

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 กระจุกดาว(Star Clusters)

กระจุกดาวเป็นระบบของดาวจำนวนมากที่อยู่ใกล้กัน กระจุกดาวบางกลุ่มจะมีดาวกระจุกกระจายอย่างหลวม ๆ แต่บางกลุ่มก็มีดาวจำนวนมากอยู่รวมกันอย่างหนาแน่น เมื่อสังเกตการณ์เคลื่อนที่ของสมาชิกในกระจุกดาวต่าง ๆ ก็พบว่ามีการเคลื่อนที่สอดคล้องกัน ซึ่งชี้ให้เห็นว่าดาวแต่ละดวง น่าจะมีจุดกำเนิดร่วมกัน ซึ่งนักดาราศาสตร์สามารถแบ่งกระจุกดาวได้เป็น 2 พวกคือ

2.1.1 กระจุกดาวเปิด (Open Cluster)

กระจุกดาวเปิดหรือกระจุกดาวกาแลคติก เป็นกระจุกดาวที่พบมากแถบบริเวณระนาบกาแลคซี มีสมาชิกประกอบด้วยดาวฤกษ์อยู่รวมกันอย่างหลวม ๆ เมื่อมองผ่านกล้องดูดาวจะสามารถเห็นดาวแต่ละดวงแยกกันอย่างชัดเจน และในกระจุกดาวบางกลุ่มก็สามารถมองเห็นดาวแต่ละดวงแยกกันด้วยตาเปล่าเท่านั้น

2.1.2 กระจุกดาวปิด (Globular Cluster)

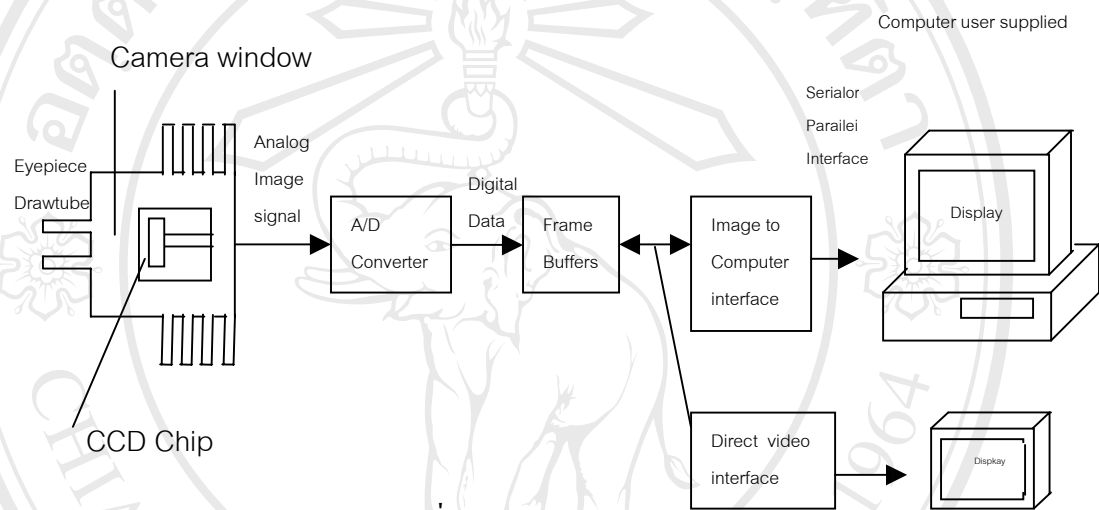
กระจุกดาวปิดเป็นกระจุกดาวที่มีดาวอยู่รวมกันอย่างหนาแน่น มีรูปร่างค่อนข้างเป็นทรงกลม มีสมาชิกมากกว่ากระจุกดาวเปิด เมื่อส่องด้วยกล้องดูดาวบริเวณใจกลาง ไม่สามารถแยกให้เห็นดาวแต่ละดวงได้ ตำแหน่งของดาวมักพบบริเวณเฮโล (Halo) ของกาแลคซี และสมาชิกของดาวส่วนใหญ่จะมีอายุมาก

2.2 ซีซีดี (CCD)

ซีซีดี เป็นอุปกรณ์ตรวจจับแสงที่มีประสิทธิภาพสูงมีความไวแสงสูงกว่าฟิล์มถ่ายรูปทั่วไป หน้าของ ซีซีดี คือเป็นตัวเปลี่ยนพลังงานแสงไปสู่พลังงาน ไฟฟ้าเพื่อนำเข้าสู่ระบบอิมเมจโปรเซสซิง (Image Processing) คุณสมบัติของ ซีซีดี คือ มีย่านตอบ สนองต่อความยาวคลื่นได้กว้าง และ เก็บรายละเอียดได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงมีการนำมาใช้งานด้านการถ่ายภาพทางดาราศาสตร์ โดยมาประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์ประกอบรวม ที่เรียกว่า กล้องซีซีดี เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกล้องโทรทรรศน์ให้สามารถถ่ายภาพดาวที่มีแสงน้อยได้ชัดเจน

2.3 ระบบ ซีซีดี โฟโตเมตรี

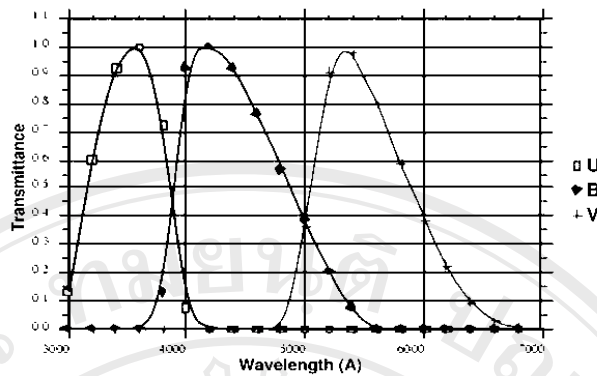
หลักการสำคัญทาง ซีซีดีโฟโตเมตรี เมื่อแสงจากวัตถุท้องฟ้าตกกระทบบน ชิพ ซีซีดี (CCD Chip) ซึ่งทำด้วยสารกึ่งตัวนำ อะตอมจะถูกไอออไนซ์โดยโฟตอน (Photon) เกิดเป็นอิเล็กตรอนอิสระ จำนวนอิเล็กตรอนอิสระ จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณ โฟตอนจากวัตถุท้องฟ้าที่ตกกระทบบ ชิพ ซีซีดี เมื่อให้ความต่างศักย์สูงระหว่างขั้ว จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้างกล่าวจะถูก ขยายโดยวงจรขยาย(Amplifier) แล้วถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณดิจิทัล เพื่อแสดงภาพบนจอคอมพิวเตอร์ เพื่อแสดงภาพบนจอคอมพิวเตอร์



