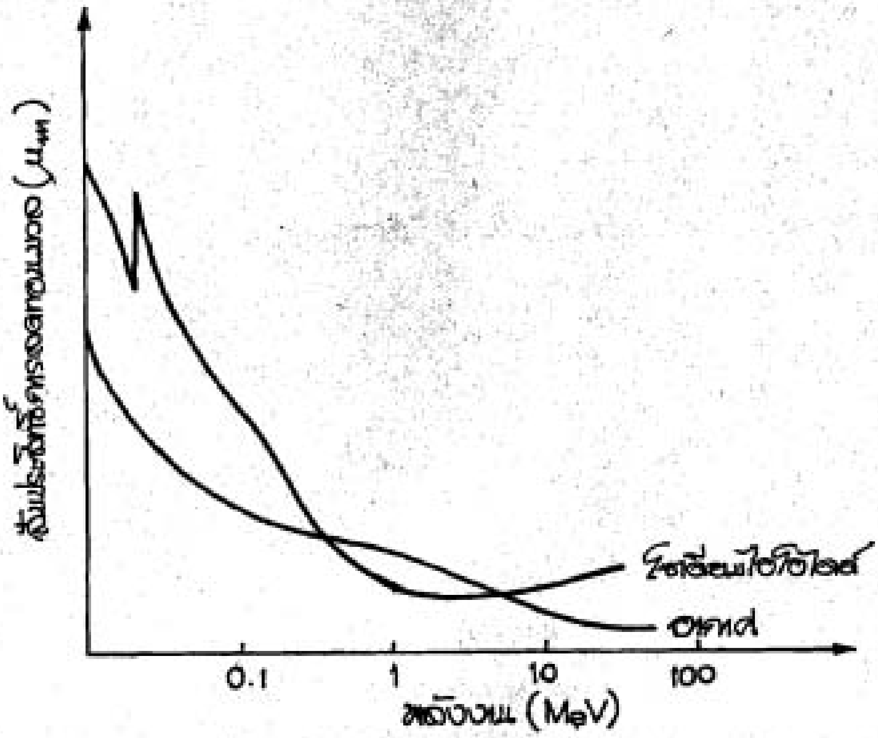
$$\mu = w + \tau + \sigma + K + \pi$$

เนื่องจากสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น μ เป็นผลรวมของสัมประสิทธิ์การลดทอนของขบวนการต่างๆ จึงอาจจะเรียก μ ว่า สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นรวม (TOTAL LINEAR ATTENUATION COEFFICIENT)

ตามปกติจะไม่คิดขบวนการโคเฮอเรนท์ และขบวนการโฟโตดิสอินทีเกรชัน ซึ่งเกิดขึ้นน้อยมาก ทำให้ประมาณค่า μ ได้ดังนี้

$$\mu = \tau + \sigma + \pi$$

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนนี้ จะแปรผันกับพลังงานของรังสีและเลขอะตอมของตัวกลาง นอกจากนี้ยังขึ้นกับความหนาแน่นของตัวกลางอีกด้วย ดังนั้น เพื่อที่จะทำให้สัมประสิทธิ์



รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การลดทอนมวลรวมของอากาศ, โซเดียมไอโอไดด์ กับ พลังงานของโฟตอนที่วิ่งผ่าน

การลดทอนไม่มีค่าขึ้นกับความหนาแน่น จึงหารสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นด้วย ความหนาแน่นของตัวกลาง และเรียกชื่อใหม่ว่า สัมประสิทธิ์การลดทอนมวล (MASS ATTENUATION COEFFICIENT) โดยเพิ่มอักษร m ห้อยไว้ $\mu_m = \mu/\rho$, $w_m = w/\rho$, $\tau_m = \tau/\rho$, $\sigma_m = \sigma/\rho$, $\kappa_m = \kappa/\rho$, $\pi_m = \pi/\rho$ เมื่อ ρ = ความหนาแน่นของตัวกลางสัมประสิทธิ์การลดทอนมวลมีหน่วยเป็น ซม^2/กรัม หรือ ซม^2/มิลลิกรัม เมื่อเป็นเช่นนี้ ความหนา x_m จะมีหน่วยเป็น กรัม/ซม^2 หรือ มิลลิกรัม/ซม^2

นอกจากนี้ อาจพูดถึงความหนาของตัวกลางเป็นจำนวนของอะตอม หรืออิเล็คตรอน ต่อ 1 หน่วยพื้นที่

เมื่อ x_a = ความหนาในหน่วย อะตอม/ซม^2

x_e = ความหนาในหน่วย อิเล็คตรอน/ซม^2

$$x_a \ \frac{\text{อะตอม}}{\text{ซม}^2} = \frac{x\,(\text{ซม})\ \rho\ (\text{กรัม/ซม}^3)\ N_0(\text{อะตอม/กรัมอะตอม})}{M\ (\text{กรัม/กรัมอะตอม})}$$

$$\boxed{x_a = \frac{x\rho N_0}{M}}$$

$$x_e\ (\text{อิเล็คตรอน/ซม}^2) = x\ (\text{อะตอม/ซม}^2)\ \sigma\ (\text{อิเล็คตรอน/อะตอม})$$

$$\boxed{x_e = x_a\sigma}$$

เมื่อ M = จำนวนกรัมใน 1 กรัมอะตอมของตัวกลาง

σ = เลขอะตอมของตัวกลาง

N_0 = เลขอะโวกาโดร = 6.02×10^{23}

= จำนวนอะตอมใน 1 กรัมอะตอม

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนอะตอมรวม (TOTAL ATOMIC ATTENUATION CO-EFFICIENT, μ_a) และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนอิเล็คตรอนรวม μ_e จะมีค่าหน่วยกลับกันกับ x_a และ x_e โดยที่

$$\mu_a\ (\text{ซม}^2/\text{อะตอม}) = \frac{\mu(\text{ซม}^{-1})\ M\ (\text{กรัม/กรัมอะตอม})}{\rho(\text{กรัม/ซม}^3)\ N_0(\text{อะตอม/กรัมอะตอม})}$$

$$\boxed{\mu_a = \frac{\mu M}{\rho N_0}}$$

$$\mu_e\ (\text{ซม}^2/\text{อะตอม}) = \frac{\mu_a\ (\text{ซม}^2/\text{อะตอม})}{Z\ (\text{อิเล็คตรอน/อะตอม})}$$

$$\boxed{\mu_e = \frac{\mu_a}{Z}}$$

ดังนั้น จำนวนโฟตอน (I) ที่วิ่งผ่านตัวกลางอาจคำนวณจากสมการ 4 สมการ ซึ่งจะให้ค่าเท่ากันทุกสมการ คือ

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

$$I = I_0 e^{-\mu_m x_m}$$

$$I = I_0 e^{-\mu_a x_a}$$

$$I = I_0 e^{-\mu_e x_e}$$

ตัวอย่างที่ 4.8 ลำโฟตอนขนาดเล็กซึ่งมีโฟตอนพลังงานเท่ากันจำนวน 2,000 ตัว ถูกทำให้ลดลงเหลือ 1,000 ตัว โดยใช้ทองแดง 1 ซม. ให้หาสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของทองแดงสำหรับโฟตอนเหล่านี้

