

שלום לכולם, שמי דורון קושניר מהמחלקה לאסטרופיזיקה במכון ויצמן. היום אספר לכם על הגילוי משנה שעברה של גלי הגרביטציה ומה זה אומר לגבי מה שמבינים על היקום. לפני שנגיע לזה, מכיוון שאני מניח שיש פה אנשים מכל מיני דיסציפלינות, אז אני אנסה לתת לכם הקדמה קצרה לשני מושגים חשובים באסטרופיזיקה. בחצי הראשון נתעסק בזה ואז נדבר על גלי גרביטציה.

אז סדרי גודל. הסימון שבו אשתמש, 10 בחזקת משהו, זה ייצא מספרים מאוד קטנים, נגיד למשל 10 בחזקת -5... אני מניח שכולכם מכירים.

אז הדברים שאני הולך להתעסק איתם מורכבים מאטומים. אטומים מורכבים מגרעין, שבתוכם פרוטונים ונויטרונים ומקיפים אותם אלקטרונים.

יש להם מסה, מדדנו, 10 במינוס 27 גרם. הפרוטונים שיושבים בפנים יותר כבדים, 10 במינוס 24 גרם. בניגוד לאלקטרונים יש להם גודל, 10 במינוס 13 ס"מ.

הגרעין עצמו אוסף של פרוטונים ונויטרונים.

הגודל הוא בערך הגודל של פרוטון.

אטום שהוא הגודל של כל הדבר הזה, הוא כבר הרבה יותר גדול, 10 במינוס 9 ס"מ. הרבה יותר גדול מהגרעין.

המסה של האלקטרונים מאוד קטנה.

המסה של האטום בערך המסה של הגרעין.

מולקולה זה כמה אטומים ביחד, יותר גדול וכבד מאטום, כמה אטומים יחד.

תא זה כבר המון מולקולות ביחד, הרבה יותר גדול ממולקולות, 10 במינוס 3 ס"מ. המסה מאוד קטנה 10 במינוס 9 גרם.

אדם זה בערך מטר, הוא חי 10 בחזקת 8 שניות.

כדור הארץ ענק, 10 בתשיעית ס"מ, 10,000 ק"מ. יש לו מסה, 10 בחזקת 28 גרם ויודעים מה גילו, 10 ב-17 שניות, שזה בערך 10 בעשירית שנה.

כדור הארץ נמצא ליד השמש. השמש יותר גדולה, 10 ב-11 ס"מ, כבדה יותר.

מערכות השמש והשמש נמצאים בתוך גלקסיה, אנו נמצאים פה איפשהו... כל הגלקסיה יותר גדולה מהשמש ויותר כבדה, טיפה יותר זקנה מהשמש.

כל הגלקסיות נמצאות ביקום הנראה, 10 ב-28 ס"מ, המסה 10 ב-55 גרם.

אלה כל הסקאלות הרלוונטיות למה שנדבר היום.

הדברים פה משתנים מ10 מינוס 27 גרם ל-10 ב55 גרם.

הדבר הכי מעניין בטבלה זה המס'. אנשים הצליחו למדוד את כל המס'. הגודל והמסה של כל הדברים שיש פה, זה לקח דורות רבים של אסטרונומים ופיזיקאים.

בשביל להתחמם נעשה דוג' קטנה.

נסתכל שנייה על השמש.

אראה לכם את צפיפות השמש.

המסה והרדיוס של השמש אפשר למדוד בצורה פשוטה אז אני יכול להעריך צפיפות.

צפיפות זה מאסה חלקי נפח.

זה סדרי גודל...

אם אני מכניס את המס' מהטבלה פה לשמש אז תהיה לי הצפיפות.

בואו נקבל תחושה על צפיפויות בטבע.

צפיפות אוויר 10 במינוס 3 גר' לסמ"ק.

עופרת שזו מתכת כבדה 10 גר' לסמ"ק.

שזו צפיפות כדור הארץ פחות או יותר.

מה צפיפות כדור הארץ? מכניסים מס' ויוצא 10 גר' לסמ"ק.

השמש זה גר' לסמ"ק.

השמש פחות צפופה מכדור הארץ. אנו יודעים שהיא פולטת אור והרבה זמן אנשים חשבו שהיא עשויה מפחם.

היום יודעים שזה לא נכון אבל הדרך לראות את זה הקונספט הראשון שאראה לכם, אנרגיה לחלקיק.

מה הרעיון? יש חומר שמורכב מאטומים ויש לו אנרגיה. רוצים למדוד כמה אנרגיה יש בכל חלקיק בחומר הזה. אנרגיה לחלקיק.

הכי נוח למדוד את זה לפרוטון. לא אוכיח את זה אבל אני מקווה שכולם שמעו שאנרגיה זה MC בריבוע. זה אומר שהאנרגיה זה מסה של חלקיק כפול מהירות האור בריבוע.

אם אני יודע מה המאסה של החלקיק אני יכול לחשב את האנרגיה הזו.

אני לוקח חומר, בודק כמה אנרגיה יש לו ומחלק במסה של פרוטון כפול MC בריבוע.

לנויטרונים בערך אותה מסה.

בואו נקבל תחושה למס'.

מולקולות, יש לה אנרגיית קשר. אני מפרק אותה וצריך להשקיע אנרגיה. כמה אנרגיה אני מקבל? האנרגיה חלקי המסה שלה כפול C בריבוע זה 10 במינוס 10, מס' קטנטן.

כמעט כל האנרגיה שרואים ביומיום, פוטוסינתזה, פחם, דלק של האוטו, הכל עובד ב 10 מינוס 10. אנו מנצלים כמות קטנטנה ממסת המנוחה.

כמה אנרגיה יש באטום? כמה אנרגיה צריך כדי לקחת אלקטרון ולפרק מאטום?

האנרגיה הזו יותר גדולה מאנרגיית קשר של מולקולות, זה 10 במינוס 8. זה עדיין מס' מאוד קטן.

גם דברים שעובדים על אנרגיה של אטומים לא יעילים במובן הזה.

מה עם אנרגיה גרעינית? נניח שאני יכול לקחת גרעין ולפרק אותו, כמה אנרגיה אני משקיע? פה האנרגיה חלקי המסה של הגרעין כפול C בריבוע זה 10 במינוס 3. זה יותר יעיל מלשרוף פחם או משהו כזה, לעומת פצצות רגילות שעובדות ב-10 על מינוס 10.

גם אלקטרון אחד יש לו אנרגיית מנוחה אז אני יכול לחשב את היחס, זה 10 במינוס 3. בפרוטון זה 1 חלקי 1 אז זה 1.

זה כמה אנרגיה יש לנו בחלקיקים ואוספי חלקיקים בטבע וזה פחות או יותר כל האנרגיה שיש בטבע.

זה הקונספט הראשון.

השני קשור בגרביטציה. אנו מתעסקים באסטרופיזיקה, כמו כוכבים או פלנטות או דברים מהסוג הזה. מה מיוחד בהם? הם קשורים. כל האטומים וכל החלקיקים בגוף הזה מחוברים אחד לשני. למה? בגלל כוח המשיכה, הוא מושך אותם אחד לשני. אנו רוצים לדעת כמה אנרגיה יש בכוח המשיכה הזה, אנרגיה גרביטציונית, ואנו מחשבים את זה לחלקיק.

כמה אנרגיה קינטית צריך לתת לחלקיק כדי להעיף אותו מהכוכב.

למשל יש טיל שאני רוצה להעיף מכדור הארץ, האנרגיה הקינטית שאני נותן לגוף הזה זו אנרגיה גרביטציונית שיש לו שאני צריך להתגבר עליה.

מסה כפול מהירות הבריחה בריבוע אבל אני רוצה לחלק את זה באותו דבר שקראתי קודם, מחלק במאסה כפול C בריבוע. המאסה מצטמצמת, חלקי C, הכל בריבוע. זה נכון למולקולות, לאטומים, נכון לכולם, נכון גם לטיל.

יש שני מס', אחד, כמה אנרגיית קשר יש לחלקיק בגוף מסוים וכמה אנרגיה גרביטציונית יש לחלקיק שזו מהירות הבריחה חלקי מהירות האור הכל בריבוע.

בכדור הארץ זה 10 ק"מ לשנייה, מחלק ב C זה 10 במינוס 9.

המס' הזה מאוד דומה לאנרגיה כימית, קשרים בין מולקולות. זו הסיבה שאפשר לטוס החוצה מכדור הארץ. עם דלק כימי יכולים להאיץ טיל החוצה מכדור הארץ.

השמש למשל, מה מהירות הבריחה מהשמש? היא יותר גדולה ומאסיבית, שזה מה שחשוב בעיקר, שזה בערך אלף ק"מ לשנייה.

בשביל לעוף מהשמש צריך 10 במינוס 5. אם היינו נוחתים על השמש לא היינו יכולים לטוס משם אח"כ. אין לה משטח גם אבל ברמה העקרונית...

עוד מעט נדבר על יצורים אחרים, ננסים לבנים. לפני שנסביר מה זה, אגיד שהמסה שלו זה המסה של השמש והרדיו כמו של כדור הארץ. מהירות הבריחה יותר גבוהה מהשמש. יש יצורים יותר מוזרים, כוכבי נויטרונים, הם מאוד קטנים, הרדיוס 10 ק"מ, מהירות הבריחה ענקית, קרובה למהירות האור, אני צריך אנרגיה לחלקיק של 1, אני צריך להשקיע את כל אנרגיית הבריחה.

הדבר הכי קיצוני זה חורים שחורים, אי אפשר לברוח מחור שחור.

זה פחות או יותר מה שיש ביקום.

עכשיו יכולים לחזור לשמש.

בשמש האנרגיה לחלקיק זה 10 במינוס 5, זה הרבה יותר גדול מ-10 במינוס 10 שזו אנרגיית הקשר של מולקולות, אין מולקולות בשמש, כל המולקולות בשמש התפרקו כי האנרגיה הגרביטציונית לחלקיק יותר גדולה מאנרגיית הקשר.

אין אטומים בשמש גם כן. אנרגיית הקשר של אטום זה 10 במינוס 8 והאנרגיה הגרביטציונית זה 10 במינוס 5, אין אטומים בשמש.

מה לגבי גרעינים? זה 10 במינוס 3, זה יותר גדול מ-10 במינוס 5. האנרגיה הגרביטציונית לא מספיק גדולה לפרק גרעינים ולכן השמש מורכבת מאלקטרונים ומכל האלקטרונים שברחו, קוראים לזה פלזמה וזה מה שיש בשמש.

אז מה מקור האנרגיה של השמש אם אי אפשר לשרוף פחם? בשביל לענות על שאלה זו צריך לדעת כמה אנרגיה השמש פלטה, באותן יח' שמדברים שמנרמלים למסת המנוחה של השמש, השמש קרנה לאורך חייה בחום ואור 10 במינוס 4 ממסת המנוחה שלה. זה המס' שצריך להסביר.

כבר אמרנו שאין פחם בשמש אבל גם אם היה זה לא היה מספיק, זה לא יכול להיות שום דבר כזה.

רעיון אחד שהסתובב הרבה מאוד זמן בעולם הוא של קלווין, השמש מתכווצת לאט לאט כל הזמן והאנרגיה הגרביטציונית שמתחררת בתהליך הזה היא מקור האנרגיה שהשמש

פולטת, אבל אין מספיק אנרגיה גרביטציונית לשמש לעשות את זה. אין מספיק אנרגיה. הרעיון של קלווין גם לא נכון, זו לא האנרגיה גרביטציונית של השמש, זה משהו אחר.

מדובר באנרגיה גרעינית, דבר שמבחינת מס' מסתדר. אפשר לשחרר 10 במיננס 3 מאנרגיית המנוחה וזה הרבה יותר, זה אומר שיש עוד המון אנרגיה בשמש והיא יכולה לפלוט לפחות פקטור 10 מהזמן שחיה עד עכשיו, יש עוד המון זמן לשמש לחיות וזה מקור האנרגיה, תרמו-גרעינית. איך זה עובד? תכף אסביר.

צריך להסתכל קצת יותר בזהירות על גרעינית. מה שהגרף מראה זה כל מיני גרעינים שיש לנו בטבע.

המס' שכתוב פה למטה זה כמה פרוטונים ונויטרונים יש בגרעין הזה.

למשל מעל 4 זה הליום. שני פרוטונים, שני נויטרונים.

באזור ה-60 נמצא ברזל.

אורניום איפשהו פה...

הגרף מצייר כמה אנרגיה יש בחלקיק באותן יח' ששמענו קודם, שהמס' לא יהיו 10 במיננס 3 אז הכפילו באלף, זה אותו דבר.

אם אני יכול לקחת גרעינים קלים ולחברם יחד, אני מרוויח אנרגיה. מהצד השני אם אני לוקח גרעינים מאוד כבדים ומפרק אותם אני גם מרוויח אנרגיה. יש מקום באמצע שאי אפשר להרוויח אנרגיה מפירוק וחיבור וזה קורה בערך בברזל.

למשל איך עובדות פצצות גרעיניות ואיך עובדים כורים גרעיניים? לוקחים דברים כבדים כמו אורניום ומפרקים.

איך עובדות פצצות תרמו-גרעיניות? לוקחים איזוטופים קלים, מחברים, קוראים לזה היתוך.

השמש עושה היתוך. היא לוקחת מימנים, פרוטונים והופכת אותם להליום. היא לוקחת 4, בדרך צריכה להפוך 2 פרוטונים לנויטרונים. זה קשה לעשות את זה, הפרוטונים לא רוצים להתחבר יחד ודוחים אחד את השני. הטמפ' בשמש מספיק גבוהה כדי שהדבר הזה יוכל לקרות.

השמש לאט לאט לוקחת 4 פרוטונים והופכת להליום, מרוויחה אנרגיה, פולטת אור, ועושה את זה כבר 10 ביליון שנה.

למשל לקחת 4 הליומים ולהפוך אותם לפחמן את זה השמש לא יכולה לעשות, אין לה מספיק אנרגיה. כך עובדת השמש.

מה יקרה שיגמר לשמש כל המימן ויישאר רק הליום? במקרה כזה לשמש לא יהיה מה שיחזיק אותה נגד הגרביטציה והיא תתחיל להתכווץ ואז האנרגיה הגרביטציונית תעלה ואז ה-10 במיננס 5 יהפוך ל-10 מיננס 4 והשמש תשרוף הליום לפחמן. הכוכב ישנה את צורתו

ויהפוך לענק אדום, לא אכנס לזה, באיזשהו שלב גם ההליום הזה ייגמר ולא תוכל לשרוף פחמן ותמשיך להתכווץ. השמש מתכווצת ולפני שמצליחה לשרוף את הפחמן ולעלות לאזור הזה, היא לא יכולה לעשות את זה כי מה שעוצר אותה, מה שתוקע אותה זה אלקטרונים, השמש תקועה ולא יכולה לעשות שום דבר עם עצמה.

חוץ מזה בתהליך מאוד מסובך שלא מבינים איך קורה, היא מצליחה לאבד את כל המעטפת, זה נקרא PLANTERAY NEBULA, לא משנה, מה שנשאר זה הבעירה של הפחמן, בכוכב שנקרא ננס לבן, הוא קטן כי השמש ניסתה לשרוף פחמן ולא הצליחה ונתקעה. איפה שנתקעה זה הרדיוס, המסה זה המסה של השמש, והאנרגיה גרביטציונית זה 10 במינוס 3. יש גוף שמחזיק עצמו, לא שורף שום דבר והאנרגיה הגרביטציונית לחלקיק בפנים זה 10 במינוס 3.

