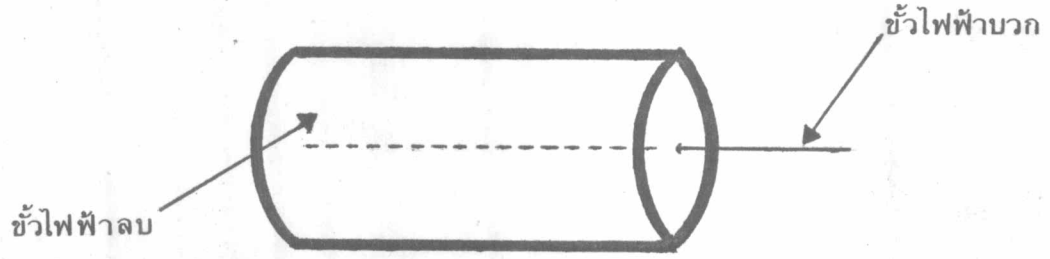
บทที่ ๒

หลอดไกเกอร์-มูลเลอร์ (Geiger-Muller Tube)

วิธีวัดรังสีมีอยู่หลายแบบด้วยกัน บางแบบใช้หัววัดเป็นผลึก เช่น ผลึกของโซเดียมไอโอไดด์ ซึ่งจะเปล่งแสงเมื่อถูกชนด้วยอนุภาครังสี หัววัดแบบนี้ได้แก่ ซินทิลเลชันดีเทคเตอร์ สารเคมีบางชนิดก็ใช้วัดรังสีได้ เพราะจะเปลี่ยนสีเมื่อถูกรังสี แต่วิธีวัดรังสีแบบหนึ่งที่มีมาตั้งแต่มนุษย์เริ่มรู้จักรังสีใหม่ ๆ ตราบจนปัจจุบันนี้ก็ยังใช้กันอยู่เป็นที่แพร่หลาย ได้แก่ หัววัดรังสีแบบที่ให้อนุภาครังสีไอออไนซ์กาซในหลอดหัววัด หัววัดแบบนี้ชนิดหนึ่งที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ หลอดไกเกอร์-มูลเลอร์

๒.๑ ลักษณะโดยทั่วไปของหลอดไกเกอร์-มูลเลอร์

หลอดไกเกอร์-มูลเลอร์หรือที่เรียกว่า หลอดไกเกอร์หรือบางทีเรียกย่อ ๆ ว่า หลอด G.M. มีรูปแบบได้หลายอย่าง แต่ส่วนใหญ่แล้วมักมีลักษณะเป็นหลอดทรงกระบอก โดยจะประกอบด้วยกระบอกโลหะซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าลบ ล้อมรอบและแยกจากกันโดยเด็ดขาดจากแกนกลาง ซึ่งเป็นลวดโลหะตรึงอยู่ตรงกลางหลอด ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าบวก



รูปที่ ๒.๑ โครงสร้างคร่าว ๆ ของหลอดไกเกอร์

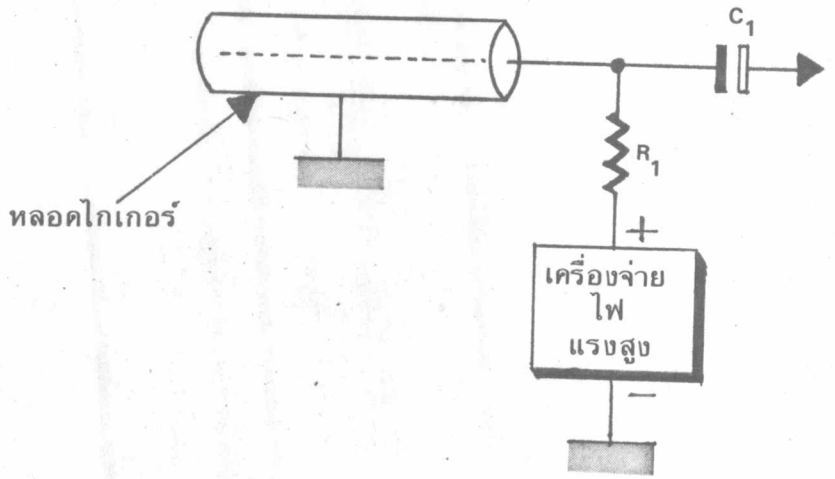
ลักษณะสำคัญของทรงกระบอกขั้วไฟฟ้าลบก็คือ ควรจะทำจากสารที่มีค่า Work Function สูงเพื่อลด Photoelectron ที่จะเกิดจากแสงสว่างเนื่องจากปฏิกิริยา Photo-electric Effect หลอดไกเกอร์ที่ไวต่อแสงสว่างธรรมดาจะเรียกว่า Photosensitive Detector เมื่อจะนำไปใช้งานควรปิดป้องกันแสงให้สนิท

