บทที่ 2

แสง อะตอม โมเลกุล : บรรยากาศชั้นบน

(Light Atom Aolecule : Upper Atmosphere)

2.1 กฎของไอน์สไตน์และฟิสิกส์แผนใหม่

2.2 แสง อะตอม และโมเลกุล

2.3 ออกซิเจน และโอโซน

2.3.1 แก๊สคลอโรฟลูออโรคาร์บอนและการทำลายโอโซนในบรรยากาศ

2.4 โครงสร้างของชั้นบรรยากาศในแนวดิ่ง

2.5 ชั้นไอโอไนสเฟียร์ และคลื่นวิทยุ

2.6 แสงออโรรา

2.7 การแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์

2.7.1 คุณสมบัติของพลังงานแสงที่แผ่ออก

2.7.2 การส่งผ่าน การดูดกลืน และการสะท้อน

2.7.3 การกระเจิง

ในชั้นบรรยากาศเบื้องบนนั้นประกอบด้วยชั้นของไอโซนที่คอยปกป้องเราจากอันตรายของแสงอุลตราไวโอเล็ตคลื่นสั้นที่มาจากดวงอาทิตย์ ในบทนี้เราจะกล่าวถึงการเกิดของไอโซนและการสลายตัวด้วยแสงอาทิตย์ การวิเคราะห์จะเริ่มต้นด้วยกฎที่ค้นพบโดย แอลเบิร์ตไอน์สไตน์ ซึ่งจะอธิบายถึงปฏิกริยาของแสงที่มีต่ออะตอมหรือโมเลกุล จากกฎโดยทั่วไปนี้เราจะไม่เรียนรู้แต่ไอโซนเพียงอย่างเดียว แต่จะรู้ถึงปรากฏการณ์ที่เรียกว่า แอร์โกร (airglow) ออโรร่า ไอโอไนสเฟียร์ และชั้นอื่น ๆ ของบรรยายกาศอีกด้วย

2.1 กฎของไอน์สไตน์ และฟิสิกส์แผนใหม่

การค้นพบของไอสไตน์ เป็นการอธิบายถึงปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (photoelectric effect) ซึ่งกล่าวว่าแสงไม่ได้เป็นแต่คลื่นอย่างเดียวแต่ยังมีลักษณะเหมือนกับลำธารของอนุภาคเล็ก ๆ (stream of tiny particles) อีกด้วยเมื่อมันชนกับวัตถุที่เป็นของแข็งเช่นอะตอมเป็นต้น

ไอสไตน์พบว่าพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งรวมทั้งแสงด้วยนั้นขึ้นกับความยาวของคลื่น โดยความจริงแล้วความยาวของคลื่นยิ่งสั้นพลังงานของคลื่นแสงจะยิ่งมาก

พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มักแสดงในหน่วยของ electron volt (eV) ค่าของ eV เป็นค่าที่น้อย สมมุติว่าเรายกน้ำหนัก 1 n.n. ขึ้นไปสูง 1 เมตร จำนวนพลังงานที่ใช้จะมีค่า 10 จูล หรือประมาณเท่ากับ

$$6.25 \times 10^{19} \quad \text{electron volt}$$

หรือ 1 eV จะเท่ากับ 1.6×10^{-19} joule นั่นเอง

จากกฎของไอสไตน์เขียนเป็นสูตรได้ว่า

$$E = h\nu$$

หรือ $E = h\frac{c}{\lambda}$ จูล (เมื่อ $\nu = \frac{c}{\lambda}$)

เมื่อ c = ความเร็วของแสง

λ = ความยาวของคลื่นแสง

เนื่องจาก $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19}$ joule

เพราะฉะนั้น $1 \text{ J} = \frac{1}{1.6 \times 10^{-19}}$ eV

ดังนั้นสมการของไอสไตน์จะจะเปลี่ยนเป็น

$$E = \frac{hc}{\lambda \times 1.6 \times 10^{-19}} \text{ eV}$$

เมื่อ h □ Planck's Constant. = 6.63×10^{-34} joule-set

c = ความเร็วของแสง $= 3 \times 10^{8}$ m/sec

λ = ความยาวของคลื่นแสง

โดยการแทนค่าลงในสมการจะได้

$$E = \frac{(6.63 \times 10^{-34} \text{ joule-sec})(3 \times 10^{8} \text{ m/sec})}{(1.6 \times 10^{-19} \text{ joule/eV})\lambda}$$

$$= \frac{12.5 \times 10^{-7}}{\lambda} \text{ eV}$$

แต่ $1\ \mu = 10^{-6}$ m ดังนั้นสูตรของไอน์สไตน์คือ

$$E = \frac{1.25}{\lambda} \text{ eV} \quad (\text{เมื่อ } \lambda \text{ มีหน่วยเป็นไมครอน})$$

ตัวอย่างที่ 2.1

จงหาพลังงานของความยาวคลื่นแสงสีแดง

ข้อมูล : คลื่นแสงสีแดงมีความยาวคลื่นประมาณ 0.7 ไมครอน (μ)

จากสูตร

$$E = \frac{1.25}{\lambda}$$

เพราะฉะนั้น $E = \frac{1.25}{0.70}$

$E = 1.79$ eV สำหรับคลื่นแสงสีแดง

ตัวอย่างที่ 2.2

จงหาพลังงานของความยาวคลื่นแสงสีม่วง

ข้อมูล : แสงสีม่วงมีความยาวคลื่นประมาณ 0.4 ไมครอน

จากสูตร

$$E = \frac{1.25}{\lambda}$$

$$E = \frac{1.25}{0.40} \text{ eV}$$

$E = 3.13$ eV สำหรับคลื่นแสงสีม่วง

ตัวอย่างที่ 2.3

คลื่นแสงชนิดใดระหว่างอัลตราไวโอเล็ต และอินฟราเร็ดที่มีพลังงานมากกว่ากัน

เนื่องจากความยาวของคลื่นแสงเป็นตัวหาร เมื่อตัวหารมีค่ามากค่าที่ได้จะน้อยลง ดังนั้นคลื่นแสงยิ่งยาว พลังงานก็จะน้อยลง (ระหว่างคลื่นอินฟราเรด และคลื่นอัลตราไวโอเล็ต คลื่นอินฟราเร็ดจะยาวกว่า ดังนั้นคลื่นอินฟราเร็ดมีพลังงานน้อยกว่า)

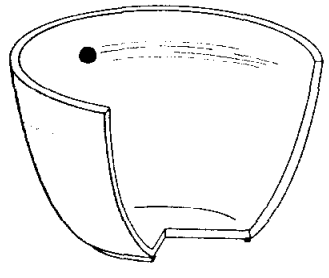
2.2 แสง อะตอมและโมเลกุล

บางทีเราอาจคิดว่าสูตรของไอสไตน์เกี่ยวข้องกับอุตุนิยมวิทยาน้อยมากความจริงแล้วสูตรนี้เป็นสูตรที่สำคัญของอุตุนิยมวิทยาแม้ว่าจะไม่ได้นำมาใช้ในการพยากรณ์อากาศโดยตรงก็ตาม

ดวงอาทิตย์จะแผ่รังสีออกมาทุกความยาวคลื่น แต่จะแผ่รังสีที่มองเห็นได้ด้วยความเข้มมากที่สุด ประมาณ 9% ของรังสีดวงอาทิตย์ประกอบด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต เนื่องจากแสงนี้มีความยาวลคลื่นแสงค่อนข้างสั้น ดังนั้นจึงมีพลังงานมาก และสามารถทำให้อะตอมและโมเลกุลแตกตัวได้

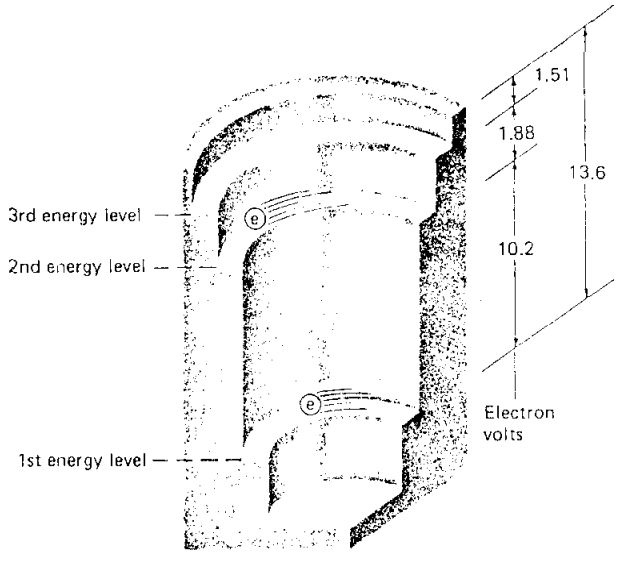
ร่างกายของเราเกิดจากอะตอมและโมเลกุลเช่นเดียวกัน คลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นมากพอ สามารถแยกโมเลกุลในร่างกายเราได้ซึ่งจะทำให้เกิดมะเร็งหรือตายได้ คลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นจากดวงอาทิตย์จะมาถึงยอดของบรรยากาศและอัลตราไวโอเล็ตที่เป็นอันตรายจะถูกดูดกลืนโดยแก๊สในชั้นบรรยากาศเบื้องบนและจะเหลือส่วนที่ไม่เป็นอันตรายมาถึงพื้นดินเท่านั้น

ในปี ค.ศ. 1913 นิลส์ โบร์ (Niels Bohr) ได้ค้นพบว่าอีเล็กตรอนต่าง ๆ สามารถมีแต่ละออบิทล์โดยเฉพาะ ที่จะใช้ในการหมุนรอบนิวเคลียส (ออบิทล์เหล่านี้บางครั้งรู้จักในชื่อของเชลล์) ความประหลาดของธรรมชาติของการจำกัดการอนุญาตให้อิเล็กตรอนอยู่ในแต่ละออบิทล์สามารถแสดงได้ง่าย ๆ ดังนี้ ถ้าเรากลิ้งก้อนหินกลมรอบ ๆ ภายในชามอ่าง ก็จะสามารถทำให้ก้อนหินอยู่ที่ออบิทล์ใดก็ได้เพียงแต่ปรับความเร็วเท่านั้น นั่นคือเป็นการปรับพลังงานของก้อนหินนั่นเอง ถ้าเราเพิ่มพลังงานขึ้นเล็กน้อยในก้อนหินมันก็จะเลื่อนสูงขึ้นไปข้างบนชามอ่าง และถ้าเราเพิ่มพลังงานมากไปก้อนหินก็จะหมุนหลุดออกไปจากชามอ่าง(ดูรูป 2.1)



รูป 2.1 ก้อนหินสามารถหมุนรอบชามอ่างที่ความสูงใด ๆ ก็ได้

แต่ตามความเป็นจริงของการที่อิเล็กตรอนหมุนรอบออบิทส์จะไม่เป็นอิสระอย่างที่กล่าวแล้ว เราต้องเพิ่มพลังงานที่มีจำนวนแน่นอนลงในอิเล็กตรอนเพื่อที่จะเปลี่ยนออบิทส์ของอิเล็กตรอนและจะไม่มีออบิทส์ที่เกิดขึ้นในกึ่งกลาง และถ้าไม่เพิ่มพลังงานที่มีจำนวนแน่นอนลงในอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนก็จะไม่ยอมรับพลังงานใด ๆ ที่จะทำให้เลื่อนจากออบิทส์หนึ่งไปยังอีกออบิทส์หนึ่ง (ดูรูป 2.2)



รูป 2.2 อิเล็กตรอนสามารถหมุนรอบอะตอมในออบิทส์ที่อนุญาติ (permitted orbits) เฉพาะออบิทส์หนึ่ง ๆ เท่านั้น รูปนี้แสดงถึงออบิทส์บางออบิทส์ในไฮโดรเจนอะตอมและพลังงานที่ต้องการในการเปลี่ยนออบิทส์

