

עקומת ההארה של סופרנובות

במהלך קריסת הליבה של כוכב מסיבי המגיעה לאיזור במרחב הפאזה בו ברזל מתפרק, משתחררת כמות אדירה של אנרגיה. רוב האנרגיה הולכת לחימום הליבה שקרסה (לרדיוס של כ- 30 ק"מ) שמיד מתקררת על ידי פליטה רבה של נויטרונים, כך שרוב אנרגית הקשר משתחררת בצורה זו:

$$(1) \quad E_\nu \approx E_{binding} \sim \frac{GM_{core}^2}{R_{core}} \sim \text{few} \times 10^{53} \text{erg}$$

כאן "core" מסמן גדלים של הליבה אחרי שקרסה.

הקריסה נעצרת רק כאשר הצפיפות בליבה גבוהה די הצורך כדי להגדיל את הלחץ מספיק מהר עם הצפיפות (דהיינו, ש- $\gamma > 4/3$), דבר המתרחש רק עם הגעת הליבה לצפיפות של חומר גרעיני. בשלב זה החומר הקורס חייב לעצור ונוצר גל הלם בו חומר הנופל במהירות על קולית מאיט למהירות תת קולית. הסברה כיום היא שחלק קטן מהאנרגיה בנויטרינים חוזר לחומר מתחת לגל הלם, ומחמם אותו, כך שנוצר "כדור-אש" המתחיל להתפשט במהירות. כשכדור-האש מתנפח, הגדלת הנפח גוררת קירור אדיאבטי (על ידי עבודת PdV). כפי שנראה במהשך, כדור האש נהיה שקוף על סקלת מרחק של 10^{15}cm אולם הוא מתחיל מרדיוס אופיני של כמה פעמים 10^6cm . המשמעות היא שהנפח גדל בהרבה סידרי גודל וכל האנרגיה הפנימית שהייתה אבדה. אולם משימור אנרגיה היא חייבת להיות ברכיב אחר במערכת—הלחץ גרם להאצת החומר וכל האנרגיה התרמית ההתחלתית הפכה לאנרגיה קינטית.

המהירות האופינית לחומר המועף בסופרנובה היא כ-10000 ק"מ לשנייה. אם נקח מסה של 10 מסות שמש, נקבל שהאנרגיה הקינטית היא:

$$(2) \quad E_{kin} = \frac{1}{2} \Delta M v^2 \sim 10^{34} \text{gr} (10^9 \text{cm/sec})^2 = 10^{52} \text{erg.}$$

דהיינו, האנרגיה הקינטית של המעטפת היא כמה אחוזים מהאנרגית הקשר שהשתחררה בנויטרינים.

ניתן לראות הסבר וסימולציה של הקריסה והווצרות הכוכב נויטרונים בלינקים:

<http://www.physik.unibas.ch/~liebend/project/supernova/iau/iau.html>

<http://www.physik.unibas.ch/~liebend/display/index.html>

Y_e שמופיע הוא היחס בין מספר האלקטרונים והנוקלאונים כלומר $1/\mu_e$. בסימולציה ניתן לראות כיצד נוצר הפרוטו-כוכב נויטרונים, כיצד נוצרת קונבקציה באיזור מתחת לגם להם (המביאה אנרגיה מהליבה לאיזור מתחת לגל הלם) וכיצד הגל הלם מתחיל להתפשט אחרי כמה מאות מילישניות. בסימולציות חד מימדיות שלא יכולות לתאר קונבקציה אין את החימום של האיזור מחוץ לליבה והגל הלם לא מצליח "להמריא" ולהעיף את המעטפת. (אגב, מסיבה לא ידועה הלינקים בעברית לא עובדים! אולי אור יוכל לעזור?)

כעת נשאלת השאלה, אם כמעט כל האנרגיה משתחררת כנויטרינים ועוד כמה אחוזים כאנרגיה קינטית, איך זה שבכל זאת רואים סופרנובות?

הפתרון הוא שישנו מקור נוסף של אנרגיה המחמם את החומר המועף במהירות, והוא התפרקות רדיו אקטיבית של ניקל 56 וקובלט 56. זהו מקור האור הדומיננטי ברוב הסופרנובות. בחלק קטן מהסופרנובות המעטפת מתנגשת בחומר שהועף עוד קודם ע"י הכוכב כך שניתן לשחרר גם חלק מהאנרגיה הקינטית—ההתנגשות מחממת את החומר שקורן.

ננסה כעת לבנות מודל פשוט שיתן לנו את עקומת ההארה של סופרנובות.

