หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 วิวัฒนาการของเครื่องเร่งอนุภาคแบบเส้นตรง

เมื่อปี ค.ศ. 1919 รัทเธอร์ฟอร์ด (Rutherford) ได้ทำการทดลองโดยการใช้อนุภาคอัลฟา (alpha particle) ที่ได้จากการสลายตัวตามธรรมชาติของธาตุเรเดียม (radium) และทอเรียม (thorium) ซึ่งมีพลังงาน 5 - 8 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์เข้าชนกับนิวเคลียสของธาตุไนโตรเจน (nitrogen) ทำให้นิวเคลียสของไนโตรเจนเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ (nuclear reaction) และระยะนั้นนักฟิสิกส์เริ่มมีความรู้เกี่ยวกับเรื่องโครงสร้างของนิวเคลียสของอะตอมบ้างแล้ว จึงเริ่มมีความคิดที่จะเร่งอนุภาคที่มีประจุโดยใช้เครื่องเร่งอนุภาคเข้าชนนิวเคลียสของอะตอมเพื่อศึกษาโครงสร้างภายในอะตอมภายในห้องทดลอง และในช่วงปี ค.ศ. 1920 การพัฒนาเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ก็สามารถทำให้มีค่าพลังงาน 100 - 120 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์แล้ว แต่อย่างไรก็ตามการพัฒนาเครื่องเร่งในระยะนั้นก็มีปัญหาเกี่ยวกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูง เพราะว่ายิ่งทำให้ศักย์ไฟฟ้าให้สูงมาก ๆ จะมีการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าตามส่วนต่าง ๆ ของเครื่องมือมากขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในระยะนั้น เช่น ฉนวนและโลหะที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า (electrode)ยังไม่มีประสิทธิภาพดีพอ ทั้งนี้เนื่องจากมีการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (partial discharge) ขึ้นกับเครื่องมือที่ใช้ในการทำแหล่งกำเนิดไฟฟ้าความต่างศักย์สูงนั้น

ต่อมาปี ค.ศ. 1927 รัทเธอร์ฟอร์ด ได้ประกาศว่าเครื่องเร่งอนุภาคจะต้องสามารถสร้างขึ้นในห้องทดลองและสามารถทำให้อนุภาคมีค่าพลังงานสูงพอที่จะทำให้นิวเคลียสของธาตุแตกตัวออกได้เมื่อถูกอนุภาควิ่งเข้าชน

ในปี ค.ศ. 1928 กาโมว์ (Gamow) กับคอนดอน (Condon) และเกอร์เนย์ (Gurney) ก็สามารถอธิบายการทะลุผ่านชั้นพลังงานของนิวเคลียสโดยอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าได้ โดยอาศัยทฤษฎีกลศาสตร์ของคลื่นมาอธิบาย และเขายังบอกได้ว่าอนุภาคที่มีประจุนั้นถ้ามีค่าพลังงานเพียง 500 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ก็สามารถทำให้เกิดการแตกตัวของนิวเคลียสได้

ปี ค.ศ. 1932 คอคก์ครอฟท์และวอลตัน (Cockcroft and Walton) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ ก็สามารถสร้างเครื่องเร่งโปรตอนสำเร็จเป็นครั้งแรก ณ ห้องทดลองคาเวนดิช (Cavendish Laboratory) ของมหาวิทยาลัยเคมบริดจ์ และหลังจากนั้น Cockcroft และ Walton ได้ทำการทดลองยิงโปรตรอน (proton) ซึ่งมีประจุบวกที่มีพลังงาน 400 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์เข้าชนนิวเคลียสของธาตุลิเธียม (lithium) ได้สำเร็จเป็นครั้งแรก

หลังจากนั้น Cockcroft และ Walton ก็ได้ปรับปรุงเครื่องเร่งให้มีพลังงานของอนุภาคสูงขึ้นอีกเป็น 750 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์

