

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ธาตุเรดอน-222

เมื่อกล่าวถึงเรดอนมักจะหมายถึง เรดอน-222(Rn-222) แต่ยังมีไอโซโทปของเรดอนที่เกิดจากนิวไคลด์อื่นๆ อีก กล่าวคือเรดอน-219(Rn-219) หรือ actinon ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของยูเรเนียม-235และเรดอน-220 หรือ thoron เกิดจากการสลายตัวของทอเรียม-232 แต่ในส่วนของเรดอน-219 จะพบน้อยมากเนื่องจากปริมาณของยูเรเนียม-235 ในธรรมชาติพบน้อยมากและเรดอน-219เองมีค่าครึ่งชีวิตเพียง 5 วินาที ส่วนเรดอน-220 นั้นจำนวนของทอเรียม-232 มีปริมาณมากกว่ายูเรเนียม-238 แต่โดยเฉลี่ยแล้วการเกิดเรดอน-220 กับเรดอน-222 จะเท่ากัน แต่เรดอน-220 มีค่าครึ่งชีวิตเพียง 55 วินาที ซึ่งน้อยกว่าเรดอน-222 มาก ดังนั้นหากพิจารณาในแง่ของอันตรายที่เกิดจากเรดอน แล้วจะหมายถึงเรดอน-222

คุณสมบัติทางเคมีของเรดอน เรดอนเป็นก๊าซไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และในการทำปฏิกิริยาเคมีมีรายงานพบเรดอนอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนกับฟลูออไรด์ ถ้าเปรียบเทียบกับเรดอนกับธาตุหมู่ 8 ด้วยกัน เรดอนเป็นธาตุหนักที่สุดมีจุดเดือด จุดหลอมเหลวสูงที่สุด

คุณสมบัติทางฟิสิกส์ตามตารางที่ 1 พบว่าเรดอนสามารถละลายในน้ำได้ ซึ่งความสามารถในการละลายของเรดอนจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำด้วย กล่าวคือ ถ้าน้ำมีอุณหภูมิต่ำเรดอนสามารถละลายได้ดีกว่าน้ำที่อุณหภูมิสูงขึ้น และสามารถละลายได้ดีมากในตัวทำละลายอินทรีย์

ตารางที่ 2.1 แสดงรายละเอียดการสลายตัวจาก Uranium-238 ถึง Lead-206 ¹

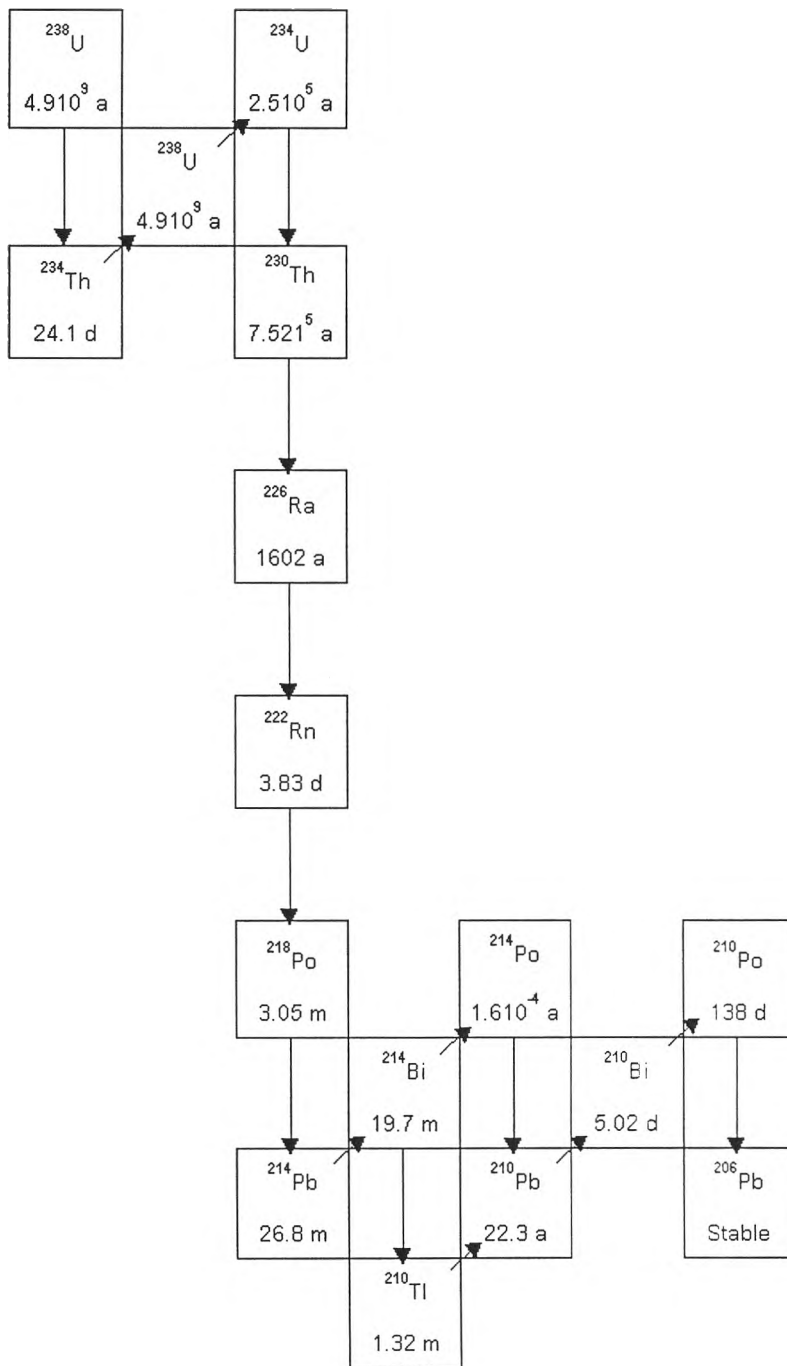
Isotopic Name	Historical Name	Half-Life	Principal radiations and energies(MeV)
U-238	Uranium I	4.47 X 10 ⁹ y	α 4.198(77%) 4.149(23%)
Th-234	Uranium X1	24.1 d	β 0.198(72%)
Pa-234m	Uranium X2	1.17 min	β 2.29(98%)
U-234	Uranium II	244,500 y	α 4.773(72 %) 4.721(27%)

Th-230	Ionium	75,000 y	α 4.688(76%) 4.621(23%)
Ra-226	Radium	1,600 y	α 4.785(94%) 4.602(6%)
Rn-222	Radon	3.82 d	α 5.490(100%)
Po-218	Radium A	3.11 min	α 6.003(100%)
Pb-214	Radium B	26.8 min	β 0.65(50%) γ 0.295(19%) 0.352(37%)
Bi-214	Radium C	19.8 min	β 3.26 γ 0.609(46%) 1.120(15%) 1.765(16%)
Po-214	Radium C	1.6×10^{-4} s	α 7.687(100%)
Pb-210	Radium D	22.3 y	β 0.015(81%)
Bi-210	Radium E	5.01 d	β 1.161(100%)
Po-210	Radium F	138 d	α 5.297(100%)
Pb-206	Radium G	Stable	none

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของเรดอน-222²

Property	Value
Atomic number	86
Boiling point at normal temperature and pressure	-61.8 °C
Density at normal temperature and pressure	9.96 Kg/m ³
Coefficient of Solubility at atmospheric pressure in water at the temperature of:	
0°C	0.57
20°C	0.250
37°C	0.167
100°C	0.106
Coefficient of solubility at atmospheric pressure at 18°C in:	
Hexane	16.56
Olive oil	29.00
Petroleum (Liquid paraffin)	9.20
Toluene	13.24

Condense data derived from NCRP (1988)



