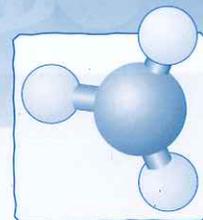


מהמפץ הגדול ועד תחילת החיים

דפנה מנדלר*

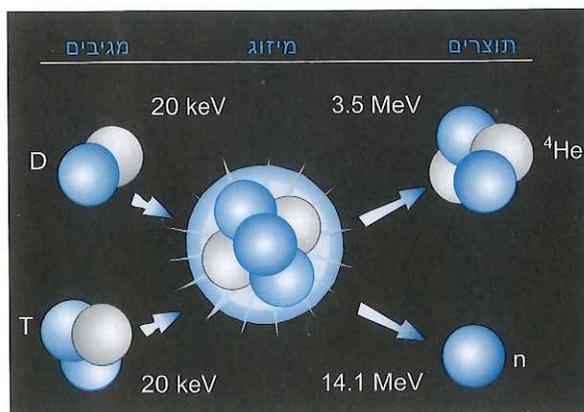


בסופו של דבר התעבה המימן ונהפך לכוכבים. תהליכים כמו מיזוג גרעיני, שבהם גרעיני מימן הופכים לגרעיני הליום, היו התהליכים העיקריים על הכוכבים עד למותו של הכוכב. תהליכים אלו אחראים גם לעובדה שהכוכבים החלו להאיר את החלל האפל.

את המפתח להבנה של תהליך המיזוג הגרעיני ושל הגורמים לפליטת אנרגיה במהלך המיזוג, פיתח אלברט איינשטיין במשוואתו המפורסמת על אנרגיה: $E = M \cdot C^2$, הממירה מסה לאנרגיה. כדי להגיע להבנה מעמיקה יותר, נסתכל בפרוטרוט על תהליך המיזוג הגרעיני.

תהליך המיזוג הגרעיני של יסודות קלים

תגובת המיזוג "D-T" היא בעלת מהירות התגובה הגבוהה ביותר בטמפרטורות הפלזמה הניתנות כיום להשגה במעבדה. בנוסף תגובה זו משחררת אנרגיה גבוהה בעת התרחשותה. בזכות שני מאפיינים אלה משמשת תגובה זו למחקר תהליכי מיזוג גרעיניים. כפי שניתן לראות באיור 1, תוצרי התגובה הם חלקיקי α (הליום טעון חיובית) וניטרון.



איור 1 - תגובת מיזוג "D-T"

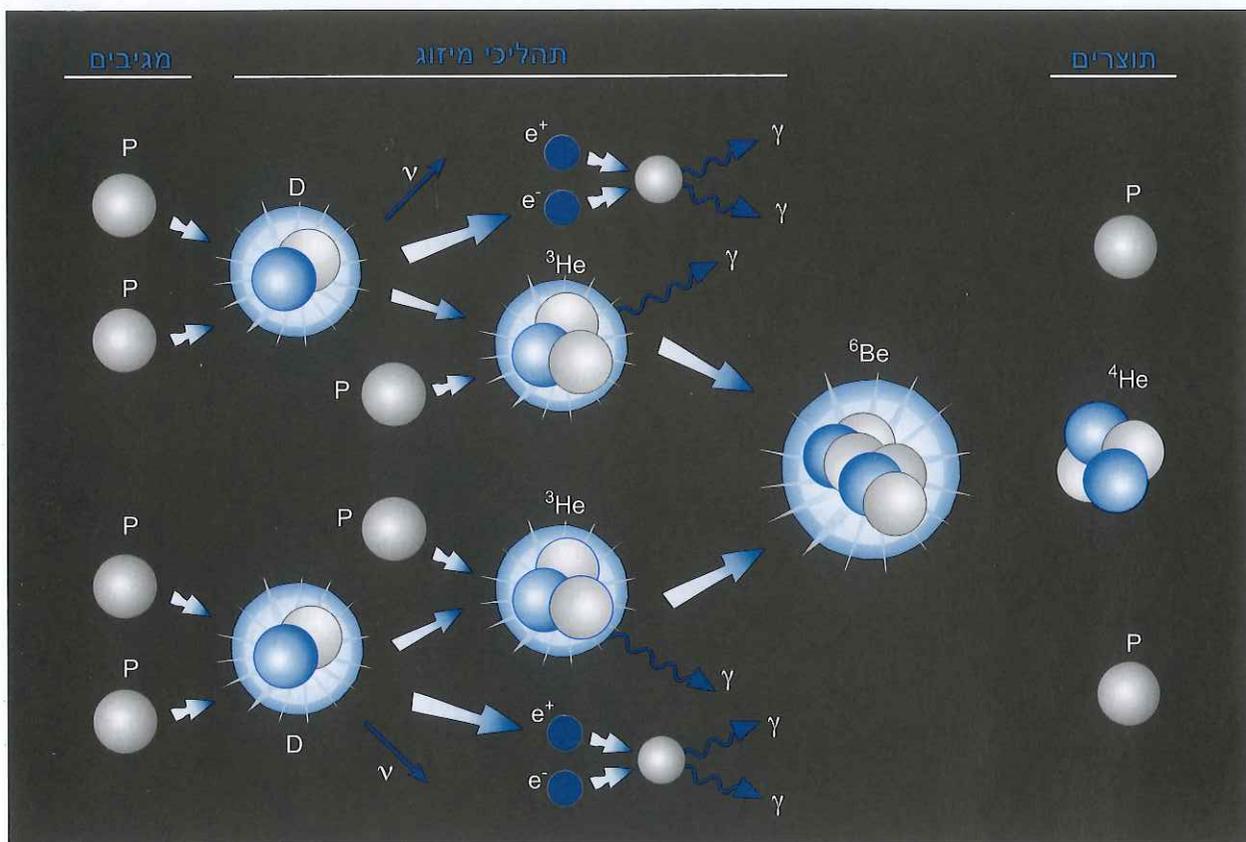
בבואנו לדון על היקום, כל מה שמעבר לאטמוספירה של כדור הארץ הופך להיות חלל עצום. בעצם האטמוספירה, המעטפת הדקיקה של כדור הארץ, מהווה רק חלק מזערי מנפח היקום כולו. למילה מעבר יש משמעות אניגמאטית, מסתורית משהו, כאשר מסתכלים על הנפח העצום הזה מעבר לנו במטרה להבין כיצד התחילו החיים על פני כדור הארץ וכיצד נוצרה המעטפת הדקיקה הזו המכונה אטמוספירה. כדי לנסות ולתת מענה לשאלות הללו נעבור בזריזות מנקודת ההתחלה וננסה להתחקות אחר היווצרות היסודות הקלים והכבדים. משם נמשיך וננסה להבין כיצד מהיסודות נוצרו התרכובות ובהמשך גם המולקולות המסובכות יותר; כל אלה יובילו אותנו בסופו של דבר לקיומם של החיים כפי שאנו מכירים אותם כיום.

כאשר מלמדים כימיה גרעינית מתייחסים בין היתר לעובדה שהברזל הוא הגרעין היציב ביותר, ולא ניתן למזגו עם גרעינים אחרים ליצירת גרעינים גדולים יותר. אחת השאלות הנפוצות בהקשר זה שנשאלות על ידי תלמידים היא: כיצד נוצרו הגרעינים הקלים מן הברזל והכבדים ממנו? שאלה טובה! את המסע שלנו להבנת החיים על פני כדור הארץ נתחיל בחיפוש אחר תשובה לשאלה ונחקור כיצד נוצרו היסודות הקלים וכיצד גרעיני היסודות הקלים התחברו יחד בחלל. התהליך נקרא בשפה המדעית "סינתזה גרעינית" (nucleosynthesis).

הכול התחיל במפץ הגדול. אסטרופיזיקאים חושבים שבזמן כלשהו לאחר המפץ הגדול, כאשר קווארקים החלו להידחס יחד ליצירת פרוטונים וניטרונים, גרעיני האטומים הראשונים שנוצרו היו של מימן, מעט הליום ועוד פחות מזה ליתיום. הטבלה המחזורית של אותם הזמנים הייתה קטנה מאוד.

* דפנה מנדלר, תיכון הראל, מבשרת ירושלים.





איור 2 - תגובת מיזוג "P-P"

לא יציב, והוא ממשיך ומתפרק לשני פרוטונים ולגרעין ${}^4\text{He}$. בנוסף התהליך משחרר שני נויטרונים, שני פוזיטרונים וקרני γ . הפוזיטרונים מתחברים במהירות עם האלקטרונים לתוך הפלזמה תוך שחרור אנרגיה נוספת בצורת קרני γ .

