

הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל  
המחלקה להוראת הטכנולוגיה  
והמדעים  
קבוצת הכימיה



משרד החינוך  
האגף לתכנון ולפיתוח תוכניות  
לימודים



מטה מל"מ  
המרכז הישראלי לחינוך מדעי טכנולוגי  
על-שם עמוס דה-שליט



שול"ך  
הפקולטה לכימיה על-שם שול"ך



# כימיה מכל וחול: מרמת הננו למיקרואלקטרוניקה

עירית ששון  
רותי שטנגר

ראשי הפרויקט:  
פרופ. יהודית דורי  
פרופ. אורי פסקין

הוצאת ספרים יסוד

## ברצוננו להודות ל:

- § **ורד דנגור** - על עזרתה כמורה נסיינית, כתיבת פעילויות ליחידת הלימוד ותרומתה ליישום התוכנית בבתי הספר.
- § **עביר עאבד, ד"ר דליה עובדיהו, יהודית פלדמן ועדינה שיינפלד** - על עזרתן כמורות נסייניות, תרומתן בכתיבת חומרי עזר להוראת התוכנית והמשוב הבונה.
- § **חולוד חלף, נעמי חרמוני, ניהאל נאסר, גלה קוטלר ואירנה קיגל** - על עזרתן כמורות נסייניות אשר שילבו את יחידת הלימוד בכיתתן.
- § **אמירה אלוש, יוסף לבנה, רותי לפלר, גדי מדור, עדינה שיינפלד וד"ר אליאנה תפוחי** - על קריאתם את פרקי התוכנית, הערותיהם החשובות והמשוב הבונה.
- § **פרופ' אורי סיוון ראש המכון לננו-מדעים וננו-טכנולוגיה ע"ש ראסל ברי, הטכניון, חיפה ופרופ' אורי בנין, הפקולטה לכימיה, מנהל המרכז לננו-מדע וננו-טכנולוגיה, הפקולטה למדעי הטבע, האוניברסיטה העברית, ירושלים** - על תרומתם במהלך כתיבת פרק אחרית דבר.
- § **ד"ר אורית הרשקוביץ** - על תרומתה הרבה בעריכת ספר הלימוד.
- § **אמל אסמאעיל, תמר אשקר ונאל מועד** - על הסיוע בכתיבת פעילות ליחידת הלימוד במסגרת לימודיהן בקורס "בעיות נבחרות בכימיה 1". מרצה: ד"ר עירית ששון.

**עריכה לשונית:** אבשלום גינוסר

**עיצוב וגרפיקה:** נועם שושן

**עיצוב עטיפה:** טל הרשקוביץ

שותף בהוצאה לאור: יואל אייזנברג, הוצאת אח



כל הזכויות שמורות, משרד החינוך

אין לשכפל, להעתיק, לצלם, להקליט, לתרגם, לאכסן במאגר מידע, לשדר או לקלוט בכל דרך או אמצעי אלקטרוני, אופטי או מכני או אחר כל חלק שהוא מהחומר שבספר זה. שימוש מסחרי מכל סוג שהוא בחומר הכלול בספר זה אסור בהחלט אלא ברשות מפורשת בכתב מהמחברים.  
מהדורה ראשונה יולי 2007



משרד החינוך התרבות והספורט

אישור מס'

## תוכן עניינים

7	<b>פרק 1 - מזיקוקי דינור אל המבנה האלקטרוני של האטום</b>
	פירוטכניקה - הכימיה בפעולה
	האור - קרינה אלקטרומגנטית
	ספקטרום הפליטה של אטומים
	מודל בוהר לאטום המימן
	המודל הקוונטי של האטום - אורביטלים אטומיים
	אטומים רבי אלקטרונים
	שאלות לתרגול נוסף
38	<b>פרק 2 - מחומרי צבע אל המבנה האלקטרוני של מולקולות</b>
	צבעים בראי ההיסטוריה
	הקשר הקוולנטי
	תיאורית האורביטלים המולקולריים
	אורביטלים מולקולריים במולקולות רב-אטומיות
	אורביטלי HOMO - LUMO
	מולקולות אורגניות כחומרי צבע
	מולקולות מצומדות
	שאלות לתרגול נוסף
81	<b>פרק 3 - ממיקרואלקטרוניקה אל המבנה האלקטרוני של מוצקים</b>
	התקן קטן - תרומה גדולה
	מוליכים, מבדדים ומה שביניהם
	תעשיית המוליכים למחצה
	מבנה של דיודת מוליך למחצה
	שאלות לתרגול נוסף
	<b>אחרית דבר</b>
	מבט לעתיד - מרמת הננו לנוו-טכנולוגיה
	<b>דף נוסחאות</b>
	<b>טבלה מחזורית</b>

## הקדמה

תוכנית הלימודים "כימיה מכל וחול - מרמת הננו למיקרואלקטרוניקה" עוסקת בהכרת המבנה האלקטרוני של אטומים, מולקולות ומוצקים. בתוכנית תמצאו הסברים לשאלות ולתופעות רבות המוכרות לכם מחיי היום יום, הקשורות למבנה האלקטרוני של החומר, כגון:

- Ⓒ כיצד פועלים זיקוקי דינור? מה קובע את צבעם?
- Ⓒ כיצד אנו רואים צבעים? מדוע הפלמינגו ורוד?
- Ⓒ מה בין גחלילית, מקלות זוהרים וחקר החלל?
- Ⓒ מדוע משנה האינדיקטור פנולפאלאין את צבעו בתמיסה בסיסית?
- Ⓒ כיצד מנקה המלבין את החולצה הלבנה מכתמים צבעוניים?
- Ⓒ מהם מוליכים למחצה? מהם ההיבטים הכימיים בתעשיית המיקרואלקטרוניקה?

בכל אחד משלושת פרקי הספר תיחשפו לנושאי הלימוד דרך תופעה מוכרת מחיי היום יום. לתופעה זו היבטים יישומיים והיא מעוררת שאלה/בעיה. לצורך פתרון הבעיה, תידרש העמקה לאורך הפרק בתכני הלימוד הכימיים, תוך הדגשת הקשר בין מבנה החומר לבין תכונותיו. בתוכנית ניתן דגש על שילוב ייצוגי מידע מגוונים ופעילויות ממוחשבות.

בלימוד התוכנית תעברו דרך, שמתחילה בהכרת סידור האלקטרונים באטום הבודד, עוברת להכרת סידור האלקטרונים במולקולה ובצבר של אטומים במוצק, ומסתיימת בהיכרות עם עולם התעשייה המודרנית, תוך מתן דגש לקשר שבין הכימיה לבין תעשיית המיקרו-אלקטרוניקה על שימושיה המגוונים בחיי היום יום.

אנו מאחלים לכם לימוד פורה ומעניין,  
צוות הפיתוח.

# פרק 1

## מזיקוקי דינור אל המבנה

### האלקטרוני של האטום

הפרק הראשון עוסק במודלים המתארים את המבנה האלקטרוני של האטום.

בפרק זה נלמד כיצד המבנה האלקטרוני של האטום מתבטא בתופעות מחיי היום יום, כגון פליטת צבע בלהבה או זיקוקי דינור.

הפרק נפתח במידע על זיקוקי הדינור. הניסיון להבין את מקור הצבעים השונים של זיקוקי הדינור מוביל לנושא המרכזי של הפרק, המבנה האלקטרוני של האטום.



## פירוטכניקה - הכימיה בפעולה!

התבוננות במופע זיקוקי דינור הינה חוויה מרהיבה, המלווה בהופעת צבעים ססגוניים וקולות פיצוץ.

זיקוקי הדינור נוצרו לראשונה, כנראה בסין, במהלך שלטונה של שושלת סאנג (1279-960). על פי האגדה, הכל החל כאשר טבח סיני חיפש אחר תערובת חומרים שתעניק חיי נצח. בחיפושיו, גילה הטבח, שתערובת של גופרית, מלח (אשלגן חנקני) ופחם (שבשל צבעה כונתה "אבקה שחורה"), עשויה להיות מאוד דליקה וכי דחיסת התערובת עלולה להוביל לפיצוץ. השימוש הראשון בתגלית זו היה לצורכי בידור. עם שיפור מתכון "האבקה השחורה", החלו הסינים להשתמש בה גם לצרכים אחרים: במלחמתם במונגולים, הם עיצבו דרקונים עשויי עץ, שמפיותיהם נורו זיקוקים מסוג זה.

מגלי עולם הרפתקניים העבירו את הידע להכנת זיקוקים אל העולם המערבי.

זיקוקי דינור מתאפיינים בקול, אור וחום. רעם הזיקוק הנשמע הוא תוצר של שחרור האנרגיה בתגובה, שגורם לאוויר להתפשט במהירות גבוהה ממהירות הקול. החום הוא תוצאה של תגובת פיצוץ אקסותרמית.

המרכיבים הכימיים הבסיסיים בזיקוק דינור הם חומר מספק חמצן וחומרי דלק. לאספקת החמצן מקובל השימוש בתרכובות של יון מתכתי עם יון חנקתי ( $\text{NO}_3^-$ ). אשלגן חנקתי ( $\text{KNO}_3$ ) הוא הנפוץ מכולם. בתהליך פירוק החומר מתקבלים אשלגן חמצני, חנקן וחמצן. החמצן, המתקבל בתגובת פירוק המלח, מגיב מיד עם גופרית או עם פחמן (חומרי הדלק) בתגובה אקסותרמית ליצירת הגזים גופרית דו חמצנית או פחמן דו חמצני.

עד המאה ה-19, נעדר מהזיקוקים מרכיב חשוב המוכר לנו כיום והוא הססגוניות הנובעת מפליטת אור במבחר צבעים.

**מה מקנה לזיקוקים את צבעיהם האופייניים?**



התשובה לשאלה המוצגת בקטע דורשת היכרות עם מושגי "האור" ו"הצבע". לאחר שנכיר מושגים אלו, ננסה לענות על השאלה. התשובה קשורה למבנה האלקטרוני של האטום, שהוא הנושא המרכזי בפרק זה.

1. באשלגן כלורתי ( $KClO_3$ ) ואשלגן על כלורתי ( $KClO_4$ ) ניתן להשתמש כחומרים המספקים חמצן. בזמן פירוק חומרים אלו מתקבלים חמצן ואשלגן כלורי.
- א. נסחו את תגובות הפירוק של: אשלגן חנקתי, אשלגן כלורתי ואשלגן על כלורתי לקבלת חמצן גזי.
- ב. עבור כל תגובה, קבעו מיהו החומר המחמצן ומיהו המחזור. נמקו תשובתכם.

## ניסוי 1: הכנת זיקוקים

### כלים

מאזניים, כוס כימית בנפח 100 מ"ל לשקילה, כפיות, סכין, מזלף טפי, רצועות נייר (לייבוש), קערית חרסינה, חוטי מתכת באורך 25 ס"מ, משקפי מגן.

### חומרים

11 גרם בריום חנקתי  $Ba(NO_3)_2$ , 3 גרם אבקת ברזל, 3 גרם אבקת אלומיניום, 3 גרם אבקת אבץ, 3 גרם אבקת מגנזיום, 7 גרם עמילן, 5-6 טיפות מים, גפרורים.

### מהלך הניסוי

- ⊖ שיקלו את כל החומרים היבשים וערבבו אותם היטב בקערית.
- ⊖ הוסיפו את המים וערבבו. הוסיפו עוד מים לפי הצורך עד שתתקבל עיסה סמיכה.
- ⊖ מרחו שכבה דקה של עיסה, קוטר 1-2 מ"מ, על חוט מתכת.
- ⊖ קצה החוט, השאירו כ-5 ס"מ ללא התערובת.
- ⊖ הניחו את החוטים לייבוש למשך יום או יומיים.
- ⊖ הרכיבו משקפי מגן.
- ⊖ הדליקו בעזרת גפרור את הקצה המצופה של החוט (הקפידו להרחיק את הזיקוק מפניכם).

### סיכום

- תארו את תצפיותיכם.
- נסחו שלוש שאלות המתעוררות בעקבות תצפיות אלו.

## האור - קרינה אלקטרומגנטית

תופעות רבות המוכרות לנו כרוכות בהסעה של אנרגיה בחלל. כאלה הם: גלי הרדיו, גלי ראדאר, חום (גלי אינפרא-אדום), האור הנראה לעין, אור אולטרא-סגול, קרינת רנטגן, גלי מיקרו ועוד. לתופעות אלה מכנה משותף: כולן, ביטויים שונים של קרינה "אלקטרומגנטית". האור הנראה הוא סוג של קרינה אלקטרומגנטית.

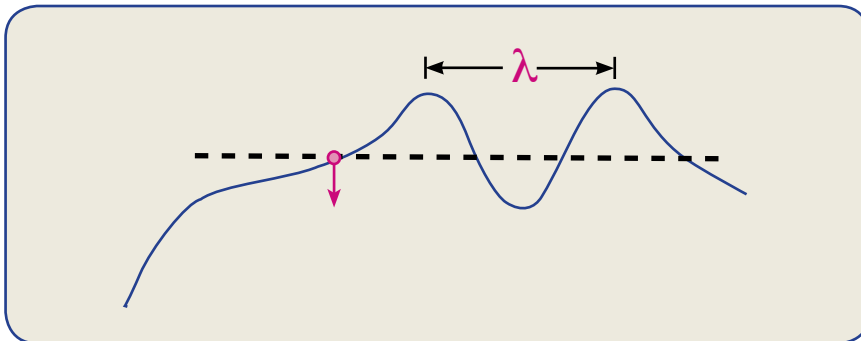
אנרגיית השמש מועברת אל כדור הארץ כקרינה אלקטרומגנטית, שמקורה בתהליכים שונים המתרחשים על פני השמש ובתוכה. חלק מהקרינה מגיע לכדור הארץ כאור נראה, שעין האדם רגישה אליו. חלק מהקרינה הוא בלתי נראה לעינינו.

מהמאה ה-17 ועד המאה ה-19, התנהל ויכוח בין המדענים ביחס למהות האור. המדען האנגלי אייזיק ניוטון (I. Newton) טען, שהאור הוא זרם של חלקיקים קטנים הנעים בקווים ישרים במהירות קבועה. לעומת זאת, טען המדען ההולנדי היוגנס (C. Huygens), שהאור הוא גל אשר מתפשט במרחב. כיום, מקובל להתייחס לאור בפרט ולקרינה האלקטרומגנטית בכלל על פי מודל דואלי הכולל את שתי התיאוריות: התיאוריה החלקיקית והתיאוריה הגלית. התפשטות האור במרחב מוסברת על ידי התנהגותו כגל. באינטראקציה בין האור לחלקיקי חומר, כגון אטומים או מולקולות, מתגלה לעיתים אופיו החלקיקי.

על פי המודל הגלי, מתייחסים אל הקרינה האלקטרומגנטית כאל הפרעה המועברת במרחב בצורה מחזורית. בעוד שגלי ים וגלי קול מועברים בתווך - מים או אוויר, גלים אלקטרומגנטיים מועברים גם בריק. מהירות תנועתם בריק היא מהירות האור (כ-300,000 ק"מ לשנייה).

גלים שונים מאופיינים על פי "אורכי גל" שונים. אורך הגל הוא המרחק בין שתי נקודות דומות במסלול המחזורי של הגל. למשל, בין שתי "פסגות עוקבות" של השדה החשמלי הנוצר עם ההתקדמות של הגל האלקטרומגנטי. אורך הגל מסומן באות היוונית  $\lambda$  (למדה). לצורך המחשה, באיור 1 מתואר גל הנוצר במיתר מתנדנד.

איור 1: אורך גל במיתר מתנדנד



### פעילות - היכן "מסתתרים" כל צבעי הקשת?

האור מגיע אלינו באופן טבעי מהשמש. התבוננו סביבכם, האור המופץ מהשמש וממנורות רגילות הוא אור לבן. אם כן, היכן "מסתתרים" כל צבעי הקשת?

- Ⓒ הרכיבו את משקפי הספקטרום והתבוננו אל מקור האור בחדר.
- Ⓒ תארו מה אתם רואים.
- Ⓒ אלו תופעות מוכרות מחיי היום יום מראה זה מזכיר לכם?



משך הזמן שבו מתקדם הגל מפיסגה לפיסגה נקרא "זמן המחזור" ומסומן באות T. כאמור, בריק, מתקדם הגל במהירות האור  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/sec}$  ולפיכך הקשר בין זמן המחזור לאורך הגל מבוטא באמצעות הנוסחה  $T = \frac{\lambda}{c}$ . מספר המחזורים בשניה נקרא תדירות הגל, מסומן באות  $\nu$  (ני) ונמדד ביחידות הרץ ( $1\text{Hz} = 1/\text{sec}$ ) הקשר בין אורך הגל לתדירות הוא:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad \text{נוסחה 1}$$

$\nu$  (ני) - תדירות הגל - מספר המחזורים בשנייה, יחידות הרץ,  $\text{Hz} = 1/\text{sec}$   
 C - מהירות האור:  $3 \times 10^8 \text{ m/sec}$   
 $\lambda$  - אורך גל

שימו

הקשר בין תדירות, זמן מחזור ואורך גל:  $\frac{1}{T} = \frac{c}{\lambda}$ .

האור הלבן הנפלט מן השמש מכיל את כל צבעי הקשת, כלומר את כל אורכי הגל המתאימים להם. כיצד אם כן מקבלים עצמים את צבעם בהשפעת האור הלבן?

בתהליך הראיה, עין האדם מסוגלת להבחין באורכי גל שונים של קרינה הפוגעת ברשתית בתחום האור הנראה (אורכי גל בין 390 ל-740 nm (ננומטר). אורכי גל שונים מתורגמים בתהליך הראיה לצבעים שונים.

מעבר בין יחידות אורך:  $1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$

הטבלה הבאה מתארת את אורכי הגל השונים על פי צבע האור הנראה

טבלת צבעים ואורכי גל

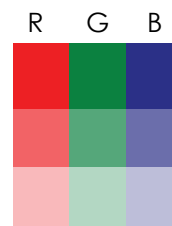
אורך גל (nm)	צבע
390 - 455	סגול
455 - 492	כחול
492 - 577	ירוק
577 - 597	צהוב
597 - 622	כתום
622 - 780	אדום



## פעילות ממוחשבת 1 - שלושת צבעי היסוד

היכנסו לאתר: <http://science.cet.ac.il/science/colors/color2.asp>

- "הדליקו" את מקרני האור של שלושת הצבעים להארה מקסימלית, על ידי הזזת הסמנים הנמצאים מתחת למקרנים ימינה.
- הזיזו את שלושת עיגולי האור בעזרת העכבר, כך שיחפפו מעט, ושימו לב לצבעים המתקבלים באזורי החפיפה.
- הזיזו את העיגול האדום והירוק בלבד וצרו חפיפה חלקית ביניהם.
- הפחיתו את עוצמת התאורה של המקרן הירוק והתבוננו בשינוי הצבע הנוצר באזור החפיפה.
- החזירו את עוצמת התאורה של המקרן הירוק לתאורה מקסימלית והפחיתו את עוצמת התאורה של המקרן האדום. התבוננו בשינוי הצבע הנוצר באזור החפיפה.
- בצעו ניסוי דומה על ידי חפיפה של העיגול האדום והכחול ועל ידי חפיפה של העיגול הכחול והירוק.



1. סכמו את מסקנותיכם מהפעילות על ידי השלמת המשפטים הבאים:

שלושת צבעי היסוד הם: \_\_\_\_\_

בערבוב של אור אדום עם אור כחול מתקבל הצבע \_\_\_\_\_

בערבוב של אור אדום עם אור ירוק מתקבל הצבע \_\_\_\_\_

בערבוב של אור כחול עם אור ירוק מתקבל הצבע \_\_\_\_\_

בערבוב של כל שלושת צבעי היסוד מתקבל אור בצבע \_\_\_\_\_

בתחתית העמוד, תחת הכותרת "גלו בעצמכם", הקישו על הקישור אל: "אל תוך הצבע".

2. סכמו במספר מילים כיצד עובדת שיטת ה- RGB במחשב ובטלוויזיה הצבעונית.

הפעילו את ההדמיה ובצעו את הפעילות.

3. נסו ליצור את הצבע החום הכתוב במילה "אתגר". רשמו מהם ערכי שלושת צבעי היסוד המתאימים והשוו תשובתכם לתשובה בהמשך העמוד.



## סוגי קרינה אלקטרומגנטית

במסגרת המודל החלקיקי, מתוארת הקרינה האלקטרומגנטית כזרם של חלקיקים הנקראים פוטונים (פירוש המילה פוטו בלטינית הוא אור). הפוטון הוא חלקיק נושא אנרגיה, שנע במהירות האור. המיון לקבוצות השונות של הקרינה האלקטרומגנטית (ולצבעים השונים של האור הנראה) נקבע על פי מנת האנרגיה שנושא עמו כל פוטון. הקשר בין התיאור החלקיקי לתיאור הגלי של הקרינה האלקטרומגנטית נוסח על ידי מקס פלאנק ב-1900: מנת האנרגיה של פוטון קשורה ישירות לתדירות הגל, על פי הנוסחה:

$$E = h\nu \quad \text{נוסחה 2}$$

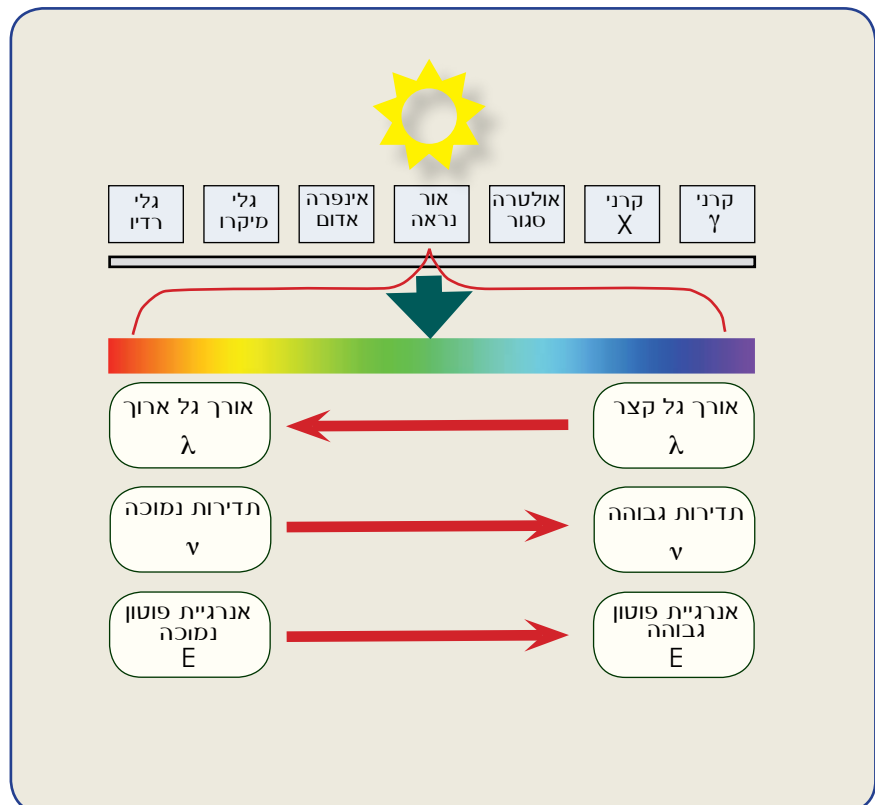
$$E = \text{אנרגיה של מנת קרינה (פוטון) הנמדדת בג'אול J}$$

$$h = \text{קבוע פלנק אשר ערכו } 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ Jsec}$$

$$\nu = \text{תדירות הקרינה אשר יחידותיה } 1/\text{sec}$$

באיור 2 מוצגים סוגי הקרינה האלקטרומגנטית והקשר בין סוג הקרינה, אורך הגל, התדירות והאנרגיה.

איור 2: סוגי הקרינה האלקטרומגנטית



רשע הסטורי

מקס לודוויג, פלאנק

(1858-1947) היה פיזיקאי

גרמני מאבות מכניקת

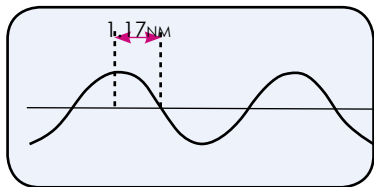
הקוונטים. מקור שמה של תורה

זו הוא מהמילה quanta

שפירושה בלטינית מנה, כמות.



## זמן תרגול 1: אורך גל, תדירות ואנרגיה



1. לפניכם ציור היפותטי של גל אלקטרומגנטי. חשבו את אורך הגל המתואר ואת תדירותו.
2. שידורי הרדיו של תחנת "גלי צה"ל" משודרים בתדירות של  $96,600 \text{ Hz}$ . מה אורך הגל בקילומטרים של גלי רדיו אלו?
3. כאמור, תחום האור הנראה הוא בין  $390 - 780 \text{ nm}$ . מהו תחום התדירויות של האור הנראה?
4. כלורופיל הוא חומר המצוי בעלים. חומר זה קולט אור באנרגיה של  $3.056 \cdot 10^{-19} \text{ J/photon}$ .
  - א. לאיזו תדירות מתאימה כמות אנרגיה זו?
  - ב. מהו אורך הגל המתאים לערך התדירות שחישבת בסעיף א'?
  - ג. היעדרו בטבלת הצבעים ושערו האם ניתן לגדל צמחים ירוקים המכילים כלורופיל תחת מנורה אדומה בלבד?

### כדאי לדעת... חזרה אל משקפי הספקטרום...

מהירות האור העובר במדיום כלשהו נמוכה ממהירותו בריק. לאור מהירות שונה בכל מדיום. בנוסף לכך, גלים בעלי אורכי גל שונים, שונים זה מזה גם במהירותם במדיום. כתוצאה מכך, נשברות קרני האור במעברן מהאוויר למנסרה והאור מתפצל לצבעים השונים.

### שימו לב ליחידות המתאימות בחישובים!

#### סיכום בית

בתחילת הפרק נשאלה השאלה: מה מקנה לזיקוקים את צבעיהם האופייניים? למדנו, כי הצבעוניות קשורה לפליטת אור באורכי גל שונים (או תדירויות שונות). בתהליך הבעירה של זיקוקים מתרחשת תגובת חימצון אקסותרמית המלווה בפליטת אור. אך מהו המרכיב הכימי שקובע איזה צבע ייפלט?

## זמן תרגול 2: צבעים בזיקוקי דינור

לאחר היכרות קצרה עם מושגי האור והצבע, ננסה להבין מהו מקור צבעיהם הססגוניים של זיקוקי דינור. לפניכם טבלה ובה פירוט המרכיבים הכימיים של מספר תערובות המשמשות בזיקוקי דינור והצבע הנפלט בעת בעירתן:

ניסוי מס'	מרכיבי הזיקוק	צבע
1	סטרונציום פחמתי ( $\text{SrCO}_3$ ), אשלגן חנקתי ( $\text{KNO}_3$ ) וחומרי דלק	אדום
2	נחושת כלורית ( $\text{CuCl}_2$ ), אשלגן כלורתי ( $\text{KClO}_3$ ) וחומרי דלק	כחול
3	סידן פחמתי ( $\text{CaCO}_3$ ), אשלגן חנקתי ( $\text{KNO}_3$ ) וחומרי דלק	כתום
4	נחושת גופרתית ( $\text{CuSO}_4$ ), אשלגן כלורתי ( $\text{KClO}_3$ ) וחומרי דלק	כחול
5	סטרונציום כלורי ( $\text{SrCl}_2$ ), אשלגן כלורתי ( $\text{KClO}_3$ ) וחומרי דלק	אדום
6	נחושת גופרתית ( $\text{CuSO}_4$ ), אשלגן חנקתי ( $\text{KNO}_3$ ) וחומרי דלק	כחול

1. א. קבעו מיהו החומר המספק חמצן בכל אחת משש התערובות בששת הניסויים שבוצעו.
- ב. קבעו מהו החומר הגורם להופעת כל אחד מהצבעים: כתום, כחול ואדום.
- ג. מה משותף לחומרים אלו?
2. השלימו את המשפט: זיקוק המכיל סידן גופרתי ( $\text{CaSO}_4$ ), אשלגן חנקתי ( $\text{KNO}_3$ ) וחומרי דלק יפיץ אור בצבע \_\_\_\_\_
3. מהו המרכיב הכימי הקובע את צבעו של זיקוק דינור?

### שימואל:

לפני הדלקת המלחים חשוב להסיר את הכפפות מחשש לדליקה.

## ניסוי מס' 2: בעירת מלחים בגל

### חומרים

תמיסה רוויה של סידן אצטט ( $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ ), אתאנול ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ), מעט גבישים של מלח בישול ( $\text{NaCl}$ ), סטרונציום כלורי ( $\text{SrCl}_2$ ), נחושת כלורית ( $\text{CuCl}_2$ ), בריום כלורי ( $\text{BaCl}_2$ ), ליתיום כלורי ( $\text{LiCl}$ ), סידן כלורי ( $\text{CaCl}_2$ ).

### כלים

7 תחתיות עגולות לנרות עשויות אלומיניום, משורה בנפח 10 מ"ל, משורה בנפח 50 מ"ל, כורית חרסין, ספטולות, גפרורים וכפפות חד פעמיות.

### מהלך הניסוי

מדדו במשורות מתאימות 8 מ"ל תמיסה רוויה של סידן אצטט ו-30 מ"ל אתאנול.

- ⊖ שפכו את הנוזלים לכורית כשידיכם עטופות כפפות.
  - ⊖ לושו את הגיל המתקבל, הכינו ממנו שני כדורים והניחו כל אחד מהם בתחתית אלומיניום של נר.
  - ⊖ חזרו על הפעולה כך שיתקבלו 7 כדורי גיל.
- הניחו את כל כדורי הגיל על מגש אלומיניום. בשישה מהכדורים הכינו שקע קטן בעזרת האגודל. הניחו בכל שקע מעט גבישים של אחד המלחים. כדור גיל אחד השאירו ללא גבישי מלח. הבעירו את כדורי הגיל וצפו בצבעי הלהבות.

### סיכום

השלימו את הטבלה הבאה בהתאם לתצפיותיכם:

צבע הלהבה	החומר הנשרף
	כוחל
	כוחל + $\text{NaCl}$
	כוחל + $\text{SrCl}_2$
	כוחל + $\text{CuCl}_2$
	כוחל + $\text{BaCl}_2$
	כוחל + $\text{LiCl}$
	כוחל + $\text{CaCl}_2$

מה תוכלו להסיק מתצפיותיכם?

## סיכום פנימי

אם כן, יוני המתכות בזיקוקי הדינור הם האחראים להופעת הצבע. כיצד פולטים אטומי המתכת אור? מדוע מתכות שונות פולטות אור בצבעים שונים? התשובות לשאלות אלו דורשות העמקה במבנה האטום. האטום הוא החלקיק הקטן ביותר של היסוד. מהם מימדי האטום? מהו המבנה הפנימי שלו?

## זמן תרגול 3: מרמת הננו למרחקים אסטרונומיים



בחיי היום יום, אנו רגילים למדוד ממדי אורך במטרים, סנטימטרים או קילומטרים. אך מהם הממדים המתאימים לגודלם של אטומים ומולקולות? יחידת האורך המתאימה לתיאור גודל האטום היא האנגסטרם

$$1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ מטר}$$

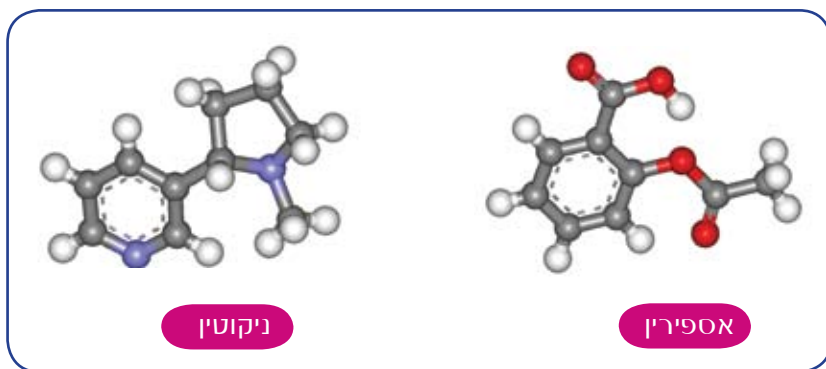
יחידת האורך המתאימה לתיאור מולקולה ובה מספר אטומים היא הננו-מטר

$$1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ מטר}$$

1. היעזרו במקורות מידע וענו על השאלות הבאות:

- מהו הרדיוס האטומי של אטומי יסודות השורה השנייה: ליתיום Li, בריליום Be, פחמן C, חנקן N וחמצן O? מהי מגמת השינוי ברדיוס האטומי לאורך השורה? הסבירו.
- מהו הרדיוס האטומי של אטומי היסודות: אשלגן K, רובידיום Rb, עופרת Pb? מהי מגמת השינוי ברדיוס האטומי לאורך הטור? הסבירו.

2. לפניכם מודלים של מולקולות הסם ניקוטין והתרופה אספירין (צבעי הכדורים מייצגים אטומים שונים: אפור מייצג אטום פחמן, לבן אטום מימן, אדום אטום חמצן וכחול מייצג אטום חנקן):



השתמשו בנתוני הרדיוסים האטומיים שמצאתם בשאלה הקודמת והעריכו מהו אורכן של מולקולות אלו?

## פעילות ממוחשבת 2 - המחשת סדרי גודל

בפעילות זו ננסה להמחיש סדרי גודל שונים. היכנסו לקישור הבא:

<http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/slieuceopticsu/Powers.of.Ten/index.html>

הפעילות מתחילה מנקודה רחוקה בחלל בכ- $10^{23}$  מטר מכדור הארץ, ויורדת בסדרי הגודל עד ל- $10^{-14}$  מטר, תוך כדי "התבוננות לתוך" החומר.

בתום צפייה רציפה באנימציה, הפעילו את הפעילות באופן ידני, ע"י לחיצה על MANUAL, וענו על השאלות הבאות:

3. השלימו את נתונים בטבלה הבאה:

אורך ב -		עצם
יחידות של ננומטר	יחידות של שנות אור או חזקות של 10 מטר/ק"מ	
		נקודת התחלה בתצוגה
		הגלקסיה שלנו
		מערכת השמש
		מסלול הקפת הירח
		קוטר כדור הארץ
		מדינת פלורידה
		ענף של עץ
		תא בעלה
		מולקולת DNA
		אטום פחמן
		גרעין אטום
		פרוטון
		קוורקים

שימו לב:  $1\text{m} = 10^9\text{nm}$

4. מהם סדרי הגודל של מרחקים אסטרונומיים?

5. מהם ממדי האורך הנוחים לשימוש בביולוגיה מולקולרית?

6. מהם ממדי האורך הנוחים לשימוש בכימיה?

כצאילרעס

שנת אור היא יחידת מידה לאורך המשמשת באסטרונומיה לחישוב מרחקים בין גרמי שמים ברחבי היקום. שנת אור אחת שווה למרחק שהאור עובר בריק (ואקום) במשך 365.25 יום בדיוק (31,557,600 שניות).

## ספקטרום הפליטה של אטומים

האור, המגיע אלינו מהשמש או ממנורת להט רגילה, נובע ממספר רב של תהליכים המתרחשים בו זמנית ולכן מכיל גלים בעלי אורכי גל רבים ושונים. ספקטרום אור כזה נקרא רציף. אם מקור האור פולט מספר מצומצם של אורכי גל שונים, כמו במקרה של מנורות ניאון או כספית, יקרא הספקטרום קווי או בדיד. נהוג להציג את הספקטרום הקווי של אטומים כאוסף קווים בצבעי הפליטה השונים, אשר ביניהם רווחים.

### ניסוי 3: צפייה בספקטרום רציף וקווי

#### ציוד

ספקטרומטר, סריג, פנס, מנורת ניאון, מנורת כספית (שימו לב: התבוננות ישירה במנורת הכספית מסוכנת. הקפידו לבדוק שמכסה ההגנה סגור), משקפי מגן.

#### מהלך הניסוי

חברו את חלקי הספקטרומטר והניחו את הסריג בחלקו הקדמי. הרכיבו משקפי מגן.

#### שלב א':

הציבו בחלקו האחורי של הספקטרומטר פנס המאיר אור לבן. התבוננו דרך הסריג. תארו את תצפיותיכם.

#### שלב ב':

הציבו בחלקו האחורי של הספקטרומטר מנורת ניאון. התבוננו דרך הסריג. מה אתם רואים כעת? במה שונה מראה זה מן המראה דרך הסריג עליו מאיר הפנס? הציבו בחלקו האחורי של הספקטרומטר מנורת כספית. התבוננו דרך הסריג. תארו את תצפיותיכם.

#### סיכום

נסחו שאלות המתעוררות בעקבות תצפיותיכם בניסוי זה.

כדאי לדעת -

ננו

הקידומת "ננו" (מקורה הלשוני: "ננוס" ביוונית או "ננס" בעברית) קשורה ליחידת האורך "נומטר", שהיא מיליונית המילימטר או אלפית המיקרון, כגודל מולקולות מסוימות. קנה מידה זה הופך יותר ויותר רלוונטי בפיתוחים טכנולוגיים מתקדמים, שבהם יש ניסיון לארגן או להרכיב אטומים או מולקולות בודדות למבנים פונקציונאליים.

כדאי לדעת -

#### ספקטרום אטומי וגילוי יסודות

לכל יסוד בטבע ספקטרום קווי ייחודי ואופייני לו כטביעת אצבעות, המעיד על המבנה האלקטרוני הייחודי שלו. לדוגמה, בשנת 1860 גילו רוברט בונזן (Robert Bunsen) וגוסטב קירכהוף (Gustav Kirchhoff) יסוד חדש על פי הספקטרום הקווי האופייני לו. הספקטרום כלל צבע כחול ולכן נקרא היסוד בשם צזיום שמקורו במילה הלטינית Caesius, שמשמעותה כחול. בדרך דומה, גילו חוקרים אלו את היסוד רובידיום בשנת 1861. פירוש המילה Rubidius בלטינית הוא אדום עמוק, בהתאם לספקטרום האטומי שהתקבל מיסוד זה. היסוד הליום נתגלה בקרינת השמש עוד לפני שבודד על פני כדור הארץ. בשנת 1868 נראה הספקטרום הקווי של היסוד הליום בזמן ליקוי מאורות. פירוש המילה היוונית Helios הוא שמש.



### פעילות ממוחשבת 3 - ספקטרום אטומי של יסודות

לצפייה בספקטרום האטומי של היסודות השונים, היכנסו לאתר האינטרנט בכתובת הבאה:

<http://astro.u-strasbg.fr/~koppen/discharge/>

עיינו בטבלה המופיעה מתחת לתמונות וקבעו:

1. לאיזה מבין היסודות המספר המועט ביותר של קווי ספקטרום פליטה (באור הנראה)?

2. לאיזה מבין היסודות בטבלה המספר הרב ביותר של קווי ספקטרום פליטה (באור הנראה)?

3. לפניכם מספר ערכים של אורכי גל המתאימים לקווי הספקטרום של היסוד סידן:

א. 392.3nm      ב. 429.9 nm      ג. 612.2 nm

I. לגבי כל אחד מקווי הספקטרום, קבעו באיזה צבע הוא נראה לעינינו.

היעזרו בטבלת הצבעים ואורכי הגל שבעמוד 5.

II. לגבי כל אחד מקווי הספקטרום, חשבו את התדירות המתאימה לו ואת מנת האנרגיה הנפלטת.

כצא/צא -

#### כימיה בין כוכבים...

האסטרונומים חוקרים את ההרכב הכימי של הכוכבים בעזרת ניתוח האור המגיע מהם. הדרך העיקרית לקבלת המידע על העצמים האסטרונומיים היא השימוש בטכניקת הספקטרוסקופיה - כל השיטות הספקטרוסקופיות מבוססות על ההבדלים בבליעה או בפליטה של קרינה אלקטרומגנטית על-ידי חומרים שונים. מדידת הספקטרום הקווי מצביעה על היסודות שמרכיבים את מקור הקרינה. יותר מכך, ניתן לדעת באיזה מצב הם נמצאים - מולקולות, אטומים בודדים, או יונים. כמו כן, ניתן לקבל מידע על מהירותו של העצם הפולט בחלל (אפקט דופלר). כאשר מקור קרינה מתרחק מאתנו, אורכי הגל נמדדים אצלנו כארוכים יותר, תופעה זו נקראת "הסחה לאדום". כאשר המקור מתקרב אלינו, אורכי הגל נמדדים אצלנו כקצרים יותר, תופעה הנקראת "הסחה לכחול". מדידות של הסחת קווי ספקטרום הפליטה מעצם אסטרונומי מלמדות על כיוון תנועתו ביחס אלינו.

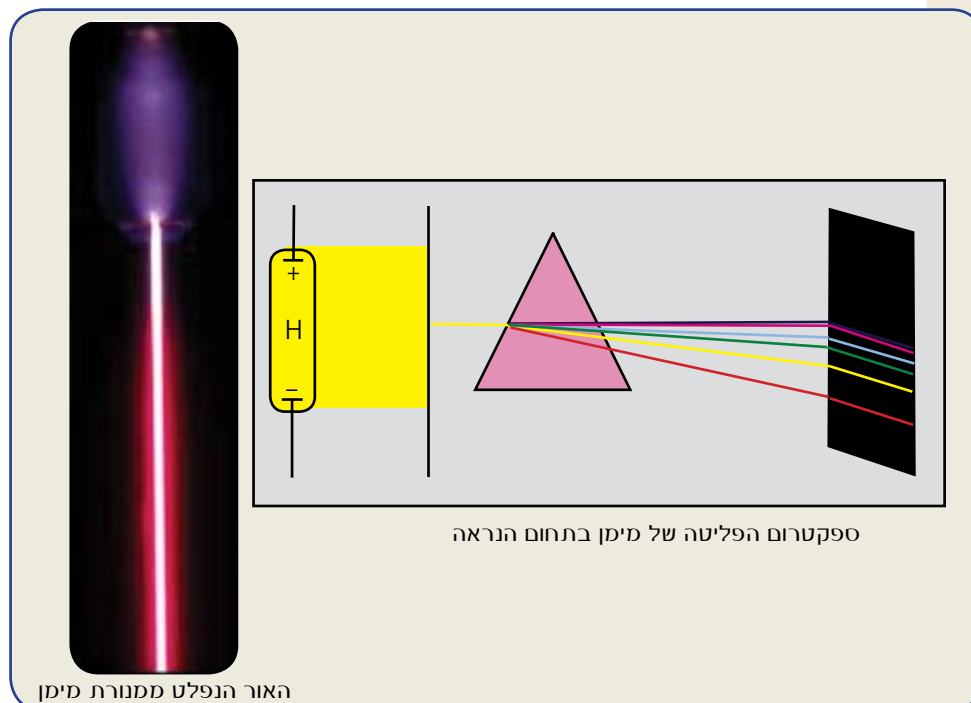


## מודל בוהר לאטום המימן

הניסויים בהם צפיתם מעידים, כי לאטומים שונים יש ספקטרום קווי האופייני להם. נשאלת השאלה מדוע פולט אטום ספקטרום קווי ולא רציף? כפי שלמדנו, קווי ספקטרום מסוימים מתאימים לאורכי גל מסוימים (לפי המודל הגלי) או למנות אנרגיה מסוימות (פוטונים) על פי המודל החלקיקי. ניתן לפיכך לנסח את השאלה: מדוע פולט אטום מסוים פוטונים מסוימים ולא אחרים? התשובה לשאלה זו נעוצה במבנה האטום ותשמש גם בסיס להבנת המבנה האלקטרוני של תרכובות מורכבות יותר, שבהן נדון בהמשך התוכנית. המדען הראשון שהציע תשובה לשאלה היה נילס בוהר, בשנת 1913.

חוקרים רבים התבוננו בספקטרום הקווי של היסוד מימן, הפשוט מבין האטומים, המכיל אלקטרון אחד בלבד. מנורת מימן מפיצה אור הנקלט בעין האדם כגוון סגול, אך כאשר מעוררים אטומי גז מימן הנמצאים בלחץ נמוך, מתקבל ספקטרום קווי הכולל מספר קווים בתחום הנראה, כפי שניתן לראות באיור 3.

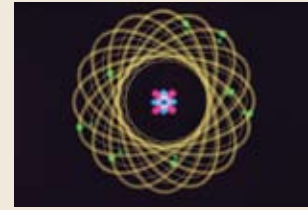
איור 3: האור הנפלט ממנורת מימן וספקטרום הפליטה של אטומי מימן



האור הנפלט ממנורת מימן

בתחומים שונים של הקרינה האלקטרומגנטית מתקבלים קווי פליטה שונים בספקטרום של אטום המימן. סדרות הקווים נקראות על שם המדענים אשר גילו אותם. בתחום הנראה נקראת הסידרה על שם בלמר (Balmer), בתחום הקרינה האולטרה סגולה נקראת הסידרה על שם לימן (Lyman) ובתחום הקרינה האינפרא אדומה היא נקראת על שם פשן (Paschen).

בשנת 1885 גילה המדען יוהאן בלמר (Johann Balmer) את סידרת הקווים השונים המתקבלים בתחום האור הנראה. התדירויות המתאימות לקווי הפליטה השונים בתחום זה מתאימות לנוסחה הבאה:



רצף היסטורי

נילס הנריק דויד בוהר

נילס (1885 - 1962) פיזיקאי יהודי דני, אשר תרם רבות להבנת מבנה האטום והיה מאבות מכניקת הקוונטים. מספרים כי בוהר הצעיר עסק לא רק בפיסיקה אלה גם בכדורגל. בוהר הוא הכדורגלן הראשון והאחרון שזכה בפרס נובל.



בול ממונגוליה משנת 1977 המתאר את הספקטרום

### סדרת בלמר Balmer

$$\nu = 3.2881 \times 10^{15} \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$
$$n > 2$$

$\nu$  - תדירות הגל של קו, ביחידות של Hz  
 $n$  מקבל ערכים טבעיים (שלמים וחיוביים) מעל 2.  
(כדי לחשב את תדירות הקו הראשון יש להציב  $n=3$ ,  
עבור הקו השני יש להציב  $n=4$  וכן הלאה).

קווי הספקטרום של אטום המימן בתחום האולטרה סגול (UV) מתאימים לנוסחה דומה:

### סדרת לימן Lyman

$$\nu = 3.2881 \times 10^{15} \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$
$$n > 1$$

וכך גם קווי הספקטרום של אטום המימן בתחום האינפרא אדום, (IR) מתאימים לנוסחה:

### סדרת פשן Paschen

$$\nu = 3.2881 \times 10^{15} \left( \frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$
$$n > 3$$

מתברר, ששלוש סדרות הקווים שבספקטרום הפליטה של אטום המימן, מתאימות לנוסחה כללית אחת - נוסחת רידברג, על שם המדען שהציע אותה:

### נוסחה 3

$$\nu = 3.2881 \times 10^{15} \left( \frac{1}{n_a^2} - \frac{1}{n_b^2} \right)$$
$$n_a < n_b$$

$n_a=1$  בסדרת Lyman בתחום ה-UV  
 $n_a=2$  בסדרת Balmer בתחום האור הנראה  
 $n_a=3$  בסדרת Paschen בתחום ה-IR

## שינוי א2

כאשר  $h$  שואף לאין סוף, האנרגיה שואפת לאפס. מצב זה מגדיר אלקטרון שנמצא במרחק אינסופי מהגרעין (אלקטרון לא קשור). אלקטרון הקשור לגרעין יהיה בעל אנרגיה שלילית וככל שהוא קרוב לגרעין, ערך האנרגיה שלילי יותר.

במשך שנים רבות, לא הצליחו אנשי המדע להסביר את התוצאות הניסויים המתקבלות בספקטרום הקווי של אטום המימן. מודל האטום, אשר הוצע על ידי רתרפורד בשנת 1911, קבע, כי רוב מסת האטום וכל המטען החיובי שלו מרוכזים בגרעין והאלקטרונים נמצאים בתנועה מתמדת ותופסים את מרבית נפח האטום. לא די היה במודל זה על מנת להסביר את הספקטרום האטומי של היסודות. החוקיות המתמטית הפשוטה יחסית, שנמצאה מתאימה לחישוב תדירות הסדרות השונות בקווי הפליטה של אטום המימן, העסיקה רבים בניסיון למצוא מודל מתאים של מבנה האטום. בשנת 1913 הציע נילס בוהר (Niels Bohr) פתרון אפשרי לתעלומה.

בוהר הציע מודל, שעל פיו האלקטרון סובב סביב הגרעין החיובי במסלולים מעגליים מסוימים ה"מותרים" לתנועתו. בכל מסלול כזה, המרחק בין האלקטרון (הטעון שלילית) לגרעין (החיובי) שונה. ככל שהמסלול קרוב לגרעין המטענים המנוגדים קרובים יותר זה לזה והאנרגיה של האלקטרון קטנה (נדרשת השקעת אנרגיה על מנת להרחיק את האלקטרון מהגרעין). מסלולי האלקטרון ממוספרים ( $n=1,2,3,\dots$ ) לפי קרבתם לגרעין, כך שהמסלול שעבורו  $n=1$  הוא הקרוב ביותר אל הגרעין. על פי מודל בוהר, רדיוס המעגל המתאים למסלול זה הוא  $0.529\text{\AA}$  ונקרא "רדיוס בוהר". הנוסחה לחישוב האנרגיה במסלולים השונים, או רמות האנרגיה של האלקטרון, היא:

### נוסחה 4

$$E_n = -\frac{R}{n^2}$$

$R$  הוא קבוע שערכו על פי מודל בוהר:

$$R = 2.18 \times 10^{-18} \text{ J} = 13.6 \text{ eV}$$

במצב היסודי, האלקטרון באטום המימן נמצא ברמת האנרגיה הנמוכה ביותר,  $n=1$ . כאשר מקבל האלקטרון אנרגיה מסביבתו (על ידי בליעת קרינה. או התנגשות בחלקיק אחר), האטום מעורר והאלקטרון עובר לרמות גבוהות יותר ( $n=2,3,\dots$ ). כאשר האלקטרון חוזר מרמת אנרגיה גבוהה ( $n_b$ ) לנמוכה ( $n_a$ ) הוא פולט אנרגיה בשיעור הזהה להפרש האנרגיה בין הרמות. בתהליך נשמרת האנרגיה ולכן,

### נוסחה 5

$$h\nu = -(E_{n_a} - E_{n_b})$$

ומכאן, האנרגיה שעשוי לפלוט אטום מימן מעורר במעבר מרמה  $n_b$  לרמה  $n_a$  הן:

### נוסחה ב5

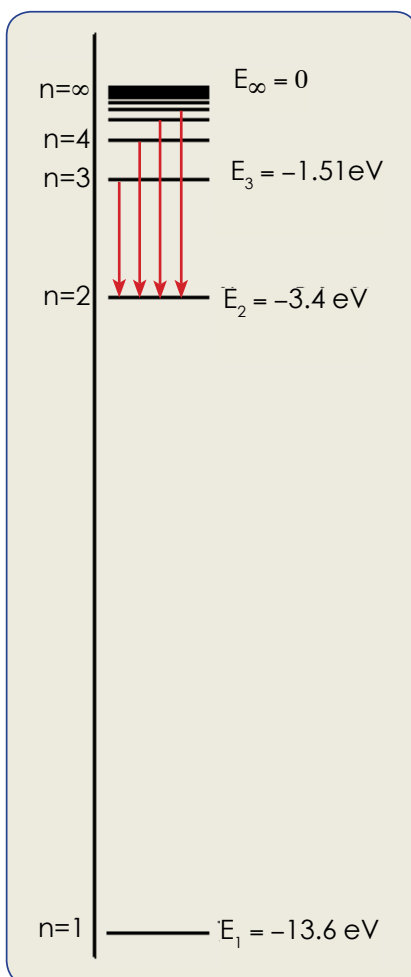
$$h\nu = R \left( \frac{1}{n_a} - \frac{1}{n_b} \right)$$

אם נחלק את הקבוע  $R$  בערך של קבוע פלנק  $h$ , נוכל לראות כי נוסחה ב5 זהה לנוסחה 3. המסקנה היא, כי המודל התיאורטי שהוצע על ידי בוהר מתאים בדיוק לתיאור המדידות של הסדרות השונות שהתגלו בספקטרום הפליטה של אטום המימן!

הבנת היערכות האלקטרון ברמות אנרגיה באטום המימן איפשרה הסבר של תוצאות הניסוי והמדידות של הספקטרום האטומי. נמצא, כי סידרת לימן מתקבלת בעירור האלקטרון לרמות גבוהות וחזרתו לרמת האנרגיה הראשונה ( $n=1$ ). סידרת בלמר מתקבלת מעירור של האלקטרון לרמות גבוהות וחזרתו לרמת האנרגיה השנייה ( $n=2$ ) ובסידרת פשן חוזר האלקטרון המעורר לרמת האנרגיה השלישית ( $n=3$ ).

איור 4 הינו גרף לדוגמא, המתאר את סידרת בלמר באטום המימן.

איור 4: דיאגרמת רמות האנרגיה עבור סידרת בלמר באטום המימן



כדאילוסטר

מעברים בין יחידות למדידת

אנרגיה:

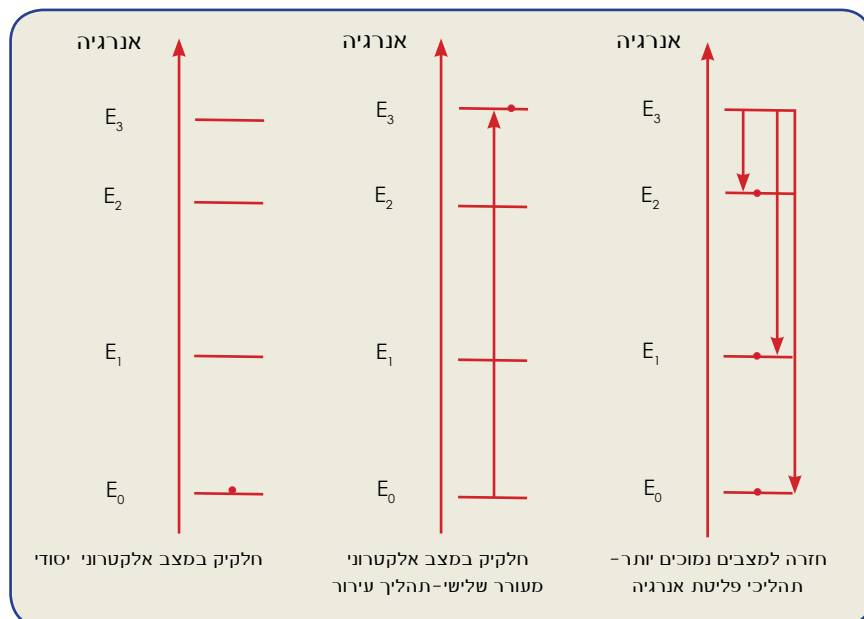
$$1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{J}$$

הצלחתו המדהימה של בוהר הייתה מוגבלת לאטום המימן בלבד. עם זאת, העקרונות שהציע היוו בסיס לתיאוריה הקוונטית של מבנה האטום המקובלת כיום. על פי תיאוריה זו, נמצאים האלקטרונים בכל אטום ברמות אנרגיה בדידות. אמנם האלקטרונים לא נעים סביב הגרעין במסלולים, אלא מתוארים בעזרת אורביטלים, כפי שנלמד בהמשך, אך בדומה להנחתו של בוהר, ככל שהאלקטרונים הטעונים מטען שלילי ממוקמים רחוק יותר מהגרעין בעל המטען החיובי, האנרגיה שלהם גבוהה יותר. רמות האנרגיה תלויות בסוג האטום (במטען הגרעין ובמספר האלקטרונים), ולכן ההפרשים בין הרמות, המתגלים בספקטרום הקווי, משתנים בין יסוד ליסוד. האנרגיה של אלקטרון באטום עשויה לרדת עקב פליטה של פוטון או לעלות על ידי בליעה של פוטון. במהלך בליעה מנוצלת אנרגיית הפוטונים הנבלעים לעלייה במצב האנרגטי של החלקיק. חלקיק, שהיה במצב אנרגטי  $E_1$ , עולה למצב אנרגטי  $E_2$ . אנרגיית הפוטון הנבלע צריכה להיות שווה במדויק להפרש בין שתי רמות האנרגיה כדי שהתהליך יתבצע, כך שמתקיים:

$$h\nu = E_2 - E_1$$

תהליך הבליעה כרוך בירידת עוצמת הקרינה מכיוון שחלק מהפוטונים נבלעו על ידי החלקיק. חלקיק שבלע פוטונים נמצא במצב אנרגטי מעורר. מצב זה אינו יציב בדרך כלל ולכן החלקיק יחזור למצב אנרגטי בעל אנרגיה נמוכה יותר, תוך פליטת עודף האנרגיה בצורת פוטונים. מכיוון שרמות האנרגיה באטום מוגדרות היטב, ספקטרום הפליטה מורכב מסידרת קווים צרים. לפניכם איור 5, המתאר באופן גרפי תהליכי עירור (בליעה) ופליטת אנרגיה עבור חלקיק מסוים:

איור 5: תהליכי עירור ופליטה



## זמן תרגול 4: תהליכי עירור באטום המימן



1. א. היעזרו בנוסחה לחישוב תדירות קווי הפליטה באטום המימן בסידרת בלמר וחשבו את תדירות הקו המתקבל במעבר אלקטרון מרמת האנרגיה החמישית לשנייה.  
ב. מהו אורך הגל המתאים לקו זה?  
ג. העתיקו למחברותיכם את איור 4 וצבעו את החץ המתאים לקו הפליטה המופיע בסעיפים הקודמים.
2. האם יכול האלקטרון באטום המימן להימצא ברמת אנרגיה של  $-1 \times 10^{-20} \text{ J}$ ? (היעזרו בתשובתכם בנוסחה 4).



### חזרה אל זיקוקי הדינור...

3. הסבירו את מיגוון הצבעים השונים המתקבל עקב הוספת מלחי מתכות שונות ללהבה. התייחסו בהסבר למבנה האלקטרוני של האטום.
4. ערכו השוואה בין תהליך הופעת הצבע בניסוי בעירת המלחים לבין פעולת זיקוקי דינור. התייחסו לנקודות הדימיון והשוני.

## פעילות ממוחשבת 4 - ספקטרום בליעה ופליטה של אטום מימן

התבוננו בספקטרום הבליעה והפליטה של אטום המימן באתר האינטרנט הבא:

<http://csep10.phys.utk.edu/astr162/lect/light/absorption.html>

- ⦿ תארו את ההבדלים בין תמונת ספקטרום הבליעה לתמונת ספקטרום הפליטה באטום המימן (עיינו בתמונה השנייה).
- ⦿ העין שלנו קולטת רק את הקווים השייכים לסידרת בלמר. הסבירו מדוע.

### סיכום ביתנים

פעולת זיקוקי הדינור ממחישה תופעה של עירור אלקטרוני באטומי מתכות (או יוני מתכות) ופליטה של אור בצבע האופייני למבנה רמות האנרגיה הספציפי למתכת מסוימת.

### מבט אפרק הבא

עד כה התייחסנו לפליטת אור על ידי אטומים. כפי שיתברר בפרק הבא, גם במולקולות מסודרים האלקטרונים ברמות אנרגיה מותרות. לכן, גם מולקולות, בדומה לאטומים, עשויות לבלוע ולפלוט קרינה אלקטרומגנטית. בפרק השני נעמיק בהבנת המבנה האלקטרוני של חומרי צבע אורגניים שונים.

## המודל הקוונטי של האטום - אורביטלים אטומיים

מודל בוהר תיאר בהצלחה את מבנה האטום המימן אך לא ניתן היה להכלילו עבור אטומים של יסודות אחרים (אטומים רבי אלקטרונים) ולא ניתן היה להסביר בעזרתו את הספקטרום הקווי שלהם. בעקבות הצלחתו של המודל בתיאור אטום המימן מחד גיסא, אך בעקבות הסתירות שהיו בין הנחות המודל להנחות המכניקה הקלאסית מאידך גיסא, פותח המודל הקוונטי של מבנה האטום, שהוא המודל המקובל היום. ניסוח המודל הקוונטי מחייב רקע מתמטי מתאים, הנרכש בדרך כלל בלימודים אוניברסיטאיים. לכן, במסגרת זו נתאר רק את התוצאות העקרוניות של המודל ובאופן איכותי.

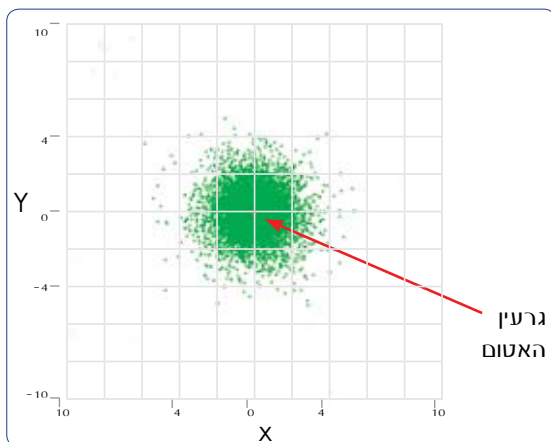
בדומה למודל בוהר, המודל הקוונטי עבור אטום המימן ממקם את האלקטרון מסביב לגרעין ברמות אנרגיה בדידות "מותרות". הנוסחה המתקבלת עבור רמות האנרגיה של האלקטרון זהה לנוסחת בוהר (שכאמור התאימה לניסיונות של ספקטרום הפליטה):

$$E_n = -\frac{R}{n^2}$$

כאשר  $n=1,2,3,\dots$  כמו במודל בוהר, ככל ש-  $n$  גדול, רמת האנרגיה גבוהה יותר והאלקטרון (השלילי) מתרחק מהגרעין (החיובי).

החידוש המהותי בתיאור הקוונטי, מתייחס למצב האלקטרון. בעוד שעל פי בוהר, האלקטרון נע כחלקיק במסלול מעגלי סביב הגרעין, לפי המכניקה הקוונטית לא ניתן לקבוע בוודאות את מיקום האלקטרון באטום, אך ניתן לתאר מהי ההסתברות למצוא אותו במקום כלשהו במרחב מסביב לגרעין.

על פי המודל הקוונטי, מתואר מצב האלקטרון באטום באופן הסתברותי. לאזורים, בהם קיימת הסתברות גבוהה למיקום האלקטרון, ניתן לייחס "צפיפות מטען שלילי" גבוהה. את צפיפות המטען (או צפיפות ההסתברות למיקום האלקטרון) באטום, ניתן לתאר באופן דומה למפה הסינופטית. לדוגמא, נתאר באיור 6 את צפיפות ההסתברות להימצאות האלקטרון בחתך מישורי כלשהו המכיל את גרעין האטום עבור המצב היסודי באטום המימן, ברמת האנרגיה  $n=1$ :

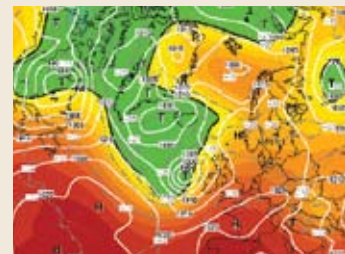


איור 6: תיאור הסתברותי של מיקום האלקטרון במישור  $(x,y)$  עבור רמת האנרגיה הראשונה (המרחקים נמדדים ביחידות של רדיוס בוהר)

### כדאי לדעת -

#### על תאור הסתברותי

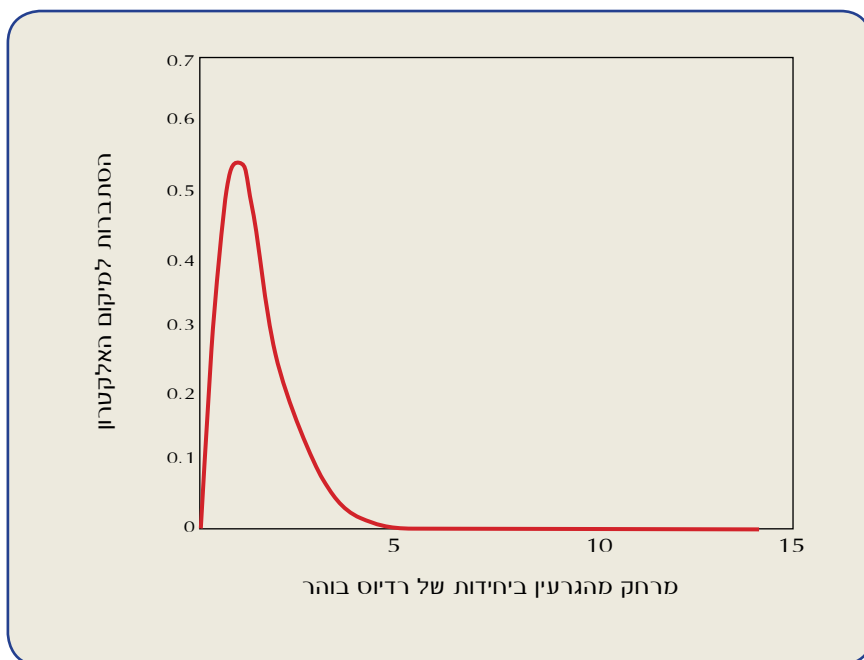
תיאורים סטטיסטיים הסתברותיים הם חלק בלתי נפרד מחיינו. לדוגמא, חזאי מזג האוויר אינו מסוגל לנבא את מזג האוויר בוודאות ומעביר לנו תחזית מזג אוויר על פי הערכה הסתברותית למזג האוויר (טמפרטורה, כמות משקעים, לחץ ברומטרי וכו'). המפה הסינופטית היא אחד הכלים בהם משתמש החזאי. במפה מתוארים אזורים לחץ גבוה ולחץ נמוך. ככל שהלחץ גבוה צפיפות האוויר גבוהה, כך שמפה סינופטית מתארת למעשה את השתנות צפיפות האוויר על פני משטח מסוים.





במפה זו, צפיפות הנקודות היא מדד לצפיפות ההסתברות למיקום האלקטרון. האלקטרון ממוקם בהסתברות גבוהה בקרבת הגרעין. תיאור מישורי זה הוא חלקי בלבד, ולאמיתו של דבר, צפיפות המטען במצב זה מרוכזת ב"כדור" תלת ממדי סביב הגרעין. אם נסכם את ההסתברות למיקום האלקטרון על פני קליפה כדורית שהולכת ומתרחקת מהגרעין, נקבל את הגרף המתואר באיור 7:

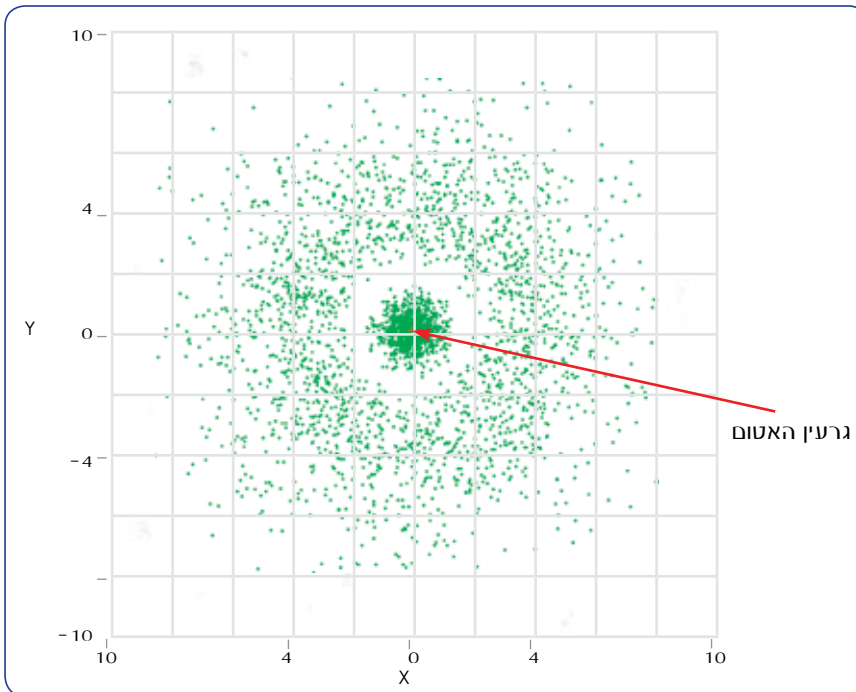
איור 7: תיאור הסתברותי של מיקום האלקטרון כתלות במרחקו מהגרעין עבור רמת האנרגיה הראשונה (ללא תלות בכיוון)



**כדאילצס**  
 בשנת 1906 זכה תומסון האב  
 בפרס נובל על גילוי האלקטרון  
 כחלקיק.  
 בשנת 1937 זכו גורג' תומסון  
 הבן ודוויסון בפרס נובל על גילוי  
 התנהגות האלקטרון כגל.  
 תומסון האב והבן הציגו את  
 ההתנהגות הדואלית של  
 אלקטרונים בדומה לדואליות  
 של האור.

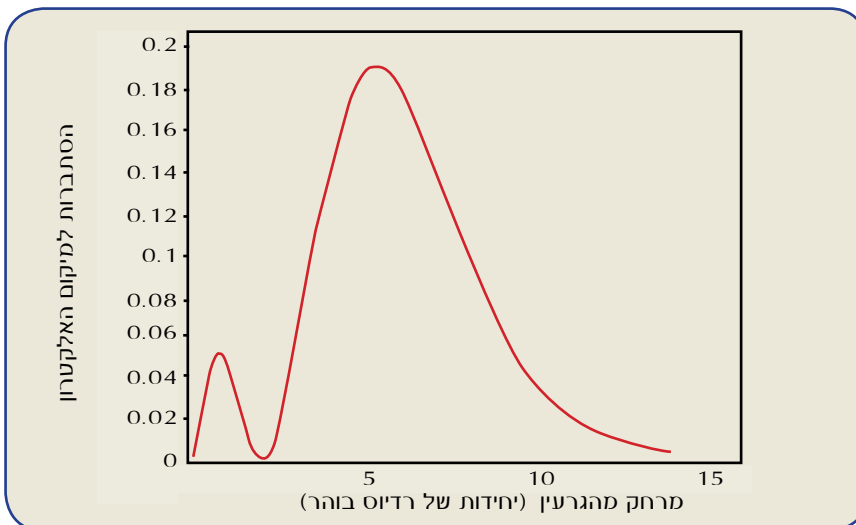
כפי שניתן לראות, קיים מרחק מסוים מסביב לגרעין, שבו ההסתברות להימצאות האלקטרון גבוהה. בניגוד למודל בוהר, אשר על פיו האלקטרון נמצא במסלול (orbit = אורביט באנגלית) בעל מרחק קבוע סביב הגרעין, התיאור ההסתברותי של מיקום האלקטרון סביב הגרעין מכונה "אורביטל". האורביטל הכדורי, המתאים לרמת האנרגיה  $n=1$ , מכונה אורביטל  $1s$ . גם ברמת האנרגיה  $n=2$  קיים אורביטל כדורי מטיפוס  $s$  (המסומן  $2s$ ), אולם מפת צפיפות ההסתברות שלו שונה, כפי שניתן לראות באיור 8:

איור 8: תיאור הסתברותי של מיקום האלקטרון במישור  $(y,x)$  עבור רמת האנרגיה השנייה המרחקים נמדדים ביחידות של רדיוס בוהר



ההסתברות המקסימלית למיקום האלקטרון, נמצאת במרחק גדול יותר מן הגרעין, בהשוואה לאלקטרון באורביטל  $1s$ , כפי שנראה בגרף המתואר באיור 9:

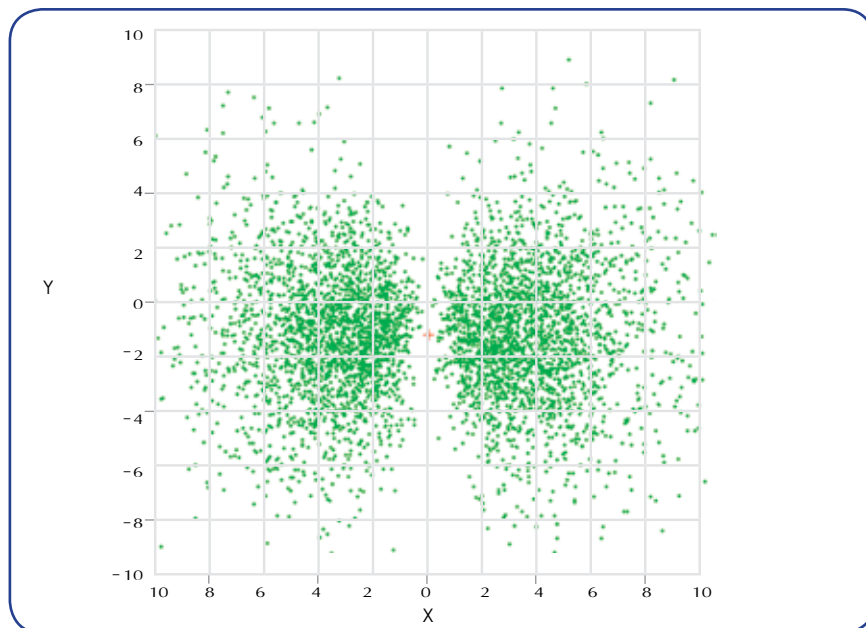
איור 9: תיאור הסתברותי של מיקום האלקטרון כתלות במרחקו מהגרעין עבור רמת האנרגיה השנייה (ללא תלות בכיוון)



על פי המודל הקוונטי, ברמת האנרגיה  $n=2$  קיימות שלוש צורות נוספות "מותרות" לתיאור מצב האלקטרון. כלומר, קיימים עוד שלושה אורביטלים. אורביטלים אלו אינם כדוריים.

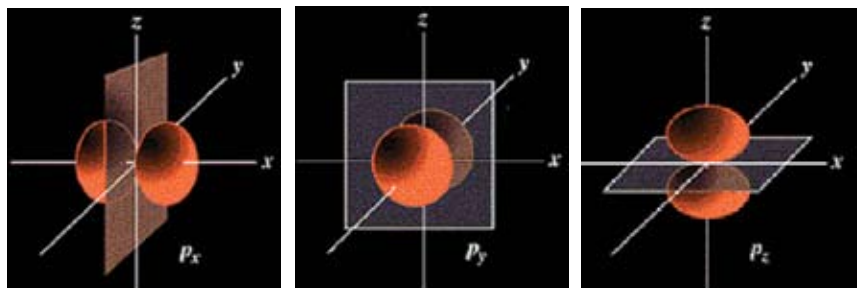
לדוגמא, נתאר באיור 10 את ההסתברות להימצאות האלקטרון על פני מישור  $(x,y)$ , המכיל את גרעין האטום, עבור אחד מאורביטלים אלו:

איור 10: תיאור הסתברותי של מיקום האלקטרון במישור  $(x,y)$  עבור רמת האנרגיה השנייה - אורביטל  $2p_z$ . המרחקים נמדדים ביחידות של רדיוס בוהר



כפי שניתן לראות, צפיפות המטען באורביטל זה מקוטבת בצורת שתי אונות המכוונות לאורך ציר  $x$ . לכן, נקרא האורביטל  $2p_x$ . לציון רמת האנרגיה השנייה, ו- $x$  לציון כיוון הקיטוב. אין העדפה לציר זה או אחר במרחב סביב הגרעין ולכן קיימים גם שני אורביטלים נוספים  $P_y$  ו- $P_z$ . מקובל לסמנם על פי שלושת הצירים במרחב  $p_x, p_y, p_z$  כפי שניתן לראות באיור 11:

איור 11: אורביטלי  $p_x, p_y, p_z$



## פעילות ממוחשבת 5 - ייצוגים של אורביטלים אטומיים

היכנסו לאתר האינטרנט הבא:

<http://www.shef.ac.uk/chemistry/orbitron/>

בחרו בסרגל השמאלי העליון את האורביטלים  $1s, 2s, 2p$

צפו בייצוגים של אורביטלים אטומיים אלו.

ציירו את שלושת האורביטלים.

## סוגי אורביטלים

עם העלייה ברמות האנרגיה, מספר האורביטלים השונים האפשריים לאלקטרון באטום המימן גדל לאינסוף. נהוג לסווג את האורביטלים השונים על פי "נפחם" ועל פי "צורתם". ככל שעולים ברמת האנרגיה ( $n$ ), גדל נפח האורביטל (גדלה ההסתברות להימצאות האלקטרון רחוק יותר מהגרעין) וגדל מספר הצורות השונות של האורביטלים. נהוג לסמן את צורות האורביטלים האטומיים באותיות לועזיות. כך למשל, מסומנות ארבע הצורות הראשונות באותיות:  $s$ ,  $p$ ,  $d$ ,  $f$ . העלייה במספר האורביטלים ובצורתיהם עם העלייה באנרגיה מתוארת בטבלה הבאה:

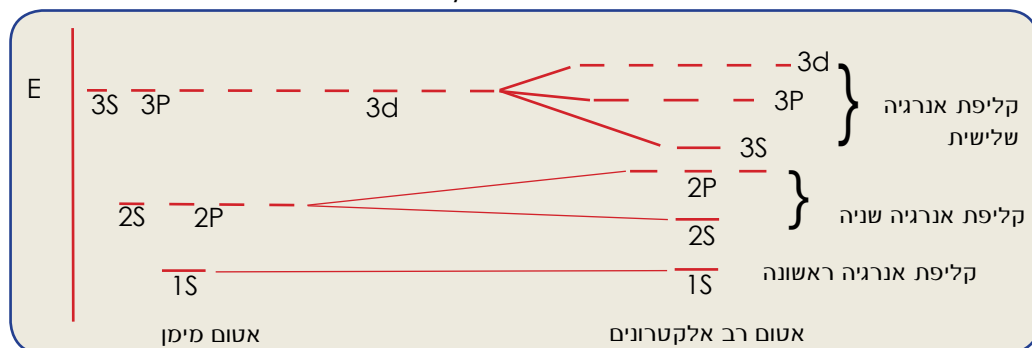
רמת האנרגיה	מספר האורביטלים הכולל	אורביטלי s	אורביטלי p	אורביטלי d	אורביטלי f
$n=1$	1	1			
$n=2$	4	1	3		
$n=3$	9	1	3	5	
$n=4$	16	1	3	5	7

## אטומים רבי אלקטרונים

יתרונן הגדול של המודל הקוונטי הוא יכולתו להסביר את המבנה הקוונטי של אטומים רבי אלקטרונים (ולא רק של אטום המימן), ואף לנבא את מבנה המערכה המחזורית של היסודות. התיאור הקוונטי (המקורב) של אטום רב אלקטרונים מבוסס על מודל האורביטלים: באטום רב אלקטרונים, מאוכלס כל אחד מהאלקטרונים באורביטל משלו. אורביטלים אלו דומים לאורביטלים של אטום המימן בצורתם:  $s$ ,  $p$ ,  $d$ , וכו', אך בשל הדחייה בין האלקטרונים מופיעות תת רמות אנרגיה. איור 12 מתאר את ההבדלים בין רמות האנרגיה באטום המימן ובאטום רב אלקטרונים.

איור 12: תיאור סכמטי של רמות אנרגיה לאלקטרון באטום המימן ובאטום רב

### אלקטרונים



כפי שניתן לראות באיור 12, באטום רב אלקטרונים המספר הסידורי  $n=1,2,3\dots$  אינו מגדיר במדויק את רמת האנרגיה, אלא "קליפת אנרגיה" (Energy shell). קליפת האנרגיה  $n=2$ , למשל, כוללת את רמות האנרגיה  $2s$  ו- $2p$ . קליפת האנרגיה  $n=3$  כוללת את רמות האנרגיה  $3s$ ,  $3p$ ,  $3d$ .

## כללים לאכלוס אלקטרונים

### סדר המילוי

באטום רב אלקטרונים שאינו מעורר, האלקטרונים מאכלסים את האורביטלים השונים על פי סדר עולה של האנרגיה שלהם.

### עקרון פאולי

באורביטל אחד ניתן לאכלס לכל היותר שני אלקטרונים. ספין הוא תכונה פנימית של האלקטרון המתגלית בחשיפתו לשדה מגנטי. לכל אלקטרון יש אחד מתוך שני מצבי ספין אפשריים המתוארים על ידי הסימון הבא:

$$m_s = \frac{1}{2} \text{ או } m_s = -\frac{1}{2}$$

אנו נסמן את שני מצבי הספין בעזרת שני חיצים בעלי כיוונים הפוכים:  $\uparrow$  על פי עקרון פאולי - שני אלקטרונים המאכלסים אותו אורביטל חייבים להיות בעלי ספינים מנוגדים.

### כלל הונד

כאשר מאכלסים אלקטרונים באורביטלים בעלי אנרגיה זהה (אורביטלים מנוונים), יאוכלס תחילה אלקטרון אחד בכל אורביטל, בספין מקביל לאחרים. רק לאחר האכלוס בכל האורביטלים המנוונים, יזווגו האלקטרונים הנותרים באורביטלים, כך שלכל זוג אלקטרונים באורביטל ספין מנוגד.

לפי כללי אכלוס אלה, באטום ההליום (He) יאכלסו שני אלקטרונים בעלי ספינים מנוגדים את אורביטל  $1s$ . היערכות האלקטרונים באטום הליום תהיה: He:  $1s^2$  הספרה 2 מסמלת את שני האלקטרונים באורביטל  $1s$ . באטום הליתיום (Li) שלושה אלקטרונים. על פי חוק האיסור של פאולי, האלקטרון השלישי יאכלס את רמת האנרגיה השנייה ותתקבל היערכות הבאה: Li:  $1s^2 2s^1$ .

## זמן תרגול 5: היערכות אלקטרונים באטום

1. מספר האלקטרונים בכל קליפת אנרגיה באטום תלוי במספר  $n$  ומחושב על פי הנוסחה  $2n^2$ . התבססו על חוק האיסור של פאולי והשלימו את הטבלה הבאה:

מספר האורביטלים	מספר האלקטרונים המקסימלי האפשרי	המספר (n)
		1
		2
		3
		4

באיור הבא מתוארת היערכות האלקטרונים באטום עבור מספר יסודות.

איור מס' 1.6: היערכות האלקטרונים באטום עבור מספר יסודות

היסוד	מספר האלקטרונים באטום	דיאגרמת אכלוס האלקטרונים באטום				היערכות האלקטרונים באטום	
		1s	2s	2p			3s
Li	3	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow$				$1s^2 2s^1$
Be	4	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$				$1s^2 2s^2$
B	5	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow$			$1s^2 2s^2 2p^1$
C	6	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow$	$\uparrow$		$1s^2 2s^2 2p^2$
N	7	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$1s^2 2s^2 2p^3$
Ne	10	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	$1s^2 2s^2 2p^6$
Na	11	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$

2. הציגו דיאגרמות אכלוס והיערכות לאלקטרוני האטומים הבאים: חמצן (O), פלואור (F) ומגנזיום (Mg).

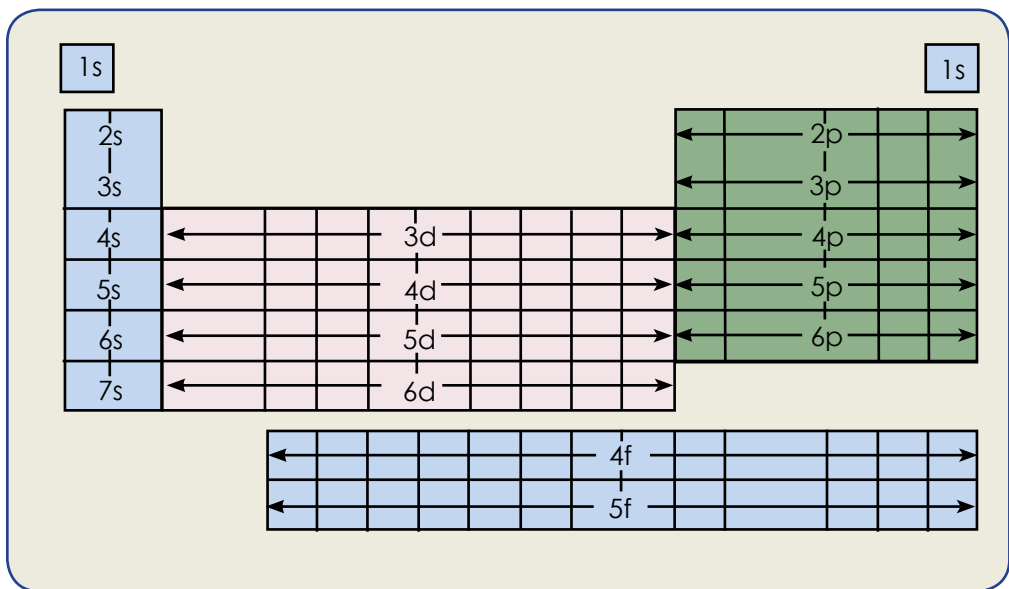
3. א. התבוננו בהיערכות האלקטרונים באטומים: מימן (H), ליתיום (Li), בריליום (Be), נתרן (Na) ומגנזיום (Mg). מה משותף להם?  
 ב. התבוננו בהיערכות האלקטרונים בקבוצת האטומים: בור (B), פחמן

(C), חנקן (N), חמצן (O), פלואור (F) וניאון (Ne). מה משותף להם?  
 ג. מהו הקשר בין היערכות האלקטרונים של האטומים ומקומם  
 במערכת המחזורית?

