บทที่ 2

สเปกตรัมและการกว้างของสเปกตรัม

ในปี พ.ศ.1402 กุสตาฟ เคิร์ชฮอฟฟ์(Kirchhoff, Gustav. R.) ได้แถลงหลักการเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมและสมบัติของแหล่งกำเนิดแสง[1] พอสรุปความได้ดังนี้

(ก) ของแข็ง ของเหลว หรือแกสที่มีความดันสูง เมื่อได้รับพลังงานจนร้อนเพียงพอที่จะเปล่งแสงจะให้แสงที่มีลักษณะสเปกตรัมต่อเนื่อง(continuous spectrum)

(ข) แกสที่มีความดันต่ำ และมีอุณหภูมิที่สูงเพียงพอ จะเปล่งแสงเฉพาะบางความยาวคลื่น เป็นเส้นสเปกตรัมเปล่งออก(bright emission lines)

(ค) ถ้านำแกสที่มีอุณหภูมิและความดันต่ำมาบังหน้าแหล่งกำเนิดแสงที่ให้แสงที่มีลักษณะเป็นสเปกกตรัมต่อเนื่อง แสงที่ผ่านแกสออกมาจะปรากฏเส้นสเปกตรัมดูดกลืน(absorption line spectrum)อยู่ร่วมกับสเปกตรัมต่อเนื่อง

หลักการที่เคิร์ชฮอฟฟ์แถลงนี้ แม้จะไม่ค่อยสมบูรณ์นัก แต่ก็นำไปสู่การศึกษาสเปกตรัมของวัตถุต่างๆในรายละเอียด รวมทั้งสเปกตรัมของเทห์ฟากฟ้าทั้งหลาย เช่น ดาวฤกษ์ ดวงอาทิตย์ เนบูลาเปล่งแสงต่างๆ ในบทนี้จะได้กล่าวถึง ลักษณะสเปกตรัมของเทห์ฟากฟ้าต่างๆ รูปลักษณ์ของเส้นสเปกตรัมดูดกลืน การกว้างขึ้นของเส้นสเปกตรัม โดยย่อ การจัดลำดับสเปกตรัมของดาวฤกษ์ การจัดกลุ่มดาวฤกษ์ตามความสว่างและสเปกตรัม เป็นต้น

<u>ลักษณะสเปกตรัมของเทห์ฟากฟ้า</u>

เทห์ฟากฟ้ามีหลายชนิด แต่ในที่นี้เราจะกล่าวถึงเพียงเทห์ฟากฟ้าที่สามารถเปล่งแสงได้ด้วยตัวเอง เช่น ดวงอาทิตย์ ดาวฤกษ์ เนบูลาเปล่งแสง เป็นต้น สำหรับหัวข้อนี้จะกล่าวถึงสเปกตรัมของดาวฤกษ์ และเนบูลาที่อาจกล่าวได้ว่าเป็นองค์ประกอบพื้นฐานของเทหฟากฟ้าต่างๆ เช่น กระจุกดาวฤกษ์ ดาราจักร เป็นต้น ทั้งนี้ ดวงอาทิตย์

ก็อาจกล่าวได้ว่าเป็นดาวฤกษ์ดวงหนึ่งเช่นกัน

ในกรณีของดาวฤกษ์ แสงที่มาถึงผู้สังเกตบนโลกจะเป็นแสงโดยรวมจากตำแหน่งต่างๆของตัวดวง ลักษณะของสเปกตรัมจะเป็นสเปกตรัมต่อเนื่องและปรากฏเส้นสเปกตรัมดูดกลืนอยู่ด้วย สำหรับดวงอาทิตย์ เนื่องจากเป็นดาวฤกษ์ที่อยู่ใกล้โลกมาก เราจึงอาจเลือกศึกษาสเปกตรัมของส่วนต่างๆของดวงได้โดยสะดวก สำหรับในกรณีของสเปกตรัมของแสงอาทิตย์จากบรรยากาศชั้นโฟโตสเฟียร์โดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นเส้นสเปกตรัมต่อเนื่องซ้อนทับด้วยเส้นสเปกตรัมดูดกลืนเฟราน์โฮเฟอร์เส้นต่างๆที่แสดงไว้ในหัวข้อถัดไป และมีลักษณะคล้ายคลึงกับสเปกตรัมของแสงจากดาวฤกษ์ ดังนั้นเราจะพิจารณาสเปกตรัมของแสงอาทิตย์เป็นหลัก

กรณีของดวงอาทิตย์ สเปกตรัมของแสงอาทิตย์จากโฟโตสเฟียร์จะเป็นสเปกตรัมต่อเนื่องร่วมกับเส้นสเปกตรัมดูดกลืนเฟราน์โฮเฟอร์ สเปกตรัมต่อเนื่องจากโฟโตสเฟียร์เชื่อว่ามาจากไอออนลบของธาตุไฮโดรเจน(H^-) คือ เกิดจากการจับอิเลกตรอนของอะตอมไฮโดรเจน($H + e^- \longrightarrow H^-$) ปฏิกิริยานี้จะให้โฟตอนออกมา แต่ในกรณีที่เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ คือเกิดการไอออไนซ์ไอออนลบของธาตุไฮโดรเจน ปฏิกิริยานี้จะเป็นปฏิกิริยาที่ดูดกลืนแสงต่อเนื่องในบรรยากาศดวงอาทิตย์ โดยจะมีค่าศักย์ไอออไนซ์เท่ากับ 0.75 อิเลกตรอนโวลต์ แสงต่อเนื่องที่เปล่งออกมาจะถูกดูดกลืนไปที่บางความยาวคลื่นด้วยอะตอมหรือไอออนของธาตุต่างๆในบรรยากาศ เกิดเป็นเส้นสเปกตรัมเฟราน์โฮเฟอร์ขึ้น สำหรับบริเวณที่เกิดการดูดกลืนแสงเป็นเส้นสเปกตรัมเฟราน์โฮเฟอร์ ได้แก่ บางส่วนของโฟโตสเฟียร์ หรือในบางเส้นอาจเกิดในระดับสูงถึงโครโมสเฟียร์[1]

สำหรับกลุ่มแกสในอวกาศ ปรกติจะไม่ปรากฏว่าเปล่งแสงมักจะมีบทบาทในการดูดกลืนแสงจากดาวต่างๆเบื้องหลัง แต่ในบางกรณี เช่น เนบูลาเปล่งแสงที่อยู่ใจกลางกลุ่มดาวนายพราน(Orion) ที่เรียกว่า เนบูลานายพราน(Orion's nebula) เหตุที่เนบูลานี้เปล่งแสงเพราะมีดาวฤกษ์อยู่ในกลุ่มแกสด้วยและแสงจากดาวฤกษ์จะกระตุ้นให้แกสเปล่งแสงเป็นสเปกตรัมเปล่งออก(emission spectra) ถ้าถ่ายภาพของกลุ่มแกสผ่านแผ่นเกรตติงหรือปริซึม แสงที่มาจากกลุ่มแกสที่ความยาวคลื่นต่างๆจะแยกออกไปปรากฏเป็นภาพของกลุ่มแกสที่ความยาวคลื่นต่างๆ

ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับดวงอาทิตย์

ดวงอาทิตย์นอกจากจะมีความสำคัญในฐานะที่เป็นศูนย์กลางของระบบสุริยะ และเป็นแหล่งพลังงานที่ให้พลังงานแก่โลกในรูปแสงสว่างแล้ว ยังเป็นดาวฤกษ์ดวงหนึ่งในระบบดาราจักรทางช้างเผือกด้วย ดังนั้นดวงอาทิตย์จึงเป็นดาวฤกษ์เพียงดวงเดียวที่อยู่ใกล้โลกเพียงพอที่จะศึกษาในรายละเอียด ดังนั้นเพื่อความเข้าใจในขั้นต้นจึงขอเสนอข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับดวงอาทิตย์เพื่อให้พิจารณาเป็นตัวแทนลักษณะต่างๆของดาวฤกษ์ ดังนี้

(1) ลักษณะทั่วไปของดวงอาทิตย์[2]

รัศมีของดวงอาทิตย์ = 6.96×10^{10} เซนติเมตร

มวลของดวงอาทิตย์ = 1.989×10^{33} กรัม

ความหนาแน่นเฉลี่ย = 1.409 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ระยะทางเฉลี่ยจากโลกถึงดวงอาทิตย์ = 1 หน่วยดาราศาสตร์

= 1.496×10^{13} เซนติเมตร

ระยะใกล้ที่สุดจากโลกถึงดวงอาทิตย์ = 1.471×10^{13} เซนติเมตร

(ระยะ perihelion)

ระยะไกลที่สุดจากโลกถึงดวงอาทิตย์ = 1.521×10^{13} เซนติเมตร

(ระยะ aphelion)

มุมรองรับเส้นผ่าศูนย์กลางดวงที่ระยะ

1 หน่วยดาราศาสตร์ = 1909.26 ฟิลิปดา

ความสุกสว่าง(luminosities)* = 3.826×10^{33} เอิร์ก/วินาที

ฟลักซ์การแผ่รังสีที่ผิวดวง** = 6.27×10^{10}

เอิร์กต่อวินาทีต่อตารางเซนติเมตร

---

*หมายถึงปริมาณพลังงานของแผ่รังสีที่ออกจากผิวดวงอาทิตย์ทั้งหมดในเวลาหนึ่งวินาที

**เรียกโดยสามัญว่า ความเข้มการแผ่รังสีที่ผิวดวง หมายถึงปริมาณพลังงานของการแผ่รังสีที่ออกจากผิวดวงอาทิตย์พื้นที่หนึ่งตารางเซนติเมตรในเวลาหนึ่งวินาที

ค่าคงที่สุริยะ* = 1.36×10^3 เอิร์กต่อวินาทีต่อตารางเซนติเมตร

โชติมาตรสัมบูรณ์(absolute visual magnitude)** = + 4.83

โชติมาตรปรากฏ(apparent visual magnitude) = -26.74

ชนิดของสเปกตรัม(spectral type) = G2V (รายละเอียดในบทที่ 2)

อุณหภูมิยังผล(effective temperature)

ตามกฎของสเตฟานโบลต์ซมันน์ = 5770 เคลวิน(K)

(2) <u>โครงสร้างของดวงอาทิตย์(solar structure)</u> สามารถจัดออกได้เป็น 2 ส่วน[1] คือ

(ก) โครงสร้างภายใน(interior structure) โครงสร้างภายในของดวงอาทิตย์เป็นส่วนที่ไม่สามารถทำการสังเกตได้ แต่อาจจะใช้ทฤษฎีทางฟิสิกส์สร้างภาวะขอบเขต(boundary condition)และแบบจำลองโครงสร้างภายในให้สอดคล้องกับข้อมูลจากการสังเกตการณ์ เช่น มวล, รัสมี, ความสุกสว่าง รวมทั้งปรากฏการณ์ต่างๆที่เกิดบนผิวดวง โดยทั่วไปโครงสร้างภายในของดวงอาทิตย์ตามแบบจำลองมี 3 ชั้น คือ

---

*ค่าคงที่สุริยะ(solar constant) หมายถึงฟลักซ์การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ที่นอกบรรยากาศโลก(ห่างจากดวงอาทิตย์เท่ากับระยะทางเฉลี่ยจากโลกถึงดวงอาทิตย์)

**โชติมาตร(magnitude) เป็นปริมาณที่บอกความสว่างของดาวโดยพิจารณาจากความสามารถในการรับรู้ความสว่างของตาคนเป็นเกณฑ์ในระยะแรก นิยามผลต่างของโชติมาตรของดาว 2 ดวงเทียบกับฟลักซ์(I)ของดาวทั้ง 2 ดังนี้

$$m_1 - m_2 = 2.5\log_{10}(I_2/I_1)$$

โชติมาตรที่กล่าวถึงนี้คือโชติมาตรปรากฏ(ที่มองเห็นด้วยตา)แบ่งออกเป็นหลายลักษณะตามช่วงความยาวคลื่น เช่น โชติมาตรที่ตามองเห็น(visual magnitude) โชติมาตรถ่ายภาพ(photographic magnitude) ฯลฯ โชติมาตรสัมบูรณ์ หมายถึงโชติมาตรใดๆเมื่อวัตถุนั้นอยู่ห่างจากผู้สังเกตเป็นระยะทาง 10 ปาร์เสก(parsec)สัมพันธ์กับโชติมาตรปรากฏ ดังนี้ $M = m + 5 - 5\log_{10}d$ d คือระยะทางจากโลกถึงวัตถุนั้นในหน่วยปาร์เสก(1 ปาร์เสก = 3.08×10^{18} เซนติเมตร)

1. แกน(core) เป็นส่วนที่เกิดปฏิกิริยาเทอร์โมนิวเคลียร์ของอะตอมธาตุไฮโดรเจน ได้ผลเป็นอะตอมของธาตุฮีเลียมพร้อมทั้งปลดปล่อยพลังงานออกมา ตามแบบจำลองเชื่อว่าส่วนแกนนี้จะมีความดันสูงถึง 3.4×10^{16} นิวตันต่อตารางเมตร ความหนาแน่น 160 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และอุณหภูมิ 15 ล้านเคลวิน พลังงานที่ปลดปล่อยออกมาจะออกจากแกนในรูปของโฟตอน และพลังงานจลน์ของนิวตริโน

