



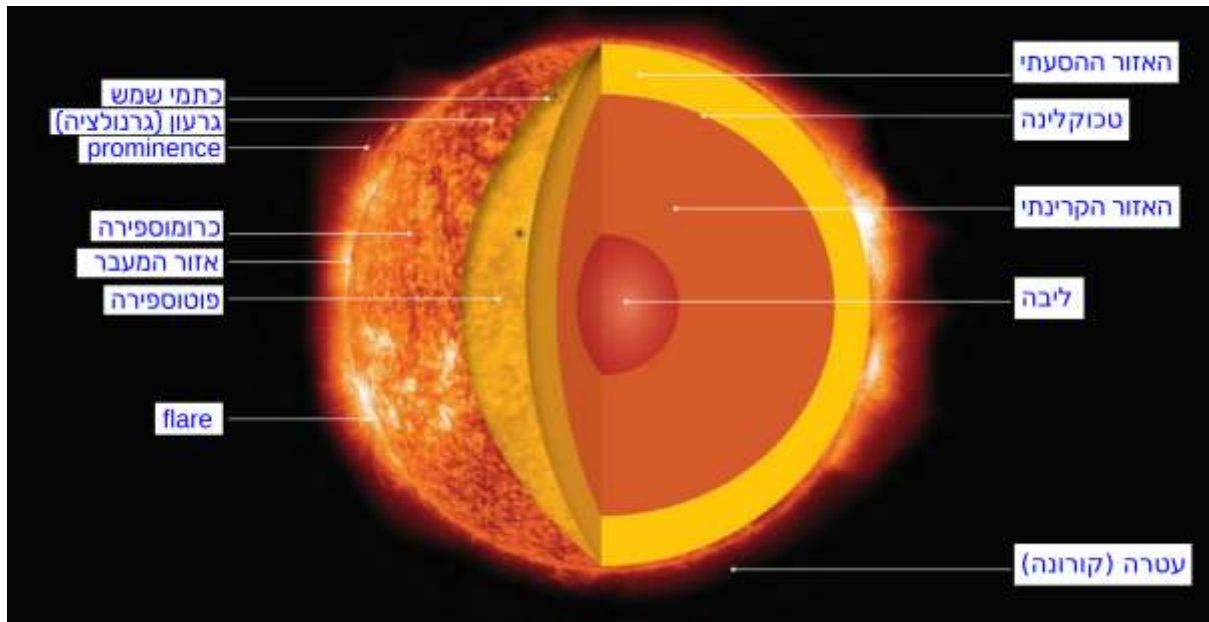
השמש כמקור אנרגיה

מאת: ד"ר אריה מלמד-כץ

מערכת השמש שלנו כוללת כוכב אחד, השמש, ומספר גדול של עצמים קטנים יותר - כוכבי לכת, כוכבי לכת ננסיים, ירחים, אסטרואידים, שביטים וגופים קטנים רבים נוספים. הקוטר של השמש גדול פי 109 לערך מקוטר כדור הארץ והמסה שלה מהווה כ-99.85% ממסת מערכת השמש כולה. בהיותה כוכב, השמש מהווה את מקור האנרגיה הראשי במערכת השמש - מרבית האנרגיה נפלטת כקרינה אלקטרומגנטית, מתוך זה חלק ניכר בצורת אור נראה. חלק מאור השמש הפוגע בעצמים אחרים במערכת השמש מוחזר מהם, כלומר שאר העצמים מלבד השמש, כולל כוכבי הלכת, הם מעין מראות המחזירות את אור השמש לחלל. חלק אחר מאור השמש הפוגע בעצמים אלה מחמם את פני השטח ואת האטמוספירה שלהם.

שכבות השמש

מלבד רגע השקיעה או הזריחה, אסור להסתכל על השמש ישירות, ללא אמצעי מיגון (משקפי שמש לא מספיקים), משום שהקרינה החזקה מסוגלת לעוור אדם תוך שניות ספורות. על מנת לחקור את השמש משתמשים מדענים בטלסקופים שעליהם מורכבים מסננים ייעודיים ונעזרים בחלליות מחקר המצוידות בשלל מכשירי תצפית. בעזרת מכשירים אלה ניתן לצפות בשכבות החיצוניות של השמש, ועל ידי ניתוח מדעי ניתן להבין מה קורה בתוך השמש, מתחת לשכבות הנראות. איור 1 מציג את שכבות השמש וכמה תופעות מעניינות שניתן לזהות על פני השמש.