## היערכות אלקטרונים והטבלה המחזורית

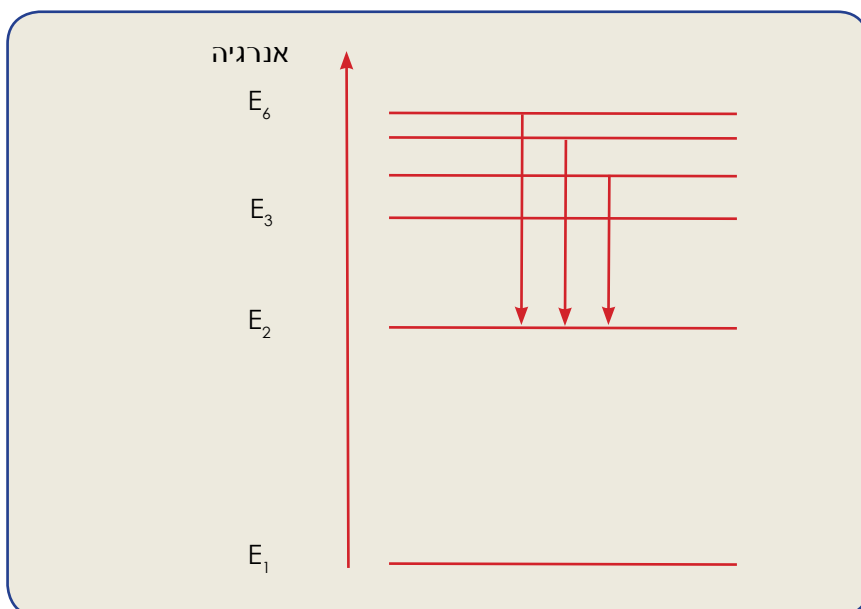
כפי שכבר למדתם, סידור היסודות במערכת המחזורית אינו מקרי. כפי שאיור מס' 13 מציג, אלקטרוני הערכיות (האלקטרונים המרוחקים ביותר מהגרעין) של יסודות באותו טור מאכלסים אורביטלים דומים. השורה הראשונה במערכת המחזורית מכילה שני יסודות שלהם אלקטרונים המאכלסים את אורביטל 1s. השורה השנייה מכילה יסודות שלהם אלקטרונים המאכלסים את תת רמות האנרגיה המתאימות לקליפת האנרגיה  $n=2$ , כך שאלקטרוני היסודות בשורה השנייה בשני הטורים משמאל מאכלסים את אורביטלי 2s ואלקטרוני שאר היסודות בשורה, הנמצאים בטורים הימניים, מאכלסים את אורביטלי 2p. מגמה זו נמשכת גם בשורות הבאות במערכת המחזורית.

איור 13: היערכות האלקטרונים באטומי היסודות וסידור המערכת המחזורית



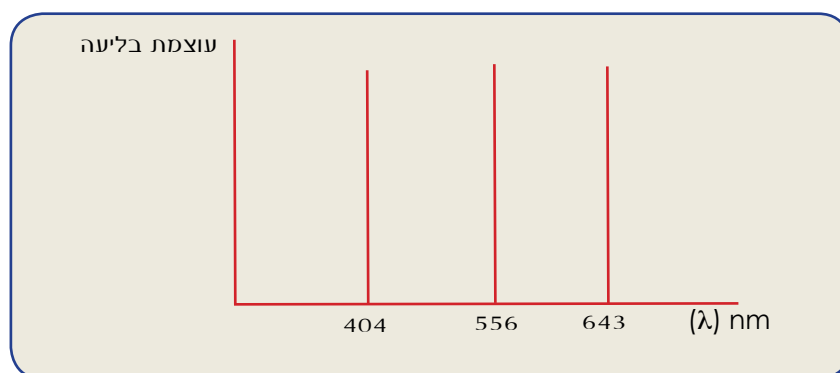
## זמן תרגול נוסף

1. חשבו את אורך הגל של פוטון בעל אנרגיה של  $7.36 \times 10^{-19} \text{ J}$ .
2. מהי אנרגיית פוטון (בג'אול J) המשודר על ידי תחנת רדיו FM בתדירות  $100 \text{ MHz}$ ?
3. א. חשבו את האנרגיה של אלקטרון באטום המימן עבור הרמה הראשונה, השנייה והשלישית.  
 ב. בנו דיאגרמת רמות אנרגיה עבור שלוש הרמות הראשונות באטום המימן.  
 ג. מהו אורך הגל שיפלוט אלקטרון העובר מהרמה השלישית לרמה הראשונה?
4. שפופרת גז פולטת אור באורך גל  $560 \text{ nm}$ .  
 א. מהי תדירות האור הנפלט?  
 ב. מהי אנרגיית הפוטון המתאימה לאורך גל זה?  
 ג. האם אורך גל זה מתאים לתחום האור הנראה? הסבירו את תשובתכם.
5. נתונים ערכי אורך גל של מספר קווי ספקטרום של היסוד X:  
 $513.3 \text{ nm}$ ,  $514.3 \text{ nm}$ ,  $515.1 \text{ nm}$ .  
 א. חשבו את התדירות המתאימה לכל אחד מקווי הספקטרום הנתונים. פרטו את חישוביכם.  
 ב. חשבו את האנרגיה המתאימה לכל מעבר בין רמות המתאר על ידי קווי הספקטרום. פרטו את חישוביכם.  
 ג. הפניכם תיאור סכמטי של קטע מדיאגרמת רמות האנרגיה של היסוד X. התאימו את ערכי האנרגיה שקיבלתם בסעיף ב' למעברים המתוארים בדיאגרמה.





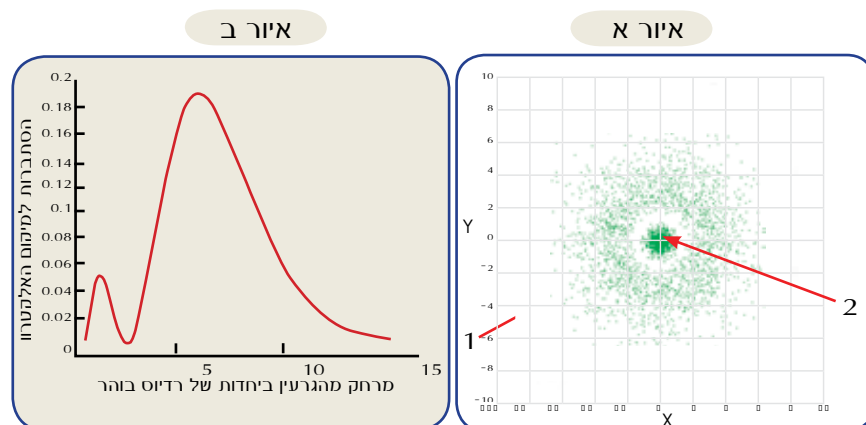
6. לפניכם מספר קווי בליעה של אטום מסוים המתאימים למעברים 1-2, 3-1, 4-1:



א. חשבו את האנרגיה המתאימה לכל מעבר בין רמות המתואר בספקטרום. פרטו את חישוביכם.  
 ב. מהו אורך הגל המתאים למעבר 2-1? הסבירו תשובתכם.  
 ג. שרטטו דיאגרמה של רמות האנרגיה אשר תתאים למעברי האנרגיה אשר חישבתם בסעיף א.

7. מהי היערכות האלקטרונים ביסודות וביונים הבאים:  
 א. אשלגן (K)      ב. ארגון (Ar)      ג. יון גופרית ( $S^{2-}$ )  
 ד. זרחן (P)      ה. צורן (Si)      ו. אלומיניום (Al)      ז. חמצן (O).

8. לפניכם שני ייצוגים גרפיים שונים של האורביטל 2s באטום המימן:

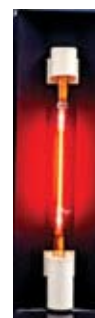


א. הסבירו מה מיוצג באזור עליו מראה חץ 1 באיור א'. הסבירו מה מיוצג באזור עליו מראה חץ 2.  
 ב. הסבירו מה מתארות נקודות המקסימום ונקודת המינימום באיור ב'.

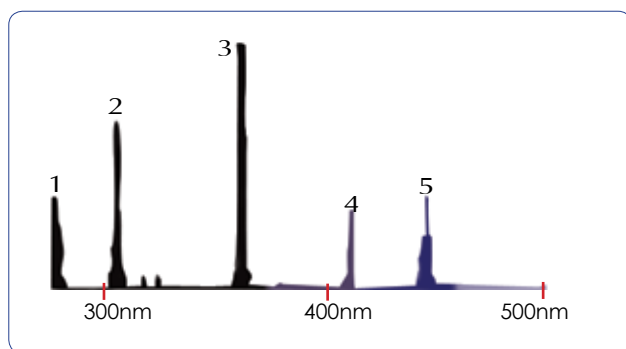
## 9. קראו את המידע הבא וענו על השאלות

### נורת כספית

נורת כספית הומצאה על ידי פטר קופר הויט בשנת 1903. בניגוד לנורת הליבון הרגילה, אין בנורת הכספית חוט להט. נורה זו בנויה משפופרת זכוכית מרוקנת מאוויר. במקום אוויר הכניסו לתוכה כמות קטנה של גז כספית. כאשר סוגרים את המעגל החשמלי בתנאים נאותים, המאפשרים מעבר מהיר של אלקטרונים, עוברים האלקטרונים מהדק אחד של השפופרת למשנהו, דרך הגז שבשפופרת. מעבר כזה נקרא התפרקות חשמלית. בזמן מעבר האלקטרונים דרך השפופרת, הם פוגעים בחלקיקי הגז. כתוצאה מההתנגשויות בין האלקטרונים לבין חלקיקי הגז, נפלט אור. צבע האור תלוי בסוג הגז שבשפופרת. בשפופרת שמכילה אדי כספית נפלט אור לבן. נורות כספית משמשות בעיקר לתאורת רחובות וחוץ. במכונות שכפול עתיקות השתמשו בסטנסיל המצופה בחומר הבולע אור בתחום 400-420 nm בלבד.

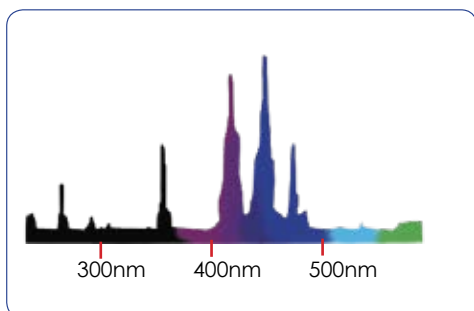


לפניכם איור המתאר את ספקטרום הפליטה של נורת כספית.



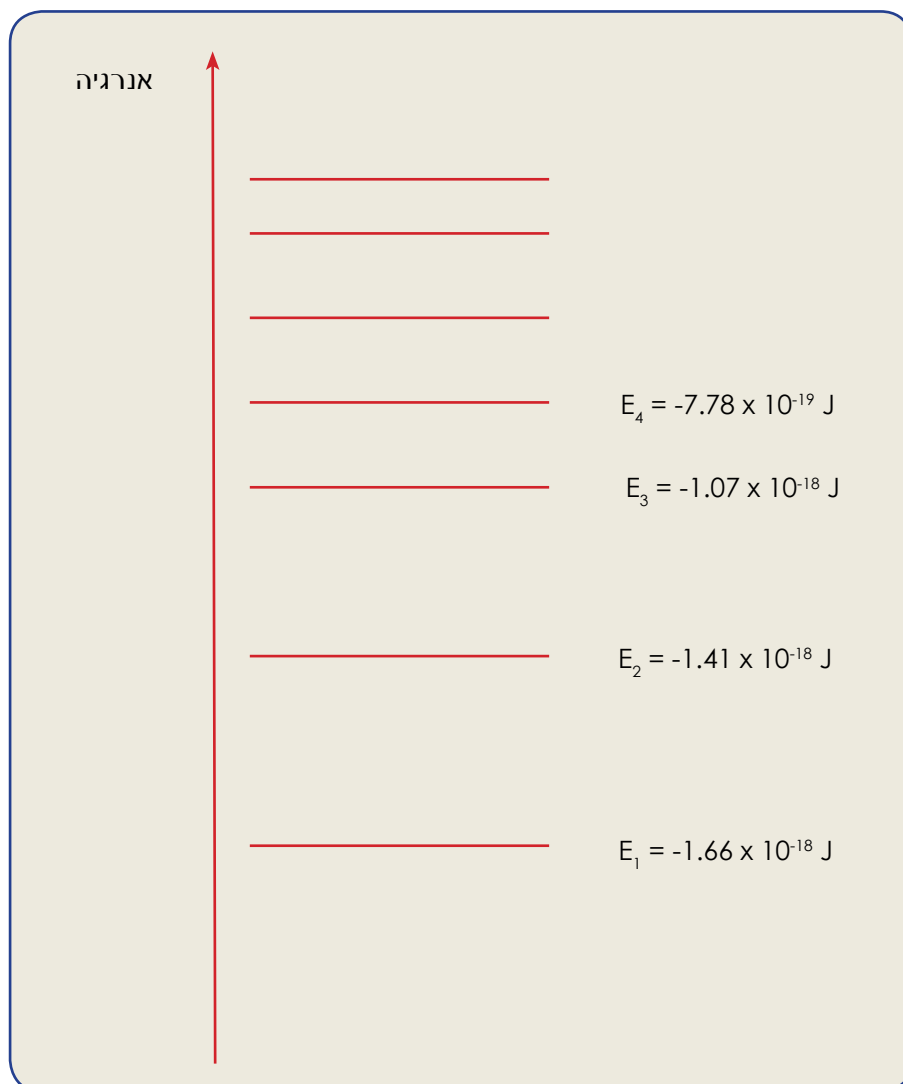
א. האם נורת כספית עשויה לגרום שינוי בסטנסיל? נמקו תשובתכם?

נורת מטל-הליד היא נורת כספית בה הוספו אדי תרכובת של הליד מתכתי (תרכובת של אחד מיסודות ההלוגנים עם מתכת כמו ברזל או קובלט). לפניכם איור המתאר את ספקטרום הפליטה של נורת מטל הליד.



ב. איזו נורה מבין השתיים עדיפה לשימוש כנורה במכונת השכפול?  
נמקו תשובתכם.

ג. התבוננו בדיאגרמה הבאה המתארת את רמות האנרגיה באטום  
מסוים:



- i. חשבו את תדירות קו הפליטה המתאים למעבר מרמה שלישית לרמה ראשונה. פרטו את חישוביכם.
- ii. חשבו מהו אורך הגל המתאים לקו זה. האם הוא בתחום האור הנראה או בתחום האולטרה סגול? פרטו את חישוביכם ונמקו.
- iii. אורך גל זה מופיע בספקטרום הפליטה של נורת הכספית (mercury vapor) באיור. זהו את הקו על פי מספרו בספקטרום.
- vi. האם יתכן, כי קו מס' 3 בספקטרום הפליטה של נורת הכספית יתאים למעבר מרמה רביעית לרמה ראשונה? נמקו ללא חישוב.



# פרק 2

## מחומרי צבע אל המבנה האלקטרוני של מולקולות

בפרק הראשון ראינו, כי ספקטרום הפליטה וספקטרום הבליעה של אטומי יסודות שונים תלויים בסידור האלקטרונים סביב גרעין האטום. גם הצבע של חומרים מולקולריים קשור למבנה האלקטרוני שלהם. בפרק זה נלמד על המבנה האלקטרוני של מולקולות, וכיצד מתבטא המבנה האלקטרוני בצבע של החומר הבנוי ממולקולות אלו.

21 Sc Scandium 44.956	22 Ti Titanium 47.88	23 V Vanadium 50.942	24 Cr Chromium 51.996	25 Mn Manganese 54.938	26 Fe Iron 55.845	27 Co Cobalt 58.933	28 Ni Nickel 58.69	29 Cu Copper 63.546	30 Zn Zinc 65.37	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.63	33 As Arsenic 74.9216	34 Se Selenium 78.96	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 83.80
39 Y Yttrium 88.906	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.906	42 Mo Molybdenum 95.94	43 Tc Technetium 98	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.905	46 Pd Palladium 106.4	47 Ag Silver 107.868	48 Cd Cadmium 112.412	49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.710	51 Sb Antimony 121.757	52 Te Tellurium 127.60	53 I Iodine 126.905	54 Xe Xenon 131.29
72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.948	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.222	78 Pt Platinum 195.084	79 Au Gold 196.967	80 Hg Mercury 200.59	81 Tl Thallium 204.387	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.980	84 Po Polonium (209)	85 At Astatine (210)	86 Rn Radon (222)	
104 Rf Rutherfordium (261)	105 Db Dubnium (262)	106 Sg Seaborgium (263)	107 Bh Bohrium (264)	108 Hs Hassium (265)	109 Mt Meitnerium (266)	110 Uun Ununium (267)	111 Uuu Ununium (271)	112 Uub Unbium (277)	113 Uut Ununtrium	114 Uuq Ununquadium	115 Uup Ununpentium	116 Uuh Ununhexium	117 Uus Ununseptium	118 Uuo Ununoctium	
57 La Lanthanum 138.905	58 Ce Cerium 140.12	59 Pr Praseodymium 140.908	60 Nd Neodymium 144.24	61 Pm Promethium (145)	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.925	66 Dy Dysprosium 162.50	67 Ho Holmium 164.930	68 Er Erbium 167.26	69 Tm Thulium 168.934	70 Yb Ytterbium 173.054	71 Lu Lutetium 174.967	
89 Ac Actinium 227.028	90 Th Thorium 232.038	91 Pa Protactinium (231.036)	92 U Uranium 238.029	93 Np Neptunium (237.048)	94 Pu Plutonium (244)	95 Am Americium (243)	96 Cm Curium (247)	97 Bk Berkelium (247)	98 Cf Californium (251)	99 Es Einsteinium (252)	100 Fm Fermium (257)	101 Md Mendelevium (258)	102 No Nobelium (259)	103 Lr Lawrencium (260)	

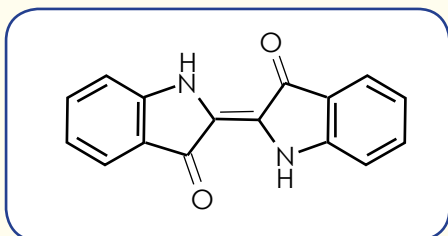
## צבעים בראי ההיסטוריה

רוב חומרי הצבע בימינו הם סינתטיים, אך בעבר הפיקו חומרי צבע ממירלים שונים או מצמחים ובעלי חיים.

חומרי צבע חומים מסוימים הכילו חלודה,  $Fe_2O_3$ . הצבע אדום ורמיליון, הופק ע"י טחינת המינרל סינבר (Cinnabar), המכיל את החומר היוני כספית גפרית, HgS. במצרים העתיקה השתמשו במלח הנחושת מלכיט (malachite) ליצירת צבע ירוק לשימושם של ציירים ואף לאיפור עפעפי נשים.

חומרי צבע מסוג זה הם חומרים יוניים. חומרי צבע שהופקו מצמחים או בעלי חיים הם חומרים מולקולריים.

צבע הג'ינס, אינדיגו, הופק מן הצמח אינדיגופרה (Indigofera), שגדל באזורים טרופיים.



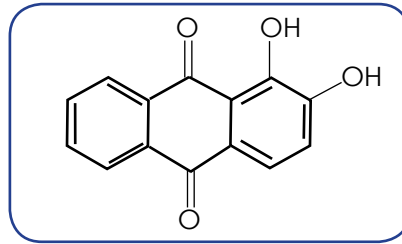
בסוף המאה התשע עשרה, גדל הביקוש לצמח על ההיצע, וב-1905 קיבל אדולף פון באייר פרס נובל לכימיה על זיהוי מבנה החומר ופיתוח תהליך תעשייתי לייצור סינתטי של כמויות גדולות של אינדיגו. ביהדות נהגו לצבוע את פתילי הציצית בצבע תכלת, שהופק מהחילזון ארגמון קהה - קוצים (Murex Trunculus). חילזון זה נפוץ בים התיכון, ובתי מלאכה להפקת הצבע מן החילזון התגלו לאורך חופי ישראל, מראש הנקרה ועד חיפה.

**מדוע חומרים מולקולריים מסוימים, כמו האינדיגו, הם בעלי צבע ואחרים - חסרי צבע?**

את שיחזור הפקת הצבע מהחילזון ומוצגים ארכיאולוגיים הקשורים לתעשייה זאת, תוכלו לראות במוזיאון המזגה בנחשולים: <http://www.mizgaga.com/Site/pages/inPage.asp?catID=227>.



1. נסחו שלוש שאלות המתעוררות בעקבות קריאת המידע.
2. לפני שנים, הצבע האדום היה אחד הסממנים למעמד של העשירים והמלוכה. חומר הצבע האדום נקרא אליזרין ונוסחת המבנה שלו היא:

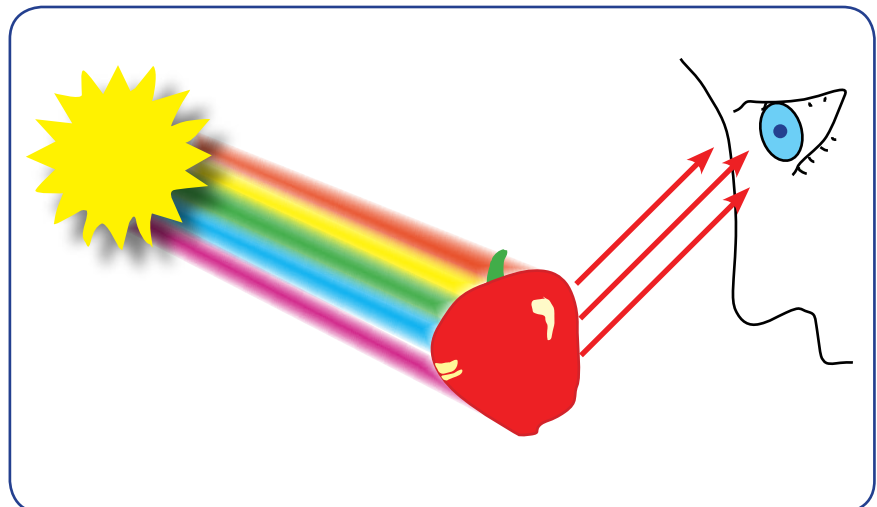


צינו במה דומה ובמה שונה המבנה המולקולרי של שני חומרי הצבע: האליזרין והאינדיגו.

### ראיית צבעים וצבענים

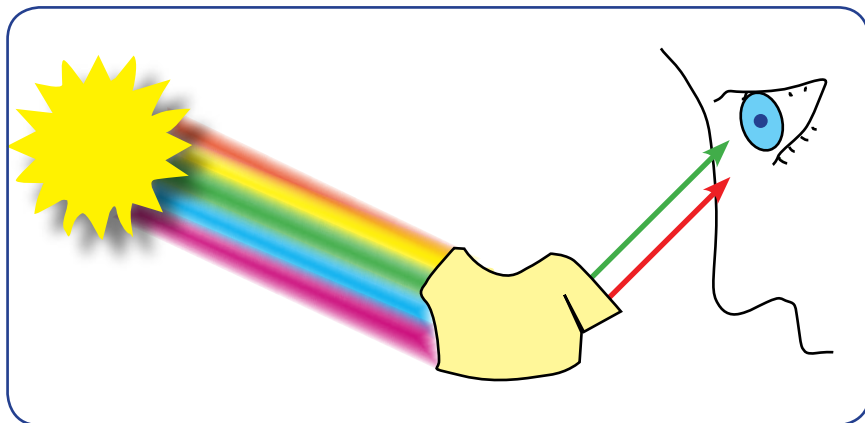
בפרק הקודם למדנו כיצד מתקבלים צבעים שונים מחיבור של שלושת צבעי היסוד של האור: אדום, כחול וירוק. מדוע התפוח שבאיור נראה לנו בצבע אדום? ומדוע הבננה צהובה? והגינס כחול? בחפצים אלה, נמצאים חומרים הנקראים "צבענים" (פיגמנטים). צבענים הם חומרים הבולעים חלק מאורכי הגל בתחום האור הנראה, ומפזרים ומחזירים לעינינו את אורכי הגל האחרים, אותם הם לא בולעים. אורכי הגל המוחזרים, אותם קולטות העיניים, קובעים את הצבע אותו אנו רואים. כאשר אור השמש פוגע בחפץ צבעוני, כמו התפוח האדום שבאיור 1, הצבען שקליפת התפוח בולע את כל אורכי הגל שבאור הלבן, מלבד אורכי הגל המתאימים לצבע האדום. אורכי גל אלה מתפזרים ומגיעים לעינינו, וכך אנו רואים את התפוח בצבע אדום.

איור 1: ראיית חומר צבע אדום



באיור 2 שלפניכם מופיעה חולצה צהובה. האור הלבן פוגע בחולצה, והצבענים שבבד בולעים את אורכי הגל המתאימים לאור הכחול, אך אינם בולעים את אורכי הגל המתאימים לאור האדום והירוק. אורכי גל אלה מתפזרים ומגיעים לעינינו. האור האדום והירוק יחד נקלטים על ידינו כצהוב.

איור 2: ראיית חומר צבע צהוב



הצבענים הם חומרים אורגניים. בהמשך הפרק נלמד מהו הקשר בין מבנה החומר לבין יכולתו של החומר לבלוע אורכי גל בתחום הנראה ולשמש כצבען.

### זמן תרגול 1: ראיית צבעים

לדוגמאות נוספות לראיית צבעים היכנסו לאתר:

<http://science.cet.ac.il/science/colors/color1.asp#4>

1. השלימו את הטבלה הבאה:

צבע החפץ	אורכי גל נבלעים (מתוך אדום, ירוק, כחול)	אורכי גל מפוזרים (מתוך אדום, ירוק, כחול)
כחול		
טורקיז (ציאן)		
לבן		
שחור		

2. כלורופיל הוא חומר הצבע (הצבען) הנמצא בעלים ירוקים ומקנה להם את צבעם. חומר זה אחראי לקליטת האור בתהליך הפוטוסינתזה. האם ניתן לגדל צמחים בחממה שבה מאירים את הצמחים בנורות ירוקות בלבד? הסבירו.



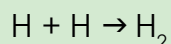


3. מאירים כדור אדום, הנמצא בחדר חשוך לחלוטין, בעזרת נורה הפולטת אורכי גל המתאימים לצבע הירוק בלבד. באיזה צבע יראה הכדור לעינינו? הסבירו את תשובתכם.

## הקשר הקוולנטי

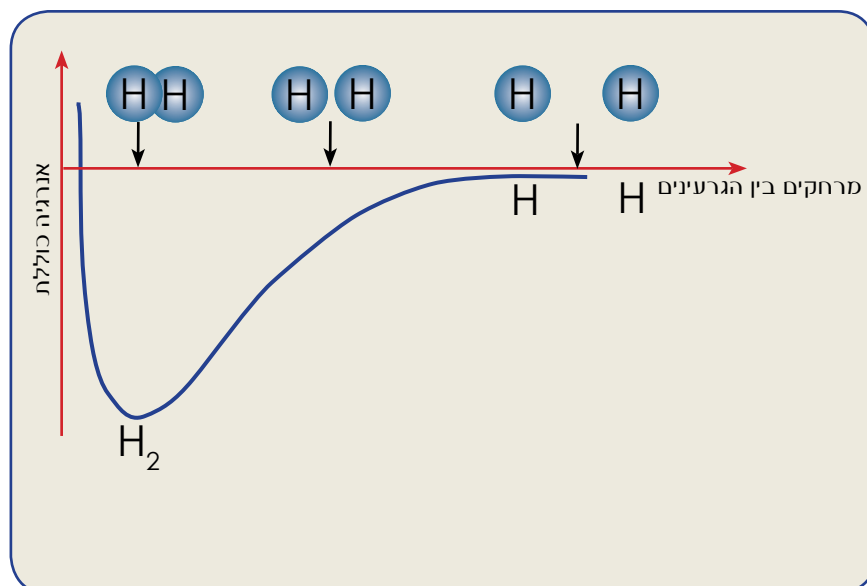
מולקולות נוצרות כאשר אטומים יוצרים ביניהם קשרים קוולנטיים. כפי שלמדתם, קשר קוולנטי בין שני אטומים נוצר כאשר מתקיימים שני תנאים:  
 א. לשני האטומים יש אלקטרונים משותפים - לא ניתן לשייך את האלקטרונים לאחד הגרעינים ולא לאחר.  
 ב. כתוצאה משיתוף האלקטרונים, יורדת האנרגיה של צמד האטומים בהשוואה לאנרגיה של שני האטומים הבודדים.

נתבונן בתהליך יצירת מולקולת המימן משני אטומי מימן:

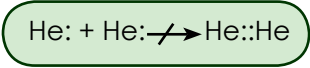


כאשר אטומי המימן רחוקים זה מזה, הם אינם משפיעים זה על זה, וכל אחד משני הגרעינים (המכיל פרוטון אחד בעל מטען חיובי) מוקף על ידי אלקטרון יחיד (בעל מטען שלילי). במולקולה הדו-אטומית, כל גרעין חיובי מוקף על ידי שני האלקטרונים המשותפים. כאשר שני האלקטרונים נמצאים באזור שבין שני הגרעינים, המשיכה בין הגרעינים לאלקטרונים גדלה והאנרגיה יורדת, כפי שניתן לראות באיור 3:

איור 3: שינוי האנרגיה כפונקציה של המרחק בין שני אטומי מימן



הרווח האנרגטי המתקבל בגלל שיתוף האלקטרונים הוא אם כן "הכוח המניע" ליצירת קשרים קוולנטיים. אולם, לא כל זוג אטומים יוצרים מולקולה יציבה! לדוגמא, שני אטומי הליום לא יצרו מולקולה, למרות "רווח פוטנציאלי" בשיתוף ארבעת האלקטרונים



האם ניתן לצפות מראש באילו מקרים תיווצר מולקולה משני אטומים ובאילו לא? שתי תיאוריות עיקריות מסבירות את היווצרות הקשר הכימי. בגישת "קשר הערכיות" (Valence Bond), מתואר הקשר כשיתוף של זוג אלקטרוני ערכיות באורביטל שנוצר ע"י חפיפה במרחב של אורביטלים אטומיים משני אטומים סמוכים. גישה זו נוחה לתיאור מקורב של המבנה המרחבי של מולקולות, כאשר מניחים, כי יצירת הקשר מלווה בהכלאה (hybridization) של אורביטלים לקבלת מערך (set) חדש של אורביטלים אטומיים, הנקראים אורביטלים היברידיים (מוכלאים). תיאוריה אחרת היא תיאוריית האורביטלים המולקולריים (Molecular Orbitals). על פי תיאוריה זו, האלקטרונים במולקולה מאוכלסים במערך חדש של אורביטלים מולקולריים. גישה זו נוחה לתיאור מקורב של מבנה רמות האנרגיה והספקטרום של מולקולות.

### תיאורית האורביטלים המולקולריים

תיאורית האורביטלים המולקולריים (Molecular Orbitals, MO), היא מודל מקורב, המסביר את המבנה האלקטרוני של מולקולות. מודל זה מאפשר לנבא את יציבותן היחסית של מולקולות, את המבנה המרחבי שלהן ונתונים ספקטרליים, כגון: מדוע חומר מסויים בולע קרינה בתחום הנראה ואחר - בתחום האולטרה סגול? וכמובן, מדוע חומרים מולקולריים מסויימים הם צבעוניים?

על פי מודל זה, האלקטרונים המשותפים לאטומים במולקולה נמצאים באורביטלים, בדומה לאלקטרונים באטום. אולם בעוד שאורביטל אטומי ממוקם סביב הגרעין של אטום מסוים, אורביטל מולקולרי ממוקם סביב שני גרעינים (או יותר) במולקולה. לכל מולקולה יש מערך אורביטלים מולקולריים האופייני לה, כמו שלכל אטום בודד יש מערך אורביטלים אטומיים משלו. האורביטלים המולקולריים, בדומה לאורביטלים האטומיים שהכרנו בפרק הקודם, מייצגים את ההסתברות למצוא את האלקטרון במקום מסויים במרחב המולקולה. בדומה לאורביטלים אטומיים, האורביטלים המולקולריים ניתנים לסיווג על פי האנרגיה שלהם וכן על פי צורתם המרחבית. בכל אורביטל מולקולרי מאוכלסים לכל היותר שני אלקטרונים, בדומה לאורביטל אטומי.

ניתוח הצורות המרחביות של אורביטלים מולקולריים ורמות האנרגיה המתאימות להם, מגלה קשרים פשוטים בין אורביטלים מולקולריים לבין האורביטלים האטומיים של האטומים המרכיבים את המולקולה.

**רגע היסטורי**

בשנת 1998 זכו המדענים ג'ון פופל ווולטר קוהן בפרס נובל בכימיה על פיתוח שיטות חישוביות בכימיה קוונטית. תוכנות המחשב, שפותחו על בסיס רעיונותיהם, מסייעות בפירוש תופעות כימיות ובניבוי תוצאות ניסיות.

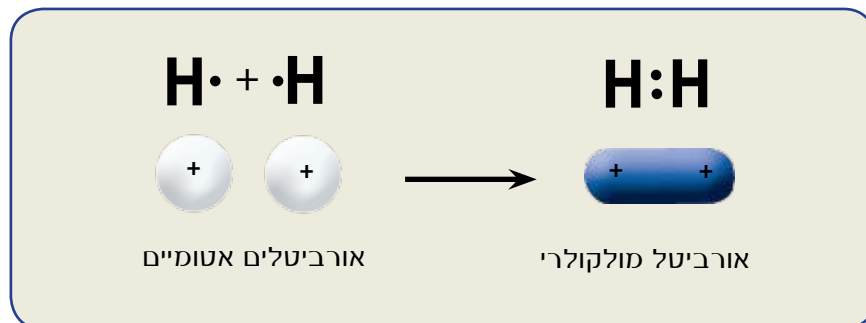


John A. Pople      Walter Kohn

## אורביטלים מולקולריים עבור מולקולות דו אטומיות

באיור 4 מתואר באופן סכימטי האורביטל המולקולרי המאכלס את שני האלקטרונים של המולקולה  $H_2$ :

איור 4: יצירת אורביטל מולקולרי קושר במולקולת מימן

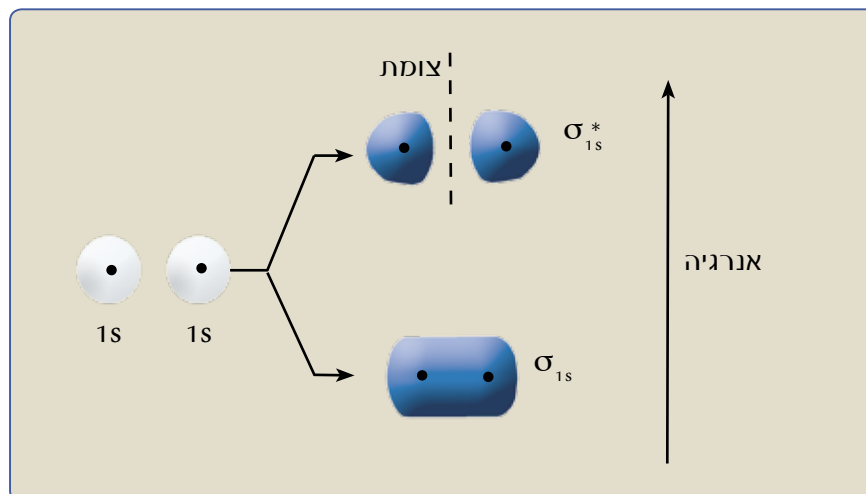


האורביטל המולקולרי מסומן כ- $\sigma_{1s}$ , וניתן להצגה כחיבור של שני האורביטלים האטומיים מטיפוס  $1s$  של שני האטומים המשתתפים בקשר. באורביטל מולקולרי זה, ההסתברות להימצאות אלקטרון באזור שבין שני הגרעינים גדלה בהשוואה לאורביטלים האטומיים הבודדים, ובכך מוסברת יציבות המולקולה בהשוואה לאטומים הבודדים.

אורביטל מולקולרי, בו צפיפות המטען באזור שבין הגרעינים גדולה, נקרא **אורביטל קושר** (bonding orbital).

במולקולה  $H_2$  מאוכלסים שני האלקטרונים באורביטל המולקולרי בעל האנרגיה הנמוכה ביותר,  $\sigma_{1s}$ . במולקולה קיימים אורביטלים מולקולריים נוספים, שאינם מאוכלסים באלקטרונים. אלקטרון שיתווסף למולקולה (למשל, ליצירת היון  $H_2^-$ ), לא יאוכלס באורביטל  $\sigma_{1s}$  שכן באורביטל זה כבר נמצאים שני אלקטרונים. אלקטרון זה יאוכלס באורביטל הבא, המתקבל אף הוא משני האורביטלים האטומיים מטיפוס  $1s$ .

איור 5: יצירת אורביטלים מולקולריים במולקולת מימן



איור 5 מתאר את יצירת שני האורביטלים המולקולריים במולקולת מימן. האורביטל בעל האנרגיה הגבוהה יותר,  $\sigma_{1s}^*$ , ניתן להצגה כחיסור שני האורביטלים האטומיים  $1s$ . באורביטל זה, ההסתברות למצוא אלקטרונים בין שני הגרעינים קטנה בהשוואה לאורביטלים האטומיים הבודדים. כאשר ההסתברות למציאת אלקטרונים בין הגרעינים החיוביים יורדת, אנרגיית הדחייה בין הגרעינים מערערת את יציבות המולקולה. אורביטל מולקולרי, שבו צפיפות המטען באזור שבין הגרעינים קטנה, נקרא **אורביטל אנטי-קושר** (antibonding orbital). אורביטלים אנטי קושרים מסומנים בכוכבית \*.

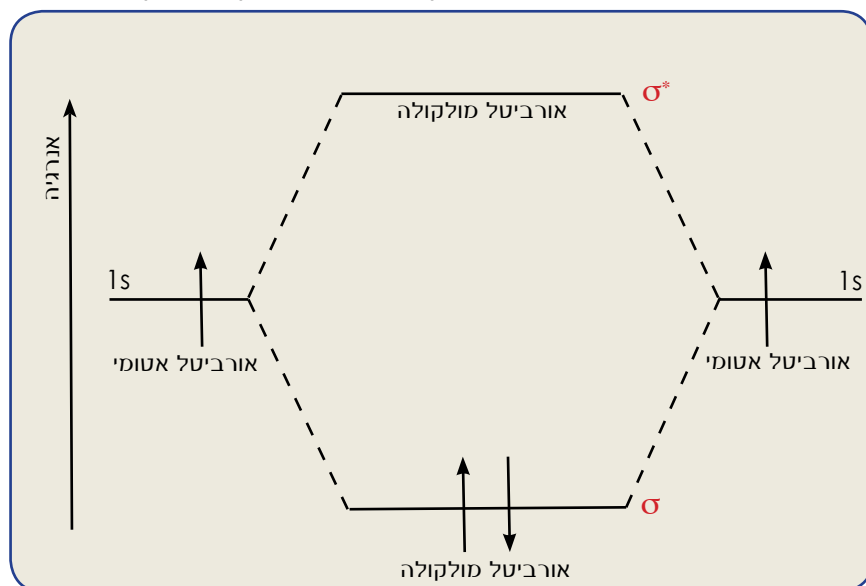
אורביטלים מולקולריים נקראים אורביטלי סיגמה,  $\sigma$ , כאשר הם סימטריים לגבי סיבוב סביב הקו המחבר את שני הגרעינים. התוספת  $1s$  מציינת, שהאורביטלים ניתנים לתיאור כחיבור (או חיסור) של שני אורביטלים אטומיים מסוג  $1s$ .

אורביטל  $\sigma_{1s}$  - האורביטל הקושר - הוא בעל אנרגיה נמוכה, הן מזו של האורביטל האנטי קושר והן מזו של האורביטלים האטומיים המקוריים  $1s$ . כאשר שני האלקטרונים עברו מאכלוס שני אורביטלי ה- $1s$  לאכלוס האורביטל המולקולרי הקושר  $\sigma_{1s}$ , נוצר קשר בין שני אטומי המימן. יצירת קשר היא תהליך אקסותרמי. אנרגיית הקשר H-H שנפלטת, היא בקירוב הפרש האנרגיה בין שני אלקטרונים באורביטלים האטומיים  $1s$  לבין שני אלקטרונים באורביטל המולקולרי  $\sigma_{1s}$ .

שימו לב, שבאורביטל האנטי קושר קיים מישור צומת (node או nodal plane) בין שני גרעיני האטומים (מסומן באיור 5 בקו מקווקו). בהשוואת אורביטלים מאותו סוג (למשל  $\sigma$ ), ככל שלאורביטל יש יותר מישורי צומת, כך האנרגיה שלו גבוהה יותר.

ניתן לצייר את דיאגרמת רמות האנרגיה עבור המולקולה  $H_2$  בצורה המוצגת באיור 6:

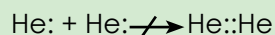
איור 6: דיאגרמת אכלוס אלקטרונים עבור מולקולת מימן



כששני אטומי המימן אינם קשורים, לכל אחד אלקטרון אחד באורביטל אטומי מסוג  $1s$ . עם היווצרות המולקולה  $H_2$ , שני האלקטרונים מאכלסים את האורביטל הקושר  $\sigma_{1s}$  ואין כלל אלקטרונים באורביטל האנטי קושר  $\sigma_{1s}^*$ . מולקולת המימן יציבה, שכן יש אלקטרונים רק באורביטל הקושר. שימו לב, שכל אורביטל מולקולרי יכול לאכלס שני אלקטרונים בעלי ספינים הפוכים, בדומה לאורביטל אטומי.

### ומה לגבי המולקולה $He_2$ ?

דיאגרמת רמות אנרגיה דומה תהיה גם למולקולה  $He_2$ . משני אורביטלי  $1s$  של  $He$ , ניתן ליצור אורביטל קושר ואורביטל אנטי-קושר. שני האלקטרונים יאכלסו באורביטל  $\sigma_{1s}$  ושני אלקטרונים באורביטל האנטי קושר  $\sigma_{1s}^*$ , הגבוה יותר באנרגיה. הרווח האנרגטי לאלקטרונים באורביטל הקושר מתקזז עם העלייה באנרגיה של האלקטרונים באורביטל האנטי קושר. לכן, המולקולה הדו אטומית  $He_2$  אינה יציבה ואינה קיימת.



### פעילות ממוחשבת 1: אורביטלים מולקולריים

התבוננו באתר:

<http://www.shef.ac.uk/chemistry/orbitron/index.html>

בסרגל משמאל, בחרו במולקולה  $H_2$ . הקליקו על הקישור "ס" והתבוננו בסימולציה.

מה מייצגות הנקודות השחורות בסימולציה?

ציירו במחברתכם את צורת האורביטל המתקבל.

היכן צפיפות האלקטרונים הגבוהה ביותר?

הקליקו על הקישור "ס\*", והתבוננו בסימולציה כיצד נוצרים אורביטלים אלה מן האורביטלים האטומיים.

ציירו במחברתכם את צורת אורביטל זה.

במה שונה צורת אורביטל זה מצורת האורביטל "ס"?

היכן צפיפות האלקטרונים הגבוהה ביותר במקרה של אורביטל זה?

