

บทที่ 9 การวัดรังสีแบบ อิน-วิโทร

ในการตรวจวินิจฉัยโรค โดยเทคนิคเวชศาสตร์นิวเคลียร์ เช่น Schilling test การหาค่า blood volume การศึกษาการดูดกลืนโปรตีนและไขมัน การศึกษา ferrokinetics และเรดิโออิมมูโนแอสเสย์ (radioimmunoassays) ต่าง ๆ เป็นต้น ล้วนจำเป็นต้องหาปริมาณกัมมันตภาพรังสี ในตัวอย่างที่ต้องการศึกษา เพื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน การทดสอบดังกล่าวอาจมีบ้างบางกรณี (เช่น Schilling test) ที่คนไข้ได้รับสารรังสีแต่ส่วนใหญ่ เช่น เรดิโออิมมูโนแอสเสย์ต่าง ๆ นั้นคนไข้ไม่ได้รับสารรังสีเลย อย่างไรก็ตาม ทั้งสองกรณีดังกล่าว มีจุดสำคัญเด่นเช่นเดียวกันได้แก่ การตัดสินใจเลือกใช้หัววัดรังสี และการจัดจีโอเมตรี (geometry) ในการวัดตัวอย่างกัมมันต-รังสี ซึ่งป้องกันได้จากประสิทธิภาพพลัฟ (ความไว) ของการจัดสำหรับแต่ละกรณี การที่ประสิทธิภาพพลัฟเพิ่มค่าขึ้น จะช่วยในการลดโดสรังสีให้คนไข้หรือลดเวลาที่ใช้นับวัดโดยมี standard deviation error ตามกำหนด

บทนี้จะอธิบายถึงเทคนิคต่าง ๆ ที่ใช้ในการตรวจหาปริมาณกัมมันตภาพรังสีแบบ อิน-วิโทร (in-vitro) ของนิวไคลด์รังสีที่เปล่งทั้งรังสีเบตา (β -ray) และรังสีแกมมา (γ -ray)

ค่าประสิทธิภาพพลัฟ (E) :

ในการวัดกัมมันตภาพรังสีนั้นค่าประสิทธิภาพพลัฟขึ้นกับประสิทธิภาพจีโอเมตรีในการจัดระบบเชิงฟิสิกส์ (E_g) และประสิทธิภาพของหัววัดเอง (E_i) หรือเรียกทับศัพท์ว่า intrinsic efficiency เขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$E = E_g \times E_i$$

intrinsic efficiency: เป็นประสิทธิภาพภายในของหัววัด (E_i) (ดูบทที่ 8)

ถูกนิยามเป็น :

$$E_i = \frac{\text{ปริมาณรังสีที่หัวบันทึกได้}}{\text{ปริมาณรังสีที่ตกกระทบปริมาตรที่มีความไวของหัววัด}}$$

องค์ประกอบที่มีผลต่อค่า E_i ได้แก่สัมประสิทธิ์ของการลดทอนพลังงานเชิงเส้น คือ μ (linear) ของสารหรือวัสดุซึ่งใช้สร้างหัววัด

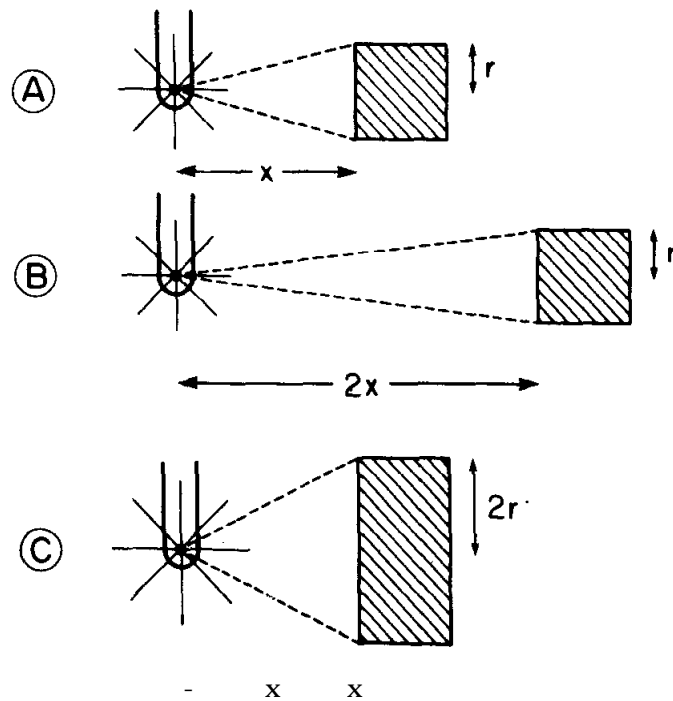
สำหรับเครื่องนับวัดแบบซินทิลเลชัน ถ้าเจาะจงเฉพาะโฟลด์พีคเพียงอย่างเดียว จะตีความหมาย intrinsic efficiency เป็น photopeak efficiency

