

מהמפץ הגדול לנוקלאוסינתזה כוכבית: אנחנו עשויים מאבק כוכבים

היקום הוא בד עצום ודינמי, מצויר באור הכוכבים וביסודות שהם יוצרים. ממקורו הקטסטרופלי של המפץ הגדול ועד לעתיד רחוק ומתפוגג של קוסמוס קר, דורות הכוכבים – אוכלוסיות II, III ו-I, ויורשיהם הפוטנציאליים – עיצבו את ההתפתחות הכימית, הפיזית והביולוגית של היקום. דרך חייהם הלוהטים ומוותם המתפוצץ, הכוכבים יצרו את היסודות המרכיבים גלקסיות, כוכבי לכת והחיים עצמם. מאמר זה חוקר את התקופות הקוסמיות, צולל למקורות, לסביבות ולמורשת של דורות הכוכבים, עם בחינה מפורטת של נוקלאוסינתזה כוכבית – התהליכים האלכימיים המניעים כוכבים ומייצרים את יסודות היקום. הוא מגיע לשיא באמת העמוקה שאנו אבק כוכבים, שנולד מחדש מאפרם של כוכבים עתיקים, ומתבונן בעתיד היווצרות הכוכבים ביקום המתעמעם.

פרק 1: המפץ הגדול ושחר הקוסמוס

היקום החל לפני כ-13.8 מיליארד שנים עם המפץ הגדול, אירוע של צפיפות וטמפרטורה אינסופיות שבו נוצרו כל החומר, האנרגיה, המרחב והזמן מסינגולריות. התופת הראשונית הזו, החמה מ- 10^{32} K, שמרה על הכוחות היסודיים – כבידה, אלקטרומגנטיות, הכוח הגרעיני החזק והכוח הגרעיני החלש – במצב מאוחד, רגע חולף של סימטריה קוסמית.

התפשטות והתקררות קוסמית

תוך פחות מ- 10^{-36} שניות, אינפלציה – התפשטות אקספוננציאלית – מתחה את היקום מממדים תת-אטומיים למימדים מקרוסקופיים, החליקה אי-סדירויות וזרעה תנודות צפיפות שמאוחר יותר יצרו גלקסיות. עד 10^{-12} שניות, הכוח החזק נפרד מהכוח האלקטרו-חלש, ואחריו הפרדה של אלקטרומגנטיות והכוח החלש בסביבות 10^{-6} שניות, כאשר הטמפרטורות ירדו מתחת ל- 10^{15} K. הפרדות אלו קבעו את חוקי הפיזיקה השולטים בחומר, מקווארקים ועד גלקסיות.

היווצרות יסודות ראשוניים

לאחר שנייה אחת, היקום התקרר לכ- 10^{10} K, מה שאפשר לקווארקים ולגלואונים להתעבות לפרוטונים ולניוטונים דרך הכוח החזק. במהלך הדקות הבאות – תקופת הנוקלאוסינתזה של המפץ הגדול (BBN) – פרוטונים וניוטונים התמזגו ליצירת היסודות הראשוניים: כ-75% מימן (^1H , פרוטונים), 25% הליום-4 (^4He), וכמויות זעירות של דאוטריום (^2H), הליום-3 (^3He) וליתיום-7 (^7Li). הטמפרטורה הגבוהה ($\sim 10^9$ K) שמרה על גרעינים אלה מיוננים, תומכת בפלזמה של חלקיקים טעונים.

רקומבינציה ורקע המיקרוגל הקוסמי

כ-380,000 שנים לאחר מכן (היסט אדום $z \approx 1100$), היקום התקרר לכ-3000 K, מה שאפשר לפרוטונים ולגרעיני הליום ללכוד אלקטרונים בתהליך הרקומבינציה. זה נטרל את הפלזמה, ויצר אטומים יציבים של מימן והליום. פוטונים, שקודם לכן פוזרו על ידי אלקטרונים חופשיים, שוחררו ויצרו את רקע המיקרוגל הקוסמי (CMB) – תמונה תרמית שהוסטה לאדום ל-2.7 K עקב ההתפשטות. תנודות זעירות ב-CMB

(~חלק אחד ב- 10^5) חושפות את זרעי המבנה הקוסמי, הניתנים לזיהוי כיום על ידי מצפי כוכבים כמו פלאנק.

