

การตรวจเอกสาร

ทฤษฎีที่สำคัญต่องานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการคำนวณหาค่ากัมมันตภาพและประสิทธิภาพของชุดสารมาตรฐาน กัมมันตรังสี ^{14}C ด้วยวิธีที่เรียกว่า CIEMAT/NIST โดยใช้เครื่องนับรังสีจากแสงวับของของเหลว LSC (Liquid Scintillation Counter) หรือเรียกสั้นๆ สำหรับงานวิจัยเล่มนี้ว่า เครื่องนับรังสี LSC ประกอบด้วยหลอดตัวคูณแสงที่ภายในมีส่วนประกอบของโฟโตแคโทด ไคโนดและแอโนด อาศัยการนับรังสีจากแสงวับของของเหลว (Liquid Scintillation Counting) ซึ่งเป็นวิธีการตรวจวัดและหาปริมาณรังสีที่มีความไวต่อการวัดสูงมาก จึงเป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในการวัดพลังงานรังสีไม่ว่าจะเป็นอนุภาคแอลฟา (α), บีตา (β), การจับยึดอิเล็กตรอนจนถึงรังสีแกมมา (γ -ray) โดยการวัดรังสีจะอาศัยการวัดอัตรา การปล่อยแสงหรือโฟตอนโดยมีสารกัมมันตรังสีอยู่ภายในของเหลวในไวแอลที่สามารถถ่ายทอด พลังงานรังสีไปเป็นพลังงานแสงได้ ซึ่งเรียกดาวอย่างนี้ว่า คอกเทล อัตราการปล่อยพลังงานแสง หรือโฟตอนจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการเกิดการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี นอกจากนี้ความ เข้มของพลังงานแสงหรือโฟตอนที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานของสารกัมมันตรังสีแต่ละ ชนิดซึ่งมีความแตกต่างกันจึงสามารถนำมาใช้บอกชนิดของสารกัมมันตรังสีได้ ปัจจุบันนี้ถือว่าการนับ รังสีจากแสงวับของของเหลวเป็นวิธีการที่นำไปใช้อย่างกว้างขวางสำหรับการตรวจวัดของสาร กัมมันตรังสี

วิธีการนับรังสีจากแสงวับของของเหลวใช้พื้นฐานฟิสิกส์ทางนิวเคลียร์ต่างๆ ไปเริ่มจากความรู้ เกี่ยวกับเรื่องกระบวนการทางฟิสิกส์ต่างๆ ในหัวข้อที่ 1 อนุภาคบีตาและการผลิตโฟตอน เกี่ยวกับการ สลายตัวของสารกัมมันตรังสีที่ให้อนุภาคบีตาและการผลิตโฟตอนจากนั้นทำความเข้าใจถึงกระบวนการ ตรวจนับโฟตอนในหัวข้อที่ 2 และเนื่องจากการปลดปล่อยโฟโตอิเล็กตรอนที่เอาที่พุทของโฟโตแคโทด เป็นไปตามกฎของปัวซอง ซึ่งเกี่ยวข้องกับทางสถิติจึงนำความรู้เกี่ยวกับสถิติของการวัดกำหนดไว้ใน หัวข้อที่ 3 และนำความรู้ต่างๆ ในหัวข้อข้างต้นทั้งหมดไปใช้ในการทำความเข้าใจหัวข้อที่ 4-10 ซึ่ง เกี่ยวข้องกับเครื่องนับรังสี LSC ทั้งสิ้น เช่น เทคโนโลยีของอุปกรณ์เครื่องนับรังสี LSC ในหัวข้อที่ 4, การสอบเทียบอุปกรณ์เครื่องนับรังสี LSC ในหัวข้อที่ 5 , หลอดตัวคูณแสง ในหัวข้อที่ 6, กลไกของ กระบวนการเกิดรังสีจากแสงวับของของเหลว ในหัวข้อที่ 7 และเนื่องจากพจนานุกรมฉบับ ราชบัณฑิตยสถานไม่ได้บัญญัติศัพท์ทางนิวเคลียร์ของคำว่า “quenching” หรือ “quench” ไว้ ดังนั้นใน งานวิจัยนี้จึงกำหนดให้คำว่า “quenching” หรือ “quench” เรียกว่า “การควน” ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งที่ส่งผล

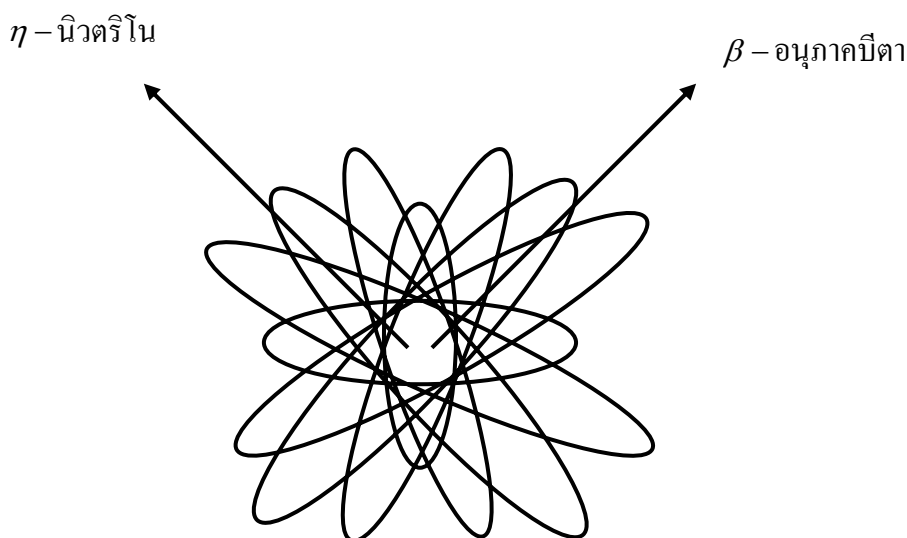
กระทบอย่างมากต่อค่าประสิทธิภาพของการนับของสารกัมมันตรังสีโดยใช้เครื่องนับรังสี LSC กล่าวรายละเอียดเกี่ยวกับเรื่องของการควenching ในหัวข้อที่ 8 , เคนไทม์ของหัววัดรังสีจากแสงวัดในหัวข้อที่ 9 และกล่าวถึงเรื่องแหล่งกำเนิดของรังสีพื้นหลังในหัววัดรังสีจากแสงวัดในหัวข้อที่ 10

เมื่อเข้าใจพื้นฐานและรับรู้ถึงข้อจำกัดและวิธีการหลายๆอย่างของเครื่องนับรังสี LSC แล้ว จากนั้นจึงศึกษาขั้นตอนกระบวนการคำนวณหาประสิทธิภาพด้วยวิธี CIEMAT/NIST ในหัวข้อที่ 11 เนื่องจากพจนานุกรมฉบับราชบัณฑิตยสถานไม่ได้บัญญัติศัพท์ทางนิวเคลียร์ของคำว่า “free parameter” และ “figure of merit” ไว้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงกำหนดให้คำว่า “free parameter” เรียกว่า “พารามิเตอร์อิสระ” และ “figure of merit” เรียกว่า “ฟิกเกอร์ออฟเมริท” ซึ่งอธิบายรายละเอียดและความหมายของพารามิเตอร์อิสระ (free parameter) และฟิกเกอร์ออฟเมริท (figure of merit) ไว้ในหัวข้อที่ 12 และถึงแม้ว่าวิธีนี้จะเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สะดวกและรวดเร็วต่อการนำไปใช้ อีกทั้งยังใช้ทำนายค่าประสิทธิภาพของการนับของสารกัมมันตรังสีได้อย่างแม่นยำ แต่ทั้งนี้ก็ยังมีความเกี่ยวข้องกับเรื่องของการควenching จากการแตกตัวเป็นไอออน (ionization quench) แสดงรายละเอียดเกี่ยวกับการควenching ชนิดนี้ในหัวข้อที่ 13 และเมื่อการควenching ดังกล่าวนั้นมีผลกระทบต่อกระบวนการคำนวณหาประสิทธิภาพของวิธี CIEMAT/NIST จึงต้องหาสูตรคำนวณหาพารามิเตอร์สำหรับแก้ค่าของการควenching ดังกล่าวขึ้นโดยใช้สูตรของเบิร์ก โดยพารามิเตอร์แก้ค่าของการควenching ขึ้นอยู่กับค่า kB ดังนั้นจึงกำหนดให้หัวข้อที่ 14 เป็นเรื่องความเหมาะสมของพารามิเตอร์ kB ซึ่งเป็นหัวข้อสุดท้าย เมื่อทำความเข้าใจเนื้อหาตั้งแต่เริ่มต้นจะทำให้เข้าใจถึงระเบียบขั้นตอนการคำนวณหาค่ากัมมันตภาพและค่าประสิทธิภาพของการนับโดยวิธี CIEMAT/NIST ได้ดียิ่งขึ้น

1. อนุภาคบีตาและการผลิตโฟตอน

จากความรู้เกี่ยวกับเรื่องโครงสร้างของสารและสารกัมมันตรังสีทำให้ทราบว่าสารทั้งหมดถูกสร้างขึ้นจากหน่วยการสร้าง (building block) โดยการจัดเรียงเพื่อกำหนดธาตุและพฤติกรรมเชิงเคมีของธาตุในรูปแบบที่ง่ายที่สุดก็คือประกอบด้วยนิวเคลียสที่เป็นมวลส่วนใหญ่อยู่ภายในและระบบหมอกอิเล็กตรอนโคจรรอบๆ คล้ายกับระบบสุริยะที่มีดาวเคราะห์หมุนรอบดวงอาทิตย์ ซึ่งดวงอาทิตย์ในที่นี้เทียบได้กับนิวเคลียสและดาวเคราะห์ก็เสมือนเป็นหมอกอิเล็กตรอน โดยนิวเคลียสประกอบด้วยโปรตอนและนิวตรอน ซึ่งอนุภาคที่โคจรในหมอกคืออิเล็กตรอน ส่วนโปรตอนเป็นอนุภาคประจุบวก นิวตรอนมีมวลเท่ากันโดยประมาณแต่เป็นกลางทางไฟฟ้า สำหรับอิเล็กตรอนเป็นอนุภาคประจุลบและมีมวลเป็นส่วนสองพันเท่าของนิวตรอนและโปรตอน โดยทั่วไปธาตุที่มีน้ำหนักเชิงอะตอมต่างๆ ในตารางเชิงอะตอมจะมีจำนวนโปรตอนและนิวตรอนเท่ากันในนิวเคลียส เมื่อน้ำหนักเชิงอะตอมเพิ่มขึ้น

จำนวนของนิวตรอนจะมีค่ามากกว่าจำนวนของโปรตอน ส่วนจำนวนอิเล็กตรอนในระบบวงโคจรจะต้องเท่ากับจำนวนของโปรตอนในนิวเคลียสซึ่งแสดงให้เห็นว่าอะตอมเป็นกลางทางไฟฟ้า นอกจากนี้จำนวนของอิเล็กตรอนก็สามารถกำหนดพฤติกรรมทางเคมีของธาตุได้อีกด้วย เมื่อจำนวนของโปรตอนและนิวตรอนไม่สมดุลกันในนิวเคลียสก็จะทำให้ธาตุนั้นไม่เสถียรและเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ ซึ่งสิ่งต่างๆ นี้แสดงให้เห็นถึงการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีและพลังงานจะถูกปล่อยในรูปแบบของการแผ่รังสี ดังภาพที่ 1



พลังงานรวม (E) ถูกปล่อยออกมาตาม
ลักษณะเฉพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสี

$$E = \beta^- (\text{พลังงานของอนุภาค}) + \eta (\text{พลังงานของนิวตริโน})$$

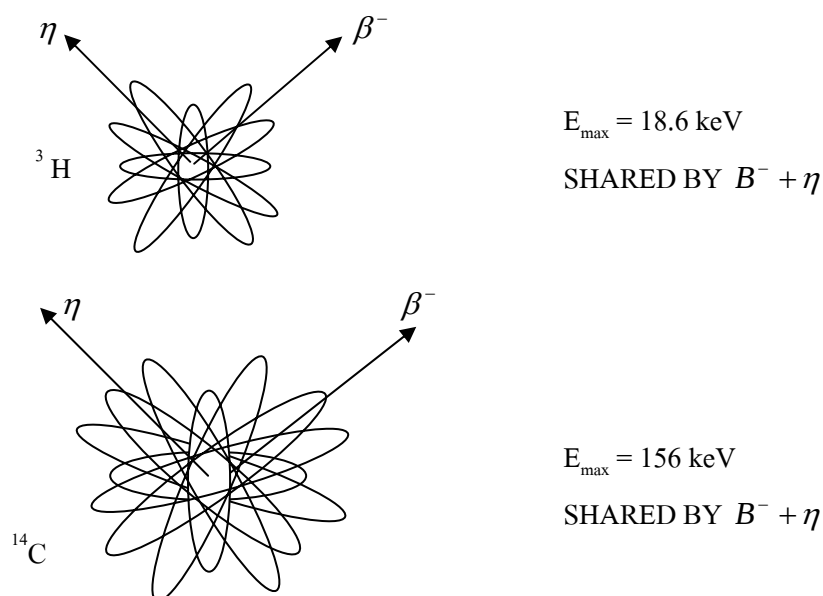
ภาพที่ 1 การสลายตัวของสารกัมมันตรังสีให้อนุภาคบีตา

ที่มา : Michael (1989)

พื้นฐานของกระบวนการเกิดรังสีจากแสงวับมีหลักสำคัญเกี่ยวกับการแผ่รังสีกับเหตุการณ์การสลายตัวดังต่อไปนี้

พิจารณากรณีของทริเทียม(tritium; ^3H) ซึ่งเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีของไฮโดรเจนที่มีลักษณะทางเคมีเหมือนกับไฮโดรเจนแต่นิวตรอนในนิวเคลียสมากเกินไป ผลที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวของ

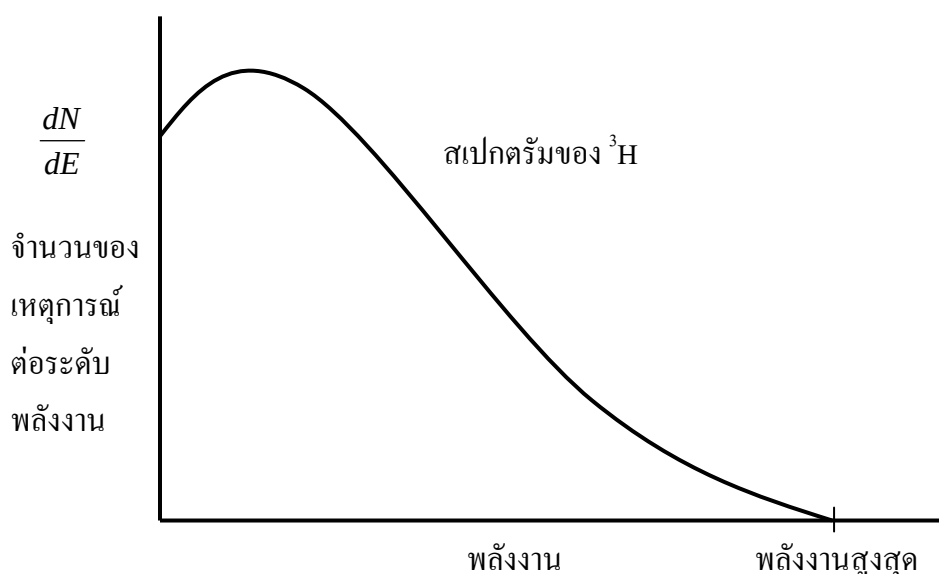
กัมมันตรังสีชนิดนี้ก็คือการปล่อยอนุภาคหรืออิเล็กตรอนสองตัวที่เรียกว่าอนุภาคบีตาและนิวตริโนดัง
ภาพที่ 2



ภาพที่ 2 การสลายตัวของสารกัมมันตรังสี ^3H , ^{14}C

ที่มา : Michael (1989)

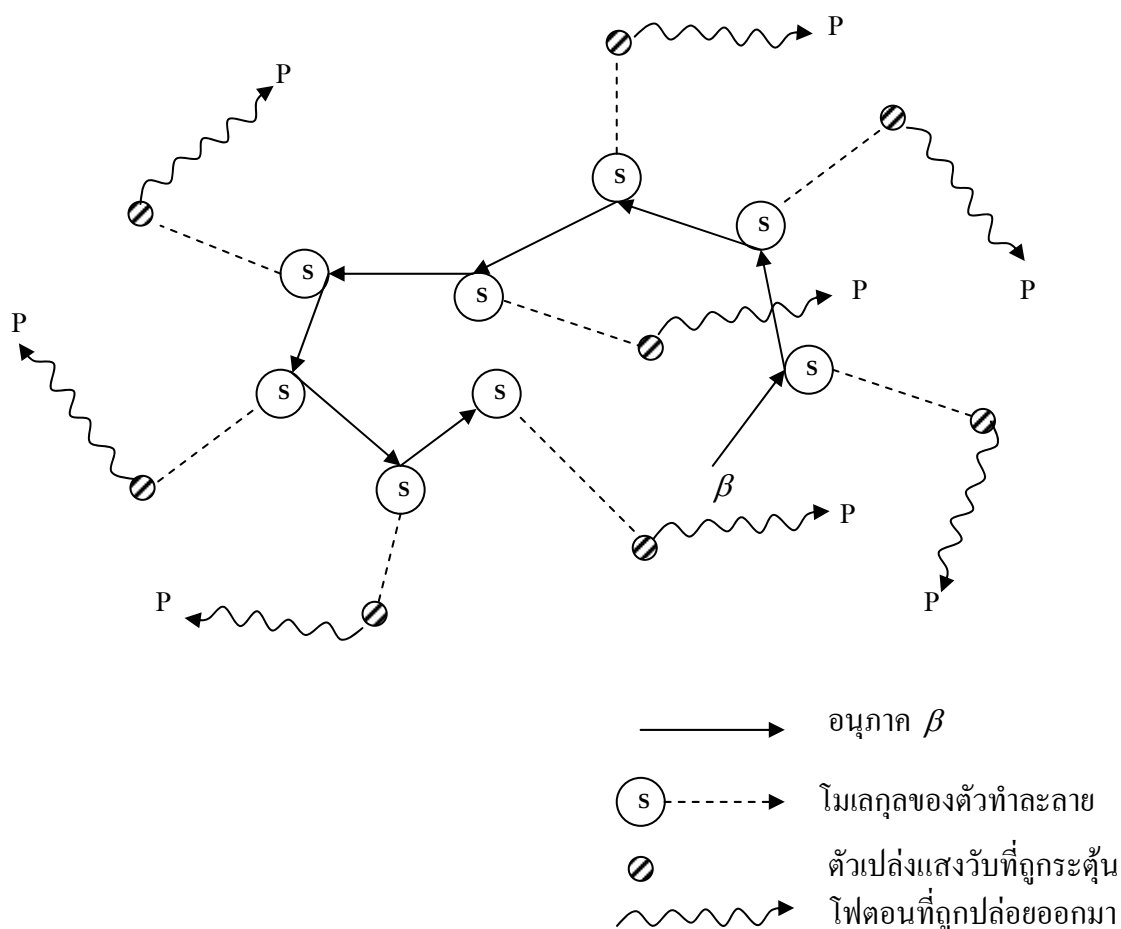
อนุภาคทั้งสองเหล่านี้ถูกปล่อยพร้อมๆ กันโดยใช้พลังงานของการสลายตัวของนิวเคลียส ซึ่งพลังงานนี้เป็นลักษณะเฉพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีแต่ละชนิด ในกรณีของทริเทียมมีพลังงานที่เกิดจากการสลายตัวเท่ากับ 18.6 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (keV) ซึ่งเป็นหน่วยของพลังงานที่ใช้ในฟิสิกส์ นิวเคลียร์ นิวตริโนเป็นอนุภาคที่ไม่ได้รับความสนใจในการนับรังสีจากแสงวับของของเหลวถึงแม้ว่าในความเป็นจริงจะนำพลังงานจากการสลายตัวบางส่วนออกไปด้วยโดยพลังงานที่นำมาใช้ร่วมกันแบบสุ่มระหว่างอนุภาคบีตาและนิวตริโน มีค่าเท่ากับ 18.6 keV ดังนั้นในทางทฤษฎีอนุภาคบีตาจะใช้พลังงานระหว่าง 0 และ 18.6 keV ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 การกระจายพลังงาน (สเปกตรัม) ของ ^3H 6 keV

ที่มา : Michael (1989)

