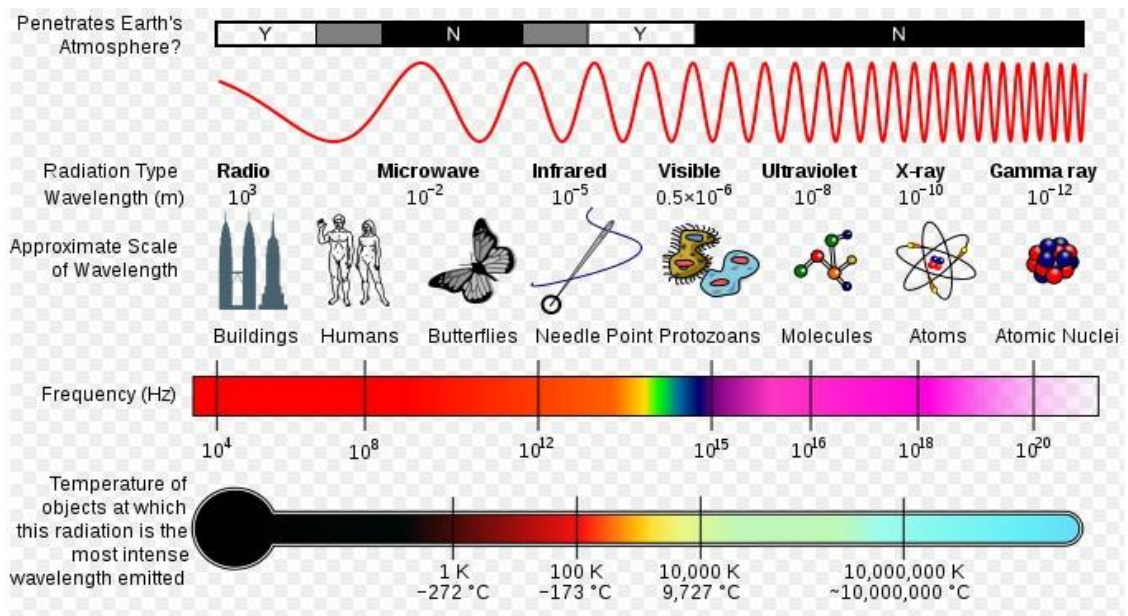


บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คุณสมบัติของรังสี [2, 3]

รังสี (Radiation) คือพลังงานในรูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีความถี่ที่แตกต่างกันกระจายเป็นสเปกตรัม เช่น คลื่นวิทยุ (Radio) มีความถี่หรือพลังงานน้อยกว่าคลื่นไมโครเวฟ (Microwave) และแสงอาทิตย์มีความถี่ครอบคลุมตั้งแต่รังสีใต้แดง (Infrared) ถึงรังสีเหนือม่วง (Ultraviolet) เป็นต้น

ผังรูปที่ 2.1 แสดงสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยส่วนล่างสุดแสดงอุณหภูมิของแต่ละช่วงความถี่ ส่วนถัดขึ้นไปเป็นความถี่ ส่วนถัดขึ้นไปอีกเป็นขนาดเปรียบเทียบความยาวคลื่นกับวัตถุ ตามด้วยชนิดของคลื่นและคุณสมบัติการทะลุทะลวงผ่านชั้นบรรยากาศของโลกของรังสีแต่ละชนิด



รูปที่ 2.1 สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [2]

ถ้าจำแนกรังสีตามคุณสมบัติทางกายภาพแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ รังสีชนิดไม่ก่อไอออน (Non-Ionizing Radiation) และรังสีชนิดก่อไอออน (Ionizing Radiation) ซึ่งรังสีชนิดไม่ก่อไอออนจะทำให้อะตอมของตัวกลางสั่นสะเทือน (Vibrate) แต่ไม่ก่อให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนในตัวกลางที่ผ่าน เช่น คลื่นวิทยุไมโครเวฟ รังสีใต้แดงถึงรังสีเหนือม่วง ซึ่งรังสีเหนือม่วงช่วงบนที่มีพลังงานใกล้เคียงกับรังสีเอกซ์ ทำให้สารตัวกลางเกิดการแตกตัวเป็นไอออนได้เช่นกัน ส่วนรังสีที่สามารถก่อให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนในตัวกลางที่ผ่านนั้นเรียกว่า รังสีชนิดก่อไอออน อีกทั้งรังสีที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงภายในนิวเคลียสของอะตอมเป็นรังสีชนิดก่อไอออนทั้งสิ้น ประกอบด้วย รังสีคอสมิก

รังสีแกมมา และอนุภาคที่มีพลังงานสูง เช่น อนุภาคอิเล็กตรอน โพซิตรอน โปรตอน นิวตรอน และแอลฟา รังสีเหล่านี้เรียกรวมว่ารังสีนิวเคลียร์ ส่วนรังสีเอกซ์เป็นรังสีชนิดก่อไอออนเช่นกัน แต่เกิดจากปฏิกิริยาของอิเล็กตรอนที่โคจรรอบนิวเคลียส

2.2 อันตรกิริยาระหว่างรังสีกับสสาร (Interaction of Radiations with Matter)

[1, 4, 5]

จากสมบัติความเป็นอนุภาคของคลื่นในกลศาสตร์ควอนตัม คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทุกชนิดซึ่งรวมไปถึงรังสีแกมมา ประกอบด้วยอนุภาคที่เรียกว่า โฟตอน มีสมบัติเป็นกลางทางไฟฟ้าและไม่มีมวล เมื่อโฟตอนวิ่งเข้าไปในตัวกลางใดๆ จะมีอันตรกิริยากับอะตอมของตัวกลางทั้งกับอิเล็กตรอนที่วิ่งวนรอบนิวเคลียสหรือกับนิวเคลียส ถึงแม้ว่าโฟตอนจะเป็นกลางทางไฟฟ้า แต่ก็มีอันตรกิริยากับอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเช่นอิเล็กตรอนหรือนิวเคลียสได้ ถ้าคิดว่าโฟตอนเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ก็มองได้ว่าอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลาของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือถ้าคิดในแง่ของความเป็นอนุภาคของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ต้องอาศัยแนวคิดในทฤษฎีพลศาสตร์ไฟฟ้าแบบควอนตัม (Quantum Electrodynamics) ที่อธิบายว่าอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเกิดจากการแลกเปลี่ยนอนุภาคตัวกลาง ซึ่งก็คือโฟตอนนั่นเอง อีกทั้งพลังงานของโฟตอนแต่ละตัวมีค่าเท่ากับค่าคงที่ของพลังค์คูณกับความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ($E=h\nu$)

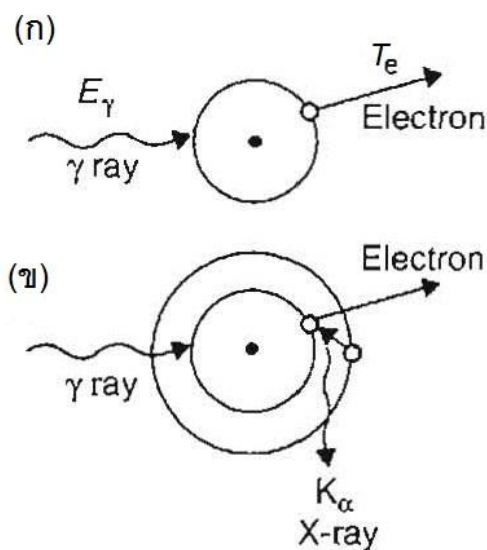
อันตรกิริยาระหว่างรังสีกับสสารนั้น การสูญเสียพลังงานของรังสีจะไม่ต่อเนื่องตามแนวการเคลื่อนที่ เนื่องจากรังสีสามารถเคลื่อนที่ในสสารได้เป็นระยะทางค่าหนึ่ง โดยที่ไม่เกิดอันตรกิริยากับสสารก่อนที่จะเกิดอันตรกิริยากับอะตอมของสสารขึ้น ระยะทางที่ปราศจากอันตรกิริยานี้ถูกควบคุมในเชิงสถิติด้วยโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาต่อระยะทางของรังสีกับอะตอมของสสาร ซึ่งมีค่าขึ้นกับพลังงานของรังสีและชนิดของสสาร เมื่อรังสีเกิดอันตรกิริยากับอะตอมของสสาร รังสีอาจจะถูกดูดซับหายไป หรือเกิดการกระเจิงได้ ส่งผลต่อแนวการเคลื่อนที่ของรังสีที่เปลี่ยนไปจากเดิม ในขณะที่บางกรณีมีการสูญเสียพลังงานเกิดขึ้น แต่ในบางกรณีก็แทบจะไม่มี การสูญเสียพลังงานเลย

อันตรกิริยาที่เกิดกับอิเล็กตรอนที่อยู่ภายในอะตอมของสสาร ประกอบด้วยปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric Effect) และการกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton Scattering) นอกจากนี้ยังมีอันตรกิริยาที่เกี่ยวข้องกับนิวเคลียสของสสาร อย่างอันตรกิริยาการเกิดอนุภาคคู่ (Pair Production) โดยอันตรกิริยาเหล่านี้จะส่งผลต่อการสูญเสียพลังงานของรังสี หรือมีการถ่ายทอดพลังงานให้กับ

สสาร ซึ่งโอกาสการเกิดอันตรกิริยานั้นเกิดขึ้นได้มากน้อยไม่เท่ากันขึ้นกับพลังงานของรังสีและชนิดของสสาร

2.2.1 อันตรกิริยาโฟโตอิเล็กทริก

ในกรณีรังสีแกมมาที่มีพลังงานต่ำ คือมีพลังงานอยู่ในช่วง 0.01-0.5 MeV อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเป็นปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก ซึ่งมักเกิดขึ้นกับอิเล็กตรอนชั้นในของอะตอม (อิเล็กตรอนวงนอกมีโอกาสเกิดอันตรกิริยาแบบคอมป์ตันสูงกว่า) เมื่ออิเล็กตรอนชั้นในหลุดออกจากอะตอมจะเกิดสถานะว่างขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.2 (ก) อิเล็กตรอนตัวอื่นภายในอะตอมเดียวกันจะลดพลังงานลงมาเพื่อแทนที่สถานะว่างดังกล่าว ส่งผลให้เกิดการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะออกมา ถ้าหากรังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะถูกดูดกลืนโดยอิเล็กตรอนในสสาร และทำให้เกิดการแตกตัวเป็นประจุตามแนวทางการเคลื่อนที่ของมันขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.2 (ข)



รูปที่ 2.2 อันตรกิริยาโฟโตอิเล็กทริก [5]

เมื่อรังสีหรือโฟตอนถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้กับอิเล็กตรอนของอะตอมของสสาร ถ้าพลังงานนั้นมีค่ามากกว่าพลังงานที่ยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนไว้ในสสารนั้น จะทำให้อิเล็กตรอนนั้นหลุดออกมา อันตรกิริยาแบบนี้เรียกว่า ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก พลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน (E_b) ในสสารมีค่าขึ้นอยู่กับชนิดของสสาร พลังงานจลน์ (Kinetic Energy: T_e) มากที่สุดของอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาเท่ากับผลต่างของพลังงานของรังสีแกมมากับพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน แสดงดัง

สมการที่ 2.1 ซึ่งค่าพลังงานจลน์มีค่ามากที่สุด เนื่องจากว่าอิเล็กตรอนอาจมีการสูญเสียพลังงานที่ได้มาจากรังสีแกมมาระหว่างการเคลื่อนที่มาจากตัวของสสารเอง

$$T_e = E_\gamma - E_b \quad (2.1)$$

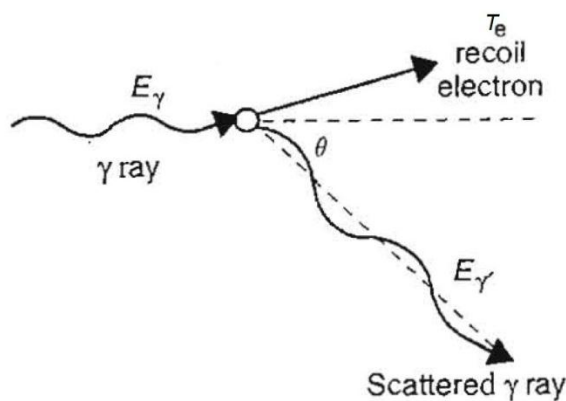
2.2.2 อันตรกิริยาคอมป์ตัน

ในกรณีที่รังสีแกมมาพลังงานสูงปานกลาง คือมีพลังงานประมาณ 0.1-5 MeV อันตรกิริยาส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นคือการการกระเจิงแบบคอมป์ตัน โดยรังสีแกมมาที่วิ่งเข้าไปในตัวกลางอาจมีการกระเจิงเป็นมุม θ เนื่องจากอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนของอะตอมได้ ซึ่งมีผลทำให้ทั้งพลังงานและแนวทางการเคลื่อนที่ของรังสีแกมมามีการเปลี่ยนแปลง อาจกล่าวได้ว่าเป็นการชนกันระหว่างรังสีแกมมากับอิเล็กตรอนของอะตอม โดยรังสีแกมมาถ่ายทอดพลังงานบางส่วนให้กับอิเล็กตรอน ซึ่งทำให้รังสีแกมมามีพลังงานเหลือ E'_γ แสดงดังสมการที่ 2.2

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \left(\frac{E_\gamma}{m_e c^2}\right)(1 - \cos\theta)} \quad (2.2)$$

เมื่อ $m_e c^2$ คือพลังงานมวลนิ่งของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ 0.511 MeV

อิเล็กตรอนที่เกิดการกระเจิงแบบคอมป์ตันมักเป็นอิเล็กตรอนที่อยู่วงนอก ซึ่งมีพลังงานยึดเหนี่ยวน้อยกว่าพลังงานของรังสีแกมมาที่วิ่งเข้ามา มาก หรืออาจถือว่าเป็นอิเล็กตรอนอิสระในมุมมองของรังสีแกมมาก็ได้ พลังงานที่รังสีแกมมาถ่ายทอดให้กับอิเล็กตรอนขึ้นอยู่กับมุมกระเจิงของรังสีแกมมา ลักษณะของการกระเจิงแบบคอมป์ตันแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 อันตรกิริยาคอมป์ตัน [5]

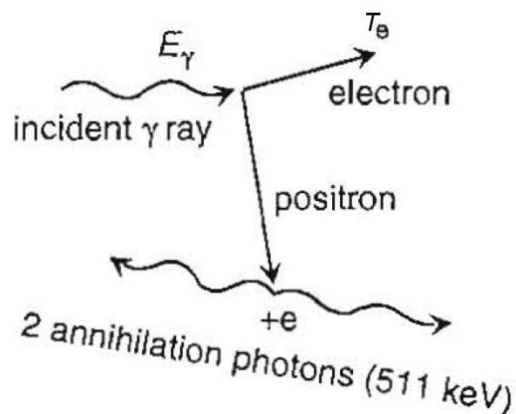
2.2.3 อันตรกิริยาการเกิดอนุภาคคู่

ถ้ารังสีแกมมามีพลังงานสูง คือมีพลังงานมากกว่า 1.02 MeV จะทำให้เกิดอันตรกิริยาการเกิดอนุภาคคู่ จากทฤษฎีสัมพัทธภาพของไอสไตน์ ที่กล่าวถึงการเปลี่ยนพลังงานเป็นมวล ($E=mc^2$) พบว่าโฟตอนที่ มีพลังงานมากกว่า 2 เท่าของพลังงานมวลนิ่งของอิเล็กตรอน ($E > 1.022$ MeV) สามารถเปลี่ยนกลายเป็นอิเล็กตรอนและโพสิตรอน เนื่องจากผลของอันตรกิริยากับสนามไฟฟ้าของนิวเคลียสของ อะตอมตัวกลาง อันตรกิริยาของรังสีแกมมาในลักษณะนี้เรียกว่าการเกิดอนุภาคคู่ ซึ่งอนุภาคคู่ที่ หมายถึงคือ อิเล็กตรอนและโพสิตรอนนั่นเอง ทั้งสองอนุภาคเป็นปฏิยานุภาค (Antiparticle) ซึ่งกัน และกัน (มีมวลและขนาดของประจุไฟฟ้าที่เท่ากัน แต่มีชนิดของประจุไฟฟ้าตรงกันข้าม) พลังงานของ รังสีแกมมาที่เหลือจากการเปลี่ยนพลังงานเป็นมวลของอิเล็กตรอน และโพสิตรอนกลายเป็น พลังงานจลน์ของทั้งสองอนุภาค ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วพลังงานจะแบ่งครึ่งเท่าๆ กันระหว่างอนุภาค ทั้งสอง นอกจากนี้ยังมีแนวการเคลื่อนที่ของอนุภาคทั้งสอง ส่วนใหญ่จะทำมุมแหลมกับแนวการ เคลื่อนที่ของรังสีแกมมาอีกด้วย โพสิตรอนที่เกิดขึ้นเคลื่อนที่ไปไม่ได้ไม่ไกลก็รวมตัวกับอิเล็กตรอนซึ่งมี อยู่มากมายในตัวกลางกลายเป็นโฟตอน 2 ตัว เรียกว่าการแอนนิฮิเลชันอิเล็กตรอน-โพสิตรอน (Electron-Positron Annihilation) แสดงดังรูปที่ 2.4 ดังนั้นพลังงานของรังสีแกมมามีค่า

$$E_\gamma = m_{e^-}c^2 + m_{e^+}c^2 + T_{e^-} + T_{e^+} \quad (2.3)$$

เมื่อ $m_{e^-}c^2$ และ $m_{e^+}c^2$ คือมวลของอิเล็กตรอน และโพสิตรอน ตามลำดับ

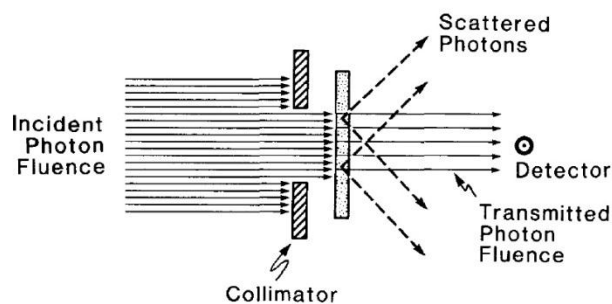
T_{e^-} และ T_{e^+} คือพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน และโพสิตรอน ตามลำดับ



รูปที่ 2.4 อันตรกิริยาการเกิดอนุภาคคู่ [5]

2.2.4 การลดทอนรวมของโฟตอนจากอันตรกิริยาแบบต่างๆ

การเกิดอันตรกิริยาระหว่างโฟตอนกับสสารบอกด้วยโอกาสต่อระยะทางการเคลื่อนที่ ซึ่งคล้ายกับการสลายของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ที่การสลายบอกด้วยโอกาสของการสลายต่อหน่วยเวลา (ค่าคงที่การสลาย: λ) เมื่อพิจารณาการส่งรังสีโฟตอนลำแคบๆ ที่มีพลังงานค่าเดียว (Monoenergetic Narrow Photon Beam) ไปยังแผ่นตัวกลางขวางกั้นที่ปรับค่าความหนาได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 อีกด้านหนึ่งมีเครื่องมือตรวจนับจำนวนหรือความเข้มของโฟตอนที่สามารถทะลุผ่านแผ่นขวางกั้นมาได้ โฟตอนที่ถูกรวมนับสมมติว่าเป็นโฟตอนที่ไม่มีเกิดอันตรกิริยาใดๆ กับอะตอมของตัวกลาง หรือเรียกว่าโฟตอนปฐมภูมิ (Primary Photon) ทั้งนี้ถ้าหากโฟตอนมีอันตรกิริยาเกิดขึ้น มันจะเกิดการกระเจิงไปในทิศทางอื่นและไม่ถูกรวมนับ หรือไม่เช่นนั้นมันก็จะถูกดูดกลืนหายไป



รูปที่ 2.5 แผนภาพการทดลองเพื่อวัดการลดทอนของโฟตอน [4]

ความเข้มโฟตอนที่เกิดอันตรกิริยากับแผ่นขวางกั้น (dI) จะแปรตามความเข้มโฟตอนที่ตกกระทบ (I) และความหนาของแผ่นตัวกลางขวางกั้น (dx)

$$dI \propto I dx \quad (2.4)$$

เช่นเดียวกันกับจำนวนการสลายของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ที่แปรผันตรงตามจำนวนนิวไคลด์กัมมันตรังสีเริ่มต้นและเวลา สำหรับตัวกลางขวางกั้นชนิดหนึ่ง จำนวนหรือความเข้มของโฟตอนที่ผ่านออกมาหาได้จากความสัมพันธ์

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.5)$$

โดยที่ I_0 คือความเข้มของโฟตอนตกกระทบ และ μ คือสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear Attenuation Coefficient) มีหน่วยเป็นส่วนกลับของระยะทาง ซึ่งเป็นค่าคงที่ซึ่งเกี่ยวข้องกับโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาของโฟตอน โดยมีค่าขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกลางขวางกั้น และพลังงานของโฟตอน

จากสมการ 2.5 จะพบว่าสัดส่วนของโฟตอนที่วิ่งผ่านตัวกลางหนา x มีค่าเป็น $\frac{I}{I_0} = e^{-\mu x}$ จึงกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าอัตราส่วนนี้คือโอกาสที่โฟตอนจะวิ่งในตัวกลางเป็นระยะ x โดยไม่เกิดอันตรกิริยากับอะตอมของแผ่นขวางกั้น หรือเกิดอันตรกิริยาขึ้นหลังจากเดินทางเป็นระยะทาง x ในตัวกลาง ซึ่งโอกาสดังกล่าวจึงมีความหมายคล้ายคลึงใกล้เคียงกับแนวคิดของภาคตัดขวาง ที่ใช้อธิบายโอกาสในการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ดังในสมการ $-\frac{dI}{I} = \frac{nA\sigma dx}{A} = n\sigma dx$ เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังกำลังกับในสมการ 2.5 จะได้ความสัมพันธ์

$$\mu = \sigma_A n \quad (2.6)$$

โดยที่ σ_A คือภาคตัดขวางของอะตอมตัวกลางสำหรับโฟตอน และ n คือจำนวนอะตอมต่อปริมาตรของตัวกลาง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่น (ρ) คือ $n = \frac{\rho}{A} N_A$ โดยที่ A คือมวลเชิงอะตอมกรัมของอะตอมตัวกลางกั้น และ N_A คือเลขอาโวกาโดร์ เมื่อแทนลงไปในสมการ 2.6 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลกับภาคตัดขวางดังสมการ

$$\frac{\mu}{\rho} = \sigma_A N_A \quad (2.7)$$

โดยที่ $\frac{\mu}{\rho}$ คือสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (Mass Attenuation coefficient) ได้จากการหารสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นด้วยความหนาแน่นของตัวกลางนั้น จึงมีหน่วยเป็นระยะทางกำลังสองต่อมวล

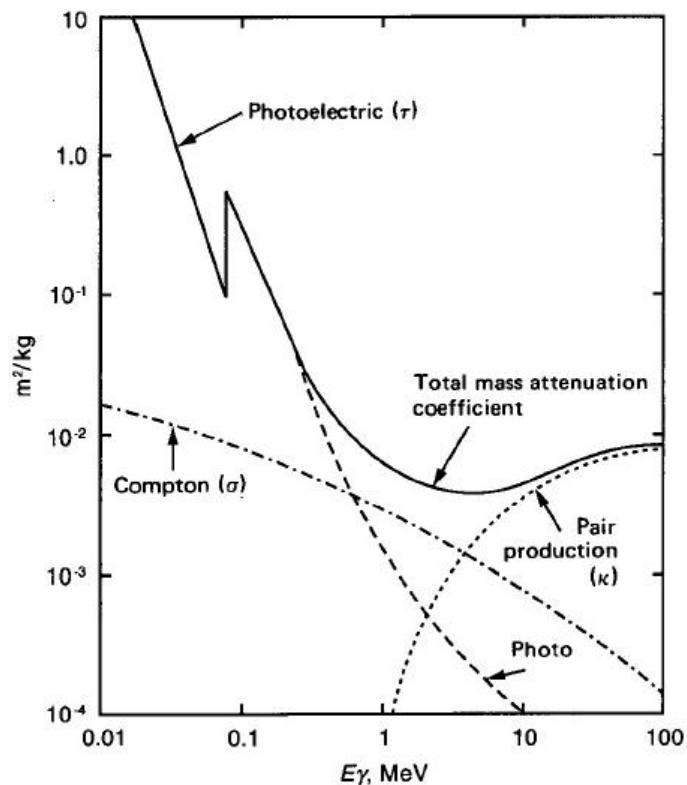
สำหรับตัวขวางกั้นที่ประกอบด้วยอะตอมหลายชนิดหรือเป็นสารประกอบ การหาสัมประสิทธิ์การลดทอนทำได้จากการนำเอาค่าของสัมประสิทธิ์การลดทอนของอะตอม แต่ละชนิดมารวมกันตามสัดส่วนที่ประกอบกัน

การลดทอนของโฟตอนเกิดขึ้นเนื่องจากอันตรกิริยากับตัวกลาง ดังนั้นสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นจึงประกอบไปด้วยพจน์ที่มาจากอันตรกิริยาของโฟตอนแต่ละแบบ

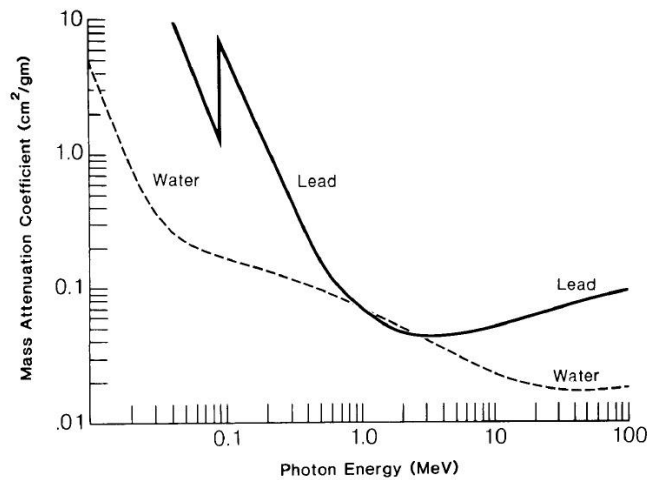
$$\mu = \tau + \sigma + \kappa \quad (2.8)$$

โดย τ , σ และ κ แทนสัมประสิทธิ์การลดทอนจากปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก การกระเจิงแบบคอมป์ตัน และการเกิดอนุภาคคู่ สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของอันตรกิริยาแต่ละแบบได้จากการหารด้วยความหนาแน่นของตัวกลางเช่นเดียวกัน

ในที่นี้อันตรกิริยาหลักที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของโฟตอนในตัวกลาง เป็นตามสมการ 2.8 โดยวิเคราะห์ได้ว่าสำหรับโฟตอนพลังงานต่ำ อันตรกิริยาที่ส่งผลสำคัญต่อการลดทอนคืออันตรกิริยาโฟโตอิเล็กทริก เนื่องจากแปรผกผันกับพลังงานยกกำลังสาม แต่สำหรับโฟตอนพลังงานสูง อันตรกิริยาการเกิดอนุภาคคู่มีความสำคัญที่สุด เนื่องจากประมาณได้ว่าเป็นตามพลังงานของโฟตอน สัดส่วนการเกิดอันตรกิริยาทั้งสามชนิดที่โฟตอนพลังงานต่างๆ กัน แสดงในรูปที่ 2.6 พร้อมทั้งได้ยกตัวอย่างสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลรวมจากแต่ละอันตรกิริยา สำหรับในตัวกลางอะลูมิเนียมและตะกั่ว สำหรับโฟตอนพลังงานต่างๆ แสดงให้เห็นในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 สัดส่วนของอันตรกิริยาโฟโตอิเล็กทริก (τ) คอมป์ตัน (σ) และการเกิดอนุภาคคู่ (κ) ในตัวกลางที่โฟตอนพลังงานต่างๆ [4]



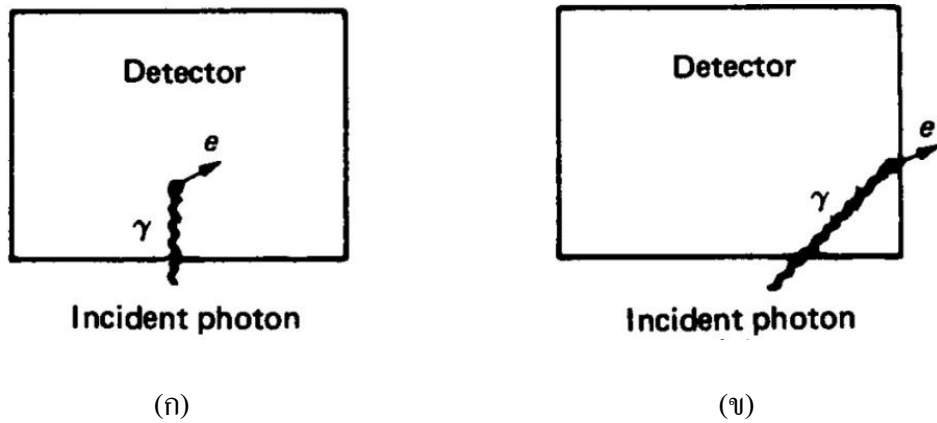
รูปที่ 2.7 สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของโฟตอนรวม จากอันตรกิริยาโฟโตอิเล็กทริก (τ) คอมป์ตัน (σ) และการเกิดอนุภาคคู่ (κ) สำหรับโฟตอนพลังงานในช่วง 10 keV ถึง 10 MeV สำหรับตัวกลางที่เป็น (ก) อะลูมิเนียม (ข) ตะกั่ว [4]

2.3 สเปกโทรสโกปีของรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์ [6, 7]

อิเล็กตรอนจะถูกผลิตขึ้น เมื่อเกิดอันตรกิริยาระหว่างโฟตอนกับวัสดุที่ใช้ทำหัววัดรังสี อันตรกิริยาดังกล่าวทำให้เกิดปรากฏการณ์หลักๆ คือปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก การกระเจิงคอมป์ตัน และอนุภาคคู่ อิเล็กตรอนหรือโพสิตรอนที่เกิดจากอันตรกิริยาเหล่านี้ จะจ่ายพลังงานให้หัววัดและเกิดสัญญาณพัลส์ ความสูงของสัญญาณพัลส์จะแปรผันตรงกับพลังงานที่จ่ายให้กับหัววัดหรือพลังงานอนุภาคที่ตกกระทบนั่นเอง

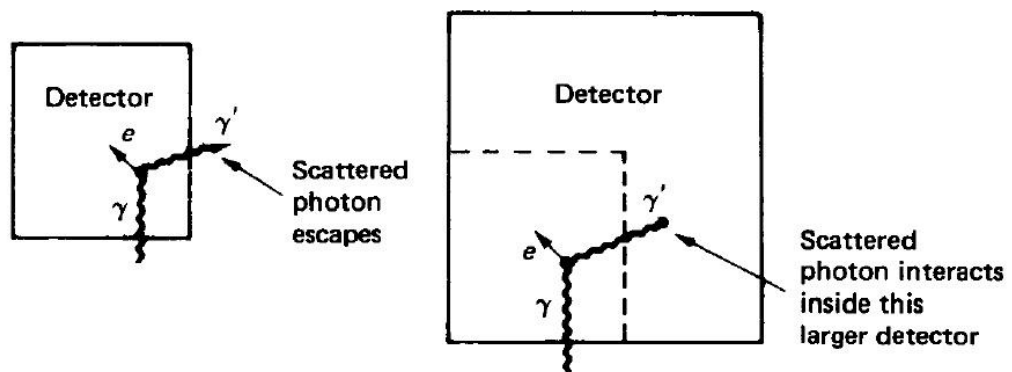
2.3.1 กรณีพลังงานโฟตอนที่ตกกระทบบมีค่าน้อยกว่า 1.022 MeV

เมื่อพลังงานโฟตอนที่มีค่าน้อยกว่า 1.022 MeV สามารถเกิดอันตรกิริยาของปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกหรือการกระเจิงคอมป์ตันเท่านั้น ถ้าเกิดอันตรกิริยาแบบโฟโตอิเล็กทริกเกิดขึ้น โฟตอนจะหายไปและเกิดอิเล็กตรอน ซึ่งมีพลังงานเท่ากับผลต่างระหว่างพลังงานโฟตอนที่ตกกระทบกับพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน พิสัยของอิเล็กตรอนในผลึกซินทิลเลเตอร์นั้นจะสั้นมากส่งผลให้พลังงานของอิเล็กตรอนเกือบทั้งหมดจ่ายให้กับหัววัดแสดงดังรูปที่ 2.8 (ก) แต่ถ้าอันตรกิริยาเกิดขึ้นใกล้ๆ กับผนังของหัววัด อิเล็กตรอนอาจจะจ่ายพลังงานเพียงบางส่วนให้กับหัววัดแสดงดังรูปที่ 2.8 (ข) ซึ่งโอกาสที่จะเกิดขึ้นนี้น้อยมาก อีกทั้งในทางปฏิบัตินั้นจะสมมติว่าโฟโตอิเล็กตรอนจะจ่ายพลังงานทั้งหมดภายในหัววัด



รูปที่ 2.8 ผลของปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกที่โฟตอนหายไปและเกิดอิเล็กตรอน โดยที่ (ก) พลังงานของอิเล็กตรอนทั้งหมดจ่ายให้กับหัววัด (ข) พลังงานของอิเล็กตรอนบางส่วนจ่ายให้กับหัววัด [7]

หลังจากปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเกิดขึ้น เมื่ออิเล็กตรอนชั้นในหลุดออกจากอะตอมจะเกิดสถานะว่างขึ้น อิเล็กตรอนตัวอื่นภายในอะตอมเดียวกันจะลดพลังงานลงมาเพื่อแทนที่สถานะว่างดังกล่าว ส่งผลให้เกิดการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะ หรือ ไอเจอร์อิเล็กตรอนออกมาจากการแทนที่ชั้นอิเล็กตรอน ซึ่ง ไอเจอร์อิเล็กตรอนก็จะจ่ายพลังงานทั้งหมดภายในหัววัด รังสีเอกซ์ที่มีพลังงานต่ำในช่วงราว 100 keV หรือน้อยกว่านี้จะก่อให้เกิดอันตรกิริยาแบบโฟโตอิเล็กทริก และผลิตอิเล็กตรอนใหม่อีก ผลลัพธ์สุทธิของอันตรกิริยาที่ติดตามมาเกิดจากพลังงานบางส่วนของพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนของพลังงานโฟตอนที่ตกกระทบ และจะเพิ่มขึ้นในหัววัด โดยเหตุการณ์ทั้งหมดจะเกิดขึ้นภายในเวลา 10^{-8} วินาที



รูปที่ 2.9 ผลของการกระเจิงคอมป์ตัน พลังงานบางส่วนของโฟตอนอาจจะสูญหายไป [7]

ถ้าเกิดการกระเจิงคอมป์ตันจะมีเพียงบางส่วนของพลังงานโฟตอนที่จ่ายให้กับอิเล็กตรอน โฟตอนที่กระเจิงจะเป็นผู้รับพลังงานส่วนที่เหลือทั้งหมด

โฟตอนที่กระเจิงอาจจะเกิดหรือไม่เกิดอันตรกิริยาภายในหัววัดอีกก็ได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของหัววัด ตำแหน่งของอันตรกิริยาครั้งแรก พลังงานของโฟตอนที่กระเจิงและวัสดุที่ใช้ทำหัววัด เว้นเสียแต่หัววัดจะมีขนาดใหญ่ไม่จำกัดนั้นคือจะมีโอกาสเสมอที่โฟตอนกระเจิงจะมีการหักเหแสดงดังรูปที่ 2.9 ซึ่งในกรณีนี้จะก่อสัญญาณพัลส์ที่ความสูงแปรผันตามพลังงานซึ่งน้อยกว่าพลังงานของโฟตอนตกกระทบ

จากการศึกษาผลของคอมป์ตัน พบว่าอิเล็กตรอนคอมป์ตันจะมีช่วงพลังงานจากศูนย์ถึงพลังงานสูงสุด (T_{max}) ซึ่ง

$$T_{max} = E - \frac{E}{1+2E/mc^2} \quad (2.9)$$

เมื่อ E คือพลังงานของโฟตอน

รูปที่ 2.10 ถึง 2.12 จะแสดงว่าสเปกตรัมโฟตอนพลังงานเดี่ยวถูกบันทึกจากผลลัพธ์ของปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกและการกระเจิงคอมป์ตัน

ในรูปที่ 2.10 แสดงสเปกตรัมแหล่งกำเนิดแกมมาพลังงานเดี่ยวในกรณีของการแยกพลังงานสมบูรณ์ วิเคราะห์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์สัญญาณหลายช่อง โดยรูปที่ 2.11 บางโฟตอนจะผลิตสัญญาณพัลส์ซึ่งถูกบันทึกในช่วง C_0 สมัยกับแหล่งพลังงาน E_0 และจะแสดงเป็นพีคหลักของสเปกตรัม ซึ่งเรียกว่าพีคพลังงานเต็ม (Full Energy Peak) อิเล็กตรอนคอมป์ตันจะเห็นในส่วนต่อเนื่องของสเปกตรัม โดยแผ่จากช่องหมายเลข 0 ถึงช่วง CC ซึ่งเรียกว่าส่วนต่อเนื่องคอมป์ตัน ด้านปลายของส่วนต่อเนื่องคอมป์ตันเรียกว่าขอบคอมป์ตัน (Compton Edge) ซึ่งสอดคล้องกับพลังงานที่กำหนดให้โดยสมการ 2.9 เนื่องจากไม่มีหัววัดใดที่มีการแยกพลังงานสมบูรณ์ สเปกตรัมที่วัดได้จะดูเหมือนกับรูปที่ 2.12

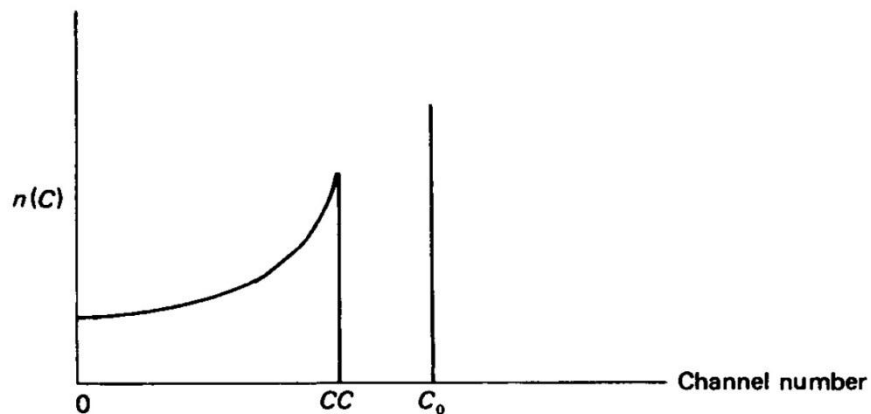
ในบางครั้งอันตรกิริยาคอมป์ตันเกิดขึ้นใกล้ๆ กับผิวของหัววัดหรือในวัสดุที่ห่อหุ้มอยู่รอบๆ เพื่อป้องกันหัววัด ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้สูงที่อิเล็กตรอนจะหักเห และจะมีเพียงพลังงานของโฟตอนที่กระเจิงเท่านั้นที่จะเพิ่มขึ้นในหัววัด ดังรูปที่ 2.13 พลังงานต่ำสุด E_{min} ของโฟตอนที่กระเจิงจะเป็นไปตามสมการ

$$E_{min} = \frac{E}{1+2E/mc^2} \tag{2.10}$$

ในบางครั้งพีคที่ค่อนข้างกว้างซึ่งสมนัยกับพลังงานที่ให้โดยสมการ 2.10 จะเกิดขึ้นในสเปกตรัมแกมมา พีคนี้เรียกว่าพีคกระเจิงกลับ (Backscatter Peak) ดูรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.10 สเปกตรัมแกมมาพลังงานเดียว [7]

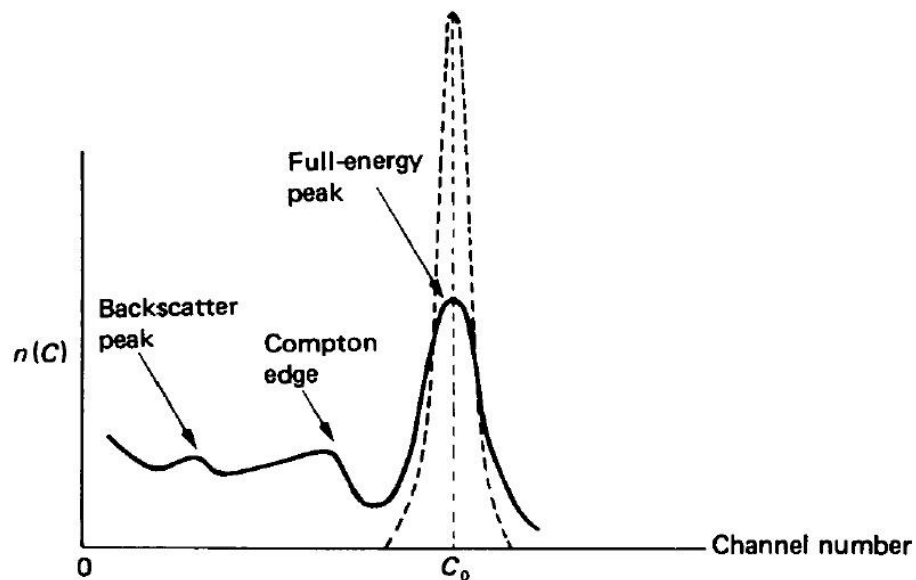


รูปที่ 2.11 สเปกตรัมความสูงของสัญญาณพัลส์ที่ได้รับจากแหล่งกำเนิดสเปกตรัมของรูปที่ 2.10 โดยไม่มีผลของสถิติในหัววัด (การแยกพลังงานสมบูรณ์) [7]

สัดส่วนของจำนวนนับถูกบันทึกภายนอก พีคพลังงานเต็มขึ้นอยู่กับพลังงานของแกมมาและขนาดของหัววัด พลังงานของโฟตอนจะพิจารณาอัตราส่วน $\sigma\mu$ ของสัมประสิทธิ์การกระเจิงคอมป์ตันต่อสัมประสิทธิ์การลดทั้งหมด ยิ่งพลังงานแกมมามีค่าต่ำเท่าใดก็ตามก็จะทำให้อัตราส่วนลดลงตาม นั่นคืออนุภาคส่วนใหญ่ทำอันตรกิริยาแบบโฟโตอิเล็กทริกและถูกบันทึกในพีคพลังงานเต็ม ซึ่งก็จะไปลดส่วนต่อเนื่องคอมป์ตันลง ตัวอย่างเช่นให้พิจารณาแกมมาพลังงาน 100 keV และ 1 MeV และหัววัด Ge (Li) สำหรับแกมมาพลังงาน 100 keV ในหัววัดเจอร์เมเนียมอัตราส่วน $\sigma\mu$ คือ $0.9/3.6 \approx 0.25$ ซึ่ง

ระบุว่า 25 % ของอันตรกิริยาคือคอมป์ตัน และ 75 % เป็นอันตรกิริยาแบบโฟโตอิเล็กทริก จำนวนพัลส์ในส่วนต่อเนื่องคอมป์ตันควรจะเท่ากับหรือน้อยกว่าหนึ่งในสามของจำนวนที่บันทึกภายใต้ฟลักพลังงานเต็ม ที่ 1 MeV อัตราส่วน σ_{μ} มีค่าประมาณ $0.4/0.42 \approx 0.95$ ซึ่งหมายความว่า 95 % ของอันตรกิริยาคือคอมป์ตัน และเพียง 5 % เป็นโฟโตอิเล็กทริก ด้วยเหตุนี้ส่วนต่อเนื่องคอมป์ตันเนื่องจากโฟตอนพลังงาน 1 MeV คือส่วนที่มากที่สุดของสเปกตรัม

จากรูปที่ 2.9 ยิ่งหัววัดมีขนาดใหญ่เท่าใดก็จะมีโอกาสมากยิ่งขึ้นเท่านั้นที่จะเกิดอันตรกิริยาคอมป์ตันครั้งที่สอง ถ้าหัววัดขนาดใหญ่มีส่วนต่อเนื่องคอมป์ตันจะหายไป จึงสรุปได้ว่า ขนาดต่อเนื่องของคอมป์ตันจะขึ้นอยู่กับขนาดของหัววัด



รูปที่ 2.12 ความสูงของสัญญาณพัลส์ที่วัดได้ของสเปกตรัม ผลเชิงสถิติในหัววัดทำให้ทั้งฟลักและส่วนต่อเนื่องคอมป์ตันของสเปกตรัมกว้างขึ้น เส้นประแสดงสเปกตรัมที่ถูกบันทึกโดยไม่มีส่วนต่อเนื่องคอมป์ตัน [7]

2.3.2 กรณีพลังงานโฟตอนที่ตกกระทบมีค่ามากกว่า 1.022 MeV

เมื่อพลังงานโฟตอนที่มีค่ามากกว่า 1.022 MeV จะมีโอกาสการเกิดอนุภาคคู่ ส่งผลให้โฟตอนหายไป และเกิดคู่ของอิเล็กตรอน-โพสิตรอนปรากฏขึ้นแทน และพลังงานจลน์ (T) ของทั้งคู่จะมีค่าเท่ากับ

$$T_{e^-} + T_{e^+} = T = E - 1.022 \text{ MeV} \quad (2.11)$$

พลังงานจลน์ของทั้งคู่จะจ่ายให้กับหัววัด ซึ่งสัญญาณพัลส์จะแปรผันตามพลังงานจลน์ ($T = E - 1.022 \text{ MeV}$) โฟตรอนจะเคลื่อนที่ช้าลง และถึงจุดปลายของพิสัยในช่วงเวลาที่สั้นน้อยกว่าเวลาในการเกิดสัญญาณพัลส์ ในบางครั้งระหว่างการเดินทางโฟตรอนจะรวมตัวกับอิเล็กตรอน ก่อให้เกิดแอนนิฮิเลชัน (Annihilation) และให้รังสีแกมมาออกมา 2 ตัว แต่ละตัวมีขนาดพลังงาน 0.511 MeV แต่ว่ามีความเป็นไปได้สำหรับเกิดรังสีแกมมาแอนนิฮิเลชันปลอมคือ

1. พลังงานของแกมมาแอนนิฮิเลชันทั้งสองจะเพิ่มขึ้นในหัววัด ดังนั้นความสูงของสัญญาณพัลส์จะแปรผันกับพลังงานที่เกิดขึ้นดังสมการ

$$(E - 1.022) + 1.022 = E \quad (2.12)$$

2. โฟตอนแอนนิฮิเลชันทั้งคู่วิ่งออกนอกหัววัดหมด ซึ่งความสูงของสัญญาณพัลส์จะแปรผันกับพลังงานที่เกิดขึ้นดังสมการ

$$E - 1.022 \text{ MeV} \quad (2.13)$$

3. หนึ่งในโฟตอนแอนนิฮิเลชันวิ่งออกนอกหัววัด อย่างเช่นถ้าเหตุการณ์อนุภาคคู่เกิดขึ้นบนหรือใกล้ผิวของหัววัด จะมีความเป็นไปได้ที่มีเพียงโฟตอนแอนนิฮิเลชันหนึ่งตัวจะเข้าสู่หัววัด ความสูงของสัญญาณพัลส์จะแปรผันกับพลังงานที่เกิดขึ้นดังสมการ

$$E - 1.022 \text{ MeV} + 0.511 \text{ MeV} = E - 0.511 \text{ MeV} \quad (2.14)$$

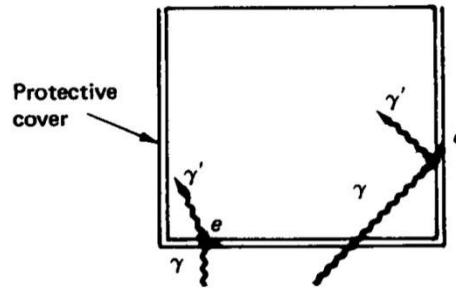
พิกที่สมนัยกับพลังงานเหล่านี้จะสามารถระบุได้ แต่ไม่ได้หมายความว่า จะพบเหตุการณ์เหล่านี้ในทุกสเปกตรัมของรังสีแกมมา จำนวนพลังงานและความเข้มของพิกขึ้นอยู่กับขนาดของหัววัดรูปทรงเชิงเรขาคณิตของแหล่งกำเนิด และพลังงานของแกมมาในสเปกตรัม ถ้าแหล่งกำเนิดปลดปล่อยแกมมาเพียงอย่างเดียว สเปกตรัมที่วัดได้จะแสดงว่า

1. พิกพลังงานเต็ม ที่สอดคล้องกับพลังงาน E (ซึ่งเป็นพิกพลังงานสูงสุด)
2. ขอบคอมป์ตันที่สอดคล้องกับพลังงาน $E - \frac{E}{1+2E/mc^2}$

พิกอื่นๆ ที่อาจจะวัดได้คือ

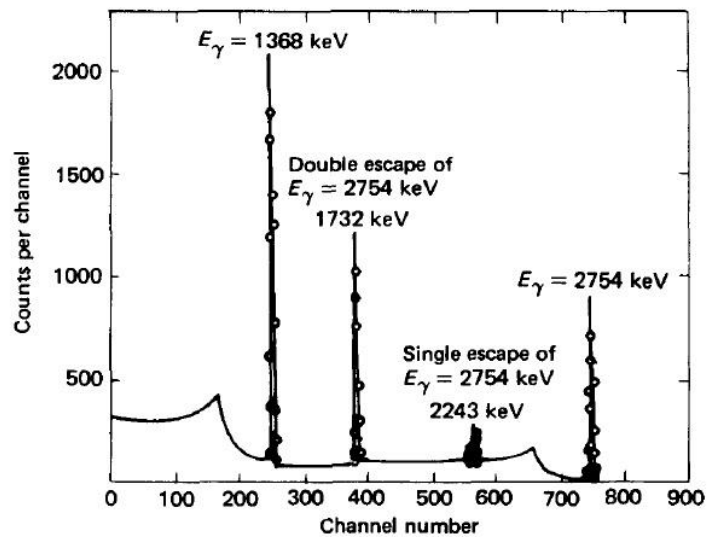
3. พิกกระเจิงกลับ มีพลังงานเท่ากับ $\frac{E}{1+2E/mc^2}$

4. พิคหลีกหนีเดี่ยว (Single-Escape Peak) มีพลังงานเท่ากับ $E - 0.511$ MeV
5. พิคหลีกหนีคู่ (Double-Escape Peak) มีพลังงานเท่ากับ $E - 1.022$ MeV



รูปที่ 2.13 การกระเจิงคอมป์ตันเกิดขึ้นใกล้กับบริเวณผิวของหัววัด [7]

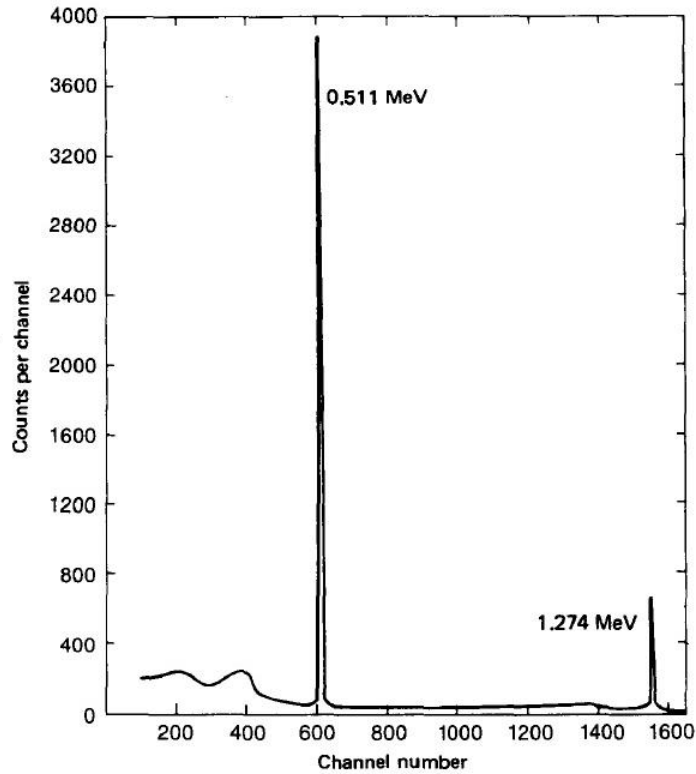
รูปที่ 2.14 แสดงสเปกตรัมของ ^{24}Na พิคหลีกหนีเดี่ยวและหลีกหนีคู่เนื่องจากรังสีแกมมาพลังงาน 2.754 MeV ซึ่งแสดงชัดเจน พิคหลีกหนีเดี่ยวและพิคหลีกหนีคู่นั้นสำคัญมากเมื่อสเปกตรัมของรังสีแกมมาซับซ้อนถูกบันทึก การวัดจะต้องระวังอย่างยิ่ง เพื่อหลีกเลี่ยงการระบุพิคเหล่านี้ว่าเป็นพิคที่เกิดจากแกมมาที่ปลดปล่อยจากแหล่งกำเนิดรังสี



รูปที่ 2.14 สเปกตรัมของรังสีแกมมาที่แสดงพิคการหลีกหนีเดี่ยวและการหลีกหนีคู่ [7]

ถ้าแหล่งกำเนิดรังสีให้โพสิตรอนจะมีพิค 0.511 MeV เกิดขึ้นเสมอ ตัวอย่างเช่น โพสิตรอน-อิเล็กตรอนของไอโซโทป ^{24}Na ที่ปลดปล่อยเพียงแกมมาเดี่ยวที่มีพลังงาน 1.274 MeV ซึ่งทำให้

สเปกตรัมที่เกิดขึ้นมี 2 พีค โดยพีคที่สองเกิดขึ้นจากพลังงานโฟตอนแอนนิลเลชัน 0.511 MeV ที่ปลดปล่อยออกมาหลังจากที่โพสิตรอนเกิดแอนนิลเลชัน ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 สเปกตรัม ^{22}Na แสดงพีคพลังงาน 1.274 และ 0.511 MeV ที่เกิดขึ้นจากแกมมาแอนนิลเลชัน [7]

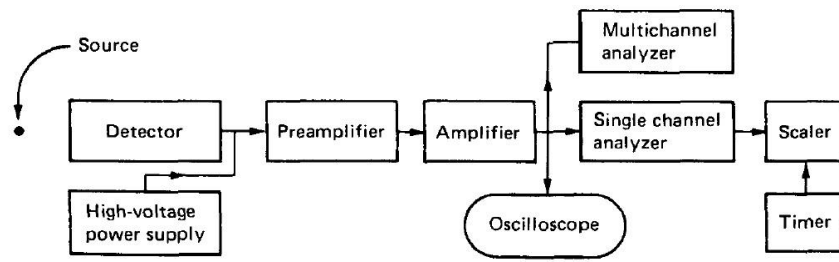
2.4 การตรวจและการวัดรังสี (Radiation Detection and Measurement) [6, 7]

2.4.1 คุณสมบัติทั่วไปของหัววัดรังสี

หน้าที่ของหัววัดรังสีคือผลิตสัญญาณพัลส์ออกมาทุกครั้งที่มิออนูภาคพุ่งชน ทุกหัววัดรังสีจะทำงานโดยอาศัยอันตรกิริยาบางอย่างระหว่างรังสีกับสสาร ซึ่งชนิดของหัววัดที่ใช้กันหลักๆ มีดังนี้

1. หัววัดชนิดบรรจุด้วยแก๊ส (Gas-Filled Detectors)
2. หัววัดชนิดซินทิลเลชัน (Scintillation Detectors)
3. หัววัดชนิดสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Detectors)

ระบบวัดสัญญาณรังสีแบบพัลส์ประกอบด้วยอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 2.16



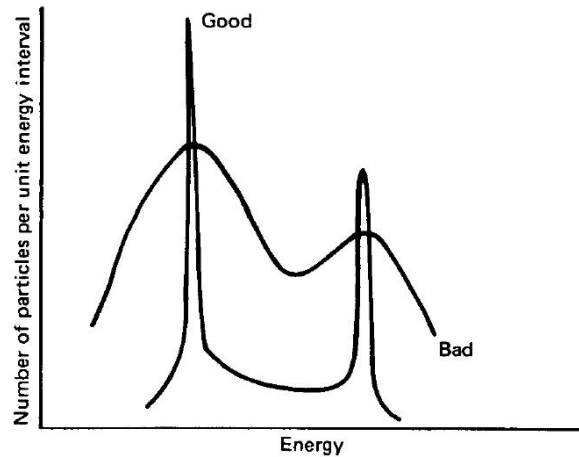
รูปที่ 2.16 ระบบวัดสัญญาณแบบพัลส์ [7]

2.4.2 หัววัดรังสีแบบพัลส์ในอุดมคติ

หัววัดรังสีแบบพัลส์ในอุดมคติควรตอบสนองความต้องการต่อไปนี้

1. ทุกอนุภาคที่เข้าสู่หัววัด ควรผลิตสัญญาณพัลส์ที่ทางออกของเครื่องวัด ซึ่งมีขนาดสูงกว่าระดับสัญญาณพัลส์อิเล็กทรอนิกส์ของหน่วยขยายสัญญาณส่วนหน้า (Preamplifier) ในกรณีดังกล่าว ทุกๆ อนุภาคที่เข้าสู่หัววัดจะถูกวัด ประสิทธิภาพของหัววัดคืออัตราส่วนของจำนวนอนุภาคที่วัดได้ต่อจำนวนของอนุภาคที่เข้าสู่เครื่องวัดจะมีค่าเท่ากับ 100 %
2. ช่วงเวลาของสัญญาณพัลส์ควรจะสั้น เพื่ออนุภาคที่เข้ามาหลังจากอนุภาคแรกในช่วงต่อเนื่องรวดเร็วสามารถผลิตสัญญาณพัลส์แยกออกจากกัน ช่วงเวลาของสัญญาณพัลส์คือการวัดเดดไทม์ (Dead Time) ของเครื่องวัด และอาจส่งผลให้สูญเสียจำนวนนับในกรณีที่อัตรานับสูงๆ
3. ถ้าจะทำการนับพลังงานอนุภาคของสัญญาณพัลส์ ควรมีความสัมพันธ์ที่แน่นอนกับพลังงานของอนุภาค ฉะนั้นขนาดของหัววัดจะต้องใหญ่พอที่อนุภาคจะสูญเสียพลังงานทั้งหมดในหัววัด
4. ถ้าอนุภาค 2 ตัว หรือมากกว่านั้นสูญเสียพลังงานขนาดเท่ากันในหัววัดแล้ว สัญญาณพัลส์ที่เกิดขึ้น ทั้งสองควรจะมีค่าสูงเท่ากัน ความต้องการนี้จะระบุในเทอมของการแยกขีดพลังงานของหัววัด การแยกขีดพลังงานที่คี่นั้นมีความสำคัญอย่างยิ่ง ถ้าสนามรังสีประกอบด้วยอนุภาคที่มีพลังงานต่างกัน และวัตถุประสงค์ของการวัดคือการจำแนกพลังงานเหล่านี้ รูปที่ 2.17 แสดงตัวอย่างของการแยกขีดพลังงานที่ดีและการแยกขีดพลังงานที่ไม่ดี

ในทางปฏิบัตินั้นจะไม่มีหัววัดแบบใดที่ตอบสนองความต้องการได้ทั้งหมด และเป็นไปไม่ได้ที่รังสีแกมมาและนิวตรอนจะสูญเสียพลังงานทั้งหมดให้กับหัววัด ฉะนั้นผู้ทดลองจะต้องเลือกหัววัดที่ตอบสนองความต้องการให้มากที่สุด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการวัดและทำการปรับแก้ข้อมูลที่ได้จากการวัดให้เหมาะสม



รูปที่ 2.17 การแยกชุดพลังงานที่ดีและการแยกชุดพลังงานที่ไม่ดี [7]

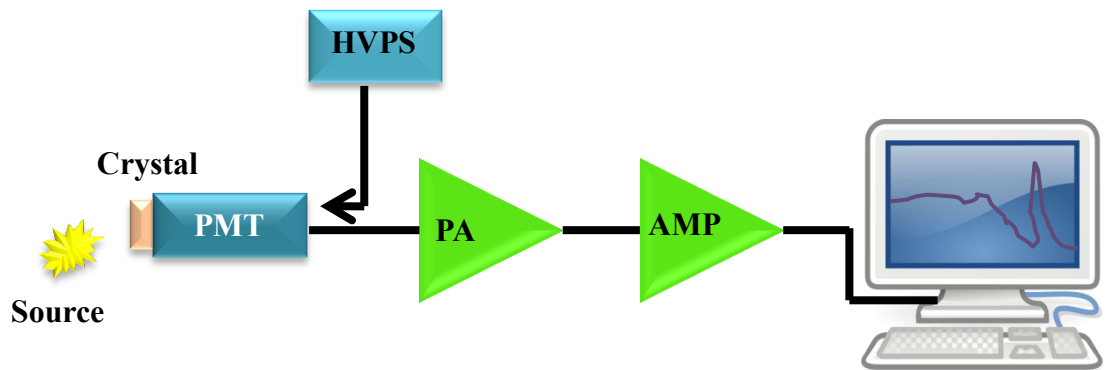
2.4.3 ระบบวัดมาตรฐานของ NIM

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดรังสีส่วนใหญ่ที่มีขายในเชิงการค้านั้นจะทำเป็นมอดูล (Module) อุปกรณ์นิวเคลียร์มาตรฐานที่พัฒนาโดยคณะกรรมการพลังงานนิวเคลียร์สหรัฐอเมริกา (ปัจจุบันเรียกว่าคณะกรรมการควบคุมนิวเคลียร์) วัตถุประสงค์ของ NIM คือออกแบบมอดูลในเชิงการค้าที่จะทำให้สามารถสับเปลี่ยนได้ทั้งอุปกรณ์และกระแสไฟฟ้า การสับเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าจะถูกกำหนดเพียงเพื่อเป็นแหล่งจ่ายกำลังให้กับมอดูลต่างๆ ไป ไม่รวมถึงการออกแบบของวงจรภายใน

2.5 หัววัดรังสีแบบซินทิลเลชัน [6, 7]

ซินทิลเลเตอร์เป็นวัสดุของแข็ง ของเหลว หรือแก๊สที่ทำให้เกิดประกายหรือเปล่งแสงเมื่อรังสีพุ่งผ่าน ในปีค.ศ. 1910 เออร์เนสต์ รัทเทอร์ฟอร์ด (Ernest Rutherford) ได้ใช้ฟลูออเรสเซนต์ไฟล์ทำเป็นฉากเพื่อวัดรังสีแอลฟาที่กระเจิงมากกระทบ แล้วทำให้เกิดการเปล่งแสงซึ่งสามารถวัดได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ไม่มีประสิทธิภาพ ไม่แม่นยำ และใช้เวลามากจึงได้เลิกใช้กันมาเป็นเวลานานถึง 30 ปี จนกระทั่งได้มีการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถตรวจจับแสงที่เกิดจากซินทิลเลเตอร์ได้ ปริมาณของแสงมีความเข้มน้อยมากจึงต้องมีการขยายก่อนแล้วเปลี่ยนไปเป็นสัญญาณพัลส์ก่อนส่งออก อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ดังกล่าวได้คือหลอดทวีคูณแสงซึ่งสามารถขยายได้ประมาณ 10^6 เท่า นอกจากหลอดทวีคูณแสงแล้วระบบซินทิลเลชันนั้นเหมือนกับที่แสดงในรูปที่ 2.18 ซึ่งหัววัดรังสีทำงานในแบบสัญญาณพัลส์ เมื่อรังสีมากระทบหัววัดรังสี จะสร้างสัญญาณไฟฟ้าขึ้นตามจำนวนโฟตอนรังสีที่เข้ามา และนำสัญญาณมาวิเคราะห์ หากความสูงและความกว้างของสัญญาณ โดยระบบ

นับวัดรังสีจะประกอบไปด้วย ผลึกซินทิลเลชัน หลอดทวิคูณแสง แหล่งจ่ายไฟฟ้าความต่างศักย์สูง (High Voltage Power Supply: HVPS) วงจรขยายส่วนหน้า วงจรขยาย (Amplifier) และเครื่องวิเคราะห์สัญญาณหลายช่อง



รูปที่ 2.18 แผนภาพของระบบวัดรังสีแบบซินทิลเลชัน

เมื่อรังสีแกมมาผ่านเข้าไปในผลึก มันจะไปทำอันตรกิริยากับอะตอมของผลึกโดยปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก การกระเจิงคอมป์ตัน และการเกิดอนุภาคคู่ พลังงานของอนุภาคปฐมภูมิที่เกิดจากขบวนการเหล่านี้จะถูกทำให้หายไปโดยการกระตุ้น (Exciting) และการทำให้อะตอมในผลึกเกิดการแตกตัว (Ionizing) อะตอมในผลึก อะตอมที่อยู่ในสภาวะกระตุ้นเมื่อกลับคืนสู่สภาวะปกติ มันจะปล่อยแสงออกมา แสงเหล่านี้จะไปชนกับโฟโตคาโทดของหลอดทวิคูณแสงที่มีความไวมากจะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมา

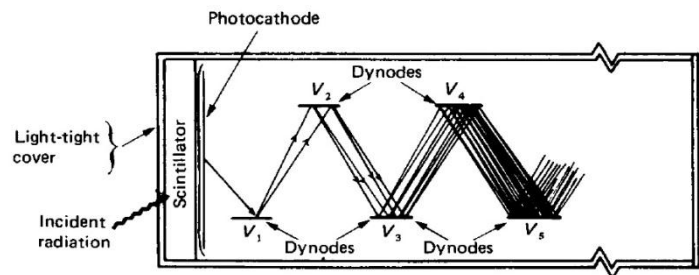
2.5.1 หลอดทวิคูณแสง

หลอดทวิคูณแสงเป็นส่วนกลางของระบบวัดรังสีแบบซินทิลเลชัน ถ้าไม่มีการขยายที่เกิดขึ้นในหลอดทวิคูณแสงแล้วตัวทวิคูณแสงก็จะไม่มีประโยชน์ ในการวัดรังสีหลอดทวิคูณแสงชนิดนี้ต้องการหน่วยขยายรวดเร็วภายใน 10^{-9} วินาที จะขยายสัญญาณพัลส์ตกกระทบของแสงที่มองเห็นประมาณถึง 10^6 เท่า หรือมากกว่านั้น หลอดนี้ประกอบด้วย หลอดแก้วสุญญากาศโดยมีโฟโตคาโทดอยู่ตรงทางเข้า และมีไดโนด (Dynode) อยู่ตรงกลาง แสดงดังรูปที่ 2.19 โฟตอนที่เกิดขึ้นในซินทิลเลเตอร์จะผ่านหลอดทวิคูณแสงและชนกับโฟโตคาโทด ซึ่งทำด้วยวัสดุที่เมื่อมีแสงมาตกกระทบแล้วจะปล่อยอิเล็กตรอนออกมา อิเล็กตรอนจะถูกอำนาจสนามไฟฟ้า นำทางไปยังไดโนดตัวที่หนึ่ง ซึ่งฉาบด้วยสารที่ปล่อยอิเล็กตรอนเมื่อมีอิเล็กตรอนมาฟุ้งในตัวมัน และก็เช่นเดียวกันอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ก็จะถูก

สนามไฟฟ้านำทางไปยังไดโนดตัวที่สอง พร้อมกับให้อิเล็กตรอนชุดใหม่ออกมา และจะเป็นอย่างนี้ต่อเนื่องไปซึ่งหลอดทวีคูณแสงที่มีขายต่างๆ ไป จะมีถึง 15 ไดโนด ซึ่งนั่นคือวิธีการขยายจำนวนของอิเล็กตรอน ความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับไดโนดขนาดต่างกันจะอยู่ในช่วงราว 80-120 โวลต์ ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าระหว่างไดโนด โดยที่ความต่างศักย์จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

วัสดุที่ใช้ทำหลอดโฟโตคาโทดที่มีขายในเชิงพาณิชย์จะประกอบด้วยซีเซียม-พลวง (Cs-Sb) วัสดุที่ใช้เคลือบไดโนดอาจจะเป็นซีเซียม-พลวง และเงินแมกนีเซียม (Ag-Mg) อัตราการปลดปล่อยทุติยภูมิของไดโนดนั้นขึ้นกับชนิดของผิวและความต่างศักย์ที่จ่ายให้ด้วย

พารามิเตอร์ที่มีความสำคัญมากของทุกหลอดทวีคูณแสงก็คือ ความไวต่อสเปกตรัมของหลอดโฟโตคาโทด เพื่อผลที่ดีที่สุดสเปกตรัมของซินทิลเลเตอร์ควรจะพอดีกับความไวของโฟโตคาโทด ผิวของซีเซียม-พลวงจะไวต่อแสงความยาวคลื่น 440 nm ซึ่งส่วนใหญ่สอดคล้องดีกับการตอบสนองสเปกตรัมของซินทิลเลเตอร์



รูปที่ 2.19 ส่วนประกอบของหลอดทวีคูณแสง [7]

2.5.2 แหล่งจ่ายไฟฟ้าความต่างศักย์สูง

เป็นส่วนที่ทำหน้าที่จ่ายความต่างศักย์บวกหรือลบให้แก่หลอดทวีคูณแสง เพื่อทำหน้าที่ขยายสัญญาณ ซึ่งส่วนแหล่งจ่ายจะแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating Current: AC) ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current: DC) โดยการเปลี่ยนแปลงของแหล่งจ่ายไฟฟ้ามีผลกระทบต่อความสูงของสัญญาณ ซึ่งหัววัดส่วนใหญ่ต้องการความต่างศักย์สูงบวก และ HVPS ในทางการทั่วไป ผนังด้านหน้าจะมีแสงบ่งชี้เพื่อแสดงว่าหน่วยใดปิดหรือเปิด และถ้าเปิดอยู่ความต่างศักย์ขาออกเป็นบวกหรือลบ มีปุ่มสองปุ่มเพื่อใช้ในการปรับความต่างศักย์ โดยปุ่มแรกสำหรับการปรับแบบหยาบๆ ในขณะที่ปุ่มที่สองจะให้สำหรับการปรับอย่างละเอียด ส่วนปุ่มความต่างศักย์ส่งออกจะอยู่ทางด้านหลัง

2.5.3 วงจรขยายส่วนหน้า

เป็นส่วนที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อขาออกของหัววัดกับส่วนที่เหลือของระบบ รวมทั้งทำหน้าที่ลดแหล่งสัญญาณรบกวนใดๆ ที่อาจเปลี่ยนเป็นสัญญาณให้มีขนาดน้อยที่สุด วงจรขยายที่ดีจะต้องขยายสัญญาณ โดยความสูงของสัญญาณจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนสัญญาณที่มาจากหัววัดรังสี นั่นคือความสูงของสัญญาณจะสัมพันธ์โดยตรงกับพลังงานของรังสีนับวัดได้นั่นเอง

สัญญาณที่ออกมาจากหัววัดจะอ่อนมากในช่วงมิลลิโวลต์ (mV) ซึ่งก่อนที่จะสามารถบันทึกได้นั้น จะต้องขยายให้ขนาดใหญ่ขึ้นเป็น 1,000 เท่า หรือมากกว่านั้น ดังนั้นสัญญาณจะต้องส่งผ่านเคเบิลไปยังอุปกรณ์ถัดไปของระบบวัดซึ่งได้แก่วงจขยาย และถ้าสัญญาณขาออกจากหัววัดค่อนข้างอ่อน จะทำให้สูญเสียสัญญาณรบกวนในช่วงการส่งผ่านซึ่งเราหลีกเลี่ยงได้ โดยการจัดวางวงจขยายส่วนหน้าควรอยู่ใกล้หัววัดมากที่สุด เพื่อเป็นการทำให้อัตราส่วนระหว่างสัญญาณและสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio) สูงสุดถึงแม้ว่าบางวงจขยายส่วนหน้าจะขยายสัญญาณเพียงเล็กน้อย แต่หน้าที่แรกนั้นเพื่อจับคู่ระหว่างสัญญาณออกของหัววัดกับสัญญาณเข้าของวงจขยาย

2.5.4 วงจขยาย

เป็นส่วนที่ขยายสัญญาณที่ได้จากวงจขยายส่วนหน้าซึ่งยังถือว่าเป็นขนาดเล็กให้มีขนาดสูงขึ้น การขยายหลักคือวงจขยายซึ่งจะเพิ่มขนาดสัญญาณประมาณ 1,000 เท่า หรือมากกว่านั้น

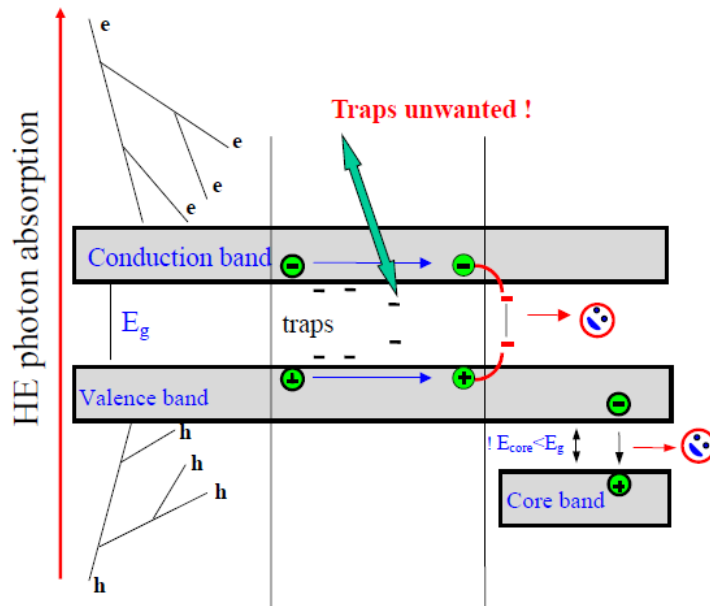
วงจขยายสัญญาณจะมี 2 ปุ่ม เพื่อปรับการขยาย คือ อัตราขยายหยาบ (Coarse Gain) ปุ่มนี้จะปรับการขยายทีละขั้น แต่ละขั้นจะเป็นสัดส่วนของการขยายมากที่สุด และอัตราขยายละเอียด (Fine Gain) ปุ่มนี้จะปรับการขยายอย่างต่อเนื่องภายในแต่ละขั้นของการขยายหยาบ

2.5.5 เครื่องวิเคราะห์สัญญาณหลายช่อง

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้บันทึกและเก็บสัญญาณพัลส์ที่ขึ้นอยู่กับความสูงกับขนาดความสูง ซึ่งหน่วยของแต่ละหน่วยเรียกว่าช่อง โดยสามารถทราบความสัมพันธ์ในรูปปฏิภาคกับอนุภาคที่เข้าสู่หัววัดได้ด้วยความสูงของสัญญาณพัลส์ ซึ่งแต่ละสัญญาณพัลส์จะถูกเก็บในช่องเฉพาะที่สัมพันธ์กับพลังงานนั้นๆ สำหรับการแจกแจงของสัญญาณพัลส์ในแต่ละช่องคือ ภาพของการแจกแจงพลังงานของอนุภาค และเมื่อสิ้นสุดช่วงเวลาการวัด สเปกตรัมที่บันทึกจะแสดงผลที่จอภาพของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณหลายช่อง

2.6 กลไกของกระบวนการเกิดซินทิลเลชัน [8]

กระบวนการเกิดซินทิลเลชันในผลึกซินทิลเลเตอร์มี 3 ขั้นตอนคือ คอนเวอร์ชัน (Conversion) ทรานสปอร์ต (Transport) และลูมิเนสเซนซ์ (Luminescence) แสดงดังรูปที่ 2.20 ดังนี้



รูปที่ 2.20 กระบวนการเกิดซินทิลเลชันในผลึกซินทิลเลเตอร์ [8]

2.6.1 ขั้นตอนคอนเวอร์ชัน

เมื่อมีโฟตอนพลังงานสูงไปกระตุ้นผลึกก็จะเข้าสู่ขั้นตอนคอนเวอร์ชัน รังสีจะทำอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนในผลึก อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังแถบการนำ (Conduction Band) ส่วนโฮลจะเคลื่อนที่ไปยังแถบวาเลนซ์ (Valence Band) โดยอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นจะเป็นตัวแสดงปริมาณของรังสีที่มากระตุ้นเราเรียกโฟโตอิเล็กตรอน โดยขั้นตอนคอนเวอร์ชันจะเกิดขึ้นเร็วมากประมาณ 10^{-12} - 10^{-11} วินาที หลังจากนั้นอิเล็กตรอนจะเข้าสู่ขั้นตอนทรานสปอร์ต

2.6.2 ขั้นตอนทรานสปอร์ต

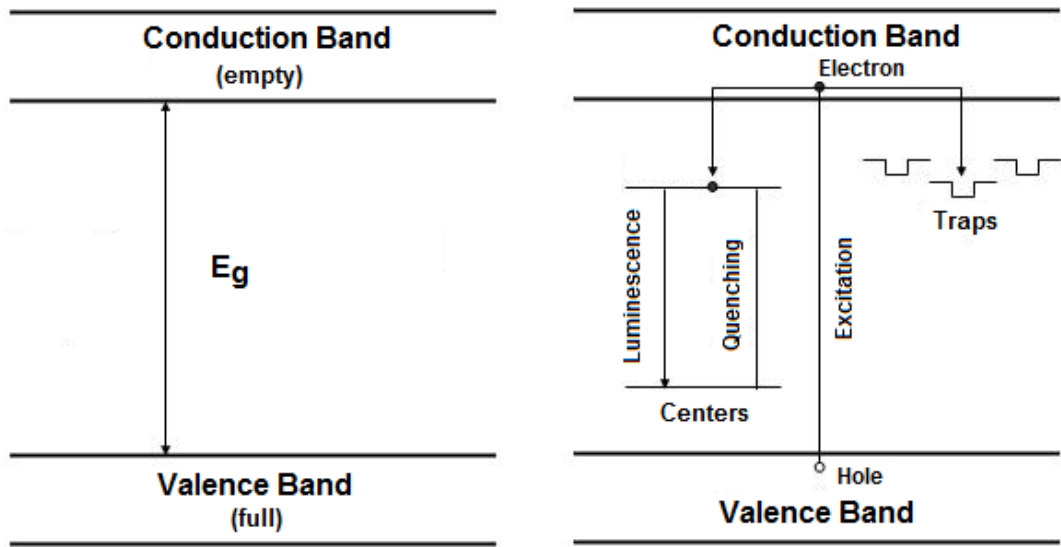
ขั้นตอนทรานสปอร์ตนั้น อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่บริเวณแถบการนำ และโฮลจะเคลื่อนที่บริเวณแถบวาเลนซ์ไปยังศูนย์กลางลูมิเนสเซนซ์ หากผลึกไม่สมบูรณ์จะมีกับดัก (Traps) โดยปริมาณของชั้นกับดักจะขึ้นอยู่กับความบกพร่องในผลึก โดยตัวกับดักจะทำการจับแล้วก็ปล่อยอิเล็กตรอนและโฮล ทำให้

อิเล็กตรอนและโฮลเคลื่อนที่ไปยังศูนย์กลางลูมิเนสเซนส์ช้า เพื่อให้เข้าใจขั้นตอนทรานสปอทนี้มากขึ้นจะอธิบายถึงลักษณะของผลึกที่สมบูรณ์และไม่สมบูรณ์ประกอบด้วย

ผลึกที่สมบูรณ์มีสถานะทางอิเล็กทรอนิกส์ของแลตทิซผลึกอนินทรีย์ อิเล็กตรอนสามารถอยู่ได้ซึ่งถูกขึ้นด้วยแถบที่ไม่มีพาหะของอะตอมจะถูกแสดงด้วยแผนภาพแถบพลังงานดังรูปที่ 2.21 (ก) ภายใต้ระดับพลังงานเฟอร์มิ (Fermi Level) ที่คำนวณจากสมการชโรดิงเงอร์ (Schrodinger Equation) โดยแถบพลังงานสามารถแบ่งเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงแรกเป็นแถบพลังงานต่ำเรียกแถบวาเลนซ์ อิเล็กตรอนที่อยู่ภายในแถบพลังงานนี้จะมีพลังงานศักย์ยึดเหนี่ยวสูง แต่มีพลังงานจลน์น้อยและมีอิเล็กตรอนอยู่เต็มช่วงถัดจากแถบวาเลนซ์คือแถบช่องว่างพลังงาน (Energy Gap: E_g) เป็นแถบที่ไม่มีอิเล็กตรอน หรือพาหะตัวนำอยู่ และช่วงสุดท้ายเป็นแถบพลังงานสูง เรียกแถบการนำอิเล็กตรอนที่อยู่บริเวณแถบพลังงานนี้เป็นอิเล็กตรอนที่มีพลังงานมากพอที่จะหลุดออกมาจากการยึดเหนี่ยวของอะตอม และกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ โดยอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์สามารถกระตุ้นหรือเกิดไอออไนเซชันไปยังแถบการนำได้ และเกิดเอกซ์ไซทอนของอิเล็กตรอนที่แถบการนำกับโฮลที่แถบวาเลนซ์

ปกติแล้วผลึกที่ไม่สมบูรณ์มีแบบจำลองของแลตทิซผลึกอนินทรีย์คล้ายกับผลึกที่สมบูรณ์ ต่างกันที่บริเวณแถบช่องว่างเท่านั้น โดยที่แถบช่องว่างจะมีโอกาสเกิดกับดักขึ้นมาซึ่งแบ่งเป็น 3 ชนิดแสดงดังรูปที่ 2.21 (ข)

1. ศูนย์กลางลูมิเนสเซนส์ (Luminescence Center) ประกอบไปด้วย สถานะกระตุ้นและสถานะพื้น โดยอิเล็กตรอนจากแถบการนำจะตกลงมาอยู่ที่สถานะกระตุ้น เมื่ออิเล็กตรอนที่สถานะกระตุ้นเกิดการทรานซิชันลงมายังสถานะพื้น ก็จะเกิดการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปคลื่นแสงช่วงที่ตามองเห็น (เกิดลูมิเนสเซนส์นั่นเอง)
2. ศูนย์กลางควENCHING (Quenching Center) คือการทรานซิชันของอิเล็กตรอนลงมายังสถานะพื้นแล้วมีการปล่อยพลังงานส่วนเกินในรูปที่ไม่ใช่รังสี
3. กับดัก คือระดับชั้นที่ไม่มีความเสถียร สามารถที่จะจับอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ในผลึก ทำให้การทรานซิชันของการปล่อยแสงลดน้อยลง



(ก)

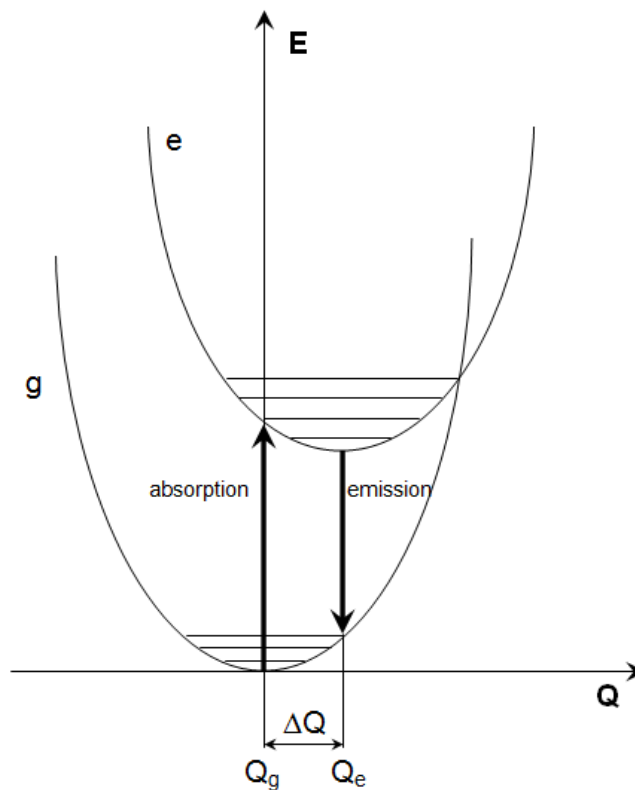
(ข)

รูปที่ 2.21 (ก) แถบพลังงานของผลึกที่สมบูรณ์ และ (ข) แถบพลังงานในผลึกที่ไม่บริสุทธิ์หรือมีสารเจือ โดยแสดงกับดักอิเล็กตรอน เอกซ์ไซทอน ศูนย์กลางการเกิดลูมิเนสเซนส์และควอนซิง [8]

2.6.3 ขั้นตอนลูมิเนสเซนส์

ขั้นตอนลูมิเนสเซนส์ อิเล็กตรอนและโฮลจะเคลื่อนที่มายังศูนย์กลางลูมิเนสเซนส์ และอิเล็กตรอนที่สถานะกระตุ้นจะเกิดการทรานซิชันลงมายังสถานะพื้น ทำให้เกิดการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนส์ออกมา ในช่วงเวลาประมาณ 10^{-8} วินาที ซึ่งสามารถอธิบายเงื่อนไขการเกิดลูมิเนสเซนส์ได้ด้วยแบบจำลอง Single-Configurational Coordinate (SCC) โดยฮิปเปอ (Hippel) ในปี 1936 และไซทส์ (Seitz) ในปี 1938 และ 1939 ได้อธิบายการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนส์ หรือการลดหายของลูมิเนสเซนส์เนื่องจากความร้อน (Luminescence Quenching) ด้วยโมเดลที่แสดงสถานะกระตุ้นและสถานะพื้น อธิบายในรูปแบบฮาโมนิกออสซิลเลเตอร์ ค่าโคออร์ดิเนต Q อธิบายการสั่นและแสดงระยะทางระหว่างไอออนลูมิเนสเซนส์ และลิแกนด์ (Ligands) (ลิแกนด์คือ อะตอม ไอออน หรือกลุ่มฟังก์ชันที่สามารถจะเชื่อมต่อกับ ไอออนหรืออะตอมตัวกลาง โดยการสร้างพันธะ โคออร์ดิเนต โคเวเลนต์) โมเดลนี้ยังอธิบายเกี่ยวกับกระบวนการกระตุ้นด้วยความร้อนที่นำไปสู่การปล่อยพลังงานในรูปแบบที่ไม่ใช่รังสี และการลดทอนของแสงลูมิเนสเซนส์ จากรูปที่ 2.22 แสดงแผนภาพ SCC แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานศักย์ E กับ โคออร์ดิเนต Q ซึ่งเส้นโค้งพลังงานศักย์ในลักษณะพาราโบลาเป็นสถานะ

พื้น g และสถานะกระตุ้น e ส่วนเส้นตามแนวนอนแสดงระดับการสั่น สำหรับเส้นแนวตั้งบ่งบอกการทรานซิชันของแสง ตำแหน่ง Q_g เป็นระยะทางระหว่างไอออนลูมินิสเซนส์และลิแกนด์ที่สถานะพื้น และไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดการดูดกลืนแสงและทรานซิชันจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้น แต่มีการเลื่อนตำแหน่งไปที่ Q_e เมื่อเกิดการผ่อนคลายของสถานะกระตุ้น หรือทำให้การทรานซิชันแบบปลดปล่อย (Emission) มีพลังงานน้อยกว่าการทรานซิชันแบบดูดกลืนแสง (Absorption) เรียกว่า สโตกชิฟ (Stokes Shift) ผลของสโตกชิฟมาจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างศูนย์กลางลูมินิสเซนส์และการสั่นของแลกทิส กรณีที่สโตกชิฟมีขนาดใหญ่เกิดจากอันตรกิริยาที่รุนแรงระหว่างอิเล็กตรอนและโฟนอน



รูปที่ 2.22 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานศักย์ E กับ โคออร์ดิเนต Q แสดงถึงการทรานซิชันแบบดูดกลืนแสงและปลดปล่อยแสง [8]

2.7 ประสิทธิภาพซินทิลเลชัน [8]

สมบัติของซินทิลเลเตอร์คือ ต้องมีประสิทธิภาพในการแปลงรังสีที่มากกระตุ้นให้เป็นแสงในช่วงที่ตามองเห็น กลไกการเกิดซินทิลเลชันสามารถอธิบายด้วยสูตรเชิงปรากฏการณ์ (Phenomenological Formula) สำหรับประสิทธิภาพ

$$\eta = \beta \times S \times Q \quad 0 \leq \eta, \beta, S, Q \leq 1 \quad (2.15)$$

จากสมการ 2.15 แสดงความสัมพันธ์ของผลรวมประสิทธิภาพควอนตัมของกระบวนการซินทิลเลชัน ทั้ง 3 ขั้นตอน (คอนเวอร์ชัน ทรานสปอต และลูมิเนสเซนส์) ที่ประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ทั้ง 3 คือ β, S และ Q

พารามิเตอร์ตัวแรกคือ β อธิบายประสิทธิภาพควอนตัมของขั้นตอนคอนเวอร์ชัน หาได้จาก

$$\beta = \frac{n_{e-h}}{E_Y/bE_g} \quad (2.16)$$

เมื่อ n_{e-h} คือจำนวนคู่ของอิเล็กตรอน-โฮล ที่ได้จากการหยุดยั้งหนึ่งโฟตอนแกมมา

พารามิเตอร์ตัวที่สองคือ S อธิบายประสิทธิภาพควอนตัมของขั้นตอนทรานสปอต ส่วนพารามิเตอร์ตัวที่สามคือ Q อธิบายประสิทธิภาพควอนตัมของขั้นตอนลูมิเนสเซนส์ ซึ่งหาได้จากสมการจำนวนโฟตอนที่เกิดจากโฟตอนแกมมาเดี่ยวเท่ากับ

$$n_{ph} = n_{e-h}SQ = \frac{E_Y}{bE_g} \beta SQ \quad (2.17)$$

ดังนั้นอิเล็กตรอนแสง ในหน่วยจำนวนโฟตอนต่อ MeV สามารถเขียนได้เป็น

$$Y = \frac{10^6}{bE_g} \beta SQ \quad (2.18)$$

และสามารถหาได้ถ้าทราบค่า E_g (eV), b , β , S และ Q ค่า E_g และ Q ได้จากการวัดสมบัติทางแสงของผลึก ส่วนค่า β สามารถดูได้จากค่าคงที่ของวัสดุที่ใช้ งานวิจัยพบว่า $\beta \sim 1$ สำหรับซินทิลเลเตอร์ฉนวนที่มีค่าแถบช่องว่างพลังงาน (E_g) กว้าง

จากสมการที่ 2.18 แสดงให้เห็นว่าถ้าผลึกมีแถบช่องว่างพลังงานแคบ ก็จะมีประสิทธิภาพซินทิลเลชันสูง สนับสนุนแนวคิดนี้ด้วยผลึกในกลุ่มอัลคาไลน์ที่อุณหภูมิต่ำ

2.8 คุณสมบัติในอุดมคติ ตัวอย่าง และการนำไปใช้งานของหัววัดซินทิลเลเตอร์

ผลึกซินทิลเลเตอร์มักถูกนำมาใช้ในหัววัดรังสี และประยุกต์ใช้งานด้านการถ่ายภาพทางการแพทย์ งานวิจัยทางด้านฟิสิกส์พลังงานสูง การสำรวจทางด้านธรณีวิทยา และอุตสาหกรรม

ประยุกต์ใช้งานด้านการถ่ายภาพทางการแพทย์มีสองแบบ คือ

1. เทคนิคการถ่ายภาพแบบ SPECT (Single Photon Emission Computed Tomography) ใช้กล้องแกมมา (Gamma Camera) วัดรังสี ซึ่งมีทั้งแบบหมุนได้รอบตัวผู้ป่วยและแบบที่อยู่กับที่ นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ใช้มีอายุครึ่งชีวิตค่อนข้างยาวเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี PET (Positron Emission Tomography) เช่น เทคนิเชียม-99m ($t_{1/2} = 6$ ชั่วโมง) ไอโอดีน-123 ($t_{1/2} = 13.3$ ชั่วโมง) เป็นต้น โดยปกติเครื่อง SPECT จะใช้แหล่งกำเนิดแกมมา เทคนิเชียม-99m (^{99m}Tc) ที่ให้พลังงาน 140 keV [3] ผลึกซินทิลเลเตอร์ที่นำมาใช้กับเครื่อง SPECT จะต้องมีคุณสมบัติที่ลดหลั่นตามความสำคัญดังนี้ คือมีสัมประสิทธิ์การส่องสว่างสูง ความหนาแน่นสูง เวลาในการสลายตัวเร็ว และมีความความเป็นสัดส่วนกับฮิลด์แสง ซึ่งผลึก NaI:Tl เป็นผลึกที่ได้รับความนิยมและใช้มานานกว่า 40 ปี เพราะทำให้ฮิลด์แสงมาก และยังสามารถสลายตัวได้เร็วอีกด้วย [8]
2. เทคนิคการถ่ายภาพแบบ PET ใช้นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่สลายตัวแบบให้อนุภาคโพซิตรอน เช่น คาร์บอน-11 ($t_{1/2} = 20.3$ นาที) ไนโตรเจน-13 ($t_{1/2} = 9.96$ นาที) ฟลูออรีน-18 ($t_{1/2} = 109.7$ นาที) เป็นต้น กล้อง PET จะวัดโฟตอนคู่ที่ถูกปล่อยออกมาจากปฏิกิริยาแอนนิฮิเลชันซึ่งทำมุม 180 องศาซึ่งกันและกัน [3] โดยผลึกซินทิลเลเตอร์ที่นำมาใช้กับเครื่อง PET ต้องมีคุณสมบัติที่ลดหลั่นตามความสำคัญดังนี้ คือมีการลดทอนต่อหน่วยความยาวสั้นน้อยกว่า 1.2 cm เวลาการสลายตัวเร็วน้อยกว่า 300 ns และมีสัมประสิทธิ์การส่องสว่างสูงมากกว่า 8,000 ph/MeV ซึ่งนิยมใช้ผลึก BGO และ LSO [8]

เทคนิคการถ่ายภาพทางเวชศาสตร์นิวเคลียร์ นอกจากจะให้ภาพทางกายภาพของอวัยวะแล้ว ยังให้ภาพทางสรีระ (Physiology) หรือภาพการทำงานของเนื้อเยื่ออีกด้วย มีการใช้เทคนิคนี้ในการวินิจฉัยโรคผิดปกติเกี่ยวกับหัวใจ ประสาท รวมทั้งโรคมะเร็งในระยะต่างๆ [3]

การวิจัยและพัฒนาผลึกซินทิลเลเตอร์เพื่อให้ได้ผลึกที่มีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงอุดมคติมากที่สุด โดยคุณสมบัติของซินทิลเลเตอร์ในอุดมคติ และคุณสมบัติของซินทิลเลเตอร์ในปัจจุบัน แสดงในตารางที่

2.1 และ 2.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของซินทิลเลเตอร์ในอุดมคติ [8]

เกณฑ์ตัวดำเนินการ	คุณสมบัติของซินทิลเลเตอร์
ประสิทธิภาพหัววัด	มีความหนาแน่นสูงและมีเลขอะตอมมาก
ต้นทุนการผลิต	วัสดุมีราคาต่ำ
ความเสถียรภาพต่อสารเคมี ความร้อน และ เครื่องกล	เฉื่อย/ไม่ดูดความชื้น ปริมาณแสงไม่ตอบสนองต่ออุณหภูมิ การแผ่พลังงานความร้อนน้อย ไม่แตก กันสะเทือน
มีอัตราการนับวัดสูง และการแยกชัดเวลาตรงกัน	มีเวลาการสลายตัวสั้น และไม่ทิ้งช่วงเวลาในการเรืองแสง
ความละเอียด และอัตราส่วนระหว่างสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนดี	มีyieldแสงสูง
มีการแยกชัดพลังงานที่ดี	yieldแสงสูง และตอบสนองต่อพลังงานที่มากระตุ้นดี
ปลดปล่อยความยาวคลื่นในช่วงที่เหมาะสม	ใกล้ 400 nm สำหรับใช้กับ PMTs
ทนต่อรังสี	ผลึกต้องไม่ไวต่อการกระตุ้นของรังสี
ส่งผ่านแสงหรือ โฟตอนไปยังหัววัดได้ดี	มีดัชนีการหักเหต่ำ

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของซินทิลเลเตอร์ในปัจจุบัน [8]

คุณสมบัติ	ตัวอย่างผลึก	ปริมาณ	ปัจจัยที่มีผลกระทบ
แสงที่เปล่งออกมา	NaI (ที่ 77 K) LaBr ₃ :Ce CsI:Tl	120,000 ph/MeV 61,000 ph/MeV 52,000 ph/MeV	พลังงานที่ใช้ในการผลิตคู่ อิเล็กตรอน-โฮล ประสิทธิภาพในการเปลี่ยน เป็นแสงลูมิเนสเซนส์ ประสิทธิภาพควอนตัมสูง
การแยกแยะพลังงาน	LaBr ₃ :Ce	2.6 %	ตอบสนองต่อพลังงานเป็น เชิงเส้น
เวลาการสลายตัว (Decay Time)	BaF ₂ (Core-Valence Luminescence)	0.6 ns	Oscillator Strength ความ ยาวคลื่น ดัชนีหักเห
ความหนาแน่น	Lu ₂ O ₃ :Eu(เซรามิก)	9.4 g/cm ³	โครงสร้างผลึก
เลขอะตอม	PbWO ₄ Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂	76 75	ธาตุ
ต้นทุน	PbWO ₄	~\$2/cm ³	วัตถุดิบ กระบวนการ ปลูกผลึก และอุปกรณ์