หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

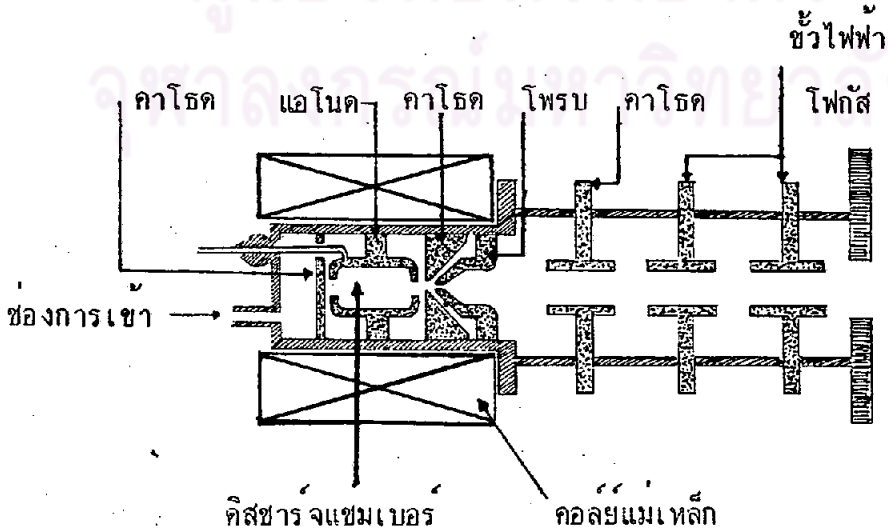
ส่วนประกอบของเครื่องเร่งโปรตอน

เครื่องเร่งโปรตอน ประกอบด้วยส่วนสำคัญดังนี้

1. แหล่งกำเนิดไอออน (ion source)
2. ส่วนนำไอออนออกจากแหล่งกำเนิด (probe)
3. ส่วนโฟกัสก่อนเข้าท่อเร่ง (focusing)
4. ส่วนท่อเร่ง (accelerating column)
5. ส่วนท่อลำโปรตอน (beam tube)

2.1 แหล่งกำเนิดไอออนแบบอิเล็กตรอนออสซิเลชัน (electron oscillation ion source)

ลักษณะแหล่งกำเนิดไอออนชนิดนี้ประกอบด้วยแอโนดทรงกระบอก (cylindrical anode) กลวงอยู่ระหว่างคาโธด (cathode) 2 อัน ทั้งหมดนี้อยู่ภายในหลอดแก้วบรรจุก๊าซไฮโดรเจนหรือก๊าซชนิดอื่นที่ต้องการศึกษาที่ความดันต่ำ และมีคอยล์สนามแม่เหล็ก (magnetic field coil) วางอยู่โดยมีแกนร่วมกับแอโนด ทรงกระบอก ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะของแหล่งกำเนิดไอออน, ขั้วไฟฟ้าโพรบ, ขั้วไฟฟ้าโฟกัส

เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าแก่คาโธด และแอโนด อิเล็กตรอนปฐมภูมิจะหลุดออกมาจากคาโธดแต่ละอัน ซึ่งจะถูกแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก แรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าจะทำให้อิเล็กตรอนปฐมภูมิเคลื่อนที่ด้วยความเร่งไปยังแอโนดทรงกระบอกในทิศทางตรงข้ามกับสนามไฟฟ้า และเลยเข้าไปในบริเวณที่ไม่มีสนามไฟฟ้าภายในแอโนดทรงกระบอก ขณะที่ถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าจะเกิดการควงเนื่องจากถูกแรงอันเกิดจากสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากกับระนาบของทิศสนามแม่เหล็กกับความเร็วของอิเล็กตรอน เนื่องจากภายในมีกาซไฮโดรเจนอิเล็กตรอนปฐมภูมิจึงสูญเสียพลังงานส่วนหนึ่งในการไอออไนซ์กาซ และจะให้ไอออนชนิดบวกกับอิเล็กตรอนทุติยภูมิ จากนั้นอิเล็กตรอนปฐมภูมิจะเลยออกมาด้านตรงข้ามด้วยพลังงานที่น้อยกว่าตอนแรกที่เข้ามา และจะถูกสนามไฟฟ้าเนื่องจากคาโธดอีกด้านหนึ่งผลักกลับ จะเป็นเช่นนี้ไปจนอิเล็กตรอนปฐมภูมิมีพลังงานต่ำ และถูกนำพามายังแอโนดกลายเป็นกระแสในวงจรภายนอก อิเล็กตรอนทุติยภูมิมีพลังงานต่ำจึงมีผลน้อยมากต่อการไอออไนซ์กาซ

