

การเร่งโปรตอนด้วยศักย์ 150 กิโลโวลต์



นายชัชวาลย์ สักกะวงศ์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2529

ISBN 974-566-811-7

013585

I15498463

The Acceleration of Protons at 150 Kilovolts

Mr. Chachawan Sakkawong



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

For the Degree of Master of Science

Department of Physics

Graduate School

Chulalongkorn University

1986

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเร่งโปรตอนด้วยศักย์ 150 กิโลโวลต์

โดย

นายชัชวาลย์ สักกะวงศ์

ภาควิชา

ฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.ภิญโญ บัณยารชุน

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้แก่นักศึกษานี้ เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.สรชัย พิศาลบุตร)

รักษาการในตำแหน่งรองคณบดีฝ่ายวิชาการ

ปฏิบัติราชการแทนรักษาการในตำแหน่งคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย



คณะกรรมการ สอ.บ.วิทยานิพนธ์

.....
(Signature)

.....ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ แสง โพธิ์เงิน)

.....
(Signature)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.อนันต์สิน เตชะกำพูน)

.....
(Signature)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิจิตร เล็งทะพันธ์)

.....
(Signature)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ภิญโญ บัณยารชุน)

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเร่งโปรตอนด้วยศักย์ 150 กิโลโวลต์
ชื่อนิสิต นายชัชวาลย์ สักกะวงศ์
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.ภิญโญ บัณยารชุน
ภาควิชา ฟิสิกส์
ปีการศึกษา 2528



บทคัดย่อ

ได้สร้างเครื่องเร่งโปรตอนขนาด 150 กิโลโวลต์ จากวัสดุที่ทำได้ในภายในประเทศเป็นส่วนใหญ่ เครื่องเร่งโปรตอนนี้ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดไอออนซึ่งทำให้เกิดโปรตอนจากการแตกตัวของก๊าซไฮโดรเจน ชั่วไฟฟ้าโพรบ เป็นส่วนดึงโปรตอนจากแหล่งกำเนิดไอออน ชั่วไฟฟ้าโฟกัสเป็นส่วนที่ทำหน้าที่โฟกัสลำของโปรตอนก่อนที่จะเข้าสู่ท่อเร่ง ท่อเร่งเป็นส่วนที่เร่งให้ลำของโปรตอนมีพลังงานสูงขึ้นโดยใช้ชั่วไฟฟ้าที่มีลักษณะคล้ายถ้วยทำด้วยโลหะสแตนเลสส์ วางเรียงกันโดยมีแกนร่วมกัน กันด้วยท่อแก้วทรงกระบอกเพื่อทำให้ลำของโปรตอนที่ถูกเร่งผ่านไปได้อิสระ และแหล่งกำเนิดไฟฟ้าความต่างศักย์สูงชนิดกระแสตรง

เมื่อโปรตอนถูกเร่งจะมีค่าพลังงานสูงขึ้นและลำของโปรตอนมีขนาดเล็ก เมื่อไปชนกับฉากที่ฉาบสารเรืองแสงไว้จะได้จุดเล็กมาก เครื่องเร่งโปรตอนนี้สามารถใช้ทดลองทางนิวเคลียร์ได้โดยการเร่งลำของโปรตอนเข้าชนกับเป้าที่มีนิวเคลียสของธาตุโบรอนฉาบไว้ และเมื่อใช้เครื่องวัดรังสีแกมมา แบบหลายช่องตรวจจับแล้วสามารถวัดค่าพลังงานของรังสีแกมมาที่ได้จากการทำปฏิกิริยาทางนิวเคลียร์ได้มากกว่า 3 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ขึ้นไปอีกด้วย

Thesis Title The Acceleration of Protons at 150 Kilovolts
Name Mr. Chachawan Sakkawong
Thesis Advisor Associate Professor Bhiyayo Panyarjun, Ph.D.
Department Physics
Academic Year 1985



Abstract

A 150 kilovolts proton accelerator has been constructed from the materials mostly available in Thailand. It consist of an ion source for the production of protons from the ionization of hydrogen gas, an electrostatic probe for the extraction of protons from the ion source, focusing electrodes for focusing proton beam before entering an accelerating column and the accelerating column used for increasing the energy of the protons. The accelerating column consists of sections of stainless steel tube aligned in a straight line separated with sections of glass tubes. The high voltage from a self-constructed power supply is connected to the accelerating column via a potential divider.

It has been found that the accelerated proton beam produces a small spot on the phosphor screen placed at the end of the accelerating tube. The proton beam from the accelerator can create gamma rays of which the energies exceeding 3 Mev measured by a gamma detector and a multichannel analyzer when bombarding a baron coated target.



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ ดร.ภิญโญ ป้ายารชุน
ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้การแนะนำและช่วยเหลือตลอดจนควบคุมการวิจัยอย่างใกล้ชิด
ตลอดมา ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณท่านเป็นอย่างสูง อีกส่วนหนึ่งยังได้รับความช่วยเหลือ
จากท่าน ศาสตราจารย์ แสง โพธิ์เงิน พ.จ.อ. พูน อางปรุ ในคำคำแนะนำและ
ช่วยเหลือทางด้านเครื่องมือบางประการ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

นอกจากนี้ยังได้รับความช่วยเหลือบริการ เครื่องมือ และอำนวยความสะดวกจาก
โรงงานภาควิชาฟิสิกส์ ภาควิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาธรณีวิทยา ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้เขียนจึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
รายการ ตารางประกอบ.....	ฐ
รายการ รูปประกอบ.....	ฑ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 วิวัฒนาการของเครื่องเร่งอนุภาคแบบเส้นตรง.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 วิธีดำเนินการวิจัยโดยย่อ.....	3
1.4 ทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัยโดยย่อ.....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	7
บทที่ 2 ส่วนประกอบของเครื่องเร่งโปรตอน.....	8
2.1 แหล่งกำเนิดไอออนแบบอิเล็กตรอนออสมิเลสชัน.....	8
2.2 ส่วนนำไอออนจากแหล่งกำเนิด.....	10
2.3 ส่วนโพกัส.....	10
2.4 ส่วนทอเร่ง.....	11
2.5 ส่วนทอนำลำอนุภาค.....	13
2.6 แหล่งกำเนิดไฟฟ้าความต่างศักย์สูง.....	15
บทที่ 3 ทฤษฎีเกี่ยวกับการวิจัย.....	16
3.1 การชนของอิเล็กตรอน.....	16
3.2 การเกิดไอออนบวก.....	18
3.3 ระยะทางของการเคลื่อนที่เฉลี่ย.....	18
3.4 จำนวนไอออนที่เกิดขึ้นจากการชนของอิเล็กตรอน.....	21
3.5 ทฤษฎีเกี่ยวกับการเร่งและการเกิดการโพกัสภายในทอเร่ง.....	24

3.6	ทฤษฎีเกี่ยวกับการแปลงศักย์ไฟฟ้าให้สูงขึ้นแบบทวีคูณ.....	35
3.7	ทฤษฎีเกี่ยวกับตัวเก็บประจุ	45
3.8	ทฤษฎีเกี่ยวกับการวัดความต่างศักย์สูง.....	48
3.9	ทฤษฎีเกี่ยวกับการดัดจลาร์จบางส่วน.....	56
3.9.1	ลักษณะการเกิดดัดจลาร์จบางส่วน.....	56
3.9.1.1	ดัดจลาร์จภายใน.....	56
3.9.1.2	ดัดจลาร์จที่ผิว.....	59
3.9.1.3	โคโรนาดัดจลาร์จ.....	59
3.9.2	วิธีแก้ไขการดัดจลาร์จบางส่วน.....	60
3.10	ทฤษฎีเกี่ยวกับเครื่องวัดรังสีชนิดบรรจุภาซ.....	60
3.11	ทฤษฎีของเครื่องวัดรังสีประเภท.....	65
3.12	เครื่องวัดรังสีแบบประกายแสง.....	68
3.13	ทฤษฎีเกี่ยวกับการที่รังสีแกมมาถูกดูดกลืนโดยธาตุนั้น.....	71
3.13.1	ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก.....	74
3.13.2	ปรากฏการณ์คอมป์ตัน.....	76
3.13.3	ปรากฏการณ์การเกิดอนุภาคคู่อิมี่ประจุ.....	78
บทที่ 4	เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	83
4.1	เครื่องกำเนิดไอออนชนิดอิเล็กตรอนออกซิเลชัน.....	83
4.1.1	แหล่งกำเนิดไอออน.....	83
4.1.2	ส่วนดึงไอออนจากแหล่งกำเนิด.....	83
4.1.3	ขั้วไฟฟ้าโพสิทีฟ.....	83
4.1.4	คอยล์แม่เหล็ก.....	84
4.2	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าความต่างศักย์สูง.....	85
4.2.1	ตัวเก็บประจุ.....	85

