

Introduction to Particle Physics

מבוא לפיזיקת חלקיקים

Yevgeny Kats



אוניברסיטת בן-גוריון בנגב

Ben-Gurion University of the Negev

جامعة بن غوريون في النقب

מטרה

להבין מהם המרכיבים היסודיים של הטבע
והכוחות ביניהם

המרכיבים היסודיים של הטבע והכוחות ביניהם

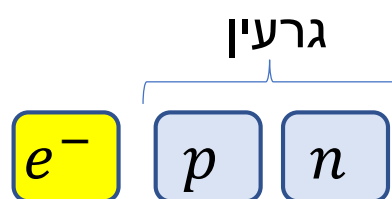
מה יש בטבע?

מחיי היום יום (וקצת מעבר):

❖ חומרים

המרכיבים היסודיים של הטבע והכוחות ביניהם

מה יש בטבע?

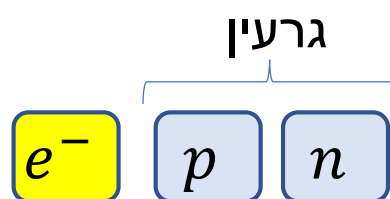


מחיי היום יום (וקצת מעבר):

❖ חומרים: בנויים מאטומים

המרכיבים היסודיים של הטבע והכוחות ביניהם

מה יש בטבע?



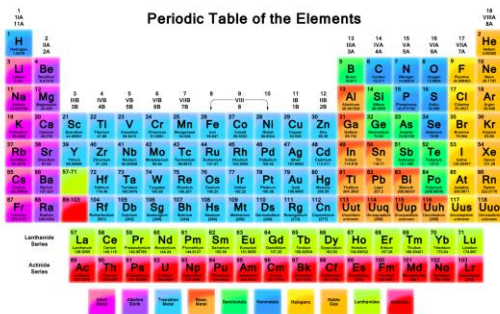
מחיי היום יום (וקצת מעבר):

❖ חומרים: בנויים מאטומים

❖ כוחות חשמליים ומגנטיים

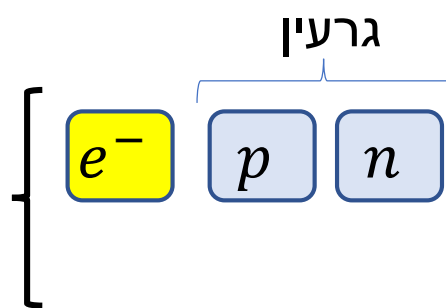
המרכיבים היסודיים של הטבע והכוחות ביניהם

מה יש בטבע?



Periodic Table of the Elements

The image shows a standard periodic table of elements, color-coded by groups. The elements are arranged in rows and columns, with their symbols and names. The table includes the Lanthanide and Actinide series at the bottom.



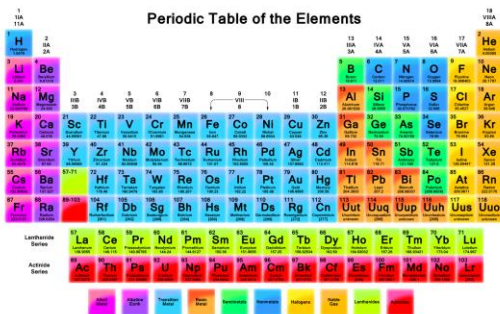
מחיי היום יום (וקצת מעבר):

❖ חומרים: בנויים מאטומים

❖ כוחות חשמליים ומגנטיים

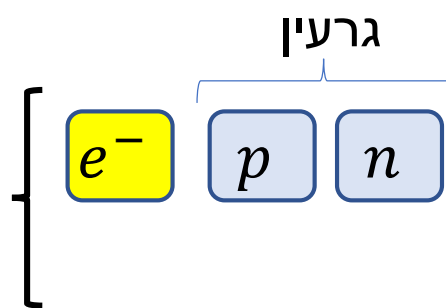
המרכיבים היסודיים של הטבע והכוחות ביניהם

מה יש בטבע?



Periodic Table of the Elements

The image shows a standard periodic table of elements, color-coded by groups. The elements are arranged in rows and columns, with their symbols and names in Hebrew. The table includes elements from Hydrogen (H) to Oganesson (Og).



מחיי היום יום (וקצת מעבר):

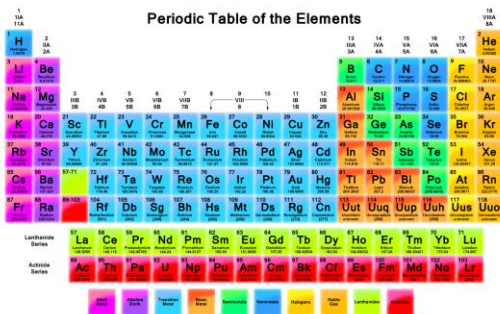
❖ חומרים: בנויים מאטומים

❖ כוחות חשמליים ומגנטיים

❖ אור

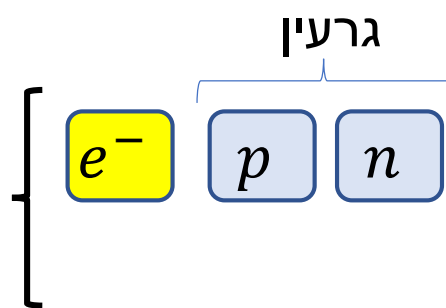
המרכיבים היסודיים של הטבע והכוחות ביניהם

מה יש בטבע?