รูปที่ 2.1 ระบบ CCD

2.4 ระบบแผ่นกรองแสงแบบ UVB

ส่วนที่สำคัญส่วนหนึ่งในระบบ ซีซีดีโฟโตเมตรีและระบบโฟโตอิเล็กตริก โฟโตมิเตอร์ คือ ระบบแผ่นกรองแสง ซึ่งในการวัดความเข้มของแสงที่เปล่งออกมาจากวัตถุท้องฟ้า นั้น นิยมวัดเป็น ช่วงความถี่หรือความยาวคลื่นของสเปกตรัม ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือ แผ่นกรองแสงชนิด แถบกว้าง (Wide Band Filter System) ในช่วงความยาวคลื่น อัลตราไวโอเล็ต (U) มีความไวสูง ณ ความยาวคลื่น 3500 อังสตรอม สีน้าเงิน(B) มีความไวสูง ณ ความยาวคลื่น 4250 อังสตรอม และ สีเหลือง(V) มีความไวสูง ณ ความยาวคลื่น 5500 อังสตรอม แต่ละแถบความยาวคลื่นจะมีช่วงกว้าง ประมาณ 1000 อังสตรอม ระบบนี้เรียกว่า ระบบแผ่นกรองแสง UVB ที่หอดูดาวสิรินธร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ก็ใช้แผ่นกรองแสงระบบนี้ ซึ่งรูป 2.1 แสดงค่าฟังก์ชันการผ่านของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากแผ่นกรองแสงแต่ละชนิด



รูปที่ 2.2 แสดงฟังก์ชันการผ่านของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแผ่นกรองแสงแต่ละชนิด

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

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของแผ่นกรองแสงแต่ละชนิดที่มีต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

2.5 ตำแหน่งของดาวบนท้องฟ้า

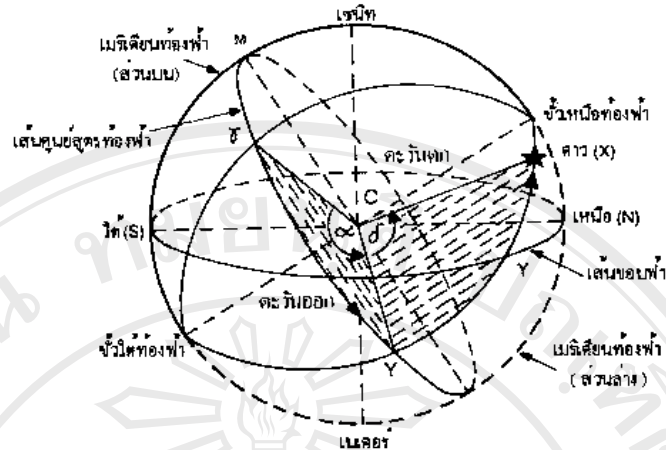
การบอกตำแหน่งของดาวบนท้องฟ้า สามารถบอกได้หลายระบบแล้วแต่ความเหมาะสมระบบ พิกัดศูนย์สูตรเป็นระบบหนึ่งที่ใช้กันมาก การบอกตำแหน่งของดาวด้วยระบบพิกัดศูนย์สูตรบอกได้ด้วยพิกัดสองชนิดคือ

2.5.1 เดคลิเนชัน

เดคลิเนชัน(Declination , Dec.) ระยะทางเชิงมุมจากเส้นศูนย์สูตรท้องฟ้าไปทางเหนือหรือไปทางใต้ ถึงตำแหน่งของดาวตามเส้นวงกลมชั่วโมง ที่เส้นศูนย์สูตรท้องฟ้ามีค่าเดคลิเนชันเท่ากับ 0 องศา จนถึง ± 90 องศา ใช้นหน่วยเป็น องศา,ลิปดา,ฟิลิปดา สัญลักษณ์ของเดคลิเนชัน คือ δ

2.5.2 ไรต์แอสเซนชัน

ไรต์แอสเซนชัน(Right Ascension , R.A) หมายถึงมุมที่จุดศูนย์กลางหรือส่วนโค้งบนเส้นศูนย์สูตรท้องฟ้า โดยเริ่มนับ 0 ชั่วโมงที่จุดวันวิษุวัต(Vernal Equinox) ไปทางทิศตะวันออก จนถึง 24 ชั่วโมงเมื่อกลับมาสู่จุดเริ่มต้นอีกครั้ง ใช้นหน่วยเป็น ชั่วโมง,นาท,วินาที สัญลักษณ์ของไรต์แอสเซนชันคือ α



รูปที่ 2.3 ค่าเดคลิเนชันและไรต์แอสเซนชัน

2.6 โชติมาตรของดาว

ดวงดาวบนท้องฟ้ามีความสว่างไม่เท่ากัน การบอกระดับความสว่างของดวงดาวเราบอกด้วยค่า “โชติมาตร (Magnitude)” ความสว่างของดวงดาวจะขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ ขนาด และระยะทางที่ดาวอยู่ห่างจากโลก ดังนั้นการบอกระดับความสว่างของดาวจะบอกเป็น 2 แบบ คือ

2.6.1 โชติมาตรปรากฏ

ในทางดาราศาสตร์ได้กำหนดเกณฑ์ที่แน่นอน เพื่อถือเป็นหลักในการกำหนดโชติมาตรของดวงดาวว่า ดวงดาวที่มีค่าโชติมาตรที่ 1 จะมีความสว่างมากกว่าดวงดาวที่มีค่าโชติมาตรที่ 6 อยู่ 100 เท่า

ถ้ากำหนดให้ อัตราส่วนของความสว่างของดาวที่มีค่าโชติมาตรติดกันเป็น a และผลต่างของค่าโชติมาตรที่ 1 และที่ 6 คือ 5 ดังนั้นจะได้ว่า

$$a^5 = b_1/b_6 = 100$$

$$a = 10^{2/5}$$

$$a = 2.512$$

นั่นคือ ถ้าดาวมีค่าโชติมาตรต่างกัน 1 จะมีความสว่างต่างกัน 2.512 เท่า

พิจารณาดาวสองดวงที่มีค่าโชติมาตรเป็น m และ n และส่งพลังงานแสงมายังโลกมีความสว่างเป็น b_m และ b_n ดังนั้นผลต่างของโชติมาตรเท่ากับ $m - n$ จะแปรตามอัตราส่วนของความสว่าง b_n/b_m นั่นคือ

$$b_n/b_m = 10^{(m-n)/5}$$

$$\log(b_n/b_m) = \{(m-n) / 5\} \log 100$$

$$= 0.4 (m - n)$$

$$m - n = 2.5 \log(b_n/b_m) \quad (2.1)$$

จากสมการ (2.1) คือนิยามของโชติมาตรปรากฏ จะเห็นว่าค่า $m > n$ เมื่อ $b_m < b_n$ นั่นคือ ดวงดาวที่สว่างมากกว่าจะมีค่าโชติมาตรน้อยกว่า

