หอสมุดกลาง
จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเครื่องวัดรังสี

ในการทดลองเกี่ยวกับเครื่องวัดรังสีในสมัยต้น ๆ รัธเธอร์ฟอร์ด (Rutherford) และไกเกอร์ (Geiger) สร้างเครื่องมือที่สามารถวัดอนุภาคแต่ละอนุภาคที่เกิดจากอะตอมได้ เครื่องมือนี้ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าสองขั้วในกล่องบรรจุกาซ อนุภาคที่ผ่านปริมาตรระหว่างขั้วไฟฟ้าจะทำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้า (voltage pulse) เครื่องมือนี้เรียกว่า "เครื่องวัดรังสี" (counter) เครื่องวัดรังสีเกี่ยวข้องกับเรื่อง อันตรกิริยาระหว่างรังสีหรืออนุภาคที่เกิดจากกัมมันตภาพรังสี หรือเครื่องเร่งอนุภาค หรือรังสีคอสมิคกับสสาร และพฤติกรรมของไอออนในกาซที่มีสนามไฟฟ้าอยู่

2.1 อันตรกิริยาระหว่างรังสีหรืออนุภาคกับสสาร[1]

อันตรกิริยาระหว่างรังสีหรืออนุภาคกับสสารจะแตกต่างกันตามชนิดของรังสี หรืออนุภาคที่เกิดอันตรกิริยากับสารนั้น การศึกษาอนุภาคเป็นกลุ่มศึกษาเฉพาะอนุภาคที่เป็นตัวแทนของกลุ่ม ก็ทราบผลที่เกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคทั้งกลุ่มกับสสารได้ รังสีหรืออนุภาคที่กล่าวถึงแบ่งออกเป็นกลุ่ม ๆ คือ อนุภาคแอลฟา อิเลคตรอน รังสีแกมมา นิวตรอน และส่วนที่เกิดจากการแตกตัว (fragments of fission) สองกลุ่มท้ายจะไม่กล่าวรายละเอียด

ก. คุณสมบัติของอนุภาคแอลฟา

อัตราการสูญเสียพลังงานของอนุภาคที่มีประจุในขณะที่ผ่านสสารขึ้นอยู่กับต่างๆ ในสมการ (2.1) อนุภาคในกลุ่มของอนุภาคแอลฟาประกอบด้วย อนุภาคแอลฟา อนุภาคไฮโดรตอน อนุภาคดิวเทอเรียม และโปรตอน โดยที่มวลของอนุภาคในกลุ่มนี้ต่างกันไม่เกินสี่เท่าและประจุต่างกันเพียงสองเท่าเท่านั้น

เมื่ออนุภาคแอลฟาผ่านสสารดูดกลืน อนุภาคจะเสียพลังงานโดยการโลด (excitation) และการเกิดไอออน (ionization) แก่อะตอมของสสารดูดกลืน อนุภาคเสียพลังงานเนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างสนามคูลอมบ์ของอนุภาคกับอิเลคตรอนที่ถูกยึดของสสารดูดกลืน

อนุภาคที่ถูกดูดกลืน หรือที่เคลื่อนจากลำขนาน (collimation beam) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์ และการกระเจิงโดยนิวเคลียสของอะตอม แต่ขบวนการเกิดการโลด (excitation) และการเกิดไอออน (ionization) น่าสนใจมาก เพราะทำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้า

ลิวิงสตัน (Livingston) และเบเธ (Bethe) ได้คำนวณหาการเสียพลังงานที่เกิดจากการโลด และการเกิดไอออน $\frac{dE}{dx}$ แทนการเสียพลังงานต่อหนึ่งหน่วยระยะทาง หรือเรียกว่า "พลังหยุด" (stopping power) ของสสาร

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\, e^4\, z^2\, ZNB}{mv^2} \qquad (2.1)$$

ซึ่ง E แทนพลังงานจลน์ของอนุภาค

ze แทนประจุของอนุภาค

v แทนความเร็วของอนุภาค

N แทนจำนวนอะตอมของสสารดูดกลืน/ซม.^{3}

Z แทนเลขอะตอมของสสารดูดกลืน

B แทนเลขหยุด (stopping number)

สัญญลักษณ์ e และ m แทนประจุและมวลของอิเลคตรอน และ stopping number B เป็นฟังค์ชันลอการิทึมของความเร็ว และเลขอะตอมของสสารดูดกลืน (absorber)

จากสมการ (2.1) จะได้ว่า

1. ในช่วงที่ความเร็ว $v << c$ (non-relativistic energy) $\frac{dE}{dx} \propto \frac{1}{v^2}$ หมายความว่า การเสียพลังงานจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วลดลง

2. อัตราการเสียพลังงานขึ้นอยู่กับเลขอะตอมของสสารดูดกลืนโดยตรง ไม่เกี่ยวข้องกับฟังค์ชันลอกการิทึม B ถ้าความเร็ว v คงที่ $\frac{dE}{dx} \propto NZ$ หรือความหนาแน่นของอิเลคตรอนในสสารดูดกลืน

3. ในพิสัยของสัมพันธภาพ (relativistic range) $v \simeq c$ การเสียพลังงาน $\frac{dE}{dx}$ จะถึงจุดต่ำสุดแล้วค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามพลังงานของอนุภาคแอลฟา

การดูดกลืนของอนุภาคแอลฟา ศึกษาได้จากการทดลองโดยการวัดจำนวนไอออนคู่ (ion - pairs) ที่เกิดต่อหน่วยความยาวของระยะทาง เรียกว่า "การเกิดไอออนเฉพาะ" (the specific ionization) การเสียพลังงานจะสัมพันธ์กับการเกิดไอออนโดยค่าพลังงาน w ซึ่งเป็นอัตราส่วนของพลังงานที่เสียไปโดยอนุภาคที่มีประจุต่อการแตกตัวทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากอนุภาคนั้น ค่าพลังงาน w ขึ้นอยู่กับสสารดูดกลืน ชนิดของอนุภาคและพลังงานของอนุภาค สำหรับกาซค่าพลังงานนี้อยู่ในช่วง 25 - 50 eV/ion - pair ดังตาราง 2 . 1 สำหรับตัวกลางที่ควบแน่น (condensed media) พลังงาน w มีค่าประมาณ 5eV/ion - pair

