



บรรยากาศของดวงอาทิตย์และเส้นพرونออฟเฟลร์

ดวงอาทิตย์เป็นดาวฤกษ์ที่อยู่ใกล้โลกมากที่สุด มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 13.9198×10^{10} เซนติเมตร ปริมาตร 1.4122×10^{33} ลูกบาศก์เซนติเมตร มวล 1.989×10^{33} กรัม ค่าความหนาแน่นเฉลี่ย 1.409 กรัมต่อ ลบ.เซนติเมตร อยู่ห่างจากโลกเฉลี่ย 1.4960×10^{13} เซนติเมตร กล่าวคืออยู่ใกล้กับโลกมากที่สุดที่ตำแหน่งเพอริเฮลิออน (perihelion) 1.4710×10^{13} เซนติเมตร และอยู่ห่างจากโลกมากที่สุดที่ตำแหน่งแอฟเฮลิออน (aphelion) 1.5210×10^{13} เซนติเมตร เมื่อสังเกตจากโลกดวงอาทิตย์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรองรับมุมจำนวน 1922.4 พิลิปดาความโค้ง (second of arc) อายุของดวงอาทิตย์ประมาณ 5×10^9 ปี

แหล่งกำเนิดพลังงานของดวงอาทิตย์ซึ่งอยู่บริเวณแกนกลางได้มาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชัน (nuclear fusion) ของธาตุพื้นฐานคือไฮโดรเจน โดยมีอุณหภูมิที่แกนกลางประมาณ 15.5×10^6 องศาเซลเซียส (Allen, 1973)

เมื่อพิจารณาว่าดวงอาทิตย์เป็นวัตถุดำ (Black body) ที่ส่องแสงจะสามารถคำนวณค่าอุณหภูมิยังผล (effective temperature) จากสมการของสเตเฟน-โบลต์ซมานน์ (Stefan - Boltzmann) ได้เท่ากับ 5750 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่ได้จากรีการอื่น ๆ (Brandt and Hodge, 1964)

นักฟิสิกส์ดาราศาสตร์แบ่งบรรยากาศของดวงอาทิตย์เป็น 3 ชั้น คือโฟโตสเฟียร์ โครโมสเฟียร์ และคอโรนา ซึ่งจะได้กล่าวถึงแต่ละชั้นต่อไป

1. โฟโตสเฟียร์

ความหมายของโฟโตสเฟียร์คือทรงกลมแสงสว่าง (sphere of light) โดยที่ภาวะปรกติแสงที่เราได้รับจากดวงอาทิตย์มาจากบรรยากาศชั้นโฟโตสเฟียร์นี้เอง กล่าวอีกนัยหนึ่งภาพถ่ายดวงอาทิตย์ที่ได้จากกล้องโทรทรรศน์คือภาพโฟโตสเฟียร์ของดวงอาทิตย์ เป็นการยากที่จะกำหนดขอบเขตอย่างชัดเจนของบรรยากาศของดวงอาทิตย์ สิ่งที่น่าแปลกต่างของบรรยากาศคือภาวะและลักษณะทางเคมีและฟิสิกส์

ขอบเขตของโฟโตสเฟียร์ทางแสง นับจากบริเวณที่ให้แสงจนถึงบริเวณที่บดบัง เนื่องจากความทึบตันของก๊าซ (Fredrick and Baker, 1974)

จากการสังเกตภาพของดวงอาทิตย์ จะพบว่าตรงกลางดวงสว่างที่สุดและความเข้มของแสงสว่างจะลดลงเมื่อห่างจากจุดศูนย์กลางและใกล้ขอบมากขึ้น ปรากฏการณ์นี้อธิบายได้โดยอ้างการที่ดวงอาทิตย์เป็นก๊าซ ไม่ใช่ทรงกลมที่มีผิวแข็ง และก๊าซในดวงอาทิตย์มีอุณหภูมิสูงขึ้นตามความลึกแสงสว่างที่ออกมาจากบริเวณกลางดวงนั้นมาจาก ระดับที่ลึกกว่าแสงที่ออกมาจากตำแหน่งใกล้ขอบดวงจึงมีความเข้มมากกว่า เพราะมาจากก๊าซมีอุณหภูมิสูงกว่า ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การมืดคล้ำที่ใกล้ขอบดวง (limb darkening) การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความเข้มของแสงตามระยะทางจากจุดศูนย์กลางนี้ ทำให้เราทราบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในบรรยากาศของดวงอาทิตย์ชั้นโฟโตสเฟียร์

การมืดคล้ำที่ใกล้ขอบดวงนี้ เมื่อพิจารณาในแสงสีเดียวต่าง ๆ กันจะมีลักษณะต่างกัน กล่าวคือการมืดคล้ำที่ขอบดวงเป็นฟังก์ชัน (function) ของความยาวคลื่น (Minnaert, 1953)

อาจกล่าวได้ว่า การมืดคล้ำที่ใกล้ขอบดวงเป็นปรากฏการณ์ชนิดดาว รบนดวงอาทิตย์ นอกจากนี้บรรยากาศชั้นโฟโตสเฟียร์ยังมีปรากฏการณ์ชั่วคราวซึ่งหมายถึงเป็นปรากฏการณ์ที่มีลักษณะเคลื่อนไหว ไม่ถาวร มีการเกิดขึ้นและสลายตัว ปรากฏการณ์ที่สำคัญดังนี้

1.1 การเป็นดอกดวง ลักษณะพื้นฐานของโฟโตสเฟียร์คือการเป็นดอกดวง คล้ายมีการแบ่งโฟโตสเฟียร์เป็นช่องเล็ก ๆ ติดต่อกันไป ช่องเล็ก ๆ นี้เรียกดอกดวง (granules)

สังเกตได้ชัดในภาพของโฟโตสเฟียร์ที่ถ่ายเหนือบรรยากาศของโลกหรือด้วยกล้องที่มีกำลังแยก
สูง ดอกดวงมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 700 กิโลเมตร ลึกประมาณ
300 กิโลเมตร อายุเฉลี่ยประมาณ 4 นาที กล่าวคือมีการปรากฏชัดเจนขึ้นและจาง
พร่าไปของ เม็ดหรือดอกดวงสลับกันไปทั่วดวงอาทิตย์ การเกิดดอกดวงเป็นผลจากการ
พาความร้อน (convection) ของก๊าซที่ร้อนปะทุขึ้นตรงกลางดอกดวงและไหลกลับลงไปสู่
เบื้องล่าง ณ ขอบของดอกดวง ตรงกลางจึงสว่างและขอบของดอกดวงมืดกว่า
(Brandt and Hodge, 1964)

1.2 แฟคิวเล่ ปรากฏการณ์ของโฟโตสเฟียร์อีกชนิดหนึ่งคือ แฟคิวเล่ (faculae)
ซึ่งเป็นบริเวณที่สว่างกว่าบริเวณทั่ว ๆ ไปในโฟโตสเฟียร์ สังเกตได้ชัดที่ขอบดวง ลักษณะ
เป็นคล้ายรอยสะเก็ดหรือรอยถลอกหรืออาจเป็นกิ่งก้านแขนงที่เปลี่ยนแปลงในเวลาสองสามชั่วโมง
และหรืออาจมีอายุหลายสัปดาห์ (Abetti, 1951) เนื่องจากลักษณะแบบแฟคิวเล่
ปรากฏในบรรยากาศชั้นโครโมสเฟียร์ด้วย จึงมักระบุชัดเจนลงไปว่าเป็นแฟคิวเล่ของโฟโตสเฟียร์
(photospheric faculae) หรือแฟคิวเล่ของโครโมสเฟียร์ (chromospheric
faculae) หรือพลาจ (plage) โดยปกติแฟคิวเล่เกิดอยู่กับจุดบนดวงอาทิตย์
โดยที่จะเกิดก่อนและคงอยู่หลังจากจุดสลายตัวไปเป็นเวลาหลายรอบของการหมุนของดวงอาทิตย์
การกระจายตามละติจูดของแฟคิวเล่เป็นเช่นเดียวกับการกระจายตามละติจูดของจุด จากการ
ที่แฟคิวเล่สังเกตเห็นได้ที่บริเวณขอบดวงทำให้สรุปได้ว่า ตอนบนของแฟคิวเล่สว่างกว่าบริเวณ
ใกล้เคียง แต่ตอนล่างของแฟคิวเล่มีมืดกว่าบริเวณใกล้เคียง เมื่อสังเกตที่กลางดวงความมืด
และความสว่างหักล้างกัน แต่เมื่ออยู่ที่ขอบดวงจะสังเกตเห็นส่วนบนของแฟคิวเล่ทำให้เห็นเป็น
รอยสว่างกว่าบริเวณใกล้เคียง บริเวณแฟคิวเล่มีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณใกล้เคียงประมาณ
100 องศาเคลวิน (Brandt and Hodge, 1964)