עד עתה הצלחנו באמצעות שני התהליכים המתוארים להבין כיצד נוצר היסוד הליום. התהליכים הללו עדיין אינם מסבירים כיצד נוצרו מרבית היסודות. בשלבים מאוחרים יותר בחייו של כוכב נוצרים גרעינים גדולים יותר כמו פחמן, חנקן וחמצן כתוצאה ממיזוג בין גרעיני הליום. מסתבר שככל שעולה המסה, כך הופכים גרעיני היסודות הנוצרים בדרך זו ליציבים יותר והברזל הוא היסוד הכבד ביותר הנוצר בדרך זו. גרעינים כבדים יותר מברזל הם פחות יציבים. על מנת להבין את תהליכי המיזוג יש להתייחס למושג אנרגיית קישור גרעינית

הנויטרונים בורחים לתוך הפלסמה, ושם ניתן ללכוד אותם בתגובות המשך כמו:



תגובה זו יכולה לשמש כדי להפוך את הנויטרונים חזרה לטריטיום ולהחזירו למעגל התגובה.

תגובה נוספת של מיזוג גרעיני ידועה בשם "P-P"

תגובה זו ידועה בשם תגובת שרשרת "פרוטון-פרוטון" (ראו איור 2). תגובה זו היא תגובת המיזוג הגרעיני העיקרית בכוכבים (בכוכבים כבדים יותר שולטים תהליכים מורכבים יותר הידועים כמעגל הפחמן). בשרשרת "P-P" שני זוגות של פרוטונים מתמזגים ויוצרים שני דוטרונים (גרעיני דיאוטריום). כל דוטרון מתמזג עם פרוטון נוסף ליצירתו בגרעיני ${}^3\text{He}$. שני גרעיני ${}^3\text{He}$ מתמזגים יחד ליצירת ${}^6\text{Be}$, שהוא גרעין

ולעוד נושאים נוספים כמו דעיכה רדיואקטיבית. הסיבה היא שעם העלייה במסה האטומית יש עלייה במטען החיובי של הגרעין. כוח הדחייה בין הפרוטונים גובר על הכוח החזק שמחזיק אותם יחד מלכתחילה. אם כך כיצד נוצרו גרעינים כבדים יותר כמו הצורן, בריום או טונגסטן?

“מעבר לברזל” – תהליך המיזוג הגרעיני של היסודות הכבדים

ייצור היסודות הכבדים מברזל מתרחש אף הוא. התהליך מתבצע ע"י הוספת נויטרונים לגרעין. בהיותם חלקיקים חסרי מטען חשמלי, הנויטרונים יכולים להתקרב בקלות לגרעין המתהווה וליצור גרעין כבד יותר.

קיימות שתי סביבות כוכביות שבהן התהליך של “לכידת הנויטרון” יכול להתרחש. סביבה אחת היא בתוך כוכבים גדולים במיוחד, כאשר הם מתים ומתפוצצים כסופר נובה. בתהליך דרמטי זה תהליך “לכידת הנויטרון” מתרחש מהר מאוד. התהליך נקרא תהליך r (r-rapid).

אך לא כל היסודות הכבדים נוצרים בדרך דרמטית זו. דרך נוספת ו”רגועה” יותר מתרחשת בכוכבים רגילים הנמצאים לקראת סוף חייהם, שבהם הליום משמש כדלק. התהליך נקרא תהליך s (s-slow). היסודות הכבדים מתקבלים כתוצאה ממיזוג מתון יחסית של הנויטרונים והגרעין. המדענים סבורים שמחצית מכל היסודות הכבדים יותר מברזל התקבלו בדרך זו במהלך האבולוציה המאוחרת של כוכבים.

תהליך s מתרחש במהלך שלב מסוים באבולוציה של כוכב. שלב זה ידוע בשם “AGB”. הוא מתרחש לפני שהכוכב הזקן מפזר את המעטפת הגזית שלו לחלל הבין כוכבי, לעתים מיד אחר כך הכוכב מת. כוכבים שהמסה שלהם נעה בין 0.8 ל-8 פעמים מהשמש, הם כנראה אלה שמועמדים להפוך לכוכבי “AGB”. הם אלו שמסיימים את חייהם בדרך המתוארת. גם השמש שלנו תסיים כנראה את חייה בדרך זו בעוד שבעה מיליארדי שנה.