ไอออนบวกที่สร้างขึ้นมาถูกบังคับไปตามแนวแกนโดยสนามแม่เหล็กภายนอก เมื่อเข้าใกล้คาโธดมันจะถูกเร่งตรงไปยังคาโธดและชนด้วยพลังงานหลายร้อยอิเล็กตรอนโวลต์ (eV) โดยผิวคาโธดที่เหมาะสมจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิขึ้นอีก ถ้าจำนวนอิเล็กตรอนทุติยภูมิเกิดขึ้นมากกว่าจำนวนไอออนที่สร้างต่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิ การดิสชาร์จจะกลายเป็นการสะสมขึ้นและกระแสจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งจำกัดโดยวงจรภายนอกในที่สุด การดิสชาร์จ (discharge) จะมีเสถียรภาพโดยปรากฏการณ์ดำเนินการด้วยตนเอง (self maintaining phenomenon) เป็นการสมดุลย์ของกระแสและความต่างศักย์ ซึ่ง ก็คือจำนวนของไอออนต่ออิเล็กตรอน และอิเล็กตรอนต่อไอออนเท่ากัน ขณะที่ไอออนบวกกระทบคาโธดโดยเหตุที่ตรงกลางคาโธดมีช่องเล็ก ๆ อยู่ ดังนั้นจะมีไอออนบวกส่วนหนึ่งที่พุ่งออกมาซึ่งจะถูกเร่งออกมาด้วยขั้วไฟฟ้าโพรบ ซึ่งเป็นส่วนที่ดึงไอออนออกมาจากแหล่งกำเนิดนั่นเอง

แหล่งกำเนิดไอออนชนิดอิเล็กตรอนออสซิลเลชันนี้ จะให้อัตราส่วนของกระแสไอออนต่อกระแสอิเล็กตรอนในการดิสชาร์จ (discharge) ดีกว่าชนิดคาโธดร้อนและให้อัตราส่วนไอออนอะตอมต่อไอออนโมเลกุลมีค่าดีขึ้น และยังพบว่ามีอะตอมเป็นส่วนประกอบ 40 เปอร์เซนต์ของไอออนทั้งหมดที่ออกมาจากแหล่งกำเนิด เนื่องจากเป็นคาโธดชนิดไม่มีไส้

ดังนั้นความร้อนในการดิสชาร์จ สามารถควบคุมได้อย่างง่าย และได้ความหนาแน่นกระแสสูง นอกจากนี้อัตราการไหลของกาซที่ออกจากช่องคาโธดเล็ก ๆ

มีค่าน้อย คือ อยู่ในลำดับ 25 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อชั่วโมงที่ เอ็น ที พี (N.T.P.) ผลอันนี้จึงทำให้แหล่งกำเนิดไอออนชนิดอิเล็กตรอนออสซิเลชั้นไม่ต้องใช้สูบสูญญากาศที่แตกต่างกัน (differential pumping) บริเวณขั้วไฟฟ้าโพรบ (probe electrode) กับบริเวณคอลัมน์การเร่ง

2.2 ส่วนนำไอออนออกจากแหล่งกำเนิด (probe)

