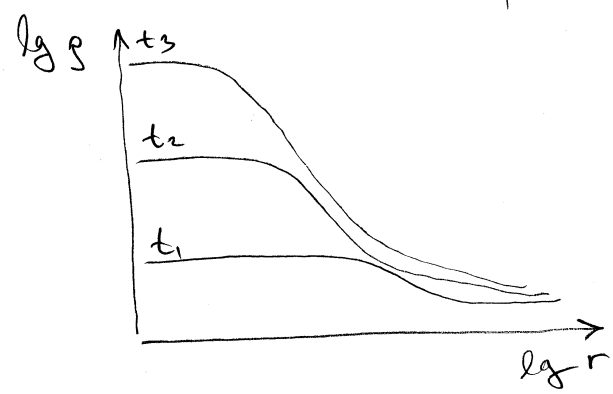


א-בולוציה של כוכבים

א-בולוציה של כוכבים

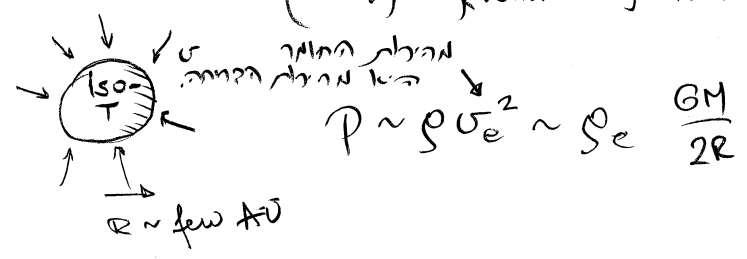
השדה הראשון בחייהם של כוכבים הוא קרינתם מידן בתלות הבין-כוכבית. עם גמישות קצתם טמפרטורה הפנימית (המופכת למחץ גאזי, לחץ סטטיסטי) שבה מתחיל, וזאת א קרינת קוסמית) אינו מצליח להתקדם או להשיגה המכבידה צינורית, הקריטיביון לאם מסה יציבה או לאו נקדוהו קריטיביון ע"ס. (לא נפתר אותו כן הוא יתמו יפתח בקוסמוס אחרים...)

ובכן, קטנה שהצדק גמישות קצתם, הוא יתחיל במצב קו הוא עקרו, הולך והצטנן האוספן קצת יותר במרכז, הקריסה מתקדמת למרכז יותר.



ב סדר העסק שקר הוא יכול להתקדם, ולשמוך אל טמפרטורה של כ-10¹⁰ K. מצב זה נמשך עד אשכ: (עדיך עם בלם מסה כוללת א 1 M_☉).
 $\rho \sim 10^{-13} \text{ gr/cm}^3$
 $M_{\text{core}} \sim 10^{31} \text{ gr}$
 $t \sim 10^{13} \text{ שנה (300,000,000 שנה)}$

במצב זה מתקבלת קרינה שאינה שקופה יותר הלידה הזו. (היינו אינולתכמית, הנמוצקת ע"י לחץ חיובוני סופי) (היי שאין פתרון איזותרמי עם לחץ אפס בשפה!). לחץ אלה נוצר מהסטאציה (לצורה) של החומרים הנפול.

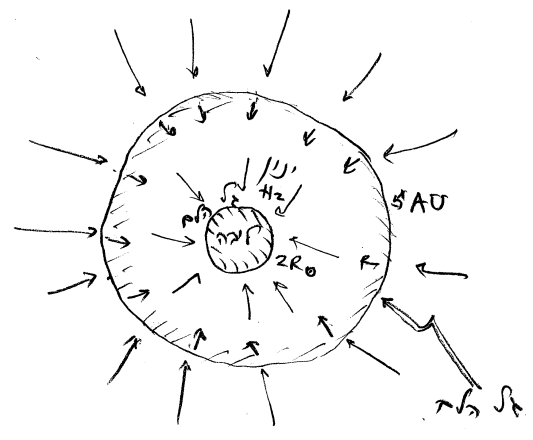
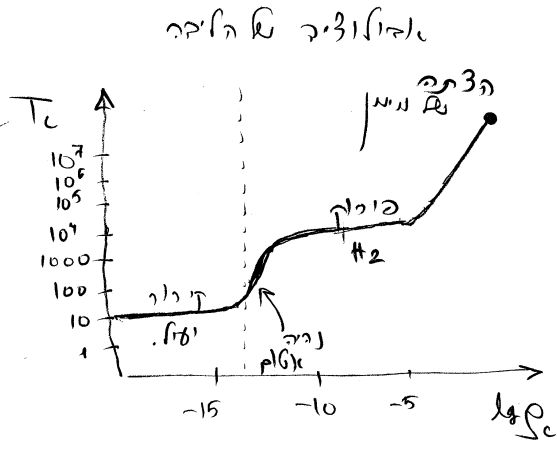