2.6.2 โชติมาตรสัมบูรณ์

เมื่อทราบว่า โชติมาตรปรากฏของดาวขึ้นอยู่กับระยะทางของดาวด้วย เมื่อต้องการเปรียบเทียบระดับความสว่างของดาว เราจึงต้องกำหนดที่ระยะทางเท่ากัน ระยะทางที่เรากำหนดเพื่อการเปรียบเทียบ คือ ระยะทางที่ห่างจากโลก 10 พาร์เซก (Parsec) โชติมาตรที่ระยะนี้เราเรียกว่า “โชติมาตรสัมบูรณ์ (Absolute Magnitude)”

กำหนดให้โชติมาตรสัมบูรณ์ของดาวเป็น M ความสว่างสัมบูรณ์เป็น B ในระยะทาง 10 พาร์เซก และโชติมาตรปรากฏเป็น m ความสว่างปรากฏเป็น b ในระยะทาง d พาร์เซก

จากกฎกำลังสองผกผันเราจะได้

$$B/b = (d/10\text{pc})^2 \quad ; \text{pc คือ parsec}$$

อาศัยสมการที่ (2.1) จะได้

$$\begin{aligned} m - M &= 2.5 \log (B/b) \\ m - M &= 2.5 \log (d/10\text{pc})^2 \\ m - M &= 5 \log d - 5 \\ M &= m + 5 - 5 \log d \end{aligned} \quad (2.2)$$

สมการที่ (2.2) เป็นสมการหาค่าโชติมาตรสัมบูรณ์ (M) ของดาว

2.7 การแผ่รังสีของวัตถุดำ (Blackbody Radiation)

วัตถุดำ เป็นวัตถุในอุดมคติ เป็นวัตถุที่มีคุณสมบัติแผ่รังสีได้ดีและดูดกลืนรังสีที่ตกกระทบได้อย่างสมบูรณ์แบบ การแผ่รังสีของวัตถุดำขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอย่างเดียว โดยไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของวัตถุและส่วนประกอบของมันเลย การกระจายความยาวคลื่นของการแผ่รังสีตามกฎของแพลงค์ (Planck 's law) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิอย่างเดียว ความเข้ม (Intensity) ที่ความถี่ ν ของวัตถุดำที่อุณหภูมิ T คือ

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1}$$

ซึ่ง h = ค่าคงที่ของแพลงค์ $= 6.63 \times 10^{-34}$ Js

c = ความเร็วแสง $= 3 \times 10^8$ ms⁻¹

k = ค่าคงที่โบลซ์มานน์ (Boltzmann constant) $= 1.38 \times 10^{-23}$ JK⁻¹

เราสามารถเขียนกฎของพลังค์ได้อีกรูปแบบหนึ่งในรูปฟังก์ชันของความยาวคลื่นจาก

$B_\lambda dv = -B_\lambda du$ (ความยาวคลื่นลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น) ซึ่ง $v = c/\lambda$ จะได้

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^3}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc/\lambda kT) - 1}$$

จากนิยามของความเข้ม หน่วยของ คือ $Wm^{-1} Hz^{-1} sterad^{-1}$ นอกจากนี้ยังมีกฎอื่นๆ ที่กล่าว ถึง การแผ่รังสีของวัตถุดำ ได้แก่

กฎของสเตฟาน (Stefan's law) ซึ่งกล่าวไว้ว่า พลังงานต่อหน่วยปริมาตรของทุกๆ ความถี่ที่แผ่ออกมาจากวัตถุดำจะแปรผันตรงกับกำลังสี่ของอุณหภูมิ

$$u = e\sigma T^4$$

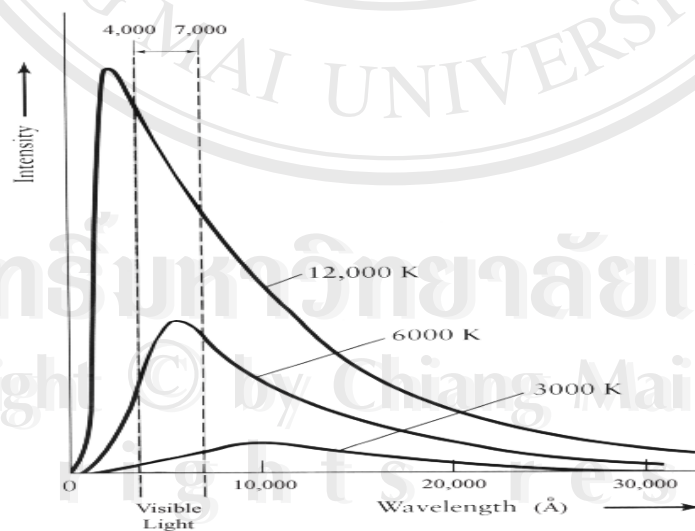
เมื่อ คือก่าคงที่ของสเตฟาน $= 5.67 \times 10^{-8} Wm^{-2}K^{-4}$

กฎของวิน (Wein's law) กล่าวว่าวัตถุทุกชนิดที่มีอุณหภูมิสูงกว่าองศาสมบูรณ์จะมีการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาเสมอเมื่อวัตถุมีอุณหภูมิสูงขึ้น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมาได้มากที่สุดจะมีความถี่สูงขึ้นและความถี่จะสูงขึ้นเรื่อยๆ ถ้าเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไปอีก

ให้ λ_{max} เป็นความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมาได้มากที่สุด ณ ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ T คืออุณหภูมิของวัตถุเป็นองศาสมบูรณ์ กฎของวินเขียนได้เป็นสมการได้ดังนี้

$$\lambda_{max} T = 2.898 \times 10^{-3} \quad m \cdot K$$

เส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมาได้และพลังงานที่แผ่ออกมาจะเป็นดังรูป



