

סופרנובות חשובות – לא יודעים איך מתפוצצות

הרצאה של ד"ר בועז כץ, 12.2.2019

אני בועז כץ מהפקולטה לפיזיקה, יחסית חדש במכון. ואני מתעניין אותי בשאלה של סופרנובות. לא סתם בחרתי את הנושא: סופרנובות חשובות, לא יודעים איך הן מתפוצצות. אבל בעצם אנחנו כן יודעים, ויש כמה פרטים חסרים. אבל בסופו של דבר אני לא יודע איך זה מתפוצץ, אולי זה ברקיס אולי לא. דרך אגב, גם לי זה חדש, אלה מונחים של השנים האחרונות. לפני עשר שנים, אם הייתם שואלים איך סופרנובות מתפוצצות, הייתי נותן תשובה. לקח לי שנים להבין שהתשובה אולי לא נכונה, אני מנחש שהתשובה לפני עשר שנים לא היתה נכונה. מצד שני, יש הרבה דברים שאנחנו יודעים על סופרנובות, העולם היה נראה שונה בלעדיהן. אני מתכוון שאפילו כדור הארץ לא היה נראה כמו שהוא בלי סופרנובות.

אני כן רוצה שנייה להתמודד עם השאלה הזאת. זו עוד מיסקונספציה, ואני לא רוצה להצטרף למיסקונספציה. כשאנחנו שומעים על דברים במדע, - אני לא יודע מה הרקע שלכם פה – הרבה פעמים יש בקרב אנשים תחושה שבמדע יש תיאוריה כזאת, יש תיאוריה כזאת, מדענים כאלה אומרים כך, מדענים כאלה אומרים כך, אחר כך אומרים שמה שאמרו לא נכון, והכל תיאוריות שהיום הן משהו אחד ומחר משהו אחר. אני לא חושב כך. יש המון דברים במדע שאנחנו יודעים. כל רשימה שאעשה, תעשה עוול למה שיודעים. כדור הארץ הוא עגול. אתם רוצים ללכת רחוק יותר? גלי קול זה תנודות של לחץ באוויר, אפשר לחשב את זה בדיוק, אין ספק בזה. העולם עשוי אטומים, יודעים למדוד את החלקיקים, יש המון דברים שאנחנו יודעים. פשוט איך סופרנובות מתפוצצות זה לא משהו שאנחנו יודעים. זה לא שאנחנו לא יודעים כלום, יש המון דברים מדהימים שכן יודעים על סופרנובות. היה לי חשוב להבהיר את זה.

נתחיל לדבר על סופרנובות. כל אחד שמסתכל החוצה בלילה, אם רוצים לראות את החלל בלילה, זה מה שאתם רואים (בשקף). אני מציע לכם הלילה להסתכל החוצה על השמיים, זה מה שתראו. זה שקר; זה אמנם לא ציור, אבל זו תמונה שיש בה אמת ושקר ביחד. מה אמת ומה שקר פה? אלף, זו תמונה, במובן הזה זה לא שקר, זה לא ציור. הדברים האלה באמת בשמיים. השקר הכי קטן זה שהם לא יושבים זה ליד זה, זה זז כל הזמן, לכן כל תמונה כזאת תהיה שקרית. מה שחשוב זה העוצמה, ואפשר להגיד שזה בערך מה שתראו. אפשר לראות את זה בעין, אבל זה לא נראה כך, זה נראה כאילו יש בעין שלנו כתם שהוא לא בסדר. כדי לראות את זה כמו שרואים בשקף, צריך טלסקופ או מצלמה עם חשיפה ארוכה, תצלמו ותראו את זה.

השקר הכי גדול זו העוצמה, העוצמה היא לא כך. העוצמה של הדבר השמאלי כאן היא הרבה יותר גדולה. הצבעים אמיתיים פחות או יותר, אם כי אני לא מתחייב. יש עוד שקר – האדום השמאלי זה לא אדום אמיתי, הכחול הוא לא כחול. האדום זה קרני רנטגן **בצבע** חצי קילו אלקטרוולט, ופה זה 1-2 קילו אלקטרוולט; זה רנטגן, לא אור. היינו חייבים לקחת תמונה ברנטגן ולהפוך לצבעים. מה לא שקרי כאן ומאוד מרשים? הגודל בשמיים. הגרם שאתם רואים כאן זה לא גודל אמיתי (מצביע בשקף), הגודל של זה בקילומטרים הוא הרבה יותר קטן מזה, וזה יותר קטן מזה, בשמיים זה באמת הגודל, הדבר הזה – הקוטר שלו הוא חצי מעגל בשמיים, וזה בכמה מעלות יותר. אם הייתם רואים רנטגן והעיניים שלכם היו יותר גדולות, הייתם יוצאים החוצה ורואים את זה. הנה עוד אחד, יש 200 כאלה בשמיים בגדלים

שונים. בטח היה קל לשכנע אתכם שזה סופרנובה. אני לא יודע אם זה חשוב, אבל זה מעניין כי יוצאים החוצה, רואים את הירח, רואים עוד גרמי שמיים, מתבקש לענות מה זה. כאשר רואים דברים חדשים, דבר ראשון נותנים להם שם, זה סופרנובה או שארית סופרנובה. במתן שם לא אומרים כלום, זה נותן הרגשה שאנו מבינים משהו, בעצם לא. זו מדידה ישירה, עם לוויין ורנטגן ורואים את זה. כדי לקבל תחושה אם זה זבוב או משהו בגודל של ירח או גדול יותר, חייבים לדעת את המרחק. מרחק זה משהו קשה באסטרונומיה, יודעים את המרחק לגרם הזה, ולזה, לאלה הקטנים יודעים פחות. אנחנו יודעים מה זה הדבר הימני פה. זה המון כוכבים מקובצים ביחד, זה הגוש הלבן הגדול. אבל לא כל כך יודעים איך זה נוצר גוש כוכבים, גם לא יודעים איך נוצר האמצעי וגם לא איך האדום. יודעים על זה המון דברים, זה מדהים, אבל המון דברים לא יודעים.