### אורביטלים מולקולריים עבור מולקולות דו אטומיות מהשורה השנייה בטבלה המחזורית

במולקולות דו אטומיות של אטומים מן השורה השנייה בטבלה המחזורית, מאוכלסים יותר מארבעה אלקטרונים, ולכן אין די בשני האורביטלים המולקולריים הנמוכים מסוג "ס". האלקטרונים הנוספים מאוכלסים באורביטלים מולקולריים גבוהים יותר באנרגיה. אורביטלים אלה מתקבלים מזוגות של אורביטלים אטומיים גבוהי אנרגיה, המתאימים זה לזה ברמת האנרגיה ובצורתם המרחבית. באטומי השורה השנייה בטבלה המחזורית,

אלקטרוני הערכיות מאוכלסים בקליפת האנרגיה השנייה, הכוללת את אורביטלי  $2s$  ו- $2p$ . כאשר נוצרות מולקולות דו אטומיות, האלקטרונים מאוכלסים באורביטלים מולקולריים הנוצרים מאורביטלים אלה.

### כללים ליצירת אורביטלים מולקולריים ואכלוסם באלקטרונים

1.	אורביטלים מולקולריים נוצרים מחיבור וחיסור של אורביטלים אטומיים הדומים ברמת האנרגיה ובצורה המרחבית
2.	מחיבור וחיסור של שני אורביטלים אטומיים נוצרים שני אורביטלים מולקולריים
3.	שני האורביטלים המולקולריים שנוצרים הם אורביטל קושר - בעל אנרגיה נמוכה מזו של שני האורביטלים האטומיים, ואורביטל אנטי קושר - בעל אנרגיה גבוהה מזו של האורביטלים האטומיים
4.	מאכלסים את האורביטלים באלקטרונים החל מהאורביטל בעל האנרגיה הנמוכה ביותר
5.	בכל אורביטל ניתן לאכלס עד שני אלקטרונים - בעלי ספין הפוך (עקרון האיסור של פאולי)
6.	באורביטלים מנוונים (בעלי אנרגיה זהה) מאכלסים אלקטרון אחד בכל אחד מהם לפני שמוסיפים את האלקטרון השני (כלל הונד)

כמו  
באורביטלים  
אטומיים

### האם המולקולה $Li_2$ יציבה?

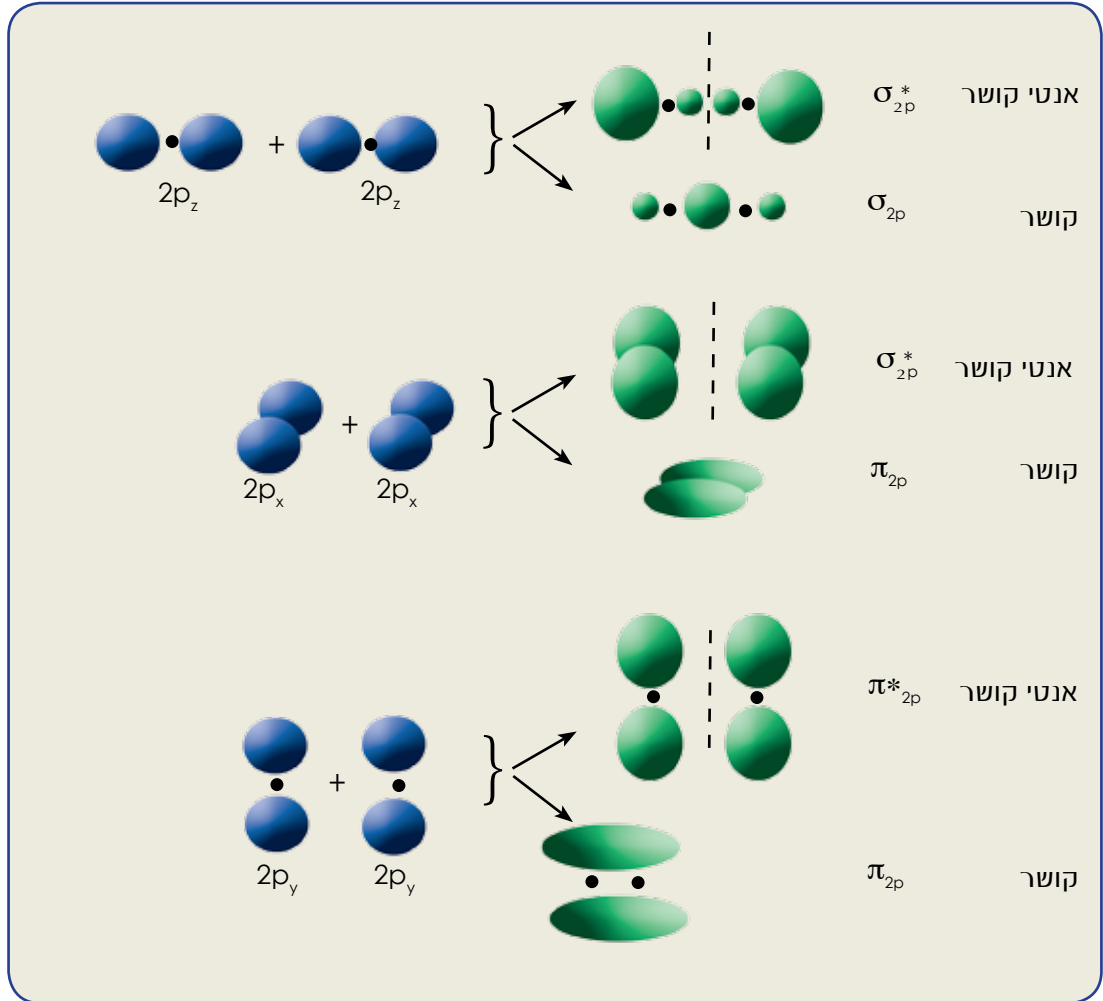
לכל אטום ליתיום יש שלושה אלקטרונים: שניים ברמה הראשונה, ואלקטרון אחד ברמת הערכיות, באורביטל  $2s$ . חיבור או חיסור בין שני אורביטלי  $2s$  יוצרים שני אורביטלים מולקולריים  $\sigma_{2s}$  ו- $\sigma_{2s}^*$ , בדומה למתקבל מאורביטלי  $1s$ .

שני אלקטרוני הערכיות של שני אטומי הליתיום, מאכלסים את האורביטל הקושר  $\sigma_{2s}$  בעוד שהאורביטל האנטי קושר,  $\sigma_{2s}^*$  ריק מאלקטרונים. מכאן, שהמולקולה יציבה, והיא אכן התגלתה בפאזה הגזית.

### האם המולקולה $Be_2$ יציבה?

ארבעת אלקטרוני הערכיות - שניים מכל אטום ברליום - מאכלסים את האורביטל  $\sigma_{2s}$  וגם את האורביטל  $\sigma_{2s}^*$  כמו במקרה של המולקולה  $He_2$ , הרווח האנרגטי לאלקטרונים באורביטל הקושר, מתקזז בקירוב עם העלייה באנרגיה של האלקטרונים באורביטל האנטי קושר, ולכן המולקולה  $Be_2$  אינה יציבה. באטומים הנמצאים בהמשך השורה, קיימים אלקטרוני ערכיות גם באורביטלי  $2p$ .

כיצד נוצרים אורביטלים מולקולריים מאורביטלי  $2p$ ?  
נתבונן באיור 7:



בציור העליון, שני אורביטלי  $p_z$  מתחברים ליצירת אורביטל קושר,  $\sigma_{2p}$ , הנמוך יותר באנרגיה, ואורביטל אנטי קושר,  $\sigma_{2p}^*$ , הגבוה יותר באנרגיה. שימו לב, שלאורביטל האנטי קושר יש מישור צומת בין הגרעינים. שני האורביטלים סימטריים ביחס לקו המחבר את שני הגרעינים ולכן הם אורביטלי סיגמה,  $\sigma$ . לעומת זאת, כאשר שני אורביטלי  $p_x$  מתחברים, החיבור אינו "ראש לראש" אלא "צד לצד". נוצרים שני אורביטלים שאינם סימטריים ביחס לקו המחבר את שני הגרעינים. אורביטלים מסוג זה נקראים אורביטלי פאי,  $\pi$ . מתקבל אורביטל קושר  $\pi_{2p}$  ואורביטל אנטי קושר  $\pi_{2p}^*$ . גם במקרה זה, לאורביטל האנטי קושר יש מישור צומת בין הגרעינים ואנרגיה גבוהה יותר מזו של האורביטל הקושר או של האורביטלים האטומיים.

החיבור בין שני אורביטלי  $p_y$ , יוצר שני אורביטלי  $\pi$  הזחים בצורתם לאורביטלים שהתקבלו בחיבור שני אורביטלי  $p_x$ , אך ניצבים להם.

## פעילות ממוחשבת 2: אורביטלים מולקולריים במולקולת החנקן

התבוננו באתר: <http://www.shef.ac.uk/chemistry/orbitron/index.html>

בסרגל משמאל, בחרו במולקולה  $N_2$ .

הקליקו על הקישורים של כל האורביטלים המולקולריים המופיעים באתר

והתבוננו כיצד נוצרים אורביטלים אלה מן האורביטלים האטומיים.

מה צורתם? ציירו במחברותיכם.

האם צפיפות האלקטרונים בין שני אטומי החנקן גבוהה או נמוכה בכל אחד

מן האורביטלים?

### דיאגרמות רמות אנרגיה

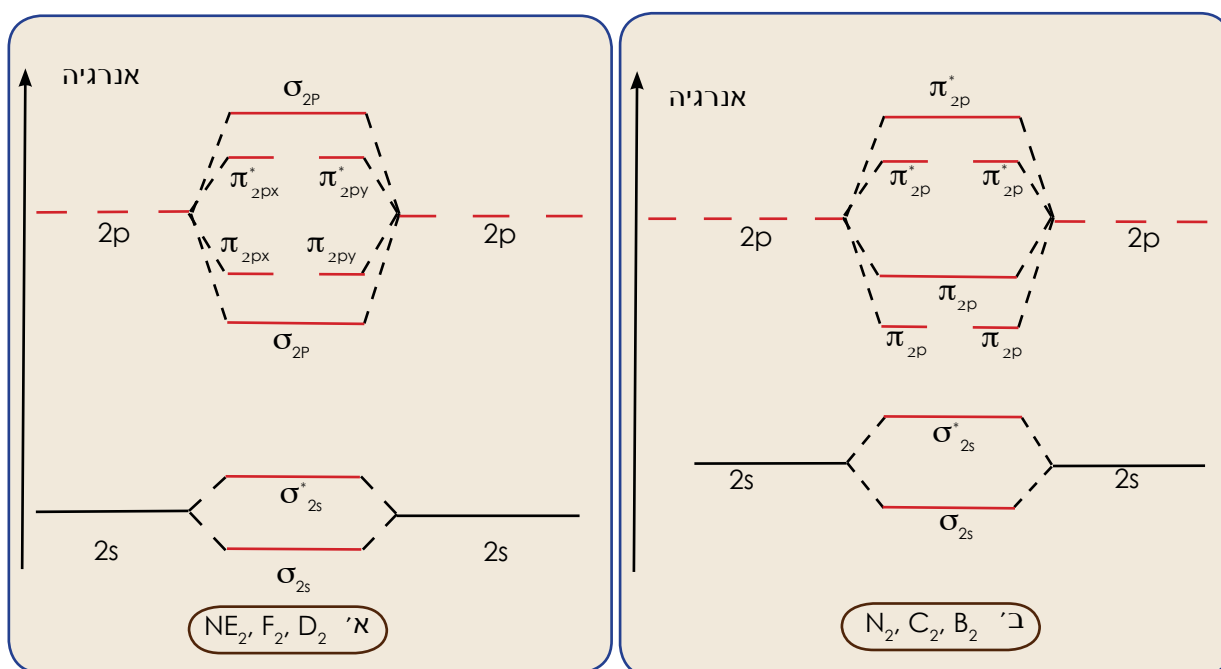
באיור 8 שלפניכם נתונות דיאגרמות רמות האנרגיה המתאימות למולקולות

דו אטומיות בעלות שני אטומים זהים (מולקולות דו אטומיות הומונוקלאריות)

מהשורה השנייה בטבלה המחזורית. דיאגרמה ב' מתאימה ל-  $N_2, C_2, B_2$

ודיאגרמה א' ל-  $Ne_2, F_2, O_2$ .

איור 8: דיאגרמות רמות אנרגיה עבור מולקולות דו אטומיות בשורה השנייה



אנו רואים, כי עבור  $Ne_2, F_2, O_2$  - לאורביטל המולקולרי  $\sigma_{2p}$  יש אנרגיה נמוכה מאשר לאורביטלי  $\pi_{2p}$ . ואילו עבור  $N_2, C_2, B_2$  - לאורביטלי  $\pi_{2p}$  יש אנרגיה נמוכה מזו של אורביטל  $\sigma_{2p}$ .

ניעזר בדיאגרמה המתאימה כדי לשער האם המולקולה  $N_2$  היא מולקולה יציבה. לכל אטום חנקן יש חמישה אלקטרוני ערכיות. עשרת אלקטרוני הערכיות של המולקולה מאכלסים את האורביטלים המולקולריים בצורה הבאה:  $\sigma_{2s}^2 \sigma_{2s}^{*2}$

$$\sigma_{2p}^2 \pi_{2p}^4$$

שימו לב לכך, שקיימים שני אורביטלי  $\pi_{2p}$ : האחד נוצר מחיבור של שני אורביטלי



$p_y$  והשני - משני אורביטלי  $p_x$ . שני האורביטלים שנוצרו זהים בצורתם ולכן הם בעלי אותה אנרגיה (אורביטלים מנוונים). מכיוון שיותר אלקטרונים מאוכלסים באורביטלים קושרים מאשר באנטי קושרים, המולקולה  $N_2$  יציבה.

## זמן תרגול 2: היערכות אלקטרונים במולקולות

1. רשמו באילו אורביטלים מאוכלסים האלקטרונים במולקולה  $F_2$ .
2. לאיזו מולקולה דו אטומית הומונוקלארית מהשורה השנייה בטבלה המחזורית, שייר אכלוס האלקטרונים הנתון? נמקו.  $\sigma_{2s}^2 \sigma_{2s}^{*2} \pi_{2px}^2 \pi_{2py}^2$
3. האם המולקולה  $Ne_2$  יציבה? היעזרו בהסברכם בדיאגרמת רמות האנרגיה המתאימה.

### סדר קשר

סדר קשר הוא מדד המאפשר לחזות את יציבותן היחסית של מולקולות על פי אכלוס האורביטלים המולקולריים שלהן. סדר הקשר מחושב על ידי חילוק מספר האלקטרונים באורביטלים הקושרים פחות מספר האלקטרונים באורביטלים האנטי קושרים ב-2, ונתון על ידי הנוסחה:

$$\text{סדר קשר} = \frac{(\text{מספר אלקטרונים באורביטלים אנטי קושרים}) - (\text{מספר אלקטרונים באורביטלים קושרים})}{2}$$

כאשר סדר הקשר של מולקולה קטן או שווה לאפס, המולקולה אינה יציבה. כאשר סדר הקשר גדול מאפס, המולקולה יציבה.

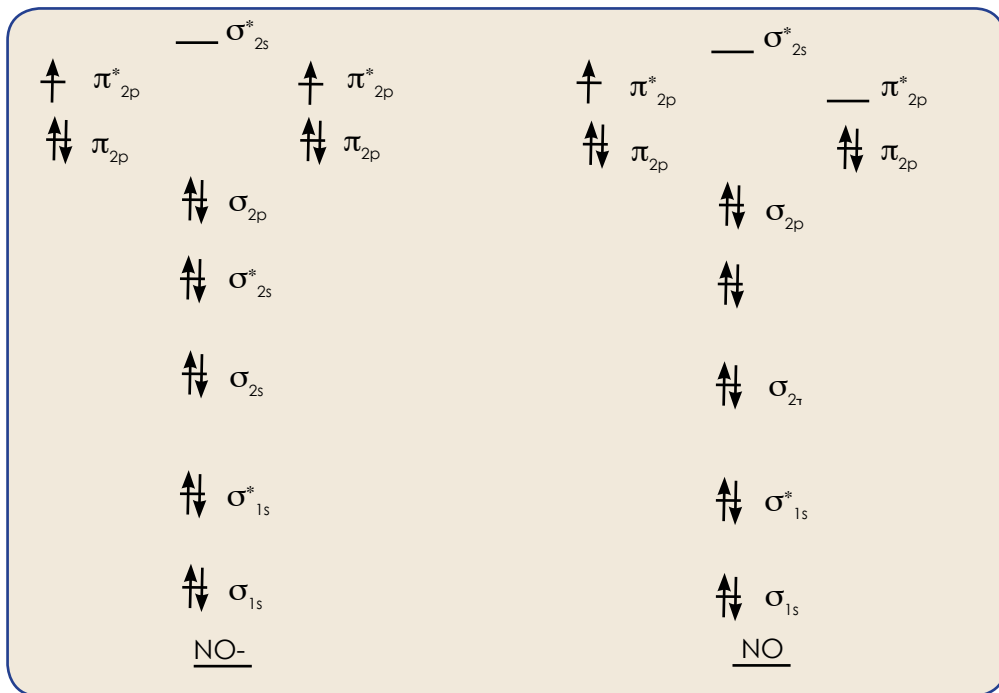
### דוגמאות לחישוב סדר קשר:

לפניכם אכלוס כל האלקטרונים עבור המולקולה  $N_2$ :  $\sigma_{1s}^2 \sigma_{1s}^{*2} \sigma_{2s}^2 \sigma_{2s}^{*2} \pi_{2p}^4 \sigma_{2p}^2$ . מספר האלקטרונים באורביטלים הקושרים הוא 10. מספר האלקטרונים באורביטלים האנטי קושרים הוא 4. חישוב סדר הקשר:  $3 = (10 - 4) / 2$ . מולקולה זאת יציבה מאוד.

עבור המולקולה  $He_2$ , אכלוס האלקטרונים הוא:  $\sigma_{1s}^2 \sigma_{1s}^{*2}$ . מספר האלקטרונים באורביטלים הקושרים הוא 2. מספר האלקטרונים באורביטלים האנטי קושרים הוא 2. חישוב סדר הקשר:  $0 = (2 - 2) / 2$ . מולקולה זאת אינה יציבה.

### זמן תרגול 3: סדר קשר

1. חשבו מהו סדר הקשר עבור המולקולות הדו-אטומיות  $Ne_2$ ,  $C_2$  ו- $F_2$ .
2. לפניכם דיאגרמות רמות אנרגיה סכמטיות של החומרים NO ו- $NO^-$ . איזה מהחומרים יציב יותר? נמקו.



#### תנאים לשיתוף אורביטלים אטומיים ליצירת אורביטלים מולקולריים

כאמור, תיאוריית האורביטלים המולקולריים מגדירה קשר כימי כקשר הנוצר משיתוף בין אורביטלים אטומיים. האורביטלים המולקולריים מתקבלים על ידי חיבור וחיסור של אורביטלים אטומיים. נשאלת השאלה - מהם התנאים שצריכים להתקיים על מנת ששיתוף בין זוג אורביטלים אטומיים יוביל ליצירת אורביטלים מולקולריים השונים מהאורביטלים האטומיים מהם נוצרו?

התבוננו באיור 8, בו מיוצגים אורביטלים מולקולריים כגון:  $\sigma_{2p}$ ,  $\sigma_{2s}$ ,  $\pi_{2p}$ . כל אורביטל מולקולרי נוצר משיתוף זוג אורביטלים אטומיים.

- במה דומים האורביטלים האטומיים המרכיבים את האורביטל המולקולרי  $\sigma_{2p}$ ?
- במה דומים האורביטלים האטומיים המרכיבים את האורביטל המולקולרי  $\pi_{2p}$ ?
- על פי איור זה, שערו מהם התנאים לשיתוף של אורביטלים אטומיים ליצירת אורביטל מולקולרי?

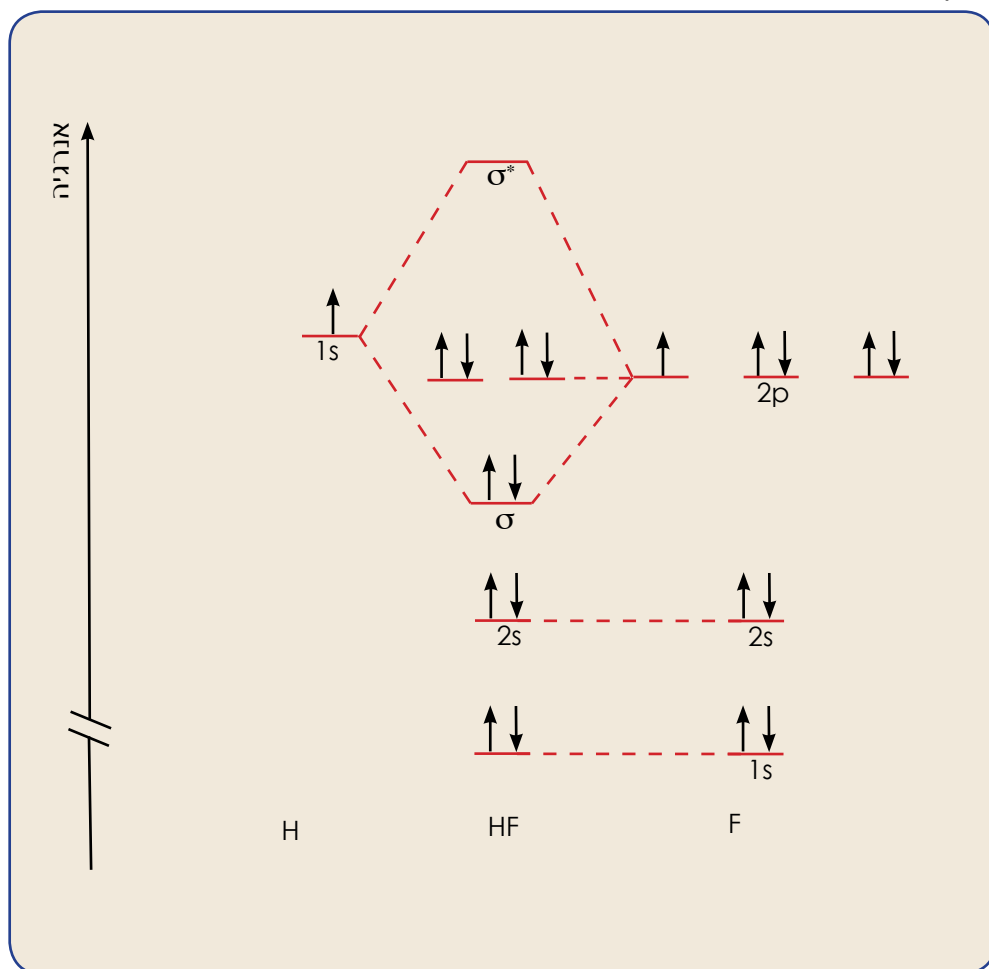
על פי תיאוריית האורביטלים המולקולריים, אורביטל מולקולרי השונה מהאורביטלים האטומיים המרכיבים אותו יתקבל כאשר:

- Ⓒ בין האורביטלים האטומיים קיימת חפיפה במרחב.
- Ⓒ קיימת התאמה באנרגיה של האורביטלים האטומיים.
- Ⓒ האורביטלים האטומיים בעלי סימטריה דומה.

במקרה של מולקולות דו אטומיות, בעלות שני אטומים זהים (מולקולות דו אטומיות הומונוקלאריות), קל יחסית לראות שמתקיימים התנאים לשיתוף אורביטלים אטומיים המאכלסים את אלקטרוני הערכיות ומתקבל קשר כימי קוולנטי שאינו קוטבי.

במקרה של מולקולות דו אטומיות, בעלות שני אטומים שונים, כמו מולקולת מימן פלואורי HF, הקשר הוא קשר קוולנטי קוטבי ואלקטרוני הקשר נוטים לכיוון אטום הפלואור. ניתן להבין את קוטביות הקשר על פי דיאגרמת האורביטלים המולקולריים המוצגת באיור 9. האורביטל המולקולרי הקושר  $\sigma$ , מתקבל משיתוף בין אחד מהאורביטלים האטומיים  $2p$  באטום הפלואור לבין אורביטל אטומי  $1s$  של אטום המימן. שני אורביטלים אטומיים אלו קרובים יחסית באנרגיה.

שימו לב, שאורביטל  $1s$  של אטום המימן אינו יוצר אורביטל מולקולרי עם האורביטל  $1s$  של אטום הפלואור, אלא רק עם אורביטל אטומי של פלואור המקיים את התנאים הנדרשים.



## אורביטלים מולקולריים במולקולות רב-אטומיות

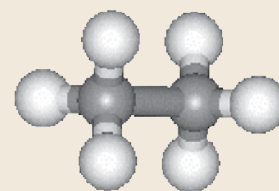
במולקולות רב אטומיות, התנאים ליצירת שיתוף בין אורביטליים אטומיים הם מורכבים וצורות השיתוף מגוונות, כך שקשה לתאר את דיאגרמת האורביטלים המולקולריים באופן פשוט.

נתבונן בפחמימן הרווי אתאן,  $C_2H_6$ , על פי מודל האורביטלים המולקולריים, הקשרים במולקולה נוצרים מאכלוס זוגות אלקטרונים באורביטלים מולקולריים קושרים מסוג  $\sigma$ .

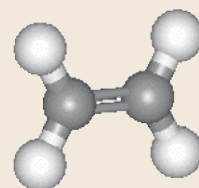
כל קשר C-H נוצר משיתוף של אורביטל  $1s$  של המימן עם אורביטלי הערכיות  $2s$  ו- $2p$  של הפחמן, ואילו קשר C-C נוצר משיתוף בין אורביטלי  $2s$  ו- $2p$  של שני הפחמנים.

כעת נתבונן בפחמימן הלא רווי אתן,  $C_2H_4$ . לפחמימן זה שני אטומי מימן פחות, ובין אטומי הפחמן נוצר קשר כפול.

כיצד ניתן להסביר את היווצרות הקשר הכפול? שני אלקטרונים נוספים, אחד מכל פחמן, (שבמולקולה  $C_2H_6$  אוכלסו באורביטלי הקישור לאטומי המימן), מאוכלסים כאן באורביטל קושר הנוצר מחיבור אורביטלי אטומי הפחמן. מכיוון שאורביטלי הסיגמא בין אטומי הפחמן כבר מאוכלסים, זוג האלקטרונים הנוסף מאכלס אורביטל קושר מטיפוס פאי, כבאיור 10:

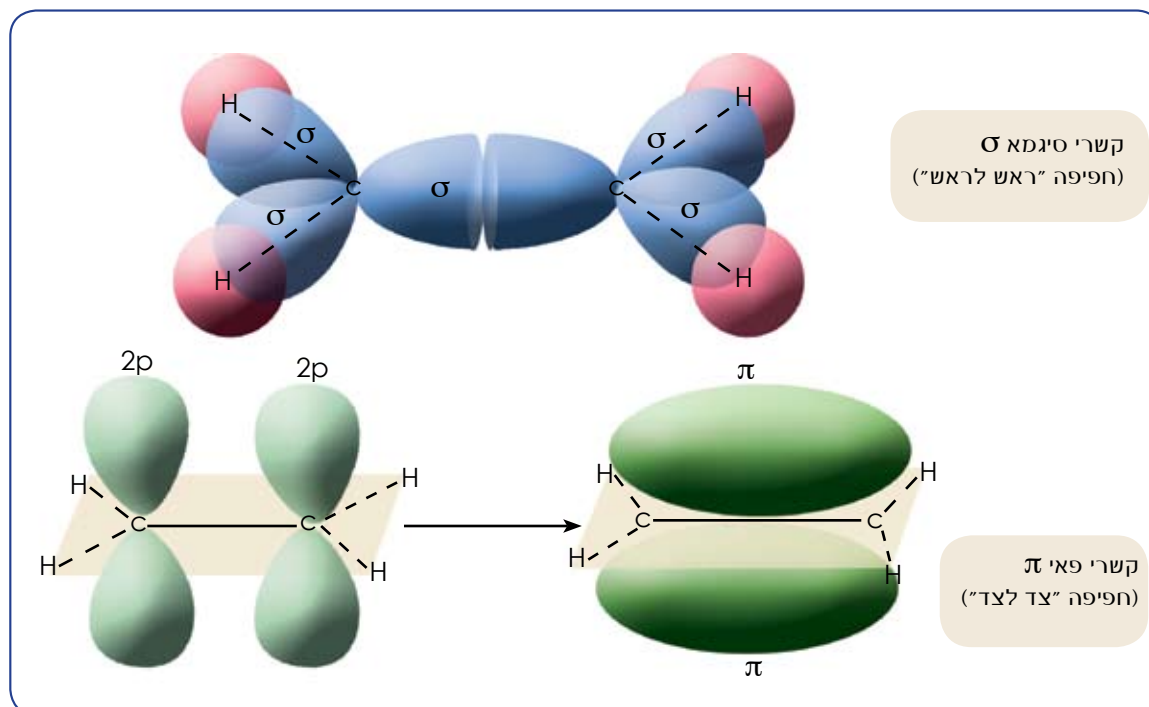


אתאן,  $C_2H_6$



אתאן,  $C_2H_4$

איור 10: יצירת אורביטלים קושרים במולקולה אתן



מכאן, שקשר כפול בין שני אטומי פחמן מכיל שני אלקטרונים באורביטל קושר מסוג  $\sigma$  ושני אלקטרונים באורביטל קושר מסוג  $\pi$ .

## אורביטלי HOMO ו-LUMO

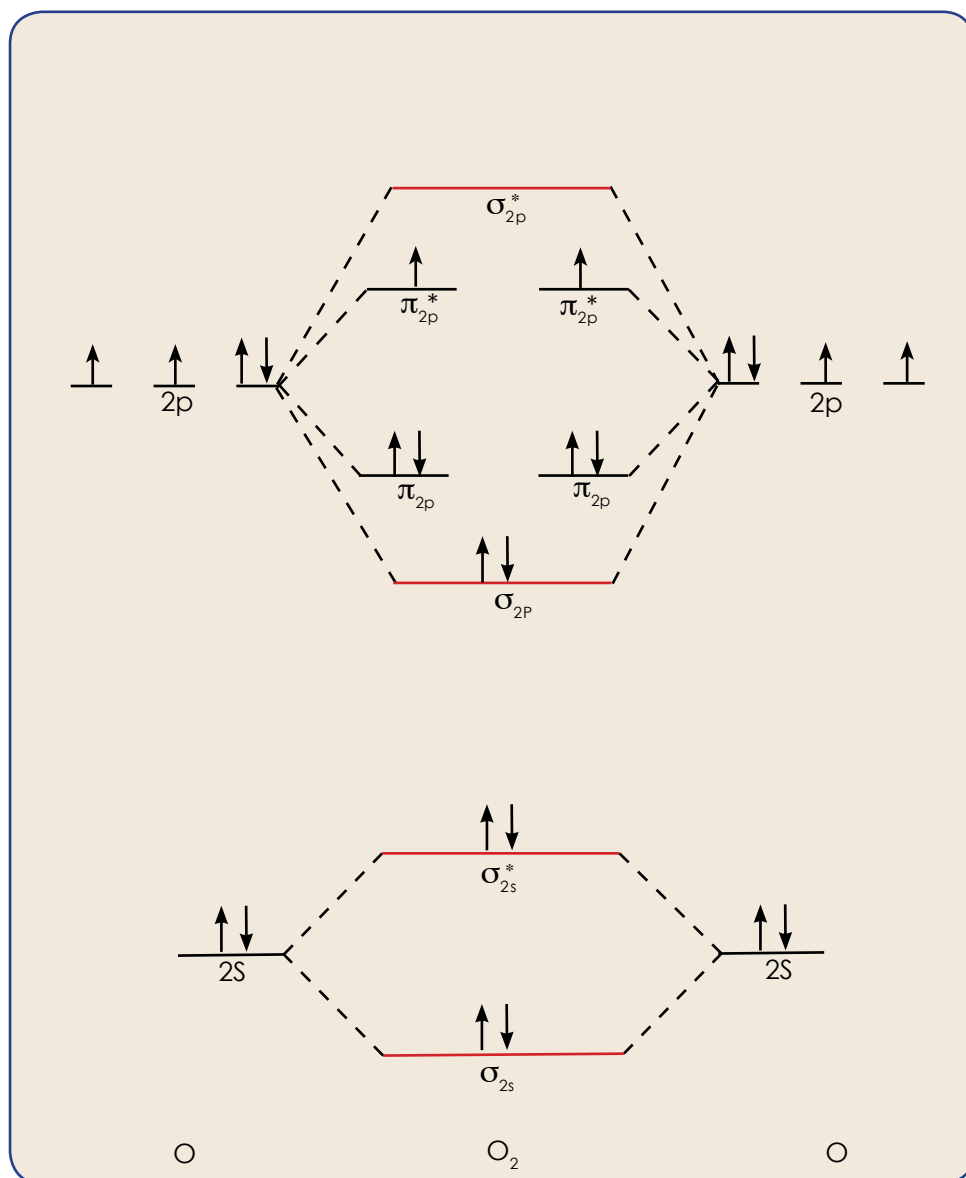
כפי שלמדנו, במצב היציב של מולקולה, מאוכלסים האלקטרונים באורביטלים המולקולריים לפי סדר אנרגטי עולה. האורביטל הגבוה ביותר באנרגיה, שמאוכלס באלקטרונים, נקרא HOMO.

(Highest Occupied Molecular Orbital).

האורביטל שמעליו, שהוא האורביטל הנמוך ביותר באנרגיה שאינו מאוכלס באלקטרונים, נקרא LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital) במולקולת המימן למשל, האורביטל  $\sigma_{1s}^*$  הוא ה-HOMO ואילו האורביטל  $\sigma_{1s}^*$  הוא ה-LUMO.

לפניכם איור 11, המתאר חלק מדיאגרמת רמות האנרגיה של המולקולה  $O_2$ :

איור 11: דיאגרמת אכלוס אלקטרונים במולקולת חמצן



בדיאגרמה ניתן לראות, כי האורביטל הגבוה ביותר באנרגיה, שמאוכלס באלקטרונים, הוא האורביטל  $\pi_{2p}^*$  ולכן הוא ה- HOMO, והאורביטל הנמוך ביותר באנרגיה, שאינו מאוכלס באלקטרונים, הוא האורביטל  $\sigma_{2p}^*$  ולכן הוא ה- LUMO.

שני אורביטלים אלה, הנקראים גם אורביטלי החזית (frontier orbitals), חשובים להבנת מנגנוני תגובות בכימיה ולהסבר של נתונים ספקטריים, ובפרט הצבע של חומרים מולקולריים.

בתגובות חימצון חוזר, לדוגמה, מולקולת המחזר מוסרת את האלקטרונים הנמצאים באורביטל ה- HOMO שלה. אלקטרונים אלה נמסרים למולקולת המחמצן באורביטל ה- LUMO שלה. כאשר מעוררים מולקולה, האלקטרונים הנמצאים באורביטל ה- HOMO עולים לרמות גבוהות יותר: אורביטל ה- LUMO או האורביטלים שמעליו.

## זמן תרגול 4: אורביטלי HOMO ו-LUMO, גחליליות ומקלות זוהרים



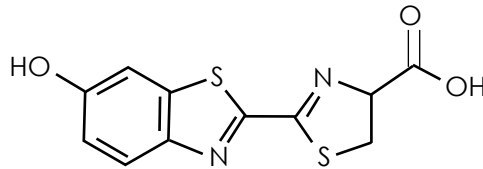
1. רשמו מהו אורביטל ה-HOMO ומהו אורביטל ה-LUMO עבור המולקולות  $F_2$  ו- $C_2$ .
2. קראו את המידע הבא וענו על השאלות.



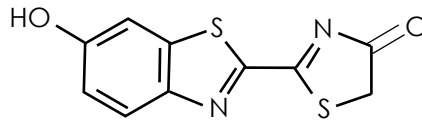
### מה בין גחלילית לחקר החלל?

מדוע הגחלילית מאירה?

בגופה של הגחלילית קיים חומר הנקרא לוציפרין (מן המילים הלטיניות lux - אור ו-ferre - נושא, כלומר - נושא אור).



כאשר חמצן מגיע לתאים בהם נמצא הלוציפרין יחד עם אנזים הנקרא לוציפראז, הלוציפרין מתחמצן לאוקסילוציפרין:



האוקסילוציפרין נוצר במצב מעורר, וכאשר האלקטרונים חוזרים לאורביטלי ה-HOMO, נפלטת אנרגיה. אצל גחליליות, האנרגיה הנפלטת היא בתחום הנראה, וצבעה ירוק-צהוב.

הגחליליות משתמשות בתאורה לצורך חיזור.

ומה הקשר בין הגחלילית לחקר החלל?

בתהליך החימצון של לוציפרין לאוקסילוציפרין, משתתפת גם מולקולת ATP - מולקולה הנמצאת בכל תא חי והמשתתפת בתהליכים בהם נחוצה אנרגיה.

בעזרת התגובה המתרחשת בגוף הגחלילית, ניתן יהיה, אולי לגלות סימני חיים על כוכבי לכת אחרים.

מכשיר אלקטרוני, שיונחת על כוכב לכת, יערבב דגימה של אדמת הכוכב עם לוציפרין, לוציפראז, מים וחמצן.

אם לפתע התערובת תאיר, הרי שבאדמת הכוכב קיים ATP המצביע על צורת חיים כלשהי על פני הכוכב. שיטה זו רגישה מאוד ופועלת גם בנוכחות כמויות קטנות מאוד של ATP.

3. התבוננו במקל הזוהר (stick light) שלפניכם. רשמו את כל תצפיותיכם.
4. הפעילו את המקל על ידי שבירת המיכל הפנימי וצפו במתרחש.
5. נסחו שלוש שאלות המתעוררות בעקבות התצפית.
6. קראו את המידע הבא:

### אלקטרונים "מעוררים" והמקלות הזוהרים!

מקלות זוהרים הפכו בשנים האחרונות ללהיט אטרקטיבי ושימושי בחגיגות ואירועים. הם מופיעים בצורת שרשראות זוהרות וצמידים, ומשמשים אף לתאורה עבור מטיילים וצוללנים. יתרונם הוא בהיותם בטיחותיים, ניידים וזולים יחסית.

כבדרך קסם, מאירים המקלות באור זוהר ומרהיב, ללא נורה או סוללה. כיצד זה מתרחש?

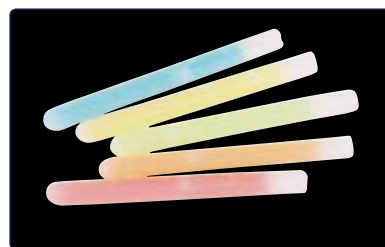
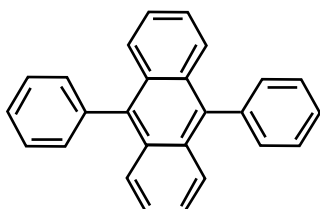
פליטת האור נובעת מפליטת אנרגיה כתוצאה מתגובה כימית המתרחשת כתוצאה של ערבוב תמיסות שונות בתוך המקל, בתהליך שנקרא כמילומינסנציה.

ברוב המקלות הזוהרים משתמשים בחומר צבע, תמיסת מימן על חמצני ( $H_2O_2$ ) ותמיסת האסטר פניל אוקסלט.

בשרשרת תגובות כימיות בין תמיסת המימן העל חמצני לבין האסטר, משתחררת אנרגיה הנקלטת על ידי מולקולות חומר הצבע. מולקולות אלה פולטות את עודף האנרגיה בתהליך ספונטני, הנקרא לומינסנציה, שבו עוברים האלקטרונים למצב נמוך אנרגיה והאנרגיה העודפת משתחררת בצורה של אור. לפני הפעלת המקל הזוהר, מופרדות התמיסות זו מזו. תמיסת האסטר ממלאת את רוב מיכל הפלסטיק ממנו עשוי המקל. תמיסת המימן העל חמצני מוחזקת במיכל קטן ושביר עשוי זכוכית במרכז המקל. כיפוף המקל שובר את המיכל בו מוחזקת תמיסת המימן העל חמצני, שתי התמיסות באות במגע והתגובה מתחילה להתרחש.

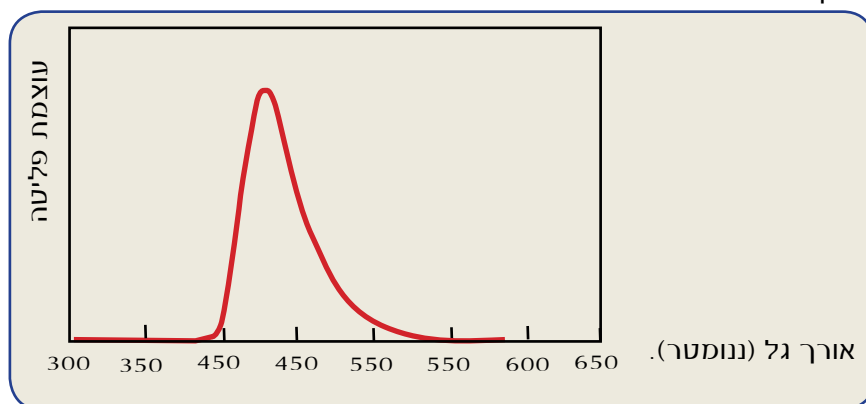
פליטת האור כתוצאה מתגובה כימית היא תופעה מוכרת בעולם החי. הגחליליות הן מודל יעיל לניצול תגובות כימיות ליצירת אור. בעוד שיעילות המקלות הזוהרים, מעשה ידי האדם, היא כ- 23%, מפיצות הגחליליות אור ביעילות הקרובה ל- 90%.

- א. הציגו באמצעות ציור או סכמה את עקרון פעולתו של המקל הזוהר.
- ב. במה דומה ובמה שונה פעולת המקל מפעולת ההארה שבגחלילית?
- ג. מקל זוהר מסוים מכיל חומר צבע בעל הנוסחה הבאה:





ספקטרום הפליטה של החומר הוא:



קבעו באיזה צבע יאיר המקל? נמקו תשובתכם.



### תרכובות אורגניות כחומרי צבע

תרכובות אורגניות רבות מהוות מרכיב חשוב ביופיו של הטבע סביבנו והן אחראיות לצבעים של פרחים, שיחים ופירות. המשך הפרק יעסוק בקשר בין מבנה תרכובות אלו ותכונות הצבע.

#### ניסוי וירטואלי 1 - הפרדת חומרי הצבע שבעלה

התבוננו בסרטון שבאתר:

[Video.uni-regensburg.de:8080/ramgen/fakultaeten/chemie/org\\_chemie/demonstratimexperimente/column\\_chromatography.rm](https://video.uni-regensburg.de:8080/ramgen/fakultaeten/chemie/org_chemie/demonstratimexperimente/column_chromatography.rm)

באתר מוצגת הפרדה של חומרי צבע בעלה על עמודה.