ננס לבן מתי שנוצר הוא היה טיפה חם ואז הוא מתקרר בשמיים, מתישהו יהיה ננס אפור ואז שחור ואז נפסיק לראות אותו. זה דבר נפוץ בגלקסיה. כל כוכב שהיה כמו השמש, שסיים לבעור, הופך להיות אחד כזה. הגלקסיה מלאה בננסים לבנים שפעם היו כוכבים כמו השמש.

יש פה צירוף מקרים. אנרגיה גרביטציונית לחלקיק בננס לבן זה 10 במינוס 3, האנרגיה לחלקיק באנרגיה גרעינית וגם מסת האלקטרונים, זה צירוף מקרים, אין שום דבר שמבטיח שזה יקרה.

מה קורה בכוכבים גדולים מהשמש עם יותר מסה?

הם שורפים מימן, עם אותה אנרגיה, שורפים, המימן נגמר, מתכווצים, מתחילים לשרוף הליום. הם נקראים סופר ענק אדום.

אם מישהו מכיר את מפת השמיים יודע איפה זה אוריון, 3 כוכבים... יש כוכב שנקרא ביטל ג'וס שהוא סופר ענק אדום, בדיוק אחד כזה.

הכוכבים האלה מאוד מאסיביים. אחרי בעירת ההליום הם מצליחים לשרוף פחמן וחמצן וסיליקון ומגיעים עד ברזל, אבל אי אפשר להרוויח אנרגיה מברזל ואז יש ננס לבן מברזל. הדבר לא יכול להחזיק את עצמו כי עוד מאסה נצברת עליו והוא קורס בתהליך שלא מבינים אותו, כל המעטפת מתפוצצת, SUPERNOVA, ואז או שהברזל בפנים קורס ונעצר בכוכב נויטרונים, מה שמחזיק אותו זה הלחץ... מהירות הבריחה היא בערך מהירות האור.

אופציה אחרת שהנויטרונים לא מצליחים לעצור את הכוכב שקורס וזה קורס והופך לחור שחור.

אלה שתי אפשרויות.

כוכב נויטרונים זה מאוד דומה לננס לבן, מוחזק בלחץ ניוון. הוא יותר קטן.

זהו.

לפני שנעבור לגלי גרביטציה. תנו לי בשקף אחד להסביר את נושא המחקר שלי.

שאלה אחת, ננס לבן, אמרנו שזה 10 במינוס 3 אנרגיה לחלקיק שזה בערך אנרגיה גרעינית. מיד היינו מפוצצים את הננס הלבן הזה כי זה דומה לאנרגיה גרעינית שהוא יכול לשחרר אותה.

השאלה השנייה, כוכבים מאסיביים איך הם מאבדים את המעטפת בסופר נובה.

אז התשובות הן 1, סופר נובה מסוג a1, ויש 2, סופרנובה מסוג 2.

איך כל אחד מתפוצץ ונותן סופרנובה מסוג אחר.

עכשיו אעבור לגלי גרביטציה.

מה גלי גרביטציה יכולים ללמד אותנו?

הקדמה קצרה, מה זה גלי גרביטציה? גלים אלקטרומגנטיים, למשל גלי רדיו.

יש אנטנה, מה זה? אלקטרונים שאנו מאיצים אותם עם שדה חשמלי, הם זזים בשדה חשמלי ותכונה ידועה של מטען חשמלי, אם הוא מואץ הוא משחרר גלי קרינה אלקטרומגנטיים.

אנו מאיצים, הוא משחרר גלים, הם מתקדמים, גם בווקום, במהירות האור, ומגיעים לאנטנה הקולטת. מה קורה בה?

הגלים מתחילים להזיז אלקטרונים באנטנה ומוודדים את האלקטרונים ויודעים מה היו הגלים ומפענחים וככה עובד רדיו.

גלי גרביטציה זה אותו דבר, במקום מטענים חשמליים מחליפים במסה.

מסה מואצת משחררת גלים. אם אני לוקח מסה, אני מזיז את המסה, היא זזה וכוללת גלים, גלי כבידה שמתקדמים במהירות האור ואם הייתה לי דרך למדוד אותם הייתי יכול לדעת מה יש בגלים האלה.

עוד מעט נתאר את התפתחות הדבר הזה.

הגלאי נקרא LIGO, יש שניים כאלה, בלואיזיאנה ובוושינגטון סטייט.

מטרתו למדוד את גלי גרביטציה.

הוא משתמש בתכונה ש גלי גרביטציה מעוותים את המרחק בין שתי מסות. אם גל גרביטציה מגיע לפה והוא מספיק חזק הוא ישנה את המרחקים ונצליח למדוד גלי גרביטציה.

ככה עובדת האנטנה. חשוב להבין שיש לנו משהו שמסדר גלי גרביטציה ואנו יכולים למדוד אותו.

השאלה הגדולה מה זה הדבר הזה?

מה יכול לשדר גלי גרביטציה שנצליח למדוד את כדור הארץ?

