บทที่ 2

กลไกของหัววัดกัมมันตรังสี

2.1 บทนำ

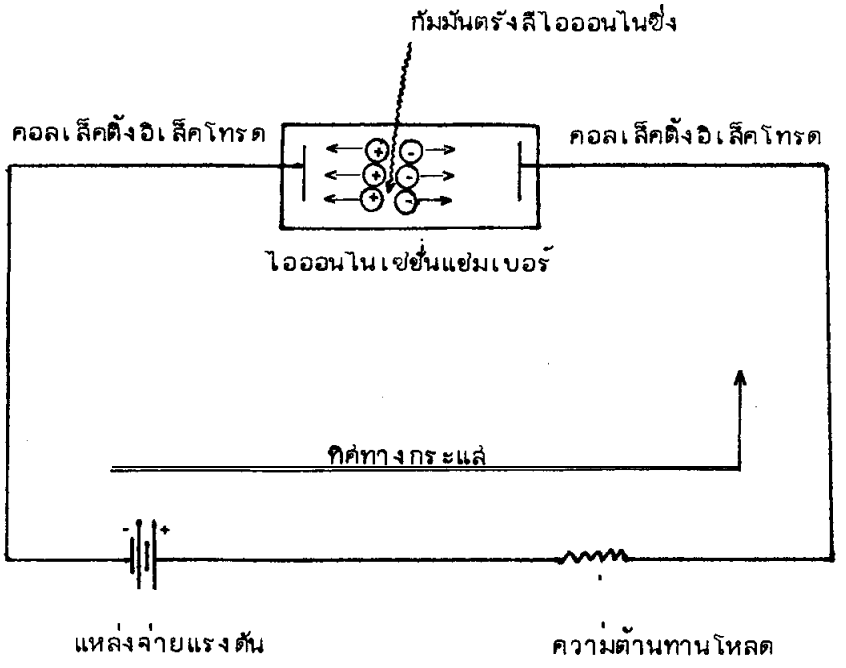
หัววัดกัมมันตรังสีเป็นส่วนสำคัญของระบบนับวัดกัมมันตรังสี (ทั้ง *in vivo* และ *in vitro*) การศึกษาเพื่อทำความเข้าใจกับกลไกของหัววัดกัมมันตรังสีนับเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง ในหัวข้อต่อไปนี้จะได้กล่าวถึงรายละเอียดของกลไกของหัววัดกัมมันตรังสีชนิดต่างๆ ซึ่งแยกเป็นหัววัดที่เติมด้วยแก๊ส *(Gas-filled detector)* หัววัดแบบสารกึ่งตัวนำ และหัววัดแบบซินทิลเลชั่น *(scintillation detector)* โดยที่หัววัดแบบเติมด้วยแก๊สยังได้แยกออกเป็นหัววัดไอออนไนเซชั่นแชมเบอร์ *(ionization chamber)* หัววัดแบบพรอพพอร์ชันนัล *(proportional counter)* และหัววัดแบบไกเกอร์-มุลเล่อร์ *(Geiger-Muller counter)* ซึ่งเป็นพื้นฐานในการศึกษาบทที่ 3 ต่อไป

2.2 หัววัดที่บรรจุด้วยแก๊ส (Gas-filled detectors)

2.2.1 ไอออนไนเซชั่นแชมเบอร์ *(ionization chamber)*

อุปกรณ์ใดๆที่ใช้วัดปริมาณกัมมันตรังสี มักจะวัดสัญญาณไฟฟ้าที่เกิดจากสารรังสีที่ทำปฏิกริยากับสารที่บรรจุอยู่ในหัววัดสัญญาณ เครื่องมือที่ใช้หลักการดังกล่าวง่ายที่สุดคือไอออนไนเซชั่นแชมเบอร์ซึ่งวัดปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรภายนอกเมื่อเกิดการแตกตัวออกเป็นไอออนหรือเรียกว่าเกิดอิเล็คตรอนอิสระขึ้นในแก๊สที่ใช้บรรจุอยู่ในปริมาตรนั้น (ดูรูปที่ 2.1) ทั้งนี้ต้องอาศัยการป้อนด้วยแรงดันไฟฟ้าขนาดสูง *(high voltage)* ที่พอเหมาะ กล่าวคืออิเล็คตรอนอิสระที่

เกิดขึ้นจะถูกจับเก็บไว้โดยไม่มีการสูญเสียเนื่องจากการกลับคืนไปรวมตัวใหม่*(recombination)* เพื่อจะให้เกิดอะตอมที่มีสภาวะปกติ และในทางตรงข้ามคือไม่มีการเพิ่มจำนวนทวีคูณของอิเล็คตรอนอันเกิดจากการแตกตัวทุติยภูมิซึ่งเป็นผลมาจากขบวนการจับเก็บอิเล็คตรอน จึงกล่าวได้ว่ากระแสที่ไหลในแอมเบอร์และค่าแรงดันที่ป้อนเข้าไปเป็นดัชนีของฟลักซ์รังสีที่เคลื่อนผ่านแอมเบอร์



รูป 2.1 แผนผังอย่างง่ายของไอออนไนเซชั่นแอมเบอร์ กัมมันตรังสีผ่านเข้าในหัววัดจะทำให้อะตอมหรือโมเลกุลของแก๊สแตกตัวภายในหัววัด อิเล็คตรอนอิสระถูกจับเก็บโดยอิเล็คโทรดบวก จึงเกิดกระแสในวงจร สัญญาณออกคือแรงดันตกคร่อมความต้านทานโหลดเมื่อมีกระแสไหลในวงจร

แต่การวัดฟลักซ์รังสีด้วยไอออนไนเซชั่นแอมเบอร์ก็มีข้อจำกัดเนื่องจากต้องอาศัยต้นกำเนิดรังสีที่มีความเข้มข้นรังสีพอเหมาะเพื่อจะทำให้เกิดกระแสออกที่สามารถบันทึกค่าได้เนื่อง-

จากกระแสดังกล่าวมีค่าน้อยมาก จึงดูเสมือนว่าหัววัดรังสีแบบนี้ไม่มีความไวในการวัดปริมาณรังสี นอกเสียจากว่าต้นกำเนิดรังสีจะมีความเข้มข้นรังสีมาก

