# אסטרונומיה על קצה המזלג

# פרופסור חגי נצר

# בית הספר לפיזיקה ולאסטרונומיה, אוניברסיטת תל אביב

(עדכון אחרון נובמבר 2017 )

"אסטרונומיה על קצה המזלג" הוא חומר קריאה בסיסי באסטרונומיה שמטרתו להציג את החידושים האחרונים בשטח זה בצורה עדכנית וקלה להבנה. המטרה היא לאפשר לקורא שאינו בעל השכלה מקיפה בשטחי מדעי הטבע והמדעים המדויקים להבין את המושגים הבסיסיים ולהכיר את גודלו ותכולתו של היקום, ואת הבעיות המרכזיות העומדות בפני האסטרופיזיקאים בראשית המאה העשרים ואחת.

"אסטרונומיה על קצה המזלג" מבוסס, בחלקו, על פרקי האסטרונומיה שבספר "חיים שם: החיפוש אחר חיים תבוניים ביקום" מאת חגי נצר ועמי בן בסט (1999, הוצאת ידיעות אחרונות) ועל הספר "צפונות היקום" מאת מידב, נצר וברוש (מהדורה אחרונה 2013).

**תוכן העניינים**

1. בראשית היה המפץ הגדול 2

 1.א. ממדי היקום 2

 1.ב. המפץ הגדול 4

2. גלקסיות 6

 2.א. כיצד נוצרו הגלקסיות 7

 2.ב. סוגי גלקסיות 8

 2.ג. צבירי גלקסיות והתפלגות החומר ביקום 9

 2.ד. גלקסיות פעילות וקוואזרים 10

 2.ה. גלקסיית שביל החלב 11

3. מבנה היקום 13

 3.א. העיקרון הקוסמולוגי 13

 3.ב. היקום המתפשט 13

 3.ג. גיל היקום 14

 3.ד. האסטרונומיה כהיסטוריה 15

 3.ה. האופק 15

4. כוכבים 16

 4.א. הולדת כוכבים 16

 4.ב. חיי כוכב 17

 4.ג. מסה, בהירות, טמפרטורה וזמן חיים 18

 4.ד. כוכבים כפולים 19

 4.ה. מותם של כוכבים 21

 4.ו. ענקים אדומים וננסים לבנים 22

 4.ז. סופרנובות וכוכבי ניטרונים 23

 4.ח. חורים שחורים וגלי כבידה 24

 4.ט. יצירת היסודות בטבע 26

5. כוכבי לכת - פלנטות 27

 5.א. מערכת השמש 27

 5.ב. פלנטות ענקיות ופלנטות ארציות 28

 5.ג. מערכות שמש אחרות 30

 5.ד. חיים ליד כוכבים אחרים 31

## 1. בראשית היה המפץ הגדול

**ממדי היקום**

היקום בו אנו חיים הוא בעל ממדים אדירים. ניתן לתאר אותו בעזרת רשימת המרחקים, בקילומטרים, מכוכב לכוכב או מגלקסיה לגלקסיה. מספרים אלה כוללים עשרות כה רבות של אפסים שאיש אינו יודע לכנותם בשם. ניתן גם לנסות ולקבל מושג על כמות החומר שביקום, לדוגמא מספרם של כל האטומים המרכיבים את החומר הנראה לעין. ואפשר גם לעשות זאת בעזרת זמנים. למשל, בעזרת הזמן הלוקח לאור לעבור מן הקצה האחד של הגלקסיה בה אנו חיים, לקצה השני, או הזמן הדרוש לאור להגיע מכאן ועד האופק. כל אלו דורשים טפול במספרים "אסטרונומיים" בגודלם ורצוי, לפני שנכנס לתיאור מפורט, לעשות בהם סדר.

אבני הבניין של היקום הן הגלקסיות. אלו הם גופים אדירי ממדים המכילים, כל אחד, עשרות ומאות מיליארדי כוכבים. הכוכבים, דוגמת השמש, גם הם גופים עצומים בממדיהם. קוטרם נמדד במיליוני קילומטרים ומסתם נמדדת במיליארדים רבים של טונות. מסת השמש שלנו, שהיא כוכב ממוצע בגודלו, כ- 2x1030 ק"ג. מכיוון ש-90 אחוזים מן האטומים המרכיבים את השמש הם אטומי מימן, ניתן לתאר מסה זו בעזרת מספר אטומי המימן בשמש. מסת אטום מימן אחד היא 1.6x10-27 ק"ג ומכאן כי השמש מכילה, בקרוב, 1057 אטומים של חומר. מספר הכוכבים בגלקסיה שלנו הוא כמאתיים מיליארד, ולא יקשה עלינו לחשב, על ידי כפל המספרים זה בזה, את מספר אטומי המימן בגלקסיה. בדרך זו נוכל אף להעריך את מספר האטומים ביקום הנראה כולו, המכיל עשרות מיליארדי גלקסיות. אם נאסוף את המספרים, אחד לאחד, נקבל את המספר האסטרונומי של 1080 אטומים. כלומר הספרה אחת ולאחריה 80 אפסים. לשם השוואה, באצבע הקטנה של היד יש, לכל אחד מאתנו, כ- 1024 אטומים של חומר.

המרחקים או הממדים הקטנים ביותר הדרושים לנו על מנת לתאר את מרכיבי היקום, קטנים לאין שיעור. מדובר בגודלו של אטום בודד, שהוא כ- 10-10 מטרים, ובגדלו של גרעין האטום, הקטן ממנו לערך פי מאה אלף. המרחקים או הגדלים האחרים בהם נשתמש הם "אסטרונומים" תרתי משמע. מדובר במרחקים שבין הכוכבים והגלקסיות. אין זה מעשי או יעיל למדוד מרחקים כאלו במטרים או אפילו בקילומטרים ורצוי למצוא יחידת מרחק גדולה ושימושית יותר. יחידה כזו היא "שנת אור", שהוא המרחק אותו עובר האור בשנה אחת. מהירות האור בריק היא כידוע כ-300,000 ק"מ לשניה. כפל מספר זה במספר השניות שבשנה נותן את מספר הקילומטרים שבשנת אור אחת, לערך 1013 (עשרה מליון מיליונים או עשרה טריליון) ק"מ. כאשר מודדים מרחקים ביחידות אלו מקבלים שהמרחק אל הכוכב הקרוב ביותר הוא כ-4 שנות אור, המרחק מן השמש אל קצה הגלקסיה הוא כ-80,000 שנות אור והמרחק אל הגלקסיה השכנה לנו הוא כשני מיליון שנות אור. ביחידות של שנות אור נעשה גם המרחק אל "האופק", כלומר המרחק הגדול ביותר אליו ניתן היום לצפות, כמעט בר תפיסה. מרחק זה הוא כ-14 מיליארד שנות אור. בהמשך ננסה להסביר מהו אופק זה.

הבנתנו את היקום תלויה, בעיקר, בשני ענפים של הפיזיקה המודרנית. הפיזיקה של חלקיקי היסוד, העוסקת בקטן ביותר (הגופים הקטנים ביותר והזמנים הקצרים ביותר), והפיזיקה של היקום כולו, הקרויה אסטרונומיה או אסטרופיזיקה, העוסקת בגדול ביותר (הממדים הגדולים ביותר והזמנים הארוכים ביותר). אם נתבונן במספרים אותם הזכרנו, נראה כי עלינו לכסות תחום רחב ממדים, מגרעין של אטום בודד ועד ממדי היקום הנראה. חשבון קצר מראה כי היחס בין שני מספרים אלו הוא המספר הדמיוני 1041. כלומר הספרה אחת ולאחריה 41 אפסים. אוהבי המספרים ירצו בודאי לחשוב על משמעות העובדה כי, מבחינת מספר האפסים (כלומר בסקאלת ממדים לוגריתמית) גודלו של כדור הארץ הוא כמעט בדיוק במחצית הדרך מן הקטן ביותר אל הגדול ביותר ביקום.

הטבלה הבאה מתארת את מסתם, גודלם וממדיהם של מרכיבי היקום, החל מן האטום הבודד ועד לממדי היקום עצמו.

|  |  |
| --- | --- |
| **מרחקים** |  |
| קוטר גרעין האטום | 10-15 מטר |
| קוטרו של אטום המימן | 10-10 מטר |
| רדיוס כדור הארץ | 6,400 ק"מ |
| רדיוס השמש | 700,000 ק"מ (2.3 שניות אור) |
| המרחק אל השמש (יחידה אסטרונומית אחת) | 150 מיליון ק"מ (כ8- דקות אור) |
| שנת אור - המרחק אותו עובר האור בשנה | כ- 1013 ק"מ |
| המרחק אל הכוכב הקרוב ביותר | כ-4 שנות אור |
| קוטרה של גלקסית שביל החלב | כ-100,000 שנות אור |
| המרחק אל צביר הגלקסיות במזל בתולה | כ-50 מיליון שנות אור |
| המרחק אל האופק | כ-14 מיליארד שנות אור |
|  |  |
| **מסות, צפיפויות ומספרי גופים** |  |
| מסת אטום המימן | 1.67x10-27 ק"ג |
| מסת כדור הארץ | 5.98x1024 ק"ג |
| מסת השמש | 2x1030 ק"ג |
| מסת הגלקסיה | 1041 ק"ג בקרוב |
| מספר הכוכבים בגלקסיה  | 100-300 מיליארד |
| מספר הגלקסיות בצביר גלקסיות עשיר | 3000 |
| מספר הגלקסיות ביקום הנראה | כ-100 מיליארד |
| מספר אטומי המימן ביקום הנראה | 1080 בקרוב  |
|  |  |
| **זמנים** |  |
| גיל כדור הארץ וגיל השמש | 4.6 מיליארד שנים |
| גיל הגלקסיה | כ-12 מיליארד שנים |
| גיל היקום | כ-13.8 מיליארד שנים |
| יצירת הפרוטונים והניטרונים | היקום בן מיליונית שניה |
| יצירת ההליום והדאוטריום | היקום בן דקה |
| נוצרות הגלקסיות הראשונות | היקום בן 0.5-1 מיליארד שנים |

למרות המספר העצום של אטומים, אפשר לאמור כי יחסית לממדיו, כמות החומר שביקום אפסית. צפיפותו **הממוצעת** היא כה קטנה שהיא יכולה להיחשב, לכל צורך ועניין, כריק מושלם. דמו לעצמכם אטום אחד בלבד לכל מטר מעוקב. צפיפות זו היא כה קטנה שאפילו משאבות הריק המשוכללות ביותר, הנמצאות בידינו, אינן יכולות להתקרב לערך כה קטן. לצורך ההשוואה, צפיפות האוויר בגובה פני הים, הנחשבת לצפיפות נמוכה ביותר, היא לערך 1025 אטומים למ"ק. אלא שאפילו בצפיפות ממוצעת כה זעירה, כמות החומר ביקום אדירה, משום ממדיו העצומים. גם צפיפותן הממוצעת של הגלקסיות, קטנה ביותר, משום המרחקים העצומים שבין הכוכבים. צפיפות חומר הכוכבים, דוגמת השמש, גדולה הרבה יותר, ואינה שונה בהרבה מצפיפות החומר ממנו מורכב כדור הארץ.

מהו אותו גבול אותו כבר הזכרנו, הקרוי "אופק", והאם מסתתר משהו נוסף מאחריו? האופק הוא המרחק הגדול ביותר אליו ניתן לראות. לא מדובר במגבלה טכנית כלשהי. למעשה, המכשירים המודרניים שבידינו מסוגלים לראות גם למרחקים גדולים יותר, אלא במגבלה אמיתית ובסיסית יותר בה נעסוק בהמשך. מעבר לאופק נמצא חומר רב נוסף שיש לשער כי הוא עולה בכמותו, אלפי מונים, על כמות החומר אותה הזכרנו. אפשר לשער, בלא שניתן להוכיח זאת בצורה חד משמעית, כי החומר מעברו השני של האופק הוא בצורת כוכבים, גלקסיות ופלנטות, הדומים ביותר לחומר המוכר לנו מסביבתנו הקרובה.

**המפץ הגדול**

כל אותם 1080 אטומים של חומר הנראה לעינינו, וכנראה מספר גדול הרבה יותר (כלומר גם חלקם הנכבד של האטומים שמעבר לאופק), נוצרו בהתפוצצות אדירה, "מפץ גדול", לפני כ-14 מיליארד שנה. באירוע זה, שהוא ראשית ההיסטוריה של היקום, נברא כל החומר ועמו נבראו גם המרחב והזמן. בתחילתו של התהליך היה מרוכז החומר הנראה לעיננו באזור קטנטן בעל טמפרטורה וצפיפות גדולות מעבר לכל דמיון. משום הטמפרטורה העצומה ששררה באותו האירוע נהוג לכנותו "המפץ הגדול החם". בשבריר השניה הראשון לא עלה קוטרו של האזור המכיל את כל אותם 1080 אטומי חומר, על מספר סנטימטרים. בהמשך, כתוצאה מן הפיצוץ האדיר, התפשט היקום, הלך וגדל הלך והתקרר, עד שהגיע, לאחר כ-14 מיליארד שנים, לממדיו העכשוויים ולטמפרטורה הקרובה לאפס בה הוא נמצא היום. הגורמים המדויקים למפץ הגדול, כלומר לתחילתו של אותו האירוע, אינם ידועים עדיין אך המחקר המודרני הולך ומתקרב להבנתם. היום אנו יודעים לתאר, בפרוטרוט, את ההיסטוריה של היקום החל ממיליונית השניה הראשונה ולמעשה אפילו מוקדם יותר.

לפני שנמשיך כדאי לעצור ולבדוק מהו אותו "זמן" שאנו מתייחסים אליו או, במדויק יותר, מתי החל הזמן? השעון בו אנו מןדדים זמנים ביקום החל לתקתק בתחילתו של אירוע המפץ הגדול. לפני כן לא היו שעונים ולא היה קיים זמן במובן שעליו אנו מדברים. אם ננסה ללכת אחורנית בזמן, אל לפני מיליונית השניה הראשונה, נמצא כי הבנתנו את האירועים והתהליכים הולכת ופוחתת. עם זאת, ישנם רעיונות מבוססים למדי על מה שהתרחש רק 10-35 שניות לאחר האירוע. מספר זה, זערורי ככל שיהיה, אינו מניח עדיין את דעת המדענים המנסים לחקור את מה שהתרחש אפילו מוקדם יותר. הסיבה למרוץ אל ראשיתו של הזמן מובנת. ככל שנלך אחורה בזמן, אל ראשית הבראשית, כך נבין טוב יותר את הגורמים למפץ הגדול ואת מה שנברא בו - כל החומר והאנרגיה הנראים לעיננו ביקום. ככל שנבין טוב יותר את אותו האירוע כך נבין טוב יותר את עצמנו (מבחינה פיזיקלית כמובן). יש החושבים כי לא רחוק היום בו נוכל לדעת כיצד בדיוק נברא היקום.

הדקות והשניות הראשונות לאחר המפץ הגדול הן שקבעו את אופיו ותכונותיו של היקום ובמידה רבה את אופי החיים שנוצרו בו. חשיבות רבה נודעת למה שהתרחש בשלוש הדקות הראשונות לחיי היקום, בזמן בו הייתה הטמפרטורה ביקום כמה מאות מיליוני מעלות ורובו של החומר היה עשוי מאלקטרונים, פרוטונים וניטרונים. מהיכן הגיע חומר בראשיתי זה? האם נוצר יש מאין? כמובן שביטוי זה, "יש מאין" אינו פיזיקלי אך לאמתו של דבר הוא בהחלט רומז על מה שהתרחש בשבריר השניה הראשון. זאת משום שאותם חלקיקים בראשיתיים נוצרו מן הקרינה החמה ביקום הקדום והלוהט.

האנרגיה ביקום הצעיר, הקדום, הייתה בעיקר בצורת קרינה. יש המתארים לכן את המפץ הגדול כ"כדור האור הקדמוני". קרינה זו, שהיא הקרינה האלקטרומגנטית הידועה לנו מחיי יום יום, מורכבת מחלקיקים הקרויים פוטונים. קרינה היא כידוע צורה אחת של אנרגיה היכולה להפוך באופן ספונטני לחומר. גם המעבר ההפוך, מחומר לקרינה, אפשרי בתנאים מסוימים כל זמן שמתקיים התנאי אותו ניסח לראשונה אלברט אינשטיין, האומר כי E=mc2, כאשר E היא כמות האנרגיה, m מסת החלקיקים הנוטלים חלק בתהליך, ו- c היא מהירות האור. כך למשל, פגישתם של שני פוטונים יכולה "להוליד" צמד של חלקיקים הנושאים עמם את כל אנרגיית הקרינה. בתהליך כזה, הקרוי "יצירת זוגות", הופכים הפוטונים לצמד של חלקיק והאנטי-חלקיק שלו. זוג פוטונים יכולים להפוך למשל לאלקטרון ואנטי-אלקטרון (הקרוי גם פוזיטרון). הדרך ההפוכה גם היא אפשרית. חלקיק ואנטי-חלקיק, למשל אלקטרון ופוזיטרון, יכולים להיפגש ולעבור "השמדה הדדית" (הקרויה אנהילציה, או בעברית "איון", מלשון "אין"). תוצאת פגישה דרמטית שכזו היא היעלמותם המוחלטת של שני החלקיקים ויצירת זוג של חלקיקי קרינה, פוטונים. ככל שהחלקיקים העוברים השמדה הדדית כבדים יותר, כך גדלה, על פי נוסחת אינשטיין, האנרגיה שלהם, כלומר הפוטונים הנוצרים מהם אנרגטיים יותר.

