

## הגישה האנתרופית\* כקוו סיפורי מרתק בהוראת הפיסיקה

יעקב אוראן, מכון רקח לפיסיקה, האוניברסיטה העברית, ירושלים

... "מה אדם ותזעהו, בן אנוש ותחשבהו..." (תהלים, קפ"ד, ג')

### תקציר

קבועי הפיסיקה (כגון קבוע הכבידה, מטען האלקטרון והמסות של חלקיקי היסוד) הם עדיין חידה. אין שום תיאוריה הנותנת את גודלם. אולם, כפי שמתברר, הם מכווננים להפליא לאפשרות קיומם של חיים ביקום. במאמר זה הצעה לקורס המתבסס על הגישה האנתרופית, זו הרואה "הסבר" לקבועים בקיומו של האדם.

### מילות מפתח:

הגישה האנתרופית, קבועים פיסיקליים.

### מבוא

כל פיסיקאי המכבד את עצמו יסכים שהאדם בעולמנו הינו חסר חשיבות לחלוטין. קופרניקוס היה זה שהוריד את האדם מכס המלכות שבמרכז העולם. מאז למדנו שהשמש שלנו אינה אלא כוכב ממוצע אחד מתוך מיליארדים רבים המצויים ב"שביל החלב" ללא כל מאפיין יחודי, ו"שביל החלב" עצמו הוא גלקסיה אחת ממוצעת מתוך מיליארדים של גלקסיות דומות המצויות ביקום. דרווין (Darwin) והבאים אחריו לימדונו שהחיים, והאדם בתוכם, הם מוצר של התפתחות מקרית (על לווין בינוני של כוכב בינוני) שהחלה מיליארדים של שנים **לאחר** שהעולם כפי שאנו מכירים אותו - על כל חוקי הפיסיקה שבו - החל בפעולתו. האדם הינו, קרוב לוודאי, אפיזודה חד-פעמית וחולפת. העולם על חוקיו ימשיך לפעול בדיוק כפי שהוא עושה זאת כיום, מיליארדים של שנים לאחר שייכחדו החיים מתוכו.

### לידתה של הגישה האנתרופית

בשנים האחרונות הפך המשפט שבו פתחתי לבלתי מדוייק. פיסיקאים אחדים הקימו מעין תנועת "מחתרת" שניתן אולי לקרוא לה "התנועה האנתרופית" או שמה "התנועה להשבת כבוד האדם בפיסיקה"...

רוב הפיסיקאים מתייחס אליה בחשדנות או ביריבות גלויה. מוכרים לי פיסיקאים מעולים המקבלים פריחה כאשר מזכירים בפניהם את "העיקרון האנתרופי". מאידך,

\* מן המילה היוונית "אנתרופוס" שפירושה בן-אדם.

ישנם פיסיקאים חשובים (ובניהם חתני פרס נובל) הנוזקים לעיקרון זה בדיוניהם, ללא בושה. אני עצמי לא מצאתי שעיקרון זה יש בו האלמנטים ההכרחיים של עיקרון פיסיקלי. חסר בו הכוח להסביר או לפשט ולאחד תופעות פיסיקליות. אף על פי כן, אני מבין את סוד קסמו. אם כפיסיקאי אראה לנכון להתעלם מהאדם, הרי כאדם אשמח לגלות שיש חולקים עלי. יהא ערכו של **העיקרון** האנתרופי קטן ככל שיהיה, אני מוצא עניין רב **בגישה** האנתרופית מנקודת מבט דידיקטית.

במאמר זה אני מציע לנסות לנצל רעיונות אנתרופיים בהוראת הפיסיקה. אני בטוח שאלו יתרמו הרבה לעניין ולמוטיבציה שבלימודי הפיסיקה.