הבנה מעמיקה של תהליך s ובמיוחד זה המתרחש בכוכב “AGB” מושגת על יד מחקרים רבים הנערכים זה שנים רבות. מחשבים רבי עוצמה מדמים וחוזים את

תהליכי s . המסקנות ממודלים אלה הם שתהליכי s יעילים במיוחד בכוכבים בעלי כמות מועטה של מתכות (כוכבים אלה נקראים “metal poor” או low metallicity). בכוכבים זקנים למדי שנולדו בשלבים המוקדמים של היווצרות הגלקסיה שלנו, תהליכי s צפויים להיות יעילים וליצור גרעינים מברזל ועד לאטומים הכבדים והיציבים ביותר כמו גרעיני עופרת (מספר אטומי 82) וביסמוט (מספר אטומי 83). מרגע שיסודות אלה נוצרו, תהליכי s נוספים ייצרו יסודות לא יציבים שידעכו חזרה לעופרת. כלומר תהליכי s מסבירים את היווצרות היסודות הכבדים עד מספר אטומי 82 וסביבת מספר אטומי זה.

כיצד מתרחשים תהליכי s ? כאשר גרעיני פחמן - 13 (גרעינים המכילים 6 פרוטונים ו-7 נויטרונים) פוגעים בגרעיני הליום - 4 (2 פרוטונים ושני נויטרונים), הם מתמזגים ונוצר חמצן - 16 (8 פרוטונים ו-8 נויטרונים). בתהליך זה, כפי שניתן לראות מחיבור המספרים, נויטרון אחד משתחרר. נויטרונים אלה הם אבני הבניין ליצירת גרעינים כבדים יותר.

תהליך המיזוג הגרעיני מרחיב את הטבלה המחזורית הקוסמית משלושה יסודות לעשרים ושישה. אך עדיין הדרך ארוכה עד יסודות שמספרם האטומי הוא 100 ומעלה. מאחר וברזל הוא גרעין יציב, הוא אינו עובר תהליכי מיזוג נוספים היוצרים גרעינים גדולים יותר. רק כאשר הגדולים מבין הכוכבים הראשונים צרכו את כל הדלק הגרעיני שלהם והפכו לסופר נובה, רק אז הייתה האנרגיה מספיקה כדי למזג יחד גרעינים גדולים יותר. ההתפוצצות האלימה של הכוכב היא זו שייצרה את היסודות הכבדים כדוגמת אורניום. בכל מקרה הייתה זו ההתנהגות של הכוכבים שייצרה את היסודות בטבלה המחזורית.

אולם מן האמור לעיל ברור שתהליכי s אינם יכולים להיות אחראים לייצור גרעינים רדיואקטיביים של המתכות הכבדות. אחת הסיבות לכך היא העובדה שיסודות רדיואקטיביים דועכים במהירות גבוהה מזו של תהליכי s היוצרים אותם. לכן כדי לקבל אורניום עדיין יש צורך בסופר נובה.



האבק הבין כוכבי והמבנה האלקטרוני

נשאלת השאלה כיצד יודעים החוקרים אילו יסודות מרכיבים את הכוכבים ואת האבק הבין כוכבי. הדרך לזהות קיומם של יסודות מסוימים בתרכובות ובחומרים נעשית כאן על פני כדור הארץ באמצעות חקירת קווי הספקטרום האופייניים לכל יסוד ויסוד. היסוד ליתיום התגלה כתוצאה ממחקר הקווים הספקטראליים המתקבלים בדעיכת אור השמש. היסוד ליתיום התגלה על פני השמש לפני שהוא התגלה כמתכת על פני כדור הארץ. ספקטרום של אור כוכבים הוא אחד האמצעים העיקריים לקביעת ההרכב של כוכבים. מאחר ולכל יסוד יש ספקטרום אופייני משלו, זיהוי קווי הספקטרום באור המגיע מכוכבים מאפשר את קביעת הרכבם.

בסקירה זו לא נרחיב בנושא ספקטרום של יסודות ומולקולות. הרחבה בנושא זה ניתן למצוא בספר "נושאים באינטראקציה בין קרינה לחומר" בהוצאת המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע.