מהם אותם "אנטי-חלקיקים"? לכל חלקיק בטבע אנטי-חלקיק משלו השונה מן החלקיק במספר תכונות. מסת החלקיק והאנטי-חלקיק שווה אך אם לחלקיק מטען חשמלי מסוים, מטענו החשמלי של האנטי-חלקיק שווה בגדלו והפוך בקוטביותו. כך למשל, לפוזיטרון, האנטי-אלקטרון, מסה זהה למסת האלקטרון ומטען חשמלי חיובי של יחידת מטען אטומי אחת (יחידת מטען אטומי הקרויה לעיתים יחידת המטען היסודית בטבע, שווה בגודלה למטען האלקטרון או הפרוטון). לאנטי-פרוטון מסה כשל הפרוטון ומטען חשמלי שלילי של יחידה אטומית אחת. גם לחלקיקים ניטרליים אנטי-חלקיק משלהם. למשל קיים אנטי-ניטרון שמסתו כמסת הניטרון ומטענו החשמלי אפס. השוני בין הניטרון לאנטי-ניטרון מתבטא בהרכבם הפנימי ותכונות שגם אותן נהוג לכנות "מטענים", אלא שאין אלו מטענים חשמליים. התכונה המעניינת היא שחלקיק ואנטי-חלקיק אינם יכולים לדור בכפיפה אחת יותר משבריר של שניה. כשהם פוגשים זה את זה הם מושמדים והופכים לקרינה או אוסף של חלקיקים אחרים.

ביקום הקדום, הלוהט, התרחשו, במהירות עצומה, תגובות של יצירת זוגות חלקיקים מפוטונים ותגובות של השמדה הדדית של חלקיקים ואנטי-חלקיקים, היוצרות פוטונים. ככל שהיקום צעיר יותר, ולכן חם יותר, כלומר ככל שהפוטונים שבו היו אנרגטיים יותר, כך נוצרו מהם, חלקיקים כבדים יותר (שהרי האנרגיה הכללית נשמרת). בשבריר השניה הראשון הייתה הטמפרטורה כה גבוהה עד שנוצרו חלקיקים כבדים הרבה יותר מן הפרוטון והניטרון. רובם של חלקיקים לא היו יציבים וגם אם לא עברו השמדה הדדית, הם התפרקו ונעלמו לאחר זמן קצר. היום לא נותר מהם שריד. כאשר היה גילו של היקום כמיליונית השניה, הגיעה הטמפרטורה לערך של כ- 1013 מעלות קלווין. בטמפרטורה זו אנרגית הפוטונים מתאימה בדיוק ליצירת פרוטונים ואנטי-פרוטונים, ניטרונים ואנטי-ניטרונים. חלקיקים אלו עברו כמובן, גם הם, השמדה הדדית אלא שמסתבר כי היה קיים עודף קטנטן של חומר על אנטי חומר. כתוצאה מכך, גם לאחר ההשמדה ההדדית נותרו ביקום פרוטונים וניטרונים, אם כי במספר קטן מאוד יחסית למספר הפוטונים.

הפרוטונים הם חלקיקים יציבים שאינם מתפרקים במשך זמן הגדול בהרבה מגיל היקום. ניטרונים חופשיים, כלומר אלה שאינם נמצאים בגרעיני אטומים, מתפרקים באופן ספונטני בתהליך האורך כ-11 דקות. בדקות הראשונות לחיי היקום היו בו פרוטונים וניטרונים חופשיים. מאוחר קצת יותר, כשהיה היקום לערך בן שניה, ירדה הטמפרטורה ונוצרו זוגות של אלקטרון ואנטי-אלקטרון. בדקה הראשונה לחיי היקום היו האלקטרונים, הפרוטונים והניטרונים החלקיקים השכיחים ביותר ביקום. הפרוטון והניטרון דומים מאד במסתם והיחס המספרי ביניהם, בדקה הראשונה לחיי היקום, היו לערך חמישה פרוטונים לכל ניטרון. פרט להם היו ביקום חלקיקים קלים מן האלקטרון הידועים בשם ניטרינו ויתכן גם חלקיקים כבדים נוספים שעד היום איננו יודעים את זהותם (ראה בהמשך בעניין "החומר האפל").

בטמפרטורה של עשרות ומאות מיליוני מעלות, בהרכב ובצפיפות החמר של היקום הקדום, התרחשו באפן ספונטני ריאקציות של היתוך גרעיני. ריאקציות כאלו מתרחשות בחומר בעל צפיפות וטמפרטורה גבוהה. במצב כזה נעים חלקיקי החומר במהירויות גדולות ומתנגשים זה עם זה. תוצאת ההתנגשות היא, לעתים "היתוך גרעיני", כלומר מיזוגם של כמה חלקיקים קלים לחלקיק אחר, כבד יותר. הריאקציה החשובה והמהירה ביותר שהתרחשה בשלוש הדקות הראשונות לחיי היקום היא היתוך של מימן להליום:

 energy + H1 + 1H1 + H1 + 1H1 ⇒ 2He4 1

כאשר 1H1 מסמן את אטום המימן, שבו פרוטון אחד ואילו 2He4  מסמן את גרעין אטום ההליום, שבו 2 פרוטונים ו-4 נוקליאונים (נוקליאונים הוא השם הכולל לפרוטונים והניטרונים שבגרעין האטום). בריאקציות אחרות, איטיות הרבה יותר, נוצרה כמות זעירה של יסודות נוספים, דוגמת דאוטריום (מימן כבד, 1H2 שהוא איזוטופ של מימן המכיל בגרעינו, פרט לפרוטון, גם ניטרון אחד), וליתיום. כמות המימן שהפכה להליום תלויה ביחס שבין מספר הפרוטונים למספר הניטרונים ביקום הצעיר. ביחס ששרר ביניהם בדקות הראשונות, נוצר אטום אחד של הליום על כל תשעה אטומי מימן. הניטרונים בגרעין ההליום יציבים ואינם מתפרקים אך הניטרונים שלא הפכו להליום התפרקו ונעלמו ולאחר כמה שעות לא נותרו ביקום ניטרונים חופשיים. שניה אחת לאחר המפץ הגדול, היה כאמור כל חומר היקום עשוי מפרוטונים, ניטרונים, אלקטרונים וחלקיקי ניטרינו. לאחר השעה הראשונה היה חומר היקום כ-90 אחוז אטומי מימן, כ-9 אחוז אטומי הליום וכמות מזערית של יסודות אחרים. כל החומר הנראה לעינינו היום ביקום היה מרוכז, לאחר שלוש דקות, באזור שקוטרו כ-70 שנות אור.

ההיסטוריה של המפץ הגדול היא היסטוריה של התפשטות והתקררות. מיד לאחרי הדקות הראשונות, ובמשך תקופה של עשרות אלפי שנים, היו הטמפרטורה והצפיפות גבוהות מאד. במצב זה מתנגשים החלקיקים במהירות זה בזה, וגם עם הפוטונים, מה שגורם ליינון מוחלט של החומר, כלומר להפרדה בין גרעיני האטומים לאלקטרונים הסובבים אותם. כך, ינון אטום המימן פירושו הפרדה בין הפרוטון והאלקטרון המרכיבים את אותו האטום. עקב ההתנגשויות היה היקום הקדום מלא באלקטרונים חופשיים, ובגרעיני מימן והליום. עם ההתפשטות וההתקררות השתנה המצב. הפוטונים, חלקיקי הקרינה, אבדו אנרגיה תוך כדי ההתפשטות וגם חלקיקי החומר, בעיקר האלקטרונים המהירים, נעו לאט יותר ואבדו מיכולתם ליינן את האטומים על ידי התנגשויות. במצב זה נמשכו האלקטרונים החופשיים, הטעונים במטען שלילי, אל גרעיני האטומים, הטעונים במטען חיובי, והחומר עבר רה-קומבינציה (שחבור) והפך ניטרלי. עבור מימן והליום, מרכיביו העיקריים של החומר הבראשיתי, התרחש תהליך השחבור בטמפרטורה של כ-4000 מעלות קלווין, כאשר היה גילו של היקום כ-400,000 שנה.

הפיכת החומר המיונן ביקום לאטומים ניטרליים השפיעה באפן דרמטי על התפשטות קרני האור. עד אז היה היקום מלא באלקטרונים חופשיים אשר מנעו את תנועתם החופשית של הפוטונים (פגיעת פוטון באלקטרון מסיטה את הפוטון ממסלולו וגורמת לשינוי כוון התנועה שלו). בזמן השחבור התחברו האלקטרונים עם גרעיני האטומים ויצרו אטומים ניטרליים, אשר אינם מפזרים יעילים של קרינה. כמות האלקטרונים החופשיים שנותרו הייתה כה קטנה שהאור היה חפשי לנוע לדרכו. אפשר לאמור שבתקופת הרה-קומבינציה נעשה היקום "שקוף". הפוטונים הקדמונים, שמקורם במפץ הגדול, נעים מאז במרחב, בין אטומי החומר, תוך כדי שהם הולכים ומתקררים (כלומר, אורך הגל שלהם מתארך) עם התפשטות היקום. עם הזמן נוצרו מן החמר הגלקסיות והכוכבים אך מרבית הקרינה הקדמונית, כלומר אותם הפוטונים, לא הושפעה מכך כלל.

הסיפור שסופר עד כאן מבוסס על ידע תיאורטי של תהליכים פיזיקליים שונים ועל מחשבה מעמיקה על מה שיכול היה להתרחש ביקום הצעיר. האם ישנן לכך הוכחות כשלהן? למשל, היכן היום היא אותה הקרינה (אותם הפוטונים) שנוצרה במפץ הגדול והשתחררה מכבלי החומר לאחר כ-400,000 שנה? עד שנת 1965 לא הייתה לכך תשובה. בשנת 1965 התגלתה הקרינה, באקראי על ידי פנזייס (Penzias) ווילסון(Wilson) , שני פיזיקאים אשר עסקו בתצפיות רדיו שאיש אינו זוכר היום מה הייתה מטרתן המקורית. פנזייס ווילסון כוונו את טלסקופ הרדיו שבנו לכוונים שונים במרחב ומצאו, להפתעתם, כי היקום כולו קורן גלי רדיו, מכל מקום. קרינה זו המכונה "קרינת הרקע הקוסמית", מגיעה אלינו מכל כוון בו אנו צופים ומאפשרת לכן להשוות את ההיסטוריה של היקום הצעיר, כפי שמנבאה התיאוריה, עם תצפיות הרדיו. היום אין כל ספק כי מדובר אמנם בקרינה הקדמונית שמקורה במפץ הגדול.

תוספת משמעותית לממצאיהם של פנזיאס ווילסון התקבלה בשנות התשעים של המאה העשרים. בתחילת אותו העשור שוגר לחלל, על ידי סוכנות החלל האמריקאית נאס"א, לווין מתקדם ביותר בשם COBE (שהוא ראשי תיבות של Cosmic Background Explorer). מטרתו של לווין זה הייתה כפולה, למדוד את הטמפרטורה המדויקת של קרינת הרקע הקוסמית ולבדוק האם אמנם הטמפרטורה זהה בכל מקום במרחב. תוצאות הניסוי היו מדהימות. ראשית, טמפרטורת הקרינה נמדדה בדיוק רב ונמצאה 2.73 מעלות קלווין (כלומר 2.73 מעלות מעל האפס המוחלט, שערכו כזכור הוא 273- מעלות צלסיוס). על פי התיאוריה של המפץ הגדול, מידת התקררות היקום מאותו הרגע בו יצאה הקרינה לדרכה (כאשר היה היקום בן כ-400,000 שנים) ועד היום מתאימה בדיוק להפרש הטמפרטורות שבין אז (כ-4,000 מעלות קלווין) לבין היום (כ-2ץ73 מעלות קלוין). הפוטונים של קרינת הרקע שאנו מגלים היום הן קרני אור "זקנות" אשר נדדו בין הגלקסיות במשך כ-14 מיליארדי שנים.

התוצאה השניה של COBE היא אולי המשמעותית יותר. נמצא כי קיים הבדל מזערי, של בערך חלק אחד ל-100,000, בין הטמפרטורה של אזורים שונים. במילים אחרות, לאזורי יקום שונים הייתה בעבר טמפרטורה שונה במקצת. להבדלים זעירים אלה, כאלפית האחוז, משמעות כבירה. הם מרמזים על כך כי היו ביקום הקדום אזורים צפופים יותר וצפופים פחות של חומר. כפי שנראה, האזורים הצפופים קצת יותר הם שהפכו, עם הזמן, לגלקסיות וכוכבים.

בעשורים הראשונים של המאה ה-21 שוגרו לחלל שני ניסויים גדולים, רגישים ומדויקים יותר מניסוי COBE, במטרה למפות טוב יותר את קרינת הרקע הקוסמית. ניסויים אלה, WMAP ו-PLANCK, הוסיפו והרחיבו במידה משמעותית את הידע בתחום זה ומפות היקום של היום מדויקות ומפורטות הרבה יותר. הן מאפשרות לחקור את האזורים השונים בהם הייתה טמפרטורת קרינת הרקע, מיד לאחר עידן הרקומבינציה, גבוהה או נמוכה יותר בשבריר המעלה. הם אפשרו גם למדוד באופן מדויק את הקצב בו מתפשט היקום ואת המרכיבים הנוספים בו, אשר יופיעו בהמשך, החומר האפל והאנרגיה האפלה.

## 2. גלקסיות

### **כיצד נוצרו הגלקסיות**

ההיסטוריה של היקום והתפתחותו נקבעים במידה רבה על ידי התפשטותו שהחלה עם הפיצוץ הראשוני. עם ההתפשטות הולכת ויורדת צפיפות חומר היקום והקרינה גם היא הולכת ומתקררת - הפוטונים מאבדים מן האנרגיה שלהם . אלא שכוח הכובד פועל בין חלקיקי היקום המתפשט, ואם אין כוחות אחרים הוא גורם להאטת ההתפשטות עם הזמן. כוח הכובד פועל בכל המרחקים, ובין כל החלקיקים, והשפעתו גוברת ככל שמדובר במרחקים קצרים יותר. מסיבות שעדיין אינן מובנות לחלוטין אך קשורות כנראה לתנאים מיד לאחר המפץ הגדול, בתקופה הנקראת תקופת "האינפלציה" בה לא נדון כאן, לא היו כל האזורים ביקום הקדום בעלי צפיפות אחידה. במקומות שונים הייתה הצפיפות גדולה במקצת מן הצפיפות הממוצעת נוצרו במשך הזמן הגלקסיות והכוכבים.

גלקסיות וצבירי גלקסיות, שהם קבוצות המכילות מעשרות ועד אלפי גלקסיות כל אחת, נוצרו בתהליך הקרוי "קריסה כובדית" או "קריסה גרביטציונית" . באזורי היקום בהם הייתה צפיפות החומר גדולה במקצת מן הצפיפות הממוצעת, היו כוחות הכובד גדולים במקצת מן הכוחות באזורים הסמוכים וכתוצאה מכך התכווץ אזור זה במקצת. דחיסת החומר גרמה כמובן להגדלת נוספת של הצפיפות ולכן גם של כוחות הכבידה. הדבר גרם לכווץ נוסף, להגברת כוחות המשיכה וחוזר חלילה. התהליך מאיץ את עצמו וגורם לאזור שהיה צפוף רק במקצת מסביבתו להפוך לגוף נפרד, המוחזק על ידי כוחות המשיכה שבין חלקיו השונים. במשך כל התהליך קיימת תחרות בין התפשטות היקום, המרחיקה את פרודות החמר זו מזו, לבין הכווץ עקב כוחות הכובד, המקרב אותן. באזורים בהם גברה ההתפשטות חזרה הצפיפות והשתוותה לצפיפות הממוצעת ולא נוצר דבר. באזורים בהם גברו כוחות הכובד המקומיים נוצרו ענני גז שהפכו, לאחר זמן, לגלקסיות.

 הגלקסיות הראשונות נוצרו במיליארד הראשון לחיי היקום, מחומר היקום הראשוני, המימן וההליום. אנו רואים אותן היום הולכות ומתרחקות זו מזו משום ההתפשטות שהחלה במפץ הגדול. הגלקסיות עצמן אינן מתפשטות ואינן משנות את גודלן עם הזמן. הסיבה היא שכוחות הכבידה בין החלקיקים בגלקסיה, למשל בין הכוכבים, חזקים מאוד יחסית לתנועת התפשטות היקום.

תהליך הקריסה הכובדית מורכב הרבה יותר מהתיאור הפשטני שניתן כאן, משום שהגוף המתכווץ עצמו אינו בהכרח בעל צפיפות אחידה. הבדלי צפיפות קטנים מנקודה אחת לשניה בגוף כזה גורמים לאחדים מחלקיו, אילו בעלי הצפיפות הגבוהה יותר, לקרוס מהר יותר מן החלקים האחרים. גם כאן, קריסה מואצת מקומית מביאה להגברת הצפיפות וכתוצאה מכך לחיזוק כוחות הכובד וחוזר חלילה. התוצאה היא שהאזור הצפוף נפרד לאחר זמן משכניו והופך לגוף עצמאי. ענן גז בראשיתי גדול, המתחיל לקרוס עקב כוחות הכובד, יכול להתפרק בתהליך הקריסה לגופים קטנים יותר מגלקסיה, כלומר לכוכבים. בנוסף לכך, גלקסיות סמוכות שנוצרו מענן גדול, משפיעות ומושכות זו את זו. כך יהפוך אוסף של גלקסיות בודדות, באזור צפוף, לצביר של גלקסיות המכיל מאות או אלפים של גלקסיות. תצפיות ביקום מראות אמנם צבירי גלקסיות רבים המכילים מאות ואלפים של גלקסיות.