לידתו של העיקרון האנתרופי בשנת 1961, כאשר (ב-4 בנובמבר) התפרסם בעתון "Nature" מכתב של הפיסיקאי החשוב רוברט דיקי (R.H. Dicke) מפרינסטון תחת הכותרת: "הקוסמולוגיה של דיראק ועיקרון מאך". המיכתב התייחס למאמר של דיראק (P.A.M. Dirac) משנת 1938 שבו הוא דן בבעיית המספרים הטהורים הגדולים בפיסיקה. דיראק מבחין בעובדה שכמה יחסים חסרי מימדים בין קבועי הפיסיקה האוניברסליים הם עצומים בגודלם. ביתר פירוט:

$$(1) \quad \frac{\hbar c}{Gm^2} \sim 10^{40}$$

באשר  $\hbar$  - הקבוע של פלאנק,  $c$  - מהירות האור,  $G$  - קבוע

הכבידה של ניוטון ו- $m$  המסה של חלקיק אלמנטרי טיפוסי (הפרוטון, למשל).

$$(2) \quad \frac{Tmc^2}{h} \sim 10^{40}$$

באשר  $T$  הינו גילו הנוכחי של היקום, כפי שהוא מתקבל מעיקרון האבל (E. Hubble) של התפשטות היקום. (ראה מקור (9), פרק ה')

$$(3) \quad \frac{M}{m} \sim 10^{80} \quad \text{לבסוף:}$$

באשר  $M$  הינו המסה הכוללת של כל הגופים הנצפים ביקום. לדעתו של דיראק, אין כל סיכוי שתיאוריה פסיקלית סבירה תוכל להסביר יחסים עצומים, כמו  $10^{40}$ ; יתר על כן, אמר, יש לשים לב לכך שקיימים יחסים פשוטים **בין המספרים** הללו.

בהגיונו הפשוט הניח דיראק שגודלם המסתורי של המספרים, מחד, והדמיון שביניהם, מאידך, אינם מקריים. וכך העלה את השערתו שקבוע הכבידה  $G$ , וכן מסת היקום,  $M$  אינם כלל קבועים, אלא הם פונקציה של גיל היקום,  $t$ :  
 $G \propto t^{-1}$ ,  $M \propto t^2$   
 השערה זו פותרת, לכאורה, את שתי החידות.

טענתו של דיקי כנגד דיראק היתה שאין כל מיסתורין במספרים הגדולים ובדמיון שביניהם. אין כל צורך בהנחות קוסמולוגיות מרחיקות לכת כדי להסבירם. רק כאשר גיל היקום,  $t$ , משתווה בקירוב לאורך חייו,  $T_*$ , של כוכב דמוי השמש, **יתכן קיומו של האדם**. הנמקה לטיעון זה תינתן בהמשך. חישוב פשוט למדי נותן עבור משך חיי הכוכב:

$$(4) \quad T_* \sim \left( \frac{hc}{Gm} \right) \left( \frac{h}{mc^2} \right) \sim 10^9 \text{ y}$$

(דהיינו סדר גודל של מיליארד שנה). (ראה, למשל, מקור (5) סעיף 2.3). במילים אחרות גיל היקום  $T$  בתקופתנו - תקופת האדם - חייב לקיים בקרוב את השוויון:

$$(4') \quad T \sim T_*$$

אין זה מקרי או מפתיע - אומר דיקי - שאנו, בני האדם הצופים בגדלים השונים מגלים שוויון "מפתיע" בין (1) ל (2) (שהרי זה מתקבל בפשטות מן ההנחה (4')). ומה בדבר הזהות השלישית (לגבי מסת היקום)?

מסתבר שאחת הדרכים המעניינות לפרש את עיקרון מאך, המייחס את מקורה של ההתמדה לקיומן של גלקסיות רחוקות ביקום, היא שקבוע הכבידה העולמי,  $G$ , אינו שרירותי, כי אם תוצאה של כמות המסה ביקום וגודלו (או גילו) של היקום. הקשר ניתן בנוסחה:

$$(5) \quad \frac{GM}{Tc^3} \sim 1$$

נוסחה זו שקולה כנגד ההנחה שצפיפות החומר ביקום שווה לצפיפות הקריטית שמעליה היקום סגור ומתחתה - פתוח (ראה מקור 9 פרק ה').

נוסחה (5) ניתנת להיכתב גם בצורה:

$$(5') \quad \frac{M}{m} \sim \left( \frac{Tmc^2}{h} \right) \left( \frac{hc}{Gm^2} \right)$$

וכך מתאשרת גם משוואה (3).