เป็นส่วนดึงไอออนออกจากแหล่งกำเนิดด้วยขั้วไฟฟ้าโพรบ (probe electrode) ลักษณะของขั้วไฟฟ้าชนิดนี้จะทำให้มีลักษณะเป็นกรวยหัวตัดแหย่เข้าไปในคาโธด ดังรูปที่ 2.1 แต่ไม่สัมผัสกับขั้วไฟฟ้าคาโธดจะห่างกันประมาณ 1.1 เซนติเมตร โดยมีแกนร่วมกัน และตรงปลายกรวยหัวตัดที่แหย่เข้าไปจะมีรูเล็ก ๆ เพื่อให้ไอออนบวกที่เกิดที่แหล่งกำเนิดไหลผ่านออกมา ความต่างศักย์ที่ให้บนขั้วไฟฟ้าโพรบนี้จะเทียบกับแหล่งกำเนิดไอออน หลักการดึงไอออนนั้นเกิดจากสนามไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขั้วไฟฟ้าโพรบกับแหล่งกำเนิดไอออน (2)

2.3 ส่วนโฟกัส (focusing)

ส่วนโฟกัสนี้เป็นส่วนสำคัญมากในการเร่งอนุภาค เพราะว่าไอออนที่ถูกส่วนดึงออกมาจากแหล่งกำเนิดไอออนแล้วจะไม่เป็นลำที่เหมาะสมสำหรับการเร่งคือความเข้มของลำไอออนจะน้อยมาก ดังนั้น ก่อนที่ไอออนจะเข้าสู่ท่อเร่งอนุภาคนั้นจะต้องถูกขั้วไฟฟ้าโฟกัสทำการโฟกัสให้เป็นลำเล็ก ๆ และมีความเข้มสูง ๆ เพื่อที่จะเข้าสู่ท่อเร่งและถูกเร่งให้เป็นลำลักษณะเดิมตลอดแนวท่อเร่ง

การโฟกัสที่ขั้วไฟฟ้าโฟกัสกับขั้วไฟฟ้าโพรบมีความสัมพันธ์กันมาก (10) โดยที่ขั้วไฟฟ้าโฟกัสจะทำด้วยอลูมิเนียมทรงกระบอก 2 ขั้ววางเรียงกันโดยมีแกนร่วมกัน และลักษณะการโฟกัสและระยะโฟกัสนั้นจะเป็นไปตามสมการ

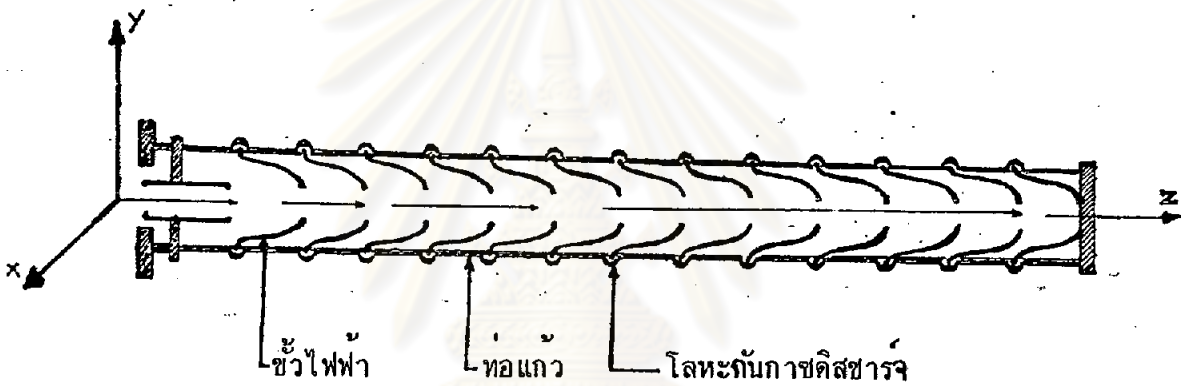
$$\frac{1}{f} = -\frac{r' \text{ หลัง}}{r \text{ ก่อน}} = \frac{3}{16}\left(\text{ค่าเฉลี่ยของ } \frac{V'^2}{V^2}\right) \qquad 2.1$$