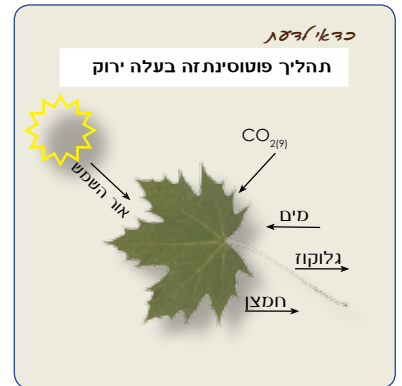
- רשמו את תצפיותיכם בעת הניסוי.
- מהם הצבעים שהתגלו בעלה?
- מדוע לדעתכם, מרבית העלים ירוקים למרות שהם מכילים חומרי צבע נוספים?
- האם לדעתכם, יתכן כי עלים אדומים מכילים גם חומרי צבע אחרים? נמקו תשובתכם.

## זמן תרגול 5: צבעי עלים

קראו את המידע וענו על השאלות.

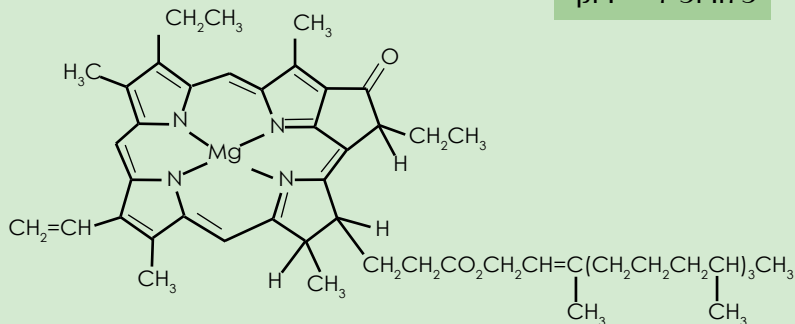
### עלי שלכת

מדוע משנים העלים את צבעם בסתיו?  
 עלי הקיץ הירוקים מכילים כמות גדולה של הצבען (pigment) כלורופיל. הכלורופיל בולע אור נראה בתחום אורכי הגל האדומים והכחולים ומחזיר את האור הירוק ולכן העלה נראה לעינינו בצבע ירוק. האור שנבלע ע"י הכלורופיל מספק את האנרגיה הדרושה לתגובה האנדותרמית של הפוטוסינתזה, שבה הופך הצמח מים ופחמן דו חמצני לחמצן וגלוקוז. הכלורופיל ממסך ומסתיר את צבעיהם של צבענים אחרים הנמצאים בעלה בגלל כמותו הרבה. קרינת השמש הורסת את הכלורופיל ובמהלך חודשי הקיץ הצמח יוצר כל הזמן כלורופיל חדש. ייצור הכלורופיל דורש אור וטמפרטורות גבוהות, ולכן כשהסתיו מגיע, ייצור הכלורופיל מואט וצבעיהם של צבענים אחרים הנמצאים בעלה מתחילים להתגלות לעינינו. אלה הם הקרוטנואידים - התורמים את צבעי הצהוב, הכתום והחום, האנתוציאנינים בעלי הצבעים הסגולים והאדומים וחומרים נוספים. הבשלת פירות מלווה בתהליך דומה: פירות בוסר הם ירוקים בגלל תכולת הכלורופיל הגבוהה שבהם. עם הבשלת הפרי, ייצור הכלורופיל מואט, וצבעם של צבענים אחרים הנמצאים בפרי נגלה לעינינו.

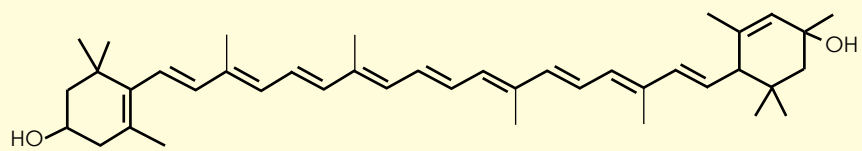


1. לפניכם נוסחאות של מספר חומרים צבעוניים המצויים בעלים:

### כלורופיל - ירוק



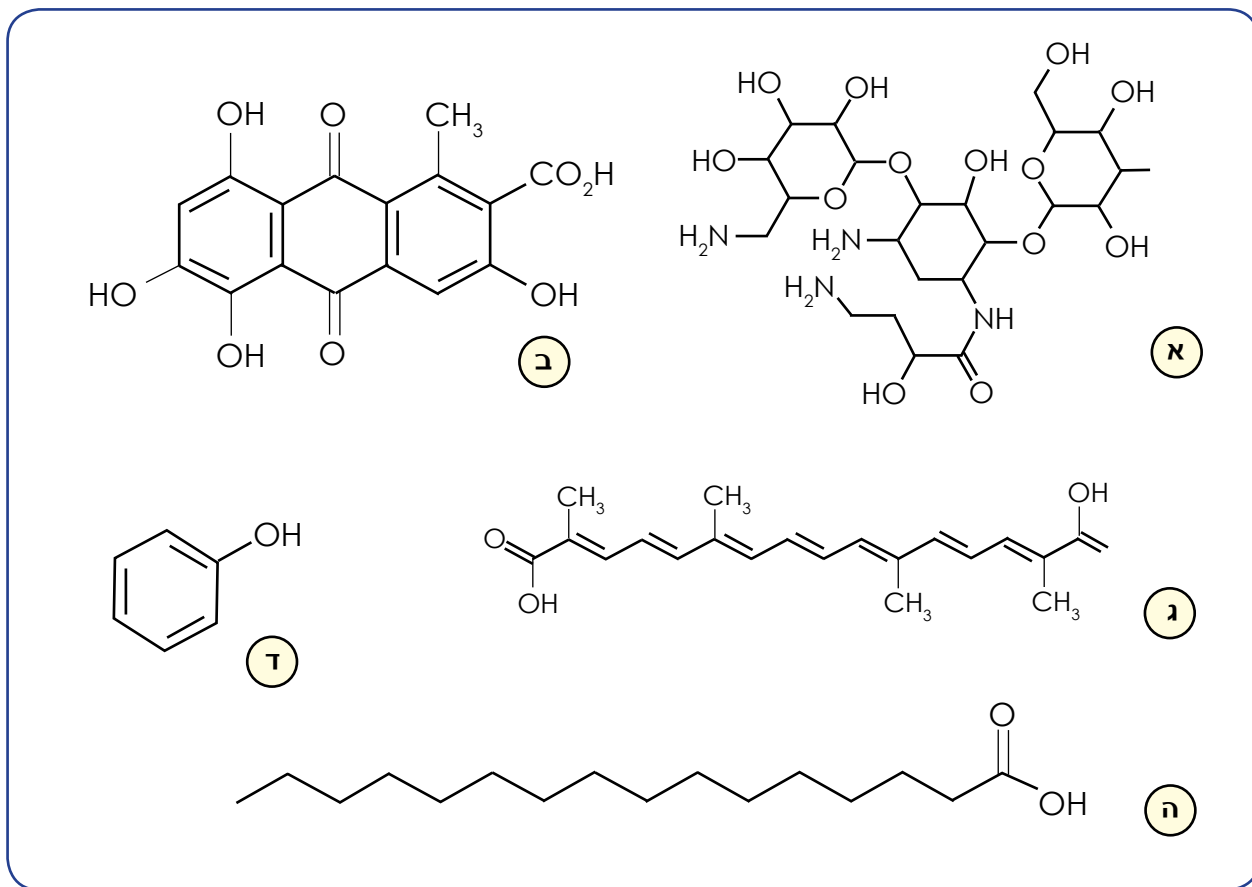
אנטיציאנין - סגול



קסנטופיל - צהוב

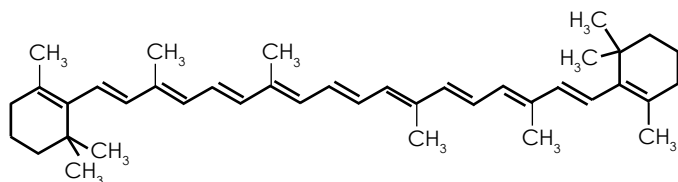
התבוננו בנוסחאות המולקולות של שלושת החומרים הצבעוניים: האם תוכלו לחשוב על גורמים משותפים לחומרים אלה, שיסבירו מדוע כולם צבעוניים?

2. על פי תשובתכם לשאלה הקודמת, נסו לקבוע האם החומרים הבאים יהיו צבעוניים. נמקו בקצרה את תשובותיכם לגבי כל אחד מהחומרים.



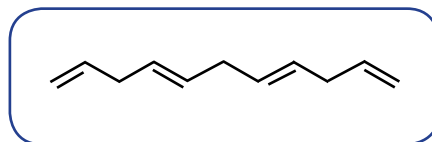
### מולקולות מצומדות

האם קיים קשר בין מבנה המולקולה לצבע החומר? במולקולות של חומרי צבע אורגניים קיימת מערכת של קשרי פחמן - פחמן בודדים וכפולים לסירוגין. מולקולה, שבה קיימת מערכת כזאת של קשרים, נקראת מולקולה מצומדת (conjugated molecule). לדוגמה, צבעם הכתום של גזר ודלעת נובע מנוכחות החומר בטתה - קרוטן:

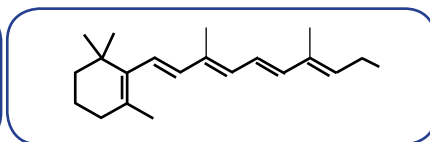


במולקולה של בטתה - קרוטן ישנם אחד עשר קשרים כפולים מצומדים.

○ האם המולקולות הבאות הן מולקולות מצומדות? נמקו תשובתכם.



II



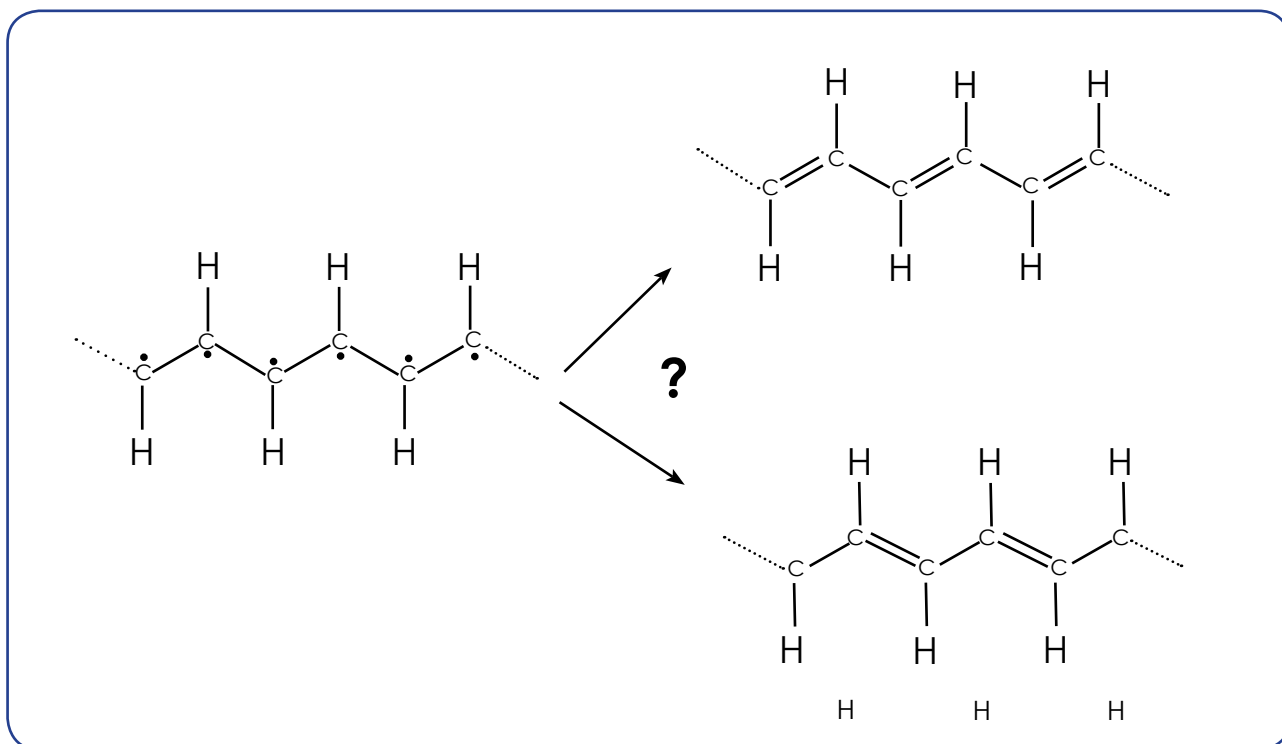
I

## אורביטלים מולקולריים של מולקולות אורגניות מצומדות - אל איתור

כפי שלמדנו בראשית פרק זה, במולקולה  $C_2H_4$ , נוצר קשר כפול בין שני אטומי פחמן שכנים, כאשר שני אלקטרונים (אחד מכל אטום פחמן) מאכלסים אורביטל קושר מסוג  $\sigma$ , ושני אלקטרונים (אחד מכל פחמן) מאכלסים אורביטל קושר מסוג  $\pi$ .

נתבונן כעת באיור 12, המתאר קטע מפחמימן מצומד בעל שרשרת ארוכה המכילה קשר כפול וקשר יחיד לסירוגין:

איור 12: קישור במולקולה מצומדת



מהו התיאור הנכון של הקישור במולקולה? האם התמונה העליונה מייצגת אותו נאמנה, או אולי התחתונה? בשרשרת הארוכה שלפנינו, בין כל שני פחמנים קיים קשר מסוג  $\sigma$ . כזכור, הסברנו את יצירת הקשר הכפול על ידי אכלוס

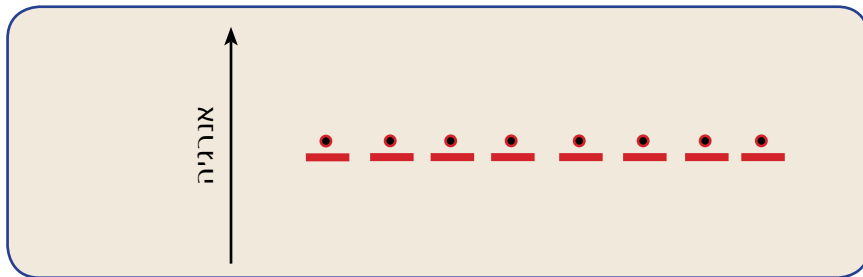
זוג אלקטרונים משני פחמנים שכנים באורביטל  $\pi$  קושר ביניהם. אך בין אילו פחמנים יוצרו קשרי ה- $\pi$ ? האם פחמן מסוים ייצור את קשר ה- $\pi$  עם הפחמן שמשמאלו או מימינו?

התשובה על פי מודל האורביטלים המולקולריים היא, ששתי התמונות נכונות במידה שווה, ולכן אף אחת מהן אינה מייצגת נאמנה את סידור האלקטרונים במולקולה המצומדת. העובדה, שאלקטרון במערכת קשרי ה- $\pi$  פנוי ל"זיווג" במידה שווה עם יותר משכן אחד, משמעה, שהאלקטרון אינו מאותר בקשר זה או אחר. למעשה, מאוכלסים אלקטרוני הקשרים הכפולים באורביטלים מולקולריים משתרעים לכל אורך המערכת המצומדת.

כיצד ניתן להבין זאת באופן איכותי על פי מודל האורביטלים המולקולריים? כפי שראינו בראשית הפרק, מחיבור וחיסור של שני אורביטלים שכנים נוצרים שני אורביטלים משותפים: האחד - נמוך באנרגיה, והאחר - גבוה באנרגיה, בהשוואה לאורביטלים המקוריים.

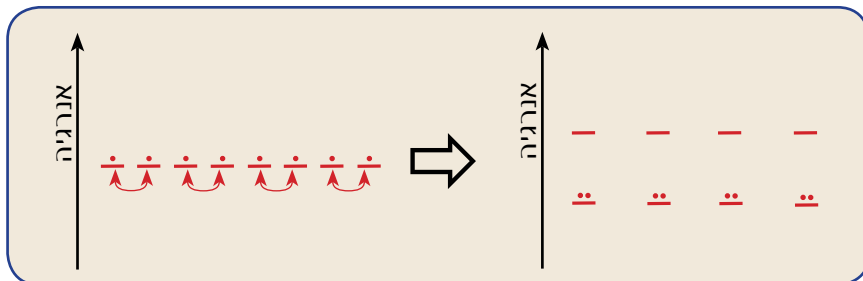
מתברר, כי ניתן להכליל עקרון זה ולהבין על פיו גם את המבנה האלקטרוני של שרשרת אטומי הפחמן המצומדים. כדוגמה, נדון בשרשרת ובה שמונה אטומי פחמן. כל אחד מאטומי הפחמן משתף שלושה אלקטרוני ערכיות באורביטלי  $\sigma$  עם שכניו ונותר לו אלקטרון אחד, הפנוי לשיתוף בקשרי  $\pi$ , כך שכל אטום פחמן תורם אלקטרון אחד למערכת ה- $\pi$  כפי שניתן לראות באיור 13.

איור 13: אלקטרוני אטומי הפחמן במערכת ה- $\pi$



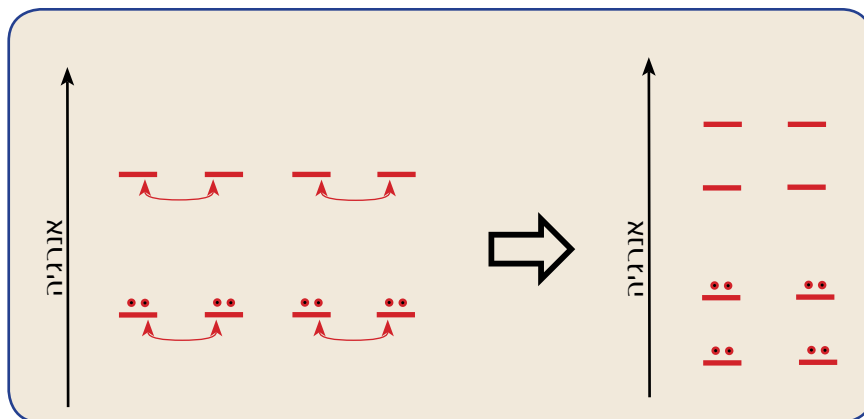
בשלב ראשון נחלק את השרשרת לזוגות של פחמנים באופן שרירותי. בכל זוג, מחיבור וחיסור של האורביטלים השכנים ייווצרו שני אורביטלים מולקולריים, האחד גבוה יותר באנרגיה והשני נמוך יותר באנרגיה. בסך-הכל, נקבל ארבעה אורביטלים בעלי אנרגיה נמוכה יותר, שבהם יאוכלסו האלקטרונים על-פי כללי האכלוס, כמוצג באיור 14:

איור 14: שיתוף בין אורביטלי ה- $\pi$



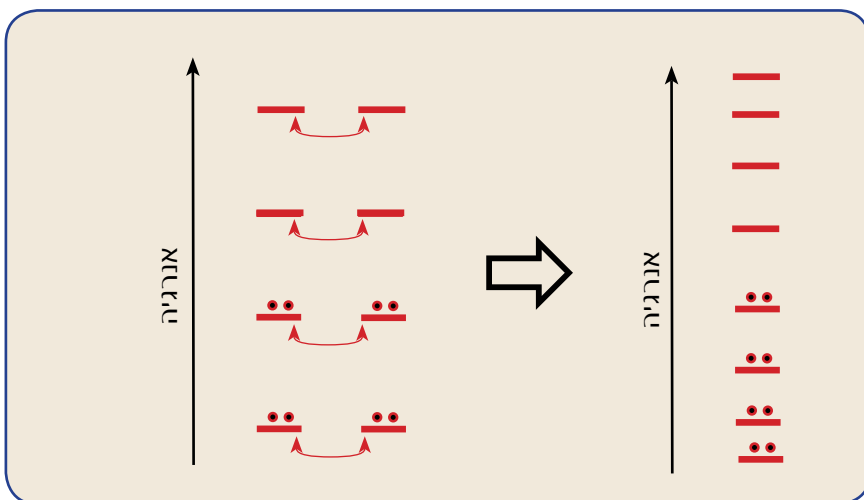
שיתוף האלקטרונים אפשרי גם בין שני זוגות סמוכים: מכל שני אורביטלים מולקולריים שכנים שנוצרו בשלב הקודם, ניתן ליצור שני אורביטלים, כאשר כל אורביטל משותף לרביעייה של אטומי פחמן. שוב יאוכלסו האלקטרונים על פי כללי האכלוס כפי שניתן לראות באיור 15:

איור 15: שיתוף בין אורביטלים מולקולריים:



ניתן להמשיך וליצור שיתוף אלקטרונים גם בין הרביעיות השכנות. מכל שני אורביטלים שכנים, ניתן ליצור שני אורביטלים (כאשר כל אורביטל משותף לשמינייה של אטומי פחמן). האלקטרונים יאוכלסו, כמובן, באורביטלים הנמוכים באנרגיה כפי שניתן לראות באיור 16:

איור 16: המשך שיתוף בין אורביטלים מולקולריים



בצורה דומה, ניתן להמשיך ולתאר את אכלוס האלקטרונים ברמות גם עבור שרשראות ארוכות יותר.

השוואת דיאגרמות אכלוס האלקטרונים ברמות האנרגיה, שציינו עבור זוג, רביעייה ושמינייה אטומי פחמן, מגלה, כי ככל שמאריכים את השרשרת המצומדת, נוספות רמות אנרגיה חדשות לאכלוס האלקטרונים, ובסך-הכל,

האנרגיה במערכת יורדת. אנו רואים, כי האורביטל הגבוה ביותר באנרגיה, שמאוכלס באלקטרונים (HOMO), עולה באנרגיה, אך האורביטל הנמוך ביותר באנרגיה, שאינו מאוכלס באלקטרונים (LUMO), יורד באנרגיה: **הפרש האנרגיה בין אורביטל ה-HOMO לאורביטל ה-LUMO, מצטמצם ככל שהמערכת המצומדת ארוכה יותר (או, ככל שמספר אטומי הפחמן במערכת המצומדת גדול יותר).**

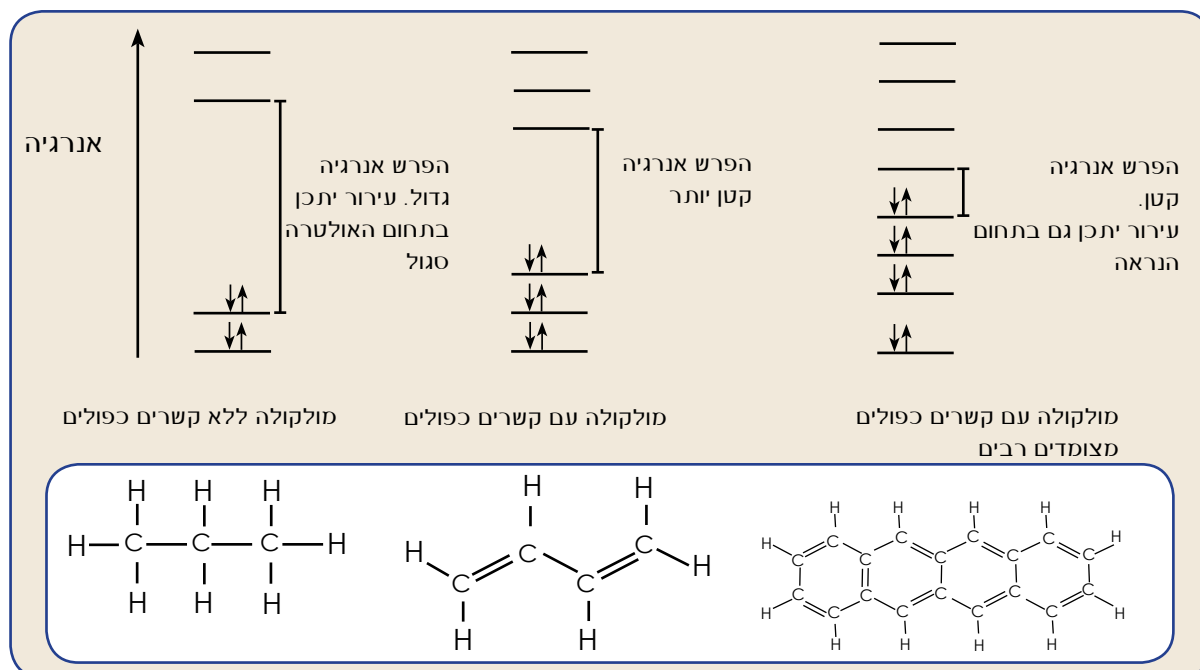
כאשר מולקולה בולעת פוטון בעל מנת אנרגיה מתאימה, יתבצע עירור אלקטרוני, ואלקטרון יעבור מה-HOMO ל-LUMO, או לרמות גבוהות יותר (LUMO+1, LUMO+2 וכו'), בהתאם למנת האנרגיה של הפוטון.

במולקולות, שבהן אין כלל קשרים כפולים, האלקטרונים מאוכלסים באורביטלים מולקולריים מסוג  $\sigma$  בלבד. ההפרש האנרגטי בין אורביטל  $\sigma$  לאורביטל  $\sigma^*$  הוא גבוה, ולכן לפוטון בתחום הנראה אין אנרגיה מספיק כדי לגרום לעירור אלקטרוני. פוטון בתחום האולטרה סגול, שהוא באנרגיה גבוהה יותר, יוכל לגרום לעירור אלקטרוני. חומרים אלה יהיו חסרי צבע כנוזלים, ולבנים כמוצקים.

במולקולות, שבהן קשרים כפולים, כמו בדוגמא שהכרנו,  $C_2H_4$ , האלקטרונים מאוכלסים גם באורביטלים מולקולריים מסוג  $\pi$ . ההפרש האנרגטי בין אורביטל  $\pi$  לאורביטל  $\pi^*$  נמוך יותר מההפרש בין  $\sigma$  ל- $\sigma^*$ .

במולקולות אורגניות מצומדות, שבהן קשרי  $\pi$  לא מאותרים, ככל שבמולקולה יש יותר קשרים כפולים מצומדים, הפרש האנרגיה בין ה-HOMO ל-LUMO מצטמצם, ולכן, במקרים רבים, גם לקרינה בתחום הנראה יש מספיק אנרגיה כדי לגרום לעירור אלקטרוני. במקרים אלה, החומרים יבלעו קרינה בתחום הנראה ויהיו צבעוניים.

איור 17: הקשר בין מבנה המולקולה לעירור אלקטרוני





כאשר חומר המורכב ממולקולות מצומדות בולע חלק מאורכי הגל בתחום הנראה, אורכי הגל שלא נבלעו נקלטים ע"י עינינו. נתבונן בדוגמה הבאה. בטבלה שלפניכם נתונים אורכי הגל של הבליעה  $\pi \rightarrow \pi^*$ , עבור סדרת חומרים, שבהם מספר הקשרים המצומדים הולך וגדל:

מספר הקשרים הכפולים המצומדים	המולקולה	אורך הגל של הבליעה (nm)
1	$\text{CH}_2=\text{CH}_2$	180
2	$\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}_2$	217
3	$\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}_2$	268
4	$\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}_2$	310
5	$\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}_2$	335

מהטבלה ניתן לראות, כי ככל שמספר הקשרים המצומדים במולקולה גדל, אורך הגל הנבלע גדל. מדוע? ההפרש האנרגטי בין אורביטל ה-HOMO לאורביטל ה-LUMO, הולך ומצטמצם ככל שמספר הקשרים הכפולים המצומדים עולה, ומכיוון שקיים יחס הפוך בין אורך הגל לאנרגיה, ככל שהאנרגיה הנדרשת לעירור האלקטרוני קטנה, אורך הגל גדל. הקשר בין האנרגיה ואורך הגל מתואר בנוסחה הבאה:

$$\Delta E = E(\text{LUMO}) - E(\text{HOMO}) = h\nu = hc / \lambda$$

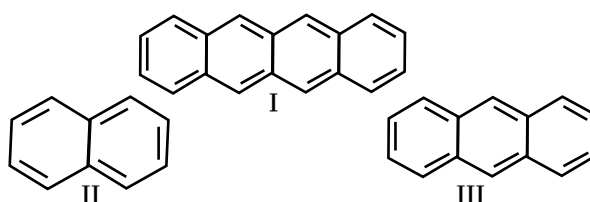
$$E = \text{אנרגיה של מנת קרינה (פוטון) הנמדדת בג'אול J}$$

$$h = \text{קבוע פלנק אשר ערכו } 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{sec}$$

$$v = \text{תדירות הקרינה אשר יחידותיה } 1/\text{sec}$$

### זמן תרגול 6: קשרים מצומדים וחומרי צבע

- בהנחה שכל קשר כפול מצומד נוסף מקטין את ההפרש בין ה-HOMO ל-LUMO, כך שאורך הגל הגורם לעירור גדל ב-30 nm, חשבו כמה קשרים כפולים צריכים להיות במולקולה הקצרה ביותר בסדרת המולקולות המופיעה בטבלה, כדי שאורך הגל הגורם לעירור יהיה בתחום הנראה.
- אחד מן החומרים שלפניכם הוא בעל צבע כתום-אדום. שני החומרים האחרים הם לבנים במצב צבירה מוצק. מיהו החומר הכתום-אדום? נמקו.



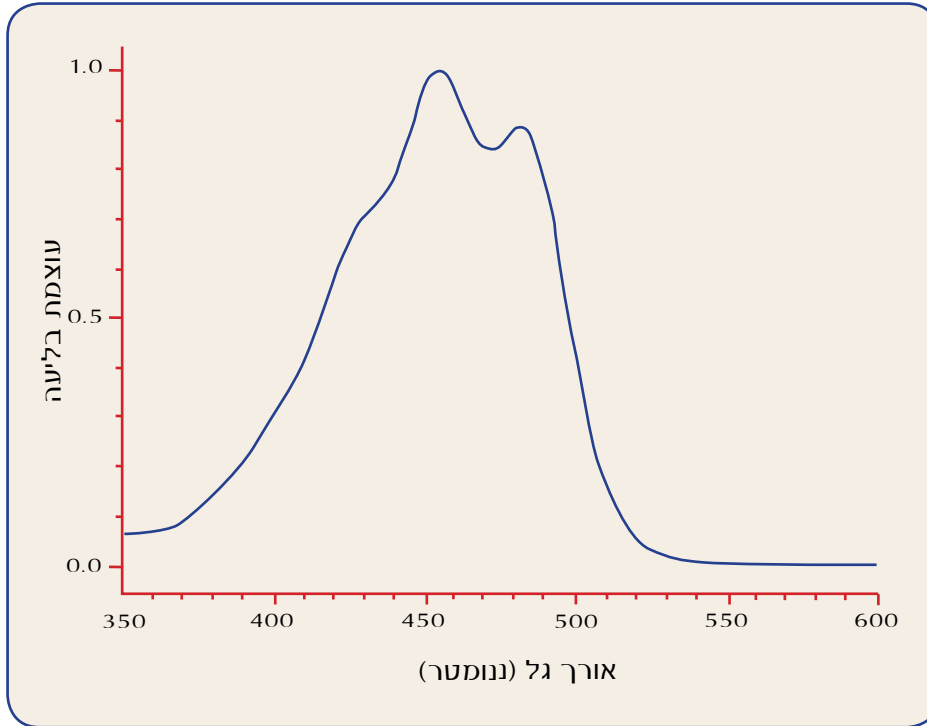
#### שימו לב:

מספר הקשרים הכפולים המצומדים המתאים לעירור בתחום הנראה שמצאתם בשאלה 1, מתאים למערכת המולקולות המצוירת בשאלה 2. במערכות אחרות, מספר הקשרים המצומדים המתאים לעירור בתחום הנראה יהיה שונה.

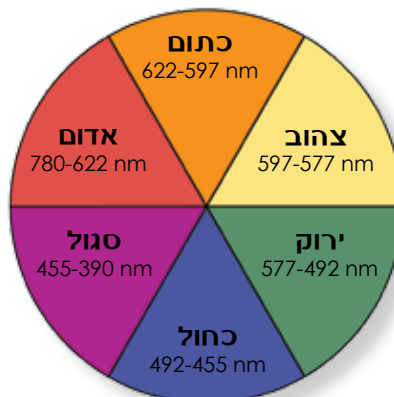
## מהו הצבע הנראה לעינינו?

לפינו ספקטרום הבליעה של בטת קרוטן. ספקטרום הבליעה מתאר את הבליעה של החומר באורכי גל שונים.

איור 18 : ספקטרום בליעה של בטת קרוטן



לבטת קרוטן בליעה גבוהה בתחום שבין 450 ל-500nm. אם נסתכל בגלגל הצבעים, אורכי גל אלה מתאימים לצבע הכחול. כאשר אור השמש או המנורה פוגעים בגזר, הפוטונים, בעלי מנת הקרינה המתאימה לאורכי גל אלה, נבלעים, ושאר הפוטונים מפוזרים ומגיעים לעינינו. הצבע המשלים של הכחול, כלומר הצבע שאנו רואים לאחר שהפוטונים הכחולים מוסרים מן האור הלבן, ע"פ גלגל הצבעים, הוא הצבע הכתום.





## פעילות ממוחשבת 4: ספקטרום פליטה

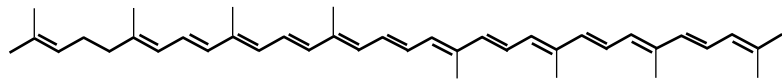
התבוננו באתר: [http://www.cs.rit.edu/~ncs/color/a\\_spectr.html](http://www.cs.rit.edu/~ncs/color/a_spectr.html)  
 באתר זה מופיע ספקטרום אינטראקטיבי. הזיזו את הנקודות על קו הספקטרום בעזרת העכבר, ונסו לייצר ספקטרום של הבטתה קרוטן. שימו לב: זהו ספקטרום המציג את אורכי הגל המתפזרים מן החומר ומגיעים אל עינינו (ולא ספקטרום בליעה, המציג את אורכי הגל הנבלעים על ידי החומר ולא מגיעים אל עינינו). בדקו מהו הצבע המתקבל.

## זמן תרגול 7: ספקטרום בליעה

1. לפניכם מספר אורכי גל. מהו אורך הגל המתאים לבליעה על ידי צבע הג'ינס - אינדיגו?

א. 750nm    ב. 500nm    ג. 600nm    ד. 520 nm

2. ליקופן (lycopene) נמצא במיגון ירקות ופירות.



לליקופן בליעה חזקה באורך גל 505nm. היעזרו בגלגל הצבעים וקבעו איזה מהירקות והפירות הבאים מכיל ליקופן:



### כדאי לדעת:

מדוע הפלמינגו ורוד?  
 בין נוצות הפלמינגו נמצא חומר הצבע קנתקסנתין (Canthaxanthin) המעניק לפלמינגו את צבעו. הפלמינגו אינו יכול לייצר את הקנתקסנתין מחומרים פשוטים, אך הוא יכול להפיקו מקרוטנואידים הנמצאים בצמחים, כמו בטתה - קרוטן. בדיאטה חסרת קרוטנואידים, הפלמינגו יצמיח נוצות חדשות בעלות צבע אפור בהיר. גם דגי סלמון, המגודלים בבריכות, זוכים לדיאטה מתאימה השומרת על צבעם האדום. בשוק משווקות גלולות קנתקסנתין לקבלת מראה שזוף ללא חשיפה לשמש.



### ניסוי 2:

כדיקת נייר לקמוס אדום ונייר לקמוס כחול

כחול (אקונומיקה)

- טבלו נייר לקמוס אדום ונייר לקמוס כחול בתמיסת מלבין. טבלו עלה ירוק בתמיסת המלבין. תארו את המתרחש.
- הדגמה: בדיקת נייר לקמוס אדום ונייר לקמוס כחול בכלור הכניסו במהירות לארלנמאיר המכיל גז כלור **במנדף**, נייר לקמוס אדום, נייר לקמוס כחול ועלה ירוק. סגרו את הארלנמאיר מיד. תארו את המתרחש. מהי מסקנתכם?

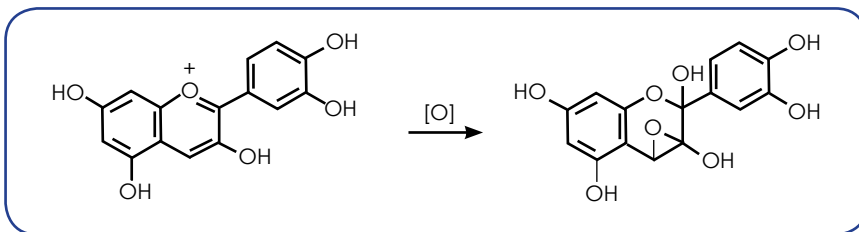
## כיצד מנקה המלבין את החולצה הלבנה מכתמים צבעוניים?

המלבין מכיל מלח נתרני של חומצה היפוכלורית,  $\text{NaClO}$ .  
היון  $\text{ClO}^-$  מחמצן את חומר הצבע, חומר הצבע המחומצן אינו בולע קרינה בתחום הנראה, בניגוד לחומר הצבע המקורי.



בתהליך החימצון על ידי המלבין, חלק מקשרי הפחמן - פחמן הכפולים הופכים ליחידים.

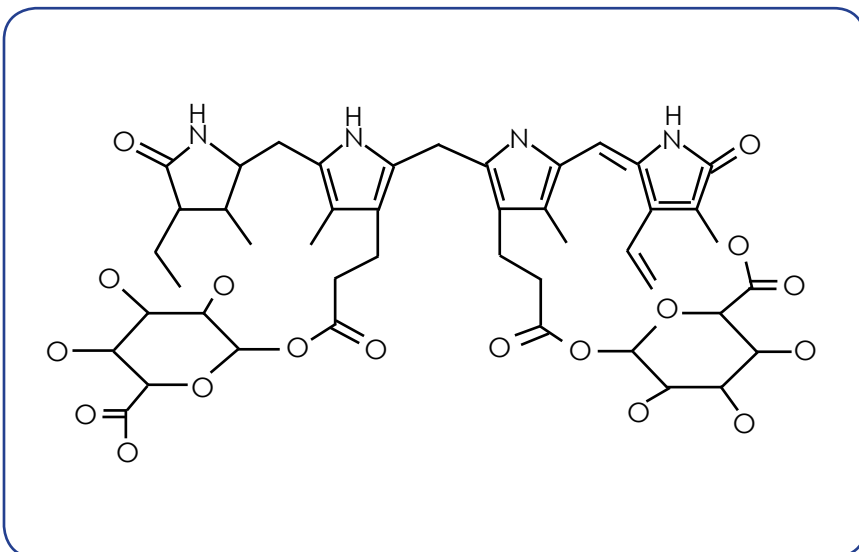
לדוגמה, הציאנידין הוא חומר צבע כחול הנמצא בפרח הדגנית. בעת החימצון, יכול אחד הקשרים הכפולים שבכרומופור להיפתח ולהיקשר לאטום חמצן מן המלבין. לדוגמה:



הקטעים המצומדים במולקולה הופכים לקצרים יותר, ובמקום לבלוע בתחום הנראה, החומר בולע בתחום האולטרה סגול. הכתם לא נראה לעינינו, גם אם הוא עדיין קיים על הבגד. בהמשך התהליך, חומר הצבע מתפרק למולקולות קטנות יותר, שבדרך כלל נשטפות מהבגד.

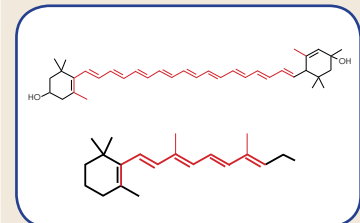
### זמן תרגול 8: חומרי צבע

1. סמנו בצבע את הכרומופור/ים במולקולה שלפניכם



#### כדאי לדעת:

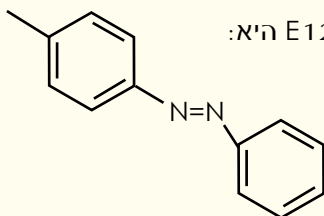
כרומופור (chromophore) הוא החלק או החלקים במולקולה הבולע/ים בתחום הנראה והאחר/ים לצבעו של החומר. לפניכם מספר מולקולות, בהן מסומן הכרומופור בצבע אדום. הכרומופור הוא הקטע המצומד במולקולה.



### צבעי מאכל

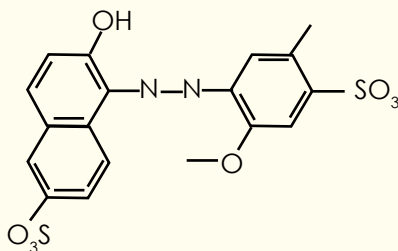
מקובל להקנות צבע למיני מזון על ידי שימוש בצבעי מאכל. צבעי מאכל סינתטיים רבים הם צבעי אזו (Azo dyes), המשמשים לצביעת צמר וכותנה. אלו הן תרכובות אורגניות, המכילות קשר כפול בין שני אטומי חנקן הצמוד לטבעות ארומטיות. מקובל לסמן את צבעי המאכל בדומה לשאר תוספי המזון באמצעות האות הלועזית E ומספר. צבעי המאכל מוצגים בתחום E100 - E199.

נוסחת המבנה של צבע המאכל האדום E129 היא:

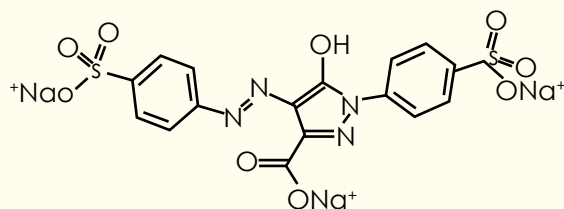


החומר מופיע לרוב כמלח הנתרן. בליעה מקסימלית של חומר זה מתקבלת באורך גל של 504nm. מקור הצבע הוא חיפושית הגדלה בדרום ובמרכז אמריקה. החומר אושר לשימוש גם במוצרי קוסמטיקה ובקעקועים.

