

## אינטראקציה בין קרינה וחומר וספקטרוסקופיה



מגישים : סעדי זיאד  
חיגאזי טאהא

מנחים :

דר' דן אורון – המחלקה לפיזיקה  
דר' אמנון חזן – המחלקה להוראת המדעים

## תודות

✓ למשפחות שלנו שתמכו ועזרו ועודדו והעניקו לנו את הזמן החום והאהבה.

✓ לדר' **דן אורון** על ההנחיה העניינית והעזרה והתמיכה ותשומת הלב הרבה שהעניק לנו לאורך כל הדרך

✓ לדר' **אמנון חזן** על הלווי הענייני שדאג שהכל יתנהל באופן תקין ובזמן .

✓ לפרופ' **שמעון לוויט** על התמיכה והעזרה והדאגה המתמשכת לאורך כל הדרך.

✓ לפרופ' **בת שבע אלון** על העצות הענייניות והתמיכה הרבה שקיבלנו ממנה.

✓ לדק' **אסתר בגנו** שהקדישה לנו מזמנה והעזרה הרבה שלה.

✓ לדר' **חנה ברגר** על התמיכה, העזרה והזמינות לאורך כל הדרך.

## העבודה כוללת :

- (א) מבוא .
- (ב) ארבעה פרקים.
- (ג) שלושה נספחים.

### פרק "א"

#### הכרת הספקטרום ובנית ספקטרומיטר פשוט.

1. ספקטרום וסוגי ספקטרום שונים.
2. בנית ספקטרומיטר פשוט ומדידת ספקטרום בליעה של מספר נוזלים.
3. העברת הפעילות בכתה ומשוב תלמידים.

### פרק "ב"

#### אנטראקציה בין קרינה ומולקולה

1. יחידת הבניה הבסיסית של החומר "המולקולה והמבנה שלה".
2. דרגות חופש במולקולות השונות .
3. אינטראקציה בין קרינה ומולקולה.
4. תנודה רוטציונית ומודל הרוטור הצפיד.
5. תנודה ויברציונית ומודל האוסילטור ההרמוני.
6. אינטראקציה בין אור ומולקולה ואפקט ראמאן.

### פרק "ג"

#### ניסוי מעבדה:חקירת המבנה של מספר נוזלים ע"י פיזור.

1. פיזור לייזר ירוק מאצטון ( $C_3H_6O$ ).
2. פיזור לייזר ירוק מטולואין ( $C_7H_8$ ).

### פרק"ד"

#### אפקט החממה.

#### נספחים:

- נספח מס"1 : חומר תיאורטי שמסכם את החומר הרלוונטי הנלמד בכתה.
- נספח מס"2 : שאלות פתורות.
- נספח מס"3 : תדריך מעבדה לבנית ספקטרומיטר פשוט ומדידת ספקטרום של מספר נוזלים.

## תוכן העניינים.

עמוד	נושא	
4	מבוא	1
5	רציונל	2
7 8 9 11	פרק "א" בנית ספקטרומיטר פשוט. הפעלה בבית הספר ותוצאות. משוב תלמידים.	3
12 13 14 15 16 17 18 21 26 28 29	פרק "ב". אינטראקציה בין קרינה וחומר. המולקולה – יחידת הבניה הבסיסית של החומר. סוגי תנועה במולקולה. דרגות חופש במולקולה. מספר אופני סיבוב במולקולה. תנור המיקרוגל. מודל הרוטור הצפיד. תנועה ויברציונית ומודל האוסילאטור ההרמוני. מעברים אנרגטיים במולקולה. כללי ברירה. אפקט ראמאן	4
32 33 37	פרק "ג" ניסוי מעבדה. תוצאות הניסוי. ניתוח גראפיים.	5
39	פרק "ד" אפקט החממה.	6
43	סיכום.	7
45	מקורות	8
46 62 65	נספחים: 1. רקע תיאורטי. 2. תרגילי הערכה. 3. תדריך מעבדה	9

## **מבוא**

" בשנת 1666 השגתי מנסרה משולשת מזכוכית כדי לנסות את התופעה המפורסמת של צבעים . תחילה הגפתי את התריס, כדי שחדרי יהיה חשוך . עשיתי חור קטן בתריס שדרכו חדרה קרן אור השמש . את המנסרה שמתי קרוב לחור , והצבעים נראו על הקיר ממול . היה זה בידור משעשע מאוד להתבונן בצבעים החזקים והבוהקים " .

כך מתאר ניוטון ( SIR ISAAC NEWTON 1642-1727 ) את הניסוי שהביאו למסקנה כי האור הלבן הוא לאמיתו של דבר תערובת של אורות בצבעים שונים . פראונהופר ( JOSEPH VON FRAUENHOFER 1787-1826 ) המיר את החור שבעדו חדר האור בניסוי של ניוטון בסדק כאשר התבונן בספקטרום של אור השמש דרך טלסקופ , גילה כי להפתעתו שבתוך הצבעים מופיע מספר גדול של קווים שחורים ( כלומר חלק מהספקטרום של אור השמש היה חסר ) . ההסבר להופעת הקווים השחורים (קווי פראונהופר ) ניתן רק 45 שנה מאוחר יותר ע"י בונזן ( 1811-1899BUNSEN ) וקירכהוף ( KIRCHHOFF 1824-1887 ) .

**ספקטרוסקופיה**, בפיסיקה, בכימיה ובאסטרונומיה, שיטה לחקר הרכב החומר ומבנהו ע"י פירוק הקרינה האלקטרומגנטית הנפלטת ממנו עם חימומו (או הנבלעת בו עם הקרנתו) למרכיביה, יצירת הספקטרום שלה באמצעות מכשירים ייעודיים, וזיהוי האטומים והמולקולות שמהם עשוי חומר זה, לפי מאפייני הספקטרום הקרויים "קווי פליטה" או "קווי בליעה". בהגדרה רחבה יותר, הספקטרוסקופיה חוקרת את יחסי הגומלין בין חלקיקי החומר התת-אטומיים, ואף את המבנה הפנימי שלהם, כפונקציה של אנרגיית ההתנגשויות ביניהם. הספקטרוסקופיה מילאה תפקיד חשוב בפיתוח התיאוריות המרכזיות של הפיסיקה והכימיה המודרניות, ונודע לה תפקיד חשוב בהסברת פעולתם של כוחות היסוד של הטבע - לא רק הכוח האלקטרומגנטי, אלא גם שני הכוחות הגרעיניים, החזק והחלש.

**בפיסיקה**, הספקטרוסקופיה תרמה רבות לפיתוחם של המודלים התיאורטיים הקיימים של מבנה אטומים ומולקולות, תחילה בתרומתה להבנת מבנה האטום ולפיתוחה של תורת הקוונטים, ובהמשך ביישומה לניסויי מאיצי חלקיקים ולניסויים אחרים שהבהירו את המבנה הפנימי של גרעין האטום ואת פעולות הגומלין המתרחשות בהתנגשויות מאיץ, דהיינו היווצרות חלקיקים, התפרקותם והתאינוותם.

הספקטרוסקופיה בגלי רדיו של גרעיני אטום השרויים בשדה מגנטי משמשת ברפואה להדמיית רקמות רכות, בשיטה הקרויה הדמיית תהודה מגנטית (MRI).

תרומת הספקטרוסקופיה לאסטרונומיה ניכרת בכל ענפיו של תחום זה, מעל ומעבר לזיהוי ההרכב הכימי של כוכבים רחוקים, כמתואר לעיל. לדוגמה, הספקטרוסקופיה ביססה את דגם המפץ הגדול כהסבר לראשית היקום, תחילה כאשר החל השימוש בהיסט לאדום של קווי הספקטרום, וחשף את התפשטות היקום; בהמשך, ספקטרוסקופיה בגלי מיקרו הביאה לגילוי קרינת הרקע הקוסמית, שאישרה את הדגם הזה. זאת ועוד, תצפיות ספקטרוסקופיות חשפו כוכבי לכת במסלוליהם סביב כוכבים אחרים מלבד השמש, ואחרות זיהו את קיומן של מולקולות אורגניות מורכבות למדי בענני גז בין-כוכביים; הדבר מסייע לביולוגים בפיתוחן של

תיאוריות על מוצא החיים. האסטרונומיה מסתייעת גם בספקטרוסקופיה של קרני רנטגן וקרני גמא מזה, ושל גלי רדיו מזה, בעיקר בחקר המבנה והתנועה של גרמי שמים רחוקים מאוד, כמו קוואזרים.

הספקטרוסקופיה בגלי מיקרו היא כלי חשוב מאין כמוהו בחקר מבנים מולקולריים. שיטותיה מספקות מידע על המרחקים בין גרעיני האטומים במולקולה, על המבנה הגיאומטרי שלה ועל תכונות אחרות כמו מומנט דיפול חשמלי ומומנט מגנטי, התפלגות האלקטרונים במולקולה וחוזק הקשרים בין היסודות השונים. במיוחד, ניתוחי פוריה של המידע הנקלט בספקטרומטר גלי מיקרו מאפשרים את חקירתם של יונים ומולקולות קצרי חיים, למשל רדיקלים חופשיים. גם הספקטרוסקופיה בתת-אדום תורמת רבות לחקר המולקולות; למעשה, שיטת הזיהוי הנוחה ביותר של מולקולות מבוססת על מדידות בפלח זה של הספקטרום.

### **רציונל:**

במסגרת לימודנו לתאר שני בהוראת הפיזיקה במכון וייצמן למדע נחשפנו לתכנים חשובים מאוד הן בתחום הפדגוגי והן בתחום המדעי, תכנים קלאסיים ותכנים שהם בחזית המחקר המדעי. השתתפנו בסדנאות ועשינו מעבדות. עמדנו מקרוב על אופן עבודתם של מדענים שהם בשורה הראשונה של המדענים בארץ ובעולם ולפעמים היינו חלק מצוות המחקר שלהם. חלקים מהידע ומהמיומנויות שרכשנו הפעלנו בתוך הכיתות שאנו מלמדים בהן וראינו שהן משפרות את הוראת הפיזיקה בצורה ניכרת. משפרות את הגישה שלנו להוראה ואת האופן שבו אנו מטפלים בתכנים המועברים לתלמידים. משפרות את הביטחון העצמי שלנו ואת זה אנו מעבירים גם לתלמידינו.

מתוך מודעות לחשיבות של העברת הידע שרכשנו לקבוצה גדולה של מורים ותלמידים ומתוך רצון עז לתרום את תרומתנו הקטנה למקצוע ההוראה שלנו, ולהיות מתווכים בין האקדמיה לעבודה בשטח, אנו מגישים עבודה זו כחלק מהחובות הנדרשות לקבלת התואר ובתקווה כי היא תהווה מבנית להפעלת תלמידים על ידי מורים, בהתחלה בבית הספר ובהמשך במכון וייצמן.

בחרנו בנושא ספקטרוסקופיה משום שחלק גדול ממנו נמצא בתוכנית הלימודים הרגילה בפיזיקה והוספנו הרחבה שהיא מעבר לתוכנית הלימודים הרגילה שהיא לדעתנו חשובה מאוד לצורך העמקה וקישור בין דיסציפלינות שונות במדע וגם מאירה ומסבירה חלק מתופעות היום יום ועומדת על הסיבות להיווצרותם.

אנו תקווה כי מבנית זו תיושם על ידי חלק גדול של מורים ותלמידים וכי תופק ממנה תועלת רבה וקידום של לימודי הפיזיקה בארץ.

### המבנית מורכבת משני חלקים :

חלק פדגוגי שיכלול בנייה של ספקטרומטר פשוט המורכב ממקור אור לבן , שתי עדשות מרכזות , חריר , סריג החזרה , מסך ומצלמה . בעזרת הספקטרומטר נמדוד באופן איכותי את ספקטרום הבליעה של חומרים פשוטים ונשווה עם הספרות .

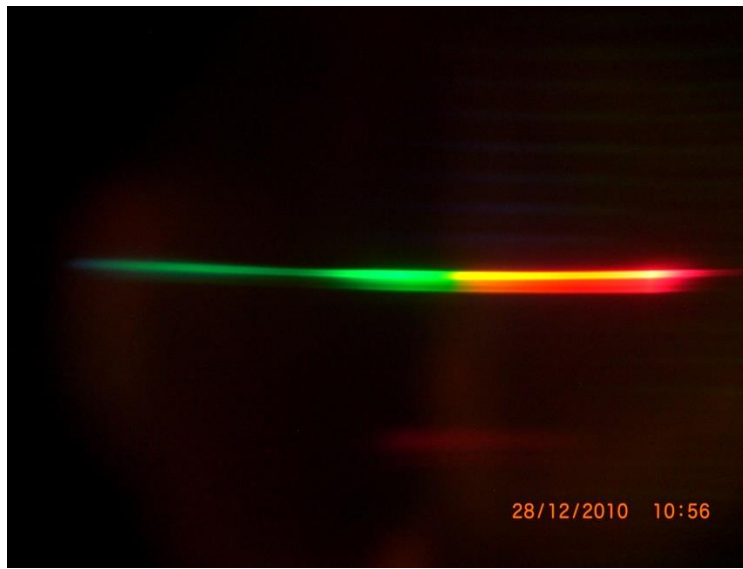
חלק מדעי שיכלול הרחבה בנושא בליעה מסוגים שונים כמו בליעה ויברציונית ואפקטים חשובים כמו אפקט ראמאן והשפעתו על יצירת אפקט החממה והמלצות לפעילות המשך . יישום המבנית מסתמך על לימוד מקדים של הנושאים הבאים מתוך תוכנית הלימודים בפיזיקה

- (1) אופטיקה גיאומטרית
- (2) גלים וגדלים אופייניים .
- (3) קרינה אלקטרומגנטית וספקטרום הקרינה של השמש .
- (4) ספקטרום בליעה וספקטרום פליטה.
- (5) ספקטרום פליטה /בליעה של אטום המימן
- (6) מבנה האטום לפי בור ורמות אנרגיה .
- (7) אינטראקציה בין קרינה ואטומים
- (8) החומר התיאורטי הקשור לנושאים הנ"ל מפורטים בנספחים של העבודה .

# פרק "א"

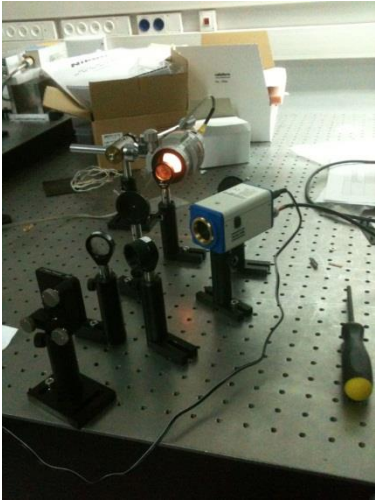
## הכרת הספקטרום ובנית ספקטרומיטר פשוט.

1. ספקטרום וסוגי ספקטרום שונים.
2. בנית ספקטרומיטר פשוט ומדידת ספקטרום בליעה של מספר נוזלים.
3. העברת הפעילות בכתה ומשוב תלמידים.



## **בניית ספקטרומטר פשוט והכרת תופעת הבליעה.**

במסגרת הפרויקט שלנו בנינו ספקטרומטר פשוט שמורכב ממספר אלמנטים פשוטים. המטרה הייתה להכיר מקרוב מה זה ספקטרומטר? להתנסות בבנייתו, עיקרון הפעולה של ספקטרומיטר ושפעת הפרמטרים השונים על איכות התמונה המתקבלת.

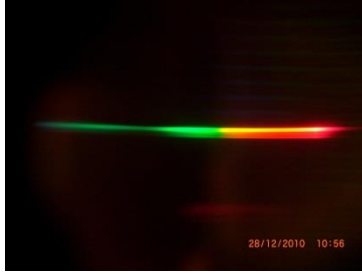


- כפי שמתואר בתמונה הספקטרומטר מורכב מ:-
- (1) מנורת להט
  - (2) שלוש עדשות
  - (3) חריר
  - (4) קיוויטה ( מיכל שבו שמים את החומר )
  - (5) סריג החזרה
  - (6) מצלמה

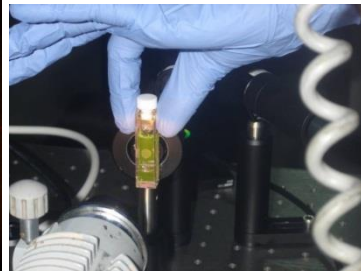


### **ספקטרום של מנורת להט**

באמצעות הספקטרומטר הצלחנו לקבל את ספקטרום הבליעה של מספר חומרים. בתמונות ניתן לראות את ההבדל בבספקטרום הקרינה לפני ואחרי הכנסת החומר.



ספקטרום של מנורת להט  
אחרי הכנסת החומר



הכנסת החומר



ספקטרום של מנורת להט  
לפני הכנסת החומר

### הפעלה בבית הספר

מדידת ספקטרום הבליעה של כלורופיל :  
התלמידים התבקשו לבנות ספקטרומטר פשוט ולמדוד בעזרתו את ספקטרום הבליעה של כלורופיל שהוא החומר המצוי בעלים של הצמחים ומשתתף בתהליך ייצור האנרגיה בתוך הצמח .

לתלמידים חולק תדריך ( מצורף לנספחים ) מעבדה המסביר את אופן הרכבת הספקטרומטר ואת אופן הכנת הכלורופיל ומהלך ביצוע הניסוי . כדי לחסוך זמן הם התבקשו להכין את הכלורופיל יום לפני ביצוע הניסוי.

בהתאם להנחיות שבתדריך הם קיבלו את הספקטרום של פנס אור לבן על מסך ואת זה הם צלמו במצלמה דיגיטלית . לאחר מכן הם הכניסו את הכלורופיל שהכינו לתוך קיוויטה ואותה הכניסו לספקטרומטר בצמוד לחריר כך שהאור הלבן היוצא מהחריר יעבור כולו דרך החומר שבקיוויטה . הם צילמו שוב את הספקטרום שהתקבל על המסך .

### תוצאות :

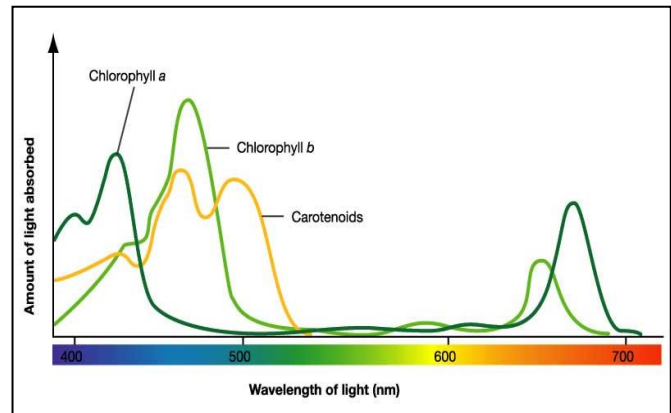
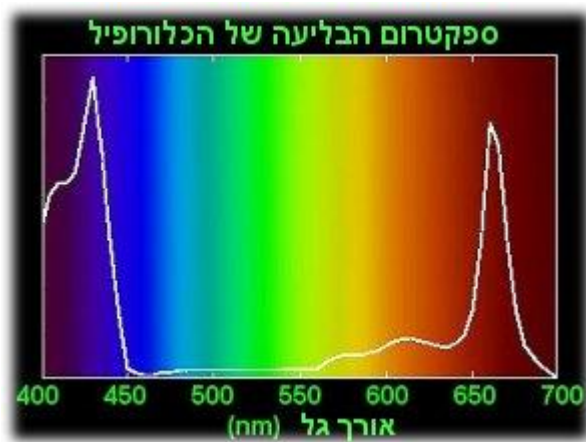
התלמידים עשו השוואה בין הספקטרום שהתקבל לפני הכנסת הכלורופיל ואחריו וראו בבירור כי הכלורופיל בלע בכחול ובקצה האדום .



## לפני הכנסת הכלורופיל

## אחרי הכנסת הכלורופיל

השוואה עם הספרות מראה שיש התאמה .



חזרו על הניסוי אבל עם שמן זית במקום הכלורופיל , תוצאות הניסוי הראו שגם לשמן זית יש בליעה בתחום הכחול והאדום אבל בעוצמה חלשה יותר מאשר בכלורופיל . הם הגיעו למסקנה שבשמן זית יש כלורופיל בריכוז נמוך ולאחר מכן להכללה שניתוח ספקטרום הבליעה של חומר מסויים יכול להעיד על הרכבו הכימי .

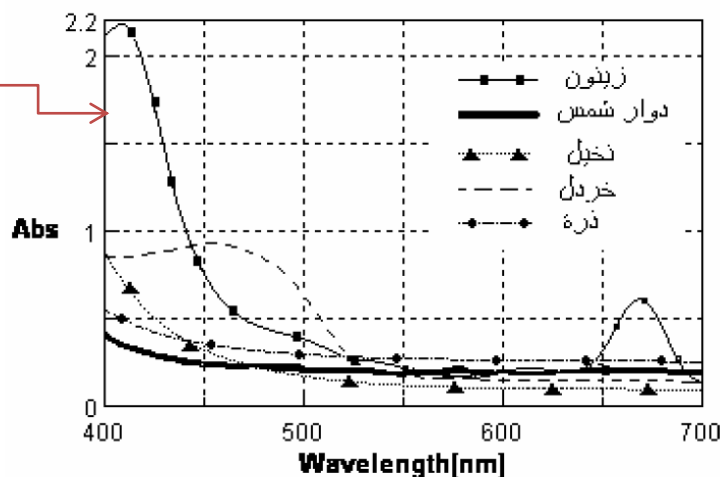


אחרי הכנסת שמן הזית

לפני הכנסת שמן הזית

השוו את ספקטרום הבליעה של שמן בתחום האור הנראה עם הספרות והראו התאמה טובה .

ספקטרום הבליעה של שמן זית בתחום הנראה



الشكل (3) طيف امتصاص الزيوت المجال الموجي (400-700 nm).

### משוב של התלמידים :

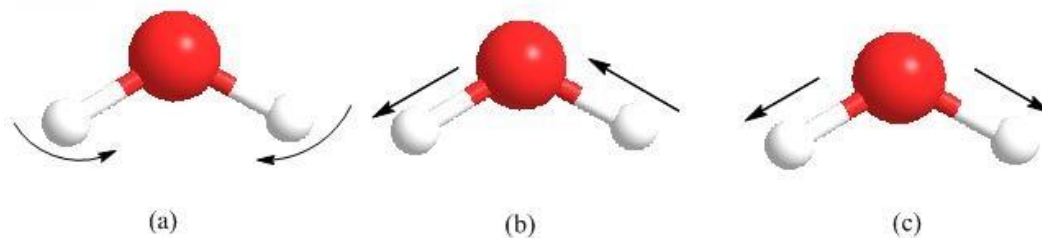
לאחר הניסוי הועברה בכיתה פעילות שיגרה של ארגון ידע במטרה לבדוק מה למדו מתוך הניסוי ומה תרם להם . השיגרה שנבחרה היא " אז מה עשינו " ( דפי הפעילות של השגרה מצורפים לנספחים ) .

ניתוח המשוב של התלמידים מראה שהניסוי והמסקנות שהגיעו אליהן אם זה בעבודה הפרטנית ואם בקבוצה ולאחר מכן בדיון הכיתתי תרם להם להבין יותר מה זה ספקטרום בכלל ומה זה ספקטרום בליעה בפרט ואיך זה קשור להרכב החומרים .

# פרק "ב"

## אנטראקציה בין קרינה ומולקולה

1. המולקולה - יחידה הבניה הבסיסית של החומר .
2. סוגי תנועה במולקולה.
3. דרגות חופש במולקולות השונות .
4. מספר אופני הסיבוב במולקולה.
5. תנור המיקרוגל.
6. תנועה רוטציונית ומודל הרוטור הצפיד.
7. תנועה ויברציונית ומודל האוסילטור ההרמוני.
8. מעברים אנרגייטים במולקולה ותחומי קרינה מתאימים.
9. אפקט ראמאן.