2.2.2 หัววัดพรอพพอร์ชันนัล *(proportional counter)*

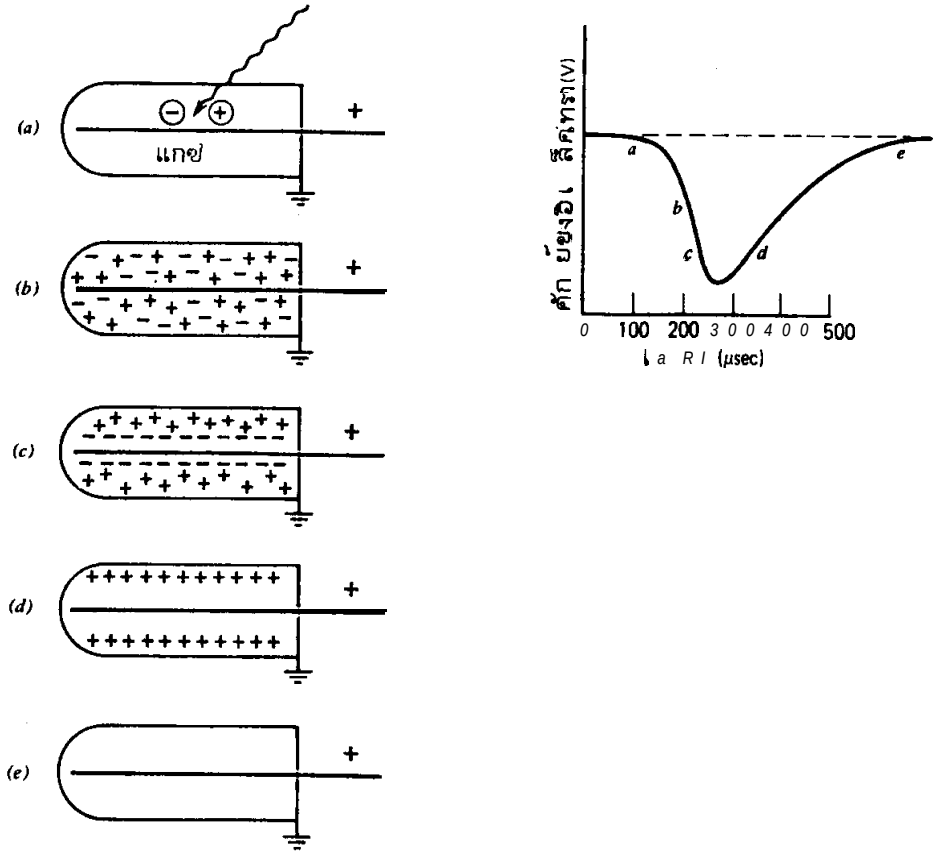
หัววัดพรอพพอร์ชันนัลก็จัดอยู่ในประเภทหัววัดที่บรรจุด้วยแกซแต่ต่างจากไอออนไนเซชั่นแชมเบอร์ตรงที่สามารถทำงานได้ในภาวะที่มีสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าสูงกว่ามาก (ประมาณ 300-750 โวลต์) ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากในขบวนการจับเก็บนั้นอิเล็คตรอนถูกเร่งจนทำให้เกิดพลังงานมากพอจะทำให้อะตอมอื่นที่มันวิ่งไปชนเกิดการแตกตัว การแตกตัวทุติยภูมิทำให้เกิดอิเล็คตรอนที่จะเป็นตัวทำให้เกิดการแตกตัวต่อไปเป็นลูกโซ่ ดังนั้น กระแสที่ได้จากการแตกตัวจึงมีค่าเพิ่มสูงไปจากเดิมมาก ทำให้ง่ายต่อการบันทึกวัดปริมาณรังสี นอกจากนี้ ความสูงของสัญญาณแรงดันไฟฟ้ายังเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณแตกตัวเริ่มแรกซึ่งเกิดขึ้นในแชมเบอร์ ซึ่งกล่าวได้ว่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานที่สูญเสียไปโดยการแผ่รังสีนั่นเอง นี่คือที่มาของการเรียกหัววัดรังสีแบบนี้ว่า "พรอพพอร์ชันนัล เคาน์เตอร์" นั่นเอง

เครื่องมือชนิดนี้เหมาะในการวัดรังสีเอ็กซ์และรังสีแกมม่าที่มีพลังงานต่ำ *(5 - 100 keV)* ปัจจุบันไม่นิยมใช้ในเชิงค่าสตรัคเคลียร์

2.2.3 หัววัดไกเกอร์มุลเล่อร์ *(Geiger-Muller counter)*

โดยทั่วไปมักเรียก "จี-เอ็ม เคาน์เตอร์" *(G-M Counter)* ทำงานได้ในภาวะที่สนามไฟฟ้ามีขนาดสูง โดยใช้แรงดันไฟฟ้าที่เป็นตัวเร่งมีค่าสูง (ประมาณ 800 - 1500 โวลต์) และใช้เส้นลวดขนาดเล็กเป็นขั้วไฟฟ้า กระแสที่มีได้เกิดจากการแตกตัวในหัววัดจะมีค่าต่ำมาก เนื่องจากมีความดันอากาศต่ำมาก (ประมาณ 1/75 บรรยากาศ)

เมื่อมีอนุภาคหรือโฟตอนวิ่งเข้าไปในหัววัด จะทำให้เกิดการแตกตัวโดยมีขั้นตอนของขบวนการเช่นเดียวกับ "พรอพพอร์ชันนัล เคาน์เตอร์" แต่การทวีคูณของอิเล็คตรอนมีค่ามาก



รูป 2.2 *(a)* หัววัด *GM* ประกอบด้วยแกซ่ซึ่งถูกทำให้แตกตัวโดยรังสีแกมม่า

(b) อิเล็คโทรดศูนย์กลางซึ่งมีศักย์บวกสูง (เช่น 1000 *v*) ถูกห่อหุ้มโดยอิเล็คตรอนซึ่งจะได้รับพลังงานเพิ่มในการทำให้แกซ่แตกตัวจนกระทั่งทั้งปริมาตรประกอบไปด้วยคู่ไอออน

(c) เป็นช่วงอิเล็คตรอนถูกจับโดยเร็ว แรงดันของอิเล็คโทรดศูนย์กลางลดลงดังแสดงในกราฟ

