

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 กระจุกดาว (Star Clusters)

กระจุกดาวเป็นระบบดาวของดาวจำนวนมากที่อยู่ใกล้กันมาก เนื่องจากมีแรงโน้มถ่วงของดาวแต่ละดวงกระทำซึ่งกันและกัน กระจุกดาวบางกลุ่มมีดาวกระจายตัวอย่างหลวมๆ แต่บางกลุ่มมีดาวรวมตัวอยู่รวมกันอย่างหนาแน่น เมื่อสังเกตการณ์เคลื่อนที่ของดาวที่เป็นสมาชิกของกระจุกดาว ก็พบว่ามีการเคลื่อนที่สอดคล้องกัน ซึ่งชี้ให้เห็นว่าดาวแต่ละดวง น่าจะมีจุดกำเนิดร่วมกัน ซึ่งนักดาราศาสตร์สามารถแบ่งกระจุกดาวได้ 2 ประเภทคือ

2.1.1 กระจุกดาวเปิด (Open Star Clusters)

กระจุกดาวเปิดหรือกระจุกดาวกาแลคติก เป็นกระจุกดาวที่พบมากบริเวณระนาบกาแลคซี มีสมาชิกประกอบด้วยดาวฤกษ์อยู่รวมกันอย่างหลวมๆ มีจำนวนสมาชิกประมาณ 10 – 100 ดวงขึ้นไป เมื่อมองผ่านกล้องดูดาวจะสามารถเห็นดาวแต่ละดวงได้ อย่างชัดเจน และในกระจุกดาวบางกลุ่มก็สามารถมองเห็นดาวแต่ละดวงแยกกันอยู่ได้ด้วยตาเปล่า

2.1.2 กระจุกดาวปิด (Close Star Clusters)

กระจุกดาวปิดเป็นระบบของจำนวนดาวจำนวนมากอยู่ใกล้กัน กระจุกดาวชนิดนี้จะมีการรวมตัวกันอย่างหนาแน่นและมีรูปร่างค่อนข้างจะเป็นทรงกลม มีสมาชิกจำนวนมากประมาณ 10^5 ดวงขึ้นไป เมื่อใช้กล้องโทรทรรศน์ ส่องบริเวณใจกลางกระจุกดาวจะไม่สามารถเห็นดาวแต่ละดวงได้ กระจุกดาวประเภทนี้มักพบว่ากระจายอยู่ในบริเวณฮาโล(Halo) ของกาแลคซี ดังนั้น สมาชิกในกระจุกดาวปิดจึงเป็นดาวที่มีอายุมาก

2.2 ซีซีดี (CCD)

ซีซีดี(CCD) ย่อมาจาก Charge Couple Device เป็นอุปกรณ์ตรวจจับแสงที่มีประสิทธิภาพสูงมีความไวแสงสูงกว่าฟิล์มถ่ายรูปทั่วไป หน้าที่ของซีซีดี คือเป็นตัวเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อนำเข้าสู่ระบบอิมเมจ โพรเซสซิ่ง (Image processing) ซีซีดียังมีคุณสมบัติพิเศษต่างๆอีกเช่น มี্যানตอปสนองต่อความยาวคลื่นได้กว้างและเก็บรายละเอียดได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงมีการนำซีซีดีมาใช้ในการถ่ายภาพทางดาราศาสตร์ โดยนำมาใช้ร่วมกับกล้องซีซีดี(CCD camera)เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกล้องโทรทรรศน์ ให้สามารถถ่ายภาพดาวให้ได้ภาพที่ชัดเจนและมีความละเอียดสูงได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพการทำงานของ CCD chip ซึ่งทำมาจากสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ทำหน้าที่เป็นตัวรับแสง ภายใน CCD chip จะแบ่งพื้นที่ออกเป็นส่วนเล็กๆจำนวนมาก เรียกว่า พิกเซล (Pixel) แต่ละพิกเซลจะบรรจุประจุไฟฟ้าอยู่หนึ่งตัวและจะมีการถ่ายเทประจุโดยการไหลของการหมุน

เฟสพิกเชสบนซีซีดี โดยจำนวนพิกเซลจะมีผลต่อประสิทธิภาพของซีซีดี ช่วงความยาวคลื่นที่ตอบสนองต่อ CCD chip นั้นจะแตกต่างกับช่วงความยาวคลื่นที่ตอบสนองต่อสายตามนุษย์และฟิล์มถ่ายรูป ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญนำไปสู่การเข้าใจในความสามารถในการตอบสนองความยาวคลื่นย่านต่างๆ ของเครื่องมือวัด

2.3 ระบบ CCD photometry

หลักการสำคัญทาง ซีซีดี โฟโตมิเมตรี เมื่อแสงตกกระทบบน CCD chip อะตอมจะถูกไอออไนซ์โดยโฟตอนเกิดเป็นไอออน และอิเล็กตรอนอิสระจำนวนไอออน และอิเล็กตรอนอิสระขึ้นอยู่กับจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบบน CCD chip เมื่อให้ความต่างศักย์สูงระหว่างขั้วทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า และจะถูกขยายโดยวงจรภาคขยายแล้วถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณดิจิทัลซึ่งจะถูกคอมพิวเตอร์คอมพิวเตอร์ประมวลผลปรากฏเป็นภาพถ่ายบนจอมอนิเตอร์

2.4 ระบบแผ่นกรองแสงแบบ UBV

การวิจัยเกี่ยวกับสีและโชติมาตรปรากฏของดาวจะทำการศึกษาในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ โดยใช้แผ่นกรองแสง(Filters) เนื่องจากฟิลเตอร์แต่ละชนิดมีคุณสมบัติยอมให้แสงผ่านได้ในความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน นั่นคือ จำนวนฟลักซ์(Flux) หรือค่าพลังงานแสงจากการแผ่รังสีของดาวที่ส่งมายังโลกมีปริมาณที่แตกต่าง ซึ่งระดับความสว่างของในแต่ละชนิดของแผ่นกรองแสง เรียกว่า โชติมาตรปรากฏ(Apparent magnitude) ระบบ แผ่นกรองแสงที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย ได้แก่ระบบแผ่นกรองแสงชนิดแถบกว้าง(Wide band) ของจอห์นสันและมอร์แกน(H.L. Johnson and W.W. Morgan)ในแต่ละช่วงความยาวคลื่นมีความกว้างประมาณ 1000 อังสตรอม ได้แก่ ช่วงความยาวคลื่นอุตราไวโอเลต(U), ช่วงความยาวคลื่นช่วงที่ตามองเห็น ประกอบด้วย B (สีน้ำเงิน), V(สีเหลือง) ดังแสดงในตารางดังนี้

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของแผ่นกรองแสงแต่ละชนิดที่มีต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

Band	ความยาวคลื่นแสงที่ส่งผ่านมากที่สุด(อังสตรอม)	แถบกว้าง (อังสตรอม)
U	3500	1000
B	4250	1250
V	5500	1000

2.5 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่ออกมาจากวัตถุได้หลายช่วงความถี่หรือความยาวคลื่น กล่าวคือ ช่วงคลื่นวิทยุ, ช่วงไมโครเวฟ, ช่วงอินฟราเรด, ช่วงมองเห็นได้, ช่วงอุลตราไวโอเลต, ช่วงรังสีเอกซ์ และช่วงรังสีแกมมา ช่วงความถี่หรือความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแต่ละช่วงเหล่านี้ รวมกันเป็น “สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Spectrum)” โดยมี ความยาวคลื่น (Wavelength, λ) สัมพันธ์กับความถี่ (Frequency, ν) ตามสมการ

$$c = \lambda \nu \quad \dots\dots\dots(2.1)$$

โดย c เป็นค่าความเร็วแสงในสุญญากาศ มีค่า 3×10^8 เมตร/วินาที

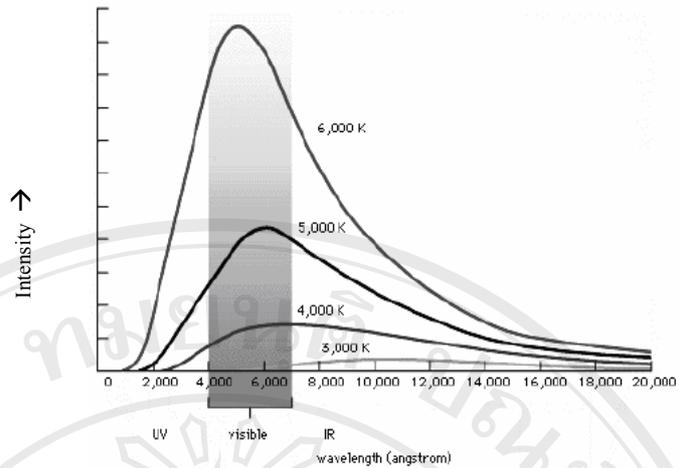
คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่จากวัตถุท้องฟ้า ส่วนใหญ่จะถูกดูดกลืนโดยบรรยากาศของโลก คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านบรรยากาศของโลกได้ มีเฉพาะบางช่วงความยาวคลื่นเท่านั้น ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นช่วงมองเห็นได้ (Visible) และช่วงคลื่นวิทยุ (Radio)