ส่วนเส้นลวดแกนกลางจะเป็นโลหะชนิดใดก็ได้ แต่ก็มักจะทำจากโลหะทังสเตนเพราะเหนียว สามารถรีดให้เล็กและเรียบได้ดีกว่าโลหะชนิดอื่น ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นลวดนี้มักจะอยู่ระหว่าง ๐.๐๐๑ และ ๐.๐๑๐ นิ้ว

นอกจากนี้ภายในหลอดไกเกอร์จะบรรจุไว้ด้วยกาซจำพวก Noble Gas โดยเฉพาะมักจะเป็น กาซอาร์กอนหรือกาซนีออน เพราะเป็นกาซเฉื่อย มีค่า Specific Ionization สูง ผสมกับกาซจำพวกอัลกอฮอล์ หรือมีเธนประมาณ ๑ เปอร์เซนต์ เพื่อช่วย Quenching ความกดดันของกาซภายในหลอดไกเกอร์มีใช้กันหลายค่า แต่ส่วนมากมักจะเป็นความดันต่ำ ๆ เช่น ในช่วง ๗-๒๐ เซนติเมตรของปรอท ทั้งนี้เพื่อเพิ่ม Mean Free Path ของอิเลคตรอนอิสระ

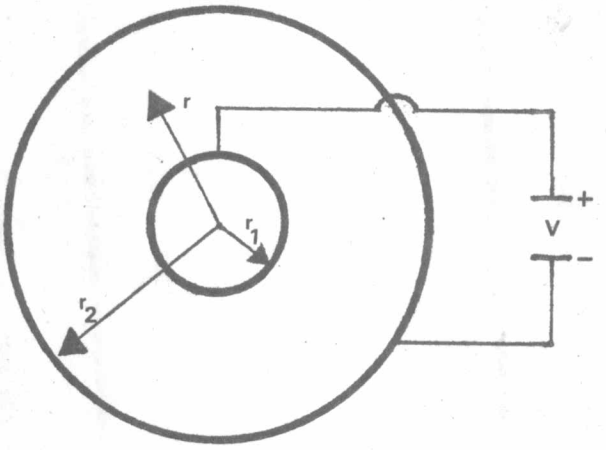
๒.๒ ปฏิกิริยาระหว่างอนุภาครังสีกับหลอดไกเกอร์

ในการที่จะนำหลอดไกเกอร์ไปใช้วัดรังสี ขั้วไฟฟ้าบวกและขั้วไฟฟ้าลบของหลอดไกเกอร์จะต้องได้รับไฟแรงสูงตามวงจรต่อไปนี้



รูปที่ ๒.๒ วงจรผลิตสัญญาณพัลส์

แต่โดยขอบเขตจำกัดจากรูปทรงของหลอดที่มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในหลอดจึงไม่สม่ำเสมอ แต่จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามรัศมีของรูปทรงกระบอก ตามความสัมพันธ์



รูปที่ ๒.๓ แผนภาพตัดขวางของหลอดไกเกอร์

$$E_r = \frac{V}{r \ln (r_2/r_1)} \qquad (2.1)$$

เมื่อ E_r คือความเข้มสนามไฟฟ้าที่จุด r ใด ๆ

V คือค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าบวกกับขั้วไฟฟ้าลบ

r_1 คือรัศมีของเส้นลวดแกนกลาง (ขั้วไฟฟ้าบวก)

r_2 คือรัศมีของทรงกระบอก (ขั้วไฟฟ้าลบ)

จากสมการที่ (2.1) จะเห็นได้ว่าความเข้มของสนามไฟฟ้ามีค่าสูงที่สุดที่บริเวณใกล้กับเส้นลวดแกนกลาง และจะมีค่าลดลงเมื่อห่างออกมา

สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะมีผลต่อประจุไฟฟ้าดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$v = \mu E/P \qquad (2.2)$$

เมื่อ v คือความเร็วของประจุไฟฟ้าในกาซตัวกลาง

μ คือ Mobility ของประจุไฟฟ้าในกาซตัวกลาง

E คือความเข้มสนามไฟฟ้า

P คือความดันของกาซตัวกลาง

จะเห็นได้ว่า ยิ่งสนามไฟฟ้ามีความแรงมากประจุไฟฟ้าก็จะมีความเร็วสูงมาก

สำหรับในกรณีของหลอดไกเกอร์ ประจุไฟฟ้าที่กล่าวถึงหมายถึงประจุไฟฟ้าที่เกิดจากกระบวนการไอออไนเซชัน

