บทที่ ๕

ปฏิกริยาของรังสีที่มีต่อสาร

รังสีทุกชนิดมีพลังงานประจำตัวของมันเอง เมื่อผ่านไปยังสารใดมันจะทำปฏิกริยากับสารนั้น วิธีที่รังสีทำปฏิกริยากับสารมี 2 วิธีคือ 1. การที่รังสีถูกผลักให้เบี่ยงเบนไป (Scattering) 2. การที่รังสีถูกดูดกลืน (Absorption) แต่ขบวนการที่รังสีถูกดูดกลืนเป็นรากฐานอันสำคัญ ในวิชาสุขภาพรังสีวิทยา (Radiological Health) ด้วยเหตุผลดังต่อไปนี้คือ

1. เมื่อเนื้อเยื่อของร่างกายดูดกลืนรังสีเข้าไปจะทำให้เกิดอันตรายได้

2. การดูดกลืนรังสี เป็นรากฐานในการทดสอบรังสี

3. การที่สารดูดกลืนรังสี ได้มากหรือน้อย เป็นเครื่องช่วยในการคำนวณสิ่งที่จะใช้ป้องกันรังสี

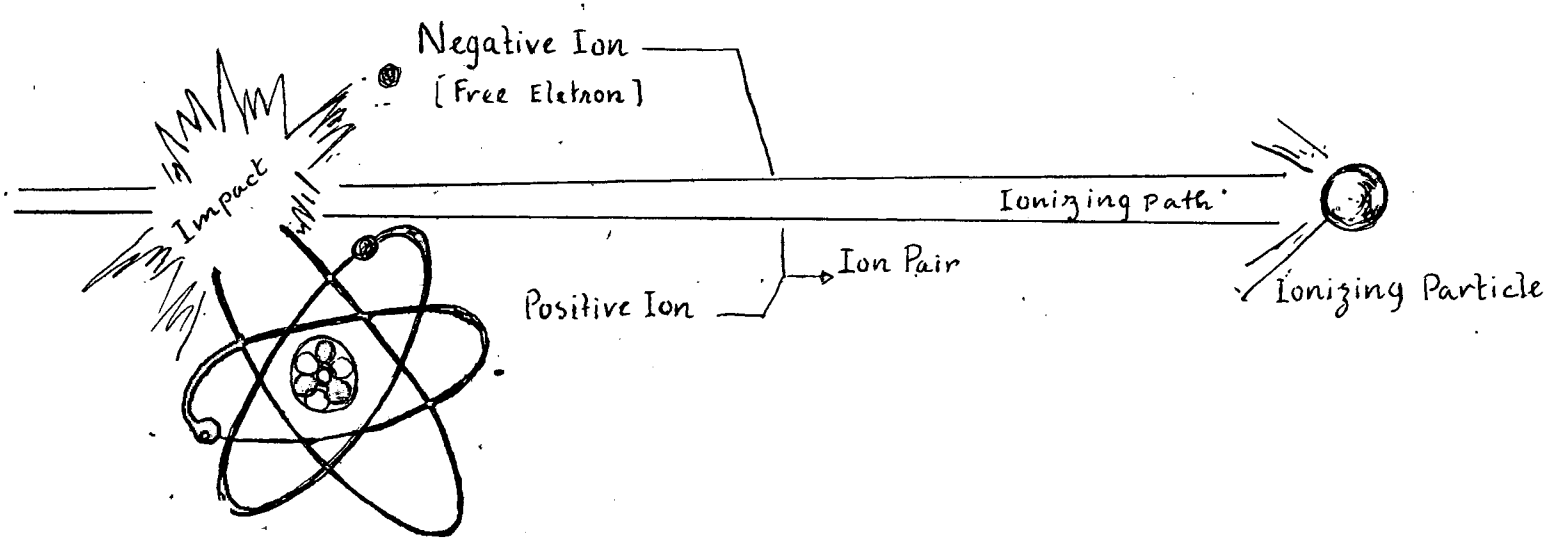
รังสี หรือ โฟตอน เมื่อถ่ายพลังงานให้แก่อะตอมของสารที่ดูดกลืนรังสีจะทำให้เกิดขบวนการที่สำคัญหลายอย่าง แต่ที่สำคัญที่สุดก็คือ