1.3 จุดและกลุ่มจุด ปรากฏการณ์ที่เด่นชัดและมีความสำคัญและสัมพันธ์ต่อปรากฏการณ์อื่น ๆ ในบรรยากาศของดวงอาทิตย์คือ จุด หรือเรียกให้ชัด ๆ ว่าเป็นจุดบนดวงอาทิตย์ โดยปกติจุดมักปรากฏอยู่ในรูปของกลุ่มจุด (spot group) โดยเริ่มจากการเป็นรู (pore) ขนาดเล็ก ๆ และพัฒนาขึ้นเป็นจุดและกลุ่มจุด จุดคือบริเวณที่เห็นมืดกว่าพื้นผิวโดยทั่วไป มีขนาดที่แยกออกได้อย่างชัดเจนจากรอยต่อของดอกดวงซึ่งมืดเช่นกัน ประกอบด้วยสองส่วนคือ เขตมืด และเขตสว่าง จากการสังเกตการณ์เคลื่อนที่ของจุดจากขอบตะวันออกของดวงอาทิตย์ไปยังขอบตะวันตก แสดงว่าดวงอาทิตย์มีการหมุนรอบตัวเองในทิศทางเดียวกับโลก นอกจากนี้ยังพบว่าบริเวณกลางดวงมีการหมุนรอบตัวเองเร็วกว่าบริเวณใกล้ขั้วเข้าไป ที่ละติจูด 0 องศาหรือเส้นศูนย์สูตร มีอัตราการหมุนรอบตัวเองเป็น 25 วันต่อรอบ ที่ละติจูด 35 องศา มีค่า 27 วัน และที่ละติจูด 75 องศา มีค่า 33 วัน (Fredrick and Baker, 1974)

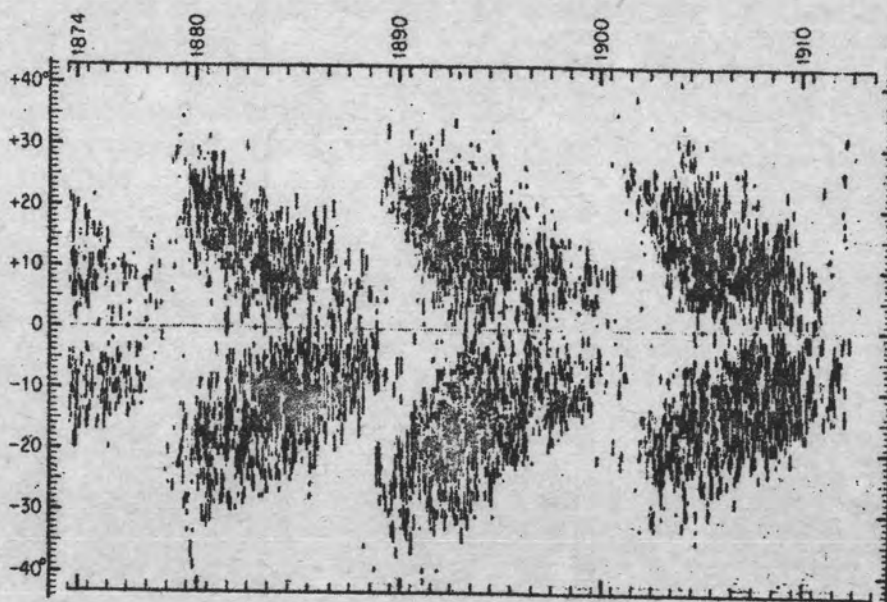
เมื่อจุดชนิดค่อนข้างกลมปรากฏเคลื่อนไปอยู่ใกล้ขอบดวงเนื่องจากการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์ จะปรากฏว่าเขตสว่างซึ่งวงรอบเขตมืดทางด้านห่างจากขอบดวงอาทิตย์หดแคบลงมากกว่าเขตสว่างทางด้านใกล้ขอบ อเล็กซานเดอร์ วิลสัน (Alexander Wilson) เป็นผู้ตรวจพบปรากฏการณ์นี้เป็นครั้งแรก และได้ให้คำอธิบายว่าจุดเป็นโครงสร้างรูปแฉกคล้ายกะทะบนผิวดวงอาทิตย์ เมื่อจุดเคลื่อนไปใกล้ขอบดวงจึงแลเห็นด้านใกล้ขอบดวงกว้างกว่าด้านห่างจากขอบดวง (ภาวิไล, 2522) คำอธิบายของวิลสันยังไม่เป็นที่เห็นด้วยมากนัก อย่างไรก็ตามด้วยหลักการคำนวณทางเรขาคณิตวิลสันพบว่าความลึกเฉลี่ยของจุดประมาณหนึ่งในสามของรัศมีโลกหรือประมาณ 2123 กิโลเมตร ซึ่งมีผู้รับรองหลายครั้งแต่ก็มีผู้โต้แย้งต่างกันเช่น เชวาเลียร์ (Chevalier) พบว่าจุดลึกประมาณไม่เกิน 1 กิโลเมตรความโค้งหรือ 720 กิโลเมตร (Abetti, 1951)

จำนวนของจุดบนดวงอาทิตย์มีการแปรค่าเป็นคาบ ๆ เรียกว่า รอบของจุด กล่าวคือจำนวนของจุดจะมีการแปรค่าจากมากที่สุด (หลายร้อย) ไปหาน้อยที่สุด (เกือบไม่มี) ไปหามากที่สุดอีกในช่วงเวลาประมาณ 11 ปี (ค่าเฉลี่ยจาก Allen, 1973 คือ 11.04 ปี) จากบันทึกของนักดาราศาสตร์พบว่าปีที่มีจำนวนมากที่สุดซึ่งส่งผลต่อปรากฏการณ์

บนดวงอาทิตย์มากในช่วง 30 ปี คือ 1948, 1959, 1970, 1981, ... ส่วนปีที่มีจำนวนจุดน้อยที่สุดคือ 1954, 1965, 1976, 1987, ... (Kaufmann, 1977)

ส่วนใหญ่จุดบนดวงอาทิตย์ปรากฏระหว่างละติจูด 5 ถึง 30 องศาเหนือและใต้ มีน้อยมากที่จะปรากฏเหนือหรือใต้ละติจูด 45 องศาเหนือและใต้ ตามลำดับ กล่าวคือจุดมักจะปรากฏภายในเขตเป็นแนวขนานกับเส้นศูนย์สูตรทั้งเหนือและใต้ด้วยระยะเขตที่เท่ากัน การปรากฏของจุดใหม่เมื่อมีการสลายของจุดเก่ามีแนวโน้มที่จะเกิดใกล้เส้นศูนย์สูตรเข้ามา (Fredrick and Baker, 1974)

ปรากฏการณ์จุดมีการกระจายตามละติจูดนี้เห็นได้ชัดในแผนภาพแสดงกลุ่มจุดและเวลาที่เรียกว่า แผนภาพรูปผีเสื้อของมอนเดอ (Maunder butterfly diagram) ดังแสดงในรูป 2.1



รูป 2.1 แผนภาพรูปผีเสื้อของมอนเดอ (จาก Brandt and Hodge, 1964)

มวลสารภายในจุดบดดวงอาทิตย์มีการไหลออก ตามแนว รัศมีในแนวระดับด้วยความเร็ว ประมาณ 2 กิโลเมตรต่อวินาที โดยไหลขึ้นตรงกลางจุดและไหลไปตามแนว รัศมีทุกทิศทาง รอบจุด มีความเร็วสูงสุดที่ขอบของเขตมืดและความเร็วจะลดลงเมื่อมวลสารนั้น ไหลกลับสู่ โฟโตสเฟียร์ (Brandt and Hodge, 1964)

