บทที่ 2

ส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดไอออน

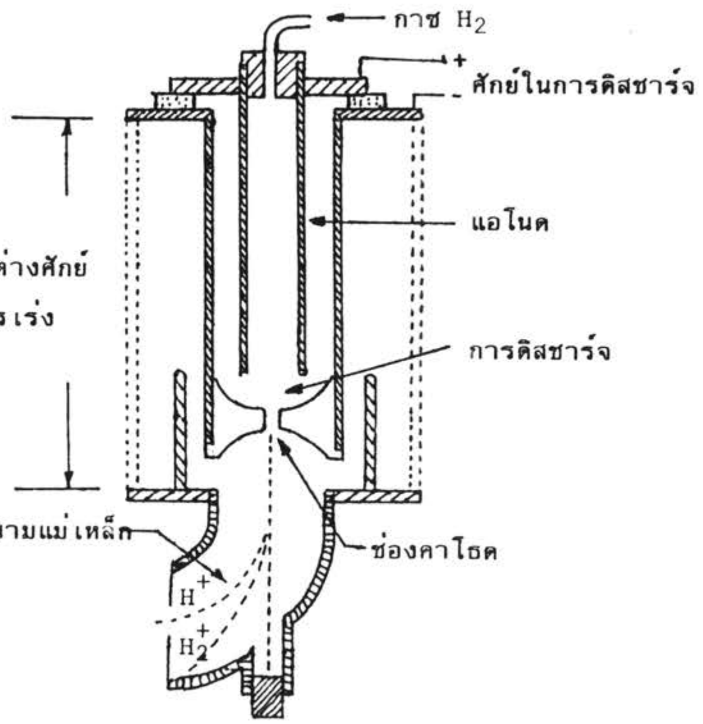
ในเครื่องกำเนิดไอออนประกอบด้วย 3 ส่วน คือ

1. แหล่งกำเนิดไอออน (Ion source)
2. ส่วนนำไอออนออกจากแหล่งกำเนิด
3. ส่วนโฟกัส (Focusing)

2.1 <u>แหล่งกำเนิดไอออน</u>

แหล่งกำเนิดไอออนทุกชนิดมีหลักการเดียวกัน คือ การไอออไนซ์กาซให้เป็นไอออน กลวิธีสำหรับการไอออไนซ์กาซนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องกำเนิดไอออนแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน ในการวิจัยนี้จะกล่าวถึงแหล่งกำเนิดไอออนบวกชนิดต่างๆ ที่ให้ลำไอออนเชิงเส้น (linear beam) ดังจะได้กล่าวอย่างสั้นๆ ยกเว้นวิธีที่ใช้ในการวิจัยนี้เท่านั้นที่จะกล่าวอย่างละเอียด แหล่งกำเนิดไอออนที่ใช้ในปัจจุบันได้แก่

2.1.1 แหล่งกำเนิดไอออนชนิดลำคาแนลคาโธดเย็น (cold cathode canal ray ion source) ชนิดนี้ประกอบด้วยคาโธดและแอโนดทรงกระบอกที่มีแกนร่วมกัน แอโนดอยู่ภายในระหว่างผนังคาโธดและแอโนดมีช่องว่างเพียงพอสำหรับการดิสชาร์จ (discharge) บริเวณการดิสชาร์จเกิดขึ้นรอบๆ ขอบของแอโนดทรงกระบอก ที่ปลายคาโธดมีช่องเล็กๆ สำหรับให้ไอออนพุ่งออกไป ดังรูปที่ 2.1

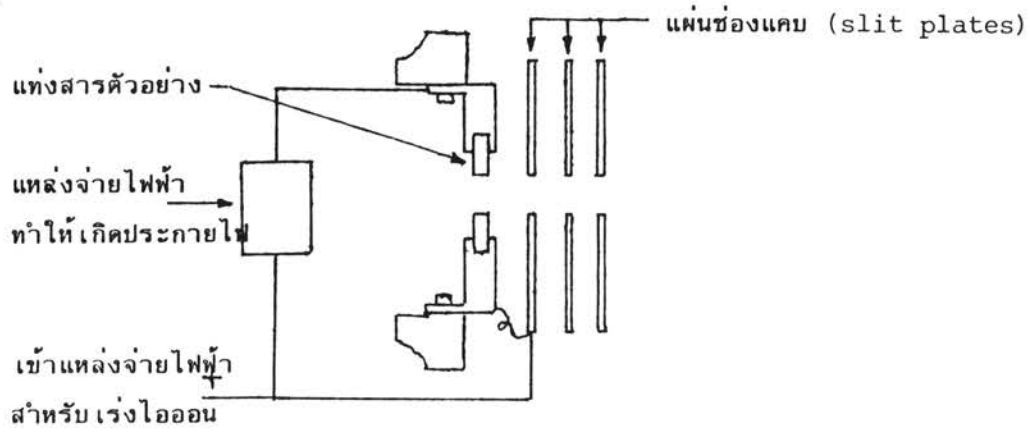


รูปที่ 2.1 แสดงไดอะแกรมของแหล่งกำเนิดไอออนชนิดลำคาแนลคาโธดเย็น

ความต่างศักย์ที่ให้ต่อแหล่งกำเนิดชนิดนี้มีค่า 20 กิโลโวลต์ ใช้กระแส 10 ถึง 100 มิลลิแอมป์ ขณะที่เครื่องทำงานปลายคาโธดจะร้อนจนแดง และที่บริเวณฐานเครื่องกำเนิดจะมีน้ำมันซึ่งเย็นระบายความร้อนอยู่ กาซจะถูกปล่อยเข้าทางฐานเข้าไปภายในแอโนด ความดันภายในไม่จำกัดแต่หากเทียบกับแหล่งกำเนิดที่ใช้ศักย์สูงๆ จะอยู่ระดับ 10^{-2} มิลลิเมตรปรอท ถัดจากช่องคาโธดจะมีแม่เหล็กเพื่อที่จะแยกไอออนที่ถูกเร่งออกมา ตอนแรกขณะเครื่องทำงานจะมีไอออนโมเลกุลไฮโดรเจนมาก แต่หลังจากนั้นไม่กี่ชั่วโมงจะมีโปรตอนซึ่งเป็นส่วนประกอบอยู่เพิ่มขึ้นประมาณ 20 เปอร์เซนต์ และลำโปรตอนนี้มีกระแสประมาณ 1 ไมโครแอมป์

แหล่งกำเนิดชนิดนี้ไม่ค่อยใช้ประโยชน์เพราะมีการกระจายพลังงานของไอออนที่พุ่งออกมามาก การกระจายพลังงานมีตั้งแต่ระดับ 0 ถึงระดับ 20 กิโลโวลต์ ซึ่งไม่เหมาะกับเครื่องเร่งแบบใหม่ [2]

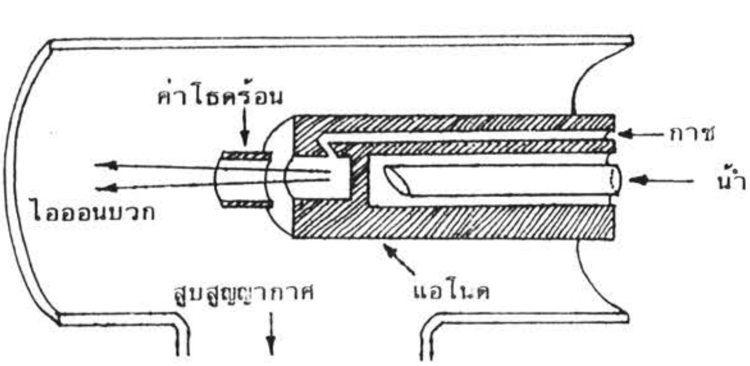
2.1.2 แหล่งกำเนิดโดยใช้ประกาย (spark source) วิธีนี้เป็นแหล่งกำเนิดที่ใช้สร้างไอออนจากอนินทรีย์สารของแข็ง (inorganic solid) แหล่งกำเนิดชนิดนี้ประกอบด้วยขั้วที่มีสารที่ต้องการวิเคราะห์ติดอยู่ภายในความดันต่ำ ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงไดอะแกรมของแหล่งกำเนิดโดยใช้ประกาย

ไอออนสร้างขึ้นได้โดยการใส่ความต่างศักย์สูงมากอยู่ในลำดับขนาด (order of magnetude) 30-100 กิโลโวลต์ เข้ากับขั้วไฟฟ้าทั้งสอง เมื่อเกิดประกาย (spark) การดิสชาร์จ (discharge) จะเกิดขึ้น ผลจะทำให้ไอออนของสารที่จะศึกษาเกิด แล้วจึงเร่งไอออนและทำให้เป็นลำตรงก่อนที่จะผ่านเข้าส่วนโฟกัส [2]

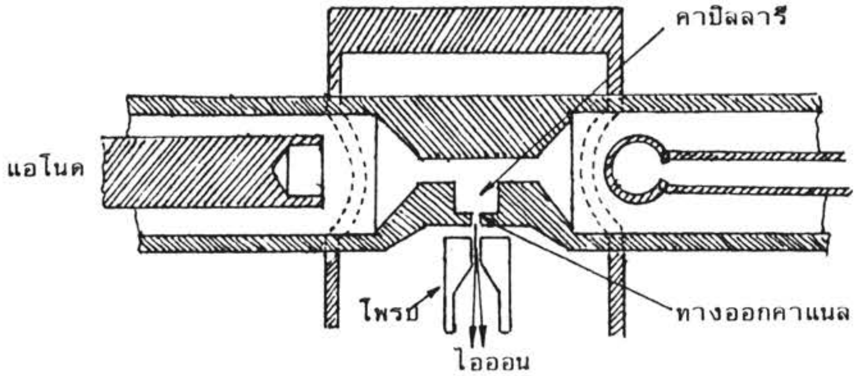
2.1.3 **แหล่งกำเนิดไอออนชนิดอาร์คคาโธดร้อน** (Hot cathode arc ion source) วิธีนี้สร้างไอออนโดยการปล่อยอิเล็คตรอนออกจากคาโธดซึ่งร้อน (คาโธดที่มีไส้) ขณะเดียวกันให้ความต่างศักย์ระหว่างคาโธดและแอโนดน้อย ที่ใช้กันประมาณ 200 โวลต์ แต่กระแสมาก เนื่องจากภายในมีกาซ ทำให้เกิดการไอออไนซ์ ผลที่ได้ก็คือจะมีไอออนบวกเกิดขึ้น และไอออนบวกจะถูกสนามไฟฟ้าผลักออกมาตรงรูคาโธด ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งเป็นแบบหนึ่งของแหล่งกำเนิดชนิดนี้



รูปที่ 2.3 แสดงไดอะแกรมแหล่งกำเนิดไอออนชนิดอาร์คคาโธดร้อน

แหล่งกำเนิดประเภทนี้ให้ไอออนที่หลุดมาจากแหล่งกำเนิดมีพลังงานที่สม่ำเสมอมาก และยังกระทำที่ความดันต่ำได้ นอกจากนี้ยังลดปริมาณของกาซที่เหลือจากการไอออไนซ์ที่รวมออกมากับลำไอออน [2]

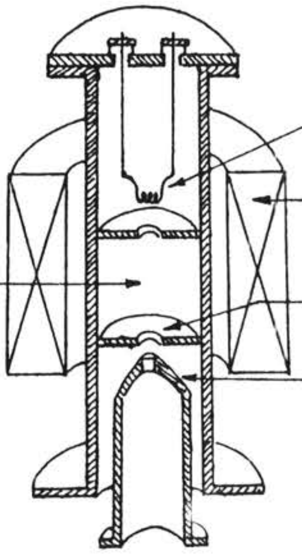
2.1.4 แหล่งกำเนิดไอออนชนิดคาปิลลารีอาร์ค (capillary arc) ลักษณะของแหล่งกำเนิดไอออนชนิดนี้ ความจริงแล้วดัดแปลงมาจากแหล่งกำเนิดไอออนชนิดอาร์คคาโธดร้อน โดยการรวมการดิสชาร์จ (discharge) ไว้ในบริเวณเล็กๆ ซึ่งเรียกว่า คาปิลลารี (capillary) และมีรูที่คาปิลลารีเป็นทางออกของไอออนเรียกว่าคาแนล (canal) ซึ่งคาปิลลารีจะขวางทิศทางของการแผ่ลำไอออนโดยหันด้านคาแนลออก ส่วนคาโธดและแอโนดจะแยกจากกันโดยขยายออกทั้ง 2 ข้าง ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงไดอะแกรมแหล่งกำเนิดไอออนชนิดคาปิลลารี (ผนังโลหะ) อาร์ค

เมื่อมีคาปิลลารีจะเพิ่มกระแสในการอาร์ค และยังเลือกผิวที่จะทำผนังของคาปิลลารีได้ ทำให้การรวมไอออนอะตอมได้ดีขึ้น ในคาปิลลารีมีความหนาแน่นไอออนสูงจึงบังคับให้ฝักพลาสม่า (plasma sheath) เข้าใกล้ผนัง ไอออนบวกพุ่งออกตามแนวรัศมีตลอดฝักและปรากฏออกที่คาแนลของคาปิลลารีด้วยพลังงานไม่ต่างกันนัก ยิ่งกว่านั้นถ้าผนังคาปิลลารีใช้สสารที่มีสัมประสิทธิของรีคอมไบเนชัน (recombination) มาก ไอออนบวกจะกลายเป็นอะตอมธรรมชาติ จะปลดปล่อยพลังงานความร้อนและผลนี้ทำให้มีอะตอมในกาซมากขึ้น การไอออไนซ์กาซที่มีอะตอมมากๆ จะทำให้มีโปรตอนสูงขึ้นทำให้ลำมีความเข้มมากขึ้น และเปอร์เซนต์ของไอออนอะตอมมากขึ้น [2]

