

## บทที่ 2

### แสง อะตอม โมเลกุล : บรรยากาศชั้นบน (Light Atom Aolecule : Upper Atmosphere)

- 2.1 กฏของโอบอร์สไตน์และฟิลิปส์แมนใหม่
- 2.2 แสง อะตอม และโมเลกุล
- 2.3 ออกซิเจน และโอโซน
  - 2.3.1 แก๊สคลอโรฟลูออโรคาร์บอนและการทำลายโอโซนในบรรยากาศ
- 2.4 โครงสร้างของชั้นบรรยากาศในแนวตั้ง
- 2.5 ชั้นไอโอโนสเฟียร์ และคลื่นวิทยุ
- 2.6 แสงออโรรา
- 2.7 การแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์
  - 2.7.1 คุณสมบัติของพลังงานแสงที่แผ่ออก
  - 2.7.2 การส่งผ่าน การดูดกลืน และการสะท้อน
  - 2.7.3 การกระเจิง

ในชั้นบรรยากาศเบื้องบนนั้นประกอบด้วยชั้นของไอโซนที่คอยปกป้องเราจากอันตรายของแสงอัลตราไวโอเล็ตคลื่นสั้นที่มาจากดวงอาทิตย์ ในบทนี้เราจะกล่าวถึงการเกิดของไอโซน และการสลายตัวของรังสีแกมมา การวิเคราะห์จะเริ่มต้นด้วยบทที่ค้นพบโดย แอลเบิร์ต ไอน์สไตน์ ซึ่งจะอธิบายถึงกฎของแสงที่มีต่ออะตอมหรือโมเลกุล จากกฎโดยทั่วไปนี้เราจะไม่เรียนรู้แต่ไอโซนเพียงอย่างเดียว แต่จะรู้ถึงปรากฏการณ์ที่เรียกว่า แอร์โกล (airglow) ออโรรา ไอโอโนสเฟียร์ และชั้นอื่น ๆ ของบรรยากาศอีกด้วย

## 2.1 กฎของไอน์สไตน์ และฟิสิกส์แบบใหม่

การค้นพบของไอส์ไตน์ เป็นการอธิบายถึงปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (photoelectric effect) ซึ่งกล่าวว่าแสงไม่ได้เป็นแต่คลื่นอย่างเดียวแต่ยังมีลักษณะเหมือนกับลำธารของอนุภาคเล็ก ๆ (stream of tiny particles) อีกด้วยเมื่อมันชนกับวัตถุที่เป็นของแข็งเช่นอะตอม เป็นต้น

ไอส์ไตน์พบว่าพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งรวมทั้งแสงด้วยนั้นขึ้นกับความยาวของคลื่น โดยความจริงแล้วความยาวของคลื่นยังสัมพันธ์พลังงานของคลื่นแสงจะยิ่งมาก

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

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

$$\text{หรือ } 1 \text{ eV จะเท่ากับ } 1.6 \times 10^{-19} \text{ joule} \text{ นั่นเอง}$$

จากกฎของไอส์ไตน์เขียนเป็นสูตรได้ว่า

$$E = hv$$

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

เมื่อ  $c$  = ความเร็วของแสง

$\lambda$  = ความยาวของคลื่นแสง

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

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

ดังนั้นสมการของไอส์ไตน์จะเปลี่ยนเป็น

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

$$\text{เมื่อ } h = \text{Planck's Constant} = 6.63 \times 10^{-34} \text{ joule-sec}$$

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

$$\lambda = \text{ความยาวของคลื่นแสง}$$

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  $1 \mu = 10^{-6} \text{ m}$  ดังนั้นสูตรของไฮน์สไตน์คือ

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

### ตัวอย่างที่ 2.1

จงหาพลังงานของความยาวคลื่นแสงสีแดง

ข้อมูล : คลื่นแสงสีแดงมีความยาวคลื่นประมาณ 0.7 ไมครอน ( $\mu$ )

จากสูตร

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

$$\text{เพราะฉะนั้น } E = \frac{1.25}{0.70}$$

$$E = 1.79 \text{ eV} \quad \text{สำหรับคลื่นแสงสีแดง}$$

### ตัวอย่างที่ 2.2

จงหาพลังงานของความยาวคลื่นแสงสีม่วง

ข้อมูล : แสงสีม่วงมีความยาวคลื่นประมาณ 0.4 ไมครอน

จากสูตร

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

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

$$E = 3.13 \text{ eV} \quad \text{สำหรับคลื่นแสงสีม่วง}$$

### ตัวอย่างที่ 2.3

คลื่นแสงชนิดใดระหว่างอัลตราไวโอเล็ต และอินฟราเรดที่มีพลังงานมากกว่ากัน  
 เนื่องจากความยาวของคลื่นแสงเป็นตัวหาร เมื่อตัวหารมีค่ามากกว่าที่ได้จะน้อยลง  
 ดังนั้นคลื่นแสงที่ยาว พลังงานก็จะน้อยลง (ระหว่างคลื่นอินฟราเรด และคลื่นอัลตราไวโอเล็ต  
 คลื่นอินฟราเรดจะยาวกว่า ดังนั้นคลื่นอินฟราเรดมีพลังงานน้อยกว่า)

### 2.2 แสง อะตอมและโมเลกุล

บางทีเราอาจคิดว่าสูตรของไฮสไตน์เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิต่ำกว่าความจริงแล้ว  
 สูตรนี้เป็นสูตรที่จำกัดของอุณหภูมิต่ำกว่าจะไม่ได้นำมาใช้ในการพยากรณ์อากาศโดยตรงก็ตาม  
 ดวงอาทิตย์จะแผ่รังสีออกมาทุกความยาวคลื่น แต่จะแผ่รังสีที่มองเห็นได้ด้วย  
 เข้มมากที่สุด ประมาณ 9% ของรังสีดวงอาทิตย์ประกอบด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต เนื่องจากแสง  
 นี้มีความยาวคลื่นสั้นกว่า ดังนั้นจึงมีพลังงานมาก และสามารถทำให้อะตอมและ  
 โมเลกุลแตกตัวได้

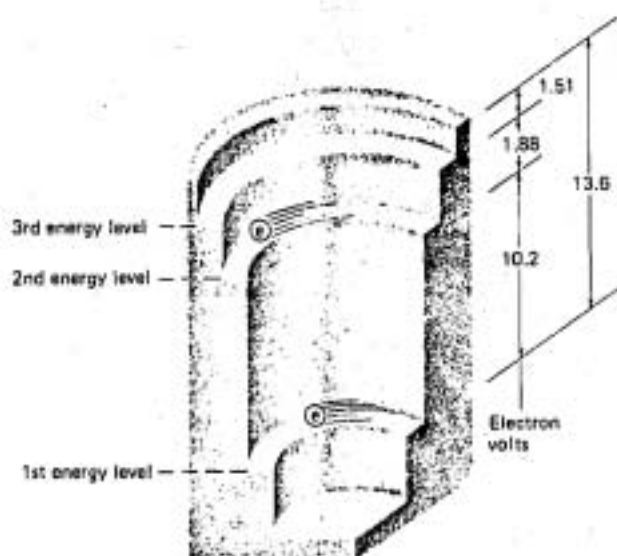
ร่างกายของเราเกิดจากอะตอมและโมเลกุลเช่นเดียวกัน คลื่นแสงที่มีความยาว  
 คลื่นสั้นมากพอ สามารถแยกโมเลกุลในร่างกายเราได้ซึ่งจะทำให้เกิดมะเร็งหรือตายได้ คลื่น  
 แสงที่มีความยาวคลื่นสั้นจากดวงอาทิตย์จะมาถึงยอดของบรรยากาศและอัลตราไวโอเล็ตที่เป็น  
 อันตรายจะถูกดูดกลืนโดยแก๊สในชั้นบรรยากาศเบื้องบนและจะเหลือส่วนที่ไม่เป็นอันตรายมาถึงพื้น  
 ดินเท่านั้น

ในปี ค.ศ. 1913 นิลส์ โบร์ (Niels Bohr) ได้ค้นพบว่าอิเล็กตรอนต่าง ๆ  
 สามารถมีแต่ละออร์บิทัลโดยเฉพาะ ที่จะใช้ในการหมุนรอบนิวเคลียส (ออร์บิทัลเหล่านี้บางครั้งรู้จัก  
 ในชื่อของเชลล์) ความประหลาดของธรรมชาติของการจำกัดการอนุญาตให้อิเล็กตรอนอยู่ในแต่ละ  
 ออร์บิทัลสามารถแสดงได้ง่าย ๆ ดังนี้ ถ้าเราผลักก้อนหินกลมรอบ ๆ ภายในซามอย่าง ก็จะสามารถ  
 ทำให้ก้อนหินอยู่ที่ออร์บิทัลใดก็ได้ เพียงแต่ปรับความเร็วเท่านั้น นั่นคือเป็นการปรับพลังงาน  
 ของก้อนหินนั่นเอง ถ้าเราเพิ่มพลังงานขึ้นเล็กน้อยในก้อนหินมันก็จะเลื่อนสูงขึ้น ไปข้างบนซามอย่าง  
 และถ้าเราเพิ่มพลังงานมาก ไปก้อนหินก็จะหลุดหลุดออกไปจากซามอย่าง (ดูรูป 2.1)



รูป 2.1 ก้อนหินสามารถหมุนรอบซามอย่างที่ความสูงใด ๆ ก็ได้

แต่ตามความเป็นจริงของการที่อิเล็กตรอนหมุนรอบออร์บิทัลจะไม่เป็นอิสระอย่างที่กล่าวแล้ว เราต้องเพิ่มพลังงานที่มีจำนวนแน่นอนลงในอิเล็กตรอนเพื่อที่จะเปลี่ยนออร์บิทัลของอิเล็กตรอนและจะไม่มีออร์บิทัลที่เกิดขึ้นในกึ่งกลาง และถ้าไม่เพิ่มพลังงานที่มีจำนวนแน่นอนลงในอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนก็จะไม่ยอมรับพลังงานใด ๆ ที่จะทำให้เลื่อนจากออร์บิทัลหนึ่งไปยังอีกออร์บิทัลหนึ่ง (ดูรูป 2.2)



รูป 2.2 อิเล็กตรอนสามารถหมุนรอบอะตอมในออร์บิทัลที่อนุญาต (permitted orbits) เฉพาะออร์บิทัลหนึ่ง ๆ เท่านั้น รูปนี้แสดงถึงออร์บิทัลบางออร์บิทัลในไฮโดรเจนอะตอม และพลังงานที่ต้องการในการเปลี่ยนออร์บิทัล