รูปที่ 2.1 การสลายตัวของอนุกรมยูเรเนียม-238 ในธรรมชาติ³

2.2 เครื่องวัดลิวทิลเลชันทิลเลชัน (Liquid Scintillation Counter) ⁴

ในปี ค.ศ. 1950 Reynolds และ Kallmann (1950) พบว่าเมื่อรังสีทำอันตรกิริยากับสารอินทรีย์บางชนิด (สารเรืองแสง) จะเกิดการเรืองแสงขึ้น ความเข้มของแสงที่เกิดขึ้น จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับพลังงานของรังสีที่ถ่ายเทให้กับสารเรืองแสง โดยปกติการวัดด้วยเครื่องวัดลิวทิลเลชันทิลเลชันด้วยวิธี Internal Sample สารตัวอย่างจะรวมเป็นเนื้อเดียวกันกับสารเรืองแสง(scintillator) และตัวทำละลาย(solvent) อยู่ในไวอัล(vial) ขนาด 20 มิลลิลิตร ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการวัดสารกัมมันตรังสีที่มีปริมาณน้อยและสลายตัวให้อนุภาคเบตาพลังงานต่ำมีความไวมากขึ้น นอกจากนี้การใช้เทคนิคการวัดแบบโคอินซิเดนซ์โดยจัดไวอัลไว้ระหว่างหลอดทวีคูณแสง 2 หลอดดังรูปที่ 2.1 จะช่วยให้ระบบวัดเป็นระบบที่มีแบกรวดต่ำ(low background counting system)

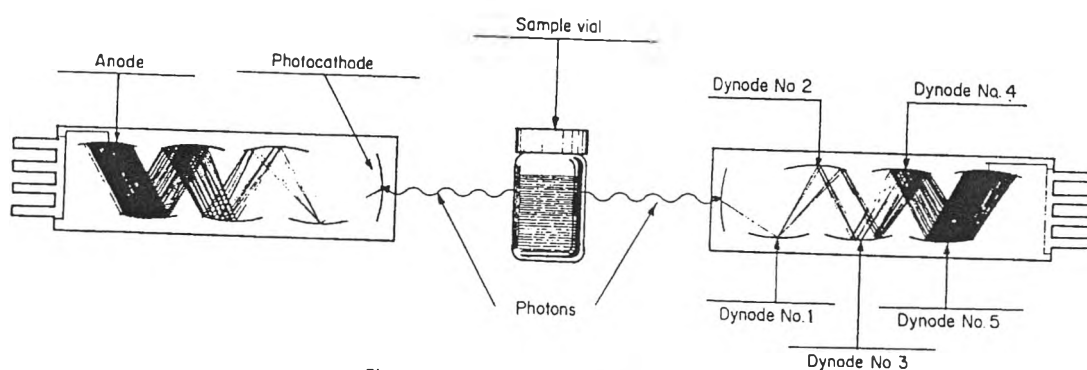
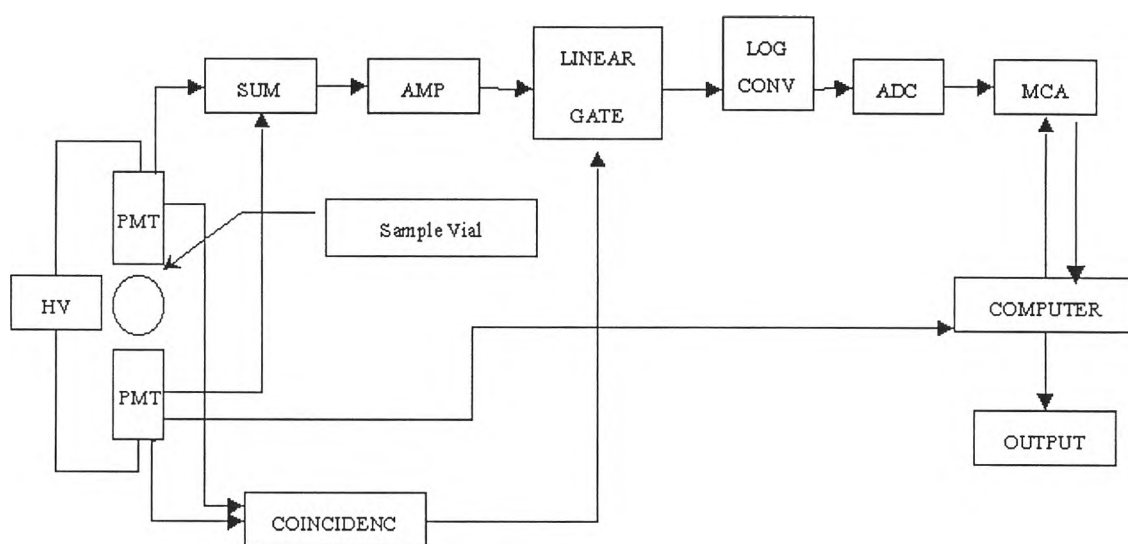


Fig. 5.1 Photomultiplier tubes with sample vial.

รูปที่ 2.2 แสดงการวัดด้วยเทคนิค โคอินซิเดนซ์ในเครื่องวัดลิวทิลเลชันทิลเลชัน ⁴

เมื่อรังสีจากตัวอย่างถ่ายโอนพลังงานให้กับสารทำละลายและสารเรืองแสงจะทำให้โมเลกุลอยู่ในสถานะถูกกระตุ้นการกลับสู่สภาวะปกติของโมเลกุลสารเรืองแสงจะปลดปล่อยพลังงานในรูปแบบของ

แสง(photon) แสงที่เกิดขึ้นจะถูกเปลี่ยนเป็นโฟโตอิเล็กตรอน(photoelectron) ที่โฟโตแคโทด (photocathode)ของหลอดทวีคูณแสง และถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าบวกของไดโนด(dynode) แต่ละตัวซึ่งทำหน้าที่ทวีปริมาณอิเล็กตรอน ทำให้เกิดเป็นอิเล็กตรอนจำนวนมาก เก็บรวบรวมที่แอโนด(anode) จำนวนของโฟโตอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มแสงที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยาของรังสีที่ระดับพลังงานนั้นๆ จึงทำให้สัญญาณที่ได้รับมีขนาดความสูงแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความเข้มของแสง สัญญาณที่เกิดขึ้นจากหลอดทวีคูณแสงทั้ง 2 จะนำไปผ่านกระบวนการวัดรังสีด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ความสูงของพัลส์ดังแสดงในรูปแผนภาพรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การทำงานของเครื่องลิวทอนทิลเลชันชนิดวิเคราะห์ความสูงของพัลส์⁴

จากรูปที่ 2.3 ขวดบรรจุตัวอย่าง(sample vial) จะวางไว้ระหว่างหลอดทวีคูณแสง 2 หลอดและรวมสัญญาณด้วย pulse summation circuit (SUM) เพื่อให้วัดความเข้มของแสงที่ได้รับจากหลอดทวีคูณแสงทั้ง 2 หลอดรวมกัน 100 % พร้อมกันนั้นสัญญาณที่เกิดขึ้นจากหลอดทวีคูณแสงทั้ง 2 หลอดจะส่งให้กับวงจร coincidence circuit ซึ่งเป็นวงจรเกตที่ให้ฟังก์ชันลอจิกชนิด AND สัญญาณลอจิกพัลส์จะเกิดที่ทางออกต่อเมื่อหลอดทวีคูณแสงทั้ง 2 หลอดเกิดสัญญาณพัลส์พร้อมกันทำการคัดเลือกสัญญาณที่ linear gate ดังนั้นการทำงานของวงจรนี้จะเป็นการตัดสิ่งรบกวน (electronic noise) ที่ไม่ได้เกิดจากรังสีในขวดบรรจุตัวอย่างมีผลทำให้แบกกราวด์ต่ำ และสัญญาณที่ผ่านการคัดเลือกจาก

linear gate จะนำไปวิเคราะห์ความสูงของ (pulse height analyser) โดยใช้วงจรวิเคราะห์ความสูงของพัลส์แบบหลายช่อง (Multichannel Analyzer; MCA)