### **סוגי גלקסיות**

לגלקסיות גדלים רבים וצורות שונות. "דיאגרמת המזלג" הנראית בתמונה מציגה את הסוגים העיקריים של הגלקסיות ואת הדרך המקובלת למיינן. ניתן להבחין בה במספר סוגים של גלקסיות. הראשונות הן



***דיאגרמת המזלג של הבל*** *למיון גלקסיות*

גלקסיות הספירליות הניכרות בזרועותיהן הלוליניות ובתפיחה (bulge)הגדולה שבמרכזן. גלקסיות כאלו מסומנות באות S. מידת הפתיחה של הזרועות שונה מגלקסיה ספירלית אחת לשניה ומשמשת למיונן לתת קבוצות. כך למשל, גלקסיות מטיפוס Sa ניכרות בתפיחה המרכזית הגדולה ובזרועות הכרוכות במהודק סביבה ואילו גלקסיות מטיפוס Sc הן בעלות תפיחה מרכזית קטנה וזרועות פתוחות. הגלקסיות מטיפוס Sb מייצגות את קבוצת הביניים. גלקסית שביל החלב, בה אנו נמצאים, היא מטיפוס Sbc , כלומר בין הקבוצה השניה לשלישית. תת קבוצה אחרת של גלקסיות ספירליות כוללת גלקסיות שבמרכזן, פרט לתפיחה המרכזית, מבנה דמוי מוט ( Bar באנגלית). גם אלו באות עם זרועות פתוחות יותר או פחות ונהוג למיינן בצורה דומה לגלקסיות הספירליות האחרות אלא שהפעם מוסיפים את האות B לתת הקבוצה, על מנת לציין את המוט. כך למשל גלקסיה מטיפוס SBc היא גלקסיה בעלת זרועות ספירליות פרושות, תפיחה מרכזית קטנה ומוט.

 הגלקסיות הספירליות ניכרות באוכלוסיית הכוכבים שלהן ובסיבובן. בגלקסיות אלו כמויות ניכרות של גז, שלא הפך עדיין לכוכבים, הנראה היטב באזורי הזרועות הספירליות. הן מכילות כוכבים צעירים וחמים, בעלי צבע כחול, הנמצאים בעיקר בזרועות הספירליות , וכוכבים זקנים וקרים יותר, בעלי צבע כתום, הנמצאים בין הזרועות ובאזור התפיחה המרכזית. הגלקסיות הספירליות שטוחות ודקות, כדוגמת דיסקה. עובייה האופייני של דיסקה כזו אינו עולה על כמה מאות שנות אור בעוד שקוטרן של גלקסיות ספירליות גדולות כמה עשרות אלפי שנות אור. מסת הגלקסיות הספירליות הגדולות היא כ-1041 ק"ג. הן סובבות סביב מרכזן במהירות גדולה. מניחים כי הצורה השטוחה היא תוצאת סיבוב זה.

סוג שני של גלקסיות הן הגלקסיות האליפטיות. צורתן של אלו כצורת אליפסה אלא שהאליפסה אינה דומה בהכרח מכל הכוונים. אפשר לדמיין זאת על ידי אוסף עצום של כוכבים הנעים כולם מסביב למרכז הגלקסיה במסלולים אליפטיים. אלא שמידת האליפטיות של המסלול, ונטייתו (כלומר מישור המסלול ביחס לקו המשווה של הגלקסיה) שונים מכוכב לכוכב. צבען האופייני של גלקסיות אליפטיות צהוב-כתום מה שמעיד על כוכבים זקנים וקרים יחסית. בגלקסיות אלו כמות קטנה מאד של גז שלא הפך עדיין לכוכבים. הן מסתובבות בקצב נמוך ביותר יחסית לגלקסיות הספירליות, או שאינן מסתובבות כלל, ותנועת הכוכבים בהן אקראית (כלומר כל כוכב נע בכוון אחר). תנועה זו מקנה להן את הצורה המרחבית הכדורית.

מסמנים גלקסיות אליפטיות באות E ומוסיפים לכך מספר שלם, n, בין 0 ל-7, המתאר את היחס בין צירי הגלקסיה, כך

 

בנוסחה זו, a מציין את אורך הציר הארוך של האליפסה ו-b מציין את אורך הציר הקצר. גלקסיה מטיפוס E0 צורתה כדורית, עגולה (כלומר a=b), וגלקסיה מטיפוס E5 היא כזו שבה אורך הציר הגדול כפול מאורך הציר הקטן. גלקסיות אליפטיות יכולות להיות גדולות או קטנות, מסיביות יותר או פחות. הגדולות ביותר ביניהן דומות בממדיהן ובמסתן לגלקסיות הספירליות הגדולות, ואפילו גדולות יותר. אחרות קטנות הרבה יותר, כך למשל ידועות גלקסיות אליפטיות שקוטרן רק כמה אלפי שנות אור ומסתן כאלפית או פחות ממסת הגלקסיות הגדולות ביותר. אם נאסוף את מסת כל הכוכבים הכלולים בגלקסיות האליפטיות הגדולות ביותר נקבל מסה של לערך 2X1042 ק"ג.

הסוג השלישי של גלקסיות הן הגלקסיות הלא-סדורות (Irregular) המסומנות על ידי Irr. על פי שמן, אין לגלקסיות אלו צורה מוגדרת והן נראות, לעתים, כערמה אקראית של כוכבים וגז. אוכלוסיית הכוכבים בגלקסיות לא סדורות דומה לאוכלוסיית הכוכבים בגלקסיות ספירליות, כלומר, הן מכילות כוכבים חמים וצעירים. זו הסיבה לכך שבסכמת המיון של הגלקסיות נהוג למקמן בקצות הזרועות של המזלג.

### **צבירי גלקסיות** **והתפלגות החומר ביקום**

חלק ניכר של הגלקסיות ביקום מקובץ לקבוצות הקרויות צבירי גלקסיות. הצבירים הקטנים יותר מכילים כמה עשרות גלקסיות. בצבירים הגדולים, העשירים, כמה אלפי גלקסיות. כוחות הכובד בתוך צבירים עשירים של גלקסיות חזקים למדי וגוברים על תהליך ההתפשטות של היקום. צבירים כאלו אינם משנים את גודלם עם הזמן. פרט לאלפי הגלקסיות שבצביר עשיר, קיים שם גם גז הנמצא בין הגלקסיות. מסתו של גז זה אינה פחותה, ולעתים אף עולה, על כמות החומר שבגלקסיות עצמן. עקב התנועה המהירה בתוך הצביר מתחמם הגז מאד וקורן קרינה חזקה, בייחוד קרינת- X. בצבירים עשירים של גלקסיות רואים מספר גדול יחסית של גלקסיות אליפטיות, ואילו בצבירים עניים, ומחוץ לצבירים, רואים מספר יחסי גדול יותר של גלקסיות ספירליות. הסיבה לכך היא כנראה התנגשויות בין גלקסיות בצבירים עשירים, במקום בו הצפיפות גדולה, בייחוד ליד מרכז הצביר. התנגשות כזו גורמת לגז החופשי, שלא הפך לכוכבים, לעזוב את הגלקסיות הספירליות. הדבר משפיע על הזרועות ועל צורת הגלקסיה המשתנה והופכת דומה יותר לגלקסיה אליפטית, חסרת גז בינכוכבי.

צבירי גלקסיות גדולים הרבה יותר מגלקסיות בודדות. קוטרו של צביר גלקסיות עשיר הוא כ-10 מיליון שנות אור. אחת השאלות המעניינות לגבי מערכות ענק אלו היא כמות המסה שהן מכילות. ישנן דרכים שונות למדוד את המסה בצבירים ורובן מבוססות על הרעיון הפשוט שככל שכמות המסה גדולה יותר, כך גדולים יותר כוחות הכבידה. התוצאה היא שבמערכות בהן כמות מסה גדולה ינועו הגופים במהירויות גדולות . מדידת מהירות התנועה של גלקסיה (בשיטה הקרויה "הסחת דופלר" אותה נכיר בהמשך) מאפשרת להעריך את כמות המסה שבצביר. גם טמפרטורת הגז שבין הגלקסיות מאפשרת להעריך את מסת הצביר. כמות המסה בצבירי גלקסיות נמדדה בשיטות כאלה, וגם אחרות, ונמצאה גדולה הרבה יותר מכמות המסה "הנראית" של הגלקסיות והגז הבין-גלקטי גם יחד. כלומר, בצבירי גלקסיות נמצא חומר שאינו פולט כל קרינה וניתן להסיק על קיומו רק מתנועת הגלקסיות בצביר. האסטרונומים קוראים לחומר זה "החומר האפל". מסתבר כי כמות גדולה של חומר אפל נמצאת גם בגלקסיות בודדות. הכמות כה גדולה עד שלגבי גלקסיות ספירליות היא מהווה כ-90 אחוז מן המסה הכללית. בצבירי גלקסיות עשירים מהווה החומר האפל לא פחות מ-95 אחוז ממסת הצביר. עדיין לא ידוע מהו חומר אפל זה אך ברור כי הוא שונה מאד מן המימן וההליום, המרכיבים את רוב החמר הקורן ביקום. יתכן כי מדובר בחלקיקים שאינם מוכרים עדיין שנוצרו בשבריר השניה הראשון לחיי היקום. אם ניקח בחשבון מסה זו נמצא כי מסתם של צבירי גלקסיות גדולים היא לערך 1045 ק"ג.

למרות גודלם העצום, צבירי הגלקסיות אינם המבנים הגדולים ביותר ביקום. קיימים גם "על-צבירים" של גלקסיות שהם גופים המאגדים מספר צבירים. ממדי העל-צבירים אדירים, מאות מיליוני שנות אור מקצה אל קצה, ומסתם פי עשרה ויותר ממסת הצבירים העשירים. הצבירים ועל צבירים של גלקסיות מרכיבים את "הרשת הקוסמית" של חומר היקום. מיפוי חומר זה מראה מבנים שונים – חלקם בצורה של חוטים דקים, אחרים בצורה של יריעות חומר, כלומר אלפי גלקסיות המתאגדות למבנה דמוי יריעה. ביחד הם יוצרים מעין רשת שהחללים בה גדולים בנפחם מהאזורים צפופי החומר. המבנים אותם תארנו כ"על צביר" של גלקסיות הם חלקים שונים של הרשת הקוסמית הזו.

### **גלקסיות פעילות וקוואזרים**

במרכזן של חלק ניכר של הגלקסיות מתרחשים תהליכי יצור אנרגיה השונים תכלית השינוי מן התהליכים המתרחשים בכוכבים, שאותם נתאר בהמשך. באזורים אלו צפיפות החמר גדולה והוא מתרכז באזור קטנטן ופולט לחלל כמויות אדירות של אנרגיה. תצפיות בגלקסיות כאלה מראות כי עצמת הקרינה הנפלטת ממרכזן אינה קבועה ומשתנה עם הזמן, לפעמים תוך שעות או ימים בודדים. מסיקים מכך כי אזור פליטת הקרינה קטן מאד בממדיו. עובדות אלו ואחרות מובילות למסקנה כי אותו אזור קטן מכיל חור שחור ענק (ראה להלן) שמסתו ממיליון ועד מיליארד ויותר מסות שמש.

פליטת אנרגיה מחומר הנמצא ליד חור שחור ענק היא תהליך מורכב שעדיין איננו מבינים את כל פרטיו. בעוד שכוכב פולט אנרגיה משום שהוא גוף לוהט (או, בשפה טכנית, "גוף שחור") המשמר את צורתו ואת טמפרטורת פני השטח שלו במשך מיליוני ואף מיליארדי שנים. לא כך הדבר ליד החור השחור. באזורים אלה נופל חומר (או בשפה מקצועית "נספח חומר") אל תוך החור השחור ומתנגש בדרכו בחומר נוסף. עקב ההתנגשות מאבד החומר הנספח אל החור השחור אנרגיה כובדית וזו הופכת לקרינה אלקטרומגנטית הנפלטת לחלל. בגלקסיות פעילות יכולה האנרגיה הנפלטת מן המרכז, עקב ספיחת חומר אל החור השחור, לעלות על כמות האנרגיה הנפלטת ממאה מיליארדי כוכבים. הגופים הבהירים ביותר בקבוצה זו, נקראים "קוואזרים". אלו הם הגופים הבהירים ביותר ביקום ומרביתם נמצאים במרחקים עצומים מאתנו. קוואזרים בהירים פולטים כמות אנרגיה העולה פי אלף ויותר על כמות האנרגיה של גלקסיה גדולה ומייצרים אנרגיה זו באזור שאינו עולה בגודלו על גודלה של מערכת השמש.

הקווזארים הבהירים ביותר נמצאים בקצה היקום הנראה, כ-90 אחוזים מן המרחק אל האופק. הם נוצרו כשהיקום היה צעיר ביותר וסיימו את חייהם לפני זמן רב. האור שאנו קולטים היום נפלט מהם כאשר היה היקום צעיר מאוד יחסית לגילו היום, כאשר הם היו ב"תקופת הזהר" שלהם. אור זה נדד במשך מיליארדי שנים בדרכו אלינו. במשך הזמן הפכו רובם לגופים קרים וחיוורים אך החור השחור שבמרכזם נשאר כשהיה.

### **גלקסית שביל החלב**

הגלקסיה בה אנו נמצאים קרויה גלקסית שביל החלב. זוהי גלקסיה ספירלית גדולה שאינה שונה מאלפי ומיליוני גלקסיות ספירליות אחרות. היא דקה ושטוחה, בעלת קטר של כ-100,000 שנות אור ועובי ממוצע של כמה מאות שנות אור. לגלקסיה זרועות ספירליות ותפיחה מרכזית גדולה והיא מסווגת כטיפוס Sbc. השמש היא כוכב אופייני, אחד מתוך כמאתיים מיליארדי כוכבים בגלקסיה. היא נמצאת כ-25,000 שנות אור ממרכז בגלקסיה, במישור הדיסקה, ומקיפה את המרכז במסלול אליפטי – כמעט מעגלי. מהירות התנועה של השמש במסלולה סביב למרכז הגלקסיה היא כ-220 ק"מ בשניה. כל הקפה כזו אורכת כ-200 מיליון שנה, משך זמן שנהוג לכנותו "שנה גלקטית".

בגלקסיה שלנו, כמו בגלקסיות ספירליות אחרות, מרכיבים שונים. הכוכבים מהווים כ-80 אחוז מן המסה הקורנת של הגלקסיה (כלומר בלא לקחת בחשבון את המסה האפלה). כ-20 אחוזים נוספים מן המסה הקורנת הם ענני גז ואבק. במרבית המקומות הגז הבינכוכבי דליל ביותר, כמיליון אטומים למטר מעוקב. ישנם אזורים בגלקסיה בהם הגז צפוף יותר. אלו הם ענני גז קרים שהגז שבהם רובו מולקולרי ומהם נוצרים כוכבים. כאשר נולד כוכב בענן כזה (ראה בהמשך) הוא מחמם ומיינן את הגז סביבו לטמפרטורות של אלפי מעלות. גז זה קורן ונראה לעין כענן גדול בצבע אדמדם.

בנוסף לגז, מכיל התווך הבין-כוכבי גם "אבק". האבק הבינכוכבי הוא אוסף של גרגירים קטנים, עשויים מפחמן, חמצן וסיליקטים שונים, בעלי קוטר אופייני של כעשירית המיקרון (מיקרון אחד הוא 10-6 מטר). יש גם חלקיקי אבק המכוסים בקליפת קרח דקה. קל להבחין בחלקיקי האבק משום שהם בולעים ומפזרים את אור הכוכבים ומסתירים מעיננו כוכבים רחוקים. תמונת שמיים מאזורים רבים בגלקסיה מראות כתמים שחורים גדולים. אלה הם ענני גז ואבק אדירי ממדים, עשרות ומאות שנות אור כל אחד.



***ענן גז בגלקסיה. האזורים בצבעי ירוק צהוב ואדום מכילים גז מיונן. האזורים הכהים מכילים אבק בין-כוכבי המסתיר מעיננו חלק מן הגז הקורן.***

קל למדי לראות ולמפות גלקסיות אחרות, בעזרת טלסקופים מודרניים, אך מיפוי הגלקסיה שלנו קשה יותר, משום שאנו נמצאים בתוך המערכת עצמה. אבק וגז בין-כוכבי מסתירים מאתנו אזורים שונים, למשל במרכז הגלקסיה, ויש להשתמש בשיטות מיפוי המבוססות על קרינה אלקטרומגנטית החודרת אזורים אלו. כזו היא למשל קרינת הרדיו שאינה מושפעת כמעט על ידי החומר שבדרך. גם לקרינת האינפרא-אדום ולקרינת ה-X, כושר חדירות גבוה ובשנים האחרונות נעזרים בהן לחקר האזורים המוסתרים מעיננו בגלקסיה שלנו.

