

การออกแบบและการสร้างเครื่องเอกรงค์



นาย จำนงค์ ฉายเชิด

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย สุโขทัยราชภัฏมหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2524

THE DESIGN AND CONSTRUCTION OF A MONOCHROMATOR

Mr. Chumnong Chaicherd

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science

Department of Physics


Graduate School

Chulalongkorn University

1981

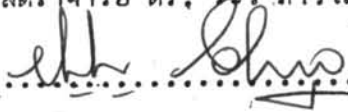
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบและการสร้างเครื่องเอกซเรย์
โดย นาย ฉันทศักดิ์ ฉายเชิด
ภาควิชา ฟิสิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. รัชต์ รักวีระธรรม


บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้มหาวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

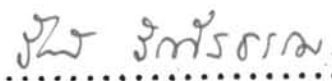
.....  คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุประติษฐ์ บุนนาค)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....  ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ชรินทร์ ภาวิไล)

.....  กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิญญู เจริญกุล)

.....  กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิศิษฐ์ เล็งหะพันธ์)

.....  กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. รัชต์ รักวีระธรรม)

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Thesis Title The Design and Construction of a Monochromator
Name Mr. Chumnong Chaicherd
Thesis Advisor Associate Professor Rachanee Rakveeradham, Ph.D.
Department Physics
Academic Year 1980

ABSTRACT

A monochromator is an optical instrument for producing monochromatic light. This instrument consists of five basic components : a dispersing element, a collimator, a telescope, an entrance slit and an exit slit. The instrument was designed to fulfil several optical conditions, and constructed to perform certain mechanical manoeuvres.

Lenses for collimator and telescope were designed as cemented doublets for correcting chromatic aberration, spherical aberration and coma. The lenses were cut from originally flat pieces of crown glass and flint glass to suitable sizes as circular discs which were further subjected to grinding, smoothing and polishing. Each lens was then tested curvatures of the surface. Afterwards cemented doublet was tested for their qualities.

A dispersing table, arms, collimator and telescope holders, disc scale and vernier scale were also designed and constructed.

As the monochromator was established, the wavelength, the intensity and the purity of light obtained from the monochromator were then measured accurately at many positions of the exit slit.

หัวข้อวิทยานิพนธ์ : การออกแบบและการสร้างเครื่องเอกรงค์
ชื่อ นิสิต : นาย จันทงค์ ฉายเชิด
อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.รัชณี รักวีระธรรม
ภาควิชา : ฟิสิกส์
ปีการศึกษา : 2523



บทคัดย่อ

เครื่องเอกรงค์เป็นทัศนอุปกรณ์ สำหรับให้แสงสีเดียว ประกอบด้วยองค์ประกอบพื้นฐาน 5 อย่าง คือ ตัวกระจายแสง คอลลิเมเตอร์ กล้องโทรทรรศน์ ช่องแคบเปิดแสงเข้าและช่องแคบเปิดแสงออก เครื่องมือนี้ได้รับการออกแบบให้เป็นไปตามหลักวิชาทัศนศาสตร์ และได้สร้างระบบเชิงกลที่สอดคล้องกัน

ได้ออกแบบให้เลนส์สำหรับกล้องคอลลิเมเตอร์ และสำหรับกล้องโทรทรรศน์เป็นเลนส์คู่ประกบ ทั้งนี้เพื่อแก้ความคลาดตรงค้ ความคลาดทรงกลมและโคมา การสร้างเลนส์ เริ่มจากตัดแผ่นแก้วคราวน์ และแผ่นแก้วฟลินท์ให้เป็นแผ่นกลมตามขนาดที่ต้องการ นำแผ่นกลมไปฝน ชัด เรียบและขัดไล่แล้วจึงนำเลนส์แต่ละอันไปทดสอบหาความโค้งของผิวเลนส์ จากนั้นนำมาประกบเป็นเลนส์คู่ประกบสองอัน แล้วนำเลนส์คู่ประกบนั้นไปทดสอบคุณภาพ

หลังจากนั้นได้ออกแบบและสร้างแท่นวางตัวกระจายแสง แชน ตัวจับกล้องคอลลิเมเตอร์ และกล้องโทรทรรศน์ แผ่นสเกลกลมและ เวอร์เนียสเกลแล้วประกอบเข้าด้วยกัน

