

אסטרופיזיקה וקוסמולוגיה 2012/3 – תרגיל 6

1. א. מנגנון ייצור האנרגיה הדומיננטי בשמש הוא ה PP1 chain. תהליך זה, הופך 4 פרוטונים (שקיימים שם בשל המימן המיומן) לגרעין הליום 4 (חלקיק אלפא). התהליך עובר דרך השלבים הבאים:
 - היתוך פרוטון-פרוטון: ${}^1\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu_e + \gamma$
 - היתוך פרוטון-דויטריום: ${}^1\text{H} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$
 - היתוך הליום 3 – הליום 3: ${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^1\text{H} + {}^1\text{H}$

המסות של מימן, דויטריום, הליום 3 והליום 4 הן בהתאמה: $m({}^1\text{H}) = 1.008\text{amu}$, $m({}^2\text{H}) = 2.014\text{amu}$, $m({}^3\text{He}) = 3.016\text{amu}$, $m({}^4\text{He}) = 4.003\text{amu}$ | $(\text{amu} = 1.66 \cdot 10^{-24}\text{gram})$. העריכו את כמות האנרגיה המשתחררת (בפרוטונים וניטרונים) בתהליך זה. הביעו את תשובתכם ביחידות של MeV.
2. על מנת ליצור בעירה גרעינית בכוכבים, יש צורך ששני גרעינים טעונים חיובית יתנגשו זה בזה. ניתן לתאר את הפוטנציאל האפקטיבי של המסה המצומצמת μ בין שני גרעינים: z_1, z_2 כפוטנציאל קולומבי דוחה: $V(r) = \frac{z_1 z_2 e^2}{r}$ עבור $r > r_F \equiv 10^{-13}\text{cm}$. עבור $r < r_F$ הפוטנציאל ניתן לקירוב כפוטנציאל מושך קבוע: $V = -30\text{MeV}$ (זהו האזור של הכוח החזק).
 - א. העריכו את הטמפרטורה הדרושה (קלאסית) על מנת שחלקיק ממוצע יוכל להתגבר על המחסום הקולומבי ולבצע ראקציה עם הגרעין השני. השוו את התוצאה לטמפרטורה האמיתית במרכז השמש. הניחו שהגרעינים מפולגים על פי התפלגות בולצמן והעריכו את שבר החלקיקים שיכולים לבצע התנגשות כזו בשמש.
 - ב. בפועל, גם חלקיקים פחות אנרגטיים יכולים לבצע ראקציות, הודות לעקרון אי הוודאות של הייזנברג. בשל אי הוודאות מקום-תנע, חלקיק יכול למנהר דרך מחסום פוטנציאל ברוחב x אם התנע שלו מקיים: $p \geq \frac{\hbar}{x}$. מצאו את הטמפרטורה הדרושה על מנת שלחלקיק ממוצע תהיה מספיק אנרגיה להגיע עד כדי $x(p)$ ממרכז הכוח.
3. בשיעור מצאתם את קצב הריאקציות הגרעיניות r_{ax} כפונקציה של הטמפרטורה. חשבו מספרית את $\frac{d \ln r_{ax}}{d \ln T}$ בשמש, עבור הריאקציות P-P ועבור He3-He3.
4. רוב הניטרונים המגיעים לכדור הארץ, נפלטים מריאקציות גרעיניות בשמש. התבוננו בשלבי תהליך ה P-P המפורטים בשאלה 1 וענו על הסעיפים הבאים.
 - א. מהו מטען הניטרינו?
 - ב. בהנתן שטף האנרגיה (בפרוטונים) המגיע לכדור הארץ מהשמש, $F_{\odot} = 1.37 \cdot 10^6 \frac{\text{erg}}{\text{sec cm}^2}$, ובהנחה שכל הפרוטונים נוצרו בתהליך ה P-P, העריכו את מס' הניטרינים שנוצרים בשמש בכל שנייה.
 - ג. העריכו את מס' הניטרינים שעוברים דרך כף ידכם בכל שנייה.
 - ד. הסבירו (ללא חישוב) כיצד תשתנה תוצאת הסעיף הקודם בשעות הלילה?
5. ניתן לקרב את שטח החתך לאינטראקציה של ניטרינים באנרגיות של $E \sim \text{MeV}$ עם פרוטונים במולקולות מים ע"י: $\sigma_{\nu e-p} \approx 10^{-45} \text{cm}^2/\text{molecule}$. העריכו את מספר האינטראקציות של ניטרינים מהשמש עם הנוקליאונים בגופו של אדם שיתרחשו במהלך חייו. לצורך החישוב הניחו כי האדם עשוי כולו מים והשתמשו בכך שמולקולת מים מורכבת מ:עשרה פרוטונים, שמונה ניוטרונים ועשרה אלקטרונים.
6. מסת השמש היא $M_{\odot} = 2 \cdot 10^{33}\text{gram}$. כתוצאה מחלוקת היסודות במפץ הגדול, כ-75% מהמסה התחילית של השמש היתה מימן ובקירוב טוב 25% הנותרים הם הליום. רק 13% מהמסה של השמש נמצאת בליבה ומשתתפת בתהליך הבעירה הגרעינית.
 - א. חשבו את סך המסה של מימן שהשמש תבער במהלך חייה.
 - ב. השתמשו בהנחה (המקורבת) כי ההארה של השמש קבועה בשלב בעירת המימן $(L_{\odot} = 3.8 \cdot 10^{33} \frac{\text{erg}}{\text{sec}})$ והעריכו את הזמן שיקח לשמש לסיים את שלב שריפת המימן.