ในกรณีที่เราใส่พลังงานลงไปมากเพียงพอ เช่นใส่พลังงานลงไป 10.2 eV ก็จะสามารถยกให้อิเล็กตรอนของไฮโดรเจนอะตอมในเชลล์ที่ 1 ซึ่งอยู่ต่ำสุดให้เลื่อนไปอยู่ในเชลล์ที่ 2 ได้ (ถ้าค่าน้อยกว่า 10.2 eV ก็ไม่สามารถทำให้อิเล็กตรอนเลื่อนขึ้นไปได้) และถ้าจะให้อิเล็กตรอนหลุดออกไปจากเชลล์ที่ 1 ออกไปนอกไฮโดรเจนอะตอมนั้น ต้องใช้พลังงานอย่างน้อย 13.6 eV

กฎที่สำคัญก็คืออิเล็กตรอนพยายามเลื่อนลงไปอยู่ในเชลล์ที่ 1 เสมอเท่าที่มันสามารถทำได้ อย่างไรก็ตามในแต่ละเชลล์ของอะตอมจะมีอิเล็กตรอนจำนวนที่แน่นอนเท่านั้นที่อนุญาติให้อยู่ได้ ตัวอย่างเช่นมีอิเล็กตรอนจำนวน 2 ตัวเท่านั้นที่อยู่ในเชลล์ที่ 1 ซึ่งเป็นเชลล์ที่อยู่วงในสุด ถ้าหากอิเล็กตรอนของวงในสุดว่างลงอิเล็กตรอนที่อยู่วงนอกจะตกลงมาอยู่ในที่ซึ่งว่างนั้นทันที

เมืออิเล็กตรอนตกจากวงทีสูงลงมายังวงทีต่ำกว่า มันจะสูญเสียจำนวนพลังงานเท่ากับที่มันได้รับเมื่อยกขึ้นจากวงใน พลังงานนี้จะถูกปล่อยออกมาและออกไปจากอะตอม

ถ้าหากเราต้องการที่จะยกอิเล็กตรอนให้ไปอยู่ในวงถัดไป หรือแม้แต่ชนให้อิเล็กตรอนหลุดกระเด็นออกจากอะตอมสามารถทำได้โดยการใส่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าลงไปในปริมาณของพลังงานที่พอเหมาะ และในทางกลับกันเมื่ออิเล็กตรอนตกลงมายังวงในมันจะปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในปริมาณที่พอเหมาะออกเช่นเดียวกัน

เมื่ออิเล็กตรอนถูกชน (knock) หลุดออกจากอะตอมเราเรียกว่ามันถูกไอออนไนส์ (ionized) ตัวไอออนส์ก็คืออะตอมที่อิเล็กตรอน 1 ตัวหรือมากกว่าถูกแยกหลุดออกไป

ตัวอย่างที่ 2.4

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดไดถูกส่งออกมาเมื่ออิเล็กตรอนให้ไฮโดรเจนอะตอมตกจากพลังงานระดับที่ 2 ลงมายังพลังงานระดับที่ 1

ข้อมูล : จากรูป 2.2 มันจะส่งพลังงานออกมา 10.2 electron volts

จากสมการของไอสไตน์

$$E = \frac{1.25}{\lambda}$$

แทนค่า

$$10.2 = \frac{1.25}{\lambda}$$

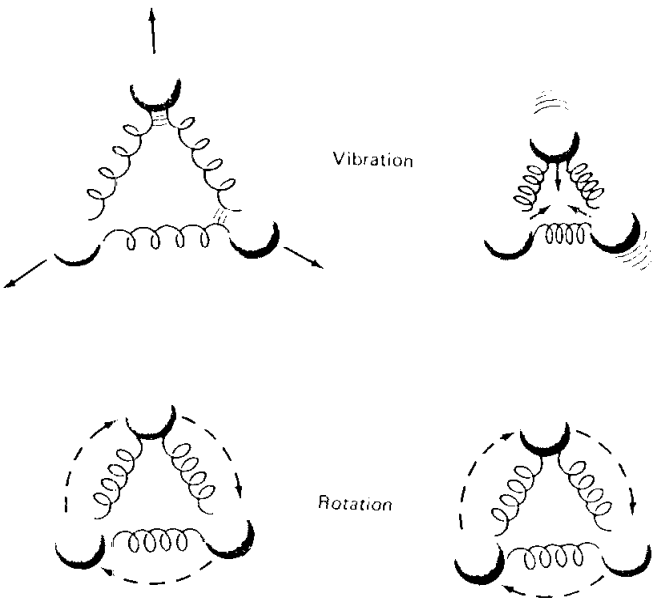
เพราะฉะนั้น $\lambda = \frac{1.25}{10.2}$ ไมครอน

$= 0.123$ ไมครอน

นี่คือความยาวของคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ต

ได้มีการพบว่าดวงอาทิตย์จะแผ่รังสีที่มีความยาวคลื่น 0.123 μ ออกมาเป็นจำนวนมากและทำให้นักวิทยาศาสตร์สรุปได้ว่าดวงอาทิตย์จะต้องมีจำนวนไฮโดรเจนอยู่เป็นจำนวนมากมายเช่นกัน

ความรู้ที่เกี่ยวกับอะตอมก็สามารถใช้ได้กับโมเลกุลเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามเนื่องจากโมเลกุลประกอบด้วยกลุ่มของอะตอม ดังนั้นพฤติกรรมก็ยิ่งยุ่งยากมากขึ้น อิเล็กตรอนในโมเลกุล สามารถเปลี่ยนออบิทส์เช่นเดียวกับในอะตอมนอกจากนี้โมเลกุลสามารถหมุน (rotate) หรือสั่นสะเทือน (vibrate) (ดูรูป 2.3) และเมื่อพลังงานที่พอเหมาะถูกเพิ่มเข้าไปในโมเลกุล มันอาจจะทำให้โมเลกุลหมุนมากขึ้น สั่นสะเทือนมากขึ้นหรือเปลี่ยนออบิทส์อินเล็กตรอน



รูป 2.3 การหมุน และการสั่นสะเทือนของโมเลกุล

ตัวหนึ่งในโมเลกุลก็ได้ และถ้าความยาวคลื่นแสงสั้นเพียงพอ มันสามารถทำให้อะตอมในโมเลกุลนั้นสะเทือนอย่างรุนแรง และทำให้โมเลกุลแยกออกจากกัน การแยกกันของโมเลกุลโดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเรียกว่า โฟโตดิสโซสิเอชั่น (photodissociation) และเมื่ออิเล็กตรอนถูกแยกออกจากอะตอมหรือโมเลกุลโดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเราเรียกว่าเป็นการ โฟโตไอออนไนส์ (photoionized) ถ้าโมเลกุลของอากาศชั้นบนไม่ได้ถูกแยกออกจากกันโดยคลื่นสั้นจากดวงอาทิตย์ แล้วโมเลกุลในร่างกายของคนเราก็จะถูกแสงอาทิตย์ทำให้แยกออกจากกันแทนนั่นเอง

2.3 ออกซิเจนและโอโซน (Oxygen and Ozone)

ออกซิเจนโมเลกุล (O_2) นั้นประกอบด้วยออกซิเจน 2 อะตอมและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานเพียง 5.12 electron volts ก็สามารถทำให้ออกซิเจนโมโลกุลแยกออกเป็น 2 อะตอมได้

จากสมการของไอสไตน์

$$E = \frac{1.25}{\lambda}$$

แทนค่า

$$5.12 = \frac{1.25}{\lambda}$$

เพราะฉะนั้น $\lambda = \frac{1.25}{5.12}$

$= 0.244$ ไมครอน

ดังนั้นออกซิเจนถูกแยกออกจากกันด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต (ซึ่งอาจจะมีคลื่นสั้นกว่า 0.244 μ ก็ได้)

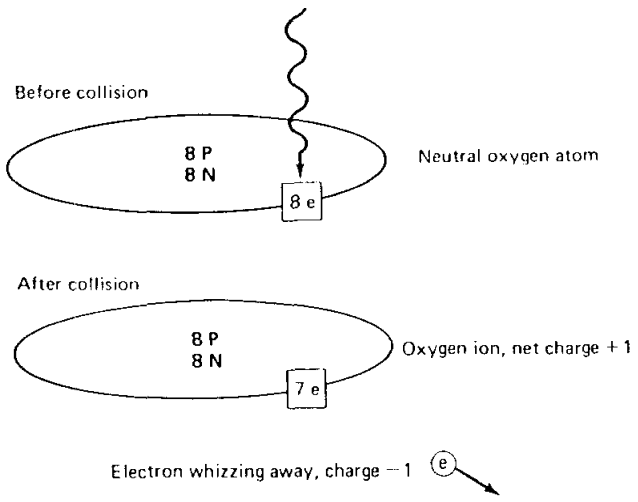
อะตอมและโมเลกุลต่าง ๆ จะถูก ไฟโตไอออนไนส์ (photoionized) และแยกออกจากกันในระหว่างเวลากลางวันด้วยแสงอาทิตย์ และจะรวมตัวกลับในเวลากลางคืนซึ่งจะปล่อยแสงออกมา ในเวลากลางคืนแสงจำนวนมากจะเกิดขึ้นที่ความสูงประมาณ 80 กิโลเมตร และเรียกว่า airglows

ที่ความสูงประมาณ 65 ถึง 115 กิโลเมตรในชั้นบรรยากาศเบื้องบน ออกซิเจนโมเลกุลจะกั้นแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นระหว่าง 0.1 ถึง 0.2μ ออกไปได้ แต่การกั้นนี้ O_2 ต้องแยกตัวออกเป็นออกซิเจน 2 อะตอม และสำหรับคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่า 0.1 ไมครอนจะมีพลังงานสูง และเป็นอันตรายต่อมนุษย์เรามาก อย่างไรก็ตามอะตอมมิคออกซิเจน (O) ที่ความสูงเหนือ 100 กิโลเมตร จะเป็นผู้ป้องกันเอาไว้โดยการ ไฟโตไอออนไนส์ (photoionization) ดังในรูป 2.4

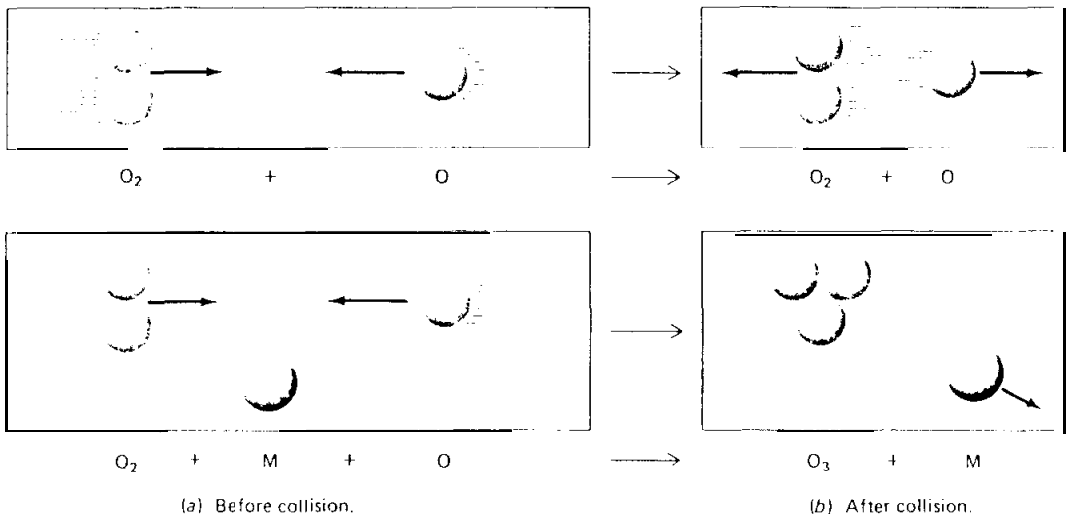
ออกซิเจนไอออนส์ และไอออนส์ของอะตอมอื่น ๆ และอิเล็กตรอนจะพบในบรรยากาศที่สูงกว่า 90 กิโลเมตรเหนือพื้นผิวโลก ดังนั้นบริเวณนี้จึงเรียกว่าไอโอโนสเฟียร์ (ionosphere) ซึ่งมีความสำคัญต่อการสะท้อนคลื่นวิทยุในบรรยากาศ