รูปที่ 2.4 กราฟลักษณะความสัมพันธ์ของ ความเข้ม(Intensity)และ ความยาวคลื่น

เมื่อความยาวคลื่นมีค่าสั้นมากหรือยาวมากกว่า $\lambda_{\max}$ สามารถแสดงฟังก์ชันของเพลงค์ในรูปแบบง่าย ๆ เมื่อ

$$\lambda \ll \lambda_{\max} \text{ (หรือ } hc/\lambda kT \gg 1 \text{) จะได้ } e^{hc/\lambda kT} \gg 1$$

เรียกว่า Wien approximation

$$B_{\lambda}(T) \approx \frac{2hc^3}{\lambda^5} e^{-hc/\lambda kT}$$

แต่เมื่อ $hc/\lambda kT \ll 1$ ($\lambda \gg \lambda_{\max}$) เราจะได้ $e^{hc/\lambda kT} \approx 1 + hc/\lambda kT$

เรียกว่า Rayleigh – Jeans approximation

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^3}{\lambda^5} \frac{\lambda kT}{hc} = \frac{2ckT}{\lambda^5}$$

2.8 อุณหภูมิของดาวฤกษ์

อุณหภูมิของเทหวัตถุมีตั้งแต่เข้าใกล้ศูนย์องศาสัมบูรณ์จนถึงหลายล้านองศาสัมบูรณ์ สำหรับอุณหภูมิของดาวฤกษ์ได้รับการนิยามเพื่ออธิบายปรากฏการณ์หรือค่าต่างๆ ที่ตรวจวัดได้จากเครื่องมือมีความหมายและให้ค่าแตกต่างกันไปดังต่อไปนี้

2.8.1 อุณหภูมิสัมฤทธิ์ (Effective Temperature)

อุณหภูมิสัมฤทธิ์หมายถึง อุณหภูมิของดาวฤกษ์ที่แผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยผลรวมเชิงอินทิกรัลทุกความยาวคลื่นของความเข้มคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผิวดาวนั้น เป็นการแผ่รังสีของวัตถุดำ นั่นคือ อุณหภูมิที่ผิวดาวเป็นอุณหภูมิสัมฤทธิ์ โดยผิวดาวนั้นในที่นี้หมายถึงบรรยากาศชั้นโฟโตสเฟียร์ ซึ่งเป็นบรรยากาศชั้นบาง ๆ ด้านนอกซึ่งปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา

การวัดอุณหภูมิสัมฤทธิ์วัดได้จากดัชนีสี (Color Index) ซึ่งก็คือผลต่างของโชติมาตรของดาวฤกษ์ที่ความยาวคลื่นในช่วงสีน้ำเงิน(B)กับความยาวคลื่นในช่วงสีเหลือง (V) โดยความสัมพันธ์ตามสมการ

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

เมื่อ C_b คือ ค่าการนับจำนวนโฟตอนสุทธิในช่วงความยาวคลื่นสีน้ำเงิน(B)

C_v คือ ค่าการนับจำนวนโฟตอนสุทธิในช่วงความยาวคลื่นสีเหลือง(V)

โดยวิธีการหาดัชนีสีนี้ เป็นการวัดโดยใช้เทคนิคโฟโตเมตรี ซึ่งมีผู้หาความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีสีกับอุณหภูมิสัมฤทธิ์ไว้ เช่น Cameron Reed จาก Alma College (Michigan) ซึ่ง Astronomical Society of Canada February / March 1998 Volume 92 Number 1 [669] page 366 ได้รับความสัมพันธ์ว่า

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

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

หรือ จากรายงานการวิจัยเกี่ยวกับ “การศึกษาอุณหภูมิสัมพัทธ์ของสมาชิกในกระจุกดาวเปิดโดยเทคนิคโฟโตเมตรี” ของ รศ.บุญรักษา สุนทรธรรม และคณะปี พ.ศ.2530 ทำให้ทราบว่าค่าดัชนีสีแปรผกผันเชิงเส้นกับค่าส่วนกลับของอุณหภูมิสัมพัทธ์ ยกเว้นบริเวณที่มีค่าดัชนีสีมาก ซึ่งเป็นข้อมูลของดาวยักษ์ไม่เหมือนกับของวัตถุดำ เมื่อวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพบว่า

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

เราสามารถหาค่าอุณหภูมิสี(Color Temperature) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าดัชนีสี ดังนี้

$$T_c = 7,200 / (I + 0.64) ; I \text{ เป็นค่าดัชนีสี}(B - V)$$

2.9 การลดของแสงดาวเนื่องจากผลของบรรยากาศของโลก

บรรยากาศที่หุ้มห่อโลกมีผลต่อการลดของแสงดาว ถ้าทำการสังเกตการณ์บนพื้นโลก เมื่อดาวอยู่ที่ขอบฟ้าแสงดาวจะผ่านบรรยากาศของโลกเป็นระยะทางมากกว่าเมื่อดาวอยู่ ณ ระยะมุมเงยที่สูงขึ้นไป และจะผ่านเป็นระยะทางน้อยที่สุดเมื่อดาวอยู่ที่ตำแหน่งเหนือศีรษะ หรือจุดเซนิท (Zenith) ดังนั้นเมื่อค่ามุมเงยของดาวฤกษ์เพิ่มขึ้นแสงดาวจะปรากฏสว่างขึ้น นอกจากนั้นยังพบอีกว่าสีของดาวเมื่ออยู่ใกล้ระดับขอบฟ้าจะปรากฏแดงกว่าความเป็นจริง และผลดังกล่าวนี้จะลดลงเมื่อตำแหน่งของดาวสูงขึ้น

2.10 มวลอากาศ(Airmass)

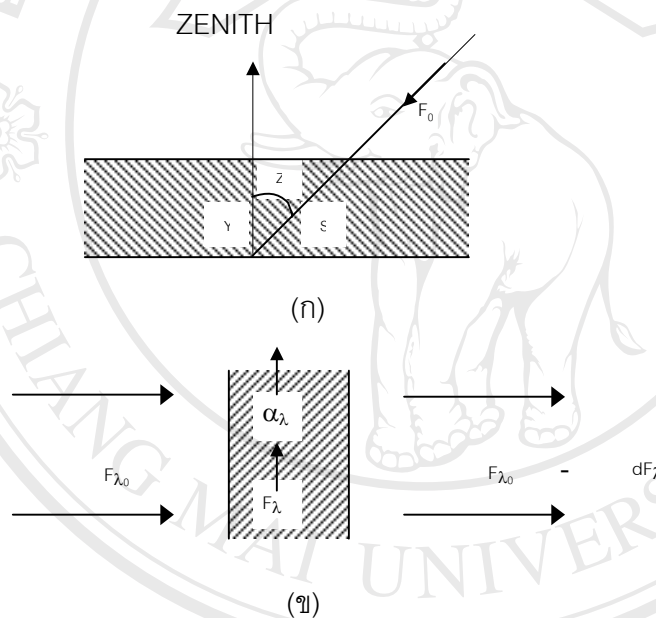
ความหนาของบรรยากาศของโลกกำหนดในเทอมของ มวลอากาศ (Air Mass,X) ดังนั้น ณ บริเวณขอบฟ้าค่ามวลอากาศจะมากและลดลงเมื่อมุมเงยเพิ่มขึ้น โดยกำหนดว่า

