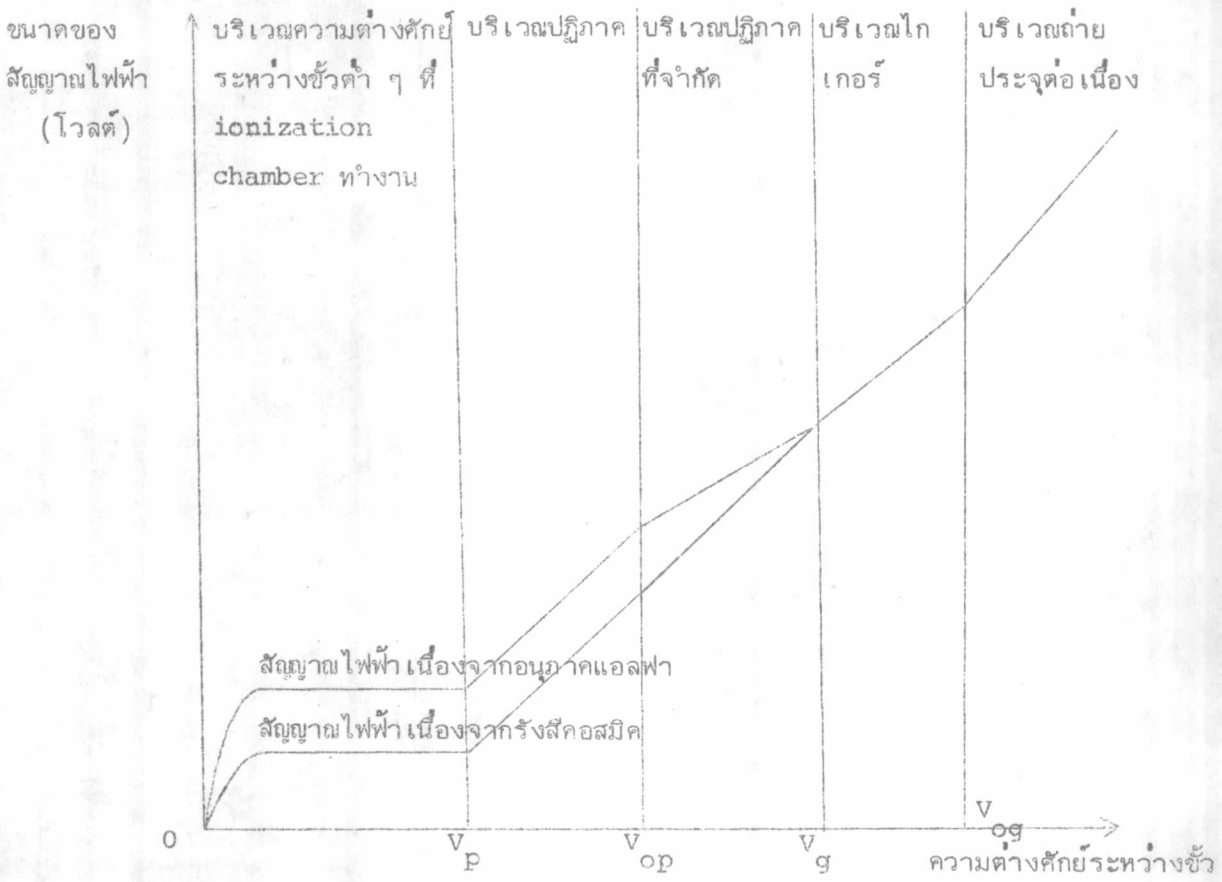
บทที่ 3

ชนิดของเครื่องวัดรังสีบรรจุกาซ

หลักการสำคัญของเครื่องวัดรังสีตามที่กล่าวมาแล้วคือ เมื่ออนุภาคหรือรังสีผ่านสสาร จะทำให้อะตอมหรือโมเลกุลของสสารที่อยู่ใกล้ ๆ ทางเดินของอนุภาค หรือรังสีที่ผ่านเกิดการโลดและการเกิดไอออน ได้ไอออนบวกและอิเลคตรอนวิ่งไปยังขั้วลบและขั้วบวกตามลำดับ จึงเกิดสัญญาณไฟฟ้า เครื่องวัดรังสีแบ่งออกตามปรากฏการณ์การเกิดไอออนของกาซที่บรรจุ และปรากฏการณ์นี้ก็ขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ระหว่างขั้วที่ให้แก่เครื่องวัดรังสีนั้น ดังรูปข้างล่าง

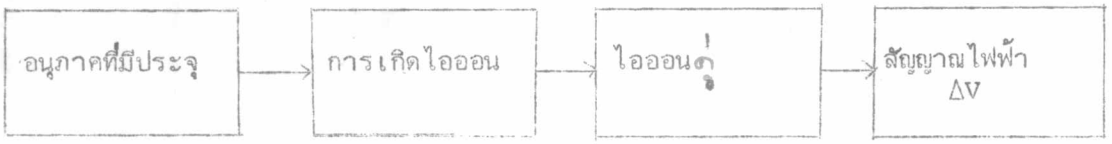


รูปที่ 3.1[3] แสดงการทำงานของเครื่องวัดรังสีในช่วงความต่างศักย์ระหว่างขั้วต่าง ๆ

ในรูปส่วนโค้งบนแทนสัญญาณไฟฟ้าที่เกิดจากอนุภาคแอลฟา ซึ่งทำให้เกิดไอออนคู่ 10,000 ไอออนคู่ ในขณะที่อนุภาคแอลฟาผ่านเครื่องวัดรังสี ส่วนโค้งล่างเกิดจากรังสีคอสมิคซึ่งทำให้เกิดไอออนคู่ 30 ไอออนคู่ ส่วนโค้งทั้งสองพบกันที่ขีดเริ่มไกเกอร์ V_g (Geiger threshold)

3.1 การแบ่งชนิดของเครื่องวัดรังสีตามปรากฏการณ์ในช่วงความต่างศักย์ระหว่างขั้วต่าง ๆ กัน

ก. บริเวณความต่างศักย์ระหว่างขั้วต่ำ ๆ ในช่วงนี้อนุภาคที่วิ่งผ่านเครื่องวัดรังสีจะทำให้อะตอมและโมเลกุลของกาซเกิดเป็นไอออนได้ และไอออนเหล่านี้จะทำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้าโดยตรง เขียนแผนผังแสดงการทำงานของเครื่องวัดรังสีง่าย ๆ ได้คือ



และ $\Delta V = -\frac{Q}{C}$ หรือ $-\frac{ne}{C}$ สำหรับเครื่องวัดรังสีแบบทรงกระบอก