### **המולקולה - יחידה הבניה הבסיסית של החומר .**

בפרק הקודם דנו באינטראקציה בין קרינה ואטומים בודדים שאין ביניהם אינטראקציה הדדית והבנו את עקרונות הבליעה והפליטה של קרינה ע"י אטומים והקשר בין ספקטרום הבליעה והפליטה לרמות האנרגיה האלקטרונית באטום.

החומרים שמשמשים בהם ונתקלים בהם בכל יום, כמו, מים, דלקים וחומרים למיניהם, אינם מורכבים מאטומים בודדים אלא מיחידת מבנה בסיסית שנקראת **מולקולה**. תכונות החומר תלויות בסוג האטומים, מספר האטומים שמרכיבים אותה והמבנה הגיאומטרי של המולקולה.

מכן החשיבות הרבה להבין את מבנה המולקולה, אורך וסוג הקשר בין האטומים במולקולה ואת המבנה הגיאומטרי שלה.

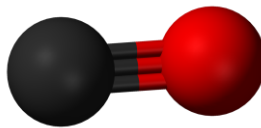
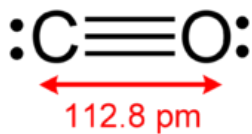
המולקולה מורכבת מכמה אטומים ולכן תכונותיה שונות מתכונות של אטום יחיד.

### **דמיון ושוני בין אטום למולקולה**

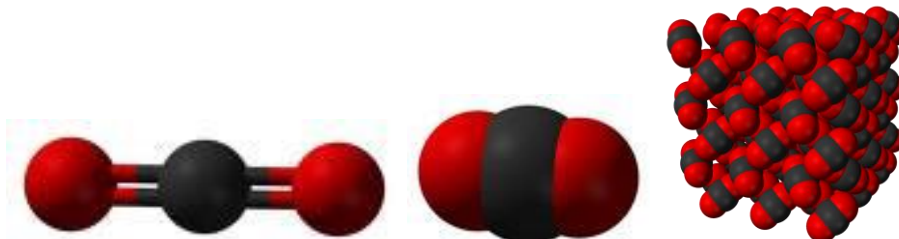
מולקולה	אטום
מורכבת ממספר אטומים.	אטום בודד.
מספר מרכזים של מטען חיובי - גרעיני אטומים.	מרכז אחד של מטען חיובי - גרעין.
מסה מפוזרת בצורה מסוימת במרחב, כתוצאה מכך יש למולקולה מבנה מרחבי אופייני.	מסה מרוכזת בנקודה אחת - בגרעין.
עירור אלקטרוני (בתחום האור הנראה והקרינה האולטרה-סגולה)	עירור אלקטרוני
תנועת מעתק	תנועת מעתק
תנועת סיבוב (בתחום גלי המיקרו)	
תנועת תנודה (בתחום הקרינה האינפרא-אדומה)	

בלימודיך בכימיה למדת כבר על המבנה המרחבי של מולקולות שונות, כך לדוגמא:

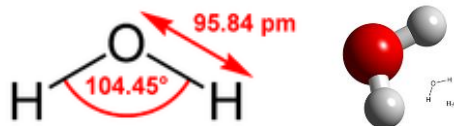
(1) פחמן חד חמצני (CO) בעל מבנה קווי.



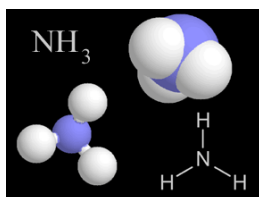
(2) פחמן דו חמצני (CO<sub>2</sub>) בעל מבנה קווי.



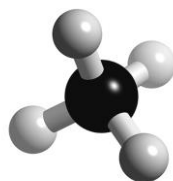
(3) מולקולה של מים בעלת מבנה מישורי בצורת משולש שווה שוקיים עם זווית של  $104.45^\circ$  ביניהם.



(4) מולקולת אמוניה (NH<sub>3</sub>) היא בעלת מבנה של פירמידה משולשת כמתואר בציור.



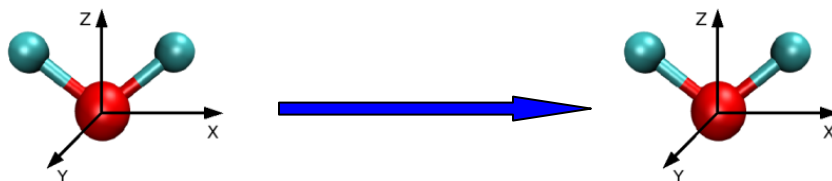
(5) מולקולה מתאן (CH<sub>4</sub>) היא בעלת מבנה של טטראדר כמתואר בציור הבא.



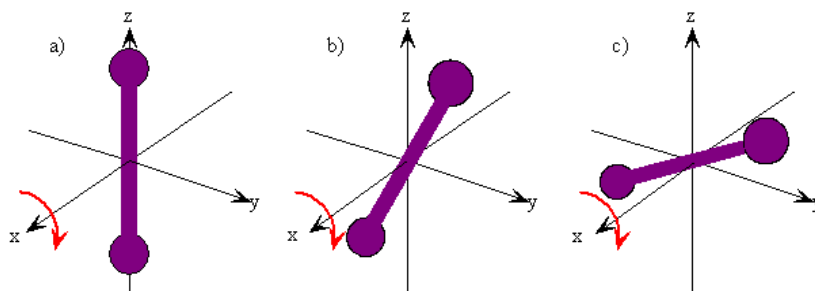
### סוגי תנועה במולקולה.

על אף שהמולקולה היא יצור מורכב יותר מאטום יחיד, ישנם תהליכים המתרחשים במולקולה בצורה דומה לנעשה באטום. כך למשל לכל מולקולה יש רמות אנרגיה אלקטרוניות בדידות וכל בליעה של קרינה אלקטרו-מגנטית בתחום האור הנראה או האולטרא-סגול יעביר את המולקולה ממצב אלקטרוני יסודי למצב אלקטרוני מעורר. בנוסף לערור האלקטרוני מולקולה יכולה לבצע תנועות נוספות במרחב, למשל:

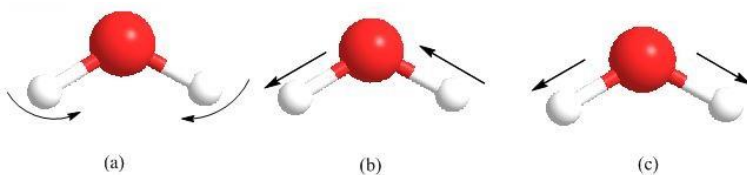
(1) **תנועת מעתק**: היא תנועה של כל המולקולה בשלמותה ממקום אחד לשני במרחב.



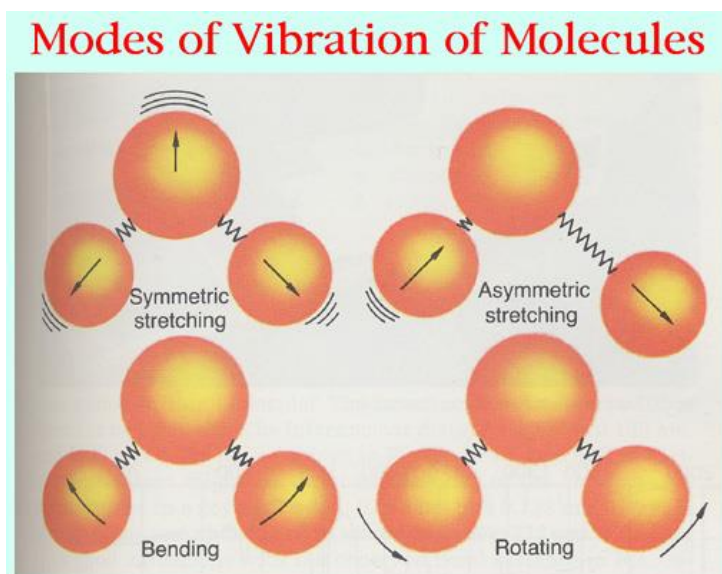
2) **סיבוב (רוטציה):** סיבוב של המולקולה בשלמותה כגוף אחד סביב אחד הצירים של מערכת צירים שמרכזו נמצא במרכז המסה של המולקולה.



3) **תנועה תנודתית (ויברציה):** זו תנועה שנובעת מכך שהמולקולה אינה גוף צפיד על אף שראינו שמולקולה היא בעלת צורה גיאומטרית מוגדרת במרחב, המבנה הזה אינו מוצק וסטטי לחלוטין אלא יש תנועה יחסית בין האטומים השונים שמרכיבים אותה.



תנודות סימטריות      תנודות א-סימטריות      תנודות כיפוף



**דרגות חופש:**

לכל מולקולה יש מספר אופני סיבוב ותנודה שונים ובלתי תלויים זה בזה, כמובן שלמולקולות שונות מספר אופני סיבוב ותנודה שונים, תלוי במספר האטומים במולקולה, סוג האטומים והמבנה הגיאומטרי של המולקולה. לכל אחד מאופני התנודה השונים דרוש משתנה בלתי תלוי לתיאורו וכל אחד מן המשתנים האלה נקרא **דרגת חופש פנימית**.  
אופני התנועה העצמאיים האלה לא יכולים להיות בעלי אנרגיה שרירותית, אלא שבדומה לתנועת אלקטרונים באטום, לכל אופן תנועה עצמאי יש מערכת של רמות אנרגיה משלו, זאת אומרת שכל אחד מאופני התנועה השונים יכול לקבל ולפלוט אנרגיה בצורה מנתית באמצעות קרינה אלקטרו-מגנטית.

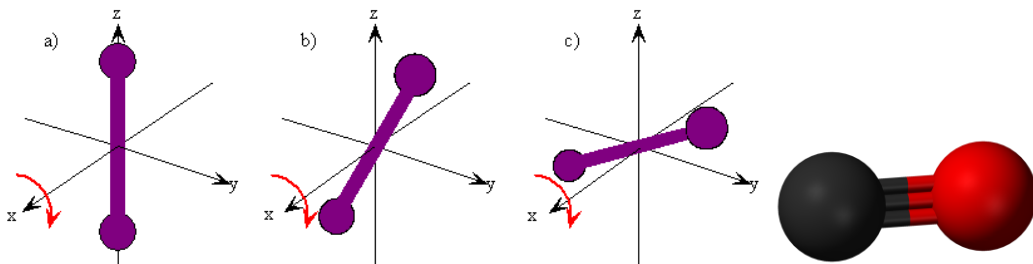
לכל אטום 3 דרגות חופש מרחביות  $(x,y,z)$ , לכן עבור מולקולה בעלת N אטומים יש  $3N$  דרגות חופש, בדומה לאטום, כדי לתאר תנועת מעתק של מרכז המסה של מולקולה צריך 3 דרגות חופש מרחביות  $(x,y,z)$ , ולכן **מולקולה שמורכבת מ-N אטומים היא בעלת  $3N-3$  דרגות חופש פנימיות**.

מולקולה דו-אטומית ( $N=2$ ) בעלת 3 דרגות חופש פנימיות.  
מולקולה תלת-אטומית ( $N=3$ ) בעלת 6 דרגות חופש פנימיות.  
ניתן לראות שכל שמספר האטומים במולקולה רב יותר כך תהיה בעלת מספר גדול יותר של דרגות חופש.  
ניתן לסכום ולומר שבאינטראקציה בין קריה וחומר מולקולארי קיימים שלושה תהליכים אפשריים:

- 1) בליעה וערור אלקטרוני שמתרחש בצורה דומה מאוד למתרחש במקרה של אטום. כאשר האור הפוגע הוא בתחום של האור הנראה או האולטרא-סגול.
- 2) סיבוב של המולקולה באחד מאופני הסיבוב שלה, כאשר האור הפוגע בתחום המיקרו.
- 3) תנודה או ויברציה של המולקולה באופן אחד מאופני התנודה השונים של המולקולה, כאשר האור הפוגע הוא בתחום של האינפרא-אדום.

### מספר אופני הסיבוב במולקולה.

מספר אופני הסיבוב במולקולה תלוי בסוג המולקולה ובמבנה הגיאומטרי שלה, נתחיל מהמולקולה הפשוטה, מולקולה קווית:  
כמו במקרה של מולקולת פחמן חד חמצני ( $CO$ ) או מולקולת פחמן דו חמצני ( $CO_2$ ).

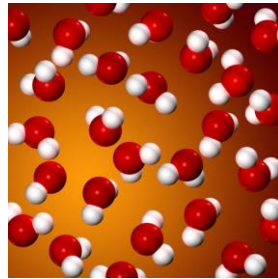
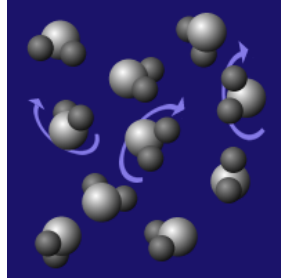


הציור למעלה מדגים סיבוב של המולקולה סביב ציר X אבל עקרונית המולקולה יכולה להסתובב סביב כל אחד משלוש הצירים  $(x,y,z)$ , אבל סיבוב המולקולה סביב ציר Z העובר לאורך המולקולה (ציר הסימטריה) ישאיר את המולקולה בעלת גיאומטריה קווית ללא שינוי

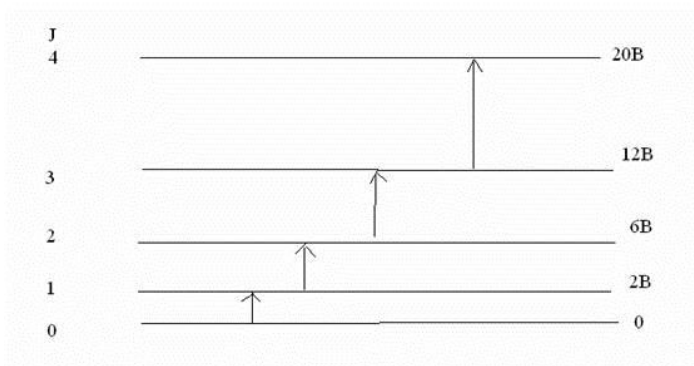
בהשוואה למצבה הקודם, לכך יהיו לה שני אופני סיבוב בלתי תלויים בלבד.

מולקולה בעלת מבנה גיאומטרי אחר (לא קווי):

למולקולה בעלת מבנה לא קווי יהיו עקרונית שלושה אופני סיבוב שונים. כמו במקרה של מולקולת מים.



לכל אחד מאופני הסיבוב יש מערכת רמות אנרגיה בדידות משלו. מערכת אופינית של רמות אנרגיה סיבובית מוצגת בציור הבא. אנרגיה של מצב היסוד הרוטציוני שווה לאפס. נהוג לסמן את המצבים הרוטציונים בצורה הבאה.



- $J_0$  – מצב רוטציוני יסודי.
- $J_1$  – מצב רוטציוני מעורר ראשון.
- $J_2$  – מצב רוטציוני מעורר שני.
- $J_3$  – מצב רוטציוני מעורר

המרווחים בין רמות האנרגיה תלויים במסת האטומים המרכיבים את המולקולה, במבנה הגיאומטרי שלה ובציר הסיבוב. קיימים מספר מודלים שבמסגרתם ניתן לחשב את רמות האנרגיה הרוטציוניות בצורה מדויקת תוך ידיעת גדלים מולקולאריים אופייניים. אחד המודלים המתאים למולקולות דו-אטומיות יוצג בהמשך. ברוב המקרים מרווחי האנרגיה בין רמות רוטציוניות שונות מתאים לאנרגיה של פוטונים בתחום גלי המיקרו, לכן כאשר קרינה אלקטרו-מגנטית נבלעת היא גורמת לערור רוטציוני: המולקולה שבלעה אותה עוברת למצב רוטציוני מעורר ומתחילה להסתובב במרחב. ככל שמולקולה מגיעה לרמה רוטציונית גבוהה יותר יש לה יותר אנרגיה וזה מתבטא במהירות סיבוב יותר גדולה.

כתוצאה מהתנגשויות אקראיות בין מולקולה מעוררת במולקולות שונות שנמצאות בסביבתה מפסידה המולקולה המעוררת חלק או כל האנרגיה שלה וחוזרת למצב רוטציוני יותר נמוך או למצב הרוטציוני היסודי, וכך מתחלקת האנרגיה בצורה אחידה בין כל חלקי החומר את הממוצע של האנרגיה הקינטית הסיבובית מתבטא בעלית הטמפרטורה של החומר.

### תנור המיקרו-גל.



הוא אחד המכשירים המנצל את בליעת הקרינה האלקטרו-מגנטית בתחום גלי המיקרו. תנור המיקרו-גל הפועל בעזרת קרינה אלקטרו-מגנטית מעביר גלי המיקרו אל המזון, הקרינה נבלעת ישירות על ידי חלקיקים שונים של המזון שהוכנס לתנור. המזון מורכב מהרבה מולקולות להן יכולת בליעה בתחום גלי המיקרו, כך למשל למולקולות המים יש יכולת בליעה טובה של גלי מיקרו. המולקולות מתנגשות בחזקה בחלקיקים אחרים המרכיבים את המזון שנמצא בסביבתן. כתוצאה מהתנגשויות אלה האנרגיה עוברת בין החלקיקים בצורה אקראית, טמפרטורת המזון עולה והא מתבשל.

### מודל הרוטור הצפיד ורמות אנרגיה רוטציוניות.

המודל הזה מתאים במיוחד לתיאור תנועת הסיבוב של מולקולה דו אטומית. במסגרתו מתוארת המולקולה כשתי מסות נקודתיות המחוברות ביניהם ע"י מוט קשיח וחסר מסה כך שהמרחק בין שתי המסות נשאר קבוע ושווה ל-  $R$ . כל המערכת יכולה להסתובב סביב שני צירים המאונכים זה לזה אשר עוברים דרך מרכז המסה.

חישוב מומנט ההתמד (I):

$$I = M_1 r_1^2 + M_2 r_2^2$$

כאשר  $r_1, r_2$  הם מרחקי המסות  $M_1, M_2$  בהתאמה ממרכז המסה שלהם. חישוב המסה המצומצמת:

$$\mu = \frac{M_1 M_2}{M_1 + M_2}$$

את מומנט האנרציה ניתן לבטא גם בצורה הבאה:

$$I = \mu \cdot R^2$$

את הנוסחה לחישוב רמות האנרגיה ניתן לגזור מכתיבת משוואת שרדינגר עבור המודל הזה, ניתן לפתור אותה באופן מדויק ופתרונה נותן את רמות האנרגיה של הסיבוב עבור מולקולה דו אטומית.

$$E_J = \frac{J(J+1)h^2}{8\pi^2 I}$$

כאן:

J : מספר שלם המסמן את מספר הרמה .

J=0 רמת היסוד

J=1 רמה מעוררת ראשונה.

h : קבוע פלנק (  $h = 6.63 \times 10^{-34} J \cdot sec$  ).

I : מומנט ההתמד של המערכת.

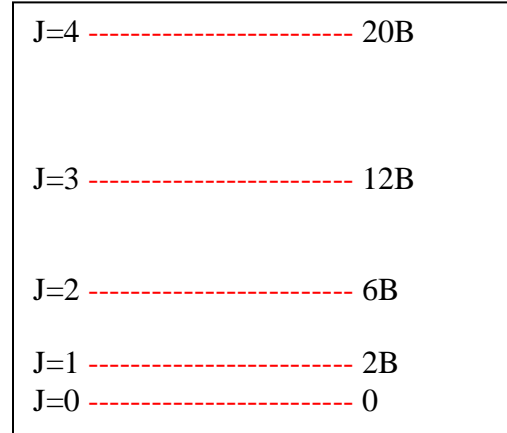
לשם קיצור נסמן :

$$B = \frac{h^2}{8\pi^2 I}$$

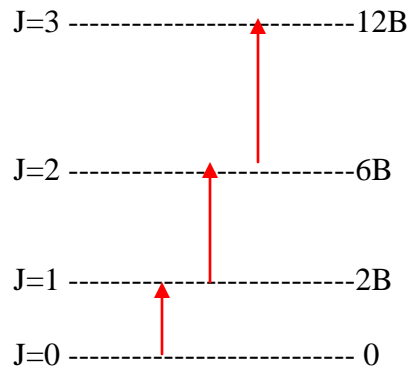
ואת הנוסחה לחישוב רמות אנרגיה תהיה:

$$E_J = J(J+1)B$$

האנרגיה	סימון הרמה	שם הרמה
0	J=0	רמת היסוד
2B	J=1	רמה מעוררת ראשונה
6B	J=2	רמה מעוררת שניה
12B	J=3	רמה מעוררת שלישית
20B	J=4	רמה מעוררת רביעית

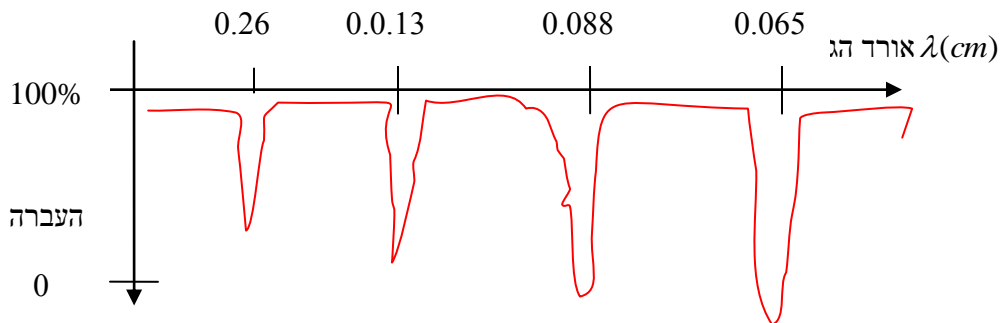


לא כל המעברים בין רמות האנרגיה האלה אפשריים במידה שווה. במסגרת המודל "רוטר צפיד" כאש למולקולה יש זו קוטב קבוע אפשריים רק המעברים בהם השינוי ב- J שווה אחד.



### חישוב אורך הקשר במולקולת (CO).

אם נתון ספקטרום הרוטציה של המולקולה ניתן לדעת את אורכי הגל שמתרחשת בהם בליע רוטציונית במולקולה.



חישוב האנרגיה של הקרינה הנבלעת:

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

$$h = 6.63 \times 10^{-27} \text{ erg}\cdot\text{sec}$$

$$c = 3 \times 10^{10} \text{ cm/sec}$$

$$E = \frac{19.89 \times 10^{-8}}{\lambda(\text{cm})} \text{ erg}$$

$$E_1 = \frac{19.89 \times 10^{-8}}{0.26} = 7.65 \times 10^{-16} \text{ erg}$$

$$E_2 = \frac{19.89 \times 10^{-8}}{0.13} = 1.53 \times 10^{-15} \text{ erg}$$

$$E_3 = \frac{19.89 \times 10^{-8}}{0.088} = 2.26 \times 10^{-15} \text{ erg}$$

$$E_4 = \frac{19.89 \times 10^{-8}}{0.065} = 3.06 \times 10^{-15} \text{ erg}$$

ברור מהדיון הקודם שכל שאורך הגל הנבלע גדול יותר האנרגיה של הפוטון הנבלע קטנה יותר וזה מתאים למעבר בין רמות יותר נמוכות לכן ניתן לזהות את המעברים המתאימים לכל אורך גל.