2. ชั้นการแผ่รังสี(radiative zone) อยู่ถัดขึ้นมาจากแกน พลังงานจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ในแกนจะส่งผ่านชั้นนี้ไปสู่ชั้นสูงกว่าในรูปของการแผ่รังสีและการแพร่ของโฟตอนจากแกน ทั้งนี้เพราะความดันและความหนาแน่นของแกสในบริเวณนี้ยังมากเกินกว่าที่จะส่งผ่านพลังงานออกมาในวิธีอื่น

3. ชั้นการพา(convective zone) เป็นบริเวณที่ความดันและความหนาแน่นของมวลสารลดลงจนสามารถส่งผ่านพลังงานสู่ผิวของดวงอาทิตย์ได้ด้วยการพา(convection) หรือเรียกง่ายๆว่าการเดือด(boiling)ของแกส เป็นผลให้เมื่อสังเกตผิวหน้าของดวงจะพบว่าผิวดวงอาทิตย์ปรากฏเป็นดอกดวง(granules)

(ข) บรรยากาศของดวงอาทิตย์(solar atmospheres) หมายถึงกลุ่มแกสที่หุ้มห่อตัวดวงอยู่ มวลสารของแกสในส่วนนี้มีสมบัติที่แตกต่างกันมากในแต่ละส่วนตามความสูง การจัดแบ่งชั้นของบรรยากาศของดวงอาทิตย์ จัดแบ่งจากปริมาณๆหนึ่งเรียกความลึกเชิงแสง(optical depth) ดังนิยามดังนี้

ความลึกเชิงแสง($\tau(\lambda)$) หมายถึง ปริมาณที่มีความสัมพันธ์กับการดูดกลืนรังสีที่ความยาวคลื่น λ เมื่อรังสีนั้นผ่านตัวกลาง(มักจะหมายถึงแกส) ถ้าแสงที่เข้าสู่ตัวกลางมีความเข้มจำเพาะ(specific intensity) $I(\lambda,0)$ และแสงที่ออกจากตัวกลางมีความเข้มจำเพาะ $I(\lambda)$ ดังนั้น

$$I(\lambda) = I(\lambda,0)\exp[-\tau(\lambda)] \qquad [3]$$

ค่าความลึกเชิงแสง($\tau(\lambda)$) เป็นปริมาณที่มีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสี(absorption coefficient)ที่ความยาวคลื่น λ และไม่จำเป็นต้องเท่ากันในแต่ละความยาวคลื่น ถึงแม้จะเป็นตัวกลางเดียวกัน สำหรับดวงอาทิตย์จะพิจารณาแยกชั้นบรรยากาศโดยอาศัยความลึกเชิงแสงที่ความยาวคลื่น 5000 อังสตรอม โดยกำหนดให้ค่าความลึกเชิงแสงมีค่าลดลงตามแนวรัสมี บรรยากาศของดวงอาทิตย์เริ่มต้น

จากตำแหน่งที่มีค่าความลึกเชิงแสงที่ความยาวคลื่น 5000 อังสตรอม เป็น 1 โดยกำหนดให้เป็นจุดเริ่มของบรรยากาศ[2] ด้วยการจัดแบ่งลักษณะนี้บรรยากาศของดวงอาทิตย์สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน คือ

1. โฟโตสเฟียร์(photosphere) เริ่มต้นจากผิวดวง(จุดที่มีค่าความลึกเชิงแสงที่ความยาวคลื่น 5000 อังสตรอมเป็น 1) ถึงค่าความลึกเชิงแสงที่ความยาวคลื่น 5000 อังสตรอมเป็น 0.005 [2] เป็นบรรยากาศชั้นล่างสุดและเป็นที่มาของแสงอาทิตย์ที่เรามองเห็น ลักษณะของแสงคือเป็นแสงต่อเนื่อง(continuum light) ที่แสงบางความยาวคลื่นถูกดูดกลืนไป ปรากฏเป็นเส้นมืดซ้อนทับอยู่ข้างบน เส้นมืดเหล่านี้เรียกว่าเส้นเฟราน์โฮเฟอร์(Fraunhofer lines)

โฟโตสเฟียร์อยู่เหนือเขตการนำ ดังนั้นจึงมองเห็นเป็นดอกดวง(granulation) เมื่อพิจารณาที่ระดับสูงขึ้นแก๊สในโฟโตสเฟียร์จะลดความดัน ความหนาแน่น และอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว โดยลดเป็น 0.386 เท่าทุกๆค่าความสูงจริง 110 กิโลเมตร ดังนั้นจึงเรียกค่าความสูงนี้ว่าความสูงมาตรา(scale height) และจะถือว่าความหนาของบรรยากาศชั้นโฟโตสเฟียร์เป็น 320 กิโลเมตรวัดจากผิวดวง [2,4] เหนือจากระดับนี้ขึ้นไปจะเป็นบรรยากาศชั้นโครโมสเฟียร์

2. โครโมสเฟียร์(chromosphere) มีฐานอยู่ที่ตำแหน่งระดับความลึกเชิงแสงที่ความยาวคลื่น 5000 อังสตรอมมีค่า 0.005 มีอุณหภูมิที่ตำแหน่งนี้เป็น 4560 เคลวิน สูงขึ้นจากระดับนี้อุณหภูมิจะลดลงจนต่ำสุดเท่ากับ 4180 เคลวินที่ระดับความลึกเชิงแสงที่ 5000 อังสตรอม เป็น 0.0001 (ประมาณ 200 กิโลเมตรจากฐาน) สูงขึ้นจากนั้นอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงชั้นเปลี่ยน(transition region)ที่ความสูง 2000 กิโลเมตรจากฐานที่ความสูงระดับนี้จะมีอุณหภูมิถึง 100,000 เคลวิน ที่ขอบของโครโมสเฟียร์จะมีโครงสร้างของแก๊สร้อนเคลื่อนไปมาอยู่เสมอและมักจะปรากฏแก๊สร้อนพุ่งขึ้นตามแนวขอบในแนวเดียวกับรัศมี เรียก สปิกุล(spicule) นอกจากนี้ตามขอบของโครโมสเฟียร์ยังปรากฏการพวยพุ่งของแก๊สในลักษณะอื่นด้วย ทำให้ในบางครั้งตำแหน่งขอบบนของโครโมสเฟียร์เลื่อนขึ้นไปถึงประมาณ 10,000 กิโลเมตรจากฐาน[2,4]

การศึกษาสเปกตรัมของโครโมสเฟียร์จะกระทำได้เมื่อแสงจากโครโมสเฟียร์ไม่ถูกรบกวนด้วยแสงจากโฟโตสเฟียร์ โดยมากจะทำการศึกษาได้เมื่อ