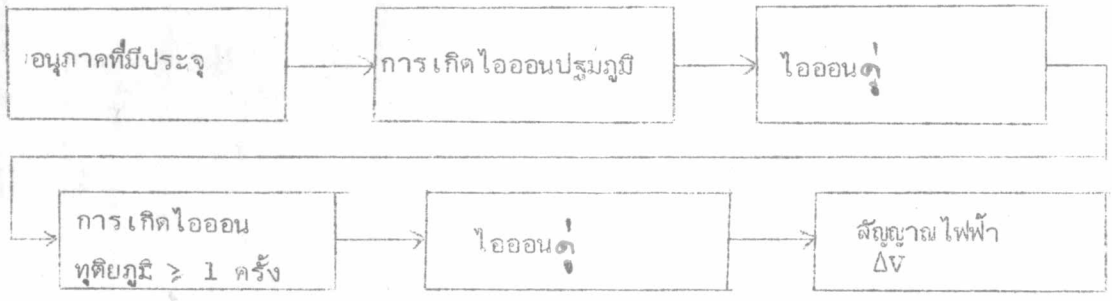
ถ้าความต่างศักย์ระหว่างขั้วเป็นศูนย์ จะไม่มีสัญญาณไฟฟ้า ΔV เกิดขึ้น เพราะไอออนเคลื่อนที่อย่างสะเปะสะปะ เมื่อมีความต่างศักย์ระหว่างขั้วน้อย ๆ ไอออนบวกจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วลบ และอิเลคตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วบวก ด้วยความเร็วตามสมการ (2.1) และเกิดสัญญาณไฟฟ้าตามสมการข้างบน ขนาดของสัญญาณไฟฟ้าขึ้นอยู่กับจำนวนของอิเลคตรอนที่มาถึงขั้วบวก และจะไม่มีการสร้างอิเลคตรอนทุติยภูมิจากอิเลคตรอนปฐมภูมิเลย จำนวนอิเลคตรอนที่มาถึงขั้วบวกจะเท่ากับจำนวนอิเลคตรอนที่เกิดจากการเกิดไอออนปฐมภูมิ ไม่มีการรวมตัวของไอออนบวกกับอิเลคตรอน (recombination) เพราะสนามไฟฟ้ามีค่ามากและความดันของกาซต่ำ สังเกตได้ว่าสัญญาณไฟฟ้ามีขนาดไม่ขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ระหว่างขั้ว เครื่องวัดรังสีที่ทำงานในช่วงนี้ เรียกว่า "ionization chamber"

ข. บริเวณปฏิภาค (proportional region) เมื่อความต่างศักย์ระหว่างขั้วสูงขึ้นกว่า V_p จะเกิดอิเลคตรอนทุติยภูมิ หรือเกิดกาซัลติพลิเคชันจากการชนของอิเลคตรอน

ปฐมภูมิขณะที่เคลื่อนที่เข้าสู่ขั้วบวก สัญญาณไฟฟ้าที่ปรากฏจะมากกว่าบริเวณที่ความต่างศักย์ระหว่างขั้วต่ำ ๆ ขณะที่ความต่างศักย์ระหว่างขั้วสูงขึ้นจะมีอิเลคตรอนทุติยภูมิเกิดขึ้นบริเวณใกล้ ๆ ขั้วบวก และขยายบริเวณออกไปตามความต่างศักย์ระหว่างขั้วที่เพิ่มขึ้น การเพิ่มความเข้มของสนามไฟฟ้าก็เท่ากับการเพิ่มพลังงานจลน์ให้กับอิเลคตรอนปฐมภูมิ จึงทำให้เกิดไอออนเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เรียกว่า "กาซมัลติพลิเคชัน" หรือ "ถล่มขั้นต้น" สัญญาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในช่วงนี้สำหรับเครื่องวัดรังสีแบบทรงกระบอกเป็นไปตามสมการ

$$\Delta V = -Mne/C$$

ΔV จะต่างจาก ΔV ของบริเวณความต่างศักย์ระหว่างขั้วต่ำ ๆ ซึ่ง $M = 1$ แต่ในบริเวณนี้ค่า M สูงได้ถึง 10^7 ขึ้นอยู่กับชนิดของกาซ ค่า M คงที่สำหรับค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วค่าหนึ่ง ๆ ดังนั้น ΔV จะขึ้นอยู่กับจำนวนของไอออนบวกหรืออิเลคตรอน n ที่เกิดในการเกิดไอออนปฐมภูมิ ความต่างศักย์ระหว่างขั้วที่ M คงที่เรียกว่า "บริเวณปฏิภาค" (proportional region) ช่วงความต่างศักย์ระหว่างขั้วที่ M ขึ้นอยู่กับขนาดสัญญาณไฟฟ้า เรียกว่า "บริเวณปฏิภาคที่จำกัด" (limited proportionality) จาก V_p ถึง V_{op} เครื่องวัดรังสีที่ทำงานในบริเวณปฏิภาค เรียกว่า "เครื่องวัดรังสีปฏิภาค" (proportional counter) แผนภาพแสดงการทำงานของเครื่องวัดรังสีปฏิภาคคือ



ค. ในบริเวณไกเกอร์ (Geiger region) เมื่อความต่างศักย์ระหว่างขั้วสูงขึ้นถึง V_g สัญญาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะไม่ขึ้นอยู่กับจำนวนไอออนที่เกิดจากไอออนปฐมภูมิ ทุก ๆ สัญญาณบนจออออสซิลโลสโคปจะเท่ากันหมด ค่าของ M จะขึ้นอยู่กับขนาดของสัญญาณไฟฟ้า

แต่ละสัญญาณ ความต่างศักย์ระหว่างขั้วต่ำสุดคือ V_g เครื่องวัดรังสีที่ทำงานในบริเวณไกเกอร์นี้เรียกว่า "เครื่องวัดรังสีไกเกอร์" (Geiger counter) สำหรับเครื่องวัดรังสีไกเกอร์ขนาดสัญญาณไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ระหว่างขั้วที่ให้แก่เครื่องวัดรังสี แผนภาพการทำงานของเครื่องวัดรังสีแบบนี้ก็เช่นเดียวกับเครื่องวัดรังสีปฏิภาคนั่นเอง

สรุปการให้ความต่างศักย์ระหว่างขั้วแก่เครื่องวัดรังสีบริเวณต่าง ๆ

1. บริเวณความต่างศักย์ระหว่างขั้วต่ำ ๆ ขนาดสัญญาณไฟฟ้าไม่ขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ระหว่างขั้วที่ให้แก่เครื่องวัดรังสี