חקר הגלקסיה מאפשר למדוד את מרחקה של השמש מן המרכז (כ-25,000 שנות אור), זמן ההקפה של מרכז הגלקסיה (כ-200 מיליון שנים) ועוד. המחקר מראה כי בגלקסיה שלנו כ-200 מיליארד כוכבים אשר רובן קטנים יותר מן השמש. חלקם של הכוכבים נע לו לבדו במרחב וחלקם האחר נמצא בקבוצות הקרויות "צבירי כוכבים". צביר כזה יכול להכיל מכמה עשרות ועד למאות אלפי כוכבים. משערים שכל הכוכבים בצביר "נולדו" מאותו ענן גז והם לכן בעלי גיל זהה. מירב המידע שיש לנו על התפתחותם של כוכבים הוא תוצאת מחקר השוואתי של כוכבים שונים בצבירי כוכבים. הצבירים הגדולים ביותר קרויים "צבירים כדוריים" על שום צורתם. הם מכילים כמיליון כוכבים כל אחד. חלקם הגדול של צבירים אלה נמצא מחוץ לדיסקת הגלקסיה, באזור הקרוי הילת הגלקסיה. נראה כי אלו הם הכוכבים הזקנים ביותר אשר נוצרו בתחילת חיי הגלקסיה. גילם של אחדים מהם כ- 12 מיליארד שנים.

בדומה למרבית הגלקסיות, גם במרכזה של הגלקסיה שלנו חור שחור ענק שמסתו כ-4 מיליון מסות שמש. תכונות חור שחור זה, שכמעט ואינו פולט קרינה, נבחנו ונמדדו בדיוק רב בעזרת תצפיות בקרני X, בתחום הרדיו ובתחום האינפרא-אדום.

3. מבנה היקום

**העיקרון הקוסמולוגי**

 העיקרון הבסיסי בו משתמשים למדידת מרחקים באסטרונומיה קשור בעובדה שאם ידועה בהירותו של גוף כלשהו, כלומר כמות האנרגיה שהוא פולט בכל שניה, ומרחקו מאתנו, ניתן למצוא את מרחקו באם אפשר למדוד את כמות האור המגיעה לכדור הארץ. הדבר נובע מן העובדה כי כמות האור המגיעה אלינו מגוף כלשהו תלויה בריבוע המרחק. כך למשל, אם כמות האור המגיעה מכוכב נתון היא X הרי כמות האור שתגיע מאותו הכוכב, באם ימצא במרחק כפול, היא (1/4)X. מכיוון שכוכבים דומים פולטים אותה כמות אור, ניתן להשוות כוכב סמוך לנו, שמרחקו ידוע, עם כוכב דומה לו בגלקסיה אחרת, שמרחקה אינו ידוע. בהנחה שכמות האור שנפלטת בכל שניה משני הכוכבים היא זהה, ניתן להשוות את כמות האור המגיעה לכדור הארץ ולהסיק מכך על יחס המרחקים ביניהם.

מדידת המרחקים הקטנים בגלקסיה, עד לכ-1000 שנות אור מאתנו, מתבצעת בשיטות טריגונומטריות פשוטות ומדויקות למדי. מכיוון שבסביבה הקרובה לנו מספר רב של כוכבים, מדידת המרחק לגופים אחרים נערכת בעזרת שיטת כמות האור שתיארנו, תוך השוואה בין כוכב קרוב, שמרחקו נמדד בשיטות הטריגונומטריות, לבין הכוכב הרחוק שאת מרחקו מבקשים למדוד. השיטה המדויקת ביותר המוכרת היום למדידת מרחקים גדולים של מיליוני שנות אור מבוססת לא על עצמת האור של כוכב רגיל, אלא על זו של כוכב מתפוצץ הקרוי "סופר-נובה" (ראה פרק 4.ז). מסתבר כי סופר-נובות מסוג מסוים פולטות אור בעצמה קבועה וידועה. סופר-נובה כזו הנצפית בגלקסיה רחוקה מאפשרת למדוד את המרחק אליה גם אם מרחקה של הגלקסיה מאתנו כמה מיליארדי שנות אור. הדרך הפרקטית יותר למדידת מרחקים מבוססת על חוק ידוע, הקרוי "חוק הבל" אשר יוסבר בהמשך.

תוצאות מיפוי היקום הקרוב לנו מצביעות על מספר מסקנות. הראשונה היא שהיקום בו אנו חיים הוא הומוגני. פירושה של אמירה זו הוא שאם נבחר אזור יקום מסוים, גדול מספיק כך שיכיל הרבה צבירי גלקסיות (למשל אזור שקוטרו, מצד לצד, 300 מיליון שנות אור), נמצא כי מבחינת סוגי הגלקסיות, צפיפותן ותנועתן במרחב, אזור זה אינו שונה מאזור יקום אחר, זהה בגדלו, שנבחר באופן אקראי בחלק אחר של היקום. ניתן לאמור כי היקום נראה דומה בכל מקום. המסקנה השניה היא שהיקום בו אנו חיים הוא איזוטרופי. פרושה של אמירה זו היא שאם נבחר כוון אקראי במרחב, ונבדוק את מספר הגלקסיות, סוגיהן, מרחקיהן וכו' בכוון זה, לא נוכל להבדילו בצורה כלשהי מכוון אחר שיבחר באקראי גם הוא. היקום נראה דומה בכל כוון. הדבר אמור גם לגבי תכונות קרינת הרקע הקוסמית, זו שמופתה על ידי הלווינים COBE, WMAP ו-PLANCK.

שתי התצפיות גם יחד, הומוגניות ואיזוטרופיות היקום, ניתנות לניסוח בדרך מקוצרת האומרת כי: "כל המקומות ביקום הם שווי ערך". אין להבחין בעזרת ניסוי כלשהו מקום אחד ממשנהו. ובמיוחד אין כל דרך להבחין בין המקום המסוים שלנו, כלומר חלק היקום בו נמצאת גלקסית שביל החלב**,** לבין מקומות אחרים. עובדה זו קרויה גם בשם "העיקרון הקוסמולוגי". כל מודל של היקום חייב להיות תואם לעובדה נסיונית זו. למשל, ליקום מתפשט לא יכול להיות מרכז שהרי נקודה זו נבדלת בתכונותיה מן הנקודות האחרות של היקום.

**היקום המתפשט**

המחקר המפורסם ביותר בתולדות האסטרונומיה הוא, לדעת רבים, מחקרו של אדווין הבל בשנות ה-20 וה-30 של המאה העשרים. הבל חקר את היחס שבין מרחקי הגלקסיות לבין תנועתן במרחב. לשם כך הוא ערך מספר רב של תצפיות כאשר בכל אחת מהן הוא מדד את מרחקה ומהירותה של גלקסיה מסוימת. המרחקים נמדדו בעזרת שיטת עצמת הקרינה שתוארה קודם לכן. מדידת המהירות נעשתה בעזרת תופעה פיזיקאלית ידועה המכונה "הסחת דופלר".

אורך הגל של אור המגיע אלינו מגוף פולט קרינה תלוי במהירות תנועתו של הגוף. זוהי תופעה פיזיקאלית ידועה הקשורה לאופן התפשטות גלים במרחב, כולל גלי קול, גלי אור וגלים נוספים, הקרויה "הסחת דופלר". היא גורמת לכך שאורכי הגל המגיעים אלינו גדלים באם הגוף מתרחק מאתנו (נהוג לקרא לכך "הסחה לאדום" משום שהצבע האדום מציין אורכי גל גדולים יחסית) ומתקצרים באם הגוף מתקרב אלינו (כאן מדברים על "הסחה לכחול, משום אורך הגל הקצר של הצבע הכחול). ככל שגדלה המהירות כך גדל השינוי באורך הגל. מדידה של אורכי הגל של גוף נע, למשל אור שפולט אטום מסוים באורך גל מסוים והשוואתם לאורכי הגל של אותו היסוד כפי שנמדדו במעבדה, מאפשרת למדוד את מהירות תנועתו של הגוף. מדידת הסחת דופלר של גופים אסטרונומיים פולטי קרינה היא מכשיר מרכזי למדידת תנועתם של גופים שמימיים רבים, כוכבים, גלקסיות, פלנטות וגופים נוספים.

הבל מדד כאמור מרחקים ומהירויות של כמה עשרות גלקסיות. כאשר השווה את המדידות גילה להפתעתו כי מרבית הגלקסיות מתרחקות מאתנו. יתרה מזו, הוא מצא גם כי בין המרחקים והמהירויות של הגלקסיות קיים יחס פשוט הניתן לניסוח כך:

 V = HD

כאשר V מציין את מהירות התרחקות הגלקסיות מאתנו ו- D את מרחקן. הקבוע H שבנוסחה נקרא קבוע הבל וערכו ידוע היום בדיוק של לערך 5 אחוזים. לנו, המכירים כבר שנים רבות את תיאורית המפץ הגדול ואת התפשטות היקום, לא נראית תגלית זו מרעישה במיוחד. הבל, שביצע את מחקריו במחצית הראשונה של המאה ה-20, לא ידע על כך דבר ותגלית דרמטית זו הפכה לאבן היסוד של הקוסמולוגיה המודרנית. תצפיותיו של הבל הן כמובן הוכחה חותכת לקיומו של מפץ גדול בראשית חיי היקום. הן מראות כי בעבר הקדום היו כל הגלקסיות קרובות יותר זו לזו. ככל שנלך לעבר הרחוק יותר כך נמצא יקום של גלקסיות צפוף יותר. ניתן להמשיך בדמיוננו אל העבר הרחוק עוד יותר ולשער כיצד החלה ההתפשטות. הגלקסיות שנוצרו מן החומר המתפשט ביקום הקדום, מאפשרות לנו, על ידי מדידת מהירותן ומרחקן מאיתנו, לשחזר את פרטי אותו האירוע.

ההסתכלות המודרנית והעדכנית יותר בהתפשטות הגלקסיות שונה במידת מה מן החוק הפשוט הקושר מהירות ומרחק בעזרת הסחת דופלר. תאור מדויק כזה משתמש במושג של "הסחה קוסמולוגית לאדום" כלומר שינוי אורכי הגל של פוטונים עקב התפשטות היקום עצמו ולא עקב הסחת דופלר. סמוך מאד אלינו במושגים אסטרונומיים, עד למרחק של כמה מיליוני שנות אור, אין הבדל גדול בין שתי הגישות. רחוק יותר, יש צורף לעבור לתאור המבוסס על ההסחה לאדום הקוסמולוגית.

**גיל היקום**

התגלית של הבל, והמדידות המדויקות של הקבוע H שבנוסחה, מאפשרות למדוד את גיל היקום, כלומר את הזמן שחלף מאז תחילת ההתפשטות. כיצד נעשה הדבר. נניח למשל התפשטות במהירות קבועה. במקרה זה קל לראות מן הנוסחה כי הזמן בו החלה ההתפשטות הוא לפני 1/H שנים. כאשר מציבים את ערכו הידוע של H מקבלים זמן בתחום של 13-15 מיליארד שנים. תוצאה זו ניתנת לשיפור. למשל אם ההתפשטות אינה בקצב קבוע אלא מואטת עקב כוחות הכובד שבין הגלקסיות, נקבל כי גיל היקום קטן יותר מ1/H-. אם ההתפשטות מואצת, כפי שמקובל לחשוב עתה, יהיה הגיל גדול יותר מ-1/H. ומה אם בתחילת הדרך הייתה התפשטות מואטת ולאחר מכן היא הואצה, כפי שמקובל לחשוב היום?

מדידת שעור ההאטה או ההאצה של הגלקסיות קשה ביותר ורק בתחילת המאה ה-21 התפתחו שיטות מתאימות למדידתה. בשנים אלו הסתבר, להפתעתם של המדענים, שהיקום לא רק שאינו מאט את התפשטותו, הוא למעשה מאיץ והמרחקים בין הגלקסיות גדלים מהר יותר משחשבו. המסקנה היא שביקום שלנו, פרט לכוכבים, גז, גלקסיות וחומר אפל, גם "אנרגיה אפלה", צורה של אנרגיה הגורמת להאצת ההתפשטות. רעיון זה הוצע כבר על ידי אינשטיין שנתן לו את השם "הקבוע הקוסמולוגי". אלא שהוא נזנח על ידו בהמשך לאחר שהתגלה חוק הבל. חידת האנרגיה האפלה היא אולי החידה הגדולה ביותר של היקום, ואולי גם של הפיזיקה, שעדיין מחכה לפתרונה. המדידות המדויקות מאד של קבוע הבל ושל האצת היקום מאפשרות לקבוע, בדיוק רב, את גיל היקום, כ-13.8 מיליארד שנה. אלא שמקורה הפיזיקאלי של האנרגיה האפלה, עדיין אינו ידוע.

חוק הבל מספק גם שיטה נוחה ופשוטה לקביעת מרחקיהן של גלקסיות רחוקות. מכיוון שערכו של H ידוע, הרי אם נמדוד את מהירותה של גלקסיה מסוימת נוכל, בעזרת החוק, להסיק מכך על מרחקה מאתנו. מדידת מהירויות של גלקסיות בעזרת הסחת דופלר קלה יחסית. אי לכך ידועים היום מרחקיהן של מיליוני גלקסיות וניתן לערוך מפה מפורטת של היקום הקרוב והרחוק.

ישנן דרכים אחרות למדידת גיל היקום. ראשית, אפשר להעריך או למדוד את גילם של הכוכבים הזקנים ביותר שאנו רואים בגלקסיה. התיאוריה של התפתחות כוכבים מובנת היטב וטווח הגילים האמור הוא בערך 11-13 מיליארד שנים, בהתאמה מלאה עם גיל היקום. ישנן גם דרכים נוספות, כאלו המבוססות על קצב הדעיכה של יסודות רדיו-אקטיביים בגלקסיה. גם כאן מקבלים מספרים דומים. נראה שכל ההערכות מגיעות לאותו תחום הגילים אותו ציינו והיקום בו אנו חיים הוא לערך בן 14 מיליארד שנים.

### **האסטרונומיה כהיסטוריה**

גם מהירות האור, שהיא המהירות הגבוהה ביותר האפשרית בטבע, היא מהירות סופית כך שתצפית אל כוכב קרוב, הנמצא 10 שנות אור מאתנו, תראה לנו את מצבו של הכוכב (הטמפרטורה שלו, מהירות תנועתו וכו') כפי שהיו לפני 10 שנים, כאשר יצא האור לדרכו. תצפית בכוכב הנמצא במרכז הגלקסיה שלנו תראה אותו כפי שהיה בערך לפני 25,000 שנים, משום שהמרחק מאתנו למרכז הגלקסיה הוא כ-25,000 שנות אור. כאשר יצא האור לדרכו מאותו הכוכב "התכונן" האדם הקדמון לרדת מן העצים ועסק בייצור כלים פשוטים. תצפית בגלקסיה הנמצאת במרחק של מיליארד שנות אור תראה את הגלקסיה כפי שהייתה לפני מיליארד שנים. השאלה "מה מתרחש שם היום" אינה מעניינת למעשה את האסטרונומים. הדבר אינו נובע מכך שהאסטרונומים נחנו ביצר סקרנות מוגבל אלא משום שאין כל דרך לדעת זאת. כדי לענות על כך יש לחכות בסבלנות מיליארד שנים נוספות כך שנוכל לגלות את האור שנפלט מן הגלקסיה ההיא היום (למעשה אפילו יותר, מכיוון שבינתיים הולכת הגלקסיה ומתרחקת מאתנו ומרחקה בעוד מיליארד שנים יהיה גדול ממיליארד שנות אור). האסטרונומים הם בהחלט "ההיסטוריונים של היקום".

**האופק**

כזכור ה"אופק" הוא המרחק המכסימלי אליו ניתן לצפות. מהו אם כן המרחק הגדול ביותר אליו ניתן לראות היום, כלומר היכן הוא האופק? הדבר תלוי כמובן בגיל היקום, כלומר בזמן שעבר מאז המפץ הגדול. היום, כ-14 מיליארד שנה לאחר המפץ הגדול, אנו יכולים לקלוט במכשירי המדידה קרינה שנעה במרחב זמן זה, אך כמובן לא יותר מכך, מפני שלפני כן לא היו כוכבים וגלקסיות או כל חומר אחר. כלומר, ביקום בו אנו חיים אין אף קרן אור אחת הנודדת במרחב יותר מ-14 מיליארד שנים משום שלפני כן לא היה יקום, מרחב או חומר וממילא לא היה גם אור. המרחק הגדול ביותר אליו ניתן לצפות היום, כלומר מרחקו של האופק, הוא כ-14 מיליארד שנות אור. בתקופת הרה-קומבינציה, כאשר היה גילו של היקום כ-400,000 שנה, היה המרחק הגדול ביותר אליו ניתן היה לצפות רק 400,000 שנות אור. כאשר היה היקום בן שניה אחת היה מרחקו של האופק רק 300,000 ק"מ, שהם שניית אור. האופק הולך ומתפשט במהירות האור ובכל זמן שהוא ניתן לראות עד לאופק, אך לא מעבר לכך. מעבר לאופק יש בודאי חומר נוסף רב. כמות חומר זה, וגדלו של היקום, לא ידועים עדיין. מניחים כי האזור הנמצא בתוך האופק שלנו מהווה רק חלק קטנטן מן היקום כולו ויתכן שאנו חיים ביקום אינסופי שאין לו גבולות כלל.