เกิดสุริยุปราคา จากการแยกสเปกตรัมของแสงจากโครโมสเฟียร์พบว่ามีลักษณะสเปกตรัมเป็นสเปกตรัมเปล่งออก(emission spectra)จากธาตุต่างๆเช่น ไฮโดรเจน แคลเซียม มักนีเซียม ฯลฯ แสงที่เปล่งออกมากที่สุดคือ เส้นสเปกตรัมของธาตุไฮโดรเจนที่ 6562.8 อังสตรอม(เส้น Hα) ดังนั้นเมื่อเกิดสุริยุปราคาเต็มดวงแสงจากโครโมสเฟียร์จะปรากฏให้เห็นเป็นแสงแดงชั่วขณะ สเปกตรัมเปล่งออกจากโครโมสเฟียร์ที่สังเกตได้ขณะที่เกิดสุริยุปราคานี้เรียกว่า สเปกตรัมวาบ(flash spectrum)เพราะปรากฏให้เห็นเฉพาะเมื่อเกิดสุริยุปราคาเท่านั้น[4]

3. โคโรนา(corona) เป็นบรรยากาศที่อยู่ชั้นบนสุดและห่อหุ้มดวงอาทิตย์นับตั้งแต่ชั้นเปลี่ยนที่ต่อกับโครโมสเฟียร์ขึ้นมาและแผ่กระจายออกเป็นลมสุริยะ (solar wind)อุณหภูมิของโคโรนาอยู่ในระดับขนาด 1 ล้านเคลวิน เราจะเห็นโคโรนาได้เมื่อเกิดสุริยุปราคาเต็มดวง จากการวิเคราะห์พบว่าแสงที่มาจากโคโรนามาจากสาเหตุต่างๆกัน 3 ประการดังนี้

(ก) เป็นแสงที่กระเจิงจากอิเลกตรอนที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงในบรรยากาศชั้นนี้ ตามผลของอุณหภูมิที่สูงมากเรียกส่วนนี้ว่า เค-โคโรนา (K-corona)

(ข) เป็นแสงอาทิตย์ที่สะท้อนจากอนุภาคขนาดเล็กที่โคจรรอบดวงอาทิตย์ในระยะใกล้ อนุภาคเหล่านี้จะสะท้อนแสงอาทิตย์ทำให้ท้องฟ้าบริเวณใกล้ดวงสว่างขึ้นจึงไม่ถือว่าเป็นบรรยากาศจริง เรียกว่า เอฟ-โคโรนา(F-corona)

(ค) เป็นแสงที่มาจากการเปล่งแสงของไอออนของธาตุเหล็ก นิเกิล แคลเซียม ที่เสียอิเลกตรอนไปมาก เรียกโคโรนาส่วนที่เปล่งแสงนี้ว่า แอล-โคโรนา(L-corona) จากการที่มีสเปกตรัมของธาตุที่เสียอิเลกตรอนไปเป็นจำนวนมากนี้เองเป็นข้อพิสูจน์ถึงอุณหภูมิของโคโรนาที่สูงในระดับล้านเคลวิน และสูงกว่าอุณหภูมิของโครโมสเฟียร์[4]

(3) <u>เส้นสเปกตรัมเฟรานโฮเฟอร์</u> หมายถึง เส้นสเปกตรัมดูดกลืนที่ปรากฏในสเปกโทรแกรมของแสงอาทิตย์ เส้นสเปกตรัมดูดกลืนนี้เกิดจากการดูดกลืนแสงในการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเลกตรอนในอะตอมหรือไอออนของธาตุต่างๆในบรรยากาศของดวงอาทิตย์ เส้นสเปกตรัมเฟรานโฮเฟอร์ที่เห็นได้ชัดในรูปสเปกตรัมของดวงอาทิตย์

ได้แก่ เส้นสเปกตรัมดูดกลืนของ แคลเซียมไอออน(CaII หรือ Ca^{+}) อะตอมของธาตุไฮโดรเจน มักนีเซียม โซเดียม เป็นต้น รายละเอียดของเส้นเฟรานโฮเฟอร์ที่สำคัญได้แสดงไว้ในตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 แสดงเส้นเฟรานโฮเฟอร์ที่สำคัญ

ความยาวคลื่น (อังสตรอม)	ชื่อ	อะตอมหรือไอออนของธาตุ
3581.21	N	FeI
3734.87	M	FeI
3820.44	L	FeI
3933.68	K	CaII
3968.49	H	CaII
4045.83		FeI
4101.75	Hδ	HI
4226.74	g	CaI
4340.48	Hγ	HI
4383.56	d	FeI
4861.34	Hβ	HI
5167.33	b_4	MgI
5172.70	b_2	MgI
5183.62	b_1	MgI
5889.97	D_2	NaI
5895.94	D_1	NaI
6562.81	Hα	HI

รูปลักษณ์ของเส้นสเปกตรัม

ถ้าเราศึกษาเส้นสเปกตรัมดูดกลืนเฟราน์โฮเฟอร์ด้วยอุปกรณ์ที่มีความละเอียดสูง จะพบว่าเส้นสเปกตรัมเฟราน์โฮเฟอร์มีความกว้าง ไม่ได้ถูกดูดกลืนเฉพาะความยาวคลื่นนั้น แต่จะเริ่มถูกดูดกลืนลดความเข้มแสงลงก่อนถึงความยาวคลื่นนั้นจนต่ำสุดแล้วเพิ่มขึ้นจนถึงระดับแสงต่อเนื่องอีกครั้ง รูปร่างของเส้นที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่ารูปลักษณ์ของเส้นสเปกตรัมโดยเรียกส่วนกลางเส้นว่าแกน(core) และบริเวณถัดแกนออกไปที่แสงเพิ่มความเข้มขึ้นจนถึงระดับแสงต่อเนื่องเรียกว่าปีก(wing)ของเส้น[4]

ในการพิจารณาถึงรูปลักษณ์ของเส้นสเปกตรัมดูดกลืนนั้น เราอาจพิจารณาได้ผ่านทางค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่ความถี่นั้น(absorption coefficient;$K(\nu)$) ที่มีผลมากที่สุดต่อรูปลักษณะของเส้นสเปกตรัมดูดกลืน ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของเส้นสเปกตรัมเฟราน์โฮเฟอร์หนึ่งๆทำให้เกิดการกว้างขึ้นด้วยสาเหตุหลายประการ ทั้งผลที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติของการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเลกตรอนในอะตอมหรือไอออน หรือเกิดจากปัจจัยภายนอกที่มามีผลเสริมขึ้นอีก สาเหตุหลักของการกว้างขึ้นของเส้นสเปกตรัมจนปรากฏเป็นรูปลักษณ์ของเส้นนั้นมีดังนี้*

(1) การกว้างขึ้นตามธรรมชาติ(natural broadening)

การกว้างขึ้นตามธรรมชาติของเส้นสเปกตรัมเป็นผลมาจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเลกตรอนในการดูดกลืนแสงหรือเปล่งแสงเอง ทั้งนี้สามารถพิจารณาได้ในหลายนัย แต่แนวทางอธิบายถึงการกว้างขึ้นตามธรรมชาติของเส้นสเปกตรัมที่ง่ายที่สุดได้แก่การอธิบายการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเลกตรอนในอะตอมหรือไอออน ร่วมกับหลักความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์ก(Heisenberg's uncertainty principle)ดังที่จะได้กล่าวถึงดังต่อไปนี้[1,5]