จากการวิเคราะห์สเปกตรัมของจุด แสดงให้เห็นว่าจุดมีอุณหภูมิต่ำกว่าโฟโตสเฟียร์ โดยรอบประมาณ 1,500 องศาเซลวิน นอกจากนี้จากการเกิดการแยกออกของเส้น สเปกตรัมของจุดหรือซีแมน เอฟเฟค ทำให้สรุปได้ว่ามีสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูงเกี่ยวเนื่อง กับการเกิดจุดบดดวงอาทิตย์ สนามแม่เหล็กภายในจุดมีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยของสนามทั้งดวง ประมาณจากหลายร้อยถึงหลายพันเท่า (Kaufmann, 1977)

ทฤษฎีที่บรรยายการเกิดจุดบดดวงอาทิตย์ที่เป็นที่ยอมรับ เสนอโดยแบบคอค (H.W. Babcock) ในปี 1961 โดยเสนอแนวความคิดว่าผลจากการที่ดวงอาทิตย์มีการ หมุนรอบตัวเองที่ต่างกันตามละติจูด ทำให้สนามแม่เหล็กของดวงอาทิตย์ที่อยู่ใต้ผิวมีการม้วนตัว โดยรอบตามแนวขนานกับเส้นศูนย์สูตร เมื่อเวลาผ่านไปอีกจะมีการพันกันอย่างสับสนจนปะทุ ขึ้นมาเหนือโฟโตสเฟียร์ ณ ตำแหน่งที่สนามแม่เหล็กโป่งทะลุออกมาเกิดการพาความร้อนของก๊าซ ในโฟโตสเฟียร์จะถูกขัดขวาง ดังนั้นอุณหภูมิที่ตำแหน่งนี้จึงเย็นกว่ารอบด้าน จุดบดดวงอาทิตย์ จึงเกิดขึ้น (Babcock, 1961)

2. โครโมสเฟียร์

บรรยากาศของดวงอาทิตย์ชั้นสูงขึ้นไปจากโฟโตสเฟียร์คือ โครโมสเฟียร์ ซึ่งจะเห็น ได้ด้วยตาเปล่าเป็นวงแหวนที่มีขอบนอกแบบเปลวไฟสีแดงจางโดยรอบตัวดวงขณะเกิดสุริยุปราคา เต็มดวง (Abetti, 1951) ความหนาของบรรยากาศชั้นนี้ประมาณ 10,000 ถึง 15,000 กิโลเมตร อยู่ระหว่างโฟโตสเฟียร์ซึ่งมีอุณหภูมิในช่วง 5,000 องศาเซลวิน และโคโรนาซึ่งมีอุณหภูมิในช่วง 1,000,000 องศาเซลวิน โครโมสเฟียร์มีองค์ประกอบ ที่ไม่สม่ำเสมอ (inhomogenous) และไม่อยู่ในภาวะสมดุลทางเทอร์โมไดนามิก (thermodynamic equilibrium) (Brandt and Hodge, 1964)

ในขณะที่การถ่ายภาพโฟโตสเฟียร์หมายถึงการถ่ายโดยรับแสงขาว (white light) การถ่ายภาพโครโมสเฟียร์คือการถ่ายภาพดวงอาทิตย์โดยเลือกรับแสงสีโคสีหนึ่งที่มีความยาวคลื่นหนึ่ง ๆ โดยใช้ฟิลเตอร์ (filter) หรือถ่ายภาพโดยใช้สเปกโตรกราฟเข้าช่วยที่ความยาวคลื่นหนึ่ง ๆ ความยาวคลื่นที่มักจะถูกเลือกคือ ไฮโดรเจน-อัลฟา หรือเส้นซี (Hydrogen alpha or C line) ซึ่งมีความยาวคลื่น 6562.81 อังสตรอม และเส้นเคของแคลเซียม (K line of calcium) ซึ่งมีความยาวคลื่น 3933.68 อังสตรอม ภาพถ่ายที่ได้จะแสดงบรรยากาศชั้นโครโมสเฟียร์ที่ปกคลุมโดยรอบดวงอาทิตย์เหนือบรรยากาศชั้นโฟโตสเฟียร์ (Fredrick and Baker, 1974)

โครโมสเฟียร์แบ่งออกได้เป็น 3 ชั้นย่อยคือ

ชั้นที่ 1 นับจากโฟโตสเฟียร์ขึ้นไป 500 กิโลเมตร

ชั้นที่ 2 เรียกโครโมสเฟียร์ตอนล่าง (lower chromosphere) มีความสูงน้อยกว่า 5,000 กิโลเมตร ประกอบด้วยไฮโดรเจนที่เป็นกลาง (neutral hydrogen) เป็นส่วนใหญ่ อุณหภูมิยังผลประมาณ 5,000 องศาเคลวินซึ่งถือได้ว่ามีอุณหภูมิต่ำ

ชั้นที่ 3 เรียกโครโมสเฟียร์ตอนบน (upper chromosphere) นับต่อจากชั้นที่ 2 จนถึงขอบของโครโมสเฟียร์ซึ่งอยู่ในช่วง 10,000 ถึง 15,000 กิโลเมตร ก๊าซส่วนใหญ่ถูกไอออไนซ์ (ionized) มีอุณหภูมิตั้งแต่ 5,000 องศาเคลวินจนถึงอุณหภูมิของคอโรนา (Brandt and Hodge, 1964)

ลักษณะและปรากฏการณ์ที่สำคัญของโครโมสเฟียร์มีดังนี้

2.1 สปิคูล (Spicules) มีลักษณะคล้ายเปลวไอน้ำจำนวนมากพุ่งขึ้นทั่วไปในโครโมสเฟียร์ ความสูงอาจถึง 10,000 กิโลเมตรเหนือขอบดวง สปิคูลจะสว่างจ้าและหายไปในช่วงเวลา 2 ถึง 5 นาที สปิคูลถือว่าเป็นคุณสมบัติของดวงอาทิตย์ที่สงบ (Quiet Sun) ลำของสปิคูลอยู่ในแนวสนามแม่เหล็กซึ่งสนับสนุนแนวความคิดที่ว่าสปิคูลคือมวลสารที่เคลื่อนจากโครโมสเฟียร์ตอนล่างไปสู่คอโรนา และเป็นไปได้ที่จะเป็นทางสำหรับ

ส่งพลังงานลงสู่โครโมสเฟียร์ อย่างไรก็ตามแหล่งพลังงานที่สำคัญของโครโมสเฟียร์นั้น ได้มาจากการนำความร้อนจากคอโรนา กล่าวโดยสรุป สเปกตรัมจึงเป็นเสมือนท่อติดต่อกันหรือ ทางผ่านของมวลสารและพลังงานระหว่างโครโมสเฟียร์ตอนล่างกับคอโรนา (Brandt and Hodge, 1964)

2.2 แฟลควเล่ หมายถึงรอยสว่างที่ปรากฏในภาพของดวงอาทิตย์ที่ถ่ายในบรรยากาศ ชั้นโครโมสเฟียร์ แฟลควเล่ที่ปรากฏในลักษณะคล้าย ๆ กลีบรอยมันสว่างใกล้เคียงกับกลุ่มจุด เรียกว่า พลาจ แฟลควเล่เป็นกลุ่มธาตุ เช่น คัลเซียม หรือไฮโดรเจนที่ลอยอยู่ใน โครโมสเฟียร์กลุ่มที่มีอุณหภูมิสูงจะปรากฏเป็นรอยสว่าง กลุ่มที่อุณหภูมิต่ำจะปรากฏเป็นรอยมืด แฟลควเล่มีอีกชื่อหนึ่งว่า ฟิลาเมนต์ (filament) (Fredrick and Baker, 1974 และ Abetti, 1951)