Periodic Table of the Elements

The image shows a standard periodic table of elements, color-coded by groups. The elements are arranged in rows and columns, with their symbols and names. The table includes the Lanthanide and Actinide series at the bottom.



מחיי היום יום (וקצת מעבר):

❖ חומרים: בנויים מאטומים

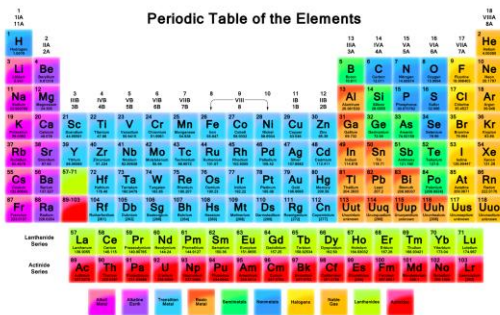
❖ כוחות חשמליים ומגנטיים

❖ אור

❖ גלי רדיו, גלי מיקרוגל, קרני רנטגן...

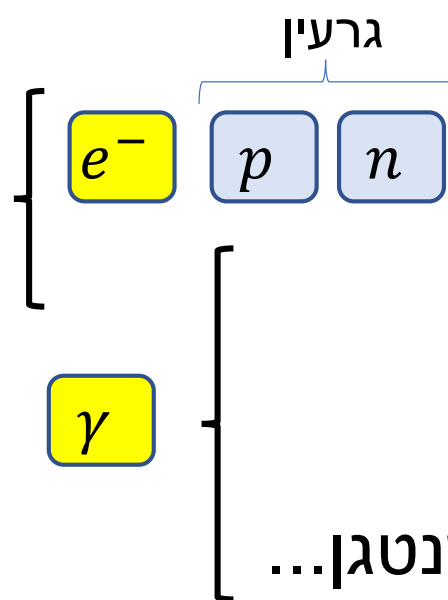
המרכיבים היסודיים של הטבע והכוחות ביניהם

מה יש בטבע?



Periodic Table of the Elements

The image shows a standard periodic table of elements, color-coded by groups. It includes the title 'Periodic Table of the Elements' and the atomic numbers of the elements.



מחיי היום יום (וקצת מעבר):

❖ חומרים: בנויים מאטומים

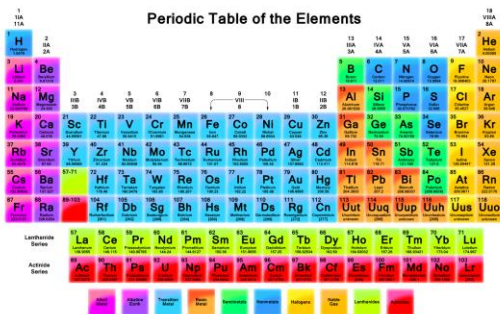
❖ כוחות חשמליים ומגנטיים

❖ אור

❖ גלי רדיו, גלי מיקרוגל, קרני רנטגן...

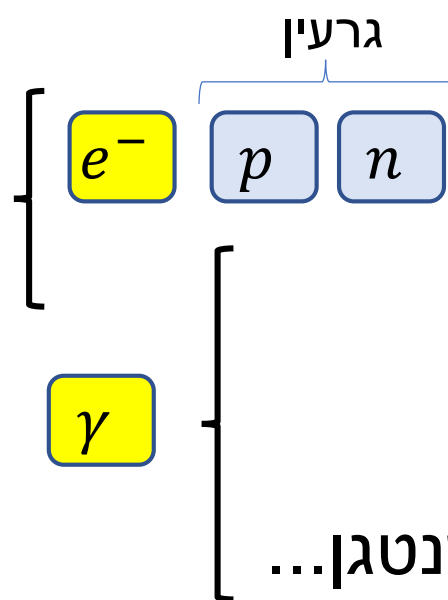
המרכיבים היסודיים של הטבע והכוחות ביניהם

מה יש בטבע?



Periodic Table of the Elements

The image shows a standard periodic table of elements, color-coded by groups. It includes the title 'Periodic Table of the Elements' and the element symbols and names in both Hebrew and English.



מחיי היום יום (וקצת מעבר):

❖ חומרים: בנויים מאטומים

❖ כוחות חשמליים ומגנטיים

❖ אור

❖ גלי רדיו, גלי מיקרוגל, קרני רנטגן...

❖ "הכוח החזק" שמחזיק את גרעין האטום

המרכיבים היסודיים של הטבע והכוחות ביניהם

מה יש בטבע?

מחיי היום יום (וקצת מעבר):

❖ חומרים: בנויים מאטומים

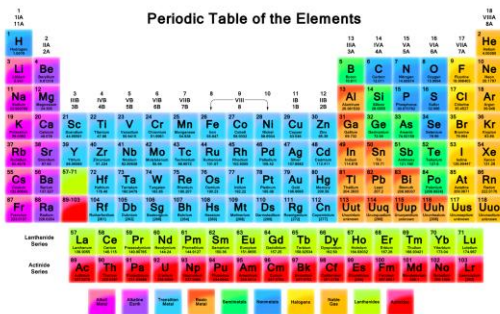
❖ כוחות חשמליים ומגנטיים

❖ אור

❖ גלי רדיו, גלי מיקרוגל, קרני רנטגן...