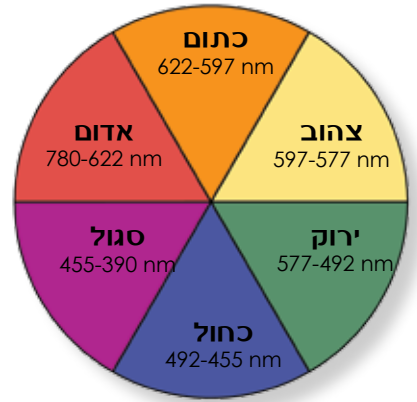
נוסחת המבנה של צבע המאכל הצהוב E102, הנקרא גם טרטריין, היא:



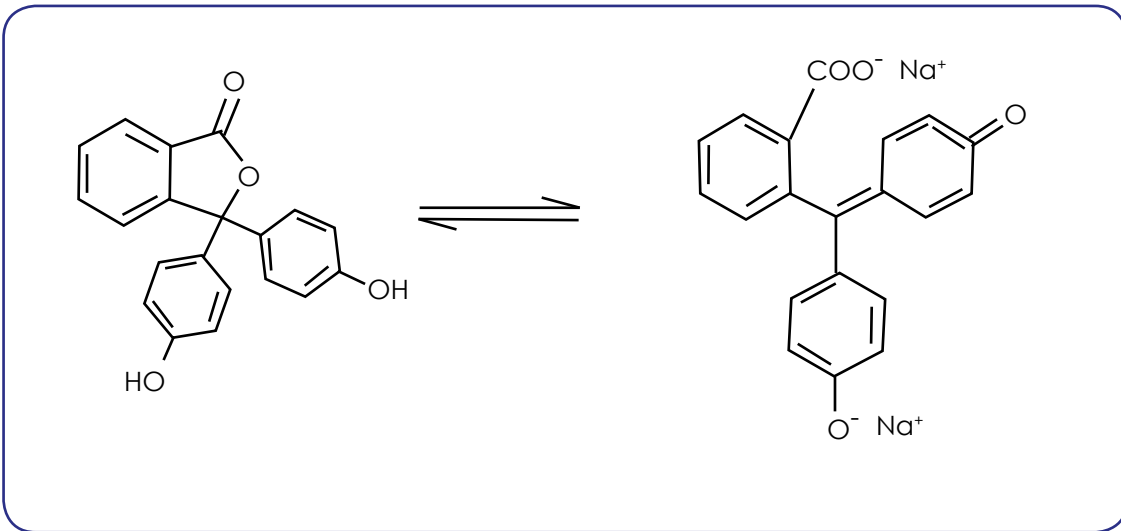
חומר זה מוסף למוצרי מזון רבים, כגון: משקאות קלים, אינסטנט פודינג, תערובות מוכנות של עוגות, מרקים, גלידות, ממתקים, ג'לי, מרציפן. ניתן אף למצוא אותו בכמוסות של תרופות מסוימות. צבע מאכל זה נחשב למסוכן ביותר מבין צבעי האזו. הוא עלול לגרום לאלרגיות, לכאבי ראש ולהיפראקטיביות בקרב ילדים.



לקריאה נוספת על צבעי מאכל: "הכל כימיה - ניתוח מאמרים מדעיים מעובדים וחקר ארועים", עמוד 8.



- א. ציינו מהם השיקולים בעד ונגד שימוש בצבעי מאכל.
- ב. האם צבעי המאכל האדום והצהוב מסיסים במים? נמקו תשובתכם. האם לדעתכם חשוב שצבעי מאכל יתמוססו במים? נמקו תשובתכם.
- ג. היעזרו בגלגל הצבעים ובמידע והסבירו מדוע צבע המאכל האדום נראה לעינינו אדום.
2. הכניסו מעט תמיסה של צבע מאכל אדום למבחנה. הוסיפו מעט תמיסת מלבין (אקונומיקה).
- א. רשמו את תצפיותיכם.
- ב. הקיפו את המילה/מילים הנכונות, כך שיתקבלו משפטים נכונים:
- i. בעקבות הוספת תמיסת המלבין, החומר בולע/אינו בולע אור בתחום הנראה.
- ii. הפרש האנרגיה בין אורביטל ה-HOMO לאורביטל ה-LUMO במולקולת חומר הצבע לפני הוספת תמיסת המלבין, קטן/שווה/גדול מהפרש האנרגיה בין אורביטל ה-HOMO לאורביטל ה-LUMO במולקולה לאחר הוספת תמיסת המלבין.
- ג. הסבירו איזה שינוי, שהתרחש במבנה חומר הצבע, מסביר את תצפיותיכם.
3. פנולפתלאין הוא אינדיקטור חסר צבע בתמיסה חומצית, ובעל צבע ורוד-סגול בתמיסה בסיסית. מבנה האינדיקטור משתנה עם השינוי ב-pH.
- התבוננו בשתי נוסחאות המבנה שלפניכם וקבעו: איזה מבנה קיים בתמיסה החומצית ואיזה בסיסית? הסבירו. התייחסו לכרומופור במולקולות.



### ניסוי 3: ניסוי אקרי-השולאה בין מסייבי כתמים

בניסוי זה תחקרו שני חומרים מלבינים A ו-B. איזה חומר עדיף להסרת כתמים? מהו ההבדל ביניהם?

#### רקע

חומר A משמש כמלבין רק לכתמים על בגדים לבנים, בעוד חומר B מתאים גם לכביסה צבעונית. החומר הפעיל במסיר הכתמים B הוא מימן חמצני  $H_2O_2$ . מימן על חמצני הוא חומר מחמצן חזק. חומר A מכיל את החומר היוני נתרן תת כלוריתי  $NaClO_{(aq)}$ . זהו החומר הפעיל האחראי להלבנה וחיטוי.

#### חומרים

תמציות מפירות וירקות צבעוניים: סלק, שזיף, מנגו, כרוב סגול, גרגרי פטל, תותים, גמבה אדומה וצהובה, חצילים (מקופסה), חסה, מיצוי של עלי יהודי נודד סגול (מומלץ להשתמש ב-4-5 סוגים).  
אבקות כורכום ופפריקה.

#### ציוד

15 מבחנות, 2 צלחות פטרי, בקבוק טפי עם אקונומיקה, בקבוק טפי עם תמיסת מימן על חומצי (30%),  
עט סימון

#### הוראות כלליות

הקפידו על:

- מילוי מדויק אחר ההנחיות לביצוע הניסוי.
  - דיווח ברור ומאורגן של התצפיות (מומלץ לארגן את התצפיות בטבלה).
  - חלוקת תפקידים בתוך הקבוצה ושיתוף כל חברי הקבוצה בפעילות.
  - שימוש בשפה מדעית מדויקת לתאור התהליך.
- בדקו שנמצאים ברשותכם כל הציוד והחומרים הדרושים לביצוע הניסוי.

#### שלב א': מהלך הניסוי

הקפידו ללבוש כפפות ולהרכיב משקפי מגן. יש לעבוד בזהירות עם מי החמצן.

1. חלקו כל אחת מתמציות הפרי שקיבלתם ל-3 מבחנות וסמנו אותן.
2. למבחנה אחת הוסיפו מספר טיפות מחומר A.
3. למבחנה השנייה הוסיפו מספר טיפות מי חמצן.

4. את המבחנה השלישית השאירו ללא שינוי.
5. צפו במבחנות במשך מספר דקות.
6. חיזרו על שלבים 1-5 עם תמציות הפרי הנוספות.
7. שימו מעט כורכום בשלושה צדדים של צלחת פטרי. על אבקה בצד אחד, טפטפו כמה טיפות מחומר A, בצד שני טפטפו מי חמצן. שימו לב שהחומרים לא יתערבבו. צפו במתרחש במשך מספר דקות.
8. חיזרו על שלב 7 עם אבקת הפפריקה.

### שלב ב': מהלך החקר

1. נסחו לפחות 5 שאלות שונות, שמתעוררות בעקבות הניסוי שביצעתם.
  - בחרו שאלה אחת מהשאלות שהצעתם.
  - נסחו שאלה זאת כשאלת חקר בצורה בהירה ובמידת האפשר כקשר בין שני משתנים.
  - נסחו בצורה בהירה ועניינית השערה המתייחסת לשאלה שבחרתם לחקור.
  - נמקו את השערתכם על בסיס ידע מדעי רלוונטי ונכון.
2. תכננו ניסוי שיבדוק את השערתכם.
  - הגדירו את המשתנה התלוי ואת המשתנה הבלתי תלוי.
  - ציינו את הגורמים הקבועים.
  - פרטו את כל שלבי הניסוי, כולל שלב הבקרה.
  - הכינו רשימה מפורטת של חומרים וציוד הדרושים לביצוע הניסוי המתוכנן.
  - קבלו את אישור המורה למהלך הניסוי שהצעתם.
  - העבירו ללבורנט/ית את רשימת הציוד והחומרים.
3. בצעו את הניסוי שהצעתם כפי שאושר על ידי המורה.
  - הציגו את התצפיות ואת התוצאות בצורה מאורגנת (טבלה, תרשים, גרף וכו').
  - פרשו ונתחו את התוצאות.
  - הסיקו מסקנות רבות ככל האפשר על סמך כל תוצאות הניסוי.
  - התייחסו לקשר שבין המסקנות לשאלת החקר וההשערה.
  - חפשו בספר הלימוד ובמקורות נוספים מידע על הגורמים שעשויים להשפיע על מהירותן של תגובות והסבירו את מסקנותיכם על בסיס ידע מדעי רלוונטי.
4. דיון מסכם קבוצתי
  - התייחסו בביקורתיות לתוצאות הניסוי (מבחינת דיוק הנתונים, מגבלות הניסוי וכו').
  - התייחסו בביקורתיות למידת ההתאמה בין המסקנות להשערות (תוקף המסקנות).



- במידת הצורך הצביעו על השינויים הרצויים בתהליך החקר (בניסוח ההשערה, בתכנון הניסוי וכו').
- רשמו שאלות נוספות שהתעוררו בעקבות הניסוי כולו.
- הכינו את סיכום ניסוי החקר של קבוצתכם להצגה בפני הכיתה.

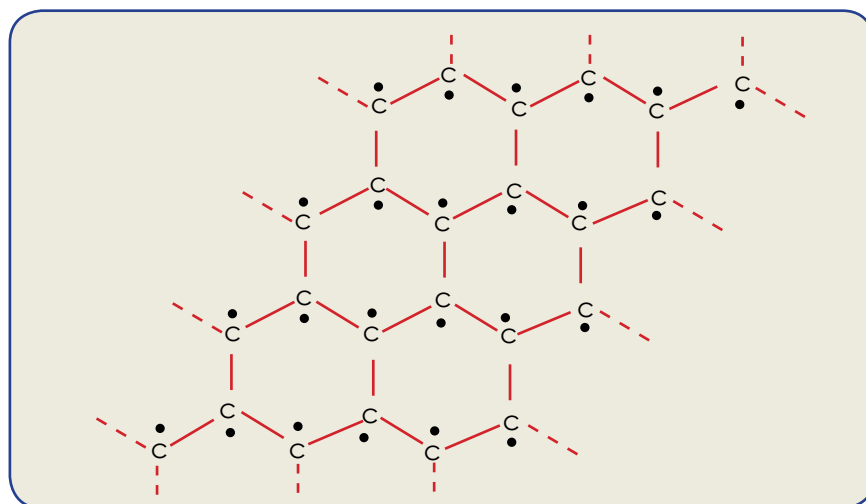
5. הכינו דיווח בכתב, הכולל את כל שלבי הפעילות ואת הרקע המדעי המתאים.  
אם חסר לכם מידע, חפשו במקורות מידע מתאימים והוסיפו רשימה ביבליוגרפית.

6. הגישו דו"ח מאורגן, אסתטי וקריא.

### מננו-צינוריות לננו-טכנולוגיה

תופעת האל-איתור של אלקטרונים היא המפתח להבנת המבנה האלקטרוני של מולקולות אורגניות מצומדות, אך אינה מוגבלת לחומרים אלה. נתבונן באיור 19. אם נחליף בדמיוננו את אטומי המימן בשרשרות אטומי פחמן מצומדים יתקבל המבנה הבא:

איור 19: משטח דו מימדי של שרשרות אטומי פחמן מצומדים



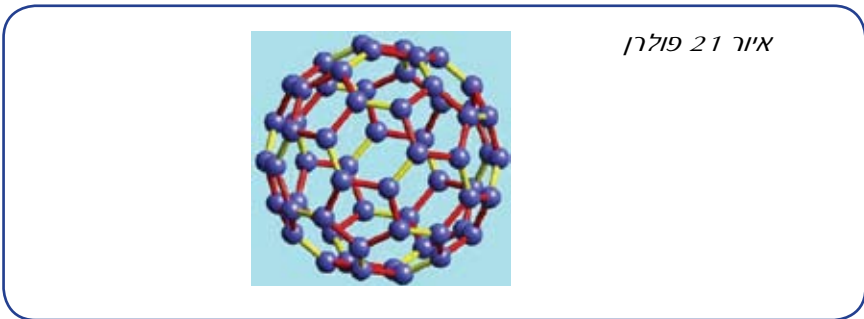
ניתן לצפות, שבמערכת זו יהיו אלקטרוני ה- $\pi$  בלתי מאותרים על פני משטח דו מימדי. שכבות במבנה זה מרכיבות את הגרפיט, צורת גיבוש נפוצה של היסוד פחמן.

○ גרפיט מוליכה זרם חשמלי. נסו לשער כיצד משפיע המבנה האלקטרוני של שכבות הגרפיט על הולכת החומר (בפרק הבא נדון בפירוט במושג המוליכות החשמלית).

איור 20: ננו-צינוריות פחמן

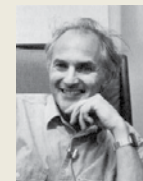


בשנים האחרונות, עם התפתחות הננו-טכנולוגיה התגלו צורות נוספות של היסוד פחמן, המורכבות משכבות בודדות של אטומי פחמן כפי שמופיע באיור, כגון פולרנים וננו-צינוריות פחמן (carbon-nanotubes). פרס נובל לכימיה בשנת 1996 הוענק למדענים ריצ'ארד סמאלי Richard Smalley, רוברט קרל Robert Curl, והארולד קרוטו Harold Kroto על גילויים של פולרנים\*. בפולרנים, מסודרים אטומי הפחמן במבנים סגורים, המכילים 60 או 70 אטומי פחמן. באיור 21 מוצגת דוגמא לפולרן.

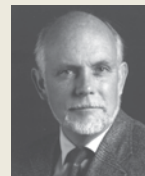


גילוי זה היווה פריצת דרך ליצירת צינוריות פחמן מולקולריות. קוטר צינורית בודדת הוא 1-1.4 ננומטר, אך אורכה יכול להגיע גם ל-100,000 ננומטר (0.1 מילימטר). ננו-צינוריות פחמן מוליכות זרם חשמלי או מוליכות למחצה\*\* בהתאם לפרטי המבנה המולקולרי שלהן.

השילוב של תכונות הולכה, חוזק מכני וגמישות מבטיח, כי חומרים אלה יהיו בסיס לפיתוחים בתחום הננו-טכנולוגיה וצפויים להם שימושים רבים בעתיד. במאי 2005, חשפה מעבדת המחקר של מוטורולה אב טיפוס של מסך טלוויזיה בכושר הפרדה גבוהה. במסך זה, במקום שפופרת קתודית מותקן משטח זכוכית המצופה במערך של ננו-צינוריות. ננו-צינוריות עומדות גם במרכז הניסיון ליצור צג המודפס מרכיבים פולימריים גמישים. קבוצות מחקר אחדות ערבבו ננו-צינוריות עם פולימר גמיש כדי לשפר את המוליכות החשמלית של החומר. ננו-צינוריות עומדות במרכזם של מחקרים באלקטרוניקה מולקולרית העוסקת בפיתוח רכיבים אלקטרוניים בעזרת מולקולות ביולוגיות כמו DNA, זאת בזכות תכונות ייחודיות של הננו-צינוריות, כגון: יחס גדול בין אורך לרוחב ואדישות לתגובות כימיות. תחום נוסף בו ניתן יהיה להשתמש בננו-צינוריות הוא בבניית חומרים חזקים וקלים עבור טכנולוגיית החלל.



Harold Kroto



Richard Smalley



Robert Curl

\*פולרן נקרא על שם האדריכל האמריקאי בקמינסטר פולר ממציא המבנים הכיפתיים (גאודזיים) המזכירים את מבנה מולקולות הפולרן.

\*\* מושגים אלה יוסברו בפירוט בפרק הבא.

## זמן תרגול 9: ננו-צינוריות פחמן

ניתן לייצר מהתרכובת בורו-ניטרید  $BN_{(s)}$  ננו-צינוריות. א. נסו להסביר עובדה זו.

ב. נסו לשער האם לננו-צינוריות בורו-ניטרید מוליכות גבוהה/נמוכה/שווה לזו של ננו-צינוריות פחמן. הסבירו תשובתכם.

מקורות נוספים לקריאה בנושא:

[http://www.hayadan.org.il/BuildaGate4/general2/data\\_card.php?U=no&SiteName=hayadan&ItemID=394260174&ValuePage=Product](http://www.hayadan.org.il/BuildaGate4/general2/data_card.php?U=no&SiteName=hayadan&ItemID=394260174&ValuePage=Product)

המאמר המקורי: ננו-צינוריות שימושיות, ג'רי מינקל, סיינטיפיק אמריקן (עברית) פברואר 2006

<http://www.pa.msu.edu/cmp/csc/nanotube.html>

מדנ"א לאלקטרוניקה מולקולרית, מאת ארז בראון סיינטיפיק אמריקן (עברית), גליון 12, אוגוסט 2004

## פולימרים מוליכים- פרס נובל 2000

פרס נובל לכימיה בשנת 2000 ניתן לשלושה מדענים:

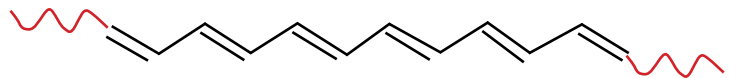
Alan Heeger, Alan MacDiarmid, Hideki Shirakawa

על תרומתם לפיתוח פלסטיק מוליך חשמל.

הפלסטיק הוא מבדד, ולכן משתמשים בו, למשל, לציפוי של חוטי החשמל העשויים נחושת.

פלסטיק הוא פולימר, כלומר חומר הבנוי ממולקולות שהן שרשרות ארוכות שבהן יחידות זהות רבות הקשורות זו לזו.

כדי שהפולימר יוליך חשמל, על השרשרות להיות מצומדות, כלומר להכיל קשרי פחמן-פחמן כפולים ויחידים לסירוגין:



צימוד זה, לאורך כל השרשרת, מעלה את מוליכות הפולימר, אך עדיין לא במידה מספקת כדי להוליך בדומה למתכות.

הגדלת המוליכות נעשית ע"י הסממה (doping) - הכנסת חומרים זרים לפולימר. הפולימר עובר חימצון ע"י יוד או חיזור ע"י נתרן. בתהליך החימצון, הפולימר מוסר אלקטרונים, ובתהליך החיזור, הפולימר מקבל אלקטרונים עודפים. בשני המקרים, האלקטרונים באורביטלי ה- $\pi$  יכולים לנוע לאורך כל השרשרת ולהפוך את הפולימר למוליך.

מפולימרים מוליכים ניתן ליצור חומרים אנטיסטטיים, כמו שטיחים למשרדים שלא יטענו בחשמל סטטי, צגי מחשב שיגנו על המשתמש מקרינה אלקטרומגנטית, ועוד.



Hideki Shirakawa



Alan MacDiarmid

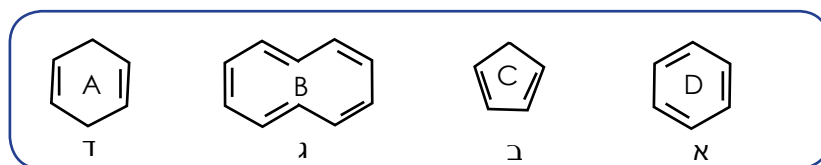


Alan Heeger

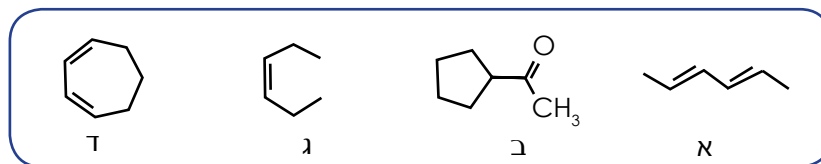
על תהליך ההסממה וחשיבותו בתעשיית המיקרואלקטרוניקה נלמד במפורט  
בפרק הבא.  
התבוננו באתר: <http://nobelprize.org/chemistry/laureates/2000/public.html>  
וקראו את ההודעה הרשמית וההסבר לציבור על פרס נובל לשנת 2000  
בכימיה.

**זמן תרגול נוסף:** 

1. על-פי מודל האורביטלים המולקולריים, איזו מהמולקולות הבאות היא הפחות יציבה? נמקו:  $\text{He}_2$ ,  $\text{Li}_2$ ,  $\text{B}_2$ ,  $\text{C}_2$ .
2. על-פי מודל האורביטלים המולקולריים, מהו סדר הקשר של  $\text{F}_2^+$ ? פרטו חישוביכם.
3. כאשר המולקולה  $\text{N}_2$  מאבדת אלקטרון, האם היון שנוצר יציב יותר או פחות מהמולקולה  $\text{N}_2$ ? נמקו.
4. מהו אורביטל ה-HOMO של  $\text{O}_2$ ? נמקו.
5. סדרו את המולקולות הבאות על-פי אורך הגל הנבלע על ידן, מהגבוה לנמוך. נמקו.



6. לאיזו מהמולקולות הבאות יש מערכת מצומדת? הקיפו אותה בעיגול או סמנו אותה בצבע.



7. לפניכם נתונים על אורך הגל של הבליעה המתאימה למעבר עבור שלושה חומרים: 319 nm, 289 nm, 223 nm. לאיזה מהחומרים יש הפרש האנרגיה הקטן ביותר בין אורביטל ה-HOMO לאורביטל ה-LUMO? נמקו.

8. קראו את קטע המידע הבא וענו על השאלות:



## שיזוף ללא שמש

אפשר למצוא בבתי המרקחת מבחר גלולות פלא: גלולות להפחתת משקל, גלולות לשיפור זיכרון ואפילו גלולה שיכולה להעניק לעורנו מראה שזוף ללא צורך בחשיפה מסוכנת לקרינת השמש.

מהו החומר הפעיל בגלולת קסם זו?

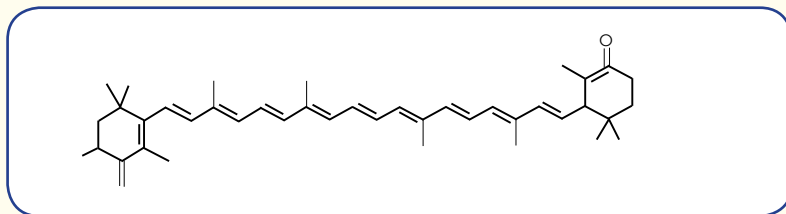
החומר הפעיל הוא קנתקסנתין (canthaxanthin) - תוסף אורגני וטבעי השייך לקבוצת **הקרוטנואידים**\*. הקנתקסנתין מקנה את הצבעים ורוד ואדום לחלק מהירקות והפירות וכן לנוצות של בעלי כנף כמו הפלמינגו.

בתעשיית המזון משתמשים בקנתקסנתין כצבע מאכל "טבעי" במוצרים רבים, כמו משקאות פרי, רוטב ספגטי ורוטב ברביקיו. אנשים הנוטלים קנתקסנתין כתוסף מזון טבעי הבחינו בתופעת לוואי מפתיעה - העור שלהם קיבל מראה שזוף! מהו ההסבר לכך?

כאשר הקנתקסנתין נספג בגוף הוא נקשר לשכבה השומנית התת-עורית. שכבת העור החיצונית שקופה ואפשר לראות דרכה את צבע הקנתקסנתין. כך מוענק לעור מראה שזוף ללא צורך להיחשף לקרינה האולטרה סגולה המזיקה של השמש.

למרות שהקנתקסנתין אושר ע"י מינהל המזון והתרופות האמריקאי (ה-FDA) לשימוש כצבע מאכל וכוויטמין, השימוש בו כחומר משזף עדיין לא אושר.

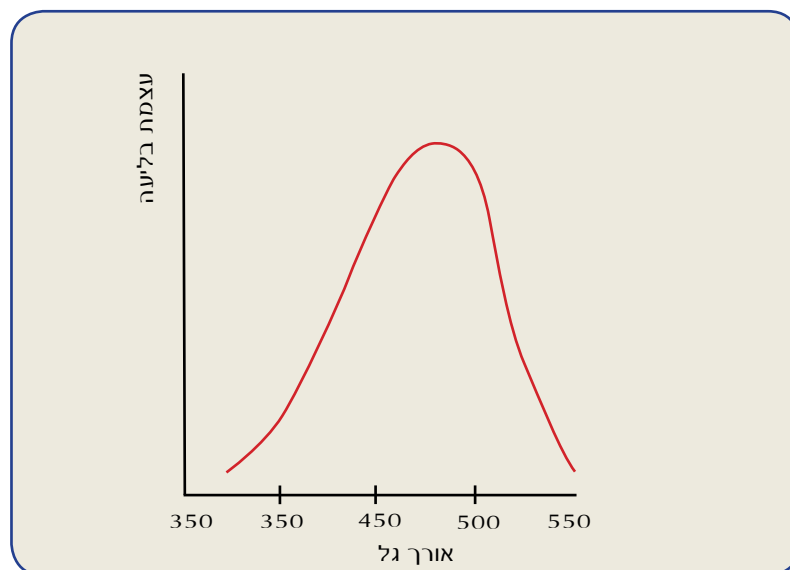
נוסחת הקנתקסנתין:



\* קרוטנואידים הם חומרי צבע טבעיים הנמצאים בחלק גדול מהצמחים ומקנים צבעים אדומים, כתומים וצהובים למיגון פירות, ירקות ופרחים, ואף לעלי השלכת. ניתן למצוא קרוטנואידים גם בחיות מסוימות, במיוחד בחסרי חוליות, ובנוצות של עופות מסוימים. המקור לקרוטנואידים בחיות אלה הוא הצמחים מכילי הקרוטנואידים שהם אוכלים.

1. נסחו שתי שאלות, המתעוררות בעקבות קריאת קטע המידע, ושעליהן לא קיבלתם תשובות מקריאת הקטע.
2. התבוננו בנוסחת הקנתקסנתין והסבירו מדוע הוא מתמוסס דווקא בשכבה השומנית של העור.

3. השימוש בקנתקסנתין כצבע מאכל אושר ע"י מינהל המזון והתרופות האמריקאי. שימוש זה מצריך כמויות קטנות מאוד של קנתקסנתין. מדוע, לדעתכם, חל איסור להשתמש בו כחומר משזף?
4. לפניכם ספקטרום הבליעה של קנתקסנתין:



היעזרו בספקטרום הבליעה ובגלגל הצבעים וכתבו איזה מהירקות והפירות הבאים מכיל קנתקסנתין:



פלפל



מלפפונים



חציל



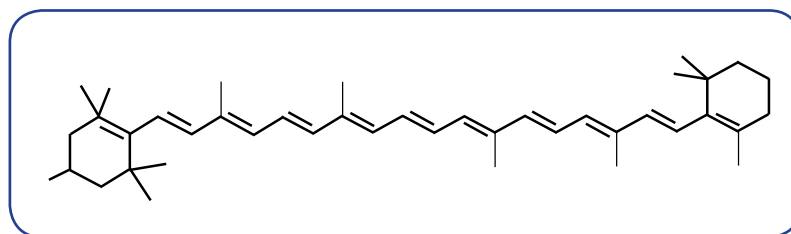
תפוזים

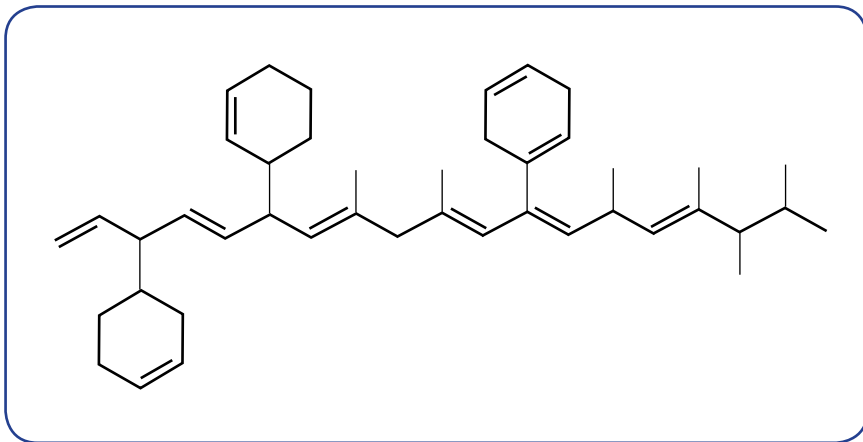


תפוחים



5. ביצים של תרנגולות מכילות חלמון שצבעו נע מצבע צהוב בהיר לצבע צהוב כהה ואפילו כתום. צבעו של החלמון תלוי בתזונת התרנגולות. הסבירו תופעה זו.
6. הסבירו מדוע חומר המכיל קנתקסנתין הוא צבעוני. התייחסו בתשובתכם למבנה האלקטרוני של מולקולת הקנתאקסנתין.
7. בטא-קרופן גם הוא חומר מקבוצת הקרוטנואידים. צבעו הוא צהוב-כתום והנוסחה המולקולרית שלו היא  $C_{40}H_{56}$ . איזו מהנוסחאות הבאות היא נוסחת המבנה של בטא-קרופן? נמקו את תשובתכם.






מקורות למידע נוסף בנושא:

<http://ordertron.store.yahoo.com/ultrabronze.html>

<http://www.musclemass.com/canthaxanthin.html>

[http://hni.ilsa.org/NR/rdonlyres/CC497240-523E-4A67-BA25\\_967E44D0483B/0/carotenoid.pdf](http://hni.ilsa.org/NR/rdonlyres/CC497240-523E-4A67-BA25_967E44D0483B/0/carotenoid.pdf)





## פרק 3

# ממיקרואלקטרוניקה למבנה האלקטרוני של מוצקים

בפרק הראשון והשני, למדנו על הקשר בין המבנה האלקטרוני של אטומים ומולקולות לבין תופעות שונות הקשורות לצבע של חומרים. בפרק זה, נלמד על המבנה האלקטרוני של חומרים מוצקים ונסביר באמצעות תכונות נצפות של החומר, כמו הולכה חשמלית וצבע. הפרק פותח במידע על אמצעי תאורה שונים, בעקבותיו עולה השאלה המרכזית של הפרק.

## התקן קטן - תרומה גדולה!

20% מכלל צריכת החשמל ו- 7.2% מכלל האנרגיה הם לצרכי תאורה.

המנורה הראשונה הומצאה בערך 70,000 שנים לפני הספירה. היא כללה אבן חלולה, שבתוכה הובער טחב ספוג בשומן חיה. מאוחר יותר, הוחלפה האבן בקדרות חרס או בכלי מתכת. בשלב הבא, הוכנסו פתילים למנורה כדי לשלוט בעוצמת הבעירה. בסוף המאה ה-18, החל שימוש במנורות פחם וגז, ובשנת 1930 הוארו הרחובות במנורות חשמל.

נורת החשמל הפשוטה ביותר, המוכרת לכם בוודאי, היא נורת הלהט של תומס אדיסון\* (Thomas Edison), המכילה חוט מתכת (בדרך כלל, טונגסטן).

נורות הלוגן הן גרסה משופרת של נורת הלהט. כמו בנורת להט רגילה, האור בנורת ההלוגן נפלט כתוצאה מהתחממותו של מוליך מתכתי, אולם במקרה זה, הטמפרטורה של המוליך גבוהה יותר מאשר הטמפרטורה במוליך נורת הלהט הרגילה. גם משך החיים של נורת ההלוגן ארוך יותר. בתוך הנורה מצויים אדי יוד, שהוא יסוד השייך למשפחת ההלוגנים, ומכאן שמה של הנורה.

תאורת ניאון נפוצה בשלטי פרסומות ושלטי חנויות. נורות אלה הן בצורת צינור גמיש ושקוף בצבעים שונים. מנורת הניאון מכילה גז ניאון וגזים נוספים, היוצרים את הצבעים השונים. מתח גבוה גורם לעירור אלקטרונים בגז וכך נוצרת פליטת אור.

נורת הפלואורוסנט היא צינור זכוכית המפיץ אור לבן. בתוך הזכוכית, יש גז ארגון ואדי כספית. עירור אטומי הגזים גורם לפליטת פוטונים באורכי גל בתחום האולטרה סגול. קרינה זו פוגעת בחומר זרחני, גורמת לעירור ולפליטת אור בתחום הנראה.

בשנים האחרונות, נעשה שימוש בטכנולוגיות ה-LED - דיודה פולטת אור (Light Emitting Diode) לצורך תאורה. לדיודה שימושים רבים: היא מאירה את הרמזורים, משדרת אינפורמציה בשלט הרחוק ומרכיבה את שלטי החוצות המאירים. דיודות מספקות גם את התאורה הדרושה לגידול צמחים בתחנות החלל. לדיודה יתרונות רבים: היא אינה מתחממת כמו נורה רגילה, היא קטנה יותר, אורך חייה ארוך יותר, וצריכת האנרגיה שלה נמוכה ביותר. שימוש בדיודה פולטת אור, עשוי לצמצם את עלויות התאורה פי חמישה.

עקרון הפעולה של ה-LED מבוסס על מבנה אלקטרוני מיוחד של חומרים מוצקים הנקראים מוליכים למחצה (semiconductors). במה שונה המבנה האלקטרוני במוליך למחצה מזה של מוצקים אחרים? כיצד מאיר חומר זה?

לקריאה נוספת על תרומתו של תומס אדיסון לתחום התאורה קראו באתר:

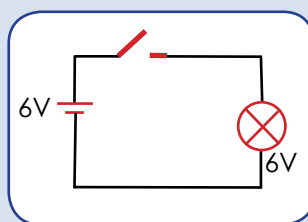
<http://inventors.about.com/library/inventors/Lightbulb>



1. השוו את תהליך פליטת האור במנורת הנאון לפליטת האור הצבעוני בזיקוקי הדינור. רשמו נקודות דמיון ושוני.
  2. לפניכם נתונים של חלק מתדירויות הפליטה בספקטרום הקווי של היסוד נאון:  $4.61 \cdot 10^{14}$ ,  $4.886 \cdot 10^{14}$ ,  $4.975 \cdot 10^{14}$  H. קבעו את אורכי הגל המתאימים ואת הצבע האופייני למנורה. פרטו חישוביכם.
  3. קבעו על פי המידע בקטע באיזה תחום אורכי גל פולטת מנורת הפלואורסנט. הסבירו קביעתכם.
- בפרק זה נלמד על המבנה האלקטרוני של מוצקים בכלל ושל מוליכים למחצה בפרט.

### ניסוי 1: מוליך, מבדד ומה שביניהם...

**חומרים:** חוט נחושת, חוט ברזל, חוט בעל התנגדות גבוהה, מוט פלסטיק, מוט זכוכית.  
**ציוד:** ספק משתנה עד 24V, חוטים, מנורה, דיודה.



#### מהלך העבודה:

- בנו מעגל חשמלי פשוט, המכיל ספק 6V, מנורה ומפסק.
- במקום המפסק, הכניסו חומרים שונים וסגרו את המעגל.
- רשמו את תצפיותיכם.
- החליפו את הדקי הספק (את ה+ וה-), וחזרו על הבדיקה.

#### סיכום

1. רשמו שאלות העולות בעקבות הניסוי.
2. נסו להסביר את תוצאות הניסוי על סמך ידע קודם.
3. האם ניתן לחלק את כל החומרים למוליכים ומבדדים? הסבירו.

### מוליכים, מבדדים ומה שביניהם

בפרק השני עסקנו במבנה האלקטרוני של חומרים מולקולריים, המבוסס על אכלוס אלקטרונים באורביטלים מולקולריים. בפרק זה נעסוק תחילה בתיאור המבנה האלקטרוני של מתכות ולאחר מכן נתייחס למבנה האלקטרוני של מוצקים נוספים.

כיצד מסודרים האלקטרונים בצבר אטומי מתכת? כיצד ניתן להבין את תכונות ההולכה של מתכת?

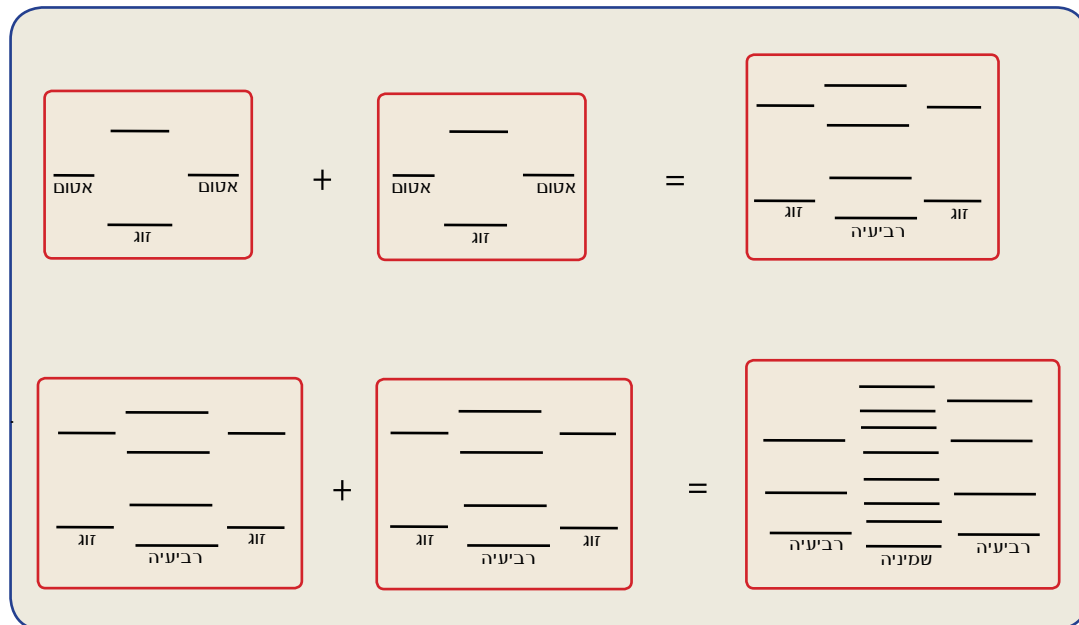
## מבנה פסי אנרגיה במוצק סריגי

הכרנו את חשיבותה של תופעת האל איתור של אלקטרונים ביצירת קשרים קוולנטים בין אטומים. ניתן להבין בצורה דומה גם את הקשר בין אטומים בצבר מתכתי. האטומים במתכת מסודרים במבנה סריגי תלת ממדי, אך לשם פשטות נדמיין לעצמנו שרשרת חד ממדית של אטומים של המתכת ליתיום (Li). כאשר שני אטומי ליתיום (Li) קרבים זה אל זה, יש רווח אנרגטי בשיתוף אלקטרונים ביניהם. אלקטרוני הערכיות מאוכלסים באורביטל הנוצר מחיבור אורביטלי 2s של האטומים. אם נחבר בדמיוננו **זוגות** אטומים הקרובים זה אל זה, תתקבלנה רביעיות, מחיבור רביעיות, מחיבור רביעיות וכו'. הלאה. שיתוף האלקטרונים בין האטומים בשרשרת דומה לשיתוף אלקטרונים בשרשרת של פחמימנים מצומדים בחומרי צבע, עליו למדנו בפרק הקודם (ראו איורים 16-12 בפרק 2).

### זמן תרגול 1: מבנה רמות האנרגיה בשרשרת אטומי ליתיום Li

כדי להבין את מבנה רמות האנרגיה בהן מאוכלסים אלקטרוני ה-2s בשרשרת האטומים של הליתיום, ניעזר באיור 1:

איור 1: תיאור סכמטי של מבנה רמות האנרגיה בשרשרת אטומים חד ממדית

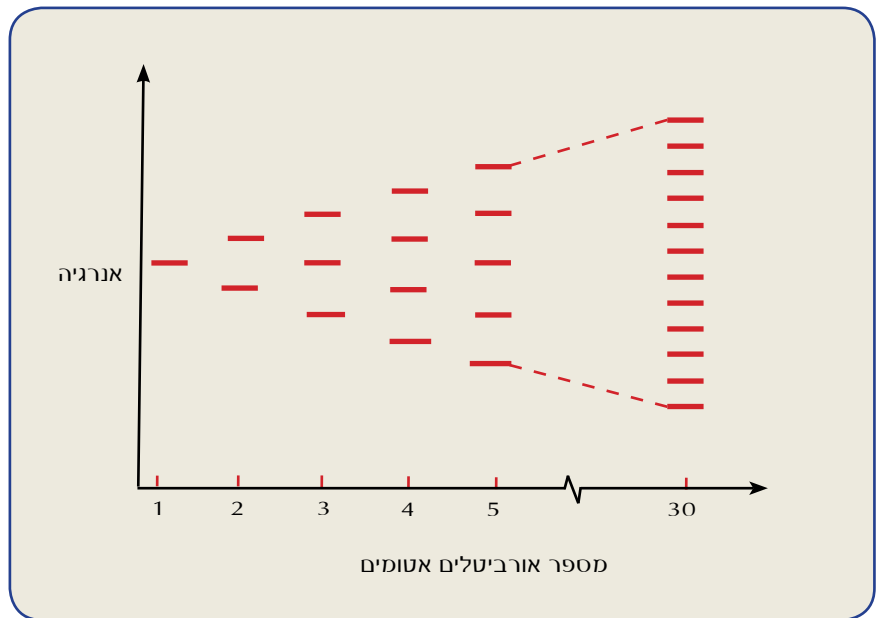


1. תארו מה מיוצג באיור.
2. מה מייצגים הקווים האופקיים בדיאגרמות?
3. היכן מיוצגים באיור אורביטלי 2s של אטום ליתיום בודד?
4. מדוע אין התייחסות בהקשר זה לאורביטלי 1s של אטומי ליתיום?
5. כיצד משתנים ההפרשים באנרגיה בין האורביטלים הנוצרים במפגש של שני אטומי מתכת, ארבעה אטומי מתכת ושמונה אטומי מתכת?

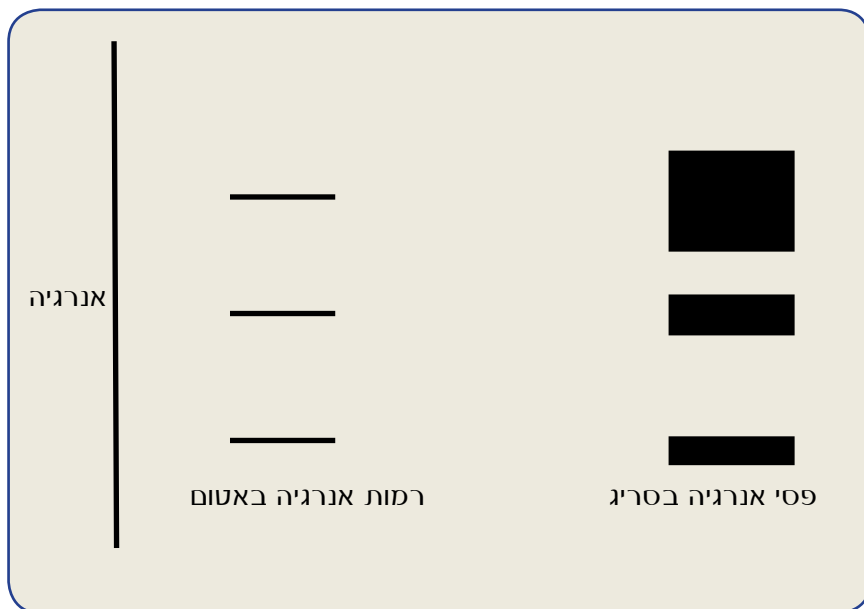
ככל שגדל מספר האטומים, קטנים הפרשי האנרגיה בין האורביטלים הנוצרים, וגדל מספר האורביטלים, כך שצפיפות האורביטלים גדלה. במקרה של מוצק, שבו מספר גדול של אטומים המשתפים אלקטרונים, כבר לא ניתן להתייחס לאורביטלים בודדים אלא לרצף של אורביטלים, הערוכים ב"חבורות". לרמות האנרגיה המתאימות לחבורת אורביטלים מתייחסים כאל "פס אנרגיה" רציף (Energy Band). מספר רמות האנרגיה בפס שווה למספר האטומים השותפים בחבורת האורביטלים.