2.6 การแผ่พลังงานของดาวฤกษ์

ดาวฤกษ์สามารถเปล่งแสงได้จากการผลิตพลังงานโดยปฏิกิริยาเทอร์โมนิวเคลียร์ที่ใจกลางของดาว พลังงานทั้งหมดที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาจะถูกส่งผ่านจากใจกลางผ่านชั้นต่างๆ ของดาวฤกษ์ออกสู่อวกาศนอกโดยการส่งถ่ายพลังงาน 2 แบบคือ การพาพลังงาน และการแผ่พลังงาน หากพิจารณาคูสมบัติของดาวฤกษ์ในการแผ่พลังงานออกสู่อวกาศภายนอก โดยกำหนดให้ดาวฤกษ์เสมือนเป็นทรงกลมซึ่งผลิตพลังงานจากใจกลางและแผ่พลังงานที่ได้ออกมาจากผิวทรงกลม ปริมาณพลังงานที่ถูกแผ่ออกมาจากดาวฤกษ์แต่ละดวงย่อมมากน้อยแตกต่างกันตามคุณสมบัติการแผ่พลังงานของดาวฤกษ์นั้นๆ ปริมาณการแผ่พลังงานออกจากผิวดาวในทางดาราศาสตร์สามารถกำหนดได้หลายลักษณะ เช่น ความเข้ม (Intensity), ฟลักซ์พื้นผิว (Surface flux) หรือกำลังส่องสว่าง (Luminosity) เป็นต้น

2.6.1 ความเข้มของการแผ่พลังงาน (Intensity)

ดาวฤกษ์โดยทั่วไปจะประกอบไปด้วยกลุ่มก๊าซร้อนจัด ถ้าพิจารณาว่าดาวฤกษ์ ดังกล่าวมีสถานะสมดุลย์ (Equilibrium) ดาวจะสามารถแผ่พลังงานออกมาได้ ทุกๆ ความยาวคลื่น เรียกคุณสมบัตินี้ว่า “การแผ่รังสีของวัตถุดำ” (Blackbody radiation) โดยจะขึ้นกับว่าดาวดังกล่าวมีอุณหภูมิเป็นเท่าใด ฟังก์ชันการแผ่พลังงานของที่มีอุณหภูมิของแหล่งกำเนิดแสงต่างกันจะมีลักษณะเป็นดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กราฟแสดงลักษณะความสัมพันธ์ความเข้มและความยาวคลื่น

กราฟการแผ่พลังงานดังกล่าวมีฟังก์ชันการแผ่พลังงานเป็นดังนี้

$$I_{\lambda} = \frac{2 h^2 c^2}{\lambda^5} \left(e^{hc / \lambda kT} - 1 \right)^{-1} \dots\dots\dots(2.2)$$

โดย h = ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant) = 6.63×10^{-34} Js

k = ค่าคงที่ของโบลทซ์มานน์ (Boltzmann's constant) = 1.3806×10^{-23} J/K

c = ค่าความเร็วแสงในสุญญากาศ = 3×10^8 ms⁻¹

λ = ความยาวคลื่นของการแผ่รังสี

2.6.2 ฟลักซ์พื้นผิว (Surface flux)

ฟลักซ์พื้นผิวหมายถึงพลังงานที่แผ่ออกมาจากดาวฤกษ์ต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลาโดยถ้าพิจารณาดาวฤกษ์มีการแผ่พลังงานแบบวัตถุดำแล้ว จะได้ว่าฟลักซ์พื้นผิวสามารถหาได้จากความเข้มของการแผ่พลังงาน ซึ่ง

$$F = \int_0^{\infty} I_{\lambda} d\lambda \dots\dots\dots(2.3)$$

นั่นคือ ฟลักซ์พื้นผิวได้มาจากการรวมความเข้มของการแผ่พลังงานจากทุกๆ ความเข้มที่ดาวฤกษ์แผ่ออกมาทั้งหมด เมื่อแทนค่า I_{λ} ลงในสมการดังกล่าว จะได้ว่า

$$F = \sigma T_e^4 \dots\dots\dots(2.4)$$

โดย σ = ค่าคงตัวสเตฟาน-โบลทซ์มานน์ มีค่า = 5.66956×10^{-5} erg•cm⁻² degree⁻⁴ second⁻¹

T_e = อุณหภูมิยังผลของดาวฤกษ์ (Effective temperature)

2.6.3 กำลังส่องสว่างของดาวฤกษ์ (Luminosity)

กำลังส่องสว่างคือพลังงานที่แผ่ออกมาจากดาวฤกษ์ ต่อหน่วยเวลาโดยถ้าคิดว่าพลังงานแผ่ออกมาจากใจกลางของดาวฤกษ์แล้ว พิจารณาที่พื้นผิวของดาวซึ่งห่างจากใจกลางดาวด้วยระยะ R (ซึ่งก็คือรัศมีของดาวฤกษ์นั่นเอง) จะได้ว่ากำลังส่องสว่างกับฟลักซ์พื้นผิวของดาวฤกษ์ จะมีความสัมพันธ์กันโดย

$$L = 4\pi R^2 F \quad \dots\dots(2.5)$$

กำลังส่องสว่างจะไม่ขึ้นกับระยะทาง ดังนั้นถ้าดาวฤกษ์ดวงหนึ่งมีระยะห่างจากโลกเท่ากับ r และพลังงานต่อพื้นที่ต่อหน่วยเวลาที่วัดได้บนโลกมีค่าเท่ากับ f แล้ว ดังนั้นกำลังส่องสว่าง

$$L = 4\pi r^2 f$$

$$4\pi r^2 f = 4\pi R^2 F \quad \dots\dots(2.6)$$

ซึ่ง
ถ้าดาวฤกษ์มีการแผ่พลังงานแบบวัตถุดำแล้ว จะสามารถเขียนได้เป็น $L = 4\pi R^2 \sigma T_e^4$
ดังนั้น ถ้าทราบค่าอุณหภูมิยังผลและรัศมีของดาวฤกษ์ดวงใดๆ ก็สามารหาค่ากำลังส่องสว่างของดาวฤกษ์นั้นได้

2.7 ตำแหน่งของดาวบนทรงกลมท้องฟ้า

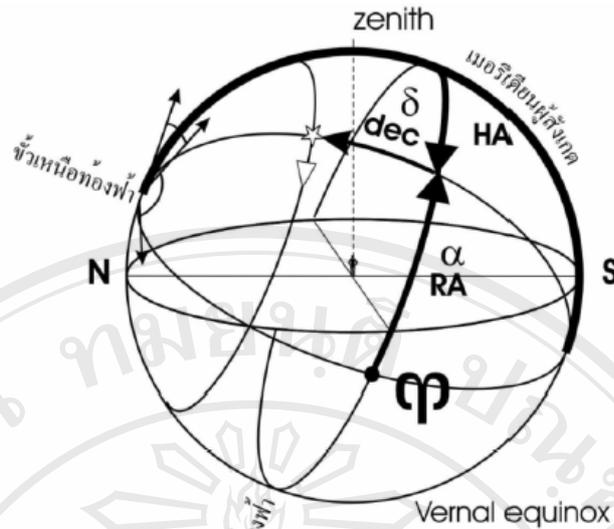
การบอกตำแหน่งบนท้องฟ้า สามารถบอกได้หลายระบบแล้วแต่ความเหมาะสมระบบพิกัดศูนย์สูตรเป็นระบบที่นิยมใช้ในการบอกตำแหน่งของดาว พิกัดในระบบศูนย์สูตรมี 2 ค่า คือ