עכשיו נתקן את השקר הראשון, הקטן, החבר הזה (מצביע בשקף) זה איפה שזה נמצא בשמיים. אכזב אתכם בשמיים, הרבה מכם שמו לב לצורה של W של הכוכבים האלה, ובמקרה באותו אזור קיבלנו גם את זה (מצביע בשקף), הם לא כל כך רחוקים בשמים. זה לא מה שתראו בעין, מה שתראו בעין דומה יותר לזה למטה, פה לא רואים כלום כי זה בקרני רנטגן וזה סופר חלש. כך זה נראה בזום אין, זה יפה, קרני רנטגן נחמדות, קשה להגיד על זה משהו אם לא יודעים את המרחק, האם הוא קטן, האם הוא גדול, זה משמעותי. קשה לדעת. יודעים לא רע את המרחק לדבר הזה. איך יודעים בערך? הוא מרחק לא סופר מדויק, אבל מה יודעים? דבר אחד, הדבר הזה לא קבוע בשמיים. צילמו אותו בהפרש של 20 שנה, הוא זז, מתפשט בשמיים. הזווית שלו בשמיים גדלה. יודעים באיזה קצב הוא מתפשט הצידה במעלות. עוד משהו שאפשר לבדוק לגבי הדבר הזה – יודעים לזהות משהו שנקרא אור שבא מחומר שיוצאים לזהות במעבדה, יש משהו שנקרא אפקט דופלר. כשמשהו נע מהר, האור משנה את הצבע שלו או את אורך גל שלו. יודעים למדוד בכמה, וכמה מהר. ככה השוטר תופס אותנו כשאנחנו נוסעים מהר במכונית, על ידי מדידת השינויים האלה בצבע, יודעים כמה מהר החומר הזה מתקרב ומתרחק מאיתנו. יש לנו סקלת מהירות, התשובה כמה אלפי קילומטר בשנייה. ברגע שיוצאים כמה קילומטר בשנייה, עושים הנחה שזה כדור, זו הנחה סבירה, המהירות הזאת משקפת את מהירות הזאת (מראה בשקף), לכן אפשר מזה לחלץ את המרחק; יש זווית סקלת מהירות ומזה מחלצים את המרחק. הדבר הזה נמצא במרחק 10,000 שנות אור מאיתנו, הזווית זה החלק שלמעלה, הרחב זה 15 שנות אור. רק להזכיר, שנות אור זה מרחק, מהו המרחק שהאור עושה בשנה. עשירית מעלה בשמיים שווה ל-15 שנות אור. המרחק לירח זה שנות אור, המרחק מהשמש הוא יותר.

זה (מצביע בשקף) דבר ענקי. הדבר הזה מתפשט בשמיים, זה אומר שבעתיד הוא יהיה יותר גדול, היה בעבר יותר קטן, לפני המון שנים הוא היה נקודה. שמו לב אליו לפני כמה מאות שנים, פה רואים מילים מתוך הספר של טיכו בראהה משנת 1572. הוא לא ראה קרני רנטגן, הם לא התפשטו ולא היו בגודל של מי יודע מה; הוא ראה משהו כמו כוכב חדש, התלהב, זה שינה את חייו ואת מהלך ההיסטוריה המדעית. אבל זה בסך הכל כוכב חדש. כוכב מאוד בהיר, נראה כמו נוגה, זה הדבר הכי בהיר בשמיים אחרי הירח. בטח כולכם ראיתם את נוגה, ופתאום הוא ראה עוד נוגה במקום שלא היה שם קודם, יש לזה משמעות מיוחדת. לא היתה דרך להבין שזה פיצוץ ענק שיגיע עוד כמה מאות אלפי שנים לרדיוס של עשרות שנות אור. הדבר הזה – יש 200 כאלה בגלקסיה, ב-1604 ראינו עוד אחד בעין, ומאז לא ראינו יותר בעין בכלל. זה משהו די נדיר, זה קורה פעם ב-100 שנה בגלקסיה שלנו, ולכן קשה לדעת על זה. ברגע שיוצאים את הגודל והמהירות ועוצמת קרני הרנטגן ומזהים חומרים מסוימים, אפשר

להעריך את המסה. יודעים מהירות, יודעים מיד MB בריבוע חלקי 2, אנרגיה, יודעים על זה הרבה דברים. כמה אנרגיה יש לזה, והנה התשובה האנרגיה היא כמו מיליארד מיליארד מיליארדי פצצות מימן, כמות המסה היא מיליארד מיליארד מיליארדי טונות. זו אותה כמות אנרגיה כמו פצצות מימן, זה נותן רמז לכך שאולי הדבר הזה הוא פיצוץ גרעיני. אנחנו חושבים שזה פיצוץ גרעיני. מי שכן יודע קצת פיזיקה, יוכל לדעת את זה כבר מהמהירות. אלפי קילומטרים לשנייה נשמע גרעיני. זה לא מקרי שזה יוצא אותו יחס. בכל מקרה זה משהו ענק. אולי למישהו מוכר המספר מיליארד מיליארד מיליארדי טונות? זה המשקל של השמש. יש פה שני רמזים, המהירות אומרת שזו תפוקת אנרגיה כמו של פיצוץ גרעיני, המסה נשמעת כמו השמש, כך שזה נראה כמו פיצוץ גרעיני של כוכב. בסוף, זה בערך מה שיודעים להגיד על זה. כנראה היה פה כוכב שהתפוצץ בצורה גרעינית, ולא יודעים איך התפוצץ. כמעט סיימנו את ההרצאה...

בכל זאת, נגיד עוד כמה דברים. רואים שזה משחרר יסודות חיוניים, נגיע לזה אחר כך, אפשר לספור, זה נראה שכך הגיעו ליסודות האלה – על ידי ספירה. רוב היסודות בטבע באו מסופרנובות, לכן העולם היה נראה אחרת אם לא היו סופרנובות בעולם.

צריך לחקור את זה. זה קורה 100 שנה בגלקסיה, האחרון שראה את זה היה אוסקר דואלדה, מאז לא ראינו. צריך להמשיך לחקור את זה. ככה טיכו ראה סופרנובה בעין, זה קורה אחת ל-100 שנים בגלקסיה, אם יש טלסקופ יכולים להסתכל על מאה גלקסיות, ונראה סופרנובה פעם בשנה. זו אחת הדוגמאות היפות שרואים גלקסיה, 100 מיליארד כוכבים, סופרנובה נראית כמו כוכב חדש, מאוד בהיר, בכמות האור שלו הוא דומה לכל גלקסיה, כמות אדירה של אור.