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

Z	Secz	X	Correction	Z	secz	X	Correction
0°.....	1.000	1.000	0.000	69°.....	2.790	2.773	.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	3.558	.040

Z	Secz	X	Correction	Z	secz	X	Correction
64.....	2.281	2.273	.008	75.....	3.864	3.816	.048
65.....	2.366	2.356	.010	75.....	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

ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามวลอากาศ(X) และค่าระยะเซนทิ(Z)



รูปที่ 2.5 (ก) ทางเดินของแสงดาวผ่านบรรยากาศของโลก ณ ค่าระยะเซนทิ(Z)

(ข) การดูดกลืนแสงเนื่องจากผลของบรรยากาศของโลก

รูป 2.5 (ก) แสดงทางเดินของแสงดาวผ่านชั้นบรรยากาศของโลก เมื่ออนุโลมว่าบรรยากาศของโลกเป็นลักษณะระนาบขนาน(Plane-Parallel Atmosphere) ข้อกำหนดดังกล่าวใช้ได้โดยมีความผิดพลาดไม่เกิน 2% เมื่อสังเกตดาวที่มีค่ามุมเงยไม่ต่ำกว่า 30 องศาหรือมีค่าระยะเซนทิไม่เกิน 60 องศาและอาจประมาณได้ว่า

$$X = \sec Z$$

ซึ่ง

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

โดย ϕ เป็นละติจูดของผู้สังเกต

δ เป็นเดคลิเนชันของดาว

H เป็นค่ามุมชั่วโมงของดาว ณ เวลาสังเกตการณ์

สำหรับระยะเซนิทที่มีค่ามากกว่า 60 องศาเงื่อนไขระยะนาบของบรรยากาศจะใช้ไม่ได้ค่ามวลของอากาศจะสัมพันธ์กับระยะเซนิท โดยการประมาณของเบมโพราด (Bemporad Approximation) ดังนี้

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

2.11 เทคนิคการแก้ผลการลดของแสงดาวเนื่องจากผลของบรรยากาศของโลก

โดยทั่วไปอาจกำหนดเงื่อนไขระยะนาบนานของบรรยากาศได้ โดยถือว่าส่วนโค้งของผิวโลกมีผลน้อยมาก สำหรับการสังเกตการณ์ทางดาราศาสตร์เกี่ยวกับตำแหน่งของวัตถุท้องฟ้าที่มีค่ามุมเงยไม่น้อยกว่า 30 องศาตามรูปที่ 2.5 (ข) เมื่อแสงเดินทางผ่านบรรยากาศของโลกซึ่งมีความหนาแน่น ds ฟลักซ์ของแสงจะสูญเสียไป dF_λ ค่าการสูญเสียของฟลักซ์ดังกล่าวนี้มีค่าเป็นสัดส่วนกับฟลักซ์ทั้งหมดของดาว (F_λ) และค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α_λ) ตลอดจนระยะทางที่แสงผ่านในบรรยากาศ (ds) ดังนั้น

$$dF_\lambda = -F_\lambda \alpha_\lambda ds$$

เครื่องหมายลบแสดงว่า F_λ ลดลงหรือถูกดูดกลืน เมื่อระยะทางที่แสงเคลื่อนที่ในบรรยากาศมากขึ้น

$$dF_\lambda / F_\lambda = -\alpha_\lambda ds$$

ถ้าบรรยากาศมีความหนา S ดังนั้นอินทิเกรตตั้งแต่ผิวของบรรยากาศเป็นระยะทาง S จะได้ว่า

$$dF_\lambda / F_{\lambda_0} = \exp\left(-\int_0^S \alpha_\lambda ds\right)$$

ซึ่ง F_{λ_0} เป็นฟลักซ์ที่ตกกระทบ ณ ผิวด้านบนของบรรยากาศ

ถ้ากำหนดว่า

$$\tau_\lambda = \int_0^S \alpha_\lambda ds$$

ดังนั้น

$$F_\lambda / F_{\lambda_0} = e^{-\tau_\lambda}$$

อัตราส่วนของฟลักซ์ในสมการนี้อาจเขียนได้ในรูปผลต่างของโชติมาตรดังนี้

$$m_\lambda - m_{\lambda_0} = -2.5 \log(F_\lambda / F_{\lambda_0})$$

$$= -2.5 \log(e^{-\tau_\lambda})$$

$$= 1.086 \tau_\lambda$$

$$= 1.086 \sec Z \int_0^y \alpha_y dy$$

$$m_{\lambda_0} = (m_\lambda - k'_\lambda) \sec Z$$

โดย $k'_{\lambda} = 1.086 \int_0^V \alpha_y dy$ เรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์การลดของแสงดาวเนื่องจากผลของบรรยากาศของโลกที่มีความหนา y

ค่า k'_{λ} เป็นค่าสัมประสิทธิ์หลักซึ่งมีผลโดยตรงต่อการลดของแสงดาวเนื่องจากผลของบรรยากาศของโลก ดังนั้นจึงเรียก k'_{λ} ว่าเป็นค่าสัมประสิทธิ์การลดของแสงดาวอันดับหนึ่ง (First Order Extinction Coefficient)

2.11.1 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การลดของแสงดาวเนื่องจากผลของบรรยากาศของโลกอันดับที่หนึ่ง (The First – order Extinction)