איור 2 ממחיש יצירת פס אנרגיה מרמות אטומיות בודדות במספר גדל והולך של אטומי מתכת.

איור 2: היווצרות פסי אנרגיה במוצק



בפרק הראשון למדנו, שלאלקטרון באטום בודד יש "סולם" של רמות האנרגיה אפשריות. בפרק השני למדנו, שמזוג אורביטלים אטומיים הקרובים באנרגיה ניתן ליצור זוג אורביטלים מולקולריים. באופן דומה, בסריג מוצק ניתן עקרונית ליצור פס אנרגיה מכל חבורה של אורביטלים אטומיים הקרובים באנרגיה, כמודגם באיור 3:



מכיוון שכל אורביטל אטומי באטום הבודד נוטה לחבור לאורביטלים הדומים לו באנרגיה מהאטומים השכנים ליצירת פס אנרגיה מתאים, ניתן לצפות לפס הנוצר מחבורת אורביטלי  $1s$ , פס אחר הנוצר מחבורת אורביטלי  $2s$ , פס הנוצר מחבורת  $2p$ , וכן הלאה.

מכיוון שלכל פס אנרגיה יש רוחב סופי, מתקבלים מרווחים בין פסי האנרגיה הנוצרים מאורביטלים אטומיים שונים (למשל פס  $1s$  ופס  $2s$ ). מרווח בין פסי האנרגיה נקרא **אזור (או פער) אנרגיה אסור**.

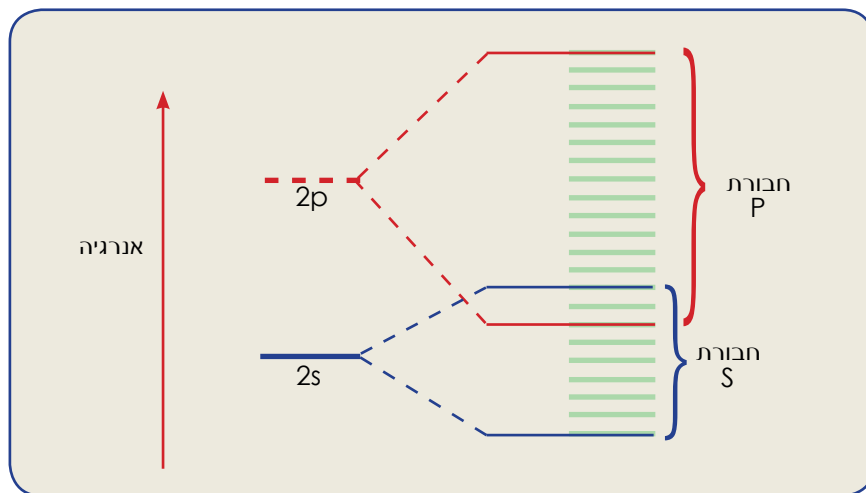
(בעקרון, ניתן לתאר את המבנה האלקטרוני של כל מוצק בעזרת דיאגרמת פסים מתאימה. באופן מעשי, נוח יותר לתאר את המבנה של מוצקים מולקולריים (כגון  $I_2$ ,  $S_8$ ,  $P_4$ ) בעזרת אורביטלים מולקולריים וקשרי ואן-דר ואלס בין-מולקולריים.)

במוצק תלת מימדי, מבנה הפסים תלוי בסידור האטומים במרחב, כלומר במבנה הגבישי של החומר. לכן, הניבוי של מבנה פסים לחומר נתון הוא משימה מורכבת. בפרט, יש להביא בחשבון את התופעות של "מיזוג" ו"פיצול" של פסים.

## "מיזוג" ו"פיצול" פסים

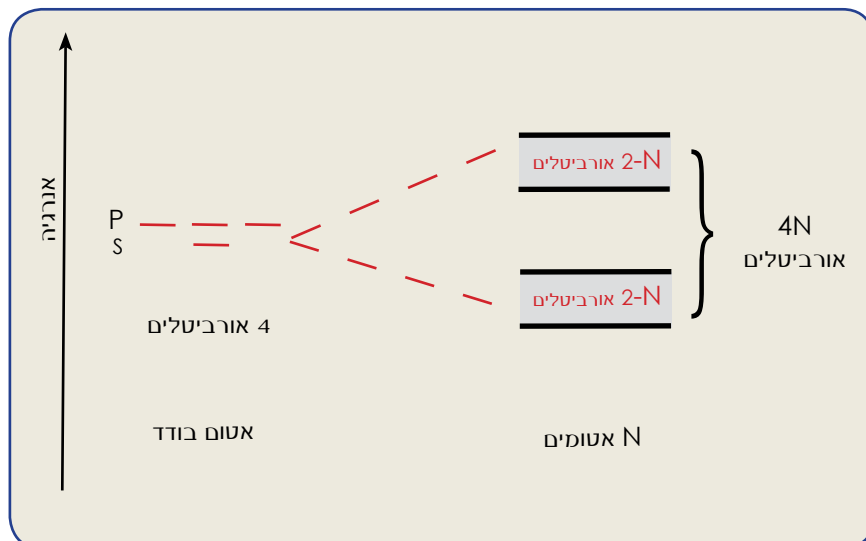
כשקיים פער אנרגיה קטן בין רמות האנרגיה של אורביטלים באטומים הבודדים (למשל אורביטלי  $2s$  ו- $2p$ ), הפסים המתקבלים מחבורות האורביטלים השונים (למשל חבורת  $2p$  וחבורת  $2s$ ) מתמזגים, כך שלמעשה מתקבל פס אנרגיה רציף אחד, ללא פער אסור, כפי שניתן לראות באיור 4.

איור 4: מיזוג בין חבורות אורביטלים



מבנה הפסים הופך למורכב, כאשר מדובר בסריגים תלת ממדיים בהם מסודרים האטומים במבנים מרחביים מגוונים. במבנה תלת ממדי מורכב, אורביטל אטומי מסוים של אטום משתף אלקטרונים במידה שונה עם אורביטלים אטומיים של שכניו השונים בגביש. כתוצאה מכך, עשויה להתפצל חבורת האורביטלים המתקבלת מערבוב אורביטלי  $s$  ו- $p$  לתת פסים שונים וביניהם קיים פער אסור. איור 5 מציג דוגמה לפיצול מסוג זה:

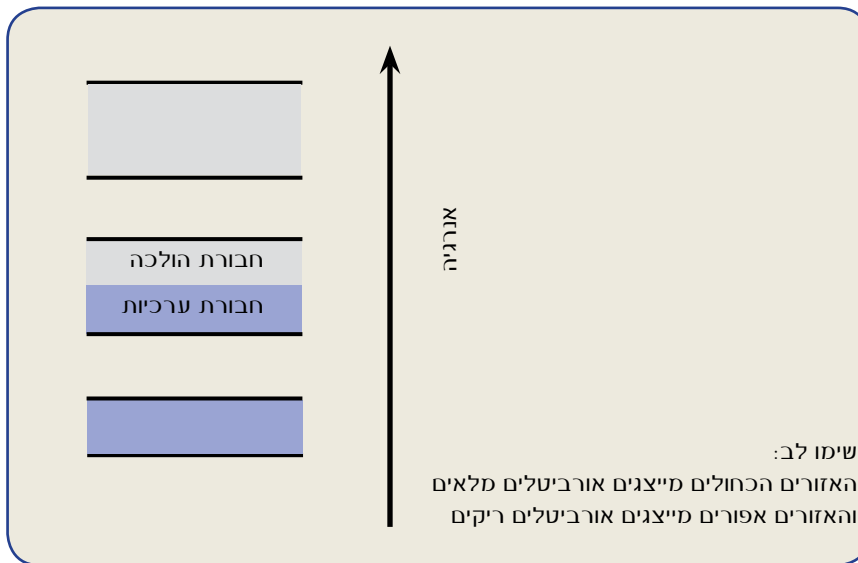
איור 5: פיצול ל"תת פסים"



## אכלוס האלקטרוניים בפסים

ההבחנה בין חומר מוליך לבין חומר מבדד טמונה באופן בו מאכלסים אלקטרוני הערכיות את פסי האנרגיה בחומר. כפי שלמדנו, בכל אורביטל ניתן לאכלס לכל היותר שני אלקטרונים. במצב היסוד של החומר, יאוכלסו האלקטרונים באורביטלים לפי סדר אנרגיה עולה. עקרונות אלה חלים גם על אכלוס האלקטרונים בפסים. בחומרים מסוימים, רמת האנרגיה הגבוהה ביותר בה מאוכלסים אלקטרוני הערכיות ממוקמת באמצע הפס, כך שבצמוד לה נמצאות רמות אנרגיה לא מאוכלסות. חומרים מסוג זה הם מוליכים. באיור 6 מוצג מבנה פסים של חומר מוליך. חבורת האורביטלים, שבה מאוכלסים אלקטרוני הערכיות, נקראת **חבורת ערכיות**. חבורת האורביטלים הבאים, הריקים מאלקטרונים ומתאימים לאנרגיות הגבוהות יותר, נקראת **חבורת הולכה**.

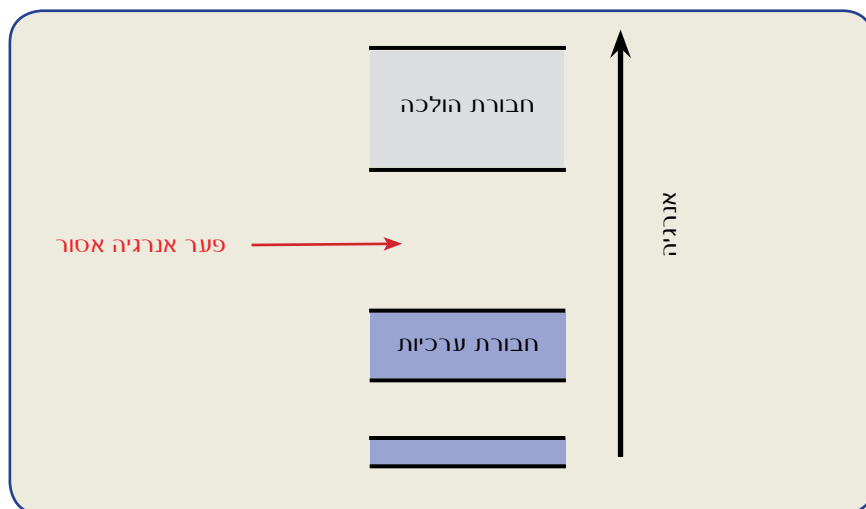
איור 6: תיאור סכמטי של אכלוס האלקטרונים במוליך



בחומרים אחרים, הרמה הגבוהה ביותר, בה מאוכלסים אלקטרוני הערכיות, ממוקמת בקצהו העליון של פס, כך שקיים פער אנרגיה בינה לבין רמות אנרגיה לא מאוכלסות. מוליכות זרם אלקטרונים מחייבת מעבר אלקטרונים לרמות אנרגיה גבוהות יותר. כאשר פער האנרגיה גדול, בהשוואה לאנרגיה התרמית, לא יעברו אלקטרונים לפס העליון והחומר יהיה מבדד. בחומר מבדד מופרדת חבורת ההולכה מחבורת הערכיות המאוכלסת באלקטרונים על ידי אזור (פס) אזור. אין די אנרגיה לאלקטרונים לעבור מחבורת ערכיות לחבורת ההולכה. באיור 7 מוצג מבנה פסים של חומר מבדד.

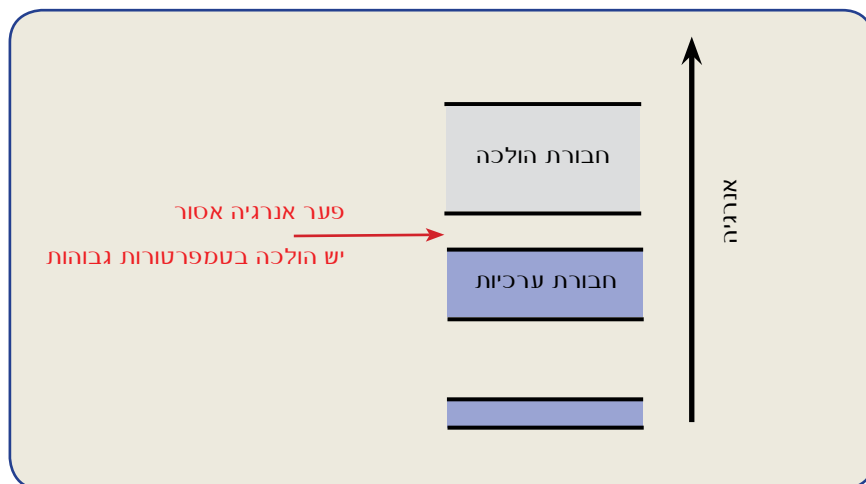


איור 7: תיאור סכמטי של אכלוס האלקטרונים במבדד



בחומר, שבו פער האנרגיה קטן יחסית, ניתן להעביר אלקטרונים לפס העליון על ידי העלאת הטמפרטורה. חומר כזה יהיה מוליך למחצה (מלי"מ). בחומר מוליך למחצה, פער האנרגיה האסור בין חבורת ההולכה וחבורת הערכיות קטן יותר מזה שבחומר מבדד ולכן בחימום מתאפשרת הולכה. באיור 8 מוצג מבנה הפסים המתאים לחומר מוליך למחצה.

איור 8: תיאור סכמטי של אכלוס האלקטרונים במוליך למחצה



ההבחנה בין מבדד לבין מוליך למחצה הינה שרירותית. בשני המקרים, פס האנרגיה המאוכלס הגבוה ביותר, מאוכלס עד תומו, אלא שרוחב "האזור האסור" עד לפס האנרגיה הבא, קטן יותר במוליך למחצה בהשוואה למבדד. בטבלה 1 שלפניכם מופיעים נתונים על האנרגיה הדרושה למעבר אלקטרון מחבורת הערכיות לחבורת ההולכה עבור מספר חומרים:

טבלה 1: נתוני פער האנרגיה האסור עבור יסודות מהטור הרביעי

היסוד	פער האנרגיה האסור ב-eV
צורן Si	1.1
גרמניום Ge	0.6
פחמן - יהלום C	5.4

רוחב הפס האסור קובע את אופיו של החומר: כמבדד או כמוליך למחצה. חומרים, שהפער שלהם הוא באזור של 1eV, יכוננו מוליכים למחצה. פערים של מספר eV יאפיינו מבדדים.

נדון לדוגמה במבנה הפסים של המתכת ליתיום. פס האנרגיה הראשון נוצר מאורביטלי 1s של האטומים השונים. הפס מלא, מכיוון שכל אטום תורם אורביטל אחד ושני אלקטרונים לפס זה. הפס הבא, המכיל את אלקטרוני הערכיות, נוצר מאורביטלי 2s ו-2p. כל אטום תורם שלושה אורביטלי 2p ואורביטל 2s אחד, ולכן החבורה הנוצרת מ-N אטומים תכיל 4N רמות אנרגיה, היכולות לאכלס 8N אלקטרונים. במתכת ליתיום, החבורה המתקבלת מחפיפת חבורת 2s ו-2p, מכילה שמינית מהקיבולת שלה, מכיוון שכל אטום תורם רק אלקטרון ערכיות אחד לפס זה.

במתכת בריליום (Be), תורם כל אטום שני אלקטרונים לפס השני, והחבורה מלאה עד כדי רבע מהקיבולת שלה. שימו לב, כי אלמלא חפיפת הפסים, כלומר אילו היה פער אנרגיה אסור בין חבורות 2s ו-2p, לא ניתן היה להסביר את המוליכות של מתכת זו, כי חבורת 2s הייתה מלאה באלקטרונים.

### תרכובות של מוליכים למחצה

עד כה עסקנו בתכונות ההולכה של יסודות במצבם המוצק, וקיישרנו את מידת ההולכה לגודל פער האנרגיה האסור. באופן דומה, ניתן לסווג תרכובות מוצקות על פי מידת ההולכה שלהן. לדוגמה, לפניכם טבלה 2 ובה נתונים על פער האנרגיה האסור בתרכובות של שני יסודות היוצרים מוליך למחצה:

טבלה 2: נתוני פער אנרגיה אסור עבור תרכובות של מוליכים למחצה

התרכובת	פער האנרגיה האסור ב-eV
GaAs	1.41
GaP	2.26
GaSb	0.661
InAs	0.354
InP	1.344
InSb	0.17

## זמן תרגול 2: תרכובות של מוליכים למחצה



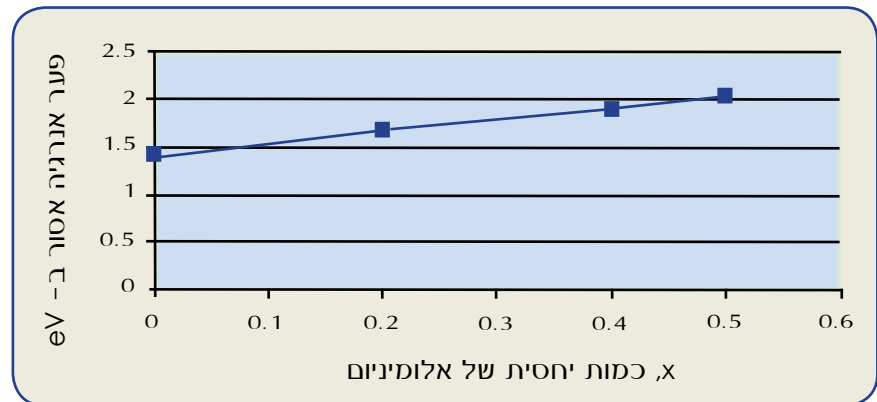
1. לאיזו מבין תרכובות הגליום (Ga) יש את המוליכות החשמלית הגבוהה ביותר ולאיזו יש את המוליכות החשמלית הנמוכה ביותר? הסבירו.
2. לאיזו מבין תרכובות האינדיום (In) יש את המוליכות החשמלית הגבוהה ביותר ולאיזו את המוליכות החשמלית הנמוכה ביותר? הסבירו.
3. האם ניתן למצוא קשר בין גודל פער האנרגיה האסור בתרכובת, לבין מיקום היסודות המרכיבים אותה בטבלה המחזורית?

ההרכב הכימי של תרכובת של מוליכים למחצה משפיע על ההולכה שלה. החומר AlGaAs הוא תרכובת של מוליכים למחצה, הנפוצה בתעשיית המיקרואלקטרוניקה והמשמשת לייצור דיודות פולטות אור ולייזרים מוליכים למחצה. בתהליך ייצור החומר, ניתן להחליף אטומי גליום (Ga) באטומי אלומיניום (Al). מסמנים ב-x את החלק היחסי של אטומי אלומיניום בתרכובת:  $Al_xGa_{(1-x)}As$ . מתברר, כי גודל הפער האסור תלוי בהרכב התערובת, על פי נוסחה מקורבת (ביחידות eV):

$$\Delta E(x) = 1.424 + 1.247x \quad (\text{מתאים לתחום בו } 0 < x < 0.45)$$

על פי נוסחה זו, ניתן לשלוט על גודל הפער האסור בעת הכנת הגביש. לפניכם הצגה גרפית של הנוסחה:

גרף 1: פער האנרגיה האסור כתלות בכמות יחסית של אלומיניום בגביש



4. א. הסבירו מדוע אטומי אלומיניום Al יכולים להחליף את אטומי הגליום Ga.  
 ב. מפעל מייצר גבישים של AlGaAs. בסוג אחד בגבישים הוחלפו 0.1 (10%) מאטומי הגליום באלומיניום, ובגביש השני 0.4 (40%) מאטומי הגליום הוחלפו באלומיניום. קבעו לאיזה מבין הגבישים מוליכות חשמלית גבוהה יותר. נמקו תשובתכם.  
 ג. למי הולכה גבוהה יותר בטמפרטורת החדר, ל-AlAs או ל-GaAs? נמקו תשובתכם.

עיון בטבלה 2 מגלה מספר מאפיינים של התרכובות:

- (1) שני היסודות שייכים לטורים שונים בטבלה המחזורית, הממוקמים משני צידיו של "טור הסיליקון". לאחד היסודות אופי מתכתי יותר (ממוקם משמאל לטור הסיליקון) ולאחר אופי אל מתכתי (ממוקם מימין לסיליקון).
- (2) ההבדל בין היסוד המתכתי ליסוד האל מתכתי מתבטא בהפרש באלקטרושליליות ביניהם. כשמשווים בין תרכובות הגאליום Ga, או בין תרכובות האינדיום In, מתברר, כי ככל שהפרש זה גדול, כן גדל פער האנרגיה האסור בתרכובת המוצקה של שני היסודות. ניתן להבין תופעה זו באופן איכותי - ככל שגדל פער האלקטרושליליות בין המתכת לאל-מתכת, המוצק דומה יותר בתכונותיו לחומר יוני ומידת ההולכה שלו יורדת.

ומדוע חומרים יוניים הם מבדדים?

רוב הסריגים היוניים בנויים מאטומי מתכת ואל מתכת. בגלל הצורך בהתאמה באנרגיה, כתנאי לשיתוף בין אורביטלים אטומיים, נוצר פס המכיל אורביטלים של האל-מתכת, ובאנרגיות גבוהות יותר פס נוסף המכיל אורביטלים של המתכת. שני הפסים מופרדים על ידי פער אסור. לפי כללי האכלוס, מאוכלסים אלקטרוני הערכיות (מהמתכת ומהאל-מתכת) בפס נמוך האנרגיה וממלאים אותו.

קראו את המידע וענו על השאלות



### כימיה מכל וחול...

בעבר הלא רחוק, קשה היה להאמין שהמחשב יתפוס מקום כל כך מרכזי בחיינו. כיום, המחשב הוא כלי חיוני וקשה להעלות על הדעת חיים מודרניים בלעדיו. תעשיית המיקרואלקטרוניקה<sup>1</sup> האחראית על ייצור שבבים<sup>2</sup> עבור מחשבים וטלפונים סלולאריים, צועדת בעקביות לקראת מזעור רכיבים בעלי ביצועים משופרים.

הצורן (סיליקון) הנו הבסיס לתעשיית הרכיבים האלקטרוניים. קשיותו של הצורן ואופן העיבוד שלו, מאפשרים את ייצורם של רכיבים אלו בממדים מיקרוסקופיים. בשבב סיליקון אחד ניתן לדחוס מיליונים של רכיבים אלקטרוניים. המבנה האלקטרוני של גביש הצורן הופך אותו לתבנית אידיאלית להדפסת רכיבים אלקטרוניים על ידי שינויים כימיים בגביש.

הרעיון של שבב הוצע לראשונה בשנת 1952 על-ידי המהנדס האנגלי, ג'פרי דאמר.

מקור השם סיליקון הינו במילה הלטינית Silicis שמשמעותה אבן-צור. מכאן שמו העברי צורן. הצורן הינו יסוד וסימנו הכימי הוא Si. צורן טהור הינו מוצק בגוון אפור כהה, ניתך לנוזל בטמפרטורה של 1,414°C. הצורן בודד לראשונה על ידי המדען השוודי ברצליוס (Berzelius). זהו היסוד השני הנפוץ ביותר על פני קליפת כדור הארץ, והוא מהווה כרבע ממשקלה. הצורן הינו המרכיב העיקרי של חול – תחמוצת הצורן, חומר מוצא עיקרי לתעשיית הסיליקון שהוא זמין וזול.

תעשייה עתירת ידע בכל העולם מתבססת כיום על הצורן כחומר גלם חשוב בייצור רכיבים אלקטרוניים.

תהליך ייצור של רכיבים בתעשיית המוליכים למחצה, מתבסס על סדרה של תהליכים כימיים המקנים לחומר תכונות שונות באיזורים שונים שלו. הייצור מתבסס כיום על שימוש בפרוסות של צורן גבישי (wafers). החול, המשמש לייצור פרוסות הסיליקון, צריך להיות נקי ואיכותי. בשלב ראשון, מחומם החול לטמפרטורה של 1600°C (מעט מעל נקודת ההיתוך שלו). בתוך החול המותך מניחים גביש טהור של צורן, המשמש גרעין גיבוש. את גביש הצורן הזה מושכים בהדרגה כלפי מעלה, כך שמתקבל גליל צורן אשר ממנו נחתכות פרוסות.

ייצור השבבים נעשה בחדרים נקיים, בהם העובדים לובשים חליפות ומסכות, זאת מכיוון שכמות קטנה מאוד של אבק עלולה לפגום בשבב.

<sup>1</sup> מושגים המוסברים ברשימת המושגים המצורפת,

לקריאה נוספת על ההתפתחות הטכנולוגית "מסרגל חישוב עד לפנטיום 4":

<http://www.intel.com/il/intel/exhibition/index.htm>

## רשימת מושגים

**מיקרואלקטרוניקה** - טכנולוגיה העוסקת בעיבוד ובהעברה של מידע באמצעות אותות חשמליים ואלקטרומגנטיים. בתעשיית האלקטרוניקה מייצרים רכיבים אלקטרוניים פעילים, מעגלים משולבים ומיקרופרוססורים. המוליכים למחצה מפקחים על זרימת החשמל והאותות החשמליים במיגון רחב של מוצרים אלקטרוניים.

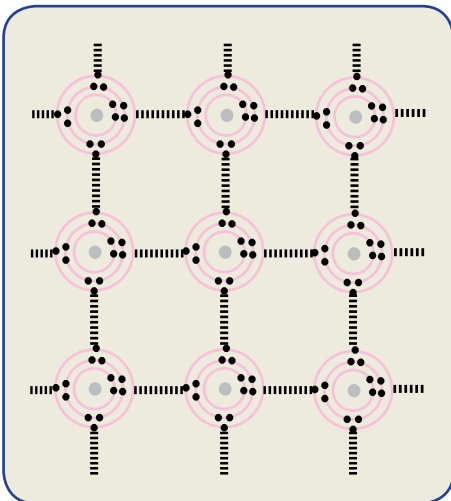


**שבב (chip)** - לעיתים מכונה מעגל משולב, ג'וק או צ'יפ - מעגל חשמלי מיקרוסקופי, המכיל בתוכו מרכיבים אלקטרוניים העשויים ממוליכים למחצה, שמספרם יכול לנוע בין עשרות בשבבים לוגיים פשוטים ועד לכמה מאות מיליונים במעבדים המתקדמים ביותר של ימינו.

\* פרוסה של צורן גבישי (wafers). יכולה להכיל מאות שבבים.

## זמן תרגול 2: תעשיית המוליכים למחצה

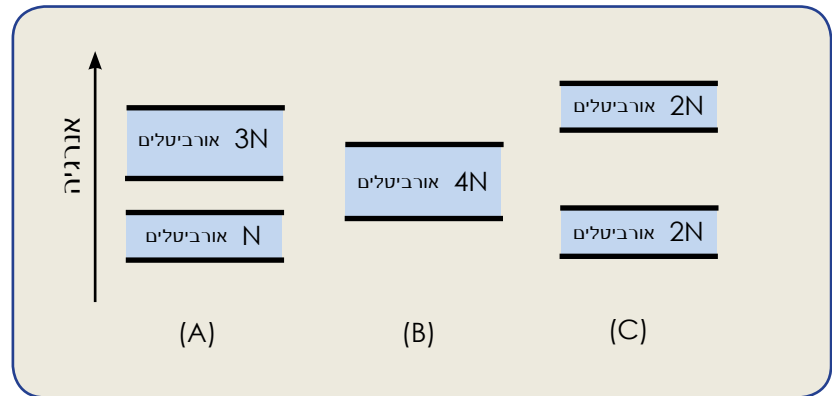
צורן Si (סיליקון) ממוקם בטור הרביעי במערכת המחזורית. מספרו האטומי הוא 14. לפניכם איור סכמתי המתאר מבנה של גביש סיליקון. היעזרו באיור וענו על השאלות הבאות:



1. מה מייצגים המעגלים הורודים באיור? מה מייצגים העיגולים האפורים? מה מייצגים העיגולים השחורים? מה מייצג הסימון המקווקו?
2. רשמו היערכות אלקטרונית המתאימה לאטום צורן (Si).
3. רשמו נוסחת ייצוג אלקטרונית לקטע מגביש של צורן (Si) הכולל ארבעה אטומים.
4. היעזרו בטבלה 1, שבה הנתונים על האנרגיה הדרושה למעבר אלקטרון מחבורת הערכיות לחבורת ההולכה עבור צורן גרמניום ופחמן-יהלום, ודרגו את שלושת החומרים לפי מידת ההולכה שלהם בטמפרטורת החדר. נמקו תשובתכם.

על פי נוסחאות הייצוג האלקטרוניות, הצורן הוא גביש אטומרי מבדד. אולם, נוסחאות הייצוג האלה אינן מתארות במדויק את האופן בו ממוקמים אלקטרוני הערכיות של האטומים השותפים בגביש בקשרים בין האטומים. לאמיתו של דבר, אלקטרוני הערכיות אינם מאותרים כבאיור 9, אלא מאכלסים מבנה של פסים, ולצורן פער אנרגיה אסור של  $1.1 \text{ eV}$ .

5. לפניכם שלוש אפשרויות למבנה פסים בהם מאוכלסים אלקטרוני הערכיות עבור גביש צורן המכיל  $N$  אטומים:



איזו מדיאגרמות הפסים (A), (B) או (C) עשויה לתאר את מבנה הפסים האמיתי של גביש הצורן? נמקו תשובתכם.

### סיכום ביניים

מוצקים מוליכים ומבדדים נבדלים זה מזה באופן שבו אלקטרוני הערכיות מאכלסים את פסי האנרגיה בחומר. במבדד ובמוליך למחצה, קיים פער אנרגיה אסור המפריד בין חבורת ההולכה לבין חבורת הערכיות. כאמור, בצורן, הפער האסור הוא  $1.1 \text{ eV}$ . פירוש הדבר, כי צריך להשקיע אנרגיה כדי להביא להולכת חשמל בחומר ובטמפרטורת החדר יתנהג צורן כמבדד. אם כן, כיצד משמש הצורן בתעשיית המוליכים למחצה? על כך נדון בסעיף הבא.

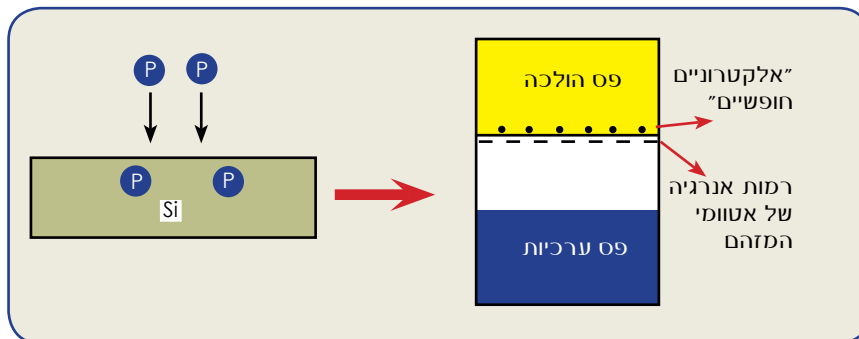
## הסממה כתנאי להולכה

לחומרים מהטור הרביעי של הטבלה המחזורית, כגון צורן Si (סיליקון) וגרמניום Ge, יש ארבעה אלקטרוני ערכיות (4 אלקטרונים בקליפת האנרגיה החיצונית). אלקטרונים אלה מאוכלסים בפסי האנרגיה בגביש וקובעים את תכונות ההולכה שלו.

ניתן לשנות בקלות יחסית את תכונות ההולכה של גביש הצורן על ידי תהליך שנקרא הסממה (Doping). בהסממה, מוסיפים מעט חומר מזהם אל גביש הצורן. בתהליך ההסממה מתקבלים אורביטלים נוספים בפס האסור ומתאפשרת הולכת מטען, דהיינו זרם חשמלי, גם בטמפרטורות נמוכות. נוהגים לסווג את המוליכים למחצה (מל"מ), המתקבלים בעקבות הסממה, לשני סוגים:

מוליך למחצה מסוג N: מתקבל לדוגמה על ידי הוספת כמות מעטה של זרחן (P) או ארסן (As) לגביש של צורן. יסודות אלו ממוקמים בטור החמישי של הטבלה המחזורית ובקליפת האנרגיה האחרונה שלהם חמישה אלקטרוני ערכיות. שילוב אטום מיסודות אלו בגביש, במקום אטום צורן, יוצר מצב בו ארבעה אלקטרוני ערכיות של האטום המזהם אינם מאותרים ושותפים במבנה פסי האנרגיה בגביש, בעוד שהאלקטרון החמישי נותר ממוקם באורביטל על האטום. אורביטל זה גבוה באנרגיה בהשוואה לאורביטלי פס הערכיות המלא של הגביש, ולמעשה ממוקם בתוך הפער האסור של הגביש הנקי. די באנרגיה תרמית נמוכה יחסית, על מנת לעורר את האלקטרון לפס ההולכה הריק, בו הוא חופשי לנוע בגביש. נדרשת כמות קטנה של מזהם כדי ליצור תנועה חופשית של אלקטרונים והולכה חשמלית. מטען האלקטרונים שלילי ומכאן מקור שם המוליך למחצה (Negative).

איור 9: הוספת אטומי זרחן לגביש צורן - הולכת אלקטרוניים





## פעילות ממוחשבת 1 : מוליך למחצה מסוג N

התבוננו באתר הבא, הכולל אנימציה של סריג סיליקון שעבר הסממה עם זרחן.

<http://oldsite.vislab.usyd.edu.au/photronics/devices/semicdev/doping7.html>

התבוננו גם באתר הבא, המתאר מוליך למחצה מסוג N. לחצו על NEXT כדי לראות את המשך האנימציה.

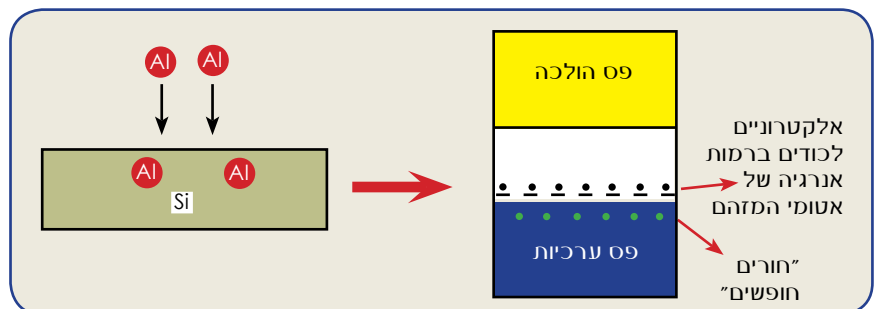
[http://www.rpi.edu/dept/phys/SciT/InformationProcessing/semicond/sc\\_content/doping\\_15.html](http://www.rpi.edu/dept/phys/SciT/InformationProcessing/semicond/sc_content/doping_15.html)

הפעילו את שתי האנימציות המופיעות במרכז הדף. התייחסו לאנימציה הימנית:

1. מה מייצגים העיגולים האדומים?
  2. מה מייצגים הפסים הכחולים?
  3. מה מייצג העיגול הוורוד (במרכז)?
  4. מה מייצג הקו הירוק?
  5. הסבירו מהו התהליך המוצג כאשר האנימציה פועלת.
- התייחסו לאנימציה השמאלית המציגה את פסי האנרגיה.
6. הסבירו מה מייצג המצב ההתחלתי.
  7. הסבירו את התהליך המוצג בהמשך האנימציה.

מוליך למחצה מסוג P: מתקבל לדוגמא על ידי הוספת כמות מעטה של בורון (B), אלומיניום (Al), או גאליום (Ga) לגביש של צורן. יסודות אלו ממוקמים בטור השלישי של הטבלה המחזורית ובקליפת האנרגיה האחרונה שלהם רק שלושה אלקטרונים ערכיות. כשאתם מיסודות אלו משתלב בגביש, במקום אטום צורן, נגרע אלקטרון מפס הערכיות ומתמקם על האטום המזהם. אכלוס האלקטרון הנוסף באורביטל האטומי של המזהם (בפס האסור), דורש אנרגיה תרמית נמוכה יחסית, ולכן נוצרים "חורים" (אורביטלים פנויים לאכלוס אלקטרון) בפס הערכיות, ומתאפשרת תנועת מטענים (מוליכות חשמלית). חוסר באלקטרונים (מטען חיובי) בפס הערכיות הוא מקור שם המוליך למחצה מסוג זה (Positive). מקובל לייחס את תנועת המטען במוליך מסוג זה ל-"חורים" הטעונים מטען חיובי. למעשה, תנועת האלקטרונים הממלאים את החורים היא המקור לתנועת ה"חורים" בתוך הסריג.

איור 10 : הוספת אטומי אלומיניום לגביש צורן - הולכת חורים



קשה לנו יותר לדמיין תנועה של "חורים" מאשר תנועה של אלקטרונים, ולכן נדגיש:

- Ⓒ "חור" הוא היעדר של אלקטרון.
- Ⓒ ה"חור" נושא מטען חיובי.
- Ⓒ ה"חור" יכול להתמלא באלקטרון.
- Ⓒ כאשר "חור" מתמלא באלקטרון, נוצר חור במקום ממנו הגיע האלקטרון. זרם חשמלי הוא תנועה מכוונת של אלקטרונים. תנועת "חורים" מנוגדת בכיוונה לתנועת האלקטרונים בגביש.

## פעילות ממוחשבת 2: מוליך למחצה מסוג P

התבוננו באתר הבא, הכולל אנימציה של סריג סיליקון שעבר הסממה עם בור.

<http://oldsite.vislab.usyd.edu.au/photonics/devices/semicdev/doping8.html>

התבוננו גם באתר הזה, המתאר מוליך למחצה מסוג P. לחצו על NEXT כדי לראות את המשך האנימציה.

[http://www.rpi.edu/dept/phys/ScIT/InformationProcessing/semicond/sc\\_content/doping\\_20.html](http://www.rpi.edu/dept/phys/ScIT/InformationProcessing/semicond/sc_content/doping_20.html)

בוודאי מוכר לכם המשחק הבא:

1	14	3	9
11	4	10	12
13	8	6	2
5	7	15	↓

במשחק זה, עליכם להזיז את ריבועי המספרים, כך שיתקבל סדר נכון של המספרים מ-1 עד 15 (במשחקים דומים המטרה היא סידור של תמונה).  
1. האם ניתן היה לסדר את המספרים על פי סדר עולה, אילו לא היה ריבוע חסר בלוח?

הזזת ריבוע עם מספר למקום החסר במשחק ("חור"), מאפשרת הזזה של ריבוע נוסף אל המקום החסר שנוצר.

2. השלימו: תנועת ריבועי המספרים במשחק זה ממחישה את תנועת \_\_\_\_\_ בגביש של מוליך למחצה.

שימו לב, שהזזת מספר 2 כלפי מעלה, לאזור החסר ("חור") תחתון ימני, גורמת ליצירת "חור" במקום בו היה מספר 2 (כלפי מעלה ביחס ל"חור").

הקודם). כלומר, ריבועי המספרים נעים בכיוון הפוך ל"חורים". באותו אופן, בגביש של מוליך למחצה, אם ריבועי המספרים הם אלקטרונים, ה"חורים" מתנהגים כמו מטען חיובי הנע בכיוון הפוך לאלקטרונים.

היכנסו לאתר האינטרנט בכתובת הבאה ושחקו להנאתכם:

[http://www.ody.org/slide/slide\\_game.htm?Odyssey.seagull\\_9,100,100,3,.jpg,1](http://www.ody.org/slide/slide_game.htm?Odyssey.seagull_9,100,100,3,.jpg,1)

### משחק הכיסאות...

סדרו שורה של שבעה כסאות. בקשו מחמישה תלמידים לשבת על חמשת הכסאות הימניים ביותר. כעת בקשו מהם לזוז שמאלה. התלמידים נעו שמאלה, אך הכסאות הריקים נעו ימינה. הסבירו כיצד משחק הכסאות קשור למוליך למחצה מסוג P?

### סיכום ביניים

במל"מ מסוג N, הזיהומים תורמים אלקטרונים לפס ההולכה. אטומי הזיהום הנייחים נטענים במטען חיובי, ועודף המטען השלילי חופשי לנוע בגביש.

במל"מ מסוג P, הזיהומים גורעים אלקטרונים מפס הערכיות. אטומי הזיהום הנייחים נטענים במטען שלילי, ועודף המטען החיובי חופשי לנוע בגביש.

### זמן תרגול 3: סוגי מוליכים למחצה

גרמניום (Ge) הוא מוליך למחצה. בגביש של גרמניום ערוכים האטומים במבנה טטרהדרלי. בתהליך התגבשות הגרמניום, הוחלפו מעט אטומי גרמניום באטומי אנטימון (Sb) הנמצא בטור החמישי במערכת המחזורית. א. איזה סוג מוליך למחצה התקבל? נמקו תשובתכם. ב. שערו כיצד תשתנה מוליכות גביש של גרמניום (Ge) כתלות במספר אטומי אנטימון המוחלפים בו? הסבירו את השערתכם. ג. שרטטו גרף המתאר את השתנות המוליכות של גביש גרמניום כתלות במספר אטומי האנטימון שהוספו.

בסעיף זה הכרנו שני סוגי מוליכים למחצה: N ו-P. מה יקרה כאשר נחבר מוליך למחצה מסוג N עם מוליך למחצה מסוג P? בכך נעסוק בסעיף הבא.

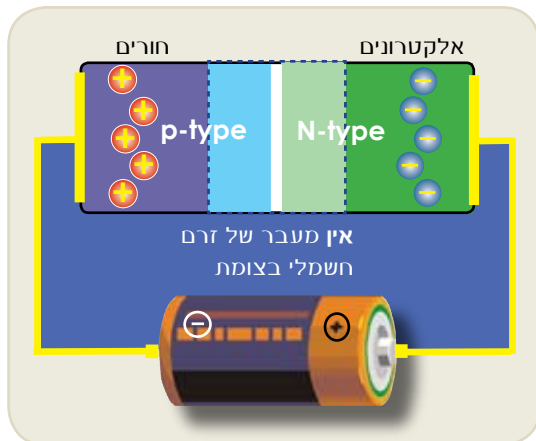
## מבנה של דיודת מוליך למחצה

דיודת מל"מ היא ההתקן המיקרואלקטרוני הפשוט ביותר המבוסס על מוליך למחצה. היא מתקבלת מחיבור של מוליך למחצה מסוג N עם מוליך למחצה מסוג P. אזור החיבור נקרא צומת.