จากที่กล่าวมาข้างต้นเครื่องวัดลิวทิลเลชันชนิดนี้จึงเหมาะสมที่จะใช้วัดสารกัมมันตรังสีที่ให้อนุภาคเบตาพลังงานต่ำ ๆ เช่น คาร์บอน-14 และ ทริเทียม โดยให้ประสิทธิภาพในการวัดสูงกว่าเครื่องมือชนิดอื่น ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเครื่องวัดรังสีชนิดที่ให้อาจแยกแยะการวัดรังสีอัลฟาและเบตา ได้พร้อมกัน โดยเพิ่มการทำงานของกรวิเคราะห์รูปสัญญาณ(Pulse Shape Analyser; PSA) เพื่อให้แยกการแทรกสอดระหว่างรังสีอัลฟาและเบตา นอกจากนี้ยังใช้การกำบังรังสีจากสิ่งแวดล้อมควบคู่กับการใช้เทคนิคโคอินซิเดนซ์ เพื่อให้แบกรวดค่าจึงสามารถวัดรังสีได้ในระดับต่ำมากได้

2.3 กลไกการถ่ายโอนพลังงาน^{5,6}

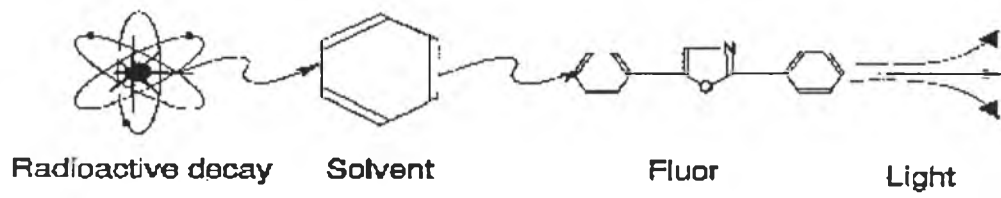
ในการวัดรังสีด้วยเครื่องวัดลิวทิลเลชันชนิดนั้น กระบวนการเรืองแสงจะเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการวัดรังสีโดยวิธีนี้ ซึ่งองค์ประกอบสำคัญในกระบวนการเรืองแสงคือ ตัวทำละลาย (solvent) และตัวถูกละลาย (solute) รวมกันเรียกว่า คอกเทล (cocktail) ตัวทำละลายส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ ได้แก่ โทลูอีน (toluene) ไซลีน (xylene) หรือเบนซีน (benzene) เป็นต้น สำหรับตัวถูกละลายหรือสารเรืองแสง (scintillator) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเรืองเช่น PPO (2,5-Diphenyl-oxazole) หรือ PBD (2-phenyl)-1,3,4-Oxadiazole) ปัจจุบันได้มีการพัฒนาทางด้านคอกเทล โดยทำเป็นคอกเทลสำเร็จรูปที่มีสัดส่วนผสมต่าง ๆ กัน เพื่อให้สะดวกต่อการใช้งานและเลือกให้เหมาะสมกับตัวอย่างในรูปที่ 2.4 แสดงกระบวนการถ่ายโอนพลังงานในลิวทิลเลชัน

ในสารละลายลิวทิลเลชัน(liquid scintillation solution) สารตัวทำละลายซึ่งเป็นสารอินทรีย์ (organic Solvent) ซึ่งมีโครงสร้างซับซ้อนและมีการจัดโมเดลของสถานะการเปลี่ยนพลังงานด้วยโครงสร้าง π -Electron ตามรูปที่ 2.5 เมื่อสารทำละลายได้รับพลังงานเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำโมเลกุลอยู่ในสถานะกระตุ้นแล้วทำให้สามารถถ่ายโอนพลังงานไปยังสารเรืองแสงได้

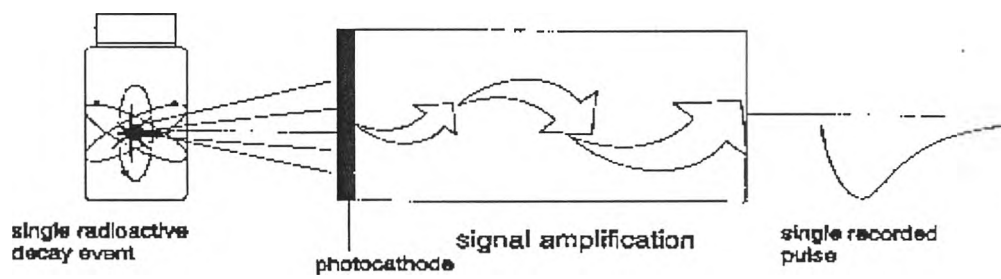
เนื่องจากโมเลกุลของตัวทำละลายมากกว่าโมเลกุลของตัวถูกละลาย (สารเรืองแสง) ดังนั้นกระบวนการถ่ายโอนพลังงานจึงเริ่มจากโมเลกุลของตัวทำละลายในคอกเทล จะดูดกลืนพลังงานจากการแผ่รังสีของสารรังสี ทำให้โมเลกุลของตัวทำละลายนั้น อยู่ในสถานะกระตุ้น (excited State) หรือเกิดการแตกตัวเป็นโมเลกุลที่มีประจุบวกกับอิเล็กตรอน (ionization) ซึ่งโมเลกุลที่มีประจุบวกอาจจะรวมกับอิเล็กตรอนของโมเลกุลที่อยู่ในสถานะกระตุ้นทำให้เกิดโมเลกุลกระตุ้นเช่นกัน การที่โมเลกุลที่อยู่ในสถานะกระตุ้นจะกลับมาสู่สถานะพื้น(ground state) นั้นจะมีโอกาสหลายขั้นตอนด้วยกันแสดงได้ด้วย π -Electron Model โมเลกุลที่อยู่ใน S_{0x} ดังแสดงในรูปที่ 2.6 จะมีระดับพลังงานของ vibrational

energy ลดต่ำลงมาอยู่ในระดับเดียวกับ vibrational energy ที่สูง ของ excited state single แรก คือ S_{ix} หรือ S_{nx} มีพลังงานต่ำลงกลายเป็น S_{ix} ที่ระดับพลังงานสูง เกิดกระบวนการที่เรียกว่า Internal Conversion (IC) กระบวนการลดพลังงานชนิดนี้นั้น ใช้เวลาอย่างรวดเร็ว (ประมาณ 10^{-12} วินาที) อิเล็กตรอนจะลงมาสู่ S_{ix} โดยที่ไม่มีการแผ่รังสี และอาจจะมีการลดพลังงานต่อไปได้ 2 รูปแบบคือ เกิด deexcited ไปสู่ S_{ox} โดยมีการให้โฟตอน เรียกว่า ฟลูออเรสเซนซ์ (fluorescence) ซึ่งอาจเรียกว่า solvent fluorescence และให้ช่วงคลื่นที่ไม่เหมาะสมในการวัดด้วยหลอดโฟโตมัลติฟลายเออร์ จึงเป็นกระบวนการสูญเปล่า (wasteful-process) การลดพลังงานอีกแบบหนึ่ง โมเลกุลของตัวทำละลายที่อยู่ในระดับพลังงาน S_{ix} ก็คือ การถ่ายโอนพลังงานให้แก่โมเลกุลของตัวถูกละลาย (สารเรืองแสง) ทำให้โมเลกุลของสารเรืองแสงอยู่ในสถานะกระตุ้น โดยทั่วไปจะอยู่ในระดับพลังงานต่ำ (S_0) ถ้าปริมาณความเข้มข้นของตัวถูกละลายมีปริมาณที่เหมาะสม ประสิทธิภาพในการถ่ายโอนพลังงานจากโมเลกุลของตัวทำละลาย สู่โมเลกุลของตัวถูกละลายจนเข้าใกล้กัน ซึ่งหมายความว่า พลังงานเกือบทั้งหมดจะถูกถ่ายเทจากโมเลกุลของตัวทำละลายที่อยู่ในสถานะกระตุ้นไปยังโมเลกุลของตัวถูกละลาย