2. บริเวณปฏิภาค M ไม่ขึ้นอยู่กับจำนวนของไอออนที่เกิดจากการเกิดไอออนปฐมภูมิ และ nM จะขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ระหว่างขั้วที่ให้แก่เครื่องวัดรังสี

3. บริเวณไกเกอร์ nM จะมีค่าคงที่ที่ความต่างศักย์ระหว่างขั้วค่าหนึ่ง ๆ ไม่ว่าอนุภาคหรือรังสีชนิดใดเข้าไปในเครื่องวัดรังสี

เครื่องวัดรังสีปฏิภาค (proportional counter)

การทำงานของเครื่องวัดรังสีบริเวณปฏิภาคเป็นช่วงความต่างศักย์ระหว่างขั้วต่ำสุดที่เกิดกาซมัลติพลิเคชัน ค่า M จะมีค่าคงที่ที่ความต่างศักย์ระหว่างขั้วค่าหนึ่ง ๆ สำหรับเครื่องวัดรังสีปฏิภาคแบบทรงกระบอก ขนาดสัญญาณไฟฟ้าจะเป็นไปตามสมการ (2.27)

$$\Delta V = -\frac{Mne}{C}$$

ΔV แทนสัญญาณไฟฟ้าที่มีหน่วยเป็นโวลต์

M แทนกาซมัลติพลิเคชัน

n แทนจำนวนอิเลคตรอนที่เกิดในการเกิดไอออนปฐมภูมิ

C แทนความจุของเครื่องวัดรังสีมีหน่วยเป็นไมโครฟารัด

สมการนี้ไม่คำนึงถึงประจุบวกอิสระ พิจารณาแต่อิเลคตรอนปฐมภูมิที่เคลื่อนที่จากขั้วลบ เมื่ออิเลคตรอนปฐมภูมิแต่ละอนุภาคเข้าไปในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสูงพอใกล้ ๆ ขั้วบวก อิเลคตรอนปฐมภูมิจะได้รับพลังงานมากพอและชนโมเลกุลของกาซ ทำให้เกิดไอออนคู่ขึ้น อิเลคตรอนที่เกิดใหม่ก็จะทำให้เกิดไอออนคู่เพิ่มขึ้นอีกโดยการชน และจะเป็นเช่นนี้เรื่อย ๆ ไป นิยามของกาซมัลติพลิเคชัน M ที่กำหนดไว้คือ

"กาซมัลติพลิเคชัน (gas multiplication) คืออัตราของจำนวนอิเลคตรอนทั้งหมดต่อจำนวนไอออนคู่ปฐมภูมิ"

เครื่องวัดรังสีปฏิภาคสร้างขึ้นเพื่อประสงค์จะได้เครื่องมือที่มีสัญญาณคาย (output voltage) ที่เกิดจากการเกิดไอออนปฐมภูมิมีขนาดใหญ่พอเหมาะที่จะป้อนให้เครื่องบันทึก เพื่อเป็นประโยชน์ในกรณีที่มีภูมิหลัง (back ground) น้อย ๆ

ทฤษฎีของเครื่องวัดรังสีปฏิภาค

อาศัยหลักการเกิดไอออนในกาซ เนื่องจากการชนของอนุภาคหรือโฟตอน แล้วให้ความต่างศักย์ระหว่างขั้วสูง ๆ เพื่อให้เกิดกาซมัลติพลิเคชันใกล้ ๆ ขั้วบวก การเพิ่มความเข้มสนามไฟฟ้าใกล้ ๆ ขั้วบวกอาจจะใช้วิธีดัดแปลงรูปร่างของขั้วไฟฟ้าก็ได้ ขีดเริ่มความต่างศักย์ (voltage threshold) ของเครื่องวัดรังสีปฏิภาคคือ ความต่างศักย์ที่อิเลคตรอนได้รับพลังงานพอเหมาะที่จะทำให้เกิดการเกิดไอออนในระยะทางอิสระ (free path) สุดท้ายก่อนที่จะถูกเก็บบนขั้วบวก เมื่อความต่างศักย์เพิ่มขึ้นพิสัยวิกฤตที่จะเกิดการเกิดไอออนจากอิเลคตรอนปฐมภูมิจะเพิ่มขึ้นในปริมาตรของเครื่องวัดรังสี ทำให้เกิดการเกิดไอออนคู่ทวีคูณขึ้นอีก ขณะที่อิเลคตรอนปฐมภูมิเริ่มทำให้เกิดไอออนที่จุดใกล้ ๆ ขั้วบวก จำนวนอิเลคตรอนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จะได้ว่า

$$dN = \alpha N dx \qquad (3.1)$$

dN แทนจำนวนของอิเลคตรอนใหม่ที่เกิดจากอิเลคตรอน N อนุภาค ในพิสัยระหว่าง x ถึง x + dx

α แทน สัมประสิทธิ์ทาวน์เซนด์ที่ 1 (first Townsend coefficient)

เป็นฟังค์ชันของความเข้มสนามไฟฟ้า ธรรมชาติของกาซและความดันของกาซ

ถ้า α ไม่เป็นฟังค์ชันของระยะทาง x จากสมการ (3.1) จะได้ว่า

$$N = N_o e^{\alpha x} \qquad (3.2)$$

N_o แทนจำนวนอิเลคตรอนปฐมภูมิ

α จะแปรผันไปอย่างมากตามปัญหาการถ่ายประจุของกาซ (gas discharge problem)

ทาวน์เซนด์ได้สูตรเอมไพริกัลของ α คือ

$$\alpha = A\, p\, e^{(-Bp/E)} \qquad (3.3)$$

ค่า A และ B เป็นค่าคงที่ที่หาจากการทดลอง

E แทนสนามไฟฟ้า

p เป็นความดันกาซ

ในการชนที่เกิดการเกิดไอออนแต่ละครั้งมีทั้งไอออนบวกและอิเลคตรอน ไอออนบวกเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าอิเลคตรอน และไอออนบวกเป็นอุปสรรคต่อกาซมัลติพลิเคชันอีกด้วย แต่เนื่องจากสนามไฟฟ้าสูงและความดันต่ำ ๆ ในเครื่องวัดรังสี จึงไม่มีการรวมกันใหม่ (recombination) ไอออนบวกจึงไม่มีความสำคัญสำหรับเครื่องวัดรังสีปฏิภาค และการเกิดไอออนลบ (electron attachment) มีผลน้อยมากไม่จำเป็นที่จะต้องคำนึงถึง

