

אסטרונומיה כללית - תרגול 5

מתרגל: עידו אופיר

תוכן עניינים

1. גופים סופחים ובהירות אדינגטון.....2
- 1.1. דסקת ספיחה.....2
- 1.2. בהירות אדינגטון.....2
- 1.3. גרעיני גלקסיות פעילים (AGN) וקוואזרים.....4
2. גלקסיות וצבירי גלקסיות.....4
- 2.1. דמוגרפיה של גלקסיות.....4
- 2.2. קבוצות וצבירי גלקסיות.....5
- 2.3. מדידת מסה עבור צביר גלקסיות.....6

1. גופים סופחים ובהירות אדינגטון

1.1. דסקת ספיחה

דיסקת ספיחה - מבנה דמוי דיסקה הנוצר סביב גרמי שמים מסיביים. הדיסקה מורכבת בדרך כלל מגז (או פלזמה) הנע בקירוב בתנועה מעגלית סביב הגוף המרכזי. תוך כדי התנועה, החלקיקים מאבדים אנרגיה ותנע זוויתי עקב חיכוך. לפיכך, החלקיקים מבצעים תנועה ספירלית לכיוון המרכז, רדיוס הסיבוב של החלקיקים קטן עד שהם מגיעים לשפת הכוכב (או לרדיוס שוורצשילד אם מדובר בחור שחור).

נסתכל על אלמנט מסה dM מסביב לכוכב במסה M . במעבר מרדיוס $r + dr$ לרדיוס r החלקיקים מאבדים אנרגיה פוטנציאלית כאשר חצי מהאנרגיה הפוטנציאלית הופכת לאנרגיה קינטית והחצי השני מומר לחום. הרווח באנרגיה התרמית של אלמנט המסה dM הוא:

$$(1) \quad dE_{th} = \frac{1}{2} \left(\frac{GMdM}{r} - \frac{GmdM}{r + dr} \right)$$

הנוהר יהיה:

$$(2) \quad dL = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} GM \frac{dM}{dt} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r + dr} \right) = \frac{1}{2} GM \dot{M} \frac{dr}{r^2}$$

כאשר \dot{M} - קצב הספיחה. מהקשר בין נוהר לטמפרטורה, נוכל לקבל את פרופיל הטמפרטורה של דסקת ספיחה:

$$(3) \quad T(r) = \left(\frac{GM\dot{M}}{8\pi\sigma} \right)^{\frac{1}{4}} r^{-\frac{3}{4}}$$

קיבלנו כי $T \propto r^{-\frac{3}{4}}$ אשר מצביע על כך שהאזור הפנימי בדסקה הוא חם יותר - משם רוב הנוהר מגיע. על מנת לקבל את הנוהר הכולל נגדיר את הרדיוס הפנימי r_{in} , והרדיוס החיצוני r_{out} . מכאן נקבל:

$$(4) \quad L = \int_{r_{in}}^{r_{out}} dL = \frac{1}{2} GM\dot{M} \left(\frac{1}{r_{in}} - \frac{1}{r_{out}} \right)$$

אם נניח כי $r_{out} \gg r_{in}$ נקבל את הנוהר של דסקת ספיחה:

$$(5) \quad L = \frac{1}{2} \frac{GM\dot{M}}{r_{in}}$$

1.2. בהירות אדינגטון

לפי הביטוי שקיבלנו לדיסקת ספיחה, ניתן לראות כי הפרמטרים המשפיעים על הנוהר הם M, \dot{M}, r_{in} .

נסתכל על אלקטרון הנמצא ברדיוס r בתוך בגז מיון. הגז נמצא בזרם הספיחה של אובייקט במסה M . זרם הספיחה יוצר נוהר ליחידת תדר L_ν . צפיפות הפוטונים עם אנרגיה $h\nu$ ברדיוס r היא:

$$(6) \quad n_{ph} = \frac{L_\nu}{4\pi r^2 c h \nu}$$

הקצב בו פוטונים בעלי אנרגיה כזו יתפזרו על אלקטרון בפיזור תומסון¹:

$$(7) \quad R_{scat} = n_{ph} \sigma_T c$$

כאשר σ_T הוא חתך הפעולה לפיזור תומסון. כל פיזור כזה מעביר במוצע תנע של $p = \frac{h\nu}{c}$ לאלקטרון. קצב מעבר התנע לאלקטרון, כלומר הכוח הפועל עליו כתוצאה מקרינה הוא:

$$(8) \quad \frac{dp}{dt} = R_{scat} \frac{h\nu}{c} = \frac{L_\nu \sigma_T}{4\pi r^2 c}$$