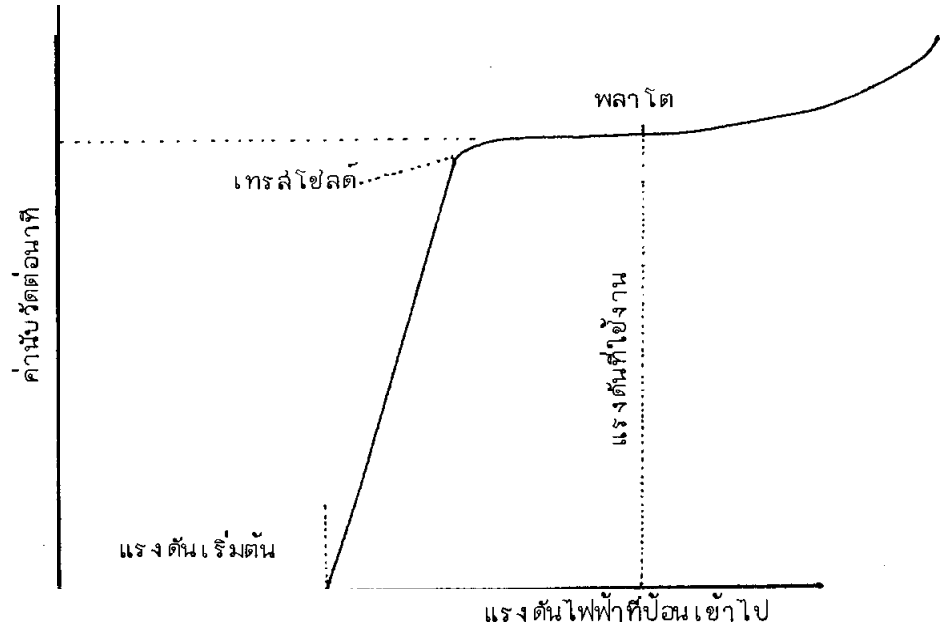
(d) ไอออนบวกซึ่งหนักและเคลื่อนที่ช้าๆไปยังผนังด้านนอก

(e) หลังจากขบวนการในรูป*(d)*ผ่านไปประมาณ 400 μ *sec* หัววัดพร้อมที่จะเริ่มต้นขบวนการใหม่คือจาก *(a)* - *(e)* นั่นเอง

กว่าจนทำให้เกิดการแตกตัวของแก๊สทั้งหมดในแอ่มเบอร์ ดังนั้น สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกจะมีค่ามากและมักจะมีความสูงเท่ากับการเกิดการแตกตัว (ณ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้ค่าหนึ่งตามที่กำหนดไว้) สัญญาณดังกล่าวจะมีค่าคงที่และเป็นอิสระต่อพลังงานของอนุภาคหรือโฟตอนที่วิ่งไปชนทำให้การวิเคราะห์และบันทึกค่าทางอิเล็คทรอนิกส์เป็นไปโดยไม่ยุ่งมาก ซึ่งแสดงแผนภาพ ในรูปที่ 2.2

ความสูงของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากหัววัด *G-M* คือฟังค์ชั่นของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปนั่นเอง แม้ว่าสัญญาณมีขนาดเดียวกันหมด แต่ถ้าป้อนแรงดันไฟฟ้าที่มีค่ามากกว่าค่าแรงดันที่ทำให้เกิดสัญญาณออกที่มีขนาดเกินกว่าค่าเทรสโฮลด์ของสัญญาณเข้า *(input threshold)* ของเครื่องนับวัด (คือสเกลเล่อร์ *(scaler))* ก็จะทำให้เกิดบริเวณราบหรือที่เรียกว่า "พลาโต" *(plateau)* บนเส้นกราฟระหว่างค่าความสูงของสัญญาณแรงดันหรืออัตรานับวัด (แกน y) และแรงดันไฟฟ้า (แกน x) ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.3 เห็นได้ว่าบริเวณ "พลาโต" นั้นค่าอัตรานับวัด (คือค่านับวัดรังสีต่อหน่วยเวลา) ไม่ขึ้นกับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป ซึ่งจะเป็นการลดปริมาณความต้องการของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป และลดความยุ่งยากในการปรับค่าแรงดันไฟฟ้า โดยทั่วไปแล้วบริเวณ "พลาโต" ที่ได้จากกราฟจะไม่เป็นลักษณะราบเรียบดังแสดงในรูปที่ 2.3 เนื่องจากสัญญาณเอาท์พุทมิได้มีค่าเท่ากันหมดอย่างแท้จริง

หัววัด *G-M* ขนาดเล็กมักใช้ในการนับวัดรังสีเบต้า เช่น การนับวัดปริมาณรังสีเบต้าจากฟอสฟอรัส -32 ในการวินิจฉัยเมลาโนมาในลูกตา *(intraocular melanomas)*



รูป 2.3 กราฟแสดงลักษณะสมบัติของหัววัดไกเกอร์มุลเลอร์ บริเวณ "พลาโต" *(plateau)* เป็นบริเวณซึ่งค่านับวัดจะเกือบคงที่ กล่าวคือค่าอัตรานับวัดไม่ขึ้นกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าโดยทั่วไปจะเลือกค่าแรงดันไฟฟ้าตรงบริเวณกึ่งกลางพลาโตเป็นค่าที่ใช้ในการทำงานของหัววัด *GM*

2.3 หัววัดแบบสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor detectors)

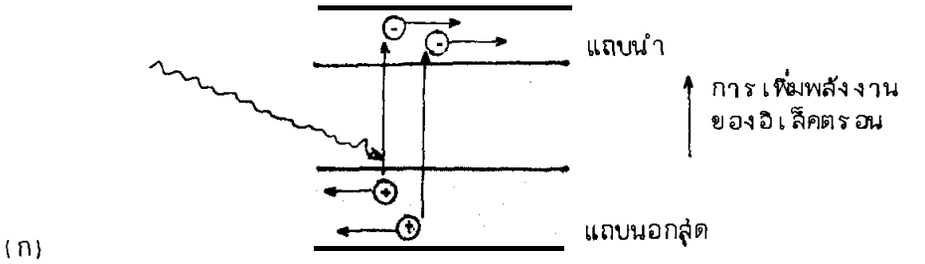
สาเหตุที่มีการใช้หัววัดก้ามมันตรังสีแบบของแข็งแทนแก๊ส (เช่น ไอออนไนเซชันแชมเบอร์ ดังอธิบายแล้วข้างต้น) น่าจะเป็นไปได้เนื่องจากเหตุผลสองประการดังนี้คือ

- 1. ของแข็งมีคุณสมบัติในการสกัดกั้นและสามารถดูดเก็บพลังงานของอนุภาครังสีหรือโฟตอนได้ดี