สำหรับโฟตอนก็มีความสำคัญในการเพิ่มไอออนเช่นกัน แต่โมเลกุลหลายเชิงของกาซจะลดผลจากโฟตอนลงมาก โฟตอนจึงไม่มีผล

ในการเกิดกาซมัลติพลิเคชันนั้น สามารถพิจารณาจากเครื่องวัดรังสีรูปทรงกระบอกทั่ว ๆ ไปได้ สนามไฟฟ้าภายในเครื่องวัดรังสีทรงกระบอกมีค่า

$$E = \frac{V}{r \ln (r_2/r_1)} \qquad (3.4)$$

r_1 แทนรัศมีขั้วบวก

r_2 แทนรัศมีภายในขั้วลบ $(r_1 < r < r_2)$

E แทนสนามไฟฟ้า

V แทนความต่างศักย์ระหว่างขั้วของเครื่องวัดรังสี

ความต่างศักย์ระหว่างขั้วต่ำสุดที่เกิดกาซมัลติพลิเคชันในเครื่องวัดรังสี เรียกว่า "ขีดเริ่มความต่างศักย์ (voltage threshold) สำหรับการทำงานของเครื่องวัดรังสีปฏิภาค"

V_p มีความหมายในทางฟิสิกส์ว่า เป็นค่าต่ำสุดที่อิเลคตรอนวิ่งไปยังขั้วบวก และได้รับพลังงานมากพอทำให้เกิดการชนและเกิดไอออน ในระยะทางอิสระสุดท้าย ก่อนที่อิเลคตรอนจะถึงขั้วบวก

ให้ r_o เป็นรัศมีที่เริ่มเกิดกาซมัลติพลิเคชัน r_o ที่ขีดเริ่ม (threshold) เท่ากับรัศมีขั้วบวก หรือ $r_o = r_1$ ในช่วงที่เครื่องวัดรังสีปฏิภาคเกิดกาซมัลติพลิเคชัน รัศมีมากกว่า r_1 จะได้ค่าประมาณที่เปลี่ยนแปลงตามความต่างศักย์อย่างเชิงเส้น เป็น

$$r = r_1 V/V_p \qquad (3.5)$$

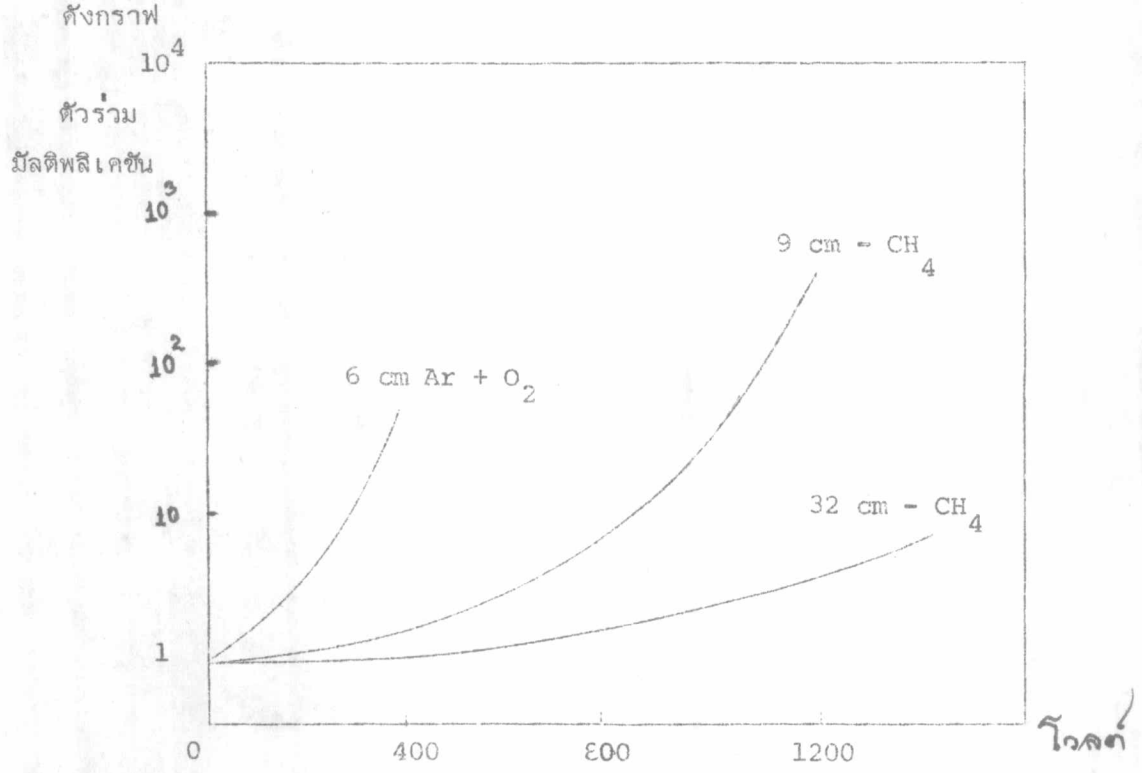
ในเครื่องวัดรังสี ระยะอิสระเฉลี่ย เฉลี่ยอยู่ในขนาด (order) 10^{-3} ซม. กาซมัลติพลิเคชันที่มีค่า 1000 จะเกิดขึ้นเมื่อเริ่มเกิดกาซมัลติพลิเคชันที่ระยะอิสระที่ 10 และอิเลคตรอนที่ทำให้เกิดกาซมัลติพลิเคชันนี้ มีพลังงานอยู่ในช่วง 30 - 50 eV

ในทางทฤษฎี กาซมัลติพลิเคชันขึ้นอยู่กับรัศมีของขั้วบวก r_1 ความจุ C ของเครื่องวัดรังสี, ความต่างศักย์ระหว่างขั้ว V ที่ให้แก่เครื่องวัดรังสี, ความดันกาซ p ในทางปฏิบัติค่ากาซมัลติพลิเคชันได้จากสมการ (2.27) สำหรับเครื่องวัดรังสีแบบทรงกระบอก