เมื่อมีอนุภาครังสีวิ่งผ่านเข้ามาในหลอดไกเกอร์ อนุภาคนี้จะไปไอออไนซ์ กาซที่อยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าของหลอดไกเกอร์ ในกรณีของรังสีแอลฟาและเบตานั้น เนื่องจากเป็นอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าจึงสามารถเข้าไปไอออไนซ์ กาซในหลอดได้โดยตรง ส่วนรังสีแกมมาหรือรังสีเอกซ์นั้น เพราะเป็นอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้าจึงต้องใช้วิธีโดยอ้อม คือทำให้เกิดอิเลคตรอนจากผิวของคาโธดด้วยกระบวนการ Photoelectric Effect หรือ Compton Scattering ก่อน แล้วอิเลคตรอนตัวนี้เองที่ไปทำหน้าที่ไอออไนซ์กาซในหลอดไกเกอร์ ซึ่งจะช่วยกันไอออไนซ์อะตอมอื่น ๆ กันต่อ ๆ ไป โดยเฉพาะที่บริเวณใกล้เส้นลวดขั้วไฟฟ้าบวก ซึ่งสนามไฟฟ้ามีความเข้มสูงมาก อิเลคตรอนในบริเวณนี้ได้รับพลังงานสูงมาก จึงสามารถจะไปไอออไนซ์อะตอมอื่น ๆ ได้มากมาย เรียกกระบวนการนี้ว่า Gas Multiplication หรือ Electron Avalanche อิเลคตรอนที่เกิดขึ้นจำนวนมากมายนี้จะวิ่งเข้าหาเส้นลวดแกนกลาง ซึ่งมีศักดาไฟฟ้าเป็นบวกภายในเวลาประมาณ $๑๐^{-๖}$ วินาที ทำให้เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าช่วงสั้น ๆ ไหลในวงจร ตามรูปที่ ๒.๒ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านความต้านทาน R_1 ทำให้ความต่างศักย์ของหลอดไกเกอร์ลดลงไปเท่ากับค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ตกคร่อมความต้านทาน R_1 ซึ่งเมื่อดูจากออสซิโลสโคปจะเห็นเป็นสัญญาณพัลส์ทางลบ

ในขณะที่อิเลคตรอนที่เกิดจากกระบวนการ Electron Avalanche วิ่งเข้าหาขั้วไฟฟ้าบวก ไอออนบวกที่เกิดขึ้นก็จะวิ่งเข้าหาขั้วไฟฟ้าลบด้วยเช่นกัน ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ ๑๐๐×๑๐^{-๖}-๕๐๐×๑๐^{-๖} วินาที แล้วไปรวมกับอิเลคตรอนของขั้วไฟฟ้าลบ (คาโธด) กลายเป็นอะตอมในสถานะโลด

เมื่อจะกลับลงสู่สถานะปรกติ อะตอมพวกนี้จะปล่อยโฟตอนออกมา โฟตอนพวกนี้จะไปทำให้เกิดกระบวนการ Photoelectric Effect ที่แผ่นคาโธด ซึ่ง Photoelectron ที่เกิดขึ้นสามารถจะทำให้เกิด Electron Avalanche ได้ใหม่อีกครั้งหนึ่ง ทำให้การนับรังสีของหลอดไกเกอร์ผิดพลาด วิธีกำจัดเหตุการณ์นี้ก็โดยการผสมกาซพวกอัลกอฮอล์หรือมีเธนเข้าไปเพียงเล็กน้อย ซึ่งเรียกว่า Quenching Gas เพื่อทำหน้าที่ดูดกลืนโฟตอนที่อะตอมปล่อยออกมาเมื่อจะกลับสู่สถานะปรกติ ทำให้ไม่เกิด Photoelectron จากแผ่นคาโธด แต่ตัวของ Quenching Gas ก็จะแตกสลายตัวไป ด้วยเหตุนี้หลอดประเภทนี้จึงมีอายุการใช้งานจำกัด โดยทั่วไปจะใช้นับรังสีได้ประมาณ $๑๐^{๙}$ ตัว Quenching Gas ที่ใส่ในหลอดไกเกอร์จะอยู่ในสถานะไอที่อุณหภูมิห้อง แต่จะกลั่นตัวทันทีที่อุณหภูมิลดลงเพียงเล็กน้อย ดังนั้น เพื่อการนับรังสีที่เที่ยงตรงหลอดประเภทนี้จึงควรถูกควบคุมให้มีอุณหภูมิคงที่