 התשובה לשאלה מהו גדלו של היקום, והאם הוא סופי או אינסופי, תלויה בצפיפות החומר והאנרגיה ביקום הצעיר, מיד לאחר המפץ הגדול. כל חומר היקום שנברא במפץ הגדול הולך ומתפשט עם הזמן. כל נקודה בתוך האופק שלנו לקחה חלק באירוע ראשוני זה והתרחקות הגלקסיות זו מזו הוא תוצאת ההתפוצצות הבראשיתית. בשלבים הראשונים של ההתפשטות אין כמעט השפעה לאנרגיה האפלה והקצב הולך ומואט עם הזמן, עקב כוחות הכבד ההדדיים. אם נשכח לרגע את האנרגיה האפלה נוכל לשאול האם ההתפשטות תמשך לנצח או אולי תיעצר בעתיד. במקרה הראשון היקום אינסופי, ואין לו גבולות כלל. במקרה השני תיעצר ההתפשטות בעתיד וכיוון שכוחות הכבידה פועלים תמיד, תחל לאחריה התכווצות. לאחר מכן ילך היקום ויקטן, ילך ויתכווץ בתהליך שסיומו היחיד האפשרי הוא חזרה לתנאים הדומים לאלה ששררו במפץ הגדול. יתכן שהכווץ יגרום למפץ גדול נוסף, ולתהליך נוסף של התפשטות, כווץ וחוזר חלילה.

התגליות החדשות מלמדות שלאחר כמה מיליארדי שנים גוברת האנרגיה האפלה על כוחות הכבידה וההתפשטות הולכת ומואצת עם הזמן. התפשטות זו יתכן ותמשך לנצח, אם האנרגיה האפלה לא תקטן, או תאט ואולי אף תעצר אם האנרגיה האפלה תקטן ואולי אף תעלם לחלוטין. האם תמשך ההתפשטות היקום לנצח או אולי תיעצר בעתיד? התשובה לכך עדיין לא ידועה.

## 4. כוכבים

### **הולדת כוכבים**

הכוכבים הראשונים ביקום נוצרו כשגילו היה כמה מאות מיליוני שנים. בתקופה ההיא היו הגלקסיות, או מה שעתיד להיות בהמשך גלקסיות, עננים גדולים של גז בהרכבו הבראשיתי, כפי שנוצר במפץ הגדול, כ-91 אחוזי מימן, כ-9 אחוזי הליום, וכמות זעירה של יסודות אחרים. יש לשער שאותו ענן לא היה בעל צפיפות אחידה והיו בו אזורים צפופים יותר או פחות שגם אותם ניתן לכנות בשם "עננים". ענני הגז שבגלקסיה החלו לקרוס, תחת השפעת כובדם העצמי, בתהליך הדומה לקריסה שיצרה את הגלקסיה עצמה. גם כאן, האזורים הצפופים יותר קרסו מהר יותר, משום כוחות הכובד הגדולים. קריסה מואצת כזו הגדילה את צפיפות החומר וזו מצידה הגבירה את כוחות הכובד ההדדיים, וחוזר חלילה. עננים קורסים גדולים הפכו בסופו של התהליך לצביר כוכבים גדול ואזורים קטנים יותר למספר קטן של כוכבים, ויתכן אפילו לכוכב בודד או שני כוכבים. יצירת הכוכבים הראשונים החלה עוד לפני שקבלה הגלקסיה שלנו את צורתה הסופית, השטוחה. זו הסיבה לכך שאנו רואים היום צבירי כוכבים גדולים, המכילים עד מיליון כוכבים כל אחד, שנוצרו בתקופה קדומה זו, כשהם נמצאים מחוץ לדיסקת הגלקסיה והרחק ממנה.

ספור הולדתו של כוכב מענן גז הוא סיפור התחרות שבין כוחות הכובד, הגורמים לכווצו של הענן, לבין הלחץ הפנימי המתנגד לכווץ זה. ענן גז מתכווץ הולך ומתחמם עם הזמן. כתוצאה מכך, הלחץ הפנימי, שהוא מכפלת הצפיפות בטמפרטורה, גדל. בתחילת התהליך הלחץ הפנימי קטן ביותר יחסית לכוחות הכובד החיצוניים. גם החימום הראשוני של הגז, עקב הכווץ, אינו משנה זאת בהרבה משום שחלקיקי הגז המתחממים פולטים קרינה אינפרא-אדומה המשתחררת לחלל ומקררת את הגז. הקירור היעיל של הגז נפסק רק כאשר הצפיפות גדולה מספיק על מנת למנוע את פליטת הקרינה האינפרא-אדומה מן הענן. בשלב זה מואץ החימום, גדלה הטמפרטורה הפנימית ועמה הלחץ, והתהליך מסתיים במצב של שווי משקל, בו משתווים כוח הלחץ הפנימי וכוח הכובד החיצוני.

אחריתו של ענן גז קורס תלויה במסתו. ככל שגדולה המסה כך גדולים יותר כוחות הכובד וכך גדולה יותר הטמפרטורה במרכז הענן. באם מסת הענן גדולה מספיק, תגיע הטמפרטורה לערך כה גבוה שתתחלנה במרכז ריאקציות של היתוך גרעיני. תגובות אלה, שיפורטו בהמשך, מתחילות באפן ספונטני, עקב התנגשות גרעיני האטומים זה בזה. תוצאת ההיתוך הגרעיני היא חימום רב של מרכז הכוכב, עליית הלחץ הפנימי ועצירת ההתכווצות. הטמפרטורה והלחץ שנוצרו במרכז הענן מאפשרים המשך התגובות הגרעיניות, יצור נוסף של אנרגיה, וקיומו של מצב שווי משקל בין הכוחות השונים כל זמן שקיים במרכז "חומר דלק" גרעיני לקיום הריאקציות. תחילתם של תהליכי ההיתוך הגרעיני הוא הרגע בו הופך ענן הגז לכוכב.

תהליך יצירת כוכבים מענני גז אורך מאות אלפי שנים. בתקופה זו נפלטת לחלל כמות אדירה של קרינה, בעיקר קרינת אינפרא-אדום בגלים ארוכים. תצפיות מודרניות, מן הקרקע והחלל, מראות בברור אזורים שונים בגלקסיה שלנו, ובגלקסיות רבות אחרות, שם נולדים גם היום כוכבים חדשים. כאשר ענני הגז הקורסים קטנים מערך מכ-8 אחוזים ממסת השמש, הטמפרטורה במרכזם אינה מספקת לקיום ריאקציות היתוך גרעיני. גוף כזה אינו נחשב "כוכב" במובן המקובל של המילה והוא קרוי "ננס חום".

### **חיי כוכב**

כוכבים הם ענני גז כדוריים גדולים המייצרים אנרגיה על ידי תגובות של היתוך גרעיני בליבותיהם. המושג "ליבת הכוכב" פירושו האזור הפנימי בו מתרחשת הבעירה הגרעינית. מחוץ לאזור זה קיים חמר נוסף אלא שהתנאים שם אינם מתאימים לבעירה גרעינית. קצב התגובות הגרעיניות, אופיין ומשך חיי הכוכב, תלויים במסתו. מסת השמש, שהיא כוכב אופייני ממוצע בגדלו, היא כאמור x1030 2 ק"ג. האסטרונומים מכנים מספר זה "מסת שמש אחת". תהליך ייצור האנרגיה בשמש הוא בעיקרו בעירת מימן להליום, הדומה לתהליך יצירת ההליום ביקום הקדום. התהליך מתרחש בדרכים שונות שאחת מהן ידועה כ"שרשרת הפרוטונים" (p-p chain). בשלב הראשון מתחברים שני פרוטונים, שהם גרעיני מימן המסומנים כזכור 1H1 ליצירת דאוטריום, H21 , שהוא מימן כבד המכיל בגרעינו פרוטון אחד וניטרון אחד

→ 1H2  + e+ + ν 1H1 + 1H1

בתהליך משתחררים גם אנטי-אלקטרון (e+ ) וניטרינו (ν) שהוא חלקיק בעל מסה קטנטנה יחסית לאלקטרון. בשלב השני מתחבר הדאוטריום עם פרוטון ליצור He32 , שהוא איזוטופ של הליום המכיל שני פרוטונים וניטרון אחד

 1H2  + 1H1 → 2He3  + γ

ה- γ במשוואה מציין פוטון של קרינת גמא הנפלט בתהליך. בשלב האחרון מתחברים שני גרעינים של He32 ויוצרים גרעין של He42 , שהוא האיזוטופ השכיח של הליום

 1H1 + 1H1  + 42He → He3 + 2He32

כדי שיתרחש השלב השלישי חייבים שני השלבים הראשונים של התהליך להתרחש פעמיים (על מנת ליצור שני גרעיני 2He3 ). אם נסכם את שהתרחש בתהליך כולו נמצא כי בסופו של דבר הופכים ארבעה גרעינים של מימן לגרעין של הליום, כך:

+ γ  2H4e →  1H1 + 1H1  + 1H1 + 1H1

או במילים

מימן+ מימן + מימן + מימן ⇐ הליום + אנרגיה

 בתהליך זה, כמו גם בתהליכי התוך גרעיני אחרים, הופכת מסה לאנרגיה על פי הנוסחה E=mc2. יעילות התהליך, כלומר אחוז המסה ההופכת לאנרגיה, היא 0.7 אחוז. המספר נראה קטן אך זוהי למעשה יעילות אדירה הגדולה מיליוני מונים מיעילותם של חומרי דלק קונבנציונליים. קצב שחרור האנרגיה הוא כה גדול שהוא מספיק לקיים את הטמפרטורה הגבוהה, יותר מעשרה מיליוני מעלות, הדרושה להמשך הבעירה בליבת הכוכב, כל זמן שקיימת כמות מספיקה של "חומרי דלק", כלומר מימן. האנרגיה הנוצרת בהיתוך הגרעיני במרכז השמש מתפשטת כלפי חוץ הופכת לקרינה הנפלטת לחלל. מדידת כמות האנרגיה שפולטת השמש מאפשרת לנו לחשב את כמות המימן ההופכת להליום בכל שניה ולהשוותה לכמות המימן שבשמש. החשבון מראה כי הכמות מספיקה לייצור אנרגיה בקצב הנוכחי למשך תקופה של כ-10 מיליארדי שנים. חשבון פשוט זה מאשר את הידוע לנו מעדויות גיאולוגיות כי השמש וכוכבים אחרים הם מאגרי אנרגיה אדירים היכולים לקרון, בקצב קבוע, תקופה ארוכה ביותר. גילה של השמש שלנו כ-4.6 מיליארדי שנים והיא תמשיך ותבעיר מימן, בליבה שלה, כ-5 מיליארדי שנים נוספות.

### **מסה, בהירות, טמפרטורה וזמן חיים**

בתהליך הקריסה של ענני הגז נוצרים כוכבים בעלי גדלים שונים. הדבר תלוי במסה ההתחלתית של הענן הקורס ובמידת התפרקותו לשברים קטנים תוך כדי הקריסה. ככל שגדולה יותר המסה הסופית, כך גדול יותר הלחץ במרכז וכך גבוהה יותר הטמפרטורה שם. חישובים ותצפיות מראים כי המסה המרבית היכולה להיווצר בתהליך היא לערך פי מאה ממסת השמש. לגבי המסה המינימלית, זו יכולה להיות קטנה מאד אלא שכאן יש לקחת בחשבון את הטמפרטורה בליבת הענן. מסה קטנה פרושה טמפרטורה נמוכה ומתחת למסה מסוימת, כפי שראינו, הטמפרטורה אינה מתאימה לקיומן של תגובות גרעיניות. מסה מינימלית זו היא לערך כשמונה אחוזים ממסת השמש. תהליך הקריסה הגרביטציונית גורם גם להיווצרותם של גופים קטנים הלא הם הננסים החומים. טווח המסות של כוכבים הוא לכן בין 0.08 מסות שמש לבין לערך מאה מסות שמש.

מסת הכוכב והטמפרטורה במרכזו קובעים את קצב יצור האנרגיה ולכן את בהירות הכוכב (המושג "בהירות" כאן פירושו כמות האנרגיה שפולט הכוכב לחלל בכל שניה, כלומר הספק הקרינה הנפלטת לחלל). ככל שגדולה המסה כך גבוהה יותר הטמפרטורה וכך גדל קצב התגובות הגרעיניות ובהירות הכוכב. קיים לכן יחס פשוט בין מסת הכוכב לבהירותו. אם נסמן את הבהירות באות L ואת מסת הכוכב באות M נמצא כי לכוכבים הדומים במסתם לשמש מתקיים

 L = a M4  ,

כאשר a הוא קבוע. כך למשל כוכב שמסתו כפולה ממסת השמש פולט בכל שניה כמות אנרגיה הגבוהה לערך פי 16 (24 ) מן האנרגיה שפולטת השמש.

תצפיות בכוכבים מאשרות כי קיימים אמנם כוכבים בהירים יותר ובהירים פחות ובהירות הכוכב תלויה במסתו. הכוכבים הבהירים יותר הם גם אלו בעלי טמפרטורת פני שטח גבוהה יותר. טמפרטורת פני השטח של השמש היא כ-5,800 מעלות קלווין. כוכבים מסיביים יותר חמים יותר וכוכבים בעלי מסה נמוכה ממסת השמש הם בעלי טמפרטורת פני שטח נמוכה יותר.

ככל שכוכב מסיבי יותר כך הוא מכלה את מלאי המימן שלו מהר יותר וכך הוא בעל טמפרטורת פני שטח גבוהה יותר. כך ניתן למצוא את מסתם של הכוכבים ממדידת טמפרטורת פני השטח שלהם. האסטרונומים מחלקים את הכוכבים לתת קבוצות, על פי הטמפרטורה שלהם (ולכן גם על פי המסה שלהם). השמש היא כוכב מטיפוס G שאינו חם במיוחד ואינו קר במיוחד. תת הקבוצה O מכילה את הכוכבים המסיביים, החמים והבהירים ביותר. מסתם של כוכבים אלו גדולה פי עשרה ויותר ממסת השמש, טמפרטורת פני השטח שלהם כ-30,000 מעלות והם קורנים בקצב הגדול פי עשרת אלפים ויותר מקצב פליטת האנרגיה של השמש. הכוכבים הקרים ביותר הם מטיפוס M. אלו הם כוכבים בעלי מסה קטנה, פחות ממחצית מסת השמש, וטמפרטורת פני שטח של כ-3000 מעלות בלבד. הסדרה כולה, מן החם ביותר אל הקר ביותר (משמאל לימין), היא

 O , B , A , F , G , K , M

(קל לזכור זאת משום שאילו הם ראשי התיבות של Oh Be a Fine Girl Kiss Me). נהוג גם לחלק כל קבוצה לעשר תת קבוצות על פי הספרות 0 (תת הקבוצה החמה ביותר) עד 9 (תת הקבוצה הקרה ביותר). על פי חלוקה זו, השמש היא כוכב מטיפוס G2.

זמן החיים של כוכב, שהוא הזמן הדרוש לו לכלות את מלאי הדלק הגרעיני, המימן, שבליבתו, תלוי במסתו. מלאי המימן של השמש מספיק לקיים את קצב יצור האנרגיה הנוכחי שלה במשך כ-10 מיליארדי שנים. לכמה זמן מספיק מלאי האנרגיה של כוכבים בעלי מסה שונה? מסתבר כי ככל שהכוכב מסיבי יותר הוא שורף מהר יותר את מלאי המימן שלו ומסיים את חייו מהר יותר. הסיבה היא התלות החזקה של קצב הבעירה הגרעינית בטמפרטורת הליבה. ככל שהכוכב מסיבי יותר, הטמפרטורה בליבה שלו גבוהה יותר והזמן הלוקח לו לכלות את מלאי הדלק הגרעיני, קצר יותר.

אפשר להשתמש בעובדות שציינו על מנת למצוא את אורך החיים של כוכבים שונים. כזכור בהירות הכוכב, אותה ציינו באות L, מציינת את קצב קרינת האנרגיה שלו . כמות הדלק העומדת לרשות הכוכב היא מסתו M, או ליתר דיוק מסת המימן בליבתו (שהיא חלק יחסי ידוע, כ-5 אחוזים מן המסה הכללית). ניתן לכן למצוא את הזמן הדרוש לבעירת כל המימן בליבת הכוכב על ידי חלוקת המסה M בבהירות, L. כזכור L∝M4 ולכן מוצאים כי זמן החיים, Tlife, מקיים

 Tlife  ∝ M/L∝M-3  .

כלומר, אורך חיי כוכב שמסתו כפולה ממסת השמש הוא שמינית (2-3) בלבד מאורך חיי השמש, או כ-1.2 מיליארדי שנים. מכאן, שכוכבים מסיביים מאד חייהם קצרים מאד. כך למשל מכלה כוכב בעל עשר מסות שמש את מלאי המימן שלו תוך כ-10 מיליון שנים. לכוכבים בעלי מסה הקטנה ממסת השמש זמן חיים ארוך יותר מזמן החיים של השמש. כוכב שמסתו 0.9 מסות שמש אורך חייו כ-13.7 מיליארד שנים. זמן זה גדול יותר מאורך חיי הגלקסיה ומשתווה בקרוב לגיל היקום. כוכב כזה שנולד מיד לאחר היווצרות הגלקסיה לא סיים עדיין את חייו והוא ממשיך להבעיר את המימן שבליבתו עד עצם היום הזה.