ซึ่งรายละเอียดของการโฟกัสนี้จะกล่าวไว้ในบทที่ 3 การโฟกัสแบบนี้เป็นการโฟกัสด้วยท่อทรงกระบอกโดยใช้ศักย์ของไฟฟ้ากระแสตรงหรือเรียกว่า โฟกัสด้วยเลนส์ไฟฟ้าสถิต (focusing

of an electrostatic lens) ซึ่งแสดงในรูปที่ 1.1 และ 2.1

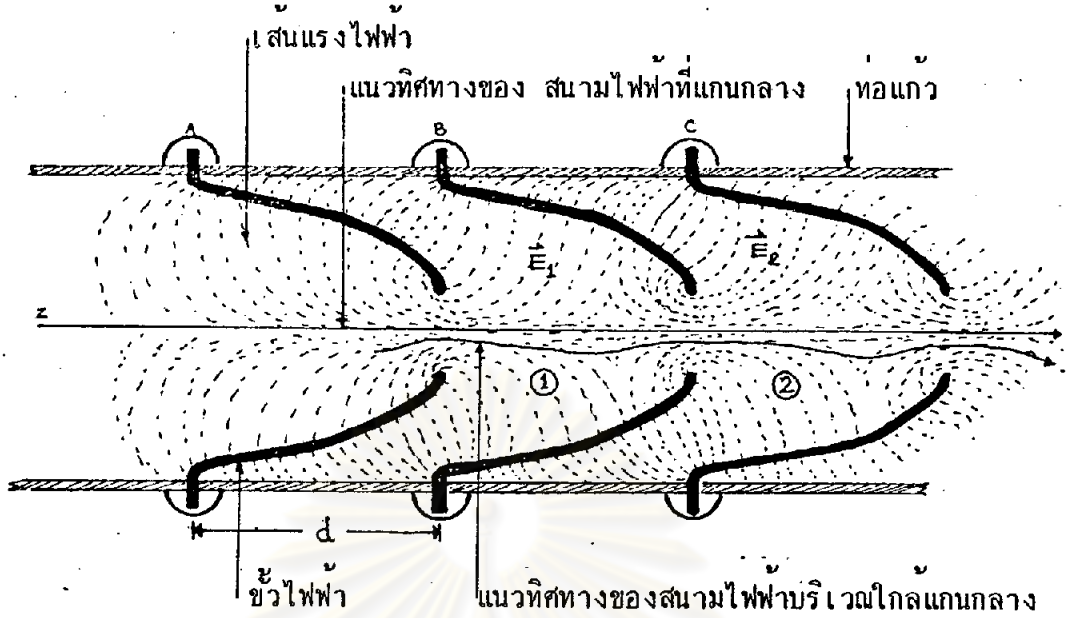
2.4 ส่วนท่อเร่ง (accelerating tube)

ท่อเร่งนี้มีความสำคัญมากต่อเครื่องเร่งอนุภาคเพราะว่าท่อเร่งนั้นจะต้องเป็นท่อที่มีความยาวหรือสั้นนั้นขึ้นอยู่กับการออกแบบของเครื่องเร่งอนุภาคว่าจะใช้เร่งอนุภาคในลักษณะใด (10) สำหรับท่อเร่งที่ออกแบบที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นลักษณะท่อตรงยาวตลอดแนวการเคลื่อนที่ของอนุภาค ทำด้วยท่อแก้วทรงกระบอกกลวงและจะคั้นไว้ด้วยขั้วไฟฟ้ามีลักษณะเป็นรูถ้วย (cup) ที่เจาะรูตรงกลางทำด้วยโลหะสเตนเลสส์ ดังรูปที่ 2.2