❖ "הכוח החזק" שמחזיק את גרעין האטום

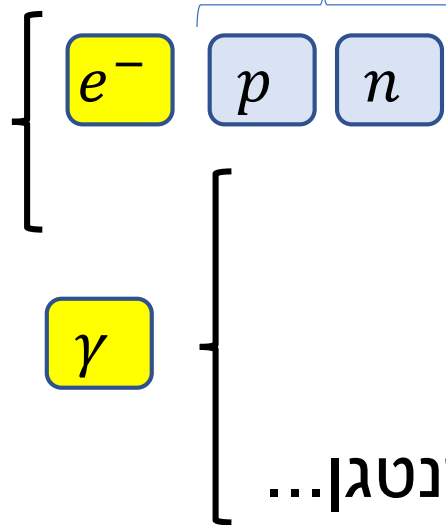
❖ רדיואקטיביות ("הכוח החלש") $\bar{\nu}_e$ ν_e e^+ e^- p n



Periodic Table of the Elements

The image shows a standard periodic table of elements, color-coded by groups. It includes the title 'Periodic Table of the Elements' and the element symbols and names in both Hebrew and English. The table is organized into rows and columns, with the Lanthanide and Actinide series shown at the bottom.

גרעין



המרכיבים היסודיים של הטבע והכוחות ביניהם

מה יש בטבע?

מחיי היום יום (וקצת מעבר):

❖ חומרים: בנויים מאטומים

❖ כוחות חשמליים ומגנטיים

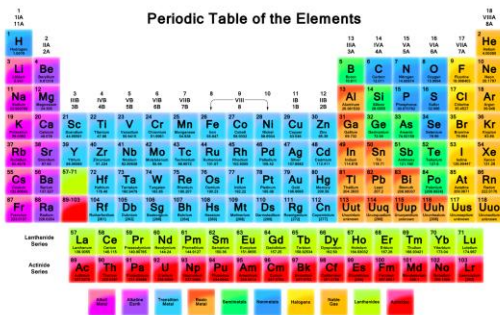
❖ אור

❖ גלי רדיו, גלי מיקרוגל, קרני רנטגן...

❖ "הכוח החזק" שמחזיק את גרעין האטום

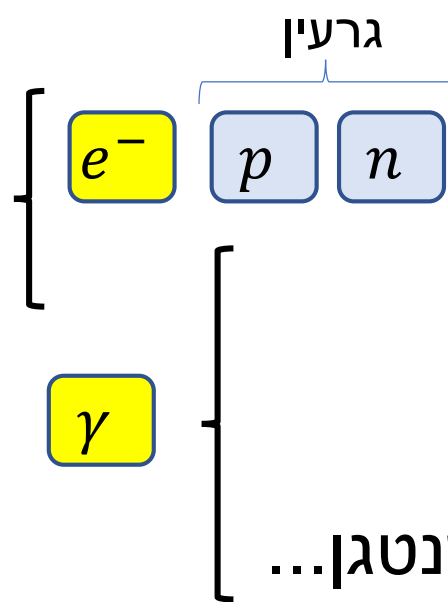
❖ רדיואקטיביות ("הכוח החלש") $\bar{\nu}_e$ ν_e e^+ e^- p n

❖ כוח הכבידה G



Periodic Table of the Elements

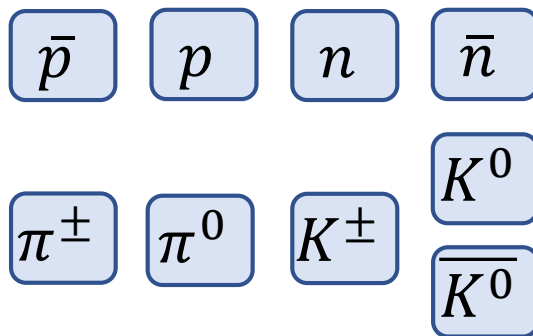
The image shows a standard periodic table of elements, color-coded by groups. It includes the title 'Periodic Table of the Elements' and the element symbols and names in both Hebrew and English. The table is organized into rows and columns, with the Lanthanide and Actinide series shown at the bottom.



האדרונים

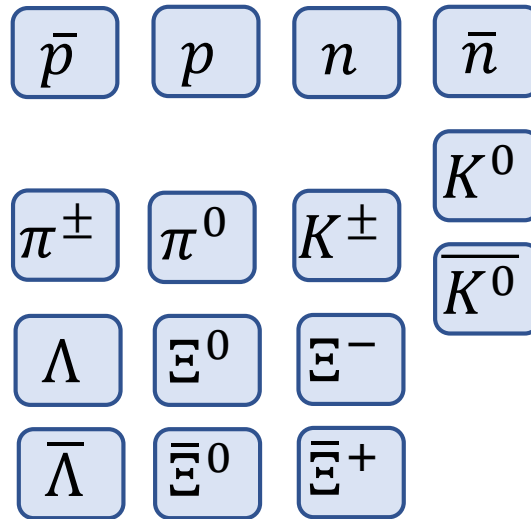
p n

האדרונים



האדרונים

ועוד הרבה...



האדרונים

ועוד הרבה...

\bar{p}	p	n	\bar{n}
π^\pm	π^0	K^\pm	K^0
Λ	Ξ^0	Ξ^-	\bar{K}^0
$\bar{\Lambda}$	$\bar{\Xi}^0$	$\bar{\Xi}^+$	

הובן שחלקיקים אלה ("האדרונים") הם בעצם קומבינציות שונות של קווארקים u d s שקשורים ע"י שדה הגלואונים g ("צבע")

\bar{u} \bar{d} \bar{s}

האדרונים

ועוד הרבה...