כל המספרים שציינו, ובייחוד אלה הקשורים ליחס בין L ל-M של הכוכב, מבוססים על הערכות שהן אמנם מדויקות למדי אך אינן תחליף לחישובים של ממש. הטבלה הבאה מסכמת את התכונות העיקריות של כוכבים בעלי מסות שונות כאשר הפעם גיל הכוכבים מבוסס על חישובים מדויקים. זו הסיבה שהמספרים שבטבלה שונים במקצת מן המספרים בהם השתמשנו עד עתה.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| מסה (יחסית לשמש) | 0.7 | 1.0 | 1.5 | 3.0 |
| טמפרטורת פני השטח (K) | 4,100 | 5,800 | 7,000 | 9,700 |
| סוג ספקטרלי | K5 | G2 | F2 | A1 |
| בהירות (יחסית לשמש) | 0.37 | 1.0 | 5.1 | 81 |
| אורך חיים (מיליארדי שנים) | 30 | 10 | 2.0 | 0.2 |

## כוכבים כפולים

כמחציתם של הכוכבים בסביבת השמש הם כוכבים כפולים. ככל שמשתכללים אמצעי הגילוי אנו מוצאים יותר ויותר מערכות כאלו ויש הטוענים כי מדובר ב-70 אחוזים מכלל הכוכבים ואולי אף יותר. מערכות של כוכבים כפולים נוצרות מענני גז מסתובבים המתכווצים והופכים לכוכבים. הסיבוב מונע ממסת הענן להתרכז באזור קטן אחד והתוצאה , במקרים רבים, היא שני כוכבים הסובבים סביב מרכז המסה המשותף שלהם.

****

***הסחת דופלר של קווים ספקטרלים כתוצאה מתנועתו של כוכב***

ניתן להבחין בכוכבים כפולים, כלומר בצמד כוכבים, במספר דרכים. ישנם מקרים בהם המרחק בין הכוכבים כה גדול שאפשר לראות את שני בני הזוג ולעקוב אחר תנועתם ההדדית במרחב. מערכות כאלו קרויות "צמד נראה" של כוכבים. במקרים אחרים, המרחק בין הכוכבים שבצמד קטן ולא ניתן, בתצפיות מכדור הארץ, להבחין בשני בני הזוג. במקרה כזה נראית המערכת כנקודת אור בודדת, ויש להשתמש בשיטות אחרות על מנת להסיק על קיום הצמד. השיטות העיקריות למציאת צמדים כאלו הן בעזרת ליקויי כוכבים ובעזרת מדידת תנועת בני הזוג בשיטות ספקטרוסקופיות.

במספר מערכות של כוכבים כפולים מבחינים, לעתים, בתופעה מחזורית של ירידה בעצמת האור של הצמד. זוג כוכבים כזה נקרא "צמד לוקה" והירידה בעצמת האור היא תוצאת ההסתרה ההדדית של בני הזוג, פעמיים בכל הקפה. מקרים כאלו יתכנו כאשר נטיית מסלול הצמד יחסית לקו הראיה שלנו, גדולה. כלומר, כאשר מישור המסלול ניצב בקרוב למישור השמיים. בדרך כלל מבחינים בלקוי ראשוני ובלקוי משני. הליקוי הראשוני הוא הליקוי העמוק יותר, כלומר הליקוי בו אבוד האור מרבי. בלקוי כזה הכוכב החוור יותר מסתיר מעיננו את הכוכב הבהיר או את חלקו. הלקוי המשני, בו הירידה בעצמת האור קטנה יותר, מתרחש כאשר מסתיר הכוכב הבהיר את בן הזוג החוור. צמדים לוקים של כוכבים נדירים למדי, משום העובדה שניתן לגלותם רק בנטייה מסוימת של מסלול הסיבוב ההדדי.

דרך נוספת לגלוי צמדי כוכבים קרובים מבוססת על מדידת מהירות תנועת הכוכבים במרחב בעזרת השינויים בספקטרום שלו. ספקטרום של כוכב מספק מידע רב ערך על טמפרטורת פני השטח שלו ועל היסודות מהם הוא מורכב. בספקטרום של מרבית הכוכבים מבחינים ב"קוים ספקטרליים" שהם אורכי גל מסוימים בהם יש עודף או חסר של אנרגיה. קוים אלו הם תוצאה של בליעת הקרינה על ידי האטומים באטמוספירת הכוכב. קרינה חזקה הנפלטת ממרכז הכוכב עוברת דרך הגזים שבאטמוספירה ונבלעת בדרכה באטומים שונים. באורכי גל מסוימים, המתאימים למעברים בין רמות האנרגיה של האטומים, הבליעה חזקה במיוחד. בתמונת ספקטרום הכוכב יופיעו באורכי גל אלו קוים כהים. הרכב אטמוספירת הכוכב, והטמפרטורה שלה, הם הקובעים את אופים של קווי הבליעה. כך למשל בכוכבים חמים מאד הקווים החזקים ביותר הם קווי הליום ובכוכבים הדומים לשמש רואים קוים חזקים של סידן וברזל.

כזכור, אורך הגל הנצפה של קו ספקטרלי תלוי במהירות תנועתו של הכוכב, עקב הסחת דופלר אותה כבר הזכרנו. ככל שגדלה המהירות כך גדל השינוי באורך הגל. מדידה מדויקת של אורכי הגל של הקווים בספקטרום של כוכב נע, והשוואתם לאורכי הגל של אותו היסוד האטומי כפי שנמדדו במעבדה, מאפשרת למדוד את מהירות תנועתו של הכוכב.

 מהירות התנועה של כוכבים בצמד תלויה במסת הכוכבים ובמרחק שביניהם. מהירויות אופייניות הן כמה עשרות ק"מ בשניה. תצפיות בכוכבים שונים הנראים כנקודת אור אחת בשמיים מראות, במקרים רבים, קוים ספקטרליים המשנים את ארך הגל שלהם באפן מחזורי. הדבר מלמד על תנועה במסלול סגור כלומר על מציאותם של שני כוכבים במערכת. יש ורואים קוים ספקטרליים משני בני הזוג. במקרים אחרים אחד מבני הזוג כה בהיר יחסית לבן זוגו שאנו רואים רק את הספקטרום שלו. גם במקרה זה ניתן להסיק על קיומו של בן זוג מן השינויים המחזוריים של אורכי הגל של הקווים הספקטרליים של הכוכב הנראה לעין.

חלק גדול מצמדי הכוכבים המוכרים לנו התגלו על ידי חקירת הספקטרום שלהם, במשך תקופה ארוכה, וגילוי השינוי המחזורי באורכי הגל של קוים ספקטרליים. מדידת מהירות התנועה של הכוכבים בצמד כזה, בעזרת הסחת דופלר של הקווים, ומדידת זמן ההקפה, מלמדת על המרחק שבין בני הזוג ומאפשרת למדד את מסת הכוכבים בעזרת חוקי ניוטון. זוהי השיטה המדויקת ביותר למדידת מסה של כוכבים והיא, כפי שעוד נראה, גם שיטה חשובה לגילוי פלנטות ליד כוכבים אחרים .

### **מותם של כוכבים**

תקופת בעירת המימן בליבת הכוכב היא התקופה הארוכה בחייו. תהליך ה"לידה" עליו דיברנו קצר הרבה יותר, כמיליון שנים או פחות, ותהליך סיום החיים, אותו נפרט להלן, גם הוא מהיר וקצר יחסית.

סיום התקופה היציבה של חיי הכוכב, בה הוא הופך בליבתו מימן להליום, מגיע כאשר אוזל מלאי המימן בליבה. בשלב זה נפסקת הבעירה הגרעינית, יורדת הטמפרטורה ועמה יורד גם הלחץ הפנימי המייצב את הכוכב. כתוצאה מכך גוברים כוחות הכובד ומתחילה קריסה מחודשת של מרכז הכוכב. תוצאת הקריסה כפולה. ראשית היא מביאה לעליית הטמפרטורה הפנימית כך שגם מימן שנמצא קודם לכן מחוץ לליבה (ולכן לא בער) יכול לבעור. שנית, הטמפרטורה בליבת ההליום עולה גם היא ונעשית כה גבוהה על שמתחילות שם תגובות של היתוך הליום ליסודות כבדים יותר. התגובה החשובה ביותר היא זו בה הופכים שלשה גרעיני הליום לגרעין של פחמן:

 C126 → He42 + He42 + He42 .

בתגובה זו משתחררת כמות עצומה של אנרגיה המחממת את הליבה ומאפשרת לכוכב להמשיך ולייצר פחמן כל זמן שקיים שם מספיק הליום.

השלבים הבאים דומים למדי לשלב הקודם. בעירת ההליום לפחמן מתקדמת במהירות רבה ומלאי ההליום מתכלה תוך תקופה קצרה. עם תום הבעירה נותר הכוכב עם ליבת פחמן שאינה בוערת שמעליה קליפת הליום. קריסה נוספת של הליבה גורמת לחימום נוסף והתחלת בעירת ההליום מחוץ לליבת הפחמן כשמעליה בוערת עדיין קליפת מימן. כווץ הליבה יכול להביא לריאקציות היתוך בהן מעורבים גרעינים של אטומים כבדים אף יותר. כל למשל, שרידי ההליום בליבה יכולים להתחבר עם הפחמן וליצר גרעין של חמצן, 8O16 כך:

 8O16 → C126 + He42 .

החמצן בוער עם חמצן אחר ויוצר גופרית, 16S32 , שני אטומי פחמן בוערים ויוצרים מגנזיום, וכו'. בכל שלב מעורבים יסודות כבדים יותר ודרושה, לכן, טמפרטורה גבוהה יותר. באפן עקרוני ניתן להגיע כך עד ליצירת ברזל אלא שברוב המקרים נעצר התהליך קודם לכן.

ככל שגרעין של אטום כבד יותר דרושה לתגובת ההיתוך שלו טמפרטורה גבוהה יותר. טמפרטורת הליבה של כוכבים נקבעת בעיקר על ידי לחץ הכובד התלוי במסת הכוכב. ככל שהמסה גדולה יותר גדול יותר הכובד וגדולה יותר הטמפרטורה במרכז. בכוכבים בעלי מסת שמש אחת יכול לחץ הכובד לגרום לטמפרטורות מתאימות ליצירת פחמן וחמצן, אך לא יסודות כבדים יותר. כוכבים כבדים יותר ייצרו בליבתם גם צורן, גופרית ומגנזיום. הכוכבים המסיביים ביותר יכולים לייצר אפילו ברזל. כוכבים קלים מן השמש יעצרו בשלבים מוקדמים יותר ולא יוכלו לייצר אפילו פחמן.

### **ענקים אדומים וננסים לבנים**

תהליכי הבעירה המהירים בתום בעירת המימן בליבה מביאים גם לשינויים משמעותיים בקליפות החיצוניות של הכוכב. בשלב ייצור ההליום והפחמן מתנפח הכוכב והופך ל"ענק אדום", שהוא כוכב גדול יותר וקר יותר מן השמש (מכאן השם "אדום" המציין טמפרטורה נמוכה יותר מהטמפרטורה של 5,800 מעלות הגורמת לצבעה הצהבהב של השמש). הענק האדום עובר גם הוא שלבים שונים ובשלב מסוים הוא כה גדול עד שרדיוסו עולה על המרחק בין השמש לכדור הארץ. בשלבים האחרונים של חייה תבלע השמש, שתהפוך לענק אדום, את כל הפלנטות הפנימיות, כוכב חמה, נגה וכדור הארץ.

גם בליבת הכוכב מתרחשים כל אותו הזמן תהליכים דרמטיים והיא הופכת צפופה ודחוסה יותר ויותר. לקראת סיום התהליך מורכב כוכב הדומה לשמש מליבה קטנטנה, שקוטרה כ-10,000 ק"מ, קרוב לקוטרה של הארץ, ומסביב לה מעטפת עצומה ודלילה של ענק אדום. כמות החמר בליבה הקטנה עצומה, יותר ממחצית חומר הכוכב, וצפיפות החמר אדירה, לערך פי מליון מצפיפות המים. סנטימטר מעוקב אחד מחומר הליבה משקלו טונה אחת.



***עננה פלנטרית, שארית האטמוספרה של ענק אדום ובמרכזה ננס לבן.***

לקראת סיום הבעירה בליבה מתרחשים התהליכים במהירות רבה. מעטפת הכוכב נפרדת ונזרקת אל החלל. לזמן קצר היא מוארת עדיין על ידי הקרינה שנפלטה מן הליבה החמה, וקורנת באור יקרות. מעטפת מתפשטת זו נקראת "עננה פלנטרית". הליבה החמה עצמה, המורכבת מפחמן וחמצן כשמעליהם קליפת הליום דקיקה, מופיעה לעין כגוף קטן וחם, בעל צבע לבנבן. גוף זה נקרא "ננס לבן" על שם גודלו וצבעו. הננס הלבן מתקרר בקצב איטי ביותר והופך, לאחר כמה מיליארדי שנים לגוף קטן, צפוף, חוור וקר. זמן חיי העננה הפלנטרית קצרצר במושגים אסטרונומיים, כעשרת אלפים שנה. לאחר מכן מתמזג החומר שנזרק עם הגז הבין-כוכבי ונעלם מן העין.

### **סופרנובות וכוכבי ניטרונים**

כוכבים מסיביים הרבה יותר מן השמש מבעירים את המימן בליבתם בקצב אדיר ושלבי ההתפתחות האחרונים שלהם שונים בצורה משמעותית מאלו שתוארו כאן. עקב המסה הגדולה, וכוחות הכובד העצומים, הטמפרטורה בליבה גבוהה בהרבה מן הטמפרטורה שבליבת השמש. לאחר גמר בעירת ההליום בליבה מתחילים לבעור שם הפחמן והחמצן ונוצרים, בין השאר, צורן, גופרית, מגנזיום ויסודות נוספים, עד לברזל. גם כאן, לאחר גמר בעירת המימן מתנפח הכוכב והופך לענק אדום וגם כאן שלבים אחרונים אלו מהירים מאד.

היתוך גרעיני של יסודות קלים ליסודות כבדים יותר, תוך הפיכת חומר לאנרגיה, הוא תהליך המקיים את עצמו כל אימת שלתוצרי הריאקציה מסה **קטנה יותר** ממסת חומרי הדלק. כך למשל, מסת שלשה גרעיני הליום גדולה במקצת ממסת גרעין של פחמן והפרש המסה הופך בתהליך ההיתוך לאנרגיה. אנרגיה זו מחממת את מרכז הכוכב ומבטיחה תנאים מתאימים להמשך תהליך הבעירה. לגבי ברזל ויסודות כבדים מברזל, אין הדבר כך. חיבור שני יסודות כאלו יוצרים יסוד בעל מסה **גדולה יותר** מסכום המסות ההתחלתיות. ריאקציה כזו לא משחררת אנרגיה אלא דורשת, על מנת שתוכל להתקיים, השקעת אנרגיה מן החוץ. מסיבה זו לא נוצרים באפן ספונטני, במרכזי כוכבים, יסודות כבדים מברזל. בסוף חייו של כוכב בעל מסה גדולה, הוא עשוי מעין "קליפות" של חמר גרעיני בוער ובמרכזו הולך ומצטבר ברזל שאינו בוער.

****

***מבנה פנימי של כוכב בעל מסה גדולה מ-6 מסות שמש***

כאשר כלה מלאי הדלק הגרעיני במרכזו של כוכב שמסתו ההתחלתית כ-8 או יותר מסות שמש, והלחץ יורד, קורסת ליבת הכוכב עקב כוחות הכובד האדירים. הקריסה מתבצעת תוך שבריר של שניה ותוצאותיה דרמטיות. הכוכב מתפוצץ וזורק לחלל את רב החמר שבו והליבה הופכת לגוף זעיר וצפוף לאין שעור. ההתפוצצות, הקרויה "סופר נובה" פולטת כמות כה רבה של אנרגיה שלזמן קצר, מספר שבועות, היא מאירה כגלקסיה שלימה, מיליארדי פעמים יותר מן השמש. במרכז, היכן שהיה הכוכב, נותר כוכב ניטרונים.

כוכבי ניטרונים הם הגופים הצפופים ביותר המוכרים בטבע. מסת כוכב כזה היא בדרך כלל בין 1-2 מסות שמש ורדיוסו כ-10 ק"מ בלבד. צפיפות החמר גדולה פי 1014 ויותר מצפיפות המים. ראש סיכה העשוי מחמר כזה ישקול כ-100,000 טון (!). הצפיפות היא תוצאת הלחץ העצום ששרר בליבת הכוכב בעת שהפך לסופר נובה. בלחץ זה, מתפרקים אטומי וגרעיני החמר למרכיביהם היסודיים. הפרוטונים שבגרעין מתחברים עם האלקטרונים ליצור ניטרונים

 p + e- → n + ν

כאשר בכל תגובה כזו משתחרר החלקיק הקל נייטרינו, ν. הניטרונים חסרי המטען החשמלי מצטופפים זה ליד זה ויוצרים מעין גרעין גדול של אטום העשוי ניטרונים בלבד. כוכב הניטרונים שנוצר מסתובב בדרך כלל במהירות רבה ומשדר אותות לחלל בצורה של אלומות צרות של קרינה. אותות אלו יכולים להקלט (תלוי בכיוונם) כפולסים של קרינה על פני כדור הארץ ומכאן שמם של כוכבי ניטרונים מסתובבים, "פולסרים". הפולסר הראשון התגלה, בתצפיות רדיו, בשנת 1967 ומאז התגלו רבים נוספים.

תוצאה חשובה נוספת של התפוצצות הסופר-נובה היא יצירת יסודות חדשים. התפוצצות הכוכב משחררת לזמן קצר אנרגיה רבה המאפשרת את היתוכם של יסודות כבדים מברזל. בתהליך זה נוצרים היסודות קובלט, ניקל ואורניום ושאר היסודות בטבע הכבדים מברזל. מרבית הניקל והקובלט הם איזוטופים רדיו-אקטיביים הדועכים, תוך כדי פליטת אנרגיה, עם זמן מחצית חיים של כמה עשרות ימים. מרבית הקרינה הנצפית מארועי סופר-נובה היא תוצאת תהליכי דעיכה רדיו-אקטיביים כאלה. לולא היו נוצרים כוכבים מסיביים לא היו התפוצצויות סופר נובה ולא היו נוצרים היסודות הכבדים מברזל. בגופינו כמות לא קטנה של יסודות כבדים כאלו וניתן לאמור בוודאות כי לולי נוצרו הכוכבים הכבדים לא היו כאן חיים תבוניים.