เมื่อได้เครื่องเอกรงค์แล้ว ได้ทำการตรวจสอบความยาวคลื่น วัดความเข้ม และหาความบริสุทธิ์ของแสงที่ออกจากช่องแคบเปิดแสงออกของ เครื่องเอกรงค์ เมื่อช่องแคบนี้อยู่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ กัน



กิตติกรรมประกาศ

ในงานวิจัยนี้ ผู้เขียนได้รับคำแนะนำสั่งสอน ทั้งในด้านความรู้และการทำวิจัยตลอดจน
วิธีแก้ปัญหาต่าง ๆ จากรองศาสตราจารย์ ดร.รัชณี รักวีระธรรม อาจารย์ที่ปรึกษา และ จาก
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กัญญา เจริญกุล ซึ่งทำให้งานสำเร็จลุล่วงไปได้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระ
คุณอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กัญญา เจริญกุล ที่ได้กรุณาให้ยืมเครื่องมือและ
อุปกรณ์ต่าง ๆ สำหรับใช้ในการวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กัญญา เจริญกุล ที่ได้กรุณาให้ยืมอุปกรณ์ทางไฟฟ้า
และอิเล็กทรอนิกส์ พร้อมทั้งให้คำแนะนำในการใช้อุปกรณ์ดังกล่าว

ขอขอบคุณ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ บางแสน และ
อาจารย์สมบัติ การล้มศาสตร์ ที่ได้กรุณาให้ยืมอุปกรณ์วัดแสง

ขอขอบคุณ อาจารย์รังสรรค์ เฉลิมศรี ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย
สงขลานครินทร์ ขอขอบคุณ คุณวิทยา ปรียธาดา ศูนย์คอมพิวเตอร์ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
ไทย และขอขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือจนงานวิจัยนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้กำลังใจและทุนสนับสนุนในการศึกษาครั้งนี้ด้วยดีตลอดมา
ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยและ โครงการพัฒนามหาวิทยาลัยที่ได้กรุณาให้ทุนในการวิจัยครั้งนี้

และขอบคุณคุณสุนดา ลู่วรรณ ที่ให้ความกรุณาช่วยเหลือเรื่องการพัฒนาวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จ
เป็นรูปเล่มขึ้นมาได้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
รายการตารางประกอบ	ฅ
รายการรูปประกอบ	จ
บทที่	
1 บทนำ	1
1. วัตถุประสงค์	1
2. วัตถุประสงค์ดำเนินงาน	1
3. เครื่องมือ	1
4. ตัวกระจายแสง	7
4.1 ปริซึมกระจายแสง	7
4.2 เกรตติ้ง	13
5. สันนิษฐานทางเครื่องหมายของการหักเหผ่านผิวทรงกลมเดี่ยว	17
2 ทฤษฎีของความคลาดและการแกะรอยรังสี	19
1. ความคลาดของระบบทัศนศาสตร์	15
1.1 ความคลาดเชิงรังสี	19
1.2 ความคลาดเชิงหน้าคลื่น	19
2. ความคลาดตรง	21
2.1 ความคลาดตรงเชิงรังสี	23
2.2 ความคลาดตรงเชิงหน้าคลื่น	24



3.	ความคลาดเอกรงค์	31
3.1	ความคลาดเอกรงค์เชิงรังสี	31
3.1.1	ความคลาดทรงกลม	31
3.1.2	โคมา	33
3.1.3	ความคลาดเฉียง	35
3.1.4	ความโค้งของสนาม	36
3.1.5	ความบิดเบี้ยว	38
3.2	ความคลาดเอกรงค์เชิงหน้าคลื่น	40
3.2.1	ทฤษฎีปฐมภูมิ	40
3.2.2	ฟังก์ชันของความคลาดปฐมภูมิ	41
3.2.3	ความสัมพันธ์ของความคลาดเอกรงค์เชิงหน้าคลื่นและเชิงรังสี ..	46
4.	การแกะรอยรังสี	49
5.	สัมพรรคภาพมหาค่าความคลาดเชิงหน้าคลื่น	54
3.	การคำนวณออกแบบและการสร้างเลนส์	58
1.	การคำนวณหารูปร่างของเลนส์ออร์บ์	61
2.	การเลือกรูปร่างของเลนส์ออร์บ์ที่ให้ค่าความคลาดเอกรงค์น้อยที่สุด	65
3.	การสร้างเลนส์ออร์บ์	85
4.	การประกอบเลนส์ออร์บ์	87
4.	การทดสอบเลนส์ที่สร้างขึ้น	88
1.	การทดสอบด้วยวิธีวงแหวนของนิวตัน	88
1.1	การหาความสัมพันธ์ของความโค้งของผิวและทางยาวโฟกัสของเลนส์ประกอบสำหรับ เลนส์คอลลิเมเตอร์	94