\bar{p}	p	n	\bar{n}
π^\pm	π^0	K^\pm	K^0
			\bar{K}^0
Λ	Ξ^0	Ξ^-	
$\bar{\Lambda}$	$\bar{\Xi}^0$	$\bar{\Xi}^+$	

הובן שחלקיקים אלה ("האדרונים") הם בעצם קומבינציות שונות של קווארקים u d s שקשורים ע"י שדה הגלואונים g ("צבע")

\bar{u} \bar{d} \bar{s}

כמו שהאלקטרונים קשורים לפרוטונים באטום ע"י שדה הפוטונים

γ

p e^-

האדרונים

לדוגמה:

אינטראקציה עם גלואונים

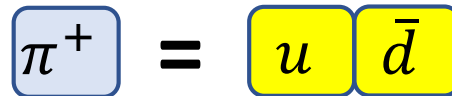
g

u מטען חשמלי $+2/3$

d מטען חשמלי $-1/3$



וכו'...



האדרונים

לדוגמה:

אינטראקציה עם גלואונים

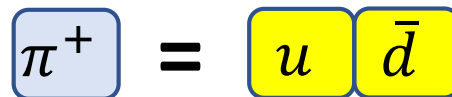
g

u מטען חשמלי $+2/3$

d מטען חשמלי $-1/3$



וכו'...



מסביר גם את הכוח הגרעיני החזק ← פיזיקה גרעינית

המרכיבים היסודיים של הטבע והכוחות ביניהם

סיכום ביניים

+ אנטי
חלקיקים

❖ אלקטרונים (בעלי מטען חשמלי) e^-

וידידים הנייטרונים (הנייטרליים) ν_e

❖ קווארקים (בעלי מטען חשמלי וצבע) u d s

g

γ

G

❖ נושאי כוחות

המרכיבים היסודיים של הטבע והכוחות ביניהם

כל החלקיקים הידועים היום: "המודל הסטנדרטי"

+ אנטי
חלקיקים

τ^- μ^- e^-

❖ לפטונים בעלי מטען חשמלי

ν_τ ν_μ ν_e

ולפטונים נייטרליים (נייטרינו)

u d s

❖ קווארקים (בעלי מטען חשמלי וצבע)

c b t

g

Z W^\pm γ

❖ נושאי כוחות

G

h

❖ בוזון היגס

המרכיבים היסודיים של הטבע והכוחות ביניהם

כל החלקיקים הידועים היום: "המודל הסטנדרטי"

❖ לפטונים בעלי מטען חשמלי
ולפטונים נייטרליים (נייטרינו)

+ אנטי חלקיקים

τ^-	μ^-	e^-
ν_τ	ν_μ	ν_e

❖ קווארקים (בעלי מטען חשמלי וצבע)

u	d	s
c	b	t

❖ נושאי כוחות

Z	W^\pm	g	γ
		G	

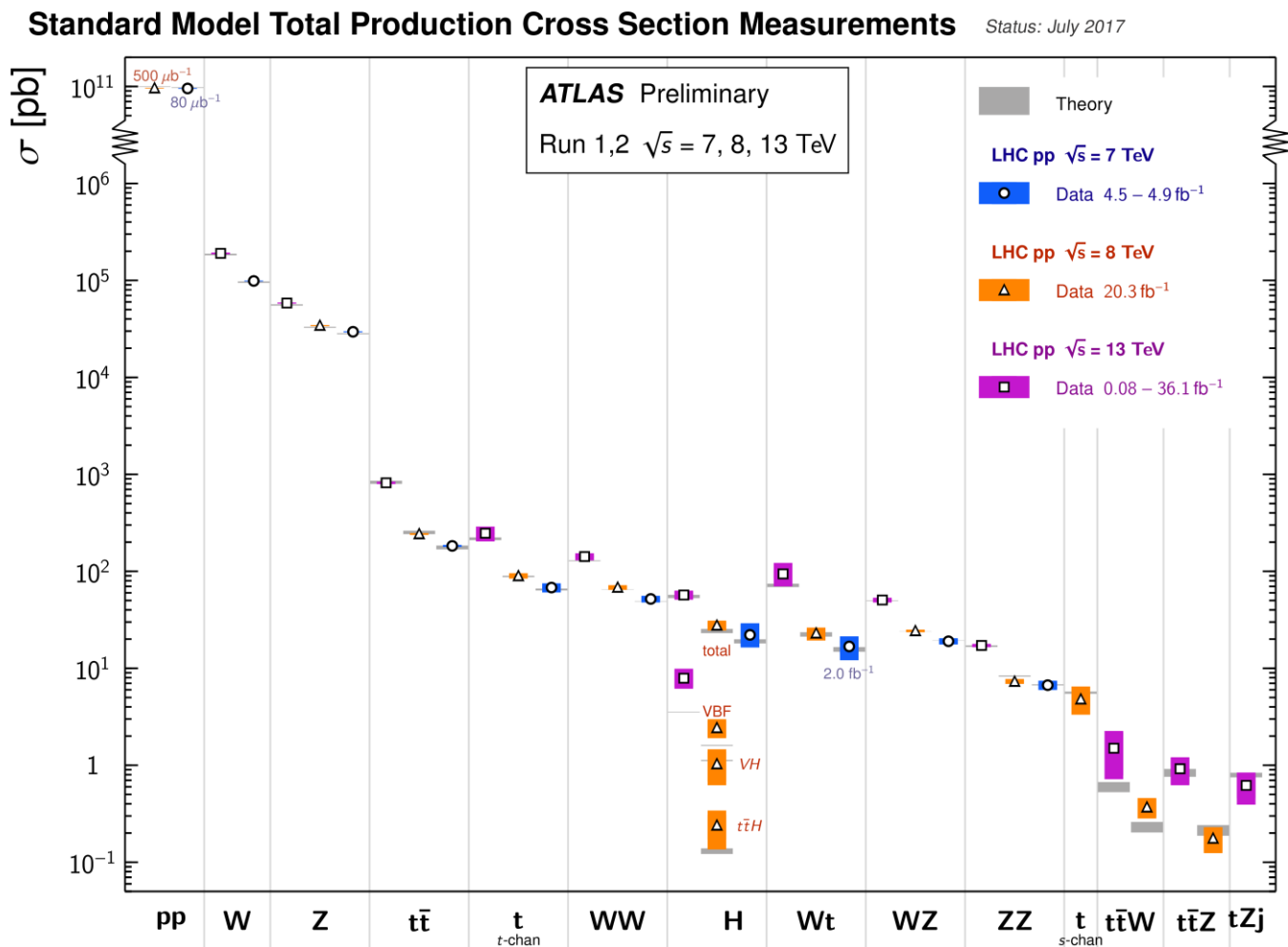
הוצעו בשנות ה-60 כדי להסביר את ה"כוח החלש".
התגלו בניסוי UA1 של המאיץ SPS ב-CERN ב-1983.

