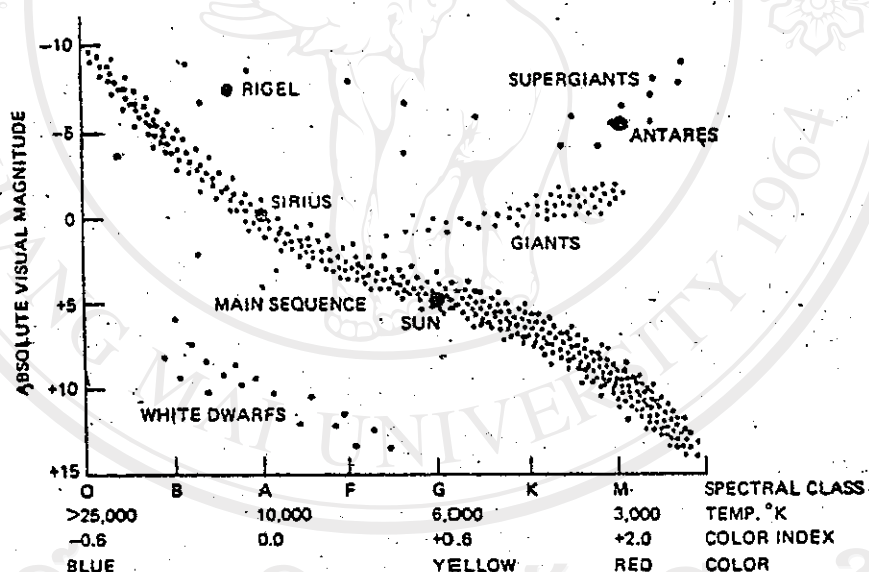


บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 วิวัฒนาการของดาวฤกษ์ (Stellar Evolution)

ในวิวัฒนาการของดาว เมื่อดาวยุบตัวเข้าสู่แถบบางหลัก (Main Sequence) พลังงานที่ดาวปลดปล่อย มาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชัน (Fusion Nuclear Reaction) โดยใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนเป็นหลักในกระบวนการเผาไหม้ไฮโดรเจน (Hydrogen Burning) ซึ่งก่อให้เกิดความดัน ได้แก่ ความดันเนื่องจากแก๊ส (Gas Pressure ; P_g) เนื่องจากอิเล็กตรอนอิสระ (Electron Pressure ; P_e) เนื่องจากการแผ่รังสี (Radiation Pressure ; P_r) ค่าความดันรวมจะสมดุลกับแรงจากการยุบตัว เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของดาว (Gravitation) ทำให้ดาวที่อยู่ในแถบบางหลัก มีความสมดุลทางอุทกสถิตยศาสตร์ (Hydrostatic Equilibrium)



รูปที่ 2.1 แผนภาพ เฮช-อาร์ (H-R Diagram)

เมื่อพิจารณาดำแหน่งของดาวฤกษ์ในแผนภาพเฮช-อาร์ จะพบว่าดาวส่วนใหญ่ จะตกอยู่ที่ตำแหน่งบริเวณแถบบางหลัก ซึ่งจะมีคุณสมบัติ คือจะมีองค์ประกอบทางเคมีเป็นเนื้อเดียวกัน (Chemical Homogeneous) และกำลังอยู่ในระยะที่ไฮโดรเจนที่ใจกลางเกิดปฏิกิริยาเทอร์โมนิวเคลียร์เปลี่ยนไปเป็นฮีเลียม อัตราส่วนระหว่างฮีเลียมต่อไฮโดรเจนจะมีค่าโดยเฉลี่ยคงที่ ยกเว้นที่แกนกลางของดาว ช่วงนี้ดาวฤกษ์จะแผ่พลังงานและส่องสว่างอย่างสม่ำเสมอ

คุณสมบัติทั่วไปของดาวฤกษ์ที่เป็น Homogeneous ในแถบขบวนการหลัก กรณีดาวที่มวลมาก อุณหภูมิ ณ ใจกลางจะมีค่าสูงมาก สูงกว่า 16×10^8 เคลวิน ทำให้ปฏิกิริยานิวเคลียร์ภายใน ดาวฤกษ์ เนื่องจาก CNO Cycle ดังนั้นบริเวณใจกลางดาวฤกษ์ จึงเป็น Convection Zone กำลังส่องสว่าง (Luminosity ;L) จะขึ้นมวล เช่น ดาวที่มวลมากกว่า 3 เท่าของมวลดวงอาทิตย์

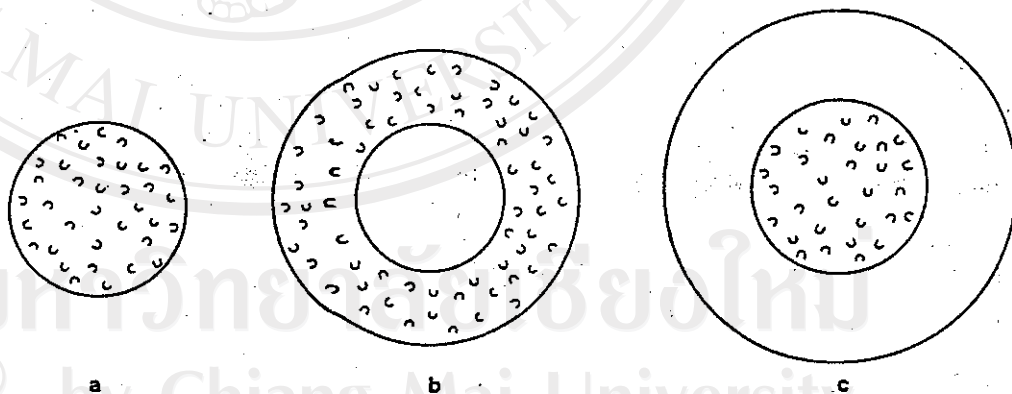
$$L \propto M^3 \quad 2.1$$

สำหรับดาวมวลต่ำ อุณหภูมิ ณ ใจกลางจะมีค่าต่ำกว่า 16×10^8 เคลวิน ปฏิกิริยานิวเคลียร์ภายใน ดาวเนื่องจาก Proton-Proton Chain เป็นหลัก กำลังส่องสว่างของดาว ถ้ามวลน้อยกว่า มวลของดวงอาทิตย์

$$L \propto M^{4.5} \quad 2.2$$

การส่งถ่ายพลังงานภายในดาวจะขึ้นอยู่กับมวล โดยถ้ามวลน้อยกว่า $0.26 M_{\odot}$ บริเวณ ณ ใจกลาง จะเป็น Convection Zone ถ้ามวลมีค่าระหว่าง $0.26 - 1.5 M_{\odot}$ ณ ใจกลางจะเป็น Radiative Zone ดังแสดงในรูป

Energy transport in the main sequence phase.
(a) The least massive stars ($M < 0.26 M_{\odot}$) are convective throughout. (b) For $0.26 M_{\odot} < M < 1.5 M_{\odot}$, the core is radiative and the envelope convective. (c) Massive stars ($M > 1.5 M_{\odot}$) have a convective core and a radiative envelope



รูปที่ 2.2 การส่งถ่ายพลังงานของดาวในแถบขบวนการหลัก

การใช้พลังงานของดาวฤกษ์ในแถบขนานหลัก จะขึ้นอยู่กับมวลของดาว ถ้าดาวมวลมากก็จะใช้พลังงานสูงตามไปด้วยทำให้ช่วงชีวิต (life time) ของดาวฤกษ์ในแถบขนานหลัก เป็นไปตามสมการ

$$t = 0.007 Mc^2 / L \quad 2.3$$

Mass [$M/M_\odot$]	Spectral type on the main sequence	Contraction to main sequence	Main sequence	Main sequence to red giant	Red giant
30	O5	0.02	4.9	0.55	0.3
15	B0	0.06	10	1.7	2
9	B2	0.2	22	0.2	5
5	B5	0.6	68	2	20
3	A0	3	240	9	80
1.5	F2	20	2000	250	
1.0	G2	50	10000	680	
0.5	M0	200	30000		
0.1	M7	500	10 ⁷		

