

מערכות בינריות ודיסקאות ספיחה

רוב הכוכבים בטבע מופיעים בזוגות. הסיבה היא שזו צורה יעילה להפטר מהתנע הזוויתי. (במערכת השמש למשל, 99% מהתנע הזוויתי יושב על מסלוליהם של ארבעת כוכבי הלכת הגדולים). אם המרחק בין הכוכבים אינו גדול מאד, סביר להניח שתהיה אינטראקציה בין הכוכבים והאבולוציה שלהם תהיה מורכבת יותר מאשר האבולוציה של כוכבים בודדים.

יתרה מכך, מרחב הפרמטרים המאפיין את כוכבים בודדים כולל את המסה, מתכתיים ותנ"ז. כוכבים כפולים, לעומת זאת, מתוארים ע"י יותר פרמטרים. לא רק שיש כעת יחס בין המסות, יש גם את פרמטרי המסלול ובעיקר המרחק בין הכוכבים - החצי ציר ראשי a (semi-major axis).

היות ומרחב הפרמטרים הרבה יותר גדול משל כוכבים בודדים, ישנו עושר עצום של מערכות עם אבולוציות שונות ומשונות. אחד מהתהליכים הכי חשובים במערכות כפולות הוא ספיחת מסה.

ספיחת מסה מתרחשת כי הגודל המסקימלי של כוכבים במערכת בינרית מוגבל (הוא לא יכול להיות יותר מכחצי a). לכן, כשכוכב עובר אבולוציה ומגיע לשלבים מתקדמים, כאשר הוא יגיע לרדיוס המסקימלי, הוא יתחיל להעביר מסה לבן זוג במקום להמשיך להתנפח.

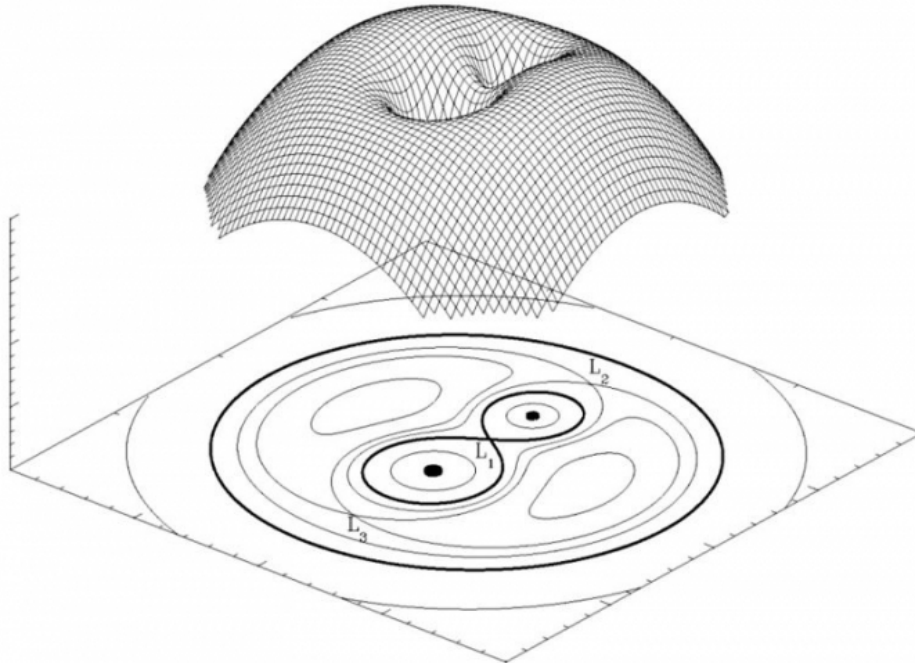
כדי להבין זאת יותר (למשל, מדוע לכוכב יש "שפיץ"), נבחן את הפוטנציאל של המערכת הבינרית. תדירות הסיבוב של הכוכבים היא:

$$(1) \quad \omega = \left(\frac{G(M_1 + M_2)}{a^3} \right)^{1/2} \hat{z} \equiv \left(\frac{GM}{a^3} \right)^{1/2} \hat{z}$$

