บทที่ 6

การทดลองทางนิวเคลียร์ที่ 150 keV โดยใช้เครื่องเร่งโปรตอน และสรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการทดลอง

6.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทดลองทางนิวเคลียร์

6.1.1 ปฏิกิริยานิวเคลียร์ หมายถึงการที่นิวเคลียสหรือนิวคลีออนสองตัวเคลื่อนที่ผ่านแรงคูลอมบ์เข้ามาในระยะใกล้ ๆ กันภายในระยะของแรงนิวเคลียร์ อาจจะทำให้เกิดการจัดระเบียบเรียงตัวของนิวคลีออนภายในนิวเคลียสขึ้นใหม่ ผลที่ได้อาจเป็นหนึ่งนิวเคลียสหรือมากกว่าก็ได้ การเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์จะเกิดได้ภายในนิวเคลียสของธาตุเท่านั้น

โดยทั่วไปปฏิกิริยานิวเคลียร์เกิดจากการยิงนิวเคลียสซึ่งเป็นเป้าด้วยอนุภาคต่าง ๆ เช่น นิวตรอน โปรตอน หรือยิงด้วยนิวเคลียสเบา ๆ เช่น ดิวทีรอน หรืออนุภาคอัลฟา นอกจากนี้ยังสามารถใช้รังสีโฟตอน (photon) หรือแกมมายิงนิวเคลียสเพื่อให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ได้ ในปี พ.ศ. 2462 รัทเธอร์ฟอร์ด (Rutherford) เป็นผู้ทดลองปฏิกิริยานิวเคลียร์เป็นคนแรกโดยการใช้อนุภาคอัลฟา (alpha) ที่มีพลังงาน 7.68 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ (MeV) จากธาตุพอโลเนียม -214 ($_{84}Po^{214}$) ไปยังนิวเคลียสของไนโตรเจน -14 ผลที่ได้คือกาซออกซิเจนและโปรตอน ดังสมการ 6.1

$$ {}^{4}_{2}He + {}^{14}_{7}N \longrightarrow {}^{1}_{1}H + {}^{17}_{8}O \qquad 6.1 $$

ในปฏิกิริยานิวเคลียร์นั้น การเกิดปฏิกิริยาจะเป็นไปตามกฎที่สำคัญดังต่อไปนี้

1) หลักการคงตัวของประจุไฟฟ้า คือ ผลรวมของประจุไฟฟ้าก่อนเกิดปฏิกิริยาและหลังการเกิดปฏิกิริยาย่อมเท่ากัน คือ

$$ \Sigma Z_i = \Sigma Z_f \qquad (i = \text{ก่อน}, \quad f = \text{หลัง}) \qquad 6.2 $$

2) หลักการคงตัวของจำนวนนิวคลีออนทั้งหมด คือผลบวกของเลขมวลก่อนและหลังปฏิกิริยาย่อมมีค่าเท่ากัน

$$\Sigma A_i = \Sigma A_f \qquad 6.3$$

3) หลักการคงที่ของมวลและพลังงาน เนื่องจากมวลและพลังงานมีความสัมพันธ์กันตามทฤษฎีสัมพัทธภาพของไอน์สไตน์ จะใช้มวลหรือพลังงานคำนวณก็ได้โดยที่มวลสารและพลังงานทั้งหมดของระบบคงที่

4) หลักการคงตัวของโมเมนตัมเชิงเส้น $\Sigma P_i = \Sigma P_f$

5) หลักการคงตัวของโมเมนตัมเชิงมุม $\Sigma L_i = \Sigma L_f$

6.1.2 ประเภทของปฏิกิริยาทางนิวเคลียร์

เมื่ออนุภาควิ่งชนเป้าที่มีนิวเคลียสของสารอื่นอยู่จะมีการเกิดหลายสิ่งเกิดขึ้น กล่าวคืออนุภาคเดิมอาจจะหลุดออกมาด้วยพลังงานเท่าเดิมหรือพลังงานลดลง หรืออนุภาคนั้นจะถูกจับไว้ด้วยนิวเคลียสของเป้าก็ได้ ประเภทของปฏิกิริยานิวเคลียร์จะแบ่งได้ดังนี้

6.1.2.1 ปฏิกิริยาอนุภาคนิวเคลียร์และการกระเจิง (nuclear particle reaction and scattering) อนุภาคนิวเคลียร์ในที่นี้หมายถึงนิวคลีออน คือโปรตอนหรือนิวตรอน หรือนิวคลีไออื่น ๆ (nuclei) ที่ใช้ยิงเข้าไปชนเป้า เช่น อนุภาคแอลฟา ดิวทีรอน

เมื่ออนุภาคนิวเคลียร์เข้าไปใกล้หรือเข้าไปในนิวเคลียสของเป้าจะเกิดอันตรกิริยา (interact) กันขึ้น ถ้าอนุภาคที่ออกมาเหมือนเดิมคือเช่นเดียวกับตัวที่ยิงเข้าไปในนิวเคลียสครั้งแรก เราเรียกกระบวนการนี้ว่า การกระเจิง (scattering) ถ้าอนุภาคที่ออกมาต่างชนิดกันกับอนุภาคที่ยิงเข้าไปในนิวเคลียสครั้งแรกเรียกกระบวนการนี้ว่า ปฏิกิริยาของการเปลี่ยนสภาพ (reaction of transmutation) ทั้งนี้เนื่องจากนิวเคลียสที่เหลืออยู่นั้นกลายเป็นนิวเคลียสชนิดใหม่อยู่ในสถานะกระตุ้น จากนั้นจะสลายตัวให้รังสีแกมมาเพื่อที่จะกลับไปอยู่ในสถานะพื้นฐาน ตัวอย่างเช่น

$$P + {}^{26}_{12}Mg \longrightarrow {}^{26}_{12}Mg + P \quad \text{การกระเจิง (elastic scattering)} \qquad 6.4$$

$$\searrow \quad {}^{23}_{11}Na + {}^{4}_{2}He \quad \text{การเปลี่ยนสภาพ (inelastic scattering)}$$

6.5

$$P + {}^{11}_{8}B \longrightarrow B^{11}_{8} + P \quad \text{การกระเจิง} \qquad 6.6$$

โดยเขียนเป็นสัญญลักษณ์ได้ดังนี้

$${}^{26}_{12}Mg(P,P)^{26}_{12}Mg \qquad 6.7$$

$${}^{26}_{12}Mg\ (P,\alpha)^{23}_{11}Ma \qquad 6.8$$

6.1.2.2. เรดิเอทีปแคปเจอร์ (radiative capture) เมื่ออนุภาคโปรตอนหรือนิวตรอนที่มีพลังงานต่ำถูกจับไว้ภายในนิวเคลียสที่เป็นเป้า จะทำให้นิวเคลียสนั้นอยู่ในลักษณะกระตุ้นแทนที่จะทำให้อนุภาคอื่นหลุดออกมาจากนิวเคลียส นิวเคลียสนี้จะสลายตัวให้รังสีแกมมาออกมา กระบวนการนี้จึงเรียกว่า เรดิเอทีปแคปเจอร์ (radiative capture) ตัวอย่างเช่น

$${}^{27}_{12}Mg + P \longrightarrow {}^{28}_{13}Al + \gamma \qquad 6.9$$

$${}^{12}_{6}C + n \longrightarrow {}^{13}_{6}C + \gamma \qquad 6.10$$

6.1.2.3. โฟโตดิสอินติเกรชัน (photodisintegration) คือปฏิกิริยาที่ให้รังสีแกมมามาตกกระทบบนนิวเคลียสที่เป็นเป้า และพลังงานของรังสีแกมมานั้นสูงพอที่จะทำให้อนุภาคหนึ่งหรือหลายอนุภาคหลุดออกมาจากเป้า ตัวอย่างเช่น

$${}^{27}_{13}Al + \gamma \longrightarrow {}^{26}_{12}Mg + {}^{1}_{1}P \qquad 6.11$$

ซึ่งขบวนการโฟโตดิสอินติเกรชันนี้จะเป็นขบวนการที่ตรงกันข้ามกับขบวนการเรดิเอทิปแคปเจอร์

6.1.2.4 ฟิชชัน (fission) คือขบวนการที่ทำให้นิวเคลียสแตกตัวออกเป็นสองหรือสามส่วนที่มีขนาดไล่เลี่ยกัน ขบวนการนี้จะเกิดปฏิกิริยาที่รุนแรงมากและให้พลังงานออกมาสูงมากจะเกิดกับธาตุหนัก ๆ เช่น ยูเรเนียม ($_{92}U^{235}$) เช่น

$$^{235}_{92}U + n \longrightarrow ^{236}_{92}U^{*} \longrightarrow x + y + \text{นิวตรอน} \qquad 6.12$$

x และ y คือชิ้นส่วนที่เกิดจากฟิชชัน ทั้งนี้เนื่องจากเป็นส่วนของฟิชชันนี้ไม่ได้มีค่าหนึ่งค่าใดโดยเฉพาะ จึงต้องใช้สัญญลักษณ์ x และ y แทนรวมทั้งจำนวนของนิวตรอนที่เกิดขึ้นด้วย และจำนวนนิวตรอนก็จะมีค่าขึ้นอยู่กับ x และ y ด้วย ตัวอย่าง ฟิชชันที่แน่นอนบางอย่างที่เกิดขึ้นดังนี้

$$^{1}_{0}n + ^{235}_{92}U \longrightarrow ^{236}_{92}U^{*} \longrightarrow ^{144}_{56}B + ^{89}_{36}K + 3\,^{1}_{0}n + Q \qquad 6.13$$

$$^{1}_{0}n + ^{235}_{92}U \longrightarrow ^{236}_{92}U^{*} \longrightarrow ^{140}_{54}Xe + ^{94}_{38}Sr + 2\,^{1}_{0}n + Q \qquad 6.14$$

โดยที่ Q ที่ค่าพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาจากการเกิดปฏิกิริยา

6.1.2.5. ฟิวชัน (fusion) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากการรวมตัวของนิวเคลียสของธาตุเบาสองนิวเคลียส กลายเป็นนิวเคลียสของธาตุหนักหนึ่งนิวเคลียสและจะปล่อยค่าพลังงานออกมาอย่างมากมาย เช่น

$$^{1}_{1}H + ^{1}_{1}H \longrightarrow ^{2}_{1}H + {}_{1}e^{+} + 0.4 \text{ ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ (Mev)} \qquad 6.15$$

$$^{1}_{1}H + ^{2}_{1}H \longrightarrow ^{3}_{2}He + 5.5 \text{ ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ (MeV)} \qquad 6.16$$

$$^{3}_{2}He + ^{3}_{2}He \longrightarrow ^{4}_{2}He + 2\,^{1}_{1}He + 12.9 \text{ ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ (MeV)}$$

ซึ่งการเกิดตัวอย่างนี้เราเรียกว่า วัฏจักรของโปรตอน-โปรตอน คือเมื่อนิวเคลียสของไฮโดรเจน 4 ตัว มารวมกันเข้าจะได้อนุภาคอัลฟา 1 ตัว โปรตอน 2 ตัว และโปรสิตรอนอีก 2 ตัว พร้อมกับปล่อยค่าของพลังงานทั้งหมดในวัฏจักรอีก 24.7 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์

6.1.3 ปริมาณของพลังงานที่เกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียส (Q-values)

พลังงานของการเกิดปฏิกิริยาหรือเรียกว่าปริมาณ Q นั้นเราสามารถจะบอกได้อีกอย่างว่าปริมาณของ Q ของปฏิกิริยานิวเคลียสใด ๆ ก็คือความแตกต่างระหว่างผลรวมของมวลของอนุภาคก่อนเกิดปฏิกิริยากับหลังปฏิกิริยา ดังนั้นจากปฏิกิริยาที่เกิดจากการยิงอนุภาค (bombardment) เข้าไปบนเป้านั้นจะเขียนเป็นสมการเพื่อจะหาค่า Q ได้ดังนี้คือ

$$\Delta M = M + m - M' - m' \qquad 6.18$$

M, m เป็นมวลของธาตุและอนุภาคก่อนเกิดปฏิกิริยา

M', m' เป็นมวลของธาตุและอนุภาคหลังเกิดปฏิกิริยาแล้ว

ΔM เป็นผลต่างของมวลก่อนเกิดปฏิกิริยาและหลังปฏิกิริยา

และจากความสัมพันธ์ของมวลและพลังงานเราจะได้

$$E = Q = \Delta M \times C^2 \qquad 6.19$$

จากสมการที่ 6.18 และ 6.19 ถ้าค่าของ Q ออกมาเป็นบวก (+) แล้วแสดงว่ามวลก่อนปฏิกิริยามีการสลายตัวให้พลังงานออกมา เรียกว่าเป็นปฏิกิริยาคายพลังงาน (exothermal reaction or exoergic reaction) แต่ถ้าปฏิกิริยาใด ๆ ที่ทำให้มวลหลังปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้นแล้ว แสดงว่า Q เป็นค่าลบ (-) แสดงว่าพลังงานบางส่วนก่อนเกิดปฏิกิริยากลายเป็นมวลหลังปฏิกิริยา นั่นคือค่าพลังงานจะถูกดูดกลืน เรียกปฏิกิริยาเช่นนี้ว่าปฏิกิริยาดูดพลังงาน (enodothermic reaction or endoergic reaction) ส่วนค่า Q ที่ได้จากการสลายตัวตามธรรมชาติของธาตุที่นิวเคลียสไม่เสถียรนั้นจะมีค่าเป็นบวกเสมอ

6.1.4 ปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบเรดิเอทีปแคปเจอร์ (radiative capture)

ปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบเรดิเอทีปแคปเจอร์ (radiative capture nuclear process) นี้เกิดจากการที่ อนุภาคต่าง ๆ เช่น โปรตอน (proton) นิวตรอน (neutron) อัลฟา (alpha) ที่มีพลังงานสูง วิ่งเข้าชนนิวเคลียร์ของอะตอมของธาตุต่าง ๆ ที่อยู่นิ่ง หรือทำเป็นฉากบาง ๆ (thin layer) ไว้ ซึ่งบางทีการชนแบบนี้เราเรียกว่า การระดมยิง (bombardment) และถ้าการชนนี้เป็นการชนแบบไม่ยืดหยุ่นจะทำให้นิวเคลียร์ของอะตอมของธาตุที่เป็นเป้าหรือถูกชนนั้นจับ (capture) เอาอนุภาคนั้นไว้ แล้วจัดเรียงตัวนิวเคลียสของอะตอมของธาตุใหม่ขึ้นและจะทำให้มีพลังงานสูงขึ้นอยู่ในสภาวะโลด (exited state) และพอนิวเคลียสของอะตอมของธาตุที่เกิดใหม่จะกลับมาสู่สภาวะปกติ (normal state) แล้วจะมี 2 วิธีด้วยกันคือ

1. กลับลงมาสภาวะระดับพลังงานปกติ (normal state) โดยการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของโฟตอน (photon) เช่น แกมมาที่มีพลังงานสูงมาก และนิวเคลียสของอะตอมของธาตุนั้นก็ยังเป็นธาตุใหม่อย่างเดิม

2. กลับลงมาสภาวะระดับพลังงานปกติ (normal state) การกลับเป็นธาตุเดิมตอนก่อนถูกชนแต่มีไอโซโทป (isotope) เปลี่ยนไปและจะปล่อยอนุภาคอัลฟาและแกมมาออกมามีพลังงานสูงแต่น้อยกว่ากรณีแรก

สำหรับการเกิดขบวนการแบบเรดิเอทีปแคปเจอร์นี้ผู้ที่สังเกตและทดลองครั้งแรกคือ Cockcrof และ Walton นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษในปี ค.ศ. 1932 โดยการสังเกตจากการยิงโปรตอนเข้าไปชนกับนิวเคลียสของอะตอมของลิเธียม (Lithium) และหลังจากนั้น ปี ค.ศ. 1950 Bennet Roys และ Tappel ก็ได้สังเกตการเกิดขบวนการนี้จากการยิงอนุภาคอัลฟาเข้าไปชนนิวเคลียสของอะตอมของลิเธียม ดังสมการที่ 6.20

$$ {}_{3}Li^{7} + {}_{2}He^{4} \longrightarrow ({}_{5}B^{11})^{*} \longrightarrow {}_{5}B^{11} + h\nu \qquad 6.20 $$

6.1.5 การเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบเรดิเอทีปแคปเจอร์โดยใช้โปรตอน (proton capture)

ขบวนการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบเรดิเอทีปแคปเจอร์โดยใช้โปรตอนนี้ได้รับการสังเกตและทดลองครั้งแรกโดย Cockcroft และ Walton ในปี ค.ศ. 1932 โดยการเร่งโปรตอนจากนิวเคลียสของอะตอมของไฮโดรเจนให้ผ่านศักย์ไฟฟ้าขนาด 500,000 โวลต์ เข้าชนกับเป้า (target) ที่ฉาบไว้ด้วยลิเธียม จะทำให้เกิดอนุภาคอัลฟา (alpha particle) โดยสังเกตจากฉากเรืองแสง (fluorescent screen) การทดลองต่อมาได้ทำการทดลองซ้ำอีกโดย Dee และ Walton โดยใช้ห้องหมอกควันของวิลสัน (Wilson Cloud Chamber) เป็นเครื่องตรวจจับอนุภาคอัลฟานี้ การเกิดขบวนการลักษณะดังกล่าวนี้สามารถเขียนเป็นสมการทางนิวเคลียร์ได้ดังสมการที่ 6.21

$$ {}_3Li^7 + {}_1H^1 \longrightarrow ({}_4Be^8)^* \longrightarrow {}_2He^4 + {}_2He^4 + Q \qquad 6.21 $$

จะเห็นว่านิวเคลียสเชิงประกอบ (compound nucleus) ได้ถูกสร้างขึ้นโดยการจับเอาอนุภาคโปรตอนเข้าไปโดยนิวเคลียสของลิเธียมและหลังจากนั้นก็จะแตกตัวออกเป็นอนุภาคอัลฟา 2 ตัวที่แยดออกจากกันไปในทิศทางตรงกันข้าม ซึ่งแต่ละอนุภาคอัลฟาก็จะมีค่าพลังงาน 8.63 เม็กกะอิเล็กตรอนโวลต์ (MeV) ซึ่งสามารถทะลุผ่านไปในอากาศได้เพียง 8.31 เซนติเมตรเท่านั้น และค่าพลังงาน Q ที่ได้จะมีค่าพลังงานเท่ากับ 17.28 เม็กกะอิเล็กตรอนโวลต์ (MeV) ซึ่งหาได้จากสมการที่ 6.18 และ 6.19

และยังมีปฏิกิริยาบางอันที่น่าสนใจมากที่ใช้โปรตอนยิงเข้าไปชนนิวเคลียสของลิเธียมนี้ ซึ่งถ้าเราใช้โปรตอนที่มีค่าพลังงานสูงยิงเข้าไปในนิวเคลียสของลิเธียมที่มีไอโซโทปของมวลอะตอมเป็น 6 แล้วจะทำให้ขบวนการเรดิเอทีปแคปเจอร์เป็นไปตามสมการที่ 6.22

$$ {}_3Li^6 + {}_1H^1 \longrightarrow ({}_4Be^7)^* \longrightarrow {}_2He^4 + {}_2He^3 + Q \qquad 6.22 $$

ซึ่งจะเห็นว่าอะตอมของฮีเลียมทั้ง 2 นั้น อันหนึ่งมีเลขมวลเป็น 4 และอีกอันหนึ่งเป็น 3 ซึ่งจะเกิดขึ้นได้และผ่านไปในอากาศเพียง 0.8 เซนติเมตร และ 1.2 เซนติเมตร ตามลำดับ

เท่านั้น และค่าของ Q นั้นจะมีค่าเป็น 3.94 เม็กกะอิเล็กตรอนโวลต์ และจะมีปฏิกิริยาอีก 2 - 3 ปฏิกิริยาที่น่าสนใจ คือ

$$_5B^{11} + {}_1H^1 \longrightarrow ({}_6C^{12})^* \longrightarrow {}_4Be^8 + {}_2He^4 \qquad 6.23$$

$$_{11}Na^{23} + {}_1H^1 \longrightarrow ({}_{12}Mg^{24})^* \longrightarrow {}_{10}Ne^{20} + {}_2He^4 \qquad 6.24$$

$$_{17}Cl^{35} + {}_1H^1 \longrightarrow ({}_{18}A^{36})^* \longrightarrow {}_{16}S^{32} + {}_2He^4 \qquad 6.25$$

ปฏิกิริยาข้างบนทั้ง 3 นั้นจะเป็นปฏิกิริยาชนิดโปรตอน-อัลฟา (p-α reaction) ซึ่งจะเห็นว่าขั้นสุดท้ายจะให้อนุภาคอัลฟาออกมา

จากปฏิกิริยาทั้งหมดในสมการ 6.23 , 6.24 และ 6.25 นั้นไม่ได้เกิดจากปฏิกิริยาในรูปของโปรตอน-อัลฟาเสมอไป เพราะว่าในกรณีของเบอร์เลียม (beryllium) แล้วจะมี 2 ปฏิกิริยาที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งสามารถสังเกตุได้ กรณีแรกจะมีอนุภาคอัลฟาออกมาและในกรณีที่ 2 จะมีดิวเทอรอน (deuteron) ออกมาด้วย ซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาชนิดนี้ว่า ปฏิกิริยา โปรตอน-ดิวเทอรอน (p-d reaction) ดังสมการที่ 6.26 และ 6.27

$$_4Be^9 + {}_1H^1 \longrightarrow ({}_5B^{10})^* \longrightarrow {}_3Li^6 + {}_2He^4 \qquad 6.26$$

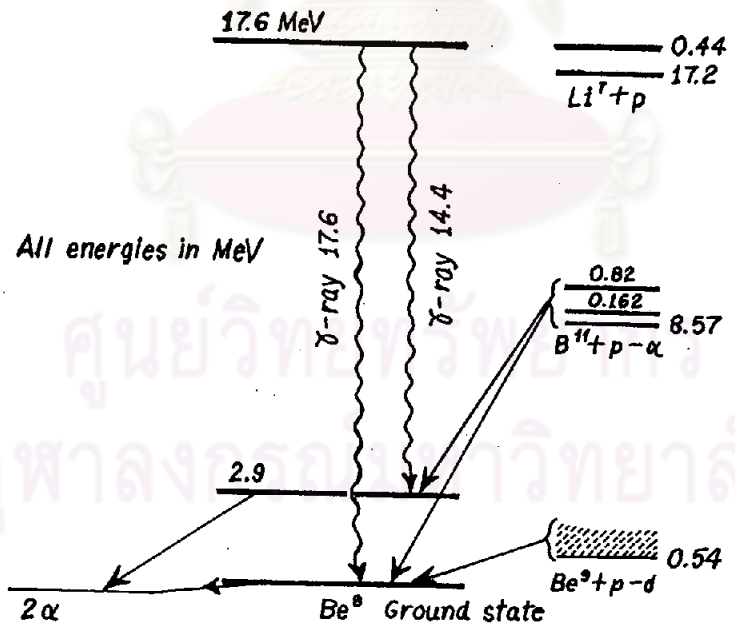
$$_4Be^9 + {}_1H^1 \longrightarrow ({}_5B^{10})^* \longrightarrow {}_4Be^8 + {}_1H^2 \qquad 6.27$$

รังสีแกมมาอาจจะสังเกตหรือตรวจวัดจากปฏิกิริยาที่เกิดจากการใช้โปรตอนยิงไปยังเป้าของธาตุต่าง ๆ ได้ บางกรณีนั้นรังสีแกมมาจะมีค่าของพลังงานสูงมาก ทั้งนี้เนื่องจากว่าโปรตอนที่ยิงเข้าไปนั้นถูกจับ (capture) ไว้โดยนิวเคลียสของอะตอมของธาตุที่เป็นเป้า และจะมีการจัดเรียงตัวนิวเคลียสใหม่ขึ้น ซึ่งจะอยู่ในสภาวะโลด (exited state) และนิวเคลียส

ใหม่นี้จะต้องกลับลงมาอยู่สภาวะปกติ (normal state) โดยการปล่อยพลังงานออกมาในรูปของรังสีแกมมา (gamma-ray) ขบวนการเกิดแบบนี้เรียกว่าเป็นปฏิกิริยาโปรตอน-แกมมา (proton-gamma reaction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่โปรตอนถูกจับ (proton capture) ปฏิกิริยานี้จะเป็นดังตัวอย่างสมการที่ 6.28

$$ {}_3Li^7 + {}_1H^1 \longrightarrow ({}_4Be^8)^* \longrightarrow {}_4Be^8 + h\nu \qquad 6.28 $$

จากสจากสมการที่ 6.28 นั้นจะเห็นว่าเมื่อ Lithium ถูกชนด้วยโปรตอนแล้วจะทำให้เกิดนิวเคลียสของเบอริเลียม อยู่ในสภาวะโลดและขณะที่เบอริเลียมกลับมาอยู่ในสภาวะปกติจะปล่อยค่าพลังงานออกมาในรูปของรังสีแกมมาที่มีค่าพลังงาน 17.6 เม็กกะอิเล็กตรอนโวลต์ เบอริเลียมกลับมาอยู่ในสภาวะปกติอีกกรณีหนึ่งแล้วโดยการปลดปล่อยอนุภาคอัลฟาออกมาด้วยจะให้ค่าพลังงานออกมามีค่า 14.4 เม็กกะอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งพลังงานส่วนหนึ่งจะอุลายไปเป็นพลังงานของอนุภาคอัลฟา ดังแสดงในรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 แสดงการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบเรดิเอทีปแคปเจอร์ โดย $B^{11}(p,\alpha)Be^8$, $Be^9(p\text{-}d)Be^9$ และ $Li^7(p,\gamma)Be^8$

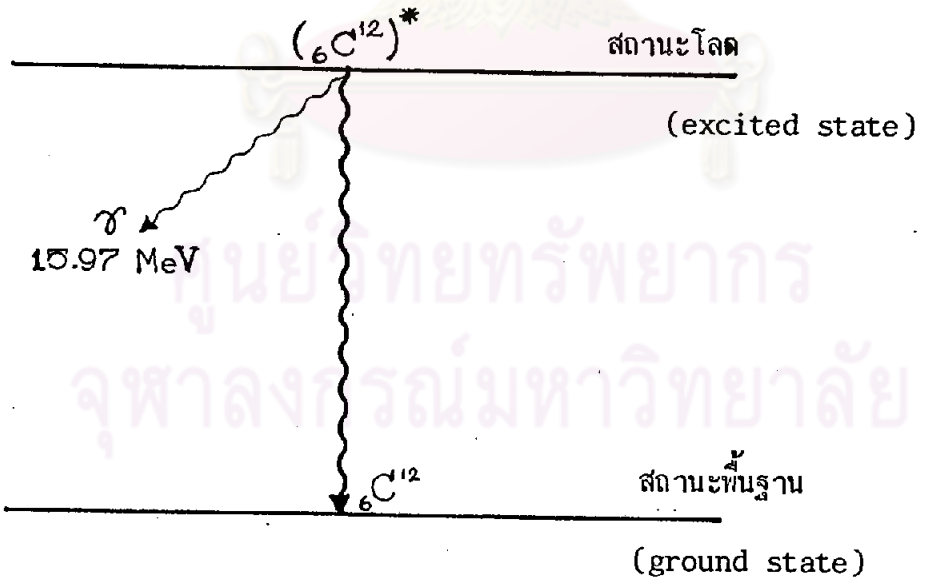
6.1.6 ปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดจากการชนของโปรตอนกับโบรอน $B^{11}(p,\gamma)C^{12}$

จากสมการที่ 6.23 เมื่อเราใช้ Boron เป็นเป้าและยิงด้วยอนุภาคโปรตอนที่มีพลังงานค่าหนึ่งแล้วจะทำให้ได้สมการการเกิดปฏิกิริยาเป็น

$$_5B^{11} + {}_1H^1 \longrightarrow (_6C^{12})^* \longrightarrow {}_6C^{12} + Q \qquad 6.29$$