2.3 โพรมิแนนซ์ มีลักษณะคล้ายเปลวไฟอยู่เหนือขอบดวงระหว่างการเกิดสุริยุปราคา เต็มดวง จะเห็นมีสีแดงสว่างจ้าท่ามกลางแสงขาวนวลของคอโรนา ในภาพถ่ายแสงสีเดียว เช่นแสงไฮโดรเจนหรือคัลเซียมของขอบดวงโพรมิแนนซ์ปรากฏเป็นลำสว่างขนาดใหญ่อาจสูงถึง หลายพันกิโลเมตร (Kaufmann, 1977) เมื่อโพรมิแนนซ์ปรากฏอยู่กลางดวงจะได้ภาพ รอยมืดลักษณะยาวคล้ายกลุ่มเมฆหมอกลอยอยู่ท่ามกลางความสว่างของโครโมสเฟียร์ เรียกว่า ฟิลาเมนต์ โพรมิแนนซ์มีหลายลักษณะ เช่น แบบระเบิด จะมีมวลสารพุ่งออกจากโครโม สเฟียร์ด้วยความเร็วสูงมากแล้วหลุดลอยไปแบบสงบ (quiescent) มีลักษณะคล้าย กองหญ้าแขวนลอยอยู่สงบนิ่งเป็นเวลานานจึงสลายตัว (Fredrick and Baker, 1974)

โพรมิแนนซ์หรืออาจเรียกว่า พวยก๊าซ นี้เกิดจากการกลั่นตัวของสสารจากชั้น คอโรนาแล้วเคลื่อนตัวลงสู่โครโมสเฟียร์ตามแนวทางสนามแม่เหล็ก มีอุณหภูมิราว 8,000 องศาเซลเซียส (สมาคมวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย, 2515)

2.4 การลุกจ้า ปรากฏเป็นบริเวณสว่างจ้าในลักษณะลูกไฟคือค่อย ๆ สว่างขึ้นจนสว่างที่สุดแล้วค่อย ๆ มอดลง อาจมีอายุ 2 - 3 นาที หรือบางครั้งซึ่งเกิดได้ยาก อาจใช้เวลา 15 นาทีจึงจะสว่างที่สุดและใช้เวลา 1 ชั่วโมงหรือกว่านั้นสำหรับการค่อย ๆ จางหายไป การลุกจ้าเกิดจากมวลสารจากไฮโดรเจนและฮีเลียมระเบิดขึ้นสู่อิออนอสเฟียร์ โดยปกติขณะเกิดการลุกจ้า จะมีคลื่นวิทยุเกิดขึ้น และคลื่นวิทยุตลอดจนอนุภาคที่เกิดจากการลุกจ้าจะเดินทางมาถึงโลกและส่งผลให้เกิดแสงเหนือแสงใต้ (Fredrick and Baker, 1974)

การลุกจ้ามักจะเกิดขึ้นในบริเวณที่เกี่ยวข้องกับจุดบนดวงอาทิตย์ จากสเปกตรัมของการลุกจ้าพบว่าสารที่เกิดการลุกจ้านั้นได้แก่ธาตุ ไฮโดรเจน ฮีเลียม คัลเซียม เหล็ก ซิลิกอน (silicon) และธาตุโลหะบางชนิดเช่น ไททาเนียม (titanium) และ สตรอนเทียม (strontium) เป็นต้น (Abetti, 1951)

3. คอโรนา

ส่วนนอกสุดของบรรยากาศของดวงอาทิตย์คือ คอโรนา มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ขณะเกิดสุริยุปราคาเต็มดวง ความสว่างประมาณครึ่งหนึ่งของดวงจันทร์เต็มดวง ลักษณะของคอโรนาที่เห็นขึ้นกับช่วงเวลาในรอบของจุด ขณะที่มีการจุดมากที่สุดจะมีรูปร่างเกือบกลม ขณะที่มีการจุดน้อยที่สุดบริเวณขั้วจะแบนลงมาเหลือแต่ในแนวบริเวณเส้นศูนย์สูตร ปัจจุบันแม้ไม่ได้เกิดสุริยุปราคาเต็มดวงก็อาจสังเกตคอโรนาได้ด้วยเครื่องคอโรนากราฟซึ่งมีส่วนบังแสงจากไฮโดรเจนและฮีเลียมแทนดวงจันทร์ (Fredric and Baker, 1974)

บรรยากาศชั้นคอโรนาแบ่งได้เป็นชั้นย่อย ๆ 3 ชั้น โดยถือเอาระยะ 1.03 เท่าของรัศมีดวงอาทิตย์เป็นระยะเริ่มต้น คอโรนาชั้นในอยู่ระหว่าง 1.03 ถึง 1.3 คอโรนาชั้นกลางอยู่ระหว่าง 1.3 ถึง 2.5 และจากระยะ 2.5 เท่าเป็นต้นไปเป็นคอโรนาชั้นนอก

แสงจากคอโรนาแบ่งได้เป็น 3 ส่วนคือ (1) เค คอโรนา (K corona) เป็นแสงต่อเนื่องเกิดจากการกระเจิงของอิเล็กตรอน (2) เอฟ คอโรนา (F corona)

เกิดจากการดิฟแฟรค (diffraction) โดยฝุ่นผงในอากาศ แสงส่วนนี้ไม่ได้มีส่วนสัมพันธ์
 ต่อคุณสมบัติทางกายภาพของคอโรนา และ (3) อี คอโรนา (E corona) ซึ่งเป็น
 แสงที่ให้เส้นสเปกตรัมเปล่งแสงของคอโรนาทั้งหมดที่มนุษย์ถ่ายภาพได้

เชื่อว่าคอโรนาเป็นชั้นของก๊าซที่ถูกไอออไนซ์มีอุณหภูมิสูงในช่วงของล้านองศาเคลวิน
 นอกจากแสงแล้วคอโรนายังให้คลื่นวิทยุออกมาอีกด้วย (Brandt and Hodge, 1964)

4. สเปกตรัมของดวงอาทิตย์

แถบสเปกตรัมที่ได้จากดวงอาทิตย์นั้นมี 2 แบบคือ สเปกตรัมที่มีเส้นมืด และ
 สเปกตรัมที่มีเส้นสว่าง แถบสเปกตรัมที่ได้จากบรรยากาศชั้นโพโตสเฟียร์ซึ่งแสงจะต้องผ่าน
 บรรยากาศชั้นที่สูงกว่านั้นเป็นแถบต่อเนื่องที่มีเส้นมืดแทรกอยู่เป็นระยะ ๆ เส้นมืดในแถบ
 สเปกตรัมนี้เรียกว่า เส้นฟรอนฮอฟเฟอร์

4.1 การเกิดเส้นฟรอนฮอฟเฟอร์ เมื่อแสงขาวจากแหล่งกำเนิดใด ๆ ผ่านกลุ่ม
 ของไอหรือก๊าซที่มีอุณหภูมิต่ำ สเปกตรัมของแสงนั้นจะปรากฏเป็นแถบต่อเนื่องมีเส้นฟรอนฮอฟเฟอร์
 แทรกอยู่ ก๊าซแต่ละชนิดจะทำให้เกิดเส้นมืดในตำแหน่งบนสเปกตรัมต่อเนื่องที่แตกต่างกันไป
 กล่าวคือ ก๊าซแต่ละชนิดจะดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นเฉพาะตัว ทำให้ความเข้มของแสง
 ในสเปกตรัมต่อเนื่องลดลง จึงปรากฏเป็นเส้นมืดท่ามกลางแถบสว่างของความยาวคลื่นอื่น

ในทำนองกลับกันเมื่อธาตุใด ๆ ได้รับความร้อนสูงพอที่จะเปล่งแสงก็จะเปล่งแสงใน
 ความยาวคลื่นเฉพาะตัว (ซึ่งมักจะมีหลายความยาวคลื่นสำหรับธาตุหนึ่ง ๆ) หากมีการถ่าย
 ภาพสเปกตรัมก็จะได้เส้นสว่างเป็นระยะ ๆ

สำหรับกรณีของกลุ่มก๊าซอยู่ในรูปของโมเลกุลสเปกตรัมที่ได้มีทั้งลักษณะของเส้นและ
 ลักษณะเป็นแถบอันเป็นผลมาจากการสั่น (vibration) หรือการหมุนของโมเลกุล