1.2	การหารัดที่มีความโค้งของผิวและทางยาวโฟกัสของ เลนส์ประกอบสำหรับ เลนส์โทรทรรศน์	100
2.	การคำนวณหาตำแหน่งและทางยาวโฟกัสของ เลนส์โดยการแกะรอยรังสี	107
2.1	การหาตำแหน่งและทางยาวโฟกัสของ เลนส์คอนสปีเมเตอร์	112
2.2	การหาตำแหน่งและทางยาวโฟกัสของ เลนส์โทรทรรศน์	116
3.	การทดลองกำลังขยาย	120
3.1	การหาทางยาวโฟกัสของ เลนส์คอนสปีเมเตอร์โดยการทดลองกำลังขยาย ..	123
3.2	การหาทางยาวโฟกัสของ เลนส์โทรทรรศน์โดยการทดลองกำลังขยาย	123
4.	การทดลองด้วยดาว	123
4.1	การทดลองด้วยดาวสำหรับ เลนส์คอนสปีเมเตอร์	128
4.2	การทดลองด้วยดาวสำหรับ เลนส์โทรทรรศน์	128
5.	การทดลองด้วยคมมีดของฟูคอลลี	128
5.1	การทดลองด้วยคมมีดสำหรับ เลนส์คอนสปีเมเตอร์	133
5.2	การทดลองด้วยคมมีดสำหรับ เลนส์โทรทรรศน์	133
6.	การทดลองด้วยวิธีของฮาร์ตแมนน์	136
6.1	การทดลองด้วยวิธีของฮาร์ตแมนน์สำหรับ เลนส์คอนสปีเมเตอร์	139
6.2	การทดลองด้วยวิธีของฮาร์ตแมนน์สำหรับ เลนส์โทรทรรศน์	142
7.	การทดลองหาค่ากำลังแยก	143
7.1	การทดลองหาค่ากำลังแยกของ เลนส์คอนสปีเมเตอร์	144
7.2	การทดลองหาค่ากำลังแยกของ เลนส์โทรทรรศน์	147

5.	การออกแบบและสร้างลั่วนประกอบกลไก	150
1.	แทนวางตัวกระจายแล่ง	150
2.	ลากล้องยึดเลนส์กับช่องแคบ	151
2.1	ตัวสับเลนส์	151
2.2	ตัวสับช่องแคบ	152
2.3	ช่องแคบ	152
3.	ฐาน	154
4.	การปรับเครื่องเอกรงค์	157
4.1	การปรับแนวแกนมุขยสำคัญของกล้องคอลลิเมเตอร์ให้ร่วมกันกับของ กล้องโทรทรรศน์	157
4.2	การปรับให้ระนาบของเกรตติงตั้งได้ฉากกับแกนมุขยสำคัญของกล้อง ..	160
4.3	การปรับระยะโฟกัสของกล้องคอลลิเมเตอร์และของกล้องโทรทรรศน์ ..	161
5.	การใช้เครื่องเอกรงค์	161
6.	การทดลองเครื่องเอกรงค์ที่สร้างขึ้น	163
1.	ลักษณะของเกรตติงที่ใช้ในการทดลอง	163
2.	การทดลองเครื่องเอกรงค์กับแหล่งกำเนิดแสงต่าง ๆ	165
3.	การตรวจสอบความยาวคลื่นที่ได้จากเครื่องเอกรงค์	170
4.	การทดลองวัดแล่ง	174
5.	การหาความบริสุทธิ์ของแล่ง	180
7.	สรุปและข้อเสนอนนะ	184
	เอกสารอ้างอิง	189

บทที่		ฉ.	หน้า
ภาคผนวก	ก	โปรแกรมคอมพิวเตอร์	191
		ก 1. โปรแกรมหลัก	191
		ก 2. ฝังงาน	193
		ก 3. ผลการคำนวณ	194
	ข	เขียนแบบเครื่องเอกซเรย์	206
	ค	แหล่งกำเนิดแสงขาว	215
	ง	รายละเอียดของเครื่องเอกซเรย์	217
ประวัติ		218

รายการตารางประกอบ

ตารางที่	หน้า
3.1	ผู้ตัดค่าความโค้งของผิวสำหรับ เลนส์คอลลิเมเตอร์และ เลนส์โทรทรรศน์..... 66
3.2	สัมประสิทธิ์ของความคลาดทรงกลมและของ โคมาสำหรับ เลนส์คอลลิเมเตอร์..... 78
3.3	สัมประสิทธิ์ของความคลาดทรงกลมและของ โคมาสำหรับ เลนส์โทรทรรศน์..... 79
4.1	ผลจากการแกะรอยรังสีในโซนต่าง ๆ ของเลนส์คอลลิเมเตอร์..... 112
4.2	ผลจากการแกะรอยรังสีในโซนต่าง ๆ ของเลนส์โทรทรรศน์ 116
4.3	ผลการทดลองหาทางยาวโฟกัสของ เลนส์คอลลิเมเตอร์ด้วยการทดลองกำลังขยาย.. 124
4.4	ผลการทดลองหาทางยาวโฟกัสของ เลนส์โทรทรรศน์ด้วยการทดลองกำลังขยาย..... 124
4.5	ทางยาวโฟกัสในแต่ละโซนจากการทดลองด้วยเครื่องมือของฟูคอลท์สำหรับ เลนส์ คอลลิเมเตอร์ 133
4.6	ทางยาวโฟกัสในแต่ละโซนจากการทดลองด้วยเครื่องมือของฟูคอลท์สำหรับ เลนส์โทรทรรศน์ 136
4.7	ผลการทดลองหาทางยาวโฟกัสในแต่ละโซนจากการทดลองด้วยวิธีของฮาร์ดแมนน์ สำหรับ เลนส์คอลลิเมเตอร์ 140
4.8	ผลการทดลองหาทางยาวโฟกัสในแต่ละโซนจากการทดลองด้วยวิธีของฮาร์ดแมนน์ สำหรับ เลนส์โทรทรรศน์ 141
4.9	ข้อมูลการทดลองหาค่ากำลังแยกของ เลนส์คอลลิเมเตอร์ 145
4.10	ทางยาวโฟกัสของ เลนส์คอลลิเมเตอร์ จากการทดลองหาค่ากำลังแยก 146
4.11	ข้อมูลการทดลองหาค่ากำลังแยกของ เลนส์โทรทรรศน์ 148
4.12	ทางยาวโฟกัสของ เลนส์โทรทรรศน์ จากการทดลองหาค่ากำลังแยก 149
6.1	ค่าความไวปริศน์ของแสงในทางทฤษฎี 165
6.2	เส้นสี่เหลี่ยมจากการทดลอง เครื่องเอกซเรย์ 166
6.3	ตำแหน่งสี่เหลี่ยมของ เส้นสี่เหลี่ยมจากการทดลองโฟโตนิกส์ซึ่งอ่านได้จากเวอร์เฟียร์ ของเครื่องสี่เหลี่ยมโตริเตอร์ 170
6.4	ผลการตรวจสอบความยาวคลื่น..... 173
6.5	ผลการหาความปริศน์ของแสง 182
7.1	รัศมีความโค้งของผิว เลนส์จากการออกแบบและจากการสร้าง 185

ตารางที่

ผู้.

