

บทที่ 11
เครื่องเร่งอนุภาค
PARTICLE ACCELERATORS

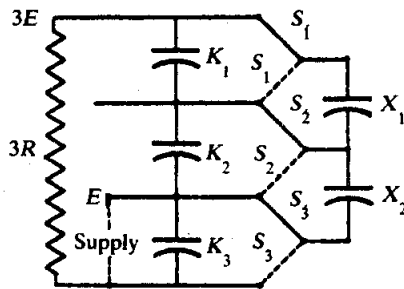
วัตถุประสงค์

เพื่อให้สามารถ

1. อธิบายการทำงานของเครื่องเร่งอนุภาคแบบต่างๆ ได้
2. เลือกใช้เครื่องเร่งอนุภาค เพื่อให้ได้อนุภาคที่จะให้รังสีเข้าชนเป้า มีความเร็วตามต้องการได้

11.1 เครื่องเร่งอนุภาคแบบคอกครอฟท์-วอลตัน (Cockcroft-Walton)

เจ.ดี. คอกครอฟท์ และ อี.ที. วอลตัน เป็นนักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ ได้สร้างเครื่องเร่งอนุภาค เรียกวจรคอกครอฟท์-วอลตัน ดังรูปที่ 11.1 โดยการให้ความต่างศักย์คงที่ ระหว่างหลอดร่อนที่ใช้เป็นต้นกำเนิดอิเล็กตรอน อาจใช้ท่อจ่ายประจุ (discharge tube) ที่บรรจุแก๊สไฮโดรเจน หรือดิวเทอเรียม หรือฮีเลียม เป็นต้นกำเนิดโปรตอน, ดิวเทรอน หรือ อนุภาคแอลฟา ปฏิกิริยาแรกที่เขาทำขึ้น คือ $\text{Li}^7(p,\alpha)\text{He}^4$