ที่กล่าวมาแล้วความยาวคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ตระหว่าง 0.1 ถึง 0.2 ไมครอนได้ถูกกั้นเอาไว้ แต่ก็ยังมีคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ตที่เป็นอันตรายระหว่าง 0.2 - 0.3 ไมครอนที่ยังไม่ได้กล่าวถึง ซึ่งความยาวคลื่นขนาดนี้ทั้ง O และ O_2 ไม่สามารถถูกกลืนเอาไว้ได้ จะมีก็แต่โอโซน (O_3) ซึ่งสามารถดูดกลืนคลื่นขนาดนี้เอาไว้ได้ ดังนั้นเรามาพิจารณาว่าโอโซนเกิดขึ้นในบรรยากาศได้อย่างไร

โดยปกติแล้วออกซิเจนอะตอมมีความว่องไวในการรวมตัวกับออกซิเจนอะตอมอื่นเพื่อก่อตัวเป็นออกซิเจนโมเลกุล แต่ในบรรยากาศนั้นมีออกซิเจนอะตอมน้อยกว่าออกซิเจนโมเลกุล ดังนั้นออกซิเจนอะตอมจะไปชนกับออกซิเจนโมเลกุลกลายเป็นโอโซน (O_3) ขึ้นมาแทน ในการชนกันนี้จะต้องมีโมเลกุลที่เป็นกลาง (M) ร่วมอยู่ด้วยเสมอ เพราะเมื่อ O ชนกับ O_2 โดยตรงนั้นจะมีพลังงานมากเกินไปที่จะร่วมกันได้ นอกจากจะมีโมเลกุลที่สามร่วมอยู่ด้วยในการชน ซึ่งโมเลกุลที่เป็นกลางนี้จะนำเอาพลังงานที่เกินออกไป (ดูรูป 2.5)



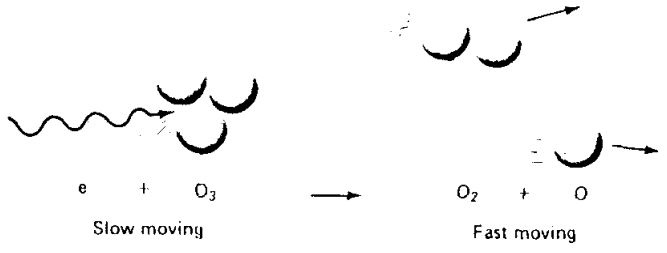
รูป 2.4 การโฟโตไอออนไนส์ของออกซิเจนอะตอม



รูป 2.5 การเกิดโอโซน ซึ่งต้องการโมเลกุลที่เป็นกลางในการดูดกลืนพลังงานส่วนเกินที่เกิดจากการชนกัน

โอโซนเป็นกาซที่ไม่คงที่ กัดกร่อนและทำลายเมื่อมันทำปฏิกิริยากับวัตถุบนพื้นโลก โอโซนเป็นสารที่เป็นพิษ ถ้าสูดดมเข้าไปมากอาจทำให้ถึงตายได้ ความสำคัญของโอโซนก็คือถ้ามีมากเกินไปก็จะเป็นพิษต่อคนเรา และถ้ามีน้อยก็จะเป็นอันตรายจากรังสีของดวงอาทิตย์ นับว่าโชคดีที่มีโอโซนอยู่พอดีในบรรยากาศและมีความเข้มข้นอยู่ไกลออกไปจากพื้นดิน คืออยู่ที่บริเวณความสูงระหว่าง 15 ถึง 50 Km. เหนือพื้นผิวโลกซึ่งจะเป็นอันตรายต่อเราได้น้อยมาก แต่ก็มีโอโซนจำนวนเล็กน้อยที่มาถึงพื้นดินได้และจะถูกทำลายไปอย่างรวดเร็ว

เมื่อโอโซนดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่น 0.2 ถึง 0.3 ไมตรอน เอาไว้ก็จะแตกตัวออกบน O และ O_2 (ดูรูป 2.6)



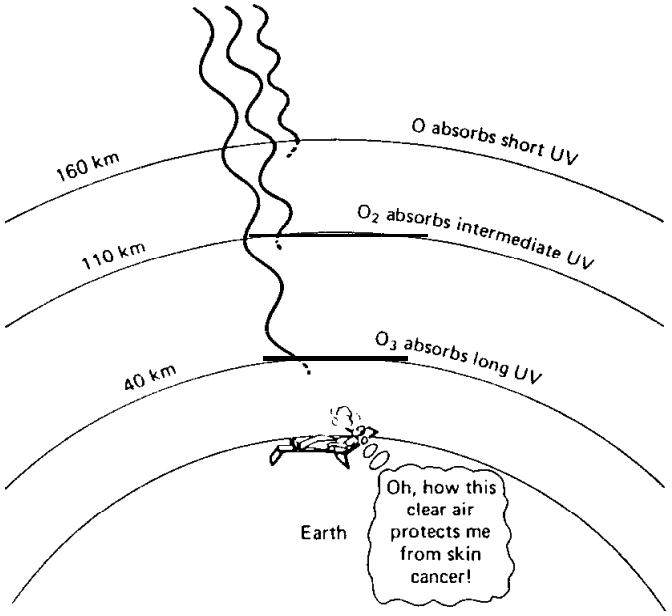
รูป 2.6 การแตกตัวเป็นไอออนส์ของโอโซนโมเลกุลในชั้นสตราโตสเฟียร์ และออกซิเจนอะตอมจะรวมกับ O_2 โมเลกุลใหม่อีกเพื่อให้ผลของกระบวนการทั้งหมดเพิ่มความร้อนแก่ชั้นสตราโตสเฟียร์นั่นเอง

สมการที่กล่าวนี้จะไม่ทำให้โอโซนหมดไปจากบรรยากาศเพราะ O จะรวมตัวกับ O_2 ใหม่อย่างรวดเร็วเมื่อมีโมเลกุลที่เป็นกลางอยู่ด้วย

สรุป คลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น

1. น้อยกว่า 0.1 ไมครอน จะโฟโตไอออนไนส์ออกซิเจนอะตอม
2. อยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 0.2 ไมครอน จะแยก O_2 โมเลกุลออกจากกัน
3. อยู่ระหว่าง 0.2 ถึง 0.3 ไมครอน จะแยก (photodissociate) O_3 ออกจากกัน

คลื่นแสงเหล่านี้ล้วนเป็นอันตรายต่อโมเลกุลในร่างกายคนเรา (ดูรูป 2.7)



รูป 2.7 ชั้นต่าง ๆ ที่ดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตคลื่นสั้นเอาไว้

2.3.1 แก๊สคลอโรฟลูออโรคาร์บอนและการทำลายโอโซนในบรรยากาศ

ร่างกายของคนเรานั้นสามารถสร้างวิตามิน D ได้จากแสงอัลตราไวโอเล็ตเมื่อผิวหนังถูกกับแสงแดด วิตามิน D นี้มีความสำคัญต่อการสร้างกระดูกในร่างกายของคน ในกรณีที่ชั้นโอโซนมีมากเกินไป แสงอัลตราไวโอเล็ตก็จะมีน้อย การสร้างวิตามิน D ในร่างกายก็มีได้ไม่พอ ซึ่งจะทำให้เกิดโรคกระดูกผุ (rickets) และถ้าชั้นโอโซนในบรรยากาศมีน้อย แสงอัลตราไวโอเล็ตที่เป็นอันตรายจะมาถึงคนเราได้มากซึ่งทำให้สร้างวิตามิน D ในร่างกายมากเกินไป ทำให้เกิดการเกาะของหินปูนที่ไต หรือทำให้เกิดมะเร็งที่ผิวหนัง ดังนั้นโอโซนในชั้นบรรยากาศจะต้องมีอยู่พอเหมาะพอดีจึงทำให้คนเรามีชีวิตอยู่ได้

บังเอิญนับว่าโชคไม่ดี ที่แก๊สคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (chlorofluorocarbon) (อักษรย่อ CFC) ซึ่งมีสูตรโครงสร้าง CCl_2F_2 ที่บรรจุอยู่ในกระป๋องสเปรย์และเครื่องทำความเย็นสามารถลอยไปถึงชั้นบรรยากาศเบื้องบน และดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตเอาไว้ และปล่อยคลอรีนออกมา คลอรีนนี้จะทำปฏิกิริยากับโอโซนและเกิดเป็นคลอรีนออกไซด์ (ClO) และ O_2 โมเลกุล

1. $Cl + O_3 \longrightarrow ClO + O_2$

และคลอรีนออกไซด์ จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนอะตอมและให้คลอรีนอะตอมกลับออกใหม่บวกกับออกซิเจนไมเลกุล

2. $ClO + O \longrightarrow Cl + O_2$

คลอรีนที่ได้ใหม่นี้ก็จะกลับไปทำปฏิกิริยาเคมีกับโอโซนไมเลกุลอื่นและจะต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ ทำให้โอโซนในบรรยากาศหมดไป

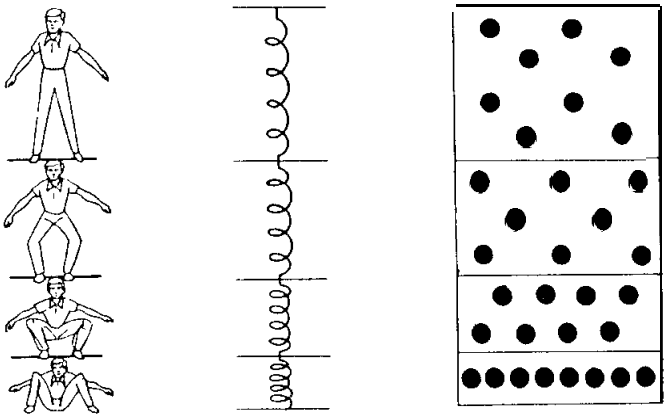
จะเห็นว่าสาร CFC ที่บรรจุอยู่ในเครื่องทำความเย็นและกระป๋องสเปรย์เป็นอันตรายต่อโอโซนในบรรยากาศอย่างยิ่ง

2.4 โครงสร้างของชั้นบรรยากาศในแนวดิ่ง (Vertical Structure of the Atmosphere)

ถ้าเราขึ้นสูงไปในชั้นบรรยากาศ อากาศจะเบาบางและความกดจะลดลงเมื่อขึ้นไปได้สูงประมาณ 5.5 กิโลเมตรเหนือระดับน้ำทะเล ครึ่งหนึ่งของบรรยากาศจะอยู่ในระดับนี้ อากาศที่ 5.5 กม. จะเบาบางกว่า (มีความหนาแน่นน้อยกว่า) อากาศที่ระดับน้ำทะเล และมนุษย์ไม่สามารถมีชีวิตที่ระดับความสูงนี้ได้เพราะอากาศมีน้อยเกินไปที่จะหายใจได้ และแม่แต่ไฟก็จะลุกได้ไม่ดีเช่นกัน

ถ้าเราขึ้นสูงไปอีก 5.5 กิโลเมตร ถึงระดับความสูง 11 กิโลเมตรเหนือระดับน้ำทะเล เราไม่ได้ผ่านชั้นบรรยากาศไปอีกครึ่งหนึ่ง แต่ว่าเราผ่านขึ้นไปประมาณครึ่งหนึ่งของบรรยากาศส่วนที่เหลือ หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งว่าทุก ๆ 5.5 กิโลเมตร ที่เราขึ้นไป ความกดของบรรยากาศจะลดลงครึ่งหนึ่งของค่าเดิม การที่เป็นเช่นนี้ขึ้นกับความจริงที่ว่า อากาศสามารถอัดตัวได้และอากาศที่เบื้องล่างจะถูกอัดตัวด้วยอากาศทั้งหมดที่อยู่เหนือขึ้นไป สมมุติว่าเรามีสปริงอยู่ชุดหนึ่งโดยที่มีสปริง แต่ละท่อนวางซ้อนเหนือขึ้นไป สมมุตว่าน้ำหนักในแต่ละท่อนมีค่าเท่ากันจะเห็นชัดว่า สปริงท่อนล่างสุดจะอัดตัวมากที่สุดในขณะที่สปริงท่อนบนสุดจะยืดออกมากที่สุด (ดูรูป 2.8) จากสมการแก๊สอุดมคติ (ideal gas) แสดงถึงผลลัพธ์ที่เหมือนกัน คือเมื่อความกดลดลงครึ่งหนึ่งปริมาตรจะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า (ในกรณีอุณหภูมิคงที่)