4.2.1.1 ทอพี.วี.ซี 85

4.2.1.2 แผ่นอลูมิเนียม 85

4.2.1.3 แผ่นพลาสติก 86

4.2.1.4 กาวอีพ็อกซี่ 86

4.2.1.5 น้ำมันหม้อแปลง 86

4.2.2 หลักการทำตัวเก็บประจุ 86

4.2.3 ตัวเรียงกระแส 89

4.2.4 หม้อแปลง 90

4.3 แหล่งจ่ายไฟฟ้าในระบบเครื่องเร่งโปรตอน 93

4.3.1 แหล่งจ่ายไฟฟ้าเขาแหล่งกำเนิดไฟฟ้าความตํ่ากัสูง 93

4.3.2 แหล่งจ่ายไฟฟ้าเขาแหล่งกำเนิดไอออน 93

4.3.3 แหล่งจ่ายไฟฟ้าเขาคอลลยส์นามแม่เหล็ก 93

4.3.4 แหล่งจ่ายไฟฟ้าเขาขั้วไฟฟ้าโพรบ 94

4.3.5 แหล่งจ่ายไฟฟ้าเขาส่วนโพกัส 94

4.3.6 แหล่งจ่ายไฟฟ้าเขาทอเร่งโปรตอน 94

4.4 ทอเร่งอนุภาคแบบทอตรง 96

4.4.1 ส่วนทอเร่ง 96

4.4.2 ส่วนนำลำโปรตอน 96

4.5 ส่วนประกอบของทอเร่งและส่วนนำลำโปรตอนเมื่อแยกรายละเอียด 99

4.5.1 ขั้วไฟฟ้า 99

4.5.2 วงแหวนโลหะ 100

4.5.3 โลหะโค้ง 101

4.5.4 ทอแกวทงกรระบอก 102

4.5.5 ส่วนนำลำโปรตอน 103

4.6 ระบบสุญญากาศ 104

4.6.1 ป้มกลโรตารี 104

4.6.2	ป้อนไอพ่นกระจาย.....	106
4.7	เกจเหน็บ.....	108
4.8	เครื่องมือสำหรับเบงก์ยไฟฟ้าเข้าท่อแรง.....	110
4.9	วิธีการทดลอง.....	114
4.9.1	เตรียมเครื่องมือ.....	114
4.9.2	เดินเครื่องสูบลำอากาศ.....	114
4.9.3	ปล่อยก๊าซไฮโดรเจนเข้าแหล่งกำเนิด.....	114
4.9.4	จ่ายไฟฟ้าเข้าแหล่งกำเนิดไอออน.....	114
4.9.5	การปิดเครื่อง.....	115
บทที่ 5	ผลการทดลองเพื่อหาสมรรถภาพของ เครื่องแรง โปร ตอน.....	116
5.1	ผลการทดลองของการหาค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จาก เครื่องกำเนิดไฟฟ้าความ ต่างศักย์สูง.....	116
5.2	ผลการทดลองของการหาค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จาก เครื่องกำเนิดไฟ ฟ้าความ ต่างศักย์สูง โดยการวัดค่าสนามไฟฟ้า.....	122
5.3	ผลการวัดค่าของกระแสอนุภาคโดยใช้ถ้วยของฟาราเดย์.....	128
5.4	ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าโพสิทีฟ กับกระแสของอนุภาค โปร ตอน.....	134
5.5	การทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสภายนอกของแหล่งกำเนิด ไอออนกับกระแสที่ได้จากลำอนุภาคที่ถูกเร่งมาชนกับถ้วยของฟาราเดย์.....	136
5.6	การทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ที่ใช้ขั้วไฟฟ้า คาโทดและแอโนดของแหล่งกำเนิดไอออนกับกระแสของลำอนุภาค โปร ตอน ที่เร่งมาชนกับถ้วยของฟาราเดย์.....	139

บทที่ 6 การทดลองทางนิวเคลียร์ที่ 150 keV โดยใช้เครื่องเร่งโปรตอน และสรุปผลการทดลอง และขอเสนอแนะเกี่ยวกับการทดลอง..... 143

6.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทดลองทางนิวเคลียร์..... 143

6.1.1 ปฏิกริยานิวเคลียร์..... 143

6.1.2 ประเภทของปฏิกิริยาทางนิวเคลียร์..... 144

6.1.2.1 ปฏิกริยาอนุภาคนิวเคลียร์และการกระเจิง..... 144

6.1.2.2 เรดิเอทีฟแคปเจอร์..... 145

6.1.2.3 โฟโตนิวคลีเอชัน..... 145

6.1.2.4 ขบวนการฟิชชัน..... 146

6.1.2.5 ขบวนการฟิวชัน..... 146

6.1.3 ปริมาณพลังงานที่เกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์..... 147

6.1.4 ปฏิกริยานิวเคลียร์แบบเรดิเอทีฟแคปเจอร์..... 148

6.1.5 การเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบเรดิเอทีฟแคปเจอร์โดยใช้โปรตอน..... 149

6.1.6 ปฏิกริยานิวเคลียร์ที่เกิดจากการชนของโปรตอนกับโบรอน ($B^{11}(p,\alpha)C^{12}$)..... 152

6.2 ผลการทดลองทางนิวเคลียร์เพื่อวัดพลังงานของรังสีแกมมาที่ได้จากปฏิกริยานิวเคลียร์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์รังสีแกมมา (multichannel analyzer)..... 153

6.3 ผลการทดลองปฏิกริยานิวเคลียร์โดยตรวจนับรังสีแกมมาโดยใช้เครื่องวัดแบบ pulse counter..... 170

6.4 ผลการทดลองทางนิวเคลียร์ ($B^{11}(p,\alpha)C^{12}$) โดยการยิงโปรตอนเข้าชนกับนิวเคลียสของธาตุโบรอน..... 172

6.5 ผลการทดลองหาค่าจำนวนอนุภาคแกมมาที่ผ่านตะกั่วที่มีความหนาต่าง ๆ กัน..... 175

	หน้า
6.6 ผลการทดลองอัตราการดูดกลืนของรังสีแกมมาโดยตะกั่ว.....	178
6.7 ผลวิเคราะห์ผลการทดลองและขอเสนอแนะ	181
6.8 ข้อควรจำเป็นของการทดลอง	183
6.9 สรุปผลการทดลอง ปัญหาและขอเสนอแนะ	185
เอกสารอ้างอิง	188
ภาคผนวก	190
-วงจรมัดค่า	190
-รูปผลการทดลองและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง	192
ประวัติผู้เขียน	199



 ศูนย์วิทยพัทยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการ ตาราง ประกอบ

ตารางที่		หน้า
3.1	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยวัดระบบ M.K.S. (SI) กับระบบ c.g.s.....	54
3.2	แสดงความสัมพันธ์ค่าพลังงานของรังสีแกมมากับค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวล	81
5.1	แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงที่จ่ายไฟฟ้าให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูง	116
5.2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าสูงจากแหล่งไฟฟ้าศักย์สูงที่คำนวณจากสมการที่ 3.53 กับกระแสไฟฟ้าที่อ่านได้จากไมโครแอมมิเตอร์	117
5.3	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่อ่านได้จากไมโครแอมมิเตอร์กับศักย์ไฟฟ้าสูงที่คำนวณได้โดยอาศัยกฎของโอห์ม	118
5.4	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายระหว่างขั้วไฟฟ้าทรงกลมกับแผ่นโลหะขนานสัมพันธ์กับศักย์ไฟฟ้า	128
5.5	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางของขั้วไฟฟ้าทรงกลมกับโลหะขนานกับศักย์ไฟฟ้าที่คำนวณได้เมื่อปล่อยลำของโปรตอน	
5.6	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายของลำอนุภาคโปรตอนกับศักย์ไฟฟ้าสูงที่จ่ายให้กับท่อเร่ง	129
5.7	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายของอนุภาคโปรตอนกับศักย์ของขั้วไฟฟ้าโพรบ	131
5.8	แสดงความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าโพลบกับกระแสของลำอนุภาคโปรตอน	134
5.9	แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายของแหล่งกำเนิดไอออนกับกระแสที่ได้จากลำอนุภาคที่ถูกเร่ง	137

ตารางที่	หน้า
5.10 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างคาโทดกับแอโนดของแหล่งกำเนิดไอออนกับกระแสของลำอนุภาคที่ถูกเร่งไปชนกับดิวเทอเรียม	140
6.1 แสดงจำนวนอนุภาคแกมมาต่อช่องที่เครื่องวิเคราะห์รังสีแบบหลายช่องวัดได้	154
6.2 แสดงความสัมพันธ์ของอนุภาคแกมมาที่นับได้จากเครื่องวัดรังสีและวิเคราะห์แบบหลายช่องระดับพลังงานจาก 0-19.418 MeV	158
6.3 แสดงจำนวนอนุภาคแกมมาที่วัดได้จากเครื่องวัดแบบหลายช่องโดยไม่มีเป้าที่ฉาบสารโบแรกซ์วางกัน	162
6.4 แสดงจำนวนของอนุภาคแกมมาที่วัดในระดับปกติ (background)	166
6.5 แสดงช่วงเวลาของการชนเป้าของโปรตอนกับจำนวนของอนุภาคที่ตรวจจับได้	172
6.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนของอนุภาคแกมมาที่นับได้ต่อความหนาของแผ่นตะกั่ว 0 - 10 เซนติเมตร	175
6.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาการนับจำนวนอนุภาคแกมมากับความหนาของตะกั่วและจำนวนอนุภาคต่อเวลา 1 นาที	178

รายการรูปประกอบ

หน้า

รูปที่		
1.1	แสดงการ เกิดไอออนบวกหรือ โปตร ตอนจากกาชไฮโดร เจนและแสดงแนวทาง เดินที่ถูกรังของอนุภาคโปตร ตอน.....	4
2.1	แสดงลักษณะของแหล่งกำเนิดไอออน, ชั่วไฟฟ้าโพรบ ชั่วไฟฟ้าโฟกัส.....	8
2.2	แสดงลักษณะส่วนประกอบของท่อ เร่ง.....	11
2.3	แสดงเส้นสมศักย์ไฟฟ้าระหว่างชั่วไฟฟ้าในท่อเร่ง.....	12
2.4	แสดงส่วนที่ลำโฟกัสผ่านปลายสุดของท่อนำลำอนุภาค.....	14
3.1	แสดงการ ชนของอิเล็กตรอนกับอะตอม.....	16
3.2	แสดงการ ชนของอนุภาค.....	19
3.3	แสดงไออะแพร้มเลนส์ของเปิด (aperture lens) แสดงถึงเส้นสมศักย์... สำหรับ $E_1 > E_2$ ซึ่งเกิดจากชั่วไฟฟ้าแบบไออะแพร้ม.....	26
3.4	ก. แสดงไออะแกรมของเส้นสมศักย์ที่เกิดจากเลนส์ไฟฟ้าสถิตของชั่วไฟฟ้า แบบทรงกระบอก.....	29
	ข. แสดงไออะแกรมของการเขียนกราฟ V, V', V'' กับระยะทางตาม แนวแกน z ของเลนส์ไฟฟ้าสถิตที่เกิดจากชั่วไฟฟ้าทรงกระบอก.....	30
3.5	ก. แสดงลักษณะทางเดินของอนุภาคในการเร่ง.....	30
	ข. แสดงลักษณะทางเดินของอนุภาคในการหน่วง.....	30
3.6	แสดงลักษณะชั่วไฟฟ้าทรงกรวย (cone) ปลายตัดภายในท่อเร่ง.....	31
3.7	กราฟแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าบนชั่วไฟฟ้าแบบกรวย V_1, V_2 และ V_3 อย่างคร่าว ๆ	32
3.8	แสดงถึงลักษณะการ โฟกัสด้วยเลนส์ไฟฟ้าสถิตแบบรูปกรวยปลายตัด.....	33
3.9	แสดงความสัมพันธ์ของ $V(t)$ กับเวลา t ใด ๆ ของไฟฟ้ากระแสสลับ.....	35
3.10	แสดงการ ต่อแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับกับตัวเก็บประจุแล้วทำให้ศักย์ไฟฟ้า เพิ่มเป็น 2 เท่า.....	36
3.11	แสดงการ ต่อวงจรไฟฟ้าให้ได้ศักย์ไฟฟ้าแบบทวีคูณ.....	37