2.1.5 แหล่งกำเนิดไอออนโดยใช้แม่เหล็ก (Magnetic ion source) แหล่งกำเนิดชนิดนี้ปรับปรุงเพิ่มเติมจากแหล่งกำเนิดชนิดอื่นๆ โดยการใช้คอยล์สนามแม่เหล็ก (magnetic field coil) ซึ่งมีสนามแม่เหล็กตามแนวแกนทำหน้าที่นำการดิสชาร์จ (discharge) มารวมไว้แห่งเดียวกันในบริเวณใกล้ๆ รูทางออกซึ่งมีความหนาแน่นของการไอออไนซ์มาก ตัวอย่างแหล่งกำเนิดไอออนโดยใช้แม่เหล็กซึ่งปรับปรุงมาจากชนิดอาร์คคาโธดร้อน ดังรูปที่ 2.5

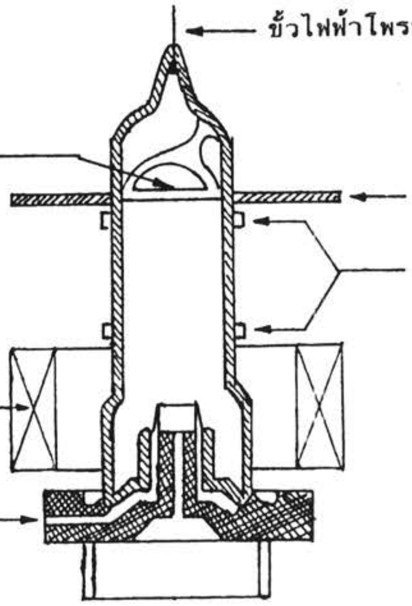


รูปที่ 2.5 แสดงไดอะแกรมแหล่งกำเนิดไอออนโดยใช้แม่เหล็กปรับปรุงจากชนิดอาร์คคาโธดร้อน

สนามแม่เหล็กจะทำให้อิเล็คตรอนอยู่ในแนวเดียวกันอย่างหนาแน่น ดังนั้นการดิสชาร์จถูกจำกัดด้วยพื้นที่หน้าตัดเท่ากับพื้นที่ของผิวการแผ่ของคาโธด แหล่งกำเนิดชนิดนี้จะมีไอออนเพิ่มขึ้นมาก เพราะว่าสนามแม่เหล็กจะรักษาโปรตอนส่วนที่แผ่ไปยังผิวของแชมเบอร์ ซึ่งจะหายไปให้คงอยู่และจะได้ผลมากๆ เมื่อรัศมีเฉลี่ยของความโค้งของทางเดินไอออนในสนามแม่เหล็กมีขนาดเท่ารูทางออก [2]

2.1.6 แหล่งกำเนิดไอออนโดยใช้ความถี่วิทยุดิสชาร์จ (Radio frequency - discharge ion source) แหล่งกำเนิดชนิดนี้ไม่มีขั้วไฟฟ้า เกิดการดิสชาร์จ (discharge) ในกาซได้โดยใช้สนามความถี่วิทยุและมีสนามแม่เหล็กตามแนวแกนทำให้เพิ่มจำนวนไอออนที่สร้างขึ้นมา ประโยชน์อันหนึ่งของการดิสชาร์จ (discharge) โดยไม่มีขั้วนี้ คือ ไม่มีปัญหาเรื่องอายุการใช้งานของคาโธด นอกจากนี้อิเล็คตรอนจะหมุนเป็นวงเนื่องจากสนามแม่เหล็กตลอดที่มีกาซทำให้เพิ่มความน่าจะเป็นการชน ผลก็คือ ได้ไอออนมากขึ้นและสนามแม่เหล็กจะทำให้ไอออนมา

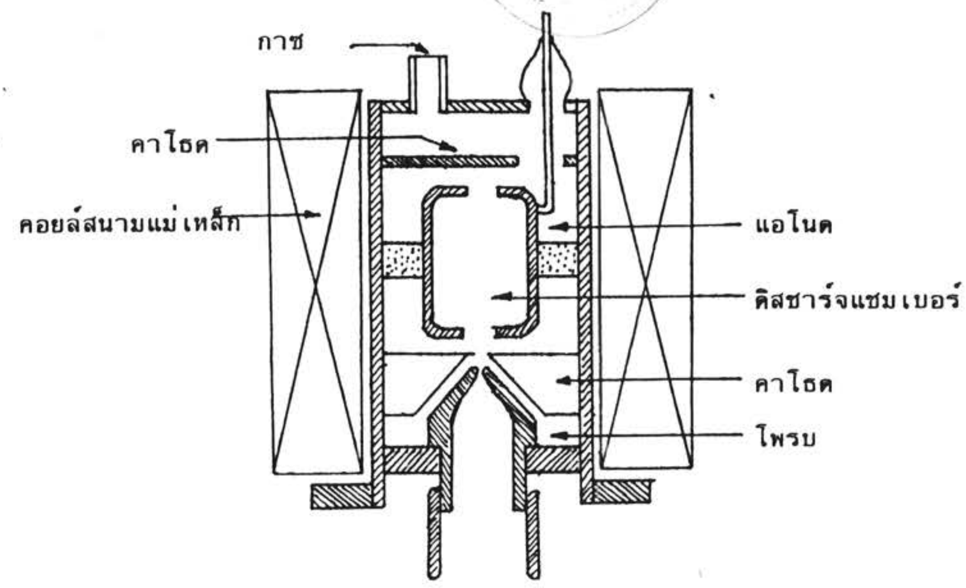
รวมที่แห่งเดียวกัน จึงเพิ่มจำนวนไอออนอีกและไอออนจะเคลื่อนออกทางช่องของขั้วไฟฟ้าโพรบ ซึ่งเป็นส่วนดึงไอออนออกจากแหล่งกำเนิด รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างของแหล่งกำเนิดชนิดความถี่วิทยุดิสชาร์จแบบหนึ่ง



รูปที่ 2.6 แสดงไดอะแกรมแหล่งกำเนิดไอออนโดยใช้ความถี่วิทยุดิสชาร์จ

ปัญหาที่สำคัญของแหล่งกำเนิดไอออนโดยใช้ความถี่วิทยุดิสชาร์จนี้ก็คือ การรวมการดิสชาร์จ (discharge) มาไว้แห่งเดียวกันในปริมาตรเล็กๆ และการป้อนพลังงานความถี่วิทยุทำให้เกิดการดิสชาร์จ (discharge) การนำแหล่งกำเนิดชนิดนี้ไปใช้เพื่อที่จะสร้างไอออนบวกซึ่งมีการค้นคว้าโดยการทดลองหลายครั้งในประเทศอังกฤษและแคนนาดา พบว่าความถี่ที่ใช้คือ 100 ถึง 200 เมกกะไซเฮิร์ซ (negahertz) ซึ่งมีวงจรรีโซแนนท์ (resonant) โดยมีคอยล์พันรอบดิสชาร์จแชมเบอร์ (discharge chamber) 2 ถึง 3 รอบ กำลังความถี่วิทยุ (rf - power) อยู่ในลำดับ 100 วัตต์ [2]