2.5.1. มุมชั่วโมง (Hour Angle, HA) และ ค่าไรท์แอสเซนชัน (Right Ascension, RA)

ในการกำหนดมุมชั่วโมงนั้นจะอาศัยเส้นที่ลากจากจุดขั้วเหนือท้องฟ้าผ่านจุดเซนิทหรือจุดเหนือศีรษะลงไปยังขั้วใต้ท้องฟ้าเรียกเส้นนี้ว่าเมอริเดียนผู้สังเกต แล้วมุมชั่วโมงจะเป็นมุมที่ทำระหว่างเส้นเมอริเดียนผู้สังเกตกับตำแหน่งของดาวฤกษ์ โดยมีหน่วยเป็นชั่วโมง นาที และวินาที เมื่อดาวอยู่ที่เส้นเมอริเดียนผู้สังเกตก็จะมีมุมชั่วโมงเท่ากับ 0 ชั่วโมงแล้วเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเมื่อดาวเลื่อนไปทางทิศตะวันตกโดยทุกๆ 15 องศาเท่ากับ 1 ชั่วโมง แต่เนื่องจากค่ามุมชั่วโมงมีการเปลี่ยนแปลงทั้งคืนนักดาราศาสตร์จึงกำหนดพิกัดใหม่อีกค่าคือ ไรท์แอสเซนชัน (Right Ascension, RA) กำหนดจุดเวอรินอลอิกคลินอกซ์ (Vernal Equinox, Υ) มีค่า RA เป็น 0 ชั่วโมง แล้วค่า RA จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆไปทางทิศตะวันออก โดย 15 องศาเท่ากับ 1 ชั่วโมง หรือ 360 องศาเท่ากับ 24 ชั่วโมง

2.5.2. เดคลิเนชัน (Declination, dec, δ)

ค่าเดคลิเนชันของดาวนั้น กำหนดจากระยะห่างเชิงมุมจากเส้นศูนย์สูตรท้องฟ้าถึงตำแหน่งของดาวตามเส้นเมอริเดียน โดยถ้าดาวอยู่ที่ซีกฟ้าเหนือจะมีค่าเดคลิเนชันเป็นบวก จาก 0 ถึง 90 องศา และถ้าอยู่ซีกฟ้าใต้ก็จะมีค่าเป็นลบ จาก 0 ถึง -90 องศา



รูปที่ 2.2 ภาพทรงกลมท้องฟ้าแสดงตำแหน่งดาว

2.8 ความสว่างและโชติมาตรของดาวฤกษ์

2.8.1 โชติมาตรปรากฏ

ดวงดาวบนท้องฟ้ามีความสว่าง (Brightness) ไม่เท่ากัน ความสว่างของดาวจะขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ ขนาด และระยะทางของดาวที่อยู่ห่างจากโลก ในทางดาราศาสตร์ สามารถบอกระดับ ความสว่างของดาวได้ด้วยค่าโชติมาตร (Magnitude) โดยกำหนดไว้ว่า “ดาวที่มีค่าโชติมาตรเท่ากับ 1 จะมีความสว่างมากกว่าดาวที่มีโชติมาตรเท่ากับ 6 อยู่ 100 เท่า” นั่นคือ กำหนดให้อัตราส่วนของ ความสว่างในโชติมาตรติดกันมีค่าเท่ากับ a ดังนั้น

$$a^5 = B_1/B_6 = 100$$

$$a = 10^{2/5} = 2.512 \dots\dots(2.7)$$

พบว่า ดาวที่มีค่าโชติมาตรต่างกัน 1 จะมีความสว่างต่างกันอยู่ 2.512 เท่า ดังนั้น สำหรับการพิจารณาค่าความสว่างของดาวที่มีค่าโชติมาตรเท่ากับ m_1 และ m_2 จะได้

$$\frac{B_{m_1}}{B_{m_2}} = (2.512)^{-(m_1-m_2)} \dots\dots(2.8)$$

เมื่อใส่ลอการิทึมทั้งสองข้าง

$$\log\left(\frac{B_{m_1}}{B_{m_2}}\right) = -(-m_1 - m_2)\log 2.512 = -0.4(m_1 - m_2)$$

จะได้

$$(m_1 - m_2) = 2.5 \log \left(\frac{B_{m_2}}{B_{m_1}} \right) \quad \dots\dots(2.9)$$

จากสมการข้างบน คือนิยามของโชติมาตรปรากฏจะเห็นว่า $m_1 > m_2$ เมื่อ $B_{m_1} < B_{m_2}$ นั่นคือ ดาวที่สว่างมากจะมีค่าโชติมาตรน้อยกว่า

2.8.2 โชติมาตรสัมบูรณ์ (Absolute magnitude)

เมื่อต้องการเปรียบเทียบระดับความสว่างของดาว เราต้องกำหนดระยะทางที่เท่ากัน ระยะทางมาตรฐานที่ใช้คือระยะทางที่ห่างจากโลก 10 พาร์เซก(Parsec, pc.) โดยโชติมาตรที่ระยะนี้เรียกว่า โชติมาตรสัมบูรณ์ (Absolute magnitude)

กำหนดให้โชติมาตรสัมบูรณ์ ของดาวเป็น M และค่าความสว่างสัมบูรณ์เป็น B ในระยะทางที่ 10 pc. และ คือ ค่าโชติมาตรปรากฏเป็น m ความสว่างปรากฏเป็น b ในระยะ d pc. จากกำลังสองผกผัน จะได้

$$\frac{B}{b} = \left(\frac{d}{10 pc} \right)^2 \quad \dots\dots(2.10)$$

แทนค่าสมการที่ (2.10) ใน สมการที่ (2.9) จะได้

$$\begin{aligned} m - M &= 2.5 \log \left(\frac{d}{10 pc} \right)^2 \\ m - M &= 5 \log d - 5 \\ M &= m + 5 - 5 \log d \end{aligned} \quad \dots\dots(2.11)$$

สมการที่ (2.11) เป็นสมการแสดงค่าโชติมาตรสัมบูรณ์(M)ของดาว

2.8.3 โชติมาตรที่วัดได้จากเครื่องมือ

กล้องซีซีดีที่นำมาใช้ในการศึกษาทางดาราศาสตร์ฟิสิกส์ด้านต่างๆในกรณีทำการศึกษาเกี่ยวกับการทำโฟโตเมตรี(Photometry)ของดาว

ถ้าให้

$f(\lambda)$ = จำนวนฟลักซ์(Flux) ที่มาจากการแผ่รังสีของดาวในหน่วย A/D(Analog-to-digital)

$F(\lambda)$ = จำนวนฟลักซ์(Flux) ที่แท้จริงของดาวในหน่วย Photo/cm²

จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$f(\lambda) = C(\lambda)F(\lambda) \quad \dots\dots(2.12)$$

โดย $C(\lambda)$ = ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของกล้อง, ฟิลเตอร์(Filter), CCD และอื่นๆ แต่โดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับค่าความยาวคลื่นที่วัดได้

ทำให้ ผลต่างของค่าโชติมาตรมีความสัมพันธ์กับค่า log ของอัตราส่วนของฟลักซ์ คือ

$$(m_1 - m_2) = -2.5 \log \left(\frac{f_1(\lambda_1)}{F_2(\lambda_2)} \right) \quad \dots\dots(2.12)$$

เมื่อ m_1, m_2 และ $f_1(\lambda_1), F_2(\lambda_2)$ คือ ค่าโชติมาตรและฟลักซ์ของดาวดวงที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ซึ่งจะมีค่าเปลี่ยนแปลงได้เมื่อเครื่องมือที่ใช้วัดมีการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่น