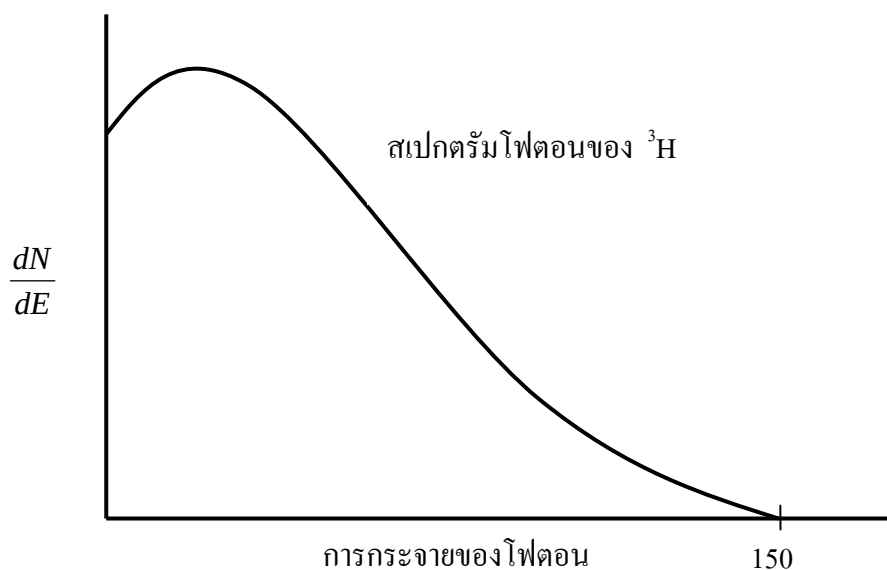
พลังงานดังกล่าวเป็นพลังงานจลน์ซึ่งเป็นพลังงานของการเคลื่อนที่คล้ายกับการเคลื่อนที่ของมวล ซึ่งอนุภาคบีตาจะสูญเสียพลังงานจากการชนกันเองในตัวกลางของของเหลว อนุภาคบีตาที่เกิดจากทริเทียมจะเคลื่อนที่เป็นระยะทางสั้นๆ ก่อนที่จะสูญเสียพลังงานจลน์ทั้งหมดไป ซึ่งพลังงานจะถูกตัวกลางดูดกลืนใน 3 รูปแบบนั่นคือความร้อน การแตกตัวเป็นไอออนและการกระตุ้นโมเลกุลของสารละลาย โดยพลังงานที่สูญเสียไปจะกระตุ้นโมเลกุลของสารละลายซึ่งเป็นวิธีการทำให้เกิดรังสีจากแสงวับของของเหลวแสดงให้เห็นถึงการส่งผ่านพลังงานที่มีประสิทธิภาพระหว่างอนุภาคบีตาและสารละลายที่ทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายของสารตัวอย่าง ซึ่งโมเลกุลของตัวทำละลายที่ถูกกระตุ้นไม่สามารถจำแนกได้ทันทีดังนั้นสารละลายของตัวเปล่งแสงวับที่เรียกว่า คอกเทล จึงประกอบด้วยส่วนผสมระหว่างตัวทำละลายและตัวถูกละลาย(ตัวเปล่งแสงวับ) โดยที่โมเลกุลของตัวทำละลายที่ถูกกระตุ้นสามารถถ่ายเทพลังงานไปยังตัวถูกละลายได้ การถ่ายเทพลังงานดังกล่าวทำให้รับกวนหมอกออิเล็กทรอนิกส์ในวงโคจรของตัวถูกละลายให้อยู่ในสถานะกระตุ้นที่สูงขึ้น เมื่ออิเล็กตรอนในวงโคจรของโมเลกุลของตัวถูกละลายถูกกระตุ้นจะพยายามที่จะกลับเข้าสู่สถานะพื้นโดยการแผ่รังสี ในกรณีนี้รังสีที่แผ่ออกมาก็คือโฟตอนของแสงนั่นเอง ดังนั้นอนุภาคบีตาเดี่ยว (single beta particle) จะปรากฏอย่างเด่นชัดโดยชนกับโมเลกุลของตัวทำละลายและการกระตุ้นของโมเลกุลของตัวเปล่งแสงวับซึ่งแสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ตัวอย่างประกอบของกระบวนการของการชน

ที่มา : Michael (1989)

จำนวนของโฟตอนทั้งหมดที่เกิดจากโมเลกุลของตัวเปล่งแสงวับที่ถูกกระตุ้นทำให้เกิดรังสีจากแสงวับ จากการถูกกระตุ้นครั้งแรกนี้จะเป็นการเปลี่ยนพลังงานไปเป็นโฟตอน ดังนั้นความเข้มแสงของรังสีจากแสงวับจะต้องแปรผันโดยตรงกับพลังงานเริ่มต้นของอนุภาคบีตา จากกรณีของทริเทียมจะได้ว่าความเข้มของรังสีจากแสงวับจะมีพิสัยจาก 0 ถึงค่าสูงสุดที่เป็นไปได้สำหรับอนุภาคซึ่งก็คือ 18.6 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ จากภาพที่ 5 แสดงให้เห็นถึงการกระจายของโฟตอนต่อระดับพลังงาน ซึ่งสารละลายของตัวเปล่งแสงวับจะเปลี่ยนพลังงานจลน์ของอนุภาคบีตาไปเป็นพลังงานแสง



ภาพที่ 5 สเปกตรัมของโฟตอนของทริเทียม

ที่มา : Michael (1989)

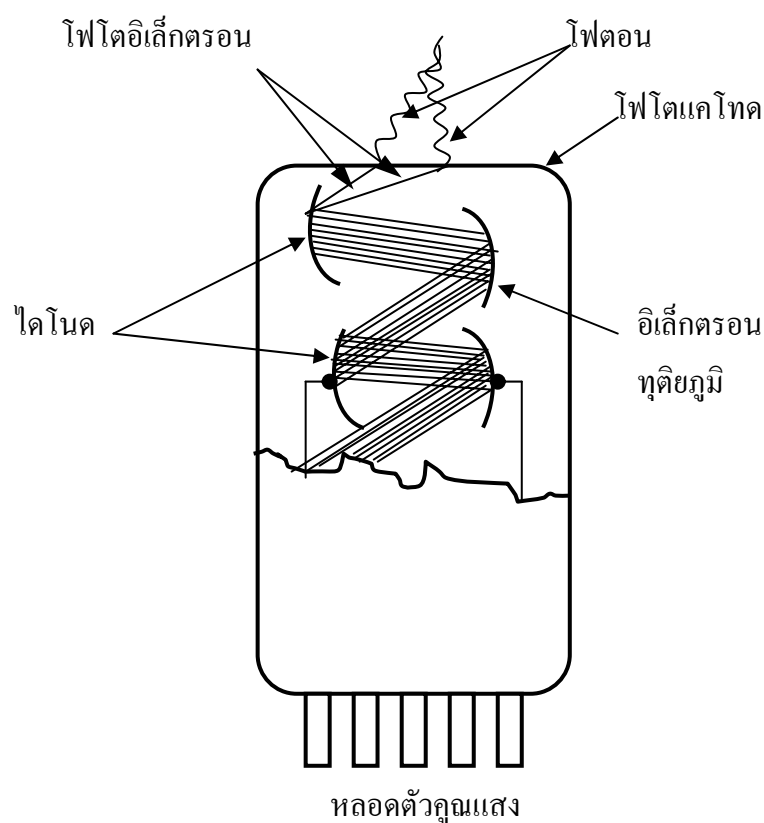
2. กระบวนการตรวจนับโฟตอน

การวางไวแอลที่ผลิตมาจากแก้วหรือพลาสติกที่บรรจุกัมมันตรังสีที่ต้องการวิเคราะห์กับสารละลายในผนังปิดล้อมมืดแล้วสังเกตความเข้มของโฟตอน พบว่าความเข้มของโฟตอนสัมพันธ์ขึ้นอยู่ กับตัวประกอบหลายๆอย่างรวมถึงชนิดของคอกเทลที่ทำให้เกิดรังสีจากแสงวับของของเหลวสารกัมมันตรังสี, ตัวถูกละลายอื่นๆ ที่ละลายรวมกับสารตัวอย่างที่วิเคราะห์, วัสดุที่ใช้ทำไวแอลของสารตัวอย่าง, ปริมาณของสารกัมมันตรังสีที่ต้องการวิเคราะห์, การปล่อยพลังงานสูงสุด, และปรากฏการณ์ทางเคมีอื่นๆที่สัมพันธ์กันซึ่งมีผลต่อการกระจายของรังสีเชิงเคมี ธรรมชาติของนิวเคลียร์และอันตรกิริยาทางเคมีที่ทำให้เกิดการปล่อยโฟตอนในช่วงสเปกตรัมของพลังงานทางแม่เหล็กไฟฟ้าของอัลตราไวโอเลต (ultraviolet) หรือเรียกว่า UV ซึ่งโดยทั่วไปมีความเข้ม (intensity) ต่ำ

สำหรับการตรวจนับโฟตอนที่ถูกปล่อยออกมาให้มีประสิทธิภาพนั้นอุปกรณ์ไวแสงมีความสำคัญในการนำไปใช้เพื่อขยายแสงและเปลี่ยนโฟตอนที่ตรวจนับได้ไปเป็นรูปแบบของการทำงานอย่างง่าย โดยอุปกรณ์ชนิดนี้เรียกว่าหลอดตัวคูณแสง ซึ่งพัฒนาเป็นครั้งแรกโดย Gworykin et al ในปี 1936 เครื่องนับรังสีจากแสงวับในปัจจุบันนี้ประกอบด้วยหลอดตัวคูณแสง 2 หลอดที่สะสมแสงทั้งหมด

ที่เกิดขึ้นภายในไวแอลแล้วไปตกกระทบยังโฟโตแคโทดหรือถูกสะท้อนไปยังโฟโตแคโทดด้วยตัวสะท้อนที่ติดตั้งอย่างเหมาะสมระหว่างหลอดตัวคูณแสงทั้งสองหลอด

ผิวหน้าภายในของหลอดตัวคูณแสงโดยทั่วไปจะเคลือบด้วยวัสดุไวแสงซึ่งมีคุณสมบัติของการเปลี่ยนพลังงานโฟตอนที่ตกขึ้นไปเป็นพลังงานทางไฟฟ้าโดยปลดปล่อยโฟโตอิเล็กตรอนซึ่งเป็นอนุภาคประจุลบและถูกเร่งไปยังไดโนดภายในหลอดโดยศักย์ที่เป็นบวกของ ไดโนดทำให้เกิดการผลิตอิเล็กตรอนเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอิเล็กตรอนทุติยภูมิเหล่านี้จะถูกเร่งไปยังไดโนดตัวถัดไปเรื่อยๆ โดยใช้กระบวนการที่คล้ายคลึงกัน ดังภาพที่ 6

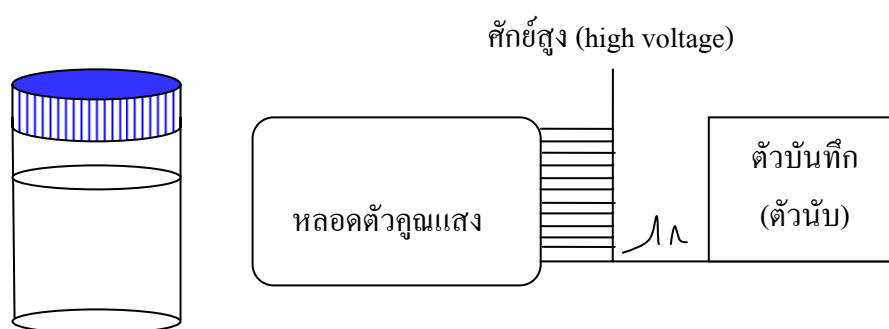


(photomultiplier tube; PMT หรือ multiplier-phototube; MPT)

ภาพที่ 6 หลักการทำงานของหลอดตัวคูณแสง

ที่มา : Michael (1989)

หลอดตัวคูณแสงประกอบด้วยไดโนดจำนวน 11-13 หลอด ซึ่งอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่ผ่านไดโนดจะขยายจำนวนเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถสร้างพัลส์ทางไฟฟ้านี้เพื่อแทนการตอบสนองของโฟตอนเนื่องจากหลอดตัวคูณแสงเป็นอุปกรณ์เชิงเส้นดังนั้นแอมพลิจูดของพัลส์จึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนของโฟตอนที่ตรวจวัดโดยโฟโตแคโทด จะได้ว่ารังสีจากแสงวับที่ตรวจนับได้และเปลี่ยนไปเป็นพัลส์ทางไฟฟ้า การบันทึกในแต่ละพัลส์ระหว่างเวลาของการวัดบ่งบอกถึงจำนวนของเหตุการณ์ที่เกิดการเปล่งแสงขึ้นในเวลานั้น แสดงไว้ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ระบบของการเกิดรังสีจากแสงวับของของเหลวแบบง่าย
ที่มา : Michael (1989)

การนับรังสีจากแสงวับของของเหลวเป็นการวัดแสงหรือโฟตอนที่เกิดจากอันตรกิริยาของการสลายตัวทางนิวเคลียร์กับตัวเปล่งแสงวับ หลอดตัวคูณแสงต้องมีความไวในการนำศักย์ไฟฟ้ามาใช้ระหว่างไดโนด ซึ่งเพียงพอต่อการผลิตพัลส์เล็ก ๆ ที่เป็นพัลส์รบกวน (noise pulses) มีผลต่อค่าพื้นหลังของการวัดสารตัวอย่างที่สังเกตได้

การถ่ายโอนความร้อนกับสิ่งแวดล้อมเป็นตัวประกอบอื่นที่สามารถตอบสนองต่อการผลิตพัลส์ที่รบกวนเมื่อเทียบกับการทำงานของหลอดตัวคูณแสง ข้อจำกัดที่ทราบค่าของหลอดตัวคูณแสงเป็นผลกระทบทางเทอร์มิออนิก (thermionic) ซึ่งเป็นพื้นฐานของความจริงอย่างง่ายที่ว่า การเคลื่อนย้ายของอิเล็กตรอนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ผลก็คือพัลส์รบกวนเกิดขึ้นมาจากพัลส์ที่แปลกลบและกลายเป็นพัลส์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่คล้ายคลึงกันของโฟตอนที่เกิดจากการสลายตัวทางนิวเคลียร์ พัลส์รบกวนจะต้องถูกจำเอาไว้เพื่อใช้ในการแทนค่าของการปล่อยทางนิวเคลียร์ที่ถูกต้อง ข้อจำกัดอื่นๆ คือแอมพลิจูดต่างๆของพัลส์ที่ได้จากหลอดตัวคูณแสง ซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นภายในไวแอล การเกิดขึ้นของเหตุการณ์หรือกล่าวคือการผลิต 100 โฟตอนจะผลิตแอมพลิจูดของพัลส์แปรผกผันกับระยะทาง

ระหว่างเหตุการณ์กับหลอดตัวคูณแสง ซึ่งแอมพลิจูดของพัลส์มีความสำคัญมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้ามีสารกัมมันตรังสีมากกว่าหนึ่งชนิดที่บรรจุอยู่ในไวแอล

3. สถิติของการวัด

สมมติว่าการปลดปล่อยโฟโตอิเล็กตรอนที่เอาท์พุทของโฟโตแคโทดเป็นไปตามกฎของปัวซอง (Poisson law) เมื่ออิเล็กตรอนที่มีพลังงาน E เกิดอันตรกิริยากับตัวแปลงแสงวับ ทำให้มีโฟโตอิเล็กตรอน m ตัวที่ปล่อยออกมาจากโฟโตแคโทด จะได้ว่าความน่าจะเป็นของการปลดปล่อยจำนวนที่แท้จริงของโฟโตอิเล็กตรอน n ตัวคือ

$$P(n,m) = \frac{m^n e^{-m}}{n!} \quad (1)$$

กระบวนการของหลอดตัวคูณแสงที่ให้สัญญาณที่เอาท์พุทของแอดโนคเมื่อจำนวนของโฟโตอิเล็กตรอนถูกปล่อยออกมาจากโฟโตแคโทดมีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 1 นั้นก็หมายความว่าประสิทธิภาพของการตรวจนับได้มาจากสมการ

$$\text{Detector efficiency} = \sum_1^{\infty} \frac{m^n e^{-m}}{n!} \quad (2)$$

เมื่อ

$$\sum_0^{\infty} \frac{m^n e^{-m}}{n!} = P(0,m) + \sum_1^{\infty} \frac{m^n e^{-m}}{n!} = 1 \quad (3)$$

ประสิทธิภาพของการตรวจนับสามารถหาได้ง่าย ๆ จากสมการ

$$\text{Detector efficiency} = 1 - P(0,m) = 1 - e^{-m} \quad (4)$$

เมื่อเครื่องนับรังสี LSC มีหลอดตัวคูณแสง 2 หลอดที่ทำงานแบบบรจวบ(coincidence)หมายถึงเป็นวงจรที่ให้สัญญาณเอาท์พุทได้ก็ต่อเมื่อรับสัญญาณอินพุทเข้ามาพร้อมกันทั้งสองหลอด ตัวคูณแสงหรือภายในช่วงเวลาเขกนั้นคือ 18 นาโนวินาทีของอนุภาคพลังงานเดียว (monoenergetic particles) กับตัวแปลงแสงวับ ประสิทธิภาพของการนับได้มาจากประสิทธิภาพของการตรวจนับซึ่งสอดคล้องกับหลอดตัวคูณแสงในแต่ละหลอด ถ้าสมมติว่าหลอดตัวคูณแสงมีการตอบสนองที่เหมือนกันจะได้ประสิทธิภาพของการนับคือ

$$\text{Counting efficiency } \varepsilon = (1 - e^{-m})^2 \quad (5)$$

การคำนวณหาค่า m ต้องกำหนดพารามิเตอร์อิสระ λ (แสดงรายละเอียดในหัวข้อที่ 12) เป็นจำนวนสมมติของอิเล็กตรอนที่ปล่อยจากโฟโตแคโทดเพื่อที่จะให้ค่าประสิทธิภาพของการนับที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับประสิทธิภาพของการนับที่ได้จากการทดลอง ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์อิสระ λ , พลังงาน E ของอิเล็กตรอนที่เกิดอันตรกิริยากันและจำนวนเฉลี่ย m ของโฟโตอิเล็กตรอนที่ปล่อยออกมาจากโฟโตแคโทด (สำหรับเครื่องนับรังสี LSC ที่มีหลอดตัวคูณแสง 2 หลอด) กำหนดได้โดยสมการ

$$m = \frac{EQ(E)}{2\lambda} \quad (6)$$

เมื่อ $Q(E)$ เป็นตัวประกอบของการควมจากการแตกตัวเป็นไอออน (แสดงรายละเอียดในหัวข้อที่ 13)

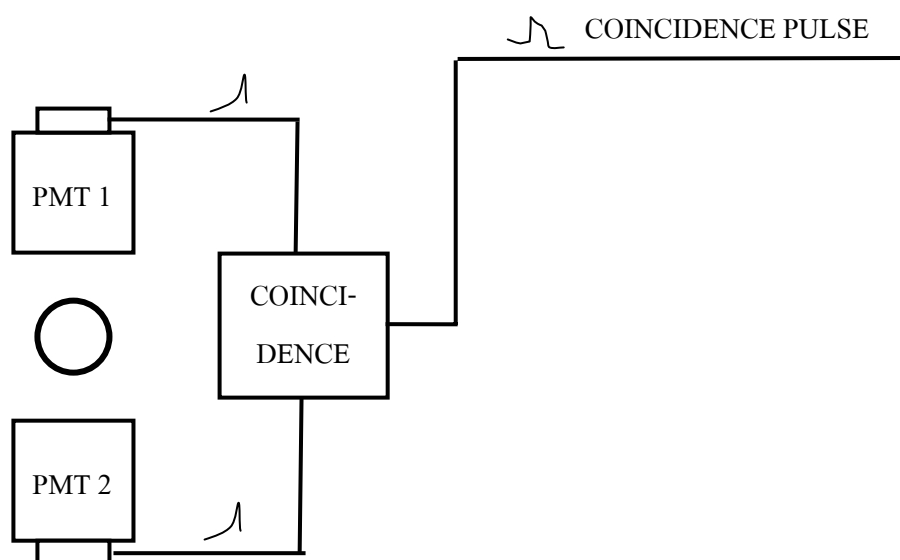
4. เทคโนโลยีของอุปกรณ์เครื่องนับรังสี LSC

อุปกรณ์เครื่องนับรังสี LSC เริ่มต้นพัฒนาขึ้นมาจากการใช้สารตัวอย่างที่มีสารกัมมันตรังสีที่ไม่สามารถผสมกับสารอินทรีย์ที่บรรจุรวมเป็นкоктелได้โดยตรง จนกระทั่งถึงต้นศตวรรษ 1950 สารละลายที่ทำให้เกิดรังสีจากแสงวับเป็นส่วนประกอบของน้ำ และสารตัวอย่างถูกวางภายนอกของкоктел เป็นเหตุผลทำให้น้ำเทอมของ “การนับรังสีจากแสงวับของของเหลวภายนอก” มาใช้พิจารณา