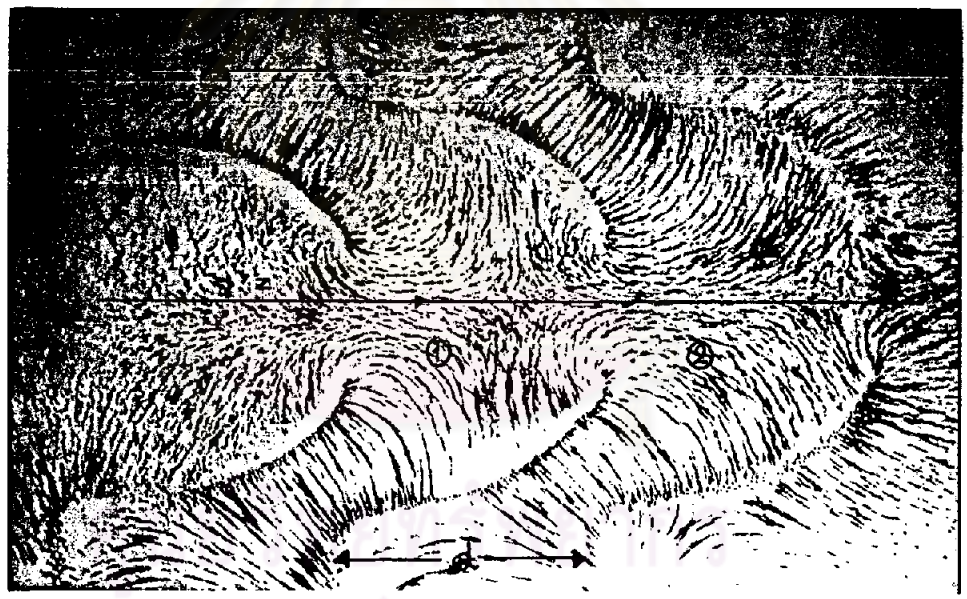


รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะส่วนประกอบของท่อเร่ง

ซึ่งขั้วไฟฟ้าลักษณะนี้จะมีลักษณะการเร่งอนุภาคให้ไปตามแนวแกน z คือจาก A ไปยัง B และ C ดังรูปที่ 2.3 ก. คล้าย ๆ กับขั้วไฟฟ้าชนิดไดอะแฟรม (4, 5) แต่ความโค้งของขั้วไฟฟ้าชนิดนี้จะทำให้มีสมบัติคล้าย ๆ กับขั้วไฟฟ้าแบบทรงกระบอก (4, 5) ดังนั้นจะเห็นว่าบริเวณใกล้กับแนวแกนกลาง (z) นั้นจะมีค่าสนามไฟฟ้าคงที่และขนานกับแนวแกนกลาง อาณาบริเวณระหว่างขั้วไฟฟ้าจะมีค่าสนามไฟฟ้าผ่านตลอดทำให้ลำของอนุภาคมีค่าความเข้มสูงมาก (1, 4, 5)



รูปที่ 2.3 (ก) (ข) แสดงเส้นสมศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าในท่อเร่ง



ลักษณะเกิดการเร่งของอนุภาคระหว่างขั้วไฟฟ้าภายในท่อเร่งนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 2.3 ก, ข ณ บริเวณ ① จะเกิดสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้า A กับ B และบริเวณแกน z นั้นค่าของสนามไฟฟ้าเกือบจะเป็นระเบียบ พิจารณาทิศทางของสนามไฟฟ้าระหว่าง A กับ B ถ้าต้องการจะเร่งอนุภาคให้เคลื่อนที่จาก A ไปยัง B แล้ว ค่าของศักย์ไฟฟ้าที่ B ต้องเป็นลบเมื่อเทียบกับ A ซึ่งเป็นลบต่ำกว่า เราถือว่าให้ A เป็นขั้วไฟฟ้าบวก เมื่ออนุภาคอยู่ในบริเวณ ① แล้วจะอยู่ในสนามไฟฟ้า $\vec{E}_1$ ซึ่งมีค่าแรงทางไฟฟ้าเท่ากับ

$$\vec{F}_1 = q\vec{E}_1 \qquad 2.2$$

และถ้าเทียบศักย์ระหว่าง B กับ A ณ บริเวณใกล้แนวแกน z แล้วจะได้

$$\vec{F}_1 = q\left(\frac{V_B - V_A}{d}\right)\hat{z} \qquad 2.3$$

โดยที่ q = ประจุของอนุภาค ถ้าเป็นบวกจะเคลื่อนที่จาก A ไปยัง B ตามแกนกลาง ถ้าเป็นลบก็จะเคลื่อนที่จาก B ไปยัง A