การเสียพลังงานของอนุภาคแอลฟาในการผลิตไอออนคู่ แต่ละคู่ในกาซ เมื่อพิจารณาแล้วมากกว่าที่ใช้ในการเกิดไอออนของอะตอม พลังงานที่เพิ่มขึ้นนั้นใช้ในการแยกโมเลกุลของกาซและการเกิดการโลดของโมเลกุลและอะตอมของกาซ

พิสัยของอนุภาคแอลฟา (range of alpha particles)

อนุภาคแอลฟาที่มีพลังงานเท่ากันเดินทางได้ระยะเท่า ๆ กันในตัวกลางชนิดเดียวกัน เมื่ออนุภาคหยุดนิ่งในตัวกลางนั้น สมการเอมไพริกัล (empirical equation) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพิสัยในอากาศกับพลังงานของอนุภาคคือ

$$R = 0.309\, E^{3/2} \qquad (2.2)$$

ในที่นี้ R แทนพิสัยเฉลี่ยในหน่วยเซนติเมตร

E แทนพลังงานของอนุภาคแอลฟาในหน่วย MeV

ถ้าพลังงานมีหน่วยต่ำกว่านี้ 4MeVพิสัยจะขึ้นอยู่กับ $E^{3/4}$ แต่ถ้าพลังงานมีหน่วยสูงกว่า 15 MeV พิสัยจะขึ้นอยู่กับ E^2

ตาราง[1] 2.1 ค่าต่าง ๆ ของ w ในหน่วย eV/ion - pair สำหรับกาซบริสุทธิ์ต่าง ๆ

กาซ	อนุภาค β	อนุภาค α จาก P_o^{210}	อนุภาค α 1.2 MeV
He	42.3	42.7	42.4
Ne	36.6	36.8	37.4
Ar	(26.4)	26.4	(26.4)
Kr	(24.2)	24.1	24.1
Xe	22.0	21.9	-
H_2	36.3	36.3	-
Air	34.0	35.5	37.1
N_2	35.0	36.6	38.1
O_2	39.9	32.5	-
CO_2	32.9	34.5	36.3
C_2H_4	26.2	28.0	29.8
C_2H_6	24.8	26.6	28.5
CH_4	27.3	29.2	31.0
C_2H_2	25.9	27.5	29.0

การดูดกลืนของอนุภาคแอลฟาในสสารอื่นนอกจากอากาศ

สูตรเอมไพริกัล ในการคำนวณ R_A ของอนุภาคที่ผ่านสสารที่มีน้ำหนักอะตอม A จะได้ว่า

$$R_A \ (mg/cm^2) = 0.56 \ R \ (cm) A^{1/3} \qquad (2.3)$$

R แทนพิสัยของอนุภาคแอลฟา (หน่วยเป็นเซนติเมตร) ในอากาศที่ 15° ซ และ 76 มิลลิเมตรของปรอท

พิสัยของอนุภาคแอลฟาในสสารที่มีหน่วยเป็นเซนติเมตร หาได้จากการหาร R_A ด้วย $10^3 \rho$ ซึ่ง ρ เป็นความหนาแน่นของสสารในหน่วย กรัม/ลบ.ซม.

การหาพิสัยของอนุภาคคล้าย ๆ กัน

$R_{zM} (E_1 \longrightarrow E_2)$ แทนพิสัยที่อนุภาคมวล M มีประจุ ze ผ่านสสารไป โดยพลังงานของอนุภาคลดลงจาก $E_1 \longrightarrow E_2$ คือ

$$R_{zM} (E_1 \longrightarrow E_2) = \int_{E_2}^{E_1} \frac{dE}{dE/dx}$$

$$= \frac{Mm}{4\pi e^4 z^2 ZN} \int_{V_2}^{V_1} \frac{v^3 \, dv}{B(v)} \qquad (2.4)$$

จากสมการ (2.1) ใช้ความสัมพันธ์ $E = \frac{Mv^2}{2}$ ถ้าความเร็วสุดท้าย $v_2 = 0$ จะได้สมการ (2.4) ใหม่เป็น

$$R_{zM} (v) = Mz^{-2} F(v) \qquad (2.5)$$

F(v) เป็นอินทิกรัล (integral) ในสมการ (2.4) ที่หาระหว่างขีดจำกัด (limits) 0 ถึง v สมการ (2.5) แสดงว่า พิสัยของอนุภาคที่มีความเร็วต่าง ๆ ผ่านสสารดูดกลืนที่กำหนดให้ ขึ้นอยู่กับมวล M ประจุ z และความเร็วของอนุภาค v

ให้ R_p เป็นพิสัยของโปรตอนที่มีความเร็ว v เท่ากับอนุภาคแอลฟา จะได้ความสัมพันธ์ตามสมการ (2.5) คือ

$$R_p(v) = \frac{M_p z_\alpha^2}{M_\alpha z_p^2} R_\alpha(v) - c \qquad (2.6)$$

c เป็นค่าคงที่ ใช้ในการคำนวณเมื่อคำนึงถึงการจับและการสูญเสียอิเลคตรอนที่พลังงานของอนุภาคต่ำ ๆ แม้ว่าค่า c จะน้อยมาก แต่ $c \neq 0$ เพราะอนุภาคแอลฟามีผลต่างกับโปรตอน สำหรับอากาศที่อุณหภูมิ 15° ซ ความดัน 760 มิลลิเมตรของปรอท (อุณหภูมิและความดันปกติ) เมื่อพลังงานมากกว่า 500 keV ค่า c ประมาณ 0.20 ซม. ที่พลังงาน 6.7 keV ค่า c ลดลงถึง 0.02 ซม.