การเกิดขึ้นของเส้นสเปกตรัมทั้งสเปกตรัมเปล่งออกและสเปกตรัมดูดกลืนเป็นผลมาจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเลกตรอนในอะตอมหรือไอออนของธาตุต่างๆที่มีอยู่ในบรรยากาศของดาวฤกษ์ โดยหลักการแสงที่เปล่งออกหรือดูดกลืนจะมีความยาวคลื่น

---

*รายละเอียดของการพิสูจน์หารูปลักษณ์ของเส้นสเปกตรัมในทางทฤษฎีสามารถศึกษาได้จากเอกสารอ้างอิงหมายเลข[5]

ที่สัมพันธ์กับผลต่างของพลังงานของระดับพลังงานทั้งสองที่อิเลกตรอนเปลี่ยนระดับไป ตามความสัมพันธ์ $\Delta E = hc/\lambda$ เมื่อ h คือค่าคงตัวของพลังค์ และ c คือค่าอัตราเร็วของแสงในตัวกลาง แต่ถ้าพิจารณาโดยอาศัยหลักความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์ก ระดับพลังงานในอะตอมหรือไอออนในระดับต่างๆจะมีลักษณะที่ไม่ชัดเจน ถ้าที่ระดับพลังงานหนึ่งๆมีช่วงเวลาที่อิเลกตรอนจะอยู่ที่ระดับพลังงานนั้นก่อนจะเปลี่ยนสถานะไปยังสถานะพื้นหรือระดับพลังงานอื่น(life time) เป็น Δt พลังงานของระดับพลังงานนั้นๆจะมีความไม่แน่นอนของระดับพลังงานตามหลักความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์กเป็น δE ที่มีความสัมพันธ์เป็น

$$\delta E \cdot \Delta t \approx h/2\pi$$

สำหรับในสถานะพื้น(ground state) อิเลกตรอนมีโอกาสที่จะอยู่ที่ระดับนี้มากหรืออาจกล่าวได้ว่ามีค่าช่วงอายุ(life time)มาก ดังนั้นความไม่แน่นอนของระดับพลังงานจะน้อยมาก ระดับพลังงานในสถานะพื้นจะมีลักษณะที่ชัดเจน แต่ในระดับที่เป็นสถานะกระตุ้น(excited state) อิเลกตรอนจะมาอยู่ที่ระดับนี้เพียงชั่วขณะ โดยทั่วไปจะมีช่วงอายุ(Δt) ประมาณ 10^{-8} วินาที ก่อนจะเปลี่ยนสถานะไป ดังนั้นในการเปลี่ยนระดับพลังงานค่าความไม่แน่นอนในระดับพลังงานของสถานะกระตุ้น(δE)ที่อิเลกตรอนจะไปอยู่จะมีค่าขนาดหนึ่ง ในการดูดกลืนหรือเปล่งออกของแสงในเส้นสเปกตรัมต้องมีการเปลี่ยนระดับพลังงานจากสถานะหนึ่งไปยังอีกสถานะหนึ่ง ลักษณะความไม่แน่นอนของระดับพลังงานที่อิเลกตรอนจะไปอยู่จะส่งผลให้เส้นสเปกตรัมนั้นๆกว้างขึ้นด้วยโดยทั่วไปจะมีค่าความกว้างของเส้นประมาณ 0.05 มิลลิอังสตรอมในช่วงความยาวคลื่นแสง

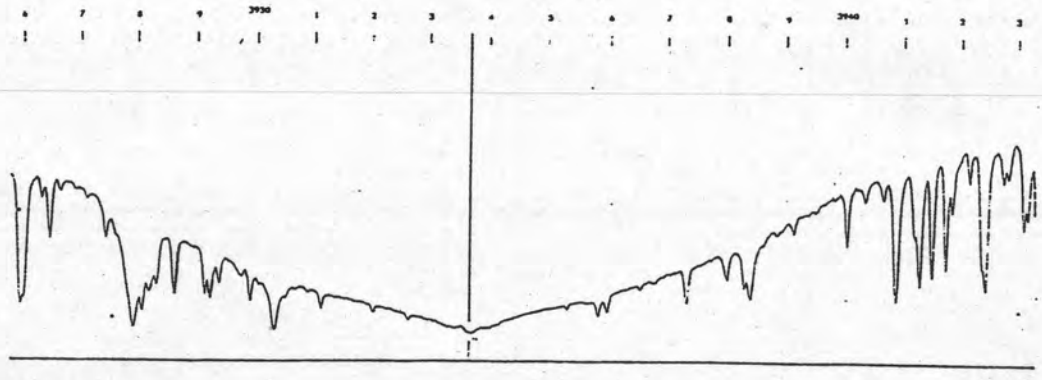
(2) <u>การกว้างขึ้นจากปรากฏการณ์ดอปเพลอร์(Doppler broadening)</u>

ตามความเป็นจริงอะตอมหรือไอออนต่างๆในบรรยากาศมิได้อยู่นิ่ง แต่จะเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา สัดส่วนของอะตอมหรือไอออนที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่างๆจะเป็นไปตามการแจกแจงความเร็วของแมกซ์เวลล์(Maxwell's velocity distribution) เมื่อพิจารณาเทียบกับผู้สังเกตก็จะมีอะตอมหรือไอออนที่เปล่งแสงหรือดูดกลืนแสงในขณะที่กำลังเคลื่อนที่ในทิศที่เข้าหาหรือออกจากผู้สังเกต ผลจากการเคลื่อนที่นี้จะมีผลต่อรูปลักษณ์ของเส้นสเปกตรัมเพิ่มจากการกว้างขึ้นตามธรรมชาติของเส้นสเปกตรัม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนแกนของเส้น[5]

(3) <u>การกว้างขึ้นเนื่องจากการชนกันของอะตอมหรือไอออนในบรรยากาศ (collision broadening)</u>

ตามสภาพที่แท้จริงของบรรยากาศของดาวฤกษ์ อะตอมหรือไอออนของธาตุต่างๆมิได้อยู่ห่างกันมากจนกระทั่งสามารถพิจารณาว่าเป็นระยะอนันต์ แต่จะอยู่ใกล้กันเพียงพอที่จะส่งผลรบกวนถึงระดับพลังงานของกันและกันได้ หรืออาจกล่าวอีกนัยหนึ่งคือในทุกขณะจะมีการชนกันของอะตอมหรือไอออนในบรรยากาศ ซึ่งจะส่งผลโดยรวมแก่การเกิดเส้นสเปกตรัมของบรรยากาศให้มีรูปลักษณ์กว้างขึ้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือส่งผลเสริมกับการกว้างขึ้นตามธรรมชาติของเส้นสเปกตรัม ผลจากส่วนนี้สามารถสังเกตหาความแตกต่างได้ง่ายด้วยการเปรียบเทียบเส้นสเปกตรัมเส้นหนึ่งๆในดาวสองดวงที่มีลักษณะสเปกตรัมที่เหมือนกันแต่มีบรรยากาศที่มีความหนาแน่น ความดัน แตกต่างกัน