ต่อมา Cockcroft และ Walton ได้มอบหมายให้บริษัทฟิลลิปส์ (Phillips) สร้างเครื่องเร่งโปรตอนให้มีค่าพลังงานสูงขึ้นอีกเป็น 1.25 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ (1.25 Mev)

ตั้งแต่นั้นเป็นต้นมาเครื่องเร่งอนุภาคก็ได้มีการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น และมีลักษณะแตกต่างกันออกไป ซึ่งแต่ละประเทศได้มีการปรับปรุงและพัฒนาให้มีค่าพลังงานสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนมีพลังงานถึง 400 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ และปัจจุบันนี้ยังคงมีการพัฒนากันต่อไปอีกอย่างไม่สิ้นสุด

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการสร้างและพัฒนาเครื่องเร่งอนุภาคด้วยตนเอง

1.2.2 เพื่อศึกษาทฤษฎีการโฟกัสลำอนุภาคที่มีประจุด้วยศักย์เลนส์ (potential lens)

1.2.3 เพื่อศึกษากระแสไฟฟ้าจากลำของอนุภาคที่ได้จากกาซไฮโดรเจน

1.2.4 เพื่อศึกษาแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงเพื่อเร่งโปรตอน

1.2.5 เพื่อศึกษาการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์โดยใช้เครื่องเร่งโปรตอน

1.3 วิธีดำเนินการวิจัยโดยย่อ

1.3.1 สร้างท่อเร่งแบบท่อตรง (linear accelerating column)

1.3.2 ปรับปรุงแหล่งกำเนิดไอออน ให้ไอออนที่ได้ออกมามีจำนวนโปรตอนมากขึ้น เพื่อที่จะทำการเร่งให้มีพลังงานสูงขึ้น

1.3.3 สร้างแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงเพื่อใช้เร่งโปรตอน

1.3.4 ทำการทดลองทางนิวเคลียร์โดยการเร่งโปรตอนไปชนกับนิวเคลียสของธาตุโบรอนที่ฉาบไว้บนฉากแล้วตรวจจับอนุภาคที่เกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์โดยใช้เครื่องวัดรังสีแกมมาประกอบกับเครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่อง

