

מה בין אצות כחולות, משבר אנרגטי ומכניקה קוונטית?

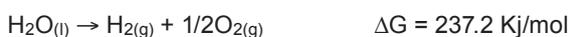
מיכאל קויפמן*

אנרגיית הרוח והשמש, גוברת המגמה של "חזרה למקורות": להשתמש בתהליך הפוטוסינתזה כמקור אנרגיה.

אחת השיטות הנגזרות ממגמה זו מכוונת ל"דלקים ירוקים", קרי לפיתוח דלקים ביולוגיים שיוכלו להחליף חלק מהנפט הנצרך למכוניות. למשל, בארה"ב הולך וגובר שימוש באתנול המיוצר מתירס.

כמות האתנול שיוצרה בארה"ב בשנת 2005 היא 16.2 מיליארד ליטר, והיא מהווה כ-3% מסך כל נפח הדלק למכוניות בארה"ב. השימוש באתנול מפחית אמנם פליטה של גזי חממה, אך בהסתכלות כוללת מתגלות מספר בעיות. למשל, לא ברורה עלותם הסביבתית של חומרי הדשן לגידול תירס. חלק מהחוקרים טוענים שגידול התירס וזיקוק האתנול צורכים יותר אנרגיה מאשר האנרגיה המופקת מן הדלק במנועי מכוניות, ובכל זאת בשריפת האתנול מתקבל הפחמן הדו-חמצני, שהוא אחד מגזי החממה העיקריים.

בשנים האחרונות נעשים מחקרים שמטרתם לחקות רק חלק מתהליך הפוטוסינתזה - השלב התלוי באור. אחד מהתהליכים המרכזיים של שלב זה הוא פירוק (פוטוליזה) של מים:



על מנת לבצע תהליך זה צמחים משתמשים באנרגיית האור. מימן שנוצר בתהליך זה משמש מחזר של פחמן דו-חמצני בתהליכי הפיכתו לגלוקוזה. יש לציין שבצמח מימן אינו נוצר כגז - קיימים חומרים שקושרים אטומי מימן ומשמשים מתווכים בין תגובה של פירוק מים לבין תגובות שבהן מימן מנוצל. עם זאת, אם התגובה

משבר אנרגיה אינו תופעה חדשה על פני כדור הארץ. כבר לפני למעלה מ-3 מיליארדי שנים שרר מצב זה על פני כדור הארץ. הסיבה למשבר הייתה דומה לזו של היום - שימוש במשאבים מתכלים להספקת האנרגיה בקצב העולה על קצב התחדשותם. האורגניזמים הראשונים שחיו בתקופה זו היו אורגניזמים הטרוטרופיים, כלומר אורגניזמים שזקוקים להספקה מתמדת של חומרים אורגניים מהסביבה. תרכובות אלה התקבלו מ"המרק הקדמון" שבו הם נוצרו מחומרים אנאורגניים. בתנאים של שפע חומרי מזון התרבו אורגניזמים אלה בקצב גובר והולך. הואיל ומהירות התגובות בתא גבוהה בהרבה מהמהירות מחוץ לתא, מאגר החומרים האורגניים ב"מרק הקדמון" הלך והתדלדל. בתנאים אלה של משבר אנרגיה הופיעו "אצות כחולות" שהחלו להשתמש באנרגיית האור הנראה על מנת ליצור חומרים אורגניים מחומרים אנאורגניים - זהו תחילתו של תהליך הפוטוסינתזה שבמרוצת הזמן הלך והשתכלל.

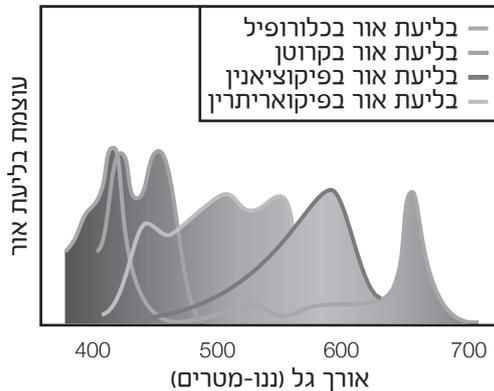
כל הדלקים שאנו משתמשים בהם עד היום להפקת האנרגיה - מקורם בפעילות הפוטוסינתטית של האורגניזמים הקדומים. גידול האוכלוסייה ועלייה ברמת החיים מביאים לעלייה מאריכית בצריכת האנרגיה. מרבית האנרגיה מופקת כיום משרפת דלקים מאובנים, והדבר גורם להתחממות הגלובלית של כדור הארץ עקב פליטת פחמן דו-חמצני. מקורות אנרגיה אלו שייכים למשאבים מתכלים, כלומר קצב התחדשותם אטי בהרבה מקצב ניצולם. לכן שימוש במשאבים אלו כמקור העיקרי להספקת אנרגיה גורם למשבר האנרגיה העולמי, שסימניו ניכרים כבר היום.

