แบบเรียนของกระทรวงศึกษาธิการ

ชุดวิทยาศาสตร์

แสง

ชั้นเตรียมอุดมศึกษา

กองวิชาการ กระทรวงศึกษาธิการ

หนังสือชุดวิทยาศาสตร์

แสง

ชั้นเตรียมอุดมศึกษา

พิมพ์ครั้งที่หนึ่ง ๑๐,๐๐๐ เล่ม

พ. ศ. ๒๔๙๗

ปกกระดาษราคาเล่มละ ๑๔.๐๐ บาท

พิมพ์ที่โรงพิมพ์คุรุสภา

ปากคลองบางลำพูบน พระนคร

มีลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติ

ก 06189

คำนำ

หนังสือแสง ชั้นเตรียมอุดมศึกษา ซึ่งนายวัฒนา นิตยศรี เรียบเรียง เป็นหนังสือที่ชนะการประกวด ในการประกวดแบบเรียน ครั้งที่ ๗ พ.ศ. ๒๔๙๕ กรมวิชาการได้พิจารณาแล้ว เห็นสมควรใช้เป็นแบบเรียน สำหรับชั้นเตรียมอุดมศึกษา แผนกวิทยาศาสตร์ จึงได้จัดพิมพ์ขึ้น โดยผู้เรียบเรียงได้มอบลิขสิทธิ์หนังสือนี้ให้กระทรวงศึกษาธิการ.

กรมวิชาการ

๑๑ ตุลาคม ๒๔๙๗

ตามที่กรมวิชาการได้จัดให้มีการประกวดแบบเรียน ครั้งที่ ๗ ขึ้น เมื่อ พ.ศ. ๒๔๙๕ และได้คัดเลือกหนังสือแสง ชั้นเตรียมอุดมศึกษา ซึ่ง นายวัฒนา นิตยศรี เรียบเรียง เป็นแบบเรียนสำหรับชั้นเตรียมอุดมศึกษา แผนกวิทยาศาสตร์นั้น ผู้เรียบเรียงได้มอบลิขสิทธิ์หนังสือนี้ให้กระทรวง ศึกษาธิการ และกระทรวงศึกษาธิการได้อนุมัติให้พิมพ์ขึ้นใช้เป็นแบบเรียน เมื่อวันที่ ๑๑ ตุลาคม ๒๔๙๗.

พลเอก ป. ชุณหวัน

รัฐมนตรีว่าการกระทรวงศึกษาธิการ

สารบาญ

หน้า

คำนำ

สัญญลักษณ์ที่ใช้ในเล่ม

บทที่ 1 ความเบื้องต้น

แสงสว่าง แหล่งกำเนิดของแสง ประโยชน์ของแสงสว่าง 1

การที่เราแลเห็นสิ่งต่าง ๆ ได้ แสงสว่างเดินทางจากดวงอาทิตย์มาสู่โลกเรา 2

เทหวัตถุโชติ เทหวัตถุอโชติ ตัวกลาง 3

วิธีทดสอบตัวกลาง รังสีของแสง 5

แสงสว่างเดินทางเป็นเส้นตรงในตัวกลางเอกพันธุ์ 7

รูปที่เกิดขึ้นเมื่อแสงลอดช่องเข้ามา 8

กล้องถ่ายรูปรูเข็ม 9

เงา 12

ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแหล่งกำเนิดแสง ตัวกลาง และเงา 14

สุริยุปราคา 17

จันทรุปราคา 19

แบบฝึกหัดที่ 1 21

บทที่ 2 ความสว่างของดวงไฟ

กำลังการส่องสว่าง 24

ความเข้มแห่งการส่องสว่างที่จุดใดจุดหนึ่ง 25

กฎกำลังสองผกผัน 27

การเปรียบเทียบกำลังการส่องสว่าง 31

หน้า

โฟโตมิเตอร์ 37

แบบฝึกหัดที่ 2 39

บทที่ 3 การสะท้อนของแสงบนผิวระนาบ

การสะท้อนของแสง 43

กฎของการสะท้อนของแสง 44

ภาพ 46

ภาพในกระจกเงาระนาบเป็นภาพเสมือน

การพิสูจน์ว่า ระยะภาพจากกระจกเงาระนาบเท่ากับระยะจากกระจกเงาถึงวัตถุ 48

การทดลองว่า ระยะภาพจากกระจกเงาระนาบ = ระยะจากกระจกเงาถึงวัตถุ 50

วิธีเขียนทางเดินของแสงมายังตา 52

ขนาดของกระจกเงาที่สามารถให้ผู้ส่องแลเห็นตนเองได้ตลอดตัว 54

การเหแผ่นกระจกเงาระนาบ 55

เซกสแตนต์ 58

กระจกเงาระนาบ 2 บานวางเป็นมุมซึ่งกันและกัน 59

แสดงภาพจากกระจกเงาทำมุมต่างๆ กัน และวิธีเขียนทางเดินของแสงมายังตา 61

จำนวนภาพที่เกิดจากกระจกเงา 2 บานที่ทำมุมต่าง ๆ กัน

การสะท้อนของแสงบนกระจกเงาระนาบ 2 บานที่วางขนานกัน

และหันหน้าเข้าหากัน 62

การเกิดภาพซ้อนในกระจกเงาที่มีความหนามาก 64

การสะท้อนของแสงจากกระจกเงาระนาบหลายบาน 65

เรื่องเบ็ดเตล็ดเกี่ยวกับการสะท้อนของแสง 66

แบบฝึกหัดที่ 3 69

หน้า

บทที่ 4 การสะท้อนของแสงบนผิวทรงกลม

กระจกเงาทรงกลม ชื่อส่วนต่าง ๆ ของกระจกเงาทรงกลม 73

การสะท้อนของแสงบนผิวทรงกลม

การสะท้อนของแสงที่ขนานกับแกนมุขสำคัญ 74

โฟกัสมุขสำคัญอยู่ที่จุดกึ่งกลางของรัศมีความโค้งของกระจกเงา 75

การหาที่ตั้งของภาพในกระจกเงาทรงกลม 77

วิธีเขียนทางเดินของแสงมายังตา แสดงว่าตาเห็นภาพจากกระจกเงาทรงกลมได้อย่างไร 80

ความสัมพันธ์ระหว่างระยะต่าง ๆ ของกระจกเงาทรงกลม 82

กำลังขยายภาพของกระจกเงาทรงกลม 89

โฟกัสสังยุคของกระจกเงา 97

วิธีหาความยาวโฟกัสของกระจกเงาเว้า 99

วิธีหาความยาวโฟกัสของกระจกเงานูน 104

แบบฝึกหัดที่ 4 106

บทที่ 5 การหักเหของแสง

การหักเหของแสง การหักเหมีสอง 2 ลักษณะ 113

ตัวอย่างที่เรามักจะแลเห็นเกี่ยวกับการหักเหของแสง 114

การทดลองที่แสดงว่าแสงมีการหักเหเมื่อผ่านตัวกลางต่างชนิดกัน 115

ทำไมแสงจึงมีการหักเหเมื่อผ่านเข้าไปในตัวกลางต่างชนิดกัน 118

กฎของการหักเหของแสง ดรรชนีหักเห 119

การหาดรรชนีหักเห 122

หน้า

วิธีเขียนรูปแสดงการหักเหของแสงจากรังสีตกกระทบ
และตรรชนีหักเหที่กำหนดให้ 125
ตรรชนีหักเหจากตัวกลาง A ไปสู่ตัวกลาง B เป็นส่วนย้อนกลับ
ของตรรชนีหักเหจากตัวกลาง B ไปสู่ตัวกลาง A 129
ถ้าแสงผ่านเข้าและผ่านออกทางด้านที่ขนานกันของตัวกลาง มุมตกกระทบ
ทางด้านที่แสงผ่านเข้าจะเท่ากับมุมหักเหทางด้านที่แสงผ่านออก 130
วิธีหาตรรชนีหักเหเมื่อแสงผ่านตัวกลางหลาย ๆ ชนิดที่วางติดกัน
และมีด้านที่ติดกันขนานกัน 131
ความลึกปรากฏของบ่อน้ำเท่ากับ $\frac{3}{4}$ ของความลึกแท้จริง 132
มุมวิกฤต 136
การสะท้อนกลับหมด 137
วิธีหามุมวิกฤตของตัวกลางคู่หนึ่งโดยการคำนวณ 140
ตัวอย่างของจริงที่เกี่ยวกับการสะท้อนกลับหมด 141
ของเหลวโปร่งใสชนิดที่ไม่ผสมกัน
การหาตรรชนีหักเหของเพชรหรือพลอยเม็ดเล็ก
หรือสิ่งที่หาตรรชนีหักเหได้ยาก 142
การหักเหของแสงเมื่อผ่านชั้นของอากาศบนผิวโลก 143
แบบฝึกหัดที่ 5 144

บทที่ 6 การหักเหของแสงเมื่อผ่านปริซึมและเลนส์

ปริซึม 149
แสงที่ผ่านปริซึมย่อมหักเหเข้าหาด้านฐานเสมอ 150
ภาพที่แลเห็นผ่านปริซึม การเบี่ยงเบนของแสง 151

หน้า

การคำนวณหาตรรชนีหักเหของปริซึม 152
การสะท้อนกลับหมดของแสงในปริซึม 155
เลนส์ กำลังของเลนส์ การหักเหของแสงที่ผ่านเลนส์นูน 156
การหักเหของแสงที่ผ่านเลนส์เว้า ส่วนต่าง ๆ ของเลนส์ 157
การเขียนแผนภาพของรังสีหักเหเมื่อผ่านเลนส์
วิธีเขียนแผนภาพเพื่อหาที่ตั้งของภาพที่เกิดจากเลนส์ 159
ภาพที่เกิดขึ้นโดยเลนส์นูน 160
ภาพที่เกิดขึ้นโดยเลนส์เว้า 162
ความคลาดของเลนส์ 168
การวัดระยะต่าง ๆ ของเลนส์ และเครื่องหมาย
ความสัมพันธ์ของระยะต่าง ๆ ของเลนส์ 164
กำลังขยายภาพของเลนส์ 167
โฟกัสสังยุคของเลนส์ 173
ตาเราแลเห็นภาพที่เกิดจากเลนส์ได้อย่างไร
เลนส์บางสองอันวางประกบกัน 175
กำลังของเลนส์ 178
กำลังรวมของเลนส์หลายอันที่วางประกบกัน 179
วิธีหาความยาวโฟกัสของเลนส์นูน 182
วิธีหาความยาวโฟกัสของเลนส์เว้า 184
กล้องถ่ายรูป 187
ฟิล์ม 188
ลูกตา 191

	หน้า
ลูกตากับกล้องถ่ายรูปคล้ายคลึงกันอย่างไร	192
การเปลี่ยนความยาวโฟกัสของแก้วตาเพื่อให้แลเห็นสิ่งต่าง ๆ ได้ชัด	193
การมีสองตามีประโยชน์อย่างไร	194
สเตอริโอสโคป	195
ข้อบกพร่องของทรรศนาการ	197
การเลือกใช้แว่นตา	199
การเลือกชนิดของแว่นตาสำหรับคนที่มีสายตาสั้น	200
การเลือกชนิดของแว่นตาสำหรับคนที่มีสายตายาว	203
แบบฝึกหัดที่ 6	206
บทที่ 7 สเปกตรัม - สี	
การกระจายแสง สเปกตรัม	215
การทดลองสเปกตรัมไม่บริสุทธิ์	216
การทดลองสเปกตรัมบริสุทธิ์	217
หลักในการทำสเปกตรัมให้ได้ชัด เหตุใดแสงสีต่าง ๆ จึงมี การหักเหไม่เท่ากันเมื่อผ่านปริซึม สิ่งควรรู้ที่เกี่ยวกับแสงและรังสี	218
การกระจายของแสงโดยเลนส์	219
กำลังกระจายแสงของวัตถุ	220
สี	221
เรื่องเบ็ดเตล็ดที่เกี่ยวกับเรื่องสี การรวมแสงสีต่าง ๆ	223
สีของเทหวัตถุขณะที่ถูกเผาไฟจะบอกให้เรารู้อุณหภูมิได้คร่าว ๆ	224
ตาบอดสี รุ้งกินน้ำ	225
กลดของดวงอาทิตย์ และดวงจันทร์	229

หน้า

สีของท้องฟ้า
แบบฝึกหัดที่ 7 230

บทที่ 8 อุปกรณ์ที่ใช้ในวิชาแสง

แคมเมอราลูซิดา 233
แคมเมอราออบสคูรา กล้องเปอริสโคปเรือดำน้ำ 234
เครื่องฉายกระจกภาพ 235
แว่นขยายหรือกล้องจุลทรรศน์อย่างง่าย ๆ 236
กล้องจุลทรรศน์เชิงประกอบ 238
ประโยชน์ของเลนส์ที่เกี่ยวกับกล้องต่าง ๆ กล้องโทรทรรศน์ 241
กล้องดูละครหรือกล้องโทรทรรศน์แบบอย่างกาลิเลโอ 244
กล้องส่องแบบอย่างใช้ปริซึม 245
สเปกโตรสโคป 246
สเปกโตรมิเตอร์ สเปกโตรมิเตอร์มือ
แบบฝึกหัดที่ 8 247

บทที่ 9 ความเร็วของแสง

ความเร็วของแสง ปีแสง วิธีหาความเร็วของแสงวิธีของโรเมอร์ 251
วิธีหาความเร็วของแสงวิธีของฟีโซ 253
วิธีหาความเร็วของแสงวิธีของฟูโคลต์ 254
แบบฝึกหัดที่ 9 256

สัญญลักษณ์ (Symbol)

ที่ใช้ในหนังสือเล่มนี้ดังนี้

⊙	แทน	วงกลม	O^{co}	แทน	เส้นรอบวง
∧	,,	มุม	∟ฉ	,,	มุมฉาก
⊥	,,	ตั้งฉาก	//	,,	ขนานกับ
□	,,	สี่เหลี่ยม	△	,,	สามเหลี่ยม
>	,,	มากกว่า, ยาวกว่า	<	,,	น้อยกว่า, สั้นกว่า
μ	,,	ตรรชนิหักเห	∞	,,	อนันต์, ระยะไกลที่สุด
A	,,	ขั้วกระจก, มุมยอดปริซึม	M	,,	กระจก
C	,,	ศูนย์กลางความโค้ง	m	,,	กำลังขยายภาพ
D	,,	มุมเบี่ยงเบน, กำลังของเลนส์,	n	,,	จำนวนภาพ
		ระยะใกล้ของตา	O	,,	ศูนย์กลางของเลนส์,
d	,,	ระยะทาง, มุมการกระจาย			ความสูงของวัตถุ
		แสงของวัสดุ,	P	,,	ปริซึม, กำลังการส่องสว่าง
		ระยะไกลของสายตา	u	,,	ระยะวัตถุ,
F	,,	โฟกัส, ความยาวโฟกัสรวม			ระยะจากดวงไฟถึงวัตถุ
f	,,	ความยาวโฟกัส	v	,,	ระยะภาพ, ระยะจากดวงไฟ
I	,,	ความเข้มแห่งการส่องสว่าง,			ถึงเงา
		ความสูงของภาพ	w	,,	กำลังกระจายแสงของวัตถุ
L	,,	เลนส์			

๓) ช่วยในการบันทึกภาพเหตุการณ์ต่าง ๆ ไว้ เช่นการถ่ายรูป เป็นต้น

๔) ช่วยให้ความบันเทิง เช่น ใช้ฉายภาพยนตร์ หนังตลุง เป็นต้น

๕) ใช้ประโยชน์ในทางการแพทย์ เช่น รังสีเอ็กซ์ (X-Rays) แสงอัลตราไวโอเลต เป็นต้น

การที่เราแลเห็นสิ่งต่าง ๆ ได้ เพราะว่าแสงบางส่วนสะท้อนจากสิ่งเหล่านั้นมาเข้าตาของเรา แล้วสมองของเราก็ทำให้เรารู้สึกเป็นภาพของสิ่งนั้นขึ้น

สำหรับแสงสว่างนั้นเราแลไม่เห็น เพราะฉะนั้น ในสถานที่ใดถ้าไม่มีสิ่งที่ทำให้เกิดการสะท้อนแสงขึ้นแล้ว เราจะต้องใช้แสงสว่างปริมาณมากจึงจะพอแก่ความต้องการ เช่น ภายในถ้ำ กลางดินภายหลังฝนตกใหญ่ ถ้าฉายไฟจะเห็นไม่ค่อยสว่าง *เพราะว่ามีฝุ่นละอองน้อย*

แสงสว่างเดินทางจากดวงอาทิตย์มาสู่โลกเรา โดยดวงอาทิตย์มีพลังงานทำให้อีเทอร์ (Ether) สะเทือนเป็นคลื่นมา แสงก็มีคลื่นขนาดหนึ่ง ความร้อนก็มีคลื่นอีกขนาดหนึ่ง มนุษย์เรามีสถานที่รับคลื่นได้พอเหมาะ คือ ตา รับรู้คลื่นแสง ผิวกาย รับรู้ คลื่นความร้อน

ขนาดของคลื่นต่าง ๆ (*รวมเรียกว่า* คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า) มีดังนี้

๑) **แสงสว่าง** มีขนาดความยาวคลื่น (Wave length) เท่าที่ตาเราแลเห็นได้ ระหว่าง $\frac{4}{10,000}$ (0.00038 - 44) มม. ถึง $\frac{8}{10,000}$ (0.00063-78) มม.

๒) คลื่นที่สั้นกว่า $\frac{4}{10,000}$ มม. ตาของเราแลไม่เห็นเรียกว่า **รังสีรองเจนต์** (Rongent ray) หรือ **รังสีเอ๊กซ์**

๓) คลื่นที่ยาวกว่า $\frac{8}{10,000}$ มม. เล็กน้อยเป็น **คลื่นความร้อน**

๔) **ไฟฟ้า** มีขนาดความยาวคลื่นประมาณ ๒ มม.

๕) วิทยุ มีขนาดความยาวคลื่น นับเป็นสิบ ๆ เป็นร้อย ๆ เมตรขึ้นไป

๖) วิทยุโทรเลข มีขนาดความยาวคลื่นนับเป็นกิโลเมตรขึ้นไป

ความรู้ในตอนนี้เรียกว่า **กายภาพทรรศนศาสตร์** (Physical optics) เราจะเรียนแต่ปรากฏการณ์ต่าง ๆ ของแสงสว่างเท่าที่ตาแลเห็น ซึ่งเรียกว่า Geometrical optics

เทหวัตถุโชติ (Luminous body) คือเทหวัตถุที่มีแสงสว่างส่องมาเข้าตาเราได้เอง ได้แก่ ดวงอาทิตย์ ดวงไฟ หิ่งห้อย เทหวัตถุที่ถูกเผาจนร้อนจัด

เทหวัตถุอโชติ (Non-luminous body) คือเทหวัตถุที่ไม่มีแสงสว่างส่องมาเข้าตาเรา หรือเราแลเห็นไม่ได้เมื่อไม่มีแสงสว่างมาจากเทหวัตถุโชติ ได้แก่ เทหวัตถุนอกจากที่ได้กล่าวไว้ในเทหวัตถุโชติ แต่ ดวงจันทร์ กระจกเงา ดาวบางดวง เทหวัตถุที่มีผิวขัดมันจะสะท้อนแสงสว่างได้มาก จนทำให้เราเข้าใจผิดไปได้ว่าเป็น **เทหวัตถุโชติ**

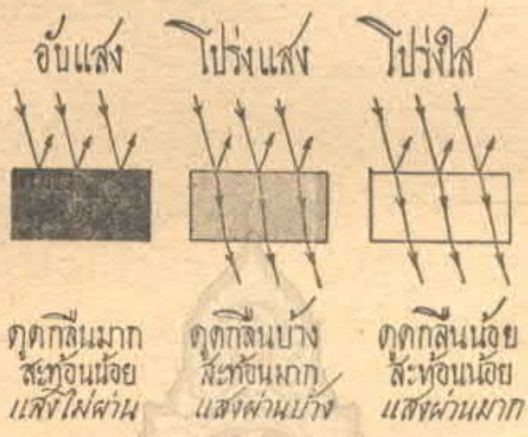
ตัวกลาง (Medium) คือสิ่งที่กั้นทางเดินของแสงอยู่ระหว่าง เทหวัตถุ หรือแหล่งกำเนิดแสงกับตาของเรา ได้แก่ อากาศ แก้ว น้ำ แว่นตา ไม้ ฯลฯ

แบ่งออกเป็นพวกใหญ่ ๆ ตามสมบัติที่กั้นแสงได้เป็น ๓ พวกคือ

ก) **โปร่งใส** (Transparent) คือตัวกลางที่มีสมบัติยอมให้แสงสว่างผ่านไปได้เกือบทั้งหมด เราแลเห็นแหล่งกำเนิดแสงได้ชัดเจน ได้แก่ อากาศ น้ำใส แก้วใส ปลาสติกใส เซลลูลอยใส ฯลฯ

ข) **โปร่งแสง** (Translucent) คือตัวกลางที่มีสมบัติยอมให้แสงสว่างผ่านไปได้บ้าง แลเห็นแหล่งกำเนิดแสงได้พร่า ๆ ได้แก่กระดาษบาง ๆ กระจกฝ้า แผ่นโลหะที่แผ่นบาง กระดาษชุบน้ำมัน กระดาษชุบเทียน อากาศมีหมอก ถ้วยเคลือบบาง ๆ ฯลฯ

ค) **อับแสง** (Opaque) คือตัวกลางที่มีสมบัติไม่ยอมให้แสงสว่างผ่านไปได้ ทำให้เราไม่แลเห็นแหล่งกำเนิดแสงเลย ได้แก่แผ่นไม้ แท่งโลหะ กระดาษแข็ง ฯลฯ



รูป 1 แสดงสมบัติของตัวกลาง 3 พวก

การแบ่งตัวกลางยังแบ่งได้อีกวิธีหนึ่งเป็น 2 ชนิด คือ

ก) **ตัวกลางเอกพันธุ์** (Homogeneous Medium) คือตัวกลางซึ่งทุกส่วนของมันมีสมบัติและกริยาต่อแสงเหมือนกันหมด เช่นแสงเดินเป็นเส้นตรง ได้แก่ชั้นอากาศที่มีอุณหภูมิเท่ากันตลอด แท่งแก้วปราศจากฟองอากาศและมีความหนาแน่นเท่ากันทั่วทั้งแท่ง เป็นต้น

ข) **ตัวกลางวิวิธพันธุ์** (Heterogeneous Medium) คือ ตัวกลางซึ่งส่วนต่าง ๆ ของมันมีสมบัติและกริยาต่อแสงแตกต่างกัน ไม่เหมือนกันหมด เช่นแสงเดินหักเหไปหักเหมา ได้แก่อากาศที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน แก้วที่มีฟองอากาศหรือมีความหนาแน่นไม่เท่ากันทุกส่วน เป็นต้น

ตัวกลางหลายชนิดรวมกันหรือซ้อนกัน เราก็เรียกว่า **ตัวกลางวิวิธพันธุ์**

ด้วย สมบัติจะเป็นอย่างไร สุดแล้วแต่ตัวกลางที่มีอยู่ โดยมากเป็นอย่างตัวกลางที่อับแสงกว่า

1) ถ้าเป็น โปร่งใส ด้วยกัน จะเป็น โปร่งใส หรืออาจจะกลายเป็น โปร่งแสง

2) ถ้าเป็น โปร่งแสง ด้วยกัน หรือกับ โปร่งใส จะเป็น โปร่งแสง หรืออาจเป็น อับแสง ก็ได้

3) ถ้าเป็น อับแสง กับชนิดอื่นใด ก็จะมีสมบัติเป็น อับแสง อย่างเดียว ตัวกลางที่เป็นสารละลาย ส่วนมากเป็น โปร่งใส กับ โปร่งแสง

วิธีทดสอบตัวกลาง ให้เอาสิ่งนั้นมากั้นแหล่งกำเนิดแสงเสียจากตาเรา เมื่อ

ก) เราแลเห็นแหล่งกำเนิดแสงได้ชัด ก็เป็น โปร่งใส

ข) เราแลเห็นแหล่งกำเนิดแสงได้เพียงพร่า ๆ ก็เป็น โปร่งแสง

ค) เราแลไม่เห็นแหล่งกำเนิดแสงเลย ก็เป็น อับแสง

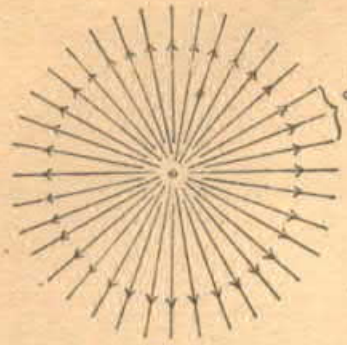
เมื่อแสงสว่างฉายไปกระทบเทหวัตถุใดก็ตาม ย่อมเกิดอาการดังนี้

ก) แสงสว่างผ่านทะลุไปได้บ้าง

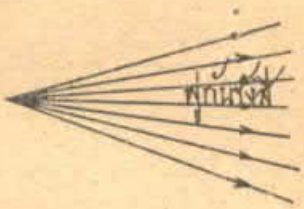
ข) แสงนั้นกระจายซึมไปในเทหวัตถุบ้าง

ค) แสงนั้นสะท้อนกลับไปเสียบ้าง ดังแสดงไว้ในรูป 1

รังสีของแสง (Rays of Light) เทหวัตถุที่มีแสง (A Luminous Body) ย่อมประกอบด้วย จุดที่มีแสง (Points of Light) ปริมาณมากมาย และเราเข้าใจว่า จุดที่มีแสงแต่ละจุดกระจายรังสีของแสงออกรอบตัวเอง ดังรูป 2 ก.



รูป 2 ก.
การกระจายรังสีของแสงจากจุดที่มีแสง



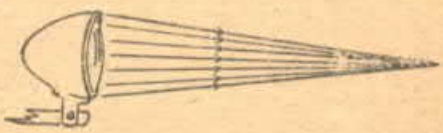
รูป 2 ข.
พู่กันรังสี

เพราะฉะนั้น **รังสีของแสง** คือแนวของแสงแต่ละแนวที่กระจายออกจากจุดที่มีแสง

พู่กันรังสี (Pencil of rays) คือกลุ่มหนึ่งของรังสีของแสงดังรูป 2 ข. มี 3 ลักษณะ คือ

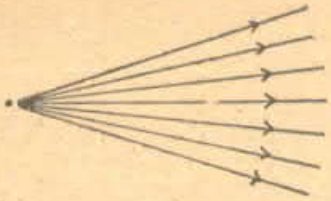
ก) พู่กันรังสีขนาน (Parallel rays) คือพู่กันรังสีที่ประกอบด้วยรังสีขนานกันตลอด ดังรูป 3 ได้แก่พู่กันรังสีที่มาจากดวงอาทิตย์ ดวงดาว ไฟฉายเครื่องบิน ฯลฯ

รูป 3 พู่กันรังสีขนาน



รูป 4 พู่กันรังสีลู่เข้า

ข) พู่กันรังสีลู่เข้า (Convergent rays) คือพู่กันรังสีที่มีรังสีเหเข้าหากันไปรวมกันที่จุด ๆ หนึ่ง ดังรูป 4 ได้แก่แสงสะท้อนจากกระจกเงาเว้า หรือแสงที่หักเหเมื่อผ่านเลนส์นูน

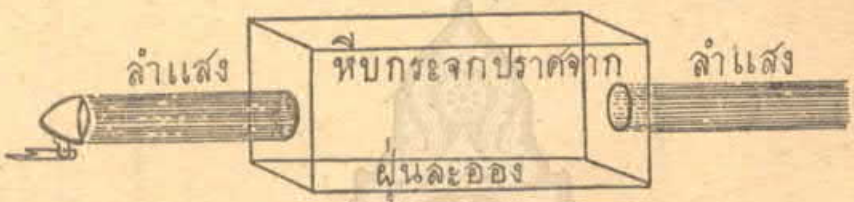


รูป 5 พู่กันรังสีลู่ออก

ค) พู่กันรังสีลู่ออก (Divergent rays) คือ พู่กันรังสีที่มีรังสีต่างออกจากกันทุกที่ ๆ ดังรูป 5 ได้แก่ แสงจากโคมที่ให้ความสว่าง

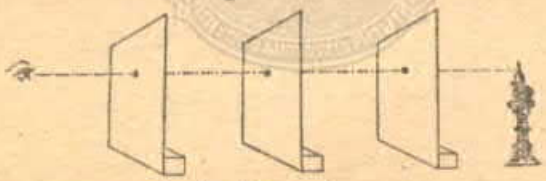
แสงสว่างเดินทางเป็นเส้นตรงในตัวกลางเอกพันธุ์ ทดลองให้เห็นจริงได้ดังนี้

ก. ฉายแสงสว่างให้ผ่านหีบกระจกที่ปราศจากฝุ่นละออง จะแลเห็นพู่กันรังสีเข้าและออกจากหีบกระทบฝุ่นละอองในอากาศต่อเป็นเส้นตรงอันเดียวกัน ดังรูป 6



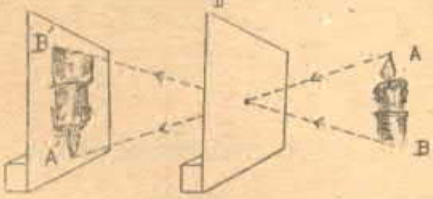
รูป 6 พู่กันรังสีในอากาศต่อเป็นเส้นตรงอันเดียวกัน

ข. แลเห็นแหล่งกำเนิดแสงผ่านรูกระดาษแข็ง 3 อันที่เจาะไว้ในแนวระดับเดียวกันและวางไว้ตรงกัน ดังรูป 7



รูป 7 แสงเดินเป็นเส้นตรงผ่านรูฉาก 3 อัน

ค. รูปที่ได้จากแสงสว่างผ่านรูเล็ก ๆ เข้ามา เป็นรูปหัวกลับ ดังรูป 8



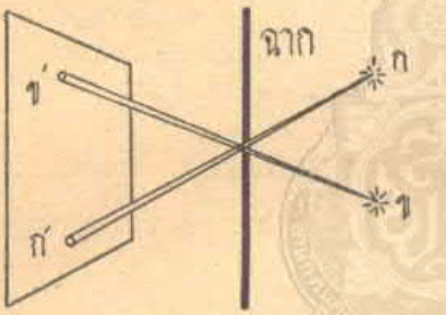
รูป 8 แสงเดินเป็นเส้นตรงทำให้เกิดรูปหัวกลับ

รูปที่เกิดขึ้นเมื่อแสงลอดช่องเข้ามา

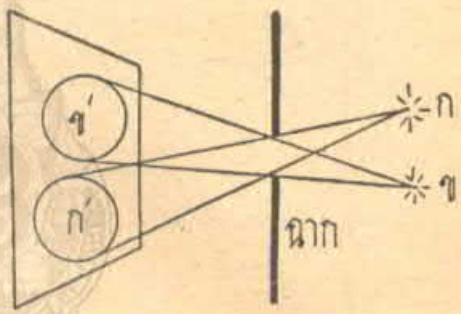
ถ้า **ช่องเล็ก** ได้รูปชัด เพราะรังสีที่ผ่านเข้าไปถูกแยกออกจากกันโดยเด็ดขาดไม่ซ้อนเหลื่อมกัน ดังรูป 9 และ 12

ถ้า **ช่องโต** ได้รูปมัวมาก เพราะรังสีที่ผ่านเข้าไปซ้อนเหลื่อมกันมาก ฐานรูปกรวยของพู่กันรังสีบนฉากจึงโตและต้องการที่มาก ดังรูป 10, 11 และ 13

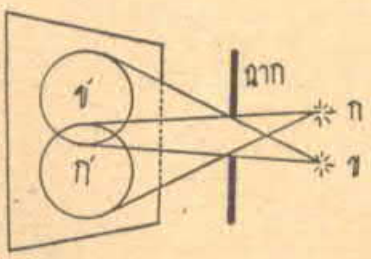
ก) เมื่อแหล่งกำเนิดแสงเป็นดวงหรือจุด



รูป 9 รูปเมื่อแสงลอดช่องเล็ก

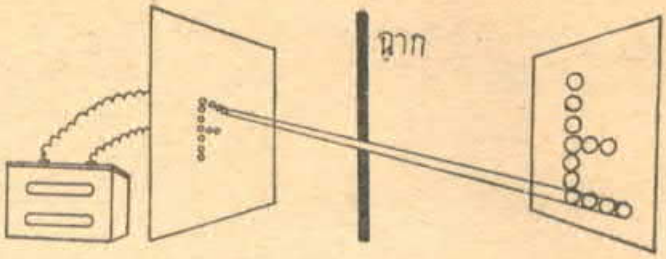


รูป 10 รูปเมื่อแสงลอดช่องโตขึ้น

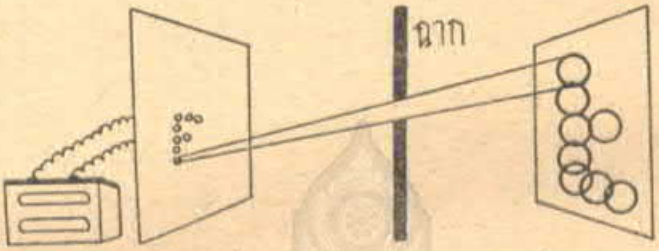


รูป 11 รูปเมื่อแสงลอดช่องขนาดโตมาก

ข) เมื่อแหล่งกำเนิดแสงประดับเป็นรูป



รูป 12 รูปเมื่อแสงลอดช่องเล็ก



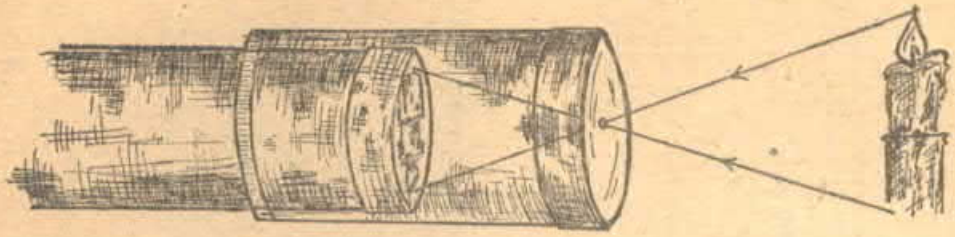
รูป 13 รูปเมื่อแสงลอดช่องโต

รูที่ฉากจะเป็นรูปอย่างใด (△, □) ก็ตาม รูปย่อมเหมือนแหล่งกำเนิดแสงเสมอ

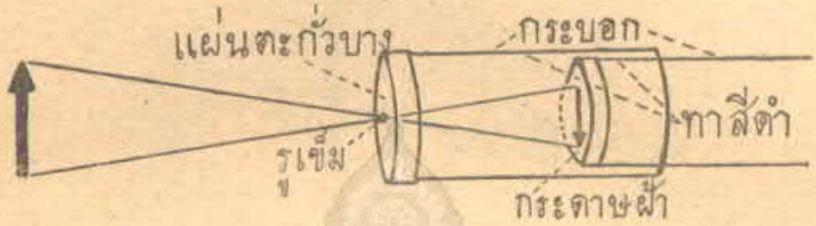
กล้องถ่ายรูปรูเข็ม สร้างขึ้นโดยอาศัยหลักว่า

แสงลอดช่องเล็กได้ภาพชัด

ประกอบด้วยกระบอก 2 อันสวมกันได้คล่อง ๆ ภายในทาสีดำ ปากกระบอกอันนอก มีกระดาษตะกั่วหุ้มอยู่ ตรงกลางเอาเข็มเจาะรูไว้ 1 รู ขนาดโตกว่า $\frac{1}{10}$ มม. พอได้รูปชัด ถ้าเล็กกว่านั้น แสงที่ผ่านเข้าไปมีลักษณะเป็นคลื่น จะได้รูปเป็นวงกลมดำและขาวสลับกัน เรียกว่า **ดิฟแฟรคชัน** ปากกระบอกอันในหุ้มไว้ด้วยกระดาษฝ้า สำหรับเป็นฉากรับรูป กระบอกอันในยาวประมาณ 1 ฟุต ส่วนกระบอกอันนอกยาวประมาณ $\frac{1}{2}$ ฟุตก็พอเหมาะ ดังรูป 14 ก. และ ข.



รูป 14 ก. กล้องถ่ายรูปรูเข็ม

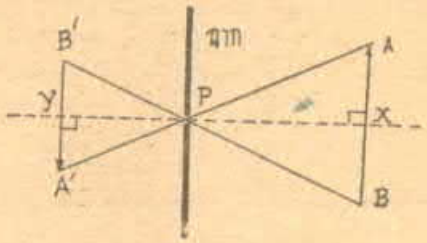


รูป 14 ข. อธิบายส่วนประกอบของกล้องถ่ายรูปรูเข็ม

วิธีใช้ ตามองที่กระดาษฝ้าจากปากกระบอกอันในที่เขียดอยู่ แล้วหันหน้ากล้องไปทางเทหวัตถุที่ต้องการมอง เลื่อนกระบอกอันนอกไปมา จนกว่าจะได้รูปชัด

สูตรคำนวณ

$$\frac{\text{ความสูงของวัตถุ}}{\text{ความสูงของรูป}} = \frac{\text{ระยะวัตถุจากรูเข็ม}}{\text{ระยะของรูปจากรูเข็ม}} \quad \text{.... สูตร 1}$$



รูป 15 คำนวณความสูงของรูปในกล้องถ่ายรูปรูเข็ม

ตามรูป $\frac{AB}{AB'} = \frac{PX}{PY}$

การพิสูจน์

กำหนดให้ AX เป็นความสูงของวัตถุ

A'Y เป็นความสูงของรูป

PX เป็นระยะวัตถุจากรูเข็ม

PY เป็นระยะของรูปจากรูเข็ม

จะต้องพิสูจน์ว่า $\frac{AX}{A'Y} = \frac{PX}{PY}$

พิสูจน์ $\because$ AX // A'Y *(ทบ. 13)*

$\therefore$ $\triangle$ APX กับ $\triangle$ A'PY มีมุม 3 มุมเท่ากัน มุมต่อมุม *(ทบ. 14, 3)*

$\therefore$ $\frac{AX}{A'Y} = \frac{PX}{PY}$ *(ทบ. 62)* ....(1)

โดยทำนองเดียวกันจะพิสูจน์ได้ว่า

$$\frac{XB}{YB'} = \frac{PX}{PY} \quad \ldots\ldots (2)$$

(1) = (2) $\frac{AX}{A'Y} = \frac{XB}{YB'}$

ไขว้เทอม $\frac{AX}{XB} = \frac{A'Y}{YB'}$

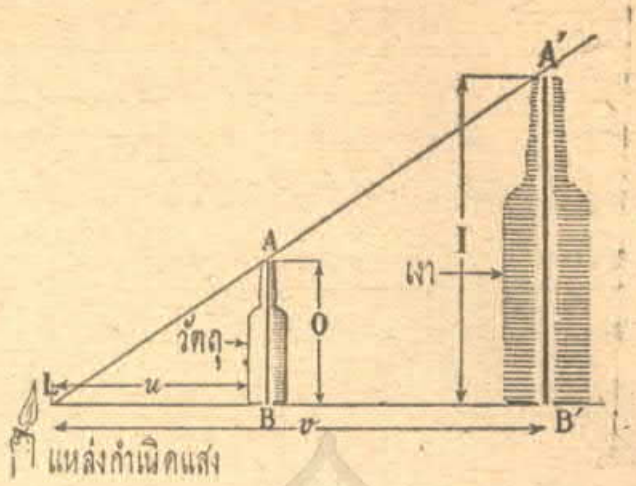
$$\frac{AX}{XB} + 1 = \frac{A'Y}{YB'} + 1$$

$$\frac{AX + XB}{XB} = \frac{A'Y + YB'}{YB'}$$

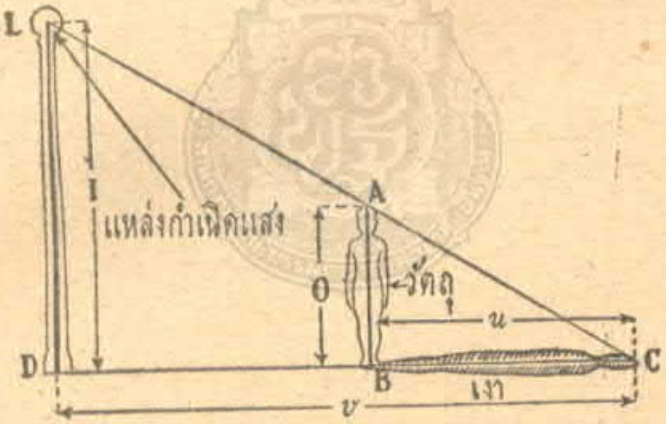
$$\frac{AB}{XB} = \frac{A'B'}{YB'}$$

ไขว้เทอม $\frac{AB}{A'B'} = \frac{XB}{YB'}$ .... (3)

(3) = (2) $\frac{AB}{A'B'} = \frac{PX}{PY}$



รูป 17 คำนวณความสูงของเงา



รูป 18 คำนวณความยาวของเงา

ตามรูป 17
$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{LB'}{LB}$$

หรือ
$$\frac{L}{O} = \frac{v}{u}$$

โดยทำนองเดียวกันถ้าแหล่งกำเนิดแสงอยู่ในที่สูง ดังรูป 18 เราก็จะได้สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\frac{\text{ความสูงของดวงไฟ}}{\text{ความสูงของวัตถุ}} = \frac{\text{ระยะจากปลายเงาถึงฐานของดวงไฟ}}{\text{ความยาวของเงา}} \quad \text{.....สูตร 3}$$

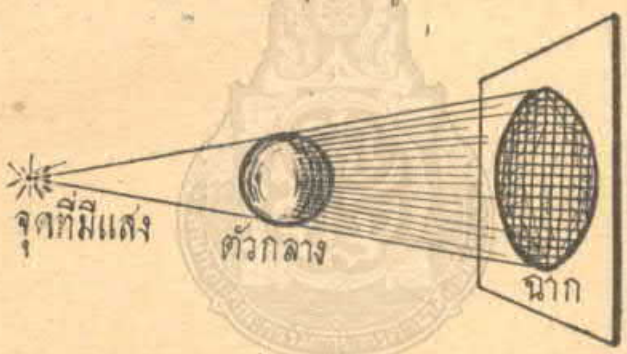
หรือ $\frac{I}{O} = \frac{v}{u}$

และยังจะได้ความจริงจาก ทย. 73 ต่อไปอีกว่า

$$\frac{\text{พื้นที่ของเงา}}{\text{พื้นที่ของวัตถุ}} = \frac{(\text{ระยะจากดวงไฟถึงเงา})^2}{(\text{ระยะจากดวงไฟถึงวัตถุ})^2} \quad \text{.....สูตร 4}$$

ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแหล่งกำเนิดแสง ตัวกลาง และเงา แบ่งเป็น 4 ลักษณะ ดังนี้

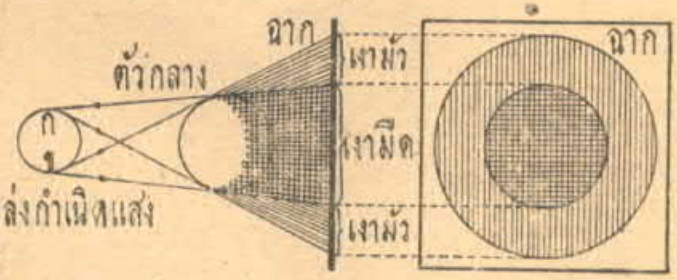
1) แหล่งกำเนิดแสง เป็น จุด ดังรูป 19



รูป 19 เงาที่เกิดจากจุดกำเนิดแสง

มีแต่ เงามืด อย่างเดียว ขนาดโตกว่าตัวกลางและแหล่งกำเนิดแสง

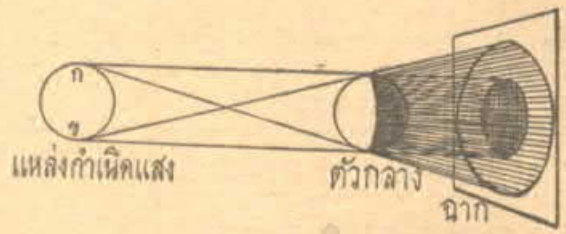
2) แหล่งกำเนิดแสงมีความสูงและมีขนาดเล็กกว่าตัวกลาง ดังรูป 20



รูป 20 เงามืดและเงามัวที่เกิดจากแหล่งกำเนิดแสงที่เล็กกว่าตัวกลาง

มี เงามืด อยู่กลาง เงามัว เงาทั้งสองนี้มีขนาดโตกว่าตัวกลางและแหล่งกำเนิดแสง

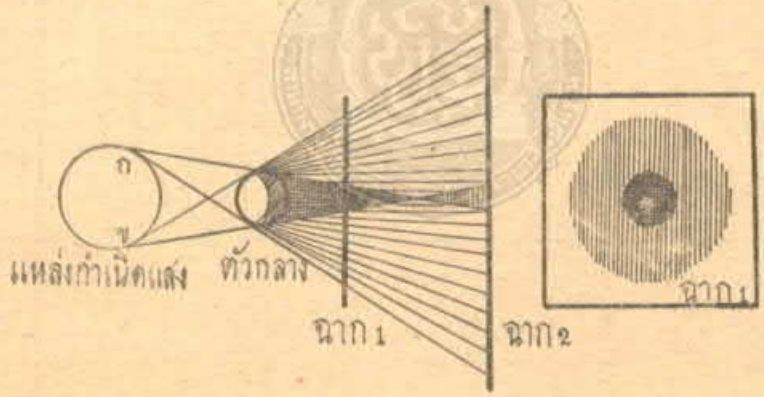
3) แหล่งกำเนิดแสงมีขนาดเท่าตัวกลาง ดังรูป 21



รูป 21 เงาที่เกิดจากแหล่งกำเนิดแสงที่มีขนาดเท่าตัวกลาง

มี เงามืด อยู่กลาง เงามัว และมีขนาดเท่าตัวกลางและแหล่งกำเนิดแสง

4) แหล่งกำเนิดแสงมีขนาดโตกว่าตัวกลาง ดังรูป 22



รูป 22 เงาที่เกิดจากแหล่งกำเนิดแสงที่มีขนาดโตกว่าตัวกลาง

จะได้เงามืดอยู่กลางเงามัว มีขนาดเล็กกว่าตัวกลางและแหล่งกำเนิดแสง และจะมีรูปเรียวลงจนหมดไป คงเหลือแต่เงามัวซึ่งจะโตขึ้นตามลำดับ

ขนาดของเงามัวใหญ่กว่าตัวกลาง จะเล็กกว่าหรือโตกว่าแหล่งกำเนิดแสงได้ สุดแต่ระยะใกล้หรือไกลของฉากที่ใช้รับเงา

ตารางสรุปความสัมพันธ์ของขนาดระหว่างแหล่งกำเนิดแสง ตัวกลาง และเงา

ลักษณะที่	ขนาดของแหล่งกำเนิดแสงกับตัวกลาง	ลักษณะ และขนาดของเงาบนฉาก	เงาเมื่อร่นฉากห่างออกไป	เงาเมื่อร่นตัวกลางเข้าหาฉาก
1	แหล่งกำเนิดแสงเล็กมาก	เป็นเงามืดอย่างเดียว ขนาดโตกว่าตัวกลางและแหล่งกำเนิดแสง	มีขนาดโตขึ้นกว่าเดิม	มีขนาดเล็กลงกว่าเดิม
2	แหล่งกำเนิดแสงเล็กกว่าตัวกลาง	เป็นเงามืดอยู่กลางเงามัว ขนาดโตกว่าตัวกลางและแหล่งกำเนิดแสงทั้งสองเงา	มีขนาดโตขึ้นกว่าเดิมทั้งสองอย่าง	มีขนาดเล็กลงกว่าเดิมทั้งสองอย่าง
3	แหล่งกำเนิดแสงและตัวกลางเท่ากัน	เป็นเงามืดอยู่กลางเงามัว มีขนาดเท่าตัวกลางและแหล่งกำเนิดแสง ส่วนเงามัวโตกว่า	เงามืด มีขนาดเท่าเดิม เงามัวมีขนาดโตขึ้น	เงามืดมีขนาดเท่าเดิม ขนาดของเงามัวเล็กลงกว่าเดิม
4	แหล่งกำเนิดแสงโตกว่าตัวกลาง	เป็นเงามืดอยู่กลางเงามัว ขนาดเล็กกว่าตัวกลางและแหล่งกำเนิดแสง ส่วนเงามัวโตกว่าตัวกลางอาจเล็กหรือโตกว่าแหล่งกำเนิดแสงได้	เงามืดจะเล็กลงจนหมดไป คงเหลือแต่เงามัว อย่างเดียว และโตขึ้นกว่าเดิม	เงามืดจะมีขนาดโตขึ้น แต่เงามัวจะมีขนาดเล็กลงกว่าเดิม

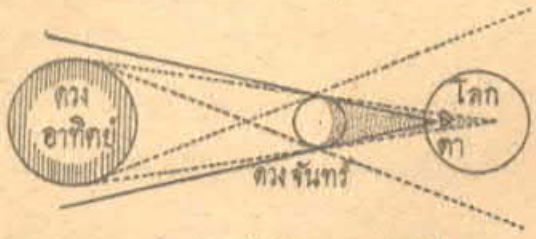
สุริยุปราคา (Eclipse of the Sun) คือปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่เราแลเห็นดวงอาทิตย์มืดไปหมดทั้งดวงหรือเพียงส่วนหนึ่ง ดังรูป 23, 24, 25 และ 26

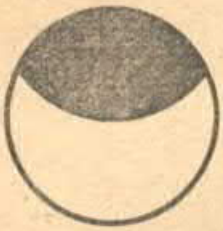
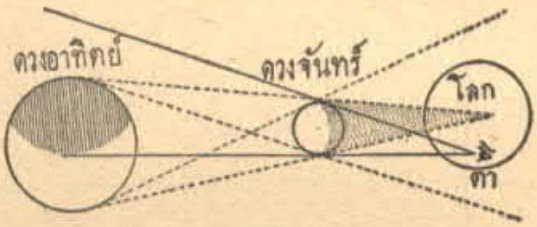
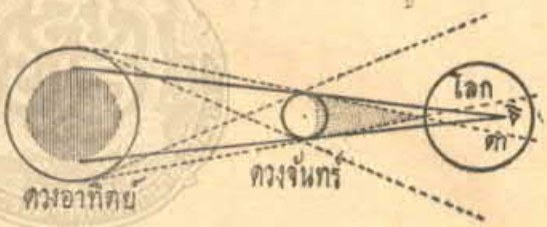
เหตุที่เกิดขึ้นได้ คือดวงจันทร์โคจรมาอยู่ในแนวที่บังดวงอาทิตย์เสียจากตาของผู้ที่อยู่บนผิวโลก หรือ ดวงอาทิตย์ ดวงจันทร์และโลกโคจรมาอยู่ในแนวเดียวกัน

เวลาที่เกิดสุริยุปราคา ต้องเป็นเวลากลางวันในระยะข้างแรมแก่ ๆ

รูป 23 แสดงการเกิดสุริยุปราคา

สุริยุปราคาที่แลเห็นเป็น ๓ ลักษณะ คือ

เลขที่	ลักษณะที่แลเห็น	ที่อยู่ของผู้แลเห็นบนผิวโลก
1	มืดหมดทั้งดวง (Total Eclipse) รูป 24 ก.	อยู่ในปริเวณเงามืดของดวงจันทร์ที่เกิดจากดวงอาทิตย์ และทอดมายังโลก ดังรูป 24 ข.  รูป 24 ข. ตาที่เห็นสุริยุปราคาเต็มดวง

เลขที่	ลักษณะที่แลเห็น	ที่อยู่ของผู้แลเห็นบนผิวโลก
2	มืดเพียงบางส่วน (Partial pEclise)  รูป 25 ก.	อยู่ในปริเวณเงามัวของดวงจันทร์ ดังรูป 25 ข.  รูป 25 ข. การที่เห็นสุริยปราคามืดเพียงบางส่วน
3	สว่างเป็นวงแหวน (Ring-Shaped Eclipse) รูป 26 ก	อยู่ในปริเวณเงามัวที่เป็นรูปกรวยมีปลายจรดกับเงามืดและมีขนาดเกือบกัน เนื่องจากโลกกับดวงจันทร์อยู่ห่างกันมากเกินไป ดังรูป 26 ข.  รูป 26 ข. การที่เห็นสุริยปราคาสว่างเป็นวงแหวน

สุริยปราคาเมื่อเกิดขึ้นครั้งหนึ่ง ๆ นั้นเห็นกันไม่ได้ทั่วทั้งโลก เพราะเงาของดวงจันทร์เล็กยิ่งโลกได้ไม่มาก และผู้แลเห็นจะเห็นลักษณะได้ไม่เหมือนกัน สุดแต่ลักษณะที่อยู่ของเงาดังกล่าวมาแล้ว

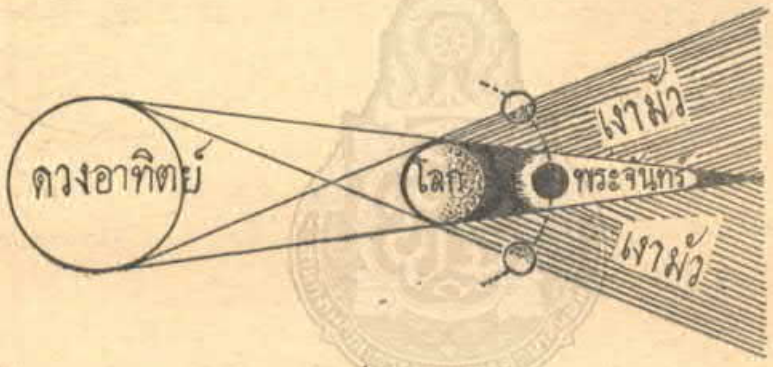
ลักษณะสำคัญที่จะเห็นได้มีหลัก คือลักษณะที่ 1 กับที่ 3 ซึ่งจะมีผู้แลเห็นพร้อมกันในครั้งเดียวกันไม่ได้ เมื่อเห็นลักษณะที่ 1 หรือที่ 3 ในขณะเดียวกันก็จะเห็นลักษณะที่ 2 ก็ลักษณะที่ไม่เห็นสุริยุปราคาเลยด้วย คือ

ได้แก่ผู้ที่อยู่นอกเขตเงาของดวงจันทร์ ส่วนที่จะเห็นมากที่สุดคือลักษณะที่ 2 กับไม่เห็นเลย

จันทรุปราคา (Eclipse of the Moon) คือปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่เราแลเห็นดวงจันทร์มืดหมดทั้งดวง หรือเพียงส่วนหนึ่งในขณะที่กำลังเต็มดวงอยู่

เกิดขึ้นโดยดวงจันทร์โคจรผ่านเข้าไปในเงามืดของโลกอันเกิดแต่ดวงอาทิตย์ *หรือ* ดวงอาทิตย์ โลกและดวงจันทร์พอดีมาอยู่ในแนวเดียวกัน ดังรูป 27

เวลาที่เกิดจันทรุปราคามักเป็นวันขึ้น 15 ค่ำ.



รูป 27 การที่เกิดจันทรุปราคา

จันทรุปราคาที่เห็นกันอยู่นั้นมี 2 ลักษณะคือ มืดทั้งดวงกับมืดเพียงส่วนหนึ่ง เมื่อเกิดขึ้นจะเห็นกันทั่วทั้งโลกในส่วนที่เป็นกลางคืน และจะเห็นได้ในลักษณะใดลักษณะหนึ่งเท่านั้น ลักษณะที่เห็นเป็นวงแหวนไม่มีในจันทรุปราคา เพราะว่าดวงจันทร์โคจรไปในระยะที่ห่างที่ขนาดของดวงจันทร์ไม่โตกว่าเงามืดของโลก ก่อนเกิดเล็กน้อย และหลังจากเกิดจันทรุปราคาแล้วใหม่ ๆ ดวงจันทร์จะมีแสงไม่แจ่มใสด้วยกำลังผ่านเข้าและผ่านออกไปในเงามัวของโลกตามลำดับ

แบบฝึกหัดที่ 1

1. ท่านเชื่อได้อย่างไรว่า

   ก) แสงสว่างไม่ใช่สสาร

   ข) แสงเดินเป็นเส้นตรงในตัวกลางเอกพันธุ์

   ค) โลกมีรูปกลม

2. เหตุใด

   ก) เราจึงแลเห็นสิ่งต่าง ๆ รอบตัวเราได้

   ข) เมื่อถูกยีดคาแล้วเราไม่ทราบว่า ห้องที่ถูกนำเข้าไปนั้น มืด หรือสว่าง

   ค) เมื่อแลเห็นเทหวัตถุบางอย่าง เราจึงสามารถบอกได้ว่าร้อนโดยไม่ต้องแตะเทหวัตถุนั้น

   ง) รูปที่ได้จากแสงลอดช่องเล็ก ๆ จึงชัดเจนดี

   จ) ไฟฟ้าเดินทางจึงใช้ไม่ใคร่ได้ผล ในถ้ำที่ปราศจากฝุ่นละออง

   ฉ) ดวงจันทร์จึงคูมัว เมื่อก่อนเกิดและภายหลังการเกิดจันทรุปราคาเล็กน้อย

   ช) รูปในกล้องถ่ายรูปรูเข็มจึงเป็นรูปหัวกลับ

3. ตัวกลาง และเทหวัตถุ ต่างกันอย่างไร และท่านจะทดสอบตัวกลางได้อย่างไร

4. น้ำ มีสมบัติเป็นตัวกลางชนิดใดได้บ้าง และตัวกลางอย่างไหนที่เรียกว่า ตัวกลางวิวิธพันธุ์

5. เงาของเราจากแสงแดดมีลักษณะเป็นอย่างไรบ้าง

6. กล้องถ่ายรูปรูเข็มสร้างขึ้นโดยอาศัยหลักอะไร มีส่วนประกอบอย่างใดบ้าง จงอธิบายตลอดจนถึงวิธีใช้ และเขียนแผนภาพประกอบ

7. จงอธิบายศัพท์ต่อไปนี้ :- รังสีของแสง, พู่กันรังสี, โฟร่งแสง, เงามัว, จันทรุปราคา

8. คนสมัยก่อนมีความรู้เกี่ยวกับ สุริยุปราคา และจันทรุปราคาอย่างไร

9. จะยังเกิดผลอย่างไร เมื่อ

   ก) ค่อย ๆ ขยายรูหน้ากล้องถ่ายรูปชนิดรูเข็มให้ใหญ่ขึ้น

   ข) เลื่อนฉากออกห่างจากตัวกลางอันแสงที่มีขนาดเล็กกว่าแหล่งกำเนิดแสง

   ค) เลื่อนตัวกลางที่มีขนาดเท่ากับแหล่งกำเนิดแสงเข้าหาฉาก

10. สุริยุปราคาเกิดขึ้นได้โดยเงาของดวงจันทร์ทอดไปยังดวงอาทิตย์ใช่หรือไม่ มีลักษณะอย่างใดบ้าง เพราะเหตุใด ให้เขียนแผนภาพประกอบ

11. รูปของชายสูง 5 ฟุต ในกล้องถ่ายรูปรูเข็มจะเป็นเท่าไร เมื่อเขายืนอยู่ห่างจากกล้อง 15 ฟุต และฉากห่างจากรูกล้อง 6 นิ้ว

12. โคมที่ยอดเสาจะสูงเท่าไร เมื่อคนสูง 1.80 เมตร ยืนอยู่ห่างจากเสาโคม 1.50 เมตร แล้วเงาของเขาทอดไปตามพื้นยาว 1.20 เมตร

13. ต้องการให้เงาขนฉากของรูปทรงกลมซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 ซม. อยู่ห่างจากจุดกำเนิดแสง 10 ซม. มีพื้นที่โตเป็น 2 เท่า จะต้องเอาฉากรับที่ไหน

14. ดวงไฟกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว อยู่ห่างจากตัวกลางกลมอันแสงที่มีขนาดเท่ากันเป็นระยะ 10 ฟุต ให้คำนวณพื้นที่ของเงามัวบนฉากข้างหลังตัวกลาง เมื่อฉากอยู่ห่างจากตัวกลาง 5 ฟุต

15. ดวงไฟกลมซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 ซม. อยู่ห่างจากกำแพง 18 ซม. มีแผ่นกระดาษแข็งรูปวงกลมอยู่ห่างจากกำแพง 3 ซม. ยังแสงเกิดเงามืดบนกำแพงเป็นวงกลมรัศมี $\frac{1}{2}$ ซม. จงหาเส้นผ่าศูนย์กลางของแผ่นกระดาษ และพื้นที่ของเงามัว

16. เมื่อเกิดสุริยคราสขึ้น จะมีลักษณะเต็มดวงไหม ในเมื่อดวงจันทร์ห่างจากโลก 238,000 ไมล์ และระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์เท่ากับ 93,000,000 ไมล์ กำหนดให้เส้นผ่าศูนย์กลางของดวงอาทิตย์เป็น 400 เท่าของดวงจันทร์

17. ชายคนหนึ่งสูง 6 ฟุต ยืนอยู่ห่างจากเสาไฟฟ้า 32 ฟุต สังเกตเห็นเงาของเขาที่เกิดจากโคมยอดเสาทอดไปตามพื้นยาว 8 ฟุต ถามว่าโคมไฟนั้นอยู่สูงจากพื้นเท่าไร และถ้าเด็กคนหนึ่งสูง 5 ฟุต ยืนอยู่ห่างจากเสาไฟฟ้า 20 ฟุต เงาของเด็กคนนั้นจะทอดไปตามพื้นยาวเท่าไร

18. คนสูง 6 ฟุต ยืนอยู่ห่างจากเสาโคม 15 ฟุต เงาของเขาซึ่งเกิดจากโคมยอดเสาทอดไปตามพื้นยาว 5 ฟุต จงหาความสูงของโคมไฟ และถ้าเขายืนใกล้เสาโคมเข้าไปอีก 8 ฟุต จงหาความยาวของเงาของเขา

19. ชายผู้หนึ่งยืนอยู่ทางทิศใต้ของประภาคาร จะแลเห็นเงาของเขาซึ่งเกิดจากโคมไฟยอดประภาคารทอดไปตามพื้นยาว 24 ฟุต แต่ถ้าเขาเดินไปทางทิศตะวันออกเป็นระยะ 100 หลาแล้ว เงาของเขาจะยาวเพิ่มขึ้นอีก 6 ฟุต สมมุติว่าความสูงของชายผู้นั้นเป็น 6 ฟุต จงคำนวณหาความสูงของโคมไฟจากพื้น.

บทที่ 2
ความสว่างของดวงไฟ

กำลังการส่องสว่าง (Illuminating Power) ของดวงไฟดวงหนึ่ง คือปริมาณแสงสว่างจากดวงไฟดวงนั้นที่ตกลงบนผิวพื้นที่ 1 ตารางหน่วย ซึ่งวางไว้ตั้งฉากกับรังสีของดวงไฟ และอยู่ห่างจากดวงไฟ 1 หน่วยระยะ

กำลังการส่องสว่าง วัดเป็น กำลังเทียน (Candle Power)

1 กำลังเทียน คือกำลังส่องสว่างซึ่งเท่ากับเทียนมาตรฐานที่จุดไว้ 1 เล่ม

เทียนมาตรฐาน คือเทียนที่ทำด้วยไขปลาวาฬมีน้ำหนักเล่มละ $\frac{1}{6}$ ปอนด์ พันด้วยไส้ที่เมื่อจุดแล้วจะทำให้ไขหมดไปชั่วโมงละ 120 เกรน (*หรือ 7.776 กรัม*) ดังรูป 30

รูป 30
เทียนมาตรฐาน

เทียนมาตรฐานใช้ประโยชน์ในทางวิทยาศาสตร์ไม่ใคร่ได้ผล จุดครั้งหนึ่ง ๆ ได้แสงสว่างต่างกันมาก ทั้งนี้เป็นเพราะเวลาพันทำเทียนนั้น เราไม่สามารถทำให้ขนาดของเล่มเทียน และขนาดของไส้เทียนคงตัวเท่ากันได้ทุกเล่ม และเวลาจุดก็เช่นเดียวกัน ความสูงของเปลวไฟ หรือกำลังการส่องสว่างก็ไม่สู้คงตัว แปรผันได้ตามภาวะของบรรยากาศที่มีปริมาณไอน้ำและคาร์บอนไดะ-

ออกไซด์แตกต่างกัน ตลอดจนอุณหภูมิของอากาศ ฯลฯ ต่อมาจึงมีผู้ประดิษฐ์คะเกียงมาตรฐานขึ้นใหม่ ใช้จุดด้วยกาซหรือไฟฟ้า

ชื่อคะเกียงมาตรฐาน ที่นิยมใช้กันมีดังนี้

1) Harcourt Pentane lamp เป็นคะเกียงมาตรฐานสากล มีกำลังการส่องสว่าง 10 กำลังเทียน ใช้น้ำมันเปนเตน

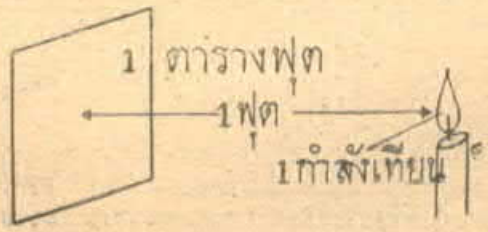
2) Carcel lamp เป็นคะเกียงมาตรฐานฝรั่งเศส มีกำลังการส่องสว่างประมาณ 9.5 กำลังเทียน ใช้น้ำมันคอลซา ซึ่งเมื่อจุดจะต้องให้เปลืองไปด้วยอัตราจำกัดอันหนึ่ง

3) Hefner-Alteneck lamp เป็นคะเกียงมาตรฐานเยอรมัน มีกำลังการส่องสว่าง 0.9 กำลังเทียน ใช้น้ำมันแอมิลแอซิเตต เวลาจุดต้องยังคงเปลวไฟให้สูงเท่าที่จำกัดโดยการหมุนไส้

ความเข้มแห่งการส่องสว่างที่จุดใดจุดหนึ่ง คือปริมาณแสงที่ตกลงบนผิวที่มีพื้นที่ 1 ตารางหน่วยรอยจุดนั้น

ความเข้มแห่งการส่องสว่างนี้มีหน่วยเป็น กำลังเทียน - ฟุต (Candle-foot) กำลังเทียน - เมตร (Candle-metre)

1 กำลังเทียน-ฟุต เป็นความเข้มแห่งการส่องสว่างของแสง ซึ่งอยู่บนพื้นที่ 1 ตาราง ฟุต ที่วางอยู่ ห่าง 1 ฟุต และตั้งฉากกับรังสี อันเปล่งจากแหล่งกำเนิดแสงที่มีกำลังการส่องสว่าง 1 กำลังเทียน ดูรูป 31



รูป 31 ความเข้มแห่งการส่องสว่าง 1 กำลังเทียน - ฟุต

(๓) จากไฟดวงเดียวกัน ความเข้มแห่งการส่องสว่างบนพื้นที่ตั้งฉากของแสงเป็นมุมฉาก ย่อมมากกว่าบนพื้นที่ตั้งฉากของแสงเป็นแนวเฉียง ดังรูป ๓๓ ข. ความเข้มแห่งการส่องสว่างบนพื้นที่ BC มากกว่าบนพื้นที่ B´C

กฎกำลังสองผกผัน (Inverse Square Law) มีใจความว่า :- ถ้ากำลังการส่องสว่างคงตัว ความเข้มแห่งการส่องสว่างที่จุดใดจุดหนึ่งจากแหล่งกำเนิดแสงที่กำหนดให้ย่อมเป็นสัดส่วนผกผันกับกำลังสองของระยะทางระหว่างจุดนั้นและแหล่งกำเนิดแสง

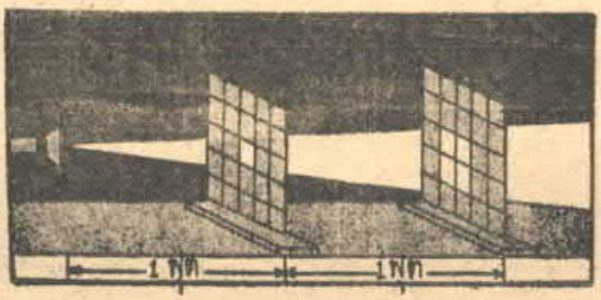
นั่นคือ ความเข้มแห่งการส่องสว่าง $= \frac{\text{กำลังการส่องสว่างของแหล่งกำเนิดแสง}}{(\text{ระยะทาง})^2}$

ให้ P เป็นกำลังการส่องสว่างของแหล่งกำเนิดแสง

d เป็นระยะทางระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับจุดที่ต้องการหาความเข้มแห่งการส่องสว่าง

I เป็นความเข้มแห่งการส่องสว่าง

$$\therefore \quad I = \frac{P}{d^2} \quad \text{.....สูตร ๕}$$



รูป ๓๔ การทดลองแสดงกฎกำลังสองผกผัน

สิ่งที่ใช้ประกอบการทดลอง มี

(1) ไฟฟ้าเดินทาง

(2) ฉากกระดาษแข็งอันหนึ่งที่แบ่งไว้เป็นตารางนิ้ว มีขนาด 5×5 ตารางนิ้ว และเจาะช่องตรงกลางให้มีขนาดเท่ากับ 1 ตารางนิ้ว พอดี

(3) ฉากกระดาษแข็งที่มีขนาดและส่วนแบ่งเหมือนกับอันแรกทุกประการ

(4) ไม้บรรทัดและชอล์ค

(5) ห้องมืด

วิธีทดลอง ให้ปฏิบัติดังนี้

(1) นำสิ่งที่ต้องใช้ทั้งหมดเข้าห้องมืด

(2) แบ่งระยะเป็นฟุตไว้บนโต๊ะ สัก 5 ระยะ

(3) ที่ฟุตแรกเอาฉากอันที่เจาะรูวางไว้

(4) ฉายไฟฟ้าจากจุดที่ห่างจากฉากนั้น 1 ฟุต ให้แสงส่องผ่านช่องที่เจาะไป

(5) เอาฉากอันที่สองมารับแสงที่ระยะ 2 ฟุต จากแหล่งกำเนิดแสง และปรับปรุง (adjust) ไฟฉายให้แสงจับที่ฉากนั้นจนกระทั่งจะเห็นได้ว่า แสงจับฉากมีพื้นที่ 4 ตารางนิ้ว พอดี ดูรูป 34

(6) เลื่อนฉากอันที่สองออกไปที่ระยะ 3 ฟุต 4 ฟุต และ 5 ฟุต ตามลำดับ และปฏิบัติอย่างที่กล่าวในข้อ 5 ด้วย ผลจะปรากฏว่าแสงที่จับที่ฉากเป็น 9, 16 และ 25 ตารางนิ้ว ตามลำดับ และความเข้มแห่งการส่องสว่างจะลดน้อยลงตามลำดับด้วย

จากการทดลองนี้จะสรุปผลได้ดังต่อไปนี้ สมมุติว่าความเข้มแห่งการส่องสว่างที่ขนฉากอันแรก = x กำลังเทียน-ฟุต

∴ ความเข้มแห่งการส่องสว่างที่ขนฉากอันที่สอง $= \frac{x}{4}$ ซึ่งเท่ากับ $\frac{x}{2^2}$ กำลังเทียน-ฟุต

ความเข้มแห่งการส่องสว่างที่ขนฉากอันที่สาม $= \frac{x}{9}$ ซึ่งเท่ากับ $\frac{x}{3^2}$ กำลังเทียน-ฟุต

ฯลฯ

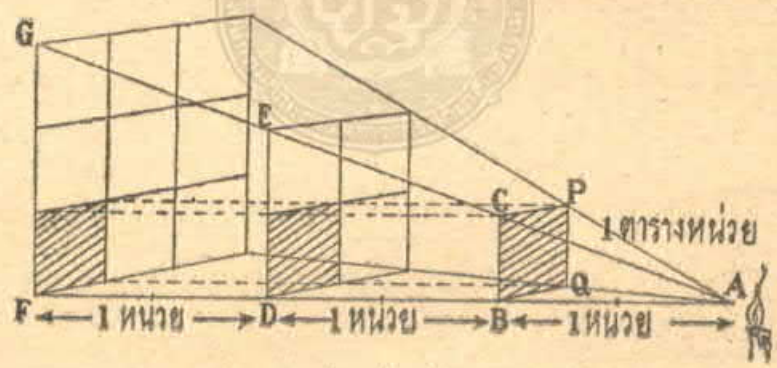
ดังนี้จะเห็นได้ว่า ความเข้มแห่งการส่องสว่างจะลดน้อยลงตามส่วนของ $(\text{ระยะทาง})^2$

นั่นคือ ความเข้มแห่งการส่องสว่าง $= \frac{\text{กำลังการส่องสว่าง}}{(\text{ระยะทาง})^2}$

$$I = \frac{P}{d^2}$$

การพิสูจน์สูตร $I = \frac{P}{d^2}$ โดยวิธีคำนวณ

วิธีที่ 1 อาศัยหลักรูป △ คล้ายคล้ายกัน (Similar triangles)



รูป 85 การพิสูจน์กฎกำลังสองผกผัน

กำหนดให้ A เป็นจุดกำเนิดแสง

□ BCPQ เป็นระนาบที่พื้นที่ 1 ตารางหน่วย อยู่ห่างจาก A 1 หน่วยระยะทาง

$\therefore$ BC = 1 หน่วยระยะทาง

□ จตุรัส DE^2 เป็นระนาบที่มีพื้นที่อยู่ห่างจาก A 2 หน่วยระยะทาง

□ จตุรัส FG^2 เป็นระนาบที่มีพื้นที่อยู่ห่างจาก A 3 หน่วยระยะทาง

พิสูจน์ โดยทฤษฎี △ ABC กับ ADE มีมุมทั้ง 3 เท่ากัน มุมต่อมุม (ท. ย. 62)

$\therefore$ $DE = 2\ BC$

$\therefore$ $DE^2 = (2\ BC)^2$

$= 4$ ตารางหน่วย

ในทำนองเดียวกัน $FG^2 = 9$ ตารางหน่วย

สมมุติว่า BC^2 ได้รับแสงมีปริมาณ = 1 หน่วย

$\therefore$ พื้นที่ยน DE^2 และ FG^2 ย่อมได้รับแสงมีปริมาณ = 1 หน่วยด้วย

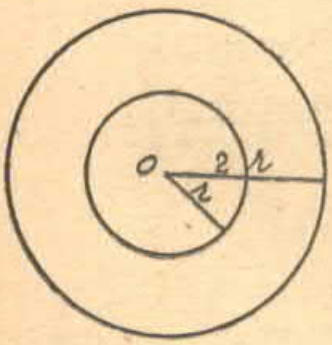
$\therefore$ พื้นที่ 1 ตารางหน่วยบน DE^2 ย่อมมีความเข้มแห่งการส่องสว่าง = $\frac{1}{4}$ หน่วย

$= \frac{1}{2^2}$ หน่วย

ในทำนองเดียวกัน

พื้นที่ 1 ตารางหน่วยบน FG^2 ย่อมมีความเข้มแห่งการส่องสว่าง = $\frac{1}{3^2}$ หน่วย

ดังนั้น $I = \frac{P}{d^2}$



รูป 36
การพิสูจน์กฎกำลังสองผกผัน

วิธีที่ 2 สมมุติว่ามีดวงไฟอยู่ดวงหนึ่ง ที่ O ซึ่งเป็นศูนย์กลางของลูกทรงกลม 2 ลูก

r เป็นรัศมีของลูกทรงกลมลูกใน

2r เป็นรัศมีของลูกทรงกลมลูกนอก

$\therefore$ พื้นที่ผิวภายในของลูกใน = $4\pi r^2$ ตารางหน่วย

และพื้นที่ผิวภายในของลูกนอก = $4\pi(2r)^2$ ตารางหน่วย

$= 16\pi r^2$ ตารางหน่วย

สมมุติว่าปริมาณแสงที่ออกจากดวงไฟ = x หน่วย

∴ ปริมาณแสงทั้งหมดที่ตกลงบนผิวด้านในของลูกทรงกลม = x หน่วย

ดังนั้น ความเข้มแห่งการส่องสว่างบนพื้นผิวของลูกใน $= \frac{x}{4\pi r^2}$ หน่วย ... (1)

และ ความเข้มแห่งการส่องสว่างบนพื้นผิวของลูกนอก $= \frac{x}{16\pi r^2}$ หน่วย .. (2)

(2) ÷ (1) ∴ $\frac{\text{ความเข้ม ฯ บนผิวภายในของลูกนอก}}{\text{ความเข้ม ฯ บนผิวภายในของลูกใน}} = \frac{x}{16\pi r^2} / \frac{x}{4\pi r^2}$

$= \frac{x}{16\pi r^2} \times \frac{4\pi r^2}{x}$

$= \frac{1}{4}$

ซึ่งเท่ากับ $\frac{1}{2^2}$

∴ ความเข้ม ฯ บนผิวภายในของลูกทรงกลมที่มีรัศมี 2r $= \frac{1}{2^2}$ เท่าของลูกที่มีรัศมี r. ในทำนองเดียวกัน

ความเข้ม ฯ บนผิวภายในของลูกทรงกลมที่มีรัศมี 3r $= \frac{1}{3^2}$ เท่าของลูกที่มีรัศมี r.

ฯลฯ

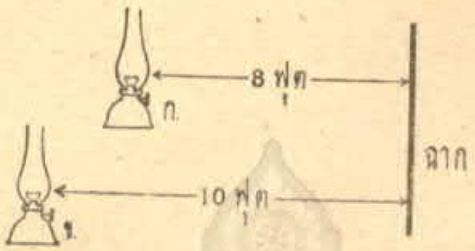
ดังนั้น $I = \frac{P}{d^2}$

การเปรียบเทียบกำลังการส่องสว่าง (Photometry) มีวิธีดังนี้

นำแหล่งกำเนิดแสงที่ต้องการเปรียบเทียบมาวางไว้ใกล้ ๆ กัน ปรับปรับตำแหน่งให้ได้ความเข้มแห่งการส่องสว่างบนฉากเท่ากัน แล้ววัดระยะทางจากแหล่งกำเนิดแสงไปยังฉากมาเปรียบเทียบกันก็จะรู้ได้ว่า ดวงไหนมีกำลังการส่องสว่างเป็นกี่เท่าของกัน ดูตามรูป 37 ก. และ ข. คือ

ตัวอย่างที่ 1 ตะเกียง ก. ข. สองดวง ก. วางห่างจากฉาก 8 ฟุต ข. 10 ฟุต มีความเข้มแห่งการส่องสว่างที่ฉากเท่ากัน จงเปรียบเทียบกำลังการส่องสว่างของตะเกียง ก. และ ข. ถ้า ก. มีกำลังการส่องสว่าง 32 กำลังเทียน ข. จะมีกำลังการส่องสว่างเท่าไร

วิธีทำ



รูป 38

จากสูตร $\frac{P_1}{P_2} = \frac{d_1^2}{d_2^2}$

ในที่นี้ P_1 เป็นกำลังการส่องสว่างของตะเกียง ก. = ?

P_2 เป็นกำลังการส่องสว่างของตะเกียง ข. = ?

d_1 เป็นระยะทางที่ตะเกียง ก. ห่างจากฉาก = 8 ฟุต

และ d_2 เป็นระยะทางที่ตะเกียง ข. ห่างจากฉาก = 10 ฟุต

$\therefore \quad \frac{P_1}{P_2} = \frac{8^2}{10^2}$

$= \frac{64}{100}$

$= \frac{16}{25}$

ถ้า $P_1 = 32$ กำลังเทียน

$\therefore \quad \frac{32}{P_2} = \frac{16}{25}$

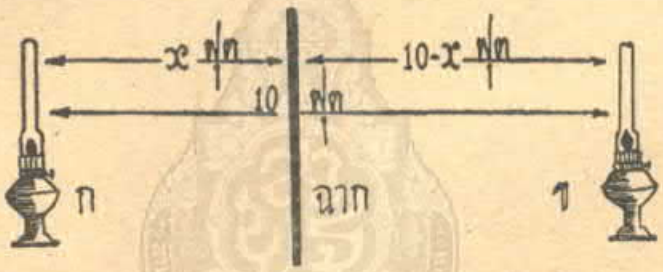
หรือ $P_2 = \frac{32 \times 25}{16}$

∴ กำลังการส่องสว่างของตะเกียง ข. = 50 กำลังเทียน

ตอบ { กำลังการส่องสว่างของตะเกียง ก : ข = 16 : 25
ตะเกียง ข. มีกำลังการส่องสว่าง 50 กำลังเทียน

ตัวอย่างที่ 2 ตะเกียง 2 ดวง ก. และ ข. มีกำลังการส่องสว่างเป็นอัตราส่วน 4 : 9 ถ้าตะเกียงสองดวงนั้นห่างกัน 10 ฟุต จะต้องวางฉากระหว่างตะเกียงที่ไหนจึงจะได้ความเข้มแห่งการส่องสว่างที่ฉากเท่ากัน

วิธีทำ



รูป 39

เมื่อตะเกียง ก. และ ข. ห่างกัน 10 ฟุต

สมมุติให้วางฉากไว้ห่างจากตะเกียง ก. = x ฟุต

∴ ฉากอยู่ห่างจากตะเกียง ข. = $(10-x)$ ฟุต

จากสูตร $\frac{P_1}{P_2} = \frac{d_1^2}{d_2^2}$

ในที่นี้ $\frac{P_1}{P_2}$ เป็นอัตราส่วนของกำลังการส่องสว่างของตะเกียง ก. กับ ข. $= \frac{4}{9}$

d_1 เป็นระยะที่ฉากห่างจากตะเกียง ก. = x ฟุต

และ d_2 เป็นระยะที่ฉากห่างจากตะเกียง ข. = $10-x$ ฟุต

$$\therefore \quad \frac{4}{9} = \frac{x^2}{(10-x)^2}$$

$$\left(\frac{2}{3}\right)^2 = \left(\frac{x}{10-x}\right)^2$$

ถอดรากที่ 2 $\quad \frac{2}{3} = \frac{x}{10-x}$

$$20-2x = 3x$$

$$5x = 20$$

$$x = 4$$

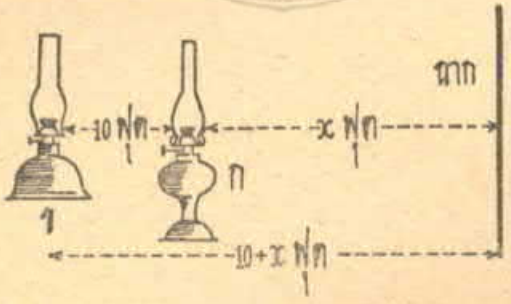
$\therefore$ ต้องวางฉากห่างจากตะเกียง ก. 4 ฟุต

หรือ ต้องวางฉากห่างจากตะเกียง ข. $10-x$ ฟุต

$= 6$ ฟุต

ตอบ วางฉากห่างจากตะเกียง ก. 4 ฟุต หรือ ข. 6 ฟุต

ตามตัวอย่างนี้ ถ้าถามว่าจะวางฉากที่ไหนได้ข้างจึงจะให้ความเข้มแห่งการส่องสว่างเท่ากัน เราจะมีวิธีคำนวณหาได้อีกแห่งหนึ่งดังนี้



รูป 40

สมมุติว่าวางฉากให้ตะเกียงทั้งสองอยู่หน้าฉากด้วยกัน และฉากอยู่ห่างจากตะเกียง ก. x ฟุต

$\therefore$ ฉากอยู่ห่างจากตะเกียง ข. $= x + 10$ ฟุต

จากสูตร $\frac{P_1}{P_2} = \frac{d_1^2}{d_2^2}$

$\therefore \frac{4}{9} = \frac{x^2}{(10+x)^2}$

ถอดรากที่ 2 $\frac{2}{3} = \frac{x}{10+x}$

$20 + 2x = 3x$

$x = 20$

ตอบ ต้องวางฉากห่างจากตะเกียง ก. 20 ฟุต และตะเกียง ข. 30 ฟุต

ถ้าโจทย์มิได้แยกถามเช่นนี้ ก็ให้ใช้วิธีต่อไปนี้คำนวณ จะได้คำตอบทั้งสองค่าออกมาด้วยกัน

จาก $\frac{4}{9} = \frac{x^2}{(10-x)^2}$

ดังนั้น $\pm \frac{2}{3} = \pm \frac{x}{10-x}$

ถ้า $\frac{2}{3} = \frac{x}{10-x}$

$\therefore 20 - 2x = 3x$

$5x = 20$

$x = 4$

และ ถ้า $\frac{2}{3} = -\frac{x}{10-x}$

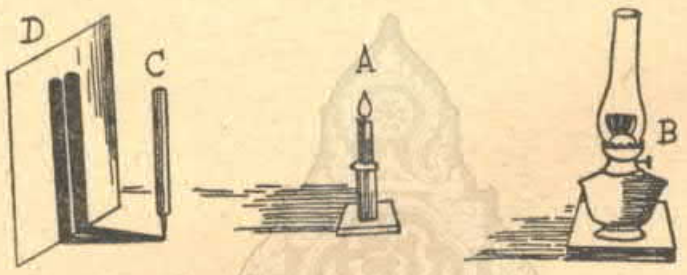
$\therefore 20 - 2x = -3x$

$x = -20$

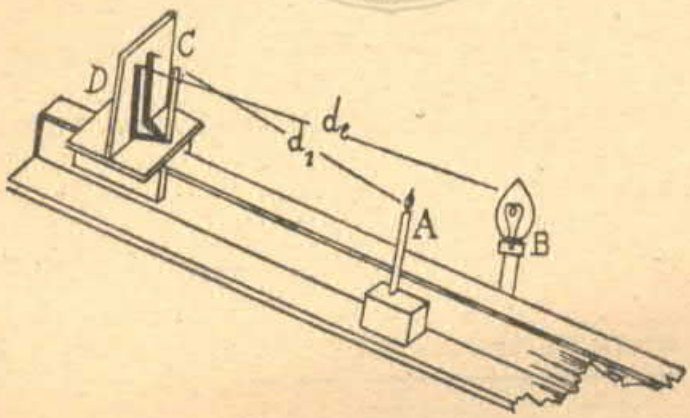
ตอบ ต้องวางฉากระหว่างตะเกียงทั้งสองให้ห่างจากตะเกียง ก. 4 ฟุต
ต้องวางฉากให้ตะเกียงทั้งสองอยู่หน้าฉากด้วยกัน โดยให้ตะเกียง ก. อยู่ห่างจากฉาก 20 ฟุต

โฟโตมิเตอร์ (Photometers) เป็นอุปกรณ์สำหรับใช้เปรียบเทียบกำลังการส่องสว่างของแหล่งกำเนิดแสงต่าง ๆ ที่ควรเรียนรู้มีดังนี้คือ.

ก. **โฟโตมิเตอร์เงาของรุมฟอร์ด** (Rumford's Shadow Photometer) สังเกตเงาของหลักที่ปักอยู่ระหว่างดวงไฟทั้งสองว่าดำเท่ากันหรือไม่ ดังรูป 41 ก. ข. และแผนภาพในรูป 41 ค.



รูป 41 ก. โฟโตมิเตอร์เงาของรุมฟอร์ด



รูป 41 ข. โฟโตมิเตอร์เงาของรุมฟอร์ด

4. ท่านมีหลักเปรียบเทียบได้อย่างไรบ้างจึงจะทราบว่า ตะเกียงดวงไหนมีกำลังการส่องสว่างมากกว่ากัน

5. ความเข้มแห่งการส่องสว่างบนพื้นที่ต่าง ๆ จากแหล่งกำเนิดแสงอันเดียวกัน มีความสัมพันธ์อย่างไรกับระยะห่าง ท่านจะแสดงการทดลองให้เห็นจริงได้อย่างไร

6. ในการเปรียบเทียบดูกำลังการส่องสว่างของดวงไฟ 2 ดวงนั้น ในทางปฏิบัติท่านจะทำได้อย่างไรบ้าง

7. จงอธิบายถึงส่วนประกอบ และวิธีใช้โฟโตมิเตอร์แบบที่ท่านเห็นว่าดีที่สุดมา และเขียนรูปประกอบด้วย พร้อมทั้งเหตุผล

8. จงเปรียบเทียบความเข้มแห่งการส่องสว่างของเทียนมาตรฐานเล่มหนึ่ง ซึ่งจุดไว้ห่างจากฉาก 1 ฟุต กับตะเกียง 9 กำลังเทียน ซึ่งจุดอยู่ห่าง 12 ฟุต คนละข้างของฉาก

9. ถ้าจุดเทียนมาตรฐานอ่านหนังสือ จะต้องวางหนังสือห่างจากเทียน 1 ฟุตจึงจะสว่างพอเหมาะ แต่ถ้าจุดเทียนมาตรฐานรวมกันไว้ 16 แท่ง จะต้องวางหนังสือห่างจากเทียนเท่าไร

10. แหล่งกำเนิดแสงที่มีกำลังการส่องสว่างเท่ากัน 2 ดวง วางไว้คนละข้างของกระดาษจุดน้ำมัน ห่างไป 20 ซม. และ 30 ซม. ตามลำดับ จงเปรียบเทียบความเข้มแห่งการส่องสว่างบนกระดาษจุดน้ำมันนั้น

11. เมื่อเอาดวงไฟดวงหนึ่งวางห่างจากจุดน้ำมันของโฟโตมิเตอร์แบบขุนเส้น 8 ฟุต แล้วจุดเทียนมาตรฐานดวงหนึ่ง มาวางไว้คนละข้างของจุดน้ำมัน ห่าง 1 ฟุต จะมองไม่เห็นจุดน้ำมัน จงหากำลังการส่องสว่างของดวงไฟนั้น

12. ดวงไฟ 40 กำลังเทียนอยู่ห่างจากฉาก 30 ซม. ถ้าดวงไฟนั้นเป็น 60 กำลังเทียน จะต้องอยู่ห่างจากฉากเท่าไร ความเข้มแห่งการส่องสว่างบนฉากจึงจะคงเดิม

13. ตะเกียงคาเซลมีกำลังการส่องสว่าง 9 กำลังเทียน วางห่างจากเทียนมาตรฐานเล่มหนึ่ง 4 ฟุต จงหาว่าจะต้องเอาฉากตั้งที่ตรงไหน ความเข้มแห่งการส่องสว่างบนฉากจึงจะเท่ากัน

14. จงหากำลังการส่องสว่างของตะเกียงดวงหนึ่ง ซึ่งนำมาเปรียบเทียบกับเทียนมาตรฐานโดยโฟโตมิเตอร์เงาของรูมฟอร์ดแล้ว ปรากฏว่าเงาจะมืดเท่ากันต่อเมื่อตะเกียงดวงนั้นและเทียนวางอยู่ห่างจากฉาก 2 ฟุต และ 3 ฟุต ตามลำดับ

15. การเปรียบเทียบโดยโฟโตมิเตอร์ของยูนเส็น จะได้ผลว่าดวงไฟ 2 ดวงต้องวางอยู่ห่างจากจุดน้ำมัน 45 ซม. และ 30 ซม. จึงจะแลไม่เห็นจุดน้ำมัน จงเปรียบเทียบกำลังการส่องสว่างของดวงไฟทั้งสอง

16 ถ้าดวงไฟมีกำลังการส่องสว่าง 64 และ 16 กำลังเทียน อยู่ห่างกัน 1 เมตร จะต้องเลื่อนกระดาษจุดน้ำมันไปไว้ที่ไหนจึงจะแลไม่เห็นจุดน้ำมัน

17. ความเข้มแห่งการส่องสว่าง ณ จุดที่อยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดแสง ที่มีกำลังการส่องสว่าง 40 กำลังเทียน เป็นระยะทาง 4 ฟุต จะเท่ากับเท่าไร

18. ความสว่างที่พอเหมาะกับการเขียนหนังสือนั้นเท่ากับ 10 กำลังเทียน-ฟุต ถ้าใช้หลอดไฟฟ้าที่มีกำลังการส่องสว่าง 25 กำลังเทียน จะต้องแขวนไว้สูงจากโต๊ะเท่าไร

19. เมื่อเทียนมาตรฐานเล่มหนึ่งกับตะเกียงกาซ 4 กำลังเทียนจุดอยู่ห่างกัน 6 ฟุต เราจะเอากระดาษจุดน้ำมันของโฟโตมิเตอร์ของบุนเส้นตั้นกลาง ที่ไหนจึงจะแล ไม่เห็นจุดน้ำมัน

20. ดวงไฟ 2 ดวง เมื่อวางห่างจากฉาก 1 และ 4 ฟุต ตามลำดับ ปรากฏว่า ความเข้มแห่งการส่องสว่างบนฉากนั้นจะเท่ากัน ถ้าเลื่อนดวงที่มีกำลังการ ส่องสว่างมากกว่าออกไป 8 ฟุต จงหาว่าจะต้องเลื่อนอีกดวงหนึ่งไปอยู่ห่าง เท่าไรจึงจะมีผลเช่นเดิม

21. ตะเกียง 16 กำลังเทียน กับ 25 กำลังเทียนวางห่างกัน 6 ฟุต จะต้องเอาฉาก วางที่ไหนข้างจึงจะได้ความเข้มแห่งการส่องสว่างเท่ากัน

22. ดวงไฟ 2 ดวง มีกำลังการส่องสว่างเท่ากับ 20 และ 30 กำลังเทียน วาง อยู่ห่างกัน 1 เมตร ถามว่าที่ไหนข้างมีความเข้มแห่งการส่องสว่างเนื่องจาก ดวงไฟทั้งสองเท่ากัน

23. ดวงไฟ 2 ดวง ที่มีกำลังการส่องสว่างเป็น 100 และ 80 กำลังเทียน อยู่ ห่างจากกระดาษจุดน้ำมัน 3 ฟุตเท่า ๆ กัน เอาแผ่นกระจกแผ่นหนึ่งมากั้น แสงจากดวงแรกก่อนแล้วความเข้มแห่งการส่องสว่างบนกระดาษจุดน้ำมันจะ เท่ากัน แผ่นกระจกนั้นดูดแสงไว้ร้อยละเท่าไร

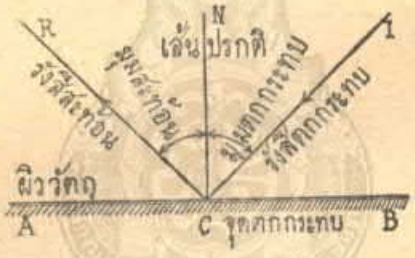
24. ตะเกียงดวงหนึ่งอยู่ห่างจากฉาก 75 ซม. เมื่อเอาแผ่นกระจกมากั้นแสงเสียจะ ต้องเลื่อนฉากเข้าไปอีก 15 ซม. จึงจะได้ความเข้มแห่งการส่องสว่างบนฉาก เท่าเดิม แผ่นกระจกนั้นดูดแสงไว้ร้อยละเท่าไร

25. จงเปรียบเทียบกำลังการส่องสว่างของตะเกียง 3 ดวง ที่ตั้งไว้ที่ปลายทั้งสอง และที่จุดกึ่งกลางของฐาน BC ของรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า ABC เมื่อตะเกียง ทั้งสามนั้นให้ความเข้มแห่งการส่องสว่างที่จุดยอด A เท่ากัน

บทที่ 3
การสะท้อนของแสงบนผิวระนาบ

การสะท้อนของแสง (Reflection) คือการที่แสงเปลี่ยนทิศทางกลับออกมา เมื่อแสงนั้นส่องไปกระทบกับผิวของเทหวัตถุ

แสงจะสะท้อนได้มากหรือน้อยสุดแต่ลักษณะของผิวของเทหวัตถุ ถ้าผิวนั้นเป็นมัน เรียบ หรือมันวาว ก็สะท้อนแสงได้มาก



รูป 43 การสะท้อนแสงของรังสีหนึ่งบนผิวระนาบ

รังสีตกกระทบ (Incident Ray) คือรังสีของแสงแต่ละรังสีที่ส่องไปกระทบผิวของเทหวัตถุ

จุดตกกระทบ คือจุดแต่ละจุดบนผิวของเทหวัตถุที่รังสีของแสงส่องไปกระทบ

เส้นปรกติ (Normal) คือเส้นตรงที่ลากตั้งได้ฉากกับผิวของเทหวัตถุ ณ จุดตกกระทบ

รังสีสะท้อน (Reflected Ray) คือรังสีของแสงที่เปลี่ยนทิศทางกลับออกมาเมื่อไปกระทบกับผิวของเทหวัตถุ

มุมตกกระทบ (Angle of Incidence) คือมุมที่รังสีตกกระทบกระทำกับเส้นปรกติ ณ จุดตกกระทบ

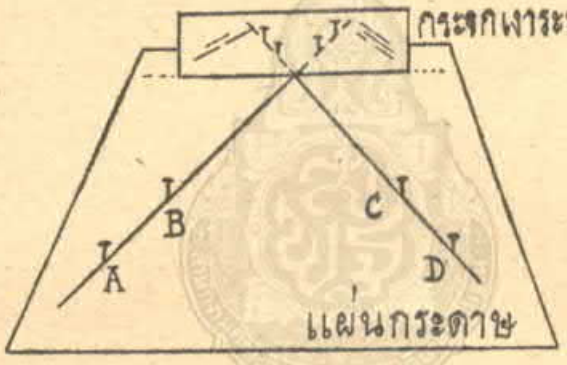
มุมสะท้อน (Angle of Reflection) คือมุมที่รังสีสะท้อนกระทำกับเส้นปรกติ ณ จุดตกกระทบ

กฎของการสะท้อนของแสง (Law of Reflection of Light) มี 2 ข้อ คือ

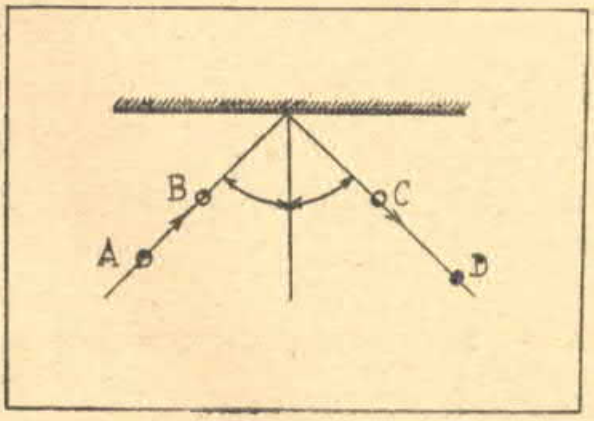
1. รังสีตกกระทบ เส้นปรกติ และรังสีสะท้อน ที่จุดตกกระทบของแต่ละจุด ย่อมอยู่บนระนาบ (Plane) อันเดียวกัน

3. มุมตกกระทบ กับมุมสะท้อน คู่เดียวกัน ย่อมเท่ากันเสมอ

ทดลองให้เห็นจริงได้ดังนี้



รูป 44 ก. การปักเข็มหมุดหน้ากระจกเงาระนาบเพื่อแสดงกฎของการสะท้อนของแสง



รูป 44 ข. การชี้ดเส้นแสดงว่าผลของการสะท้อนของแสงเป็นความจริง

สิ่งที่ใช้ประกอบการทดลอง มี

1. กระจกเงาระนาบแผ่นเล็ก ยาวและยาง 1 แผ่น
2. กระดาษ 1 แผ่น กินสอ ไม้โปรแทรกเตอร์
3. เข็มหมุด 4 ตัว

วิธีทดลอง ทำตามลำดับดังนี้

1) ขีดเส้น ๆ หนึ่งบนกระดาษ เป็นแนวสำหรับตั้งกระจกเงา

2) เอากระจกเงาตั้งตามแนวที่ขีดไว้ ให้ตั้งฉากกับกระดาษอย่าให้เคลื่อนที่ได้

3) เอาเข็มหมุด 2 ตัว คือ A และ B ปักบนแผ่นกระดาษหน้ากระจกเงา อย่าให้อยู่ในแนวขนานกับกระจกเงา และอย่าให้อยู่บนเส้นตั้งฉากกับกระจกเงาด้วย

4) มองจนเห็นภาพของเข็มหมุดในกระจกเงาอยู่เป็นแนวเส้นตรงอันเดียวกันแล้วปักเข็มหมุดลงบนแผ่นกระดาษอีก 2 ตัว คือ C และ D ให้อยู่เป็นแนวเส้นตรงอันเดียวกันกับภาพของเข็มหมุด 2 ตัวแรก ดังรูป 44 ก.

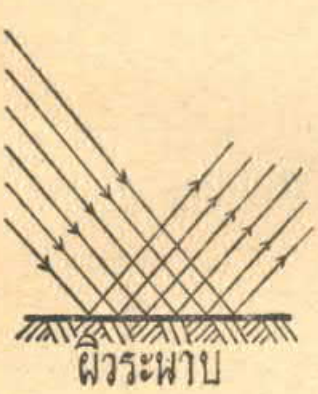
5) ยกกระจกเงาออกและถอนเข็มหมุดขึ้น แล้วลากเส้นผ่านรูเข็มหมุด 2 ตัวแรกและ 2 ตัวหลัง

6) เส้นทั้งสองนั้นจะไปพบกันที่แนวของกระจกเงาพอดี จากจุดนี้เราก็ลากเส้นตั้งฉากกับแนวกระจกเงา

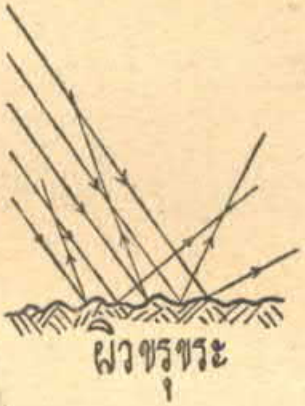
7) วัดมุมที่เกิดขึ้นทั้งสองข้างของเส้นตั้งฉากนี้จะเห็นว่าเท่ากัน ดังรูป 44 ข. นั่นแสดงให้เห็นว่า กฎของการสะท้อนของแสงเป็นความจริง

การสะท้อนของแสงบนผิวระนาบ ย่อมเป็นระเบียบเป็นแนว ดังรูป 45 ก. แม้จะมีการกระจายแสง บ้างก็เป็นส่วนน้อย จนไม่ต้องคำนึงถึงเลย เช่นการสะท้อนแสงของกระจกเงาระนาบ

ส่วน การสะท้อนของแสงบนผิวขรุขระ นั้นไม่มีระเบียบ ดังรูป 45 ข. แต่ก็เป็นไปตามกฎของการสะท้อนของแสงทุกจุดตกกระทบ มีการกระจายแสงมาก สะท้อนออกไปหลายทิศทาง เช่นการสะท้อนของผนังตึก



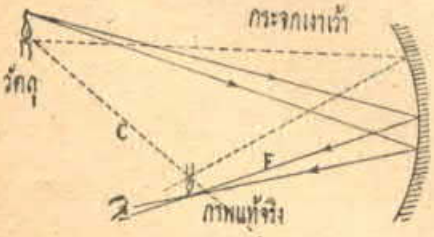
รูป 45 ก.
แสงสะท้อนบนผิวระนาบมีระเบียบ



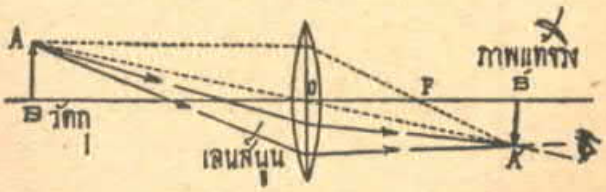
รูป 45 ข.
แสงสะท้อนบนผิวขรุขระไม่มีระเบียบ

ภาพ (Image) เป็นที่ตัดกัน หรือเหมือนตัดกันของแสงภายหลังการสะท้อนของแสง หรือการหักเห มี 2 ชนิด คือ

ก. **ภาพแท้จริง** (Real image) เป็นจุดที่ตัดกันของแสงที่กระจายออกจากจุดที่มีแสงภายหลังการสะท้อนหรือการหักเห เช่นภาพที่เกิดจากกระจกเงาเว้า หรือเลนส์นูน และเราอาจจะเอาฉากรับภาพได้ ณ จุดที่เกิดภาพนั้น ดังรูป 46 และ 47 ตามลำดับ



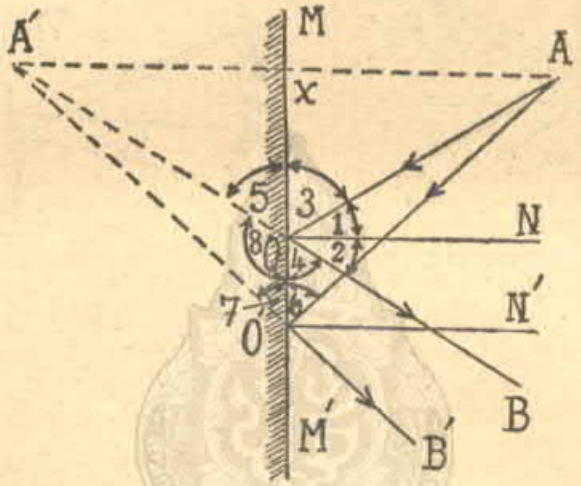
รูป 46 ภาพแท้จริงที่ได้จากกระจกเงาเว้า



รูป 47 ภาพแท้จริงที่ได้จากเลนส์นูน

ภาพในกระจกเงาระนาบเป็นภาพเสมือน อยู่ห่างจากกระจกเงาเป็นระยะทางเท่ากับระยะทางจากต้นแสงไปยังกระจกเงานั้น และภาพนั้นมีลักษณะเป็น ปรัศวภาควิโลม (Lateral Inversion) *คือการกลับข้าง จากซ้ายเป็นขวา และขวาเป็นซ้าย* ดังรูป 51 ก. และ ข.

การพิสูจน์ว่า ระยะภาพจากกระจกเงาระนาบเท่ากับระยะจากกระจกเงาถึงวัตถุ



รูป 52 แสดงว่าภาพห่างจากกระจกเงาระนาบ = วัตถุห่างจากกระจกเงา

กำหนดให้ MM′ เป็นกระจกเงาระนาบ
A เป็นวัตถุ
AO เป็นรังสีตกกระทบที่หนึ่ง
AO′ เป็นรังสีตกกระทบที่สอง
ON เป็นเส้นปรกติที่จุดตกกระทบ O
O′N′ เป็นเส้นปรกติที่จุดตกกระทบ A′
OB เป็นรังสีสะท้อนของ AO
O′B′ เป็นรังสีสะท้อนของ AO′
และ A′ เป็นจุดที่รังสีสะท้อน OB และ O′B′ ต่อถอยหลังไปตัดกัน ลาก AA′ ตัด MM′ ที่จุด X

จะต้องพิสูจน์ว่า AA′ ตั้งฉากกับ MM′ และ A′X = AX

พิสูจน์ $\because \hat{1} = \hat{2}$ (*กฎการสะท้อนแสง*)

และ $\overset{\wedge}{3} = \overset{\wedge}{4}$

แต่ $\overset{\wedge}{5} = \overset{\wedge}{4}$ (*ท.บ.* 3)

$\therefore \overset{\wedge}{5} = \overset{\wedge}{3}$ ด้วย

และ $\because \overset{\wedge}{8} = \overset{\wedge}{1} + \overset{\wedge}{2} + \overset{\wedge}{3}$

$\therefore \overset{\wedge}{8} = \overset{\wedge}{1} + \overset{\wedge}{2} + \overset{\wedge}{4}$ หรือ $\mathrm{A\hat{O}M'}$ ด้วย

ทำนองเดียวกันกับ $\overset{\wedge}{3}$ และ $\overset{\wedge}{5}$

$\overset{\wedge}{7} = \overset{\wedge}{6}$

ใน $\triangle \mathrm{A'OO'}$ กับ $\triangle \mathrm{AOO'}$

$\because$ $\begin{cases} \overset{\wedge}{8} = \mathrm{A\hat{O}M'} \\ \overset{\wedge}{7} = \overset{\wedge}{6} \\ \mathrm{OO'} \text{ เป็นด้านร่วม} \end{cases}$

$\therefore \triangle \mathrm{A'OO'} = \triangle \mathrm{AOO'}$ ทุกประการ (*ท.บ.* 17)

และ $\mathrm{A'O} = \mathrm{AO}$

ใน $\triangle \mathrm{A'XO}$ กับ $\triangle \mathrm{AXO}$

$\because$ $\begin{cases} \mathrm{A'O} = \mathrm{AO} \\ \mathrm{XO} \text{ เป็นด้านร่วม} \\ \overset{\wedge}{5} = \overset{\wedge}{3} \end{cases}$

$\therefore \triangle \mathrm{A'XO} = \triangle \mathrm{AXO}$ ทุกประการ (*ท.บ.* 4)

$\mathrm{AA'}$ ตั้งฉากกับ $\mathrm{MM'}$

และ $\mathrm{A'X} = \mathrm{AX}$

นั่นคือ **ระยะภาพจากกระจกเงาระนาบ = ระยะจากกระจกเงาถึงวัตถุ**

การพิสูจน์นี้ แสดงด้วยว่า

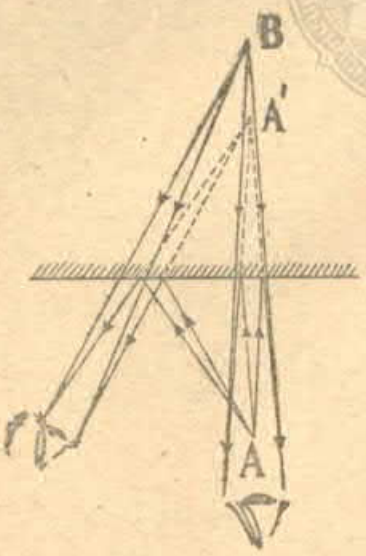
อัตราเร็วที่ภาพเคลื่อนที่เข้าหากระจกเงา=อัตราเร็วที่วัตถุเคลื่อนเข้าหากระจกเงา

การทดลอง ว่า ระยะภาพจากกระจกเงาระนาบ = ระยะจากกระจกเงาถึงวัตถุ

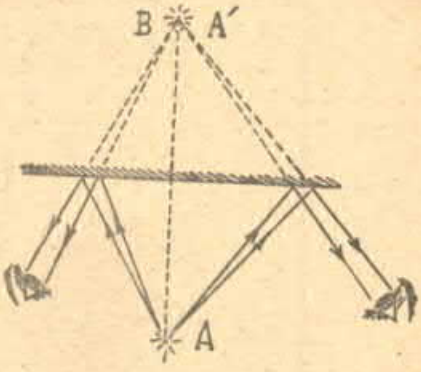
ก. โดยอาศัยหลักปารัลลักซ์ (Parallax)

ปารัลลักซ์ หมายถึงการสังเกตเห็นวัตถุ หนีออกจากกันเมื่อเราเคลื่อนตาจากจุดที่มองอยู่เดิม *โดยตาคงจับอยู่ ณ ที่ที่หมายตามอง*

เช่น การเห็นไม้หลักกับกองฟางที่อยู่ไกลหนีออกจากกัน หรือ การเห็นวัตถุที่วางอยู่หลังกระจกเงากับภาพของวัตถุอีกอันหนึ่งที่แลเห็นในกระจกเงา เมื่อเคลื่อนตามองแล้วไม่ทับกัน ดังรูป 53 แต่ถ้าหากเคลื่อนตาไปมอง ณ ตำแหน่งต่าง ๆ หน้ากระจกเงา แล้ววัตถุอันนั้นกับภาพไม่หนีจากกัน เรียกว่า หมดปารัลลักซ์ ดังรูป 54



รูป 53 ภาพมีปารัลลักซ์



รูป 54 ภาพหมดปารัลลักซ์

อุปกรณ์ มี 1) กระจกเงาระนาบแผ่นเดียว ๆ แต่ยาว

2) เข็มหมุด 2 ตัว (สั้น 1 ตัว ยาว 1 ตัว คือ A กับ B)

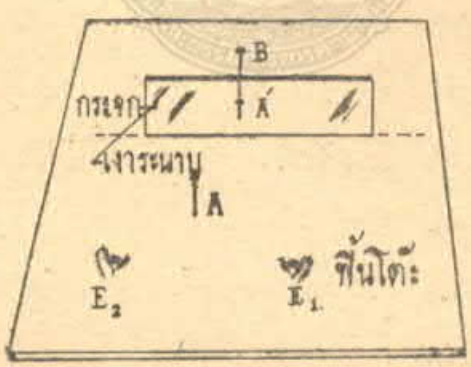
3) ดินสอ และไม้บรรทัด

วิธีทดลอง 1) ขีดแนววางกระจกเงา แล้ววางกระจกเงาตามแนวนั้นให้ตั้งฉากกับพื้น

2) ปักเข็มหมุดอันสั้น (A) หน้ากระจกเงา

3) แลดูในกระจกเงาจะเห็นภาพของ A พยายามปักเข็มหมุดอันยาว (B) หลังกระจกเงาให้พอดีทับกับภาพของ A (คือ A') ที่แลเห็นในกระจกเงา ตามวิธีปารัลลักซ์ ดังรูป 55

4) เมื่อเข็มหมุด B กับภาพของเข็มหมุด A ทับกันแล้ว หรือ หมดปารัลลักซ์แล้ว ก็วัดระยะจากเข็มหมุด A และ B ไปยังแนวกระจกเงา จะปรากฏว่า ยาวเท่ากัน และต่อเป็นเส้นตรงอันเดียวกันด้วย



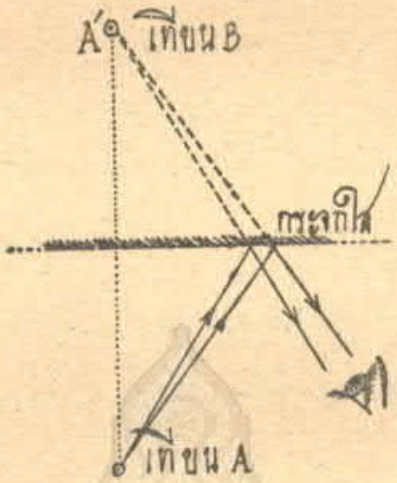
รูป 55 แสดงปารัลลักซ์

ข. โดยใช้กระจกใส อุปกรณ์มีดังนี้

1. เทียนไข 2 เล่ม คือ A และ B และไม้ขีดไฟ

2. กระจกใสติดกับที่ตั้ง 1 แผ่น (*เป็นกระจกทาปรอทบาง ๆ ได้ก็ยิ่งดี*)

3. ดินสอหรือชอล์ก และไม้บรรทัด



รูป 56 ใช้กระจกใสทดลองว่า ระยะภาพ = ระยะวัตถุ

วิธีทดลอง ให้ทำดังนี้

1. เขียนแนวสำหรับวางกระจกบนกระดาษ

2. ตั้งกระจกตามแนวที่เขียนไว้ให้ด้านหลังมืดกว่า

3. จุดเทียน A ตั้งหน้ากระจก

4. จุดเทียน B แล้วตั้งไว้หลังกระจกให้พอดีทับกับภาพของเทียน A คือ A' ที่แลเห็นจากหน้ากระจก

ดังนั้น เทียน B จะแทนภาพของเทียน A ดังรูป 56

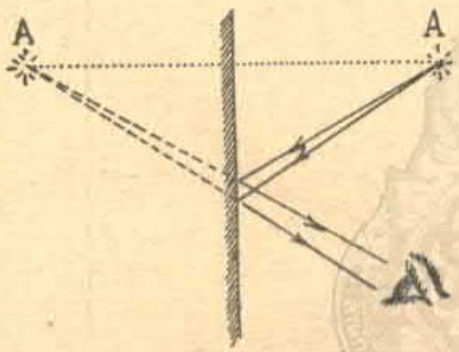
5. เอากระจกออก วัดระยะตั้งฉากจากเทียน A และ B ไปยังแนวกระจก จะเห็นว่าเท่ากัน และต่อเป็นเส้นตรงอันเดียวกันด้วย

วิธีเขียนทางเดินของแสงมายังตา ขณะที่ตามองเห็นภาพในกระจกเงาระนาบให้ทำเป็นขั้น ๆ ดังนี้

1) หาที่ตั้งของภาพหลังกระจกเงา (*ระยะภาพ = ระยะวัตถุ*) วัตถุที่มีขนาดใหญ่ ใช้วิธีหาที่ตั้งของจุดปลายสุด

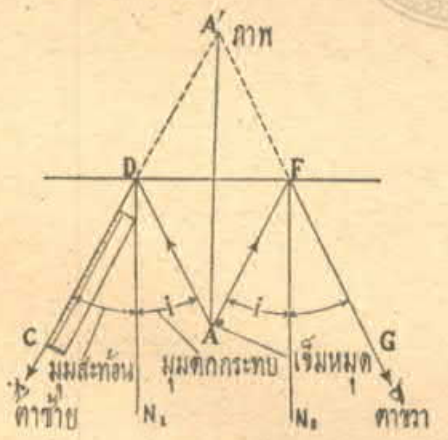
2) ลากเส้นจาก ตา ไปหา ภาพ (*เส้นหลังกระจกเงาใช้เส้นเบา หรือเส้นจุด*) นิยมใช้เส้นคู่ด้วยแสงกระจายมาในรูป พู่กันรังสี แต่ถ้ารูปจะยุ่งมากไปใช้เส้นเดียวก็ได้

3) จากจุดที่เส้นตามข้อ (2) ตัดกับกระจกเงา ลากเส้นไปหาวัตถุ

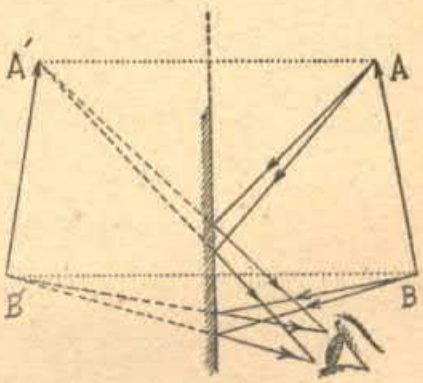


รูป 57 ก. ตาแลเห็นภาพที่เป็นจุด

รูป 57 ข.



รูป 57 ค. ตาแลเห็นภาพเข็มหมุดได้อย่างไร



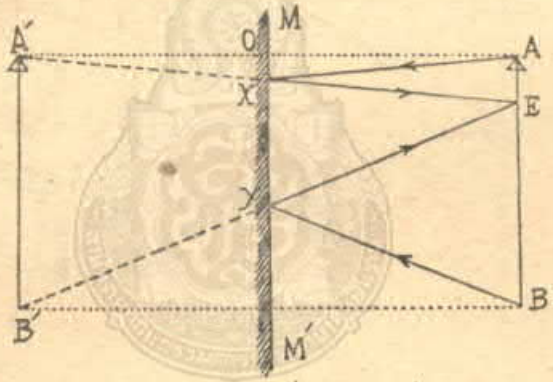
รูป 57 ง. ตาแลเห็นภาพที่เป็นวัตถุ

4) เขียนหัวลูกศรแสดงทางเดินของแสงจากวัตถุไปพบกระจกเงาแล้วสะท้อนมายังตา ดังรูป 57 ก. และ ง.

ข้อควรสังเกต 1) ขณะที่เราหาที่ตั้งของภาพ เส้นที่ลากจากแหล่งกำเนิดแสงไปยังภาพอาจจะไม่ตัดกับกระจกเงาก็ได้ เราต้องต่อแนวกระจกเงาออกไป ดังรูป 57 ง.

2) เส้นที่ลากจากตาไปยังภาพต้องตัดกระจกเงาทุกเส้น ถ้าไม่ตัดกระจกเงาแสดงว่า ตาเราซึ่งอยู่ ณ ที่นั้นก็จะแลไม่เห็นภาพ

ขนาดของกระจกเงาที่สามารถให้ผู้ส่องแลเห็นตนเองได้ตลอดตัว $= \frac{1}{2}$ ของความสูงของผู้ส่อง



รูป 58 พิสูจน์หาขนาดสูงของกระจกเงาที่ผู้ส่องแลเห็นส่วนสูงของตนได้ตลอด

กำหนดให้ AB เป็นความสูงของผู้ส่อง

A´B´ เป็นภาพของผู้ส่อง

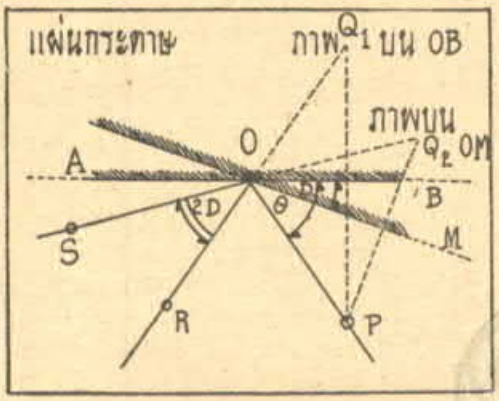
MM´ เป็นกระจกเงาระนาบยาวใหญ่

E เป็นตาของผู้ส่อง

และ XY เป็นขนาดสูงของกระจกเงาที่ผู้ส่องแลเห็นส่วนสูงของตนเอง คือ ภาพ A´B´ ได้ตลอดตัวพอดี

จะต้องหา ขนาดของ XY

การทดลองความจริงข้อนี้อย่างง่าย ๆ ใช้เครื่องประกอบ คือกระจกเงาระนาบ กระดาษสำหรับเขียน ดินสอ ไม้โปรแทรกเตอร์ และเข็มหมุด 4 ตัว



รูป 60
การทดลองแสดงว่า รังสีสะท้อนเอไปจากแนวเดิมเป็นมุมโต 2 เท่าของมุมที่กระจกเงาทำไป

วิธีทดลอง เอาแผ่นกระดาษวางบนโต๊ะเรียบ ๆ ลากเส้น AB บนแผ่นกระดาษนั้น

ให้ O เป็นจุด ๆ หนึ่งบนเส้น AB

ลาก OM ทำมุมกับ OB = D

ลาก OP ทำมุมกับ OB = θ

เอากระจกเงาวางทับเส้น AB และตั้งฉากกับแผ่นกระดาษ เอาเข็มหมุดยัดที่ P และ O

ดังนั้นจะเกิดภาพของ P ในกระจกเงา AB และสมมุติว่าตำแหน่งของภาพอยู่ที่ Q_1

ยกเข็มหมุดอีกเล่มหนึ่งทาบที่ R หน้ากระจกเงา โดยเล็งให้เห็นว่าอยู่ในแนวเดียวกันกับเข็มหมุด O และภาพ Q_1 ที่เห็นอยู่ในกระจกเงา

ยกแผ่นกระจกเงาจากแนว AB มาวางตามแนว OM

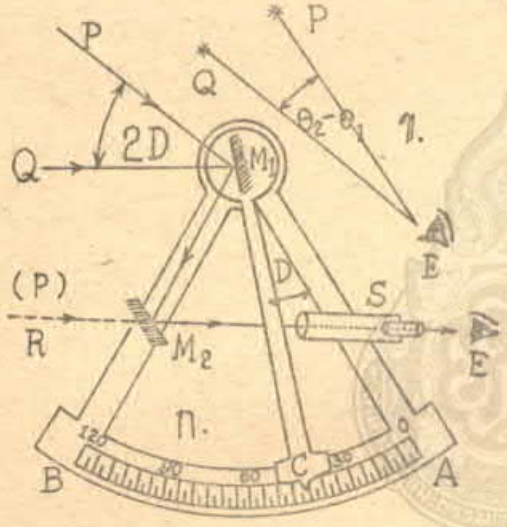
ดังนั้นจะเกิดภาพของ P ในกระจกเงา OM สมมุติว่าตำแหน่งของภาพอยู่ที่ Q_2 แล้วยกเข็มหมุดอีกเล่มหนึ่งทาบที่ S หน้ากระจกเงา โดยเล็งให้เห็นว่าอยู่ในแนวเดียวกันกับเข็มหมุด O และภาพ Q_2 ที่เห็นอยู่ในกระจกเงา

ยกกระจกเงาออกและถอนเข็มหมุดออกให้หมด ลากเส้น OR และ OS

วัด $R\hat{O}S$ จะได้ 2D ดังรูป 60

มุม ROS จะเป็นมุมที่รังสีสะท้อนเฉไปจากแนวเดิมโดเท่ากับ 2D นั่นแสดงให้เห็นว่า เมื่อกระจกเงาเหไปเป็นมุมเท่าใดก็ตาม มุมที่รังสีสะท้อนเฉจากแนวเดิมจะเป็น 2 เท่า ของมุมที่กระจกเงาเหไปเสมอ

เซกสแตนต์ เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดมุมระหว่างวัตถุที่อยู่ห่างกัน เช่น ดวงอาทิตย์ กับโลก หรือ ใช้วัดมุมระหว่างวัตถุ 2 อันที่ตาเราแลเห็น ว่ากระทำมุมกันเท่าใด ที่ตาของเรา



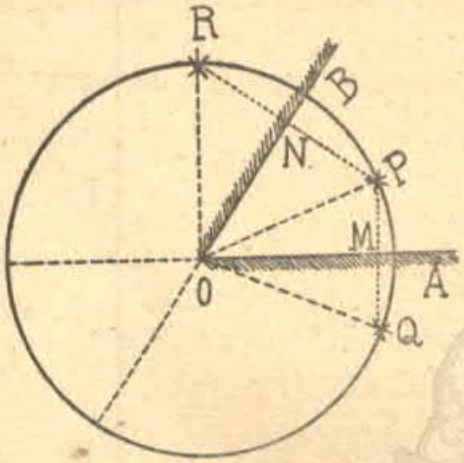
รูป 61 แสดงส่วนประกอบและวิธีใช้เซกสแตนต์

ส่วนประกอบ มีกระจกเงาระนาบ 2 แผ่น คือ M, กับ M, M, เป็นกระจกเงา M, เป็นกระจกเงาเพียงครึ่งส่วนล่างเท่านั้น กล้องโทรทรรศน์ S และมาตราส่วนโค้ง AB มีเข็มชี้ M, C หมุนได้รอบจุด M, เราอ่านจำนวนองศาได้ที่ C บนมาตราส่วนโค้ง AB ดังรูป 61 ก.