מן היסודות הכבדים עד למולקולות פשוטות

עד עכשיו עסקנו באטומים. יצירת היסודות הכבדים היא רק שלב אחד בדרך מהמפץ הגדול ועד ליצירת היקום, שיכול לתמוך ביצירת חיים. מרגע היווצרות אטומים מורכבים נסללת הדרך להיווצרות מולקולות. מולקולות פשוטות כמו מולקולות מים, אמוניה ופחמן חד חמצני נפוצות בחלל. פעמים רבות ניתן למצוא אותן באבק הבין כוכבי הנותר בערפילית לאחר סופר נובה. מערכת השמש שלנו היא דור שני של כוכב שנוצר מאבק של סופר נובות עתיקות ולכן עשיר בתרכובות אלה.

תיאוריה חדשה טוענת שחלק מגרעיני החמצן והפחמן התמזגו ונוצרו במהלך המפץ הגדול, ומרגע היווצרותם הם יכולים להתרכב יחד ליצירת פחמן חד חמצני. אחת התצפיות החשובות נערכה ביוני 1998. באירוע זה נצפתה סופר נובה על ידי אסטרונומר יפני. צוות מחקר נוסף מאוניברסיטת אוסטיין בטקסס מצא פחמן דו חמצני שנוצר לאחר התקררות החלקיקים שנותרו בעקבות הסופר נובה. המולקולות הנוצרות מתנהגות כמו ספוג וקולטות את האנרגיה ליצירת גז חם ואז

פולטות את האנרגיה לחלל כקרינה אינפרה אדומה. תהליך היווצרותן של מולקולות כדוגמת פחמן חד חמצני, אמוניה, מים ואחרות מסייע לקירור הנשורת מסביב לסופר נובה ומאפשר לחלקיקים מוצקים נוספים להיווצר.

ממצאים אלה חשובים במיוחד משום שמזה זמן רב העריכו המדענים שסופר נובה היא המקור העיקרי למולקולות גז ולחלקיקי אבק בחלל, ואלה הם אבני הבניין החיוניים לכוכבים החדשים הנוצרים.

היקום מתעורר לחיים

מולקולות כדוגמת CO ומולקולות פשוטות נוספות הן אלה האחראיות לחיים על פני כדור הארץ ולתהליך האבולוציה שהחל מיד עם היווצרותן של מולקולות אלה.

המדענים חושבים שהתגובות היוצרות חיים החלו באוקיינוסים. יש לציין שחקר האבולוציה הפרה-ביוטית אינו כולל תהליכים רבים המקובלים כיום להבנת הכימיה של האטמוספירה. הסיבה לכך היא שכיום ידוע שהאטמוספירה הנוכחית של כדור הארץ אינה דומה לזו שהייתה בתחילת תהליך היווצרות החיים. הטענות על טיבה או על הרכבה של האטמוספירה באותם הזמנים עדיין שנויות במחלוקת. מחלוקת זו חשובה משום שלהתנהגות הכימית של האטמוספירה יכולה להיות השפעה מכרעת על התהליכים הכימיים שהתרחשו באוקיינוסים. לדוגמה, כיום האטמוספירה שלנו היא "אטמוספירה מחמצנת". המדענים חשבו שבעבר שלטה אטמוספירה המורכבת ממים, חנקן, אמוניה ומתאן. אטמוספירה זו הייתה אטמוספירה מחזרת. בשנות החמישים של המאה שעברה ביצע חוקר צעיר בן 22 בשם סטנלי מילר (Stanley Miller) ניסוי, שכיום הוא אבן הבניין להבנת היווצרות החיים על פני כדור הארץ. הוא השתמש בתמיסת מי מלח כדי לחקות את האוקיינוס הקדום. הוא הכניס את התמיסה למיכל חתום, כאשר האווירה מעל התמיסה הייתה אטמוספירה מחזרת, כפי שתיארנו להלן. הוא העביר ניצוצות חשמליים בתוך המיכל וזאת במטרה לחקות או לדמות ברקים

שכבר היו קיימים בעת ההיא. הוא גילה שבמהרה החלו להופיע חומצות אמיניות פשוטות בתנאים אלה. למרות שהתנאים שבהם השתמש סטנלי אינם התנאים הקיימים כיום על פני כדור הארץ, אלה הם התנאים שהחוקרים סבורים ששררו בתחילת היווצרות החיים על פני כדור הארץ.