בחיפושים אחרי מקורות אנרגיה אלטרנטיביים כמו אנרגיה הידרואלקטרית, גאותרמית, אנרגיה גרעינית,

* מיכאל קויפמן, מורה לכימיה, ביה"ס עינות ירדן, קיבוץ עמיר. ברצוני להודות לחברי הצוות המעולה של קבוצה להוראת הכימיה במכון ויצמן למדע, גב' דבורה קצביץ' וגב' זיוה בר-דב על התמיכה ועזרה בהכנת המאמר.

אורכי הגל ש"נבחרו" על ידי הצמחים הם אורכי גל שנמצאים בתחום של האור הנראה. כיוון שקיים קשר בין מבנה החומר לבין ספקטרום הבליעה (או הקליטה) שלו - למעשה, קשר בין מבנה החומר לצבעו - צמחים משתמשים בפיגמנטים שונים על מנת לנצל ביעילות המרבית את אנרגיית האור.

בליעת אור בצבענים פוטוסינתטיים



כפי שניתן לראות, פיגמנטים שונים "מכסים" את כל התחום של האור הנראה, כלומר כל אורכי הגל של התחום הזה יכולים להוות מקור אנרגיה לפעילות פוטוסינתטית. עם זאת קיימת "הייררכיה" מסוימת בין הפיגמנטים האלו: כלורופיל a הוא הפיגמנט "הראשי", וכלורופיל b וקרוטנאודים ופיגמנטים אחרים - פיגמנטי עזר. ההבחנה הזו קשורה לתפקידים השונים של הפיגמנטים האלו בתהליך קליטת האור ולהמרת אנרגיית האור לצורות אנרגיה אחרות.

כלורופיל a ופיגמנטי עזר נמצאים בקרומים הפנימיים של כלורופלסטים (האברונים בתא צמחי האחראי על תהליך הפוטוסינתזה) ומסודרים בקבוצות-מערכות אור או ביחידות פעולה Photosystems (Ph). המערכות האלו בנויות כ"משפך אנרגטי" או אנטנה. כל מערכת כזו כוללת שתי מולקולות כלורופיל a ("מרכז ראקציה") וכמה מאות מולקולות של פיגמנטי עזר. קליטת אנרגיית האור על ידי כל אחת מהמולקולות במערכת אור גורמת לעירורה, אך רק מולקולות של כלורופיל a יכולות למסור את האלקטרונים שלהם למולקולות אחרות.

מתרחשת מחוץ לתא, ניתן לקבל מימן בצורת גז וניתן להשתמש בשריפתו להפקת האנרגיה. היתרון של שיטה זו לעומת השיטה של "דלקים ירוקים" הוא באי-היווצרות של פחמן-דו-חמצני, כלומר תהליך זה הוא ידודתי בהרבה לסביבה. היעילות האנרגטית של שיטה זו מוערכת בכ-15%-20%. לפי חישובים שנעשו בשוודיה, מתקנים לתהליך זה שתופסים פחות מ-0.2% משטחה, יכולים לספק צרכים אנרגטיים של כל התחבורה שלה (ראוי לציין, שאחד מהמזהמים החמורים ביותר הוא התחבורה).

קיים גם הבדל עקרוני בין שיטה זו לבין השיטה של "דלקים ירוקים". השימוש ב"דלקים ירוקים" מבוסס על שימוש מלא בפוטוסינתזה טבעית. "פוטוסינתזה מלאכותית", לעומת זאת, הנה "חיקוי" של שלב מסוים בתהליך הפוטוסינתזה הטבעית. חיקוי זה דורש ידע מעמיק אודות כל המנגנונים של השלב הזה ואודות כל הגורמים שמשפיעים עליו. היום גם האדם מתחיל להשתמש בהם על מנת לא להגיע למשבר אנרגיה.

לעקרונות של תהליך הפוטוסינתזה יש מקום נכבד גם בהוראת הכימיה, והוא יכול להוות מודל רב-תכליתי ורלוונטי מאוד במגוון נושאים בתכנית הלימודים החדשה.

צבע ופעילות ביולוגית

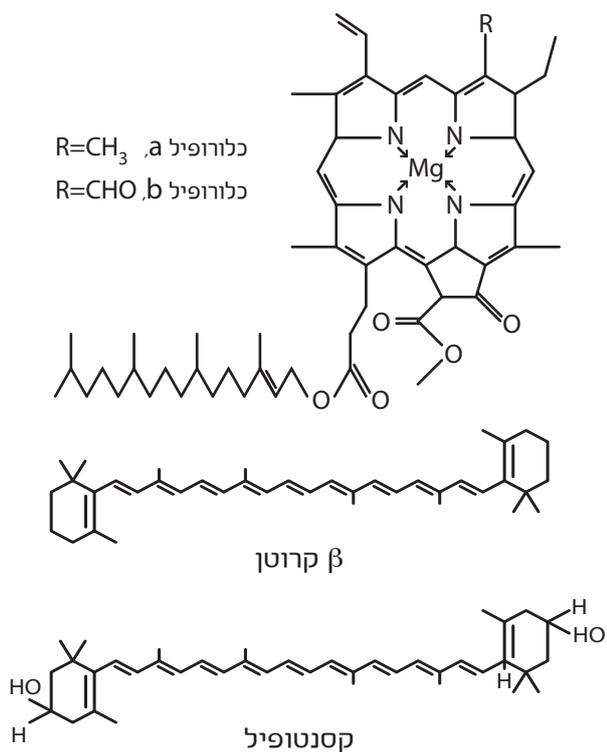
השימוש באור השמש כמקור אנרגיה לפעילות ביולוגית כרוך ביכולתו של הצמח "להבחין" בין אורכי גל שונים. הסיבה לכך נעוצה בקשר בין אורך גל ובין אנרגיית הקוונטים: ככל שאורך הגל קצר יותר, אנרגיית הקוונטים גבוהה יותר.

$$E = hc/\lambda$$

לכן לא כל אורך גל מתאים לפעילות ביולוגית: אורכי גל קצרים מדי עלולים לפגוע במרכיבי התא (למשל, השפעה מזיקה של קרינת UV), בעוד שלאורך הגל שבו ארוך מדי, אין די אנרגיה לפעילות ביולוגית יעילה.

מאופיינות במספר רב של קשרים מצומדים שבהם קיימת מערכת של קשרי פאי לא מאותרים. במערכות כאלו הפרשי האנרגיה בין רמות LOMO ו-HUMO אינם גדולים. לכן האנרגיה של האור הנראה מספיקה להעברת האלקטרונים וכתוצאה מכך להופעת הצבע.

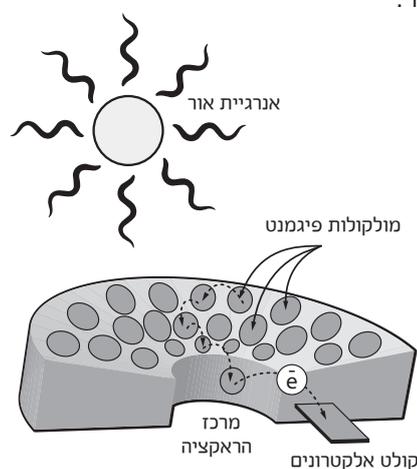
מולקולות הפיגמנטים שמרכיבות את המערכות הפוטוסינתטיות מכילות מספר רב יחסית של קשרים מצומדים. מולקולות אלו קולטות אורכי גל בתחומים שונים של האור הנראה ובהתאם לכך הם בעלות צבע שונה: כלורופיל - ירוק, קרוטן - כתום, קסנטופיל - צהוב. עם זאת רק מולקולות כלורופיל יכולות "להתחלף" באלקטרונים שלהן עם חומרים שנמצאים מחוץ למרכז הראקציה, כלומר, רק הן יכולות להתנהג גם כמחמצן וגם כמחזור. הסיבה לכך טמונה בעובדה שיוני מגנזיום נמצאים במרכז המערכת של טבעות פורפיריניות.



אחד מהמאפיינים של אטומי המתכות הוא מספר רב של אורביטלים לא מאוכלסים בהשוואה למספר האלקטרוני ערכיות. בהתחשב בהתנהגות הקוונטית של האלקטרון, ניתן לומר שבאטומי מתכות קיים מספר רב

כל הפיגמנטים האחרים יכולים רק לפלוט בחזרה את האנרגיה שנקלטה ולגרום לעירור המולקולה הבא. בסופו של דבר אנרגיה שנקלטה על ידי כל המולקולות של מערכת האור מועברת למרכז הראקציה - מולקולות כלורופיל a - והללו מוסרות את האלקטרונים שלהן למולקולות של נשאי אלקטרונים (NADPH).

כפי שצוין, לפיגמנטים שונים במערכת האור יש אורך גל בו הם הבליעה היא מקסימלית. אורכי גל אלה נמצאים בתחומי אנרגיה שונים, ולכן תחום קליטת האור מתרחב וזה גורם להגדלת כמות האנרגיה המנוצלת ב"מרכז הראקציה".



תיאור התהליכים האלו מעורר מספר שאלות, ואלה הן:

1. מהו הקשר בין מבנה החומר לבין צבעו?
2. כיצד מועברת אנרגיה מפיגמנט אחד למשנהו?
3. מה "מכוון" את זרימת האנרגיה במערכת פוטוסינתטית?
4. מדוע כלורופיל מסוגל להעביר את האלקטרונים שלו לחומרים אחרים, ואילו פיגמנטים אחרים אינם מסוגלים?

התשובות על השאלות האלו מדגימות מספר עקרונות שקשורים ללימודי הכימיה בכלל וללימודי התכנית החדשה בפרט.

במולקולה של חומר בעל צבע נמצאות קבוצות אטומים הנקראות קבוצות כרומופוריות. קבוצות אלו

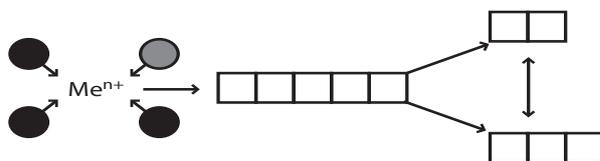
חומר יוני עקב מיום של יוני מתכת: למשל, יוני Cu^{2+} - $\text{CuSO}_4(s)$ (צבע לבן) ובתמיסה מימית ובהידרט $(\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}(s))$ - צבע כחול. גם צבע החומר עם אותה קבוצה כרומופורטי יכול להיות שונה עקב נוכחות יוני מתכת.

דוגמה טובה לכך היא צבעם של כלורופיל, של המוגלובין ושל בילירובין (חומר שנוצר בכבד עקב הוצאת יוני ברזל ממולקולות המוגלובין ומקנה למיץ המרה יחד עם הפיגמנטים האחרים את צבעו הירוק כהה).

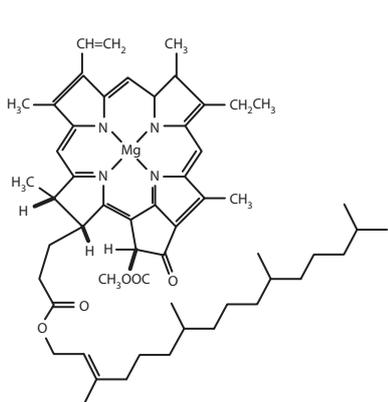
ניתן לגרום להחלפת יוני מגנזיום במולקולת כלורופיל באטומי מימן על ידי הוספת חומצה כלורית מרוכזת לתמיסה כוהלית של כלורופיל. מתרחשת תגובה שבה נוצר פיאופיטין - חומר לא יציב בצבע כתום.

עם זאת, גם שינויים במבנה של קבוצה פורפירינית מביאים לשינויי צבע.

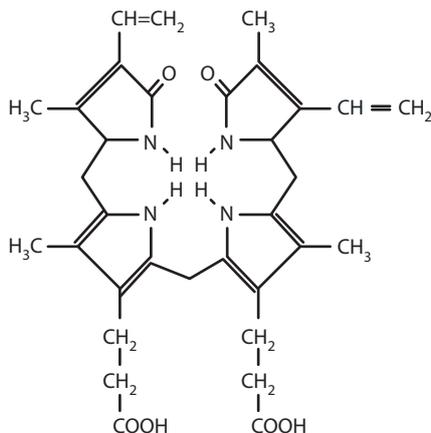
של מצבים "מותרים" להימצאות אלקטרוני ערכיות - דבר שמקנה, בין היתר, את כושר ההולכה של מתכות. ביון ה- Mg^{2+} יש אורביטלים $3s, 3p$ ו- $3d$ לא מאוכלסים. כתוצאה מכך נוצרת קרבה גדולה יותר בין האורביטלים LOMO ו-HUMO, וכושר תנועת האלקטרונים גדל. היווצרות הקשר בין יון המתכת לבין קבוצות אטומים שונות גורמת לכך שאורביטלים אטומיים שווי אנרגיה של אטומי מתכות מתפצלים לאורביטלים מולקולריים שהאנרגיה שלהם אינה שווה.



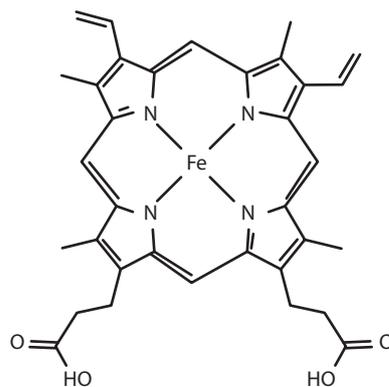
שינוי זה בא לידי ביטוי, למשל, בשינויי צבע של



כלורופיל



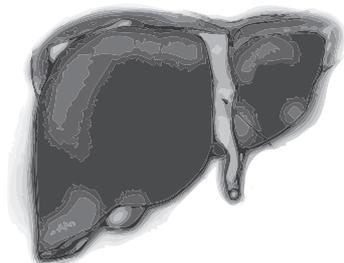
בילורובין



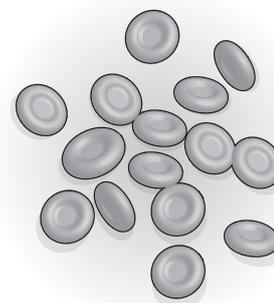
המוגלובין



עלה



כבד



כדוריות דם

ניסוי: שינוי מבנה – שינוי צבע – החלפת יוני מגנזיום בכלורופיל ליוני אבץ

אם לתמיסה שהתקבלה מוסיפים מספר גרגרי אבץ אצטט $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn}$ או נחושת אצטט $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Cu}$, ניתן לראות שהצבע הופך לכחול-ירוק.

חומרים וציוד

3 מבחנות.

תמיסת 10% HCl.

$(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn}$.

מיצוי כלורופיל בכוהל.

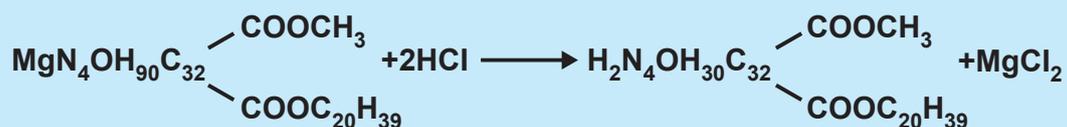
משורה.

מהלך העבודה

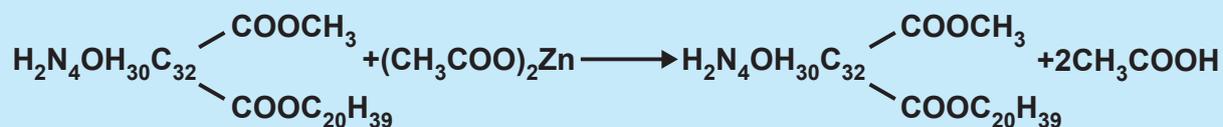
לכל אחת משלוש המבחנות מוסיפים 2 מ"ל של מיצוי כלורופיל. מוסיפים מבחנה אחת לביקורת.

לשתי המבחנות מוסיפים 3-2 טיפות של HCl. צופים במתרחש.

משאירים מבחנה אחת להשוואה ולמבחנה השנייה מוסיפים מספר גרגרי $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn}$. צופים במתרחש.



משוואה 1



משוואה 2