איור 1: המבנה הפנימי והחיצוני של השמש. מקור: ESA

ליבה (core) – החלק הפנימי של השמש, בו מתרחש תהליך היתוך גרעיני, המהווה את מנגנון יצירת האנרגיה של השמש. בעת היווצרות כוכב מענן של גז, הכבידה מפעילה כוח כלפי המרכז וגורמת לגז להידחס ולהתחמם. בגלל הטמפרטורה הגבוהה הגז עובר יינון והופך לפלזמה, מצב צבירה שבו האלקטרונים מתרחקים מגרעיני האטומים ואינם קשורים אליהם.

הטמפרטורה הגבוהה היא בעצם תנועה מהירה של חלקיקים, ובליבה ערכה מגיע ל-15 מיליון קלווין. קלווין היא יחידת מידה לטמפרטורה, כמו מעלת צלזיוס, אלא שנקודת האפס של יחידות קלווין, הקרויה האפס המוחלט, נמצאת ב-273.15- מעלות צלזיוס. בזכות הטמפרטורה הגבוהה וצפיפות החומר העצומה בליבת השמש, גרעיני מימן, חומר המהווה את המרכיב העיקרי של השמש, מצליחים להתנגש זה בזה, למרות הדחייה החשמלית ביניהם (המטען החשמלי שלהם חיובי), ובתהליך היתוך גרעיני להפוך להליום.

תהליך ההיתוך העיקרי שמתרחש בשמש נקרא שרשרת פרוטון-פרוטון והוא כולל מספר שלבים. בסופו של התהליך 4 גרעיני מימן הופכים לגרעין הליום אחד. מסה של גרעין הליום נמוכה ממסת 4 גרעיני מימן ועודף המסה הופך לאנרגיה. בעזרת הנוסחה המפורסמת של אלברט איינשטיין $E=mc^2$ ניתן לחשב כמה אנרגיה משתחררת בתהליך, אנרגיה זו נישאת על ידי החלקיקים הנוצרים בליבה. כל החלקיקים הללו, מלבד נייטרונים שכמעט אינו מגיב עם חומר ובורח מהשמש, מעבירים את האנרגיה לשכבות החיצוניות של השמש, מחוץ לליבה, ומחממים אותן.

אזור קרינתי (radiative zone) – האזור שנמצא מסביב לליבה, מעביר את האנרגיה מהליבה החוצה באמצעות קרינה אלקטרומגנטית מסוג קרינת גמא. חלקיקי הקרינה, הקרויים פוטונים, נעים בתוך האזור הקרינתי במהירות האור, אך בגלל הצפיפות הרבה של הפלזמה בתוכו הם מתקדמים מעט בין התנגשות להתנגשות. למעשה, לאנרגיה שנוצרת בליבה לוקח בערך 170,000 שנה לעבור



את האזור הקרינתי. הטמפרטורה בחלק הפנימי של האזור הקרינתי מגיעה ל-7 מיליון קלווין והיא יורדת ל-2 מיליון קלווין בחלק החיצוני.

טכוקלינה (tachocline) – הגבול בין האזור הקרינתי לחלקי השמש שמעליו. מתחת לטכוקלינה השכבות מסתובבות כגוש אחד, במהירות אחידה, ומשלימות סיבוב ב-27 ימים לערך. מעל הטכוקלינה מהירות הסיבוב משתנה בהתאם לקו הרוחב – אזור קו המשווה מסתובב מהר יותר ומשלים סיבוב ב-25 ימים, ואילו ואזורי הקטבים מסתובבים לאט יותר ומשלימים סיבוב תוך יותר מ-30 ימים. חוקרים משערים שלטכוקלינה תפקיד בהיווצרות השדות המגנטיים בשכבות העליונות של השמש.

אזור הסעתי (convection zone) – האזור שנמצא סביב האזור הקרינתי והאנרגיה מועברת בו במנגנון הסעת חום. הפלזמה שמרכיבה את האזור ההסעתי נעה מאזור הגבול החם מאוד עם האזור הקרינתי עד לשכבת הפוטוספירה שבה הטמפרטורה עומדת על אלפי קלווין בלבד. הפלזמה שמתקררת בתהליך יורדת חזרה משום שהיא הופכת להיות צפופה יותר. התהליך מזכיר עליה של מים חמים מתחתית סיר מרק מתבשל וירידתם מטה אחרי שהם מגיעים לקצה העליון.

פוטוספירה (photosphere) – השכבה הנראית של השמש שממנה נפלטת מרבית האנרגיה של השמש לחלל, בצורת אור. ידוע שעצמים פולטים ספקטרום (תחום רציף) של אור בהתאם לטמפרטורה שלהם, תופעה הקרויה קרינת גוף שחור. עצם מכונה גוף שחור אם הוא בולע את כל סוגי הקרינה האלקטרומגנטית ולא מחזיר קרינה שפוגעת בו. לפי הצבעים הנפלטים מהפוטוספירה ניתן לדעת בצורה מדויקת מה הטמפרטורה שלה. הפוטוספירה של השמש פולטת אוסף צבעים, צבעי הקשת, שהשילוב שלהם נותן אור לבן. קרינת האור הספציפית הזו מתאימה לגוף בטמפרטורה של 5,777 קלווין (כ-5,500 מעלות צלזיוס).

בדרך דומה ניתן למדוד טמפרטורת פוטוספירה של כוכבים מרוחקים – העוצמה היחסית של הצבעים בספקטרום האור של כוכב מצביעה על הטמפרטורה, ככל שהצבעים כתום-אדום חזקים יותר כך הטמפרטורה נמוכה יותר וככל שהצבעים כחול-סגול חזקים יותר כך הטמפרטורה גבוהה יותר. על כן, טמפרטורת הפוטוספירה של ענקים אדומים ושל ננסים אדומים, למרות ההבדל העצום בגודלם, דומה ועומדת על כ-4,000 קלווין, ולעומת זאת בענקים כחולים הטמפרטורה של הפוטוספירה מגיעה ל-10,000 קלווין ומעלה.

כרומוספירה (chromosphere) – אזור בעל צפיפות חומר נמוכה שנמצא מעל לפוטוספירה. הכרומוספירה חדירה לאור ואפשר לראות דרכה את הפוטוספירה. בעזרת מסננים ייעודיים, שמעבירים אור הנפלט על ידי חומרים מסוימים, ניתן לצפות בכרומוספירה עצמה וללמוד בדרך זו על תהליכים המתרחשים על פני השמש, שמקורם בתהליכים פנימיים בתוך השמש.

אזור מעבר (transition region) – אזור דק יחסית המפריד בין הכרומוספירה שהטמפרטורה בה עומדת על אלפי קלווין לעטרה שבה הטמפרטורה מטפסת למיליון קלווין ומעלה.

עטרה (corona) – אזור חם, בעל צפיפות חומר נמוכה מאוד ועצום בגודלו, המהווה את השכבה החיצונית של השמש. מקור רוח השמש, חלקיקים טעונים הנפלטים מהשמש, בעטרת השמש. בניגוד



לקרינה האלקטרומגנטית הנפלטת באופן קבוע ואחיד מהפוטוספירה, רוח השמש מתגברת בעת פעילות מגנטית חזקה יותר בשמש. רוח השמש עלולה להיות מסוכנת לבריאותם של אסטרונאוטים ולפגוע בלוויינים וחלליות, אך על פני כדור הארץ אנו מוגנים ממנה בזכות השדה המגנטי של כדור הארץ ובזכות האטמוספירה. מצד שני, רוח השמש אחראית לתופעת זוהר הקוטב היפהפיה.

תופעות על פני השמש

המאפיין המבני הבולט של הפוטוספירה, וגם של הכרומוספירה שמעליה, הוא תופעת **הגרעון של פני השמש (granulation)** – כיסוי משתנה בצורה של תאים. תאים אלה מהווים בעצם את הקצה העליון של זרמי ההסעה מהאזור ההסעתי. מרכזי התאים הללו בהירים יותר והם מציינים אזורים של פלזמה חמה שעלתה מעלה, ואילו הדפנות של התאים כהים יותר והם מציינים פלזמה שהתקררה ומתחילה לרדת מטה. אורכו של כל תא כ-1,000 ק"מ והוא נעלם תוך 20 דקות בערך ומפנה את מקומו לתאים חדשים שנוצרים.

בתקופות של פעילות מגנטית מוגברת בשמש מופיעים מבנים מעניינים נוספים, והבולטים שבהם הם אזורים כהים בפוטוספירה הקרויים **כתמי שמש (sunspots)**. כתמים אלה, המופיעים בתוך **אזורים פעילים (active regions)** של מגנטיות חזקה, קרים מסביבתם ולכן הם פולטים פחות אור ונראים כהים. גודלם של כתמי השמש אינו אחיד וכך גם משך חייהם – מרגע שנוצרו הם נעלמים תוך ימים ספורים עד חודשים.

כמות כתמי השמש בזמן נתון מהווה מדד טוב למידת הפעילות המגנטית של השמש, ובזכות השתנות הכמות שלהם לאורך השנים התגלתה מחזוריות בפעילות המגנטית של השמש – זמן המחזור שלה עומד על 11 שנה בערך. בתחילת מחזור סולארי אין כמעט כתמי שמש, בשנים הראשונות הם מופיעים בעיקר בקווי רוחב גבוהים, הרחק מקו המשווה של השמש, ועם התגברות הפעילות המגנטית של השמש הם מופיעים יותר ויותר בסביבות קו המשווה. בשיא המחזור השדה המגנטי של השמש מתהפך ואז מתחילה ירידה בכמות כתמי השמש, עד שהכמות שלהם עולה שוב במחזור הבא.

השמש פולטת אנרגיה בצורת קרינה אלקטרומגנטית מהפוטוספירה בקצב קבוע, אך בעת פעילות מגנטית חזקה מתרחשות עוד תופעות, בעיקר באזורים הפעילים, בסביבת כתמי השמש. צורות הקרויות Prominences מתבלטות בתוך העטרה של השמש. הן נראות כמו לולאות של גז ופלזמה הזורמים מהפוטוספירה אל העטרה ומשם חזרה לפוטוספירה. הצבע האדום שלהן (איור 2) נובע מפליטת אור של אטומי מימן.



איור 2: השמש בעת ליקוי חמה מלא בשנת 1999. הירח מסתיר את כל חלקי השמש מלבד העטרה שצבעה לבן. ניתן להבחין גם בבליטות אדומות הקרויות prominences.

צלם: [Luc Viatour](#)

התופעות המרשימות ביותר שמתרחשות בעטרת השמש, במיוחד בשיא המחזור הסולארי, הן התפרצויות שמש הנמשכות דקות בודדות. ניתן לסווג אותן לשני סוגים, שלעיתים מופיעים יחד: flares ו-coronal mass ejections (CME). תופעת ה-flares מתאפיינת בפליטה מקומית וחזקה של קרינה אלקטרומגנטית בטווח רחב של אורכי גל, כולל קרינת רנטגן. הקרינה הזו מגיעה לכדור הארץ במהירות האור, תוך כ-8 דקות, אך המרכיבים המסוכנים שלה, הקרויים קרינה מייננת, נבלעים באטמוספירה ולא מגיעים לפני השטח. תופעת ה-CME מתאפיינת בפליטה מקומית חזקה של חלקיקים, כלומר של רוח השמש. החלקיקים הללו מגיעים לכדור הארץ תוך יום אחד עד 3 ימים, אך למרבה המזל גם הם לא מצליחים להגיע לפני השטח בזכות האטמוספירה ובזכות השדה המגנטי של כדור הארץ.