$$\Delta V = -Mne/C$$

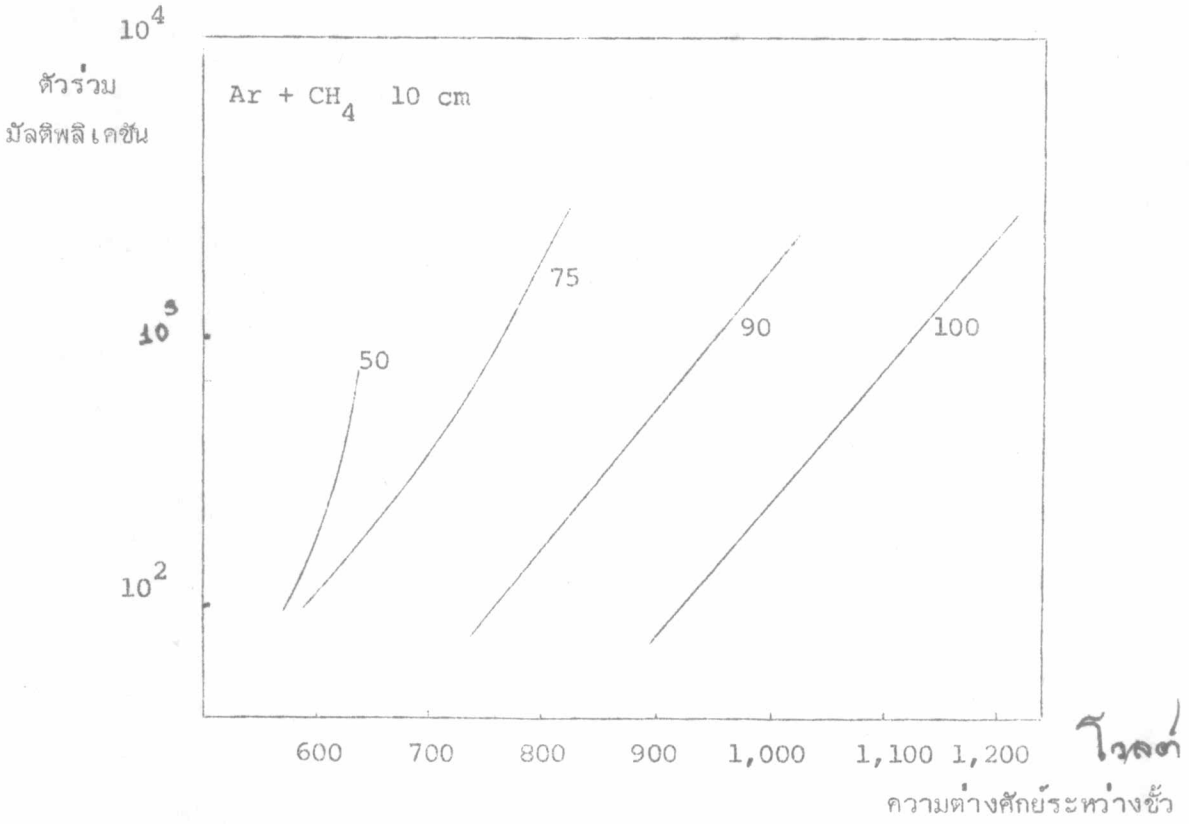
จากการทดลองที่ผ่านมาแล้ว พบความจริงเกี่ยวกับกาซมัลติพลิเคชัน คือ

1. M ขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ระหว่างขั้วที่ให้แก่เครื่องวัดรังสีสำหรับกาซต่าง ๆ ดังกราฟ



รูปที่ 3.2 แสดงตัวร่วมมัลติพลิเคชัน (multiplication factor) กับความต่างศักย์ระหว่างขั้ว ของอาร์กอนและออกซิเจน (6 cm : 0.94 Ar + 0.06 O_2) และมีเทนที่สองความดัน

2. M ขึ้นอยู่กับชนิดของกาซ ถ้าเอามีเทนผสมอาร์กอนกำหนดความดันรวมคงที่ แต่เปอร์เซนต์ของกาซแต่ละชนิดเปลี่ยนไปจะให้ผลแตกต่างกันออกไป ดังกราฟที่ 3.2



รูปที่ 3.3 แสดงว่า M ขึ้นอยู่กับชนิดของกาซ โดยการใช้กาซผสมระหว่างมีเทนและอาร์กอน โดยเปลี่ยนเปอร์เซนต์ไปเรื่อย ๆ ในกราฟแสดงเปอร์เซนต์ของมีเทน

3. M ขึ้นอยู่กับเส้นผ่าศูนย์กลางของขั้วบวกด้วย M เพิ่มขึ้นเมื่อเส้นผ่าศูนย์กลางขั้วบวกลดลง

ข้อสังเกต การใช้กาซบริสุทธิ์โมเลกุลเชิงเดี่ยว (monoatomic gas) และกาซโมเลกุลเชิงคู่ (diatomic gas) ค่า M เพิ่มขึ้นเร็วเมื่อความต่างศักย์ระหว่างขั้วเพิ่มขึ้น กาซบริสุทธิ์โมเลกุลเชิงซ้อน (polyatomic gas) และกาซผสมที่มีเปอร์เซนต์ของกาซโมเลกุลเชิงซ้อนมาก จะทำให้ค่า M เพิ่มขึ้นช้ากว่ากาซบริสุทธิ์สองชนิดแรก เปอร์เซนต์ของกาซโมเลกุลเชิงซ้อนยิ่งมากในการผสม ก็ทำให้การเปลี่ยนแปลงของค่า M ช้าลงยิ่งขึ้นเมื่อความต่างศักย์ระหว่างขั้วเปลี่ยนไป ดังนั้นในบริเวณปฏิภาคนิยมใช้กาซโมเลกุลเชิงซ้อน

และกาซผสมระหว่างกาซโมเลกุลเชิงเดี่ยวและกาซโมเลกุลเชิงคู่กับกาซโมเลกุลเชิงซ้อน เพื่อความสะดวกในการควบคุมให้ M เปลี่ยนแปลงช้า ๆ ไปกับความต่างศักย์ระหว่างขั้ว

สาเหตุที่ไม่นิยมบรรจุกาซโมเลกุลเชิงซ้อนให้มีปริมาณเท่ากับกาซโมเลกุลเชิงเดี่ยวและคู่เพราะ

1. โมเลกุลของกาซโมเลกุลเชิงซ้อน เมื่อถูกทำให้เกิดการเกิดไอออน คุณสมบัติจะเปลี่ยนไป

2. ความต่างศักย์ระหว่างขั้วที่ใช้กับเครื่องวัดรังสีที่บรรจุกาซโมเลกุลเชิงซ้อนสูงกว่าเครื่องวัดรังสีที่บรรจุกาซโมเลกุลเชิงเดี่ยวและคู่ แต่ความต่างศักย์ระหว่างขั้วเริ่มต้นของเครื่องวัดรังสีที่บรรจุกาซโมเลกุลเชิงซ้อนจะลดลงได้มาก โดยการเพิ่มกาซโมเลกุลเชิงเดี่ยวและคู่