สำหรับอนุภาคที่มีพลังงานมากกว่า 500 keV ในอากาศ

$$R_p(v) = 1.007\, R_\alpha(v) - 0.20 \text{ cm} \qquad (2.7)$$

ในช่วงความเร็ว v น้อยกว่าความเร็วแสงมาก ความเร็วของอนุภาคแอลฟาเท่ากับความเร็วของอนุภาคโปรตอน จะได้ว่า $E_p = E_\alpha M_p/M_\alpha$ สมการ (2.7) จะกลายเป็น

$$R_p(E) = 1.007\, R_\alpha(3.972\, E) - 0.20 \text{ cm} \qquad (2.8)$$

$R_\alpha(3.972\, E)$ หมายถึง พิสัยของอนุภาคแอลฟาที่มีพลังงาน 3.972 E

สำหรับอนุภาคที่มี z เท่ากัน ความสัมพันธ์ระหว่างพิสัยและพลังงานเปลี่ยนไปจากสมการ (2.6) , (2.7) , (2.8) correction term c จะหายไปเพราะการจับและการเสียอิเลคตรอนที่ใกล้ ๆ ปลายพิสัยของอนุภาคทั้งสองเหมือนกัน ดังนั้นพิสัยของอนุภาคมวล M สามารถคำนวณได้จากมวล M_o เมื่อประจุของอนุภาคเหมือนกันคือ

$$R_{zM}(E) = \frac{M}{M_o} R_{zM_o}(E') \qquad (2.9)$$

เมื่อ $E' = E M_o/M$

ข. คุณสมบัติของอิเลคตรอน

ในที่นี้ "อิเลคตรอน หมายถึง อิเลคตรอนที่เกิดจากการเกิดไอออนของอะตอมของกัมมันตภาพรังสี เครื่องเร่งอิเลคตรอน และอิเลคตรอนทุติยภูมิที่เกิดจากรังสีแกมมาผ่านสสาร" **โปซิตรอนและอิเลคตรอน** มีลักษณะคล้ายกัน และเกิดจากแพร์โปรดักชัน (pair-production) ด้วยกัน ทั้งยังสามารถรวมกันกลายเป็นรังสีแกมมาได้ จึงจัดไว้กลุ่มเดียวกัน

อิเลคตรอนต่างจากอนุภาคหนักที่มีประจุ เพราะอิเลคตรอนไม่สามารถเดินทางเป็นเส้นตรงในตัวกลาง และไม่มีระยะแน่นอน ทางเดินของอิเลคตรอนจะคดงอ อิเลคตรอนที่มีพลังงานเท่ากันก็มีระยะทางต่างกันมาก เหตุที่อิเลคตรอนเดินทางคดงอ เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างอิเลคตรอนกับอิเลคตรอน หรือนิวเคลียสของอะตอมของสสารดูดกลืน

อิเลคตรอนจะเสียพลังงานโดยการโลด และการเกิดไอออนแก่อิเลคตรอนที่ถูกยึดของสสารดูดกลืนคล้ายอนุภาคหนัก แต่อิเลคตรอนอาจจะเสียพลังงานโดยการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เรียกว่า เบรมสตราลุง (bremsstrahlung) ด้วย

การเสียพลังงานของอิเลคตรอนโดยอันตรกิริยาแบบไม่ยืดหยุ่น

การดูดกลืนของอิเลคตรอนเมื่อเกิดอันตรกริยาการชนกันแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic collision) ทำให้เกิด การโลดและการเกิดไอออนตามสมการ (2.1) แต่เทอม B ต่างกับอนุภาคหนัก เมื่อพลังงานสูงถึง 0.5 MeV B จะมีค่าคงที่

ดังนั้น $\left[\frac{dE}{dx}\right]_c$ แทนอัตราการเสียพลังงานเนื่องจากการเกิดอันตรกริยาคือ

$$\left[\frac{dE}{dx}\right]_c \sim \frac{1}{v^2} \qquad (2.10)$$

v เป็นความเร็วของอนุภาค อัตราการเสียพลังงานจะถึงจุดต่ำสุดเมื่อพลังงานประมาณ 1 MeV และสูงกว่าจุดต่ำสุดเมื่อพลังงานประมาณ 3 MeV โดยอัตราการ

เสียพลังงานจะสูงขึ้นอย่างช้า ๆ ตามค่าลอกการิทึมของพลังงาน อัตราการเสียพลังงาน

$$\left[\frac{dE}{dx}\right]_c \sim \text{specific ionization } I_m$$

$$\left[\frac{dE}{dx}\right]_c = w\, I_m \qquad (2.11)$$

w เป็นอัตราการเสียพลังงานต่อไอออนคู่ ประมาณ 32.5 eV สำหรับอิเลคตรอนในอากาศ

การเสียพลังงานโดยการแผ่รังสีของอิเลคตรอน

ตามทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าพื้นฐาน อนุภาคมีประจุที่มีความเร่ง $\vec{a}$ จะแผ่รังสีออกมาในอัตรา $\frac{2e^2a^2}{3c^3}$ อีเลคตรอนที่อยู่ในสนามคูลอมบ์ของนิวเคลียสถูกเร่งด้วยความเร่งอย่างมาก เนื่องจากมวลของอิเลคตรอนมีค่าน้อย และความเร่งแปรผันโดยตรงกับประจุ Z หารด้วยมวลของอิเลคตรอน m , $\vec{a} \propto \frac{Z}{m}$

อัตราการเสียพลังงานเนื่องจากการแผ่รังสีคือ

$$\left[\frac{dE}{dx}\right]_r \sim Z^2EN \qquad (2.12)$$

Z แทนเลขอะตอมของสสารดูดกลืน

N แทนความหนาแน่นของอะตอม (atomic density) ของสสารดูดกลืน

E แทนพลังงานของอิเลคตรอน

อัตราส่วนการเสียพลังงานโดยการแผ่รังสีและการชน คือ

$$\frac{(dE/dx)_r}{(dE/dx)_c} = \frac{EZ}{800} \qquad (2.13)$$

E มีหน่วยเป็น MeV อนุภาคที่มีพลังงาน 10 MeV ผ่านตะกั่วอัตราการเสียพลังงานทั้งสองวิธีจะเท่ากัน ถ้าพลังงานของอนุภาคสูงกว่า 10 MeV การเสียพลังงานโดยการแผ่รังสีจะสูงกว่า

ความเร่งของอนุภาคแปรผันโดยตรงกับ $\frac{1}{m}$ ดังนั้นการเสียพลังงานโดยการแผ่รังสีจึงไม่มีผลสำหรับอนุภาคหนัก ๆ จนถึงพลังงานในช่วง BeV จึงจะมีค่ามากพอที่จะพิจารณา

พิสัยของอิเลคตรอน (range of electron)

สมการเอมไพริกัลของอิเลคตรอน

$$\left.\begin{aligned} R &= 0.542\,E - 0.133 \quad 0.8 < E < 3 \text{ MeV} \\ R &= 0.407\,E^{1.38} \quad 0.15 < E < 0.8 \text{ MeV} \end{aligned}\right\} \qquad (2.14)$$