עידני החושך

לאחר הרקומבינציה, היקום נכנס לעידני החושך, תקופה ללא כוכבים שנשלטה על ידי גז נייטרלי של מימן והליום. קריסה כבידתית בתוך הילות של חומר אפל החלה ליצור גושים צפופים, והכינה את הקרקע לכוכבים הראשונים. היסודות הראשוניים, פשוטים ונדירים, היו חומרי הגלם להיווצרות כוכבים, כאשר החומר האפל סיפק את השלד הכבידתי.

פרק 2: כוכבי אוכלוסייה III - דור 1: החלוצים הקוסמיים

כוכבי אוכלוסייה III, הדור הראשון של כוכבים, התלקחו כ-100-400 מיליון שנים לאחר המפץ הגדול ($z \approx 20-10$), סיימו את עידני החושך ופתחו את "שחר הקוסמוס". כוכבים אלה נוצרו ביקום צפוף ($\sim 10^{-24}$ גרם לסמ"ק), חם ($\sim 20-100$ K) וטהור מבחינה כימית, המורכב כמעט לחלוטין ממימן ($\sim 76\%$) והליום ($\sim 24\%$), עם מתכתיות של $Z \approx 10^{-10}$.

סביבה והיווצרות

הצפיפות הגבוהה של היקום המוקדם אפשרה לענני גז לקרוס בתוך מיני-הילות של חומר אפל ($\sim 10^5-10^6$ מסות שמש), והגיעה לצפיפות של $\sim 10^4-10^6$ חלקיקים לסמ"ק. דחיסה כבידתית חיממה את העננים ל- $\sim 10^3-10^4$ K, אך הקירור תלוי במימן מולקולרי (H_2), שנוצר דרך תגובות כמו $H + e^- \rightarrow H^- + \gamma$, ולאחר מכן $H^- + H \rightarrow H_2 + e^-$. קירור H_2 דרך מעברים סיבוביים ורטטיים היה לא יעיל, שמר על העננים חמים ומנע פיצול. מסת ג'ינס גבוהה ($\sim 10^2-10^3$ מסות שמש) העדיפה פרוטו-כוכבים מסיביים.

מאפיינים

כוכבי אוכלוסייה III היו ככל הנראה מסיביים (10-1000 מסות שמש), חמים ($\sim 10^5$ K) טמפרטורת פני השטח) ומאירים, פולטים קרינה אולטרה-סגולה עזה. מסתם הגבוהה דחפה היתוך מהיר, בעיקר דרך מחזור CNO (באמצעות עקבות של פחמן מהיתוך מוקדם), תוך מיצוי הדלק תוך $\sim 1-3$ מיליון שנים. גורלם השתנה: - **10-100 מסות שמש**: סופרנובות של קריסת ליבה, שפיזרו מתכות כמו פחמן, חמצן וברזל. - **מעל 100 מסות שמש**: קריסה ישירה לחורים שחורים, שעשויים לשמש כזרעים לקוואזרים מוקדמים. - **140-260 מסות שמש**: סופרנובות של אי-יציבות זוגית, שבה ייצור זוגות אלקטרון-פוזיטרון גרם להתפרקות מוחלטת ללא שאריות.

חשיבות

כוכבי אוכלוסייה III היו אדריכלים קוסמיים. קרינתם האולטרה-סגולה יוננה את המימן, והניעה יוניזציה מחדש ($z \approx 6-15$), מה שהפך את היקום לשקוף. הסופרנובות שלהם העשירו את המדיום הבין-כוכבי (ISM) במתכות, ואפשרו היווצרות של כוכבי אוכלוסייה II. משוב מקרינה, רוחות ופיצוצות ויסת את היווצרות הכוכבים ועיצב גלקסיות מוקדמות. שרידי החורים השחורים שלהם עשויים היו ליצור את הזרעים לחורים שחורים סופר-מסיביים במרכזי גלקסיות.

זיהוי אפשרי וסיכויים לעתיד

התצפית הישירה על כוכבי אוכלוסייה III היא מאתגרת בשל מרחקם ותוחלת חייהם הקצרה. טלסקופ החלל ג'יימס ווב (JWST) סיפק רמזים: בשנת 2023, GN-z11 ($z \approx 11$) הראה פליטת הליום מיונן (He II) ללא קווי מתכת, מה שמרמז על כוכבי אוכלוסייה III. RX J2129-z8He II (2022, $z \approx 8$) הראה גם סימנים

פוטנציאליים, אם כי גרעינים גלקטיים פעילים (AGN) או כוכבי אוכלוסייה II דלי מתכת נותרו חלופות. אימות דורש ספקטרוסקופיה ברזולוציה גבוהה כדי לאמת את היעדר מתכות ופליטה חזקה של He II $1640\text{\AA}$.