เมื่อโมเลกุลของตัวถูกละลายหรือสารเรืองแสงซึ่งมีโครงสร้างเป็น π -Electron เช่นเดียวกับสารทำละลาย(solvent) ดังรูปที่ 2.6 ในขณะที่โมเลกุลของตัวถูกละลายดูดกลืนพลังงานจากการถ่ายโอนพลังงานของตัวทำละลายทำให้โมเลกุลของตัวถูกละลายอยู่ในสถานะถูกกระตุ้นซึ่งอิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นไปยังระดับพลังงานที่สูงขึ้นตามระดับพลังงาน singlet state (spin 0) หรือ $S_0, S_1, S_2 \dots$ และที่ระดับพลังงาน triplet state (spin 1) ซึ่งโมเลกุลถูกกระตุ้นจะขึ้นไปยังระดับพลังงานที่ในรูปแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับพลังงานที่ถ่ายเทให้กับโมเลกุลของตัวทำละลายหรือชนิดของรังสีนั่นเอง โมเลกุลของสารเรืองแสงที่ถูกกระตุ้นไปยังระดับพลังงานที่ singlet state เมื่อกลับลงมาสู่สถานะพื้นจะทำให้ปลดปล่อยพลังงานในรูปของแสงที่เรียกว่า fluorescence :ซึ่งจะใช้เวลาในการเกิดแสงประมาณ 10 – 20 nsec .ในส่วนของโมเลกุลของสารเรืองแสงที่ถูกกระตุ้นให้อยู่ในระดับพลังงาน triplet state เมื่อกลับลงมาอยู่ในสถานะพื้นจะปลดปล่อยพลังงานในรูปของแสงที่เรียกว่า phosphorescence ซึ่งใช้เวลาในการเกิดแสงประมาณ 200 – 300 nsec ดังรูปที่ 2.5

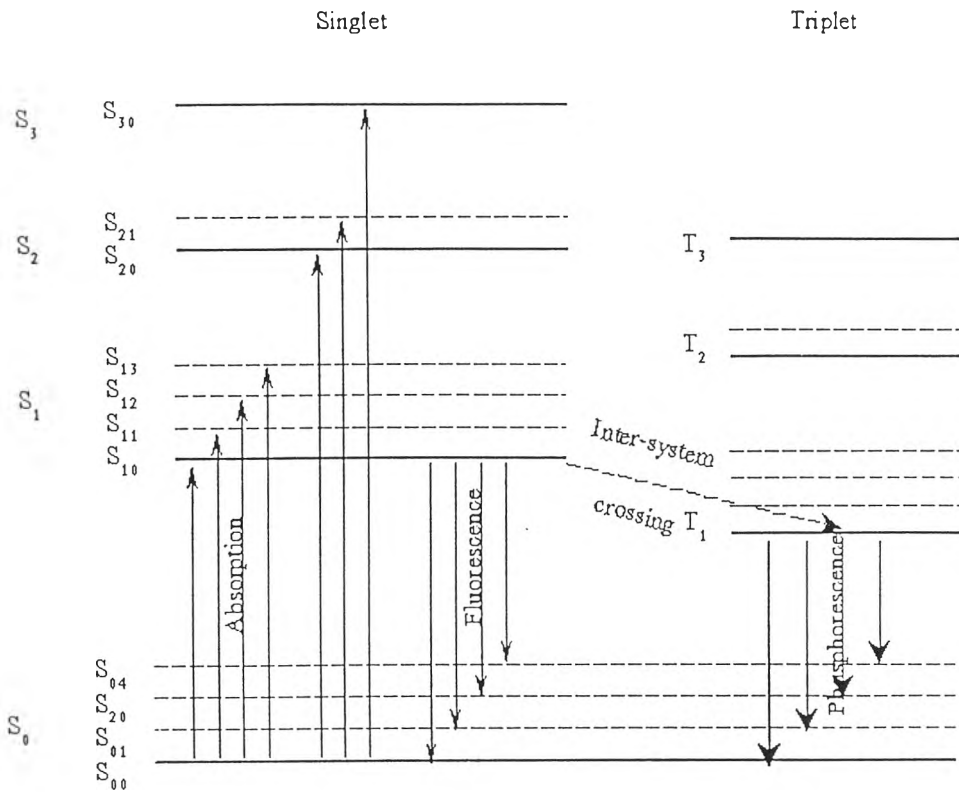


แสดงกระบวนการถ่ายโอนพลังงาน

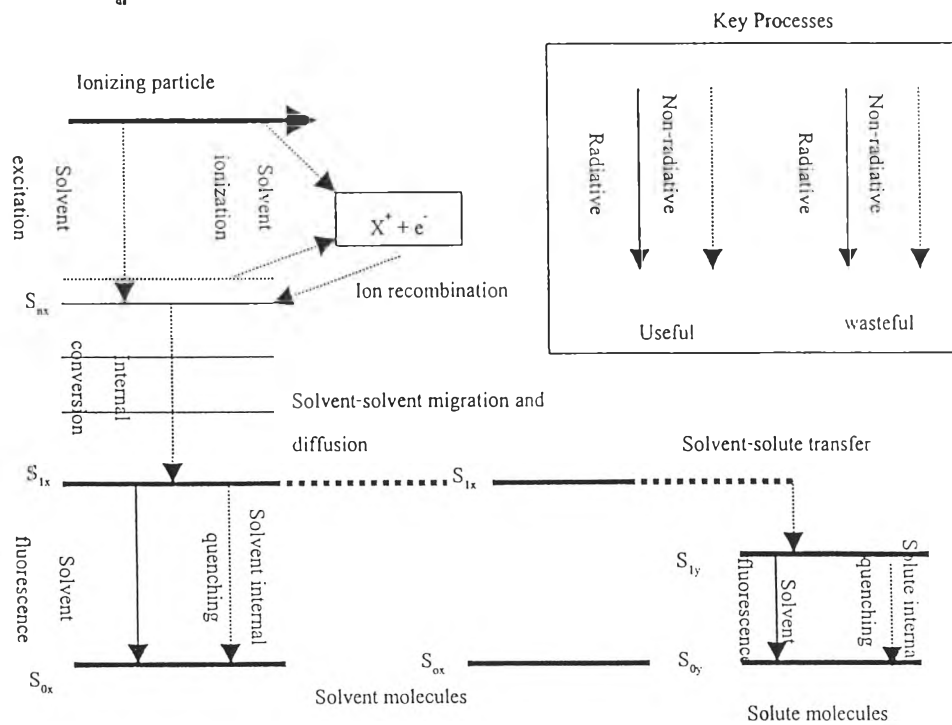


แสดงการวัดด้วยลิควิดซินทิลเลชัน

รูปที่ 2.4 แสดงกระบวนการวัดด้วยเครื่องวัดลิควิดซินทิลเลชัน⁵



รูปที่ 2.5 แสดงกระบวนการเรืองแสงของสารละลายเรืองแสง⁶



รูปที่ 2.6 แสดงกระบวนการถ่ายโอนพลังงานของสารรังสีให้กับตัวทำละลาย⁵

2.4 ตัวทำละลาย (solvent) ⁷

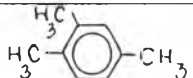
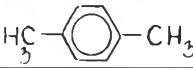
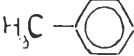

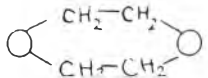

ประสิทธิภาพของการวัดรังสีด้วยเครื่องวัดลิกวิดซินทิลเลชันนั้นจะอยู่กับวิธีการเตรียมตัวอย่าง กล่าวคือถ้าตัวอย่างสามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกับตัวทำละลายจะทำให้ประสิทธิภาพการวัดมีค่ามาก