2

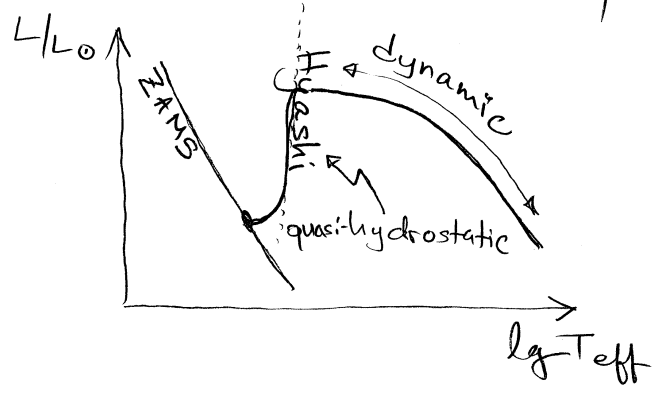
השלב הבא הוא שלביה מתכווצת ופולטת קינור בקר התלפת
 השקופה, בשלב זה היא לא יכולה לדחוף את שכבת הקרינה ולכן היא
 מתחממת.

כאשר הטמפרטורה בליבה מגיעה ל- 2000°K , ה- H_2 מתפרק ויוני
 המתקדם האטומי מקיים: $\chi \approx 4.7$ שהפרק יורד לזיהוי זניחה בצנתי.
 ויוני היא קורסת.

הקריסה מתקדמת מהר מאוד, עד שלב ה- H_2 מתפרק. בשלב זה
 הלידה יכולה להמשיך להתחמם, היא נעוה דו-קטלית (מטרפולציה ליוט),
 המבנה בשלב זה מכיל נפילה של חומרים והאטה בגודל טמפרטורה אטום
 ואחר כך האצה שוב באיזור זה כיוון ה- H_2 ועצירה בליבה הדו-קטלית.



למרות שנספח בזה החומר, המעטפת נעוה שקטה ומתקלפת ליבה הדו-קטלית
 שלטת לטוטר ממוצע ראויק מסוה ה- Hyashi (איתו גמולו בתנאי).



HR (בהצטתה)
 המסוה נראה!

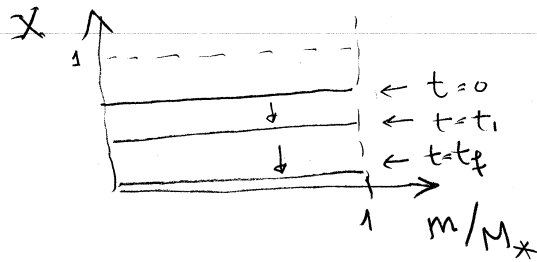
3

השלב הבא הוא השלב הארוך ביותר (והמשמעותי ביותר) בחיי כוכבים: בעיית מימן בלידה.

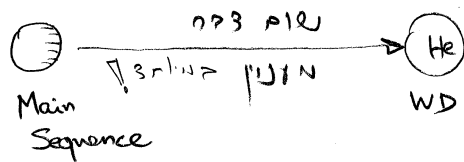
האדולוציה תהיה תלויה במסה של הכוכב:

$M < 0.5 M_{\odot}$: במסלול קטן, בעיית המימן נדושה בכופף שהיא

כולה קונבולטיבית, ולכן, הביעיה נפתרת אצל המימן מכל הכופף.



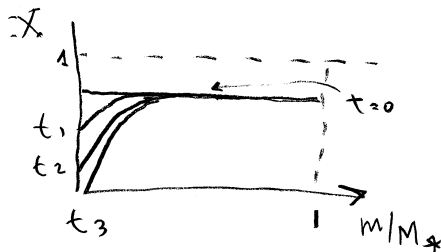
בסיבוב של צורה ישאר ננס לבן המכיל He. (המסה במרכז לא תהיה ארוכה מסת גזיבה מספיק כדי לפרוץ את ה-He ולכן כשיגיע המימן הכוכב כשיל יתפוצץ לזו שיהיה ננס).