2.1.7 แหล่งกำเนิดไอออนชนิดอิเล็กตรอนออสซิลเลชัน (Electron oscillation (P.I.G) ion source) ลักษณะแหล่งกำเนิดไอออนชนิดนี้ประกอบด้วยแอโนดทรงกระบอก (cylindrical anode) กลวงอยู่ระหว่างคาโธด (cathode) และแอนตี้คาโธด (anti - cathode) และทั้งหมดนี้อยู่ภายในหลอดแก้วบรรจุกาซไฮโดรเจนหรือกาซชนิดอื่นที่ต้องการศึกษาที่ความดันต่ำ และมีคอยล์สนามแม่เหล็ก (magnetic field coil) วางอยู่โดยมีแกนร่วมกับแอโนดทรงกระบอก ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงไดอะแกรมของแหล่งกำเนิดไอออนชนิดอิเล็กตรอนออสซิลเลชัน

เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าแก่คาโธด แอนติ์คาโธดและแอโนด อิเล็กตรอนปฐมภูมิจะหลุดออกมาจากคาโธดแต่ละอัน ซึ่งจะถูกแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก แรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าจะทำให้อิเล็กตรอนปฐมภูมิเคลื่อนที่ด้วยความเร่งไปยังแอโนดทรงกระบอกในทิศทางตรงข้ามกับสนามไฟฟ้า และเลยเข้าไปในบริเวณที่ไม่มีสนามไฟฟ้าภายในแอโนดทรงกระบอก ขณะที่ถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าจะเกิดการควงเนื่องจากถูกแรงอันเกิดจากสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากกับระนาบของทิศสนามแม่เหล็กกับความเร็วของอิเล็กตรอน เนื่องจากภายในมีกาซไฮโดรเจนอิเล็กตรอนปฐมภูมิจึงสูญเสียพลังงานส่วนหนึ่งในการไอออไนซ์กาซ และจะให้ไอออนชนิดบวกกับอิเล็กตรอนทุติยภูมิ จากนั้นอิเล็กตรอนปฐมภูมิจะเลยออกมาด้านตรงข้ามด้วยพลังงานที่น้อยกว่าตอนแรกที่เข้ามา และจะถูกสนามไฟฟ้าเนื่องจากคาโธดอีกด้านหนึ่งผลักกลับ จะเป็นเช่นนี้ไปจนอิเล็กตรอนปฐมภูมิมีพลังงานต่ำ และถูกนำพามายังแอโนดกลายเป็นกระแสในวงจรภายนอก ส่วนอิเล็กตรอนทุติยภูมิมีพลังงานต่ำจึงมีผลน้อยมากในการไอออไนซ์กาซ

ไอออนบวกที่สร้างขึ้นมาถูกบังคับไปตามแนวแกนโดยสนามแม่เหล็กภายนอก เมื่อเข้าใกล้คาโธดมันจะถูกเร่งตรงไปยังคาโธดและชนด้วยพลังงานหลายร้อยอิเล็กตรอนโวลต์ (eV) โดยผิวคาโธดที่เหมาะสมจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิขึ้นอีก ถ้าจำนวนอิเล็กตรอนทุติยภูมิเกิดขึ้นมากกว่าจำนวนไอออนที่สร้างต่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิ การดิสชาร์จจะกลายเป็นสะสมมากขึ้นและกระแสจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งจำกัดโดยวงจรภายนอกในที่สุด การดิสชาร์จ (discharge)

จะมีเสถียรภาพโดยปรากฏการณ์ดำเนินการด้วยตนเอง (self maintaining phenomenon) เป็นการสมดุลย์ของกระแสและโปเทนเชียลดร็อป (potential drop) ซึ่งก็คือจำนวนของไอออนต่ออิเล็กตรอนและอิเล็กตรอนต่อไอออนเท่ากัน ขณะที่ไอออนบวกกระทบคาโธดโดยเหตุที่ตรงกลางคาโธดมีช่องเล็กๆ อยู่ ดังนั้นจะมีไอออนบวกส่วนหนึ่งที่พุ่งออกมา ซึ่งจะถูกเร่งออกมาด้วยขั้วไฟฟ้าโพรบ ซึ่งเป็นส่วนที่ดึงไอออนออกมาจากแหล่งกำเนิด

แหล่งกำเนิดไอออนชนิดอิเล็กตรอนออสซิลเลชันนี้ จะให้อัตราส่วนของกระแสไอออนต่อกระแสอิเล็กตรอนในการดิสชาร์จ (discharge) ดีกว่าชนิดคาโธดร้อนและให้อัตราส่วนไอออนอะตอมต่อไอออนโมเลกุลมีค่าดีขึ้นโดยความหนาแน่นกระแส พบว่ามีอะตอมเป็นส่วนประกอบ 60 เปอร์เซนต์ ของไอออนทั้งหมดที่ออกมาจากแหล่งกำเนิด เนื่องจากเป็นคาโธดชนิดไม่มีไส้ ดังนั้นความร้อนในการดิสชาร์จ (discharge) สามารถควบคุมได้อย่างง่ายและได้ความหนาแน่นกระแสสูง นอกจากนี้อัตราการไหลของกาซที่ออกจากช่องคาโธดเล็กมีค่าน้อย คือ อยู่ในลำดับ 25 ลูก-บาศก์เซนติเมตรต่อชั่วโมงที่ เอ็น.ที.พี (N.T.P) ผลอันนี้จึงทำให้แหล่งกำเนิดไอออนชนิดอิเล็ก-ตรอนออสซิลเลชันไม่ต้องใช้สูบสุญญากาศที่แตกต่างกันบริเวณขั้วไฟฟ้าโพรบ (probe electrode) กับบริเวณคอลัมน์การเร่ง

จากการพัฒนาแหล่งกำเนิดไอออนชนิดนี้ พบว่าโลหะที่ใช้ในการทำขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมนั้น คือ อะลูมินัม (aluminum) และเบอร์ลิเลียม (beryllium) เนื่องจากโลหะชนิดอื่นทำให้เกิดออกไซด์ฟิลม์ (oxicle film) ขึ้นและไม่กลับสู่สภาพเดิมได้ง่าย [2,3]

2.2 ส่วนนำไอออนออกจากแหล่งกำเนิด

ส่วนนี้นับว่าเป็นส่วนสำคัญอีกส่วนหนึ่งของเครื่องกำเนิดไอออน เพราะหากว่าสร้างไอออนขึ้นมาแล้ว หากไม่สามารถนำไอออนออกมาจากแหล่งกำเนิดได้ก็ใช้ประโยชน์ไม่ได้หรือถ้าดึงไอออนออกได้ไม่ดีก็ทำให้ได้ไอออนไม่เข้มพอเพียง ในการวิจัยนี้จะกล่าวถึงวิธีการดึงไอออนออกจากแหล่งกำเนิดแต่ละวิธีอย่างสั้นๆ ยกเว้นวิธีสุดท้ายซึ่งใช้ในการวิจัยนี้