0.065	0.088	0.13	0.26	אורך גל ( $\lambda$ ) של הקרינה הנבלעת
$3.06 \times 10^{-15}$	$2.26 \times 10^{-15}$	$1.53 \times 10^{-15}$	$7.65 \times 10^{-16}$	$E$ (erg) – אנרגיה מתאימה
8B	6B	4B	2B	אנרגיה המתאימה למעבר במסגרת המודל
J=3 to J=4	J=2 to J=3	J=1 to J=2	J=0 to J=1	סימון המעבר
$3.825 \times 10^{-16}$	$3.825 \times 10^{-16}$	$3.825 \times 10^{-16}$	$3.825 \times 10^{-16}$	קבוע B של המולקולה
$1.456 \times 10^{-39}$	$1.456 \times 10^{-39}$	$1.456 \times 10^{-39}$	$1.456 \times 10^{-39}$	I, מומנט התמד המחושב ביחידות של $\text{gr}\cdot\text{cm}^2$

### חשוב המסה המצומצמת:

המסה של מול פחמן  $^{12}\text{C}$  היא 12gr.

המסה של מול של חמצן  $^{16}\text{O}$  היא 15.99gr.

בכל מול יש מספר אבוגדרו של חלקיקים  
 לכן המסה של אטום בודד של פחמן שווה :  $1.99 \times 10^{-23} \text{ gr}$   
 והמסה של אטום בודד של חמצן שווה :  $2.66 \times 10^{-23} \text{ gr}$

$$\mu = \frac{M_1 M_2}{M_1 + M_2} = \frac{1.99 \times 10^{-23} \times 2.66 \times 10^{-23}}{1.99 \times 10^{-23} + 2.66 \times 10^{-23}} = 1.14 \times 10^{-23} \text{ gr}$$

חישוב אורך הקשר (R):

$$I = \mu \cdot R^2$$

$$R = \sqrt{\frac{I}{\mu}} = \sqrt{\frac{1.456 \times 10^{-39}}{1.14 \times 10^{-23}}} = 1.13 \times 10^{-8} \text{ cm} = 1.13 \text{ \AA}$$

### תנועה ויברציונית במולקולה ומודל האוסילטור ההרמוני.

בפרק הקודם דנו בדרגות חופש מסוג סיבוב, רמות אנרגיה רוטציונית ומה הם תחומי הקרינה האלקטרומגנטית שיכולה לגרום לערור רוטציוני במולקולות. בנוסף לערור האלקטרוני והעירור הרוטציוני שיכול להתרחש באינטראקציה בין קרינה וחומר ישנם עוד מספר אופני תנועה מסוג מתיחה וכפוף, שנחשבות לסיבה העיקרית לתופעה הידועה והמדוברת ביותר בתקופה האחרונה שנקראת "אפקט החממה", תופעה שנחשבת לגורם העיקרי להתחממות כדור הארץ. נחזור לדון בתופעה ביותר פירוט לאחר שנדון בתנודות מסוג מתיחה וכפוף או מה שנקרא עירור ויברציוני.

### מספר דרגות חופש מסוג תנודה.

בפרק הקודם למדנו שעבור מולקולה שמורכבת מ-N אטומים המספר הכללי של דרגות חופש פנימיות (הן מטיפוס תנודה והן מטיפוס סיבוב) הוא 3N-3, כמו כן ראינו שמספר דרגות החופש מסוג סיבוב (אופני סיבוב) הוא 2 עבור מולקולה קווית ו-3 עבור מולקולה לא קווית. לכן:

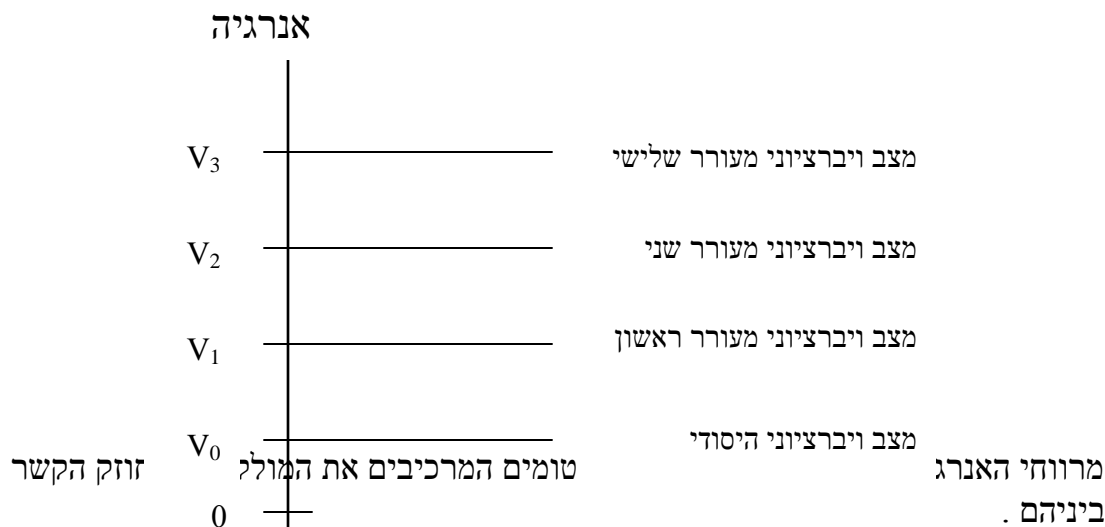
- . מספר דרגות החופש מסוג תנודה עבור מולקולה קווית יהיה 3N-5.
- . מספר דרגות החופש מסוג תנודה עבור מולקולה קווית יהיה 3N-6.

### טבלת סיכום:

מספר אופני תנודה	מספר אופני סיבוב	סוג המולקולה	מספר אטומים במולקולה
3N-5	2	קווית	N
1	2	קווית	2
4	2	קווית	3
3N-6	3	לא קווית	N

3	3	לא קווית	3
6	3	לא קווית	4

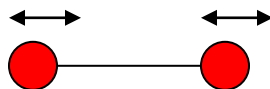
בדומה לאופני סיבוב גם לכל אופן תנועה יש מערכת של רמות אופייניות והוא יכול לבלוע ולפלוט קרינה אלקטרומגנטית בצורה מנתית.



קרינה אלקטרומגנטית שמתאימה למרווחים בין רמות האנרגיה הויברציוניות נמצאת בתחום האינפרא-אדום, לכן כאשר קרינה אלקטרומגנטית נבלעת על ידי מולקולה מסוימת היא גורמת לתנודות גדולות יותר של האטומים המרכיבים את המולקולה, לתהליך זה קוראים **ערור ויברציוני**.

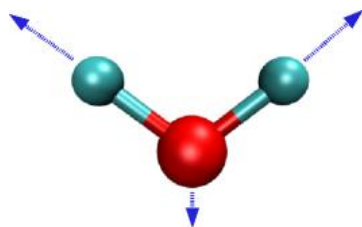
במסגרת דיונינו בעירור הויברציוני נתרכז באופני תנועה משני סוגים: **מתיחה וכיפוף**.

(א) מולקולה דו אטומית, שהיא המולקולה הפשוטה ביותר, כפי שלמדנו, למולקולה דו אטומית יש אופן תנועה אחד. תנועת האטומים היא לאורכם של הקשרים הכימיים שקיימים ביניהם. התנועה הזאת היא תנועה בו-זמנית של שני האטומים המתקרבים ומתרחקים זה מזה לאורך הקשר המחבר ביניהם.

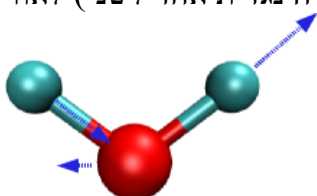


(ב) מולקולה תלת אטומית לא קווית כמו מולקולת מים ניתן להבחין בין שלושה סוגי תנועה.

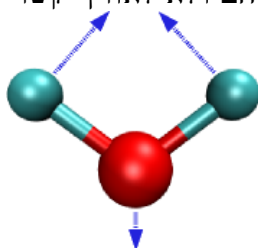
(1) **מתיחה סימטרית**: שני האטומים הלא מקושרים ביניהם מתקרבים ומתרחקים בו זמנית לאורך הקשר שמחבר כל אחד לאטום השלישי



(2) **מתיחה א-סמטרית**: שני האטומים הלא מקושרים ביניהם מתקרבים ומתרחקים מהאטום השלישי בו זמנית לסרוגין (בצורה נגדית אחד לשני) לאורך קשריהם עם האטום השלישי.



(3) **כיפוף**: שני האטומים הלא מקושרים ישירות ביניהם מתקרבים ומתרחקים אחד מהשני במישור הדרך, תוך שינוי הזווית ביניהם ולא לאורך קשריהם עם האטום השלישי.



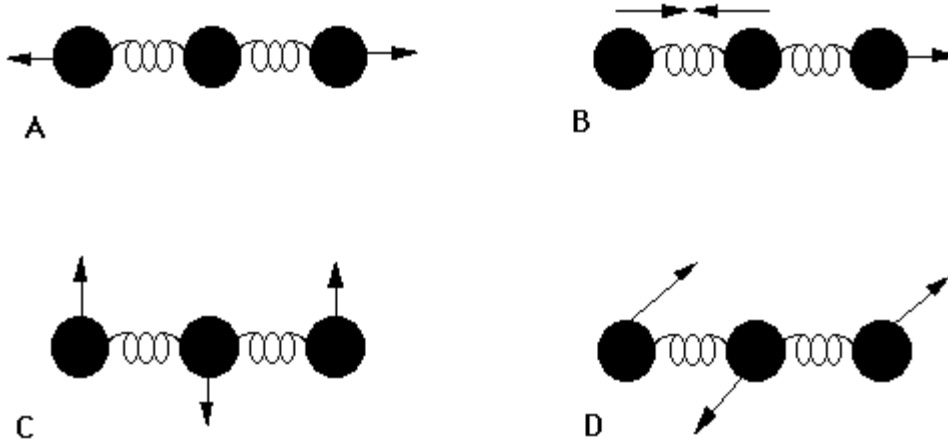
(ג) מולקולה תלת אטומית קווית כמו במקרה של מולקולת דו תחמוצת הפחמן. ניתן גם כן להבחין בין שלושה סוגי תנודה:

(A) **מתיחה סימטרית**: שני אטומי החמצן מתקרבים ומתרחקים לאטום הפחמן יחד ובו זמנית לאורך קשריהם.

(B) **מתיחה א-סימטרית**: שני אטומי החמצן מתקרבים לאטום הפחמן ומתרחקים ממנו לסרוגין כאשר אטום אחד מתקרב השני מתרחק.

(C) **כיפוף המקביל לדרך**: אטום הפחמן נע מעלה מטה לאורך ציר Y במישור X-Y (מישור הדרך) ואטומי החמצן מתקרבים ומתרחקים זה מזה.

(D) **כיפוף במישור הניצב לדרך**: אטום הפחמן נע הלוך חזור לאורך ציר Z הניצב למישור הדרך ראטומי הפחמן מתקרבים ומתרחקים זה מזה.

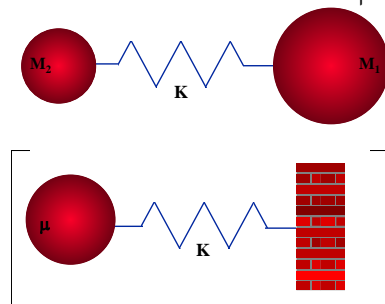


בתחילת הפרק למדנו שרמות האנרגיה של תנודה תלויה במסת האטומים ובחוזק הקשר ביניהם.

נציג כעת את המודל הפשוט ביותר, הנקרא מודל האוסילטור ההרמוני, שבמסגרתו ניתן לחשב רמות אנרגיה ויברציוניות בדיוק די טוב. מעברים בין רמות אנרגיה אלה נגרמות בשל בליעה או פליטה של קרינה אלקטרומגנטית בתחום האינפרא-אדום.

### מודל האוסילטור ההרמוני.

המודל מתאים במיוחד לתאור של מולקולה דו-אטומית. במסגרת המודל, מולקולה דו-אטומית מתוארת ע"י שתי מסות נקודתיות שמחוברות ביניהם על ידי קפיץ בעל קבוע  $K$ .



ניתן להראות שהמערכת הזאת שוות ערך למערכת של חלקיק אחד בעל מסה  $\mu$  (המסה המצומצמת של המערכת) הקשורה באמצעות קפיץ בעל קבוע  $K$  לקיר בעל מסה אינסופית. תנודה של המערכת מתוארת כתנועה הרמונית פשוטה.

$\mu$  - המסה המצומצמת של המערכת.

$$\mu = \frac{m_1 \times m_2}{m_1 + m_2}$$

$V$  - מספר הרמה

$$E_v = (V + \frac{1}{2})h\nu$$

$h$  - קבוע פלנק

$$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ j} \cdot \text{sec}$$

$\nu$  - תדירות אופיינית

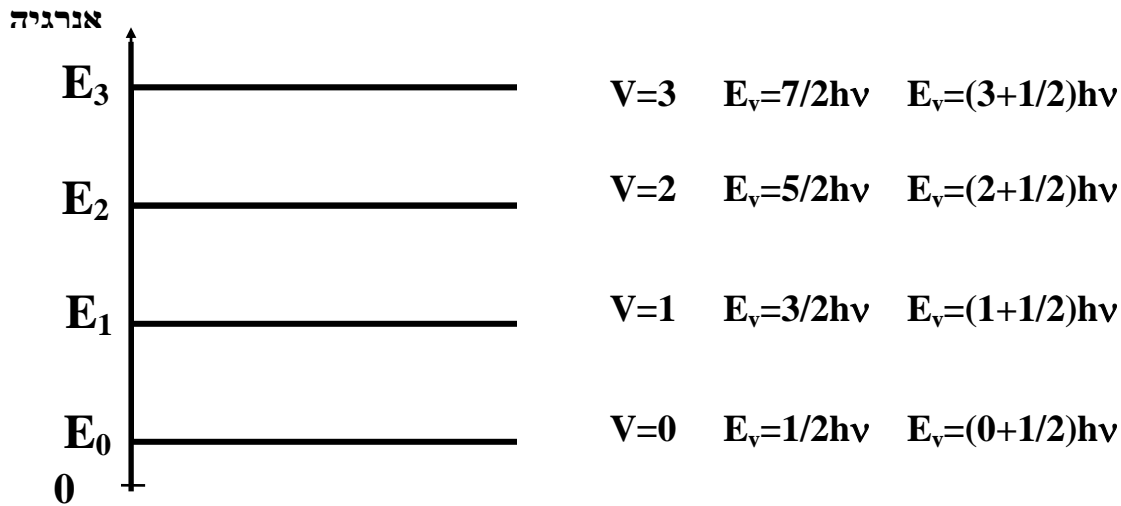
$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{\mu}}$$

של האוסילטור

$K$  - קבוע שמבטא את חוזק הקפיץ(חוזק

הקשר)

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.



כש-  $V=0$ , אנרגיה שונה מאפס: האטומים במולקולה אינם במנוחה מוחלטת אלא מבצעים תנודות קטנות.

$$E = h\nu$$

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

$$\Rightarrow E = \frac{hc}{\lambda}$$

בספקטרוסקופיה (במיוחד בתחום האינפרא-אדום) מקובל להשתמש בגודל שנקרא מספר

$$\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda} \left( \frac{1}{cm} \right) \text{ הגל } \bar{\nu} \text{ שמוגדר בצורה הבאה:}$$

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = c\bar{\nu}$$

$$E = hc\bar{\nu}$$

למדנו במסגרת מודל האוסצילטור ההרמוני:

בספקטרום בליעה, תדירות של קו (פס) הבליעה תלויה רק במסת האטומים שמרכיבים את המולקולה ובחוזק הקשר ביניהם.

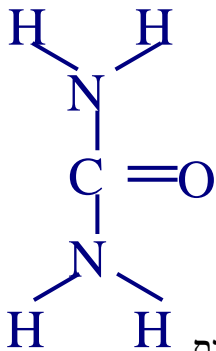
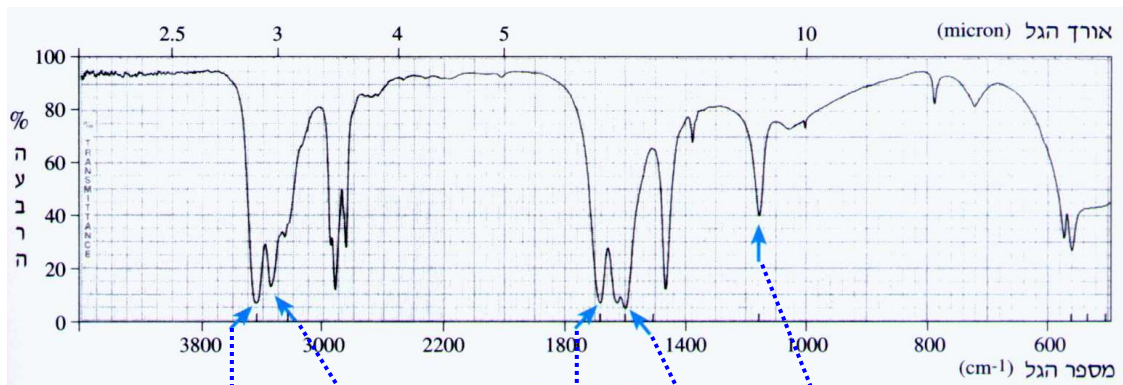
במהלך הפרק למדנו שכאשר מולקולה מורכבת מ-N אטומים, מספר דרגות החופש מסוג תנודה הוא  $3N-5$  עבור מולקולה קווית ו-  $3N-6$  עבור מולקולה לא קווית.

במשך הזמן נמדדו ספיקטראות בליעה בתחום האינפרא-אדום עבור אלפי תרכובות שונות והתוצאות נאספו בטבלאות מיוחדות, בעקבות כך הסתבר לחוקרים שלכל קשר כימי יש תדירות תנודה אופיינית, חשוב להבין שבתרכובות שונות תדירויות תנודה אופייניות תהיינה

שונות במקצת, אך הן יהיו בין גבולות מסוימים.

טבלת תדירויות אופייניות למספר קשרים כימיים.

מספר הגל ( $\text{cm}^{-1}$ )	הקשר הכימי	סוג התנודה
1150-1250	C-C	מתיחה
1600-1670	C=C	מתיחה
2100-2260	C≡C	מתיחה
3610-3680	O-H	מתיחה
1650-1800	C=O	מתיחה
1070-1150	C-O	מתיחה
2800-3000	C-H	מתיחה
760-990	C-H	כיפוף
1020-1220	C-N	מתיחה
1580-1650	N-H	כיפוף
3340-3500	N-H	מתיחה



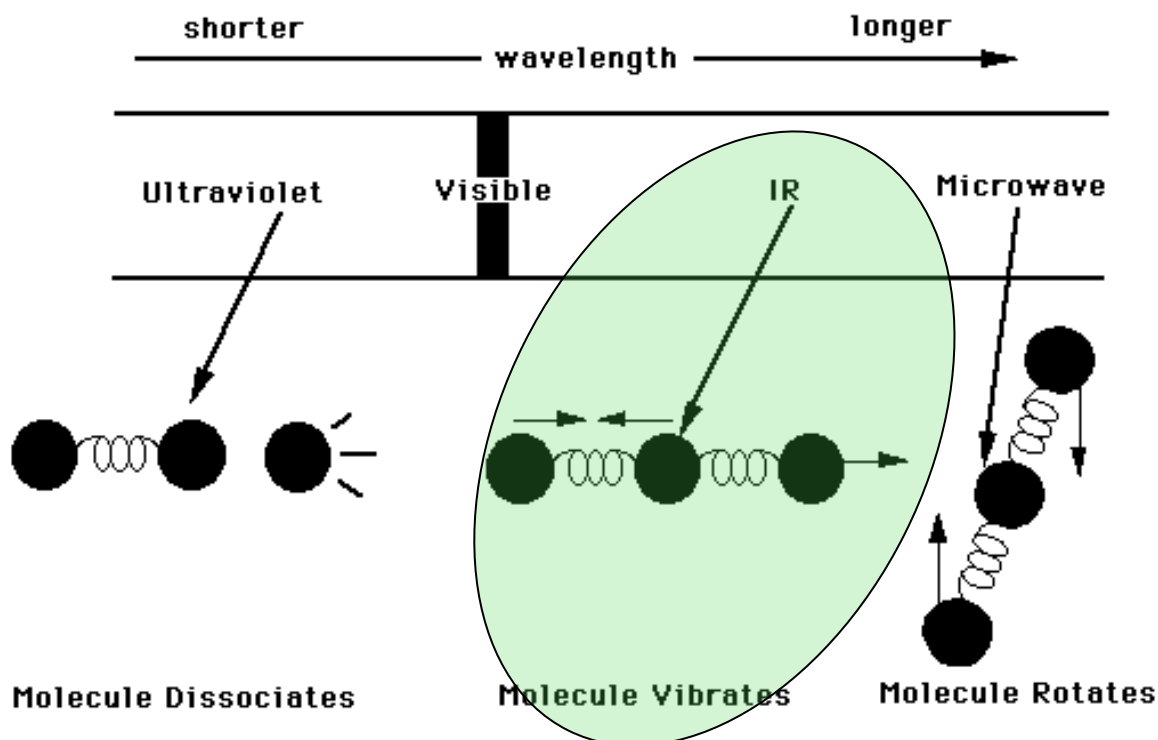
מספר הגל ( $\text{cm}^{-1}$ )	3440	3340	1680	1600	1160	מספר הגל ( $\text{cm}^{-1}$ )
הקשר	$\text{H} \rightarrow \text{N}-\text{H}$	$\text{H} \rightarrow \text{N}-\text{H}$	$\text{O}=\text{C}$	$\text{H} \rightarrow \text{N}-\text{H}$	$\text{N}-\text{C}$	הקשר
סוג התנודה	מתיחה	מתיחה	מתיחה	כיפוף	מתיחה	סוג התנודה

בפרקים הקודמים למדנו על דרגות חופש של סיבוב ותנודה בנפרד, ואינו שלעיתים מתרחשים בו זמנית תהליכים של סיבוב ותנודה, בפרק זה נקדיש להבנה יותר מעמיקה של תהליכים המשלבים מעברים מסוגים שונים.

**מעברים אנרגטיים במולקולה ותחומי קרינה מתאימים.**

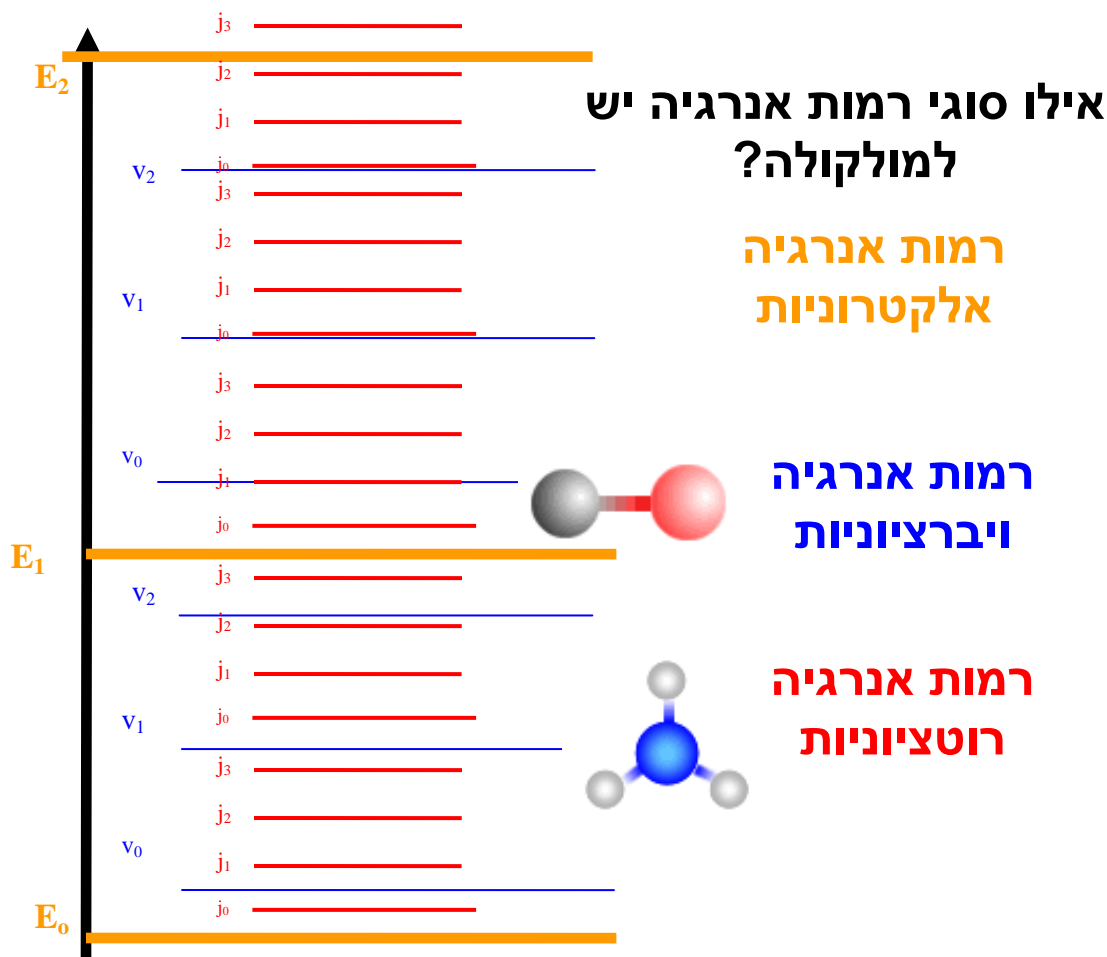
בדומה לאטומים למולקולה יש רמות אנרגיה אלקטרוניות, קרינה אלקטרומגנטית בתחום האור הנראה ובתחום האולטרא סגול גורמת לערור אלקטרוני. קרינה בתחום גלי המיקרו גורמת לעירור רוטציוני בעוד שקרינה בתחום האינפרא-אדום

גורמת לערור ויברציוני של המולקולה.