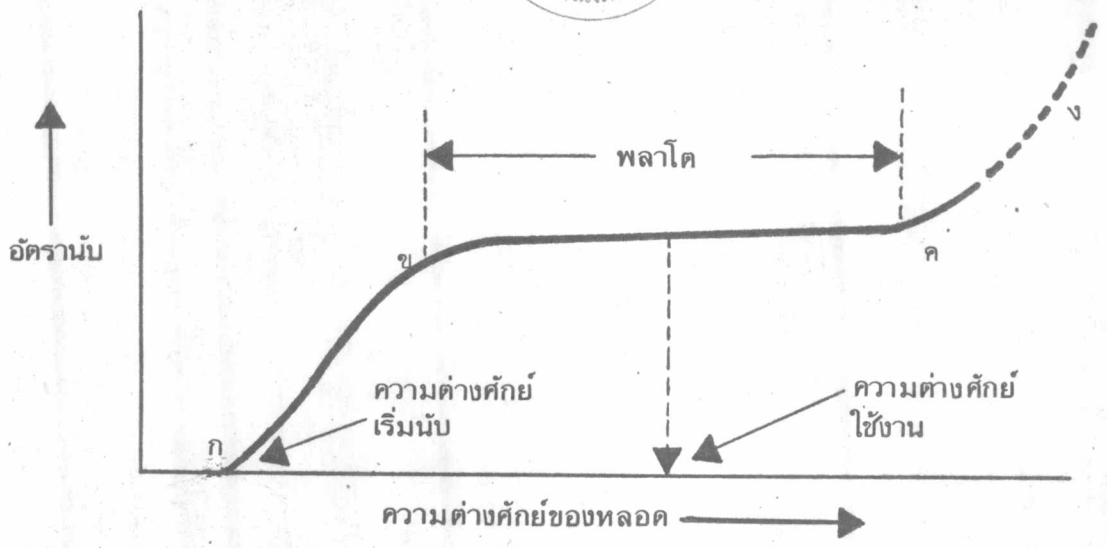
โดยที่หลักการทำงานของหลอดไกเกอร์อาศัยประโยชน์จากกระบวนการ Gas Multiplication ในช่วงที่จำนวนอิเลคตรอนทุติยภูมิที่เกิดจะไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณของอิเลคตรอนปฐมภูมิ ดังนั้นหลอดไกเกอร์จึงไม่สามารถใช้ตรวจสอบชนิดของรังสีได้ เพราะเมื่อได้จ่ายไฟแรงสูงค่าที่เหมาะสมให้แก่หลอดไกเกอร์แล้ว ไม่ว่าจะเป็นอนุภาคชนิดใด มีพลังงานเท่าใด ต่างก็จะให้สัญญาณพัลส์ที่มีขนาดเท่ากัน

๒.๓ กราฟประจำตัวของหลอดไกเกอร์

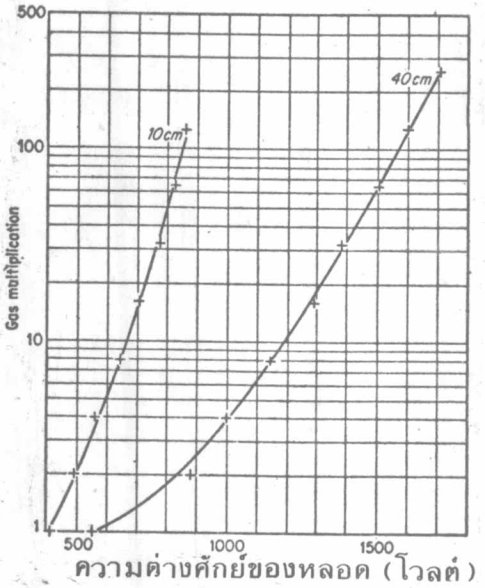
กราฟประจำตัวของหลอดไกเกอร์หมายถึง กราฟระหว่างจำนวนสัญญาณพัลส์ที่เกิดขึ้นในหนึ่งหน่วยเวลากับความต่างศักย์ของหลอด

ช่วง ก ข เป็นช่วงที่เรียกว่า Region of Proportional Counting ขนาดของสัญญาณพัลส์ที่เกิดขึ้น เมื่อความต่างศักย์ระหว่างแอโนดกับคาโธดอยู่ในช่วงนี้จะขึ้นอยู่กับพลังงานของอนุภาคที่วิ่งผ่านหลอดสำหรับในช่วงนี้เมื่อเพิ่มความต่างศักย์มากขึ้นจะทำให้ Gas-multiplication Factor มีค่ามากขึ้นด้วย ช่วงพลังงานของอนุภาคที่จะถูกนับได้จึงกว้างขึ้น อัตราการนับจึงเพิ่มขึ้น

หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

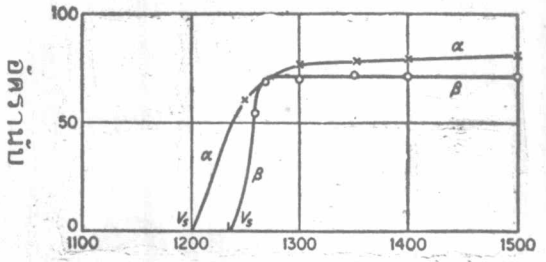


รูปที่ ๒.๔ กราฟประจำตัวของหลอดไกเกอร์



รูปที่ ๒.๕ กราฟแสดงการเพิ่มขึ้นของ Gas-multiplication Factor เมื่อความต่างศักย์เพิ่มขึ้น ที่ความดันกาซ ๑๐ และ ๔๐ เซนติเมตรของปรอท กาซที่ใช้คืออาร์กอนบริสุทธิ์ ๙๙.๖ เปอร์เซนต์ เส้นผ่าศูนย์กลางของแอโนด ๐.๐๑ นิ้ว เส้นผ่าศูนย์กลางของคาโธด ๐.๘๗ นิ้ว (จาก Price, Wm. J. Nuclear Radiation Detection 2nd ed. หน้า ๑๔๖)

นอกจากนั้นค่าความต่างศักย์ตรงจุดเริ่มนับคือ จุด ก จะแตกต่างกันไปแล้วแต่ชนิดของอนุภาค



รูปที่ ๒.๖ กราฟเปรียบเทียบระหว่างอัตรานับกับความต่างศักย์ของหลอดไกเกอร์หลอดเดียวกัน และตั้งดิสคริมิเนเตอร์ไว้ที่จุดเดียวกันคือ ๑๒๕ มิลลิโวลต์ ของการวัดรังสีเบตา (β) และรังสีแอลฟา (α) (จาก Price, Wm. J. Nuclear Radiation Detection 2nd ed. หน้า ๑๒๑)

ช่วง ข ค เป็นช่วงที่เรียกว่า Geiger Region ในช่วงนี้อนุภาคทุกตัวที่วิ่งผ่านหลอดจะสามารถถูกนับได้ เพราะขนาดของพัลส์มีค่าเท่ากันหมด เนื่องจาก Gas-multiplication Factor มีค่าคงที่ตลอดช่วงนี้ เราเรียกช่วงนี้ว่า พลาโต ช่วงนี้เป็นช่วงที่อัตราการนับจะไม่ขึ้นอยู่กับค่าความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับหลอดไกเกอร์ แต่โดยทั่วไปพลาโตจะเอียงเล็กน้อย ทั้งนี้เป็นด้วยเมื่อเพิ่มค่าความต่างศักย์ให้แก่หลอดไกเกอร์ Sensitive Volume ภายในหลอดจะเพิ่มขึ้นด้วย ความยาวและความเอียงของพลาโตจะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของกาซที่บรรจุในหลอด คุณลักษณะของเส้นลวดขั้วไฟฟ้าบวกและคุณสมบัติของทรงกระบอกขั้วไฟฟ้าลบสำหรับความต่างศักย์ที่จะให้แก่หลอดไกเกอร์ เมื่อนำไปใช้งานมักจะอยู่ในช่วงกึ่งกลางของพลาโต เพราะถ้าเมื่อไฟแรงสูงที่จ่ายให้หลอดไกเกอร์เปลี่ยนแปลงไปบ้างจะไม่ทำให้อัตราการนับเปลี่ยนไปด้วย

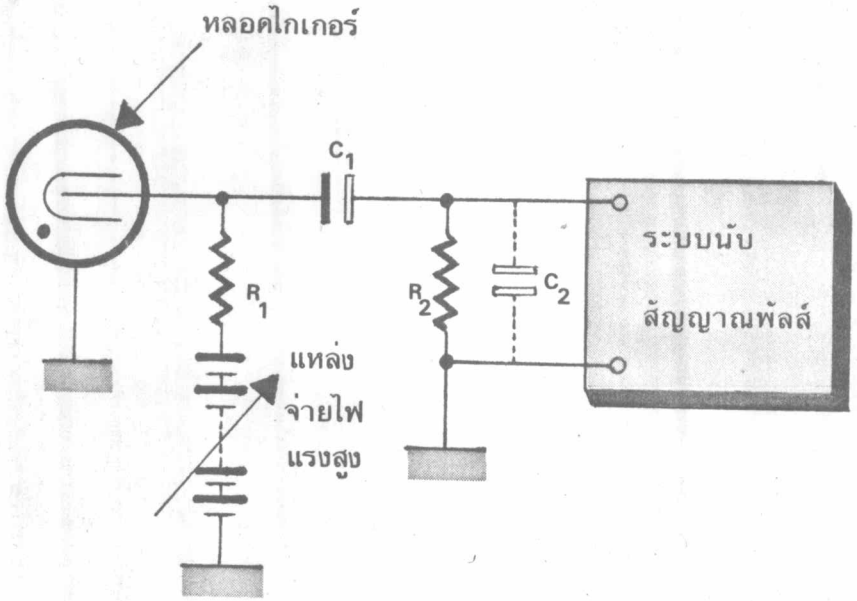
ช่วง ค ง เป็นช่วงที่เรียกว่า Region of Continuous Discharge ในช่วงนี้เมื่อเกิดการดิสชาร์จนำเพียงหนึ่งครั้ง จะทำให้เกิดการดิสชาร์จเกิดขึ้นตามติดมาอีกหลายครั้ง

นั่นคือ อนุภาคเพียง ๑ ตัวสามารถทำให้เกิดพัลส์ได้หลายพัลส์ ทำให้การนับรังสีเกิดการผิดพลาดหมด

โดยปกติหลอดไกเกอร์ที่ได้รับไฟแรงสูงจนเข้าไปอยู่ในช่วงนี้มักจะเสียในเวลาต่อมา แต่ในบางครั้งอาจยังพอใช้งานได้ แต่ช่วงพลาโตจะสั้นลงและความเอียงของพลาโตจะเพิ่มขึ้น

๒.๔ ลักษณะของสัญญาณพัลส์จากหลอดไกเกอร์

เมื่อจะนำหลอดไกเกอร์ไปใช้วัดปริมาณรังสี จะต้องนำหลอดไกเกอร์ไปต่อเข้ากับระบบนับสัญญาณพัลส์ดังวงจรต่อไปนี้

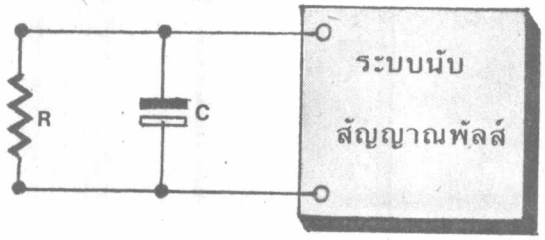


รูปที่ ๒.๗ หลอดไกเกอร์เมื่อต่อกับระบบวงจรนับสัญญาณพัลส์

จากวงจรนี้ ความต้านทาน R_1 จะต่ออนุกรมอยู่กับแหล่งจ่ายไฟแรงสูง มีหน้าที่ป้องกันไม่ให้แหล่งจ่ายไฟแรงสูงต่อโดยตรงกับขั้วทั้งสองของหลอดไกเกอร์ ดังนั้น เมื่อเกิดกระบวนการ Electron Avalanche ในหลอดไกเกอร์ จะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน R_1 ทำให้เกิดแรงเคลื่อนตกคร่อม R_1 เกิดเป็นสัญญาณพัลส์ทางลบส่งผ่าน C_1 เข้าระบบนับสัญญาณพัลส์ C_1 ทำหน้าที่ป้องกันไฟตรงจากแหล่งจ่ายไฟแรงสูงไม่ให้ผ่านไปเข้าภาคนับสัญญาณได้ ดังนั้น C_1 ต้องเป็นคาปาซิเตอร์ชนิดพิเศษทนไฟแรงสูงได้ โดยทั่วไป C_1 จะมีค่าความจุอยู่ในระดับไมโครฟาราด

R_2 คือความต้านทานขาเข้าของระบบนับสัญญาณพัลส์ และ C_2 คือ Stray Capacityของสาย Coaxial หรือความจุขาเข้าของระบบนับสัญญาณพัลส์

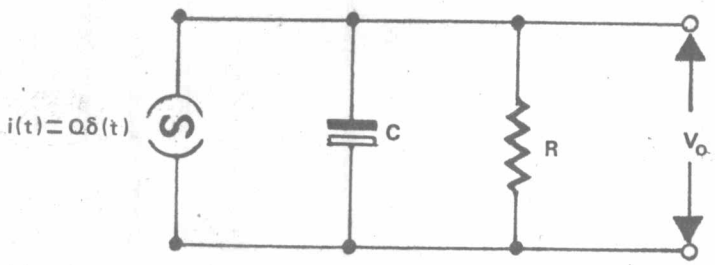
วงจรสมมูลย์ของวงจรตามรูปที่ ๒.๗ เมื่อมองจากทางด้านหลอดไกเกอร์ เขียนแทนได้ดังนี้



เมื่อ C เป็นผลบวกของ C_2 กับความจุของหลอดไกเกอร์ โดยทั่วไปจะมีค่าความจุอยู่ในระดับพิโคฟาราด ในที่นี้ได้ลัดวงจร C_1 ไปเพราะถือว่ามีค่ามากเมื่อเทียบกับ C