สเปกตรัมของดวงอาทิตย์ซึ่งมีเส้นมืดแทรกระหว่างสเปกตรัมต่อเนื่องนั้นก็สามารถ
 อธิบายเชิงพรรณนาได้โดยอาศัยหลักการข้างต้น กล่าวคือแสงขาวอันเป็นแสงที่ให้สเปกตรัม

ต่อเนื่องจากโฟโตสเฟียร์เมื่อผ่านเข้าไปในบรรยากาศชั้นโครโมสเฟียร์และคอโรนาจะถูกดูดกลืนด้วยธาตุที่เป็นก๊าซหรืออยู่ในภาวะของไอในบรรยากาศชั้นนั้น ๆ . เมื่อถ่ายภาพสเปกตรัมจึงปรากฏเป็นเส้นมืดในแถบต่อเนื่อง ในกรณีที่ระหว่างการถ่ายสเปกตรัมเกิดมีปรากฏการณ์ที่เปล่งแสง เช่น การลุกจ้า หรือโปรมิแนนซ์ สเปกตรัมที่ได้ก็อาจปรากฏเส้นสว่างได้เช่นกัน ความเข้มของเส้นสเปกตรัมเทียบกับแถบต่อเนื่อง ลักษณะความคมของเส้นการกว้างออกของเส้นในสเปกตรัมที่ได้จะแสดงถึงภาวะและคุณสมบัติของธาตุที่เป็นต้นเหตุให้เกิด เช่น มีความเร็ว อุณหภูมิ ภาวะของอะตอม การวิเคราะห์สเปกตรัมของดวงอาทิตย์จึงเป็นทางนำไปสู่ความรู้เกี่ยวกับฟิสิกส์ของบรรยากาศของดวงอาทิตย์ (Kaufmann, 1977)

นอกเหนือไปจากผลจากการดูดกลืนซึ่งเคอร์ซอพแสดงให้ เห็นว่าเป็นต้นเหตุให้เกิดเส้นสเปกตรัมแล้วสโตกส์ (Stokes) ยังแสดงให้เห็นอีกว่าการกระเจิง (scattering) เป็นอีกเหตุหนึ่งของการเกิดเส้นฟรอนฮอฟเฟอร์

กลไกและขั้นตอนพิจารณาได้โดยกล่าวถึงบทบาทของไฮโดรเจนไอออนลบ (negative hydrogen ion) ดังนี้ (Minneart, 1953)

ขั้นแรกเริ่มจากการตอบคำถามที่ว่า การส่งผ่านรังสี (transfer of radiation) ในบรรยากาศของดวงอาทิตย์เกิดขึ้นอย่างไรถ้ามีแต่ไฮโดรเจนไอออนลบ (H^-) เท่านั้น คำตอบคือพิจารณาโฟตอนของรังสีที่แผ่ออกตัวหนึ่งซึ่งมีความถี่ ν ซึ่งจะชนกับไฮโดรเจนไอออนลบตัวหนึ่ง และทำให้อิเล็กตรอนตัวหนึ่งหลุดออกมาด้วยความเร็ว ν แล้วอิเล็กตรอนตัวนี้จะแลกเปลี่ยนพลังงานของมันกับอิเล็กตรอนอิสระ (free electron) ตัวอื่น ๆ จากนั้นอิเล็กตรอนตัวอื่นที่มีความเร็ว ν' จะกลับรวมเข้า (recombine) กับอะตอมของไฮโดรเจน (H) และปล่อยโฟตอนออกมาด้วยความถี่ ν' ซึ่งอาจมากกว่าหรือน้อยกว่า ν ก็ได้ โดยกลไกนี้โฟตอนที่มีความถี่ทุกความถี่จะมีการแลกเปลี่ยนพลังงานกันอย่างต่อเนื่อง (continuously) ขบวนการนี้เรียกว่าการดูดกลืน (ทางความร้อน) อย่างต่อเนื่อง (continuous (thermal) absorption)

ขั้นต่อไปสมมติเอา (assume) ว่ามีเพียงก๊าซที่มีระดับอะตอม 2 ระดับ (two atomic levels) เทียบได้กับรังสีที่มีความถี่ ν ผสมอยู่กับไฮโดรเจนไอออนลบ กรณีนี้จะเกิดปรากฏการณ์ 2 ลักษณะคือ (1) โฟตอนที่มีความถี่ ν จะกระตุ้น (excite) อะตอมของก๊าซและมีการเปล่งรังสีอีกครั้งด้วยความถี่ที่เกือบเท่ากับ ν แต่ในทุกทิศทาง ขบวนการเช่นนี้จะเกิดซ้ำแล้วซ้ำอีกหลายครั้ง จึงปรากฏเป็นว่าโฟตอนมีการเคลื่อนที่เป็นระยะทางยาวด้วยเส้นทางที่ไม่สม่ำเสมอ (irregular path) (2) โฟตอนที่ได้จาก (1) ส่วนใหญ่จะชนกับไอออนของไฮโดรเจนชนิดลบ และโดยกลไกของการดูดกลืนโฟตอนเหล่านี้ จะถูกแทนโดยโฟตอนตัวอื่น ๆ ที่มีความถี่ต่างไป ผลโดยสุทธิก็คือส่วนใหญ่ของการแผ่รังสี ชนิดคลื่นสั้นเดี่ยวถูกเปลี่ยนแปลงกลายเป็นการแผ่รังสีชนิดต่อเนื่อง และนั่นก็จะมีเส้นมืดเกิดขึ้น (๗ ความถี่ของการแผ่รังสีที่ถูกเปลี่ยนให้เป็นการแผ่รังสีต่อเนื่อง)

ปรากฏการณ์ (1) เรียกว่า ขบวนการเลือกเฉพาะ (selective process) เป็นการที่แสงสีเดี่ยวถูกขวางกั้น (intercept) ปรากฏการณ์ (2) เรียกว่า การดูดกลืนต่อเนื่อง (continuous absorption) เป็นการเปลี่ยนรังสีที่มีสีเดียวให้เป็น รังสีต่อเนื่อง

การเกิดแต่ขบวนการเลือกเฉพาะเพียงอย่างเดียวไม่มีขบวนการดูดกลืนต่อเนื่อง จะไม่ทำให้มีเส้นพรอนฮอฟเฟอร์เกิดขึ้น

ขั้นต่อไปพิจารณาอะตอมตัวหนึ่งมีระดับพลังงาน 2 ระดับคือ 1 และ 2 เกิดอันตรกิริยา (interaction) กับอิเล็กตรอนอิสระจำนวนมากที่มีพลังงานแบบต่อเนื่อง (เรียกว่ามีระดับพลังงาน c) ขบวนการเลือกเฉพาะที่เกิดขึ้นซึ่งมีการดูดกลืนแสงสีเดี่ยว และต่อมาก็เปล่งแสงสีเดี่ยวที่มีความถี่ ν ในกรณีนี้จำนวนครั้งของการเกิดการดูดกลืน จะไม่เท่ากับจำนวนของการเปล่งแสง (ที่เกิดตามมา) เพราะการเปลี่ยนสถานะของ พลังงานอาจเป็น $1 - 2 - c - 1$ หรือ $1 - c - 2 - 1$ ก็ได้ จากการวิเคราะห์ ของไอน์สไตน์ จำนวนของการดูดกลืนต่อวินาทีระหว่างระดับ 1 และ 2 จะเป็น $N_1 B_{12} I_{12}$ โดยที่ N_1 คือจำนวนอะตอมที่อยู่ในระดับ 1 ต่อ ลบ.ซม.