3.12	แสดงการ ทดลองจริง เพื่อให้ได้ศักย์ไฟฟ้าแบบทวีคูณแบบ Cockcroft และ Walton	40
3.13	แสดงลักษณะหลักโครงสร้างของตัวเก็บประจุ.....	45
3.14	แสดงการเกิดประจุ q และสนามไฟฟ้า E ภายในตัวเก็บประจุ.....	46
3.15	แสดงลักษณะของอิเล็กทรอนิกส์ โคร สแตติก โวลต์มิเตอร์	48
3.16	แสดงการ วัดค่าศักย์ไฟฟ้าสูงโดยใช้ตัวแบ่งศักย์และอิเล็กทรอนิกส์ โคร สแตติก โวลต์มิเตอร์	50
3.17	แสดงการ ทดลองจริงการ วัดไฟฟ้าความต่างศักย์สูงโดยใช้ไมโครแอมมิเตอร์.....	51
3.18	แสดงการ วัดค่าของศักย์ไฟฟ้าความต่างศักย์สูง	52
3.19	แสดงลักษณะการ ทด เครื่องวัดค่าความต่างศักย์สูงโดยอาศัยสนามไฟฟ้าที่ใช้ งานจริง.....	53
3.20	แสดงการ ดิสซาร์ ฉายในและวงจรสมมูล.....	57
3.21	แสดงถึงกระแสดีสซาร์ กับการ เวลาที่เปลี่ยนไป	57
3.22	แสดงการ ดิสซาร์ บางส่วน.....	59
3.23	แสดงการทำงานของ เครื่องวัดรังสีในช่วงความต่างศักย์ระหว่างขั้วต่าง ๆ	61
3.24	แสดงแผนผังแสดงการทำงานของ เครื่องวัดรังสีอย่างง่าย.....	62
3.25	แผนภาพแสดงการทำงานของ เครื่องวัดรังสีปฏิภาค.....	64
3.26	แสดงส่วนต่าง ๆ ในการ วัดอนุภาคโดยใช้ เครื่องวัดแบบประกายแสง.....	68
3.27	แสดงการ เกิดประกายแสงและการ ขยายสัญญาณภายในหัววัดแบบประกายแสง ...	69
3.28	แสดงถึงการที่รังสีแกมมาทะลุผ่านสิ่งกีดขวางได้ และการ ตรวจนับรังสีแกมมา ที่เหลือจากการ วิ่งทะลุผ่านตะกั่ว.....	71
3.29	แสดงถึงการที่รังสีแกมมาตกกระทบสิ่งที่ดูดกลืนและระยะต่าง ๆ ที่แปรผันตาม ค่าของสมการที่ 3.82	72
3.30	แสดงปริมาณของรังสีแกมมาที่ ระยะทางความหนาของสิ่งกีดกัน.....	73
3.31	แสดงการ เกิดโฟโตอิเล็กทริก	75
3.32	แสดงการ เกิดปรากฏการณ์คอมป์ตัน	76
3.33	แสดงการ เกิดปรากฏการณ์อนุภาคคู่.....	78

รูปที่	ค หน้า
3.34 แสดงความสัมพันธ์การคูณกลืนเชิงมวลของตะกั่ว (μ_m) รังสีแกมมาโดย ตะกั่ว.....	80
4.1 แสดงส่วนประกอบของแหล่งกำเนิดไอออน ส่วนตั้งไอออน และส่วนโพกัส....	84
4.2 แสดงส่วนต่าง ๆ ของแหล่งกำเนิดไอออนเมื่อใช้งานแล้ว.....	85
4.3 แสดงการตัดส่วนประกอบของตัวเก็บประจุ	
ก. แผนอลูมิเนียม.....	87
ข. แผนพลาสติก.....	87
ค. การเอาแผนอลูมิเนียมพอยล์แทรกเข้าไปในระหว่างแผนพลาสติกที่ ซ้อนกันอยู่และต่อขั้วไฟฟ้าออกมา.....	87
ง. และ จ. การม้วนแผนพลาสติกและแผนอลูมิเนียม.....	88
ฉ. การเอาแผนพลาสติกและแผนอลูมิเนียมซ้อนกันสอดเข้าไปในท่อพีวีซี.....	88
ช. ตัวเก็บประจุที่สมบูรณ์ที่จะนำไปใช้งาน.....	88
4.4 ก. แสดงการต่อตัวเรียงกระแส.....	89
ข. ตัวเรียงกระแสที่ใช้งานจริง.....	89
4.5 แสดงถึงลักษณะการต่อวงจรแบบ Cockcroft-Walton.....	90
4.6 แสดงลักษณะการต่อวงจรเพื่อให้ได้ศักย์ไฟฟ้าสูงตามลักษณะที่ใช้งานจริง.....	92
4.7 แสดงแหล่งจ่ายไฟฟ้าเข้าเครื่องเร่งโปรตอน.....	95
4.8 แสดงส่วนประกอบของท่อเร่งบริเวณส่วนเร่งของเครื่องเร่งโปรตอน.....	97
4.9 แสดงส่วนท่อนำลำโปรตอน.....	98
4.10 แสดงลักษณะขั้วไฟฟ้าของท่อเร่งโปรตอน.....	99
4.11 แสดงลักษณะของวงแหวนที่ยึดระหว่างขั้วไฟฟ้าของท่อเร่งกับท่อแก้ว.....	100
4.12 แสดงลักษณะของวงแหวนโคจรรอบขั้วไฟฟ้าของท่อเร่ง.....	101
4.13 แสดงรูปท่อแก้วทรงกระบอก.....	102
4.14 แสดงส่วนต่าง ๆ ที่ยึดติดกันของส่วนนำลำโปรตอน.....	103
4.15 แสดงปฏิกิริยาโรตารีแบบเวน.....	104
4.16 แสดงลักษณะภายในและการทำงานของปั๊มไอพุงกระจาย.....	106
4.17 แสดงเกจเพนนิ่ง.....	108

รูปที่	หน้า
4.18 ก. แสดงส่วนประกอบภายในหัววัดของเกจเพนนิ่ง.....	109
ข. แสดงการทำงานของเกจเพนนิ่ง.....	109
4.19 แสดงการทดสอบความต้านทานลงบนกระดาษฉนวน.....	111
4.20 แสดงการทดสอบความต้านทานกระดาษฉนวนและท่อแกนกลางเข้าด้วยกัน.....	112
4.21 แสดงส่วนประกอบของเครื่องแบ่งศักย์ไฟฟ้าที่สมบูรณ์แล้ว.....	113
5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากไมโครแอมมิเตอร์ที่ต่อกับตัวแบ่งศักย์กับศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงที่จ่ายให้กับตัวแปลงศักย์ไฟฟ้าได้จากตารางที่ 5.1.....	119
5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากไมโครแอมป์ที่ต่ออนุกรมกับตัวแบ่งศักย์กับศักย์ไฟฟ้าสูงที่คำนวณได้จากสมการ 3.53 ซึ่งได้จากตารางที่ 5.2.....	120
5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่วัดได้จากไมโครแอมมิเตอร์กับศักย์ไฟฟ้าความต่างศักย์สูงที่คำนวณได้จากกฎของโอห์ม ดังตารางที่ 5.3.....	121
5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระหว่างศักย์ไฟฟ้าความต่างศักย์สูงกับแผ่นโลหะขนานได้จากตารางที่ 5.4.....	124
5.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแผ่นโลหะขนานกับขั้วไฟฟ้าทรงกลมกับความต่างศักย์ไฟฟ้าความต่างศักย์สูงได้จากตารางที่ 5.5.....	127
5.6 แสดง ก. อุปกรณ์ฟาราเดย์คัพ คอลเล็กเตอร์ (Faraday's cup collector)	128
ข. การต่ออุปกรณ์ฟาราเดย์คัพคอลเล็กเตอร์เพื่อวัดกระแสของลำโปรตอน.....	128
5.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าของลำอนุภาคที่วัดจากฟาราเดย์คัพคอลเล็กเตอร์กับศักย์ไฟฟ้าสูงที่จ่ายให้ท่อเร่งได้จากตารางที่ 5.6.....	130
5.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ได้จากการเร่งอนุภาคโปรตอนไปชนฟาราเดย์คัพคอลเล็กเตอร์กับศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วไฟฟ้าโพรบได้จากตารางที่ 5.7.....	132

รูปที่	หน้า	
5.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าของลำอนุภาคที่เร่งแล้วกับ ศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับขั้วไฟฟ้าโพลีก่อนเข้าท่อเร่งอนุภาคได้จากตารางที่ 5.8....	135
5.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสของลำอนุภาคที่ชนกับฟาราเดย์คัพ คอลเล็กเตอร์กับกระแสไฟฟ้าจากวงจรภายนอกของแหล่งกำเนิดไอออน ได้จากตารางที่ 5.9.....	138
5.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสจากการชนของอนุภาคกับฟาราเดย์คัพ คอลเล็กเตอร์กับค่าความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้าคาโทดและแอโนดที่แหล่งกำเนิด ไอออน.....	141
6.1	แสดงการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบเรดิโอแอคทีฟโดย $B^{11}(p,\alpha)Be^8$, $Be^9(p-d)Be^9$ และ $Li^7(p,\alpha)Be^8$	151
6.2	แสดงอะตอมของคาร์บอน-12 กลับมาอยู่สถานะปกติพลอยพลังงานออกมา...	152
6.3	แสดงลักษณะของฉากที่ใช้เล็อบส์ในการทดลองนิวเคลียร์	153
6.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของจำนวนอนุภาคแกมมาที่วัดได้กับพลังงานของอนุภาค แกมมา (MeV) ได้จากตารางที่ 6.1.....	156
6.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอนุภาคแกมมาที่ระดับค่าของพลังงาน ที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์รังสีแบบหลายช่องได้จากตารางที่ 6.2.....	160
6.6	กราฟแสดงจำนวนอนุภาคแกมมาที่วัดได้จากเครื่องวัดแบบหลายช่องโดยที่ฉาก ไม่มีโบแรกซ์ได้จากตารางที่ 6.3.....	164
6.7	กราฟแสดงจำนวนอนุภาคแกมมาที่ระดับปกติ (background) โดยวัดจาก เครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่อง.....	168
6.8	แสดงการจับคู่กรณีในการทดลองเพื่อนับจำนวนรังสีแกมมา.....	171
6.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอนุภาคที่นับได้สัมพันธ์กับเวลา (นาที) ได้จากตารางที่ 6.5.....	173
6.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอนุภาคที่นับได้เป็นสัญญาณกับความหนา ของตะกั่ว (เซนติเมตร) ได้จากตารางที่ 6.6	176
6.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอนุภาคที่นับได้กับความหนาของตะกั่ว (เซนติเมตร) ได้จากตารางที่ 6.7.....	179