כאשר נבצע אינטגרציה על כל התדירויות נקבל את כוח הקרינה:

$$(9) \quad F_{rad} = \frac{L \sigma_T}{4\pi r^2 c}$$

כלומר, האלקטרון מרגיש דחייה מהגוף הסופח כתוצאה מהנוהר שלו. כוח הגרביטציה הפועל על האלקטרון הוא:

$$(10) \quad F_{grav} = \frac{GMm_p}{r^2}$$

הגוף הסופח יוכל להמשיך לספוח בתנאי ש- $F_{rad} < F_{grav}$. כאשר שני הכוחות שווים, נוכל למצוא את הבהירות המקסימלית במערכת סופחת:

$$(11) \quad L_E = \frac{4\pi c G M m_p}{\sigma_T} = 1.38 \cdot 10^{38} \frac{erg}{s} \frac{M}{M_\odot}$$

הבהירות המקסימלית נקראת בהירות אדינגטון.

¹ פיזור תומסון - פיזור אלסטי של קרינה אלקטרומגנטית על ידי חלקיק טעון חופשי (זהו הגבול של פיזור קומפטון באנרגיות נמוכות). האנרגיה הקינטית של החלקיק ותדירות הפוטונים כתוצאה מהפיזור אינה משתנה. הגבול תקף כאשר אנרגיית הפוטון קטנה בהרבה מאנרגיית החלקיק: $v \ll \frac{nc^2}{h}$.

1.3. גרעיני גלקסיות פעילים (AGN) וקוואזרים

ראינו כי חורים שחוריים מסדר גודל של $10^6 M_\odot - 10^9 M_\odot$ נפוצים במרכזי גלקסיות. בהתאם למה שלמדנו, נצפה שהחורים השחורים המסיביים יספחו חומר. גרעיני גלקסיות פעילים (הנקראים AGN) (Active Galactic Nuclei) הבהירים ביותר הם קוואזרים בעלי נוהר של $L \sim 10^{44} \frac{erg}{s}$. כדי להבין מהו החסם העליון לבהירות, נציב במשוואה של בהירות אדינגטון, חור שחור בעל מסה של $10^9 M_\odot$ ונקבל בהירות אדינגטון של עד $L_E \sim 10^{47} \frac{erg}{s}$. זו בהירות גבוהה יותר מבהירות כל הגלקסיה.

אם ניקח את הקוואזר הבהיר ביותר אשר סביב החור השחור שלו ישנה דיסקת ספיחה עם רדיוס פנימי $r_{in} = 3r_s = \frac{6GM}{c^2}$ נקבל:

$$(12) \quad L \approx \frac{1}{2} \frac{GM\dot{M}}{r_{in}} = \frac{\dot{M}c^2}{12}$$

נשווה את התוצאה במשוואה (12) לבהירות אדינגטון שקיבלנו במשוואה (11) ונקבל את קצב ספיחת המסה:

$$(13) \quad \dot{M} = 4 \cdot 10^{-8} M_\odot yr^{-1} \frac{M}{M_\odot}$$

כלומר, חור שחור המסיבי עם $M \sim 10^9 M_\odot$ הקורן בנוהר אדינגטון סופח $40 M_\odot$ בשנה.

לפי משוואה (3), הטמפרטורה ברדיוס $r_{in} = 3r_s$ תהיה:

$$(14) \quad T = 1.4 \cdot 10^5 K$$

כיוון שקוואזרים הם בהירים יותר בסדר גודל של $10^4 - 10^1$ מגלקסיית L_* עם בערך $N \sim 10^{10}$ כוכבים, גלקסיות בהן יש קוואזרים קשות לגילוי עקב הבהירות של גרעין הגלקסיה.

2. גלקסיות וצבירי גלקסיות

2.1. דמוגרפיה של גלקסיות

לגלקסיות יש סדר גודל של $10^7 - 10^{11}$ כוכבים.