ถ้าวัดดาว 2 ดวง ที่ความยาวคลื่นคงที่ และให้ $C(\lambda)$ ของดาวทั้งสองดวงมีค่าเท่ากัน สามารถเขียนในเทอม

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log \left(\frac{f_1(\lambda)}{f_2(\lambda)} \right) \quad \dots\dots(2.13)$$

หากกำหนดดาวใดดวงหนึ่งเป็นดาวมาตรฐาน มีโชติมาตรเป็น m_0 และ $f_0(\lambda)$ เป็นค่าฟลักซ์ของดาวมาตรฐานที่วัดได้ และอีกดวงหนึ่งเป็นดาวเปรียบเทียบมีโชติมาตร เป็น m_1 และ $f_1(\lambda)$ เป็นค่าฟลักซ์ของดาวเปรียบเทียบที่วัดได้ จะทำให้สมการที่ (2.13) กลายเป็น

$$m_1 = m_0 - 2.5 \log \left(\frac{f_1(\lambda)}{f_0(\lambda)} \right) \quad \dots\dots(2.14)$$

ซึ่งจะนำไปใช้ในการ Calibrate โชติมาตรของดาวที่วัดได้ต่อไป

เนื่องจากภาพดาวที่ถ่ายด้วยกล้องซีซีดี มีลักษณะเป็นจุดแสง หรือมีลักษณะเป็นพื้นที่รูปร่างกลม(Circular aperture) แสดงเส้นขอบชัดเจน ซึ่งเป็นการรวมความเข้มแสงทั้งหมดที่กระทบ CCD chip ในรูปพิกเซล โดยทั่วไปพิกเซลทั้งหมดที่ปรากฏเป็นรูปดาวนั้นเป็นสัญญาณรวม โดยที่มีสัญญาณรบกวน(Noise signal) จากแหล่งกำเนิดแสงอื่น ๆ รวมอยู่ด้วย เช่น CCD dark current และ Atmospheric emission เป็นต้น เราต้องทำการหักลบสิ่งเหล่านี้่ออกเพื่อให้ได้แต่สัญญาณแสงจากดาวเท่านั้น เราเรียกผลลัพธ์นี้ว่า Sky subtracted flux ของดาว โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ ซึ่งมี function การทำงานเกี่ยวกับ photometry สำหรับการวิเคราะห์โฟโตเมตรีของดาวแบบอัตโนมัติ

เป้าหมายของการสังเกตการณ์โดยเทคนิคโฟโตเมตรี ได้แก่ การวัดค่าโชติมาตรของดาวฤกษ์(m) สัมพันธ์กับค่าฟลักซ์ของแสงจากดาวฤกษ์ (F) ตามสมการ

$$m = -2.5 \log F \quad \dots\dots(2.15)$$

เมื่อทำการวัดผ่านแผ่นกรองแสงต่างๆกันที่จะตอบสนองต่อช่วงความยาวคลื่นที่ต่างกัน ทำให้เกิดค่าโชติมาตรที่เกิดจากการวัดที่แผ่นกรองแสงต่างๆ ยกตัวอย่างเช่น

$$\begin{aligned} \text{Filter B ;} & \quad b = -2.5 \log F_b \\ \text{Filter V ;} & \quad v = -2.5 \log F_v \end{aligned} \quad \dots\dots(2.16)$$

ในทางปฏิบัติโดยเทคนิคนี้ ฟลักซ์ของแสงจะถูกบันทึก อยู่ในรูป ค่าการนับสุทธิ(Net count; C) ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{Filter B;} & \quad b = -2.5 \log C_b \\ \text{Filter V;} & \quad v = -2.5 \log C_v \end{aligned} \quad \dots\dots(2.17)$$

2.9 สีและดัชนีสี

2.9.1 สีของดาวฤกษ์

ถ้าสังเกตดาวฤกษ์บนท้องฟ้าจะพบว่าสีแตกต่างกันไปเนื่องจากว่าแสงแต่ละสีจะมีความยาวคลื่นไม่เท่ากันและมีช่วงตั้งแต่ประมาณ 400-700 nm โดยแสงสีแดงมีความยาวคลื่นมากที่สุด จากนั้นจึงเป็นแสงสีส้ม, เหลือง, เขียว, น้ำเงิน, ฟ้า และแสงสีม่วงจะมีความยาวคลื่นสั้นที่สุดจากความรู้ทางฟิสิกส์เบื้องต้นพบว่าจากแสงสีความยาวคลื่นต่างกันที่สังเกตเห็นได้จากแหล่งกำเนิดแสงต่างกัน สามารถบอกได้ว่ามีอุณหภูมิ มากน้อยเท่าใด จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$\lambda \propto \frac{1}{T} \quad \dots\dots(2.18)$$

นั่นหมายความว่าสำหรับแหล่งกำเนิดแสงสีแดงจะมีอุณหภูมิต่ำที่สุดในบรรดาแสงสีที่มองเห็นได้ทั้งหมดเนื่องจากแสงสีแดงมีความยาวคลื่นมากที่สุด และแหล่งกำเนิดแสงสีม่วงก็จะมีอุณหภูมิสูงที่สุดในบรรดาแสงสีที่มองเห็นได้ ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถเขียนเป็นสมการได้

$$\lambda = 0.2898 \cdot \frac{1}{T} \quad \dots\dots(2.19)$$

โดยสมการดังกล่าวสามารถนำมาคำนวณโดยใช้หน่วยของความยาวคลื่นเป็นเซนติเมตร และหน่วยของอุณหภูมิเป็นเคลวิน ดังนั้นสำหรับดาวฤกษ์สีแดงเช่นดาวบีเทลจูส หรือ แอนทาร์ิส จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าดาวฤกษ์ที่มีสีตามความยาวคลื่นที่ยาวกว่าสีแดง

2.9.2 ดัชนีสีของดาวฤกษ์

ในการพิจารณาสีด้วยค่าดัชนีสี (Color index) ซึ่งคือผลต่างของโชติมาตรเมื่อวัดด้วยอุปกรณ์ทางแสงสองชนิดซึ่งมีผลตอบสนองทางแสงต่างกัน เช่นในการสังเกตการณ์ทางโฟโตเมตรี ถ้าใช้แผ่นกรองแสงสีน้ำเงินวัดแสงดาวได้โชติมาตรเท่ากับ B คือ ค่าการนับสุทธิในช่วงความยาวคลื่นสีน้ำเงินและใช้แผ่นกรองแสงสีเหลืองวัดแสงดาวได้โชติมาตรเท่ากับ V แล้ว จะได้ว่า

$$\text{ค่าดัชนีสี(I)} = B - V = -2.5 \log (C_b/C_v) \quad \dots\dots(2.20)$$

เมื่อ

C_b คือ ค่าการนับจำนวนโฟตอนสุทธิในช่วงความยาวคลื่นสีน้ำเงิน(B)

C_v คือ ค่าการนับจำนวนโฟตอนสุทธิในช่วงความยาวคลื่นสีเหลือง(V)

โดยวิธีการหาดัชนีสีนี้เป็นการวัดโดยใช้เทคนิคโฟโตเมตรีซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีสีกับอุณหภูมิสัมฤทธิ์ โดย Careron Reed (Astor. Society of Canada, vol.92, no.1, 1998) คือ

$$B - V = -3.684 \log(T) + 14.551 \quad \text{เมื่อ } \log T < 3.961$$

$$B - V = 0.344 [\log(T)]^2 - 3.402 \log(T) + 8.037 \quad \text{เมื่อ } \log T > 3.961 \quad \dots\dots(2.21)$$

และจากรายงานวิจัยเกี่ยวกับ การศึกษาอุณหภูมิสัมฤทธิ์ของสมาชิกกระจุกดาวเปิดโดยใช้เทคนิคโฟโตเมตรี (รศ.บุญรักษา สุนทรธรรมและคณะ, 2530) ทำให้ทราบความสัมพันธ์ของค่าดัชนีสีเชิงเส้นกับค่าส่วนกลับของอุณหภูมิสัมฤทธิ์ ยกเว้นบริเวณที่มีค่าดัชนีสีมาก ไม่เหมือนกับวัตถุค่าเมื่อวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น พบว่า

$$1/T_{\text{eff}} = 9.52307 \times 10^{-5} + 1.32488 \times 10^{-4} (B-V)$$

ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าดัชนีสีดังนี้

$$T_{\text{eff}} = 7200 / (I + 0.64) , I = \text{ค่าดัชนีสี } B-V \quad \dots\dots(2.22)$$