การเลือกสสารที่ใช้ทำขั้วลบก็มีความสำคัญเนื่องจากผลของโฟโตอิเลคตริค (photoelectric effect) เพราะส่วนมากไอออนบวกที่เกิดการรวมใหม่ (recombination) ที่ขั้วลบจะให้โฟตอนที่พลังงานสูงกว่าขีดเริ่ม (threshold) ของโฟโตอิเลคตรอน (photoelectron)

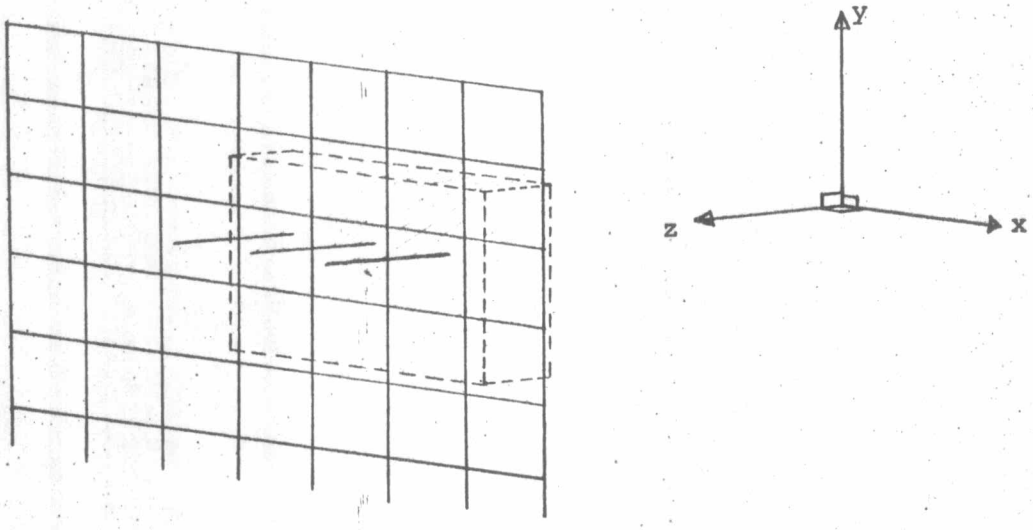
การปล่อยกาซไหลผ่านเครื่องวัดรังสีปฏิภาคขณะทำการทดลอง[6]

เนื่องจากในอากาศมีกาซออกซิเจน และสิ่งไม่บริสุทธิ์อื่น ๆ ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อขบวนการกาซมัลติพลิเคชัน หรือมีผลต่อขนาดสัญญาณไฟฟ้าของเครื่องวัดรังสีปฏิภาค สำหรับเครื่องวัดรังสีปฏิภาคที่ใส่แหล่งกำเนิดอนุภาคหรือรังสีภายในเครื่องวัดรังสี เพื่อป้องกันกาซออกซิเจนและสิ่งไม่บริสุทธิ์อื่น ๆ ในอากาศ หรือป้องกันอากาศรั่วเข้าไปในเครื่องวัดรังสี จึงให้กาซไหลผ่านเครื่องวัดรังสีตลอดการทดลอง โดยเริ่มวิธีการดังนี้ คือ หลังจากใส่แหล่งกำเนิดอนุภาคหรือรังสีไว้ภายในเครื่องวัดรังสีแล้วไล่อากาศ (flush) ออกจากเครื่องวัดรังสีอย่างแรง (ประมาณ 1 นาที) ก่อนที่จะเริ่มนับสัญญาณไฟฟ้า การไหลของกาซผ่านเครื่องวัดรังสีทำให้ความดันภายในเครื่องวัดรังสีมากกว่าความดันภายนอกเครื่องวัดรังสี ใส่ปลายท่อปล่อยกาซของเครื่องวัดรังสีลงในแก้วบรรจุน้ำมัน เพื่อปรับให้อัตราไหลของกาซในตอนที่เครื่องวัดรังสีทำงานคงที่ โดยนับจากฟองกาซที่ผุดในแก้วน้ำมัน อัตราการไหลของกาซประมาณ 1 ฟอง/วินาที เหมาะกับการทดลองปกติ

