บทที่ 6
อันตรกิริยาของรังสีพลังงานสูงกับวัสดุกั้น

อัตรกิริยาเป็นข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับธรรมชาติของอนุภาคความแจ่มแจ้งของอันตรกิริยา ได้แก่ การมองเห็น ได้ยิน ดมกลิ่น และลิ้มรส รายละเอียดในบทนี้คือ กลไกของอันตรกิริยาระหว่างรังสีพลังงานสูงและวัสดุกั้น ซึ่งรังสีในที่นี้หมายถึงทั้งคุณสมบัติเป็นอนุภาค (ได้แก่อนุภาคมีประจุและนิวตรอน) และคลื่นรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า (เช่น รังสีเอ็กซ์และแกมมา)

ประโยชน์ของความรู้ในบทนี้คือ เป็นพื้นฐานเพื่อเข้าใจวิธีการตรวจวัด และผลส่งถึง (โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านชีวภาพ) ตลอดจนการป้องกันอันตรายจากรังสี เพื่อสะดวกในการเข้าใจการนำเสนอจะแยกออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

(1) อันตรกิริยาของอนุภาคมีประจุ (พลังงาน 10 keV - 10 MeV) เช่น e, e^+, p, α, และ ^2D

(2) อันตรกิริยาของโฟตอนพลังงานสูง เช่น รังสีเอ็กซ์และแกมมา

(3) อันตรกิริยาของนิวตรอน

อันตรกิริยาของอนุภาคมีประจุ (10 keV ถึง 10 MeV)

ทฤษฎีกลไกของการเกิดอันตรกิริยา

เมื่ออนุภาคมีประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่านสารใด ๆ (โดยทั่วไปเรียกว่า "เป้า" (target) ของการชนกัน) ย่อมเกิดการชนกันหรืออันตรกิริยากับประจุลบของอิเล็กตรอน และประจุบวกของนิวคลีไอของอะตอมเป้า (หรือโมเลกุล) มันมีแนวโน้มที่จะดูดหรือผลักอิเล็กตรอนหรือนิวคลีไอมีประจุที่อยู่ใกล้เคียง หรืออยู่ในแนวรัศมีการเคลื่อนที่แบบวงโคจร (trajectory) ภายใต้แรงคูลอมป์ (coulomb force) โดยทั่วไปลักษณะของแรงดูดหรือผลักดังกล่าวถูกจัดเป็นแบบ inelastic ซึ่งอนุภาคมีประจุจะสูญเสียพลังงานบางส่วนในตัวมันให้กับอิเล็กตรอนของอะตอมเป้า หรือกล่าวได้ว่าอิเล็กตรอนของอะตอมเป้ามีการดูดกลืนพลังงาน ซึ่งผลต่อไปคือทำให้อะตอมดังกล่าวเกิดการแตกตัว (ionization) หรืออยู่ในสถานะกระตุ้น ถ้าพลังงานมีค่าอยู่ภายในช่วง 10 keV ถึง 10 MeV มักเกิดการแตกตัวมากกว่าจะก่อให้อยู่ในสถานะกระตุ้น จากเหตุผลดังอธิบายนี้จึงมักเรียกรังสีพลังงานสูงเป็น "ไอออนไนซิงเรดิเอชัน" (ionizing radiation) อย่างไรก็ตาม ปรากฏการณ์ที่กระตุ้นให้อะตอมมีสถานะกระตุ้นยังไม่อาจละทิ้งเสียเลยทีเดียว โดยทั่วไป "โอกาส" ในการเกิดชนกันแบบ inelastic นั้นมีค่าสูงวัสดุกั้นที่หนาไม่มากนัก จะไม่สามารถหยุดอนุภาคมีประจุได้อย่างสมบูรณ์

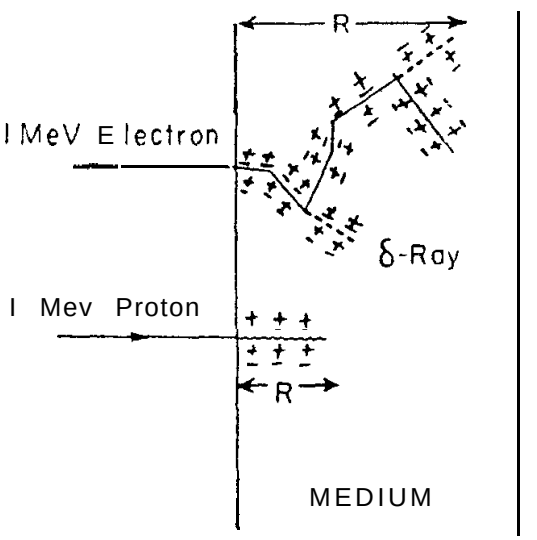
ข้อแตกต่างระหว่างอนุภาคมีประจุที่เบากว่าและหนักกว่า

วัตถุประสงค์ของหัวข้อนี้คืออธิบายคำถามเกี่ยวกับลักษณะการชนกันของอนุภาคมีประจุว่าเป็นเช่นเดียวกันทั้งหมดหรือไม่ คำตอบอาจเป็น "ใช่" หรือ "ไม่ใช่" ก็ได้ เหตุผลมีดังนี้

(1) ถ้าเป็นคำตอบ "ใช่" เนื่องจากธรรมชาติการชนกันของทุกอนุภาคมีประจุไฟฟ้าในช่วงพลังงานนี้เป็นเช่นเดียวกันหมด (inelastic collisions)

(2) สำหรับคำตอบ "ไม่ใช่" เนื่องจากผลปรากฏของการชนกันดังกล่าวของอนุภาคเบากว่าซึ่งมีมวลอยู่ในลำดับเดียวกับอิเล็กตรอน (เช่น e และ e^+) หรือหนักกว่าซึ่งมีมวลเท่ากับหรือมากกว่าของโปรตอน (เช่น โปรตอน และ อัลฟา) นั้นแตกต่างกันโดยสิ้นเชิง

อนุภาคเบากว่าจะชนกับอิเล็กตรอนของอะตอมเป้าแบบ inelastic ซึ่งนอกจากสูญเสียพลังงานแล้วยังมีแนวโน้มที่จะถูกเบี่ยงเบนด้วยมุมที่โตกว่าของกรณีอนุภาคหนักกว่า ผลตามมาคือมีการแปรค่ามากในทางเดินของอนุภาคทั้งสองชนิด แสดงในรูป 6 –1 ซึ่งเป็นแผนภาพของอิเล็กตรอนและโปรตอนในตัวกลางทางเดินของอนุภาคหนักกว่าจะเป็นเส้นตรง แต่อนุภาคเบาจะเป็นแบบซิกแซ็ก เมื่ออนุภาค (มีประจุ) เบากว่าถูกเบี่ยงเบนด้วยมุมขนาดใหญ่จะทำให้การส่งผ่านพลังงานให้อิเล็กตรอนของอะตอมเป้ามีค่ามากตามไปด้วย ผลคืออิเล็กตรอน



รูป 6-1 พิสัย R ของอนุภาคมีประจุ อนุภาคหนัก (เช่น โปรตอน) เดินทางและเสียพลังงานในแนวเส้นตรงหรือเกือบเป็นเส้นตรง อนุภาคเบา (เช่น อิเล็กตรอน) เสียพลังงานในการเดินทางแบบซิกแซ็ก อนุภาคที่เบากว่าสามารถถ่ายเทพลังงานปริมาณมากให้กับอิเล็กตรอนของตัวกลางโดยตรง ดังนั้นจึงก่อให้เกิดรังสี เครื่องหมายบวกและลบแทนการแตกตัวของอะตอมของตัวกลาง (รูปมิได้บอกสเกลที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้ไกลกว่าโปรตอน)

ดังกล่าวซึ่งได้รับพลังงานปริมาณมากนี้ประพฤติตนเช่นเดียวกับอนุภาคมีประจุพลังงานสูง ดังนั้นจะสร้างทางเดินของมันเองในตัวกลาง (คือเป้านั่นเอง) เรียกทางเดินที่ถูกสร้างโดยอิเล็กตรอนพลังงานสูงทุติยภูมินี้ว่า รังสี

(δ rays) ในรูป 6 –1 เป็นเส้นประซึ่งการส่งผ่านพลังงานลักษณะดังกล่าวนี้จะไม่ค่อยเกิดในกรณีของโปรตอนหรืออนุภาคหนักกว่า

พิสัยของอนุภาคมีประจุ (R)

เมื่ออนุภาคมีประจุเคลื่อนที่ไปในตัวกลาง ยิ่งระยะทางการเคลื่อนที่มาก ยิ่งมีการเสียพลังงานให้กับอะตอมของตัวกลางมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งพวกอะตอมที่อยู่ใกล้เคียงแนวทางเดินดังกล่าว ผลคือเกิดการแตกตัวหรือก่อให้อะตอมเกิดสถานะกระตุ้น ระยะทางเฉลี่ยซึ่งอนุภาคมีประจุเดินทางใน แนวทางตกกระทบนี้เรียกเป็น พิสัย (range) R ซึ่งจะใกล้เคียงค่าจริงได้แน่นอนเฉพาะอนุภาคหนัก เช่น อัลฟา ถ้าเป็นพวกอนุภาคเบากว่า เช่น อิเล็กตรอน โพสิตรอน จะกำหนดค่าพิสัยแน่นอนได้ยากวิธีการหนึ่งซึ่งอนุโลมใช้คือถือว่าความหนาต่ำสุดของวัสดุที่อนุภาคเหล่านี้สามารถทะลุทะลวงไปได้ ประโยชน์ของค่าพิสัยมักเป็นด้านการป้องกันรังสี การออกแบบหัววัด และการนับวัดรังสี

ลักษณะของพิสัยแยกได้เป็น 2 แบบ ดังนี้

(1) อนุภาคหนัก พิสัยจะเป็นหรือเกือบเป็นเส้นตรงซึ่งมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับระยะทางเฉลี่ยของอนุภาคมีประจุในตัวกลาง

(2) อนุภาคเบากว่า ลักษณะการเดินทางเป็นแบบซิกแซก ดังนั้น ค่าพิสัยจะสั้นกว่าระยะทางจริงที่อนุภาคสามารถเคลื่อนผ่าน ตัวกลาง (ดูรูป 6 –1)

ตาราง 6`–1 แสดงพิสัยของอนุภาคอัลฟาและอิเล็กตรอนซึ่งมีพลังงานค่าต่าง ๆ กัน เคลื่อนผ่านตัวกลางต่างกัน 2 ชนิด ซึ่งช่วยทำความเข้าใจเกี่ยวกับระยะทางของอนุภาค

สำหรับกรณีนิวไคลด์รังสีเปล่งอนุภาคเบตา ซึ่งมีพลังงานหลายค่า และมี $E_{\beta max}$ เป็นพลังงานสูงสุด ค่าพิสัยที่คำนวณจาก $E_{\beta max}$ จะมีค่ามากหรือน้อยกว่าค่าจริง

ตาราง 6-1 พิสัยโดยประมาณของอนุภาคมีประจุ

	พิสัย R (ซม.)			
	เนื้อเยื่ออ่อน		อากาศ	
พลังงาน (keV)	e หรือ e^+	α	e หรือ e +	a
10	2×10^{-4}	$< 10^{-5}$	1.6×15^{-10}	1×10^{-2}
100	2×10^{-2}	1.4×10^{-4}	16	1×10^{-1}
1,000	4×10^{-1}	7.2×10^{-4}	3.3×10^{2}	5×10^{-1}
10,000	5	1.4×10^{-2}	4.1×10^{3}	10.5

องค์ประกอบที่มีผลต่อค่าพิสัย R

ค่าพิสัย (R) ของอนุภาคมีประจุนั้นขึ้นกับหลาย ๆ องค์ประกอบ ที่สำคัญอาจแยกได้เป็น 4 ประการ ดังนี้

พลังงาน (E) :

พิสัย (R) ของอนุภาคหนึ่ง ๆ จะเพิ่มค่าตามพลังงานเริ่มต้น (E) ของอนุภาค ตัวอย่างเช่น พิสัยของอิเล็กตรอนซึ่งมีพลังงาน 5 MeV มีค่ามากกว่าอิเล็กตรอน 1 MeV ประมาณ 6 เท่า ความสัมพันธ์ของ R และ E ค่อนข้างซับซ้อนแต่ในช่วงพลังงานที่สนใจ R สัมพันธ์แบบเส้นตรงกับพลังงานเริ่มต้นของอนุภาคประจุ ดังนี

$$R = AE + B$$

โดย A และ B เป็นค่าคงที่

มวล (M) :

อนุภาคเบากว่าจะมีพิสัยยาวกว่าอนุภาคหนักซึ่งมีพลังงานและประจุขนาดเดียวกันพิสัยของโพสิตรอน ($\dot{e}^+$) ขนาด 1 MeV จะยาวกว่าของโปรตอน (p^+) ขนาด 1 MeV (โปรตอนมีมวลมากกว่าโพสิตรอน 2,000 เท่า) ลักษณะที่พิสัยขึ้นต่อมวลนี้ บางครั้งเขียนในรูปที่ขึ้นต่อค่าความเร็ว โพสิตรอน 1 MeV เคลื่อนที่เร็วกว่าโปรตอน 1 MeV ถ้าอนุภาค (มีประจุ) มีความเร็วในการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น ค่าพิสัยจะเพิ่มตามด้วย

ประจุ (Q) :

อนุภาคที่มีประจุน้อยกว่าจะเคลื่อนที่เร็วกว่าอนุภาคที่มีประจุมากกว่า ตัวอย่างเช่น อนุภาค $^3H_1$ (ประจุ 1, มวล 3) มีพิสัยยาวกว่าอนุภาค $^3H_2$ (ประจุ 2, มวล 3) ในกรณีที่มีอนุภาคทั้งสองมีพลังงานเท่ากัน ความสัมพันธ์เขียนได้ดังนี้

$$R \propto \frac{1}{Q^2}$$

ดังนั้น อนุภาค $^3H_1$ มีระยะทางยาวกว่าของอนุภาค $^3H_2$ 4 เท่า ทั้งนี้ไม่ขึ้นกับเครื่องหมายของประจุ (บวกหรือลบ)

ความหนาแน่นของตัวกลาง (d) :

พิสัย (R) ของอนุภาคมีประจุขึ้นกับความหนาแน่นของตัวกลางที่มันเคลื่อนผ่าน ยิ่งมีความหนาแน่นสูงพิสัยยิ่งสั้น กล่าวคือ R มีค่าเป็นสัดส่วนกลับกับ d ของตัวกลาง หรือ $R \propto \frac{1}{d}$ ดังนั้น พิสัยของอนุภาคมีประจุในแก๊สจะยาวกว่าในของเหลวหรือของแข็ง.