עד כה הכרנו תהליכים בהם המולקולה מבצעת תנועה מסוג אחד בלבד ולכן רמות האנרגיה שהוצגו מתארות את הנעשה בצורה חלקית. חשוב להבין שבמציאות אין הפרדה ממשית בין תנועות מולקולאריות שונות ובמידה שיש למולקולה מספיק אנרגיה היא יכולה בו זמנית לבצע מספר תנועות מסוגים שונים.

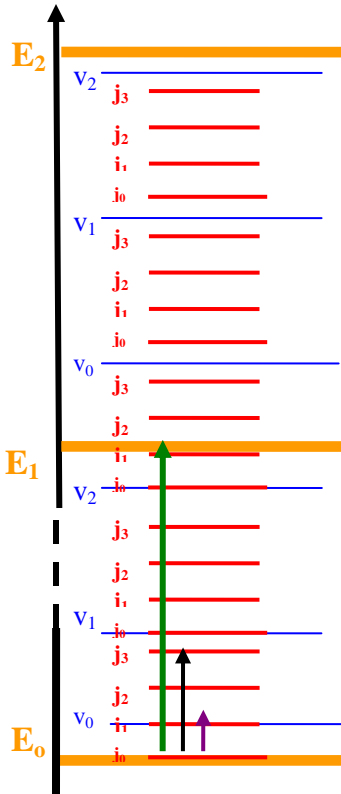
כדי להבין איך נראית מערכת רמות אנרגיה של מולקולה נתבונן במולקולה הפשוטה ביותר מולקולה דו-אטומית כלשהיא כמו למשל חד תחמוצת הפחמן (CO) למולקולת יש שתי רמות אנרגיה רוטציוניות מתאימים לקרינה בתחום גלי המיקרו, לשם פשוט נשרטט בציר רק מערכת אחת ונסמן אותן באותיות  $(j_0, j_1, j_2, j_3)$ . בנוסף למולקולה רמה ויברציונית אחת מסוג מתיחה ונסמן אותה באותיות  $(V_1, V_2, V_3, V_4)$ .



בדומה לאטומים יש גם למולקולה רמות אנרגיה אלקטרוניות שהמרווחים ביניהם מתאימים לקרינה בתחום האור הנראה והקרינה האולטרא-סגולה, נסמן אותן באותיות  $(E_0, E_1, E_2, E_3)$ .

אנו רואים שמערכת כוללת ושלמה של רמות אנרגיה של מולקולה דו אטומית (שהיא המולקולה הפשוטה ביותר) היא מורכבת ומסובכת. אם הינו רוצים לתאר מערכת כללית של רמות אנרגיה עבור מולקולה המורכבת משלושה אטומים הדבר היה מסובך הרבה יותר. לשם המחשה והפנמת תהליכי העירור השונים במולקולה נשאר עם מולקולה דו אטומית. בהתאם למערכת של רמות האנרגיה, המולקולה יכולה לבלוע קרינה אלקטרומגנטית מתחומים שונים וכך ניתן לגרום לערור דרגות חופש שונות.

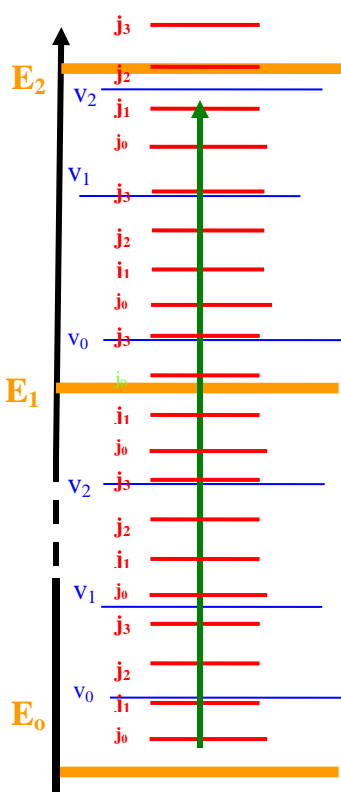
כאשר מקרינים חומר מולקולארי בקרינה בתחום האור הנראה (לייזר ירוק למשל) ידבר יכול לגרום לתהליכי ערור מסוגים שונים (אלקטרוני, ויברציוני, רוטציוני).



בציור מוצגים שלושה סוגי עירור :

1. עירור אלקטרוני שנגרם ע"י קרינה בתחום האור הנראה והאולטרא-סגול ממצב היסוד למצב של אלקטרוני מעורר ראשון.
2. ערור ויברציוני שנגרם על ידי קרינה בתחום האנפרא-אדום מהרמה הויברציונית היסודית לרמה הויברציונית הראשונה.

3. עירור רוטציוני שנגרם ע"י קרינה מתחום גלי המיקרו מהרמה הרוטציונית היסודית לרמה הרוטציונית הראשונה.



עד כה הצגנו תהליכים בהם מבצעת המולקולה תנועה מסוג אחד, אך מכיוון שלא קיימת הפרדה ממשית בין סוגי התנועה השונים, יתכן מצב בו הקרינה הנבלעת גורמת לערור בו זמנית של מספר דרגות חופש גם יחד.

בציור מוצג תהליך בליעה הגורם לערור של רמה אלקטרונית, ויברציונית ורוטציונית גם יחד. במקרה הזה המולקולה עברה ממצב היסוד למצב האלקטרוני המעורר הראשון, ויברציוני מעורר ראשון ורוטציוני מעורר ראשון. ניתן לרשום את המעבר הזה בצורה מקוצרת באופן הבא.

$$(E_0, V_0, J_0) \longrightarrow (E_1, V_1, J_1)$$

**כללי ברירה** הם כללים המגדירים את התנאים תחתם מתרחשים מעברים מותרים (מאופיינים בהסתברות גבוהה, יחסית) לבין מעברים אסורים (הסתברות הקרובה ל-0) בין מצב התחלתי לבין מצבה הסופי.

לפי כללי הברירה לא כל מעבר הוא מותר, כדי שיתרחש

מעבר ספקטרוסקופי ויברציוני צריכים להתקיים מספר תנאים:

1. צריך שינוי המומנט הדיפול תוך כדי ויברציה. לדוגמה למולקולה  $O=C=O$  יהיה ספקטרום ויברציה רק אם המתיחה תהיה שונה בשני הצדדים, כי אז יהיה שינוי במומנט הדיפול.

2.  $\Delta v = \pm 1$

3.  $\Delta v = \pm 2$ . למעברים כאלו אנו קוראים *overtones* והם מאוד חלשים. משמעות הדבר היא שרוב הויברציות הן לינאריות.

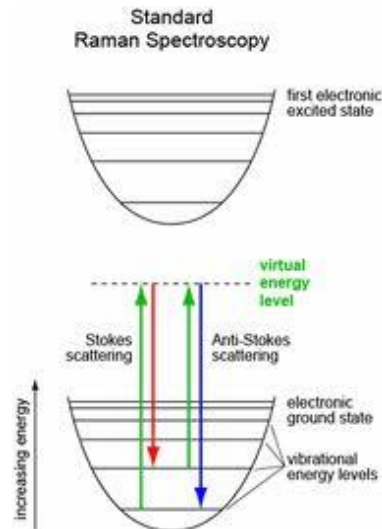
### אפקט ראמאן.

הוא פיזור לא אלסטי של אור מחומר. תופעה זו נתגלתה לראשונה ע"י ונקאטה ראמאן בנוזלים.

כאשר אור מפוזר מחומר, רובו מפוזר בצורה אלסטית (פיזור ריילי) זאת אומרת שתדירותו וכן אורך הגל, אינם משתנים, ומכאן שלפוטונים המפוזרים אנרגיה זהה לפני ולאחר הפיזור. לעומת זאת בקירוב אחד ל-10 מיליון פוטונים מפוזר בצורה לא אלסטית בה מתבצעת החלפת אנרגיה עם החומר. הפרש האנרגיות בין הפוטון המקורי לפוטון המפוזר מספק מידע לגבי דרגות החופש הפנימיות של החומר (רוטאציות, ויברציות וכן רמות אלקטרוניות).

בשנת 1922 הפיזיקאי ההודי צ'נדרסקהארה ונקאטה ראמאן פרסם את עבודתו על "נפיצה מולקולארית של אור" - מאמר ראשון בסדרה בה הוצג מחקרם שלו ושל עמיתו שהוביל לבסוף) 28 בפברואר 1928 לגילוי האפקט הקרינתי שעל שמו. בשנת 1930 זכה ראמאן בפרס נובל בפיזיקה על עבודתו.

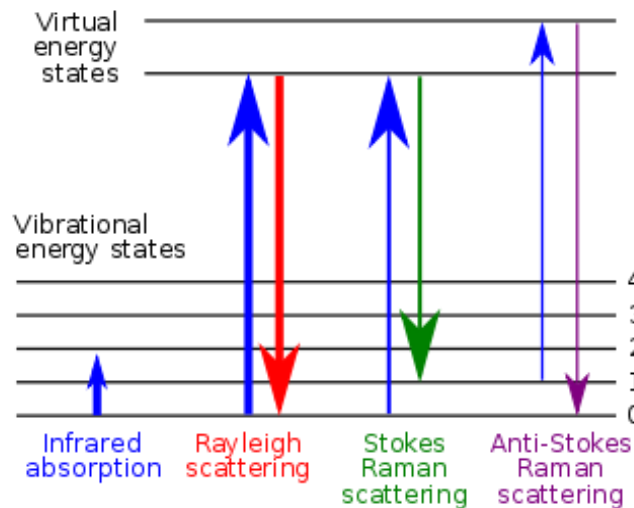
כאשר נוזל מולקולארי מעורר ע"י קרינה בתחום האור הנראה (לייזר ירוק) והאנרגיה של הפוטונים קטנה מההפרש בין שתי רמות אנרגיה אלקטרוניות, הקרינה של הלייזר לא נבלעת אבל הדבר יכול לגרום לנדנדוד הדיפולים של המולקולות בתדר של הקרינה הפוגעת והמולקולות עוברות ממצב היסוד למצב מעורר וירטואלי, אבל המולקולה לא נשארת במצב המעורר והיא עוברת שוב אחרי זמן מאוד קצר של  $10^{-15}$  שניה בקירוב מהמצב המעורר למצב היסוד האלקטרוני, וויברציוני מעורר תוך פליטה ספונטנית בתחום האור הנראה בצבע שונה (אורך גל שונה) מצבע האור הפוגע, דבר המעיד על שנוי באנרגיה של הקרינה הפוגעת.



הפוטון שמפוזר מהחומר יכול לאבד אנרגיה לחומר או לרכוש אנרגיה ממנו וזאת לפי התפלגות האנרגיה בחומר (הטמפרטורה שלו). על פי אבחנה זו ניתן להבחין בין שני סוגי פיזור :

**פיזור סטוקס:** (Stokes Raman scattering)

פיזור בו פוטון מפסיד אנרגיה לחומר נקרא פיזור סטוקס. בפיזור זה הפוטון החדש יופיע באורך גל ארוך יותר ובתדירות קטנה יותר מהפוטון המקורי. (הסחה לאדום).



**פיזור אנטי-סטוקס:** (Anti-Stokes Raman scattering)

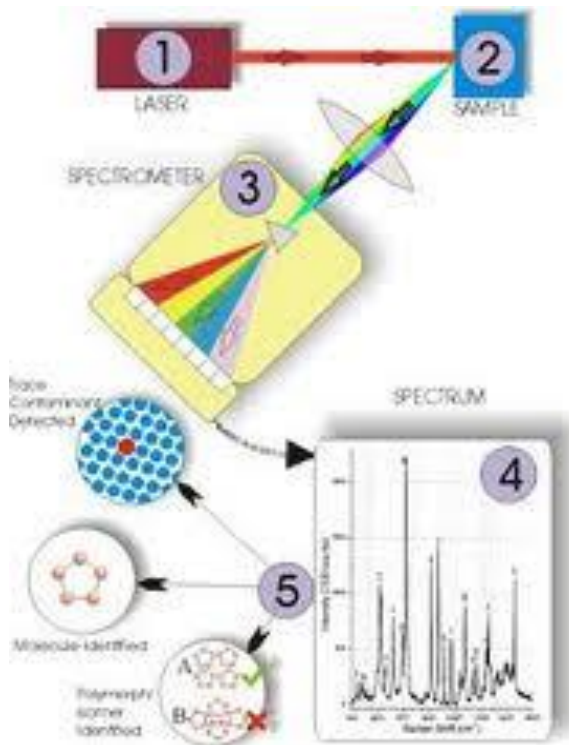
פיזור בו הפוטון רוכש אנרגיה מהחומר נקרא פיזור אנטי-סטוקס והפוטון החדש יופיע באורך גל קצר יותר ובתדירות גבוהה יותר מאשר הפוטון המקורי, (הסחה לכחול).

# פרק "ג"

## ניסוי מעבדה

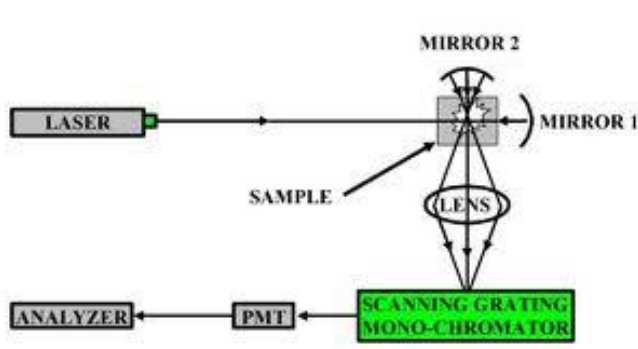
חקירת המבנה של מספר נוזלים ע"י פיזור.

1. מטרת הניסוי.
2. תיאור מערכת הניסוי.
3. פיזור לייזר ירוק מאצטון ( $C_3H_6O$ ).
4. ניתוח הגרף וחשוב סוגי קשרים.
5. פיזור לייזר ירוק מטולואין ( $C_7H_8$ ).
6. ניתוח תוצאות והשפעת רוחב הסדק של המונוכרומאטור וקיטוב האור על הקרינה המפוזרת



**מטרת הניסוי:** כפי שנאמר מקודם לכל חומר ספקטרום בליעה ופיזור ייחודי, כמו טביעות האצבע של הבן-אדם. ע"י ספקטרום הפיזור ניתן לזהות את סוג הקשרים הכימיים, ואת המבנה המולקולארי של החומר. ננסה להבין ולהפנים את המשמעות של ספקטרום פיזור וספקטרום בליעה, מה נית ללמוד מתוך הספקטרום על המבנה המולקולארי של החומר ומה הם הגורמים המשפיעים על ריזולוציה הספקטרום.

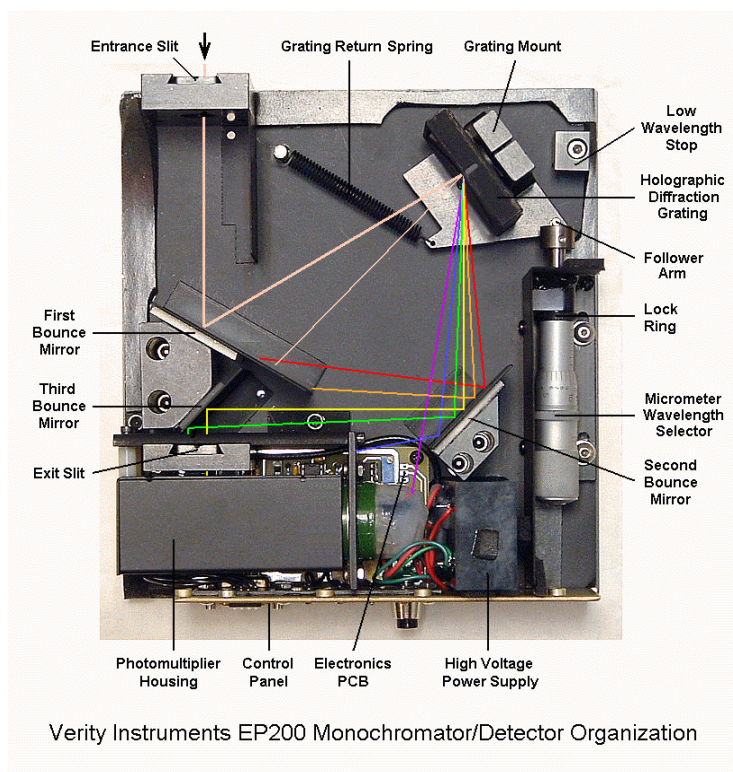
**מערכת הניסוי:** מערכת הניסוי שהשתמשנו בה הייתה מערכת בנוי בתוך המעבדה והיא כללה:



1. מקור לייזר בתחום האור הירוק.
2. התקן נפיצה להפרדה לאורכי גל שונים (מונוכרומטור).
3. עדשות.
4. מראות החזרה.
5. חריר.
6. פילטר.
7. גלי.
8. רשם.

**סכמה של מערכת הניסוי**

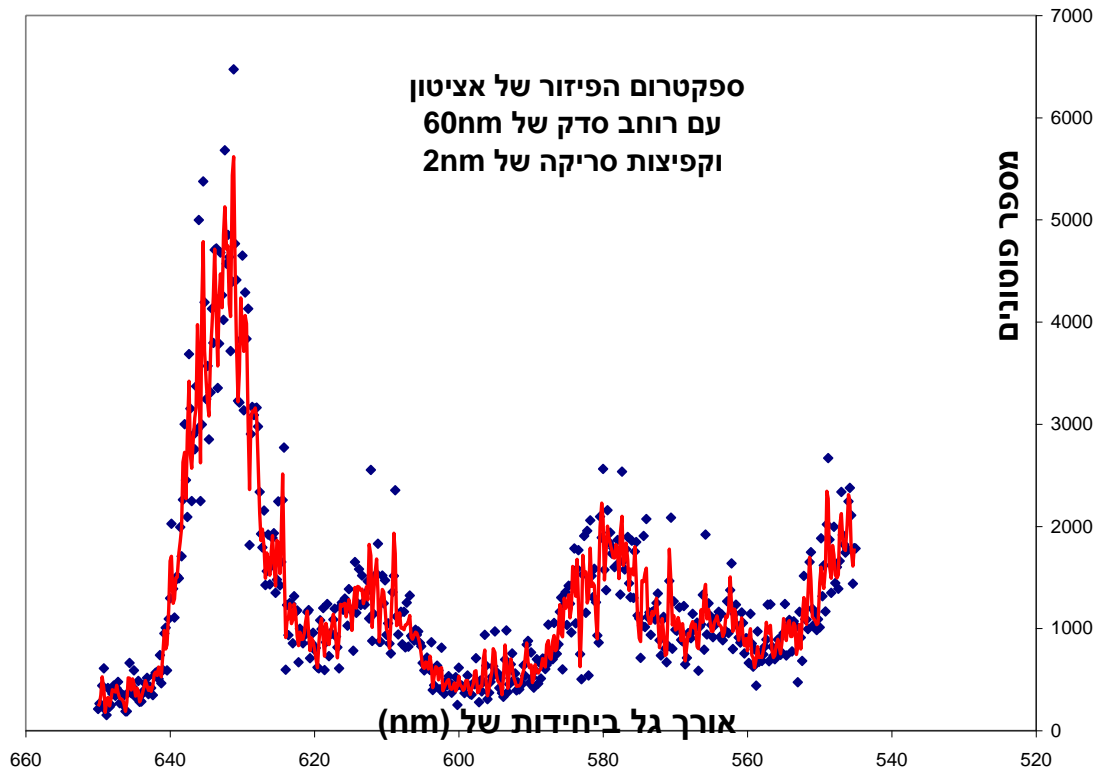
קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.



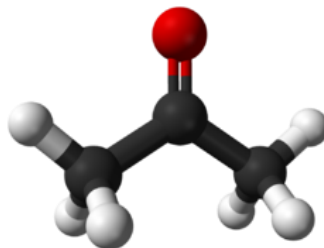
**התקן נפיצה להפרדה לאורכי גל שונים (מונוכרומאטור).**

**תוצאות הנסויי:**

1) ספקטרום הפיזור של האציטון  
 בנסויי הראשון מדדנו את ספקטרום הפיזור של האצטון כאשר רוחב הסדק של המונוכרומאטור היה על 60nm והסריקה של הגל המפוזר התבצעה בקפיצות של 2nm בתחום אורכי גל של (540nm-650nm).



הנוסחה הכימית של האצטון היא  $C_3H_6O$ .



כפי שניתן לראות מהמבנה המולקולארי של האצטון יש לו ששה קשרים מסוג (C-H) שני קשרים מסוג (C-C) וקשר אחד כפול מסוג (C=O).

כדי לבדוק את סוג הקשרים לפי גרף הפיזור שקיבלנו נחשב את אנרגיית הקשר:  
אורך הגל של קרינת הלייזר הפוגעת  $\lambda = 532 \text{ nm}$ .

מהתבוננות בגרף הפיזור שקיבלנו עבור האצטון ניתן לזהות שלושה אורכי גל שיש בהם פיזור:

1.  $\lambda = 545 \text{ nm}$

2.  $\lambda = 580 \text{ nm}$

3.  $\lambda = 612 \text{ nm}$

4.  $\lambda = 632 \text{ nm}$

(1) חישוב סוג הקשר המתאים לאורך הגל  $\lambda = 545 \text{ nm}$

$$E_i = \frac{1240}{532} = 2.33 \text{ eV}$$

$$E_s = \frac{1240}{545} = 2.2752 \text{ eV}$$

$$\Delta E = 2.33 - 2.2752 = 0.0548 \text{ eV}$$

$$\lambda = \frac{1240}{0.0548} = 22627.735 \text{ nm} = 2.2627 \times 10^{-3} \text{ cm}$$

$$\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda} = 442 \frac{1}{\text{cm}}$$

מספר הגל שקיבלנו יכול להיות מתאים **לתנועת הכיפוף** של הקשר (C-H)  $\lambda=580 \text{ nm}$  (2)

$$E_i = \frac{1240}{532} = 2.33 \text{ eV}$$

$$E_s = \frac{1240}{580} = 2.138 \text{ eV}$$

$$\Delta E = 2.33 - 2.138 = 0.192$$

$$\lambda = \frac{1240}{0.192} = 6455 \text{ nm} = 6.455 \times 10^{-4} \text{ cm}$$

$$\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda} = 1548 \frac{1}{\text{cm}}$$

מספר הגל שקיבלנו מתאים לתנועת מתיחה של הקשר הכפול (C=O)  $\lambda=612 \text{ nm}$  (3)

$$E_i = \frac{1240}{532} = 2.33 \text{ eV}$$

$$E_s = \frac{1240}{612} = 2.026 \text{ eV}$$

$$\Delta E = 2.33 - 2.026 = 0.3038$$

$$\lambda = \frac{1240}{0.3038} = 4081.63 \text{ nm} = 4.081 \times 10^{-4} \text{ cm}$$

$$\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda} = 2450 \frac{1}{\text{cm}}$$

מספר הגל שקיבלנו מתאים לקשר (C-H) עם תנועה תנודית.