การวัดรังสีด้วยเครื่องวัดลิกวิดซินทิลเลชันนั้น ส่วนของตัวกลางวัดรังสีจะประกอบด้วยตัวทำละลายและตัวถูกละลาย (สารเรืองแสง) สำหรับในกระบวนการเรืองแสงนั้น ขณะที่โมเลกุลของตัวทำละลายอยู่ในสถานะกระตุ้นจะต้องสูญเสียพลังงานในรูปของแสง (fluorescence) ซึ่งลงมาสู่สถานะพื้นโดยไม่ถ่ายโอนพลังงานให้กับตัวทำละลายน้อยที่สุด เพราะการสูญเสียพลังงานโดยวิธีนี้จะเป็นการสูญเสียเปล่า เนื่องจากเป็นช่วงคลื่นของแสงที่ไม่สามารถวัดได้ด้วยหลอดทวิคูณแสง ดังนั้นตัวทำละลายที่ดีนั้นควรมีสมบัติดังนี้

1. สามารถละลายตัวอย่าง และสารเรืองแสงได้ดี
2. มีความสามารถดูดกลืนพลังงานจากรังสี และถ่ายโอนพลังงานให้สารเรืองแสงได้มากที่สุด
3. มีการดูดกลืนแสงจากสารเรืองแสงน้อยที่สุด
4. มีความบริสุทธิ์สูง

ตัวทำละลายที่นิยมมากที่สุด ได้แก่ ไซลีน (xylene) โทลูอีน (toluene) ซึ่งเหมาะสำหรับสารรังสีที่อยู่ในรูปของสารอินทรีย์ ที่สามารถละลายในตัวทำละลายได้ดีเท่านั้น สำหรับตัวอย่างที่เป็นน้ำนั้น ตัวทำละลายจำเป็นต้องเติมสารพวกลดแรงตึงผิว (surfactant) ซึ่งเรียกคอกเทลเหล่านี้ว่า “emulsive scintillator”

ตารางที่ 2.3 แสดงประสิทธิภาพการเกิดแสงของตัวทำละลายในการวัดด้วยเครื่องวัดลิกวิดซินทิลเลชัน⁹

Solvent	Structure	Scintillation Yield * (with 3 g/l PPO)
1,2,4-Trimethylbenzene		112
p-Xylene		110
Toluene		100
Benzene		85
Dioxane		65
Cyclohexane		20

2.5 สารเรืองแสง (Scintillator)⁴

จากที่กล่าวมาแล้วว่าสารเรืองแสงหรือตัวถูกละลายทำหน้าที่ในการเปลี่ยนพลังงานจากการถ่ายโอนพลังงานจากตัวทำละลายทำให้อยู่ในสถานะกระตุ้น เมื่อกลับมาสู่สถานะพื้นปลดปล่อยพลังงานในรูปของแสงโดยสารประกอบที่จะนำมาใช้เป็นสารเรืองแสงสำหรับการวัดด้วยเครื่องวัดลิกวิดซินทิลเลชันจึงควรมีคุณสมบัติดังนี้

1. มีประสิทธิภาพสูงในการให้แสงเมื่อถูกกระตุ้นด้วยรังสี
2. เรืองแสงให้ช่วงคลื่นที่ให้ maximum sensitivity ของหลอดทวีคูณแสง
3. ละลายได้ดีและมีเสถียรภาพภายใต้สภาวะที่ทำการวัด
4. ไม่มีการเกิดควENCHING เนื่องจากความเข้มข้น

ในบางครั้งจำเป็นต้องใส่สารเรืองแสงลำดับที่ 2 (secondary scintillation) ในคอกเทลในกรณีต่างๆ ดังนี้

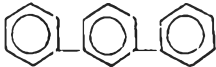
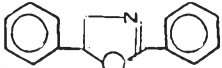
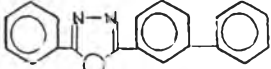
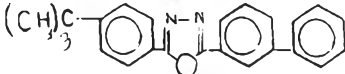
1. ในกรณีที่คอกเทลมีสารประกอบที่ไปรบกวนกระบวนการเรืองแสงจากสารเรืองแสงลำดับที่ 1

2. ในกรณีของความเข้มข้นของสารเรืองแสงลำดับที่ 1 เป็นสาเหตุของการเกิดควENCHING (self quenching)

3. ในกรณีของความเข้มข้นของสารเรืองแสงลำดับที่ 1 ให้แสงที่มีช่วงความยาวคลื่นไม่เหมาะสมกับความไวและประสิทธิภาพของหลอดทวิคูณแสง จึงต้องเติมสารเรืองแสงลำดับที่ 2 เพื่อให้ปลดปล่อยแสงในช่วงความยาวที่เหมาะสมกับหลอดทวิคูณแสง ซึ่งเรียกว่าสารเรืองแสงนี้ว่า wavelength shifter⁴

สารเรืองแสงที่นิยมใช้กันมากได้แก่ PPO (2,5-diphenyloxazole) butyl-PBD [2-(4-tert-butylphenyl)-5-(4-biphenyl)-1] เป็นต้น

ตารางที่ 2.4 สารเรืองแสงลำดับที่ 1 ที่นิยมใช้สำหรับเครื่องวัดลิวทริสซินทิลเลชัน¹⁰

Name	Formula	Relative light output
PPP		1
PPO		1.01
PBD		1.28
Butyl PBD		1.28

สารเรืองแสงลำดับที่ 1 ส่วนใหญ่จะให้แสงในช่วงความยาวคลื่นในราว 360 นาโนเมตรซึ่งเป็นช่วงที่ไม่พอดีกับความไวของหลอดทวิคูณแสงจึงจำเป็นต้องเติมสารเรืองแสงลำดับที่ 2 เพื่อเลื่อนคลื่นแสงให้อยู่ในช่วงไวแสงของการทำงานของหลอดทวิคูณแสง สารเรืองแสงลำดับที่ 2 ที่นิยมใช้กันมากได้แก่ POPOP ซึ่งจะเรืองแสงในช่วงความยาวคลื่น 415 นาโนเมตรตามตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 สารเรืองแสงลำดับที่ 2 ที่ใช้ในเครื่องวัดลิวคิควิดซินทิลเลชัน⁹

Name	Formular	Conc.(g/L)	Average wavelength (nm)
POPOP		0.05-0.2	415
bis-MSB		1.5	425
PBBO		0.5	415

สำหรับส่วนผสมของสารเรืองแสงหรือคอกเทลที่ใช้กับเครื่องวัดลิวคิควิดซินทิลเลชันมีมากมายหลายชนิด ซึ่งประกอบด้วยตัวทำละลาย ตัวถูกละลายหรือสารเรืองแสงลำดับที่ 1 สารเรืองแสงลำดับที่ 2 และสารละลายบางตัวที่เติมเข้าไปเพื่อให้สามารถผสมได้กับตัวอย่างที่เป็นน้ำ ปัจจุบันนี้การเตรียมคอกเทลมีหลายบริษัทที่ผลิตคอกเทลสำเร็จรูปจำหน่ายเช่น UltimaGold ของPackquad , Optiscint Hisafe ของ Wallac เป็นต้น ซึ่งทำให้เกิดการสะดวกต่อการใช้งาน

2.6 เควนชิง (quenching)²¹

เควนชิงเป็นปรากฏการณ์ใด ๆ ก็ตามที่ทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องลิวคิควิดซินทิลเลชันลดลง สาเหตุของการเกิดเควนชิงมีด้วยกันหลายประการ สามารถแยกเป็นประเภทต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. เคมีคัลเควนชิง (chemical quenching) เกิดขึ้นเนื่องจากมีสารใน cocktail เข้าไปรบกวนกระบวนการถ่ายทอดพลังงานจากโมเลกุลของตัวทำละลายไปยังสารเรืองแสง ทำให้ปริมาณการเรืองแสงจาก cocktail ลดลง เช่น ความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย ความเข้มข้นของสารเรืองแสงที่มากหรือน้อยเกินไป เป็นต้น