นอกจากสาเหตุหลักของการกว้างขึ้นของเส้นสเปกตรัมทั้ง 3 ประการนี้แล้วยังมีสาเหตุอื่นที่มีผลต่อการกว้างขึ้นและรูปลักษณ์ของเส้นสเปกตรัมอีก เช่น ผลกระทบจากการเคลื่อนไหวอย่างไม่เป็นระเบียบของบรรยากาศ ผลกระทบจากสนามแม่เหล็กในบางส่วนของดวง เป็นต้น รูปลักษณ์ของเส้นสเปกตรัมดูดกลืนเฟราน์โฮเฟอร์ของแคลเซียมไอออนที่ 3933.68 อังสตรอม(K-line) [6] ได้แสดงไว้ในภาพที่ 2-1



รูปที่ 2-1 แสดงรูปลักษณ์ของเส้นสเปกตรัมดูดกลืนเฟราน์โฮเฟอร์ของแคลเซียมไอออน(CaII)ที่ 3933.68 อังสตรอม(K-line)[6]

การจำแนกประเภทสเปกตรัมของดาวฤกษ์(stellar spectra classification)

ในตอนต้น เราได้กล่าวถึงเส้นสเปกตรัมดูดกลืนเฟราน์โฮเฟอร์ที่สำคัญต่างๆ ในสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ ในดาวฤกษ์ต่างๆก็เช่นเดียวกัน ถ้าเราแยกแสงจากดาวฤกษ์ออกเป็นแถบสเปกตรัมจะพบว่ามีลักษณะคล้ายคลึงกับสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ คือปรากฏเส้นสเปกตรัมดูดกลืนเฟราน์โฮเฟอร์อยู่ด้วย แต่จำนวนเส้น ความแรง(strength)ของเส้นสเปกตรัมจะไม่เหมือนกับดวงอาทิตย์ ความแตกต่างนี้เป็นผลจากอุณหภูมิ ความหนาแน่นของอิเลกตรอน ฯลฯ จากการพิจารณาลักษณะสเปกตรัมของดาวฤกษ์ต่างๆอย่างละเอียดได้มีการจำแนกประเภทสเปกตรัมของดาวฤกษ์ออกเป็นลำดับต่างๆแต่ละลำดับแทนด้วยอักษรเมื่อนำมาจัดตามอุณหภูมิจากมากไปน้อยได้เป็นลำดับดังนี้ O B A F G K M นอกจากนี้อาจมีประเภทสเปกตรัมพิเศษอื่นอีก แต่จะไม่กล่าวถึงในที่นี้ นอกจากนี้ในระหว่างลำดับยังแบ่งย่อยออกเป็น 10 ส่วน เช่น ...,B9,A0,A1,...,A9,F0,... โดยที่ดาวที่มีเลขตามตัวอักษรมากจะมีลักษณะสเปกตรัมที่ใกล้เคียงกับสเปกตรัมของลำดับถัดไปมากกว่าเลขน้อย รายละเอียดของประเภทของสเปกตรัมในแต่ละลำดับมีดังนี้[1]

ดาวฤกษ์ที่มีประเภทสเปกตรัม O จะเป็นดาวฤกษ์ที่มีแสงสีน้ำเงิน บรรยากาศร้อนจัด มีเส้นสเปกตรัมดูดกลืนน้อย ลักษณะเด่นในสเปกตรัมของดาวประเภทนี้คือ จะมีเส้นสเปกตรัมดูดกลืนของฮีเลียมไอออน(HeII หรือ He^+) ในบางครั้งจะมีเส้นสเปกตรัมเปล่งออกของไอออนนี้ด้วย มีเส้นสเปกตรัมดูดกลืนของธาตุฮีเลียม(HeI)ที่มีความแรงอ่อนแต่เพิ่มความแรงขึ้นในลำดับ O5 ถึง O9 ปรากฏเส้นสเปกตรัมของธาตุไฮโดรเจน ในชุดอนุกรมบัลเมอร์(Balmer series) ด้วย

ดาวฤกษ์ที่มีประเภทสเปกตรัม B เป็นดาวสีน้ำเงิน บรรยากาศร้อนแต่ไม่เท่าประเภท O เส้นสเปกตรัมดูดกลืนของธาตุฮีเลียมเด่น มีความแรงสูงสุดที่ลำดับ B2 ส่วนเส้นสเปกตรัมดูดกลืนของฮีเลียมไอออนจะหายไป เส้นสเปกตรัมดูดกลืนของธาตุไฮโดรเจนในอนุกรมบัลเมอร์ มีความแรงมากขึ้น บางครั้งปรากฏเส้นสเปกตรัมของแมกนิเซียมไอออน(MgII หรือ Mg^+)และซิลิกอนไอออน(SiII หรือ Si^+)ด้วย

ดาวฤกษ์ที่มีประเภทสเปกตรัม A มีลักษณะสเปกตรัมที่มีเส้นสเปกตรัมดูดกลืนของธาตุไฮโดรเจนในอนุกราบัลเมอร์ ที่มีความแรงสูงสุดที่ A0 มีเส้นสเปกตรัมดูดกลืนของไอออนของโลหะ(FeII,SiII,MgII)ชัดที่ลำดับ A5 ในลำดับท้ายๆเริ่มมีเส้นสเปกตรัม

015757

1030434

ของแคลเซียมไอออน(CaIIหรือCa^+)ที่แรงขึ้น เส้นสเปกตรัมดูดกลืนของธาตุโลหะเริ่มมีปรากฏขึ้น

ดาวฤกษ์ที่มีประเภทสเปกตรัม F จะปรากฏเป็นดาวสีขาว ในลำดับต้นๆจะมีความแรงของเส้นสเปกตรัมดูดกลืนของธาตุไฮโดรเจนชัดเจน และลดความแรงลงอย่างเห็นได้ชัดในลำดับถัดๆมา เส้นสเปกตรัมดูดกลืนของแคลเซียมไอออน ที่ความยาวคลื่น 3933.68 อังสตรอม(เส้น K)และ 3968.49 อังสตรอม(เส้น H) มีความแรงมากขึ้นจนเห็นได้ชัด ในลำดับท้ายๆของประเภทนี้มีเส้นสเปกตรัมดูดกลืนของธาตุโลหะโดยเฉพาะเหล็ก(FeI)ปรากฏชัดขึ้น

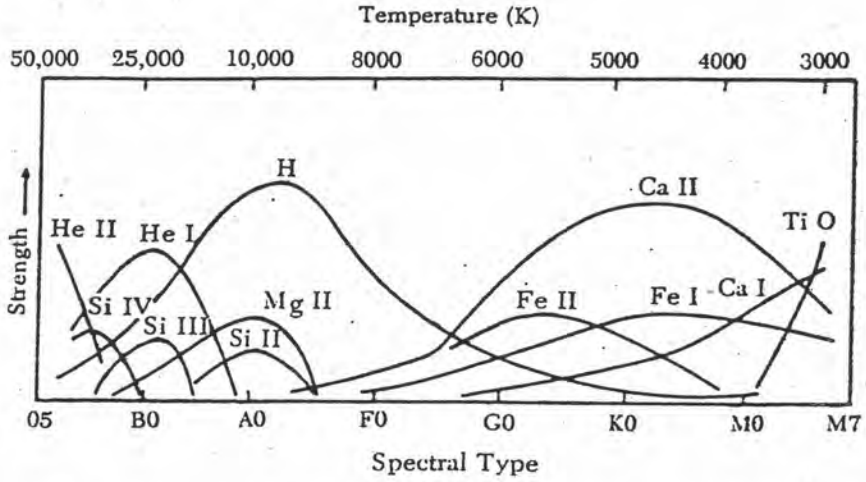
ดาวฤกษ์ที่มีประเภทสเปกตรัม G เป็นดาวฤกษ์ที่มีสีเหลือง ดวงอาทิตย์ก็จัดอยู่ในดาวที่มีประเภทสเปกตรัมแบบนี้โดยมีลำดับ G2 ลักษณะเด่นของสเปกตรัมคือจะมีเส้นสเปกตรัมดูดกลืนของธาตุโลหะมากเส้น เช่น เหล็ก(FeI) มังกานีส(MnI) แมกนีเซียม(MgI) แคลเซียม(CaI) เส้นสเปกตรัมดูดกลืนของแคลเซียมไอออน(CaII)จะมีความแรงมากเห็นได้ชัด ความแรงของเส้นนี้สูงสุดที่ G2 เส้นสเปกตรัมดูดกลืนของธาตุไฮโดรเจนในอนุกรมบัลเมอร์ลดความแรงลง รวมทั้งพวกไอออนของธาตุโลหะด้วย เริ่มปรากฏแถบดูดกลืนของโมเลกุลสารประกอบขึ้น

ดาวฤกษ์ที่มีประเภทสเปกตรัม K เป็นดาวฤกษ์ที่มีสีแดง มีสเปกตรัมที่มีลักษณะเด่นที่มีแถบดูดกลืนของโมเลกุลของ TiO เส้นสเปกตรัมดูดกลืนของธาตุโลหะต่างๆเด่นชัดโดยเฉพาะอย่างยิ่งเส้นของธาตุแคลเซียม มีความแรงมากขึ้นในลำดับท้ายๆ สำหรับเส้นสเปกตรัมดูดกลืนของธาตุไฮโดรเจนในอนุกรมบัลเมอร์จางลงจนเกือบมองไม่เห็น

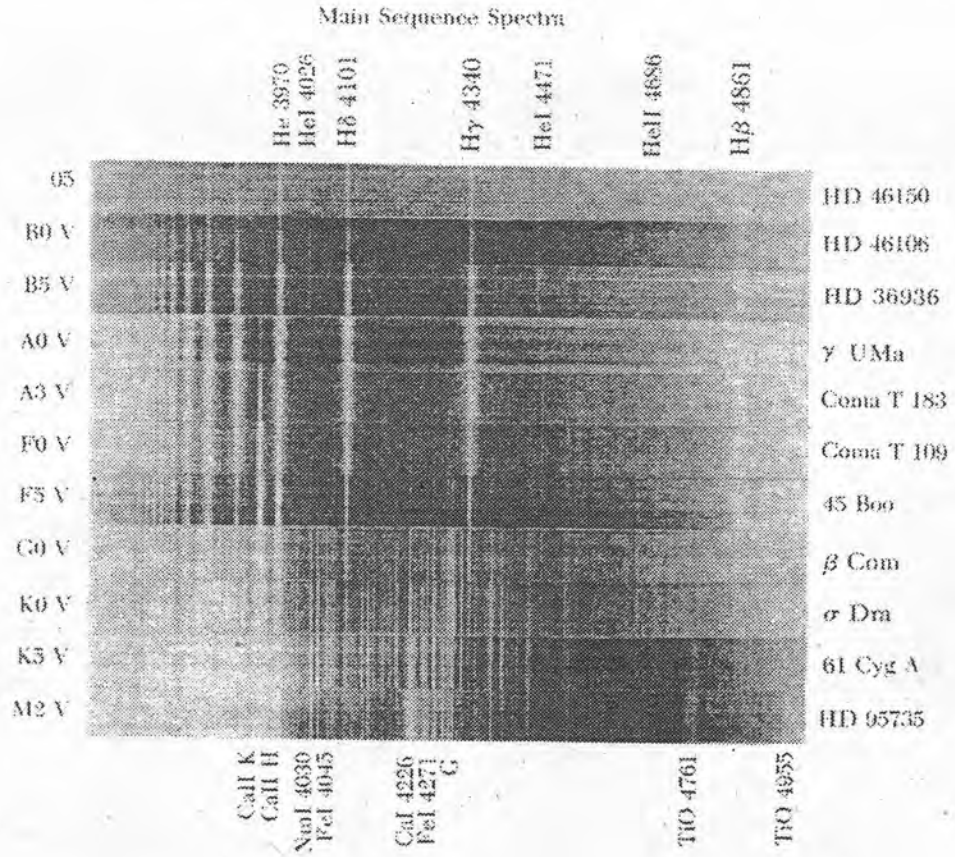
ดาวฤกษ์ที่มีประเภทสเปกตรัม M เป็นดาวฤกษ์ที่มีสีแดง อุณหภูมิของบรรยากาศต่ำสุด เส้นสเปกตรัมดูดกลืนของธาตุโลหะเห็นได้ชัดและมีจำนวนเส้นมาก และตั้งแต่ลำดับ M5 แถบดูดกลืนของโมเลกุล TiO ปรากฏเห็นได้ชัด

เหตุที่สามารถจัดประเภทสเปกตรัมของดาวฤกษ์ตามลำดับอุณหภูมิได้ มาจากการพิจารณาจากลักษณะการแผ่รังสีของดาวฤกษ์นั้นว่าใกล้เคียงกับวัตถุดำในสมดุลที่อุณหภูมิใดร่วมกับค่าพลังงานที่ใช้ในการไอออไนซ์ธาตุต่างๆและค่าพลังงานการกระตุ้นจากสถานะหนึ่งไปยังอีกสถานะหนึ่งของอะตอมหรือไอออนต่างๆ นำมาพิจารณาร่วมกับความแรงของเส้นสเปกตรัมเส้นต่างๆในสเปกตรัมดาว ดังนั้นเราสามารถอนุมานอุณหภูมิของดาวในประเภท

สเปกตรัมต่างๆได้ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2-2 และลักษณะสเปกตรัมของดาวในประเภทสเปกตรัมต่างๆได้แสดงไว้ในรูปที่ 2-3



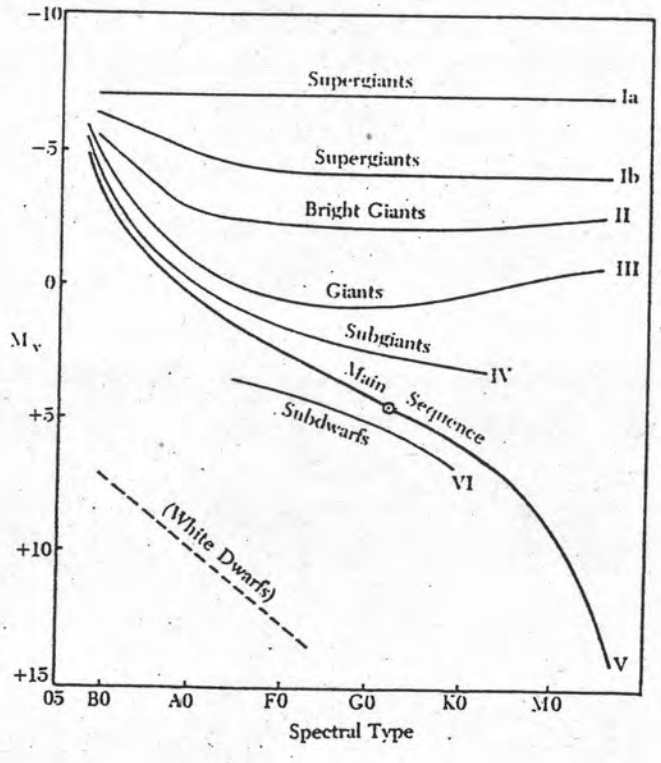
รูปที่ 2-2 แสดงความสัมพันธ์ของเส้นสเปกตรัมต่างๆและอุณหภูมิของบรรยากาศดาวฤกษ์ และดาวฤกษ์ที่มีสเปกตรัมประเภทต่างๆ[1]



รูปที่ 2-3 สเปกตรัมของดาวฤกษ์ที่มีประเภทสเปกตรัมต่างๆ[1]

การจำแนกประเภทความสุกสว่างของดาวฤกษ์(luminosity classification)

เนื่องจากดาวฤกษ์แต่ละดวงมีค่าโชติมาตรสัมบูรณ์ที่ต่างกัน นั่นหมายความว่าที่ระยะห่างจากโลกเท่าๆกันดาวฤกษ์แต่ละดวงจะมีความสุกสว่างไม่เท่ากัน เมื่อเปรียบเทียบดาวฤกษ์ที่มีประเภทสเปกตรัมแบบเดียวกัน แต่ความสุกสว่างหรือโชติมาตรสัมบูรณ์ไม่เท่ากัน พบว่ามีลักษณะพิเศษเกิดขึ้น ถ้าพิจารณารูปที่ 2-4 ที่แสดงแผนภูมิระหว่างประเภทสเปกตรัมและโชติมาตรสัมบูรณ์ของดาวฤกษ์ เมื่อนำค่าประเภทสเปกตรัมและโชติมาตรสัมบูรณ์ของดาวฤกษ์ต่างๆมาเขียนลงบนแผนภูมิ พบว่าดาวจำนวนมากเรียงอยู่ในแนวจากบนซ้ายมาถึงทางด้านล่างขวามือ จึงได้เรียกดาวเหล่านี้ว่าดาวในลำดับหลัก(main sequence) แต่ก็มีดาวอีกจำนวนหนึ่งที่แยกออกจากแนวลำดับหลักออกไป ทั้งในแนวที่มีโชติมาตรมากกว่าและในแนวที่มีโชติมาตรน้อยกว่า ทั้งนี้ในแนวที่มีโชติมาตรมากกว่าแนวลำดับหลักเมื่อพิจารณาถึงความเป็นไปได้แล้วก็จะหมายถึงดาวที่มีมวลมากและมีพื้นที่ผิวมากกว่าดาวในลำดับหลักหรือมีรัศมีมากกว่า จึงได้มีการจัดจำแนกดาวออกเป็นกลุ่มๆตามความสว่างในแผนภูมินี้ ซึ่งในรูปที่ 2-4 แทนแนวของดาวที่อยู่ในแผนภูมิด้วยเส้น



รูปที่ 2-4 แสดงแผนภูมิจัดจำแนกความสุกสว่างของดาวฤกษ์[1]

จากรูปที่ 2-4 เห็นได้ว่าในการแบ่งกลุ่มจะแทนแต่ละกลุ่มด้วยเลขโรมัน สำหรับดาวฤกษ์ในกลุ่ม I ถึง IV แทนดาวฤกษ์ที่มีความสุกสว่างมากกว่าคือมีรัศมีมากกว่า จึงอาจเรียกโดยย่อว่าเป็นกลุ่มดาวฤกษ์ยักษ์(giants) กลุ่ม V แทนดาวฤกษ์ในลำดับหลัก ลักษณะสเปกตรัมของดาวฤกษ์ในลำดับหลักและดาวฤกษ์ยักษ์ที่ประเภทสเปกตรัมเดียวกันจะแตกต่างกันเล็กน้อย คือในดาวยักษ์เส้นสเปกตรัมจะมีลักษณะที่บางหรือคมกว่าดาวในลำดับหลัก ทั้งนี้เนื่องจากผลการกว้างขึ้นเนื่องจากการชนกันและความดันจะไม่เหมือนกับดาวในลำดับหลัก เพราะสมบัติต่างๆของบรรยากาศที่มีความแตกต่างกันในแง่ความดันและความหนาแน่น(ทั้งความหนาแน่นมวลสารและความหนาแน่นจำนวนของอิเลกตรอน)

ในการบอกประเภทสเปกตรัมของดาวฤกษ์ในเอกสารต่างๆ มักจะบอกประเภทของความสุกสว่างของดาวฤกษ์ไว้ร่วมกัน เช่นดวงอาทิตย์เป็นดาวฤกษ์ที่มีประเภทสเปกตรัมเป็น G2V ซึ่งก็หมายตวามถึง ดาวฤกษ์ในลำดับหลักที่มีประเภทสเปกตรัม G2 ดังนั้นในกรณีที่ต้องการเปรียบเทียบสเปกตรัมจึงมักจะกระทำในดาวฤกษ์ที่มีความสุกสว่างในชุดเดียวกัน เช่นดาวฤกษ์ในลำดับหลักเพื่อหลีกเลี่ยงความแตกต่างระหว่างดาวฤกษ์ในกลุ่มความสุกสว่างที่ต่างกัน ดังรูปที่ 2-3