הדרך לחקור את זה – באסטרונומיה אי אפשר לעבוד בדרך אחת, צריך סטטיסטיקה, להסתכל על המון גלקסיות עם טלסקופים. כדאי ללכת למקום שאוסף בצורה מרוכזת מכל העולם את התצפיות בסופרנובה, כמו שאתם רואים זה נמצא באתר שמנוהל על ידי מכון ויצמן, על ידי הקבוצה של עופר ירון, אבישי גל-ים וערן אופק. בואו נלך לאתר. נראה מה המצב היום. האתר מרכז את כל המידע בעולם, אין עוד אתרים כאלה בעולם. אתם רואים – האתר התחיל לספור מינואר 2016, עד היום יש בערך 3000 סופרנובות, כלומר ב-3 שנים 3000, אלף בשנה, מגלים גם כמה כאלה יש ביום. אם תלכו שנים אחורה, הקצב היה קטן יותר, היכולת לראות סופרנובות גדלה בקצב מטורף.

אם רוצים יותר מידע, אלך למשהו קצת מפחיד, שחשוב לדעת אותו. יש פה באתר רשימה של סופרנובות שעושה כאב ראש. רואים כל מיני אותיות שאומרות איזה סוג של סופרנובה; לא נוכל להיכנס לזה יותר מדי, אבל רואים הרבה פיצוצים כאלה שמה שמאפיין אותם זה מסות של כוכב, מהירות של אלפי קילומטרים בשנייה, זה כמו אנרגיה גרעינית שהתפוצצה בכוכב. רואים הרבה כאלה, התכונות שונות, סוג החומרים שונה, ההבדל הכי חשוב זה אם יש להם היסוד הכי נפוץ בטבע או לא. בסופרנובות יש שני הסוגים, היסוד הכי נפוץ זה מימן. המספר 1 אומר שאין מימן, 2 – יש מימן. יש עוד סוגים שלא ניכנס אליהם.

אנחנו לא כל כך מבינים אבל הטבע מרמז שכנראה אין דרך אחת לייצר סופרנובה, יש לפחות שתי דרכים. לא יודעים את הדרך זאת ואת זאת, וכנראה שלשאלה איך מתפוצצות סופרנובות – אין תשובה אחת. זה עושה כאב ראש, גם לי בתור אסטרופיזיקאי. במכון ויצמן, חוץ מאבישי גל-ים ורן אופק שעוסקים בצפייה, יש גם תיאורטיקנים וגם דורון קושניר, אלי וקסמן ואני עוסקים בזה. כשאני מסתכל על זה, השאלה שאני רוצה לדעת קודם היא: זה אותם מספרים, יש אלפיים, אבל רואים שיש משהו

שנקרא la, זה האור. יש 2 הזה, וזה משלים את רוב מה שחסר. יש משהו לא הוגן פה, כי מה שכתוב כאן זה הקצב שמגלים, זה לא מייצג את הקצב שזה קורה. בואו נבין את זה קודם כל, ואחר כך את שאר הדברים. שוב, נראה לי קצת בעייתי בתחום שלנו שאנשים לא קולטים שהם לא יודעים תשובה לשני הדברים שכתובים פה למעלה (SN II 404 ו-SN Ia 1805) ועסוקים בכל האחרים. זה סוג השאלה שאני מנסה להתמקד בה. מה שמרוכז פה זה מכל הסקרים בעולם, יש 5-6 קבוצות מרכזיות, תבינו כמה עבודה נעשית פה. לשם כך אתמקד בסקר אחד שאני אוהב ואני מכיר את האנשים שעושים אותו. הם לא משתמשים בטלסקופים אלא במצלמה גדולה ויקרה שקונים מהמדף. הם שמו אותה בכמה נקודות בעולם. פה יש לכם רשימה של סופרנובות שגילו באוגוסט 2018 תראו איזו רשימה. למה אני לא מראה מינואר 2019? הנה הסיווג, לא דיברנו מה זה la, יש la, 2, 2, 2. כל סיווג כזה הוא המון עבודה. בשביל לשים את האות הזאת, la, חוץ מזה שהמצלמה צריכה לצלם, אדם ישב זיהה, כתב אימייל למישהו אחר שייקח טלסקופ גדול יותר שמאפשר להגיד איזה סוג זה. כל אחד מאלפי הסופרנובות אלה זה עבודה, זה אימייל אחד או שניים של אנשים, עשרות אנשים שעובדים קשה. כך נראית תגלית (בשקף). מהסקר עם המצלמות הגדולות האלה, זו תמונה שהם צילמו, באפריל 2018. רואים פה כל מיני דברים, רובם כוכבים קרובים, חלק יכול להיות גלקסיות ברקע, קשה לדעת, משווים את התמונה זאת לתמונה מלפני כמה שנים, רואים – הדבר הזה הוא זה, זה הוא זה, מצליחים לזהות ששתי תמונות הן אותו הדבר, רק יש פה משהו חדש. כך מזהים סופרנובה. בהתחלה לא יודעים מה זה, אולי זה אסטרואיד. צריך לקחת עוד טלסקופ, עוד תמונות, לדעת שזה באמת סופרנובה, ולזהות איזה סוג.

הנה הסופרנובות שגילו בינואר 2019, פה הרשימה יותר קצרה מקודם. בחודשים האחרונים יש קשיים מכל מיני סיבות. עובדים פחות קשה כבני אדם, יש פחות סופרנובות.. זו עבודה קשה. לפני שנמשיך בעוד פרטים, כמו שאתם מבינים, ביום מגלים ים אינפורמציה, מה עושים עם זה, למה זה לא יספיק? השאלה איזו מין אינפורמציה. בגדול מסתכלים בטלסקופ, רואים אור. מה אפשר לעשות עם זה? באופן גס אפשר לחלק את זה לאיך אור משתנה כתלות בשני דברים. איך הוא משתנה כתלות בזמן ואיך הוא משתנה כתלות באורך גל (צבע). לגבי הזמן, רואים פה כמה סופרנובות, זה הזמן מהרגע שגילו את הנקודה הזאת של אור; על פני עשרות ימים, שבועות, האור עולה. למי שיש מושגים של פיזיקה והספק, אם יודעים את המרחק, אפשר להגיד איזה הספק זה משחרר, אלה המספרים 10 בחזקת 36 ואט, זה כמה אור יוצא מזה. אם משווים למנורה של 100 ואט, זה המספר של סופרנובה, זה עולה ויורד מסופרנובה אחת לשנייה, כאשר הסקלה היא בשבועות וחודשים. אור עולה ויורד – זו דוגמה לסופרנובה אחת כתלות בזמן.