วิธีการของการนับรังสีจากแสงวับของของเหลวที่รู้จักกันในปัจจุบันนี้เริ่มมาตั้งแต่ 1953 เมื่อ Hayes et al เป็นคนแรกที่นำวัสดุของสารกัมมันตรังสีทางชีววิทยาใส่เข้าไปในสารละลายที่ทำให้เกิดรังสีจากแสงวับ ซึ่งวิธีการนี้รู้จักกันในภายหลังว่าเป็น “การนับรังสีจากแสงวับของของเหลวภายใน” การนับรังสีจากแสงวับของของเหลว สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในแง่ของการวัดสารตัวอย่างเนื้อเดียวกันเชิงเรขาคณิต ซึ่งไม่มีผลกระทบของการดูดกลืนและทำให้ได้ประสิทธิภาพของการนับสารกัมมันตรังสีสูงสุด ซึ่งสิ่งเหล่านี้เป็นแนวคิดขั้นสูงทางเทคโนโลยีของการเกิดรังสีจากแสงวับที่จะอธิบายไว้ในส่วนต่อไป

ในช่วงปีเดียวกันคือ 1953 เครื่องนับรังสี LSC ถูกผลิตขึ้นเพื่อการค้าเป็นครั้งแรกโดย Packard Instrument Company จนกระทั่งเวลานี้ได้ผลิตขึ้นในประเทศเพื่อนำไปใช้เอง และออกแบบออกมาบ่อยครั้งเพื่อให้สอดคล้องกับงานของการวัดจำเพาะและสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงได้เล็กน้อยหรือไม่ได้เลยก็ต่อเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขของการวัดที่ต้องการ

เครื่องนับรังสี LSC ของ Packard Instrument Company หรือเรียกว่าเครื่องนับรังสี Tri-Carb เป็นอุปกรณ์ที่ผลิตขึ้นมาใหม่ซึ่งมีลักษณะพิเศษอยู่ 2 ประการด้วยกันคือสามารถตรวจนับพัลส์ที่เกิดขึ้นจากการทำงานแบบบรจวบ และใช้หลอดตัวคูณแสง 2 หลอดที่วางอยู่ด้านตรงกันข้าม การตรวจนับพัลส์ที่เกิดบรจวบเป็นไปตามภาพที่ 8 ซึ่งเป็นภาพแสดงวงจรที่เป็นดิจิทัลทางอิเล็กทรอนิกส์เทียบกับสัญญาณที่ออกจากหลอดตัวคูณแสงทั้งสองหลอด การออกแบบดังกล่าวถือว่าประสบความสำเร็จเนื่องจากว่ามีการใช้เครื่อง LSC กันอย่างแพร่หลายในหลายๆ ปีมานี้



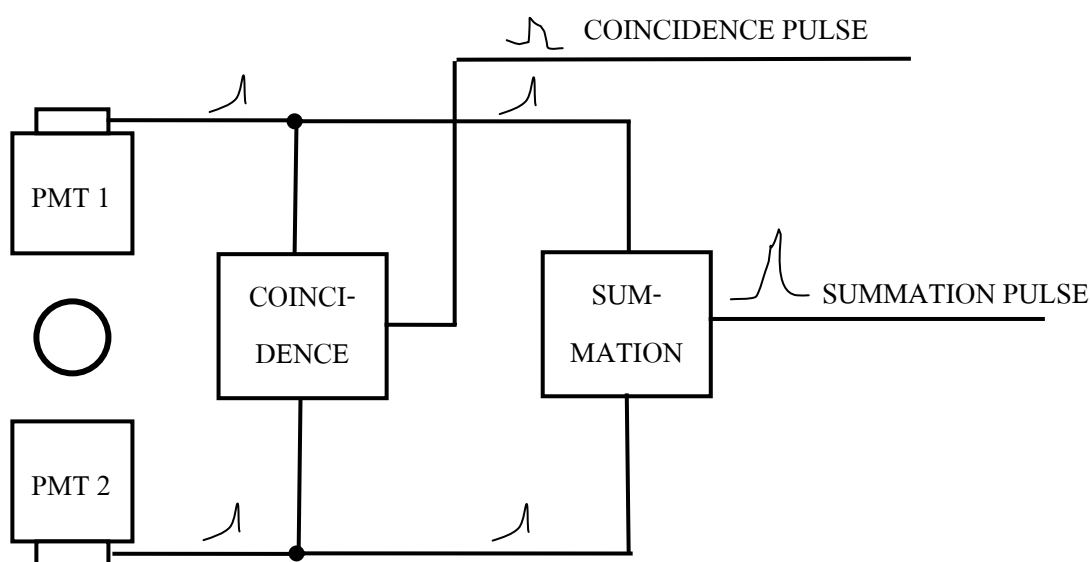
ภาพที่ 8 รูปแสดงวงจรที่เป็นดิจิทัลทางอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งเทียบกับสัญญาณที่ออกจากหลอดตัวคูณแสงทั้งสองหลอด

ที่มา : Michael (1989)

การสลายตัวทางนิวเคลียร์สามารถผลิตโฟตอนประมาณ 10 ตัวต่อพลังงานในหน่วย keV พลังงานจะสูญเสียในช่วงเวลาที่อยู่ในอันดับของ 5×10^{-9} วินาที (5 ns) ดังนั้นความยุ่งยากของผลลัพธ์ที่

ได้จากการสลายตัวให้บีตาของโฟตอนจะกระตุ้นหลอดตัวคูณแสงทั้งสองในเวลาเดียวกัน สัญญาณจากแต่ละหลอดตัวคูณแสงจะส่งต่อไปยังวงจรที่เอาท์พุท ถ้ามี 2 สัญญาณเกิดขึ้นพร้อมกันหรือภายในช่วงเวลาของการแยก (resolving time) ของวงจร ซึ่งประมาณ 18×10^{-9} วินาที (18 ns) วงจรนี้เรียกว่าวงจรบรรจบ ซึ่งสามารถตัดสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าจากหลอดตัวคูณแสงทำให้ค่าพื้นหลังลดต่ำลงได้

ในปี 1963 Packard เป็นบริษัทแรกที่ได้เสนอวิธีการในการเขียนข้อจำกัดอื่นๆ อย่างเช่น ผลกระทบต่างๆ เนื่องจากตำแหน่งทางเรขาคณิตของโฟตอนที่ปล่อยออกมาภายในไวแอลที่เปล่งแสงวับแล้วส่งผ่านไปยังหลอดตัวคูณแสงในแต่ละหลอด จำนวนของการนับที่ได้จากผลรวมของหลอดตัวคูณแสงต่างๆถูกนำมาใช้ในการออกแบบสัญญาณ โดยการรวมกันของแอมพลิจูดของสัญญาณจากเอาท์พุทแต่ละหลอดตัวคูณแสงซึ่งแปรผันตามความเข้มทั้งหมดของรังสีจากแสงวับเมื่อหลอดตัวคูณแสงผลิตแต่ละหลอดผลิตสัญญาณจากเหตุการณ์เดียวกัน ทำให้ตำแหน่งทางเรขาคณิตของเหตุการณ์จะมีความสำคัญลดลง การใช้วิธีการของการรวมกันของพัลส์ทำให้ลักษณะเฉพาะของการนับของอุปกรณ์ของเครื่องนับรังสี Tri-Carb ดีขึ้น ซึ่งประสิทธิภาพของ ทริเทียมได้รับการพัฒนาขึ้นมาประมาณ 30% ถึง 45% และค่าพื้นหลังที่ได้จากอุปกรณ์ที่ใช้วัดลดลงจาก 50 cpm เหลือประมาณ 30 cpm ในวินโดว์ (window) ของการนับของทริเทียม

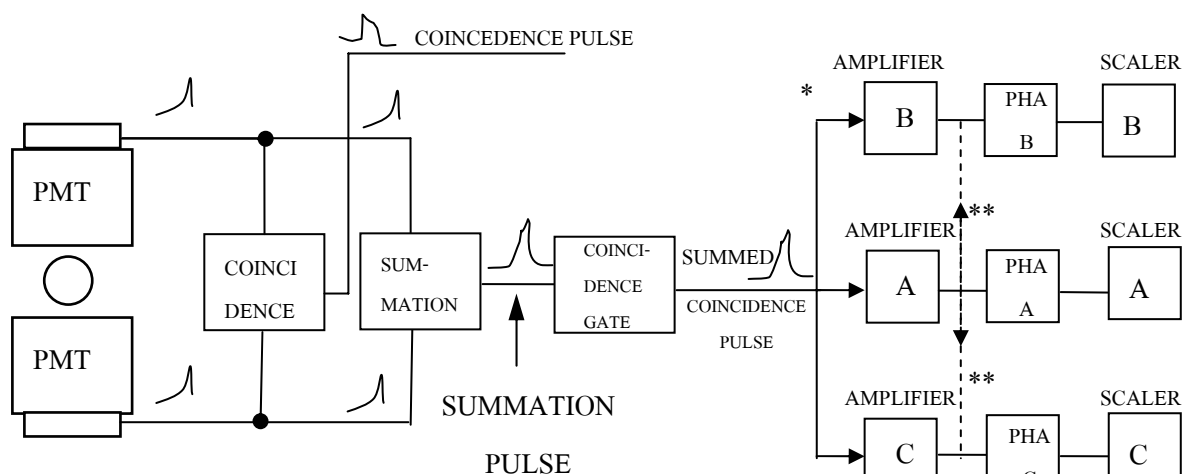


ภาพที่ 9 วงจรรวมพัลส์

ที่มา : Michael (1989)

ปัจจุบันนี้เครื่อง LSC แบบใหม่เพื่อการคำนวณส่วนใหญ่ใช้แบบวิธีการตรวจนับพัลส์จากวงจรบรรจบและการนับแบบรวมพัลส์ วิธีของการตรวจนับเหตุการณ์ทางนิวเคลียร์และการตรวจนับโฟตอนยังคงใช้พื้นฐานเหมือนเดิมไม่มีการเปลี่ยนแปลงมานานหลายปีแล้ว ซึ่งในภายหน้าอาจจะใช้ระบบของการนับรังสีจากแสงวับที่แตกต่างออกไป

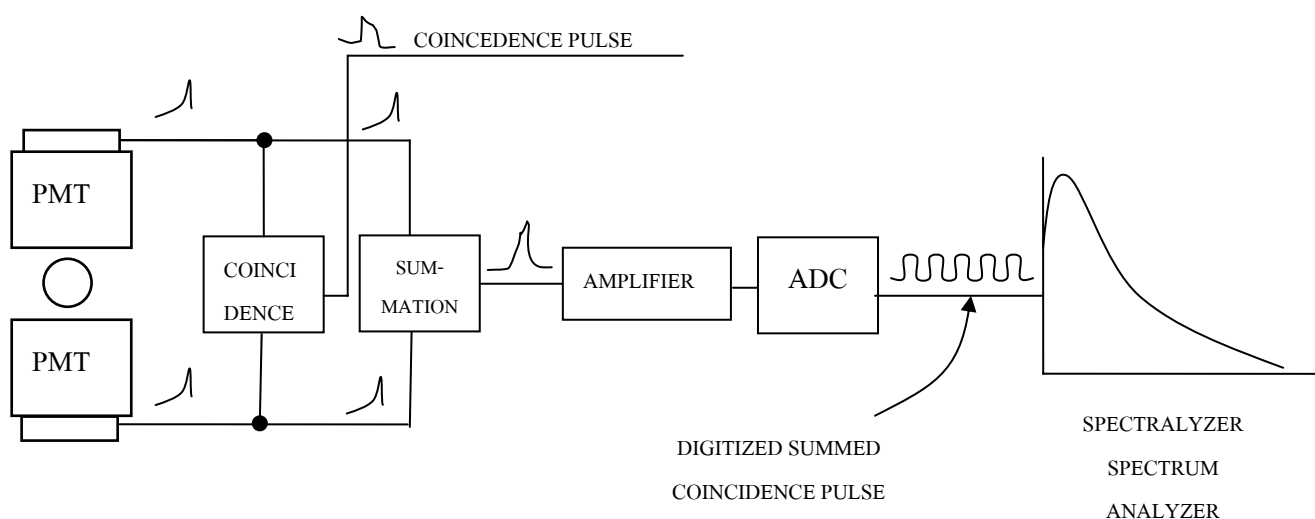
ในหลักการของเอาท์พุทที่เกิดจากการรวมกันของพัลส์ที่เป็นสัญญาณจากวงจรบรรจบสามารถให้สัญญาณผ่านเข้าไปยังตัวนับทั้งสองเพื่อที่จะบันทึกเหตุการณ์แบบง่าย ๆ ดังภาพที่ 10 หรือพัลส์เหล่านี้ก็สามารถกำหนดค่าของพลังงานและความสูงพัลส์ให้สัญญาณผ่านไปยังตัวที่ทำหน้าที่ในการวิเคราะห์สเปกตรัมของพลังงานดังภาพที่ 11 การใช้ตัวนับในการเก็บเหตุการณ์ของรังสีจากแสงวับที่สังเกตได้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ตามคำแนะนำของเครื่องนับรังสี LSC ซึ่งเครื่องนับรังสีดังกล่าวนำไปใช้ประโยชน์ในรูปของการขยายเชิงเส้นโดยเทียบกับวินโดว์ของการนับต่างๆ ทั้งสามและการใช้ประโยชน์จากช่อง(channel)เพื่อบันทึกการนับที่สังเกตได้จากการใช้วงจรขยายเพื่อแยกสัญญาณ ตัววิเคราะห์ความสูงพัลส์และตัวนับในแต่ละช่อง ซึ่งทางเลือกในเรื่องวิธีการของกระบวนการของพัลส์ถูกนำมาใช้เป็นครั้งแรกเมื่อ 1964 โดย Ansitron และนำมาใช้อีกครั้งหนึ่งเมื่อปี 1965 โดยเครื่องวัดของ Beckman ซึ่งมีพื้นฐานตามวิธีการขยายเชิงลอการิทึม โดยที่การใช้เครื่องขยายเชิงลอการิทึมจำเป็นสำหรับการขยายในแต่ละช่องโดยเฉพาะ



ภาพที่ 10 ระบบของการนับอย่างง่าย

ที่มา : Michael (1989)

แสดงให้เห็นว่ากระบวนการในการเปลี่ยนพลังงานของอนุภาคบีตาไปเป็นอิเล็กตรอนเป็นแบบเชิงเส้น อนุภาคที่มีพลังงาน 100 keV เมื่อสูญเสียพลังงานจะผลิตโฟตอนประมาณ 1000 โฟตอน (i.e. ~ 10 โฟตอน/keV) การตรวจนับโฟตอนเหล่านี้ด้วยหลอดตัวคูณแสงสองหลอดที่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นเอาท์พุทที่ได้จากวงจรรวมสัญญาณผลิตพัลส์โดยมีแอมพลิจูดแทนพลังงาน 100 keV ที่ถูกปล่อยในสารละลายของตัวแปลงแสงวับ เนื่องจากกระบวนการเป็นแบบเชิงเส้น อนุภาคบีตาที่มีพลังงาน 150 keV ทำให้เกิดสัญญาณเอาท์พุทออกจากวงจรรวมสัญญาณที่มีแอมพลิจูดสูงกว่า 50% ซึ่งสูงกว่าอนุภาคที่มีพลังงาน 100 keV โดยทั่วไปอนุภาคบีตาของพลังงานนี้จะเกิดการกระจายทั่ว ๆ โดยใช้เวลาเพียง 2-3 นาโนวินาที ผลที่เกิดขึ้นนี้จะอยู่ในรูปของพัลส์แบบอนาล็อก (Analog) ที่สูงขึ้นๆ จนถึงแอมพลิจูด หลังจากนั้นก็ลดลงจนเป็นศูนย์ แอมพลิจูดของพัลส์แบบอนาล็อกถูกเปลี่ยนให้เป็นค่าของดิจิทัล ซึ่งสามารถนำมาใช้ได้กับวงจรบรรจบ การเปลี่ยนดังกล่าวประสบความสำเร็จในรูปแบบของอนาล็อกความเร็วสูงไปเป็นค่าดิจิทัลดังภาพที่ 11 และค่าดิจิทัลซึ่งแทนพลังงานของอนุภาคบีตาเป็นที่เก็บของช่องความจำของตัววิเคราะห์สเปกตรัม โดยตัววิเคราะห์สเปกตรัม ประกอบด้วยช่องเก็บจำนวนมาก ซึ่งครอบคลุมพิสัยของพลังงานจาก 0 keV ถึง 2000 keV

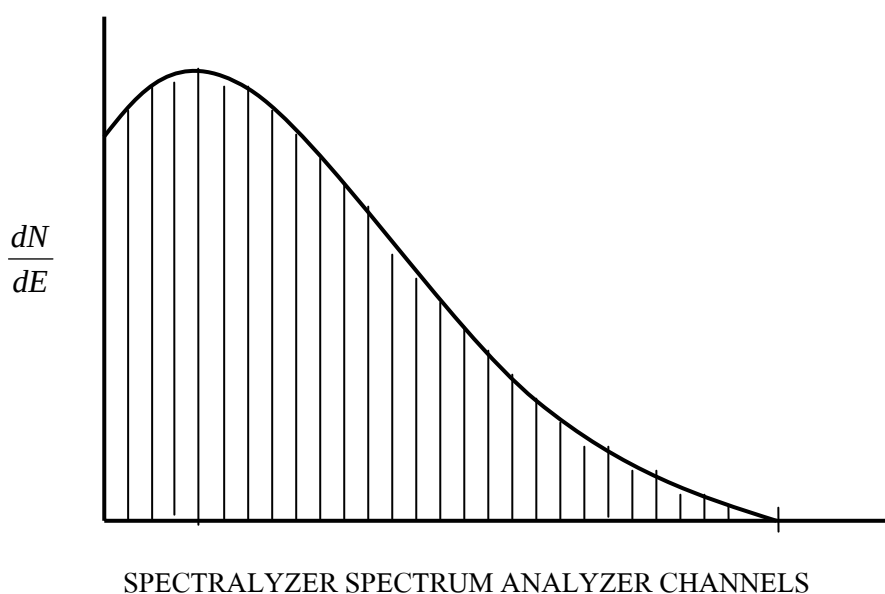


ภาพที่ 11 ตัววิเคราะห์สเปกตรัมของพลังงาน

ที่มา : Michael (1989)

สำหรับการเปลี่ยน ADC เป็นแบบเชิงเส้นนั้นในระหว่างการวัดค่าของสารตัวอย่าง ตัววิเคราะห์สเปกตรัมจะสะสมการนับซึ่งเป็นตัวที่แสดงถึงสเปกตรัมพลังงานของสารกัมมันตรังสีสัมบูรณ์ (absolute

activity) เป็นผลดีถ้าในกรณีที่ช่วงระยะเวลาในการนับยาวนานหรือจำนวนของสารตัวอย่างที่ก่อกัมมันต์ยังมีมากเท่าไรก็จะทำให้จำนวนของเหตุการณ์ที่เก็บไว้มีมากขึ้นเท่านั้นและทำให้ความแน่นอนของสเปกตรัมที่เก็บไว้มีมากขึ้นด้วย ตัววิเคราะห์สเปกตรัมมีหลายช่อง ซึ่งแต่ละช่องนั้นก็แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของพลังงาน 0.5 keV ในตัวอย่างของการวิเคราะห์เหตุการณ์ทั้งหมดจากสารตัวอย่างของทริเทียม การนับจะถูกเก็บอยู่ใน 38 ช่องที่ต่ำลงมา นั่นคือช่องที่ 38 จะแทนค่าพลังงาน 18.6 keV ดังนั้นอนุภาคบีตาที่มีพลังงานเท่ากับ 6.3 keV จะถูกบันทึกไว้ในช่องที่ 6.0 ถึง 6.5 keV ของตัววิเคราะห์สเปกตรัมที่จุดสุดท้ายของการวัดค่าของทุก ๆ เหตุการณ์ที่ตรวจสอบได้จากตัวอย่างซึ่งถูกเก็บไว้ระหว่าง 0 และ 2000 keV ดังภาพที่ 12 รวมไปถึงเหตุการณ์เหล่านั้นซึ่งเกิดจากพื้นหลังและปรากฏการณ์อื่นๆ ซึ่งสามารถที่จะส่งผลกระทบไปยังการนับของสารตัวอย่าง



ภาพที่ 12 สเปกตรัมสะสมของสารตัวอย่าง
ที่มา : Michael (1989)