2.10 การลดลงของแสงดาวเนื่องจากผลของบรรยากาศโลก

บรรยากาศที่ห่อหุ้มโลกมีผลต่อการลดลงของแสงดาว ถ้าทำการสังเกตการณ์พื้นโลก เมื่อดาวอยู่ที่ขอบฟ้าแสงดาวจะผ่านบรรยากาศของโลกเป็นระยะทางมากกว่าเมื่อดาวอยู่ระย่มุมเงยที่สูงขึ้นไป และจะผ่านเป็นระยะทางน้อยที่สุดเมื่อดาวอยู่ที่ตำแหน่งเหนือศีรษะ หรือจุดเซนิท (Zenith) ดังนั้นเมื่อค่ามุมเงยของดาวฤกษ์เพิ่มขึ้นแสงดาวจะปรากฏแสงสว่างขึ้น นอกจากนั้นยังพบว่า สีของดาวเมื่ออยู่ใกล้ระดับขอบฟ้าจะปรากฏสีแดงกว่าความเป็นจริง และผลดังกล่าวนี้จะลดลงเมื่อตำแหน่งของดาวสูงขึ้น

2.10.1 มวลอากาศ(Air-Mass)

ความหนาของบรรยากาศโลกกำหนดในเทอมของมวลอากาศ(Air-Mass, X) ดังนั้น ณ บริเวณของฟ้าค่ามวลอากาศจะมากและลดลงเมื่อมุมเงยเพิ่มขึ้น โดยกำหนดว่า

$$\text{ระยะเซนิท}(Z) = 90^\circ - \text{มุมเงย} \quad \dots\dots(2.23)$$

โดยกำหนดให้บรรยากาศโลกเป็นลักษณะระนาบขนาน(Plane-Parallel Atmosphere) ซึ่งกำหนดดังกล่าวใช้ได้ โดยมีความผิดพลาดไม่เกิน 2 % เมื่อสังเกตดาวที่มีค่ามุมเงยไม่ต่ำกว่า 30° หรือมีระยะเซนิทไม่เกิน 60° และอาจประมาณได้ว่า

$$X = \sec Z$$

ซึ่ง

$$\sec Z = (\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos H)^{-1} \quad \dots\dots(2.24)$$

- โดย ϕ = ค่าละติจูด (Latitudes) ของผู้สังเกต
- δ = ค่าเดคลิเนชัน (Declination) ของดาว
- H = ค่ามุมชั่วโมงของดาว ณ เวลาสังเกตการณ์

สำหรับ ระยะเซนทิเมตรมีค่ามากกว่า 60° เงื่อนไขระยะนาบบรรยากาศจะใช้ไม่ได้ ค่ามวลอากาศจะสัมพันธ์กับระยะเซนทิเมตร โดยการประมาณของเบมโพราด(Bemporad Approximation) ดังนี้

$$X = \sec Z - 0.001816(\sec Z - 1) - 0.002875(\sec Z - 1)^2 - 0.0008083(\sec Z - 1)^3 \dots\dots(2.25)$$

2.10.2 สัมประสิทธิ์การลดลงของแสงดาวอันดับที่หนึ่ง (The first-order extinction, k')

การสังเกตการณ์ทางโฟโตเมตรี ในช่วงความยาวคลื่นแถบกว้างนั้น จากการสังเกตการณ์ในช่วงความยาวคลื่น สีน้ำเงิน(B) สีเหลือง(V) ดังนั้นอาจเขียนค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของแสงดาวอันดับที่หนึ่ง ได้จากค่าโชติมาตรที่ได้จากเครื่องมือวัดกับค่ามวลอากาศได้ดังนี้

$$\begin{aligned} b_o &= b - k'_b X \\ v_o &= v - k'_v X \end{aligned} \dots\dots(2.26)$$

เมื่อ k' = ค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของแสงดาวอันดับที่หนึ่ง

b_o, v_o = ค่าโชติมาตรที่ประมาณว่าวัดนอกบรรยากาศโลก

b, v = ค่าโชติมาตรที่วัดจากเครื่องมือ

ในเทอมของดัชนีสี เขียนได้ดังนี้

$$(b - v)_o = (b - v) - k'_{bv} X \dots\dots(2.27)$$

โดย $k'_{bv} = k'_b - k'_v$

โดยทั่วไปในการหาค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของแสงดาวอันดับที่หนึ่ง แบบ All-sky photometry หรือ Absolute photometry จะมีการกำหนดค่าโชติมาตรมาตรฐานและสีของดาวมาตรฐาน จากดาวที่มีสเปกตรัม A-type และ B9-type ซึ่งวัดโดยเครื่องบันทึกสัญญาณและชุดแผ่นกรองแสงใดๆเอาไว้ เพื่อให้การวิเคราะห์ข้อมูลทางโฟโตเมตรีไม่ว่าจะทำการสังเกตการณ์ ณ สถานที่ใด จะสามารถนำข้อมูลการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบกันได้

ในทางปฏิบัติ อาจะวัดพลั๊กซ์ของแสงดาวในช่วงความยาวคลื่นที่สนใจ ณ ค่ามวลอากาศต่างๆ ค่าความชันของกราฟระหว่างผลต่างของค่าโชติมาตรที่แท้จริงและโชติมาตรที่วัดโดยเครื่องมือ ณ ค่ามวลอากาศต่างๆ จะเป็นค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของแสงดาวอันดับที่หนึ่งเนื่องจากผลของบรรยากาศโลก ในการสังเกตการณ์แต่ละคืน อย่างไรก็ตามข้อมูลที่วัดได้จะมีการกระจายเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงท้องถิ่น ซึ่งผู้สังเกตการณ์ต้องใช้เทคนิคการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Liner regression analysis) มาปรับข้อมูลดังกล่าว

2.10.3 การแปลงค่าโชติมาตรที่วัดได้สู่ค่าโชติมาตรมาตรฐาน

การแปลงค่าโชติมาตร หรือค่าสีที่วัดได้จากเครื่องมือสู่ค่าโชติมาตรมาตรฐาน ผู้ทำการสังเกตการณ์จะต้องวัดทั้งดาวโปรแกรมและดาวมาตรฐานสลับกันไป เพื่อให้การแปลงค่าโชติมาตรและสีของดาวโปรแกรม สู่ระบบมาตรฐาน เพื่อให้มีความถูกต้องและสมบูรณ์มากที่สุด

ในระบบแผ่นกรองมาตรฐาน UBVRi ของ ณ สถานที่สังเกตใดๆ พบว่า

$$\begin{aligned} V &= v_0 + \mathcal{E}(B - V) + \zeta_v \\ B - V &= \mu(b - v)_0 + \zeta_{bv} \end{aligned} \quad \dots\dots(2.28)$$

ในทางปฏิบัติ การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแปลงค่า(Transformation coefficients; \mathcal{E})

และการหาค่า จุดศูนย์ (Zero point constants; ζ_v) จากความชันกราฟระหว่างค่า $(V - v_0)$ กับ ค่า

$(B - V)$ ของดาวมาตรฐาน

ต่อจากนั้นหาค่า Extra-atmosphere instrumental color ; $(b - v)_0$ จาก

$$(b - v)_0 = \frac{(B - V) - \zeta_{bv}}{\mu}$$

เมื่อลบสมการที่ ด้วย $(b - v)_0$ แล้วจัดรูปใหม่จะได้

$$(B - V) - (b - v)_0 = (\mu - 1)(b - v)_0 + \zeta_{bv}$$

เมื่อ แทนค่า $(b - v)_0$ จะได้

$$(B - V) - (b - v)_0 = (\mu - 1) \left[\frac{(B - V) - \zeta_{bv}}{\mu} \right] + \zeta_{bv}$$