הניסוי של סטנלי סימן את יריית הפתיחה בחקר האבולוציה הפרה-ביוטית. המדענים מקווים כיום שההבנה של התנאים שבהם החלו החיים על פני כדור הארץ, תוביל לאפשרות לחזות באלה מקומות נוספים ביקום יכולות להיווצר סביבות תומכות חיים, הדומות לאלה שעל פני כדור הארץ. התחום שאותו סטנלי עזר לפתח נקרא כיום בשם האבולוציה הפרה-ביוטית - exobiology.

האבולוציה הפרה-ביוטית ותרומתה לראשית החיים

את המושג exobiology תבע המדען, חתן פרס נובל, ג'ושוע לדרברג (Joshua Lederberg). משמעות המילה היא חקר החיים מחוץ לכדור הארץ. אולם מאחר שלא ידוע על חיים מחוץ לכדור הארץ, יש שסבורים שזהו נושא מחקר ללא נושא מחקר. ובכל זאת המחקר עוסק בחיפוש חיים במאדים, בירחים של יופיטר ובמערכות סולריות אחרות.

לענייננו, תחום זה כולל בתוכו גם מחקרים על תחילתם של החיים על פני כדור הארץ - כלומר חקר כדור הארץ הפרה-ביוטי - ועל התהליכים הכימיים המשוערים שהובילו להיווצרות חיים.

בשנות ה-20 של המאה ה-19 הודיע כימאי גרמני בשם ווהלר (Woeller) שהוא הצליח לסנתז אוריאנה מאמוניום ציאנט. החשיבות של סינתזה זו היא ביצירת חומר שנוצר בגוף האדם מחומרים אחרים שאינם אורגניים. מאז התפרסמו מאוד ניסוייו של ווהלר משום שהייתה זו הדוגמה הראשונה לחומרים אי אורגניים ששימשו להכנת חומר אורגני המעורב בתהליכי החיים בגוף. מאז קיימת הפרדה בין חומרים אורגניים, כלומר ממקור

ביולוגי, לחומרים אי אורגניים כמו CO_2 , CO וגרפיט. היום אנחנו יודעים שהאבחנה היא מלאכותית.

עדיין נותרה התעלומה כיצד ניתן להכין חומרים אורגניים בתנאים גיאולוגיים ולארגן את החומרים ליצירת אורגניזם חי. בעבר היו קיימות תיאוריות רבות ומגוונות. פעם חשבו שאם לוקחים חומר אורגני כמו שטיח או בשר רקוב ומניחים לו - ייווצרו ממנו בעלי חיים באופן ספונטאני. רעיון זה נקרא רעיון "הצמיחה הספונטאנית" (spontaneous generation). הרעיון לא היה מופרך לחלוטין והנחות מסוגו נשמעו הגיוניות, בהתחשב בעובדה שבזמן ההוא טרם התגלה ה-DNA.

השינוי בגישה התרחש בשנות ה-60 של המאה ה-18, כאשר לואי פסטר הראה שלא ניתן לקבל אורגניזם חי אלא רק מאורגניזם חי אחר. רעיונותיו של פסטר סתרו את רעיון הצמיחה הספונטאנית.

רעיון הצמיחה הספונטאנית טומן בחובו שני היבטים. האחד הוא הרעיון שחיים אינם יכולים להתחיל מערימת שטיחים. האחר הוא שהחיים נוצרו פעם אחת לפני מאות מיליוני שנים ומאז הם ממשיכים ומתפתחים. פסטר מעולם לא הוכיח שהחיים נוצרו בבת אחת, הוא רק הראה שאין מדובר בתהליך המתרחש כל הזמן.

מספר חוקרים ניסו ניסויים פרה-ביוטים בעבר, אבל הם השתמשו ב- CO_2 , חנקן ומים. כאשר משתמשים במולקולות אלה, דבר אינו מתרחש, משום שמולקולות אלה אינן יוצרות אטמוספירה מחזרת. רק כאשר משתמשים באטמוספירה מחזרת תהליכי החיים מתחילים להתרחש.