ประสิทธิภาพจีโอเมตริย์ :

(ค่าของ E_g นั้นเกี่ยวข้องกับการจัดลักษณะเรขาคณิตของระบบ ได้แก่ ตัวอย่างกับหัววัด เป็นต้น, ผู้แปล) รูป 9-1A แสดงตัวอย่างซึ่งมีสารประกอบกับมันตรังสีปริมาณน้อย ๆ อยู่ห่างจากหัววัดเป็นระยะ x โดยหัววัดมีรัศมีภาคตัดขวางเป็น r กรณีนี้ไม่มีการบังกบทิศทางของรังสี ซึ่งมันจะกระจายออกได้ทุกทิศทุกทางในโอกาสเท่ากัน ดังนั้น จะมีเพียงบางส่วนของรังสี (α, β, γ) เท่านั้น ที่วิ่งตรงเข้าสู่หัววัด geometric efficiency หรือ E_g จึงถูกนิยามเป็นอัตราส่วนของปริมาณรังสีตกกระทบบนหัววัด ต่อปริมาณรังสีทั้งหมดที่สารตัวอย่างเปล่งออกมา

$$E_g = \frac{\text{ปริมาณรังสีตกกระทบหัววัด}}{\text{ปริมาณรังสีทั้งหมดที่สารตัวอย่างเปล่งออกมา}}$$

สำหรับกรณีรูป 9-1A นั้น E_g ขึ้นกับ 2 องค์ประกอบดังนี้



รูป 9-1 การแปรห ของประสิทธิภาพจีโอเมตริกของหัววัดรังสีหัววัดเดี่ยว ต้นกำเนิดรังสีทำการเปล่งรังสีออกทุกทิศทุกทาง เฉพาะรังสีที่มีแนวทางเดินอยู่ในขอบเขตเส้นประเท่านั้นที่จะเข้าสู่หัววัดได้ ประสิทธิภาพจีโอเมตริกหมายถึงการวัดจำนวนรังสีแกมมาซึ่งเข้าสู่หัววัดขึ้นกับระยะทาง X ซึ่งเป็นระยะระหว่างต้นกำเนิดและหัววัดรังสี และรัศมีของหัววัด ตามลักษณะ $1/x^2$ และ r^2 ดังนั้น ประสิทธิภาพจีโอเมตริกในภาพ (B) จะมีค่าเป็น 1/4 ของภาพ (A) และในภาพ (C) จะมีค่าประสิทธิภาพจีโอเมตริกเป็น 4 เท่าของภาพ (A) อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพจีโอเมตริกดังแสดงในภาพนั้นจะมีค่าไม่เกิน 50%

(1) ระยะทางระหว่างต้นกำเนิดกัมมันตภาพรังสีและหัววัด ในรูปคือระยะ x

(2) รัศมี r ซึ่งเป็นพื้นที่หน้าตัดของหัววัด

ถ้าระยะ x มีค่ามากกว่ารัศมี r มาก ๆ ($x \gg r$) ดังนั้น E_g จะแปรตาม $1/x^2$ และ r^2 ตามลำดับ ตัวอย่างเช่น เพิ่มระยะ x เป็น 2 เท่า E_g จะมีค่าลดลง 4 เท่า (ตามรูป 9-1B) แต่ถ้ารัศมี r ของหัววัดเพิ่มเป็น 2 เท่า E_g จะเพิ่มเป็น 4 เท่า (รูป 9-1C)