R แทนพิสัยของอิเลคตรอนมีหน่วยเป็น กรัม/ซม.^{2}

E แทนพลังงานของอิเลคตรอนมีหน่วยเป็น MeV

การกระเจิงของอิเลคตรอน (scattering of electron)

ในการชนแต่ละครั้ง อิเลคตรอนจะมีการเลี้ยวเบนมาก เพราะมวลของอิเลคตรอนน้อยมาก เมื่อเทียบกับมวลของนิวเคลียส ถ้าสสารที่ทำให้อิเลคตรอนกระเจิงหนาพอจะทำให้อิเลคตรอนกระเจิงไปมาก และอิเลคตรอนส่วนใหญ่จะกระเจิงมากกว่ามุม 90 องศา เรียกว่า "การกระเจิงกลับหมด" (back scattering)

ค. คุณสมบัติของรังสีแกมมาและรังสีเอ็กซ์

การดูดกลืนรังสีแกมมาและรังสีเอ็กซ์ รังสีแกมมาและรังสีเอ็กซ์เป็นการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสองแบบที่แตกต่างกันที่จุดกำเนิด รังสีแกมมาเกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ ส่วนรังสีเอ็กซ์เกิดจากการโลด หรือโดยการหน่วงอิเลคตรอน

รังสีแกมมาและรังสีเอ็กซ์ คือ โฟตอนที่มีพลังงาน E_p กำหนดโดย

$$E_p = h\nu = h\frac{c}{\lambda} \qquad (2.15)$$

h แทน ค่าคงที่ของแพลงค์

c แทน ความเร็วแสง

ν แทน ความถี่ของคลื่น

λ แทน ความยาวคลื่น

รังสีเอ็กซ์และรังสีแกมมาเมื่อเกิดอันตรกิริยากับสสาร จะเกิดปรากฏการณ์สามอย่าง คือ ผลของโฟโตอิเลคตริค (photoelectric effect), การกระเจิงของคอมป์ตัน (Compton scattering) และแพร์โปรดักชัน (pair production)

ในผลของโฟโตอิเลคตริค โฟตอนมีพลังงาน $h\nu$ เมื่อเกิดอันตรกิริยากับอะตอมหนึ่ง โฟตอนจะถ่ายเทพลังงานให้แก่อิเลคตรอนหนึ่งอนุภาคและตามปกติจะเป็นอิเลคตรอนในวงในสุด (inner - most shell) อิเลคตรอนอนุภาคนั้นจะถูกปล่อยออกมาด้วยพลังงานจลน์ E_{kin}

$$E_{kin} = h\nu - E_b$$

E_b เป็นพลังงานยึดกัน (binding energy) ของอิเลคตรอนในวงโคจร (orbital electron) ก็พลังงาน

เมื่อมีการจัดวงของอิเลคตรอนใหม่เข้าแทนที่อิเลคตรอนเดิมที่หลุดไป จะมีรังสีเอ็กซ์ถูกปลดปล่อยออกมาหนึ่งโฟตอนหรือมากกว่า และมีพลังงานรวมกันเท่ากับ E_b

ในการกระเจิงแบบคอมป์ตัน โฟตอนปฐมภูมิ (primary photon) จะเกิดอันตรกิริยากับอิเลคตรอนในวงโคจร อิเลคตรอนนี้ถือเสมือนว่าเป็นอิเลคตรอนอิสระเพราะพลังงานของโฟตอนปฐมภูมิมากกว่าพลังงานยึดกันของอิเลคตรอนมาก อันตรกิริยานั้นอาจวิเคราะห์เป็นการชนกันแบบยืดหยุ่น (elastic collision) ระหว่างโฟตอนปฐมภูมิและอิเลคตรอน และถือเสมือนว่าเป็นโฟตอนที่ถูกทำให้กระเจิง

การดูดกลืนโดยแพร์โปรดักชัน (absorption of pair production)

ขบวนการแพร์โปรดักชัน รังสีแกมมาจะกลายเป็นโปซิตรอนและอิเลคตรอน พลังงานของรังสีแกมมาจะต้องมากกว่าพลังงานเนื่องจากมวลทั้งหมดของโปซิตรอนและอิเลคตรอนรวมกัน (total rest mass energy)

$$2mc^2 = 1.02 \text{ MeV}$$

แพร์โปรดักชันจะเกิดในสนามคูลอมบ์ของนิวเคลียส พลังงานที่สูงกว่าพลังงานเนื่องจากมวลทั้งหมดของอิเลคตรอนและโปซิตรอนรวมกัน จะกลายเป็นพลังงานจลน์ E_{kin} ของทั้งคู่

$$E_{kin} = h\nu - 2mc^2 = h\nu - 1.02 \text{ MeV} \qquad (2.16)$$

พลังงานเกินกว่าครึ่งหนึ่งของ E_{kin} เป็นของโปซิตรอนเพราะเป็นอนุภาคที่มีประจุบวก และถูกผลักโดยนิวเคลียส ในขณะที่อิเลคตรอนถูกดูด