4) חישוב סוג הקשר המתאים לאורך הגל  $\lambda=632 \text{ nm}$

$$E_i = \frac{1240}{532} = 2.33 \text{ eV}$$

$$E_s = \frac{1240}{632} = 1.962 \text{ eV}$$

$$\Delta E = 2.33 - 1.962 = 0.3679$$

$$\lambda = \frac{1240}{0.3679} = 3370.48 \text{ nm} = 3.37048 \times 10^{-4} \text{ cm}$$

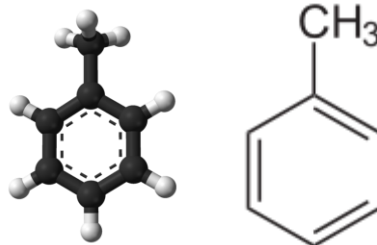
$$\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda} = 2967 \frac{1}{\text{cm}}$$

מספר הגל שקיבלנו יכול להיות מתאים **לתנועה תנודית** של הקשר (C-H)

סוג הקשר	אנרגית הקשר לפי טבלאות	סוג התנודה	אנרגיה מחושבת (1/cm)
C-H	2800-3000	מתיחה	2967
C-H	390-533	כיפוף	442
C-C	1150-1250	מתיחה	
C=O	1650-1800	מתיחה	1548

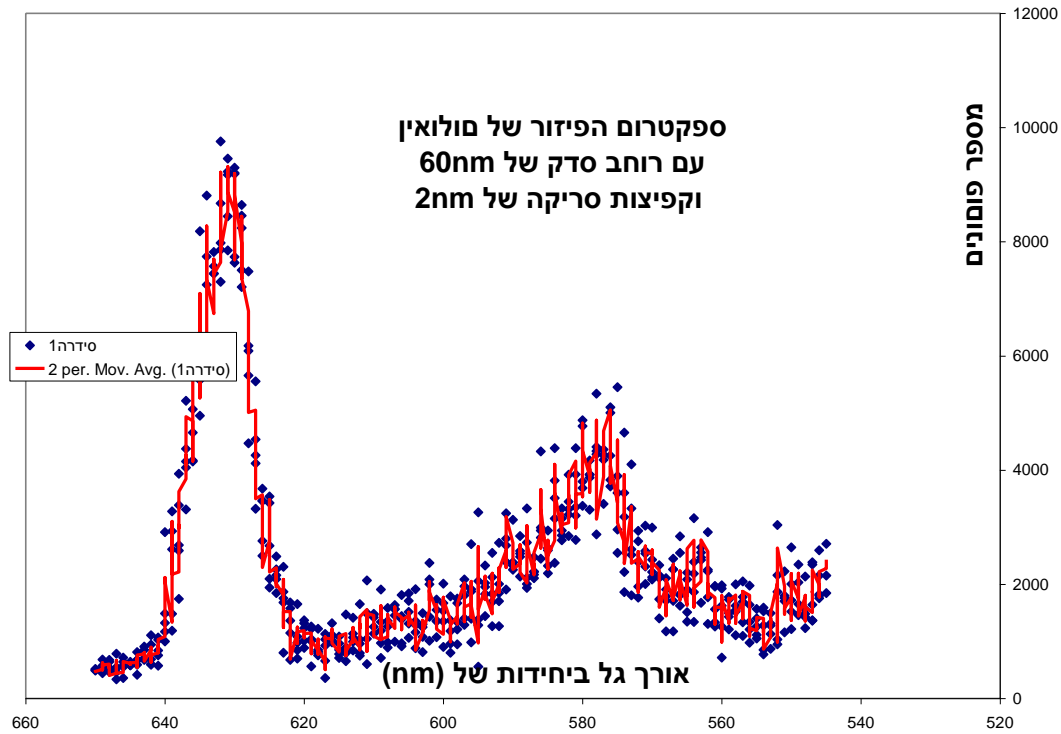
## 2) ספקטרום הפיזור של הטולואן:

**טולואן** (Toluene) הידוע גם כמתיל בנזן הוא חומר כימי **ארומטי**, נוזל בטמפרטורת החדר. הטולואן דומה לבנזן פרט לכך שאחד מאטומי המימן הותמר בקבוצה מתילית.

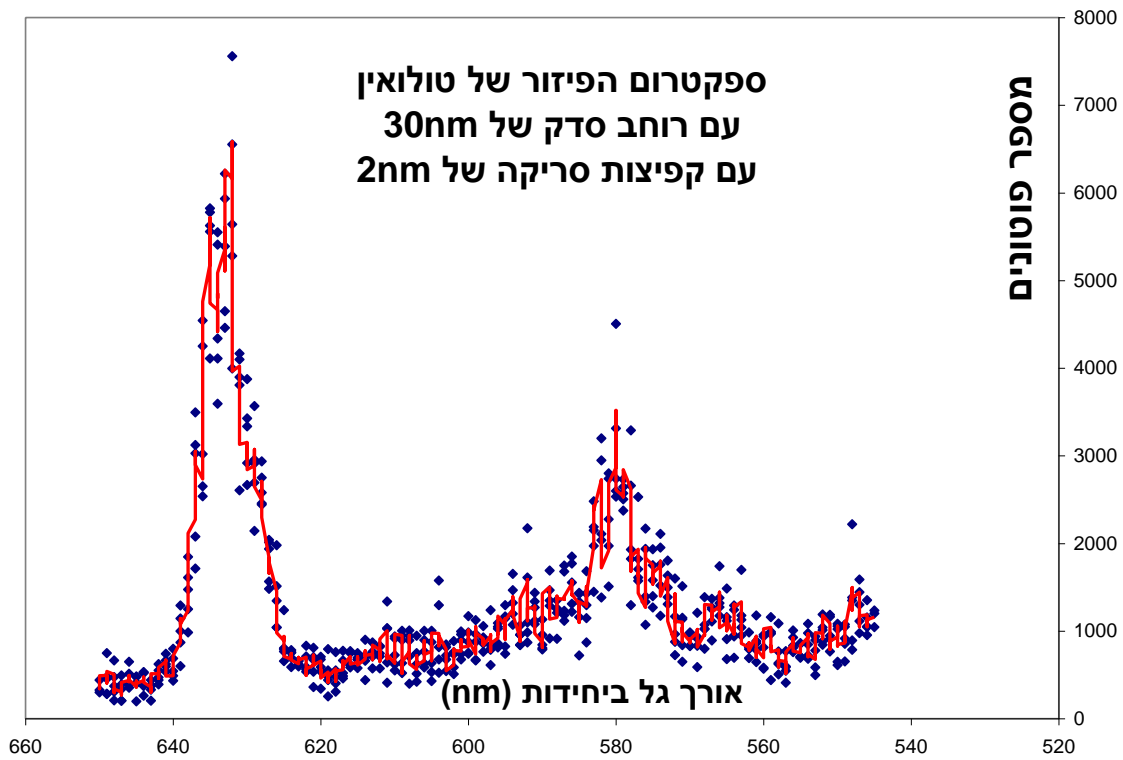


מדדנו את ספקטרום הפיזור של טולואן ובנוסף בדקנו את השפעת הגורמים הבאים:

- רוחב הסדק של המונכרומטור.
- הקיטוב של האור הפוגיע.
- קפיצות הסריקה של המונכרומטור.

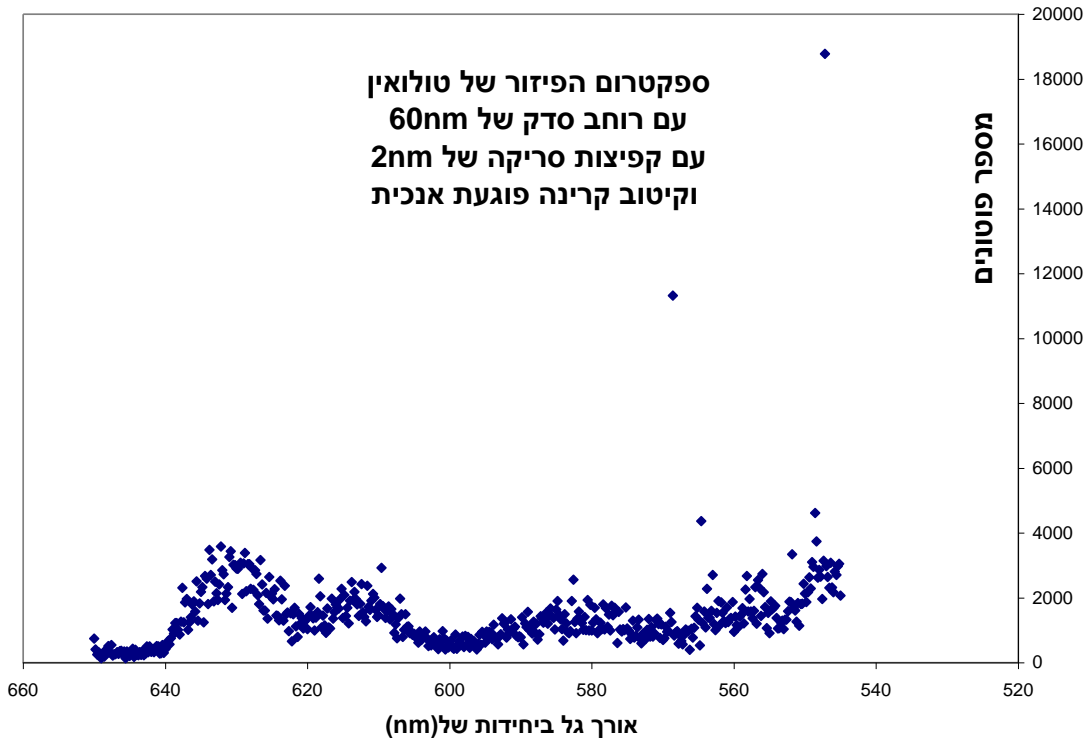


גרף מס-1 של הטולואין



גרף מס-2 של הטולואין

### גרף מס-3 של הטולואין



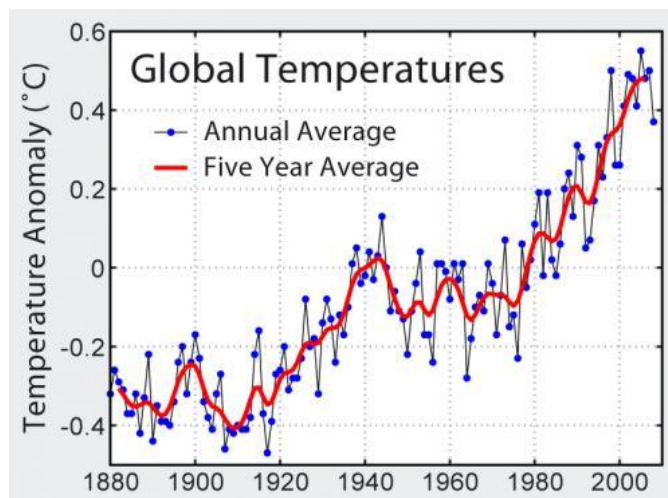
#### השפעת רוחב הסדק של המונוכרומאטור.

שני הגרפים מס-1 ומס-2 מתארים ניסוי פיזור של קרינת לייזר ירוק עם אורך גל של  $\lambda=632\text{nm}$  מנוזל הטולואין כאשר בשניהם קפיצות הסריקה של המונוכרומאטור הייתה 2nm אבל בפעם הראשונה עם רוחב סדק של 60nm ופעם השנייה עם רוחב סדק של 30nm. ניתן לראות בבירור שעם הקטנת רוחב הסדק של המונוכרומאטור הקווים נהיו יותר חדים ורוחב הבסיס נהיה יותר צר כלומר קושר הפרדה (רוזוליוציה) יותר גדולה.

#### השפעת הקיטוב של האור.

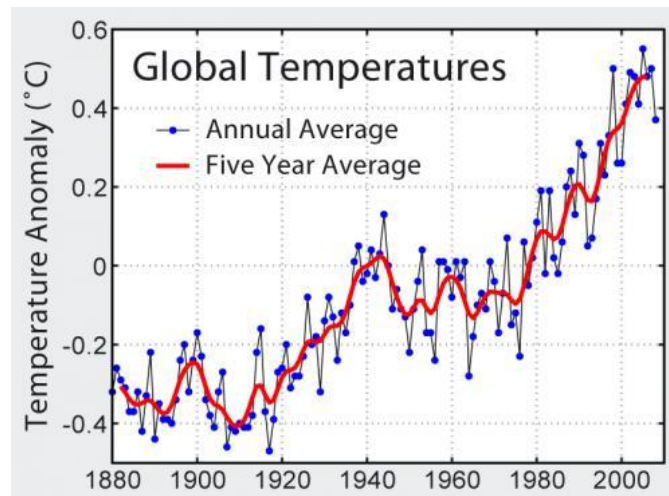
בניסוי השלישי שנינו את הקיטוב של האור, מקיטוב אופקי לקיטוב אנכי וחזרנו על אותו ניסוי עם רוחב סדק של 60nm וקפיצות סריקה של 2nm. ראה גרף מס-3. ניתן לראות שפס הפיזור המתאים לאורך הגל של  $\lambda=632\text{nm}$  נעלם מהגרף. אפשר להסביר את זה בכך שהקיטוב של הקשר C-H עכשיו הוא אופקי והתנודה שבין שני האטומים היא אופקית לכן הקרינה הדיפולית המפוזרת מהתנודה של הקשר הזה היא בניצב לכיוון התנודה (למעלה ולמטה), לכן הקרינה הדיפולית המפוזרת לא מגיעה לסדק של המונוכרומאטור ולכן היא אינה חלק מספקטרום הפיזור שמנותח במונוכרומאטור.

# פרק"ד" אפקט החממה.



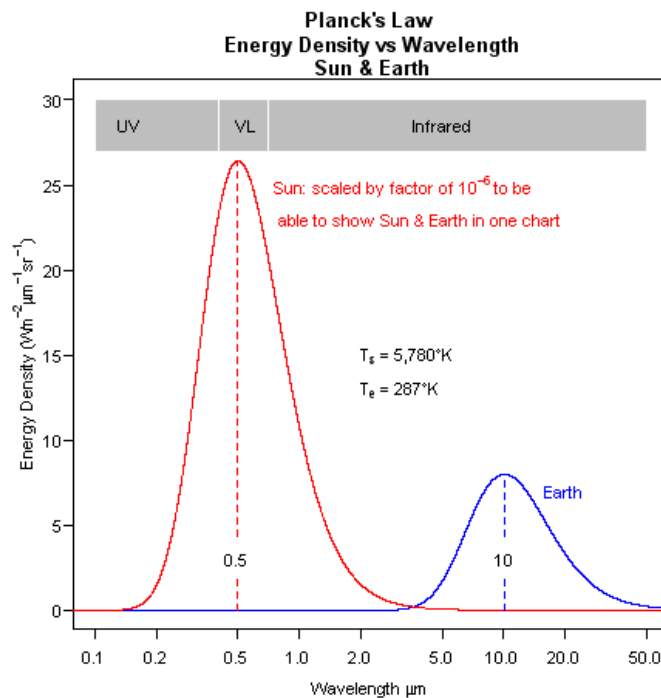
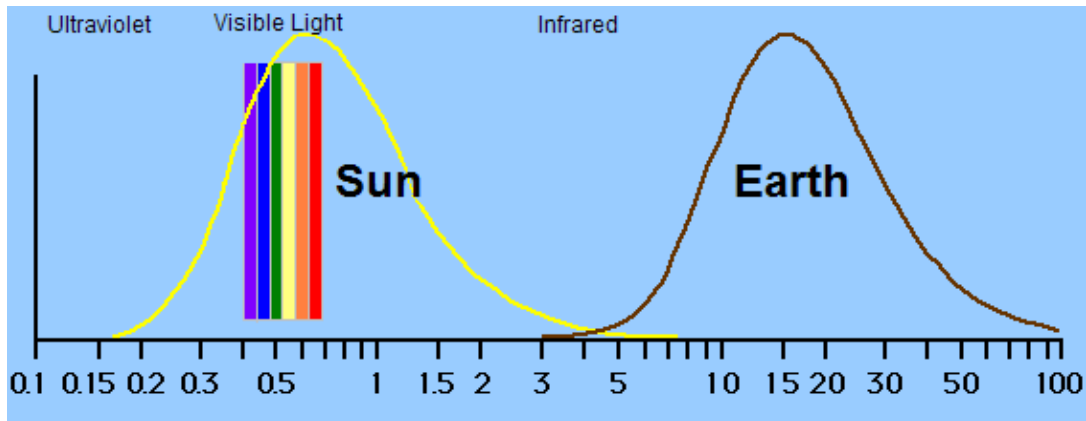
## אפקט החממה

אחת התופעות המדוברת היום בתוך החברה המדעית ובתקשורות היא תופעת התחממות כדור הארץ, תופעה הידועה בשם "אפקט החממה". הסיבה לתופעה זו היא שלא כל האנרגיה שנפלטת מפני כדור הארץ עוברת את האטמוספירה ויוצאת לחלל החיצון. באטמוספירה של כדור הארץ נמצאים גזים שונים אשר בולעים חלק מן הקרינה הנפלטת ממנו. ופולטים אותה בחזרה אל כדור הארץ דבר שגורם עם הזמן לעליה הדרגתית של טמפרטורת כדור הארץ. הגרף הבא מציג את ממוצע השינויים בטמפרטורה של כדור הארץ במשך 20 שנה.



## מה גורם לאפקט החממה.

כאשר טמפרטורה של גוף מסוים גבוהה יותר מטמפרטורת הסיביבה הגוף פולט קרינה אלקטרומגנטית אופיינית. בהתאם לכך השמש וכדור הארץ פולטים קרינה כגופים הנמצאים בקירוב בטמפרטורות 300k- ו- 6000k בהתאמה.



D Kelly O'Day - <http://chartgraphs.wordpress.com>

11/29/ 2009

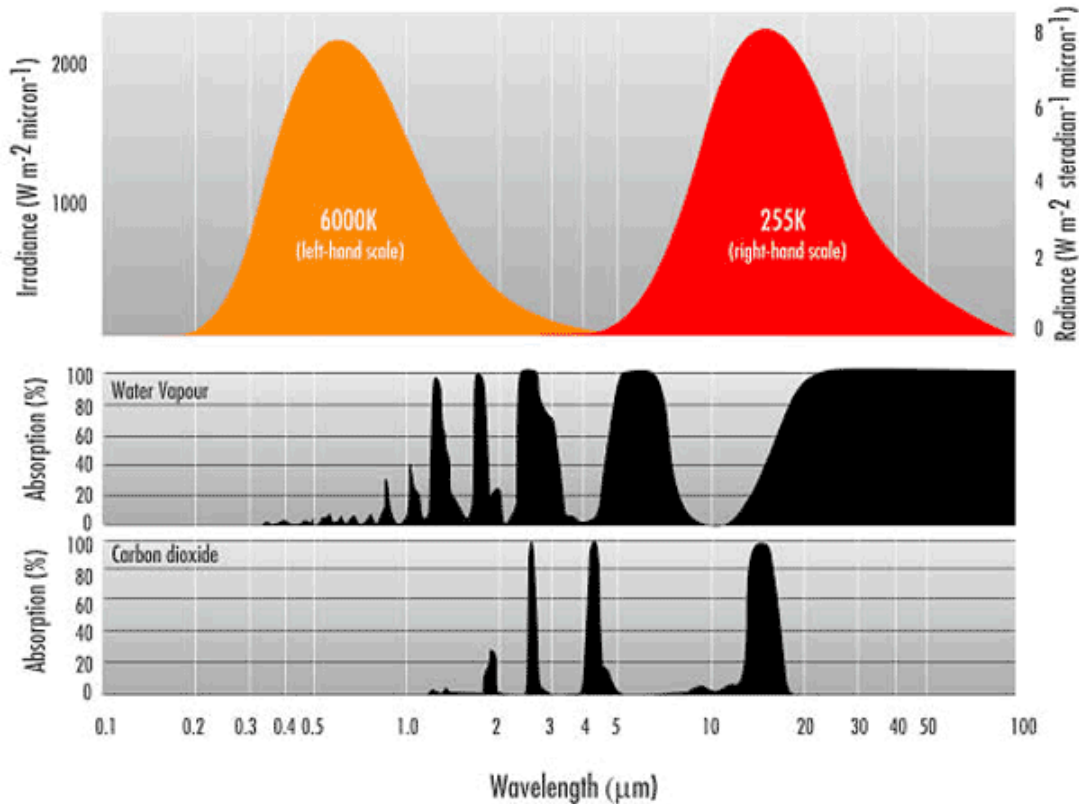
משני הגרפים ניתן לראות שהשמש פולטת רוב הקרינה שלה בתחום האור הנראה, בעוד שהקרינה שנפלטת מכדור הארץ היא בתחום האינפרא-אדום, ובעלת אורך גל בין 4-50 מיקרון.

אפקט החממה מתרחש מפני שבאטמוספירה של כדור הארץ נמצאים גזים שונים הבולעים היטב חלק מן הקרינה הזאת.

חשוב לציין שאפקט החממה קיים באופן טבעי ובלעדיו לא יתכנו חיים, ללא אפקט החממה הטמפרטורה על פני כדור הארץ הייתה הרבה יותר נמוכה וגם השינויים בין הטמפרטורות השוררות ביום ללילה מאוד חריפים.

כאן אנו דנים בהגברת אפקט החממה כתוצאה מהגדלת אחוזי הגזים השונים באטמוספירה

הבולעים קרינה בתחום האינפרא-אדום .  
 שני גזים הנמצאים באטמוספירה ותורמים לאפקט החממה הטבעי הם אדי מים ( $H_2O$ )  
 ופחמן דו חמצני ( $CO_2$ ) .  
 אדי המים מגיעים לאטמוספירה עקב אידוי של ימים ואוקיינוסים, בעוד שלפחמן דו חמצני  
 יש שני מקורות, טבעי ומלאכותי.  
 באופן טבעי ( $CO_2$ ) הגזי נוצר בתהליך הנשימה ובאופן מלאכותי הוא נוצר בתהליכי  
 שריפה של דלקים שונים.  
 לשני הגזים יש כושר בליעה שונה כתלות באורך הגל של הקרינה .  
 ספקטרום הבליעה של שני הגזים מוצג בציור הבא.



