

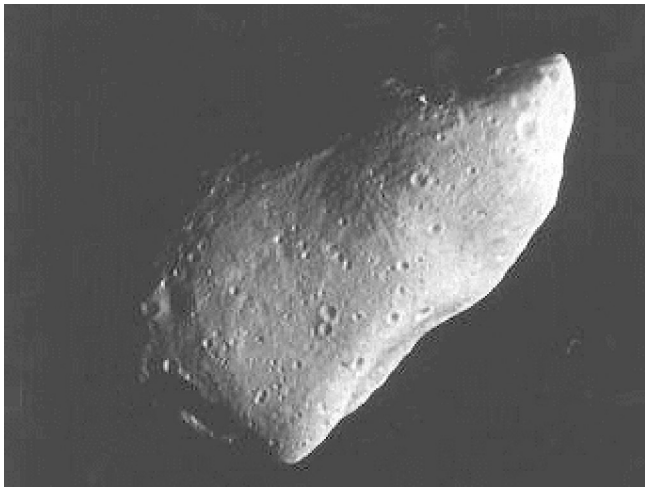


## האולימפיאדה השביעית באסטרונומיה וחקר החלל:

ע"ש פרופ' דרור שדה ז"ל - שלבים ב' וג'\*

מאיר מידב, בית הספר לחינוך, אוניברסיטת תל-אביב

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



תרשים 15 - אסטרויד אופייני

לייצר חום פנימי שישנה את צורתם: מתכות צפופות הותכו בהם ונדדו למרכזם, תוך יצירת ליבות, והותרת שאריות סלעיות בשכבותיהם החיצוניות. בחלקם אף התבצעה פעילות געשית, ששינתה את אופיים הסלעי. אף אחד מהם אינו גדול מספיק כדי להחזיק באטמוספירה משלו, אך מציאותם של מינרלים מסוימים בשרידיהם של מספר מטאוריטים מצביעה על קיומם, לעיתים קרובות, של מים נוזליים בגופים אלה. השפעתו של צדק הביאה לפיזור אחיד של האסטרואידים בחגורה שבינו לבין מאדים - דבר שהיה כרוך במפגשים אלימים בין אסטרואידים. במקום להמשיך ולגדול, הופגזו האסטרואידים האחד על ידי השני, וחלקם התנפץ לחלקים קטנים יותר. החלקים הללו המשיכו לעיתים להקיף את השמש במשפחות בעלות אותן תכונות מסלוליות וספקטראליות.

אסטרואידים ומטאוריטים רבים הינם שרידיהם של אותם "כמעט כוכבי לכת" ששינו את תכונותיהם. אסטרואידים אחרים, וכן מרבית השביטים, הם גופים קדומים יותר, שתכונותיהם מעולם לא השתנו, והם מהווים את השרידיים החיים מן העידן שלפני היות כוכבי הלכת.

### שלב ב'

בשלב זה הייתה התמקדות בשלושה נושאים, על פי מאמרים שקיבלו המתמודדים לפני חידון הגמר. שלושת הנושאים היו:

- \* אסטרואידים.
- \* ננסים חומים.
- \* גלקסיות ננסיות ויצירת כוכבים.

הנה השאלות של שלב ב' ופתרונו.

### 1. מהו הקשר המשוער בין האסטרואידים ובין יצירתה של מערכת השמש?

**תשובה:** האסטרואידים הינם גופים סלעיים זעירים המצויים במערכת השמש, בעיקר בחגורה המצויה בין מסלוליהם של כוכבי הלכת מאדים וצדק. קבוצות קטנות יותר של אסטרואידים, הידועים בשם "האסטרואידים הטרויאניים", מצויות במסלולים קרובים יותר לכדור הארץ ולצדק. כמו כן ידוע על אוכלוסיית גופים זעירים נוספת - השביטים - המצויה הרחק מעבר למסלולו של פלוטו, בענן אורט (Oort) המקיף את מערכת השמש. קוטרם של האסטרואידים נמצא בתחום שבין כמה מאות מטרים לכמה מאות קילומטרים, והם בעלי צורות שונות. הרכבם הכימי של האסטרואידים מצביע על קשר לאחדים מן המטאוריטים שנפלו על כדור הארץ בעבר. חקר האסטרואידים וכוכבי הלכת, הביא את החוקרים להרכבת תסריט אפשרי להיסטוריה של מערכת השמש. כדי שכוכבי הלכת (Planets) ייווצרו מענן האבק והגז הראשוני, שממנו נוצרה מערכת השמש, יש צורך בשלב התחלתי שבו נוצרו מגררי האבק הראשוניים גופים קטנים הקרויים Planetisimals, שהיוו את אבני הבניין של כוכבי הלכת. הפרעות שנגרמו בהשפעת כבידתו של כוכב הלכת צדק לא איפשרו יצירה של גופים הגדולים יותר מכ-1000 ק"מ באזור שבין מאדים וצדק, וכך נותרו שרידי ה-Planetisimals שהתגלו כאסטרואידים של ימינו.

הגדולים שב"כמעט-כוכבי לכת" הללו צברו מספיק מסה כדי

\* שלב א' של האולימפיאדה השביעית התפרסם ב"תהודה" 22(1), יוני 2001

## 2. האם קיים גבול תחתון לגודלו של כוכב? מהו בקירוב? מה ההסבר לכך?

**תשובה:** כוכב הינו גוף שמימי עשוי גז, שנוצר מענן גז ראשוני שקרס עקב כובדו העצמי, ומייצר אנרגיה באופן עצמאי (בתגובות תרמו-גרעיניות בליבתו), אותה הוא משחרר כקרינה לחלל.

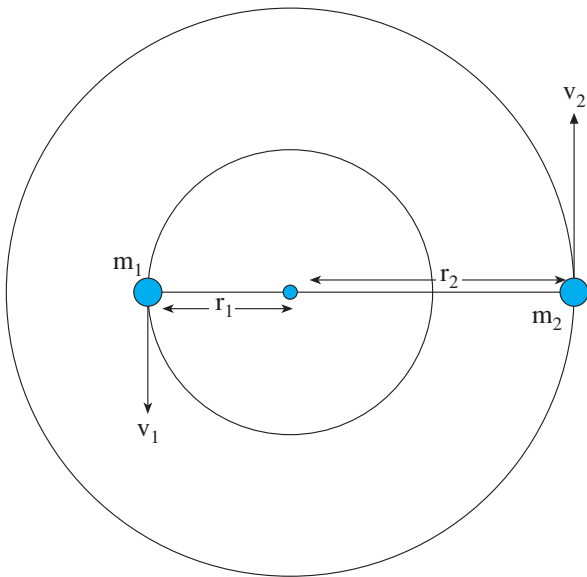
מקור האנרגיה של כוכבים הנו בתהליכים תרמו-גרעיניים המתרחשים בליבתם, ובהם הופכים גרעיני אטומים של מימן (פרוטונים) לגרעיני הליום, תוך שחרור אנרגיה. קיום תהליך זה דורש לקרב פרוטונים זה לזה עד למרחק הקטן מ- $2 \times 10^{-15}$  מטר, מרחק שבו פועל הכוח הגרעיני החזק. אולם כדי לקרב שני פרוטונים למרחק כזה, יש להתגבר על הדחייה החשמלית ביניהם. כדי להתגבר על המחסום הקולומבי, דרושה להם אנרגיה קינטית עצומה, המתאפשרת רק כאשר טמפרטורת גז הפרוטונים שבכוכב מגיעה לכ-3 מיליון מעלות קלווין. בליבות גופים מסיביים, כמו כוכבים, נוצר לחץ עצום כתוצאה מכבידתם העצמית, לחץ המלווה בטמפרטורות הגבוהות הדרושות לתהליכים אלה. בגופים שאינם די מסיביים, אין הטמפרטורה בליבה מספיקה כדי להצית את התהליכים הגרעיניים הללו, שהם המקור לקרינה הנפלטת מן הכוכבים. לכן קיים גבול תחתון למסתו של כוכב. גבול זה מוערך בכ-75 מסות צדק או כ-7% ממסת השמש. **הגופים השמימיים, שלהם מסה הקטנה מגבול זה, וקיומם היה רק משוער עד שנת 1995, קרויים "ננסים חומים".**

## 3. מדוע חיפשו המדענים "ננסים חומים" במיוחד בקרבת כוכבים רגילים? מה היה העיקרון של שיטת חיפוש זאת? מה היה החסרון העיקרי?

**תשובה:** החיפוש אחר ננסים חומים הוא קשה, משום שמדובר בגופים מאד חיוורים. משום כך היה על האסטרונומים להחליט על אסטרטגיה יעילה לחיפושם. מקום טוב כדי להתחיל בו היה בקרבת כוכבים ידועים. יותר ממחצית הכוכבים הידועים הם חלק ממערכת כוכב כפול - זוג כוכבים המקיפים את מרכז המסה המשותף שלהם - והחוקרים חשדו כי לרבים מן הכוכבים הנראים כבודדים, יש למעשה בני-זוג חיוורים מאד שהם ננסים חומים.

אחד היתרונות בחיפוש כזה הוא שהאסטרונומים אינם צריכים לצפות באזורים נרחבים בשמים כדי למצוא ננסים חומים – הם יכולים לכוון את הטלסקופים לאזורים מצומצמים יחסית, סביב כוכבים ידועים. יתרון נוסף בשיטת החיפוש הזאת הוא שאין צורך לצפות ממש בננס החום. ניתן

לגלות ננסים חומים במערכות כוכב כפול על-ידי גילוי השפעתם על הכוכב אותו הם מקיפים (בדומה לשיטת החיפוש אחר כוכבי לכת מחוץ למערכת השמש). כאמור, למעשה שני בני-הזוג במערכת כוכב כפול מקיפים את מרכז המסה המשותף שלהם, ולכן שניהם מתרחקים מאתנו ומתקרבים אלינו לסירוגין. הדבר תלוי גם בנטיית מסלוליהם ביחס לקו הראייה שלנו - אם אנו צופים במערכת כזאת מן "הצד", נראה אכן שני כוכבים מתרחקים ומתקרבים לסירוגין, אך אם אנו רואים את המערכת מ"מבט על", לא תהיה התרחקות או התקרבות יחסית אלינו.



תרשים 16 - מערכת כוכב כפול ממבט על

ניתן למדוד את השינויים במהירות תנועתו של כוכב על-ידי מדידת הסחת דופלר, הנגרמת על ידי תנועתו, בספקטרום האור המגיע אלינו. כאשר הכוכב מתרחק ומתקרב לסירוגין יוסח ספקטרום האור שלו לאדום ולכחול בהתאמה. כאמור, במקרה של מערכת של כוכב וננס חום, ניתן לצפות רק באור המתקבל מן הכוכב. משיקולים דינמיים ניתן לקבל חסם תחתון למסתו של הננס החום הנסתר. חסרונה של השיטה הוא בכך שהיא נותנת רק חסם תחתון למסה משום שלא ניתן לדעת בעצם מהי נטייתם של מסלולי בני-הזוג ביחס לקו הראייה. כתוצאה מכך, עצמים שהתגלו בשיטה זאת, יכולים להיות בעצם כוכבים בעלי מסה קטנה ולא ננסים חומים.

#### 4. תאר לפחות שתי שיטות שבעזרתן הצליחו המדענים להוכיח את קיומם של "ננסים חומים".

**תשובה:** במקביל לשיטה המתוארת בשאלה 3, חיפשו האסטרונומים שיטות אחרות לגילוי ננסים חומים. שיטות אלה מנצלות תכונות מסוימות המיוחדות לננסים חומים:

1. משערים כי ננסים חומים, כמו כוכבים, נוצרו כתוצאה מקריסת ענן גז תחת כובדו העצמי. תהליך הקריסה מלווה בשחרור אנרגיה המתקבלת מהקטנת הנפח. אנרגיה זאת נפלטת כקרינה, כאשר עיקר הקרינה של ננס חום הוא בתחום האינפרא-אדום. עם תחילת התכווצותו של ענן הגז, מתחיל לפעול לחץ תרמודינמי של הגז מן המרכז כלפי חוץ. לחץ זה פועל לאיזון התכווצות הגז ולמניעת קריסה כללית של הענן. דבר דומה קורה לאטמוספירה של כדור הארץ. במקרה של כוכבים, נוצר לחץ גבוה מספיק לצורך איזון כוח הכבידה. עליית הלחץ מלווה בעליית הטמפרטורה של ליבת הכוכב, עד להצתת התהליכים התרמו-גרעיניים (ראו שאלה 2). בשלב זה, נשמרות תכונותיהם הנצפות של הכוכבים, כמו בהירותם ורדיוסם, והם יציבים לאורך תקופה ארוכה מאד, לעיתים במשך מיליארדי שנים. השמש שלנו היא בת כ-4.5 מיליארד שנים ומצויה כעת בערך באמצע התקופה היציבה שלה. שלב יציב זה בחיי כוכב קרוי שלב "הסדרה הראשית".

במקרה של ננסים חומים לעומת זאת, הלחץ התרמודינמי אינו מאזן את כוח הכבידה לאחר ההתכווצות הראשונית, והננס החום ממשיך להתכווץ באופן איטי, תוך דעיכת עוצמת הקרינה שלו. הטמפרטורה המלווה את הלחץ הקיים בליבתו של ננס חום אופייני, מתאימה לגוף שחור ששיא עוצמת הקרינה שלו הוא בתחום האינפרא-אדום. בשל כך שאפו המדענים לחפש ננסים חומים צעירים, שכן אז אולי ניתן יהיה לגלותם על פי קרינתם שעדיין חזקה יחסית.

המקום הטוב ביותר לחיפוש עצמים צעירים הוא בצבירי כוכבים. הכוכבים בצבירים נוצרו כולם באותו הזמן, אך בזמן נתון הם נמצאים בשלבי התפתחות שונים. ככל שמסתו של כוכב גדולה יותר, הטמפרטורה בליבתו גבוהה יותר, ולכן תהליכי המיזוג הגרעיניים שבו אינטנסיביים ומהירים יותר. כוכבים כאלה יסיימו את שלב הסדרה הראשית שלהם מהר יותר. הכוכבים המסיביים ביותר קורנים רק במשך כמה מיליוני שנים עד שהם מכלים את מלאי המימן שלהם. הכוכבים הקלים יותר ממשיכים לקרן במשך מיליארדי שנים. גיל הצביר, אם כן, ניתן

להערכה על פי הערכת גילם של הכוכבים המסיביים ביותר שבו.

ברגע שהחוקרים מאתרים צביר כוכבים צעיר, עליהם לחפש את העצמים החיוורים והאדומים ביותר בתוכו, כדי לזהות "מועמדים" לננסים חומים. התיאוריה מאפשרת לחשב את מסת הכוכב אם נתונים טמפרטורת פני השטח שלו ובהירותו, אותם ניתן למדוד ישירות. כך ניתן לחשב את מסתם של הגופים המועמדים להיחפץ לננסים חומים.

שיטה זאת לא הוכחה כיעילה ביותר, משום שרבים מן המועמדים לננסים חומים שהתגלו בעזרתה, התבררו ככוכבים רגילים. למשל, מספר מועמדים התגלו כענקים אדומים - כוכבים זקנים, קרים ועצומים ברדיוסם - המצויים מאחורי הצביר שבו אותרו. בשל מרחקם הגדול מאחורי אותו צביר, הם נראו כחיוורים ונחשבו בטעות לננסים חומים.

2. מבחן הליתיום - גילויים של קווי בליעה של ליתיום בספקטרום של גופים אסטרונומיים מעיד על מסה המצויה מתחת לגבול הקרוב מאד לגבול המסה בין ננסים חומים וכוכבים - כ-60 מסות צדק. מתחת לגבול זה לא מתקיים מיזוג ליסוד ליתיום.

החומר הראשוני שנותר ביקום לאחר המפץ הגדול שממנו נוצרו הכוכבים הראשונים, הכיל אחוז מסוים של היסוד ליתיום. לאחר ש"נכלא" בתוך כוכבים, נהרס הליתיום הזה תוך זמן קצר עקב הטמפרטורה הגבוהה שלהם. תהליך ההרס של הליתיום נובע מהפגזתם של גרעיני ליתיום על-ידי פרוטונים שכתוצאה ממנה נוצר הליום. אפילו הכוכב הקל ביותר מכלה את הליתיום שלו בכמה מיליון שנים, בעוד שננסים חומים, למעט אלה המסיביים ביותר, שומרים על הליתיום שלהם לנצח. איתור קווי ליתיום בספקטרום יעיד לכן על גוף בעל מסה קטנה - ננס חום. שיטה זאת הביאה לגילוי של הננס החום הראשון בשנת 1995.

3. חיפוש בני-זוג חיוורים לכוכבים קטני מסה על-ידי טלסקופ המצויד במתקן מיוחד המאפשר את הסרת האור של הכוכב הראשי וחיפוש סביבו.

החיפוש נעשה בקרבת כוכבים קטני מסה, משום שהם בדרך כלל כוכבים חיוורים יחסית, דבר המקל על מלאכת גילויים של ננסים חומים. לאחר שנמצאו מועמדים לננסים חומים, בוצעה תצפית נוספת לכיוונם לאחר כשנה כדי לאשר כי הם נעים ביחד עם בן-זוגם. שיטה זאת נתנה

למדענים כי תופעת פרץ יצירת הכוכבים היא תופעה קצרת מועד, מכיוון שלו הייתה אורכת יותר מכמה מאות מיליוני שנים, היה מלאי הגז של הגלקסיה נגמר, ויצירת הכוכבים הייתה נפסקת. משערים כי דחיסת הגז הדרושה לשם הצתת פרצי יצירת כוכבים כאלה מתרחשת כתוצאה מפעילות גומלין כבידתית בין גלקסיות - שתי גלקסיות החולפות זו בקרבת זו, מתנגשות ונפרדות, או אף מתמזגות זו עם זו.

### שלב ג'

בשלב זה הוצגה לתלמידים שאלת אחד השופטים, פרופ' עמיאל שטרנברג. התלמידים נתבקשו לענות על השאלה בכתב, במשך 10 דקות. לשם כך יצאו מן האולם לחדר נפרד. במהלך 10 דקות אלה, הרצה פרופ' צבי מאז"ה, מביה"ס לפיסיקה ואסטרונומיה באוניברסיטת תל-אביב, על נושא מחקר בו הוא שותף - "חיפוש אחרי פלנטות ליד כוכבים רחוקים".

**הנה שאלת השופט פרופ' עמיאל שטרנברג:**

**א. הקוואזרים התגלו לפני למעלה מ-30 שנה. אז הועלתה ההשערה שבמרכזיהם ובמרכזי גלקסיות רגילות קיימים חורים שחורים מסיביים מאד. הסבר מה הוביל להשערה זו.**

**תשובה:** אחד התחומים החדשים באסטרונומיה המודרנית הוא רדיו-אסטרונומיה, כלומר תצפיות לגילוי קרינת רדיו מהחלל. ואכן, במשך עשרות השנים האחרונות נתגלו גופים רבים ביקום (כגון שרידי סופרנובה, עננים מולקולריים, ענני מימן נייטרלי, גלקסיות רדיו ועוד), הפולטים גלי רדיו. בשנות ה-60 של המאה ה-20 נתגלו עצמים מעניינים נוספים, הפולטים קרינת רדיו חזקה מאד, שאופייה הספקטרלי מתאים לזה של גלקסיה ולא לזה של כוכב, אך הם נראים דומים לכוכבים. עצמים אלה כונו בשם קוואזרים (קיצור של מקורות רדיו דמויי כוכב - quasi-stellar radio sources). הספקטרום של הקוואזרים דמה באופן מפתיע לספקטרום של עצמים ידועים אחרים - גרעיני גלקסיות פעילים (active galactic nuclei - AGN) - שהינם קרובים יותר לכדור הארץ מאשר קוואזרים, וקל יותר להבחין בהם בפרטים. ספקטרום זה היה שונה לחלוטין מהספקטרום של גוף שחור - הספקטרום האופייני לכוכבים ולגלקסיות רגילות - והיה מאופיין על ידי קרינת רצף הניתנת לתיאור על ידי חוק מעריכי  $F_\nu = \nu^{-\alpha}$ ; כאשר  $\alpha$  הוא גודל קבוע,  $F_\nu$  הוא שטף הקרינה ו- $\nu$  היא תדירות הקרינה) ובקווי פליטה חזקים. ספקטרום הרצף היה מפולג באופן אחיד יחסית בין התחומים הספקטרליים

פירות רבים יותר מן השיטה המתוארת בשאלה 3, והמדענים משערים כי ננסים חומים נפוצים יותר כשותפים במערכות כוכב כפול עם כוכבים קטני מסה מאשר עם כוכבים מסיביים. תופעה זאת נובעת כנראה מתהליכי יצירת מערכות כוכב כפול, הנוטות ליצור שני שותפים שיחס המסות שלהם אינו גדול מדי.

4. מיפוי חלקים גדולים של השמים בתחום האינפרא-אדום לחיפוש ננסים חומים בודדים, שעיקר הקרינה מהם הוא בתחום ספקטראלי זה.

לאחר מציאת "המועמדים", מחפשים בספקטרא שלהם את חתימת הליתיום המאשרת את היותם ננסים חומים (סעיף ב'). מדגמים אלה של השמים מראים כי מספרם של הננסים החומים ליחידת שטח בשמים דומה לזה של כוכבים קטני מסה. תוצאה זאת מרמזת על כך שננסים חומים נפוצים כמעט כמו כוכבים.

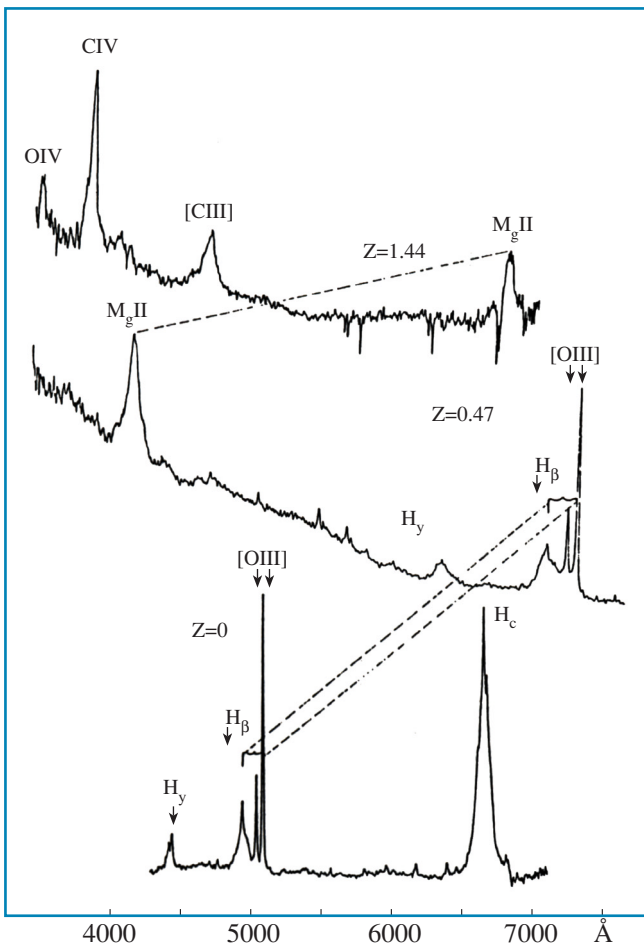
5. האם גם בגלקסיה שלנו נוצרים כוכבים חדשים? באיזה קצב נוצרים הכוכבים בשביל החלב ובאיזה קצב בפרץ של יצירת כוכבים בגלקסיות אחרות? כיצד יודעים המדענים כי פרץ יצירת הכוכבים מתרחש בתקופה קצרה יחסית?

**תשובה:** כוכבים נולדים, חיים במצב יציב במשך תקופה מסוימת, ומתים לבסוף. תהליך לידתם של כוכבים עדיין אינו מובן במלואו. משערים כי ענן של גז ואבק ראשוני, הקורס תחת כובדו העצמי, הוא המקור ליצירת כוכב. כאשר הענן קורס, עולים הלחץ והטמפרטורה במרכזו (כפי שהוסבר בשאלה 2), עד הגיעם לטמפרטורה הקריטית, שבה מתחילים תהליכי מיזוג גרעיניים, המהווים את המקור לקרינת הכוכב. כדי שענן גז או חלק ממנו יידחסו ויחלו בתהליך הקריסה, יש צורך בתהליך חיכוך שיגרום לכך.

בגלקסיה "רגילה" כמו בגלקסיה שלנו, "שביל החלב", תהליכי דחיסת הגז הם איטיים ואחידים, ומתרחשים באופן קבוע. דחיסת הגז מתבצעת בעיקר בזרועות הספיראליות, שהן בעצם גלים עצומים של גז דחוס, המתפשטים ממרכז הגלקסיה כלפי חוץ, כחלק משחרור אנרגיית הסיבוב הנוצרת עקב סיבובם של הכוכבים סביב מרכז הגלקסיה. הדבר דומה לגלים הנוצרים על-פני הנוזל כאשר מסובבים כוס מים מלאה. קצב יצירת הכוכבים בשביל החלב הוא כמסת שמש אחת בשנה. בניגוד לכך, פרץ יצירת כוכבים מתרחש בתקופה קצרה יחסית - כ-20 מיליון שנה - שבמהלכן קצב יצירת הכוכבים גדול הרבה יותר מן הממוצע - עד 100 מסות שמש בשנה. ידוע

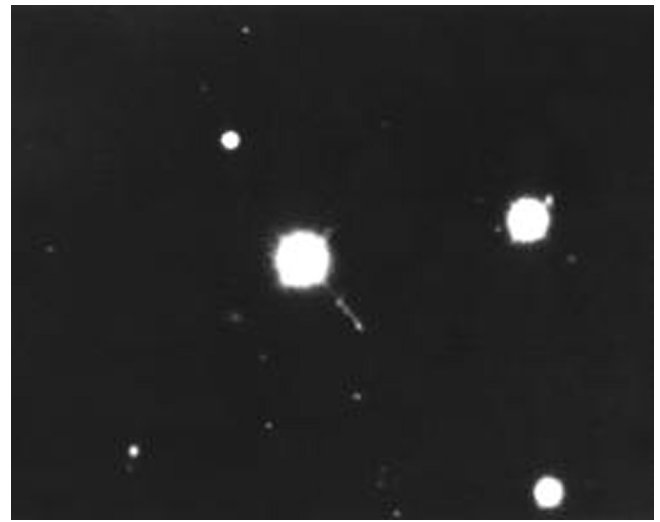
ההסבר הפיסיקלי שהיה יכול ליישב את התופעה של פליטת האנרגיה האדירה הזאת (עד פי 1,000 מגלקסיה רגילה) עם הגודל הפיסי הקטן יחסית ושאר התופעות שתוארו היה חייב לספק מנגנון פיסיקלי יעיל ביותר לייצור קרינה. התופעה היעילה ביותר בפיסיקה מבחינת ייצור אנרגיה בכמויות גדולות היא המרת אנרגיית הכובד לקרינה בנפילת חומר לחור שחור. היעילות של המרת החומר לאנרגיה בחור שחור היא 10%-40%, בעוד שיעילות תהליכי המיזוג הגרעיניים בכוכבים היא רק כ-0.7%. הערכתם של המדענים הייתה כי מדובר בחורים שחורים מסדר גודל של  $10^8 - 10^9$  מסות שמש.

תופעה נוספת שחזקה את השערת החורים השחורים הייתה רוחבם של קווי פליטה אחדים של הקוואזרים (עשרות עד מאות אנגסטרם). אם מניחים כי הדבר נובע מהסחת דופלר של חומר הנע בתוך הקוואזר, מתקבלות מהירויות עצומות, של אלפי ק"מ בשנייה, שאינן נראות בגלקסיות רגילות, ומעידות על קיומו של שדה כובד חזק במיוחד.



תרשים 18: ספקטרום אופייני של שלושה קוואזרים, בשלוש הסחות לאדום שונות.

השונים - הרדיו, האינפרא-אדום, האולטרא-סגול, X-ולעיתים אף בתחום קרינת ה- $\gamma$  - זאת בניגוד לכוכבים, שבהם הפליטה מצומצמת יחסית לתחום הצר של פונקציית פלאנק. תצפיות רדיו בקוואזרים הראו לעיתים, פרט למקור מרכזי דמוי כוכב, מבנה מורכב יותר. לעיתים קרובות נראו נובעים, משני צדי הקוואזר, סילונים כמעט ישרים של חומר שאורכם מגיע עד כמה מיליוני (!) שנות אור. אחת ההשערות הייתה כי מדובר בחומר שנפלט מן הקוואזר. כדי לקיים מבנה כל כך מוארך ודק במשך זמן כה רב (מיליוני שנה לפחות), דרוש גוף בעל תנע זוויתי עצום.



תרשים 17 - הקוואזר 3C273, המצוי במרחק 3 מיליארד שנות אור מאתנו. בהירותו גדולה פי 100 מזו של שביל-החלב. ניתן להבחין בסילון בגודל 100,000 שנות אור הבוקע ממנו.

ספקטרום קווי הפליטה של הקוואזרים הצביע על הסחה לאדום גדולה מכל מה שהיה ידוע עד אותה תקופה (לדוגמה 3C273 עם מידת הסחה לאדום שניתנת על ידי גודל  $z$  השווה במקרה זה ל-0.158). בהירותם המחושבת של הקוואזרים הייתה גדולה בכמה סדרי גודל מזאת של גלקסיות נורמליות. תופעה נצפית נוספת הייתה השתנות עוצמת האור מן הקוואזרים בזמנים קצרים יחסית - שבועות וחודשים. המדענים הניחו כי משך הזמן האופייני להתבהרות (או היחלשות) עוצמת האור מתכונתי לזמן מעבר האור על-פני אותו הגוף, ולכן זמן זה נותן מדד לגודלו הפיסי של הגוף. תופעת ההשתנות מעידה אם כן על גודלם הקטן של הקוואזרים (בקנה מידה אסטרונומי) - שבועות עד חודשי אור, כלומר המרחק אותו עובר האור במשך זמן ההתבהרות האופייני.

הגלקסיה, וממנו להסיק כי מסת הגוף המרכזי - החור השחור - היא כ-3 מיליון מסות שמש.

● **מדידת מהירות הגז והכוכבים בגלקסיות אחרות:**

בגלקסיות קרובות אחרות לא ניתן לצפות באופן ישיר בכוכבים בודדים, אך ניתן לבצע מדידות ספקטרוסקופיות של הגז קרוב מאד למרכזן, ומשיקולים דינמיים להסיק את מסת הגוף המרכזי. המסות של החורים השחורים שהתגלו הם בתחום  $10^7$ - $10^9$  מסות שמש. המדענים משערים כי חורים שחורים אלה דומים לחורים השחורים שבמרכזי גלקסיות פעילות, מלבד העובדה שפליטת האנרגיה מהם אפסית, משום שכנראה אזלה אספקת הדלק לתהליכי יצירת האנרגיה שלהם.

● **בגלקסיות פעילות מסוימות קיימות עדויות ישירות לקיום דיסקת הספיחה:**

המדענים נעזרים בתופעה, שבה מולקולות מסוימות (למשל, מולקולות מים) המצויות בגז מעוררות על-ידי קרינת X ממקור מרכזי ופולטות קרינה חזקה בתחום המיקרו-גל, באופן המזכיר אלומת לייזר (תופעה זאת קרויה "מייזר" - maser). בשיטה זאת ניתן למדוד את מסת הגוף המרכזי. התוצאות שהתקבלו עד כה ממדידות אלה מתאימות למודל של חור שחור מרכזי.

● **במידה ואכן קיים גוף מסיבי וקומפקטי כמו חור שחור במרכזן של גלקסיות, השפעתו הכובדית אמורה לעוות את המרחב סביבו באופן הניתן לתצפית:**

ידוע כי אור הנפלט מגוף מסיבי עובר הסחה כובדית לאדום, כלומר פוטונים בעלי אורכי גל שונים, יושפעו באורח שונה עקב שדה הכבידה. גלקסיות פעילות וקוואזרים, מספקים את הסביבה המתאימה לתצפית כזאת. סמוך מאד לחור השחור בגלקסיות פעילות, נפלטת קרינת X. בתחום ספקטראלי זה קיים קו הפליטה  $K_{\alpha}$  של היסוד ברזל, באנרגיה של 6.4 keV. בקו זה ניתן לראות את השפעתה האופיינית של ההסחה הכובדית לאדום, אשר בשילוב עם אחת העדויות הנוספות, מחזקת את השערת קיום החור השחור.

● **תופעת ה"הדהוד":**

מקור האור המרכזי בקוואזרים ובגלקסיות פעילות הוא כפי הנראה דיסקת הספיחה של הגז המתאסף סביב החור השחור. מקור זה פולט את קרינת הרצף המעריכית וידוע גם כי הוא משתנה באופן דרמטי בתוך שבועות ולעיתים אף ימים. אם מניחים כי קווי הפליטה הנראים בספקטרום נפלטים מענני גז המרוחקים מן המקור

אחת הבעיות שהעלו מדענים, כאשר שקלו את האפשרות לקיום חורים שחורים מסיביים במרכזם של קוואזרים, הייתה בעיית ההזנה שלהם בחומר. על מנת לקיים את עוצמת האור האדירה הנפלטת מקוואזר במשך מיליוני שנים, יש "לספק" לחור השחור שלו מנות עצומות של גז, ונראה היה, כי בשלב מסוים, יכולים חורים שחורים אחדים לחסל את מנת החומר שלהם עד תום. המדענים שיערו שבמצב זה יעבור הקוואזר לתקופה שקטה, שבה יהיה החור השחור רדום. ייתכן כי בגלקסיות רבות שאינן נראות כקוואזרים, קיים בעצם חור שחור מסיבי, אך הוא מצוי בשלב התרדמה שלו.

**ב. תן שתי עדויות מהעשור האחרון, לקיומם של חורים שחורים מסיביים במרכזי גלקסיות.**

על-פי המודל הסטנדרטי המקובל כיום, קוואזרים הם חורים שחורים מסיביים במיוחד (עשרות מיליוני עד מיליארדי מסות שמש), השוכנים במרכזן של גלקסיות ומושכים ענני גז מן התווך הבין-כוכבי של אותה גלקסיה. ענני הגז בעלי התנע הזוויתי מצטברים סביב החור השחור בצורת דיסקה, המתערבלת פנימה בהדרגה. כוח הכובד העצום, המונע אפילו מאור לברוח מן החור השחור, מאיץ את החומר שבקרבתו למהירויות גבוהות מאד (יחסותיות). כוחות החיכוך האדירים, הפועלים על הגז בדיסקת הספיחה, גורמים לחימומו, דבר המתבטא בהקרנת כמויות האנרגיה העצומות מן הקוואזרים, שאנו מודדים. באזורים מרוחקים יותר מן החור השחור מצויים ענני גז הנעים במהירויות של עד אלפי ק"מ בשניה. עננים אלה מיוננים על-ידי הקרינה מן המרכז (מדיסקת הספיחה), ופולטים ספקטרום אופייני של קווי פליטה. בשנים האחרונות הצטברו מספר עדויות לקיומם של חורים שחורים במרכזן של גלקסיות "רגילות", ובכללן גלקסיית שביל-החלב:

● **מדידת מהירות כוכבים באופן ישיר במרכז גלקסיית שביל-החלב:**

בשנים האחרונות התאפשרו זיהוי ישיר של כוכבים באזור מרכז גלקסיית שביל-החלב, ומדידה ישירה ומלאה של מהירויותיהם. ניתן לחשב את מהירויותיהם לאורך קו הראייה באמצעות מדידת אפקט דופלר בספקטרום שלהם. באמצעות מעקב אחרי אותם כוכבים במשך מספר שנים ניתן למדוד את רכיב המהירות הנוסף שלהם, הרכיב במישור השמיים (מדידה זאת קרויה מדידה אסטרוטטרית). כעת ניתן היה להרכיב מודל דינמי של תנועת הכוכבים, על סמך חוקי קפלר, סביב מרכז

המרכזי כתגובה לאותו מקור, קיימת כאן למעשה תופעה של "הדהוד" - השתנות עוצמת המקור המרכזי גוררת השתנות של קווי הפליטה, אך לא באופן מיידי, אלא בעיכוב מסוים הנובע מן הגיאומטריה של המערכת. למשל, אור מן המקור, הנע ישירות כלפינו, יעורר את קווי הפליטה בענן שבדרכו, ולא יהיה כל עיכוב ביניהם. לעומת זאת, האור הנע בכיוון ההפוך, מעורר קווי פליטה מן העננים וחוזר אלינו, יגיע אלינו לאחר זמן ארוך יותר. בעזרת שיטה זאת ניתן אם כן למצוא אילוץ על מבנהו הגיאומטרי של הקוואר. בשילוב עם מדידות מהירות ענני הגז, למשל מרחב קווי הפליטה, ניתן להסיק על גודלה של המסה המרכזית.

מדידות מסה של חורים שחורים במרכזן של גלקסיות פעילות, כמו אלה המתוארות לעיל, שהצטברו עד כה, מראות על מגמה מעניינת: קיים קשר בין גודל החור השחור המרכזי לגודל הגלקסיה, שבה הוא שוכן. ליתר דיוק, קיים יחס קבוע בין מסת החור השחור בגלקסיות ספירליות לבין מסת התפיחה של הגלקסיה שלו, כלומר

למסה של אוכלוסיית הכוכבים הזקנים. באופן דומה, בגלקסיות אליפטיות שבהן כל הכוכבים הם זקנים, מסת החור השחור מתכונתית למסת כל הגלקסיה. אחד המודלים, שהוצעו להסבר הקשר הזה הוא, שבזמן יצירת הגלקסיות הראשונות והכוכבים הראשונים, אלה המצויים כיום בגלקסיות אליפטיות ובתפוחות של הגלקסיות הספירליות, נותר גם גז נוסף במרכזי הגלקסיות. גז זה נותר כתוצאה מכך שתהליך יצירת הכוכבים אינו יעיל במאת האחוזים. לכן כמות הגז מהווה אחוז קבוע פחות או יותר ממסת הכוכבים. משערים כי בתנאים מסוימים של צפיפות וטמפרטורה קורס גז זה ויוצר את החור השחור.

### סיכום

הבאנו כאן דיווח קצר על האולימפיאדה השביעית באסטרונומיה וחקר החלל. פעם נוספת הופתענו מהמספר הגדול של הנוכחים באולם בעת האולימפיאדה. תגובות התלמידים, הקהל ואנשי האקדמיה היו חיוביות מאוד.

תהודה

## פרד הויל 1915 – 2001 Fred Hoyle

פרופסור פרד הויל נפטר ב-20 באוגוסט 2001, בגיל 86, בבורנמות (Bournemouth), אנגליה, כתוצאה מאירוע מוחי. הויל היה אחד האסטרופיסיקאים היצירתיים, המקוריים והפרובוקטיביים ביותר בחמישים השנים האחרונות. הוא טבע את השם "המפץ הגדול" לתיאוריה של יצירת היקום, שהוא התנגד לה בחריפות. הויל השתמש לראשונה בשם זה, בלעג, בהרצאה האחרונה שנתן בסידרה ששודרה ב-BBC ב-1950. אבל שם זה אומץ כעבור זמן קצר על ידי כל האסטרופיסיקאים. הויל דבק בתיאוריה שלו, תיאוריית המצב העמיד (steady state), לפיה החומר נוצר כל הזמן, באופן שהיקום המתפשט נשאר אותו היקום בכל עת, ואין לו התחלה או סוף. ד"ר טרימבל (Dr. Virginia Trimble) מאוניברסיטת קליפורניה באירוין (Irvine) אמרה שהתנגדותו של הויל לתיאוריית המפץ הגדול, אף שהייתה שגויה, תרמה רבות להפיכת הקוסמולוגיה למדע אמיתי, אשר בו נבחנו תיאוריות מתחרות על ידי תצפיות.

פרופ. ויקרמסינג (Prof. Chandra Wickramasingh) מאוניברסיטת ויילס (Wales) בבריטניה אמר: "הויל האמין, וגם אני מאמין, שתיאוריית המפץ הגדול המקובלת, הטוענת שהכל התחיל ברגע מסוים בזמן, ושלא היה שום דבר לפני כן, היא שגויה ביסודה, ושגל היקום הוא אינסופי ומשתרע לאינסוף בחלל."

הויל, יחד עם שלושה מדענים עמיתים: Dr. William Fowler, Dr. G Burbridge, Dr. M. Burbridge, מצא הסבר אפשרי לדרך בה נוצרו היסודות הכבדים. Fowler זכה ב-1983 בפרס נובל על עבודתו זו ואחרות באסטרופיסיקה. באוטוביוגרפיה שלו כתב Fowler שהויל היה אחד מבעלי ההשפעה החשובים ביותר בחייו. תוצאות עבודה זאת פורסמו במאמר היסטורי ב-1957 ב-Reviews of Modern Physics בשם: "Synthesis of the Elements in the Stars": (הסינתזה של היסודות בכוכבים).

בשנים 1958-1972 כיהן כפרופסור לאסטרונומיה באוניברסיטת קימברידג' באנגליה, והיה החשוב שבמיסדי המכון לאסטרונומיה תיאורטית באוניברסיטה זו ומנהלו הראשון. אסטרונומים רבים מכל העולם עלו לרגל למוסד יוקרתי זה. כעבור עשר שנים בהן ניהל את המכון, התפטר הויל מן ההנהלה אחרי ויכוחים סוערים על עתיד האסטרונומיה בבריטניה. הויל גם כתב ספרים במדע בדיוני, ביניהם "הענן השחור" (1957) ו-"A" עבור אנדרומדה" (1962) - שניהם פנטזיות מעולם האסטרופיסיקה.