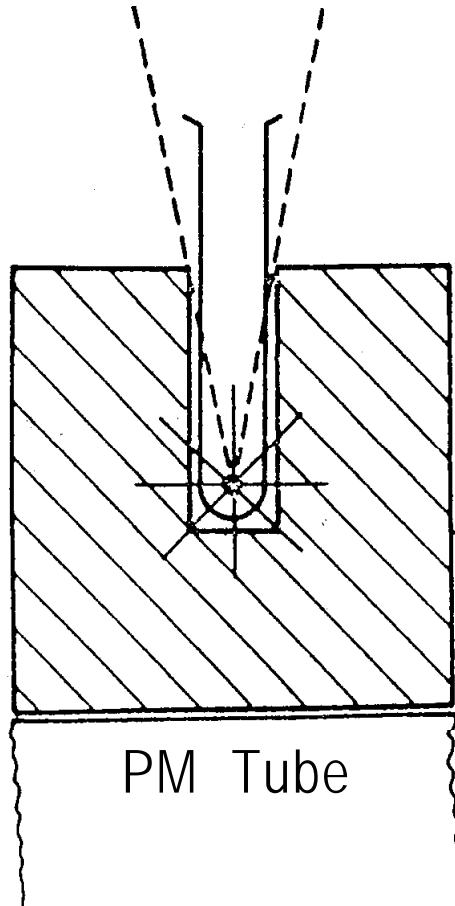
ในกรณีสารตัวอย่างอยู่ชิดกับหัววัด ซึ่งหมายความว่าความถึงระยะ x น้อยกว่า r มาก ๆ ($x \ll r$) ความสัมพันธ์ที่ว่า $E_g \propto 1/x^2$ ใช้ไม่ได้ geometric efficiency สำหรับค่า $x = 0$ (คือตัวอย่างอยู่ชิดกับหัววัด) มีค่าเป็น $E_g = 50\%$ เหตุผลคือจะมีรังสีครึ่งหนึ่งหลุดออกจากหัววัดได้

แต่ถ้าต้องการได้ค่าดังกล่าวมากกว่า 50% ทำโดยใช้หัววัดหลาย ๆ หัว หรืออาจติดตั้งไว้ล้อมรอบตัวอย่าง กรณีหลังคือใช้หัววัดโซเดียมไอโอไดด์แบบหลุม (Well-type NaI(Tl) หรือ Well Counter) หรือ ลิวิดซินทิลเลชัน (liquid scintillation) ดังจะอธิบายรายละเอียดต่อไป

หัววัดซินทิลเลชันแบบหลุม :

ในแง่ของการใช้งานและส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์แล้ว หัววัดซินทิลเลชันแบบหลุมยังคงเหมือนหัววัดซินทิลเลชัน NaI(Tl) ดังได้อธิบายในบทที่ 8 ทุกประการ แต่มีลักษณะเป็นหลุมหรือป่อเล็ก ๆ บางครั้งเรียกทับศัพท์เป็นหัววัดแบบ “well type” หรือ “well counter” ซึ่งหลุมทรงกระบอกเล็ก ๆ จะอยู่ระหว่างกลางผลึกโซเดียมไอโอไดด์นั้นเพื่อเป็นที่วางตัวอย่างกัมมันตรังสีได้ชิดกับศูนย์กลางของผลึกมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ดังแสดงในรูป 9-2 ลักษณะเช่นนี้ จะมีเพียงบางส่วนของรังสีสูญเสียไปซึ่งเล็กน้อย ($< 5\%$) หรือกล่าวได้ว่า E_g ประมาณ 95% ค่า intrinsic efficiency ของหัววัดขึ้นกับขนาดของผลึก และจะมีค่าสูงตามขนาดที่ใหญ่ขึ้นของผลึก ขนาดมาตรฐานของหัววัด ซินทิลเลชันแบบหลุมคือ เส้นผ่าศูนย์กลาง 1.75 นิ้ว สูง 2 นิ้ว โดยรูมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.75 นิ้ว และลึก 1.5 นิ้ว แต่ถ้ารังสีแกมมาที่มีพลังงานมากกว่า 500 keV มักใช้หัววัดขนาด 3" x 3" มากกว่า ตาราง 9-1 ได้เสนอค่า intrinsic efficiency ของหัววัดแบบหลุมขนาด 3" x 3" เมื่อรังสีแกมมาที่มีพลังงานแปรไป เปรียบเทียบกับขนาดมาตรฐานดังกล่าว ข้อสังเกตคือในคอลัมน์ที่ 2 และ 3 เมื่อพลังงานแกมมาสูง ๆ จะได้ค่า intrinsic efficiency จากหัววัดขนาด 3" x 3" สูงมากกว่าขนาดมาตรฐานประมาณ 1.5 เท่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีกัมมันตภาพรังสีใด ๆ นั้น มักสนใจเฉพาะค่านับวัดของโฟโตพีค (ไม่รวมค่านับวัดจากคอมป์ตันเอฟเฟกต์) ซึ่งหัววัดขนาด 3" x 3" จะได้เปรียบกว่าสำหรับกรณีพลังงานแกมมาสูง ๆ (ดูคอลัมน์ 4 และ 5 ในตาราง 9-1)

ค่าของประสิทธิภาพลัพธ์สามารถคำนวณได้โดยวิธีง่าย ๆ (คือผลคูณของ intrinsic efficiency และ geometric efficiency, ผู้แปล) ตัวอย่างเช่น รังสีแกมมาพลังงาน 140 keV จากตาราง (9-1) สำหรับหัววัดแบบหลุมขนาดมาตรฐาน จะมีค่า intrinsic efficiency เป็น 0.94 ส่วน geometric efficiency ได้จากการคาดคะเนว่า



รูป ๑-๒ ประสิทธิภาพจีโอมेटริกของหัววัดแบบหลุมรังสีที่สูญเสียไปมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้น คือในแนวเส้นประ การจัดลักษณะนี้จะมีค่าประสิทธิภาพจีโอมेटริกประมาณ 95%

สารตัวอย่างปริมาตรน้อย ๆ (< 1 ml) มีค่า geometric efficiency เป็น 0.95 นั่นคือ ประสิทธิภาพพัลส์มีค่าเป็น $0.94 \times 0.95 = 0.89$ (หรือ 89%) (สำหรับประสิทธิภาพ ณ โฟโตพีคต้องอ่านค่าจาก ตาราง (๑-1) ในคอลัมน์ที่ 4 แถวที่ 2 ซึ่งมีค่าเป็น 0.88, ผู้แปล) ค่าประสิทธิภาพพัลส์ของโฟโตพีค คือ $0.95 \times 0.88 = 0.84$ (หรือ 84%) การนำค่าของประสิทธิภาพพัลส์ไปใช้ประโยชน์นั้น ได้แก่การคำนวณหาอัตรานับวัดรังสี ตัวอย่างเช่น ^{99m}Tc 1 μCi จะเปล่งรังสีแกมมาทั้งหมดเป็นปริมาณ $3.7 \times 10^4 \times 0.88$ ตัวต่อวินาที ซึ่งแต่ละแกมมามีพลังงาน 140 keV ค่า 0.88 เป็นจำนวนของรังสีแกมมา 140 keV ต่อการสลายตัวของ ^{99m}Tc ซึ่งถ้าย้อนกลับไปพิจารณาบทที่ ๒ (ภายใต้หัวข้อ "Decay Scheme") ค่าดังกล่าวคือ n_γ ดังนั้นหัววัดแบบหลุมซึ่งมีขนาดมาตรฐานจะสามารถสร้างอัตรานับวัด ณ โฟโตพีคเป็น $(3.7 \times 10^4 \times 0.88) \times (0.84)$ ซึ่ง 0.84 เป็นค่าประสิทธิภาพ ณ โฟโตพีค กล่าวคือ

$$\begin{aligned}
 \text{อัตรานับวัด ณ โฟโตพีค} &= 3.7 \times 10^4 \times 0.88 \times 0.84 \text{ counts/sec} \\
 &= 2.73 \times 10^4 \text{ counts/sec} \\
 &= 1.6 \times 10^6 \text{ counts/min}
 \end{aligned}$$