2.2.1 เร่งไอออนออกจากแหล่งกำเนิดโดยสนามไฟฟ้าจากแผ่นช่องแคบ (slit - plate) วิธีนี้มักจะสร้างแผ่นช่องแคบวางขนานกันไว้ภายในแหล่งกำเนิด ดังรูปที่ 2.2 แล้วให้ความต่างศักย์เพื่อเกิดสนามไฟฟ้าในการเร่งไอออนออกมา

2.2.2 เร่งไอออนออกจากแหล่งกำเนิดโดยสนามไฟฟ้าระหว่างคาโธดและแอโนด วิธีนี้อาศัยสนามไฟฟ้าที่เกิดจากคาโธดและแอโนดของแหล่งกำเนิดไอออนโดยตรง เพื่อที่จะเร่งไอออนที่เกิดจากการดิสชาร์จ ส่วนจะเร่งไอออนบวกหรือไอออนลบออกขึ้นอยู่กับศักย์ที่ให้บนคาโธดและแอโนด

2.2.3 ดึงไอออนออกจากแหล่งกำเนิดด้วยขั้วไฟฟ้าไพรบ (probe electrode) วิธีนี้ใช้กันมากในเครื่องกำเนิดไอออน เพราะแหล่งกำเนิดไอออนหลายชนิดมักจะสร้างไอออนแล้วใช้วิธีการนำไอออนมารวมไว้ในบริเวณรูทางออกที่คาโธด ซึ่งเป็นทางออกของแหล่งกำเนิดไอออน ทำให้มีปัญหาของขีดจำกัดสเปซชาร์จ (space charge) ซึ่งมีกระแสของไอออนที่มีความเร็วต่ำมีค่าสูงและจะถูกดึงออกทางช่องเล็กๆ ที่คาโธด ดังนั้นขั้วไฟฟ้าที่จะใช้ดึงจึงมีลักษณะแหย่เข้าไปในคาโธด ดังรูป 2.4 ถึง 2.7 ซึ่งเรียกว่าขั้วไฟฟ้าไพรบ (probe electrode) โดยขั้วไฟฟ้าที่ต้องมีลักษณะที่เหมาะสมและปกติที่ใช้กันมีรูปร่างเป็นกรวยและวางในลักษณะแกนร่วมกันกับแหล่งกำเนิดโดยหันทางด้านปลายแหลมที่มีช่องเข้าไป ความต่างศักย์ที่ให้บนขั้วไฟฟ้าโพรบนี้จะเทียบกับแหล่งกำเนิดไอออน แต่ศักย์จะเป็นบวกหรือลบขึ้นอยู่กับการใช้งานว่าจะดึงไอออนประเภทใดที่เกิดจากแหล่งกำเนิด หลักการดึงไอออนนั้นเกิดจากสนามไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขั้วไฟฟ้าไพรบกับแหล่งกำเนิดไอออน [2]

2.3 <u>ส่วนไฟกัส</u> (focusing)

ส่วนไฟกัสนี้มีหน้าที่รวมลำไอออนที่ถูกเร่งออกมาจากแหล่งกำเนิดไอออนให้มีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของลำเล็กๆ ซึ่งก็คือมีความเข้มสูง เพราะการสร้างเครื่องเร่งอนุภาคต้องการลำไอออนที่ขนานโดยมีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กๆ (มีความเข้มมาก) ก่อนที่จะต่อเข้ากับคอลัมน์การเร่ง (accelerating column) การไฟกัสนั้นมีหลายวิธีที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับรูปร่างและเครื่องมือที่ใช้ สำหรับวิธีแรกจะกล่าวอย่างละเอียดกว่าวิธีอื่นเพราะเป็นวิธีที่ใช้ในการวิจัยนี้

2.3.1 การไฟกัสด้วยเลนส์ไฟฟ้าสถิต (focusing of an electrostatic lens) การศึกษาการไฟกัสลำไอออนตอนแรกๆ ส่วนใหญ่ได้จากการทดลองและการสังเกตคุณสมบัติของการไฟกัสของขั้วไฟฟ้าแบบต่างๆ เช่น รูปกรวย ทรงกระบอก และระนาบขนาดต่างๆ กันโดยมีหนึ่งช่วงหรือสองช่วง คุณสมบัติของเลนส์ไฟฟ้าสถิต (electrostatic lens) จะมีคุณภาพดีขนาดไหนขึ้นอยู่กับศักย์ที่ให้และพลังงานของลำไอออน ถ้าให้ศักย์ที่ขั้วอย่างเหมาะสม

008969

จะทำให้เกิดเลนส์ไฟฟ้าสถิต ซึ่งมีคุณสมบัติของการโฟกัสลำอนุภาคได้ดี ขั้วไฟฟ้าที่ออกแบบมาส่วนมากไม่ต้องการใช้กับศักย์สูงๆ ในการวิจัยนี้จะใช้คุณสมบัติของการโฟกัสด้วยเลนส์ไฟฟ้าสถิต ซึ่งจะกล่าวถึงขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการโฟกัสด้วยเลนส์ไฟฟ้าสถิต 2 แบบเท่านั้นคือ แบบไดอะแฟร์มวางขนานกัน ดังรูปที่ 2.8 และแบบทรงกระบอกวางเรียงกันโดยมีแกนร่วม ดังรูปที่ 2.9

ขั้วการโฟกัสทั้ง 2 แบบ หากคิดว่ามันมีค่าศักย์กระจายตามแกน Z มีค่า คือ

$$V(r = 0) = V_o(Z) \qquad 2.1$$

เมื่อศักย์นี้อ้างอิงกับจุดหนึ่งๆ ซึ่งพลังงานอนุภาคเป็นศูนย์ ดังนั้นการวัดความต่างศักย์ก็คือ การวัดพลังงานของอนุภาค ถ้าอนุภาคมีพลังงาน T จะได้ว่า พลังงาน $T = -V$

ค่าศักย์ (V) นี้เมื่อกระจายรอบๆ รัศมี $r = 0$ จะได้

$$V = V_o - \frac{r^2}{4}\frac{d^2V_o}{dZ^2} + \frac{r^4}{64}\frac{d^4V_o}{dZ^4} \qquad 2.2$$