מכשירים עתידיים כמו הטלסקופ הגדול במיוחד (ELT) ו-NIRSpec של JWST יחקרו $z > 10-20$, מכוונים לגלקסיות בתוליות. סימולציות מציעות זיהוי של סופרנובות של אוכלוסייה III דרך עקומות האור הייחודיות שלהם או גלי כבידה מפיצוצים של אי-יציבות זוגית. כוכבי אוכלוסייה II דלי מתכת, כמו אלה בהילה הגלקטית, עשויים לשמר את התפוקות של סופרנובות של אוכלוסייה III, ומספקים ראיות עקיפות. מאמצים אלה עשויים לחשוף את המסה, המתכתיות ותפקידם של כוכבי אוכלוסייה III בהתפתחות הקוסמית.

פרק 3: כוכבי אוכלוסייה II – דור 2: הגשר למורכבות

כוכבי אוכלוסייה II נוצרו כ-400 מיליון עד כמה מיליארדי שנים לאחר המפץ הגדול ($z \approx 10-3$), כאשר גלקסיות התאספו ביקום פחות צפוף וקר יותר. כוכבים אלה שימשו כגשר בין העידן הראשוני לגלקסיות המודרניות, בונים מורכבות באמצעות העשרת מתכות.

סביבה והיווצרות

הצפיפות הממוצעת של היקום ירדה עם ההתפשטות, אך ענני יצירת כוכבים בגלקסיות מוקדמות הגיעו ל- 10^2-10^4 חלקיקים לסמ"ק בתוך הילות חומר אפל גדולות יותר (10^7-10^9 מסות שמש). ה-CMB התקרר ל- $10-20$ K, ועננים, שהועשרו על ידי סופרנובות של אוכלוסייה III, היו בעלי מתכתיות של $Z \approx 10^{-4}$. $Z \approx 10^{-2}$. מתכות (למשל, פחמן, חמצן) אפשרו קירור דרך קווים אטומיים ([C II] 158 מיקרומטר, [O I] 63 מיקרומטר), והפחיתו את הטמפרטורות ל- 10^2-10^3 K. עקבות של אבק שיפרו את הקירור באמצעות פליטה תרמית. מסת ג'ינס מופחתת ($1-100$ מסות שמש) אפשרה פיצול, וייצרה מסות כוכביות מגוונות.

מאפיינים

כוכבי אוכלוסייה II נעים ממסה נמוכה ($0.1-1$ מסות שמש, תוחלת חיים $< 10^{10}$ שנים) למסיביים ($10-100$ מסות שמש, 10^6-10^7 שנים). הם נמצאים בהילות גלקטיות, צבירי כוכבים כדוריים (למשל, M13) ובליטות גלקטיות מוקדמות, עם מתכתיות נמוכה, המייצרת ספקטרה אדמדמה יותר. היווצרותם בצבירים משקפת פיצול, והסופרנובות שלהם העשירו עוד יותר את ה-ISM ל- $Z \approx 0.1$.

חשיבות

כוכבי אוכלוסייה II הניעו את ההתפתחות הגלקטית. הסופרנובות שלהם סינתזו יסודות כבדים יותר (למשל, סיליקון, מגנזיום), יצרו אבק ומולקולות שהקלו על היווצרות כוכבים. כוכבי אוכלוסייה II בעלי מסה נמוכה, הניתנים לתצפית בצבירי כוכבים כדוריים ובהילה של שביל החלב, שומרים על חתימות של סופרנובות של אוכלוסייה III. משוב מקרינה ופיצוצות עיצב דיסקות גלקטיות וויסות את היווצרות הכוכבים. הם הניחו את היסודות לכוכבי אוכלוסייה I ומערכות פלנטריות.