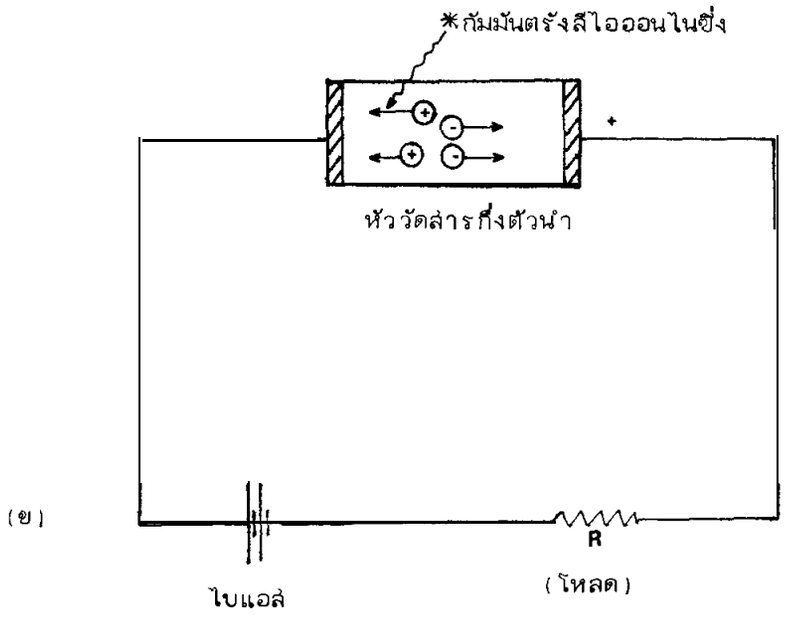
2. พลังงานเฉลี่ยที่ใช้ในการทำให้เกิดการแตกตัว (เป็นไอออนบวกและลบ) หนึ่งหน่วยในแก๊สมีค่าประมาณ 30 อิเล็คตรอนโวลต์ แต่ในของแข็งต้องการพลังงานเพื่อให้เกิด - อิเล็คตรอน-โฮลหนึ่งคู่ (กล่าวคือ เกิดอิเล็คตรอนอิสระซึ่งเป็นผลให้เกิดช่องว่างเรียกว่า "โฮล") ประมาณ 3 อิเล็คตรอนโวลต์ จึงเห็นได้ว่า ถ้าให้พลังงานจำนวนเท่ากัน ปริมาณกัมมันตรังสีที่เกิดจากการแตกตัวในของแข็งจะมีมากกว่าในแก๊สถึง 10 เท่า ซึ่งทำให้ง่ายต่อการบันทึกค่า ทั้งยังทำให้ค่าทางสถิติถูกต้องขึ้นอีกด้วย

หัววัดที่ใช้สารกึ่งตัวนำมีหลักการเช่นเดียวกับไอออนไนเซชั่นแชมเบอร์ในรูปที่ 2.1 กล่าวคือสร้างด้วยสารกึ่งตัวนำเป็นรูปสี่เหลี่ยมต่อกับตัวต้านทาน ซึ่งทำหน้าที่คล้ายคอลเล็คติ้งอิเล็คโทรด *(collecting electrode)* ดังแสดงในรูปที่ 2.4 รังสีที่ตกกระทบจะทำให้เกิดคู่อิเล็คตรอน-โฮลขึ้น อิเล็คตรอนซึ่งมีพลังงานอยู่ในแถบการนำ *(conducting band)* จะเดินทางไปยังคอลเล็คติ้งอิเล็คโทรด ช่องว่างในแถบนอกสุดที่เกิดขึ้น (คือ "โฮล" นั่นเอง) จะเดินทางไปยังขั้วลบของอิเล็คโทรด เครื่องมือชนิดนี้จึงมักเรียกเป็นหัววัดแบบ *"conductivity"* มากกว่าจะเรียกเป็น *"Solid ionization chamber"*

ถ้าเกิดความร้อนจากคู่อิเล็คตรอน-โฮลมาก (โดยทั่วไปมักเนื่องมาจากสารเจือ)จะเป็นผลให้เกิดกระแสแบ็คกราวนด์ซึ่งอาจมีค่ามากกว่าสัญญาณแท้จริงที่เกิดจากสารกัมมันตรังสี นอกจากนี้ กระแสดังกล่าวยังเป็นตัวทำลายประสิทธิภาพของหัววัดอีกด้วย ในทางปฏิบัติจึงต้องพยายามเลือกใช้สารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์มากที่สุดเท่าที่จะเป็นได้ ซึ่งเป็นการยากมาก ต่อมาได้มีการใช้สารกึ่งตัวนำสองชนิดอยู่ด้วยกัน คือสารกึ่งตัวนำชนิด p (เป็นตัวนำของโฮล) และชนิด n (เป็นตัวนำของอิเล็คตรอน) ซึ่งขบวนการสร้างรอยต่อ p-n เป็นไปได้หลายแบบ ในรูปที่ 2.5 ใช้สารกึ่งตัวนำชนิด p ฉาบบนสารกึ่งตัวนำชนิด n ซิลิคอน เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าในวงจร อิเล็คตรอนจะถูกดึงให้หลุดพ้นออกจากบริเวณสารชนิด n ซึ่งอยู่ชิดที่สุดกับบริเวณสารชนิด p โดยปราศจากอิเล็คตรอนที่วิ่งไปจากสารชนิด p ดังนั้น จึงต้องจัดให้มีบริเวณ *depletion* กระแสแบ็คกราวนด์ที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยมาก



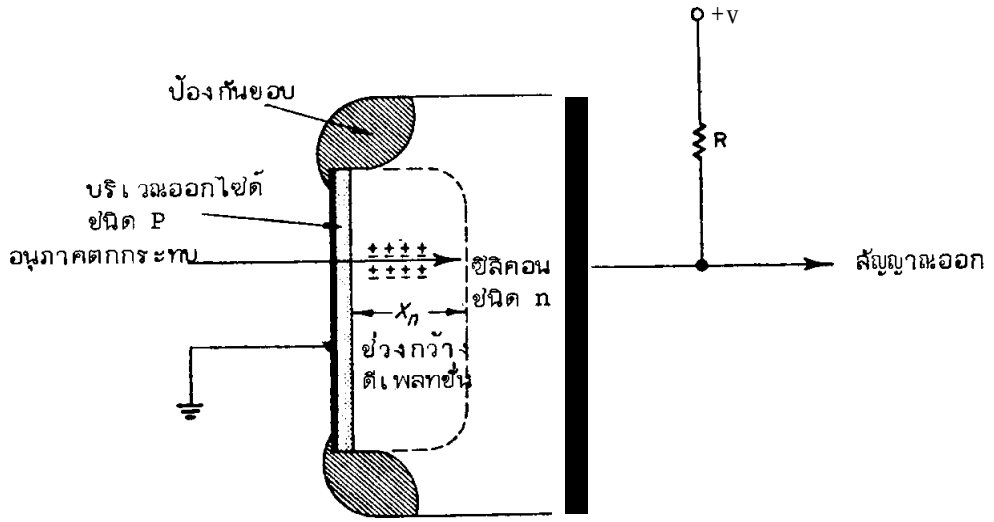
(ก)