בשקף הבא רואים את עוצמת האור כתלות באורך גל, בצבע. פעם העוצמה באה באדום, פעם בכחול, בסגול, כל פעם העוצמה בצבע אחר. זה ספקטרום שרואים כמה אור בא לאיזה צבע, זה נלקח מאות ימים אחרי הפיצוץ. מה שמעניין במקרה זה – ניכנס לפרטים כדי להפוך את זה קצת אישי – מה שמעניין הוא, שהצורה נשאר די קבועה כשמסתכלים על ימים שונים. העוצמה ככלל יורדת, הסיבה שבגרפים כאן אין הבדל כשזה נהיה חלש יותר, כי הקטנו כל אחד שיהיה באותה עוצמה, התלות היא בצבע, צבע נשאר קבוע.

זה משהו שמאוד מעניין אותנו - הדברים כאן בשקף הם מזמנים מאוחרים, כי נורא קשה לעבוד עם זמנים מוקדמים, זה מאוד עמוק, אי אפשר לראות דרכו, הוא מאוד לא שקוף. אם מסתכלים בזמנים

כאלה, זה נעשה שקוף, אפשר להיכנס פנימה, לאמצע של הסופרנובות. זה סוג מידע שמאפשר לנו הרבה יותר מסתם אור, כאלה יש מעט מאוד. מגלים 5 ביום, אבל אנחנו כרגע אוספים את 100 הספקטראות מהסוג הזה מזמנים מאוחרים, את 100 הראשונות עד כה. יש אלפי סופרנובות, אבל מהסוג הזה, השימושי, רק עכשיו אוספים 100. לפעמים המספרים הגדולים האלה מטעים. הסיבה שלדעתי עד עכשיו כמעט לא מתעסקים עם זה, כי קורית פה מהפכה בכמות המידע. יש לנו הרבה יותר ויותר מידע איכותי שיאפשר לעשות סטטיסטיקה. כך יש סיכוי להשתמש בזה.

אז זה סוג הדברים שאנו מודדים. יופי שמודדים, אבל אנחנו רוצים להגיע לשאלה איך הן מתפוצצות. זו שאלה תיאורטית, הדרך להתקדם בתיאוריה היא למצוא איזשהו סדר בתוך ים הנתונים. כמו שאמרתי סופרנובות הן מסוגים שונים, קשה לערבב. בשקף רואים את 1A שזה 80% ממה שאנחנו רואים, זה משהו משנות ה-60, לא אסביר מה זה, אבל כל נקודה פה היא סופרנובה. כאן יש משהו לגבי העוצמה שלה, וכמה זמן היא עולה ויורדת. יש פה קורלציה, סדר, מין חוק, מסתתר פה חוק. את החוק הזה אגיד בצניעות שנראה לי שבמכון ויצמן הבנו אותו פעם ראשונה כמו שצריך לפני שנה. לצערנו זה מקדם אותנו מעט בהבנה איך זה מתפוצץ, לא הרבה, זה בעיקר מלמד איך אור נע בחומר, מאפשר לנו מיידית לומר מה הפיצוץ. אלה הדברים שמתקדמים בתיאוריה, רואים סדר ומנסים למצוא בו חוקים.

נלך אחורה למשהו שאמרתי בהתחלה. את מי מעניין איך סופרנובות מתפוצצות? אם הייתם יוצאים החוצה עם רנטגן ורואים את זה, בוודאי שזה היה מעניין. אבל אתם לא רואים את זה, אתם יודעים שיש שם סופרנובות וזהו. אבל מי שמתעסקים בזה יודעים שסופרנובות הן חשובות. תחת ההנחה שאתם לא יודעים כלום בכימיה, נעשה קורסון קטן של עשר דקות בכימיה, פיזיקה גרעינית, אחרת קשה לדבר על זה. אני מתנצל בפני מי שיודע את זה בעל פה, ננסה לעשות את זה מהר, קורס בכימיה. כימיה זה הבנת חומרים, צריך להבין שהם עשויים ממולקולות ואטומים, בסוף הם מתחברים ליסודות שונים. מה זה יסוד? נתחיל מכוס מים, יש מיליארד מיליארד מיליארדי חלקיקים שנמצאים בכוס. כל חלקיק הוא מין גוש שעשוי מ-3 חלקיקים. חלקיק אחד שקוראים לו חמצן, שני חלקיקים בשם מימן, יחסית קל לפרק את החלקיקים. באיזה מובן הוא עשוי מ-3 חלקיקים? בני אדם במעבדה או במטבח, קל להם יחסית לפרק את הקשר הזה ולהפוך אותו ל-3 חלקיקים שונים, לא נורא קל, אבל עם אש זה יחסית קל. לעומת זאת, נורא קשה לקחת את אחד משלושת החלקיקים בנפרד ולפרק אותו. זה סיפור של יסודות. יסוד קשה לפרק. ניתן לזה שמות H- זה אטום מימן, היסוד הכי נפוץ בטבע. O זה חמצן. אטומים זה משהו שבאמצעים כימיים ביתיים של אלפי מעלות לא יכולים לפרק. מה שמבלבל זה שבאוויר יש חמצן, אם מסתכלים על גז החמצן - גם עשוי מחלקיקים שאפשר לפרק, אבל במקרה של חמצן אפשר לחבר שני אטומים של חמצן. מולקולה זה חיבור של אטומים, יסוד החמצן הוא יסוד. לוקחים חומרים שעשויים מאטומים, אפשר לפרק אותן בדרכים שונות. אפשר להפיק הרבה אנרגיה מלסדר חמצן ומימן בצורה הזאת. דלק זה מימן וחמצן, בסוף אחרי שזה נשרף יוצאים מים.

כדי להבין איך יש שפע של חומרים בעולם למרות שהכל עשוי אותם יסודות, נספור כמה יסודות יש. בשקף אתם יכולים לראות את הטבלה המחזורית של כל סוגי האטומים, במבט ראשון היא נראית טבלה גדולה. זה מטעה כי רוב החומרים היומיומיים סביבנו לא משתמשים ברוב היסודות הטבלה. גוף האדם זה בעיקר חמצן, מימן, פחמן וחנקן, ורוב החומרים סביבנו עשויים מהרבה פחות יסודות מכל טבלה המחזורית. לכן הטבלה מטעה.