การเกิดเบรมสตราห์ลังก์ (Bremstrahlung)

ตามที่ได้กล่าวแล้วว่าอนุภาคมีประจุอาจสูญเสียพลังงานโดยการชนกันแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic collision) นอกจากนี้ยังอาจสูญเสียพลังงานได้ตามขบวนการเปล่งเบรมสตราห์ลังก์ ซึ่งในกรณีนี้อนุภาคมีประจุจะตกอยู่ในอำนาจสนามไฟฟ้าของนิวเคลียสซึ่งมีความเร่งหรือหน่วงแบบลักษณะทันทีทันใด ดังนั้น เกิดการเปล่งโฟตอนพลังงานสูง (หรือรังสีเอ็กซ์) โดยทั่วไปสำหรับช่วงพลังงานที่เราใช้งานอยู่นี้มักมีโอกาสการเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวน้อยมาก ยกเว้นเมื่ออิเล็กตรอนและโพสิตรอนชนกับสารที่มีเลขเชิงอะตอมค่าสูง เช่น ตะกั่ว เหล็ก เป็นต้น ถ้าให้ f เป็นเศษส่วนของพลังงานที่ถูกเปล่งออกมาในรูปรังสีเอ็กซ์โดยอิเล็กตรอนซึ่งมีพลังงาน E(MeV) ในสารหรือวัสดุที่มีเลขเชิงอะตอม Z สามารถเขียนค่าโดยประมาณได้ ดังนี้

$$f = \frac{Z.E}{1400}$$

(E อยู่ในหน่วย MeV)

สำหรับหลอดเอ็กซเรย์ซึ่งมีเป้าทำด้วยทังสเตน (tungsten) (Z = 74) และอิเล็กตรอน พลังงาน 100 keV ตกกระทบจะมีการเปล่งรังสีเอ็กซ์เพียง 0.5% ของพลังงานทั้งหมดของอิเล็กตรอนเท่านั้น และปริมาณ 0.5% ดังกล่าวนี้ จะกลายเป็นรังสีเอ็กซ์ต่อเมื่ออิเล็กตรอนขนาด 1 MeV เคลื่อนผ่านน้ำ (Z = 7.4) ยกเว้นสเปคตรัมเอ็กซเรย์ (พลังงานของเอ็กซเรย์ที่ถูกเปล่งออกมา) ในกรณีแรก (จากหลอดเอ็กซเรย์) อย่างไรก็ตาม สำหรับงานทางเวชศาสตร์นิวเคลียร์ไม่คำนึงถึงปรากฏการณ์นี้ เนื่องจากการผลิตโฟตอนพลังงานสูงตามกลไกดังกล่าวนี้มีน้อยมาก

Stopping Power (S)

ในบางกรณีมีการใช้ค่า stopping power, s เป็นพารามิเตอร์แทนค่าพิสัย R ของอนุภาคมีประจุ stopping power ถูกนิยามเป็นอัตราส่วนของปริมาณพลังงานสูญเสีย (dE) ของอนุภาคมีประจุในการเคลื่อนผ่านตัวกลางด้วยระยะสั้น (dx) ต่อระยะทาง dx หรือเขียนสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ดังนี้

$$S_{medium} = -\frac{dE}{dx}$$

พิสัย R สัมพันธ์กับ stopping power,s ด้วยค่าส่วนกลับ กล่าวคือ stopping power ยิ่งมีค่าสูงพิสัยจะยิ่งมีค่าต่ำ (โดยอนุภาคเดียวกันในตัวกลางเดียวกัน) จากความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ ค่า stopping power, s ยังขึ้นกับแฟคเตอร์อื่น ๆ เช่นเดียวกับค่าพิสัย R (คือ E, M, Q และ d) ซึ่งเป็นค่าโดยประมาณเท่านั้น

Linear Energy Transfer (LET)

พารามิเตอร์นี้จัดว่ามีความสำคัญในงานชีวรังสี มาก LET ถูกนิยามเป็นอัตราส่วนของปริมาณพลังงานปล่อยออกไป (dE_{local}) โดยอนุภาคมีประจุสู่อะตอมเป้าซึ่งหมายถึงบรรดาอะตอมที่อยู่ในแนวทางเดินของ

มัน ในการเคลื่อนด้วยระยะทางน้อย ๆ (dx) ต่อระยะทาง dx หรือ

$$LET = \frac{-dE_{local}}{dx}$$

ข้อแตกต่างระหว่าง LET และ Stopping Power, S

ค่า stopping power, S เป็นปริมาณที่เกี่ยวข้องกับพลังงานสูญเสียทั้งหมดของอนุภาค แต่ LET เป็นปริมาณที่สัมพันธ์กับพลังงานที่ถูกละทิ้ง (หรือปลดปล่อย) ไว้ ณ บริเวณหนึ่ง ๆ ของอนุภาคมีประจุ กรณีอนุภาคหนัก ค่าของ S และ LET เกือบจะเท่ากัน แต่สำหรับอนุภาคเบากว่า จะมีปริมาณทั้งสองต่างกันโดยสิ้นเชิง เนื่องจากพลังงานสูญเสียในรังสี δ หรือจากขบวนการเบรมสตราห์ลังก์ก็ตาม เป็นปรากฏการณ์ที่มิได้ปลดปล่อยพลังงานทิ้งไว้ในสิ่งแวดล้อมรอบข้าง (ของอนุภาค) อย่างไรก็ตาม หน่วยของ stopping power และ LET เป็นหน่วยเดียวกันคือ keV/μ ($1\mu = 10^{-4}$ cm)

การสลายตัวของโพสิตรอน

การสูญเสียพลังงานให้แก่ตัวกลางของอิเล็กตรอนและโพสิตรอนเป็นเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตาม เมื่อโพสิตรอนได้สูญเสียพลังงานไป มันจะมีสถานะไม่เสถียร และจะถูกทำลายทันทีทันใดโดยการรวมตัวกับอิเล็กตรอน พลังงานมวลของอิเล็กตรอนและโพสิตรอนจะถูกแปลงเป็นรังสีแกมมา 2 ตัว แต่ละรังสีมีพลังงาน 511 keV และเคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้ามกัน พึงรำลึกว่าการสลายตัวของโพสิตรอนจะเกิดต่อเมื่อมันได้มีการสูญเสียพลังงานจนเกือบหมด กล่าวคือใกล้เคียงกับค่าที่ปลายพิสัยของมันในตัวกลาง

อันตรกิริยาของรังสีเอ็กซ์ (X-rays) หรือรังสีแกมมา (γ-rays) (10 keV ถึง 10 MeV)

แม้ว่าโฟตอนจะไม่มีประจุไฟฟ้า สิ่งที่น่าสนใจคือปรากฏการณ์ที่เกิดเมื่อโฟตอนชนกับประจุไฟฟ้า เช่น อิเล็กตรอน (ของอะตอมวัสดุ) โอกาสของการชนกันหรืออันตรกิริยา และรูปแบบ (mode) ของการชนกันของโฟตอนกับวัสดุนั้นกับพลังงานของโฟตอนเป็นหลักสำคัญ ณ ที่นี้จะกล่าวเฉพาะกรณีการชนกันของโฟตอนพลังงานสูง (รังสีเอ็กซ์หรือแกมมา) กับวัสดุ

โดยทั่วไป โอกาสการชนกันของรังสีเอ็กซ์หรือแกมมากับอะตอมจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับอนุภาคมีประจุพลังงานสูง แต่รังสีเอ็กซ์หรือแกมมามีอำนาจทะลุทะลวงสูงกว่าอนุภาคมีประจุ และจากคุณสมบัติประการหลังนี้ทำให้ไม่สะดวกในการใช้ค่า stopping power หรือพิสัยก็ตาม ดังนั้นจึงมีการนิยามพารามิเตอร์ใหม่เรียกเป็นสัมประสิทธิ์ของการลดค่าเชิงเส้น (linear attenuation coefficient) ใช้สัญลักษณ์ μ ซึ่งใช้ร่วมกับค่า half-value layer หรือ HVL

การลดค่าและการทะลุผ่านของรังสีเอ็กซ์หรือแกมมา :

เพื่อสะดวกในการเข้าใจ พิจารณาเมื่อมีลำรังสีแกมมามาชนกับพื้นที่ผิวหนึ่ง ๆ ย่อมเกิดปรากฏการณ์

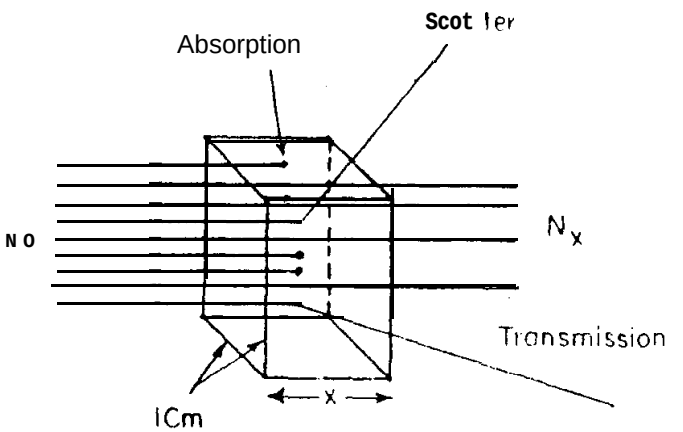
เป็นไปได้ 3 ลักษณะดังนี

(1) รังสีแกมมาถูกดูดกลืนโดยสมบูรณ์ภายในวัสดุ

(2) มีการเบนหรือกระเจิง (Scatter) ของรังสีแกมมา โดยอาจสูญเสียพลังงานหรือไม่ก็ตาม

(3) รังสีแกมมาสามารถทะลุผ่านพื้นที่ผิวดังกล่าว โดยไม่เกิดปฏิกิริยาใด ๆ

แผนภาพแสดงเหตุการณ์ดังอธิบายมาแล้วข้างต้นแสดงในรูป 6 –2 โดยรังสีเอ็กซ์หรือแกมมาพลังงาน E_γ ตกกระทบบนปริมาตรบาง ๆ ซึ่งมีพื้นที่ตัดขวาง 1 ตารางเซ็นติเมตร หนา x เซ็นติเมตร ทั้งสองขบวนการแรกถูกจัดเป็นการลดทอนพลังงาน (attenuation) ส่วนลักษณะที่สามเรียกเป็นการทะลุผ่าน (transmission) ซึ่งการทะลุผ่านของรังสีแกมมาผ่านตัวกลางหนา x ซม. นั้นขึ้นกับธรรมชาติของวัสดุ (ได้แก่ ความหนาแน่นและเลขเชิงอะตอม) และความหนา ^{x} ของแผ่นบางดังกล่าว โดยทั่วไป สามารถวัดปริมาณรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านวัสดุใด ๆ ได้โดยวิธีการทดลอง แปรค่าความหนาของวัสดุกั้น จากนั้นวัดปริมาณรังสีแกมมาที่ทะลุผ่าน (ถือว่าไม่มีการสูญเสียหรือเบนเลี้ยวของพลังงาน) และอาศัยความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ดังนี้



รูป 6-2 การลดทอนพลังงานของรังสีแกมมา (γ) เมื่อฟลักซ์รังสีแกมมา N_0 ตกกระทบบนสารหนา x ซม. ส่วนที่สามารถทะลุผ่านสารเป็นฟลักซ์ N_x ซึ่งน้อยกว่ารังสีแกมมาที่เหลืออาจถูกดูดกลืนโดยสารดังกล่าวหรือกระเจิงออกจากลำตกกระทบ

$$\frac{N_x}{N_o} = e^{-\mu(\text{linear})x} \qquad (1)$$

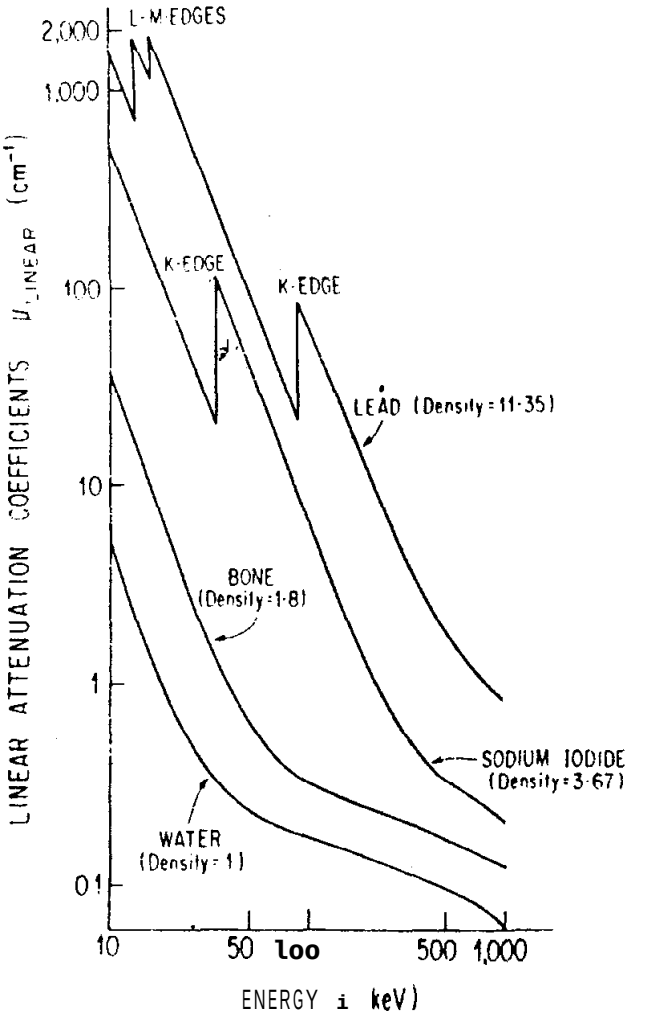
โดย N_o หรือ N_x เป็นปริมาณรังสีแกมมาที่ตกกระทบและทะลุผ่านแผ่นวัสดุกั้น ตามลำดับ

x เป็นความหนาแน่นของวัสดุกั้น

μ(linear) เป็นสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงาน ซึ่งใช้แทนปริมาตรกายภาพของโอกาสในการชนกันหรืออันตรกิริยาของรังสีแกมมา เมื่อเคลื่อนผ่านวัสดุหนึ่งหน่วยซึ่งหนา 1 ซม. ค่า μ(linear) ขึ้นกับพลังงานของรังสีแกมมา (E) อย่างมาก และยังขึ้นกับธรรมชาติของวัสดุ (คือความหนาแน่น

และเลขเชิงอะตอม)

สังเกตว่าสมการ (1) เป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เช่นเดียวกับการสลายตัวของกัมมันตภาพรังสีตามเวลา (ดูบทที่ 3) อย่างไรก็ตาม ณ ที่นี้ได้อธิบายถึงความแตกต่างโดยสิ้นเชิงของขบวนการกายภาพซึ่งเรียกว่าการทะลุผ่านของรังสีแกมมาผ่านวัสดุหนา x สัมประสิทธิ์ของการลดทอนเชิงเส้นของสาร 4 ชนิดแสดงในรูป 6 – 3



รูป 6-3 สัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานเชิงเส้น μ(linear) ของน้ำ กระดูก โซเดียมไอโอไดด์ และตะกั่ว เป็นฟังก์ชันของพลังงานรังสีเอ็กซ์หรือแกมมา

ในทางปฏิบัติ การวัดค่า μ ทำได้ไม่ง่าย ดังนั้นนิยมวัดค่าครึ่งความหนา (HVL) แทนนิยามให้ค่าครึ่งความหนาเป็นความหนาของวัสดุซึ่งลดทอนรังสีแกมมาลงครึ่งหนึ่งของปริมาณเดิมที่ตกกระทบผิววัสดุสืบเนื่องจากสมการ (1) ถ้าเป็นไปตามนิยามที่กล่าวข้างต้น สามารถเขียนความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{N_x}{N_o} = \frac{1}{2} \qquad \text{โดย } x = HVL)$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง HVL และ μ(linear) คือ

$$HVL = \frac{0.693}{\mu(\text{linear})} \qquad (2)$$

ซึ่งคล้ายคลึงกับลักษณะค่าครึ่งชีวิตนิวไคลด์รังสี ($T\frac{1}{2}$) สัมพันธ์กับค่าคงตัวของการสลายตัว (decay constant)-λ หน่วยของ $\mu_{(\text{linear})}$ คือ ซม.$^{-1}$ (ต่อเซ็นติเมตร) แต่ HVL มีหน่วยเป็น ซม. กรณีทราบค่าใดค่าหนึ่งในสองค่าดังกล่าวแล้ว สามารถคำนวณหาลำรังสีแกมมา (ซึ่งมีลักษณะเป็นลำขนาน) ที่ถูกลดทอนพลังงานลง โดยวัสดุหนา x จากสมการที่ (1) หรือตามวิธีการในบทที่ 3 ซึ่งต้องแก้ปัญหาเอ็กซ์โพเนนเชียล

ตัวอย่าง รังสีแกมมา 140 keV มีค่าครึ่งความหนาในผลึก NaI(Tl) ประมาณ 0.3 ซม. จงคำนวณหาเปอร์เซ็นต์รังสีแกมมาที่ทะลุผ่านผลึก NaI(Tl) หนา 1.2 ซม. ($\frac{1}{2}$'') โดยถือว่าลำรังสีแกมมาเป็นลำขนาน

วิธีการคำนวณ

สำหรับรังสีแกมมา 140 keV (ในผลึก NaI(Tl))

ความหนา 1.2 ซม. มีค่าเป็น $\frac{1.2}{0.3} = 4$ HVL

เนื่องจาก 1 HVL มีอัตราส่วน $\frac{N_x}{N_o} = \frac{1}{2}$

ดังนั้น 4 HVL จึงมีค่า $\frac{N_x}{N_o} = (\frac{1}{2})^4 = \frac{1}{16}$

นั่นคือ รังสีแกมมาทะลุผ่านได้ $\frac{100}{16} = 6\%$

หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่ารังสีแกมมาถูกลดทอนพลังงานลงถึง 94%

หมายเหตุ ในกรณี ความหนา x มีค่าเป็นทวีคูณของ HVL จึงไม่จำเป็นต้องใช้สมการ (1)

สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล μ(mass) :

เนื่องจาก μ(linear) มีค่าขึ้นกับความหนาแน่นของวัสดุเป็นตัวดูดกลืน ถ้าต้องการกำจัดผลจากความหนาแน่นของสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานเชิงเส้นตรง ต้องเสนอการลดทอนดังกล่าวในรูปของการลดทอนเชิงมวล μ(mass) ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์ที่แสดงถึงโอกาสของการชนกัน 1 ครั้งกับ 1 หน่วย มวลของวัสดุ ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานทั้งสองค่าคือ

$$\mu(\text{mass}) = \frac{\mu(\text{linear})}{\text{density}}$$

หน่วยของ μ(mass) คือ ซม.^{2}/กรัม ($\frac{cm^2}{gm}$)

สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงอะตอม μ(atom)

μ(linear) และ μ(mass) เป็นโอกาสของการชนกัน ซึ่งใช้อธิบายอันตรกิริยาของรังสีแกมมาในระดับ macroscopic (1 กรัม หรือ 1 ลบ.ซม.) ปัญหาคือจะทำการหาความสัมพันธ์ของทั้งสองปริมาณดังกล่าวได้อย่างไรในระดับอะตอม (เช่น โอกาสที่รังสีแกมมาชนกับ 1 อะตอม) จำนวนอะตอมในวัสดุหรือสาร 1 กรัม หาโดยทำการหาร Avogadro's number (N_{av}/A) ส่วน μ(atom) หาค่าโดยหาร μ(mass) ด้วยจำนวนอะตอมในวัสดุนั้น ๆ 1 กรัม หรือ เขียนเป็น

$$\mu(\text{atom}) = \frac{\mu(\text{mass})/N_{av}}{A} = \frac{\mu(\text{mass})\cdot A}{N_{av}}$$

μ(atom) มีหน่วยเป็น ซม.^{2}

กลไกการเกิดอันตรกิริยา :

ตามที่ได้อธิบายแล้วข้างต้น ล้วนเป็นกรณีการลดทอนพลังงานรังสีเอ็กซ์หรือแกมมาโดยไม่มีการบ่งถึงลักษณะหรือกลไกซึ่งก่อให้เกิดการลดทอนพลังงาน สำหรับพลังงานช่วง 10 keV - 10 MeV มี 3 ขบวนการพื้นฐานที่ใช้อธิบายการชนของโฟตอนและวัสดุ ได้แก่

(1) Photoelectric effect

(2) Compton effect

(3) Pair production

ส่วนโอกาสของการเกิดขบวนการใดนั้นขึ้นกับพลังงานของโฟตอนและเลขเชิงอะตอมของวัสดุที่โฟตอนชน

ปรากฏการณ์ดังกล่าวเป็นการสร้างอนุภาคมีประจุพลังงานสูง (ได้แก่ e หรือ e^+) ซึ่งในขั้นตอนต่อไปจะต้องสูญเสียพลังงานให้กับวัสดุตัวกลาง ก่อให้เกิดการแตกตัว และสถานะกระตุ้นดังได้กล่าวแล้ว จากสาเหตุนี้ จึงเรียกรังสีเอ็กซ์หรือแกมมาว่าเป็นรังสีที่เกิดจากการแตกตัวทางอ้อม

Photoelectric Effect :

ลักษณะอันตรกิริยาที่จัดเป็นการดูดกลืนแบบโฟโตอิเล็กทริคคือ โฟตอนตกกระทบและชนกับอะตอมเป้า โดยโฟตอนดังกล่าวถ่ายทอดพลังงานทั้งหมดให้กับอิเล็กตรอนของอะตอม กล่าวคืออะตอมได้ดูดกลืนโฟตอนโดยสมบูรณ์ตามแผนภาพแสดงในรูป 6 –4 ผลคือเกิดการแตกตัว โดยมีการเปล่งอิเล็กตรอนดังกล่าว ซึ่งมีพลังงานจลน์ (Ee) ปริมาณเท่ากับพลังงานของโฟตอน ($E\gamma$) ลบด้วยพลังงานยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนภายในวงโคจร (B.E. = Binding Energy) คือ

$$Ee = E\gamma - B.E.$$

การเปล่งอิเล็กตรอนอาจเกิดขึ้นในวงโคจรใดก็ได้ ถ้าถูกเปล่งจากวงโคจรที่อยู่ด้านใน (เช่น วง K) ย่อมเกิดช่องว่างอิเล็กตรอนและในทันทีทันใดก็จะถูกเติมด้วยอิเล็กตรอนจากวงโคจรที่อยู่นอกกว่า (เช่นวง L หรือ M) ดังได้อธิบายแล้วในบทที่ 1 และ 2 ผลลัพธ์คือเกิดการเปล่งแคแรคเธอริสติคเอ็กซเรย์ (characteristic x-ray) หรืออาจเป็นออเกอร์อิเล็กตรอน (Auger electron) จากอะตอม ในทางตรงข้ามอิเล็กตรอนในวงโคจรด้านนอกมักเกิดปฏิกิริยาแบบโฟโตอิเล็กทริค อะตอมจะเกิดแตกตัวออก โอกาสในการเกิดปฏิกิริยาแบบโฟโตอิเล็กทริค (กำหนดให้เป็น τ) ของอะตอมขึ้นกับ 2 องค์ประกอบ คือ

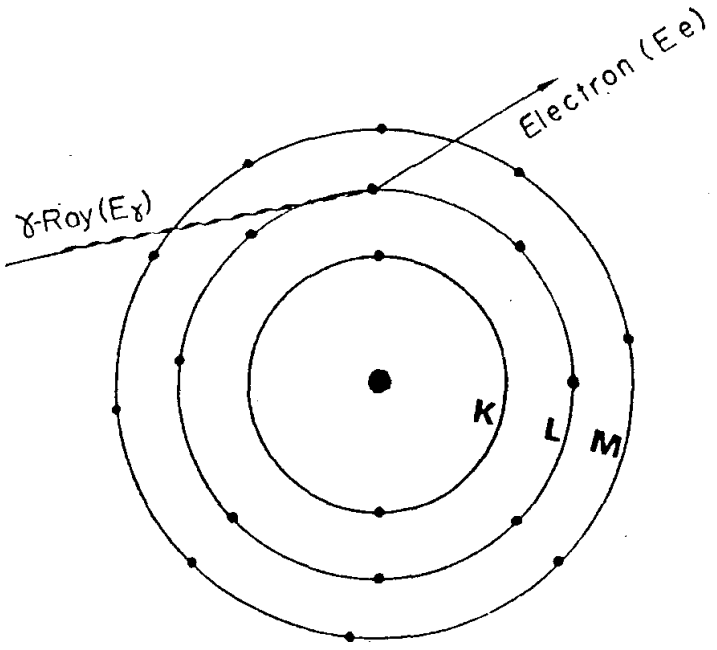
(1) พลังงานของโฟตอน ($E\gamma$) และ

(2) เลขเชิงอะตอม (Z) ของอะตอม

ลักษณะการขึ้นกับพลังงานของโฟตอน ($E\gamma$):

โอกาสของการชนกันแบบโฟโตอิเล็กทริค (τ) ของอะตอมจะลดค่าลงอย่างทันทีทันใดเมื่อพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (หรือแกมมา) เพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าของ τ แปรตามส่วนกลับของพลังงานยกกำลังสาม หรือ

$$\tau(\text{atom}) \propto \frac{1}{E_\gamma 3}$$



รูป 6-4 อันตรกิริยาโฟโตอิเล็กทริค รังสีแกมมาถ่ายทอดพลังงานให้กับอิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอมของสารซึ่งมีผลให้อะตอมแตกตัว อิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยออกไปจะมีพลังงานปริมาณ E_e ซึ่งเท่ากับพลังงานแกมมา E_γ ลบออกจากพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในวงโคจรนั้น ถ้าในช่วงเกิดการแตกตัวจะเกิดช่องว่างในวงโคจรที่อยู่ด้านในจะมีการเปล่งแคแรคเธอริสติคเอ็กซเรย์หรือออเกอร์อิเล็กตรอนติดตามมา

ดังนั้น โอกาสที่รังสีแกมมา 45 keV จะเกิดการชนกันแบบโฟโตอิเล็กทริคจะมีค่าสูงกว่ารังสีแกมมา 90 keV ถึง 8 เท่า กล่าวคือ

$$\frac{90^3}{45^3} = 8$$

แต่ลักษณะการแปรผกผันกับค่าพลังงานยกกำลังสาม ยังมีข้อยกเว้นในกรณีต่าง ๆ ที่เป็นไปได้ดังนี้ ถ้า E_γ มีค่าเท่ากับ B.E. ของอิเล็กตรอนในวงโคจรอะตอม โอกาสของการเกิดปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริคจะเพิ่มมากขึ้นอย่างทันทีทันใด ตัวอย่างเช่นการชนกันแบบโฟโตอิเล็กทริคของรังสีแกมมา 45 keV กับอะตอมของตะกั่วจะมีค่าสูงกว่ารังสีแกมมา 90 keV ถึง 8 เท่า เนื่องจากกฎ $\frac{1}{E_\gamma^3}$ อย่างไรก็ตาม พลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในวงโคจร K (ของอะตอมตะกั่ว) มีค่าประมาณ 88 keV โอกาสการเกิดปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริคของรังสีแกมมา 90 keV จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ถึงจุดหนึ่ง ซึ่งเกือบมีค่าเท่ากับรังสีแกมมา 45 keV โอกาสการชนกันแบบโฟโต-อิเล็กทริคของรังสีแกมมา 80 keV ในตะกั่วมีค่าต่ำกว่าของกรณีรังสีแกมมา 90 keV ประมาณ 6 เท่า เนื่องจากกรณีหลังเป็นรังสีแกมมาพลังงานสูงกว่าบริเวณหรือช่วงที่กฎ $\frac{1}{E_\gamma^3}$ ล้มเหลวเรียกเป็น absorption edge (สันของการดูดกลืน) และมีโอกาสเกิดมากน้อยอย่างไรขึ้นกับเลขเชิงอะตอม Z ของอะตอมเป้าซึ่งรังสีแกมมาวิ่งชน ตัวอย่างเช่น K absorption edge (ซึ่งแน่นอนว่าเป็นเรื่องราวของอิเล็กตรอนในวงโคจร K) เกิดประมาณค่า 88 keV ในตะกั่ว แต่ในไอโอดีน (iodine) ประมาณ 32 keV (รูป 6 – 3)

ลักษณะการขึ้นกับค่า Z :

โอกาสการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริคของอะตอม (แทนด้วยสัญลักษณ์ τ) ขึ้นต่อเลขเชิงอะตอมเป้าอย่างมาก จัดได้ว่าขึ้นตรงกับกำลังที่ 4 ของลำดับอะตอม กล่าวคือ

$$\tau(\text{atom}) \alpha Z^4$$

ตัวอย่างเช่น โอกาสการชนกันของรังสีแกมมา 50 keV กับอะตอมของตะกั่ว (Z = 82) มีค่าสูงกว่า กรณีอะตอมอ็อกซิเจน (Z = 8) ถึง 11,000 เท่า ทั้งนี้เนื่องจาก $\frac{(82)^4}{(8)}$ = 11,000 ถ้าพลังงานแกมมามีค่าใกล้เคียงสันการดูดกลืนของอะตอมนั้น ๆ จะต้องแก้ไขกฎนี้

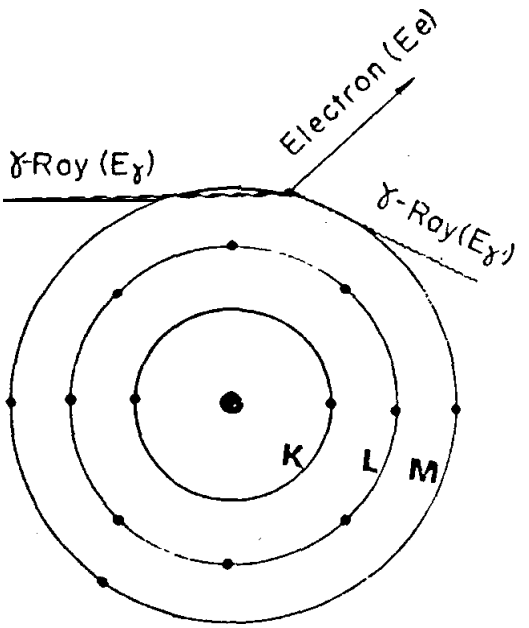
การกระเจิงแบบคอมป์ตัน :

ในขบวนการนี้ โฟตอนพลังงานสูงถูกทำให้กระเจิงในลักษณะเช่นเดียวกับลูกบิลเลียดโดยอิเล็กตรอน ดังแสดงในภาพ 6 –5 อิเล็กตรอนที่กระเจิงไปจะได้รับพลังงานเพิ่ม และโฟตอนตกกระทบจะสูญเสียพลังงาน ส่วนปริมาณแน่นอนของพลังงานที่ได้รับหรือสูญเสียดังกล่าวนั้น ขึ้นกับมุมของการกระเจิงและพลังงานของโฟตอนตกกระทบ E_γ โดยทั่วไปยิ่งโฟตอนมีมุมกระเจิงกว้างจะยิ่งสูญเสียพลังงานให้กับอิเล็กตรอนมากขึ้น ดังนั้น การถ่ายทอดพลังงานค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ (จากโฟตอนไปยังอิเล็กตรอน) เกิดเมื่อโฟตอนถูกทำให้กระเจิงเป็นมุม 180 องศา (หรือเรียกว่าเป็นการสะท้อนกลับนั่นเอง) สิ่งที่น่าสนใจคือความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานของโฟตอนตกกระทบและโฟตอนสะท้อนกลับ พบว่าค่าต่ำสุดของโฟตอนสะท้อนกลับมีค่าเป็น

$$E_{\gamma \text{ minimum}} \simeq \frac{E_\gamma}{1+4E_\gamma} \quad (E_\gamma \text{ ในช่วง MeV})$$

พลังงานโฟตอนตกกระทบ (MeV)	พลังงานโฟตอนที่กระเจิง (MeV)
1.000	0.200
0.360	0.148
0.140	0.090
0.080	0.060

ข้อมูลดังกล่าวได้จากการวิเคราะห์โดยใช้หัววัด NaI(TI) (บทที่ 8) พลังงานของโฟตอนที่กระเจิงจะมีค่าตั้งแต่ค่าต่ำสุดดังได้แสดงแล้วนั้นจนถึงค่าเท่ากับพลังงานของโฟตอนตกระทบ ในรูป 6 –6 ได้แสดงการกระจายพลังงานค่าต่าง ๆ ของโฟตอนที่กระเจิง และอิเล็กตรอนที่กระเจิง สำหรับโฟตอนปฐมภูมิ 360 keV ซึ่งเป็นผลมาจากการชนกันแบบคอมป์ตัน



รูป 6-5 อันตรกิริยาคอมป์ตัน รังสีแกมมาถ่ายนทอดพลังงานบางส่วนของมันให้กับอิเล็กตรอนในวงโคจร (มักเป็นวงโคจรที่อยู่ด้านนอก) รังสีแกมมาที่ถูกกระเจิงจะมีพลังงาน E_γ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $E_\gamma - Ee$ โดย E_γ เป็นพลังงานเริ่มแรกของรังสีแกมมา และ Ee เป็นพลังงานของอิเล็กตรอนซึ่งทำให้กระเจิงไป

การขึ้นกับค่า E :

กำหนดให้ σ(atom) แทนโอกาสของการชนกันแบบคอมป์ตัน เดิมค่านี้จะเริ่มลดค่าลงอย่างช้า ๆ ตามพลังงานที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จากนั้นจะตกลงอย่างรวดเร็ว

การขึ้นกับค่า Z :

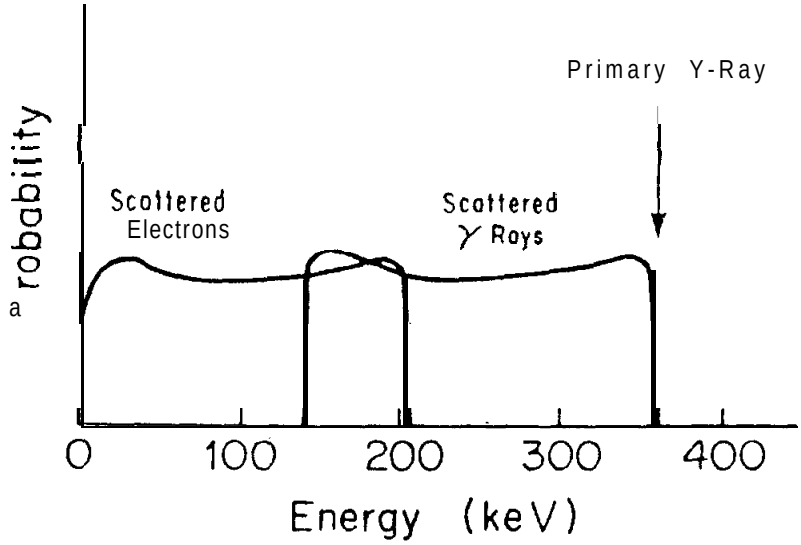
เนื่องจากในแต่ละอะตอมประกอบด้วยอิเล็กตรอนจำนวน Z พารามิเตอร์ σ(atom) ขึ้นโดยตรงต่อเลขเชิงอะตอม กล่าวคือ

$$\sigma(\text{atom}) \propto Z$$

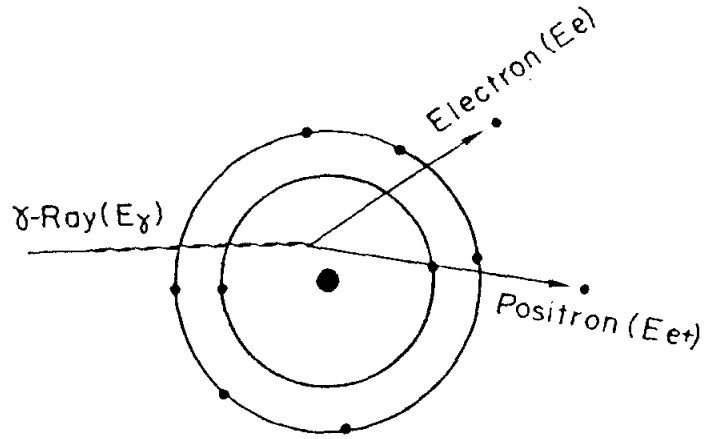
การเกิดคู่อนุภาค :

การเกิดคู่อนุภาคจะเป็นไปได้ต่อเมื่อรังสีแกมมาที่วิ่งชน มีพลังงานสูงกว่า 1.02 MeV ซึ่งเมื่อมันวิ่งผ่านสนามของนิวเคลียสจะก่อให้เกิดหนึ่งอิเล็กตรอนและหนึ่งโพสิตรอน (กล่าวคือ พลังงานบางส่วนของรังสีแกมมาถูกแปลงเป็นมวล) เรียกขบวนการดังกล่าวว่า การเกิดคู่อนุภาค แสดงในรูป 6 – 7 คำถามคือพลังงานส่วนเกินของรังสีแกมมา (E_γ – 1.02 MeV) จะหายไปไหน คำตอบคือพลังงานดังกล่าวจะถูกแบ่งให้กับ e^- และ e^+ ในรูป

ของพลังงานจลน์



รูป 6-6 การกระจายค่าของรังสีแกมมาและอิเล็กตรอนที่ถูกทำให้กระเจิงในอันตรกิริยาคอมป์ตัน ซึ่งรังสีแกมมามีพลังงาน 364 keV ปริมาณพลังงานสูงสุดที่รังสีแกมมา 364 keV สามารถถ่ายทอดให้กับอิเล็กตรอนตามกระบวนการนี้คือ 210 keV



รูป 6-7 การเกิดคู่อนุภาค (Pair Production) ภายใต้อิทธิพลประจุบวกของนิวเคลียส รังสีแกมมาพลังงาน E_γ ซึ่งมีค่ามากกว่า 1.02 MeV จะสลายตัวและผลิตคู่อนุภาคขึ้นมา (หนึ่งอิเล็กตรอนและหนึ่งโพสิตรอน) ซึ่งต่างมีพลังงานเป็น $E_\gamma - 1.02$ MeV โพสิตรอนจะสลายตัวต่อไปอีกทันทีทันใดด้วยอาการเป็นไปตามอธิบายในหน้า 74

การขึ้นกับค่า E :

ถ้าให้ K(atom) แทนโอกาสการเกิดคู่อนุภาค กรณีพลังงานต่ำกว่า 1.02 MeV K = 0 แต่ถ้าพลังงานสูงกว่า 1.02 MeV จะมีค่า K(atom) สูงขึ้น และมีค่าสูงมากสำหรับพลังงานเกินกว่า 10 MeV (กล่าวคือ ในการชนกันของพลังงานรังสีแกมมาเกินกว่า 10 MeV ขบวนการเกิดคู่อนุภาคจะมีโอกาสเกิดได้มาก, ผู้แปล)

การขึ้นกับค่า Z :

โอกาสการเกิดคู่อนุภาค (ของอะตอม) แปรตามค่า Z^2

ลักษณะที่ค่า μ(เชิงมวล) และ μ(เชิงเส้น) ขึ้นกับค่า Z

ในหัวข้อที่แล้วได้กล่าวถึงลักษณะการขึ้นต่อค่า Z ของ μ(atom) ในแต่ละขบวนการชนกัน สิ่งที่น่าสนใจคือ สัมประสิทธิ์ของการลดทอนพลังงาน (ทั้งลักษณะเชิงเส้นและเชิงมวล) แปรค่าอย่างไรกับลำดับอะตอม? คำตอบคือทั้งสามขบวนการมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนทั้ง μ(linear) และ μ(atom) ขึ้นต่อค่า Z ในลักษณะเดียวกัน อย่างไรก็ตาม μ(mass) ขึ้นต่อค่า Z ในลักษณะ Z^3, Z^0 และ Z ในกรณีของปรากฏการณ์ โฟโตอิเล็กทริค คอมป์ตัน และการเกิดอนุภาคคู่ตามลำดับ พึงรำลึกเสมอว่า ถ้าการชนกันมีโอกาสที่จะเกิดขบวนการของคอมป์ตันมากหรือเป็นส่วนใหญ่วัสดุหรือสารจะมีน้ำหนักแต่ละกรัม เป็นตัวลดทอนรังสีเอ็กซ์หรือแกมมาในปริมาณเท่ากันโดยประมาณ (ตัวกลางหรือวัสดุดังกล่าวอาจเป็นน้ำไอโอดีน กระดูก หรือตะกั่ว เป็นต้น) อย่างไรก็ตาม การลดทอนต่อปริมาตร ซม.^{3} ของสารต่าง ๆ ดังกล่าวย่อมต่างกัน จะมากหรือน้อยกว่ากันตามความหนาแน่นของแต่ละสาร (หมายถึงความหนาแน่นอิเล็กตรอน หรือ จำนวนอิเล็กตรอนใน 1 ซม.^{3})

เปรียบเทียบขบวนการชนกันทั้งสามลักษณะ :

โอกาสทั้งหมดของขบวนการชนกัน μ(atom) ย่อมเป็นผลรวมของโอกาสในการเกิดปรากฏการณ์ทั้งสามกล่าวคือ

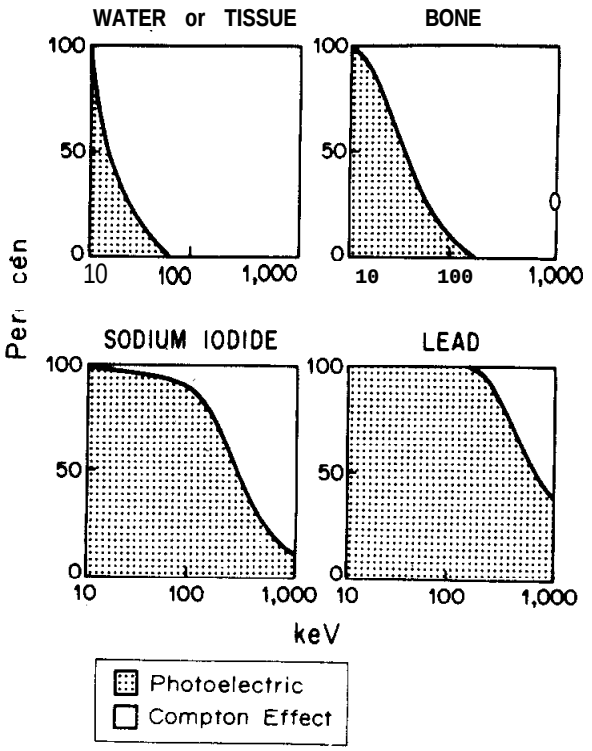
$$\mu(\text{atom}) = \tau(\text{atom}) + \sigma(\text{atom}) + K(\text{atom})$$

แต่ μ(atom) ขึ้นกับพลังงานของรังสีแกมมา (E_γ) และเลขเชิงอะตอม ในลักษณะเชิงซ้อนโดยทั่วไปจะมีเพียงขบวนการเดียวเท่านั้นที่มีโอกาสเกิดเด่นชัด รูป 6 – 6 แสดงการเปรียบเทียบของขบวนการทั้งสามสำหรับช่วงพลังงาน 10 keV - 1 MeV ชนกับสารต่าง ๆ 4 ชนิด ซึ่งต่างมีความสำคัญในสาขาเวชศาสตร์นิวเคลียร์ ได้แก่ น้ำ (จัดเป็นลักษณะของเนื้อเยื่อ) กระดูก โซเดียมไอโอไดด์ NaI(Tl) และตะกั่ว (Pb) สำหรับน้ำหรือกระดูกที่ถูกชนด้วยรังสีเอ็กซ์หรือแกมมาที่พลังงานสูงกว่า 50 keV มักเกิดปรากฏการณ์แบบคอมป์ตัน ถ้าเป็นตะกั่วถูกชนโดยพลังงานประมาณ 1 MeV มักเกิดขบวนการโฟโตอิเล็กทริคเป็นส่วนใหญ่ และอาจมีปรากฏการณ์แบบคอมป์ตันปะปนอยู่เสมอเช่นกัน และกรณีโซเดียมไอโอไดด์ ถ้าพลังงานสูงถึง 300 keV มักเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริคเป็นส่วนใหญ่

อันตรกิริยาของนิวตรอน :

นิวตรอนไม่มีประจุไฟฟ้า จึงไม่มีแรงดูดหรือแรงผลักกับอนุภาคมีประจุ การชนกับนิวคลีไอจะเป็นไปในลักษณะเช่นเดียวกับลูกบิลเลียด (ชนโดยตรง) นิวตรอนที่มีพลังงานต่ำมากจะสามารถเคลื่อนสู่นิวเคลียสได้ง่ายและอาจก่อโครงสร้างอะตอมกลายเป็นนิวไคลด์รังสี อันตรกิริยาของนิวตรอนไม่มีบทบาทสำคัญในเวชศาสตร์

นิวเคลียร์ ยกเว้นในการผลิตนิวไคลด์รังสีบางตัวโดยขบวนการจับเก็บนิวตรอน (neutron-capture) ซึ่งอธิบายโดยละเอียดแล้วในบทที่ 4 ดังนั้นไม่อธิบายในบทนี้



รูป 6-8 อันตรกิริยาโฟโตอิเล็กทริคและคอมป์ตันซึ่งมีส่วนเกี่ยวข้องกับสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานของน้ำ (แทนเนื้อเยื่อ) กระดูก, โซเดียมไอโอไดด์ และตะกั่วโดยพล็อตเป็นฟังค์ชันของพลังงาน ในน้ำและกระดูก อันตรกิริยาที่พลังงานสูงกว่า 50 keV จะเกิดการกระเจิงแบบคอมป์ตันเกือบหมด ขณะที่โซเดียมไอโอไดด์และตะกั่วมักเกิดโฟโตอิเล็กทริคเป็นส่วนใหญ่จนถึง 300 keV