การสังเกตการณ์ทาง โฟโตเมตรี ในช่วงความยาวคลื่นแถบกว้างนั้น นิยมสังเกตการณ์ในช่วงความยาวคลื่น UBV ดังนั้นอาจเขียนค่าสัมประสิทธิ์การลดของแสงดาวอันดับที่หนึ่ง (First Order Extinction Coefficients ; k') ได้จากค่าโชติมาตรได้จากเครื่องมือ กับค่ามวลอากาศได้ดังนี้

$$v_0 = v - k'_v X$$

$$b_0 = b - k'_b X$$

$$u_0 = u - k'_u X$$

u_0, b_0, v_0 คือค่าโชติมาตรที่วัดโดยเครื่องมือ ที่นอกบรรยากาศโลก

u, b, v คือค่าโชติมาตรที่วัดโดยเครื่องมือ ที่พื้นโลก

X คือค่ามวลอากาศ

ในเทอมของดัชนีสีอาจเขียนได้ดังนี้

$$(b - v)_0 = (b - v) - k'_{bv} X$$

$$(u - b)_0 = (u - b) - k'_{ub} X$$

โดย

$$k'_{bv} = k'_b - k'_v$$

$$k'_{ub} = k'_u - k'_b$$

โดยปกติทั่วไป ในทางโฟโตเมตรี จะมีการกำหนดค่าโชติมาตรมาตรฐาน และสีของดาวมาตรฐาน ซึ่งวัดโดยเครื่องบันทึกสัญญาณและชุดของแผ่นกรองแสงใดๆ เอาไว้ เพื่อให้การวิเคราะห์ ข้อมูลทางโฟโตเมตรี ไม่ว่าจะทำการสังเกตการณ์ ณ สถานที่ใด จะสามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้

ในทางปฏิบัติ อาจจะวัดฟลักซ์ของแสงดาวในช่วงความยาวคลื่นทั้งสาม ณ ค่ามวลอากาศต่าง ๆ ค่าความชันของกราฟระหว่างผลต่างของโชติมาตรที่แท้จริงและโชติมาตรที่วัดโดยใช้เครื่องมือ กับค่ามวลอากาศ จะเป็นค่าสัมประสิทธิ์การลดของแสงดาวเนื่องจากผลของบรรยากาศของโลกอันดับที่หนึ่ง ในการสังเกตการณ์แต่ละคืน อย่างไรก็ตามข้อมูลที่วัดได้อาจมีการกระจาย

เนื่องจากผลของการเปลี่ยนแปลงท้องถิ่น ซึ่งผู้สังเกตการณ์ต้องใช้เทคนิคการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Analysis) ปรับข้อมูลดังกล่าว

2.12 การเปลี่ยนค่าสู่ระบบมาตรฐาน

การแปลงค่าโชติมาตร หรือ สีที่วัดได้โดยเครื่องมือสู่ค่ามาตรฐาน ผู้ทำการสังเกตการณ์จะต้องวัดทั้งดาวโปรแกรมและดาวมาตรฐานสลับกันไป เพื่อให้การแปลงค่าโชติมาตรและสีของดาวโปรแกรมสู่ระบบมาตรฐานมีความถูกต้องและสมบูรณ์มากที่สุด

เมื่อให้ B, V, R และ I เป็นค่าโชติมาตรในระบบ UBVR_I ของดาวมาตรฐานใดๆ

b, v, r และ i เป็นค่าโชติมาตรที่วัดได้จากเครื่องมือของดาวมาตรฐาน

พบว่า

$$V = \epsilon(B - V) + v_0 + \xi_v \quad (2.3)$$

$$(B - V) = \mu(B - V) + \xi_{bv}$$

โดย ϵ, μ เป็นค่าสัมประสิทธิ์การแปลงค่าของโชติมาตรและสีในระบบ UBVR_I ของสถานที่สังเกตการณ์ใดๆ

ξ_v, ξ_{bv} เป็นค่าจุดศูนย์ของโชติมาตรและสีในระบบ UBVR_I ของสถานที่สังเกตการณ์ใดๆ

ดังนั้น เมื่อทราบค่า ϵ, μ และ ξ_v, ξ_{bv} ของดาวมาตรฐานแล้ว สามารถที่จะแปลงค่าโชติมาตรและดัชนีสีของดาวโปรแกรมในระบบ UBVR_I ได้ดังสมการ

ในทางปฏิบัติ การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแปลงค่า(transformation coefficients) ระหว่าง ϵ และ μ หรือการหาค่าจุดศูนย์ระหว่าง ξ_v และ ξ_{bv} จะต้องวัดจากดาวมาตรฐานจำนวนหนึ่ง แล้วหาค่ามาตรฐานจากสมการ

$$V = \epsilon(B - V) + v_0 + \xi_v$$

โดยความชันของกราฟ(Slope) $V - v_0$ และ $B - V$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปลงค่าของ ϵ และ ξ_v

จากสมการ

$$(B - V) = \mu(B - V) + \xi_{bv}$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $(B - V) - (b - v)_0$ กับ $(B - V)$ จะได้

ความชันของกราฟ(Slope) คือ $1 - 1/\mu$ และจุดตัดบนแกน Y คือ ξ_{bv}/μ

2.13 สเปกตรัมของดาว

ในปลายศตวรรษที่ 19 ได้มีการถ่ายภาพสเปกตรัมของดาวหลายพันดวง ซึ่งพบว่าดาวต่างชนิดกันมีเส้นสเปกตรัมที่ต่างกันไป ดังนั้นจึงมีการแบ่งชั้นสเปกตรัมของดาวเกิดขึ้น

นักดาราศาสตร์ท่านแรกที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับการจัดชั้นสเปกตรัมของดาว ได้แก่ แอนนิ เจ แคนนอน (Anni J. Cannon) แห่งหอดูดาวมหาวิทยาลัยฮาร์วาร์ด ในขณะนั้นเขาได้จัดเป็นแคตาล็อกขึ้นมาซึ่งเรียกว่า “แคตาล็อกของเฮนรี เดรอปเปอร์ (Henry Draper Catalogue)” ซึ่งดาวในแคตาล็อกนี้จะใช้ชื่อย่อว่า “HD” เช่น HD3176

ต่อมาพบว่า สเปกตรัมของดาวขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของดาวด้วย ดังนั้นในการพิจารณาสเปกตรัมของดาวจึงพิจารณาเส้นมืดที่มีความเข้มมาก ๆ เป็นหลัก การแบ่งชั้นสเปกตรัมของดาวจากดาวที่ร้อนที่สุดจนถึงเย็นที่สุด จะเป็นดังนี้คือ O, B, A, F, G, K, M ชั้นของสเปกตรัมเหล่านี้ยังถูกแบ่งออกเป็นชั้นย่อย ๆ อีกชั้นละ 10 กลุ่ม เช่น B0, B1, B2, ..., B9 เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้เพิ่มชั้น R, N, S ขึ้นภายหลังอีกด้วย ดาวเหล่านี้มีอุณหภูมิลดลงคล้ายกับดาวชนิด M แต่เส้นของสเปกตรัมเกิดจากธาตุต่างกัน ลักษณะสำคัญของดาวที่มีชั้นสเปกตรัมชนิดต่าง ๆ มีดังนี้