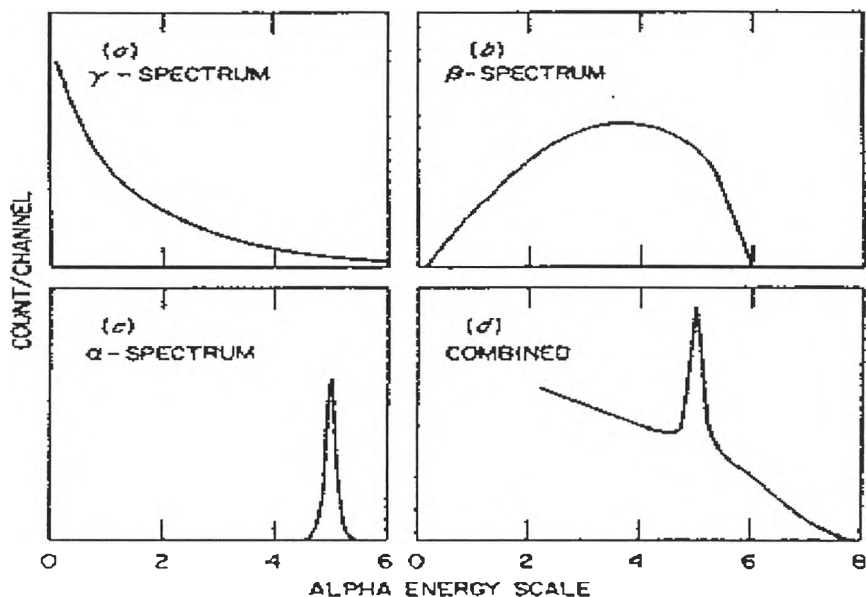
2. คัลเลอร์เควนชิง (color quenching) เกิดขึ้นเนื่องมาจากสีใด ๆ ก็ตามที่มีอยู่ใน cocktail และสามารถดูดกลืนแสงที่เกิดขึ้นจากสารเรืองแสงได้ ซึ่งมีผลทำให้ปริมาณแสงเรืองลดลง

3. ออปติคัลเควนชิง (optical quenching) เกิดขึ้นเนื่องจากลักษณะของขวดบรรจุ สารวัด (sample vial) เช่น ความขุ่นมัว ปลายนิ้วมือ หรือสิ่งที่ตกค้างภายในขวดบรรจุ ซึ่งมีผลทำให้แสงเรืองลดน้อยลง

เมื่อเกิดควENCH ในการวัดตัวอย่างด้วยเครื่องวัดลิวทอนทิลเลชันมีผลทำให้จำนวนโฟตอน ที่โฟโตคาโทดลดลง ดังนั้นสัญญาณที่เกิดขึ้นมีขนาดลดลง และสเปกตรัมจะเลื่อนไปทางซ้ายมือและความสูงของสเปกตรัมจะลดลงด้วย ด้วยเหตุนี้ในหาความเข้มข้นของสารรังสีในตัวอย่าง จึงต้องทำการเปรียบเทียบมาตรฐานกับสารตัวอย่างมาตรฐานที่มีผลของควENCH (standard quench solution)

2.7 การวัดรังสีอัลฟาด้วยเครื่องวัดลิวทอนทิลเลชัน¹⁰

การวัดรังสีอัลฟาด้วยเครื่องวัดลิวทอนทิลเลชัน มีปัญหาหลัก 2 ประการ ในกรณีที่ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ขนาดของพัลส์ประการแรกประสิทธิภาพการเกิดแสงน้อย เมื่อเทียบกับหน่วยพลังงานของรังสีอัลฟาและเบตา เป็นสาเหตุให้ความสามารถในการแจกแจงพลังงานต่ำด้วย ประการที่ 2 การแทรกสอด (interference) ของรังสีเบตาและแกมมา ในกรณีของตัวอย่างที่ให้รังสีอัลฟา เบตาและแกมมา เครื่องไม่สามารถที่จะแยกวัดด้วยวิธีวัดขนาดพัลส์ของรังสีแต่ละชนิดได้ แต่ในปัจจุบันการพัฒนาระบบการวัดด้วยเครื่องวัดลิวทอนทิลเลชันพัฒนาไปอย่างมาก ได้มีการนำเอาเทคนิคการแจกแจงชนิดของรังสีจากรูปร่างของพัลส์ (pulse shape discrimination) มาใช้ สามารถลดการรบกวนของรังสีแกมมาและเบตาได้ นอกจากนี้ยังมีการนำเอาวิธีสกัดด้วยของเหลวมาใช้แยกสารรังสีเฉพาะที่สนใจออกจากตัวอย่าง แล้วนำไปวัดด้วยเครื่องวัดลิวทอนทิลเลชัน สามารถแก้ปัญหาของการวัดรังสีอัลฟาด้วยเครื่องวัดลิวทอนทิลเลชันได้



รูปที่ 2.7 แสดงสเปกตรัมการวิเคราะห์ขนาดของพัลส์ (pulse height spectrum) ของรังสีในการวัดด้วยเครื่องวัดลิควิดซินทิลเลชัน¹⁰

รูป a สเปกตรัมที่เกิดจากรังสีแกมมา

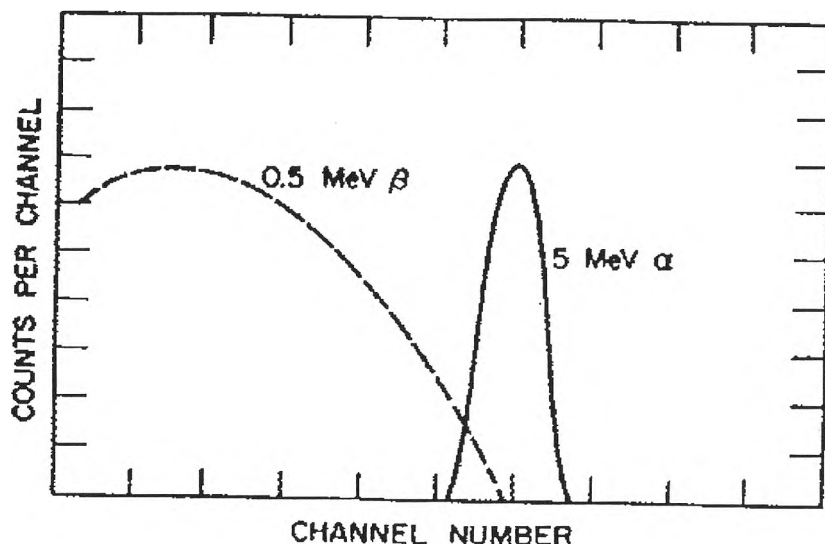
รูป b สเปกตรัมที่เกิดจากรังสีเบตา

รูป c สเปกตรัมที่เกิดจากรังสีอัลฟา

รูป d สเปกตรัมที่เกิดจากรังสีทั้ง 3 ชนิดรวมกัน

เมื่อพิจารณาการทำอันตรกิริยาของรังสีกับตัวกลางในที่นี้ซึ่งเป็นสารละลายซินทิลเลชัน (Scintillation Solution) ในกรณีใช้การวิเคราะห์ขนาดของพัลส์ (pulse height analyser) ตามสเปกตรัมดังรูปที่ 7a เมื่อรังสีแกมมาซึ่งเป็นรังสีที่มี specific ionization ต่ำ ดังนั้นกรณีที่รังสีแกมมาพลังงานสูงจะทะลุผ่านในส่วนของตัวกลางไป โดยทำให้เกิดไอออนไนซ์โมเลกุลของตัวกลางได้น้อยกว่ารังสีแกมมาพลังงานต่ำ ในส่วนของรังสีเบตาซึ่งมีค่า specific ionization สูงกว่ารังสีแกมมาและสามารถทำอันตรกิริยาในตัวกลางได้ภายในไว้อล สำหรับการทำอันตรกิริยาของรังสีเบตานั้นมีพลังงานตั้งแต่ 0 จนถึงพลังงานสูงสุดของรังสีเบตา ซึ่งเป็นสเปกตรัมต่อเนื่องดังรูปที่ 7b ในกรณีของการทำอันตรกิริยาของรังสีอัลฟาซึ่งเป็นรังสีที่มีค่า specific ionization สูงกว่ารังสีแกมมาและรังสีเบตาและสามารถทำอันตรกิริยาได้ทั้งหมดภายในไว้อลดังแสดงในรูปที่ 7c ในกรณีที่ตัวอย่างมีรังสีรวมอยู่หลายชนิดเมื่อทำการ