הנה דוגמאות לדברים שימושיים, זה משהו שאוהבים לשתות – אלכוהול, זה עשוי ממימן פחמן וחמצן. זה מה ששתיתם הבוקר, קפאין, שבו בנוסף למימן חמצן ופחמן יש גם חנקן, יסוד נפוץ. את הדברים האלה אפשר לפרק ולהרכיב, אבל זהב שהוא יסוד, האם גם אותו אפשר לפרק? אפשר לנסות לפרק עם אש, לא יוצא זהב. באלכימיה ניסו לפרק ולקבל זהב, לא הצליחו, היום מצליחים, אלכימיה זה פיזיקה גרעינית. להפוך יסוד אחד ליסוד אחר זה מאוד קשה אבל אפשרי, צריך טמפרטורות גבוהות של מיליוני מיליוני מעלות. אחד הדברים שאנו יודעים, שזה מקור האנרגיה של השמש, זה מה שהיא עושה – לוקחת מימנים ומחברת אותם. גם אנו יודעים לעשות את זה, לא בצורה כזו מושלמת אבל יודעים. איך זה עובד? צריך לקחת את האטום, להבין שגם הוא עשוי ממהו. כל אטום, יש לו גרעין וסביבו משהו שנקרא אלקטרונים. האלכימיה לקחת שילוב של גרעין ואלקטרונים וניסתה לנתק ולחבר, בעוד שאם רוצים לשנות יסודות צריך לשנות את הגרעין. פיזיקה גרעינית זה להחליף את הגרעין, זה קשה. בשקף שלפניכם הנקודות האלה זה גודל אלקטרון, גודל הגרעין קטן מהאטום פי מאה אלף, כך שלשחק עם גרעין יותר קשה.

אז אגיד מילה אחרונה על קורס כימיה שעומדים לסיים אותו, למעשה יש לנו הבנה טובה של הטבלה המחזורית הזאת, מה ההבדל בין אטומים שונים. צריך להסתכל על החלקיקים שמהם עשוי האטום – יש את האלקטרונים ואז יש גרעין. בגרעין יש שני סוגים של חלקיקים – פרוטונים ונויטרונים. כל החומר בעולם עשוי מפרוטונים, נויטרונים ואלקטרונים. כל הטבלה המחזורית מצטמצמת לשלושת החלקיקים האלה. הכימיה זה שני חלקיקים, תמיד אותה כמות של פרוטונים ואלקטרונים. כמה פרוטונים יש בגרעין? 1 זה פרוטון, 2 זה אלקטרון. מספר הנויטרונים לרוב שווה למספר הפרוטונים או גדול ממנו. יש לי הצעה לכל מי שחושב ללמד כימיה, אנחנו עושים עוול ענק בעולם הזה לילדים ואנשים בכך שאנו משתמשים בכל האותיות האלה. תארו לכם שהיינו משתמשים בחומרים ואומרים: ילדים, זה מים. זה יותר מעניין, הרבה יותר מזמין ממהו ערטילאי של אותיות. זה הערת שוליים לסוף הקורס של כימיה ופיזיקה.

עכשיו נחזור לסופרנובות. איך כל זה קשור לסופרנובות? בכימיה, כמו שאנחנו יודעים, מימן וחמצן זה מים, חיבור בין יסודות קורה כל הזמן בטבע. לשנות את כמות היסודות – כמה חמצן, חנקן, מימן, צריך פיזיקה גרעינית. בטבע קורית פיזיקה גרעינית, איפה בעיקר? בסופרנובות. עכשיו, הסופרנובות משחקות שני תפקידים. אחד, הכוכבים במרכז שלהם מייצרים יסודות, כוכבים זה תנורים - תפקידם להאיר, לתת אנרגיה. עוד תפקיד – הם מייצרים יסודות. השמש מייצרת הליום, יסוד לא נורא שימושי, בעתיד אולי היא תייצר פחמן וחמצן. את זה אנו צריכים. מה הבעיה עם השמש? זה נחמד שהיא עושה את זה, אבל מה שהיא מייצרת תקוע בשמיים, זה לא עוזר לי. כדי שחנקן וחמצן יגיעו אליי, צריך לשחרר אותם איכשהו. לא יודעים איך זה קורה, אבל רואים שזה קורה, זה סופרנובה. כאשר סופרנובה מתפוצצת זה פיצוץ כוכב שמש שחרר את היסודות האלה. דבר שני, בהרבה מהסופרנובות, תוך כדי פיצוץ יש פיזיקה גרעינית. סופרנובה מסוג Ia – בשנייה אחת של פיצוץ, מייצר גרעינים; לכל 1000 מסות שמש, הסופרנובה הזאת משחררת בערך מסת שמש של ברזל, שזה מיליארד מיליארד מיליארדי חומר, זה יסודות כבדים. ברזל זה יסוד 26, יש סיבה גרעינית למה דווקא ברזל.

אז יופי שזה קורה שם במרחק מיליוני שנות אור, איך זה קשור לפה? איך אני יודע שברזל אצלי בא מסופרנובה. אעשה לכם חשבון. הנה הוא. מה צריך לספור? אגיד עוד מספרים למי שיכול לעשות חשבון בראש, תזכרו שכך אפשר לדעת. כל כמה זמן רואים סופרנובות בגלקסיה? אחת למאה שנה. כמה זמן

היו סופרנובות בהיסטוריה? משהו כמו 10 מיליארד שנה, כך שבגלקסיה יש 100 מיליון סופרנובות. כל סופרנובה משחררת מסה כמו של שמש, לעומת בערך 50 מיליארד מסות שמש של מימן בגלקסיה. כל הספירה מובילה לדבר הזה. זה מתחלק למסה בגלקסיה, על כל אלף מסות שמש בגלקסיה, בהיסטוריה שלנו היתה בערך סופרנובה אחת la. רק ספרנו כמה מסות יש, כמה סופרנובות יש. כל סופרנובה מסוג la, לכל 1000 מסות שמש משחררת מסת שמש של ברזל. הברזל הוא מסה אחת, אם הכל מתערבב, אז 1 חלקי 1000 מהחומר במסה יהיה ברזל. אם נסתכל בוויקיפדיה על השמש, על האטמוספירה בוויקיפדיה, רואים שברזל זה 0.1% מהמסה של המימן בשמש. לכן כשהשמש נולדה – זה היה 5 מיליארד שנה אחרי היווצרות הגלקסיה, זה מדהים. מה אני לומד מזה? כנראה שחלק משמעותי מהברזל בשמש והברזל אצלי בדם בא מסופרנובות מהסוג הזה. האם אני בטוח בכך? אולי חיזרים עשו מעבדה ושמו שם ברזל. זה יהיה מעניין, אבל זו נראית לי הנחה סבירה, ואין לי משהו טוב יותר לומר.