หน้า

7.2	ทางยาวโฟกัสของเลนส์จากการทดลองด้วยวิธีต่าง ๆ	185
7.3	ความคลาดทรงกลมและโคมาจากการออกแบบและจากการสร้างโดยการคำนวณ ..	186
7.4	ความคลาดทรงกลมเชิงรังสีจากผลการทดลองด้วยวิธีต่าง ๆ	187

รายการรูปประกอบ

รูปที่	หน้า
1.1 แสดงหลักการทํางานของเครื่องเอกซเรย์	2
1.1 ก แบบลิตโทรวัวในระบบปริซึม	4
1.1 ข แบบเฟรีย	4
1.1 ค ระบบฮีเอิร์ต-แพลโท	5
1.1 ง ระบบเซอร์นีย์-เทอร์เนอร์	5
1.1 จ ระบบเซอร์นีย์-เทอร์เนอร์ของบริษัทเอียง เบค จำกัด	5
1.1 ฉ แบบปาเลเฮน-รัง	6
1.1 ช แบบเอเกิล	6
1.1 ซ แบบแวลล์เวียร์	7
1.1 ฌ แบบเฮยา-นามิโอะกะ	7
1.2 แสดงการกระจายแสง (ก) และการเบี่ยงเบนแสง (ข)	9
1.3 การหาค่าสังแยกของปริซึม	12
1.4 ปรากฏการณ์การแทรกสอดของคลื่นแสงเมื่อผ่านเกรตติง	13
2.1 ความคลาดเชิงรังสี (δl) และความคลาดเชิงหน้าคลื่น (W)	20
2.2 ความคลาดตรงค	21
2.3 ความคลาดตรงคตามยาวและตามขวาง	22
2.4 ความคลาดตรงคเชิงหน้าคลื่น	24
2.5 รังสีผ่านระบบจากวัตถุไปยังภาพ	25
2.6 การหาความคลาดตรงคเชิงหน้าคลื่น	27
2.7 ความคลาดเชิงรังสีตามยาว (δf) และเชิงหน้าคลื่นตามยาว (W_L)	29
2.8 ช่องเปิดของตัวจำกัดแสง	30
2.9 ความคลาดทรงกลมเชิงรังสี	32
2.10 โคมา	33
2.11 การเกิดโคมา	34

รูปที่

2.11 (ก) ระนาบของเลนส์	34
2.11 (ข) ระนาบของภาพที่เกิดจากโชนเดียวกัน	34
2.11 (ค) ภาพที่ได้จากทุก ๆ โชน	34
2.12 การเกิดความคลาดเอียง	35
2.13 โลกัล์ของ T และ S	36
2.14 ความคลาดเอียงและความโค้งของสนาม	37
2.14 (ก) ความคลาดเอียงแก้ขาด	37
2.14 (ข) ความโค้งของสนาม	37
2.14 (ค) ความคลาดเอียงแก้เกิน	37
2.15 การเกิดความบิดเบี้ยว	39
2.16 การหาฟังก์ชันของความคลาด	41
2.17 รังสีหักเหผ่านผิวทรงกลมเดี่ยวใน 3 มิติ	43
2.18 ความสัมพันธ์ของความคลาดเอกรงค์เชิงหน้าคลื่นและเชิงรังสี	47
2.19 การหักเหของรังสีผ่านผิวทรงกลมเดี่ยว	50
2.20 การหักเหของรังสีผ่านผิวทรงกลมสองผิว	53
3.1 ผิวโค้งทรงกลมที่มีค่า C เป็นบวกและลบ	63
3.1 (ก) ผิวโค้งทรงกลมที่มีค่า C เป็นลบ	63
3.1 (ข) ผิวโค้งทรงกลมที่มีค่า C เป็นบวก	63
3.2 กราฟความคลาดทรงกลมและโคมาของเลนส์คอลลิเมเตอร์	80
3.3 รูปร่างของเลนส์คอลลิเมเตอร์จากการออกแบบ	83
3.4 กราฟความคลาดทรงกลมและโคมาของเลนส์โทรทัศน	81
3.5 รูปร่างของเลนส์โทรทัศนจากการออกแบบ	84
3.6 การชดเชยและชดใส่ผิวโค้ง	86
4.1 การทดลองด้วยวิธีวงแหวนของนิวตัน	89