B_{12} คือสัมประสิทธิ์ของอินส์ไตน์สำหรับการดูดกลืน (Einstein coefficient for absorption) ของระดับ 1 และ 2 สำหรับ I_{12} คือ ความเข้มของรังสี ส่วนจำนวนของการเกิดการเปล่งแสงความถี่ ν เป็น $N_2 A_{21}$ เมื่อ N_2 คือจำนวนอะตอมที่อยู่ในระดับ 2 และ A_{21} คือ สัมประสิทธิ์ของอินส์ไตน์ของการเปล่งแสงโดยตัวเอง (Einstein coefficient of spontaneous emission)

ด้วยเหตุนี้ประชากรของอะตอมทั้ง 2 ระดับจะเป็นตัวกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนและการเปล่งแสงในสมการของการส่งผ่านพลังงานและที่สุดท้ายจะแสดงการจัดเรียง (distribution) ของความเข้มของรังสีภายในเส้น

ถ้าหากมีการไอออไนซ์ (ionization) และการกลับรวม (recombination) เกิดขึ้นหลายครั้ง อิเล็กตรอนจะมีการแลกเปลี่ยนพลังงานกับอิเล็กตรอนอิสระบ่อยขึ้นและประชากรที่มีพลังงานระดับ 1 (N_1) และประชากรที่มีพลังงานระดับ 2 (N_2) จะมีอัตราส่วนที่เป็นไปตามกฎของโบลต์ซมานน์ (Boltzmann's law) กล่าวคือ

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{q_2}{q_1} \exp(-E_{12}/kT) \quad (2.1)$$

เมื่อ q_1 คือน้ำหนักทางสถิติ (statistical weight) ของระดับ 1

q_2 คือน้ำหนักทางสถิติของระดับ 2

E_{12} คือพลังงานระหว่างระดับ 1 และ 2

k คือค่าคงที่ของโบลต์ซมานน์

T คืออุณหภูมิของอิเล็กตรอนอิสระ

ความสัมพันธ์ระหว่างการเปล่งและการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น ν เขียนได้จากกฎของเคอร์ชอฟและแพลงก์ (Kirchhoff - Planck law) คือ

$$\frac{j_\nu}{k_\nu} = 4\pi B_\nu(T) \quad (\text{Aller, 1963}) \quad (2.2)$$

โดยที่ j_ν คือสัมประสิทธิ์ของการเปล่งรังสีที่ความถี่ ν

k_ν คือสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนที่ความถี่ ν

$B_\nu(T)$ คือฟังก์ชันของพลังค์ (Planck's function) สำหรับอุณหภูมิ T

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^2}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/kT_1}} \quad (\text{Aller, 1963}) \quad (2.3)$$

โดยที่ h คือค่าคงที่ของพลังค์

c คือความเร็วแสง

การเกิดปรากฏการณ์ที่แสดงได้ในรูปของสมการของเคอร์ชอฟและพลังค์

สมการ (2.2) นั้นเป็นการเกิดการดูดกลืนแบบเลือกเฉพาะ (selective absorption)

ในทางตรงกันข้ามหากไม่มีการเปลี่ยนแปลงเข้าสู่ระดับต่อเนื่อง จำนวนประชากรในแต่ละระดับพลังงานจะถูกกำหนดโดยผลรวมของการแผ่รังสีชนิดอิสระที่ความถี่ ν ทั้งหมด คือเกิดการกระเจิงแบบเลือกเฉพาะขึ้น (selective scattering) กรณีนี้อัตราส่วนระหว่างอะตอมที่มีระดับพลังงาน 2 (N_2) ต่ออะตอมที่มีระดับพลังงาน 1 (N_1) จะเป็น

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{c}{2h\nu^2} \int I_\nu d\omega \quad (2.4)$$

เมื่อ I_ν คือความเข้มของการแผ่รังสีที่ความถี่ ν

ω คือมุมตัน (solid angle)

สมการการส่งผ่านพลังงานสำหรับกรณีที่เกิดแต่การดูดกลืนแบบเลือก เฉพาะจะเป็น
ดังนี้

$$\mu \frac{dI_\nu}{dt} = \kappa_\nu I_\nu - \kappa_\nu B_\nu \quad (2.5)$$

เมื่อ μ คือ \cos (มุมระหว่างเส้นตั้งฉากกับแนวรังสี)

κ_ν คือ สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแบบเลือก เฉพาะความถี่ ν

t คือ ระยะทางที่รังสีผ่าน

สำหรับสมการของการส่งผ่านพลังงานสำหรับกรณีที่เกิดแต่การกระเจิงแบบโคฮีเรนต์
(coherent scattering) ที่ความถี่ ν จะเป็น

$$\mu \frac{dI_\nu}{dt} = \sigma_\nu I_\nu - \frac{\sigma_\nu}{4\pi} \int I_\nu d\omega \quad (2.6)$$

เมื่อ σ_ν คือ สัมประสิทธิ์ของการกระเจิงแบบเลือก เฉพาะความถี่ ν

และท้ายสุด พิจารณาว่ามีก๊าซที่มีระดับพลังงานหลายระดับกับระบบที่มีพลังงานต่อเนื่องผสมอยู่
กับไอออนของไฮโดรเจนชนิดลบ (H^-) และพิจารณาโดยเฉพาะถึงการเกิดเส้นฟรอนทอฟเฟอร์
โดยระดับพลังงานสูงระดับหนึ่ง ในกรณีนี้เช่นกัน รังสีที่มีความยาวคลื่นเดียวจะกระตุ้นอะตอม
ต่าง ๆ แล้วเปล่งรังสีออกมาอีกในทิศทางอื่น ๆ และผลสุดท้ายก็คือการเปลี่ยนรังสีสเปกตรัมไป
เป็นรังสีต่อเนื่องโดยการดูดกลืนต่อเนื่อง (continuous absorption) อิเล็กตรอนที่ถูกขับ
จากระดับพลังงานหนึ่งอาจสลับลงสู่ระดับพลังงานที่แตกต่างไป หรืออาจขึ้นไปสู่ระดับสูงกว่า
อะตอมที่มีระดับพลังงานสูงจะแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนกับอิเล็กตรอนอิสระที่มีพลังงานต่อเนื่อง
และแลกเปลี่ยนกันเองบ่อย ๆ ครั้ง ซึ่งทำให้ค่าของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนและสัมประสิทธิ์
การเปล่งแสงที่ปรากฏในสมการการส่งผ่านรังสีมีความสอดคล้องกับ การจำแนกของโบลทซ์มานน์
(Boltzmann) นี้เป็นเหตุผลที่ว่าทำไมเส้นกำทอน (resonance lines) ต่าง ๆ จึงอาจ

อธิบายได้ด้วยวิธีการกระเจิงเป็นหลัก (บวกกับการดูดกลืนแบบต่อเนื่อง) ขณะที่เส้นที่
 สว่างรองลงไป (subordinate lines) ต่าง ๆ อาจอธิบายได้โดยการดูดกลืนแบบ
 เลือกเฉพาะเป็นหลัก (บวกกับการดูดกลืนอย่างต่อเนื่อง) ทั้งนี้การดูดกลืนแบบเลือกเฉพาะ
 หรือการกระเจิงอย่างเดียวไม่อาจทำให้เกิดเส้นฟรอนฮอฟเฟอร์ได้ ต้องมีการดูดกลืนแบบ
 ต่อเนื่องด้วยจึงจะเกิดเส้นฟรอนฮอฟเฟอร์

อัตราส่วนระหว่างวิธีการกระเจิงแบบเลือกเฉพาะกับการดูดกลืนแบบเลือกเฉพาะ
 อาจประมาณได้ว่าเท่ากับเรโซ (ratio) ของโอกาส (probability) ของการ
 เปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอน (ในอะตอม) จากระดับ 2 ไปยังระดับ 1
 กับโอกาสของการดูดกลืนจากรดับ 2 ไปยังระดับที่สูงขึ้นไป จนถึงค่าที่ต่อเนื่อง (the
 continuum) กล่าวคือเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\frac{\kappa_{\nu}}{\sigma_{\nu}} = \frac{\sum B_{2x} J_{2x}}{A_{21}} \quad (2.7)$$

- เมื่อ κ_{ν} คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแบบเลือกเฉพาะที่ความถี่ ν
- σ_{ν} คือ สัมประสิทธิ์การกระเจิงแบบเลือกเฉพาะที่ความถี่ ν
- B_{2x} คือ สัมประสิทธิ์ไอน์สไตน์ของการดูดกลืนจากรดับ 2 ไปยัง
 ระดับใด ๆ (x)
- J_{2x} คือ ความเข้มของรังสีที่ทำให้เกิดการดูดกลืนจากรดับ 2 ไปยัง x
- A_{21} คือ สัมประสิทธิ์ไอน์สไตน์ของการเปล่งแสงโดยตัวเองจากรดับ 2
 ไประดับ 1