เนื่องจากการขยายพัลส์ของระบบการนับรังสีจากแสงวัดของของเหลวเป็นแบบเชิงเส้นเมื่อเทียบกับพลังงาน ทำให้ง่ายและสอดคล้องในการเลือกเงื่อนไขในการวัดสารกัมมันตรังสีที่ปล่อยอนุภาคบีตา ตัววิเคราะห์สเปกตรัมถูกสอบเทียบ(calibrate)ในหน่วย keV ที่ประมาณไว้และผู้ใช้สามารถเลือกขอบเขตใดก็ได้ระหว่าง 0 และ 2000 keV ซึ่งใช้ในการวัดสารตัวอย่าง ตัวอย่างเช่นขอบเขตของผลลัพธ์สำหรับ

^3H ก็คือเรียงจาก 0 ถึง 18.6 keV ($^3\text{H } \beta_{\text{MAX}} - 18.6 \text{ keV}$) และผลลัพธ์ของ ^{14}C ก็คือจาก 0 ถึง 156 keV ($^{14}\text{C } \beta_{\text{MAX}} - 156 \text{ keV}$) การจำกัดขอบเขตที่ดึงเอาไว้ในตัววิเคราะห์สเปกตรัมถูกตั้งค่าให้ใช้กับกัมมันตรังสีต่างๆ ไปมากกว่าขอบเขตที่ถูกตั้งค่าการนับโดยผู้ใช้ถึงแม้ว่าจะง่ายกว่าก็ตาม

5. การสอบเทียบอุปกรณ์เครื่องนับรังสี LSC

5.1 กระบวนการของการสอบเทียบ

ก่อนการนับสารตัวอย่างต้องสอบเทียบเครื่องก่อน ซึ่งทำได้โดยอัตโนมัติเมื่อใช้ SNC (Self-Normalization and Calibration) นำเตาเลียบโพโรโทคอล ใส่ที่ตลับ (cassette) แล้วใส่ไวแอลที่บรรจุสารละลาย unquench C-14 calibration standard โดยในระหว่างขั้นตอนการสอบเทียบเครื่องจะมีการส่งสีกส์สูงเข้าสู่ส่วนหลอดตัวคูณแสงของแต่ละข้าง และปรับแต่งให้เป็นอิสระต่อกันจนกระทั่งหลอดทั้งสองถูกทำให้เป็นบรรทัดฐาน (normalized) กล่าวคือมีการตอบสนองต่อไวแอลที่บรรจุสารละลาย unquench C-14 calibration standard ในอัตราที่เท่ากัน จากนั้นสีกส์สูงที่เข้าไปในหลอดทั้งสอง ก็จะถูกปรับแต่งจนกระทั่งจุดปลายสเปกตรัมของ C-14 อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมในแผนภูมิของตัววิเคราะห์สเปกตรัม (4000-channel analyzer) ถ้าหากใส่ตลับ SNC ที่งไว้ เครื่องจะทำการนับให้โดยอัตโนมัติทุก 23 ชั่วโมง

หมายเหตุ ในเครื่องรุ่น 2770 TR/SL super low level ให้วัดไวแอลเปล่าด้วยเพื่อดูสเปกตรัมของ detector guard เพราะวัสดุของไวแอลที่แตกต่างกันจะให้สเปกตรัมแตกต่างกันด้วย

5.2 Automatically tracking instrument performance หรือ IPA

หากใส่ไวแอลสำหรับวัดค่าพื้นหลังของสารกัมมันตรังสี ^3H และ ^{14}C ลงในตลับ (cassette) ของ SNC ก็จะทำให้ได้ค่าพื้นหลัง ประสิทธิภาพ E^2/B (ความไว) และการทดสอบไคสแควร์ (Chi-square test) ซึ่งเป็นการบันทึกค่า IPA นั้นเอง

5.3 ขั้นตอนดำเนินการของกระบวนการสอบเทียบ

5.3.1 ใส่ SNC protocol plug ลงไปที่ตลับ

5.3.2 เลื่อน SNC plug ไปทางซ้ายมือสำหรับเครื่องนับรังสี LSC รุ่น Packard Tri-Carb® Model 2770TR/SL โดยตำแหน่งที่ 2 สำหรับใส่ไอโซโทปให้ใส่ขวดเปล่า ถ้าเครื่องอยู่ในภาวะ IDLE (ไม่ได้ทำการนับ) ให้ปฏิบัติดังนี้

ก. วางตลับทางฝั่งขวาของ sample changer deck แล้วกด F-11 เพื่อเริ่มต้น ตลับก็จะเลื่อนเข้าสู่ตำแหน่งนับ แล้วหย่อนขวดสารกัมมันตรังสี C-14 เข้าสู่ส่วนนับวัด

แต่ถ้าเครื่องกำลังนับสารตัวอย่างอื่นอยู่ ให้ปฏิบัติดังนี้

ข. วาง calibration cassette ต่อสุดท้ายของแถวตลับที่จะเข้านับ เมื่อ เครื่องมือนับโปรโทคอล(protocol)ของสารตัวอย่างเดิมนั้นเสร็จก็จะเลื่อนตลับสอบเทียบเข้านับโดย อัตโนมัติ

5.4 การแปลผลของการสอบเทียบ (calibration Results)

เมื่อการสอบเทียบ(calibration)เสร็จเรียบร้อยแล้วจะปรากฏคำว่า SYSTEM NORMALIZED หมายถึงค่าพารามิเตอร์ของการควาน tSIE สำหรับ unquenched C-14 standard ได้ตั้งไว้ที่ 1000

เมื่อเรานับตัวอย่างที่ศึกษา หากมีค่า tSIE = 1000 แสดงว่าสารตัวอย่างนี้ไม่มีการควาน เกิดขึ้นเลย แต่หาก tSIE ลดลงมากเท่าไรก็แสดงว่าเกิดการควานมากขึ้นเท่านั้น

6. หลอดตัวคูณแสงหรือ PMT

6.1 โครงสร้างของหลอดตัวคูณแสง

หลอดตัวคูณแสงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นหลอดตัวคูณแสงชนิดไดโนประกอบด้วย โครงสร้างหลักดังต่อไปนี้

6.1.1 โฟโตแคโทด ทำหน้าที่เปลี่ยนแสงวัดจากตัวแปลงแสงวัดไปเป็นโฟโตอิเล็กตรอน โฟโตแคโทดมักทำจากวัสดุที่มีความไวแสงเช่น $\text{Cs}_3\text{Sb-O}$, $\text{Na}_2\text{KSb-Cs}$ และ RbSc

6.1.2 ชุดของขั้วไฟฟ้าที่เรียกว่าไดโนด ซึ่งประกอบด้วยแผ่นไดโนดประมาณ 11-13 แผ่น ที่ทำหน้าที่เพิ่มจำนวนอิเล็กตรอน กลุ่มของอิเล็กตรอนจะถูกเร่งจากไดโนดแผ่นแรกไปยังไดโนดแผ่นถัดไปและเพิ่มจำนวนขึ้นได้

6.1.3 ขั้วแอโนด ทำหน้าที่รวบรวมจำนวนอิเล็กตรอนทั้งหมด

6.1.4 ภาชนะแก้วสุญญากาศ ที่สามารถบรรจุโครงสร้างของหลอดได้ทั้งหมดและทำหน้าที่ป้องกันมิให้แสงผ่านเข้าไปได้

6.1.5 ชุดความต้านทาน ทำหน้าที่เป็นตัวแบ่งศักย์ไฟฟ้าให้กับไดโนดแต่ละตัว ค่าของความต้านทานจะขึ้นอยู่กับการออกแบบเพื่อการให้งาน

6.2 การถ่ายเทพลังงานในหลอดตัวคูณแสง

เมื่อรังสีกระทบตัวเปล่งแสงวับ และมีการถ่ายเทพลังงานเพื่อให้ตัวเปล่งแสงวับเกิดการเปล่งแสงวับ ซึ่งจะเป็นขั้นตอนแรกของการวัดรังสี จากนั้นหลอดตัวคูณแสงจะทำหน้าที่เปลี่ยนแสงที่เกิดขึ้นให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า การถ่ายเทพลังงานเพื่อให้เกิดสัญญาณไฟฟ้าในหลอดตัวคูณแสงมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

6.2.1 รังสีปล่อยอนุภาคให้เคลื่อนที่ด้วยพลังงานแล้วสูญเสียพลังงานทั้งหมดให้กับตัวทำละลายในкоклет จากนั้นตัวทำละลายจะอยู่ในสถานะกระตุ้นแล้วถ่ายเทพลังงานไปยังตัวเปล่งแสงวับซึ่งผสมรวมอยู่ในไวแอลทำให้เกิดรังสีจากแสงวับ

6.2.2 แสงหรือโฟตอนที่ปล่อยออกมาถูกส่งผ่านไปยังโฟโตแคโทด เมื่อโฟตอนมีพลังงานสูงกว่าเวิร์กฟังก์ชัน (work function) ตามปรากฏการณ์ของการเกิดโฟโตอิเล็กทริกก็จะทำให้อิเล็กตรอนของโฟโตแคโทดหลุดออกมาและถูกเร่งด้วยความต่างศักย์ระหว่างไดโนดทำให้ถูกเร่งไปยังไดโนดตัวถัดไป

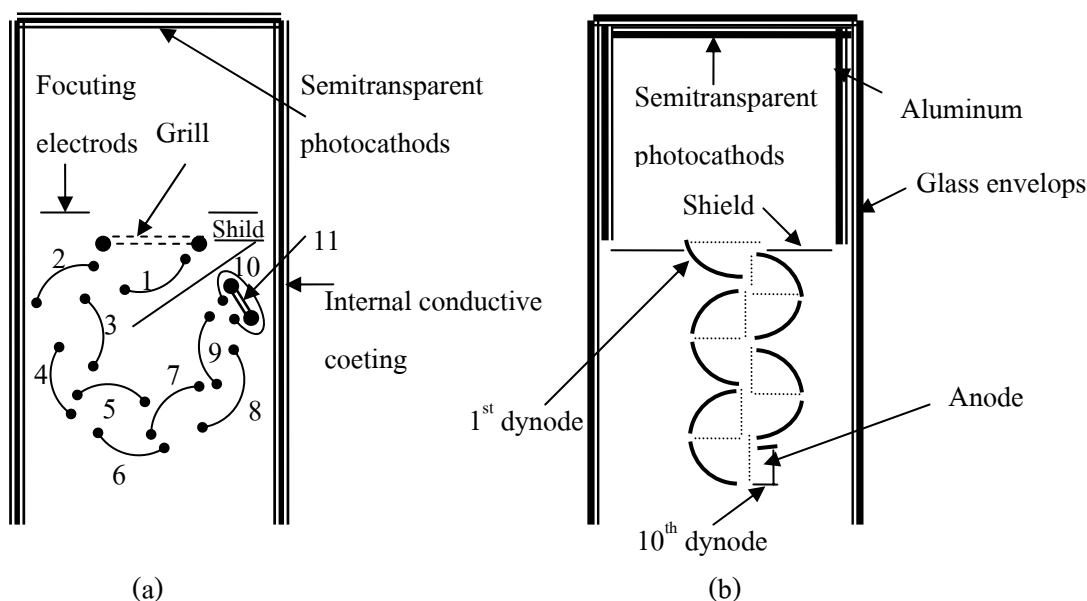
6.2.3 เกิดการเพิ่มจำนวนอิเล็กตรอนโดยชุดของไดโนดต่างๆ

6.2.4 อิเล็กตรอนทั้งหมดถูกรวบรวมที่แอโนดแล้วจะเกิดสัญญาณพัลส์ในรูปของกระแสและส่งสัญญาณอินพุตไปยังวงจรขยายส่วนหน้า (preamplifier)

6.2.5 สัญญาณพัลส์ถูกส่งผ่านไปยังวงจรคัดเลือกสัญญาณ (discriminator) และวงจรตกแต่งสัญญาณ (pulse shaper) แล้วจะถูกบันทึกในเครื่องนับรังสีทางอิเล็กทรอนิกส์

พารามิเตอร์ที่สำคัญอื่น ๆ อีกของหลอดโฟโตแคโทดคือ ขนาดของกระแสดำ (dark current) กระแสดำประกอบด้วยอิเล็กตรอนที่ปล่อยโดยแคโทด หลังจากพลังงานความร้อนถูกดูดกลืนเข้าไป กระบวนการนี้เรียกว่าเทอร์มิออนิก หลอดโฟโตแคโทดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร อาจจะปลดปล่อยอิเล็กตรอนในความมืดมากถึง 10^5 อิเล็กตรอนต่อวินาทีที่อุณหภูมิห้อง การเย็นลงของแคโทดจะลดสัญญาณรบกวนได้ 50% ของทุก ๆ $10-15^\circ \text{C}$ ที่ลดลง การปล่อยเทอร์มิออนิกอาจจะเกิดกับไดโนดและผนังแก้วของหลอดแต่มีจำนวนน้อย อิเล็กตรอนอาจจะปลดปล่อยจากโฟโตแคโทดเนื่องจากไอออนบวกที่เกิดจากการแตกตัวเป็นไอออนของแก๊สเหลืออยู่ในหลอดไปกระทบ สุดท้ายก็คือแสงที่ปล่อยอันเป็นผลมาจากการรวมตัวกลับของไอออน อาจจะปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากการไปชนกับแคโทดหรือไดโนด ขนาดของกระแสดำจะมีความสำคัญในกรณีที่แหล่งกำเนิดรังสีที่จะวัดมีพลังงานต่ำมาก ดังนั้นเมื่อซื้อหลอดโฟโตแคโทดมาแล้วควรจะตรวจสอบกระแสดำและการตอบสนองสเปกตรัม

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าอิเล็กตรอนจะถูกนำทางจากไดโนดหนึ่งไปยังไดโนดถัดไปโดยอิทธิพลของสนามไฟฟ้า ถ้ามีสนามแม่เหล็กอยู่ในหลอดดังกล่าว อาจจะเบี่ยงอิเล็กตรอนออกนอกเส้นทางและทำให้มีอิเล็กตรอนบางส่วนเท่านั้นที่ชนไดโนดอันถัดไป ทำให้การขยายลดลง สนามแม่เหล็กอ่อนของโลกมีส่วนทำให้เกิดผลเช่นนี้ เพื่อลดอิทธิพลของสนามแม่เหล็กนี้จะใช้แผ่นวงแหวนที่ทำด้วยโลหะมาวางรอบ ๆ หลอดตัวคูณแสงเรียกว่าโลหะมิว (μ -metal) ซึ่งก็มีการทำขายในหลายรูปแบบ โดยทั่วไปหลอดโฟโตแคโทดจะมีชั้นครึ่งโปร่งแสงวางติดผิวในของหลายหน้าต่างของหลอดผิวนอกของหน้าต่างจะแบน เพื่อให้่ายต่อการประกบเข้ากับตัวแปลงแสงไว้ สองรูปแบบทางเรขาคณิตของหลอดโฟโตแคโทดได้แสดงได้ดังภาพที่ 13



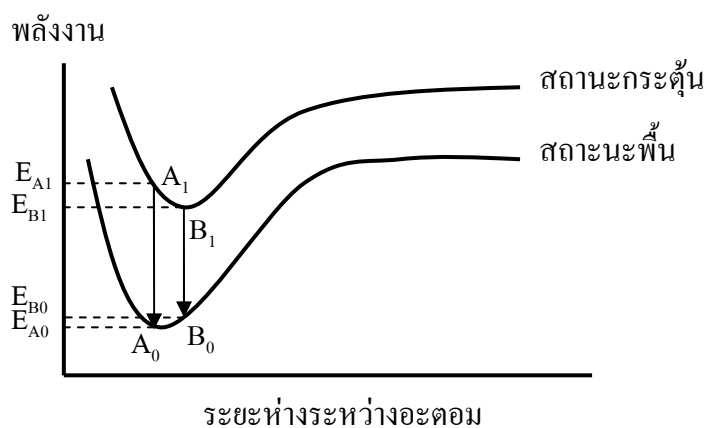
ภาพที่ 13 แสดง 2 รูปแบบทางเรขาคณิตของหลอดโฟโตแคโทด
ที่มา : ธวัช (2541)

ในการที่จะให้เกิดสนามไฟฟ้ากับไดโนด เราต้องจ่ายความต่างศักย์อย่างเพียงพอแก่ไดโนด วงจรแบ่งความต่างศักย์จะทำหน้าที่นี้ ถ้าจ่ายความต่างศักย์ 900 V ให้กับหลอดโฟโตที่มีไดโนด 10 ตัว แล้วความต่างศักย์ระหว่าง 2 ไดโนด คือ 100 V

7. กลไกของการบวนการเกิดรังสีจากแสงวับของของเหลว

การผลิตแสงในตัวเปล่งแสงวับอินทรีย์เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงในระดับโมเลกุล พิจารณาแผนภาพระดับพลังงานของภาพที่ 14 ซึ่งได้แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์ของโมเลกุลเกิดได้ อย่างไรก็ตามระยะทางระหว่างอะตอม สถานะพื้นของโมเลกุลนั้นอยู่ที่จุด A ซึ่งซ้อนทับกับค่าต่ำสุดของพลังงานศักย์ เมื่อรังสีพุ่งผ่านตัวเปล่งแสงวับจะจ่ายพลังงานให้กับโมเลกุล และยกระดับไปอยู่ในสถานะกระตุ้น ตัวอย่างเช่นการเปลี่ยนจาก $A_0 \rightarrow A_1$ อาจเกิดขึ้น ตำแหน่ง A_1 นั้นไม่ใช่ตำแหน่งพลังงานต่ำสุดโมเลกุลจะปลดปล่อยพลังงานโดยผ่านการสั่นของแลตทิซ (พลังงานจะกระจายในรูปความร้อน) และเคลื่อนไปยังจุด B_1 จุด B_1 ยังคงเป็นสถานะกระตุ้นและในบางกรณีโมเลกุลจะทรานซิชันจาก $B_1 \rightarrow B_0$ ตามด้วยการปล่อยโฟตอนด้วยพลังงาน $E_{B_1} - E_{B_0}$ เวลาของการทรานซิชันจะอยู่ในราว 10^{-8} วินาที ข้อสังเกตคือการปล่อยโฟตอนด้วยพลังงาน $E_{B_1} - E_{B_0}$ จะน้อยกว่าพลังงานที่ทำให้เกิด

การกระตุ้น $E_{A_1} - E_{A_0}$ ความแตกต่างนี้สำคัญมากเพราะว่าสเปกตรัมของตัวเปล่งแสงวับที่ปล่อยออกมาจะซ้อนทับกับสเปกตรัมดูดกลืนทำให้ไม่มีรังสีจากแสงวับเกิดขึ้น

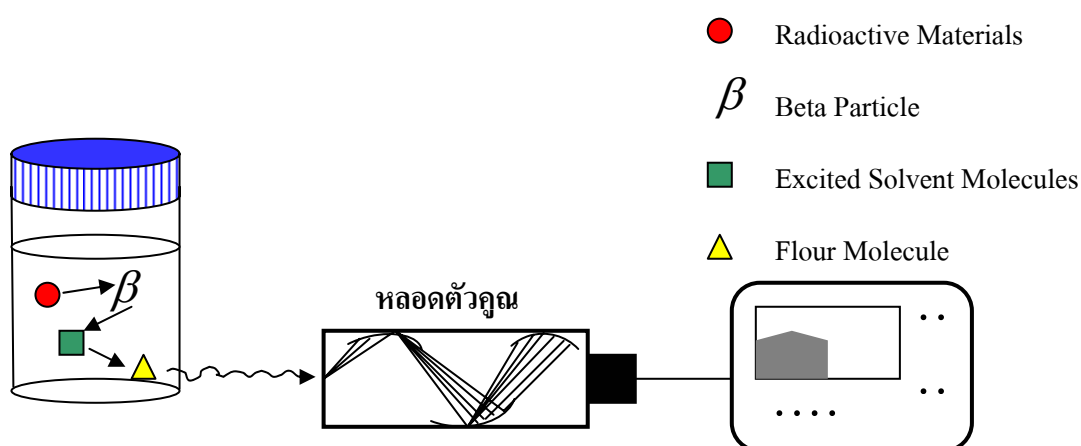


ภาพที่ 14 แผนภาพระดับพลังงาน

ที่มา : ธวัช (2541)

ข้อแตกต่างที่สำคัญระหว่างตัวเปล่งแสงวับอนินทรีย์และอินทรีย์ คือ เวลาตอบสนองของสารอินทรีย์ซึ่งมีค่า $1 \mu s$ ในขณะที่สารอินทรีย์มีค่าน้อยกว่า 10 นาโนวินาที ซึ่งเหมาะสมกับการวัดเวลาที่รวดเร็ว

ภาพที่ 15 แสดงถึงการแผ่รังสีโดยปล่อยอนุภาคที่เกิดอันตรกิริยาในкоклетก่อนที่จะนำไปสู่การบันทึกการนับของระบบ