ความกดของอากาศที่พื้นดินมีค่าเท่ากับ 1013.2 mb หรือค่าหยาบ ๆ ประมาณเท่ากับ 1000 mb ในส่วนล่างสุดของบรรยากาศที่ความสูงสองสามพันเมตรเป็นการง่ายที่จะจำว่าความกดจะลดลงประมาณ 1 มิลลิบาร์ต่อทุก ๆ 10 เมตร เมื่อขึ้นไปสูงจากพื้นดิน



รูป 2.8 ความกดอากาศและความหนาแน่นลดลงพร้อมกับความสูงเพราะเบื้องบนมีน้ำหนักน้อยกว่า อากาศประพฤติตนคล้ายท่อนสปริง

นักอุตุนิยมวิทยาจะใช้แผนที่อากาศมาตรฐาน (เรียกว่า constant presure chart) บอกลักษณะอากาศที่ความสูงต่างๆ เหนือพื้นดิน ในตาราง 2.1 บอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างความกดและความสูงต่าง ๆ เหนือระดับน้ำทะเล

The Average Altitudes of Standard Pressure Levels

Pressure (millibars)	*Typical Height (Meters)*
1013	0
850	1500
700	3000
500	5500
300	9000
200	12500

ตาราง 2.1 ความสูงโดยเฉลี่ยที่ระดับความกดมาตรฐานต่าง ๆ

ในศตวรรษที่ 19 นักวิทยาศาสตร์คิดว่าเมื่อขึ้นไปสูงในชั้นบรรยากาศอุณหภูมิก็จะยิ่งลดลงจนกระทั่งประมาณปี ค.ศ.1900 Teisserenc de Bort พบว่าที่ความสูงประมาณ 12 กิโลเมตร จากพื้นดิน อุณหภูมิของอากาศจะหยุดลดลงตามความสูงและให้ชื่อชั้นที่ติดกับพื้นดินนี้ว่าชั้นโตรโฟสเฟียร์ (troposphere) (ซึ่งแปลว่าบรรยากาศที่เปลี่ยนแปลง) และชั้นนี้เองเป็นชั้นที่เกิดของ พายุ และ กาลอากาศ (weather)

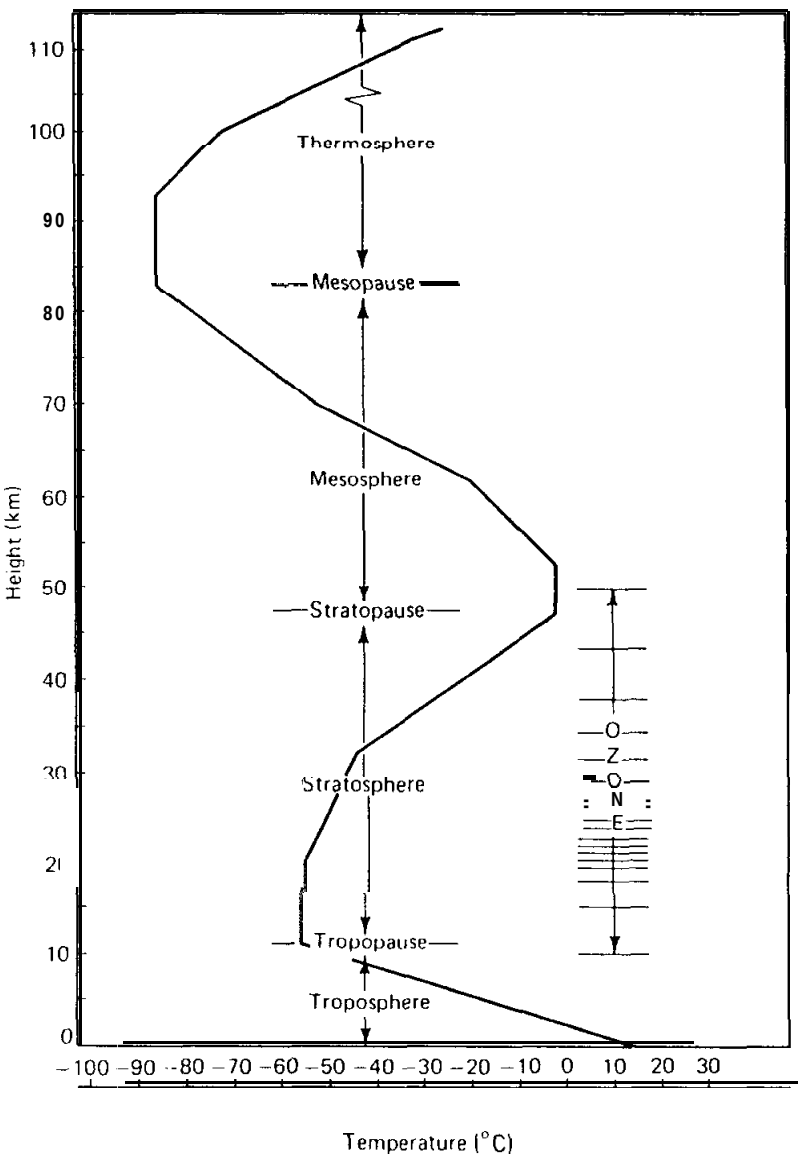
พ้นจากชั้นโตรโพสเฟียร์ ก็จะผ่านชั้น โตรโพพอส (tropopause) เพื่อที่จะขึ้นไปชั้นถัดไปชั้นที่ 2 ซึ่งเรียกว่าสตราโตสเฟียร์ (stratosphere) ในชั้นนี้อุณหภูมิมีระดับคงที่อยู่ส่วนหนึ่งก่อน และค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเมื่อสูงขึ้นไปจากพื้นดิน ที่ความสูงประมาณ 50 กิโลเมตร อุณหภูมิจะขึ้นสูงสุด และจะต้องผ่านชั้น สตราโตพอส (stratopause) เพื่อผ่านเข้าไปชั้นที่ 3 ที่เรียกว่ามีโซสเฟียร์ (mesosphere) ภายในชั้นมีโซสเฟียร์อุณหภูมิจะลดลงตามความสูงและที่ความสูงประมาณ 80 กิโลเมตร ก็จะผ่านชั้นมีโซพอส (mesopause) เพื่อเข้าสู่ชั้นที่ 4 ซึ่งเรียกว่าเทอร์โมสเฟียร์ ชั้นนี้อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นมากมายตามความสูง บางทีอุณหภูมิอาจขึ้นถึง 1200^{o}C ก็ได้ ชั้นเทอร์โมสเฟียร์นี้บางที่รู้จักในนามไอโอโนสเฟียร์ (ionosphere) ด้วย (ดูรูป 2.9)

จากที่กล่าวมาแล้ว สรุปได้ว่าจะมีบริเวณที่อบอุ่นอยู่ 3 บริเวณคือที่พื้นดินที่ความสูง 50 กิโลเมตร และเหนือชั้นความสูง 80 กิโลเมตร บริเวณเหล่านี้อบอุ่นเพราะมีแหล่งความร้อนโดยเฉพาะ ส่วนบริเวณที่เย็นเพราะขาดแหล่งความร้อนนั่นเอง

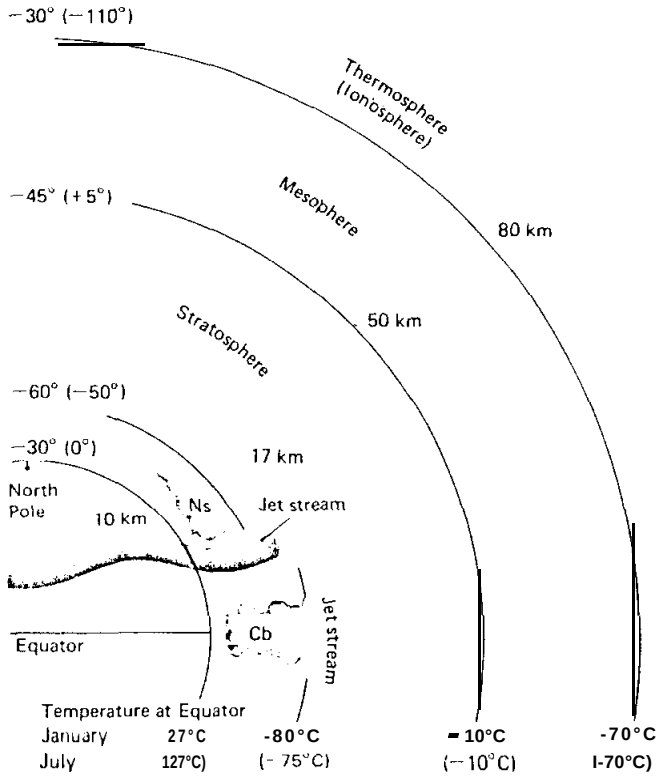
แหล่งความร้อนสำหรับพื้นดินคือแสงจากดวงอาทิตย์ แสงแดดส่วนใหญ่สามารถส่องทะลุชั้นบรรยากาศลงมาได้และถูกดูดกลืนที่ดิน ผลก็คือพื้นดินจะร้อนขึ้นและทำให้อากาศที่อยู่เหนืออุ่นตามไปด้วย แม้ว่าอากาศอุ่นจะลอยขึ้นจากพื้นดินแต่ในชั้นบน ๆ ของโตรโปสเฟียร์ อากาศก็ยังเย็นเพราะเมื่ออากาศลอยตัวขึ้นจะขยายตัวและเย็นลง

ชั้นที่มีความร้อนขึ้นถัดไปคือชั้น สตราโตสเฟียร์ ชั้นนี้โอโซนจะดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่นระหว่าง 0.2 ถึง 0.3 ไมครอน ดังที่กล่าวแล้ว สำหรับชั้นที่มีความร้อนชั้นบนสุดก็คือชั้น เทอร์โมสเฟียร์ อะตอมและโมเลกุลต่าง ๆ จะดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่นสั้นที่สุดเอาไว้ และจะเกิดการแยกตัวและร้อนขึ้นจากรูป 2.10 จะแสดงถึงลักษณะอุณหภูมิในเดือนมกราคม และเดือนกรกฎาคมในซีกโลกทางเหนือ เป็นที่น่าประหลาดที่ว่าส่วนของโตรโปพอส ที่เย็นที่สุดของทั้งสองเดือนนี้ได้แก่ที่เส้นศูนย์สูตรแทนที่จะเป็นที่ขั้วโลก คือที่เส้นศูนย์สูตรที่ความสูง 17 กิโลเมตร อุณหภูมิมีค่า -80^{o}C

ที่ขั้วโลกจะมีความแตกต่างในอุณหภูมิระหว่างเดือนมกราคม และกรกฎาคมความแตกต่างที่มากมายนี้ขึ้นกับความจริงที่ว่า ในระหว่างเดือนมกราคมจะไม่มีแสงแดดส่องมาถูกขั้วโลกเหนือ แหล่งความร้อนที่ความสูง 50 กม. จะขาดไปผลที่ตามมาก็คืออุณหภูมิจะยิ่งลดลงเมื่อความสูงเพิ่มขึ้น



รูป 2.9 โครงสร้างอุณหภูมิของบรรยากาศจนถึงความสูงประมาณ 110 กิโลเมตร



รูป 2.10 ชั้นต่าง ๆ ของบรรยากาศ อุณหภูมิที่แสดงเป็นของเดือนมกราคม และเดือนกรกฎาคม (ค่าของเดือนกรกฎาคมจะอยู่ในวงเล็บ)

