

# אלקטרוניס יחסותיים בסופרנובה

נציבי בן-אמוץ

Copyright © 2013

○ כמה מלים על סופרנובה 2- 8

○ כמה מלים על אלקטרוניס יחסותיים 9 - 16

○ אלקטרוניס יחסותיים בסופרנובה 17 - 25

○ תהליכים נוספים 26 - 41

**ספרנובה זה כוכב שהתפוצץ**

- זו תמונה מהתקופה הנוכחית של כוכב שהתפוצץ לפני 7500 שנים.
- האור הראשון מהפיצוץ הגיע לכדור הארץ בשנת 1054 לספירה.
- הוא נצפה ע"י אסטרונומים סיניים, יפניים, ערבים ואינדיאנים. הסינים קראו לו כוכב אורח.
- כיום הוא נקרא ערפילית הסרטן.
- עד עתה אסטרונומים צפו באלפי כוכבים מתפוצצים כאלה וקראו להם סופרנובות (יחיד: סופרנובה).
- האחרון הקרוב ביותר נקרא 1987A.
- הוא קרה בגלקסיה שכנה הנקראת הענן המגלני הגדול – LMC, והאור מפיצוץ זה הגיע ב-1987.
- בימים הראשונים לאחר הפיצוץ אורו חזק יותר מגלקסיה
- החומר הנפלט מתפשט במהירויות של עשרות אלפי קילומטרים לשנייה.

# תקציר

- כוכב קורס פנימה לפני שהוא מתפוצץ כסופרנובה.
- התהליכים הגורמים לקריסה פנימה מובנים כיום, יחסית.
- לא כך התהליכים הגורמים לפיצוץ.
- נדון ב-3 תהליכים יחסותיים לא ידועים עד כה ההופכים את הקריסה פנימה לפיצוץ וגורמים לסופרנובה.

# מה גורם לסופרנובה?

- כמה תהליכים הקורים בכוכבים יכולים לגרום לסופרנובה:
- תהליכים תרמו-גרעיניים, ז"א היתוך גרעיני,
- ייצור זוגות של אלקטרונים ופוזיטרונים,
- לכידת אלקטרון בגרעין,
- קריסת גרעין הכוכב implosion,
- שילובים של האחרון עם האחרים,
- עוד?

# תהליכים ידועים בתוך כוכבים

- $4\text{H}_1$  מתמזגים ל- $\text{He}_4$  ומשחררים אנרגיה שעוצרת את קריסת הכוכב. (שמש, כוכבי הסדרה הראשית)
- $3\text{He}_4$  מתמזגים ל- $\text{C}_{12}$  ומשחררים אנרגיה שעוצרת את קריסת הכוכב. (ענקים אדומים)
- תהליכי מזוג נוספים -  $\text{Fe}_{56}$  משחררים אנרגיה, אבל
- ב-  $8-9 \text{ Mev} = 10^{11} \text{ K}^\circ$
- $\text{Fe}_{56}$  מתפרק ל- $4\text{N} + 13\text{He}_4$  וגורם לקריסה, כי הפירוק דורש  $2.22\text{Mev}$  לנוקלאון
- ב-  $17 \text{ Mev} = 2 \times 10^{11} \text{ K}^\circ$
- $\text{He}_4$  מתפרק ל-  $4\text{H}_1$  ומגביר קריסה, כי הפירוק דורש  $8\text{Mev}$  לנוקלאון

# בעיה - חידה

- סימולציות במחשב מראות קריסה פנימה, אבל לא מראות:

- איך הקריסה הופכת לפיצוץ כה חזק המפוצץ את כל הכוכב, כך שרואים סופרנובה

- **Liebendörfer et al 2008, Shaviv 2009, Podsiadlowski 2012**

ברשימת הבעיות הלא פתורות בפיסיקה ויקיפדיה מונה מה המכניזם המדויק בו קריסה פנימה של כוכב גוסס הופכת לפיצוץ.