הזר והכוכבים הולכים מאוחרים בעצמם מאד נמוכה הזמן שיקח להם לשחרר את המימן הוא הארוך יותר מעל הקיום!

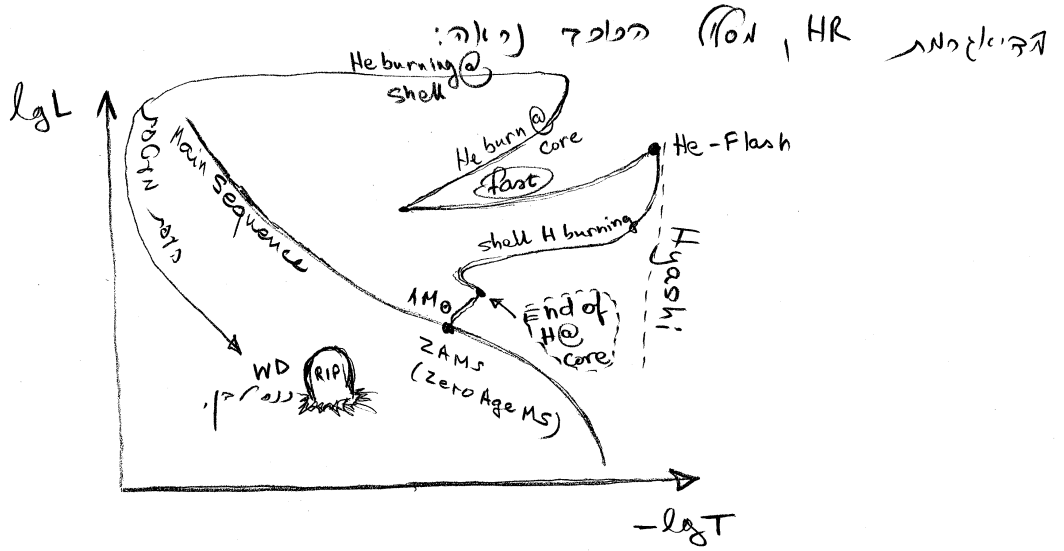
$0.5 M_{\odot} \leq M \leq 1.5 M_{\odot}$: כוכבים יותר מסוימים יהיו בעלי ליקה שהיא

על קונבולטיבית, קפיכה, בלידה יאל המימן קצוץ של שאר הכוכב



קטן:

5



$1.5M_{\odot} \lesssim M \lesssim 6M_{\odot}$

עדכו מסלול אתר גזולות הלידה שתיווצר אחרי לסיפת המימן (אחריה) בלידה, תהיה תמה מספק רצוי שהלידה או תהיה מנוונת. מוצע שני, המסה הלידה תהיה קטנה יותר ממסת שונדריג צנזוסקר, כך שתיווצר ליהה אסטרומית לא מנוונת. במסל של הלידה או מנוונת, הוצתת הלידה תהיה עלו בזיה של He-Flash. עממי $M \lesssim 4M_{\odot}$, האקויוזיה תהיה צומח אכוכדיים פחות מספיק שכן צומחים הליגם-פולס, דהיינו, אחרי של ה-He הלידה נצטרך, תתקבל לידה מנוונת של C_{\odot} ושיניה של H, He בשתי קליפות והעם המעלפתי.

$M \gtrsim 4M_{\odot}$

עממי מסה גדולה יותר מ- $4M_{\odot}$ קצתן, קיבית ה- C_{\odot} תהיה קטנה מסה מספק גדולה כך שה- C_{\odot} יוצתו, ותתקבל בקרה של $C, O \rightarrow O, Ne, Mg$

עממי מסה קטנה מ- $8M_{\odot}$, יסו ניתן יהיה לכתוב את ה- O, Ne, Mg ונדבר על רמתו של מסה קטנה, מאן, מעל (מפני שפיר (מסה) אכוכדיים יותר מספיק).

6

עבור כוכבים יותר מסידיום מכ- $8 M_{\odot}$, הלידה של O, Ne, Mg
 תגיע קטמל' גדולה מספיק כדי להביא את היסלוגר האו והקטיו
 גם האלים עד היצא.

כואש מניעה אבדן, המיל' היו ל כן גדולה שווה למערכת
 קפדן את הכתלים להילום:

$${}_{26}^{56}Fe + \gamma \rightarrow {}_{2}^4He + 4n$$

הסבה לרואקציה זו מתחלת היא שנוצרים ל כן הכבה יוצר חלקיקים
 שהינניה החופשית $F = E + TS$ גלגה כי ל גז, ו- T גדולה, ולמיל
 ל- E קטן, (זהו היבט אנרגיה אפיק את הכינע).
 האז זה הלידה דווס, הצפופים שלה, ואלקטרוני- (באליס ב- p
 (נוטילניציה):

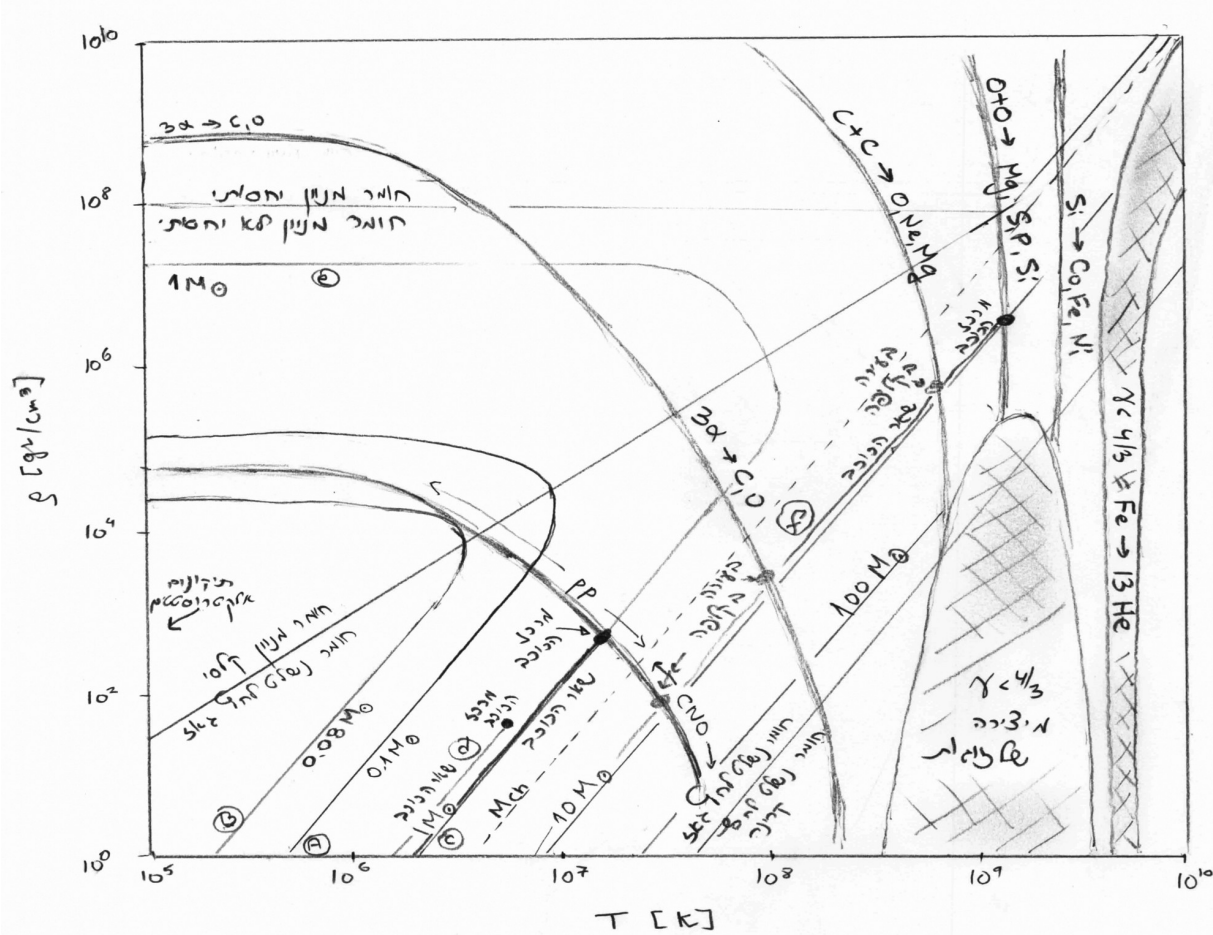
$$p^+ + e^- \rightarrow n + \gamma$$

אויבז הגניקה ע"י התקצצת האנזבותמילר ואויבז הגניקה ע"י נויטילניג
 לבניתיז אנמניז אקילר מחר ל הלידה וקניוסתה.
 דניסר הליקה מספיה קן טלר הצביסלר חובה מספן כדי שלה
 תינוק ל ה- n גפול מספן.
 האז זה נוצר ל הצר גילבו החולה ומילר יור המעלם - ספרי נזקה -
 זה שרלר זה כלב נויטילניג, ואל אלה הנטה הפתילניג מספן גדולה -
 חר בשלוי.

במסלר גדולה, האפולוציה שלה מגד ג'אבנר" Z הסדה היא
 שהחולר שמעלר חוטי נילר חלוקת ולכסיים כתלים החיים (ס)
 עזמלר הלה שלה אוו כמילר מתמלר (החולר מואזילר ע"י דניסר שיתר
 את הילר צדק קווי כללה ל המתבור). קטן, שול' ב- Z יתן שול
 גפול ג- m , ושול במסה הספיר דניסר אורה מסה התתילניג.

אבולוציה של כוכב מנקודת מבט של התנאים במרכז

דיאגרמה שימושית להבנת האבולוציה של כוכבים היא דיאגרמת $\rho-T$ ובפרט, ρ_c-T_c במרכז הכוכב.



- ראשית, לפני שנבחן את מיקום הכוכבים בדיאגרמה זו, ישנם כמה איזורים בעלי אופי שונה.
- האיזורים הצפופים והקרים (צד שמאל למעלה) הם האיזורים בהם לחץ הניוון חשוב יותר מהלחץ התרמי.
 - האיזורים החמים והדלילים יותר הם אלה שנשלטים ע"י לחץ תרמי של הגז (בצמוד לגבול עם החומר המנוון) או לחץ תרמי של הקרינה (בפינה הימנית תחתונה).

שנית, ישנם תחומים בהם הליבה יכולה להיות בשיווי משקל אנרגטי - בה הראקציות הגרעיניות מיצרות את כמות הקרינה הנפלטת ע"י המעטפת. אם הטמפ' גבוהה במעט, קצב יצור האנרגיה גדל מאוד (והכוכב ירצה להתנפח) ואם הטמפ' קטנה, קצב יצור האנרגיה הגרעינית יהיה זניח (והכוכב יקרין ויגדיל את אנרגיית הקשר שלו כשהוא מתכווץ).

שלישית, ישנם איזורים בהם הכנסת חום למערכת כמעט ולא הולכת להעלאת הטמפרטורה אלא לדרגות חופש פנימיות. איזור אחד כזה הוא איזור בו העלאת הטמפרטורה מגדילה באופן חזקתי את מספר הזוגות של אלקטרונים ופוזיטרונים. איזור נוסף הוא איזור בו העלאת הטמפרטורה מפרקת את הברזל לגרעיני הליום (בגלל שהאנרגיה החופשית מכילה את האיבר TS שנהיה חשוב בטמפ' גבוהה ובגלל שהאנטרופיה גדלה מאוד מפירוק הברזל להרבה חלקיקים קטנים יותר). באיזורים אלה, $c_p - c_v$ מאד גדולים ולכן:

$$4/3 > \gamma = c_p / c_v \rightarrow 1$$

כאשר $\gamma < 4/3$, ראינו שהכוכב נהיה לא יציב והוא קורס.

כעת ננסה להבין היכן נמצאים הפתרונות לגופים בעלי מסות שונות. אם נסתכל על גוף בעל $1M_{\odot}$, אזי ישנו פתרון

שנראה בערך כמו פוליטרופה ($n=3$). מרכז הגוף יושב על נקודה מסוימת על הפוליטרופה ואילו שאר הגוף על שאר הפוליטרופה בכיוון של טמפרטורות וצפיפויות נמוכות יותר.

למשל הקו d מתאר גוף עם מסה הקטנה במעט מ- $1M_{\odot}$ ותנאים במרכז שהם פחות חמים מהדרוש ליצור אנרגיה מראקציות גרעיניות.

ישנו גם פתרון מנוון לתנאים במרכז (למשל (e) בציור עבור $1M_{\odot}$). היות והחומר מנוון הטמפ' אינה חשובה ומתקבל קו אופקי לאוסף הפתרונות עם אותה המסה.

מה זה אומר?

נבחן גוף בעל מסה הקטנה ממסת צ'נדרסקר. גוף זה יתחיל את חייו ההידרוסטטיים קרוב לפתרון הפוליטרופי עם $n=3$ הנשלט ע"י לחץ הגז. הגוף יתכווץ על סקלת זמן של קלווין הלמהולץ עד אשר ליבתו תגיע לטמפ' הגבוהה מספיק להצית בעירת מימן להליום (בשרשרת (pp)). אחרי שבליבתו יגמר המימן, שריפת המימן תמשך זמן מה בקליפה מסביב לליבה איזותרמית (כי אם אין מעבר קרינה בליבה אין הפרש טמפ' בין המרכז לבין הקליפה שורפת המימן). בשלב מסויים, כשהליבה תהיה גדולה מספיק, ההליום יוצת. עבור מסת שמש אחת זה יקרה כאשר הליבה מנוונת. הטמפ' של הליבה תעלה בארוע מהיר ($helium\ flash$) עד אשר הניוון יוסר ותהיה שריפת הליום יציבה בליבה (וישרף לפחמן ומיד גם לחמצן). כמו כן תמשיך שריפה של מימן בקליפה. כשיגמר ההליום בליבה, הליבה תמשיך להתכווץ (עם בעירה של הליום ומימן בקליפות) עד אשר לחץ הניוון יהיה דומיננטי. משלב זה הליבה גודלת במסה עם בעירה של הליום. בשלב מסוים החלק החיצוני של הכוכב מגיע לרדיוסים גדולים כל-כך, שהמעטפת מועפת ויוצרת ערפילית פלנטרית. הליבה מתקררת והופכת לננס לבן (e) .

עבור מסה פחותה מספיק (מסלול a בציור), הטמפ' בליבה המנוונת לא תהיה גבוהה מספיק כדי להצית את ההליום וישאר ננס לבן המורכב מהליום. עבור מסה הקטנה מבערך $0.08M_{\odot}$ (מסלול b בציור) הליבה לא תגיע לטמפ' הגבוהה מספיק כדי להצית מימן ולא ייוצר כוכב, אלא "ננס חום" ($Brown\ dwarf$).

עבור כוכב מספיק מסיבי (למשל מסלול f בציור עבור $10M_{\odot}$), הליבה יכולה להתכווץ ואחרי כל התכווצות יוצת דלק "כבד" יותר. השלב האחרון הוא הצתה של צורן (סיליקון) ובעירה לברזל וניקל. כאשר נגמר הצורן בליבה, הליבה תתכווץ ובשלב מסוים תגיע לתנאים בהם $\gamma < 4/3$. בשלב זה הליבה נהיית לא יציבה והיא קורסת. הקריסה תעצר כאשר צפיפות החומר תגיע לצפיפות המאפיינת גרעינים, וליבה תראה כמו כוכב נויטרונים חם. עם העצירה של הנפילה ייוצר גל הלם. אם וכאשר גל ההלם הזה מצליח לעלות במעלה המעטפת של הכוכב, המעטפת תועף ונראה את הכוכב כסופרנובה.

קריסת ליבתם של כוכבים מסיביים עוד יותר תתרחש לא מפירוק של ברזל כי אם מיצירה של זוגות.

לתיאור הפשוט הנ"ל ישנן תוספות:

1. כוכבים מאבדים מסה ברוח לאורך חייהם. איבוד המסה הזה לרוב חשוב יותר בשלבים מתקדמים יותר של האבולוציה וכוכבים מסיביים יותר. למשל, הגבול בין המסה ההתחלתית היוצרת ננס לבן וזו היוצרת כוכב נויטרונים הוא כ-8 מסות שמש, לא מסת צנדרסקר.
2. אם מסת כוכב הנויטרונים שנוצר בסופרנובה גדלה מספיק ועוברת את מסת אופנהיימר-וולקוף (המקביל של מסת צ'נדרסקר לכוכבי נויטרונים), הליבה תמשיך לקרוס ותיצור חור שחור.
3. אם האנרגיה המשתחררת בקריסה גדולה מספיק (למשל, כי פחמן מוצת בסופרנובה של יצירת זוגות) אפשר לקבל מצב שכל החומר מועף ולא שריד לכוכב.
4. ערבוב יכול לשנות את ההרכב הקליפתי.
5. האבולוציה של כוכבים המאבדים מסה לבני זוג (או מקבלים מבני הזוג) במערכות בינריות, יכולה להשתנות משמעותית.