รูปที่	หน้า
4.1	การทดสอบด้วยวิธีวงแหวนของนิวตัน 89
4.2	การหาระยะห่างจากจุดสัมผัสของผิวโค้งทรงกลม 90
4.3	การหาความหนาของฟิล์มบาง 91
4.4	แสดงกราฟการหาระยะที่มีความโค้งของผิวที่ 1 ของเลนส์นูนสำหรับเลนส์คอลลีเมเตอร์ ด้วยวิธีทดสอบวงแหวนของนิวตัน; D มีหน่วยเป็นเซนติเมตร 95
4.5	แสดงกราฟการหาระยะที่มีความโค้งของผิวที่ 2 ของเลนส์นูนสำหรับเลนส์คอลลีเม เตอร์ ด้วยวิธีทดสอบวงแหวนของนิวตัน : D มีหน่วยเป็น เซนติเมตร 95
4.6	แสดงกราฟการหาระยะที่มีความโค้งของผิวที่ 1 ของเลนส์เว้า สำหรับเลนส์ คอลลีเมเตอร์ ด้วยวิธีทดสอบวงแหวนของนิวตัน : D มีหน่วยเป็น เซนติเมตร .. 97
4.7	แสดงกราฟการหาระยะที่มีความโค้งของผิวที่ 2 ของเลนส์เว้าสำหรับเลนส์คอลลีเม เตอร์ ด้วยวิธีทดสอบวงแหวนของนิวตัน ; D มีหน่วยเป็นเซนติเมตร 97
4.8	รูปร่างของเลนส์คอลลีเมเตอร์ จากการสร้าง 97
4.9	รูปร่างของเลนส์คอลลีเมเตอร์ในการคำนวณหาทางยาวโฟกัสปฐมภูมิ 99
4.10	แสดงกราฟการหาระยะที่มีความโค้งของผิวที่ 1 ของเลนส์นูน สำหรับเลนส์โทรทัศน์ ด้วยวิธีทดสอบวงแหวนของนิวตัน ; D มีหน่วยเป็น เซนติเมตร 102
4.11	แสดงกราฟการหาระยะที่มีความโค้งของผิวที่ 22 ของเลนส์นูนสำหรับเลนส์โทรทัศน์ ด้วยวิธีทดสอบวงแหวนของนิวตัน ; D มีหน่วยเป็น เซนติเมตร 102
4.12	แสดงกราฟการหาระยะที่มีความโค้งของผิวที่ 1 ของเลนส์เว้าสำหรับเลนส์โทรทัศน์ ด้วยวิธีทดสอบวงแหวนของนิวตัน ; D มีหน่วยเป็น เซนติเมตร 103
4.13	แสดงกราฟการหาระยะที่มีความโค้งของผิวที่ 2 ของเลนส์เว้า สำหรับเลนส์โทรทัศน์ ด้วยวิธีทดสอบวงแหวนของนิวตัน ; D มีหน่วยเป็นเซนติเมตร 103
4.14	รูปร่างของเลนส์โทรทัศน์จากการสร้าง 105
4.15	การหาทางยาวโฟกัสโดยการแกะรอยรังสี 107
4.16	แสดงการหาทางยาวโฟกัสสุดท้ายของเลนส์หนา H และ H คือจุดमुखสำคัญของเลนส์ 109
4.17	การหักเหที่ผิวทรงกลมเดี่ยว เมื่อรังสีตกกระทบเป็นรังสีขนาน 111