אם נסתכל על מערכת המסתובבת עם שני הכוכבים, הפוטנציאל יראה:

$$(2) \quad \phi = -\frac{GM_1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_1|} - \frac{GM_2}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_2|} - \frac{1}{2} (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2$$

או באופן גרפי:



לפוטנציאל הזה יש כמה תכונות מעניינות:

- ישנן חמש נקודות (שלוש מסומנות ושניים נוספות בשני שיאי הפוטנציאל) בהן הכח מתאפס. הנקודות הללו נקראות נקודות לגראנז'.
- הנקודה הכי מעניינת היא $L1$ הנמצאת בין הכוכבים.
- הפוטנציאל יורד ברדיוסים גדולים. הסיבה היא שאנחנו מסתכלים במערכת המסתובבת.

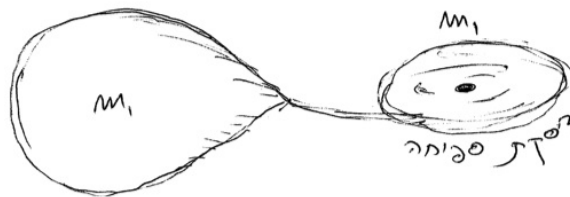
יש לתכונות הנ"ל כמה משמעויות.

כאשר כוכב גדל (למשל כאשר מסיים לשרוף דלק מסוים בליבה) הוא ירצה להתנפח אבל יהיה מוגבל. הרדיוס המקסימלי יהיה זה שהכוכב יגיע לפוטנציאל ב- $L1$. במצב זה הוא ימלא את "אונת רוש" שלו Roche Lobe, וכל התנפחות נוספת תגרור ספיחת מסה לבן זוג.

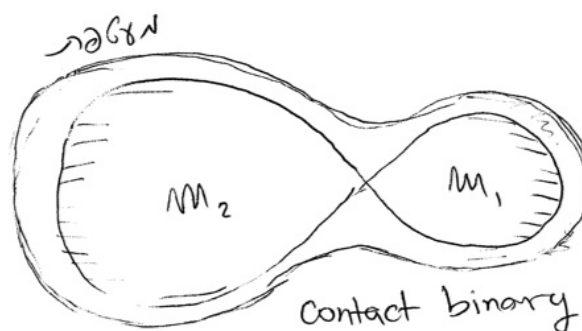
במקרה כזה, המערכת תראה כך:



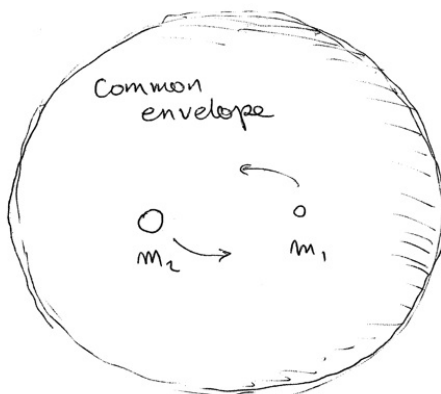
אם ההעברת חומר נעשית בצורה איטית יחסית, נקבל דסקת ספיחה.



אם העברה נעשית מהר יותר, החומר לא יוכל בהכרח להספת, ונקבל מצב שהחומר ממלא את בורות הפוטנציאל וחלק מהחומר נמצא כבר ברמת פוטנציאל גבוהה יותר מ- $L1$. במקרה כזה נקבל מערכת שהיא זוג במגע (contact binary):



אם כמות החומר שעוברת היא גדולה מדי, אזי נקבל מצב של "מעטפת משותפת" (common envelope). מצב זה לא יציב. מה שמתרחש מהר מאד הוא שהליבות התקרבות. הן עושות את זה ע"י העברת תנ"ז אנרגיה למעטפת. בסופו של דבר המעטפת מועפת ונשאר זוג הקשור מאוד חזק. זו הסיבה שניתן למצוא למשל זוג כוכבי נייטרונים שהמרחק ביניהם קטן יותר מרדיוס השמש.



1 דסקאות ספיחה

אחד מהתהליכים החשובים והנפוצים שיש במערכות בינריות הוא ספיחה. למשל, כאשר אחד מבני הזוג מתפנח, היות והוא לא יכול להיות גדול יותר מאונת הרוש שלו, כל התפנחות נוספת תגרור העברת מזה לבן זוג. אבל, היות והספיחה היא עם תנע זוויתי (יחסית לכוכב הסופח), החומר לא יכול ליפול ישירות אל הבן זוג. במקום זאת חייבת להוצר דסקת ספיחה.

בדיסקת הספיחה ישנו תהליך בו חומר מאבד אנרגיה (וקורן אותה) וכן העברת תנע זוויתי החוצה. כל זאת נעשה בעזרת הצמיגות. למעשה את כל התנע הזוויתי לוקח מעט מאוד חומר מהקצה החיצוני של הדסקה.

צמיגות היא דיפוזיה של תנע. אולם הצמיגות המיקרוסקופית בדסקאות ספיחה היא כה קטנה שתהליך דיפוזיית התנע ודיסיפציה האנרגיה לא נעשה בעזרתה. במקום זאת, חייב להיות תהליך מקרוסקופי. למשל, טורבולנציה מערבבת בין אלמנטים עם תנע שונה. הבעיה אבל היא שאנליזה לינארית ליציבות הזרימה בדסקאות מראה שהללו יציבות. לכן יש בקהילה ויכוח למקור הטורבולנציה. חלק טוען שמקור הצמיגות הוא באי יציבות של השדה המגנטי שיהיה בכל הדסקאות החמות מספיק לשמור על החומר מיונן. חלק אחר טוען שאמנם אנליזה לינארית מראה יציבות אולם איברים מסדר שני ומעלה כן יוצרים כי יציבות כך שהפרעה לא לינארית יכולה לגרום לדסקאות להפך לטורבולנטיות ובכל ליצר את הצמיגות הנחוצה להסביר את קיום הדסקאות.

המודל הפשוט ביותר לדסקאות ספיחה הוא זה של שקורה וסוניאב Shakura-Sunyaev. ההנחה הבסיסית במודל זה היא שכאשר חומר נופל במורד הפוטנציאל, בכל רדיוס ורדיוס הוא נמצא קרוב למהירות הקפלרית ועם מהירות פנימית (טמפרטורה) נמוכה. המשמעות היא שבכל רדיוס האנרגיה של החומר נקבעת רק מעומק הפוטנציאל וכמות האנרגיה שהוקרנה תלויה לכן רק במקום.

חומר שהגיע לרדיוס r איבד (ליח' מסה) אנרגיה השווה ל-

$$(3) \quad -u_{tot} = -u_{grav} + e_{kin} = \frac{GM}{r} - \frac{1}{2}v_{kep}^2 = \frac{GM}{2r}$$

אם חומר נספח בקצב של \dot{m} , אזי כמות האנרגיה המשתחררת והמוקרנת עד רדיוס r היא לכן

$$(4) \quad L \approx \frac{GM\dot{m}}{2r}.$$

זהו קרוב כי אנחנו מניחים כמה הנחות כמו שיחרור כל האנרגיה באופן מידי ושמירת החומר קר. אם נגזור את הביטוי יחסית לרדיוס, נקבל כמה אנרגיה משתחררת ליחידת רדיוס. אם נחלק בשטח שיש ביחידת רדיוס

(ונזכור שישנם שני צדדים לדיסקה!) נקבל שכמות האנרגיה המשתחררת ליחידת שטח היא

$$(5) \quad D(r) = \frac{1}{(4\pi r)} \left| \frac{dL(r)}{dr} \right| \approx \frac{GM\dot{m}}{8\pi r^3}.$$

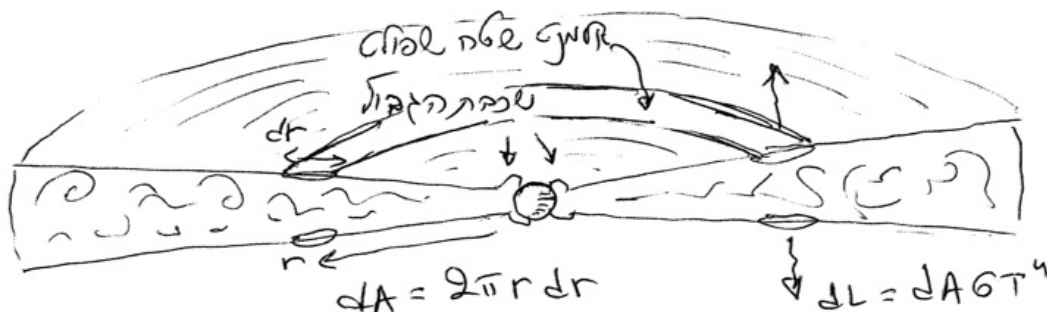
אם נניח שפני שטח הדיסקה הם כמו גוף שחור, אזי הטמפרטורה בכל רדיוס תקיים

$$(6) \quad D(r) = \sigma T^4$$

ולכן

$$(7) \quad T(r) = \left(\frac{D(r)}{\sigma} \right)^{\frac{1}{4}} \approx \left(\frac{GM\dot{m}}{8\pi\sigma r^3} \right)^{\frac{1}{4}}$$

אפשר להעזר גם בציור:



הספקטרום שיפלט נובע מתרומה של כל רדיוס ורדיוס. הוא יהיה:

$$(8) \quad L_\nu = \int_{R_{in}}^{R_{out}} I_\nu(T) 4\pi r dr$$

שימו לב שהשטח של טבעת ברדיוס r היא $4\pi r dr$ כשפקטור 2 מגיע מהעובדה שלטבעת שני צדדים. והספקטרום של גוף שחור נתון ע"י

$$(9) \quad I_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1}.$$

היות וישנה טמפרטורה ברדיוס פנימי וטמפרטורה ברדיוס חיצוני

$$(10) \quad T_{in,out} = \left(\frac{GM\dot{m}}{8\pi\sigma R_{in,out}^3} \right)^{\frac{1}{4}}$$

נקבל סכום של ספקטרומים של גופים שחורים כמו בציור:

מ.ש.ל.

בנוסף לדיסקה, נוצרת גם שכבת גבול. היא נובעת מהעובדה שהחומר חייב להאיט מהמסלול הקפלרי הפנימי ביותר אל המהירות של הגוף הסופח (אם זה לא חור שחור). אם הגוף מסתובב לאט, קצב שחרור האנרגיה בשכבת הגבול יהיה

$$(17) \quad L \approx \frac{GM\dot{m}}{2R_{in}}$$

(כי האנרגיה הקינטית במסלול קפלרי היא חצי מהגרביטציונית בערך מוחלט). אנרגיה זו משתחררת מאיזור ששיטחו $A \sim 4\pi R_{in}^2$. ולכן נקבל פליטה בטמפרטורה

$$(18) \quad T_{BL} = \left(\frac{L}{4\pi\sigma R_{in}^2} \right)^{\frac{1}{4}} \approx \left(\frac{GM\dot{m}}{8\pi\sigma R_{in}^3} \right)^{\frac{1}{4}}$$

כלומר שכבת הגבול תתן תרומה בטמפרטורה הפנימית של הדיסקה ועצמתה הכוללת תהיה כמו הדיסקה (אם הגוף הפנימי אינו מסתובב).