כפי שראיתם בניסוי, דיודה משמשת כהתקן ל"יישור זרם", כלומר מאפשרת הולכה בכיוון אחד בלבד. מהו עקרון הפעולה של דיודת מל"מ? שני סוגי המוליכים למחצה, P ו-N, מוליכים זרם. אך, בעוד שבמוליך מסוג N המטענים השליליים הם הניידים, במוליך מסוג P המטענים החיוביים הם הניידים. באיור 12 מתואר מעגל חשמלי ובו צומת N-P:



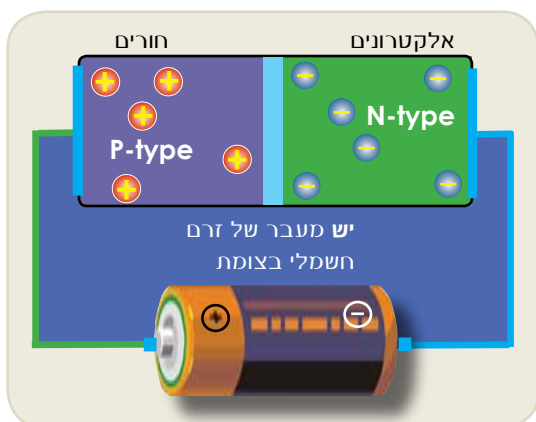
איור 12: צומת NP במצב נתק



באיור 12, המטען החיובי הנייד ("חורים") במוליך למחצה מסוג P נמשך להדק השלילי של הסוללה, בעוד שהמטען השלילי הנייד (אלקטרונים) במוליך למחצה מסוג N נמשך להדק החיובי של הסוללה. אזור החיבור בין שני המוליכים למחצה מתרוקן ממטענים ניידים, ולא ניתן להעביר דרכו זרם. הצומת מתנהג כמבדד.

היפוך הדקי הסוללה יגרום לדיודה להוליך זרם, כפי שניתן לראות באיור 13. ההדק השלילי מספק אלקטרונים הנמשכים להדק החיובי. אלה נעים דרך הצומת ומתלכדים עם חורים הנמשכים להדק השלילי. כך נשמרת כמות המטענים הניידים המאפשרת מעבר זרם חשמלי.

איור 13: צומת NP במצב זרם



### כדאי לדעת:

#### זרם ישר וזרם חילופין

**זרם ישר** (המסומן ב-DC) הוא זרימת מטענים בכיוון אחד. סוללה יוצרת זרם ישר במעגל, משום שהסימנים של ההדקים אינם משתנים עם הזמן. אלקטרונים נעים מההדק השלילי, שדוחה אותם, אל ההדק החיובי, שמושך אותם, וכך הם נעים במעגל החשמלי תמיד בכיוון אחד.

**זרם חילופין** (המסומן ב-AC) הוא זרם חשמלי, שהופך את כיוונו באופן מחזורי. זרם חילופין נפוץ מאוד ביישומים הדורשים מתח גבוה. בישראל, מתח זרם החילופין הביתי הוא 220 וולט. תדירות הזרם נמדדת ביחידות של הרץ (מספר מחזורים בשנייה). הזרם בארץ הנו בתדר של 50 הרץ, כלומר הוא משלים 50 מחזורים בשנייה.

רצף היסטורי -

### המצאת הדיודה



ג'והן אמברוז פלמינג

הדיודה  
הראשונה  
הומצאה  
על ידי ג'והן  
אמברוז  
פלמינג  
ושימשה  
מתקן

ליישור זרם, ההופך זרם חשמלי דו כיווני (זרם חילופין) לזרם ישר. התקן זה לא היה מבוסס כמו היום על רכיב מוליך למחצה. רעיון פיתוח הדיודה נבע מניסויים שערך תומס אדיסון עם מנורת הלהט שאותה המציא. פלמינג לא הבין, שבהמצאה שלו גלומות אפשרויות מרחיקות לכת בהרבה מאשר יישור זרם. שנתיים לאחר המצאתו של פלמינג, הצליח לי דה פורסט מארה"ב להפוך את הדיודה למגבר, מהלך שהביא להתפתחות שידורי הרדיו. לאמיתו של דבר, הפך ההתקן של דה פורסט לרכיב היסודי בכל המערכות האלקטרוניות המטפלות באותות, עד להופעת הטרנזיסטור בשנות ה-50 פיתוח הטרנזיסטור אפשר בעשורים האחרונים את המזעור של כל ההתקנים המטפלים במידע.



### פעילות ממוחשבת 3: דיודה

1. צפו באתר האינטרנט הבא באנימציה המתארת זרם ישר: <http://web.macam.ac.il/~ltami/zeremhs/zeryash.htm>
2. צפו באתר האינטרנט הבא באנימציה המתארת זרם חילופין: <http://web.macam.ac.il/~ltami/zeremhs/zerhel.htm>

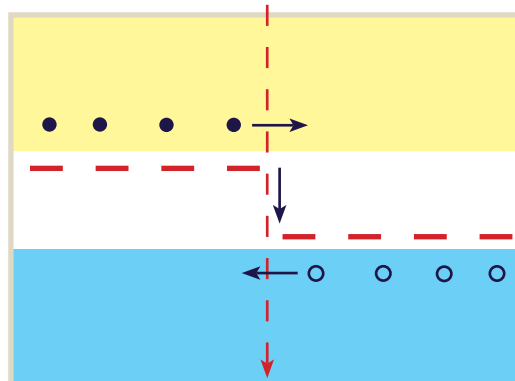
במכשירים חשמליים רבים המכילים סוללות, מוספים דיודה לצורך הגנה על התקנים רגישים, העלולים להפגם במקרה של הכנסת הסוללות בצורה הפוכה.

- לקריאה נוספת היכנסו לאתרי האינטרנט הבאים:
- <http://www.mada.org.il/data/flemming.html>
  - <http://www.mada.org.il/data/forest.html>

### ובחזרה אל הדיודה פולטת אור - LED

כאשר אלקטרונים חוצים את הצומת בדיודה וממלאים "חורים", משתחררת אנרגיה. בדיודה רגילה, אנרגיה זו משתחררת בצורת חום. בדיודה פולטת אור - LED, האנרגיה משתחררת בצורת אור. זכרו, כי המטענים השליליים באזור ה-N, מאכלסים רמות אלקטרוניות גבוהות בפס ההולכה, ואילו המטענים החיוביים באזור ה-P, נובעים מאורביטלים ריקים ברמות אנרגיה נמוכות בפס הערכיות. כאשר אלקטרון מתלכד עם "חור" בצומת בין מוליך למחצה N - P, הוא "נופל" מפס ההולכה לפס הערכיות, תוך שיחרור עודף האנרגיה, כפי שמוצג באיור 14.

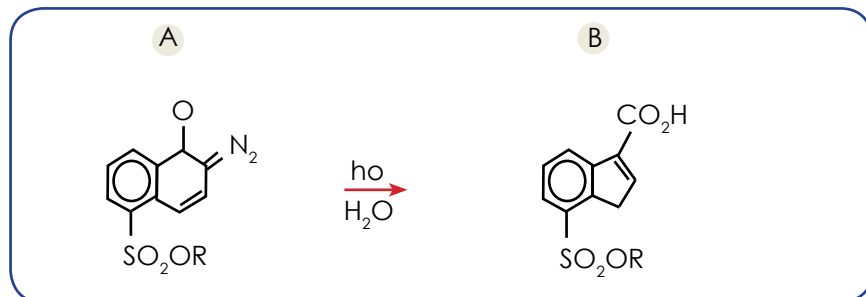
איור 14: תנועת אלקטרונים בדיודה



## הפוטוכימיה של המיקרואלקטרוניקה

הבסיס הטכנולוגי, המאפשר ייצור שבבים לתעשיית המיקרואלקטרוניקה, הוא תהליך בו מודפסת תבנית המעגל החשמלי על פני צורן (סיליקון) באמצעות בליעת אור - ליתוגרפיה. מקור השם הוא בתהליך הדפסה עתיק, בו השתמשו בחומצות כדי לחרוט תמונות על לוח אבן.

פיתוח התהליך התאפשר הודות לתרומתו של כימאי גרמני בשם אוסקר סואס (Oskar Sues), שמצא כי תרכובות אורגניות מסוימות (כדוגמת חומר A) רגישות לאור אולטרה סגול ובנוכחות קרינה מסוג זה הופכות לחומצות קרבוקסיליות (כדוגמת חומר B).



בתהליך הליתוגרפיה בייצור שבבים, מנצלים שינויים כימיים אלו בתכונות החומר כתוצאה מהשפעת הקרינה האולטרה סגולה, להכנת תבנית המעגל החשמלי על פני הצורן (ראו איור 10). אזורים של החומר הרגיש, שנחשפו לקרינה, מסיסים בממס בסיסי וניתנים לסילוק קל יחסית תוך השארת התבנית הרצויה. בעזרת שימוש חוזר בתבניות שונות, ניתן לכוון הסממה מסוגים שונים (P-N) באזורים שונים של הסיליקון ולייצר את רכיבי האלקטרוניקה הבסיסיים, כגון דיודות וטרנזיסטורים. טכנולוגיה זו מאפשרת ייצור מסחרי של שבבים, בהם רוחב המוליכים הדקים ביותר מגיע כיום כ-130 ננו-מטר (0.1 מיקרון).

\* לקריאת מידע נוסף בנושא שכפול באמצעות אור ותולדות הצילום והתפתחותו, היכנסו לאתר הבא:

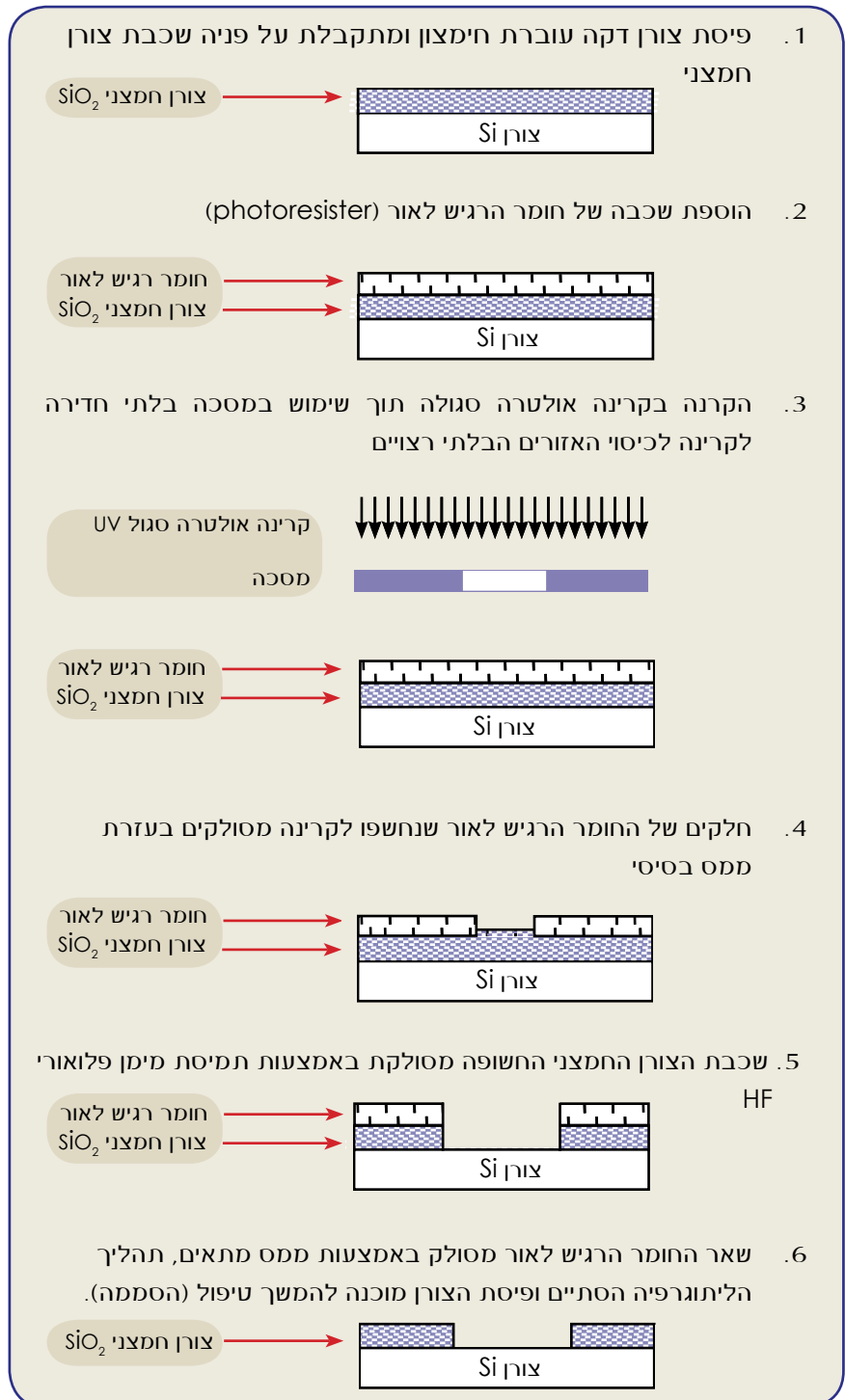
[http://www.snunit.k12.il/heb\\_journals/kimat2000/006008.html](http://www.snunit.k12.il/heb_journals/kimat2000/006008.html) וקראו את המאמר "שכפול על ידי אור" / מרי וירג'ינה אורנה, כמעט 2000, כתב העת למדע וטכנולוגיה, המרכז להוראת המדעים, האוניברסיטה העברית ירושלים.

### זמן תרגול 5: פוטוליתוגרפיה בייצור שבבים

1. בחרו שמונה מושגים מדעיים המופיעים במידע וערכו אותם במפת מושגים.
2. הסבירו מדוע מסיסותו במים של החומר האורגני הרגיש לאור (חומר A) נמוכה.
3. רשמו ניסוח לתגובה המתרחשת בין החומר האורגני, שנחשף לאור (חומר B) לבין תמיסת NaOH.

4. במפעלי השבבים החדשים משתמשים במכשיר המספק קרינה אולטרה-סגולה בעלת אורך גל של 248 ננו-מטר.
- א. חשבו את תדירות קרינה זו.
- ב. חשבו מהי אנרגיית הפוטון הדרושה להפיכת חומר A לחומר B.

איור 11: דוגמה לשלבי תהליך הליתוגרפיה בייצור שבבים



זמן פעולת הדיודה, נפלטת אנרגיה לסביבה בצורת חום או אור. דיודות, שעשויות גאליום שעבר הסממה באמצעות זרחן (גאליום זרחני), פולטות אור בגווי ירוק - צהוב. דיודות, שעשויות גאליום חנקני (גאליום שעבר הסממה עם חנקן), פולטות אור כחול. אור אדום נפלט מדיודה עשויה גאליום שעבר הסממה עם אטומי ארסן וזרחן.



### זמן תרגול 4: דיודה פולטת אור

1. בדיודה פולטת אור LED, הבנויה מגבישים מסוג P-N, נפלט האור כאשר אלקטרונים הנמצאים בפס ההולכה (גביש מסוג N) מתלכדים עם חורים בפס הערכיות בגביש מסוג P. פער האנרגיה (הנקבע על ידי סוג החומרים וריכוזם) קובע את צבע האור הנפלט.
  - א. חשבו את פער האנרגיה המתאים לדיודה הפולטת אור כחול. פרטו חישוביכם.
  - ב. איזה צבע תפלוט דיודה עם פער אנרגיה של  $2.384\text{eV}$ ? פרטו חישוביכם.

## מננו-חלקיקים של מולכים למחצה לתאי שמש

נניח, שלפינוי פיסת מוליך למחצה מסוג גאליום סלניום  $\text{GaSe}$  שבה הפער האסור הוא  $1.93\text{eV}$ .

- ☺ חשבו את אורך הגל המקסימלי לבליעה בחומר.
- ☺ השתמשו בגלגל הצבעים וקבעו: מהו צבע החומר?

כעת, נדמיין תהליך שבו מסתתים את פיסת החומר ובמהלכו ניתזים חלקיקים זעירים מהחומר. מתברר, כי צבעם של החלקיקים הזעירים שונה למרות שמדובר באותו חומר!

כיצד ניתן להסביר קשר בין גודל החלקיק לבין צבעו?

קשר זה מתגלה רק עבור חלקיקים זעירים במיוחד שקוטרם האופייני הוא מספר ננומטרים בודדים ועד עשרות ננומטרים. חלקיקים מסוג זה מכונים ננו-גבישים או "נקודות קוונטיות" (quantum dots). בגדלים אלה, פערי האנרגיה בין הרמות האלקטרוניות (ובפרט פער האנרגיה בין הרמה המאוכלסת הגבוהה לרמה הפנויה הנמוכה) גדולים מהפערים בגביש "אינסופי", ובליעת הקרינה האלקטרו-מגנטית שלהם מוסטת לכיוון ארכי גל קצרים ("הסטה לכחול"). התופעה נקראת "חיתום קוונטי". (Quantum site Effect).

בפרק השני למדנו על תופעה דומה הקשורה בשינוי אורך הגל הנבלע כתלות באורך המולקולה.

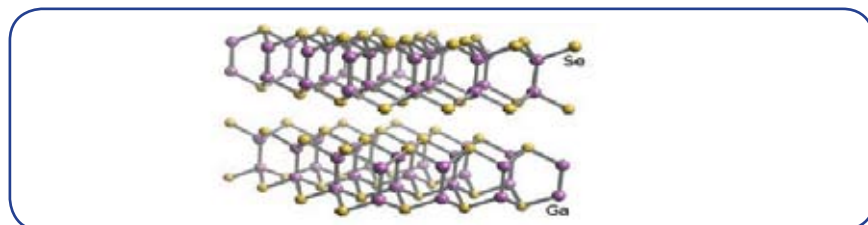
- ☺ כיצד משתנה אורך גל הבליעה המקסימלית במולקולות צבע בעלות קשרים מצומדים ככל שהשרשרת המצומדת מתקצרת?
- ☺ האם בתופעת "החיתום הקוונטי" מתגלה אותה תלות, או תלות הפוכה, בין אורך הגל של הבליעה לבין גודל המערכת הבולעת? נמקו תשובתכם.



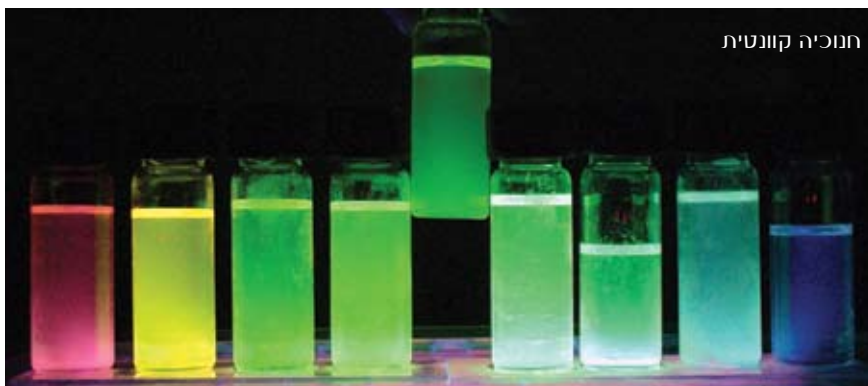
אם כן, כפי שלמדנו בהקשר של פחמימנים מצומדים, במערכת בה האלקטרונים אינם מאותרים, הפערים בין רמות האנרגיה גדלים עם הקטנת מימדי המערכת. בגביש "גדול" השינויים זניחים אך בנו-גבישים הגדלת פערי האנרגיה משמעותית וצבעם משתנה.

בחלקיקים של גליום סלניד (GaSe) מודגמת התופעה של "חיתום קוונטי". לנו-גבישים אלה מבנה חד-שכבתי ובו אטומים של גליום וסלניום בסידור הבא: Se-Ga-Ga-Se. הקוטר של נו-חלקיקים אלה נע בין 2.5 ל- 10 ננומטר וצורתם כצורת הדיסקית, כפי שניתן לראות באיור 15.

איור 15: מבנה נו-חלקיקים מסוג גליום סלניד



בתמיסה בטמפרטורת החדר, הדיסקיות נערמות זו על גבי זו. התכונות האלקטרוניות של נו-גבישים ניתנות לשליטה על פי גודלם. למרות "גילם הצעיר" (אופייני לראשונה בשנות ה-90 של המאה העשרים) כבר נמצאו להם שימושים. למשל על ידי שימוש בנו-גבישים בהרכבים שונים, של GaSe עם InSe, נוצרים צמתים, כפי שקורה כאשר מצמידים מוליך למחצה מסוג N לאחר מסוג P. כאשר מעוררים את הנו-גבישים על ידי הקרנה אלקטרומגנטית, האלקטרונים, שהפכו לניידים עקב בליעת הקרינה, זורמים לעבר החורים. בהתלכדות בין אלקטרון לחור נוצרת אנרגיה. תהליך זה הוא הבסיס לקולטנים הממירים את אנרגיית השמש לאנרגיה חשמלית. עיקרון זה מיושם בתאי שמש (תאים פוטו-וולטאיים), ההופכים אנרגיית שמש לאנרגיה חשמלית תוך פליטת חום מינימלית לסביבה.



חנוכיה קוונטית: פליטת אור מתמיסות המכילות ננוגבישים של קדמיום סלניד בגדלים שונים. מימין תמיסת ננוגבישים בקוטר של כ- 2 ננומטר (כ- 2000 אטומים) הפולטים בכחול. עם הגדלת הנוגביש האור הנפלט מוסט לאנרגיות נמוכות יותר ולאורכי גל ארוכים יותר ומשמאל התמיסה מכילה ננוגבישים בקוטר 6 ננומטר המכילים כ- 3000 אטומים. ננוגבישים אלה משמשים כבר היום לסימון תאים ביולוגיה וברפואה וישמשו בעתיד במקורות אור ובלייזרים חדשים.

(צולם על ידי רוני קוסטי במעבדתו של פרופ' אורי בנין, המכון לכימיה והמרכז לננומדע ולננוטכנולוגיה, האוניברסיטה העברית בירושלים)

## זמן תרגול 6: ננו-חלקיקים

לפניכם טבלה ובה נתונים על אורך הגל עבור בליעה מקסימלית של ננו גבישים של גליום סלניד (GaSe) ושל אינדיום סלניד (InSe) בהתאם לגודלם.

אורך גל עבור בליעה מקסימלית בחומר GaSe (ביחידות של ננומטר)	אורך גל עבור בליעה מקסימלית בחומר InSe (ביחידות של ננומטר)	רדיוס הגביש
370	500	2.8nm
400	570	5.0nm

1. על פי המידע בטבלה, תארו כיצד משתנה אורך הגל הנבלע על ידי החומרים כפונקציה של רדיוס הננו-גבישים.
2. בהנחה כי אורך הגל הנבלע המרבי נקבע על ידי פער אנרגיה אסור, חשבו את פער האנרגיה האסור (ביחידות של אלקטרון וולט.  $1\text{eV}=1.6\cdot 10^{-19}\text{J}$ ) עבור שני החומרים בשני הגדלים.

## זמן תרגול נוסף:

1. לפניך נתונים על האנרגיה הדרושה למעבר אלקטרון מחבורת הערכיות לחבורת ההולכה (פער אסור) בשלושה יסודות שונים במצב המוצק.

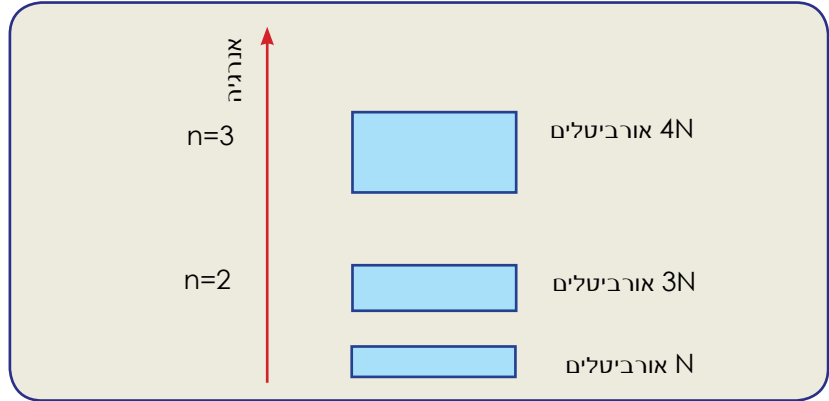
אנרגיה ב-eV	יסוד מספר
4.2	1
0.6	2
0.0	3

- נתון, כי אחד היסודות הוא מתכת, אחד אל מתכת ואחד מוליך למחצה. קיבעו איזה מבין היסודות הוא מתכת, איזה אל מתכת ואיזה מוליך למחצה. **נמקו תשובתכם.**
2. הסבירו מדוע מוליך למחצה מוליך חשמל טוב יותר בטמפרטורה גבוהה.
3. א. רשמו דיאגרמת אכלוס אלקטרונית לאטום ניטרלי של נתרן Na בעזרת התרשים הבא:  
 רשמו מעל כל ריבוע את הסימול של האורביטל והוסיפו בתוך הריבועים המתאימים את הייצוג של האלקטרונים.

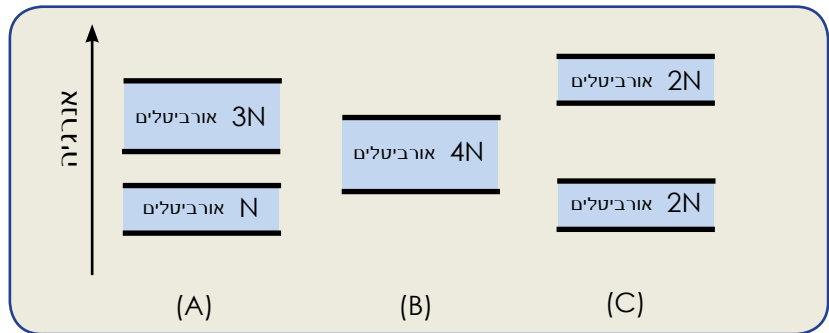
--	--	--	--	--	--	--	--

- ב. לפניכם קטע מסכמת מבנה פסים של נתרן מוצק. סמנו את מיקום הרמה האלקטרונית המאוכלסת הגבוהה ביותר בסכמה, בהנחה שבגביש

הנתון  $N$  אטומים. הסבירו מדוע מבנה פסים זה מתאים לחומר מתכתי.

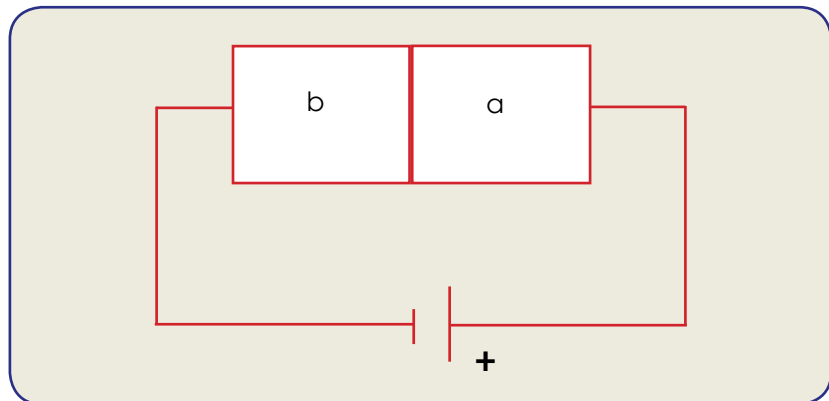


4. איזה מהאיורים הבאים אינו יכול להתאים לתיאור מבנה הפסים של גביש מגנזיום ובו  $N$  אטומים? נמקו תשובתכם. התייחסו רק לאלקטרוני הערכיות בקליפת האנרגיה  $n=3$ .



5. לפניכם תיאור סכמטי של דיודה. הדיודה בנויה מגביש צורן  $Si$  שעבר הסממה בכל אחד מהאזורים המסומנים ב- $\sigma$  ו- $b$ . במצב הנתון בסכמה הדיודה מוליכה חשמל.

- קיבעו איזה מבין הגבישים הוא מסוג  $N$  ואיזה מסוג  $P$ . נמקו.
- על סמך קביעתכם בסעיף א', הציעו באיזה יסוד עבר הסממה גביש  $\sigma$  ובאיזה יסוד גביש  $b$ ? נמקו. (שימו לב - יש יותר מאפשרות אחת).



6. השאלה מתייחסת לתרכובת מוליכים למחצה נפוצה בתעשיית המיקרואלקטרוניקה - החומר  $AlGaAs$ . בתהליך ייצור החומר, הוחלפו

אטומי גליום (Ga) באטומי אלומיניום (Al). מסמנים ב-X את החלק היחסי של אטומי אלומיניום בתרכובת:  $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$ . גודל הפער האסור תלוי בהרכב התערובת ומבוטא על ידי הנוסחה:  $\Delta E(x) = 1.424 + 1.247x$ . בהנחה שגודל הפער האסור קובע את צבע האור הנפלט מהדיודה, חשבו את אחוז האלומיניום בגביש המתאים לדיודה הפולטת אור אדום באורך גל של 730nm. פרטו חישוביכם.

## דף מידע

נוסחאות המקשרות בין אורך גל, תדירות ואנרגיה:

$$E = h \cdot \nu$$

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

חישוב רמות האנרגיה המותרות באטום המימן:  
מנות האנרגיה שעשוי לפלוט אטום מימן מעורר במעבר מרמה לרמה:

יחידות:

$$1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$$

אורכי גל וצבע:

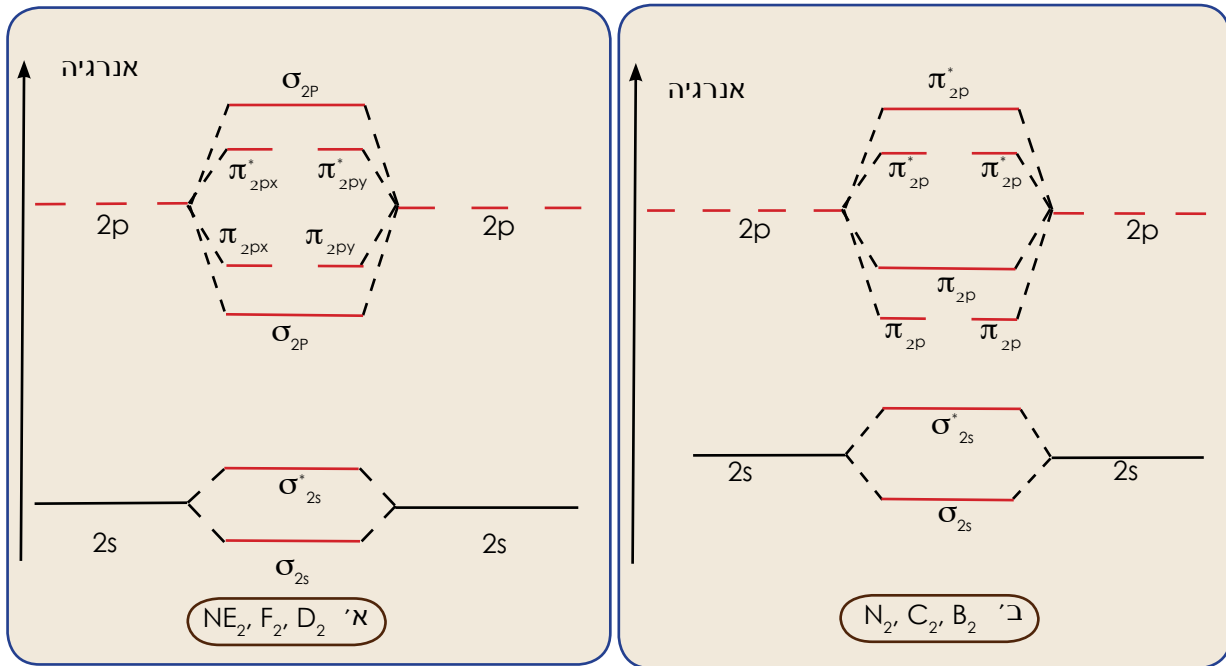
אורך גל (nm)	צבע
390 - 455	סגול
455 - 492	כחול
492 - 577	ירוק
577 - 597	צהוב
597 - 622	כתום
622 - 780	אדום

חישוב סדר קשר:

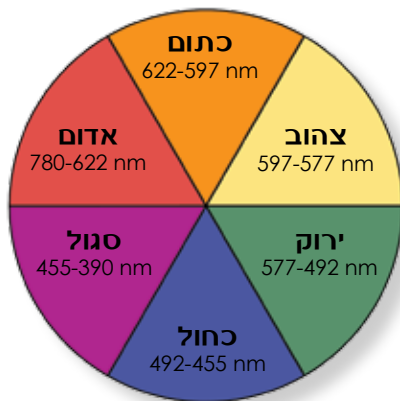
$$\text{סדר קשר} = \frac{\text{מספר אלקטרונים באורביטלים אנטי קושרים} - \text{מספר אלקטרונים באורביטלים קושרים}}{2}$$

שים לב: המשך הנוסחאות בעמוד הבא.

דיאגרמות רמות אנרגיה עבור מולקולות דו אטומיות בשורה השנייה:



גלגל הצבעים:



## אחרית דבר - מרמת הננו לנו - טכנולוגיה

"ננו-טכנולוגיה" הוא מונח רווח בתקשורת ובתחום העסקים. חברות רבות מצהירות שהן עוסקות בננו-טכנולוגיה בתחומים מגוונים: ננו-חומרים, ננו-ביוטכנולוגיה, ננו-אלקטרוניקה ננו-אופטיקה, ועוד. גם יישומים רבים מזכרים בהקשר זה, כגון: התקנים אלקטרוניים הבנויים ממולקולות ביולוגיות, מצלמות זעירות לאבחון רפואי, תאי שמש מומסים כמקורות אנרגיה, התקנים אלקטרו אופטיים וחומרים חזקים וקלים בעלי יכולת תיקון עצמית.

ננו-טכנולוגיה נתפסת כטכנולוגיה בה גודלו של אחד או יותר מממדי החומר/הרכיב/ההתקן הינו בקנה מידה ננומטרי (פחות מ-100 ננומטר). הגדרה זו הינה כללית ולא מספקת. במזעור כשלעצמו אין בעצם חידוש וזהו המשך ישיר להתפתחות הטכנולוגיה המודרנית. כך לדוגמה, בתחום הרכיבים האלקטרוניים יגיעו בקרוב חברות הי-טק ליכולת ייצור של התקנים מיקרו אלקטרוניים בגדלים של עשרות ננומטרים בלבד.

בתחילת תוכנית הלימודים שלנו עסקנו בסדרי גודל, ומצאנו כי יחידת האורך המתאימה לתיאור מולקולה המורכבת ממספר אטומים היא הננו-מטר. אמנם, כבר יותר מ-150 שנה מדענים מתארים את התהליכים הכימיים בשפת האטומים. אולם, הננו הינו תחום מחקר חדש בכימיה, שהתפתח באופן מואץ בעיקר בשני העשורים האחרונים. מדענים הצליחו "לראות את האטומים" ולייצר רכיבים חדשניים בעלי תכונות מיוחדות באמצעות המיזעור.

נשאלת השאלה: מה מייחד את הננו-טכנולוגיה מטכנולוגיות אחרות? האם יש פירוש מוסכם למונח "ננו-טכנולוגיה"? - לא בהכרח!

להלן שני תיאורים על המתרחש בתחום הננו-טכנולוגיה:

- ננו-טכנולוגיה משלבת את כל הכלים והשיטות שבאמצעותם מיישמים בצורה תעשייתית או מסחרית את תכונות החומר בטווח הגודל הננומטרי.
- בתחום הננו-טכנולוגיה פועלים לשינוי התכונות הכימיות, האלקטרוניות, המגנטיות, האופטיות והמבניות של חומרים ומבנים בגדלים ננומטריים.

להבהרת המונח ננו-טכנולוגיה, משמעותו וכיווני המחקר בתחום זה, פנינו במספר שאלות לשני חוקרים מובילים בתחום: פרופ' אורי סיוון ראש המכון לננו-מדעים וננו-טכנולוגיה ע"ש ראסל ברי, הטכניון, חיפה ופרופ' אורי בנין, מנהל המרכז לננו-מדע וננו-טכנולוגיה, הפקולטה למדעי הטבע, האוניברסיטה העברית, ירושלים.

השאלות ששאלנו את המדענים היו:

- כיצד אתה מגדיר ננו-טכנולוגיה?
- מהם לדעתך הנושאים או תחומי המחקר השייכים לתחום הננו-טכנולוגיה כיום?
- כיצד אתה צופה את התפתחות התחום בעתיד?

תשובותיהם מתייחסות למספר היבטים:

**תופעות תלויות-גודל** (size-dependent): תכונותיו של חומר משתנות באופן רציף, או באופן קיצוני ומפתיע, כאשר ממדיו קטנים לרמת הננו. התכונות המושפעות מהגודל הן אופטיות, חשמליות, מגנטיות וכימיות. היבט זה מעניין מאוד מבחינה מחקרית וצופים כי ממנו יצמחו חידושים מדעיים וטכנולוגיים. דוגמאות לתופעות תלויות-גודל:

- חוזקם של חומרים נקבע בין היתר על פי הכמות היחסית של הפגמים שבהם. ניתן ליצור גבישים/התקנים מאוד קטנים ללא פגמים ולפיכך הם יהיו חזקים יותר;
- הזהב ידוע כמתכת אצילה (אדישה מבחינה כימית), אך כאשר יוצרים גבישי זהב ננו-מטריים הם הופכים לפעילים מבחינה כימית ויכולים אפילו לשמש כזרזים בתגובות שונות. יישום אפשרי לתכונה זו הוא החלפת הפלטינה, המשמשת כזרז בממיר הקטליטי במכוניות, בננו-גבישי זהב (הזהב זול יותר מפלטינה).

## הרכבה עצמית (self assembly) של ננו-חומרים וננו התקנים:

השיטה המקובלת בטכנולוגיה היא בניה מלמעלה למטה (top-down). זו השיטה בה השתמשה עד היום תעשיית המיקרו אלקטרוניקה ויש לה יתרונות של ייצור בכמות גדולה בעלות נמוכה. שיטה זו מבוססת על העיקרון של בניית מבנים זעירים מחומר קיים, תוך שימוש בשיטות מכאניות או אופטיות (ראו בספר הלימוד שיטת הפוטוליטוגרפיה, עמודים 96-97). המשך תהליך המזעור צפוי להיות מוגבל בגלל הטכנולוגיה (יחד עם זאת, חשוב לציין, כי לטכנולוגיה הקיימת של ייצור שבבים, למשל, ניבאו לאורך השנים חסמים טכנולוגיים שהוכחו כלא אמיתיים). שיטה אפשרית נוספת, הדומה לדרך בה פועל הטבע, היא בניה מלמעלה למעלה (bottom-up). כלומר, בניית הגבישים או הרכיבים הננו-מטרים מאבני הבניין שלהם - האטומים או המולקולות. השיטה מבוססת על יכולתן של המולקולות להיקשר זו לזו בתהליך הנקרא הרכבה עצמית (self assembly). גישה זו מעמידה אתגרים גדולים בפני החוקרים העוסקים בננו-טכנולוגיה: שימוש בכוחות הקישור המוכרים לנו (כוחות ואן-דר ואלס, כוחות אלקטרוסטטיים, קשרים קוולנטיים) ליצירה ספונטאנית של מבנים מורכבים והתקנים ננו-מטריים בעלי תפקוד ייעודי. מחקר נרחב עוסק באירגון ובחיבור רכיבי הננו זה לזה. באוניברסיטה העברית בירושלים, למשל, עוסקים בבניית ננו-גבישים של תרכובות חומרים מוליכים למחצה, כמו קדמיום סלניד (CdSe), אשר צבעיהם ותכונותיהם האופטיות משתנים בהתאם לגודלם. בטכנולוגיה מיוחדת, נבנים מגבישים אלה מחטים אשר לקצותיהם מוספים אטומי זהב. למחטים אלה מוליכות גבוהה. אטומי זהב שבקצות המחטים מאפשרים נקודות חיבור ובתהליך של התארגנות עצמית (self-assembly) נוצרות שרשרות<sup>2</sup>.

ניתן להרחיב את הרעיון של התארגנות עצמית ולפתחו לכיוון של בניה ושכפול עצמי (self replication). בטבע, המידע הגנטי מקודד במולקולות ה-DNA ומועבר בעזרת מולקולות RNA ליצירת החלבונים. כלומר, במולקולות אלה אגור מידע רב. יצירת אבני בניין, בהן יהיה אגור כל המידע הדרוש לבנייה עצמית ולאירגון עצמי, היא משימה מאתגרת המציתה את הדמיון.

## אבולוציה מכוונת (directed evolution):

אבולוציה מכוונת הוא תחום מבטיח בננו-טכנולוגיה, אשר בניגוד לעקרונות ההנדסה המקובלת, מיישם עקרונות ביולוגיים. בטבע, ההתפתחות האבולוציונית מבוססת על מוטציות ושונות רבה, וגם על שגיאות בקידוד המידע הגנטי ב-DNA. שגיאות אלה מאפשרות את "תהליך הברירה הטבעית", שבמהלכו מי שמתאים ביותר לסביבה שורד ומעביר את המטען הגנטי שלו לדור הבא. הטכנולוגיה המקובלת היום אינה יכולה לחקות את התהליך הטבעי הזה, המבוסס על ניסוי וטעייה. תארו לעצמכם, למשל, תהליך של תכנון מכוונת על ידי מהנדסים ואנשי פיתוח. לא סביר מבחינה כלכלית לייצר מיליוני מכוניות, כל אחת שונה במקצת, ולבחור את המכונית הטובה ביותר בשיטה של התנסות. בגלל גודלן הזעיר של המולקולות, ניתן באבולוציה מכוונת ברמת הננו להשתמש בשיטה זו, לייצר מולקולות שונות לתפקידים מיוחדים (כמו למשל אנזימים), ולברור את המולקולה המתאימה ביותר ליעודה. עלות "תהליכי ייצור" אלה היא נמוכה מאוד<sup>3</sup>.

במהלך לימוד התוכנית, הכרנו דוגמאות של חומרים, כמו ננו-צינוריות פחמן, אשר תכונותיהן משתנות בהתאם למבנה המולקולרי שלהן, וכמו ננו-גבישים של גליום סלניד CdSe, אשר תחום בליעת אורכי הגל שלהם משתנה בהתאם לגודלם. חומרים אלה ודומים להם נחשבים אבני בניין בתחום הננו-טכנולוגיה.

**הננו-טכנולוגיה משלבת ידע מתחומי מדע ומחקר מגוונים, כמו כימיה, פיסיקה, ביולוגיה ורפואה. עדיין מוקדם לצפות את מידת ההשפעה של ננו-טכנולוגיה על חיינו, אך ניתן לומר כי למדע הכימיה תפקיד מפתח בהתפתחות תחום זה, כיום ובעתיד.**

2 Mokari, T., Rothenberg, E., Popov, I., Costi, R. & Banin, U. (2004) Selective Growth of Metal Tips onto Semiconduc for Quantum Rods and Tetrapods. Science, 34, 1787-1790

3 <sup>\*\*\*</sup> <http://www.lib.cet.ac.il/Pages/item.asp?item=10144>