



אולימפיאדה ותחרויות

האולימפיאדה השביעית באסטרונומיה וחקר החלל

על-שם פרופ' דרור שדה ז"ל

מאיר מידב, בית הספר לחינוך, אוניברסיטת תל-אביב

אוריאל גבעון וחגי נצר, בית הספר לפיסיקה ואסטרונומיה, אוניברסיטת תל-אביב

מבוא

בחודש אוקטובר 1993 הלך לעולמו פרופ' דרור שדה, שהיה פיסיקאי ואסטרונום בעל שם עולמי. החלטנו לערוך אולימפיאדה שנתית לזכרו. האולימפיאדה הראשונה נערכה בשנת 1994 והשלב הסופי שלה התקיים ב-4 בדצמבר 1994 (ראה תהודה, (17(1).

מאז נערכו שש אולימפיאדות נוספות. האחרונה ביניהן, האולימפיאדה השביעית, החלה בשנת 2000 ונסתיימה בשנת 2001 בחידון הגמר.

לאולימפיאדה השביעית נרשמו כ-400 תלמידים מ-65 בתי-ספר שונים ברחבי הארץ (לעומת 73 תלמידים שנרשמו לאולימפיאדה הראשונה). משתתפים אלה עברו מבחן מיון ראשון בבית ספרם ומתוכם עלו 89 משתתפים לשלב השני. חמישה תלמידים שעברו את השלב הזה בציונים הגבוהים ביותר הגיעו לשלב השלישי, חידון הגמר, שנערך באוניברסיטת תל-אביב ב-22 במרץ 2001.

בחידון הגמר ברחך נשיא אוניברסיטת תל-אביב, פרופ' איתמר רבינוביץ, שגם תרם את הפרס הראשון, שנת לימודים חיים באוניברסיטה; רקטור אוניברסיטת תל-אביב, פרופ' נילי כהן, אישרה מימון חלקי להוצאות האולימפיאדה. ואלה חמשת התלמידים שהשתתפו בחידון הגמר:

- ברק ברקוביץ** - תיכון ליד האוניברסיטה בירושלים, כיתה י"ז.
- ליאל ספיר** - תיכון ליד האוניברסיטה בירושלים, כיתה י"א.
- גלב פולבוי** - מקיף אורט מגדים בכרמיאל, כיתה י"ב.
- יורי פונר** - מקיף מבואות עירון, כיתה י"ב.
- גל שולקינד** - תיכון קלעי גבעתיים, כיתה י"א.

השופטים היו:

פרופ' עמיאל שטרנברג, ביה"ס לפיסיקה ואסטרונומיה, אוניברסיטת תל-אביב

פרופ' ליאון הופמן, אורח מ-NASA

פרופ' חגי נצר, יו"ר חבר השופטים, ביה"ס לפיסיקה

ואסטרונומיה, ראש המכון לאסטרונומיה, אוניברסיטת תל-אביב, שהיה גם שותף בהכנת אולימפיאדה זו וקודמותיה. בשלושת המקומות הראשונים, בחידון הגמר, זכו התלמידים:

גלב פולבוי - מקום ראשון

גל שולקינד - מקום שני

ליאל ספיר - מקום שלישי

שלושת הזוכים במקומות הראשונים זכו בפרסים כספיים: פרס ראשון - שנת לימודים חיים באוניברסיטה, מטעם נשיא אוניברסיטת תל-אביב.

פרס שני - 3,000 ₪ תרומתו של צבי גלר, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, רחובות.

פרס שלישי - 2,500 ₪ תרומה של החוג להוראת המדעים, ביה"ס לחינוך, אוניברסיטת תל-אביב.

פרס נוסף - פרס מיוחד מטעם חברת "סיליקון גרפיקס" ניתן לכל חמשת המשתתפים - מילגות לימודים ביחידה לנוער שוחר מדע.

פרס חשוב במיוחד ניתן על-ידי מר דוד סלע, מפמ"ר לפיסיקה. הוא אישר לכל חמשת המשתתפים ציון 100 ביחידת בחירה במסגרת בחינות הבגרות בפיסיקה בהיקף 5 יחידות.

בחידון הגמר היו שלושה שלבים. להלן השאלות שהופיעו בשלב א' בצירוף תשובות מתאימות. שלבים ב' ו-ג' יופיעו במלואם בצירוף תשובות מפורטות בעיתון הבא.

שלב א'

בשלב זה היו שלושה סיבובים, כאשר כל משתתף נשאל שאלה אחת בכל סיבוב; סך הכל 15 שאלות (רב-בחירתיות). אם ענה התלמיד נכון - נשאל שאלת המשך נוספת הקשורה לנושא.

להלן השאלות והתשובות לשלב א'. התשובה הנכונה מסומנת בעיגול.

משותפים עם חללית המחקר Galileo. שיא המבצע, המתוכנן לסוף שנת 2004, יהיה מיפוי של ירחו הגדול ביותר של שבתאי והטלת גשושית (Huygens) על פניו לצורך מחקר על האטמוספירה שלו. טיטאן הינו הירח היחיד במערכת השמש שהוא בעל אטמוספירה משמעותית, המכסה את פניו. אטמוספירה זאת סמיכה יותר מזו של כדור הארץ.



תרשים 2: שיחרור הגשושית על הירח טיטאן, הצפוי להתרחש בשנת 2004.

נתונים נוספים על החללית ניתן למצוא באתר האינטרנט <http://www.jpl.nasa.gov/cassini/>.

3. משערים כי לכוכב הלכת צדק היה תפקיד חשוב בהתפתחות החיים התבוניים על-פני כדור הארץ. מהו?
 - א. השפעת השדה המגנטי החזק שלו הייתה אחד המרכיבים ביצירת המולקולות האורגניות הראשונות על-פני כדור הארץ.
 - ב. צדק מחזיר חלק גדול מרוח השמש, שמרכיביה הכרחיים ליצירת חיים.
 - ג. שאריות הגז והאבק שלו בעת יצירתו הכילו חומרים אורגניים שהגיעו לכדור הארץ.
 - ד. הגנה על סביבת מערכת השמש הפנימית מפני שביטים.