ในกรณีที่เราใส่พลังงานลงไปมากเพียงพอ เช่นใส่พลังงานลงไป 10.2 eV ก็จะสามารถยกให้อิเล็กตรอนของไฮโดรเจนอะตอมในเซลล์ที่ 1 ซึ่งอยู่ต่ำสุด ให้เลื่อนไปอยู่ในเซลล์ที่ 2 ได้ (ถ้าค่าน้อยกว่า 10.2 eV ก็ไม่สามารถทำให้อิเล็กตรอนเลื่อนขึ้นไปได้) และถ้าจะให้อิเล็กตรอนหลุดออกไปจากเซลล์ที่ 1 ออกไปนอกไฮโดรเจนอะตอมนั้น ต้องใช้พลังงานอย่างน้อย 13.6 eV

กฎที่สำคัญก็คืออิเล็กตรอนพยายามเลื่อนลงไปอยู่ในเซลล์ที่ 1 เสมอเท่าที่มันสามารถทำได้ อย่างไรก็ตามในแต่ละเซลล์ของอะตอมจะมีอิเล็กตรอนจำนวนที่แน่นอนเท่านั้นที่อนุญาตให้อยู่ได้ ตัวอย่างเช่นมีอิเล็กตรอนจำนวน 2 ตัวเท่านั้นที่อยู่ในเซลล์ที่ 1 ซึ่งเป็นเซลล์ที่อยู่วงในสุด ถ้าหากอิเล็กตรอนของวงในสุดว่างลงอิเล็กตรอนที่อยู่วงนอกจะตกลงมาอยู่ในที่ซึ่งว่างนั้นทันที

เมื่ออิเล็กตรอนตกจากวงที่สูงลงมายังวงที่ต่ำกว่า มันจะสูญเสียจำนวนพลังงานเท่ากับที่มันได้รับเมื่อยกขึ้นจากวงใน พลังงานนี้จะถูกปล่อยออกมาและออกไปจากอะตอม

ถ้าหากเราต้องการที่จะยกอิเล็กตรอนให้ไปอยู่ในวงถัดไป หรือแม้แต่ชนให้อิเล็กตรอนหลุดกระเด็นออกจากอะตอมสามารถทำได้โดยการใส่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าลงไป ปริมาณของพลังงานที่พอเหมาะ และในทางกลับกันเมื่ออิเล็กตรอนตกลงมายังวงใน มันจะปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในปริมาณที่พอเหมาะออกเช่นเดียวกัน

เมื่ออิเล็กตรอนถูกชน (knock) หลุดออกจากอะตอม เราเรียกว่ามันถูกไอออไนส์ (ionized) ตัวไอออนก็คืออะตอมที่อิเล็กตรอน 1 ตัวหรือมากกว่าถูกแยกหลุดออกไป

#### ตัวอย่างที่ 2.4

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดใดถูกส่งออกมาเมื่ออิเล็กตรอนให้ไฮโดรเจนอะตอมตกจากพลังงานระดับที่ 2 ลงมายังพลังงานระดับที่ 1

ข้อมูล : จากรูป 2.2 มันจะส่งพลังงานออกมา 10.2 electron volts จากสมการของไฮสไตน์

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

แทนค่า

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

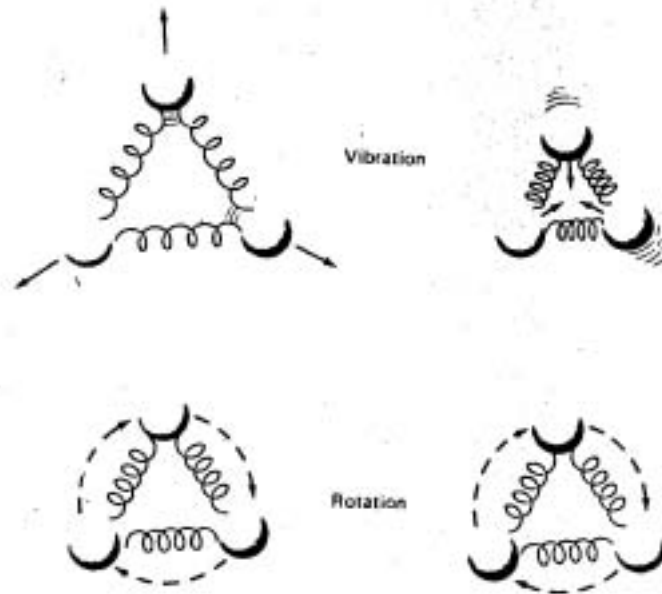
เพราะฉะนั้น  $\lambda = \frac{1.25}{10.2}$  ไมครอน

$$= 0.123 \text{ ไมครอน}$$

นี่คือความยาวของคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ต

ได้มีการพบว่าดวงอาทิตย์จะแผ่รังสีที่มีความยาวคลื่น 0.123  $\mu$  ออกมาเป็นจำนวนมากและทำให้นักวิทยาศาสตร์สรุปได้ว่าดวงอาทิตย์จะต้องมีจำนวนไฮโดรเจนอยู่เป็นจำนวนมากมายเช่นกัน

ความรู้ที่เกี่ยวกับอะตอมก็สามารถใช้ได้กับโมเลกุลเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามเนื่องจากโมเลกุลประกอบด้วยกลุ่มของอะตอม ดังนั้นพฤติกรรมก็ยิ่งยุ่งยากมากขึ้น อิเล็กตรอนในโมเลกุลสามารถเปลี่ยนออร์บิทัลเช่นเดียวกับในอะตอมนอกจากนี้โมเลกุลสามารถหมุน (rotate) หรือสั่นสะเทือน (vibrate) (ดูรูป 2.3) และเมื่อพลังงานที่พอเหมาะถูกเพิ่มเข้าไปในโมเลกุล มันอาจจะทำให้โมเลกุลหมุนมากขึ้น สั่นสะเทือนมากขึ้นหรือเปลี่ยนออร์บิทัลอิเล็กตรอน



รูป 2.3 การหมุน และการสั่นสะเทือนของโมเลกุล

ตัวหนึ่งในโมเลกุลก็ได้ และถ้าความยาวคลื่นแสงสั้นเพียงพอ มันสามารถทำให้อะตอมในโมเลกุลนั้นสั่นสะเทือนอย่างรุนแรง และทำให้โมเลกุลแยกออกจากกัน การแยกกันของโมเลกุลโดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเรียกว่า โฟโตดิสโซซิเอชัน (photodissociation) และเมื่ออิเล็กตรอนถูกแยกออกจากอะตอมหรือโมเลกุลโดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เราเรียกว่าเป็นการ โฟโตไอออไนส์ (photoionized) ถ้าโมเลกุลของอากาศชั้นบนไม่ได้ถูกแยกออกจากกันโดยคลื่นสั้นจากดวงอาทิตย์แล้วโมเลกุลในร่างกายของคนเราก็จะถูกแสงอาทิตย์ทำให้แยกออกจากกันแทนนั่นเอง

### 2.3 ออกซิเจนและโอโซน (Oxygen and Ozone)

ออกซิเจนโมเลกุล ( $O_2$ ) นั้นประกอบด้วยออกซิเจน 2 อะตอมและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานเพียง 5.12 electron volts ก็สามารถทำให้ออกซิเจนโมเลกุลแยกออกเป็น 2 อะตอมได้

จากสมการของไฮส์ไตน์

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

แทนค่า



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

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

$$= 0.244 \text{ ไมครอน}$$

ดังนั้นออกซิเจนถูกแยกออกจากกันด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต (ซึ่งอาจจะมีความสั้นสั้นกว่า 0.244  $\mu$  ก็ได้)

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

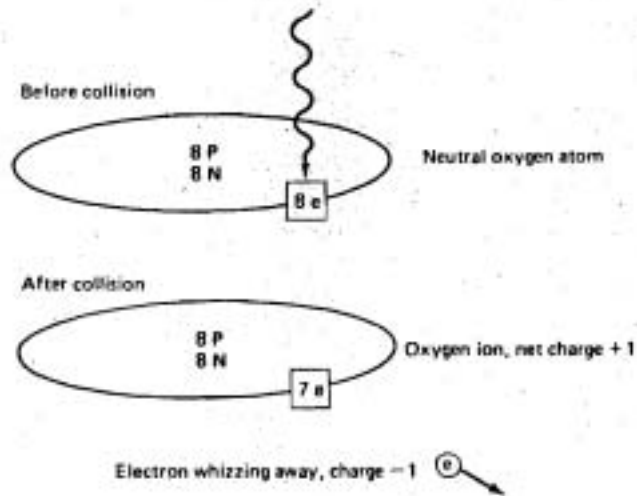
ที่ความสูงประมาณ 65 ถึง 115 กิโลเมตรในชั้นบรรยากาศเบื้องบน ออกซิเจนโมเลกุลจะกั้นแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นระหว่าง 0.1 ถึง 0.2 $\mu$  ออกไปได้ แต่การกั้นนี้  $O_2$  ต้องแยกตัวออกเป็นออกซิเจน 2 อะตอม และสำหรับคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่า 0.1 ไมครอนจะมีพลังงานสูง และเป็นอันตรายต่อมนุษย์เรามาก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

ออกซิเจนไอออนส์ และไอออนส์ของอะตอมอื่น ๆ และอิเล็กตรอนจะพบในบรรยากาศที่สูงกว่า 90 กิโลเมตรเหนือพื้นผิวโลก ดังนั้นบริเวณนี้จึงเรียกว่าไอโอโนสเฟียร์ (ionosphere) ซึ่งมีความสำคัญต่อการสะท้อนคลื่นวิทยุในบรรยากาศ

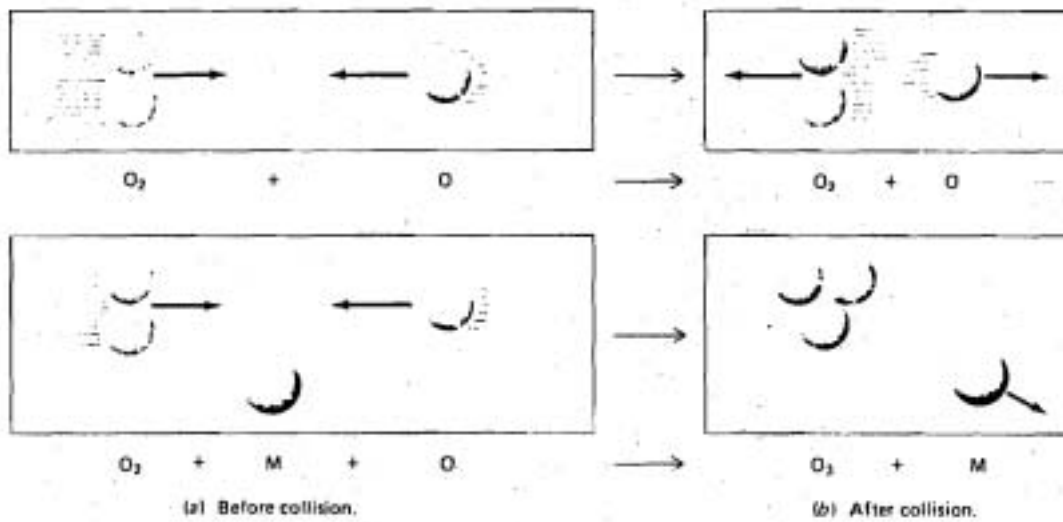
ที่กล่าวมาแล้วความยาวคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ตระหว่าง 0.1 ถึง 0.2 ไมครอน ได้ถูกกั้นเอาไว้ แต่ก็ยังมีคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ตที่เป็นอันตรายระหว่าง 0.2 - 0.3 ไมครอน ที่ยังไม่ได้กล่าวถึง ซึ่งความยาวคลื่นขนาดนี้ทั้ง O และ  $O_2$  ไม่สามารถถูกกั้นเอาไว้ได้ จะมีก็แต่โอโซน ( $O_3$ ) ซึ่งสามารถดูดกลืนคลื่นขนาดนี้เอาไว้ได้ ดังนั้นเราพิจารณาว่าโอโซนเกิดขึ้นในบรรยากาศได้อย่างไร