את הגלקסיות ניתן לחלק לשלושה סוגים:

1. **גלקסיות ספירליות** (או גלקסיות דיסק) אשר מרכיביהן העיקריים הן באלגי (אוסף כוכבים זקנים שנמצא במרכז הגלקסיה והתנועות שם כאוטיות. מבנה הבאלגי הוא כדורי), דסקה והילה אפלה. מסלול תנועת הכוכבים הוא קבוע לדסקה - ביצוע מסלולים מעגליים (בקירוב) מסביב למרכז הגלקסיה.
2. **גלקסיות אליפטיות** להן אין דסקה והן דומות לבאלגי של ספירליות. המסלולים האורביטלים של הכוכבים הם רנדומליים. הגלקסיות האליפטיות מכילות בעיקר כוכבים זקנים ומעט מאוד אבק. הן "זקנות" יותר מהגלקסיות הספירליות והן מהוות את הגלקסיות המסיביות ביותר ביקום.

3. **גלקסיות אי רגולריות** (בלתי רגילות) יוצרות כוכבים באופן פעיל ואוכלוסיית כוכביהן צעירה. אין להם דיסק מוגדר ולא ברור עד כמה ההילה האפלה משמעותית.

גלקסיות מכל סוג מגיעות במגוון בהירויות, מסות וגדלים. בעזרת פרמטרים אלו ניתן למדוד את הנוהר של גלקסיה. את פונקציית הנוהר - luminosity function ניתן לתאר על ידי פונקציית שכטר המתארת את מספר הגלקסיות לנפח עם נוהר במרווחי dL סביב L :

$$(15) \quad \phi(L)dL \approx \phi(L_*) \left(\frac{L}{L_*}\right)^{-1} e^{-\frac{L}{L_*}} dL$$

יש הרבה יותר גלקסיות חיוורות והרבה פחות גלקסיות בהירות כאשר הבהירות האופיינית של גלקסיה מסומנת ב- L_* ושווה ל- $2 \cdot 10^{10} L_\odot$. מעל בהירות זו, גלקסיות הופכות להיות יותר נדירות.

גם לגלקסיית שביל החלב וגם לגלקסיית אנדרומדה יש בהירות של בערך L_* . הצפיפות האופיינית של גלקסיות עם בהירות בתחום $L_* \pm \frac{L_*}{2}$ היא:

$$(16) \quad \phi(L_*) \sim 10^{-2} \text{ Mpc}^{-3}$$

כלומר יש בממוצע גלקסיית L_* אחת בכל 100 Mpc^{-3} , או מרחק ממוצע של כ- 5 Mpc בין שתי גלקסיות גדולות.

נוכל להעריך זמן טיפוסי להתנגשות של שתי גלקסיות צמודות. ניקח רדיוס אופייני לגלקסיה של 50 Kpc , מהירות יחסית בין שתי גלקסיות צמודות $500 \frac{\text{km}}{\text{s}}$. את הצפיפות $\phi(L_*)$ ניקח מפונקציית שכטר. בעזרת נתונים אלו נקבל שהזמן הטיפוסי להתנגשות הוא:

$$(17) \quad \tau_{\text{collision}} = \frac{1}{n\sigma v} = \frac{1}{[10^{-2} \cdot (3.1 \cdot 10^{24} \text{ cm})^{-3}] \cdot [\pi(2 \cdot 50 \cdot 3.1 \cdot 10^{21} \text{ cm})^2] \cdot [500 \cdot 10^5 \frac{\text{cm}}{\text{s}}]} \approx 5 \cdot 10^{12} \text{ yr}$$

לפיכך, במהלך הזמן בו היקום קיים רק גלקסיה אחת מ- 500 גלקסיות אמורה לעבור התנגשות עם גלקסיה גדולה אחרת. במציאות שיעור ההתנגשויות גבוהה יותר מכיוון שגלקסיות הקשורות כבידתית בצבירי גלקסיות נוטות להתאחד.

2.2. קבוצות וצבירי גלקסיות

גלקסיות נוטות להתקבץ בקבוצות של עד 10 גלקסיות. לפעמים, צבירי גלקסיות עשירים מכילים סדר גודל של עד 100 גלקסיות L_* . גלקסיית שביל החלב היא חלק מקבוצת גלקסיות הנקראת הקבוצה המקומית (the local group) ובה נמצאות גם הגלקסיות אנדרומדה (M31), טריאנגולום (M33) ועוד מספר גלקסיות קטנות/ננסיות.

הצביר הקרוב ביותר אלינו הוא צביר וירגו במרחק של בערך 15 Mpc . הרדיוס האופייני של צביר גלקסיות הוא מסדר גודל של $R_{\text{cluster}} \sim 1 \text{ Mpc}$. רוב הגלקסיות בצבירי גלקסיות הן גלקסיות אליפטיות. את המהירות האופיינית של צביר גלקסיות ניתן למדוד באמצעות אפקט דופלר. המהירות v_{rms} סביב המהירות הממוצעת היא $\sigma \sim 1000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$.