# ליתר דיוק

- "איך חלק מאנרגיית הקריסה נמצא בדיוק מתחת, ומצטבר עד שיש מספיק אנרגיה לפיצוץ" (Podsiadlowski 2012)
- כה חזק, עד שהוא מפוצץ את כל הכוכב כסופרנובה?
- או בקיצור:
- איפה ואיך מאוחסנת אנרגיה זו?
- ללא אחסון האנרגיה עבור הפיצוץ, התוצאה היא קריסה לחור שחור.
- עד כאן ידע מקובל כיום. בהמשך חידושינו
- בעצם חור שחור מסמן את חוסר הידע מה קורה בטמפרטורות ולחצים יותר גבוהים, אותם נרצה לחקור

# משוואות

הכוח הגרביטציוני  $-F = m(r)MG/r^2$

נגזרת האנרגיה

$$-F = dE/dr = d(mc^2)/dr = c^2 d(m(r))/dr$$

השוואה

$$m(r)MG/r^2 = c^2 d(m(r))/dr$$

פתרון המשוואה

$$m(r) = m_\infty \exp(-MG/c^2 r)$$

למסות במהירות אפס

(Milne 1938, Yilmaz, Kiesslinger, Vankov, Hatch, Turanyanin, Majernik, Marmet, Ben-Amots)

# אלמנט

להשוואה בלבד ה- "Line element"

$$ds^2 = \exp(-2MG/c^2r)c^2dt^2 - \exp(2MG/c^2r)dr^2 - \dots$$

Coleman (1971) line element,

אבל עם מסה משתנה במנוחה

$m(r)$

ומסה קבועה במנוחה

$M$

זה חורג ממשוואות איינשטיין

# מטען חשמלי

- נניח אנלוגיה של מטען חשמלי למסה, (בניגוד להנחה אחרת של איינשטיין, שהניח שהמטען החשמלי קבוע). מתקבל

$$q(r) = q_{\infty} \exp(-QY/r)$$

- הנחה זו מובילה לקבוצה נוספת של מסלולים מעגליים שנקראים sub-Bohr של אלקטרונים במהירויות יחסותיות (בן-אמוץ 2006, IARD, 2007).

- המסלול הנמוך ביותר של אלקטרון יחסותי סביב פרוטון הוא באנרגיה 51 MeV במהירות

$$v = c - 8 \text{ km/sec,}$$

- בצעדים של 51.5 MeV וברדיוס  $2.8 \times 10^{-13} \text{ cm}$
- (לעומת מסלולי BOHR באנרגיות עד 30 eV במהירות  $c / 137$  ברדיוס מינימאלי של  $5.3 \times 10^{-9} \text{ cm}$ )

- Milne (1943), Corben (1963), Santilli (2003)
- מצאו בנפרד מסלול דומה אבל רק אחד של אלקטרון יחסותי sub-Bohr
- הפיתוח שלנו הוביל למשוואה ריבועית עם הפתרונות:
- הקבוצה הידועה של מסלולי אלקטרונים BOHR
- קבוצה נוספת של מסלולי אלקטרונים יחסותיים sub-Bohr
- ברדיוס  $2.8 \times 10^{-13}$  cm שהוא יותר מכפליים מרדיוס הפרוטון  $1.2 \times 10^{-13}$  cm

$$r_{\text{bohr}} =$$

$$\left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 - \left( \frac{4q_{e^\infty}^2 \pi}{nch} \right)^2} \right\} \left( \frac{nh}{2\pi q_{e^\infty}} \right)^2 / m_{e^\infty}$$

$$\approx \left( \frac{nh}{2\pi q_{e^\infty}} \right)^2 / m_{e^\infty} = \text{סט בוהר}$$

$$r_{\text{sub-bohr}} =$$

$$\left\{ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{1 - \left( \frac{4q_{e^\infty}^2 \pi}{nch} \right)^2} \right\} \left( \frac{nh}{2\pi q_{e^\infty}} \right)^2 / m_{e^\infty}$$

$$\approx q_{e^\infty}^2 / (m_{e^\infty} c^2)$$

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

• תורת היחסות הכללית לא נותנת סט נוסף של מסלולי אלקטרונים.

# Relativistic electrons in imploding supernovas

Copyright © 2013 Netsivi Ben-Amots

Energy

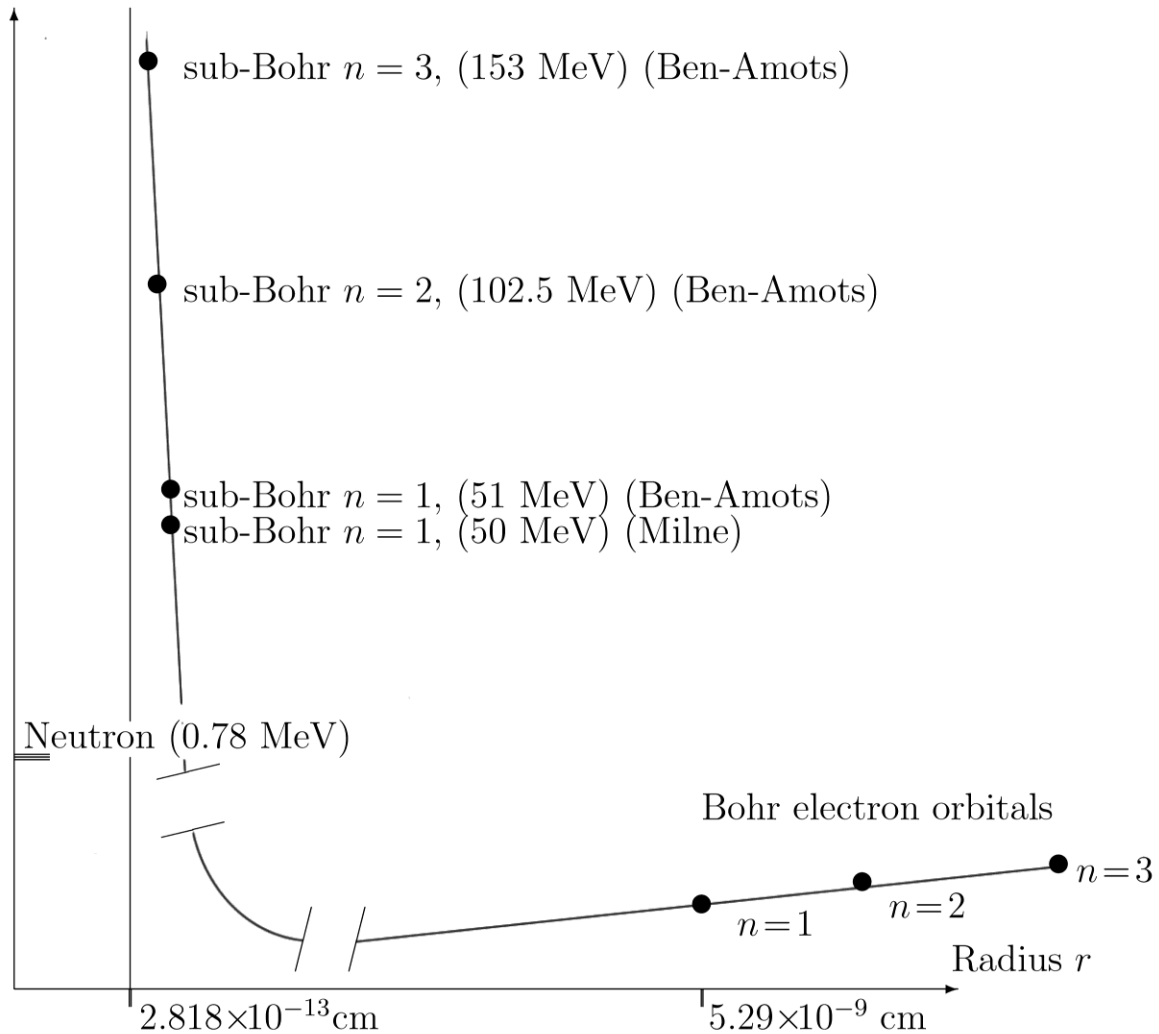


Figure 1: Schematic energy versus the distance  $r$  between a proton and an electron circularly orbiting around it, showing sub-Bohr energy levels (not to scale) Copyright © 2013 Netsivi Ben-Amots

• המסלולים של האלקטרונים היחסותיים הם תוצאה של איזון של כוחות משיכה חשמליים אקספוננציאליים עם כוחות צנטריפוגליים, היוצרים "מחסום אנרגיה" צר וגבוה ברדיוס  $2.8 \times 10^{-13}$  cm המונע מהאלקטרונים "ליפול" אל הפרוטון.

לאלקטרון בסט הנוסף של המסלולים

יש אנרגיה חיובית גבוהה מאוד, שעבור

מספר קוונטי נמוך  $n$  היא בערך

$$n \times 51.5 \text{ Mev}$$

ראה ציור. Milne 1943 קיבל מסלול

אחד של 50 Mev

• ההבדל בין הרדיוסים בסט sub-Bohr

הוא מסדר גודל של

$$10^{-17} \text{ cm}$$

# מסלולי sub-Bohr בסופרנובה

• ב-  $51\text{Mev} = K^0 = 10^{11} \times 6$  אלקטרונים נלכדים

במסלולי

sub-Bohr

• אלקטרון במסלול זה גוזל אנרגיה של  $51\text{Mev}$

מסביבתו, ומפחית את עצמו ממספר החלקיקים.

• שני האפקטים מגבירים את הקריסה, אבל

• כל אלקטרון כזה אוגר  $51\text{Mev}$

• בהמשך כל אלקטרון כזה קופץ למסלול פנימי

יותר הגבוה ב-  $51.5\text{Mev}$  בכל צעד, ואוגר אותם

**כאשר אלקטרון בזוג זה מגיע לרמה**

**מקסימלית של אנרגיה  $51.5 \text{ MeV} \times n_{\text{MAX}}$**

**לאן שלא ילך,**

**בין אם יילכד ע"י הפרוטון ויוצר נייטרון,**

**או יפלט החוצה והזוג יתפרק,**

כאשר אלקטרון בזוג זה מגיע לרמה

מקסימלית של אנרגיה  $51.5 \text{ Mev} \times n_{\text{MAX}}$

לאן שלא ילך,

בין אם יילכד ע"י הפרוטון ויוצר נייטרון,

או יפלט החוצה והזוג יתפרק,

**האלקטרון היחסותי**

**משחרר  $51.5 \text{ Mev} \times n_{\text{MAX}}$**

וכשהאלקטרון נלכד בפרוטון ונוצר נייטרון,  
הוא נפטר מהמומנטום הזוויתי ע"י פליטת

$n_{\max}$  נייטרונים. אם

$$n_{\max} > 20$$

האנרגיה הנאגרת ומשתחררת היא  
יותר ממסת המנוחה של

הפרוטון  $E=Mc^2$

**זה מעבר למה שאנחנו רגילים**

**אבל אפשרי**

**ניסוי להדגמת העיקרון**

**כדור סטטי הנופל לרצפה יכול לקפוץ**

**לגובה נמוך מהמקורי**

**או אולי יותר?**

# בדרך דומה,

- הלחץ של השכבות העליונות בכוכב מגביר את הלחץ במרכז הכוכב, כך שהאנרגיה במרכז היא לא רק האנרגיה של המרכז, אלא בנוסף גם אנרגיה שמקורה בשכבות העליונות.
- לכן האנרגיה במרכז הכוכב יכולה להיות מוגדלת במספר פעמים של  $E = Mc^2$  של מרכז הכוכב.

**השחרור הפתאומי של כמות כה גדולה  
של אנרגיה שנאגרה עוצר את הקריסה**

השחרור הפתאומי של כמות כה גדולה

של אנרגיה שנאגרה עוצר את הקריסה

**ומפוצץ את הכוכב**

**= סופרנובה!**

# החידה איפה מאוחסנת האנרגיה נפתרה

- זו נקודה טובה לסיים את ההרצאה,  
אחרי שהגענו להערכה כמותית.

# החידה איפה מאוחסנת האנרגיה נפתרה

- זו נקודה טובה לסיים את ההרצאה, אחרי שהגענו להערכה כמותית.
- אבל, נוכל להסתכל הלאה, ולשקול באופן איכותי תהליכים ואפקטים נוספים, אך עם פחות דיוק.

# שימור המטען החשמלי

- הפתוח שלנו התעלם מחוק שימור המטען החשמלי, והרשה הגדלת המטען החשמלי השלילי של האלקטרון, אך שמר קבוע את המטען החשמלי החיובי של הפרוטון.
- אם נניח הגדלה שווה של שני המטענים החשמליים, אנו צריכים לקבל משוואות אחרות.
- לפי ההנחות שלנו, הגדלת המטען החשמלי של הפרוטון מגדילה את מסתו.

# פתאומיות

- האלקטרון הנלכד בפרוטון משחרר את עודף המטען החשמלי שצבר.
- האנרגיה, התנע הזוויתי והמטען החשמלי נצברו בהדרגה.
- אבל, שחרורם הוא פתאומי.
- השחרור הפתאומי של המטען החשמלי לובש כנראה צורה של שדות חשמליים ומגנטיים חזקים.
- אלו יכולים להסביר תצפיות מפתיעות.

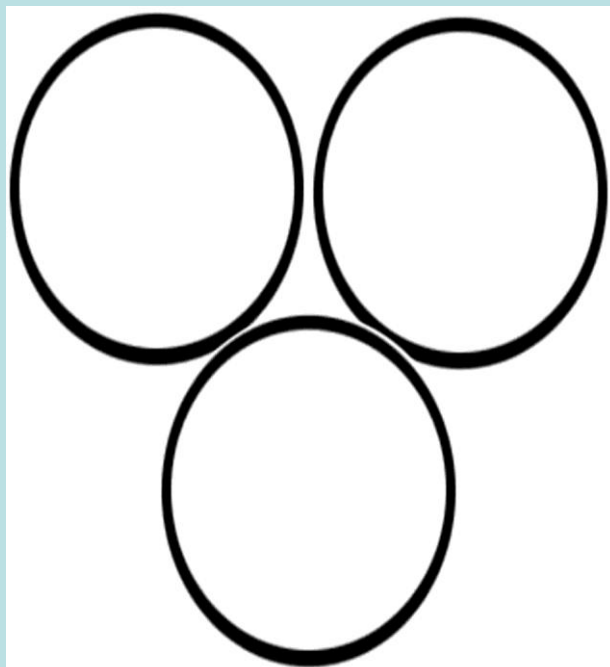
# מרכז מסה

- עד עתה הזנחנו את העובדה שהאלקטרון והפרוטון חגים סביב מרכז המסה המשותף שלהם.
- אין להזניח זאת עבור מסלולים עם  $n$  גדול, בהם מסת האלקטרון גדלה, וגורמת לפרוטון לחוג סביב מרכז המסה המשותף.
- התנועה המהירה של הפרוטון מגדילה את מסתו.
- בן-אמוץ (2011) מצא גם פתרון לשתי מסות שוות, אך לא לשתי מסות כלשהן.
- אנו מניחים שאופי המשוואה הריבועית נשמר, כך של- $n$  יש מקסימום, שמעליו אין פתרון ומתקבלת לכידת אלקטרון בפרוטון, הגורמת פיצוץ וסופרנובה.

- אם לא נקבל את הפיתוח שלנו כי הוא אינו מתחשב בשימור המטען החשמלי ולא במרכז המסה, אנו נשארים עם יחסות כללית. אבל,
- כאמור, יחסות כללית נותנת רק סט אחד של אלקטרונים, ומתעלמת לחלוטין מהסט של האלקטרונים היחסותיים.
- מוטב לקבל את הפיתוח שלנו, ולזכור שהערכים במציאות שונים במידה מסוימת מהערכים שקבלנו בחישובינו.

# חלקיקים אלמנטאריים

- הלחץ הגבוה במרכז הכוכב הקורס יכול למעוך את 3 הקוורקים הסובבים בתוך הנייטרונים, כך שהם חודרים זה לתוך זה (בן-אמוץ 2003, IARD2002).



• צפיפות קוורק גבוהה מאוד. צפיפותו בהיקף

היא

$$4.3 \times 10^{15} \text{gram/cm}^3$$

מהירות האור בתוכו קטנה בהרבה מ-c

• אבל מהירות החדירה היחסית בין שני קוורקים

$$\text{היא } c \cdot 0.99999999999999984$$

• החדירה גורמת לקרינה אלקטרומגנטית חזקה,

דומה

לקרינת צ'רנקוב,

שנהיית התופעה הדומיננטית.

• הנה צילום של קרינת צ'רנקוב במים בכור גרעיני.

• זו תמונת השער מהירחון "מדע" מאוגוסט 1956



- האנרגיה של המקבילה הקוורקית של קרינת צ'רנקוב בתוך הכוכב נלקחת מהאנרגיה הקינטית של הקוורק הסובב, שהיא יותר מ-99% ממסת הקוורק (בן-אמוץ IARD2002, 2003)
- כך שהקוורקים הופכים להיות פוטונים ונייטרिनואים
- זה יוצר לחץ גבוה מאוד

- זה יכול להיות מקור האנרגיה של קוואזארים, AGN ועוד (בן-אמוץ 2003, IARD2002)
- זה יכול לעצור קריסה של כוכב ולהפוך אותה לפיצוץ, ולתרום אנרגיה לסופרנובה, על חשבון מסת הנייטרונים.

# שדה גרביטציה

• בן-אמוץ (IARD2008, 2011) שאל:

- "מדוע מסת השדה הגרביטציוני קורסת אל המסה המרכזית" ובתשובה הציע ש "המשיכה המרכזית יוצרת זרם חומרי (flux) של השדה הגרביטציוני פנימה אל המרכז.  
נפילת השדה הגרביטציוני פנימה צריכה להיות מאוזנת ע"י קרינה בכיוון החוצה מהמסה המרכזית, עם זרימת חומר במסה שווה למסת השדה הגרביטציוני הנופל פנימה.  
גרביטציה היא לכן סופרפוזיציה של נפילה פנימה של השדה הגרביטציוני בעל מסה, ושל קרינה החוצה של שדה גרביטציוני בעל מסה."

- "שדה גרביטציוני בעל מסה, נופל אל המקור הגרביטציוני, וגורם למקור הגרביטציוני ולשדה הגרביטציה להקרין כלפי חוץ ברציפות שדה גרביטציוני."
- מכאן שקריסה חזקה דוחסת את השדה הגרביטציוני מעבר לצפיפות מאוזנת מקסימאלית
- השדה הגרביטציוני הנדחס ביתר גורם ללחץ כלפי חוץ, שעוצר את הקריסה ויוצר פיצוץ חזק כלפי חוץ.

## שניים יחד

• מה יקרה אם הטמפרטורה בה קוורקים חודרים זה לתוך זה נמוכה מ-

$$n_{MAX} \times 51.5 \text{ Mev} = n_{MAX} \times 6 \times 10^{11} \text{K}^{\circ} ?$$

במקרה זה שני התהליכים פועלים ביחד, משאירים לנו לנחש איך.

# סיבוב הכוכב

- עד עתה הנחנו סימטריה כדורית של הכוכב
- לא שקלנו סיבוב של הכוכב סביב צירו, הגורם לסימטריה צירית.
- כוכב יכול להסתובב סביב צירו לאט או מהר.
- בקריסה פנימה, מהירות הסיבוב עולה, כדי לשמור על התנע הזוויתי.
- ככל שמהירות הסיבוב עולה, הכוחות הצנטריפוגליים מתחזקים, ומשפיעים גם על הקריסה פנימה וגם על הפיצוץ.
- אנו מניחים ש-3 תהליכי האנרגיה הראשיים שמנינו לעיל, מתגברים על אפקטים אחרים, כולל סיבוב הכוכב סביב צירו.

# סיכום

• הראינו 3 תהליכים היכולים לעצור קריסה של הכוכב, ולהפוך את כיוונה לפיצוץ, ע"י צבירת אנרגיה ושיחרורה:

○ סט  $51.5 \text{ MeV} \times n$  של מסלולי אלקטרונים

יחסותיים סביב פרוטון, משמעותיים

בטמפרטורות גבוהות מ-  $10^{11} \text{ K}$

○ מעיכה של קוורקים בתוך הנייטרון,

○ התפשטות חוזרת לאחר קריסת שדה

גרביטציוני בעל מסה.