ซึ่งจะเห็นว่าเกิดได้กรณีเดียวเท่านั้น

คือเมื่ออนุภาคโปรตอนเข้าชนกับนิวเคลียสของอะตอมของโบรอนทำให้นิวเคลียสของโบรอนจับ (capture) โปรตอนไว้แล้วนิวเคลียสของโบรอนจะจัดเรียงตัวใหม่เป็นนิวเคลียสอะตอมของคาร์บอน-12 ($_6C^{12}$) ซึ่งอยู่ในสภาวะโลด (exite) และขณะที่อะตอมของคาร์บอน-12 กลับลงมาอยู่ในสภาวะปกติจะมีการปล่อยพลังงานออกมา ซึ่งค่าพลังงานนี้หาได้จากสมการที่ 6.18 และ 6.19 มีค่าเท่ากับ 15.9 เม็กกะอิเล็กตรอนโวลต์ (MeV) ดังรูปที่ 6.2 และปฏิกิริยานี้สามารถเกิดได้แม้แต่เมื่อพลังงานจลน์ของโปรตอนที่เข้าชนประมาณ 162.5 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์เท่านั้น



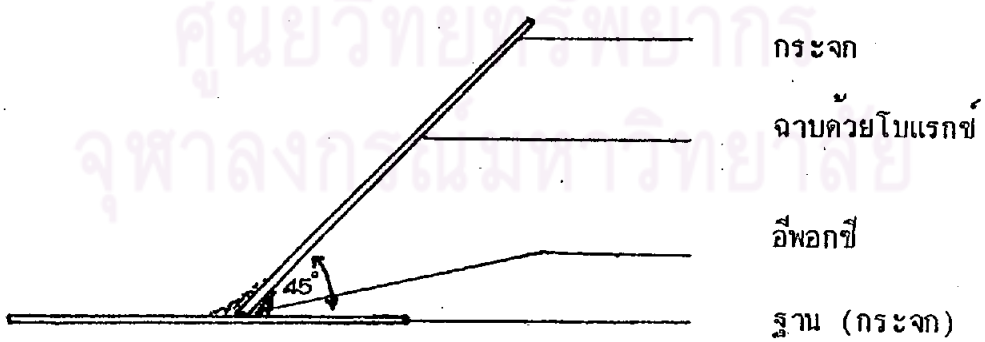
รูปที่ 6.2 แสดงอะตอมของคาร์บอน-12 กลับมาอยู่สถานะปกติปลดปล่อยพลังงานออกมา

ค่าพลังงานที่ปล่อยออกมานั้นจะอยู่ในรูปของรังสีแกมมาหรือโฟตอนที่มีค่าพลังงานสูง ซึ่งสามารถตรวจวัดได้

6.2 <u>การทดลองทางนิวเคลียร์เพื่อวัดค่าพลังงานของรังสีแกมมาที่ได้จากปฏิกิริยานิวเคลียร์</u>

โดยการทำเป้า (target) โดยใช้กระจกหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 6.3 วางไว้ที่ตำแหน่ง 20 เซนติเมตร จากปลายสุดของนำลำโปรตอนจากท่อเร่ง โดยเป้านั้นต้องฉาบด้วยสารประกอบโบแรกซ์ (borax) ซึ่งมีสารโบรอนเป็นส่วนประกอบ แล้วปิดระบบให้สนิท แล้วเริ่มสูบอากาศออกจากระบบให้ได้ประมาณ 2×10^{-6} มิลลิบาร์ เมื่อปล่อยก๊าซไฮโดรเจนเข้าแล้ว

และจากนั้นก็ติดตั้งระบบเครื่องตรวจวัดรังสีแกมมาโดยใช้หัววัดที่เป็นผลึกของโซเดียมไอโอไดด์ (NaI) ต่อเข้ากับเครื่องตรวจนับรังสีแกมมาชนิดหลายช่องและเครื่องวิเคราะห์หลายช่อง (multichannel analyzer) หลังจากนั้นก็จ่ายไฟฟ้าเข้าแหล่งกำเนิดไอออนให้ได้กระแสวงจรภายนอก 5 มิลลิแอมแปร์ และจ่ายไฟฟ้าเข้าขั้วไฟฟ้าโฟกัสและขั้วไฟฟ้าโพรบให้ได้ประมาณ 1500 โวลต์ และ 10 กิโลโวลต์ขึ้นไป เพื่อจะได้ลำโปรตอนออกมาให้ได้มากที่สุดและมีกระแสมากที่สุด หลังจากนั้นก็จ่ายไฟฟ้าเข้าท่อเร่งอนุภาคเพื่อเร่งโปรตอนโดยจ่ายไฟฟ้าให้ประมาณ 150 กิโลโวลต์ขึ้นไป หลังจากนั้นก็เปิดเครื่องนับและเครื่องตรวจจับรังสีแกมมาเพื่อหาค่าของพลังงานของรังสีแกมมาที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างโปรตอนกับโบรอน



รูปที่ 6.3 แสดงลักษณะของเป้าที่ใช้เคลือบสารในการทดลองทางนิวเคลียร์

จากการตรวจจับของเครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่อง (multichannel analyzer) นั้นจะได้ค่าต่าง ๆ ดังนี้

6.2.1 เมื่อตรวจนับที่ระดับพลังงาน 0 ถึง 6 เมกกะอิเล็กตรอนโวลต์ (MeV) จะได้จำนวนของอนุภาคต่อช่อง (channel) และค่าพลังงานจากน้อยไปหามาก ดังตาราง ที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 แสดงจำนวนอนุภาคแกมมาต่อช่องที่เครื่องวิเคราะห์รังสีแบบหลายช่องวัดได้

TAG NO. = 0 SERIES 40 V- 2.1 PAGE 1
MEMORY= 1/2 LIVE TIME= 100 TRUE TIME= 116 3 FEB 81 00:09

ENERGY(MEV)=+ 0.01147 * CH0+ 0.00000

ROI#	FROM MEV	TO MEV	INTEGRAL	AREA
1	0.011	5.859	1736892	1726672

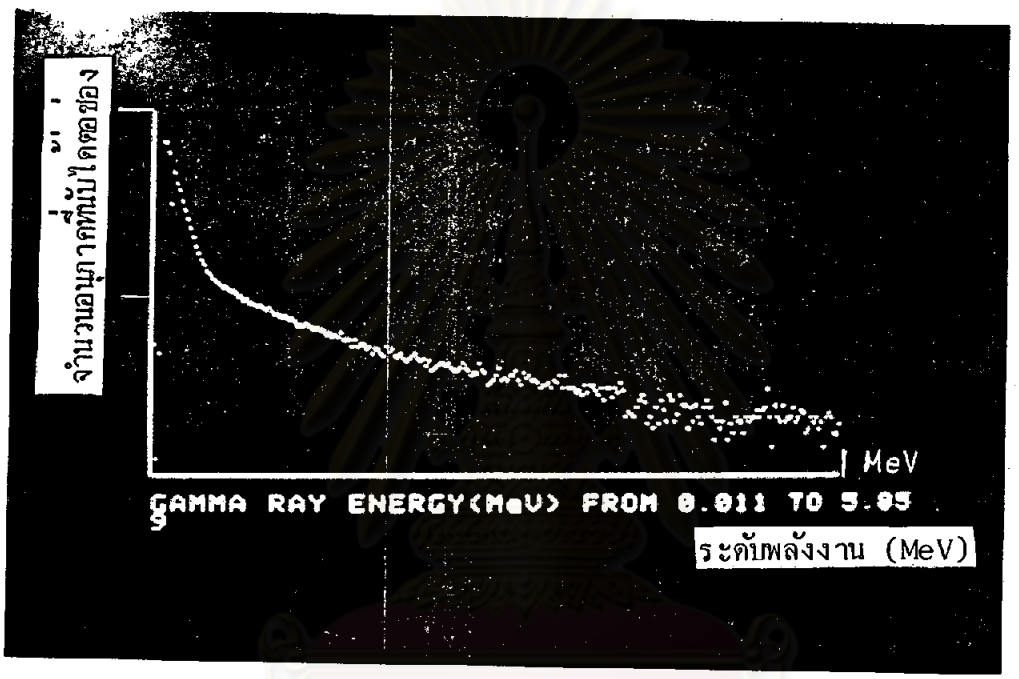
TAG NO. = 0 SERIES 40 V- 2.1 PAGE 2
MEMORY= 1/2 LIVE TIME= 100 TRUE TIME= 116 3 FEB 81 00:09

CHANNELS	DATA							
1	116	1	2	19	85	2709	200920	321356
9	203911	150386	128789	109403	91538	76609	64406	53778
17	41811	37822	30931	25967	21290	17920	15061	12579
25	10600	9062	7600	6433	5625	4719	4059	3522
33	3053	2702	2488	2178	2006	1846	1647	1480
41	1430	1321	1263	1227	1141	1087	1079	1056
49	979	945	893	857	910	887	849	800
57	774	805	751	721	659	645	627	589
65	554	558	580	535	518	497	506	499
73	460	462	449	416	446	449	412	394
81	393	374	410	360	343	319	327	352
89	334	364	305	318	311	299	273	311
97	280	269	289	265	251	242	216	231
105	221	225	212	221	236	225	213	212
113	203	222	197	202	202	204	188	185
121	183	166	161	195	170	187	141	138
129	151	143	145	155	168	123	129	134
137	133	145	127	118	102	121	133	134
145	105	110	108	100	107	122	96	109
153	105	89	82	103	92	94	91	97
161	78	90	72	86	101	86	87	79
169	95	72	73	91	76	57	79	72
177	69	69	61	72	67	64	72	67
185	81	70	67	58	63	52	69	55
193	53	54	60	56	45	60	50	47
201	51	64	56	46	55	69	54	49

TAG NO. = 0 SERIES 40 V- 2.1 PAGE 3
MEMORY= 1/2 LIVE TIME= 100 TRUE TIME= 116 3 FEB 81 00:13

CHANNEL#	DATA							
209	55	57	49	49	44	47	43	53
217	49	47	59	61	47	50	44	44
225	39	38	42	50	40	40	57	54
233	43	50	41	40	28	39	30	47
241	32	35	38	40	48	36	33	34
249	35	27	32	33	39	44	38	30
257	44	35	32	33	27	30	42	29
265	35	40	37	39	32	35	31	34
273	29	28	25	34	28	32	28	31
281	29	22	25	27	32	25	30	31
289	38	29	24	26	37	24	24	28
297	25	31	25	26	21	27	22	33
305	20	17	27	28	21	20	26	18
313	28	17	22	15	20	24	24	17
321	16	27	25	23	25	24	18	17
329	25	22	21	18	29	17	23	14
337	19	17	20	15	15	20	21	23
345	13	19	17	15	20	20	15	17
353	17	25	15	15	17	14	17	19
361	9	16	14	14	19	14	16	19
369	11	15	19	17	13	12	12	6
377	12	10	14	12	10	14	20	17
385	15	10	6	17	25	9	19	15
393	14	17	18	14	14	15	9	14
401	14	19	11	17	8	23	15	6
409	7	13	11	7	13	7	8	7
417	9	11	11	17	10	7	19	10
425	7	14	9	18	6	13	10	12
433	7	12	16	14	12	14	8	6
441	20	11	17	9	8	11	10	12
449	19	4	14	15	14	13	6	7
457	13	12	8	13	14	11	9	10
465	7	8	13	9	17	9	13	11
473	9	8	4	16	8	5	6	8
481	8	8	15	6	4	10	7	7
489	5	6	9	9	8	6	8	3
497	5	13	9	5	7	14	8	8
505	5	6	6	4	4	11	5	

เมื่อนำตารางที่ 6.1 มาเขียนเป็นกราฟแสดงจำนวนอนุภาคแกมมาที่ออกมากับค่าพลังงานจะได้ดังรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 แสดงความสัมพันธ์ของจำนวนอนุภาคแกมมาที่วัดได้กับพลังงานของอนุภาคแกมมา (MeV)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากตารางที่ 6.1 รูปที่ 6.4 ได้ผลดังต่อไปนี้

จากตารางที่ 6.1 พบว่าเมื่อจัดเครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่องให้มีการนับพลังงานให้สูงขึ้นจาก 0.011 - 5.859 เม็กกะอิเล็กตรอนโวลต์แล้วจะสังเกตุเห็นว่าจากตารางที่ 6.1 นั้นในช่องต้น ๆ จำนวนของรังสีแกมมาจะมีจำนวนมากและจะค่อยลดลงไปเรื่อย ๆ ดังรูปที่ 6.4 และจำนวนรังสีแกมมาทั้งหมดที่เครื่องนับได้นั้นมีค่าเป็น 1,736,892 ครั้งต่อ 100 วินาที และจำนวนช่องทั้งหมด 561 ช่อง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.2.2 เมื่อใช้เครื่องวิเคราะห์ที่ระดับพลังงาน 0 - 19.7 เม็กกะอิเล็กตรอนโวลต์ จะได้จำนวนของรังสีแกมมาต่อช่อง (channel) และพลังงานจากน้อยสุดไปต่ำสุดดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 แสดงความสัมพันธ์ของอนุภาคแกมมาที่นับได้จากเครื่องวัดรังสี และวิเคราะห์แบบหลายช่องระดับพลังงานจาก 0-19.418 MeV

TAG NO. = 3 SERIES 40 V- 2.1 PAGE 1
MEMORY= 1/2 LIVE TIME= 100 TRUE TIME= 101 3 FEB 81 00:37

ENERGY(MEV)=+ 0.03800 * CH#+ 0.00000

ROI#	FROM MEV	TO MEV	INTEGRAL	AREA
1	0.038	19.418	136745	128569

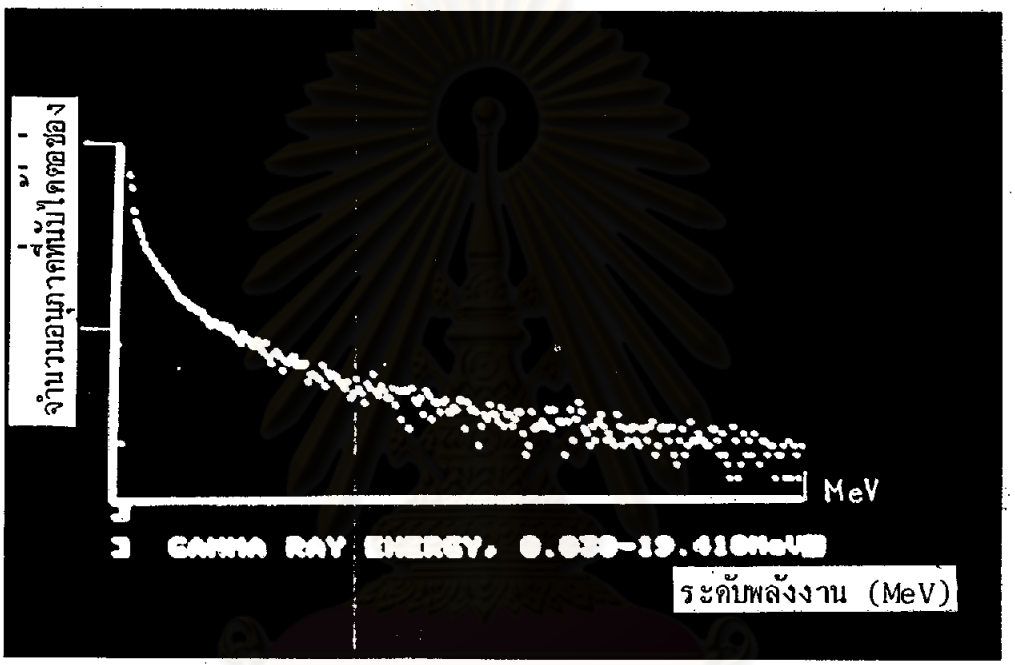
TAG NO. = 3 SERIES 40 V- 2.1 PAGE 2
MEMORY= 1/2 LIVE TIME= 100 TRUE TIME= 101 3 FEB 81 00:37

CHANNEL#	DATA							
1	101	0	0	0	6	43	17880	26039
9	11658	6901	5491	4816	3894	3580	3211	2896
17	2643	2359	2034	2034	1745	1663	1551	1408
25	1401	1211	1195	1095	1067	1002	947	843
33	851	804	748	725	702	688	620	586
41	536	507	490	472	417	401	376	370
49	368	310	332	309	345	318	285	303
57	282	259	258	263	245	242	251	211
65	198	219	199	217	166	194	178	166
73	171	162	167	164	153	135	161	139
81	136	106	151	124	136	117	120	123
89	107	102	96	105	122	96	109	103
97	101	90	97	88	104	96	93	95
105	84	66	73	76	94	84	63	63
113	54	58	67	79	72	54	64	47
121	44	57	56	66	52	53	62	53
129	63	49	48	51	53	45	49	51
137	52	44	32	48	39	32	37	48
145	36	39	33	60	49	36	27	37
153	41	35	35	29	37	31	36	25
161	31	34	29	34	25	29	31	28
169	20	28	22	27	33	26	25	22
177	22	16	17	29	29	21	26	22
185	37	27	23	18	21	22	28	21
193	25	26	22	28	24	25	22	25
201	24	19	19	19	20	21	26	15
209	16	21	23	14	11	17	23	22

TAG NO. = 3 SERIES 40 V- 2.1 PAGE 3
MEMORY= 1/2 LIVE TIME= 100 TRUE TIME= 101 3 FEB 81 00:40

CHANNELS	DATA							
217	23	17	8	16	25	25	18	19
225	17	11	19	18	12	18	23	19
233	21	16	11	18	17	19	17	12
241	13	8	17	13	18	17	13	12
249	13	15	15	12	14	11	18	19
257	18	8	8	9	17	9	14	9
265	14	13	13	11	5	12	9	9
273	12	12	11	1	16	11	12	10
281	12	13	10	13	15	8	9	9
289	12	8	12	6	9	10	11	7
297	13	8	13	10	7	10	4	6
305	5	12	8	13	8	15	9	10
313	9	11	10	6	9	6	14	8
321	8	3	14	9	8	8	10	7
329	10	9	4	10	10	10	14	5
337	6	11	11	9	17	10	13	9
345	8	9	7	13	5	7	9	11
353	6	7	10	4	12	7	9	11
361	6	9	7	7	6	8	5	8
369	12	8	9	7	5	6	8	1
377	6	5	8	9	9	4	6	10
385	5	8	8	5	8	13	6	8
393	9	7	10	5	4	9	5	8
401	8	10	9	7	8	9	6	5
409	9	3	4	9	3	7	4	1
417	8	5	4	6	5	7	10	6
425	6	9	6	4	7	7	6	11
433	6	5	5	8	5	8	8	2
441	8	10	6	3	4	5	7	6
449	4	3	3	6	2	7	9	6
457	6	3	2	6	3	8	7	5
465	4	4	6	6	4	6	7	6
473	1	7	3	5	6	7	6	11
481	4	4	5	4	5	6	2	5
489	4	5	4	2	5	2	2	2
497	6	6	2	4	5	3	4	3
505	2	5	5	7	6	10	5****	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอนุภาคแกมมากับระดับค่าของพลังงานที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์รังสีแบบหลายช่อง

จากตารางที่ 6.2 และรูปที่ 6.5 ได้ผลดังต่อไปนี้

จากตารางที่ 6.2 พบว่าเมื่อจับเครื่องนับรังสีแกมมาชนิดหลายช่องให้สามารถนับค่าพลังงานจาก 0.038 - 19.418 เม็กกะอิเล็กตรอนโวลต์ (MeV) แล้วจะพบว่าจำนวนรังสีแกมมาที่เครื่องนับแบบหลายช่องนับได้นั้นในช่องต้น ๆ จะมีจำนวนมากและน้อยลงไปเรื่อย ๆ ตามรูปที่ 6.5 ซึ่งจำนวนของรังสีแกมมาที่นับได้ทั้งหมดเท่ากับ 136745 ครั้งต่อ 100 วินาที และจำนวนช่องทั้งหมด 561 ช่อง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.2.3 เมื่อใช้เป้าที่ไม่มีโบแรกซ์ฉาบไว้แล้วให้โปรตอนวิ่งชนที่ระดับความต่างศักย์ 150 กิโลโวลต์ แล้วใช้เครื่องตรวจนับแบบข้อ 6.2.1, 6.2.2 แล้วจะได้ค่าของจำนวนรังสีแกมมาต่อช่อง (channel) และค่าพลังงานของรังสีแกมมา ดังตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 แสดงจำนวนอนุภาคแกมมาที่วัดได้จากเครื่องวัดแบบหลายช่องโดยไม่มีเป้าที่ฉาบสารโบแรกซ์วางกั้น

TAG NO. = 1 SERIES 40 V- 2.1 PAGE 1
MEMORY= 1/2 LIVE TIME= 0 TRUE TIME= 1 27 NOV 85 10:33

ENERGY(MEV)=+ 0.03800 * CHN+ 0.00000

ROIN	FROM MEV	TO MEV	INTEGRAL	AREA
1	0.038	19.418	47053	46798

TAG NO. = 1 SERIES 40 V- 2.1 PAGE 2
MEMORY= 1/2 LIVE TIME= 0 TRUE TIME= 1 27 NOV 85 10:33

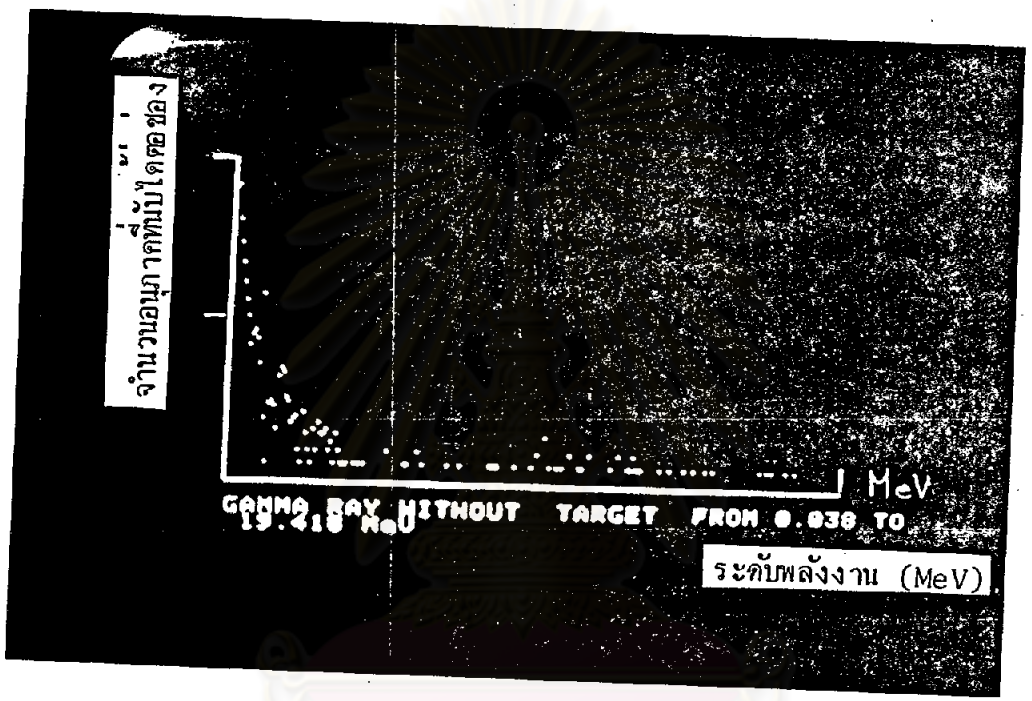
CHANNELS	DATA							
1	1	0	0	3	6	72	16907	18260
9	5607	2606	1314	685	364	217	83	0
17	0	120	133	105	47	43	8	2
25	13	0	14	2	0	0	0	43
33	30	9	6	0	11	0	0	0
41	34	41	36	15	16	7	8	1
49	10	5	3	0	14	6	0	0
57	0	0	0	5	5	4	6	6
65	0	0	4	0	0	0	0	8
73	8	8	7	1	1	0	0	1
81	0	0	3	0	0	1	1	1
89	0	0	1	2	0	3	0	0
97	0	0	1	1	1	0	0	0
105	0	0	0	0	0	0	1	0
113	1	0	1	0	0	0	0	0
121	0	1	2	0	0	0	0	1
129	0	1	0	0	1	0	0	3
137	0	1	0	0	0	0	2	2
145	0	0	0	0	0	0	1	0
153	0	0	1	0	0	0	1	0
161	2	1	0	0	0	0	0	0
169	0	0	1	0	0	1	0	0
177	1	0	0	0	0	0	0	0
185	0	0	0	0	1	0	0	1
193	0	0	0	0	0	0	0	1
201	0	0	0	0	0	0	0	0
209	0	0	0	0	0	0	0	0
217	0	0	0	0	0	0	1	1
225	0	0	0	2	3	1	1	0
233	0	0	0	0	0	0	0	0

TAG NO. = 1 SERIES 40 V- 2.1 PAGE 3
MEMORY= 1/2 LIVE TIME= 0 TRUE TIME= 1 27 NOV 85 10:36

CHANNEL#	DATA							
241	0	0	0	0	0	0	1	0
249	0	0	0	0	0	1	0	1
257	0	0	0	0	0	0	0	0
265	1	0	0	0	0	0	0	0
273	0	0	0	0	0	1	0	0
281	0	1	1	0	0	0	0	0
289	1	0	0	0	0	0	0	0
297	0	0	0	0	0	0	0	0
305	0	0	0	0	0	0	0	0
313	0	0	0	0	0	0	0	0
321	0	0	0	0	0	0	1	0
329	0	0	0	0	0	1	0	0
337	0	0	0	0	0	0	0	0
345	0	0	1	0	0	1	0	0
353	1	1	1	0	0	0	0	0
361	0	0	0	0	0	0	1	0
369	0	0	0	0	0	0	0	0
377	0	0	0	0	0	1	0	0
385	0	0	0	0	0	0	0	0
393	0	0	0	0	0	0	0	0
401	0	0	1	0	0	0	0	0
409	1	0	0	0	0	0	0	0
417	0	0	0	0	0	0	0	0
425	0	0	0	0	0	0	0	0
433	0	0	0	1	0	0	0	0
441	0	0	0	0	1	0	0	0
449	0	0	0	0	0	0	0	0
457	0	0	0	0	0	0	0	0
465	0	0	0	1	0	0	1	0
473	0	0	0	0	0	0	0	0
481	0	0	0	1	0	0	0	0
489	0	0	1	0	0	0	0	0
497	1	0	0	0	0	1	0	0
505	0	1	0	1	0	0	0	0

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากตารางที่ 6.3 เมื่อนำมาเขียนเป็นกราฟจะได้ดังรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.6 แสดงจำนวนอนุภาคแกมมาที่วัดได้จากเครื่องวัดแบบหลายช่องโดยที่เป้าไม่มีโบแรกซ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากตารางที่ 6.3 และรูปที่ 6.6 ได้ผลดังต่อไปนี้

จากตารางที่ 6.3 พบว่าเมื่อจัดเครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่องให้นับค่าพลังงานของรังสีแกมมาให้อยู่ในช่วง 0.038 - 19.418 เม็กกะอิเล็กตรอนโวลต์ (MeV) แล้วจะเห็นว่าในช่องต้น ๆ นั้นจำนวนรังสีแกมมาจะมีค่ามาก และจะลดลงเกือบเป็น 0 ในช่องที่ 97 ขึ้นไป และยิ่งช่องมากขึ้นจะเห็นว่าแทบจะไม่มีรังสีแกมมาที่มีพลังงานสูงออกมาเลย ซึ่งเมื่อเทียบกับระดับปกติ (background) ในตารางที่ 6.4 ถือได้ว่าจำนวนรังสีแกมมาที่นับได้มีค่าเป็น 0 แต่อย่างไรก็ตามจำนวนรังสีแกมมาที่เครื่องนับสามารถนับได้ก็มีค่าเป็น 47053 ต่อ 100 วินาที และจำนวนช่องทั้งหมดเป็น 561 ช่อง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 6.4 แสดงจำนวนของอนุภาคแกมมาที่วัดในระดับปกติ (background)

TAG NO. = 0 SERIES 40 V- 2.1 PAGE 1
MEMORY= 2/2 LIVE TIME= 100 TRUE TIME= 99 28 NOV 85 10:50

ENERGY(MEV)=+ 0.03800 * CHN+ 0.00000

ROI#	FROM MEV	TO MEV	INTEGRAL	AREA
1	0.038	19.418	12821	6689

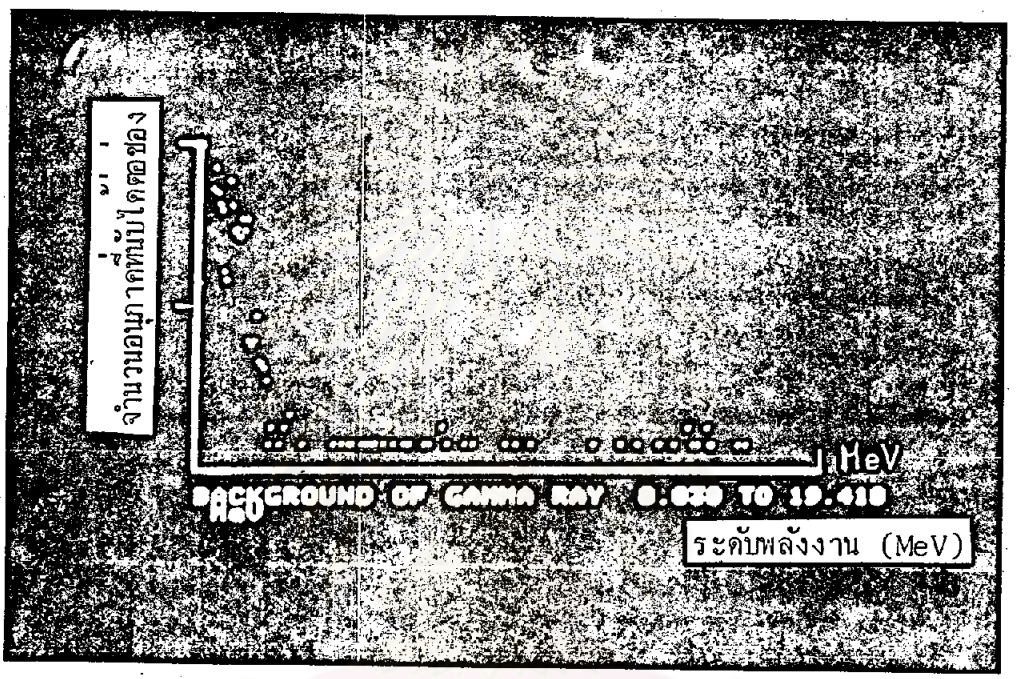
TAG NO. = 0 SERIES 40 V- 2.1 PAGE 2
MEMORY= 2/2 LIVE TIME= 100 TRUE TIME= 99 28 NOV 85 10:50

CHANNEL#	DATA							
1	99	0	0	0	1	6	1010	1770
9	920	692	586	525	479	493	542	733
17	783	354	230	198	200	191	165	189
25	195	127	126	143	137	144	138	99
33	86	85	79	85	130	198	157	103
41	43	28	20	23	23	38	35	27
49	22	18	20	14	14	12	11	14
57	14	21	10	9	9	8	4	8
65	6	7	0	17	18	17	24	4
73	4	3	0	1	0	0	0	1
81	0	0	2	0	1	0	1	0
89	0	0	1	0	0	0	1	0
97	0	0	2	0	0	0	2	0
105	1	0	0	0	2	1	1	0
113	0	0	1	0	0	1	0	0
121	0	0	0	0	0	1	1	0
129	1	0	0	0	1	0	0	1
137	2	0	1	0	0	0	0	0
145	1	0	0	0	0	0	1	0
153	0	0	0	0	0	0	0	0
161	0	0	0	1	0	0	0	1
169	1	0	0	0	0	1	0	0
177	0	0	0	0	0	0	1	1
185	0	1	0	0	0	1	0	0
193	0	0	0	1	0	0	0	0
201	0	1	0	0	0	0	0	0
209	0	0	0	0	0	0	0	0
217	0	0	0	0	0	0	0	0
225	0	1	0	0	0	0	1	0	0
233	0	0	1	0	0	0	0	0
241	0	1	0	1	0	0	0	0
249	1	0	1	0	0	0	0	0
257	0	0	0	1	0	0	1	0
265	0	0	1	0	0	1	0	0
273	0	0	0	0	1	0	0	0

281	0	1	0	0	0	0	0	0
289	0	1	0	0	0	1	1	0
297	0	0	0	0	0	1	1	0
305	0	0	0	0	0	0	1	0
313	0	0	0	0	0	0	0	0
321	1	0	0	1	0	0	0	0
329	0	0	0	0	0	0	0	1
337	0	0	1	0	0	0	0	1
345	0	0	0	0	0	0	0	0
353	0	0	0	0	1	0	0	0
361	0	0	0	1	0	0	0	0
369	0	0	0	0	0	1	0	0
377	0	0	0	0	0	0	0	0
385	0	0	0	0	0	0	0	0
393	0	0	0	0	0	0	0	0
401	0	0	0	0	0	0	0	0
409	0	1	0	1	0	0	0	0
417	0	0	0	1	0	0	0	0
425	0	0	0	0	0	0	0	0
433	0	0	0	0	0	0	0	0
441	0	0	0	0	0	0	0	0
449	0	0	0	0	0	0	1	1
457	1	1	0	0	0	0	1	0
465	0	0	0	0	0	0	0	0
473	0	0	0	0	0	1	0	1
481	0	0	0	0	0	0	0	1
489	0	0	0	0	0	0	0	0
497	0	0	0	0	0	0	0	0
505	0	0	0	0	0	0	0	0

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากตารางที่ 6.4 เมื่อนำมาเขียนเป็นกราฟจะได้ดังรูปที่ 6.7



รูปที่ 6.7 แสดงจำนวนอนุภาคแกมมาที่ระดับปกติ (background) โดยวัดจากเครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่อง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากตารางที่ 6.4 และรูปที่ 6.7 ได้ผลดังต่อไปนี้

จากตารางที่ 6.4 พบว่าเมื่อจัดเครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่องให้นับค่าพลังงานของรังสีแกมมาอยู่ในช่วง 0.038 - 19.418 เม็กกะอิเล็กตรอนโวลต์ (MeV) แล้วจะเห็นว่าในช่อง (channel) ต้น ๆ นั้นรังสีแกมมาจะมีค่ามาก และจะลดลงเรื่อย ๆ จนถือว่ามีค่าเป็น 0 ในช่องหลัง ๆ ที่มีค่าพลังงานสูง ๆ แต่อย่างไรก็ตามแบคกราวน์ (background) ที่เครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่องนับได้ก็ยังมีค่าทั้งหมดเป็น 12821 ครั้งต่อ 100 วินาที และจำนวนช่องทั้งหมด 561 ช่อง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

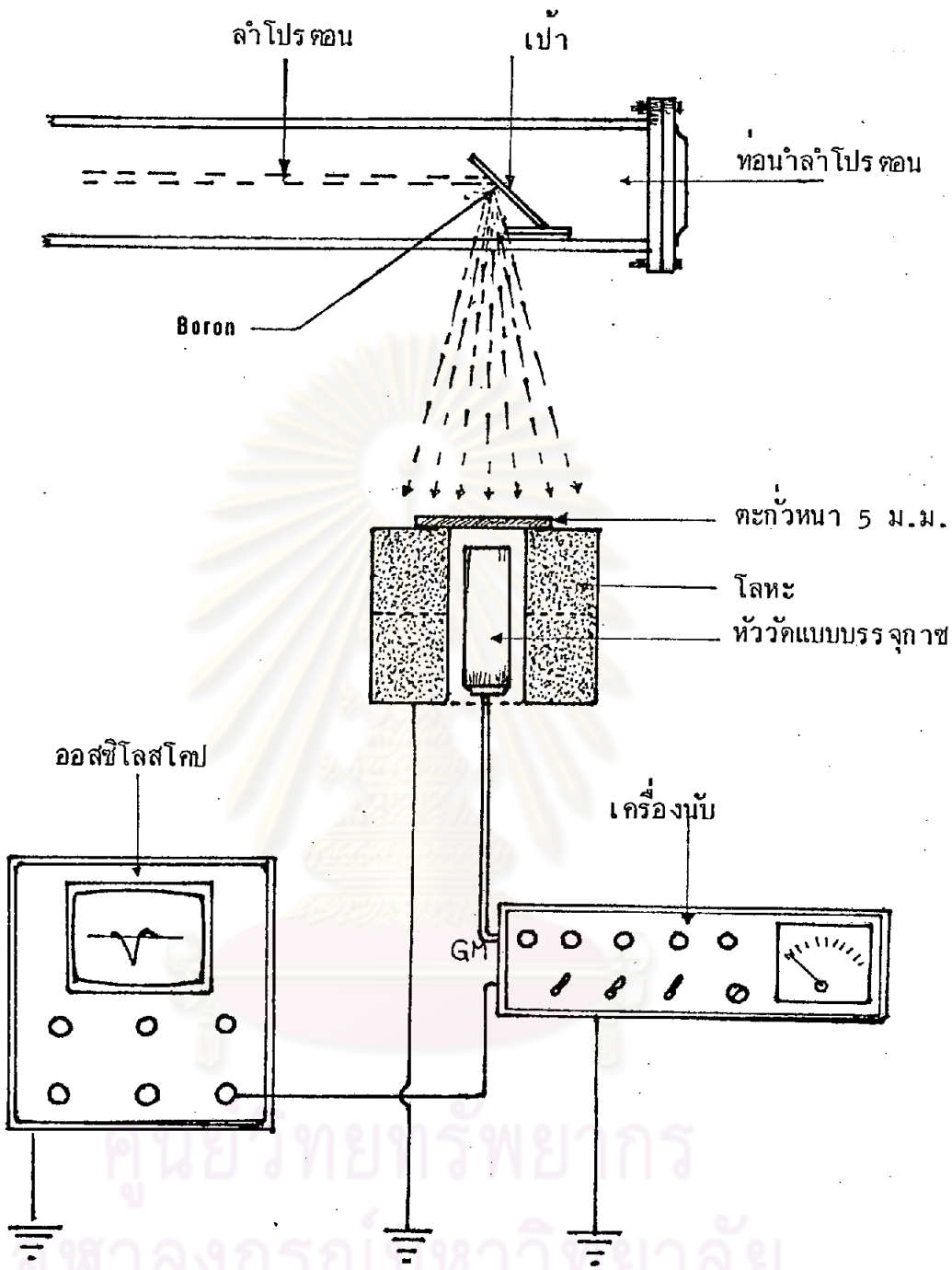
6.3 การทดลองปฏิกิริยานิวเคลียร์โดยตรวจจับรังสีแกมมาจากเครื่องวัดแบบ

โดยการเอาเป้าที่ทำด้วยกระจกใสหนาที่เคลือบด้วยสารประกอบโบแรก (Borax) ($Na_2B_4O_7.10H_2O$) ที่เป็นผงละเอียดเคลือบลงบนผิวกระจกให้มีความบางมาก ๆ และทำการให้ความร้อนแก่ฉากที่เคลือบด้วยโบแรกซ์นั้นเพื่อไล่ความชื้นออก แต่อย่าให้โบแรกซ์เกิดการไหม้เพราะจะทำให้ผลการทดลองไม่ได้ผล

เมื่อทำฉากแล้วก็นำฉากไปตั้งไว้ตำแหน่งโฟกัสของท่อเร่ง โดยวางทำมุมกับแนวดิ่ง 45° โดยเอาด้านที่เคลือบโบแรกซ์หันเข้ากับลำของโปรตอนที่จะเร่งออกจากท่อแล้วทำการติดตั้งอุปกรณ์การวัดโดยใช้หัววัดแบบไกเกอร์-มูลเลอร์ (Geiger-Muller counter) วางไว้ตำแหน่งที่ห่างจากเป้าประมาณ 0.50 เมตรในแนวดิ่งและรอบ ๆ หัววัดนั้นต้องกั้นด้วยเหล็กที่มีความหนามาก ๆ และต่อลงดินด้วย ทั้งนี้เพื่อกันไฟฟ้าความต่างศักย์สูงจะมีผลต่อหัววัดนี้ และที่หัววัดก็ต่อสัญญาณเข้ากับเครื่องนับและออสซิลโลสโคป (oscilloscope) ดังรูป 6.10

และเมื่อติดตั้งดังรูปที่ 6.8 แล้วก็ทำการเปิดเครื่องเร่งอนุภาคโดยใช้กระแสไฟฟ้าที่แหล่งกำเนิดไอออนเท่ากับ 5 มิลลิแอมแปร์ ศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าโพรบ 1,173.9 โวลต์ และขั้วไฟฟ้าโฟกัส 1,760 โวลต์ และทำการเร่งโปรตอนให้ชนกับเป้าโดยใช้ไฟฟ้าความต่างศักย์สูง 150 กิโลโวลต์ โดยการปล่อยให้โปรตอนชนเป้าต่อเนื่องกันเป็นเวลา 2 นาที แล้วค่อยเช็คเครื่องนับ เมื่อนับว่ามีปฏิกิริยาเกิดขึ้นแล้วมีอนุภาคออกมาจากการทำปฏิกิริยานี้หรือไม่ โดยดูที่หัวหลอดเครื่องนับและดูสัญญาณจากจอออสซิโลสโคป และบันทึกค่าข้อมูล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.8 แสดงการจัดอุปกรณ์ในการทดลองเพื่อนับจำนวนรังสีแกมมา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.4 ผลการทดลองทางนิวเคลียร์ ($B^{11}(p,\gamma)C^{12}$) โดยการยิงโปรตอนเข้าชนกับนิวเคลียสของธาตุโบรอน

จากการทดลองวัดค่าของจำนวนอนุภาคที่เกิดออกมาจากการชนเป้าของโปรตอนนั้นจะแบ่งผลการทดลองเป็น 2 อย่าง

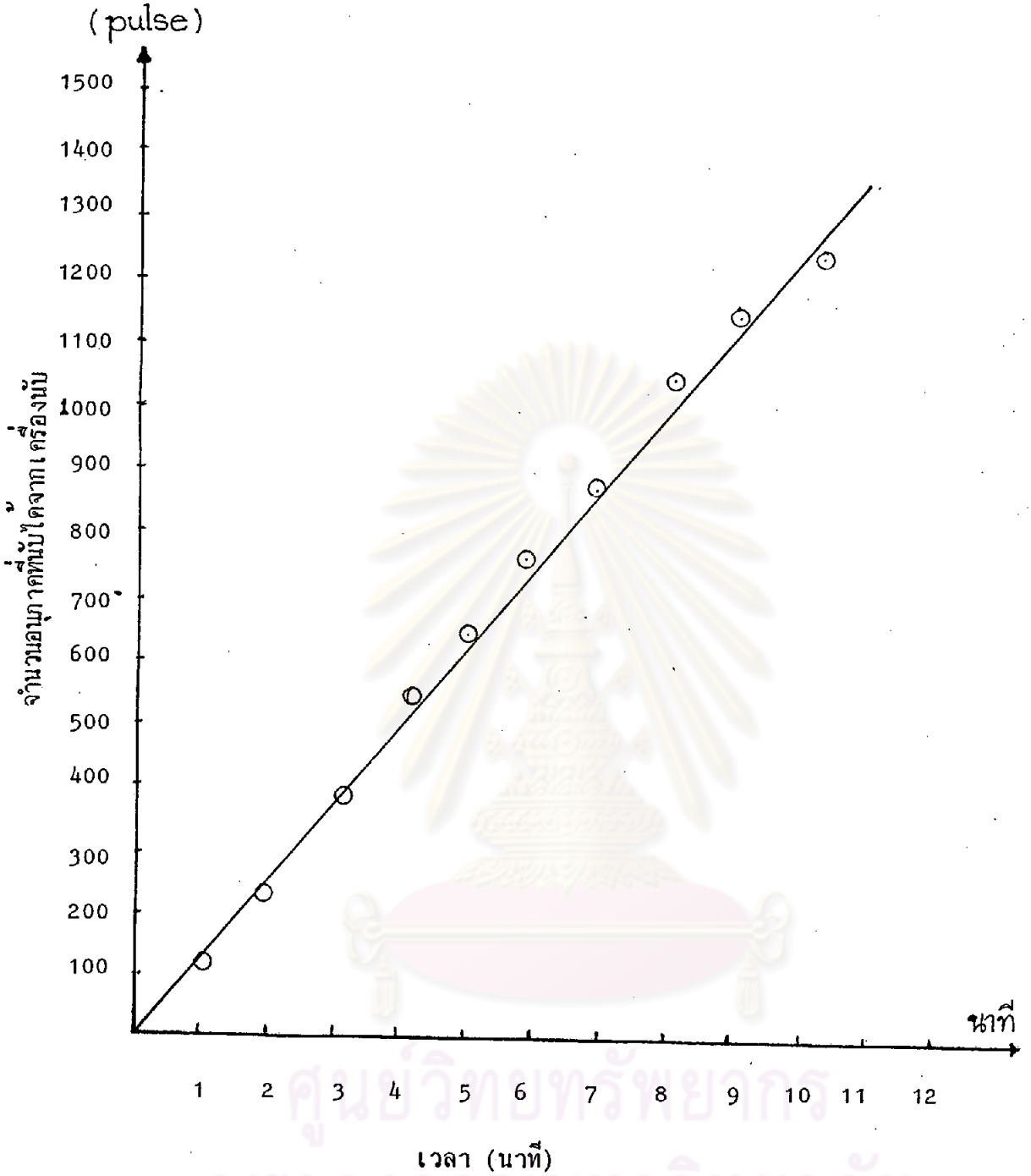
1. การทดลองอัตราการตรวจจับจำนวนอนุภาคต่อระยะเวลาของการชนเป้าของโปรตอน จะได้ผลออกมาตามตารางข้างล่างนี้

ตารางที่ 6.5 แสดงช่วงเวลาของการชนเป้าของโปรตอนกับจำนวนของอนุภาคที่ตรวจจับได้

ช่วงเวลาของการชนเป้าของโปรตอน (นาที)	จำนวนอนุภาคที่ตรวจจับได้ pulse counter (pulse)
1	128
2	249
3	386
4	515
5	635
6	764
7	894
8	1,024
9	1,150
10	1,271

จากตารางที่ 6.5 เมื่อนำไปเขียนกราฟจะได้ดังรูปกราฟที่ 6.9

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอนุภาคที่นับได้สัมพันธ์กับเวลา (นาที)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากตารางที่ 6.5 และรูปที่ 6.9 ได้ผลดังต่อไปนี้

จากรูปที่ 6.9; พบว่าจำนวนอนุภาคที่ตรวจจับได้นั้นแปรผันตรงกับช่วงเวลาของการชนเป้าของอนุภาคโปรตอน คือถ้าช่วงเวลาน้อยแล้วอนุภาคที่ตรวจจับได้ก็น้อย และถ้าช่วงเวลาของการชนเป้ามากก็ทำให้จำนวนอนุภาคที่ตรวจจับได้มากตามไปด้วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.5 การทดลองหาค่าจำนวนอนุภาคแกมมาที่ผ่านตะกั่วที่ความหนาต่าง ๆ กัน

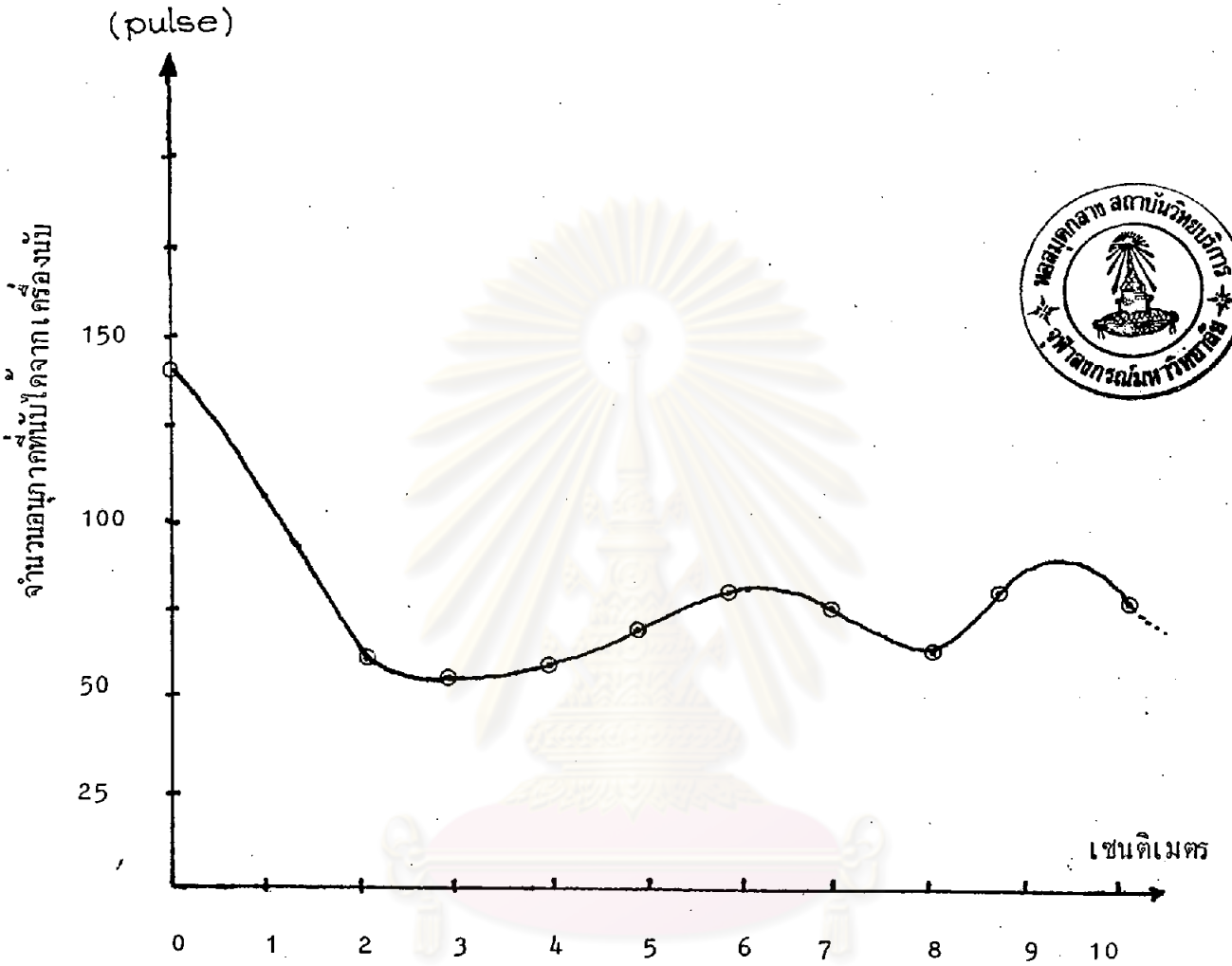
การทดลองนี้จะใช้ตะกั่วที่มีความหนา 0 - 10 เซนติเมตร วางไว้เหนือหัววัด และทำการวัดจำนวนอนุภาคแกมมา 400 ตัวต่อเวลาต่อความหนาของตะกั่ว โดยใช้ค่าต่าง ๆ ในการทดลองเหมือนกับการทดลองครั้งแรก และหัววัดจะใช้ความต่างศักย์ 950 โวลต์ ซึ่งอยู่ในช่วงพลาโต (plateau) จะได้ผลการทดลองออกมาตามตารางที่ 6.6

ตารางที่ 6.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนของอนุภาคแกมมา ที่นับได้ต่อความหนาของแผ่นตะกั่ว 0 –10 เซนติเมตร

ความหนาของตะกั่ว (เซนติเมตร)	จำนวนอนุภาคแกมมาที่นับได้จากหัววัดแบบ pulse counter (pulse)
0	130
1	111
2	65
3	60
4	63
5	68
6	75
7	73
8	60
9	80
10	75

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากตารางที่ 6.6 เมื่อนำมาเขียนกราฟจะได้กราฟดังรูป 6.10



รูปที่ 6.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอนุภาคที่นับได้เป็นสัญญาณกับความหนาของตะกั่ว (เซนติเมตร)

จากตารางที่ 6.6 และรูปที่ 6.10 จะได้ผลดังนี้

จากตารางที่ 6.6 เมื่อความหนาของตะกั่วมีค่าเป็น 0 แล้วจะทำให้จำนวนของพัลส์ (pulse) ของอนุภาคที่ผ่านเข้าไปในหัววัดมีค่ามากสุดและเมื่อความหนาของตะกั่วเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แล้วจะทำให้ค่าของจำนวน pulse ที่วัดได้ลดลง แต่เมื่อความหนาของตะกั่วเพิ่มขึ้นไปเรื่อย ๆ ปรากฏว่าจำนวน pulse ที่วัดได้จะอยู่ในอัตราที่เกือบจะคงที่ ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนในรูปกราฟที่ 6.10

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

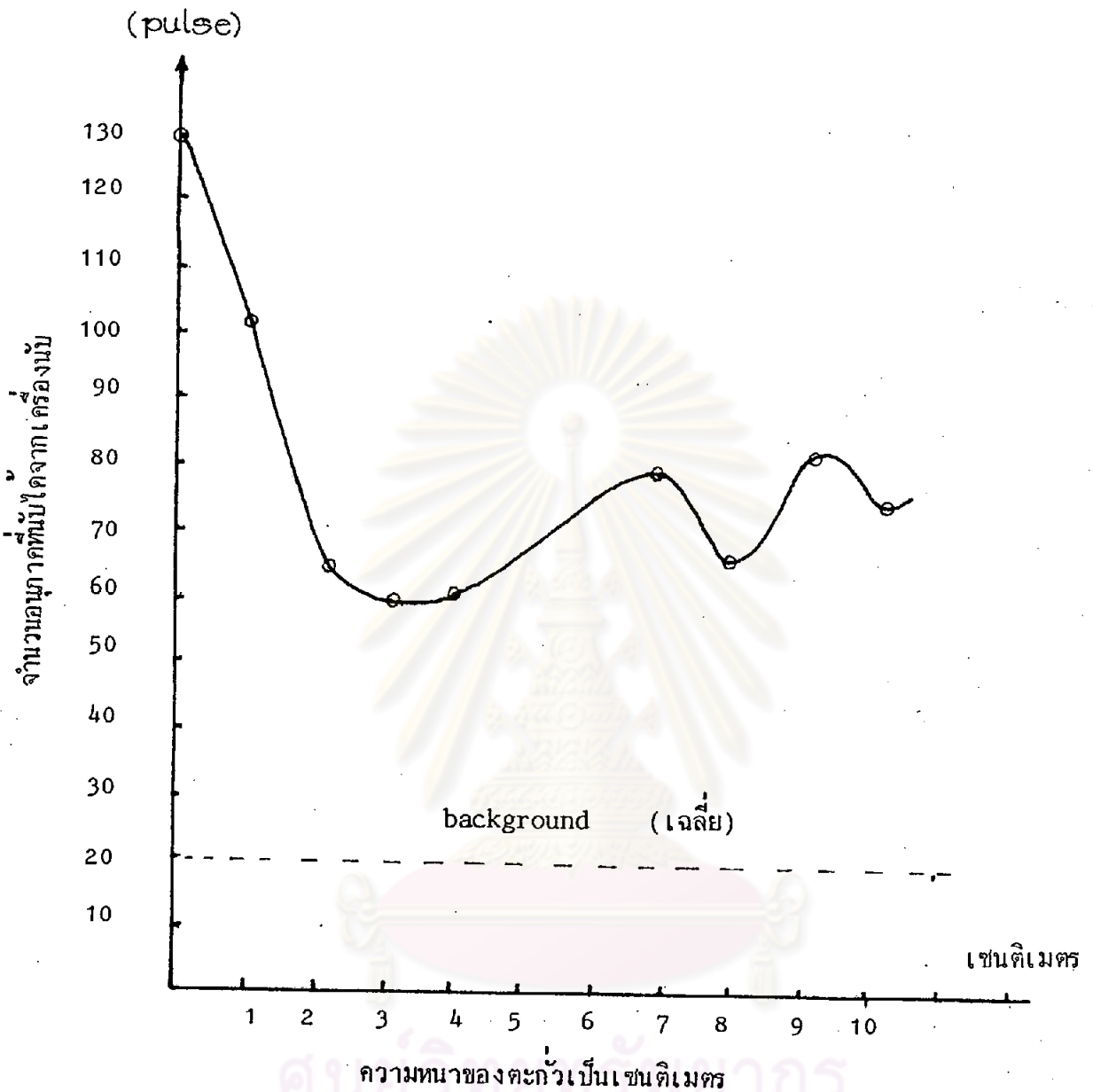
6.6 การทดลองหาอัตราการดูดกลืนของรังสีแกมมาโดยตะกั่ว

การทดลองนี้คล้ายกับการทดลองที่ 6.3 แต่เปลี่ยนจากเครื่องตรวจนับจากมัลติแชนแนลเป็นเครื่องตรวจนับแบบพัลส์ (pulse counter) ซึ่งการวัดแบบนี้จะต้องใช้ศักย์ไฟฟ้าให้กับหัววัด 950 ถึง 1100 โวลต์ ซึ่งเป็นช่วงพลาโต (plateau region) โดยต่อเข้ากับเครื่องนับ (counter) และออสซิโลสโคป (oscilloscope) ซึ่งจะสามารถเห็นพัลส์ (pulse) ของรังสีแกมมาได้อย่างชัดเจนจากจอของออสซิโลสโคป ลักษณะการวัดนั้นจะต้องใช้ตะกั่วหนา 1 เซนติเมตร วางบนหัววัดเป็นลำดับเรื่อย ๆ ไปจนถึง 10 เซนติเมตร ทั้งนี้ให้จำนวนที่นับได้ของอนุภาคที่ผ่านแผ่นตะกั่วนั้นคงที่ แต่ต้องจับเวลาให้แปรตามจำนวนอนุภาค ซึ่งค่าต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 6.7

ตารางที่ 6.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาการนับจำนวนอนุภาคแกมมา ความหนาของตะกั่ว และจำนวนอนุภาคต่อเวลา 1 นาที

เวลาที่ใช้ในการนับจำนวนอนุภาคแกมมาให้ได้ 400 pulse (นาที)	ความหนาของแผ่นตะกั่ว (เซนติเมตร)	จำนวนอนุภาคต่อเวลา 1 นาที (เฉลี่ย)
3.06	0	130
5.39	1	100
7.22	2	60
7.22	3	60
7.55	4	70
6.84	5	72
5.06	6	79
5.09	7	78
6.08	8	65
4.91	9	81
6.00	10	65

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอนุภาคที่นับได้กับความหนาของตะกั่ว (เซนติเมตร)

จากตารางที่ 6.7 และรูปที่ 6.11 ได้ผลดังต่อไปนี้

จากรูปที่ 6.11 พบว่าเมื่อตะกั่วหนา 2 เซนติเมตรกั้นอนุภาคแกมมาที่ออกมาจากปฏิกิริยาทางนิวเคลียสแล้วจะทำให้จำนวนอนุภาคแกมมาลดลงครึ่งหนึ่งจากเดิมที่ไม่มีตะกั่วกั้น และเมื่อเอาจำนวนแผ่นตะกั่วเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ แล้วจะเห็นว่าจำนวนอนุภาคแกมมาที่ตรวจจับได้นั้นจะมีค่าไม่แน่นอน ทั้งนี้ดูได้จากตารางที่ 6.7 และรูปที่ 6.11 จะเห็นว่าเส้นกราฟนั้นจะขึ้นลงอยู่ในช่วง 60 - 85 และจะเป็นอย่างนี้ตลอดไปจนกระทั่งความหนาของตะกั่วเพิ่มเป็น 10 เซนติเมตร และจากตารางที่ 6.7 จะเห็นว่าจำนวนของรังสีแกมมาลดลงครึ่งหนึ่งนั้นประมาณความหนาของตะกั่วมีค่าประมาณ 3 เซนติเมตร และเมื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวล (μ_m) โดยใช้สมการที่ 3.95 แล้วจะได้ค่าเท่ากับ 0.0204 (เซนติเมตร)^{2}ต่อกรัม ซึ่งเมื่อเทียบค่านี้จากตารางที่ 3.2 แล้วจะทราบค่าพลังงานของรังสีแกมมาได้ประมาณ 15 - 20 เม็กกะอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งค่าพลังงานขนาดนี้จะเท่ากับการทดลองวัดโดยเครื่องวัดรังสีแกมมาและเครื่องวิเคราะห์หลายช่องแบบหลายช่อง (multichannel analyzer) ซึ่งแสดงในตารางที่ 6.3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.7 วิเคราะห์ผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.7.1 จากการทดลองหาค่าความต่างศักย์ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าความต่างศักย์สูงตามการทดลองที่ 5.1.1 นั้นพบว่าค่าความต่างศักย์ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าความต่างศักย์สูงนั้นมีค่าเกินกว่า 150 กิโลโวลต์ ทั้งนี้ได้คิดอัตราการสูญเสียให้กับสิ่งแวดล้อมแล้ว และจากการวัดนั้นได้จากการทดลองวัดโดยตรง และเทียบกับทฤษฎีที่คำนวณได้ซึ่งอัตราการสูญเสียให้กับสิ่งแวดล้อมจะมีค่าถึง 85 กิโลโวลต์ จากอัตราการสูญเสียนี้เนื่องจากสภาวะอากาศภายในห้องทดลองไม่เหมาะสมคือมีความชื้นและฝุ่นละอองมากเกินไป วัสดุในการทำแหล่งกำเนิดไฟฟ้าความต่างศักย์สูงนั้นยังไม่มาตรฐานพอ สถานที่ที่ตั้งของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าความต่างศักย์สูงนี้ไม่ดีพอและเครื่องมือในการวัดยังไม่ดีพอ

6.7.2 จากการทดลองเพื่อวัดค่าของศักย์ไฟฟ้าความต่างศักย์สูงโดยอาศัยสนามไฟฟ้าตามการทดลอง 5.2.1 และ 5.2.2 นั้นสรุปได้ว่า

6.7.2.1 จะเห็นว่าศักย์ไฟฟ้าความต่างศักย์สูงที่วัดได้นั้นจะมีค่าสูงมากเมื่อไม่มีการปล่อยไอออนหรือลำโปรตอน คือจะมีค่าประมาณ 148.8 กิโลโวลต์ ซึ่งการวัดโดยวิธีการแบบนี้นั้นจะไม่มีการสูญเสียของพลังงานทางไฟฟ้าที่อุปกรณ์ทางไฟฟ้าเลย และจะมีการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าให้กับอากาศเท่านั้น ซึ่งมีการน้อยมาก แต่ที่ผลการทดลองวัดค่าออกมาได้ประมาณ 148.8 กิโลโวลต์นั้น อาจจะผิดพลาดเนื่องจากภายในห้องมีฝุ่นละอองมากจึงทำให้เกิดการสูญเสียของพลังงานไฟฟ้าไปได้บ้าง ซึ่งอย่างไรก็ตามค่าที่วัดได้ก็ยังคงมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองที่ 5.1.1 เช่นกัน เช่นกัน

6.7.2.2 ได้ผลว่าศักย์ไฟฟ้าความต่างศักย์สูงนั้นจะมีค่าลดลงไปบ้างเมื่อมีการปล่อยลำของอนุภาคไอออนหรือโปรตอน ทั้งนี้เนื่องจากว่าไอออนหรือโปรตอนเป็นอนุภาคที่มีประจุเมื่อมีการเคลื่อนที่ก็สามารถทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ระหว่างขั้วไฟฟ้าของท่อเร่งทำให้ศักย์ไฟฟ้าความต่างศักย์สูงลดลงไปบ้างแต่ก็น้อยมากเพียง 4 กิโลโวลต์ เท่านั้น เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ก็ประมาณ 3 % เท่านั้น ซึ่งค่าที่วัดออกมาได้จะมีค่าเป็น 144.0 กิโลโวลต์

6.7.3 จากการทดลองเพื่อวัดค่ากระแสไฟฟ้าของลำอนุภาคโปรตอนการทดลองที่ 5.3.1, 5.3.2, และ 5.3.3 นั้น สรุปได้ว่า

6.7.3.1 กระแสของลำของอนุภาคโปรตอนนั้นแปรตามตรงกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงที่ให้กับท่อเร่งในระยะแรก ๆ และมีขีดจำกัดสูงสุดที่ 200 ไมโครแอมแปร์ ไม่ว่าจะให้ศักย์ไฟฟ้าสูงเท่าใดกับท่อเร่งก็ตาม

6.7.3.2 กระแสของลำอนุภาคโปรตอนนั้นจะมีค่าคงที่ที่ 200 ไมโครแอมแปร์ ไม่ว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของโพรบจะสูงเท่าใดก็ตาม

6.7.3.3 ค่าของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วโฟกัสจะมีค่าเหมาะสมที่ให้กระแสไฟฟ้าของโปรตอนที่สุดประมาณ 880 – 1760 โวลต์ เท่านั้น ทั้งนี้เพราะว่าเมื่อความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้าโฟกัสสูง จะทำให้ลำโปรตอน ที่ถูกโฟกัสสั้นลงเรื่อย ๆ จนในที่สุดมีบางส่วนที่น้อยของลำโปรตอนที่ใช้ถึงท่อเร่งจึงทำให้กระแสมีค่าน้อยลง

6.7.3.4 จะเห็นว่ากระแสจากวงจรภายนอกที่แหล่งกำเนิดไอออนนั้นจะมีค่ามากขึ้นเรื่อย ๆ แต่ค่าของกระแสของลำอนุภาคที่ถูกเร่งจะมีค่าคงที่คือ 200 ไมโครแอมแปร์ ทั้งนี้เพราะว่าเป็นขีดจำกัดของแหล่งกำเนิดไอออนว่าสามารถที่จะทำให้เกิดการแตกตัวของการไฮโดรเจนได้กระแสไฟฟ้าของลำไอออนหรือลำอนุภาคสูงสุดเพียง 200 ไมโครแอมแปร์

6.7.3.5 จากการทดลองทั้ง 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 และหัวข้อดังกล่าวข้างต้นทำให้ทราบว่า ความต่างศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าโพรบเป็น 7826.0 โวลต์ ขึ้นไป ของขั้วไฟฟ้าโฟกัสอยู่ระหว่าง 880 ถึง 1760 โวลต์ ขึ้นไป ขั้วทั้งหมดนี้จะใช้ในการทดลองทางนิวเคลียร์ว่าจะต้องให้ศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าต่างมีค่าเหมาะสมในการใช้งานได้ดีที่สุด ทั้งนี้จะทำให้ลำของโปรตอนมีความเข้มสูงและมีค่าพลังงานสูงสุดที่ได้จากการทดลอง

จากกระแสไฟฟ้าของลำอนุภาคทั้งหมดที่วัดได้จากการใช้ฟาราเดย์คัพคอเลคเตอร์นั้น พบว่าแหล่งกำเนิดที่ใช้กาซไฮโดรเจนนั้นได้ตรวจพบว่าลำไอออนที่ถูกเร่งมานั้นไม่ใช่ลำของอนุภาคโปรตอน 100 % ทั้งหมด (10) ทั้งนี้จะมีบางไอออนเกิดขึ้นด้วยคือไอออนของ

มวลอะตอมของออกซิเจน (O^+_{16}) มวลไอออนไตรอะตอมมิคของไฮโดรเจน (H^+_3) มวลอะตอมของโมเลกุลไฮโดรเจน (H^+_2) หรือดิวเทอรอน (O^+_2) แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมวลทั้งหมดนี้ถูกเร่งในความต่างศักย์สูงแล้วจะพบว่ามวลอะตอมของไฮโดรเจน (H^+_1) นั้นจะมีค่าพลังงานสูงกว่าทั้งหมดเพราะว่ามวลจะมีค่าน้อยกว่ามวลของไอออนที่เกิดขึ้นทั้งหมด และส่วนมากมวลที่เกิดขึ้นทั้งหมดนั้นมวลละตอมของไฮโดรเจนจะมากที่สุด (10)

6.8 จากการทดลองข้อที่จำเป็นอย่างมากในการทดลองพอสรุปได้ดังนี้

6.8.1 ระบบสุญญากาศ ในการทดลองมักจะมีการรั่วของอากาศเกิดขึ้นเสมอ สาเหตุที่อากาศรั่วส่วนใหญ่จะพบตรงรอยต่อที่มีการปิดเปิดบ่อย ๆ เช่นตรงส่วนปลายสุดของท่อเร่ง เพราะว่าจะต้องมีการเปลี่ยนเป้าในการทดลองทางนิวเคลียร์และเป้าที่เป็นฟาราเดย์คับคอลเลคเตอร์ เพื่อวัดค่ากระแสของลำอนุภาค ซึ่งตรงรอยต่อจะขั้นด้วยยางวงแหวนรูปตัวโอ (O ring) สัมผัสกับแผ่นอลูมิเนียมหรือแผ่นทองเหลืองที่มีผิวเรียบ ทุกครั้งที่ปิดและเปิดต้องตรวจดูรอยต่อให้เรียบร้อย อย่าให้มีเศษผงติดอยู่เพราะจะทำให้เกิดการรั่วได้ และนอกจากนี้ยังพบการรั่วที่บริเวณวาล์วที่มีการปิดเปิดท่อสูบอากาศ ซึ่งเกิดจากไดอะแฟรมวาล์ว (diaphragm valve) ซึ่งเป็นยางที่เก่าเกินไป จึงแข็งตัวทำให้ปิดเปิดได้ไม่สนิทและรั่วไป ทุก ๆ ครั้ง ที่เดินเครื่องควรตรวจสอบการรั่วโดยตรวจเป็นช่วง ๆ

นอกจากนี้สิ่งที่ควรระวังมากที่สุดในการเดินเครื่องคือท่อเร่งซึ่งเป็นส่วนประกอบด้วยท่อแก้วทั้งหมดเชื่อมด้วยกาวอีพอกซีอย่าให้มีการเคลื่อนไหวมาก จะทำให้ท่อหักหรือไม่ก็ทำให้ท่อแก้วร้าวได้

6.8.2 ความต่างศักย์ที่ให้กับแหล่งกำเนิดไอออนจะต้องมีขีดจำกัดสูงสุดค่าหนึ่งเพราะหากให้มากเกินไปจะทำให้ท่อแก้วร้อนอย่างรวดเร็ว จึงทำให้ท่อแก้วร้าวได้ ซึ่งจะทำให้เกิดการรั่วของระบบสุญญากาศทันที แต่การทดลองนี้ต้องใช้ศักย์ไฟฟ้ามากจึงต้องใช้พัดลมช่วยลดปริมาณความร้อนเพราะว่าเวลาทดลองนั้นจะต้องใช้เวลาต่อเนื่องกันหลายนาที สำหรับการทดลองนี้ความต่างศักย์ที่ใช้กับแหล่งกำเนิดไม่เกิน 6 กิโลโวลต์ โดยสังเกตุจากกระแสจากวงจรภายนอกจะประมาณ 10 มิลลิแอมแปร์

6.8.3 แหล่งกำเนิดไฟฟ้าความต่างศักย์สูงที่จ่ายไฟฟ้าให้กับท่อเร่งนั้นเวลาจ่ายไฟฟ้าให้กับหม้อแปลงควรจะต้องค่อย ๆ จ่ายให้ความต่างศักย์สูงขึ้นทีละน้อย ๆ และขณะที่เวลาลดความต่างศักย์ลงก็ควรค่อยลดลง ทั้งนี้เพราะว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าความต่างศักย์สูงนั้นทำด้วยตัวเก็บประจุและตัวเรียงกระแส เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าอย่างรวดเร็วแล้วอาจจะทำให้ตัวเก็บประจุและตัวเรียงกระแสชำรุดได้ง่าย และต้องจ่ายไฟฟ้าจากหม้อแปลงเปลี่ยนค่าได้ไม่เกิน 230 โวลต์

6.8.4 แม่เหล็กที่แหล่งกำเนิดไอออนถ้าใช้แม่เหล็กถาวรแล้วจะลดขีดของความต่างศักย์ที่แหล่งกำเนิดไอออนได้เพราะว่าไม่ทำให้เกิดความร้อนขึ้นมาก

6.8.5 ที่ขั้วตัวให้ความร้อนของปั๊มไอฟุ้งกระจายมักจะเกิดออกไซด์ (oxide) ขึ้นทำให้กระแสไหลเข้าตัวให้ความร้อนน้อยกว่าปกติ จึงทำให้ต้มน้ำมันได้ร้อนไม่เต็มที่ ผลที่ตามมาก็คือ อัตราการปั๊มของปั๊มไอฟุ้งกระจายลดลงและปั๊มลงได้ไม่เต็มที่ จึงควรทำความสะอาดที่ขั้วตัวให้ความร้อนบ่อย ๆ

6.8.6 การทดลองทุกครั้งต้องใช้ไฟฟ้าความต่างศักย์สูง ดังนั้นก่อนการทดลองทุก ๆ ครั้งจะต้องทำความสะอาดท่อเร่ง, แหล่งกำเนิดไอออน, แหล่งกำเนิดไฟฟ้าความต่างศักย์สูงและส่วนอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับไฟฟ้าความต่างศักย์สูงด้วยสารละลายอาซิโตน (acetone) ทั้งนี้เพื่อเป็นการเช็ดเอาฝุ่นละอองที่เกาะอยู่ตามผิวส่วนต่าง ๆ ออกเพื่อไม่ให้เกิดการเบรคดาวน์ (breakdown) ของศักย์ไฟฟ้าสูงได้และยังเป็นการไม่ให้เกิดการสูญเสียของศักย์ไฟฟ้าสูงได้

6.8.7 การวางตำแหน่งเครื่องวัดต่าง ๆ เมื่อมีการทดลองทางนิวเคลียร์นั้นจะต้องวางห่างจากส่วนที่วัดนั้นอย่างน้อย 50 เซนติเมตร และอุปกรณ์ทุกชิ้นจะต้องต่อลงดิน (ground) ทั้งหมด เพื่อไม่เกิดการชำรุดของเครื่องวัดต่าง ๆ เนื่องจากไฟฟ้าความต่างศักย์สูงได้

6.8.8 เครื่องเร่งอนุภาคเป็นเครื่องเร่งที่ต้องใช้ทดลองทางนิวเคลียร์และจากการทดลองหัวข้อที่ 6.1 นั้นพบว่ามีรังสีแกมมาออกมาพลังงานสูงมาก ซึ่งอันตรายจากรังสีแกมมาที่ทดลองนี้จะมีการป้องกันให้มาก ดังนั้นเวลาทดลองควรอยู่ห่าง ๆ และควรใช้เวลาทดลองให้เร็วที่สุดไม่ควรทดลองต่อเนื่องเป็นเวลานาน ๆ และผู้ทำการทดลองควรตรวจสุขภาพบ่อย ๆ

6.8.9 เวลาทดลองเกี่ยวกับเครื่องเร่งอนุภาคควรระมัดระวังเกี่ยวกับไฟฟ้าความต่างศักย์สูงให้มาก ๆ ดังนั้นก่อนทดลองทุก ๆ ครั้งควรตรวจสอบระบบไฟฟ้าความต่างศักย์สูงให้ละเอียดเสียก่อน

นอกจากปัญหาที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ปัญหาที่อาจพบเล็ก ๆ น้อย ๆ ได้แก่ ปัญหาเรื่องความต่างศักย์ให้ในส่วนต่าง ๆ ของเครื่องเร่งอนุภาคไม่คงที่ ดังนั้นต้องหาแหล่งหรือปรับปรุงแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้คงที่ในส่วนต่าง ๆ ให้ดีขึ้น

ในการทดลองเครื่องเร่งอนุภาคนี้ ถ้าจะให้ผลดีกว่าที่เป็นอยู่ควรทดลองในเวลาที่อากาศแห้ง ๆ เพราะจะทำให้ระบบสูญญากาศและระบบไฟฟ้าความต่างศักย์สูงทำงานได้อย่างเต็มที่ เพราะไม่มีไอน้ำที่จะเป็นอุปสรรคต่อการทดลอง

6.9 สรุปผลการทดลอง ปัญหาและข้อเสนอแนะ

6.9.1 จากการทดลองทางนิวเคลียร์โดยการยิงอนุภาคโปรตอนซึ่งได้จากนิวเคลียสของไฮโดรเจนเข้าชนกับเป้าซึ่งเป็นโบแรกซ์ (borax) โดยในสารประกอบโบแรกซ์นี้จะมีสารโบรอน (boron), น้ำ (H_2O) โซเดียม (Na), ออกซิเจน (O_2) และในสารประกอบทั้งหมดนี้จะเห็นว่าโบรอนนั้นเมื่อใช้โปรตอนยิงเข้าไปชนกับนิวเคลียสโดยต้องใช้ค่าพลังงานของโปรตอนเพียง 162.5 keV เท่านั้น ก็สามารถเกิดปฏิกิริยาทางนิวเคลียร์ได้ (7, 8, 15) และจากการทดลองนั้นสามารถทำให้อนุภาคโปรตอนมีค่าพลังงานเป็น 150 keV ซึ่งใกล้เคียงกับระดับพลังงานเรสโซแนนซ์ (resonance) ของการเกิดปฏิกิริยาของโบรอนได้ ดังนั้นเมื่อทดลองตามการทดลองที่ 6.1 แล้วและเมื่อตรวจนับรังสีแกมมาออกมาโดยใช้เครื่องวัดแบบหลายช่องแล้วก็สามารถจะวัดค่าของพลังงานของรังสีแกมมาออกมาได้ในระดับ 0 — 19 MeV ซึ่งแสดงถึงการทดลองนี้น่าจะเกิด

เป็นปฏิกิริยาทางนิวเคลียร์ประเภท เรดิเอทีฟแคบเจอร์ (radiative capture) ได้อย่างแน่นอน เพราะว่ารังสีแกมมาที่ได้จากการทดลองนี้มีค่าเกินกว่า 3 เม็กกะอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งระดับพลังงานของรังสีแกมมาขนาดดังกล่าวนี้จะไม่สามารถเกิดได้ตามธรรมชาติได้ หรือโดยการเกิดรังสีเอกซ์ได้

แต่จากตารางที่ 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 จะพบว่าในช่องแรก ๆ ที่มีระดับพลังงานต่ำ ๆ นั้นจำนวนรังสีแกมมาจะมีค่ามากทั้งนี้เนื่องจากการเกิดรังสีเอกซ์ (x-ray) ของอิเล็กตรอนที่วิ่งสวนทางกับโปรตอนในท่อเร่งแล้วชนกับขั้วไฟฟ้าในท่อเร่งทำให้เกิดรังสีเอกซ์ได้ ซึ่งรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการทดลองนี้จะมีค่าไม่เกิน 150 keV

และการตรวจนับรังสีแกมมานี้วัดในระยะห่างจากเป้า 50 เซนติเมตร ซึ่งทั้งนี้เพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนของศักย์ไฟฟ้าสูงกับหัววัดรังสีแกมมา และถ้าสามารถวัดในระยะใกล้ ๆ กว่านี้อีกก็ยิ่งสามารถวัดจำนวนของรังสีแกมมาออกมาได้มากกว่านี้

การที่พลังงานของรังสีแกมมามีค่าเกินกว่า 15.97 เม็กกะอิเล็กตรอนโวลต์ที่ได้จากการตรวจนับนี้อาจจะเป็นเพราะว่าจำนวนรังสีแกมมามากกว่า 1 ตัวไปเข้าหัววัดพร้อม ๆ กัน ทำให้เกิดสัญญาณแรงมากเครื่องวัดจึงบอกค่าพลังงานออกมาในช่องที่มีพลังงานสูง ๆ ได้ แต่อย่างไรก็ตามจำนวนรังสีแกมมาที่ตรวจนับได้นั้นก็เป็นที่ยืนยันได้ว่ามีค่าพลังงานสูงพอจะบอกได้ว่าเกิดจากปฏิกิริยาทางนิวเคลียร์ได้คือมากกว่า 3 MeV ซึ่งค่าพลังงานของรังสีแกมม่าในปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่ทำขึ้นนี้ไม่ได้มาจากการสลายตัวในธรรมชาติ (natural radioactivity) อย่างแน่นอน

6.9.2 จากการทดลองหาค่าการถูกดูดกลืนของรังสีแกมมาโดยตะกั่วในหัวข้อ 6.6 , 6.7 ได้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของตะกั่วมีค่าเป็น 0.0204 (เซนติเมตร)^{2}ต่อกรัม ซึ่งการทดลองนี้ได้ทำหลาย ๆ ครั้งโดยเอาค่าเฉลี่ยมาเป็นข้อมูลซึ่งมีความแน่นอนยิ่งขึ้นและเมื่อเทียบค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวล (μ_m) ของตะกั่วจากตารางที่ 3.2 แล้วจะได้ค่าพลังงานของรังสีแกมมามีค่าประมาณ 15 - 20 เม็กกะอิเล็กตรอนโวลต์ (MeV) และผลที่ได้นี้สอดคล้องกับการทดลองที่ 6.3 ซึ่งรังสีแกมมาจะออกมาจาก

เป้าชนิดเดียวกัน แสดงว่าการทดลองนี้เกิดปฏิกิริยาทางนิวเคลียร์ขึ้นกับโบรอนซึ่งเป็นสารประกอบในโบแรกซ์กับอนุภาคโปรตอนอย่างแน่นอน และถ้ารังสีแกมมาที่ตรวจรับได้นี้เป็นรังสีเอกซ์ (x-rays) ที่เกิดในท่อเร่งแล้วก็มีค่าพลังงานไม่เกิน 150 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งระดับพลังงานขนาดนี้ของรังสีเอกซ์ก็จะถูกกั้นด้วยตะกั่วหนาประมาณ 3 - 5 มิลลิเมตรก็สามารถป้องกันไม่ให้รังสีเอกซ์ทะลุผ่านได้

6.9.3 จากการตรวจวัดรังสีแกมมาโดยการยิงโปรตอนไปยังเป้าที่ไม่มีสารประกอบโบแรกซ์ในหัวข้อที่ 6.3 พบว่าไม่มีจำนวนของรังสีแกมมาที่มีค่าพลังงานสูง ๆ ออกมาเลย หรืออาจจะมีบ้างแต่ปริมาณนั้นถือได้ว่าเท่ากับระดับปกติ (background) ทั้งนี้พอจะสรุปได้ว่า

1) ปฏิกิริยาทางนิวเคลียร์ไม่สามารถเกิดได้เพราะว่าเป้าไม่มีสารที่ถูกระดมยิง ณ พลังงานของลำโปรตอนที่ใช้คือ 150 keV

2) เป้าที่ทำด้วยกระจกและมีกาวอิพอกซีทาไว้นั้นไม่สามารถเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ได้ ณ พลังงานของลำโปรตอนที่ใช้อยู่ 150 keV

3) ปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดในการทดลองในหัวข้อที่ 6.3 — 6.7 นั้นเกิดจากโบรอนที่เป็นสารประกอบอยู่ในโบแรกซ์ (Borax : $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย