

האם התפשטות היקום מואצת על-ידי אנרגיה אפלה ? אתגר למדע של המאה ה-21

רמי ברזשטיין

המחלקה לפיסיקה



אוניברסיטת בן-גוריון

הרצאה בקורס סוגיות נבחרות במדע

30.12.2004

תמונת המצב של היקום ה"מאוחר"

- מבוססת על מרכיבים סבירים שנבדקה נכונותן במידה זו או אחרת
 - תורת הכבידה של איינשטיין
 - תורת המפץ הגדול
 - תורות על מבנה החומר והכוחות
- התמונה הכללית לא סבירה, מפתיעה ולא מובנת

תכנית ההרצאה

| ההתפשטות המואצת אתגר למדע | התפשטות היקום | תכולת היקום |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ol style="list-style-type: none">1. הסברים מדעיים1.א. אי דיוק במדידות2. חוק הכבידה שונה3. תכונות החומר שונות <ol style="list-style-type: none">2. הסברים לא מדעיים1. העקרון האנתרופי | <ol style="list-style-type: none">1. היקום מתפשט2. מיפוי היקום3. היקום אחיד4. המשולש הקוסמי5. אנרגיה אפלה6. עדויות להתפשטות המואצת | <ol style="list-style-type: none">1. חומר נראה2. חומר אפל3. "אנרגיה אפלה"4. גודל היקום |

היקום

”...כוכבי השמיים וכחול
אשר על שפת הים...”



תכונות היקום

צא - חומר נראה: 5% כוכבים וגז (בעיקר מימן)

במערכות קשורות באמצעות כבידה - חלבולביות
(גלאקסיות) המאורגנות בצבירים

- כוכב הוא גוף כדורי המורכב ברובו מגז מימן
- הכוכבים מאירים בגלל כור גרעיני "על אש קטנה" הבער במרכזם

תכונות היקום

א- חומר נראה: 5% כוכבים וגז

- מאה מיליארד כוכבים בגלקסיה (מסת כל גלקסיה כאלף מיליארד מסות שמש)
- מאה מיליארד גלקסיות ביקום הנראה
- סה"כ ~ 10^{22} כוכבים (יותר מחול על שפת הים *...)
- צפיפות ממוצעת 1 פרוטון למטר מעוקב

- * כמה גרגרי חול יש על שפת הים?
 - גודל ממוצע של גרגיר חול ~ 1 מ"מ ← מיליארד גרגרי חול במטר מעוקב
 - בקילומטר של חוף יש כעשרת אלפים מטר מעוקבים ← 10^{13} גרגרי חול בקילומטר חוף
 - אלף ק"מ חוף בישראל ← 10^{16} גרגרי חול

חלבולבובית סלילית



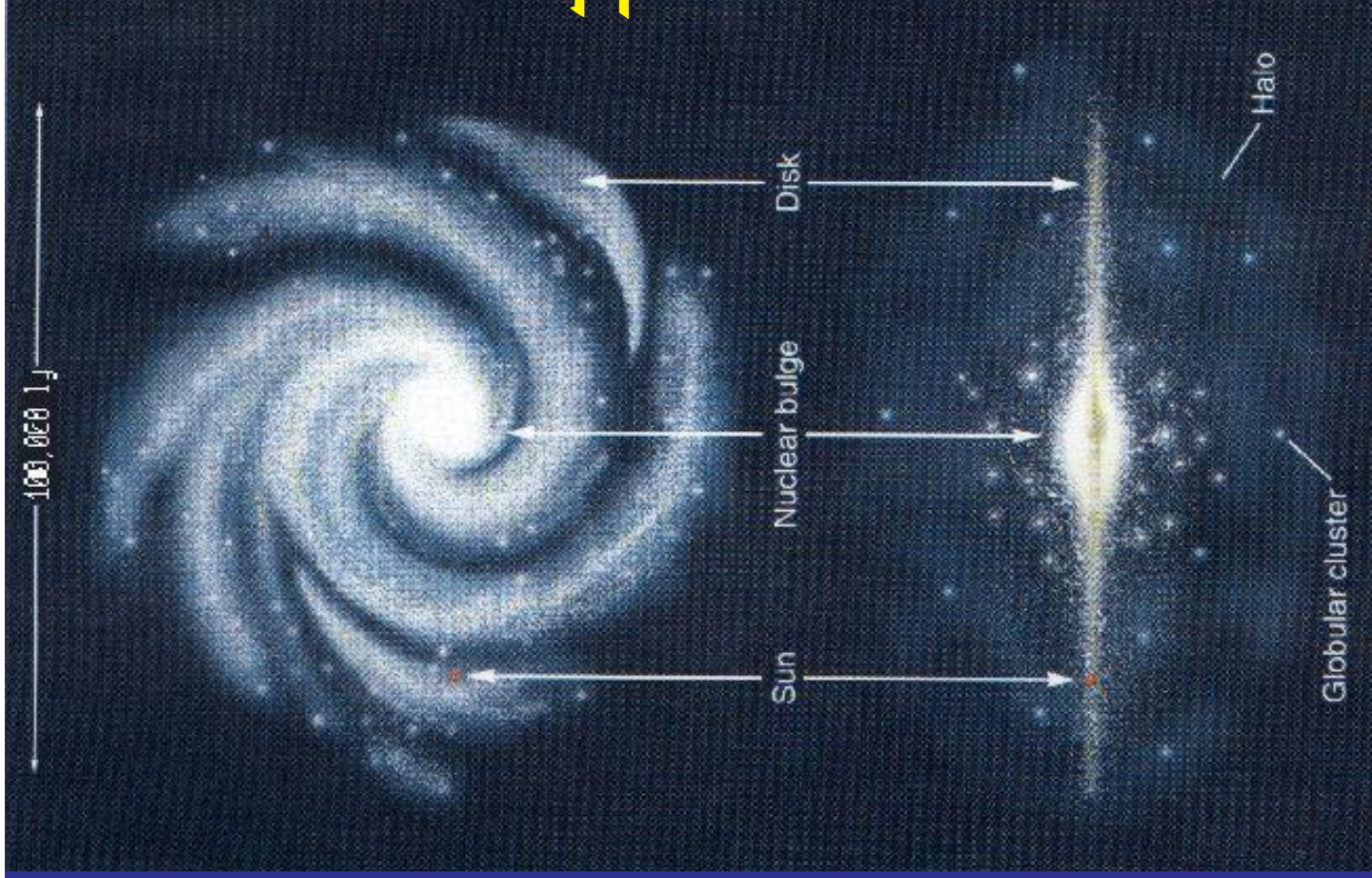
חלבולבובית סלילית



חלבלוב בית סלילית On Orion's belt

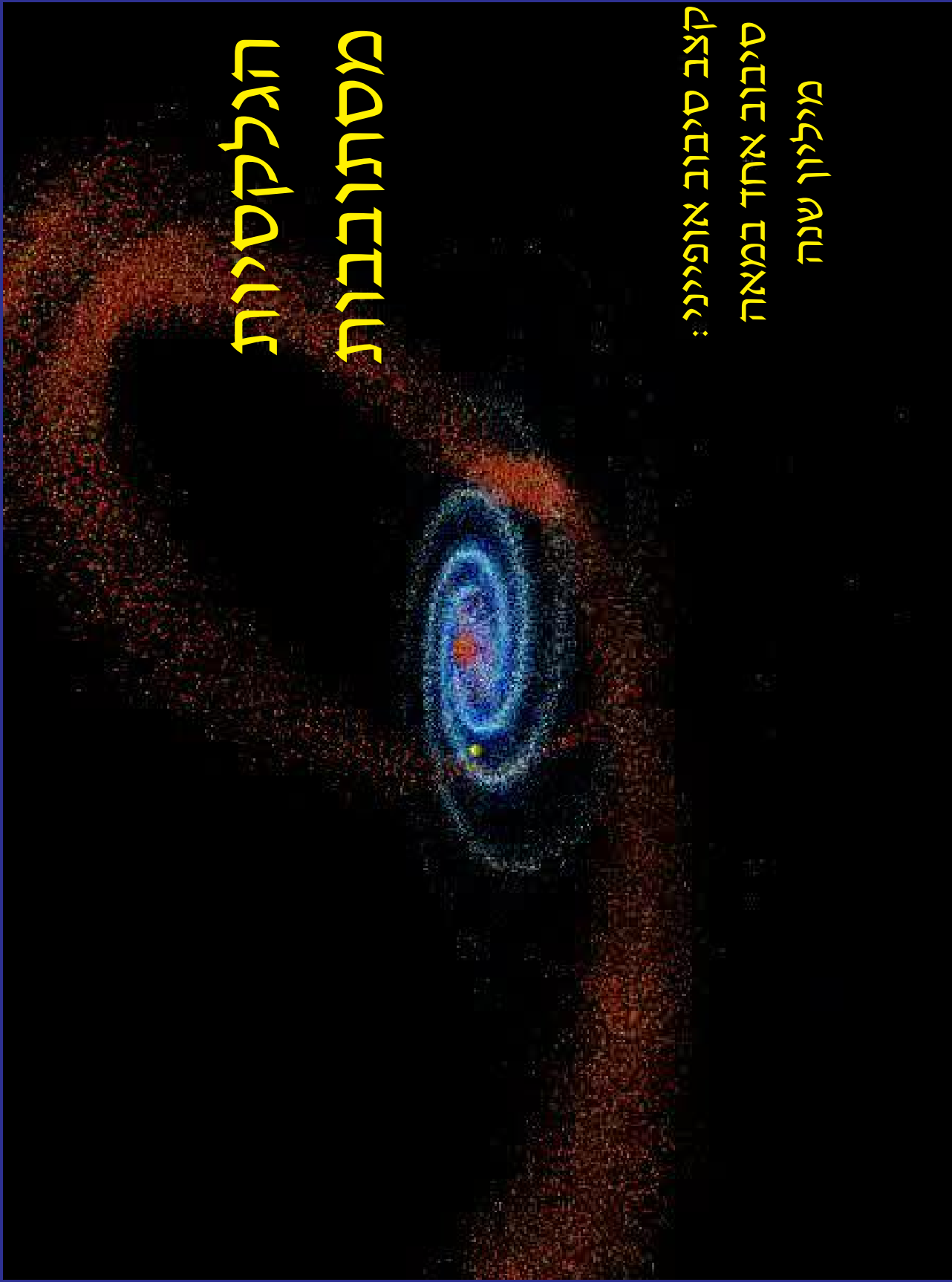


חלבולבובית סלילית: שביל החלב



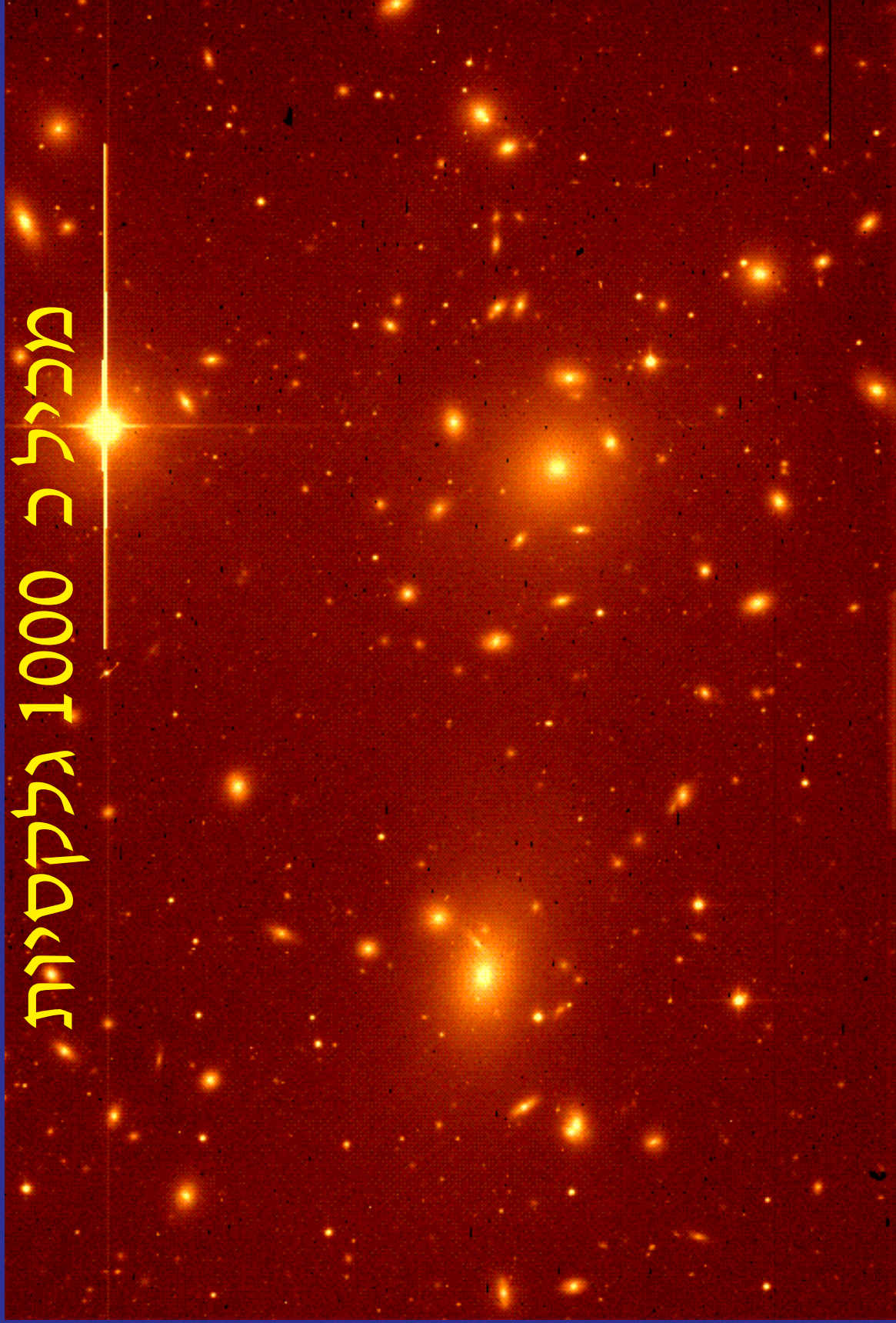
הגלקסיות מסתובבות

קצב סיבוב אופייני:
סיבוב אחד במאה
מיליון שנה

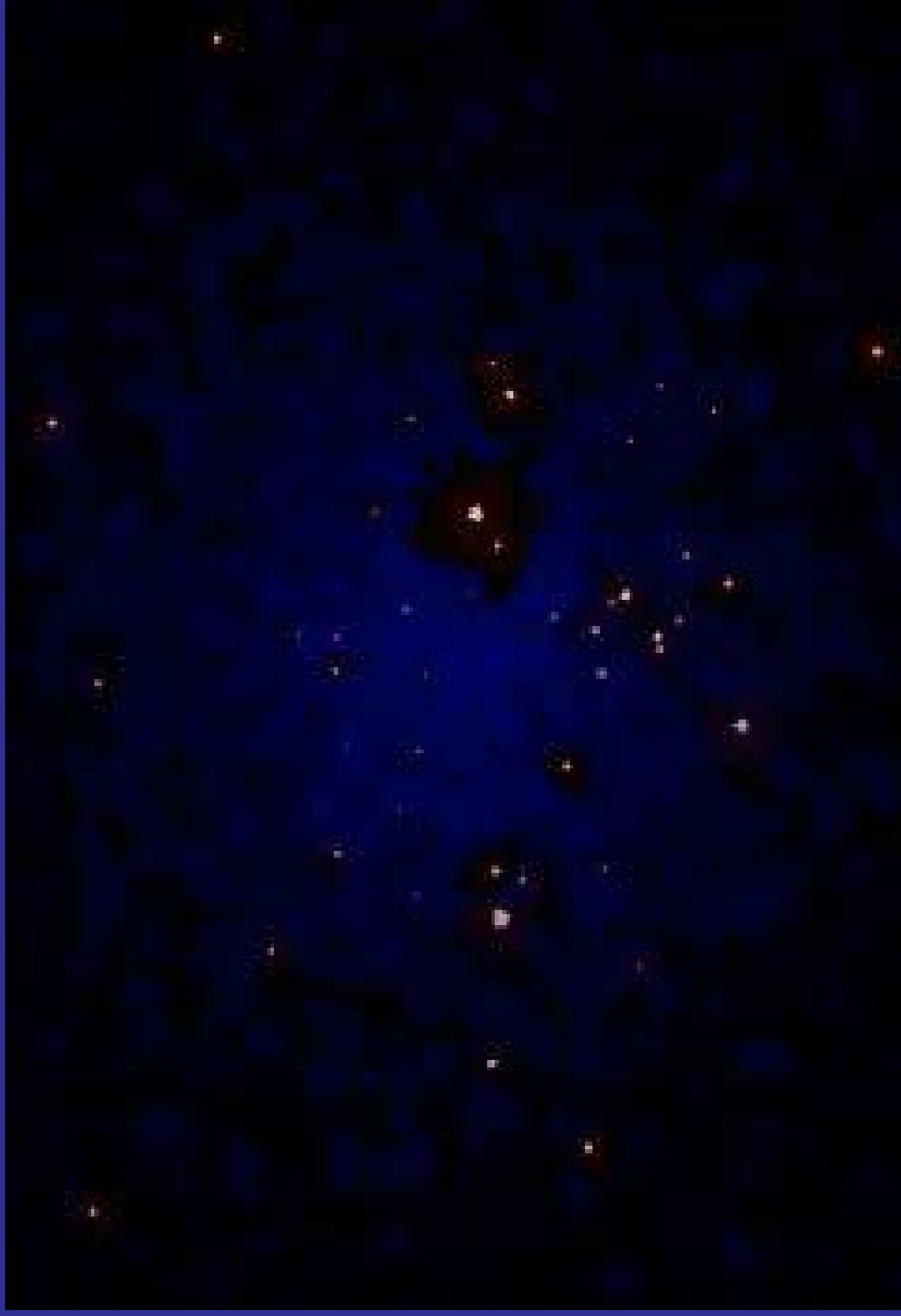


צביר חלבולביות קומה

מכיל כ 1000 גלקסיות



הגלקסיות בצביר מסתובבות ונעות



מגוון חלבולביות בקצה היקום



Hubble Ultra Deep Field
Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

NASA, ESA, S. Beckwith (STScI) and the HUDF Team

STScI-PRC04-07a

גודל היקום

- יחידת מרחק parsec, 30,000 מיליארד ק"מ = 1 פארסק
- מרחק אופייני בין כוכבים = 3.26 שנות אור = 1 pc
- גודל אופייני של גלאקסיה 30,000 שנות אור ~ 10 קילופארסק
- מרחק בין גלאקסיות 1.5 מליון שנות אור ~ 500 קילו פארסק
- מרחק לצביר הקרוב 20 מגה פארסק (מליון פארסק)
- גודל היקום הנראה 30 מיליארד שנות אור ~ 10 גיגה פארסק
- 3.1×10^{23} ק"מ ~ 10 גיגה פארסק (מיליארד פארסק)

תכונות היקום

כ-1/4 "חומר אפל" בתוך הגלקסיות ומסביבן
ובצבירי ומסביבם (פי שש מהחומר הנראה!)

איך "רואים" חומר אפל ?

חומר אפל מפעיל כוח כבידה על חומר נראה!
מודדים מהירות סיבוב של כוכבים בגלקסיה ומסיקים על
התפלגות החומר

• עקומות סיבוב של גלקסיות

הנחה: כוח הכבידה מאזן כוח צנטריפוגלי ←

ככל שכמות החומר גדולה יותר, מהירות הסיבוב של הגלקסיה גדולה יותר

מסקנה: התפלגות כדורית אחידה ברדיוס גדול מהרדיוס הנראה

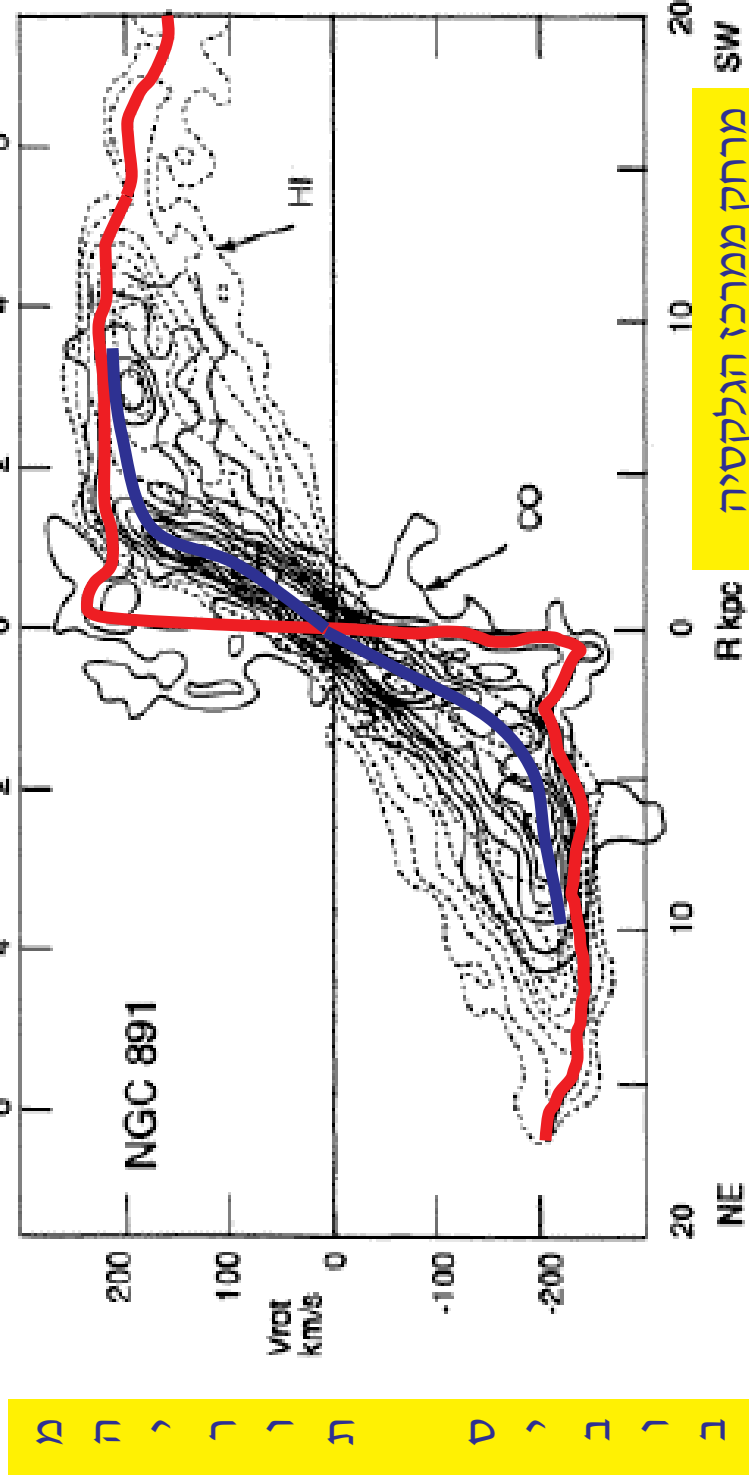
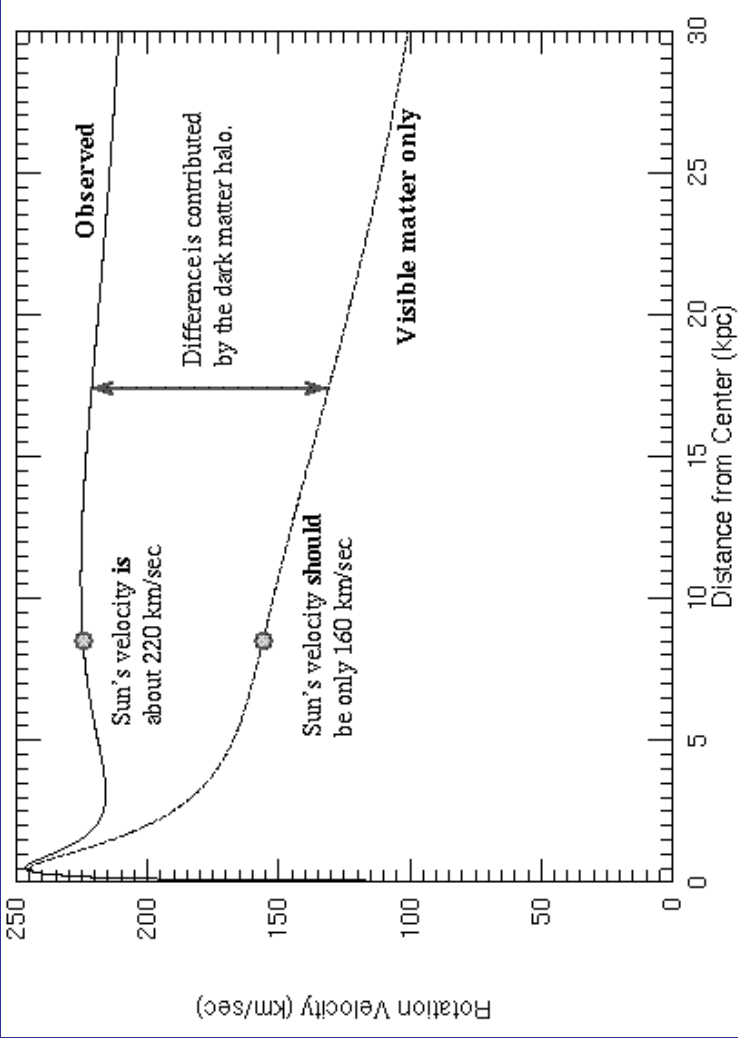
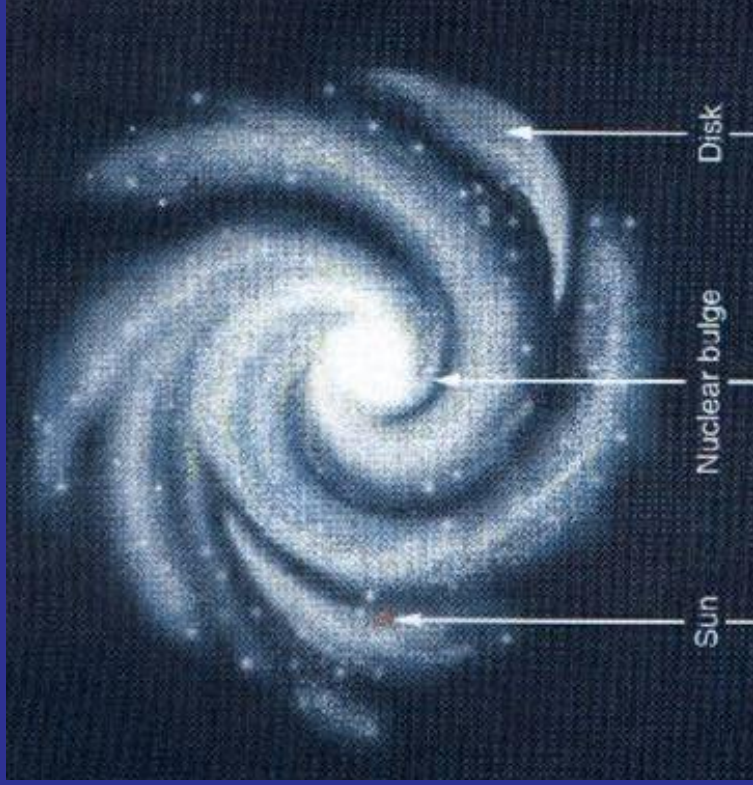


FIG. 1.—CO + HI composite position-velocity diagram for NGC 891 as reproduced from Sofue et al. (1994). A rotation curve is superposed by the thick line.

- עקומות סיבוב של גלקסיות

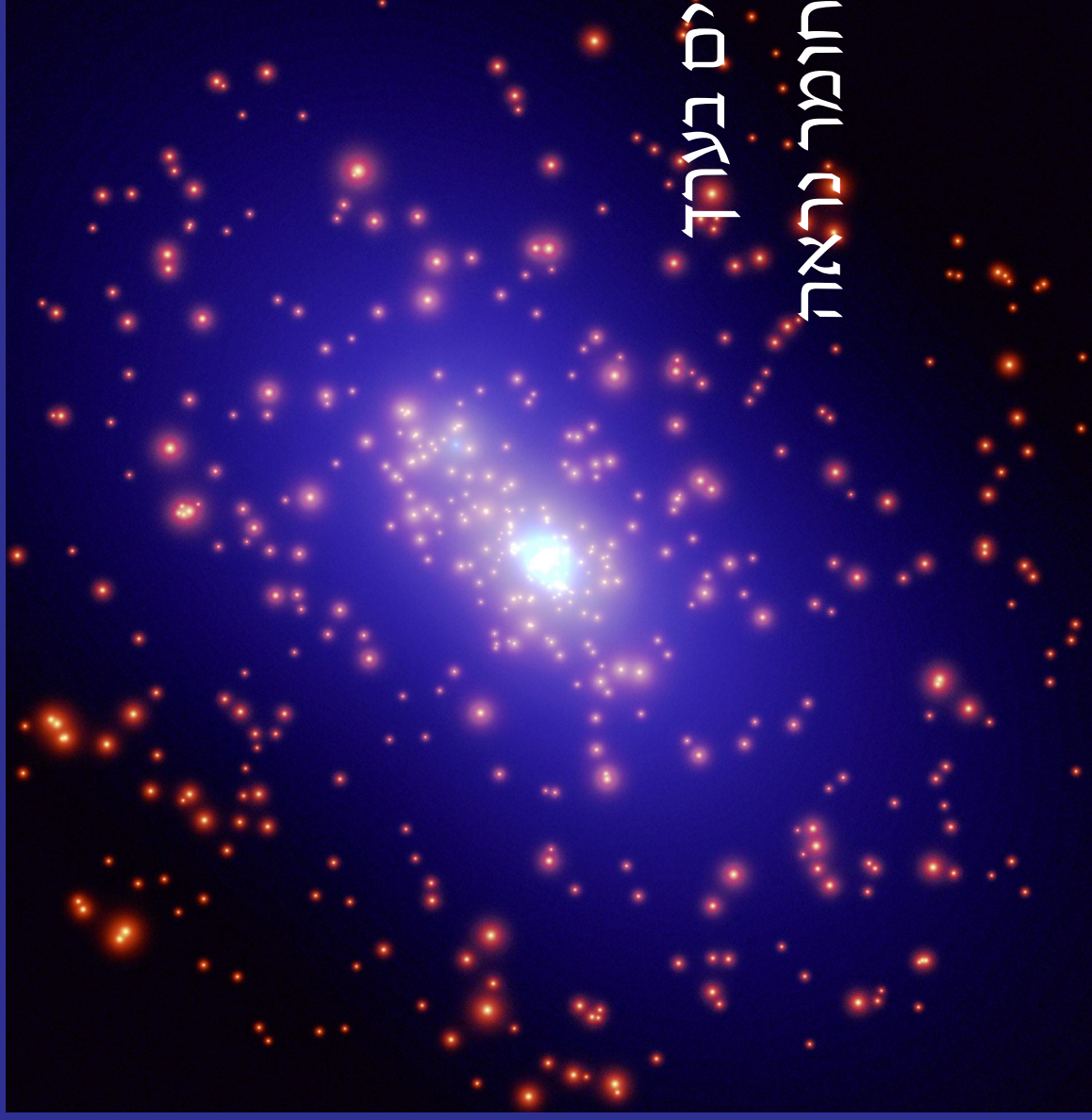
הנחתה: כוח הכבידה מאזן כוח צנטריפוגלי

מסקנה: התפלגות כדורית אחידה ברדיוס גדול מהרדיוס הנראה



The gravity of the visible matter in the Galaxy is not enough to explain the high orbital speeds of stars in the Galaxy. For example, the Sun is moving about 60 km/sec too fast. The part of the rotation curve contributed by the visible matter only is the bottom curve. The discrepancy between the two curves is evidence for a **dark matter halo**.

• מפה של "חומר אפל" בצביר פרסאוס

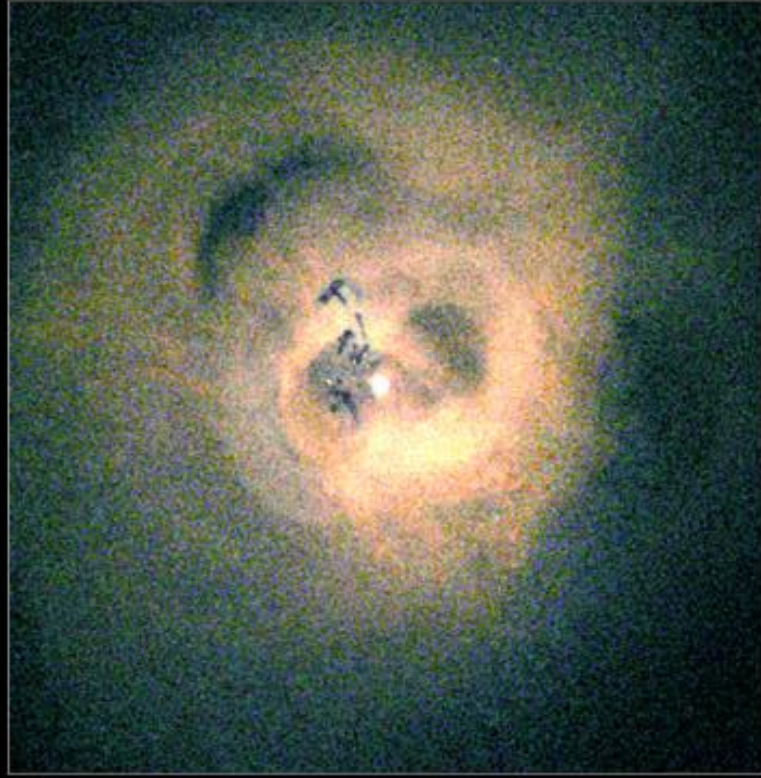


- אמצעי מיפוי
- מהירותות שירות
- טמפרטורה
- עידוש

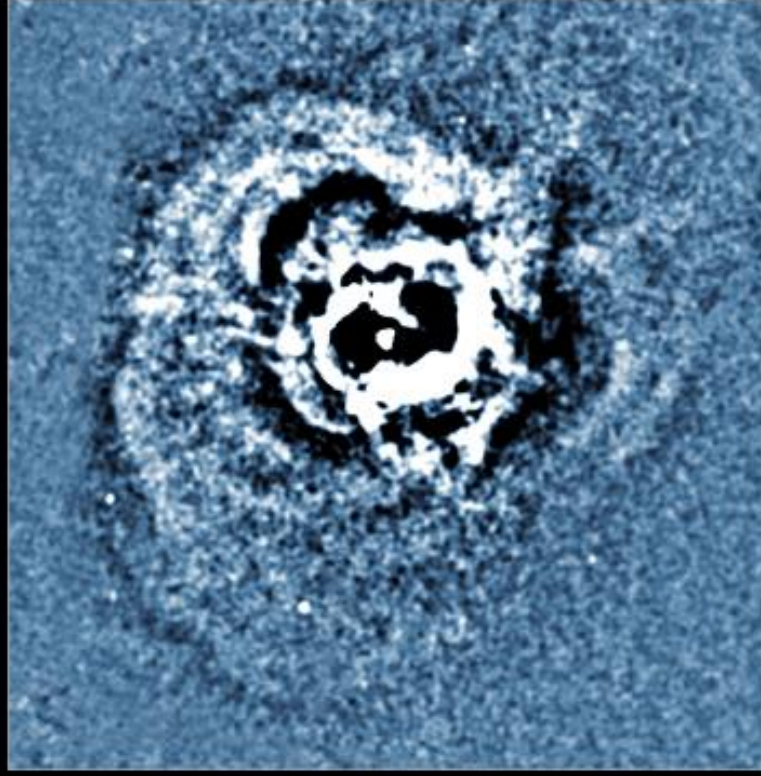
• מסקנה: גם בצבירים בערך

פי 5 "חומר אפל" מחומר נראה

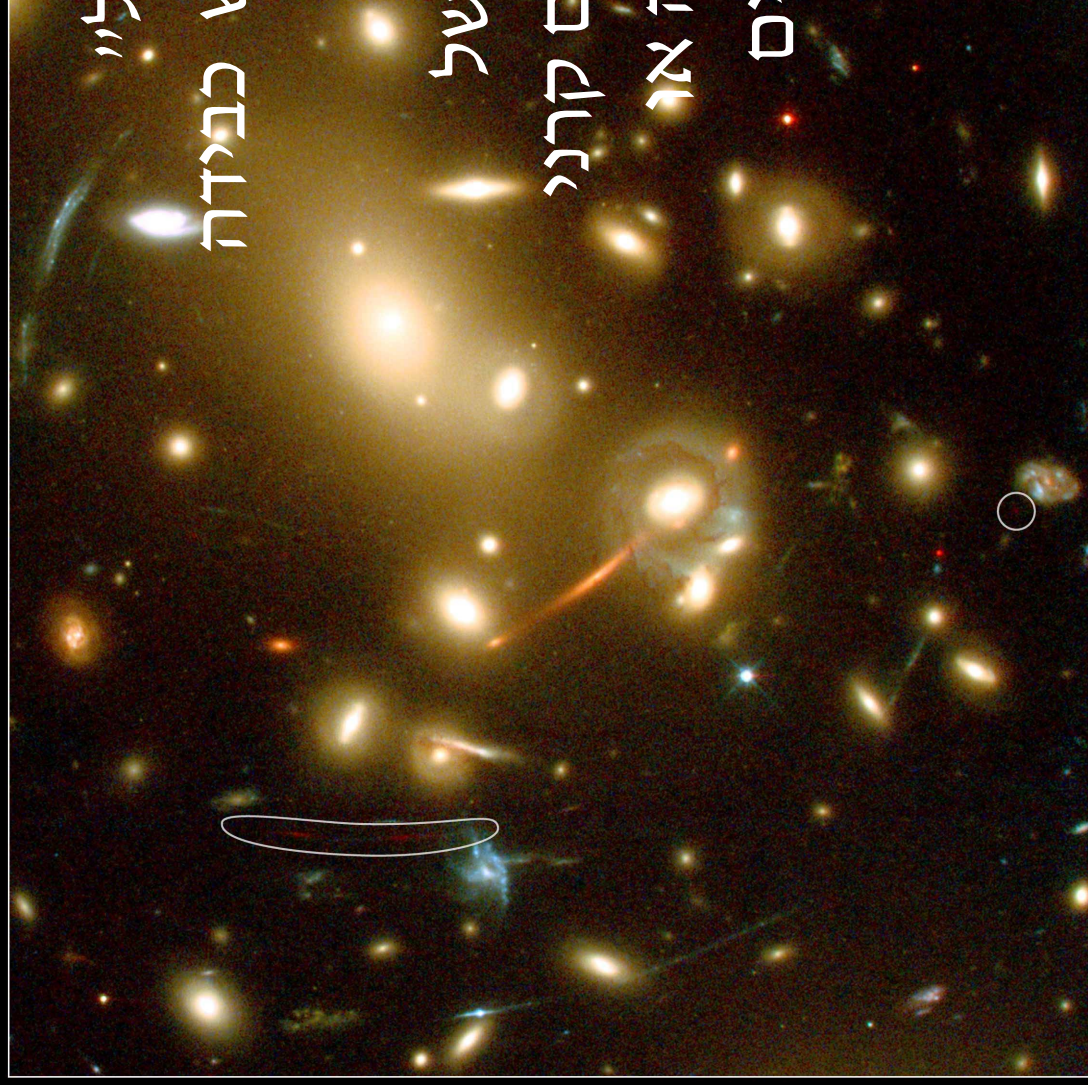
מפת הנתגן של הצביר פרסאוס



CHANDRA X-RAY [3-COLOR]



CHANDRA X-RAY [SOUND WAVES]



- מיפוי של "חומר אפל"
- בצביר באמצעות עידוש כבידה
- על פי תורת הכבידה של איינשטיין החומר מעקם קרני אור בדיוק כמו שעדשה או מים משנים את העצמים המשתקפים דרכם

Distant Galaxy Lensed by Cluster Abell 2218
Hubble Space Telescope • WFPC2 • ACS

ESA, NASA, J.-P. Kneib (Caltech/Observatoire Midi-Pyrénées) and R. Ellis (Caltech)

STScI-PRC04-08

תכונות היקום

ג- 2/3 "אנרגיה אפלה" מרוחה בצורה אחידה

על פני היקום כולו

איך יודעים ?

סיפור ארוך, מעניין, ועדיין לא גמור לחלוטין

השאלה המעניינת באמת: מה הסיבה?

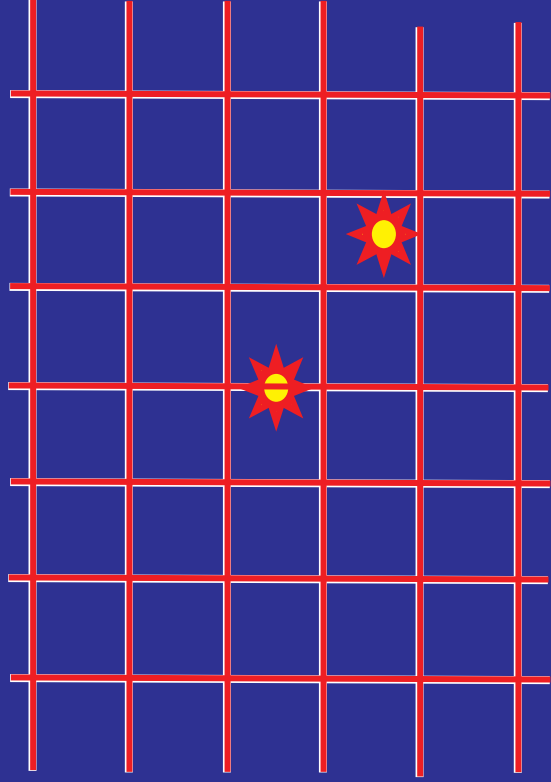
המשך ההרצאה

ההתפשטות המואצת: אתגר למדע

1. הסברים מדעיים
1. אי דיוק במדידות
2. חוק הכבידה שונה
3. תכונות החומר שונות
- הסברים לא מדעיים
1. העקרונות האנתרופיים

התפשטות היקום

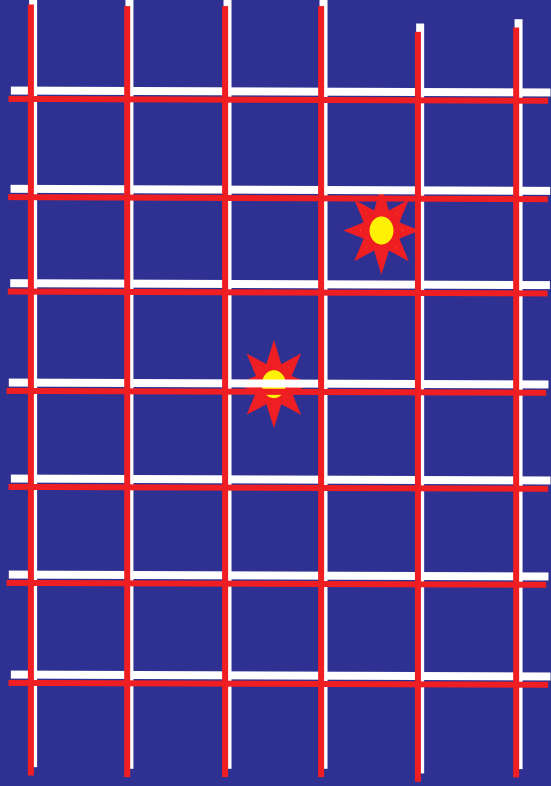
1. היקום מתפשט
2. מיפוי היקום
3. היקום אחיד
4. המשולש הקוסמי
5. אנרגיה אפלה והקבוע הקוסמולוגי
6. עדויות להתפשטות המואצת



• היקום מתפשט

לתוך מה מתפשט היקום?

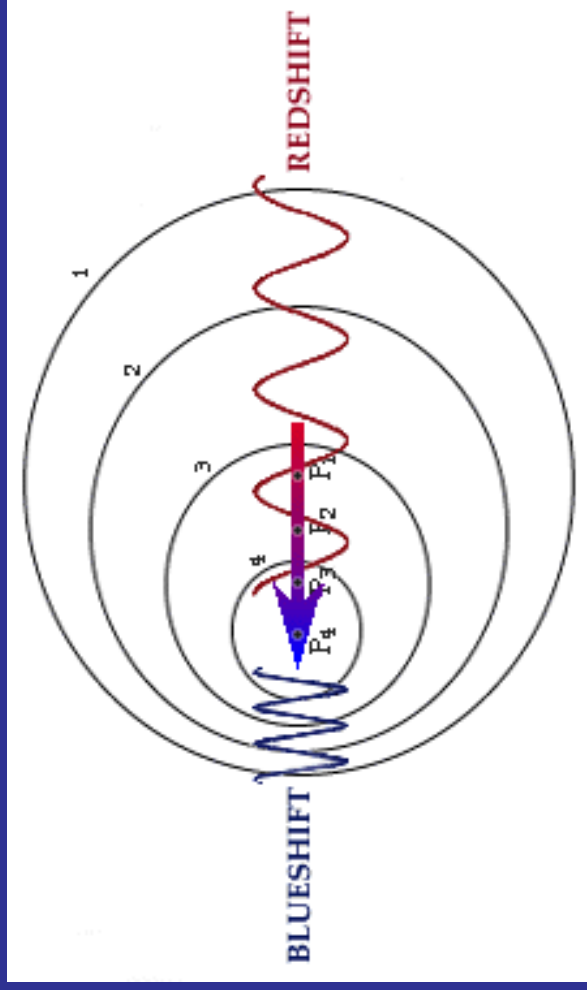
לתוך כלום!



התפשטות = כיול מרחיקים

• היקום מתפשט

- הסחה לאדום z
 - גלקסיות פולטות אור בצבעים שונים
 - ככל שהאור אדום יותר אורך הגל של האור ארוך יותר והתדר נמוך יותר
 - ככל שהאור כחול יותר אורך הגל של האור קצר יותר והתדר גבוה יותר
- קווי פליטה של גז בגלקסיות רחוקות מוסחים לאדום



$$z = \frac{\Delta L}{L}$$

• היקום מתפשט

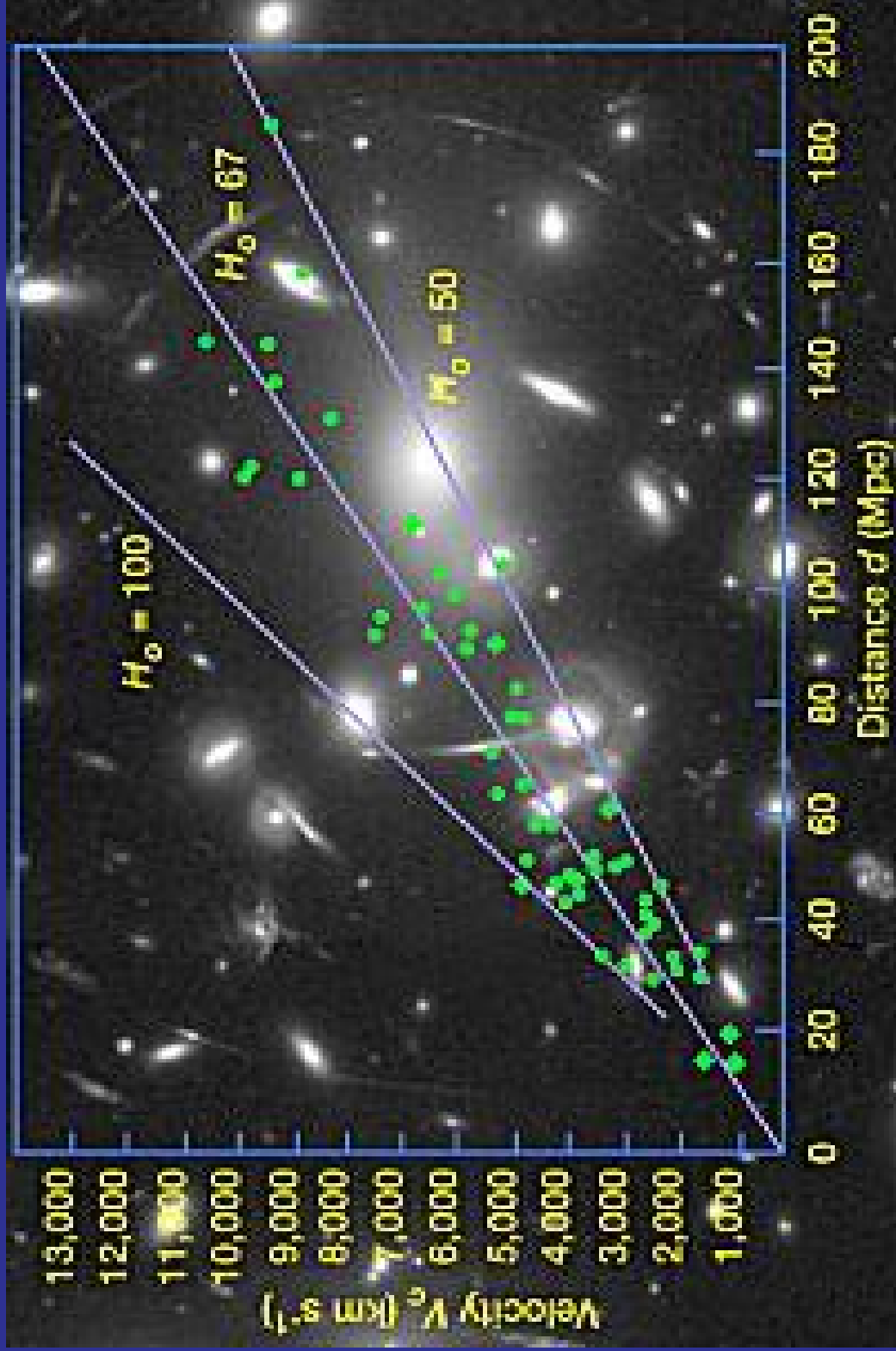
- חוק האבל: הכמות היחסית של ההסחה לאדום גדולה יותר ככל שהעצם הפולט מרוחק יותר

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{H_0}{c} d$$

- תרשים האבל (Hubble diagram)
תרשים של

$$cz = H_0 d$$

$$v = \Lambda D_L$$



D_L

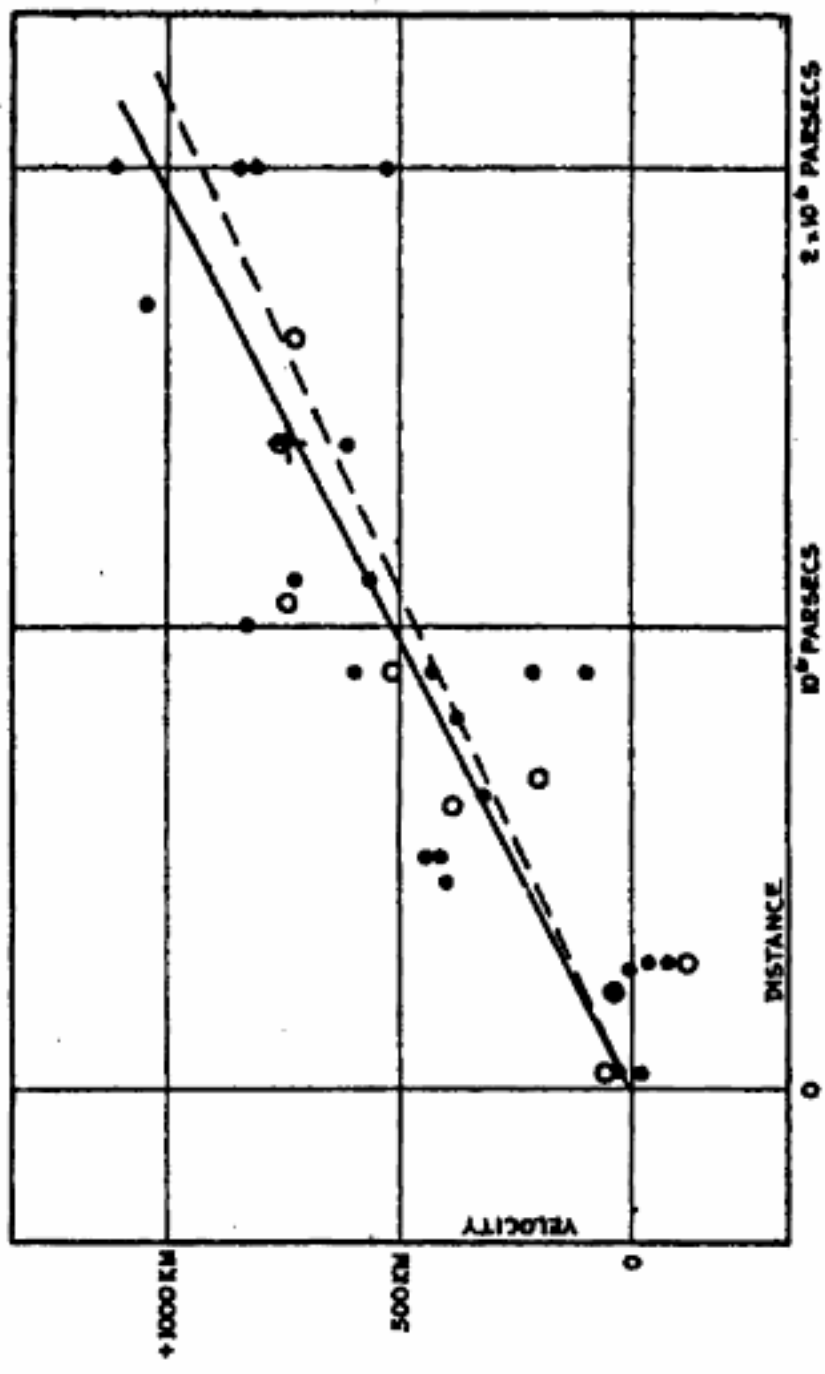


FIG. 2—Reproduced from Hubble (1929). The first "Hubble diagram" including galaxies with redshifts up to 1100 km s^{-1} and implying a Hubble constant near $500 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}$.

ולאלה שעדיין לא משוכנעים:

זמן ומקום

ידוע היום במדע שממד הזמן ושלשת ממדי המקום מהווים יחד מרחב אחד של ארבעה ממדים. ממד הזמן הוא הממד ה"מופשט" הבלתי נתפס בחושים הגשמיים (במונחי המתמטיקה: "ממד דמיוני") ביחס לממדי המקום (שהנם "ממדים ממשיים").

על פי הקבלה, ממד הזמן חודר לתוך המקום ו"מזדווג" עמו ב"נקודה האמצעית" שבו. מכח "זיווג" זה פורץ המקום לכל עבר (**בלשון המדע: התפשטות היקום**), בסוד "ופרצת ימה וקדמה וצפונה ונגבה" ("נחלת יעקב אביך" - "נחלה בלי מצרים", בסוד "עתידה ארץ ישראל שתתפשט בכל הארצות"), וכמו שיתבאר.

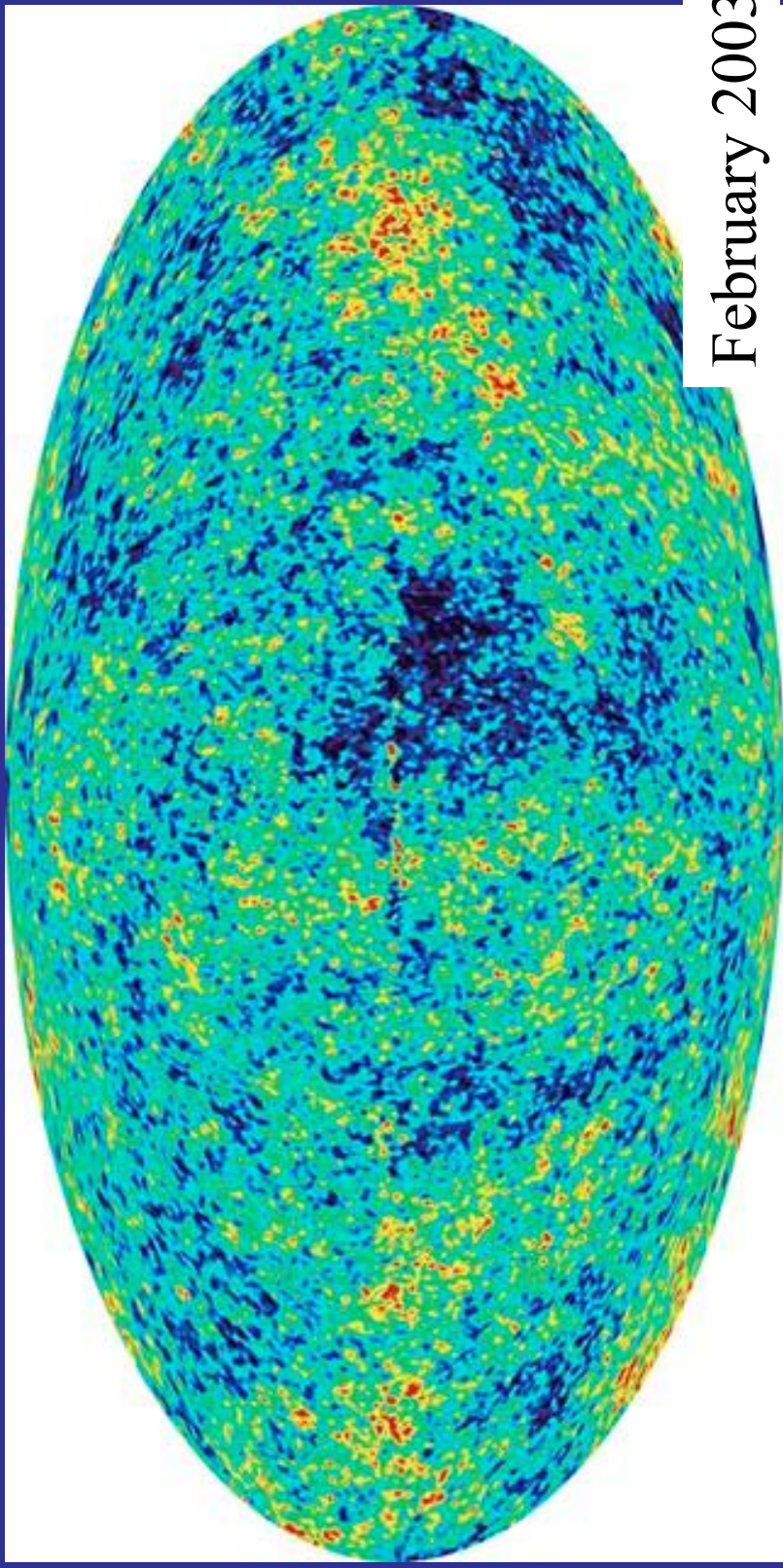
• מיפוי היקום

-קרירת הרקע הקוסמי

- בנוסף לחומר נראה ואפל יש גם מעט קרירת מיקרוגל ביקום, בערך אלפית מכמות החומר, הקרירת התגלתה בשנות ה-60 כמעט בטעות
- קרירת המיקרוגל הקוסמית היא שריד מהתקופה שהיקום היה חם הרבה יותר, בערך 10,000 מעלות, ולכן נושאת עמה מידע על מצב היקום אז
- קרירת הרקע היא אחת העדויות החזקות ביותר לתורת המפץ הגדול החם
- קרירת הרקע אחידה עד לדיוק של אלפיות האחוז

• מיפוי היקום

- מיפוי קרינת הרקע הקוסמי כפי שנמדדה ע"י הלויין
WMAP : עדויות לאי-תלות בכיוון



שינויים בטמפרטורה בעוצמה יחסית של 1/100,000

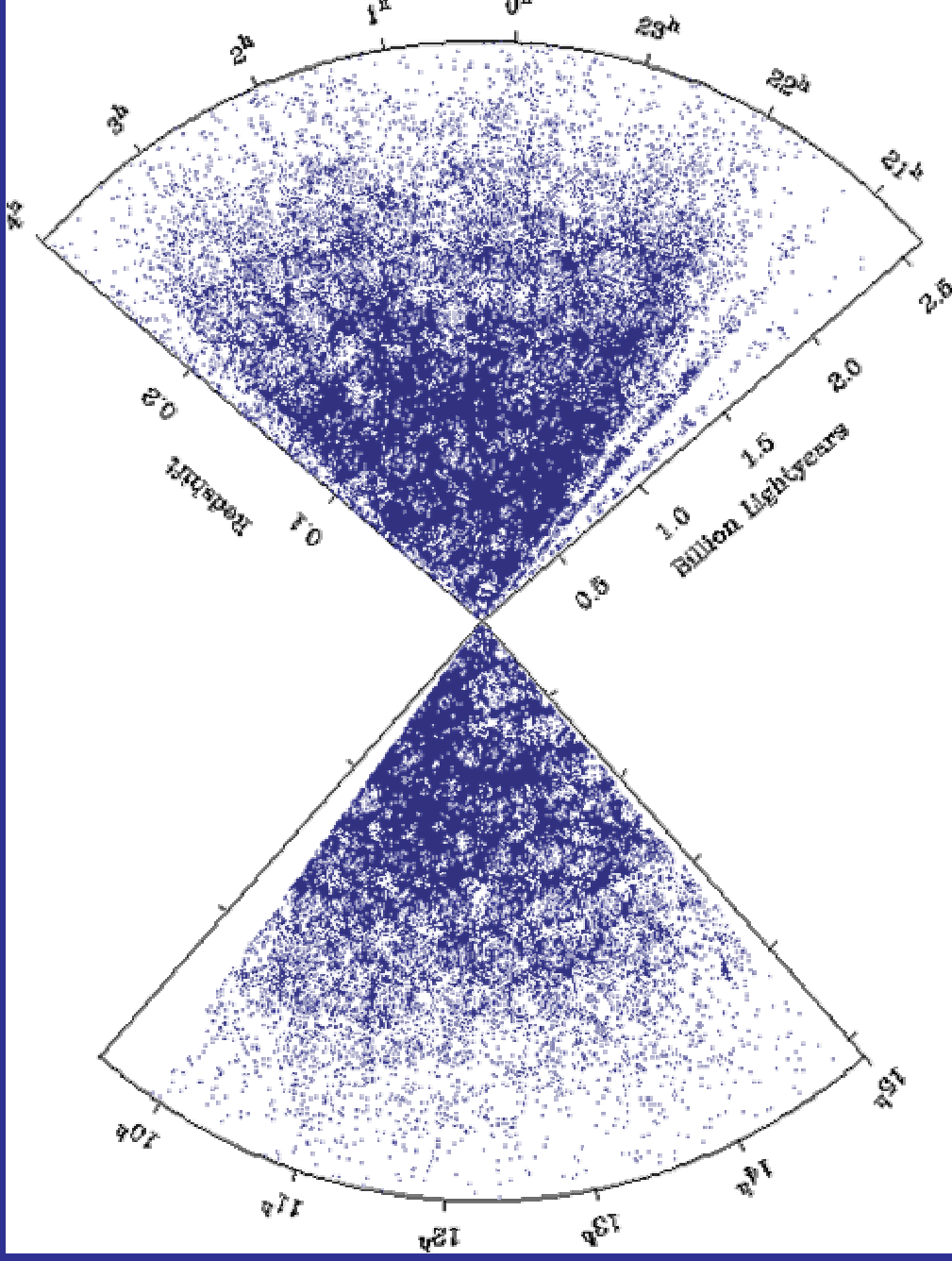
• מיפוי היקום

- מיפוי החומר הנראה כפי שנעשה על ידי סקר השמיים
הדיגיטלי Sloan 2004 : עדויות לאי-תלות במיקום

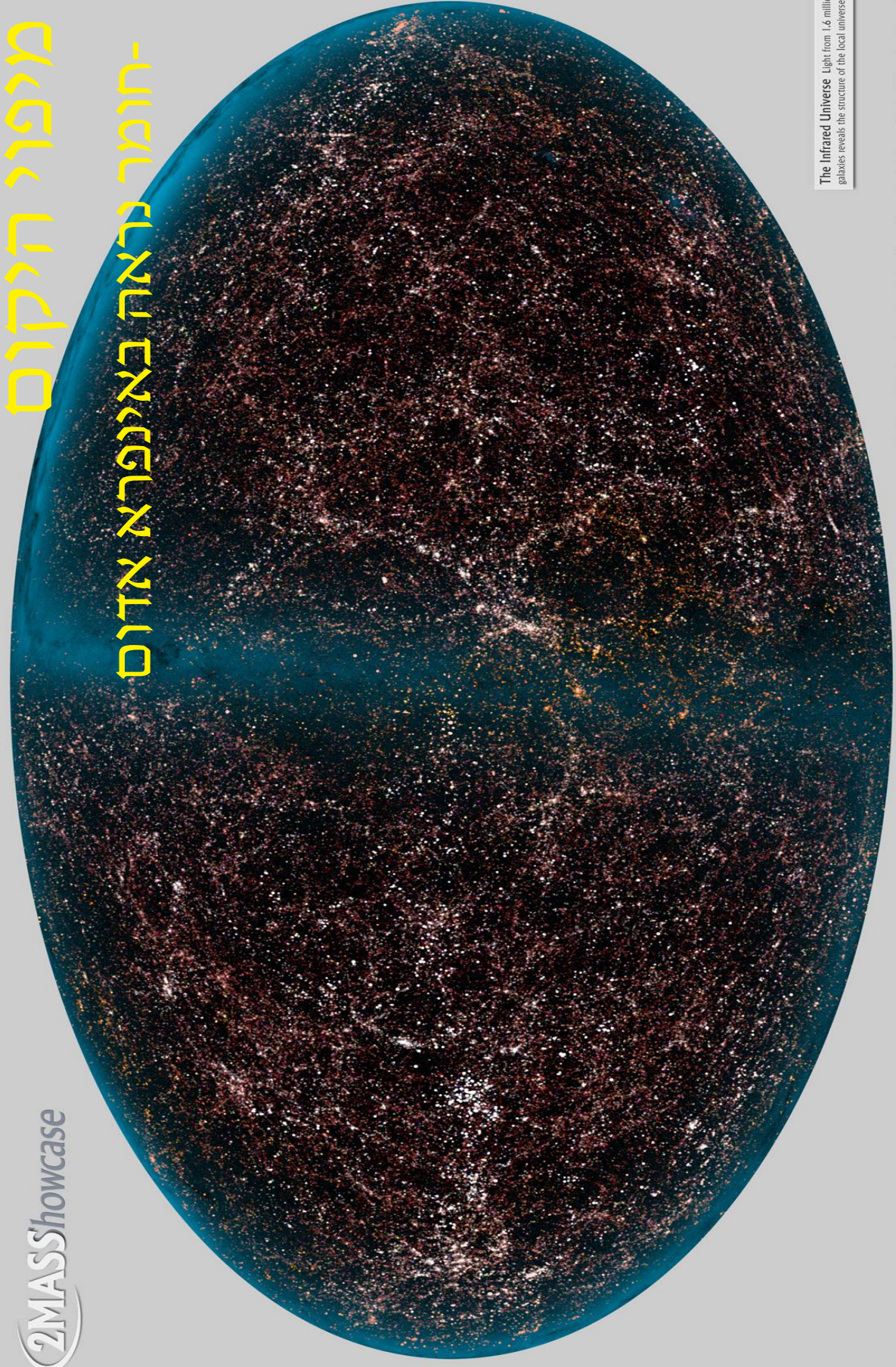


• מיפוי היקום

- מיפוי החומר הנראה כפי שנעשה על ידי סקר השמיים
הדיגיטלי Sloan 2004 : עדויות לאי-תלות במיקום



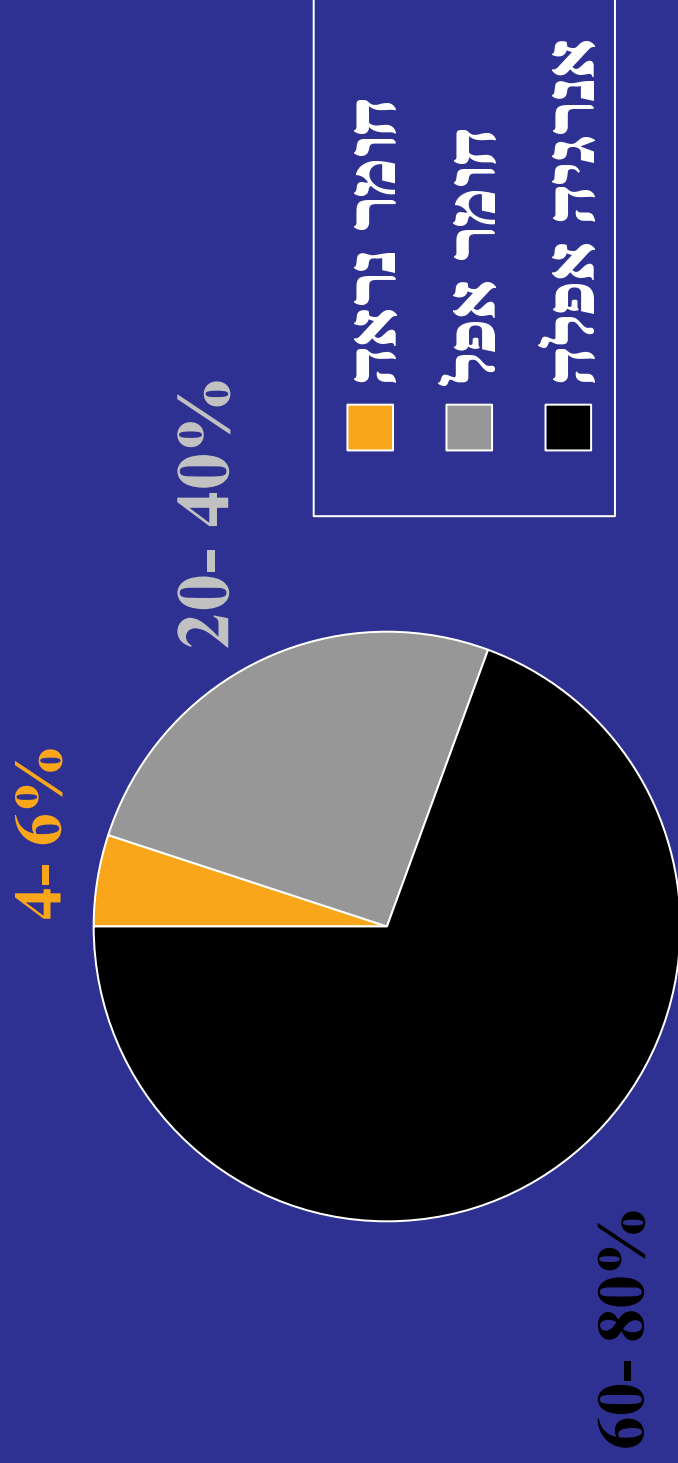
מיפוי היקום •
-חומר נראה באינפרא אדום



The Infrared Universe Light from 1.6 million galaxies reveals the structure of the local universe

סיכום ביניים

- היקום אחיד ללא תלות במיקום ובכיוון
- היקום מתפשט



המשך ההרצאה

ההתפשטות המואצת: אתגר למדע

1. ההתפשטות המואצת של היקום
2. הקשר בין אנרגיה אפלה להתפשטות מואצת
3. תכונות האנרגיה האפלה
4. הסברים מדעיים
 1. אי דיוק במדידות
 2. חוק הכבידה שונה
 3. תכונות החומר שונות
 5. הסברים לא מדעיים
 1. יש דברים נסתרים ...
 2. העקרונות האנתרופי

מיפוי היקום

בהירות עצמית – עוצמת האור מהמקור
בהירות מדומה – עוצמת האור בגלאי
מן היחס בין הבהירות המדומה לבהירות
העצמית ניתן למצוא את המרחק לעצם

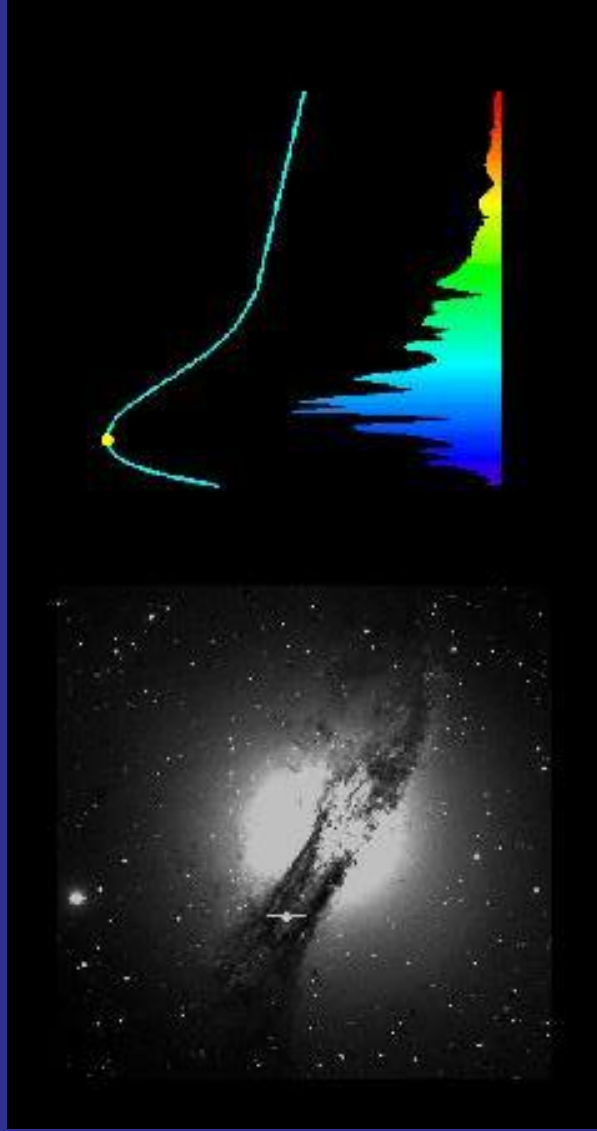
נחויץ "נר סטנדרטי": עצמים
שבהירותם העצמית קבועה,



• מיפוי היקום

-סופרנובות מסוג Ia

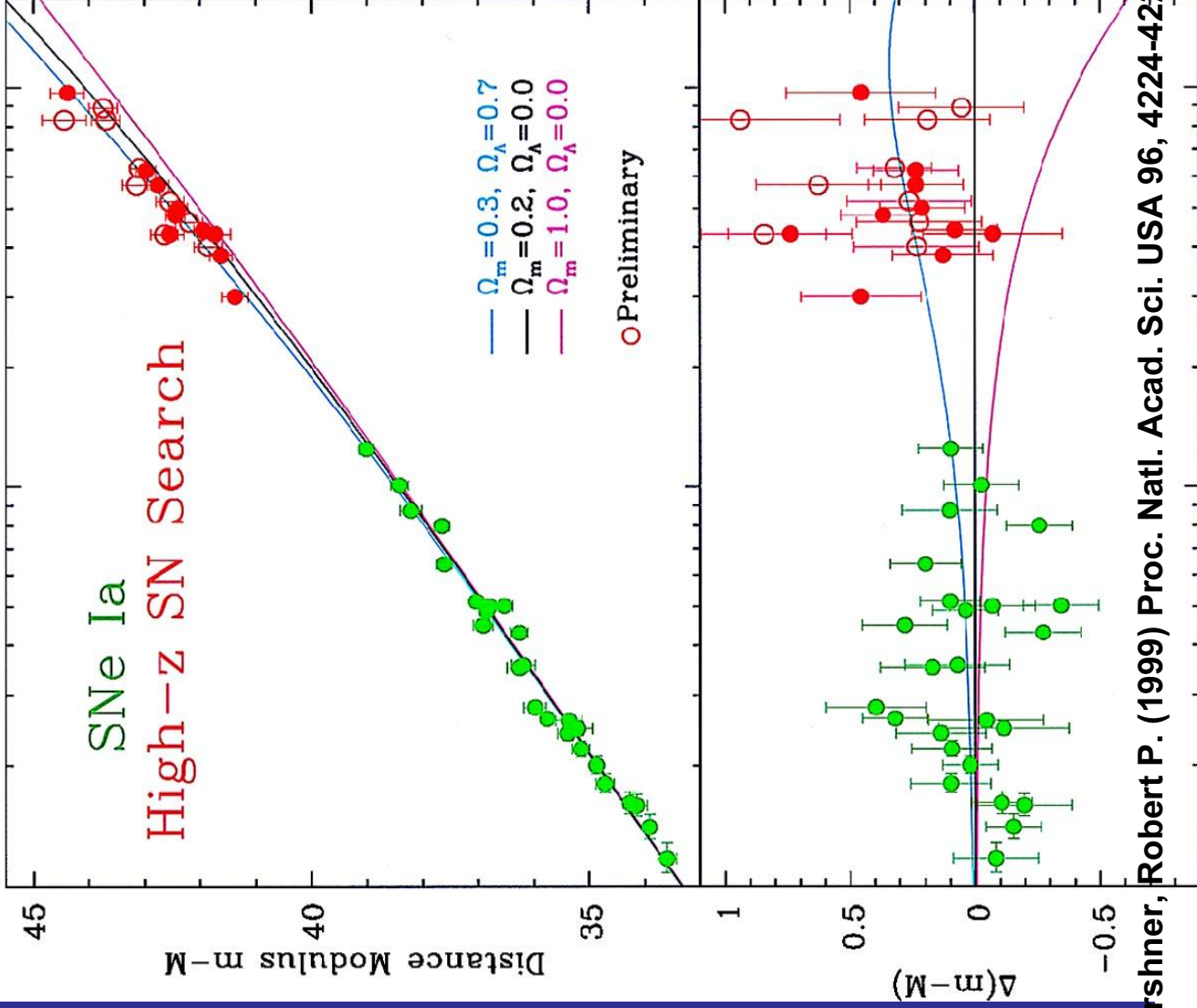
התפוצצות גרעינית של ננסים לבנים



מתאם בין בהירות שיא, צורה,
וספקטרום של עקומת האור ←
~ 10% פיזור בבהירות שיא

מיפוי היקום • -סופרנובות מסוג Ia

התאמה סטטיסטית מובהקת ליקום בו ההתפשטות מואצת: סופרנובות רחוקות יותר בהירות פחות (מעל ומעבר לדעיכת העוצמה עקב המרחק)

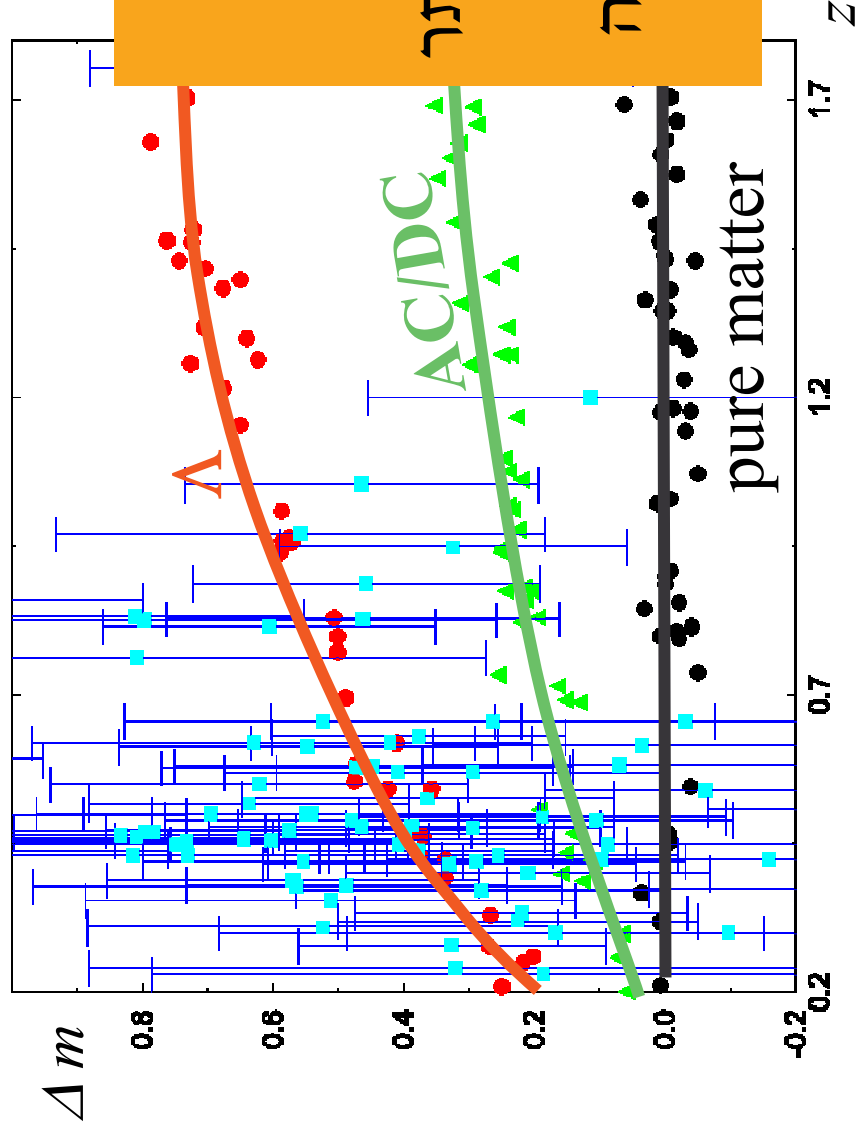


Kirshner, Robert P. (1999) Proc. Natl. Acad. Sci. USA 96, 4224-4227

0.01 0.1 1
Redshift z

מיפוי היקום • -סופרנובות מסוג Ia

Cosmological Results from High-z Supernovae^{1,2}
arXiv:astro-ph/0305008 v1 1 May 2003



התאמה סטטיסטית
מובהקת ליקום בו
ההתפשטות מואצת:
סופרנובות רחוקות יותר
בהירות פחות (מעל
ומעבר לדעיכת העוצמה
עקב המרחק)

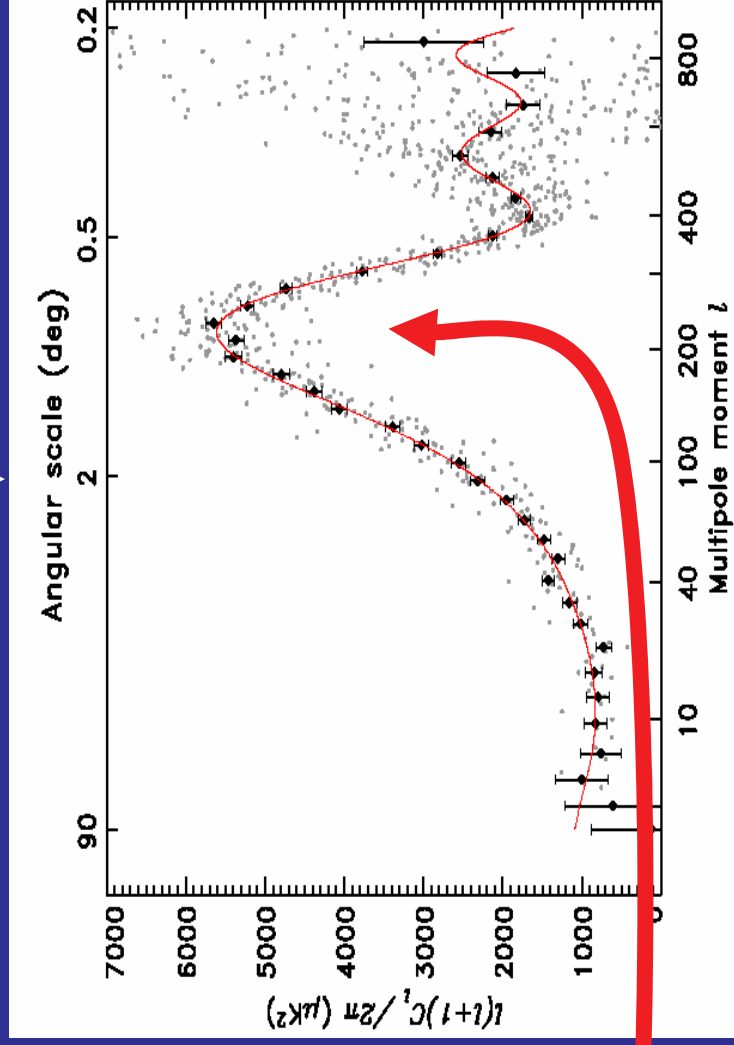
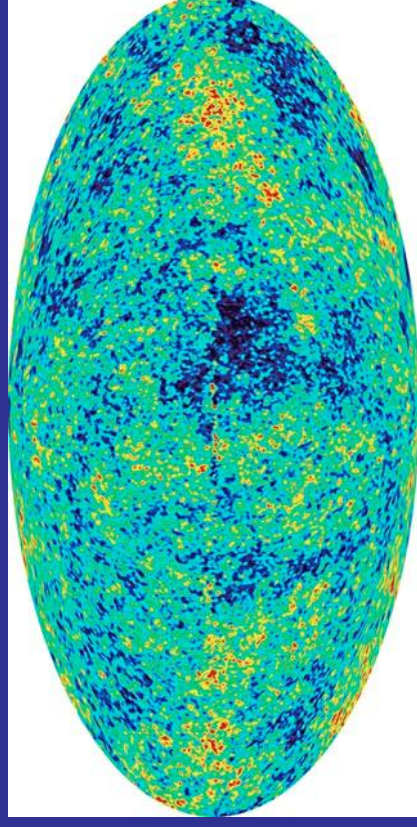
ש ל ת ר ה צ

רחוק יותר



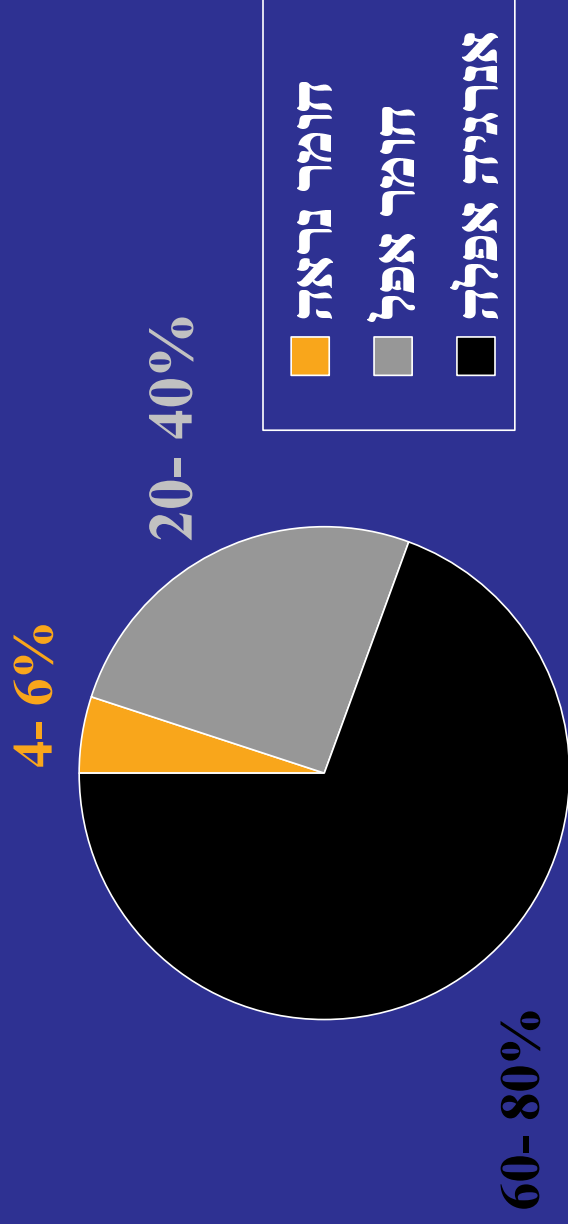
נתוני קר"ק : WMAP

מיקום השיא מעיד על
הפרש בין כמות החומר
הנראה והאפל לבין סה"כ
החומר



סיכום ביניים

- האצה לאחרונה
- היום $t > 8$ מיליארד שנים ($0 < z < 1$)
- עדויות עקביות ממספר רב של מקורות.



הסבר מדעי

- ❖ מספר מצומצם של הנחות
- ❖ תיאור עקבי באמצעות משוואות
- ❖ מפתרון המשוואות ניתן להסיק על כלל התופעות הנצפות ולנבא תופעות חדשות

הקשר בין התפשטות מואצת לאנרגיה אפלה

- תורת היחסות הכללית של איינשטיין מקשרת בין תכולת היקום לקצב ההתפשטות של היקום
 - קצב ההתפשטות מתכונתי לכלל כמות החומר
 - התפשטות מואצת או מואטת (קצב השינוי של קצב ההתפשטות) נקבעת ע"י כלל כמות החומר וגם ע"י הלחץ שהוא מפעיל
 - התפשטות מואטת: לחץ חיובי
 - התפשטות מואצת: לחץ שלילי
 - התפשטות מואצת: כוח דחייה המתגבר על כוח המשיכה של כבידה

$$\ddot{a}^2 \propto G_N \rho$$

$$\ddot{a} \propto -G_N (\rho + 3p)$$

הקשר בין התפשטות מואצת לאנרגיה אפלה

- אנרגיה אפלה: חומר אחיד המפעיל לחץ שלילי גדול מספיק המתגבר על המשיכה של כוח הכבידה
- ההסבר ה"פשוט" ביותר: קבוע קוסמולוגי אינשטיין: הבלבול הגדול בכל עבודתי המדעית
- קבוע קוסמולוגי הוא כינוי ל "חומר" שצפיפותו קבועה והלחץ השלילי שהוא מפעיל שווה בגודלו לצפיפות

בעיות הקבוע הקונסומולוגי

– למה כל כך קטן ? מדוע היקום חי כל כך הרבה זמן?

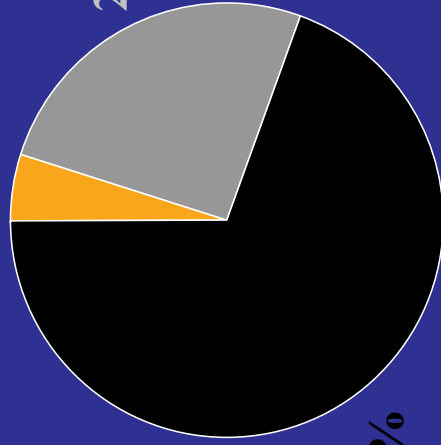
– למה עכשיו ? מדוע כמות החומר וכמות האנרגיה האפלה

דומות כל כך?

המקטע האפל &

המודל הסטנדרטי של פיזיקת החלקיקים

4-6%



■ Baryons

■ Dark matter

■ Dark energy

arXiv:hep-ph/0211065 v1 5 Nov 2002

$$M_H = 86^{+49}_{-32} \text{ GeV},$$

$$m_t = 174.2 \pm 4.4 \text{ GeV},$$

$$\alpha_s = 0.1210 \pm 0.0018,$$

$$\hat{\alpha}(M_Z)^{-1} = 127.922 \pm 0.020$$

$$s_Z^2 = 0.23110 \pm 0.00015,$$

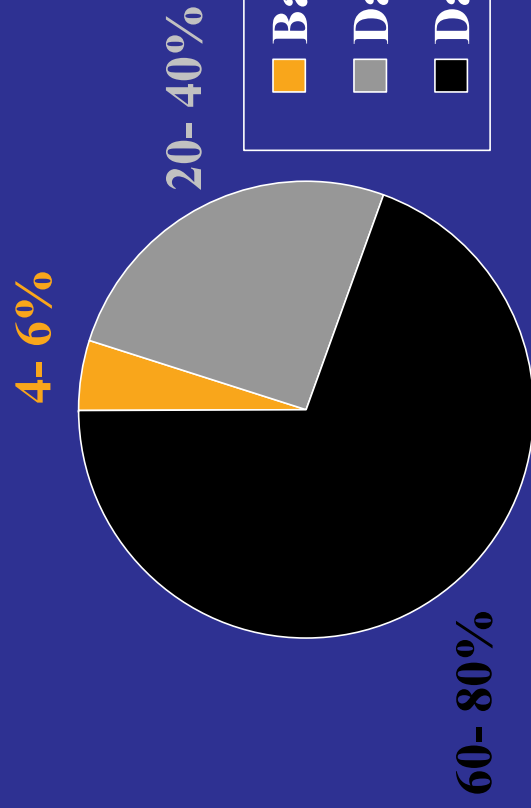
$$s_\ell^2 = 0.23139 \pm 0.00015,$$

$$s_W^2 = 0.22277 \pm 0.00035$$

$$s_{M_Z}^2 = 0.23105 \pm 0.00008$$

המקטע האפל &

מכניקת קוונטים וכבידה



$$\rho_{Vacuum} = \sum_{\omega} \frac{1}{2} \hbar \omega$$

$$G_{00} = 8\pi G_N \rho$$

לא הגרבי

Impartation

$$\rho_{\text{Vacuum}} = \sum_{\omega} \frac{1}{2} \hbar \omega$$
$$G_{00} = 8\pi G_N \rho$$

• כבידה

• חומר – שדות נוספים, קלים, מצומדים חלש: “quintessence”

• מכניקת קוונטים

הסבריים לא מדעיים

א- אין הסבר

ב- היקום הוא כפי שהוא כדי
שיתאים לחיים של בני אדם

א - יש דברים נסתרים

אל נבקש הכול לדעת
אל נסתקרן לגבי המחר
יש לפעמים שסיבה לא נודעת
יש לפעמים שנסתר הדבר

יש דברים נסתרים
לא נבין לא נדע
נעשה גם דברים
שנראים בלי סיבה
לא צריך כל דבר
לחקור ולשאול
לפעמים גם מותר
לא לדעת הכול

אל נבקש סיבה לכל צעד
אל נבקש לדעת כל סוד
יש לפעמים שסיבה לא נודעת
אל נתיאש, אל נפסיק לצעוד

מילים: תמי לוי, לחן משה נגר



The Anthropic Principle -2

R. Dicke (1961): “ carbon-based life can only arise when the Dirac large numbers hypothesis is true because this is when burning stars exist”

B. Carter (Early 1970’s): “what we can expect to observe must be restricted by the conditions necessary for our presence as observers” (Leslie ed. 1990). The word "anthropic" was intended as applying to intelligent beings.

A possible argument for preferring the God hypothesis: think in terms of many possible fundamental theories, God selecting a theory which permitted life's requirements to be fulfilled without contradictions.

P. J. E. Peebles :

arXiv:astro-ph/0209403 v1 19 Sep 2002

Abstract. Physical science has changed in the century since Lord Kelvin's celebrated essay on *Nineteenth Century Clouds over the Dynamical Theory of Heat and Light*, but some things are the same.

Cloud No. I: the Dark Sector

Cloud No. II: Strong Spacetime Curvature



Cloud

the Me



"We live where we can live,"

NYT: 2 Sept. 2003

סיכום ההרצאה

- היקום מתפשט
- התפשטות היקום מואצת
- התוצאות של ניסויים שונים עקביות
- תמונת המצב של היקום המתקבלת מוזרה מאוד:
95% מתכולת היקום אינה ידועה, ותכונותיה שונות
מכל המוכר
- מציאת הסבר למצב היקום היא אתגר גדול למדע