จากฟังค์ชั่นศักย์นี้ จะใช้เทอมต้นๆ เท่านั้น เพราะเทอมหลังๆ มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับเทอมต้น และหาส่วนประกอบของสนามตามแนวรัศมีและสนามตามแนวแกนได้ดังนี้

$$E_Z = \frac{-dV_o}{dZ} \qquad 2.3$$

$$E_r = \frac{r}{2}\frac{d^2V_o}{dZ^2}$$

สมการการเคลื่อนที่ตามแนวรัศมี คือ $m\ddot{r} = eE_r$ ซึ่งเขียนใหม่เป็น

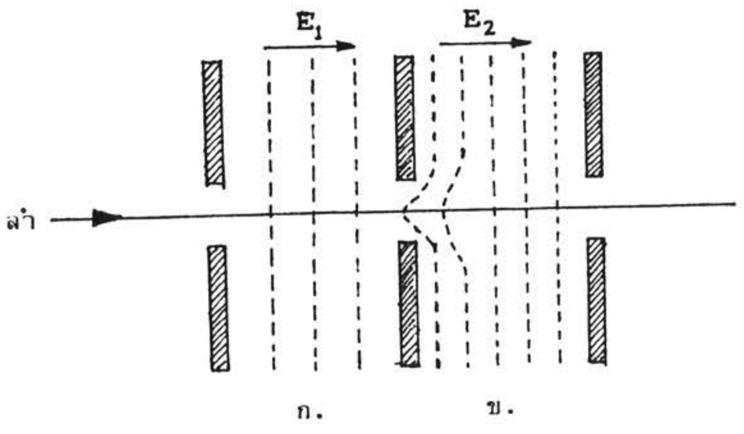
$$m\ddot{Z}\frac{dr}{dZ} + m\dot{Z}^2\frac{d^2r}{dZ^2} = eE_r \qquad 2.4$$

แต่ว่า $m\ddot{Z} = eE_Z = \frac{-edV_o}{dZ}$ และ $m\dot{Z}^2 = -2eV$ ดังนั้นสมการที่ 2.4 เขียนใหม่เป็น

$$Vr'' + \frac{V'r'}{2} + \frac{V''r}{4} = 0 \qquad 2.5$$

เมื่อไพรม (prime) บอกถึงดิฟเฟอเรนเชียลเทียบกับ Z สมการที่ 2.5 นี้เรียกว่า สมการรังสีขนานแกน (paraxial ray equation) คำตอบของสมการที่ 2.5 นี้จะขึ้นอยู่กับรูปร่างของขั้วการโฟกัส

ก. แบบไดอะแฟร่มวางขนานกัน



รูปที่ 2.8 แสดงไดอะแกรมเลนส์ช่องเปิด (aperture lens) แสดงถึงเส้นสมศักย์สำหรับ $E_2 > E_1$ ซึ่งเกิดจากขั้วไฟฟ้าแบบไดอะแฟร่ม

ขั้วการโฟกัสเช่นนี้ทำหน้าที่เป็นเลนส์ช่องเปิด ลำไอออนจะเดินทางจากบริเวณ ก. ซึ่งมีสนาม E_Z คงที่เท่ากับ E_1 ผ่านช่องเปิดอันกลางไปยังบริเวณ ข. ซึ่งมีค่า E_Z คงที่เท่ากับ E_2 การโฟกัสเกิดขึ้นในบริเวณรอบๆ ช่องเปิดอันกลาง ขอบเขตการโฟกัสสั้นและการขจัดตามแนวรัศมีของอนุภาคไม่เปลี่ยนแปลงมากนักขณะมันผ่านตลอดขอบเขตนี้ ในกรณีนี้เราจะเขียนสมการที่ 2.5 ให้เหมาะกับกรณีได้

$$\frac{d}{dZ}(r' V) + \frac{r^3}{4}\frac{d}{dZ}\left(\frac{V'}{r^2}\right) = 0 \qquad 2.6$$

โดยการพิจารณาว่า r คงที่โดยประมาณ ดังนั้นเมื่ออินทิเกรตความสัมพันธ์นี้จะได้

$$\left(r' V + \frac{rV'}{4}\right)_{final} = \left(r' V + \frac{rV'}{4}\right)_{initial} \qquad 2.7$$

ตอนแรกลำกำลังเดินทางขนานกับแกนจะได้ค่า r' เป็นศูนย์

$$\frac{1}{f} = -\left(\frac{r'}{r}\right)_{final} = \frac{V'_{final} - V'_{initial}}{4V} = \frac{E_2 - E_1}{4T} \quad 2.8$$

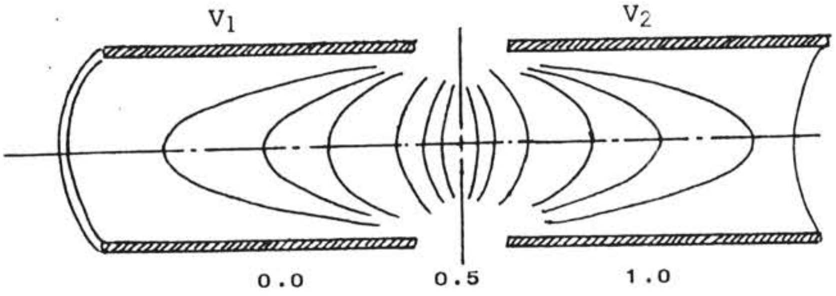
เมื่อ V เป็นศักย์ของไดอะแฟรมอันกลาง และ f คือ ความยาวโฟกัสของระบบ จากสมการที่ 2.8 แสดงว่า ในกรณีสนามการเร่ง ถ้าสนามไฟฟ้าที่ 2 มีค่ามากกว่าสนามไฟฟ้าที่ 1 เลนส์จะทำหน้าที่รวมลำ และถ้าสนามไฟฟ้าที่ 1 มีค่ามากกว่าสนามไฟฟ้าที่ 2 เลนส์กำลังทำหน้าที่กระจายลำ ในกรณีสนามการหน่วงจะกลับกัน

ข. แบบทรงกระบอกวางเรียงกันโดยมีแกนร่วมกัน เลนส์ไฟฟ้าสถิตจะเกิดขึ้นระหว่างขอบของทรงกระบอกด้านใกล้กัน ดังรูปที่ 2.10 และถ้าเขียนกราฟระหว่าง V, V' และ V'' กับแกนของระบบจะได้ดังรูปที่ 2.9 เนื่องจากว่าอนุภาคเดินทางจากบริเวณที่สนามเป็นศูนย์ผ่านเลนส์ และเข้าไปข้างในบริเวณที่มีสนามเป็นศูนย์อีก ในกรณีเช่นนี้สมการรังสีขนานแกน 2.5 เขียนได้เป็น

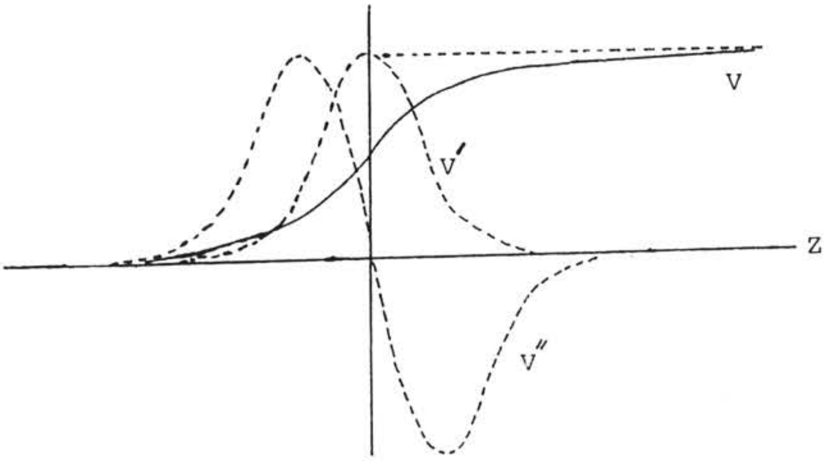
$$\frac{d}{dZ}(r' V^{1/4}) + \frac{1}{4}\frac{d}{dZ}(r V^{-3/4} V') + \frac{3}{16} r V'^2 V^{-7/4} = 0 \quad 2.9$$