และ R คือ $\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$

โดยการสมมุติให้หลอดไกเกอร์เป็น Dirac Delta Function Generator จ่ายสัญญาณพัลส์ของกระแสมีค่า $Q\delta(t)$ ต่อกับความต้านทานและคาปาซิเตอร์ ดังวงจรต่อไปนี้



เมื่อ Q คือประจุที่เกิดจากกระบวนการ Electron Avalanche โดยอนุภาค ๑ ตัว

$\delta(t)$ คือ Dirac Delta Function

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R} + j\omega C = \frac{1 + j\omega CR}{R}$$

$$Z(t) = \frac{R}{1 + j\omega CR} = \frac{1}{\frac{1}{R} + j\omega C}$$

$\therefore$ $$Z(S) = \frac{1}{\frac{1}{R} + CS}$$

$\therefore$ $$i(t) = Q\delta(t)$$

$\Longrightarrow$ $$i(S) = Q \quad ; \because \quad F(t) = \delta(t)$$

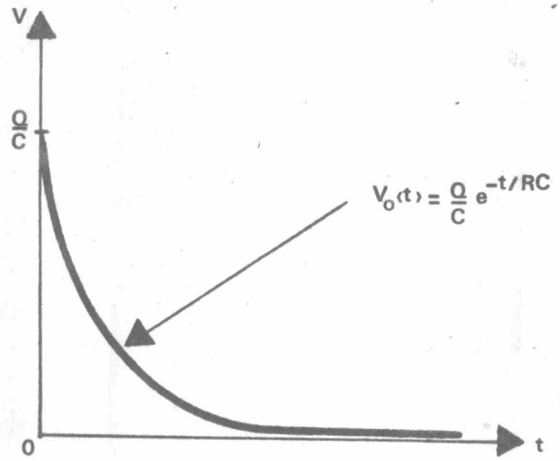
$\Longrightarrow$ $$f(S) = 1$$

$$V_o(S) = i(S)\, Z(S) = \frac{Q}{\frac{1}{R} + CS}$$

$$= \frac{Q}{C}\left[\frac{1}{S + \frac{1}{RC}}\right]$$

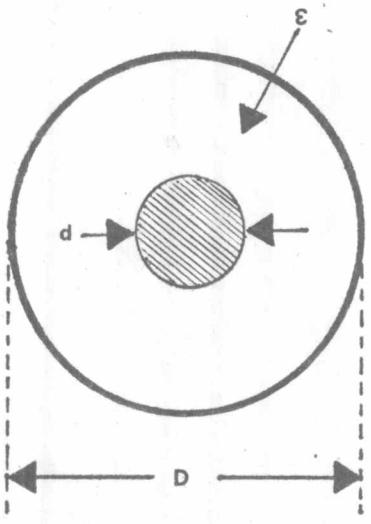
ทำ Inverse Laplace Transform

ได้ $$V_o(t) = \frac{Q}{C}\, e^{-t/RC} \qquad (2.3)$$



รูปที่ ๒.๘ ลักษณะสัญญาณพัลส์ของหลอดไกเกอร์ตามวงจรในรูปที่ ๒.๗ รูปนี้แสดงอยู่ในแกนบวก

จากสมการ (2.3) จะเห็นได้ว่า ความสูงของสัญญาณพัลส์ขึ้นอยู่กับค่าความจุ C ดังนั้นความยาวของสาย Coaxial ที่เชื่อมต่อระหว่างหลอดไกเกอร์กับระบบนับสัญญาณพัลส์ จึงมีผลต่อสัญญาณพัลส์ด้วย เพราะเมื่อสาย Coaxial ยาวขึ้น ความจุของสายก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ความจุของสาย Coaxial มีความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

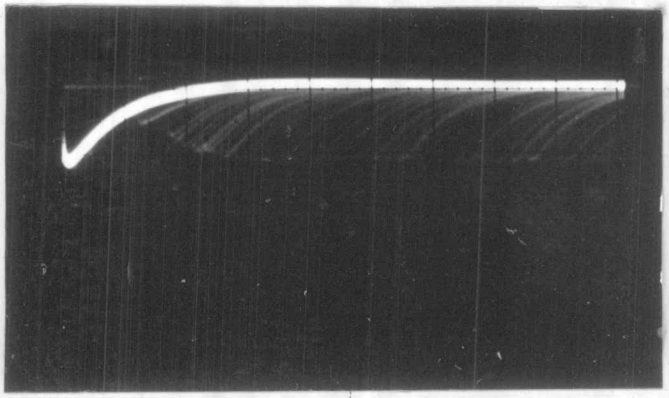


$$C = 2\pi\varepsilon / \ln\frac{D}{d} \qquad (2.4)$$

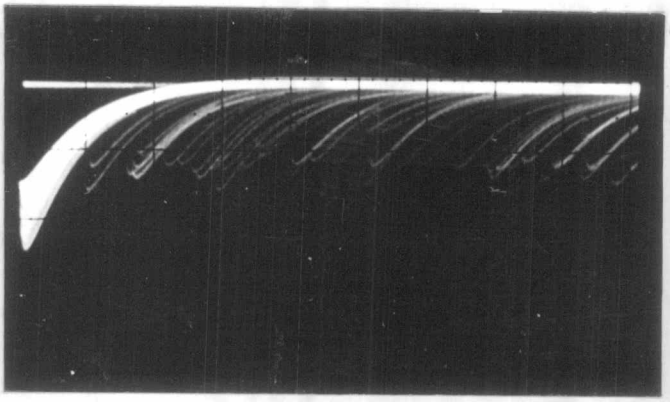
เมื่อ ε คือ Permitivity ของตัวกลางระหว่างลวดตัวนำทั้งสองชั้น และ C คือ ความจุต่อความยาว ๑ เมตร

รูปที่ ๒.๙ รูปตัดขวางของสาย Coaxial

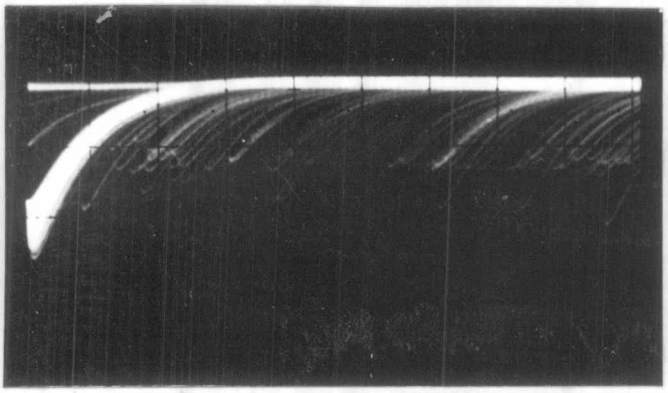
นอกจากนี้ความสูงของสัญญาณพัลส์ยังจะขึ้นอยู่กับค่าความต่างศักย์ที่จ่ายให้ระหว่างขั้วไฟฟ้าบวกกับขั้วไฟฟ้าลบด้วย โดยถ้าความต่างศักย์มีค่ามาก Q จะมีค่ามากไปด้วย



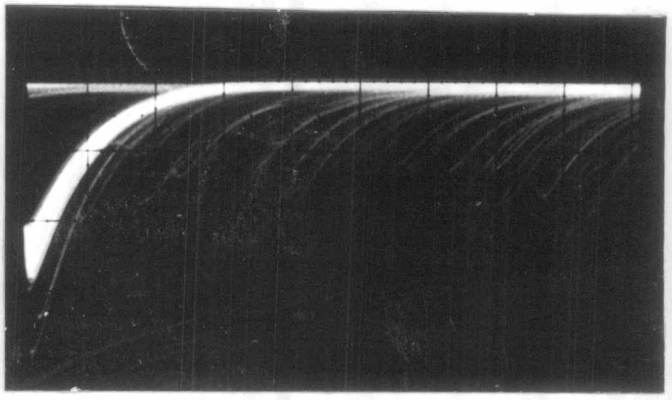
ก. ใช้หลอดไกเกอร์ ๑ หลอด



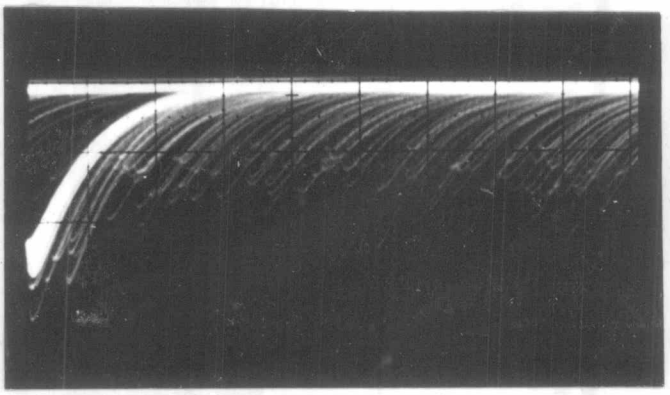
ข. ใช้หลอดไกเกอร์ ๒ หลอดต่อขนาน



ค. ใช้หลอดไกเกอร์ ๓ หลอดต่อขนาน



ง. ใช้หลอดไกเกอร์ ๔ หลอดต่อขนาน



จ. ใช้หลอดไกเกอร์ ๕ หลอดต่อขนาน

รูปที่ ๒.๑๐ แสดงลักษณะสัญญาณพัลส์ จากหัววัดรังสีชนิดหลายหลอด