ตาราง 9-1 ประสิทธิภาพของหัววัดแบบหลุม

Energy keV	Intrinsic Efficiency		Photopeak Efficiency	
	Standard	Well	Standard	3" x 3" Well
80	97*	98*	97'	98*
140	94	98	88	96
280	61	80	49	70
320	-51	73	36	59
360	48	68	31	50
410	43	66	24	45
510	38	59	17	36
660	32	51	12	25
880	29	46	8	17
1110	20	45	7	16
1170	25	42	6	15
1270	24	40	5	14

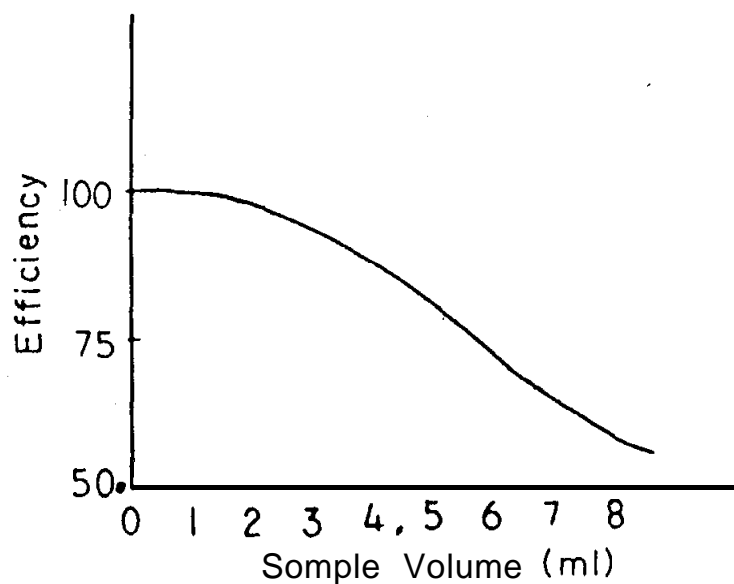
* การลดทอนพลังงานในตัวอย่างและอุปกรณ์ยึดจะลดปริมาณไปจากนี้เล็กน้อย

ในการคำนวณดังกล่าวแล้วนั้น ไม่รวมผลจากการดูดกลืน ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ในหลายตัวกลาง

ดังนี้

- (1) กล่องอลูมิเนียม ซึ่งเป็นภาชนะห่อหุ้มผลึก
- (2) สารละลาย
- (3) ฉนวนของหลอดทดลอง ซึ่งเป็นภาชนะบรรจุตัวอย่าง

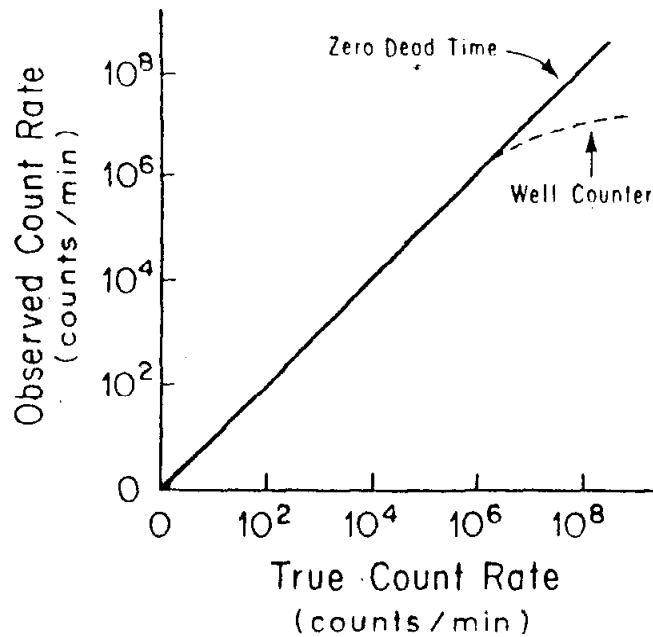
สรุปได้ว่า ในทางปฏิบัติ จะได้อัตรานับวัดน้อยกว่าค่าจากการคำนวณเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม ขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัด ^{99m}Tc ของหัววัดแบบหลุมที่มีค่าเป็น 16 counts/min สำหรับกัมมันตภาพรังสี 10 picocuries