2.5 ชั้นไอโอโนสเฟียร์และคลื่นวิทยุ (The Inonosphere and Radio Waves)

ในเวลากลางคืนชั้นไอโอโนสเฟียร์มีประโยชน์ช่วยในการรับคลื่นวิทยุทางไกล อิออนส์ที่เกิดในชั้นไอโอโนสเฟียร์มีผลต่อคลื่นวิทยุได้ 2 ประการคือสามารถทั้งดูดกลืนคลื่นและสะท้อนคลื่นวิทยุได้ ในชั้นล่างของไอโอโนสเฟียร์ คลื่นวิทยุจะถูกดูดกลืนและในชั้นบนของไอโอโนสเฟียร์คลื่นวิทยุจะถูกสะท้อน ดังนั้นส่วนบนจึงทำหน้าที่คล้ายกระจก

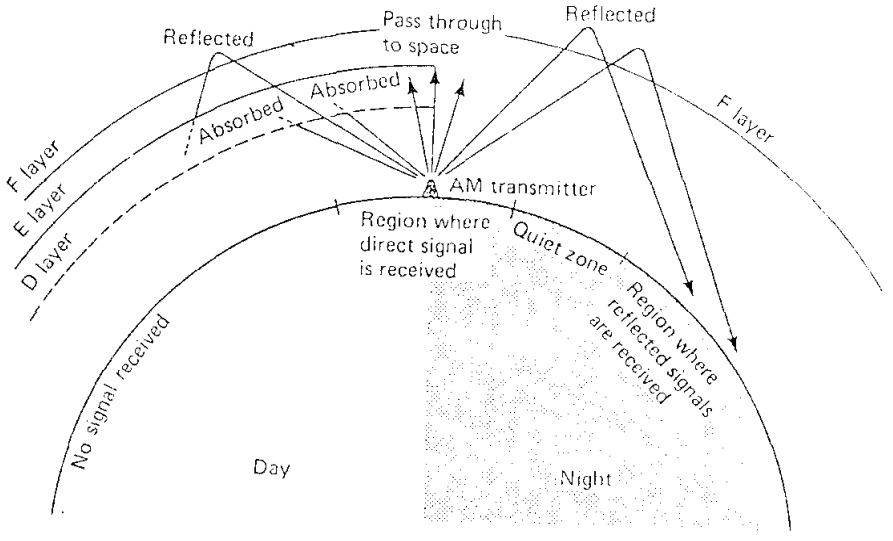
สำหรับในระยะทางสั้น ๆ บนพื้นโลก คลื่นวิทยุสามารถรับได้โดยตรงจากเครื่องส่ง แต่เพราะโลกโค้งคลื่นวิทยุที่ส่งมาจากระยะทางไกลจะรับโดยตรงไม่ได้ดังนั้นการสะท้อนจากบรรยากาศเบื้องบนจึงทำให้การส่งคลื่นวิทยุทางไกลสามารถทำได้

ในกรณีที่คลื่นวิทยุกระทบกับชั้นบรรยากาศแบบตรง ๆ คลื่นจะไม่สะท้อนแต่จะทะลุชั้นบรรยากาศออกไป ซึ่งดูได้จากรูป 2.11 สำหรับในรูปจะมีโซนเงียบ (quiet zone) ซึ่งจะเป็นโซนที่ไกลเกินไปจากสถานีส่งวิทยุที่จะรับคลื่นได้ และขณะเดียวกันเป็นโซนที่ใกล้เกินไปที่จะรับคลื่นวิทยุที่สะท้อนจากชั้นบรรยากาศเบื้องบน

ชั้นที่สะท้อนคลื่นวิทยุทางไกลเรียกว่าชั้น F_2 ซึ่งพบที่ความสูงประมาณ 300 กิโลเมตรเหนือพื้นผิวโลก ชั้น F_2 นี้จะเกิดขึ้นทั้งกลางวันและกลางคืนจริง ๆ แล้วชั้น F_2 ในเวลากลางวันจะสะท้อนได้ดีกว่า แม้ว่าวิทยุทางไกลจะรับได้ดีกว่าในตอนกลางคืนก็ตาม

เหตุผลที่ชั้น F_2 เป็นชั้นที่สะท้อนได้ดีในระหว่างเวลากลางวันก็เพราะในเวลากลางวันนั้นมีจำนวนไอออนส์อยู่มากกว่าในเวลากลางคืน ส่วนในตอนกลางคืนไอออนส์จะรวมตัวกับอิเล็กตรอนกลับเป็นอะตอมตามเดิม

จำนวนไอออนส์ที่เพิ่มขึ้นในตอนกลางวันก็จะเกิดขึ้นเช่นเดียวกับในส่วนล่างของชั้นไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งเรียกว่าชั้น D ชั้น D นี้เป็นชั้นที่ดูดกลืนคลื่นวิทยุทางไกลในเวลากลางวัน แต่ในเวลากลางคืนชั้น D จะหายไป ดังนั้นคลื่นวิทยุจะถูกดูดกลืนเฉพาะแต่ในเวลากลางวันเป็นส่วนใหญ่



รูป 2.11 ในตอนกลางวันชั้น D จะดูดกลืนคลื่นวิทยุ AM เอาไว้แต่ในตอนกลางคืนชั้น D จะหายไป ทำให้คลื่นวิทยุสามารถสะท้อนในชั้น F ได้

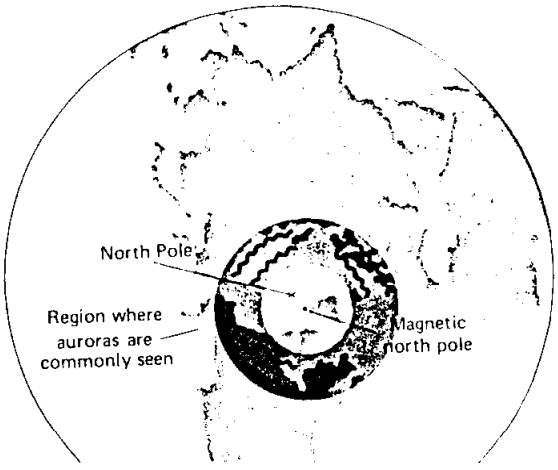
เมื่อคลื่นวิทยุถูกส่งออกไปในเวลากลางวันจะมีคลื่นวิทยุบางส่วนสามารถทะลุชั้น D ขึ้นไปได้และจะสะท้อนในชั้น F_2 (ดูรูป 2.12) คลื่นที่ถูกสะท้อนนี้ก่อนที่จะมาถึงพื้นดินก็ต้องผ่านชั้น D เป็นหนที่สอง ซึ่งจะทำให้คลื่นวิทยุถูกดูดกลืนไปเกือบหมด ในเวลากลางคืนชั้น D หายไป

หมดดังนั้นคลื่นวิทยุจะขึ้นไปสะท้อนในชั้น F_2 และกลับลงมายังพื้นดินได้โดยสะดวกห่างจากสถานีส่งนับเป็นร้อย ๆ กิโลเมตร

2.6 แสงออโรร่า (The Aurora)

ออโรร่าเป็นเหมือนพลุเงียบที่เกิดขึ้นในตอนกลางคืนแถบขั้วโลก ออโรร่าสามารถมีได้หลายรูปแบบ และอาจมีลักษณะคล้ายม่านที่สะบัดไปมาในอากาศมีสีเขียว น้ำเงินหรือสีแดง ถ้าเกิดขึ้นทางขั้วโลกเหนือเรียกว่า แสงออโรร่าเหนือ (aurora borealis) และถ้าเกิดในซีกโลกใต้เรียกว่า แสงออโรร่าใต้ (aurora australis)

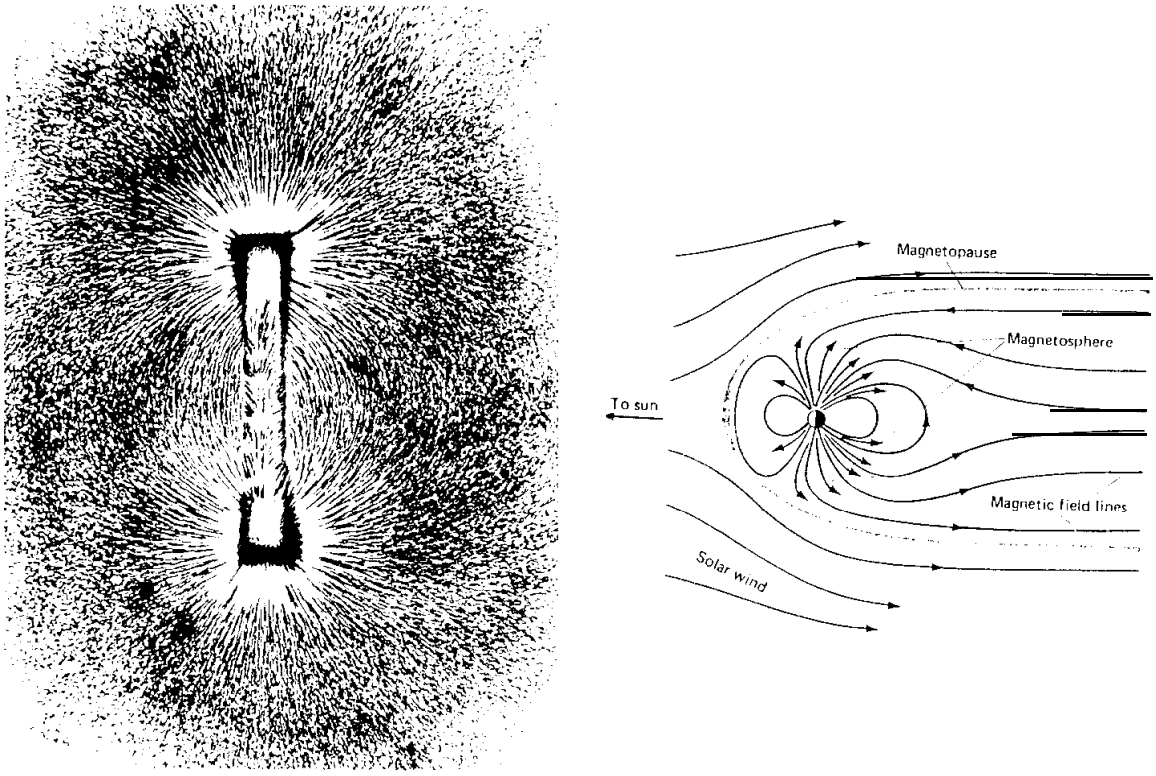
ออโรร่าสามารถมองเห็นได้ในคืนที่ท้องฟ้าแจ่มใสถ้ายืนอยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง เวลาที่มองเห็นออโรร่าได้ดีที่สุดคือ เวลาเที่ยงคืน สถานที่เหมาะสมก็คือแถบวงกลมที่ล้อมรอบขั้วแม่เหล็กโลก (magnetic north pole) ซึ่งแถบนี้มีความกว้างสองสามร้อยกิโลเมตร (ดูรูป 2.12) และอยู่ห่างขั้วแม่เหล็กโลกประมาณ 2000 กิโลเมตร



รูป 2.12 บริเวณรูปวงแหวนที่ล้อมรอบขั้วแม่เหล็กโลกที่สามารถมองเห็นออโรร่าได้

เนื่องจากออโรร่ามีศูนย์กลางอยู่ใกล้ขั้วแม่เหล็กโลก ดังนั้นจึงมีความเกี่ยวข้องกับแม่เหล็ก เมื่อเราใช้เข็มทิศหาทิศทางนั้น เข็มทิศจะไม่ชี้ไปทางทิศเหนือโดยตรง แต่เข็มจะชี้ไปยังขั้วแม่เหล็กโลก ซึ่งจะอยู่ใกล้กับขั้วภูมิศาสตร์โลก (geographical north pole)

ในปี ค.ศ. 1600 วิลเลียมกิลเบิท (William Gilbert) ได้ค้นพบว่าโลกทำตัวเหมือนกับแท่งแม่เหล็กอันมหึมา สำหรับแท่งแม่เหล็กนั้นถ้าเราโรยผงตะไบเหล็กลงไปโดยรอบก็จะปรากฏสนามเส้นแรงแม่เหล็กให้เห็น สำหรับในรูป 2.13 แสดงให้เห็นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากโลก เส้นแรงเหล่านี้แสดงคุณสมบัติที่สำคัญหลายอย่าง ขณะใดก็ตามที่ประจุไฟฟ้าพยายามเคลื่อนที่ข้ามเส้นแรงแม่เหล็ก มันจะถูกบิดเป็นเกลียว (twist) ด้วยสนามแม่เหล็ก

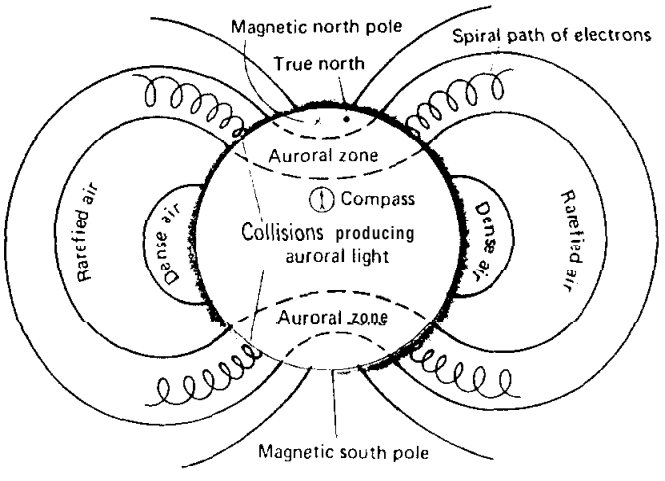


รูป 2.13 รูปเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากแท่งเหล็กและที่เกิดจากโลก หมายเหตุอนุภาคต่างจากลมสุริยะจะเข้าสู่สนามแม่เหล็กโลกจากด้านตรงกันข้ามกับดวงอาทิตย์

ออโรร่านั้นถูกทำให้เกิดขึ้นด้วยกระแสธาร (stream) ของอิเล็กตรอนและโปรตอนที่พวยพุ่งจากดวงอาทิตย์ ภายในดวงอาทิตย์นั้นประกอบด้วยไฮโดรเจนเป็นส่วนใหญ่ และเนื่องจากมีอุณหภูมิสูงมาก ดังนั้นไฮโดรเจนส่วนมากจะถูกไอออนไนส์และจะกลายเป็น โปรตอนและอิเล็กตรอน ทั้งโปรตอนและอิเล็กตรอนที่พวยพุ่งออกจากดวงอาทิตย์เราเรียกว่าลมสุริยะ (solar wind) และจะชนกับโลกโดยตรงถ้าไม่มีสนามแม่เหล็กโลกกั้นเอาไว้ เมื่ออิเล็กตรอนและอิเล็กตรอนเข้ามาสัมผัสกับสนามแม่เหล็กโลกก็จะถูกบิดเป็นเกลียวโดยสนามแม่เหล็กโลก และส่วนหนึ่งของอิเล็กตรอนจะถูกกักเอาไว้ในสนามแม่เหล็ก สำหรับในส่วนหางของสนามแม่เหล็กโลกนั้นทั้งโปรตอนและอิเล็กตรอนจะถูกเร่งให้มีความเร็วขึ้นอย่างมหาศาลโดยกระบวนการที่ยังไม่แจ้งชัด ทั้งโปรตอนและอิเล็กตรอนที่ถูกขังอยู่ในชั้นบรรยากาศซึ่งเรียกเม็กนีโตสเฟียร์ (magnetosphere) จะหมุนเป็นเกลียว (spiral) รอบ ๆ เส้นสนามแม่เหล็กโลก และจะกระโดดไปมา (bouncing) ระหว่างขั้วแม่เหล็กโลกเหนือและขั้วแม่เหล็กโลกใต้ของอนุภาค

เหล่านี้จะอยู่สูงเหนือพื้นผิวโลกซึ่งเป็นส่วนที่เกือบเป็นสูญญากาศเสียส่วนใหญ่ดังนั้นโอกาสที่โปรตอนและอิเล็กตรอนจะชนกับอากาศก็มีน้อย

อย่างไรก็ตามเมื่ออนุภาคของประจุเหล่านี้เคลื่อนที่ลงมาถึงขั้วโลกมันจะเข้าใกล้พื้นผิวโลกที่มีบรรยากาศหนาแน่น และถ้าอิเล็กตรอนและโปรตอนยิ่งมีความเร็วในการเคลื่อนที่มากเท่าไร โอกาสที่อนุภาคทั้งสองจะเข้าใกล้ขั้วแม่เหล็กโลกและพื้นดินก็ยิ่งมีมากเท่านั้น (ดูรูป 2.14)



รูป 2.14 แสงออโรร่าและความสัมพันธ์กับสนามแม่เหล็กโลก อิเล็กตรอนจะหมุนเป็นเกลียวขึ้นลงระหว่างขั้วแม่เหล็กโลกตามเส้นทางของเส้นแรงแม่เหล็ก แสงออโรร่าจะเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนสามารถเข้าใกล้โลกเพียงพอเพื่อที่จะชนกับโมเลกุลของอากาศ

เมื่ออิเล็กตรอนและโปรตอนเข้าใกล้พื้นผิวโลก โอกาสที่อนุภาคเหล่านี้จะชนกันกับโมเลกุลของอากาศก็ยิ่งมีมาก อีเล็กตรอนที่ทำให้เกิดออโรร่านั้นเดินทางด้วยความเร็วมากกว่าเศษหนึ่งส่วนสิบของความเร็วแสง และมีพลังงานมากกว่า 10,000 อิเล็กตรอนโวลท์ พลังงานขนาดนี้สามารถไอออนไนส์อะตอมได้อย่างง่ายดาย

เนื่องจากโซนที่มีการชนเกิดขึ้นเมื่อเส้นแรงสนามแม่เหล็กโลกเข้าใกล้กับพื้นผิวโลกและเกิดขึ้นรอบ ๆ ขั้วแม่เหล็กโลกนั่นเอง ดังนั้นออโรร่าจึงเกิดขึ้นรอบขั้วแม่เหล็กโลกเช่นเดียวกัน อะตอมต่าง ๆ จะถูกไอออนไนส์ด้วยอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูง แสงและพลังงานจะถูกปล่อยออกมาเมื่อไอออนส์รวมตัวกลับเหมือนเดิม (พลังงานที่ปล่อยได้จากการดูดกลืนเมื่อมีการชนกันเกิดขึ้น) แสงที่เกิดขึ้นก็คือแสงออโรร่านั่นเอง

โดยทั่วไปออโรร่าสามารถมองเห็นใกล้กับแถบวงกลมที่กล่าวแล้วอย่างไรก็ตามเมื่อเกิดจุดดับในดวงอาทิตย์ ลมสุริยะจะมีความรุนแรงขึ้นประมาณสองสามวันและผลก็คือออโรร่าจะมีความสว่างมากขึ้น เวลาเช่นนี้เป็นที่รู้จักว่าเกิดพายุแม่เหล็ก (magnetic storm) และทำให้บรรยากาศเบื้องต้นทั้งหมดถูกรบกวนคลื่นวิทยุ และคลื่นทีวี จะถูกทำให้บิดเบือนได้มาก

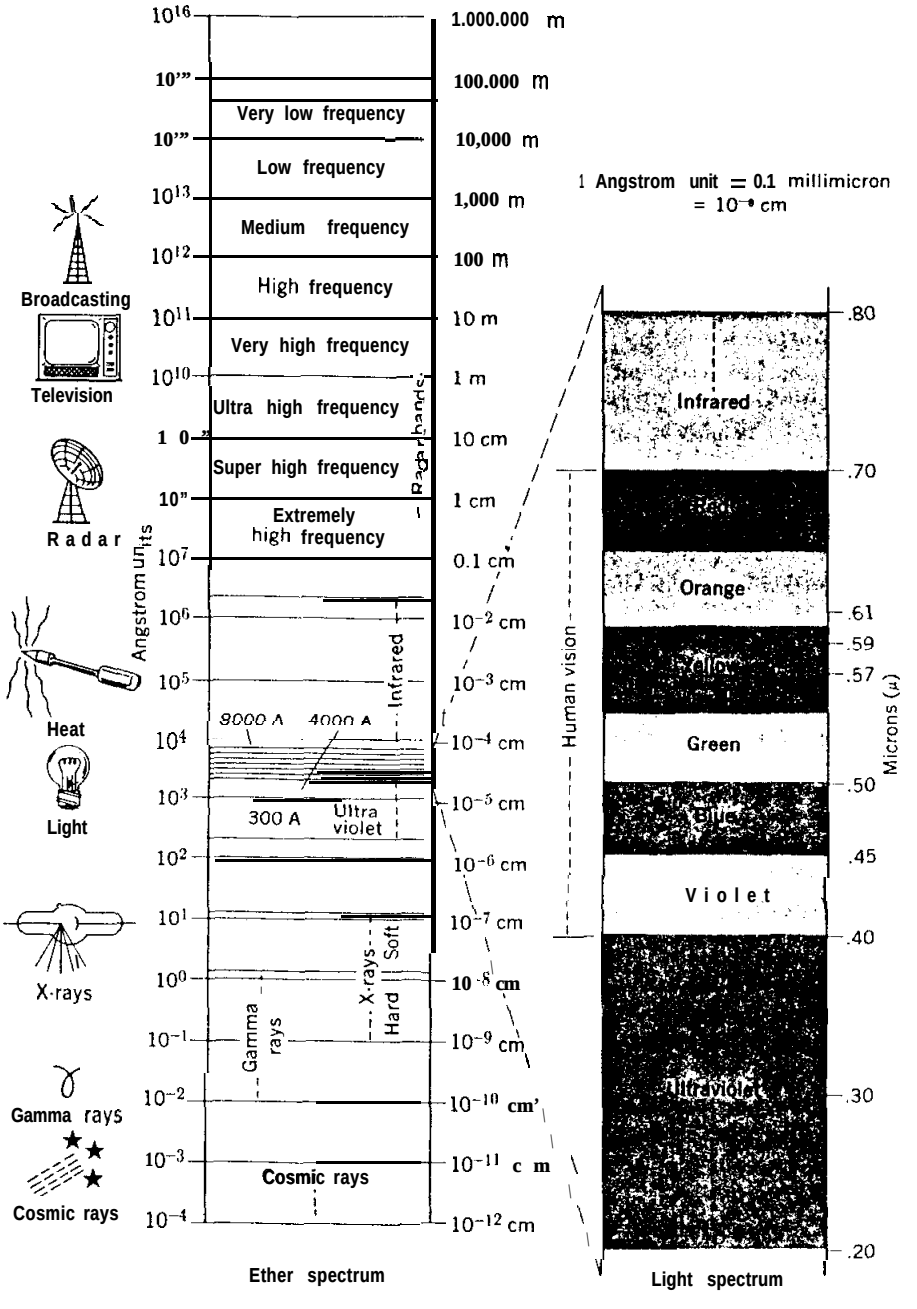
2.7 การแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ (Solar Radiation)

ดวงอาทิตย์ให้ความร้อนแก่โลกและบรรยากาศโดยการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic radiation) และความร้อนที่แผ่ออกจากโลกสู่อวกาศก็โดยการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเช่นเดียวกัน พลังงานเหล่านี้จะทำให้บรรยากาศเกิดการหมุนเวียนและทำให้เกิดกาลอากาศขึ้น ในหัวข้อนี้เราจะพิจารณาถึงคุณสมบัติของรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่าง ๆ เช่น พิจารณาว่าการแผ่รังสีมีผลอย่างไรต่อส่วนประกอบของบรรยากาศ และสามารถเปลี่ยนเป็นความร้อนได้อย่างไร ในครั้งแรกเราจะพิจารณาถึงธรรมชาติโดยทั่วไปของการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และเราจะอธิบายคุณสมบัติเฉพาะของคลื่นชนิดต่าง ๆ เหล่านี้

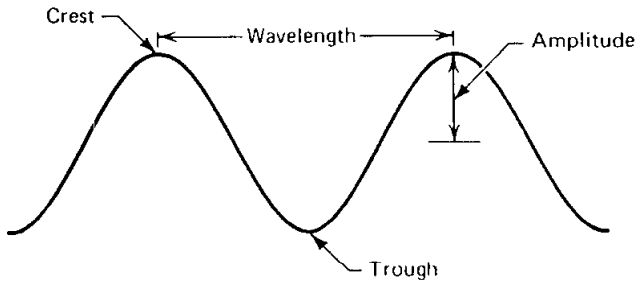
2.7.1 คุณสมบัติของพลังงานแสงที่แผ่ออก (Characteristic of Radiant Energy)

การเรียกชื่อว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพราะมันแสดงคุณสมบัติของทั้งไฟฟ้าและแม่เหล็กพร้อมกันทั้งสองอย่าง วัตถุทุกชนิดที่มีอุณหภูมิเกินกว่าศูนย์องศาสัมบูรณ์ (0 องศา K) จะต้องแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า, พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่วนใหญ่ที่มาถึงโลกมีจุดตั้งต้นจากดวงอาทิตย์และมีเพียงส่วนน้อยซึ่งไม่มีความสำคัญมาจากดวงดาว คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแต่ละชนิดเมื่อรวมกันเข้าจะกลายเป็นสเป็กตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (eletromanetic spectrum) ซึ่งแสดงไว้ในรูป 2.15 แสงซึ่งเป็นรังสีที่มองเห็นได้ (visible light) จะเป็นส่วนเล็ก ๆ ส่วนหนึ่งของสเป็กตรัมเท่านั้น คลื่นชนิดอื่น ๆ ก็ได้แก่คลื่นวิทยุ คลื่นไมโครเวฟ คลื่นอินฟราเร็ด (infrared) คลื่นอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet) เอ็กซ์เรย์ และเกมมาเรย์

รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางในรูปของคลื่นซึ่งจะบอกเป็นความยาวคลื่นและความถี่ ความยาวคลื่นก็คือระยะยอดคลื่นหนึ่งไปยังอีกยอดคลื่นหนึ่งดังแสดงไว้ในรูป 2.16 ความถี่ของคลื่นก็คือจำนวนยอดคลื่นที่ผ่านจุด ๆ หนึ่งในเวลา 1 วินาที ซึ่งจะมีหน่วยเป็นไซเคิลต่อวินาทีหรือเฮิซท์ (Hertz) สำหรับแอมปลิจูดก็คือความสูงของคลื่น สำหรับความถี่ของคลื่นจะแปรผันผกผัน



รูป 2.15 สเป็กตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



รูป 2.16 ลักษณะของคลื่นแสง

กับความยาวคลื่น ความถี่ยิ่งสูงความยาวคลื่นก็จะยิ่งสั้น เช่นคลื่นวิทยุจะมีความถี่เพียงไม่กี่ร้อยเฮิซท์ และมีความยาวคลื่นนับเป็นร้อย ๆ กิโลเมตร ในขณะที่เกมม่าเรย์มีความถี่ของคลื่น 10^{24} เฮิซท์ และความยาวคลื่นสั้นเพียง 10^{-14} เมตรเท่านั้น

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเดินทางในสูญญากาศด้วยความเร็วเท่ากับแสงคือ 300,000 กิโลเมตรต่อวินาที แต่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทุกชนิดจะเดินทางช้าลงเมื่อส่องผ่านวัตถุ, ความเร็วขึ้นกับความยาวคลื่นและชนิดของวัตถุ เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางผ่านจากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่งมันอาจสะท้อนหรือหักเหก็ได้ เช่นเมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบพื้นผิวมหาสมุทรบางส่วนจะสะท้อนและบางส่วนจะหักเหทะลุลงไปในพื้นน้ำ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ายังสามารถถูกดูดกลืนได้ เช่นดูดกลืนโดยพื้นผิวโลกและเปลี่ยนแปลงเป็นความร้อนเป็นต้น

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้น ก็จะยิ่งมีพลังงานสูง โดยการพิจารณาจากรูป 3.1 คลื่นวิทยุจะมีพลังงานต่ำและอยู่ปลายบนสุด ถัดลงมาได้แก่คลื่นทีวีและคลื่นไมโครเวฟ สำหรับคลื่นไมโครเวฟจะเป็นคลื่นที่ใช้ในการส่งวิทยุคมนาคม ใช้ในเตาอบและใช้ในการติดตามระบบความกดอากาศ (เรดาร์) เป็นต้น

คลื่นอินฟราเร็ดอยู่ระหว่างคลื่นไมโครเวฟและแสงที่มองเห็นได้ เราไม่สามารถมองเห็นรังสีอินฟราเรดแต่สามารถสัมผัสกับความร้อนได้ เช่นเมื่อความร้อนส่งออกจากเตาไฟ

สำหรับแสงที่มองเห็นได้ (visible light) มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 0.70 ไมครอน ซึ่งเป็นแสงสีแดงจนกระทั่งถึง 0.40 ไมครอน ซึ่งเป็นแสงสีม่วงและเป็นสีที่มีความยาวคลื่นสั้นที่สุดในสเป็กตรัมของแสง (1 ไมครอนเท่ากับ 10^{-6} เมตร) แสงที่มองเห็นได้เหล่านี้มีความสำคัญในการสังเคราะห์แสงของพืช และเกี่ยวข้องกับมนุษย์ สัตว์และพืชในหลาย ๆ ด้าน

ต่ำกว่าแสงที่มองเห็นลงมาไปก็คือแสงอัลตราไวโอเล็ต เอ็กซ์เรย์และเกมม่าเรย์ สำหรับแสงอัลตราไวโอเล็ต จะเกี่ยวข้องกับการสร้างกระดูกของคนเราส่วนแสงเอ็กซ์เรย์และเกมม่าเรย์จะใช้ในด้านการแพทย์ เช่นใช้ในการรักษาโรคมะเร็งเป็นต้น

2.7.2 การส่งผ่าน การดูดกลืน และการสะท้อน (Transmission Absorption and Reflection)

พลังงานที่แผ่ออก (randiant energy) ไม่เพียงแต่สามารถเดินทางผ่านอวกาศได้ แต่ส่วนหนึ่งของมันสามารถเดินทางผ่านวัตถุบางชนิดได้อีก เช่นแสงสามารถเดินทางผ่านอากาศ น้ำ และแก้ว และแสงเอ็กซ์เรย์ซึ่งเป็นแสงคลื่นสั้นสามารถเดินทางผ่านวัตถุทึบซึ่งแสงเดินทางผ่านไม่ได้ ในกรณีเช่นนี้เราพูดว่าแสงถูกส่งผ่าน (transmitted) วัตถุส่วนมากเลือกแสงที่จะผ่านนั่นคือยอมให้ความยาวคลื่นบางคลื่นผ่านไปได้ แต่คลื่นบางคลื่นจะไม่สามารถผ่านไปได้ ยกตัวอย่างแก้วหน้าต่าง ยอมให้แสงอาทิตย์ผ่านเข้ามาได้แต่ไม่ยอมให้คลื่นความร้อนที่เป็นคลื่นยาวออกไปจากห้อง วัตถุที่ต่างกันจะเลือกแสงให้ผ่านที่มีความยาวคลื่นต่างกันด้วย

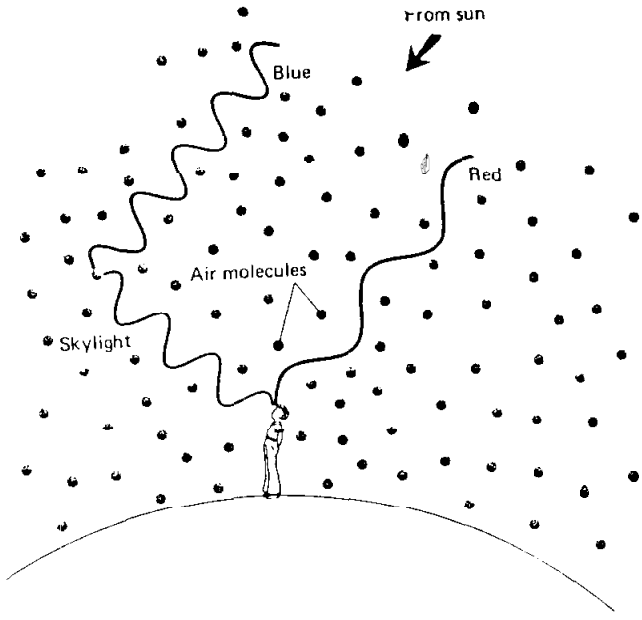
ส่วนของพลังงานแสงที่เข้าไปในวัตถุแต่ไม่ถูกยอมให้ผ่านเรียกว่าถูกดูดกลืน (absorbed) และจะเปลี่ยนเป็นพลังงานรูปอื่น เช่นกลายเป็นความร้อน หรือใช้เป็นพลังงานในการระเหยของน้ำ หรือทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี การที่แสงถูกเลือกให้ผ่านไปได้ก็จะมีความหมายเช่นเดียวกับการถูกเลือกในการดูดกลืน ดังนั้นความยาวคลื่นซึ่งไม่ถูกยอมให้ผ่านก็จะถูกกลืนนั่นเอง

คลื่นบางคลื่นเมื่อมาถึงพื้นผิวของวัตถุก็จะถูกสะท้อน (reflected) ซึ่งจะมีผลต่อทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น การสะท้อนอาจเป็นชนิดธรรมดา (regular) เช่นการสะท้อนจากกระจกหรือจากวัตถุที่มีพื้นเรียบหรืออาจเป็นการสะท้อนชนิด diffuse ซึ่งเกิดจากสะท้อนจากพื้นผิวขรุขระเช่นพื้นดิน วัตถุถูกทำให้เห็นโดยการสะท้อน ส่วนที่ไม่สะท้อนจะมองไม่เห็นยกเว้นแต่ว่าตัวมันเองเปล่งแสงออกมาเอง

2.7.3 การกระเจิง (Scattering)

ในปี ค.ศ. 1881 ลอร์ด เรย์ลี (Lord Rayleigh) ได้อธิบายว่าการที่ท้องฟ้ามีสีน้ำเงินนั้นเกิดจากโมเลกุลของอากาศซึ่งสามารถกระเจิงคลื่นแสงที่ส่องผ่านถ้าไม่มีโมเลกุลของอากาศ ท้องฟ้าในเวลากลางวันจะมืดเช่นเดียวกับในตอนกลางคืน และดวงดาวจะสามารถมองเห็นได้แม้แต่ในเวลากลางวันส่วนดวงอาทิตย์จะเห็นสว่างกว่าที่เป็นอยู่

แสงจากทองฟ้าเกิดจากโมเลกุลและฝุ่น (aerosols) นับเป็นล้านล้านโมเลกุลซึ่งสามารถกระเจิงแสงอาทิตย์ให้สามารถมาถึงตัวของเราจากทุกทิศทุกทาง (ดูรูป 2.17) สำหรับ



รูป 2.17 แสงของท้องฟ้าเป็นแสงที่เกิดจากการกระเจิง โมเลกุลของอากาศจะเล็กมากจนสามารถกระเจิงแสงสีน้ำเงินที่สั้นได้ง่ายกว่าแสงสีแดงที่ยาว ดังนั้นท้องฟ้าจึงมีสีน้ำเงิน

ก้อนเมฆดิวมิวลัสที่เราเห็นสว่างเป็นสีขาวเมื่ออยู่ในทิศของดวงอาทิตย์นั้นเนื่องจากหยดน้ำเล็ก ๆ ในก้อนเมฆสะท้อนแสงอาทิตย์และทำให้ขอบของก้อนเมฆสว่างเป็นสีขาว และการที่ก้อนเมฆมีสีขาวแทนที่จะเป็นสีน้ำเงินก็เนื่องจากหยดน้ำเล็ก ๆ ในก้อนเมฆสะท้อนสีทุกสีของแสงได้ดีเท่า ๆ กัน ส่วนท้องฟ้ามีสีน้ำเงินเพราะโมเลกุลของอากาศกระเจิง (scatler) สีน้ำเงินได้ง่ายกว่าสีอื่น