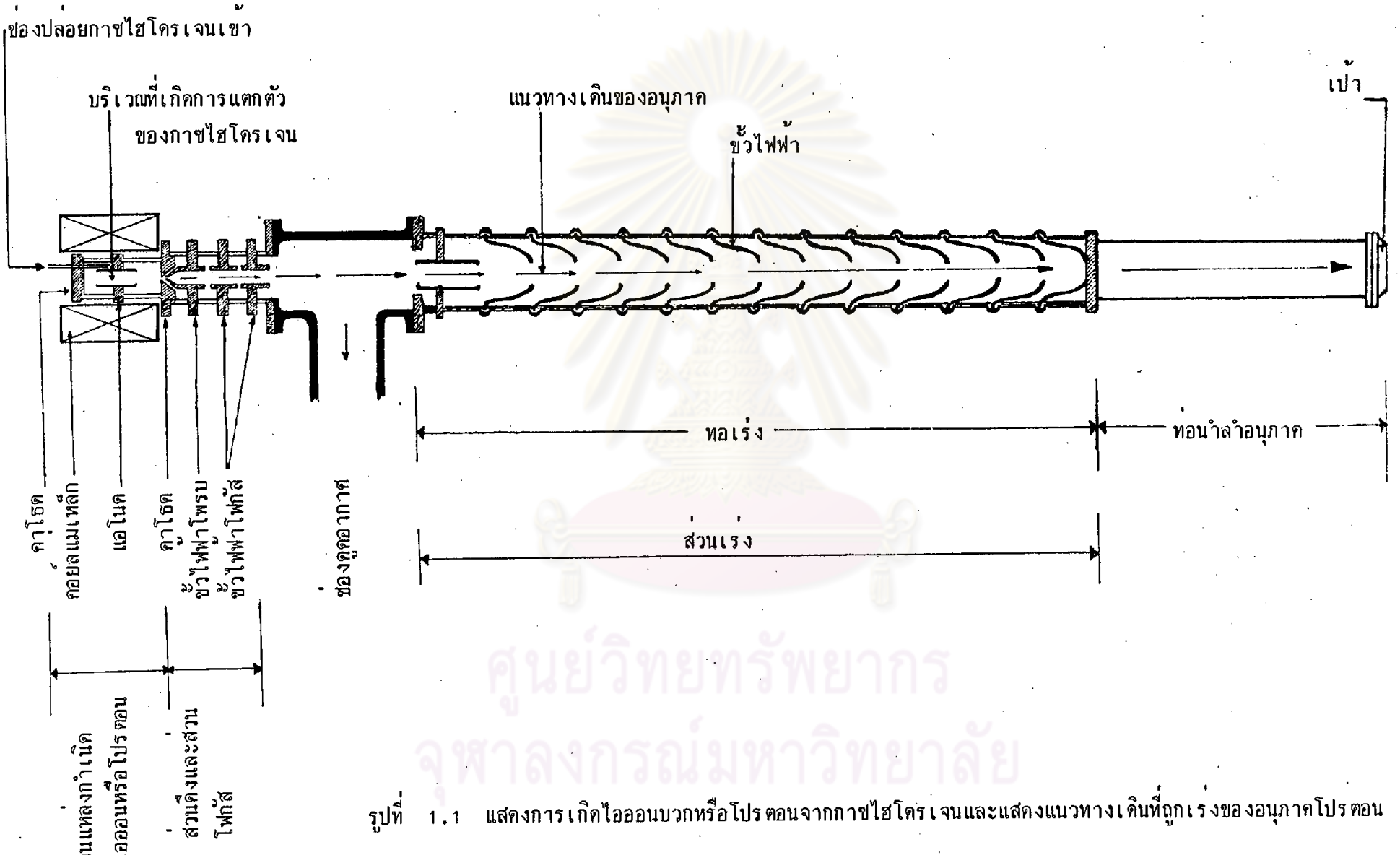
(γ-detector and multichannel analyzer)

1.4 ทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัยโดยย่อ

ไอออนที่สร้างขึ้นที่แหล่งกำเนิดไอออนชนิดอิเล็กตรอนออสซิเลชัน ซึ่งประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้าคาโธด (cathode) แอโนด (anode) ดังรูปที่ 1.1 และทำให้ศักย์ไฟฟ้าแก่แอโนด และคาโธด แล้วอิเล็กตรอนปฐมภูมิจะหลุดออกจากขั้วไฟฟ้าคาโธดแต่ละอัน ซึ่งจะถูกแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตามแนวแกน ตามสมการของแรงลอเรนซ์ (Lorentz's force)

$$\vec{F} = q\vec{E} + \frac{1}{c}(q\vec{V} \times \vec{B}) \qquad 1.1$$

แรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าจะทำให้อิเล็กตรอนปฐมภูมิเคลื่อนที่ด้วยความเร่งไปยังแอโนด ทรงกระบอกในทิศทางตรงข้ามกับสนามไฟฟ้าและเลยเข้าไปในบริเวณที่ไม่มีสนามไฟฟ้าภายในแอโนด ขณะที่ถูกเร่งสนามไฟฟ้าจะเกิดการควงเนื่องจากถูกแรงอันเนื่องจากภายในมีกาซไฮโดรเจน อิเล็กตรอนปฐมภูมิจึงสูญเสียพลังงานส่วนหนึ่งในการไอออไนซ์