ציון דרך נוסף הוא רעיונותיו של המדען הרוסי אופארין (Oparin). הוא היה הראשון שניסח את רעיונותיו בדבר מקור החיים ופרסם אותם בשנת 1924. לרעיון שלו הוא קרא ההשערה ההטרו-טרופית: האורגניזמים הראשונים היו הטרו-טרופיים, כלומר הם קיבלו את החומר האורגני שלהם מהסביבה, ולא יצרו אותו בעצמם. אופארין גם העלה את הרעיון של האטמוספירה המחזרת.



בשנת 1951, בלי שהיה מודע לעבודתו של אופארין, הגיע הרולד יורי (Harold Urey) לאותה מסקנה אודות האטמוספירה. מתוך ידיעותיו הוא שיער שניתן ליצור את אבני הבניין של החיים בתנאים אלה.

ומה בחלל?

עד עתה התייחסנו להיווצרות מולקולות פשוטות כמו מים, מתאן ואמוניה. מולקולות אלה נמצאות בחלל הבין כוכבי. היום המדענים לומדים יותר על הסביבה הבין כוכבית ומוצאים שמתרחשים שם תהליכים אורגניים רבים המעוררים עניין רב. נוכחות של חומרים אורגניים מורכבים בחלל הובילה את החוקרים לתהות, אם החומרים האורגניים בחלל היו בעלי תפקיד רק באבולוציה הפרה ביוטית. כהערת ביניים נוכל להיזכר שהאפשרות שחומרים אורגניים מורכבים יכלו להיווצר לפני האבולוציה של החיים, עמדה במרכז ויכוח הנוגע למטאוריט מאדים, שמכיל פחמימנים פוליציקליים ארומטיים. המדענים עדיין אינם מסכימים ביניהם אם סימן זה מעיד על כך שפעם היו חיים על המאדים.

על פני כדור הארץ החוקרים מנסים לחקות את הסביבה הבין כוכבית בחלל כדי לחקור כימיה אורגנית באטמוספירה השוררת בחלל. בניסויים אלה התגלו ב-1980 מולקולות הכדור רגל (buckminsterfullerene's) על ידי רוברט קרל (Robert F. Curl), סר הרלוד קרוטו (Sir Harold Kroto) וריצ'רד סמולי (Richard E. Smalley). הם זיהו קווים ספקטראליים שהגיעו מהחלל ולא היו מוכרים להם משום מולקולה אחרת מוכרת על פני כדור הארץ. אחרי חיפושים וניסויים רבים וממושכים

הם הצליחו לחקות את התנאים השוררים בחלל ולהכין כאן מולקולה חדשה ולא מוכרת בעלת אותם קווים ספקטראליים. השלושה זכו בפרס נובל בכימיה בשנת 1996.

לסיכום, כימיה גרעינית היא ללא ספק התחום שבו תהליכים בחלל ממלאים תפקיד מרכזי. תהליכים כמו מיזוג גרעיני חומני, התהליך האיטי והתהליך המהיר בסופר נובה - כולם תורמים והופכים את החלל לבית חרושת חללי ליסודות. בנוסף ספקטרום מהחלל יכול ללמד אותנו רבות על האלקטרונים המקיפים את הגרעינים שהכוכבים יוצרים. מרגע שאטומים מתחילים להתחבר יחד ליצירת מולקולות, מתחזקת האפשרות (או הסבירות) ללמוד על תהליכים ביוכימיים ובאמצעותם על האבולוציה הכימית הפרה-ביוטית.

כיוון נוסף הוא חיפוש חיים גם על כוכבים אחרים שבהם קיימת אפשרות ליצירת חומצות אמיניות, חלבונים וחומצות גרעין. בחלל מתרחשים תהליכים כימיים רבים. תהליכים אלה יכולים לעורר עניין רב בקרב תלמידים ולהוסיף גיוון ועניין בשיעורי הכימיה.

מקורות

- Mark Michalovic, "News from Online: The Chemistry of Beyond", journal of chemical education, vol. 80 No 10, 2003, pp. 1119-1122
<http://fusedweb.ppppl.gov/CPEP/Chart.html>
<http://www.astrocentral.co.uk/stardust.html>
<http://spaceflightnow.com/news/n0108/30heavy/>
<http://jersey.uoregon.edu/~djohnson/astro/prindex.html>
<http://www.dartmouth.edu/~news/releases/1999/jan99/nova.html>
<http://www.accessexcellence.org/RC/miller.html>
<http://astrobiology.arc.nasa.gov/>
<http://www.astrochem.org/>