

אסטרונומיה כללית - תרגול 6

מתרגל: עידו אופיר

תוכן עניינים

2.....	1. קוסמולוגיה.....
2.....	1.1 פרדוקס אולברס.....
3.....	1.2 חוק האבל.....
4.....	1.3 איזוטרופיות היקום.....
5.....	2. תרגילים.....
5.....	2.1 תרגיל 1.....
5.....	2.2 תרגיל 2.....
5.....	2.3 תרגיל 3.....
5.....	2.4 תרגיל 4.....

1. קוסמולוגיה

1.1 פרדוקס אולברס

אנחנו ממשיכים למצוא עוד ועוד אובייקטים ומבנים רחוקים מאוד ועולה השאלה האם ליקום יש סוף? כיוון שמהירות האור היא סופית, אובייקטים רחוקים נראים כשהם היו צעירים יותר. לכן, נרצה לשאול האם ליקום יש גיל (גבול מסוים) מעבר אליו אור אינו יכול להגיע אלינו? השאלות האלו קשורות לפרדוקס אולברס. פרדוקס אולברס מציע שאלה פרקטית יותר שניתן לשאול והיא מדוע השמים חשוכים?

בכדי להסביר מדוע שאלה זו היא פרקטית יותר נבצע מספר הנחות. נניח מרחב אוקלידי, ונניח כי היקום אינסופי בזמן ובמרחב. אזי, כל קו ראייה בשמיים אמור בסופו של דבר לפגוע בכוכב. נסמן ב- f_* את השטף מהפוטוספירה של כוכב. באמצעות הנוסחאות שלמדנו, השטף שמגיע אלנו מהכוכב יהיה:

$$(1) \quad f_{obs} = f_* \frac{r_*^2}{d^2} = f_* \frac{\Omega}{\pi}$$

מ - (1) נקבל שהשטף הכולל המתקבל הוא:

$$(2) \quad f_{tot} = 4f_*$$

הפתרון לפרדוקס אולברס הוא שלפחות אחת מההנחות שלנו שגויה. היקום חייב להיות סופי בזמן או במרחב.

נחשב כמה רחוק צריך להסתכל בכיוון רנדומלי בכדי להיפגש בכוכב. נשתמש בצפיפות של גלקסיות סטנדרטיות L_* שהיא $10^{-2} Mpc^{-3}$ $\phi(L_*) \sim 10^{-2} Mpc^{-3}$ ונניח שיש כ- 10^{10} כוכבים בגלקסיה כזו. צפיפות הכוכבים ביקום:

$$(3) \quad n_* \sim 10^8 Mpc^{-3} = \frac{10^8}{(3.1 \cdot 10^{24} cm)^3} \sim 10^{-66} cm^{-3}$$

חתך הפעולה של כוכב:

$$(4) \quad \sigma \sim \pi r_{\odot}^2 = \pi (7 \cdot 10^{10} cm)^2 \sim 10^{22} cm^2$$

המרחק - mfp עד שפוגעים בפני השטח של כוכב:

$$(5) \quad l_{mfp} = \frac{1}{n_* \sigma} \sim 10^{44} cm = 10^{26} ly$$

העובדה לכך שהשמיים חשוכים מצביע על כך שגודל היקום/גיל היקום: חייב להיות קטן מ- $10^{26} ly$:

$$(6) \quad l \ll 10^{26} \text{ ly}, \quad t_0 \ll \frac{l}{c} = 10^{26} \text{ yr}$$

כלומר, אור מפני השטח של כוכבים אלו עוד לא הגיע אלינו. המרחק מעבר אליו אור עוד לא הגיע נקרא אופק החלקיקים/אופק קוסמולוגי.

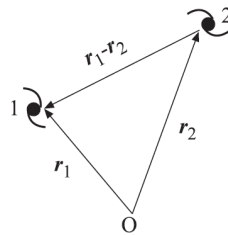
1.2. חוק האבל

המהירות בקו ראייה של כל גלקסיה יכולה להימדד באמצעות אפקט דופלר. בערך משנת 1920 אנו יודעים כי כאשר אנו מסתכלים על גלקסיות שהן רחוקות יותר מהגלקסיות הקרובות אלינו (אנדרומדה, וירגו וכו'), כולן מתרחקות מאיתנו. מהירות התרחקות הגלקסיות פרופורציונלית למרחק:

$$(7) \quad v = H_0 D$$

כאשר קבוע הפרופורציה $H_0 = 70 \frac{\text{km}}{\text{s}} \frac{1}{\text{Mpc}}$ נקרא קבוע האבל.

על מנת להבין מדוע צופה בכל מקום בגלקסיה יראה את אותו הדבר, נניח צופה הנמצא בנקודה O . בנוסף, נניח שתי גלקסיות עם מהירויות התרחקות $\vec{v}_1 = H_0 \vec{r}_1$ וגלקסיה שנייה $\vec{v}_2 = H_0 \vec{r}_2$.



איור 1: צופה הנמצא בנקודה O רואה שתי גלקסיות במרחקים \vec{r}_1, \vec{r}_2 .

צופה הנמצא בגלקסיה השנייה יראה אותנו מתרחקים במהירות \vec{v}_2 ויראה את גלקסיה \vec{v}_1 מתרחקת במהירות:

$$(8) \quad \vec{v}_{1,2} = \vec{v}_1 - \vec{v}_2 = H_0(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) = H_0 \vec{r}_{1,2}$$

מהקשר הזה נובע שהיקום תמיד מתפשט - כל הגלקסיות מתרחקות זו מזו. בנוסף, אין מרכז ליקום אלה הוא מתנהג בכל מקום בצורה דומה ואותה התפשטות תראה מכל מקום. אם היקום כל הזמן מתפשט אזי בעבר בהכרח היקום היה צפוף יותר, כלומר היה זמן בעבר בו המרחקים בין הגלקסיות היו אפסיים ולכן, ליקום יש גיל סופי. ניתן למצוא את גילו של היקום מקבוע האבל:

$$(9) \quad t_0 = \frac{1}{H_0} = \frac{1}{70 \frac{\text{km}}{\text{s}} \frac{1}{\text{Mpc}}} = 3.1 \cdot \frac{10^{24} \text{ cm}}{70 \cdot 10^5 \frac{\text{cm}}{\text{s}}} = 4.4 \cdot 10^{17} \text{ s} \approx 14 \text{ Gyr}$$

1.3. איזוטרופיות היקום

אחת הנחות היסוד בקוסמולוגיה היא שהיקום הוא איזוטרופי בסקאלות גדולות - נראה את אותו הדבר מכל הכיוונים. זה נראה בבירור בהתפלגות הגלקסיות ומקורות נוספים כגון סופרנובות או התפרצויות של קרני גמא וקוואזרים בכל הכיוונים אליהם מסתכלים.

2. תרגילים

2.1 תרגיל 1

הניחו כי קיים יחס קבוע בין המסה והנוהר בדסקות של גלקסיות ספירליות. בנוסף הניחו כי לדסקות בהירות קבועה על פני השטח (surface brightness). השתמשו ביחס סקאלות של המסה בתוך דיסקה ברדיוס r כאשר המהירות הסיבובית של המסה בתוך רדיוס זה היא v_c (התעלמו מחומר אפל), על מנת להסביר את הקשר $L \propto v_c^4$ - זהו יחס Tully - Fisher.

2.2 תרגיל 2

נמדדו מהירויות רדיאליות עבור חמש גלקסיות אשר יוצרות יחד צביר:

$$(10) \quad V = \{9700, 8600, 8200, 8500, 10000\} \frac{km}{s}$$

- א. מהו מרחק הצביר אם נתון פרמטר האבל $H_0 = 70 \frac{km}{s} \frac{1}{Mpc}$?
ב. העריכו עד סדר גודל את מסת הצביר אם נתון שכלל הגלקסיות במרחק זוויתי של $\theta = 0.5^\circ$ ממרכז הצביר.

2.3 תרגיל 3

באפקט Sunyaev - Zeldovich פוטונים המגיעים מקרינת CMB חווים פיזור על ידי אלקטרונים חמים בגז הצביר לאורך קו הראייה. הניחו ש-0.001 מהפוטונים חווים פיזור, ומסת הצביר היא $2 \cdot 10^{14} M_\odot$ כאשר 15% ממנה הוא גז חם (מימן מיונן).

- א. השתמשו בחדת הפעולה של פיזור תומסון σ_T , והניחו שהצביר ספירי עם צפיפות אחידה על מנת למצוא את קוטר הצביר.
ב. אם הגודל הזוויתי של קוטר הצביר הוא 1° , מהו המרחק של הצביר?
ג. אם מהירות ההתרחקות של הצביר היא $v = 8000 \frac{km}{s}$, מהו קבוע האבל (ביחידות של $\frac{km}{s} \frac{1}{Mpc}$)?

2.4 תרגיל 4

הראו שה- proper distance כיום אל הנקודה הרחוקה ביותר שאנחנו יכול לראות (הנקראת גם particle horizon), ביקום שטוח עם $k = 0$ ונשלט חומר היא $r_h R_0 = 3ct_0$ כאשר:

- r_h - קואורדינטת comoving רדיאלית של ה- particle horizon
- R_0 - Scale factor של היום
- t_0 - גיל היקום

מדוע התשובה שמקבלים היא שונה מהתוצאה המצופה ct_0 ?