เมื่ออินทิเกรตสมการที่ 2.9 นี้ระหว่างจุดเข้าและจุดออกตลอดเลนส์จะพบว่า เทอม V' เป็นศูนย์ ดังนั้นสมการจะเหลือ

$$(r' V^{1/4})_{final} - (r' V^{1/4})_{initial} = \frac{-3}{16}\int_{extrance}^{exit} r V'^2 V^{-7/4} dZ \quad 2.10$$



ก.



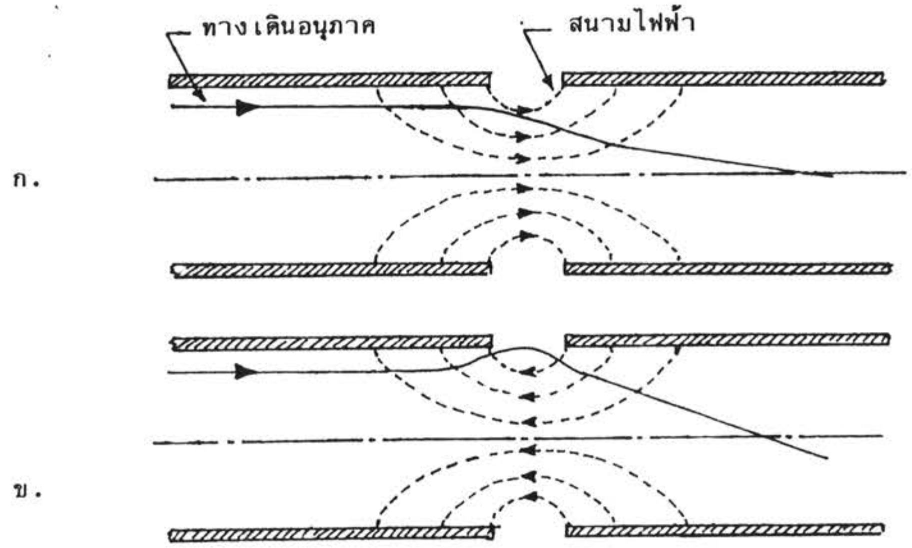
ข.

รูปที่ 2.9 ก) แสดงไดอะแกรมของเส้นสมศักย์ที่เกิดจากเลนส์ไฟฟ้าสถิต (ขั้วไฟฟ้าทรงกระบอก)
ข) แสดงไดอะแกรมของการเขียนกราฟ V, V′ , V″ กับระยะทางตามแกน Z ของเลนส์ไฟฟ้าสถิตที่เกิดจากขั้วไฟฟ้าทรงกระบอก

เหมือนเช่นกรณีแรก การขจัดในแนวรัศมี r จะไม่เปลี่ยนแปลงมากนักระหว่างทางผ่านโดยตลอดขอบเขตการโฟกัส ถ้า V_1 กับ V_2 ต่างกันไม่มากนักความต่างศักย์ระหว่างทรงกระบอกจะมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าสมบูรณ์ของ V ถ้าค่า r′ ตอนแรกเป็นศูนย์ สมการที่ 2.10 จะเขียนอย่างประมาณได้

$$\frac{1}{f} = \frac{-r'_{final}}{r_{initial}} \cong +\frac{3}{16}\left(\text{ค่าเฉลี่ยของ } \frac{V'^2}{V^2}\right) \qquad 2.11$$

ลักษณะทางเดินของอนุภาคตลอดเลนส์การเร่งและเลนส์การหน่วง แสดงดังรูปที่ 2.10 ก) และ 2.10 ข)



รูปที่ 2.10 ก) แสดงไดอะแกรมทางเดินของอนุภาคในเลนส์การเร่ง
ข) แสดงไดอะแกรมทางเดินของอนุภาคในเลนส์การหน่วง

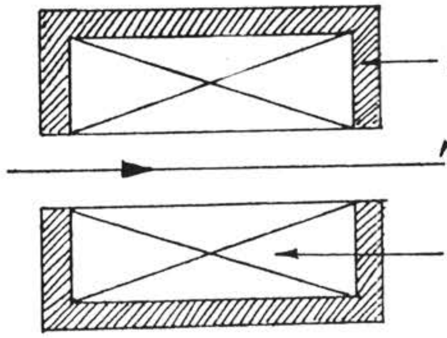
ในเลนส์การเร่ง (accelerating lens) สนามรอบๆ ช่องว่างจะบังคับอนุภาคไปทางด้านในขณะมันเข้าใกล้ช่องว่าง ที่บริเวณช่องว่างมันจะถูกเร่งและสนามตามแนวรัศมีซึ่งอ่อนกว่าตามแนวแกนจะผลักมันออก เนื่องจากความเร็วของอนุภาคสูงมากและสนามตามแนวรัศมีอ่อนกว่าสนามตามแนวแกน การผลักมันออกจึงมีผลน้อยมากเมื่อเทียบกับตอนเบนเข้าตอนเริ่มต้น ดังนั้นมันจะพุ่งออกจากเลนส์ด้วยความเร็วโดยมีความเร็วในแนวรัศมีที่เข้าทางด้านใน

ในเลนส์การหน่วง (decelerating lens) อนุภาคจะถูกดึงออกไปจากแกนขณะมันเข้าใกล้ช่องว่าง มันผ่านช่องว่างออกมาด้วยความเร็วที่ลดลงและเข้าไปในสนามการโฟกัสที่แรงกว่าตอนก่อนเข้า และมันจะออกจากเลนส์ด้วยความเร็วที่มีความเร็วในแนวรัศมี

ความยาวโฟกัสสำหรับเลนส์การเร่งและเลนส์การหน่วงจะแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย เนื่องจากทางเดินแตกต่างกันไม่มากนัก คุณสมบัติของเลนส์ไฟฟ้าสถิตที่เกิดจากขั้วทรงกระบอก 2 อัน จะมีคุณภาพดีขึ้นถ้านำตะแกรงตัวนำมาวางขวางที่ขอบหนึ่งของทรงกระบอก โดยจะเกิดสนามระหว่างตะแกรงตัวนำที่ถี่กับขั้วไฟฟ้าทรงกระบอก ซึ่งจะทำให้การโฟกัสมีระยะสั้นลงถึงครึ่งหนึ่งของระยะเดิม ถ้าเป็นเลนส์การเร่งจะวางตะแกรงตัวนำขวางที่ขอบทรงกระบอกอันที่ 2 และถ้าเป็นเลนส์การหน่วงจะวางตะแกรงตัวนำขวางที่ขอบทรงกระบอกอันที่ 1 ซึ่งทำให้