ภาพที่ 15 แสดงการแผ่รังสีโดยปล่อยอนุภาคที่เกิดอันตรกิริยาในкоклет

ที่มา : http://www.nucleide.org/ICRM_LSC_WG/icrmciematnist.htm

ขั้นตอนการนับการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีต่างๆมีดังต่อไปนี้

7.1 อนุภาคบีตาถูกปล่อยออกมาจากการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี

7.2 อนุภาคบีตาเคลื่อนที่เป็นระยะทางสั้นๆ ในคอกเทลด้วยพลังงานจลน์ค่าหนึ่งโดยทั่วไปใช้เวลาเพียง 2-3 นาโนวินาทีเท่านั้นก่อนที่จะส่งผ่านพลังงานไปยังสารละลาย ซึ่งตัวกลางจะดูดกลืนพลังงานใน 3 รูปแบบดังนี้ ความร้อน การแตกตัวเป็นไอออนและการกระตุ้น พลังงานของอนุภาคบีตาบางตัวถูกดูดกลืนโดยโมเลกุลของตัวทำละลายทำให้ตัวทำละลายอยู่ในสถานะกระตุ้น

7.3 พลังงานของตัวทำละลายในสถานะกระตุ้นพยายามที่จะกลับเข้าสู่สถานะพื้นเพื่อให้เสถียรโดยปลดปล่อยพลังงานในรูปแบบของแสงอัลตราไวโอเลต(ultraviolet; UV) โมเลกุลของตัวทำละลายที่ถูกกระตุ้นสามารถส่งผ่านพลังงานซึ่งกันและกันและกันและส่งผ่านพลังงานไปยังตัวถูกละลายดังภาพที่ 15 ซึ่งตัวถูกละลายเป็นสารที่ทำให้เกิดรังสีจากแสงวับ โมเลกุลของตัวทำละลายที่ถูกกระตุ้นซึ่งส่งผ่านพลังงานไปยังโมเลกุลของตัวถูกละลายนั้นไปรอบวงโคจรหมอกอิลีคตรอนของตัวถูกละลายทำให้วงโคจรของหมอกอิลีคตรอนอยู่ในสถานะกระตุ้นเมื่ออิลีคตรอนของวงโคจรที่ถูกกระตุ้นของโมเลกุลของตัวถูกละลายกลับเข้าสู่สถานะพื้นก็จะแผ่รังสีออกมาในรูปของโฟตอนของแสง UV แสง UV ถูกดูดกลืนโดยโมเลกุลของสารที่ทำให้เกิดรังสีจากแสงวับโดยปล่อยแสงสีน้ำเงินออกมาก่อนที่จะกลับเข้าสู่สถานะพื้น เหตุการณ์จากการสลายตัวทางนิวเคลียร์ทำให้เกิดโฟตอนประมาณ 10 ตัวต่อพลังงานในหน่วย keV พลังงานจะสูญเสียไปในช่วงเวลา 5 นาโนวินาที จำนวนทั้งหมดของโฟตอนทำให้เกิดรังสีจากแสงวับ โดยความเข้มของแสงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานเริ่มต้นของอนุภาค

7.4 แสงวับสีน้ำเงินตกกระทบโฟโตแคโทดของหลอดตัวคูณแสงทำให้เกิดโฟโตอิลีคตรอน(เป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนของพัลส์ของแสงสีน้ำเงิน) ผ่านไดโนดตัวต่าง ๆ ทำให้มีจำนวนเพิ่มมากขึ้นเพียงพอ จากนั้นโฟโตอิลีคตรอนก็จะถูกส่งไปยังแอโนดแล้วถูกปล่อยออกมาจากหลอดตัวคูณแสงในรูปของกระแสไฟฟ้าซึ่งโดยทั่วไปเครื่องนับรังสี LSC จะมีหลอดตัวคูณแสง 2 หลอด แอมพลิจูดของพัลส์ที่ได้จากหลอดตัวคูณแสงก็ขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่เกิดแสงวับภายในไวแอล ซึ่งการผลิตโฟตอน 100 ตัวที่เกิดในตำแหน่งที่ใกล้กับหลอดตัวคูณแสงจะแทนด้วยพัลส์ที่มีขนาดใหญ่กว่าตำแหน่งที่เกิดบริเวณไกลหลอด สัญญาณจากแต่ละหลอดตัวคูณแสงจะถูกส่งไปยังวงจรบรรจบ โดยผลรวมของแอมพลิจูดของพัลส์จากแต่ละ หลอดตัวคูณแสง เอาท์พุทที่ได้มาเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความ

เข็มทั้งหมดของรังสีจากแสงวับ ซึ่งพัลส์อนาล็อก (analog pulse) จะสูงเพิ่มขึ้นจนมีแอมพลิจูดสูงสุด ก่อนที่จะลดลงจนเป็น 0

7.5 แอมพลิจูดของพัลส์ทางไฟฟ้าถูกเปลี่ยนเป็นค่าดิจิทัลและค่าดิจิทัลซึ่งแทนด้วยพลังงานของอนุภาคบีตาจะส่งผ่านไปยังตัววิเคราะห์ข้อมูลเพื่อเปรียบเทียบค่าของดิจิทัลในแต่ละช่องของ LSC โดยแต่ละช่องจะถูกบันทึกในหน่วยความจำของตัววิเคราะห์หลายช่อง (multi-channel analyzer) ซึ่งประกอบด้วยช่องเก็บข้อมูล

7.6 จำนวนของพัลส์ในแต่ละช่องแสดงให้เห็นบนจอแสดงผล สารตัวอย่างที่ถูกวิเคราะห์และสเปกตรัมสามารถแสดงกราฟของข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับพลังงานของการแผ่รังสีหรือปริมาณของสารกัมมันตรังสีที่ละลายรวมอยู่ในคอกเทล

8. การควench (quenching)

8.1 ประเภทของการควench ต่างๆ

เนื่องจากตัวทำละลายและตัวเปล่งแสงวับอยู่ผสมกันทำให้มีประสิทธิภาพสูงในการถ่ายเทพลังงาน และสามารถวัดรังสีได้ 4π เรเดียน เครื่องนับรังสีจากแสงวับจึงมีประสิทธิภาพในการวัดรังสีสูง แต่อย่างไรก็ตามการวัดเช่นนี้ก็มีปัญหาจากการควench ซึ่งหมายถึงกระบวนการเกิดหรือการส่งผ่านแสงวับจากตัวเปล่งแสงวับทำให้ประสิทธิภาพของการวัดลดน้อยลง การควench จำแนกได้เป็นหลายประเภทดังต่อไปนี้

8.1.1 การควench เชิงสี (Colour quenching)

การที่สารตัวอย่างมีสีทำให้เกิดการดูดกลืนแสงที่ได้จากกระบวนการเปล่งแสงของตัวเปล่งแสงวับ ซึ่งจะมีผลทำให้โฟตอนที่ไปยังหลอดตัวคูณแสงลดน้อยลงและทำให้สัญญาณพัลส์ที่เกิดขึ้นลดลงจนอาจจะไม่ผ่านระดับล่างของหน้าต่างตัวคัดเลือกสัญญาณ จึงทำให้ได้อัตรานับน้อยลง และในบางครั้งปฏิกิริยาของสารเคมีที่ไม่มีสีก็อาจจะเป็นผลให้เกิดสารละลายที่มีสีได้ การควench เชิงสีระดับรุนแรงจะดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นในช่วง 380 – 480 นาโนเมตร ระดับปานกลางจะดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 480 – 520 นาโนเมตร และที่ระดับต่ำจะดูดกลืนแสงที่ 520 – 560 นาโนเมตร

ดังนั้นจึงควรหลีกเลี่ยงการใช้สารละลายที่มีสี และถ้าหากจำเป็นจริงๆแล้ว ควรใช้สารละลายที่มีสีที่ความเข้มข้นน้อยที่สุดเพื่อลดการควenchสี

8.1.2 การควenchเคมี (Chemical quenching)

การควenchเคมีเกิดจากสารเคมีในкоклетอบกวนการถ่ายเทพลังงานของตัวทำละลายไปยังตัวเปล่งแสงวับ โดยสารเคมีนั้นอาจรับพลังงานจากตัวทำละลายไปทำให้การเปล่งแสงลดลงหรืออาจรวมกับตัวทำละลายหรือตัวเปล่งแสงวับทำให้เกิดสารประกอบที่ให้แสงเรืองในช่วงที่ไม่เหมาะสม สารประกอบที่อาจเกิดการควenchเคมีได้แก่ สารอินทรีย์ฮาไลด์ สารประกอบที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ สารประกอบที่มี C=O เช่น อะซิโตน (acetone) แม้กระทั่งออกซิเจนที่ละลายอยู่ก็ทำให้เกิดการควenchได้ ซึ่งปัญหานี้ อาจแก้ไขได้โดยใช้ในโตรเจนผ่านเข้าไปเพื่อไล่ออกซิเจน จะทำให้มีประสิทธิภาพของการวัดเพิ่มขึ้น

8.1.3 การควenchจากการเจือจาง (Dilution quenching)

การควenchจากการเจือจางเกิดขึ้นเนื่องจากการเจือจางของตัวเปล่งแสงวับด้วยสารตัวอย่างที่ต้องการวัดหรือสารอื่นๆที่ไม่มีส่วนให้เกิดแสงทำให้การถ่ายเทพลังงานลดลงเนื่องจากระยะทางของโมเลกุลของตัวทำละลายเพิ่มมากขึ้น

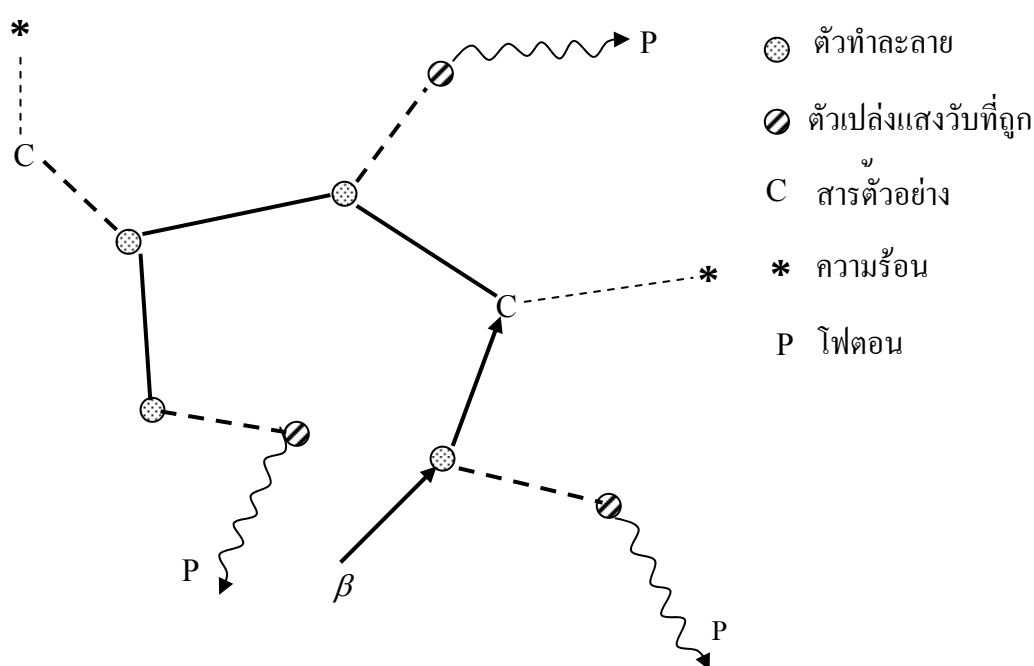
8.1.4 การควenchเชิงแสง (Optical quenching)

การควenchเชิงแสงเกิดขึ้นในกรณีที่коклетอบกวนตัว เกิดรอยนิ้วมือบนไวแอล ไวแอลสกปรกหรือภายนอกขวดเป็นฝ้า สิ่งเหล่านี้จะมีผลทำให้การส่งผ่านแสงวับน้อยลง

8.1.5 การควenchในตัว (Self quenching)

การควenchในตัวเกิดเนื่องจากความเข้มข้นของตัวถูกละลายหรือตัวเปล่งแสงวับมากขึ้นจะทำให้เกิดการรบกวนการส่งผ่านพลังงานหรือเมื่อตัวเปล่งแสงวับตื่นตัวแล้วไปรวมตัวกับโมเลกุลที่ไม่ตื่นตัว ทำให้ไม่เกิดรังสีจากแสงวับ

ภาพที่ 16 แสดงกระบวนการชน (การแลกเปลี่ยนพลังงาน) เมื่อ (C) แทนโมเลกุลของสารตัวอย่าง ไดอะแกรมแสดงการชนกันของอนุภาคบีตาเมื่อโมเลกุลของตัวทำละลาย (●) ส่งผ่านพลังงานไปยังตัวถูกละลาย (⊗) เพื่อผลิตโฟตอน (P) การชนกันครั้งที่สองเป็นโมเลกุลของสารตัวอย่างที่พลังงานสูญหายไปเป็นความร้อน (*) การชนกันครั้งอื่นๆแสดงการส่งผ่านพลังงานไปยังตัวทำละลายและส่งผ่านพลังงานไปยังโมเลกุลของสารตัวอย่างอีกครั้งทำให้เกิดความร้อนและไม่มีโฟตอนเกิดขึ้น

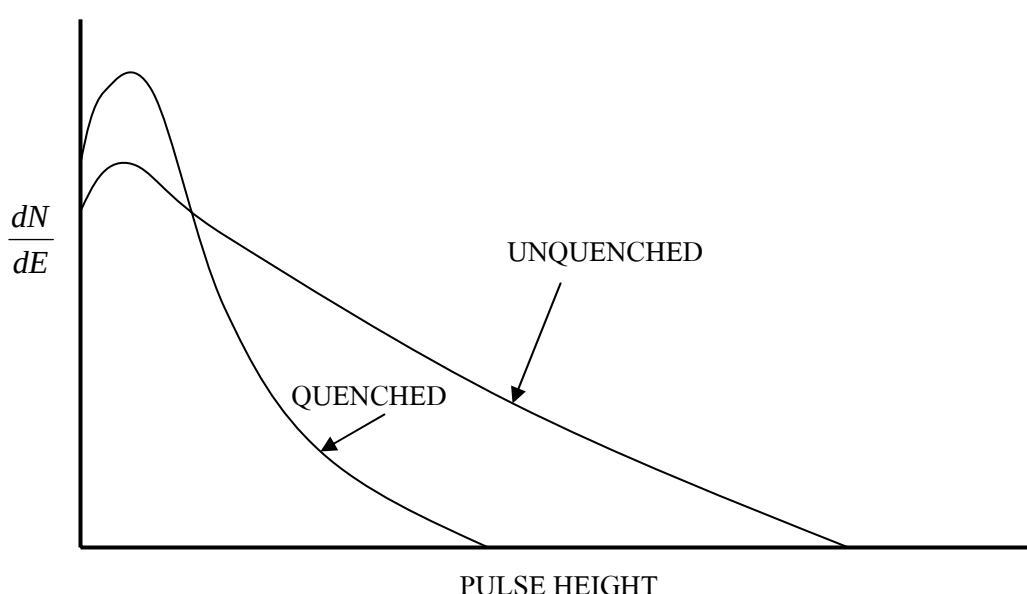


ภาพที่ 16 แสดงกระบวนการแลกเปลี่ยนพลังงานเมื่อเกิดการเควน
ที่มา : Michael (1989)

เมื่อเกิดการเควนจะทำให้การถ่ายเทพลังงานจากอนุภาคบีตาไปยังตัวทำละลายและตัวเปล่งแสงวับลดน้อยลง ซึ่งระหว่างที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางโฟตอนอาจจะถูกดูดกลืนหรือกระเจิงออกไป ความยาวคลื่นแสงสามารถเปลี่ยนแปลงได้ถ้าสารละลายมีสี ความยาวคลื่นเปลี่ยนค่าเมื่อการตอบสนองของหลอดตัวคูณแสงลดลง รูปแบบของการเกิดการเควนของแสงที่ปล่อยออกมาเหล่านี้เรียกว่าการเควนเชิงแสง ส่วนใหญ่เป็นสาเหตุสำคัญเนื่องจากสีของสารตัวอย่างหรือคอกเทลที่เลือก

รูปแบบทั้งหมดของการเควนมีผลต่อการทำให้จำนวนของโฟตอนต่อพลังงานของอนุภาคบีตาในหน่วยกิโลอิเล็กตรอนโวลต์ที่ไปยังหลอดตัวคูณแสงลดลง เพราะโฟตอนเกิดอันตรกิริยากับหลอดตัวคูณ

แสง แอมพลิจูดของพัลส์ลดลงสำหรับอนุภาคที่มีพลังงานเท่ากัน ผลทำให้แอมพลิจูดของสเปกตรัมความสูงของพัลส์ (pulse height spectrum) เลื่อนต่ำลง แสดงดังภาพที่ 17 เห็นได้ว่าสัญญาณพัลส์เลื่อนไปทางด้านซ้ายทำให้อัตราการนับเปลี่ยนแปลงไปด้วย สำหรับสารกัมมันตรังสีที่ให้อนุภาคบีตาพลังงานสูงการเลื่อนนี้ อาจเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้นหรืออาจจะไม่เกิดขึ้นเลยสำหรับประสิทธิภาพของการนับ แต่สารกัมมันตรังสีที่มีพลังงานต่ำก็จะเกิดการเลื่อนของแอมพลิจูดของสเปกตรัมความสูงของพัลส์ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยเฉพาะทริเทียมมักจะเกิดการเลื่อนเนื่องจากว่าพลังงานของอนุภาคบีตาต่ำ



ภาพที่ 17 การเลื่อนของแอมพลิจูดของสเปกตรัมความสูงของพัลส์เมื่อมีคววนเกิดขึ้น
ที่มา : Michael (1989)

8.2 พารามิเตอร์ที่บ่งบอกค่าของการคววนหรือเรียกอีกอย่างว่าพารามิเตอร์ของการคววน (Quench Indicating Parameters; QIP)

พารามิเตอร์ของการคววนสามารถแบ่งแยกเป็น 4 ส่วนใหญ่ๆได้ดังนี้

8.2.1 พารามิเตอร์ของการคววนของสเปกตรัมสารตัวอย่าง (Sample Spectrum QIPs)

ก. SIS (Spectral Index Sample)

ข. SCR (Sample Channels Ratio)

ค. SQP(I) (Spectral Quench Parameter of Isotope)

8.2.2 พารามิเตอร์ของการเคาน์ของสเปกตรัมมาตรฐานภายนอก (External Standard Spectrum QIPs)

ก. ESC (External Standard Counts)

ข. ESR (External Standard Ratio)

ค. $H^\#$ (Inflection Point Compton Edge)

ง. ESP (External Standard Pulse)

จ. SIE (Spectral Index External Standard)

ฉ. SQP(E) (Spectral Quench Parameter of the External Standard)

ช. tSIE (Transformed Spectral Index of the External Standard)

8.2.3 Internal Standardization

8.2.4 Efficiency Tracing DPM

ก. DPM without quench curves

เนื่องจากในงานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ของการเคาน์ tSIE เป็นค่าที่บ่งบอกถึงระดับการเคาน์เชิงเคมีของสารตัวอย่าง ดังนั้นจึงกล่าวถึงเฉพาะการเคาน์ชนิดนี้เท่านั้น โดยพิจารณาเฉพาะสารกัมมันตรังสี ^{14}C และ ^3H ซึ่งจากความรู้ที่ผ่านมาทำให้ทราบว่าประสิทธิภาพของการนับสารตัวอย่าง