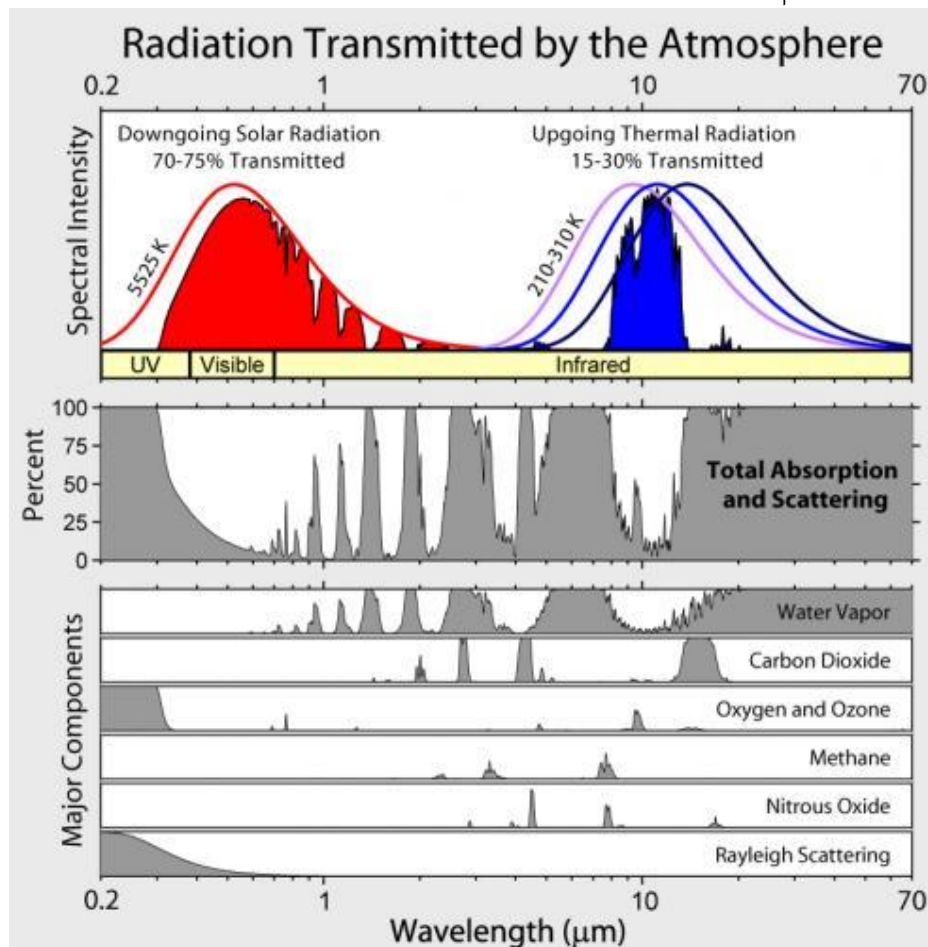
מתוך הגרפים האלה ניתן לראות שקיים מרווח (הנמצא בין 8 מיקרון ל-12 מיקרון) בין  
 בליעה חזקה של  $CO_2$  לבליעה של  $H_2O$  . לכן קרינה אלקטרומגנטית הנפלטת מכדור  
 הארץ יכולה לעבור את האטמוספירה ולצאת לחלל החיצון, מרווח זה נקרא "החלון  
 האטמוספרי האינפרא-אדום" ובזכותו נפלטת החוצה קרינה אינפרא-אדומה. עליה  
 מלאכותית של  $CO_2$  באטמוספירה מעשה ידי אדם מגבירה את בליעת הקרינה האינפרא-  
 אדומה ומקטינה את הפליטה לחלל החיצון שהייתה קיימת ממילא.

בנוסף לשני הגזים האלה מצויים באטמוספירה בריכוזים קטנים גזים אחרים הבולעים  
 קרינה אינפרא-אדומה בתחום הנדון. מתוכם נציין את :  
 (1 האוזון (2 מתאן. (3  $N_2O$ ) (4 משפחת הכלורו-פלורו-פחמנים (CFC) .  
 לגזים האלה יש בליעה חזקה בתוך "החלון האטמוספרי" ולכן על אף ריכוזיהם הזעירים

השפעתם המשותפת על עלית הטמפרטורה היא משמעותית. מדענים מעריכים שאם הטמפרטורה של האטמוספירה תעלה ב- 2 מעלות למשל מעלה אחת תגרם עקב עלית הריכוז של CO<sub>2</sub> והמעלה השניה תגרם במשותף על ידי שאר הגזים שאותם הזכרנו.

### (1) האוזון:

לאוזון תפקיד חשוב בקיום החיים על פני כדור הארץ מפני שהאוזון שנמצא בסטרטוספירה בגובה של 15 ק"מ מעל פני הקרקע בולע קרינה אולטרא-סגולה הבאה מן השמש. לעומת זאת האוזון הנמצא בטרופוספירה בסמוך לפני כדור הארץ הוא לא בולע קרינה אולטרא-סגולה, אלא הוא מחמצן חזק וכאשר ריכוזו נמוך הוא מחטא את האוויר מחיידקים שונים. אך כאשר ריכוזו גבוהה, האוזון מזיק: הוא פוגע בגידולים חקלאיים ובצמיחה, בנוסף לכך הוא בולע קרינה אינפרא-אדומה הנפלטת מכדור הארץ ובכך הוא תורם להגברת אפקט החממה.



### (2) מיתאן (CH<sub>4</sub>):

מאז שנות ה-40 היה ידוע על המצאות של מתאן באטמוספירה, אולם רק בסוף שנות ה-60 פותחו מכשירים מתאימים שבעזרתם התחילו לעקוב אחר ריכוזו באוויר בצורה אמינה ומדויקת. נראה שקצב עליית ריכוז המיתאן באטמוספירה הוא המהיר מבין יתר הגזים התורמים לאפקט החממה. באופן כללי ידוע מעט מאוד על המקורות נגרמים לעלית ריכוז

המיתאן, מדענים סבורים שהמקור העיקרי של פליטת מיתאן הוא בפעילות חקלאית ובמיוחד גידול אורז ובקר.

### **$N_2O$ (3)**

העלייה שנרשמה בריכוזו של  $N_2O$  באטמוספירה היא פי 5 קטנה יותר מזו של  $CH_4$ , אך לעומת זאת זמן החיים של  $N_2O$  באטמוספירה הוא הרבה יותר ארוך-מעריכים שהזמן שבו נעלמת מחצית מן הכמות שלו היא כ-170 שנה. היום ידוע מנגנון יחיד להעלמות  $N_2O$  והוא ע"י תגובות עם האוזון. המקור של  $N_2O$  כנראה בתהליכים מיקרוביים המתרחשים בקרקע ובמים, ככל הנראה תהליכים אלה מושפעים משימוש בחומרי דישון המכילים חנקן.

### **סיכום:**

אני אתחיל את הסיכום שלי בסקירה קצרה להיסטוריה קצרת הטווח מאז שהתחלנו לחשוב על נושא לעבודת הגמר שלנו לפני ששה חודשים, אז עלו בראשי הרבה נושאים ורעיונות שתמיד צלצלו לי באוזן. רעיונות שתמיד חשבתי שהם נושאים חשובים ונוגעים לחיי היום יום שלנו, נושאים שהם בסדר היום התקשורתי והציבורי ויכולים להוות מנוף ללימוד נושאים מדעיים קשורים, וחשוב לעגן אותם בתכנית הלימודים של בית הספר. אחד הנושאים שהצעתי אז היה:

1) קרינה אלקטרו-מגנטית והשפעתה על התא החיי. הנושא לדעתי נושא חשוב במיוחד, לאור התפתחות כלי התקשורת האלחוטית והסולארית והחששות של הציבור מהשפעת הקרינה האלקטרו-מגנטית על בריאות הציבור, אז ראיתי חשיבות רבה שהתלמיד ילמד את נושא הגלים ותכונותיהם מתוך הנושא המדובר ביותר היום בתקשורת.

### **(2) אנרגיה סולארית.**

נושא האנרגיה הסולארית הוא נושא בסדר היום התקשורתי והציבורי לאור הסכנות באנרגיה הגרעינית ומה שקרה ביפן, בנוסף להתייקרות של הנפט בעולם ועליית אחוז הגזים הרעילים באטמוספירה שמשפיעים על טמפרטורת כדור הארץ ומהווים מין מחסום שמונע בריחת הקרינה החוצה מכדור הארץ. אבל לצערי לא נמצא מדריך בשני הנושאים ונאלצנו לחפש נושא אחר, עד שקיבלנו הצעה של ד"ר דן אורון לנושא בשם "ספקטרוסקופיה". הנושא מוכר לנו ומלמדים אותו בבית הספר במסגרת מצומצמת כנושא שקשור לרמות אנרגיה באטום ובליעה ופליטה של אנרגיה ברמה האלקטרונית. אבל לאחר מספר ישיבות עם המנחה אנחנו מגלים שהנושא הרבה יותר רחב ומעניין וניתן לקשור אותו להרבה נושאים ותופעות בטבע כמו תופעת "אפקט החממה". כמו כן נוכחנו לדעת שלכל חומר יש ספקטרום ייחודי שמבדיל אותו משאר החומרים כמו טביעות האצבע שלבני-אדם. בנוסף הנושא יכול להוות התווך שמקשר בין נושאים מדעיים שונים כמו פיזיקה וכימה שהתלמידים שלנו היום חושבים שאלה שני תחומים שונים ואין קשר ביניהם.

עם התקדמות העבודה במעבדה מדדנו ספקטרום פליטה של מנורת להט, מנורת **LED**

ומנורת פלורסנט והצלחנו לדעת בעזרת הספיקטרום שלה מהם הגזים שיש בתוך מנורת הפלורסנט .

הדבר היה מדהים ומרגש, למרות שכל שנה אני מלמד את התלמידים שלי על תופעת הנפיצה והספקטרום האלקטרוני של אטום המימן. אבל הפעם הרגשתי שהחוויה היא אחרת והתופעה הרבה יותר מעניינת.

בנינו ספקטרומיטר פשוט שמורכב ממספר עדשות סריג החזרה חריר ומצלמה פשוטה . באמצעות הספקטרומיטר מדדנו ספקטרום של מספר נוזלים בהשוואה לספקטרום הרציף של מנורת להט.

התוצאות היו מאוד מעניינות וברורות שכל אחד יכול להבין מתוך התמונות מה זה ספקטרום ומה זה בליעה.

אבל הנושא הפך להיות הרבה יותר מעניין כאשר למדנו שבנוסף לרמות האנרגיה האלקטרוניות באטומים יש רמות אנרגיה רוטציוניות וויברציוניות במולקולה. עירור רוטציוני וויברציוני מתאים לקרינה בתחום גלי המיקרו והאינפרא-אדום בהתאמה. וכדי לגלות את רמות האנרגיה האלה ערכנו נשוי מאוד מעניין שבו הקרנו את החומר הנבדק באמצעות לייזר ירוק ומדדנו את עוצמת הקרינה המפוזרת . על ידי חישוב ההפרש בין האנרגיה של הקרינה הפוגעת והמפוזרת ניתן ללמוד על סוגי התנועה והקשרים הכימיים של המולקולות בחומר הנבדק ועל ידי כך ניתן לזהות את סוג החומר.

עם סיום העבודה שלנו במעבדה יצאנו עם אמונה שהנושא מאוד חשוב ומעניין שבמסגרתו התלמיד יכול לצעוד עוד צעד קדימה למבט יותר מעמיק וכוללני על תופעות המיקרו והמקרו בטבע.

הייתה לי הרגשה שאנחנו מגששים את הדרך שלנו באפלה הרי בנוסף לחוסר הניסיון שלנו אף אחד לא נתן תוכנית ברורה ומפורטת או מתווה ברור לאן צריך להגיע ומה המוצר הסופי שיש לחפש, ואיך צריך לעצב אותו או לנתח אותו. למרות כל זה, יצאנו בהרגשה שהבנו והפנמנו הרבה דברים שהיו בעבר בגדר תיאוריה בלבד.

"המבנית" שכתבנו יכולה להוות בסיס טוב ללמוד הנושא אבל צריך עוד לפתח אותה ולנסות אותה בפועל בבית הספר כדי לעמוד על נקודות החוזק והחולשה שלה. לצערנו הרב לא הייתה אפשרות לנסות את "המבנית" בבית הספר בגלל זמן סיום העבודה ויציאת התלמידים שלנו לבחינות המתכונת והבגרות. אנחנו מציעים להמשיך בפתוח "המבנית" וממושה בבית הספר בשנה הבאה.

בנוסף לאחר ההתנסות שעברנו בששת החודשים האחרונים אנחנו יודעים היום שלפרויקט כזה צריך הרבה יותר זמן במעבדה וזמן הדרכה מצד הצוות הפדגוגי והמדעי.

אנחנו ממליצים להתחיל כבר את העבודה על הפרויקט מתחילת סמסטר קיץ לאחר סיום שנה ראשונה כך שהעבודה תבוא במקום המעבדה שעשינו בסמסטר קיץ ותסתיים בסוף סמסטר "א" בשנה "ב" כך שיהיה זמן להעביר את "המבנית" ואת ההתנסות בבית הספר כל אחד עם התלמידים שלו.

### מקורות:

- 1) נושאים באינטראקציה בין קרינה וחומר יעקוב רונקין – המחלקה להוראת מדעים, מכון ויצמן למדע.
- 2) אתר האינטרנט של ויקאבידיא.

### 2) Optics

Eugene Hecht

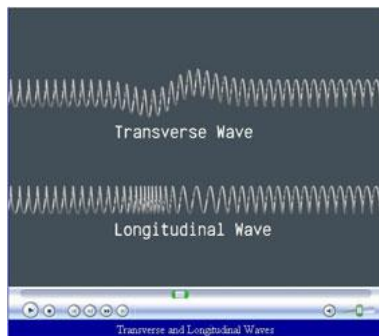
Adelphi University

### 3) MODERN SPECTROSCOPY

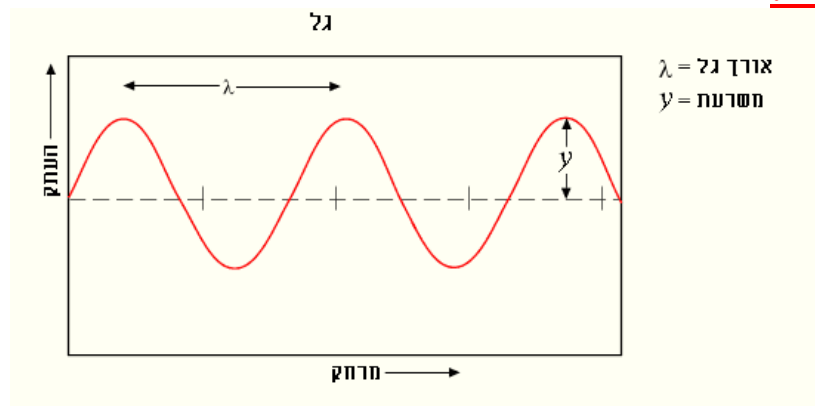
J.MICHAEL HOLLAS

**נספח מס"1 :**  
**חומר רקע תיאורטי**  
**גלים**

גל הוא תופעת מעניינת וייחודית שניתן למצוא אותה בהרבה תופעות בחיי היום יום, כמו גלי מים, גלי מיתר, גלי קול וגלים בקפיץ.  
**מהו גל :** ניתן להגדיר גל כהפרעה שמתקדמת מנקודה אחת לשניה תוך העברת אנרגיה בין שתי הנקודות.



**גדלים אופייניים:**



**משרעת:**  $[y_{\max}=A(m)]$  העתק מקסימאלי של חלקיקי התווך מנקודת שווי המשקל.  
**זמן מחזור:**  $[T(\text{sec})]$  הוא הזמן הדרוש לחלקיק כדי להשלים תנועה אחת (מחזור אחד) ולחזור לנקודת המוצא שלו.

**תדירות:**  $[f(\text{Hz})]$  היא מספר המחזורים שמבצע כל חלקיק בכל שנייה .

**אורך גל:**  $[\lambda(m)]$  הוא המרחק שמתקדם הגל בזמן מחזור אחד.

**מהירות הגל:**  $[v(m/\text{sec})]$  היא מהירות התקדמות ההפרעה בתווך ושווה להעתק ליחידת זמן.  
**הקשר בין הגדלים:**

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{\text{sec}} = \text{Hz}$$

$$V = \lambda \cdot f$$

$$\lambda = V \cdot T$$

ניתן לסווג את הגלים לשני סוגים:

1. **גלים מיכניים:** הם גלים שצריכים תווך כדי להתקדם מנקודה אחת לנקודה כלשהיא.

כמו גלי מים , גלי מיתר , גלי קול ....

גלים מיכניים ניתן לסווג לשני סוגים:

(א) **גלים רוחביים:** שהם הגליים שמהירות התקדמותם מאונכים לכיוון התנודות

של חלקיקי התווך שבו הם מתקדמים , כמו : גלי מים , גלי מיתר .

(ב) **גלים אורכיים:** הם גלים שכוון התקדמותם מקביל לכיוון התנודות של

חלקיקי התווך בו הם נעים . למשל גלי קול .

למדנו במסגרת תוכנית הלימודים על סוגי גלים והתכונות שלהם והתעכבנו רבות על תכונות ייחודיות של גלים כמו התאבכות ועקיפה .

### **התאבכות:**

היא תופעה שמתרחשת כאשר שני גלים שמגיעים לאותה נקודה ובאותו זמן מתחברים יחד כדי ליצור גל חדש .

**התאבכות בונה:** היא התאבכות שמתרחשת כאשר שני גלים נפגשים בנקודה אחת באותו הזמן

**והפרש הדרכים שלהם כפולה שלמה של אורך הגל**  $(\Delta r = n\lambda)$  אז שני הגלים מתחברים יחד

כדי ליצור גל חדש בעל משרעת גדולה או שווה למשרעת של כל גל בנפרד משני הגלים המתאבכים.

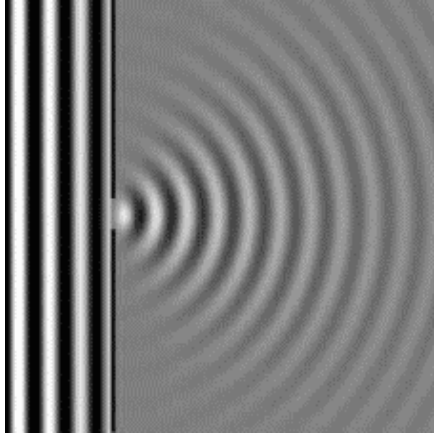
**התאבכות הורסת:** היא התאבכות שמתרחשת כאשר שני גלים נפגשים בנקודה אחת באותו

הזמן **והפרש הדרכים שלהם כפולה שלמה של חצי אורך הגל**  $[\Delta r = (n + \frac{1}{2})\lambda]$  אז שני הגלים

מתחברים יחד כדי ליצור גל חדש בעל משרעת קטנה או שווה למשרעת של כל גל בנפרד משני הגלים המתאבכים.

**עקיפה:** היא תופעה שמתרחשת כאשר גל עובר דרך סדק או מתנגש במחסום , אז הגל עוקף

את המחסום ועובר למקומות בצד השני של המסום.



עקיפה מסדק יחיד

$$\sin \theta_n = \frac{n\lambda}{w} \quad \text{זוויות ההתאבכות ההורסת.}$$

$$\Delta x = \frac{\lambda L}{w} \quad \text{קרוב יאנג בעקיפה.}$$

$w$  – רוחב הסדק.

$\Delta x$  – מרחק בין שתי נקודות

התאבכות הורסת עוקבות.

זאת שאלה שהעסיקה את המדענים ועוררה ויכוחים רבים במשך יותר ממאתיים שנה, שבהם

התלבטו המדענים במהות האור .

### האור בתקופת יוון העתיקה.

ביוון הקדומה **אמפדוקלס** ניסה להסביר את האור במסגרת תורת **ארבעת היסודות** שאותה הגה.

הוא שיער שהאור והראייה קשורים לאינטראקציה בין אש השמש לאש שנמצאת בעין.

### האור בימי הביניים.

**בימי הביניים**, בתקופה שכונתה **תור הזהב של האסלאם** ושל המדע הערבי, חלה התקדמות

גדולה בחקר האור ובמדע האופטיקה. **איבן סהל** (Ibn Sahl) חקר **עדשות ומראות** בעלות

עקמומיות, וגילה את **חוק סנל**, שהוא חוק השבירה של אור בחומר שקוף. **איבן אל-**

**היית'ם**, (965–1040) אשר נחשב לאבי האופטיקה ולחלוץ השיטה המדעית, שיער שהאור

הוא חלקיקים הנעים במהירות סופית. משטח מואר מאיר לכל הכוונים, ואת תופעת הראייה

הסביר כפגיעה של קרן אור בניצב לעין. הוא ניסח את חוקי השבירה וההחזרה, גם מעדשות

ומראות קעורות וקמורות, תוך שימוש במחקריו של איבן סהל, וחקר את תופעות הנפיצה, אור

וצל, צבע האור בשקיעה, אשליית ההגדלה של **השמש והירח** הסמוכים לאופק, ו**ליקוי חמה**.

### התורה הגלית והתורה החלקיקית.

בפיסיקה הקלאסית יש הפרדה ברורה בין חלקיקים וגלים, לפני שנתקדם כדי לעשות השוואה

בין תכונות של חלקיקים ותכונות של גלים .

גלים	חלקיקים
חסרי מידות וגבולות מכיוון שתחילת הגל עוברת למקסימום בצורה רציפה והמקסימום עובר לסוף הגל בצורה רציפה.	בעלי מידות מוגדרת וגבולות מוגדרים (לכל חלקיק ניתן לקבוע, לפחות ברמת העיקרון, באיזו נקודה במרחב הוא מתחיל ובאיזו נקודה מסתיים)
חסרי מסה (מסה יכולה להיות לחלקיקים המתנוודים כשהגל עובר דרכם, אך לא לגל עצמו).	בעלי מסה מוגדרת
בעלי אורך גל, אמפליטודה, תדירות ופאזה מוגדרים	חסרי אורך גל, אמפליטודה, תדירות ופאזה
בהתנגשות עם הפרעה יכולים (א) לחזור מההפרעה בצורה אלסטית או (ב) לעקוף את ההפרעה (דיפרקציה)	בהתנגשות עם הפרעה יכולים: (א) לחזור מההפרעה בהתנגשות אלסטית, (ב) לעוות את ההפרעה או את עצמם בהתנגשות פלסטית או (ג) להדגים את שתי ההתנהגויות בו-זמנית
שני גלים יכולים להיות בו זמנית באותו מקום. בזה הם יכולים להשפיע אחד על השני (התאבכות) או לא להרגיש זה את זה	שני חלקיקים לא יכולים להיות בו-זמנית באותו מקום

חלוקה זו בין חלקיקים וגלים היא חלוקה נוחה וגם פשוטה. והיא מספקת קריטריונים ברורים לשייך קרינה לגלים או חלקיקים, אומנם הניסויים הדגימו, שהחיים יותר עשירים ומגוונים.

### **התורה הגלית של היגנס.**

כריסטיאן הויגנס בספרו "חיבור על האור", שפורסם בשנת 1690, הציע כי האור דומה לגלים המתפשטים על מים או גלי. הויגנס ידע כי גלים אינם מסוגלים לנוע בחלל ריק אלא זקוקים לחומר כלשהו, ומכיוון שהאור מגיע אלינו מהחלל שאין בו אוויר, הויגנס שיער שקיים חומר בלתי נראה הממלא את כל החלל ונקרא בשם אתר, ומהירות האור היא גבוהה מאוד. הויגנס כתב כי האור לא יכול להכיל חלקיקים כלשהם, משום ששתי אלומות של אור חוצות אחת את השנייה בלי הפרעות או עיוותים גלויים, בעוד זרמים של חלקיקים בהכרח יתמודדו ויובילו לעיוות.

### **התורה החלקיקית של ניוטון.**

בניגוד לתיאורית הגלים של הויגנס, סבר אייזק ניוטון ("ההיפותזה של האור", 1675, "אופטיקה", 1706) כי האור מועבר על ידי חלקיקים, אשר נעים במהירות אינסופית, עם זאת, יש להם מספר מאפיינים המקרבים אותם לגלים. תיאורית החלקיקים הצליחה להסביר בקלות אלגנטית את השבירה של האור, כמו כן את תופעת הנפיצה כאשר קבע שכל צבע הוא זרם של חלקיקים כדוריים בעל גדלים שונים.