הוצע בשנות ה-60 כדי להסביר מסות של חלקיקים כמו Z, W^\pm .
התגלה בניסויים ATLAS ו-CMS של המאיץ LHC ב-CERN ב-2012.

❖ בוזון היגס h

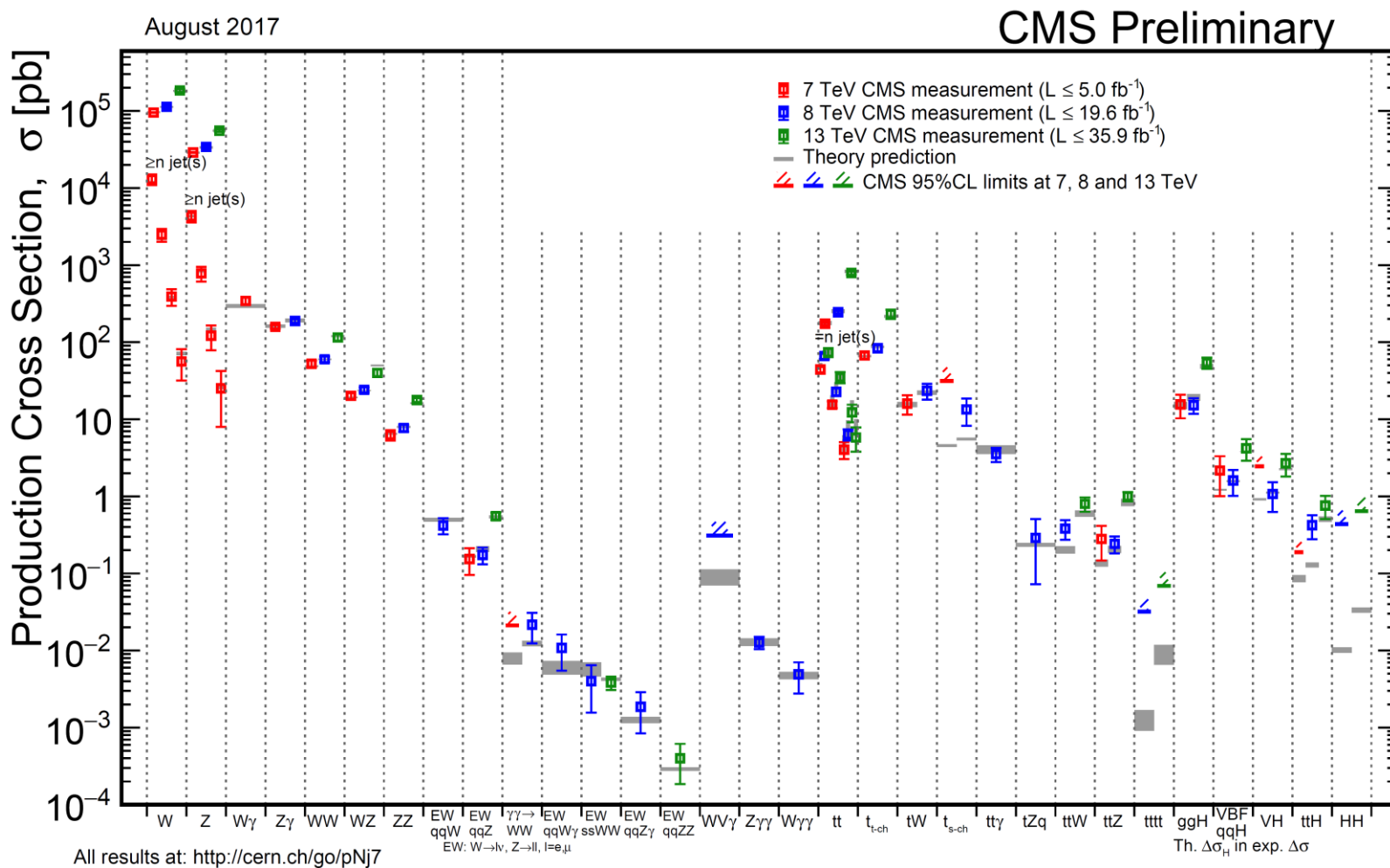
המרכיבים היסודיים של הטבע והכוחות ביניהם

המודל הסטנדרטי נבחן באינספור ניסויים,
וכל התוצאות עד עכשיו תואמות את החישובים.



המרכיבים היסודיים של הטבע והכוחות ביניהם

המודל הסטנדרטי נבחן באינספור ניסויים,
וכל התוצאות עד עכשיו תואמות את החישובים.