ตารางที่ 2.1 ช่วงชีวิตของดาวฤกษ์ในแถบขนานหลัก

รัศมีของดาวฤกษ์ก็จะขึ้นอยู่กับ ความสมดุลของพลังงานที่ปลดปล่อยมาจากภายในดาว และพลังงานที่หลุดหนีออกมาจากผิวดาวไปนั้นคือรัศมีจะขึ้นอยู่กับมวลของดาวฤกษ์นั่นเอง

$$R \propto M \quad 2.4$$

สำหรับดาวมวลมาก จะพบว่า

$$R \propto M^{0.8} \quad 2.5$$

เมื่อถือว่าการแผ่รังสีของดาวฤกษ์ เหมือนกับการแผ่รังสีของวัตถุดำ (Black Body)

อาศัยความสัมพันธ์

$$L = (4\pi R^2) \sigma T_e^4 \quad 2.6$$

$$\text{จะได้ } T_e \propto M^{0.5} \quad 2.7$$

เมื่อ T_e คืออุณหภูมิสัมฤทธิ์ (Effective Temperature) ของดาวฤกษ์ ซึ่งเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวดาวฤกษ์

นั่นคือดาวที่มีมวลมาก (High-mass Stars) จะมีผิวที่ร้อนกว่า และมีกำลังส่องสว่างสูงกว่าดาวที่มีมวลต่ำ (Low-mass Stars) บนแถบขนานหลัก ดังนั้นจึงมองเห็นดาวที่มีมวลมากสว่างกว่าดาวที่มีมวลต่ำในท้องฟ้า เมื่อดาวทั้งสองอยู่ห่างจากโลกใกล้เคียงกัน

2.2 ความสว่างและโชติมาตรของดาวฤกษ์ (Brightness and Magnitude)

ความสว่างของดาวฤกษ์ แบ่งออกได้เป็น

(ก) ความสว่างปรากฏ (Apparent Brightness) เป็นความสว่างที่ปรากฏต่อสายตามนุษย์

(ข) ความสว่างสัมบูรณ์ (Absolute Brightness) เป็นความสว่างของดาว เมื่อพิจารณาว่าดาวอยู่ ณ ระยะมาตรฐานอันหนึ่ง ก็คือที่ระยะ 10 พาร์เซก

การวัดความสว่างปรากฏของดาว จะเป็นการวัดปริมาณของพลังงานของดาว ที่แผ่ออกมาใน 1 วินาที แล้วมาตกกระทบผิวของวัตถุที่มีความไวแสง (Sensitive Surface) เช่น เรตินาของตา (Retina) โฟโตอิเล็กทริกเซลล์ (Photoelectric cell) แผ่นฟิล์ม (Photographic Plate) เป็นต้น ในลักษณะดังกล่าวกับทิศทางการมองเห็น

ความสว่างของดาวนอกจากจะขึ้นอยู่กับมวลของดาวแล้ว ระยะทางของดาวฤกษ์จากโลกก็มีผลทำให้มองเห็นดาวสว่างที่แตกต่างกัน เช่น ดาวที่มีมวลน้อยอาจมองเห็นสว่างกว่าดาวที่มีมวลมาก ถ้าดาวที่มีมวลน้อยอยู่ใกล้กว่า เป็นต้น

2.2.1 โชติมาตร (Magnitude) ของดาว

โชติมาตรเป็นเครื่องบอกอันดับหรือความสว่างของดาว พอกสัน (Pogson) ได้กำหนดกฎเกณฑ์อย่างแน่นอน เกี่ยวกับการกำหนดโชติมาตรของดาว โดยกำหนดว่า " ดาวโชติมาตรที่หนึ่งจะสว่างกว่าดาวที่หก 10 เท่า "

ดังนั้นดาวสองดวงที่มีโชติมาตรต่างกัน เท่ากับ 1 จะมีความสว่างต่างกัน 2.512 เท่า

จะได้ว่า

$$m = -2.5 \log b \quad 2.8$$

เมื่อ m คือ โชติมาตรของดาว

b คือ ความสว่างของดาว

2.2.2 โชติมาตรสัมบูรณ์ (Absolute Magnitude)

การกำหนดโชติมาตรสัมบูรณ์ จะสมมติให้ดาวทุกดวงอยู่ ณ ระยะมาตรฐานระยะหนึ่งจากโลก คือที่ระยะ 10 พาร์เซก

ถ้าให้ b_m เป็นความสว่างปรากฏของดาว ; B_m เป็นความสว่างสัมบูรณ์ของดาว ณ ระยะ 10

m เป็นโชติมาตรปรากฏของดาว พาร์เซก

r เป็นระยะที่แท้จริงของดาว

M เป็นโชติมาตรสัมบูรณ์ของดาว ณ ระยะ 10 พาร์เซก

ค่าความสว่างปรากฏของวัตถุท้องฟ้า จะแปรผันกับกำลังสองของระยะจากโลก ถึงวัตถุท้องฟ้าที่
พิจารณา โดยแสงกระจายออกมาจากแหล่งกำเนิด อย่างสม่ำเสมอทุกทิศทาง ดังนั้น

$$b_m \propto 1/r^2 \quad ; \quad r \text{ มีหน่วยเป็น พาร์เซค} \quad 2.9$$

ที่ระยะ 10 พาร์เซค

$$B_m \propto 1/10^2 \quad 2.10$$

$$b_m/B_m \propto 10^2/r^2 \quad 2.11$$

จะได้ว่า

$$m - M = -2.5 \log (10/r)^2$$

หรือ

$$m - M = -2.5 \log (r/10) \quad 2.12$$

ความสว่างของดาวที่แผ่ออกมา ก็คือฟลักซ์ หรือพลังงานที่แผ่ออกมานั่นเอง เป็นตามสมการ

$$F = \pi f \quad 2.13$$

โดยฟลักซ์ที่แผ่ออกมา จะขึ้นอยู่กับค่าความยาวคลื่น นั้น

$$F_\lambda = \pi f_\lambda \quad 2.14$$

จากสมการ (2.8) สามารถเขียนได้ใหม่ว่า

$$m_\lambda = -2.5 \log (\pi f_\lambda) \quad 2.15$$

2.2.3 สีของดาว (Stellar Colors)

อุณหภูมิที่ผิวของดาวฤกษ์จะบ่งบอกถึงสีของดาวฤกษ์ เมื่อพิจารณาว่าดาวฤกษ์แผ่พลังงาน คล้ายกับวัตถุดำ (Black Body) ค่าโชติมาตรของดาวก็แปรผันตามความยาวคลื่น (λ) ตามสมการ (2.15) โดยปกติการวัดค่าโชติมาตรของดาวฤกษ์ จะวัดในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ เช่น ในช่วง สีน้ำเงิน (Blue) สีเหลือง (Visible)