005252

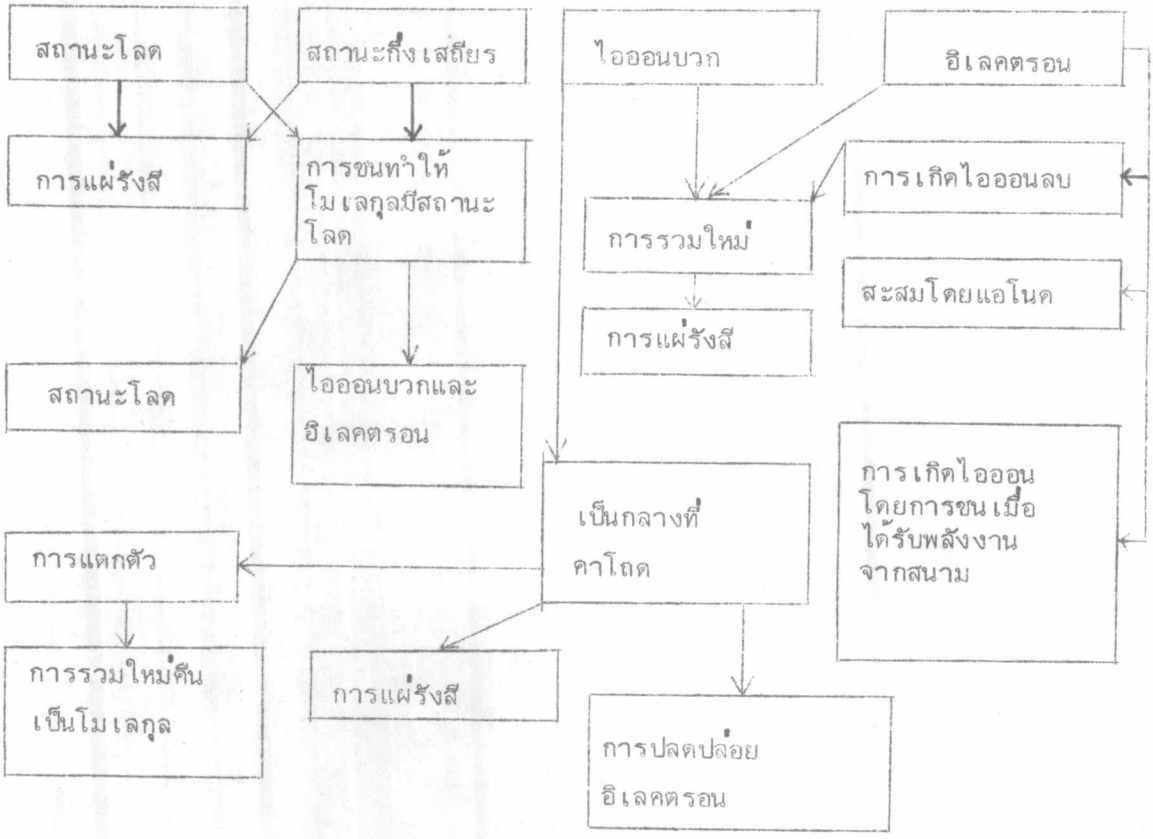
2.2 พฤติกรรมของไอออนในก๊าซที่มีสนามไฟฟ้า

เครื่องวัดรังสีชนิดต่าง ๆ อาศัยหลักของขบวนการเกิดไอออน (ionization process) ของอะตอมของสสาร เมื่อมีอนุภาคหรือโฟตอนผ่านตามที่กล่าวแล้วในหัวข้อ 2.1

การเกิดไอออน หมายถึง การกระทำหรือขบวนการต่าง ๆ ที่โมเลกุลหรืออะตอมที่เป็นกลางของก๊าซแตกตัวออกเป็นไอออนบวกและอิเลคตรอน[3]

เมื่ออะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซแตกตัวออกเป็นไอออนบวกและอิเลคตรอน ถ้าในบริเวณที่เกิดการแตกตัวไม่มีสนามไฟฟ้าไอออนบวกและอิเลคตรอนที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่อย่างสะเปะสะปะ แต่เมื่อในบริเวณนั้นมีสนามไฟฟ้าไอออนบวกจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วลบ และอิเลคตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วบวก

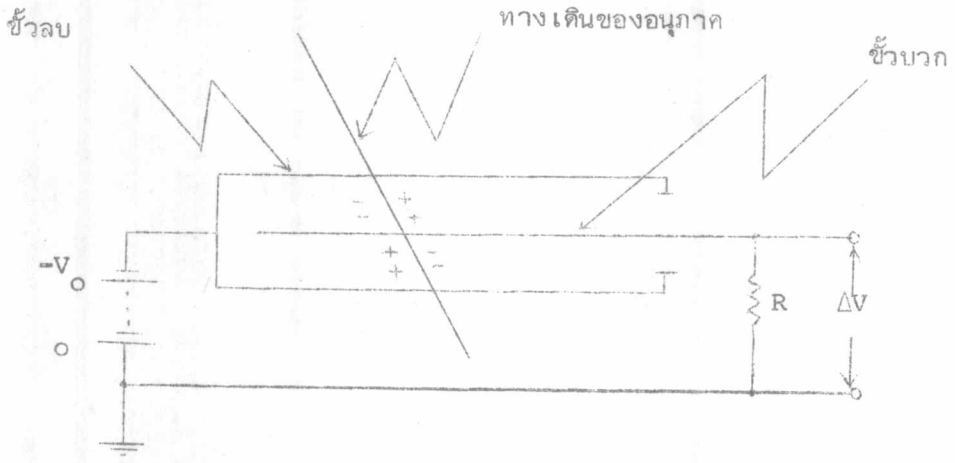
หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.1 สรุปการเสียพลังงานของอนุภาคในตัวกลางที่เป็นกาซ[4]

ก. การเกิดสัญญาณไฟฟ้า

การเกิดสัญญาณไฟฟ้าจากการเกิดไอออน เมื่ออนุภาคที่มีประจุวิ่งผ่านเข้าไปในเครื่องวัดรังสีนั้น พิจารณาได้จากรูป คือ



รูปที่ 2.2 แสดงการเกิดสัญญาณไฟฟ้าในเครื่องวัดรังสี

จากรูปที่ 2.2 ส่วนประกอบที่สำคัญมี 2 ส่วน คือขั้วบวก หรือตัวเก็บ (collector) มีลักษณะเป็นเส้นอยู่แนวแกนกลางของขั้วลบ (cathode) ที่เป็นทรงกระบอก เมื่ออนุภาคผ่านเข้าไปในเครื่องวัดรังสีจะเกิดการเกิดไอออนของอะตอมหรือโมเลกุลของกาซได้ไอออนแพร์ แล้วไอออนบวกและอิเลคตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วลบและขั้วบวกตามลำดับด้วยความเร็ว[3]

$$v = kE/p \qquad (2.18)$$

v แทนความเร็วของไอออน (ซม./วินาที)

k แทนสภาพเคลื่อนที่ได้ (mobilities) เป็นค่าคงที่ (ซม.^{2} บรรยากาศ/โวลต์ วินาที)

E แทนสนามไฟฟ้า (โวลต์/ซม.)

p แทนความดันของกาซ (บรรยากาศ)