รูปที่

4.17 (ก)	การหาตำแหน่งและทางยาวโฟกัสโดยการแกะรอยรังสีสำหรับเลนส์ คอลลีเมเตอร์	111
4.17 (ข)	การหาตำแหน่งและทางยาวโฟกัสโดยการแกะรอยรังสีสำหรับเลนส์ โทรทรรศน์	111
4.18	การเกิดภาพทางทัศนศาสตร์เกาส์เซียน	121
4.19	ภาพของดาวจากเลนส์ที่สมบูรณ์ บริเวณที่เลเยนคือบริเวณสว่าง	125
4.20	ภาพของดาวจากเลนส์ที่มีความคลาดทรงกลมแก้ไขแล้ว บริเวณที่เลเยนคือ คือ บริเวณสว่าง	126
4.21	ภาพของดาวจากเลนส์ที่มีความคลาดทรงกลมแก้ไขแล้ว บริเวณที่เลเยนคือ บริเวณสว่าง	127
4.22	ภาพถ่ายจากการทดลองด้วยดาวสำหรับเลนส์คอลลีเมเตอร์	129
4.23	ภาพถ่ายจากการทดลองด้วยดาวสำหรับเลนส์โทรทรรศน์	130
4.24	แสดงการสังเกตอุปกรณ์ทดลองด้วยคอมพิวเตอร์	132
4.25	แผนภาพของรังสีเมื่อผ่านเลนส์คอลลีเมเตอร์	134
4.26	ภาพถ่ายหน้า เลนส์คอลลีเมเตอร์เมื่อใบมีดอยู่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามรูปที่ 4.25	134
4.27	แผนภาพของรังสีเมื่อผ่านเลนส์โทรทรรศน์	135
4.28	ภาพถ่ายหน้า เลนส์โทรทรรศน์ เมื่อใบมีดอยู่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามรูปที่ 4.27	135
4.29	แสดงการสังเกตอุปกรณ์ทดลองด้วยวิธีของฮาร์ตแมนน์	137
4.30	แสดงแผนภาพเพื่อหาทางยาวโฟกัสของ เลนส์ด้วยวิธีของฮาร์ตแมนน์	139
4.31	แสดงภาพถ่ายจากการทดลองเลนส์คอลลีเมเตอร์ ด้วยวิธีของฮาร์ตแมนน์ ..	140
4.32	แสดงภาพถ่ายจากการทดลองเลนส์โทรทรรศน์ด้วยวิธีของฮาร์ตแมนน์	142
4.33	ปรากฏการณ์เสี้ยวเบนของคลื่นแสงจากจุดวัตถุ 2 จุด	143

รูปที่	ต. หน้า
4.34	ภาพถ่ายของจุดกำเนิดแสง 2 จุดสำหรับเลนส์คอลลิเมเตอร์ 145
4.35	ภาพถ่ายของจุดกำเนิดแสง 2 จุดสำหรับเลนส์โทรทรรศน์ 147
5.1	เห็นวางตัวกระจายแสง 150
5.2	ภาพตัดขวางของตัวรับเลนส์ 152
5.3	ภาพตัดขวางของตัวรับย่นแคบ 153
5.4	ฐานของเครื่องเอกรงค์ 155
5.5	การบังสับกล้องโทรทรรศน์ 156
5.6	ตัวยึดกล้อง 157
5.7	ภาพเขียนเครื่องเอกรงค์ 158
5.8	ภาพถ่ายเครื่องเอกรงค์ 159
6.1	รูปร่างของเกรตติงที่ใช้ในการทดลอง 163
6.1 (ก)	ภาพเขียนเกรตติง 163
6.1 (ข)	ภาพถ่ายเกรตติง 163
6.2	กราฟระหว่างตำแหน่งของล่เกลกับความยาวคลื่นจากการทดลองเครื่องเอกรงค์ 168
6.3	ภาพถ่ายเส้นล่เปกตรัมและแถบล่เปกตรัมจากการทดลอง 169
6.4	กราฟระหว่างตำแหน่งของล่เกลกับความยาวคลื่นจากการทดลองเครื่องล่เปก โตรมิเตอร์ 172
6.5	แสดงการวัดอุปกรณ์วัดล่ความยาวคลื่น 171
6.6	โฟโตมิเตอร์โมเดล 8020 174
6.7 (ก)	กราฟระหว่างความเข้มสัมพัทธ์กับความยาวคลื่น 176
6.7 (ข)	กราฟความสามารถในการตอบสนองของซีซีดีเยียมต่อความยาวคลื่นต่าง ๆ ของเครื่องโฟโตมิเตอร์ โมเดล 8020 178
6.7 (ค)	กราฟระหว่างความเข้มสัมพัทธ์ที่แก้ไขจากกราฟรูปที่ 6.7 ก ด้วยกราฟ รูปที่ 6.7 ข 179
6.8	การกระจายของแสงที่ช่องเปิด 181

รูปที่		ถ.
		หน้า
6.9	กราฟระหว่างความกว้างของช่องแคบและค่าเฉลี่ยของ $d\lambda$	183
ผ.1	แหล่งกำเนิดแสงขาว	216