จากสมการ (2.15) ก็ได้เป็น

$$m_B = -2.5 \log (\pi f_B) \quad 2.16-a$$

$$m_V = -2.5 \log (\pi f_V) \quad 2.16-b$$

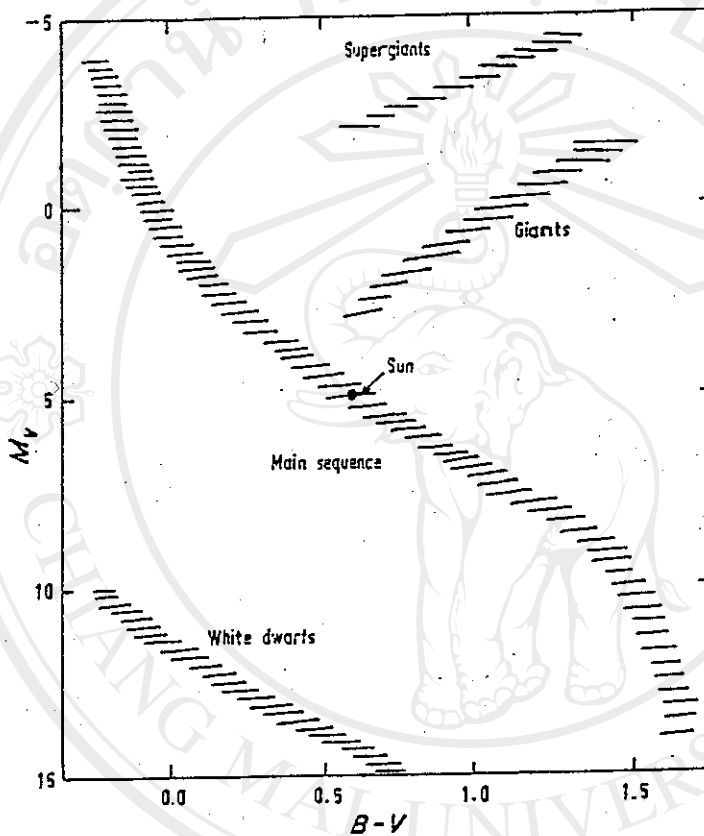
สีของดาวฤกษ์จะสัมพันธ์กับค่าโชติมาตร ก็คือ ค่าผลต่างโชติมาตรของสีน้ำเงินกับสีเหลือง จะบอกถึงสีของดาว กล่าวคือ

$$m_B - m_V = -2.5 \log (f_B/f_V) \quad 2.17$$

ค่า $m_B - m_V > 0$ ดาวจะปรากฏเป็นสีแดง

$m_B - m_V < 0$ ดาวจะปรากฏเป็นสีน้ำเงิน

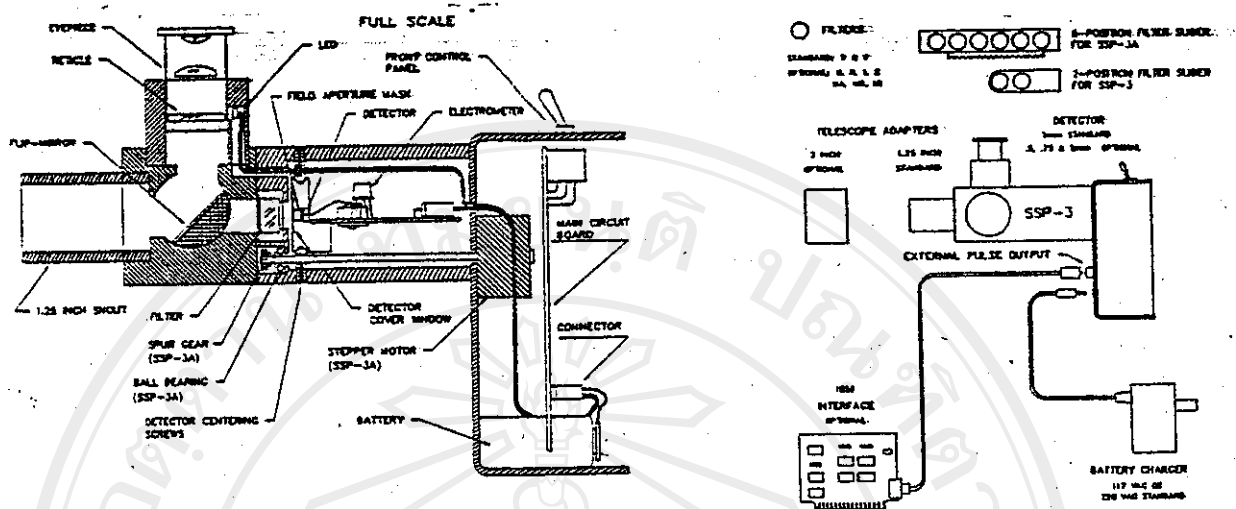
จะเรียกผลต่างของโชติมาตรที่ใกล้เคียงกันว่า "ดัชนีสี (Color Index)" เขียนแทนด้วย $U - B$, $B - V$, $V - R$, $R - I$



รูปที่ 2.3 แผนภาพ เอช-อาร์ แสดงความสัมพันธ์ของดัชนีสีและโชติมาตรสัมบูรณ์

2.3 ระบบโฟโตมิเตอร์

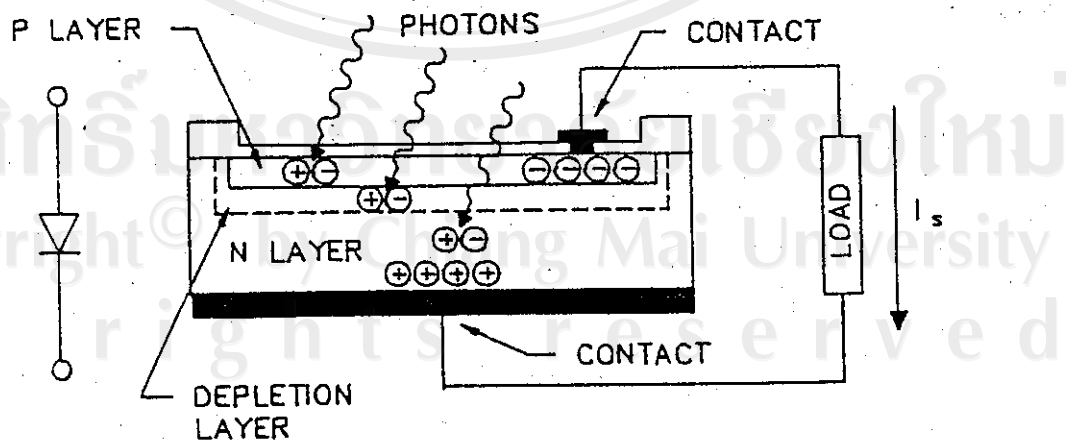
หลักการสำคัญทางฟิสิกส์ของโฟโตมิเตอร์ ก็คือเมื่อแสงดาวจากวัตถุท้องฟ้า ตกกระทบบนโฟโตมิเตอร์ โฟโตมิเตอร์จะเปลี่ยนแสงดาวให้เป็นกระแสไฟฟ้า โดยปริมาณกระแสไฟฟ้า จะขึ้นอยู่กับปริมาณพลักซ์ของแสงดาวตกกระทบบนโฟโตมิเตอร์ (Solid State Photometer) ชนิด SSP-3 ซึ่งมีหัววัดแบบ Solid State Photodiode ดังแสดงในรูป



รูปที่ 2.4 SSP-3 Photometer

ส่วนประกอบสำคัญประกอบด้วย

2.3.1 ตัววัด (Detector) ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานโฟตอน เป็นพลังงานไฟฟ้า ตัววัดเป็นชนิด Silicon PN Photodiode รุ่น 1087-01 (Model 1087-01) ซึ่งผลิตโดยบริษัท Hamamatsu