(ข)

รูป 2.4 (ก) โมเดลอย่างง่ายของแถบพลังงานในสารกึ่งตัวนำ

(ข) หัววัดสารกึ่งตัวนำ ลักษณะคล้ายกับรูป 2.1 แต่มีสารกึ่งตัวนำบรรจุอยู่แทนแก๊ส กัมมันตรังสีที่ตกกระทบทำให้เกิดอิเล็คตรอนและโฮล ซึ่งอิเล็คตรอนจะถูกทำให้อยู่ในช่วงของแถบนำ ส่วนโฮล (+) ยังคงอยู่ในแถบนอกสุด



รูป 2.5 แสดงหัววัดแบบ *surface barrier* โดยใช้รอยต่อ *p-n* เมื่อหัววัดได้รับการไบแอส อิเล็คตรอน (พาหะส่วนใหญ่ในซิลิคอนชนิด *n*) จะเคลื่อนออกทันทีทันใดจากบริเวณที่อยู่ติดกับสารชนิด *p*

เมื่อกัมมันตรังสีเข้าไปยังหัววัด ผ่าน *"barrier"* ของสารชนิด *p* จะเกิดคู่อิเล็คตรอน-โฮลขึ้นในบริเวณ "ดีเพลทชั่น" หลังจากขบวนการจับเก็บประจุที่เกิดขึ้นดังกล่าวได้จะทำให้เกิดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าซึ่งอาจต้องถูกขยายเพื่อสะดวกในการบันทึกค่าสำหรับวิเคราะห์ต่อไป ซึ่งจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานที่ดูดเก็บไว้ในบริเวณ "ดีเพลทชั่น"

หัววัดชนิดนี้ ถ้าใช้สารกึ่งตัวนำซิลิคอนจะสามารถทำงานได้ ณ อุณหภูมิห้อง แต่สารกึ่งตัวนำเจอร์มาเนียม *(Germanium)* จะทำงานได้ ณ อุณหภูมิต่ำกว่ามาก โดยทั่วไปประมาณ 77^{o} *K* (ไนโตรเจนเหลว) แต่เนื่องจากซิลิคอนมีอะตอมมิคนัมเบอร์ต่ำและความหนาแน่นปานกลางจึงทำการดูดเก็บโฟตอนจากรังสีแกมม่าหรือรังสีเอ็กซ์ได้ไม่ดี ส่วนใหญ่มักใช้ในการนับวัดค่า

จากอนุภาครังสีที่มีประจุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอนุภาคเบต้า

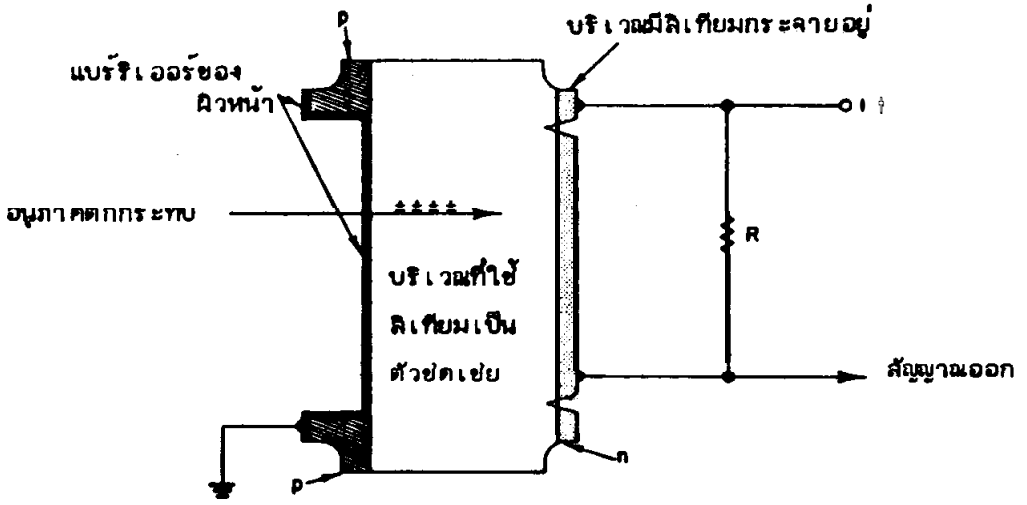
ถ้าเพิ่มแถบดีเพลทขึ้นให้กว้างขึ้น ผลลัพธ์คือจะได้รังสีที่เกิดจากการแตกตัวมากขึ้น รูปที่ 2.6 แสดงหัววัดซึ่งทำโดยปนลิเธียม *(lithium)* เข้าในสารกึ่งตัวนำชนิด p โดยจัดบริเวณที่มีพาหะ (ในกรณีนี้คือ "โฮล" *(holes)*) มากเกินความต้องการ ซึ่งก็จะทดแทนได้โดยอิเล็กตรอนซึ่งได้จากอะตอมของลิเธียม เทคนิคดังกล่าวเรียกว่า *"lithium compensation"* หัววัดแบบสารกึ่งตัวนำที่ได้นั้นจะปฏิบัติตัวเหมือนสารบริสุทธิ์ (ไม่มีสารเจือ) และพาหะของอิเล็กตรอนจะมีปริมาณลดลงกว่าแบบแรกที่ได้อธิบายแล้วข้างต้นมากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

จากเหตุผลที่หัววัดแบบ *"lithium-drifted"* มีบริเวณดีเพลทขึ้นกว้างกว่าหัววัดแบบเชื่อมต่อ p-n จึงเป็นที่นิยมใช้กว่าแม้ว่าจะมีขนาดใหญ่ก็ตาม หัววัด *"lithium-drifted silicon"* เขียนย่อเป็น *SiLi* ซึ่งอ่านออกเสียงเป็น "ซิลลี่" *(silly)* สำหรับหัววัด *"lithium compensated germanium"* เขียนย่อเป็น *GeLi* อ่านออกเสียงเป็น "เจลลี่" *(jelly)*