ค่า k เป็นค่าที่ศึกษาและรวบรวมจากการทดลองตามตาราง 2.2 , 2.3

สำหรับค่าประมาณของความเร็วของไอออนบวก คือ 1.0×10^3 ซม./วินาที และความเร็วของอิเลคตรอนประมาณ $(1-5) \times 10^6$ ซม./วินาที[1] เมื่ออิเลคตรอนเคลื่อนที่ไปยังขั้วบวก และไอออนบวกเคลื่อนที่ไปยังขั้วลบ จะทำให้ศักดาไฟฟ้าที่ขั้วบวกเปลี่ยนแปลงเกิดสัญญาณไฟฟ้าได้

ตารางที่ 2.2 สภาพเคลื่อนที่ได้ (mobilities) ของไอออนในกาซ[3]

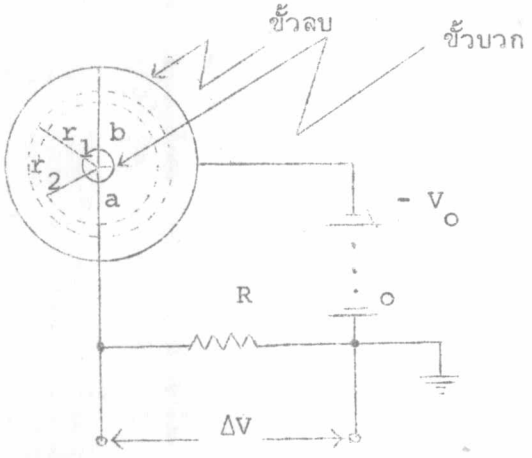
สัญญลักษณ์ของประจุ	ชนิดของไอออน	ชนิดของกาซ	k (ซม.^{2}บรรยากาศ/โวลต์วินาที)
บวก	แอลกอฮอล์	แอลกอฮอล์	2.6 ที่ 1 ซม.ของปรอท
บวก	อาร์กอน	อาร์กอน	7.1 ที่ 10ซม.ของปรอท
บวก	ไฮโดรเจน	ไฮโดรเจน	6.7 ที่หนึ่งบรรยากาศ
บวก	ฮีเลียม	ฮีเลียม	5.1 ที่หนึ่งบรรยากาศ
บวก	อาร์กอน	อาร์กอน	1.37 ที่หนึ่งบรรยากาศ
บวก	อากาศ	อากาศ	1.40 ที่หนึ่งบรรยากาศ
บวก	แอลกอฮอล์	แอลกอฮอล์	0.34 ที่หนึ่งบรรยากาศ
ลบ	อากาศ	อากาศ	1.78 ที่หนึ่งบรรยากาศ
ลบ	แอลกอฮอล์	แอลกอฮอล์	0.27 ที่หนึ่งบรรยากาศ

หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.3 สภาพเคลื่อนที่ได้ของอิเลคตรอนในกาซ (3)

ชนิดของกาซ	k x โวลต์ที่ความดันต่าง ๆ	ขีดจำกัด E/p
BF_3	$5x10^5$-$2.5x10^6$ ที่ 1 ซม.ของปรอท	5-20 โวลต์/ซ.ม. ซ.ม.ของปรอท
Ar + Alc	15700 9 cmAr+ 1cm Alc	
Alc	1630 10 ซม.ของปรอท	
$H_2 + N_2$	$4x10^5$ ที่ 1 มม.ของปรอท	2-5 โวลต์/ซ.ม. มม.ของปรอท
He	$6x10^5$ ที่ 1 มม.ของปรอท	0.2-5 "
Ne	$12.5x10^5$ ที่ 1 มม.ของปรอท	0.2-7 "
Ar	$2x10^6$ ที่ 1 มม.ของปรอท	0.1-1 "
CO_2	$1.05x10^6$ ที่ 1 มม.ของปรอท	0.5-8 "
BF_3	10^7 ที่ 1 มม.ของปรอท	1 - 9 "
$0.9Ar+0.1CO_2$	$5x10^6$ ที่ 1 มม.ของปรอท	0.1 - 1 "

สัญญาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้นถือเสมือนว่าอิเลคตรอนวิ่งไปยังขั้วบวกเลย ซึ่งความจริงแล้ว ไอออนแพร์จากการเกิดไอออนจะเกิดทุก ๆ แห่งในปริมาตรที่บรรจุกาซระหว่างขั้วไฟฟ้า



รูปที่ 2.3 ภาพตัดขวางของเครื่องวัดรังสีแสดงการเกิดสัญญาณไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.3 ให้อิเลคตรอนหนึ่งอนุภาคมีประจุ -e อยู่ที่จุด r_1 ในกาซที่รัศมี r_1 จะมีศักดาไฟฟ้าอยู่สองส่วน $V_o(r_1)$ เป็นศักดาไฟฟ้าที่เกิดจากประจุบนขั้วไฟฟ้าไม่ขึ้นอยู่กับประจุที่มีอยู่ในกาซ $V_s(r_1)$ เป็นศักดาไฟฟ้าที่เกิดจากการเกิดไอออนอื่น ๆ ที่มีอยู่ในกาซ

พลังงานไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic energy) ของอิเลคตรอนที่มีอยู่สองส่วนที่ไม่ขึ้นแก่กันคือ พลังงานจากประจุอิสระและจากสนามของขั้วไฟฟ้าเมื่อพิจารณาแยกกันออกไป* พลังงานของระบบของขั้วไฟฟ้ารวมกับอิเลคตรอนคือ

$$\frac{1}{2} \Sigma q_i V_i = \frac{1}{2} \left[-eV_o(r_1) + Q_o V_{ao} - Q_o V_{bo} \right] \qquad (2.19)$$

ซึ่ง V_a และ V_b เป็นศักดาไฟฟ้าที่ขั้วและสัญญลักขณ์ห้อย (subscript) o แสดงค่าที่จุดเริ่มต้น ขณะที่อิเลคตรอนเคลื่อนที่จาก r_1 ไป r_2 งานเนื่องจากสนามไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้ากระทำบนอิเลคตรอนคือ ผลต่างของพลังงานของระบบของขั้วไฟฟ้ารวมกับอิเลคตรอนนั่นเอง Q_o และ V_{bo} คงที่ แต่ศักดาไฟฟ้าของขั้วบวก V_a เปลี่ยนไป ΔV จะได้ว่า

$$-e \left[V_o(r_2) - V_o(r_1) \right] = \frac{1}{2} \left[-eV_o(r_2) + eV_o(r_1) + Q_o \Delta V \right] \qquad (2.20)$$

$$\Delta V = - \frac{e}{Q_o} \left[V_o(r_2) - V_o(r_1) \right] \qquad (2.21)$$

$$\Delta V = - \frac{e}{C} \left[\frac{V_o(r_2) - V_o(r_1)}{V_{ao} - V_{bo}} \right] \qquad (2.22)$$

---

* ประจุอิสระ (space charge) ไม่มีผลโดยตรงกับขนาดของสัญญาณไฟฟ้าที่เกิดจากอิเลคตรอนหนึ่งอนุภาค แต่อาจจะกระทบกระเทือนต่อความเร็วของอิเลคตรอนและรูปสัญญาณไฟฟ้า ใน pulse ionization chamber ประจุอิสระเล็กมากไม่มีความสำคัญ แต่จะมีความสำคัญในขั้นการทำงานของเครื่องวัดรังสีไกเกอร์ (Geiger counter)

เมื่อ C แทนความจุของเครื่องวัดรังสี

สมการ (2.22) เป็นผลเนื่องจากอิเลคตรอนเพียงอนุภาคเดียว ถ้าอิเลคตรอนทุกอนุภาคที่เกิดจากการเกิดไอออนเคลื่อนมายังขั้วบวก โดยเสมือนว่า อิเลคตรอนเคลื่อนมาจากขั้วลบ (เพราะสัญญาณไฟฟ้าเกิดจากการที่อิเลคตรอนเคลื่อนที่เข้าหาขั้วบวก และเมื่อไอออนบวกเคลื่อนที่เข้าหาขั้วลบ) แล้วจะได้ว่า $V_o(r_2) = V_o(a) = V_a$ และ $V_o(r_1) = V_o(b) = V_b$ สมการ (2.22) จะกลายเป็น

$$\Delta V = -\frac{Q}{C} \quad ; \quad Q = ne \tag{2.23}$$

n แทนจำนวนของอิเลคตรอนที่เกิดจากการเกิดไอออน

แสดงว่าสัญญาณไฟฟ้า ΔV ขึ้นอยู่กับจำนวนของไอออนคู่ ที่เกิดจากการเสียพลังงานของอนุภาคที่ผ่านเครื่องวัดรังสี สมการ (2.23) เป็นหลักการของ ionization chamber

ข. กาซมัลติพลิเคชัน (gas multiplication)

กาซมัลติพลิเคชัน[5] M หมายถึงปรากฏการณ์ที่เกิดในบริเวณรอบ ๆ ขั้วบวกของเครื่องวัดรังสีซึ่งมีความเข้มสนามไฟฟ้า (electric field strength) สูงพอที่จะทำให้อิเลคตรอนที่เกิดจากการเกิดไอออนปฐมภูมิ (primary ionization) มีพลังงานมากพอและชนโมเลกุลของกาซทำให้เกิดการเกิดไอออนให้ไอออนบวกและอิเลคตรอนอีก อิเลคตรอนที่ถูกปลดปล่อยออกมาใหม่ได้รับพลังงานมากพะก็จะชนโมเลกุลของกาซ ทำให้เกิดการเกิดไอออนเพิ่มขึ้นอีกและเป็นเช่นนี้เรื่อย ๆ ไป

การชนของอิเลคตรอนที่ทำให้เกิดการเกิดไอออนโดยที่อิเลคตรอนนั้นไม่ใช่อนุภาคที่มาจากภายนอก เรียกว่าการเกิดไอออนทุติยภูมิ (secondary ionization) อิเลคตรอนที่เกิดโดยตรงจากอนุภาคภายนอกชนโมเลกุลของกาซเกิดการเกิดไอออนปฐมภูมิ และเกิดโดยการเกิดไอออนทุติยภูมิก็จะวิ่งไปยังขั้วบวกทำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้าใหญ่กว่าตอนที่ไม่มีการเกิดไอออนทุติยภูมิ

ปรากฏการณ์นี้จะขยายสัญญาณไฟฟ้าที่เกิดจากกัมมันตภาพรังสีที่มีพลังงานต่ำได้ บริเวณที่เกิดกาซมัลติพลิเคชันเล็กมาก เมื่อเทียบกับปริมาตรของเครื่องวัดรังสี อิเลคตรอนที่เกิดจากการเกิดไอออนปฐมภูมินอกบริเวณที่เกิดกาซมัลติพลิเคชัน โดยเฉลี่ยแล้วจะผลิตไอออนคู่ จำนวนเท่า ๆ กันจากการชนโมเลกุลของกาซก่อนที่จะถึงขั้วบวก = Y - 1 อนุภาค เมื่อ Y แทนจำนวนอิเลคตรอนทั้งหมดต่อไอออนคู่ ปฐมภูมิเรียกว่า "ถล่มตอนต้น" (initial avalanche) หรือกาซมัลติพลิเคชัน

อิเลคตรอนในเครื่องวัดรังสีอาจจะเกิดเพิ่มขึ้นอีกจากผลของโฟโตอิเลคตริค (photoelectric effect) เนื่องจากโฟโตอิเลคตรอนที่หลุดจากขั้วลบโดยรังสีแกมมาในช่วงอุลตาไวโอเลท กาซโมเลกุลหลายเชิง (polyatomic gas) มีความสามารถดูดควอนตัมอุลตาไวโอเลทสูง สำหรับกาซโมเลกุลเชิงเดี่ยว (monoatomic gas) เช่น อาร์กอน (argon) นั้นไม่ดูดควอนตัมอุลตาไวโอเลท ทำให้ควอนตัมอุลตาไวโอเลทชนโฟโตอิเลคตรอนที่ขั้วลบ และอิเลคตรอนเป็นอนันต์ (infinite) เครื่องวัดรังสีที่บรรจุกาซอาร์กอนจึงถึงช่วงการถ่ายประจุต่อเนื่อง (continuous discharge) เร็ว เมื่อกาซมัลติพลิเคชัน M = 100 การเกิดไอออนคู่ จำนวนมากจะมีไอออนบวกเหลือเป็นประจุอิสระเนื่องจากอิเลคตรอนเคลื่อนที่ไปยังขั้วบวก ทำให้ความเข้มสนามไฟฟ้าในบริเวณใกล้เคียงลดลงเป็นเหตุให้ M ไม่สูงเท่าที่ควรตามจำนวนไอออนคู่ ปฐมภูมิ[4]

ให้ γ เป็นจำนวนเฉลี่ยของโฟโตอิเลคตรอนที่เกิดต่อไอออนคู่ ซึ่งในกาซส่วนมาก $\gamma << 1$ แล้วถล่มตอนต้นของอิเลคตรอน y อนุภาคจะผลิตโฟโตอิเลคตรอน = γy อนุภาค ทำให้เกิดถล่มทุติยภูมิ (secondary avalanche) ได้โฟโตอิเลคตรอน = γy^2 อนุภาค ในที่สุดค่าของ M ของอิเลคตรอนที่หลุดเป็นอิสระในเครื่องวัดรังสี เมื่อไอออนแพร่ถูกผลิตจากโฟตอนจะกลายเป็น

$$M = y + \gamma y^2 + \gamma^2 y^3 + \ldots \qquad (2.24)$$

ค่าของโฟโตอิเลคตรอน γy ขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ระหว่างขั้วที่ให้กับเครื่องวัดรังสี เมื่อความต่างศักย์ระหว่างขั้วต่ำ ๆ $\gamma y < 1$ เครื่องวัดรังสีจะทำงานในช่วงปฏิภาค (proportional region) เรียกว่า "เครื่องวัดรังสีปฏิภาค" (proportional counter) จากสมการ (2.24) เขียนใหม่โดยอาศัยหลักการกระจายได้

$$M = \frac{y}{1 - \gamma y} \tag{2.25}$$

สมการนี้จะเห็นว่า เมื่อ γ มีค่าน้อย ๆ $M \sim y$ ในทางปฏิบัติจึงไม่คำนึงถึงผลของโฟโตอิเลคตริค ถ้าความต่างศักย์ระหว่างขั้วทำให้ $\gamma y \geq 1$ แล้ว $M = \infty$ หมายความว่า อิเลคตรอนจะไม่ปรากฏในเครื่องวัดรังสีทางกายภาพ ซึ่งจะไม่กล่าวในที่นี้

ในกรณีที่การเกิดไอออนปฐมภูมิ กาซมัลติพลิเคชันมีค่าน้อย ๆ และไม่มีการสร้างไอออนลบ (electron attachment) กาซมัลติพลิเคชันจะเป็นฟังค์ชันของเส้นผ่าศูนย์กลางของขั้วบวกและของขั้วลบ ความดัน p , และความต่างศักย์ระหว่างขั้ว V_o เพราะกาซมัลติพลิเคชันเป็นค่าคงที่ที่ไม่ขึ้นกับการเกิดไอออนปฐมภูมิและการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าใกล้ ๆ ขั้วบวก อันเนื่องมาจากประจุอิสระ (space charge) ถ้าโฟโตอิเลคตริคมีผลแล้ว M จะขึ้นอยู่กับลักษณะของขั้วลบด้วย ถ้า k เป็นตัวคูณร่วมของ a และ b ความดันเป็น p/k แต่ V_o คงที่ เครื่องวัดรังสีจะมีคุณสมบัติเป็นเชิงเส้น (linear) ทุกครั้ง เมื่อสนามไฟฟ้ากลายเป็น E/k แล้ว ระยะทางอิสระเฉลี่ย (mean free path) จะเพิ่มขึ้น k เท่า M เป็นฟังค์ชันของอัตราส่วน $V_o/\ell n(b/a)$ และ pa

$$M = M\left[\frac{V_o}{\ell n(b/a)}, pa\right] \tag{2.26}$$

สรุปผลการศึกษา กาซมัลติพลิเคชัน โดยการใช้กาซชนิดต่าง ๆ

1. เกือบทุกกรณี กาซมัลติพลิเคชันเป็นฟังค์ชันเอกซ์โปเนนเชียล (exponential function) ของ V_o

2. ความลาดชัน (slope) ของส่วนโค้ง (curve) ที่แทน ℓnM เป็นฟังค์ชันของ V_o ที่ความดันต่ำ ๆ น้อยกว่าค่าวิกฤต

ความสูงของสัญญาณไฟฟ้ายังขึ้นอยู่กับระยะจากแนวไอออนดู (track) ถึงขั้วบวก เพราะถ้าเพิ่ม E/p มากขึ้น การเกิดไอออนลบจะน้อยลง และความเข้มสนามไฟฟ้าใกล้ ๆ ขั้วลบของเครื่องวัดรังสีที่มีขั้วบวกใหญ่จะมีค่าน้อยกว่าเครื่องวัดรังสีที่มีขั้วบวกเล็ก ซึ่งก็ทำให้สนามไฟฟ้า E/p มีค่าเปลี่ยนไปและมีผลกับขนาดของสัญญาณไฟฟ้า

การที่ขั้วบวกและขั้วลบมีจุดศูนย์กลางไม่ตรงกันจะทำให้ผลการเกิดการมัลติพลิเคชันผิดไป เนื่องจากสนามไฟฟ้ามีความเข้มไม่สม่ำเสมอ บริเวณเกิดกาซมัลติพลิเคชันรอบ ๆ ขั้วบวกก็ไม่เหมือนกันด้วย

สัญญาณไฟฟ้าจากอนุภาคที่มีพลังงานเท่ากัน อาจจะมีความสูงไม่เท่ากัน เนื่องจากประจุบวกอิสระ การเกิดไอออนลบ จุดศูนย์กลางขั้วบวกและขั้วลบไม่ตรงกัน นอกจากนี้ความสะอาดของขั้วบวกและความไม่สม่ำเสมอของขั้วบวกก็มีผลต่อความสูงของสัญญาณไฟฟ้าด้วย

สนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงจำเป็นสำหรับการเกิดไอออนทุติยภูมิ และส่วนมากใช้การดัดแปลงรูปร่างของขั้วไฟฟ้าแทนการให้ความต่างศักย์สูงแก่ขั้วไฟฟ้าโดยตรง ขนาดของสัญญาณไฟฟ้า ΔV ในช่วงความต่างศักย์ระหว่างขั้วที่ทำให้เกิดกาซมัลติพลิเคชัน คือ

$$\Delta V = -Mne/C \qquad (2.27)$$

สำหรับเครื่องวัดรังสีแบบทรงกระบอก