1. Ionization คือขบวนการที่อิเลคตรอนหลุดออกไปจากอะตอมหรือโมเลกุล ซึ่งทำให้อะตอมหรือโมเลกุลนั้นมีประจุบวก ส่วนอิเลคตรอนที่หลุดออกไปนั้น จะเป็นอิเลคตรอนอิสระ

2. Excitation ถ้าอิเลคตรอนใน Orbit ได้รับพลังงานแล้วทำให้ตัวมันเองมี Energy Level สูงกว่าเดิม เรียกว่า Excitation

โดยปรกติอะตอมของสารทุกชนิดมีคุณสมบัติเป็นกลางอยู่แล้ว เพราะว่ามีจำนวนอิเลคตรอนที่หมุนอยู่รอบ ๆ นิวเคลียสเท่ากับจำนวนโปรตอนในนิวเคลียส พวกรังสีสามารถที่จะทำให้อิเลคตรอนหลุดออกจาก Orbit ได้ หรือไม่ก็ทำให้มันมี Energy Level สูงกว่าเดิม กรณีแรกนั้น (Ionization) อิเลคตรอนหลุดออกไปเป็นอิเลคตรอนอิสระ ส่วนอะตอมที่เหลือก็จะมีประจุบวกมากกว่า ส่วน

รูป ๔ IONIZATION



ในกรณีหลัง (Electronic Excitation) อะตอมที่ถูก Excite อาจจะคายพลังงานออกมา ในเมื่ออิเลคตรอนซึ่งอยู่ใน Orbit มี Energy Level สูง กระโดดกลับเข้าสู่ Orbit ที่มี Energy Level ต่ำ มันจะคายพลังงานออกมาในรูปของโฟตอนซึ่งเป็นรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า ตัวที่ทำให้เกิด Excitation ที่สำคัญได้แก่ นิวเคลียส และรังสีอื่น ๆ ที่มีพลังงานสูง

ลักษณะของปฏิกริยาที่รังสีมีต่อสารที่มันผ่านไปนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของรังสี ซึ่งสามารถแบ่งประเภทของปฏิกริยาตามชนิดของรังสีที่ผ่านตัวกลางเข้าไปได้ 4 ชนิดคือ

1. พวกที่มีประจุบวก และมีมวลมาก ๆ ได้แก่พวกอนุภาค แอลฟ่า โปรตอน ดิวทีรอน ตริตอน รวมทั้งเมซอน พวกนี้จะให้ปฏิกริยากับสารคล้าย ๆ กัน ในกรณีนี้ใช้ปฏิกริยาของ แอลฟ่า เป็นตัวอย่าง

2. พวกอนุภาค บีตา ทั้งอิเลคตรอน และโปสิตรอน ก็จัดอยู่ในกลุ่มนี้ด้วย ซึ่งทั้งสองตัวนี้มีมวล และจำนวนประจุเท่ากัน แต่ชนิดของประจุต่างกัน พวกนี้ให้ปฏิกริยากับสารคล้ายกัน ซึ่งจะใช้อิเลคตรอนเป็นตัวอย่าง

3. พวกรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า รวมทั้งรังสีเอกซ์ และรังสีแกมม่าด้วย ทั้งสองชนิดนี้ต่างกันที่ต้นกำเนิดเท่านั้น ปฏิกริยาของรังสีในกลุ่มนี้มีต่อสารคล้าย ๆ กัน ซึ่งจะใช้รังสีแกมม่า เป็นตัวอย่าง

4. นิวตรอน

ปฏิกริยาที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้ คือ Absorption เท่านั้น

การดูดกลืนรังสีแอลฟ่า

(Alpha-Absorption)

เมื่อรังสีแอลฟ่าเข้าใกล้อิเลคตรอน จะทำให้เกิดแรงดูดขึ้น แต่ถ้าเข้าใกล้นิวเคลียส แรงระหว่างนิวเคลียส และรังสีแอลฟ่า จะเป็นประเภทแรงผลัก

เนื่องจากแอลฟ่ามีมวลมาก คือประมาณ 8000 เท่าของมวลอีเลคตรอน และมีประจุด้วย อีกทั้งยังมีความเร็วสูง เพราะมันถูกส่งออกมาจากอะตอมของสารกัมมันตภาพรังสีด้วยความเร็วประมาณ $\frac{1}{20}$ เท่า ของความเร็วของแสง ดังนั้น เมื่อมันผ่านไปยังอะตอมของสารจึงทำให้มันมีโอกาสที่จะทำปฏิกริยาหรือชนกับอีเลคตรอนที่วิ่งอยู่ใน Orbit และนิวเคลียสของอะตอมได้ง่าย

สำหรับการชนกันระหว่างอนุภาคแอลฟ่ากับอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า เป็นการชนแบบ Inelastic Collision การชนกันระหว่างอนุภาคแอลฟ่ากับอนุภาคอื่น เช่น อีเลคตรอนหรือนิวเคลียสของอะตอมของตัวกลางที่มันผ่านไป ทำให้พลังงานจลน์ของแอลฟ่ามีค่าลดลงเรื่อย ๆ เพราะมันต้องเสียพลังงานจลน์ไปในการทำให้อะตอมของตัวกลางนั้นเกิด Excitation หรือ Ionization จนกระทั่งในที่สุดอนุภาคแอลฟ่ามีพลังงานจลน์เหลือน้อยมากและจับเอาอีเลคตรอน 2 ตัวจากอะตอมของตัวกลางมารวมกับตัวมันเป็นอะตอมของฮีเลียม

เนื่องจากแอลฟ่าทำปฏิกริยากับอีเลคตรอนใน Orbit ของอะตอมของสารได้ง่าย ดังนั้น จึงทำให้เกิด Ion Pair จำนวนมากมายในหนึ่งหน่วยช่วงความยาวของทาง (Path) ที่มันผ่านไป และในการเกิด Ion Pair แต่ละคู่ต้องการพลังงานมาก ดังนั้น แอลฟ่าจะผ่านอะตอมของสารไปได้ไม่ไกลเท่าใดนักก็ต้องหยุด เพราะถูกอีเลคตรอนในอะตอมดูดกลืนพลังงานไปหมด จึงทำให้ Range ของแอลฟ่าในตัวกลางใดตัวกลางหนึ่งน้อยกว่า Range ของรังสีชนิดอื่น ๆ ในตัวกลางเดียวกันนั้น จากนี้ เราอาจสรุปได้ว่า แอลฟ่ามีความสามารถในการ Ionize สูง แต่มีกำลังทะลุทะลวงน้อย (Low Penetrating Power)

แอลฟ่าที่ถูกส่งออกมาจากอะตอมของสารกัมมันตภาพรังสีชนิดต่าง ๆ กันนั้นมีพลังงานต่างกันไม่มากนัก ดังนั้น Range ของแอลฟ่า ที่ถูกส่งออกมาจากต้นกำเนิดต่าง ๆ กันจึงมี Range ในสารใดสารหนึ่งเกือบเท่า ๆ กัน

Range ของแอลฟ่า มักจะสรุปเป็นเซนติเมตร ความสัมพันธ์ระหว่าง Range และ Energy มีดังนี้

$$R = 0.318\ E^{3/2}$$

สำหรับ Range[๑๒] ในของแข็งนั้น เราสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง Range ในของแข็งและ Range ในอากาศดังต่อไปนี้

ถ้าให้ R = Range

ρ = ความหนาแน่น

A = Mass Number

จะได้ $R_{\text{ของของแข็ง}} = R_{\text{อากาศ}} \times \frac{\rho\ \text{อากาศ}}{\rho\ \text{ของแข็ง}} \times \frac{A\ \text{ของแข็ง}}{A\ \text{อากาศ}}$

จำนวน Ion Pair ที่เกิดขึ้นเมื่อแอลฟ่าผ่านไปในตัวกลาง 1 เซนติเมตร เรียกว่า "Specific Ionization"

$$\text{Specific Ionization} = \frac{\text{จำนวน Ion Pair ที่เกิดขึ้นทั้งหมด}}{\text{ระยะทางที่ผ่านไปเป็น ซ.ม.}}$$

ในการทำให้เกิด Ion Pair ในอากาศแต่ละคู่ต้องใช้พลังงานถึง 35 ev.

การดูดกลืนรังสีบีตา

(Beta-Absorption)

บีตามีมวลเท่ากับมวลของอิเลคตรอน แต่ว่าเมื่อเทียบกับนิวเคลียสแล้วมันจะมีมวลน้อยกว่านิวเคลียสมาก นอกจากนี้ยังมีประจุเหมือนอิเลคตรอนด้วย ดังนั้น เมื่อบีตาวิ่งไปใกล้อิเลคตรอนที่วิ่งอยู่ใน Orbit ก็จะเกิดแรงผลักระหว่าง

---

๑๒ Radionuclides in Food, (Course Manual, Radiological Health Training, Robert A.Taft, Sanitary Engineering Center Cincinnati, Ohio, U.S. Department of Health, Education, and Welfare Public Health Service, 1960), หน้า๔ (RA. IA. 6b. 2. 60.)

ปีตาและอีเลคตรอน ขณะเดียวกันก็เกิดแรงดูดระหว่างปีตากับนิวเคลียส จากคุณสมบัติเหล่านี้ทำให้เข้าใจถึงปฏิกริยาระหว่างปีตาและอะตอมของตัวกลางที่รังสีปีตาผ่านไป ถ้าปีตาชนอีเลคตรอนแล้วถ่ายพลังงานให้อีเลคตรอนหมด ก็จะทำให้อีเลคตรอนหลุดออกไปเป็นอีเลคตรอนอิสระ สามารถไป Ionize อะตอมอื่นได้อีก แต่ถ้าปีตาถ่ายพลังงานให้อีเลคตรอนไม่มากพอ อีเลคตรอนที่รับพลังงานนั้นก็ยังไม่หลุดออกจากอะตอม แต่จะกระโดดออกมาสู่ Orbit นอก (ถูก Excite) ซึ่งธรรมดา ปีตาสูญเสียพลังงานโดย ๒ วิธีนี้ อีเลคตรอนมีมวลและประจุไฟฟ้าน้อย มันจึงมีโอกาสที่จะทำปฏิกริยากับปีตาได้น้อย เพราะฉะนั้น Range ของปีตา จึงยาวกว่า Range ของแอลฟ่า ในกรณีที่ทั้งสองมีพลังงานเท่ากัน

สำหรับการ Collision ระหว่างปีตา และ นิวเคลียสนั้นเหมือนการ Collision ระหว่างอีเลคตรอนกับนิวเคลียส เพราะว่าอีเลคตรอนมีมวลน้อย เมื่อเทียบกับนิวเคลียส ในการเกิด Collision แต่ละครั้ง จะทำให้ทางเดินของอีเลคตรอนมันเปลี่ยนเบนไปได้มาก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในกรณีที่อีเลคตรอนนั้นมีพลังงานน้อย ๆ และนิวเคลียสนั้นมี Atomic Number สูง ๆ ดังนั้น เมื่อปีตาที่มีพลังงานต่ำ ๆ วิ่งเข้าไปใน Absorbing Medium ที่มี Atomic Number สูง ๆ ทางเดินของปีตาจะคดเคี้ยวมาก นอกจากปีตาจะสูญเสียพลังงานไปในขบวนการ Ionization และ Excitation แล้วมันยังอาจจะเสียพลังงานไปในการทำให้เกิด Radiative Collision คือ การที่ปีตาซึ่งมีพลังงานสูงวิ่งผ่านเข้าไปใกล้อะตอมแล้วปีตานั้นถูกทำให้มีความเร็วลดลงอย่างกะทันหัน และปีตาจะคายพลังงานออกมาในรูปของโฟตอน พลังงานโฟตอนที่ปีตาส่งออกมาโดยขบวนการนี้ เรียกว่า[๑๓] Bremsstrahlung Radiation หรือ Braking Radiation

---

[๑๓] F.W., Van Name, JR., Modern Physics, (Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, Inc., 1958), หน้า ๑๖๙, ๓๘๒

การดูดกลืนรังสีแกมม่า

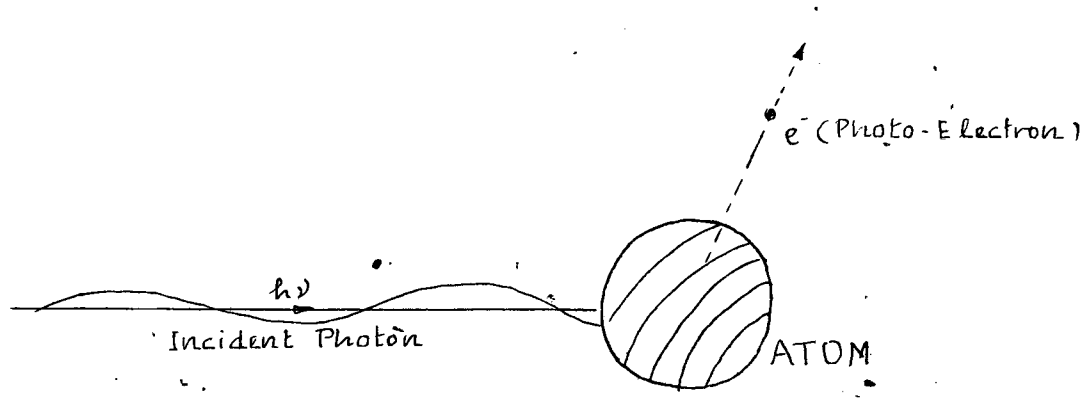
(Gamma Absorption)

รังสีเอกซ์และรังสีแกมม่านั้น มีลักษณะและคุณสมบัติเหมือนกันมาก ต่างกันที่บ่อเกิดเท่านั้น ดังนั้นถ้าพิจารณารังสีเอกซ์และรังสีแกมม่าทีละตัวจะเห็นว่าไม่แตกต่างกันเลย ทั้งคู่เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งต่างจากคลื่นวิทยุและคลื่นแสงที่ไม่สามารถมองเห็นได้ก็โดยที่มันมีคลื่นสั้น การที่เรียกชื่อต่างกันก็เพราะว่า รังสีเอกซ์และรังสีแกมม่า มีที่เกิดต่างกัน รังสีแกมม่าเกิดในนิวเคลียส ส่วนรังสีเอกซ์ เกิดนอกนิวเคลียส ถึงแม้ว่า ทั้งสองตัวนี้จะมีมวลเป็นศูนย์และไม่มีประจุ แต่เมื่อมันผ่านอะตอมของสารไปมันก็จะทำปฏิกริยากับอะตอมและทำให้เกิด Ionization ได้ ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงปฏิกริยาของรังสีแกมม่าที่มีต่ออะตอมของสารที่มันผ่านไป

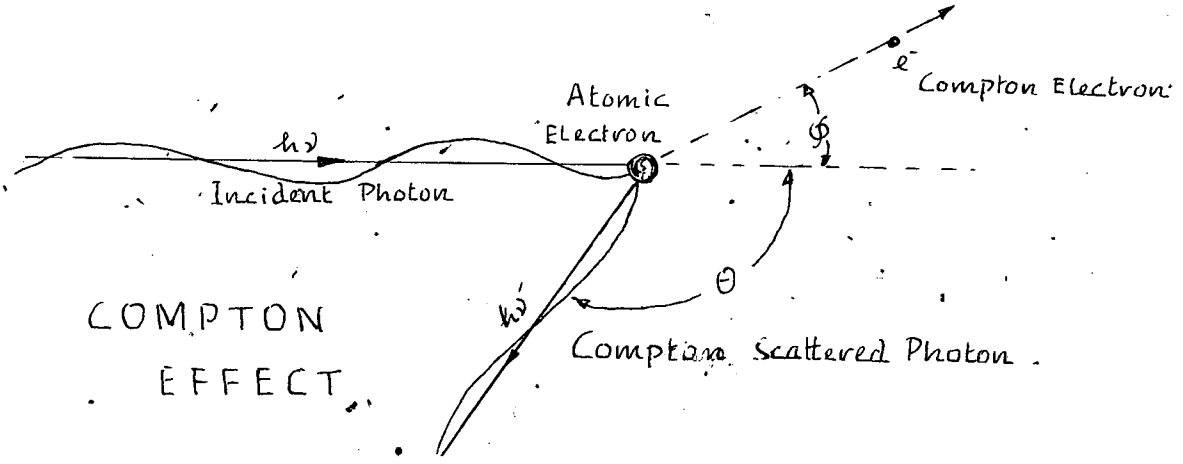
เมื่อรังสีแกมม่าผ่านไปยังอะตอมของสาร มันจะสูญเสียพลังงานให้กับอะตอมของสารนั้น แล้วจะทำให้เกิดผล 3 อย่าง คือ

1. Photoelectric Effect

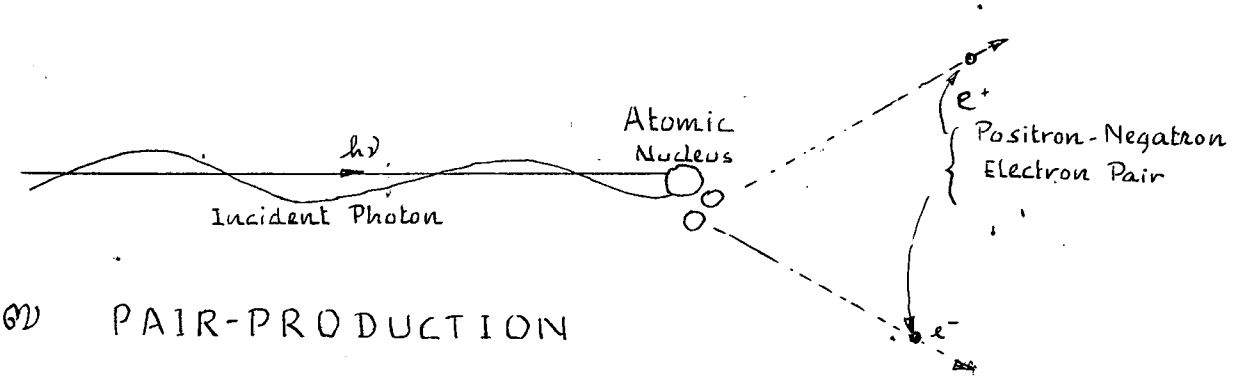
เมื่อรังสีแกมม่าที่มีพลังงานน้อย ๆ วิ่งผ่านเข้าไปยังอะตอมของสาร มันจะชนกับอิเลคตรอนใน Orbit ของอะตอมของสารนั้น แล้วอิเลคตรอนจะรับพลังงานไปหมด อิเลคตรอนที่รับพลังงานไปก็จะแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนหนึ่งใช้ไปในการทำลาย Binding Force อีกส่วนหนึ่งใช้ไปในการเคลื่อนที่ ขณะที่อิเลคตรอนเคลื่อนที่ไป มันก็จะวิ่งไปชนหรือเฉียดกับอิเลคตรอนใน Orbit ของอะตอมอื่นซึ่งมันจะถ่ายพลังงานให้กับอิเลคตรอนตัวใหม่นี้ ทำให้อิเลคตรอนตัวใหม่หลุดออกจากอะตอมไปหรือไม่ก็ทำให้อิเลคตรอนกระโดดไปอยู่ใน Excited State โดยมากอิเลคตรอนมักไม่ค่อยหลุดออกไปจากอะตอม เพียงแต่อยู่ในลักษณะ Excited State ซึ่งไม่อยู่ตัว (Unstable) ดังนั้น ในไม่ช้า Electron ใน Excited State จะกระโดดกลับเข้าสู่ State เดิม (Lower State) แล้วจะถ่ายพลังงานออกมาในรูปของโฟตอน ส่วนอิเลคตรอนตัวเดิมจะวิ่งต่อไป เพื่อแจกจ่ายพลังงานให้กับอิเลคตรอนตัวอื่นของอะตอมต่อ ๆ ไป จนในที่สุดพลังงานหมดมันก็



รูป ๔ PHOTOELECTRIC EFFECT



รูป ๖ COMPTON EFFECT



รูป ๗ PAIR-PRODUCTION

จะหยุด ส่วนอิเลคตรอนตัวที่ได้รับพลังงานไปนั้นก็จะถ่ายพลังงานกลับออกมาในรูปของโฟตอน เพื่อทำให้ตัวมันกลับเข้าสู่ State เดิม

2. Compton Effect

เมื่อรังสีแกมม่ามีพลังงานมากปานกลางวิ่งผ่านไปยังอะตอมของสาร มันจะถ่ายพลังงานส่วนหนึ่งให้กับอิเลคตรอนที่วิ่งอยู่ใน Orbit อิเลคตรอนรับพลังงานไป และถ่ายให้กับอิเลคตรอนตัวอื่น ๆ ดังข้อ 1. และผลที่สุดจะได้แสงออกมา อิเลคตรอนตัวที่รับพลังงานจากรังสีแกมม่า เรียกว่า Recoil Electron ส่วนรังสีแกมม่าส่วนที่เหลือ เรียกว่า Scattered Photon ซึ่งจะมีความยาวคลื่นเปลี่ยนไป พลังงานทั้งหมดอาจเขียนเป็นรูปสมการได้ดังนี้

$$h\nu = (W + K.E.) + h\nu'$$

ในเมื่อ $h\nu$ = พลังงานทั้งหมดที่รังสีแกมม่ามีอยู่เดิม

W = พลังงานที่ใช้ทำลาย Binding Energy ของ Recoil Electron.

$K.E$ = Kinetic Energy ของ Recoil Electron

$h\nu'$ = พลังงานของรังสีแกมม่าส่วนที่เหลือ

รังสีแกมม่าส่วนที่เหลืออาจจะไปชนอิเลคตรอนของอะตอมอื่น ๆ แล้วเกิด Photo-Electric Effect, Compton Effect หรืออาจจะไม่ชนเลยก็ได้

3. Pair Production

เมื่อรังสีแกมม่ามีพลังงานมาก ๆ อย่างน้อยที่สุด 1.02 Mev. วิ่งผ่านเข้าไปยังอะตอมของสาร มันจะทำปฏิกริยากับสนามไฟฟ้ารอบ ๆ นิวเคลียส (นิวเคลียสที่มีประจุบวกมาก ๆ) จะทำให้รังสีแกมม่าแตกออกเป็นโปสิตรอนและเนกาตรอน (Negatron) สำหรับโปสิตรอนนั้น จะไปรวมกับอิเลคตรอนของอะตอมอื่น แล้วหายไป กลายเป็นโฟตอนสองตัวซึ่งแยกออกจากกันและมีทิศตรงกันข้าม ซึ่งแต่ละตัวมีพลังงาน 0.511 Mev. โฟตอนทั้งสองตัวนั้น จะวิ่งไปชนอิเลคตรอนของอะตอม

อื่น ๆ ได้ และอาจจะทำให้เกิด Photo-electric Effect หรือ Compton Effect. ต่อไปอีก ส่วนอิเลคตรอนจะวิ่งไป Ionize หรือ Excite อะตอมของสารที่มันผ่านไป แล้วทำให้เกิดโฟตอนขึ้น