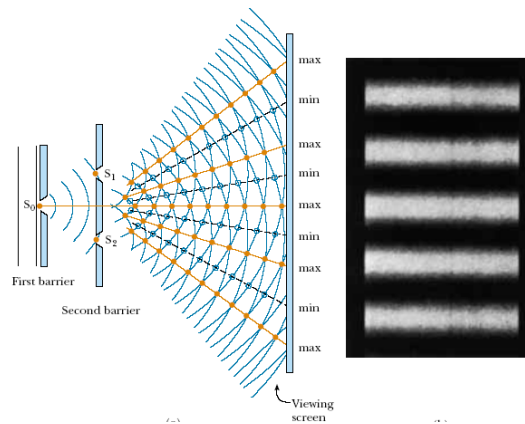
אבל על השאלה מדוע קרני האור עוברות בחופשיות זו דרך זו, לא סיפקה הסבר משביע רצון.

הרשות של ניוטון בעולם המדעי הייתה עצומה והתיאוריה שלו זכתה לתמיכה רבה יותר מאשר תיאורית הגלים של הויגנס. עם זאת, כמעט מיד לאחר מכן, במהלך 10-15 השנים הבאות בוצעו הניסויים שהובילו את המדענים בהדרגה לעבר טבע גל של אור. תופעות ההתאבכות ועקיפה היו ידועות כבר במאה ה-17 והם תופעות ייחודיות לגלים. למעשה, ניוטון עצמו הבחין בהתאבכות המתרחשת כאשר האור עובר בשכבה דקה המפרידה בין שני משטחי זכוכית. תופעה זו ידועה בשם "**טבעות ניוטון**", משום שניוטון השתמש בעדשות זכוכית עגולות וקיבל סדרה של טבעות בהירות וכהות לסירוגין. אף-על-פי שניוטון לא האמין שהאור הוא גל, הוא קיבל את רעיון האתר. הוא הסביר אפוא את תופעת הטבעות בכך שהניח שפגיעת חלקיקי האור במשטח זכוכית אחד יוצרת תנודות מחזוריות של האתר, המחזקות ומחלישות לסירוגין את מעבר האור במשטח השני. אחד הניסויים ----- את כפות המאזניים לטובת התורה הגלית, הוא ניסוי ההתאבכות של האור משני מקורות שערך תומס יאנג בשנת 1801.

### **ניסוי יאנג:**

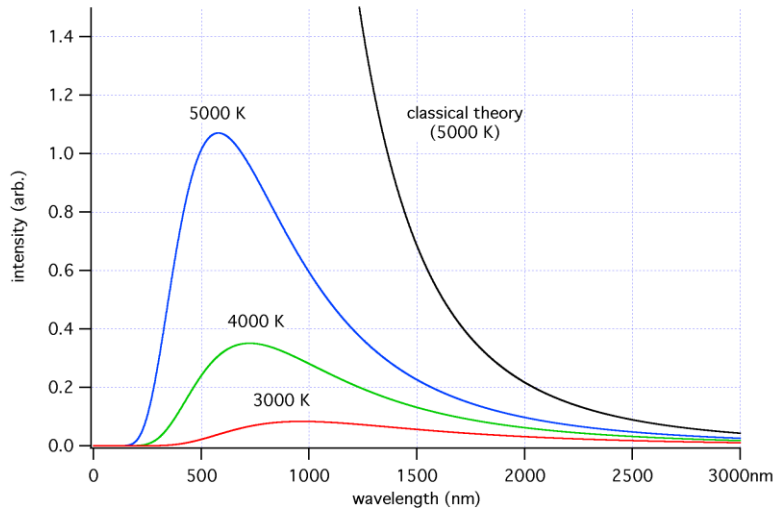
כידוע תופעת ההתאבכות בולטת כאשר רוחב הסדק הוא מסדר גודל של אורך הגל, וכיוון שגלי האור הם גלים בעלי אורך גל קצר מאוד (400nm-700nm), תופעה זו התאפשרה רק כאשר השתכללו האמצעים והיה אפשר ליצר סדקים ברוחב קטן מאוד. בניסוי זה העביר יאנג אלומה מקבילה של אור דרך שני סדקים וקבל תמונת התאבכות על מסך מקביל.

אם האור הוא אוסף של חלקיקים שנעים בקווים ישרים מהמקור היה צריך לקבל שני קווים מוארים על המסך במקביל לשני הסדקים, אולם על המסך קיבל סדרה של קווים בהירים וכהים מה שנחשב לעדות חותכת לאופי הגלי של האור, ומאז עד תחילת המאה העשרים צברה התיאוריה הגלית תנופה גדולה והייתה לתיאוריה המקובלת לתאורן והסברן של תופעות שונות של האור.



### **האור במאה העשרים.**

בתחילת המאה העשרים התגלו תופעות חדשות שלא היו ידועות קודם לכן כמו:  
1. קרינת גוף שחור.



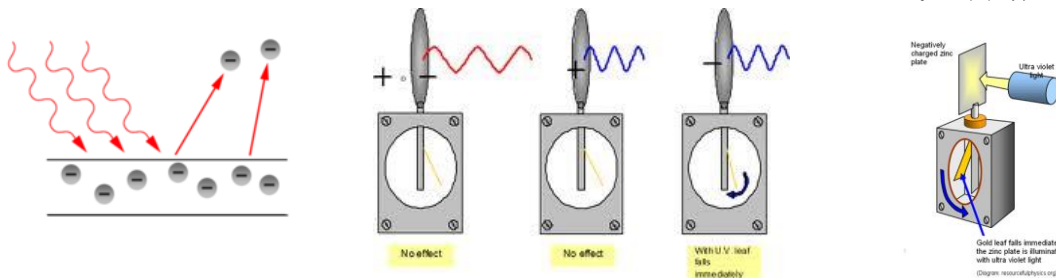
את ספקטרום הקרינה של גוף שחור או מה שנודע אז "קסטטרופה של הקרינה האולטרא סגולה" הצליח פלנק להסביר רק כאשר הניח שהקרינה היא אוסף של חלקיקים חסרי מסה ובעלי אנרגיה פרופורציונית לתדירות של הגל.

$$E_{ph} = h\nu$$

כאשר :

$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$  : קבוע שנקרא קבוע פלנק  
 $\nu$  : תדירות של הגלים האלקטרומגנטיים.

2. **האפקט הפוטואלקטרי:** פליטה של אלקטרונים ממתכות כאשר היא מוקרנת באור המתאים.



רק בשנת 1905 הצליח אינשטיין במאמרו "האפקט הפוטואלקטרי" להסביר את התופעה כאשר אימץ את הרעיון של פלנק על האופי החלקיקי של האור כאשר כל חלקיק בעל :

$$E_{ph} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{12400}{\lambda(A^{\circ})} \text{ אנרגיה:}$$

$$p = \frac{E_{ph}}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

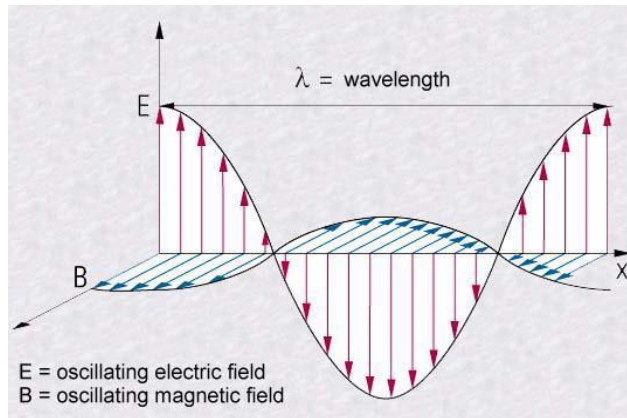
ותנע :

**דואוליות האור**

מתברר שהאור מתנהג בתופעות מסוימות כגל כמו בהתאבכות, עקיפה, שבירה וקיטוב בעוד שבתופעות אחרות כמו האפקט הפוטואלקטרי ואפקט קומפטון מתנהג כחלקיק. לכן התגבשה תיאוריה חדשה שנקראה התיאוריה הדואלית של האור שגורסת: האור מתפשט כגלים בעוד שהאור מתנהג כחלקיק בעת אינטראקציה עם החומר.

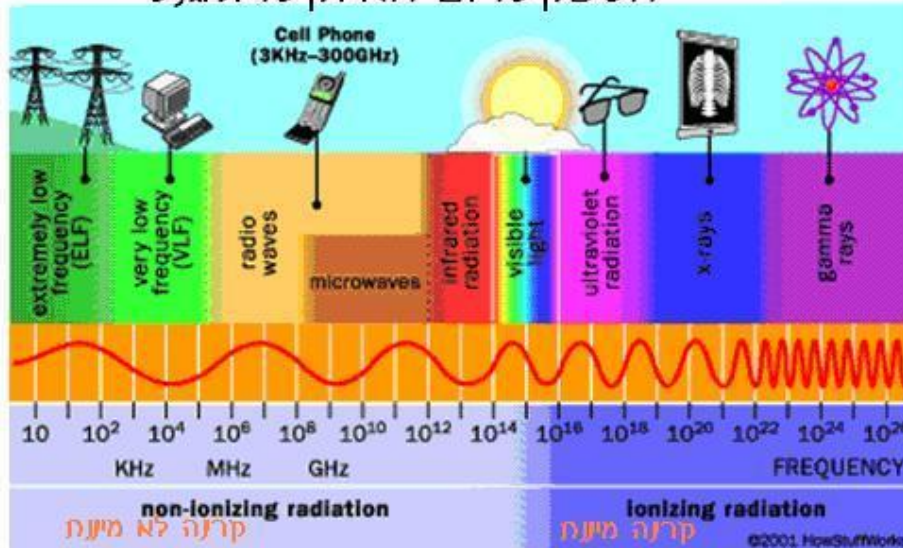
**גלים אלקטרומגנטיים:** הם שדות חשמליים ומגנטיים מחזוריים מאונכים זה לזה שיכולים להתקדם בוואקום ללא צורך בתווך כדי, והם נעים בוואקום במהירות האור  $c = 300000\text{km/sec}$ .

$$c = \lambda \cdot f \Rightarrow \lambda = cT$$



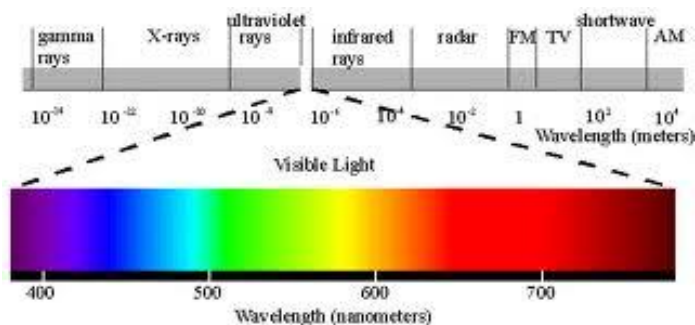
גלים אלקטרו מגנטיים הם גלים רוחביים והם בעלי תכונות שונות ותחום תדרים רחב שניתן לחלק אותו למספר תחומים לפי קטגוריות שונות.  
 (א) קרינה מיננת/לא מיננת.  
 (ב) שמושים שונים.

### הספקטרום האלקטרומגנטי



### הספקטרום האלקטרומגנטי עם חלוקה לתחומים והדגשה של החלק הנראה

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.



טבלת חלוקה של הספקטרום הנראה למספר תחומים לפי צבע כל תחום

צבע	תחום אורכי גל (בקירוב, בנומטרים)	תחום תדירויות (בקירוב, ב- $10^{12}$ הרץ)
תת-אדום	750–	400–
אדום	750–625	480–400
כתום	625–590	510–480
צהוב	590–565	530–510
ירוק	565–500	600–530
תכלת	500–485	620–600
כחול	485–440	680–620
סגול	440–350	800–680
על-סגול	350–	–800

### המודלים הראשונים של מבנה האטום

- בשנת 1897 התגלה האלקטרון ואז החלו לצוץ תאוריות המתארות את מבנה האטום.

המודל של תומסון :

המודל של תומסון מתאר את האטום כגוש טעון מטען חיובי ובתוכו, כמו צימוקים בעוגה, מפוזרים האלקטרוֹנֵי. תומסון הניח שהמטען החיובי מושך את המטען השלילי, ואילו המטענים הזהים דוחים זה את זה כך שבסה"כ יש ש"מ. המודל של תומסון לא הצליח לתת תשובה לספקטרום הקווי תומסון הניח שכאשר האלקטרוֹנֵי יוצא מש"מ הוא מתנדד באופן הרמוני ולכן פולט קרינה. אולם לפי תאוריה זו צריכה היתה להפלט קרינה באורך גל אחד דבר שלא תאם את המציאות.



רתרפורד וגייגר הפגישו עלי זהב דקים בחלקיקי אלפא. רוב חלקיקי האלפא המשיכו דרכם ללא סטייה. היו מספר חלקיקים שחזרו בכמעט 180 מעלות. רתרפורד הבין שרק כוחות דחיה חשמליים בין חלקיקי האלפא ובין החלק החיובי של האטום יכלו לגרום לסטייה כזו.

כאשר מטען  $q_1$  מתקרב מאינסוף למטען  $q_2$  האנרגיה הקינטית הופכת לאנרגיה פוט' חשמלית. לאטום הזהב מטען חיובי של 79 אלקט. 'את המרחק הממוצע בין אטומי הזהב ניתן להעריך ע"פ המשקל הסגולי ומתקבל רדיוס של  $13A^0$  האנרגיה הקינטית של חלקיקי האלפא היא  $5.3 \times 10^6 eV$

נחשב את המרחק בו ייעצר חלקיק האלפא לגמרי כלומר המרחק בו ימיר את כל האנרגיה הקינטית לפוט'

$$E_k = \frac{kq_1q_2}{r}$$

$$r = \frac{kq_1q_2}{E_k} = \frac{k \cdot 79e \cdot 2e}{5.3 \times 10^6 \cdot 1.6 \times 10^{-19}} = 4.3 \times 10^{-14} m$$

כיוון שרדיוס האטום הוא מסדר גודל של  $10^{-10} m$  המסקנה המתבקשת היא שהחלק החיובי של האטום מרוכז בחלק קטן מאוד הנקרא גרעין.

רתרפורד הציע מודל לאטום הדומה לשמש. האלקט' השליליים סובבים סביב הגרעין החיובי. רדיוס האטום נקבע ע"פ רדיוס הסיבוב של האלקט' כלומר בסדר גודל של ובמרכז גרעין קטן מאוד מסדר גודל של מסת האטום מרוכזת ברובה בגרעין הכבד פי כמה אלפים מן האלקט'. המסקנה ממודל זה היא שהאטום הוא ברובו ריק! רתרפורד הסביר שכיוון שהאלקט' נעים בתאוצה צנטרפטלית הרי שהם אמורים לפלוט קרינה א"מ. עקב פליטת האנרגיה היו האלקט' אמורים להקטין את רדיוס הסיבוב שלהם וליפול אל הגרעין. חישובים

$$10^{-8} \text{ sec}$$

מראים שזמן הקריסה הוא בערך כך שהאטום אינו יציב! המודל אינו מסוגל להסביר את הספקטרום הקווי. משתי הסיבות האחרונות נפל המודל.

## מודל האטום של בוהר:

המודל של בוהר יצא בשנת 1913 לאחר הצעת הקוונטיזציה של פלנק והצעת הפוטון של איינשטיין אך לפני גילוי האופי הגלי של האלקט 'ע"י דה ברולי.

מטרת המודל להסביר את הספקטרום הקווי. ההנחה של בוהר היא שיש רדיוסים מסויימים המותרים לתנועה לאלק. נגדיר גודל חדש:

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}$$

הרדיוסים המותרים מקיימים:

$$n\hbar = mvr_n$$

המסלולים המותרים נקראים **מסלולים סטציונריים**.

נפתח את הבטוי למסלולים הסטציונריים:

$$\frac{kq_1q_2}{r^2} = \frac{mv^2}{r} \quad n^2\hbar^2 = m^2v^2r_n^2$$

משיקולי כוחות לאלקט' המסתובב נרשום:

$$v^2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{rm}$$

נחליף את V בריבוע ונקבל:

$$n^2\hbar^2 = m^2 \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{rm} \right) \cdot r^2$$

נציב את הביטוי למהירות במשוואת של בוהר:

ונקבל שהרדיוסים המותרים הם:

$$r_n = \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m e^2} n^2$$

$$r_n = r_1 n^2$$

$$r_1 = 0.53 \text{ \AA}$$

57

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה וזהו אחד בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

## הסבר בעזרת עקרון דה ברולי

• ע"פ דה ברולי

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

• נציב את מהירות האלקטרוני

$$v = \frac{n\hbar}{mr} = \frac{nh}{2\pi mr}$$

ונקבל:

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{m \cdot \left( \frac{nh}{2\pi mr} \right)} = \frac{2\pi r}{n}$$

$$2\pi r = \lambda n$$

כלומר היקף המסלול שווה למספר שלם של אורכי גל

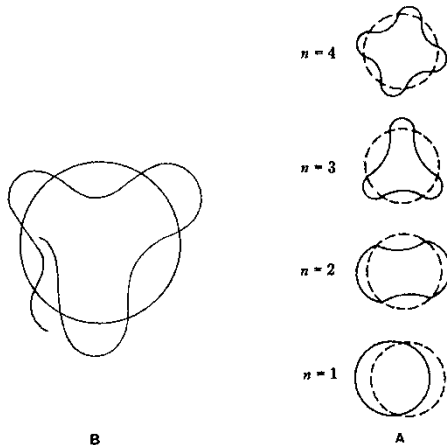
## רמות האנרגיה באטום המימן

• האנרגיה של האלקטרון באטום מרכבת מאנרגיה פוט' חשמלית ומאנרגיה קינטית:

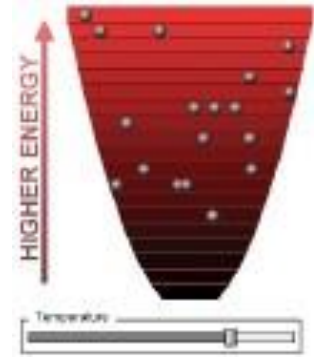
$$E_p = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r} = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r}$$

$$E = E_p + E_k = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r}$$



צור 5.11: רק תנודות שאורך תול שלהן נכנס מספר שלם של פעמים בהיקף המסלול (א) אם מספר לא שלם של אורכי גל נכנס בהיקף תהיה התאבדות חרוטת (B). (לחצו על גל)



נציב את הביטוי לרדיוס ונקבל:

$$E = -\frac{e^4 m}{8h^2 \epsilon_0^2} \cdot \frac{1}{n^2} = \frac{E_1}{n^2} = -\frac{13.6}{n^2} eV$$

האנרגיה איננה רציפה אלא מופיעה בכמויות בדידות. ככל שרמת האנרגיה גבוהה יותר האנרגיה גדולה יותר וכאשר  $n \rightarrow \infty$  האלקטרון הופך להיות חופשי. במקרה זה האנרגיה שווה לאפס.

כאשר האלקט 'קשור' האנרגיה שלו שלילית כיוון שיש להשקיע אנרגיה על מנת לשחררו מן האטום.

לאלקטרון חופשי יכולה להיות אנרגיה חיובית.

באופן סכמתי מסורטטות רמות האנרגיה בצורה הבאה:

$n = \infty$	=====	0 eV	רמות אנרגיה
$n = 4$	=====	- 0.85 eV	מעוררות
$n = 3$	=====	- 1.51 eV	
$n = 2$	=====	- 3.4 eV	
$n = 1$	=====	- 13.6 eV	רמת היסוד

טבעי אלקט 'יושב היסוד אלא אם כן אולץ חיצוני לעלות לרמת

ציר 5.13: רמות האנרגיה באטום המימן.

באופן ברמת ע"י גורם אנרגיה גבוהה יותר.

## עירור האלקט 'ע"י פגיעת פוטון - הפוטון נבלע לגמרי וכל האנרגיה הופכת

להיות אנרגיה של האלק 'הקשור.

תהליך זה מתרחש רק אם האנרגיה של הפוטון מתאימה בדיוק למעבר אלק 'קשור מרמה אנרגטית אחת לאחרת. אם האנרגיה של הפוטון לא מתאימה לא תתרחש אינטראקציה כלל.

תהליך זה הוא המקור לספקטרום הבליעה של חומרים. כאשר מוקרן אור דרך גז דליל רוב אורכי הגל ימשיכו בדרכם כיוון שהאנרגיה שלהם לא תתאים לרמות האנרגיה של הגז. רק אותם אורכי גל שהאנרגיה שלהם מתאימה למעבר אלק 'קשור בחומר מרמה אנרגטית אחת לאחרת יבלעו.

בדיקת הספקטרום לאחר הגז תראה קווים בהם כמות הפוטונים נמוכה בהרבה. אלה הם קווי הבליעה של האטום.

**ירידת אלק 'לרמת היסוד** - זמן השהיה של אלק 'ברמה מעוררת הוא מסדר גודל של  $10^{-8}$  sec

אלק 'תמיד ירד אל רמות אנרגיה נמוכות מן הרמה המעוררת בה הוא נמצא. לעולם לא יעלה לרמה מעוררת גבוהה יותר. הירידה אל רמת היסוד יכולה להתבצע בשלבים או בבת אחת. הבחירה היא סטטיסטית בלבד. באופן כללי הנוסחה לאנרגיה של הפוטון הנפלט בירידה מרמת אנרגיה m

$$hf = E_m - E_n \quad \text{לרמת אנרגיה } n \text{ היא:}$$
$$hc/\lambda = E_m - E_n \quad \text{או:}$$

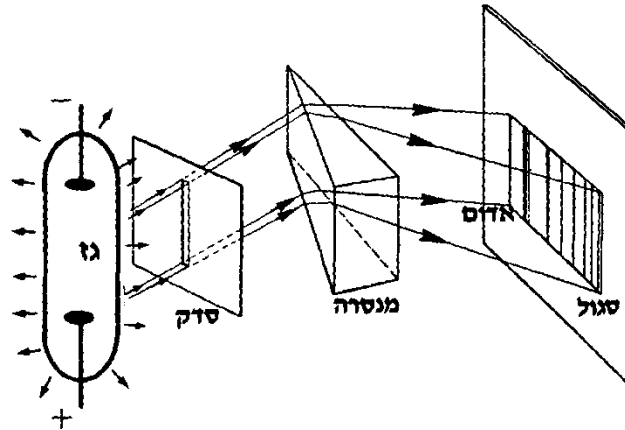
אורך הגל של הפוטון הנפלט :

$$\lambda = hc / (E_m - E_n)$$

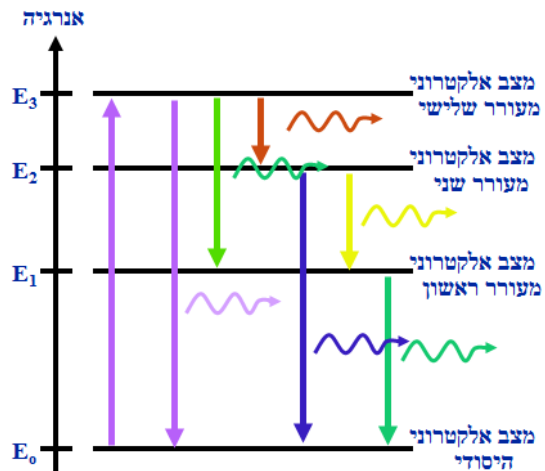
**ספקטרום פליטה** | ספקטרום בליעה

**ספקטרום הקרינה הנפלטת** נקרא **ספקטרום פליטה**.  
כאשר הקרינה הנפלטת נובעת מחומו של הגוף מתקבל **ספקטרום רציף**.

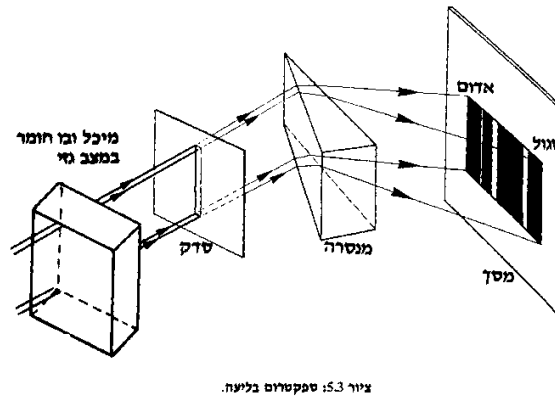
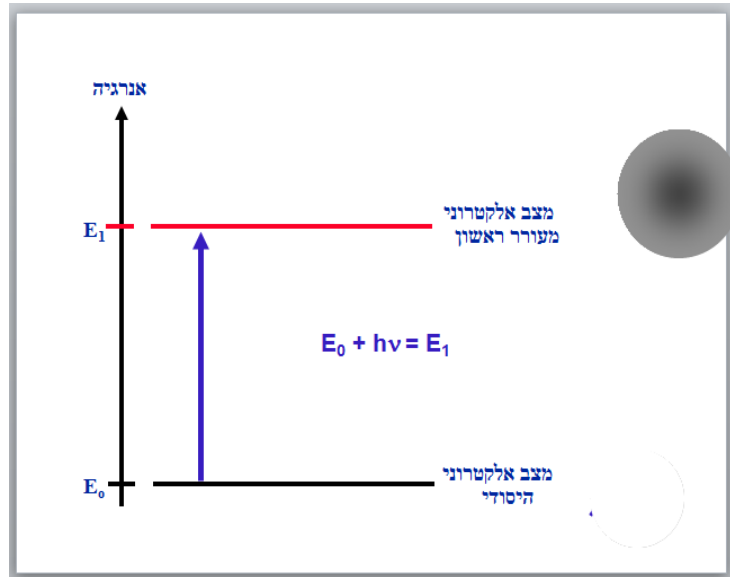
כאשר מעבירים זרם חשמלי דרך גז מתקבל ספקטרום בדיד במספר אורכי גל.