המשך: תן דוגמה לאירוע כזה שקרה לאחרונה. **תשובה:** מקורם של מרבית השביטים הוא בענן אורט (Oort) המקיף את מערכת השמש. גופים המצויים בענן אורט נמשכים מדי פעם לכיוון פנים מערכת השמש עקב הפרעות כבידתיות. משערים כי שביטים אלה אשר פגעו בכדור הארץ בעבר גרמו להכחדת החיים על פניו בתקופות מסוימות. כוח הכבידה החזק בו נמשכים עצמים אלה אל צדק, שמסתו גדולה פי 300 ממסת

1. מי מבין החלליות הבאות נמצאת במרחק הגדול ביותר מכדור הארץ כיום?
 - א. NEAR-Shoemaker.
 - ב. Voyager 2.
 - ג. Apollo 9.
 - ד. Cassini.

המשך: מה היה כוכב הלכת האחרון שפגשה החללית? **תשובה:** Voyager 2 שוגרה בשנת 1977, והיא היחידה מבין החלליות הללו שיצאה ממערכת השמש. החללית NEAR-Shoemaker מצויה כעת על האסטרואיד ארוס (Eros), המקיף את השמש במסלול אליפטי החותך את מסלולו של מאדים ומתקרב לעיתים לכדור-הארץ. החללית Apollo 9 חזרה לכדור הארץ בשנת 1969 לאחר שסיימה את משימתה. החללית Cassini מצויה בדרכה לכוכב הלכת שבתאי. בשנת 1989 ביצעה החללית Voyager 2 את מפגשה האחרון עם כוכב הלכת נפטון, ויצאה ממערכת השמש.



תרשים 1: החללית Voyager 2

2. מהו ייעודה העיקרי של חללית המחקר Cassini?
 - א. הטלת גשושית על פני טיטאן, ירחו של שבתאי.
 - ב. חקר מערכת הירחים של כוכב הלכת צדק.
 - ג. חקר שביטים.
 - ד. חקר חגורת האסטרואידים.

המשך: מה מייחד את טיטאן מבין כל הירחים במערכת השמש?

תשובה: החללית Cassini שוגרה בשנת 1997, כשמטרתה לחקור את כוכב-הלכת שבתאי ואת מערכת הירחים שלו. במהלך דרכה בשנה האחרונה התעכבה Cassini בסביבת כוכב הלכת צדק ומערכת הירחים שלו, וביצעה תמרונים

5. איזה ליקוי נראה על-פני שטח גדול יותר של כדור הארץ?
 א. ליקוי חמה מלא.
 ב. ליקוי חמה טבעתי.
 ג. ליקוי לבנה.

ד. תלוי במרחקו של הירח מכדור הארץ באותו הזמן.
המשך: מה ההבדל, מבחינת מיקומי כדור הארץ, השמש והירח, בין ליקוי חמה מלא וליקוי חמה טבעתי?

תשובה: ליקוי חמה מתרחש כאשר הירח מסתיר את השמש וצלו נופל על פני כדור הארץ. מכיוון שמכדור הארץ הגודל הזוויתי של הירח כמעט שווה לזה של השמש, ליקוי כזה אורך זמן קצר בלבד, והטווח הזוויתי לצפייה בו מכדור הארץ הוא צר מאוד. לעיתים "מחטיא" צלו של הירח את כדור הארץ, ואז לא נראה ליקוי החמה כלל. ליקוי חמה מלא נראה רק מרצועה צרה על פני כדור הארץ. בשעת ליקוי לבנה, נופל צלו של כדור הארץ על הירח. ליקוי זה נראה בו-זמנית מכל נקודה על מחצית כדור הארץ. מכיוון שצלו של כדור הארץ גדול מן הירח, ליקוי זה נמשך זמן ארוך דיו כדי שכדור הארץ יספיק להסתובב מעט, וכך למעשה ניתן לצפות בליקוי משטח הגדול ממחצית כדור הארץ. כל זה תלוי כמובן בתנאי הליקוי הספציפיים. מרחקו של הירח מכדור הארץ אינו קבוע. לכן, בשעת ליקוי חמה, כאשר הירח מרוחק יחסית מכדור הארץ, צלו אינו מכסה את כל השמש, וטבעת זוהרת בהיקף השמש נראית בבירור על רקע הירח הכהה. זהו ליקוי חמה טבעתי.

לצערנו לא קיבלנו אישור מהאופ"פ לפרסום התרשים

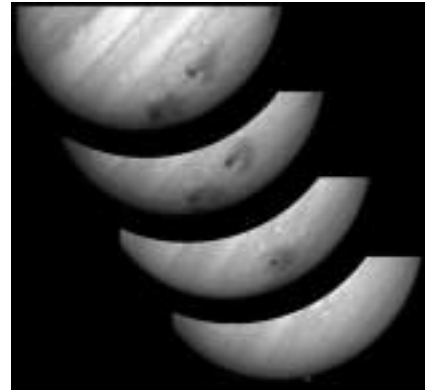
תרשים 4: ליקוי חמה

לצערנו לא קיבלנו אישור מהאופ"פ לפרסום התרשים

תרשים 5: ליקוי לבנה

6. אם שני כוכבים הם בעלי אותו גודל נצפה, אזי
 א. לשניהם יש טמפרטורה זהה.
 ב. הם חייבים להיות במרחק זהה מאתנו.
 ג. הרחוק מביניהם הוא בעל הבהירות הגדולה יותר.
 ד. יש להם גודל זוויתי זהה.

כדור הארץ, הוא המונע מרבים מהם להתקרב יותר אל כדור הארץ, וכך הוא מוגן יחסית מפגיעתם. התקופה הארוכה יחסית מאז פגיעת השביט המשוערת האחרונה, אפשרה לתרבות התבונית הנוכחית להתפתח על פני כדור הארץ. דוגמה לתפקידו זה של צדק אפשר למצוא באירוע שהתרחש ב-1994, כאשר השביט Shoemaker-Levy 9 התנגש בו.



תרשים 3: פגיעת השביט שומייקר-לוי 9 בצדק. הכתמים הכהים הם סימני הפגיעה (ראה כריכה קדמית)

4. אלו מבין הנתונים והחוקים הבאים דרושים כדי לחשב את מרחקו של גנימד מצדק?
 א. מרחקו של קליסטו מצדק, זמן המחזור שלו ושל גנימד סביב צדק, והחוק השלישי של קפלר.
 ב. מרחקו של כדור הארץ מן השמש, זמן המחזור של כדור הארץ ושל גנימד סביב השמש, והחוק השלישי של קפלר.
 ג. מסתו של צדק וחוק הכבידה העולמי של ניוטון.
 ד. מסתו של גנימד, החוק השלישי של קפלר, וחוק הכבידה העולמי של ניוטון.

המשך: מה מייחד את גנימד מכל הירחים במערכת השמש?

תשובה: החוק השלישי של קפלר, $T^2 = \frac{4\pi^2}{GM} a^3$, נותן את הקשר בין T , זמן המחזור של עצם הנע בשדה הכובד של עצם מרכזי בעל מסה M , ו- a , חצי הציר הראשי של האליפסה המתארת את מסלולו של העצם. ניתן להשתמש בחוק זה כדי להשוות בין נתוני המסלול של שני עצמים רק אם שניהם מקיפים את אותו עצם מרכזי. לכן, כדי לחשב את מרחקו של גנימד מצדק, יש להשוות את גנימד לירח אחר במערכת הירחים של צדק, ואי אפשר להשוותו לכדור הארץ (סעיף ב). ייחודו של גנימד הוא בכך שהוא הירח הגדול ביותר במערכת השמש.

חומר מן הענק האדום אל הננס הלבן. היות שלחומר זה יש תנע זוויתי, מעצם היותו חלק ממערכת מסתובבת, הוא נופל אל הננס הלבן במסלול לולייני, כפי שמתאר התרשים הבא:



תרשים 6: מעבר חומר מן הענק האדום אל הננס הלבן במערכת כוכב כפול

החומר שמקורו בענק האדום אינו מגיע אל פני הננס הלבן ברציפות. סביב הננס הלבן נוצרת דיסקת חומר הקרויה "דיסקת ספיחה". בדיסקה זאת מומרת אנרגיית הכבידה לחום וקרניה כתוצאה מחיכוך בין אזורים שונים בדיסקה. לאחר שהוא עובר לחלקיה הפנימיים של הדיסקה, נופל החומר על-פני הננס הלבן ומצטבר שם. החומר הזה שרובו מורכב ממימן, מתחמם בשל הטמפרטורה הגבוהה של פני השטח של הננס הלבן, ובשל הלחץ הנוצר כתוצאה מהצטברות החומר. דבר זה מוביל להצתת תהליכי מיזוג גרעיני, אך לא בליבת הכוכב, כפי שקורה באופן רגיל, אלא על-פני השטח שלו. כאשר מתרחשים תהליכים כאלה בליבת כוכב, אזי בשל הסימטריה הכדורית, מתקיים איזון בין כוח הכבידה לבין הלחצים התרמודינמיים. כאשר מתרחשים התהליכים על-פני השטח של הכוכב, לא מגיעים הכוחות לשיווי משקל, והדבר מתבטא בשחרור האנרגיה בצורת פיצוץ, שיכול להעיף גם חלק מדיסקת הספיחה. כך "נולד" כוכב חדש, שבהירותו גדלה פתאום אלפי מונים. כנראה שתהליך זה, שתואר בקצרה לעיל, יכול להתרחש מספר פעמים בחייו של כוכב, כאשר תהליך ספיחת החומר חוזר ונשנה.

8. אלו מן התצפיות הבאות מהוות עדות לקיומו של חומר בין-כוכבי?
 א. כוכבים רחוקים מואדמים.
 ב. הסחת דופלר גדולה בספקטרום של כוכבים רחוקים.
 ג. הכוכבים הבהירים ביותר הם הרחוקים ביותר מאתנו.
 ד. במשך הזמן, הכוכבים מאיטים את תנועתם עקב החיכוך.

המשך: מה מודדת בהירותו של כוכב?

תשובה: באסטרונומיה מקובל לסמן ב-L את בהירותו של כוכב - סך כל הקרינה שפולט הכוכב ביחידת זמן. נסמן ב-S את שטף הקרינה מן הכוכב, כלומר סך כל הקרינה המגיעה מן הכוכב ביחידת זמן ליחידת שטח. לכן ניתן לרשום

$$S = \frac{L}{4\pi r^2}, \text{ כאשר } r \text{ הוא מרחקו של הכוכב מאתנו. עוצמת}$$

האור שעינינו רואה בפועל, התלויה כמובן ברגישותה של העין, נקראת באסטרונומיה בשם "גודל נצפה" (magnitude), ומסומנת בדרך-כלל ב-m. הקשר בין הגדלים הנצפים של שני כוכבים ובין השטף מהם מוגדר כ- $m_2 - m_1 = 2.5 \log(S_1/S_2)$. כלומר, הגודל הינו יחידת מידה לוגריתמית לשטף הקרינה (הסבר על הסקאלה הלוגריתמית ניתן למצוא במאמר על האולימפיאדה השישית באסטרונומיה, "תהודה" (2), עמ' 50). אם שני כוכבים הם בעלי אותו גודל נצפה, זה משניהם שרוקן מאתנו יותר, הוא בעל הבהירות הגדולה יותר. כלומר:

$$\text{אם } m_2 = m_1, \text{ נקבל } S_2 = S_1 \text{ או } \frac{L_1}{r_1^2} = \frac{L_2}{r_2^2}$$

$$\text{כלומר: } \frac{L_1}{L_2} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2$$

7. נובה היא כוכב העובר ...

- א. שינוי בהירות עקב שינוי ברדיוסו.
 ב. התפוצצות על-פני השטח שלו.
 ג. התפוצצות כוללת.
 ד. התפוצצות בלתי נראית בליבה.

המשך: באיזה סוג של כוכבים מתרחשת נובה?

תשובה: נובה הינו שם שניתן לתופעה התצפיתית המרשימה שבה מוגברת בהירותו של כוכב משמעותית באופן פתאומי, ואחר-כך דועכת באיטיות. לעיתים מדובר בכוכב, אשר לפני "הופעתו" כנובה, עוצמת האור המתקבלת ממנו מצויה מתחת לסף הגילוי של מכשירי המדידה, והוא מופיע כך לפתע בשמים. כאשר קרו מקרים כאלה בעבר, חשבו הצופים כי מדובר בכוכב חדש, ולכן כינו את התופעה בשם "נובה" (Nova), כלומר "חדש" בלטינית. כיום משערים כי נובה מתרחשת כאשר במערכת כוכב כפול, אחד מבני הזוג הינו ננס לבן. כאשר הכוכב השני מתחיל את שלב הענק האדום שלו בשלהי חייו, תופחים ממדיו עד מאד ובגלל הרדיוס העצום, כוח הכובד בשכבותיו החיצוניות נעשה חלש מאוד. במצב זה יתכן כי תחת השפעת כוח הכובד של הננס הלבן יתרחש מעבר של

9. היכן נוצרים כיום מרבית הכוכבים בגלקסיות ספיראליות:

- א. בדיסקה.
- ב. בזרועות הספיראליות.
- ג. בתפיחה המרכזית.
- ד. בהילה.

המשך: מהו ההסבר הפיסיקלי לכך?

תשובה: אחד המאפיינים לפיהם מקובל למיין גלקסיות הינו צורתן. מקובל למיין גלקסיות לשלוש צורות עיקריות - ספיראליות, אליפטיות ולא-סדורות. לגלקסיות ספיראליות צורה של דיסקה שטוחה, שבמרכזה אזור כדורי תפוח הקרוי "התפיחה המרכזית". קוטר הדיסקה גדול מאוד ביחס לעובייה (יחס של 1:100). בתוך הדיסקה ניתן להבחין ב"זרועות" ספיראליות היוצאות מן המרכז כלפי חלקיה החיצוניים של הדיסקה. כמו כן משערים המדענים כי הדיסקה שוכנת בתוך מבנה כדורי אפל ברובו, הקרוי "הילת הגלקסיה". גלקסיות שביל החלב הינה דוגמה טיפוסית לגלקסיה ספיראלית.

תצפיות בגלקסיות ספיראליות מראות כי חלקים שונים בתוכן נבדלים זה מזה בצבעם. ניתן לצפות בתמונה צבעונית של גלקסיה ספיראלית באתר האינטרנט

<http://www.obspm.fr/messier/m/m083.html>. ההשערה היא כי הדבר נובע משוני באוכלוסיות הכוכבים המצויות בחלקים אלה. בגלקסיית שביל-החלב ובגלקסיות קרובות אחרות ניתן לצפות באופן ישיר בכוכבים אלה. אזור הזרועות הספיראליות בתוך הדיסקה הוא כחול, דבר המעיד על הימצאותם של כוכבים צעירים וחמים מאד. גם באזורים אחרים יכולה להתרחש יצירת כוכבים, אך אוכלוסיית הכוכבים האופיינית שם היא זקנה יותר. למשל, התפיחה המרכזית בגלקסיות כאלה היא בדרך כלל צהובה-כתומה, דבר המעיד על אוכלוסייה אופיינית של כוכבי סדרה ראשית הדומים לשמש. ההסבר הפיסיקלי לכך שמרבית הכוכבים נוצרים כיום



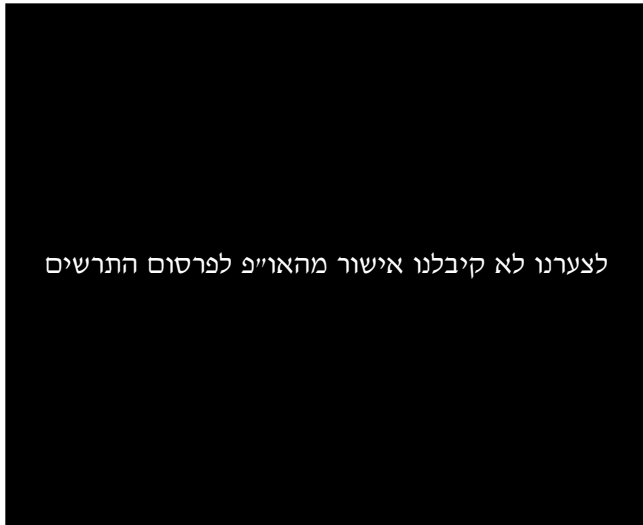
תרשים 7 - הגלקסיה הספיראלית M83

המשך: ציין שני מרכיבים חשובים של התווך הבין-כוכבי.

תשובה: החל מתחילת המאה העשרים ידוע כי גלקסיית שביל החלב, בה נמצאת מערכת השמש, כוללת לא רק כ-200 מיליארד כוכבים, אלא גם כמות גדולה של חומר הידוע בשם "החומר הבין-כוכבי". כיום ידוע כי חומר זה מורכב ברובו מאטומים ומולקולות של מימן (90%) והליום (9%), בצפיפות נמוכה מאד של חלקיק אחד לסמ"ק (לשם השוואה, צפיפות ה"ריק" בגובה מאות ק"מ מעל האדמה הינה כ- 10^4 חלקיקים לסמ"ק), וכן מ"אבק" בין-כוכבי. האבק מורכב מגרגירים קטנים מאד, בגודל אופייני של אלפית המילימטר, בצפיפות אופיינית של כ-1000 גרגירים לק"מ מעוקב! אולם לענני אבק עצומים, שגודלם מגיע לעשרות ומאות שנות אור, יש השפעה רבה על האור העובר דרכם.

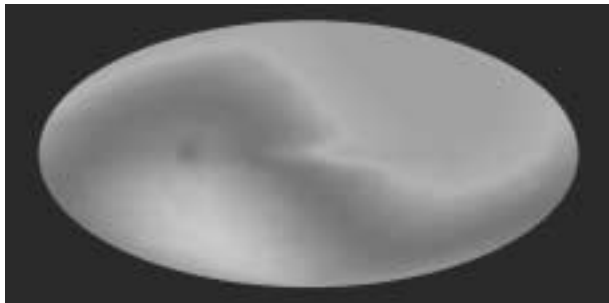
האבק משפיע על אור הכוכבים בשני אופנים. ראשית, הוא בולע ומפזר חלק מן האור ובכך מקטין את עוצמת מקור האור. לעיתים הוא אף מסתיר את מקור האור לחלוטין. שנית, בשל העובדה שגודלם של חלקיקי האבק הוא מסדר גודל של אורך הגל (גודל אופייני של מיקרון - מיליונית מטר, המתאים לאורך גל בתחום האינפרא-אדום), הוא בולע ומפזר את האור באופן התלוי באורך הגל - אור בעל אורך גל קצר (כחול) נבלע ומפוזר יותר מאור בעל אורך גל ארוך (אדום). בשל כך, כוכב המוקף באבק ייראה אדום יותר מאשר כוכב חשוף לחלוטין - האור הכחול עובר פיזור חזק יותר, ולכן חלקו כלל לא יגיע אלינו. לעומת זאת הסיכוי לפיזור של אור אדום נמוך הרבה יותר, ולכן ישנתנה הספקטרום של הכוכב וייראה אדום יותר. תהליך זה נקרא "האדמה" (reddening).

דבר דומה קורה כאשר צופים בשמים בשעות היום. בתחום האור הנראה הסיכוי לפיזור באטמוספירה מתכונתי ל- $1/\lambda^4$ (פיזור ריילי). עקב פיזור ריילי נראים השמים כחולים בשעות היום - האור הכחול מפוזר וחוזר לעינינו, בעוד האור האדום מפוזר מעט מדי מכדי להגיע אלינו. לעומת זאת, בשעת השקיעה, המרחק שעובר האור מן השמש באטמוספירה מספיק כדי "להאדים" את השמש - האור הכחול מפוזר ומוסט מקו הראייה שלנו אל השמש. מכיוון שהאבק הבין-כוכבי מצוי בתווך שבין הכוכבים, הרי שבאופן סטטיסטי, ככל שכוכב רחוק יותר מאתנו, כך גדול יותר הסיכוי להימצאות אבק על קו הראייה אליו, ולכן סביר שכוכבים אלה ייראו אדומים יותר. התצפיות אכן מאשרות השערה זאת.



לצערנו לא קיבלנו אישור מהאוי"פ לפרסום התרשים

תרשים 8 - התפלגות קרינת הרקע הקוסמית כפי שנמדדה על-ידי COBE



תרשים 9 - מפת הטמפרטורה שמדד הלוויין COBE (ראה כריכה אחורית)

האסטרונומיה, מערכת מוחלטת לקביעת מהירויות - קרינת הרקע. מתוך מדידת הסטייה מטמפרטורת קרינת הרקע, ניתן לקבל את מהירותה של הגלקסיה שלנו ביחס אליה - כ-500 ק"מ בשנה.

התופעה התצפיתית, המושפעת אם כן באופן החזק ביותר מתנועת הגלקסיה, היא האיזוטרופיות שלה - היותה זהה בכל כיוון. תכונה נוספת של קרינת הרקע - התפלגות הקרינה של גוף שחור - אינה משתנה כלל עקב תנועת הגלקסיה. הדבר נובע מכך שצורת התפלגות הקרינה של גוף שחור נשמרת, ללא תלות בתנועתו. אין זה משנה מה אופייה של תנועת הגלקסיה, קרינת הרקע תמיד תזוהה כקרינת גוף שחור.

טמפרטורת קרינת הרקע משתנה אמנם עקב תנועת הגלקסיה, כפי שנראה בתרשים 9 לעיל, אך בטווח צר מאד - אלפיות מעלת קלווין. גם שיא העוצמה משתנה מעט כתלות במהירות הגלקסיה, אך הוא עדיין מצוי בתחום המיקרו.

היקום הפך לשקוף לקרינת הרקע כאשר היה בן כמאתיים אלף שנה. עד לפני זמן זה עדיין היה היקום חם מאוד במידה

בזרועות הספיראליות, נעוץ בעובדה שהחומר בגלקסיה (גז, אבק וכוכבים) סובב סביב מרכזה באופן דיפרנציאלי - החלקים הפנימיים מסתובבים מהר, ואלה החיצוניים מסתובבים לאט. תחת אילוצי כוחות הכבידה העצמית של החומר ולחץ הגז, נוצרים מבנים גליים של חומר דחוס יותר וחומר דחוס פחות, הלוכדים צורה של זרועות ספיראליות. כתוצאה מקריסת הגז תחת כובדו העצמי במקומות בהם הגז דחוס יותר, מתרחשת יצירת כוכבים מסיבית בזרועות הספיראליות.

10. איזו תכונה תצפיתית של קרינת הרקע תלויה בתנועת הגלקסיה?

- א. צורת הספקטרום - ספקטרום גוף שחור.
- ב. הטמפרטורה הנוכחית שלה - 3 מעלות קלווין.
- ג. איזוטרופיות - עוצמה אחידה בכל הכיוונים.
- ד. שיא העוצמה בתחום המיקרו.

המשך: מתי ומדוע הפך היקום שקוף לקרינת הרקע?

תשובה: בשנת 1963 גילו במקרה שני אסטרונומים שעבדו במעבדות בל (Bell) בארה"ב, פנזיאס ווילסון (Penzias and Wilson), את אחת התגליות החשובות באסטרונומיה המודרנית. (מאוחר יותר, בשנת 1978, הוענק להם על כך פרס נובל בפיסיקה). הם מצאו שמכל כיוון אליו היפנו אנטנה לגילוי אותות רדיו, נמדד תמיד אותו הרעש. קרינה איזוטרופית זאת ידועה בשם "קרינת הרקע הקוסמית". תצפיות שנעשו מאז הראו כי התפלגות הקרינה הזאת תואמת באופן מדויק להפליא את התפלגות הקרינה של גוף שחור בטמפרטורה של 2.73K. התפלגות הקרינה מתוארת בתרשים 8, המבוסס על תצפיות בתחום גלי המיקרו שנעשתה מאחד הלוויינים החשובים ביותר באסטרונומיה, COBE, ששוגר בשנת 1990.

תוצאות תצפיותיו של הלוויין COBE ניתנות להצגה גם כמפה שבה מוצגת טמפרטורת הקרינה הנמדדת עבור כל כיוון בשמים. מפת טמפרטורה כזאת מוצגת בתרשים 9.

במפה ניתן להבחין באזור של טמפרטורות הגבוהות במקצת מ-2.73K בצד ימין למעלה, ובאזור של טמפרטורות נמוכות במקצת מערך זה בצד שמאל למטה. ההפרשים הקטנים בטמפרטורה בהם מדובר הם מסדר גודל של מספר אלפיות של מעלת קלווין. הדבר נובע מהסחה קטנה יחסית לאדום (טמפרטורה נמוכה יותר) ולכחול (טמפרטורה גבוהה יותר) של קרינת הרקע עקב תנועת הגלקסיה שלנו ביחס לקרינה זו. למעשה, מתוך המפה הזאת מתקבלת, לראשונה בתולדות

- ג. עוצמת האור הנמדדת מן הכוכב תוגבר יותר בתדירויות גבוהות מאשר בתדירויות נמוכות.
- ד. עוצמת האור הנמדדת מן הכוכב תוגבר יותר בתדירויות נמוכות מאשר בתדירויות גבוהות.

המשך: מהי "טבעת אינשטיין"?

תשובה: על-פי תורת היחסות הכללית של אינשטיין, אנו מצפים כי אור העובר בקירבתם של גופים מסיביים, כמו גלקסיות, צבירי גלקסיות, חורים שחורים, ובתנאים מסוימים גם עצמים קטנים כמו כוכבי לכת או ננסים חומים, יסטה מתנועה בקו ישר, וישנה את כיוונו. עיקום זה של האור בקרבת גופים מסיביים, דומה לעיקום האור העובר דרך עדשה אופטית. לכן נקראת תופעת עיקום האור ממקור כלשהו ביקום בשם "עידוש כבידתי" (gravitational lensing). עידוש כבידתי גורם לשתי תופעות הניתנות לתצפית - הגברת האור מן המקור המרוחק, קוואר או גלקסיה, עקב הסחה של קרני אור נוספות לעברנו, ועיוות צורתו של מקור האור לצורת טבעת או קשת (עידוש חזק) או הכפלתו למספר דמויות (עידוש חלש).

במקרה שבו מקור האור והגוף המעוות את האור ("העדשה") קרובים אלינו, כמו לדוגמה כוכב בגלקסיה השכנה, "הענן המגלאני הגדול" כמקור, וגוף אפל בהילת גלקסיית שביל החלב כעדשה, תאריך תופעת העידוש זמן קצר יחסית (מספר ימים), שבמהלכו ניתן יהיה לצפות בהגברת אור הכוכב, ולאחר מכן בדעיכתו. תופעה זאת קרויה מיקרו-עידוש (microlensing). הזמן האופייני לאירוע העידוש הינו הזמן שבו חולף הגוף הקרוב על-פני הגוף הרחוק. תופעת ההגברה אינה תלויה בתדירות, ולכן תיראה ההגברה זהה בכל אורכי הגל. כאשר הצופה, העדשה, ומקור האור מצויים על קו אחד, נוצרת דמות רציפה וסימטרית של מקור האור סביב העדשה. צורת הדמות טבעתית, והיא קרויה "טבעת אינשטיין".

כאשר מקור האור הוא קוואר מרוחק, העובר עידוש על-ידי צביר גלקסיות, שאף הוא מרוחק, תיראה תופעת העידוש באופן קבוע, ללא השתנות הנראית לעין.



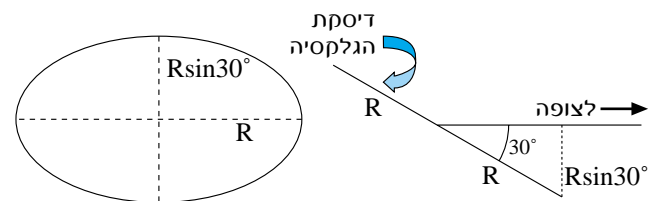
תרשים 11 - עידוש כבידתי חלש על-ידי צביר הגלקסיות Abell 2212, שצולם מטלסקופ החלל HST (NASA).

שלא איפשרה את קיומם של אטומי מימן, והיה מלא בפרוטונים, אלקטרונים, פוטונים, וחלקיקים נוספים. בשל תהליכי פיזור, בעיקר על-ידי אלקטרונים, היה היקום אטום לקרינה, בפרט לקרינה אשר נוצרה בעת היווצרותו - קרינת הרקע הקוסמית. כשהיה היקום בן כמאתיים אלף שנה, התרחש עידן ההתאחות (רקומבינציה) - התלכדות אלקטרונים חופשיים ופרוטונים לאטומי מימן. הפרוטונים של קרינת הרקע היו כעת חופשיים לעבור מרחקים גדולים ללא פיזור, והיקום הפך לשקוף.

11. כיצד תיראה גלקסיה בעלת צורה של דיסקה מעגלית שטוחה, שמישורה נטוי בזווית של 30° לקו הראייה?
- א. אליפסה שצורה הראשי שווה לרדיוס הדיסקה וצורה המשני שווה לכ-87% מרדיוס הדיסקה.
- ב. לא ניתן לדעת מן הנתונים.
- ג. אליפסה שצורה המשני כפול מצורה הראשי.
- ד. אליפסה שצורה הראשי שווה לרדיוס הדיסקה וצורה המשני שווה למחצית רדיוס הדיסקה.

המשך: מהי זווית הנטיה האופיינית של גלקסיות בעלות צורה של דיסקה?

תשובה: הדיסקה תיראה כאליפסה עקב הנטייה. צורה המשני של האליפסה יהיה $R \sin 30^\circ = R/2$ כאשר R הוא רדיוס הדיסקה, וצורה הראשי יהיה R (ראו תרשים 10). אין זווית נטייה אופיינית לגלקסיות. הגלקסיות נטויות בזוויות אקראיות ביחס לקו הראייה שלנו אליהן.

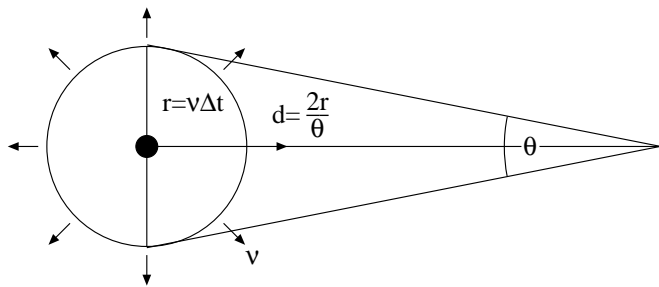


תרשים 10 - עיוות צורתה של דיסקה לאליפסה עקב זווית הנטייה.

12. כוכב בענן המגלאני הגדול עובר עידוש (lensing) כבידתי על-ידי גוף אפל בהילת גלקסיית שביל החלב. אילו מן המשפטים הבאים הוא נכון?
- א. עוצמת האור הנמדדת מן הכוכב תוגבר באותה המידה בכל תחום התדירויות בספקטרום שלו במשך מעבר הגוף האפל לפניו.
- ב. עוצמת האור הנמדדת מן הכוכב תקטן באותה המידה בכל תחום התדירויות בספקטרום שלו במשך מעבר הגוף האפל לפניו.

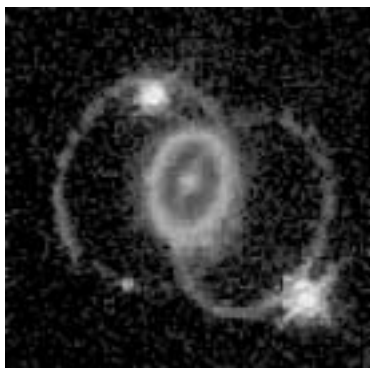
המשך: אילו כוכבים עוברים פיצוץ סופרנובה מסוג II? **תשובה:** כוכבים מסיביים (מעל 8 מסות שמש) מסיימים את חייהם בהתפוצצות סופרנובה, כאשר הם מגיעים לשלב בהתפתחותם, שבו אין שום כוח היכול לאזן את מחץ הכבידה העצום שמפעילות שכבותיהם החיצוניות על מרכזם. הם קורסים לכיוון המרכז, עד למצב שבו גרעיני האטומים המרכיבים את הכוכב מתקרבים עד כדי מגע פיסי - דבר הגורם ליצירת כוכב נייטרונים או חור שחור בליבת הכוכב, ולהעפת השאריות כלפי חוץ בפיצוץ עז. בהתפוצצות מועפות לחלל השכבות החיצוניות במהירות עצומה - כ-10,000 ק"מ/שנייה. החומר המועף נע במהירות זאת לתוך התווך הבין-כוכבי.

הזמן מאז ההתפוצצות ומהירות ההתקדמות של החומר נותנים הערכה לגודלו האמיתי של הענן על-ידי הקשר $r = v \cdot \Delta t$. מדידת גודלו הזוויתי של הענן, כלומר הזווית θ אותה תופס קוטרו ($2r$) של הענן בשמים, תיתן את המרחק d , על-פי הקשר $d = 2r/\theta$. (ראה תרשים 12).



תרשים 12

כדי שמדידה כזאת תהיה אפשרית, הסופרנובה צריכה להיות קרובה יחסית אלינו, כך שניתן יהיה לצפות בהתפשטות הענן. דוגמה לכך היא הסופרנובה שהתרחשה בענן המגלאני הגדול בשנת 1987 - סופרנובה 1987A. (תרשים 13)



תרשים 13: טבעות גז זוהר סביב סופרנובה 1987A

13. לענן גז גלקטי הנמצא במרחק r_1 מאתנו נמדדה בהירות ליחידת שטח I_1 . ענן גלקטי זהה לחלוטין נצפה במרחק r_2 . מה תהיה הבהירות ליחידת שטח של הענן השני?

א. $\frac{r_2}{r_1} I_1$

ב. $\frac{r_2 - r_1}{r_2 + r_1} I_1$

ג. אותה הבהירות ליחידת שטח.

ד. אין מספיק נתונים.

המשך: האם התשובה נכונה גם לו היה מדובר בגלקסיות במרחקים קוסמולוגיים במקום בענני גז?

תשובה: הבהירות ליחידת שטח (surface brightness) הינה גודל המאפיין גוף פיסיקלי נצפה, והוא מחושב על-ידי חלוקת השטף הנמדד מן הגוף בזווית המרחבית שהוא תופס בשמים.

שטף הקרינה נתון על-ידי הקשר $S = \frac{L}{4\pi r^2}$, כאשר L היא

בהירותו של הגוף, כלומר סך כל הקרינה הנפלטת ממנו ליחידת זמן, ו- r הוא מרחקו של הגוף מאתנו. Ω הינו היחס בין שטח פניו הפיסי של הגוף A ושטח פני הכדור השמימי,

$\frac{S}{\Omega} = \frac{L}{A} = 4\pi r^2$. מכאן שהבהירות המשטחית היא $\Omega = \frac{A}{4\pi r^2}$

ללא תלות במרחק. משמעות הדבר היא ששני גופים זהים לחלוטין בכל תכונותיהם, המצויים במרחקים שונים, יהיו בעלי בהירות משטחית זהה.

אין זה כך בהכרח עבור גלקסיות במרחקים קוסמולוגיים. במקרה זה תלות הבהירות והשטח הזוויתי במרחק היא מסובכת יותר, בהתאם למודל הקוסמולוגי.

14. נניח כי לפני כשנה ארעה התפוצצות סופרנובה מטיפוס II בגלקסיה. מאז צפו בה האסטרונומים פעמים רבות. אילו מדידות דרושות כדי לקבוע את המרחק אל הסופרנובה?

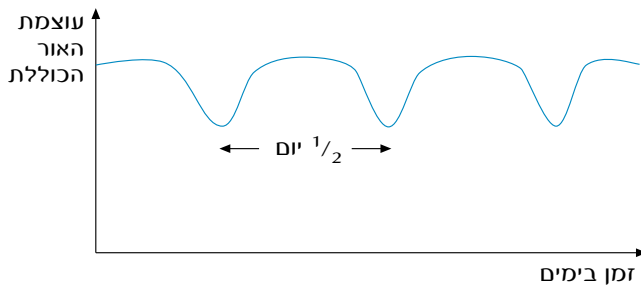
א. הזמן מאז ההתפוצצות, מהירות ההתפשטות של חזית הפיצוץ, והגודל הזוויתי של ענן הסופרנובה כיום.

ב. הגודל הזוויתי של ענן הסופרנובה ועוצמת הקו $H\beta$ בספקטרום הסופרנובה.

ג. ההסחה לאדום של ספקטרום הסופרנובה והזמן מאז ההתפוצצות.

ד. מהירות ההתפשטות של חזית הפיצוץ והגודל הזוויתי של ענן הסופרנובה כיום.

את זה. מכיוון שהם זהים, ירידת עוצמת האור הכוללת הנובעת מן ההסתרה ההדדית תהיה זהה, ולכן המינימום שווים. בכל מחצית מחזור של הסיבוב תהיה הסתרה כזאת, ולכן בעצם נקבל עוצמת אור כוללת עם מחזור של חצי יום. כ-2/3 מכלל הכוכבים מצויים במערכות כוכב כפול.



תרשים 14: עוצמת האור הכוללת של שני כוכבים זהים, שהמרחק ביניהם הוא שלוש פעמים רדיוסם, כפונקציה של הזמן.

תהודה

15. שני כוכבים זהים, שהמרחק ביניהם שווה ל-3 פעמים רדיוסם, נעים זה סביב זה במחזור של יום אחד. מסלוליהם מצויים במישור הנוטה ב- 30° מעלות ביחס לקו הראייה שלנו. איזה מבין המשפטים נכון ביחס להשתנות עוצמת האור הכוללת ממערכת זאת?

- עוצמת האור נותרת קבועה כפונקציה של הזמן.
 - עוצמת האור היא מחזורית, ותגיע למינימום כל חצי יום.
 - עוצמת האור היא מחזורית עם מחזור של יום, כאשר בכל מחזור יש שתי נקודות מינימום השונות בערכן.
 - עוצמת האור היא מחזורית, ותגיע למינימום פעם ביום.
- המשך:** מהי שכיחותן של מערכות כוכב כפול ביחס לכוכבים בודדים?

תשובה: עקב נטיית מסלולם ביחס לקו הראייה, יהיה המרחק הנצפה בין מרכזי הכוכבים קטן מסכום רדיוסיהם - $3R\sin 30 = 3R/2 < 2R$ לכן, מסתירים הכוכבים חלקית זה

המחלקה להוראת המדעים
מכון ויצמן למדע



ספרים חדשים שהופיעו במחלקתנו



א. לקט מבחני בגרות פיסיקה 4 ו-5 יחידות לימוד בעריכת עדי רוזן הספר יצא בפורמט חדש, והוא כולל את כל בחינות הבגרות בפיסיקה, החל ב-תשמ"ג וכלה בבחינה שהתקיימה בקיץ תש"ס.

ב. פעילויות חקר בפיסיקה מאת עדי רוזן ספר זה הוא שכתוב של הספר "חקר מודרך בפיסיקה". בספר החדש התווספו כ-9 פעילויות חדשות, שחלקן בתחום הפיסיקה המודרנית. הוצאו התשובות לשאלות (פרט לשתי הפעילויות הראשונות שהן משמשות מבוא לחקר). קובץ Excel הנדרש לפעילות "אנרגיית קשר גרעינית" מופיע באתר מורי הפיסיקה (יש לבחור שם "למורה ולכיתה", ואחר כך "קרונה וחומר") פעילויות המופיעות בספר מתאימות להוראה שוטפת, כניסויים לבחינת הבגרות במעבדה במתכונת הרגילה, וכהכנה לבחינת הבגרות במעבדה במתכונת החקר, ובחלקם מתאימות לשמש כבסיס לפרוייקטים.

ג. פעילויות חקר בפיסיקה - מדריך למורה מאת עדי רוזן ספר זה יצא לאור בעתיד הקרוב. הוא כולל תוצאות לכל הניסויים המופיעים בספר לתלמיד, וכן את התשובות לשאלות שבספר לתלמיד, שהוצאו מן המהדורה הקודמת של "פעילויות חקר בפיסיקה"

נזכירכם כי את כל הספרים שבהוצאתנו אפשר לרכוש בחנויות הספרים וב"גסטליט",
חברה לשיווק והפצה בע"מ, רח' קצנשטיין 7, ת.ד. 73, קרית חיים 26103 טל' 04-8410083, 04-8419353