มีคำถามว่าทำไมจึงเป็นเช่นนั้น เหตุผลก็คือโมเลกุลของอากาศจะมีขนาดเล็กมาก และไม่เพียงแต่จะมีขนาดเล็กกว่าหยดน้ำในก้อนเมฆแต่มันยังมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นแสงเสียอีก แสงที่เรามองเห็นสามารถผ่าน (bypass) โมเลกุลของกาศเหล่านี้ไปได้และยังคงไปในทิศทางเดิม อย่างไรก็ตามแสงยิ่งมีความยาวคลื่นสั้นโอกาศที่จะผ่านโมเลกุลของอากาศก็ยิ่งยากมากขึ้น ซึ่งมีโอกาศที่จะชนกับโมเลกุลและกระเจิงไปในทิศทางอื่น จากกฎของเรย์ลีกล่าวว่าถ้าวัตถุที่ทำให้เกิดการกระเจิงมีขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับความยาวของคลื่นแสงแล้วกำลังของการกระเจิง (scattered power) จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค (particle) ยกกำลังหก และจะเป็นสัดส่วนผกผันกับความยาวคลื่นแสงยกกำลังสี่ หรือ

$$P = k \frac{D^6}{\lambda^4}$$

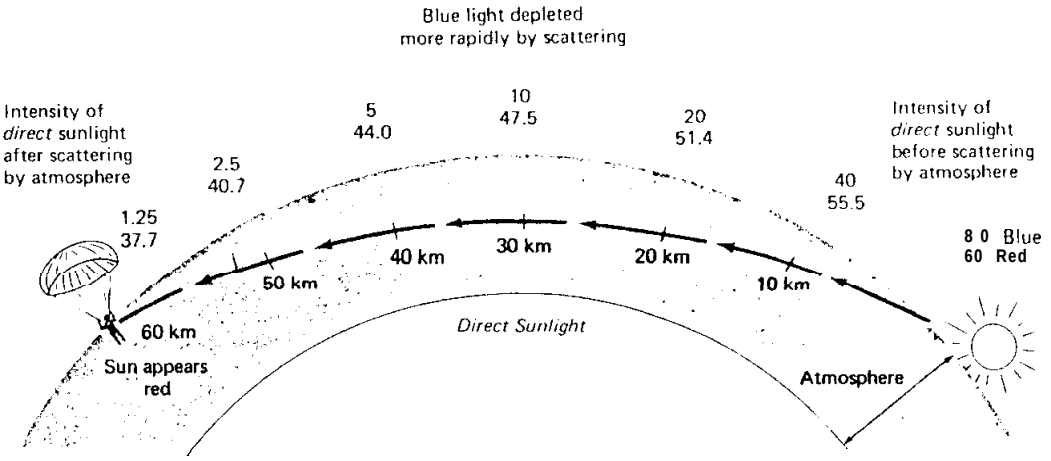
เมื่อ P เป็นกำลังของการกระเจิง D เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคที่ทำให้เกิดการกระเจิง k เป็นค่าคงที่ λ เป็นความยาวของคลื่นแสงสูตรที่กล่าวนี้เรียกว่า Rayleigh scattering

จากสูตรของเรย์ลี ถ้าหาก λ ลดจากเดิมลงเหลือครึ่งหนึ่ง กำลังของการกระเจิงจะเพิ่มขึ้นเป็น 16 เท่า กฎนี้ไม่สามารถประยุกต์เข้ากับหยดน้ำเล็ก ๆ ในก้อนเมฆได้ เนื่องจากหยดน้ำเล็ก ๆ เหล่านี้มีขนาดใหญ่กว่าความยาวของคลื่นแสง ดังนั้นมันจะสะท้อนคลื่นของแสงทุกสีได้ดีเท่ากันหมด และจะไม่มีคลื่นสีใด ๆ สามารถผ่าน (bypass) ไปได้

มีคำถามเพิ่มขึ้นว่า แสงสีม่วงซึ่งเป็นแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นที่สุดในคลื่นแสงที่มองเห็นได้ทำไมท้องฟ้าจึงไม่เป็นสีม่วงแทนที่จะเป็นสีน้ำเงิน คำตอบสองอย่างที่มีเหตุผลก็คือ

1. แสงสีน้ำเงินจะมีมากกว่าแสงสีม่วงในแสงอาทิตย์
2. ตาของคนเรามีความไวต่อแสงสีน้ำเงินมากกว่าแสงสีม่วง

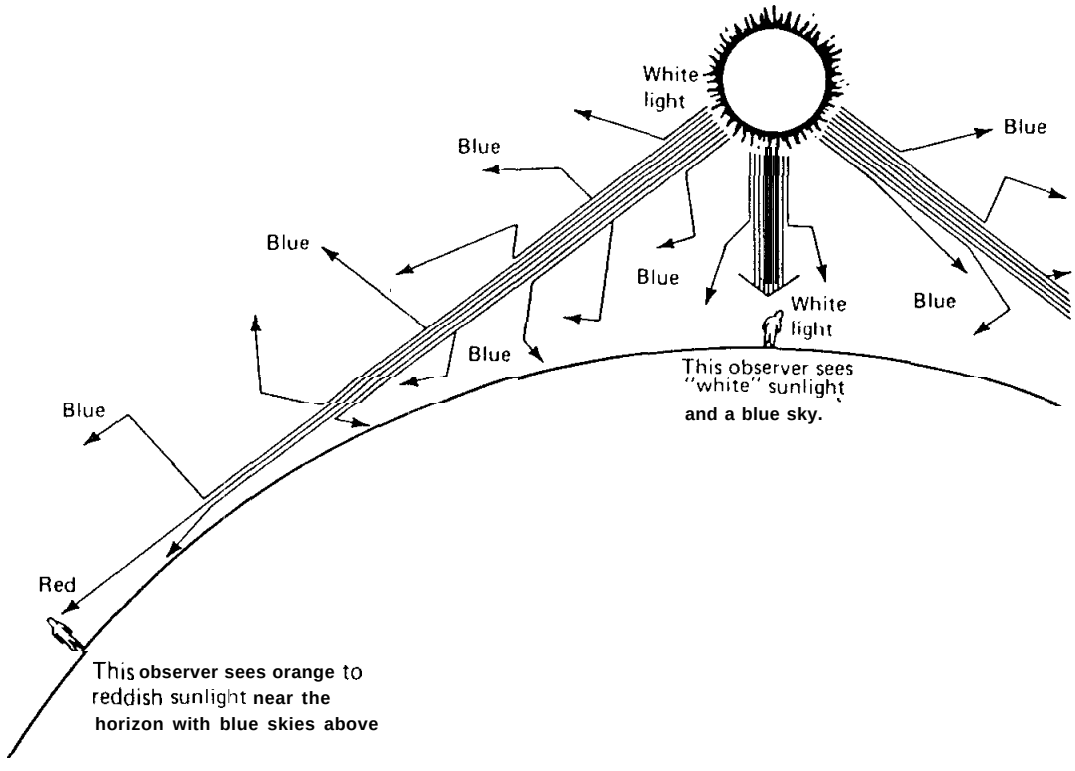
ในระหว่างที่ดวงอาทิตย์กำลังขึ้นและตกที่ขอบฟ้าจะมีสีแดง (ดูรูป 2.18) และจะไม่สว่างเท่ากับเมื่ออยู่ในเวลากลางวันที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากดวงอาทิตย์เมื่ออยู่ใกล้กับขอบฟ้า



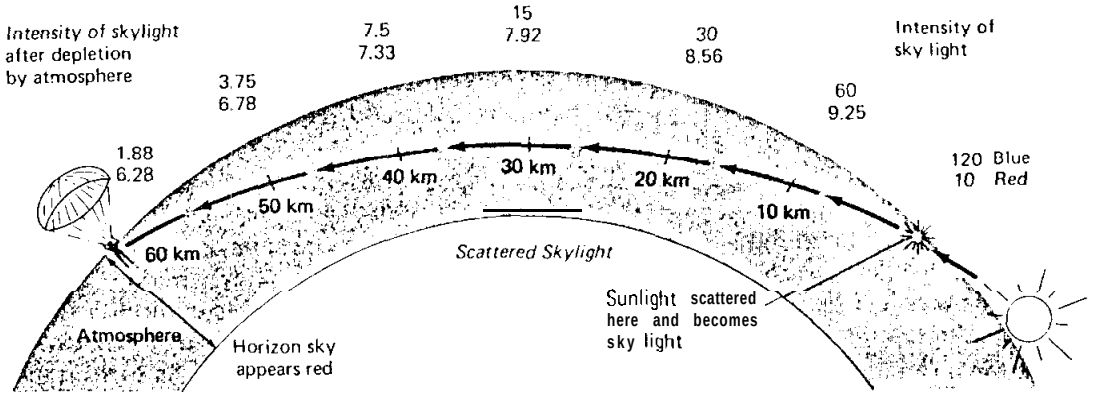
รูป 2.18 ดวงอาทิตย์มีสีแดงใกล้ขอบฟ้า เพราะแสงสีน้ำเงินส่วนใหญ่ถูกกระเจิงออกไปเกือบหมด

จะต้องผ่านชั้นบรรยากาศที่หนากว่า ดังนั้นแสงจะถูกกระเจิงมากกว่าเมื่อดวงอาทิตย์อยู่กลางท้องฟ้า และในกรณีที่ดวงอาทิตย์ใกล้จะตกแสงที่มาถึงตาผู้เห็นโดยตรงก็จะมีแต่แสงสีแดง ส่วนสีน้ำเงิน ม่วง และเขียว จะถูกกระเจิงออกไปด้านข้างจนหมด (ดูรูป 2.19)

มีคำถามว่าทำไมแม้แต่ขอบฟ้าที่อยู่ใกล้กับพระอาทิตย์ที่ตกไปแล้วจึงมีสีแดงเช่นเดียวกัน คำตอบก็คือ เนื่องจากแสงในท้องฟ้าเป็นแสงที่เกิดจากการกระเจิงดังนั้นครั้งแรกจะมีแสงสีน้ำเงินเป็นส่วนใหญ่ และเมื่อแสงสีน้ำเงินนี้มาถึงผู้สังเกตมันจะถูกกระเจิงอีกครั้งหนึ่ง การกระเจิงครั้งที่สองนี้จะทำให้แสงสีน้ำเงินค่อย ๆ หายไปในขณะที่เดินทางผ่านทะลุความหนาของชั้นบรรยากาศและเมฆเข้ามา (ดูรูป 2.20) ดังนั้นแสงสีน้ำเงินจะถูกทำให้หมดไป (depleted) และเหลือแต่แสงสีส้มและแดงมาถึงตาผู้มอง



รูป 2.19 เมื่อดวงอาทิตย์อยู่กลางท้องฟ้า แสงอาทิตย์ที่ประกอบด้วยแสงทั้งหมดที่เห็นได้จะมาถึงตาเราและมองเห็นโดยตรงเป็นสีขาว แต่ถ้าดวงอาทิตย์อยู่ใกล้ขอบฟ้าจะเห็นเป็นสีแดง เพราะแสงสีน้ำเงินส่วนใหญ่ถูกกระเจิงไปหมด



รูป 2.20 บริเวณท้องฟ้าที่ใกล้ขอบฟ้าที่ดวงอาทิตย์ตกจะมีสีแดง เนื่องจากแสงสีน้ำเงินที่อยู่ในท้องฟ้าตอนแรกนั้นหลังจากผ่านชั้นบรรยากาศเข้ามาก็จะถูกกระเจิงอีกครั้งหนึ่ง เนื่องจากเป็นระยะที่ไกลท้องฟ้าก็จะมองเห็นเป็นสีแดง จำนวนตัวเลขที่แสดงเป็นหน่วยความเข้มข้นของแสงสีแดงและสีน้ำเงิน