วิธีใช้ เมื่อต้องการวัดมุมระหว่างของสิ่งใด ก็ให้หาตำแหน่งที่ตั้งของตัวแรกก่อนโดยมองจากกล้องโทรทรรศน์ผ่านส่วนใสของกระจก M_2 ให้แลเห็นสิ่งนั้น แล้วเลื่อนเข็มชี้ M, C ไป จนกระทั่งแลเห็นสิ่งที่สองจากการสะท้อนของแสงโดยกระจกเงา M, และ M_2 อ่านมุมจากมาตราส่วนโค้ง BC ที่เข็ม M,C ชี้อยู่ เมื่อเอา 2 คูณ ผลที่ได้ก็จะเป็นมุมที่เราต้องการ ดังในรูป 61 ก. แต่เขามักจะเขียนมาตราส่วนให้อ่านได้ทันที โดยที่จริงเป็น 1 องศา ก็เขียนไว้ให้อ่านเป็น 2 องศา

กระจกเงาระนาบ 2 บานวางเป็นมุมซึ่งกันและกัน เราจะเขียนภาพได้โดยอาศัยหลักว่า

ภาพที่เกิดขึ้นทั้งหมดและวัตถุย่อมอยู่บนเส้นรอบวง ของวงกลมวงหนึ่ง



รูป 62 แสดงว่าภาพทุกภาพที่เกิดจากกระจกเงาทำมุมกันและวัตถุย่อมอยู่บนเส้นรอบวงของวงกลมวงเดียวกัน

กำหนดให้ OA และ OB เป็นกระจกเงา 2 บานวางรอดกันที่จุด O ทำมุม AOB ต่อกัน

P เป็นแหล่งกำเนิดแสงอยู่ระหว่างกระจกเงา OA และ OB

Q เป็นภาพของ P ในกระจกเงา OA

และ R เป็นภาพของ P ในกระจกเงา OB

ลาก PQ ตัด OA ที่จุด M

ลาก PR ตัด OB ที่จุด N

จะต้องพิสูจน์ว่า P, Q, R อยู่บนเส้นรอบวงของวงกลมวงเดียวกัน หรือ OP = OQ = OR

พิสูจน์ ลาก OP, OQ และ OR

ใน $\triangle$ OPM กับ $\triangle$ OQM

$\therefore$ ระยะวัตถุ PM = ระยะภาพ MQ
OM เป็นด้านร่วม
มุมฉาก PMO = มุมฉาก QMO

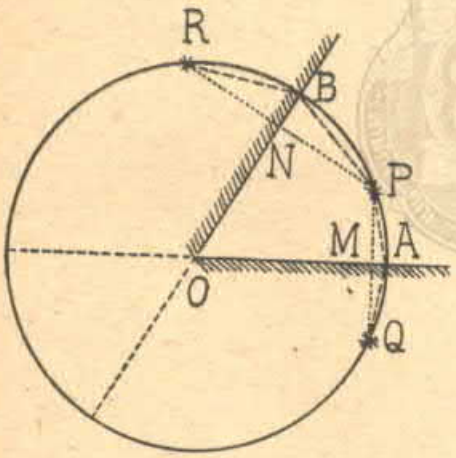
$\therefore$ $\triangle$ OPM เท่ากับ $\triangle$ OQM ทุกประการ (ด.ม. 4)

$\therefore$ OP = OQ

ในทำนองเดียวกันจะพิสูจน์ได้ว่า

OR = OP และ = OQ ด้วย

นั่นคือ วัตถุและภาพที่เกิดขึ้นทั้งหมดอยู่บนเส้นรอบวงของวงกลมวงเดียวกัน โดยมีจุดที่กระจกเงาจรดกันเป็นศูนย์กลาง และระยะจากจุดนั้นถึงวัตถุเป็นรัศมี



รูป 63
แสดงว่าวิธีเขียนภาพตามเส้นรอบวงของวงกลมมีผลอย่างเดียวกับใช้ระยะภาพเท่ากับระยะวัตถุ

วิธีเขียนภาพ ใช้จุดที่เส้นรอบวงตัดกับกระจกเงาเป็นศูนย์กลาง คือ จุด A เอาระยะจากจุดนั้นถึงวัตถุ P เป็นรัศมีตัดเส้นรอบวงที่หลังกระจกเงา จุดที่เกิดขึ้นคือ Q จะเป็นที่เกิดภาพของ P

กำหนดให้ ตามรูป 62 ลาก AP, AQ , BP และ BR

จะต้องพิสูจน์ว่า AP = AQ หรือ BP =BR

พิสูจน์ ∵ △ APM เท่ากับ △ AQM ทุกประการ (ท.บ. 4)

∴ AP = AQ

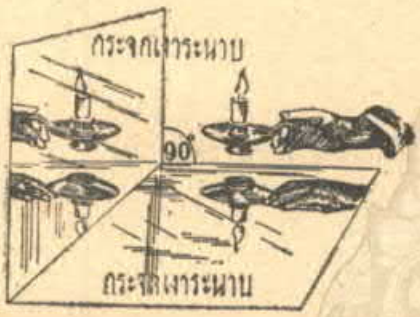
ในทำนองเดียวกันจะได้

BP = BR

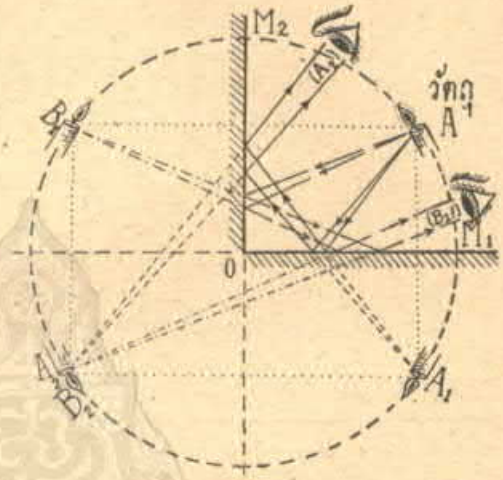
ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ใช้วิธีนี้ผลอย่างเดียวกับ ใช้ระยะตั้งฉากกับกระจกเงาและสะดวกกว่าด้วย

ต้องจำไว้ว่า *เมื่อภาพไปเกิดระหว่างแนวหลังกระจกเงา 2 บานแล้ว ก็จะไม่เกิดภาพขึ้นอีกต่อไป*

ก. เมื่อทำมุมกัน 90° (90° หาร 360° ลงตัว จะได้ภาพสุดท้ายทับกัน)



รูป 64 ก.
ภาพของเทียนหน้ากระจกเงา 2 บานที่ทำมุมกัน 90°



รูป 64 ข.
แสดงว่าตาแลเห็นภาพสุดท้าย (A_2 กับ B_2) จากกระจกเงา 2 บานซึ่งทำมุมกัน 90° ได้อย่างไร

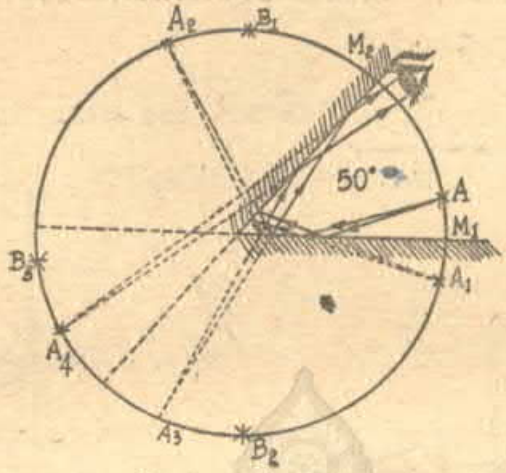
ตามรูป 64 ข. A_1 เป็นภาพที่หนึ่งของ A จากกระจกเงา M_1

B_1 เป็นภาพที่หนึ่งของ A จากกระจกเงา M_2

และ A_2 และ B_2 เป็นภาพที่เกิดทับกันอยู่ระหว่างแนวหลังกระจกเงาทั้งสองบานจึงไม่เกิดภาพขึ้นอีก

วิธีเขียนทางเดินของแสงมายังตา เมื่อเราแลเห็นภาพสุดท้ายเกิดจากกระจกเงาบานใดก็ลากเส้นจากภาพนั้นมายังตา แล้วลากเส้นจากจุดที่เส้นนั้นตัดกระจกเงาไปยังภาพถัดขึ้นมาซึ่งเป็นเสมือนหนึ่งวัตถุ ทำอย่างนี้มาจนถึงวัตถุจริง ๆ แล้วเขียนหัวลูกศรแสดงทางเดินของแสงจากวัตถุมายังตา

ข. เมื่อทำมุมกัน 50° (50° หาร 360° ไม่ลงตัว จะได้ภาพสุดท้ายไม่ทับกัน)



รูป 65 แสดงว่าตาแลเห็นภาพ A_4 ซึ่งเกิดจากกระจกเงา M_2 ได้อย่างไร

จำนวนภาพที่เกิดจากกระจกเงา 2 บานที่ทำมุมต่าง ๆ กัน คำนวณได้โดยสูตรต่อไปนี้

ให้ n เป็นจำนวนภาพ

θ เป็นมุมที่กระจกเงาวางจรดกัน

ก. ถ้า θ หาร 360° ลงตัวภาพสุดท้ายจะทับกัน ดังรูป 64 ข.

เราใช้สูตร $n = \frac{360}{\theta} - 1$ .....สูตร 7

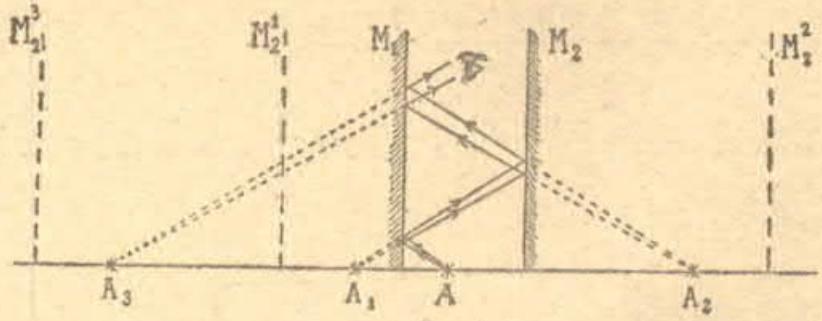
ข. ถ้า θ หาร 360° ไม่ลงตัว แสดงว่าภาพสุดท้ายไม่ทับกัน ดังรูป 65

เราใช้สูตร $n = \frac{360}{\theta}$ (เหลือเศษตัดทิ้ง).....สูตร 8

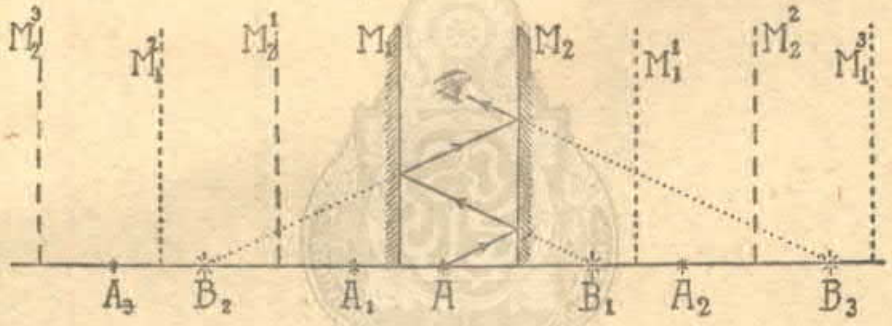
การสะท้อนของแสงบนกระจกเงาระนาบ 2 บานที่วางขนานกันและหันหน้าเข้าหากัน จะทำให้เกิดภาพซึ่งเราหาตำแหน่งได้โดยอาศัยหลักดังนี้

1. ระยะภาพเท่ากับระยะวัตถุ

2. ภาพไปอยู่หน้ากระจกเงาบานใดจะเป็นเสมือนหนึ่งวัตถุทำให้เกิดภาพขึ้นใหม่หลังกระจกเงาบานนั้น ดังรูป 66 และ 67



รูป 66 แสดงภาพภายในกระจกเงา M_1 ที่เริ่มเกิดจากกระจกเงา M_1 ก่อน



รูป 67 แสดงภาพภายในกระจกเงา M_2 ที่เริ่มเกิดจากกระจกเงา M_2 ก่อน และแสดงภาพที่เกิดภายในกระจกเงา M_1 ด้วย

กระจกเงาระนาบ 2 บานวางขนานกันและหันหน้าเข้าหากัน ก็คือกระจกเงา 2 บาน ซึ่งวางเป็นมุม o องศาซึ่งกันและกัน จำนวนภาพที่เกิดขึ้นย่อมจะคำนวณได้จากสูตร

$$n = \frac{360}{\theta} - 1 \text{ หรือ } n = \frac{360}{\theta} \text{ ก็ได้}$$

$$\therefore \text{ จำนวนภาพที่เกิดขึ้น } = \frac{360}{0} - 1$$

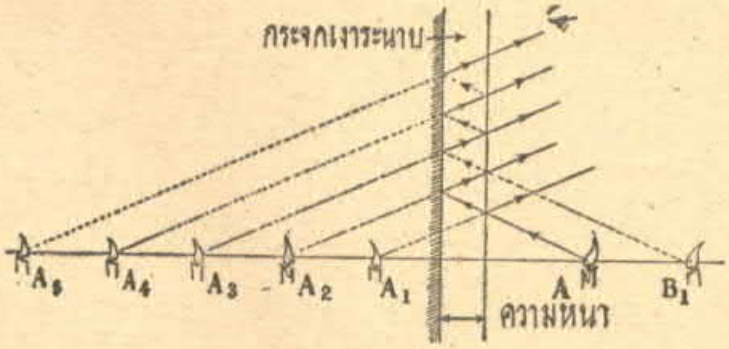
$$= \infty \text{ , คือมากจนนับไม่ถ้วน}$$

แต่เราจะแลเห็นจำนวนภาพทั้งหมดไม่ได้ เพราะแสงที่สะท้อนไปมาเป็น

ภาพเหล่านั้นย่อมจะมีความเข้มน้อยลงทุกที ๆ เนื่องด้วยกระจกดูดกลืนไว้เสียบ้าง จนในที่สุดจางหายไปไม่อาจทำให้เราแลเห็นภาพต่อไปอีกได้

การเกิดภาพซ้อนในกระจกเงาที่มีความหนามาก การที่เป็นเช่นนั้นเพราะแสงส่วนมากผ่านผิวกระจกเงาด้านหน้าเข้าไปสะท้อนที่ผิวกระจกเงาด้านหลัง เมื่อกลับมากระทบผิวกระจกเงาด้านหน้า บางส่วนจะสะท้อนกลับเข้าไปอีก จะเป็นเช่นนี้ต่อเนื่องกันไป ดังรูป 68 ข.

รูป 68 ก. ภาพซ้อนในกระจกเงาที่หนามาก



รูป 68 ข. แสดงเหตุที่เกิดภาพซ้อนขึ้นในกระจกเงาที่หนามาก

ตามรูป 68 ข. A_1 เป็นภาพที่เกิดขึ้นจากผิวหน้ากระจกเงา

A_2 เป็นภาพแรกที่เกิดขึ้นจากผิวหลังกระจกเงา จะเป็นภาพที่ชัดที่สุด ดังรูป 68 ก.

B_1 เป็นภาพแรกที่เกิดขึ้นเพราะการสะท้อนแสงภายในของผิวหน้ากระจกเงา โดยมีภาพ A_2 เป็นเสมือนหนึ่งวัตถุ เช่นเดียวกับภาพที่เกิดขึ้นจากกระจกเงาระนาบ 2 บาน วางขนานกันและหันหน้าเข้าหากัน

A_3 เป็นภาพที่สองที่เกิดขึ้นจากผิวหลังกระจกเงา โดยมี B_1 เป็นเสมือนหนึ่งวัตถุ ภาพ A_4, A_5 ฯลฯ เกิดขึ้นได้โดยมีเหตุผลเช่นเดียวกับภาพ A_3

สำหรับการหาตำแหน่งของภาพ A_3, A_4 ฯลฯ เขาใช้ระยะ A_1A_2 วัดเอา และในการทดลอง กระจกเงาที่หนามากนั้นเราจะทำได้โดยใช้กระจกใสวางไว้หน้ากระจกเงา และให้ขนานกับกระจกเงา เป็นผิวหน้าของกระจกเงาที่หนามากก็ได้โดยมีกระจกเงานั้นแทนผิวหลัง

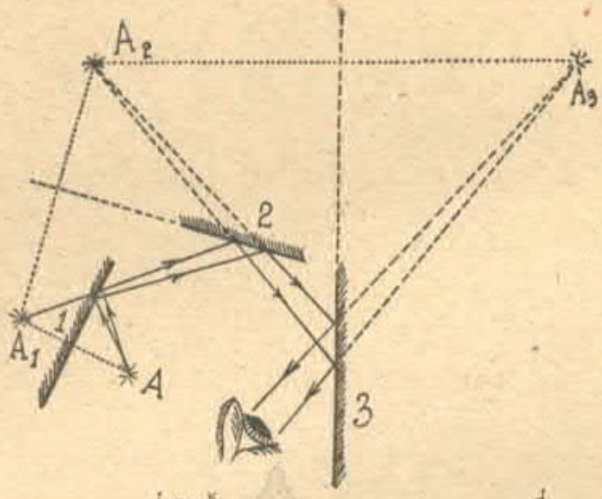
การสะท้อนของแสงจากกระจกเงาระนาบหลายบาน มีหลักการเกิดภาพดังนี้

ภาพจากกระจกเงาบานที่ 1 เป็นเสมือนหนึ่งวัตถุของกระจกเงาบานที่ 2

ภาพจากกระจกเงาบานที่ 2 เป็นเสมือนหนึ่งวัตถุของกระจกเงาบานที่ 3

ฯลฯ

วิธีเขียนทางเดินของแสงมายังตา ก็เช่นเดียวกับการเขียนภาพในกระจกเงา 2 บานวางเป็นมุมซึ่งกันและกัน คือ เมื่อตาแลเห็นภาพสุดท้าย ก็ลากเส้นจากภาพมายังตา แล้วลากเส้นจากจุดที่ตัดกระจกเงาไปหาภาพที่ถัดขึ้นมาซึ่งเป็นเสมือนหนึ่งวัตถุของภาพสุดท้าย ทำย้อนมาจนถึงวัตถุจริง ๆ แล้วเขียนหัวลูกศรแสดงทางเดินของแสงจากวัตถุมายังตา ดังรูป 69



รูป 69 แสดงภาพที่เกิดขึ้นในกระจกเงาระนาบหลายบานที่ตาแลเห็น

เรื่องเบ็ดเตล็ดเกี่ยวกับการสะท้อนของแสง

1. เมื่อดวงอาทิตย์ลับดวงไปแล้วใหม่ ๆ ในเวลาเย็น เรายังสามารถแลเห็นสิ่งต่าง ๆ ได้ เพราะการสะท้อนของแสงจากก้อนเมฆ อากาศและฝุ่นละออง ลงมายังโลก และเราแลเห็นสิ่งต่าง ๆ ที่อยู่ในร่มได้ ก็ด้วยเหตุผลอย่างเดียวกัน

2. คาไลโดสโคป (Kaleidoscope) คือกล้องที่ได้สร้างขึ้นตามหลักกระจกเงาระนาบวางจรดเป็นมุมซึ่งกันและกัน เพื่อส่องดูเล่นเพลิน ๆ และประกอบสิ่งลวดลายสวย ๆ แปลกตา ส่วนประกอบมีดังรูป 70 ก. และภาพที่ดูแลเห็นมีทำนองเดียวกับรูป 70 ข.

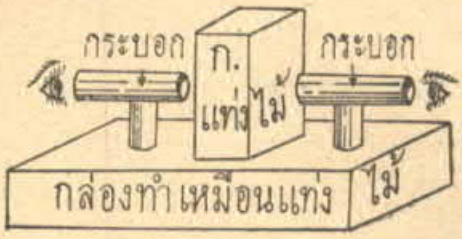
รูป 70 ข. แสดงภาพ ๆ หนึ่งที่แลเห็นจากคาไลโดสโคป

รูป 70 ก. แสดงส่วนประกอบของคาไลโดสโคป

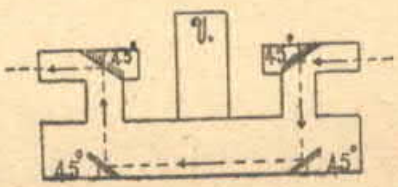
ส่วนประกอบพิเศษพิสดารนั้นใครจะประดิษฐ์ต่อเติมขึ้นอีกก็ได้ เช่นทำกล้องกลมหรือเหลี่ยมสวมแทนกระดาษหุ้ม ตอนที่ใส่เศษเซลลูลอยสีต่าง ๆ นั้นอาจจะทำเป็นกล่องกลมต่างหาก หมุนไปมาได้โดยไม่ต้องหมุนหรือเขย่ากล้อง เป็นต้น

๓. ใช้ประโยชน์ในการแสดงกล

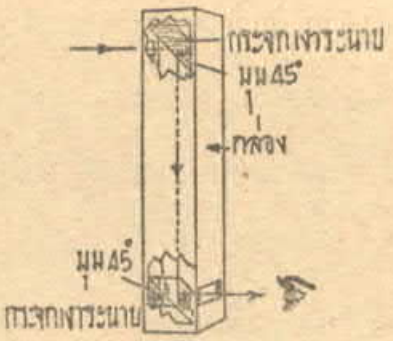
ก. แท่งไม้วิเศษ มีส่วนประกอบดังนี้ กล่องสี่เหลี่ยม แท่งไม้สี่เหลี่ยมกระบอกสั้น ๆ 4 อัน ซึ่งต่อทะลุถึงกันตรงกลางเป็นรูปตัว T 2 ตัว กระจกเงาระนาบ 4 แผ่น ประกอบกันไว้ดังรูป 71 ก. และ 71 ข. ด้วยกระจกเงาติดไว้ในมุมที่เหมาะ *ให้ตรงกันและเอียงเป็นมุม 45° กับแนวนอน* เมื่อมองจากรูกระบอกข้างใดข้างหนึ่งก็จะแลเห็นสิ่งซึ่งแท่งไม้ยังอยู่ได้ ด้วยการสะท้อนของแสงโดยกระจกเงา 4 แผ่นนั้น และเพราะเหตุที่ว่ากระจกเงาในกระบอกยิ่งรูกระบอกมืด จึงสวงตาทำให้ผู้ดูเห็นเป็นไม่มีแท่งไม้กั้นอยู่ แต่มีสิ่งต้องระวัง *คือรูกระบอกต้องไม่โตเกินไปจนผู้ดูแลเห็นกระจกเงาได้ชัด ภายในควรทาสีดำและห้ามผู้ดูจับต้องเครื่องมือด้วย*



รูป 71 ก.
รูปแท่งไม้วิเศษเมื่อดูภายนอก



รูป 71 ข.
รูปภายในแท่งไม้วิเศษ

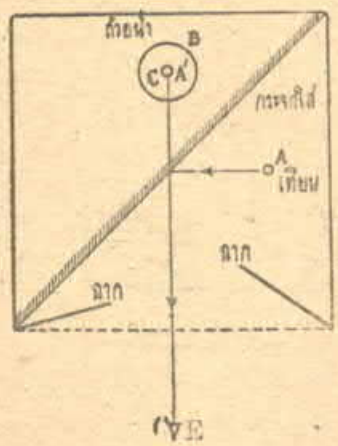


รูป 71 ค. กล้องเปอริสโคป

โดยการใช้กระจกเงาระนาย 2 แผ่นติดไว้ที่ปลายกระบอกยาว วางกระจกเงาให้ขนานกันและตรงกันให้หน้ากระจกเงานั้นหันเข้าหากันและเอียงเป็นมุม 45° กับแนวนอน เจาะรูให้แสงผ่านเข้าไป และสำหรับมอง เราจะได้อุปกรณ์เรียกว่า กล้องเปอริสโคป (Periscope) แบบง่าย ๆ ใช้สำหรับมองดูสิ่งต่าง ๆ ที่มีอะไรกั้นอยู่ ดังรูป 71 ค.

กล้องนี้สร้างขึ้นโดยอาศัยหลักการสะท้อนของแสงโดยกระจกเงาระนาย 2 แผ่น ทำให้แลเห็นสิ่งที่กระทำมุมตกกระทบกับกระจกเงาเป็นมุม 45° ได้

ข. จุดเทียนในน้ำ แสดงได้โดย วางถ้วยน้ำ B ที่รูป C ในรูป 72 เอากระจกใสวางตามแนว MM' ตามองถ้วยน้ำผ่านกระจกตามแนว EC ยกเทียน A หน้ากระจก ณ ตำแหน่งที่จะแลเห็นภาพของเทียนนั้น คือ A' อยู่กลางถ้วยน้ำ จัดการบังเทียนเสียไม่ให้ผู้ดูแลเห็น แล้วจุดเทียน



รูป 72 วิธีแสดงกลจุดเทียนในน้ำ

ข้อสำคัญ ต้องจัดแสงทางด้านหลังกระจกให้มีความสว่างน้อยกว่าด้านหน้ากระจก และจากวิธีนี้จะใช้

4. ก. ภาพในกระจกเงาระนาบเป็นภาพชนิดไหน และมีลักษณะเป็นอย่างไร

ข. จงบรรยายการทดลองที่แสดงให้เห็นว่า ภาพที่เกิดหลังกระจกเงาระนาย ระอยู่ห่างจากกระจกเงาเป็นระยะเท่ากับที่วัตถุอยู่ห่างจากกระจกเงา

5. ต่อไปนี้คืออะไร จงอธิบาย :-

ภาพแท้จริง, ภาพเสมือน, ปรัศวภาควิโลม ปารัลลักซ์ เซกสแตนท์ เปอริสโคป คาไลโดสโคป

6. จงอธิบายหลักการสร้างส่วนประกอบและวิธีใช้อุปกรณ์ต่อไปนี้ และเขียนรูปประกอบด้วย

ก. เปอริสโคป

ข. คาไลโดสโคป

ค. เซกสแตนต์

7. เพราะเหตุใด

ก. จึงเกิดภาพซ้อนกันในกระจกเงาที่หนามาก ๆ และภาพอันไหนเป็นภาพชัดที่สุด

ข. เขาจึงแสดงกลยังตัวให้เราแลเห็นจริงได้

ค. เมื่อดวงอาทิตย์ลับไปแล้วเราจึงยังแลเห็นสิ่งต่าง ๆ ได้อยู่

ง. ตามรูป 71 ผู้ดูจึงแลทะลุแท่งไม้ได้

จ. จึงแลเห็นส่วนหลังของเราได้จากกระจกเงาระนาย ซึ่งวางไว้ข้างหน้าและข้างหลังข้างละบาน

ฉ. เราจึงแลเห็นผู้ที่อยู่นอกแผ่นกระจกเงาระนายได้ เมื่อต่างฝ่ายต่างอยู่ไม่ตรงแผ่นกระจกเงา แต่อยู่หน้ากระจกเงาด้วยกัน และคนละข้าง

8. เมื่อเรายืนอยู่หน้ากระจกเงาระนาบวางเอียงเป็นมุม 45° กับพื้นมาทางตัวเรา จะแลเห็นภาพของเราในกระจกเงานั้นอย่างไร จงเขียนรูปประกอบ

9. ชายคนหนึ่งสูง 6 ฟุต ยืนอยู่หน้ากระจกเงาระนาบสูงบานหนึ่ง จงหาว่ากระจกเงาระนาบแผ่นนั้นจะต้องสูงอย่างน้อยที่สุดเท่าไร ชายผู้นั้นจึงจะเห็นภาพตัวของเขาได้ทั้งตัว จงเขียนรูปแสดงว่าเขาเห็นตัวของเขาได้อย่างไร มาให้ดูด้วย

10. จงแสดงว่า รังสีสะท้อนจากกระจกเงาระนาบแผ่นที่สองจะขนานกับรังสีตกกระทบบนกระจกเงาระนาบแผ่นที่หนึ่งเสมอ เมื่อกระจกเงา 2 แผ่นนั้นตั้งฉากกัน

11. จงพิสูจน์ให้เห็นว่า

ก. เมื่อเราเดินเข้าหากระจกเงาระนาบ ภาพจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับเรา

ข. เมื่อกระจกเงาระนาบเคลื่อนที่เข้าหาเรา ภาพจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสองเท่าของกระจกเงานั้น

12. กระจกเงาระนาบแผ่นหนึ่งหมุนด้วยความเร็ว 10 รอบต่อนาที รังสีสะท้อนจากกระจกเงานั้นจะหมุนไปวินาทีละกี่องศา

13. ท่านจะใช้วิธีปารัลลักซ์ หาระยะภาพจากกระจกเงาระนาบได้อย่างไร

ถ้าผลการทดลองจากกระจกเงาระนาบที่หนาแผ่นหนึ่ง ปรากฏว่าเมื่อปักเข็มหมุดไว้ห่างจากผิวหน้ากระจกเงานั้น 4 ซม. จะเห็นภาพห่างจากผิวหลังกระจกนั้น 4.4 ซม. จากผลอันนี้เราจะได้ความจริงอะไรบ้าง

14. ถ้าท่านอยู่ในห้องที่เผชิญผนังตรงข้ามเป็นกระจกเงาระนาบคู่หนึ่ง จงแสดงจำนวนภาพของดวงไฟฟ้าที่แขวนอยู่กลางห้องในกระจกเงาด้านใดด้านหนึ่ง

15. ก. จงพิสูจน์ให้เห็นว่าภาพของจุด ๆ หนึ่ง อยู่ห่างจากหลังกระจกเงาเข้าไปเป็นระยะเท่ากับที่จุดนั้นอยู่ห่างจากหน้ากระจก

ข จงพิสูจน์และทดลองให้เห็นจริงว่า เวลาเราเหกระจกเงาระนาบไป แนวของแสงสะท้อนจะเฉไปเป็นมุมโตเป็นสองเท่าของมุมที่กระจกเงาเหไป

16. เมื่อกระจกเงาระนาบ 2 ขานวางเอียงทำกันเป็นมุม (ก) 120° (ข) 90° (ค) 75° (ง) 60° (จ) 45° (ฉ) 30° (ช) 55° นั้นแต่ละมุมจะเกิดภาพขึ้นเป็นจำนวนเท่าไร จงเขียนแผนภาพมาให้ดูด้วย

C เป็น จุดศูนย์กลางของความโค้งของกระจกเงา (Centre of curvature)

A เป็น ขั้วกระจกเงา (Pole of Mirror)

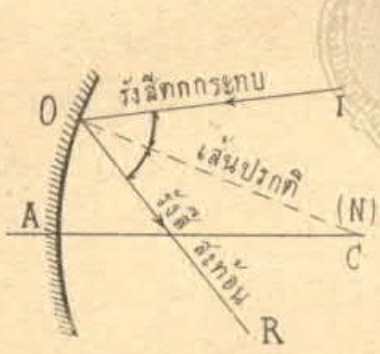
ระยะ CA เป็น รัศมีความโค้ง (Radius of curvature)

เส้นที่ลากผ่าน CA เป็น แกนมุขสำคัญ (Principal axis)

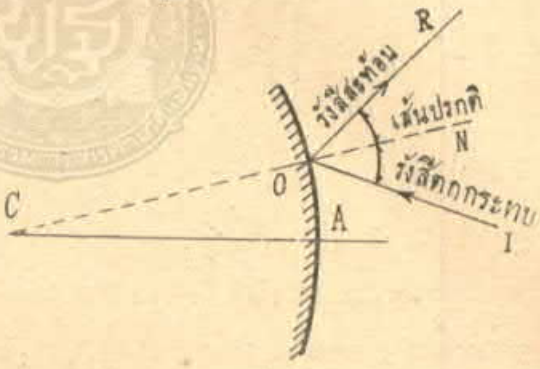
เส้นที่ลากผ่าน CA' เป็น แกนทุติยภูมิ (Secondary axis)

F เป็น โฟกัสมุขสำคัญ (Principal focus) คือจุดที่รังสีสะท้อนของรังสีตกกระทบที่ขนานกับแกนมุขสำคัญตัดกัน หรือดูเหมือนตัดกันบนแกนมุขสำคัญ

การสะท้อนของแสงบนผิวทรงกลม มีหลักเกณฑ์อย่างเดียวกับการสะท้อนของแสงบนผิวระนาบ เส้นปรกติคือ:- เส้นที่ลากจากจุดศูนย์กลางของความโค้งของกระจกเงามายังจุดตกกระทบนั้น ดังรูป 77 ก. และ ข.



รูป 77 ก.

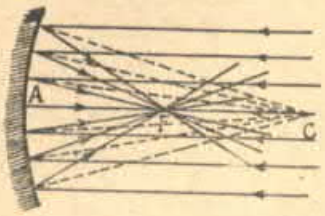


รูป 77 ข.

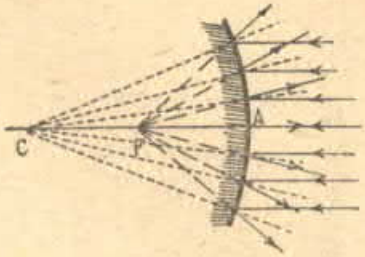
แสดงกฎของการสะท้อนของแสงบนกระจกเงาเว้า แสดงกฎของการสะท้อนของแสงบนกระจกเงานูน

การสะท้อนของแสงที่ขนานกับแกนมุขสำคัญ

(ก) ขนกระจกเงาที่โค้งน้อยรังสีสะท้อนจะกลับไปตัดกันที่จุด ๆ เดียวกันบนแกนมุขสำคัญ คือที่โฟกัสมุขสำคัญ ดังรูป 78 ก. และ ข.

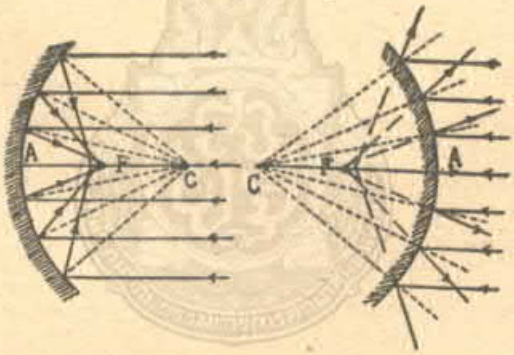


รูป 78 ก.
การสะท้อนของรังสีตกกระทบที่ขนานกับแกนมุขสำคัญบนกระจกเงาเว้าที่โค้งน้อย



รูป 78 ข.
การสะท้อนของรังสีตกกระทบที่ขนานกับแกนมุขสำคัญบนกระจกเงานูนที่โค้งน้อย

(๒) บนกระจกเงาที่โค้งมากรังสีสะท้อนจะกลับไปตัดกัน ณ ที่แห่งหนึ่งซึ่งมีอาณาเขตที่จะนับว่าเป็นจุดไม่ได้ ดังรูป 79 ก. และ ข.

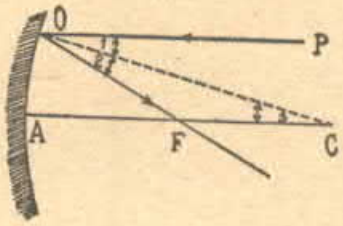


รูป 79 ก.
การสะท้อนของรังสีสะท้อนที่ขนานกับแกนมุขสำคัญบนกระจกเงาเว้าที่โค้งมาก

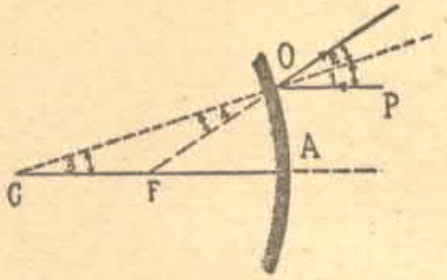
รูป 79 ข.
การสะท้อนของรังสีตกกระทบที่ขนานกับแกนมุขสำคัญบนกระจกเงานูนที่โค้งมาก

โฟกัสมุขสำคัญอยู่ที่จุดกึ่งกลางของรัศมีความโค้งของกระจกเงา

กำหนดให้ PO เป็นรังสีตกกระทบที่ขนานกับแกนมุขสำคัญ CA ไปยังกระจกเงาทรงกลมที่จุดตกกระทบ O และให้รังสีสะท้อน OF ตัดแกนมุขสำคัญที่จุด F ซึ่งเป็นโฟกัสมุขสำคัญ



รูป 80 ก. กระจกเงาเว้า
การพิสูจน์ว่าโฟกัสอยู่ที่จุดกึ่งกลางของรัศมีความโค้ง



รูป 80 ข. กระจกเงานูน
การพิสูจน์ว่าโฟกัสอยู่ที่จุดกึ่งกลางของรัศมีความโค้ง

จะต้องพิสูจน์ว่า F เป็นจุดกึ่งกลางของ CA

หรือ $2\,FA = CA$

พิสูจน์ จากรูปทั้งสองจะเห็นว่า $\hat{1} = \hat{2}$ (*กฎของการสะท้อนของแสง*)

และ $\hat{1} = \hat{3}$ (*ท.บ.* 14)

ในรูป 80 ก.	ในรูป 80 ข.
$\therefore \hat{2} = \hat{3}$	แต่ $\hat{2} = \hat{4}$ (*ท.บ.* 3)
	$\therefore \hat{3} = \hat{4}$ ด้วย

$$\therefore \quad FO = FC \qquad (\text{ท.บ. } 6)$$

กระจกเงาทรงกลมที่ใช้เป็นกระจกบานเล็ก ๆ และโค้งน้อย ดังนั้น O กับ A จึงอยู่ใกล้กันมาก จนพอจะถือว่าทับกันได้

$$\therefore \quad FO + FC = CA$$

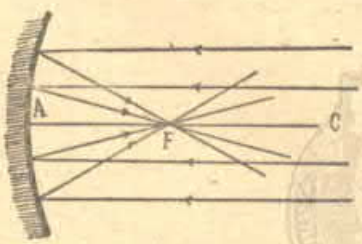
นั่นคือ F เป็นจุดกึ่งกลางของ AC หรือ $2\,FA = CA$

เมื่อ $FA = \frac{1}{2}CA$ ก็แสดงว่าความยาวโฟกัสของกระจกเงาทรงกลม = ครึ่งหนึ่งของรัศมีความโค้ง

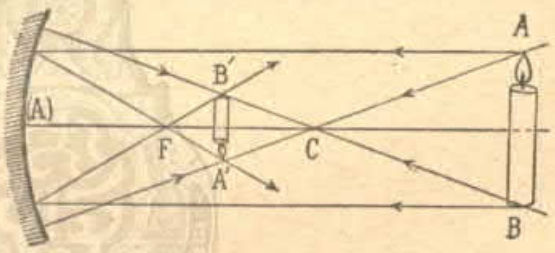
การหาที่ตั้งของภาพในกระจกเงาทรงกลม ให้ปฏิบัติดังต่อไปนี้

1. จากวัตถุซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดแสง ลาก *รังสีตกกระทบ* ให้ขนานกับแกนมุขสำคัญ ไปจนพบกระจกเงาแล้วลาก *รังสีสะท้อน* ไปผ่านโฟกัสมุขสำคัญ
2. จากจุด ๆ นั้น ลากเส้นผ่านจุดศูนย์กลางของความโค้งของกระจกเงา
3. จุดที่เส้นในข้อ (1) และ (2) ตัดกัน จะเป็นที่เกิดภาพที่เราต้องการหา
4. *เขียนหัวลูกศรแสดงทางเดินของแสงด้วย*

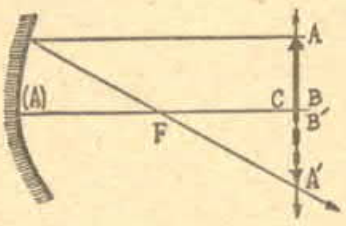
ก. **ภาพที่เกิดขนจากกระจกเงาเว้า** แบ่งลักษณะและขนาดออกเป็น 6 อย่าง ทั้งนี้แล้วแต่ที่ตั้งของวัตถุ คือ



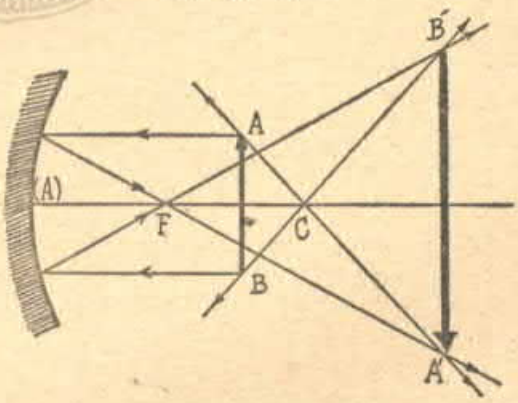
I รูป 81
วัตถุอยู่ที่ระยะไกลมาก ๆ (Infinity) เช่นดวงอาทิตย์



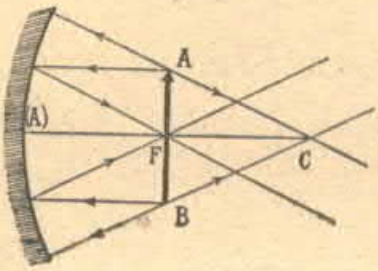
II รูป 82
วัตถุอยู่นอกจุด C



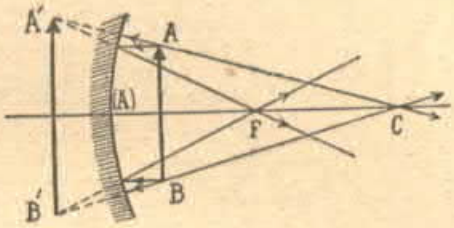
III รูป 83
วัตถุอยู่ที่จุด C



IV รูป 84
วัตถุอยู่ระหว่างจุด F กับจุด C



V รูป 85
วัตถุอยู่ที่จุด F

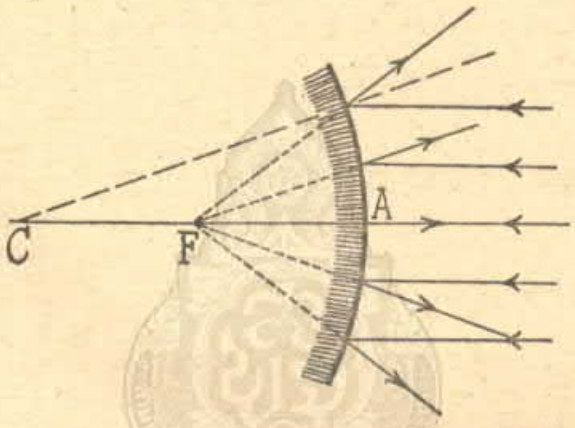


VI รูป 86
วัตถุอยู่ระหว่างจุด A กับ F

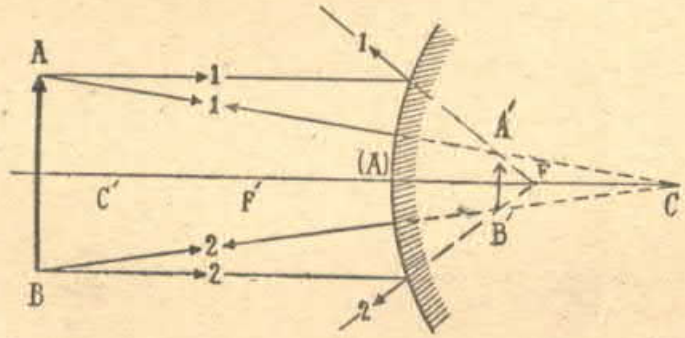
ตารางสรุปลักษณะและขนาดของภาพที่เกิดขึ้นจากกระจกเงาเว้า

เลขที่	ที่ตั้งของวัตถุ	ตำแหน่งภาพ	ลักษณะภาพ
I		ที่จุด F	ภาพแท้จริง หัวกลับ ขนาดเล็กกว่าวัตถุ
II	อยู่นอกจุด C	อยู่ระหว่างจุด F กับจุด C	ภาพแท้จริง หัวกลับ ขนาดเล็กกว่าวัตถุ
III	อยู่ที่จุด C	ที่จุด C	ภาพแท้จริง หัวกลับ ขนาดเท่าวัตถุ
IV	อยู่ระหว่างจุด F กับจุด C	นอกจุด C	ภาพแท้จริง หัวกลับ ขนาดโตกว่าวัตถุ
V	อยู่ที่จุด F		ภาพแท้จริง หัวกลับ ขนาดโตกว่าวัตถุ
VI	อยู่ระหว่างจุด A กับจุด F	หลังกระจก	ภาพเสมือน หัวตั้ง ขนาดโตกว่าวัตถุ

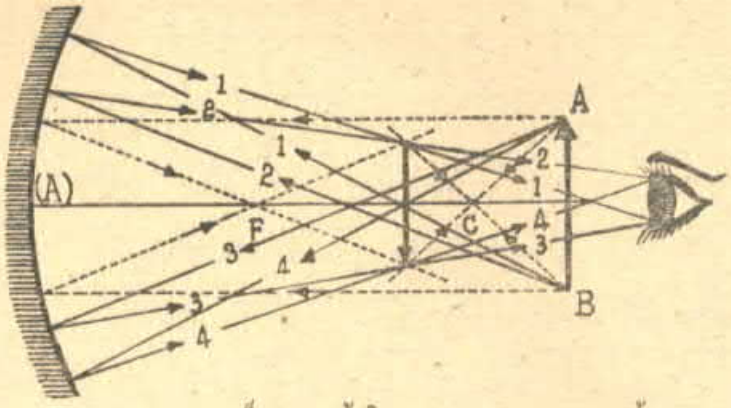
ข. ภาพที่เกิดจากกระจกเงานูน ภาพทั้งหมดเป็นภาพเสมือน หัวตั้ง ขนาดเล็กกว่าวัตถุ อยู่หลังกระจกเงาระหว่างจุด F กับจุด A ดังแสดงในรูป 87, 88 และ 89 ว่าวัตถุอยู่ใกล้กระจกเงาเข้ามา ภาพจะมีขนาดโตขึ้นทุกที



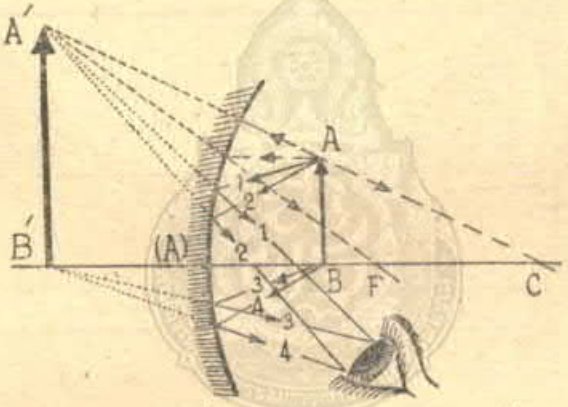
รูป 87 แสดงภาพที่เกิดจากกระจกเงานูน เมื่อวัตถุอยู่ที่ infinity



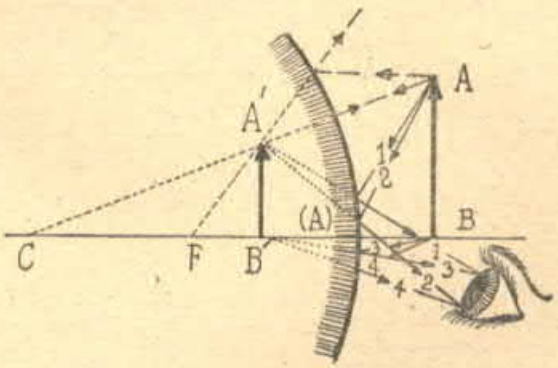
รูป 88 แสดงภาพที่เกิดจากกระจกเงานูน เมื่อวัตถุอยู่นอกจุด C



รูป 91 ตาแลเห็นภาพแท้จริงของวัตถุจากกระจกเงาเว้า



รูป 92 ตาแลเห็นภาพเสมือนจากกระจกเงาเว้า



รูป 93 ตาแลเห็นภาพเสมือนจากกระจกเงานูน

ความสัมพันธ์ระหว่างระยะต่าง ๆ ของกระจกเงาทรงกลม มีดังนี้

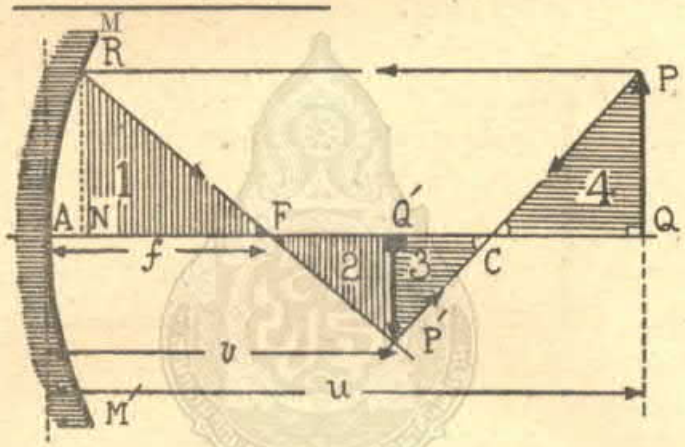
$$\frac{1}{\text{ความยาวโฟกัส}} = \frac{1}{\text{ระยะวัตถุ}} + \frac{1}{\text{ระยะภาพ}}$$

ระยะต่าง ๆ ที่กล่าวนี้วัดจากกระจกเงาทั้งนั้น

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v} \quad \text{.....สูตร 9}$$

การพิสูจน์สูตรนี้สำหรับกระจกเงาเว้า

ก. ในกรณีที่เกิดภาพแท้จริง



รูป 94

ให้ MM' เป็นกระจกเงาเว้า PQ เป็นวัตถุตั้งอยู่หน้ากระจกเงานอกจุด C ตั้งฉากกับแกนมุขสำคัญ CA โดยมีจุด Q อยู่บนแกนมุขสำคัญ CA นั้น PR เป็นรังสีขนานกับ CA พบกระจกเงา MM' ที่จุด R และ P'Q' เป็นภาพแท้จริงของ PQ ให้ AF = f หน่วย AQ = u หน่วย และ AQ' = v หน่วย ลาก RN ตั้งฉากกับ CA ที่จุด N

พิสูจน์ $\because$ $\triangle$ 1 กับ $\triangle$ 2 เป็น $\triangle$ ที่มีมุมทั้ง 3 เท่ากันมุมต่อมุม (*ท.ย.*3, 16)

$$\therefore \quad \frac{P'Q'}{RN} = \frac{FQ'}{FN} \ (\text{ท.ย. } 62) \quad \text{.....(1)}$$

และ $\therefore$ Δ 3 กับ 4 เป็น Δ ที่มีมุมทั้ง 3 เท่ากัน มุมต่อมุมอีกคู่หนึ่ง

$$\therefore \quad \frac{P'Q'}{PQ} = \frac{CQ'}{CQ}$$ ด้วย

แต่ $$RN = PQ$$ (ท.บ. 21)

$$\therefore \quad \frac{P'Q'}{RN} = \frac{CQ'}{CQ} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

(1)=(2) $\therefore$ $$\frac{FQ'}{FN} = \frac{CQ'}{CQ} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3)$$

เมื่อ R อยู่ใกล้ A เข้าไป จุด N จะเกือบทับจุด A

ซึ่งพอจะถือว่า $FN = FA$ ได้

จาก (3) $$\frac{FQ'}{FA} = \frac{CQ'}{CQ}$$

ถ้าใช้ v, u และ f แทนค่าจะได้ $\frac{v-f}{f} = \frac{2f-v}{u-2f}$

$$(v-f)(u-2f) = f(2f-v)$$

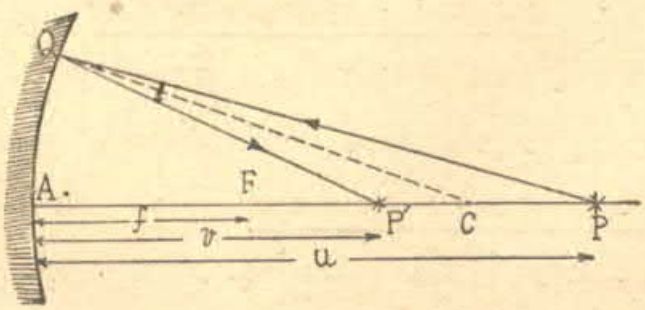
$$vu-2vf-uf+2f^2 = 2f^2-vf$$

$$vu = vf+uf$$

เอา vuf หารตลอด $\frac{vu}{vuf} = \frac{vf}{vuf} + \frac{uf}{vuf}$

$$\therefore \quad \frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$$

ในกรณีวัตถุเป็นจุด



รูป 95

ให้ จุด P เป็นจุดกำเนิดแสงจุดหนึ่งบนแกนมุขสำคัญ CA หน้ากระจกเงาเว้า

จุด Q เป็นจุดตกกระทบบนกระจกเงาเว้าของรังสีตกกระทบ PQ

จุด P′ เป็นจุดที่รังสีสะท้อน QP′ ตัดกับ CA และเป็นภาพแท้จริงของจุด P ให้

ระยะ AP = f หน่วย AP = u หน่วย และ AP′ = v หน่วย

พิสูจน์ ใน △ PQP′

$\therefore$ CQ เป็นเส้นแบ่งครึ่งมุม PQP′ (*ตามกฎการสะท้อนของแสง*)

$\therefore \frac{PQ}{P'Q} = \frac{CP}{CP'}$ (*ท.ย.* 61)

เมื่อจุด Q อยู่ใกล้จุด A มาก ๆ ก็พอจะถือได้ว่า

$PQ = PA$ และ $P'Q = P'A$

$\therefore \frac{PA}{P'A} = \frac{CP}{CP'}$

ถ้าใช้ v,u และ f แทนค่าจะได้ $\frac{u}{v} = \frac{u-2f}{2f-v}$

$u(2f-v) = v(u-2f)$

$2uf-vu = vu-2vf$

$2vu = 2vf+2uf$

เอา 2 vuf หารตลอดจะได้ $\frac{1}{f} = \frac{1}{u}+\frac{1}{v}$

ระเบียบแบบแผนเรื่องเครื่องหมาย

เครื่องหมายที่ใช้กับระยะทางอาจเป็น + หรือ −

เมื่อต้องการวัดระยะทางระหว่างกระจกเงากับวัตถุ ภาพ หรือ โฟกัสเรา ต้องวัดจากกระจกเงาไปหาสิ่งนั้นเสมอ

(1) ถ้าระยะทางนั้นวัดสวนทางกับแสงที่มาจากวัตถุ จะได้เครื่องหมายเป็น +

$$\therefore \quad \frac{CQ'}{CQ} = \frac{P'Q'}{RN} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(2)$$

$$(1)=(2) \quad \frac{FQ'}{FN} = \frac{CQ'}{CQ} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(3)$$

เมื่อ R อยู่ใกล้ A มาก ๆ จุด N จะเกือบทับจุด A

ซึ่งพอจะถือได้ว่า $FN = FA$

จาก (3) $\therefore \frac{FQ'}{FA} = \frac{CQ'}{CQ}$

ถ้าใช้ v, u และ f แทนค่าจะได้

$$\frac{f+(-v)}{f} = \frac{2f+(-v)}{2f-u}$$

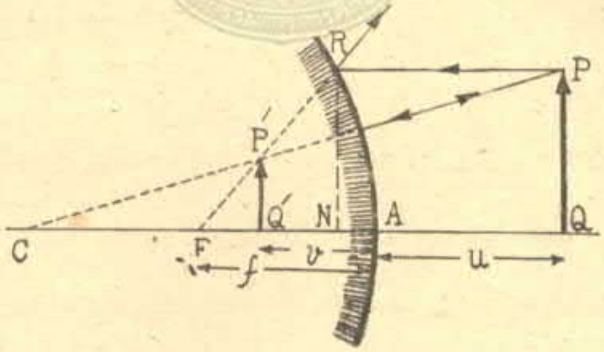
$$(f-v)(2f-u) = f(2f-v)$$

$$2f^2-uf-2vf+vu = 2f^2-vf$$

$$vu = vf+uf$$

เอา vuf หารตลอดจะได้ $\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$

การพิสูจน์สูตรนี้สำหรับกระจกเงานูน



รูป 97

ให้ เหมือนรูป 96 นอกจากเป็นกระจกเงานูน

พิสูจน์ $\because$ $FP'Q'$ กับ $\triangle FRN$ เป็น $\triangle$ ที่มีมุมทั้ง 3 เท่ากัน มุมต่อมุม $(n.u.14,16)$

$$\therefore \quad \frac{FQ'}{FN} = \frac{P'Q'}{RN} \quad (n.u.\ 62) \ldots\ldots\ldots\ldots(1)$$

และ $\because$ $\triangle CP'Q'$ กับ $\triangle CPQ$ เป็น $\triangle$ ที่มีมุมทั้ง 3 เท่ากัน มุมต่อมุม อีกคู่หนึ่ง

$$\therefore \quad \frac{CQ'}{CQ} = \frac{P'Q'}{PQ} \quad \text{ด้วย}$$

$$\text{แต่} \quad PQ = RN \quad (n.u.\ 21)$$

$$\therefore \quad \frac{CQ'}{CQ} = \frac{P'Q'}{RN} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots(2)$$

$$(1)=(2) \quad \therefore \quad \frac{FQ'}{FN} = \frac{CQ'}{CQ} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots(3)$$

เมื่อ R อยู่ใกล้ A มาก ๆ จุด N จะเกือบทับจุด A

ซึ่งพอจะถือได้ว่า $FN = FA$

จาก (3) $\quad \frac{FQ'}{FA} = \frac{CQ'}{CQ}$

ถ้าใช้ v, u และ f แทนค่าจะได้

$$\frac{-f-(-v)}{-f} = \frac{-2f-(-v)}{-2f+u}$$

$$\frac{v-f}{-f} = \frac{v-2f}{u-2f}$$

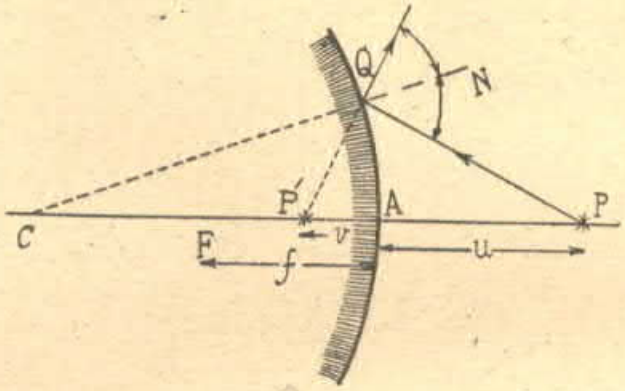
$$(v-f)(u-2f) = -f(v-2f)$$

$$vu-2vf-uf+2f^2 = -vf+2f^2$$

$$vu = vf+uf \ .$$

เอา vuf หารตลอดจะได้ $\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$

ในกรณีที่วัตถุเป็นจุด



รูป 98

ให้ P เป็นจุดกำเนิดแสงจุดหนึ่งบนแกนมุขสำคัญ CA หน้ากระจกเงานูน PQ เป็นรังสีตกกระทบอันหนึ่งตกลงบนกระจกเงาที่จุด Q แล้วสะท้อนไปตามแนว P'Q ต่อรังสีนี้ให้ถอยหลังไปตัด CA ที่จุด P' P' นี้เป็นภาพเสมือนของ P ให้ระยะ AF = f หน่วย AP = u หน่วย และ AP' = v หน่วย

พิสูจน์ ∵ มุมภายนอก Q ของ △ PQP' ถูกแบ่งครึ่ง *(ตามกฎการสะท้อนของแสง)*

$$\therefore \frac{QP'}{QP} = \frac{CP'}{CP} \qquad (ท.บ.\ 61)$$

ถ้า Q อยู่ใกล้ A มาก ๆ จุด Q จะเกือบทับจุด A

ซึ่งพอจะถือได้ว่า QP' = P'A และ QP = PA

$$\therefore \frac{P'A}{PA} = \frac{CP'}{CP}$$

ถ้าใช้ v, u และ f แทนค่าจะได้

$$\frac{-v}{u} = \frac{-2f-(-v)}{-2f+u}$$

$$-v(u-2f) = u(v-2f)$$

$$-vu+2vf = vu-2uf$$

$$2vu = 2vf+2uf$$

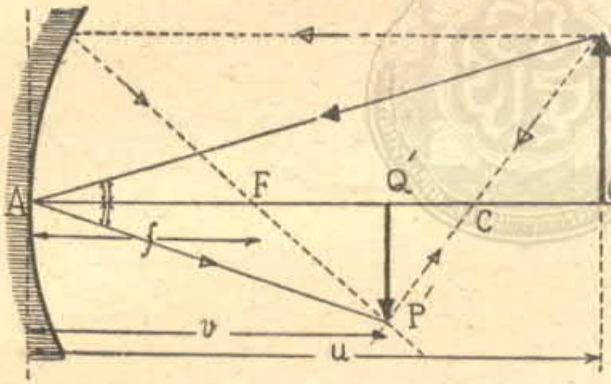
เอา 2 vuf หารตลอดเราจะได้ $\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$

กำลังขยายภาพ (Magnifying power) **ของกระจกเงาทรงกลม** คือ อัตราส่วนระหว่างความสูงของภาพกับความสูงของวัตถุ มีสูตรสำหรับคำนวณ คือ

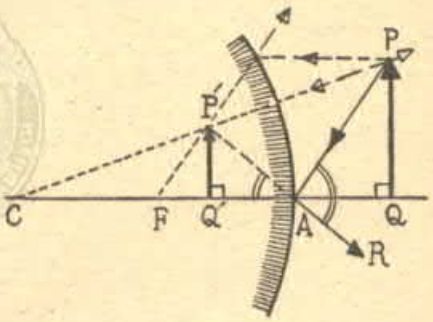
$$\text{กำลังขยายภาพ} = \frac{\text{ระยะภาพ}}{\text{ระยะวัตถุ}}$$

หรือ $m = \frac{v}{u}$ ..... สูตร 10

เราจะพิสูจน์สูตรได้ดังต่อไปนี้



รูป 99 ก. พิสูจน์ว่ากำลังขยายภาพของกระจกเงาเว้าว่า $m = \frac{v}{u}$



รูป 99 ข. พิสูจน์ว่ากำลังขยายภาพของกระจกเงานูนว่า $m = \frac{v}{u}$

ให้ PQ เป็นวัตถุวางอยู่หน้ากระจกเงาทรงกลมโดยตั้งฉากกับแกนมุขสำคัญ CA และมีจุด Q อยู่บนแกนมุขสำคัญ CA ด้วย

P'Q' เป็นภาพที่เกิดขึ้น

A เป็นขั้วกระจกเงา PA เป็นรังสีตกกระทบ AP′ เป็นรังสีสะท้อน ให้ระยะ AF = f หน่วย AQ = u หน่วย และ AQ′ = v หน่วย

พิสูจน์ ตามกฎของการสะท้อนของแสง เราจะพิสูจน์ได้ว่า △ AP′Q′ กับ △ APQ เป็น △ ที่มีมุมทั้ง 3 เท่ากัน มุมต่อมุม

$$\therefore \frac{P'Q'}{PQ} = \frac{AQ'}{AQ} \quad (\text{ท.บ. } 62)$$

แทนค่าจะได้

$$\frac{P'Q'}{PQ} = \frac{v}{u}$$

เมื่อ m เป็นกำลังขยายภาพของกระจกเงา $m = \frac{P'Q'}{PQ}$

$$\therefore m = \frac{v}{u} \text{ ด้วย}$$

หมายเหตุ u จะมีค่าเป็น + เสมอ แต่ v อาจจะเป็น + หรือ − ก็ได้ (*ถ้าเกิดภาพแท้จริงหน้ากระจกเงา v จะเป็น +; ถ้าเกิดภาพเสมือนหลังกระจกเงา v จะเป็น −*) เพราะฉะนั้นเราจะบอก ตำแหน่งที่เกิดภาพ ลักษณะของภาพได้จากค่าของ m ที่เป็น + หรือ −

คือ (1) ถ้า m มีค่าเป็น + ภาพที่เกิดขึ้นเป็นภาพแท้จริง หัวกลับ อยู่หน้ากระจกเงา

(2) ถ้า m มีค่าเป็น − ภาพที่เกิดขึ้นเป็นภาพเสมือน หัวตั้งอยู่หลังกระจกเงา

ตัวอย่างที่ 1 เปลวเทียนไขสูง 3 ซม. วางห่างจากกระจกเงาเว้า 45 ซม. กระจกเงามีความยาวโฟกัส 30 ซม. จะเกิดภาพที่ไหน มีลักษณะอย่างไร และมีขนาดเท่าไร

วิธีทำ จากสูตร $\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$

ในที่นี้ f เป็นความยาวโฟกัสของกระจกเงานูน = 30 ซม.

u เป็นระยะจากกระจกเงาถึงวัตถุ = 45 ซม.

และ v เป็นระยะจากกระจกเงาถึงภาพ = ? ซม.

$$\therefore \frac{1}{30} = \frac{1}{45} + \frac{1}{v}$$

$$\frac{1}{v} = \frac{1}{30} - \frac{1}{45}$$

$$= \frac{1}{90}$$

$$\therefore v = 90$$

เมื่อ v มีค่าเป็น + เพราะฉะนั้นภาพที่เกิดขึ้นเป็นภาพแท้จริง หัวกลับ อยู่หน้ากระจกเงาห่างจากกระจกเงา 90 ซม.