המרכיבים היסודיים של הטבע והכוחות ביניהם

המודל הסטנדרטי נבחן באינספור ניסויים,
וכל התוצאות עד עכשיו תואמות את החישובים.

$$\mu = -\frac{g}{2} \mu_B \frac{\mathbf{S}}{\hbar/2}$$



המומנט המגנטי
של האלקטרון

Hanneke, Fogwell, Gabrielse
Phys. Rev. Lett. 100, 120801 (2008)

1.00115965218073(28)

ניסוי:

Aoyama, Kinoshita, Nio
arXiv:1712.06060 (2017)

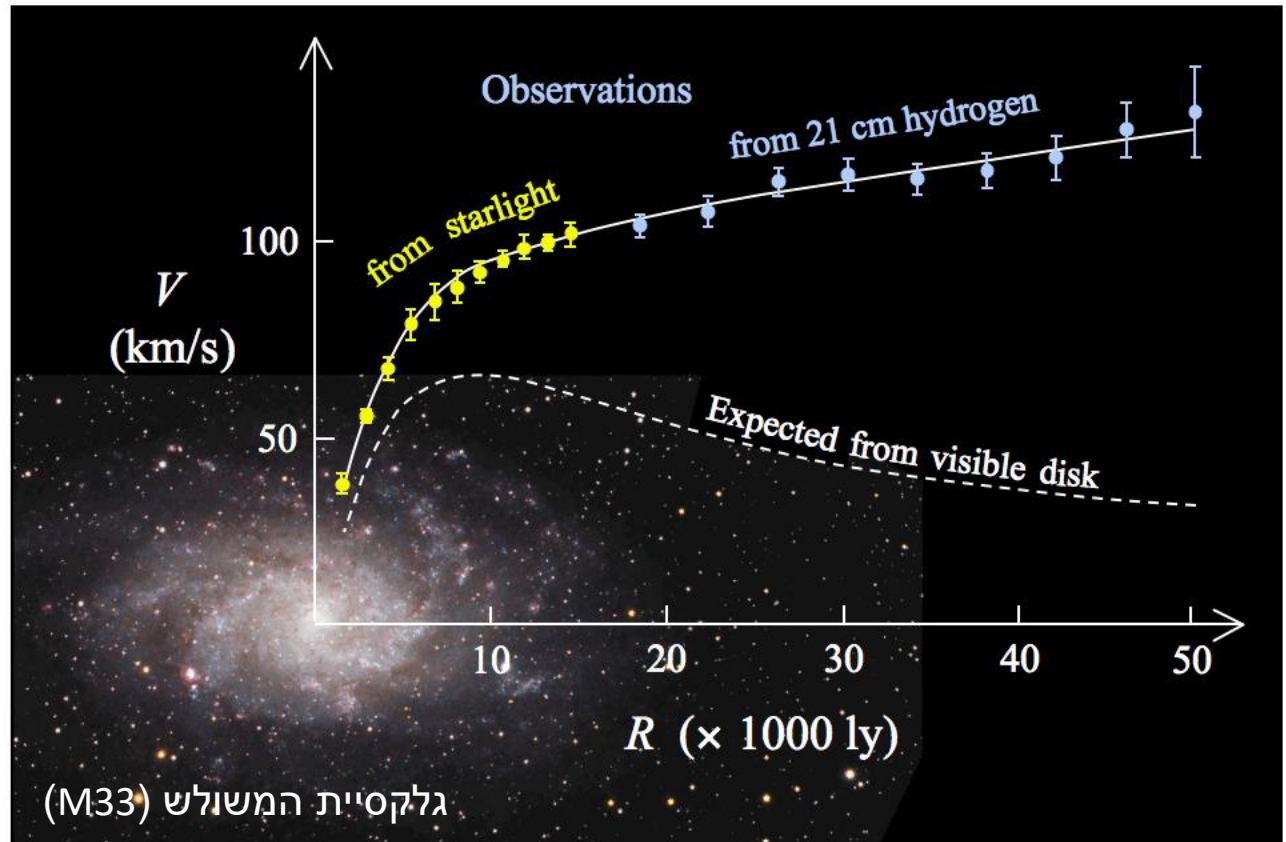
1.00115965218203(72)

תאוריה:

שאלות פתוחות

❖ "חומר אפל"

החלקיקים הידועים – רק כ-16% מהמסה שיש ביקום.
יש סוג נוסף של חומר, שלא רואים!



