



האולימפיאדה הרביעית באסטרונומיה ובחקר החלל על-שם פרופ' דרור שדה ז"ל

מאיר מידב, בית הספר לחינוך, אוניברסיטת תל-אביב,

בני בילנקו וחגי נצר, בית הספר לפיזיקה ואסטרונומיה, אוניברסיטת תל-אביב

מבוא

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

מאז נערכו שלוש אולימפיאדות נוספות. האחרונה מביניהם, האולימפיאדה הרביעית, החלה בשנת 1997 ונסתיימה ב-1998 בחידון הגמר.

לאולימפיאדה הרביעית נרשמו 350 תלמידים (!) מ-55 בתי ספר שונים ברחבי הארץ (לעומת 73 תלמידים שנרשמו לאולימפיאדה הראשונה). משתתפים אלה עברו מבחן מיון ראשון בבית ספרם ומתוכם עלו 66 משתתפים לשלב השני. חמישה תלמידים שעברו את השלב הזה בציונים הגבוהים ביותר הגיעו לשלב השלישי, חידון הגמר, שנערך באוניברסיטת תל-אביב ב-31 במרץ 1998. ואלה חמשת התלמידים שהשתתפו בחידון הגמר:

איזנברג אריאל - תלמיד כיתה י"א ממכללת אורט גבעת רם ירושלים.

ארנסט אבי - תלמיד כיתה י"א מתיכון להנדסאים שליד אוניברסיטת תל-אביב.

חסידיים אבינתן - תלמיד כיתה י"א מתיכון ליד האוניברסיטה בירושלים.

כהן אייל - תלמיד כיתה י"א מתיכון ליד האוניברסיטה בירושלים.

עובד עמית - תלמיד כיתה י"א מתיכון בן-צבי גבעתיים.

בחידון הגמר השתתפו קהל רב, ביניהם בני משפחת שדה, תלמידים רבים, בני משפחות התלמידים ואנשי סגל רבים. השופטים היו:

פרופ' דינה קובץ-פריאלניק, החוג לגיאופיזיקה ומדעים פלנטריים, אוניברסיטת תל-אביב.

פרופ' יואל רפאלי, החוג לאסטרונומיה, אוניברסיטת תל-אביב.
ד"ר ארי לאור, הפקולטה לפיזיקה, הטכניון חיפה.
פרופ' חגי נצר, ראש המכון לאסטרונומיה, אוניברסיטת תל-אביב, שהיה גם שותף בהכנת אולימפיאדה זו וקודמותיה.

בשלושת המקומות הראשונים, בחידון הגמר, זכו התלמידים: אבינתן חסידיים - מקום ראשון.

אריאל איזנברג - מקום שני.

אייל כהן - מקום שלישי.

שלושת הזוכים במקומות הראשונים זכו בפרסים כספיים:

פרס ראשון - 3,000 ש"ח מתנת אוניברסיטת תל-אביב.

פרס שני - 2,500 ש"ח מתנת המכון לאסטרונומיה ע"ש ריימונד וברלי סאקלר, אוניברסיטת תל-אביב.

פרס שלישי - 1,500 ש"ח מתנת מועצת רמת-השרון, בה גרה משפחת שדה.

כמו כן חולקו לכל המשתתפים פרסים נוספים, שהחשוב מביניהם ניתן על-ידי מר דוד סלע, מפמ"ר לפיזיקה.

הוא אישר לכל חמשת המשתתפים ציון 100 ביחידת בחירה במסגרת בחינות הבגרות בפיזיקה בהיקף 5 יחידות.

בחידון הגמר היו שלושה שלבים. להלן כל השאלות שהופיעו בשלבים אלה בצירוף תשובות מתאימות.

שלב א'

בשלב זה היו שלושה סיבובים, כאשר כל משתתף נשאל שאלה אחת בכל סיבוב; סך הכל 15 שאלות (רב-בחירתיות). אם

התלמיד ענה נכון - נשאל שאלה נוספת הקשורה לנושא.

להלן 15 שאלות של שלב א'. התשובה הנכונה מוקפת בעיגול. I.1 מי יוצא הדופן בקבוצה: ROSAT, ASCA, ISO, EINSTEIN ?

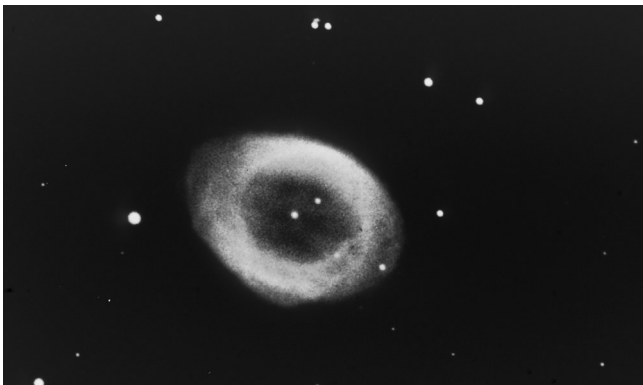
א. ROSAT

ב. ASCA

ג. ISO

ד. EINSTEIN

אחת הערפיליות היפות בשמים הינה ערפילית הטבעת בקבוצת נבל (Lyra) הניתנת בצילום הבא:



תרשים 1: ערפילית הטבעת בקבוצת נבל (Lyra)

I.3 איזה חוק שימור מסביר את סיבובם המהיר של הפולסרים?

- א. חוק שימור האנרגיה
- ב. חוק שימור התנע הזוויתי
- ג. חוק שימור התנע הקווי
- ד. חוק שימור המטען החשמלי.

II.3 מהו זמן המחזור של פולסאר?

בשנת 1967 גילתה סטודנטית המחקר ג'וסלין בֵּל גוף הפולט פולסים של קרינת רדיו במחזור 1.3373 שניות. בתחילה נקרא עצם זה בשם LGM (Little Green Man) בהנחה ש"איש קטן וירוק" מנסה לאותת לנו בגלי רדיו. מאוחר יותר הבינו האסטרונומים שהכוכב הוא הפולט קרינת רדיו. למקור פולסים כזה ניתן השם פולסר (Pulsar Pulsating Star). היום ידועים מאות פולסרים בתחומים שונים של הספקטרום האלקטרומגנטי (גלי רדיו, אור נראה ואפילו קרינת-X), שזמני המחזור שלהם נעים בין אלפית השניה לכארבע שניות. הסבר התופעה מסתמך על חוק שימור התנע הזוויתי: השמש שלנו שהיא כוכב טיפוסי ביקום, מסתובבת סביב עצמה במחזור של כ-26 ימים. אילו השמש היתה "מצטמקת" לכדור שרדיוסו 10 ק"מ, והתנע הזוויתי היה נשמר, מחזוריה היה כעשירית השנייה בלבד. השמש תסיים את חייה כננס לבן (כמתואר בתשובה לשאלה הקודמת) שרדיוסו כ-7000 ק"מ. אולם לא כל הכוכבים מסיימים כך את חייהם. כוכבים שמסתם הרבה יותר גדולה מזו של השמש, מסיימים את חייהם בהתפוצצות הידועה בשם **סופרנובה**. אם מסת הליבה הנותרת לאחר ההתפוצצות עולה על 1.4 מסות שמש, ולא יותר מכשלוש, מסות שמש, ייווצר כוכב דחוס מאד, שרדיוסו מספר קילומטרים בלבד, וצפיפותו כ- 10^{15} גרם לסמ"ק. כוכב

II.1 איזה מבין הטלסקופים כבר לא פעיל?

יוצא דופן הוא ISO, כי שלושת האחרים הם לוויינים שהכילו טלסקופים לחקר קרינת ה-X מן החלל, בעוד ש-ISO נושא טלסקופ בתחום האינפרא אדום. EINSTEIN שולח בסוף שנות ה-70, ואילו ROSAT שולח ב-1990 על ידי קבוצת מדינות מאירופה, וניקרא על שמו של רנטגן, מגלה קרני-X (Röntgen Satellite). הלוויין על שם אינשטיין לא פעיל כיום.

I.2 ערפיליות פלנטריות נוצרות כאשר...

- א. כוכב מסיבי מתפוצץ כסופרנובה.
- ב. ענן גז נמצא בשלבו האחרונים לפני קריסתו, ונוצר כוכב חדש.
- ג. ענק אדום משיל את המעטפת שלו.
- ד. גלקסיות נוצרות.

II.2 ציין שם של ערפילית פלנטרית.

שלושה שלבים עיקריים בחייו של כוכב: הולדתו, מהלך חייו ומותו. מסתו של הכוכב הינה הגורם הקובע את ההתפתחות של כוכב בכל שלושת השלבים. כוכבים שמסתם אינה גבוהה במיוחד, כמו השמש שלנו, הופכים מעננה של גז לכוכב במהלך כמה מליוני שנים. לאחר מכן הם "חיים" ביציבות גבוהה יחסית, במשך מיליארדי שנים. במהלך שנים אלה המימן אשר בליבתם עובר תהליכי מיזוג תרמו-גרעיניים והופך להליום, תוך פליטת אנרגיה. בתקופה ארוכה זו מתקיים שיווי משקל בין כוחות הכבידה השואפים לדחוס את הכוכב לבין לחץ הקרינה ואחרים המתנגדים לקריסתו. כל עוד מתקיים שיווי משקל זה, הכוכב ממשיך בחייו בלי שינוי משמעותי בנתונים הניצפים שלו. בשלב מסוים המימן שבליבתו של הכוכב המזדקן הופך כולו להליום. ליבת ההליום קורסת באיטיות, והכוכב הופך להיות ענק אדום, שרדיוסו עולה אפילו על רדיוס מסלול כדור הארץ סביב השמש (רדיוס השמש כ-700,000 ק"מ ורדיוס הסיבוב של כדור הארץ סביב השמש כ-150,000,000 ק"מ). כך מתחיל השלב האחרון בחייו של כוכב. סופו של תהליך זה (מבלי להיכנס לפרטים) קורה כאשר לחץ הקרינה בתוך הכוכב גדל במידה כזאת שהוא גורם ל"זריקת" מעטפת הענק האדום, במהירות של עשרות ק"מ לשנייה! החומר הנזרק יוצר סביב הכוכב הנותר ערפילית, הנקראת **ערפילית פלנטרית**. הליבה הנותרת הינה כוכב זעיר, שרדיוסו כרדיוס כדור-הארץ, ומסתו כמחצית מסת השמש לכן צפיפותו גבוהה מאד, 10^6 גרם לסמ"ק לעומת 1.4 גרם לסמ"ק, שהיא הצפיפות הממוצעת של השמש. כוכב זה ידוע בשם **ננס לבן**.

כזה ידוע בשם **כוכב נייטרונים** (אם מסת הליבה הנותרת עולה על כשלוש מסות שמש, ייווצר חור שחור). בהנחה שבמהלך הקריסה עד ליצירת כוכב הנייטרונים מתקיים חוק שימור התנע הזוויתי, יסתובב כוכב הנייטרונים בתדירות עצומה (זמני מחזור אופייניים של שניות!). במהלך הקריסה מתחזקים מאד השדות המגנטיים, בעיקר באזור הקטבים המגנטיים של הכוכב.

חומר מיונן הנלכד בשדות מגנטיים חזקים אלה מואץ, ופולט קרינה אלקטרומגנטית (גלי רדיו, אור נראה ואף קרינת-X). אלומת קרינה זו מסתובבת בתדירות עצומה כאלומה של מגדלור יחד עם הכוכב, לכן הסבר זה ידוע בשם **מודל המגדלור**. אם במקרה אלומה זו מגיעה אלינו הצופים, **נבחין באות**.

תופעה דומה של פליטת קרינה עקב האצת חלקיקים טעונים בשדה מגנטי מתגלה גם אצלנו על כדור-הארץ כתופעה הידועה בשם **"זהר הקוטב"**.

I.4 משימתו של הלווין SOHO היא...

- צילום מקרוב של שביט.
- מחקר על הרכב האטמוספירה של נוגה.
- מחקר של תופעות על פני השטח של השמש.
- מיפוי המכתשים על הירח.

II.4 מה מחזור הפעילות של השמש?

הלווין SOHO שוגר בתחילת דצמבר 1995 כאשר מטרותיו כללו: מחקר לגבי טבעה של הילת השמש והמנגנונים אשר גורמים להתחממותה, חקר רוח השמש ומדידת תאוצתה ומעקב ומחקר על תופעות ועל פני השטח של השמש. הלווין שוגר לנקודת לגרנזי הראשונה שהיא נקודה מיוחדת בין השמש לכדור הארץ, בה שקול כוחות המשיכה בין כדור הארץ לשמש מתאפס ולכן קל ללווין להישאר בנקודה זו. זמן החיים המיועד של הלווין שנתיים.

לשמש מחזור פעילות של 11 שנה (או 22 שנה) שבה השמש עוברת ממצב של חוסר פעילות אטמוספירית למצב של סערות שמש וכתמי שמש (ובחזרה).

I.5 לווין במסלול קוטבי (פולארי) משמש בעיקר לצורך...

- סקר של משאבי קרקע ומיפוי.
- תקשורת
- ריגול
- תחנת חלל

II.5 מה החיסרון בשיגור לווין כזה?

הלוויינים הנעים במסלול קוטבי מסתובבים סביב כדור הארץ במישור בו נמצאים שני הקטבים, בגובה של מאות קילומטרים. מסלול כזה מאפשר להם לסרוק את פני כדור הארץ המסתובב סביב צירו. לוויינים אלה מיועדים לחיפוש מחצבים ונפט, לבדיקה ולמעקב אחרי חקלאות, לסריקת יערות וכו'. הידועים מבין לוויינים אלה - לווייני סדרת **לנדסט** האמריקאיים, אשר הראשון ביניהם שוגר לחלל בשנת 1972 לגובה של כ-700 ק"מ.

בעת שיגור של לוויינים למסלולים לא קוטביים נעזרים ב"סחיפה" הנובעת מהסיבוב העצמי של כדור הארץ, דבר המקטין את האנרגיה הדרושה לשיגור. במסלול קוטבי אי אפשר להיעזר בסיבוב העצמי של כדור הארץ, לכן השיגור יקר יותר.

I.6 אם היקום שטוח - מה טווח הערכים של Ω (פרמטר הצפיפות של היקום)?

- Ω צריך להיות קטן מ-1.
- Ω יהיה גדול מ-1.
- Ω שווה ל-1.
- Ω אינו קשור לגיאומטריה של היקום.

II.6 מה ההערכה המקובלת עבור Ω כיום?

הכוח "השולט" ביקום והקובע את אופיו (פתוח או סגור) הוא כוח הכבידה. על כן המסה הכוללת של החומר ביקום היא אשר תקבע אם היקום פתוח או סגור. בקוסמולוגיה מקובל להשתמש בצפיפות החומר ביקום כגודל הקובע אם היקום ייסגר או לא. אם הצפיפות של החומר ביקום תהיה שווה לפחות לכ- $2 \cdot 10^{-29}$ גרם לסמ"ק, היא תספיק לעצירת התפשטותו ולסגירתו. צפיפות זו ידועה בשם **הצפיפות הקריטית**, ρ_c . היחס בין צפיפות החומר ביקום ρ לצפיפות הקריטית ρ_c מסומן על ידי Ω . מתקיים:

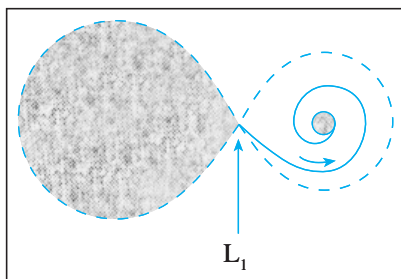
$$\Omega > 1 \text{ יקום סגור.}$$

$$\Omega < 1 \text{ יקום פתוח.}$$

$$\Omega = 1 \text{ יקום שטוח.}$$

ההערכה המקובלת היום ל- Ω , המבוססת על תצפיות אסטרונומיות הינה 0.2-0.4, כלומר **פחות** מהדרוש ליקום שטוח.

לשלבם האחרונים של חייו. מקרה מעניין הוא של זוג כוכבים, שהמסיבי מבין שניהם סיים את חייו והפך לננס לבן, כוכב ניטרונים או חור שחור בשעה שכן זוגו עדיין לא הגיע לסוף חייו. בשלב מסוים גם כוכב זה מגיע לסוף דרכו ומתנפח לענק אדום. אולם, עם ההתנפחות צורתו הכדורית הולכת ומתעוותת לצורה של אגס, (כמתואר בתרשים 2), המופנה לעבר בן הזוג. הכוכב אינו יכול להמשיך ולהתנפח, כי חלק ממעטפתו נמשך ועובר אל בן הזוג הדחוס. לחומר העובר אל בן הזוג יש תנע זוויתי, כי הוא בא מגוף שהוא בעצמו מסתובב, לכן זרם החומר מסתובב סביב בן הזוג בצורה של טבעת המקיפה את הכוכב השני. לחומר בטבעת יש צמיגות, כלומר חיכוך פנימי הגורם לו לאבד אנרגיית כובד, והוא הולך ומתקרב לכוכב עד שנספח אליו בצורת דיסקת ספיחה.



תרשים 2: מעבר חומר מענק אדום לבן זוג במערכת כפולה

עצמים קומפקטיים אחרים, כמו כוכבי ניטרונים, מתנהגים באופן דומה, וגם הם סופחים גז על-ידי דיסקת ספיחה.

I.9 מה הטמפרטורה האופיינית של גז בתווך הבין גלקטי בצביר גלקסיות?

- כמה מעלות מעל האפס המוחלט.
- אפס מעלות צלסיוס
- כמה אלפי מעלות
- 10-כ-10 מיליון מעלות

II.9 מה הצפיפות הממוצעת של גז זה?

האם קיים חומר בתווך בין הגלקסיות בצבירי גלקסיות? (כמו שקיים חומר בתווך הבין כוכבי בגלקסיה שלנו). לשאלה הזאת לא היה מענה עד שנות השמונים של המאה העשרים. אז שולחו לוויינים לגובה רב מעל לאטמוספירה, שנשאו גלאים לקרינת-X מן החלל החיצון. לוויינים אלה גילו שהרבה מצבירי הגלקסיות פולטים קרינת X, שמקורה בדרך כלל בחומר אשר בתווך בין הגלקסיות.

I.7 האם שנת אלפיים תהיה שנה מעוברת (29 יום בפברואר) ומדוע?

- כן כי 2000 מתחלק בארבע.
- לא כי 2000 מתחלק ב 100
- כן כי 2000 מתחלק בארבע וב-400
- לא כי 2000 מתחלק ב 100 וב-400

II.7 מי הכניס תיקון זה ללוח השנה?

21 במרץ הוא תאריך הידוע בשם **נקודת האביב**, בו יש שיוויון בין אורך היום והלילה. בהקפתה סביב השמש, חוזרת הארץ לנקודת האביב כעבור 365 ימים, 5 שעות, 48 דקות ו-46 שניות, לכן כעבור 4 שנים נקודת האביב תהיה ב 22 לחודש מרץ, וכעבור עוד 4 שנים ב 23 במרץ. כך משתבש לוח השנה. כדי לתקן זאת החליט יוליוס קיסר להגדיל את השנה ביום אחד כל 4 שנים - כך מקבלים שנה מעוברת. כל שנה המתחלקת ב 4 ללא שארית הינה מעוברת ובה נוסף יממה אחת לחודש פברואר (אצל הרומאים חודש זה היה האחרון בלוח השנה). כך התקבל הלוח היוליאני ע"ש יוליוס קיסר. אולם, חישוב מדויק מראה שכל 4 שנים יש להוסיף 4 פעמים את הסכום 5 שעות + 48 דקות + 46 שניות, שהם פחות מיממה. כדי להתגבר על פיגור זה, הכניס האפיפיור גרגוריוס השמיני בשנת 1582, תיקון לפיו השנה האחרונה בכל מאה תהיה מעוברת רק אם היא תתחלק ב-4 וב-400 ללא שארית. לכן שנת 2000 תהיה מעוברת.

I.8 דיסקות ספיחה נוצרות בעת ספיחה של גז לחור שחור כי...

- לגז אנרגיה פוטנציאלית גבוהה.
- כבידת החור השחור מעוותת את המרחב סביב החור השחור.
- הגז צריך לאבד תנע זוויתי.
- מבנה הגלקסיה גם הוא דמוי דיסקה.

II.8 איזה עצמים נוספים סופחים גז באמצעות דיסקות ספיחה?

רוב הכוכבים שאנו רואים בשמי הלילה (מעל 65%) הם כוכבים כפולים, או זוגות כוכבים השוכנים יחד בחלל ומשפיעים האחד על השני עקב כוח הכבידה. כוכב, במערכת כזאת, מתפתח ומושפע מבן זוגו.

נדון במערכת של שני כוכבים שנוולדו ביחד אך בעלי מסות שונות, לכן נמצאים בשלבי התפתחות שונים. הכוכב בעל המסה הגדולה יותר מתפתח מהר יותר, ומגיע מהר יותר

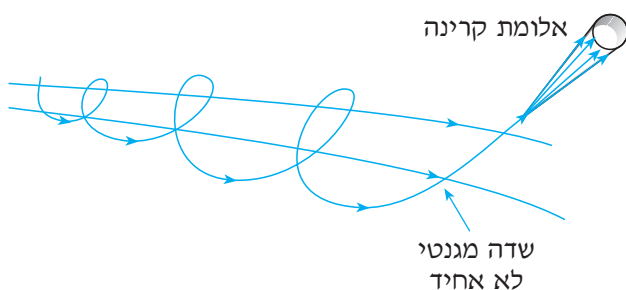
אורך הגל של הקרינה בה נפלטת העוצמה המכסימלית לבין הטמפרטורה. על כן, על מנת שגוף חם יפלוט קרינה שאורך הגל בו נפלטת הקרינה בעלת העוצמה המכסימלית יהיה בתחום קרינת ה-X (סדר גודל של 10^{-10} m), הטמפרטורה שלו צריכה להיות כמה מליוני מעלות קלווין. אפשרות ידועה לחימום חומר לטמפרטורות כה גבוהות הינה ספיחה של חומר אל חור שחור. כוח הכבידה החזק בו ימשך ויספח חומר אל החור השחור, יאיץ את החומר למהירות גבוהה והתנגשויות בין חלקיקי החומר יביאו לטמפרטורות גבוהות מאד. מצב כזה מתקבל למשל במערכת של שני כוכבים (כוכב כפול) שאחד מהם סיים את חייו כחור שחור, כמתואר בתשובה לשאלה 8.

I.12 קרינת סינכרוטרון נפלטת כאשר :

- אלקטרונים יורדים רמה בתוך האטום.
- מטענים חשמליים מואצים בשדה מגנטי.
- אלקטרונים ופוזיטרונים עוברים השמדה הדדית.
- יסוד עובר דעיכה רדיואקטיבית.

II.12 היכן בטבע רואים קרינה כזו?

המקור המוכר ביותר לקרינה הוא גוף שחור: גוף שחור חם פולט קרינה אלקטרומגנטית, שנקבעת על פי הטמפרטורה של אותו הגוף. (חוקי קרינה של גוף שחור). אבל קיים מנגנון נוסף, שמקורו לא תרמי, לפליטה של קרינה אלקטרומגנטית, שאינו קשור בטמפרטורה של הגוף. במנגנון כזה הקרינה נפלטת ממטענים חשמליים המואצים למהירויות גבוהות מאד בשדה מגנטי. לקרינה הנפלטת ניתן השם **קרינת סינכרוטרון**. כידוע, מטען חשמלי הנכנס במהירות בניצב לשדה מגנטי אחיד, מסתובב במעגל. אך אם השדה המגנטי אינו אחיד, הוא נע בתנועה בורגית (מסתובב ומתקדם), כמתואר בתרשים 3.



תרשים 3: תנועה בורגית של מטען חשמלי נע המואץ בשדה מגנטי לא אחיד המאונך לו

מקורה של קרינה זו כנראה בגז חם ודליל מאד, הנמצא בתווך בין הגלקסיות שבצביר.

מחוקי הקרינה של גוף שחור ניתן להגיע למסקנה שהטמפרטורה של הגז הבין גלקטי בצביר הינה מסדר גודל של מליוני מעלות קלווין. הצפיפות הממוצעת של גז זה הינה כ- 10^{-3} אטומים לסמ"ק. לשם השוואה, הצפיפות בתווך הבין-כוכבי הינה כחלקיק אחד לסמ"ק. אחת ההשערות להימצאותו של חומר בתווך הבין גלקטי: חומר זה נזרק מן הגלקסיות הבודדות אל החלל ביניהן או נזרק מגלקסיות מתנגשות.

I.10 מה התרומה שתרמה תופעת ליקוי כוכב על-ידי ירח לתצפיות הראשונות בתחום קרינת-X ?

- כיול הטלסקופים
- קביעת מיקום מקור הקרינה.
- מדידת הקרינה מהירח.
- מדידת מרחק מקור הקרינה.

II.10 מה הייתה הבעיה בקביעת המיקום ?

כושר ההפרדה של גלאי קרינת-X הראשונים שצפו במקורות בחלל היה נמוך ולא איפשר איתור מדויק למקומו של המקור לקרינה. לשם קביעה יותר מדויקת של מקום מקור הקרינה, נעזרו בליקויו של המקור על ידי הירח.

דמות הכוכב הפולט את קרינת ה-X כפי שהתקבלה על ידי טלסקופי קרינת ה-X אינה נקודתית. לכן, בעת התכסותו על ידי הירח בשעת הליקוי, עוצמת קרינת ה-X המתקבלת ממנו הולכת וקטנה. מתוך מדידת השינוי של עוצמת הקרינה המתקבלת, ניתן היה לקבוע בדיוק טוב את מיקומו של המקור לקרינת ה-X.

I.11 קרינת X נקודתית רומזת בדרך כלל על קיומו של חור שחור. מדוע ?

- גז הנספח לחור שחור מתחמם עד כדי פליטת קרינה בתחום קרינת ה-X.
- אופק האירועים של החור השחור יוצר חגורת קרינה בתחום קרינת ה-X.
- תהליך פְּנֵרוֹז-הוּקִינג גורם לקרינה בתחום זה.
- קרינת ה-X היא הקרינה הנפלטת מנקודה ייחודית (סינגולארית).

II.11 מה צריכה להיות הטמפרטורה של גז הפולט קרינה בתחום קרינת ה-X, אם הגז קורן כמו גוף שחור ?

על פי חוקי קרינה של גוף שחור חם, קיים יחס הפוך בין

מהרבה כוכבים ומקורות אחרים כמו גלקסיות. לכן תחום זה הינו חשוב באסטרונומיה המודרנית. כיום, עיקר המחקר נערך באמצעות גלאים הנמצאים על לווינים. גלאים אלה הינם, בדרך כלל, גבישים (למשל גרמניום + סיגים של גליום), אשר התנגדותם החשמלית משתנה כשקרינה תת-אדומה נופלת עליהם. אולם, קרינה תת-אדומה רבה מגיעה אל הגלאי גם מהסביבה החמה, הגורמת לרעש רקע בו נבלע האות העיקרי שמקורו בקרינה של הכוכב או הגלקסיה. כדי להקטין את רעש הסביבה, נוהגים לקרר את הגלאים לטמפרטורות קרובות לאפס המוחלט באמצעות הליום נוזלי. ברגע שמלאי ההליום הנוזלי אוזל, פעולתם של גלאי הקרינה התת-אדומה אינה יעילה.

I.14 מה החשיבות של אבק ויסודות כבדים ממימן לתהליך יצירת כוכבים ?

- א. יסודות כבדים עוזרים בקירור הגז בעת קריסתו לכוכב.
- ב. היסודות הכבדים עוזרים בהצתת התהליכים הגרעיניים.
- ג. היסודות הכבדים יוצרים חוסר יציבות כבידתית אשר מתחילה את תהליך הקריסה.
- ד. אין שום חשיבות ליסודות כבדים בתהליך יצירת כוכבים.

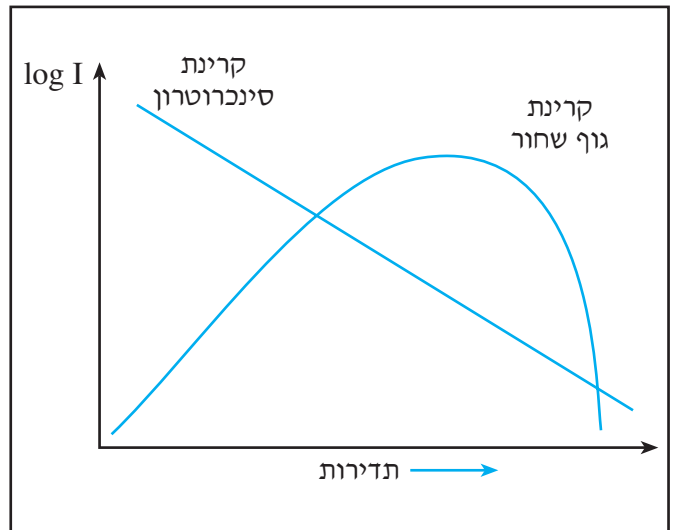
II.14 מה ההשפעה של ענני אבק על צבעי הכוכבים הנמצאים מאחוריהם?

הכוכבים נולדים במקומות בהם יש ריכוז גבוה של מימן ניטרלי או מוליקולרי. ריכוזים כאלה אנו מוצאים בענני החומר בתווך הבין-כוכבי.

צפיפות החלקיקים בענני החומר הבין-כוכבי הצפופים מגיעה לעתים ל- 10^4 חלקיקים לסמ"ק. הטמפרטורה של גז כזה נמוכה מאד, כמה עשרות מעלות קלווין בלבד. כוח הכבידה הפועל בין החלקיקים גורם להתקרבותם זה לזה, כלומר לדחיסת הגז. דחיסה זו גורמת להתנגשויות בין חלקיקי החומר, כלומר לעליה במהירות הממוצעת של החלקיקים, ובמילים אחרות - לעליית הטמפרטורה והלחץ של הגז. עליית טמפרטורת הגז ולחצו מונעת את המשך התכווצות הגז, ויכולה אף לגרום לפירוק עננת הגז לעננות קטנה יותר. הימצאותם של חלקיקי אבק ויסודות כבדים בעננת הגז עוזרת בקירור הגז, כי חלק מן האנרגיה הקינטית נלקח על ידם.

התווך הבין-כוכבי מכיל גם גרגירי אבק קטנים מאד, שקוטרם קטן בהרבה מגרגירי חול (סדר גודל של 10^{-5} ס"מ). צפיפותם

העוצמה של קרינת הסינכרוטרון כפונקציה של תדירות הקרינה הנפלטת מתוארת על ידי קו ישר יורד (תרשים 4). התנהגות זו שונה לחלוטין מזו של הקרינה הנפלטת על ידי גוף שחור. התפלגות הקרינה של גוף שחור ניתנת על ידי פונקציה בעלת מכסימום, פונקציה פלנק, כמתואר בתרשים 4.



תרשים 4: קרינת סינכרוטרון לעומת קרינת גוף שחור

I.13 זמן החיים של טלסקופים תת-אדומים על גבי לוויין מוגבל למספר מועט של שנים. מדוע ?

- א. גובה מסלולם נמוך ולכן הם נשרפים באטמוספירה.
- ב. הגלאים רגישים לריק ששורר בחלל.
- ג. מלאי ההליום הנוזלי שדרוש לקירור הגלאים אוזל.
- ד. המערכת האופטית של הטלסקופ יוצאת מאיפוס בהעדר כבידה.

II.13 מדוע דרוש לקרר גלאי תת-אדום לטמפרטורות כל כך נמוכות ?

האטמוספירה של כדור הארץ אטומה לרוב הקרינה האלקטרומגנטית המגיעה אלינו מהחלל, כלומר בולעת את רוב הקרינה. כך היא בולעת גם את רוב הקרינה התת-אדומה המגיעה אלינו, בעיקר באורכי גל מעל 10,000 אנגסטרם. מוליקולות מים ופחמן דו-חמצני הן האחראיות לבליעה של רוב הקרינה התת-אדומה. הקרינה שבין 8,000 ל-10,000 אנגסטרם אינה נבלעת ומגיעה עד לפני כדור הארץ.

תצפיות ראשונות שנעשו בשנות השבעים עם גלאי קרינה תת-אדומה, באמצעות בלוניס, הראו שקרינה זו מתקבלת

כמעט עגולים) כמו כוכבי הלכת והכוכבים, ולכן מדידת מחזור הסיבוב שלהם אינה מוגדרת בצורה חד-ערכית. ניתן להגדיר זמן מחזור של שביט מסביב לכל אחד מצירי הסימטריה שלו ובכך לפתור את אי-הבהירות הנובעת ממבנהו המיוחד.

2. מה הטמפרטורה המינימלית לתחילת בעירה גרעינית? (מדוע הריאקציות אינן מתחילות בטמפרטורה נמוכה יותר?)

כדי להחל ריאקציה גרעינית, למשל יצירת גרעין הליום מפרוטונים, יש לקרב את הפרוטונים למרחק קטן מאד זה מזה, על מנת שיפעל ביניהם הכוח החזק. הכוח החזק הינו קצר טווח, ועד לתחילת פעולתו יש להתגבר על הדחייה החשמלית החזקה בין הפרוטונים. לשם כך יש להקנות לפרוטונים אנרגיה קינטית גבוהה דיה כדי שחלק מהם יתקרבו זה לזה. במילים אחרות, הטמפרטורה צריכה להיות גבוהה, לפחות כמה מיליוני מעלות קלווין, על מנת שלחלק מן הפרוטונים תהיה האנרגיה הדרושה לכך.

3. מדוע היקום נעשה שקוף לקרינה רק כ-300 000 שנה לאחר המפץ הגדול?

בתקופות קדומות, עד כ-300 000 שנה לאחר המפץ הגדול, הטמפרטורה של היקום היתה גבוהה דיה כדי לגרום לכל החומר להיות מיונן. כאשר טמפרטורת היקום ירדה עד 4000K בקירוב, הפרוטונים התחברו עם האלקטרונים ויצרו אטומי מימן ניטרלי. במצב זה הסיכוי שפוטון יתנגש עם אלקטרון קטן בהרבה, ולכן הפוטון יכול לנוע מרחק רב מבלי להתנגש או להיבלע. אנו אומרים שהיקום נעשה שקוף לקרינה.

4. מה המרכיב העיקרי של שביט? (אם כן, כיצד תסביר את צפיפותו הסגולית הנמוכה?).

השביט הינו גוף קפוא, מעין תילכוד (aggregate) קרח. חלקיקי אבק (למשל סיליקטים, חלקיקים פחמימניים קטנים ואחרים) מוחזקים על ידי כמויות גדולות של מים וקרח וגזים קפואים כמו פחמן דו-חמצני (CO_2), מתן (CH_4) ואמוניה (NH_3). צפיפות השביטים נמוכה, כ-0.03-0.54 גר' לסמ"ק, ומכאן ניתן להסיק שמבנה השביט נקבובי מאד, וחלק גדול מנפחו ריק.

הממוצעת של גרגירי אבק אלה כ- 10^{-12} חלקיקים לסמ"ק (!) או כאלף לקילומטר מעוקב.

גרגירי האבק הנמצאים בעננה המסתירה את אור הכוכב הנמצא מאחוריה, גורמים להאדמה של אור הכוכב, ולכן הכוכב יראה אדום יותר ממה שהוא באמת. ההסבר לתופעה: אור הכוכב עובר דרך עננת האבק, ומתפזר על ידה. פיזור האור הפוגע בגרגירי האבק שונה באורכי גל שונים. גודלם של גרגירי האבק הינו מסדר גודל של אורך גל של אור נראה. במקרה זה הפיזור והבליעה של האור הם ביחס הפוך לאורך הגל, כלומר ככל שאורך הגל קצר יותר, הפיזור והבליעה גדולים יותר, לכן העוצמה הנותרת לאחר המעבר בעננת הגז נמוכה יותר. לפיכך עוצמת האור הכחול, לאחר עוברו את עננת הגז והאבק, נמוכה מזו של האור האדום, והכוכב יראה לנו אדום יותר מאשר במציאות.

I.15 לאחרונה מתחזקת ההנחה כי כוכב הלכת צדק סייע (ומסייע) לקיום חיים מפותחים על פני כדור הארץ. במה מסייע צדק?

- המולקולות האורגניות הראשונות נוצרו על פניו.
- השפעת הכבידה של צדק מייצבת את מהירות סיבוב כדור הארץ.
- צדק "מנקה" את מערכת השמש מאסטרואידים והשביטים.
- צדק מאפשר את קיומם של שביטים המכילים חומרים אורגניים.

II.15 לפני מספר שנים היינו עדים לדוגמה - מהי? שביטים ואסטרואידים רבים נופלים אל צדק בהתקרבת אליו. בכך למעשה "מנקה" צדק את מערכת השמש מגופים אלה שפגיעתם בכדור הארץ יכולה להיות מסוכנת. דוגמה טובה לכך היתה התרסקות השביט המפורסם שומייקר-לוי ביולי 1994 על פני צדק.

שלב ב'

בחלק זה היו שלושה סיבובים, בכל סיבוב נשאל כל תלמיד שאלה פתוחה אחת, עליה נתבקש לענות בקצרה. להלן מובאות השאלות שבשלב ב' ובצידן תשובות קצרות.

1. האם מדידת הסיבוב של שביט האלי מדוייקת? (מדוע לא).

שביטים כדוגמת שביט האלי אינם גופים עגולים (או אפילו

5. מה סדר הריאקציות הגרעיניות במרכזי כוכבים מבחינת היסודות המשתתפים בהם?

כפי שהסברנו בתשובה לשאלה 2, יש להקנות לפרוטונים אנרגיה גבוהה מאד כדי שיתגברו על כוחות הדחייה החשמלית ביניהם ויתקרבו במידה מספקת זה לזה על מנת שיחל לפעול הכוח החזק. רק אז תתחיל תגובה גרעינית ליצירת הליום. הטמפרטורה הדרושה לכך היא כ- 10^7K .

כאשר תהליך מיזוג המימן להליום מסתיים, ליבתו של הכוכב תהיה עשויה מהליום. כוח הדחייה החשמלי בין שני גרעיני הליום גדול פי 4 מאשר כוח הדחייה בין שני פרוטונים (כי מטענו החשמלי של גרעין ההליום כפול מזה של הפרוטון). לכן דרושה אנרגיה הרבה יותר גבוהה או טמפרטורה יותר גבוהה, כ- 10^8K , כדי להחל תהליכי מיזוג הליום ליצירת גרעיני פחמן $^{12}_6\text{C}$ וגרעיני חמצן $^{16}_8\text{O}$. שרשרת זו, ליצירת יסודות כבדים יותר ממשיכה ליצירת מגנזיום, וכן הלאה עד לברזל $^{56}_{26}\text{Fe}$. כל הריאקציות האלה מאופיינות בשחרור אנרגיה. לברזל וליסודות שלידו בטבלה המחזורית, אנרגיית קשר לנוקליאון מכסימלית, לכן ממיזוג הברזל לא נפיק אנרגיה והתהליך נפסק שם.

6. מדוע אנו מניחים כי היקום הומוגני ואיזוטרופי למרות שהחומר ביקום מפוזר בכוכבים?

אחד מעקרונות האסטרונומיה המודרנית הינו "העיקרון הקוסמולוגי", המבוסס כמובן על תצפיות אסטרונומיות. הוא אומר שהיקום הינו הומוגני ואיזוטרופי. ההומוגניות פירושה שהיקום נראה זהה מכל מקום **ממנו** נסתכל, ואילו האיזוטרופיות פירושה שהיקום זהה מכל כיוון **אליו** נסתכל. כלומר, התצפיות מראות לנו שהיקום הינו אחיד **בכל** מקום ובכל **כיוון**. אולם, אחידות זו מתקיימת רק בתצפיות שערכו על חלקים של היקום שהם גדולים דיים, למשל מסדר גודל של 300 מיליון שנות אור! רק אז התכונות הממוצעות הנצפות שוות. לעומת זאת, אם נסתכל באזורים קטנים, כוכבים, גלקסיות וכיו' למשל, סמוך לנו ביקום, לא נמצא הומוגניות ואיזוטרופיות.

7. ניתן לזהות שני זנבות נפרדים לשביט, זנב כחול וזנב צהוב; מה מקורם? (הסבר את הבדלי הצבעים)

ניתן לזהות בשביטים שני זנבות נפרדים ושונים, האחד זנב האבק והשני זנב הפלסמה, הפונים מן השמש והלאה. לחץ קרינת השמש גורם לכך שאבק הנמצא בגוף השביט יהדף אל

מחוצה לו. אבק זה מפזר את אור השמש ומכאן צבעו הצהוב. רוח השמש הודפת יונים מן השביט, יונים אלה שחלק מהם: פחמן חד חמצני (CO^+) חנקן מיון (N^+) וכן CH^+ ו- OH^+ , הם האחראים לפליטת הצבע הכחול, לכן זנב זה נקרא זנב הפלסמה.

8. כיצד ניתן להסביר את השכיחות הגבוהה ביקום של חמצן ופחמן לעומת בריליום, ליתיום ובורון הנמצאים בטבלה המחזורית לפני הפחמן והחמצן?

מירב התגובות הגרעיניות בליבות כוכבים, לאחר שנוצר שם הליום, כוללות חמצן. זו הסיבה שנוצרים יותר גרעינים המכילים כפולות של 4 נוקליאונים.

9. ישנן מספר שיטות להעריך את גיל היקום. ציין שתיים.

שיטה 1: בשנת 1929 גילה האסטרונום אדווין הבל כי מהירות התרחקותן (v) מאיתנו של גלקסיות ספירליות היא ביחס ישר למרחקן r מאיתנו: $v = H_0 \cdot r$ כאשר H_0 הוא **קבוע הבל** שערכו היום ידוע. חוק זה ידוע מאז בשם **חוק הבל**. נכתוב אותו בצורה אחרת: $r = (1/H_0)v$; למעשה ל- $1/H_0$ ממדים של זמן, ומובנו - הזמן מאז שהיתה הגלקסיה עליה אנו צופים קרובה אלינו, ועד היום (בהנחה שהמהירות לא השתנתה). גודל זה זהה לכל הגלקסיות, ולכן ערכו - הזמן שעבר מאז כל הגלקסיות היו קרובות זו לזו, ועד היום. **זהו גיל היקום.**

שיטה 2: הכוכבים שאנו רואים אינם מפוזרים בצורה אחידה. ישנם אזורים בעלי צפיפות כוכבים גבוהה יותר. לקבוצות כוכבים מרוכזים באזור אחד, קרובים זה לזה ונמצאים בערך באותו מרחק מאיתנו קוראים בשם **צבירי כוכבים**. הצבירים הכדוריים הם אחת הצורות של צבירי כוכבים, שלהם צורה כדורית הדוקה והם מכילים עד מיליוני כוכבים בכל צביר. בצבירים אלה לא מוצאים כוכבים חמים (צעירים), אלה אדומים וצהובים.

ההנחה היא שכוכבי צביר כזה זקנים מאד. ספקטרום של הכוכבים הזקנים האלה מראה שהם מכילים מעט מאד, אם בכלל, יסודות כבדים. לכן סביר להניח שהם נוצרו בשלבים המוקדמים של היקום. ישנן שיטות להערכת גילם של כוכבים אלו וזה נותן חסם תחתון לגיל היקום.

10. מה הקשר בין "אור גלגל המזלות" ("zodiacal light") לשביטים?

אבק שנשאר במערכת השמש לאחר מעבר השביטים מפזר את אור השמש, ויוצר את אור גלגל המזלות.

11. היכן נוצרים היסודות הכבדים מברזל? (כיצד?)

גלי הלם העוברים דרך הגז המתפשט בסופרנובה מחממים את הגז ומאיצים את הריאקציות שמיצרות יסודות הכבדים מברזל.

12. בשלב מוקדם מאוד של היקום עבר המימן בעירה גרעינית ויצר יסודות כבדים יותר (הליום, דיאוטריום, וכו') מדוע פסק תהליך זה?

תגובות גרעיניות מתרחשות בטמפרטורות גבוהות מאד, מיליוני או עשרות מיליוני מעלות קלווין. בטמפרטורות גבוהות כאלה לחלקיקים המשתתפים בתגובה הגרעינית אנרגיה קינטית גבוהה דיה כדי לתת לחלק מהם סיכוי להתקרב זה לזה, להתגבר על הדחיה החשמלית ביניהם וליצור תגובה גרעינית.

תנאי טמפרטורות כאלה שוררים במרכזי כוכבים, ולכן שם המימן עובר תהליכי מיזוג להליום וכן הלאה. תנאי טמפרטורות כאלה שררו בשלבים מאד מוקדמים של היקום, ואיפשרו תהליכים גרעיניים, באופן הבא:

בשלבים הראשונים שררו ביקום טמפרטורות מאד גבוהות, יותר מ- $10^{10}K$, המאפשרות ריאקציה בה מתחבר פרוטון לאלקטרון ונוצרים ניטרון (וניטריון). הניטרונים החופשיים אינם יציבים (זמן מחצית החיים של ניטרון חופשי כ-11 דקות), אבל חלק מהם מספיק להתחלף בתגובות גרעיניות עם פרוטון ליצירת גרעינים כבדים יותר כמו דאוטריום (מימן כבד), טריטיום והליום:



תגובות אלה נפסקות כאשר הצפיפות של היקום המתפשט והטמפרטורה שלו יורדים מתחת לנדרש לתגובות תרמו-גרעיניות.

13. מדוע מחקר השביטים מספק מידע על מערכת השמש בשלבי היווצרותה?

הכוכבים, וגם השמש שלנו, נוצרים בענני החומר בתווך הבין-כוכבי, באזורים בהם יש ריכוז גבוה של מימן ניטרלי. השמש שלנו נולדה מענן חומר גדול שצפיפותו נמוכה מאד. רוב החומר של ענן זה נדחס כדי ליצור את השמש עצמה, ויתרתו (כאחוז אחד) יצרה דיסקה סביב השמש עצמה, בה פיזור החומר היה אחיד. לאחר זמן קצר, נוצרו מהחומר האחיד גושים של

חומר צפוף יותר, מהם אחר כך נוצרו הפלנטות שלנו שנעו במסלולים כמעט מעגליים. חלק מהחומר הבראשיתי של הדיסקה סביב השמש המשיך לנוע סביב השמש בגושים קטנים, קפואים, מהם נוצרו השביטים. גושים אלה לא עברו תהליכי התפתחות מאז היווצרותם, לכן הם מייצגים את מערכת השמש בהיווצרותה.

14. האם נוצרות מולקולות (לדוגמא CO , H_2O , H_2 וכו') בכוכבים? הסבר!

קרינות אנרגטיות מסוג קרינה על-סגולה, קרינת-X ואחרות גורמות בקלות לפירוק מוליקולות מסוג H_2 , H_2O ו- CO_2 לאטומים המרכיבים אותן. מוליקולות כאלו יכולות להתקיים רק באזורים קרים, בהם אין קרינות אנרגטיות. בתנאים השוררים בכוכבים, שם יש קרינות אנרגטיות מאד, לא נימצא מוליקולות כאלו. הן נמצאות בעננים המוליקולריים בתווך הבין-כוכבי, לשם לא מגיעה קרינה כזו.

15. עקב התפשטות היקום, האם הגלקסיות היום גדולות יותר משהיו לפני 7 מליארד שנה?

התפשטות היקום, כפי שהיא ניצפית לנו, קשורה רק להתרחקות הגלקסיות זו מזו. הכוח המחזיק את חלקי הגלקסיה לצורה שהם יוצרים הינו כוח הכבידה. כוח זה חזק דיו כדי לשמור על צורתן שאינה משתנה עקב התפשטות היקום.

שלב ג'

בשלב זה נשאלו המשתתפים 2 שאלות זהות, של שניים מן השופטים, עליהם נתבקשו לענות בכתב. לשם כך ניתנו להם כעשר דקות, במהלכם הרצתה פרופ' דינה קובץ-פריאלניק על שביטים וראשית החיים.

שאלה ראשונה (שאלתו של פרופ' יואל רפאלי)

מהו ההסבר לכך שהאסטרונואוט הוא במצב חוסר משקל במעבורת החלל? (כיצד מאמנים אסטרונואוטים במצב זה?)

תשובה

נדמה לעצמנו מעלית שהיא וכל העצמים בה נופלים נפילה חופשית ובאותה תאוצה. אם במעלית זו נתלה גוף על קפיץ הקשור לתיקרתה, לא ימתח הקפיץ. לכן "משקלו" של הגוף, כפי שהקפיץ מראה, הינו אפס, אף כי הוא נמשך בכוח אל כדור הארץ עקב כוח הכבידה ביניהם. כך גם קורה בחללית.

(באיזו שיטה התגלו רוב כוכבי הלכת לאחרונה?)

תשובה

כוכב שלידו פלנטה נע סביב מרכז המסה המשותף למערכת שני הגופים. אפשר לעקוב אחר תנועת הכוכב ולמדוד את מהירות התנועה בזמנים שונים. מעקב כזה יגלה כי עקומת המהירות של הכוכב (כלומר הדרך בה משתנה מהירותו עם הזמן) מראה שינוי מחזורי עקב התנועה סביב מרכז המסה. כך אפשר למדוד את זמן המחזור ואת מהירות התנועה ולהסיק מהם, בעזרת חוקי קפלר, על מסת בן הזוג. הבעיה היא שמהירות כוכבים כאלו, הנמדדת בעזרת היסט דופלר של קווי הספקטרום, קטנה מאד, עקב המסה הקטנה של בן הזוג - הפלנטה. רק לאחרונה פותחו שיטות המאפשרות מדידות מדויקות של מהירות כוכבים, עד ל-10 מ/ש' ואפילו פחות מכך. בשיטות אלו התגלו עד שנת 1998 שמונה פלנטות ליד כוכבים הדומים לשמש.

תהודה

חללית הנימצאת בגובה מאות קילומטרים מפני כדור הארץ, עדיין נימצאת בשדה הכבידה שלו ופועלת עליה ועל כל הגופים בה אותה תאוצה נפילה חופשית. לכן גם כאן גוף התלוי על קפיץ לא ימתח אותו, "ומשקלו", כלומר הורית הקפיץ, הוא אפס. למעשה כוח המשיכה אל הארץ כתוצאה מהכבידה הוא המאלץ את החללית וכל אשר בה לנוע באותו מסלול מעגלי. הדרך המקובלת לאמן אסטרונאוטים למצב חוסר משקל היא ביצוע פעולות מתחת לפני המים במצב של כמעט חוסר משקל, בגלל כוח העילוי הפועל עליהם.

בבריה"מ לשעבר נהגו לאמן אסטרונאוטים למצב חוסר משקל, כאשר המטוס, בו הם נימצאו, עלה לגובה רב ומשם "נפלו" כמעט חופשית מהלך מספר קילומטרים, עד למצב של איזון.

שאלה שניה (שאלתו של ד"ר ארי לאור)

ציין שיטה אחת לגילוי כוכבי לכת מחוץ למערכת השמש.

"הפריצה הגדולה" - טורניר הכספות במכון ויצמן

נטע מעוז ואשר ואקנין, היחידה לפעולות נוער, מכון ויצמן למדע

איפשרה לראות את פנים הכספת ולהבין את עקרון הפתיחה. הטורניר עצמו נערך בחופשת הפסח במכון ויצמן במשך יומיים. במהלך התחרות התמודדו הצוותים על המרכיבים הבאים:

א. הבנת המנגנונים שבנו הצוותים האחרים, וכן ניסיון ל"פריצת" הכספת. לכל כספת הוקצב זמן מסוים להבנה ולפריצה.

ב. הגנה על המנגנון שבנה הצוות בפני חבר שופטים פיזיקאים ממכון ויצמן.

הניקוד הסופי היה מורכב מסך כל הנקודות שצברו הצוותים; 50% ניתנו להגנה על הבניה ו-50% להצלחות "הפריצות". בנוסף נערכו למשתתפים מספר הרצאות של מדענים בכירים וסיוורים במתקני המכון.

הפרויקט נערך בשיתוף הפיקוח על הפיזיקה והמחלקה לנוער שוחר מדע במשרד החינוך והתרבות. הצוותים הזוכים קיבלו ציון 100 בבחינת הבגרות במעבדה בפיזיקה.

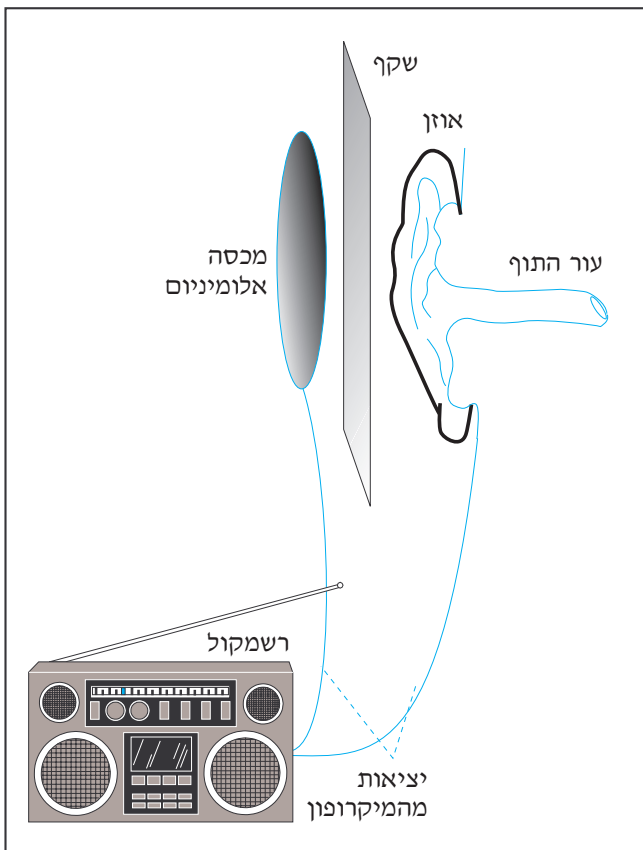
תהליך בניית המנגנונים וכן המאמצים לפריצת המנגנונים שבנו צוותים אחרים חייב עבודת צוות, יישום עקרונות פיזיקליים ידועים תוך פיתוח חשיבה מקורית ולעתים יוצאת

לפני מספר שנים החל מכון ויצמן למדע לקיים תחרות בפיזיקה בשם "טורניר בפיזיקה ע"ש שלהבת פרייאר" או "טורניר הכספות", המיועדת לתלמידי בית הספר התיכון.

למידה, כידוע, מתרחשת בדרכים שונות, ולא דוקא במסגרת הלימוד הפורמלי. אחת הדרכים היפות והמשמעותיות היא למידה תוך כדי יישום העקרונות התיאורטיים הנלמדים. גורם חשוב בעולם המודרני היא היכולת לעבוד בצוות. ההתקדמות המדעית והטכנולוגית כיום היא שילוב של יצירתיות וחדשנות של צוותים. כל הגורמים האלה הניעו אותנו להציע את המתכונת לטורניר.

בקיום הטורניר בפיזיקה חברו הגישות האלה: חיפשנו מתכונת בה תלמידים יעבדו בצוותים ויישמו עקרונות פיזיקליים הנלמדים בבית הספר.

הטורניר הינו תחרות בין צוותים (5 משתתפים בכל צוות) של בתי הספר (בדרך כלל תלמידי כיתות יא-יב) הנדרשים לתכנן ולבנות מנגנוני נעילה המבוססים על עקרונות פיזיקליים שונים. המנגנונים הורכבו בקופסאות אחידות בנויות מעץ עם דלת שקופה ומנגנון נעילה אלקטרו-מכני. הדלת השקופה



דופן. המתמודדים שפעו רעיונות תוך גילוי יוזמה, יצירתיות והבנה מעמיקה של העקרונות הפיזיקליים. הם העידו בעצמם שתוך כדי תהליך הבנייה ופתרון הבעיות שנתקלו בהם, למדו פיזיקה בצורה בלתי אמצעית ומלהיבה והפנימו היטב את העקרונות בהם השתמשו.

גם המורים שהיו מעורבים בתהליך ציינו בהתפעלות את הרעיונות היצירתיים וההתלהבות ששפעו מהתלמידים. עבודה בצוות נותנת ביטוי לסוגים שונים של יכולות, כך שתלמידים בעלי כישורים שונים יכלו לתרום לפיתרון מוצלח של הבעיה. תהליכים כאלו עוברים גם מדענים המשתפים פעולה במחקר מסוים.

המפגש בן היומיים במכון ויצמן, בו השתתפו תלמידים מבתי ספר רבים ברחבי הארץ תרם רבות להצלחת הטורניר. התלמידים נהנים מאד מפגישה עם בני נוער אחרים שהם בעלי אותם תחומי עניין וכישרון. יש לציין שחלק מהמשתתפים קיבלו את הציון במעבדה בפיזיקה עוד לפני שהשתתפו בטורניר, וזה לא מנע מהם להשתתף, בגלל האתגר שבדבר. נביא כאן תיאור של שתי כספות שהוצגו במהלך הטורניר:

א. האוזן כלוח קבל

מאלף ארט בראודה (2) - כרימל

במכשיר שבכספת מנוגנת קלטת עם קוד המספרים לפתיחתה. המטרה היא יצירת רמקול מהציוד הנלווה המתחבר ליציאות מהמכשיר.

הציוד הנלווה: צנצנת עם מכסה אלומיניום, שקפים, 2 תיילים מוליכים שבקצותיהם מצבטי תנין.

הרמקול שניתן ליצור הוא רמקול המבוסס על שינויים במתח שבין שני הלוחות של קבל. על מנת ליצור את הקבל המתאים יש לחבר יציאה אחת לגוף השומע, ויציאה שניה למכסה האלומיניום. מצמידים את המכסה לאוזן, כאשר בין האוזן למכסה נתון שקף לבידוד בין הלוחות הקבל.

היציאה שמתחברת לגוף טוענת אותו והוא משמש כלוח אחד של הקבל. הלוח השני של הקבל הוא מכסה האלומיניום. השינויים במתח שבין הלוחות הקבל גורמים לתנודות באחד משני הלוחות הקבל, זה הגמיש יותר. לוח זה הוא עור התוף. כך ניתן לשמוע את הקוד לפתיחת הכספת.

$$F = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 \cdot V^2 \cdot S}{d^2} \quad \text{הכוח } F \text{ הפועל בין לוחות קבל הוא:}$$

- כאשר: ϵ_0 - הקבוע הדיאלקטרי של הריק,
- V - המתח על הקבל
- S - שטח לוח הקבל
- d - המרחק בין שני הלוחות

כדי לקבל הספק מספיק כדי שאפשר יהיה ל"שמוע", הועברו בהתקנת הכספת היציאות מן הרמקול דרך שנאי (6/220) להגברת המתח בין הלוחות הקבל (ועל היציאה מן הרשמקול הותקן נגד של 50,000 אום למניעת התחשמלות).

לגבי שאר הפרמטרים:

d - כדאי לקרב את מכסה האלומיניום ככל שניתן לאוזן (עד הגבול בו התפלגות המטען על המכסה נשארת אחידה).

S - קיים יחס ישר בין שטח הקבל לכוח הפועל בין הלוחות הקבל, אך אם שטח המכסה יהיה גדול מגודל האפרכסת, שהיא לוח הקבל השני, ירד הכוח הפועל בין עור התוף למכסה לטובת כוח שיפעל בין המכסה לעור שמסביב לאוזן.

תפקיד השקף הוא הגדלת קיבול הקבל.

צוות "האוזן כלוח קבל" זכה בפרס ראשון בטורניר.

ב. שדה לא משמר

גיבון אצ'וי - באר ט'וביה

מנגנון הפתיחה של הכספת מבוסס על יישום התכונות של שדה חשמלי לא משמר.

תיאוריה

בשדה חשמלי משמר E קיימת פונקציית פוטנציאל התלוייה רק במקום. הפרש הפוטנציאלים (המתח) בין נקודה A לנקודה B נתון על-ידי:

$$\phi_A - \phi_B = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

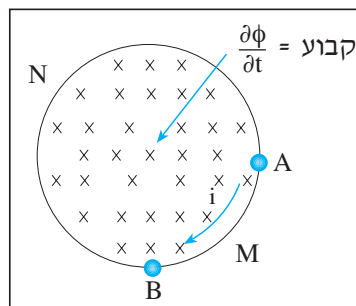
לפיכך האינטגרל על מסלול סגור מתאפס:

$$\oint_A^B \vec{E} \cdot d\vec{r} = 0$$

המצב שונה לגבי שדה חשמלי **רוטציוני** המתקבל, לדוגמה, כאשר מתחולל שינוי שטף מגנטי במרכזה של טבעת מוליכה. מחוק פארדיי ידוע כי שינוי שטף מגנטי יוצר במרחב שדה חשמלי וכא"מ ϵ המקיימים:

$$\epsilon = \int \vec{E} \cdot d\vec{r} = \frac{\partial \phi}{\partial t}$$

וערך הביטוי $\int \vec{E} \cdot d\vec{r}$ תלוי במסלול האינטגרציה (ראה תרשים א).



תרשים א'

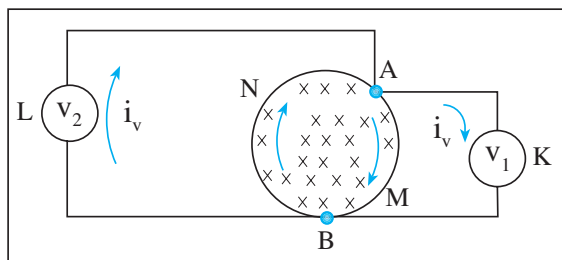
קיים: $N \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{r} = -R_N i$; $M \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{r} = R_M i$. אינטגרציה על

כל המעגל תיתן:

$$\epsilon = M \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{r} + N \int_B^A \vec{E} \cdot d\vec{r} = (R_M + R_N) i$$

עתה, מה קורה אם מחברים וולטמטר (בעל התנגדות גבוהה מאד בהשוואה להתנגדות הטבעת) לנקודות A ו-B?

(תרשים ב)

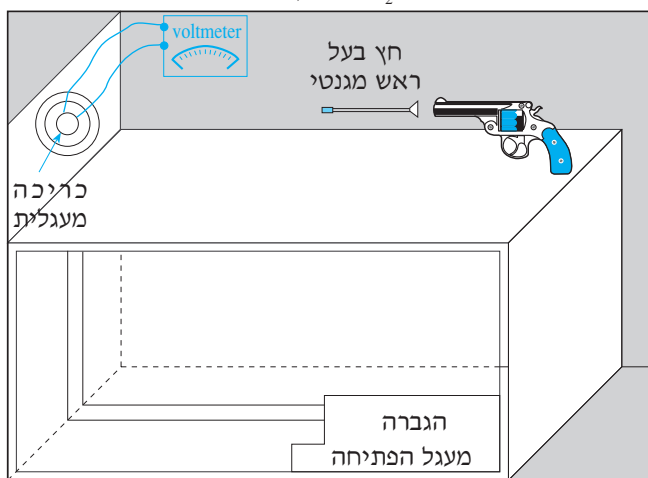


תרשים ב'

לאורך המסלול הכולל את הוולטמטר, יזרים הכא"מ המושרה ϵ זרם i_v (שלא ישנה למעשה את i , $i_v \gg i$).

ברור מן התרשים שגודל המתח וכיוון הזרם בוולטמטר המחובר בין A ו-B תלוי במיקומו; למשל בנקודות K ו-L בהתאמה. אם הוולטמטר מחובר מימין (V_1) נקבל כא"מ ϵ_M ואם הוולטמטר מחובר משמאל (V_2) נקבל כא"מ ϵ_N , ואלה שני ביטויים שונים (פרט למצב בו הנקודות A ו-B נמצאות על קצותיו של קוטר, ראה גם תרשים ד').

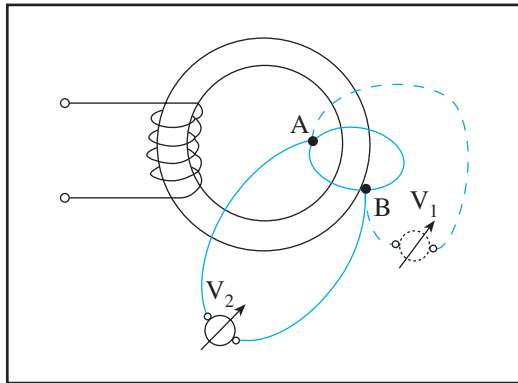
אם, לדוגמה, הכא"מ המושרה בטבעת הוא 1V והקשת AMB היא $1/3$ מהטבעת כולה, יורה הוולטמטר מימין לטבעת על $V_1 = 1/3V$ בכיוון מ A ל B, והוולטמטר המחובר משמאל לטבעת יורה על $V_2 = 2/3V$ בכיוון הנגדי.



תרשים ג': תיאור סכימטי של הכספת.

הפעלת מנגנון הפתיחה

במערכת הכספת, נקודות המגע (אל מערכת ההגברה) של הכריכה קבועות. יש ליצור מתח מספיק בין נקודות החיבור אל הכריכה על מנת לפתוח את הכספת. מיקום התיילים לפני הירי של החץ בעל הראש המגנטי יקבע אם המתח הנוצר גדול דיו (אחרי ההגברה) לפתיחת הכספת, נָלָא יש להעביר את התיילים מצד אחד אל הצד השני כמו בתרשים ב'.



ההסבר שהובא לעיל והתרשימים המופיעים בו, לקוחים מן המאמר "על כא"מ, הפרש פוטנציאלים ומתח" מאת רפי כהן.¹

מראה מקום

1. כהן, ר., על כא"מ, הפרש פוטנציאלים ומתח הדקים. גליונות 1(3), עמ' 10-12, אלול תשל"ב.

תרשים ד': מראה תלת-ממדי של הוולטמטר המחובר פעם בצד ימין ופעם בצד שמאל יחסית למעגל המקיף את השטף

רשימת בתי הספר שהשתתפו בטורניר תשנ"ח

מקום

- ראשון שני
- שלישי
- ציון לשבח
- ציון לשבח
- ציון לשבח
- פרס עידוד
- פרס עידוד
- פרס עידוד
- פרס עידוד

בית הספר

1. מכללת אורט בראודה, כרמיאל (צוות קוד-שמיעה)
2. ביה"ס התיכון ליד האוניברסיטה העברית, ירושלים
3. מכללת אורט בראודה, כרמיאל (צוות תנודה במיתר)
4. ביה"ס למדעים ואומנויות, ירושלים
5. ביה"ס מקיף זי - רביבים, ראשון לציון
6. תיכון אזורי, באר טוביה
7. ביה"ס מקיף ג', אשדוד
8. גמנסיה הגליל הנוצרית, עילבון
9. אורט הנרי רונסון, אשקלון
10. ביה"ס להנדסאים, רמת אביב
11. ביה"ס מקיף יובל קרית חינוך, הרצליה (אלקטרוסטטיקה)
12. ביה"ס בוואר, ירושלים
13. ביה"ס קציר, רחובות
14. תיכון בן גוריון, נס-ציונה
15. ביה"ס דה-שליט, רחובות
16. אורט גרינברג, טבעון
17. ישיבת בני עקיבא, שדה יעקב
18. מקיף יובל קרית חינוך, הרצליה (לחצים בנוזל)
19. מקיף א', אשדוד
20. ביה"ס קציר, רחובות (מקטבים)
21. תיכון הרצוג, בית חשמונאי
22. מקיף א', אשקלון
23. ביה"ס בגין, ראש העין
24. תיכון יגאל אלון, רמת השרון
25. ביה"ס לאומנויות, אשקלון

תצלום של צוות תיכון אזורי - באר-טוביה שזכה בציון לשבח בטורניר



תהודה