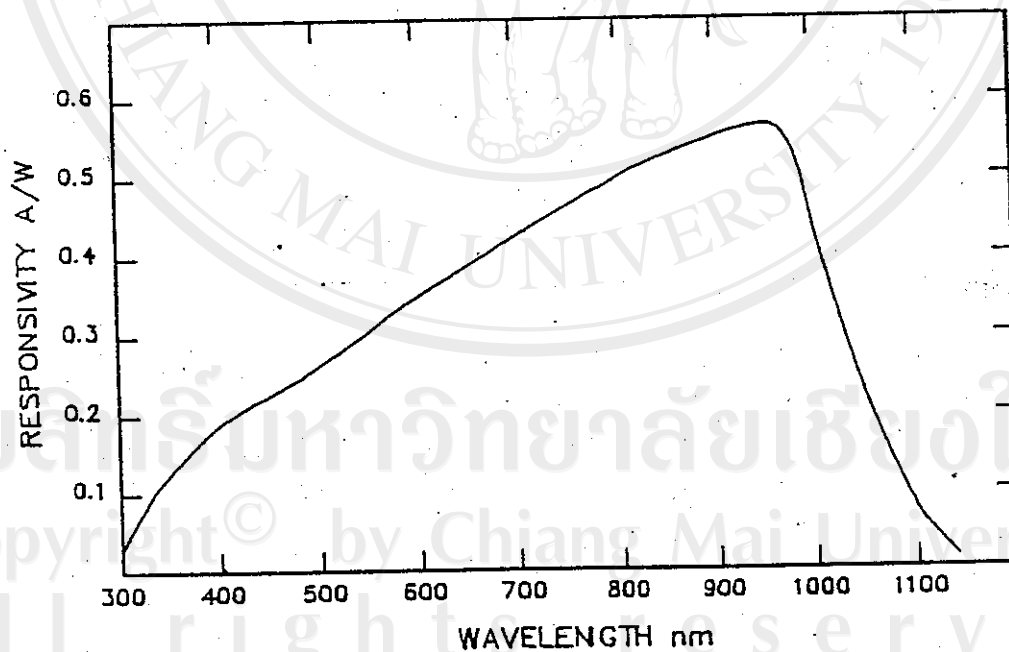
รูปที่ 2.5 Detector Silicon PN Photodiode

หลักการทำงาน ก็คือ เมื่อพลังงานแสง (Photon) ตกกระทบ Band Gap จะถูกดูดกลืนในชั้น P หรือ N ของ Photodiode แล้วอิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นไปสู่ Conduction Band เนื่องมาจากการเกิด Electron-hole pair ในโครงสร้างของซิลิกอน ดังนั้นเมื่อเชื่อมวงจรระหว่างชั้น P และชั้น N ก็จะเกิดกระแสไฟฟ้ดอน ซึ่งจะขึ้นอยู่กัฟลักซ์ของแสงควาที่ตกกระทบ

คุณสมบัติของโฟโตไดโอด

Size	1.3 x 1.3 mm
Effective Area	1.6 mm
Spectral Range	300 - 1100 nm
Peak Response	0.55 A/W at 940nm
Response at 0.55nm	0.34 A/W
Shunt Resistance	50 G ohm typical
Noise Equivalent Power	8 X 10E-16 W/√Hz

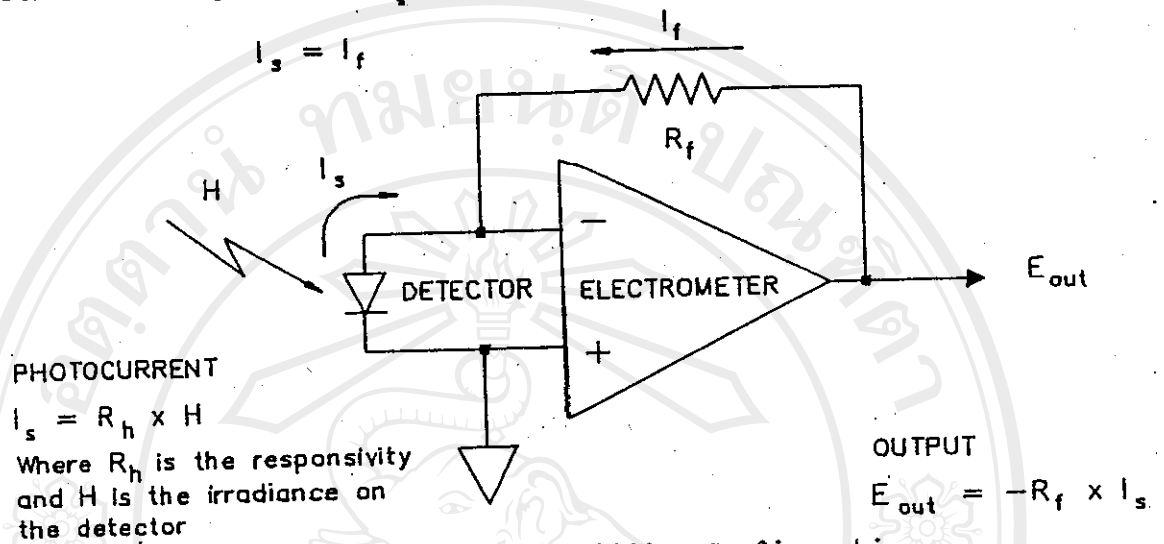
ตารางที่ 2.2 แสดงข้อมูลของโฟโตไดโอด



รูปที่ 2.6 Responsivity ของ Photodiode

ค่า Quantum Efficiency ของโฟโตไดโอด ประมาณ 75 % จะถูกดูดกลืนโฟตอนที่ตกกระทบในช่วงความยาวคลื่น 400-10,000 นาโนเมตร

2.3.2 Electrometer ทำหน้าที่เปลี่ยนกระแสโฟตอน เป็นความต่างศักย์ (Current to Voltage) มีวงจรดังรูป



รูปที่ 2.7 Current to Voltage Amplifier Configuration

หลักการทำงาน เมื่อกระแสโฟตอนจาก Detector จะสมดุลกับกระแสย้อนกลับ จากตัวต้านทาน แต่เคลื่อนในทิศทางตรงกันข้าม ดังนั้น inverting output จะมีค่าขาเข้าเป็นศูนย์ จะได้ความต่างศักย์ขาออก (output Voltage) เป็นไปตามสมการ

$$E_{out} = R_f \times I_s \quad 2.18$$

เมื่อ E_{out} เป็น ความต่างศักย์ไฟฟ้าขาออก

R_f เป็น Feedback Resistance เท่ากับ 5×10^{10} โอห์ม

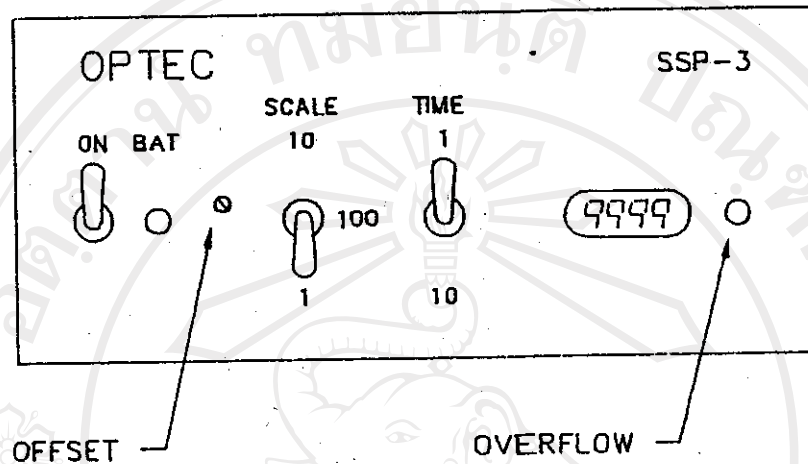
I_s เป็น กระแสโฟตอนจากหัววัด

ค่า R_f มีค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ (Temperature Coefficient) เท่ากับ 200 ppm/°C ซึ่งจะทำให้เกิดความผิดพลาด 0.004 magnitude ที่อุณหภูมิ 20 °C