เมื่อจัดรูปใหม่จะได้

$$(B - V) - (b - v)_0 = \left(1 - \frac{1}{\mu}\right)(B - V) + \frac{\zeta_{bv}}{\mu} \quad \dots\dots(2.29)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $(B - V) - (b - v)_0$ กับ $(B - V)$ จะได้ความชันกราฟ คือ $\left(1 - \frac{1}{\mu}\right)$ และจุดตัดบน

แกน Y คือ $\frac{\zeta_{bv}}{\mu}$

2.11 สเปกตรัมของดาวฤกษ์

ในปลายศตวรรษที่ 19 ได้มีการถ่ายสเปกตรัมของดาวหลายพันดวงซึ่งพบว่าดาวต่างชนิดกันจะมีสเปกตรัมที่ต่างกันไป ดังนั้นจึงมีการแบ่งชั้นสเปกตรัมของดาวขึ้น โดยนักดาราศาสตร์ ชาวอเมริกัน ชื่อ แอนนี เจ แคนนอน (Anni J. Cannon) ซึ่งในครั้งนั้นได้ จัดเป็นแคตตาล็อกขึ้นมาเรียกว่า Henry Draper Catalog ซึ่งดาวในแคตตาล็อกนี้จะใช้ชื่อย่อว่า HD เช่น HD3176 ต่อมาพบว่าสเปกตรัมของดาวขึ้นกับอุณหภูมิยังผลของดาว ด้วยดังนั้นในการพิจารณาสเปกตรัมของดาวจึงพิจารณาเส้นมืดที่มีความเข้มมากๆเป็นหลัก เช่น เส้นมืดของไฮโดรเจน ณ อุณหภูมิที่เหมาะสมของดาวอุณหภูมิหนึ่ง เส้นมืดของไฮโดรเจนจะเข้มที่สุด ถ้าอุณหภูมิสูงหรือต่ำกว่านี้ ความเข้มของเส้นมืดไฮโดรเจนนี้จะลดลง ดาวที่มีเส้นมืดดังกล่าวนี้เข้มที่สุดเรียกว่ามีชั้นของสเปกตรัม A และในการจำแนกชนิดสเปกตรัมตามแบบ Harvard Classification จะแบ่งชนิดของสเปกตรัมของดาวเรียงตามลำดับจากดาวที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดจนถึงอุณหภูมิต่ำที่สุดได้เป็น O, B, A, F, G, K และ M ชั้นของสเปกตรัมเหล่านี้ยังถูกแบ่งออกเป็น ชั้นย่อยๆได้อีกชั้นละ 10 กลุ่ม เช่น A0, A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8, A9 และ

A10 เป็นต้น ซึ่งทำให้นักดาราศาสตร์ทราบถึงอุณหภูมิยังผล, สีของดาว และบอกชนิดของธาตุในบรรยากาศของดาวได้การจำแนกชนิดสเปกตรัมตามแบบ Harvard Classification นั้น แอนนี จี แคนนอน ได้ทำการจำแนกสเปกตรัมของดาวถึง 20,000 ดวง ในช่วงปี ค.ศ. 1911-1914 ดาวดวงแรกใน HD Catalog คือ ดาวบีเทลจัส (Betelgeuse) ซึ่งเรียกชื่อตาม HD Catalog เป็น HD1พื้นฐานการจำแนกชนิดสเปกตรัมของดาวตามแบบของ Harvard Classification จะทำให้เกิดการเปรียบเทียบระหว่างชนิดสเปกตรัมของดาวแต่ละชนิดได้ เช่น ดาววิกา (Vega) ในกลุ่มดาวพิณถูกจัดให้อยู่ใน spectral type A0 ซึ่งมีเส้นมืดของไฮโดรเจนเด่นชัดมากเมื่อนำมาเทียบกับดวงอาทิตย์ซึ่งมี spectral type G2 พบว่าเส้นมืดของไฮโดรเจนของดวงอาทิตย์จะจางกว่ามาก และในทางกลับกันพบว่าดวงอาทิตย์จะมีเส้นมืดของแคลเซียมเด่นชัดกว่าดาววิกา โดยในการเปรียบเทียบอุณหภูมิยังผลของดาววิกา คือ $T_{\text{eff}} = 9,500^{\circ}\text{K}$ แต่ของดวงอาทิตย์ $T_{\text{eff}} = 5,770^{\circ}\text{K}$ ลักษณะสำคัญของดาวที่มีชั้นสเปกตรัมชนิดต่างๆ มีดังนี้

ชนิด O : เป็นดาวที่มีอุณหภูมิสูงมาก ประมาณ $30,000 - 60,000^{\circ}\text{K}$ จนทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมของธาตุต่างๆเกิดการไอออไนซ์ขึ้น เส้นมืดที่ปรากฏชัดเจนสเปกตรัมได้แก่ ไอออไนซ์ของฮีเลียม, ออกซิเจน, ไนโตรเจน รวมทั้งไฮโดรเจนด้วย ดาวชนิดดังกล่าวนี้มีอยู่กลุ่มหนึ่งเรียกว่า Wolf-Rayet star ที่แสดงเส้นสว่างของธาตุบางชนิดมีขนาดกว้างหลายอังสตรอม คาดว่าเส้นสว่างเหล่านี้เกิดจากกลุ่มก๊าซที่ห่อหุ้มดาวถูกดันให้พุ่งออกมา

ชนิด B : เส้นมืดที่มีความเข้มมากที่สุด ได้แก่ ฮีเลียมที่ไม่ถูกไอออไนซ์ (Neutral helium) โดยเฉพาะดาวชนิด B2 มีอุณหภูมิประมาณ $10,000 - 30,000^{\circ}\text{K}$ เส้นของไฮโดรเจนเข้มกว่าดาวชนิด O ตัวอย่างเช่น ดาวไรเจลในกลุ่มดาวนายพราน, ดาวสไปกาในกลุ่มดาวหญิงสาว เป็นต้น

ชนิด A : มีอุณหภูมิประมาณ $7,500 - 10,000^{\circ}\text{K}$ เส้นของไฮโดรเจนเข้มที่สุด u3650 โดยเริ่มปรากฏเส้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมที่ถูกไอออไนซ์ เป็นครั้งแรก(Singly ionized) ได้แก่ ดาวซีริอัสในกลุ่มดาวสุนัขใหญ่, ดาวเดเนบในกลุ่มดาวหงส์ และดาววิกาในกลุ่มดาวพิณ

ชนิด F : มีอุณหภูมิประมาณ $6,000 - 7,500^{\circ}\text{K}$ เส้นของไฮโดรเจนเริ่มจางลงแต่เส้นของแคลเซียมซึ่งถูกไอออไนซ์เป็นครั้งแรกเริ่มปรากฏชัดขึ้น โดยเส้นดังกล่าวมีอยู่ 2 เส้น เรียกว่าเส้น H และเส้น K ตัวอย่างเช่น ดาวคาโนปัส(Canopus) ในกลุ่มดาวกระดูกงูเรือ และดาวเหนือ(Polaris) ในกลุ่มดาวหมีเล็ก

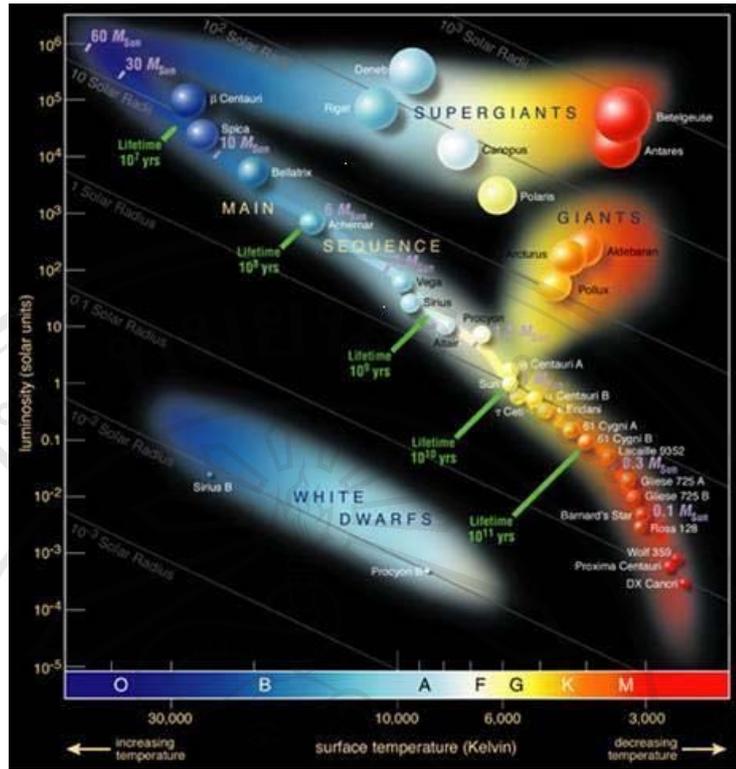
ชนิด G : มีอุณหภูมิประมาณ $5,000 - 6,000^{\circ}\text{K}$ ดาวชนิดนี้มีเส้น H และ K ของแคลเซียมชัดที่สุดส่วนเส้นไฮโดรเจนพอมองเห็นได้ ตัวอย่างเช่น ดวงอาทิตย์

ชนิด K : เป็นดาวเย็นมีอุณหภูมิประมาณ $3,500 - 5,000^{\circ}\text{K}$ มีเส้นสเปกตรัมของโลหะเป็นกลางมากมาย เช่น ดาวอาร์คตุรุส(Arcturus) ในกลุ่มดาวคนเลี้ยงสัตว์ และดาวอัลดีบาแรน(Aldebaran) ในกลุ่มดาววัว

ชนิด M : เป็นดาวที่มีอุณหภูมิน้อยกว่า $3,500^{\circ}\text{K}$ มีบรรยากาศที่โมเลกุลของก๊าซสามารถดำรงสภาพอยู่ได้ มีแถบสเปกตรัมของไททาเนียมออกไซด์ (Titanium oxide) ชัดมาก โดยเฉพาะชนิด M7 ตัวอย่างเช่น ดาวบีเทลจุส ในกลุ่มดาวนายพราน และดาวแอนทาร์ริส ในกลุ่มดาวแมงป่อง

2.12 แผนภาพเฮิทซ์ปรุง-รัสเซล (Hertzsprung-Russell diagram)

แผนภาพเฮิทซ์ปรุง-รัสเซล (Hertzsprung-Russell diagram) เป็นแผนภาพที่ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าโชติมาตรสัมบูรณ์ (Absolute Magnitude) กับชนิดของสเปกตรัม (Spectral type) ของดาวฤกษ์แต่ละดวงซึ่งสามารถนำแผนภาพดังกล่าวมาใช้ศึกษาเส้นทางการวิวัฒนาการของดาวฤกษ์ที่มีมวลต่างกันได้เป็นอย่างดี ถูกค้นพบโดยนักดาราศาสตร์ชาวเดนมาร์กชื่อ เอนาร์ เฮิทซ์ปรุง (Ejnar Hertzsprung) ในปีค.ศ. 1911 โดยเขาได้ทำการเปรียบเทียบสีกับความสว่างของดาวในกระจุกดาวหลายกระจุกโดยนำเอาค่าโชติมาตรสัมบูรณ์กับสีของดาวมาพล็อตเทียบกับความแม่นยำสูง ต่อมานักดาราศาสตร์ชาวอเมริกันชื่อ เฮนรี นอร์ริส รัสเซล ก็ได้ ศึกษาเรื่องของดาวในทำนองเดียวกันเมื่อปี ค.ศ. 1913 ผลการศึกษาของเฮิทซ์ปรุงและรัสเซลพบว่าดาวฤกษ์ส่วนใหญ่มีตำแหน่งบนแผนภาพอยู่บนแถบที่เรียกว่า “แถบลำดับหลัก” (Main sequence) โดยดาวฤกษ์ที่มีชนิดของสเปกตรัมในช่วงต้นจะมีค่าโชติมาตรสัมบูรณ์น้อย(ดาวสว่างมาก) และดาวฤกษ์ที่มีชนิดของสเปกตรัมในช่วงท้ายจะมีค่าโชติมาตรสัมบูรณ์มาก(ดาวสว่างน้อย) แผนภาพดังกล่าวนี้เป็นแนวทางนำมาสู่การค้นพบอันสำคัญยิ่งเกี่ยวกับการศึกษาวิวัฒนาการของดาวลักษณะสำคัญของดาวฤกษ์ที่นำมาพล็อตในแผนภาพเฮิทซ์ปรุง-รัสเซล นอกจากดาวฤกษ์ส่วนใหญ่จะอยู่ในแถบลำดับหลักแล้ว ก็ยังพบดาวจำนวนไม่น้อยที่มีตำแหน่งอยู่เหนือแถบลำดับหลักไปทางบนขวา ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งดาวดังกล่าวมีสมบัติคืออุณหภูมิต่ำสว่างมาก เรียกดาวพวกนี้ว่า “ดาวยักษ์”(Giant stars) ตำแหน่งในแผนภาพอีกตำแหน่งที่มีดาวจำนวนไม่น้อยคือบริเวณเหนือแถบลำดับหลักขึ้นไปด้านบนสุด ซึ่งมีความสว่างมากกว่าดาวยักษ์ เรียกว่า “ดาวยักษ์ใหญ่”(Supergiant stars) นอกจากนี้ยังมีดาวบางกลุ่มอยู่ในตำแหน่งมุมซ้ายล่างซึ่งดาวดังกล่าวมีสมบัติ คืออุณหภูมิสูงแต่สว่างน้อย เรียกว่า ดาวแคระขาว (White dwarfs) ทั้งดาวยักษ์, ดาวยักษ์ใหญ่ และดาวแคระขาว ต่างก็เป็นดาวที่อยู่นอกแถบลำดับหลัก โดยตำแหน่งของดาวดังกล่าว ในแผนภาพไม่ได้บ่งถึงตำแหน่งดาวบนท้องฟ้าแต่จะแสดงถึงชนิดของดาวที่แบ่งตามอุณหภูมิและความสว่างซึ่งเป็นสมบัติของดาวแต่ละดวง



รูปที่ 2.3 แสดงแผนภาพเฮิรตซ์ปรุง-รัสเซล (Hertzsprung-Russell diagram)

นอกจากจะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโชติมาตรสัมบูรณ์ในแกนตั้งและชนิดของสเปกตรัมในแกนนอนแล้วในแกนตั้งยังสามารถกำหนดเป็นค่ากำลังส่องสว่าง(Luminosity) และแกนนอนยังสามารถกำหนดเป็นค่าอุณหภูมิขงผล(Effective temperature) หรือค่าดัชนีสี(Color index) ได้อีก ดังนั้นถ้าพิจารณาแผนภาพเฮิรตซ์ปรุง-รัสเซลที่มีแกนตั้งเป็นกำลังส่องสว่าง และแกนนอนเป็นอุณหภูมิขงผลดัง รูปที่ 2.3 พบว่า ถ้ามีดาวสามดวงอยู่ที่ ตำแหน่ง A, B และ C ซึ่งดาวทั้งสามดวงมีค่าอุณหภูมิขงผลเท่ากัน แต่ ดาวในตำแหน่ง C มีกำลังส่องสว่างมากที่สุด รองลงมาคือดาวในตำแหน่ง A และ B ตามลำดับ ดังนั้นถ้าพิจารณาจากสมการ

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_e^4 \dots\dots\dots(2.30)$$

ดาวในตำแหน่ง C จะมีรัศมี R มากที่สุด และดาวในตำแหน่ง B จะมีรัศมี R น้อยที่สุดเมื่อเทียบกันทั้งสามดวง ซึ่งจากสมการดังกล่าว ถ้ากำหนดให้รัศมีของดาวฤกษ์คงที่ อาจเขียนเส้นกราฟรัศมีคงที่เป็นเส้นทแยงในแผนภาพเฮิรตซ์ปรุง-รัสเซลได้ดังแสดงใน รูปที่ 2.3 นอกจากรัศมีแล้ว ถ้ามวลของดาวฤกษ์ที่ดาวในตำแหน่งต่างๆ จะพบว่ายิ่งกำลังส่องสว่างมีค่าเพิ่มขึ้น มวลของดาวฤกษ์ที่ตำแหน่งนั้นก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นดาวฤกษ์ที่อยู่ในช่วงต้นของแถบลำดับหลักจะเป็นดาวฤกษ์มวลมาก และดาวฤกษ์ ที่อยู่บริเวณช่วงท้ายของแถบลำดับจะเป็นดาวฤกษ์มวลน้อย ถ้าพิจารณาแผนภาพเฮิรตซ์ปรุง-รัสเซลตามแนวตั้งซึ่งมีชนิดของสเปกตรัมคงที่แล้ว ก็ยังพบว่าในแต่ละชนิดของสเปกตรัมค่าต่างๆ ก็ยังมีกำลังส่องสว่างไม่เหมือนกัน ต่อมานักดาราศาสตร์ก็พบว่าสามารถแบ่งดาวที่มีชนิดของสเปกตรัม

หนึ่งๆ ออกเป็นประเภทย่อยได้อีก 6 ประเภทตามกำลังส่องสว่าง (Luminosity classes) ซึ่งมีทั้งหมด 6 ชั้น

- ชั้น I_a หมายถึง ดาวมหายักษ์ที่สว่าง (Bright Supergiants)
- I_b หมายถึง ดาวมหายักษ์ (Supergiants)
- II หมายถึง ดาวยักษ์ที่สว่าง (Bright Giants)
- III หมายถึง ดาวยักษ์ (Giants)
- IV หมายถึง ดาวยักษ์เล็ก (Subgiant)
- V หมายถึง ดาวในแถบกระบวนหลัก (Main sequence stars)

เช่น ดวงอาทิตย์มีชนิดของสเปกตรัม G2 และเป็นดาวฤกษ์ในแถบลำดับหลัก จึงสามารถเขียนชนิดของสเปกตรัมในประเภทย่อยลงไปอีกเป็น G2V เป็นต้น

อย่างไรก็ตามนักดาราศาสตร์ พบว่าสสารระหว่างดาว (Interstellar Medium) ฝุ่นและกระเจิงแสงของดาวฤกษ์ที่แผ่มาขังโลก ทำให้การวัดสีและโชติมาตรของดาวฤกษ์ผิดไปจากค่าที่แท้จริงฝุ่นระหว่างดาวฤกษ์ (Interstellar Dust) จะดูดและกระเจิงแสงในช่วงสีน้ำเงินและอุตราไวโอเล็ตมากกว่าช่วงสีแดง ดังนั้นทำให้สีของดาวฤกษ์ที่วัดได้ผิดไปจากค่าจริงเรียกว่าผลการเปลี่ยนแปลงของสีนี้ว่า คัลเลอร์เอกเซส(Color Excess, $E_{(B-V)}$) โดยค่าเฉลี่ยของ Color Excess จะเพิ่มขึ้น หากดาวฤกษ์อยู่บนระนาบของกาแล็กซี่ (Galactic Plane) และค่าเฉลี่ยของ Color Excess จะลดลง ถ้าดาวฤกษ์อยู่บนฮาโล(Halo)ของกาแล็กซี่อันเนื่องมาจากฝุ่นระหว่างดาวฤกษ์บริเวณฮาโลกาแล็กซี่มีปริมาณน้อยกว่าบริเวณระนาบของกาแล็กซี่

หากพิจารณาให้สมาชิกทุกดวงที่อยู่ในกระจุกดาวมีระยะห่างจากโลกเท่ากันหมด ดังนั้นจะถือว่าสมาชิกแต่ละดวงที่อยู่ในกระจุกดาวได้รับผลเนื่องจากสสารระหว่างดาวเท่ากันหมด ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนสีของดาวฤกษ์ เมื่อพิจารณาดัชนีสี B-V หรือ ค่า Color Excess ใน B-V มีค่า

$$E_{(B-V)} = (B-V) - (B-V)_0 \quad \dots\dots(2.31)$$

โดย $(B-V)$ = ค่าดัชนีสีที่สังเกตการณ์ได้

$(B-V)_0$ = ค่าดัชนีสีที่แท้จริง

และการเปลี่ยนโชติมาตรในช่วงความยาวคลื่นที่มองเห็นได้(ΔM_v) = A_v

โดยทั่วไปแล้วค่าอัตราส่วนระหว่าง A_v กับ $E(B-V)$ คือ

$$R_v = A_v / E_{(B-V)} \quad \dots\dots(2.32)$$

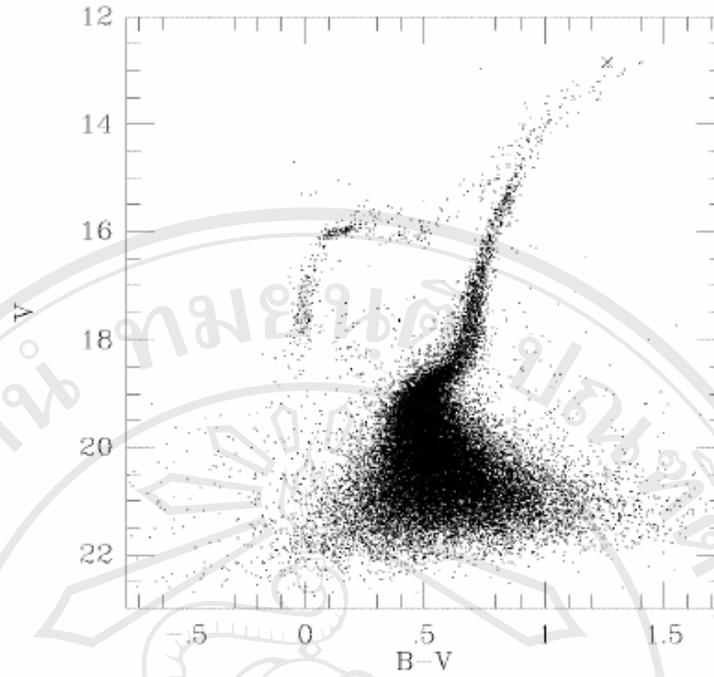
และ จะพบว่า

$$M_v = V - 5 \log d + 5 - A_v \quad \dots\dots(2.32)$$

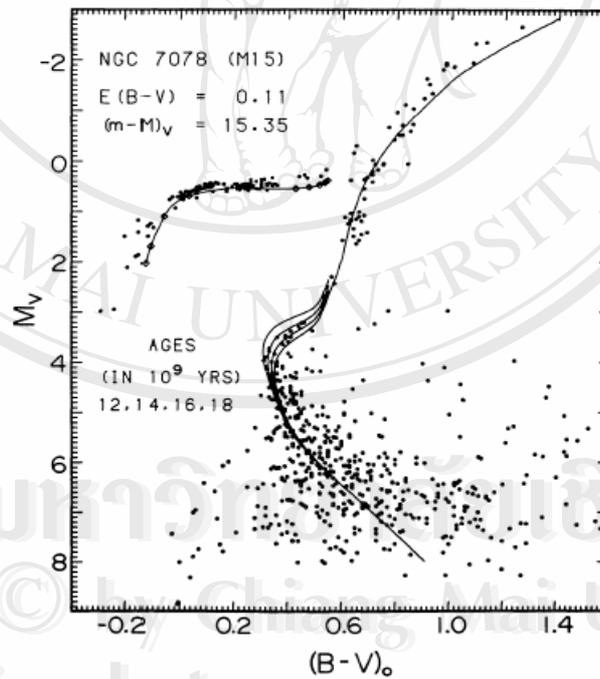
โดยให้ M_v = ค่าโชติมาตรสมบูรณ์ของดาวในระบบแผ่นกรองแสงมาตรฐาน UBV

V = ค่าโชติมาตรปรากฏของดาว ในระบบแผ่นกรองแสงมาตรฐาน UBV

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแสดงแผนภาพ Color-magnitude diagram ได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงแผนภาพ Color-Magnitude Diagram ของดาวที่เป็นสมาชิกของกระจุกดาวเปิด M15 (Van, D. M., et al., 2002)



รูปที่ 2.5 แสดงแผนภาพ H-R diagram ของดาวในกระจุกดาวเปิด M15 (Gregory, G. F., et al, 1985)