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





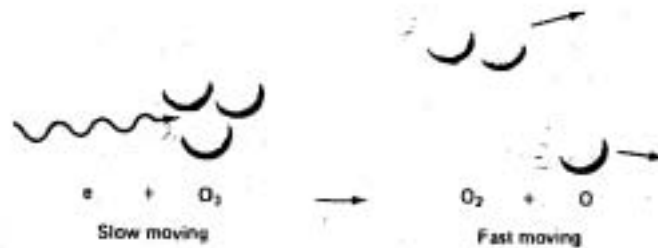
รูป 2.4 การโฟโต ไอออนไนส์ของออกซิเจนอะตอม



รูป 2.5 การเกิดโอโซน ซึ่งต้องการโมเลกุลที่เป็นกลางในการดูดกลืนพลังงานส่วนเกินที่เกิดจากการชนกัน

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

เมื่อโอโซนดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่น 0.2 ถึง 0.3 ไมครอน เอาไว้ก็จะแตกตัวออกจน  $O$  และ  $O_2$  (ดูรูป 2.6)



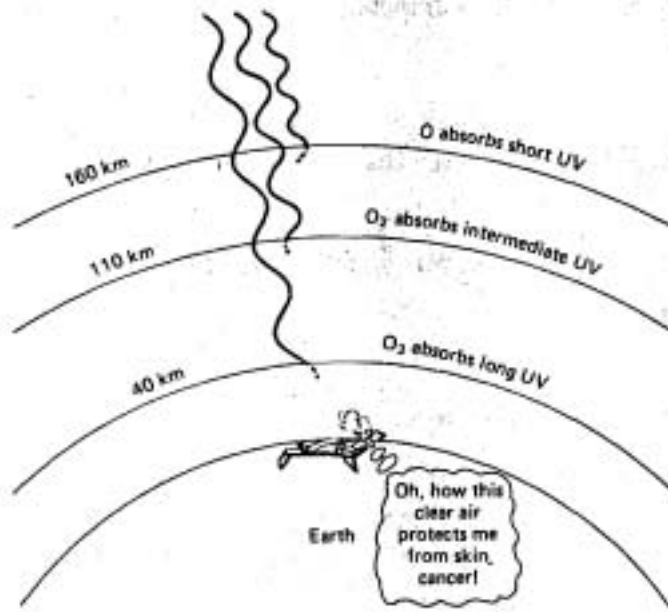
รูป 2.6 การแตกตัวเป็นไอออนส์ของโอโซนโมเลกุลในชั้นสตราโตสเฟียร์ และออกซิเจนอะตอมจะรวมกับ  $O_2$  โมเลกุลใหม่อีกเพื่อให้ผลของกระบวนการทั้งหมดเพิ่มความร้อนแก่ชั้นสตราโตสเฟียร์นั่นเอง

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)

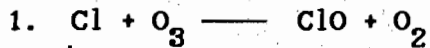


รูป 2.7 ชั้นต่าง ๆ ที่ดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตคลื่นสั้นเอาไว้

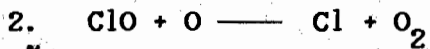
### 2.3.1 แก๊สคลอโรฟลูออโรคาร์บอนและการทำลายโอโซนในบรรยากาศ

ร่างกายของคนเรานั้นสามารถสร้างวิตามิน D ได้จากแสงอัลตราไวโอเล็ตเมื่อผิวหนังถูกกับแสงแดด วิตามิน D นี้มีความสำคัญต่อการสร้างกระดูกในร่างกายของคน ในกรณีที่มีชั้นโอโซนมีมากเกินไป แสงอัลตราไวโอเล็ตก็จะมึ้นน้อย การสร้างวิตามิน D ในร่างกายก็มีได้ไม่พอ ซึ่งจะทำให้เกิดโรคกระดูกงู (rickets) และถ้าชั้นโอโซนในบรรยากาศมีน้อย แสงอัลตราไวโอเล็ตที่เป็นอันตรายจะมาถึงคนเราได้มากซึ่งทำให้สร้างวิตามิน D ในร่างกายมากเกินไป ทำให้เกิดการเกาะของหินปูนที่ไต หรือทำให้เกิดมะเร็งที่ผิวหนัง ดังนั้นโอโซนในชั้นบรรยากาศจะต้องมีอยู่พอเหมาะพอดีจึงทำให้คนเรามีชีวิตอยู่ได้

ยังเชื่อกันว่าไซเคไมต์ ที่แก๊สคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (chlorofluorocarbon) (อักษรย่อ CFC) ซึ่งมีสูตรโครงสร้าง  $\text{CCl}_2\text{F}_2$  ที่บรรจุอยู่ในกระป๋องสเปรย์และเครื่องทำความเย็นสามารถลอยไปถึงชั้นบรรยากาศเบื้องบน และดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตเอาไว้ และปล่อยคลอรีนออกมา คลอรีนนี้จะทำปฏิกิริยากับโอโซนและเกิดเป็นคลอรีนออกไซด์ (ClO) และ  $\text{O}_2$  ไมเลกุล



และคลอรีนออกไซด์ จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนอะตอมและให้คลอรีนอะตอมกลับออกใหม่บวกกับออกซิเจนโมเลกุล



คลอรีนที่ได้ใหม่นี้ก็จะกลับไปที่ปฏิกิริยาเดิมกับโอโซนโมเลกุลอื่นและจะต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ ทำให้โอโซนในบรรยากาศหมดไป

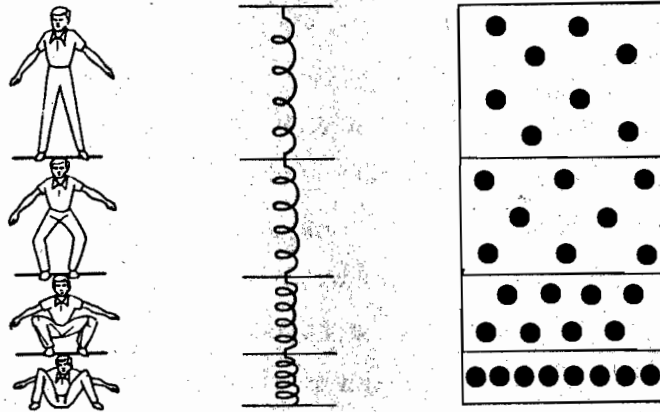
จะเห็นว่าสาร CFC ที่บรรจุอยู่ในเครื่องทำความเย็นและกระป๋องสเปรย์เป็นอันตรายต่อโอโซนในบรรยากาศอย่างยิ่ง

#### 2.4 โครงสร้างของชั้นบรรยากาศในแนวตั้ง (Vertical Structure of the Atmosphere)

ถ้าเราขึ้นไปในชั้นบรรยากาศ อากาศจะเบาบางและความกดจะลดลงเมื่อขึ้นไปได้สูงประมาณ 5.5 กิโลเมตรเหนือระดับน้ำทะเล ครึ่งหนึ่งของบรรยากาศจะอยู่ในระดับนี้ อากาศที่ 5.5 กม. จะเบาบางกว่า (มีความหนาแน่นน้อยกว่า) อากาศที่ระดับน้ำทะเล และมนุษย์ไม่สามารถมีชีวิตที่ระดับความสูงนี้ได้เพราะอากาศมีน้อยเกินไปที่จะหายใจได้ และแม้แต่ไฟก็จะลุกได้ไม่ดีเช่นกัน

ถ้าเราขึ้นไปอีก 5.5 กิโลเมตร ถึงระดับความสูง 11 กิโลเมตรเหนือระดับน้ำทะเล เราไม่ได้ผ่านชั้นบรรยากาศไปอีกครึ่งหนึ่ง แต่ว่าเราผ่านขึ้นไปประมาณครึ่งหนึ่งของบรรยากาศส่วนที่เหลือ หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งว่าทุก ๆ 5.5 กิโลเมตร ที่เราขึ้นไป ความกดของบรรยากาศจะลดลงครึ่งหนึ่งของค่าเดิม การที่เป็นเช่นนี้ขึ้นกับความจริงที่ว่า อากาศสามารถอัดตัวได้และอากาศที่เบื้องล่างจะถูกอัดตัวด้วยอากาศทั้งหมดที่อยู่เหนือขึ้นไป สมมติว่าเรามีสปริงอยู่ชุดหนึ่งโดยที่มีสปริง แต่ละท่อนวางซ้อนเหนือขึ้นไป สมมุติว่าน้ำหนักในแต่ละท่อนมีค่าเท่ากันจะเห็นชัดว่า สปริงที่อ่อนล่างสุดจะอัดตัวมากที่สุด ในขณะที่สปริงที่อ่อนบนสุดจะยืดออกมากที่สุด (ดูรูป 2.8) จากสมการแก๊สอุดมคติ (ideal gas) แสดงถึงผลลัพธ์ที่เหมือนกัน คือเมื่อความกดลดลงครึ่งหนึ่งปริมาตรจะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า (ในการพิจารณาอุณหภูมิคงที่)

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



รูป 2.8 ความกดอากาศและความหนาแน่นลดลงพร้อมกับความสูงเพราะเบื้องบนมีน้ำหนักน้อยกว่า อากาศประพืดดินคล้ายที่อนสปริง

นักอุตุนิยมวิทยาจะใช้แผนที่อากาศมาตรฐาน (เรียกว่า constant pressure chart) บอกลักษณะอากาศที่ความสูงต่างๆ เทียบพื้นดิน ในตาราง 2.1 บอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างความกดและความสูงต่าง ๆ เทียบระดับน้ำทะเล