2.3.3 Signal Progressing

ทำหน้าที่เปลี่ยนความต่างศักย์ให้เป็นสัญญาณความถี่ (Voltage to frequency) ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความต่างศักย์ขาเข้า ที่มาจาก Electrometer สัญญาณความถี่จะถูกส่งไปยังเครื่องนับ (Counter) แล้วส่งต่อไปยังส่วนแสดงผล (Display) และวงจรเชื่อมต่อ (Interface) เข้าสู่คอมพิวเตอร์ เพื่อประมวลผลต่อไป สำหรับส่วนแสดงผล จะแสดงด้วยเลข 4 หลัก กล่าวคือจะนับได้สูงสุด 9999 โดยมีสเกลให้เลือก 3 สเกล คือ 1, 10, 100 เพื่อปรับให้จำนวนนับเต็มสเกล

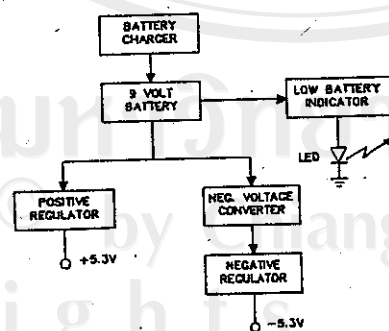
ตามความสว่างของดาว และช่วงเวลาของการนับมาให้เลือก 1 และ 10 วินาที ซึ่งเป็นเวลาที่ไม่เกี่ยวกับช่วงเวลาของเครื่องคอมพิวเตอร์ สัญญาณความถี่ ที่จะเข้าสู่คอมพิวเตอร์ จะผ่านทางวงจรเชื่อมต่อ ที่ผลิตโดยบริษัท Optec Inc. เป็นสัญญาณ TTL มีพัลส์ (Pulse) อยู่ในช่วงความถี่ 0 - 10 KHz



รูปที่ 2.8 Front Control Panel

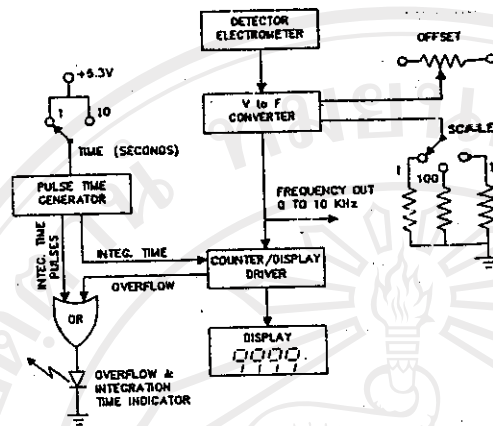
2.3.4 Power Supply

แหล่งพลังงานที่ใช้กับโพโตมิเตอร์ เป็นแบตเตอรี่ชนิด NiCd ขนาด 9 โวลต์ ประจุไฟฟ้าได้ (NiCd rechargeable battery) มีวงจรดังรูป



รูปที่ 2.9 แสดงขั้นตอนการทำงานของ Power Supply

สำหรับขั้นตอนการทำงานของโฟโตมิเตอร์ SSP-3 แสดงได้รูป



รูปที่ 2.10 แสดงขั้นตอนการทำงานของโฟโตมิเตอร์

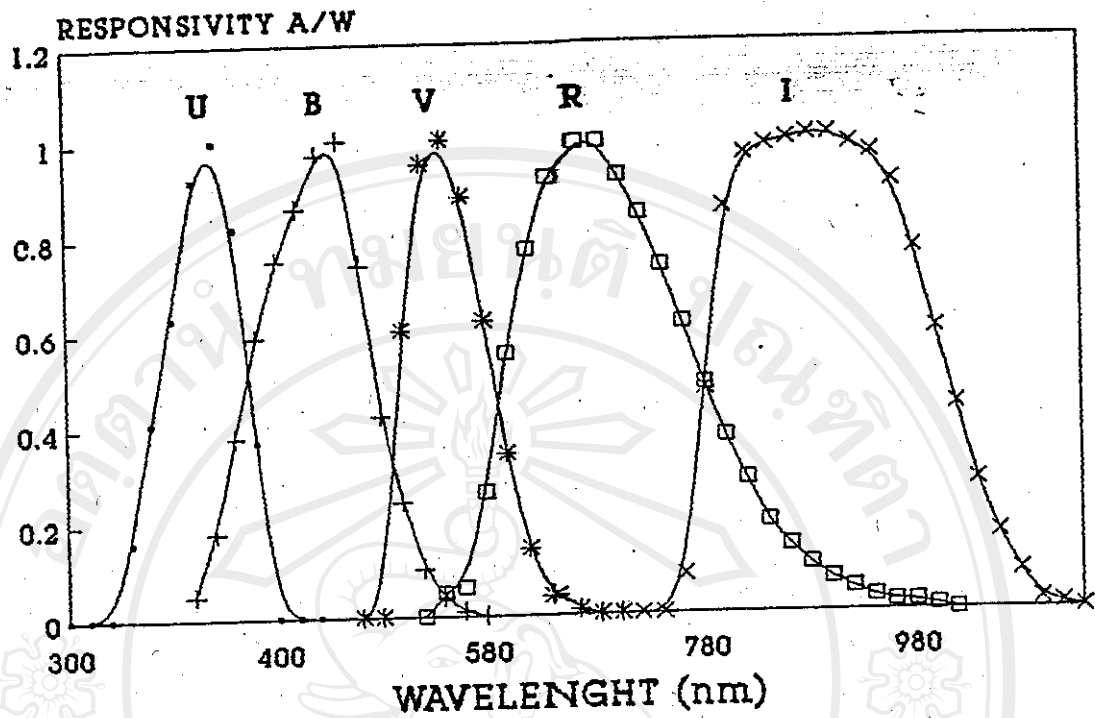
2.4 ระบบแผ่นกรองแสง

ในการวัดความเข้มของแสงดาวที่ปลดปล่อยมาจากวัตถุท้องฟ้านั้น นิยมวัดเป็นช่วงของความถี่หรือความยาวคลื่นของสเปกตรัม ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายได้แก่ ระบบแผ่นกรองแสงชนิด แฉกกว้าง (Wide Band) ของจอห์นสันและมอร์แกน (J. L. Johnson and Morgan) ในช่วงความยาวคลื่นกว้างประมาณ 1000 อังสตรอม ได้แก่ ช่วงความยาวคลื่นอุลตราไวโอเลต (U) สีน้ำเงิน (B) สีเหลือง (V) สีแดง (R) และอินฟราเรด (I) ซึ่งแผ่นกรองแสงที่ใช้ที่หอดูดาวหาวายคัสเซอใหม่ ใช้ระบบแผ่นกรองแสงแฉกกว้าง ซึ่งผลิตโดยบริษัท Optec Inc. มีคุณสมบัติดังแสดงในตาราง