תהליך נוסף בו נוצרים יסודות כבדים מברזל הוא תהליך מיזוגם של שני כוכבי ניטרונים. צמד כזה הוא תוצאת התפוצצויות סופר-נובה של שני בני הזוג של צמד הכוכבים כאשר מסת כל אחד מהם גדולה מכ-8 מסות שמש. שני כוכבי הניטרונים חגים האחד סביב לשני ואם המרחק הראשוני קטן מערך מסוים, הם מתקרבים זה לזה ומתמזגים בסופו של התהליך. מיזוג כזה תוצאתו פיצוץ אדיר הדומה במספר תכונות, כולל יצירת יסודות כבדים מברזל, להתפוצצות סופר-נובה.

חשוב להזכיר, לסיום, סוג נוסף של סופר נובות שאינו קשור בקריסה ובפיצוץ של כוכב בעל מסה גדולה. במקרים רבים של צמדי כוכבים אחד מבני הזוג (המסיבי יוצר) סיים את חייו והפך לננס לבן ואילו בן הזוג הקטן יותר עדיין מבעיר את המימן שבליבתו. אם בני הזוג סמוכים מאד זה לזה, חומר מאטמוספרת בן הזוג שאינו ננס לבן יכול לעבור לננס הלבן ולהגדיל את מסתו. כאשר המסה עולה על ערך מסוים, כ-1.4 מסות שמש, קורס הננס הלבן לכוכב ניטרונים בתהליך של התפוצצות סופר נובה הדומה למדי לזה שתיארנו קודם לכן. לסופר נובות כאלה תכונה מעניינת שעצמת הקרינה שלהם בשיא העצמה, דומה מאד ממקרה אחד למשנהו. ישנן מחשבות שלא הובהרו עדיין כל צרכן שמקור סופר-נובות אלה התהליך הוא בהתנגשות ומיזוג של שני ננסים לבנים. כך או כך, ניתן לכן להשתמש באירועים אלה כדרך למדידת המרחק לגלקסיה בה התרחשו, תהליך אותו כבר הזכרנו. סופר-נובות כאלה, המכונות סופר-נובה מסוג IIa, הן המכשיר המדויק ביותר כיום למדידת קצב התפשטות היקום.

### **חורים שחורים** **וגלי כבידה**

בכוכבים גדולים במיוחד, בהם מסת הליבה המתכווצת גדולה פי 2.5 או יותר ממסת השמש, שונה מהלך העניינים תכלית השינוי. גם כאן מתכווצת הליבה בשבריר של שניה אלא שמיזוגם של הפרוטונים והאלקטרונים לניטרונים אינו יכול לעצור את הכווץ. למעשה, אין שום כוח המוכר לנו היכול לעצור את הקריסה והחמר כולו מגיע למרכז, לנקודה שנפחה אפס אך מסתה כמסת הליבה. הליבה הפכה ל"חור שחור". חורים שחורים אלה שונים מאד במסתם אך דומים באופים לחורים השחורים הענקיים במרכזי הגלקסיות אותם פגשנו בפרק על הגלקסיות. התהליך יכול להיות מלווה בהתפוצצות סופר נובה וזריקת מרבית החומר לחלל או, אם מסת הליבה גדולה במיוחד, בהפיכת כל החומר לחור שחור שלא תותיר כל סימן חיצוני.

חורים שחורים הם אולי הגופים המוזרים ביותר ביקום. תורת היחסות הכללית, אותה פרסם איינשטיין בשנת 1915, מנבאה את קיומם למרות שהתאור הראשון של גוף כזה נעשה על יד שוורצ'ילד מאוחר קצת יותר. כזכור, שדה הכבד של גוף כלשהו תלוי במסתו ובצפיפות החמר. שדה הכבד קובע גם את מהירות תנועתם של גופים אחרים בסביבה. כך למשל, המהירות המסוימת בא נע כדור הארץ סביב לשמש, נקבעת על ידי מסת השמש והמרחק אליה. כך גם קובעים המסה והרדיוס של כדור הארץ את המהירות הדרושה על מנת להימלט מפני כדור הארץ אל החלל. במקרה של כדור הארץ מהירות זו, הקרויה "מהירות הבריחה", היא כ-11 ק"מ לשניה. על מנת לשגר חללית אל פלנטות רחוקות יש להקנות לה מהירות הגדולה ממהירות הבריחה אחרת היא תחזור אל הקרקע או תקיף את הארץ כלווין. באם היינו מכווצים את כדור הארץ במקצת הייתה דרושה מהירות בריחה גדולה יותר, משום כוח הכבד החזק יותר. בחורים שחורים כוחות הכבד כה גדולים שמהירות הבריחה גדולה ממהירות האור. במילים אחרות, גם קרן אור, הנעה במהירות המכסימלית המותרת בטבע, אינה יכולה להימלט אל החלל. גוף כזה אינו פולט כל קרינה לחלל ומכאן שמו, חור שחור. תורת היחסות מלמדת כי כל מסתו של החור שחור, באם אינו מסתובב, מרוכזת בנקודה שגדלה אפס. נקודה זו, שלה צפיפות אינסופית, קרויה "נקודה סינגולרית".

הפיזיקה ליד חור שחור, ובתוכו, שונה ביותר מכל המוכר לנו בחיי יום יום. על פי התאוריה המקובלת חלקם של הכוכבים הכבדים הופכים, בסיום חייהם, לחורים שחורים. אלא שלא מדובר כאן רק בתיאוריה מוזרה, אלא בגופים של ממש שניתן לגלותם באמצעות השפעתם על כוכבים הסמוכים להם. כך למשל במערכת זוגית של כוכבים, שאחד מהם הפך לחור שחור, ממשיך בן הזוג להקיף את החור השחור במסלול אליפטי. חקירת ספקטרום הכוכב תראה את ההסחה של הקוים הספקטרליים אותה הזכרנו ותאשר את קיומו של בן זוג נסתר. באם יוכיחו המדידות כי מסתו של בן הזוג הנסתר גדולה מכ-2.5 מסות שמש הרי שלא מדובר בכוכב רגיל (אותו היינו רואים בנקל) בננס לבן או כוכב ניטרונים (שמסתם אינה יכולה להיות כה גדולה) ויש להניח כי מדובר בחור שחור. עד היום ידועים כתריסר גופים בגלקסיה שלנו שהם כנראה חורים שחורים שנוצרו בגמר חייהם של כוכבים מסיביים.

ישנם מקרים בהם צמד של כוכבים גדולים הופך, כל אחד בתורו, לצמד חורים שחורים. גם כאן, בדומה למצב של צמד כוכבי ניטרונים, אם מרחקם של החורים השחורים זה מזה קטן מערך מסוים, הם יוסיפו ויתקרבו זה לזה ובסופו של התהליך יהפכו לחור שחור גדול יותר. הסיבה להתקרבות ההדדית היא איבוד האנרגיה הסיבובית של בני הזוג עקב פליטת "גלי כבידה". גלים אלה הם תוצאת השינויים בשדה הכבידה ותוצאה ידועה של תורת היחסות הכללית של אינשטיין. מקורם ב"עיוות" המרחב-זמן מסביב למערכת הזוגית, כלומר בשינוי המחזורי של שדה הכובד המשותף של הכוכבים, עקב הסיבוב. "הפרעה" מחזורית כזו יוצרת גל כבידה בכל המרחב (למעשה בכל היקום) כלומר שינוי במבנה המרחב-זמן עצמו. לא נפרט כאן את תכונותיה למעט העובדה שהיא נעה במרחב במהירות האור ושונה לחלוטין מן הקרינה האלקטרו-מגנטית המוכרת לנו. בשנת 2016 התגלתה לראשונה קרינה כובדית בגלאי ענק, הקרוי LIGO, שנבנה בארה"ב במשך כ-30 שנה. במקרה זה מדובר היה במיזוגם של שני חורים שחורים שמסת כל אחד מהם גדולה לערך פי 30 ממסת השמש. בשנת 2017 התגלה בשיטה זו מיזוג של שני כוכבי ניטרונים. המיזוג לווה בפרץ קרינה אלקטרו-מגנטית תוצאת השפעת המיזוג על אזורים הסמוכים למקומו של צמד כוכבי בניטרונים. בשנת 2017 הוענק פרס נובל לפיזיקה לשלשה חוקרים שהובילו את פיתוחו ובנייתו של גלאי גלי הכבידה LIGO.

### **יצירת היסודות בטבע**

היסודות השכיחים ביותר ביקום נוצרו, כפי שראינו, בשלשה תהליכים שונים. המימן וההליום, המרכיבים כ-99 אחוזים (על פי המספר) מחומר היקום המוכר לנו (כלומר ללא החומר האפל), נוצרו במפץ הגדול, בשלוש הדקות הראשונות. כמות נוספת של הליום נוצרה גם במרכזי כוכבים, כתוצאת מן הבעירה הגרעינית. היסודות הכבדים יותר, כמו פחמן, חמצן וחנקן, ועד לברזל, נוצרים במרכזי כוכבים, בתהליכי בעירה גרעינית. היסודות הכבדים מברזל נוצרו בעת סיום חייהם של כוכבים מסיביים, בהתפוצצויות סופר נובה או במיזוג כוכבי ניטרונים.

הכוכבים הראשונים שנוצרו ביקום, ובגלקסיה, הכילו רק מימן והליום. החומר המרכיב את השמש, שנולדה כמה מיליארדי שנים מאוחר יותר, עשיר הרבה יותר ביסודות כבדים. חמר מועשר זה הוא תוצאה של דורות רבים של כוכבים שנולדו, יצרו יסודות כבדים ופלטו אותם לחלל במותם. בכל התפוצצות סופר-נובה מועף לחלל רב חומר הכוכב ומשנה את הרכבו של הגז הבינכוכבי בסביבתו. כך למשל, לאחר סיום חייהם של הכוכבים הכבדים הראשונים, תהליך שארך רק כמה מיליוני שנים, הועשר החומר הבינכוכבי בחמצן, פחמן, ברזל ושאר מתכות. חומר מועשר זה הפך לכוכבים חדשים, שנוצרו בתהליכי קריסה גרביטציונית. הכוכבים הכבדים ביותר מכוכבי דור שני זה סיימו את חייהם, התפוצצו והעשירו עוד יותר את החמר הבינכוכבי שבסביבתם. דור הכוכבים השלישי עשיר יותר במתכות, וחוזר חלילה. כאמור, השמש נוצרה לפני כ-4.6 מיליארד שנים והגלקסיה לפני כ-12 מיליארד שנים. הזמן לפני הולדת השמש הוא די והותר על מנת להעשיר את החומר בגלקסיה כך שיתאים לשכיחות היסודות שאנו מודדים באטמוספרה של השמש. הטבלה הבאה מראה את שכיחות היסודות בשמש, בכדור הארץ ובגוף האדם.

***שכיחות היסודות הכימיים (אחוזים ממספר האטומים הכללי) במקומות שונים***

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **יסוד** | **סימול כימי** | **שכיחות בשמש** | **שכיחות בכדור הארץ** | **שכיחות בגוף האדם** |
| מימן | H21 | 90.99 |  | 61 |
| הליום | He42 | 9 |  |  |
| פחמן | C126 | 0.025 |  | 10.5 |
| חנקן | N147 | 0.010 |  | 2.4 |
| חמצן | O168 | 0.050 | 50 | 26 |
| ניאון | Ne2010 | 0.011 |  |  |
| מגנזיום | Mg2412 | 0.004 | 14 |  |
| צורן | Si2814 | 0.004 | 14 |  |
| גופרית | S3216 | 0.002 | 1.6 | 0.13 |
| סידן | Ca4020 | 0.0002 | 0.7 | 0.23 |
| ברזל | Fe5626 | 0.003 | 17 |  |
| כרום | Cr5224 | 0.0003 | 0.13 |  |
| אלומיניום | Al2713 | 0.0003 | 1.1 |  |

המספרים בטבלה מלמדים כי שכיחות היסודות בשמש, הדומה לשכיחות הממוצעת של היסודות ביקום, שונה ביותר משכיחותם בכדור הארץ. המסקנה המתבקשת היא שהתהליך בו נוצר כדור הארץ שונה לחלוטין מן התהליכים בהם נוצרים כוכבים. שכיחות היסודות בגופינו שונה גם משכיחותם בשמש וגם משכיחותם בכדור הארץ. הדבר קשור לתהליך הביולוגי של היווצרות החיים שלא נדון בו כאן.

## 5. כוכבי לכת - פלנטות

### **מערכת השמש**

כזכור, כוכבים נולדים מענני גז גדולים הקורסים תחת כובדם העצמי. במשך התהליך גדלה צפיפות הגז במרכז ועמה הטמפרטורה. בשלב האחרון מתחילות ריאקציות היתוך גרעיני והענן הופך לכוכב. תוצאות תהליך הקריסה תלויות בין השאר בשאלה האם הענן מסתובב , כלומר האם יש לו תנע זוויתי. ענן שאינו מסתובב קורס אל המרכז ויוצר כוכב בודד. לענן מסתובב, כמו לכל גוף מסתובב, יש תנע זוויתי - גודל פיזיקלי המציין את מידת הסיבוביות של הגוף. קיים חוק ידוע, חוק שימור התנע הזוויתי, הקובע כי מידת הסיבוביות הכללית של המערכת (או סה"כ התנע הזוויתי) נשמרת וכווץ אפשרי רק בניצב למישור הסיבוב. במילים אחרות, גוף מסתובב אינו נופל למרכז, כפי שכדור הארץ אינו נופל אל השמש.

ענן מסתובב יהפוך לאחת משתי צורות אפשריות, טבעת עבה הסובבת סביב צירה או דיסקה מסתובבת. באם נוצרה טבעת גז מסתובבת היא תמשיך להתכווץ, להתפרק, ותהפוך בדרך כלל לשני כוכבים הסובבים זה את זה. אם נוצרה דיסקה, התהליך שונה. האזור המרכזי, שבו מרוכז רוב החמר, מתכווץ והופך לכוכב מסתובב. אזורי הדיסקה הרחוקים יותר, אשר אינם יכולים לקרוס אל המרכז עקב הסיבוב, נפרדים מן החלק המרכזי והופכים, בתהליך שונה לחלוטין, לגופים קטנים יותר הסובבים את הגוף המרכזי – כוכבי לכת או פלנטות.



*הווצרות מערכת השמש. האזור המרכזי התפוח יהפוך בהמשך לכוכב (השמש) והחומר באזורי הדיסקה הרחוקים יתגבש לפלנטות.*

עדויות גיאולוגיות מכדור הארץ, מן הירח ומגופים קטנים במערכת השמש מראות כי השמש ומערכת השמש נוצרו לפני כ-4.6 מיליארד שנים. במערכת שמונה פלנטות הסובבות את הכוכב המרכזי במרחקים שונים. חלקן של הפלנטות קטן מאד, דוגמת כדור הארץ, וחלקן גדול יותר, דוגמת צדק או שבתאי. המסה הכוללת של כל שמונה הפלנטות מהווה 0.13 אחוזים בלבד ממסת השמש. הפלנטה הגדולה ביותר היא צדק שמסתו כאלפית מסת שמש. הקטנה ביותר היא כוכב חמה, שמסתו רק 1.7x10-7 ממסת השמש. כדור הארץ, הפלנטה השלישית במרחקה מן השמש, סובבת במרחק ממוצע של 149.6 מיליון ק"מ מן השמש, מרחק הקרוי "יחידה אסטרונומית". מסת כדור הארץ 5.98x1024 ק"ג, היא כשלש מיליוניות ממסת השמש. לעומת זאת, התנע הזוויתי (מכפלת המסה במהירות הסיבוב ובמרחק מן השמש) של שמונה הפלנטות גדול מאד ומייצג כ-99 אחוזים מן התנע הזוויתי הכולל של המערכת, כולל השמש. הטבלה הבאה מסכמת את התכונות הבסיסיות של הפלנטות במערכת השמש.

**תכונות הפלנטות במערכת השמש**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| פלנטה | מרחק ממוצע מן השמש ביחידות אסטרונומיות | מסה (יחסית לכדור הארץ) | קוטר בק"מ | צפיפות (יחסית למים) | מחזור סבוב עצמי (ימי ארץ) | אורך שנה(שנות ארץ) |
| כוכב חמה | 0.387 | 0.055 | 4,878 | 5.4 | 58.65 | 0.241 |
| נגה | 0.723 | 0.814 | 12,104 | 5.2 | 243.02 | 0.615 |
| ארץ | 1.0 | 1.0 | 12,756 | 5.5 | 1.0 | 1.0 |
| מאדים | 1.524 | 0.107 | 6,787 | 3.9 | 1.03 | 1.88 |
| צדק | 5.202 | 317.7 | 142,800 | 1.3 | 0.41 | 11.86 |
| שבתאי | 9.539 | 95.2 | 120,600 | 0.7 | 0.43 | 29.46 |
| אורנוס | 19.18 | 14.5 | 51,120 | 1.3 | 0.75 | 84.01 |
| נפטון | 30.06 | 17.1 | 49,530 | 1.6 | 0.80 | 164.8 |
|  |  |  |  |  |  |  |

במערכת השמש גופים נוספים, קטנים הרבה יותר, הקרויים אסטרואידים, או פלנטות קטנות (minor planets) . גופים אלו סובבים את השמש בעיקר בין המסלולים של מאדים וצדק. האסטרואיד הגדול ביותר שנתגלה עד עתה הוא קרס (Ceres) שקוטרו כ-900 ק"מ, אך רובם קטנים הרבה יותר, עשרות קילומטרים ואף פחות מזה. קיים גם אזור אסטרואידים נוסף, מחוץ למסלולו של נפטון. אזור זה, הקרוי "חגורת קויפר" (Kuiper belt) מכיל מיליארדי אסטרואידים קטנים ושביטים שגודלם האופייני מספר ק"מ. משערים כי האסטרואידים שבין מאדים לצדק נוצרו עם הפלנטות, אלא שכוח המשיכה של צדק מנע מהם להתגבש לפלנטה גדולה אחת.

 גופים נוספים במערכת השמש הם כוכבי השביט העשויים מליבת קרח ונעים במסלולים אליפטיים מסביב לשמש. גדלו של שביט ממוצע מספר ק"מ והוא הולך וקטן, עקב התאדות החומר, בכל מעבר סמוך לשמש. השביטים חיוורים ביותר וניתן לצפות בהם רק בהתקרבם אל השמש. זמני המחזור הקצרים ביותר של שביטים הם כמה עשרות שנים. כך למשל מחזורו של השביט האלי הוא 76 שנה והופעתו האחרונה בקרבת השמש הייתה בשנת 1986. רב השביטים בעלי מחזורי סבוב ארוכים יותר, מאות ואלפי שנים. מרבית השביטים הידועים לנו נמצאים רב הזמן באזורי הפלנטות החיצוניות, למשל בחגורת קויפר. ישנו גם אזור נוסף של שביטים הקרוי ענן אורט (Oort). ענן זה, המכיל מיליארדי שביטים, מקיף את מערכת השמש במרחק של כ-100,000 יחידות אסטרונומיות. מסלול השביטים בענן אורט יציב והם אינם מתקרבים לשמש. לעתים, מסיבות שלא יפורטו כאן, מופרע המסלול הסיבובי ומספר גדול מגיע לאזורים הפנימיים של מערכת השמש ומהווה מקור חדש של שביטים קצרי מחזור.

מעבר למסלולו של נפטון נמצאים גם מספר גופים גדולים יותר, שחלקם גדול מכוכב-חמה. המפורסם בהם הוא פלוטו שבעבר נהוג היה לכנותו כוכב-לכת או פלנטה. גופים אלה (פלנטות ננסיות) נוצרו כנראה בדרכים שונות מן הדרך בה נוצרו שמונה הפלנטות שהזכרנו.

### **פלנטות ענקיות ופלנטות ארציות**

עיון בטבלה מראה כי במערכת השמש שני סוגים של פלנטות: פלנטות ארציות (כלומר כאלו הדומות בהרכבן ובגדלן לכדור הארץ) ופלנטות ענקיות.

בקבוצת הפלנטות הארציות, בנוסף לכדור הארץ, גם כוכב חמה, נגה, ומאדים. עד לפני שנת 2006 נכלל גם פלוטו בקבוצה. פלנטות אלה קטנות וצפופות. קוטרן עד כ-13 אלף ק"מ וצפיפותן לערך פי חמישה מצפיפות המים. הצפיפות הגבוהה מלמדת כי הפלנטות הארציות מורכבות בעיקר מחומרים כבדים. כך למשל, החומרים השכיחים ביותר בכדור הארץ (ראה טבלה) הם חמצן וצורן, באזורים החיצוניים, וברזל וניקל במרכז. לפלנטות הארציות קליפה חיצונית קשה וצפופה. החמר במרכזן חם הרבה ויכול להיות גם במצב צבירה נוזלי.

הפלנטות הענקיות כוללות את שבתאי, צדק, אוראנוס ונפטון. פלנטות אלה גדולות ומסיביות הרבה יותר מן הפלנטות הארציות. 99.5 אחוזים ממסת הפלנטות שבמערכת השמש מצויה בפלנטות הענקיות ורובה של מסה זו מרוכזת בפלנטה אחת, צדק.

נהוג לחלק את הפלנטות הענקיות לשתי תת קבוצות: ענקי הגז, צדק ושבתאי, ופלנטות הקרח, אוראנוס ונפטון. ענקי הגז עשויים בעיקר מימן והליום, הרכב הדומה מאד להרכבה של השמש. צפיפות החמר הממוצעת שלהן קטנה הרבה יותר מצפיפות החומר בפלנטות הארציות וזו של שבתאי נמוכה אפילו מצפיפות המים (שבתאי היה צף במים, באם היינו מניחים אותו באוקיאנוס ענקי). במרכזן של פלנטות אלו ליבה צפופה הרבה יותר, שהרכבה דומה למדי להרכבן של פלנטות הקרח. אין להן מעטפת קשיחה



*הפלנטות במערכת השמש*

וקשה להבדיל בין הפלנטה לאטמוספירה סביבה. קשה למשל לדבר על נחיתה על פני הפלנטה צדק ומדויק יותר לחשוב על חדירה לתוך מעטפת הפלנטה. פלנטות הקרח מורכבות בעיקר ממים קפואים ומליבת יסודות כבדים. מבחינת גודלן הן מהוות גשר בין הפלנטות הארציות הקטנות, לבין ענקי הגז.

מיקומן והרכבן של הפלנטות הארציות קשור כנראה לאופן בו נוצרה המערכת. על פי התיאוריה המקובלת היום נוצרה מערכת השמש מענן גז מסתובב. הרכב החומרים בענן זה היה דומה להרכב החומרים שבשמש והוא הכיל גז ואבק. רובו של האבק עשוי מגרגירי פחמן, ברזל וסיליקטים עטופים בשכבת קרח. חלקיקים אלו מתנגשים ומתלכדים לגופים גדולים יותר המכילים בעיקר קרח. במהלך הקריסה הפך הענן לדיסקה בעלת מרכז נפוח ושוליים דקים. החלק המרכזי, הנפוח, הלך והתכווץ והפך, בסופו של התהליך, לכוכב, השמש. לקראת סיום התהליך נפלטה מן השמש, קרינה חזקה אשר שנתה את הרכב החומרים שבדיסקה. במרחקים גדולים מן המרכז הייתה עצמת הקרינה קטנה, הטמפרטורה נמוכה, וחלקיקי הקרח נותרו במצב מוצק. באזורים הפנימיים הייתה הטמפרטורה גבוהה יותר, הקרח התאדה, ונותרה רק הליבה המתכתית, הקטנה של החלקיקים. חלקיקי הקרח הגדולים יחסית, באזורים הרחוקים מן השמש, התנגשו ביעילות זה בזה ויצרו גושים גדולים יותר ויותר שהפכו לפלנטות. גודלן של פלנטות אלו עשרות פעמים מגדלה של הארץ. גופים כאלו גדולים וכבדים מספיק על מנת למשוך אליהם את הגז שבסביבה, שהצטבר והפך, בסופו של התהליך, לפלנטה ענקית.

באזורי הדיסקה הפנימיים היה המצב שונה. חלקיקי החומר הקטנים, נטולי הקרח, התנגשו והתחברו גם כן אלא שמשום גודלם היה התהליך איטי הרבה יותר. כל אותו הזמן נספח עוד ועוד גז מן הדיסקה אל הכוכב המרכזי, השמש. תוך כדי התהליך נזרקו מן השמש חלקיקים מהירים שסילקו מן האזור הפנימי של הדיסקה כמויות גז נוספות. כמות הגז שנותרה באזורים אלו הייתה קטנה ונוצרו שם פלנטות קטנות, העשויות בעיקר מחומרים כבדים וכמויות מזעריות של גז מימן ומים.

התהליך שתואר כאן מסביר מדוע הפלנטות הארציות, הצפופות, נוצרו סמוך לשמש, והפלנטות הענקיות, רחוק ממנה. כאמור פלוטו, אינו מתאים לתמונה זו, וזו אחת הסיבות למחשבה כי הוא לא נוצר עם יתר הפלנטות הארציות אלא נמשכה אל המערכת מחגורת האסטרואידים החיצונית. מעניין לציין כי לפלנטות הענקיות מספר רב של ירחים שניתן לשלבם בתמונה זו. הרכב הירחים שונה למדי מהרכב פלנטת האם. רובם עשויים קרח ולאחדים מהם, לדוגמא איו (Io) ירחו של צדק, צפיפות המתקרבת לזו של הפלנטות הארציות. ירחי הפלנטות הארציות דומים בהרכבם לפלנטות עצמן.

גילוין של פלנטות במערכות שמש אחרות, החל משנות ה-90 של המאה העשרים, הכניס ספקות רציניים בפרטי תיאוריה זו. בין השאר נמצא כי לא נלקחה בחשבון האפשרות כי שלוב כוחות המשיכה של הדיסקה והפלנטות הענקיות יכול לגרום לאלו האחרונות לשנות את מיקומן ולהתקרב אל השמש. תמונת מערכת השמש הנראית היום אינה בהכרח זהה לתמונת המערכת מיד כשנוצרה וקיימות מערכות פלנטריות אחרות בהן הפלנטות הענקיות קרובות הרבה יותר אל הכוכב שבמרכז.

**מערכות שמש אחרות**

שנות התשעים של המאה העשרים הביאו עימן תגליות אסטרונומיות מרעישות. במיוחד ראוי לציין את גילוין של פלנטות ליד כוכבים אחרים, כלומר ההוכחה הניסיונית כי קיימות ביקום מערכות שמש נוספות.

גילוין של פלנטות ליד כוכבים אחרים קשה ביותר. אין עדיין אפשרות לראות אותן באופן ישיר, אפילו הן גדולות כמו צדק, משום סמיכותן לכוכב האם הבהיר. יש להשתמש לכן בשיטות גילוי בלתי ישירות. ישנן היום ארבע שיטות עיקריות לגילוי פלנטות ליד כוכבים אחרים. השתיים שבעטיין התגלו מרבית הפלנטות עד עתה (כ-5000 פלנטות נכון ל-2017) הן שיטת הליקוי ושיטת מהירות הסיבוב המסתמכת על השפעת כוחות הכבידה שמפעילה הפלנטה על הכוכב סביבו היא חגה.

שיטת הליקוי פשוטה מאד בעקרון אך קשה מאד לביצוע. הרעיון פשוט ביותר. פלנטה קטנה וקרה החגה סביב לכוכב גדול וחם, גורמת לירידת עצמת אור הכוכב בכיוונים מהם נראה ליקוי, אלה בהן מישור הסיבוב של הפלנטה ניצב בקרוב למישור השמיים. מעקב ממושך אחר המערכת יראה במקרה כזה עצמת אור קבועה במשך מרבית הזמן, וירידה קטנה בעצמת האור בזמן הליקוי בו מוסתר חלק מפני השטח של הכוכב על ידי הפלנטה. הירידה בעצמת האור מזערית, במרקים רבים שבריר של אחוז, משום גדלה הזעיר של הפלנטה יחסית לכוכב. המשך המעקב יביא לאחר זמן ליקוי נוסף, לאחריו עוד אחד עם אותו מרווח זמן, וחוזר חלילה. ניתן כך למדד את קוטרה של הפלנטה ואת זמן מחזור ההקפה – שנת הפלנטה – סביב לכוכב האם.

פריצת דרך משמעותית בגילוי פלנטות בצורה כזו התרחשה עם שיגורו לחלל של הלווין "קפלר". לווין זה עקב אחרי כמה מאות אלפי כוכבים במשך כ-4 שנים רצופות והצליח לאתר בשיטה זו כמה אלפי פלנטות. מקור ההצלחה במידת הדיוק המרשימה של מכשירי הלווין היכולים לגלות ירידה בעצמת האור בשיעור של מאית האחוז ואפילו פחות מכך. נמצא גם כי בחלק משמעותי של המערכות מספר פלנטות הסובבות את הכוכב באותו המישור.

שיטת מהירות הסיבוב פשוטה אף היא, וכבר פורטה בפרק העוסק בכוכבים כפולים. גם היא דורשת דיוק מדידה יוצא דופן. כזכור, בצמד גופים הנמצא בחלל נעים בני הזוג סביב למרכז המסה המשותף של המערכת. מהירות תנועת בן הזוג הכבד יותר איטית יותר ומהירות תנועת בן הזוג הקל, מהירה יותר (מכפלת המסה במהירות שווה בשניהם). כך למשל, צדק מקיף את מרכז המסה המשותף לו ולשמש במהירות של כ-13.6 ק"מ לשניה, מהירות גדולה לכל הדעות. לעומתה, השמש מקיפה את מרכז המסה המשותף לה ולצדק במהירות של לערך 13 מטרים לשניה. זוהי מהירות קטנה ביותר וקשה מאוד לגלותה מרחוק. בשנות ה-90 של המאה העשרים חלה מהפיכה של ממש בדיוק מכשירי מדידה המבוססים על הסחת דופלר של קוים ספקטרליים. המכשירים המשוכללים יותר הגיעו לרמת דיוק של כ-5 מטרים לשניה ואפילו פחות מכך. מעקב של מספר שנים אחרי כמה מאות כוכבים הדומים לשמש, ומדידות מדויקות של מהירות תנועתם, הראו כי יותר מ-10 אחוזים מהם נעים סביב בן זוג נסתר שמסתו דומה למסתו של צדק. מכיוון שהגוף הנסתר אפל לחלוטין (כלומר לא ניתן לראותו באופן ישיר מכדור הארץ), אין ספק כי מדובר בפלנטה ענקית הסובבת את הכוכב.

פיתוחם של מכשירים מדויקים יותר ויותר הביא ליכולות משופרות וכיום (2017) ניתן למדוד בשיטה זו מהירות סיבוב של כמטר אחד לשניה (או 3.6 ק"מ לשעה, מהירות הליכה בינונית!!). עקב זאת התגלו בהמשך פלנטות קטנות יותר ויותר וכיום ישנן רבות שמסתן נמדדה ונמצאה דומה למסת כדור הארף או מספר פעמים מסת כדור הארץ. החל מן המאה ה-21, ובמיוחד לאחר פיתוחה של שיטת הליקוי ושיגורו של הלווין "קפלר", התרחב המחקר לכוכבים מטיפוס M, הקטנים הרבה יותר מן השמש. במקרה כזה הכוכב בעל מסה קטנה יתר והשפעת הפלנטה על מהירות תנועתו גדולה יותר, מה שמקל על הגילוי ומדידת המסה. רבות מבין הפלנטות הידועות היום שמסתן דומה למסת כדור הארץ, חגות סביב לכוכבים כאלה.

תוצאה מפתיעה ביותר הייתה שבמרבית המערכות שנתגלו, מרחקה של הפלנטה הענקית מן הכוכב שלה קטן הרבה יותר ממרחקו של צדק מן השמש. הדבר נוגד לכאורה את התיאוריה המקובלת על פיה נוצרות פלנטות ענק רק רחוק מאוד מהכוכב שלהן, מעבר לגבול קרינת השמש החזקה מפשירה את גושישי הקרח. יתכן מאוד כי המרכיב החסר באותה התיאוריה הוא האפשרות שלאחר שנוצרו ינועו פלנטות אלו ויתקרבו לכוכב. הדבר אפשרי אם נותרה באזור יצירת הפלנטות דיסקת החומר הראשונית. דיסקה כזו מספקת כוחות משיכה שפעולתם שונה מאוד מכוח המשיכה של הכוכב שבמרכז.

תוצאה מעניינת נוספת קשורה למחשבה כי התנאים במערכת של צמד כוכבים קרובים אינם מתאימים, בדרך כלל, לקיומן של פלנטות. תנועת הכוכבים גורמת לכוחות כובד המשתנים בזמן ואינה מאפשרת מסלולים יציבים של פלנטות. הדעה הרווחת הייתה כי תנועתן של פלנטות שנוצרו במערכות כאלו מופרעת בצורה קשה והן תזרקנה מן המערכת או תתנגשנה באחד הכוכבים. התצפיות החדשות באלפי מערכות של כוכבים מערערות במידה רבה גם הנחה פשטנית זו.

**חיים ליד כוכבים אחרים**

גילוין של אלפי פלנטות ליד כוכבים רחוקים, חלקן המכריע פלנטות ארציות הדומות במסתן ובהרכבן לכדור הארץ, מעלה בצורה חדשה את השאלה עתיקת היומין בנוגע לחיים ליד כוכבים אחרים. בשאלה סבוכה זו לא ניתן לדון "על קצה המזלג" וישנה ספרות ענפה העוסקת בה. כאן נציין רק את העובדה המעניינת כי חלק נכבד מן הפלנטות הארציות שהתגלו בשנים האחרונות נמצאות ב"אזור תומך חיים" (תרגומו לעברית של המושג האנגלי habitable zone) ליד הכוכב סביבו הן חגות. באזור זה נעה טמפרטורת פני הפלנטה בתחום שבין 0 ל-100 מעלות צלזיוס, כלומר מים הנמצאים על פני השטח יהיו במצב צבירה נוזלי. ניתוח הנתונים הקשורים ביצירתם של החיים על פני כדור הארץ, לפני כ-3.8 מיליארד שנים, מרמז כי תנאים אלה הכרחיים ליצירת החיים הראשונים. מכאן שבמיליוני מקומות בגלקסיה התנאים הבסיסיים, מבחינת שכיחות החומרים וקיומם של מים נוזלים, מתאימים ליצירת חיים. האם אמנם נוצרו שם חיים? תשובה ישירה לשאלה זו לא קיימת עדיין.