נסתכל על המעטפת כקליפה. נניח שרדיוסה החיצוני מתפשט במהירות v כך ש-

$$(3) \quad r_{out} = vt$$

ואילו רדיוסה הפנימי מקיים

$$(4) \quad r_{in} = r_{out} - \Delta r = (1 - f)r_{out}$$

דהיינו, הרוחב של הקליפה יחסית לרדיוס הוא f .

נחשב כעת כמה זמן לוקח לקרינה לפעפע (לעשות דיפוזיה) דרך הקליפה. היות והצפיפות נמוכה, האטימות נשלטת ע"י פיזור תומפסון: $\kappa_m = \text{const}$. המהלך החופשי הממוצע יהיה:

$$(5) \quad \ell^{-1} = \kappa_v = \kappa_m \rho \approx \frac{\kappa_m m_{env}}{4\pi r^2 \Delta r} = \frac{\kappa_m m_{env}}{4\pi f r^3}.$$

הזמן שלוקח לעבור m.f.p. אחד הוא ℓ/c הוא $t_1 = \ell/c$. מספר הצעדים שיש לעבור אם הפוטונים היו נעים בקו ישר ולא בצורה אקראית הוא $n = \Delta R/\ell = fr/\ell$. אולם הפוטונים מבצעים תנועה אקראית ולכן עליהם לעבור n^2 צעדים. זמן הפעפוע (הדיפוזיה) יהיה לכן

$$(6) \quad t_{diff} \approx n^2 t_1 = \frac{f^2 r^2}{\ell c} = \frac{f \kappa_m m_{env}}{4\pi c r} = \frac{f \kappa_m m_{env}}{4\pi c v t}.$$

בשוויון הלפני אחרון הצבנו את ℓ^{-1} שחושב למעלה. בשוויון האחרון הצבנו ש- $r = vt$.

קצת אפשר לשאול מתי הזמן האופייני לפעפוע דרך הקליפה משתווה לזמן ההתפשטות האופייני. אם הזמן לפעפוע ארוך יותר, אזי פוטונים לא יוכלו לצאת מכל הקליפה. במקום זאת עם ההתפשטות האדיאבטית של הקליפה, האנרגיה שלהם תקטן. לעומת זאת, אם זמן הפיעפוע קטן מזמן ההתפשטות, כל האנרגיה המשתחררת בהתפרקות רדיואקטיבית תפלט.

שיא הפליטה מהסופרנובה יתקבל כאשר שני הזמנים הם דומים. הסיבה היא שבזמנים קצרים יותר לא כל האנרגיה התרמית יכולה להשתחרר (לפני שאובדת להתפשטות) ואילו בזמנים ארוכים יותר, ישנו פחות חומר רדיואקטיבי. לכן השיא הוא בזמן

$$(7) \quad t_{diff}(t = t_{peak}) \approx t_{peak} \Rightarrow t_{peak} \approx \sqrt{\frac{f \kappa_m m_{env}}{4\pi c v}}$$

אם נציב מספרים אופייניים, למשל, $\kappa \approx 0.3 \text{ cm}^2/\text{gr}$, $f \approx 1$, $m_{env} \approx 5M_\odot$, $v \approx 10,000 \text{ km/sec}$, נקבל $t_{peak} \approx 30 \text{ days}$.

מה תהיה עצמת ההארה של הסופרנובה אחרי t_{peak} ? בשלב זה, כל האנרגיה התרמית שנוצרת מההתפרקות הרדיואקטיבית נקרנת.

נניח לשם פשטות שיש רק קובלט שמתפרק לברזל (ולא ניקל שמתפרק לקובלט ושאר"כ מתפרק לברזל). ניתן להניח זאת במקרה הנוכחי כי הזמן שלוקח לקליפה להיות שקופה ארוך יותר מזמן ההתפרקות של הניקל. במקרה כזה אם יש כמות התחלתית $\Delta m_{Co,0}$ אזי כמות הקובלט תדעך ובזמן t תהיה

$$(8) \quad \Delta m_{Co} = \Delta m_{Co,0} \exp(-t/\tau_{Co})$$

אם כמות האנרגיה המשתחררת מהתפרקות יחידת מסה אחת של קובלט היא ϵ_{Co} אזי בזמן t קצב שחרור האנרגיה יהיה:

$$(9) \quad L_{Co} = \frac{d\Delta m_{Co}}{dt} \epsilon_{Co} = \Delta m_{Co,0} \epsilon_{Co} \exp(-t/\tau_{Co})$$

עבור $t \gtrsim t_{peak}$ זו תהיה עצמת ההארה. עבור זמנים קצרים יותר, קרינה תוכל לפעפע רק מחלק מהקליפה. ממשוואה 6 ניתן לראות שזמן הדיפוזיה הולך כמו ריבוע עובי הקליפה. לכן, אם נסתכל על פרקציה α מהקליפה, אזי זמן הפיעפוע ממנה t_α יהיה

$$(10) \quad t_\alpha \approx \alpha^2 t_{diff} = \frac{\alpha^2 f \kappa_m m_{env}}{4\pi c v t}.$$

כלומר,

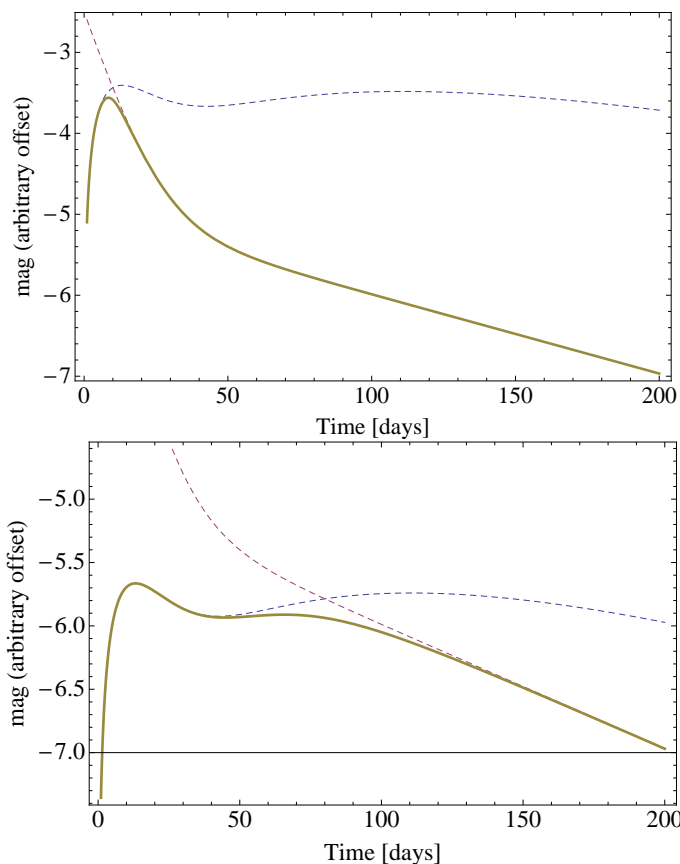
$$(11) \quad \alpha \approx \sqrt{\frac{4\pi c v}{f \kappa_m m_{env}} t}.$$

אם $\alpha < 1$ אזי הקרינה יכולה להגיע רק מחלק מהקליפה, ואילו $\alpha > 1$ הקרינה יכולה להגיע מכל הקליפה. עצמת ההארה תהיה אם כן:

$$(12) \quad L \approx \min\left(\sqrt{\frac{4\pi c v}{f \kappa_m m_{env}} t}, 1\right) \times \Delta m_{Co,0} \epsilon_{Co} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{Co}}\right)$$

אם לוקחים בחשבון שהקובלט בעצמו נוצר מניקל, מקבלים עקומות הארה כמו באיורים. במקרה הראשון τ_{peak} קטן. המעטפת מגיעה למצב בו הקרינה יכולה לפעפע החוצה מהר מאד, ואחר"כ רואים את הדעיכה של הניקל ואחר"כ של הקובלט. במקרה כזה מקבלים סופרנופה מסוג L - linear. (הקו האדום הוא האנרגיה שתומכת שנוצרת בכל הקליפה. הקו הכחול הוא האנרגיה שיכולה להשתחרר מהקליפה ע"י פעפוע. ההארה תהיה המינימום של השניים).

אם לוקח הרבה זמן לקרינה לפעפע דרך המעטפת, חלק נרחב יותר מעקומת ההארה נשלט ע"י האיבר הראשון ב- \min במשוואה הקודמת. הפקטור t גורם לעקומת ההארה להראות שטוחה הרבה יותר ומקבלים סופרנובה מסוג P - plateau.



סוגים של סופר נובות:

Type I No hydrogen	Type Ia Presents a singly ionized silicon (Si II) line at 615.0 nm (nanometers), near peak light	
	Type Ib/c Weak or no silicon absorption feature	Type Ib Shows a non-ionized helium (He I) line at 587.6 nm Type Ic Weak or no helium
Type II Shows hydrogen	Type II-P/L/N Type II spectrum throughout	Type II-P/L No narrow lines
		Type II-L Displays a "linear" decrease in its light curve (linear in magnitude versus time). ^[43]
	Type II-n Some narrow lines	
Type IIb Spectrum changes to become like Type Ib		