รูปที่ 1.1 แสดงการเกิดไอออนบวกหรือโปรตอนจากกาซไฮโดรเจนและแสดงแนวทางเดินที่ถูกเร่งของอนุภาคโปรตอน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กาซ และจะทำให้เกิดไอออนบวก และอิเล็กตรอนทุติยภูมิขึ้น จากนั้นอิเล็กตรอนปฐมภูมิจะเลยออกมาด้านตรงข้ามด้วยพลังงานที่น้อยกว่าตอนแรก และจะถูกสนามไฟฟ้าเนื่องจากคาโธดอีกด้านหนึ่งผลักกลับไปกลับมาเป็นเช่นนี้เรื่อย ๆ จนทำให้อิเล็กตรอนมีค่าพลังงานต่ำลง และจะถูกนำพาไปยังแอโนด กลายเป็นกระแสภายในวงจรภายนอก ส่วนอิเล็กตรอนทุติยภูมิมีค่าพลังงานต่ำมากจึงมีผลน้อยมาก

ไอออนบวกที่ถูกสร้างขึ้นจะวิ่งเข้าหาขั้วไฟฟ้าโพรบ (probe) และตรงกลางของขั้วไฟฟ้าโพรบมีรูเล็ก ๆ สำหรับให้ไอออนบวกวิ่งผ่านออกมาได้ และถูกโฟกัสด้วยขั้วไฟฟ้าโฟกัสอีกครั้งหนึ่งก่อนจะเข้าสู่ท่อเร่ง

สำหรับท่อเร่ง (accelerating column) นั้น ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า (electrode) ที่มีลักษณะคล้ายถ้วยทำด้วยโลหะสเตนเลสส์ (stainless steel) วางเรียงกันโดยมีรูตรงกลางและคั่นด้วยท่อแก้วทรงกระบอก เมื่อไอออนเข้าสู่ท่อเร่งหลังจากได้ผ่านการโฟกัสมาแล้วจะทำให้ไอออนถูกเร่งขึ้นไปอีกโดยสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าที่ท่อเร่ง ซึ่งสนามไฟฟ้าบนท่อเร่งนี้จะเกิดจากศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าที่มีศักย์ต่างกันและเมื่อไอออนผ่านท่อเร่งแล้วจะถูกท่อเร่งทำการโฟกัสไปพร้อม ๆ กันด้วย ทำให้ลำไอออนมีขนาดเล็กมากและมีความเข้มสูงมาก

โดยหลักการของทฤษฎีทัศนศาสตร์ของอิเล็กตรอน (electron optics) ศักย์ที่กระจายตามแกน z กำหนดได้โดย $V(r = 0) = V_o(z)$ คิดว่าเทียบจุดหนึ่ง ๆ ที่อนุภาคมีค่าพลังงานเป็นศูนย์ ดังนั้นพลังงานของอนุภาคก็คือ V ถ้าอนุภาคมีค่าพลังงาน T จะได้ว่า $T = -V$ เมื่อกระจายศักย์รอบจุดกำเนิด ซึ่ง r ไม่เท่ากับศูนย์ จะได้

$$V = V_o - \frac{r^2 d^2 V_o}{4dz^2} + \frac{r^4}{64}\frac{d^4 V_o}{dz^4} - \ldots \qquad 1.2$$

จากสมมาตรการเคลื่อนที่ตามแนวรัศมีคือ $m\ddot{r} = e\vec{E}_r$ สามารถเขียนได้เป็น

$$m\ddot{z}\frac{dr}{dz} + mz^2\frac{d^2 r}{dz^2} = e\vec{E}_r \qquad 1.3$$

ดังนั้น

$$Vr'' + \frac{V'r'}{z} + \frac{V''r}{4} = 0 \qquad 1.4$$

สัญญลักษณ์ " ' " (Prime) หมายถึงดิฟเฟอเรนเชียลเทียบกับ z

ขอบเขตการโฟกัสเกิดขึ้นบริเวณช่องว่างขั้วไฟฟ้าทรงกระบอก และการขจัดตามแนวรัศมีของอนุภาคไม่เปลี่ยนแปลงมากนั้นขณะมันผ่านตลอดขอบเขตนี้ใน ในกรณีนี้สมการ (1.4) สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{dr'V^{\frac{1}{4}}}{dz} + \frac{1}{4}\frac{drV^{-\frac{3}{4}}}{dz} + \frac{3}{16} rV'^{2}\,V^{-7/4} = 0 \qquad 1.5$$