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 นักวิทยาศาสตร์คิดว่าเมื่อขึ้นไปสูงในชั้นบรรยากาศอุณหภูมิก็น่าจะยิ่งลดลงจนกระทั่งประมาณปี ค.ศ. 1900 Teisserenc de Bort พบว่าที่ความสูงประมาณ 12 กิโลเมตร จากพื้นดิน อุณหภูมิของอากาศจะหยุดลดลงตามความสูงและให้ชื่อชั้นที่ติดกับพื้นดินนี้ว่า ชั้นโทรโพสเฟียร์ (troposphere) (ซึ่งแปลว่าบรรยากาศที่เปลี่ยนแปลง) และชั้นนี้เองเป็นชั้นที่เกิดของ พายุ และ กาลอากาศ (weather)

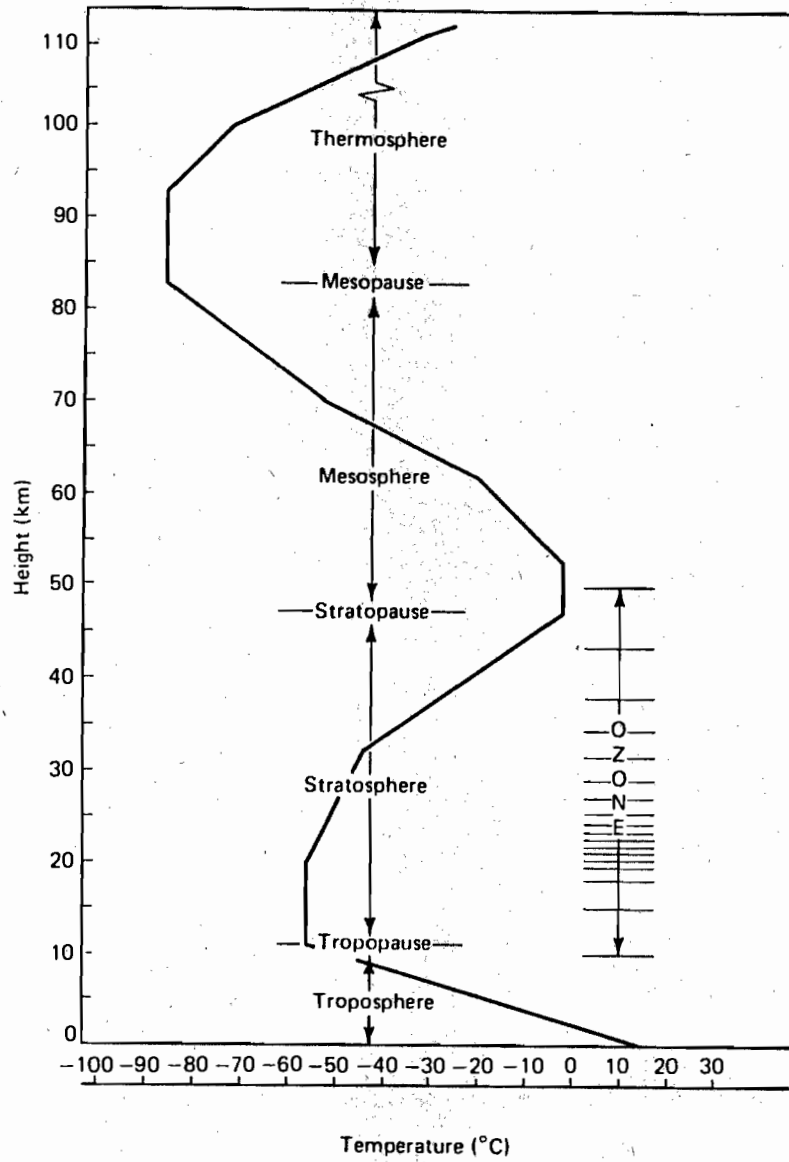
พ้นจากชั้นโทรโพสเฟียร์ ก็จะผ่านชั้น โทรโปพอส (tropopause) เพื่อที่จะขึ้นไปชั้นถัดไปชั้นที่ 2 ซึ่งเรียกว่าสตราโตสเฟียร์ (stratosphere) ในชั้นนี้อุณหภูมิมีระดับคงที่อยู่ที่ส่วนหนึ่งก่อน และค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเมื่อสูงขึ้นไปจากพื้นดิน ที่ความสูงประมาณ 50 กิโลเมตร อุณหภูมิจะขึ้นสูงสุด และจะต้องผ่านชั้น สตราโตพอส (stratopause) เพื่อผ่านเข้าไปชั้นที่ 3 ที่เรียกว่ามีโซสเฟียร์ (mesosphere) ภายในชั้นมีโซสเฟียร์อุณหภูมิจะลดลงตามความสูงและที่ความสูงประมาณ 80 กิโลเมตร ก็จะผ่านชั้นมีโซพอส (mesopause) เพื่อเข้าสู่ชั้นที่ 4 ซึ่งเรียกว่าเทอร์โมสเฟียร์ ชั้นนี้อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นมากมายตามความสูง บางที่อุณหภูมิอาจขึ้นถึง  $1200^{\circ}\text{C}$  ก็ได้ ชั้นเทอร์โมสเฟียร์นี้บางที่รู้จักในนามไอโอโนสเฟียร์ (ionosphere) ด้วย (ดูรูป 2.9)

จากที่กล่าวมาแล้ว สรุปได้ว่าจะมีบริเวณที่อบอุ่นอยู่ 3 บริเวณคือที่พื้นดินที่ความสูง 50 กิโลเมตร และเหนือชั้นความสูง 80 กิโลเมตร บริเวณเหล่านี้อบอุ่นเพราะมีแหล่งความร้อนโดยเฉพาะ ส่วนบริเวณที่เย็นเพราะขาดแหล่งความร้อนนั่นเอง

แหล่งความร้อนสำหรับพื้นดินคือแสงจากดวงอาทิตย์ แสงแดดส่วนใหญ่สามารถส่องทะลุชั้นบรรยากาศลงมาได้และถูกดูดกลืนที่พื้นดิน ผลก็คือพื้นดินจะร้อนขึ้นและทำให้อากาศที่อยู่เหนืออุ่นตามไปด้วย แม้ว่าอากาศอุ่นจะลอยขึ้นจากพื้นดินแต่ในชั้นบน ๆ ของโทรโปสเฟียร์ อากาศก็ยังไม่เย็นเพราะเมื่ออากาศลอยตัวขึ้นจะขยายตัวและเย็นลง

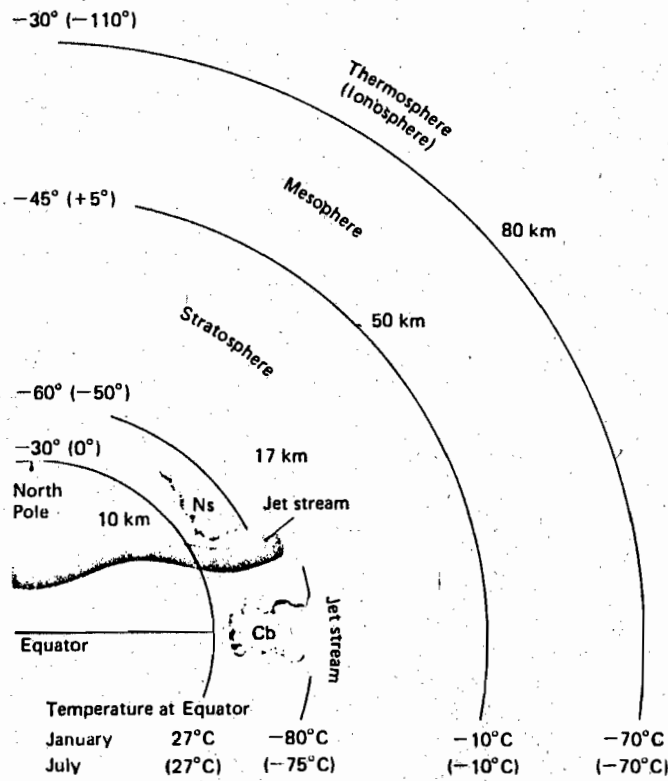
ชั้นที่มีความร้อนขึ้นถัดไปคือชั้น สตราโตสเฟียร์ ชั้นนี้โอโซนจะดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่นระหว่าง 0.2 ถึง 0.3 ไมครอน ดังที่กล่าวแล้ว สำหรับชั้นที่มีความร้อนขึ้นบนสุดก็คือชั้น เทอร์โมสเฟียร์ อะตอมและโมเลกุลต่าง ๆ จะดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่นสั้นที่สุดเอาไว้ และจะเกิดการแยกตัวและร้อนขึ้นจากรูป 2.10 จะแสดงถึงลักษณะอุณหภูมิในเดือนมกราคม และเดือนกรกฎาคมในซีกโลกทางเหนือ เป็นที่น่าประหลาดที่ว่าส่วนของโทรโปพอส ที่เย็นที่สุดของทั้งสองเดือนนี้ ได้แก่ที่เส้นศูนย์สูตรแทนที่จะเป็นที่ขั้วโลก คือที่เส้นศูนย์สูตรที่ความสูง 17 กิโลเมตร อุณหภูมิมีค่า  $-80^{\circ}\text{C}$

ที่ขั้วโลกจะมีความแตกต่างในอุณหภูมิระหว่างเดือนมกราคม และกรกฎาคมความแตกต่างที่มากมายขึ้นกับความจริงที่ว่า ในระหว่างเดือนมกราคมจะไม่มีแสงแดดส่องมาถูกขั้วโลกเหนือ แหล่งความร้อนที่ความสูง 50 กม. จะขาดไปผลที่ตามมาคืออุณหภูมิจะยิ่งลดลงเมื่อความสูงเพิ่มขึ้น



รูป 2.9 โครงสร้างอุณหภูมิของบรรยากาศจนถึงความสูงประมาณ 110 กิโลเมตร





รูป 2.10 ชั้นต่าง ๆ ของบรรยากาศ อุณหภูมิที่แสดงเป็นของเดือนมกราคม และเดือนกรกฎาคม (ค่าของเดือนกรกฎาคมจะอยู่ในวงเล็บ)

### 2.5 ชั้นไอโอโนสเฟียร์และคลื่นวิทยุ (The Ionosphere and Radio Waves)

ในเวลากลางคืนชั้นไอโอโนสเฟียร์มีประโยชน์ช่วยในการรับคลื่นวิทยุทางไกล อีออนส์ที่เกิดในชั้นไอโอโนสเฟียร์มีผลต่อคลื่นวิทยุได้ 2 ประการคือสามารถทั้งดูดกลืนคลื่นและสะท้อนคลื่นวิทยุได้ ในชั้นล่างของไอโอโนสเฟียร์ คลื่นวิทยุจะถูกดูดกลืนและในชั้นบนของไอโอโนสเฟียร์คลื่นวิทยุจะถูกสะท้อน ดังนั้นส่วนบนจึงทำหน้าที่คล้ายกระจก

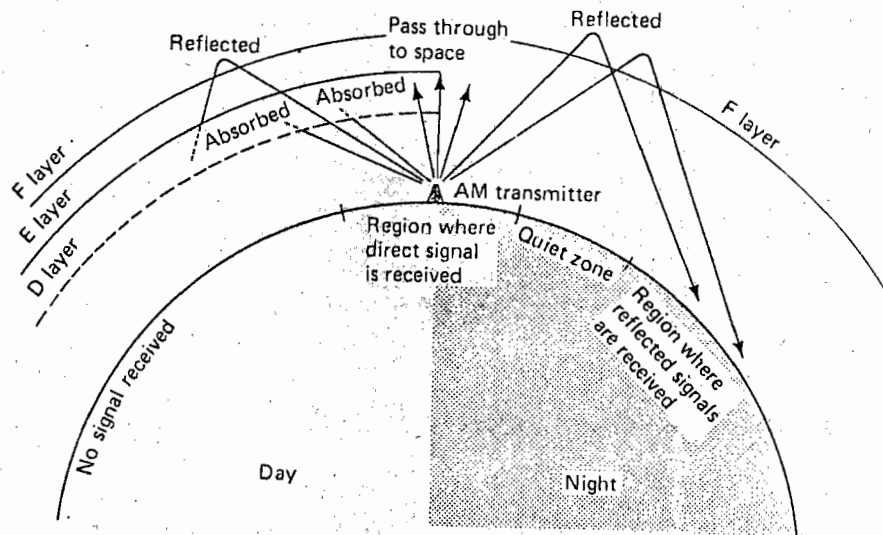
สำหรับในระยะทางสั้น ๆ บนพื้นโลก คลื่นวิทยุสามารถรับได้โดยตรงจากเครื่องส่ง แต่เพราะโลกโค้งคลื่นวิทยุที่ส่งมาจากระยะทางไกลจะรับโดยตรงไม่ได้ดังนั้นการสะท้อนจากบรรยากาศเบื้องบนจึงทำให้การส่งคลื่นวิทยุทางไกลสามารถทำได้

ในกรณีที่คลื่นวิทยุกระทบกับชั้นบรรยากาศแบบตรง ๆ คลื่นจะไม่สะท้อนแต่จะทะลุชั้นบรรยากาศออกไป ซึ่งดูได้จากรูป 2.11 สำหรับในรูปจะมีโซนเงียบ (quiet zone) ซึ่งจะ เป็นโซนที่ไกลเกินไปจากสถานีส่งวิทยุที่จะรับคลื่นได้ และขณะเดียวกันเป็นโซนที่ใกล้เกินไปที่จะ รับคลื่นวิทยุที่สะท้อนจากชั้นบรรยากาศเบื้องบน

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

เหตุผลที่ชั้น  $F_2$  เป็นชั้นที่สะท้อนได้ดีในระหว่างเวลากลางวันก็เพราะในเวลากลางวันนั้นมีจำนวนไอออนล้อยู่มากกว่าในเวลากลางคืน ส่วนในตอนกลางคืน ไอออนล้จะรวมตัวกับ อิเล็กตรอนกลับเป็นอะตอมตามเดิม

จำนวนไอออนล้ที่เพิ่มขึ้นในตอนกลางวันก็จะเกิดขึ้นเช่นเดียวกับในส่วนล่างของชั้น ไอไอโนสเฟียร์ ซึ่งเรียกว่าชั้น D ชั้น D นี้เป็นชั้นที่ดูดกลืนคลื่นวิทยุทางไกลในเวลากลางวัน แต่ในเวลากลางคืนชั้น D จะหายไป ดังนั้นคลื่นวิทยุจะถูกดูดกลืนเฉพาะแต่ในเวลากลางวันเป็นส่วนใหญ่



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

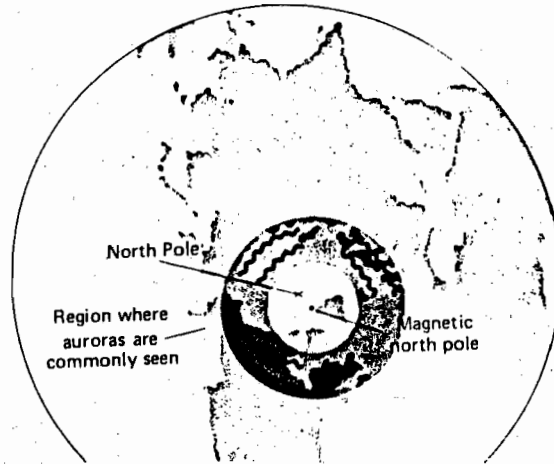
เมื่อคลื่นวิทยุถูกส่งออกไปในเวลากลางวันจะมีคลื่นวิทยุบางส่วนสามารถทะลุชั้น D ขึ้นไปได้และจะสะท้อนในชั้น  $F_2$  (ดูรูป 2.12) คลื่นที่ถูกสะท้อนนี้ก่อนที่จะมาถึงพื้นดินก็ต้องผ่านชั้น D เป็นหนที่สอง ซึ่งจะทำให้คลื่นวิทยุถูกดูดกลืนไปเกือบหมด ในเวลากลางคืนชั้น D หายไป

หมดตั้งนั้นคลื่นวิทยุจะขึ้น ไปสะท้อนในชั้น  $F_2$  และกลับลงมายังพื้นดิน ได้โดยสะดวกห่างจากสถานีส่งนับเป็นร้อย ๆ กิโลเมตร

## 2.6 แสงออโรรา (The Aurora)

ออโรราเป็นเหมือนพายุที่ เกิดขึ้นในตอนกลางคืนแถบขั้วโลก ออโรราสามารถมีได้หลายรูปแบบ และอาจมีลักษณะคล้ายมันที่พัด ไปมาในอากาศมีสีเขียว น้ำเงินหรือสีแดง ถ้าเกิดขึ้นทางขั้วโลกเหนือเรียกว่า แสงออโรราเหนือ (aurora borealis) และถ้าเกิดในซีกโลกใต้เรียกว่า แสงออโรราใต้ (aurora australis)

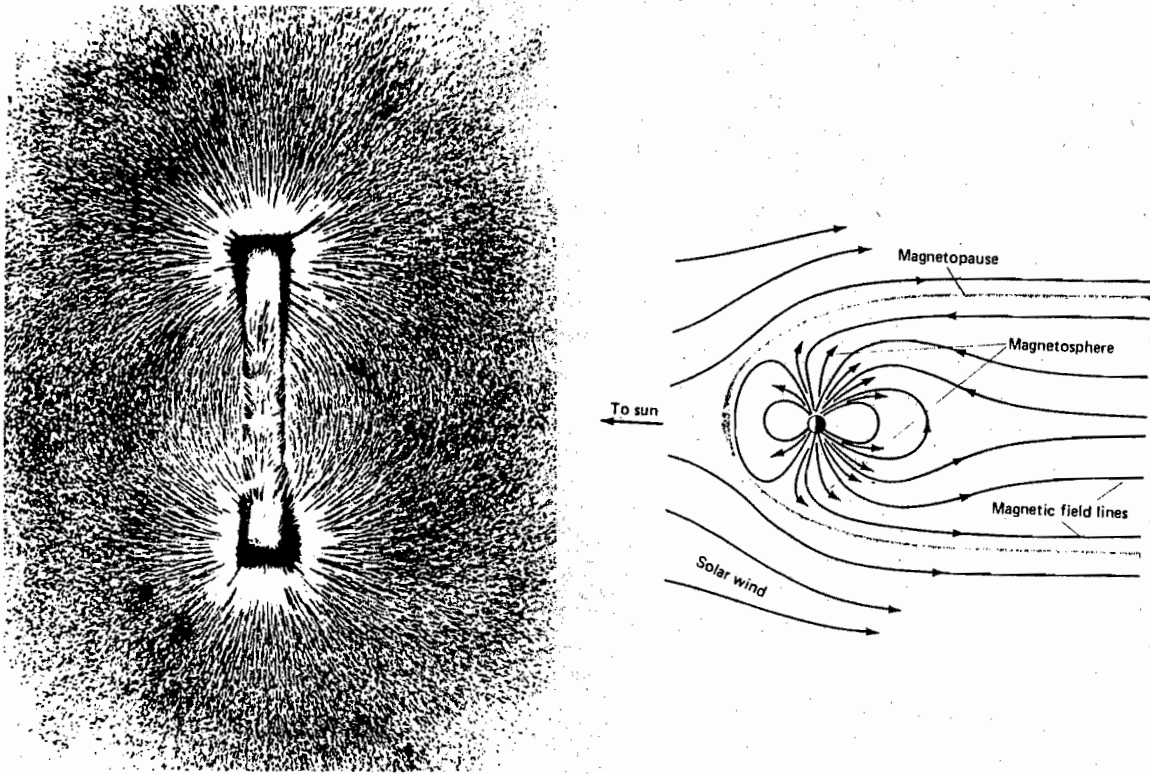
ออโรราสามารถมองเห็น ได้ในคืนที่ท้องฟ้าแจ่มใสถ้ายืนอยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง เวลาที่มองเห็นออโรราได้ดีที่สุดคือ เวลาเที่ยงคืน สถานที่ที่เหมาะสมก็คือแถบวงกลมที่ล้อมรอบขั้วแม่เหล็กโลก (magnetic north pole) ซึ่งแถบนี้มีความกว้างสองสามร้อยกิโลเมตร (ดูรูป 2.12) และอยู่ห่างขั้วแม่เหล็กโลกประมาณ 2000 กิโลเมตร



รูป 2.12 บริเวณรูปร่างแหวนที่ล้อมรอบขั้วแม่เหล็กโลกที่สามารถมองเห็นออโรราได้

เนื่องจากออโรรามีศูนย์กลางอยู่ที่ใกล้ขั้วแม่เหล็กโลก ดังนั้นจึงมีความเกี่ยวข้องกับแม่เหล็ก เมื่อเราใช้เข็มทิศหาทิศทางนั้น เข็มทิศจะไม่ชี้ไปทางทิศเหนือโดยตรง แต่เข็มจะชี้ไปยังขั้วแม่เหล็กโลก ซึ่งจะอยู่ใกล้กับขั้วภูมิศาสตร์โลก (geographical north pole)