שאלות פתוחות

"חומר אפל" ❖

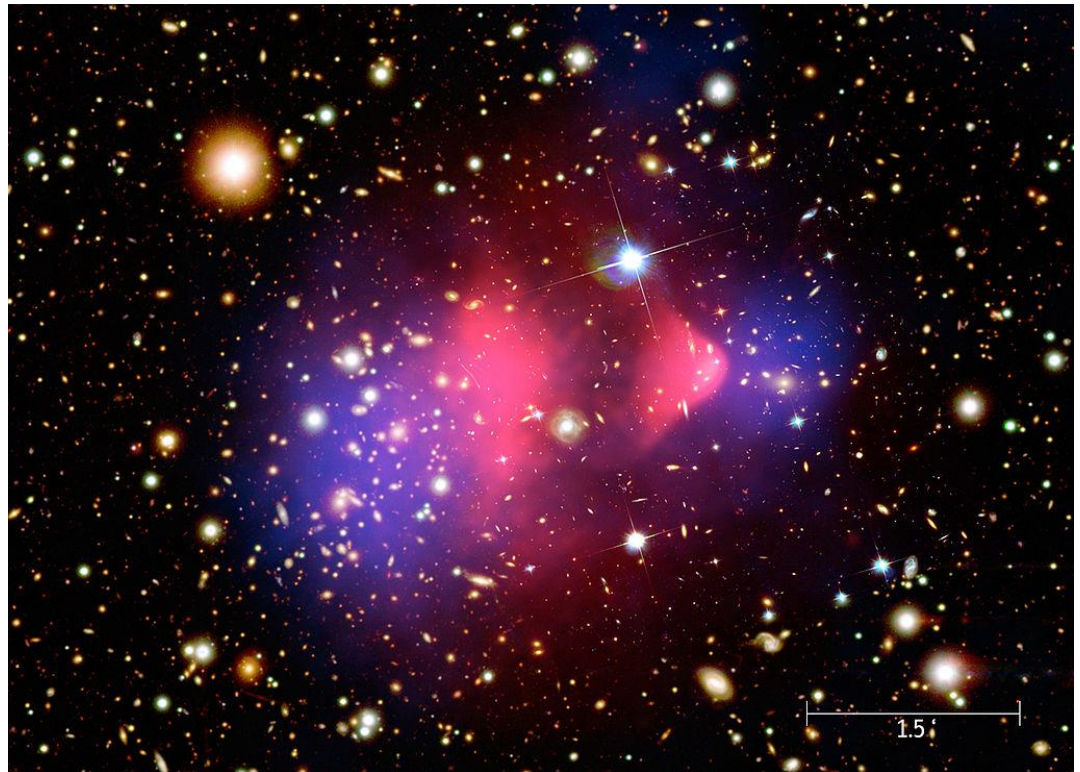
החלקיקים הידועים – רק כ-16% מהמסה שיש ביקום.
יש סוג נוסף של חומר, שלא רואים!

Bullet Cluster

נוצר מהתנגשות שני צבירי גלקסיות

כחול: התפלגות המסה, על סמך מדידות
עידוש כבידתי ע"י טלסקופ החלל Hubble

אדום: קרינת רנטגן הנפלטת ע"י גז, כפי
שנמדדה ע"י טלסקופ החלל Chandra



שאלות פתוחות

❖ "חומר אפל"

החלקיקים הידועים – רק כ-16% מהמסה שיש ביקום.
יש סוג נוסף של חומר, שלא רואים!

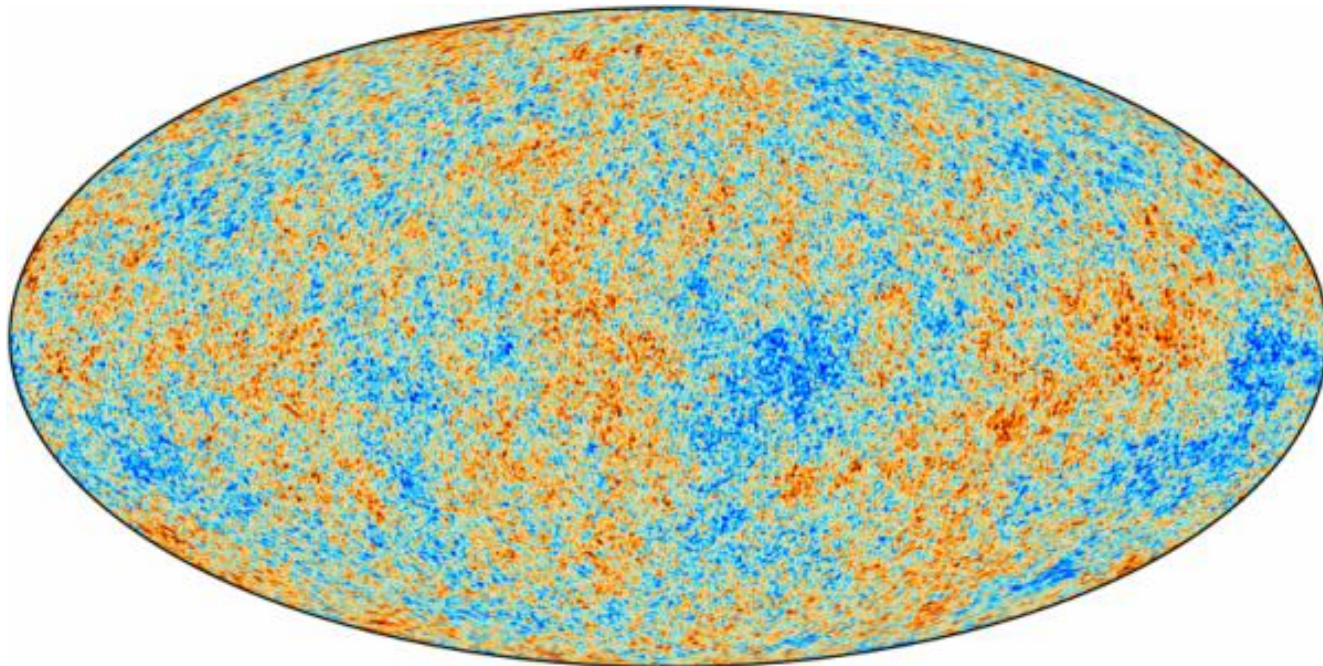
❖ כמות החומר ביקום (ולמה אין כמות דומה של אנטי-חומר)

חישוב תהליכי המפץ הגדול עם חלקיקי המודל הסטנדרטי נותן תשובה
לא נכונה. כנראה שיש סוגי חלקיקים נוספים שצריך לקחת בחשבון!