เลนส์มีการไฟกัสอย่างรุนแรง ตะแกรงตัวนำที่นำมาวางขวางขอบทรงกระบอกนั้นต้องเลือกความถี่ของตะแกรงให้เหมาะสมและดูการใช้งานด้วย เพราะถ้าเกิดถี่เกินไปแล้วจะทำให้ไปขวางลำอนุภาคทำให้ลดการผ่านของลำลง และถ้าห่างเกินไปก็ทำให้ผลการไฟกัสมีประสิทธิภาพน้อยลง โดยปกติลำที่ปรากฏออกมาหลังการไฟกัสนี้ โดยประมาณแล้วจะขนานกันและลำไอออนซึ่งเดิมมีเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 1 เซนติเมตร ที่ขั้วไฟฟ้าไพรบจะลดลงเหลือเพียง 1 หรือ 2 มิลลิเมตรเท่านั้น [2]

2.3.2 การไฟกัสโดยสนามแม่เหล็กตามแนวแกน (Focusing by axial magnetic fields) ลักษณะและรูปร่างของโครงสร้างซึ่งทำหน้าที่เป็นเลนส์การไฟกัสนี้ประกอบด้วยขดลวดโซลีนอยด์ โดยวางแกนร่วมกับลำอนุภาคและหุ้มด้วยเหล็กเพื่อลดการหักเหของสนามแม่เหล็กที่หักเหออกไปทางอื่น ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงไดอะแกรมภาคตัดขวางของเลนส์แม่เหล็กทรงกระบอกสำหรับการไฟกัสโดยสนามแม่เหล็กตามแนวแกน

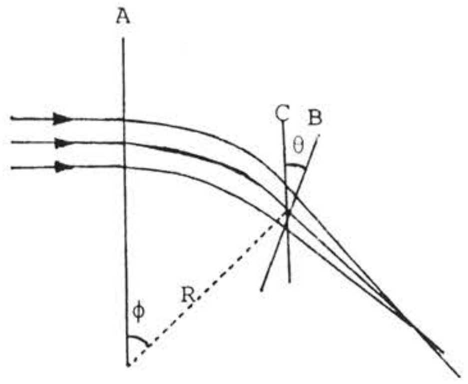
โดยทั่วๆ ไปแล้วสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะขนานกับแกน แต่จะมีสนามในแนวรัศมีบริเวณขอบของมันด้วย ถ้าลำอนุภาคที่เข้ามามีความเร็วในทิศทางตามแนวแกนกับตามแนวรัศมี ขณะที่ลำมาพบกับส่วนประกอบของสนามแม่เหล็กในแนวรัศมีที่ทางเข้า จะทำให้เกิดอัตรกิริยาระหว่างส่วนประกอบของสนามในแนวรัศมีกับความเร็วของอนุภาคทำให้ลำเกิดการเคลื่อนที่แบบสกรู และเมื่อเคลื่อนที่เข้าไปภายในโซลีนอยด์ความเร็วเชิงมุมและความเร็วในแนวรัศมีของการเคลื่อนที่แบบสกรูนี้จะเกิดอัตรกิริยากับสนามแม่เหล็กตามแนวแกนอีก ทำให้เกิดการเคลื่อนที่เป็นแบบก้นหอยรอบๆ แกนมากขึ้นไปอีก ในที่สุดจะมาพบสนามแม่เหล็กตามแนวรัศมีที่ทางออกทำให้เกิดอัตรกิริยา

กับความเร็วของอนุภาคในแนวแกนซึ่งเสริมการเคลื่อนที่แบบก้นหอย เพื่อพ้นจากสนามแม่เหล็ก ลำอนุภาคจึงมีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กลงมาก

เนื่องจากกลวิธีการโฟกัส ลำอนุภาคจะหมุนรอบแกนของมันขณะผ่านเลนส์ ถ้าลำไม่สมมาตรรอบแกนตอนเริ่มต้น ความไม่สมมาตรนี้จะทำให้ลำหมุนรอบแกนระหว่างกระบวนการโฟกัส แต่ถ้าลำสมมาตรรอบแกนตอนเริ่มต้น ผลอันนี้จะสังเกตได้หลังจากได้โฟกัสแล้วเท่านั้น

ถ้าสนามแม่เหล็กที่ใช้แรงมาก แรงรีสเทอร์ริ่ง (restoring force) จะแรงมาก และการขยายของลำในแนวรัศมีจะน้อยมาก แม้ว่าสเปซ-ชาร์จ (space charge) จะมีความหนาแน่นมาก ลำก็ยังถูกบังคับจากสนามตามแนวแกนที่กระจายอยู่ ซึ่งอันนี้เป็นกลวิธีที่ใช้ในแหล่งกำเนิดไอออนหลายๆ ชนิด (ดูหัวข้อ 2.1) เพื่อรักษาไอออนที่ได้จากการไอออไนซ์ [2]

2.3.3 การโฟกัสที่ขอบ (edge focusing) วิธีการนี้ใช้หลักที่ว่า เมื่อลำอนุภาคประจุเดินทางเข้าหรือออกจากสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขั้วและขอบของแม่เหล็กที่มีรูปทรงต่างๆ กัน จะมีผลต่อลำอนุภาคประจุนั้น ดังนั้นหากจัดขั้วและขอบของแท่งแม่เหล็กให้เหมาะสม สนามแม่เหล็กที่เกิดจากขั้วและขอบของแม่เหล็กอาจจะปฏิบัติตัวเป็นเลนส์ในการโฟกัสลำอนุภาคได้ ตัวอย่างอันหนึ่งที่ใช้การโฟกัสที่ขอบซึ่งพิจารณาได้ ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงไดอะแกรมของทางเดินของลำอนุภาคที่ขนานตอนต้นผ่านเลนส์การโฟกัสที่ขอบ

ถ้ามีลำอนุภาคที่มีประจุเดินทางในระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางของสนามแม่เหล็ก ลำอนุภาคที่ขนานกันนี้จะเข้าไปในขอบเขตของสนามแม่เหล็กซึ่งแสดงโดยเส้น A และเส้น B เนื่องจากส่วนบนมีฟลักซ์แม่เหล็กสูงกว่าส่วนล่าง ดังนั้นส่วนบนของลำอนุภาคจะเลี้ยวเบนไปมากกว่าส่วนล่าง และเมื่อพ้นออกมาจากขอบเขตสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดการโฟกัส แต่ถ้าหากสนามแม่เหล็กมีขอบเขตเป็นเส้น A และเส้น C จะทำให้ลำที่เลยจากขอบเขตออกมามีลักษณะขนานเหมือนเดิม แต่มีเส้นผ่าศูนย์กลางของลำลดลง [2]