תשובתו של דיראק, המופיעה באותו גיליון של העיתון "Nature", קצרה ומשעשעת: "לפי הנחתו של דיקי  $G$  ו- $M$  יכולים להיות קבועים בזמן. אף שגיל היקום משתנה, הוא חייב להתאים בקירוב לערך הנוכחי הנותן שוויון בין (1) ל (2), כי רק בו ייתכן קיומם של כוכבי לכת מיושבים בבני-אדם. לפי הנחתו, יתכן קיומם של אלו לזמן מוגבל בלבד. לפי הנחתי יתכן קיומם ללא גבול בעתיד, והחיים יוכלו להימשך עד אינסוף. אין כרגע כל טיעון טוב שיכריע בין שתי ההנחות. אני מעדיף את זו המאפשרת חיים ללא סוף. יש לקוות שבאחד הימים תוכרע השאלה באמצעות תצפית ישירה".

ואכן, בינתיים הוכיחו תצפיות מסוגים שונים מעבר לכל ספק שהשערתו של דיראק **איננה** נכונה. קבוע הכבידה הוא אכן **קבוע**.

דיקי במכתבו הפך לראשונה את הקיום האנושי לעובדה המסבירה יחסים בין מדידות פסיקליות טהורות.

### חידת הקבועים העולמיים - וה"פתרון" האנתרופי.

הקבועים העולמיים של הפיסיקה, כגון קבוע המבנה הדק:  $\alpha = \frac{e^2}{hc}$  (e - מטען האלקטרון), קבוע הגרביטציה (משוואה

(1)), יחסי המסות של החלקיקים האלמנטריים ועוד, הינם עדיין בבחינת חידה. הם נתונים ראשוניים, והסבר - אין.

ניתן להראות מאידך, ששינויים קלים בכל אחד מהם ישנו את עולמנו לבלי הכר, ויסלקו מתוכו כל אפשרות לחיים (המזכירים במשהו את החיים כפי שהם מוכרים לנו). הנחת קיומם של חיים כהנחת יסוד עשויה איפוא לספק מין "הסבר" לעובדות יסוד פסיקליות.

מאמר קצר שהרשים אותי פורסם בשנת 1981 ע"י הפיסיקאי הבריטי Squires. שם המאמר: "האם אנו חיים בעולם המעניין הפשוט ביותר האפשרי"? (ראה מקור 4).

(האיזון בין האנרגיה הקינטית של התפשטות היקום והמשיכה הגרביטציונית).

הקוסמולוגיות השונות. בעיית "החומר האפל". וכאן תישאל השאלה: האם ישנה חשיבות לגודלו של היקום (ולכן - גילו, צפיפות החומר שבו) מנקודת מבטו של האדם? התשובה - תשובתו של דיקי - אכן, כן! היקום מתאים במידותיו בדיוק רב לאדם! לו היה היקום גדול יותר (זקן יותר) או קטן יותר (צעיר יותר) לא היינו פה.

חומרי הבניין הדרושים לייצורו של אדם (וחיים בכלל) הם פחמן, חנקן, חמצן ועוד. חומרים אלו מיוצרים בתהליכים גרעיניים במרכזיהם של כוכבים גדולים, ונזרקים לחלל כשוכבים אלה מסיימים את חייהם בהתפוצצות. הגושים הנזרקים לחלל הופכים בחלקם לכוכבי לכת וכך - לבתי גידול פוטנציאליים לאדם. כל התהליך הזה של התפתחות הכוכב עד לסיום חייו נמשך פרק זמן שהוא בסדר הגודל של גילו הנוכחי של היקום. לא יתכן איפוא יקום צעיר מדי. מאידך, לו היה גילו הנוכחי של היקום גדול יותר, היו כל הכוכבים במצב של דעיכה סופית, וכך לא היתה בנמצא שמש שתספק אנרגיה לכוכב לכת כלשהו ותאפשר חיים.

ומה בדבר יציבותה של הגלקסיה שלנו, "שביל החלב"? הרי צפיפות החומר בתוכה גדולה בכמה סדרי גדל מצפיפות החומר ביקום. לפיכך, היתה זו אמורה להתמוטט התמוטטות גרביטציונית כעבור פרק זמן שהוא קצר בכמה סדרי גודל מגיל היקום. כאן בא לעזרתנו "נס" התנועה הסיבובית של הגלקסיה. "הכוח" הצנטריפוגלי הוא ששמר עליה בפני התמוטטות מהירה ונתן לנו חממה נוחה להתפתחותנו.

ד. מבנה החומר ויציבותו. הכוח האלקטרוסטטי וקבוע

החוזק של כוח זה בין שני מטענים אלמנטריים  $e^2 \cong 2.3 \cdot 10^{-28}$  joule-meter (גודל זה נכתב לרוב

בשיטת יחידות מקובלת:  $\frac{e^2}{4\pi\epsilon}$ ). האלקטרון, הפרוטון

והניטרון, מסותיהם ומטעניהם, הקשרים הקוואנטיים בין תנע ואנרגיה לממדי אורך וזמן. ובמיוחד:

$$(6) \quad mvR \approx h$$

ומכאן - הסקת מסקנות לגבי מבנה האטום. יחידת המסה האטומית  $M_a$ , הרדיוס האטומי  $R_a$ , ואנרגיית ערוור אטומית  $E_a$ . שני האחרונים מיתקבלים, כידוע, כאשר מחשבים את מצב שיווי המשקל (היציב) של אטום המימן, האנרגיה הקינטית של האלקטרון הופכת,

זהו מאמר ספקולטיבי הדן בצורה היולית בשאלה שבועדי אינה מוגדרת היטב. אף על פי כן - הוא מרתק. "מעניין", אומר Squires, זה עולם שיש בו משהו כמו כימיה - העושר של מבנים אטומיים ומוליקולריים הוא זה המאפשר מיגוון רחב של צורות חומר. מסקנתו היא שיש יסוד טוב להנחה שמתכנן העולם לא היה יכול לעשותו בצורה פשוטה יותר. "התבשיל" מכיל את המינימום ההכרחי של מרכיבים בסיסיים.

כאשר אני בא ללמד קורס בפיסיקה אוכל בוודאי לתרום לעניין בכך שאצביע על חידות כגון **חידת "מרכיבי היסוד"**: הקבועים העולמיים והצורות המיוחדות של החוקים. המוטיבציה ללימוד הנושא תגדל כאשר יתברר שכל אלו מותאמים באופן נפלא ומדויק לקיומנו כאנשים חיים. בהמשך אנסה להציג בקיצור את הקוו הסיפורי שאותו אני מציע לאמץ בקורס הפיסיקה: **חוקי הפיסיקה - החל מניוטון וכלה ברדיואקטיביות - הם בדיוק כאלו המאפשרים עולם שאנו מסוגלים להיווצר בו ולחיות בתוכו.**

המסלול שאני מציע ללכת בו שונה במידה ניכרת מהמסלול הכבוש והמסורתי. להלן יינתנו ציוני-דרך קצרים בלבד כפי שמסגרת מאמר כגון זה מחייבת.

### ציוני דרך לקורס בפיסיקה

א. מכניקה ניוטונית קלאסית (מרחב, זמן, כוח, מסה, אנרגיה). חוקי ניוטון (והחוק השלישי של קפלר) ההופכים את המסה לגדל שניתן לבטאו ביחידות של אורך וזמן:

$$M = \frac{4\pi^2 R^3}{G T^2}$$

באשר R הוא הרדיוס ו-T זמן המחזור של לווין המקיף את המסה M במסלול מעגלי. G הוא קבוע הכבידה. נוסחה זו, המבטאת מסה ביחידות אורך וזמן, אנלוגית לנוסחאות מוכרות היטב כגון  $A = bR^2$  הנוסחה המבטאת שטח A ביחידות אורך. הקבוע b הנדרש תלוי כמובן בצורת השטח וביחידות השטח והאורך הרצויות.

ב. מהירות האור כגודל אוניברסלי והמשמעות הנובעות מכך: האורך והזמן אקוויולנטיים; מסה היא אנרגיה.