จากสูตร $m = \frac{v}{u}$

ในที่นี้ m เป็นกำลังขยายภาพของกระจกเงา = ?

$$\therefore m = \frac{90}{45}$$

$$= 2$$

$\therefore$ กระจกเงามีกำลังขยายภาพ = 2 เท่า

เมื่อเทียนสูง 3 ซม. ภาพก็สูง $= 2 \times 3$ ซม.

$= 6$ ซม.

ตอบ ภาพอยู่หน้ากระจกเงาเป็นระยะ 90 ซม. เป็นภาพแท้จริง หัวกลับ สูง 6 ซม.

ตัวอย่างที่ 2 วัตถุอันหนึ่งวางอยู่หน้ากระจกเงาเว้าเป็นระยะ 24 ซม. ได้ภาพแท้จริงมีขนาดเป็น 2 เท่าของวัตถุ ถ้าเลื่อนวัตถุเข้ามาให้ห่างจากกระจกเงาเพียง 12 ซม. จะได้ภาพที่ไหน มีลักษณะอย่างไร และมีขนาดกี่เท่าของวัตถุ

วิธีทำ จากสูตร $m = \frac{v}{u}$

ในที่นี้ m เป็นกำลังขยายภาพของกระจกเงา $= 2$ เท่า

v เป็นระยะภาพ $= ?$ ซม.

และ u เป็นระยะวัตถุ $= 24$ ซม.

$\therefore \quad 2 = \frac{v}{24}$

และ $v = 48$

เมื่อค่าของ v เป็น +

หมายความว่า ภาพเกิดหน้ากระจกเงาห่าง 48 ซม. จากกระจกเงา

จากสูตร $\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$

f เป็นความยาวโฟกัสของกระจกเงาเว้านั่น

$\therefore \quad \frac{1}{f} = \frac{1}{24} + \frac{1}{48}$

$= \frac{3}{48}$

$= \frac{1}{16}$

$\therefore \quad f = 16$

และเมื่อวัตถุมาอยู่ระยะ 12 ซม. จากกระจกเงา

จากสูตร $\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$

$\therefore \frac{1}{16} = \frac{1}{12} + \frac{1}{v}$

$\frac{1}{v} = \frac{1}{16} - \frac{1}{12}$

$= -\frac{1}{48}$

$\therefore v = -48$

เมื่อค่าของ v เป็น — ภาพเกิดหลังกระจกเงาเว้าไป 48 ซม. และเป็นภาพเสมือน หัวตั้ง

จากสูตร $m = \frac{v}{u}$

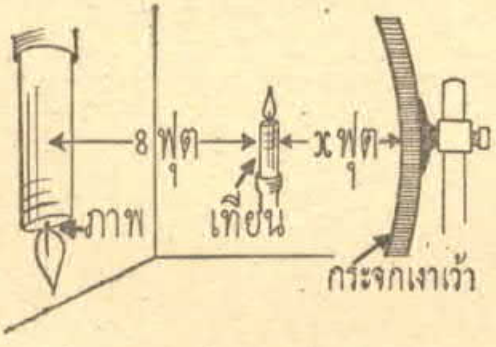
$\therefore m = \frac{-48}{12}$

$= -4$

ตอบ ภาพอยู่หลังกระจกเงา 48 ซม. เป็นภาพเสมือน หัวตั้ง ขนาดโต 4 เท่าของวัตถุ

ตัวอย่างที่ 3 เทียนไขอยู่ห่างจากกำแพง 8 ฟุต ต้องวางกระจกเงาเว้าที่ไหน จึงจะได้ภาพของเทียนที่กำแพง มีขนาดโต 3 เท่า และห่างจากกระจกเงาเว้านั้นมีความยาวโฟกัสเท่าไร

วิธีทำ



รูป 100

เราได้ภาพขนาดโต 3 เท่า ยนกำแพง

∴ ภาพนั้นต้องเป็นภาพแท้จริงและกระจกเงากับกำแพงจะต้องอยู่คนละข้างของเทียนดังรูป 100

สมมุติว่า กระจกเงาวางอยู่ห่างจากเทียน = x ฟุต

∴ กระจกเงาอยู่ห่างจากกำแพง = 8 + x ฟุต

จากสูตร $m = \frac{v}{u}$

ในที่นี้ m เป็นกำลังขยายภาพของกระจกเงา = 3

v เป็นระยะภาพ = 8 + x ฟุต

และ u เป็นระยะวัตถุ = x ฟุต

$$\therefore \quad 3 = \frac{8+x}{x}$$

$$3x = 8 + x$$

$$2x = 8$$

$$x = 4$$

นั่นคือ เราต้องวางกระจกเงาห่างจากเทียน 4 ฟุต หรือจากกำแพง 12 ฟุต

จากสูตร $\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$

ในที่นี้ f เป็นความยาวโฟกัสของกระจกเงานั้น = ? ฟุต

$$\therefore \quad \frac{1}{f} = \frac{1}{4} + \frac{1}{12}$$

$$= \frac{4}{12}$$

$$= \frac{1}{3}$$

$$\therefore \quad f = 3$$

ดังนั้นกระจกเงาเว้านี้มีความยาวโฟกัส 3 ฟุต

ตอบ { ต้องวางกระจกเงาห่างจากกำแพง = 12 ฟุต
ความยาวโฟกัสของกระจกเงาเว้า = 3 ฟุต

ตัวอย่างที่ 4 วัตถุสูง 3 ซม. วางอยู่ห่าง 20 ซม. จากหน้ากระจกเงานูนซึ่งมีความยาวโฟกัส 12 ซม. จงหาลักษณะ ขนาดและที่เกิดภาพ

วิธีทำ จากสูตร $\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$

ในที่นี้ f เป็นความยาวโฟกัสของกระจกเงานูน = − 12 ซม.

u เป็นระยะภาพ = 20 ซม.

และ v เป็นระยะวัตถุ = ? ซม.

$\therefore \quad -\frac{1}{12} = \frac{1}{20} + \frac{1}{v}$

และ $\frac{1}{v} = -\frac{1}{12} - \frac{1}{20}$

$= -\frac{2}{15}$

$\therefore \quad v = -7.5$

เมื่อค่าของ v เป็น −

ภาพที่เกิดขึ้นนี้อยู่หลังกระจกเงาเป็นระยะ 7.5 ซม. เป็นภาพเสมือนหัวตั้ง

จากสูตร $m = \frac{v}{u}$

ความสูงของภาพ = ? ซม.

ความสูงของวัตถุ = 3 ซม.

$\therefore \quad \frac{\text{ความสูงของภาพ}}{3} = \frac{-7.5}{20}$

ความสูงของภาพ $= \frac{3}{8} \times 3$ *ตัดเครื่องหมาย — ออก เพราะการหาความสูงของภาพไม่เกี่ยวกับเครื่องหมาย*

$= \frac{9}{8}$

$= 1.125$ ซม.

ตอบ ได้ภาพเสมือน หัวตั้ง อยู่หลังกระจกเงา มีระยะห่าง 7.5 ซม. และสูง 1.125 ซม.

ตัวอย่างที่ 5 วัตถุเล็ก ๆ อันหนึ่งวางอยู่บนแกนมุขสำคัญหน้ากระจกเงาเว้า ระยะห่าง 10 นิ้ว ทำให้เกิดภาพขึ้นมีขนาดโต 4 เท่า จงหาความยาวโฟกัสของกระจกเงานั้น

วิธีทำ จากสูตร $m = \frac{v}{u}$

m เป็นกำลังขยายภาพของกระจกเงาเว้า $= \pm 4$ *(ด้วยโจทย์ไม่ได้กำหนดมาว่าเป็นภาพแท้จริงหรือภาพเสมือน)*

v เป็นระยะภาพ $= ?$ นิ้ว

u เป็นระยะวัตถุ $= 10$ นิ้ว

$\therefore \pm 4 = \frac{v}{10}$

$v = \pm 40$

∴ ถ้าเป็นภาพแท้จริงก็อยู่หน้ากระจกเงาเป็นระยะ 40 นิ้ว

และ ถ้าเป็นภาพเสมือนก็อยู่หลังกระจกเงาเป็นระยะ 40 นิ้ว

จากสูตร $\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$

f เป็นความยาวโฟกัสของกระจกเงาเว้า $= ?$ นิ้ว

u เป็นระยะวัตถุ $= 10$ นิ้ว

v เป็นระยะวัตถุ $= \pm 40$ ซม.

เมื่อเกิดภาพแท้จริง $\frac{1}{f} = \frac{1}{10} + \frac{1}{40}$

$= \frac{4+1}{40}$

$= \frac{1}{8}$

$\therefore f = 8$

เมื่อเกิดภาพเสมือน $\frac{1}{f} = \frac{1}{10} + \frac{1}{-40}$

$= \frac{4-1}{40}$

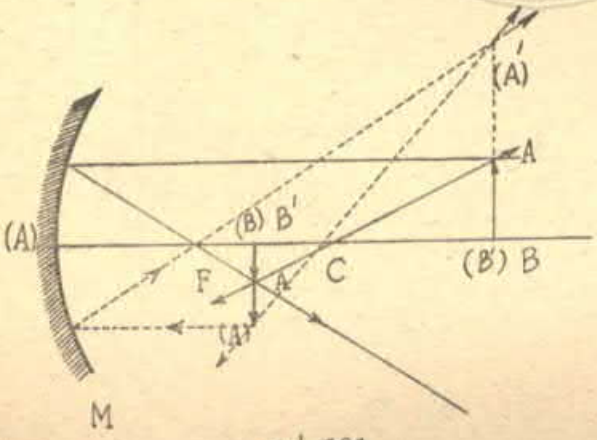
$= \frac{3}{40}$

$\therefore f = 13\frac{1}{3}$

ตอบ 8 ซม. , $13\frac{1}{3}$ ซม.

โฟกัสสังยุค (Conjugate foci) ของกระจกเงา

หมายถึงจุดที่วัตถุกับภาพสลับที่กันได้ เกิดขึ้นจากกระจกเงาเว้า เมื่อวัตถุอยู่ระหว่าง ∞ กับจุด C และจุด C กับจุด F ดังรูป 101



รูป 101
แสดงโฟกัสสังยุคของกระจกเงา

ตามรูป 1) วัตถุอยู่ที่จุด B เกิดภาพแท้จริงที่จุด B'

2) เมื่อวัตถุอยู่ที่จุด B' ภาพแท้จริงจะเกิดที่จุด B

ดังนั้นจุด B กับจุด B' เป็นโฟกัสสังยุคของกระจกเงาเว้า

เราสามารถใช้สูตร $\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$ แสดงความจริงข้อนี้ได้

ตัวอย่าง กระจกเงาเว้าอันหนึ่งมีความยาวโฟกัส 10 ซม. จงพิสูจน์ให้เห็นจริงว่า จุดบนแกนมุขสำคัญที่อยู่หน้ากระจกเงา และห่างจากกระจกเงานั้น 12 ซม. กับ 60 ซม. เป็นโฟกัสสังยุคของกระจกเงา

วิธีพิสูจน์ เมื่อวัตถุอยู่ที่ระยะ 12 ซม. จากหน้ากระจกเงาเว้า

จากสูตร $\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$

f เป็นความยาวโฟกัสของกระจกเงาเว้า $= 10$ ซม.

u เป็นระยะวัตถุ $= 12$ ซม.

v เป็นระยะภาพ $= ?$ ซม.

$$\therefore \frac{1}{10} = \frac{1}{12} + \frac{1}{v}$$

$$\frac{1}{v} = \frac{1}{10} - \frac{1}{12}$$

$$= \frac{6-5}{60}$$

$$= \frac{1}{60}$$

$$\therefore v = 60$$

เมื่อวัตถุอยู่ที่ระยะ 60 ซม. จากหน้ากระจกเงาเว้า

$f = 10$ ซม. $u = 60$ ซม. และ $v = ?$ ซม.

$$\therefore \frac{1}{10} = \frac{1}{60} + \frac{1}{v}$$

$$\frac{1}{v} = \frac{1}{10} - \frac{1}{60}$$

$$= \frac{6-1}{60}$$

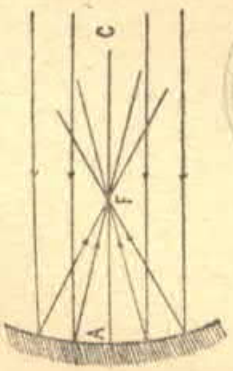
$$= \frac{1}{12}$$

$$\therefore \quad v = 12$$

ดังนั้นจุดระยะ 12 ซม. กับจุดระยะ 60 ซม. เป็นโฟกัสสังยุคของกระจกเงาจริง

วิธีหาความยาวโฟกัสของกระจกเงาเว้า มีหลายวิธีด้วยกันดังนี้

1. **อาศัยแสงจากดวงอาทิตย์** แสงจากดวงอาทิตย์เป็นแสงขนาน หรือตัววัตถุคือดวงอาทิตย์อยู่ที่ infinity ภาพจะเกิดที่โฟกัสดังรูป 102

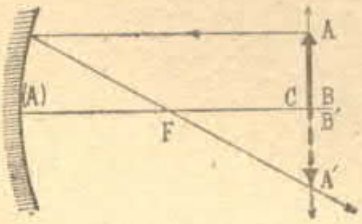


รูป 102
หา f ของกระจกเงาเว้า
โดยอาศัยแสงจากดวงอาทิตย์

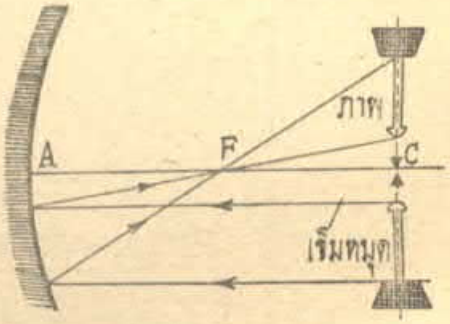
2. **โดยหารัศมีความโค้งของกระจกเงาก่อน** มี 2 วิธีคือ

ก. **ทำให้ภาพเกิดแห่งเดียวกันกับวัตถุอยู่** คือที่จุด C พอดี ใช้ฉากรับภาพแท้จริง วัดระยะ AC โดยวางฉากกับวัตถุไว้แห่งเดียวกัน เลื่อนกระจกเงาไปมาจนกระทั่งได้ภาพชัดบนฉาก ดังรูป 103 เราก็จะหาความยาวโฟกัสได้จาก $f = \frac{1}{2}$ CA

ข. วางวัตถุให้พอดีอยู่ที่จุด C โดยใช้วิธีเลื่อนวัตถุไปมาบนหน้ากระจกเงาจนกระทั่งแลเห็นภาพแท้จริงของวัตถุที่เกิดขึ้นอยู่ตรงกับตัววัตถุ หรือทับวัตถุพอดี ดังรูป 104

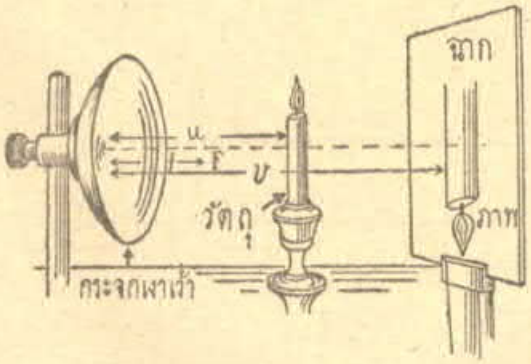


รูป 103 หา f ของกระจกเงาเว้า โดยทำให้ภาพเกิดที่เดียวกับวัตถุที่จุด C



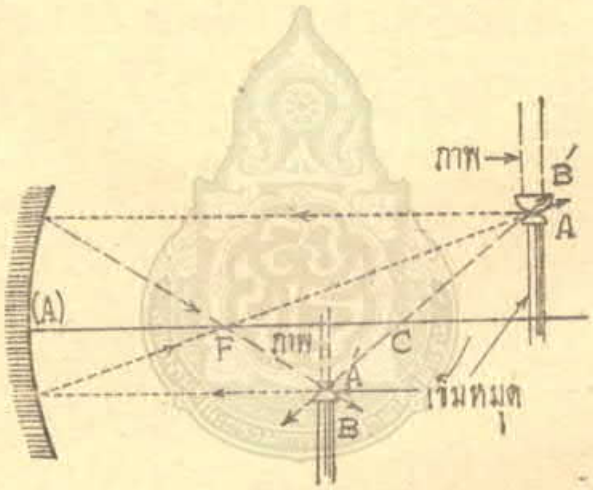
รูป 104 หา f ของกระจกเงาเว้า โดยเลื่อนเข็มหมุดให้พอดีไปอยู่ที่จุด C

3. โดยวิธีคำนวณ จุดเทียนเล่มหนึ่งวางไว้หน้ากระจกเงาเว้า ณ ตำแหน่งต่าง ๆ กัน เอาฉากรับภาพแท้จริงที่เกิดขึ้นทุก ๆ ครั้ง พร้อมกับวัดระยะวัตถุ (u) และระยะภาพ (v) เป็นคราว ๆ ไป ดังรูป 105 ก. นำผลที่วัดได้มาคำนวณหา f จากสูตร $\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$ แล้วเอาค่าของ f ที่ได้มาหาส่วนเฉลี่ยอีกครั้งหนึ่ง



รูป 105 ก. การหา f ของกระจกเงาเว้าโดยคำนวณจากสูตร $\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$

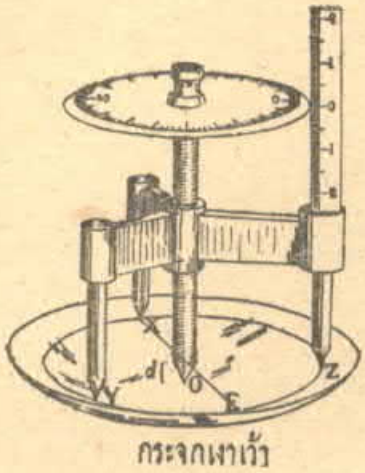
หรือ จะใช้เข็มหมุด 2 ตัววางไว้หน้ากระจกเงา ให้พอดีอยู่ที่ โฟกัสสังยุคก็ได้ ซึ่งจะแลเห็นภาพของเข็มหมุดแต่ละตัวเอาหัวลงทั้งต่อเป็นตัวเดียวกับอีกตัวหนึ่ง เพื่อให้แน่นอนอาจใช้วิธี ปารัลลักซ์ ช่วย ดังรูป 105 ข. ภาพของ A คือ A′ ต่อเป็นตัวเดียวกับ B และภาพของ B คือ B′ ต่อเป็นตัวเดียวกับ A วัดระยะเข็มหมุดทั้งสองจากกระจกเงา มาคำนวณหา f จากสูตร $\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$ โดยให้ระยะของตัวหนึ่งเป็น u และอีกตัวหนึ่งเป็น v



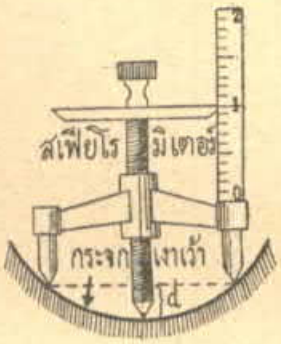
รูป 105 ข. การหา f ของกระจกเงานูนโดยวางเข็มหมุดที่โฟกัสสังยุค

แล้วคำนวณจากสูตร $\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$

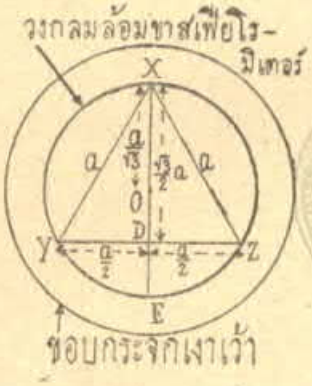
4. <u>ใช้สเฟียโรมิเตอร์</u> (Spherometer) วัดส่วนลึกของกระจกเงานูน แล้วคำนวณหา f โดยทางเรขาคณิต ดังลำดับไว้ในรูป 106 ก. ข. ค. และ ง.



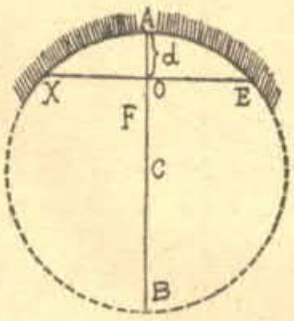
รูป 106 ก. รูปสเฟียโรมิเตอร์



รูป 106 ข. การแสดงวิธีใช้สเฟียโรมิเตอร์วัดส่วนลึกของกระจกเงาเว้า



รูป 106 ค. คำนวณหาเส้นผ่าศูนย์กลางของวงกลมที่ล้อมขาของสเฟียโรมิเตอร์



รูป 106 ง. การหาเส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกลมที่กระจกเงาเว้าเป็นส่วนหนึ่ง

วิธีคำนวณ จากรูปที่ 106 ค.

$\therefore$ จุด X, Y และ Z เป็นที่ตั้งของขาสเฟียโรมิเตอร์

$\therefore$ $\triangle$ XYZ เป็น $\triangle$ ด้านเท่า มีความยาวด้านละ a หน่วย

$\therefore$ $XD = \frac{\sqrt{3}}{2}$ a หน่วย (ท.บ. 29)

ให้ XE เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของวงกลมล้อมรอบรูป $\triangle$ XYZ

และ O เป็นจุดศูนย์กลางของวงกลม XYZ

จากสูตร $R = \frac{abc}{4\triangle}$

ตามรูป $OX = \frac{a \times a \times a}{4\sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)}}$

$$= \frac{a^3}{4\sqrt{\frac{3a}{2} \times \frac{a}{2} \times \frac{a}{2} \times \frac{a}{2}}}$$

$$= \frac{a^3}{4 \times \frac{a^2}{4}\sqrt{3}}$$

$$= \frac{a}{\sqrt{3}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

จากรูป 106 ง.

ให้ AB เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกลมซึ่งเป็นส่วนเต็มของกระจกเงาเว้า และ C เป็นจุดศูนย์กลางของลูกทรงกลม เมื่อคิดแต่ขอบของทรงกลมนั้น

$\therefore$ XAB เป็นวงกลมวงหนึ่งซึ่งมี XE เป็นคอร์ดอันหนึ่ง และ AB ย่อมแบ่งครึ่งและตั้งฉากกับ XE *(ท.บ. 31)*

และ $AO.OB = XO.OE$ *(ท.บ. 57)* ..... (2)

ให้ r เป็นรัศมีความโค้งของลูกทรงกลม

แทนค่า $d(2r-d) = \frac{a}{\sqrt{3}} \times \frac{a}{\sqrt{3}}$

$\therefore \quad 2rd - d^2 = \frac{a^2}{3}$

$$2rd = \frac{a^2}{3} + d^2$$

$$r = \frac{a^2}{6d} + \frac{d}{2}$$

แต่ $f = \frac{r}{2}$

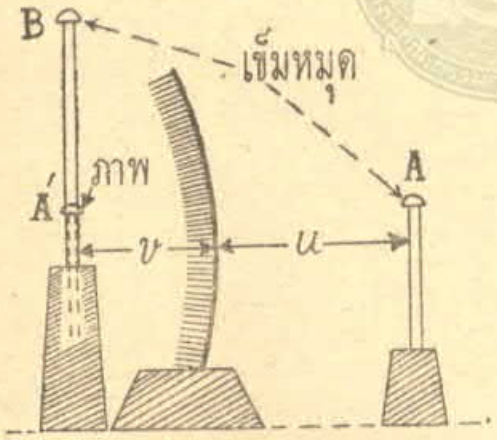
$\therefore f = \frac{a^2}{12d} + \frac{d}{4}$ ..... สูตร 11

$\therefore$ ความยาวโฟกัสของกระจกเงาเว้า

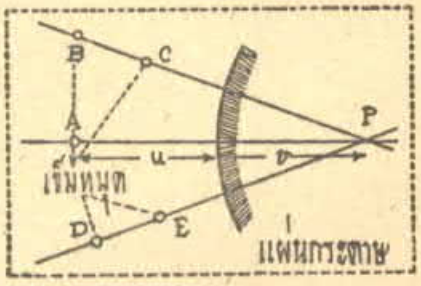
$= \frac{(\text{ระยะห่างของขาสเพียโรมิเตอร์})^2}{12 \times \text{ความลึกของกระจกเงาเว้า}} + \frac{\text{ความลึกของกระจกเงาเว้า}}{4}$

วิธีหาความยาวโฟกัสของกระจกเงานูน มีหลายวิธีด้วยกันดังนี้

1. **โดยวิธีปารัลลักซ์** โดยยกเข็มหมุด (B) หลังกระจกเงาให้ตรงกับภาพ (A´) ของเข็มหมุด (A) ตัวที่ยกอยู่หน้ากระจกเงานูน ดังรูป 107 หลาย ๆ ครั้งและวัดระยะวัตถุ (u) และระยะภาพ (v) ไว้ทุกครั้งแล้วนำมาคำนวณหา f เป็นคู่ ๆ จากสูตร $\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$ แล้วเอาค่าของ f ที่ได้มาหาส่วนเฉลี่ยอีกครั้งหนึ่ง



รูป 107 การหา f ของกระจกเงานูน โดยวิธีปารัลลักซ์และคำนวณ



รูป 108 การหา f ของกระจกเงานูน โดยใช้วิธีเรขาคณิตช่วย

2. โดยวิธีเรขาคณิต ใช้ เข็มหมุด 5 ตัว กระดาษ 1 แผ่น ดินสอ และไม้บรรทัด

วิธีทำ เอาเข็มหมุด A ปักหน้ากระจกเงานูนสูงเสมอขอบกระจกเงา ปักเข็มหมุด B และ C ให้อยู่ในแนวเดียวกับภาพของ A และสูงเสมอ A แล้วปักเข็มหมุด D และ E ให้อยู่ในแนวเดียวกับภาพ A และสูงเสมอ A อีกแนวหนึ่งเอากระดาษเปล่าแผ่นหนึ่งวางทับกับเข็มหมุดเหล่านั้นหมายที่ตั้งของเข็มหมุดและกระจกเงาไว้

ลากเส้น BC และ DE แล้วต่อเลยออกไปตัดกันที่จุด P (ภาพของ A) ลาก AP ดังรูป 108 วัดระยะวัตถุและระยะภาพ

คำนวณหา f ของกระจกเงานูนจากสูตร $\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$

ควรหาหลาย ๆ ครั้ง โดยการย้าย A ไปในที่ต่าง ๆ กัน เอา f ที่ได้มาหาส่วนเฉลี่ยอีกครั้งหนึ่ง

3. โดยใช้สเฟียโรมิเตอร์ วัดความนูนของกระจกเงาแล้วนำมาคำนวณ

$$r = \frac{a^2}{6d} + \frac{d}{2}$$

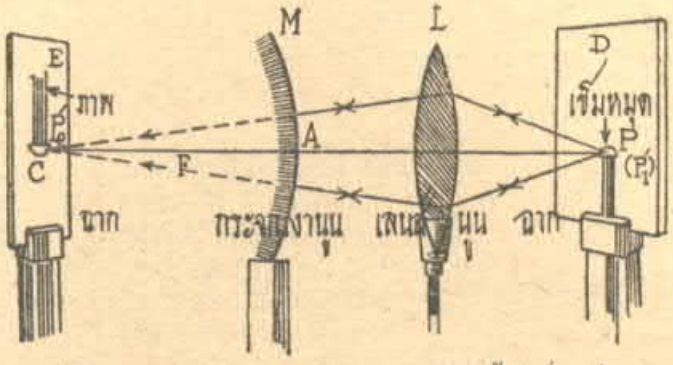
หรือ $$f = \frac{a^2}{12d} + \frac{4}{d}$$ *

4. โดยใช้เลนส์นูนช่วย

ตามรูป 109 มี P เป็นเข็มหมุด, L เป็นเลนส์นูน } วางไว้คงตัวในระยะที่จะเกิดภาพแท้จริง

M เป็นกระจกเงานูนที่ต้องการหา f วางให้แกนมุขสำคัญร่วมกับเลนส์ L แต่อยู่คนละข้างกับ P หันหน้ากระจกเงาเข้าหาเลนส์ L

D และ E เป็นฉากรับภาพ ระเป็นอันเดียวกันก็ได้



รูป 109 การหา f ของกระจกเงานูนโดยใช้เลนส์นูนช่วย

วิธีทำ เลื่อนกระจกเงา M ไปมา จนกระทั่งไปอยู่ ณ ตำแหน่งที่ทำให้ภาพของ P สะท้อนกลับจาก M ผ่าน L มาเกิดที่ P บนฉาก D ดังรูป 109 คือ P'_1

แสดงว่าแสงที่เกิดจากการหักเหจากเลนส์ L ไปพบกระจกเงา M เป็นแนวตั้งฉาก และถ้าต่อแนวแสงออกไป จะไปผ่านจุด C ของกระจกเงานูนพอดี

และภาพของ P เมื่อผ่านเลนส์ L ไปจะเกิดจุดที่ C ของ M พอดีด้วย

ยกกระจกเงา M ออก เอาฉาก E รับภาพ P ได้ชัดสมมุติว่าเป็น P'_2

ภาพ P'_2 จะเกิดที่จุด C ของกระจกเงา M พอดี ดังรูป 109

วัดระยะ AP'_2 ซึ่ง = รัศมีความโค้งของกระจกเงานูน M

ดังนั้น f ของกระจกเงานูน $= \frac{AP'_2}{2}$

แบบฝึกหัดที่ 4

1. กระจกเงาทรงกลมที่ท่านทรายนั้นมีชนิดใดบ้าง ชนิดไหนใช้มากที่สุด และใช้สำหรับทำอะไร
2. ท่านจะทรายได้อย่างไรว่ากระจกเงาทรงกลมอันหนึ่งเป็นกระจกเงานูนหรือเว้า โดยไม่ต้องไปแตะต้องกระจกเงานั้นเลย

3. กระจกเงานูนจะให้ภาพชนิดไรได้บ้าง เมื่อวัตถุอยู่ห่างจากกระจกเงาเป็นระยะต่าง ๆ กัน จงเขียนแผนภาพมาให้ดู 3 แผนภาพ

4. เมื่อวัตถุตั้งอยู่ห่างจากกระจกเงาเว้าเป็นระยะต่าง ๆ กัน จะได้ภาพที่มีลักษณะและขนาดเป็นอย่างไร ที่ไหน ให้เขียนแผนภาพประกอบด้วย

5. ภาพแท้จริง กับภาพเสมือน ในกระจกเงาทรงกลมมีลักษณะต่างกันอย่างไร จงเขียนแผนภาพที่แสดงการเกิดภาพแท้จริงกับภาพเสมือนจากกระจกเงาทรงกลมมาให้ดู และเขียนแสดงด้วยว่า ตาเราแลเห็นภาพนั้นได้อย่างไร

6. ที่กล่าวว่า การสะท้อนของแสงบนผิวทรงกลม เป็นไปตามกฎอย่างเดียวกับการสะท้อนของแสงบนผิวระนาบนั้นท่านเข้าใจว่าอย่างไร จงอธิบาย และเขียนรูปประกอบ

และท่านจะทดลองความจริงข้อนี้ได้อย่างไร ถ้าทราบความยาวโฟกัสหรือรัศมีความโค้งของกระจกเงานั้นแล้ว

7. ภาพของวัตถุ คืออะไร

จงอธิบายถึงหลักการเขียนแผนภาพของภาพสองชนิดในกระจกเงาเว้า และอธิบายด้วยว่า เหตุใดกระจกเงานูนจึงไม่ทำให้เกิดภาพแท้จริงได้

8. ที่พูดว่าโฟกัสของกระจกเงานั้นหมายถึงอะไร จงให้บทนิยามมาด้วย

9. ที่เรียกว่าความยาวโฟกัส ระยะวัตถุ ระยะภาพ นั้นคืออะไร มีหลักการวัดอย่างไร และเหตุใดยางที่จึงมีค่าเป็น + บ้าง — บ้าง ทั้งนี้มีหลักเกณฑ์อย่างไร

10. ท่านมีหลักเกณฑ์อย่างไรที่จะบอกได้ว่า ถ้าเมื่อมองอยู่ ณ จุดหนึ่งจะแลเห็นภาพแท้จริงหรือภาพเสมือนจากกระจกเงาทรงกลมได้ จงบรรยายวิธีเขียนแสงสะท้อนมายังตา

11. จงให้บทนิยามหรืออธิบาย

แกนมุขสำคัญของกระจกเงาทรงกลม จุดศูนย์กลางของความโค้งของกระจกเงา กระจกเงาทรงกลม ภาพหัวตั้ง ภาพหัวกลับ สเฟียโรมิเตอร์

12. โฟกัสของกระจกเงาทรงกลมเว้าสังยุค หมายความว่าอย่างไร จงเขียนรูปประกอบให้ชัดเจน โฟกัสสังยุคมีในกระจกเงาทรงกลมทุกชนิดหรืออย่างไร

13. ถ้าเราต้องการจะทราบความยาวโฟกัส และรัศมีความโค้งของกระจกเงาเว้าโดยเร็ว จะทำอย่างไร

14. ท่านมีวิธีหาความยาวโฟกัสของกระจกเงานูนและเว้าได้อย่างไรบ้าง จงอธิบายโดยละเอียดทั้งเขียนรูปประกอบเฉพาะวิธีที่ท่านเห็นว่าสะดวกและได้ผลดีที่สุด

15. เพราะเหตุใด

ก. เราจึงใช้กระจกเงาเว้ารุกไฟได้ เมื่อไปรับแสงจากดวงอาทิตย์

ข. เขาจึงใช้กระจกเงานูนสำหรับรถที่มาทางด้านหลัง

ค. การใช้กระจกเงาเว้าส่องหน้าในบางกรณีจึงมีผลดีกว่ากระจกเงาระนาบ แต่เหตุใดจึงไม่ใช้ทั่วไป

ง. กระจกเงานูนจึงไม่ให้ภาพที่มีขนาดโตกว่าวัตถุ

จ. กระจกเงาที่โค้งมากหรือยานใหญ่จึงมีโฟกัสไม่เย็นจุด

16. ประโยชน์ที่ได้จากกระจกเงานูนกับกระจกเงาเว้ามีอะไรบ้าง

17. ต่อไปนี้เกิดขึ้นจากกระจกเงาทรงกลมได้อย่างไร จงเขียนแผนภาพประกอบด้วย

ก. ภาพเสมือน หัวตั้ง ขนาดโตกว่าวัตถุ

ข. ภาพเสมือน หัวตั้ง ขนาดเล็กกว่าวัตถุ

ค. ภาพแท้จริง หัวกลับ ขนาดเท่าวัตถุ

18. ท่านจะใช้เข็มหมุดเย็นเครื่องหาความยาวโฟกัสของกระจกเงาเว้าได้อย่างไร

19. ท่านมีวิธีเขียนภาพที่เกิดขึ้นในกระจกเงาทรงกลมได้อย่างไร จงแสดงโดยรูป พร้อมทั้งตารางสรุปถึงตำแหน่งภาพ ลักษณะและขนาดของภาพทุกชนิดที่เกิดจากกระจกเงาเว้า

20. ต่อไปนี้มีความสัมพันธ์กันอย่างไร

ความยาวโฟกัส รัศมีความโค้งของกระจกเงา

จงพิสูจน์ และบรรยายวิธีทดลองประกอบด้วย

21. ถ้ามีผู้บอกท่านว่า โฟกัสมุขสำคัญของกระจกเงานูนนั้นอยู่ที่จุดกึ่งกลางขนรัศมีความโค้งของกระจกเงา ท่านจะพิสูจน์ความจริงข้อนี้ได้อย่างไร

22. ความยาวโฟกัสของกระจกเงาทรงกลม ระยะภาพ และระยะวัตถุ เกี่ยวข้องกันอย่างไร จงแสดงความจริงข้อนั้นมาโดยการพิสูจน์

23. กำลังขยายภาพของกระจกเงา นี้คืออะไร และเกี่ยวข้องกับระยะวัตถุและระยะภาพอย่างไร จงพิสูจน์ให้เห็นจริง

24. ถ้าภาพของวัตถุอันหนึ่งซึ่งเกิดขึ้นโดยกระจกเงาทรงกลมปรากฏอยู่ที่เดียวกับวัตถุ กระจกเงานั้นจะเป็นกระจกเงาชนิดไหน

25. เมื่อทำเครื่องหมายไว้กับผนังแล้ว ถ้าท่านมีกระจกเงาเว้าความยาวโฟกัส 3 ฟุต ทำอย่างไรจึงจะได้ภาพของเครื่องหมายไปทับเครื่องหมายนั้น จงอธิบายโดยการเขียนรูป

26. ถ้าวัตถุอยู่ห่างจากกระจกเงาเว้า เป็นระยะ 3 เท่าของความยาวโฟกัสแล้ว จงพิสูจน์ว่า ระยะภาพจะเท่ากับหนึ่งเท่าครึ่งของความยาวโฟกัส

27. จงหาตำแหน่ง ลักษณะและขนาดของภาพ เมื่อวางวัตถุไว้ที่โฟกัสของกระจกเงานูน

28. โดยการสร้างรูป จงหาระยะภาพของวัตถุซึ่งวางอยู่ห่างจากหน้ากระจกเงาเว้าเป็นระยะ 10 นิ้ว และกระจกเงานั้นมีความยาวโฟกัส 8 นิ้ว และยืนยันโดยการคำนวณด้วย

29. จงหาความยาวโฟกัสของกระจกเงาเว้า เมื่อวางวัตถุไว้หน้ากระจกเงาเป็นระยะ 8 นิ้ว แล้วจะได้ภาพแท้จริงห่างจากกระจกเงา 2 นิ้ว

30. ถ้าฉากอยู่ห่าง 48 นิ้วจากกระจกเงาเว้าซึ่งมีความยาวโฟกัส 12 นิ้ว เราจะต้องเราวัตถุไปวางไว้ห่างจากฉากเท่าไร จึงจะได้ภาพชัดบนฉาก จงเขียนแผนภาพประกอบ

31. เมื่อเอาวัตถุวางไว้บนแกนมุขสำคัญของกระจกเงาเว้า ซึ่งมีความยาวโฟกัส 8 ซม. ให้มีระยะห่างจากกระจกเงาดังนี้ (ก) 4 ซม. (ข) 5 ซม. (ค) 10 ซม. (ง) 12 ซม. จงหาว่าภาพที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเป็นกี่เท่าของวัตถุ

32. จงหาระยะภาพของวัตถุที่อยู่ห่าง 8 นิ้ว จากกระจกเงานูนซึ่งมีรัศมีความโค้ง 6 นิ้ว ให้เขียนรูปประกอบด้วย

33. ดินสอแท่งหนึ่งวางขนานกับแกนมุขสำคัญของกระจกเงาเว้าซึ่งมีความยาวโฟกัส 25 ซม. โดยปลายทั้งสองของดินสออยู่ห่างจากกระจกเงา 15 และ 20 ซม. ตามลำดับ จงหาความยาวของภาพที่เกิดขึ้นในกระจกเงานั้น

34. เมื่อเข็ม 2 เล่มอยู่ห่าง 6 และ 12 นิ้ว ตามลำดับจากกระจกเงาเว้าซึ่งมีรัศมีความโค้ง 16 นิ้ว จงหาว่าภาพที่เกิดขึ้นจะอยู่ห่างกันเท่าไร

35. ตามโจทย์ข้อ 34 ถ้ากระจกเงานั้นเป็นกระจกนูนจะมีผลเป็นอย่างไร

36. วัตถุสูง 1 นิ้ว ตั้งอยู่บนแกนมุขสำคัญของกระจกเงาเว้า ซึ่งมีความยาวโฟกัส 12 นิ้ว จงหา ระยะ ลักษณะและขนาดของภาพที่เกิดขึ้น เมื่อวางวัตถุอยู่ห่าง (ก) 10 นิ้ว (ข) 20 นิ้ว (ค) 30 นิ้ว

37. วัตถุยาว 5 ซม. ตั้งอยู่บนแกนมุขสำคัญหน้ากระจกเงาเว้า ซึ่งมีความยาวโฟกัส 20 ซม. เป็นระยะ 50 ซม. จงเขียนรูปแสดงการเกิดภาพ แล้วคำนวณหาระยะ ลักษณะ และขนาดของภาพ

38. เหรียญอันหนึ่งตั้งอยู่บนแกนมุขสำคัญของกระจกเงาเว้า และอยู่ห่างจากกระจกเงา 18 นิ้ว จะได้ภาพแท้ขนาดใหญ่เป็น 3 เท่าของเหรียญนั้น จงหาความยาวโฟกัสของกระจกนั้น

39. วัตถุอันหนึ่งวางอยู่หน้ากระจกเงาเว้า ซึ่งมีความยาวโฟกัส 6 นิ้ว จงหาว่าจะต้องวางวัตถุนั้นให้ห่างจากกระจกเงาเป็นระยะเท่าไร จึงจะได้ภาพแท้ขนาดต่างๆ กัน

(ก) 2 เท่าของวัตถุ (ข) $\frac{1}{2}$ ของวัตถุ

40. กระจกเงาเว้าอันหนึ่งจะต้องมีความยาวโฟกัสเท่าไร จึงจะทำให้เกิดภาพมีขนาดเท่ากัน เมื่อวางวัตถุหน้ากระจกเงาเป็นระยะ $3\frac{1}{3}$ นิ้ว กับ 10 นิ้ว

41. เมื่อเอากระดาษที่มีขนาด 8″ × 12″ วางตั้งฉากกับแกนมุขสำคัญ หน้ากระจกเงานูนซึ่งมีความยาวโฟกัส 7.5″ เป็นระยะ 30″ ภาพที่เกิดขึ้นนั้นจะมีพื้นที่เท่าไร

42. จุดกำเนิดแสงอยู่หน้ากระจกเงาเป็นระยะ 20 ซม. แสงสะท้อนจากกระจกเงานั้นจะไปรวมกันที่จุด ๆ หนึ่งซึ่งอยู่หน้ากระจกเงาเป็นระยะ 30 ซม. จงหาชนิดและความยาวโฟกัสของกระจกเงา

43. เอากระจกเงานูนกับกระจกเงาระนาบวางห่างกัน 28 นิ้ว โดยหันหน้ากระจกเงาเข้าหากัน จุดเทียนวางไว้ที่ตรงจุดกึ่งกลางของระยะห่างนี้ เมื่อมองดูในกระจกเงาระนาบจะแลเห็นภาพเทียน 2 ภาพและภาพที่อยู่ใกล้นั้นอยู่ห่างจากกระจกเงา 38 ซม. จงคำนวณหาความยาวโฟกัสของกระจกเงานูน และเขียนแผนภาพแสดงการเห็นภาพเมื่อมองดูในกระจกเงาระนาบด้วย

บทที่ 5
การหักเหของแสง

การหักเหของแสง (Refraction of Light) คือการที่แสงเปลี่ยนทางเดินจากแนวเดิม ซึ่งเกิดจากการที่แสงผ่านไปในตัวกลางต่างชนิดกัน *เช่นจากอากาศผ่านเข้าไปในน้ำ หรือจากแก้วผ่านออกไปในอากาศ เป็นต้น* หรือ ผ่านไปในตัวกลางวิวิธพันธุ์ หรือ ตัวกลางชนิดเดียวกัน ที่มีความหนาแน่นต่างกัน *เช่น อากาศในที่สูงกับที่ต่ำ น้ำต่างอุณหภูมิกัน เป็นต้น*

ตามปรกติ เมื่อแสงผ่านไปในตัวกลางชนิดเดียวกัน ซึ่งมีความหนาแน่นเท่ากัน หรือมีอุณหภูมิเท่ากันแล้ว แสงย่อมจะเดินเป็นเส้นตรง และมีความเร็วคงตัว

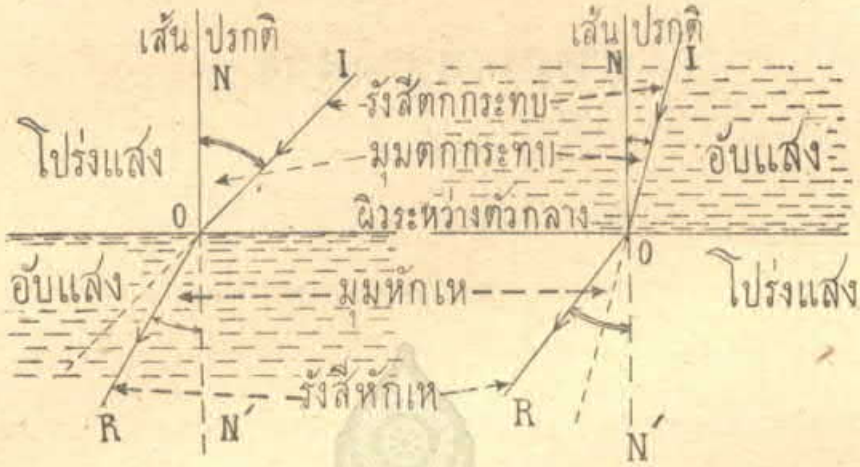
แต่ถ้าแสงผ่านเข้าไปในตัวกลางชนิดเดียวกัน ซึ่งมีความหนาแน่นต่างกัน หรือตัวกลางคนละชนิด จะมีการหักเหเกิดขึ้น และความเร็วของแสงจะเปลี่ยนแปลงไปตามความอับแสงของตัวกลางนั้น

การหักเห มี 2 ลักษณะดังนี้

1. ถ้าผ่านเข้าไปใน ตัวกลางที่อับแสงกว่าเดิม แสงจะเปลี่ยนทางเดินเบนเข้าหาเส้นปรกติ มุมหักเหจะเล็กกว่ามุมตกกระทบ และมี ความเร็วน้อยลง ดังรูป 110

2. ถ้าผ่านเข้าไปใน ตัวกลางที่โปร่งแสงกว่าเดิม แสงจะเปลี่ยนทาง

เดินเบนออกจากเส้นปรกติ มุมหักเหจะโตกว่ามุมตกกระทบ และมีความเร็วมากขึ้น ดังรูป 111



รูป 110
แสดงลักษณะของการหักเหของแสงที่ผ่านเข้าไปในตัวกลางที่อับแสงกว่า

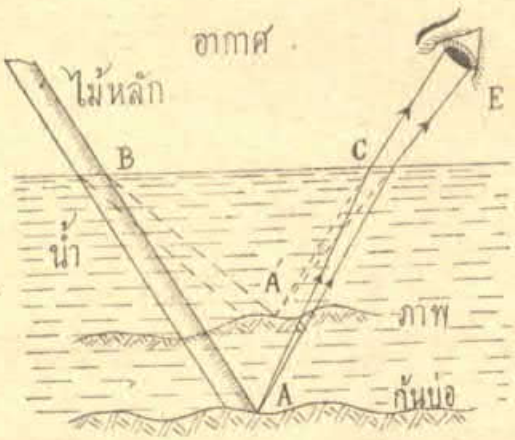
รูป 111
แสดงลักษณะของการหักเหของแสงที่เข้าไปในตัวกลางที่โปร่งแสงกว่า

ตัวอย่างที่เรามักจะแลเห็นเกี่ยวกับการหักเหของแสง มีดังนี้

ก. ถ้าเป็นน้ำกับอากาศ เราจะเห็นการหักของของที่ใต้ผิวน้ำ เช่น เมื่อเอาแปรงสีฟันหรือไม้หลักจุ่มลงในน้ำ จะเห็นสิ่งเหล่านี้หักงอตรงที่อยู่ใต้ผิวน้ำ หรือเห็นก้นบ่อน้ำตื้นกว่าที่เป็นจริง ดังรูป 112

ข. ถ้าเป็นแก้วกับอากาศ เราจะแลเห็นสิ่งซึ่งแก้วหนาๆ ทับอยู่ ลอยขึ้นมาดูใกล้กว่าที่เป็นจริง

ค. ถ้าเป็นอากาศกับอากาศ เรื่องนี้เมื่อเราไม่เรียนก็จะไม่รู้เลยว่า ทุกวันที่เราแลเห็นดวงอาทิตย์นั้นแลเห็นเพียงภาพที่อยู่สูงกว่าความจริงนอกจากขณะอยู่ตรงศีรษะเท่านั้น นอกจากนี้เราสามารถจะแลเห็นดวงอาทิตย์และดวงจันทร์ได้ก่อนเวลาที่ควรจะแลเห็น

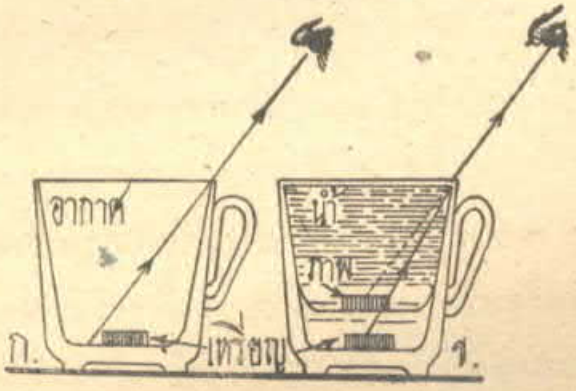


รูป 112 การหักขึ้นมาของไม้หลักตรงที่อยู่ใต้ผิวน้ำ
และก้นบ่อที่ดูตื้นกว่าที่เป็นจริง

การทดลองที่แสดงว่าแสงมีการหักเหเมื่อผ่านตัวกลางต่างชนิดกัน

วิธีที่ 1 ใช้น้ำ อุปกรณ์ มีถ้วยอัยแสง 1 ใบ เหรียญ หรือของเล็ก ๆ 1 อัน และน้ำใส ๆ แล้วปฏิบัติดังนี้

ก. เอาเหรียญอันนั้นวางไว้ที่ก้นถ้วย และเรามองอยู่ ณ ตำแหน่งที่ของถ้วยบังเหรียญนั้นพอดี ดังรูป 113 ก. แสดงว่าแสงเดินเป็นเส้นตรงในอากาศซึ่งเป็นตัวกลางเอกพันธุ์

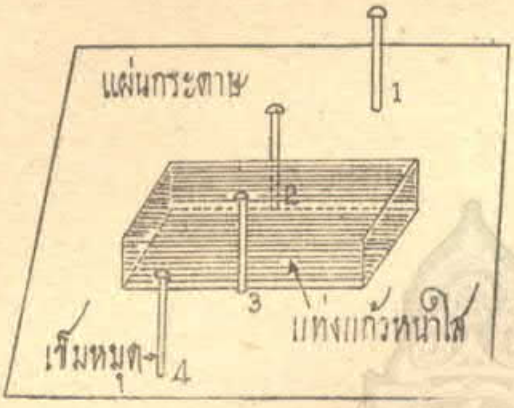


รูป 113 ก. แสดงว่าแสงเดินใน อากาศเป็นเส้นตรง จึงแลไม่เห็นเหรียญ

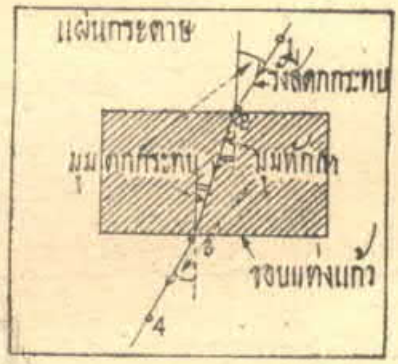
รูป 113 ข. แสดงว่าตาแลเห็นเหรียญได้ เพราะแสงที่ออกจากน้ำไปสู่อากาศมีการหักเห

ข. จินน้ำใส่ในถ้วยนั้น ไม่ช้าก็จะแลเห็นเหรียญได้ ดังรูป 112 ข. แสดงว่าแสงที่ผ่านจากน้ำออกไปในอากาศมีการหักเห คือเข้ามาเข้าตาของเรา

วิธีที่ 2 ใช้แท่งแก้วหนา อุปกรณ์ มี กระดาษ 1 แผ่น ดินสอ ไม้บรรทัด เข็มหมุด 4 ตัว และแท่งแก้วสี่เหลี่ยมผืนผ้า, หนา, และใส 1 อัน



รูป 114 ก.



รูป 114 ข.

แสดงการวางแท่งแก้วและปักเข็มหมุด 4 ตัว ขีดเส้นผ่านรอยเข็มหมุดแสดงการหักเหของแสง

การทดลอง ให้ทำเป็นขั้นๆ ดังนี้

1) เอาแท่งแก้ววางทับกลางกระดาษ แล้วเอาดินสอขีดรอยของแท่งแก้วไว้

2) เอาเข็มหมุดตัวที่ 1 และที่ 2 ปักทางด้านหนึ่งของแท่งแก้ว ในแนวเฉียงกับด้านข้างของแท่งแก้ว และให้ตัวหนึ่งอยู่ชิดกับแท่งแก้ว คือตัวที่ 2

3) จากด้านตรงข้าม มองผ่านแท่งแก้วให้เห็นว่าเข็มหมุดสองตัวนั้นอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน แล้วปักเข็มหมุดตัวที่ 3 กับที่ 4 ทางด้านนั้น ตามแนวของเข็มหมุด 2 ตัวที่เล็งเห็น ให้ตัวหนึ่ง คือ ตัวที่ 3 ชิดกับแท่งแก้ว ดังรูป 114 ก.

4) ยกแท่งแก้วขึ้น และถอนเข็มหมุดออก เอากินสอขีดเส้นผ่านรอยเข็มหมุด

5) เราจะเห็นว่า เส้นที่ลากนั้นไม่อยู่ในเส้นตรงอันเดียวกัน เส้นที่ผ่านเข้าแท่งแก้วจะหักเหเข้าหาเส้นปรกติ *เพราะแท่งแก้วอับแสงกว่า* และเส้นที่ออกจากแท่งแก้วจะหักเหออกห่างจากเส้นปรกติ *เพราะอากาศโปร่งแสงกว่า* ดังรูป 114 ข.

ถ้าไม่ใช้วิธีขีดเส้น จะเล็งหรือแลดูหัวเข็มหมุดในอากาศขณะที่กำลังอยู่ก็ได้ แต่ชักเหนสู้การขีดเส้นไม่ได้ และเราอาจจะวัดมุมและเส้นไปคำนวณ **ตรรชนีหักเหจากอากาศไปสู่แก้ว** และจากแก้วไปสู่อากาศ ได้ด้วย

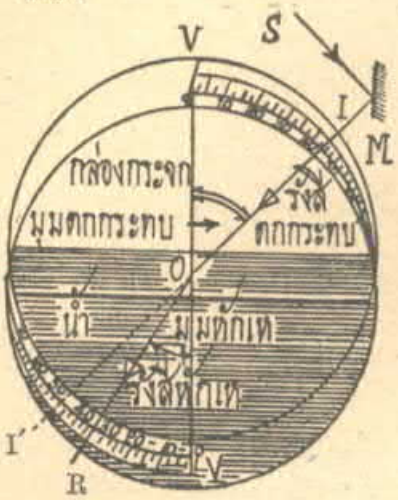
เมื่อด้านของแท่งแก้วทางที่แสงผ่านเข้าผ่านออกขนานกัน การทดลองนี้จะแสดงให้เห็นด้วยว่า แสงผ่านเข้าไปในตัวกลางก็ขนานกับด้านหรือขอบขนานกัน เมื่อกลับเข้าสู่ตัวกลางเดิม รังสีหักเหจะขนานกับรังสีตกกระทบเดิมเสมอ หรือมุมตกกระทบมุมแรก เท่ากับ มุมหักเหมุมสุดท้าย

วิธีที่ 3 ใช้หินกระจกใสทรงกระบอก หรือ ครึ่งทรงกระบอก ที่มีจำนวนองศาแบ่งไว้อย่างละเอียดที่ข้างหิน

การทดลอง ใช้หลักนี้ ทำตามลำดับดังนี้

1) เอาน้ำใสใส่ในหินนั้น ให้เสมอแนวเส้นผ่าศูนย์กลางของวงกลมที่เป็นด้านตัดของหิน

2) ฉายลำแสงที่ยังคับให้เล็ก จาก S กระทบกระจกเงาระนาบ M สะท้องลงในน้ำในหินนั้นให้ทรงกับแกนของทรงกระบอก

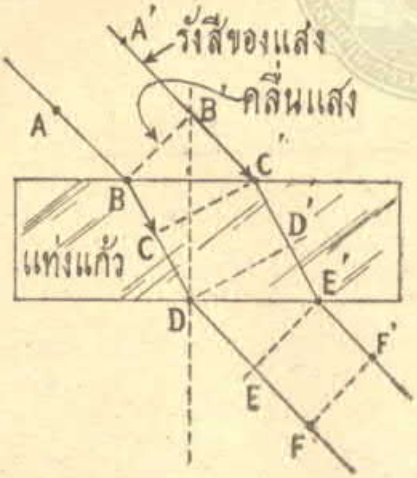


รูป 115 แสดงการหักเหของแสง
เมื่อผ่านเข้าไปในน้ำ

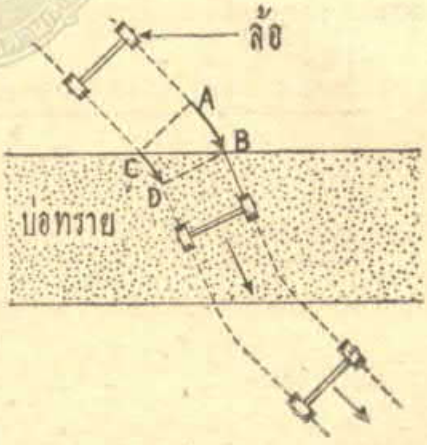
3) สังเกตดูลำแสงที่ผ่านเข้าไปในน้ำจะหักเหเข้าหาเส้นปรกติที่ขีดไว้ข้างหิบ ดังรูป 115 แสดงว่าแสงเมื่อผ่านตัวกลางต่างชนิดกันมีการหักเห

4) ถ้าเราอ่านมุมตกกระทบและมุมหักเหได้ ก็จะนำไปคิดหาตรรชนีหักเหจากอากาศไปสู่น้ำ และจากน้ำไปสู่อากาศ ได้ด้วย

ทำไมแสงจึงมีการหักเหเมื่อผ่านเข้าไปในตัวกลางต่างชนิดกัน ขอให้คำอธิบายสั้นๆ เพราะเหตุว่าขณะที่แสงผ่านตัวกลางต่างชนิดกันนั้น จะมีความเร็วเปลี่ยนไปจากเดิมคือเมื่อผ่านเข้าสู่ตัวกลางที่อัย แสงว่าจะมีความเร็วน้อยลง และเมื่อผ่านเข้าสู่ตัวกลางที่โปร่งแสงว่าจะมีความเร็วมากขึ้น ดังรูป 116



รูป 116
แสงหักเหเมื่อผ่านตัวกลาง
ต่างชนิดกัน



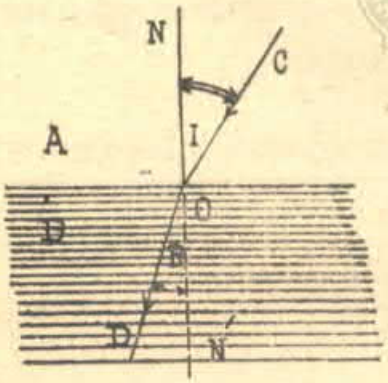
รูป 117
การทดลองเปรียบเทียบว่า ทำไมแสงจึง
หักเหเมื่อผ่านตัวกลางต่างชนิดกัน

การทดลองเปรียบเทียบ ทดลองได้ดังรูป 117 โดยชุดข่ายสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 6″×10″ ขึ้น 1 ข่าย แล้วเอาทรายใส่ เกลี่ยทรายให้เสมอปากข่าย เอาแกนด้ายหลอดหรือลวดคู่หนึ่งทาบเพลาร่วมกัน ลากข้ามข่ายทรายนั้นตามแนวเฉียงกับด้านข้างของข่าย เราจะแลเห็นแนวที่แกนด้วยหลอดเคลื่อนไปมีลักษณะหักเหเข้าหาเส้นปรกติเมื่อผ่านลงข่ายทราย และหักเหออกเมื่อขึ้นจากข่ายทราย ที่เป็นเช่นนั้นก็เพราะเหตุว่า ความเร็วเปลี่ยนไปไม่พร้อมกัน

กฎของการหักเหของแสง มี 2 ข้อด้วยกัน

1. รังสีตกกระทบ เส้นปรกติ และ รังสีหักเห จะอยู่ในระนาบเดียวกันเสมอ โดยรังสีตกกระทบกับรังสีหักเหอยู่คนละข้างของเส้นปรกติ ดังรูป 118

2. อัตราส่วนระหว่าง Sine ของมุมตกกระทบ กับ sine ของมุมหักเหของตัวกลางคู่เดียวกันย่อมมีค่าคงตัวเสมอ



รูป 118
การอธิบายกฎของการหักเหของแสง

จากรูป 118 ตามกฎข้อ 2

$$\frac{\text{sine ของมุมตกกระทบ}}{\text{sine ของมุมหักเห}} = \frac{\text{sine } \hat{I}}{\text{sine } \hat{R}} = \text{ค่าคงตัว}$$

หรือ = ดรรชนีหักเหระหว่างตัวกลางคู่นั้น

$= {}_{A}\mu_{B}$

ดรรชนีหักเห (Refractive Index) ดรรชนีหักเหของตัวกลางคู่หนึ่ง คือ อัตราส่วนระหว่าง sine ของมุมตกกระทบในตัวกลางอันหนึ่ง กับ sine ของ

มุมหักเหในตัวกลางอีกอันหนึ่ง หรือ คือ อัตราส่วนระหว่างความเร็วของแสงในตัวกลางอันแรก กับความเร็วของแสงในตัวกลางอันหลัง นั่นคือ

ดรรชนีหักเหระหว่างตัวกลาง A กับ B $= \frac{\text{sine ของมุมตกกระทบในตัวกลาง A}}{\text{sine ของมุมหักเหในตัวกลาง B}}$

จากรูป 118 $\quad {}_A\mu_B = \frac{\sin \hat{I}}{\sin \hat{R}}$ ..... สูตร 12

หรือ ดรรชนีหักเหระหว่างตัวกลาง A กับ B $= \frac{\text{ความเร็วของแสงในตัวกลาง A}}{\text{ความเร็วของแสงในตัวกลาง B}}$

$${}_A\mu_B = \frac{V_A}{V_B}$$ ..... สูตร

ดรรชนีหักเหสัมบูรณ์ (Absolute refractive index) หรือ ดรรชนีหักเหแท้จริงของตัวกลางใด ๆ คือ ดรรชนีหักเหที่ได้จากสุญญากาศ (Vacuum) ไปสู่ตัวกลางนั้น ๆ

ดังนั้น ดรรชนีหักเหสัมบูรณ์ของตัวกลาง A $= \frac{\text{ความเร็วของแสงในสุญญากาศ}}{\text{ความเร็วของแสงในตัวกลาง A}}$

$$\therefore \quad {}_V\mu_A = \frac{V \text{ ในสุญญากาศ}}{V_A}$$ .....สูตร13

* ตามปรกติดรรชนีหักเหที่กล่าวถึงกันอยู่นั้น คือจากอากาศ (ที่ 0° ซ, 760 มม.) ไปสู่ตัวกลาง ด้วยมีค่าต่างจากดรรชนีหักเหสัมบูรณ์ไม่มากนัก คือ สำหรับตัวกลางใด ๆ ก็ตาม

$\frac{\mu \text{ จากสุญญากาศ}}{\mu \text{ จากอากาศ}}$ = 1.00029 .....สูตร 14

เพราะฉะนั้นเมื่อต้องการ μ จากสุญญากาศของตัวกลางใด ก็ให้เอา 1.00029 คูณ μ จากอากาศของตัวกลางนั้น

สำหรับการเขียนดรรชนีหักเหระหว่างตัวกลางคู่หนึ่ง ๆ เขาเขียนย่อ ๆ ดังนี้ เช่น

จากอากาศไปสู่น้ำ เขียน $_{a}\mu_{w}$

และจากน้ำไปสู่อากาศ เขียน $_{w}\mu_{a}$

ฯลฯ

ตัวอย่างที่ 1 ถ้าดรรชนีหักเหจากอากาศไปสู่แก้วเป็น 1.5 จงหาความเร็วของแสงในแก้ว ถ้าความเร็วของแสงในอากาศ = 300,000,000 เมตรต่อวินาที

วิธีทำ จาก สูตร $_{A}\mu_{B} = \frac{V_A}{V_B}$

$_{A}\mu_{B}$ เป็นดรรชนีหักเหจากอากาศไปสู่แก้ว = 1.5

V_A เป็นความเร็วของแสงในอากาศ = 300,000,000 เมตรต่อวินาที

และ V_B เป็นความเร็วของแสงในแก้ว = ? เมตรต่อวินาที

$$\therefore \quad 1.5 = \frac{300,000,000}{V_B}$$

$$\text{และ} \quad V_B = \frac{300,000,000}{1.5}$$

ดังนั้นความเร็วของแสงในแก้ว = 200,000,000 เมตรต่อวินาที

ตอบ 200,000,000 เมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่ 2 ถ้าดรรชนีหักเหของน้ำเป็น 1.33 จงหาดรรชนีหักเหสัมบูรณ์ของน้ำ

วิธีทำ จาก สูตร $\frac{\mu \text{ จากสุญญากาศ}}{\mu \text{ จากอากาศ}} = 1.00029$

μ จากสุญญากาศของน้ำ = ?