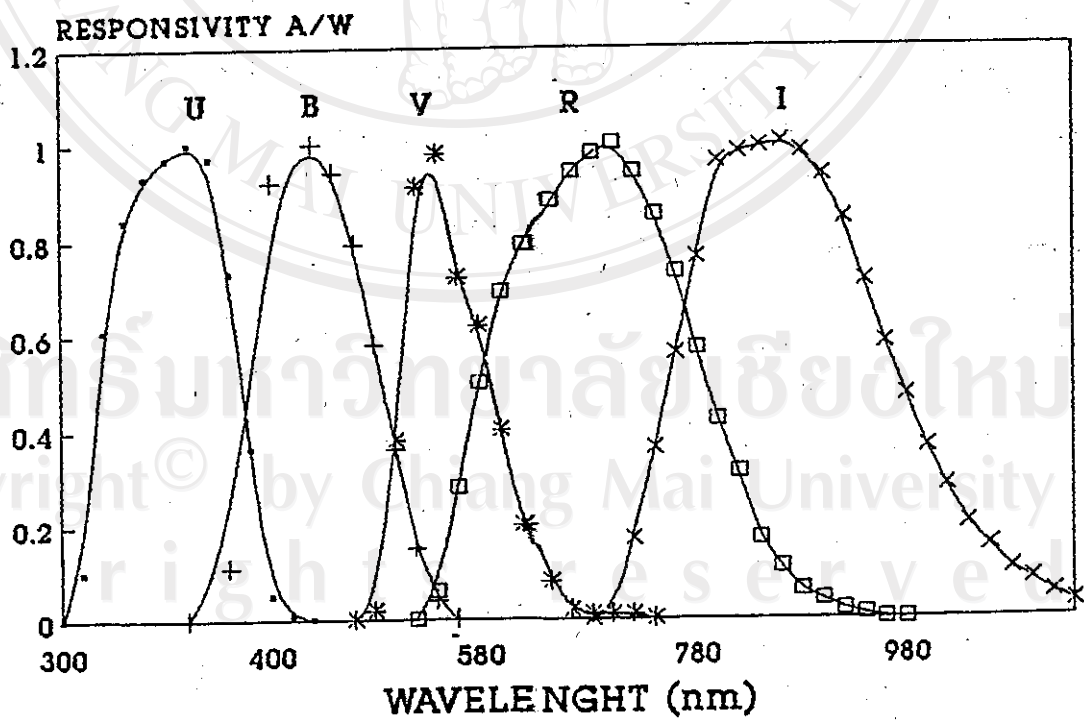
Flatness	6 fringes Max.
Surface Quality	scratch and dig 80-50
Diameter	12.7 mm
Thickness	7 mm

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของแผ่นกรองแสง UBVR I ของบริษัท Optec

โดยมีค่าฟังก์ชันการผ่านของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากแผ่นกรองแสงแต่ละชนิด ดังแสดงในรูปที่ 2.11
เปรียบเทียบกับ ระบบแผ่นกรองแสงของจอห์นสัน ในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 Optec's Standard UBVRI Response Functions



รูปที่ 2.12 Johnson's Standard UBVRI Response Functions

2.5 ค่าโชติมาตรและสีที่วัดได้จากเครื่องมือ

การสังเกตการณ์ทางโฟโตอิเล็กตริก โฟโตเมตร จะมีจุดมุ่งหมายสำคัญก็คือการวัดค่าโชติมาตรและสีของวัตถุท้องฟ้า ค่าโชติมาตรของวัตถุท้องฟ้า ที่วัดได้โดยเครื่องมือ จะสัมพันธ์กับค่าฟลักซ์ของแสงจากวัตถุท้องฟ้า ตามสมการ

$$m = -2.5 \log F \quad 2.20$$

เมื่อใช้แผ่นกรองแสงต่างชนิดกัน ก็จะตอบสนองความยาวคลื่นต่างกัน ทำให้โชติมาตรที่วัดได้จากแผ่นกรองแสงต่างๆ มีค่าแตกต่างกัน ดังนั้นตามสมการที่ 2.19 จะสามารถเขียนได้เป็น

$$u = -2.5 \log F_u \quad 2.21-a$$

$$b = -2.5 \log F_b \quad 2.21-b$$

$$v = -2.5 \log F_v \quad 2.21-c$$

$$r = -2.5 \log F_r \quad 2.21-d$$

$$i = -2.5 \log F_i \quad 2.21-e$$

ในทางปฏิบัติจะวัดฟลักซ์ของแสงจากวัตถุท้องฟ้าจากโฟโตมิเตอร์ อยู่ในรูป "ค่าจำนวนนับสุทธิ (Net Count ; C)" ดังนั้นจึงเขียนสมการที่ 2.21 ใหม่ได้ว่า

$$u = -2.5 \log C_u \quad 2.22-a$$

$$b = -2.5 \log C_b \quad 2.22-b$$

$$v = -2.5 \log C_v \quad 2.22-c$$

$$r = -2.5 \log C_r \quad 2.22-d$$

$$i = -2.5 \log C_i \quad 2.22-e$$

ในการวัดสีของวัตถุท้องฟ้า นิยมวัดในรูปของ "ดัชนีสี (Color Index) " โดยกำหนดว่าเป็นผลต่างของค่าโชติมาตร ในช่วงความยาวคลื่นต่างกัน กล่าวคือ

$$u - b = -2.5 \log C_u / C_b \quad 2.23-a$$

$$b - v = -2.5 \log C_b / C_v \quad 2.23-b$$

$$v - r = -2.5 \log C_v / C_r \quad 2.23-c$$

$$r - i = -2.5 \log C_r / C_i \quad 2.23-d$$

2.6 ผลการลดลงของแสงเนื่องจากบรรยากาศของโลก

บรรยากาศที่ห่อหุ้มโลกมีผลต่อการลดลงของแสงดาว ค่าโชติมาตรที่วัดได้ จะเรียกว่าโชติมาตรปรากฏ (Apparent Magnitude) และเมื่อพิจารณาว่าไม่มีผลของบรรยากาศของโลก จะเป็นค่าโชติมาตรปรากฏที่แท้จริง (True Apparent Magnitude) ของดาว เมื่อทำการสังเกตการณ์บนพื้นโลก ดาวที่อยู่ขอบฟ้าแสงดาวจะผ่านบรรยากาศของโลกเป็นระยะทางมากกว่าเมื่อดาวอยู่ ณ มุมเงยที่อยู่สูงขึ้น และจะผ่านน้อยที่สุดเมื่อดาวอยู่ที่ตำแหน่งเหนือศีรษะ หรือจุดเซนิท (Zenith) ดังนั้นเมื่อมุมเงยของดาวสูงขึ้น แสงดาวจะปรากฏสว่างขึ้น นอกจากนี้พบว่าสีของดาวเมื่ออยู่ขอบฟ้าจะปรากฏแดงกว่าความเป็นจริง และจะลดลงเมื่อดาวอยู่ตำแหน่งสูงขึ้น

2.6.1 มวลอากาศ (Airmass)

ความหนาของชั้นบรรยากาศของโลก กำหนดในเทอมของ "มวลอากาศ ; X " ดังนั้น ณ บริเวณขอบฟ้ามวลอากาศจะมากกว่าตำแหน่งที่มุมเงยสูงขึ้น กำหนดว่า

$$\text{ระยะเซนิท} = 90^\circ - \text{มุมเงย}$$

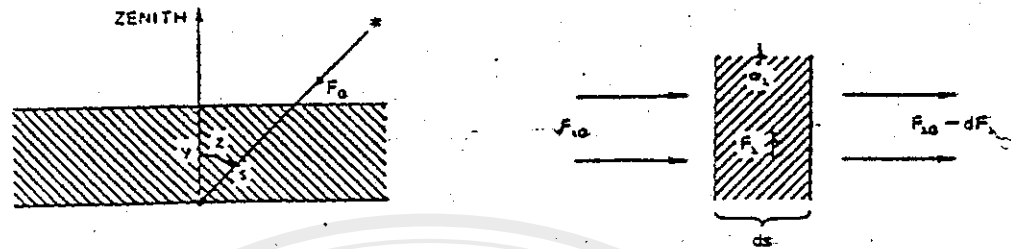
2.24

AIR-MASS CORRECTION TERMS

z	sec z	X	Correction	z	sec z	X	Correction
0°	1.000	1.000	0.000	69°	2.790	2.773	0.017
30	1.155	1.154	.001	70	2.924	2.904	.020
60	2.000	1.995	.005	71	3.072	3.049	.023
61	2.063	2.057	.006	72	3.236	3.209	.027
62	2.130	2.123	.007	73	3.420	3.388	.032
63	2.203	2.196	.007	74	3.628	3.588	.040
64	2.281	2.273	.008	75	3.864	3.816	.048
65	2.366	2.356	.010	76	4.134	4.075	.059
66	2.459	2.448	.011	77	4.445	4.372	.073
67	2.559	2.546	.013	78	4.810	4.716	.094
68	2.670	2.655	0.015	79	5.241	5.120	0.121