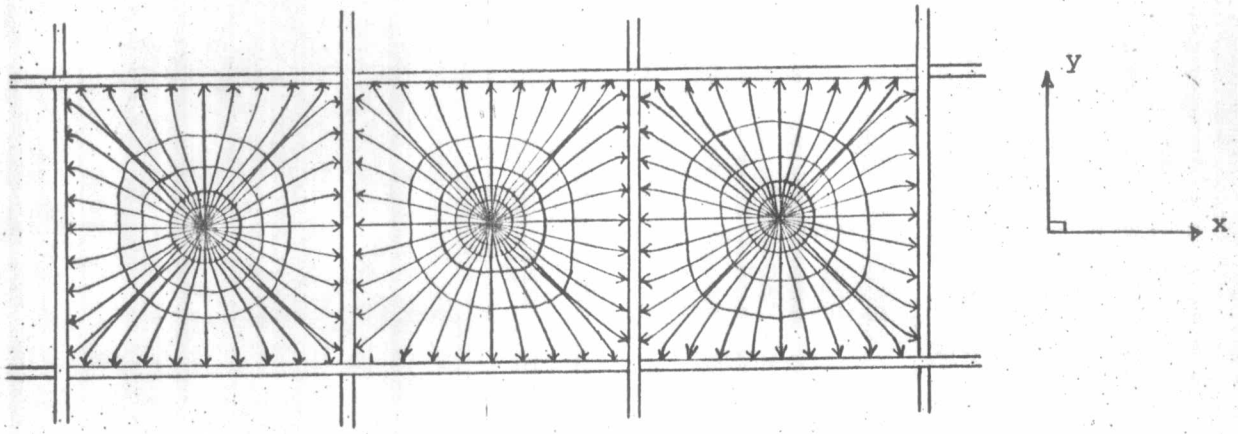
เครื่องวัดรังสีปฏิภาคชนิดปลายเข็ม

เป็นเครื่องวัดรังสีที่สร้างขึ้นได้ง่าย สนามไฟฟ้าของเครื่องวัดรังสีปฏิภาคชนิดปลายเข็มนี้เกิดจากขั้วบวก (เข็มเย็บผ้า 3 อัน) และขั้วลบ (ตาข่ายโลหะ) เป็นลักษณะทรงกลม[13] พิจารณาจากเส้นอิควิโปเทนเชียล (equipotential line) ที่ตั้งฉากกับแนวสนามไฟฟ้า[14] แนวสนามไฟฟ้าจะพุ่งออกจากปลายเข็มและเข้าหาตาข่ายโลหะในลักษณะตั้งฉากกับแนวของตาข่ายโลหะทั้งสี่ด้าน เมื่อเขียนเส้นอิควิโปเทนเชียลซึ่งตั้งฉากกับแนวของสนามไฟฟ้า จะสังเกตเห็นว่า มีเส้นอิควิโปเทนเชียลเส้นหนึ่งที่รัศมีใหญ่ที่สุดที่ยังเป็นรูปทรงกลมอยู่ ถ้าเลยเส้นนี้ไปแล้วเส้นอิควิโปเทนเชียลจะไม่อยู่ในลักษณะทรงกลมต่อไป เมื่อแหล่งกำเนิดรังสีหรืออนุภาคทำให้การเกิดไอออนในตัวกลางที่อนุภาคหรือรังสีผ่านไป ขั้วบวกและขั้วลบก็จะทำให้อิเลคตรอนและไอออนบวกเคลื่อนที่เข้าหาตามลำดับ ขณะที่ไอออนบวกและอิเลคตรอนเคลื่อนที่เข้าหาขั้วไฟฟ้าทั้งสองจะเกิดสัญญาณไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนขั้วไฟฟ้า สัญญาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะมีขนาดใหญ่ขึ้น ถ้ามีปรากฏการณ์กาซมัลติพลิเคชัน ปรากฏการณ์[13] กาซมัลติพลิเคชันต้องการสนามไฟฟ้าสูง ๆ จึงใช้วิธีดัดแปลงรูปทรงเรขาของขั้วไฟฟ้า จากทฤษฎีไฟฟ้าพบว่าสนามไฟฟ้าที่จุดนอก (just outside) ตัวนำรูปทรงกลมจะเปลี่ยนแปลงเป็นปฏิภาคผกผันกับรัศมีของส่วนโค้งของทรงกลมยกกำลังสอง เครื่องวัดรังสีปฏิภาคชนิดปลายเข็มนี้บริเวณปลายเข็มถือว่ามีสนามไฟฟ้าสูงมาก และทำให้เกิดปรากฏการณ์กาซมัลติพลิเคชันขึ้น เนื่องจากลักษณะทางเรขาของขั้วไฟฟ้ายุ่งยากในการหาความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของสัญญาณไฟฟ้า และพลังงานที่เสียไปของอนุภาคหรือรังสีที่ผ่านเครื่องวัดรังสี ไม่เหมือนกับเครื่องวัดรังสีแบบที่ขั้วไฟฟ้ามีรูปทรงกระบอกตามที่กล่าวแล้ว ในที่นี้จึงไม่ได้หาความสัมพันธ์ไว้

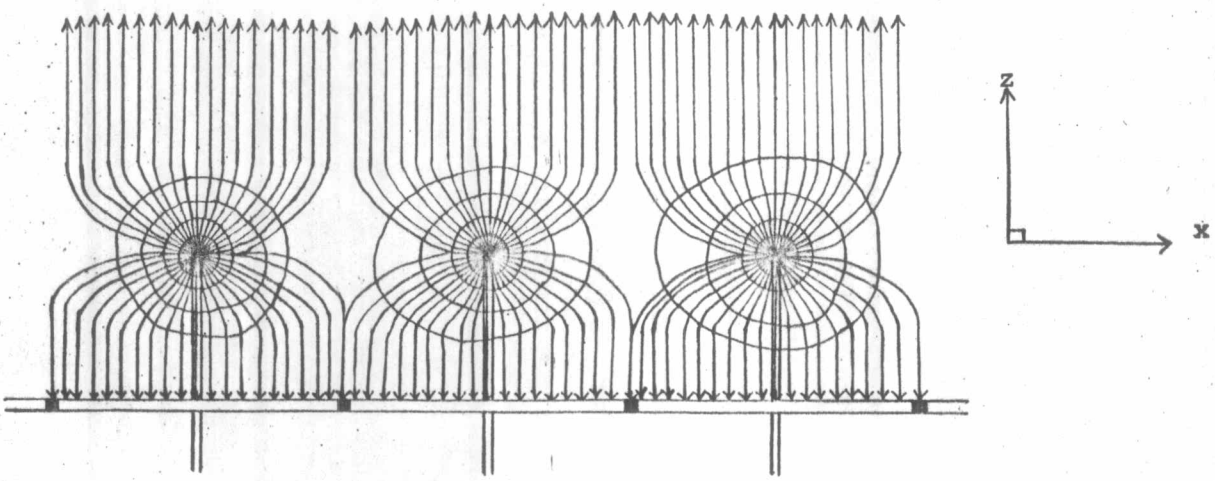
i 17735269



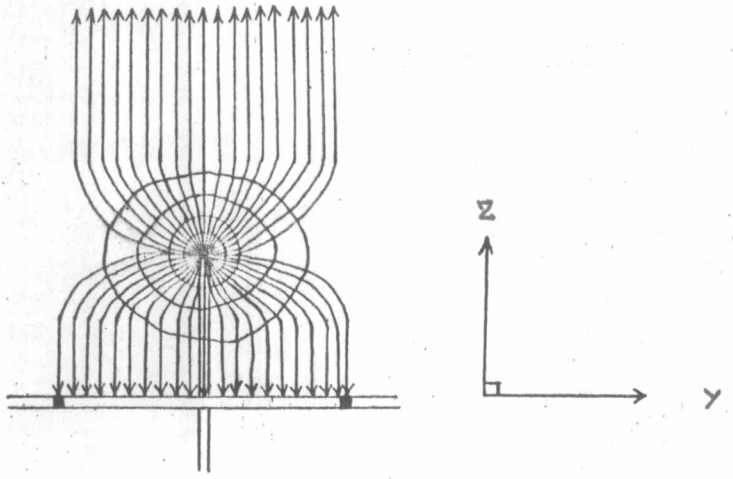
รูปที่ 3.4 แสดงระนาบ xy, yz และ xz ของขั้วไฟฟ้าบวกเข็มเย็บผ้า 3 อัน และขั้วลบตาข่ายโลหะ