วิธีทำ จาก $I = I_0 e^{-\mu x}$

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

$$\ln \frac{I_0}{I} = \mu x$$

$$\ln \frac{2000}{1000} = \mu \text{ (1 ซม.)}$$

$$\ln 2 = \mu \text{ (1 ซม.)}$$

$$\mu = \frac{\ln 2}{\text{1 ซม.}} = \frac{0.693}{\text{1 ซม.}} = 0.693 \text{ ซม.}^{-1}$$

ความหนาของสสารที่ทำให้ความเข้มของรังสีเอ็กซ์หรือรังสีแกมมาลดลงครึ่งหนึ่ง เรียกว่า เอชวีแอล (HVL) ย่อมาจาก HALF - VALUE LAYER หรือ เอชวีที (HVT) ย่อมาจาก HALF - VALUE THICKNESS ค่าเอชวีแอลจะแสดงถึงความสามารถในการทะลุทะลวงของลำโฟตอน

$$\text{HVL} = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0.693}{\mu}$$

ตัวอย่างที่ 4.4 ก. จงคำนวณสัมประสิทธิ์การลดทอนมวล (μ_m), อะตอม (μ_a) และอิเล็คตรอน (μ_e) ของแผ่นทองแดงในตัวอย่าง 4.3 กำหนดให้ทองแดงมีความหนาแน่น 8.9 กรัม/ซม^3, 1 กรัมอะตอม เท่ากับ 63.6 และเลขอะตอมเท่ากับ 29

ข. ถ้าเพิ่มทองแดงอีก 2 เซ็นติเมตร จะมีโฟตอนผ่านออกมาจากแผ่นทองแดงเท่าไร

ค. จงหาความหนา x_e ในหน่วยอิเล็คตรอน/ซม^2 สำหรับทองแดง 3 เซ็นติเมตร

ง. จงคำนวณข้อ ข. โดยใช้สัมประสิทธิ์การลดทอนอิเล็คตรอน

วิธีทำ ก. $\mu_m = \mu/\rho$

$$= \frac{0.693\ (\text{ซม.})^{-1}}{8.9\ (\text{กรัม/ซม}^{-3})} = 0.078\ \text{ซม}^2/\text{กรัม}$$

$$\mu_a = \frac{\mu M}{N_0}$$

$$= \frac{(0.693\ \text{ซม}^{-1})\ (63.6\ \text{กรัม/กรัมอะตอม})}{(89\ \text{กรัม/ซม}^3)\ (6.02 \times 10^{23}\ \text{อะตอม/กรัมอะตอม})}$$

$$= 8.2 \times 10^{-24}\ \text{ซม}^2/\text{อะตอม}$$

$$\mu_e = \mu_a / Z$$

$$= \frac{8.2 \times 10^{-24}\ \text{ซม}^2/\text{อะตอม}}{29\ \text{อีเล็คตรอน/อะตอม}}$$

$$= 2.8 \times 10^{-25}\ \text{ซม}^2/\text{อีเล็คตรอน}$$

ข. $I = I_0 e^{-\mu x}$

$$= (2{,}000)e^{-(0.693)(3)}$$

$$= (2{,}000)e^{-2.079} = 2000 \times 0.125 = 250\ \text{โฟตอน}$$

ความหนา 1 ซม. ทำให้โฟตอนลดลงครึ่งหนึ่ง ความหนา 2 ซม. ทำให้โฟตอนลดลง 1/4 และความหนา 3 ซม. ทำให้โฟตอนลดลง 1/8 = 1/8 ของ 2,000 = 250 โฟตอน

ค. $x_e = x_a \sigma$

$$= \frac{x \rho N_0 \sigma}{M}$$

$$= \frac{(29\ \text{อีเล็คตรอน/อะตอม})(3\ \text{ซม.})(8.9\ \text{กรัม/ซม.})(60.2 \times 10^{23}\ \text{อะตอม/กรัมอะตอม}}{(63.6\ \text{กรัม/กรัมอะตอม})}$$

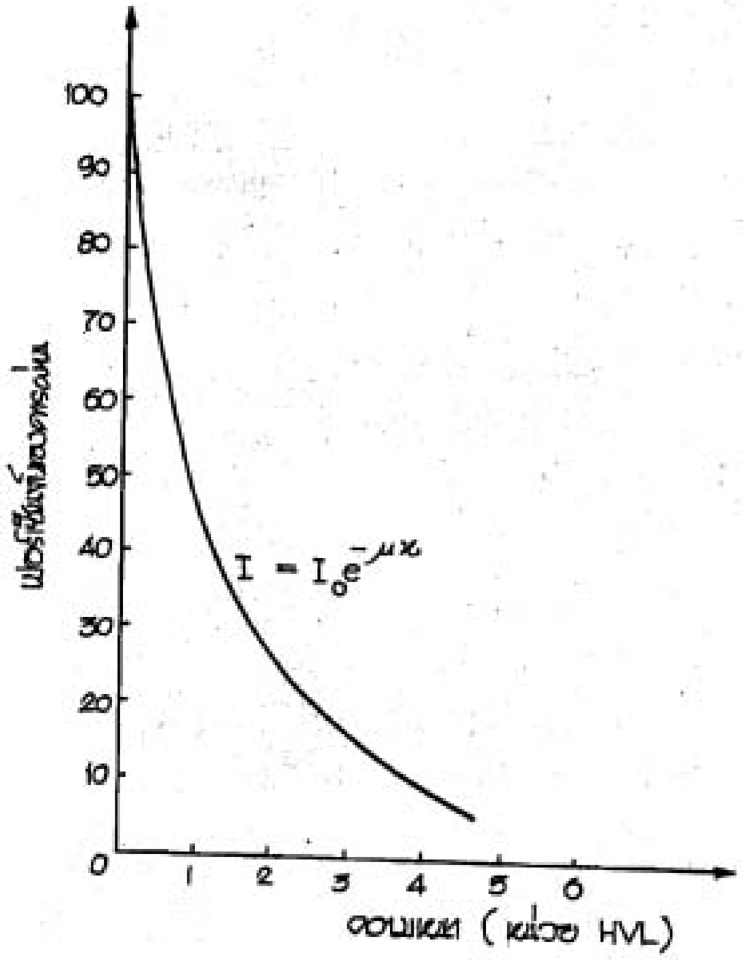
$$= 7.3 \times 10^{24}\ \text{อีเล็คตรอน/ซม}^2$$

ง. $I = I_0 e^{-\mu_e x_e}$

$$= (2.8 \times 10^{-25}\ \text{ซม}^2/\text{อีเล็คตรอน})(7.3 \times 10^{24}\ \text{อีเล็คตรอน/ซม}^2)$$

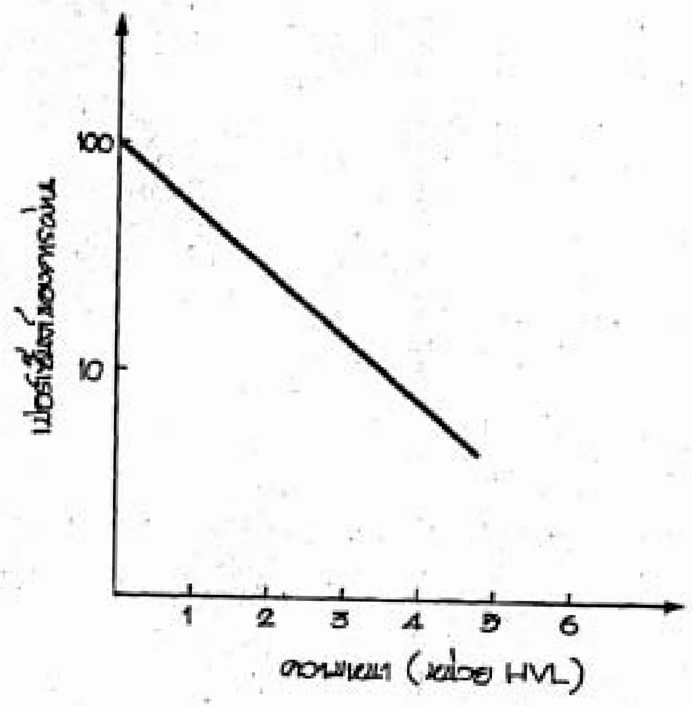
$$= (2000)e^{-2.079} = 2000 \times 0.125 = 250\ \text{โฟตอน}$$

เมื่ออยู่ในภาวะที่ถูกต้อง (GOOD GEOMETRY), ลำของโฟตอนจะลดลงอย่างเอ็กโพเน็นเชียล ดังสมการ $I = I_0e^{-\mu x}$ ซึ่งเมื่อเขียนกราฟระหว่างจำนวนโฟตอน (I) และความหนา (x) จะได้กราฟดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I และ x

จาก $\ln (I/I_0) = -\mu x$ จะเห็นได้ว่าลอการิทึมของจำนวนโฟตอน (I) จะแปรผันอย่างเชิงเส้นกับความหนาของตัวดูดกลืน (ABSORBER) ดังนั้น ถ้าเขียนกราฟระหว่างลอการิทึมของจำนวนรังสีเอ็กซ์ หรือรังสีแกมมากับความหนาจะได้กราฟเส้นตรงดังรูปที่ 4.5 อย่างไรก็ตามจะต้องระลึกไว้เสมอว่า การเขียนกราฟแบบนี้จะได้เส้นตรง เมื่อโฟตอนทั้งหมดที่อยู่ในลำรังสีมีพลังงานเท่ากัน และอยู่ในภาวะที่ถูกต้อง

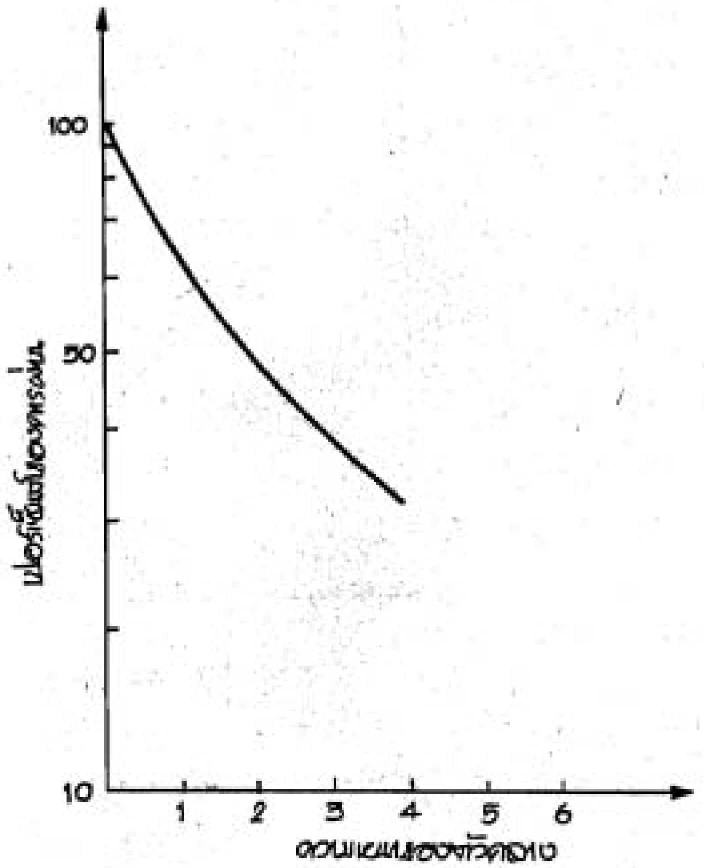


รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ln I กับ x

โดยทั่วไป ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรวมของตัวกลางใดๆ จะลดลง เมื่อพลังงานของโฟตอนที่ตกกระทบเพิ่มขึ้น ดังนั้น โฟตอนที่มีพลังงานต่ำจะถูกลดทอนเร็วกว่าโฟตอนที่มีพลังงานสูงมาก ลำโฟตอนที่มีรังสีเอ็กซ์และรังสีแกมมาที่มีพลังงานต่างๆ กัน จะแรง (HARD) มากขึ้น เช่น ความสามารถในการทะลุทะลวงของลำโฟตอนเพิ่มมากขึ้น เพราะว่าโฟตอนที่มีพลังงานต่ำจะถูกลดทอนออกจากลำโฟตอนที่มีค่าพลังงานหลายค่า (POLYENERGETIC BEAM) กับความหนาของตัวกลางบนกระดาษกึ่งล็อก จะได้กราฟไม่เป็นรูปเส้นตรง

เนื่องจากพลังงานของลำรังสีเอ็กซ์ เมื่อวิ่งผ่านตัวกลางจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความหนาของตัวกลาง ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของลำรังสีเอ็กซ์จึงไม่ได้มีค่าเดียว จะต้องคิดค่าเฉลี่ยที่เรียกว่า สัมประสิทธิ์การลดทอนเฉลี่ยรวม (EFFECTIVE TOTAL ATTENUATION COEFFICIENT) ใช้ตัวย่อว่า μ_{eff}

$$\mu_{eff} = \frac{0.693}{HVL}$$



รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ln I กับ x ของลำโฟตอนที่มีพลังงานหลายค่า

ในทำนองเดียวกันจะมีค่าพลังงานเฉลี่ย (AVERAGE EFFECTIVE ENERGY) ซึ่งมีค่าเท่ากับพลังงานของลำโฟตอนพลังงานเดียวที่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรวมในตัวกลางใดๆ เท่ากับสัมประสิทธิ์การลดทอนเฉลี่ยรวมสำหรับรังสีเอ็กซ์ในตัวกลางชนิดเดียวกัน

ตัวอย่างที่ 4.5 ลำรังสีเอ็กซ์ที่เกิดจากหลอด 200 KV_p มีค่าเอชวีแอล (HVL) เท่ากับ 1.5 มม CU

ก. จงหาสัมประสิทธิ์การลดทอนเฉลี่ยเชิงเส้น และสัมประสิทธิ์การลดทอนเฉลี่ยมวล

ข. จงหาพลังงานเฉลี่ยของลำรังสีเอ็กซ์

วิธีทำ ก) $\mu_{eff} = \dfrac{0.693}{1.5 \text{ มม.CU}} = 0.46 \text{ (มม.CU)}^{-1}$

$$(\mu_m)_{eff} = \frac{\mu_{eff}}{\rho} = \frac{0.46\ (\text{มม.CU})^{-1}\ (10\ \text{มม./ซม.})}{8.9\ \text{กรัม/ซม}^3}$$

$$= 0.52\ \text{ซม}^2/\text{กรัม}$$

ข) ถ้าโฟตอนพลังงานค่าเดียวที่มีพลังงาน 96 KeV จะมีสัมประสิทธิ์การลดทอนมวลรวมเท่ากับ 0.52 ซม^2/กรัม ในทองแดง ดังนั้นพลังงานเฉลี่ยของลำรังสีเอกซ์จะมีค่าเท่ากับ 96 KeV

4.4 ขบวนการโคเฮอเรนท์ สแกรทเทอริ ง

ขบวนการโคเฮอเรนท์สแกรทเทอริง (COHERENT SCATTERING) เป็นขบวนการที่โฟตอนพุ่งเข้าชนอะตอมแล้วเกิดการสูญเสียพลังงานน้อยมาก จนอาจจะไม่นำมาคิดก็ได้ ทิศทางของโฟตอนเกือบจะไม่เปลี่ยนอิเล็คตรอนที่ถูกชนมักจะเป็นอิเล็คตรอนในวงโคจรชั้นนอก ซึ่งยึดติดกับอะตอมด้วยแรงจำนวนเล็กน้อย ถึงแม้ว่าขบวนการนี้จะเกิดขึ้นเมื่อโฟตอนที่มีพลังงาน 150-00 เคอีวี พุ่งเข้าชนตัวกลางที่มีเลขอะตอมสูง แต่การกระทำแบบนี้เกิดขึ้นเมื่อโฟตอนที่มีพลังงานต่ำพุ่งเข้าชนเนื้อเยื่อด้วย ดังนั้น ขบวนการนี้ ก็อาจจะมีผลต่อการถ่ายภาพ ที่ใช้รังสีแกมมาพลังงานต่ำ ทำให้คุณภาพของภาพเลวลงได้

4.5 ขบวนการโฟโตอิ เล็ คตริ คแอ็ บซอฟชั น

ขบวนการโฟโตอิเล็คตริคแอ็บซอฟชัน (PHOTOELECTRIC ABSORPTION) เป็นที่โฟตอนพุ่งเข้าชนอิเล็คตรอนแล้วสูญเสียพลังงานจนหมด พลังงานจำนวนนี้ส่วนหนึ่งจะเป็นพลังงานที่ให้แก่อะตอมเพื่อเอาชนะพลังงานยึดเหนี่ยว อีกส่วนหนึ่งจะเป็นพลังงานจลน์ของอิเล็คตรอนที่ถูกชน อิเล็คตรอนที่ถูกชนจะหลุดออกจากอะตอม มีชื่อเรียกว่า โฟโตอิเล็คตรอน (PHOTOELECTRON)

$$\boxed{E_K = hV - B.E.}$$

เมื่อ E_K = พลังงานจลน์ของอิเล็คตรอนที่หลุดจากอะตอม

hV = พลังงานของโฟตอน

B.E. = พลังงานยุดเหนี่ยว

ตัวอย่างที่ 4.6 จงคำนวณพลังงานจลน์ของโฟโตอิเล็คตรอนที่หลุดออกจากวงโคจรชั้นเค (K-

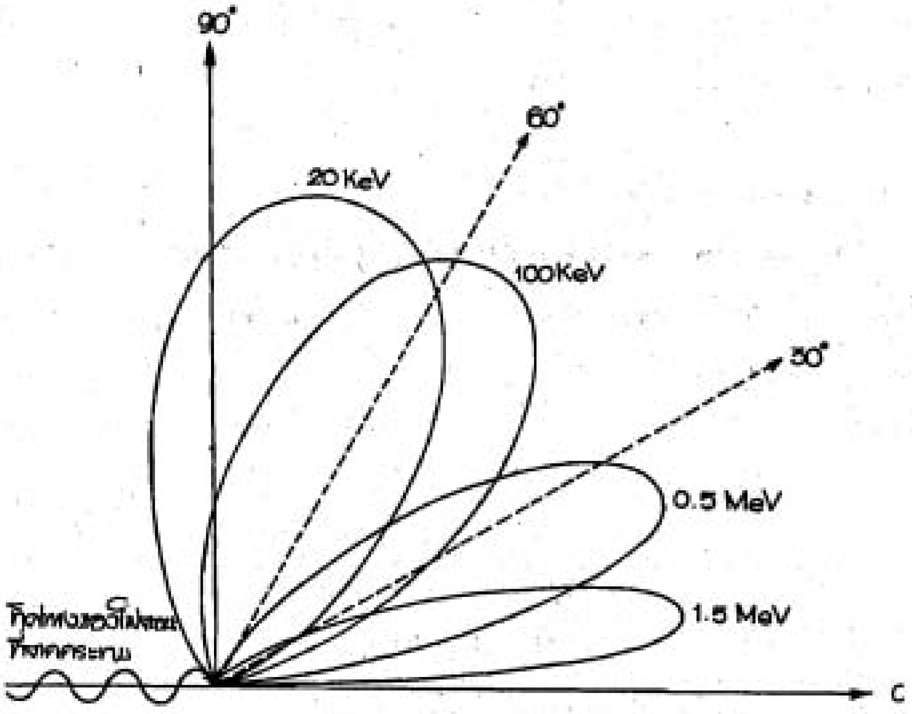
SHELL) ของตะกั่ว (พลังงานยึดเหนี่ยว = 88 เคอีวี) โดยขบวนการโฟโต-อิเล็คทริคของโฟตอนที่มีพลังงาน 100 เคอีวี

วิธีทำ $E_K = hV - B.E.$

$= 100 \text{ KeV} - 88 \text{ KeV} = 12 \text{ KeV}$

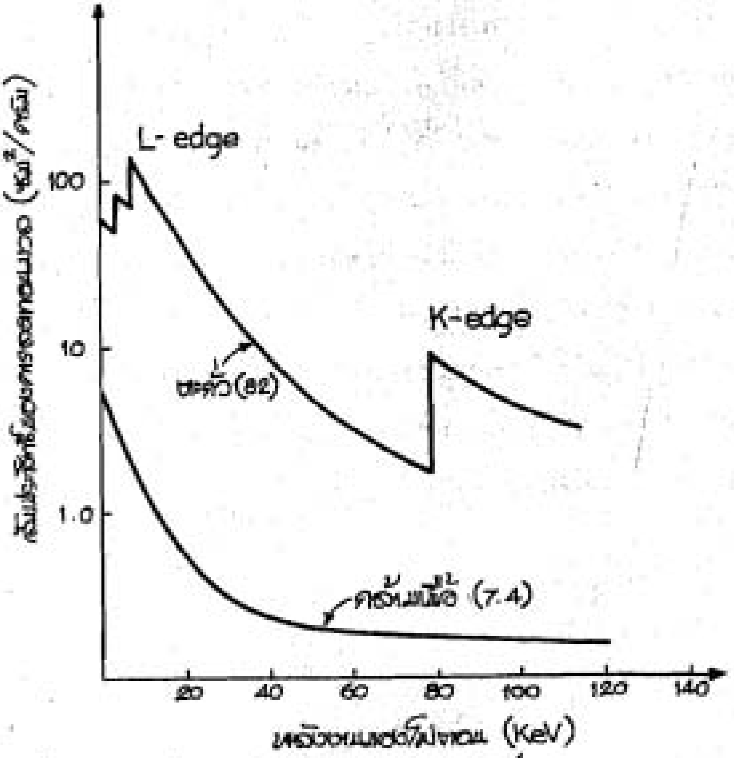
ค่าเฉลี่ยของพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็คตรอน ในวงโคจรชั้นเคของอะตอมในเนื้อเยื่อมีค่าประมาณ 0.5 เคอีวี ดังนั้นโฟโตอิเล็คตรอนที่ถูกขับออกจากวงโคจรชั้นเคของอะตอมในเนื้อเยื่อ จะมีพลังงานจลน์น้อยกว่าพลังงานของโฟตอนที่ตกกระทบ (INCIDENT PHOTON) ประมาณ 0.5 เคอีวี

ส่วนมากโฟโตอิเล็คตรอนที่เกิดจากการกระทำของโฟตอนที่มีพลังงานต่ำ จะถูกขับออกมาในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางของโฟตอน แต่เมื่อโฟตอนมีพลังงานมากขึ้น มุมระหว่างโฟตอนและโฟโตอีเล็คตรอนจะลดลง



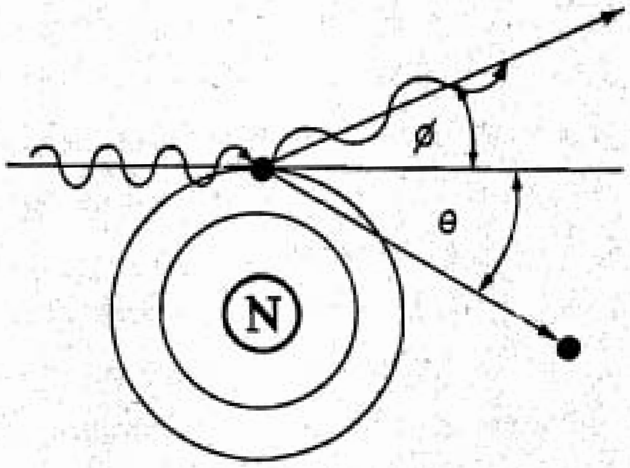
รูปที่ 4.7 อีเล็คตรอนจะถูกขับออกมาในทิศทางเกือบตั้งฉากกับทิศทางโฟตอนที่ตกกระทบ เมื่อโฟตอนที่พุ่งเข้าชนมีพลังงานต่ำ แต่เมื่อโฟตอนมีพลังงานสูงมุมระหว่างโฟตอนที่ตกกระทบ และอีเล็คตรอนที่ถูกขับออกมาจะลดลง

โอกาสในการเกิดขบวนการโฟโตอีเล็คทริคจะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อพลังงานของโฟตอนเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปสัมประสิทธิ์การลดทอนมวลของขบวนการโฟโตอีเล็คทริค (τm) จะแปรผันตาม $1/(h\nu)^3$ เมื่อ $h\nu$ เป็นพลังงานของโฟตอน จากกราฟรูปที่ 4.8 ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ ระหว่างสัมประสิทธิ์การลดทอนมวลของขบวนการโฟโตอีเล็คทริค (τm) กับพลังงานของโฟตอน ซึ่งวิ่งผ่านตัวกลาง 2 ชนิด คือ ตะกั่ว และกล้ามเนื้อ จะเห็นได้ว่า กราฟของตะกั่วบางช่วงจะไม่ต่อเนื่อง เรียกว่า แอ็ปซอฟชันเอดจ์ (ABSORPTION EDGE) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อพลังงานของโฟตอนมีค่าเท่ากับพลังงานยึดเหนี่ยวของอีเล็คตรอน ส่วนแอ็ปซอฟชันเอดจ์ของกล้ามเนื้อจะเกิดขึ้น เมื่อโฟตอนมีพลังงานต่ำมากจึงไม่ได้แสดงในรูป ไม่ว่าโฟตอนจะมีพลังงานเท่าไร สัมประสิทธิ์การลดทอนของตะกั่ว (เลขอะตอม = 82) จะมากกว่ากล้ามเนื้อ (เล-อะตอม = 7.4) โดยทั่วไปสัมประสิทธิ์การลดทอนมวลจะแปรผันกับกำลังสามของเลขอะตอม (Z^3) ดังนั้นตัวกลางที่มีเลขอะตอมแตกต่างกันจะดูดกลืนโฟตอนด้วยปริมาณที่ต่างกัน ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการถ่ายภาพโดยใช้รังสีเอ็กซ์หรือรังสีแกมมามาก เพราะว่า จะเห็นความแตกต่างของส่วนประกอบของร่างกายได้ชัดเจนขึ้น



รูปที่ 4.8 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การลดทอนมวลของพลังงานโฟโตอีเล็คทริค (τm) กับพลังงานโฟตอน

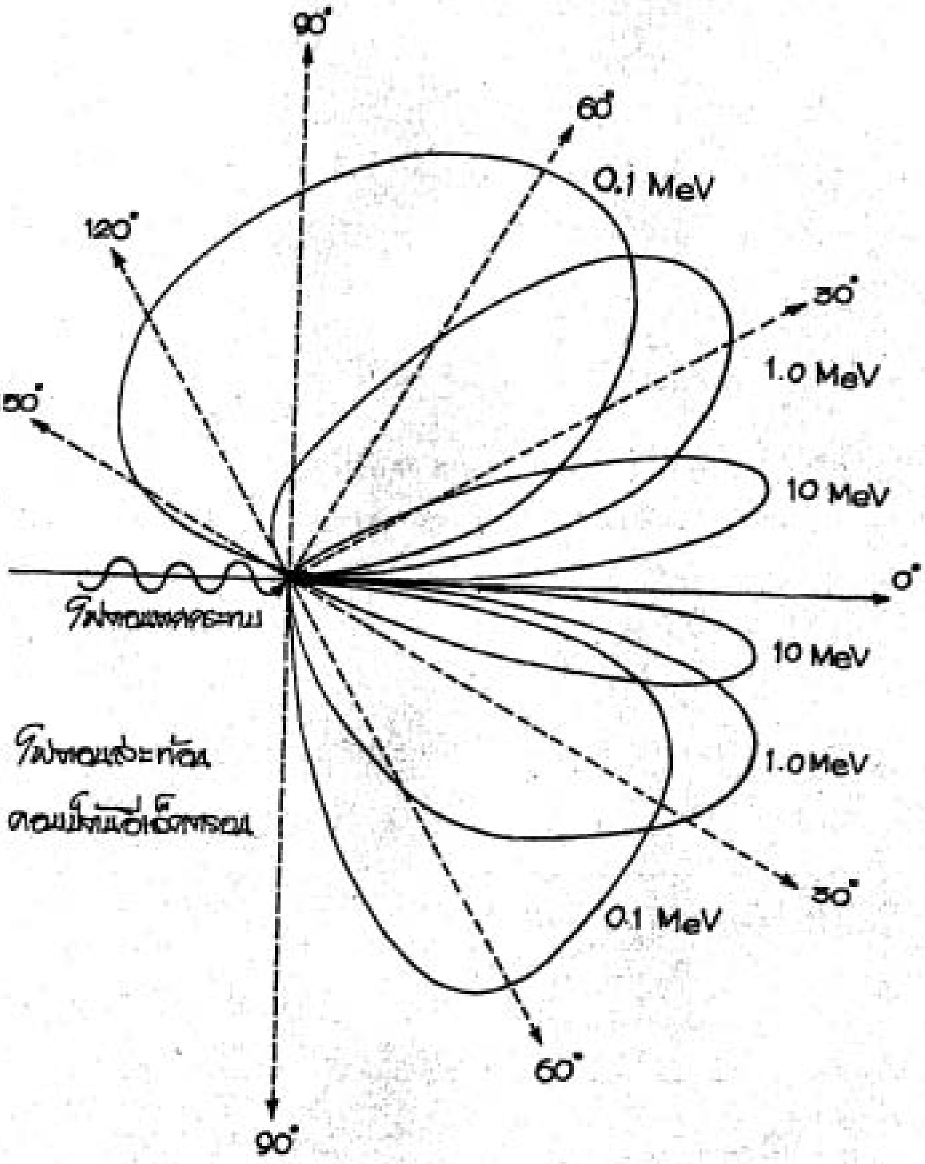
4.6 ขบวนการคอมป์ตันสแกทเทอริง



รูปที่ 4.9 ขบวนการคอมป์ตันสแกทเทอริง

รังสีเอ็กซ์และรังสีแกมมาที่มีพลังงานระหว่าง 30 เคอีวี และ 30 เอ็มอีวี ส่วนมากจะกระทำกับเนื้อเยื่อโดยขบวนการคอมป์ตันสแกทเทอริง เมื่อเกิดขบวนการนี้แล้วพลังงานบางส่วนของโฟตอนตกกระทบ (incident photon) จะส่งให้กับอิเล็คตรอนของอะตอมของตัวกลางนั้น อิเล็คตรอนจะถูกชนกระเด็นออกมาในทิศทำมุม θ กับทิศทางการเคลื่อนที่ของโฟตอนตกกระทบ อิเล็คตรอที่หลุดออกมานี้มีชื่อเรียกว่า คอมป์ตันอิเล็คตรอน (Compton electron) และโฟตอนจะสะท้อนออกไปทำมุม ϕ ดังแสดงในรูปที่ 4.9

พลังงานจลน์ของคอมป์ตันอิเล็คตรอนจะมีค่าเท่ากับพลังงานของโฟตอนที่สูญเสียไปถ้าคิดว่าพลังงานดึงดูดมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับพลังงานของโฟตอน เพราะว่า อิเล็คตรอนที่ถูกชนมักจะเป็นอิเล็คตรอนในวงโคจรชั้นนอกซึ่งมีค่าพลังงานดึงดูดน้อย



รูปที่ 4.10 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของโฟตอนและอิเล็คตรอน เมื่อโฟตอนมีพลังงานต่างๆ ต่างๆ ถ้าโฟตอนมีพลังงานสูงโอกาสในการเกิดการสะท้อนไปข้างหน้าจะมีค่ามากกว่าการสะท้อนไปข้างหน้า (sidescatter) หรือการสะท้อนไปทางด้านหลัง (back-scatter

เมื่อเกิดขบวนการคอมป์ตันสแกทเทอริง รังสีเอ็กซ์หรือรังสีแกมมา จะมีความยาวคลื่นเปลี่ยนไปตามสมการ

$$\Delta\lambda = 0.0243\,(1 - \cos\phi)$$

เมื่อ ϕ = มุมสะท้อนของโฟตอน

$\Delta\lambda$ = การเปลี่ยนแปลงของความยาวคลื่น (อังสตรอม)

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$$

เมื่อ λ' = ความยาวคลื่นของโฟตอนสะท้อน

λ = ความยาวคลื่นของโฟตอนตกกระทบจากสมการ

$$\lambda' = \lambda + \Delta\lambda$$

พลังงานของโฟตอนตกกระทบ ($h\nu$) และพลังงานของโฟตอนสะท้อน ($h\nu'$) คำนวณจากสมการ

$$h\nu\ (\text{Kev}) = \frac{12.4}{\lambda(\text{A}^{\circ})}$$

$$h\nu'\ (\text{Kev}) = \frac{12.4}{\lambda'(\text{A}^{\circ})}$$

ตัวอย่างที่ 4.7 โฟตอนพลังงาน 210 เคอีวี วิ่งผ่านตัวกลางเกิดขบวนการคอมป์ตันสแกทเทอริง จะสะท้อนไปเป็นมุม 80 องศา จงหาพลังงานของโฟตอนสะท้อน และคอมป์-ตันอีเล็คตรอน

วิธีทำ ความยาวคลื่นของโฟตอนตกกระทบมีค่าดังนี้

$$\lambda = \frac{12.4}{h\nu}$$

$$= \frac{12.4}{210 \text{ KeV}} = 0.059 \text{ A}^{\circ}$$

การเปลี่ยนแปลงของความยาวคลื่น

$$\Delta\lambda = 0.0243\,(1 - \cos\phi)$$

$$= 0.0243\,(1 - \cos 80^{\circ}) = 0.0243\,(1 - 0.174)$$

$$= 0.02 \text{ A}^{\circ}$$

ความยาวคลื่นของโฟตอนสะท้อน (λ') มีค่าดังนี้

$$\lambda' = \lambda + \Delta\lambda$$

$$= 0.059 + 0.02 = 0.079 \text{ A}^{\circ}$$

พลังงานของโฟตอนสะท้อน

$$h\nu' = \frac{12.4}{\lambda'}$$

$$= \frac{12.4}{0.079 \text{ A}^{\circ}} = 160 \text{ KeV}$$

พลังงานของคอมป์ตันอีเล็คตรอน E_K

$$E_K = h\nu - h\nu'$$

$$= 210 - 161 = 50 \text{ KeV}$$

ตัวอย่างที่ 4.8 โฟตอนพลังงาน 20 เคอีวี วิ่งผ่านตัวกลาง เกิดขบวนการคอมป์ตันสแกทเทอริง จงหาพลังงานสูงสุดของคอมป์ตันอีเล็คตรอน

วิธีทำ พลังงานที่ส่งต่อให้กับอีเล็คตรอนจะมีค่ามากที่สุด เมื่อความยาวคลื่นของโฟตอนเปลี่ยนแปลงไปมากที่สุด

$\Delta\lambda$ จะมีค่ามากที่สุดเมื่อ $\phi = 180^{\circ}$

$$\Delta\lambda_{max} = 0.0243\,(1 - \cos 180^{\circ})$$

$$= 0.0243\,[1 - (-1)] = 0.0486 = 0.05 \text{ A}^{\circ}$$

ความยาวคลื่นของโฟตอนพลังงาน 20 เคอีวี

$$\lambda = \frac{12.4}{h\nu}$$

$$= \frac{12.4}{20 \text{ KeV}} = 0.62 \text{ A}^{\circ}$$

ความยาวคลื่น λ' ของโฟตอนสะท้อนเป็นมุม 180°

$$\lambda' = \lambda + \Delta\lambda$$

$$= 0.62 + 0.05 = 0.67 \text{ Å}$$

พลังงานของโฟตอนสะท้อน

$$h\nu' = \frac{12.4}{\lambda'}$$

$$= \frac{12.4}{0.67} = 18.6 \text{ KeV}$$

พลังงานของคอมป์ตันอิเล็คตรอน E_K

$$E_K = h\nu - h\nu'$$

$$= 20.0 - 18.6 = 1.46 \text{ KeV}$$

จะเห็นได้ว่าอิเล็คตรอนรับพลังงานไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แสดงว่าเมื่อโฟตอนที่มีพลังงานต่ำเกิดการชนแบบคอมป์ตัน พลังงานส่วนใหญ่จะถูกส่งต่อให้โฟตอนสะท้อนพลังงานส่วนน้อยที่ส่งให้อิเล็คตรอน

ตัวอย่างที่ 4.9 ไฟตอนพลังงาน 2 เอ็มอีวี วิ่งผ่านตัวกลางเกิดขบวนการคอมป์ตันสแกทเทอริง จงหาพลังงานสุ.สุดของคอมป์ตันอิเล็คตรอน

วิธีทำ ความยาวคลื่นของโฟตอนที่มีพลังงาน 2 เอ็มอีวี คือ

$$\lambda = \frac{12.4}{h\nu}$$

$$= \frac{12.4}{2000 \text{ KeV}} = 0.0062 \text{ Å}$$

การเปลี่ยนแปลงของความยาวคลื่นของโฟตอนที่สะท้อนไปเป็นมุม 180° = 0.0486 (จากตัวอย่างที่ 4.8)

ดังนั้น ความยาวคลื่น λ' ของโฟตอนที่ถูกสะท้อนเป็นมุม 180° คือ

$$\lambda' = \lambda + \Delta\lambda$$

$$= 0.0062 + 0.0486 = 0.0548 \text{ Å}$$

พลังงานของโฟตอนสะท้อน

$$h\nu' = \frac{12.4}{\lambda'}$$

$$= \frac{12.4}{0.0548} = 226 \text{ KeV}$$

พลังงานของคอมป์ตันอิเล็คตรอน (E_K)

$$E_K = h\nu - h\nu'$$

$$= 2000 - 226 \text{ KeV}$$

$$= 1774 \text{ KeV}$$

เมื่อโฟตอนพลังงานสูงสุดสะท้อนโดยขบวนการคอมป์ตัน พลังงานเกือบทั้งหมดจะถูกส่งต่อให้กับคอมป์ตันอิเล็คตรอน พลังงานจำนวนเล็กน้อยเท่านั้นที่โฟตอนสะท้อนรับไป

ตัวอย่างที่ 4.10 จงแสดงให้เห็นว่า ถ้าโฟตอนตกกระทบมีพลังงานสูงมาก เมื่อสะท้อนโดยขบวนการคอมป์ตันไปเป็นมุม 180 องศา และ 90 องศา จะมีพลังงานเท่ากับ 255 เคอีวี และ 511 เคอีวี ตามลำดับ

วิธีทำ ความยาวคลื่นของโฟตอนสะท้อน λ'

สำหรับโฟตอนที่มีพลังงานสูงมาก λ จะมีค่าน้อยและอาจจะตัดทิ้งได้ เมื่อเทียบกับ $\Delta\lambda$

$$\lambda' \cong \Delta\lambda$$

สำหรับโฟตอนที่สะท้อนเป็นมุม 180°

$$\lambda' \cong 0.0243\,(1 - \cos 180^\circ)$$

$$= 0.0243\,[1 - (-1)] = 0.0486 \text{ A}^\circ$$

พลังงานของโฟตอนสะท้อนเป็นมุม 90°

$$h\nu' = \frac{12.4}{\lambda'}$$

$$= \frac{12.4}{0.0486} \cong 255 \text{ KeV}$$

สำหรับโฟตอนที่สะท้อนเป็นมุม 90°

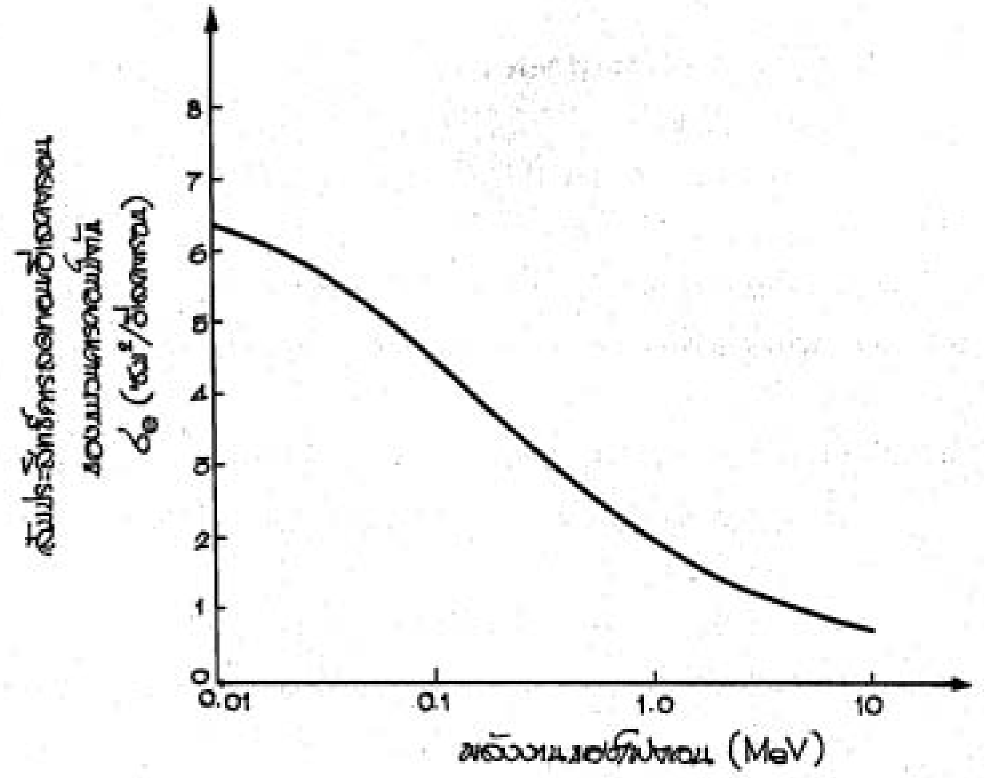
$$\lambda' \cong 0.0243\,(1 - \cos 90^\circ)$$

$$= 0.0243\,(1 - 0) = 0.243 \text{ A}^\circ$$

พลังงานของโฟตอนสะท้อนเป็นมุม 90°

$$h\nu' = 12.4 / \lambda'$$

$$= 12.4 / 0.0243 \approx 511 \text{ KeV}$$



รูปที่ 4.11 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การกระเจิงคอมป์ตันต่ออิเล็กตรอนของขบวนการคอมป์ตัน (σ_e) กับพลังงานของโฟตอน ซึ่งจะมีค่าลดลงเมื่อพลังงานของโฟตอนเพิ่มมากขึ้น

4.7 ขบวนการแพร์โปรดักชัน

รังสีเอ็กซ์หรือรังสีแกมมาจะเกิดการกระทำแบบแพร์โปรดักชัน เมื่อวิ่งเข้าไปใกล้กับนิวเคลียสของตัวกลาง เมื่อเกิดขบวนการนี้ โฟตอนจะหายไปกลายเป็นอีเล็คตรอนและโพซิตรอน เนื่องจากพลังงานที่มีค่าเท่ากับมวลของอีเล็คตรอนเท่ากับ 0.51 เอ็มอีวี ดังนั้น การสร้างอีเล็คตรอนและโพซิตรอนต้องการพลังงานไม่น้อยกว่า 1.02 เอ็มอีวี โฟตอนที่มีพลังงานน้อยกว่า 1.02 เอ็มอีวี จะไม่สามารถทำให้เกิดขบวนการแพร์โปรดักชันได้ พลังงานส่วนที่เกิน 1.02 เอ็มอีวี อีเล็คตรอนและโพซิตรอนจะรับไปทำให้มีพลังงานจลน์เพิ่มขึ้น

$$hV\ (MeV) = 1.02 + (E_K)_{e-} + (E_K)_{e+}$$

เมื่อ hV = พลังงานของโฟตอน

$(E_K)_{e-}$ = พลังงานจลน์ของอีเล็คตรอน (เนกกาตรอน, negatron)

$(E_K)_{e+}$ = พลังงานจลน์ของโพซิตรอน

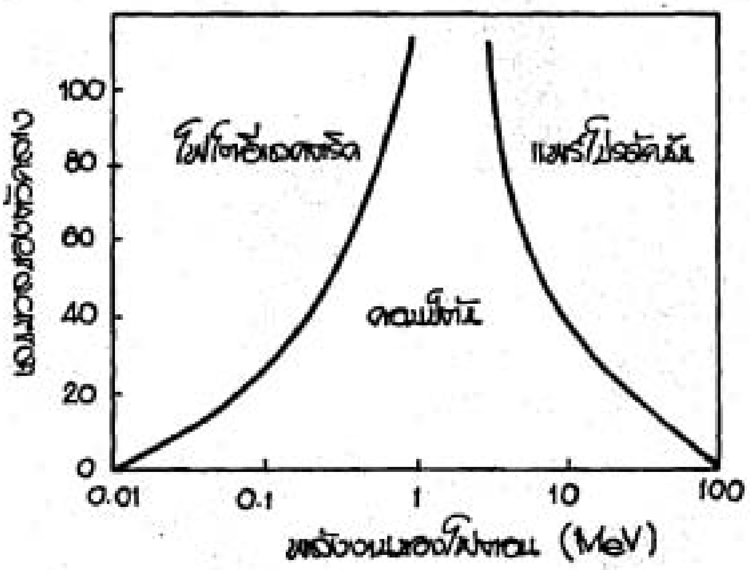
ตัวอย่างที่ 4.11 โฟตอนพลังงาน 5 เอ็มอีวี เกิดขบวนการแพร์โปรดักชันใกล้นิวเคลียส พลังงานที่หลือจะแบ่งกันระหว่างเนกกาตรอน (negatron) และโพซิตรอนเท่ากัน ให้หาพลังงานจลน์ของอนุภาคทั้งสอง

วิธีทำ

$$hV\ (MeV) = 1.02 + (E_K)_{e-} + (E_K)_{e+}$$

$$(E_K)_{e-} = (E_K)_{e+} = \frac{(hV - 1.02)}{2}\ MeV$$

$$= \frac{5 - 1.02}{2} = 1.99\ MeV$$



รูปที่ 4.2 แสดงถึงโอกาสในการเกิดขบวนการโฟโตอีเล็คทริค, คอมป์ตันและแพร์โปรดักชัน ในตัวกลางที่มีเลขมวลต่างๆ โดยการเขียนกราฟสัมพันธ์กับพลังงานของโฟตอนตกกระทบ

โอกาสในการเกิดขบวนการต่างๆ จะขึ้นอยู่กับเลขมวลตัวกลางและพลังงานของโฟตอน สำหรับโฟตอนที่มีพลังงานต่ำ โอกาสในการเกิดขบวนการโฟโตอีเล็คทริคจะมีค่ามาก ส่วนโฟ-ตอนที่มีพลังสูงมีโอกาสในการเกิดขบวนการแพร์โปรดักชันมาก ในตัวกลางที่มีเลขมวลต่ำจะมีโอกาสในการเกิดขบวนการคอมป์ตันมาก ส่วนตัวกลางที่มีเลขมวลสูง โอกาสในการเกิดขบวนการต่างๆ จะขึ้นกับพลังงานของโฟตอน ดังแสดงในรูปที่ 4.12

4.8 ขบวนการโฟโตดิสอินทีเกรชัน

ขบวนการโฟโตดิสอินทีเกรชัน (photodisintegration) เป็นขบวนการที่รังสีเอ็กซ์หรือรังสีแกมมาพุ่งเข้าชนนิวเคลียส แล้วเกิดปฏิกริยาทางนิวเคลียส์ (Nuclear reaction) เช่น $^{9}Be(h\nu, n)^{8}Be$

แบบฝึกหัดที่ 4

1. จงอธิบายการกระทำของรังสีที่เป็นอนุภาคกับวัตถุ
2. ตารางต่อไปนี้แสดงของความหนาครึ่งหนึ่ง ()HVL) ของวัตถุต่างๆ สำหรับรังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงาน 1 เอ็มอีวี จงหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้นและสัมประสิทธิ์การดูดกลืนมวลของวัตถุเหล่านี้
3. จะต้องใช้กี่ HVL จึงจะทำให้ความเข้มของรังสีเอ็กซ์ลดลง 1/80 เท่า
4. จงอธิบายกระบวนการต่างๆ ที่เกิดขึ้นเมื่อรังสีเอ็กซ์ หรือรังสีแกมมาเคลื่อนผ่านตัวกลาง
5. รังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่น λ ษ 0.708 อังสตรอม เกิดขบวนการคอมป์ตัน เมื่อวิ่งผ่านพาราฟิน จงหาความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ที่สะท้อนเป็นมุม

   ก. $\pi/2$ ข. π
6. จงหาความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ที่เกิดขบวนการคอมป์ตัน เมื่อวิ่งผ่านกราไฟท์แล้วสะท้อนไปเป็นมุม 60° โดยที่ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ที่สะท้อนเท่ากับ 2.54×10^{-7} เซ็นติเมตร
7. รังสีเอ็กซ์ความยาวคลื่น $\lambda = 0.2$ อังสตรอม เกิดขบวนการคอมป์ตันเบี่ยงเบนไปเป็นมุม 90° จงหา

   ก. การเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

   ข. พลังงานของคอมป์ตันอีเล็คตรอน

   ค. โมเมนตัมของคอมป์ตันอีเล็คตรอน
8. หลังจากเกิดขบวนการคอมป์ตัน พบว่า พลังงานของโฟตอนตกกระทบส่งต่อให้โฟตอนสะท้อนและอีเล็คตรอนจำนวนเท่ากัน โฟตอนเบี่ยงเบนไปเป็นมุม 90° จงหาพลังงานของโฟตอนสะท้อน
9. พลังงานของรังสีเอ็กซ์เท่ากับ 0.6 เอ็มอีวี จงหาพลังงานของคอมป์ตันอีเล็คตรอน ถ้าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์เปลี่ยนไป 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเกิดขบวนการคอมป์ตัน