บทที่ 8
การวัดสารรังสีพลังงานสูง

หลักการพื้นฐานของการตรวจวัดรังสี ได้จากปรากฏการณ์ที่เกิดเมื่อรังสีพลังงานสูงชนกับวัสดุ ซึ่งในบทนี้จะเรียกสั้น ๆ ว่ารังสี ผลขั้นต่อไปคือเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือทางฟิสิกส์ในวัสดุดังกล่าว ซึ่งอาจเป็นการเปลี่ยนแปลงชั่วขณะหรือถาวรก็ได้ อย่างไรก็ตาม ช่วงเวลาดังกล่าวนั้นสั้นมาก (อาจนานถึงนาที) เกินกว่าจะสัมผัสได้ด้วยความรู้สึกของบุคคลทั่วไป ดังนั้นมีการคิดค้นถึงวิธีการที่ยุ่งยากซับซ้อนมากเพื่อจะตรวจวัดรังสี ก่อนจะอธิบายรายละเอียดของวิธีการ ลองพิจารณาปัญหาสำคัญ 2 ประการดังนี้

เราต้องการทราบอะไรบ้างที่เกี่ยวกับรังสี?

คำตอบทั่วไปคือข้อมูลต่อไปนี้

- การตรวจวัดอย่างง่าย ๆ

มีรังสีอยู่หรือไม่? คำถามนี้มักจะไม่เกิดขึ้นในแผนกเวชศาสตร์นิวเคลียร์ เนื่องจากการให้โดสรังสีกับคนไข้จะต้องทราบปริมาณที่แน่นอน แต่คำถามนี้อาจจำเป็นหรือเกี่ยวข้องในกรณีเกิดการปนเปื้อนในบุคคลหรือสภาพแวดล้อม เป็นต้น

- ปริมาณรังสี

มีรังสีปรากฏอยู่ปริมาณเท่าใด? คำถามนี้คงคุ้นเคยสำหรับทุกบุคคลที่ปฏิบัติงานในหน่วยเวชศาสตร์นิวเคลียร์ เนื่องจากต้องตอบโดยบ่งบอกปริมาณสัมบูรณ์หรือสัมพัทธ์ (โดยมีมาตรฐานเป็นเกณฑ์) ด้านการศึกษาแบบพลวัตร (dynamic) อาจมีคำถาม เช่น ปรากฏรังสีปริมาณเท่าใดในหน่วยเวลาที่กำหนด เป็นต้น ในการนี้จำต้องวัดฟลักซ์รังสี หรืออัตรานับวัด ณ เวลาค่าต่าง ๆ

- พลังงานรังสี

ในเวชศาสตร์นิวเคลียร์ไม่สนใจค่าพลังงานของรังสีเท่าใดนัก (ต่างจากฟิสิกส์นิวเคลียร์) แต่ข้อมูลนี้จะช่วยในการตัดสินใจด้านปฏิบัติดังนี้

(1) เพื่อแยกปริมาณที่ไม่ต้องการออกไปโดยอาศัยการวิเคราะห์ค่าพลังงาน

(2) เพื่อบ่งถึงนิวไคลด์รังสีที่ใช้ โดยเฉพาะกรณีใช้ 2 นิวไคลด์รังสีในเวลาเดียวกัน

- ธรรมชาติของรังสี

โดยทั่วไปในงานเวชศาสตร์นิวเคลียร์จะต้องทราบ หรือรู้จักชนิดของรังสีที่ผู้ปฏิบัติเกี่ยวข้องอยู่ อย่างไรก็ตาม สำหรับกรณีการปนเปื้อนอาจต้องเผชิญกับการบ่งชี้ถึงธรรมชาติของรังสี

จะใช้ปริมาณใดเป็นตัวกำหนดคุณภาพของหัววัดรังสี?

คำถามนี้ยุ่งยากซับซ้อน ซึ่งคำตอบขึ้นกับวัตถุประสงค์ของประโยชน์ใช้สอยที่บุคคลต้องการ อย่างไรก็ตาม หัววัดรังสีที่นิยมในงานทางเวชศาสตร์นิวเคลียร์มีคุณสมบัติเด่น ดังนี้

- ความไวในการนับวัด (sensitivity) **หรือ ประสิทธิภาพจากภายใน** (intrinsic efficiency)

ประสิทธิภาพจากภายใน (แทนด้วย E_i) หมายถึงการวัดความสามารถในการนับวัดรังสี โดยทั่วไปถูกนิยามเป็นอัตราส่วนของปริมาณรังสีที่หัววัดทำการตรวจวัดได้ (α, β หรือ γ) กับปริมาณรังสีตกกระทบบนปริมาตรของหัววัด ซึ่งไวต่อการนับวัด เขียนในรูปสมการดังนี้

$$E_i = \frac{\text{จำนวนรังสีที่หัววัดทำการนับวัดได้}}{\text{จำนวนรังสีที่ตกกระทบหัววัดบริเวณมีความไว}}$$

ถ้าผลออกมาเป็น 0.5 (50%) แสดงว่ามีเพียงครึ่งหนึ่งของรังสีตกกระทบที่หัววัดทำการนับวัดได้ ซึ่งอาจเป็นไปได้ที่อีกครึ่งหนึ่งของปริมาณตกกระทบหัววัดนั้นไปชนกับบริเวณที่หัววัดไม่ไวต่อรังสี ยิ่งหัววัดมีค่า E_i สูงจะยิ่งเหมาะสมในการใช้งานทางเวชศาสตร์นิวเคลียร์ องค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับค่าของ E_i ได้แก่สัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานแบบเชิงเส้น (linear attenuation coefficient = μ(linear) และความหนาของปริมาตร (ภายในหัววัด, ผู้แปล) ที่ไวต่อกัมมันตภาพรังสี

- Dead Time หรือ Resolving Time (τ)

คำว่า dead time หรือ resolving time (ปริมาณนี้มักนิยมเรียกทับศัพท์, ผู้แปล) ใช้วัดความสามารถของหัววัดในการทำงานอย่างเที่ยงตรงเมื่อมีอัตรานับวัดสูง ๆ หรือฟลักซ์รังสีมีความเข้มสูง ๆ นั่นเอง ทุกหัววัดจะมีช่วงเวลาสั้น ๆ แต่เป็นค่าแน่นอน ซึ่งเริ่มเมื่อรังสีชนกับหัววัดและหัววัดสนองตอบปรากฏการณ์ จากนั้นมีการบันทึกค่า เรียกช่วงเวลานี้ว่า "Dead Time" หรือ "Resolving Time" ของหัววัด ถ้ามีรังสีที่สองมากระทบหัววัดในช่วงเวลาที่หัววัดกำลังประมวลผลรังสีแรกผลจะเกิดอะไรขึ้น? การสนองตอบของหัววัดอาจแยกเป็น 2 กรณี คือ

(1) หัววัดเป็นอัมพาต (paralyzable)

(2) หัววัดไม่เป็นอัมพาต (non-paralyzable)

กลไกทั้งสองอาจเกิดขึ้นในหัววัดเดียวกันก็ได้กรณีที่หัววัดเป็นอัมพาต ถ้ามีรังสีตัวที่สองตกกระทบหัววัดในช่วงเวลา τ หัววัดจะกลายสภาพเป็นอุปกรณ์ที่ไม่ไวต่อรังสีในช่วงเวลาต่อไปอีก τ นับเริ่มต้นจากเวลาที่รังสีตัวที่สองตกกระทบหัววัด ตัวอย่างเช่น หัววัดหนึ่งมีค่า dead time เป็น 100 μsec เมื่อรังสีตัวแรกตกกระทบไปแล้ว 30 μsec เกิดมีรังสีตัวที่สองมาถึงหัววัด หัววัดจะหมดความไวเป็นเวลา $30+100 = 130$ μsec แน่นอนว่ากรณีนี้ไม่คำนึงถึงรังสีตัวที่สาม ซึ่งถ้าเกิดมีขึ้นในช่วงเวลาดังกล่าวนี้ ย่อมยืดช่วงเวลาที่หัววัดไม่ทำงานออกไปอีก ตามที่ได้อธิบายข้างต้นขึ้นกับช่วงเวลาที่รังสีตกกระทบ ดังนั้น ขึ้นกับอัตรานับวัดซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของช่วงเวลาในการตกกระทบของรังสีทั้งสอง

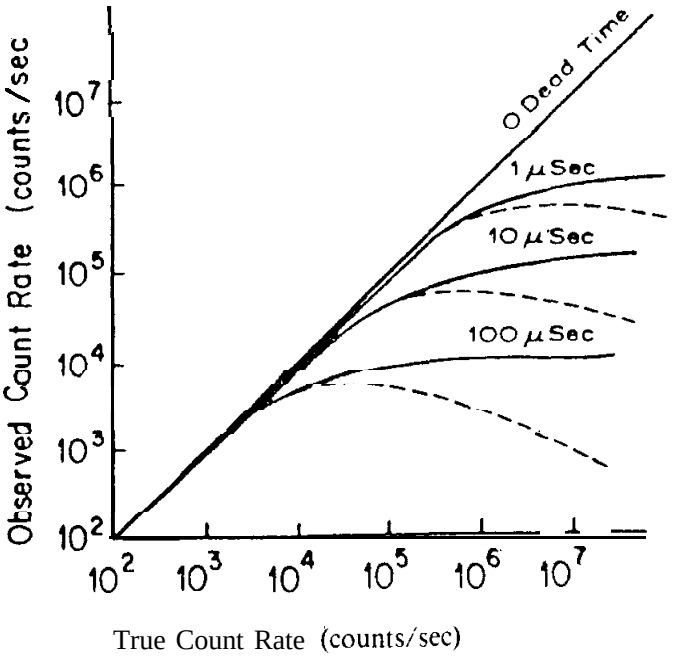
สำหรับกรณีหัววัดไม่เป็นอัมพาตนั้น ช่วงเวลาที่หัววัดไม่มีความไว (τ) จะไม่สนองตอบการวิ่งชนของรังสีตัวที่สอง ดังนั้น รังสีตัวที่สองไม่ถูกนับวัด ซึ่งหมายถึงการสูญเสียค่านับวัดนั่นเอง รูป 8 –1 แสดงผลของ dead time ที่ปรากฏต่ออัตรานับวัดค่าต่าง ๆ ในกรณีที่หัววัดเป็นและไม่เป็นอัมพาต เห็นได้ชัดว่า ณ ค่าอัตรานับวัดสูง การสนองตอบของหัววัด (ค่านับวัดที่ได้) จะไม่แปรตามการเพิ่มของอัตรานับวัดแท้จริงสำหรับกรณีหัววัดไม่เป็นอัมพาต กรณีหัววัดเป็นอัมพาตนั้น ในช่วงแรกการสนองตอบเป็นค่าเดียวกัน แต่ถ้าอัตรานับวัดสูง ๆ หัววัดจะทำการสนองตอบลดลงตามการเพิ่มค่าอัตรานับวัด

หัววัดอุดมคติควรจะมีค่า dead time สั้นที่สุดเท่าที่จะสั้นได้ อุปกรณ์นับวัดในเวชศาสตร์นิวเคลียร์ (เฉพาะที่ใช้สร้างภาพ) จะมีค่า dead time ของระบบประมาณ 10 μsec อย่างไรก็ตามถ้าเป็นการตรวจหัวใจจะใช้โดสสูง เนื่องจากเป็นการเก็บข้อมูลแบบไดนามิกส์ที่ค่อนข้างเร็ว ควรใช้หัววัดมีค่า dead time น้อยกว่า 10 μsec (2-3 μsec)

ความสามารถในการแยกพลังงาน

ENERGY RESOLUTION

ความสามารถของหัววัด ในการแยกพลังงานรังสีสองค่าที่แตกต่างกัน (เช่นรังสีแกมมามีพลังงานต่างกันสองค่า) รู้จักดีว่าเป็นความสามารถในการแยกพลังงาน ส่วนการวัดความสามารถของหัววัดในการแยกพลังงานที่ต่างค่ากันนั้น จำเป็นต้องอาศัยปริมาณ FWHM (Full Width at Half Maximum) (เป็นค่าความกว้างของพลังงานตำแหน่งครึ่งหนึ่งของยอดพลังงาน, ผู้แปล) ค่านี้ใช้แทนความสามารถที่จะแยกพลังงานที่มีค่าพลังงานใกล้เคียงกันมาก เช่น หัววัดที่มีค่า FWHM 20 keV สำหรับรังสีแกมมา หมายความว่า ถ้ามี 2 รังสีแกมมา ซึ่งพลังงานห่างกันน้อยกว่า 20 keV หัววัดไม่สามารถแยกได้ว่าเป็นรังสีแกมมา 2 รังสีที่มีพลังงานต่างกัน ค่า FWHM ยิ่งน้อย แสดงว่าหัววัดมีความสามารถในการแยกพลังงานได้ดียิ่งขึ้น การใช้ประโยชน์ค่า FWHM อีกแง่หนึ่ง ได้แก่ การถือค่านี้เป็นเสมือนดรรชนีความผิดพลาดในการวัดพลังงานรังสีเอ็กซ์หรือแกมมาของหัววัด ยิ่งมีความผิดต่ำแสดงว่าหัววัดยิ่งมีความไวสูงในการตรวจวัดการแปรค่าพลังงานของรังสี x หรือ γ



รูป 8-1 อัตรานับวัดที่ปรากฏพล็อตเปรียบเทียบกับอัตรานับวัดแท้จริงของหัววัดซึ่งมีค่าเดดไทม์ต่างกัน เส้นทึบเป็นกรณีหัววัด non-paralyzable ส่วนเส้นประเป็นกรณีหัววัด paralizable ถ้าองค์ประกอบทั้งสองคือ non-paralizable และ paralizable นั้นส่งผลถึงค่าเดดไทม์ การตอบสนองจะอยู่ระหว่างค่าทั้งสอง หมายเหตุค่าเดดไทม์ของหัววัดเพิ่มค่าเมื่อช่วงอัตรานับวัด (ส่วนที่เป็นเชิงเส้น) มีค่าลดลง

คุณสมบัติอื่น ๆ

เนื่องจากหัววัดรังสีจะทำงานได้เมื่อต่อกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิคส์อื่น ๆ โดยทั่วไป หัววัดจะถูกออกแบบ ให้มีความยืดหยุ่นได้ดีกับการแปรค่าเนื่องจากแรงดันไฟฟ้ากระเพื่อมและอุณหภูมิแวดล้อม ซึ่งถ้าหัววัดใดมีการสนองตอบโดยไม่ขึ้นกับการกระเพื่อมดังกล่าว หัววัดนั้นย่อมเหมาะสมในการใช้งาน นอกจากนี้หัววัดควรจะเคลื่อนย้ายได้ง่าย (คุณสมบัติข้อนี้แล้วแต่การใช้งาน) ใช้ง่าย (ไม่มีความซับซ้อน, ผู้แปล) และสุดท้ายคือราคาไม่แพง

โดยอาศัยหลักการเบื้องต้นดังกล่าวนี้เป็นหลัก ผู้เขียนจะวิจารณ์ถึงหัววัดรังสีแบบต่าง ๆ ซึ่งแบ่งได้ 3 ประเภท คือ

หัววัดบรรจุด้วยแกส (gas-filled detectors)

หัววัดแบบเปล่งแสงหรือหัววัดซินทิลเลชัน (scintillation detectors) และ

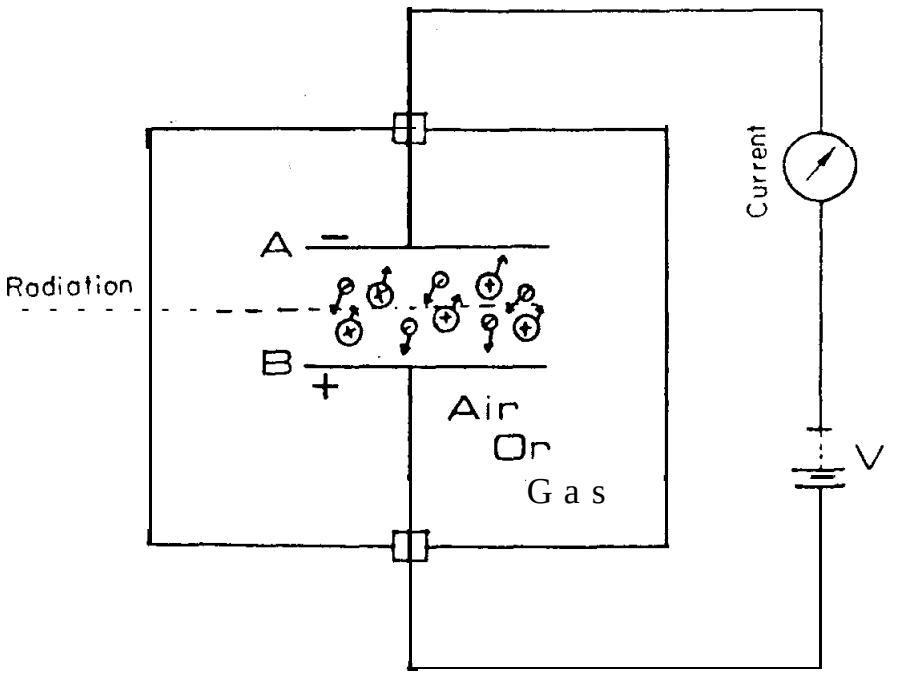
หัววัดแบบสารกึ่งตัวนำ (solid-state detectors)

ลักษณะสมบัติเด่นและประโยชน์การใช้งานของแต่ละหัววัดได้สรุปไว้ในตาราง 8 – 1

ตาราง 8-1 ลักษณะสมบัติบางประการของหัววัดรังสีแกมมาทั่วไป

Detector	Intrinsic Efficiency	Dead Time (τ)	Energy Disctimination	Uses in Nuclear Medicine
Ionization Chambers	Very low	*	None	Dose Calibrators
Proportional Counters	Very low	~ msec	Moderate	Rarely used
Geiger-Mueller Counters	Moderate	~ msec	None	Radiation survey work
NaI(Tl) Scintillation Counters	High	~ μsec	Moderate	Most widely used detector, well counter,, rectilinear scanner, scintillation camera
Solid State Ge(Li) Counters	Moderate	< 1μsec	Very Good	Neutron activation analyses

* Cannot be used as a counter.



รูป 8-2 ผังแสดงหัววัดรังสีแบบบรรจุด้วยแกส A และ B เป็นอิเล็กโทรดซึ่งทำหน้าที่เก็บคู่ไอออน ที่ถูกผลิตขึ้นในแกสเมื่อรังสีเดินทางผ่าน

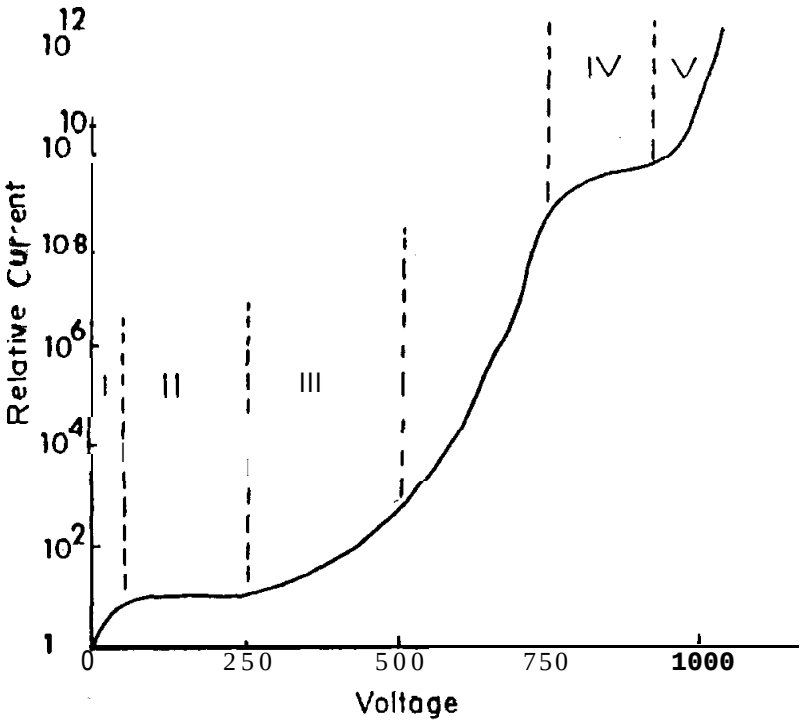
หัววัดบรรจุด้วยแกส

ปฏิกิริยาแรกที่เกิดเมื่อรังสีพลังงานสูงชนกับวัสดุคือการแตกตัว หัววัดแบบบรรจุด้วยแกส มีหลักการขั้นพื้นฐานคือทำการนับวัดปริมาณการแตกตัว โดยทั่วไปแล้วจะไม่สามารถวัดปริมาณการเกิดการแตกตัวแบบ ionization ที่เกิดขึ้นในวัสดุ ยกเว้นในแกสและของแข็งบางชนิดซึ่งรู้จักทั่วไปคือสารกึ่งตัวนำ

กลไกของหัววัด

ในการอธิบายกลไกของหัววัดที่บรรจุด้วยแกสนั้น ให้พิจารณาถึงสิ่งที่เกิดขึ้นเมื่อมีการแตกตัวภายในปริมาตรบรรจุด้วยแกสซึ่งมีขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว มีความต่างศักย์เป็น V ดังแสดงในรูป 8 – 2

ถ้า V = 0 หมายความว่าขั้วไฟฟ้าทั้งสองไม่มีความต่างศักย์ คู่ไอออนที่เกิดจากการแตกตัวดังกล่าวขั้นต้นจะรวมตัวกันใหม่ เพื่อก่อให้เกิดอะตอมหรือโมเลกุลที่เป็นกลาง (ทางไฟฟ้า, ผู้แปล) แน่นอนว่าในกรณีนี้จะไม่มีกระแสไหลในวงจร อย่างไรก็ตาม ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าซึ่งปรากฏอยู่ระหว่างสองขั้ว $V > 0$ ไอออนบางคู่จะเดินทางไปถึงขั้วไฟฟ้า (คือประจุบวกวิ่งไปสู่ขั้วลบและในทางตรงข้ามคือประจุลบจะวิ่งไปสู่ขั้วบวก, ผู้แปล) ดังนั้น ย่อมมีกระแสไหลชั่วขณะในวงจรส่วนปริมาณเท่าใดนั้น ขึ้นกับหลายองค์ประกอบ เช่น ค่าความต่างศักย์ (V) ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ธรรมชาติของแกส ความดันและอุณหภูมิของแกส การจัดตำแหน่งและรูปร่างของขั้วไฟฟ้า เป็นต้น พารามิเตอร์สำคัญที่สุดคือค่าความต่างศักย์ V ของขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ในรูป 8 – 3 แสดงกราฟปริมาณกระแสที่ถูกผลิตในหัววัดที่บรรจุด้วยแกสเทียบกับความต่างศักย์ V เห็นได้ชัดว่า การขึ้นกับค่าแรงดันไฟฟ้า V นั้นมีลักษณะซับซ้อนมาก เส้นกราฟสามารถแบ่งได้เป็น 5 บริเวณดังนี้



รูป 8-3 แสดงค่าพล็อตกระแสในฟังก์ชันของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขั้วไฟฟ้าทั้งสองคือ A และ B ในรูป 8 –2 สาเหตุการเกิดบริเวณที่ I, II, III, IV และ V อธิบายแล้วในบทนี้ ไอออนไนเซชันแชมเบอร์จะทำงานอยู่ในบริเวณที่ II พรอพพอร์ชันนัลเคาน์เตอร์ทำงานในบริเวณที่ III และไกเกอร์-มุลเลอร์เคาน์เตอร์ทำงานในบริเวณที่ IV ส่วนบริเวณกันชนระหว่างบริเวณที่ III และ IV นั้นมิได้กำหนดเครื่องหมายใด ๆ และในทางปฏิบัติก็มิได้มีความสำคัญใด ๆ ณ ที่นี้

บริเวณที่ I แรงดันไฟฟ้า V มีค่าต่ำจนทำให้คู่ไอออนซึ่งเมื่อมีรังสีวิ่งชนนั้น สามารถรวมตัวกันใหม่ได้ จากนั้นจะกลายเป็นอะตอมหรือโมเลกุลที่มีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า หรือกล่าวได้ว่าในช่วงบริเวณนี้มีการจับเก็บประจุจากการแตกตัวได้อย่างไม่สมบูรณ์

บริเวณที่ II แรงดันไฟฟ้า V มีค่าสูงพอเหมาะในการจับเก็บประจุที่เกิดจากการแตกตัวได้ ซึ่งรังสีต้องชนกับบริเวณที่หัววัดมีความไว ในบริเวณนี้ปริมาณกระแสที่เกิดจากการแตกตัวยังไม่แปรค่ามากตามการแปรค่าความต่างศักย์ V

บริเวณที่ III แรงดันไฟฟ้ามีค่ามาก นอกจากสามารถจัดเก็บประจุที่เกิดจากรังสีได้หมด ยังแรงพอจะก่อให้เกิดการแตกตัวแบบทุติยภูมิได้ กล่าวคือ คู่ไอออนคู่แรกจะก่อให้เกิดคู่ไอออนที่สองต่อไปได้อีกโดยคู่ไอออนคู่แรกจะวิ่งชน อะตอมหรือโมเลกุลแกสที่มีความสมดุลย์ทางไฟฟ้าในช่วงบริเวณนี้กระแสจะแปรตามค่าแรงดันไฟฟ้าอย่างชัดแจ้ง

บริเวณที่ IV ในบริเวณนี้แรงดันไฟฟ้าจะมีค่าสูงมาก ไอออนปฐมภูมิที่เกิดจากรังสี จะมีพลังงานสูงพอที่จะก่อให้เกิดคู่ไอออนทุติยภูมิมากมาย หรือก่อให้เกิดสถานะกระตุ้นในอะตอมหรือโมเลกุลของแกส ซึ่งถ้าวิ่งชนขั้วไฟฟ้าที่เป็นโลหะหรือโมเลกุลของแกส จะก่อให้เกิดการแตกตัวมากขึ้นหรือ

อยู่ในสถานะกระตุ้นมากขึ้นก็ได้ และการกลับคืนสู่สภาวะเสถียรของโมเลกุลดังกล่าว จะก่อให้เกิดแสงอุลตราไวโอเล็ต ซึ่งจะกระจายอยู่ทั่วปริมาตรบรรจุแกส ผลคือเกิดการแตกตัวมากขึ้น ผลลัพธ์สุดท้ายจะเป็นการคลายประจุให้กับแกสทั้งหมดในปริมาตร (สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วได้แก่การแตกตัว อยู่ในสถานะกระตุ้นและเปล่งแสง UV) ลักษณะของเส้นกราฟในบริเวณนี้คล้าย ๆ กับในบริเวณที่ II กล่าวคือกระแสเป็นอิสระต่อแรงดันไฟฟ้า V

บริเวณที่ V ค่าความต่างศักย์สูงมากจนอะตอมหรือโมเลกุลของแกสแตกตัวได้เอง โดยไม่ต้องมีการชนกับรังสีใด ๆ ภายใต้อิทธิพลสนามไฟฟ้าที่มีความแรงมากจนสามารถดึงอิเล็กตรอนออกจากวงโคจรในอะตอม อะตอมและโมเลกุล กลายสภาพเป็นพวกที่ถูกทำให้แตกตัวและการคลายประจุ อาจเกิดได้แม้แต่จะไม่มีรังสีก็ตาม

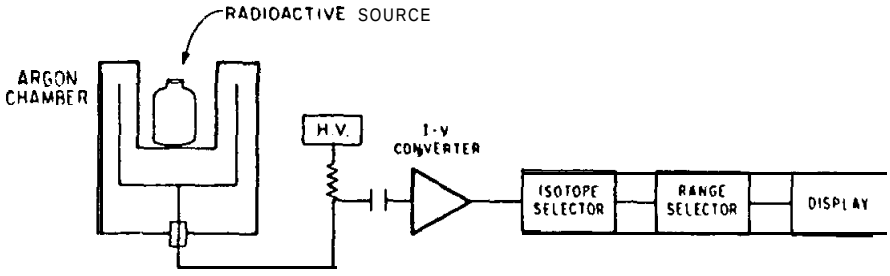
ไอออนไนเซชันแชมเบอร์

จัดเป็นหัววัดชนิดแรกที่บรรจุด้วยแกสเพื่อใช้วัดรังสี แรงดันที่ต้องป้อนอยู่ในบริเวณช่วงที่ II ของรูป 8 – 3 ซึ่งจะเห็นว่าถ้า V แปรค่าเล็กน้อย จะไม่ส่งผลให้กระแสแปรค่าอย่างเด่นชัด สรุปคือไอออนไน–เซชันแชมเบอร์มีความเสถียรและถูกต้องดี ข้อเสียคือมีความไวต่ำ (หรือ ประสิทธิภาพจากภายในไม่ดี) ต่อรังสีเอ็กซ์หรือแกมมา และยังไม่มีการแยกพลังงานที่ไม่ต้องการ ประโยชน์ใช้งานมักต้องเป็นประเภทมีฟลักซ์รังสีค่าสูง ซึ่งได้แก่งานรังสีวินิจฉัยและรังสีรักษา ในปัจจุบันมีใช้บ้างในเวชศาสตร์นิวเคลียร์คืออุปกรณ์เทียบมาตรฐานโดสเพื่อวัดกัมมันตภาพรังสีในหน่วย 2-3 μCi จนถึง Ci

อุปกรณ์เทียบมาตรฐานโดส

อุปกรณ์เทียบมาตรฐานโดสโดยทั่วไปคือไอออนไนเซชันแชมเบอร์รูปทรงกระบอก ดังแสดงในรูปที่ 8 – 4 ภายในบรรจุด้วยแกสอาร์กอน ณ ความดันสูง (ประมาณ 20 บรรยากาศ) ตามแนวแกนของทรงกระบอกจะมีรูเล็ก ๆ เพื่อบรรจุภาชนะซึ่งต้องการนับวัดรังสี ให้อยู่ใกล้กับศูนย์กลางของไอออนไนเซชันแชมเบอร์ การจัดตำแหน่งเช่นนี้จะช่วยเพิ่มความไวสุทธิของหัววัดเรียกชื่อเป็น "การจัดแบบ 4π" ผนังด้านนอกของปริมาตรจะมีวัสดุกำบังอย่างดี เพื่อลดการรบกวนจากแหล่งกำเนิดกัมมันตรังสีอื่น ๆ ภายนอกปริมาตร

ทฤษฎีและการใช้เครื่องเทียบมาตรฐานโดสนั้นง่ายเมื่อรังสีวิ่งชนแกสใน ไอออนไนเซชันแชมเบอร์ ผลคือเกิดกระแสซึ่งปริมาณเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณกัมมันตภาพรังสีของแหล่งกำเนิด อย่างไรก็ตาม นิวไคลด์รังสีต่างกันย่อมผลิตกระแสปริมาณต่างกัน แม้ว่าจะมีความแรงของกัมมันตภาพรังสีค่าเดียวกันก็ตาม ดังนั้นก่อนใช้ไอออนไนเซชันแชมเบอร์เป็นอุปกรณ์เทียบมาตรฐานโดสจำต้องมีการเทียบมาตรฐานเสียก่อน



รูป 8-4 ผังอย่างง่ายแสดงเครื่องปรับเทียบโดส

ซึ่งการเทียบมาตรฐานอันดับแรก จะต้องทำการวัดปริมาณกระแสที่เกิดจากแต่ละมิลลิคูรีของนิวไคลด์รังสี และเพื่อความแน่นอนของวิธีการ ควรปฏิบัติขั้นตอนดังกล่าวซ้ำอีก ต้นกำเนิดรังสีที่ทราบความแรงนั้น ผลิตจาก National Bureau of Standards ซึ่งหาค่าความแรงกัมมันตภาพรังสีด้วยวิธีการยุ่งยากซับซ้อนและใช้เวลามากกว่า แต่มีความเที่ยงตรงเป็นมาตรฐาน ถ้าทราบแฟกเตอร์ของการเทียบมาตรฐาน ก็สามารถหาความแรงของกัมมันตภาพรังสีได้ โดยหารค่ากระแสที่เกิดจากกัมมันตภาพรังสีที่ไม่รู้ค่าด้วยแฟกเตอร์ของการเทียบมาตรฐานสำหรับนิวไคลด์รังสีนั้น ในรูป 8 –4 อุปกรณ์เทียบมาตรฐานโดสหรือไอออนไนเซชันแชมเบอร์ต่อกับเครื่องวัดกระแสแบบตัวเลข ส่วนแฟกเตอร์ของการเทียบมาตรฐานสำหรับแต่ละนิวไคลด์รังสีได้ถูกหาค่าไว้ก่อนแล้ว จากนั้นตั้งอุปกรณ์ให้แสดงค่าความแรงกัมมันตภาพรังสีเป็นไมโครคูรี มิลลิคูรี หรือ คูรี ฯลฯ รำลึกเสมอว่าเมื่อทำการกดปุ่มซึ่งเขียนกำกับไว้ว่าเป็น ^{99m}Tc แสดงว่าผู้ปฏิบัติงานกำลังค้นหาแฟกเตอร์ของการเปรียบเทียบสำหรับ ^{99m}Tc เท่านั้น ซึ่งกรณีดังกล่าวนี้มิได้กำจัดค่าใด ๆ ของนิวไคลด์รังสีอื่นที่อาจมีอยู่ ในทางกลับกัน ถ้าเครื่องถูกตั้งค่าไว้เพื่อวัดความแรงกัมมันตภาพของต้นกำเนิดรังสีชนิดอื่น แต่ผู้ใช้ได้นำต้นกำเนิด ^{99m}Tc ไปวัด ค่าที่อ่านได้ย่อมไม่ใช่ค่าถูกต้องของความแรงกัมมันตภาพรังสีของ ^{99m}Tc

นอกจากนี้ แฟกเตอร์ของการเทียบมาตรฐานจะใช้ได้เฉพาะแต่ละลักษณะการจัดตำแหน่งปริมาตรและภาชนะบรรจุของต้นกำเนิดกัมมันตรังสีเท่านั้น กล่าวคือ ถ้ารูปร่างและชนิดหรือปริมาตรของภาชนะบรรจุต้นกำเนิดกัมมันตรังสีเปลี่ยนไป จะทำให้แฟกเตอร์ของการเทียบมาตรฐานแปรไป ดังนั้นจึงควรทำการวัดค่าใหม่ และเพื่อความแน่ใจควรทำการทดสอบความแม่นยำของอุปกรณ์ในคาบเวลาหนึ่ง ๆ (หมายถึงกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ ควรเป็นสัดส่วนกับกัมมันตภาพรังสี) ควรทดสอบเสถียรภาพเทียบกับเวลาอย่างสม่ำเสมอ

หัววัดพรอพพอร์ชันนัล

หัววัดประเภทนี้ทำงานในบริเวณที่ III ของรูปที่ 8 –3 ซึ่งเป็นการขยายปริมาณแตกตัวแบบปฐมภูมิ ($\sim 10^6$) ให้เกิดการแตกตัวทุติยภูมิ ผลคือเกิดกระแสไฟฟ้าปริมาณมากพอ แม้จะเป็นรังสีเดียวก็ตาม นับเป็นข้อแตกต่างจากหัววัดแบบ ไอออนไนเซชันแชมเบอร์ หัววัดพรอพพอร์ชันนัลต้องอาศัยการออกแบบโครงสร้างที่ดี

ตลอดจนการใช้งานอย่างถูกต้อง เสถียรภาพเมื่อเทียบกับเวลาและกรณีเกิดการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าจะด้อยกว่า ไอออนไนเซชันแชมเบอร์ ในเวชศาสตร์นิวเคลียร์มีการใช้หัววัดพรอพพอร์ชันนัลน้อยมาก

หัววัดไกเกอร์มุลเลอร์ (GM)

หัววัด หัววัดไกเกอร์มุลเลอร์ (GM) ใช้งานได้ในช่วงบริเวณที่ IV ของรูปที่ 8 – 3 อนุภาคที่เคลื่อนที่สู่ปริมาตรของหัววัด จะก่อให้เกิดการคลายประจุในแกส ปริมาณกระแสที่ถูกผลิตขึ้นจะเป็นอิสระต่อพลังงานของรังสีและแรงดันไฟฟ้า V ปัญหาคือเมื่อเกิดการคลายประจุในแกส จะทำอย่างไรให้ขบวนการบันทึกสัญญาณของหัววัดจบสิ้นไป เพื่อจะนับวัดรังสีตัวใหม่ได้ คำตอบแยกได้ 2 วิธี คือ (1) ด้านอิเล็กทรอนิคส์ หรือ (2) ด้านเคมี ถ้าเป็นกลไกทางด้านอิเล็กทรอนิคส์ ตราบเมื่อเกิดการคลายประจุแรงดันไฟฟ้า V จะลดลงทันทีจนถึงค่าหนึ่งซึ่งไม่เกิดการคลายประจุอีกเลย จากนั้นจะเพิ่มขึ้นทันทีทันใดจนเป็นค่าเดิม ส่วนกลไกทางเคมีคือเกิดโมเลกุลอินทรีย์ขึ้นในแกส เช่น แอลกอฮอล์และอีเธอร์ เป็นต้น โมเลกุลเหล่านี้จัดเป็นสารเจือ หรือกล่าวได้ว่าแกสถูกโด้ป (doped) ด้วยสารเจือดังกล่าว หน้าที่แรกของสารเจืออินทรีย์เหล่านี้ คือ เป็นตัวบดบังแสงทางเคมี หรือเรียกทับศัพท์เป็น "เคมิคอลเควนเชอร์" (chemical quencher) สารดังกล่าวจะดูดกลืนแสง UV ที่ผลิตขึ้นระหว่างเกิดการคลายประจุ ดังนั้น เป็นการหยุดหรือระงับการคลายประจุ แต่การที่โมเลกุลเควนเชอร์ดูดกลืนพลังงานย่อมก่อให้เกิดการแยกตัวและโมเลกุลเควนเชอร์มีปริมาณน้อยจึงก่อให้หัววัดไกเกอร์มุลเลอร์ มีอายุการใช้งานจำกัดหัววัด GM ในปัจจุบันจึงนิยมใช้ ฮาโลเจนหรือสารประกอบอินทรีย์ของมันเป็นเคมิคอลเควนเชอร์ ซึ่งสามารถยืดอายุการใช้งานของหัววัดได้ดี เนื่องจากเมื่อฮาโลเจนเกิดการแยกตัวหลังจากดูดกลืนพลังงานจลน์ของแสง UV แล้ว มันสามารถกลับรวมตัวคืนได้ใหม่เหมือนโมเลกุลเริ่มแรก ดังนั้น ฮาโลเจนที่ใช้อยู่จึงไม่มีวันหมดสิ้นไป เหมือนกรณีเคมิคอลเควนเชอร์ที่เป็นสารอินทรีย์ ช่วงเวลาที่ใช้ในการระงับหรือบดบังการคลายประจุทั้งสองวิธีมีค่าประมาณ 50-200 μsec- ถ้ามีรังสีตกกระทบหัววัดในช่วงเวลาดังกล่าว หัววัด GM จะไม่มีการตอบสนอง ดังนั้น ถือเป็นค่า "dead time" ของหัววัด ค่านับวัดสูงสุดที่อาจใช้หัววัด GM ได้คือ 5×10^4 counts/minute (cpm)

หัววัดไกเกอร์มุลเลอร์ (GM) นับว่ามีความไวเป็นเลิศในจำนวนหัววัดแบบบรรจุด้วยแกส ถูกสร้างในหลายรูปร่าง หลายขนาด และง่ายในการใช้งาน มีเสถียรภาพดีต่อการแปรอุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้า อย่างไรก็ตามหัววัดชนิดนี้ไม่สามารถแยกพลังงานรังสีอื่น ๆ ได้ ถ้าใช้วัดรังสีเบตา หัววัดจะมีหน้าต่างเล็ก ๆ ทำด้วยโลหะอยู่ที่บริเวณปลายหนึ่งของหัววัด ถ้าใช้วัดรังสีเอ็กซ์หรือแกมมา หน้าต่างดังกล่าวมักปิด เนื่องจากการชนกันหรือปฏิกิริยาของรังสีเอ็กซ์หรือแกมมาในปริมาตรแกสเองนั้นมีน้อยที่สุด การนับวัดรังสีดังกล่าว จึงเป็นการนับวัดจำนวนโฟตอนหรืออิเล็กตรอนคอมป์ตันที่เกิดขึ้นในผนังด้านในของหัววัด GM ในเวชศาสตร์นิวเคลียร์ใช้หัววัด GM ในงานการป้องกันรังสีหรือเพื่อสำรวจการปนเปื้อนของสภาพแวดล้อมและของบุคคลอันเนื่องมาจากรังสีเอ็กซ์และแกมมา

หัววัดซินทิลเลชัน

(หัววัดชนิดนี้มักเรียกทับศัพท์เช่นเดียวกับหัววัดอื่น ๆ ซึ่งศัพท์ "scintillation" หมายถึงการผลิตแสง, ผู้แปล) มีสารหลายชนิดทั้งอินทรีย์และอนินทรีย์ที่สามารถเปล่งแสงได้ เมื่อถูกชนด้วยรังสีพลังงานสูง คุณสมบัติดังกล่าวถูกนำไปใช้ประโยชน์ในการตรวจวัดรังสี ซึ่งเรียกอุปกรณ์นี้ว่าหัววัดซินทิลเลชัน อย่างไรก็ตาม ในการตรวจวัดแสงที่เกิดขึ้นในสาร แสงนั้นควรจะทะลุผ่านออกจากเนื้อสารได้ ถ้าเป็นของเหลวมักไม่มีปัญหามาก แต่สำหรับของแข็งจะเป็นไปได้เฉพาะกรณีผลึกเดี่ยวหรือแก้วเท่านั้น เนื่องจากสารที่มีลักษณะเป็นผง (ซึ่งอาจเรียกเป็นผลึกขนาดไมโคร (microcrystal) ก็ได้) จะดูดกลืนแสงหรือก่อให้เกิดการกระเจิงที่บริเวณขอบ ๆ ของผลึกดังกล่าวได้ ผลคือเกิดการสูญเสียและแปรค่าปริมาณแสงไปมากก่อนจะถูกนับวัด

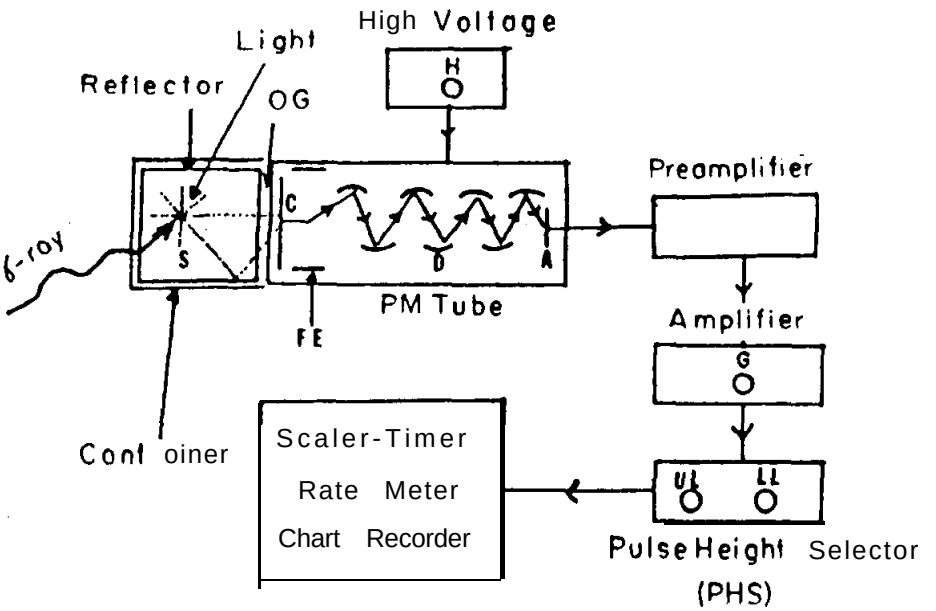
แผนภาพทั่วไปของเครื่องวัดรังสีแบบซินทิลเลชันแสดงในรูป 8 –5

ส่วนประกอบมีดังนี้ :

(1) ซินทิลเลเตอร์ (scintillator)

(2) หลอดโฟโตมัลติไพลเออร์ (photomultiplier tube)

(3) พรีแอมพลิไฟเออร์ (preamplifier)



รูป 8-5 ผังแสดงหัววัดซินทิลเลชัน อุปกรณ์ควบคุมแทนด้วยสัญลักษณ์ H (high voltage) หมายถึงแรงดันไฟฟ้าขนาดสูงที่ป้อนหัววัด G (gain) เป็นอัตราขยายของเครื่องขยายสัญญาณ UL (upper level) หมายถึงขีดจำกัดด้านบนของสัญญาณ และ LL (lower level) หมายถึงขีดจำกัดด้านล่างของสัญญาณซึ่งล้วนมีบทบาทในการทำงานที่ถูกต้องของหัววัด (หัววัดที่มีขายทั่วไปอาจใช้สัญลักษณ์อื่นที่แตกต่างจากนี้ได้) อักษรย่อ S = scintillator, OG = optical grease, C = photocathode, FE = focusing electrode, D = dynode, A = anode

(4) แอมพลิไฟเออร์ (amplifier)

(5) ส่วนวิเคราะห์สัญญาณ (pulse-height analyzer)

(6) ส่วนแสดงผลการนับวัด (scaler, count-rate meter)

รายละเอียดกลไกของการทำงานแต่ละส่วนของเครื่องมือวัดรังสีแกมมาจะกล่าวต่อไป ส่วนเครื่องวัดรังสีแบบลิขวิด-ซินทิลเลชัน (liquid scintillation) ใช้ในการนับวัดอนุภาคมีประจุที่มีพลังงานสูง (เช่น α และ β) จะอธิบายในบทที่ 9

ซินทิลเลเตอร์หรือตัวเปล่งแสง

สารที่สามารถเปล่งแสงมีหลายชนิด เช่น แอนธราซีน (anthracene) แนฟธาลีน (napthalene) พลาสติกต่าง ๆ ผลึกอัลคาไลฮาไลด์ (alkali halide crystals) ซึ่งถูกโด้ปด้วยสารเจือเล็กน้อย ตะกั่วทังสเตท (lead tungstate) บิสมัธเจอร์มาเนท (bismuth germanate หรือ BGO) ซีเซียมฟลูออร์ไรด์ (cesium fluoride หรือ CsF) และสารประกอบอโรมาติกส์ (aromatic) เช่น PPO (terpheny 1,2,5-diphenyloxazole) เป็นต้น

กลไกการผลิตแสงภายในสารเมื่อได้รับอิทธิพลจากรังสีนั้นซับซ้อนและยังไม่เป็นที่กระจ่าง ยังไม่ปรากฏทฤษฎีใด ๆ ที่ใช้อธิบายลักษณะการประพฤติตนของสารในกรณีดังกล่าว ที่ทราบทั่วไปคือรังสีแกมมาจะสูญเสียพลังงานให้กับซินทิลเลเตอร์ ตามขบวนการโฟโตอิเล็กทริค (photoelectric) หรือคอมป์ตัน (compton) หรือการผลิตคู่อนุภาค (pair-production) ก็ได้ ดังนั้น เกิดมีอิเล็กตรอนอิสระหลุดจากโมเลกุลซินทิลเลเตอร์ ซึ่งจะสูญเสียพลังงานในช่วงระยะทางสั้น ๆ โดยขบวนการแตกตัวและอยู่ในสถานะกระตุ้น คู่ไอออนที่เกิดนั้นอาจรวมตัวกันใหม่หรือจะไปรวมตัวกับอะตอมหรือโมเลกุลอื่นของซินทิลเลเตอร์ก็ได้ จากนั้นก่อให้เกิดสถานะกระตุ้น ซึ่งในการคืนสภาพกลับสู่สถานะเสถียรจะต้องเปล่งแสงออกมา ธรรมชาติและปริมาณของระดับพลังงานในสถานะกระตุ้นจะบ่งถึงปริมาณ สี และ ช่วงเวลาการสลายตัวการเปล่งแสง

ลักษณะสมบัติขั้นต้นของซินทิลเลเตอร์ถูกกำหนดดังนี้ :

(1) ประสิทธิภาพจากภายใน (intrinsic efficiency)

(2) ปริมาณของแสงที่เกิดขึ้นต่อหน่วยการดูดกลืนพลังงาน (ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสง (light conversion efficiency))

(3) ช่วงเวลาที่เกิดการเปล่งแสง (phosphorescent decay time)

พิจารณารายละเอียดของแต่ละปริมาณซึ่งประสิทธิภาพจากภายในของซินทิลเลเตอร์สำหรับรังสีแกมมา (มีพลังงานเป็นค่ากำหนดแน่นอน) ขึ้นกับสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานแบบเชิงเส้น ซึ่งขึ้นกับเลขเชิงอะตอม (atomic number) และความหนาแน่นของสาร ส่วนปริมาณแสงที่ถูกผลิตต่อหน่วยของพลังงานถูกดูดกลืนจะเป็นตัวบ่งถึงการแยกพลังงานของหัววัดประเภทนี้ สุดท้ายคือช่วงเวลาการเปล่งแสงจัดเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับค่า dead time ของหัววัด สารแต่ละชนิดจะมีค่าช่วงเวลาดังกล่าวต่างกันไป

ในสาขาเวชศาสตร์นิวเคลียร์ ซินทิลเลเตอร์ที่นิยมใช้คือผลึกโซเดียมไอโอไดด์ แทนด้วยสัญลักษณ์ NaI(Tl) ซึ่งถูกโด้ปด้วยธัลเลียม (thallium) ปริมาณน้อย ๆ ความหนาแน่นประมาณ 3.67 กรัม/ลูกบาศก์เซ็นติ-

เมตร effective atomic number (Z_{eff}) = 45 จัดเป็นค่าเหมาะสมต่อการวัดรังสีเอ็กซ์และแกมมาในช่วงพลังงาน 30-500 keV แต่ถ้าเป็นผลึก NaI ลำพังแล้วจะไม่ทำการเปล่งแสงได้มากนัก จึงจำเป็นต้องเจือหรือโด้ปด้วย ธัลเลียม (ประมาณ 1 ส่วนใน ล้าน) ซึ่งช่วยเพิ่มแสงเอาท์พุทได้มากกว่าหรือเท่ากับ 10 เท่า หัววัดมีค่า dead time ประมาณ 0.25 μsec จัดเป็นค่าเหมาะสมต่อการวัดรังสีในเวชศาสตร์นิวเคลียร์ นอกจากนี้ เทคโนโลยีสมัยใหม่ช่วยในการประดิษฐ์หรือปลูกผลึกได้หลายรูปทรง หลายขนาด และประโยชน์ใช้สอยคุ้มค่า

แสงที่ถูกผลิตในซินทิลเลเตอร์นั้นเกิดในปริมาตรเล็กมากมักอยู่ในพิสัยของโฟโตอิเล็กตรอน หรืออิเล็กตรอนจากคอมป์ตันรีคอยล์ (compton recoil electron) ที่เกิดในซินทิลเลเตอร์ สำหรับรังสีเอ็กซ์หรือแกมมาที่มีพลังงานน้อยกว่า 1 MeV จะมีพิสัยไม่เกิน 1 มม. ในผลึกโซเดียมไอโอไดด์ จากสาเหตุของการเกิดในปริมาตรเล็ก ๆ ดังกล่าว แสงจึงกระจายได้ทุกทิศทุกทาง ดังแสดงในรูป 8 – 5 วิธีการที่จะให้ทุกแสงเดินทางสู่หลอด PM ทำโดยการเคลือบผิวด้านนอกของซินทิลเลเตอร์ *ยกเว้นบริเวณที่อยู่ชิดกับหลอด PM* สารที่ใช้เคลือบได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ (magnesium oxide) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวสะท้อนแสง ลักษณะเด่นของผลึกโซเดียมไอโอไดด์คือเป็น ตัวดูดความชื้น (hygroscopic) ดังนั้นต้องป้องกันผลึกจากความชื้นอย่างดี โดยทั่วไปจะบรรจุผลึกไว้ในอลูมิเนียมหรือเหล็กกล้าผนังบาง การเชื่อมต่อผิวหน้าของผลึกกับหลอดขยายสัญญาณ PM ก็เป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากอาจมีการสูญเสียแสงได้ในช่วงบริเวณรอยต่อดังกล่าวได้ การแก้ปัญหาทำโดยใช้สารที่มีคุณภาพสมบัติเป็นตัวนำแสง (optical grease) นอกจากนี้ ผลึกจะเปล่งแสงได้ดีหรือไม่นั้นขึ้นกับอุณหภูมิห้อง ห้องที่หัววัดกำลังถูกใช้งานอยู่ไม่ควรมีอุณหภูมิแปรค่า (กล่าวคือ ถ้าทำการวัดสารหนึ่งอยู่และมีการแปรค่าอุณหภูมิขณะทำการวัด ดังนั้นประสิทธิ–ภาพของหัววัดจะไม่คงที่ ผลการวัดรังสีจากสารดังกล่าวจะได้ผลไม่แน่นอน, ผู้แปล) แม้จะไม่มีการใช้งานหัววัดก็ตาม หัววัดไม่ควรอยู่ในที่อุณหภูมิแปรค่ามาก (ไม่ควรเกิน 10% ต่อ ชม.) ตัวอย่าง เช่น กรณีโยกย้ายหัววัด ผลของการแปรค่าอุณหภูมิอาจก่อให้ผลึกแตกหรือร้าวเนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงความเค้นมาก

ส่วนประกอบอิเล็กทรอนิคส์อื่น ๆ :

หลอดโฟโตมัลติไพลเออร์ (หลอด PM) แสงที่เกิดในผลึกโซเดียมไอโอไดด์มีปริมาณน้อยมากเกินกว่าที่สายตาปกติจะสังเกตได้ แม้จะมองเห็นแต่ก็ยากในการที่จะนับวัดจำนวนแสงที่เกิดขึ้นนั้นในช่วงนาน ๆ หลอด PM เป็นอุปกรณ์ที่มีความไวต่อแสง ซึ่งจะทำหน้าที่แปลงแสงให้เป็นสัญญาณอิเล็กทรอนิคส์ที่นับวัดได้ ส่วนประกอบของหลอด PM คือ โฟโตแคโธด (photocathode) เคลือบเป็นแผ่นผิวบริเวณหน้าต่างที่แสงจะเดินทางเข้าสู่หลอด PM และมีขั้วไฟฟ้าต่ออนุกรมอยู่มากมาย หรือที่เรียกทั่วไปว่า "ไดโนดส์" (dynodes) ซึ่งมีรูปแบบการจัดเรขาคณิตอย่างพิเศษ ขั้วไฟฟ้าสุดท้ายคือ "แอนโนด" (anode) ทุกส่วนที่กล่าวมานี้บรรจุอยู่ในหลอดแก้วสูญญากาศ เมื่อแสงจากโฟตอนชนกับโฟโตแคโธด จะก่อให้เกิดอิเล็กตรอนพลังงานต่ำ (0.1-1 eV) โดยขบวนการโฟโตอิเล็กทริค โฟโตอิเล็กตรอนนั้นจะถูกเร่งให้วิ่งไปยังไดโนด ทำโดยเพิ่มแรงดันไฟฟ้าประมาณ 50-100 V ให้กับไดโนดดังกล่าวนี้) ผลจากการเร่งดังกล่าว ทำให้อิเล็กตรอนสะสมพลังงานจลน์มากพอ (ประมาณ 50-100 eV) ที่จะผลิตอิเล็กตรอนทุติยภูมิเมื่อชนกับไดโนด ปริมาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะแปรค่าในช่วง 1 – 10 จากนั้น

อิเล็กตรอนทุติยภูมิจะถูกเร่งตรงไปยังไดโนดที่สองซึ่งก่อให้เกิดการทวีคูณปริมาณอิเล็กตรอนอีก โดยทั่วไป ไดโนดสุดท้าย (มักเป็นขั้วที่สิบ) จะปรากฏประมาณ 10^5 - 10^8 อิเล็กตรอนต่อการเกิด 1 โฟโตอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนเหล่านี้จะก่อสัญญาณกระแสขนาด 2 –3 ไมโครแอมแปร์ และใช้เวลาเกิดประมาณ 1 μsec ที่แอนโนด

หลอด PM ทั่วไปจะถูกป้อนแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายเดี่ยว (ประมาณ 500-1500 V) จากนั้นแยกส่งไปยังไดโนดต่าง ๆ ด้วยค่าต่างกันโดยอาศัยตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า ความสามารถของหลอด PM ในการทวีคูณอิเล็กตรอนเรียกเป็น "เกน" (gain) มีค่าขึ้นกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไดโนดอย่างมาก ซึ่งผลลัพธ์คือขึ้นกับแรงดันไฟฟ้าขนาดสูงที่ป้อนเข้านั่นเอง

พรีแอมพลิไฟเออร์ (preamplifier) สัญญาณไฟฟ้าที่เคลื่อนไปสู่แอนโนดของหลอด PM มีขนาดน้อย ๆ (หน่วยเป็นมิลลิโวลต์หรือไมโครแอมแปร์) จึงต้องทำการขยายให้มีค่าเป็นหลายโวลต์ เพื่อสะดวกในการวิเคราะห์ต่อไป สัญญาณเอาท์พุทจากหลอด PM ไม่สามารถจะป้อนเข้าสู่แอมพลิไฟเออร์ (amplifier) ได้โดยตรง เนื่องจากเอาท์พุทอิมพีแดนซ์ (output impedance) ของหลอด PM และอินพุทอิมพีแดนซ์ (input impedance) ของแอมพลิ–ไฟเออร์มีช่วงต่างกันมาก ซึ่งจัดเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากด้านอิเล็กทรอนิกส์ แต่ถ้าฝืนต่อวงจรด้วยกัน ผลคือเกิดการเพี้ยน (distortion) และมีการลดทอนสัญญาณ (attenuation) ได้ สรุปได้ว่า พรีแอมพลิไฟเออร์เป็นอุปกรณ์ซึ่งช่วยแก้ปัญหา ในการปรับอิมพีแดนซ์ของหลอด PM และแอมพลิไฟเออร์นั่นเอง โดยทั่วไป มักจัดให้พรีแอมพลิไฟเออร์อยู่ชิดกับหลอด PM เท่าที่จะชิดกันได้ เนื่องจากถ้าใช้สายเคเบิลยาว ๆ อาจจะก่อให้เกิดการลดทอนสัญญาณอย่างเห็นได้ชัด อย่างไรก็ตามเอาท์พุทของพรีแอมพลิไฟเออร์สามารถส่งผ่านไปตามเคเบิ้ลได้ระยะทางยาว ๆ

ลิเนียร์แอมพลิไฟเออร์ (linear amplifier) หน้าที่ของลิเนียร์แอมพลิไฟเออร์คือขยายสัญญาณไฟฟ้าที่มาจากพรีแอมพลิไฟเออร์ จากนั้นดำเนินการปรับแต่ง ให้สัญญาณเหล่านั้นเหมาะสมกับอุปกรณ์วิเคราะห์ข้อมูลซึ่งต่ออยู่กับลิเนียร์แอมพลิไฟเออร์ คำที่มักพบเสมอในลิเนียร์แอมพลิไฟเออร์คือ "เกน" (gain) หมายถึงอัตราขยาย ซึ่งถูกนิยามเป็นอัตราส่วนของสัญญาณเอาท์พุทต่อสัญญาณอินพุท ซึ่งถ้าผู้ใช้ต้องการเปลี่ยนอัตราขยาย ก็สามารถทำได้โดยปรับปุ่มเกน (บนหน้าปัดของอุปกรณ์, ผู้แปล)

พัลส์ไฮต์ซีเลคเตอร์ (pulse-height selector = PHS) พัลส์ไฮต์ซีเลคเตอร์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอ–นิกส์ ทำหน้าที่เลือกรับสัญญาณเฉพาะที่มีแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วงกำหนดต้องการ ส่วนสัญญาณที่ไม่อยู่ในช่วงดังกล่าวนี้อุปกรณ์จะตัดทิ้งไป PHS ประกอบด้วยปุ่มบังคับ 2 ปุ่ม เรียกทั่วไปว่า "ระดับล่าง" (lower level) และ "ระดับบน" (upper level) หรือบางครั้งเรียกว่า "หน้าต่าง" (window) ซึ่งแยกเป็นด้านล่างและบนเช่นกัน ผู้ใช้สามารถเลือกช่วงของแรงดันไฟฟ้าได้ตามความต้องการ โดยใช้ปุ่มบังคับทั้งสองดังกล่าวเป็นตัวกำหนดช่วงแรงดันไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น ลิเนียร์แอมพลิไฟเออร์ส่งสัญญาณมายัง PHS ซึ่งอยู่ในช่วงแรงดันไฟฟ้าแปรจาก 1 ถึง 10 โวลต์ ถ้าต้องการรับเฉพาะสัญญาณในช่วง 5 และ 6 โวลต์ ปฏิบัติโดยปรับระดับล่างของ PHS ที่ 5 โวลต์ และระดับบนที่ 6 โวลต์ ผลคือ PHS จะผลิตสัญญาณเอาท์พุทจากอินพุทที่อยู่ในช่วง 5 –6 โวลต์เท่านั้น สำหรับ PHS บางเครื่องอาจมีเฉพาะระดับล่างและหน้าต่างเท่านั้น กรณีนี้ต้องปรับระดับล่างอยู่ที่ 5 โวลต์ ส่วนปุ่มบังคับหน้าต่างนั้นปรับให้อยู่ที่ 1 โวลต์

เครื่องมือเวชศาสตร์นิวเคลียร์บางชนิดยังมีปุ่มอื่น ๆ อีก เรียกว่า "integral counting" เพื่อใช้ทำการนับวัดแบบรวมค่านับวัดสะสม หรือเรียกทับศัพท์เป็นการวัดแบบ อินทีเกรต (integrate) ในการนี้ปุ่มบังคับระดับล่างเท่านั้นที่ถูกใช้งาน สัญญาณที่มีค่าสูงกว่าแนวแรงดันไฟฟ้าระดับล่างเท่านั้นที่จะถูกนับวัด นอกจากนี้ยังมีบางเครื่องที่รวมปุ่มบังคับทั้งสอง (คือระดับล่างและบน) เป็นปุ่มบังคับเดียวเรียกว่า "center line" หรือ "peak voltage" และ "% window" ย้อนกลับไปสู่ตัวอย่างการใช้เครื่องมือดังกล่าวข้างต้น ซึ่งต้องการนับวัดสัญญาณที่มีค่าอยู่ในช่วง 5 –6 โวลต์ กรณีนี้ค่า "center line" หรือ "peak voltage" อยู่ที่ค่า 5.5 โวลต์ (คือค่ากลางของช่วงแรงดันไฟฟ้านั่นเอง) และ

$$\% \text{ window} = \frac{\text{ความกว้าง window ตามต้องการ} \times 100}{\text{peak voltage}}$$

แทนค่าตามตัวอย่างจะได้ $\% \text{ window} = \frac{1 \text{ โวลต์} \times 100}{5.5 \text{ โวลต์}}$

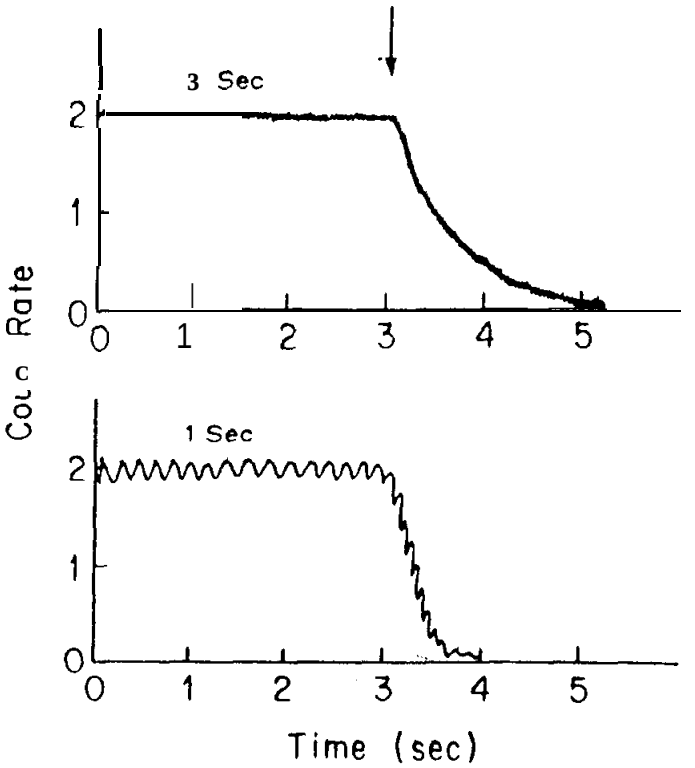
$= 18\%$

ในทางกลับกัน ถ้าทราบค่า % window สมมุติเป็น 20% ที่ค่า peak voltage 1.40 โวลต์ ดังนั้นความกว้างของช่วงหน้าต่างจะเป็น $0.2 \times 1.40 = 0.28$ โวลต์ ซึ่งหน้าต่างจะถูกตั้งขีดจำกัดอย่างสมมาตร โดยมีค่า peak voltage เป็นแกนกลาง กล่าวคือสัญญาณที่ถูกเลือกวัดจะมีค่าตั้งแต่ $1.40 - 0.28/2$ จนถึง $1.40 + 0.28/2$ หรือ 1.26 โวลท์ ถึง 1.54 โวลต์

มัลติแชนนัลอนาลัยเซอร์ (multichannel analyzer) PHS เป็นอุปกรณ์วิเคราะห์สัญญาณแบบแชนนัลเดี่ยว ผู้ใช้สามารถเลือกได้เพียงช่วงเดียวเท่านั้น แต่สำหรับมัลติแชนนัลอนาลัยเซอร์นั้น จะประกอบไปด้วย PHS หลายตัว จึงสามารถแยกวัดสัญญาณได้หลายช่วงแรงดันไฟฟ้าในเวลาเดียวกัน

สเกลเลอร์และไทเมอร์ (Scaler and Timer) อุปกรณ์นี้ประกอบด้วยหน่วยนับวัดอิเล็กทรอนิกส์ทำหน้าที่เก็บสัญญาณที่ส่งมาจากแอมพลิไพเออร์ ในช่วงเวลาที่กำหนดหรือเมื่อเก็บจำนวนนับวัดได้ตามที่กำหนด ทั้งสองกรณีดังกล่าว จำนวนสัญญาณที่ถูกจัดเก็บในช่วงเวลาที่ต้องการนับวัดหน้าปัดจะแสดงทั้งค่านับวัดและเวลา

เรตมีเตอร์ (rate meter) อุปกรณ์นี้จะแสดงผลเป็นอัตรานับวัด เช่น counts/min หรือเรียกย่อ ๆ เป็น cpm (counts per minute) ซึ่งต่างจากการแสดงจำนวนนับวัดและเวลาซึ่งจัดเก็บค่านับวัดนั้น พารามิเตอร์ที่สัมพันธ์กับเรตมีเตอร์คือค่าคงที่เวลา (time constant) กล่าวคือค่าคงที่เวลาของเรตมีเตอร์จะเป็นค่าบ่งชี้ถึงความถูกต้องทางสถิติของอัตรานับวัด รวมทั้งการตอบสนองสัญญาณและปฏิกิริยาของมัน เมื่อมีการแปรค่าอัตรานับวัด รูป 8 –6 และในการบันทึกค่านับวัดแบบพลศาสตร์นั้น ค่าคงที่เวลามีบทบาทสำคัญมาก ดังนั้น ในการเลือกค่าคงที่เวลาจึงควรได้ระมัดระวังเนื่องจากส่งผลถึงความถูกต้องทางสถิติ และการผลิตปรากฏการณ์ทางพลศาสตร์ซ้ำได้อย่างแม่นยำ



รูป 8-6 การตอบสนองของเรตมีเตอร์ 2 เครื่องซึ่งมีค่าคงที่เวลาเป็น 1 และ 3 วินาทีตามลำดับ มีลักษณะลากเป็นทางยาวในช่วงแรกเป็นกรณีที่นิวไคลด์รังสีเคลื่อนห่างจากหัววัด ศรชี้ (รูปบน) หมายถึงเวลาซึ่งต้นกำเนิดรังสีถูกย้ายที่ออกไป กราฟที่มีค่าคงที่เวลา 1 วินาที จะมีลักษณะการถ่วง (วัดจากขนาดของคลื่น) มากกว่ากราฟของ 3 วินาที ช่วงเวลาตอบสนอง (วัดจากช่วงกราฟตกสู่ค่าศูนย์ว่ามีความเร็วอย่างไร ซึ่งเป็นการย้ายต้นกำเนิดรังสีนั่นเอง) ของเส้นกราฟ ค่าคงที่เวลา 1 วินาที จะมีช่วงเวลาสั้นกว่าของกราฟค่าคงที่เวลา 3 วินาที

การตอบสนองรังสีแกมมาพลังงานเดี่ยว (γ-rays)

ขั้นตอนในการผลิตสัญญาณแรงดันไฟฟ้าในหัววัดแบบซินทิลเลชันมีดังนี้

(1) รังสีแกมมาชนกับปริมาตรของผลึก ซึ่งอาจก่อให้เกิดขบวนการโฟโตอิเล็กทริค คอมป์ตันและคู่อนุภาค

(2) ในแต่ละปรากฏการณ์ที่เกิดจากการชนกันในข้อ (1) ย่อมก่อให้เกิดอิเล็กตรอนหรือคู่อิเล็กตรอน โพสิตรอน ที่มีพลังงานสูง ซึ่งในที่สุดก็จะปล่อยหรือถ่ายทอดพลังงานทั้งหมดของมันไว้ในปริมาตรเล็ก ๆ ของแหล่งกำเนิดนั่นเอง

(3) บางส่วนของพลังงานที่ถูกละทิ้งไว้ในข้อ (2) จะแปลงเป็นแสง

(4) แสงในข้อ (3) จะถูกแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าในหลอด PM ซึ่งจะถูกขยายโดยแอมพลิไฟเออร์หลัก

องค์ประกอบที่น่าจะส่งผลต่อแอมพลิจูด (คือความสูง หรือแรงดันไฟฟ้า V) ได้แก่

(1) ปริมาณพลังงานที่รังสีแกมมาละทิ้งไว้ (กำหนดเป็น E_d)

(2) ประสิทธิภาพในการแปลงแสงของซินทิลเลเตอร์ (กำหนดเป็น N)

(3) ประสิทธิภาพของโฟโตแคโธด (กำหนดเป็น E)

(4) อัตราขยายหรือเกน (gain) ของหลอด PM (G_{pm})

(5) เกนของแอมพลิไฟเออร์ (G_{amp})

เขียนสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ดังนี้

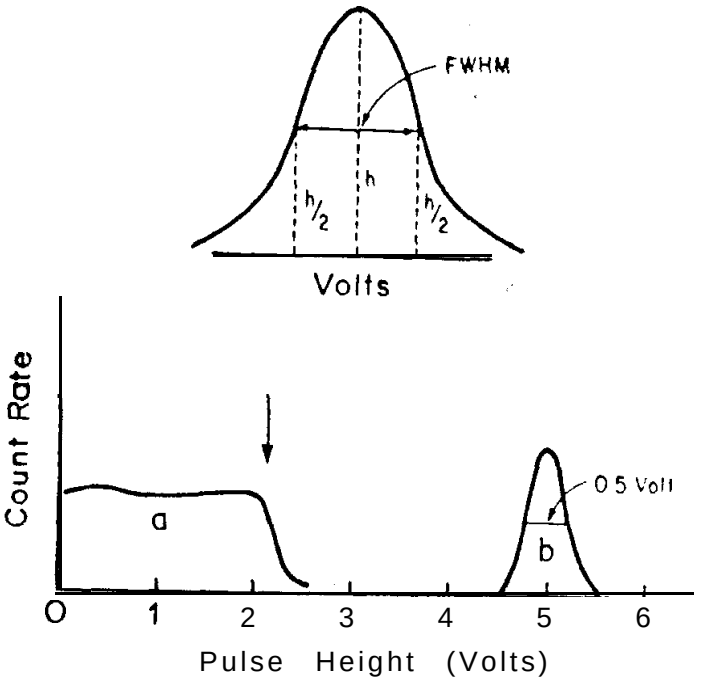
$$V = \text{ค่าคงที่} \cdot E_d \cdot N \cdot E \cdot G_{pm} \cdot G_{amp}$$

ข้อสังเกต คือลักษณะสมบัติของหัววัดซินทิลเลชัน ได้แก่ N, E_d, G_{pm} และ G_{amp} ถ้าสามารถรักษาให้ G_{pm} และ G_{amp} เป็นค่าคงที่ได้ ดังนั้น สัญญาณสูง V ที่ถูกผลิตในหัววัดจะขึ้นกับค่าของ E_d แบบเชิงเส้นตรง ถ้า E_d เพิ่มค่า แอมพลิจูดของ V จะเพิ่มตาม ซึ่งประโยชน์สำคัญที่เราได้รับคือ ลักษณะดังกล่าวบ่งชี้ถึงความสามารถของหัววัดซินทิลเลชัน ในการวัดพลังงานของต้นกำเนิดรังสี

อย่างไรก็ตาม รังสีแกมมาซึ่งมีพลังงาน E_γ จะไม่ถ่ายทอดพลังงานให้กับอะตอมของผลึกเป็นปริมาณ E_d ซึ่งมีค่าเท่ากันทุกครั้งเสมอไป E_d นั้นแปรค่าตามปรากฏการณ์ที่เกิดเนื่องจากการชนกับอะตอมของผลึก (ซึ่งมีโอกาสเป็นไปได้ 3 แบบ ได้แก่ โฟโตอิเล็กทริค คอมป์ตัน และการเกิดคู่อนุภาค) ถ้าเป็นปรากฏการณ์โฟโต–อิเล็กทริค พลังงานของรังสีแกมมาที่วิ่งชนทั้งหมดจะถ่ายทอดไว้ในผลึก กล่าวคือ $E_d = E_\gamma$ แต่อีกสองปรากฏการณ์หลังนั้น E_d มักมีค่าน้อยกว่า E_γ และความสัมพันธ์ระหว่าง E_γ กับแอมพลิจูดของสัญญาณ V จะไม่เป็นแบบง่ายอีกต่อไป

ดังนั้น ถ้าต้องการจะใช้หัววัดซินทิลเลชันเพื่อวิเคราะห์พลังงานรังสี ควรเลือกใช้ค่าจากโฟโต–อิเล็กทริคเท่านั้น ในทางปฏิบัติต้องอาศัย PHS ช่วย ในรูป 8 –7 แสดงการกระจายค่าแอมพลิจูดของสัญญาณที่ผลิตจากหัววัดโซเดียมไอโอไดด์ พลังงานรังสีแกมมาเป็นแบบ "โมโนโครมาติค" (*monochromatic*) และมีค่าต่ำกว่า 1 MeV ปรากฏการณ์ที่มีบทบาทในการนับวัดนี้ได้แก่ โฟโตอิเล็กทริค และคอมป์ตัน เรียกภาพการกระจายค่าแอมพลิจูดของสัญญาณนี้ว่า "สเปคตรัม" (spectrum) จากรูป 8 –7 นี้ ได้แบ่งออกเป็น 2 บริเวณ คือ a และ b

บริเวณ a เรียกเป็น "คอมป์ตันเพลโต" (compton plateau) ซึ่งทุกสัญญาณในบริเวณนี้เกิดจากการชนกันแบบ คอมป์ตัน สัญญาณมีแอมพลิจูดแตกต่างกันไป โดยขึ้นกับปริมาณพลังงานที่อิเล็กตรอนของผลึกได้รับ เป็นที่เข้าใจว่าปฏิกิริยาแบบคอมป์ตันนั้น รังสีแกมมาจะถ่ายทอดพลังงานของมันเพียงบางส่วนให้กับอิเล็กตรอนของผลึก และการถ่ายทอดพลังงานดังกล่าวจะมีค่ามากสุดในกรณี รังสีแกมมามีการสะท้อนกลับหมด (back-scatter) (ดูบทที่ 6) ซึ่งสมนัยกับการเกิดสันคอมป์ตัน (compton edge) ในรูป 8 –7 บริเวณลูกศรชี้แสดงอยู่ ส่วนบริเวณ b เป็นรูปโค้งระฆังคว่ำ ซึ่งเรียกว่า "โฟโตพีค" (photo peak) เกือบทุกสัญญาณในบริเวณนี้ เกิดจากการชนกันแบบโฟโตอิเล็กทริค



รูป 8-7 การกระจายค่าความสูงสัญญาณซึ่งใช้หัววัดซินทิลเลชัน NaI(Tl) วัดรังสีแกมมาพลังงานเดี่ยวการกระจายค่านั้นแบ่งได้เป็น 2 บริเวณ คือ a และ b บริเวณ a (ที่ราบคอมป์ตัน) เป็นผลลัพธ์อันดับแรกเกิดจากรังสีแกมมาชนกับผลึก NaI(Tl) ตามคอมป์ตันเอฟเฟคท์ ตำแหน่งสันของที่ราบคอมป์ตัน (ศรชี้) เกิดจากรังสีแกมมาถ่ายทอดพลังงานสูงสุดเท่าที่จะเป็นไปได้ในอันตรกิริยาแบบคอมป์ตันของอิเล็กตรอนบริเวณ b (โฟโตพีค) เกิดเมื่อรังสีแกมมามีอันตรกิริยากับผลึกโดยโฟโตอิเล็กทริคเอฟเฟคท์ ความแคบหรือกว้างของโฟโตพีคใช้เป็นดัชนีความสามารถในการแยกค่าพลังงานของหัววัด ในทางปฏิบัติความสามารถในการจำแนกค่าพลังงานหาค่าจาก FWHM (Full width at half maximum) เหนือรูปกราฟ แสดงว่า FWHM ค่าเรโซลูชันพลังงาน หาได้จากความสัมพันธ์ $\frac{\text{FWHM} \times 100}{\text{Peak voltage}}$ ถ้าคำนวณได้ต่ำกว่านี้แสดงว่าเรโซลูชันพลังงานดีขึ้น

อาจมีบางสัญญาณเกิดเนื่องจากการชนกันแบบคอมป์ตันซึ่งมีลักษณะเป็นทวีคูณ โดยเกิดการชนกันแบบคอมป์ตันก่อน จากนั้นมีการถูกดูดกลืนพลังงานทั้งหมดของรังสีแกมมาที่กระเจิงนั้น โดยเป็นไปตามขบวนการโฟโตอิเล็กทริค อย่างไรก็ตามทั้งสองเหตุการณ์จะต้องมีการถ่ายทอดพลังงานแกมมาทั้งหมดให้กับผลึก ดังนั้นโฟโตพีคจึงมักถูกจัดเป็นพีคที่มีการดูดกลืนทั้งหมดก็ได้

ข้อสังเกตคือ บริเวณทั้งสองจะถูกแบ่งแยกโดยช่วงลาดชันคล้ายหน้าผา ดังนั้น เลือกใช้ PHS วัดโฟโตพีคได้อย่างง่ายโดยตั้งให้ PHS มีระดับบนและล่างคลอบคลุมโฟโตพีค ตามรูป 8 – 7 อาจจัดให้ PHS มีระดับล่างเป็น 4.5 โวลต์ และระดับบนเป็น 5.5 โวลต์ ตามลำดับ โดยทั่วไป เลือกความกว้างของหน้าต่างนับวัดเป็น 2 เท่า ของค่า การแยกพลังงาน (รายละเอียดจะอธิบายตอนต่อไป)

FWHM และการแยกพลังงาน

FWHM and Energy Resolution

ขบวนการก่อแสงในผลึกและการทวีคูณอิเล็กตรอนในหลอด PM ล้วนเป็นสถิติตามธรรมชาติ (กล่าวคือ ไม่มีลักษณะคงที่สม่ำเสมอตลอดเวลา แต่อาจมากหรือน้อยก็ได้ตามธรรมชาติ, ผู้แปล) ผลลัพธ์คือการตอบสนองของหัววัดโซเดียมไอโอไดด์ต่อปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริคจะไม่คงที่ แต่จะมีการแปรค่าโดยกระจายค่าเป็นรูประฆังคว่ำ (หรือเรียกว่าแบบเกาเซียน (Gaussian) นั่นเอง) ยิ่งกระจายค่าในช่วงแคบเท่าใด แสดงว่าหัววัดมีความสามารถในการแยกพลังงานได้ดีมากขึ้น ค่าความกว้างของพีค ณ บริเวณที่มีความสูงครึ่งหนึ่งของพีคพลังงาน เรียกชื่อเป็น FWHM (full width at half maximum) ใช้เป็นตัวแทนค่าการแยกพลังงานของหัววัด รูปแบบทั่วไปทางคณิตศาสตร์มีดังนี้

$$\% \text{ การแยกพลังงาน} = \frac{\text{FWHM} \times 100}{\text{แรงดันไฟฟ้าที่พีค}}$$

จากรูป 8 -7 FWHM = 0.5 โวลต์, พลังงานพีค = 5 โวลต์

$$\% \text{ การแยกพลังงาน} = \frac{0.5 \times 100}{5.0}$$

$$= 10\%$$

ค่าการแยกพลังงานนี้ขึ้นต่อพลังงานของรังสีแกมมา เนื่องจากปริมาณแสงที่ถูกผลิตภายในผลึก สำหรับกรณีพีคของการดูดกลืนนั้นจะเพิ่มตามพลังงานของรังสีแกมมา โดยมีลักษณะการเพิ่มค่าดังกล่าวแบบเชิงเส้น ยิ่งพลังงานรังสีแกมมามีค่าสูงจะยิ่งมีค่าการแยกพลังงานดี แม้ว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวจะมิได้มีลักษณะเชิงเส้นก็ตาม นอกจากนี้ การแยกพลังงานยังขึ้นกับขนาดและรูปร่างของผลึกโซเดียมไอโอไดด์ผลึกรูปหลุมหรือที่เรียกทับศัพท์ว่า "เวลไทป์" (well type) จะมีค่าการแยกพลังงานต่ำกว่าผลึกรูปทรงกระบอก (ซึ่งมีลักษณะผิวหน้าเรียบตัน, ผู้แปล)

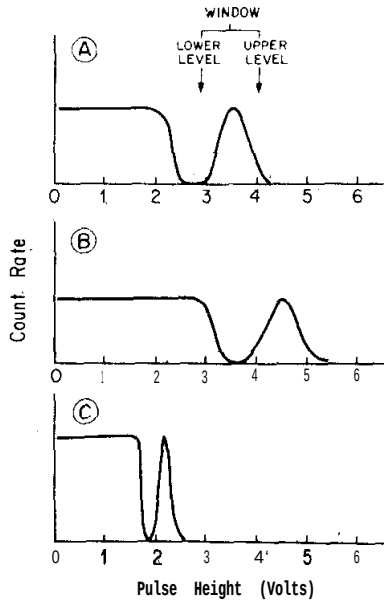
ระบบนับวัดโซเดียมไอโอไดด์ที่จัดว่าดี จะมีค่าเรโซลูชันสำหรับพลังงานรังสีแกมมา 662 KeV ของ Cs-137 ประมาณ 8 –10% และสำหรับ Tc-99m ซึ่งมีพลังงานรังสีแกมมา 140 KeV จะมีค่าการแยกพลังงานอยู่ในช่วง 11 –14%

การวัดค่าการแยกพลังงานอย่างสม่ำเสมอนั้น ทำให้ทราบสภาพเสื่อมถอยในการทำงานของผลึก สาเหตุดังกล่าวเกิดจากการรั่วไหลในส่วนห่อหุ้มผลึกและหรือหลอด PM มีประสิทธิภาพด้อยลง การแยกพลังงานมีค่าเลวลงตามอายุการใช้งานซึ่งเพิ่มขึ้น ดังสาเหตุที่กล่าวนี้

การแปรค่าเนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงอัตราขยายหรือแรงดันไฟฟ้าขนาดสูง

ถ้าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้หลอด PM มีการแปรค่า หรือ อัตราการขยายสัญญาณเพิ่มหรือลดลงเพียง

เล็กน้อย ย่อมมีผลให้แอมพลิจูดของสัญญาณ (แรงดันไฟฟ้า) เพิ่มหรือลดตามไปด้วย ดังแสดงในรูป 8 –8 ถ้าเดิมได้ทำการตั้งค่าของระดับบนและล่างในหน้าต่าง PHS ให้คลุมโฟโตพีค จากนั้นมีการแปรค่าของอัตราขยายหรือแรงดันไฟฟ้าขนาดสูงที่ใช้ป้อนเข้าไป ผลที่เกิดขึ้นนั้นอาจทำให้โฟโตพีคเลื่อนตำแหน่งไปจากเดิมจนหลุดออกนอกบริเวณหน้าต่างเดิมที่ตั้งค่าไว้ก็ได้ ดังนั้น คุณสมบัติสำคัญของแรงดันไฟฟ้าขนาดสูงและอัตราขยายจะต้องมีความเสถียร ไม่แปรค่าตามเวลา อุณหภูมิและการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้า



รูป 8-8 ผลจากการแปรค่าแรงดันไฟฟ้าขนาดสูง (หรือ "เกน" ของเครื่องขยายสัญญาณ) คือทำให้การกระจายค่าความสูงของสัญญาณแปรไป จากรูป A ถ้าเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขนาดสูงจะได้กราฟแสดงในรูป B แต่ถ้าลดแรงดันไฟฟ้าจะได้กราฟรูป C ทั้งสองกรณี (B และ C) มีผลให้โฟโตพีคที่ทำการกำหนดเลือกไว้ใน PHS เคลื่อนออกจากช่วงหน้าต่างที่กำหนดไว้อย่างสมบูรณ์ ผลคืออัตรานับวัดในช่วงกำหนดเลือกจะลดค่าลงอย่างมาก ในทางปฏิบัติ ถ้าแปรค่าแรงดันไฟฟ้าขนาดสูงหรือเกนของเครื่องขยายสัญญาณเพียงเล็กน้อยจะส่งผลให้เกิดการแปรค่าอัตรานับวัดได้ ดังนั้นควรคงค่าแรงดันไฟฟ้าขนาดสูงและเกนของเครื่องขยายสัญญาณ

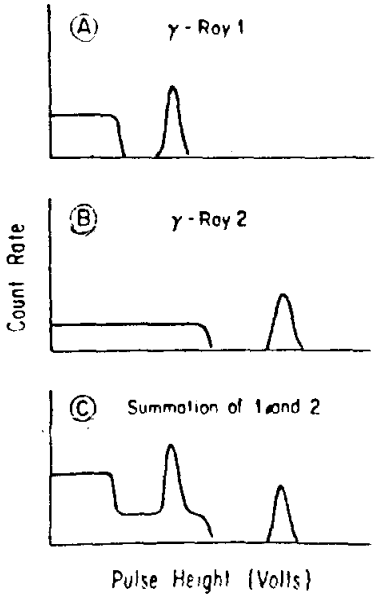
การเทียบมาตรฐานพลังงาน

ถ้ามีการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขนาดสูงและหรืออัตราขยาย จะได้สัญญาณที่มีขนาดแอมพลิจูดตามกำหนด แต่ผู้ใช้จะทำการเทียบมาตรฐาน (calibrate) แอมพลิจูดของสัญญาณให้สมนัยกับค่าพลังงานรังสีแกมมาได้อย่างไร? ในทางปฏิบัติ ใช้ต้นกำเนิดกัมมันตภาพรังสีซึ่งมีคุณสมบัติเปล่งพลังงานแกมมาค่าเดียว ซึ่งทราบค่าพลังงาน และควรมีอายุยาว เช่น Cs-137 เปล่งรังสีแกมมา 662 KeV โดยทั่วไป ในเวชศาสตร์นิวเคลียร์เทียบมาตรฐานหัววัดโดยถือว่าพลังงาน 100 KeV ที่ถ่ายทอดให้กับผลึกจะผลิตสัญญาณได้แอมพลิจูดขนาด 1 โวลต์ ดังนั้นต้องปรับหลอด PM ให้มีแรงดันไฟฟ้าขนาดสูงที่ป้อนเข้านั้นพอเหมาะต่อการสนองตอบโดยให้โฟโตพีคของ

Cs-137 มีศูนย์กลางที่ 6.62 โวลต์ ถ้าจัดได้ลักษณะดังกล่าวนี้แล้ว ควรจะตรึงค่าทั้งแรงดันไฟฟ้าขนาดสูงและอัตราขยายไว้เช่นเดิมเสมอไป อย่างไรก็ตามอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ย่อมมีการเลื่อนค่าตามอัตราขยายดังได้กล่าวแล้ว จึงสมควรได้มีการสอบการเทียบมาตรฐานพลังงานบ่อยครั้ง

การตอบสนองพลังงานรังสีแกมมาสองค่า

สำหรับกรณีรังสีแกมมามีพลังงาน 2 ค่า การกระจายค่าของสัญญาณจะเป็นพีคซึ่งเกิดจากผลบวกของแต่ละค่าพีค ในรูป 8 – 9 คือ $\gamma 1$ และ $\gamma 2$ โฟโตพีคของรังสีแกมมาที่มีพลังงานสูงกว่า ($\gamma 2$) ยังคงแยกเป็นพีคอยู่ ส่วนรังสีแกมมาพลังงานต่ำกว่า ($\gamma 1$) จะไม่มีส่วนมารบกวนใด ๆ อย่างไรก็ตาม $\gamma 1$ จะซ้อนอยู่บน



รูป 8-9 แสดงการกระจายค่าความสูงของสัญญาณซึ่งตอบสนองรังสีแกมมา 2 พลังงานแยกต่างกันคือ (1) และ (2) ในรูป C แสดงผลบวกของพลังงานแกมมาทั้งสองจากภาพ A และ B ตามลำดับ รังสีแกมมาพลังงานต่ำจะผลิตสัญญาณซึ่งความสูงไม่มากพอที่จะแทรกสอดในโฟโตพีคของรังสีแกมมาพลังงานสูง อย่างไรก็ตาม รังสีแกมมาพลังงานสูงจะผลิตสัญญาณซึ่งมีความสูงสมนัยกับสัญญาณโฟโตพีคของรังสีแกมมาพลังงานต่ำกว่า ดังนั้น ถ้าทำการนับวัดรังสีแกมมาพลังงานต่ำในเวลาเดียวกับรังสีพลังงานสูงจะต้องมีการแก้ค่านับวัด แต่ถ้าเป็นกรณีกลับกันก็ไม่ต้องมีค่าแก้ใด ๆ

แนวคอมป์ตันของ $\gamma 2$ ซึ่งมีลักษณะเป็นเพลโต (Plateau) การที่จะหลีกเลี่ยงไม่นับวัดค่าคอมป์ตันจาก $\gamma 2$ ใน PHS ของช่วงหน้าต่าง $\gamma 1$ นั้นกระทำได้ยาก อย่างไรก็ตามการที่สัญญาณคอมป์ตันมารบกวนสัญญาณของ $\gamma 1$ นั้นสามารถหาค่าได้โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีที่ให้พลังงานรังสีแกมมาเดี่ยวมีค่าใกล้เคียงกับ $\gamma 2$ มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ใช้ต้นกำเนิดรังสีดังกล่าวนี้เพื่อหาส่วนนับวัดของ $\gamma 2$ ในหน้าต่างของโฟโตพีค $\gamma 1$ โดยคำนวณเป็นเปอร์เซนต์ของโฟโตพีคของ $\gamma 2$

ดังนั้นทราบค่านับวัดในโฟโตพีคของ γ ในตัวอย่างที่ไม่ทราบค่า เนื่องจากเราสามารถทราบค่านับ

วัดคอมป์ตันซึ่งเกิดในโฟโตพีคของ $\gamma 1$

พีคทุติยภูมิ

นอกจากโฟโตพีคและคอมป์ตันเพลโตแล้ว บางกรณีอาจเกิดพีคเล็ก ๆ ในสเปคตรัม (spectrum) ของรังสีแกมมานั้นได้ กรณีดังกล่าวนี้ไม่นับรวมถึงการปรากฏมีรังสีแกมมาพลังงานอ่อนกว่าซึ่งถูกเปล่งออกมาจากนิวไคลด์รังสี ส่วนใหญ่แล้วรังสีดังกล่าวจะมีลักษณะสมบัติเด่นชัดและมีสาเหตุการเกิดดังจะอธิบายต่อไป

พีค K-เอสเคป

พีคนี้จะปรากฏเมื่อพลังงานของรังสีแกมมามีค่าระหว่าง 50-150 keV และจะพบในช่วงต่ำกว่าโฟโตพีคของรังสีแกมมาอยู่ 28 keV รังสีเอ็กซ์หรือแกมมา ในช่วง 50-150 keV นี้จะมีโอกาสชนกับอะตอมของไอโอดีน (เป็นส่วนหนึ่งของผลึก NaI(Tl),ผู้แปล) โดยปฏิกิริยามีลักษณะเป็นโฟโตอิเล็กทริคเอฟเฟคและเกิดขึ้นในระยะใกล้กับผิวหน้าของผลึกมาก (2 – 3 มม.) ดังนั้นเกิด K - เอ็กซเรย์ของไอโอดีนและเมื่อช่องว่างในวง K ของอะตอมไอโอดีนนั้นถูกเติมให้เต็มมีโอกาสจะหลุดหนีออกนอกผลึก โดยไม่ทิ้งหรือถ่ายทอดพลังงานไว้เลย

ดังนั้น ในกรณีนี้ พลังงานทั้งหมดที่รังสีแกมมาถ่ายทอดไว้จากการชนแบบโฟโตอิเล็กทริค จะไม่ใช่ค่าพลังงานทั้งหมดของรังสีแกมมาซึ่งกำหนดเป็น E_γ แต่มีค่าเป็น $E_\gamma - E_{k\ x\text{-}ray}$ สำหรับอะตอมไอโอดีนมีค่า K - เอ็กซเรย์ประมาณ 28 keV ดังนั้น พีคจากการหลบหายไปของโฟตอนดังกล่าวจะมีค่าต่ำกว่าโฟโตพีคของรังสีแกมมาอยู่ 28 keV

พีครวม

ถ้านิวไคลด์รังสีมีการเปล่งรังสีแกมมามากกว่า 1 พลังงาน บางกรณีอาจได้พีคที่มีค่าเป็นผลบวกของแต่ละพลังงานรังสีแกมมา ซึ่งตามความเป็นจริงแล้วนิวไคลด์รังสีไม่มีการเปล่งพลังงานที่เป็นผลบวกดังกล่าวเลย ชื่อของพีคดังกล่าวนี้ได้จากสาเหตุการเกิดของมัน ซึ่งได้แก่การเกิดพีคมีค่าพลังงานเป็นผลบวกของรังสีแกมมาที่มีพลังงานต่างกัน 2 ค่า ภายในผลึก การเกิดพลังงานค่ารวมกันนี้เป็นไปได้ เฉพาะกรณีที่รังสีแกมมา 2 ตัว ชนกับผลึกในเวลาเดียวกัน หรือเกือบเวลาเดียวกัน (ภายใน 0.25 μsec) ดังนั้น พีครวมจะเกิดมากในบรรดานิวไคลด์รังสี ซึ่งเปล่งรังสีแกมมาหลาย ๆ พลังงานภายในเวลาต่างกันน้อยกว่าหรือเท่ากับหนึ่ง μsec และหัววัดซินทิลเลชันชนิดหลุม (บทที่ 9) ตัวอย่างเช่น I-125 (เปล่ง K-x-ray 28 KeV โดย K-x-ray 28 KeV ตัวอื่น) และ In-111 (เปล่งรังสีแกมมา 173 และ 247 KeV) ถ้าใช้ผลึกโซเดียมไอโอไดด์แบบหลุมทำการนับวัด I-125 จะได้พีค 28 + 28 = 56 KeV ปรากฏเพิ่มอีกพีคหนึ่ง แม้ว่า I-125 จะไม่มีการเปล่งพลังงาน 56 KeV ดังกล่าวเลยก็ตาม ในทำนองเดียวกัน In-111 จะปรากฏพีครวมมีค่า 173 + 247 = 420 KeV ซึ่ง In-111 มิได้เปล่งรังสีแกมมาพลังงานนี้เลยก็ตาม แต่พีครวมนี้อาจไม่ได้เกิดจากขบวนการโฟโตอิเล็กทริคเท่านั้น อาจเกิดจากการชนกันแบบคอมป์ตันก็ได้

ดังนั้นสัญญาณที่เกิดจากการรวมค่าดังกล่าวอาจเรียกชื่อเป็น "สัญญาณไพล์อัพ" (pile up) มีค่าเป็นผลบวกของแต่ละพลังงานรังสีแกมมาที่ถ่ายทอดไว้ ที่ค่านับวัดสูง ๆ จะมีการเพิ่มสัญญา "ไพล์อัพ" มากขึ้น แม้ว่านิวไคลด์รังสีจะเปล่งรังสีแกมมาพลังงานเดียวก็ตาม

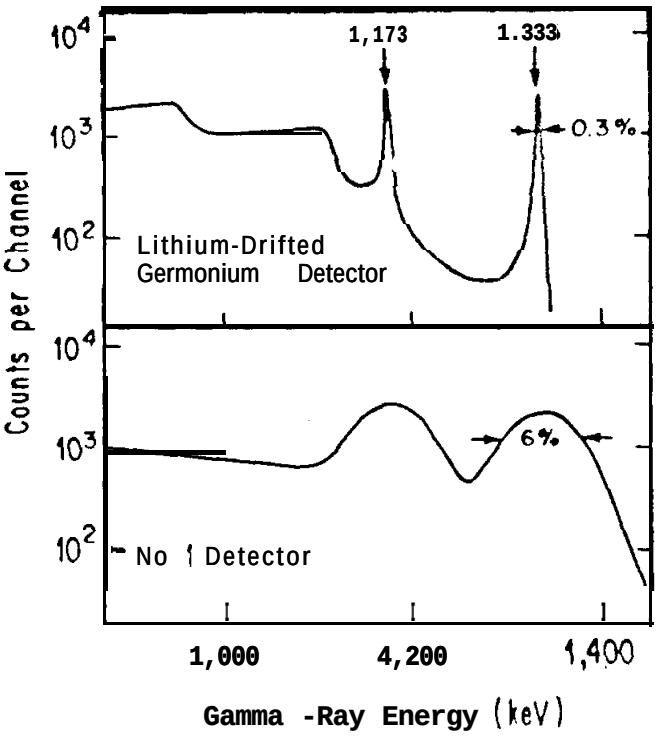
พีคจากการสะท้อนกลับและพีคเอ็กซเรย์ของตะกั่ว

พีคเหล่านี้เกิดจากสิ่งแวดล้อมหรือสิ่งที่อยู่รอบข้างของหัววัด NaI(Tl) เพื่อให้หัววัดปลอดจากแบคกราวด์ (background) โดยทั่วไปใช้ตะกั่วเป็นวัสดุกั้น ทุกด้านจะหนาเท่ากันหมดยกเว้นด้านหน้าของผลึก 1 ด้าน ถ้ารังสีแกมมาชนกับตะกั่วที่เป็นตัวกำบัง จะเกิดรังสีแกมมากระเจิงไปซึ่งก่อให้เกิด K-x-ray ประมาณ 80 KeV บรรดารังสีทุติยภูมิอาจเข้าสู่หัววัดได้ รังสีแกมมาที่กระเจิงจากวัสดุกั้นเฉพาะพวกที่อยู่ในทิศทางสะท้อนกลับเท่านั้นที่สามารถชนกับผลึกนั้นได้ พลังงานของรังสีสะท้อนกลับนั้นคำนวณจากสมการในหน้า 80 รังสีแกมมาที่เกิดจากการสะท้อนกลับนั้นมิใช่มีเพียงพลังงานเดี่ยว แต่กระจายค่าในพลังงานช่วงกว้าง ตามกฎถือว่าผลบวกของพลังงานพีคสะท้อนกลับ และพลังงานของคอมป์ตันเอดจ์ซึ่งมีค่าพลังงานค่าเดี่ยวจะเท่ากับพลังงานโฟโตพีค

หัววัดแบบสารกึ่งตัวนำ

สารกึ่งตัวนำที่ถูกใช้ประดิษฐ์เป็นหัววัดกัมมันตภาพรังสี ได้แก่ ผลึกเจอร์มาเนียม (germanium) และซิลิคอน (silicon) โดยมี ลิเธียม (lithium) เป็นสารเจือโดยการโด้ป นั้นเรียกเป็น Ge(Li) และ Si(Li) ใช้ในการนับวัดรังสีเอ็กซ์และแกมมาได้ดีซึ่งหลักการแตกตัวในของแข็งเช่นเดียวกับในแกส

คุณสมบัติที่ดีกว่าหัววัดโซเดียมไอโอไดด์ คือมีการแยกพลังงานดี หัววัด Ge(Li) มี ค่าการแยกพลังงานของรังสีแกมมาจาก Cs-137 เป็น 1% ส่วนโซเดียมไอโอไดด์ 10% (หมายเหตุ การแยกพลังงาน หมายถึงความสามารถของหัววัดในการแยกวัดพลังงานที่แตกต่างกันได้) ขีดจำกัด Ge(Li) สำหรับงานเวชศาสตร์นิวเคลียร์ คือ มีความไว (sensivity) ต่ำ (เมื่อเปรียบเทียบกับโซเดียมไอโอไดด์) การบำรุงรักษาต้องสิ้นเปลือง เนื่องจากต้องเก็บรักษา ณ อุณหภูมิต่ำ (ที่ 77° K ส่วนอุณหภูมิห้องเป็น 300° K) นอกจากนี้ ขนาดของผลึกยังไม่ใหญ่เท่ากับความต้องการของงานทางเวชศาสตร์นิวเคลียร์ในรูป 8 –10 แสดงสเปคตรัมของ Co-60 ซึ่งใช้ Ge(Li) เป็นหัววัดเปรียบเทียบกับรูปสเปคตรัมที่ใช้จาก NaI(Tl)



รูป 8-10 สเปคตรัมรังสีแกมมาของ ^{60}Co (เปล่งรังสีแกมมาพลังงาน 1173 KeV และ 1333 KeV) ซึ่งวัดด้วยหัววัดสารกึ่งตัวนำ Ge(Li) และหัววัด NaI(Tl) ตามลำดับ สำหรับหัววัด Ge(Li) โฟโตพีคของพลังงานทั้งสองจะแคบและแยกกันอย่างชัดแจ้ง แต่หัววัด NaI(Tl) จะเห็นโฟโตพีคทั้งสองดังกล่าวมีลักษณะกว้างและเกือบไม่แยกจากกัน เรโซลูชันพลังงานรังสีแกมมา 1333 KeV คือ 0.3% สำหรับหัววัด Ge(Li) และ 6% สำหรับหัววัด NaI(Tl) ถ้ามีรังสีแกมมาพลังงานที่อยู่ระหว่างพลังงานทั้งสองนั้นคือ 1250 KeV เกิดปรากฏพร้อมกับการเปล่งรังสีแกมมาของ ^{60}Co แล้ว หัววัด NaI(Tl) ไม่สามารถแยกพลังงานแกมมาทั้งสามได้ แต่หัววัด Ge(Li) จะสามารถแยกได้ชัดเจน