$$(r'V^{\frac{1}{4}})_{final} - (r'V^{\frac{1}{4}})_{initial} = -\frac{3}{16}\int_{entrance}^{exit} rV'^{2}\,V^{-7/4}\,dz \qquad 1.6$$

$$\frac{1}{f} = \frac{-r'_{final}}{r_{initial}} = +\frac{3}{16}\left(\text{avg. value of } \frac{V'^{2}}{V^{2}}\right) \qquad 1.7$$

โดยที่ f เป็นความยาวโฟกัส (focal length)

r'_{final} ดิฟเฟอเรนเชียลของรัศมีลำไอออนเทียบกับระยะทางในช่วงสุดท้าย

$r_{initial}$ เป็นรัศมีลำไอออนก่อนการโฟกัส

ดังนั้นถ้าหากลำอนุภาคเคลื่อนที่ผ่านเลนส์ไฟฟ้าสถิต (electrostatic lens) ในลักษณะที่เป็นทรงกระบอกจะถูกโฟกัสเป็นไปตามสมการ 1.7

ขอบเขตของการโฟกัสเกิดขึ้นบริเวณช่องว่างขั้วไฟฟ้าแบบไดอะแฟรม (diaphragm) ขอบเขตของการโฟกัสจะสั้นและการขจัดตามแนวรัศมีของอนุภาคไม่เปลี่ยนแปลงมานัก ในกรณีนี้เราจะเขียนสมการที่ 1.4 เป็น

$$\frac{d}{dz}(r'V) + \frac{r^{3}}{4}\frac{d}{dz}\left(\frac{V'}{r^{2}}\right) = 0 \qquad 1.8$$

โดยการพิจารณาว่า r คงที่โดยประมาณ ดังนั้น เมื่ออินทิเกรตความสัมพันธ์นี้จะได้เป็น

$$\left(r'V + \frac{rV'}{4}\right)_{final} = \left(r'V + \frac{rV'}{4}\right)_{initial} \quad 1.9$$

ในตอนแรกลำอนุภาคเคลื่อนที่ขนานกับแกน z จะได้ $r' = 0$ ดังนั้นจะได้

$$\frac{1}{f} = -\left(\frac{r'}{r}\right)_{final} = \frac{V'_{final} - V'_{initial}}{4V} = \frac{\vec{E}_2 - \vec{E}_1}{4T} \quad 1.10$$

ลักษณะการโฟกัสที่เป็นไปตามสมการ 1.10 นี้จะเกิดที่ท่อเร่งอนุภาค ซึ่ง $\vec{E}_1$, $\vec{E}_2$ ก็คือสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าในท่อเร่งอนุภาค T คือค่าของพลังงานของอนุภาคที่วิ่งตามแนวแกนกลางท่อเร่ง

จากหลักการนี้จึงนำเอามาสร้างท่อเร่งอนุภาคซึ่งอนุภาคที่เร่งนี้ส่วนมากจะเป็นโปรตอน (10)

1.5 <u>ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย</u>

1.5.1 ทำให้มีเครื่องเร่งโปรตอนขนาดศักย์ 150 กิโลโวลต์ ไว้ในห้องปฏิบัติการฟิสิกส์ และยังใช้ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาทางนิวเคลียร์โดยการยิงอนุภาคเข้าชนนิวเคลียสของธาตุได้

1.5.2 เป็นพื้นฐานการพัฒนาเทคโนโลยีของประเทศไทยทางด้านวิทยาศาสตร์โดยไม่ต้องซื้อเทคโนโลยีที่มีราคาแพงจากต่างประเทศ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย