

## חורים שחורים\*

מאת: מריו ליביו  
הפקולטה לפיסיקה, הטכניון, חיפה

עוד בשנת 1795 שם לפלס (Laplace) לב לעובדה המעניינת הבאה: אם הרדיוס  $R$  של כוכב קטן מערך קריטי מסוים  $R_c$  הנקבע ע"י מסתו  $M$ :

$$R \leq R_c = \frac{2GM}{c^2}$$

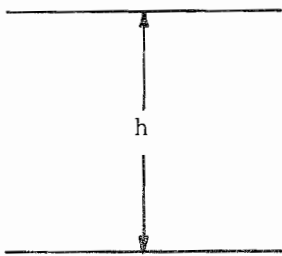
כאשר  $G$  - קבוע הגרביטציה העולמי, ו-  $c$  - מהירות האור. מהירות ההימלטות המתקבלת עבור כוכב זה:

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

גדולה ממהירות האור. לפלס הסיק איפוא שמעצם כזה אור לא יוכל להימלט ולכן הוא יהיה "שחור". האמת היא שמסקנתו של לפלס לא היתה לגמרי מוצדקת על סמך הפיסיקה הקלאסית במובן הבא: מהירות האור איננה ממלאת שום תפקיד מיוחד במכניקה ניוטונית, ולכן, לו למשל היינו שמים ראי על פניו של כוכב כזה, אור שהיה מגיע אל הראי מאינסוף, היה גם חייב להיות מוחזר לאינסוף (מתוך אינוריאנטיות משוואת התנועה). אולם, פתרונות מדויקים של הבעיה, בעזרת תורת היחסות הכללית, מאשרים שהתוצאה עצמה נכונה. ואמנם, מעצם המקיים:  $R \leq R_c$ , אור (ושום אינפורמציה אחרת) אינם יכולים לצאת. מן המסקנה האחרונה מתחייבת השאלה הבאה: האמנם אור מושפע על-ידי כוח הכובד? מסתבר שכן; ננסה להבין זאת על-ידי הניסוי המחשבתי הפשוט הבא:

---

\*מאמר זה הוא רישום הרצאה שנתן ד"ר ליביו בכנס מורי פיסיקה שהתקיים בינואר 1984 באוניברסיטת תל-אביב.



נתאר לנו חלקיק בעל מסה  $m$  הנמצא ברמה א' (תרשים 1) בשדה הכבד, בגובה  $h$  מעל רמה ב', אותה נבחר כמישור ייחוס עבור אנרגיה פוטנציאלית כובדית. האנרגיה (הכוללת) של החלקיק היא:

תרשים 1  $E_A = mc^2 + mgh$

נניח כעת כי חלקיק זה נופל לרמה ב' ושם אנו מצליחים להשמיד אותו ולהפוך את האנרגיה שלו לפוטון (בעל אנרגיה  $E_B = mc^2 + mgh$ ).

אם אמנם פוטונים אינם מושפעים על-ידי כוח הכובד, ניתן לפוטון זה לנוע בכיוון מעלה לרמה א' ושם נהפוך אותו חזרה לחלקיק. האנרגיה של חלקיק זה תהיה מורכבת מאנרגיית מנוחה (שתהיה שווה לאנרגיית הפוטון) וגם אנרגיה פוטנציאלית כובדית:

$$E_A = E_B + mgh$$

וכך קיבלנו "מכונה" ה"יוצרת" אנרגיה בגודל  $mgh$ , (כמובן שניתן לחזור על התהליך שוב ושוב). סתירה זו התקבלה בגלל ההנחה שהפוטון איננו מפסיד אנרגיה בשדה הכובד. הסתירה נעלמת אם נניח שהפוטון אכן מפסיד אנרגיה (תדירותו קטנה) בשיעור:

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{GMh}{R^2 c^2}$$

ניסויים אמנם מאשרים מסקנה זו (ראה, לדוגמה:

.(Berkeley Physics Vol 1, p 400

נשוב אם כן לכוכב שבו דנו בתחילת המאמר. אם רדיוס הכוכב שואף לערך הקריטי  $R_C$ , נוצר מעין "אופק" שמעבר לו אין צופה מבחוץ יכול לראות. בכדי לקבל מושג על סדר הגודל של רדיוס קריטי זה, נחשבו עבור כוכב בעל מסת שמש אחת  $M = M_\odot = 2 \times 10^{33}$  גרם; מתקבל 3 ק"מ  $R_C \sim$ . במילים אחרות, אילו יכולנו לדחוס את השמש לעצם בעל רדיוס הקטן מ-3 ק"מ, שום אינפורמציה לא היתה יכולה לצאת מעצם זה; זהו "חור שחור". כמובן שאין ביכולתנו לדחוס את השמש ולכן השאלה היא האם ישנם תהליכים בטבע היכולים לגרום לדחיסה כזאת. בכדי לענות על שאלה זו נסקור בקצרה מספר עובדות בהתפתחות של כוכבים.

הגורם החשוב ביותר המשפיע על המבנה וההתפתחות של כוכב הוא כוח הכובד. כוח הכובד קיים בכל שלב, ואינו ניתן לסיכוך. בהעדר כוח נגדי, יגרום כוח הכובד לקריסת הכוכב. מה מונע אם כך את קריסתם של כוכבים? במשך רוב "חיהם" של הכוכבים, תהליכים גרעיניים המתרחשים בליבת הכוכב יוצרים אנרגיה רבה וכתוצאה מכך טמפרטורות גבוהות וגרדיאנט להץ המשמש כוח נגדי לגרביטציה. במהלך ההתפתחות שלהם כוכבים מתנהגים באופן שונה בהתאם למסה שלהם, למשל:

$$M \sim 10 - 60 M_\odot$$

כוכבים כאלה מסוגלים "להדליק" תגובות מיזוג גרעיניות עד היווצרות ברזל, שהוא הגרעין היציב ביותר. בטמפרטורות הגבוהות הנוצרות בליבת הכוכב  $T \sim 10^{10}$  K, הפוטונים שוברים את גרעיני הברזל ומתקבלת קריסה

$$M \sim 0.8 - 8 M_\odot$$

כוכבים כאלה מסוגלים "להדליק" תגובות מיזוג גרעיניות רק עד היווצרות גרעינים כמו פחמן, חמצן. בסופו של דבר הם מעיפים את המעטפת שלהם ויוצרים ערפילית המכונה "ערפילית פלנטרית" ומסיימים את חייהם

$$\rho \sim 10^{14} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

דרמטית של הליבה (כי האנרגיה מושקעת

באנרגיית קשר גרעינית במקום לבנות

לחץ). קריסה זו נעצרת רק עבור

צפיפויות  $\rho < 10^{14} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ , נוצר גל הלם

והתפוצצות אדירה הנקראת "סופרנובה"

המעיפה את כל מעטפת הכוכב ומשאירה

רק את הליבה ככוכב ניוטרונים.

הגדלים המאפיינים כוכב ניוטרונים הם:

$$M \sim 1M_{\odot}$$

$$R \sim 10\text{km}$$

כ"ננסים לבנים".

הגדלים המאפיינים ננס לבן:

$$M \sim 1M_{\odot}$$

$$R \sim 5000\text{km}$$

והם מוחזקים ע"י לחץ של אלקטרונים

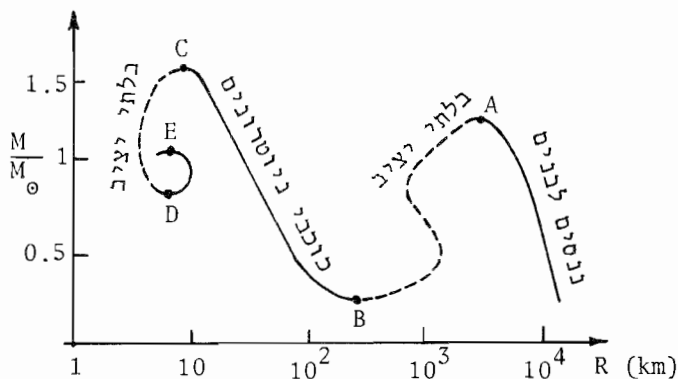
מנוונים (אפקט הנובע מעקרון האיסור

של פאולי).

אולם מסתבר, שקיימת מסה מקסימלית אפשרית לכוכב ניוטרונים (ראה תרשים 2),

ועבור מסה הגדולה מערך קריטי זה,  $M_{\text{max}} \sim 3M_{\odot}$  הקריסה הסופית לחור

שחור היא בלתי נמנעת.



תרשים 2

מסה כפונקציה של הרדיוס לחומר קר. דיאגרמה סכמטית בלבד.

החלק המקווקו מתאר קונפגורציות לא יציבות.

מנקודת ראות צופה היצוני הקריסה לעבר ה"אופק"  $R_c$ , נמשכת אמנם באופן תאורטי זמן אינסופי אולם למעשה הכוכב הקורס הופך לחור שחור תוך זמן

$\tau$  (בשניות):

$$\tau \sim \frac{R_c}{c} \sim 10^{-5} \frac{M}{M_\odot}$$

צופה היפותטי הנמצא על העצם הקורס לא יבחין אמנם בתחילה ברבר (לפי "עקרון האקויוולנציה לא ניתן להבחין בכוח גרביטציוני באופן מקומי), אולם עם המשך הקריסה והתחזקות השדה הגרביטציוני בשפת העצם מתחילים "כוחות גאות" (או עקמומיות המרחב) לשחק תפקיד חשוב. כוחות אלה מוכרים לנו גם מפעולת הירח על הימים על פני כדור הארץ והם נובעים מכך שכאשר גוף בעל מימדים סופיים נמצא בשדה כובד של כוכב (מחוצה לו), הכוח הפועל על חלק הגוף הקרוב יותר למרכז הכוכב גדול יותר מזה הפועל על חלקי הגוף הרחוקים יותר. מכיון שכוחות הגאות מתנהגים כמו:

$$F \sim \frac{M}{r^3}$$

הם שואפים לאינסוף כאשר  $r \rightarrow 0$ . כוחות אלו יקרעו כל גוף ולבסוף ישברו גם קשרים מולקולריים וגרעיניים עם הקריסה אל הסינגולריות.

נשאלת השאלה כיצד ניתן לצפות בחורים שחורים? (שכן כאמור, מחור שחור בודד, קלסי, איננו מבחינים בשום אור). בכדי לענות על שאלה זאת, נזכיר מספר עובדות תצפיתיות:

1. נתגלו מקורות הפולטים אנרגיה רבה בצורת קרינת X.
2. הוכח שחלק ניכר ממקורות אלה שייכים לזוג כוכבים וקיימות עדויות להעברת מסה מכוכב רגיל לעצם בלתי נראה (בתחום האופטי).
3. עוצמת ההארה  $L_x$  של חלק מהמקורות האלה:

$$L_x \sim 10^{38} \frac{\text{erg}}{\text{s}} \sim 2.5 \times 10^4 L_\odot$$

4. בחלק מהמקורות התגלו השתנויות בפרקי זמן בסדר גודל של  $100\text{ms} - 1 \sim \Delta t$  (אחת עד מאה מילישניות).

נראה עתה מה המסקנות שאנו יכולים להסיק מתוך תצפיות אלו. נתחיל מן העובדה הרביעית. מכיוון שניתן לראות את ההשתנות ממרחק כה גדול, הדבר מלמד שהאיזור פולט הקרינה כולו עובר השתנות ולא חלק מצומצם ממנו בלבד, שכן אז לא היינו מבחינים בכך. המימדים הגדולים ביותר  $d$  שיכולים להיות למקור ה- $x$  הם המרחק שאור יכול לעבור תוך זמן ההשתנות (כי זאת המהירות הגדולה ביותר בה ניתן להעביר את אינפורמציה ההשתנות על פני האיזור הפולט). אנו מקבלים איפוא  $d \leq ct \sim 3 \times 10^7 \text{ cm}$  ולכן העצם הפולט במקרה כזה הוא קטן מננס לבן.

מכיוון שקיימות עדויות להעברת מסה בין בני הזוג של הכוכבים, הוצע מודל שבו כוכב אחד שופך מסה על כוכב שני, הסופח אותה. האנרגיה המשתחררת לפי מודל זה, היא האנרגיה הפוטנציאלית הגרביטציונית העוברת תרמליזציה (הופכת לחום) ונפלטת בצורת קרינה.

אם אמנם הקרינה נפלטת משיחרור אנרגיה כבדית אזי הטמפרטורה המקסימלית  $T$  של הקרינה שאנו יכולים לקבל (ע"י השוואת האנרגיה הפוטנציאלית לתרמית) היא (בקלוין):

$$T \sim \xi G \frac{M_x m_p}{kR} \sim 2 \times 10^6 \left( \frac{M_x}{M_\odot} \right) \left( \frac{R_x}{R_\odot} \right)^{-1}$$

כאשר  $m_p$  היא מסת הפרוטון,  $k$  - קבוע בולצמן ו-  $\xi$  הוא גורם יעילות שנלקח כ-0.1.  $T$  מתקבל בקלוין. מכאן אנו רואים שאם רצוננו להסביר את קרינת ה- $x$  הקשה המתקבלת (המאופיינת ע"י  $T \sim 10^8 \text{ K}$ ), העצם הסופח חייב להיות בעל יחס מסה לרדיוס הגדול פי מאה מיחס זה בשמש ( $R_\odot \sim 7 \times 10^{10} \text{ cm}$ ).

$$\frac{M_x}{R_x} \sim 10^2 \frac{M_\odot}{R_\odot}$$

שלושת העצמים היחידים בטבע שהם קומפקטיים במידה כזאת הם ננסים לבנים, כוכבי ניוטרונים וחורים שחורים. נתבונן עתה בעובדה התצפיתית השלישית. שוב, אם עוצמת ההארה המוקרנת פרופורציונית לקצב השיחרור של אנרגיה פוטנציאלית נקבל:

$$L_x \sim \frac{GM\dot{M}}{R}$$

כאשר  $\dot{M}$  הוא קצב ספיחת המסה. עבור קצב העברת מסה האופייני לזוג כוכבים מסוג זה  $\dot{M} \sim 10^{18} \frac{g}{s}$ , אנו מקבלים כי בכדי להסביר את עוצמת ההארה המתקבלת חייב להתקיים\*:

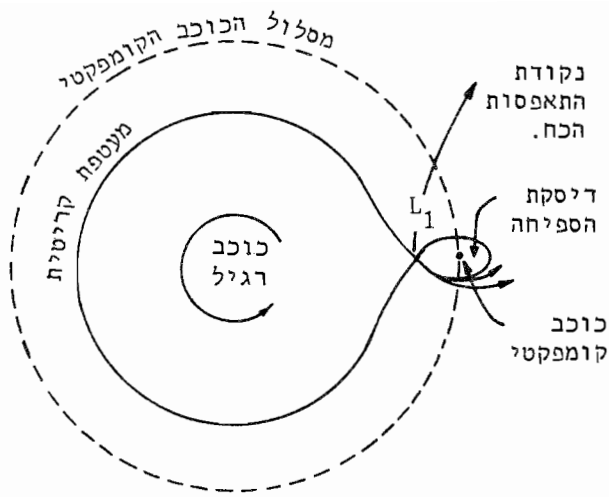
$$\frac{M_x}{R_x} \sim 5 \times 10^4 \frac{M_\odot}{R_\odot}$$

העצמים היחידים המקיימים יחס כזה הם כוכבי ניוטרונים וחורים שחורים! אנו מסיקים איפוא שמקורות ה-X הם כוכבי ניוטרונים או חורים שחורים הסופחים מסה מבן זוג שהוא כוכב רגיל (תרשים 3). בגלל העובדה שלחומר הנספח יש תנע זוויתי הוא איננו זורם ישר אל פני העצם הקומפקטי אלא יוצר דיסקת ספיחה שבה החומר נע בספירלה איטית פנימה. עקב כוחות הצמיגות בתוך דיסקה זו נוצר חום רב; ב-100 הק"מ הפנימיים של הדיסקה הגז מגיע לטמפרטורה של יותר מ-10 מעלות, רוב קרינת ה-X נפלטת מאיזור זה.

כיצד ניתן אם כך לקבוע אם מקור X הוא כוכב ניוטרונים או חור שחור? קיימת תצפית היכולה להיות עדות לכך שמקור איננו חור שחור.

---

\* Neutron Stars, Black Holes and Binary X-Ray Sources, eds. Gursky and Ruffini, Dordrecht, D. Reidel, 1975.



תרשים 3

לכוכב ניוטרונים יש לעיתים קרובות שדה מגנטי חזק מאוד המאלץ את החומר הנופל על פניו לנוע לאורך קווי שדה אל הקטבים המגנטיים, שכן החומר הנופל הוא מיונן, וכיוון התנועה היחיד בשדה מגנטי בו לא פועל כוח על חלקיקים טעונים הוא לאורך קווי השדה. באופן כזה נוצרת "נקודה חמה" בקוטב המגנטי.

אם הציר המגנטי וציר הסיבוב של כוכב הניוטרונים אינם מתלכדים, ניתן לקבל מנקודה חמה זו קרינה בפולסים עקב הסיבוב, בדומה לפולסים של אור המתקבלים ממגדלור. ואמנם, ברבים ממקורות ה-X אנו מגלים שהקרינה מגיעה בפולסים במחזור מדויק מאוד. אם לעומת זאת המקור הוא חור שחור, אזי הקרינה מתקבלת מן החומר רק כל עוד הוא נמצא בדיסקה ובמקרה כזה איננו מקבלים פולסים. קיימת גם עדות פוזיטיבית לכך שמקור הוא חור שחור. אם



מתגלה שמסת העצם הקומפקטי היא גדולה מן המסה המקסימלית המותרת לכוכב ניוטרונים (כשלוש מסות שמש) אזי העצם הוא כמעט בודאות חור שחור.

לבסוף כמובן, נשאלת השאלה האם ידועים לנו מקורות X החשודים כמכילים חורים שחורים? מסתבר שכן.

המועמד המסתבר ביותר הוא המקור Cygnus X-1 שהוא בן זוגו של כוכב ענק רגיל HDE 226868, שניהם במחזור אורביטלי של 5.6 יום. מבחינים במקור בהשתנויות לא מחזוריות מהירות בפרקי זמן מסדר גודל של אלפיות שניה.

מתוך קביעה תצפיתית של הפרמטרים של הזוג, מתקבלת עבור מקור ה-X מסה

$$9M_{\odot} \leq M_X \leq 15M_{\odot}$$

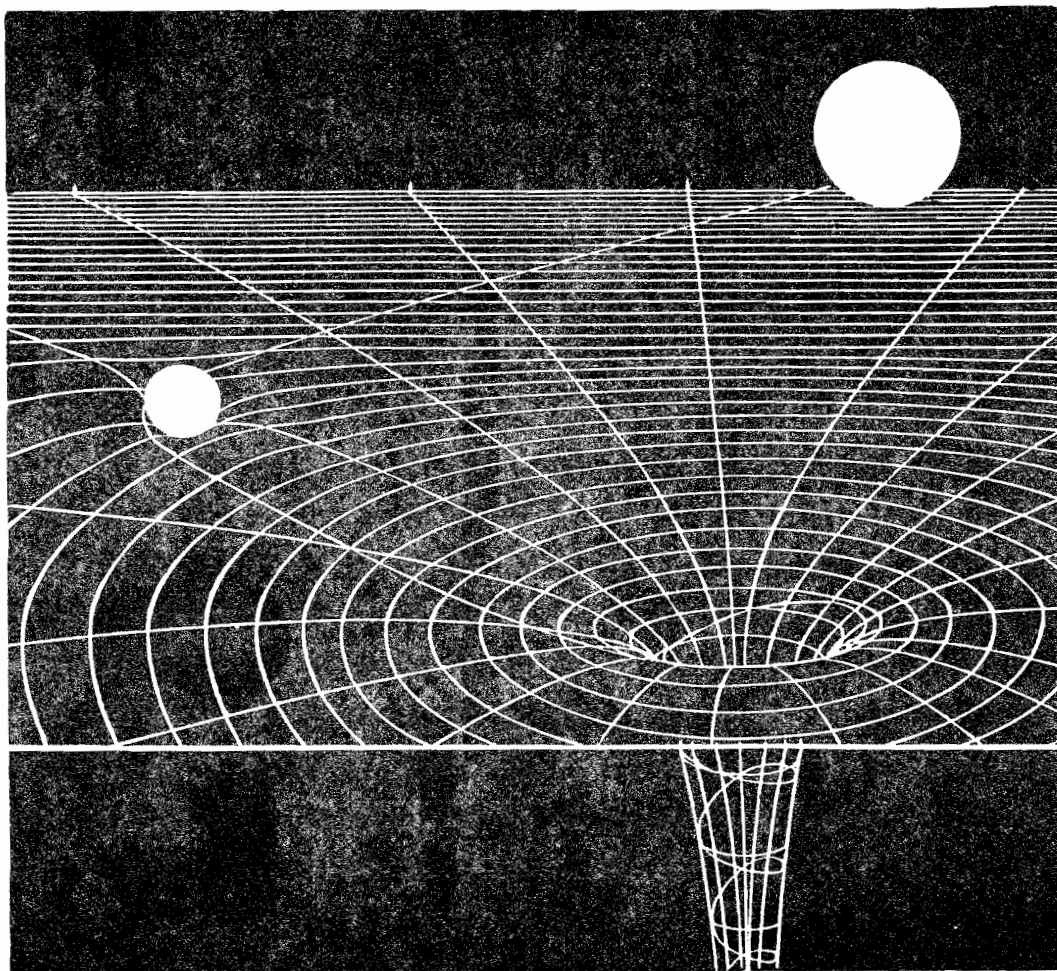
שהיא הרבה מעל המסה המקסימלית המותרת לכוכב ניוטרונים; חושדים איפוא שמקור זה הוא חור שחור.

בשנה האחרונה נקבע מועמד נוסף LMC X-3, בעל מחזור אורביטלי של 1.7 יום ומסה עבור העצם הקומפקטי של  $M_X \sim 10M_{\odot}$  שנמדדה בשתי שיטות תצפיתיות בלתי תלויות.

לסיכום, אם אנו מקבלים במלואן את המסקנות הנובעות מתורת היחסות הכללית, הקריסה של כוכבים לחור שחור היא בלתי נמנעת בתנאים מסויימים. הגילוי של חורים שחורים איננו פשוט, אולם מתוך מחקר של מקורות קרינת X נתגלו לפחות שני מועמדים בעלי סבירות גבוהה.

ברצוננו לציין שקיים סוג שני של חורים שחורים אשר מודלים תיאורטיים נוכחים מנבאים את קיומם ובהם לא דנו כלל ברשימה הנוכחית. אלה הם חורים שחורים בעלי מסות  $M > 10^8 M_{\odot}$  הנמצאים אולי בגרעיני גלקסיות פעילות וקואזרים ואשר ספיחת מסה עליהם מהווה את מקור האנרגיה של הקואזר.

נסיים בכך שנזכיר את אותו קטע מ"עליסה בארץ הפלאות" בו היא פוגשת חתול צ'שיר אשר היה נעלם מן העין בהשאירו אחריו את חיוכו בלבד. עליסה מציינת שם לעצמה שזהו הדבר המוזר ביותר שראתה בחייה. החורים השחורים נעלמים אמנם מעינינו אולם "חיוכם" - כח הגרביטציה שלהם, נשאר וממשיך להשפיע על סביבותיהם, ובכך מאפשר את גילויים, וכמו אצל עליסה, זהו בלי ספק אחד הדברים המוזרים שאנו מכירים בטבע.



תהליך התנועה של מסה במרחב - זמך עקום בסביבת חור שחור.