V_B ศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้า B, V_A ศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้า A, d ระยะเฉลี่ยระหว่างขั้วไฟฟ้า A, B

แต่เนื่องจากสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้า C กับ B นั้นจะมีค่า $\vec{E}_2 > \vec{E}_1$ อยู่แล้วทำให้บริเวณ ① และ ② มีค่าแรงทางไฟฟ้าต่างกันมาก คือแรงดึงอนุภาคที่มีประจุจากทั้ง 2 บริเวณจะเกิดแรงทางไฟฟ้าต่างกัน ซึ่งบริเวณ ② นั้นจะเกิดแรงเป็น

$$\vec{F}_2 = q\vec{E}_2 = q\left(\frac{V_C - V_B}{d}\right)\hat{z} \qquad 2.4$$

เมื่อเทียบแรงระหว่าง $\vec{F}_1$ ในสมการที่ 2.3 กับ 2.4 แล้วจะเห็นว่าถ้าค่าของแรง $\vec{F}_2 > \vec{F}_1$ แล้วอนุภาคบวกที่อยู่บริเวณ ① จะถูกแรงดึงด้วย $\vec{F}_2$ ให้เคลื่อนที่จากบริเวณที่ ① ไปยังบริเวณที่ ② ด้วยค่าของแรงทางไฟฟ้าเท่ากับ $\vec{F}_2 - \vec{F}_1$ จึงทำให้อนุภาคมีความเร็วสูงขึ้น ถือว่าเป็นการเร่ง (acceleration) และเมื่อขั้วไฟฟ้ามีต่อเนื่องกันไปเรื่อย ๆ อนุภาคก็จะถูกเร่งไปเรื่อย ๆ จนมีค่าพลังงานสูงขึ้นไปตามลำดับ และไปจนถึงช่วงการโฟกัสซึ่งอยู่ปลายสุดของท่อเร่ง ซึ่งต้องการให้ลำอนุภาคเป็นลำเล็ก ๆ และมีความเข้มสูงมากและอยู่ในแนวแกนกลางของท่อเร่ง

2.5 ส่วนท่อนำลำอนุภาค (beam tube)

ส่วนนี้จะอยู่ปลายสุดของท่อเร่ง ลักษณะเป็นท่อยาวทรงกระบอกที่หัวของท่อปิด-เปิดได้ ทั้งนี้เพื่อต้องการที่จะใส่ฉากเพื่อหาจุดโฟกัสที่ระยะต่าง ๆ และการวางเป้า (target)

ดังรูปที่ 2.4 ในช่วงนี้จะไม่ใช้เครื่องมือใด ๆ ในการโฟกัส เพราะว่าอนุภาคที่ออกมาจากท่อเร่งนั้น ซึ่งเมื่อขณะถูกเร่งไปด้วยก็จะถูกโฟกัสไปด้วย (4, 5, 10) ซึ่งจะเป็นไปตามสมการ