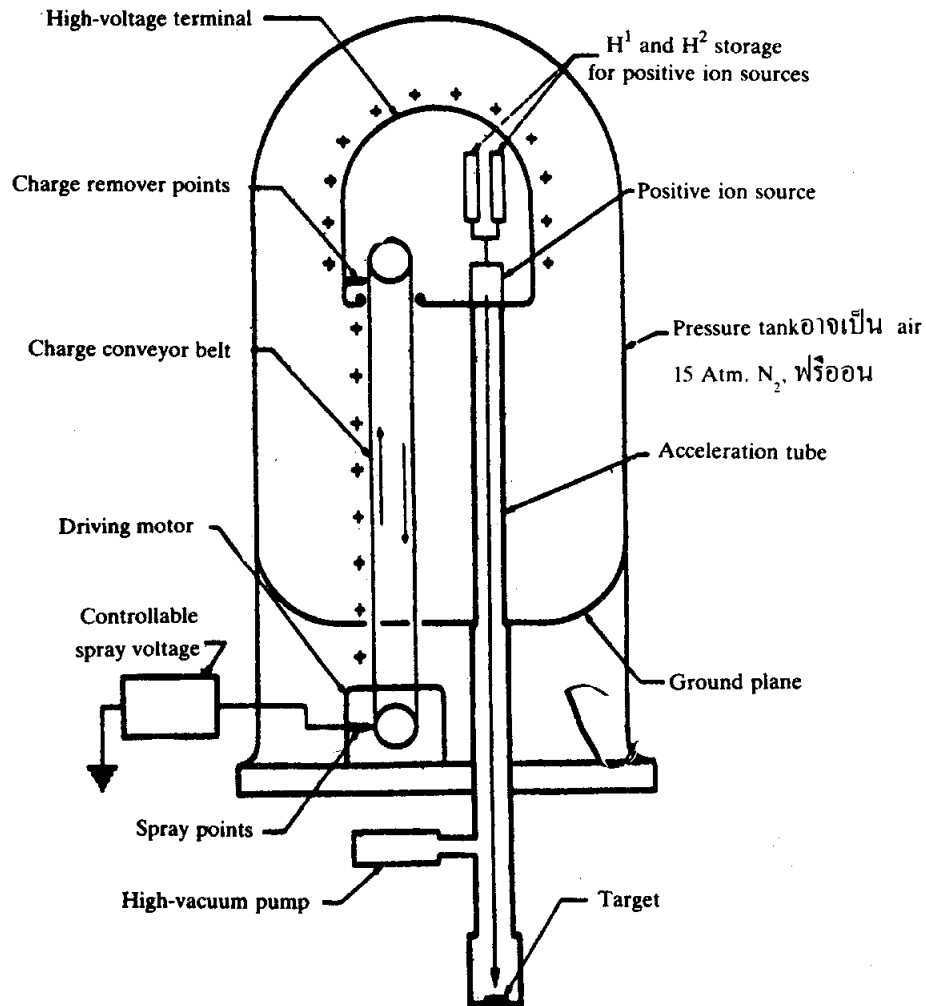


รูปที่ 11.1 แสดงหลักของคอกครอฟท์-วอลตัน กอนเดนเซอร์
เรกติไฟเออร์ โวลต์เตจ มัลติพลายเออร์

เครื่องมือประกอบด้วยเครื่องควบแน่น 3 ตัว คือ K_1, K_2, K_3 มีความจุแต่ละ C ต่อแบบอนุกรม K_3 ต่อกับตัวกำเนิด ความต่างศักย์ระหว่างปลายทั้งสองมีค่าคงที่ E ถ้า X_1, X_2 เป็นเครื่องควบแน่นที่ต่อกับ K_1, K_2 และ K_3 ตามเส้น S_1, S_2, S_3 (จุดไข่ปลา) เมื่อ X_1, X_2 ต่อกับ K_2 และ K_3 เครื่องควบแน่น X_2 จะถูกประจุจนมีความต่างศักย์ E , เมื่อสวิตช์ต่อตามเส้นที่ S_1, S_2, S_3 เครื่องควบแน่น X_2 จะแบ่งประจุให้กับเครื่องควบแน่น K_2 จนทั้งสองมีประจุ $E/2$, ถ้าเครื่องควบแน่นมีประจุเท่ากัน เมื่อกลับสวิตช์ เครื่องควบแน่น K_2 และ X_1 จะต่อกัน และมีศักดาเป็น $E/4$ ขณะเมื่อเครื่องควบแน่น X_2 ถ่ายประจุให้ E , เป็นไปเรื่อย ๆ โดยส่งประจุให้กับเครื่องควบแน่น จนมีความต่างศักย์ระหว่าง K_1, K_2 และ K_3 ที่ต่ออนุกรมเป็น $3E$ ยังมีเครื่องควบแน่นมากก็จะให้ความต่างศักย์ที่มีค่าคงที่สูงขึ้น เครื่องมือที่ใช้งานได้นั้นยุ่งยากกว่านี้มาก เขาใช้โวลต์เตจสลับ (alternating voltage) จากทรานส์ฟอร์มเมอร์และมีสวิตช์ ทำงานได้โดยใช้หลอดเรกติไฟเออร์สูญญากาศ โดยการใช้เครื่องขยายโวลต์ต่อเข้ากับท่อที่ใช้เร่ง เขาสามารถเร่งโปรตอนให้มีพลังงานได้ถึง 800 เกอวี ในปฏิกิริยา $H^2(d,n)H^3$ โดยใช้ดิวเทรอนที่ถูกเร่งจากเครื่องมือชนิดนี้ยังน้ำแข็งหนัก (heavy ice) จะได้นิวตรอนเร็วเป็นจำนวนมาก

11.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสถิตหรือเครื่องแวนเดอกราฟฟ์ (Electrostatic generator or Van de Graaff machine)

ตามรูปที่ 11.2 เป็นการเร่งประจุบวก โดยการใช้ศักย์บวกประมาณ 5,000 ถึง 20,000 โวลต์ (เทียบกับดิน) เป็นจุดจ่ายประจุ (spray point) เมื่อมีสนามไฟฟ้าสถิตสูง ทำให้อากาศบริเวณใกล้เคียงแตกตัวเป็นไอออน (บวกและลบ) จึงเกิดการผลัดประจุบวกออกจากจุดกำเนิด ผ่านไปตามสายพานทำด้วยไหม หรือสารที่ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้า ผ่านไปยังรอก รอก



รูปที่ 11.2 แสดงแผนผังของเครื่องกำเนิด แวน เดอ กราฟฟ์ ที่
ใช้เร่งประจุบวก

ตัวล่างหมุนด้วยมอเตอร์ ส่วนตัวบนอยู่เฉยๆ สายพานจะนำประจุบวกขึ้นไปข้างบน แล้วส่งประจุออกไป ประจุลบบวิ่งไปตามสายพานแล้วไปรวมกันที่จุดจ่ายประจุ เพื่อเป็นกลาง การถ่ายเทประจุจะทำต่อไปเรื่อย ๆ จนศักดาสูงขึ้น

อนุภาคที่ถูกเร่งจนมีพลังงานสูง (ทำได้สูงถึง 20 เมออีวี) จะวิ่งเข้าชนเป้า ใช้ศึกษาปฏิกิริยานิวเคลียร์ เครื่องมือนี้อาศัยเร่งอิเล็กตรอนได้ด้วย

11.3 ไซโคลตรอน (Cyclotron)

การให้ความต่างศักย์สูงโดยตรงนั้น จะต้องใช้ฉนวนอย่างดีเพื่อกันการจ่ายประจุ ในปี 1931 ลอเรนซ์และลิฟวิงสตัน (Lawrence and Livingston) จึงได้สร้างเครื่องมือ เรียกเครื่องเร่งที่ใช้เรโซแนนซ์แม่เหล็ก (magnetic resonance accelerator) หรือ ไซโคลตรอน ขึ้น

ไซโคลตรอน ประกอบด้วยโลหะรูปครึ่งวงกลม 2 ชั้น (ตามรูปที่ 11.3) เรียกดีส์ (dees) หรือ "D's" ตามรูปร่างของมัน อีออนที่เป็นตัวกำเนิดอยู่ตรงกลางของช่องว่าง (gap) ระหว่างดีส์ต่อดีส์ ไปยัง เรดิโอ ฟรีเควนซี ออสซิลเลเตอร์ (radio frequency oscillator) ทำให้เกิดศักย์สลับ มีความถี่สูงหลายล้านไซเคิลต่อวินาที ระหว่างดีส์ ทำหน้าที่เหมือนอิเล็กทรอนิกส์ โดยการเปลี่ยนแปลงศักดาบวกและลบอย่างรวดเร็ว ทำให้ทิศทางของสนามไฟฟ้าระหว่างช่องว่าง จะกลับกันตลอดเวลา มีฉนวนป้องกันสนามไฟฟ้าภายในช่องว่างของแต่ละดีส์ด้วย เครื่องมือนี้อยู่ในกล่องใหญ่บรรจุด้วยแก๊สความดันต่ำ

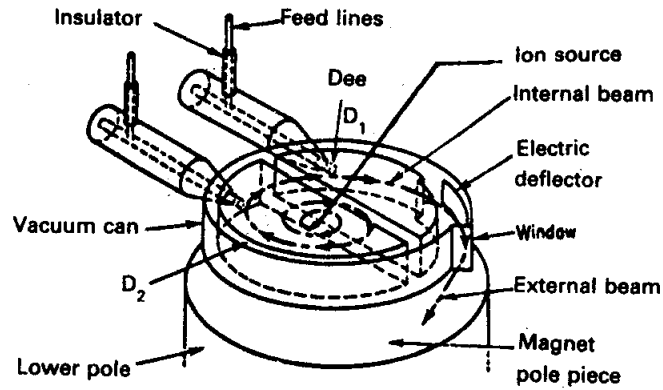
เมื่ออีออนประจุบวก q ส่งออกมาจากตัวกำเนิด ถูกเร่งผ่านสนามไฟฟ้า ระหว่างดีส์ มีสนามแม่เหล็กขนาดสม่ำเสมอ H กระทำเป็นมุมฉากกับระบบของดีส์ อีออนจะเคลื่อนที่เป็นวงกลมรัศมี r