รูป 9-3 ประสิทธิภาพพัลส์หรือจีโอมेटริกของหัววัดแบบหลุมพล็อตเป็นฟังก์ชันของปริมาตรสารตัวอย่าง (โดยมีปริมาณกัมมันตภาพรังสีคงที่)

(10^{-5} μCi) โดยห้วงวัดมีประสิทธิภาพพัลส์เป็น 1.6×10^6 counts/min ซึ่งเห็นได้ชัดว่าห้วงวัดมีความไวสูง นอกจากนี้ขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัดยังขึ้นกับแบคกราวนด์ของห้อง และช่วงเวลาที่ทำการนับวัดอีกด้วย

รายละเอียดทั้งหมดที่ได้เสนอมานี้แล้วข้างต้นนั้น เป็นกรณีตัวอย่างที่มีปริมาตรเล็ก ๆ (< 1 ml) สิ่งที่น่าสนใจคือ ปริมาตรของตัวอย่างจะส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพพัลส์ของห้วงวัดอย่างไร? จากการทดลองได้ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพพัลส์กับปริมาตรของตัวอย่างดังแสดงในรูป 9-3 (ซึ่งได้รักษาให้แอกติวิตีรังสีคงค่าเดิมโดยตลอด) กล่าวได้ว่าการเพิ่มปริมาตรตัวอย่างทุก ๆ 1 มิลลิลิตร จะเป็นการลดประสิทธิภาพจีโอเมตริค (geometric efficiency) และถ้าคงค่าของประสิทธิภาพจีโอเมตริค จะเป็นการลดค่าประสิทธิภาพพัลส์ ซึ่งลักษณะการลดค่าจะเป็นเช่นเดียวกับ ประสิทธิภาพจีโอเมตริค (สืบเนื่องจากความสัมพันธ์ในสมการ (9-1) ตัวอย่าง 4 มล. จะมีค่าประสิทธิภาพพัลส์เป็น 88% ของตัวอย่าง 1 มล. ดังนั้น ในทางปฏิบัติจึงนิยมใช้ตัวอย่าง ปริมาตรน้อยกว่า 2 มล.



รูปที่ 9-4 ผลค่าของเดดไทม์ของห้วงวัดซินทิลเลชัน

พารามิเตอร์อื่นที่สำคัญต่อห้วงวัดแบบหลุมคือ ค่า “dead time” ซึ่งจัดเป็นขีดจำกัดสูงสุดของปริมาณกัมมันตภาพรังสีที่สามารถทำการนับวัดได้ ทั้งนี้ถือว่าการสูญเสียค่านับวัด (ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้) มีค่าน้อยกว่า 5% รูป 9-4 แสดงความสัมพันธ์ของอัตรานับวัดแท้จริงกับอัตราที่ตรวจวัดได้จากห้วงวัดแบบหลุมในทางปฏิบัติ ใช้ค่านับวัดต่ำกว่า 10^6 counts/min. เพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียอัตรานับวัดเนื่องจาก “dead time” ซึ่งสมนัยกับปริมาณนิวไคลด์รังสีที่ใช้เป็นส่วนมากในเวชศาสตร์นิวเคลียร์ เช่น ^{131}I หรือ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 1 μCi ดังนั้นสรุปได้ว่า ถ้าจะทำการนับวัดกัมมันตภาพรังสีสูงกว่า 1 μCi จะต้องคำนึงถึงอัตรานับวัดที่สูญเสียไปเนื่องจากค่า “dead time” ซึ่งวิธีการง่าย ๆ ที่จะแก้การสูญเสียดังกล่าวคือทำการเจือจางสารตัวอย่างลง หรือใช้สารตัวอย่าง

ปริมาณเล็กน้อย ถ้าจะแก้ที่ลักษณะการจัด geometry อาจทำการนับวัดภายนอกหลุม (วิธีหลังนี้ไม่นิยมนัก, ผู้แปล)

เครื่องนับวัดลิขิตซินทิลเลชัน :