μ จากอากาศของน้ำ = 1.33

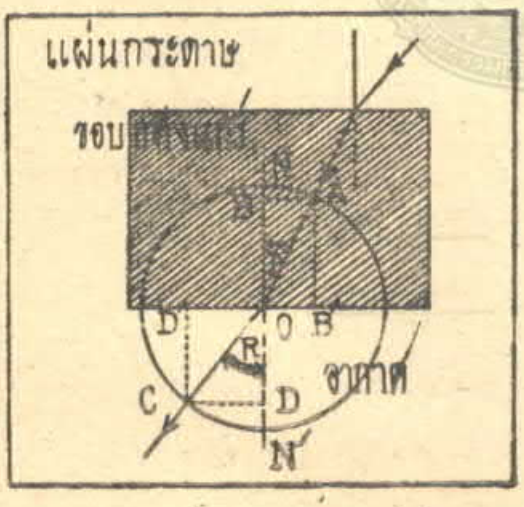
$\therefore \frac{\mu \text{ จากสุญญากาศของน้ำ}}{1.33} = 1.00029$

$\therefore \mu$ จากสุญญากาศของน้ำ $= 1.00029 \times 1.33$

$= 1.3303857$

ตอบ ดรรชนีหักเหสัมบูรณ์ของน้ำ = 1.3304

การหาดรรชนีหักเห เราจะหาได้อย่างเดียวกับการทดลองที่แสดงว่าแสงมีการหักเหเมื่อผ่านตัวกลางต่างชนิดกัน ดังกล่าวมาแล้ว แต่ **เราต้องมีการวัด และการคำนวณเพิ่มขึ้น** เช่น กำหนดให้หา μ ของแก้วชนิดหนึ่งไปสู่อากาศ เราก็นำแท่งแก้วมาหาตามรูป 114 ก. และ ข. เมื่อได้ผลแล้ว จะคำนวณหา $g\mu_a$ ได้โดยวิธีต่าง ๆ ดังนี้



รูป 119
แสดงการหา $g\mu_a$ โดยวิธีต่าง ๆ

วิธีที่ 1 วัดมุมมาคำนวณ ดูรูป 119

$\hat{I}$ เป็นมุมตกกระทบภายในแท่งแก้ว

$\hat{R}$ เป็นมุมหักเหเมื่อแสงออกมาสู่อากาศ

$\therefore$ เราวัดมุม $\hat{I}$ และ $\hat{R}$ แล้วหาค่าของ $\sin \hat{I}$ และ $\sin \hat{R}$ จากตารางตรีโกณมิติ

$\therefore g\mu_a = \frac{\sin \hat{I}}{\sin \hat{R}}$

$= ?$

วิธีที่ 2 วัดระยะมาคำนวณ

จากรูป 119 เอาจุดตกกระทบ O เป็นจุดศูนย์กลางรัศมีพอสมควร เขียนวงกลมวงหนึ่งตัดรังสีตกกระทบที่จุด A และรังสีหักเหที่จุด C จาก A และ C ลากเส้นตั้งฉากกับเส้นปรกติ NN' ที่จุด B และ D ตามลำดับ วัดระยะ AB และ CD

ดังนั้น $g\mu_a = \frac{AB}{CD} = ?$

พิสูจน์ ตามรูป 119 $g\mu_a = \frac{\sin \hat{I}}{\sin \hat{R}}$

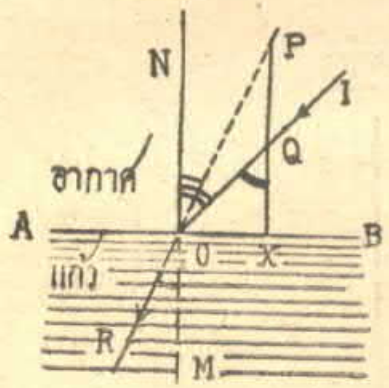
$$= \frac{AB}{OA} / \frac{CD}{OC}$$

$$= \frac{AB}{OA} \times \frac{OC}{CD}$$

$$= \frac{AB}{CD} \quad (\because OA \text{ และ } OC \text{ เป็นรัศมีวงกลมวงเดียวกัน})$$

จากจุด A และ C ให้ลากเส้นตั้งฉากกับผิวระหว่างตัวกลาง โดยการพิสูจน์ทำนองเดียวกัน เราจะได้ $g\mu_a = \frac{OB'}{OD'}$

วิธีที่ 3 วัดระยะมาคำนวณ สมมุติให้หา $_a\mu_g$ บ้าง



รูป 120
แสดงการหา $_a\mu_g$ โดยวิธีวัดระยะแล้วคำนวณ

ตามรูป 120

ให้ AB เป็นผิวระหว่างตัวกลาง คือแก้วกับอากาศ

X เป็นจุด ๆ หนึ่งบน AB

O เป็นจุดตกกระทบของรังสี IO

OR เป็นรังสีหักเหของรังสี IO

NOM เป็นเส้นปรกติที่จุด O

และ XP เป็นเส้นปรกติอีกเส้นหนึ่ง ตัด OI ที่จุด Q และตัด RO ที่ต่อออกไปที่จุด P

วิธีทำ วัดระยะ OP และ OQ มาคำนวณจะได้

$$_a\mu_g = \frac{OP}{OQ} = ?$$

พิสูจน์ $\because \hat{ION} = \hat{XQO}$ (ท.บ. 14)

$\hat{MOR} = \hat{NOP}$ (ท.บ. 3)

$= \hat{OPX}$ ด้วย (ท.บ. 14)

และ $_a\mu_g = \frac{\sin \hat{ION}}{\sin \hat{MOR}}$

$= \frac{\sin \hat{XQO}}{\sin \hat{OPX}}$

$= \frac{\frac{OX}{OQ}}{\frac{OX}{OP}}$

$= \frac{OX}{OQ} \times \frac{OP}{OX}$

$= \frac{OP}{OQ}$

ตารางดรรชนีหักเหของของบางอย่าง

เพชร	2.42	กรดซัลฟุริก	1.43	น้ำแข็ง	1.31
แก้วฟลินท์	1.65	กรดไฮโดรคลอริก	1.41	อากาศ	1.00029
แก้วคราวน์	1.51	อัลโกฮอล	1.37	ไฮโดรเจน	1.00014
แก้วธรรมดา	1.53	เบนซีน	1.50	ออกซิเจน	1.00027
สารส้ม	1.45	อีเทอร์	1.36	ไนโตรเจน	1.00030
คาร์บอนไดซัลไฟด์	1.67	น้ำ	1.333		

เท่าที่ควรจำ - สำหรับการคำนวณก็มี

$_a\mu_w$	$= \frac{4}{3}$	$_a\mu_g$	$= \frac{3}{2}$
$_w\mu_a$	$= \frac{3}{4}$	$_g\mu_a$	$= \frac{2}{3}$

ถ้าเรารู้ μ ของตัวกลางคู่หนึ่ง เช่น $_a\mu_w = \frac{4}{3}$ แล้ว เราจะหาค่า $_w\mu_a$ ได้ โดยเอาค่า $_a\mu_w$ ไปหาร 1.

$$\therefore \ _w\mu_a = \frac{1}{\frac{4}{3}}$$

$$= \frac{3}{4}$$

วิธีเขียนรูปแสดงการหักเหของแสงจากรังสีตกกระทบ และดรรชนีหักเห

กำหนดให้ ต้องบอกขนาดมุมตกกระทบ และดรรชนีหักเหระหว่างตัวกลางคู่นั้นให้ แล้วเขียนรูปโดยอาศัยหลักจากวิธีที่ 2 และ 3 ในการหาดรรชนีหักเหนั้น ในการนี้เรา ต้องพิสูจน์ให้เห็นด้วย ว่าวิธีเขียนนั้นถูกต้องแล้ว วิธีเขียนมี 3 วิธี คือ

วิธีที่ 1 ใช้หลักจากวิธีที่ 2 ตัวอย่าง เช่น

ก) กำหนดให้รังสีตกกระทบทำมุม ๆ หนึ่ง และดรรชนีหักเหจากตัวกลางโปร่งแสงไป ตัวกลางอับแสง $= \frac{5}{3}$ จงเขียนรังสีหักเห

วิธีเขียน ลากเส้นตรง XY ให้แทนผิวระหว่างตัวกลาง

ลากเส้นปรกติ NN' ตัด XY ที่จุดตกกระทบ O

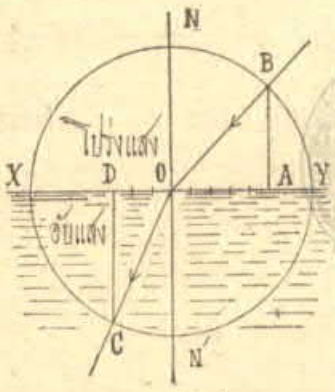
ลากรังสีตกกระทบ BO ในตัวกลางโปร่งแสง ทำมุมกับเส้นปรกติ NN' ให้เท่ากับมุมที่กำหนดให้

เอาจุดตกกระทบ O เป็นจุดศูนย์กลางรัศมีพอสมควร เขียนวงกลมตัด BO ที่จุด B

จาก B ลาก BA มาตั้งฉากกับ XY ที่จุด A

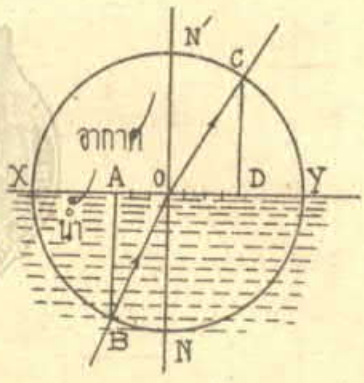
แบ่ง OA ออกไป 5 หน่วยเท่า ๆ กัน ให้ D เป็นจุด ๆ หนึ่งบน OX มีระยะห่างจากจุด O เท่ากับ 3 หน่วย

จาก D ลาก DC ตั้งฉากกับ XY ไปตัดเส้นรอบวงของวงกลมที่จุด C แต่คนละข้างกับ AB ลากเส้น OC ดังนั้น OC จะเป็นรังสีหักเหของรังสีตกกระทบ BO ดังรูป 121



รูป 121 วิธีเขียน

รังสีหักเหจากสิ่งที่กำหนดให้ $_{t}\mu_{o} = \frac{5}{3}$



รูป 122 วิธีเขียน

รังสีหักเหจากสิ่งที่กำหนดให้ $_{w}\mu_{a} = \frac{3}{4}$

ข) กำหนดให้รังสีตกกระทบทำมุม ๆ หนึ่งและ $_{w}\mu_{a} = \frac{3}{4}$ จงเขียนรังสีหักเหจากน้ำไปสู่อากาศ

วิธีเขียน ทำตามวิธีในรูป 121 นอกจากการแบ่งระยะ OA = 3 หน่วยเท่า ๆ กัน และแบ่งระยะ OD = 4 หน่วย ดังรูป 122

วิธีพิสูจน์ ทั้ง 2 รูป

$$\therefore \ {}_t\mu_o \text{ และ } {}_w\mu_a = \frac{\sin \hat{NOB}}{\sin \hat{NOC}}$$

$$= \frac{\sin \hat{OBA}}{\sin \hat{OCD}} \quad (\text{ท.บ. } 14)$$

$$= \frac{OA}{OB} / \frac{OD}{OC}$$

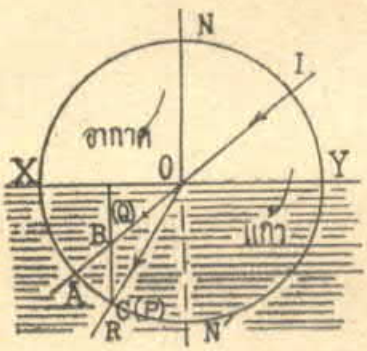
$$= \frac{OA}{OB} \times \frac{OC}{OD}$$

$$= \frac{OA}{OD} \quad (\text{เพราะ } OB = OC)$$

$\therefore$ ในรูป 121 ${}_t\mu_o = \frac{5}{3}$

ในรูป 122 ${}_w\mu_a = \frac{3}{4}$

วิธีที่ II โดยใช้วิธีหาตรรชนีหักเหแบบที่ 3 เช่นกำหนดมุมตกกระทบให้ และกำหนด ${}_a\mu_g = \frac{3}{2}$ จงเขียนรังสีหักเหจากอากาศไปสู่แก้ว



รูป 123
วิธีเขียนรังสีหักเหจากอากาศสู่แก้ว

วิธีเขียน ลากรังสีตกกระทบ IO ทำมุมตกกระทบ ION บนผิว XY ระหว่างอากาศกับแก้วให้เท่ากับมุมที่กำหนดให้ แล้วต่อเลยออกไปถึงจุด A แบ่ง OA ออกเป็น 3 ส่วนเท่า ๆ กัน ใช้ O เป็นจุดศูนย์กลาง รัศมี OA เขียนวงกลมวงหนึ่ง

จากจุด B ซึ่งเป็นจุดตรงระยะ 2 ส่วนจาก O ลากเส้นตั้งฉากกับ XY และตัดเส้นรอบวงของวงกลมที่จุด C

ลาก OR ผ่านจุด C

ดังนั้น OR จะเป็นรังสีหักเหจากอากาศสู่แก้วของรังสีตกกระทบ IO ดังรูป 123

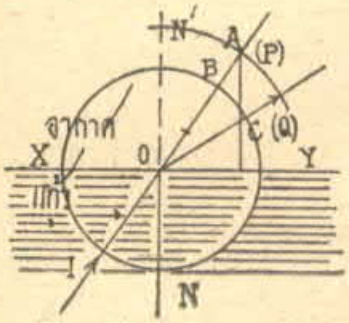
พิสูจน์ $\therefore \quad {}_a\mu_g = \frac{OC}{OB}$ (ดังได้พิสูจน์แล้ว)

$\therefore \quad {}_a\mu_g = \frac{3}{2}$

เมื่อ มุมตกกระทบ ION เท่ากับมุมที่กำหนดให้

ดังนั้น OR ก็เป็นรังสีหักเหในแก้วของรังสีตกกระทบ IO ในอากาศ

วิธีที่ III โดยใช้วิธีหาดรรชนีหักเหแบบที่ 3 เช่นเดียวกัน โดยกำหนดมุมตกกระทบให้ และกำหนด $g\mu_a = \frac{2}{3}$ จงเขียนรังสีหักเหจากแก้วไปสู่อากาศ



รูป 124
วิธีเขียนรังสีหักเหจากแก้วสู่อากาศ

วิธีเขียน ลากรังสีตกกระทบ IO ทำมุมตกกระทบ ION ยนผิว XY ระหว่างแก้วกับอากาศให้เท่ากับมุมที่กำหนดให้ แล้วต่อเลยออกไปจนถึงจุด A

แบ่ง OA ออกเป็น 3 ส่วนเท่า ๆ กัน ใช้ O เป็นจุดศูนย์กลาง รัศมี OB ยาว 2 ส่วน เขียนวงกลมวงหนึ่ง

จากจุด A ลากเส้นตรงตั้งฉากกับ XY ตัดเส้นรอบวงของวงกลมที่จุด C *ถ้าไม่ตัดเส้นรอบวงของวงกลมแสดงว่า* เกิดการสะท้อนกลับหมด ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

ลากเส้นตรง OC ดังนั้น OC จะเป็นรังสีหักเหจากแก้วไปสู่อากาศของรังสีตกกระทบ IO ดังรูป 124

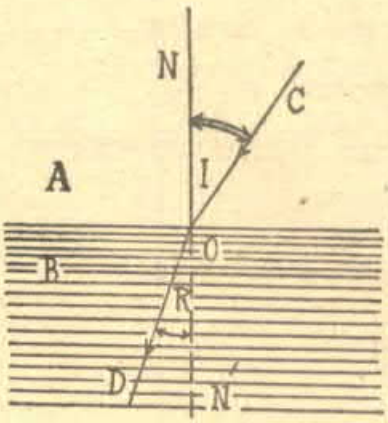
พิสูจน์ $\because \quad {}_{g}\mu_{a} = \frac{CO}{OA}$ (ดังได้พิสูจน์แล้ว)

$\therefore \quad {}_{g}\mu_{a} = \frac{2}{3}$

เมื่อ มุมตกกระทบ ION เท่ากับมุมที่กำหนดให้แล้ว

ดังนั้น OC ก็จะเป็นรังสีหักเหในอากาศของรังสีตกกระทบ IO ในแก้ว

ดรรชนีหักเหจากตัวกลาง A ไปสู่ตัวกลาง B เป็นส่วนย้อนกลับของดรรชนีหักเหจากตัวกลาง B ไปสู่ตัวกลาง A



รูป 125 พิสูจน์ว่า ${}_{A}\mu_{B} = \frac{1}{{}_{B}\mu_{A}}$

กำหนดให้ เมื่อแสงเดินจากตัวกลาง A ไปสู่ตัวกลาง B นั้น

$\hat{I}$ เป็นมุมตกกระทบ

และ $\hat{R}$ เป็นมุมหักเห ดังรูป 125

จะต้องพิสูจน์ว่า ${}_{A}\mu_{B} = \frac{1}{{}_{B}\mu_{A}}$

พิสูจน์ $\because$ เมื่อ แสงเดินจาก A สู่ B

$${}_{A}\mu_{B} = \frac{\sin \hat{I}}{\sin \hat{R}} \quad \ldots\ldots\ldots(1)$$

และถ้าแสงเดินจาก B สู่ A

$${}_{B}\mu_{A} = \frac{\sin \hat{R}}{\sin \hat{I}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots(2)$$

$$(1) \times (2) \therefore {}_{A}\mu_{B} \times {}_{B}\mu_{A} = \frac{\sin \hat{I}}{\sin \hat{R}} \times \frac{\sin \hat{R}}{\sin \hat{I}}$$

แต่ $\frac{a}{a} = \frac{d}{d}$

$\therefore \quad {}_A\mu_B \times {}_B\mu_C \times {}_C\mu_A = 1$

$$\frac{1}{{}_C\mu_A} = {}_A\mu_B \times {}_B\mu_C$$

นั่นคือ $\quad {}_A\mu_C = {}_A\mu_B . {}_B\mu_C$ .....สูตร 16

ตัวอย่าง ถ้า ${}_a\mu_g = \frac{3}{2}$ และ ${}_a\mu_w = \frac{4}{3}$. จงหา ${}_g\mu_w$

วิธีทำ จาก สูตร $\quad {}_A\mu_C = {}_A\mu_B \, . \, {}_B\mu_C$

ให้ A แทนแก้ว B แทนอากาศ และ C แทนน้ำ

$$\therefore \quad {}_g\mu_w = {}_g\mu_a \times {}_a\mu_w$$

$$= \frac{1}{{}_a\mu_g} \times {}_a\mu_w$$

ในทำนอง ${}_g\mu_w = ?$

${}_a\mu_g = \frac{3}{2}$ และ ${}_a\mu_w = \frac{4}{3}$

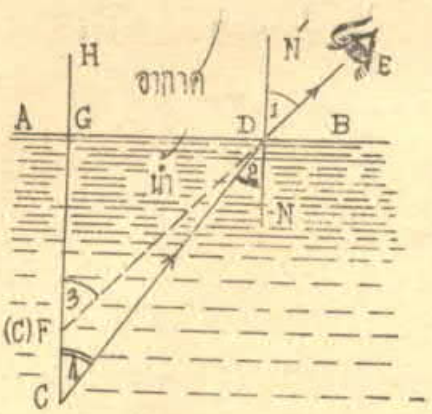
$${}_g\mu_w = \frac{1}{\frac{3}{2}} \times \frac{4}{3}$$

$$= \frac{2}{3} \times \frac{4}{3}$$

$$= \frac{8}{9}$$

ตอบ ${}_g\mu_w = \frac{8}{9}$

ความลึกปรากฏของบ่อน้ำเท่ากับ $\frac{3}{4}$ ของความลึกแท้จริง เราจะพิสูจน์ได้ดังต่อไปนี้



รูป 128 พิสูจน์ว่าความลึกปรากฏของบ่อน้ำ $= \frac{3}{4}$ ความลึกแท้จริง

กำหนดให้ C เป็นจุดหนึ่งใต้ก้นบ่อน้ำ ซึ่งอยู่ลึกจากผิวน้ำ AB = CG E เป็นตำแหน่งที่ตาอยู่โดยมองผ่านจุดตกกระทบ D เห็นจุด C อยู่ตื้นขึ้นมาอยู่ที่จุด F และอยู่ลึกจากผิวน้ำ = FG, NDN′ เป็นเส้นปรกติที่จุด D $\hat{2}$ เป็นมุมตกกระทบในน้ำที่จุด D และ $\hat{1}$ เป็นมุมหักเหในอากาศที่จุด D ดังรูป 128

จะต้องพิสูจน์ว่า $FG = \frac{3}{4} CG$

พิสูจน์ $\because \hat{1} = \hat{3}$ และ $\hat{2} = \hat{4}$ (*ทบ.* 14)

$$\text{และ} \quad {}_{w}\mu_{a} = \frac{\sin \hat{2}}{\sin \hat{1}}$$

$$= \frac{\sin \hat{4}}{\sin \hat{3}}$$

$$= \frac{DG}{CD} / \frac{DG}{FD}$$

$$= \frac{FD}{CD}$$

ในการมองของนั้นจุด D กับจุด G ใกล้กันมาก จนพอจะนับว่าทับกันได้

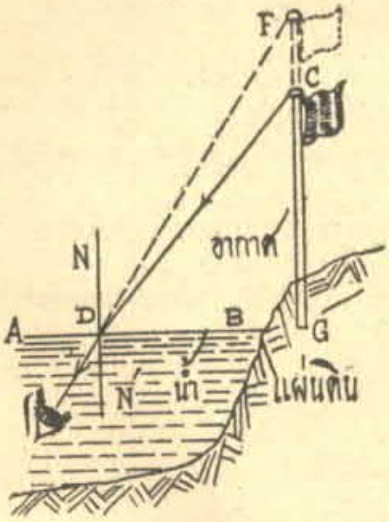
นั่นคือ $FD = FG$ และ $CD = CG$

$$\therefore \quad {}_{w}\mu_{a} = \frac{FG}{CG}$$

$$\therefore \quad FG = {}_{w}\mu_{a} \cdot CG$$

$$= \frac{3}{4} CG$$

ถ้าเราอยู่ใต้น้ำ ก็จะสามารถพิสูจน์และทดลองได้ในทำนองเดียวกันว่า สิ่งที่อยู่บนบกหรือในอากาศจะสูงขึ้นเป็น $\frac{4}{3}$ เท่าของความสูงแท้จริง ดังรูป 130



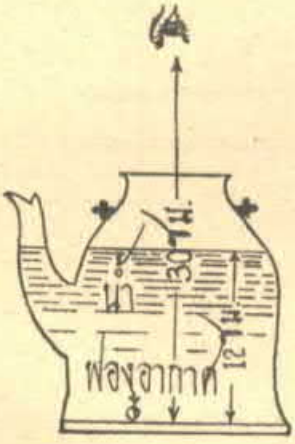
หรือ ความสูงปรากฏเห็นจากใต้น้ำ $= \frac{4}{3}$ ของความสูงแท้จริง และจะได้เป็นสูตรทั่วไปว่า

$$v = {}_a\mu_1 \cdot u \quad \text{.....สูตร 19}$$

รูป 130 เมื่อมองจากใต้น้ำ ของบนบกจะสูงเป็น $\frac{4}{3}$ ของความสูงแท้จริง

ตัวอย่าง ถ้าน้ำในกาลึก 12 ซม. เมื่อเรามองตามแนวเส้นปรกติจะแลเห็นฟองอากาศปรากฏอยู่ที่ก้นกาน้ำ และตาอยู่ห่างจากก้นกา 30 ซม. จงหาว่าฟองอากาศจะปรากฏว่าอยู่ห่างเท่าใด

วิธีทำ จากสูตร $v = {}_1\mu_a \cdot u$



รูป 131

v เป็นความลึกปรากฏของฟองอากาศ $=$? ซม.

${}_1\mu_a$ เป็น ${}_w\mu_a = \frac{3}{4}$

และ u เป็นความลึกแท้จริงของฟองอากาศ $= 12$ ซม.

$\therefore v = \frac{3}{4} \times 12$

$\therefore$ ความลึกปรากฏของฟองอากาศ $= 9$ ซม.

$\therefore$ ตาอยู่ห่างจากก้นกา 30 ซม. และน้ำลึก 12 ซม.

$\therefore$ ตาอยู่ห่างจากผิวน้ำ $= 30 - 12$ ซม.

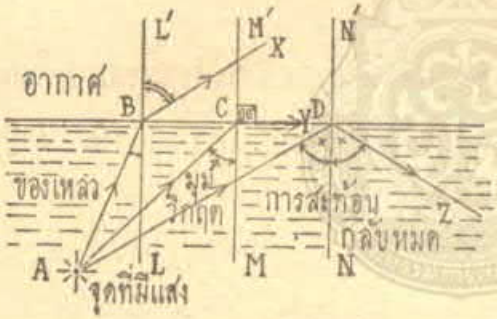
$= 18$ ซม.

∴ ฟองอากาศระปรากฏอยู่ห่างตา = 18+9 ซม.

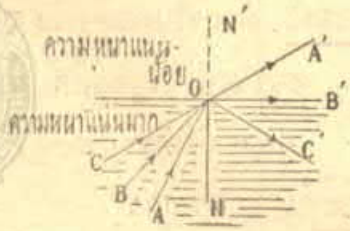
= 27 ซม.

ตอบ 27 ซม.

มุมวิกฤต (Critical angle) คือ มุมตกกระทบที่พอดีทำให้รังสีหักเหทาบไปตามผิวระหว่างตัวกลาง หรือ มุมตกกระทบที่พอดีทำให้มุมหักเหเป็นมุมฉากกับเส้นปรกติ เกิดขึ้นได้เมื่อแสงเดินทางจากตัวกลางที่มีความหนาแน่นมากสู่ตัวกลางที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า เช่น จากน้ำสู่อากาศ จากแก้วสู่อากาศ เป็นต้น ดังรูป 132 และ 133



รูป 132
การกระจายแสงของจุดที่มีแสงที่ทำให้เกิด
มุมวิกฤตและการสะท้อนกลับหมด



รูป 133
มุมวิกฤตและการสะท้อนกลับหมด
ที่เกิด ณ จุดตกกระทบจุดเดียวกัน

ตามรูป 132 A เป็นจุดที่มีแสงจุดหนึ่งอยู่ในตัวกลางที่มีความหนาแน่นมาก กระจายแสงออกโดยรอยแสงเหล่านี้

ABL เป็นมุมตกกระทบ มุม L'BX เป็นมุมหักเห

ACM เป็นมุมตกกระทบ มุม M'CY เป็นมุมหักเห = 90°

ADN เป็นมุมตกกระทบ มุม NDZ เป็นมุมสะท้อน

ดังนั้น มุมตกกระทบ ACM ที่ทำให้เกิดมุมหักเห $= 90^\circ$ พอดี นี้ คือ มุมวิกฤต

ตามรูป 133 AO, BO และ CO เป็นรังสีตกกระทบ 3 รังสี ณ จุดตกกระทบ O จุดเดียวกันภายในตัวกลางที่มีความหนาแน่นมาก

แต่ รังสี BO เป็นรังสีตกกระทบที่พอดีทำให้มุมหักเห $N'OB' = 90^\circ$

$\therefore$ มุมตกกระทบ BON เป็นมุมวิกฤต

จากรูปทั้งสอง จะเห็นว่า

1. มุมตกกระทบที่เล็กกว่ามุมวิกฤต จะมีมุมหักเหในตัวกลางที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า

2. มุมตกกระทบที่โตกว่ามุมวิกฤต จะไม่มีแสงผ่านออกจากตัวกลางนั้นเลย เพราะเกิดการสะท้อนกลับหมด

การสะท้อนกลับหมด (Total reflection) คือ การที่รังสีของแสงทำมุมตกกระทบโตกว่ามุมวิกฤต แล้วแสงนี้จะสะท้อนกลับเข้าไปในตัวกลางเดิม ตามกฎของการสะท้อนของแสง ดังรูป 132 และ 133 AD และ CO เป็นรังสีที่ทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมดตามลำดับ

การทดลอง ใช้ อุปกรณ์ต่อไปนี้ อ่างแก้วใส่น้ำใส 1 ใบ ไฟฟ้าเดินทาง 1 ชุด กระจกเงาระนาบเล็ก ๆ 1 ชิ้น ห้องมืด

วิธีทดลอง ให้ทำเป็นขั้น ๆ ดังนี้

1. ปิดหน้าไฟฟ้าเดินทาง เจาะรูเล็กตรงกลางเพื่อให้แสงผ่านออก 1 รู

2. เอากระจกเงาวางหงายไว้ที่ก้นอ่างน้ำ ให้ชิดไปทางด้านหนึ่ง มีหนุนกระจกเงาเอียงทำมุมต่าง ๆ กับผิวอ่างได้

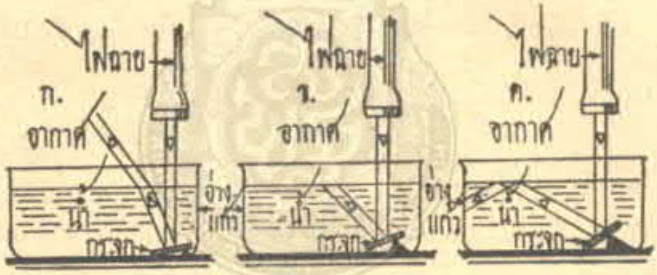
3. ฉายไฟตามแนวยืน ลงไปกระทบกับกระจกเงา ซึ่งครั้งแรกวางหงายไว้

4. หักกระจกเงาให้เอียงทำมุมกับกันอย่างให้โตขึ้นทุกที และสังเกตแนวของลำแสงที่สะท้อนจากกระจกเงา จะปรากฏดังนี้

ก. ครั้งแรกจะสะท้อนกลับตามแนวเดิม แล้ว หักเหสู่อากาศมีมุมหักเหโตขึ้นทุกที ดังรูป 134 ก.

ข. เมื่อกระจกเอียงถึงมุมหนึ่ง ลำแสงจะหักเหทาบไปตามผิวน้ำ ดังรูป 134 ข.

ค. เมื่อกระจกเอียงทำมุมกับลำแสงโตขึ้นอีก ลำแสงจะสะท้อนที่ผิวน้ำกลับเข้าสู่ตัวกลางเดิมอีก คือเกิด การสะท้อนกลับหมด ดังรูป 134 ค.



รูป 134 ก. รูป 134 ข. รูป 134 ค.

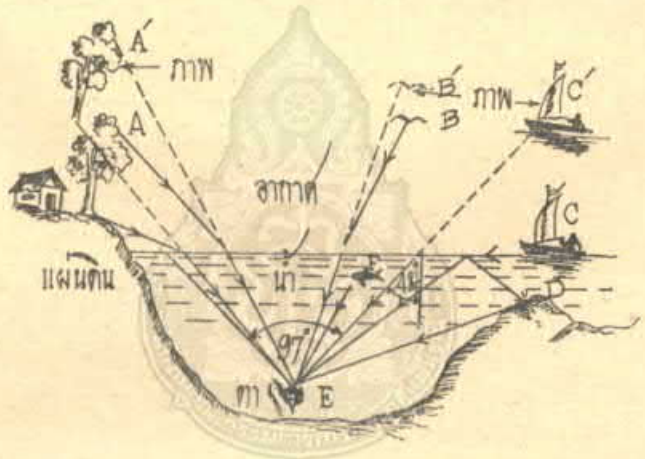
แสงหักเหออกจากน้ำ แสงหักเหที่มุมวิกฤต การสะท้อนกลับหมดของแสง

มุมวิกฤตของตัวกลางต่าง ๆ ย่อมมีค่าต่างกันไปตามชนิดของตัวกลาง ดังตารางที่แสดงไว้ข้างชนิด

ตารางมุมวิกฤต

น้ำ	$48\frac{1}{2}^\circ$	แก้วธรรมดา	42°
อัลโกฮอล	47°	แก้วฟลินต์	37°
ทับทิม	35°	เพชร	24°

เนื่องจากมีมุมวิกฤต และการสะท้อนกลับหมดในตัวกลางที่มีความหนาแน่นมากกว่า ฉะนั้นถ้าเราอยู่ในตัวกลางนั้น จะแลเห็นสิ่งต่าง ๆ ที่อยู่ในอากาศได้ ในปริเวณรูปกรวยกลมในตัวกลางนั้นที่มีมุมยอดที่ตาเราเป็น 2 เท่าของมุมวิกฤตของตัวกลางนั้น เช่นน้ำมีมุมวิกฤต เท่ากับ $48\frac{1}{2}^\circ$ ถ้าเราอยู่ในน้ำ จะแลเห็นสิ่งที่อยู่ในอากาศได้ในปริเวณจำกัดเป็นรูปกรวยกลมที่มีมุมยอดที่ตา $= 2 \times 48\frac{1}{2}^\circ$ คือ 97° ดังรูป 135 ที่แสดงไว้



รูป 135

รูป แสดงขอบเขตจำกัดของการแลเห็นได้ของผู้อยู่ในน้ำมีมุมจำกัด $= 97^\circ$

เพราะฉะนั้นจึงทำให้แลเห็นสิ่งที่อยู่ในอากาศใกล้กันเข้ามา ดังภาพของ A, B และ C ในรูป 135 ซึ่งมาอยู่ที่ A', B' และ C' ตามลำดับ และจะแลเห็นสิ่งที่อยู่ในน้ำได้ 2 วิธี คือ เห็นโดยตรงกับเห็นโดยการสะท้อนกลับหมดที่ผิวน้ำ เช่นการแลเห็นจุด D เป็นต้น

รังสีตกกระทบที่ตั้งฉากกับผิวตัวกลางจะไม่มีการหักเหเลย เพราะ $\mu = \dfrac{\sin \hat{I}}{\sin \hat{R}}$

และเท่ากับสูญ, และจากจุดที่มีแสงแต่ละจุดมีรังสีตกกระทบเพียงจุดละรังสีเดียวเท่านั้น ดังรูป 129 จึงไม่ทำให้เห็นว่าวัตถุในน้ำอยู่ลึกเท่าที่เป็นจริง

วิธีหามุมวิกฤตของตัวกลางคู่หนึ่งโดยการคำนวณ จากสูตร $= \frac{\sin \hat{I}}{\sin \hat{R}}$

$\therefore$ อัตราส่วนของแสง μ ไปร่างแสง $= \frac{\text{sine ของมุมตกกระทบ}}{\text{sine ของมุมหักเห}}$

เมื่อมุมตกกระทบ = มุมวิกฤต และมุมหักเห = 90°

$$_{o}\mu_{t} = \frac{\text{sine มุมวิกฤต}}{\text{sine } 90^\circ}$$

$$= \frac{\text{sine มุมวิกฤต}}{1}$$

$\therefore$ sine มุมวิกฤต $= {}_{o}\mu_{t}$ .....สูตร 20

ตัวอย่าง กำหนดให้ ${}_{g}\mu_{a} = \frac{2}{3}$ และ $\sin 41^\circ 48' = 0.6667$ จงหามุมวิกฤตของแก้ว

วิธีทำ จากสูตร sine มุมวิกฤต $= {}_{o}\mu_{t}$

ในที่นี้ คือ sine ของมุมวิกฤตจากแก้วไปสู่อากาศ $= {}_{g}\mu_{a}$

$$= \frac{2}{3}$$

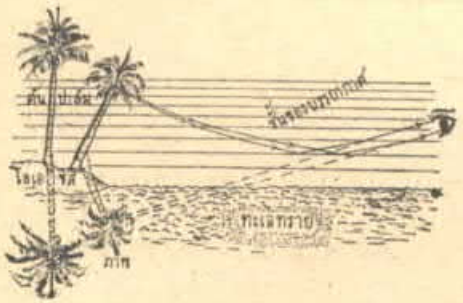
$$= 0.6667$$

$$= \sin 41^\circ 48'$$

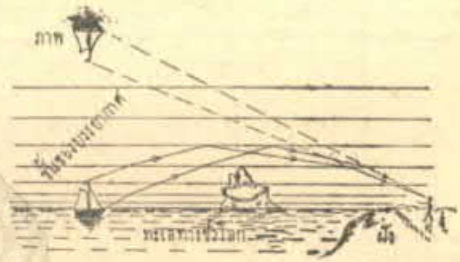
$\therefore$ มุมวิกฤตจากแก้ว $= 41^\circ 48'$

ตอบ $41^\circ 48'$

ต้นไม้ในทะเลทรายกลับเอียงลง ดังรูป 138 ด้วยอากาศชั้นล่างมีความหนาแน่นน้อย หรือเห็นเรือหงายท้องแล่นในอากาศ ในแถบขั้วโลกเหนือก็มีอากาศหนาจัด อย่างเดียวกับภาพที่แลเห็นในกระจกเงาระนาบ ดังรูป 139 ด้วยอากาศชั้นล่างมีความหนาแน่นมาก



รูป 138 มิราจในทะเลทราย



รูป 139 มิราจในทะเลแถบขั้วโลก

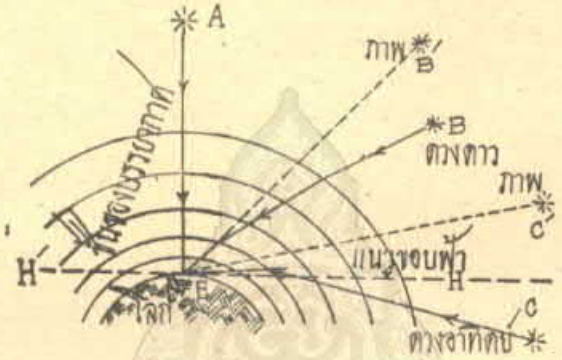
ของเหลวโปร่งใสชนิดที่ไม่ผสมกัน เมื่อเรา เอามาผสมกันแล้วเขย่า จะมองดูม้วและอับแสง เพราะของเหลวนั้นแตกเป็นเม็ด ๆ คละกัน แสงที่ผ่านเข้าไปเกิดการสะท้อนกลับไปกลับมา เหมือนอย่างเดียวกันกับที่แสงผ่านเข้าไปในก้อนน้ำแข็ง หรือกระจกที่ทุบละเอียดคละกัน

การหาตรรชนีหักเห ของเพชรหรือ พลอยเม็ดเล็กหรือสิ่งที่หาตรรชนีหักเหได้ยาก ใช้น้ำมันสองชนิดปนกันจนเมื่อเอาของนั้นใส่ลงไปแล้ว จะแลเห็นได้ยากหรือไม่แลเห็นเลย แล้วทดลองหา μ จากอากาศไปสู่น้ำมันผสมนั้นจะเท่ากับ μ ของของนั้น

ของต่างชนิดกันที่มี μ ใกล้เคียงกัน เมื่อวางเคียงกันจะแลเห็นได้ยาก หรือแลเห็นเป็นสิ่งเดียวกัน เช่นกาชต่าง ๆ ในอากาศ แก้วที่จมอยู่ในกลีเซอรีนเป็นต้น

เราอาจใช้ความจริงข้อนี้อธิบายถึงเรื่องการหายตัวได้ว่า ถ้าผู้ใดสามารถทำตัวให้มีดรรชนีหักเหเท่ากับอากาศได้แล้ว ก็จะหายตัวได้

การหักเหของแสงเมื่อผ่านชั้นของอากาศบนผิวโลก เพราะอากาศที่อยู่เหนือผิวโลกนั้นยิ่งสูงขึ้นไปจะยิ่งน้อยเข้าทุกที และแสงเมื่อผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกัน ก็จะเกิดการหักเห ทั้ง 2 ประการนี้จะทำให้ :-



รูป 140
การหักเหของแสงเมื่อผ่านชั้นของอากาศบนผิวโลก

1) ก. เราแลเห็นดวงอาทิตย์ได้ก่อนที่จะขึ้นพ้นระดับขอบฟ้า ในตอนเช้า

ข. เราแลเห็นดวงอาทิตย์ แม้ความจริงจะได้โคจรไปอยู่ต่ำกว่าระดับขอบฟ้าแล้ว ในตอนเย็น

ดังรูป 140 จุด C เป็นตำแหน่งที่ดวงอาทิตย์อยู่ และจุด C' เป็นตำแหน่งภาพของจุด C ที่เห็นได้ เพราะแสงหักเหมาเข้าตาเราด้วยผ่านชั้นของอากาศที่มีความหนาแน่นมากขึ้นทุกที

และขณะตาเราแลเห็นว่าดวงอาทิตย์ลับไปเร็วผิดปรกติก็เพราะเหตุว่า ขณะนั้นแสงอยู่เหนือระดับขอบฟ้าเพียงเล็กน้อย แต่เราแลเห็นดวงอาทิตย์ยังสูงอยู่ด้วย ระหว่างเวลานั้นมีการหักเหมาก เมื่อมันลดลงอีกเพียงเล็กน้อย แสงนั้น

ก็ลับระดับขอบฟ้าไปแล้ว จึงทำให้แลเห็นเช่นนั้น *อย่างเดียวกับดูของบนบกจากใต้น้ำ*

2. เราแลเห็นดวงอาทิตย์ ดวงจันทร์ หรือดวงดาว อยู่สูงกว่าที่เป็นจริง ยิ่งอยู่ต่ำมาก ก็ยิ่งผิดจากที่อยู่จริงมาก จะถูกต้องต่อเมื่ออยู่ตรงศีรษะ ด้วยแสงไม่มีการหักเห ดังรูป 140 ขณะอยู่ที่จุด C ผิดมาก อยู่ที่จุด B ผิดน้อยลง และอยู่ที่จุด A ไม่ผิดเลย

3. เราแลเห็นดวงอาทิตย์ และดวงจันทร์โตกว่าธรรมดา เมื่อแรกขึ้นและขณะตก อาจเนื่องด้วยขณะนั้นอากาศเหนือผิวโลก มีความหนาแน่นมากกว่าอากาศที่ผิวโลก ทำให้เราแลเห็นใกล้เข้ามาอย่างเดียวกับการที่แลเห็นของใกล้เข้ามาเมื่อมองผ่านแท่งแก้ว

4. เราแลเห็นดวงอาทิตย์หรือดวงจันทร์ เมื่อแรกขึ้นกับขณะตก มีขอบล่างโค้งน้อยกว่าขอบบน *อย่างรูปวีลิปติค* เพราะขอบล่างถูกยกขึ้นสูงกว่าขอบบน หรือขอบล่างเป็นอาร์คของวงกลมที่โตกว่าขอบบน

แบบฝึกหัดที่ 5

1. การหักเหของแสงคืออะไร เกิดขึ้นได้อย่างไร
2. ที่กล่าวว่า "แสงเดินทางเป็นเส้นตรง" นั้นเป็นความจริงเพียงใด และท่านจะแสดงความจริงข้อนั้นได้อย่างไร จงกล่าวมา 2 วิธี
3. เหตุใดเมื่อเราเอาก้นสลอมุ่งลงในน้ำ จึงแลเห็นก้นสลอหักงอขึ้นมา
4. อะไรเป็นเหตุให้เราแลเห็นสิ่งที่อยู่ในน้ำตื้นขึ้นมา
5. เหตุใดเราจึงแทงปลาในน้ำไม่ใคร่ถูกทั้ง ๆ ที่น้ำใสแลเห็นปลาได้ชัดเจน

6. จงอธิบายว่าทำไมเราจึงเห็นปลาที่อยู่ในน้ำโตกว่าที่เป็นจริง
7. ท่านจะมีวิธีทดลองให้เห็นจริงได้อย่างไรว่า เมื่อแสงผ่านแท่งแก้วมีการหักเหเกิดขึ้น และจงบอกด้วยว่าการหักเหนั้นมีลักษณะอย่างไร และวิธีทดลองนั้นยังจะให้ความจริงเกี่ยวกับการหักเหของแสงอย่างไรอีกบ้าง
8. ท่านจะทดลองได้อย่างไรบ้างว่า แสงมีการหักเหเมื่อผ่านลงในน้ำ หรือของเหลวใด ๆ
9. การหักเหของแสงจากตัวกลางที่โปร่งแสงกว่าไปสู่ตัวกลางที่อับแสงกว่า กับจากตัวกลางที่อับแสงสู่ตัวกลางที่โปร่งแสงกว่ามีลักษณะต่างกันอย่างไร จงกล่าวถึงการทดลองแสดงความจริงข้อนี้ด้วย
10. การหักเหของแสงมีหลักเกณฑ์อย่างไรบ้าง
11. กฎของการหักเหของแสงแตกต่างกับกฎของการสะท้อนของแสงอย่างไรบ้าง
12. ดรรชนีหักเหของตัวกลางอย่างหนึ่ง คืออะไร
13. ดรรชนีหักเหสัมบูรณ์ คืออะไร ท่านจะหาดรรชนีหักเหสัมบูรณ์ของอากาศได้อย่างไร
14. ท่านจะหาดรรชนีหักเหของแก้วได้อย่างไร จงเขียนรูปประกอบคำอธิบายด้วย
15. จงแสดงวิธีหาดรรชนีหักเหของน้ำมาให้ดูสัก 1 วิธี
16. เมื่อกำหนดมุมตกกระทบ $= \theta$ และดรรชนีหักเหระหว่างตัวกลาง $= \frac{x}{y}$ ท่านจะมีวิธีเขียนรังสีหักเหได้อย่างไรบ้าง จงพิสูจน์ให้เห็นจริงด้วยว่า แต่ละวิธีที่ท่านเขียนนั้นถูกต้องแล้ว
17. จงอธิบายวิธีทดลองที่แสดงว่า "เมื่อแสงผ่านเข้าและออกทางด้านที่ขนานกันของตัวกลาง มุมหักเหสุดท้ายจะเท่ากับมุมตกกระทบครั้งแรก"

ง. ในเวลาที่แดดจัดตอนบ่าย เมื่อมองไปไกล ๆ เราจึงแลเห็นถนนเสมือนหนึ่งมีน้ำนอง

จ. เมื่อเขย่าของเหลวโปร่งใสที่ไม่ผสมกันจึงแลเห็นว่ามัวและดูดแสง

ฉ. ดวงจันทร์เมื่อแรกขึ้นจึงดูมีดวงโต และไม่กลม

ช. จึงแลไม่เห็นแท่งแก้วที่จมอยู่ในกลีเซอรีนบริสุทธิ์

29. ท่านมีวิธีหาดรรชนีหักเหของวัตถุเล็กมาก ๆ เช่น เพชร ได้อย่างไร

30. เมื่อแสงผ่านจากตัวกลางหนึ่งไปสู่อีกตัวกลางหนึ่ง ทำมุมตกกระทบ 60° และมุมหักเห 30° จงหาค่าของดัรรชนีหักเห โดยการคำนวณ และสร้างรูป และถ้ามุมตกกระทบเป็น 45° และมุมหักเหเป็น 60° ดรรชนีหักเหจะมีค่าเท่าไร

31. ถ้าดรรชนีหักเหของแก้วชนิดหนึ่งเป็น $\frac{3}{2}$ จงเขียนรังสีหักเหในแก้วนั้น เมื่อมีมุมตกกระทบ 45°, 60°, 20°

32. ถ้าดรรชนีหักเหจากน้ำสู่อากาศเท่ากับ $\frac{3}{4}$ จงเขียนรังสีหักเหของแสงในอากาศ เมื่อมุมตกกระทบในน้ำ เป็น 20°, 30°, 45° และ 60°

33. เมื่อดรรชนีหักเหของแก้ว $= \frac{3}{2}$ จงเขียนรูปแสดงรังสีหักเหของแสงที่ผ่านทะลุแท่งแก้วสี่เหลี่ยม เมื่อมุมตกกระทบในอากาศ $= 30°$

34. ตัวกลางชนิดหนึ่งมีมุมวิกฤตเท่ากับ 45° จงแสดงว่าดรรชนีหักเหของตัวกลางนั้นเป็น 1.414

35. จงหาดรรชนีหักเหของตัวกลางที่มีมุมวิกฤตเท่ากับ 30°

36. ถ้าดรรชนีหักเหของน้ำเป็น $\frac{4}{3}$ และความเร็วของแสงในอากาศเท่ากับ 30,000,000 เมตรต่อวินาที จงหาความเร็วของแสงในน้ำ

37. เมื่อ sine ของมุมวิกฤตของตัวกลางคู่หนึ่ง $= \frac{8}{9}$ จงหาความชันหักเหของแสงจากตัวกลางที่โปร่งแสงสู่ตัวกลางที่อับแสงกว่า

38. ถ้าความชันหักเหของน้ำแข็ง $= 1.31$ ของแก้วฟลินท์ $= 1.65$ จงหาความชันหักเหจากน้ำแข็งมายังแก้วฟลินท์

39. จงหาความชันหักเหจากน้ำสู่แก้ว เมื่ออากาศ μ น้ำ $= \frac{4}{3}$ และ อากาศ μ แก้ว $= \frac{3}{2}$

40. มุมวิกฤตของอัลโกฮอลจะเป็นเท่าไร เมื่ออัลโกฮอลมีความชันหักเห 1.36

41. บ่อแห่งหนึ่งลึกแท้จริง 16 ฟุต แต่เห็นก้อนหินที่ก้นลึกเพียง 12 ฟุตเท่านั้น จงหาความชันหักเหของน้ำในบ่อนั้น

42. เมื่อเรามองผ่านแผ่นแก้วหนา 8 ซม. วัตถุจะอยู่ใกล้เข้ามาเท่าไร เมื่อความชันหักเหของแก้วเป็น 1.6

43. เอาแท่งแก้วหนา 10 ซม. ทับขนหยดหมึก จะปรากฏว่าหยดหมึกนั้นอยู่ที่ใด ถ้าความชันหักเหของแก้วเป็น $\frac{3}{2}$

44. ใช้กล้องจุลทรรศน์ส่องดูของเล็ก ๆ ชิ้นหนึ่งที่มีแก้วหนา 2 ซม. ทับอยู่ เมื่อเอาแก้วออกจะต้องเลื่อนกล้องลงไปอีก $\frac{2}{3}$ ซม. จึงจะแลเห็นของนั้นชัดเท่าเดิม จงหาความชันหักเหของแก้วนั้น

บทที่ 6
การหักเหของแสงเมื่อผ่านปริซึมและเลนส์

ปริซึม (Prism) คือ ส่วนหนึ่งของตัวกลางโปร่งใส ซึ่งมีหน้าระนาบสองหน้าเอียงเข้าหากันเป็นมุมขึ้นมา

รูป 141
ปริซึมที่มีภาคตัดเป็นรูปสามเหลี่ยม

หน้าของปริซึม คือผิวระนาบทางด้านหนึ่ง ๆ ของปริซึม

สันของปริซึม คือเส้นซึ่งหน้าทั้งสองของปริซึมมาบรรจบกัน

ภาคตัดมุขสำคัญของปริซึม (Principal section of prism) คือผิวระนาบที่ตั้งฉากกับหน้าและสันของปริซึม ณ จุดตัดใด ๆ บนสันของปริซึม

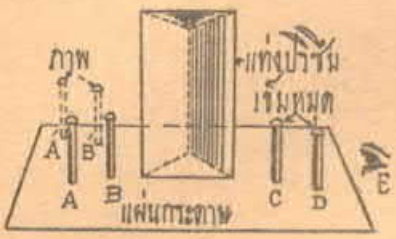
มุมของปริซึม คือมุมระหว่างหน้าของปริซึมซึ่งเอียงเป็นมุมต่อกันอยู่บนภาคตัดมุขสำคัญของปริซึม

ปริซึมแบบต่าง ๆ ที่ใช้กันทั่วไปทำด้วยแก้ว มีภาคตัดมุขสำคัญเป็นรูป △ ดังรูป 141 มี 3 แบบ คือ สามเหลี่ยมด้านเท่า, สามเหลี่ยมหน้าจั่ว และสามเหลี่ยมมุมฉาก

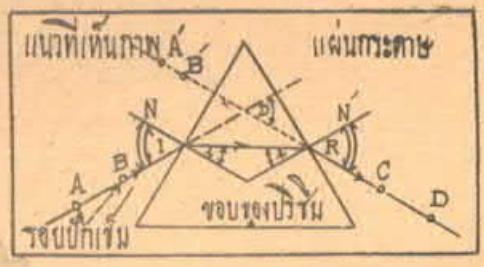
ปริซึมนั้นมิได้หมายถึงแท่งสามเหลี่ยมแต่อย่างเดียว อาจจะเป็นส่วนของแท่งแก้วลูกบาศก์เฉพาะที่อยู่ระหว่างด้านประชิดกันก็ได้

แสงที่ผ่านปริซึมย่อมหักเหเข้าหาด้านฐานเสมอ ความจริงข้อนี้ก็มิใช่ของใหม่อะไร เป็นหลักที่ได้มาจากการหักเหของแสงที่ผ่านเข้าสู่ตัวกลางที่อัยแสงกว่านั่นเอง และ สังเกตุเพิ่มขึ้นจากเดิม ก็คือ ด้านของตัวกลางนั้นไม่ขนานกัน

การทดลอง อุปกรณ์ที่ใช้ มี ปริซึม 1 อัน กระดาษ 1 แผ่น เข็มหมุด 4 ตัว ไม้โปรแทรกเตอร์ และดินสอ



รูป 142 แสดงการปักเข็มหมุด 4 ตัว หารังสีหักเหของแสงเมื่อผ่านปริซึม



รูป 143 การขีดเส้นแสดงการหักเหของแสงที่ผ่านปริซึม

วิธีทดลอง ให้ทำเป็นขั้น ๆ ดังนี้

1. วางปริซึมลงบนกลางแผ่นกระดาษให้ภาคตัดขวางสำคัญเป็นฐาน ตั้งเอาดินสอขีดขอบเขตของปริซึมไว้

2. ปักเข็มหมุด 2 ตัว A และ B ทางหน้าหนึ่งของปริซึม ให้มองผ่านปริซึมจากอีกด้านหนึ่งจนแลเห็นเข็มหมุดทั้งสองตัวอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน

3. ปักเข็มหมุดอีก 2 ตัว C และ D ทางหน้าของปริซึมที่กำลังมองอยู่นั้น ให้อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกับภาพของเข็มหมุด A และ B คือ A' และ B' ดังรูป 142

4. ยกปริซึมและถอนเข็มหมุดออก ลากเส้นผ่านจุด A และ B กับจุด C และ D ให้ต่อเลยไปตัดขอบของปริซึม แล้วลากเส้นต่อ 2 จุดนั้น ดังรูป 143 จะได้

AB เป็นรังสีตกกระทบในอากาศ

$\hat{I}$ เป็นมุมตกกระทบครั้งแรกจากอากาศสู่ปริซึม

$\hat{i}$ เป็นมุมหักเหในปริซึม

$\hat{r}$ เป็นมุมตกกระทบที่ 2 จากปริซึมสู่อากาศ

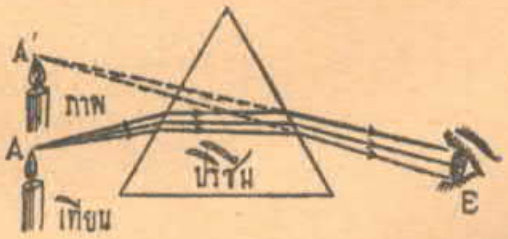
$\hat{R}$ เป็นมุมหักเหในอากาศ

CD เป็นรังสีหักเหจากปริซึมสู่อากาศ

เมื่อต่อแนวรังสีหักเห CD ไปพบกับแนวรังสีตกกระทบ AB

$\hat{D}$ เป็นมุมเบี่ยงเบน (Angle of deviation) *คือมุมที่รังสีหักเหสุดท้ายกระทำต่อแนวรังสีตกกระทบอันแรก*

ภาพที่แลเห็นผ่านปริซึม เนื่องจากแสงมีการหักเห และปริซึมเป็นตัวกลางที่อับแสงกว่าอากาศ ภาพที่เห็นนั้นจะอยู่ในแนวเดียวกับรังสีหักเหที่ออกจากปริซึมมาสู่ตาของผู้มองและจะใกล้เข้ามาด้วย ดังรูป 144 ตามขอบจะมีสีต่าง ๆ *อันเกิดจากการกระจายแสงของปริซึม ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป*



รูป 144 แสดงการแลเห็นภาพของวัตถุผ่านปริซึม

การเบี่ยงเบนของแสง จากการทดลองได้ผลดังนี้

1. แสงผ่านเข้า เมื่อเกิดหักเหขึ้นให้ใช้ ${}_a\mu_p$ ถ้าแสงหักเหออกใช้ ${}_p\mu_a$

2. เมื่อแสงผ่านเข้าจะมีมุมตกกระทบมุมหนึ่งเท่านั้น ซึ่งจะทำให้เกิดมุมเบี่ยงเบนเล็กที่สุด คือเมื่อมุมตกกระทบแรกเข้าเท่ากับมุมหักเหสุดท้าย หรือรังสีหักเหในปริซึมขนานกับฐานของปริซึม

3. ถ้ามุมตกกระทบคงตัว ปริซึมที่มีมุมเท่ากัน อันไหนมี μ มากจะมีมุมเบี่ยงเบนโตกว่า

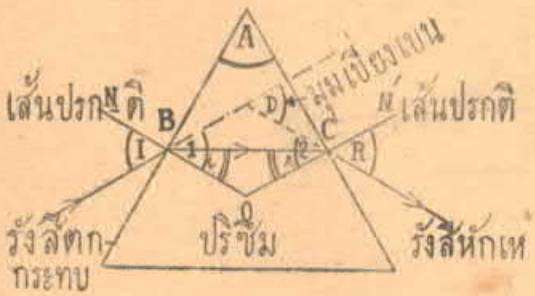
4. ถ้ามุมตกกระทบคงตัว ปริซึมที่มี μ เท่ากัน จะมีมุมเบี่ยงเบนมากน้อยตามขนาดของมุมของปริซึม

การคำนวณหาดรรชนีหักเหของปริซึม

$$\mu \text{ ของปริซึม} = \frac{\sin \text{ของมุมตกกระทบในอากาศ}}{\sin \text{ของมุมหักเหในปริซึม}}$$

$$= \frac{\sin \dfrac{\text{มุมเบี่ยงเบน} + \text{มุมยอดของปริซึม}}{2}}{\sin \dfrac{\text{มุมยอดของปริซึม}}{2}}$$

หรือ $${}_a\mu_p = \frac{\sin \dfrac{D+A}{2}}{\sin \dfrac{A}{2}}$$ ..... สูตร 21



รูป 145 พิสูจน์ว่า ${}_a\mu_p = \dfrac{\sin \frac{D+A}{2}}{\sin \frac{A}{2}}$

กำหนดให้ รังสีตกกระทบรังสีหนึ่งทำมุมตกกระทบ I กับหน้าของ Prism ซึ่งมีมุมยอดเท่ากับ A° และเกิดมุมหักเหขึ้น = i และรังสีหักเหนั้นทำมุมตกกระทบในปริซึม = r แล้วหักเหออกสู่อากาศเป็นมุมหักเห = R มีมุมเบี่ยงเบนเล็กที่สุด = D ดังรูป 145

จะต้องพิสูจน์ว่า $${}_a\mu_p = \frac{\sin\frac{D+A}{2}}{\sin\frac{A}{2}}$$

พิสูจน์ (I) $\because \hat{1} = \hat{I}$ และ $\hat{2} = \hat{R}$ (*ท.ย. 3*)

ตามรูป $\hat{D} = (\hat{1}-\hat{i}) + (\hat{2}-\hat{i})$ (*ท.ย. 16*)

$= (\hat{I}-) + (\hat{R}-\hat{r})$

$= (\hat{I}+\hat{R}) - (\hat{i}+\hat{r})$ .....(1)

$\because$ วงกลมผ่านจุด A,B,O และ C ใดๆ (*บทกลับ ท.ย. 40*)

$\therefore \hat{A} + \hat{O} = 2$ ∟ฉ (*ท.ย. 40*)

$= \hat{i} + \hat{r} + \hat{O}$ (*ท.ย. 16*)

$\therefore \hat{A} = \hat{i} + \hat{r}$ ..... (2)

เอา (2) แทนค่าใน (1) $\hat{D} = (\hat{I}+\hat{R}) - \hat{A}$ .... (3)

จากการทดลองปรากฏว่า

เมื่อ $\hat{D}$ เล็กที่สุด $\hat{I} = \hat{R}$

จาก (3) $\hat{D} = 2\hat{I} - \hat{A}$

$\therefore 2\hat{I} = \hat{D} + \hat{A}$

และ $\hat{I} = \frac{\hat{D}+\hat{A}}{2}$

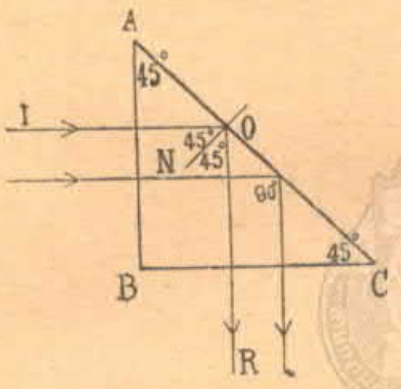
(II) $\because \hat{A} = \hat{i} + \hat{r}$ จาก (2)

เมื่อ $\hat{I} = \hat{R}$

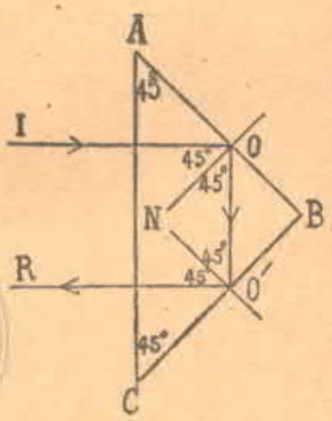
$\therefore \hat{r} = \hat{r}$ ด้วย

ดังนั้น $\hat{A} = 2\hat{i}$

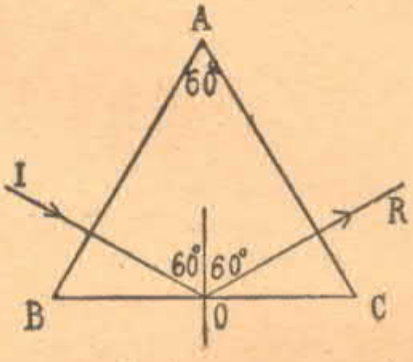
การสะท้อนกลับหมดของแสงภายในปริซึม ปริซึมก็เหมือนตัวกลางที่อัยแสงกว่าอากาศทั้งหลาย คือถ้าแสงตกกระทบผิวนอก หรือผิวในทำมุมตกกระทบโตกว่ามุมวิกฤตแล้วจะมีการสะท้อนกลับหมด โดยไม่ผ่านเข้าไปในปริซึม หรือสะท้อนกลับจากผิวที่แสงนั้นทำมุมตกกระทบโตกว่ามุมวิกฤต เขาจึงนำความรู้อันนี้ไปใช้ เปลี่ยนทางเดินของแสง ดังรูป 146, 147 และ 148 ตลอดจนการ กลับภาพ เช่นในกล้องส่องยางซนิด



รูป 146 ปริซึมที่เปลี่ยนทางเดินของแสงเป็นมุม 90°



รูป 147 ปริซึมที่เปลี่ยนทางเดินของแสงเป็นมุม 180°

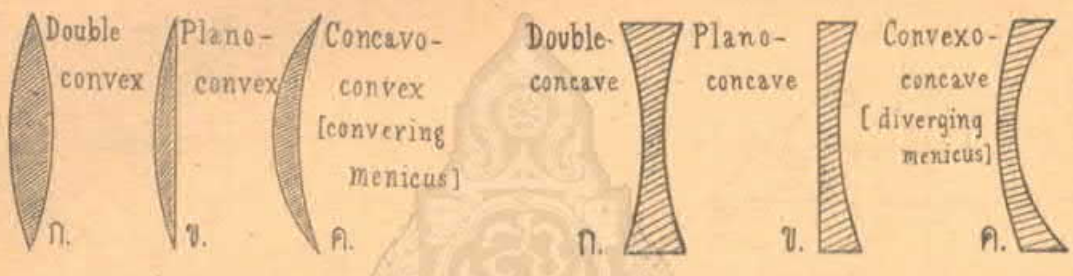


รูป 148 ปริซึมที่เปลี่ยนทางเดินของแสงเป็นมุม 120°

เลนส์ คือ ตัวกลางโปร่งใส ซึ่งมีผิวล้อมรอบ 2 ผิว แต่ละผิวเป็นอาร์ค ของทรงกลม ดังรูป 149 และ 150 มี 2 ชนิด คือ เลนส์นูน กับ เลนส์เว้า

ก. เลนส์นูน (Convex lens) คือ เลนส์รวมแสง ซึ่งตรงปริเวณแกนหนาที่สุด มี 3 แบบ ตามรูป 149 ก. ข. และ ค.