ชนิด O เป็นดาวที่มีอุณหภูมิสูงประมาณ 30,000 ถึง 60,000 K จนทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมของธาตุต่าง ๆ เกิดการไอออไนซ์ขึ้น เส้นที่ปรากฏชัดเจนบนสเปกตรัมได้แก่ ฮีเลียม ออกซิเจนและไนโตรเจน รวมทั้งไฮโดรเจนด้วย ดาวแบบ O นี้มีชนิดหนึ่งที่เรียกว่า “ดาววูล์ฟ – ไรเยต (Wolf – Rayet Star)” ดาวชนิดนี้แสดงเส้นสว่างของธาตุบางชนิด ซึ่งกว้างมากหลายอังสตรอม คาดว่าเส้นสว่างเหล่านี้เกิดจากกลุ่มก๊าซที่มีอุณหภูมิสูงมากในบรรยากาศของดาวฤกษ์

ชนิด B เป็นดาวที่มีอุณหภูมิประมาณ 10,000 ถึง 30,000 K เส้นที่มีความเข้มมากที่สุดได้แก่ ฮีเลียมที่เป็นกลาง เส้นของไฮโดรเจนเข้มกว่าดาวแบบ O ตัวอย่างได้แก่ ดาวไรเจล และดาวสปีกา

ชนิด A เป็นดาวที่มีอุณหภูมิประมาณ 7,500 ถึง 10,000 K เส้นของไฮโดรเจนเข้มที่สุด เส้นของแมกนีเซียมและแคลเซียม ซึ่งถูกไอออไนซ์เป็นครั้งแรกเริ่มปรากฏ ตัวอย่างได้แก่ ดาวซิริอุส ดาวดีเนบ และดาววีกา

ชนิด F เป็นดาวที่มีอุณหภูมิประมาณ 6,000 ถึง 7,500 K เส้นของไฮโดรเจนเริ่มจางลงแต่เส้นของแคลเซียมที่ถูกไอออไนซ์ครั้งแรกเริ่มปรากฏชัดขึ้น มี 2 เส้นที่ชัดมากเรียกเส้น H และ K ตัวอย่าง เช่น ดาวคาโนปัสและดาวเหนือ

ชนิด G เป็นดาวที่มีอุณหภูมิประมาณ 5,000 ถึง 6,000 K ดาวชนิดนี้มีฮีเลียม เส้น H และ K ของแคลเซียมชัดที่สุด ส่วนเส้นไฮโดรเจนพอมองเห็น ตัวอย่างเช่น ดวงอาทิตย์

ชนิด K เป็นดาวที่มีอุณหภูมิประมาณ 3,500 ถึง 5,000 K มีเส้นของโลหะเป็นกลางมากมาย ดาวชนิดนี้มีสีแดง เช่น ดาวอาร์คเทอรัส และดาวอัลดิบาแรน

ชนิด M เป็นดาวที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 3,500 K มีบรรยากาศที่เย็นมากจนกระทั่งโมเลกุลของก๊าซดำรงสภาพอยู่ได้ มีแถบสเปกตรัมไทเทเนียมออกไซด์ชัดมาก โดยเฉพาะชนิด M7 ตัวอย่าง เช่น ดาวบีเทลจุส และแอนทาร์ิส

ชนิด R และ N แสดงแถบโมเลกุลของคาร์บอน และสารประกอบของคาร์บอน
ชนิด S แสดงแถบโมเลกุลของเซอร์โคเนียมออกไซด์ และแลนทานัมออกไซด์

2.14 ชั้นของความสว่าง

ความแตกต่างระหว่างดาวต่าง ๆ ที่มีชั้นของสเปกตรัมเดียวกัน สามารถแบ่งได้เป็นชั้น ๆ เรียกว่า ชั้นของความส่องสว่าง (Luminosity Classes) ซึ่งมีทั้งหมด 6 ชั้นได้แก่

ชั้น I_a หมายถึง ความห้ายักษ์ที่สว่าง (Bright Supergiants)

I_b หมายถึง ความห้ายักษ์ (Supergiants)

II หมายถึง ดาวยักษ์ที่สว่าง (Bright Giants)

III หมายถึง ดาวยักษ์ (Giants)

IV หมายถึง ดาวยักษ์เล็ก (Subgiants)

V หมายถึง ดาวแคระ (Dwarfs)

ในการกำหนดชั้นสเปกตรัมของดาว นิยมบอกชั้นของความสว่างไปด้วย เช่น KOIII B8V เป็นต้น

2.15 แผนภาพเฮอร์ตซ์สปริง – รัสเซลล์ (H – R Diagram)

ในราวต้นศตวรรษที่ 20 นักดาราศาสตร์สองท่าน คือ เอจนา เฮอร์ตซ์สปริง (Ejnar Hertzsprung) ชาวเดนมาร์ก และเฮนรี รัสเซลล์ (Henry Russell) ชาวสหรัฐอเมริกา ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผิวและกำลังส่องสว่างของดาวฤกษ์ และเขียนความสัมพันธ์ดังกล่าวได้เป็นแผนภาพที่เรียกว่า แผนภาพ H-R (H-R Diagram) เพื่อเป็นเกียรติแก่นักดาราศาสตร์ทั้งสอง จากรูปแกนนอนแสดงด้วยชนิดสเปกตรัมของดาว โดยเรียงลำดับจากดาวที่มีอุณหภูมิสูง (ชนิดสเปกตรัม B) ไปสู่ดาวที่มีอุณหภูมิต่ำ (ชนิดสเปกตรัม M) หรือค่าดัชนีสี (B – V) ส่วนแกนตั้งแสดงค่าโชติมาตรสัมบูรณ์ โดยเรียงลำดับจากดาวหริ (โชติมาตร + 15) ไปสู่ดาวที่สว่าง (โชติมาตร – 5) และขนาดของดาวจากการสังเกตการณ์ดาวฤกษ์ต่าง ๆ เพื่อหาค่าอุณหภูมิผิวและกำลังส่องสว่างแล้วนำมาเขียนบนแผนภาพดังกล่าวนี้ ทำให้สามารถจำแนกดาวออกเป็นประเภทต่างๆ ได้หลายประเภท พบว่าดาวส่วนมากรวมกันเป็นแถบใหญ่ เรียกว่า แถบกระบวนหลัก (Main Sequence) ดวงอาทิตย์ก็เป็นดาวฤกษ์ดวงหนึ่งที่อยู่ในแถบขบวนหลัก นอกจากนี้ยังมีแถบของดาวยักษ์ (Giants) และดาวมหายักษ์ (Super Giants) ซึ่งเป็นดาวที่มีขนาดใหญ่มาก สำหรับดาวอีกประเภทหนึ่งเป็นดาวจำพวกที่มีอุณหภูมิก่อนข้างสูง แต่สว่างน้อย มีชื่อเรียกว่า ดาวแคระขาว (White Dwarfs)



รูปที่ 2.6 แผนภาพเอชอาร์ – รัสเซล (H – R Diagram)

ในแผนภาพเอชอาร์ – รัสเซลนั้น จำเป็นต้องทราบค่าสีและโชติมาตรที่แท้จริงของดาวฤกษ์ อย่างไรก็ตามเมื่อนักดาราศาสตร์วัดสี และโชติมาตรของดาวฤกษ์ พบว่าสารที่อยู่ระหว่างดาวฤกษ์ (Interstellar Medium) ดูดกลืนและกระเจิงแสงของดาวฤกษ์ที่แผ่มาในโลก ทำให้การวัดสีและโชติมาตรของดาวฤกษ์ผิดไป ฝุ่นที่อยู่ระหว่างดาวฤกษ์ (Interstellar Dust) จะดูดกลืนและกระเจิงแสงในช่วงสีน้ำเงินและอุลตราไวโอเล็ต มากกว่าช่วงสีแดง ดังนั้นจึงทำให้สีของดาวฤกษ์ที่วัดได้ผิดจากความเป็นจริงเรียกผลการเปลี่ยนแปลงของสีนี้ว่า “คัลเลอร์เอกเซส (Color Excess)” โดยเฉลี่ยแล้วค่าคัลเลอร์เอกเซสจะเพิ่มขึ้น ถ้าดาวฤกษ์ห่างจากเรามากขึ้น ถ้าดาวฤกษ์อยู่บริเวณระนาบของกาแล็กซี่ (Galactic Plane) ส่วนดาวฤกษ์ที่อยู่บริเวณฮาโล (Halo) ของกาแล็กซี่ การเปลี่ยนสีของดาวฤกษ์อันเนื่องมาจากฝุ่นที่อยู่ระหว่างดาวฤกษ์จะน้อยกว่า เนื่องจากบริเวณฮาโลของกาแล็กซี่จะมีฝุ่นน้อย

บริเวณระนาบของกาแล็กซี่ ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนสีของดาวฤกษ์ เมื่อพิจารณาดัชนีสี B-V หรือค่าคัลเลอร์เอกเซสใน B-V มีค่า

$$E(B-V) = (B-V) - (B-V)_0$$

โดย (B-V) เป็นค่าดัชนีสีที่สังเกตการณ์ได้

(B-V)₀ เป็นค่าดัชนีสีที่แท้จริง (Intrinsic Color Index)

และการเปลี่ยนโชติมาตรในช่วงความยาวคลื่นที่มองเห็นได้ (Visual; Wavelength) มีค่า

$$\Delta M_V = A_V \approx 1 \quad \text{โชติมาตรต่อกิโลพาร์เซก}$$

โดยทั่วไปแล้วค่าอัตราส่วน $A_V / E(B-V)$ เรียกว่าปริมาณ R กล่าวคือ

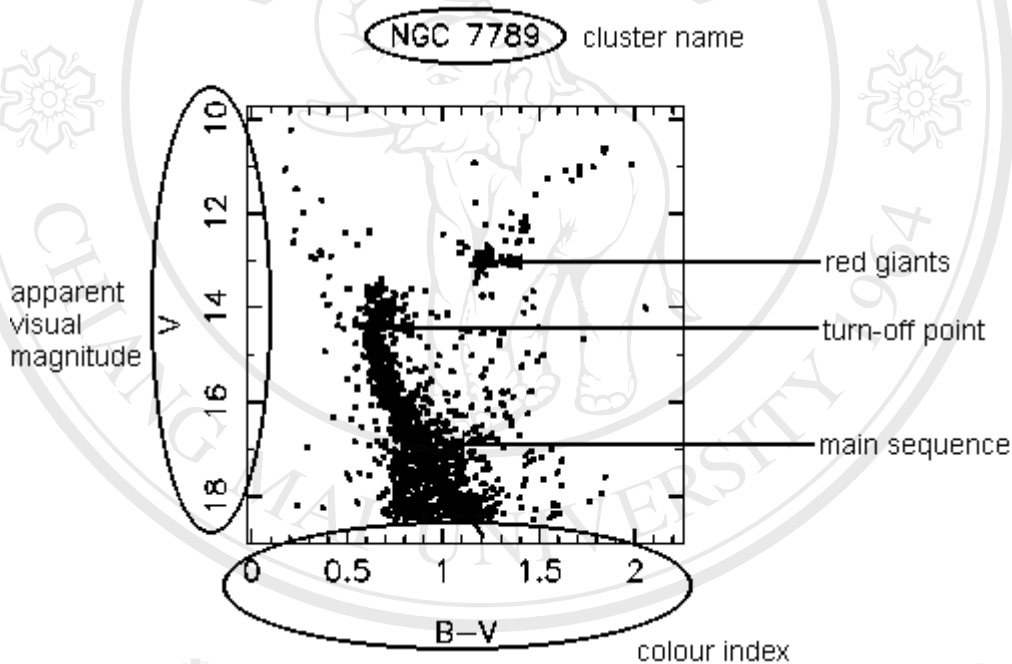
$$R = A_v / E(B-V) \approx 3.0$$

จากความสัมพันธ์ เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $V-M_v$ กับ $E(B-V)$ จะได้ค่าความชันของกราฟเป็นค่า R ซึ่งแสดงถึงค่าอัตราส่วนระหว่างการลดลงของแสงดาวในเทอมของโชติมาตรกับค่า Color Excess

คุณสมบัติสำคัญของกระจุกดาวก็คือ สมาชิกทุกดวงที่อยู่ในกระจุกดาว มีระยะห่างจากโลกเท่ากันหมด แสดงว่าสมาชิกแต่ละดวงในกระจุกดาวได้รับผลเนื่องจากสารที่อยู่ระหว่างดาวเท่ากันหมด ดังนั้นจากสมการ

$$M_v = V - 5 \log d + 5 + A_v$$

โดย A_v เป็นการเปลี่ยนแปลงโชติมาตรใน V อันเป็นผลเนื่องมาจากสารระหว่างดาว



รูปที่ 2.7 แผนภาพเฮิร์ตซ์ปรุง – รัสเซล (H – R Diagram) ของกระจุกดาวเปิด