$$r_1 = \frac{m v_1}{H q} \quad \dots (11.1)$$

เมื่อ m เป็นมวลของอีออน

v_1 เป็นความเร็วของอีออน

เมื่ออีออนอยู่ภายในดีส์ ความเร็วมีค่าคงที่ แต่เมื่อผ่านออกมาถึงช่องว่างที่มีความต่างศักย์ จะเป็นเวลาพอดีที่สนามไฟฟ้าเปลี่ยนทิศ อีออนจะถูกเร่งผ่านช่องว่างระหว่างดีส์ และเข้าไปในดีส์ที่สอง ด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้นเป็น v_2 , แล้ววิ่งเป็นรูปครึ่งวงกลมด้วยรัศมีใหญ่ขึ้นเป็น r_2 ภายในดีส์ที่สอง แล้วจึงโผล่ออกมาเพื่อผ่านช่องว่างอีก



รูปที่ 11.3 แผนผังแสดงหลักของไซโคลตรอน

ความเร็วเชิงมุมของอิเล็กตรอน คือ

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{Hq}{m} \quad \dots (11.2)$$

เมื่อ v เป็นความเร็วของอิเล็กตรอนในครึ่งวงกลมรัศมี r จะเห็นว่า ความเร็วเชิงมุม ไม่ขึ้นกับความเร็วของอิเล็กตรอน และรัศมีของวงกลมที่อนุภาควิ่ง แต่จะขึ้นกับความแรงของสนามแม่เหล็ก และอัตราส่วนระหว่างประจุต่อมวลของอิเล็กตรอน

เมื่อสนามไฟฟ้ากลับทิศ จะต้องเป็นเวลาพอดีที่อิเล็กตรอนวิ่งผ่านมาได้ครึ่งวงกลมพอดีทำได้โดยการปรับความถี่ และความแรงของสนามแม่เหล็กให้เหมาะสม

พลังงานของอิเล็กตรอน ที่ได้จากไซโคลตรอน คำนวณได้จากสมการการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก

$$Hqv = \frac{mv^2}{r} \quad \dots (11.3)$$

เมื่อ R เป็นรัศมีที่อนุภาควิ่งออกมาจากรอบวงกลม

H และ q ใช้หน่วยเป็น อีเอ็มยู

หลังจากที่ไอออนถูกเร่งแล้ว จะมีพลังงาน

$$qV = \frac{1}{2}mv^2 \quad \dots (11.4)$$

เมื่อ v เป็นความต่างศักย์ (อีเอ็มยู) ที่ไอออนถูกเร่ง

จากสมการ (11.3), นำค่า v แทนลงในสมการ (11.4), จะได้

$$v = \frac{1}{2}H^2R^2 \frac{q}{m} \quad \dots (11.5)$$

ถ้า q มีหน่วยเป็น อีเอสยู และ v มีหน่วยเป็น โวลต์ จะได้

$$\begin{aligned} v &= \frac{1}{2 \times 10^6} H^2 R^2 \frac{q}{m \text{ C}} \\ &= H^2 R^2 \frac{q}{m} (16.7 \times 10^{20}) \end{aligned} \quad \dots (11.6)$$

เมื่อ C เป็นความเร็วของแสง

$$\frac{q}{m} \text{ ของโปรตอน} = 2.87 \times 10^{14} \text{ อีเอสยู/กรัม}$$

ถ้าทราบ H, R จะหาค่าศักย์ (โวลต์) ที่ใช้กับแต่ละอนุภาคได้

ค่าของสนามแม่เหล็ก ต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับความถี่ที่เปลี่ยนแปลงระหว่างดีส์ด้วย เรียก เรโซแนนซ์ หมายความว่า เวลาที่ไอออนเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเชิงมุม ω ภายในครึ่งรอบของดีส์หนึ่ง จะต้องเท่ากับเวลาครึ่งหนึ่งของคาบ T ของความถี่ระหว่างดีส์ นั่นคือ

$$\frac{\pi}{\omega} = \frac{T}{2} \quad \dots (11.7)$$

ถ้า n คือความถี่

$$n = \frac{1}{T} = \frac{H}{2\pi} \frac{q}{m} \quad \dots (11.8)$$

สำหรับโปรตอน ถ้าใช้ความถี่ 10^7 ไซเคิล/วินาที จะต้องใช้สนามแม่เหล็กความแรง 6,500 เกาส์ และใช้ 13,000 เกาส์ สำหรับดิวเทรียม ถ้าแทนค่าลงในสมการ (11.6) และใช้รัศมี 30 ซม. ค่า V คือ 1.8 ล้านโวลต์ สำหรับโปรตอน และ 3.6 ล้านโวลต์สำหรับดิวเทรียม ถ้ารัศมีเป็น 2 เท่า ศักย์ที่ไอออนถูกเร่ง จะต้องเพิ่มขึ้นเป็น 4 เท่า

ศักย์ (โวลต์) ที่ใช้กับดีส์ไม่เกี่ยวข้องกับสมการ (11.6) ดังนั้น พลังงานของอนุภาคที่มีประจุ จึงไม่ขึ้นกับค่าโวลต์นี้ คือ เมื่อศักย์ต่ำ ไอออนจะต้องวิ่งหลายรอบ ก่อนจะวิ่งออกมาจากเส้นรอบวง จึงไม่จำเป็นต้องใช้โวลต์สูง

อนุภาคที่ถูกเร่งออกมาจะมีพลังงานสูง ต้องใช้ค่าสัมพัทธภาพ คือ

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{C^2}}}$$

เมื่อ m_0 คือมวลที่อยู่นิ่ง (rest mass)

ความเร็วเชิงมุมของอิเล็กตรอนจึงเป็น

$$\omega = H \frac{q}{m_0} \sqrt{1 - \left(\frac{v}{C}\right)^2} \quad \dots (11.9)$$

นอกจากเครื่องเร่งอนุภาคที่กล่าวมาแล้ว ยังมีเครื่องเร่งอนุภาคอีกมากมาย เช่น ซินโครไซโคลตรอน (Synchrocyclotron) จะใช้สนามแม่เหล็กมีค่าคงที่ และแปรเปลี่ยนความถี่ของสนามไฟฟ้า บางที่เรียก เอฟ-เอ็ม ซินโครตรอน (frequency-moderated (FM) cyclotron) อีกชนิดหนึ่งก็เป็นเครื่องเร่งอิเล็กตรอน เรียกเบตาตรอน (betatron) หรืออิเล็กตรอนซินโครตรอน (electron synchrotron) เครื่องมือชนิดนี้ พยายามเอาชนะค่าสัมพัทธภาพที่จะเกิดกับอิเล็กตรอนพลังงานสูง โดยการแปรเปลี่ยนสนามแม่เหล็ก ยังมีโปรตอนซินโครตรอน (proton synchrotron) มีหลักการคล้ายกับ อิเล็กตรอนซินโครตรอน นอกจากนี้ก็มีเครื่องเร่งแบบลิเนียร์ (linear accelerator) ซึ่งจะเร่งอนุภาคในช่วงพลังงานสูงกว่า 1 บีอีวี

สรุป

บทนี้พอจะสรุปได้ว่า ในการที่จะทำให้อนุภาคมีความเร็วสูง จำเป็นต้องเร่งอนุภาคเหล่านี้เพื่อวิ่งเข้าชนเป้าด้วยเครื่องเร่งอนุภาค สามารถพิจารณาได้ว่า ควรจะใช้เครื่องเร่งชนิดใด ซึ่งได้กล่าวถึงรายละเอียดของการทำงานของเครื่องเร่งอนุภาคแต่ละชนิดไว้แล้ว