ตารางที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามวลอากาศและระยะเซนิท

จากตาราง แสดงทางเดินของแสงดาวที่ผ่านชั้นบรรยากาศของโลก เมื่อประมาณว่าบรรยากาศของโลกมีลักษณะระนาบขนาน (Plane Parallel Atmosphere) ตามรูป



รูปที่ 2.13 ทางเดินของแสงที่ผ่านมวลอากาศที่ระยะ Zenith

ซึ่งค่าความผิดพลาดไม่เกิน 2 % นั่นคือ จะสังเกตการณ์ดาวที่มีค่ามุมเงยไม่ต่ำกว่า 30 องศา หรือ มีระยะ Zenith ไม่เกิน 60 องศา และอาจประมาณได้ว่า

$$X = \sec Z \quad 2.25$$

โดย $\sec Z = (\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos H)^{-1} \quad 2.26$

เมื่อ ϕ เป็นละติจูดของผู้สังเกตการณ์
 δ เป็นเดคลิเนชัน (Declination) ของดาว
 H เป็นมุมชั่วโมงของดาว ณ เวลาสังเกตการณ์

สำหรับดาวที่มีระยะ Zenith มากกว่า 60 องศา เงื่อนไขของบรรยากาศจะใช้ไม่ได้ ค่ามวลอากาศ จะสัมพันธ์กับระยะ Zenith โดยการประมาณของเบมโพรด (Bemporad Approximation) จะได้ว่า

$$X = \sec Z - 0.0018167(\sec Z - 1) - 0.002875(\sec Z - 1)^2 - 0.0008083(\sec Z - 1)^3 \quad 2.27$$

2.6.2 การลดลงของแสงดาวอันดับที่หนึ่ง (The First-order Extinction)

การสังเกตการณ์ทางโฟโตอิเล็กตริก โฟโตเมตรี ในช่วงความยาวคลื่นแถบกว้าง (UBVRI) อาจเขียนค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของแสงดาวอันดับที่หนึ่ง (First-order Extinction Coefficients ; k') ได้จากค่าโชติมาตรได้จากเครื่องมือ กับค่ามวลอากาศได้ดังนี้

All rights reserved

$$u_o = u + k'_{uX} X \quad 2.28-a$$

$$b_o = b + k'_{bX} X \quad 2.28-b$$

$$v_o = v + k'_{vX} X \quad 2.28-c$$

$$r_o = r + k'_{rX} X \quad 2.28-d$$

$$i_o = i + k'_{iX} X \quad 2.28-e$$

เมื่อ k' หมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของแสงดาวอันดับที่หนึ่ง

X หมายถึง มวลอากาศ

u_o, b_o, v_o, r_o, i_o หมายถึง ค่าโชติมาตรที่ประมาณว่าวัดนอกบรรยากาศของโลก

u, b, v, r, i หมายถึง ค่าโชติมาตรที่วัดได้จากเครื่องมือ

ในเทอมของดัชนีสี เขียนได้ดังนี้

$$(u - b)_o = (u - b) + k'_{ub} X \quad 2.29-a$$

$$(b - v)_o = (b - v) + k'_{bv} X \quad 2.29-b$$

$$(v - r)_o = (v - r) + k'_{vr} X \quad 2.29-c$$

$$(r - i)_o = (r - i) + k'_{ri} X \quad 2.29-d$$

โดย

$$k'_{ub} = k'_u - k'_b \quad 2.30-a$$

$$k'_{bv} = k'_b - k'_v \quad 2.30-b$$

$$k'_{vr} = k'_v - k'_r \quad 2.30-c$$

$$k'_{ri} = k'_r - k'_i \quad 2.30-d$$

ในทางปฏิบัติ จะวัดพลังค์ของแสงดาว ของดาวมาตรฐานในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ณ

มวลอากาศต่างๆกัน

2.6.3 การลดลงของแสงดาวอันดับที่สอง (Second-order Extinction)

ค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของแสงดาวอันดับที่สอง เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นอยู่กับสีของดาว

จะมีค่าน้อยมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการสังเกตการณ์ดาวโปรแกรมและดาวมาตรฐานที่มีชนิดของสเปกตรัมคล้ายกัน ถ้าการวิเคราะห์ไม่ต้องการค่าละเอียดมากแล้ว อาจไม่ต้องนำมาคิดก็ได้

อย่างไรก็ตาม การพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของแสงดาวอันดับที่สอง ในการวิเคราะห์ข้อมูล จะทำให้มีความถูกต้องสูงมาก ค่าสัมประสิทธิ์อาจเขียนได้ดังนี้

$$k'_{uv} \rightarrow k'_{uv} + k''_{uv} (b - v) \quad 2.31-a$$

$$k'_{ub} \rightarrow k'_{ub} + k''_{ub} (u - b) \quad 2.31-b$$

$$k'_{bv} \rightarrow k'_{bv} + k''_{bv} (b - v) \quad 2.31-c$$

$$k'_{vr} \rightarrow k'_{vr} + k''_{vr} (v - r) \quad 2.31-d$$

$$k'_{ri} \rightarrow k'_{ri} + k''_{ri} (r - i) \quad 2.31-e$$

ดังนั้นจากสมการ 2.28 และ 2.29 จะเขียนได้ว่า

$$v_o = v + k'_{uv}X + k''_{uv}(b-v)X \quad 2.32$$

$$(u - b)_o = (u - b) + k'_{ub}X + k''_{ub}(u-b)X \quad 2.33-a$$

$$(b - v)_o = (b - v) + k'_{bv}X + k''_{bv}(b-v)X \quad 2.33-b$$

$$(v - r)_o = (v - r) + k'_{vr}X + k''_{vr}(v-r)X \quad 2.33-c$$

$$(r - i)_o = (r - i) + k'_{ri}X + k''_{ri}(r-i)X \quad 2.33-d$$

การหาค่า $k''_{uv}, k''_{ub}, k''_{bv}, k''_{vr}, k''_{ri}$ ทำได้โดยการสังเกตการณ์ตามมาตรฐาน 2 ดวง ที่มีสีแตกต่างกัน และอยู่ใกล้กันมากจนถือว่า เมื่อทำการสังเกตการณ์พร้อมกัน ดาวทั้งสองจะมีค่ามวลอากาศ (X) เท่ากัน โดยการพิจารณาจากสมการ 2.32 และ 2.33 พบว่า

$$v_{o1} - v_{o2} = [v_1 + k'_{uv}X + k''_{uv}(b-v)_1X] - [v_2 + k'_{uv}X + k''_{uv}(b-v)_2X]$$

$$\Delta v_o = \Delta v + k''_{uv} \Delta(b-v)X$$

$$\Delta v = k''_{uv} \Delta(b-v)X + \Delta v_o \quad 2.34$$

ในทำนองกันเขียนในเทอมของดัชนีสี

$$\Delta(u - b) = k''_{ub} \Delta(u-b)X + \Delta(u-b)_o \quad 2.35-a$$

$$\Delta(b - v) = k''_{bv} \Delta(b-v)X + \Delta(b-v)_o \quad 2.35-b$$

$$\Delta(v - r) = k''_{vr} \Delta(v-r)X + \Delta(v-r)_o \quad 2.35-c$$

$$\Delta(r - i) = k''_{ri} \Delta(r-i)X + \Delta(r-i)_o \quad 2.35-d$$

ซึ่ง Δ แสดงถึงผลต่างของโชติมาตร หรือสีของดาวสองดวงในแต่ละมวลอากาศ จากสมการ 2.34

เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Δv กับ $\Delta(b-v)X$ จะได้กราฟเส้นตรงมีค่าความชันเท่ากับ k''_{uv} และในทำนองเดียวกัน ถ้าเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\Delta(u-b)$, $\Delta(b-v)$, $\Delta(v-r)$, $\Delta(r-i)$ กับ $\Delta(u-b)X$, $\Delta(b-v)X$, $\Delta(v-r)X$, $\Delta(r-i)X$ จะได้กราฟเส้นตรงมีค่าความชัน เท่ากับ $k''_{ub}, k''_{bv}, k''_{vr}, k''_{ri}$ ตามลำดับ

2.7 การแปลงค่าสู่ระบบมาตรฐาน

โดยปกติระบบทางไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ ไฟโตเมตรี เช่นระบบ UBURI จะมีการกำหนดค่ามาตรฐานของโชติมาตรและสีของดาวมาตรฐาน ซึ่งวัดโดยชุดของเครื่องบันทึกสัญญาณและชุดของแผ่นกรองแสงใดๆ เอาไว้เพื่อให้การวิเคราะห์ข้อมูลทางไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ ไฟโตเมตรี ไม่ว่าจะทำการสังเกตการณ์ ณ สถานที่ใด สามารถนำไปเปรียบเทียบกันได้ โดยการแปลงค่าโชติมาตร หรือสีที่วัดได้โดยเครื่องมือสู่ค่ามาตรฐาน

กำหนดให้ U, B, V, R และ I เป็นค่าโชติมาตรในระบบ UBURI ของดาวมาตรฐานใดๆ
 u, b, v, r และ i เป็นค่าโชติมาตรที่วัดได้จากเครื่องมือของดาวมาตรฐาน

พบว่า

$$V = v_0 + \epsilon(b-v) + c_{bv} \quad 2.36$$

$$(B - V) = \mu(b-v)_0 + c_{bv} \quad 2.37-a$$

$$(U - B) = \omega(u-b)_0 + c_{ub} \quad 2.37-b$$

$$(V - R) = \omega(v-r)_0 + c_{vr} \quad 2.37-c$$

$$(R - I) = \eta(r-i)_0 + c_{ri} \quad 2.37-d$$

เมื่อ $\epsilon, \mu, \omega, \omega, \eta$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์การแปลงค่าของโชติมาตรและสีในระบบ UBURI ของสถานที่สังเกตการณ์ใดๆ

$c_{bv}, c_{ub}, c_{bv}, c_{vr}, c_{ri}$ เป็นค่าจุดศูนย์ของโชติมาตรและสี ในระบบ UBURI ของสถานที่สังเกตการณ์ใดๆ

จากสมการ 2.36 จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$V - v_0 = \epsilon(b-v)_0 + c_{bv} \quad 2.38$$

ถ้าเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $V - v_0$ และ $B - V$ ของดาวมาตรฐาน จะได้กราฟเส้นตรงซึ่งมีค่าความชันเท่ากับ ϵ และค่าจุดตัดแกน Y เท่ากับ c_{bv}

จากสมการ 2.37 จะเขียนใหม่ได้เป็น

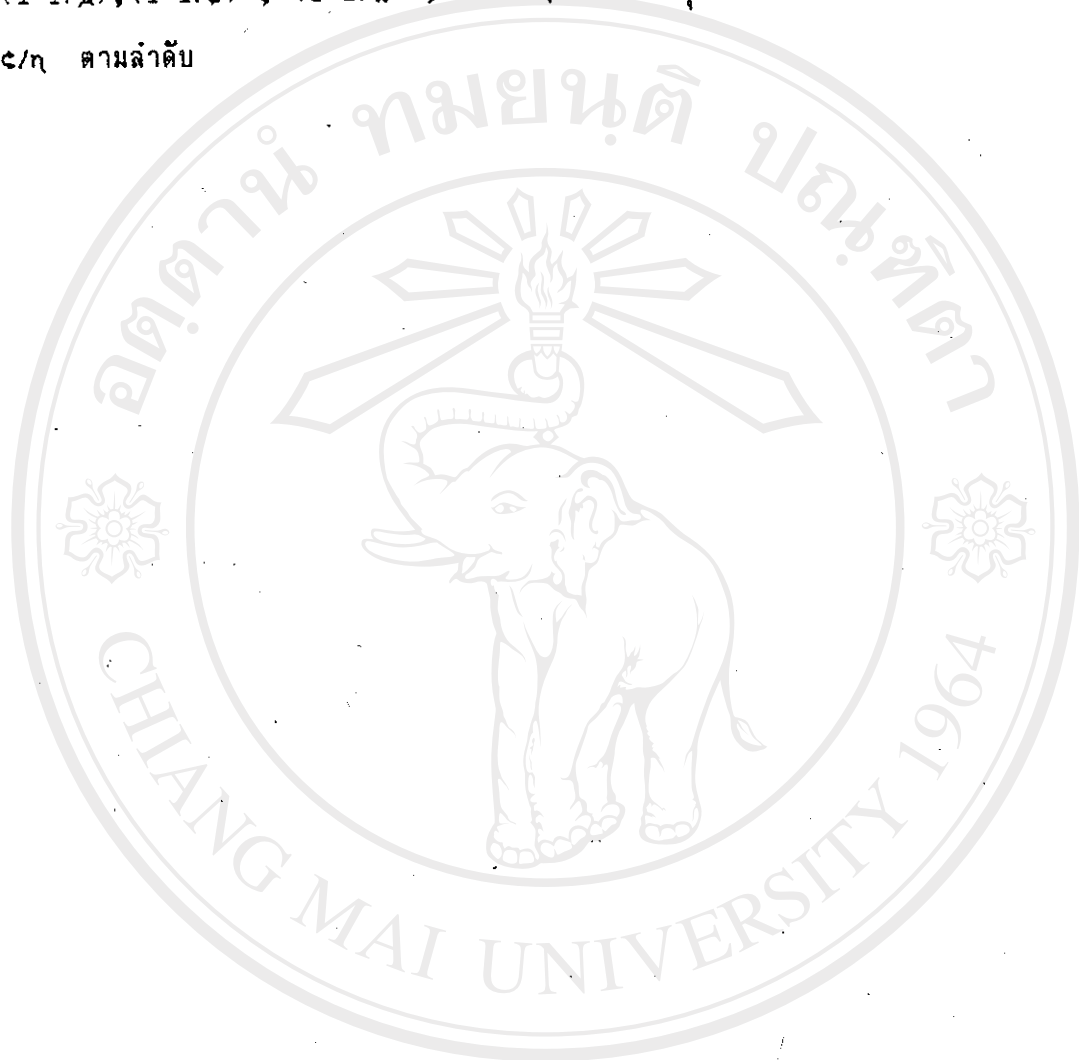
$$(B - V) - (b - v)_0 = (1 - 1/\mu)(B - V) + c_{bv}/\mu \quad 2.39-a$$

$$(U - B) - (u - b)_0 = (1 - 1/\omega)(U - B) + c_{ub}/\omega \quad 2.39-b$$

$$(V - R) - (v - r)_0 = (1 - 1/\omega)(V - R) + c_{vr}/\omega \quad 2.39-c$$

$$(R - I) - (r - i)_0 = (1 - 1/\eta)(R - I) + c_{ri}/\eta \quad 2.39-d$$

ถ้าเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(B-V)-(b-v)_0$, $(U-B)-(u-b)_0$, $(V-R)-(v-r)_0$, $(R-I)-(r-i)_0$ กับ $(B-V)$, $(U-B)$, $(V-R)$, $(R-I)$ จะได้กราฟเส้นตรง ซึ่งมีค่าความชัน เท่ากับ $(1-1/\mu)$, $(1-1/\nu)$, $(1-1/\omega)$, $(1-1/\eta)$ และค่าจุดตัดแกน Y เท่ากับ c/μ , c/ν , c/ω , c/η ตามลำดับ



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University

All rights reserved