เนื่องจากในร่างกายมนุษย์ประกอบด้วยธาตุไฮโดรเจน คาร์บอน ไนโตรเจน ออกซิเจน ฟอสฟอรัส และ กำมะถัน รวมกันแล้วมากกว่า 97% ของน้ำหนักทั้งหมดของร่างกายเรา จึงมีการสนใจใช้ไอโซโทปรังสีของธาตุเหล่านั้นทั้งในกรณีงานวิจัยและคลินิก นอกจากนี้ ไอโซโทปรังสีเหล่านั้นยังมีขายในท้องตลาด ค่าครึ่งชีวิตยาวนานเหมาะสมสำหรับงานประจำ แต่ที่มีใช้อย่างกว้างขวางในปัจจุบันได้แก่ ^3H ^{14}C ^{32}P และ ^{35}S นิวไคลด์รังสีดังกล่าวเปล่งเฉพาะรังสีเบตา (β) เท่านั้น ไม่มีรังสีเอ็กซ์หรือแกมมาในการตรวจวัดอนุภาคมีประจุ (ได้แก่อนุภาคเบตา คอนเวิรชันอิเล็กตรอน (conversion electron) หรืออนุภาคอัลฟา) นั้นยุ่งยากซับซ้อนกว่าการตรวจวัดรังสีเอ็กซ์หรือแกมมา เนื่องจากอนุภาคมีประจุจะมีค่าพิสัยสั้นในตัวกลางของแข็งและของเหลว จึงอาจมีการสูญเสียอัตรานับวัดขึ้นได้เนื่องจากเกิดการดูดกลืนภายในสารตัวอย่างเองและภายในผนังหรือหน้าต่างของหัววัดก่อนที่จะทำการนับวัดได้ เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวนี้ จำเป็นต้องใช้ตัวอย่างที่มีลักษณะบางร่วมกับหัววัดที่มีหน้าต่างบาง (thin window) และได้เกิดแนวความคิดที่จะผสมหัววัดให้อยู่ภายในปริมาตรเดียวกับวัตถุ ซึ่งในทางปฏิบัติคือ เครื่องวัดลิขิตซินทิลเลชันนั่นเอง จุดประสงค์หลักคือเพื่อนับวัดอนุภาคเบตา และอนุภาคมีประจุอื่น ๆ ที่มีความแรงกัมมันตภาพรังสีไม่มากนัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากต้นกำเนิด ^3H และ ^{14}C การใช้ลิขิตซินทิลเลชันง่ายและสะดวก ดังนั้นจึงเป็นที่นิยมแพร่หลายทั่วไป

ส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่องมือ

เครื่องมือนี้แยกส่วนประกอบที่สำคัญได้เป็น 2 ส่วนดังนี้

(1) ขวดสารตัวอย่างที่ต้องการนับวัด

(2) หลอดไฟโตมัลติฟไลเออร์ รวมทั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ร่วมกัน (พิจารณารูป 8-5)

และแสดงแผนผังในรูป 9-5 รายละเอียดของหลอด PM ได้เสนอแล้วในบทที่ 8 ดังนั้น จึงพิจารณาเฉพาะส่วนที่ (1) เท่านั้น ขวด (vial) ที่ใช้บรรจุสารตัวอย่างซึ่งเป็นสารกัมมันตรังสี นอกจากนี้ ยังต้องประกอบด้วยซินทิลเลเตอร์ ซึ่งทำหน้าที่เปล่งแสง ทั้งสองส่วนดังกล่าวจะต้องละลายเป็นเนื้อเดียวกับตัวทำละลาย ซึ่งเป็นคล้ายตัวกลางร่วม เพื่อประกอบเป็นสารละลายที่ปราศจากสี โมเลกุลของตัวเปล่งแสงจะทำหน้าที่เป็นหัววัด ดังนั้นภายในเนื้อของสารละลายดังกล่าวจะต้องมีการผสมผสานเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งนำไปสู่ข้อได้เปรียบ 2 ประการ ดังนี้

(1) อดอมรังสีของสารตัวอย่างย่อมถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของตัวเปล่งแสง หรือซินทิลเลเตอร์ จึงกล่าวได้ว่า geometric efficiency มีค่าใกล้เคียง 100%

(2) การสูญเสียพลังงานเบตา จะมีโอกาสเกิดได้น้อยมาก เนื่องจากสารที่อาจขัดขวางการเดินทาง