วัดตัวอย่างดังกล่าวจะเกิดการสอดแทรกบรบกวนกันและกันได้สเปกตรัมดังรูปที่ 7d โดยไม่สาารถแยกสเปกตรัมเพื่อหาปริมาณได้ด้วยวิธีการวิเคราะห์ความสูงของพีลส์

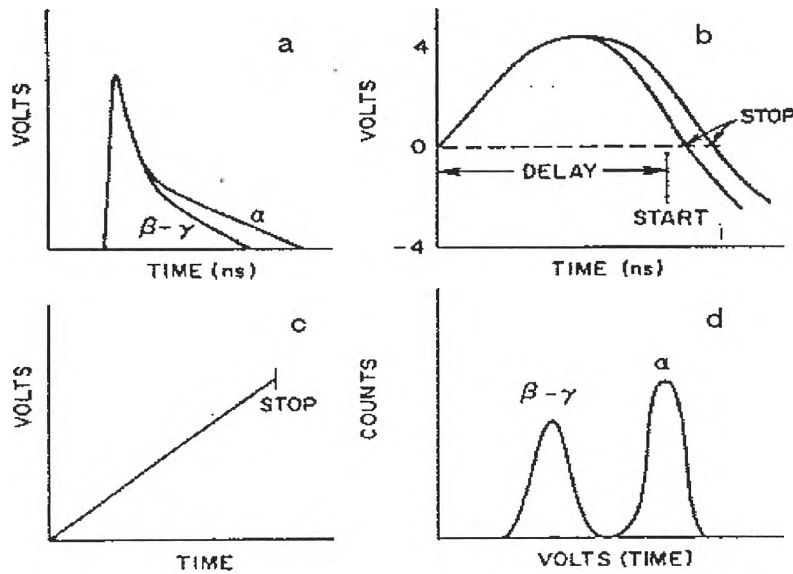


รูปที่ 2.8 แสดงเปรียบเทียบสเปกตรัมของรังสีอัลฟาและรังสีเบตา¹⁰

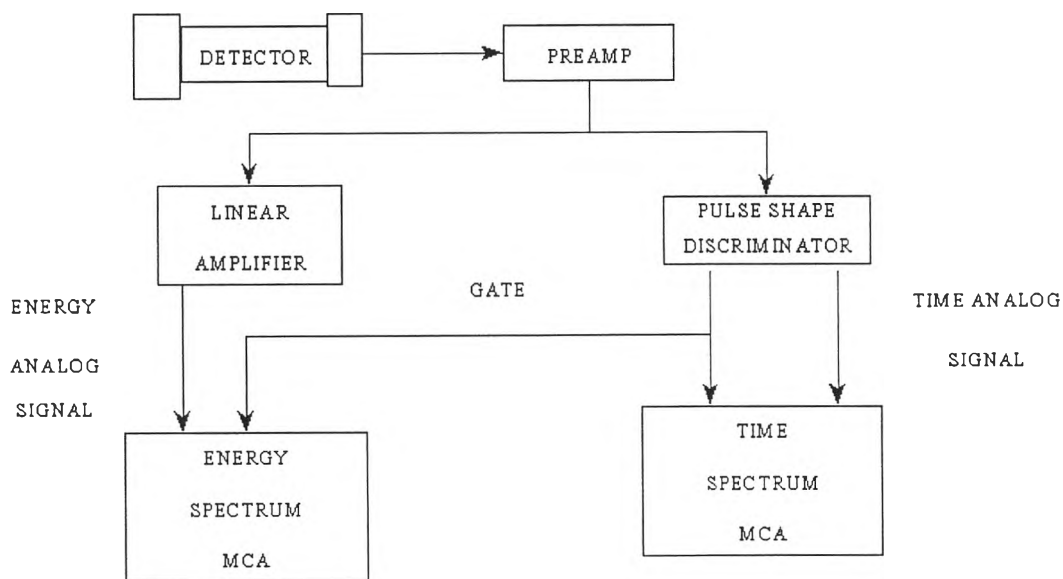
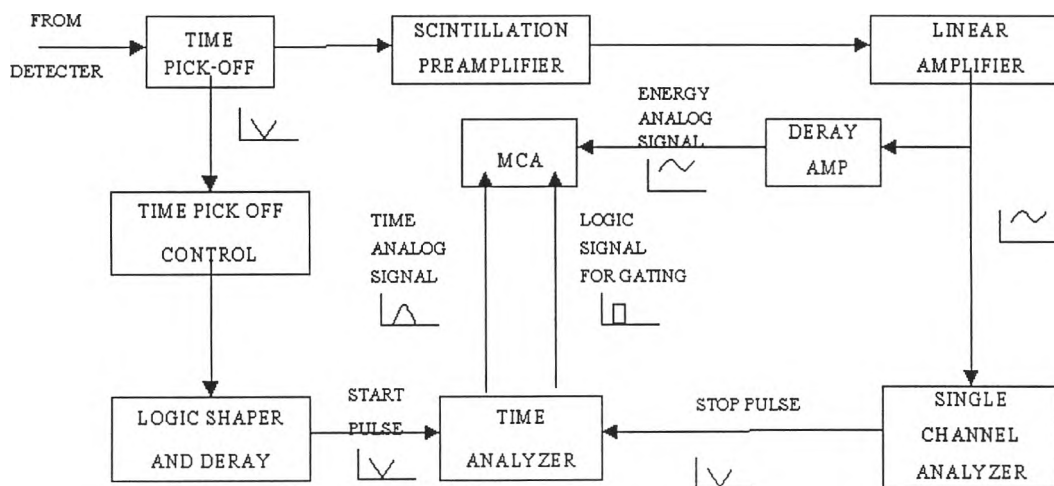
หากพิจารณาที่สเปกตรัมของรังสีเบตาและรังสีอัลฟาในกรณีของการวิเคราะห์ขนาดของพีลส์ต่อหน่วยพลังงานที่ถ่ายโอนให้กับตัวกลาง ในกรณีของประสิทธิภาพของการเกิดแสง รังสีเบตามีประสิทธิภาพมากกว่ารังสีอัลฟาประมาณ 10 เท่า ดังรูปที่ 8 และสเปกตรัมของรังสีเบตาจะมีพื้นที่ซ้อนทับกับรังสีอัลฟาด้วย ในกรณีที่ต้องการใช้เครื่องวัดลิวทิตินิลเลชันสำหรับการวัดหาปริมาณรังสีอัลฟาจำเป็นต้องแยกส่วนของรังสีเบตาจากการวัดรังสีอัลฟา ด้วยการวิเคราะห์รูปร่างของพีลส์ (PSA) ซึ่งมีขั้นตอนดังรูปที่ 2.9 กล่าวคือ ในรูปที่ 2.9 a สัญญาณพีลส์จากการวัดรังสีอัลฟาและเบตาจะมีรูปร่างต่างกันในเวลาสลายพีลส์ ดังนั้นเมื่อแปลงเวลาที่แตกต่างกันให้เป็นขนาดของพีลส์ (Time to Amplitude Conversion; TAC) จะสามารถวิเคราะห์สเปกตรัมของรังสีเบตาและอัลฟาได้ดังรูปที่ 2.9 b และ 2.9 d ซึ่งการจักระบบวัดรังสีแบบ PSA นั้นแสดงในรูปที่ 2.10