קיים סופר צביר מקומי - לניאקיאה (Laniakea). כיום לא יודעים עוד אם סופר צביר קשור כבידתית.

2.3. מדידת מסה עבור צביר גלקסיות

מדידת המסה לצבירי גלקסיות מתאפשרת במספר דרכים:

1. התפלגות מהירות:

עבור צביר גלקסיות, המהירות הממוצעת של הגלקסיות היא בערך $\frac{km}{s} \sim 1000$. בהנחה שהרדיוס הטיפוסי של צביר הוא $r_{cluster} = 1 \text{ Mpc}$ ובאמצעות המשפט הוויראלי, נעריך את המסה של הצביר.

$$-\frac{1}{2} \left(-\frac{GMm}{r} \right) = \frac{1}{2} m \sigma^2$$

$$(18) \quad M_{cl} = \frac{\sigma^2 r}{G} = \frac{\left(10^8 \frac{cm}{s} \right)^2 \times 3.1 \cdot 10^{24} \text{ cm}}{6.7 \cdot 10^{-8} \frac{erg \cdot cm}{g^2}} \approx 4.7 \cdot 10^{47} \text{ g} \approx 2 \cdot 10^{14} M_{\odot}$$

2. עידוש כבידתי:

נשתמש בעידוש כבידתי על מנת להעריך את מסת הצביר. קשת טיפוסית המתקבלת מעידוש היא בעלת רדיוס של חצי דקת קשת, כאשר המרחק של העדשה היוצרת קשת זו הוא $D_{ol} \sim 1 \text{ Gpc}$. בנוסף, נניח שהמסה המעדשת היא במחצית הדרך אל הצביר. נשתמש בזווית איינשטיין שקיבלנו:

$$\theta_E = \sqrt{\frac{D_{ls}}{D_{ol} D_{os}} \frac{4GM}{c^2}}$$

$$(19) \quad M_{cl} = \frac{\theta_E^2 c^2 D_{ol} D_{os}}{4G} = \frac{\left(\frac{0.5}{60 \cdot \frac{180}{\pi}} \right)^2 \times \left(3 \cdot 10^{10} \frac{cm}{s} \right)^2 \times 3.1 \cdot 10^{27} \text{ cm}}{2 \cdot 6.7 \cdot 10^{-8} \frac{erg \cdot cm}{s}} \approx 4 \cdot 10^{47} \text{ g}$$

$$\approx 2 \cdot 10^{14} M_{\odot}$$

3. שיווי משקל הידרוסטטי:

על מנת לחשב את מסת הצביר באמצעות שיווי משקל הידרוסטטי נבצע מספר הנחות:

- נניח כי מרבית מסת הצביר נמצאת בתווך התוך צבירי (ICM - Intra-cluster medium). טמפרטורת הפלסמה הנמצאת ב-ICM היא: $T \sim 10^8 \text{ K}$.

- נניח שיווי משקל הידרוסטטי - בתרגול 2 ראינו את המשוואה עבור שיווי משקל הידרוסטטי

$$\frac{dP(r)}{dr} = -\frac{GM(r)\rho(r)}{r^2}$$

- נניח התפלגות כדורית של הפלסמה עם רדיוס של $r_{gas} \sim 0.5 \text{ Mpc}$.

- נניח גז אידיאלי $P = \frac{\rho}{\bar{m}} k_B T$ כאשר $\bar{m} = \frac{1}{2} m_p$.

בעזרת נתונים אלו נקבל:

$$\frac{GM\rho}{r_{gas}} \sim \frac{\rho}{\bar{m}} k_B T$$

$$(20) \quad M_{cl} \sim \frac{r_{gas} k_B T}{G \bar{m}} = \frac{0.5 \cdot 3.1 \cdot 10^{24} \text{ cm} \times 10^8 \cdot 1.4 \cdot 10^{-16} \text{ erg}}{6.7 \cdot 10^{-8} \frac{erg \cdot cm}{g^2} \times 0.5 \cdot 1.7 \cdot 10^{-24} \text{ g}} \approx 4 \cdot 10^{47} \text{ g}$$

$$\approx 2 \cdot 10^{14} M_{\odot}$$