ข. เลนส์เว้า (Concave lens) คือ เลนส์กระจายแสงซึ่งตรงปริเวณแกนบางที่สุด มี 3 แบบ ตามรูป 150 ก. ข. และ ค.

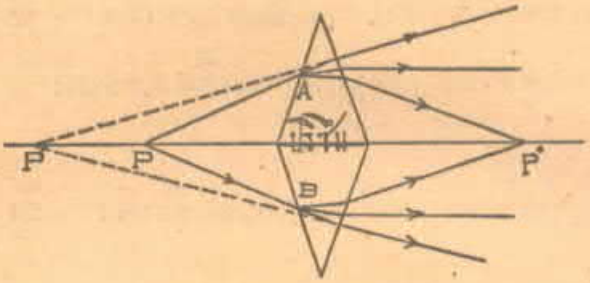


นูน-นูน นูนระนาบ นูนเว้า เว้า-เว้า เว้าระนาบ เว้านูน

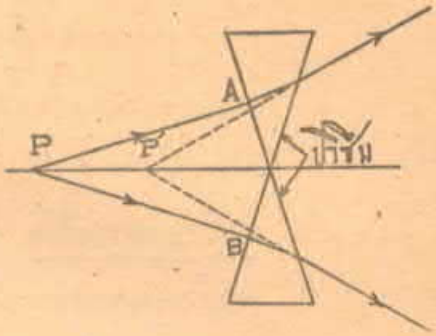
รูป 149 เลนส์นูน 3 แบบ รูป 150 เลนส์เว้า 3 แบบ

กำลังของเลนส์ เลนส์นูนสามารถบังคับแสงที่ผ่านไปให้ลู่เข้ามารวมกันได้ เลนส์เว้าสามารถทำให้แสงที่ผ่านเลนส์ลู่ออกห่างกัน ดังรูป 153 และ 154

การหักเหของแสงที่ผ่านเลนส์นูน มีปรากฏการณ์ อย่างเดียวกับแสงที่ผ่านเข้าไปในปริซึมที่มีมุมเล็กและเท่ากัน 2 อัน เอาฐานประกบกัน ดังรูป 151 แสงที่หักเหนั้นอาจจะไปรวมกันทางด้านอีกด้านหนึ่ง หรือ ขนานกัน หรือ ไม่พบกันเลย ก็ได้ ทั้งนี้สุดแต่ตำแหน่งที่อยู่ของวัตถุ ตามรูปจุด P P′ เป็นจุดที่แสงหักเหลู่เหมือนกลับมาตัดกันทางด้านเดียวกันกับจุด P และ P″ เป็นจุดที่แสงตัดกันภายหลังการหักเห ส่วนรังสีหักเหที่อยู่ตรงกลางนั้นขนานกัน



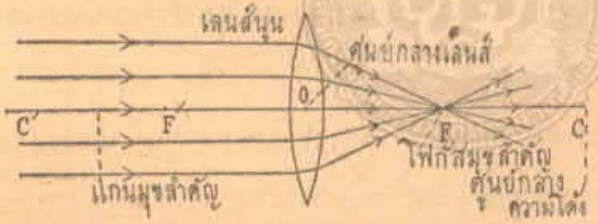
รูป 151 การหักเหของแสง
ที่ผ่านปริซึมซึ่งมีฐานประกบกัน



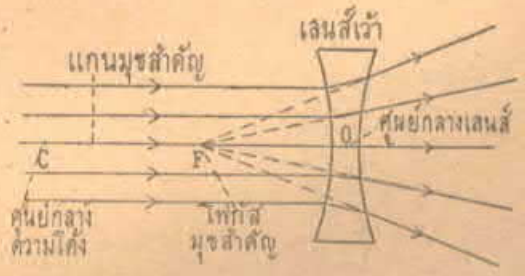
รูป 152 การหักเหของแสง
ที่ผ่านปริซึมซึ่งมีมุมยอดจรดกัน

การหักเหของแสงที่ผ่านเลนส์เว้า มีปรากฏการณ์ อย่างเดียวกับแสงที่ผ่านเข้าไปในปริซึมที่มีมุมเล็กและเท่ากัน 2 อัน วางเอาจุดยอดของมุมจรดกัน ดังรูป 152 แสงหักเหที่ผ่านปริซึมแล้ว จะไม่มีโอกาสตัดกันจริง ๆ เลย นอกจากดูเหมือนตัดกันที่จุด P' ซึ่งเป็นภาพของจุด P

ส่วนต่าง ๆ ของเลนส์ มีดังในรูป 153 และ 154 และรูป 155 และ 156



รูป 153 ส่วนต่าง ๆ ของเลนส์นูน



รูป 154 ส่วนต่าง ๆ ของเลนส์เว้า

1. **ศูนย์กลางของความโค้งของเลนส์** (Centre of Curvature of lens)

คือ ศูนย์กลางของทรงกลมซึ่งผิวของเลนส์นั้นเป็นส่วนหนึ่ง ทุกๆ จุดบนผิวของเลนส์อยู่ห่างจากศูนย์กลางของทรงกลมเป็นระยะเท่ากัน ตามรูปคือจุด C กับ C'

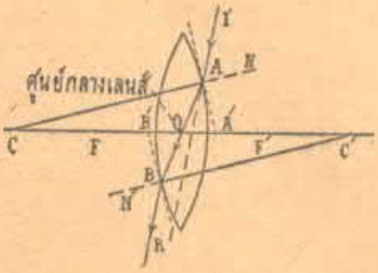
2. รัศมีของความโค้ง คือ ระยะทางจากผิวของเลนส์แต่ละผิว ถึงศูนย์กลางของความโค้ง

3. ศูนย์กลางของเลนส์ (Optical centre of lens) เป็น จุดบนแกนมุขสำคัญภายในเลนส์ ซึ่งแสงผ่านเข้าไปแล้วจะไม่เกิดการเบี่ยงเบนและรังสีตกกระทบกับ รังสีหักเหในอากาศจะขนานกัน หรือเป็นเส้นตรงเดียวกัน คือจุด O ในรูป 155 และ 156

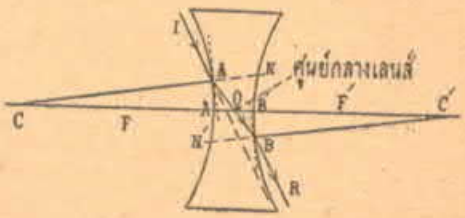
4. แกนมุขสำคัญ (Principal axis) คือ เส้นที่ลากระหว่างศูนย์กลางของความโค้งของผิวทั้งสองของเลนส์ ตามรูปคือ CC'

5. โฟกัสมุขสำคัญ (Principal focus) คือ จุดตัดกันหรือดูเหมือนตัดกันบนแกนมุขสำคัญของแสงที่ขนานกับแกนมุขสำคัญนั้นภายหลังการหักเหแล้ว ตามรูปคือจุด F หรือ F'

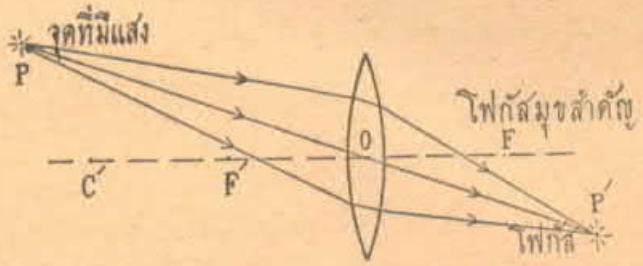
6. ความยาวโฟกัส (Focal length) คือระยะทางจากศูนย์กลางของเลนส์ถึงโฟกัสมุขสำคัญ ตามรูปคือ OF หรือ OF'



รูป 155
แสดงศูนย์กลางของเลนส์นูน



รูป 156
แสดงศูนย์กลางของเลนส์เว้า



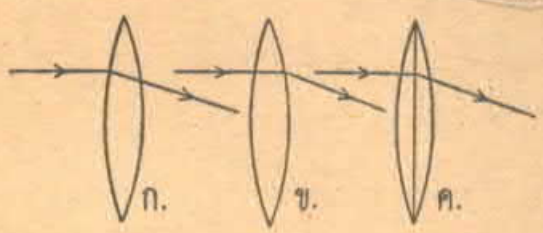
รูป 157
แสดงจุดตัดกันของแสงที่ไฟกัส

การเขียนแผนภาพของรังสีหักเหเมื่อผ่านเลนส์ ความจริงมีการหักเห 2 ครั้ง อย่างผ่านปริซึม แต่เลนส์เป็นของบาง เพื่อความสะดวกเขาจึงเขียนการหักเหรวมยอดครั้งเดียวเลย แต่แบ่งออกเป็น 3 แบบ ดังรูป 158 และ 159 ก. ข. ค. ดังนี้

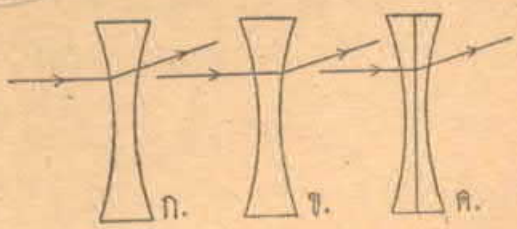
ก. แบบที่ 1 แสงตกกระทบผิวหน้าแรก แล้วหักเห

ข. แบบที่ 2 แสงตกกระทบผิวหลังก่อนจึงหักเห

ค. แบบที่ 3 แสงตกกระทบเส้นตั้งฉากกับแกนมุขสำคัญ ณ ศูนย์กลางของเลนส์ แล้วจึงหักเห

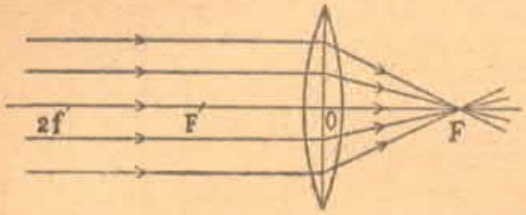


รูป 158
เมื่อรังสีหักเหผ่านเลนส์นูน

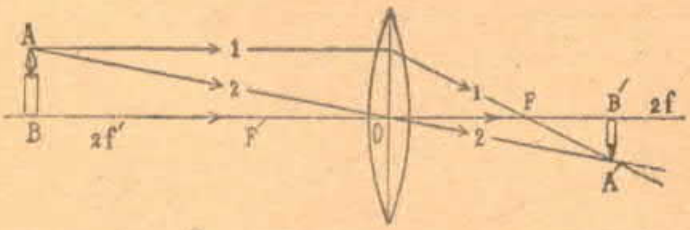


รูป 159
เมื่อรังสีหักเหผ่านเลนส์เว้า

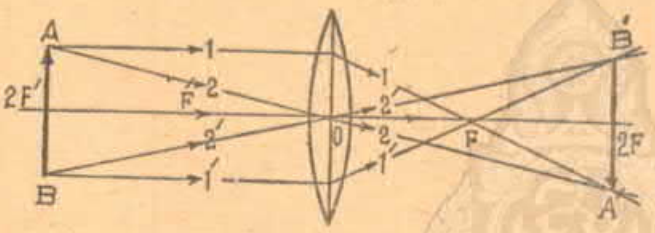
วิธีเขียนแผนภาพเพื่อหาที่ตั้งของภาพที่เกิดจากเลนส์ เราใช้ความรู้จากรูปที่ 153 ถึง 157 จะทราบได้ว่ารังสีของแสงที่ลู่ออกจากจุดหนึ่งเมื่อผ่านเลนส์จะหักเหไป



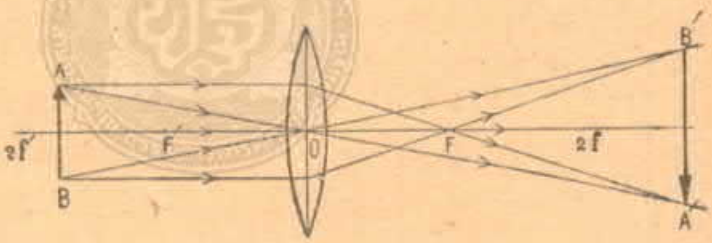
I รูป 162
วัตถุที่อยู่ไกล ๆ เช่นดวงอาทิตย์



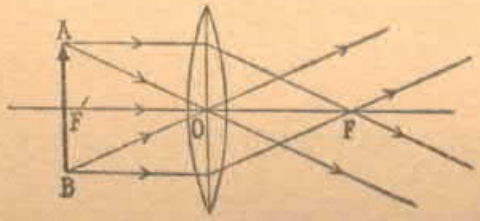
II รูป 163
วัตถุอยู่ไกลกว่า 2f



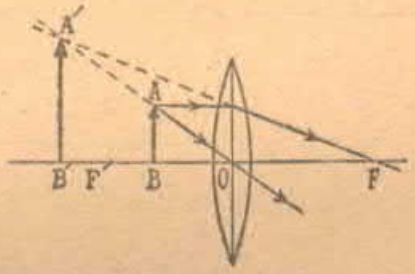
III รูป 164
วัตถุอยู่ที่ระยะ 2f



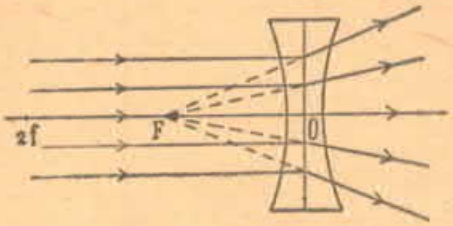
IV รูป 165
วัตถุอยู่ระหว่างจุด F กับจุด 2f



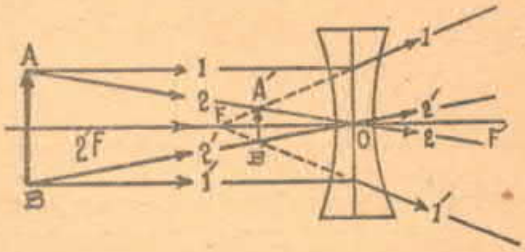
V รูป 166
วัตถุอยู่ที่จุด F



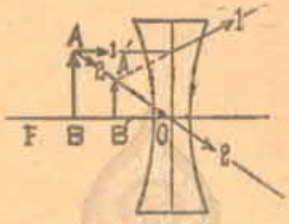
VI รูป 167
วัตถุอยู่ระหว่างจุด O กับจุด F



รูป 168 แสดงภาพที่เกิดจากเลนส์เว้าเมื่อวัตถุอยู่ที่ ∞

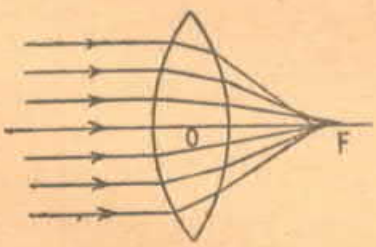


รูป 169 แสดงภาพที่เกิดจากเลนส์เว้าเมื่อวัตถุอยู่นอกจุด 2f

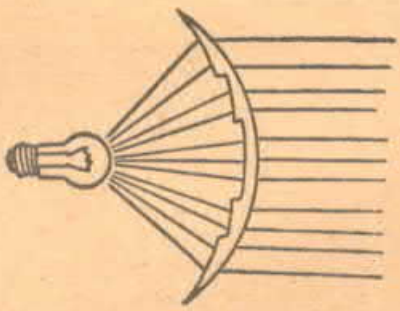


รูป 170
แสดงภาพที่เกิดจากเลนส์เว้า
เมื่อวัตถุอยู่ระหว่างจุด O กับจุด F

ความคลาดของเลนส์ หมายถึงการที่รังสีหักเหของรังสีขนานกับแกนมุขสำคัญไม่ตัดกันพอดีที่โฟกัสมุขสำคัญ หรือจุดตัดกันของรังสีเหล่านี้มีอาณาเขตกว้างมากไป ทำให้ได้ภาพไม่ชัด หรือไม่ได้โฟกัส เนื่องจากเลนส์โค้งมากหรือหนามาก ดังรูป 171



รูป 171
แสดงความคลาดของเลนส์ที่หนามากและโค้งมาก



รูป 172
เลนส์ที่เคลือบแล้วเพื่อให้ได้ลำแสงขนาน

และเมื่อต้องการลำแสงขนาน เพื่อส่องไปไกล ๆ จึงต้องใช้เลนส์ที่แต่งแล้ว คือแต่งให้ข้างมีผิวขรุขระอย่างเลนส์โคมฉายหน้ารถยนต์ ดังรูป 172

การวัดระยะต่าง ๆ ของเลนส์และเครื่องหมาย เราวัดจากเลนส์ และเครื่องหมายของระยะก็คือ ทำนองเดียวกับกระจกเงาทรงกลม คือ

1. วัด ทวนแสง เป็น +
2. วัด ตามแสง เป็น —

ฉะนั้น ก. เลนส์นูน มี f เป็น —
เลนส์เว้า มี f เป็น +

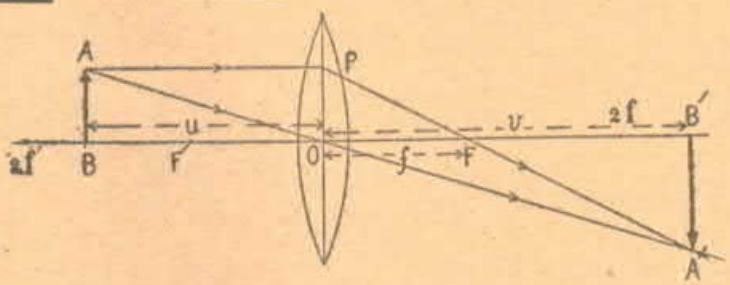
ข. ระยะ หน้าเลนส์ เป็น +
ระยะ หลังเลนส์ เป็น —

ความสัมพันธ์ของระยะต่าง ๆ ของเลนส์ มีดังนี้ :-

$$\frac{1}{\text{ความยาวโฟกัส}} = \frac{1}{\text{ระยะภาพ}} - \frac{1}{\text{ระยะวัตถุ}}$$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{v} - \frac{1}{u} \quad \text{.....สูตร 22}$$

การพิสูจน์ I. *ภาพแท้จริง* ซึ่งจะเกิดได้จากเลนส์นูนอย่างเดียวเท่านั้น



รูป 173 พิสูจน์จากการเกิดภาพแท้จริงว่า

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{v} - \frac{1}{u}$$

ให้ AB เป็นวัตถุตั้งอยู่บนแกนมุขสำคัญ CO ของเลนส์นูน และห่างจากเลนส์มีระยะ = u หน่วย, AP เป็นรังสีขนานกับ CO พบเลนส์ที่จุด P A′B′ เป็นภาพแท้จริงของ AB มีระยะห่างจากเลนส์ = v หน่วย และให้เลนส์นี้มีความยาวโฟกัส = f หน่วย ดังรูป 173

พิสูจน์ ∵ △ A′B′O กับ ABO มีมุมตั้ง 3 เท่ากัน มุมต่อมุม (*ท.บ.* 3, 14, 16)

$$\therefore \quad \frac{A'B'}{AB} = \frac{OB'}{OB} \quad \text{.....(ท.บ. 62).....(1)}$$

และ ∵ △ A′B′F กับ △ OPF มีมุมตั้ง 3 เท่ากัน มุมต่อมุมด้วย

$$\therefore \quad \frac{A'B'}{OP} = \frac{FB'}{OF}$$

แต่ $OP = AB$ (*ท.บ.* 21)

$$\therefore \quad \frac{A'B'}{AB} = \frac{FB'}{OF} \quad \text{.....(2)}$$

$$(1) = (2) \qquad \frac{OB'}{OB} = \frac{FB'}{OF} \quad \text{.....(3)}$$

แทนค่าใน (3) จะได้

$$\frac{-v}{u} = \frac{-v-(-f)}{-f}$$

$$= \frac{f-v}{-f}$$

$$\therefore \quad vf = uf - vu$$

$$vu = uf - vf$$

เอา vuf หารตลอดจะได้ $\frac{1}{f} = \frac{1}{v} - \frac{1}{u}$ *

พิสูจน์ ในทำนองเดียวกันกับรูป 174 จะได้

$$\frac{OB'}{OB} = \frac{FB'}{OF}$$

แทนค่าจะได้ $\frac{v}{u} = \frac{f-v}{f}$

$$vf = uf - vu$$

$$vu = uf - vf$$

เอา vuf หารตลอดจะได้ $\frac{1}{f} = \frac{1}{v} - \frac{1}{u}$ *

กำลังขยายภาพของเลนส์ (Magnifying Power of Lens)

คือ อัตราส่วนระหว่างความสูงของภาพกับความสูงของวัตถุ

$$\text{กำลังขยายภาพของเลนส์} = \frac{\text{ความสูงของภาพ}}{\text{ความสูงของวัตถุ}}$$

ดังได้พิสูจน์แล้วในรูป 173

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{OB'}{OB}$$

นั่นคือ $\frac{\text{ความสูงของภาพ}}{\text{ความสูงของวัตถุ}} = \frac{v}{u}$

$\therefore$ กำลังขยายภาพของเลนส์, $m = \frac{v}{u}$ .....สูตร 23

จากค่าของ m เราจะรู้ว่า

1. เมื่อ m เป็น + ภาพที่เกิดขึ้นจะเป็น ภาพเสมือน หัวตั้ง อยู่ข้างเดียวกับวัตถุ
2. เมื่อ m เป็น − ภาพที่เกิดขึ้นจะเป็น ภาพแท้จริง หัวกลับ อยู่คนละข้างกับวัตถุ

3. เมื่อ m มีค่ามากกว่า 1 จะได้ ภาพโตกว่าวัตถุ

4. เมื่อ m มีค่าน้อยกว่า 1 จะได้ ภาพเล็กกว่าวัตถุ

ข้อแนะนำในการคำนวณ

1. เมื่อจะแทนค่าลงในสูตรที่เป็นตัวเลข ต้องติดเครื่องหมายด้วย

2. ตัวอักษรที่ยังไม่รู้ค่า ไม่ต้องติดเครื่องหมาย

3. ความหมายของเครื่องหมาย + หรือเครื่องหมาย — ที่ได้จากการคำนวณ อธิบายได้ดังนี้

   ก. ถ้าได้ค่าของ v เป็น + แสดงว่าภาพเป็น ภาพเสมือน หัวตั้ง
   ถ้าได้ค่าเป็น — แสดงว่า ภาพเป็นภาพแท้จริง หัวกลับ

   ข. ถ้าได้ค่าของ f เป็น + แสดงว่าเป็น เลนส์เว้า
   ถ้าได้ค่าเป็น — แสดงว่าเป็น เลนส์นูน

ตัวอย่างที่ 1 วัตถุอันหนึ่งวางห่างจากเลนส์นูนเป็นระยะ 12" และเลนส์มีความยาวโฟกัส 8" ให้หาที่ตั้ง ลักษณะและขนาดภาพ

วิธีทำ

จากสูตร $\frac{1}{f} = \frac{1}{v} - \frac{1}{u}$

f เป็นความยาวโฟกัสของเลนส์นูน $= -8$ นิ้ว

v เป็นระยะภาพ $= ?$ นิ้ว

u เป็นระยะวัตถุ $= 12$ นิ้ว

$\therefore \quad -\frac{1}{8} = \frac{1}{v} - \frac{1}{12}$

$\frac{1}{v} = -\frac{1}{8} + \frac{1}{12}$

$= \frac{-3+2}{24}$

$$= -\frac{1}{24}$$

$$\therefore v = -24$$

จากสูตร $m = \frac{v}{u}$

$$\therefore m = \frac{-24}{12}$$

$$= -2$$

เมื่อค่าของ v หรือ m เป็น — และ m มากกว่า 1

ภาพที่เกิดเป็น ภาพแท้จริง หัวกลับ ขนาดโตกว่าวัตถุ อยู่ข้างหลังเลนส์ ห่างจากเลนส์ 24 นิ้ว

ตอบ หลังเลนส์ 24 นิ้ว เป็นภาพแท้จริง หัวกลับ ขนาดโตกว่าวัตถุ

ตัวอย่างที่ 2 วัตถุอยู่ห่างจากเลนส์เป็นระยะ 10 ซม. และได้ภาพแท้จริงโต 2 เท่า จงหาที่เกิดภาพ และความยาวโฟกัสของเลนส์ และบอกชนิดของเลนส์ด้วย

วิธีทำ

จากสูตร $m = \frac{v}{u}$

m เป็นกำลังขยายภาพของเลนส์ = —2

v เป็นระยะภาพ = ? ซม.

u เป็นระยะวัตถุ = 10 ซม.

$$\therefore -2 = \frac{v}{10}$$

$$v = -20$$

$\therefore$ ภาพเกิดข้างหลังเลนส์ 20 ซม.

จากสูตร $\frac{1}{f} = \frac{1}{v} - \frac{1}{u}$

f เป็นความยาวโฟกัสของเลนส์ = ? ซม.

$$\therefore \quad \frac{1}{f} = -\frac{1}{20} - \frac{1}{10}$$

$$= \frac{-3}{20}$$

$$\therefore \quad f = -\frac{20}{3}$$

$$= -6\frac{2}{3}$$

∴ เลนส์นี้เป็นเลนส์นูนมีความยาวโฟกัส $6\frac{2}{3}$ ซม.

ตอบ ภาพเกิดหลังเลนส์ห่างจากเลนส์ 20 ซม. เป็นเลนส์นูน มีความยาวโฟกัส $6\frac{2}{3}$ ซม.

ตัวอย่างที่ 3 เลนส์นูนมีความยาวโฟกัส 10 ซม. จะต้องวางวัตถุที่ไหน จึงจะได้ภาพโตเป็น 2 เท่าของวัตถุ

วิธีทำ

จากสูตร $m = \frac{v}{u}$

m เป็นกำลังขยายภาพของเลนส์นูน $= \pm 2$

v เป็นระยะภาพ $= ?$ ซม.

u เป็นระยะวัตถุ $= ?$ ซม.

$$\therefore \quad \pm 2 = \frac{v}{u}$$

ก. เมื่อเป็นภาพแท้จริง $\quad -2 = \frac{v}{u}$

$$\therefore \quad v = -2u$$

จากสูตร $\frac{1}{f} = \frac{1}{v} - \frac{1}{u}$

f เป็นความยาวโฟกัสของเลนส์นูน $= -10$ ซม.

v เป็นระยะภาพ $= -2u$ ซม.

u เป็นระยะวัตถุ $= u$ ซม.

$\therefore \quad -\frac{1}{10} = -\frac{1}{2u} - \frac{1}{u}$

$= -\frac{3}{2u}$

$2u = 30$

$u = 15$

$\therefore$ ต้องวางวัตถุไว้หน้าเลนส์ห่างจากเลนส์ 15 ซม.

ข. เมื่อเป็นสภาพเสมือน $+2 = \frac{v}{u}$

$\therefore \quad v = 2u$

จากสูตร $\frac{1}{f} = \frac{1}{v} - \frac{1}{u}$

$\therefore \quad -\frac{1}{10} = \frac{1}{2u} - \frac{1}{u}$

$= \frac{-1}{2u}$

$\therefore \quad 2u = 10$

และ $u = 5$

$\therefore$ ต้องวางวัตถุไว้ หน้าเลนส์ ห่างจากเลนส์ 5 ซม.

ตอบ { ถ้าเป็นภาพแท้จริง วัตถุต้องอยู่ห่างจากเลนส์ 15 ซม.
ถ้าเป็นภาพเสมือน วัตถุต้องอยู่ห่างจากเลนส์ 5 ซม.

ตัวอย่างที่ 4 ฉากกับวัตถุอยู่ห่างกัน 125 ซม. จะต้องเอาเลนส์นูนความยาวโฟกัส 20 ซม. วางที่ไหนจึงจะได้ภาพที่ฉากชัด

วิธีทำ

สมมุติว่าวางเลนส์ห่างจากวัตถุ x ซม.

f เป็นความยาวโฟกัสของเลนส์เว้า = 20 ซม.

v เป็นระยะภาพ = ? ซม.

u เป็นระยะวัตถุ = 10 ซม.

$$\therefore \quad \frac{1}{20} = \frac{1}{v} - \frac{1}{10}$$

$$\frac{1}{v} = \frac{1}{20} + \frac{1}{10}$$

$$= \frac{3}{20}$$

$$\therefore \quad v = \frac{20}{3}$$

$$= 6\frac{2}{3}$$

จากสูตร $m = \frac{v}{u}$

m เป็นกำลังขยายภาพของเลนส์เว้า = ?

$$\therefore \quad m = \frac{20}{3} \div 10$$

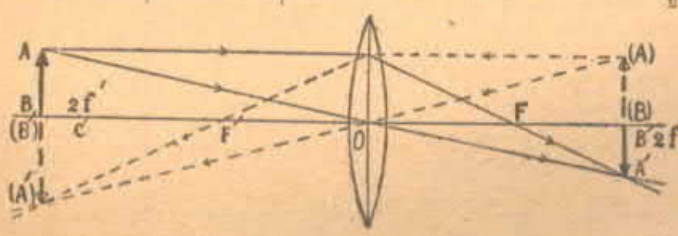
$$= \frac{20}{3} \times \frac{1}{10}$$

$$= \frac{2}{3}$$

ตอบ ภาพอยู่หน้าเลนส์ระยะ $6\frac{2}{3}$ ซม.

เป็นภาพเสมือนหัวตั้งโต $\frac{2}{3}$ เท่าของวัตถุ

โฟกัสสังยุคของเลนส์ (Conjugate foci) หมายถึงจุดที่วัตถุกับภาพสลับที่กันได้ ซึ่งจะเกิดขึ้นได้โดยเลนส์นูนอย่างเดียว เมื่อวัตถุอยู่ระหว่าง ∞ กับจุด 2 f และจุด 2 f กับจุด F คนละข้างของเลนส์ ดังรูป 176



รูป 176 แสดงโฟกัสสังยุคของเลนส์นูน

ตามรูป 1) วัตถุอยู่ที่จุด B ภาพเกิดที่จุด B′

2) แล้วเอาวัตถุมาไว้ที่จุด B′ บ้าง ภาพจะเกิดที่จุด B

ดังนั้นจุด B กับจุด B′ เป็นโฟกัสสังยุคของเลนส์

ความจริงข้อนี้จะแสดงโดยทางคำนวณเช่นเดียวกับโฟกัสสังยุคของกระจกเงาเว้า

ตัวอย่าง เลนส์นูนอันหนึ่งมีความยาวโฟกัส 8 นิ้ว ถ้ามีวัตถุวางห่างจากเลนส์เป็นระยะทาง 10 นิ้ว จะเกิดภาพขึ้นทางอีกด้านหนึ่งของเลนส์เป็นระยะทาง 40 นิ้ว จงแสดงว่าจุดทั้งสองจุดนี้เป็นโฟกัสสังยุคของเลนส์นูนอันนี้

วิธีแสดง จากสูตร $\frac{1}{f} = \frac{1}{v} - \frac{1}{u}$

f เป็นความยาวโฟกัสของเลนส์นูน $= -8$ นิ้ว

v เป็นระยะภาพที่ต้องการหา

u เป็นระยะวัตถุ $= 40$ นิ้ว

$$\therefore \quad -\frac{1}{8} = \frac{1}{v} - \frac{1}{40}$$

$$\frac{1}{v} = \frac{1}{40} - \frac{1}{8}$$

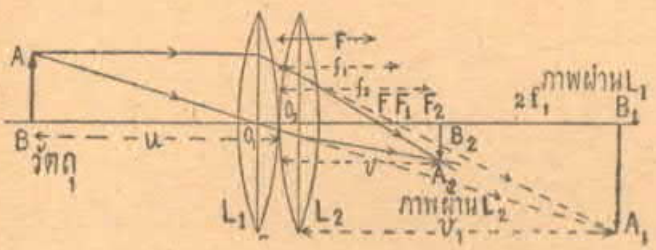
$$= \frac{1-5}{40}$$

$$= -\frac{4}{40}$$

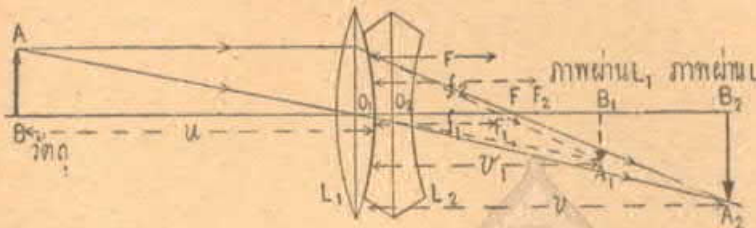
$$= -\frac{1}{10}$$

$$v = -10$$

เมื่อวัตถุอยู่ที่ระยะ 40 นิ้ว จากเลนส์ ภาพที่เกิดจะมีระยะห่าง 10 นิ้ว จากเลนส์ ดังนั้น จุดทั้งสองนี้เป็นโฟกัสสังยุคของเลนส์นูนจริง



รูป 180 แสดงว่าเมื่อเลนส์นูน 2 อันประกบกัน จะได้ $\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$



รูป 181 แสดงว่าเมื่อเลนส์นูนกับเลนส์เว้าประกบกัน จะได้ $\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$

วิธีทดลอง 1. เอาฉากรับภาพแต่ละครั้ง A$_1$B$_1$ ของ AB ที่เกิดจาก L$_1$ อันเดียวก่อน

2. วัดระยะวัตถุกับระยะภาพไว้ คือ u กับ v$_1$

3. เอาเลนส์ L$_2$ วางประกบกับเลนส์ L$_1$ ให้มีแกนมุขสำคัญเป็นเส้นตรงอันเดียวกัน

4. เอาฉากรับภาพของ A$_1$B$_1$ คือ A$_2$B$_2$ และวัดระยะภาพไว้ = v

5. คำนวณหาความยาวโฟกัสรวม โดยใช้สูตร $\frac{1}{f} = \frac{1}{v} - \frac{1}{u}$ ดูรูป 180 และ 181

พิสูจน์ ให้ F เป็นความยาวโฟกัสรวมของเลนส์ L$_1$ กับ L$_2$

จากสูตร $\frac{1}{f} = \frac{1}{v} - \frac{1}{u}$

$\therefore \frac{1}{F} = \frac{1}{v} - \frac{1}{u}$ ..... (1)

(เป็นตัวอักษรไม่ต้องติดเครื่องหมาย + หรือ −)

เมื่อเกิดภาพ A_1B_1 จากเลนส์ L, อันเกี่ยวซึ่งมีความยาวโฟกัส $= f_1$ ระยะวัตถุ $= u$ และระยะภาพ $= v_1$

$$\therefore \frac{1}{f_1} = \frac{1}{v_1} - \frac{1}{u} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

เมื่อเกิดภาพ A_2B_2 จากเลนส์ L_2 ซึ่งมีความยาวโฟกัส $= f_2$ นั้น เราถือว่า A_1B_1 เป็นวัตถุ ระยะวัตถุ $= v_1$ และระยะภาพ $= v$

$$\therefore \frac{1}{f_2} = \frac{1}{v} - \frac{1}{v_1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3)$$

$$(2) + (3) \therefore \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} = \frac{1}{v_1} - \frac{1}{u} + \frac{1}{v} - \frac{1}{v_1}$$

$$= \frac{1}{v} - \frac{1}{u} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (4)$$

$$= \frac{1}{F}$$

นั่นคือ $$\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

จากค่าของโฟกัสรวมของเลนส์ที่ประกอบกัน เราจะได้ความจริงดังนี้

1. ถ้าเป็น เลนส์นูนทั้งคู่ ผลรวมก็เป็น เลนส์นูน เพราะจะได้ค่าจากการคำนวณเป็น − ดังนี้

$$\frac{1}{F} = -\frac{1}{f_1} + -\frac{1}{f_2}$$

$$= -\left(\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}\right)$$

2. ถ้าเป็น เลนส์เว้าทั้งคู่ ผลรวมก็เป็น เลนส์เว้า เพราะจะได้ค่าจากการคำนวณเป็น + ดังนี้

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

3. ถ้า f_1 เป็นของเลนส์นูน f_2 เป็นของเลนส์เว้า

$$\frac{1}{F} = -\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

ผลรวมจะเป็นเลนส์นูน หรือเลนส์เว้าก็ได้ ทั้งนี้แล้วแต่อันไหนจะมี f น้อยกว่ากัน ถ้า $f_1 > f_2$ ผลรวมเป็นเลนส์เว้า และถ้า $f_1 < f_2$ ผลรวมเป็นเลนส์นูน

กำลังของเลนส์ (Power of a lens) กำลังของเลนส์เป็นสัดส่วนผกผันกับความยาวโฟกัสของเลนส์

ดังนั้น $D = \frac{1}{f}$ ..... สูตร 25

หน่วยวัดกำลัง เขาใช้ ไดออปเตอร์ (Dioptre)

1 ไดออปเตอร์ คือ กำลังของเลนส์ที่มีความยาวโฟกัส 1 เมตร

หมายเหตุ 1. กำลังของเลนส์นูนมีค่าเป็น $-$ (เพราะ f เป็น $-$)

2. กำลังของเลนส์เว้ามีค่าเป็น $+$ (เพราะ f เป็น $+$)

ตัวอย่าง จงหากำลังของเลนส์นูนซึ่งมีความยาวโฟกัส 3 เมตร, 50 ซม., และ 20 ซม.

วิธีทำ จาก สูตร $D = \frac{1}{f}$

$\therefore$ กำลังของเลนส์นูนที่มีความยาวโฟกัส 3 เมตร $= \frac{1}{-3}$ ไดออปเตอร์

$= -\frac{1}{3}$,,

กำลังของเลนส์นูนที่มีความยาวโฟกัส 50 ซม. หรือ $\frac{1}{2}$ เมตร $= \frac{1}{-\frac{1}{2}}$ ไดออปเตอร์

$= -2$,,

กำลังของเลนส์นูนที่มีความยาวโฟกัส 20 ซม. หรือ $\frac{1}{5}$ เมตร $= \frac{1}{-\frac{1}{5}}$ ไดออปเตอร์

$= -5$ ไดออปเตอร์

ตอบ $-\frac{1}{3}$, -2 และ -5 ไดออปเตอร์

จากคำตอบจะเห็นได้ว่า เลนส์นูนอันไหนยิ่งมี f น้อยเท่าใด ก็ยิ่งมีกำลังมากขึ้นเท่านั้น ค่า $-$ ไม่ต้องคิดว่าน้อยกว่า 1 เพราะเพียงแสดงชนิดของเลนส์เท่านั้น

กำลังรวมของเลนส์หลายอันที่วางประกบกัน เพราะว่า

ก) $D = \frac{1}{f}$, กับ ข) $\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \ldots\ldots\ldots + \frac{1}{f_n}$

$\therefore$ ถ้าให้ D เป็นกำลังรวมของเลนส์ที่มีกำลัง $D_1, D_2, D_3, \ldots\ldots$ ตามลำดับ

$$\therefore D = D_1 + D_2 + \ldots\ldots + D_n \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \text{สูตร } 26$$

นั่นคือ กำลังรวมของเลนส์หลายอันที่วางประกบกัน เท่ากับผลบวกพีชคณิตของกำลังของเลนส์แต่ละอัน

เราจะพิสูจน์ความจริงข้อนี้ได้โดยหาความยาวโฟกัสรวมจากรูป 180 และ 181 วัดระยะ f_1 และ f_2 และคำนวณหา F ก่อน แล้วนำไปคำนวณหา D จากสูตร $D = \frac{1}{f}$

พิสูจน์ $\therefore D = \frac{1}{F} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1)$

$$D_1 = \frac{1}{f_1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

และ $$D_2 = \frac{1}{f_2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3)$$

$(2) + (3)$ คือ $D_1 + D_2 = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (4)$

แต่ $\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$ ..... (5)

(5) = (4) $\frac{1}{F} = D_1 + D_2$ ..... (6)

(1) = (6) $D = D_1 + D_2$

ตัวอย่างที่ 1 เลนส์นูน 2 อันมีความยาวโฟกัส 20 และ 30 ซม. เมื่อวางประกบกันจะมีความยาวโฟกัสรวมและกำลังเลนส์รวมเท่าไร

วิธีทำ จากสูตร $\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$

F เป็นความยาวโฟกัสรวม = ? ซม.

f_1 และ f_2 เป็นความยาวโฟกัสของเลนส์นูนทั้งสองอันซึ่งเท่ากับ 20,30 ซม. ตามลำดับ

$\therefore \frac{1}{F} = -\frac{1}{20} + -\frac{1}{30}$

$= \frac{-3+(-2)}{60}$

$= -\frac{5}{60}$

$= -\frac{1}{12}$

$\therefore F = -12$

$\therefore$ ความยาวโฟกัสรวมของเลนส์ทั้งสอง = 12 ซม.

จากสูตร $D = \frac{1}{f}$

D เป็นกำลังรวมของเลนส์นูนทั้งสอง = ? ไดออปเตอร์

f เป็นความยาวโฟกัสรวมของเลนส์ทั้งสอง = − 12 ซม.

$= -\frac{12}{100}$ เมตร

$= -\frac{3}{25}$ เมตร

$\therefore D = \frac{1}{-\frac{3}{25}}$

$$= -\frac{25}{3}$$

$\therefore$ กำลังรวมของเลนส์ $= -8\frac{1}{3}$ ไดออปเตอร์

ตอบ $\begin{cases} \text{ความยาวโฟกัสรวม} = 12 \text{ ซม.} \\ \text{กำลังรวมของเลนส์} = -8\frac{1}{3} \text{ ไดออปเตอร์} \end{cases}$

ตัวอย่างที่ 2 ถ้าเลนส์นูนอันหนึ่งมีความยาวโฟกัส 20 ซม. จะต้องเอาเลนส์เว้ากี่ไดออปเตอร์มาประกบ จึงจะได้เลนส์นูนที่มีกำลังรวม 3 ไดออปเตอร์

วิธีทำ จากสูตร $D = \frac{1}{f}$

D เป็นกำลังของเลนส์นูน $= ?$ ไดออปเตอร์

f เป็นความยาวโฟกัสของเลนส์นูน $= -20$ ซม.

$= -\frac{1}{5}$ เมตร

$\therefore D = \frac{1}{-\frac{1}{5}}$

$\therefore$ กำลังของเลนส์นูน $= -5$ ไดออปเตอร์

จากสูตร $D = D_1 + D_2$

D เป็นกำลังรวมของเลนส์ทั้งสอง $= -3$ ไดออปเตอร์

D_1 เป็นกำลังของเลนส์นูน $= -5$ ไดออปเตอร์

D_2 เป็นกำลังของเลนส์เว้า $= ?$ ไดออปเตอร์

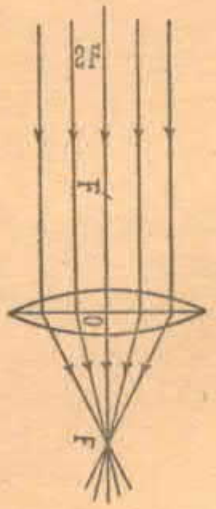
$\therefore -3 = -5 + D_2$

$\therefore D_2 = 5 - 3$

$\therefore$ เลนส์เว้านั้นต้องมีกำลัง $= 2$ ไดออปเตอร์

ตอบ 2 ไดออปเตอร์

วิธีหาความยาวโฟกัสของเลนส์นูน มีหลายวิธีด้วยกันดังนี้

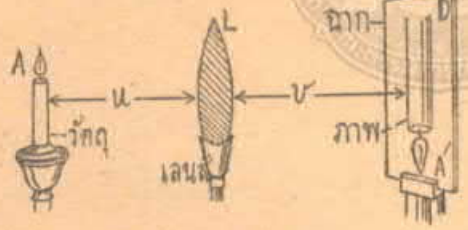


รูป 182 อาศัยดวงอาทิตย์ หาความยาวโฟกัสของเลนส์นูน

1. เอาเลนส์นูนรับแสงอาทิตย์ แล้วเอาฉากมารับตรงจุดรวมแสงซึ่งเป็นโฟกัสของเลนส์ เมื่อวัดระยะจากจุดนี้ไปยังศูนย์กลางของเลนส์จะได้ความยาวโฟกัสตามต้องการ ดังรูป 182

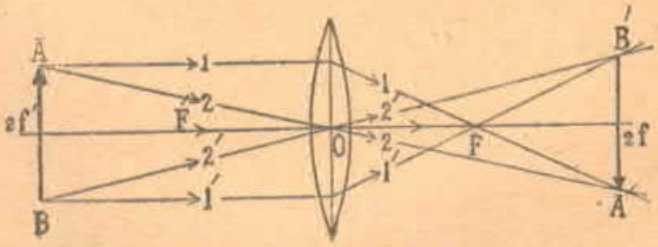
2. เอาฉากรับภาพแท้จริงของวัตถุที่เกิดจากเลนส์ วัดระยะ u และ v นำมาคำนวณหา f จากสูตร $\frac{1}{f}=\frac{1}{v}-\frac{1}{u}$ ดังรูป 183

ควรหาหลาย ๆ ครั้ง แล้วเอา f ที่ได้มาหาส่วนเฉลี่ย



รูป 183 การหาความยาวโฟกัสของเลนส์นูน จากสูตร $\frac{1}{f}=\frac{1}{v}-\frac{1}{u}$

รูป 184 การหาความยาวโฟกัสของเลนส์นูนโดยวางวัตถุให้พอดีอยู่ที่ศูนย์กลางความโค้งของเลนส์

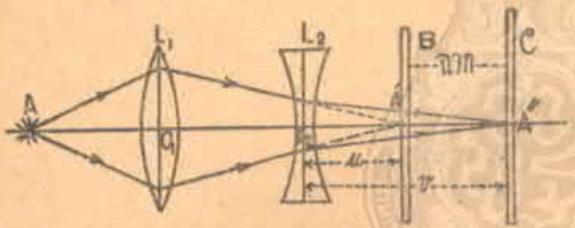


L เป็นเลนส์นูนที่เราจะหาความยาวโฟกัส วางอยู่ระหว่าง P กับ M ให้ศูนย์กลางของเลนส์ เสมอหัวเข็มหมุด

วิธีหา เลื่อนเลนส์ L ไปมาจนกระทั่งได้ภาพของเข็มหมุดขนาดชัด ระยะจากเลนส์ถึงเข็มหมุดจะเป็นความยาวโฟกัสของเลนส์ ทั้งนี้เพราะรังสีกระทบกระจกเงาตามแนวเส้นปรกติ จึงสะท้อนกลับตามแนวเดิม ดังนั้นลำแสงในขณะที่โผล่ออกจากเลนส์ต้องเป็นลำแสงขนานและระยะจากเลนส์ถึงเข็มหมุด ก็ย่อมเท่ากับความยาวโฟกัสของเลนส์

วิธีหาความยาวโฟกัสของเลนส์เว้า มีหลายวิธีด้วยกันดังนี้

วิธีที่ 1 ใช้เลนส์นูนที่มีกำลังมากกว่าช่วย



รูป 187 การหาความยาวโฟกัสของเลนส์เว้าโดยใช้เลนส์นูนที่มีกำลังมากกว่าช่วย แล้วคำนวณจากสูตร $\frac{1}{f} = \frac{1}{v} - \frac{1}{u}$

วิธีหา ให้ทำดังต่อไปนี้

เอาฉากรับภาพของวัตถุ A ซึ่งเกิดจากเลนส์นูน L_1 ให้รู้ตำแหน่งของภาพแน่นอน ตามรูปคือที่ A' เอาเลนส์เว้าที่ต้องการหาความยาวโฟกัส คือ L_2 มาตั้งระหว่าง L_1 กับ A' โดยให้แกนมุขสำคัญอยู่เป็นเส้นตรงอันเดียวกัน เลนส์เว้าก็จะสู่แสงออก ทำให้เกิดภาพโกลออกไป เลื่อนฉากไปจนได้ภาพชัดที่ A'' วัดระยะ O_2A' สมมุติว่าได้ — u ระยะนี้ก็จะเป็นระยะวัตถุ วัดระยะ O_2A'' สมมุติว่าได้ — v ระยะนี้ก็จะเป็นระยะภาพ เราก็จะคำนวณความยาวโฟกัสของเลนส์เว้า L_2 ได้จากสูตร $\frac{1}{f} = \frac{1}{v} - \frac{1}{u}$

จากสูตร $\frac{1}{f} = \frac{1}{v} - \frac{1}{u}$

$f = ?$ ซม. $v = -30$ ซม. และ $u = -10$ ซม.

$$\therefore \quad \frac{1}{f} = -\frac{1}{30} - -\frac{1}{10}$$

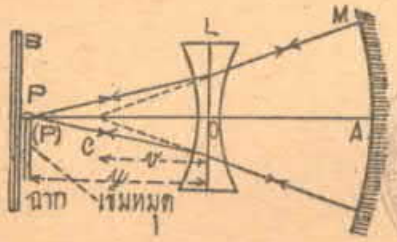
$$= \frac{-1+3}{30}$$

$$= \frac{1}{15}$$

$$\therefore \quad f = 15$$

ตอบ ความยาวโฟกัสของเลนส์เว้านั้น = 15 ซม.

วิธีที่ 2 ใช้กระจกเงาเว้าช่วย โดยปรุงปรับให้ภาพกลับมาเกิดที่เดียวกับวัตถุ แล้วคำนวณหาความยาวโฟกัสของเลนส์ ดังรูป 189



รูป 189 การหาความยาวโฟกัสของเลนส์เว้าโดยใช้กระจกเงาเว้าช่วย

ตามรูป P เป็นเข็มหมุดอยู่ในแนวแกนมุขสำคัญ

L เป็นเลนส์เว้าที่ต้องการหาความยาวโฟกัส

M เป็นกระจกเงาเว้าอยู่คนละข้างกับเข็มหมุด P มีแกนมุขสำคัญร่วมกับเลนส์ L

C เป็นศูนย์กลางของความโค้งของ M ซึ่งเรารู้รัศมีความโค้ง (CA) แล้ว

วิธีหา เลื่อนกระจกเงา M ไปมา จนกระทั่งไปอยู่ในตำแหน่งที่ทำให้ภาพของ P คือ P′ กลับมาเกิดที่เดียวกับเข็มหมุด P

วัดระยะ OC จะได้ v ของเลนส์ L

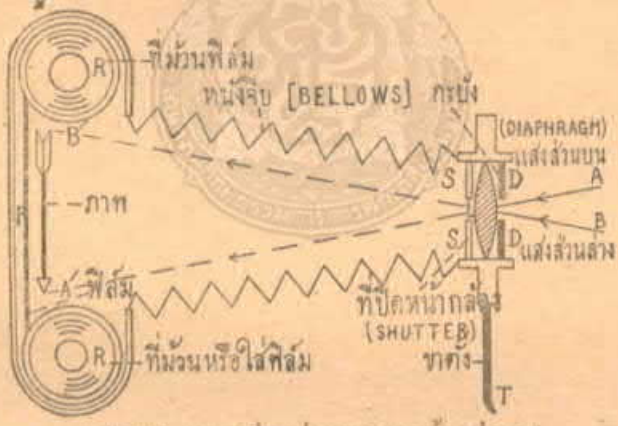
และระยะ OP จะได้ u ของเลนส์ L

แล้วเราก็คำนวณ f ของเลนส์ L ได้จากสูตร $\frac{1}{f}=\frac{1}{v}-\frac{1}{u}$

วิธีที่ 3 ใช้วัดโดย Geneva lens อย่างเลนส์นูน

(หมายเหตุ ถ้าจะวัดรัศมีความโค้งของผิวเลนส์ ใช้ส.เฟียโรมิเตอร์วัดแล้วคำนวณอย่างเดียวกันกับการหารัศมีความโค้งของกระจกทรงกลมก็ได้)

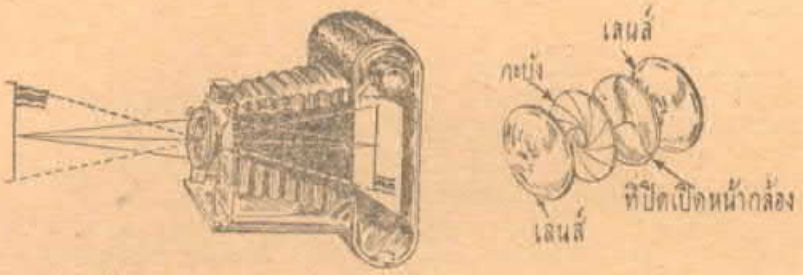
กล้องถ่ายรูป (Photographic Camera) คือกล้องถ่ายรูปรูเข็มสี่เหลี่ยมที่ใช้เลนส์แทนที่รูเข็ม สำหรับเลื่อนให้เกิดภาพชัดที่กระจกฝ้า หรือ ฟิล์ม (Film) ซึ่งอยู่ภายในกล้องแทนที่กระจกฝ้า โดยไม่ต้องเลื่อนกระจกฝ้าอย่างกล้องถ่ายรูปรูเข็ม มีที่ปิดเปิดหน้ากล้อง (Shutter) ให้แสงจากวัตถุซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดแสงไปกระทบฟิล์มได้ ภายในทุกด้านดำสนิท เพื่อป้องกันการสะท้อนของแสงซึ่งอาจทำให้รูปถ่ายไม่ชัด



รูป 190 แสดงส่วนต่าง ๆ ของกล้องถ่ายรูป

ถ้าเป็นกล้องอย่างดี ตามรูป 190 และ 191 ก็มีส่วนประกอบอย่างอื่นพิเศษขึ้นไปอีก เช่น

ตัวกล้อง ทำด้วยผ้าหรือกระดาษสำหรับยืดเข้ายืดออกได้ (Bellows) อย่างหีบเพลงชัก เพื่อเวลาเก็บจะได้มีขนาดกะทัดรัด



รูป 191 กล้องถ่ายรูป

ที่ตั้งระยะ (Range finder) คือที่สำหรับเลื่อนเลนส์เพื่อให้ได้ภาพชัดที่ฟิล์ม มีทั้งแบบธรรมดาหรือแบบอัตโนมัติ (Automatic)

กะบัง (Diaphragm) ตามในรูปคือ D ใช้สำหรับปรุงปรับรูหน้ากล้องให้แคบหรือกว้างได้เมื่อต้องการให้แสงเข้ามากหรือน้อย ทำหน้าที่เป็นรูเข็มนั่นเอง

ที่บังคับอัตราเร็วในการปิดเปิด Shutter ใช้สำหรับถ่ายภาพเคลื่อนที่

เครื่องสำหรับถ่ายตนเอง (Self-timer)

ที่ติดแสงวาบไฟ (Flash light) สำหรับถ่ายในที่มีแสงไม่พอ

ฟิล์ม (Film) คือกระจกหรือเซลลูลอยด์ที่ฉาบด้วย เกลือเงินโบรไมด์ ที่ไวต่อแสง ถ้าฟิล์มยังไม่ได้ล้างด้วยน้ำยาล้างรูป* จะให้ถูกแสงสว่างไม่ได้ เพราะจะกลายเป็นสีดำของเงิน และน้ำยาล้างไม่ออก ฟิล์มที่ล้างแล้วเรียกว่า เนกาทีฟ (Negative) ดังรูป 192 ค. รูปที่ได้บนฟิล์มจะมีสีตรงข้ามกับสีที่แท้จริง คือสีขาวเป็นสีดำ และสีดำเป็นสีขาว จะเป็นสีแก่หรืออ่อนไปตามความเข้มของสีของวัตถุ เนกาทีฟนี้ใช้สำหรับอัดขยายกระดาษอัดอีกทีหนึ่ง

---

* น้ำยาล้างรูป (Developer) ใช้ ไฮโดรควิโนน กับ โซเดียมไฮโปซัลไฟต์ ($Na_2S_2O_3$)

กระดาษอัดรูป ก็คือกระดาษที่ฉาบด้วยสารอย่างเดียวกับฟิล์ม ใช้สำหรับอัดรูปจาก เนกาติฟ เพื่อให้ได้รูปออกมาตามที่เราต้องการ รูปที่ได้นี้เรียกว่า พอสิติฟ (Positive)

รูป 192 แสดงฟิล์มและกระดาษอัดรูป

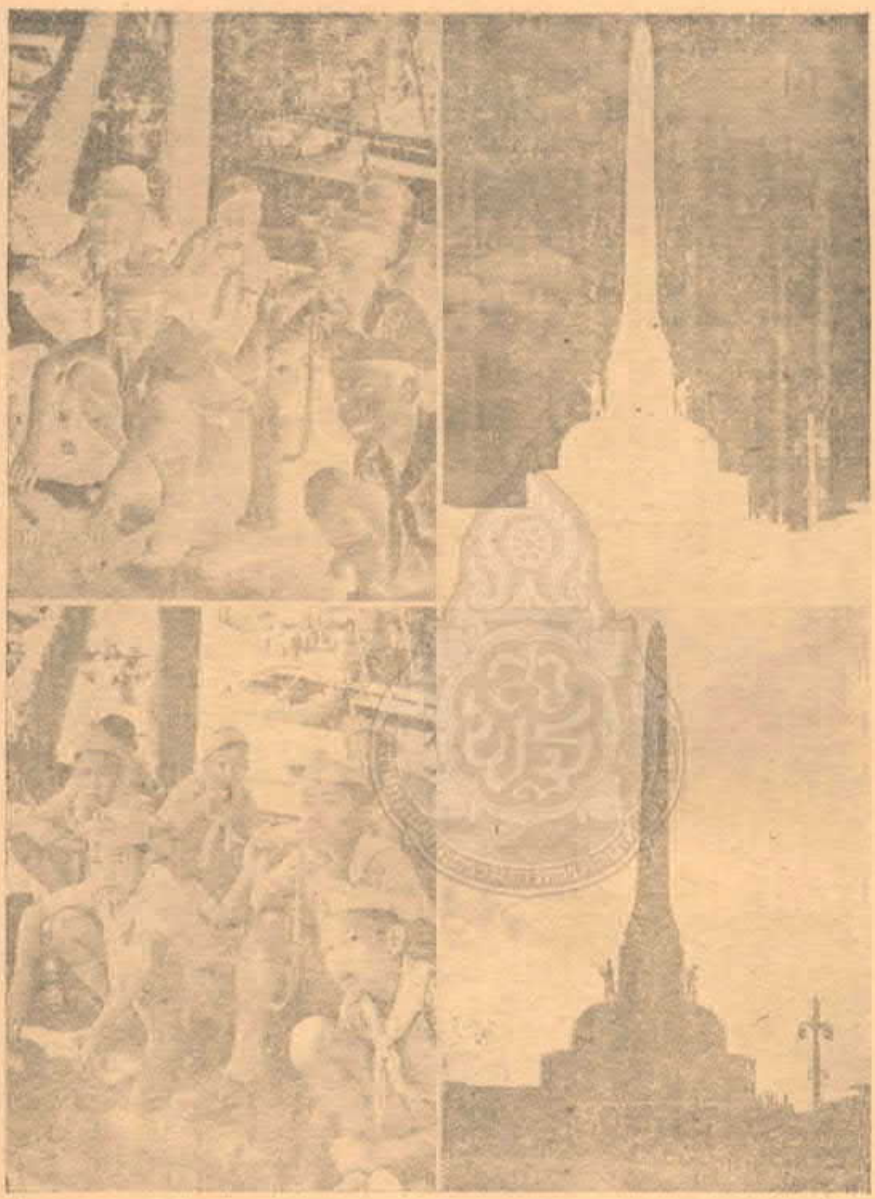
ก. วัตถุ

ข. ฟิล์มก่อนล้างน้ำยาล้างรูป

ค. ฟิล์มที่ล้างแล้ว

ง. กระดาษอัดรูปก่อนล้าง

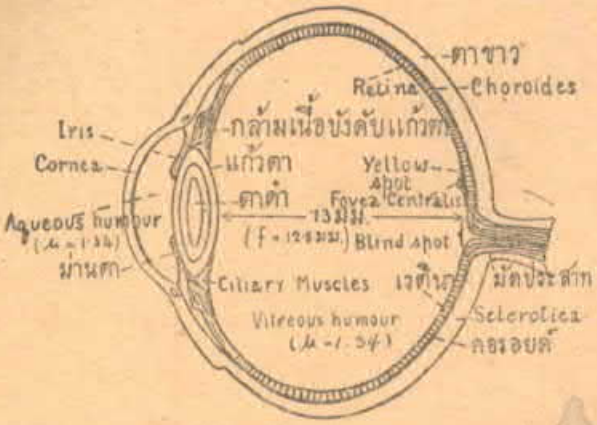
จ. กระดาษอัดรูปที่ล้างแล้ว



รูป 193
เนกาทีฟ

รูป 194
พอสิทีฟ

ตาและแว่นตา ลูกตา (Eye-ball) มีส่วนประกอบดังนี้



รูป 195
แสดงส่วนประกอบของลูกตา

ลูกตามี ๓ ชั้น ดังรูป 195

ชั้นที่ 1 ตาขาว (Selerotica) หุ้มรอบ แข็งเหนียว มีสีขาว

ชั้นที่ 2 คอรอยด์ (Choroides) ต่อจากม่านตา

ชั้นที่ 3 ฝอยประสาทตา (Retina) ทำหน้าที่เป็นฉากรับรู้การเกิดภาพ

ส่วนประกอบอื่น ๆ มีดังนี้ (จากข้างนอกมาข้างใน)

เกราะตาดำ (Cornea) คือตาขาวส่วนที่หุ้มตาดำไว้ มีรัศมี 8 มม.