ค่าโดยประมาณบางค่าของ $\kappa_{\nu}/\sigma_{\nu}$ แสดงไว้ในตาราง 2.1

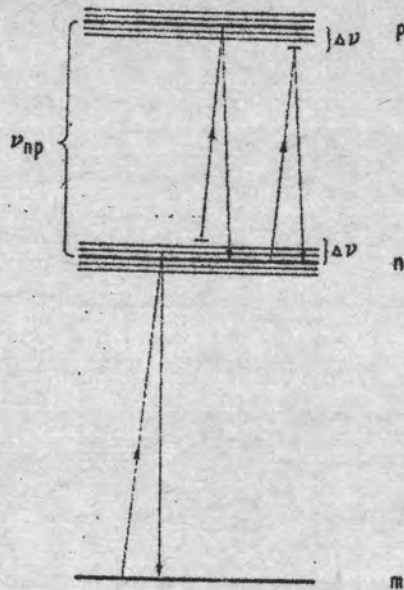
ตาราง 2.1 ค่าโดยประมาณของ κ_V/σ_V ในโฟโตสเฟียร์ จัดทำโดย
 แลบล์และก โซ. (Labs, 1951b ; Unsold, 1937) อ้างอิงโดย
 Minnaert, 1953

เส้น	κ_V/σ_V
Na $3^2P - 3^2S$	0.01
Mg $3^3P - 3^3D$	0.04
$3^3P - 4^3S$	0.02
$3^3 - 5^3S$	0.30
CaI $4^1S - 4^2P$	0.05
CaII $4^2S - 4^2P$	0.001
$3^2D - 4^2P$	0.001
FeI $d^5D - z^5D^o$	0.15
$a^5F - y^5F^o$	0.6
H_α	0.06 - 0.08

3^3p อยู่ในภาวะเมตา
 สเตเบิล (Metastable)
 3^2D อยู่ในภาวะเมตาสเตเบิล

อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์ขบวนการกระเจิง พบว่ามันเป็นสาเหตุให้เกิดการ
 เตือนความยาวคลื่นซึ่งแสดงว่าการกระเจิงไม่ได้เกิดขึ้นอย่างโคฮีเรนท์ นอกจากนี้ยังมีการ
 หน่วงการแผ่รังสี (radiation damping) เนื่องจากการกว้างออกของระดับพลังงานใน
 อะตอม เสมือนว่ามีระดับย่อย ๆ อยู่ด้วย เพราะว่าถ้าระดับพลังงานพื้นฐาน
 (fundamental level) ไม่ถูกหน่วง (damped) ระดับนี้จะเป็นระดับคม (sharp)

ระดับเทียบ ในทางตรงกันข้ามอิเล็กตรอนตัวหนึ่งในระดับย่อยระดับหนึ่งของระดับพลังงาน n ซึ่งดูดกลืนรังสีความถี่เดียวบริสุทธิ์ที่มีความถี่ $\nu_{np} + \Delta\nu$ จะขึ้นไปอยู่ในระดับย่อยระดับหนึ่งของ p แต่ไม่จำเป็นจะต้องกลับลงมาสู่ระดับย่อยเบื้องต้น ไวซ์คอฟฟ์ (Weisskopf) แสดงให้เห็นว่าการดูดกลืนจะเกิดขึ้นพร้อม ๆ กันใน 2 วิธี และในการเปล่งแสงจะมีเส้นคู่เกิดขึ้น องค์ประกอบสองส่วนนี้ซึ่งเทียบได้กับความถี่ ν_{np} และ $\nu_{np} + \Delta\nu$ จะถูกทวน



รูป 2.2 การเกิดการกระเจิงแบบไมโคฮิเรท หรือการเกิดเส้นคู่ไวซ์คอฟฟ์

อย่างไรก็ตามผลของการชนกัน (collision) ของประชากรในระดับย่อยต่าง ๆ ทำให้เป็นไปได้ที่การเกิดเส้นคู่ไวซ์คอฟฟ์ (Weisskopf doublet) ไม่อาจเกิดได้ แต่เกิดการแจกแจงใหม่อย่างสมบูรณ์ (complete redistribution) ของอิเล็กตรอนตลอดทั้งหมดของระดับย่อยขึ้นแทน ซานสตรา (Zanstra) ได้แสดงให้เห็นว่า ก๊าซที่เส้นฟอนฮอฟเฟอร์ที่ใกล้ขอบดวงไม่มี การโพลาไรซ์ (polarization) แสดงว่ามีการแจกแจงใหม่อย่างสมบูรณ์เกิดขึ้นและส่งผลมากกว่า การเกิดเส้นคู่ของไวซ์คอฟฟ์ กระนั้นก็ตามการชนกันก็ทำให้ระดับพื้นฐานกว้างออก ดังนั้น เส้นก้ำทอน

(resonance lines) จึงกว้างออกเช่นเดียวกับเส้นอื่น ๆ ออร์ทมานน์และพริงสไฮม์ (Orthmann and Pringsheim ; อ้างอิงโดย Minnaert, 1953) ทดลองพบว่า เมื่อรังสีความยาวคลื่นเดียวส่องกระทบก๊าซโดยความถี่ของรังสีพอดีกับระดับพลังงานในอะตอม ก๊าซนั้นจะเปล่งอีกครั้งด้วยรังสีที่มีลักษณะโพรไฟล์ (profile) ที่กำหนดโดยการชนกันของอะตอมของก๊าซนั้นอย่างเต็มที่

เพื่อให้เข้าใจถึงความหมายโดยสังเขปของ "การแจกแจงใหม่อย่างสมบูรณ์" จะสมมติเอาว่าฟังก์ชันของแหล่ง (source function) J_ν เป็นค่าคงที่เท่ากับตลอดความกว้างของเส้น (กำหนดว่า ฟังก์ชันของแหล่งเท่ากับสัมประสิทธิ์ของการเปล่งหารด้วยสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืน ; Brandt and Hodge, 1964) และให้มีเฉพาะการกระเจิงเกิดขึ้นเท่านั้น ดังนั้นทุก ๆ ช่วงความถี่หนึ่ง ๆ การเปล่งแสง (ϵ_ν) จะเท่ากับการดูดกลืน คือ

$$\epsilon_\nu = \sigma_\nu J \quad (2.7)$$

ต่อไปถ้าหาก J_ν แปรค่าตลอดช่วงความกว้างของเส้น สมมติว่า ϵ_ν ยังคงเป็นส่วนกับ σ_ν จะได้ว่า

$$\epsilon_\nu = j \sigma_\nu \quad (2.8)$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$j = \frac{\int J_\nu \sigma_\nu d\nu}{\int \sigma_\nu d\nu} \quad (2.9)$$

แทนค่า j จาก (2.9) ลงใน (2.8) จะได้

$$\epsilon_\nu = \sigma_\nu \frac{\int J_\nu \sigma_\nu d\nu}{\int \sigma_\nu d\nu} \quad (2.10)$$

ซึ่งจะทำให้สมการการส่งผ่านพลังงานสำหรับเฉพาะกรณีนี้ได้เป็น

$$\mu \frac{dI_v}{dt} = \sigma_v I_v - \frac{\sigma_v \int J_{v'} \sigma_{v'} dv'}{\int \sigma_{v'} dv'} \quad (2.11)$$

สรุปเมื่อพิจารณาการเกิดเส้นฟรอนฮอฟเฟอร์ซึ่งมีการดูดกลืนแบบสม่ำเสมอ การดูดกลืนแบบเลือกเฉพาะและการกระเจิงโดยมีการแจกแจงใหม่อย่างสมบูรณ์ สมการการส่งผ่านพลังงานจะได้เป็น

$$\mu \frac{dI_v}{dt} = (k + \kappa_v + \sigma_v) I_v - \sigma_v \frac{\int J_{v'} \sigma_{v'} dv'}{\int \sigma_{v'} dv'} - (k + \kappa_v) B_v \quad (2.12)$$

เมื่อพิจารณาจากสมการ (2.12) จะพบว่า การเกิดเส้นฟรอนฮอฟเฟอร์เกิดขึ้นจากผลรวมของ ปรากฏการณ์หลัก 2 อย่างคือ การดูดกลืนและการกระเจิงโดยมีอัตราส่วนที่แปรไปตามเส้นต่าง ๆ โดยที่การกระเจิงเกิดแบบไมโคฮีเรนท์ที่มีการแจกแจงใหม่อย่างสมบูรณ์

4.2 การกว้างออกของเส้นฟรอนฮอฟเฟอร์ มีเหตุสำคัญมาจากการกว้างออกของค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนซึ่งขยายค่าออกไปในช่วงของความถี่หนึ่ง อันมีสาเหตุพอสรุป 6 ประการด้วยกันคือ (1) คอปเปิลอร์เอฟเฟ็คของการเคลื่อนที่เนื่องจากความร้อน (Doppler effect of thermal motion) มีการแจกแจงสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนไปตามกฎเกณฑ์ซึ่งกำหนดโดยส่วนแยกของความเร็วของอะตอมก๊าซในแนวสายตาของผู้สังเกตการณ์ หรือโดยอุณหภูมิของก๊าซ ปริมาณที่ใช้กำหนดในสมการเรียกว่า ความกว้างคอปเปิลอร์ (Doppler width) (2) ความปั่นป่วน (turbulent motion) ของก๊าซในบรรยากาศของดวงอาทิตย์ ความเร็วในแนวสายตาของความปั่นป่วนจะเพิ่มความกว้างคอปเปิลอร์ ความปั่นป่วนไม่ขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุล (molecular weight) ของก๊าซ ดังในกรณี

การเคลื่อนที่เนื่องจากความร้อน (3) การหน่วงการแผ่รังสี เกิดจากการเคลื่อนที่ที่มีความเร็วของอิเล็กตรอนและเสียพลังงานโดยการแผ่รังสี ในทฤษฎีควอนตัม (quantum theory) อธิบายว่าเกิดจากความกว้างที่แน่นอนของระดับพลังงานในอะตอม การหน่วงการแผ่รังสีของเส้นสเปกตรัมหนึ่ง ๆ จะเป็นผลบวกของการหน่วงที่ระดับเริ่มต้นและระดับสุดท้าย ผลคือทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเกิดกว้างออก (4) การหน่วงโดยการชน (collision damping) เกิดจากการชนกันของอะตอมที่ทำให้เกิดการขัดขวางการชนครั้งต่อ ๆ ไป สาเหตุนี้ต่อสเปกตรัมของดวงอาทิตย์อาจกล่าวได้ว่ามีน้อย (5) การกว้างออกเนื่องจากความดัน (pressure broadening) หรือการกว้างออกทางสถิติ (statistical broadening) เป็นผลจากการชนกัน (ซึ่งทำให้มีความดัน) ของก๊าซแต่โดยที่ก๊าซอยู่ในสภาวะสมดุล (แม้ชั่วขณะ) และ (6) ผลจากโครงสร้างไฮเปอร์ไฟน์และไอโซโทป (hyperfine structure and isotope effect) กล่าวคือ มีการแยกออก (splitting) ของเส้นเนื่องจากนิวเคลียสสปิน (nuclear spin) หรือความแตกต่างระหว่างอะตอมที่มีไอโซโทปต่าง ๆ กันที่เป็นองค์ประกอบของบรรยากาศของดวงอาทิตย์

5. องค์ประกอบของบรรยากาศของดวงอาทิตย์

จากการศึกษาสเปกตรัมของดวงอาทิตย์เปรียบเทียบกับสเปกตรัมของธาตุต่าง ๆ ในห้องทดลอง มัวร์ (C.E. Moore) สรุปเกี่ยวกับธาตุที่ปรากฏในบรรยากาศของดวงอาทิตย์ดังนี้

มี 50 ธาตุที่พบโดยทั่วไป มีสัญลักษณ์ดังนี้ H, He, Be, C, N, O, Na, Mg, Al, Si, P, S, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, Sr, Y, Zr, Nd, Mo, Ru, Rh, Pd, Ag, Sn, Sb, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Tm, Yb, Lu, Hf, W, Os, Ir, Pt, และ Pb

มี 3 ธาตุพบเพิ่มในจุด คือ Li, Rb, และ In

มี 2 ธาตุพบในรูปของสารประกอบคือ B และ F คืออยู่ในรูปของสารประกอบ BH, MgF และ SrF

มี 4 ธาตุที่ปรากฏให้เห็นเพียงสเปกตรัมเส้นเดียว คือ Ar, Cd, Au และ Th

มี 3 ธาตุที่พบด้วยความคาดไม่ถึงคือ Tb, Er และ Ta

นอกจากนี้แม้ว่าจะระบุว่าธาตุสังเคราะห์ (Synthesis Element) ไม่อาจพบได้ในบรรยากาศดวงอาทิตย์ (Abetti, 1951)

ค่าที่น่าสนใจนอกเหนือไปจากธาตุที่ปรากฏคือ ปริมาณที่มีอยู่ (abundance) ของธาตุซึ่งวิเคราะห์จากโค้งแห่งการเจริญเติบโต (curve of growth) ซึ่งได้จากการเขียนกราฟระหว่างความกว้างสมมูลต่อความยาวคลื่น (w_λ/λ) กับ $g_i N_i f_{ij}$ เมื่อ g_i เป็นค่าน้ำหนักทางสถิติของระดับพลังงาน (statistical weight of the level) N_i คือจำนวนสัมพัทธ์ของอะตอมที่ดูดกลืน (relative number of absorbing atoms) และ f_{ij} คือความเข้มของการกักแกว่ง (oscillator strength)

ตารางที่ 2.2 เป็นตารางแสดงค่าปริมาณที่มีอยู่ของธาตุบางธาตุ โดยเปรียบเทียบกับธาตุไฮโดรเจน โดยใช้ค่าลอการิทึม 10 ของจำนวนอะตอมของธาตุหารด้วยจำนวนอะตอมของไฮโดรเจน $\log (N_{EL}/N_H)$ เป็นผลงานของ โกลด์เบิร์ก, มุลเลอร์ และแอลเลอร์ (Goldberg, Muller and Aller)

ตารางที่ 2.2 ปริมาณที่มีอยู่ของธาตุบางธาตุในบรรยากาศดวงอาทิตย์

ธาตุ	$\log(N_{El}/N_H)$	ธาตุ	$\log(N_{Fl}/N_H)$
H	12.00	O	8.96
Li	0.96	Na	6.30
Be	2.36	Mg	7.40
C	8.72	Al	6.20
N	7.98	Si	7.50
P	5.34	Ge	3.29
S	7.30	Rb	2.48
K	4.70	Sr	2.60
Ca	6.15	Y	2.25
Se	2.82	Zr	2.23
Ti	4.68	Nb	1.95
V	3.70	Mo	1.90
Cr	5.36	Ru	1.43
Mn	4.90	Rh	0.78
Fe	6.57	Pd	1.21
Co	4.64	Ar	0.14
Ni	5.91	Cd	1.46
Cu	5.04	In	1.16
Zn	4.40	Sn	1.54
Ga	2.36	Sb	1.94
		Ba	2.10
		Yb	1.53
		Pb	1.33

(ที่มา Brandt and Hodge, 1964)

จากตาราง 2.2 จะเห็นว่าไฮโดรเจนมีมากที่สุด รองลงมาได้แก่ ออกซิเจน , คาร์บอน ฯลฯ ส่วนธาตุที่มีน้อยที่สุดคือ อาร์กอน (Argon)

อย่างไรก็ตามค่าที่ได้นี้ยังคงมีความแตกต่างกันกับของงานของนักฟิสิกส์ดาราศาสตร์อื่น ๆ ยกเว้นค่าของไฮโดรเจนที่กำหนดให้เท่ากับ 12.00 ส่วนฮีเลียมไม่มีอยู่ในตารางเนื่องจากไม่มีเส้นสเปกตรัมที่เหมาะสมสำหรับใช้วิเคราะห์ (Brandt and Hodge, 1964)