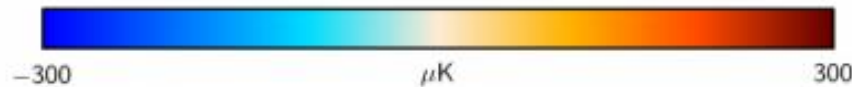
שאלות פתוחות

❖ הומוגניות של היקום

ניתן להסביר ע"י התפשטות מרחב חזקה בעבר – "אינפלציה קוסמית",
אבל זה דורש שדות לא ידועים.



מדידות מיקרוגל ע"י
טלסקופ החלל Planck



ביחס לממוצע, שהוא בערך $2700000 \mu\text{K}$

שאלות פתוחות

❖ פרטים של המודל הסטנדרטי

מה קובע את ערכי הפרמטרים (מסות, חוזק הכוחות וכו')?

שאלות פתוחות

❖ פרטים של המודל הסטנדרטי

מה קובע את ערכי הפרמטרים (מסות, חוזק הכוחות וכו')?

למשל, למה ה- τ^- כבד פי 3477 מה- e^- ?

למה ה- t כבד פי 80000 בערך מה- u ?

שאלות פתוחות

❖ פרטים של המודל הסטנדרטי

מה קובע את ערכי הפרמטרים (מסות, חוזק הכוחות וכו')?

למשל, למה ה- τ^- כבד פי 3477 מה- e^- ?

למה ה- t כבד פי 80000 בערך מה- u ?

ומאיפה לנו לדעת שלא קיימים חלקיקים / שדות נוספים?

שאלות פתוחות

❖ פרטים של המודל הסטנדרטי

מה קובע את ערכי הפרמטרים (מסות, חוזק הכוחות וכו')?

למשל, למה ה- τ^- כבד פי 3477 מה- e^- ?

למה ה- t כבד פי 80000 בערך מה- u ?

ומאיפה לנו לדעת שלא קיימים חלקיקים / שדות נוספים?

❖ אי-יציבות (לכאורה) של מסת בוזון היגס h בגלל אפקטים קוונטיים

שאלות פתוחות

❖ פרטים של המודל הסטנדרטי

מה קובע את ערכי הפרמטרים (מסות, חוזק הכוחות וכו')?

למשל, למה ה- τ^- כבד פי 3477 מה- e^- ?

למה ה- t כבד פי 80000 בערך מה- u ?

ומאיפה לנו לדעת שלא קיימים חלקיקים / שדות נוספים?

❖ אי-יציבות (לכאורה) של מסת בוזון היגס h בגלל אפקטים קוונטיים

ניתן להסביר ע"י סימטריה (למשל, "סופרסימטריה"), אבל זה דורש הרבה

חלקיקים ש(עדיין) לא ראינו.

שאלות פתוחות

❖ פרטים של המודל הסטנדרטי

מה קובע את ערכי הפרמטרים (מסות, חוזק הכוחות וכו')?

למשל, למה ה- τ^- כבד פי 3477 מה- e^- ?

למה ה- t כבד פי 80000 בערך מה- u ?

ומאיפה לנו לדעת שלא קיימים חלקיקים / שדות נוספים?

❖ אי-יציבות (לכאורה) של מסת בוזון היגס h בגלל אפקטים קוונטיים

ניתן להסביר ע"י סימטריה (למשל, "סופרסימטריה"), אבל זה דורש הרבה

חלקיקים ש(עדיין) לא ראינו.

❖ תאור כוח הכבידה G נשבר במרחקים קצרים (אורך פלנק, 10^{-35} m)

בגלל אפקטים קוונטיים

שאלות פתוחות

❖ פרטים של המודל הסטנדרטי

מה קובע את ערכי הפרמטרים (מסות, חוזק הכוחות וכו')?

למשל, למה ה- τ^- כבד פי 3477 מה- e^- ?

למה ה- t כבד פי 80000 בערך מה- u ?

ומאיפה לנו לדעת שלא קיימים חלקיקים / שדות נוספים?

❖ אי-יציבות (לכאורה) של מסת בוזון היגס h בגלל אפקטים קוונטיים

ניתן להסביר ע"י סימטריה (למשל, "סופרסימטריה"), אבל זה דורש הרבה

חלקיקים ש(עדיין) לא ראינו.

❖ תאור כוח הכבידה G נשבר במרחקים קצרים (אורך פלנק, 10^{-35} m)

בגלל אפקטים קוונטיים

תורת המיתרים מציעה פיתרון, אבל גם מנבאת הרבה חלקיקים נוספים.

סיכום

כל הניסויים שעשינו והתופעות שראינו עד עכשיו
על כדור הארץ תואמים את "המודל הסטנדרטי"

אבל הוא...

... לא פשוט מבחינה אסתטית,

... לא יכול להסביר פרטים לגבי ההרכב וההיסטוריה של היקום,

... נשבר במרחקים קצרים בגלל אפקטים קוונטיים של כבידה.

סיכום

כל הניסויים שעשינו והתופעות שראינו עד עכשיו
על כדור הארץ תואמים את "המודל הסטנדרטי"

אבל הוא...

... לא פשוט מבחינה אסתטית,

... לא יכול להסביר פרטים לגבי ההרכב וההיסטוריה של היקום,

... נשבר במרחקים קצרים בגלל אפקטים קוונטיים של כבידה.

לכן אין ספק ש...

... יש דברים מעבר למודל הסטנדרטי.

נמשיך לחפש ונקווה לתגליות חדשות בקרוב!