ในปี ค.ศ. 1600 วิลเลียมกิลเบิร์ต (William Gilbert) ได้ค้นพบว่าโลกทำตัวเหมือนกับแท่งแม่เหล็กอันมหัศจรรย์ สำหรับแท่งแม่เหล็กนั้นถ้าเราโรยผงตะไบเหล็กลงไปโดยรอบก็จะปรากฏสนามเส้นแรงแม่เหล็กให้เห็น สำหรับในรูป 2.13 แสดงให้เห็นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากโลก เส้นแรงเหล่านี้แสดงคุณสมบัติที่สลับหลายอย่าง ขณะใดก็ตามที่ประจุไฟฟ้าพยายามเคลื่อนที่ข้ามเส้นแรงแม่เหล็ก มันจะถูกบิดเป็นเกลียว (twist) ด้วยสนามแม่เหล็ก

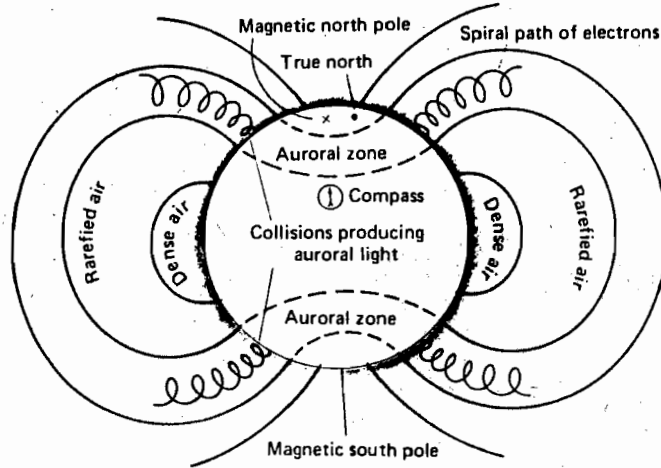


รูป 2.13 รูปเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากแท่งเหล็กและที่เกิดจากโลก หมายถึงอนุภาคต่างจากลมสุริยะจะเข้าสู่สนามแม่เหล็กโลกจากด้านตรงกันข้ามกับดวงอาทิตย์

ออโรร่า นั้นถูกทำให้เกิดขึ้นด้วยกระแสธาร (stream) ของอิเล็กตรอนและโปรตอน ที่พวยพุ่งจากดวงอาทิตย์ ภายในดวงอาทิตย์นั้นประกอบด้วยไฮโดรเจนเป็นส่วนใหญ่ และเนื่องจากมีอุณหภูมิสูงมาก ดังนั้นไฮโดรเจนส่วนมากจะถูกไอออไนส์และจะกลายเป็น โปรตอนและอิเล็กตรอน ทั้งโปรตอนและอิเล็กตรอนที่พวยพุ่งออกจากดวงอาทิตย์เราเรียกว่าลมสุริยะ (solar wind) และจะชนกับโลกโดยตรงถ้าไม่มีสนามแม่เหล็กโลกกั้นเอาไว้ เมื่ออิเล็กตรอนและอิเล็กตรอนเข้ามาสัมผัสกับสนามแม่เหล็กโลกก็จะถูกบิดเป็นเกลียวโดยสนามแม่เหล็กโลก และส่วนหนึ่งของอิเล็กตรอนจะถูกกักเอาไว้ในสนามแม่เหล็ก สำหรับในส่วนของสนามแม่เหล็กโลกนั้นทั้งโปรตอนและอิเล็กตรอนจะถูกเร่งให้มีความเร็วขึ้นอย่างมหาศาลโดยกระบวนการที่ยังไม่แน่ชัด ทั้งโปรตอนและอิเล็กตรอนที่ถูกขังอยู่ในชั้นบรรยากาศซึ่งเรียกเมกนีโตสเฟียร์ (magnetosphere) จะหมุนเป็นเกลียว (spiral) รอบ ๆ เส้นสนามแม่เหล็กโลก และจะกระโดดไปมา (bouncing) ระหว่างขั้วแม่เหล็กโลกเหนือและขั้วแม่เหล็กโลกใต้ของอนุภาค

เหล่านี้จะอยู่สูงเหนือพื้นผิวโลกซึ่งเป็นส่วนที่เกือบเป็นสุญญากาศเสียส่วนใหญ่ดังนั้นโอกาสที่โปรตอนและอิเล็กตรอนจะชนกับอากาศก็มีน้อย

อย่างไรก็ตามเมื่ออนุภาคของประจุเหล่านี้เคลื่อนที่ลงมาถึงขั้วโลกมันจะเข้าใกล้พื้นผิวโลกที่มีบรรยากาศหนาแน่น และถ้าอิเล็กตรอนและโปรตอนยังมีความเร็วในการเคลื่อนที่มากเท่าไร โอกาสที่อนุภาคทั้งสองจะเข้าใกล้ขั้วแม่เหล็กโลกและพื้นดินก็ยังมีมากเท่านั้น (ดูรูป 2.14)



รูป 2.14 แสงออโรราและความสัมพันธ์กับสนามแม่เหล็กโลก อิเล็กตรอนจะหมุนเป็นเกลียวขึ้นลงระหว่างขั้วแม่เหล็กโลกตามเส้นทางของเส้นแรงแม่เหล็ก แสงออโรราจะเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนสามารถเข้าใกล้โลกเพียงพอเพื่อที่จะชนกับโมเลกุลของอากาศ

เมื่ออิเล็กตรอนและโปรตอนเข้าใกล้พื้นผิวโลก โอกาสที่อนุภาคเหล่านี้จะชนกันกับโมเลกุลของอากาศก็ยังมีมาก อิเล็กตรอนที่ทำให้เกิดออโรรานั้นเดินทางด้วยความเร็วมากกว่าเศษหนึ่งส่วนสิบของความเร็วแสง และมีพลังงานมากกว่า 10,000 อิเล็กตรอนโวลต์ พลังงานขนาดนี้สามารถไอออนไนส์อะตอมได้อย่างง่ายดาย

เนื่องจากโซนที่มีการชนเกิดขึ้นเมื่อเส้นแรงแม่เหล็กโลกเข้าใกล้กับพื้นผิวโลกและเกิดขึ้นรอบ ๆ ขั้วแม่เหล็กโลกนั่นเอง ดังนั้นออโรราจึงเกิดขึ้นรอบขั้วแม่เหล็กโลกเช่นเดียวกัน อะตอมต่าง ๆ จะถูกไอออนไนส์ด้วยอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูง แสงและพลังงานจะถูกปล่อยออกมาเมื่อไอออนส์รวมตัวกลับเหมือนเดิม (พลังงานที่ปล่อยได้จากการดูดกลืนเมื่อมีการชนกันเกิดขึ้น) แสงที่เกิดขึ้นก็คือแสงออโรรานั้นเอง

โดยทั่วไปออโรราสามารถมองเห็นใกล้กับแถบวงกลมที่กล่าวแล้วอย่างไรก็ตามเมื่อเกิดจุดดับในดวงอาทิตย์ ลมสุริยะจะมีความรุนแรงขึ้นประมาณสองสามวันและผลก็คือออโรราจะมีความสว่างมากขึ้น เวลาเช่นนี้เป็นที่รู้จักว่าเกิดพายุแม่เหล็ก (magnetic storm) และทำให้บรรยากาศเบื้องต้นทั้งหมดถูกรบกวนคลื่นวิทยุ และคลื่นทีวี จะถูกทำให้บิดเบือนได้มาก

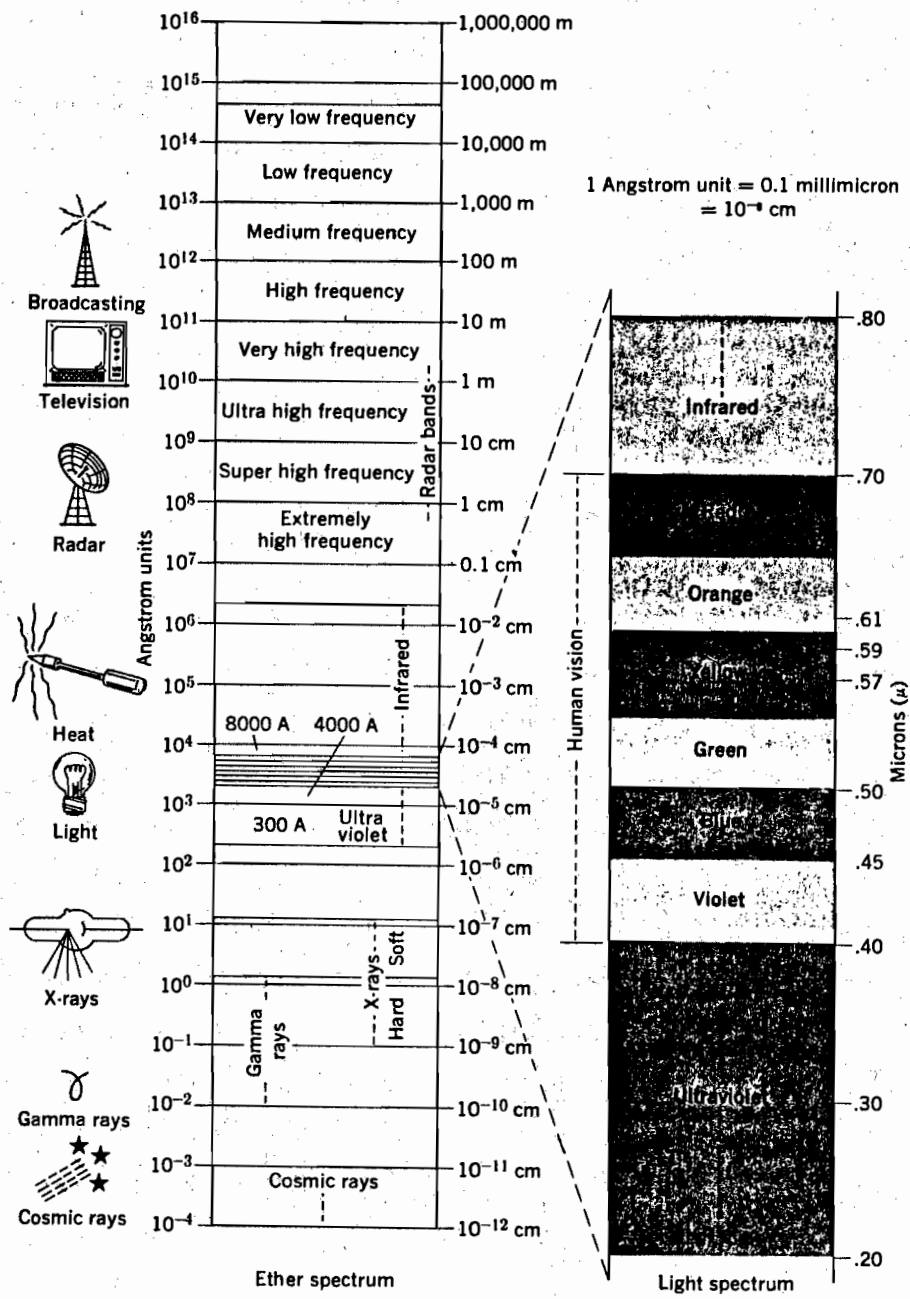
## 2.7 การแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ (Solar Radiation)

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

### 2.7.1 คุณสมบัติของพลังงานแสงที่แผ่ออก (Characteristic of Radiant Energy)

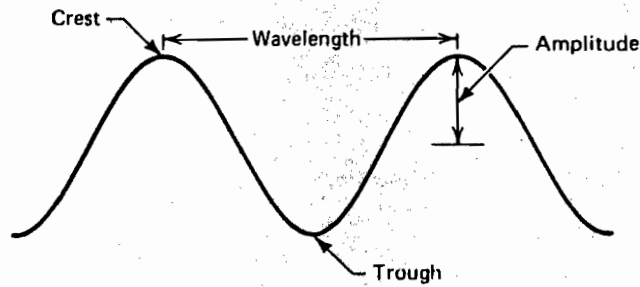
การเรียกชื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพราะมันแสดงคุณสมบัติของทั้งไฟฟ้าและแม่เหล็กพร้อมกันทั้งสองอย่าง วัตถุทุกชนิดที่มีอุณหภูมิเกินกว่าศูนย์องศาสัมบูรณ์ (0 องศา K) จะต้องแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า, พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่วนใหญ่ที่มาถึงโลกมีจุดตั้งต้นจากดวงอาทิตย์และมีเพียงส่วนน้อยซึ่งไม่มีความสำคัญมาจากดวงดาว คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแต่ละชนิดเมื่อรวมกันเข้าจะกลายเป็นสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic spectrum) ซึ่งแสดงไว้ในรูป 2.15 แสงซึ่งเป็นรังสีที่มองเห็นได้ (visible light) จะเป็นส่วนเล็ก ๆ ส่วนหนึ่งของสเปกตรัมเท่านั้น คลื่นชนิดอื่น ๆ ก็ได้แก่คลื่นวิทยุ คลื่นไมโครเวฟ คลื่นอินฟราเรด (infrared) คลื่นอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet) เอ็กซ์เรย์ และแกมมาเรย์

รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางในรูปของคลื่นซึ่งจะบอกเป็นความยาวคลื่นและความถี่ ความยาวคลื่นก็คือระยะยอดคลื่นหนึ่งไปยังอีกยอดคลื่นหนึ่งดังแสดงไว้ในรูป 2.16 ความถี่ของคลื่นก็คือจำนวนยอดคลื่นที่ผ่านจุด ๆ หนึ่งในเวลา 1 วินาที ซึ่งจะมีหน่วยเป็นไซเคิลต่อวินาทีหรือเฮิรตซ์ (Hertz) สำหรับแอมพลิจูดก็คือความสูงของคลื่น สำหรับความถี่ของคลื่นจะแปรผกผัน



รูป 2.15 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า





รูป 2.16 ลักษณะของคลื่นแสง

กับความยาวคลื่น ความถี่สูงความยาวคลื่นก็จะยิ่งสั้น เช่นคลื่นวิทยุจะมีความถี่เพียงไม่กี่ร้อย เฮิรตซ์ และมีความยาวคลื่นนับเป็นร้อย ๆ กิโลเมตร ในขณะที่เกมม่าเรย์มีความถี่ของคลื่น  $10^{24}$  เฮิรตซ์ และความยาวคลื่นสั้นเพียง  $10^{-14}$  เมตรเท่านั้น

คลื่นแม่เหล็ก ไฟฟ้าจะเดินทางในสุญญากาศด้วยความเร็วเท่ากับแสงคือ 300,000 กิโลเมตรต่อวินาที แต่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทุกชนิดจะเดินทางช้าลงเมื่อส่องผ่านวัตถุ, ความเร็วขึ้นกับความยาวคลื่นและชนิดของวัตถุ เมื่อคลื่นแม่เหล็ก ไฟฟ้าเดินทางผ่านจากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่งมันอาจสะท้อนหรือหักเหก็ได้ เช่นเมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบพื้นผิวมหาสมุทรบางส่วนจะสะท้อนและบางส่วนจะหักเหทะลุลงไปในพื้นที่ คลื่นแม่เหล็ก ไฟฟ้ายังสามารถถูกดูดกลืนได้ เช่นดูดกลืนโดยพื้นผิวโลกและเปลี่ยนแปลงเป็นความร้อน เป็นต้น

คลื่นแม่เหล็ก ไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้น ก็จะมีพลังงานสูง โดยพิจารณาจากรูป 3.1 คลื่นวิทยุจะมีพลังงานต่ำและอยู่ปลายบนสุด ถัดลงมา ได้แก่คลื่นทีวีและคลื่นไมโครเวฟ สำหรับคลื่น ไมโครเวฟจะเป็นคลื่นที่ใช้ในการส่งวิทยุคมนาคม ใช้ในเตาอบและใช้ในการติดตามระบบความกดอากาศ (เรดาร์) เป็นต้น

คลื่นอินฟราเร็ดอยู่ระหว่างคลื่น ไมโครเวฟและแสงที่มองเห็นได้ เราไม่สามารถมองเห็นรังสีอินฟราเรดแต่สามารถสัมผัสด้วยความร้อนได้ เช่นเมื่อความร้อนส่งออกจากเตาไฟ

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

ต่ำกว่าแสงที่มองเห็นลงมา ไปก็คือแสงอัลตราไวโอเล็ต เอ็กซ์เรย์และแกมมาเรย์ สำหรับแสงอัลตราไวโอเล็ต จะเกี่ยวข้องกับการสร้างกระดูกของคนเรา ส่วนแสงเอ็กซ์เรย์และแกมมาเรย์ จะใช้ในด้านการแพทย์ เช่นใช้ในการรักษาโรคมะเร็ง เป็นต้น

### 2.7.2 การส่งผ่าน การดูดกลืน และการสะท้อน (Transmission Absorption and Reflection)

พลังงานที่แผ่ออก (radiant energy) ไม่เพียงแต่สามารถเดินทางผ่านอากาศได้ แต่ส่วนหนึ่งของมันสามารถเดินทางผ่านวัตถุบางชนิดได้อีก เช่นแสงสามารถเดินทางผ่านอากาศ น้ำ และแก้ว และแสงเอ็กซ์เรย์ซึ่งเป็นแสงคลื่นสั้นสามารถเดินทางผ่านวัตถุที่ซึ่งแสงเดินทางผ่านไม่ได้ ในกรณีเช่นนี้เราพูดว่าแสงถูกส่งผ่าน (transmitted) วัตถุส่วนมากเลือกแสงที่จะผ่านนั้นคือยอมให้ความยาวคลื่นบางคลื่นผ่านไป แต่คลื่นบางคลื่นจะไม่สามารถผ่านไปได้อย่างก้าวหน้าต่าง ยอมให้แสงอาทิตย์ผ่านเข้ามาได้แต่ไม่ยอมให้คลื่นความร้อนที่เป็นคลื่นยาวออกไปจากห้อง วัตถุที่ต่างกันจะเลือกแสงให้ผ่านที่มีความยาวคลื่นต่างกันด้วย

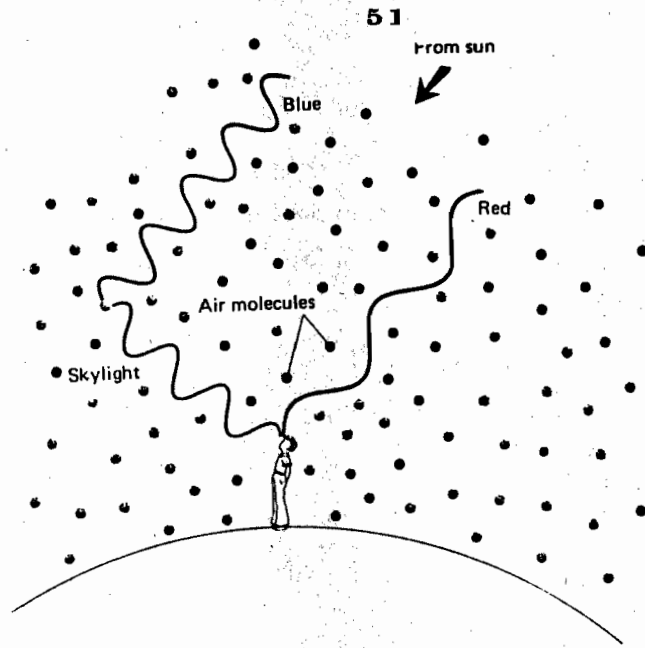
ส่วนของพลังงานแสงที่เข้าไปในวัตถุแต่ไม่ถูกยอมให้ผ่าน เรียกว่าถูกดูดกลืน (absorbed) และจะเปลี่ยนเป็นพลังงานรูปอื่น เช่นกลายเป็นความร้อน หรือใช้เป็นพลังงานในการระเหยของน้ำ หรือทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี การที่แสงถูกเลือกให้ผ่านไปก็จะมีคามหมายเช่นเดียวกับการถูกเลือกในการดูดกลืน ดังนั้นความยาวคลื่นซึ่งไม่ถูกยอมให้ผ่านก็จะถูกกลืนนั่นเอง

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

### 2.7.3 การกระเจิง (Scattering)

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

แสงจากท้องฟ้าเกิดจากโมเลกุลและฝุ่น (aerosols) นับเป็นล้านล้านโมเลกุลซึ่งสามารถกระเจิงแสงอาทิตย์ให้สามารถมาถึงตัวของเราจากทุกทิศทุกทาง (ดูรูป 2.17) สำหรับ



รูป 2.17 แสงของท้องฟ้าเป็นแสงที่เกิดจากการกระเจิง โมเลกุลของอากาศจะเล็กมากจนสามารถกระเจิงแสงสีน้ำเงินที่สั้นได้ง่ายกว่าแสงสีแดงที่ยาว ดังนั้นท้องฟ้าจึงมีสีน้ำเงิน

ก่อนเมฆคิวมูลัสที่เราเห็นสว่างเป็นสีขาวเมื่ออยู่ในทิศของดวงอาทิตย์นั้นเนื่องจากหยดน้ำเล็ก ๆ ในก้อนเมฆสะท้อนแสงอาทิตย์และทำให้ขอบของก้อนเมฆสว่างเป็นสีขาว และการที่ก้อนเมฆมีสีขาวแทนที่จะเป็นสีน้ำเงินก็เนื่องจากหยดน้ำเล็ก ๆ ในก้อนเมฆสะท้อนสีทุกสีของแสงได้ดีเท่า ๆ กัน ส่วนท้องฟ้ามีสีน้ำเงินเพราะโมเลกุลของอากาศกระเจิง (scatter) สีน้ำเงินได้ง่ายกว่าสีอื่น

มีคำถามว่าทำไมจึงเป็นเช่นนั้น เหตุผลก็คือ โมเลกุลของอากาศจะมีขนาดเล็กมากและไม่เพียงแต่จะมีขนาดเล็กกว่าหยดน้ำในก้อนเมฆแต่มันยังมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นแสงเสียอีก แสงที่เรามองเห็นสามารถผ่าน (bypass) โมเลกุลของอากาศเหล่านี้ไปได้และยังคงไปในทิศทางเดิม อย่างไรก็ตามแสงยังมีความยาวคลื่นสั้น โอกาสที่จะผ่านโมเลกุลของอากาศก็ยิ่งยากมากขึ้น ซึ่งมีโอกาสที่จะชนกับโมเลกุลและกระเจิงไปในทิศทางอื่น จากกฎของเรย์ลีย์กล่าวไว้ว่าถ้าวัตถุที่ทำให้เกิดการกระเจิงมีขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับความยาวของคลื่นแสงแล้วกำลังของการกระเจิง (scattered power) จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค (particle) ยกกำลังหก และจะเป็นสัดส่วนผกผันกับความยาวคลื่นแสงยกกำลังสี่ หรือ

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

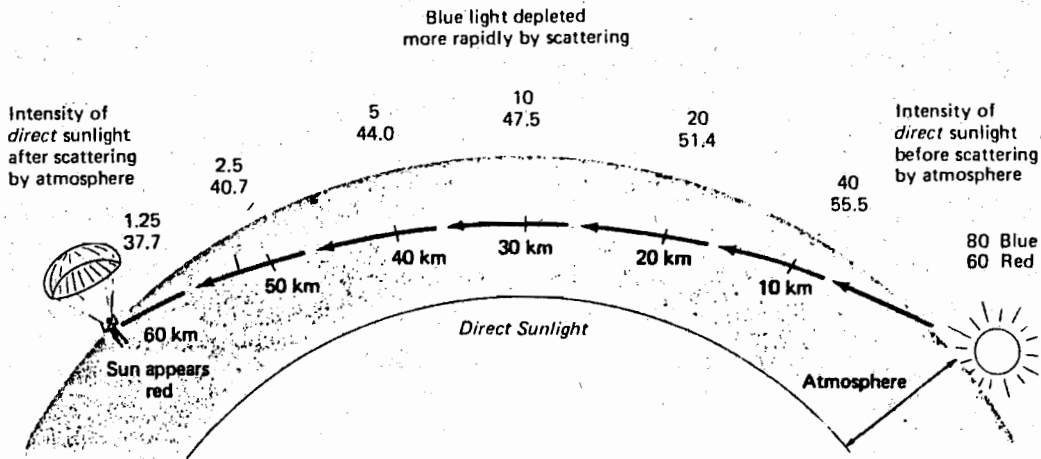
เมื่อ P เป็นกำลังของการกระเจิง D เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคที่ทำให้เกิดการกระเจิง k เป็นค่าคงที่  $\lambda$  เป็นความยาวของคลื่นแสงสูตรที่กล่าวนี้เรียกว่า Rayleigh scattering

จากสูตรของเรย์ลี ถ้าหาก  $\lambda$  ลดจากเดิมลงเหลือครึ่งหนึ่ง กำลังของการกระเจิงจะเพิ่มขึ้นเป็น 16 เท่า ฏุนนี้ไม่สามารถประยุกต์เข้ากับหยดน้ำเล็ก ๆ ในก้อนเมฆได้ เนื่องจากหยดน้ำเล็ก ๆ เหล่านี้มีขนาดใหญ่กว่าความยาวของคลื่นแสง ดังนั้นมันจะสะท้อนคลื่นของแสงทุกสีได้ดีเท่ากันหมด และจะไม่มีคลื่นสีใด ๆ สามารถผ่าน (bypass) ไปได้

มีคำถามเพิ่มขึ้นว่า แสงสีม่วงซึ่งเป็นแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นที่สุดในคลื่นแสงที่มองเห็นได้ทำไมท้องฟ้าจึงไม่เป็นสีม่วงแทนที่จะเป็นสีน้ำเงิน คำตอบสองอย่างที่มีเหตุผลก็คือ

1. แสงสีน้ำเงินจะมีมากกว่าแสงสีม่วงในแสงอาทิตย์
2. ตาของคนเรามีความไวต่อแสงสีน้ำเงินมากกว่าแสงสีม่วง

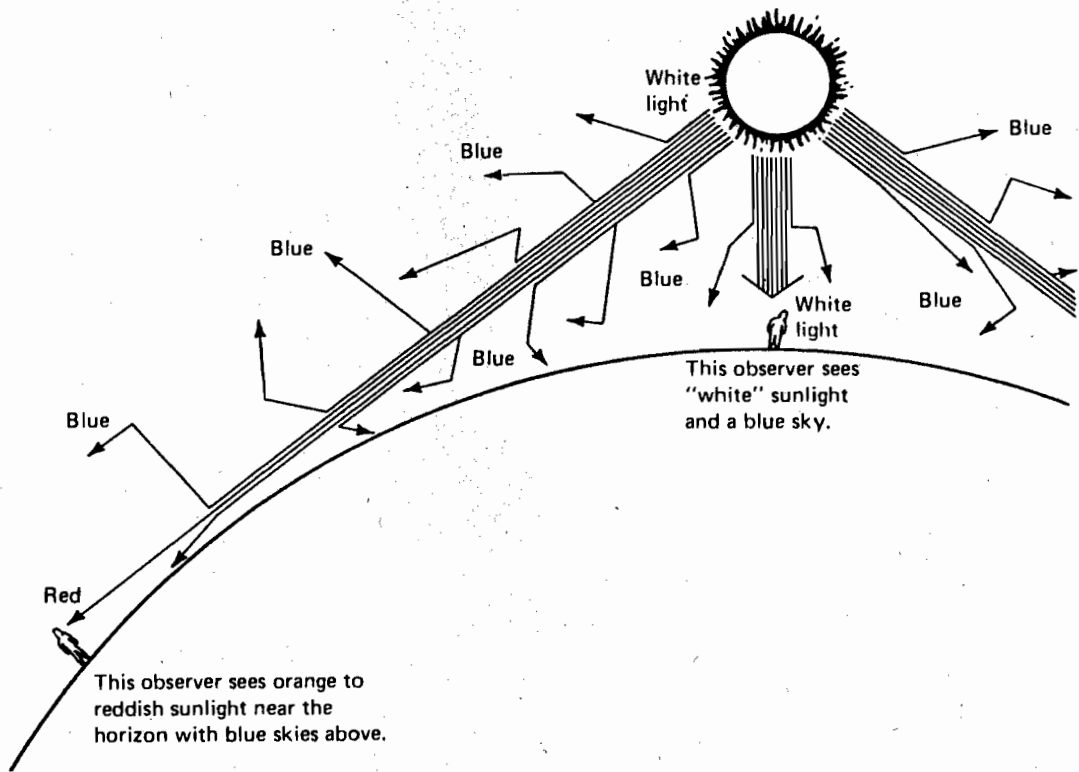
ในระหว่างที่ดวงอาทิตย์กำลังขึ้นและตกที่ขอบฟ้าจะมีสีแดง (ดูรูป 2.18) และจะไม่สว่างเท่ากับเมื่ออยู่ในเวลากลางวันที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากดวงอาทิตย์เมื่ออยู่ใกล้กับขอบฟ้า



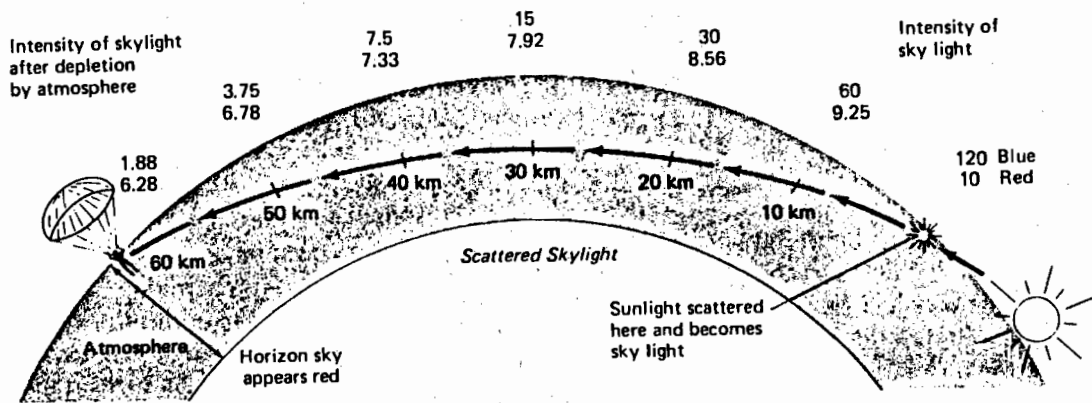
รูป 2.18 ดวงอาทิตย์มีสีแดงใกล้ขอบฟ้า เพราะแสงสีน้ำเงินส่วนใหญ่ถูกกระเจิงออกไปเกือบหมด

จะต้องผ่านชั้นบรรยากาศที่หนากว่า ดังนั้นแสงจะถูกกระเจิงมากกว่าเมื่อดวงอาทิตย์อยู่กลางท้องฟ้า และในกรณีที่ดวงอาทิตย์ใกล้จะตกแสงที่มาถึงตาผู้เห็นโดยตรงก็จะมีแต่แสงสีแดง ส่วนสีน้ำเงิน ม่วง และเขียว จะถูกกระเจิงออกไปด้านข้างจนหมด (ดูรูป 2.19)

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



รูป 2.19 เมื่อดวงอาทิตย์อยู่กลางท้องฟ้า แสงอาทิตย์ที่ประกอบด้วยแสงทั้งหมดที่เห็น ได้จะมาถึงตาเราและมองเห็น โดยตรงเป็นสีขาว แต่ถ้าดวงอาทิตย์อยู่ใกล้ขอบฟ้าจะเห็นเป็นสีแดง เพราะแสงสีน้ำเงินส่วนใหญ่ถูกกระเจิงไปหมด



รูป 2.20 บริเวณท้องฟ้าที่ใกล้ขอบฟ้าที่ดวงอาทิตย์ตกจะมีสีแดง เนื่องจากแสงสีน้ำเงินที่อยู่ ในท้องฟ้าตอนแรกนั้นหลังจากผ่านชั้นบรรยากาศเข้ามาก็จะถูกกระเจิงอีกครั้งหนึ่ง เนื่องจากเป็นระยะที่ใกล้ท้องฟ้าก็จะมองเห็นเป็นสีแดง จำนวนตัวเลขที่แสดงเป็น หน่วยความเข้มข้นของแสงสีแดงและสีน้ำเงิน