หัววัด *SiLi* มีประสิทธิภาพในการวัดโฟตอนจากรังสีแกมม่าและรังสีเอ็กซ์ได้ดี และมีความสามารถในการแยกพลังงาน *(energy resolution)* ดีมาก แต่ต้องทำงาน ณ อุณหภูมิต่ำมาก (ไนโตรเจนเหลว) ดังนั้น หัววัดชนิดนี้จึงมีราคาแพง เป็นเหตุผลหนึ่งที่ยังไม่เป็นที่แพร่หลายในวงงานเวชศาสตร์นิวเคลียร์

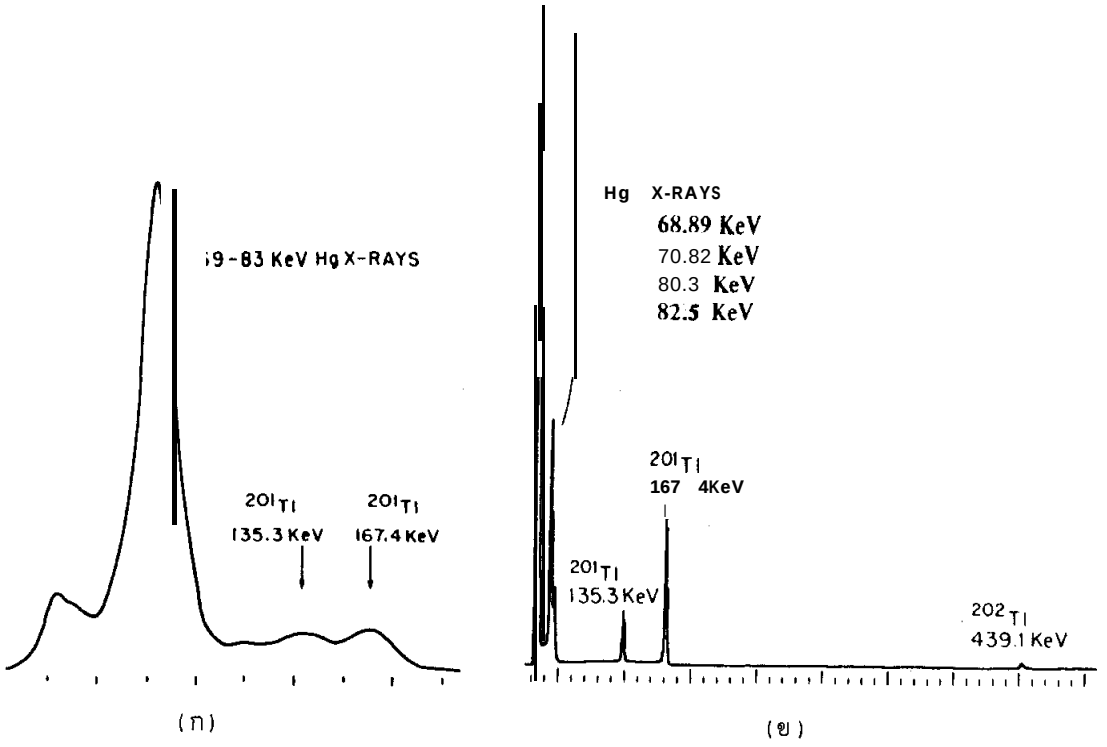
2.4 หัววัดซินทิลเลชัน (Scintillation detectors)

สำหรับงานที่ใช้สารรังสีในการวินิจฉัยโรค จำต้องอาศัยหัววัดที่มีประสิทธิภาพสูง เพื่อจะวัดปริมาณรังสีแกมม่าแบบ *in vivo* ข้อจำกัดของหัววัดแบบสารกึ่งตัวนำคือขนาดและราคา ดังนั้น จึงมีการนิยมใช้หัววัดที่เป็นของแข็งซึ่งสามารถเรืองแสงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานที่ได้



รูป 2.6 แสดงหัววัดแบบ "ลิเรียม-ดริฟท์" ในบริเวณที่มีลิเรียมจะมีพาหะมากเกินพอซึ่งมีสภาพเป็นกลาง ดังนั้นจึงจัดเป็นบริเวณ "ดีเพลทชั่น" สำหรับหัววัด

ดูดเก็บไว้จากรังสีแกมม่าหรือรังสีเอ็กซ์ เรียกหัววัดชนิดดังกล่าวว่า "หัววัดซินทิลเลชั่น" ประกอบขึ้นจากโซเดียมไอโอไดด์ *(Sodium iodide)* ซึ่งถูกแอ็คติเวต *(activated)* ด้วยทัลเลี่ยม *(Thallium)* เขียนสัญญลักษณ์เป็น *NaI (Tl)* มีประสิทธิภาพสูงในการนับวัด - ปริมาณกัมมันตรังสีแต่ความสามารถในการแยกพลังงานกัมมันตรังสีไม่ดีเท่าหัววัดแบบ *GeLi* ดังจะเห็นได้จากพีค *(peak)* ที่เกิดจากรังสีเอ็กซ์ของทัลเลียม -201 (^{201}Tl) ในรูป 2.7 อย่างไรก็ตาม งานด้านเวชศาสตร์นิวเคลียร์ยังคงนิยมใช้หัววัดโซเดียมไอโอไดด์ในการวัดปริมาณรังสีแบบ *in vivo* ทั้งนี้ควรเนื่องมาจากราคาของวัสดุอุปกรณ์ และในการวัดปริมาณรังสีเพื่อประโยชน์ด้านวินิจฉัยโรคจะพยายามเลือกใช้รังสีแกมม่าที่มีพลังงานเดียว เพื่อป้องกันการเกิด



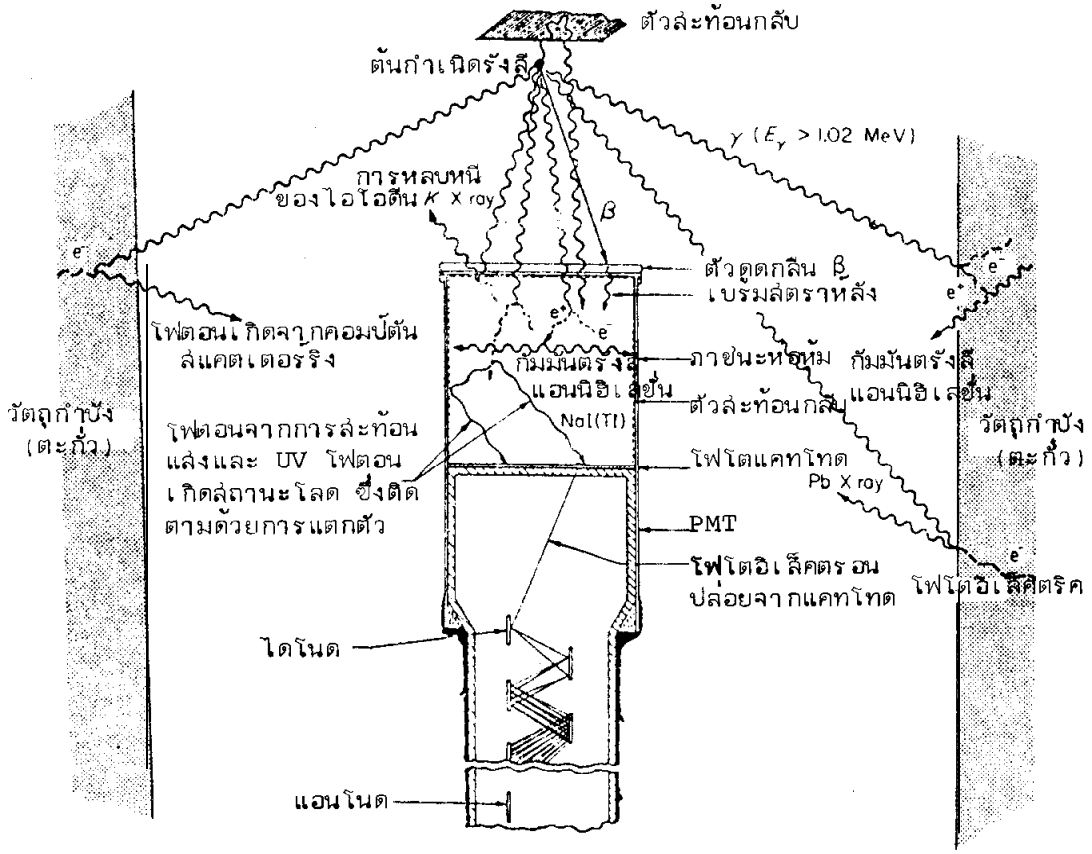
รูป 2.7 สเปคตรัมของทัลเลียม -201 *(Thallium -201)* โดย

ก) ใช้หัววัด *NaI(Tl)*

ข) ใช้หัววัด *GeLi*

อันตรายจากสารกัมมันตรังสีต่อคนไข้และเทคนิเชียนตลอดจนผู้มีส่วนเกี่ยวข้องให้น้อยที่สุดเท่าที่จะน้อยได้ ในรูป 2.8 แสดงกลไกของหัววัด *NaI(Tl)*

ในหัววัดแบบสารกึ่งตัวนำและแบบซินทิลเลชั่นนั้น พลังงานจากรังสีแกมม่าที่ถูกหัววัดได้จะเปลี่ยนเป็นประจุ (อิเล็คตรอนจำนวนมาก) โดยมีปริมาณเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานนั้น ประจุจะเปลี่ยนเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าซึ่งขนาดความสูงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณรังสีแกมม่าที่ถูกดูดกลืนในผลึกโซเดียมไอโอไดด์ตามกลไกของโฟโตมัลติไพลเออร์ *(photomultiplier)* และส่วนประกอบอื่นๆอีก ดังจะได้อธิบายรายละเอียดในบทต่อไป ส่วนสารมีคุณสมบัติเป็นซินทิล-เลเตอร์ *(scintillator)* ของเหลว เช่น *PPO BBOT PBO* และ *POPOP* เป็นต้น



รูป 2.8 แล่ดงขบวนการต่างๆ ที่รบกวนการนับวัดของผลึกโซเดียมไอโอไดด์ ซึ่งอาจก่อให้เกิดสัญญาณที่แอนโนดของหลอดมัลติไพลเออร์

ผลึก *NaI (Tl)* ที่ใช้วัดปริมาณรังสีในร่างกาย *(in vivo)* จะมีลักษณะตัน หน้ากลมเรียบ ส่วนที่ใช้กับปริมาณรังสีในหลอดทดลอง *(in vitro)* จะมีลักษณะเป็นหลุม

2.5 บทสรุป

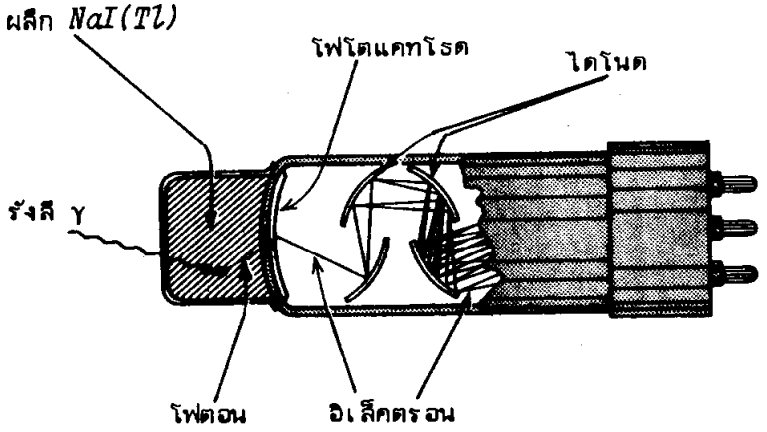
ประมาณ ค.ศ. 1900-1910 ลำยาวิชำนิวเคลียร์ฟิสิกส์ได้มีการใช้ฉากเรืองแสงเป็นตัวบอกชื้อนุภาคแอลฟ่า หลักการคือเมื่ออนุภาคแอลฟ่าชนผลึกของซิงค์ซัลไฟด์ *(zinc sulfide)* จะเกิดการเรืองแสงออกมาจากผลึก หรือที่เรียกว่าซินทิลเลชั่น *(scintillation)* จากนั้นจึงทำการวัดแสงที่เปล่งออกมา ต่อมาในปี ค.ศ. 1906 ได้มีการประดิษฐ์หัววัดไกเกอร์มูลเล่อร์ (มักเรียกเป็น *GM* เคาน์เตอร์) หลักการของหัววัด *GM* แสดงในรูป 2.2 ซึ่งแม้จะมีการแตกตัวเพียงเล็กน้อยซึ่งเกิดจากอนุภาคเบต้าก็สามารถก่อให้เกิดสัญญาณไฟฟ้าได้ ในปัจจุบันไม่นิยมใช้ในงานวิจัย แต่ยังคงใช้ในงานป้องกันอันตรายจากรังสี เนื่องจากหัววัดชนิดนี้ไม่มีความไวสำหรับรังสีแกมม่า

หัววัด *GM* และหัววัดพรอพพอร์ชันแนลเหมือนกับไอออนไนเซชั่นแชมเบอร์ที่ต่างมีส่วนประกอบที่เป็นปริมาตรบรรจุด้วยแกซ มีอิเล็คโทรดล่องตัวอยู่ล้อมรอบและมีฉนวน อุดรวมอิเล็คโทรดของไอออนไนเซชั่นแชมเบอร์มักเป็นแท่งซึ่งมีขั้วลบและบวกอยู่ด้วยกัน แต่ของหัววัด *GM* และพรอพพอร์ชันแนลเป็นแบบเส้นลวดเล็กบางและต้องมีขั้วเป็นบวก

ประมาณ ค.ศ. 1950 มีการประดิษฐ์หลอดโฟโตมัลติไพลเออร์ *(photomultiplier tube)* หรือเขียนย่อเป็น *PMT* ซึ่งสามารถตรวจวัดแสงปริมาณน้อยๆได้ หลักการทำงานแสดงในรูป (2.9) โฟตอนจากแสงปล่อยอิเล็คตรอนไปยังโฟโตแคทโถดและถูกเร่งไปยังไดโนด *(dynode)* ตัวแรกซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดอิเล็คตรอนจำนวนมากวิ่งไปยังไดโนดตัวที่สอง (มีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกมากกว่าไดโนดตัวแรก) และเกิดอิเล็คตรอนเพิ่มเป็นทวีคูณ เป็นเช่นนี้ไปจน

ถึงแอนโนด *(anode)* ปกติ *PMT* มี 10 ไดโนด เกิดการทวีคูณอิเล็คตรอน 10^5 เท่า จากโฟโตแคทโถดไปยังแอนโนด แรงดันไฟฟ้าขนาดสูงที่ใช้มีค่าประมาณ 1,000 โวลต์

วิวัฒนาการต่อเนื่องมาคือการผลิตผลึกโซเดียมไอโอไดด์ให้มีขนาดใหญ่อันจะทำให้เกิดการเรืองแสงอย่างมีประสิทธิภาพเมื่อมีรังสีแกมม่าถูกดูดกลืน ผลึกดังกล่าวจะต่อโดยตรงกับ *PMT* สัญญลักษณ์เขียนแทนหัววัดชนิดนี้คือ *NaI (Tl)* โดยทัลเลี่ยม *(Thallium)* ที่เติมมีขนาดน้อยๆเพื่อเป็นตัวกระตุ้นให้ผลึก *NaI* ทำงาน ณ อุณหภูมิห้อง ในการวินิจฉัยโรคโดยใช้สารรังสีจะใช้หัววัดชนิดนี้เป็นส่วนใหญ่เนื่องจากหัววัด *NaI (Tl)* มีความไวมาก จึงต้องมีการใช้วัสดุกั้นอย่างดีเพื่อป้องกันรังสีแบ็คกราวนด์ มักนิยมใช้ตะกั่วหนาประมาณ 5 ซม.หรือมากกว่าเป็นตัวกันรอบๆโดยเว้นช่วงเปิดตรงด้านหน้าหัววัด



รูป 2.9 แสดงหลอดโฟโตมัลติไพลเออร์ผ่าตัดขวาง

ลักษณะสมบัติการนับวัดของระบบหัววัดพรอพพอร์ชันแนลขึ้นอยู่กับชนิดของสารกึ่งตัวนำรังสีที่ต้องการวัด ลักษณะสมบัติของอิเล็คทรอนิกส์ และการทรีคูณของแกซภายในหัววัดซึ่งขึ้นกับแรงดันไฟฟ้าที่แอนโนด ดังนั้น ลักษณะสมบัติการนับวัดของหัววัดพรอพพอร์ชันแนลจึงคล้ายคลึงกับของหัววัดซินทิลเลชั่น กล่าวคือ การทรีคูณของอิเล็คตรอนในหลอดโฟโตทูบสัมพันธ์กับการทรีคูณของแกซในหัววัดพรอพพอร์ชันแนล

นอกจากนี้ยังมีหัววัดแบบสารกึ่งตัวนำซึ่งข้อดีคือมีความสามารถในการแยกพลังงานกัมมันตรังสีสูงกว่าหัววัดโซเดียมไอโอไดด์หรือที่เรียกว่า "เรสโซลูชั่น" *(resolution)* นั่นเอง แต่ข้อเสียคือมีขนาดเล็กมากและราคาแพงกว่าหัววัดซินทิลเลชั่น (เมื่อผลึกมีขนาดเดียวกัน)

หลักการของหัววัดแบบสารกึ่งตัวนำเป็นแบบง่ายๆ สารกึ่งตัวนำทำหน้าที่เสมือนกับไอออนไนเซชั่นแชมเบอร์ที่เป็นของแข็ง กล่าวคือ มันประพฤติตนเป็นฉนวนซึ่งไม่ยอมให้กระแสไหลผ่านจนกว่าจะเกิดการแตกตัวขึ้นในปริมาตรของหัววัด มักต้องเก็บไว้ในที่เย็นมากๆเพื่อลดกระแสอันเกิดจากเทอร์มอลแอ็คติเวชั่น *(Thermal activation)* ของอิเล็คตรอน เมื่อรังสีแกมม่าถูกดูดกลืนในสารกึ่งตัวนำจะเกิดคู่ไอออนขึ้นมากมาย ประมาณ 1 คู่ต่อพลังงานดูดกลืน 3 *eV* สมมติเธคนีเชี่ยม - *99m* (^{99m}Tc) มีพลังงาน *140 keV* ถูกดูดกลืนในหัววัดแบบสารกึ่งตัวนำ จะเกิดคู่ไอออนประมาณ 47,000 คู่

ศึกษาทบทวน

2.1 หัววัดกัมมันตภาพรังสีแบ่งได้เป็นกี่แบบ อะไรบ้าง

2.2 วิจารณ์ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของหัววัดแบบของแข็งแทนแกซ

2.3 งานด้านรังสีวินิจฉัยใช้หัววัดกัมมันตรังสีแบบใด เพราะเหตุใด

2.4 ลักษณะสมบัติการนับวัดของหัววัดพรอพพอร์ชันแน่ลและหัววัดซินทิลเลชั่นเหมือนหรือต่างกันอย่างไร อธิบายพอสังเขป

2.5 อธิบายกลไกของหัววัด

ก) ไอออนไนเซชั่นแชมเบอร์

ข) หัววัดพรอพพอร์ชันแน่ล

ค) ไกเกอร์-มุลเล่อร์

ง) แบบสารกึ่งตัวนำ

จ) ซินทิลเลชั่น