ג. אסטרופיסיקה אלמנטרית. שיטות למדידת מרחקים של כוכבי-לכת, כוכבים וגלקסיות. ספירת הכוכבים. מסתם של כוכבי הלכת והשמש. החוק של האבל (Hubble). המסקנה לגבי הנחת "המפץ הגדול" (Big Bang). המשוואה הנותנת את הצפיפות הקריטית של היקום

כזה. בכוכב קר אסור שאנרגיית המשיכה הגרביטציונית הפועלת על אטום בודד תעלה על המשיכה החשמלית בתוך אטום שאם לא כן - יתמוטט האטום. המשוואה המתקבלת היא:

$$(11) \quad GM_* \frac{M_a}{R_*} \lesssim \frac{e^2}{R_a}$$

באשר  $R_*$  הוא רדיוס הכוכב ו  $M_*$  - מסתו.

$$(12) \quad M_* = N_* M_a \quad \text{נגדיר:}$$

$$(13) \quad R_* \approx N_*^{1/3} R_a \quad \text{ולכן (ראה נוסחה (8)):$$

$$(14) \quad M_* \lesssim \left( \frac{e^2}{GM_a^2} \right)^{3/2} M_a \quad \text{ומכאן:}$$

$$(15) \quad R_* \lesssim \left( \frac{e^2}{GM_a^2} \right)^{1/2} R_a$$

גבולות אלו מתאימים למסתו ולגודלו של כוכב הלכת צדק.

הדרישה לכוכב חלק וכדורי נותנת גבול תחתון לגודלו. נדרוש שהרים גבוהים יקרסו, מפני שכובדם יגרום להתכה של יסודותיהם, ושגובהם יהיה קטן לעומת רדיוס הכוכב.

כפי שצינינו, אנרגיה מסדר גודל של  $\frac{1}{100} E_a$  דייה לפרק מוליקולה. אם גובהו,  $H$ , של הר יעלה עד כדי כך שהאנרגייה הגרביטציונית הפועלת על מוליקולה בתחתיתו תעלה על גודל זה, יותך בסיס ההר והוא ישקע תחתיו, לכן חייב להתקיים:

$$HAM_a g \lesssim 10^{-2} \frac{e^2}{R_a} \quad ; \quad g = \frac{GM_*}{R_*^2}$$

$AM_a$  היא המסה של מוליקולה טיפוסית. כאשר גובה ההרים הוא מסדר גדל של רדיוס הכוכב  $R_*$  נפסיק להתייחס לגוף זה כאל כוכב.

חישוב אלמנטרי נותן (בהסתמך על נוסחות (12)-(13) ובהנחה  $A \sim 60$ ):

$$\frac{H}{R_*} \lesssim 10^{-4} \left( \frac{e^2}{GM_a^2} \right) N_*^{-2/3} < 1$$

וכך את הנוסחות (ראה גם מקור (5) סעיף 2.3):

$$(16) \quad M_* > 10^{-6} \left( \frac{e^2}{GM_a^2} \right)^{3/2} M_a$$

למעשה, (כתוצאה מן העיקרון הקוואנטי (6)), לאנרגייה פוטנציאלית של דחייה. האנרגיה כולה היא איפוא צירוף של שני איברים (נוסחה (7)) שהראשון שבהם הוא הדחייה הזאת, והשני הוא המשיכה האלקטרוסטטית:

$$(7) \quad \frac{\hbar^2}{2mR^2} - \frac{e^2}{R} = E$$

כאן  $m$  הוא מסת האלקטרון. חישוב המינימום (שהוא המצב היציב) של האנרגיה נותן את  $R_a$  וכן את אנרגיית הקשר  $E_a$  של האטום.

$\rho$ , הצפיפות המאקרוסקופית המוכרת של חומר ארצי מצוי היא מסקנה מיידית מערכי יחידת המסה האטומית  $M_a$  והרדיוס האטומי  $R_a$ :

$$(8) \quad \rho \approx \rho_a \approx \frac{M_a}{R_a^3}$$

ה. הקשר בין המבנה האטומי של החומר לתכונותיו המאקרוסקופיות. מספר אבוגדרו,  $N_a$ , המקשר בין הקילוגרם ל-  $M_a$ , בין המטר ל-  $R_a$  ובין כמויות "מסחריות" של אנרגיה ל-  $E_a$ ; לדוגמא:

$$(9) \quad 1\text{kg} = 10^3 N_a M_a$$

כמות החום המופקת מ  $1 \text{ kg}$  של חומר דלק היא:

$$(10) \quad Q = 10^3 \frac{N_a}{A} \varepsilon$$

באשר  $AM_a$  הוא המסה של אטום בודד ו-  $\varepsilon$  הוא האנרגיה המופקת ממנו בריאקציה. במקרה של פחם  $A = 12$  ו-  $\varepsilon \approx \frac{1}{3} E_a$ , והתוצאה היא:  $Q = 4 \cdot 10^7 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$ .

הטמפרטורה כמושג אטומי (אנרגיה קינטית ממוצעת של פרודה).

הטמפרטורה על כדור הארץ,  $T^\circ$ , מותאמת בדיוק לתהליכים כימיים חיוניים, אך נמוכה מכדי לפרק את החומרים הדרושים לחיינו:

$$kT^\circ \sim \frac{1}{500} E_a$$

( $k$  הוא הקבוע של בולצמן).

בעוד אנרגיות פירוק מוליקולריות הן מסדר גודל של  $\frac{1}{100} E_a$ .

1. כוכב לכת קר (מהסוג הדרוש לקיומו). איזון עדין ביותר בין הכוח החשמלי והלחץ הקוואנטי המייצבים את האטום מחד, לבין הכוח הגרביטציוני, והלחץ שהוא מפעיל על כל אטום מאידך, יקבע את גודלו של כוכב

גודל זה מורכב מן הקבועים היסודיים ביותר של הפיסיקה, וערכו הוא קילוגרם אחד או שניים. על כוכב לכת קטן יותר יוכל להתקיים גם בעל מסה גדולה יותר. (היחס הוא כמו היחס ההפוך בין שורשי מסות הכוכבים. לדוגמא: כדור הארץ הוא בעל מסה נמוכה פי 320 מזו של צדק, ועל כן יוכל לחיות עליו אדם בעל מסה גדולה פי 18).

ממדי הכדור שאנו חיים עליו וממדינו שלנו נקבעים בקירוב ראוי להשתאות מהיחסים העדינים שבין הקבועים האוניברסליים של הפיסיקה. וכאן מתעוררת שאלה מעניינת: מהי המסה המינימלית עבור יצור אינטליגנטי כמו אדם? כדי לענות על כך נידרש בוודאי לביולוגים. אף על פי כן, גם פיסיקאי יודע שמוח של בעל אינטליגנציה גבוהה יחסית משקלו כק"ג. אם נוסיף לו את המערכות ההכרחיות הדרושות לקיומו: לב, ריאות ומערכות לעיבוד מזון וניקוי דם נגיע בוודאי לסדר גודל של 10 ק"ג. החישובים הפיסיקליים הטהורים נותנים תוצאות שמתאימות לתנאי היווצרותו וקיומו של האדם.

ח. הכוח הגרעיני החזק. לכוח זה שני תפקידים מרכזיים בהיווצרותו וקיומו של האדם. קודם כל, כוח זה מספק את הדבק הדרוש לייצורם של אטומים מעניינים וחיוניים מעבר לאטום המימן. היחס בין חוזק הכוח הזה לחוזק הכוח החשמלי ( $e^2$ ) מכוון בדיוק מפתיע לייצור החומרים הדרושים. לו היה הכוח החשמלי חזק קצת יותר, לא היו נוצרים רוב האטומים. מאידך, לו היה הכוח הגרעיני חזק יותר, היו נוצרים מצבים קשורים של זוגות פרוטונים ולא היה נותר מימן (ומים) לקיומנו.

שנית, הכוח הגרעיני משמש להמרת האנרגיה הגרביטציונית של השמש (וכוכבים חמים בכלל) לאנרגיית קרינה (אור וחום) וכך למקור האנרגיה של קיומנו. האנרגיה המופקת במיזוג גרעיני היא מסדר גודל של אלפיות מכלל המסה המשתתפת בתהליך.

ט. חוקי הקרינה: ויין וסטפן בולצמן ומשמעותם מבחינת הקשר בין האנרגיה של פוטונים והספק פליטתם לבין הטמפרטורה.