אז חשבון מאוד מהיר שאפשר לעשות ולא אעשה אותו, כל ניסוי שעושים בכדור הארץ, אין שום סיכוי, גלי גרביטציה חלשים מדי. חייבים ללכת למקורות אסטרופיסיקאליים.

הסיבה היא שצריכים להאיץ הרבה מאוד מסה וצריכים להגיע למהירויות שמאוד קרובות למהירות האור בתאוצות האלה בשביל שיהיו גלים מספיק חזקים שנוכל למדוד אותם.

הדבר הכי פשוט שיכולים לחשוב עליו, 2 כוכבים שמסתובבים אחד סביב השני. הם מואצים כמובן, יש תאוצה, ויכולים לקחת 2 כוכבים מאוד כבדים.

באופן עקרוני לקחת משהו כבד שמגיע לתאוצות גבוהות, יש דברים כאלה בחלל ואותם מנסים למדוד.

מה הדרישות ממע' כזו שנוכל למדוד אותה?

דרישה ראשונה, תסלחו לי, פה עברתי לאנגלית...

הדרישה הראשונה שתהיה הרבה מסה. זו מסת השמש.

הדבר השני, רוצים שמתי שמסתובבים כוכב אחד סביב השני רואים שהם במהירות האור, מהירות הבריחה שקולה בערך למהירות האור.

הם מסתובבים ומאבדים אנרגיה ב גלי גרביטציה, הם לאט לאט מתקרבים אחד לשני. ברגע שהם נוגעים אחד בשני נגמרה התנועה. רוצים רגע לפני לדעת מה המהירויות. כשיש שני גופים שהמרחק ביניהם זה הרדיוס של כל אחד מהם המהירות היחסית היא בדיוק מהירות הבריחה.

מספיק לחשוב שמהירות הבריחה מספיק גבוהה ורוצים שהיא תהיה קרובה למהירות האור.

יש עוד פרט טכני. הגלאי הזה נמצא בכדור הארץ ובשל כך יש רעשים סיסמיים שאי אפשר להיפטר מהם לגמרי. יש להם אורך גל שמתאים בערך ל-1000 ק"מ.

גלי גרביטציה האלה כמו גלים אלקטרומגנטיים יש להם אורך גל. במערכת הזו המרחק משני הכוכבים האלה. אם המרחק יותר גדול מאלף ק"מ שזה פחות או יותר איפה שהרעש הסיסמי נכנס ל LIGO אז אי אפשר למדוד את זה.

המרחק בין הכוכבים יהיה יותר קטן מאלף ק"מ, ולפני שכמעט נוגעים אחד בשני זה כמו להגיד שהרדיוס שלהם קטן מ-1000 ק"מ.

זה הדבר היחיד שיש לנו סיכוי לגלות, השאלה אם יש כאלה בכלל ומה אפשר לגלות.

הכי טוב להכין רשימת מלאי של כדורים ביקום. זו רשימת המלאי נכון ל-13.9.15.

בואו נתחיל מפלנטות כמו כדור הארץ.

האם הפלנטות יכולות לתת גלי גרביטציה? נגיד כדור הארץ והירח?

אז דבר ראשון, המאסה מאוד קטנה, פחות ממאית של השמש.

בעיה שנייה, הרדיוס שלהם 10,000 ק"מ. זה הרבה יותר גדול משל LIGO, אז זה לא יעבוד.

חוץ מזה, דרך שקולה להגיד את זה, מהירות הבריחה מכדור הארץ, מה המהירות שצריך לתת לטיל בשביל להעיף אותו מכדור הארץ, 10 ק"מ לשנייה שזה יותר קטן ממהירות האור. דברים כאלה אין סיכוי לגלות עם LIGO.

מה לגבי כוכבים? הם יכולים להיות מאוד מאסיביים, אפילו מאה פעמים של השמש.

הבעיה שהרדיוס ענק, מיליון ק"מ, הרבה יותר גדול מ LIGO, גם אם היו שני כוכבים קרובים אחד לשני, הרדיוס כ"כ גדול שה LIGO לא יכול למדוד.

מהירות הבריחה שלהם קטנה ממהירות האור.

ננסים לבנים יש להם סיכוי כי הם יותר קטנים. גם אמרנו שהמסה שלהם בערך מסת השמש שזה טוב.

הבעיה איתם שהרדיוס שלהם 10,000 ק"מ שזה יותר גדול ממה ש LIGO יכול למדוד.

מהירות הבריחה שלהם לא מספיקה.

ל LIGO זה לא טוב אבל עקרונית אפשר לבנות גלאי שיוכל למדוד שני ננסים לבנים במסלול. צריך לשים את הגלאי בחלל ואז לא תהיה בעיה של רעש סיסמי. הוא צריך להיות יותר רגיש למדוד מהירויות נמוכות, הוא נקרא LISA, הוא מאושר לפיתוח ועוד 20 שנה הוא אמור להיות בחלל.

כל הדברים האלה לא עובדים. מה לגבי כוכבי נויטרון? הם בערך מסת השמש. הרדיוס שלהם מאוד קטן, 10 ק"מ. מצוין. הרבה יותר קטן מ 1000 ק"מ ועקרונית LIGO יכול למדוד אותם.

מהירות הבריחה בערך מהירות האור. כוכבי נויטרונים מועמדים מצוינים, השאלה אם יש שניים כאלה שמסתובבים אחד סביב השני.

יש 13 כאלה. האנושות הצליחה לגלות 13 מע' של שני כוכבי נויטרונים שמקיפים אחד את השני.

זה לא מספיק, אם הם מאוד רחוקים אחד מהשני, הזמן שייקח להם להגיע יכול להיות מאוד ארוך, מעניין מע' שקרובות אחת לשנייה, מע' כאלה יש 6, זה מצוין כי זה לא אפס.

יש עוד דבר אחד קטן שלא אכנס לפרטים, חלק מהמערכת לא בטוחים במאה אחוז שזה שני כוכבי נויטרונים, יכול להיות שזה בשילוב עם ננס לבן.

כמה יש כאלה שיש סיכוי לגלות אותם? אחת.

זו מע' מפורסמת שזיכתה בפרס נובל, לא, זו מע' אחרת... מה שמעניין בה, אלה שני כוכבי הנויטרונים הכי קרובים. זה נשמע קצת אבל האמת שזה מאפשר לתת הערכה לא רעה לכמה כאלה יש ביקום והאנשים שעשו את זה נאראיין ופיני ב-91'.

כך אוכל לתכנן את הגלאי שלי. איזה אורך גל ומה הרגישות שלו.

אם אני רוצה לגלות את כל כוכבי הנויטרונים בגלקסיה שלנו, אם אני רוצה להסתכל על מאה/אלף/מיליון גלקסיות אני צריך גלים יותר רגישים... אפשר לעשות את החשבון הזה, כך למעשה נקבעה רגישותו של LIGO.

נחזור לזה תכף. לפני זה מה עם חורים שחורים? עקרונית יכולים להיות בכל מסה שהיא, גם במסות גדולות. אם המסה שלהם כמה פעמים מסת השמש, נגיד 10 פעמים, אז הרדיוס שלהם מספיק קטן בשביל ש LIGO יוכל למדוד את זה.

מהירות הבריחה כמובן בדיוק מהירות האור.

חורים שחורים מועמדים מצוינים ל LIGO. כמה כאלה מכירים בגלקסיה?

שתי מערכות, חור שחור-חור שחור. אפס מערכות כאלה. מאוד קשה להעריך איזו רגישות צריך לגלאי.

מה לגבי מערכות קצת שונה, כוכב נויטרון אחד וחור שחור? אפס מערכות כאלה שמכירים.

מה עושים? איך מתכננים גלאי כמו LIGO?

גלאי שיגלה שני כוכבי נויטרונים את זה יודעים פחות או יותר לחשב. זה גלאי מאוד מסובך. נעשה את זה בשלבים.

נבנה גלאי עם מאית הרגישות. אחרי זה עם עשירית הרגישות. נתקדם ונשפר את הטכנולוגיה אבל כל הזמן נחפש אולי במקרה חורים שחורים שמתמזגים. זה בדיוק מה שעשו, קיוו לטוב והתרגיל הצליח.

מה שרואים פה זה את המאמר המקורי שפורסם ב-11.2.16 ומה ש LIGO מדווח, הם הצליחו לגלות מיזוג של זוג חורים שחורים.

LIGO בזמן שעשו את התצפית לא היה מספיק רגיש לגלות שני כוכבי נויטרונים, פשוט במזל הסתבר שיש מספיק חורים שחורים במערכות בינאריות שאפשר לגלות אותם וזה מה שהוא גילה.

עכשיו צריך לעדכן את רשימת המלאי של היקום.

בשנת '74 גילו את המערכות הראשונה של שני כוכבי נויטרונים שזיכתה את המדענים בפרס נובל.

ב-13.9.15, יום לפני הגילוי של LIGO ידעו על 13 מע' כאלה ו-6 יתמזגו מהר.

אח"כ גילינו שני חורים שחורים ושנייה אחרי זה הם התמזגו ונעלמו. חזרנו לאפס.

LIGO גילה סוג חדש וזה רגע היסטורי, משהו חדש בחלל שלא ידענו שקיים קרה 10/20 פעמים, משהו כזה. 14.9.15 היה רגע כזה, גילינו משהו חדש.

זהו, עכשיו השאלה מה אפשר לעשות עם זה? המון דברים, עוד לא יודעים.

השיטה להשתמש באסטרונומיה של גלי גרביטציה התחילה ומה הדברים שנגלה? לא יודעים, אבל בשנים הקרובות יהיו הרבה דברים.

זהו, תודה רבה!!

אם יש שאלות אני אשמח....

מה זאת אומרת רדיוס של חור שחור? אולי תוכל להסביר?

איך יש רדיוס לחור שחור? חור שחור זו נק' אז למה יש לו רדיוס? הנקודה היא שמה שיכולים להסתכל זה על מסלולים סביב החור השחור ויש להם מהירות, המסלול של מהירות האור, זה נקרא הרדיוס של החור השחור, כל דבר שהוא מחוץ לרדיוס הזה מבחינתו זה לא משנה אם זה חור שחור, כוכב נויטרונים. אם אתה חוצה את הרדיוס אז קורה דברים אחרים. למשל אתה לא יכול לשלוח סיגנלים החוצה. הרדיוס הזה מוגדר מצוין, שני חורים שחורים שמסתובבים אחד סביב השני.

איך מבדילים בין גלי גרביטציה שמגיעים לשני חורים שחורים או כוכבי נויטרונים?

כמו שאתה יכול לדמיין, כשהכוכבים מסתובבים אחד סביב השני, האות של גלי גרביטציה זה מן סינוס שהתדר שלו זה זמן המחזור של המסלול. הם כל הזמן מתקרבים אחד לשני, התדר נהיה גבוה יותר. באופן מאוד בסיסי, זה נגזרת התדר בזמן. משני המס' האלה אפשר לקבל יחס בין המסות ואפשר לקבל עוד משהו שנקרא... שתי קומבינציות של המסה.

בעזרת שני הדברים האלה אני יכול לדעת מה המסה של כל אחד בנפרד ומה שיצא שהמסה של כל אחד בנפרד יותר גדולה...

בוא נתאר כך, יש לי מסה וזמן המסלול והמרחק ביניהם. עכשיו אני בודק אם אני יכול לדחוף את המסה למרחק הזה. המסה בתוך הרדיוס כוכב נויטרונים לא יכול להחזיק. האופציה היח' זה חור שחור. למעשה במובן זה, הראינו צפיפות גבוהה ומצד שני זה החור שחור הכי טוב שיש לנו. אם יש משהו שאפשר לקרוא לו חור שחור זה זה.

אפשר לתת דוג' למה ניתן לגלות באמצעות גלי גרביטציה?

מה שאפשר לראות בעתיד הנראה לעין, נגיד ב-20 שנה הקרובות, זה בעיקר למדוד מערכות כאלה בינאריות או של שני כוכבי נויטרונים או כוכבים שחורים, ננסים לבנים, זה מאפשר להעריך כמה כאלה יש ואם יכולים להיות מאוד מדויקים יכולים למדוד את הספין של

כל אחד מהם, כמה פעמים מסתובב סביב צירו, רמז לאיך נולדים/נוצרים, אולי זה קשור לסופרנובות, אני חושב שזה קשור...

בעתיד המאוד רחוק עקרונית אפשר למדוד את כל הכוכבים הבינאריים בגלקסיה או למדוד מערכות מאוד מיוחדות. זה פחות או יותר מה שאפשר לעשות עם גלי גרביטציה בעתיד הנראה לעין, זה בעיקר מעניין אסטרופיזיקאים.

איך מגדירים את רדיוס השמש? הפלזמה לא נגמרת, זה הולך ונחלש. זה ממוצע של משהו?

השמש היא גז, יש פרופיל צפיפות, הוא נחתך? נמשך לאינסוף? התשובה היא שהוא נחתך איפשהו. יש רדיוס שיוורד חזק בעומק אופטי אחד, אחרי זה יש צפיפות נמוכה שנקראת רוח השמש שנמשכת למרחקים עצומים ויש מקום מצוין שזה יורד חזק.

מה מהירות ההתפשטות של גלי גרביטציה?

זה פשוט מהירות האור.

לא יודעים איך השמש נוצרה.

האם יש מקורות אחרים ל גלי גרביטציה שלא חושבים עליהם? למשל האם בזמן שכוכבים נוצרים נפלטים גלי גרביטציה שאפשר לגלות?

התשובה בהחלט כן. למשל החורים השחורים האלה, אם היית שואל לפני LIGO היו אומרים כנראה אין דברים כאלה. אנו מוכנים להפתעות ואני מהמר על גלי גרביטציה שלא חשבנו עליהם.

סביר להניח שעם הגלים שיש היום, גלי גרביטציה... כל מסה שזזה עושה משהו, הם פשוט נורא חלשים. תמיד יכולות להיות הפתעות.

אפשר לפרט על מנגנון היווצרות הגלים? נתת אנלוגיה להיווצרות גלים אלקטרומגנטיים, זה לא אותו דבר.

התלונה שזה לא כמו גלים אלקטרומגנטיים אבל בשאלה הזו זה כן כמעט אותו דבר. למה אלקטרון שמואץ עושה גלים? הסיבה היא ... יודעים שאלקטרון עושה שדה חשמלי אבל אם הוא מואץ וזז למקום אחר זה נראה שהשדה משתנה. גלים זה שדה משתנה, מבחינה זו זה אותו דבר בדיוק.

יש מסה שמואצת וזזה, זה גל. זה אותן משוואות. זה נכון שזה לא בדיוק אותו הדבר כי לגלי גרביטציה יש קיטוב קצת שונה...

האם יש חלקיק שנושא גלי גרביטציה כמו שפרוטונים נושאים גלים אלקטרו מגנטיים?

יש גרביטון, יכולים להגיד מיד שאם יש דבר כזה המסה חייבת להיות אפס ויכולים לדעת מה הספין מהקיטוב של גלי גרביטציה אבל האם הצלחנו למדוד דבר כזה? ממש לא.

החסם חייב להיות יותר קטן ממהו.

האם אפשר לגלות גרביטון בודד? יש על כך תילי תילים של פילוסופיות, כנראה שאי אפשר.

הדבר הכי טוב שאפשר לעשות זה לתת חסמים.

-אמרת שיש הקבלה לשדים אלקטרומגנטיים, אז יש הקבלה לשדה המשלים המגנטי בשדה החשמלי?

-גם יש שדה חשמלי וגם שדה מגנטי ותלוי איך מסתכלים על הגל, השאלה אם יש משהו מקביל ב גלי גרביטציה? בהחלט כן.

יש כמה רכיבים בשדה שמשותפים בגלי גרביטציה והם מתערבבים עם עצמם וכו'... זה לא אותו דבר כי יש יותר רכיבים.

-יכול להיות בתיאוריה מסות שבורחות אחת מהשנייה, כמו אלקטרונים? או שזו תמיד משיכה?

-מה שנקרא מסה שלילית... תאורטית על פניו נראה לי שכן. יש על זה ספרות ענפה ואנשים חוקרים את זה, עובדתית לא ראינו רמז לזה ביקומנו.

-איינשטיין הספיק לחשוב על העידן של האסטרונמיה במידה ויתגלו גלי גרביטציה? האם חזה את זה?

-אני לא מכיר את ההיסטוריה עד הסוף. איינשטיין היה הראשון שהציע דבר כזה, גלי גרביטציה, באיזשהו שלב זנח את הרעיון כי חשב שזה לא עובד מסיבות מתמטיות. אח"כ שכנעו אותו והוא חזר לקבל את זה. במהלך חייו אנשים ניסו לגלות גלי גרביטציה, גלים מאוד פרימיטיביים, סביר שהוא הכיר את הרעיון, האם חשב שיש מערכות שמסוגלות לתת דברים כאלה? כנראה שלא. זה קשור לשנים האחרונות של איינשטיין, אני לא בטוח.

-אפשר למדוד מרחק בעזרת גלי גרביטציה?

-התשובה כן.

-אפשר לשים אחד על הירח ואחד במקום אחר?

-איך אפשר למדוד מרחק? הדרך היא אם אנחנו יודעים את המסה, רדיוס, הכל, יודעים מה צריכה להיות עוצמת האות במקור. מודדים משהו, מה שיפה ב גלי גרביטציה זה 1 חלקי המרחק, לא בריבוע, זה מאפשר למדוד מרחקים עצומים ואנשים עשו את זה.

התשובה בהחלט כן. שני הגלאים שיש היום, שני זוגות LIGO לא כ"כ טובים לזה כי הם באותם זוויות ומודדים אותו קיטוב.

יש גלאי אחר, VIRGO, שבימים אלה מתחיל לקחת דאטה והוא נמצא באירופה ונמצא בזווית אחרת, כשהדבר הזה יקרה זו תהיה פריצת דרך רצינית ויעזור לנו לחפש גלי

גרביטציה לגבי עוד משהו... בהחלט כן. הרעיון לבנות רשת של גלאים, אחד ביפן שכבר בתהליכים מתקדמים ועוד אחד בהודו ואז כשהיו 4-5 גלאים זו תהיה פריצת דרך משמעותית ונוכל למצוא את הגלקסיה שבה קורה הדבר הזה.

- גלי גרביטציה זה אלה שגורמים לגרביטציה?

-אני חושב שלא. גוף סטטי שלא זז הוא מפעיל שדה אז אני לא חושב. אבל אולי יש דרך אחרת לחשוב על זה.

ברמה העקרונית זה לא קשור, מדברים על מערכות כוכבים שקשורים רק לפיזיקה של כוכבים. זה נכון שיש חומר אפל ביקום ואחד הרעיונות שלא נפסל לחלוטין, עקרונית אתה יכול לחשוב, כמובן היו אינסוף הצעות בספרות, אין עדות שזה מה שקורה. בעיקר כי יש תכונות שהיו צריכות להתקיים ולא מתקיימות. חוץ מזה יש לנו עדויות עקיפות שכנראה זה לא המצב. החומר האפל לא עשוי מחורים שחורים.

אם זה היה נכון והיינו מסתכלים על גלקסיה אחרת דרך החומר האפל עם כל החורים השחורים היינו צריכים לראות משהו שנקרא...

אין עדות שזה המצב וכנראה שהחומר האפל זה משהו אחר אבל אנו פתוחים להכל.

-אירוע של מיזוג שני חורים שחורים נמצא אירוע קיצוני. יש לו עוד עדויות חוץ מגלים גרביטציוניים?

-אירוע של חורים שחורים משחרר המון אנרגיה, משחרר הכי הרבה אנרגיה ביקום. האם יש עוד אירוע כזה? אנשים מחפשים. אנשים הפעילו את כל הטלסקופים והלוויינים ולא גילו כלום.

תאורטית אם זה שני חורים שחורים בוואקום לא אמור לקרות כלום, אין פליטה של משהו... אולי יש חומר שמסתובב, אולי זה קורה באזור שיש הרבה גז.

ברגע שנדע יותר טוב איפה זה בשמיים נוכל לחסום את זה יותר ויותר ואולי אם יהיה מזל נצליח להגיע...

-יש קשר לאמפליטודה של הסיגנל?

-אמפליטודה אומרת את המרחק.

אוקיי, נראה לי שנעצור כאן.