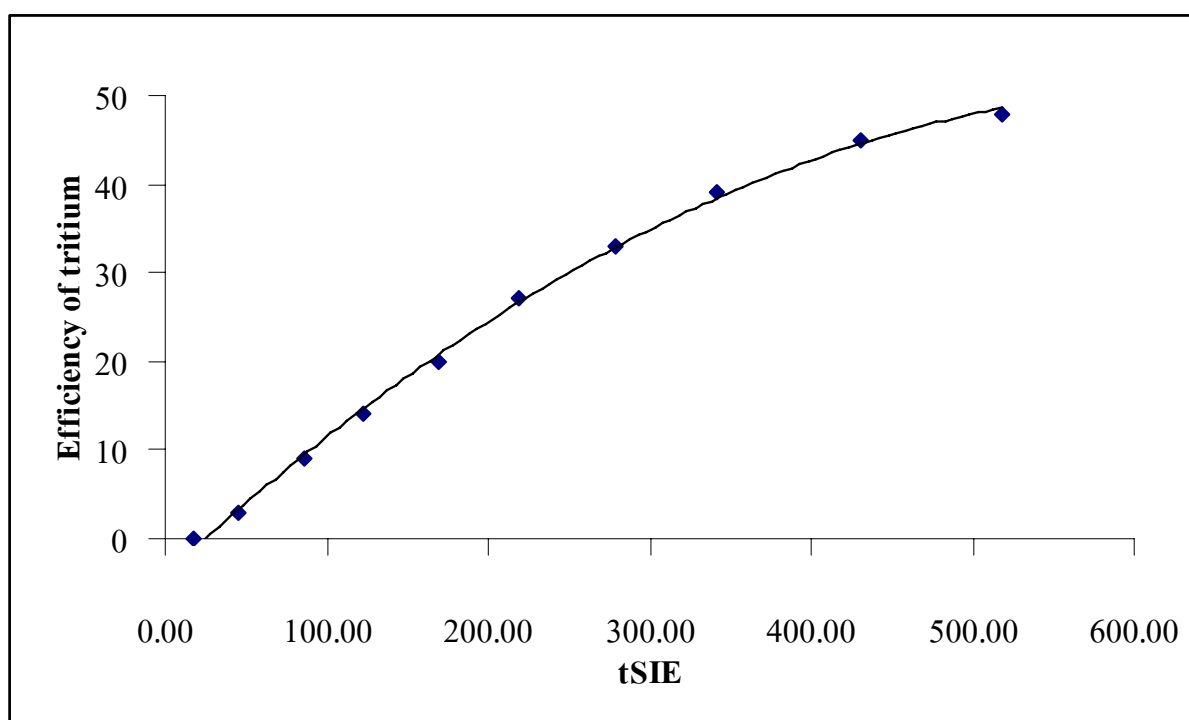
ขึ้นอยู่กับ การเควินด้วย ดังนั้นจะแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของการนับของสารกัมมันตรังสีนั้นเกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ของการเควิน tSIE และขึ้นอยู่กับความกว้างของหน้าต่าง(windows)ของตัวคัดเลือกสัญญาณ โดยให้ช่อง A มีหน้าต่างของตัวคัดเลือกสัญญาณน้อยที่สุด และช่อง C มีหน้าต่างของตัวคัดเลือกสัญญาณมากที่สุด ดังนั้นกำหนดให้ ช่อง A มีความกว้างของหน้าต่างตั้งแต่ 0 – 18.7 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ช่อง B มีความกว้างของหน้าต่างตั้งแต่ 18.6 – 156 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ และช่อง C มีความกว้างของหน้าต่างตั้งแต่ 0 – 2000 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์

การนับสารมาตรฐานกัมมันตรังสี ^3H และ ^{14}C ช่อง A ครอบคลุมพื้นที่ของพลังงานทั้งหมดสำหรับ ^3H ส่วนช่อง B ครอบคลุมช่วงพลังงานตั้งแต่สูงสุดของช่อง A ไปยังพลังงานสูงสุดของ ^{14}C คือ 156 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ และสำหรับช่อง C ครอบคลุมช่วงพลังงานทั้งหมดจนถึง 2000 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ของการเควิน tSIE กับประสิทธิภาพของการนับของช่อง A (channel A) ของสารมาตรฐานกัมมันตรังสี ^3H แสดงดังตารางที่ 1 และแสดงกราฟดังภาพที่ 18 ซึ่งประสิทธิภาพสูงสุดมีค่าประมาณ 48% สอดคล้องกับค่าพารามิเตอร์ของการเควิน tSIE คือ 518 และประสิทธิภาพต่ำสุดคือ 0.33% สอดคล้องกับค่าพารามิเตอร์ของการเควินคือ 17.9

ตารางที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ของการควีน tSIE กับค่าประสิทธิภาพของการนับของช่อง A (channel A) สำหรับสารกัมมันตรังสี ^3H

tSIE	channel A
518.00	48
430.00	45
341.00	39
279.00	33
219.00	27
169.00	20
123.00	14
86.30	9
45.20	3
17.90	0



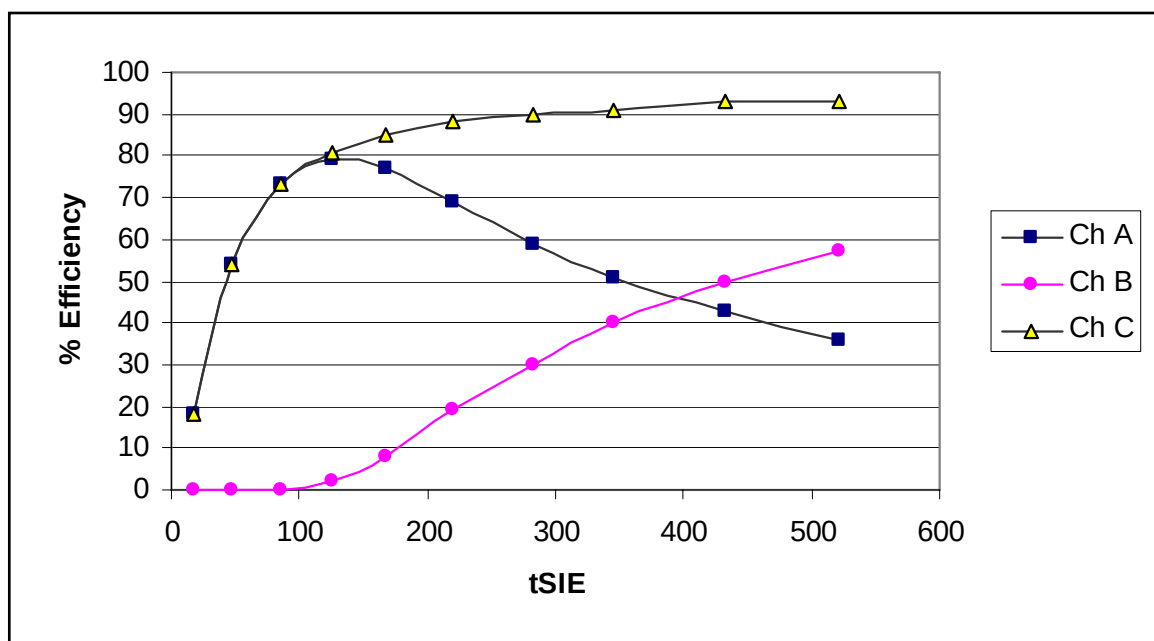
ภาพที่ 18 กราฟของการควีน (quench curve) สำหรับสารกัมมันตรังสี ^3H

ที่มา : <http://www.perkinelmer.com/lifesciences>

สำหรับสารกัมมันตรังสี ^{14}C จะพิจารณาทั้ง 3 ช่อง คือ ช่อง A มีความกว้างของหน้าต่างตั้งแต่ 0 – 18.7 keV ช่อง B มีความกว้างของหน้าต่างตั้งแต่ 18.6 – 156 keV และ ช่อง C มีความกว้างของหน้าต่างเท่ากับผลรวมของช่อง A และ B ตั้งแต่ 0 – 2000 keV สำหรับช่อง C ประสิทธิภาพมากที่สุดโดยประมาณ 92% ซึ่งสอดคล้องกับค่าพารามิเตอร์ของการเควิน tSIE คือ 522 และประสิทธิภาพที่ต่ำสุดประมาณ 18% สอดคล้องกับค่าพารามิเตอร์ของการเควิน tSIE คือ 17.9 แสดงดังภาพที่ 19 สังเกตเห็นได้ว่าการเควินที่เพิ่มสูงขึ้น ค่าพารามิเตอร์ของการเควิน tSIE จะลดลง หมายความว่าถ้าพารามิเตอร์ของการเควินมีค่าเท่ากับ 1000 หมายความว่าไม่มีเควินเชิงเคมีเกิดขึ้นเลย และยังถ้าพารามิเตอร์ของการเควินลดลงจาก 1000 เท่าไรก็เท่ากับว่าเกิดการเควินเชิงเคมีเพิ่มมากขึ้นเท่านั้น โดยพารามิเตอร์ของการเควินเท่ากับ 1000 เป็นค่าที่ได้มาจากการสอบเทียบอุปกรณ์ของเครื่องนับรังสี LSC รุ่น 2770 TR/SL จากตารางที่ 2 และแสดงกราฟดังภาพที่ 19 จะสังเกตเห็นได้อีกอย่างว่าประสิทธิภาพที่ได้จากช่อง A และ B รวมกันได้ประมาณใกล้เคียงกับประสิทธิภาพที่ได้จากช่อง C ดังนี้

ตารางที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ของการเควิน tSIE กับค่าประสิทธิภาพสำหรับสารกัมมันตรังสี ^{14}C ของแต่ละช่องที่มีความกว้างหน้าต่างแตกต่างกัน

tSIE	Channel A	Channel B	Channel C
	0 – 18.7 keV	18.6 – 156 keV	0 – 2000 keV
522	36	57	93
432	43	50	93
345	51	40	91
282	59	30	90
220	69	19	88
167	77	8	85
125	79	2	81
85.8	73	0	73
46.9	54	0	54
17.9	18	0	18



ภาพที่ 19 กราฟของการเควินสำหรับสารกัมมันตรังสี ^{14}C

ที่มา : <http://www.perkinelmer.com/lifesciences>

9. เดดไทม์ของหัววัดรังสีจากแสงวับ

เดดไทม์ (dead time) หรือ เวลาจำแนก (resolving time) คือ เวลาที่น้อยที่สุดระหว่างอนุภาค 2 ตัวต่อเนื่องและยังคงเกิดพัลส์สองพัลส์แยกจากกันอยู่ เวลานี้จะเท่ากับผลรวมของ 3 ช่วงเวลา คือ

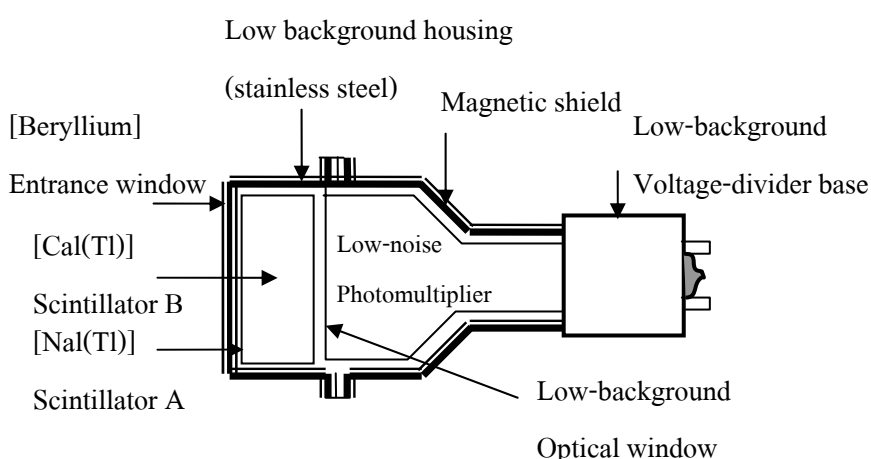
- 1) เวลาที่ใช้ในการผลิตแสงวับ ซึ่งเท่ากับเวลาสลายตัวของตัวเปล่งแสงวับ
- 2) เวลาที่อิเล็กทรอนิกส์ใช้ในการทวีคูณในหลอดโฟโตซึ่งอยู่ในช่วง 20-40 ns
- 3) เวลาที่ขยายสัญญาณและบันทึกโดยเครื่องวัด

เวลาพื้นของเครื่องวัดอยู่ในราว $1\ \mu\text{s}$ ส่วนเวลาที่ใช้ในการขยายและกีดกันตัดทิ้งได้โดยการบวกเวลา 3 ส่วนข้างต้น จะทำให้ได้ เดดไทม์ของหัววัดซึ่งอยู่ในราว 1-5 μs ซึ่งจะมีค่าน้อยกว่าเดดไทม์ในหัววัดที่บรรจุด้วยแก๊สซึ่งอยู่ในราว 10-100 μs

10. แหล่งกำเนิดของรังสีพื้นหลังในหัววัดรังสีจากแสงวับ

หนึ่งในแหล่งกำเนิดหลักของรังสีพื้นหลังในหัววัดแบบเปล่งแสงวับ คือ กระแสต่ำของหลอดตัวคูณแสง แหล่งรังสีพื้นหลังอื่นๆ คือ ไอโซโทปรังสี รังสีคอสมิก และสารที่ทำให้เกิดการเปล่งแสงวับ ภาชนะที่ใส่ตัวเปล่งแสงวับของหลอดอาจจะมีไอโซโทปรังสีตามธรรมชาติ ^{40}K และ ^{14}C ปะปนอยู่

ในส่วนของการเรืองแสงเป็นแสงที่เปล่งออกมาช้า ซึ่งมีสาเหตุจากถูกลดการกระตุ้นของอะตอมหรือโมเลกุลครึ่งชีวิตของการเรืองแสงอาจยาวนานถึงชั่วโมง สำหรับรังสีคอสมิกเป็นอนุภาคที่มีประจุพลังงานสูงก่อให้เกิดรังสีพื้นหลังกับหัววัดทุกชนิดรวมทั้งตัวเปล่งแสงวับด้วย การแก้ไขคือการใช้วงจรบรรจบบจะทำให้ผลดีที่สุด



ภาพที่ 20 หัววัดแบบฟอสวิช (Phoswich) ^(2,p214)

ที่มา : ธวัช (2541)

หัววัดฟอสวิช (ธวัช 2541) ใช้สำหรับวัดรังสีระดับต่ำ ประกอบไปด้วยตัวเปล่งแสงวับที่แตกต่างกัน 2 ชนิดปะกบเข้าด้วยกันและหุ้มด้วยหลอดตัวคูณแสงหลอดเดียวกัน โดยการใช้ค่าแตกต่างกันของค่าคงที่ของการสลายตัวของสารเรืองแสง 2 ตัว การอนุพัทธ์ระหว่างเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นใน 2 หัววัดนั้นทำได้ ผลึกที่นำมารวมกันขึ้นอยู่กับชนิดของอนุภาคที่คงอยู่ในสนามรังสีในระหว่างการวิเคราะห์

โครงสร้างพื้นฐานของหัววัดฟอสวิชแสดงดังภาพที่ 20 ตัวเปล่งแสงวับแบบบาง (ผลึก A) จะเชื่อมควบคู่กับผลึกที่ใหญ่กว่า (ผลึก B) ซึ่งทั้งคู่เชื่อมควบคู่กับหลอดโฟโต 1 หลอด ซึ่งมี 2 ตัวอย่าง

สำหรับตัวอย่างแรกคือ NaI(Tl) เป็นตัวเปล่งแสงแบบบาง (A) และ CsI(Tl) ซึ่งเป็นแบบหนา (B) พัลส์ที่เกิดในผลึกทั้งสองจะถูกแยกบนความแตกต่างของค่าคงที่การสลายตัว $0.25 \mu s$ ของ NaI(Tl) และ $1 \mu s$ ของ CsI(Tl) พัลส์เข้ามาจากอนุภาคที่สูญเสียพลังงานใน CsI(Tl) หรือในผลึกทั้งสองพร้อม ๆ กันในสนามโฟตอนผสมพลังงานต่ำ-พลังงานสูง พัลส์เร็วของ NaI(Tl) จะมาจากส่วนของรังสีพลังงานต่ำ หัววัดฟอสฟอริสแบบนี้ใช้ในการวัดรังสีเอกซ์ และแกมมาในทางดาราศาสตร์ ในการวัดฟลูโตนียมในสิ่งแวดล้อม และกรณีอื่น ๆ ในสนามรังสีผสม และตัวอย่างที่ 2 คือ $CaF_2(Eu)$ เป็น ตัวเปล่งแสงวับแบบบาง (A) และ NaI(Tl) แบบหนา (B) ซึ่งองค์ประกอบนี้ใช้วัดอนุภาคบีตาพลังงานต่ำ ในทางกลางรังสีพื้นหลังแกมมาผลึกบางขนาด 0.1 มม. ของ $CaF_2(Eu)$ วัดบีตาแต่โปร่งใสกับแกมมา เพราะวับของผลึกมีค่า หน้าต่างคอรัลสูงกวาระหว่างตัวเปล่งแสงวับ 2 ตัว เพื่อหยุดบีตาแต่ไม่ได้ฝากพลังงานทั้งหมดใน $CaF_2(Eu)$ พัลส์เร็วของ NaI(Tl) เนื่องจากแกมมาคือเวลาที่ถูกลดเทียบกับพัลส์ช้าจาก $CaF_2(Eu)$ ($\tau = 0.94 \mu s$) ด้วยเหตุนี้รังสีพื้นหลังเนื่องจากรังสีแกมมาจะลดลง

11. กระบวนการของวิธี CIEMAT / NIST

วิธี CIEMAT/NIST เป็นวิธีการหาค่ากัมมันตภาพโดยอาศัยการติดตามรังสี ซึ่งเหมาะสมสำหรับนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่สลายตัวให้บีตาเพียงอย่างเดียว, บีตา-แกมมา, EC ล้วนๆ และ EC-แกมมา โดยใช้เครื่องนับรังสี LSC

เครื่องนับรังสี LSC เริ่มจากการค้นพบของ Kallman และ Reynold ในปี ค.ศ.1950 ซึ่งพบว่าสารอินทรีย์บางชนิดเมื่อทำปฏิกิริยากับรังสีแล้วจะให้แสงวับออกมา สำหรับการทำงานของเครื่องนับรังสี LSC อาศัยหลักการเปล่งรังสีแสงวับของตัวเปล่งแสงวับเมื่อมีรังสีตกกระทบแล้วถ่ายพลังงานให้โดยแสงวับนี้ผ่านไปยังหลอดตัวคูณแสงซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นอิเล็กตรอนพร้อมกับเพิ่มจำนวนอิเล็กตรอนมากพอจนเกิดสัญญาณไฟฟ้าขึ้น จากนั้นวงจรภาคขยายสัญญาณจะทำหน้าที่ขยายสัญญาณไฟฟ้าก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ บันทึกและแสดงผล ความนิยมในการใช้เครื่องนับรังสี LSC เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการวัดสูง มีการพัฒนาในด้านการปรับปรุงการเตรียมสารตัวอย่างและการใช้ระบบคอมพิวเตอร์ในการตรวจวัดและการประเมินผล

ในที่นี้จะคำนวณหาประสิทธิภาพของการนับ โดยวิธี CIEMAT/NIST ซึ่งเป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็วต่อการนำไปใช้และเป็นอีกหนึ่งวิธีที่มีกระบวนการไม่ยุ่งยากมากนัก เนื่องจากในปัจจุบันมีการเขียนซอฟต์แวร์ต่างๆ ที่สามารถนำมาใช้ร่วมกับการคำนวณหาประสิทธิภาพโดยวิธีนี้ ยกตัวอย่างเช่น

โปรแกรม Visual Basic CN2003 นำมาใช้เพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพและค่าความไม่แน่นอน (uncertainties) โปรแกรมนี้ได้รับการพัฒนาเพื่อจุดประสงค์ทั่วไปในการคำนวณหาประสิทธิภาพของการนับสำหรับสารกัมมันตรังสีกับประสิทธิภาพของตัวแกเรอยซึ่งใช้สารกัมมันตรังสี ^3H รหัสพื้นฐานสำคัญนำมาจาก Effy ของโปรแกรม CIEMAT (Garcia-Torano และ Grau, 1985), Emi (Grau Carles et al., 1994), Cega2 และ KB (Los Arcos และ Ortiz, 1997) ซึ่งเป็นโปรแกรมที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพของนิวไคลด์ที่สลายตัวให้บีตา, บีตา-แกมมา EC และ EC-แกมมา โปรแกรมนี้นำมาประยุกต์ใช้ได้ง่ายกับนิวไคลด์ที่มีแผนผังการสลายตัวซับซ้อน

โปรแกรมนี้รวบรวมชุดข้อมูลของนิวไคลด์กัมมันตรังสีประมาณ 80 ตัว โดยใช้ฟังก์ชันของการควานกับตัวแปลงแสงวับและค่า KB ต่างๆ เอาท์พุทที่แสดงออกมาจะอยู่ในรูปของโพลีโนเมียลของประสิทธิภาพของนิวไคลด์กับประสิทธิภาพของตัวแกเรอย ตารางและกราฟแสดงโดย HPGL หรือ Excel

อุปกรณ์อื่นเป็นโปรแกรมการสลายตัวของ Visual Basic การเตรียมไฟล์ข้อมูลของนิวไคลด์สำหรับการคำนวณด้วยวิธี CIEMAT/NIST (C/N) แผนผังการสลายตัวจะต้องแยกออกในวิธีการสลายตัวแบบไม่ต่อเนื่องอย่างสมบูรณ์ ถ้าแผนผังการสลายตัวเป็นเชิงซ้อน เช่นในกรณีของ ^{152}Eu มีวิธีการสลายตัวประมาณ 60 ครั้ง โดยสลายตัวให้บีตา 9 ครั้ง, EC 14 ครั้ง และสลายตัวด้วยการเปลี่ยนแกมมาประมาณ 60 ครั้ง ซึ่งจะต้องนำไปพิจารณาด้วย สำหรับการสลายตัวเป็นเชิงซ้อนนี้เพิ่งได้รับการพัฒนาขึ้นมาโดยบรรจุชุดข้อมูลของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจำนวนน้อย