י. השמש. יחסי הכוחות, כבידה לעומת הכוח הגרעיני החזק ולחצי הקרינה בטמפרטורות גבוהות מאפשרים חישוב גדלה של השמש (וכל כוכב חם מאריך ימים):

$$(21) \quad M_{\odot} \approx \left( \frac{hc}{GM_a^2} \right)^{3/2} M_a \sim 10^{30} \text{ kg}$$

$M_{\odot}$  מסמל את מסת השמש

$$(17) \quad R_* > 10^{-2} \left( \frac{e^2}{GM_a^2} \right)^{1/2} R_a$$

כדור הארץ הוא במקום טוב באמצע:

$$(18) \quad M_{\oplus} \sim 10^{-3} \left( \frac{e^2}{GM_a^2} \right)^{3/2} M_a$$

$$(19) \quad R_{\oplus} \sim 10^{-1} \left( \frac{e^2}{GM_a^2} \right)^{1/2} R_a$$

$M_{\oplus}$  - המסה של כדור הארץ,  $R_{\oplus}$  - רדיוס כדור הארץ. וכאן המקום להרבה תרגילים מעניינים ורלבנטיים לקיומנו. לדוגמא: הראה שכדור הקטן מכדור הארץ באותה טמפרטורה לא היה מסוגל להחזיק אטמוספירה עתירת חמצן.

ז. האדם. האם חוקי הפיסיקה הבסיסיים מכתיבים את גדלו של האדם? התשובה - חיובית! גדלנו מוגבל על ידי התנאי שעלינו לשרוד ולהתקיים על כוכב הלכת שלנו. לו גדלנו יותר מדי, היינו נשברים בכל נפילה או נקרעים תחת כובד משקלנו. יש לאכזר שהכוחות הקושרים את גופנו הם חשמליים, ואילו הכוח המתנכל לכוחות אלו הוא כוח הגרביטציה.

הכוחות החשמליים המחזיקים את גופנו מתכונתיים לסדר הגודל של שטח חתך בגופנו. הכוח הגרביטציוני הפועל על גופנו מתכונתי לגובהנו ומסתנו. נכתוב עבור מסת האשה  $M_w$ , ועבור גובהה  $h_w$  ועבור שטח חתך מגופה  $S_w$ .

נגדיר:  $M_w = N_w M_a$

ולכן:  $h_w = N_w^{1/3} R_a$  ;  $S_w = N_w^{2/3} R_a^2$

ברור אז שחייב להתקיים:  $h_w M_w g \lesssim \frac{e^2}{R_a} N_w^{2/3}$

$$g = G \frac{M_*}{R_*^2}$$

$M_*$ ,  $R_*$  מתייחסים לכוכב הלכת שעליו חיה האשה. ומכאן (נוסחות (14), (15) עבור כוכב גדול) אנו מקבלים את התנאי:

$$(20) \quad M_w \lesssim \left( \frac{e^2}{GM_a^2} \right)^{3/4} M_a$$

## נספח: הקבועים המופיעים במאמר זה וערכיהם

$G = 6.7 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2}$	קבוע הכבידה:
$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	מהירות האור:
$T \approx 10^{18} \text{ s}$	גיל היקום:
$H = \frac{1}{T}$	הקבוע של האבל:
$M \approx 10^{53} \text{ kg}$	מסת היקום:
$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}$	הצפיפות הקריטית:
$\hbar = 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$	הקבוע של פלאנק:
$e^2 = 2.3 \cdot 10^{-28} \text{ J}\cdot\text{m}$	קבוע הכוח החשמלי:
$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}$	קבוע המבנה הדק:
$M_a = 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	יחידת מסה אטומית:
$G \frac{M_a^2}{\hbar c} \sim 10^{-38}$	קבוע הכבידה האטומית:
$m_e = 9 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$	מסת האלקטרון:
$R_a = \frac{\hbar^2}{m_e e^2} \approx 5 \cdot 10^{-11} \text{ m}$	רדיוס אטומי:
$E_a = \frac{e^2}{2R_a} = m_e \frac{e^4}{2\hbar^2} = 2.2 \cdot 10^{-18} \text{ J}$	אנרגיה אטומית:
$N_a = 6 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	מספר אבוגדרו:
$k \approx 1.4 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$	הקבוע של בולצמן:

מראי מקום וחומר לקריאה נוספת:

1. R.H. Dicke, Nature 192, 440 (1961).
2. P.A.M. Dirac, Nature 192, 441. (1961).
3. B.J. Carr and M.J. Rees, Nature 278, 605 (1978).
4. E.J. Squires, European J. Phys. 2, 55 (1981).
5. P.C.W. Davies, The Accidental Universe (Cambridge U. Press, 1982).
6. The Constants of Physics, Phil. Trans. R. Soc. Lond.A 310, 209-363 (1983).
7. J.D. Barrow and F.J. Tipler, The Anthropic Cosmological Principle (Oxford U. Press, 1986).
8. ויסקופף, ו.פ., על אטומים, הרים וכוכבים: עיונים בפיסיקה איכותית, תהודה 6, (1) עמי 3-11, (2), עמי 9-20, 1977.
9. גלר צבי, פרקים באסטרופיסיקה, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, 1991.

תהודה

(ראה מקור (5) סעיף 2.3)

בכוכבים קטנים מזה לא תחל הבעירה הגרעינית, וגדולים - יתפוצצו.

איכות קרינת השמש (אורכי גל, והספק) מותאמת לקליטה יעילה בצומח ובאדם. חישוב פשוט המבוסס על האנרגיה הנקלטת מן השמש על כדור הארץ נותן לנו את הספק פליטת האנרגיה מן השמש. התוצאה כ-  $10^{26}$  וואט. אם נניח שבמשך כל חייה תפלוט השמש כאלפית אחת ממסתה נגיע ל-  $10^{44}$  גיאול. המסקנה - אורך חייה של השמש מתקרב ל-  $10^{18}$  שניות, שהוא הגיל המשוער של היקום.

ניתן כמובן לחשב את גילו של כוכב משיקולים פיסיקליים יסודיים המבוססים על צפיפות הקרינה במרכזו והזמן הדרוש לזו לצאת. החישוב הזה הנו מסובך יחסית, אף כי ניתן בהחלט ללמוד בקבוצה מתקדמת של תלמידי תיכון. התוצאה (בקירוב) ניתנה במשוואה (4) לעיל. תוצאה זו, המתאימה, כאמור, לתצפיות, היתה הבסיס לשיקוליו האנתרופיים של דיקי.

יא. הכוח הגרעיני החלש. לכוח זה, האחראי להתפרקויות רדיואקטיביות מסוג  $\beta$ , תפקיד חשוב ביותר. מקורה העיקרי של אנרגיית השמש הוא "הבעירה" הגרעינית של המימן. תחילתו של תהליך זה במפגש בין שני פרוטונים (גרעיני מימן) בתנאי הצפיפות והטמפרטורה השוררים במרכזה של השמש והיווצרות גרעין מימן כבד (דוטריום). תהליך זה מתקבל באמצעות הכוח הגרעיני החלש, ולכן סיכווי קטנים ביותר. כך הופך כוח זה לווסת הדואג לכך שהבעירה הגרעינית שבשמש תהיה איטית ותספק אנרגיה בקצב דומה לקצב זרימתה של האנרגיה אל פני השמש ומפניה - אל רחבי היקום, וכדור הארץ בכלל. התיאום בין הספק קרינת האנרגיה מפני השמש לבין הספק ייצורה במרכז איננו כלל מובן מאליו. לולא תיאום נפלא זה היתה השמש מתאכלת תוך זמן קצר בהרבה מגילה הנוכחי, ולא היו נוצרים חיים.

## סיכום

הצגנו בקווים כלליים מסלול לימודים שבו מובלט הקשר בין חוקי הפיסיקה וקבועיה לבין קיומנו. אין שום הסבר בסיסי לקבועים או לחוקים. הם התגלו בתצפיות ועובדת התאמתם לצרכינו אינה הסבר. אולם היא הופכת אותם לחשובים בעינינו ואת הפיסיקה כולה לנושא מרתק גם מנקודת מבט אנושית.