נשאר לנו כעשר דקות. נחזור לשאלה של מה זאת אומרת שאני אומר שלא יודעים איך סופרנובות מתפוצצות. מדען אחד אומר משהו אחד, מדען אחר אומר משהו אחר. איך תדעו אם להאמין? כאשר מדען אומר שהוא יודע משהו, יש סיכוי טוב שהוא יודע, ותשאלו אותו איך הוא יודע. כשמדען אומר שהוא לא יודע, תאמינו לו. אני לא יכול להראות לכם את כל הנתונים, נעשה קריאה מודרכת של ויקיפדיה – כשקוראים בוויקיפדיה משהו על מדע, איך אפשר לזהות ש"פה חשדתי"? יש בעיה בדרך שמעבירים מדע, לא מצליחים להפריד בין ים הדברים שידועים מצוין לבין דברים בחזית המדע שאיננו יודעים. זה קצת התערבב וזה יוצר בעייתיות. למה בחרתי דווקא את זה? זה מאוד גרוע מה שבחרתי, זה עוול, בכל זאת אעשה את זה. כשקוראים משהו, איך לראות רמזים שזה סוג הדברים שלא יודעים? יש דברים שכן יודעים. לגבי סופרנובה, האם יודעים מה התפוצץ? לפחות בסוג השני הנפוץ, שיש הרבה מימן, אנחנו יודעים מה התפוצץ. הנה דוגמא (בשקף), זה מייצג אחד, איך יודעים מה התפוצץ? פשוט וישיר, יש לנו מידע שזה קורה – מזהים פיצוץ, ראינו סופרנובה, אומרים: אולי יש תמונה של המקום הזה הרבה קודם, חייבים תמונה מקודם כדי לראות שהיה פיצוץ, לראות הבדל. מזהים שבמקום של הפיצוץ היה כוכב, בטלסקופ רואים את זה. מחכים שהאור ידעך, כשהמקום מתבהר ונהיה רגוע, מצלמים עוד תמונה, רואים שהכוכב שהיה שם קודם נעלם, יש פה משהו ורדרד כזה שנעלם, אז אין כוכב. היה שם כוכב, הוא נעלם. פה יכולים לומר: אולי יש פה ענן אבק שמסתיר. הסיבה שזה מאוד חזק, זה קודם כל כי יש הרבה שאפשר לראות. זה גם יותר חזק מסתם, כי היתה תחזית, סוג הכוכב הזה הוא לא רגיל, הוא כוכב ענק עם עשרות מסות שמש, 15-20 מסות שמש. אז כמה שלא יודעים איך סופרנובות מתפוצצות, ידענו מי מתפוצץ וזה היה אישוש. כשיש אישוש, זה עוד יותר מחזק את הידע. ידענו מה התפוצץ, בלי שידועים איך קורה הפיצוץ. מה הכוונה שלא יודעים איך זה מתפוצץ. בוויקיפדיה יש הסבר, תוכלו לראות מה יודעים, ואיפה ממש לא יודעים. בשקף רואים מה שכתוב בוויקיפדיה על סופרנובה. זה באנגלית, אתרגם את זה לעברית: יש כוכב, יש בעירה גרעינית שממירה מימן לדברים כבדים יותר. כשמגיעים לברזל אי אפשר יותר להפיק מזה אנרגיה, הכוכב נתקל בבעיה, כשהוא לא יכול להפיק יותר אנרגיה נגמר לו הדלק, מחוג הדלק הגיע לאפס, לכן זה נכון – כשיש לו בעיה, הוא לא יכול להמשיך לייצר אנרגיה, ואז הוא חייב להתכווץ, זה יכול לקרות באופן אלים או לא, הדבר הזה קורס. יש לזה תחזית. כשיש קריסה כזאת, אמור להיות פולס של חלקיקים שידועים לחדור שהם נייטרונים, ומהפיצוץ הזה יש פה יותר אנרגיה, הקריסה פולטת נייטרון, ב-1987 היה גל

נייטרינים, ובעולם המודרני יכולנו למדוד את זה. גלאי נייטרינים לא יודעים לראות סופרנובות. הסיפור הזה נכון, מדובר בכוכב מסיבי, נגמרו החיים שלו, יש קריסה במרכז, חור שחור. כל זה נכון. אבל מה הבעיה עם הסיפור הזה, מה חסר? זו קריסה שיוצרת אור וחום, איך זה קשור לפיצוץ שמעיף דברים החוצה? פה התשובה פשוטה: אנחנו לא יודעים. כתובים פה כל מיני דברים על תהליך שמתחיל, משהו בפיצוץ נעצר, וזה ממשיך על ידי תהליך – לא יודעים איזה – שכולל גל נייטרינים. המילים האלה זו דרך מנומסת לומר: אין לנו מושג מה קורה. אם עושים חישוב של כל התהליך, יש קריסה ולא נוצר פיצוץ. נוצר פיצוץ במובן של שחרור אנרגיה, אבל לא נוצר פיצוץ כך שעשרות מסות שמש יוצאות החוצה בשנייה. יודעים שיש קריסה, למה קריסה פנימה מובילה לפיצוץ החוצה? אני חושב – גם דורון קושניר חושב כך, זה לא רעיון מקורי – שזה לא קשור למה שכתוב פה בוויקיפדיה. בסוף זה סוג של פיצוץ גרעיני. החלק שמעיף החוצה הוא טריגר, אבל הוא לא קשור לאנרגיה שהשתחררה. אולי אנחנו צודקים, אולי טועים, הדבר הבסיסי שלא מבינים הסופרנובה התפוצצה. לא אמור להיות פה חנקן ופחמן בחוץ. מה עם המקרה של 1A? זה שהצלחנו לראות את הכוכב ויש אישוש עם נייטרינים, זה אומר סופרנובות עם מימן, היסוד הכי נפוץ בטבע. הגיוני שלכל משהו בחלל יהיה מימן, 70% מהשמש זה מימן. ברוב הסופרנובות אין גרגר מימן או מעט מאוד 10 במינוס 4 או 5, נורא-נורא מעט. לכן לא רואים את זה. מה כן משתחרר? ברזל, סיליקון, סידן, ברזל, יסודות קטנים. la אומר מימן, זה רוב הסופרנובות, כל פעם מנסים את אותו תרגיל לראות מה היה קודם, לא הצלחנו פעם אחת לראות מה היה קודם. רואים פיצוץ, מסתכלים אחורה, לא רואים כלום. זה מסתדר עם החוש התיאורטי שהיה לנו, מה יכול לעשות הפיצוץ? יש רמז בסיליקון, בברזל, שזה פיצוץ גרעיני פשוט של מסת שמש. לוקחים את השמש, תנסו לפוצץ אותה גרעינית, זה לא עובד. יש כוכבים שיוודעים שאם ינסו לפוצץ אותם, הם ילכו למרכז ויעשו משהו, הם יתפוצצו לבד, זה פצצות גרעיניות. יש כאלה בטבע, הם נקראים ננסים לבנים. יש כאלה שאפשר לראות בחוץ, אלה כוכבים נפוצים, ננס לבן זה שם מוזר – אלה כוכבים שדחוסים פי מאה יותר מהשמש. יש להם רדיוס כמו השמש, אבל הצפיפות היא פי מאה גדולה יותר, הרדיוס פי מאה קטן יותר. אם יבוא חייזר ויחלק את המרכז באזור קטן, תתחיל תגובת שרשרת שתתפשט, זה יראה כמו סופרנובות. סופרנובות זה פיצוץ של ננסים לבנים. אם אתם רוצים לראות ננס לבן, תסתכלו בלילה בחוץ, זה ננס לבן (בשקף). חלק מהאור בא מננס לבן, כשמסתכלים על זה מקרוב, זה רוב האור שרואים, הקטן הזה שם הוא ננס לבן. זו תמונה של הכוכב הכי בהיר בשמיים, נוגה. מבין הכוכבים שלא זזים בשמיים הכי בהיר זה סיריוס. פה יש ננס לבן נחמד. תסתכלו על סיריוס (בשקף), תראו ננס לבן, זה מאוד נפוץ. זה נחמד מאוד. לא יודעים איך זה מתפוצץ, אבל זאת השאלה. יש ננסים לבנים. סיריוס-B הוא כנראה מאות מיליוני שנה. רוב הננסים הלבנים בני מיליארדי שנים, הם חיים בשקט. אם יבואו חייזרים במיליארד מעלות זה יתפוצץ גרעינית, אבל אין חייזרים שעושים את זה.

למה ננסים לבנים מתפוצצים? יש פה תשובה בוויקיפדיה. זה הערך של סופרנובה, זה ערך של סופרנובה מסוג la. רואים פה מילים כמו: אולי, מדובר על מכניזם, נשאר לא ברור, מודל קונצנזוס. תלכו לערך של la, משהו צריך לצעוק לעין, צועק לכם אור אדום, במילים מנומסות: אין לנו מושג. אבל זה המצב הרבה שנים, יש מחשבה שחושבים, לפעמים המחשבה נכונה, לפעמים לא. האמת הפשוטה היא: אנחנו לא יודעים. אם כתוב consensus model, תחשדו שלא יודעים. לא יודעים. זה הרבה מילים, נשמע כאילו יודעים, אבל לא יודעים.

מה אנחנו לא יודעים? אנחנו יודעים המון דברים. יודעים שסופרנובות הן חשובות, יודעים כמה אנרגיה, כנראה כולם פיצוץ גרעיני, 10 מסות של כוכב, סוג אחד קשור לקריסה פנימה של הכוכב. למה קריסה גורמת פיצוץ? לא יודעים. זה לא מספיק, זה חצי עבודה. מדוע ננסים לבנים נחמדים, שהם פצצות גרעיניות שמרחפות בחלל, למה חלק מתפוצצים? אם כולם היו מתפוצצים, היינו אומרים שזה המכניזם אבל רק אחוז מהן מחליט להתפוצץ אפילו אחרי מיליארד שנים. למה? פשוט לא יודעים. יש דברים רבים שיוודעים, יש דברים רבים שלא. אולי יבוא מישהו ויגלה... תודה רבה.

שאלה: האם יודעים למה נקודה סינגולרית הפכה למפץ גדול?

ד"ר בועז כץ: לא.

שאלה: כשטיכו ראה את סופרנובה וחשב שהוא כוכב, לא ראה את זה אחר כך כמשהו אחר? ד"ר בועז כץ: אולי הטעיתי במילים. טיכו לא חשב שזה כוכב, הוא ראה משהו שנראה כמו כוכב. הוא קורא לזה כוכב חדש, שם לב שזה עלה וירד, עשה מזה עניין גדול. הוא לא אמר: אָה יש פה עוד כוכב. הוא ניסה גם למדוד משהו, שזה מיוחד. אנשים רבים ראו זאת הרבה שנים, את העיגולים שהראיתי תיעדו הסינים עוד קודם, טיכו עשה משהו שאף אחד לא עשה לפניו, ניסה למדוד. הוא ראה כוכב חדש בשמיים, רוב האנשים אומרים וואו. הוא אמר: נמדוד. אין לו מד אור, הוא יכול למדוד זוויות. מה מעניין בזה? אם משהו קרוב לכדור הארץ, במהלך הלילה נעבור מצד אחד לשני, זה יזוז טיפה בשמיים. ככל שזה יותר רחוק, זה יזוז פחות בשמיים במהלך לילה. כך הוא ניסה כך למדוד את המרחק, לראות האם יש תזוזה ביחס לכוכבים אחרים. ראה שאין. הוא יודע בוודאות שזה רחוק, הירח זז בערך מעלה בשמיים, אפילו קצת יותר ממעלה במשך לילה, הוא ידע שזה רחוק מהירח, זה סתר את התיאוריה מקובלת שדברים מעבר לירח לא יכולים להשתנות. הוא הראה שמה שחשבו פעם לא נכון, דברים מעבר לירח יכולים להשתנות. הוא חשב שזה משהו אחר. גליליאו היה פיזיקאי הראשון שניסה להסביר את זה. אחת ההרצאות ראשונות שנתן בפומבי היתה על סופרנובות. הוא חשב שזה אטמוספירה, לא ידע מה זה, לא היה להם סיכוי לדעת מה זה בלי עוד מידע, אין דרך להתקדם.

שואל: שאלה נאיבית קצת – איך הפיצוץ משחרר יסודות?

ד"ר בועז כץ: שאלה מצוינת. יש פיצוץ, איכשהו זה מגיע אלינו, איך זה קורה? צריך לשים פה לוחות זמנים, נסתכל על הגלקסיה שלנו, על השמש ועלינו. אעשה פה הרבה עוול, אבל אגיד בערך – גלקסיה זה 10 מיליארד שנה, השמש 5 מיליארד שנה, והסופרנובות הן באמצע. עבר הרבה זמן מתחילת הגלקסיה עד שנוצרה שמש, וחצי מהסופרנובות כבר הספיקו לקרות. 100 מיליון סופרנובות, כל אחת משחררת חומר, אחרי כמה זמן החומר התערבב עם החומר סביב. הדרך שזה הגיע לדם – כל סופרנובה פיזרה את החומר כגז בין חומרים, השמש כבר נוצרה מהחומר הזה עם גז, היתה אלפית ברזל לכל מסת שמש של מימן. כשהשמש נוצרה, הברזל כבר היה מעורבב בה.

שאלה: פעם הסבירו את הפיצוץ של סופרנובה בכמות המסה, שיש כוכב שמחלק את האנרגיה שלו, המסה מתכווצת ואז יש מסה קריטית, יש פיצוץ גרעיני ואז זה מתפוצץ. ההסבר הזה כבר לא קיים? ד"ר בועז כץ: הרבה מהדברים שאמרת – נדבר על שתי סופרנובות. אחת היא כוכב שהדלק שלא נגמר ואי אפשר לשרוף יותר, באיזה שלב זה מתכווץ וקורס. אני חושב שזה קורה, זה מאוד קשור לסופרנובה. הבעיה היא לחשב מזה מה קורה, כי כל הכוכב נעלם, אין פיצוץ. יש פיצוץ במובן שמשתחררת המון אנרגיה, עפה החוצה, אבל אין ברזל שם, הכל עף החוצה, אין אור במובן של מה שרואים, זה נעלם לחור שחור, אין פיצוץ. דבר שני שאמרת, נראה לי ששני הדברים מתחברים. יש סופרנובות מסוג אחר,

יש מודל פופולרי שהיה הרבה שנים, בהרבה מקראות היה כתוב: כך מתפוצצות סופרנובות. יש ננס לבן שחי בשקט, מישהו שופך עליו מים, המסה שלו גדלה; יש גבול תיאורטי לננסים לבנים, הם לא יכולים להיות יותר מ-1.4 מסות שמש. מי שמוסיף מסה מוביל אותו להגיע ליותר מ-1.4 ואז קורה משהו. מה קשה לחשב? אולי זה מביא לפיצוץ גרעיני, לא ברור. זה סיפור שהאמינו לו. אבל אין בסיפור פרדיקציות שאפשר לאמת אותן. יש קצת פרדיקציות שסותרות מה שקורה, שזה גרוע יותר. הדבר היחיד הטוב במודל היה, שלא היו רעיונות אחרים. דבר שני, היתה מין קונספציה, אמרו שהסיפור הזה תמיד יקרה במסה של 1.4, לכן לסופרנובות יהיו אותן תכונות, לכן התכונות הומוגניות. זה מין קבר של הרעיון הזה בתוך עצמו, כי העובדה היא שאין להן אותן תכונות; יש קורלציה, אבל עוצמת האור משתנה, הסיפור שזה תמיד יוצא אותו דבר – זה לא נכון. אתה רואה לוגיקה שלא סגורה על עצמה, זה משתנה, זה לא אותו דבר. איך זה מסתדר? זה מביא אנשים להבין שזה לא מסתדר. יש רעיונות שהולכים ומתים. צריך להמציא סיבה למה זה תמיד באותה מסה קריטית? יש סיפור שבהתחלה מתחילה שריפה, לא פיצוץ, באיזשהו שלב יש טרנזיציה, המשחק עם זה מקבל דברים חלשים וחזקים. אבל מסתבר שבטבע, חלשים הם בגלקסיה אחרת מאשר החזקים. אז זה לא מסתדר. ויש רעיונות טובים יותר. אני לא יכול להגיד בביטחון שזה לא מודל נכון, אבל אין לו כרגע בסיס מעבר לרעיון עמום.

שאלה: האם יש סופרנובה, האם יש נובה? ומה הבדל?

ד"ר בועז כץ: לרוב, הדברים האלה מתחילים בצפיות. יש תופעה של הבזקי אור שקורית יותר פעמים, בעין נראים דומה. יש אור עולה ויורד על סקלות זמן מהירות יותר. בהתחלה קראו לכל הבזק כזה נובה, זה גם נראה כמו כוכב חדש, נראה כמו עוד נקודת אור בשמיים. המילה נובה זה חדש. קראו לזה סטלה נובה שזה כוכב חדש. ברגע שמדדו מרחקים, ראו שיש הבדל בעוצמה. יש סקלה אחרת לסופרנובות שהן הרבה יותר עוצמתיות באור ומסה.

שאלה: מה עם התיאוריה של קצב התפשטות היקום שהתבססה על סטנדרטים בסופרנובות? יש סימן שאלה על זה?

ד"ר בועז כץ: נכון, בעזרת סופרנובות la וקורלציה כמו זאת שהראיתי קודם, שמקשרת בין עוצמת האור למשהו אחר, שמאפשרת לנו – אם אנחנו מאמינים שתפסנו אחד כזה – לדעת את עוצמת האור שלו, לדעת את המרחק אליו. משתמשים בסופרנובות האלה כמו שאמרת, יודעים שזה מאה ואט, אם תראו כמה אור אני מקבל אני יודע באיזה מרחק הוא נמצא. את הסופרנובות רואים עד קצה היקום הנראה, אפשר למדוד באמצעות זה מרחקים, ב-1998 מאו עדות ברורה ראשונה לכך שהתפשטות היקום מאיצה עם הזמן. זה הפוך לתחזית הטבעית, יש האצה של היקום, זה משהו שאין לנו מושג איך הוא קורה, ומיד מרגישים טוב יותר, קוראים לזה אנרגיה אפלה, לא יודעים באמת מה זה. השאלה שאתה שואל, אם לא יודעים איך זה מתפוצץ, האם הדעה הזאת תקפה? לדעתי יש המון עדויות אחרות שהיקום מאיץ, למדידה לא אכפת מהתיאוריה. זו קליברציה, לוקחים סופרנובות, מכיילים את הקשר בין עוצמת האור לדברים אחרים, הכי נפוץ זה כמה מהר זה עולה ויורד; לא יודעים איך זה עובד, אבל זו הנחה שעלולה להיות לא נכונה, לכן חשוב שיש עוד המון עדויות, אבל זה לא תלוי תיאוריה. רואים סופרנובות אחרות, באיזה קצב האור עולה ויורד, ואז יודעים מה המרחק. זה לא היה קשור לאיך שעשו את זה, ושוב זה נראה לי שקרי. אוקיי? תודה רבה.

מחאות כפיים.