ציוו 5.2: ספקטרום פליטה קווי נוצר ע"י העברת זרם חשמלי בגז.



**ספקטרום בליעה** - כאשר קרינה א"מ נפלטת מחומר מסוים ועוברת דרך גז מתגלים בספקטרום הרציף ירידות חזקות בעצמת הקרינה באורכי גל מסוימים. בספקטרום הבליעה של השמש יותר מ- 6000 אורכי גל בהם יש בליעה.



### מספר עובדות שנוסחו ע"י קירכהוף

1. לכל חומר ספקטרום הפליטה האופייני רק לו.
2. השוואת ספקטרום הפליטה לספקטרום הבליעה מראה שספקטרום הבליעה מהווה חלק מספקטרום הפליטה. כלומר כל חומר מסוגל לבלוע את הקרינה שהוא פולט. מסקנה - מהסתכלות על ספקטרום של חומר ניתן לדעת מאילו חומרים הוא מרכב.

### הספקטרום הקווי של אטום המימן.

אטום המימן, הקטן ביותר, זכה לניתוח ספקטרוסקופי מקיף. בשנת 1885 גילה בלמר סידרת קווים ספקטראליים בתחום האור הנראה. הוא ראה שככל שאורך הגל מתקצר המרחק בין הקווים הסמוכים הולך וקטן. בלמר מצא שהערכים השונים מתקשרים בנוסחה:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 3, 4, 5 \dots$$

R קבוע רידברג

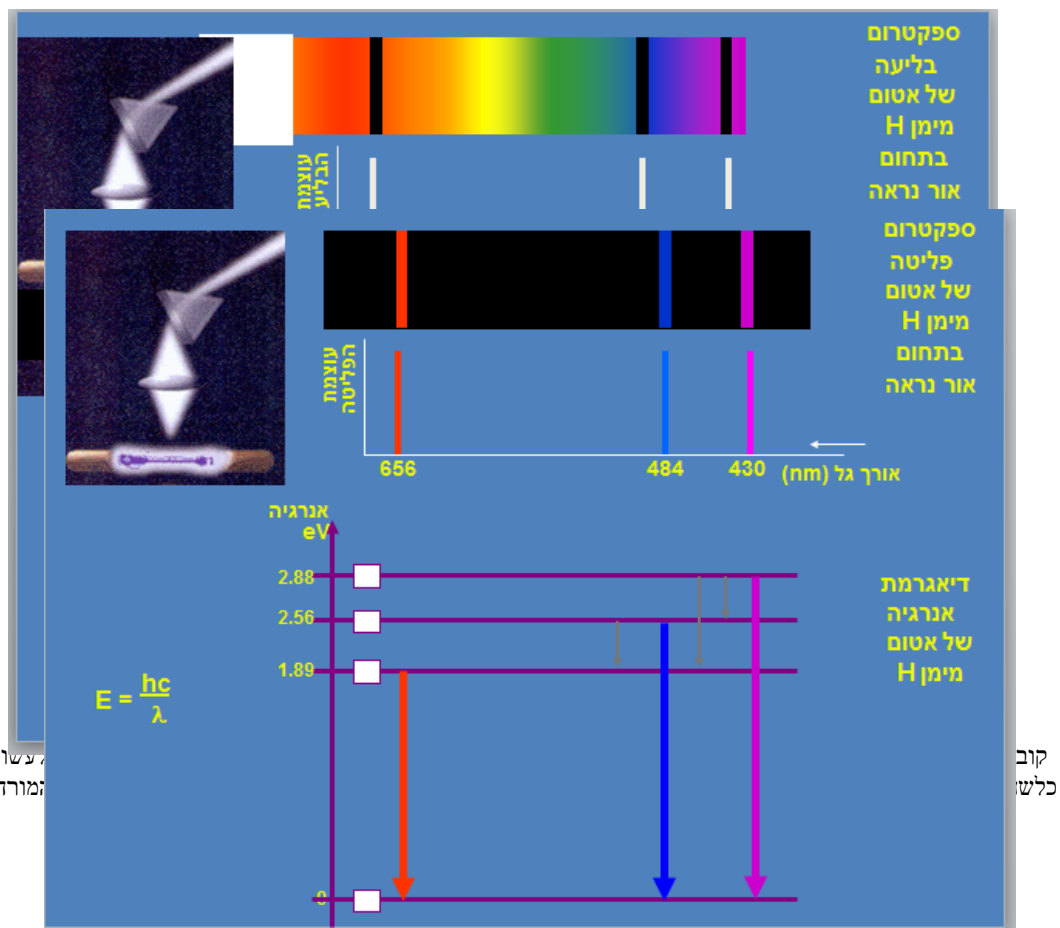
$$R = 1.097373 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

נתגלו עוד סדרות דומות. בתחום האולטרא סגול סדרת לימן –

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( 1 - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 2, 3, 4 \dots$$

נתגלו עוד סדרות בתחום האנפרא – אדום (פאשן) ו (בראקת) ו (פונד) .

היה ידוע כי מטען בתאוצה פולט קרינה א"מ ולכן הועלתה הסברה שהאטום הנייטרלי בעל מבנה פנימי המרכיב מחלקים חיוביים ושלייליים.



## **נספח מס"2 :**

64

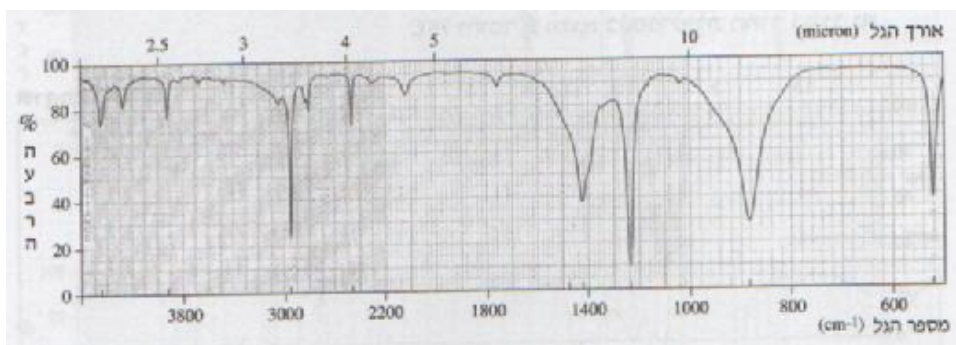
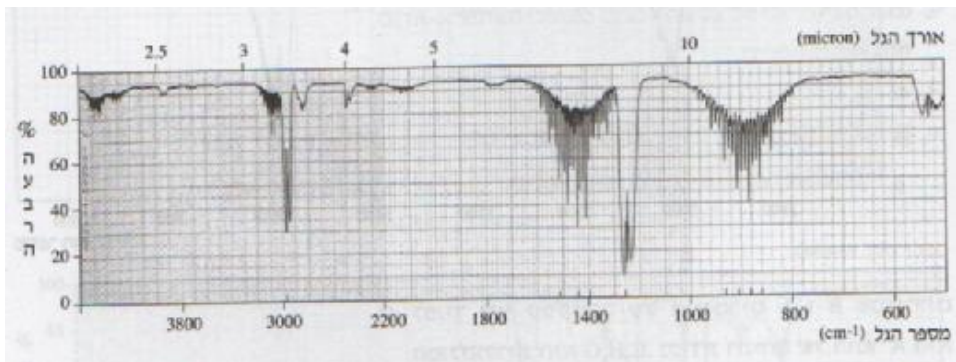
קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

## דף תרגילים

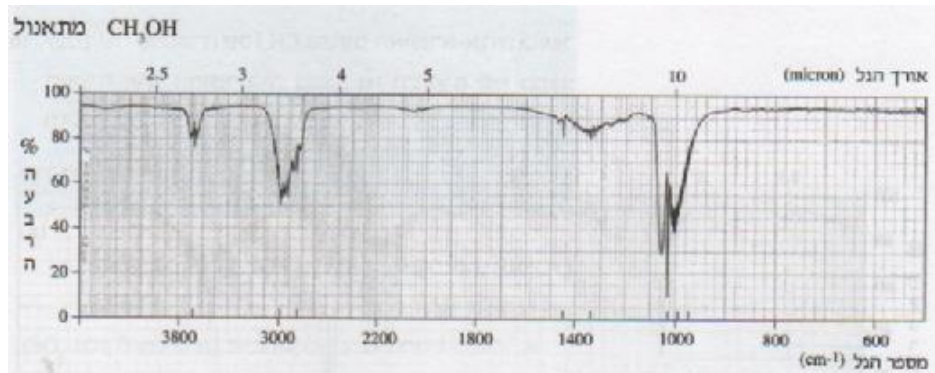
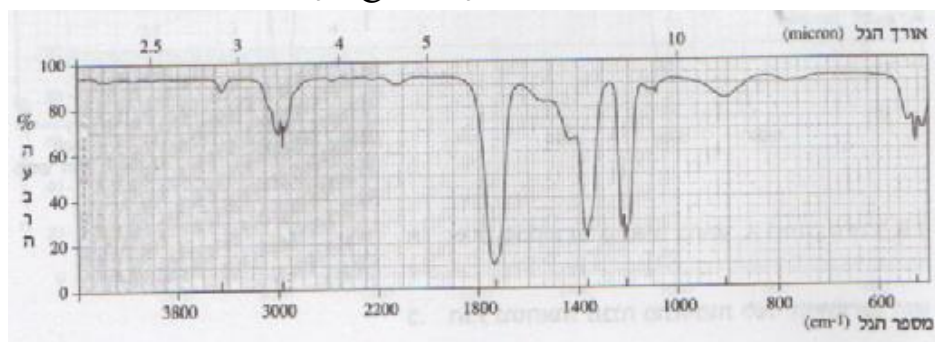
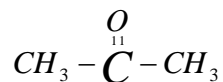
- (1) אלו סוגי תנועות אפשריות במולקולה? הסבר.
- (2) נתונות המולקולות הבאות:  
 $\text{NH}_3, \text{C}_2\text{H}_2, \text{CH}_4, \text{NO}, \text{HCN}$   
(א) מצא את מספר דרגות החופש בכל מולקולה  
(ב) קבע את מספר דרגות החופש מסוג סיבוב בכל מולקולה.
- (3) מותר להכניס לתנור המיקרוגל מזון שנמצא בתוך שקית שעשויה מפוליאאתילן. הסבר כיצד יתכן שהמזון בתוך השקית מתבשל בעוד שהשקית עצמה נשארת שלמה.
- (4) לפניך תדיריות של מעברים רוטציוניים שנמדדו בניסוי עבור מולקולה CS בתחום גלי המיקרו.

סימון המעבר	תדירות (HZ)
$J = 0 \rightarrow J = 1$	$4.9 \times 10^{10}$
$J = 1 \rightarrow J = 2$	$9.7 \times 10^{10}$
$J = 2 \rightarrow J = 3$	$1.48 \times 10^{11}$

- (א) מהי האנרגיה המתאימה למעברים השונים.  
(ב) חשב את B.  
(ג) חשב את מומנט ההתמד של המולקולה.  
(ד) חשב את המסה המצומצמת של המולקולה.  
(ה) מצא את אורך הקשר במולקולה CS.
- (5) מכשיר נוסף שפועל בעזרת קרינה אלקטרו מגנטית בתחום גלי המיקרו הוא המכ"מ (הראדאר). המכשיר משגר קרינה אלקטרומגנטית בתחום גלי המיקרו וקולט את הקרינה שמוחזרת מגופים מתכתיים. לאור עובדה זו, הסבר מדוע אסור להכניס לתנור המיקרוגל מזון עטוף בנייר אלומיניום?
- (6) בפרק "ב" הוצג לך ספקטרום שמתאר את סיבוב של מולקולת CO נניח שמבצעים ניסוי שבו כל המולקולות מורכבות מאיזוטופ  $^{13}\text{C}$  של הפחמן.  
(א) האם לדעתך יחול שינוי בקוי הספקטרום?  
(ב) אם תשובתך חיובית, הסבר את השינוי שיהול.
- (7) לפניך שני ספקטרה של  $\text{CH}_3\text{I}$  בתחום האינפרא-אדום כאשר במקרה אחד החומר היה במצב גזי ובמקרה השני במצב נוזלי.

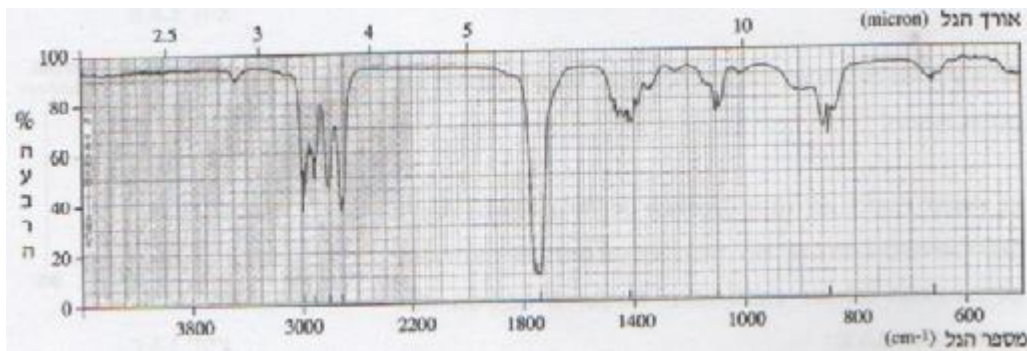
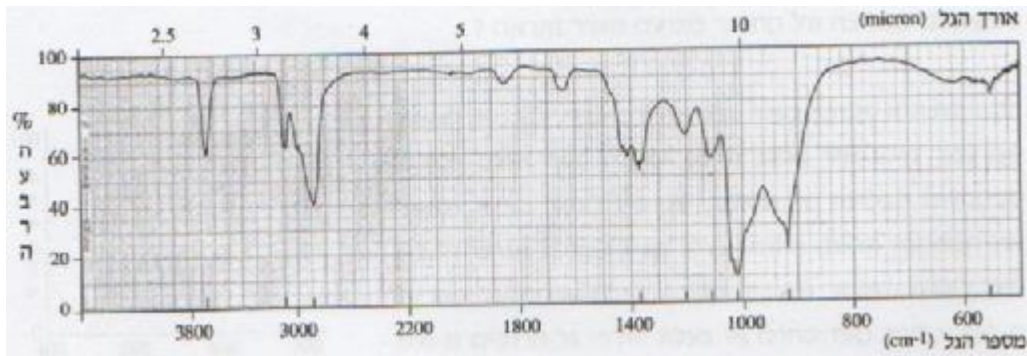
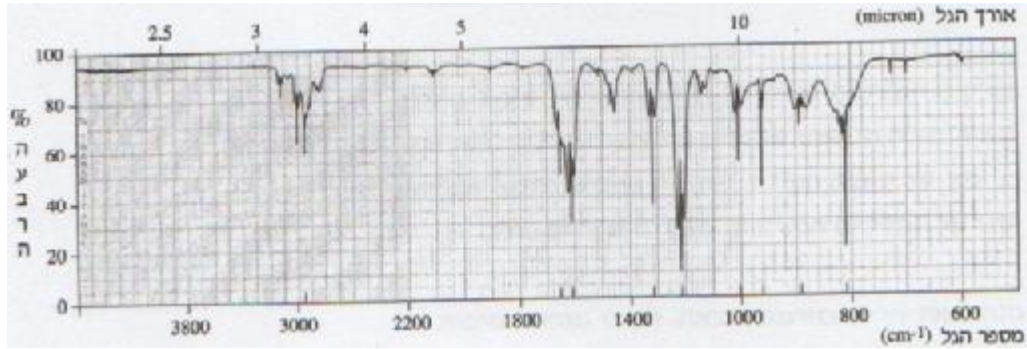
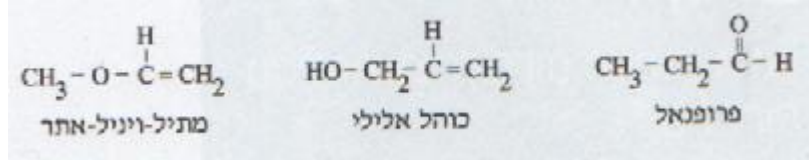


איזה ספקטרום שייך לכל חומר ?  
 (8) לפיך של אצטון ושל מתאנול. בעזרת טבלת תדירויות תגודה אופייניות זהה את הקווים המופיעים בספקטרה.



קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

9) לפניך שלושה איזומרים A, B, ו-C שנוסחתם המולקולארית היא  $C_3H_6O$ . אחד מן החומרים הוא פרופנאל, השני הוא מתיל-ויניל-אתר והשלישי הוא כוהל אלילי. על מנת לזהותם נמדד ספקטרום של כל אחד מהם בתחום האינפרא-אדום. זהה את החומרים.



- 10) מדוע מולקולות שונות בולעות קרינת אינפרא-אדום?  
 11) מה מתרחש במולקולה לאחר שהן בולעות קרינת אינפרא-אדום?  
 12) מדוע מולקולות שונות בולעות קרינת אינפרא-אדום בעלת אורכי גל שונים?

בליעת אור ע"י כלורופיל ושמן זית

תדריך מעבדה

ניסוי זה חוקר באופן איכותי את ספקטרום הבליעה של חומרים פשוטים כמו כלורופיל ושמן זית

רשימת הציוד :

- מקור אור לבן
- שלוש עדשות מרכזות
- חריר
- סריג החזרה
- מצלמה דיגיטלית
- בסיס להתקנת הציוד הנ"ל
- מחזיקי עדשות וציוד
- ברגים בגדלים שונים
- קיוויטה שתכיל את החומר שרוצים למדוד את הספקטרום שלו .
- תמיסת כלורופיל
- שמן זית



### הכנה מקדימה :

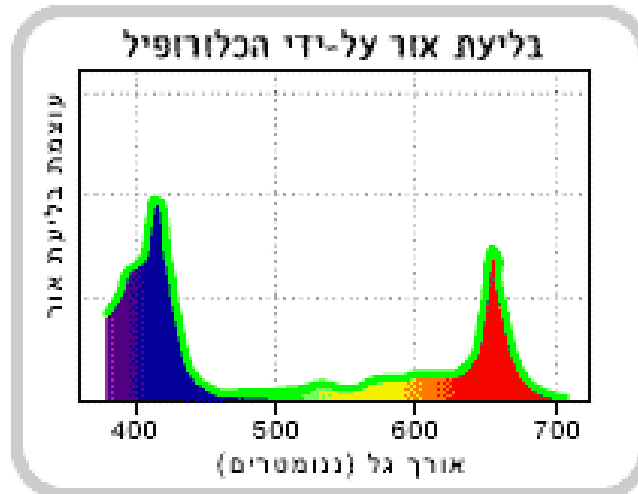
הכנת תמיסת כלורופיל : יש לקטוף כמה עלים ירוקים של צמח כל שהוא . את העלים תקצוץ לחתיכות קטנות בעזרת מספריים או כתוש אותם . את העלים הקצוצות או הכתושות תכניס למיכל שיש בו אלכוהול . תמתין עד שהנוזל במיכל יקבל צבע ירוק . התמיסה שקיבלת הינה תמיסת כלורופיל . סנן את התמיסה לפני הכנסתה לקיוויטה .  
ביצוע הניסוי :

הרכב את המערכת המתוארת בתמונה . מערכת זו תשמש אותך כספקטרומטר בליעה פשוט . הדלק את מקור האור . בעזרת העדשה הקרובה אליו מקד את האור על החריר ( מה תקבל אחרי החריר ? רמז: מצלמת נקב ) . בעזרת העדשה השנייה שאחרי החריר מקד את האור על סריג ההחזרה . נסה בעזרת העדשה השלישית לקבל גל מישורי של האור המפוזר מהסריג . קבל את התמונה של הספקטרום המוחזר מהסריג בעזרת המצלמה הדיגיטלית . שנה את המיקום של המצלמה עד שתתפוס תמונה חדה של הספקטרום ככל שאפשר . את הספקטרום שתפסת צלם בעזרת המצלמה ושמור את התמונה . עתה הכנס את את הקיוויטה המכילה תמיסת כלורופיל שהכנת מבעוד מועד והצמד אותה לחריר כך שהאור היוצא מהחריר יעבור דרך התמיסה . צלם שוב את הספקטרום שיקיבלת במצלמה ושמור את התמונה . חזור על אותו ניסוי אבל במקום תמיסת הכלורופיל הכנס לקיוויטה שמן זית .  
ניתוח הניסוי :

- ✓ השווה בין הספקטרום שקיבלת לפני הכנסת הקיוויטה עם הנוזל ואחריה .
- ✓ מה המסקנות שלך מההשוואה ?

שאלות ודף עבודה הקשורות לניסוי :  
בליעת אור על ידי כלורופיל

עיין בגרף הבא, וענה על השאלות שלאחריו:



שאלות:

1. השלם את המשפטים הבאים על פי הגרף:
  - א. יחידת המידה של אורך הגל היא: \_\_\_\_\_
  - ב. גובה הגרף מייצג את \_\_\_\_\_ האור
  - ג. עצמת בליעת האור נמוכה יותר באורכי גל שבין \_\_\_\_\_ ו \_\_\_\_\_ ננומטרים
2. איזה פרט מידע חסר בגרף?
3. הקף את המילה הנכונה במשפטים הבאים:
  - א. באורך גל 420 ננומטרים, עצמת בליעת האור של כלורופיל **גבוהה/נמוכה** יחסית
  - ב. האור הירוק באורך גל של 500 ננומטרים כמעט ואיננו **נבלע/מוחזר** מהכלורופיל
  - ג. אורך הגל של אור אדום גדול/קטן/שווה לאורך הגל של אור סגול

ד. אורך הגל בגרף הוא משתנה רציף/ בלתי רציף וגם משתנה

**משפיע/מושפע**