สำหรับกระบวนการ CIEMAT/NIST นี้ระบบจะมีหลอดตัวคูณแสง 2 หลอด ดังนั้น

$$\bar{n}_0 = \frac{EQ(E)}{2\lambda_0} \quad (7)$$

ประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลอง ε^2 ของตัวปล่อยบีตาและประสิทธิภาพของการนับที่ได้จากการคำนวณที่เอาท์พุทของโฟโตแคโทด ε_0^2 นั้นมีค่าเท่ากันดังสมการที่ (8) จะได้ว่า

$$\varepsilon^2 = \varepsilon_0^2 = \int_0^{E_m} N(E) \left[1 - \exp \left[\frac{-EQ(E)}{2\lambda_0} \right] \right]^2 dE \quad (8)$$

เมื่อ $N(E)$ เป็นการกระจายของบีตาที่ถูกทำให้เป็นบรรทัดฐานแล้ว ดังนั้น

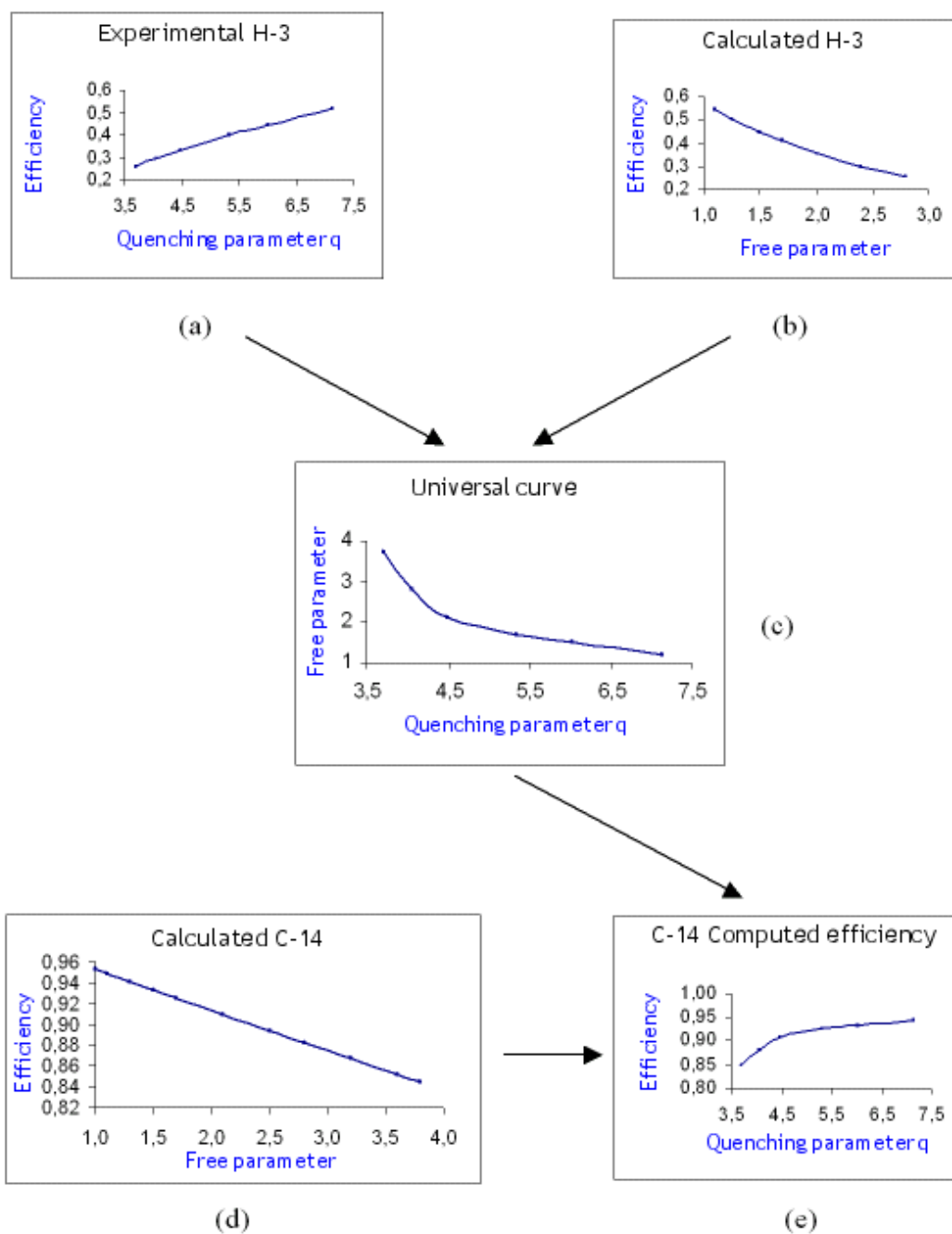
$$\int_0^{E_m} N(E) dE = 1 \quad (9)$$

โดยที่ E_m เป็นพลังงานสูงสุดของการกระจาย ดังนั้นคำนวณหาประสิทธิภาพของการนับได้จาก

$$\varepsilon^2 = \varepsilon_A^2 = \int_0^{E_m} N(E) \left[1 - \exp\left(-\frac{EQ(E)}{2\lambda_A} F_A\right) \right]^2 dE \quad (10)$$

11.1 แผนภาพวิธี CIEMAT/NIST

แผนภาพที่ได้สามารถนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพของ ^{14}C ที่ปล่อยรังสีบีตาเพียงอย่างเดียว ในสารตัวอย่างนี้จะพิจารณา ^{14}C แต่ใช้นิวไคลด์กัมมันตรังสีตัวอื่นที่ทราบค่าประสิทธิภาพของการนับ ซึ่งในกรณีนี้ใช้ทริเทียม ^3H โดยจากภาพที่ 21 ไดอะแกรมการพิจารณาการประยุกต์ของวิธี CIEMAT/NIST กับสารมาตรฐาน ^{14}C จะได้ว่าขั้นตอนแรกจะต้องได้กราฟของการสอบเทียบ (calibration curve) จากการทดลองก่อน เป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของการนับ ε กับพารามิเตอร์ของการเควนเชิงเคมี (กราฟ (a)) โดยค่าพารามิเตอร์ของการเควนเชิงเคมีอาจแสดงค่าเป็นแบบ Horrocks $H^\#$ หรือ Horrocks number, SQP(E) หรือ tSIE ก็ได้ ซึ่งการเควนเชิงเคมีเกิดจากสารเคมีในкокเตลบการถ่ายเทพลังงานของตัวทำละลายไปยังตัวเปล่งแสงวับ โดยสารเคมีนั้นอาจจะรับพลังงานจากตัวทำละลายไป ทำให้แสงวับที่ปล่อยออกมาลดลงหรืออาจจะรวมกับตัวทำละลายหรือตัวเปล่งแสงวับทำให้เกิดสารประกอบที่ให้แสงวับในช่วงแสงที่ไม่เหมาะสม แล้วคำนวณหาประสิทธิภาพของการนับกับพารามิเตอร์อิสระซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างพลังงานยังผล (ที่แก้ไขการเควนจากการแตกตัวเป็นไอออนแล้ว) กับจำนวนสมมุติ (fictitious number) ของโฟโตอิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยออกมาจากโฟโตแคโทดของทริเทียม (กราฟ (b)) เนื่องจากกราฟทั้งสองเกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของการนับเหมือนกัน เราจึงได้ความสัมพันธ์เป็นแบบโพลิโนเมียลระหว่างพารามิเตอร์อิสระและพารามิเตอร์ของการเควนเชิงเคมี (กราฟ (c)) กราฟนี้เป็นกราฟสากลที่ไม่ขึ้นอยู่กับนิวไคลด์กัมมันตรังสีแต่ขึ้นกับเครื่องนับรังสี LSC และไวแอลที่นำไปใช้ จากนั้นก็คำนวณหาประสิทธิภาพของการนับกับพารามิเตอร์อิสระสำหรับ ^{14}C ที่เป็นสารมาตรฐาน (กราฟ (d)) จากนั้นนำกราฟสากลจากกราฟ (c) ไปประยุกต์ใช้ทำให้ได้กราฟ (e) ซึ่งเป็นกราฟที่ใช้ในการเปรียบเทียบเพื่อนำไปใช้ในการหาประสิทธิภาพของการนับซึ่งสัมพันธ์กับค่าพารามิเตอร์ของการเควนเชิงเคมีของ ^{14}C



ภาพที่ 21 ไดอะแกรมการประยุกต์ใช้โดยวิธี CIEMAT/NIST สำหรับสารกัมมันตรังสี ^{14}C

(a) ประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองกับกราฟของการควนสำหรับทริเทียม

(b) คำนวณหาประสิทธิภาพกับพารามิเตอร์อิสระสำหรับทริเทียม

(c) กราฟสากล

(d) คำนวณหาประสิทธิภาพกับพารามิเตอร์อิสระสำหรับ ^{14}C

(e) คำนวณหาประสิทธิภาพกับพารามิเตอร์ของการควนสำหรับ ^{14}C

ที่มา : Agustin Grau Malonda (2001)

12. พารามิเตอร์อิสระ (free parameter) และฟิสิกเกอร์ออฟเมริท (figure of merit)

กระบวนการ CIEMAT/NIST สามารถนำมาใช้คำนวณหาประสิทธิภาพของการนับสำหรับสารกัมมันตรังสีที่ปล่อยอนุภาคบีตาหรือสารกัมมันตรังสีใด ๆ ที่สลายตัวด้วยการจับยึดอิเล็กตรอน (electron capture) สำหรับกระบวนการนี้จะนำมาใช้ในกรณีที่มีหลอดตัวคูณแสง 2 หลอด เมื่อสารกัมมันตรังสีมาตรฐานในเครื่องนับรังสี LSC ทำให้เกิดรังสีจากแสงวับและเกิดรังสีบรรจวบ ซึ่งวิธีดังกล่าวต้องพิจารณาถึงพารามิเตอร์อิสระ ฟิสิกเกอร์ออฟเมริท และการควมเชิงเคมีที่เป็นเหตุให้เกิดการเปล่งแสงวับน้อยลงแต่แก้ไขได้โดยการกระตุ้นทางอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้ต้องพิจารณาถึงการควมจากการแตกตัวเป็นไอออนซึ่งเกี่ยวข้องกับกำลังหยุดยั้งของอิเล็กตรอนพลังงานต่ำและค่า kB ที่เหมาะสม ทำให้ได้ฟิสิกเกอร์ออฟเมริทที่ดีที่สุด

ฟิสิกเกอร์ออฟเมริทแบบใหม่ที่นำมาใช้ในการนับรังสีจากแสงวับของของเหลวนั้นคำนึงถึงประสิทธิภาพสูงสุดของการนับและต้องนับค่าพื้นหลังน้อยที่สุดโดย Grau Malonda และ Garcia – Torano (1982) ให้คำจำกัดความว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าพลังงานยังผล (ที่แก้ไขการ ควมจากการแตกตัวเป็นไอออน) ที่สะสมโดยอนุภาคและค่าเฉลี่ยของจำนวนโฟโตอิเล็กตรอนที่ปล่อยออกมาจากโฟโตแคโทด ดังนั้นจำนวนของโฟโตอิเล็กตรอนที่ออกจากโฟโตแคโทดกำหนดโดยสมการ

$$\bar{n} = \frac{EQ(E)}{M} \quad (11)$$

เมื่อ E เป็นพลังงานจลน์ของอนุภาคที่เกิดอันตรกิริยากับสารเปล่งแสงวับ
 $Q(E)$ เป็นตัวประกอบ (factor) ที่ใช้แก้การควมจากการแตกตัวเป็นไอออน
 และ M เป็นฟิสิกเกอร์ออฟเมริท (ตามคำจำกัดความ (iii) ด้านบน)

การคำนวณหาประสิทธิภาพของการนับโดยตรงที่สุดคือคำนวณจากความน่าจะเป็นในขณะที่สเปกโตรมิเตอร์ยังไม่มีกรตรวจวัด $P_i(0)$ โดยตัวห้อยหมายถึงไดโนดตัวที่ i ($i = 0, 1, 2, \dots, A$) ซึ่งหมายเลข 0 คือ โฟโตแคโทด หมายเลข 1 คือไดโนดตัวแรก และ A คือแอโนด ประสิทธิภาพของการนับที่ได้จากโฟโตแคโทดคือ

$$\varepsilon_0^1 = 1 - P_0(0) = 1 - \exp\{-\bar{n}\} \quad (12)$$

เมื่อด้วยนั้นหมายถึงจำนวนของหลอดตัวคูณแสงของระบบ และสำหรับไดโอดตัวแรกจะได้ว่า

$$\varepsilon_1^1 = 1 - P_1(0) = 1 - \exp\{-\bar{n}[1 - \exp(-p_1 G_1)]\} \quad (13)$$

เมื่อ G_1 เป็นค่าอัตราขยาย (gain) ของไดโอดตัวแรก และ p_1 เป็นสัดส่วนของอิเล็กตรอนที่ผ่านโฟโตแคโทดกับไดโอดตัวแรก ประสิทธิภาพของสมการ (13) มีค่าเท่ากับสมการ (12) ถ้า $\exp(-p_1 G_1) = 0$ แต่เนื่องจากว่าค่า G_1 และ / หรือ p_1 มีค่าที่จำกัด จึงเป็นไปได้ ดังนั้น $\varepsilon_0^1 \neq \varepsilon_1^1$ เมื่อระบบของการนับมีหลอดตัวคูณแสง 2 หลอดที่เกิดบรรจบจะได้ว่า

$$\varepsilon_0^2 = (1 - P_0(0))^2 = (1 - \exp\{-\bar{n}\})^2 \quad (14)$$

และ

$$\varepsilon_1^2 = (1 - P_1(0))^2 = (1 - \exp\{-\bar{n}[1 - \exp(-p_1 G_1)]\})^2 \quad (15)$$

ประสิทธิภาพเหล่านี้เท่ากันถ้า $\exp(-p_1 G_1) = 0$ ซึ่งเป็นไปไม่ได้ ดังนั้น $\varepsilon_0^2 \neq \varepsilon_1^2$ สำหรับกรณีที่มีหลอดตัวคูณแสง 3 หลอด จะได้ว่า $\varepsilon_0^3 \neq \varepsilon_1^3$ ซึ่งผลที่ได้เหมือนกันไม่ว่าหลอดตัวคูณแสงจะมีจำนวนเท่าใดก็ตาม ต่อไปจะวิเคราะห์ในกรณีที่มีหลอดตัวคูณแสง 1 หลอดเท่านั้นโดยคำนวณหาประสิทธิภาพของการนับที่ออกจากไดโอดตัวที่ 2,3,...,A ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \varepsilon_2^1 &= 1 - P_2(0) \\ &= 1 - \exp\{-\bar{n}[1 - \exp[-G_1 P_1[1 - \exp(-G_2 P_2)]]]\} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_3^1 &= 1 - P_3(0) \\ &= 1 - \exp\{-\bar{n}[1 - \exp[-G_1 P_1[1 - \exp[-G_2 P_2[1 - \exp(-G_3 P_3)]]]]]\} \end{aligned} \quad (17)$$

....

$$\varepsilon_A^1 = 1 - \exp\{-\bar{n}[1 - \exp[-G_1 P_1[1 - \exp(-G_2 P_2[...[1 - \exp(-G_A P_A)]]]]]]\} \quad (18)$$

ประสิทธิภาพ ε_1^1 และ ε_2^1 จะเท่ากันถ้า

$$\exp(-G_1 p_1) = \exp[-G_1 p_1 [1 - \exp(-G_2 p_2)]] \quad (19)$$

หรือ $\exp(-p_1 G_1) = 0$ แต่จากกรณีของโฟโตแคโทดและไดโนดตัวแรกที่ผ่านมาพบว่าเป็นไปไม่ได้ ดังนั้น $\varepsilon_0^1 \neq \varepsilon_1^1 \neq \varepsilon_2^1$ ด้วยเหตุนี้จึงเขียนสมการความไม่เท่ากันได้ ดังสมการที่ (20)

$$\varepsilon_0^1 \neq \varepsilon_1^1 \neq \varepsilon_2^1 \dots \neq \varepsilon_A^1 \quad (20)$$

เนื่องจากว่าประสิทธิภาพของการนับที่ได้จากการทดลองได้มาจากพัลส์ที่ออกจากแอโนดจึงกำหนดให้ ε^1 เป็นประสิทธิภาพของการนับที่ได้จากการทดลองสำหรับระบบของการนับของหลอดตัวคูณแสง จะได้ว่า

$$\varepsilon^1 = \varepsilon_A^1 \quad (21)$$

จาก (20) และ (21) ทำให้ได้ว่าไม่สามารถใช้ฟังก์ชันเฟรียคคำนวณหาประสิทธิภาพของการนับที่ออกจากโฟโตแคโทดหรือไดโนดตัวใด ๆ ได้เลยยกเว้นที่แอโนดเท่านั้น และถ้ากำหนดให้ประสิทธิภาพของการนับที่ได้จากการคำนวณที่ออกจากไดโนดตัวต่าง ๆ ให้มีค่าเท่ากันดังนี้

$$\varepsilon_0^1 = \varepsilon_1^1 = \varepsilon_2^1 \dots = \varepsilon_A^1 \quad (22)$$

สมการ (22) อาจเกิดขึ้นได้ถ้ากำหนดจำนวนของโฟโตอิเล็กตรอนที่ออกจากโฟโตแคโทดที่ใช้คำนวณหาประสิทธิภาพของการนับที่ออกจากหลอดตัวคูณแสงในส่วนต่าง ๆ มีค่าเท่ากับ

$$\bar{n}_i = \frac{EQ(E)}{\lambda_i} \quad (i = 0, 1, 2, \dots, A) \quad (23)$$

เมื่อ λ_i เป็นพารามิเตอร์อิสระที่กำหนดโดย

$$\lambda_1 \equiv \lambda_0 [1 - \exp(-G_1 p_1)] \equiv \lambda_0 F_1 \quad (24)$$

$$\lambda_2 \equiv \lambda_0 [1 - \exp[-G_1 p_1 [1 - \exp(-G_2 p_2)]]] \equiv \lambda_0 F_2 \quad (25)$$

....

$$\lambda_A \equiv \lambda_0 [1 - \exp[-G_1 p_1 [1 - \exp(-G_2 p_2 [\dots [1 - \exp(-G_A p_A) \dots]]])] \equiv \lambda_0 F_A \quad (26)$$

เมื่อ $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \dots$ เป็นพารามิเตอร์อิสระและ λ_A เป็นฟังก์ชันรีออฟเมริท จาก (23) ทำให้ได้

$$\bar{n}_i = \frac{EQ(E)}{\lambda_0 F_i} = \frac{\bar{n}_0}{F_i} \quad (27)$$

และประสิทธิภาพของการนับที่ออกจากไดโนคต่าง ๆ เขียนได้ดังสมการ

$$\varepsilon_0^1 = 1 - P_0(0) = 1 - \exp(-\bar{n}_0) \quad (28)$$

$$\varepsilon_1^1 = 1 - P_1(0) = 1 - \exp\left(-\frac{\bar{n}_0}{F_1} F_1\right) = 1 - \exp(-\bar{n}_0) \quad (29)$$

$$\varepsilon_2^1 = 1 - P_2(0) = 1 - \exp\left(-\frac{\bar{n}_0}{F_2} F_2\right) = 1 - \exp(-\bar{n}_0) \quad (30a)$$

...

$$\varepsilon_A^1 = 1 - P_A(0) = 1 - \exp\left(-\frac{\bar{n}_0}{F_A} F_A\right) = 1 - \exp(-\bar{n}_0) \quad (30b)$$

ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขของสมการ (22) กำหนดให้ λ_0 เป็นอัตราส่วนระหว่างพลังงานยังผล (ที่แก้ไขการควมจากการแตกตัวเป็นไอออนแล้ว) และจำนวนสมมุติ (fictitious number) ของโฟโตอิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยออกมาจากโฟโตแคโทด และฟังก์ชันรีออฟเมริท λ_A เป็นอัตราส่วนระหว่างพลังงานยังผล (ที่แก้ไขการควมจากการแตกตัวเป็นไอออนแล้ว) และจำนวนที่แท้จริง (real number) ของโฟโตอิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยออกมาจากหลอดตัวคูณแสง