ראיות תצפיתיות

כוכבי אוכלוסייה II ניתנים לתצפית בצבירי כוכבים כדוריים, הילות גלקטיות וכוכבים דלי מתכת (למשל, HD 122563, $Z \approx 0.001$). כוכבים דלי מתכת מאוד ($Z < 10^{-3}$) עשויים לשקף את התפוקות של אוכלוסייה III. סקרים כמו SDSS ו-Gaia, ותצפיות עתידיות של ELT, יחדדו את הבנתנו על היווצרות אוכלוסייה II והרכבת גלקסיות מוקדמות.

פרק 4: כוכבי אוכלוסייה I – דור 3: עידן הכוכבים והחיים

כוכבי אוכלוסייה I, שנוצרו לפני כ-10 מיליארד שנים ועד היום ($z \approx 2-0$), שולטים בגלקסיות בוגרות כמו הדיסקה של שביל החלב. כוכבים אלה, כולל השמש, אפשרו כוכבי לכת וחיים דרך סביבותיהם העשירות במתכות.

סביבה והיווצרות

היקום דליל (10^{-30} גרם לסמ"ק), עם היווצרות כוכבים בעננים מולקולריים צפופים (10^2-10^6 חלקיקים לסמ"ק), המופעלים על ידי גלי צפיפות ספירליים או סופרנובות. ה-CMB הוא $K 2.7$, והעננים, עם $Z \approx 0.1$, מתקררים ל- $10-20$ K דרך קווים מולקולריים (למשל, CO, HCN) ופליטת אבק. מסת ג'נס נמוכה ($10-0.1$ מסות שמש) מעדיפה כוכבים קטנים, אם כי כוכבים מסיביים נוצרים באזורים פעילים.

מאפיינים

כוכבי אוכלוסייה I נעים מגמדות אדומות ($0.08-1$ מסות שמש, 10^{10} שנים) לכוכבי סוג O ($100-10$ מסות שמש, 10^6-10^7 שנים). המתכתיות הגבוהה שלהם מייצרת ספקטרה בהירה ועשירה במתכות עם קווים כמו Fe I ו-Ca II. הם נוצרים בצבירי כוכבים פתוחים (למשל, הפליאדות) או בערפיליות (למשל, אוריון). השמש, כוכב אוכלוסייה I בן 4.6 מיליארד שנים, היא טיפוסית.

חשיבות: כוכבי לכת וחיים

המתכתיות הגבוהה אפשרה היווצרות של כוכבי לכת סלעיים, שכן אבק ומתכות בדיסקות פרוטו-פלנטריות יצרו פלנטסימלים. הדיסקה של השמש יצרה את כדור הארץ לפני כ-4.5 מיליארד שנים, עם סיליקון, חמצן וברזל שיצרו כוכבי לכת יבשתיים, ופחמן שאפשר מולקולות אורגניות. התפוקה היציבה של השמש ותוחלת החיים הארוכה שלה שמרו על אזור מגורים למים נוזליים, וקידמו חיים מבוססי פחמן במשך מיליארדי שנים. המגוון של כוכבי אוכלוסייה I מניע העשרה מתמשכת של ה-ISM, תומך בהיווצרות כוכבים וכוכבי לכת.

ראיות תצפיתיות

כוכבי אוכלוסייה I שולטים בדיסקה של שביל החלב, ניתנים לתצפית באזורי היווצרות כוכבים ובצבירים. סקרי כוכבי לכת חוץ-שמשיים (למשל, קפלר, TESS) מראים שכוכבים עם מתכתיות גבוהה נוטים יותר לארח כוכבי לכת, כאשר כ-50% מהכוכבים דמויי השמש עשויים לארח עולמות סלעיים. ספקטרוסקופיה חושפת את הרכבם העשיר במתכות, ועוקבת אחר העשרה מצטברת.

פרק 5: דורות כוכביים עתידיים: קוסמוס חשוך וקר יותר

כאשר אנרגיה אפלה מניעה את ההתפשטות הקוסמית, היקום יהפוך לקר יותר, פחות צפוף ועשיר יותר במתכות, משנה את היווצרות הכוכבים. תוך כ-100 מיליארד שנים ($z \approx -1$), היווצרות הכוכבים תאט, ותוך 10^{12} שנים היא עשויה להפסיק, מה שיוביל לקוסמוס חשוך ואנטרופי.