ในรูปที่ 2.10 เมื่อรังสีจากตัวอย่างทำอันตรกิริยากับสารละลายเรืองแสงแล้วปลดปล่อยแสงซึ่งขึ้นอยู่กับนชนิดของรังสี แสงซึ่งมีเวลาสลายพีลส์ต่างกันที่เกิดขึ้นจะถูกนำไปขยายด้วยหลอดทวีคูณแสงจนได้สัญญาณไฟฟ้า เมื่อสัญญาณไฟฟ้าผ่านส่วนของ time pick off จะทำหน้าที่ตรวจสอบตั้งแต่การเริ่มเกิดเป็นสัญญาณพีลส์แต่ละพีลส์และส่งสัญญาณนั้นไปยังภาคขยายส่วนหน้า (preamp) เมื่อสัญญาณผ่านภาคขยายส่วนหน้าซึ่งจะมีรูปร่างของพีลส์แตกต่างกันในแง่ของ decay time แสดงดังรูปที่ 2.9 a สัญญาณจะถูกส่งไปยัง logic shaper and delay ที่จุดนี้สัญญาณพีลส์ที่เกิดจากรังสีอัลฟากับ

รังสีเบต้ามักมีความแตกต่างในแง่ของเวลา 30 – 40 nsec ดังรูปที่ 9b สัญญาณจะส่งผ่านไปยัง time analyser หรือ time to amplitude converter ได้ความสัมพันธ์เชิงเส้นของเวลาและขนาดสัญญาณดังรูปที่ 2.9 c จากความสัมพันธ์ของค่าขนาดสัญญาณกับเวลาสามารถนำขนาดสัญญาณนี้ไปวิเคราะห์ด้วย MCA ในแง่ของ time spectrum ได้สเปกตรัมดังรูป 2.9 d



รูปที่ 2.9 แสดงการทำงานของกรวิเคราะห์โดยใช้การวิเคราะห์รูปร่างพัลส์(PSA)¹⁰
 รูป a ความแตกต่างของรูปร่างพัลส์ของรังสีอัลฟากับรังสีเบตาและแกมมา
 รูป b สัญญาณจากความต่างเวลาของการสลายแสงภายในซินทิลเลชัน
 รูป c ความสัมพันธ์ของเวลา(decay time) และขนาดของสัญญาณ
 รูป d สเปกตรัมเวลาของรังสีอัลฟาและรังสีเบตา แกมมา



รูปที่ 2.10 แสดงการทำงานของวงจรวิเคราะห์รูปร่างของพัลส์(Pulse Shape Analyser)¹⁰

2.8 การวิเคราะห์รูปร่างของพัลส์ (Pulse Shape Analyser) ¹⁰

เทคนิค pulse shape discrimination นั้นเป็นเทคนิคที่ใช้ในนิวตรอนสเปกโตรสโกปี (neutron spectroscopy) อย่างกว้างขวาง pulse shape discrimination อาศัยหลักการที่ว่าสัญญาณที่เกิดขึ้นที่แอนโอดของหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ ในเครื่องลิวทอนซินทิลเลชันนั้น ประกอบด้วย สัญญาณ 2 แบบ คือ สัญญาณแบบ prompt และสัญญาณแบบ delayed เพื่อให้เข้าใจถึงการเกิดสัญญาณทั้ง 2 แบบ จำเป็นต้องเข้าใจถึงกระบวนการเรืองแสงดังที่ได้กล่าวมาแล้ว นั่นคือ เมื่อรังสีผ่านตัวกลางคือ cocktail พลังงานของรังสีก็จะถูกดูดกลืน และทำให้โมเลกุลต่าง ๆ ใน cocktail อยู่ในสถานะการกระตุ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของ singlet state หรือรูปของ triplet state ในสถานะกระตุ้นแบบ singlet โมเลกุลนั้นจะ deexcited ไปสู่สถานะพื้น (ground state) โดยมีกาให้โฟตอน เรียกว่า การเกิดฟลูออเรสเซนซ์ ซึ่งเกิดเร็วมาก น้อยกว่า 10^{-8} วินาที สัญญาณที่เกิดจากฟลูออเรสเซนซ์นี้ เรียกว่า สัญญาณแบบ prompt ส่วนสัญญาณแบบ delayed เกิดจาก กรณีที่โมเลกุลที่อยู่ในสถานะกระตุ้นอิเล็กตรอนตัวหนึ่งอาจเกิด spin กลับทาง โมเลกุลนั้นจะถูกเปลี่ยนจาก singlet state ไปเป็น triplet state ที่พลังงานสูงที่จะเกิดกระบวนการ Vibration Relaxation ลดพลังงานให้เป็น triplet state ที่มีพลังงานต่ำ และก็เกิดกระบวนการลดระดับพลังงานไปยังสถานะพื้น โดยให้โฟตอนเกิดขึ้น เรียกว่า ฟอสฟอเรสเซนซ์ (phosphorescence) กระบวนการนี้จะใช้เวลา หรือมีชีวิตรายาวประมาณมากกว่า 10^{-3} วินาที เป็นที่ทราบแล้วว่ารังสีอัลฟามีอำนาจก่อให้เกิดการแตกตัวได้ดีกว่ารังสีเบตา หรืออาจจะกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า รังสีอัลฟามีค่าการแตกตัวเป็นไอออนจำเพาะสูง (high specific ionization) ภาวะนี้มีผลต่อภาคตัดขวางของโมเลกุลที่อยู่ในสถานะกระตุ้นจะเปลี่ยนจาก singlet state ไปเป็น triplet state ได้ ดังนั้นรังสีแอลฟาจึงให้สัญญาณแบบ delayed มากกว่า ทำให้รูปร่างพัลส์ของอัลฟาจะมี decay time ของแสงยาวกว่าของเบตาและแกมมาพลังงานต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 a

จากลักษณะที่แตกต่างกันนี้ทำให้การใช่วงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ สามารถแยกตัวรังสีอัลฟาและรังสีเบตาออกจากกันได้ดังรูปที่ 2.9 d

2.9 การสกัดสารด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction) ¹¹

การสกัดสารด้วยตัวทำละลาย เป็นการสกัดสารที่สนใจจะวัดปริมาณละลายอยู่ในตัวทำละลายชนิดหนึ่ง ให้อยู่ในตัวทำละลายของเหลวอีกชนิดหนึ่ง โดยปกติแล้วสารละลายทั้งสองชนิดนี้จะต้องไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน อย่างเช่น นำกับตัวทำละลายอินทรีย์ เป็นต้น ส่วนวิธีการสกัดโดยการนำเอาสารที่มีสารที่สนใจละลายอยู่ใส่ลงในกรวยแยก แล้วเติมตัวทำละลายอินทรีย์ที่สามารถละลายสารที่สนใจได้ดีลงในกรวยแยก จากนั้นเขย่ากรวยแยกให้สารละลายสัมผัสกันให้มากที่สุดแล้วตั้งทิ้งไว้ให้

สารละลายทั้งสองแยกชั้นอย่างสมบูรณ์ เมื่อถึงจุดสมดุล อัตราส่วนการกระจายของตัวถูกละลาย M ระหว่างตัวทำละลายที่ 1 และ 2 จะมีค่าคงที่ เรียกว่า สัมประสิทธิ์ของการกระจาย (Distribution Coefficient; D_m)¹¹

$$D_m = [M]_1 / [M]_2 \text{-----} 1$$

D_m คือ ค่าคงที่ เรียกว่า สัมประสิทธิ์ของการกระจาย

$[M]_1$ คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในตัวทำละลายชนิดที่ 1

$[M]_2$ คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในตัวทำละลายชนิดที่ 2