



คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

เทคโนโลยีสุขภาพ เครื่องสำอางและการชะลอวัย

HEALTH, COSMETIC & ANTI-AGING TECHNOLOGY



ผศ.ดร.วรวิทย์ จันทรสุวรรณ
Asst.Prof. Woravith Chansuvarn,
Ph.D.



woravith



woravith



woravith.c@rmutp.ac.th



<http://sci.rmutp.ac.th/woravith>

หน่วย 2 วิธีอินฟราเรด สเปกโทรสโกปี

บทเรียน 2.1

หลักการพื้นฐานวิธี IR Spectroscopy

(Principle of IR Spectroscopy)

#แผนการเรียนรู้และการประเมินผลการเรียนรู้

2.1

หลักการ พื้นฐาน เทคนิค IR Spectroscopy

บอกการสั่นของพันธะโมเลกุล



อธิบายสเปกตรัมอินฟราเรด



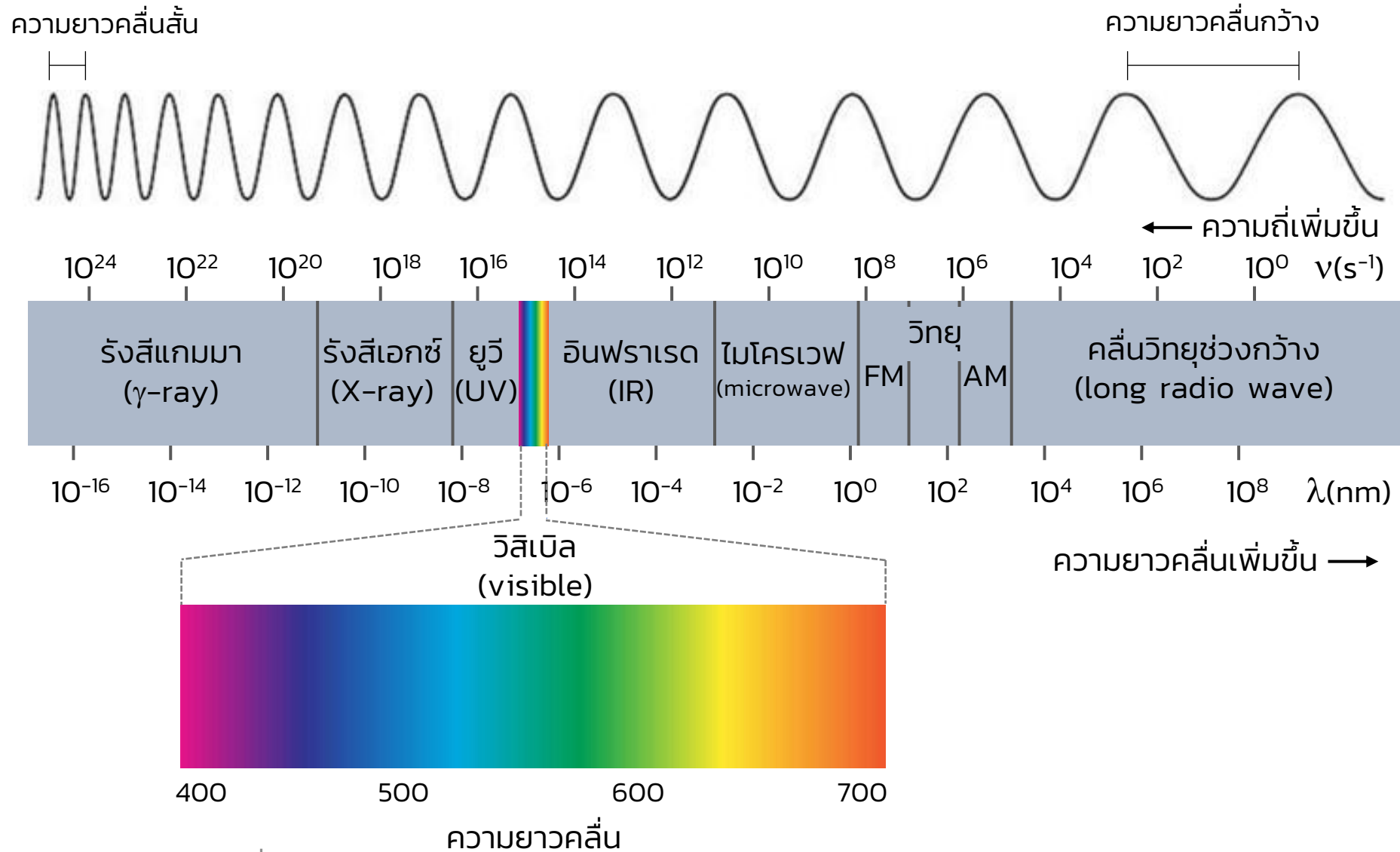
บอกส่วนประกอบของเครื่องมือ IR Spectrometer



ปฏิบัติการวิเคราะห์อินฟราเรดสเปกตรัมของสารอินทรีย์



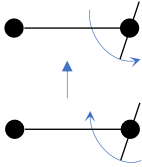
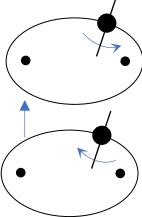
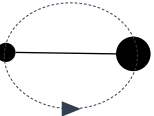
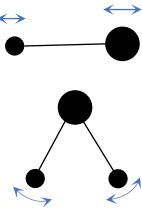
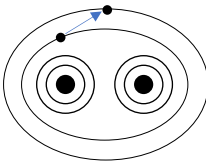
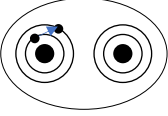
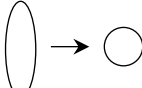
สเปกตรัมของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า

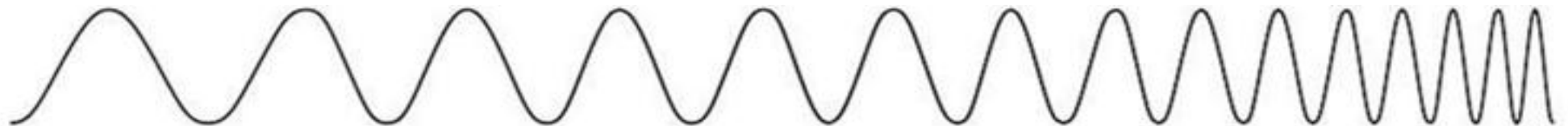


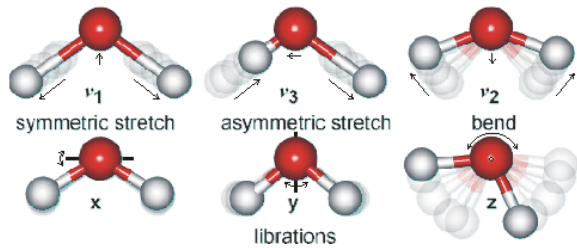
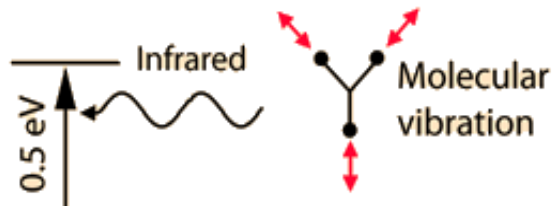
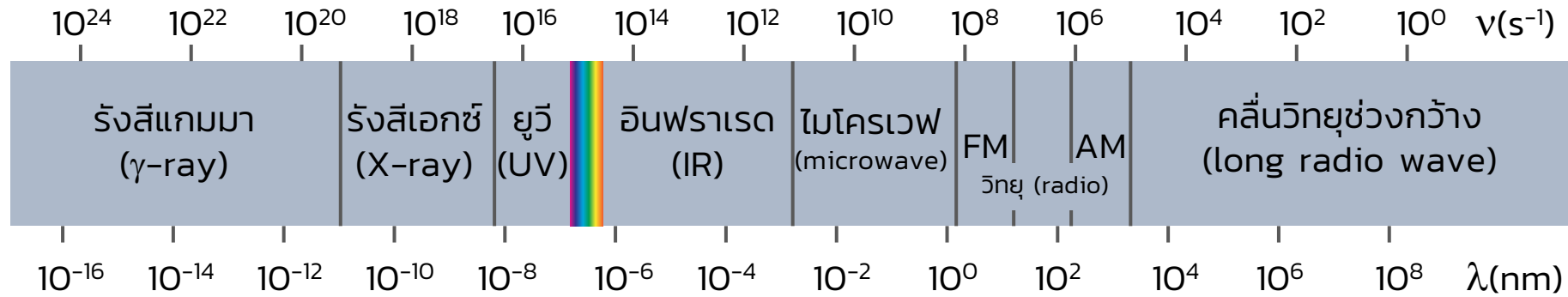
ชื่อเรียก	ความยาวคลื่น (λ , nm)
ยูวีไกล (far-ultraviolet)	10–200
ยูวีใกล้ (near-ultraviolet)	200–380
วิสิเบิล (visible)	380–780
อินฟราเรดใกล้ (near-infrared)	780–3,000
อินฟราเรดกลาง (middle-infrared)	3,000–30,000
อินฟราเรดไกล (far-infrared)	30,000–300,000
ไมโครเวฟ (microwave)	300,000–1,000,000,000

อันตรกิริยาของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้ากับสสาร

ประเภท	ความถี่ (Hz)	ความยาวคลื่น (λ)	อันตรกิริยากับสสาร	เทคนิควิเคราะห์
radio	10^8 – 10^{10}	1 m–1 cm	nucleus or electron spin	NMR, ESR
microwave	10^{10} – 10^{12}	1 cm–100 μ m	rotation	microwave
infrared	10^{12} – 10^{14}	100 μ m–1 μ m	vibration	IR, Raman
UV/vis	10^{14} – 10^{16}	1 μ m–10 nm	electronic of valence	UV/vis
X-ray	10^{16} – 10^{18}	10^{-10} m	electronic of shell	XRD
γ -ray	10^{18} – 10^{20}		electronic of nucleus	

ประเภท อันตรกิริยา	การสปีนของอิเล็กตรอน		การหมุน	การสั่น	การเปลี่ยนแปลงระดับ พลังงานของอิเล็กตรอน		นิวเคลียร์
							
เลขคลื่น (cm ⁻¹)	10 ⁻² 1		100	10 ⁴	10 ⁶	10 ⁸	
ความยาวคลื่น	10 m	100 cm 1 cm	100 μm	1000 nm	10 nm	100 pm	
ความถี่ (Hz)	3x10 ⁶	3x10 ⁸ 3x10 ¹⁰	3x10 ¹²	3x10 ¹⁴	3x10 ¹⁶	3x10 ¹⁶	
พลังงาน (J/mol)	10 ⁻³	10 ⁻¹ 10	10 ³	10 ⁵	10 ⁷	10 ⁹	
ประเภทเทคนิค สเปกโทรสโกปี	NMR		microwave	infrared	UV-Vis	X-ray	γ-ray

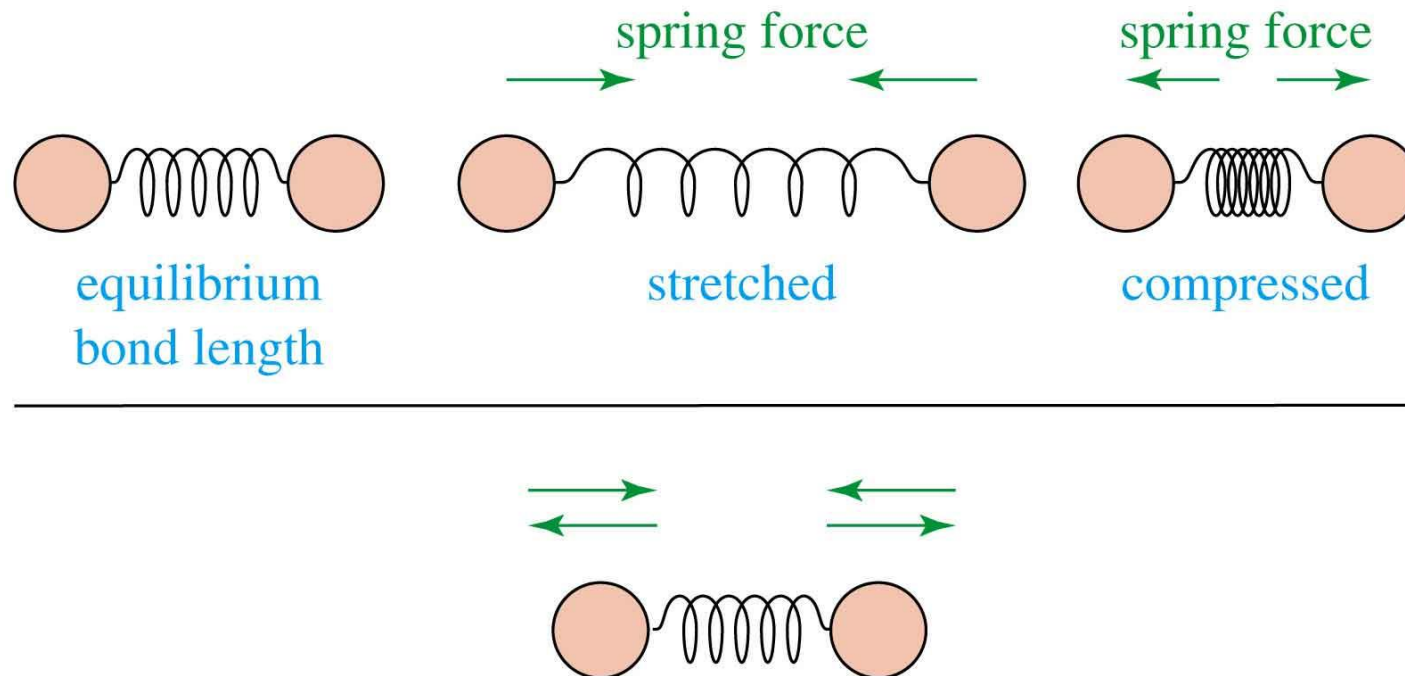
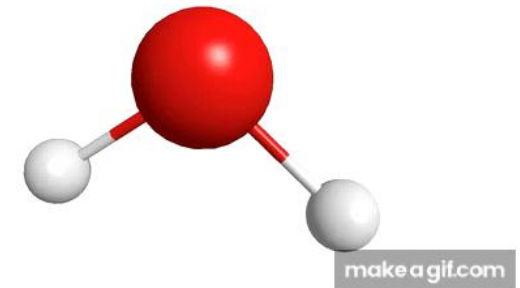




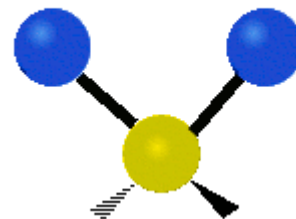
- ความถี่ช่วง 3×10^{12} ถึง 3×10^{14} Hz (ความยาวคลื่น $100 \text{ } \mu\text{m}$ ถึง $1 \text{ } \mu\text{m}$)
- พลังงานควอนตัมของโฟตอนอยู่ระหว่าง 0.001 ถึง 1.7 eV ซึ่งเป็นช่วงพลังงานที่ทำให้โมเลกุลเกิดการสั่น ความแตกต่างของระดับพลังงานของการสั่นอยู่ในช่วง 10^4 J/mol
- เทคนิคอินฟราเรด สเปกโทรสโกปี (IR) และรามาน สเปกโทรสโกปี (Raman)

การสั่นของพันธะโมเลกุล

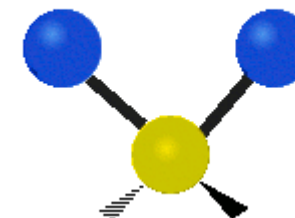
พันธะภายในโมเลกุลของสารอินทรีย์เป็นพันธะโคเวเลนต์ เกิดจากแต่ละอะตอมใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน โดยปกติพันธะจะเกิดการสั่นอยู่ตลอด เรียกว่า การสั่นแบบพื้นฐาน (fundamental vibration)



การสั่นแบบยืด (stretching) คือ พันธะระหว่างอะตอมยืดออกหรือหดตามแกน เกิดได้ทั้งแบบยืดสมมาตรและไม่สมมาตร



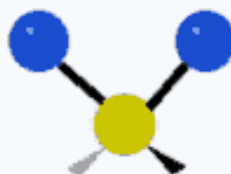
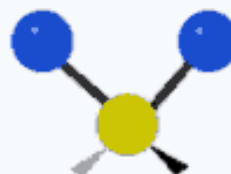
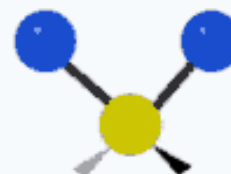
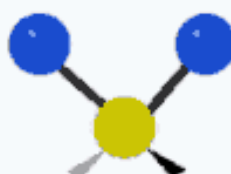
(symmetrical stretching)



(asymmetrical stretching)

การสั่นแบบงอ (bending) คือ พันธะระหว่างอะตอมเปลี่ยนตำแหน่งไปจากแกน พันธะเดิม ส่งผลให้มุมพันธะเปลี่ยนแปลง

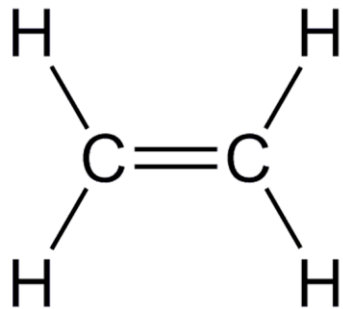
- การโยก (rocking)
- กรรไกร (scissoring)
- การบิด (twisting)
- การกระดิก (wagging)

Symmetrical stretching	Asymmetrical stretching	Scissoring (Bending)
		
Rocking	Wagging	Twisting
		

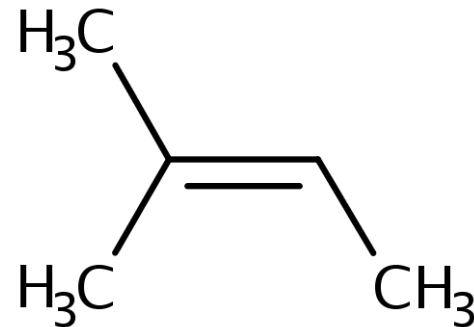
IR active & IR inactive

IR active คือการสั่นแบบยืดและแบบงอที่สามารถดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้

- IR active จะเกิดเฉพาะพันธะหรือโมเลกุลที่มีการเปลี่ยนแปลงไดโพลโมเมนต์ (dipole moment) เท่านั้น
 - A polar bond is usually IR-active.
 - A nonpolar bond in a symmetrical molecule will absorb weakly or not at all.



การสั่นของพันธะ C=C (IR inactive)



การสั่นของพันธะ C=C (IR active)

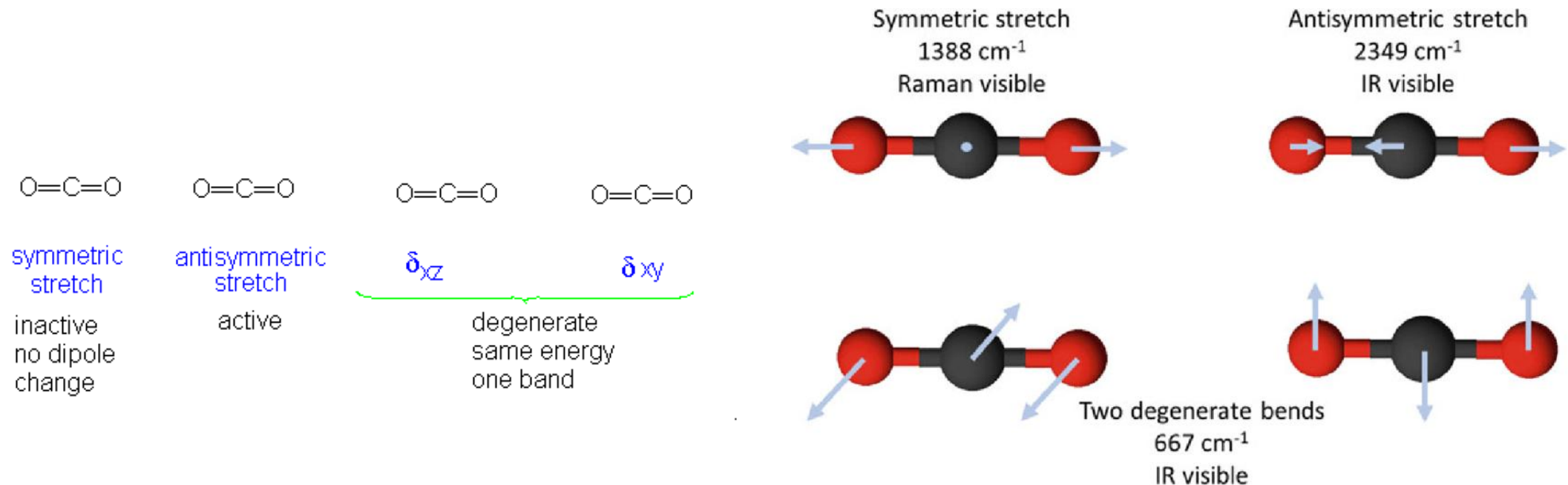
Vibration modes

กำหนดให้แต่ละอะตอมอยู่บนแกน x , y และ z (3 มิติ) เมื่ออะตอมหมุนรอบแกนทำให้มีระดับขั้นความเสรี (degree of freedom) เท่ากับ 3 ถ้าโมเลกุลมี n อะตอมระดับขั้นความเสรีเท่ากับ $3n$

- Linear molecule with n atoms usually has $3n-5$ fundamental vibrational modes.
- Nonlinear molecule with n atoms usually has $3n-6$ fundamental vibrational modes.

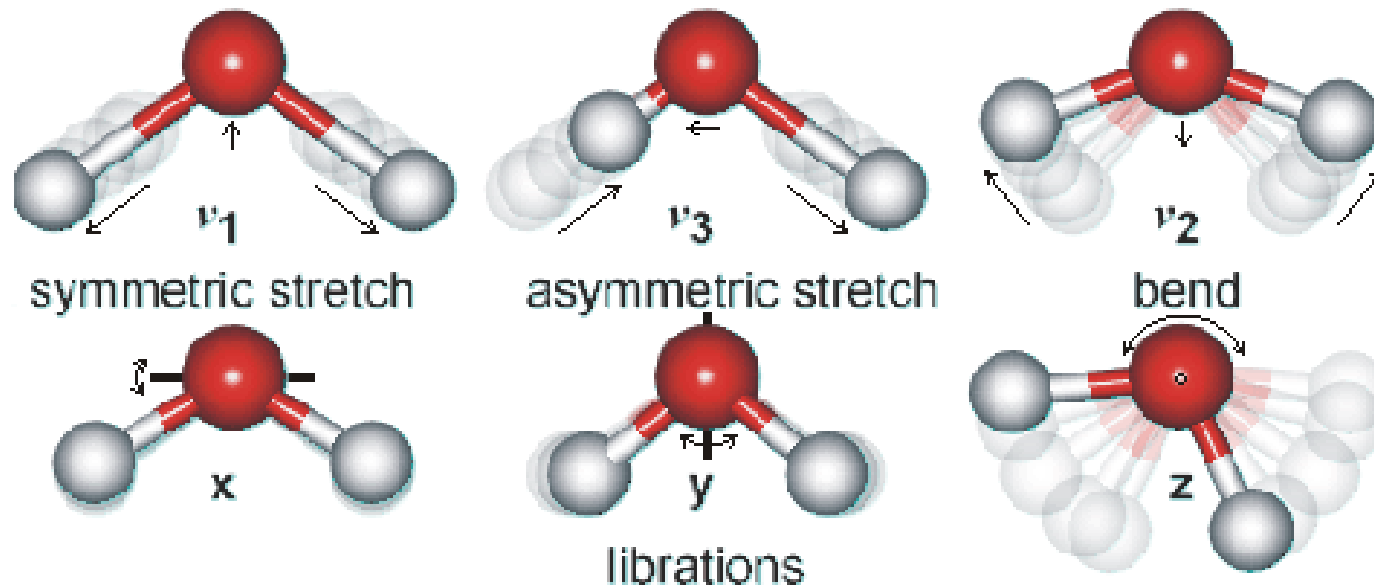
CO₂ vibration modes

- $3(3) - 5 = 4$ (มีการสั่นแบบพื้นฐาน 4 แบบ)

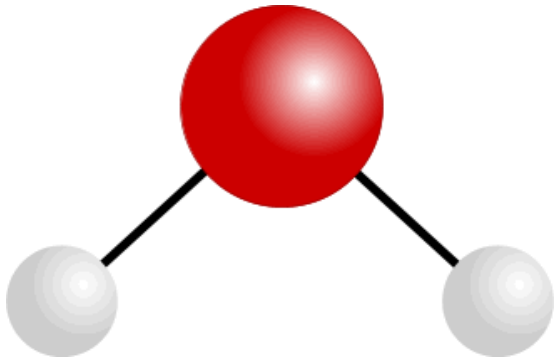


H₂O vibration modes

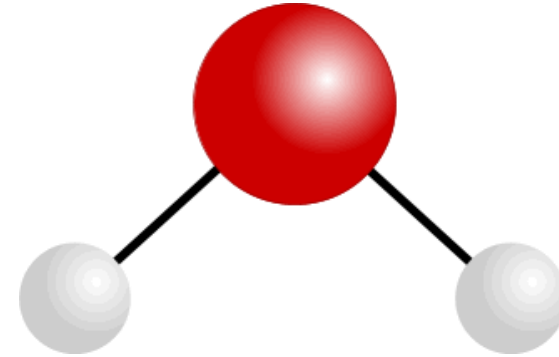
- $3(3) - 6 = 3$ (มีการสั่นแบบพื้นฐาน 3 แบบ)



A bond will absorb radiation of a frequency equal its vibration(s)



normal vibration



vibration having absorbed energy

Frequency decreases with increasing atomic weight.
Frequency increases with increasing bond energy.

Bond	Bond Energy [kcal (kJ)]	Stretching Frequency (cm ⁻¹)
<i>Frequency dependence on atomic masses</i>		
C—H	100 (420)	3000
C—D	100 (420)	2100
C—C	83 (350)	1200
heavier atoms ↓ $\bar{\nu}$ decreases		
<i>Frequency dependence on bond energies</i>		
C—C	83 (350)	1200
C=C	146 (611)	1660
C≡C	200 (840)	2200
stronger bond ↓ $\bar{\nu}$ increases		

อินฟราเรดสเปกตรัม

ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ (เลขคลื่น, cm^{-1}) หรือความยาวคลื่น) และ
ความส่องผ่าน (transmittance, T)

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีที่ผ่านสารตัวอย่างและความเข้มของรังสีที่ตก
กระทบสารตัวอย่าง

$$T = I/I_0$$

เมื่อ I = ความเข้มของรังสีที่ผ่านตัวกลาง

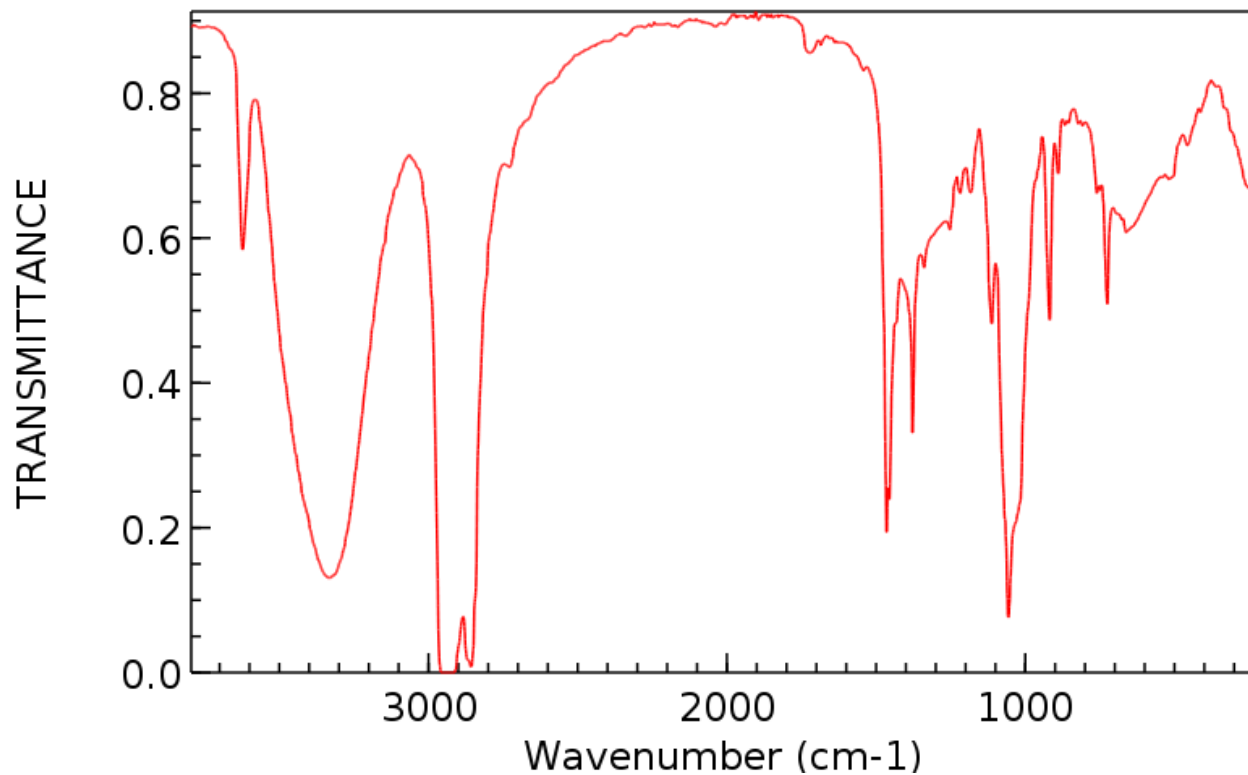
I_0 = ความเข้มของรังสีที่ตกกระทบตัวกลาง

ดังนั้น $\% \text{ Transmittance} = 100T$

IR Spectrum

แกนแนวตั้ง แสดง %T บ่งชี้ว่า ปริมาณแสงที่สามารถผ่าน ตัวอย่างได้มากน้อยเพียงใดในแต่ละช่วงความถี่

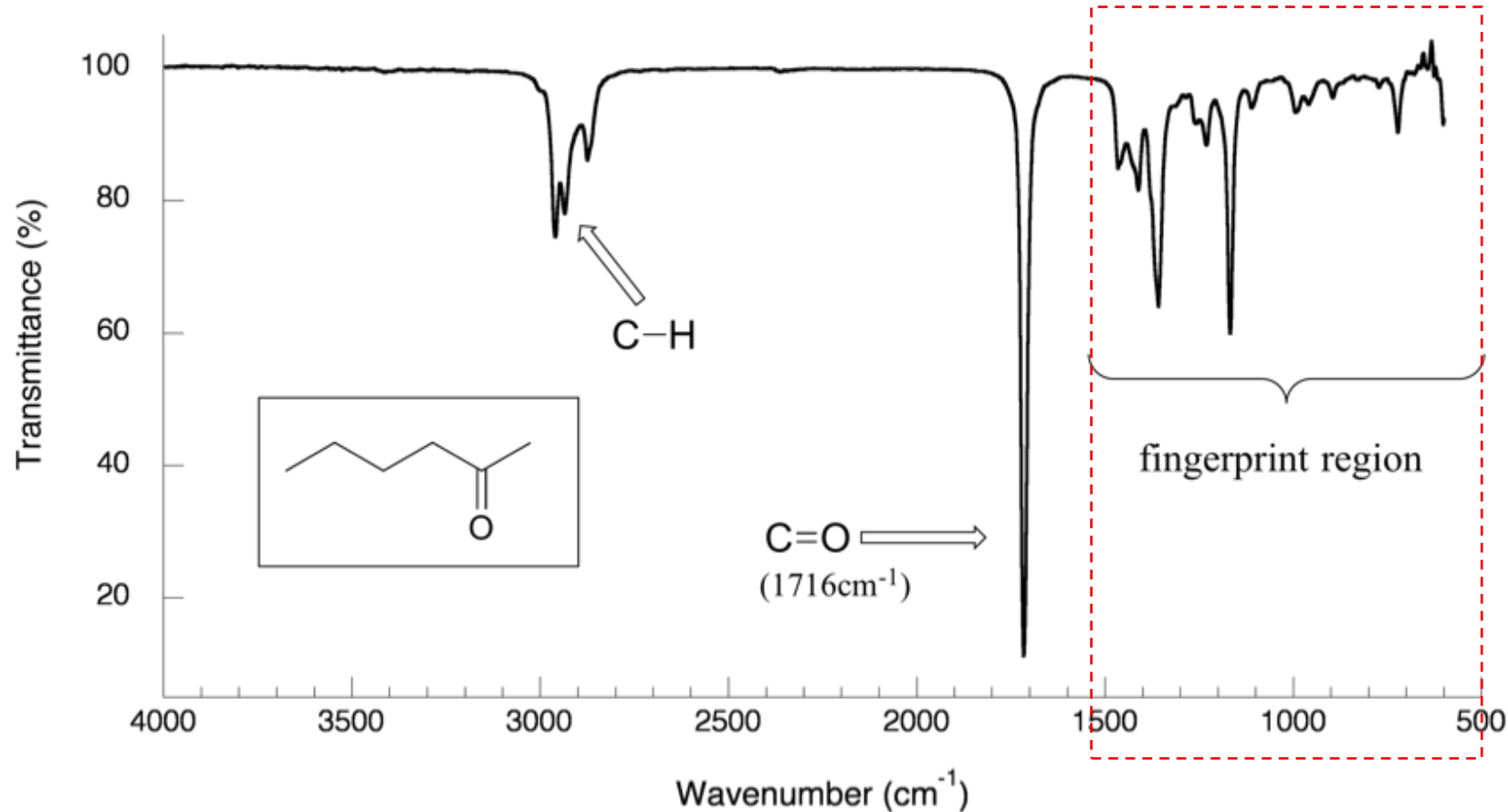
- หากค่า %T อยู่ที่ 100% หมายความว่าไม่มีการดูดกลืนแสงเกิดขึ้นที่ความถี่นั้น
- หากค่า %T ต่ำกว่า 100% แสดงว่าพลังงานบางส่วนถูกดูดกลืนโดยสารตัวอย่าง ทำให้เกิดแถบการดูดกลืน (absorption bands)



แกนนอน แสดงตำแหน่งของแถบการดูดกลืน IR ใช้สัญลักษณ์ $\bar{\nu}$ แทนเลขคลื่น (wavenumber, cm^{-1}) แสดงความถี่หรือความยาวคลื่น

- เลขคลื่นเป็นส่วนกลับของความยาวคลื่นและมีหน่วยเป็น cm^{-1}

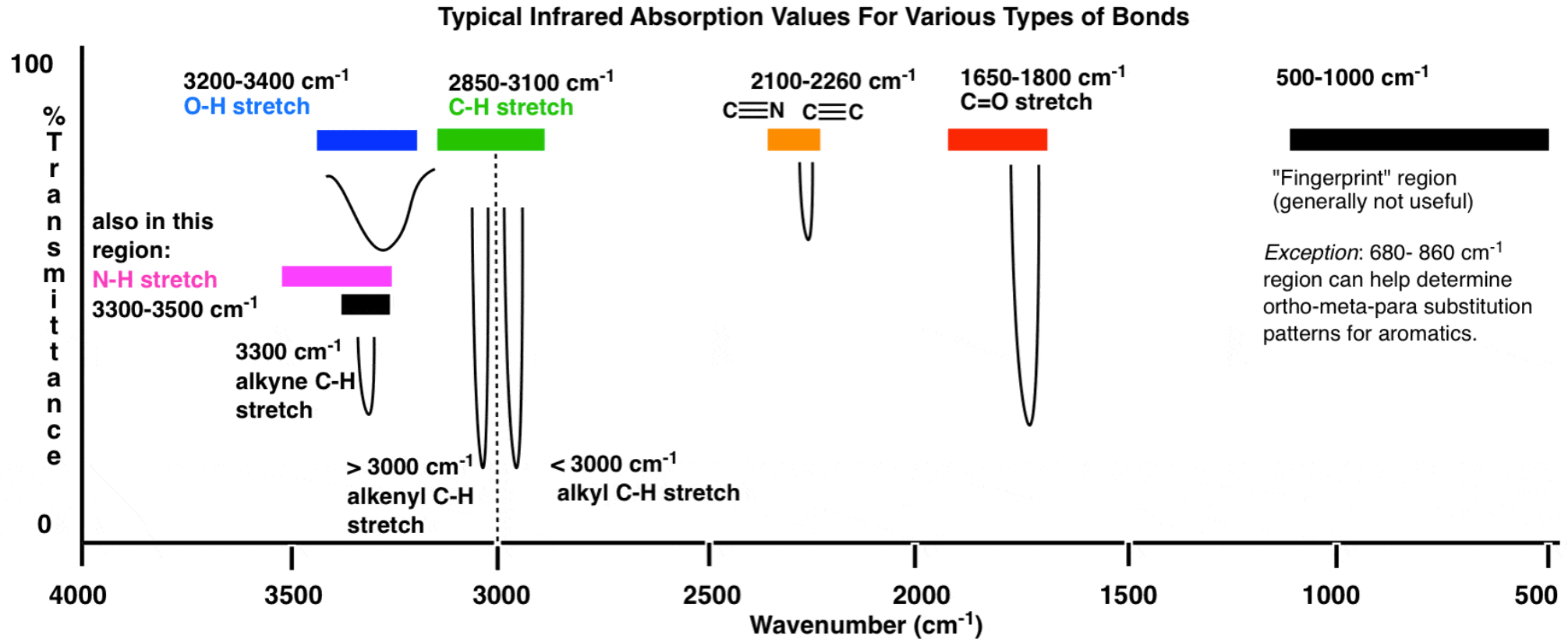
IR Spectrum



เกิดจากการสั่นแบบงอ
ของพันธะในโมเลกุล
ซึ่งมีความหลากหลาย
และเกิดขึ้นพร้อมกัน
ส่งผลให้สัญญาณการ
ดูดกลืนในช่วงนี้มี
ลักษณะเฉพาะตัวของ
แต่ละสาร

บริเวณนี้เรียกว่า
fingerprint region

IR Spectrum

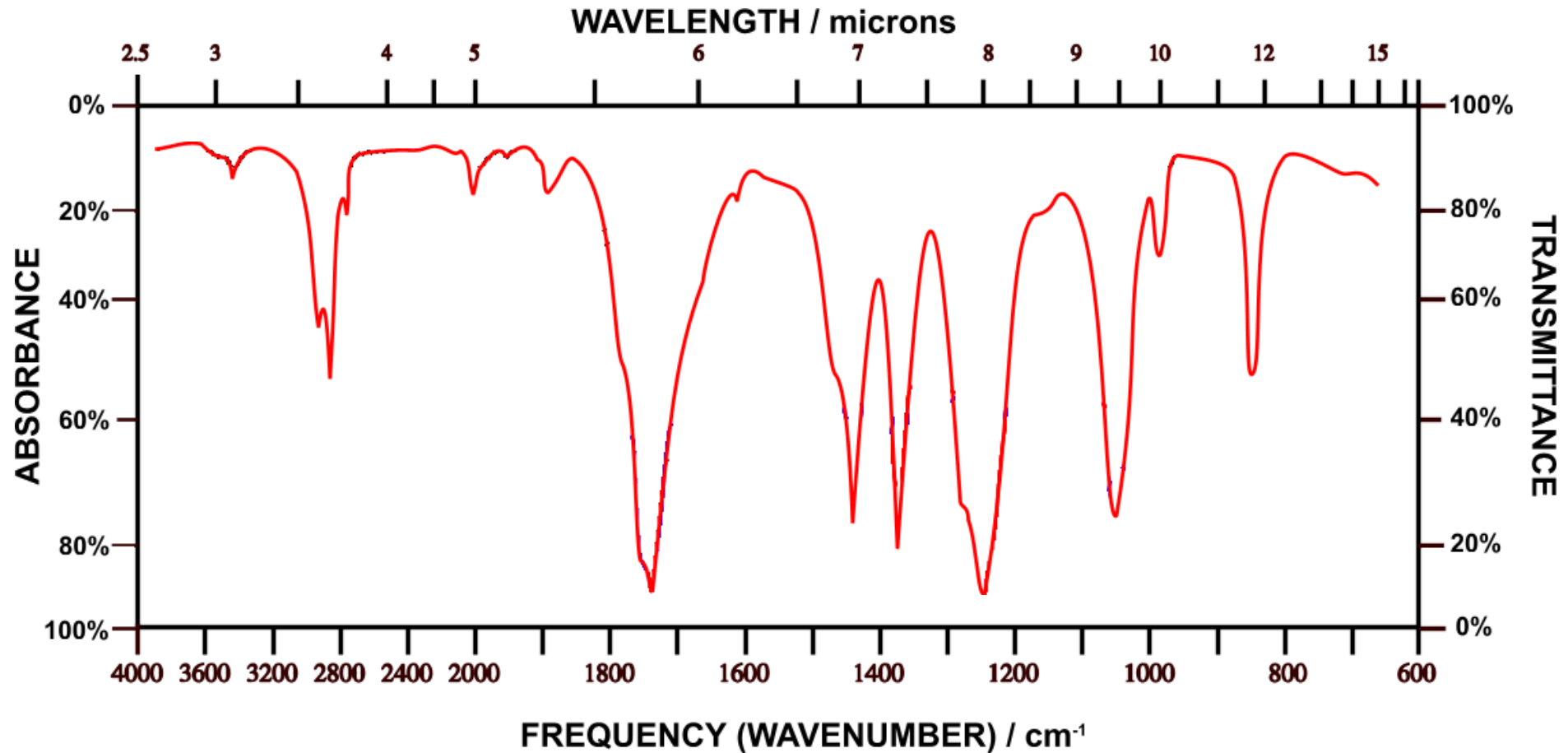


IR absorption of common functional groups

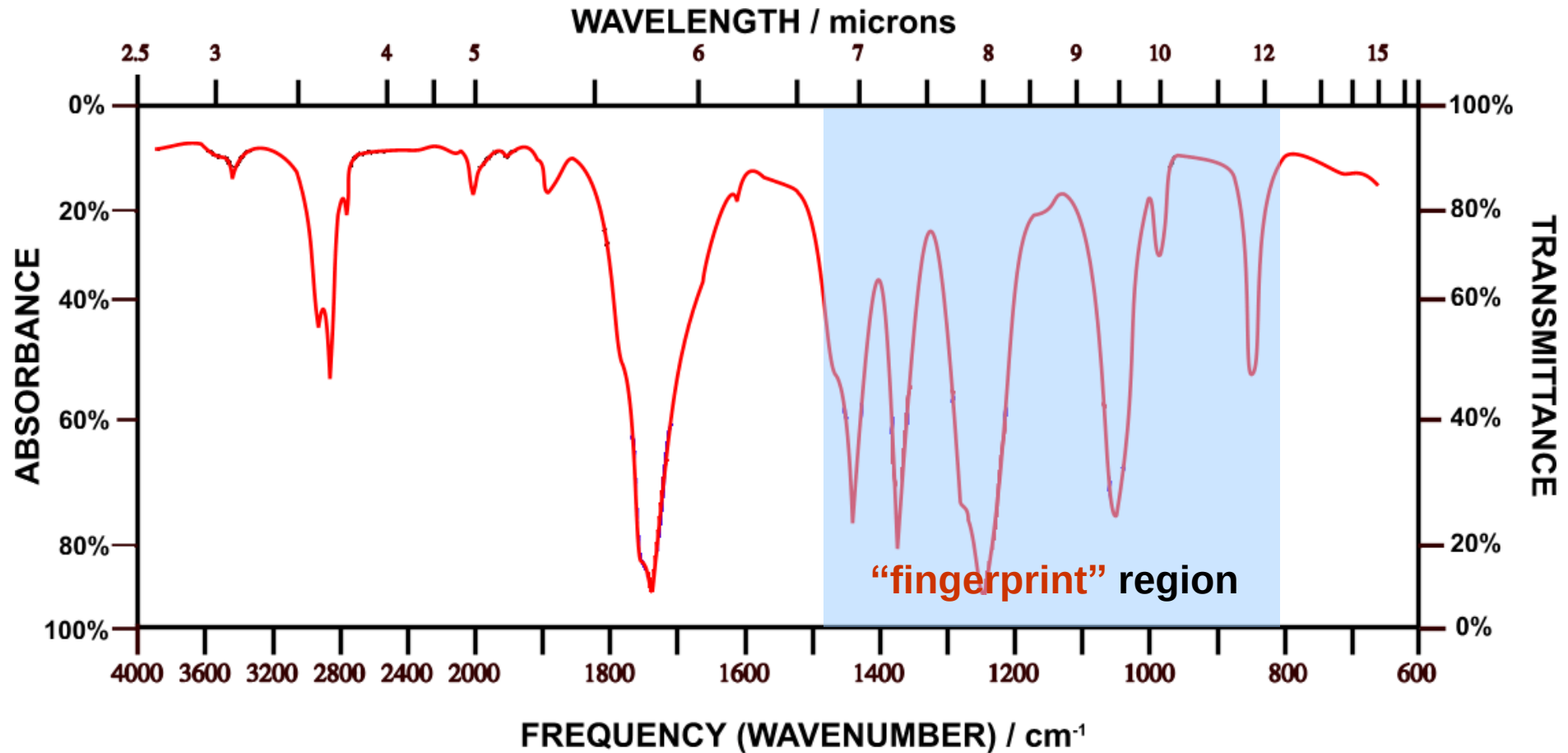
Functional Group	Absorption (cm ⁻¹)	Intensity	Functional Group	Absorption (cm ⁻¹)	Intensity
Alkane			Amine		
C-H	2850–2960	Medium	N-H	3300–3500	Medium
Alkene			C-N	1030–1230	Medium
=C-H	3020–3100	Medium	Carbonyl compound		
C=C	1640–1680	Medium	C=O	1670–1780	Strong
Alkyne			Aldehyde	1730	Strong
=C-H	3300	Strong	Ketone	1715	Strong
C≡C	2100–2260	Medium	Ester	1735	Strong
Alkyl halide			Amide	1690	Strong
C-Cl	600–800	Strong	Carboxylic acid	1710	Strong
C-Br	500–600	Strong	Carboxylic acid		
Alcohol			O-H	2500–3100	Strong,broad
O-H	3400–3650	Strong,broad	Nitrile		
C-O	1050–1150	Strong	C≡N	2210–2260	Medium
Arene			Nitro		
C-H	3030	Weak	NO ₂	1540	Strong
Aromatic ring	1660–2000	Weak			
	1450–1600	Medium			

Region (cm ⁻¹)	Group	Possible Compounds Present (or Absent)
3700-3100	-OH	Alcohol, aldehyde, carboxylic acids
	-NH	Amides, amines
	≡C-H	Alkynes
3100-3000	=C-H	Aromatic compounds
	-CH ₂ or -CH=CH-	Alkenes or unsaturated rings
3000-2800	-CH ₃ , -CH ₂ -, -CH ₃	Aliphatic groups
2800-2600	-CHO	Aldehydes (Fermi doublet)
2700-2400	-POH	Phosphorus compounds
	-SH	Mercaptans and thiols
	-PH	Phosphine
2400-2000	-C≡N	Nitriles
	-N=N ⁺ =N ⁻	Azides
	-C≡C-	Alkynes
1870-1650	C=O	Acid halides, aldehydes, amides, amino acids, anhydrides, carboxylic acids, esters, ketones, lactams, lactones, quinines
1650-1550	C=C, C=N, NH	Unsaturated aliphatics, aromatics, unsaturated heterocycles, amides, amines, amino acids
1550-1300	NO ₂	Nitro compound
	CH ₃ and CH ₂	Alkanes, alkenes, etc
1300-1000	C-O-C and C-OH	Ethers, alcohols, sugars
	S=O, P=O, C-F	Sulphur, phosphorus, and fluorine compounds
1100-800	Si-O and P-O	Organosilicon and phosphorus compounds
1000-650	=C-H	Alkenes and aromatic compounds
	-NH	Aliphatic amines
800-400	C-halogen	Halogen compounds
	Aromatic rings	Aromatic compounds

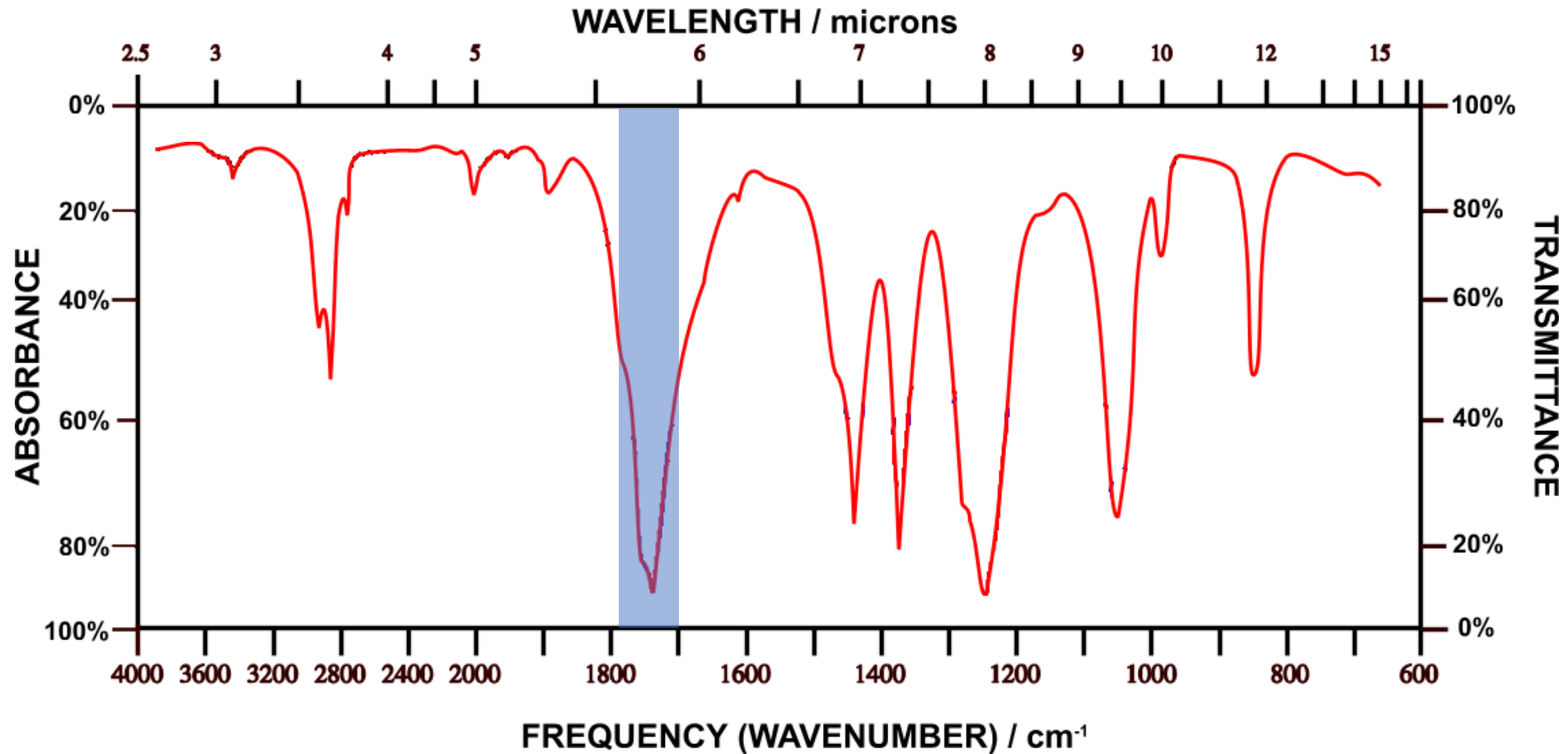
Interpretation of IR spectra



IR spectrum > Fingerprint

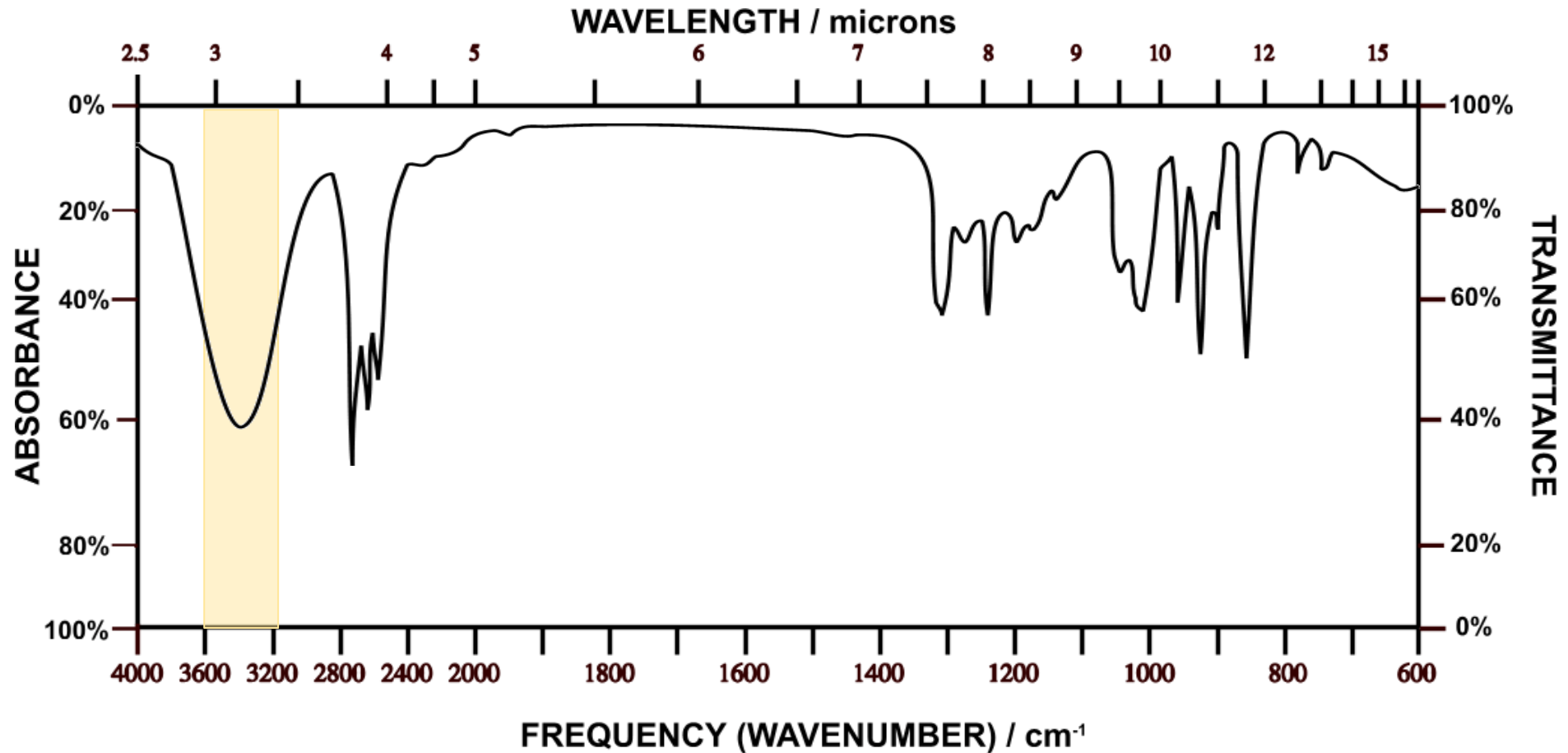


IR spectrum > Carbonyl groups (-C=O)



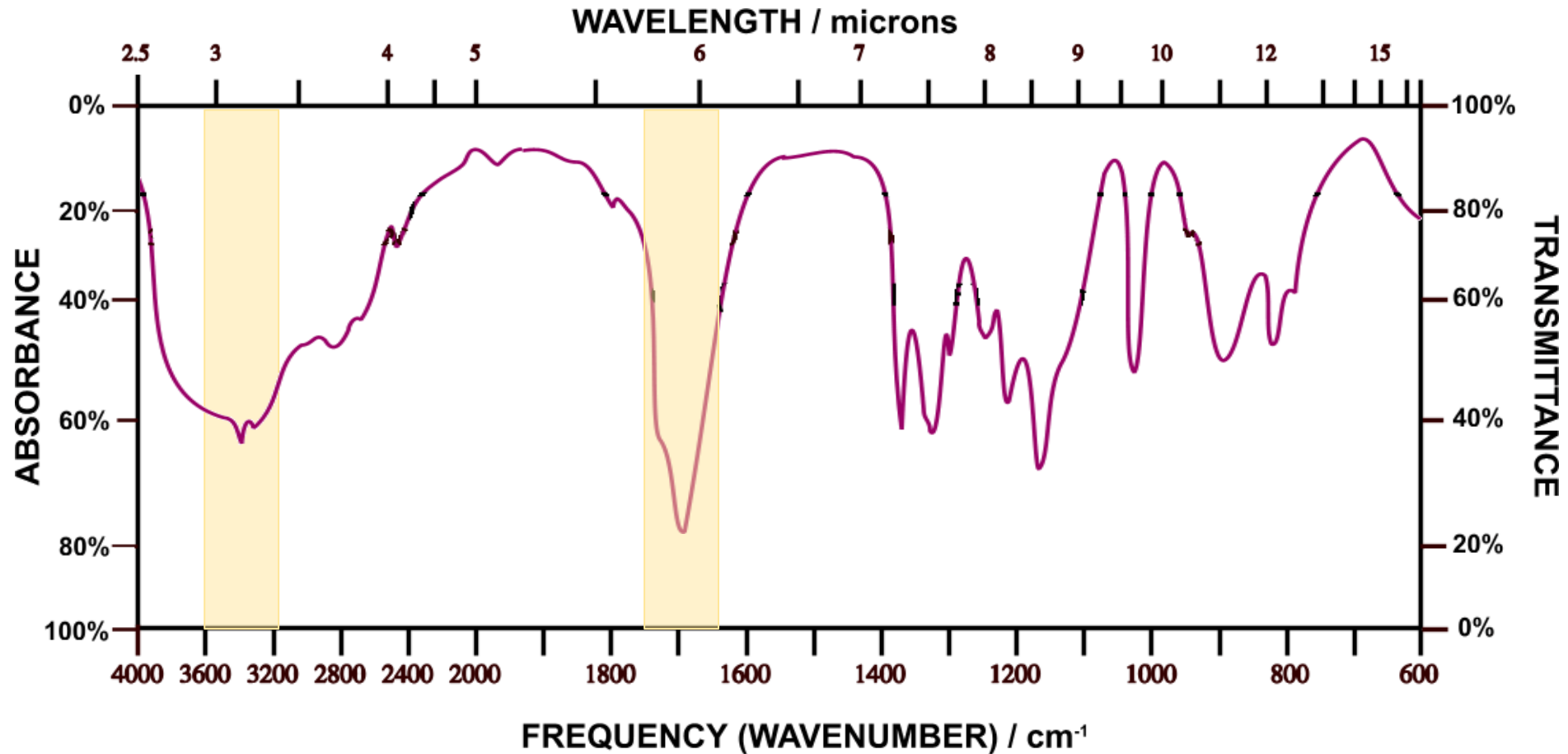
- Carbonyl compounds (C=O bond) show a sharp, strong absorption between 1,700 and 1,760 cm^{-1}

IR spectrum > Alcohol (OH)



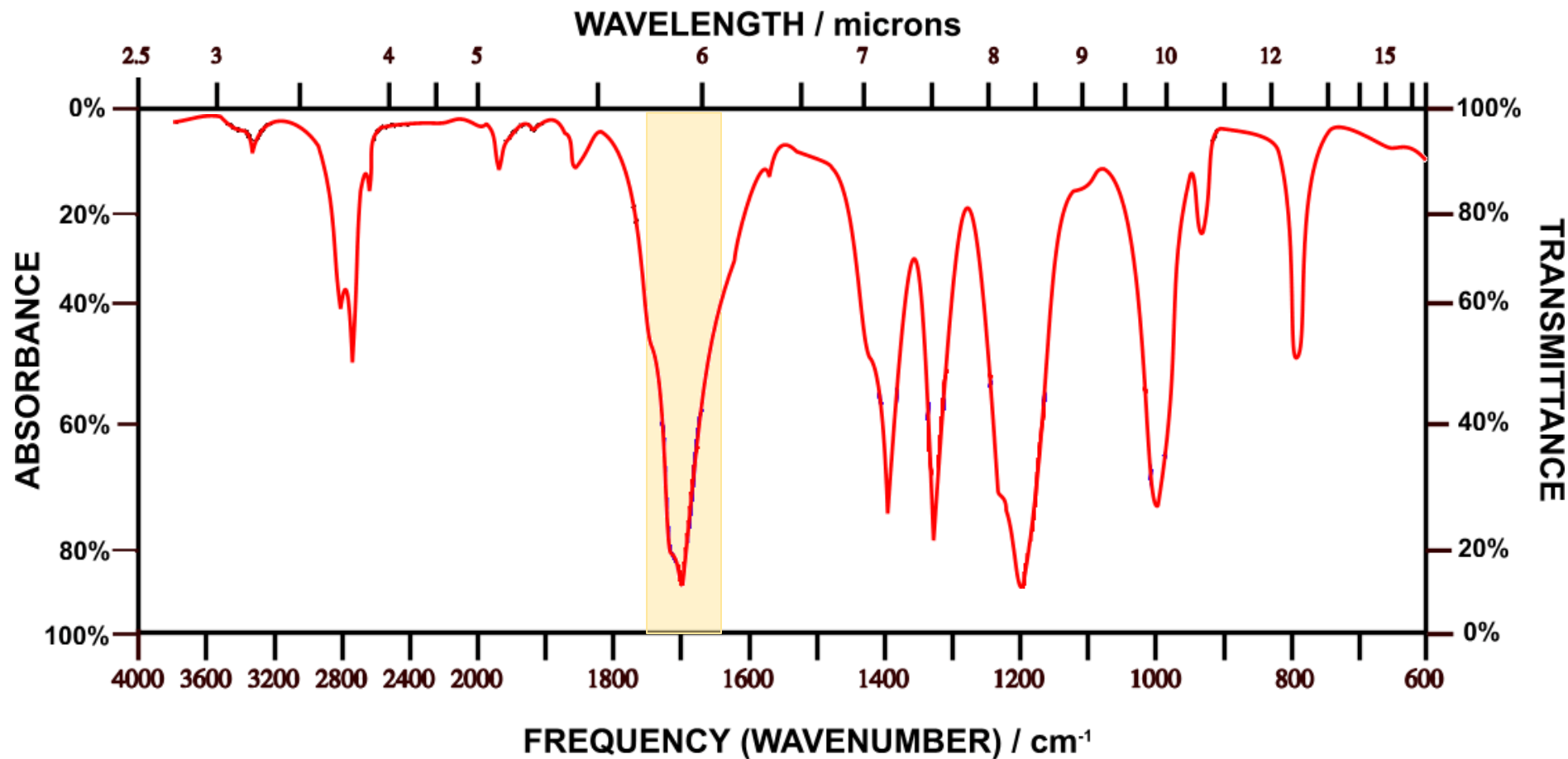
- Alcohols (O-H) show a broad absorption between 3,200 and 3,600 cm^{-1}

IR spectrum > Carboxylic acid



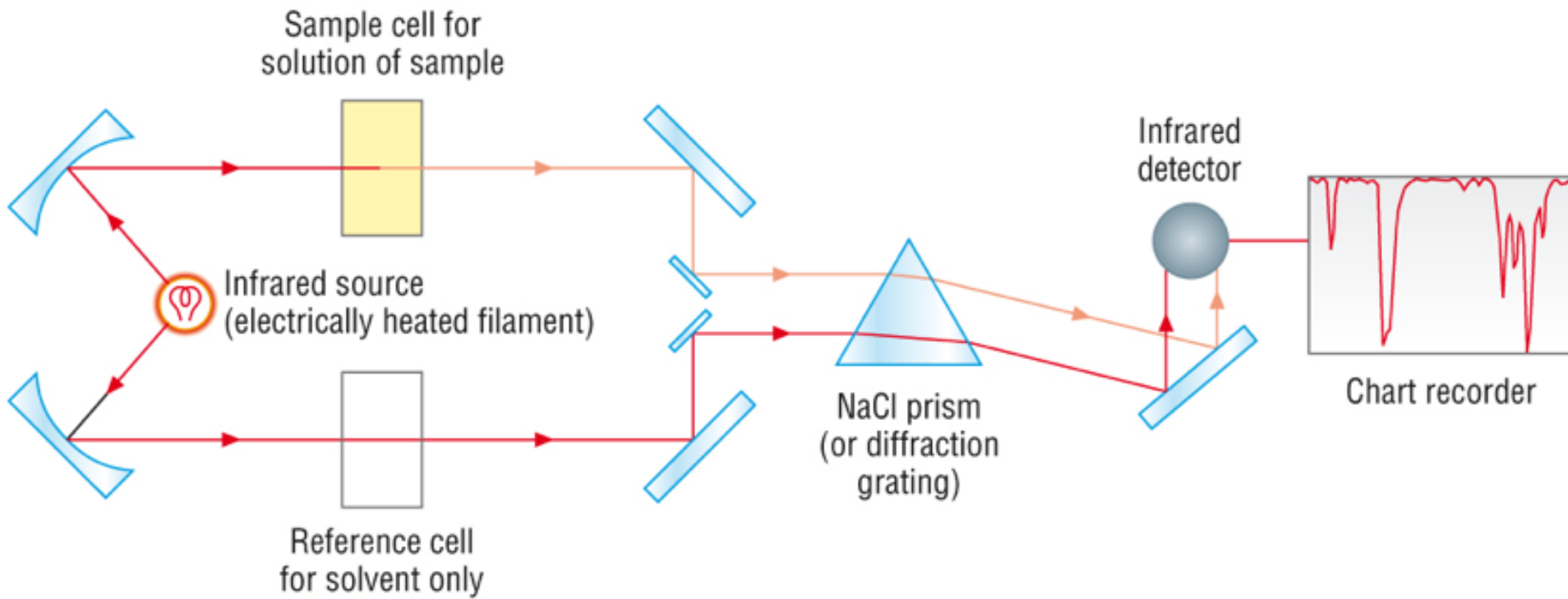
- C=O bond show a sharp, strong absorption between 1,700 and 1,760 cm^{-1}
- O-H show a broad absorption between 3,200 and 3,600 cm^{-1}

IR spectrum > Ester

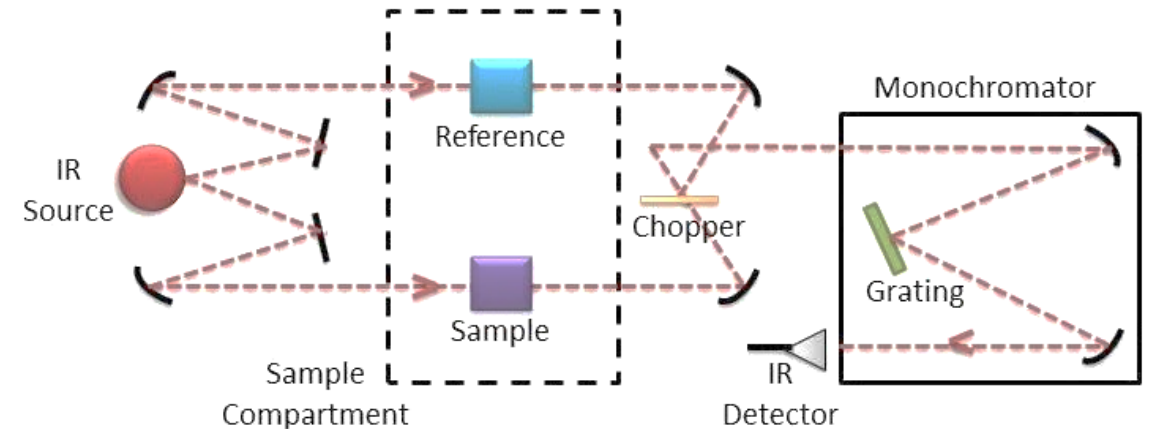


- C=O bond show a sharp, strong absorption between 1,750 and 1,730 cm^{-1}

ส่วนประกอบเครื่อง IR Spectrometer



- **Light sources** : ส่วนใหญ่อาศัยการให้ความร้อนแก่ของแข็งจนปล่อยรังสีอินฟราเรดออกมา ซึ่งอยู่ในย่านความยาวคลื่น $2.5\text{--}25\ \mu\text{m}$ ($4,000\text{--}400\ \text{cm}^{-1}$)
- **Sample cell**
- **Monochromator** : ทำหน้าที่เลือกความยาวคลื่น นิยมใช้เกรตติง (เฉพาะเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์แบบกระจายแสงเท่านั้น)
- **Detector**: มี 2 ประเภท คือ ตัวตรวจวัดความร้อน (thermal detectors) และ ตัวตรวจวัดโฟตอน (photon detectors)



Light sources

ส่วนประกอบเครื่อง FT-IR

แหล่งกำเนิดแสง	ช่วงเลขคลื่น (cm ⁻¹)	คุณสมบัติเด่น	การใช้งานหลัก
Nernst glower	5,000–400	ให้รังสีอินฟราเรดกว้าง แต่ต้องอุ่นก่อน	ใช้ในเครื่อง Dispersive IR รุ่นเก่า
Global (SiC Rod)	5,000–400	เสถียรและให้พลังงานสูงกว่า Nernst	ใช้ใน FT-IR Spectrometer
Nichrome/Kanthal filament	5,000–400	ราคาถูก ใช้พลังงานต่ำ	ใช้ในเครื่องมือขนาดเล็ก
Infrared Laser (QCL, TDLS)	5,000–1,000	ความเข้มสูง ความจำเพาะสูง	ใช้ในการตรวจจับแก๊ส และงานวิเคราะห์ที่แม่นยำ
Infrared LEDs	4,000–1,000	ความเข้มแคบ ใช้พลังงานต่ำ	ใช้ในเซ็นเซอร์ IR และเครื่องมือพกพา
Synchrotron Radiation	10,000–50	ให้ความเข้มสูงมาก ติดตั้งในสถานีวิจัย	ในงานวิจัยโครงสร้างโมเลกุลขั้นสูง

TABLE 11.3: Common Infrared Optical Materials

MATERIAL	INFRARED TRANSPARENT RANGE* (cm^{-1})	PROPERTIES
KBr	40,000–400	Soft, inexpensive, water soluble, fogs
AgBr	22,000–286	Soft, inexpensive, water insoluble, darkens if exposed to ultraviolet light
AgCl	10,000–360	Soft, inexpensive, water insoluble, darkens if exposed to ultraviolet light
CaF ₂	77,000–1,110	Hard, relatively expensive, water insoluble, acid and base resistant, no fog, withstands high pressures
NaCl	40,000–625	Soft, inexpensive, water soluble, fogs
Diamond	25,000–33	Expensive, water insoluble, structurally strong
KRS-5 (thallium bromide-iodide)	20,000–250	Soft, good ATR material, acid insoluble, base soluble, toxic

Excerpted from Advanced Light Source (Berkley Labs), Copyright © 2012 ALS Infrared Beamlines with permission.

* Because the optical bench of most IR spectrometers is exposed to air, the practical range of most spectrometers is limited to 4,000 to 300 cm^{-1} even if the optical material used has a larger range.

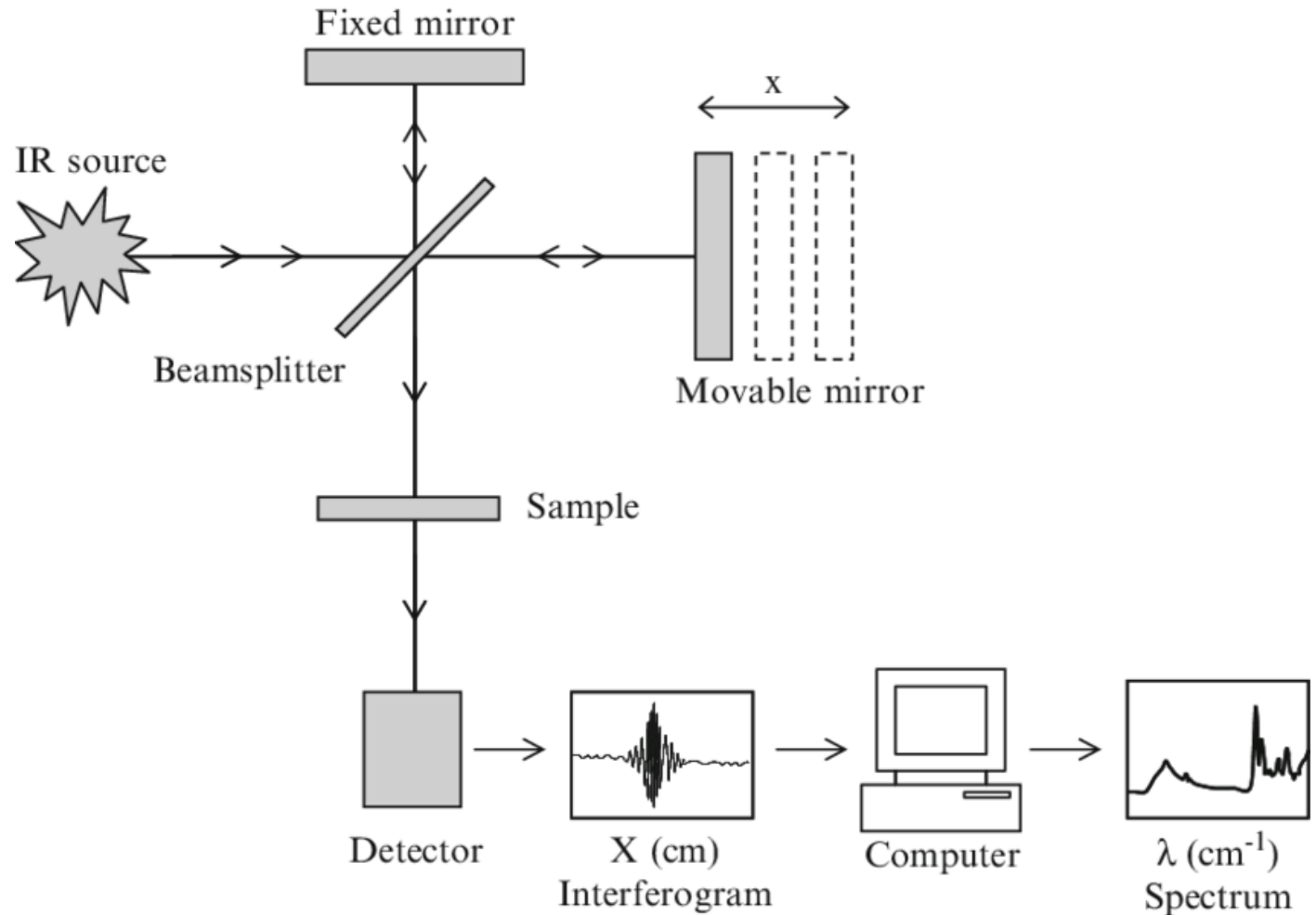
Detectors

<i>Transducer</i>	<i>Wavelength range</i>
<i>Photon detector</i>	
Photo-tube	200 to 1000 nm
Photomultiplier	110 to 1000 nm
Silicon photodiode	250 to 1100 nm
Photoconductor	750 to 6000 nm
Photovoltaic cell	400 to 5000 nm
<i>Thermal detectors</i>	
Thermocouple	0.8 to 40 μ m
Thermistor	0.8 to 40 μ m
Pneumatic	0.8 to 1000 μ m
Pyroelectric	0.3 to 1000 μ m
<i>X-ray detectors</i>	
Geiger counter	
Proportional counter	
Semiconductor detector Si(Li) or Ge(Li)	
Scintillator detector	

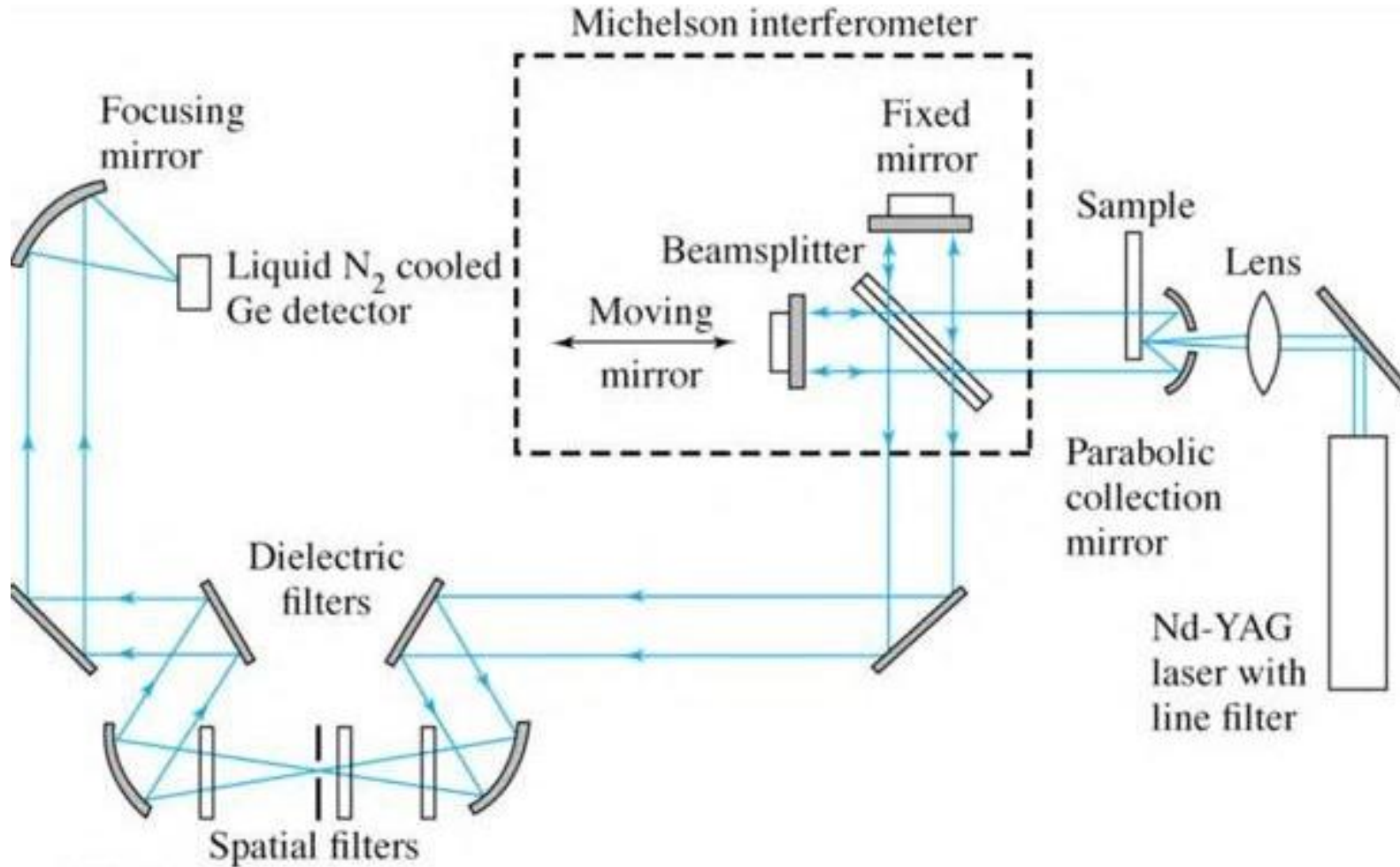
FT-IR (Fourier Transformation)

ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม (FT-IR)

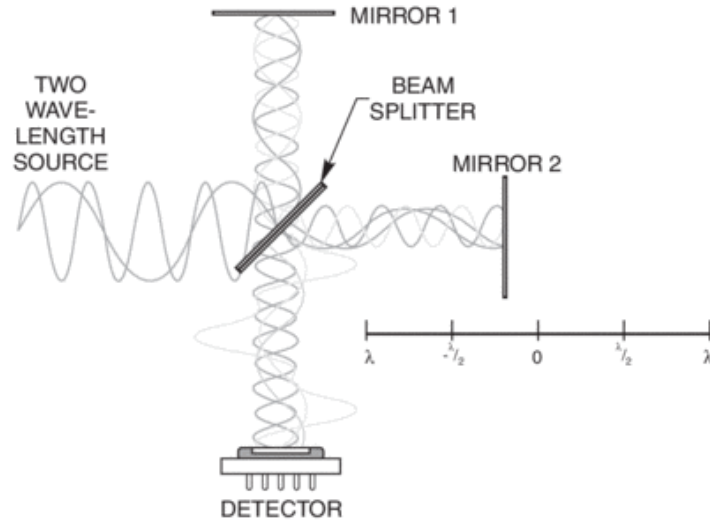
- แหล่งกำเนิดรังสี
- อินเทอร์เฟอโรมิเตอร์ (interferometer)
- ตัวตรวจวัด



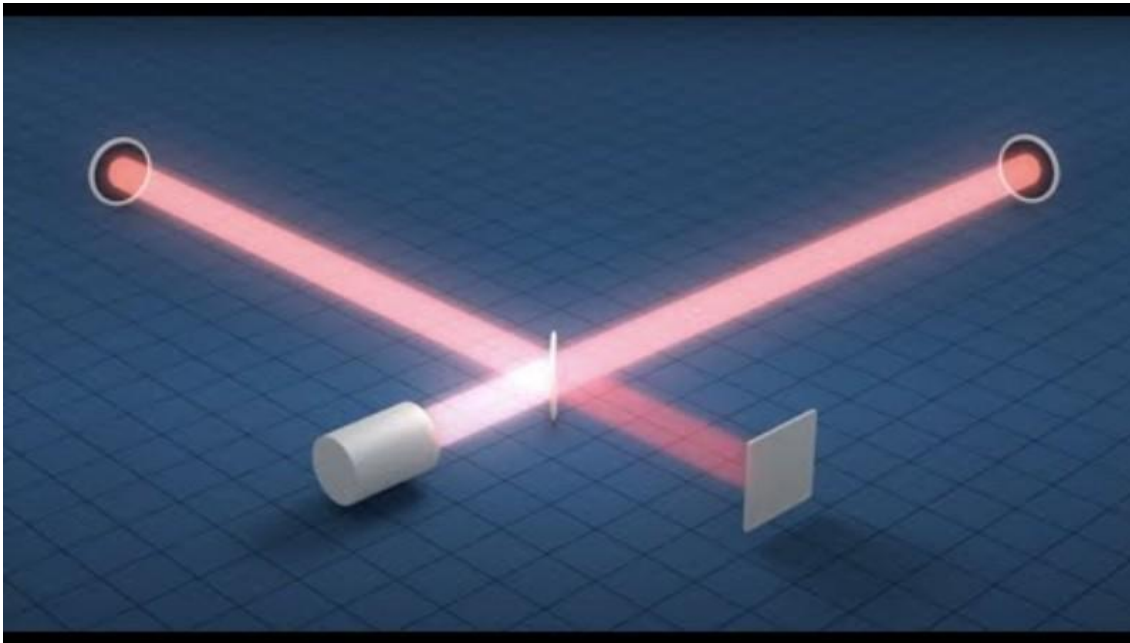
FT-IR : *Michelson interferometer*



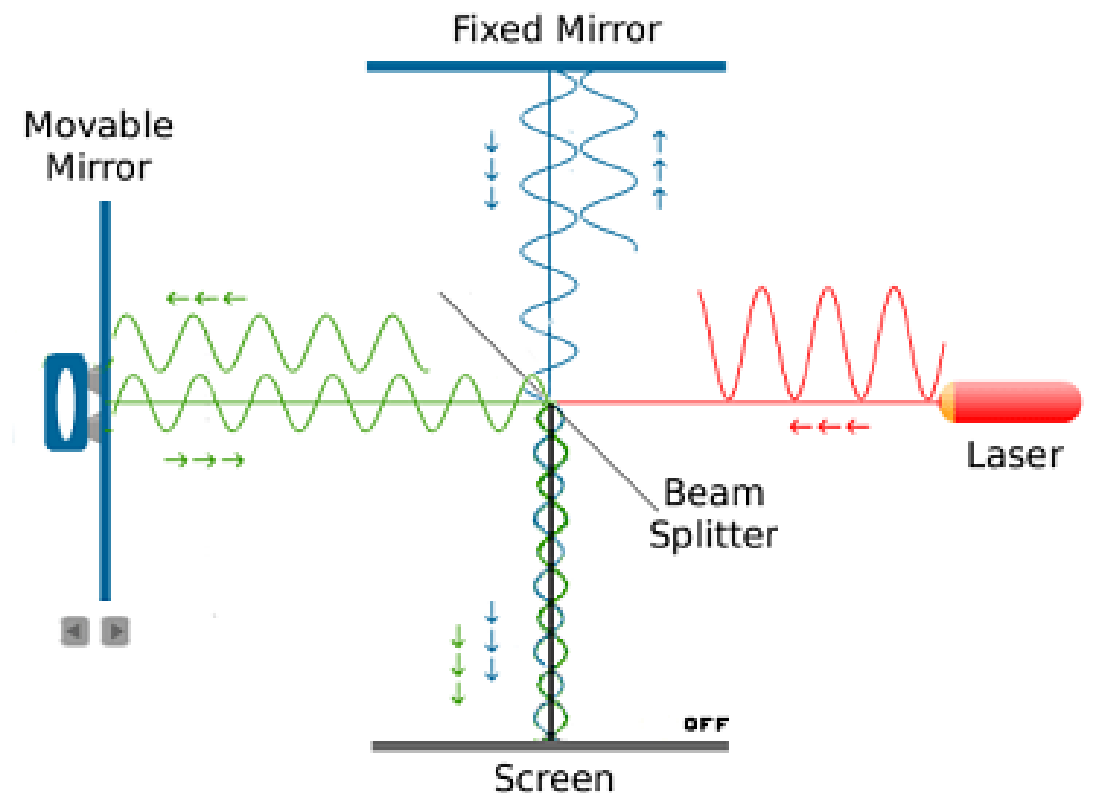
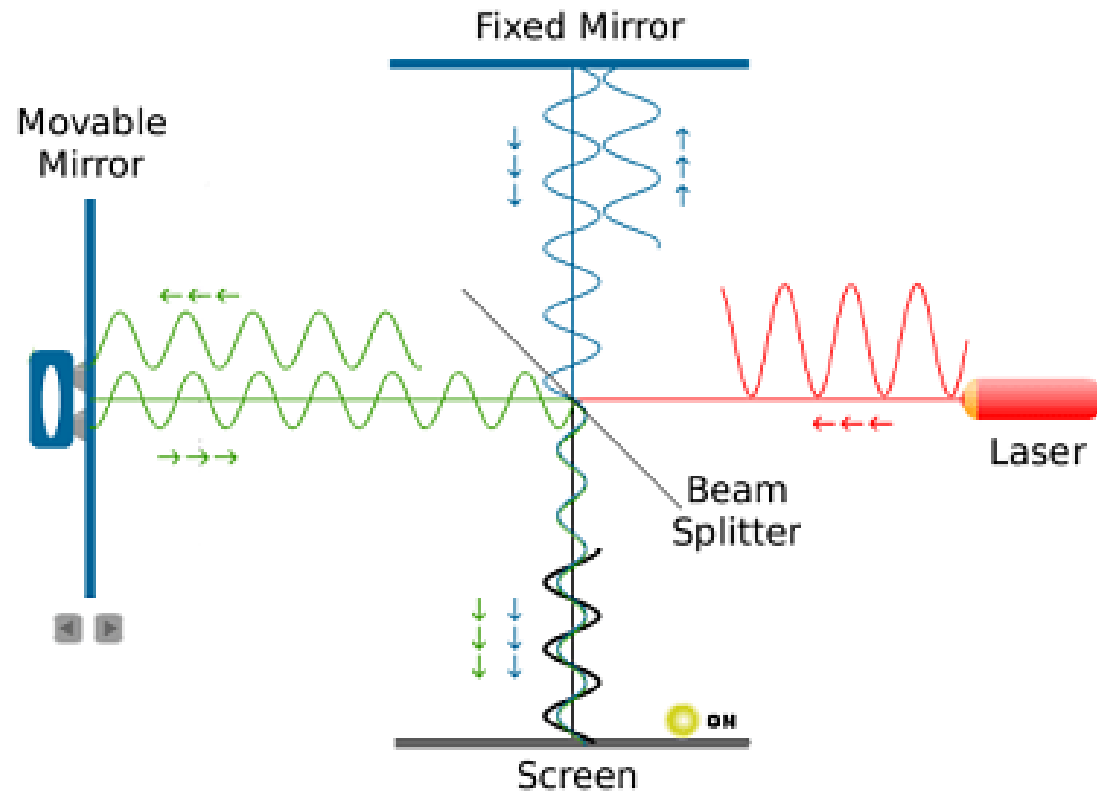
Michelson interferometer



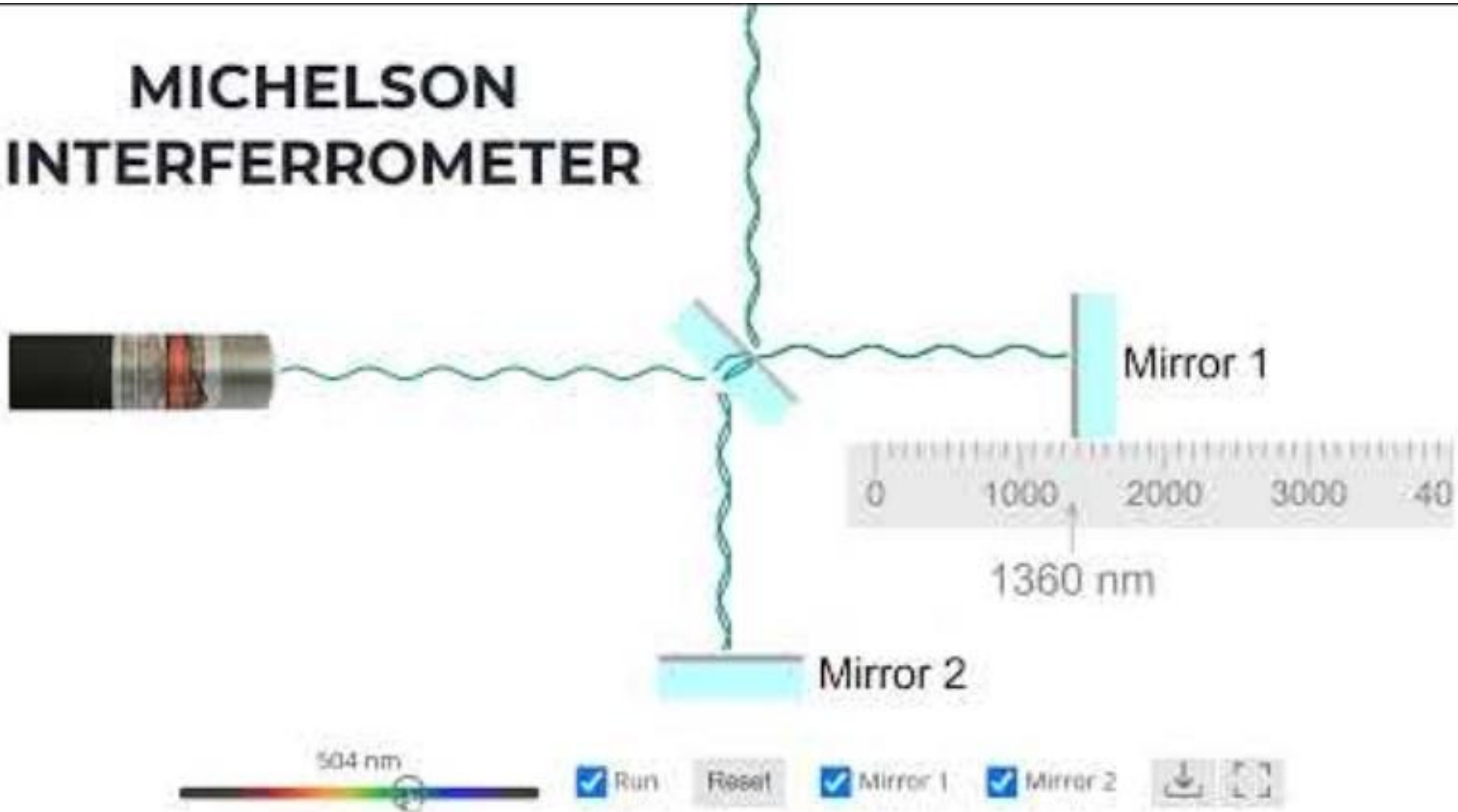
- ถ้าระยะทางที่ลำแสงทั้งสองเดินทางเท่ากัน (path difference = 0) เฟสของคลื่นจะตรงกัน ทำให้สัญญาณมีค่าสูงสุด
- เมื่อกระจกเคลื่อนที่ไป $\lambda/4$ ระยะทางเดินแสงเปลี่ยนเป็น $\lambda/2$ ทำให้เฟสของคลื่นต่างกัน 180° และเกิดการหักล้าง
- หากเคลื่อนที่อีก $\lambda/4$ เฟสของคลื่นกลับมาตรงกันอีกครั้ง



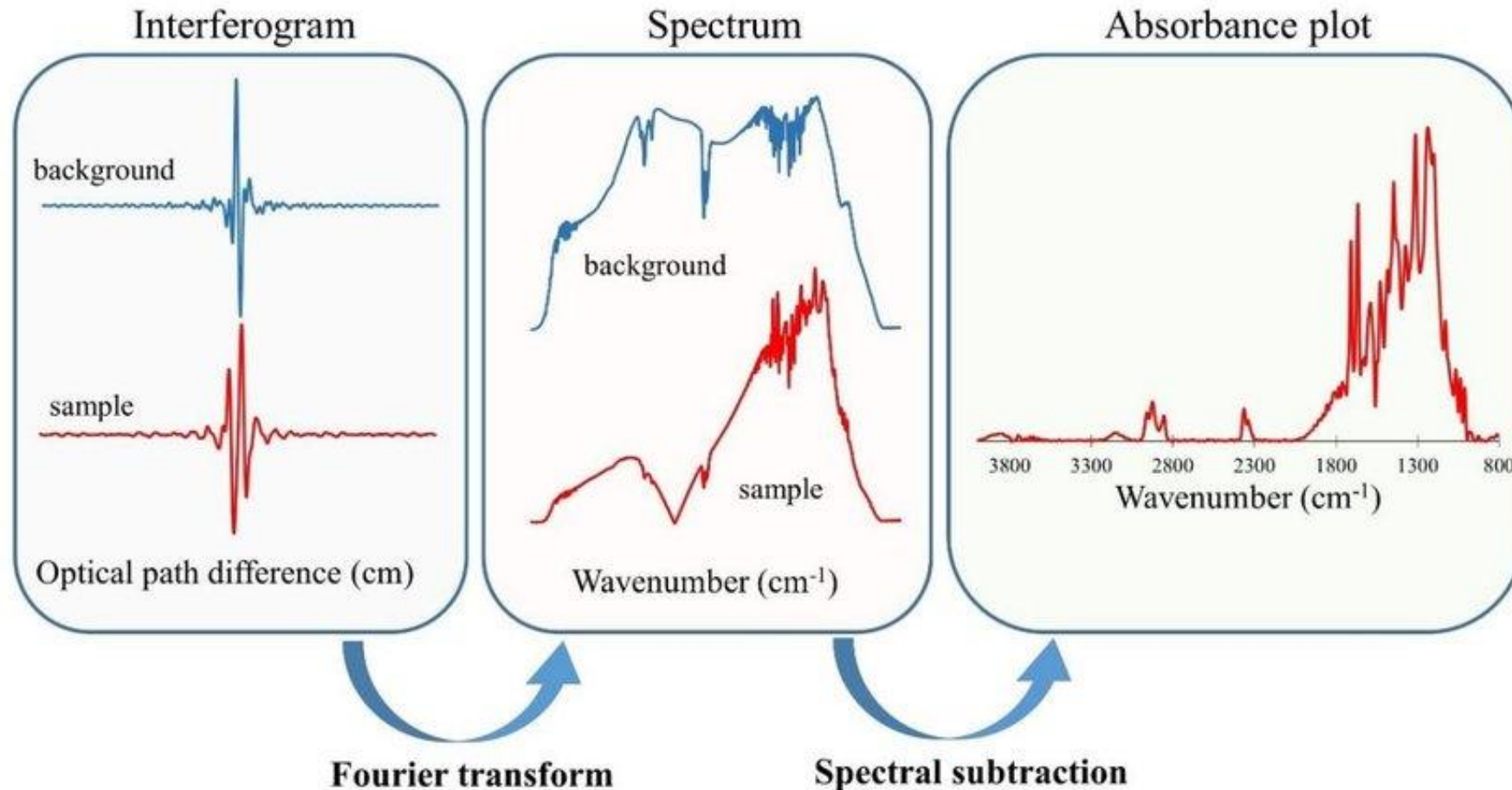
Michelson interferometer

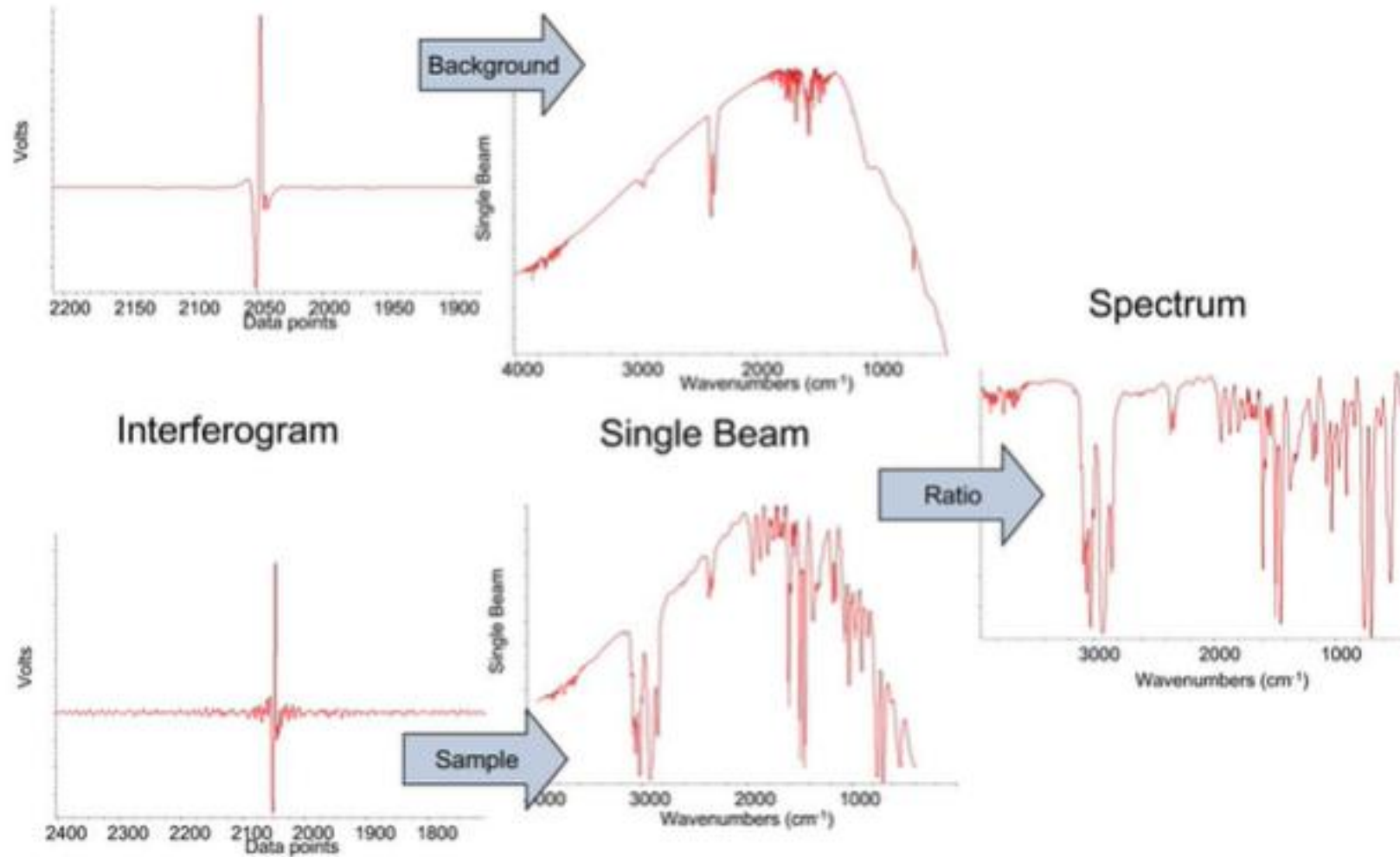


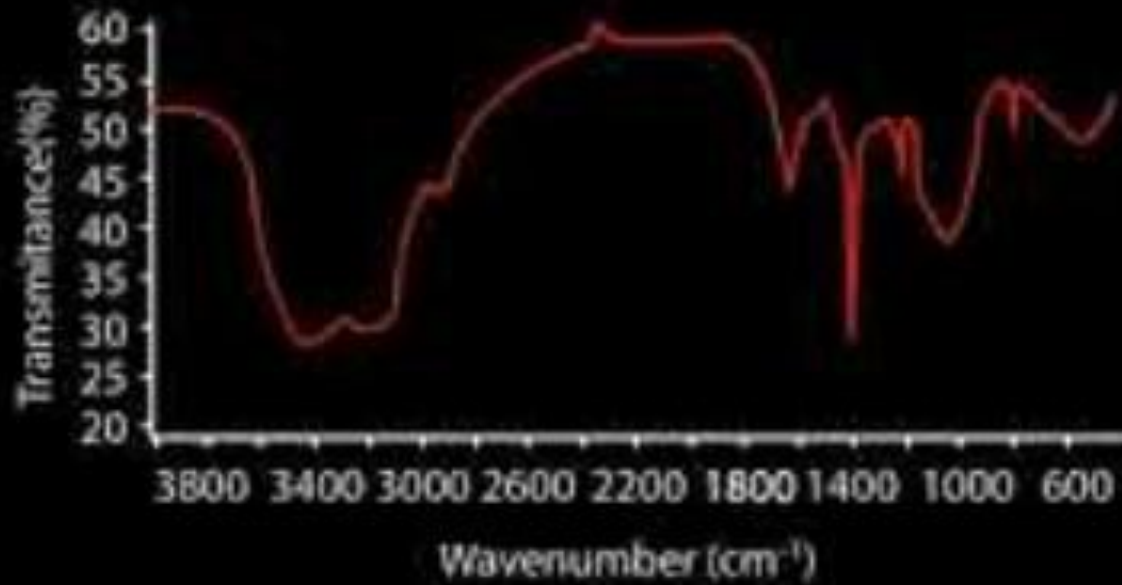
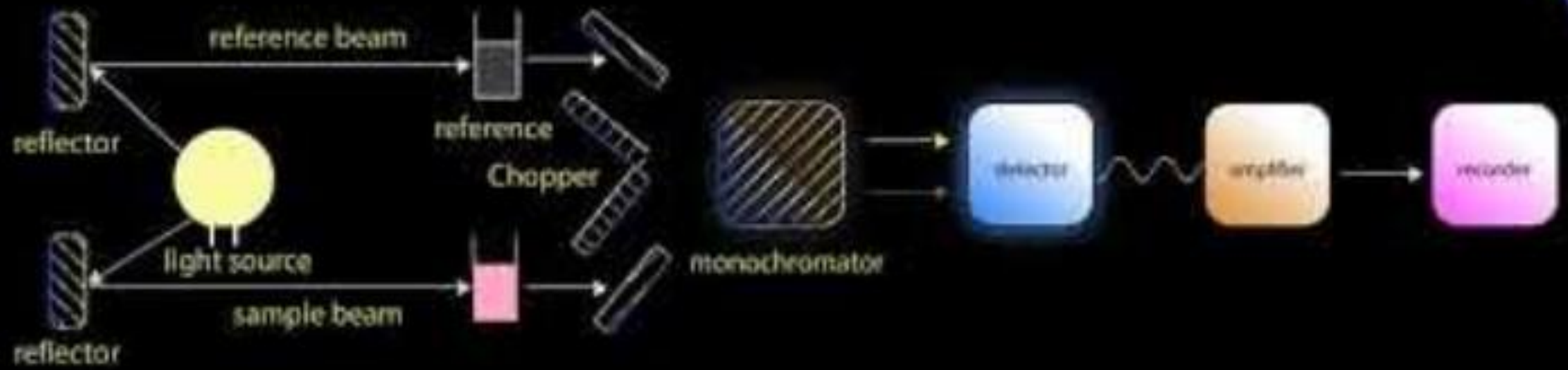
MICHELSON INTERFERROMETER



- สัญญาณที่ตัวตรวจวัดได้รับจะอยู่ในรูปของอินเทอร์เฟอโรแกรม (interferogram)
- Fourier transform (FT) จะถูกนำมาใช้แปลง interferogram จากโดเมนเวลาไปเป็นสเปกตรัมความถี่





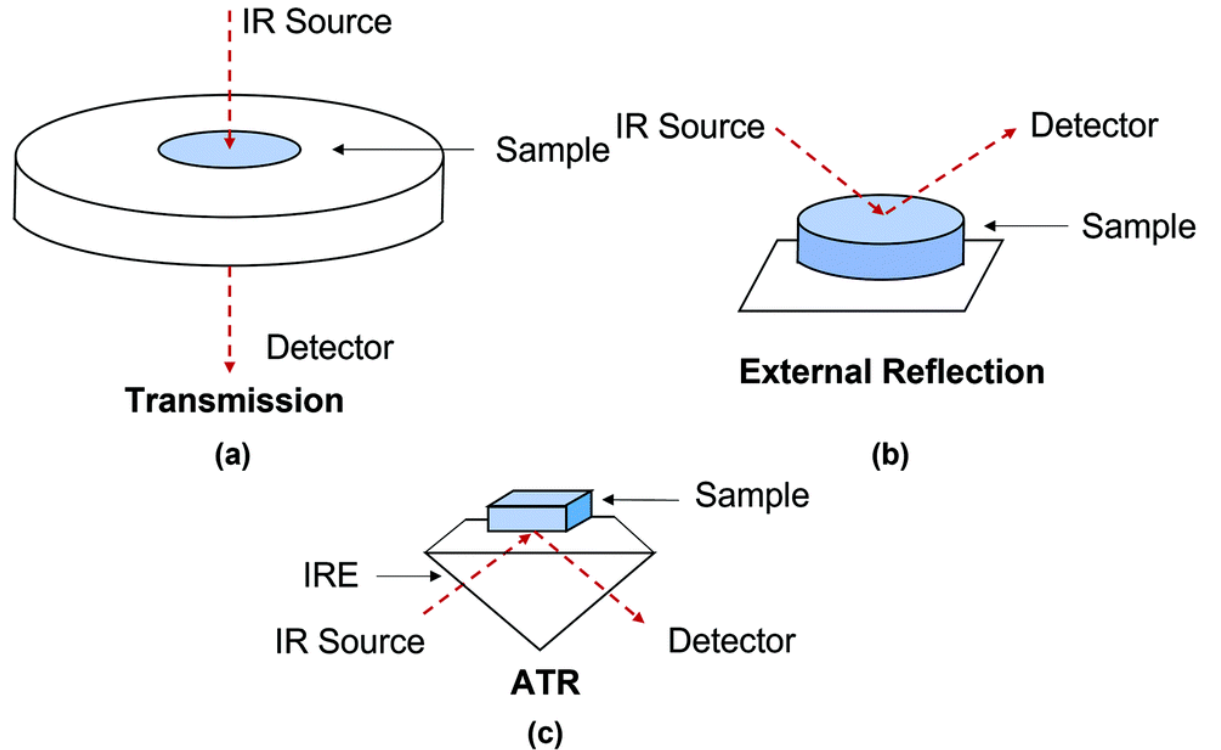




Source Type	Mid-infrared Ever-Glo (4,000 – 400 nm)
Detector Type	Deuterated triglycine sulfate (DTGS)
Applications	Academic teaching, industrial QA/QC, plastics and polymers, pharmaceuticals
Humidity	Tightly sealed to resist ambient humidity.
Beam Splitter	KBr/Ge mid-infrared optimized
ATR mode	Diamond

เทคนิคการวิเคราะห์ FT-IR

1. เทคนิคการส่องผ่าน (Transmission)
2. เทคนิคการสะท้อน (Reflection)
 - 2.1 Specular reflectance
 - 2.2 Diffuse reflectance infrared Fourier transform spectroscopy (DRIFTS)
 - 2.3 Attenuated total reflectance (ATR)

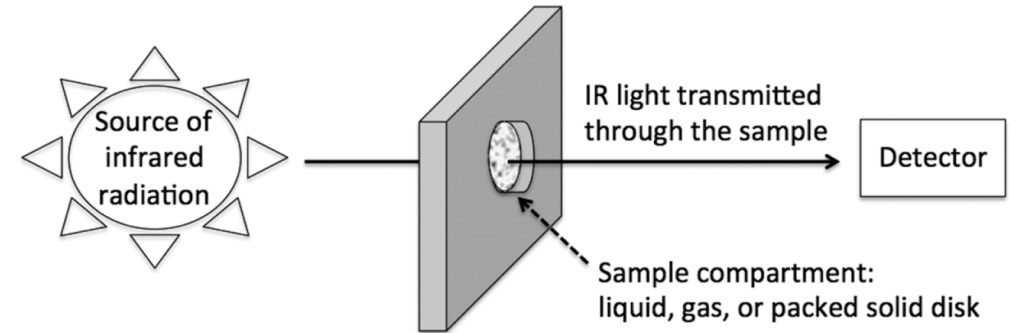


เทคนิคการวิเคราะห์ FT-IR

เทคนิคการส่องผ่าน (Transmission)

เป็นเทคนิคที่นิยมกันแพร่หลาย โดยการให้แสงผ่านสารตัวอย่างโดยตรง ให้ signal to noise ratio ที่ดี เหมาะกับตัวอย่างที่เป็นของแข็ง ของเหลว และแก๊ส

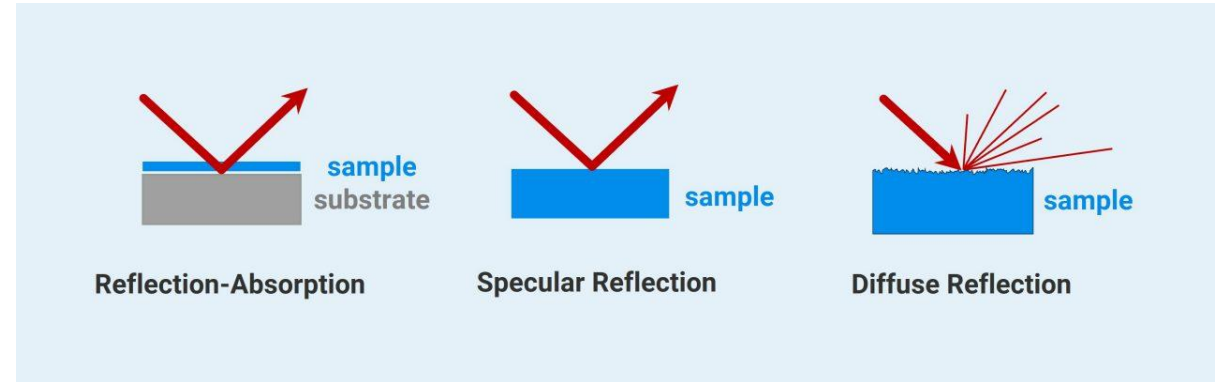
ข้อจำกัดที่สารตัวอย่างต้องให้แสงผ่านได้ และความหนาของสารตัวอย่างมีผลต่อค่าการดูดกลืน หรือการส่องผ่าน



เทคนิคการวิเคราะห์ FT-IR

เทคนิคการสะท้อน (Refraction)

เทคนิคนี้จะให้กับสารตัวอย่างที่ไม่สามารถวัดโดยวิธีการส่องผ่านได้ หรือสารตัวอย่างที่มีการสะท้อนที่ผิวดี

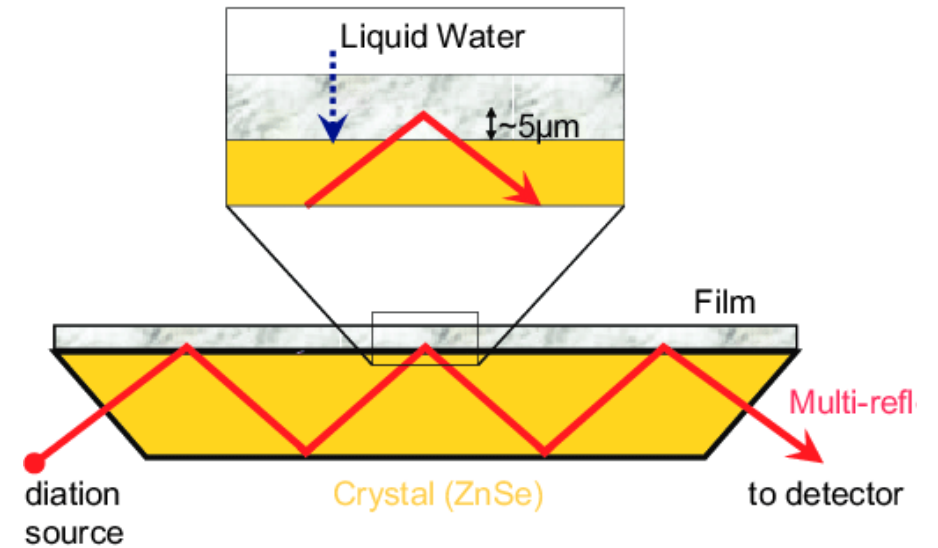
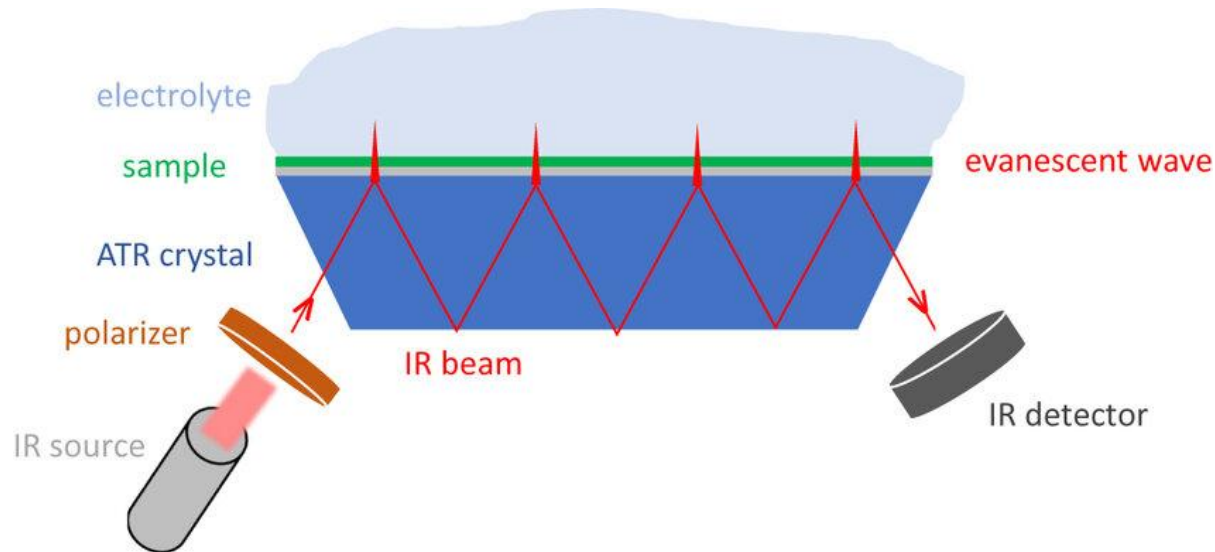


- Specular reflectance อาศัยหลักการวัดการสะท้อนที่เกิดขึ้นเมื่อมุมของแสงตกกระทบบมีค่าเท่าแสงสะท้อนให้กับตัวอย่างที่มีผิวหน้าเรียบ (smooth surface) การวัดจะมีสองแบบคือ
 - วัดสะท้อนคลื่นอินฟราเรดที่ผิวหน้าของสารตัวอย่าง
 - วัดการสะท้อนจากฟิล์มบางที่เคลือบสารผิวหน้าเรียบไว้ โดยวัดการสะท้อนของฟิล์มที่เคลือบไว้บนสารตัวอย่าง เมื่อผ่านแสงอินฟราเรดให้ผ่านสารเคลือบ แสงตกไปผิวหน้าเรียบของสารตัวอย่าง และเกิดการสะท้อนกลับไปยังสารเคลือบอีกครั้ง เรียกเทคนิคนี้ว่า reflection-absorption หรือ double transmission
- Diffuse reflectance (DRIFTS) เหมาะสำหรับตัวอย่างที่เป็นของแข็งผิวหน้าไม่เรียบ หยาบหรือเป็นผง เมื่อผ่านคลื่นอินฟราเรดไปยังสารตัวอย่างจะทำให้เกิดการสะท้อน 2 แบบ คือแบบ specular reflection และ diffuse reflectance (แสงอินฟราเรดจะผ่านเข้าไปในสารตัวอย่างก่อนที่จะชนอนุภาคต่าง ๆ แล้วสะท้อนกลับออกมา)

เทคนิคการวิเคราะห์ FT-IR

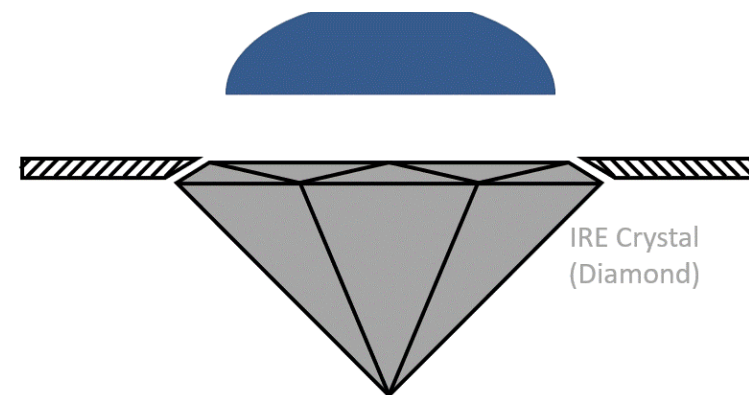
เทคนิคการสะท้อน (Refraction)

- ATR (Attenuated Total Reflectance) เป็นเทคนิคสำหรับวิเคราะห์ของแข็ง ของเหลว ฟิล์มบางหรือวัสดุทึบแสง โดยอาศัยหลักการสะท้อนกลับหมดของแสง อินฟราเรด (total internal reflection)



ATR (Attenuated Total Reflectance)

- แสงอินฟราเรดจะถูกส่งผ่านตัวกลางที่เป็นแท่งผลึก (ATR crystal) ที่มีค่าดัชนีหักเหสูง (ความหนาแน่นสูง) เช่น diamond จะตกกระทบบริเวณรอยต่อระหว่างคริสตัลกับตัวอย่างที่มีค่าดัชนีหักเหต่ำกว่า ด้วยมุมที่มากกว่ามุมวิกฤต (critical angle) ทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมดที่ตรงผิวรอยต่อ
- ในขณะเดียวกัน จะเกิด evanescent wave ทะลุผ่านเข้าไปในตัวอย่งในระยะประมาณ 0.1–5 ไมครอน ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่น มุมตกกระทบ และค่าดัชนีหักเหของทั้งสองวัสดุ
- สารตัวอย่างจะดูดกลืนบางส่วนของคลื่นนี้ ทำให้ความเข้มแสงลดลงจากเดิม เมื่อเทียบกับ background spectrum ที่ไม่มีสารตัวอย่าง แสงที่เหลือจะเกิดการสะท้อนกลับหมดออกมาและถูกวัดไว้ แสดงผลออกมาเป็น ATR สเปกตรัม



#กิจกรรม work@class

แบ่งกลุ่มทำกิจกรรม 2.1

มอบหมายโจทย์ให้แต่ละกลุ่ม
ระดมสมองแก้ไขโดยวิธีการ
ร่วมแสดงความคิดเห็น

ให้แต่ละกลุ่มนำเสนอ วิธีการแก้ไขโจทย์ปัญหา

- 1) หลักการสำคัญหรือหลักพื้นฐานที่ถูกต้อง
- 2) วิธีการคำนวณค่าที่ถูกต้อง
- 3) วิธีอธิบายเชิงพฤติกรรม (วิธีปฏิบัติ) ที่ถูกต้อง

โดยให้กลุ่มอื่น ๆ รับฟัง และซักถามในข้อที่สงสัย