น้ำเลี้ยงเลนส์ของตา (Aqueous humour) เป็นของเหลวใสบรรจุอยู่ระหว่าง Cornea กับตาดำ มีดรรชนีหักเห 1.34

ตาดำ (Pupil) คือส่วนที่ลึกสุดของลูกตา

ม่านตา (Iris) คือเยื่อส่วนที่ทำหน้าที่เป็นม่านขยายหรือลดความกว้างของรู สำหรับให้แสงผ่านเข้าสู่เลนส์ของตาได้มากหรือน้อยตามปริมาณของแสงจากวัตถุ เมื่อมีแสงจัด ๆ ก็จะแผ่ขยายออกมามากทำให้รูที่แสงผ่านเข้าสู่เลนส์ของตาเล็กลง โดยมากเป็นเยื่อยาง ๆ สีน้ำตาล (นอกจากชาวยุโรป)

เลนส์ของตา (Crystalline lens : แก้วตา) คือเลนส์นูนที่ซ้อนกันหลายชั้น

กล้ามเนื้อตา (Ciliary muscles) มีหน้าที่ยังคับเลนส์ของตาให้มีความยาวโฟกัสมากหรือน้อย เพื่อให้เกิดภาพชัดที่จุดกวงเหลือง

วิเตรียสฮูเมอร์ (Vitreous humour) เป็นของเหลวใส ๆ บรรจุอยู่ภายในลูกตามีความชื้นหักเหเท่ากับ 1.34

จุดกวงเหลือง (Yellow spot) เป็นบริเวณที่ไวต่อแสงและเกิดภาพชัดอยู่บนฝอยประสาทตาตรงข้ามกับเลนส์ของตา

จุดที่ไวต่อแสงที่สุด (Forvea centralis) เป็นจุดอยู่บนจุดกวงเหลือง เมื่อต้องการพิจารณาสิ่งใดให้ชัดจะต้องให้ภาพเกิดที่จุดนี้

จุดกวงบอด (Blind spot) เป็นบริเวณที่ไม่ไวต่อแสง อยู่ที่ขั้วมัดของฝอยประสาทตา ห่างจากจุดกวงเหลืองลงมาประมาณ 2.5 มม.

ทรรศนประสาท (Optic nerve) คือมัดของฝอยประสาทตาภายในลูกตาที่โยงไปสู่สมอง

หมายเหตุ 1. เลนส์ของตามีความยาวโฟกัสประมาณ 12.8 มม. และระยะระหว่างเลนส์ของตากับ Retina ประมาณ 13 มม.

2. ภาพที่เห็นจะติดอยู่บน Retina เป็นเวลานานประมาณ $\frac{1}{16}$ ถึง $\frac{1}{10}$ วินาที และภาพที่เคลื่อนที่ผ่านตาเร็วมากเกินไป (*น้อยกว่า* $\frac{1}{16}$ *วินาที*) ตาจะสังเกตอะไรไม่ได้เลย รูปเขียนหรือภาพยนตร์ที่มีต่อเนื่องกันเคลื่อนไปด้วยความเร็วพอเหมาะ *ประมาณวินาทีละ 16 รูป* เราจะเห็นต่อติดต่อกันได้เรียกว่า มายา (Illusion)

ลูกตากับกล้องถ่ายรูปคล้ายคลึงกันอย่างไร

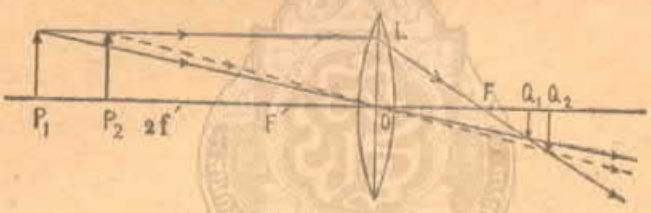
ลูกตามีเลนส์ของตาเป็นเลนส์ มีกล้ามเนื้อยังคับเลนส์ของตาให้เปลี่ยนความยาวโฟกัสเปรียบเหมือนการเลื่อนเลนส์หน้ากล้อง ถ้ากล้ามเนื้อพิการ

จะทำให้ตาเราเห็นสิ่งต่างๆ ไม่ชัด ภายในลูกตามีกเหมือนกับสีดำที่ทาภายในกล้องถ่ายรูป และมีจุดตรงเหลืองเป็นที่รับภาพซึ่งเปรียบเหมือนฟิล์มรับภาพนั่นเอง

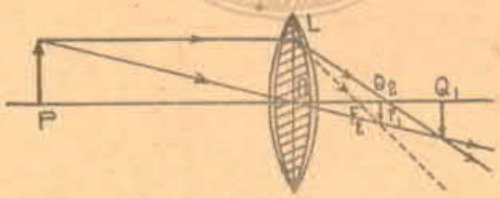
การเปลี่ยนความยาวโฟกัสของแก้วตาเพื่อให้แลเห็นสิ่งต่างๆได้ชัด(Accomodation)

มีกระบวนการอย่างไร จงพิจารณาการเกิดภาพจากเลนส์นูนดังต่อไปนี้

ก. เมื่อวัตถุเคลื่อนที่ และความยาวโฟกัสของเลนส์คงตัว ดังรูป 196 เมื่อวัตถุใกล้เลนส์เข้ามา (อยู่ที่ P_2) ภาพจะเกิดจะอยู่ห่างจากเลนส์ออกไป (ที่ Q_2) และถ้าวัตถุห่างออกไป (อยู่ที่ P_1) ภาพที่เกิดจะอยู่ใกล้เลนส์เข้ามา (ที่ Q_1)



รูป-196 แสดงการเกิดภาพเมื่อวัตถุเคลื่อนที่ แต่ความยาวโฟกัสคงตัว



รูป 197 แสดงการเกิดภาพเมื่อวัตถุอยู่คงที่
แต่ความยาวโฟกัสเปลี่ยนแปลง

ข. เมื่อวัตถุ (P) อยู่คงที่ แต่ความยาวโฟกัสของเลนส์เปลี่ยนแปลง ดังรูป 197

จะปรากฏว่า (1) เลนส์ที่มี f สั้น (นูนมาก) ได้ภาพอยู่ใกล้เลนส์ (คือที่ Q_2)

(2) เลนส์ที่มี f ยาว (*นูนน้อย*) ได้ภาพอยู่ ห่างเลนส์ (*คือที่ Q_1*)

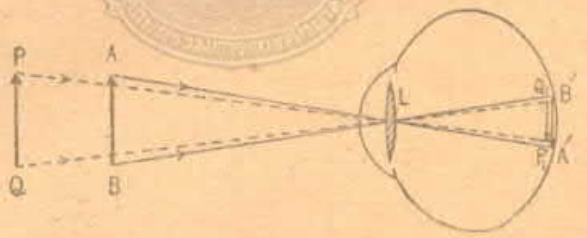
จากผลที่ได้นี้ เราจะทราบและเข้าใจเรื่องที่เกี่ยวกับเลนส์ของตาและกล้ามเนื้อตาว่า มีความสัมพันธ์กันดังนี้

I ถ้าจะมองของไกล ต้องทำให้เลนส์ของตามี f มาก โดยผ่อนกล้ามเนื้อตาออก เพราะระยะระหว่างแก้วตากับจุดรวงเหลืองคงเดิม

II ถ้าจะมองของใกล้ ก็ต้องทำให้เลนส์ของตาให้มี f น้อยลง คือใช้กล้ามเนื้อตาบีบเลนส์ของตาให้นูนมากขึ้น

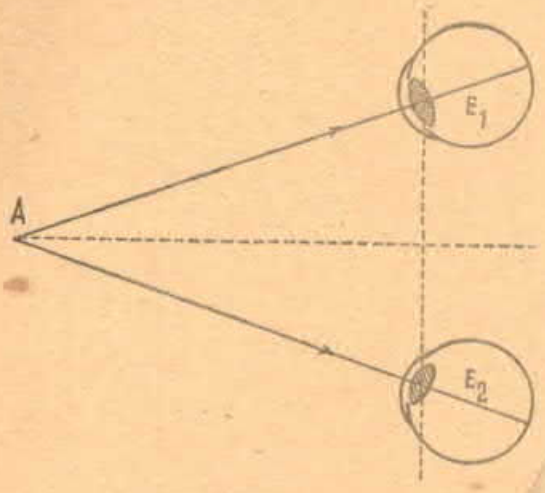
เพราะฉะนั้น การมองของใกล้นานๆ เช่นเมื่ออ่านหนังสือเราจึงรู้สึกปวดเมื่อยตา เพราะกล้ามเนื้อตาต้องอยู่ในลักษณะเกร็ง (Spasm) เป็นเวลานาน

การมองไกลหรือใกล้ก็ตาม เลนส์ของตาจะถูกกล้ามเนื้อตายังคับให้มี f พอดีสัมพันธ์กับความชื้นหักเหของน้ำเลี้ยงเลนส์ของตา และความชื้นหักเหของ Vitreous humour ซึ่งจะทำให้เกิดภาพที่จุดรวงเหลือง (Yellow spot) บนฝอยประสาทตา (Retina) พอดี ดังรูป 198

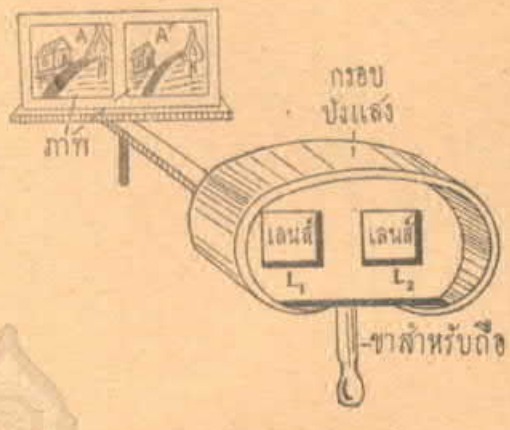


รูป 198 แสดงภาพที่เกิดบนฝอยประสาทตา

การมีตาสองตามีประโยชน์อย่างไร การมองสิ่งใดก็ตามลูกตาทั้งสองจะต้องจ้องตรงไปยังสิ่งนั้นพร้อมกันทั้งสองตา ดังรูป 199 เมื่อเรามองไปทางใด ลูกตาทั้งสองจะต้องกลอกไปทางเดียวกัน พร้อมกันและด้วยอาการอย่างเดียวกันด้วย จง *สังเกตลูกตาของคนขณะดูลูกขนไก่หรือตะกร้อ* ทั้งนี้เว้นแต่คนตาพิการ



รูป 199 แสดงลักษณะของลูกตาทั้งสองขณะมองวัตถุ

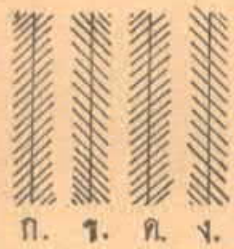


รูป 200 แสดงส่วนประกอบของสเตอรีโอสโคป

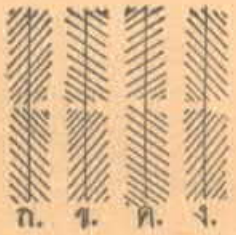
เพราะฉะนั้นการที่คนเราและสัตว์มีตา 2 ตาก็เพื่อให้กะระยะทางได้แน่นอน ยิ่งกว่ามีตาเดียว

<u>สเตอรีโอสโคป</u> (Stereoscope) เป็นอุปกรณ์สำหรับดูภาพของสิ่งต่าง ๆ ให้เห็นทั้งความหนาหรือความลึก ความกว้างและความยาวของสิ่งนั้น ๆ คือให้เห็นเป็นสามมิติ ส่วนประกอบมีที่ติดภาพ 2 ภาพ (A กับ A') ของวัตถุเดียวกัน แต่ถ่ายจากจุด 2 จุดที่ต่างที่กัน (ตาซ้ายกับตาขวา) และมีเลนส์นูนซึ่งมีความยาวโฟกัสเท่ากัน 2 อัน (L_1 กับ L_2) สำหรับให้ตา 2 ตามองผ่าน และเพื่อขยายภาพด้วย ดังรูป 200

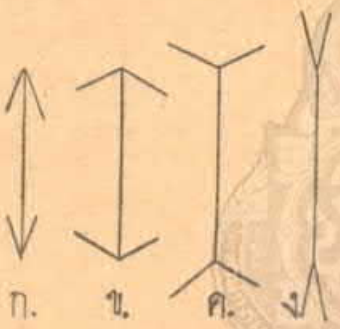
ถึงแม้เราจะมีตา 2 ตา แต่ก็ยังถูกภาพลวงได้ ดังรูป 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207 และ 208



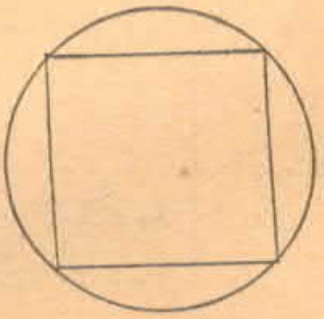
I รูป 201 เส้นทั้ง 4 นี้ขนานกัน
แต่ตาเราถูกลวงจนเห็นไม่ขนานกัน



II รูป 202 เส้นทั้ง 4 นี้ขนานกัน
แต่ตาเราถูกลวงจนเห็นเป็นเส้นคด

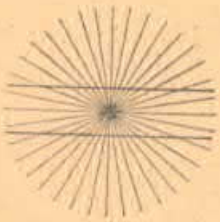


III รูป 203 เส้นทั้ง 4 เส้นนี้ยาวเท่ากัน แต่ตา
เราถูกลวงจนเห็นว่า ง. ยาวกว่า ค. ข. และ ก. ตามลำดับ



IV รูป 204 นี้เราจะไม่เห็น
เป็นวงกลมนัก

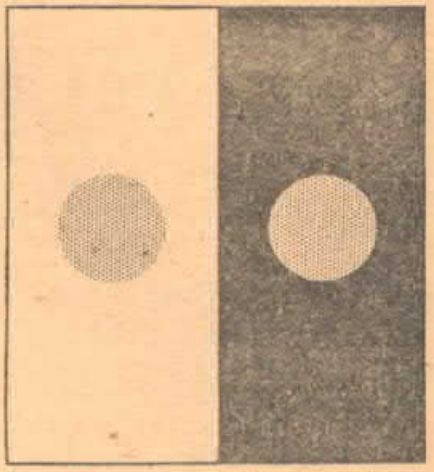
V รูป 205 ความสูงของหมวก
และความกว้างของปีกหมวกใบนี้เท่ากัน



VI รูป 206
เส้นตรง 2 เส้นนี้ขนานกัน

VII รูป 207 บันได 2 อันนี้
ยาวเท่ากัน

รูป 208 ก. จงกลับรูปนี้ลงแล้วดูใหม่ จะแลเห็นเป็นอย่างไร



รูป 208 ข. วงจุดวงไหนขาวกว่า

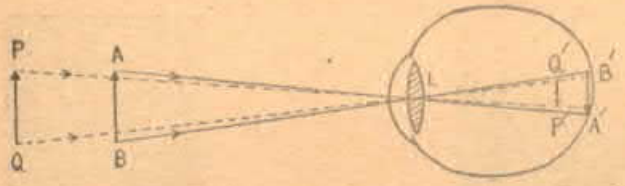
ข้อบกพร่องของทรรศนาการ ที่เราจะใช้แว่นตาช่วยแก้ไขได้ ก็มี สายตาสั้น สายตายาว และ อัสติกมาติซึม ดังนี้

1. สายตาสั้น (Myopia หรือ Short-sight) คือ การที่สายตาแลเห็นของไกลได้ไม่ชัด และแลดูของได้ชัดในระยะใกล้กว่าสายตาปรกติ ทั้งนี้เนื่องจาก

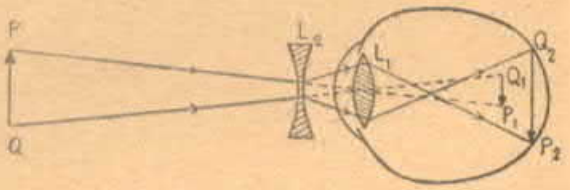
ก. ลูกตายาวเกินไป

หรือ ข. เลนส์ของตานูนเกินไป ทำให้ภาพของวัตถุที่อยู่ไกลมาเกิดไม่ถึงจุดรวงเหลือง ดังรูป 209

วิธีแก้ ให้ ใช้แว่น ทำด้วยเลนส์เว้าที่มีความยาวโฟกัสพอเหมาะช่วย เพื่อให้แสงที่หักเหภายหลังจากผ่านแว่น และผ่านเลนส์ของตาไปแล้วหักเหน้อยลง เลยทำให้ภาพไปเกิดไกลออกไปที่จุดรวงเหลืองพอดี ดังรูป 210



รูป 209
แสดงว่าสายตาสั้น ทำให้แลเห็นวัตถุไม่ชัดอย่างไร



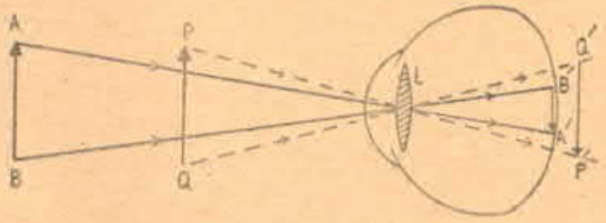
รูป 210
แสดงว่าแว่นที่ทำด้วยเลนส์เว้า
ช่วยให้คนสายตาสั้นเห็นได้อย่างไร

2. สายตายาว (Hypermetropia หรือ Long-sight) คือ การที่สายตาแลเห็นของใกล้ไม่ได้ชัด และของใกล้ได้ชัดในเมื่อของนั้นอยู่ในระยะไกลกว่าสายตาปรกติ ทั้งนี้เนื่องจาก

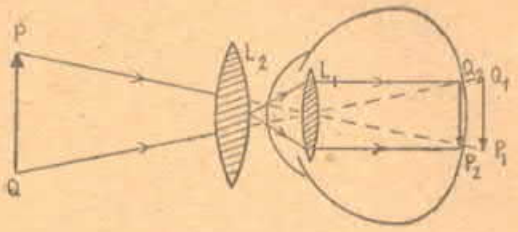
ก. ลูกตาสั้นเกินไป

หรือ ข. เลนส์ของตาแฟบเกินไป จึงทำให้ภาพของวัตถุที่อยู่ใกล้ ๆ เลยไปเกิดใกล้จากจุดรวมแสงออกไป ดังรูป 211

วิธีแก้ ให้ ใช้แว่น ที่ทำด้วยเลนส์นูนที่มีความยาวโฟกัสพอเหมาะช่วย เพื่อให้แสงสู่เข้าเสียก่อนผ่านเข้าสู่เลนส์ของตา และเมื่อผ่านเลนส์ของตาเข้าไปแล้ว ภาพก็จะไปเกิดที่จุดรวมแสงพอดี ดังรูป 212



รูป 211
แสดงว่าสายตายาวแลเห็นวัตถุไม่ชัดอย่างไร



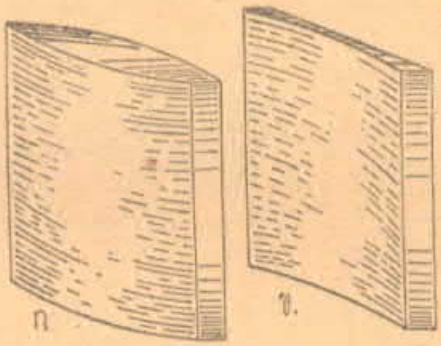
รูป 212 แสดงว่าแว่นที่ทำด้วยเลนส์นูน
ช่วยคนสายตายาวให้เห็นได้อย่างไร

สายตายาว อีกประเภทหนึ่งมักจะเป็นกับคนชรา เนื่องจากกล้ามเนื้อตาหมดกำลังยืดเลนส์ของตา คงเห็นได้ชัดแต่ของไกล ๆ สายตายาวประเภทนี้ เรียกว่า เปรสไบโอเปีย (Presbyopia)

3. อัสติกมาติซึม (Astigmatism : แก้วตาเอียง) คือ การที่สายตาแลเห็นของได้ชัดเพียงบางแนว เช่นเห็นหน้าปัดนาฬิกาชัดเฉพาะแนวเลข 12 กับ 6 หรือ เฉพาะแนวเลข 9 กับ 3 เป็นต้น เนื่องจากเกราะตาดำ (Cornea) ขรุขระไม่เป็นส่วนของทรงกลมแท้ หรือเลนส์ของตาตั้งอยู่ในลักษณะไม่ขนานกับทุกวงเหลี่ยงทุกแนว *ทั้งแนวยืนและแนวนอน* ต่างกับ ตาเหล่ ซึ่งเป็นเพราะกล้ามเนื้อกลอกลูกตาพิการ

วิธีแก้ ให้ ใช้แว่น *ทำด้วยเลนส์ทรงกระบอก* (Cylindrical lens) ช่วย ดังรูป 213 ก. และ ข.

การเลือกใช้แว่นตา คนตาปรกติ จะแลเห็นวัตถุได้ชัดทั้งในระยะไกลและใกล้ แต่ไม่ใกล้กว่า 25 ซม. หรือ 10 นิ้ว



รูป 213 เลนส์ทรงกระบอก

ระยะใกล้ (Near point) หมายถึงระยะที่ใกล้ที่สุดจากตาที่เรายังแลเห็นวัตถุได้ชัดโดยปรกติ

ระยะไกล (Far point) หมายถึงระยะที่ไกลที่สุดจากตาที่เรายังแลเห็นวัตถุได้ชัด

การเลือกชนิดของแว่นตาสำหรับคนที่มีสายตาสั้น มีหลักดังนี้

การสวมแว่นตาของผู้นั้นก็เพื่อให้มองเห็นวัตถุไกล ๆ ได้ชัดเหมือนกับคนที่มีสายตาปรกติแลเห็น ดังนั้น แว่นตาที่เขาสวมจึงต้องทำด้วยเลนส์เว้า เพื่อให้แว่นตาช่วยทำให้วัตถุที่ ∞ มาเกิดเป็นภาพที่ระยะไกลของเขา

$\therefore$ สูตรสำหรับคำนวณ ความยาวโฟกัสของแว่นตาสำหรับคนที่มีสายตาสั้น = ระยะไกลของสายตาของผู้นั้น

หรือ $$F_L = d \quad \text{..... สูตร 27}$$

วิธีพิสูจน์ที่ 1 ให้ v เป็นระยะระหว่างเลนส์ของตากับฝอยประสาทตา (Retina)

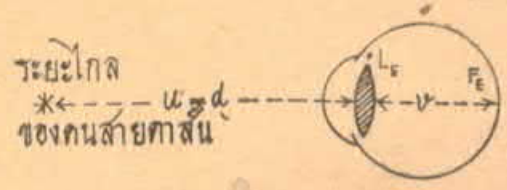
d เป็นระยะไกลของคนสายตาสั้น

F_E เป็นความยาวโฟกัสของเลนส์ของตา

F_L เป็นความยาวโฟกัสของเลนส์ของแว่นตาที่คนสายตาสั้นใช้

และ F เป็นความยาวโฟกัสรวมของเลนส์ทั้งสอง

<u>สำหรับตาเปล่า</u> เมื่อระยะไกล $= d$ หมายความว่าวัตถุอยู่ที่ d จะเกิดภาพที่ฝอยประสาทตา



จากสูตร $\frac{1}{f} = \frac{1}{v} - \frac{1}{u}$

$\therefore \quad \frac{1}{F_E} = -\frac{1}{v} - \frac{1}{d}$ .....(1)

<u>สำหรับตาเมื่อสวมแว่นตาแล้ววัตถุอยู่ที่ ∞</u> ภาพจะเกิดที่ฝอยประสาทตา

จากสูตร $\frac{1}{f} = \frac{1}{v} - \frac{1}{u}$

$\therefore \quad \frac{1}{F} = -\frac{1}{v} - \frac{1}{\infty}$

$= -\frac{1}{v} - 0$

$= -\frac{1}{v}$ .....(ก)

แต่ $\frac{1}{F} = \frac{1}{F_E} + \frac{1}{F_L}$ .....(ข)

(ก) = (ข) $\therefore \quad \frac{1}{F_E} + \frac{1}{F_L} = -\frac{1}{v}$ .....(2)

(2) − (1) $\left(\frac{1}{F_E} + \frac{1}{F_L}\right) - \frac{1}{F_E} = -\frac{1}{v} - \left(-\frac{1}{v} - \frac{1}{d}\right)$

$\frac{1}{F_L} = \frac{1}{d}$

$F_L = d$

วิธีพิสูจน์ที่ 2 ∴ การสวมแว่นตาของคนสายตาสั้น ก็เพื่อจะให้แว่นตาช่วยทำให้วัตถุที่ ∞ มาเกิดภาพที่ระยะไกลของเขา คือ d

จากสูตร $\frac{1}{f} = \frac{1}{v} - \frac{1}{u}$

f เป็นความยาวโฟกัสของแว่นตาคือ F_L

v เป็นระยะภาพ $= d$

u เป็นระยะวัตถุ $= \infty$

$$\frac{1}{F_L} = \frac{1}{d} - \frac{1}{\infty}$$

$$= \frac{1}{d} - 0$$

$$\therefore F_L = d$$

ตัวอย่างที่ 1 คนที่มีสายตาสั้นผู้หนึ่งมีระยะไกล้ 8" และระยะไกล 8" เขาจะต้องใช้แว่นตาทำด้วยเลนส์ชนิดใด มีความยาวโฟกัสเท่าไร จึงจะช่วยให้เขาแลเห็นได้ไกลเท่ากับคนที่มีสายตาปรกติ

วิธีทำ

∴ คนสายตาสั้นต้องการแว่นตาชนิดที่ทำให้วัตถุที่ ∞ มาเกิดเป็นภาพที่ระยะไกลของเขา

จาก สูตร $\frac{1}{f} = \frac{1}{v} - \frac{1}{u}$

f เป็นความยาวโฟกัสของแว่นตาสำหรับคนที่มีสายตาสั้น

v เป็นระยะภาพ $= 8''$

และ u เป็นระยะวัตถุ $= \infty$

$$\therefore \quad \frac{1}{f} = \frac{1}{8} - \frac{1}{\infty}$$

$$= \frac{1}{8}$$

$$\therefore \quad f = 8''$$

ตอบ ต้องใช้แว่นตาชนิดที่ทำด้วยเลนส์เว้าซึ่งมีความยาวโฟกัส = 8 นิ้ว

ตัวอย่างที่ 2 จากโจทย์ตามตัวอย่างที่ 1 ถามว่า เมื่อชายผู้นั้นสวมแว่นตาแล้ว ระยะใกล้ของเขาจะเป็นเท่าไร

วิธีทำ ตามโจทย์นี้ให้หาว่า เมื่อภาพอยู่ที่ระยะใกล้ของเขานั้นวัตถุจะต้องอยู่ที่ไหน

จากสูตร $\frac{1}{f} = \frac{1}{v} - \frac{1}{u}$

$$\therefore \quad \frac{1}{8} = \frac{1}{8} - \frac{1}{u}$$

$$\frac{1}{u} = \frac{1}{3} - \frac{1}{8}$$

$$= \frac{5}{24}$$

$$\therefore \quad u = \frac{24}{5}$$

$$= 4.8$$

ตอบ เมื่อสวมแว่นตาระยะใกล้จะเท่ากับ 4.8 นิ้ว

การเลือกชนิดของแว่นตาสำหรับคนที่มีสายตายาว มีหลักกังนี้

การสวมแว่นตาของผู้นั้นก็เพื่อมองดูวัตถุที่อยู่ใกล้ให้ได้ระยะเท่ากับระยะใกล้ของคนที่มีสายตาปรกติ (ที่ 25 ซม.)

สายตาปรกติ (25 ซม.) และจงหาดูว่าระยะไกลของเขาขณะสวมแว่นตาแล้วเป็นเท่าไร

วิธีทำ

$\therefore$ เขามีระยะใกล้ = 2 เมตร

$\therefore$ เมื่อแลเห็นวัตถุที่ 25 ซม. ได้

แว่นตาที่เขาสวมก็ต้องทำให้วัตถุที่ 25 ซม. ไปเกิดเป็นภาพห่างจากตาของเขา 2 เมตรหรือ 200 ซม.

จากสูตร $\frac{1}{f} = \frac{1}{v} - \frac{1}{u}$ (หรือ $\frac{1}{F_L} = \frac{1}{d} - \frac{1}{D}$)

$$\therefore \frac{1}{f} = \frac{1}{200} - \frac{1}{25}$$

$$= -\frac{7}{200}$$

$$f = -28\tfrac{4}{7}$$

การหาระยะไกลเมื่อสวมแว่นตา

คือหาว่าเมื่อเขาเห็นภาพที่ ∞ อันเกิดจากแว่นนั้น วัตถุจะต้องวางที่ไหน

จากสูตร $\frac{1}{f} = \frac{1}{v} - \frac{1}{u}$

$$\therefore -\frac{7}{200} = \frac{1}{\infty} - \frac{1}{u}$$

$$= -\frac{1}{u}$$

$$\therefore u = 28\tfrac{4}{7}$$

ตอบ ก. ต้องให้เขาสวมแว่นตาที่ทำด้วยเลนส์นูนมี $f = 28\frac{4}{7}$ ซม.
ข. เมื่อสวมแว่นตาระยะไกล $= 28\frac{4}{7}$ ซม.

หมายเหตุ เราจะเห็นได้ว่าความยาวโฟกัสของแว่นตาสำหรับคนที่มีสายตายาวเท่ากับระยะทางไกลของเขาเมื่อสวมแว่นตา

แบบฝึกหัดที่ 6

1. ต่อไปนี้คืออะไร จงให้ชัดเจน
ปริซึม, มุมของปริซึม, มุมเบี่ยงเบน, เลนส์, ศูนย์กลางของเลนส์, โฟกัสมุขสำคัญของเลนส์, โฟกัสสังยุคของเลนส์, กำลังขยายภาพของเลนส์, ความยาวโฟกัสรวมของเลนส์, กำลังของเลนส์, กำลังรวมของเลนส์, เพริสโคปเลนส์, กล้องถ่ายรูป, ฟิล์ม, เลนส์ของตา, จุดรวงเหลือง, ฝอยประสาทตา (Retina)
2. รังสีที่ผ่านเข้าไปในปริซึมมีการหักเหอย่างไร และท่านมีวิธีการทดลองให้เห็นจริงได้อย่างไร
3. มุมเบี่ยงเบนคืออะไร จงอธิบาย
4. การเบี่ยงเบนของแสงที่ผ่านปริซึมเกิดขึ้นได้อย่างไร
5. ถ้าแสงมากระทบบนปริซึมหลาย ๆ อันซึ่งมุมมีขนาดเท่ากัน ด้วยมุมตกกระทบที่เท่ากัน มุมเบี่ยงเบนของแสงโดยปริซึมแต่ละอันจะเป็นอย่างไร
6. ตามข้อ 5. ถ้าปริซึมเหล่านั้นมีดรรชนีหักเหเท่ากัน แต่มุมยอดไม่เท่ากัน มุมเบี่ยงเบนจะต่างกันไปอย่างไร
7. เมื่อไรแสงที่ผ่านปริซึมจึงจะทำมุมเบี่ยงเบนเล็กที่สุด จะทดลองและพิสูจน์ให้เห็นจริงได้อย่างไร

8. ถ้าปริซึมมีมุมยอดเท่ากับ A และทดลองได้มุมเบี่ยงเบนเล็กที่สุดเท่ากับ D จง หาว่าดรรชนีหักเหของปริซึมจะเท่ากับเท่าไร

9. รังสี ๆ หนึ่งของแสงตกกระทบผิวหน้าของปริซึมด้วยมุม 45° มุมยอดของปริซึม 60° และดรรชนีหักเหของปริซึมเท่ากับ $\frac{3}{2}$ จงเขียนแผนภาพแสดงทางเดินของรังสีนี้ผ่านปริซึมและทะลุออกสู่อากาศ

10. รังสี ๆ หนึ่งของแสงส่องตั้งฉากหน้าปริซึมแก้วด้วยมุมตกกระทบ 60° ถ้าปริซึมนี้มีระนาบมุขสำคัญเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า และ ${}_{a}\mu_{g} = 1.5$ จงเขียนรูปแสดงทางเดินของรังสีนั้น แล้วจงหามุมเบี่ยงเบนที่เกิดขึ้นด้วย

11. รังสี ๆ หนึ่งของแสงทำมุมตกกระทบกับหน้าของปริซึมด้วยมุม 60° และทำมุมหักเห 30° กับด้านนั้น จงหามุมหักเหเมื่อแสงออกสู่อากาศทางอีกด้านหนึ่ง กำหนดให้ปริซึมมีมุมยอดเท่ากับ 60°

12. ปริซึมแก้วมุมฉาก มีระนาบมุขสำคัญเป็นสามเหลี่ยมหน้าจั่ว วางอยู่บนโต๊ะ โดยมีมุมฉากเป็นมุมยอด จงเขียนรูปแสดงทางเดินของรังสีที่ขนานกับพื้นโต๊ะมาพบหน้าของปริซึม ผ่านและทะลุออกจากปริซึม

13. เมื่อมุมวิกฤตของแก้วเป็น 42° จะทำให้มีปรากฏการณ์เกี่ยวกับแสงอย่างไรบ้าง ปริซึมมีระนาบมุขสำคัญเป็นสามเหลี่ยมหน้าจั่ว มีมุมยอดเท่ากับ 90° ดรรชนีหักเหเท่ากับ $\frac{3}{2}$ จงแสดงว่าแสงที่แฉลบมาตามผิวหน้าของปริซึมจากมุมยอดเมื่อเข้าไปในแก้วแล้วจะทะลุออกทางด้านฐาน

14. ถ้าปริซึมมีมุมยอดเท่ากับ 60° และดรรชนีหักเหเท่ากับ $\frac{3}{2}$ จงเขียนรูปแสดงทางเดินของรังสี ๆ หนึ่งซึ่งตกกระทบหน้าของปริซึมทางด้านหนึ่งแล้ว ผ่านปริซึมไปถึงอีกด้านหนึ่งแล้วจะเกิดการสะท้อนกลับหมด จงวัดมุมตกกระทบครั้งแรกด้วย

15. ถ้ามุมตกกระทบครั้งแรก กับมุมหักเหที่สองของรังสีหนึ่งที่ผ่านปริซึมต่างเท่ากับ 60° จงหามุมของปริซึม เมื่อปริซึมมีดรรชนีหักเห $\frac{5}{3}$ ปริซึมมีประโยชน์ในการเปลี่ยนทางเดินของแสงอย่างไร

16. เลนส์คืออะไร แบ่งออกเป็นกี่ชนิด จงเขียนรูปประกอบ

17. ส่วนสำคัญของเลนส์มีอะไรบ้าง
โฟกัสมุขสำคัญ กับโฟกัสต่างกันอย่างไร

18. รังสีหักเหของแสงที่ผ่านเลนส์มีลักษณะอย่างไร จงอธิบายและเขียนรูปประกอบ

19. ท่านจะมีหลักในการเขียนภาพที่เกิดขึ้นโดยเลนส์อย่างไร

20. จงเขียนรูปแสดงภาพที่เกิดขึ้นโดยเลนส์นูน เมื่อวัตถุอยู่ห่างจากเลนส์นูนเป็นระยะต่าง ๆ กัน จากใกล้จนถึงไกลที่สุด เลือกเฉพาะที่เป็นตำแหน่งสำคัญ ๆ แล้วสรุปผลมาด้วย

21. เพราะเหตุใดภาพที่เกิดขึ้นโดยเลนส์เว้า จึงเป็นภาพเสมือนทั้งสิ้น จงเขียนรูปประกอบคำอธิบายสัก ๒ รูป และบอกว่าขนาดภาพเป็นอย่างไร

22. โฟกัสของเลนส์เป็นสังยุคนั้นคืออย่างไร ท่านจะมีวิธีทดลองให้เห็นจริงได้อย่างไร

23. เหตุใดความยาวโฟกัสของเลนส์นูนจึงมีค่าเป็น — และของเลนส์เว้าจึงมีค่าเป็น +

24. ระยะต่าง ๆ เกี่ยวกับเลนส์มีความสัมพันธ์กันอย่างไร จงพิสูจน์มาให้เห็นจริง

25. จงเปรียบเทียบว่าเลนส์กับกระจกเงาทรงกลมคล้ายและต่างกันอย่างไร

26. กำลังขยายภาพของเลนส์คืออะไร มีสูตรสำหรับคำนวณอย่างไร จงพิสูจน์ให้เห็นจริง

27. จากสูตร $\frac{1}{f} = \frac{1}{v} - \frac{1}{u}$ จงแสดงให้เห็นว่า

ก. กำลังขยายภาพของเลนส์เว้า $= \frac{f}{u+f}$

ข. กำลังขยายภาพของเลนส์เว้า $= \frac{f-v}{f}$

28. ถ้าภาพที่เกิดขึ้นโดยเนื้อเลนส์นูนมีขนาดเป็น x เท่าของวัตถุ จงแสดงว่า $u = \frac{x+1}{x} f$

29. เราจะรู้ที่เกิด ลักษณะ และขนาดของภาพ จากกำลังขยายภาพที่คำนวณได้อย่างไร

30. โดยไม่ต้องใช้มือสัมผัสเลนส์ ท่านจะรู้ได้อย่างไรว่าเลนส์อันหนึ่งเป็นเลนส์ชนิดไร

31. จงเขียนรูปแสดงการเกิดภาพโดยเลนส์นูนเมื่อวัตถุวางอยู่ที่ศูนย์กลางของความโค้งของเลนส์ และท่านจะใช้ความจริงข้อนี้ไปหาความยาวโฟกัสของเลนส์นูนได้อย่างไร

32. ท่านจะมีวิธีหาความยาวโฟกัสของเลนส์นูนโดยประมาณอย่างรวดเร็วได้อย่างไร

33. ท่านจะมีวิธีหาความยาวโฟกัสของเลนส์นูนได้อย่างไรบ้าง

34. โฟกัสสังยุคของเลนส์คืออะไร ท่านจะใช้ให้เป็นประโยชน์ในการหาความยาวโฟกัสของเลนส์นูนได้อย่างไร

35. ท่านจะใช้กระจกเงาระนาบช่วยในการหาความยาวโฟกัสของเลนส์นูนได้อย่างไร

36. ท่านจะใช้เลนส์ช่วยในการหาความยาวโฟกัสของกระจกเงาเว้าได้อย่างไร

37. เรามีวิธีหาความยาวโฟกัสของเลนส์เว้าได้อย่างไรบ้าง

38. เราจะมีวิธีใช้เลนส์นูนช่วยในการหาความยาวโฟกัสของเลนส์เว้าอย่างไร

39. เราจะใช้กระจกเงาเว้ามาช่วยหาความยาวโฟกัสของเลนส์เว้าได้อย่างไร

40. เราจะหาความยาวโฟกัสรวมของเลนส์บาง ๆ 2 อันที่ประกบกันได้อย่างไร

41. กำลังของเลนส์คืออะไร ท่านจะวัดได้อย่างไร เขาใช้อะไรเป็นหน่วยวัด

52. จะต้องถือเลนส์นูนที่มีความยาวโฟกัส 6 นิ้ว ห่างจากไม้บรรทัดเท่าไร จึงจะเห็นระยะ 1 นิ้วบนไม้บรรทัด ยาวเท่ากับ 3 นิ้ว

53. จะต้องเอาวัตถุวางไว้ที่ใดจึงจะได้ภาพแท้จริงมีขนาดเป็น 4 เท่าของวัตถุ เมื่อเลนส์นูนนั้นมีความยาวโฟกัส 10 ซม.

54. จงหาความยาวโฟกัสและชนิดของเลนส์ ซึ่งทำให้เกิดภาพสูง 3 นิ้ว ห่างจากเลนส์ 3 ฟุต เมื่อวัตถุสูง 9 นิ้ว

55. ภาพของเข็มจะยาวเป็น 1.5 เท่า เมื่อยักให้ตั้งฉากกับแกนมุขสำคัญของเลนส์นูน และภาพจะเกิดข้างหลังเลนส์ มีระยะห่างจากเลนส์ 80 ซม. จงหาระยะที่เข็มห่างจากเลนส์และความยาวโฟกัสของเลนส์

56. เมื่อฉากกับเทียนซึ่งจุดอยู่วางห่างกัน 86 นิ้ว จงหาว่าจะต้องเอาเลนส์นูนซึ่งมีความยาวโฟกัส 5 นิ้ว วางที่ใดข้างจึงจะได้ภาพชัดฉาก

57. จงหาขนาดของภาพของวัตถุซึ่งสูง 3 ซม. วางห่าง 36 ซม. จากเลนส์นูนซึ่งมีความยาวโฟกัส 9 ซม.

58. เลนส์นูนจะมีความยาวโฟกัสเท่าไร ถ้าเมื่อเอาวัตถุวางไว้ห่าง 20 ซม. แล้วจะได้ภาพหัวกลับ มีขนาดเป็น 4 เท่าของวัตถุ

59. จะต้องวางวัตถุห่างจากเลนส์นูนซึ่งมีความยาวโฟกัส 5 นิ้วเท่าไร จึงจะได้ภาพหัวตั้งมีขนาดเป็น 10 เท่าของวัตถุ

60. เมื่อเอาเลนส์นูนอันหนึ่งวางไว้สูงจากหนังสือ $1\frac{1}{2}$ นิ้ว จะเห็นตัวหนังสือโตเป็น 2 เท่า เลนส์นูนนั้นจะมีความยาวโฟกัสเท่าไร

61. วางวัตถุห่างจากเลนส์นูน 3 ฟุต ภาพจะไปเกิดหลังเลนส์ห่างจากเลนส์ 6 ฟุต ถ้าเลื่อนวัตถุให้ห่างจากเลนส์ออกไปอีก 2 ฟุต ภาพจะเลื่อนจากที่เดิมไปเท่าไร

62. เมื่อเอาเลนส์นูนความยาวโฟกัส 12 นิ้ว กับ 15 นิ้ว วางติดกันจะได้ความยาวโฟกัสรวมเท่าไร

63. เมื่อเอาเลนส์นูนความยาวโฟกัส 5 นิ้ว ประกบกับเลนส์เว้า ความยาวโฟกัสรวมเป็น 15 นิ้ว จงคำนวณหาความยาวโฟกัสของเลนส์เว้า

64. จุดเทียนไขไว้หน้าเลนส์นูน จะเกิดภาพขึ้นหลังเลนส์มีระยะห่าง 15 ซม. ถ้าเอาเลนส์เว้ามาวางระหว่างภาพกับเลนส์นูนให้ห่างจากเลนส์นูน 8 ซม. จะได้ภาพชัดห่างจากที่เดิมไป 3 ซม. จงหาความยาวโฟกัสของเลนส์เว้า

65. เลนส์นูนมีความยาวโฟกัส 12 ซม. วางอยู่บนกระจกเงาระนาบบนโต๊ะ ทำให้ภาพของดวงไฟที่แขวนหยู่บนเพดานไปเกิดที่เดียวกันกับดวงไฟ จงหาว่าดวงไฟอยู่สูงจากเลนส์เท่าไร

66. เลนส์นูนกับเลนส์เว้าซึ่งมีความยาวโฟกัส 10 ซม. และ 20 ซม. ตามลำดับ ประกบกันเมื่อวางวัตถุไว้หน้าเลนส์นูน 10 ซม. จงหาที่เกิดและลักษณะของภาพ

67. เลนส์เว้ามีความยาวโฟกัส 12 นิ้ว วางอยู่โดยมีแกนมุขสำคัญร่วมกับกระจกเงาเว้าซึ่งมีความยาวโฟกัส 6 นิ้ว และห่างกัน 6 นิ้ว จะต้องจุดเทียนวางไว้ที่ไหน ภาพซึ่งเกิดขึ้นโดยการให้แสงผ่านเลนส์และสะท้อนโดยกระจก จึงจะไปปรากฏอยู่ห่างจากเลนส์เท่ากับเทียน

68. วัตถุ เลนส์นูนความยาวโฟกัส $4\frac{1}{2}$ ซม. วางอยู่หน้ากระจกเงาระนาบเป็นระยะ 9 ซม. และ 3 ซม. ตามลำดับ จงหาว่าภาพจะเกิดที่ไหน

69. ถ้าต้องการฉาย 'กระจกภาพ' ขนาด 3 ตารางนิ้วให้ภาพไปตกบนฉากมีขนาด 15 ตารางนิ้ว โดยอาศัยเลนส์นูนที่มีความยาวโฟกัส 6 นิ้ว ถามว่า 'กระจกภาพ' ฉากและเลนส์จะต้องอยู่ห่างกันเท่าไร

70. กล้องถ่ายรูปที่ใช้เลนส์กับกล้องถ่ายรูปรูเข็มมีหลักการสร้างต่างกันอย่างไร

71. เราจะดัดแปลงกล้องถ่ายรูปรูเข็มให้เป็นกล้องถ่ายรูปธรรมดาได้อย่างไร

72. ตามีส่วนประกอบที่สำคัญอะไรบ้าง จงอธิบายและเขียนรูปประกอบ

73. มีผู้กล่าวว่า ตาของเรามีลักษณะคล้ายกับกล้องถ่ายรูปนั้น ท่านมีความเห็นอย่างไร

74. ทำไมคนที่มีสายตาปรกติจึงแลเห็นวัตถุได้ชัดไม่ว่าวัตถุจะอยู่ในระยะใด

75. เลนส์ของตามีความพิเศษต่างกับเลนส์ที่ทำด้วยแก้วอย่างไร

76. การที่คนและสัตว์มี 2 ตานั้นมีประโยชน์อย่างไร

77. สเตอริโอสโคป คืออะไร มีหลักการสร้างอย่างไร

78. ต่อไปนี้คืออะไร จงอธิบาย

สายตาปรกติ ระยะใกล้ และระยะไกลของตา

79. ข้อบกพร่องของทรรศนาการมีอะไรบ้าง และท่านมีวิธีแก้อย่างไร จงกล่าวมาโดยสังเขป

80. ต่อไปนี้ เกิดขึ้นได้เพราะเหตุใด และจะแก้ได้อย่างไร จงอธิบายโดยละเอียด
ก) สายตาสั้น ข) สายตายาว ค) อัสติกมาติซึม ง) สายตายาวเนื่องจากชราภาพ

81. สายตาสั้นกับสายตายาว ต่างกันอย่างไร ระยะใกล้ที่สุดที่คนสายตายาวไม่เห็นชัดเป็น 3 ฟุต จงหาความยาวโฟกัสของแว่นตาที่จะทำให้เขาอ่านหนังสือได้ เมื่อถือหนังสือห่างจากตา 1 ฟุต

82. ชายผู้หนึ่งแลเห็นได้ชัดระหว่าง 10 ซม. ถึง 100 ซม. เขาจะต้องสวมแว่นตาซึ่งทำด้วยเลนส์ชนิดใด มีความยาวโฟกัสเท่าไร จึงจะแลเห็นได้ชัดทุกระยะ และขณะเมื่อสวมแว่นตาแล้วระยะใกล้ที่สุดที่เขาเห็นชัดเป็นเท่าไร

บทที่ 7
สเปกตรัม-สี

การกระจายของแสง (Dispersion of Light) คือ การที่แสงเชิงประกอบ (Compound Light) ถูกแยกออกเป็นแสงสีต่าง ๆ ที่เป็นส่วนปรุงแต่ง เมื่อผ่านปริซึม นิวตันเป็นคนแรกที่ทดลองพบ

สเปกตรัม (Spectrum) คือ แถบแสงสีต่าง ๆ ที่ปรากฏขึ้นโดยการกระจายของแสงมีทั้งหมด ๗ สี คือ แดง ส้ม เหลือง เขียว น้ำเงิน คราม ม่วง (Red, Orange, Yellow, Green, Blue, Indigo, Violet : เขียนย่อ ๆ ว่า R O Y G B I V)

แสงที่หักเหมากที่สุด คือ แสงสีม่วง อยู่ใกล้ฐานปริซึม

แสงที่หักเหน้อยที่สุด คือ แสงสีแดง อยู่ทางสันของปริซึม

การที่แสงสีต่าง ๆ เหล่านี้หักเหไปไม่เท่ากัน เพราะว่ามีความยาวคลื่นต่างกัน

แสงสีแดงมีความยาวคลื่นยาวที่สุด คือประมาณ $\frac{8}{10000}$ มม.

แสงสีม่วงมีความยาวคลื่นสั้นที่สุด คือประมาณ $\frac{4}{10000}$ มม.

การบัดของแสงสีต่าง ๆ เราเรียกว่า **รีแฟรงจิบิลิตี** (Refrangibility)

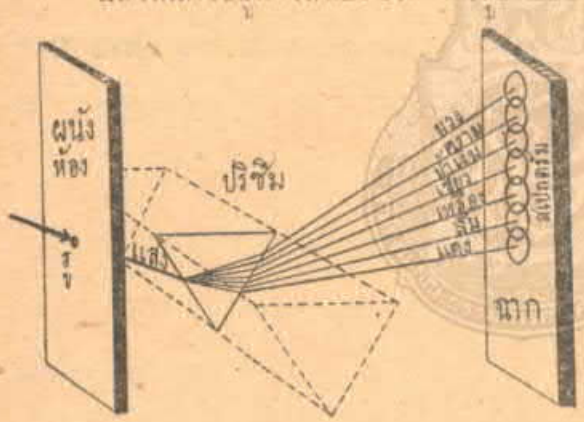
แถบแสงสีต่าง ๆ ที่หักเหออกจากปริซึมนั้น มีขนาดเท่ากับขนาดของแสงที่ไปตกกับฉากเมื่อไม่ต้องผ่านปริซึม ดังรูป 215 และ 216

สเปกตรัมมี 2 ชนิด คือ

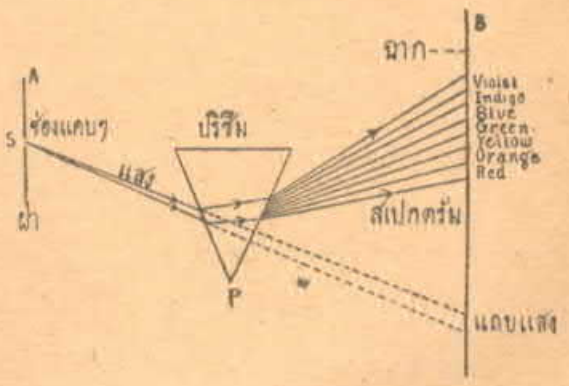
1. สเปกตรัมไม่บริสุทธิ์ (Impure Spectrum) คือสเปกตรัมที่มีแถบแสงสีเหลื่อมกันมาก ดังรูป 214 และ 216

2. สเปกตรัมบริสุทธิ์ (Pure Spectrum) คือสเปกตรัมที่มีแถบแสงสีที่แลเห็นได้ชัดเรียงกันดังรูป 217, 218 และ 219

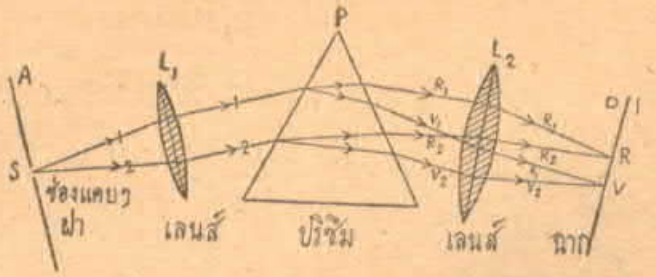
การทดลองสเปกตรัมไม่บริสุทธิ์ นิวตัน (Newton) ได้ให้แสงแดดผ่านช่องแคบ ๆ (Slit) ไปกระทบปริซึม แล้วเอาฉากรับแสงที่หักเหออกจากปริซึม จะแลเห็นแถบแสง 7 สีซ้อนกัน มีแสงสีม่วงอยู่ใกล้ด้านฐาน และแสงสีแดงอยู่ห่างฐานปริซึม ดังรูป 214 และ 215



รูป 214 การทดลองสเปกตรัมไม่บริสุทธิ์ของ Newton และการเหลื่อมกัน



รูป 215
แสดงขนาดของแถบแสงสีเท่ากับขนาดของแถบแสงขาว



III รูป 219 วางเลนส์นูนไว้หน้าและหลังปริซึม

IV รูป 218 ไม่ใช้ฉากรับสเปกตรัมกลับใช้เลนส์นูนอีกอันหนึ่งสำหรับเป็นแว่นขยาย ดูสเปกตรัมนั้น *(ให้เขียนรูปเอาเอง)*

หลักในการทำสเปกตรัมให้ได้ชัด มีดังนี้

1. ให้แสงผ่านช่องแคบที่สุดมายังปริซึม
2. ต้องวางปริซึมให้พอเหมาะ คือให้มีมุมเบี่ยงเบนเล็กที่สุด
3. ใช้เลนส์นูนช่วย เพื่อแยกแสงมิให้เกิดเหลื่อมกัน

เหตุใดแสงสีต่าง ๆ จึงมีการหักเหไม่เท่ากันเมื่อผ่านปริซึม ทั้งนี้เนื่องจากว่าแสงสีต่าง ๆ เหล่านั้นมีความยาวคลื่นไม่เท่ากันดังกล่าวมาแล้ว

สิ่งควรรู้ที่เกี่ยวกับแสงและรังสี

1. **แสงเอกพันธุ์** (Homogeneous light)

คือแสงที่เราไม่สามารถจะแยกออกเป็นแสงสีต่าง ๆ ได้อีก เช่น แสงที่เกิดจากเกลือโซเดียมคลอไรด์เผาไฟ แสงที่ผ่านแก้วสีใดสีหนึ่งแล้ว

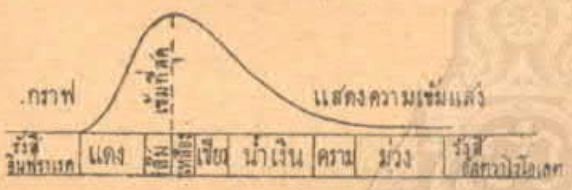
2. **รังสีอินฟราเร็ด** (Infra-red rays)

คือแสงที่มีความยาวคลื่นยาวกว่าแสงสีแดง (*ยาวกว่า* $\frac{8}{10000}$ *มม.*) แลด้วยตาเปล่าไม่เห็น แสงนี้บางทีเรียกว่า **รังสีความร้อน** (Radiant Heat)

3. **รังสีอุลตราไวโอเลต** (Ultra-violet rays)

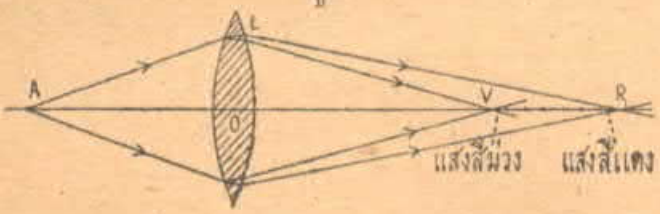
คือ แสงที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่าแสงสีม่วง (*สั้นกว่า* $\frac{4}{10000}$ *มม.*) แลด้วยตาเปล่าไม่เห็น มีประโยชน์ในการรักษาโรคได้หลายชนิด และเป็นแสงที่มีปฏิกริยาเคมีกับฟิล์มถ่ายรูป แสงนี้อาจใช้ **แก้วพิเศษ** (Fused quartz) หรือ **แก้ววิตา** (Vita glass) กรองได้

4. **ความเข้มของแสง** จากการทดลองมีผู้พบกันว่า แสงสีส้มกับสีเหลืองมีความเข้มมากที่สุด ดังกราฟที่แสดงในรูป 220



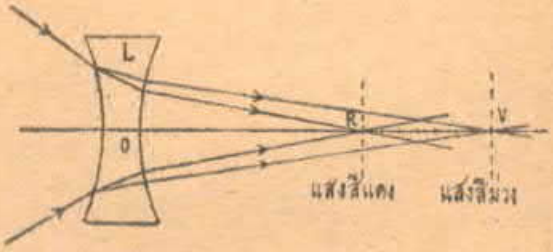
รูป 220 กราฟแสดงว่า แสงสีส้มกับสีเหลืองมีความเข้มมากที่สุด

การกระจายของแสงโดยเลนส์ เกิดขึ้นได้เพราะแสงที่เข้าไปถูกขัดออกมาไม่เท่ากัน อย่างเดียวกับที่ผ่านปริซึม เรียกว่ามี **ความคลาดรงค์** (Chromatic aberration) ดังรูป 221 และ 222



รูป 221 แสดงการกระจายของแสงโดยเลนส์นูน

รูป 222 แสดง
การกระจายของแสงโดยเลนส์เว้า



มารวมกัน ก็จะได้แสงสีขาวอีก เราเรียกสีสองสีที่เมื่อรวมกันแล้วได้ผลเป็นสีขาวว่า สีส่วนเติมเต็ม เช่นแสงสีแดงกับแสงสีน้ำเงิน แสงสีม่วงกับแสงสีเหลือง ฯลฯ ดูรูป 228 เพราะฉะนั้นสีส่วนเติมเต็ม คือสีของแสงเป็นคู่ๆ ที่เมื่อรวมกันด้วยสัดส่วนพอเหมาะ แล้วจะกลายเป็นสีขาวอย่างเดียวกับสีของแสงแดด

รงควัตถุ (Pigment) การผสมรงควัตถุที่มีสีไม่เหมือนกัน จะไม่ได้สีอย่างเดียวกับการผสมสีของแสง ตัวอย่างเช่น เมื่อรังสีเหลืองผสมกับรังสีสีน้ำเงิน ซึ่งเป็นรังสีส่วนเติมเต็มซึ่งกันและกัน ด้วยสัดส่วนที่พอเหมาะจะเกิดเป็นรังสีขาวได้ แต่รงควัตถุสีเหลือง และสีน้ำเงินผสมกัน จะได้ของผสมสีเขียว การที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะรงควัตถุสีเหลืองดูดกลืนรังสีทุกอย่าง นอกจากรังสีเหลืองและเขียว แต่รงควัตถุสีน้ำเงินดูดกลืนรังสีทุกอย่าง นอกจากรังสีสีน้ำเงินและเขียว ดังนั้นของผสมของรงควัตถุทั้งสองจึงส่งแต่รังสีเขียวอย่างเดียวมาเข้าตา

เรือง (Phosphorescence) มีสารบางชนิดที่ให้ความสว่างได้ อย่างสารที่วาวแต่เมื่อเรากันแสงไม่ให้ถูกสารนั้นเสีย ก็จะยังคงมีความสว่างอยู่ต่อไป เช่น เพชรหรือคัลเซียมซัลไฟด์ - ถ้าเอาไปทิ้งให้ถูกแสงอาทิตย์หรือแสงไฟฟ้าไว้นานพอสมควร แล้วเอาไปทิ้งไว้ในที่มืด สารนี้ก็ยังคงให้ความสว่างอยู่ต่อไป ปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า "เรือง"

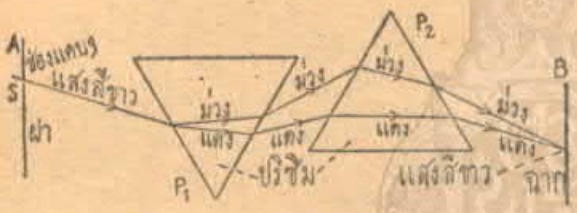
วาว (Fluorescence) มีสารหลายอย่างซึ่งสามารถจะให้ความสว่างได้เมื่อแสงซึ่งมีความยาวคลื่นอย่างหนึ่งส่องไปถูก กรณีเช่นนี้ไม่ใช่การสะท้อน เพราะแสงสว่างที่เปล่งออกมาจากสารเหล่านั้นมีความยาวคลื่นต่างกันกับแสงที่ผ่านเข้าไป ปรากฏการณ์ที่สารดูดกลืนแสงอย่างหนึ่งเข้าไปและเปล่ง

แสงอีกอย่างหนึ่งออกมาเช่นนี้เรียกว่าวาว ตัวอย่างสารที่มีสมบัติเช่นนี้ได้แก่ น้ำมันกาซ สีแอนิลิน ควินินซัลเฟต

เรื่องเบ็ดเตล็ดที่เกี่ยวกับเรื่องสี

ก. การรวมแสงสีต่าง ๆ แสงสีต่าง ๆ ซึ่งเป็นส่วนประกอบของแสงสีขาว อาจจะทำให้กลับเป็นแสงสีขาวตามเดิมได้ โดยวิธีต่อไปนี้

วิธีที่ 1 ใช้ปริซึมขนาดเท่ากันและทำด้วยแก้วชนิดเดียวกัน 2 อัน วางให้สันกลับกันและให้หน้าปริซึมขนานกัน วางให้พอเหมาะจน แสงที่กระจายออกจากกันเมื่อผ่านปริซึมอันแรกและเมื่อผ่านปริซึมอันที่สองแล้ว จะกลับรวมกันเป็นแสงสีเดิมอีก ดังรูป 227

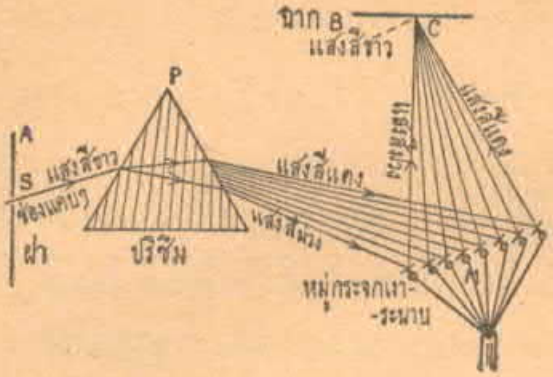


รูป 227 การรวมแสงสีต่าง ๆ ให้กลับเป็นแสงสีเดิมโดยใช้ปริซึม 2 อัน

รูป 228 แสดงวิธีหาแสงสีส่วนเติมเต็มของแสงสีต่าง ๆ

โดยวิธีนี้เอง เราก็จะสามารถ หาแสงสีส่วนเติมเต็ม ของแสงสีต่างๆ ได้ดังแสดงในรูป 228

วิธีที่ 2 ใช้กระจกเงาระนาบแผ่นเล็ก ๆ 7 แผ่น รับแสงสีต่าง ๆ ที่กระจายออกจากกันโดยปริซึม ให้สะท้อนกลับไปรวมกันทุก ๆ เดียวกันบนฉาก ดังรูป 229 วิธีนี้ใช้ หาสีส่วนเติมเต็ม และสิ่งเป็นส่วนประกอบของแสงสีต่าง ๆ ได้ อีกวิธีหนึ่ง ด้วย



รูป 229 ใช้กระจกเงาระนาบ
รวมแสงสีต่าง ๆ ที่กระจายออกโดยปริซึม

รูป 230
จานสีของนิวตัน

วิธี 3 ใช้จานสีของนิวตัน (Newton's colour disc) ทำด้วยแผ่นกระดาษแข็งทาสีต่าง ๆ แบ่งไว้เป็นช่อง ๆ ดังรูป 230 หมุนจานสีให้เร็วเกินกว่า 16 รอบต่อวินาที เราจะเห็นสีต่าง ๆ เหล่านั้นกลายเป็นสีขาวหมด ทั้งนี้เพราะตาเราสังเกตไม่ทัน

ข. สีของเทหวัตถุขณะที่ถูกเผาไฟจะบอกให้เรารู้อุณหภูมิได้คร่าว ๆ

ถ้าเราเผาเทหวัตถุให้ค่อย ๆ ร้อนขึ้น ๆ เราจะกะประมาณอุณหภูมิของเทหวัตถุนั้นได้ดังนี้ :-

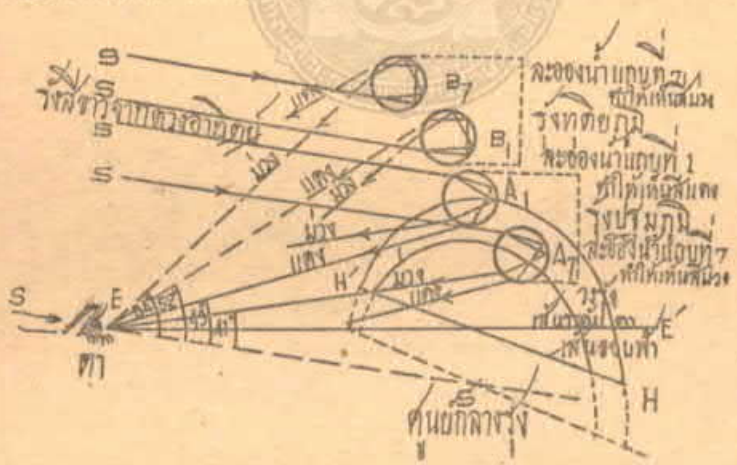
ถ้ามีสีแดงเมื่อแรกเห็น	อุณหภูมิจะเป็นประมาณ	525°	ซ.
ถ้ามีสีแดงมัว	,,	800°	ซ.
ถ้ามีสีแดงจ้า	,,	1000°	ซ.
ถ้ามีสีเหลือง	,,	1200°	ซ.
ถ้ามีสีเหลืองนวล	,,	1300°	ซ.
ถ้ามีสีขาวจ้า	,,	1500°	ซ. ขึ้นไป

ค. ตาบอดสี (Colour-Blindness)

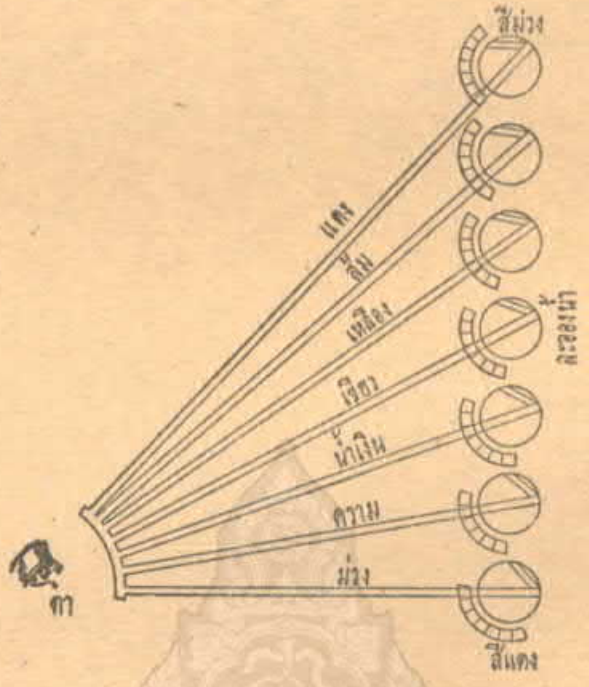
ตาของคนเรามีประสาทอยู่สามชุดบนผิวของ Retina ประสาททั้งสามชุดนี้มีความรู้สึกต่อสีแดง, สีเขียวและสีน้ำเงิน ถ้าประสาทชุดใดชุดหนึ่งพิการไป เช่นชุดที่มีความรู้สึกต่อสีแดง เราเรียกว่าคนผู้นั้นเป็นคนตาบอดสีแดง เขาจะมองเห็นสีผิดไปจากที่เป็นจริง เช่นเห็นสีแดงเป็นสีเหลือง เพราะประสาทชุดนี้ไม่ทำหน้าที่รับรู้สีแดง

ง. รุ้งกินน้ำ (Rainbow) คือ แถบแสงสีต่าง ๆ อย่างสเปกตรัมที่อยู่เรียงกันแลเห็นเป็นวงโค้งในท้องฟ้าทางด้านตรงข้ามกับดวงอาทิตย์ ดังรูป 231

รุ้งกินน้ำเกิดขึ้นจากการที่แสงอาทิตย์ส่องผ่านไปกระทบละอองน้ำที่ลอยอยู่ในอากาศขณะนั้น แล้วผ่านเข้าไปในเม็ดละอองน้ำ เกิดการสะท้อนกลับหมดและแสงนี้ถูกทำให้กระจายออกมาเป็นสีต่าง-ๆ อย่างเดียวกับเมื่อแสงสีขาวผ่านปริซึม



รูป 231 แสดง
1. เหตุที่เกิดรุ้งตัวล่างและตัวบน
2. ตาแลเห็นรุ้งได้อย่างไร
3. เหตุที่เห็นรุ้งเป็นวงโค้ง



รูป 232

แสดงการกระจายแสงของละอองน้ำทั้ง ๗ แถบ ของรุ้งตัวล่าง

รูป 233 แสดง

1. การสะท้อนกลับหมด
2. การกระจายแสงของเม็ดละอองน้ำ

ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ที่ทำให้เกิดรุ้งกินน้ำ

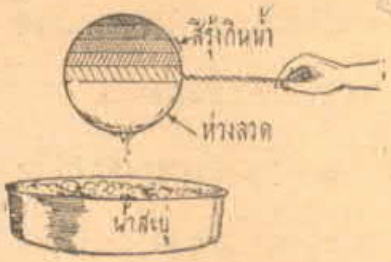
ดวงอาทิตย์ต้องอยู่ในทิศตรงกันข้ามกับรุ้ง และผู้แลเห็นรุ้งต้องหันหลังให้ดวงอาทิตย์

อาจไม่ใช่รุ้งตัวเดียวกัน ผู้อยู่ยนเครื่องบินอาจมีโอกาสเห็นรุ้งกินน้ำเป็นวงกลมเต็มวง

เหตุที่ฝนมักไม่ตกเมื่อเราแลเห็นรุ้งกินน้ำแล้ว เพราะว่าฝนได้ตกทางด้านที่เกิดรุ้งแล้ว และท้องฟ้าเหนือปริเวณที่เราอยู่ กำลังปลอดโปร่ง แสงอาทิตย์จึงผ่านไปทำให้เกิดรุ้ง และเราแลเห็นได้

วิธีทดลองการเกิดรุ้งกินน้ำ 1. หันหลังให้ดวงอาทิตย์ อมน้ำพ่นขึ้นไปในอากาศด้วยมุมที่พอเหมาะ จะเห็นสีของรุ้งในกลุ่มละอองน้ำที่เราพ่นออกไปนั้น

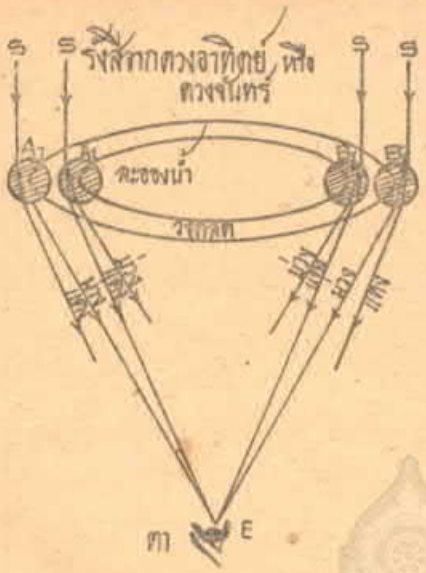
2. หันข้างให้ดวงอาทิตย์ เอาห่วงลวดเล็ก ๆ ที่ทำขึ้นชุบน้ำสบู่ให้ติดกันเป็นแผ่นบางใส ยกขึ้นรับแสงอาทิตย์ เราจะแลเห็นแถบสีอย่างเดียวกับรุ้งกินน้ำ เรียงอยู่หลายแถบที่ตอนยนของน้ำสบู่ซึ่งบางจนเกือบจะขาดอยู่แล้ว ดังรูป 234 ตอนบนจะให้สีชัดเจนกว่าตอนที่ต่ำลงมา



รูป 234
ทำรุ้งกินน้ำด้วยน้ำสบู่

รูป 235
ทำรุ้งกินน้ำโดยฉายแสงขาวผ่านน้ำในคนโทแก้วกลม

3. ฉายแสงขาวผ่านเข้าไปในคนโทแก้วกลมซึ่งบรรจุน้ำใส ๆ ไว้เต็มด้วยมุมที่พอเหมาะ เอาฉากรับแสงที่ถูกน้ำกระจายออกมา จะได้สีอย่างเดียวกันกับสีของรุ้งกินน้ำ ดังรูป 235



รูป 236 แสดงว่า
กลดของดวงอาทิตย์หรือดวงจันทร์
เกิดขึ้นได้อย่างไร

กลดของดวงอาทิตย์และดวงจันทร์ คือ รุ้งที่เกิดขึ้นในลักษณะที่ดวงอาทิตย์หรือดวงจันทร์อยู่ตรงหรือเกือบตรงศีรษะ ดังรูป 236

เกิดจากแสงผ่านละอองน้ำแข็งอยู่มากในท้องฟ้าขณะนั้น แล้วละอองน้ำทำให้เกิดการกระจายแสงขึ้น

เรื่องรุ้งกินน้ำขอให้ทำความเข้าใจให้ชัดว่า

1. *การกระจายแสงของละอองน้ำในอากาศนั้นเกิดมีขึ้นทุกเม็ด เป็นม่านในท้องฟ้า มิใช่เพียงเป็นวงโค้งแค่ตัวรุ้งเท่านั้น*

2. *แสงที่ถูกกระจายออกมาเข้าตาเรานั้นเพียงเป็นรูปตามวงรุ้งเท่านั้น*

3. *ตามรูป 231 เขียนแสดงไว้แต่การกระจายแสงของละอองน้ำแถบที่อยู่ริมสุดเท่านั้น คือ A_1 กับ A_2 หรือ B_1 กับ B_2 ขอให้คิดเห็นว่าในระหว่างนั้น คือ A_1 กับ A_2 ยังมีแถบแสงสีอื่นๆ อีก 5 แถบมาเข้าตาของเรา* ดังรูป 232

จ. สีของท้องฟ้า

ตามปรกติในอากาศย่อมมีฝุ่นละอองอยู่ทั่วไป เมื่อแสงจากดวงอาทิตย์มากระทบฝุ่นละอองเหล่านี้เข้า ก็จะสะท้อนหรือกระจายไปทุกทิศทาง แสงที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่าแสงสีส้มคือแสงสีม่วงและสีน้ำเงินสะท้อนหรือกระจายได้ง่ายกว่า ดังนั้นการที่เราแลเห็นท้องฟ้าเป็นสีน้ำเงินก็เนื่องจากตาของเราได้รับคลื่นแสงนี้ ถ้าท้องฟ้าปราศจากฝุ่นละอองแล้ว เราจะเห็นท้องฟ้าเป็นสีดำ เราอาจจะใช้ความจริงอันนี้อธิบายได้ว่า เหตุใดกลางวันยุหรือกลางวันไฟจึงปรากฏมีสีน้ำเงินได้.

แบบฝึกหัดที่ 7

1. การกระจายของแสงคืออะไร ใครเป็นคนแรกที่ค้นพบ และพบโดยวิธีใด
2. สเปกตรัมคืออะไร เราจะทดลองให้เห็นได้อย่างไร และทำอย่างไรจึงจะได้สเปกตรัมชัด
3. ต่อไปนี้คืออะไร จงให้คำนิยาม

การกระจายของแสง สเปกตรัม ปริซึม รินเฟรงจิบิลิตี แสงเอกพันธุ์ รังสีอินฟราเรด รังสีอุลตราไวโอเลต กำลังการกระจายแสงของวัสดุ สีปฐมภูมิ สีส่วนเติมเต็ม สีเชิงประกอบ เรืองวาว ฉานสีของนิวตัน ตาบอดสีรุ้งกินน้ำ

4. ถ้ามีผู้บอกท่านว่าแสงอาทิตย์นั้นประกอบด้วยสีต่าง ๆ หลายอย่าง ไม่ใช่สีขาว ท่านจะเชื่อหรือไม่ จงอธิบาย
5. เพราะเหตุใด แสงอาทิตย์เมื่อผ่านปริซึมจึงถูกแยกออกเป็นแสงสีต่าง ๆ ได้

6. ท่านมีหลักอย่างไรบ้างที่จะให้ได้สเปกตรัมที่ชัดเจน จงอธิบายวิธีทำสเปกตรัมมาสัก 1 วิธี

7. สเปกตรัมมีถึง 7 สี สีไหนมีความเข้มมากที่สุด

8. เหตุใดเมื่อเอาเลนส์มาส่องดูวัตถุจึงแลเห็นตามขอบของภาพมีสีต่าง ๆ แต่ภาพที่ได้จากเลนส์ ในกล้องถ่ายรูปจึงไม่เป็นเช่นนั้น

9. ความคลาดรงค์คืออะไร การแก้ความคลาดรงค์ของเลนส์นั้นเขามีวิธีแก้อย่างไรบ้าง

10. เหตุใดเราจึงแลเห็นภาพตามริมกระจกเงาระนาบที่เจียระไนไว้เป็นสีต่าง ๆ

11. กำลังการกระจายแสงของวัสดุคืออะไร กำลังการกระจายแสงของเลนส์ กำลังของเลนส์ นั้นต่างกันอย่างไร

12. ต่อไปนี้คืออะไร จงให้บทนิยาม

กำลังขยายภาพ กำลังการกระจายแสง กำลังของเลนส์

13. สเปกตรัมมีเพียง 7 สีเท่านั้นหรืออย่างไร

14. ทำไมตาเราจึงแลเห็นสีต่าง ๆ ได้

15. สีส่วนเติมเต็มนั้นคืออะไร ท่านจะมีวิธีทดลองหาได้อย่างไร

16. ทำไมเมื่อเราเอาแสงสีฉานส่องไปยังเทหวัตถุทึบพื้นสีแดง จึงแลดูมืดหรือดำไป แต่เมื่อเอาแสงสีขาวส่องไปจะแลเห็นเป็นสีแดงอย่างชัดเจน จงอธิบาย

17. ที่กล่าวว่าแก้วแต่ละสีย่อมกรองแสงสีฉาน นอกจากแสงสีเดียวกับมันและแสงสีขาวนั้นมีความจริงเพียงใด

18. เหตุใดการผสมสีของรงควัตถุ (Pigments) กับการผสมสีของแสงจึงได้สีผิดกัน

19. ท่านมีวิธีทำสเปกตรัมให้กลับเป็นแสงสีขาวได้อย่างไร จงอธิบายการทดลองประกอบ และเขียนรูปมาด้วย
20. ท่านจะใช้ความรู้เกี่ยวกับเรื่องแสงสีต่าง ๆ ประมาณอุณหภูมิของเทหวัตถุได้อย่างไร
21. ดาวยอดสีมีลักษณะอย่างไร เพราะเหตุใดดาวจึงยอดสีได้
22. ทำไมเราจึงเห็นท้องฟ้าขณะปราศจากเมฆมีสีเป็นสีน้ำเงินอ่อน
23. รุ้งกินน้ำ คืออะไร และเกิดขึ้นได้อย่างไร
24. เพราะเหตุใดบางครั้งเราจึงแลเห็นรุ้งกินน้ำตัวเดียว และบางครั้งจึงแลเห็นสองตัว
25. ถ้ากระจกหน้าต่างเป็นสีเขียว ท่านจะแลเห็นผู้ซึ่งนุ่งผ้าสีน้ำเงิน และเลือดแดงเป็นสีอะไร จงให้เหตุผล
26. ทำอย่างไร จึงจะได้สเปกตรัมบริสุทธิ์โดยไม่ต้องใช้เลนส์ช่วย
27. ถ้าเอาแก้วสีแดงมากั้นสเปกตรัมก่อนถึงฉาก จะปรากฏผลอย่างไร
28. ทำไมเขาจึงใช้หลอดไฟฟ้าสีแดงในห้องมืดล้างรูปถ่าย

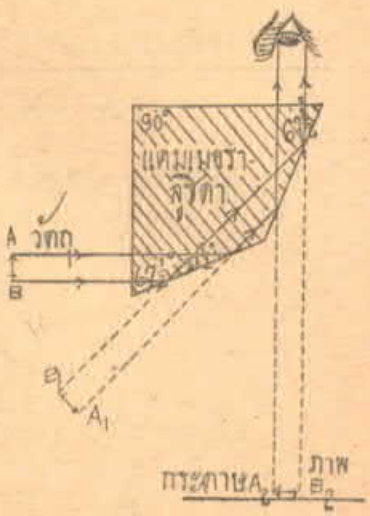
บทที่ 8
อุปกรณ์ที่ใช้ในวิชาแสง

เรื่องเกี่ยวกับอุปกรณ์ที่เรียนมาแล้วในบทก่อน ๆ มี

1. กล้องถ่ายรูปรูเข็ม (Pinhole Camera) กล่าวในหน้า 10
2. เซกสแตนส์ (Sextant) กล่าวในหน้า 58
3. กล้องส่องคาไลโดสโคป (Kaleidoscope) กล่าวในหน้า 66
4. กล้องเปอริสโคปแบบง่าย ๆ กล่าวในหน้า 68
5. กล้องถ่ายรูปที่ใช้เลนส์ (Photographic Camera) กล่าวในหน้า 187
6. สเตอรีโอสโคป (Stereoscope) กล่าวในหน้า 195

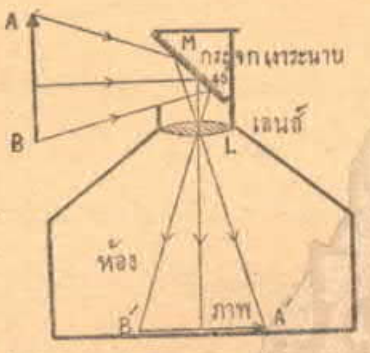
ต่อจากนี้จะได้เรียนเกี่ยวกับอุปกรณ์อย่างอื่น ๆ อีก ตามลำดับ

แคมเมอราลูซิดา (Camera Lucida) หรือ **ปริซึมแบบวอลลัสตัน** (Wollaston's Prism) ทำด้วยแก้วซึ่งมีระนาบสำคัญทั้งสี่ประกอบกันเป็นรูปสี่เหลี่ยม มีมุม 135° อยู่ตรงกันข้ามกับมุม 90° ใช้เป็นอุปกรณ์สำหรับ ลอก แบบ สถานที่ ให้ ถูก สัด ส่วน เหมือนของจริง ดังรูป 237

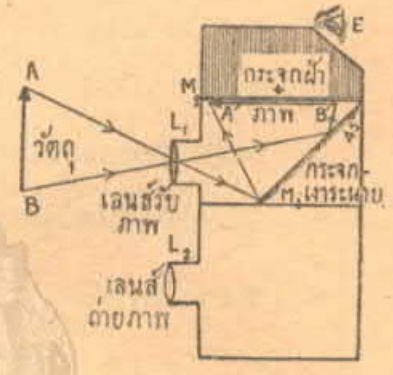


รูป 237 แคมเมอราลูซิดา
หรือปริซึมแบบวอลลัสตัน

แคมเมอราออบสคูรา (Camera Obscura) เป็นอุปกรณ์สำหรับส่องดูวัตถุที่อยู่นอกห้องให้มาเกิดเป็นภาพขึ้นในห้อง ประกอบด้วยกระจกเงาระนาบ M วางเอียงเป็นมุม 45° สำหรับรับภาพของวัตถุนอกห้องคือ AB ให้แสงจากวัตถุสะท้อนโดยกระจกเงา M แล้วผ่านเลนส์นูน L ซึ่งวางไว้พอเหมาะที่จะทำให้เกิดภาพแท้จริง A′B′ ชัดที่ฝาผนังห้อง ดังรูป 238 กล้องถ่ายรูปบางแบบมีอุปกรณ์สำหรับรับและหักกลับภาพคล้ายคลึงกัน ดังรูป 239



รูป 238
แคมเมอราออบสคูรา



รูป 239
แสดงการรับและการหักกลับภาพในกล้องถ่ายรูปบางแบบ

กล้องเปอริสโคปเรือดำน้ำ (Submarine periscope)

ประกอบด้วยปริซึม 2 อัน เลนส์นูน 4 อัน ลำกล้องกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 นิ้ว ยาวประมาณ 20 ฟุต ประกอบกันอยู่ดังรูป 241 โดยมี

ก. **ปริซึมมุม 45°** P_1 สำหรับรับแสงจากวัตถุให้สะท้อนเข้าสู่ลำกล้อง

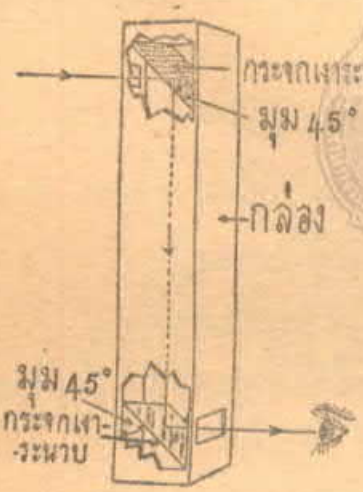
ข. **เลนส์นูน** L_1 รับแสงสะท้อนจากปริซึม P_1 ทำให้เกิดภาพแท้จริง A_1B_1 ที่หน้าเลนส์นูน L_2

ค. แสงจาก A_1B_1 ระผ่านเลนส์นูน L_2 และ L_3

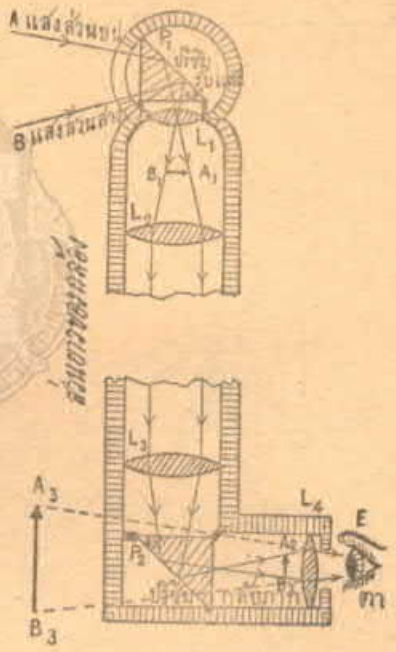
ง. เมื่อแสงออกจากเลนส์นูน L_3 ก็จะหักเหเข้าสู่ปริซึม P_2

จ. ปริซึมมุม 45° P_2 จะสะท้อนแสงทำให้เกิดภาพกลับเป็นภาพแท้จริง A_2B_2 ที่หน้าเลนส์นูน L_4 และอยู่ระหว่างโฟกัสกับศูนย์กลางของเลนส์นูนอันนั้นพอดี

ฉ. เลนส์นูน L_4 จะทำให้ภาพแท้จริง A_2B_2 ไปเกิดเป็นภาพเสมือน A_3B_3 หัวตั้ง ขนาดโตขึ้นหน้าเลนส์

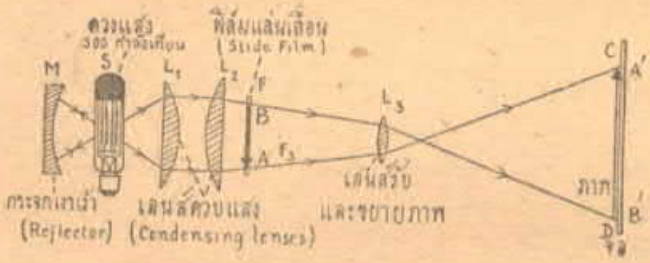


รูป 240
กล้องเปอริสโคปแบบง่าย ๆ



รูป 241
กล้องเปอริสโคปเรือดำน้ำ

เครื่องฉายกระจกภาพ (Projection Lantern) มีส่วนประกอบดังรูป 242

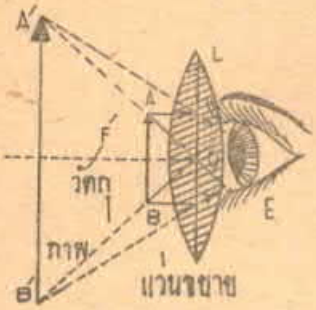


รูป 242 แสดงส่วนประกอบของเครื่องฉายกระจกภาพ

กลไกของเครื่องฉายกระจกภาพนั้นเป็นหลักเบื้องต้นของเครื่องฉายภาพยนตร์

แว่นขยายหรือกล้องจุลทรรศน์อย่างง่าย ๆ (Reading glass หรือ Simple microscope)

คืออุปกรณ์ที่ใช้สำหรับดูสิ่งเล็ก ๆ ให้เห็นโตขึ้น ดังรูป 243 มีส่วนประกอบและหลักการใช้ดังนี้



รูป 243 แว่นขยาย หรือ กล้องจุลทรรศน์อย่างง่าย

1. ใช้เลนส์นูนทีมี f น้อย ๆ
2. วางวัตถุไว้ระหว่างโฟกัสกับศูนย์กลางของเลนส์
3. ตากล้องมองให้ติดกับเลนส์
4. เลื่อนเลนส์ไปมาจนเห็นภาพชัด
5. ภาพที่เห็นจะเป็นภาพเสมือน หัวตั้ง ขนาดโตกว่าวัตถุ ข้างเคียงกับวัตถุ

(ระยะที่ภาพอยู่ห่างจากตา = ระยะใกล้ของตา)

กำลังขยายภาพของแว่น มีสูตรอย่างเดียวกับเลนส์นูน

คือ $m = \frac{v}{u}$

แต่สำหรับแว่นขยาย $v = D$ *(ระยะใกล้ของตาผู้ใช้แว่น)*

$$\therefore \quad m = \frac{D}{u} \quad \text{.....สูตร 30}$$

หรือจากสูตร $m = 1 - \frac{v}{f}$

$$\therefore \quad m = 1 - \frac{D}{f} \quad \text{.....สูตร 31}$$

ถ้าจะใช้วิธีหากำลังขยายภาพอย่างธรรมดาแบบเลนส์นูนก็ได้ คือ หา u จากสูตร $\frac{1}{f} = \frac{1}{v} - \frac{1}{u}$ (v = *ระยะใกล้ของตาผู้ดู*) แล้วหา m จากสูตร $m = \frac{v}{u}$

ตัวอย่างที่ 1 ถ้าระยะใกล้ของตาเท่ากับ 25 ซม. ให้หากำลังขยายภาพของแว่นขยายซึ่งมีความยาวโฟกัสเท่ากับ 2.5 ซม.

วิธีทำ จากสูตร $m = 1 - \frac{D}{f}$

m เป็นกำลังขยายภาพของแว่น = ?

D เป็นระยะใกล้ของตาผู้ใช้ = 25 ซม.

และ f เป็นความยาวโฟกัสของแว่น = −2.5 ซม.

$$m = 1 - \frac{25}{-2.5}$$

$$= 1 + 10$$

$$= 11$$

ตอบ กำลังขยายภาพของแว่นขยาย = 11

ตัวอย่างที่ 2 ถ้าจะใช้เลนส์นูนวางให้ติดตาให้เห็นภาพโต 5 เท่าของวัตถุ จะต้องใช้เลนส์ที่มีความยาวโฟกัสเท่าไร ในเมื่อระยะใกล้ของตาเท่ากับ 25 ซม.

วิธีทำ จากสูตร $m = 1 - \frac{D}{f}$

m เป็นกำลังขยายภาพของเลนส์ = 5

D เป็นระยะใกล้ของตา = 25 ซม.

และ f เป็นความยาวโฟกัสของเลนส์ = ? ซม.

$$\therefore \quad 5 = 1 - \frac{25}{f}$$

$$\therefore \quad \frac{25}{f} = 1 - 5$$

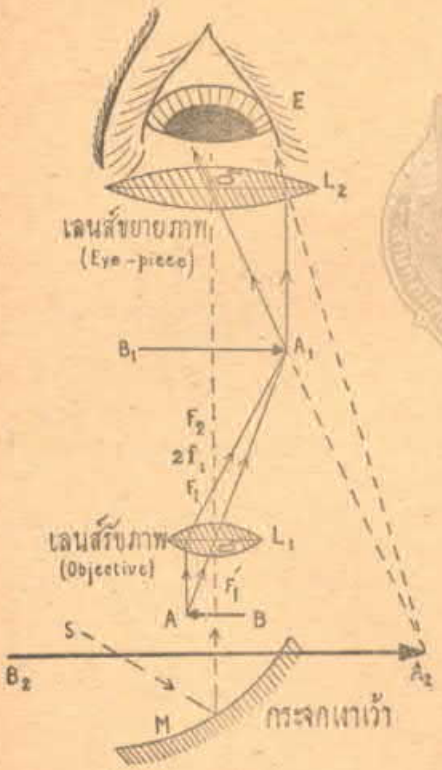
$$= -4$$

$$\therefore \quad f = \frac{25}{-4}$$

$$= -6.25$$

ตอบ ความยาวโฟกัสของเลนส์เท่ากับ 6.25 ซม.

กล้องจุลทรรศน์เชิงประกอบ (Compound Microscope) คือกล้องขยายที่มีกำลังขยายภาพมาก ๆ ใช้สำหรับดูสิ่งที่แลด้วยตาเปล่าไม่เห็นเช่นเชื้อโรคเป็นต้น มีส่วนประกอบที่สำคัญ คือเลนส์นูน 2 อัน ที่มีความยาวโฟกัสน้อย ๆ อันหนึ่งเป็นเลนส์รับภาพ (Objective) กับเลนส์ที่มีความยาวโฟกัสพอสมควรอีกอันหนึ่งเป็นเลนส์ขยายภาพ (Eye-piece)



รูป 244 แสดงแผนภาพของกล้องจุลทรรศน์เชิงประกอบ

ส่วนประกอบอย่างอื่นที่แท่นสำหรับวางสไลด์ (Slide) *(แผ่นกระจกใสบางประกบสิ่งที่ต้องการไว้)* กระจกเงาเว้าสำหรับสะท้อนแสงผ่านสไลด์เข้ากล้อง ดังรูป 244

วิธีใช้ ให้ปฏิบัติดังนี้

1. วางสไลด์ AB ขนแท่นให้อยู่ระหว่างจุด 2f กับจุด F ของเลนส์รับภาพ L_1

2. จัดกระจกเงาเว้า M ให้สะท้อนแสงผ่านสไลด์เข้าสู่กล้อง

3. จัดเลนส์ขยายภาพ L_2 ให้พอดีได้ภาพจาก L_1 มาอยู่ในระหว่างโฟกัสกับเลนส์ คือจุด F_2 กับจุด O_2

การหากำลังขยายภาพของกล้องจุลทรรศน์เชิงประกอบ ต้องคิดเป็น 2 ขั้น แล้วเอามาคูณกัน ดังนี้

1. หากำลังขยายภาพของ Objective อย่างเลนส์ธรรมดา

คือ $\frac{1}{f} = \frac{1}{v} - \frac{1}{u}$ และ $m = \frac{v}{u}$

2. หากำลังขยายภาพของ Eye-piece อย่างแว่นขยาย

คือ $m = 1 - \frac{D}{f}$

3. กำลังขยายภาพของกล้องจุลทรรศน์เชิงประกอบ $= m$ ใน ข้อ $1 \times m$ ในข้อ 2

ตัวอย่าง ในกล้องจุลทรรศน์อันหนึ่ง Objective มีความยาวโฟกัส $= 0.5$ ซม. Eye-piece มีความยาวโฟกัสเท่ากับ 3 ซม. ภาพที่ได้จะอยู่ห่างจาก Objective 20 ซม. จงหากำลังขยายภาพของกล้องอันนี้

วิธีทำ

ประโยชน์ของเลนส์นูนที่เกี่ยวกับกล้องต่าง ๆ เราทราบแล้วว่า :-

1. เมื่อวัตถุอยู่ ระหว่างจุด F กับเลนส์ ภาพที่เกิดขึ้นจะเป็น ภาพเสมือน หัวตั้ง ขนาดโตขึ้น อยู่ข้างเดียวกับวัตถุ

จึงใช้ทำ กล้องจุลทรรศน์อย่างง่าย ๆ และใช้เป็น เลนส์ขยายภาพ (Eye—piece) ในกล้องจุลทรรศน์เชิงประกอบ ในกล้องโทรทรรศน์ และใช้ในกล้องเปอริสโคปเชิงประกอบ

2. เมื่อวัตถุอยู่ ระหว่างจุด 2f กับจุด F จะได้ ภาพแท้จริง หัวกลับ ขนาดโตกว่าวัตถุ อยู่คนละข้างกับวัตถุและอยู่นอกจุด 2f

จึงใช้เป็น เลนส์รับภาพ (Objective) ในกล้องจุลทรรศน์เชิงประกอบ

3. เมื่อวัตถุอยู่ นอกจุด 2f จะได้ ภาพแท้จริง หัวกลับ ขนาดเล็กลง อยู่คนละข้างกับวัตถุ และอยู่ระหว่างจุด F กับจุด 2f

จึงใช้เป็น เลนส์รับภาพ ของกล้องโทรทรรศน์

กล้องโทรทรรศน์ (Telescope) คืออุปกรณ์สำหรับใช้ส่องดูของที่อยู่ไกล ๆ มี 2 ชนิด คือ

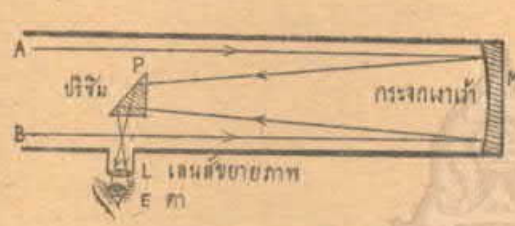
1. เมื่อใช้ กระจกเงาทรงกลม กับ เลนส์นูน ประกอบกันเป็น กล้องโทรทรรศน์สะท้อนแสง (Reflecting Telescope) ใช้ประโยชน์ในการดูดาว เป็นแบบโบราณ เดี๋ยวนี้ไม่นิยมใช้กันแล้ว กล้องแบบนี้จะเรียกว่า กล้องโทรทรรศน์สำหรับดูดาว (Astronomical Telescope) ก็ได้

2. เมื่อใช้ เลนส์นูนล้วน เรียกว่า กล้องโทรทรรศน์หักเห (Refracting Telescope) จะใช้ดูดาวก็ได้ ถ้าจะใช้เป็นแบบส่องดามพื้นดิน (Terrestial Telescope) และต้องใส่ เลนส์หกกลับภาพ (Inverting Lens) เข้าระหว่าง

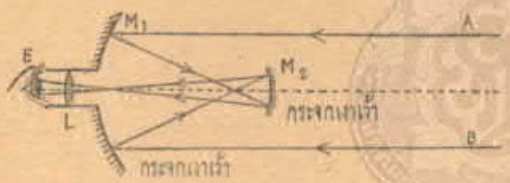
เลนส์รับภาพ และ เลนส์ขยายภาพ เพื่อหักกลับภาพให้เป็นภาพหัวตั้งเสียก่อน เลนส์หักกลับภาพ ต้องเป็น เลนส์นูน จะเป็นเลนส์ เดี่ยว หรือ เลนส์ คู่ ก็ได้

แผนภาพกล้องโทรทรรศน์แบบต่าง ๆ

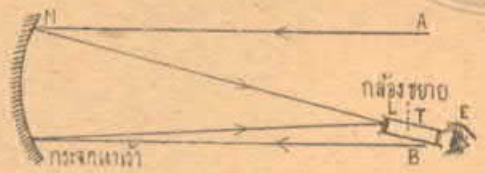
ชนิดที่ 1 กล้องโทรทรรศน์สะท้อนแสง



รูป 245 กล้องโทรทรรศน์สะท้อนแสง แบบอย่างนิวตัน (Newtonian type) จะใช้กระจกเงาระนาบแทนปริซึมก็ได้



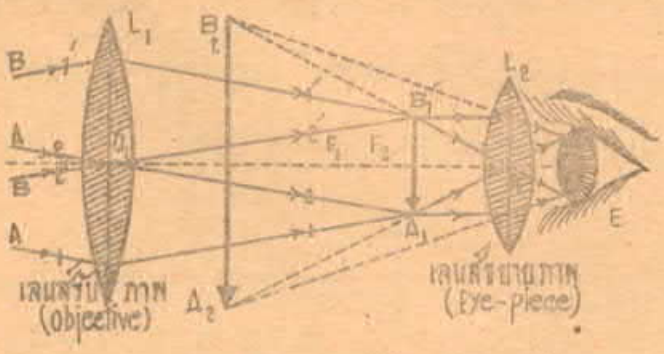
II *รูป 246 กล้องโทรทรรศน์สะท้อนแสง แบบอย่างเกรกอรี (Gragorian type)*



III *รูป 247 กล้องโทรทรรศน์สะท้อนแสง แบบอย่างแฮร์เชเลียน (Harschelian type)*

หมายเหตุ กล้องชนิดที่ใหญ่ที่สุด เป็นแบบอย่างของเกรกอรี อยู่ที่หอดูดาวพาโลมา ประเทศสหรัฐอเมริกา กระจกเงาเว้ามีเส้นผ่าศูนย์กลาง 200 นิ้ว หนัก $14\frac{1}{2}$ ตัน ใช้เวลาสร้างถึง 19 ปี ราคา 6 ล้าน 5 แสนเหรียญอเมริกัน สร้างเสร็จเมื่อปี ค.ศ. 1948

ชนิดที่ 2 กล้องโทรทรรศน์หักเห



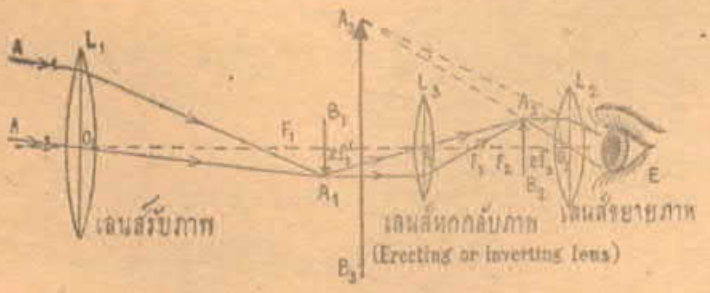
I รูป 248 กล้องโทรทรรศน์หักเหสำหรับดูดาว (Astronomical telescope) มีความยาวโฟกัสของเลนส์รับภาพมากกว่าความยาวโฟกัสของเลนส์ขยายภาพมาก จัดให้ภาพจากเลนส์รับภาพมาเกิดภาพในจุด F ของเลนส์ขยายภาพ คือให้เลนส์ทั้งสองมีจุด F ทับกัน ดังนั้นระยะที่เลนส์ L_1 และ L_2 ห่างกันจึง $= f_o + f_E$

f_o คือความยาวโฟกัสของ Objective

f_E คือความยาวโฟกัสของ Eye-piece

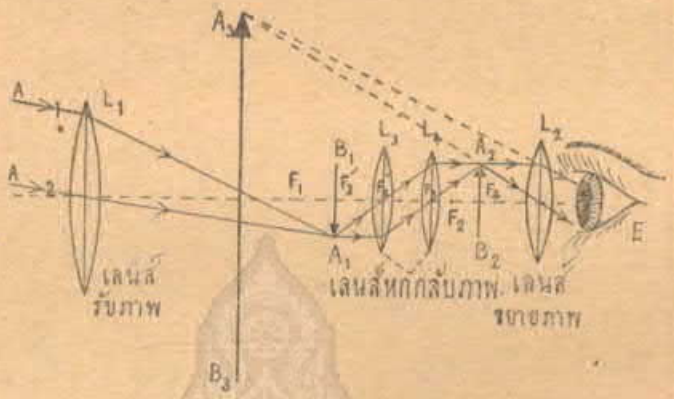
กำลังขยายภาพของกล้อง $= \frac{\text{f ของเลนส์รับภาพ}}{\text{f ของเลนส์ขยายภาพ}}$

$$\therefore \quad m = \frac{f_o}{f_E} \quad \text{.....สูตร 32}$$



II รูป 249 กล้องโทรทรรศน์หักเหแบบส่องทางไกล (Terrestial tele-

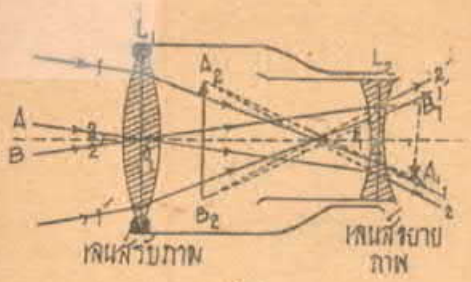
scope) ที่ใช้เลนส์นูนอันเดียวหักกลับภาพ โดยให้ภาพจากเลนส์รับภาพไปเกิดที่จุด 2 f ของเลนส์หักกลับภาพ และให้ภาพจากเลนส์หักกลับภาพไปเกิดภายในจุด F ของเลนส์ขยายภาพ



III รูป 250 กล้องโทรทรรศน์หักเหสำหรับส่องทางไกล ที่ใช้เลนส์นูนคู่ซึ่งมี f เท่ากันหักกลับภาพ เลนส์ทั้งสองนี้วางไว้ให้อยู่ที่จุด F ของกันและกัน และให้ภาพจากเลนส์รับภาพมาเกิดที่จุด F ของเลนส์หักกลับภาพอันแรก และภาพที่เกิดขึ้นหลังจากผ่านเลนส์หักกลับภาพอันหลังแล้วไปเกิดภายในจุด F ของเลนส์ขยายภาพ

กล้องตูละครหรือกล้องโทรทรรศน์แบบอย่างกาลิเลโอ (Opera Glasses หรือ Galileo's telescope) ประกอบด้วย เลนส์นูน เป็นเลนส์รับภาพ และ เลนส์เว้า เป็นเลนส์ขยายภาพ

หลัก วางเลนส์เว้าไว้ระหว่างเลนส์นูนกับภาพแท้จริง ซึ่งจะเป็นเสมือนหนึ่งวัตถุสำหรับเลนส์เว้า แล้วเลนส์เว้าก็จะดูแสงออกทำให้เกิดภาพขนาดโตขึ้นที่หน้าเลนส์เว้านั้น ดังรูป 251



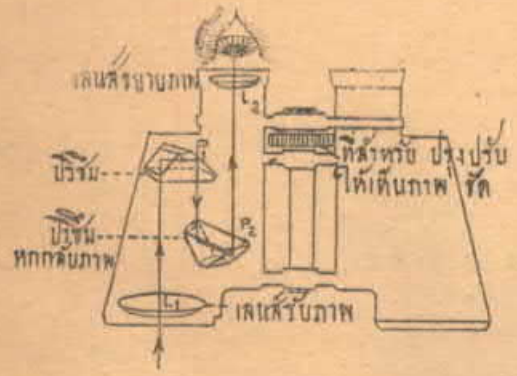
รูป 251 กล้องดูละคร
หรือกล้องโทรทรรศน์แบบอย่างกาลิเลโอ

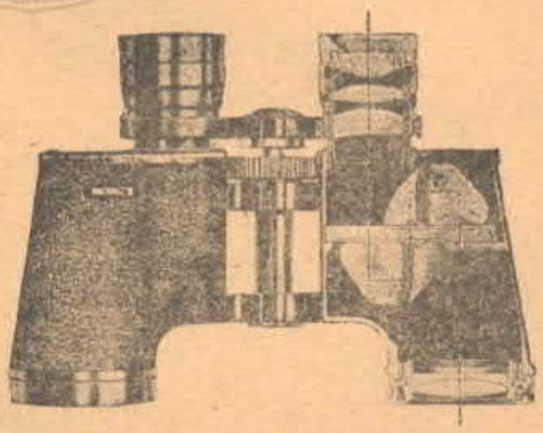
กล้องนี้มีกำลังขยายภาพน้อยประมาณ 2-3 เท่า แต่ลำกล้องสั้นและกระทัดรัดดี เหมาะที่จะนำไปใช้ดูละคร หรือแข่งม้า

กล้องส่องแบบอย่างใช้ปริซึม (Prism Binoculaps) เป็นกล้องโทรทรรศน์แบบที่ใช้ส่องดูด้วยตาพร้อมกันทั้งสองตา นิยมใช้กันทั่วไป ส่วนประกอบและหลักการสร้างมีดังนี้

1. มีเลนส์รับภาพ และเลนส์ขยายภาพเหมือนในกล้องโทรทรรศน์สำหรับดูดาว

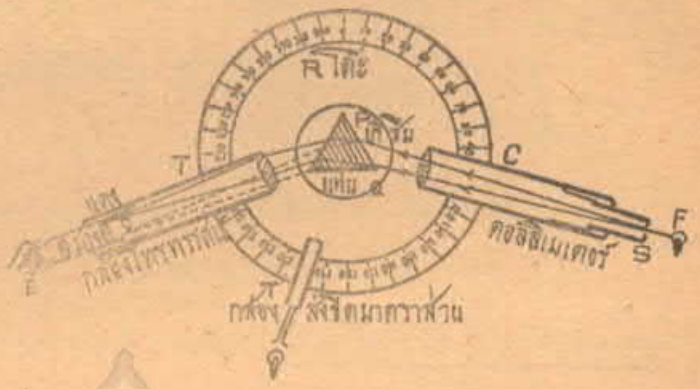
2. ใช้ปริซึม 2 อันวางกลับกันสำหรับสะท้อนแสง และหักกลับภาพให้เป็นภาพหัวตั้งด้วย



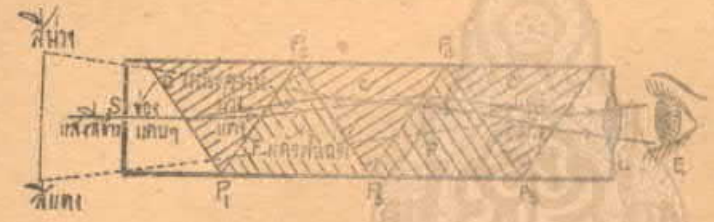


รูป 252 กล้องส่องแบบอย่างใช้ปริซึมสะท้อนแสงและหักกลับภาพ

สเปกโตรสโคปหรือสเปกโตรมิเตอร์ (Spectroscope หรือ Spectrometer)



รูป 253
สเปกโตรสโคป
หรือสเปกโตรมิเตอร์



รูป 254
สเปกโตรมิเตอร์มือที่
ใช้ปริซึม 3 อันเรียงกลับกัน

สเปกโตรสโคป คือ อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับตรวจสเปกตรัมบริสุทธิ์ มีส่วนประกอบดังรูป 253 คือ

1. R เป็นโต๊ะกลม
2. P เป็นปริซึมสำหรับกระจายแสง
3. C เป็นคอลลิเมเตอร์ (Collimator) คือกล้องที่มีช่องแคบ ๆ (Slit) ซึ่งขยายให้ใหญ่เล็กได้ สำหรับให้แสงผ่านไปกระทบปริซึม
4. T เป็นกล้องโทรทรรศน์ สำหรับดูสเปกตรัมที่ผ่านปริซึมมา
5. T' เป็นกล้องส่งขีดมาตราส่วนผ่านปริซึม สะท้อนเข้ากล้องโทรทรรศน์ T

สเปกโตรมิเตอร์ คือสเปกโตรสโคปนั่นเอง แต่ที่ของโต๊ะ B มีวิธีแบ่งองศา และเวอร์เนียสำหรับอ่านมุมและระยะที่เคลื่อนกล้องไปด้วย

ประโยชน์ ใช้ตรวจสเปกตรัม วัดมุมของปริซึม และกรรชนีหักเหของสารต่าง ๆ ได้ ตลอดจนใช้ตรวจสารต่าง ๆ ที่ไม่อาจจะตรวจโดยวิธีอื่น

สเปกโตรมิเตอร์มือ (Direct-vision Spectrometer) คืออุปกรณ์ที่ใช้สำหรับตรวจสเปกตรัมให้รู้ผลเร็ว ประกอบด้วยปริซึม 3 อันหรือ 5 อัน ที่ทำด้วยแก้วต่างชนิดกัน เลือกที่มีมุมพอเหมาะซึ่งเมื่อวางเรียงกลับกันแล้วจะทำให้มุมเบี่ยงเบนหมดไปพอดี แล้วใช้เลนส์นูนช่วยขยายภูมิกที่หนึ่ง ดังรูป 254

แบบฝึกหัดที่ 8

1. จงบอกชื่ออุปกรณ์ที่เกี่ยวกับแสงสว่าง เท่าที่ท่านได้เรียนรู้มา
2. สิ่งต่อไปนี้เป็นอะไร มีลักษณะหรือส่วนประกอบอย่างไร และใช้สำหรับทำอะไร เปอริสโคป แคมเมอราลูซิดา แคมเมอราออบสคูรา เซกสแตนต์ คาไลโดสโคป เครื่องฉายกระจกภาพ กล้องจุลทรรศน์เชิงประกอบ กล้องโทรทรรศน์สำหรับส่องดูดาว เลนส์รับภาพ เลนส์หักกลับภาพ เลนส์ขยายภาพ กล้องดูละคร กล้องโทรทรรศน์สำหรับส่องทางไกล กล้องส่องแบบอย่างใช้ปริซึม สเปกโตรสโคป สเปกโตรมิเตอร์ สเปกโตรมิเตอร์มือ
3. เลนส์รับภาพในกล้องจุลทรรศน์ กับในกล้องโทรทรรศน์ต่างกันอย่างไร เพราะเหตุใดจึงใช้ต่างกันเช่นนั้น
4. จงอธิบายส่วนประกอบของกล้องโทรทรรศน์ชนิดที่ใช้เลนส์เว้าเป็นเลนส์ขยายภาพ ตลอดจนการขยายภาพด้วย

5. หลักการวางหรือเลื่อนเลนส์ขยายภาพในกล้องโทรทรรศน์ทุกชนิดเว้นแต่แบบของกาลิเลโอมีอย่างไร เพราะเหตุใดจึงต้องจัดวางเช่นนั้น

6. กล้องโทรทรรศน์หักเหสำหรับดูดาวนั้นมีส่วนประกอบอย่างไร จงอธิบายและเขียนรูปประกอบ และเมื่อท่านต้องการระดัดแปลงให้เป็นกล้องสำหรับส่องดูบนพื้นดินท่านจะทำอย่างไร จงเขียนรูปประกอบด้วย

7. ถ้าท่านมีเลนส์นูน 2 อัน มีความยาวโฟกัสน้อยอันหนึ่ง และมากอันหนึ่ง ท่านจะจัดวางอย่างไรจึงจะเป็น ก) กล้องจุลทรรศน์ ข) กล้องโทรทรรศน์

8. ถ้าท่านมีเลนส์นูนอันหนึ่ง กับเลนส์เว้าอีกอันหนึ่ง ท่านจะจัดวางอย่างไรจึงจะให้เป็นกล้องขยายได้

9. กล้องส่องที่ใช้ปริซึมนั้น ต่อกล้องอย่างไร ต่ออย่างไรจึงเป็นที่นิยมกัน

10. ในการตรวจสเปกตรัมให้ได้ผลเร็วนั้น เขาใช้อุปกรณ์อะไร และอุปกรณ์นั้นมีส่วนประกอบและหลักอย่างไร จงเขียนรูปประกอบด้วย

11. สเปกโตรสโคปกับสเปกโตรมิเตอร์ ต่างกันอย่างไร และใช้ประโยชน์สำหรับอะไร

12. ท่านจะใช้เลนส์นูนเป็นแว่นขยายได้อย่างไร และกำลังขยายภาพของแว่นนั้นอาศัยจำนวนใดบ้าง จงพิสูจน์ให้เห็นจริงด้วย

13. จงหากำลังขยายภาพของแว่นขยายที่มีความยาวโฟกัส 5 ซม. และเขียนรูปแสดงการขยายภาพของแว่นขยายนั้นด้วย

14. จงหากำลังขยายภาพของแว่นขยายซึ่งมีความยาวโฟกัส 1" ถ้าระยะใกล้ของผู้ใช้เท่ากับ 12"

15. คนที่มีระยะใกล้ 35 ซม. เมื่อใช้เลนส์นูนมีความยาวโฟกัส 15 ซม. จะแลเห็นวัตถุมีขนาดเป็นอย่างไร

16. ท่านมีหลักในการคำนวณกำลังขยายภาพของกล้องจุลทรรศน์อย่างไร

17. กำลังขยายภาพของกล้องโทรทรรศน์สำหรับดูดาว จะต้องจำนวนอะไรบ้าง เพราะเหตุใด

18. ถ้าท่านมีเลนส์นูน 2 อัน มีความยาวโฟกัส 1 ซม. และ 25 ซม. ท่านจะจัดอย่างไรจึงจะได้กล้องโทรทรรศน์ และกล้องโทรทรรศน์นี้จะมีกำลังขยายภาพเท่าใด

19. กล้องโทรทรรศน์อันหนึ่งยาว 20 ฟุต จงหาความยาวโฟกัสของเลนส์ขยายภาพซึ่งจะทำให้เกิดภาพโตขึ้น 1000 เท่า

20. กล้องจุลทรรศน์อันหนึ่งมีเลนส์รับภาพซึ่งมีความยาวโฟกัส 0.5" และเลนส์ขยายภาพซึ่งมีความยาวโฟกัส 1" เลนส์ทั้งสองอยู่ห่างกัน 6" ถ้าผู้ใช้มีระยะใกล้ของสายตา 8" จงหาว่าควรวางวัตถุไว้ห่างจากเลนส์รับภาพเท่าใด และจงหากำลังขยายภาพของกล้องอันนี้ด้วย

21. เมื่อใช้เลนส์นูนที่มีความยาวโฟกัส 5 ซม. กับ 30 ซม. สองอันทำเป็นกล้องโทรทรรศน์จะได้กล้องที่มีกำลังขยายภาพเท่าใด

22. กล้องโทรทรรศน์สำหรับดูดาวชนิดสะท้อนแสง ประกอบด้วยอะไรบ้าง จงเขียนแผนภาพของกล้องแต่ละชนิดนั้นมาด้วย

23. เราใช้เลนส์นูนเป็นประโยชน์ในการสร้างกล้องจุลทรรศน์และกล้องโทรทรรศน์อย่างไร จงอธิบายเหตุผลของการใช้นั้น ๆ มาด้วย

บทที่ 9
ความเร็วของแสง

ความเร็วของแสง มีผู้ทดลองหาได้ว่าแสงมีความเร็วประมาณวินาทีละ 186,000 ไมล์ หรือ 300,000 กม.

ปีแสง (Light year) คือ หน่วยสำหรับวัดระยะดวงดาว

1 ปีแสง คือ ระยะทางที่แสงเดินได้ในเวลา 1 ปี

(∴ 1 ปีแสง = ระยะทาง $186{,}000 \times 60 \times 60 \times 24 \times 365$ ไมล์)

วิธีหาความเร็วของแสง มีหลายวิธีด้วยกัน คือ

I **วิธีของโรเมอร์** (Römer : ค.ศ. 1675) การหาความเร็วของแสงโดยวิธีนี้อาศัยการเกิดจันทรุปราคาของดวงจันทร์ดวงหนึ่ง ที่เป็นบริวารของดาวพฤหัสบดี (Jupiter) ซึ่งจะเห็นเกิดขึ้นทุกระยะ 42 ชั่วโมงเศษ วิธีนี้มีหลักการดังนี้

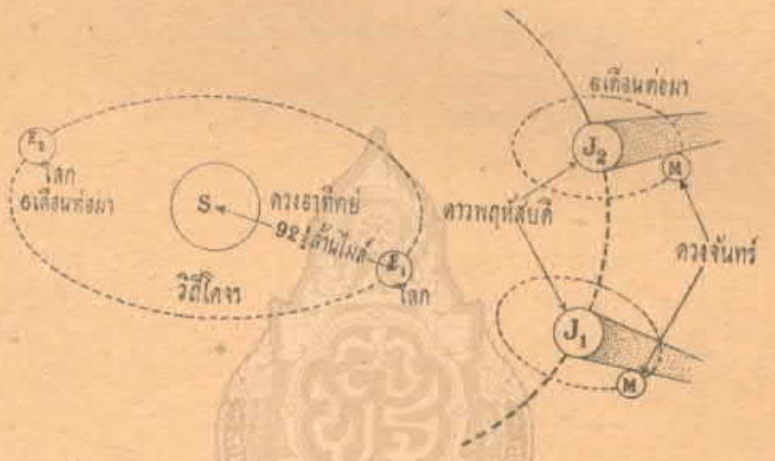
ก. เมื่อโลกอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้ที่สุดกับดาวพฤหัสบดี ก็คอยสังเกตการเกิดจันทรุปราคาของดวงจันทร์ดวงนั้น ว่าเมื่อเริ่มเกิดครั้งหนึ่งกับเริ่มเกิดครั้งต่อไป เป็นเวลาห่างกันเท่าไร

ข. ครั้นเมื่อโลกไปอยู่ในตำแหน่งที่ไกลที่สุดจากดาวพฤหัสบดี คือต่อไปอีก 6 เดือน ก็คอยสังเกตการเกิดจันทรุปราคาของดวงจันทร์ดวงนั้นอีก ว่าเมื่อเริ่มเกิดครั้งหนึ่งกับเริ่มเกิดครั้งต่อไป เป็นเวลาห่างกันเท่าไร จะปรากฏว่าเวลาในครั้งหลังนี้นานกว่าครั้งแรก

ค. ผลต่างอันนี้ก็คือเวลาที่แสงใช้ไปในการเดินทางจากตำแหน่งแรกที่โลกอยู่ถึงตำแหน่งหลัง

ง. ถ้าเรารู้ระยะทางระหว่างตำแหน่งทั้งสอง ก็จะคำนวณความเร็วของแสงได้

จงดูรูป 255 ประกอบ



รูป 255 แสดงวิธีหาความเร็วของแสงตามวิธีของ Römer

ตามรูป สมมุติว่า

ก. ที่ E_1 เห็นจันทรุปราคายนดวงจันทร์ M ทุก ๆ 42 ช.ม. 28 นาที 35 วินาที

ข. ที่ E_2 เห็นจันทรุปราคายนดวงจันทร์ M ช้าไป 16 นาที 36 วินาที

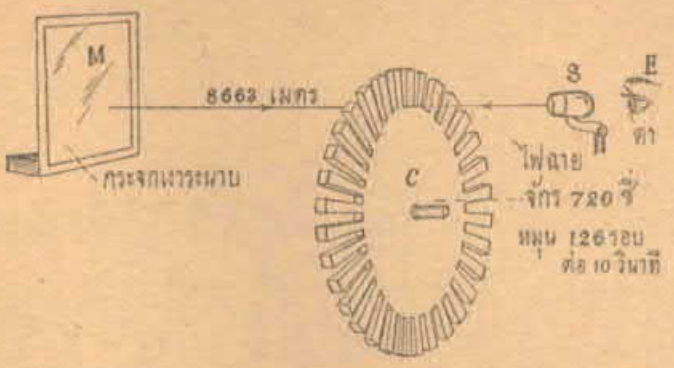
ค. เส้นผ่าศูนย์กลางของวงโคจรของโลก (*คือระยะทางระหว่าง* E_1 *กับ* E_2)

$= 92\frac{1}{2} \times 2$ ล้านไมล์

$\therefore$ ในเวลา $(16 \times 60) + 36$ วินาที แสงเดินทางได้ $= \frac{185\,000\,000}{2} \times 2$ ไมล์

และ $\therefore$ ในเวลา 1 วินาที แสงเดินทางได้ $= \frac{185\,000\,000}{996}$ ไมล์

$= 186\,000$ ไมล์



รูป 256 วิธีหาความเร็วของแสงตามวิธีของ Fizeau

II วิธีของฟิโซ (Fizeau : ค.ศ. 1849) หาจากการทดลองจริง ๆ โดยฉายแสงผ่านกงจักรไปพบกระจกเงาระนาบ แล้วให้กงจักรหมุนรอบแกนในแนวนอน เร็วจนแสงที่สะท้อนจากกระจกเงามาถูกซี่จักรบังพอดี ตาที่มองอยู่หลังซี่จักรจะแลไม่เห็นแสงสะท้อนกลับเลย ดังรูป 256

ในการคำนวณให้หา

1. ระยะทางที่แสงผ่านช่องกงจักร แล้วสะท้อนกลับมายังซี่จักร
2. เวลาที่ซี่จักรเคลื่อนที่ไป 1 ซี่
3. เวลาเท่าในข้อ (2) แสงเดินได้ทางไกล = ระยะทางในข้อ (1) แล้วจงคำนวณหาความเร็วของแสง

การทดลองของ Fizeau

กระจกเงากับซี่กงจักรห่างกัน	8663	เมตร
ซี่กงจักรมี	720	ซี่
ตัวกงจักรหมุนได้ 126 รอบในเวลา	10	วินาที

M_2 เป็นกระจกเงาระนาบที่หมุนได้รอบแกนตามแนวนอนที่จุด C วางกั้นแสงที่ผ่านจากเลนส์นูน L ให้พอเหมาะสะท้อนไปเกิดภาพที่กระจกเงาเว้า M_1 ซึ่งมีศูนย์กลางของความโค้งอยู่ที่จุด C ดังนั้นแสงที่สะท้อนจากกระจกเงาเว้า M_1 ก็จะกลับมาตามแนวเดิม ผ่านเลนส์ L ไปเกิดภาพแท้จริงที่จุด S_2 ต่อจากนี้เริ่มหมุนกระจกเงา M_2 โดยเร็ว จนเคลื่อนที่มาอยู่ที่ M_2' ซึ่งทำมุม θ กับ M_2 แสงที่สะท้อนจากกระจกเงา M_2 ไปพบกระจกเงา M_1 จะสะท้อนกลับไปพบกระจกเงา M_2' และผ่านเลนส์ L ไปเกิดเป็นภาพแท้จริงที่จุด S_1 แสงที่สะท้อนจาก M_2' จะต้องบิดไปเป็นมุม เท่ากับ 2θ ดังรูป 257 เมื่อเรารู้ความเร็วที่หมุนกระจกเงาจาก M_2 มายัง M_2' และระยะทาง CM_1 แล้วเราก็จะคำนวณความเร็วของแสงโดยการเทียบได้ดังนี้

เวลาที่หมุนกระจก M_2 มาอยู่ที่ M_2' แสงเดินทางได้ = ระยะทาง $CM_1 + M_1C$

สมมุติว่า ระยะ $M_1C = l$

ระยะ $S_2S_1 = d$

v เป็นความเร็วของแสง

$\therefore$ เวลาที่แสงเดินทางไปและกลับระหว่าง $CM_1 = \frac{2l}{v}$ .....(1)

n เป็นจำนวนรอบที่กระจกหมุนต่อวินาที

$\therefore$ กระจก M_2 หมุนได้ $2\pi n$ เรเดียนต่อวินาที

$\therefore$ มุม θ เรเดียน M_2 จะหมุนผ่านในเวลา $= \frac{\theta}{2\pi n}$ .....(2)

(1) = (2) $\therefore \frac{2l}{v} = \frac{\theta}{2\pi n}$

และ $v = \frac{4\pi nl}{\theta}$ .....(3)

ถ้าระยะ $LS_2 = r$

$\therefore 2\theta = \frac{d}{r}$

$\theta = \frac{d}{2r}$

จาก (3) $v = \frac{4\pi nl}{\frac{d}{2r}}$

$= \frac{8\pi nlr}{d}$

ในการทดลองของฟูโคลต์ระยะ CM_2 ประมาณ 20 เมตร และเขาคำนวณหาความเร็วของแสงได้วินาทีละ 298 000 กิโลเมตร

ถ้าเอาท่อน้ำวางในทางเดินของแสงระหว่าง C และ M_2 และทำการทดลองโดยทำนองเดียวกันแล้ว อาจจะหาความเร็วของแสงในน้ำได้

แบบฝึกหัดที่ 9

1. จงให้นิยาม และอธิบาย ปีแสง ดาวฤกษ์
2. เพราะเหตุใดก่อนที่ Römer และใคร ๆ จะคิดหาวิธีวัดความเร็วของแสงได้ จึงมีผู้กล่าวกันว่า "แสงไม่มีความเร็ว"
3. เท่าที่ท่านทราย มีนักวิทยาศาสตร์ผู้ใดบ้างที่คิดหาความเร็วของแสงได้สำเร็จ
4. ใครเป็นผู้ที่คิดหาความเร็วของแสงสำเร็จเป็นคนแรก เขาใช้หลักและวิธีอย่างไร
5. ใครที่คิดหาความเร็วของแสงโดยอาศัยการคำนวณจากแสงของดาวดวงอื่น
6. จงอธิบาย หลักการ และวิธีหาความเร็วของแสง ตามวิธีของฟูโคลต์

หอสมุดกระทรวงศึกษาธิการ

องค์การค้าของคุรุสภา

พิมพ์ที่โรงพิมพ์คุรุสภา
นายกำธร สีตรกุล ผู้พิมพ์และผู้โฆษณา
๑๐ พฤศจิกายน ๒๔๕๘