รูปที่ 3.5 แสดงแนวสนามไฟฟ้าและเส้นอีควิโปเทนเชียล ตามระนาบ xy



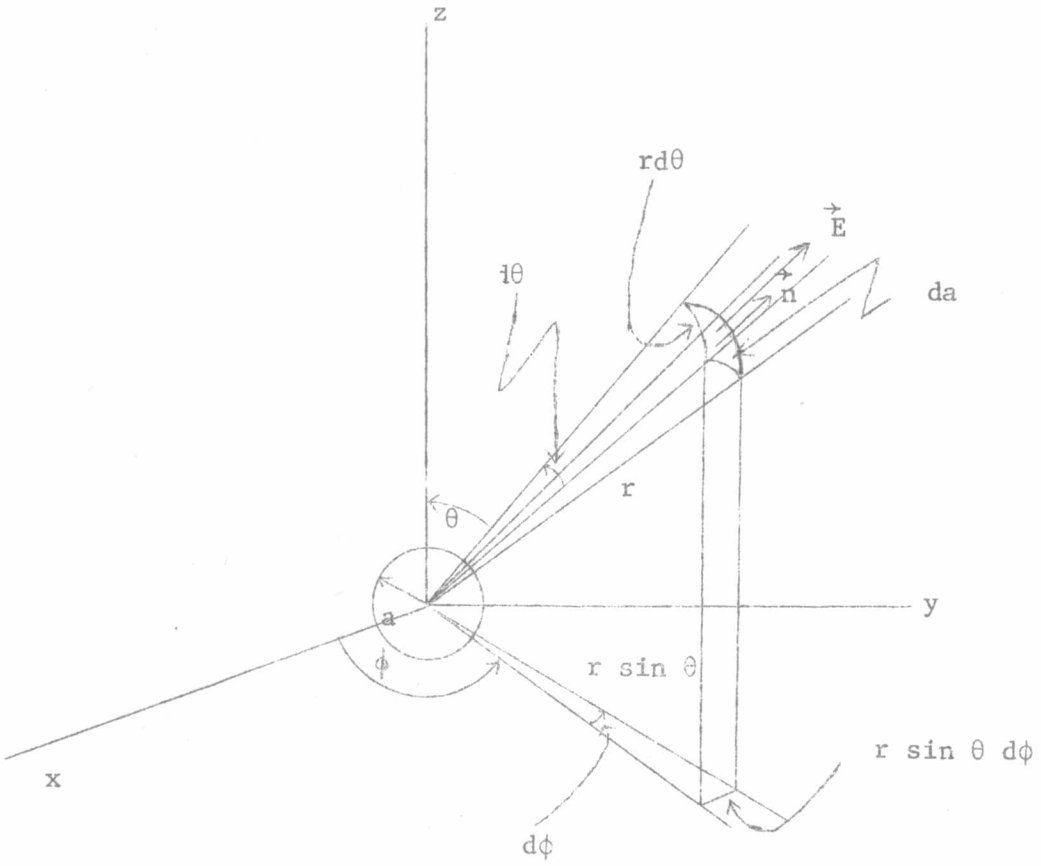
รูปที่ 3.6 แสดงแนวสนามไฟฟ้าและเส้นอีควิโปเทนเชียลตามระนาบ xz



รูปที่ 3.7 แสดงแนวสนามไฟฟ้าและเส้นอิควิโปเทนเชียลตามระนาบ yz

สำหรับสนามไฟฟ้า ณ จุดใด ๆ ในบริเวณที่อยู่ในเส้นอิควิโ เทนเชียลที่ยังเป็นรูปทรงกลม อยู่นั้นเป็นปฏิภาคผกผันกับระยะทางยกกำลังสอง ซึ่งพิจารณาได้จากสนามไฟฟ้า ณ จุดใด ๆ ภายนอกโลหะทรงกลมตัน

หาสนามไฟฟ้าภายนอกโลหะทรงกลมตันที่มีประจุ +q ประจุ +q จะกระจายอยู่บนผิวของโลหะทรงกลมอย่างสม่ำเสมอ หรือประจุ +q จะสมมาตรกับจุดศูนย์กลางของโลหะทรงกลมนี้ สนามไฟฟ้า ณ จุดใด ๆ ที่อยู่ภายนอกโลหะทรงกลมนี้หาได้โดยอาศัยกฎของเกาส์ (Gauss' law)



รูปที่ 3.8 แสดงการหาสนามไฟฟ้า ณ จุดที่อยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางโลหะทรงกลม r โลหะทรงกลมรัศมี a เมตร มีประจุ +q คูลอมบ์

จากกฎของเกาส์ จะได้ว่า

$$\varepsilon_o \oint_S \vec{E} \cdot \vec{n}\, da = q \qquad (3.6)$$

ε_o แทน permitivity constant $= 8.85418 \times 10^{-12}$ คูลอมบ์/นิวตัน เมตร

$\vec{E}$ แทน เวคเตอร์สนามไฟฟ้า

$\vec{n}$ แทน ทิศของเส้นปกติที่ตั้งฉากกับพื้นที่น้อย ๆ da

da แทน พื้นที่น้อย ๆ ของ Gaussian surface $= r \sin\theta\, d\phi\, r d\theta$

q แทน จำนวนประจุบนโลหะทรงกลม

เนื่องจาก $\vec{E}$ และ $\vec{n}$ ชี้ไปในทิศเดียวกัน $\vec{E} \cdot \vec{n} = E$ สมการ (3.6) จะได้ว่า

$$\varepsilon_o \iint E\, r \sin\theta\, d\phi\, r d\theta = q$$

$$\varepsilon_o E r^2 \int_o^{\pi} \int_o^{2\pi} d\phi \sin\theta\, d\theta = q$$

$$\varepsilon_o E r^2 \int_o^{\pi} \left[\phi\right]_o^{2\pi} \sin\theta\, d\theta = q$$

$$2\pi\, \varepsilon_o E r^2 \int_o^{\pi} \sin\theta\, d\theta = q$$

$$2\pi\, \varepsilon_o E r^2 \left[-\cos\theta\right]_o^{\pi} = q$$

$$4\pi\, \varepsilon_o E r^2 = q$$

$$E = \frac{q}{4\pi\varepsilon_o} \cdot \frac{1}{r^2} \qquad (3.7)$$

จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าที่จุดใด ๆ นอกโลหะทรงกลมระยะจากจุดศูนย์กลางโลหะทรงกลมถึงจุดนั้น = r เมตร เป็นปฏิภาคผกผันกับ r^2

ถ้าทรงกลมที่มีรัศมี = a เมตร สนามไฟฟ้าที่ผิวของโลหะทรงกลมจะแปรผันตาม $\frac{1}{a^2}$ แสดงว่า ถ้าทรงกลมโลหะมีรัศมีน้อย (อย่างในกรณีของปลายเข็ม) สนามไฟฟ้าที่ผิวและบริเวณใกล้ ๆ ผิวของทรงกลมโลหะจะแรงมาก และเป็นบริเวณที่จะก่อให้เกิดปรากฏการณ์กาซมัลติพลิเคชันได้ง่าย