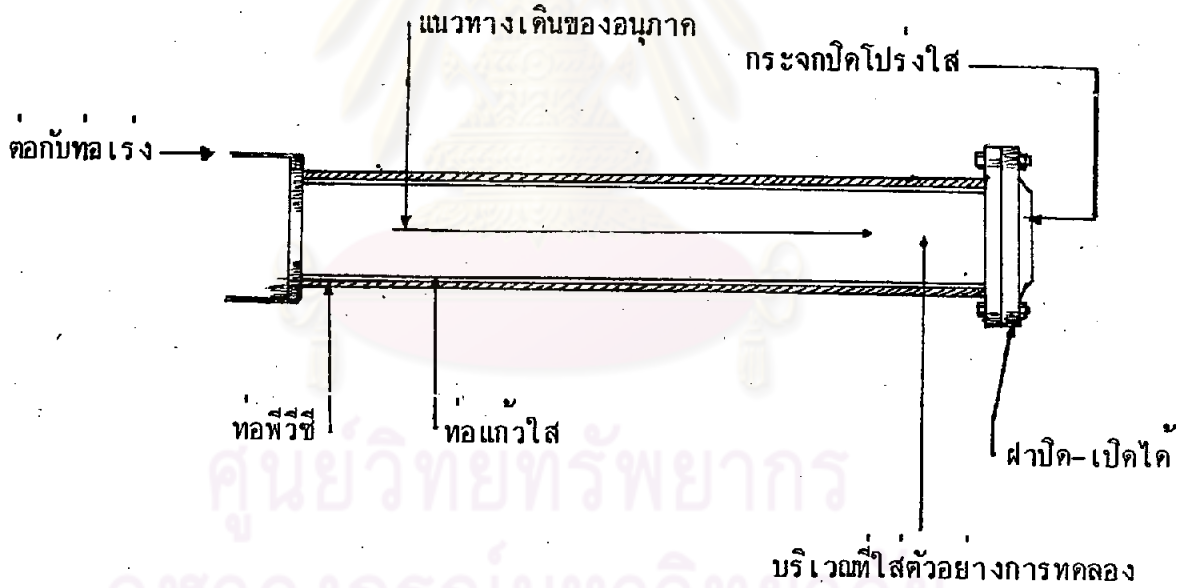
$$f = -\frac{r' \text{ หลัง}}{r \text{ ก่อน}} = \frac{4T}{E_2 - E_1} \qquad (2.5)$$

เมื่อ T พลังงานของอนุภาคเมื่อออกจากท่อเร่งโดยเทียบกับพลังงานของอนุภาคเป็นศูนย์

เมื่อก่อนเข้าท่อเร่ง

$\vec{E}_2 - \vec{E}_1$ เป็นค่าของสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าในท่อเร่งอนุภาค

หน้าที่ของส่วนนี้ที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือ ป้องกันมิให้ฉาก, เป้าและเครื่องวัดต่าง ๆ รับศักย์ไฟฟ้าแรงสูงอันจะทำให้เกิดอันตรายและเสียหายได้



รูปที่ 2.4 แสดงส่วนที่ลำโฟกัสผ่านปลายสุดของท่อนำลำอนุภาค (beam tube)

2.6 แหล่งกำเนิดไฟฟ้าความต่างศักย์สูง

ลักษณะการเร่งอนุภาคที่มีประจุทั่ว ๆ ไป จะต้องมีแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูงเพื่อใช้ในการดึงหรือผลักอนุภาคที่มีประจุให้มีค่าพลังงานสูงขึ้น การวิจัยนี้ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีศักย์สูงที่สร้างขึ้นเองเพื่อใช้กับการเร่งโปรตอนโดยเฉพาะโดยอาศัยหลักการของศักย์ไฟฟ้าทวีคูณ (Voltage multiplier) ซึ่งหลักการนี้เมื่อประกอบเป็นเครื่องมือจะประกอบด้วยส่วนสำคัญคือ

1. ตัวเก็บประจุ (condenser)
2. ตัวเรียงกระแส (rectifier)
3. หม้อแปลง (transformer)

การวิจัยนี้ตัวเก็บประจุได้สร้างขึ้นเองซึ่งสามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้สูงมาก เมื่อต่อเป็นวงจรดังรูปที่ 3.12 จะทำให้ได้ศักย์ไฟฟ้าที่ออกมามีค่าสูงมาก และในการสร้างขึ้นครั้งนี้สามารถทำให้ศักย์สูงขึ้นถึง 150 กิโลโวลต์ (kilovolts) ซึ่งรายละเอียดของหลักการและการทำงานพร้อมทั้งการใช้งานจริง ๆ จะกล่าวละเอียดในบทที่ 3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

013585