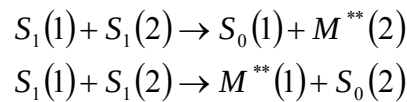
$$\lambda_A = \frac{EQ(E)}{\bar{n}_A} \quad (31)$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง λ_A และ λ_0 กำหนดโดยสมการ (32) ดังนี้

$$\lambda_A = \lambda_0 F_A \quad (32)$$

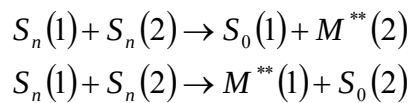
13. การคว่นจากการแตกตัวเป็นไอออน

ลักษณะเฉพาะของเครื่องนับรังสีก็คือการตอบสนองต่อการแผ่รังสีในกรณีที่เกิดอันตรกิริยาอัตราส่วนระหว่างพลังงานและจำนวนของอิเล็กตรอนที่เอาที่พหุของแคโทดไม่เป็นเชิงเส้น เมื่อพลังงานของอิเล็กตรอนที่เกิดอันตรกิริยามีค่าน้อยกว่า 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ความไม่เป็นเชิงเส้นเกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการของการคว่นจากการแตกตัวเป็นไอออน การคว่นจากการแตกตัวเป็นไอออนขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโมเลกุลตัวทำละลายที่ถูกกระตุ้นเมื่ออนุภาคที่เกิดการแตกตัวเป็นไอออนเกิดอันตรกิริยากับตัวเปล่งแสงวับ ทั้งโมเลกุลที่ถูกกระตุ้นในสถานะซิงเกิลตแรก (first singlet state) หรือสถานะกระตุ้น S_1 และโมเลกุลในสถานะซิงเกิลต (singlet state) ที่สูงกว่า S_n สามารถสร้างกระบวนการของการคว่นจากการแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งจะได้ปฏิกิริยาที่อาจจะเกิดขึ้นในสถานะสูง ๆ ดังนี้



เมื่อหนึ่งในโมเลกุลอยู่ในสถานะหลักมูล S_0 ขณะที่ตัวอื่นอยู่ในสถานะ M^{**} ซึ่งเป็นสถานะกระตุ้นสูงๆ สถานะกระตุ้นสูงๆเป็นสถานะขีดเหนี่ยว (bounded states) ที่มีพลังงานสูงกว่าระดับที่เกิดการแตกตัวเป็นไอออนครั้งแรก จะได้ว่าการคว่นจากการแตกตัวเป็นไอออนนั้นเกิดขึ้นมากกว่าการแยกตัวออกและการเปลี่ยนภายในทั้งนี้เพื่อให้ระดับทางอิเล็กทรอนิกส์ถูกกระตุ้นน้อย ๆ

เราจะได้สถานการณ์เดียวกันกับการเกิดปฏิกิริยาดังนี้



สุดท้ายจะได้ว่าสถานะทั้งสองนั้นเท่ากัน โมเลกุลที่ถูกกระตุ้นจะสูญหายไปและผลที่ตามมาก็คือเกิดความเข้มของแสงวับขึ้นจากการลดลงของอนุภาคที่เกิดการแตกตัวเป็นไอออน โดยทั่วไปการตอบสนอง (จำนวนของโฟตอนที่เปล่งแสงวับต่ออนุภาคที่เกิดการแตกตัวเป็นไอออนที่เคลื่อนที่ในตัวเปล่งแสงวับเป็นฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นสำหรับพลังงานของอนุภาค E การเพิ่มขึ้นแบบไม่เป็นเชิงเส้นเนื่องมาจากกำลังของการแตกตัวเป็นไอออนของอนุภาค ทำให้รังสีบีตาพลังงานต่ำเกิดการคว่นจากการแตกตัวเป็นไอออนสูงกว่ารังสีบีตาที่มีพลังงานสูง Birks หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับกระบวนการและจุดประสงค์ของสมการที่ได้จากการเรืองแสงเฉพาะ dL/dx (จำนวนของโฟตอนที่ปล่อยออกมาต่อหน่วยระยะทางตามทางเดิน)

$$\frac{dL}{dx} = \frac{\eta_0 \frac{dE}{dx}}{1 + kB \frac{dE}{dx}} \quad (33)$$

เมื่อ η_0 เป็นประสิทธิภาพของรังสีจากแสงวัด (จำนวนของโฟตอนที่เกิดการเรืองแสงที่ถูกปล่อยออกมาต่อหน่วยพลังงาน)

k เป็นอัตราคงที่สำหรับการควมเนื่องจากการแตกตัวเป็นไอออน

dE / dx เป็นกำลังหยุดนิ่ง

$B(dE / dx)$ เป็นความหนาแน่นของการแตกตัวเป็นไอออนแบบเชิงเส้น

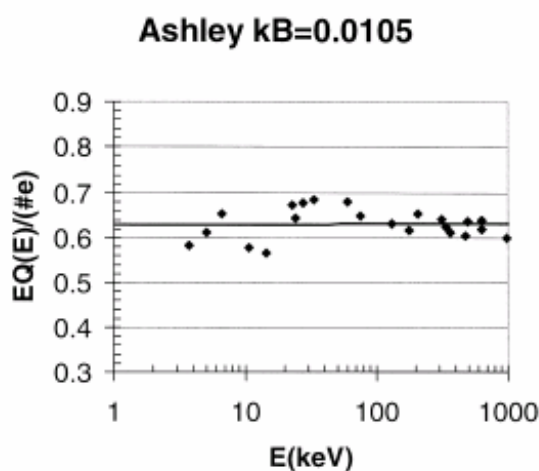
$$L = \eta_0 \int_0^E \frac{dE}{1 + kB \frac{dE}{dx}} = \eta_0 EQ(E) \quad (34)$$

$$\text{เมื่อ} \quad Q(E) = \frac{1}{E} \int_0^E \frac{dE}{1 + kB \frac{dE}{dx}} \quad (35)$$

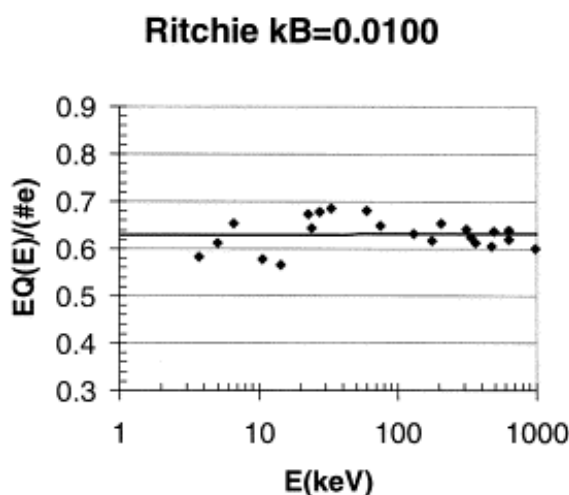
สมการ (35) เป็นสมการของพารามิเตอร์ของการควมเนื่องจากการแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งในการคำนวณฟังก์ชันของการควมเนื่องจากการแตกตัวเป็นไอออนเกิดปัญหา 3 ข้อดังนี้ : การเลือกค่าที่เหมาะสมสำหรับ kB ค่ากำลังหยุดนิ่งสำหรับพลังงานที่ต่ำกว่า 1 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ และผลที่เกิดจากตัวเปล่งแสงวัดไม่เป็นสารบริสุทธิ์

ในการหาค่าพารามิเตอร์ของการควมเนื่องจากการแตกตัวเป็นไอออนต้องทราบค่ากำลังหยุดนิ่งของการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนที่มีพลังงานต่ำ ซึ่งภาพที่ 22 แสดงให้เห็นถึงพลังงานที่ได้แก้ไขใหม่ให้เป็นฟังก์ชันของพลังงาน $Q(E)E / (\#e)$ เมื่อค่ากำลังหยุดนิ่งได้มาจาก Ashley ทำให้ได้เส้นตรงตาม

แนวนอน โดยมีค่า kB เท่ากับ $0.0105 \text{ g MeV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ และฟลักเจอร์ออฟเมริทนี้มีค่าเท่ากับ 0.630 กิโลอิเล็กตรอน/โวลต์ / โฟโตอิเล็กตรอน สำหรับภาพที่ 23 แสดงให้เห็นว่ากราฟมีลักษณะเหมือนกับค่าของกำลังหยุดยั้งที่ได้จาก Ritchie et al. (1978) เส้นกราฟตามขวางสอดคล้องกับ $kB = 0.0100 \text{ g MeV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ และมีค่าฟลักเจอร์ออฟเมริทเท่ากับ 0.632 กิโลอิเล็กตรอน / โฟโตอิเล็กตรอน จะเห็นได้ว่าการนำกระบวนการต่างๆ ไปประยุกต์สามารถนำไปหาฟังก์ชัน $Q(E)$ ได้ดีที่สุด และจะได้ค่าฟลักเจอร์ออฟเมริทสมบูรณ์แบบมากขึ้น



ภาพที่ 22 ข้อมูลจากการทดลองที่ถูกแก้ไขแล้วด้วยพารามิเตอร์ของการคววนจากการแตกตัว เป็นไอออนที่เหมาะสม เมื่อกำลังหยุดยั้งของอิเล็กตรอนได้มาจาก Ashley
ที่มา : Grau Carles and Grau Malonda (2000)



ภาพที่ 23 ข้อมูลจากการทดลองที่แก้ไขให้ถูกต้องด้วยค่าพารามิเตอร์ของการคววนจากการแตกตัว เป็นไอออนที่เหมาะสม เมื่อกำลังหยุดยั้งของอิเล็กตรอนได้มาจาก Ritchie
ที่มา : Grau Carles and Grau Malonda (2000)

พารามิเตอร์ของการเควนจากการแตกตัวเป็นไอออนหรือฟังก์ชัน $Q(E)$ สำคัญต่อการนำไปใช้ในการแก้ไขในวิธี CIEMAT/NIST ให้ถูกต้องยิ่งขึ้น สำหรับหัวข้อนี้จะเสนอรายละเอียดวิธีการวิเคราะห์สมการที่ใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพของ ^{55}Fe ประสิทธิภาพของการนับของสารกัมมันตรังสีนี้ซึ่งจะไวมากต่อรูปร่างและฟังก์ชัน $Q(E)$ หากใช้วิธีนี้ และจะแสดงให้เห็นว่าสมการของเบิร์กและกำลังหยุดยังไม่เพียงพอที่จะสามารถอธิบายถึงความแตกต่างกันระหว่างประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองและที่ได้จากการคำนวณ จึงต้องนำฟังก์ชัน $Q(E)$ ที่คำนวณได้อย่างถูกต้องและแม่นยำด้วยกระบวนการอย่างง่ายมาใช้

การตอบสนองของเครื่องนับรังสี LSC ต่ออันตรกิริยาของอนุภาคที่มีประจุไม่เป็นแบบเชิงเส้นกับพลังงานสะสม ความไม่เป็นเชิงเส้นเพิ่มขึ้นตามมวลของอนุภาค เหตุผลสำคัญที่ทำให้ไม่เป็นเชิงเส้นก็เนื่องมาจากการเควนจากการแตกตัวเป็นไอออนซึ่งเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของโมเลกุลของตัวทำละลายที่ถูกกระตุ้น นั่นคือเมื่อความเข้มข้นของโมเลกุลเหล่านี้สูงขึ้น ความน่าจะเป็นของการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลที่ถูกกระตุ้นของสองอนุภาคก็เพิ่มมากขึ้นและผลของอันตรกิริยาเหล่านี้ก็คือทำให้โมเลกุลสูญเสียพลังงานจากการกระตุ้นและมีโมเลกุลหนึ่งอยู่ในสถานะกระตุ้นที่สูงกว่าโมเลกุลที่อยู่ในสถานะกระตุ้นที่สูงกว่านี้มีความเป็นไปได้สูงที่จะเกิดการแตกตัวเป็นไอออน ผลก็คือทำให้สูญเสียพลังงานการกระตุ้นเริ่มต้นของสองโมเลกุล และพลังงานของตัวทำละลายที่ถูกกระตุ้นไม่เพียงพอต่อการส่งผ่านพลังงานไปยังตัวถูกละลาย กระบวนการนี้สังเกตเห็นได้ชัดในการเกิดอันตรกิริยาของอนุภาคแอลฟากับตัวเปล่งแสงไวของเหลว

ในกรณีของอิเล็กทรอนิกส์, การสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีโดยส่งผ่านอนุภาคบีตา พลังงานต่ำเหมือนกับทริเทียม และการสลายตัวโดยการจับยึดอิเล็กตรอนกับการปล่อยไอเจอร์รี่อิเล็กตรอนแสดงให้เห็นถึงความไม่เป็นเชิงเส้นระหว่างความเข้มข้นของการเปล่งแสงไวและพลังงานสะสมของอิเล็กทรอนิกส์

การศึกษาค่าแก้ของการเควนจากการแตกตัวเป็นไอออนถูกพัฒนาขึ้นโดย Grau Malonda and Coursey (1988), Peron(1995), Grau Malonda and Grau Carles(1999), Grau Carles and Grau Malonda (2001) และ Grau Malonda (1999) อย่างไรก็ตามในเอกสารที่น่าสนใจทั้งหมดนี้ก็ได้อธิบายหรือแสดงความคิดเกี่ยวกับความแตกต่างระหว่างประสิทธิภาพของการนับที่ได้จากการทดลองและที่ได้จากทฤษฎี แต่ค่าพารามิเตอร์ของการเควนจากการแตกตัวเป็นไอออนใช้แก้ผลจากการแตกตัวเป็นไอออนและผลจากความไม่เป็นเชิงเส้นของแบบจำลองทางการคำนวณหรือความบกพร่องจากการเตรียมสารกัมมันตรังสี สถานการณ์นี้ทำให้การวิเคราะห์ผลของการเควนจากการแตกตัวเป็นไอออนเกิดความยุ่งยาก ซึ่ง

การศึกษาทั้งหมดเกี่ยวกับเรื่องนี้ใช้สูตรของเบิร์ก โดยพารามิเตอร์เริ่มต้นที่จะต้องพิจารณาค่ามาให้ได้ ก่อนคือค่ากำลังหยุดยั้งของอนุภาค และเมื่อคำนวณค่าพารามิเตอร์ของการเหวี่ยงจากการแตกตัวเป็น ไอออนก็จำเป็นที่จะต้องอินทิเกรตจากศูนย์ถึงค่าของพลังงานของอนุภาค ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องรู้ค่า กำลังหยุดยั้งสำหรับพลังงานที่เข้าใกล้ศูนย์ เนื่องจากทราบว่าสมการ Bethe (Bethe equation) ใช้พลังงาน ต่ำกว่า 100 eV ได้ไม่ยาวนานมากนัก

14. ความเหมาะสมของพารามิเตอร์ kB

การตอบสนองของระบบที่มีหลอดตัวคูณแสง 2 หลอดที่เกิดบรรจบและผลิตโฟโต-อิเล็กตรอนออกจากแต่ละแอโนด ($\#e/2$) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

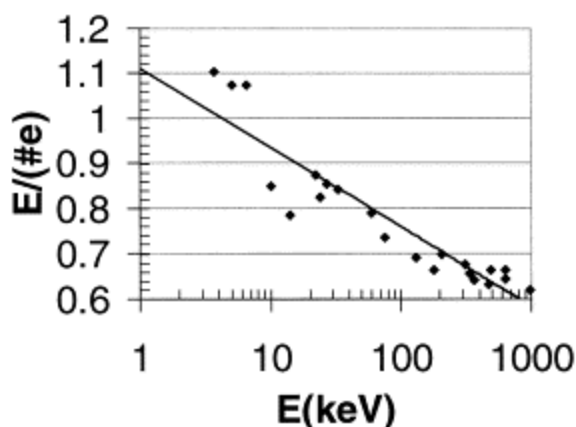
$$(\#e) = 2\bar{n}_A F_A \quad (36)$$

จากคำจำกัดความของฟิสิกเกอร์ออฟเมริท จะได้ว่า

$$\lambda_A = \frac{EQ(E)}{2\bar{n}_A} = \frac{EQ(E)}{(\#e)} F_A \quad (37)$$

เมื่อ F_A เป็นพารามิเตอร์อิสระของพลังงานของอนุภาคที่เกิดอันตรกิริยากัน และ $Q(E)$ เป็น ตัวประกอบของการเหวี่ยงจากการแตกตัวเป็นไอออนที่เป็นฟังก์ชันของพลังงาน

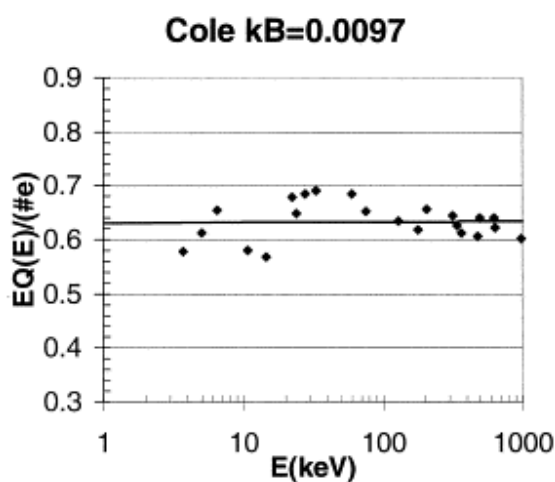
Harrocks (1983) วิเคราะห์ความไม่เป็นเชิงเส้นระหว่างส่วนสูงของพัลส์และพลังงานของ อิเล็กตรอนที่เกิดอันตรกิริยาในตัวเปล่งแสงวับของของเหลว โดยใช้หลอดตัวคูณแสง 2 หลอดที่เกิด บรรจบ จากภาพที่ 24 แสดงให้เห็นว่าพลังงานที่ใช้ในการผลิตโฟโตอิเล็กตรอน ($E/(\#e)$) เป็น ฟังก์ชันของพลังงานของอิเล็กตรอนที่สามารถแสดงให้อยู่ในรูปเชิงเส้น โดยที่ความชันลดลงหมายความว่าที่พลังงานต่ำต้องได้รับพลังงานในการผลิตโฟโตอิเล็กตรอนมากกว่าที่พลังงานสูง จากบทความตีพิมพ์ ของ Harrocks (1983) ทำให้รู้ว่าความไม่เป็นเชิงเส้นนั้นเกิดขึ้นเนื่องมาจากการเหวี่ยงจากการแตกตัวเป็น ไอออน ดังนั้นถ้าให้พลังงานและใช้ตัวประกอบของการเหวี่ยงจากการแตกตัวเป็นไอออน $Q(E)$ อย่าง ถูกต้องจะได้กราฟเส้นตรงที่ลากผ่านจุดขนานกับแกนอน



ภาพที่ 24 แสดงกราฟของพลังงานต่อการผลิตโฟโตอิเล็กตรอนซึ่งเป็นฟังก์ชันของพลังงานของอิเล็กตรอน

ที่มา : Grau Carles and Grau Malonda (2000)

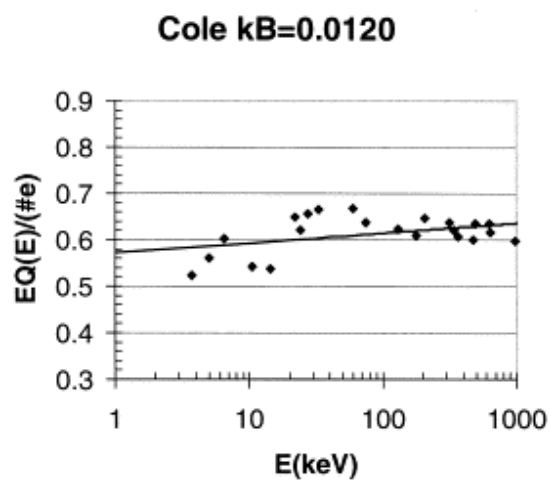
ภาพที่ 25 แสดงจุดที่ได้จากการทดลองและตรงกับเส้นตรง พารามิเตอร์ของการเหวนจากการแตกตัวเป็นไอออน $Q(E)$ ได้มาจากสูตรของ Birks โดยแทนค่ากำลังหยุดยั้งจาก Cole (1969) และ $kB = 0.0097 \text{ gMeV}^{-1}\text{cm}^{-2}$ ทำให้ได้ค่าฟลักเจอร์ออฟเมริทและพารามิเตอร์อิสระที่เหมาะสม ซึ่งค่าฟลักเจอร์ออฟเมริทมีค่าเท่ากับ $0.631 \text{ keV / โฟโตอิเล็กตรอน}$



ภาพที่ 25 แสดงข้อมูลจากการทดลองที่แก้ไขด้วยพารามิเตอร์ของการเหวนจากการแตกตัวเป็นไอออนที่เหมาะสม เมื่อค่าของกำลังหยุดยั้งของอิเล็กตรอนได้มาจาก Cole

ที่มา : Grau Carles and Grau Malonda (2000)

สำหรับภาพที่ 26 เป็นลักษณะของกราฟเมื่อ $kB = 0.0120 \text{ g MeV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$



ภาพที่ 26 ข้อมูลจากการทดลองที่แก้ไขด้วยพารามิเตอร์ของการแควนจากการแตกตัวเป็นไอออนที่สูงมากเกินไป

ที่มา : Grau Carles and Grau Malonda (2000)