תנאים עתידיים

הצפיפות הממוצעת תפחת, ותבודד גלקסיות. ה-CMB יתקרר ל- $K 0.3$, והעננים, עם $Z > 2-5$, יתקררו ביעילות דרך מתכות (למשל, [Fe II], [Si II]) ואבק. היווצרות הכוכבים תהיה תלויה בכיסי גז

נדירים, שכן רוב הגז הגלקטי יתכלה על ידי היווצרות כוכבים, סופרנובות או סילוני חורים שחורים. מיזוגים גלקטיים עשויים להגביר זמנית את היווצרות הכוכבים.

מאפייני הכוכבים העתידיים

הכוכבים העתידיים יהיו גמדות אדומות בעלות מסה נמוכה (0.08–1 מסות שמש, 10^{10} – 10^{12} שנים) בשל קירור יעיל ומסת ג'נס נמוכה. כוכבים מסיביים יהיו נדירים, שכן מתכיות גבוהה מונעת צבירה של פרוטו-כוכבים גדולים. כוכבים אלה יפלטו אור אינפרא-אדום חלש, ויעמעמו גלקסיות. דיסקות עשירות במתכות יעדיפו כוכבי לכת סלעיים.

פרספקטיבה קוסמית

גלקסיות ידהו ככל שהכוכבים ימותו, וישאירו מאחור גמדות לבנות, כוכבי ניוטרונים וחורים שחורים. החיים עשויים להיות תלויים באנרגיה מלאכותית או נווה מדבר כוכבי נדיר ביקום המתקרב ל"מוות תרמי".

פרק 6: נוקלאוסינתזה כוכבית: חישוב היסודות ופרצי ניוטרינו

נוקלאוסינתזה כוכבית היא הכבשן הקוסמי שבו כוכבים מסנתזים יסודות כבדים יותר מקלים יותר, ומניעים את ההתפתחות הכימית של היקום. מהיתוך שקט בליבות כוכביות לתהליכים נפיצים בסופרנובות, היא מייצרת את היסודות המרכיבים כוכבי לכת, חיים וגלקסיות. שרשרת פרוטון-פרוטון, מחזור CNO, תהליך שלושת האלפא, תהליכי p -, s -, r -, ופוטודיסאינטגרציה, שמגיעים לשיא בפרצי ניוטרינו, חושפים את המנגנונים המורכבים של היווצרות היסודות ומאפשרים זיהוי מהיר של סופרנובות.

שרשרת פרוטון-פרוטון

שרשרת פרוטון-פרוטון (pp) מפעילה כוכבים בעלי מסה נמוכה ($T \sim 10^7$ K, למשל, השמש). היא מתחילה בהיתוך של שני פרוטונים ליצירת דיפרוטון, שמתפרק בבטא לדאוטריום ($^1\text{H} + ^1\text{H} \rightarrow ^2\text{H} + e^+ + \nu_e$), משחרר ניוטרינו. השלבים הבאים כוללים: $^2\text{H} + ^1\text{H} \rightarrow ^3\text{He} + \gamma$ (פליטת פוטון). $^3\text{He} + ^3\text{He} \rightarrow ^4\text{He} + 2^1\text{H}$ משחרר שני פרוטונים.

לשרשרת pp יש ענפים (ppI, ppII, ppIII), המייצרים ניוטרינות באנרגיות שונות (0.4–6 MeV). היא איטית, שומרת על השמש כ- 10^{10} שנים, והניוטרינות שלה, שזוהו על ידי ניסויים כמו Borexino, מאשרות מודלים של היתוך כוכבי.

מחזור CNO

מחזור הפחמן-חנקן-חמצן (CNO) שולט בכוכבים מסיביים (< 1.3 מסות שמש, $T > 1.5 \times 10^7$ K). הוא משתמש ב- ^{12}C , ^{14}N ו- ^{16}O כזרזים להיתוך ארבעה פרוטונים ל- ^{13}C : $^{12}\text{C} + ^1\text{H} \rightarrow ^{13}\text{N} + \gamma$, $^{13}\text{N} \rightarrow ^{13}\text{C} + e^+ + \nu_e$, $^{13}\text{C} + ^1\text{H} \rightarrow ^{14}\text{N} + \gamma$, $^{14}\text{N} + ^1\text{H} \rightarrow ^{15}\text{O} + \gamma$, $^{15}\text{O} \rightarrow ^{15}\text{N} + e^+ + \nu_e$, $^{15}\text{N} + ^1\text{H} \rightarrow ^{12}\text{C} + ^4\text{He}$.

מחזור CNO מהיר יותר, מניע היתוך מהיר ($\sim 10^6$ – 10^7 שנים), ומייצר ניוטרינות באנרגיה גבוהה יותר (~ 1 –10 MeV), הניתנות לזיהוי על ידי Super-Kamiokande.

תהליך שלושת האלפא

בכוכבים מעל 8 מסות שמש, בעירת הליום ($T \sim 10^8$ K) ממזגת שלושה גרעיני ^4He ל- ^{12}C דרך תהליך שלושת האלפא. שני ^4He יוצרים ^8Be לא יציב, שלוכד ^4He נוסף ליצירת ^{12}C , תוך ניצול תהודה ברמות

האנרגיה של ^{12}C . חלק מ- ^{12}C לוכד ^4He ליצירת ^{16}O ($^{12}\text{C} + ^4\text{He} \rightarrow ^{16}\text{O} + \gamma$). תהליך זה, שנמשך כ- 10^5 שנים, הוא קריטי לייצור פחמן וחמצן, ומאפשר חיים.

שלבי בעירה מתקדמים

כוכבים מסיביים עוברים שלבי בעירה מהירים: - **בעירת פחמן** ($T \sim 6 \times 10^8 \text{ K}$, $\sim 10^3$ שנים): $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow$ $^{20}\text{Ne} + ^4\text{He}$ או $^{23}\text{Na} + ^1\text{H}$. - **בעירת ניאון** ($T \sim 1.2 \times 10^9 \text{ K}$, $\sim$ שנה): $^{20}\text{Ne} + \gamma \rightarrow ^{16}\text{O} + ^4\text{He}$. - **בעירת חמצן** ($T \sim 2 \times 10^9 \text{ K}$, ~ 6 חודשים): $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O} \rightarrow ^{28}\text{Si} + ^4\text{He}$. - **בעירת סיליקון** ($T \sim 3 \times 10^9 \text{ K}$, $\sim$ יום): $^{28}\text{Si} + \gamma \rightarrow ^{56}\text{Fe}$, ^{56}Ni דרך פוטודיסאינטגרציה ולכידה.

יסודות שיא הברזל מסמנים את סוף ההיתוך, שכן תגובות נוספות הן אנדותרמיות.

תהליך S (לכידת ניוטרונים איטית)

תהליך s מתרחש בכוכבי AGB (1-8 מסות שמש) ובכמה כוכבים מסיביים, שבהם ניוטרונים נלכדים לאט, ומאפשרים דעיכת בטא בין לכידות (למשל, $^{56}\text{Fe} + n \rightarrow ^{57}\text{Fe}$, ואז $^{57}\text{Fe} \rightarrow ^{57}\text{Co} + e^- + \bar{\nu}_e$). ניוטרונים מגיעים מתגובות כמו $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ במעטפות ההליום של כוכבי AGB. הוא מייצר יסודות כמו סטרונציום, בריום ועופרת במשך $\sim 10^3$ - 10^5 שנים, ומעשיר את ה-ISM דרך רוחות כוכביות.

תהליך R (לכידת ניוטרונים מהירה)

תהליך r מתרחש בסביבות קיצוניות (סופרנובות, מיזוגי כוכבי ניוטרונים) עם זרמי ניוטרונים של $\sim 10^{22}$ ניוטרונים לסמ"ק לשנייה. גרעינים לוכדים ניוטרונים מהר יותר מדעיכת בטא, ויוצרים יסודות כבדים כמו זהב, כסף ואורניום (למשל, $^{56}\text{Fe} + \text{מספר } ^{238}\text{U} \rightarrow n$). הוא נמשך שניות בגלי ההלם של סופרנובות או בפליטות מיזוג, ומהווה כ-50% מהיסודות הכבדים.

תהליך P (לכידת פרוטונים/פוטודיסאינטגרציה)

תהליך p מייצר איזוטופים עשירים בפרוטונים נדירים (למשל, ^{92}Mo , ^{96}Ru) בסופרנובות. קרני גמא בעלות אנרגיה גבוהה ($T \sim 2-3 \times 10^9 \text{ K}$) מפרקות גרעיני תהליכי s ו-r (למשל, $^{98}\text{Mo} + \gamma \rightarrow ^{97}\text{Mo} + n$), או שפרוטונים נלכדים בסביבות עשירות בפרוטונים. היעילות הנמוכה שלו מסבירה את הנדירות של גרעיני p.

פוטודיסאינטגרציה בסופרנובות

בסופרנובות של קריסת ליבה, פוטודיסאינטגרציה בליבת הברזל ($T > 10^{10} \text{ K}$) מפרקת ^{56}Fe לפרוטונים וניוטרונים ו- ^4He (למשל, $^{56}\text{Fe} + \gamma \rightarrow 13^4\text{He} + 4n$). תהליך אנדותרמי זה מפחית את הלחץ, ומאיץ את הקריסה לכוכב ניוטרונים או חור שחור. גל ההלם מפעיל נוקלאוסיתזה נפוצה, ופולט יסודות החוצה.

פרץ ניוטרינו וזיהוי סופרנובות

במהלך קריסת הליבה, כ-99% מאנרגיית הסופרנובה ($\sim 10^{46} \text{ J}$) משתחררת כניוטרונים דרך ניוטריניזציה (p) $(e^- \rightarrow n + \nu_e)$ ותהליכים תרמיים $(e^+ + e^- \rightarrow \nu + \bar{\nu})$. הפרץ של כ-10 שניות קודם לפיצוץ האופטי, וניתן לזהויו על ידי מתקנים כמו Super-Kamiokande, IceCube ו-DUNE. כ-20 הניוטרונים של SN 1987A אישרו זאת. טריאנגולציה ממספר גלאים מאתרת סופרנובות תוך שניות, ומאפשרת תצפיות מעקב באורכי גל אופטיים, רנטגן וגמא, החושפות את תכונות המקור ותפוקות הנוקלאוסיתזה.

שפע לא שווה

שפע היסודות משקף את הנוקלאוסינתזה: - $\sim 98\%$ H, He מ- C, O, Ne, Mg - BBN: שופעים מהיתוך. - Fe, Ni : שיא עקב יציבות גרעינית. - Au, U : נדירים, מתהליך r . - גרעיני P : הנדירים ביותר, מתהליך p .

מחקר מקרה: אורניום-235 ואורניום-238

^{235}U ו- ^{238}U נוצרים דרך תהליך r בסופרנובות או במיזוגי כוכבי ניוטרונים. ^{235}U (זמן מחצית חיים ~ 703.8 מיליון שנים) מתפרק מהר יותר מ- ^{238}U (זמן מחצית חיים ~ 4.468 מיליארד שנים). בזמן היווצרות כדור הארץ (~ 4.54 מיליארד שנים), היחס $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ היה כ-0.31 ($\sim 23.7\%$ ^{235}U). לפני כ-2 מיליארד שנים, הוא היה כ-0.037 ($\sim 3.6\%$ ^{235}U), מספיק לביקוע. כור אוקלו בגבון נוצר כאשר עפרת אורניום איכותית ($\sim 20\%$ תחמוצות אורניום), שהתרכזה על ידי תהליכים משקעיים, הגיבה עם מי תהום שמתנו ניוטרונים. לא התרחשה העשרה איזוטופית; $\sim 3.6\%$ ^{235}U טבעי אפשר קריטיות, וקיים תגובות ביקוע לסירוגין במשך כ-150,000–1 מיליון שנים, וייצר איזוטופים כמו ^{143}Nd וחום.

מסקנה: אנחנו אבק כוכבים, שנולד מחדש מאש קוסמית

מהלידה הלוהטת של המפץ הגדול ועד לעתיד המתפוגג, הכוכבים עיצבו את היקום. כוכבי אוכלוסייה III הדליקו את הקוסמוס וחשלו את המתכות הראשונות. כוכבי אוכלוסייה II בנו מורכבות, וכוכבי אוכלוסייה I אפשרו כוכבי לכת וחיים. נוקלאוסינתזה כוכבית – דרך שרשרת pp , מחזור CNO, תהליך שלושת האלפא, תהליכי r , s ו- p , ופוטוסינטיזציה – יצרה את היסודות, כאשר פרצי ניוטרינו סימנו את התפשטותם הנפיצה. כור אוקלו, המונע על ידי השפע הטבעי של ^{235}U , מגלם את המורשת הזו. אנחנו אבק כוכבים, שנולד מחדש מכוכבים עתיקים, ונושאים את היסודות שלהם בגופנו. ככל שהיקום מתעמעם, המורשת הקוסמית שלנו עשויה לעורר דורות עתידיים להדליק כוכבים חדשים, ולשמר את הבריאה בחלל אנטרופי.