

חזית הפיסיקה היסודית

נתן זיברג

המכון למחקר מתקדם, פרינסטון

Institute for Advanced Study

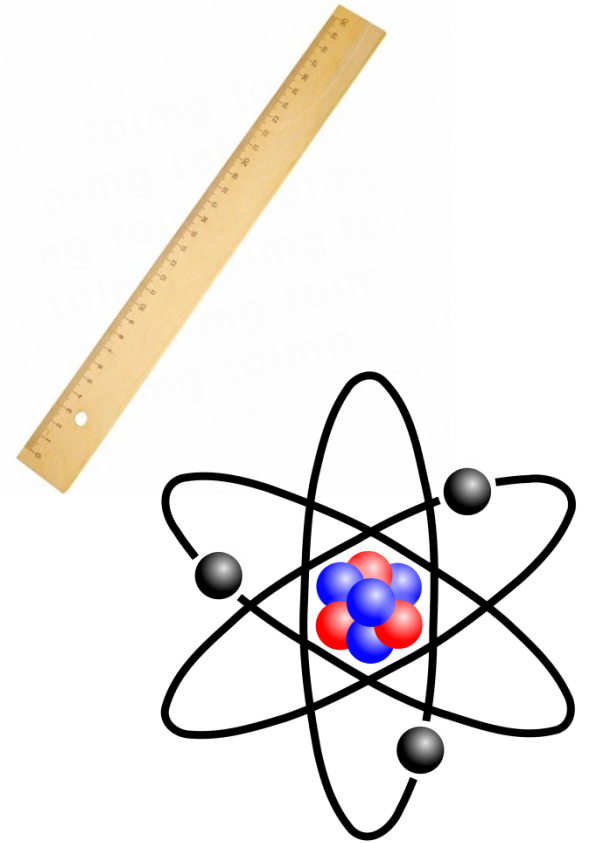


יוני 2017

פיסיקה

מטרת הפיסיקה היא להסביר תופעות
טבע בכל המרחקים

- במרחקים **קצרים** מאוד: מבנה החומר,
מולקולות, אטומים, חלקיקים יסודיים...
- במרחקים **גדולים** מאוד: כדור הארץ,
מערכת השמש, שביל החלב, גלקסיות
רחוקות, היקום כולו...



חקר הפיסיקה נמצא כעת במצב כמעט חסר תקדים

- שני "מודלים סטנדרטיים" מתארים את כל תופעות הטבע שנצפו במרחקים הקצרים ביותר והארוכים ביותר.
- הם עובדים בצורה מדויקת ביותר בכל תחום המרחקים (כמעט ללא סתירה).

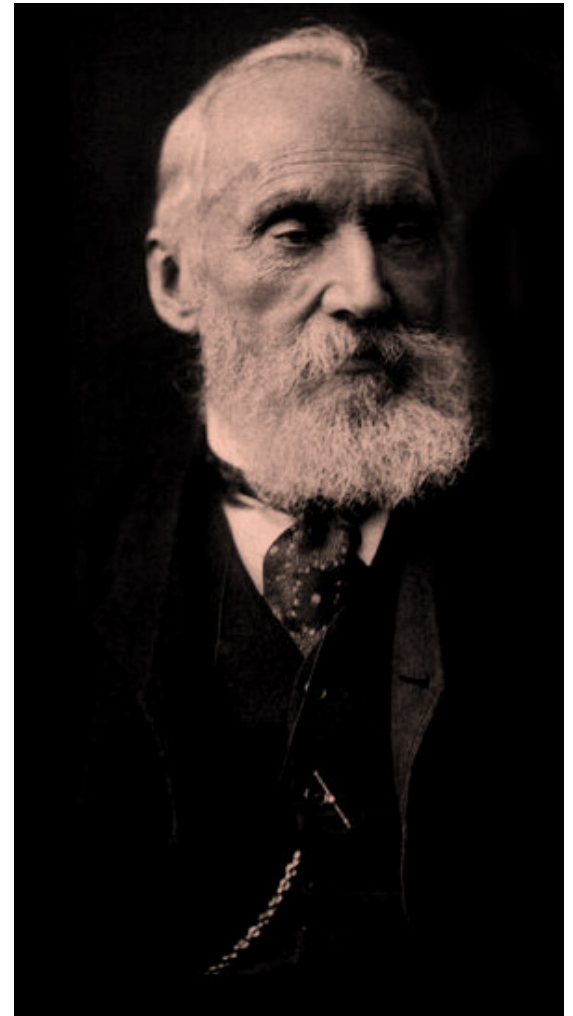
אבל

- קיימים טיעונים מצוינים שהמודלים האלו אינם מושלמים. חייבים להיות חוקי פיסיקה חדשים מעבר למודלים אלו.
- בקרוב ניסויים חדשים יוכלו לספק רמזים להמשך המחקר.

מצב דומה

בשנת 1900 נתן הפיסיקאי הבריטי
לורד קלוין (Kelvin) הרצאה "עננים
מהמאה התשע-עשרה שמרחפים
על התורה הדינמית של חום ואור"

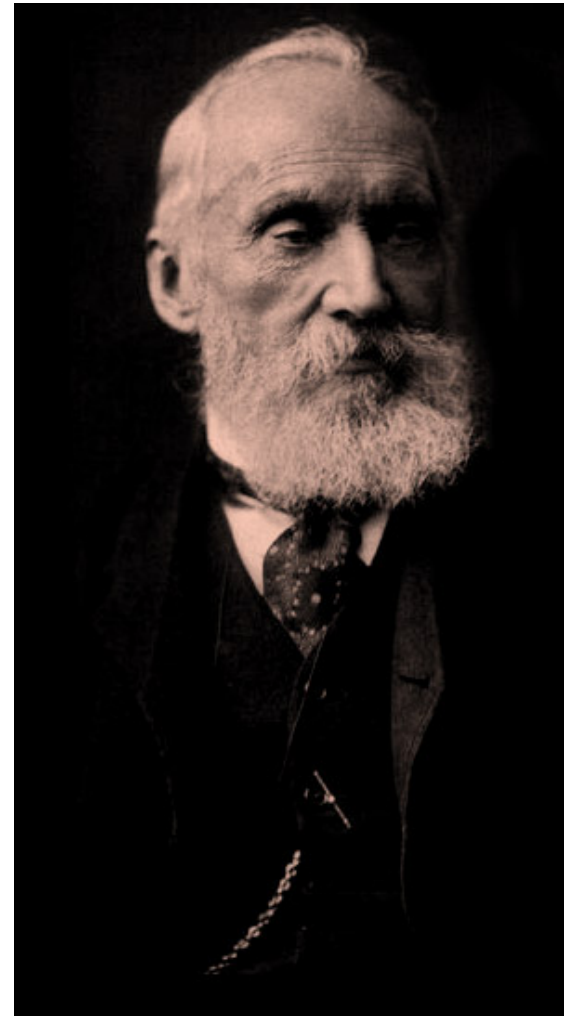
- ניסוי מיכלסון (Michelson)
ומורלי (Morley) שהוביל לתורת
היחסות
- קרינת גוף שחור (אחד המקורות
לתורת הקוואנטים)



מצב דומה

היו שפרשו את ההרצאה של קלוין
כאומרת שהפיסיקה כמעט נגמרה.
בעצם קלוין הבין את חשיבות
"העננים".

מטרת ההרצאה היום היא לסכם את
מצב הפיסיקה היסודית כעת
ולהדגיש את העננים שמרחפים
מעליה.



לעיתים קרובות מחקר מתקדם בשלבים

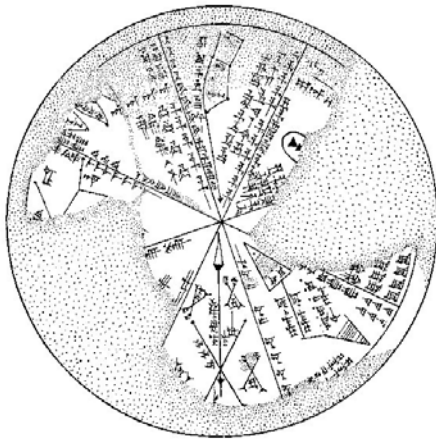
- איסוף מידע
- זיהוי חוקיות במידע (בנתונים) – הבנת מידע רב באמצעות חוקים (נוסחאות) ומספר קטן של מספרים – קבועים (פרמטרים)
- מדוע? הבנת הסיבה לחוקיות
- חקירת הפרמטרים שנשארו
- איסוף עוד מידע וגילוי פרמטרים נוספים



דוגמאות היסטוריות

1. תנועת כוכבי הלכת

• איסוף מידע



מפת הכוכבים
האשורית מנינה



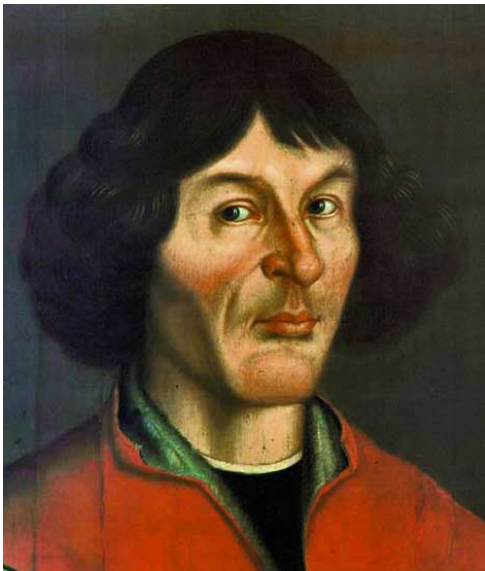
תלמי
(Ptolemaeus)



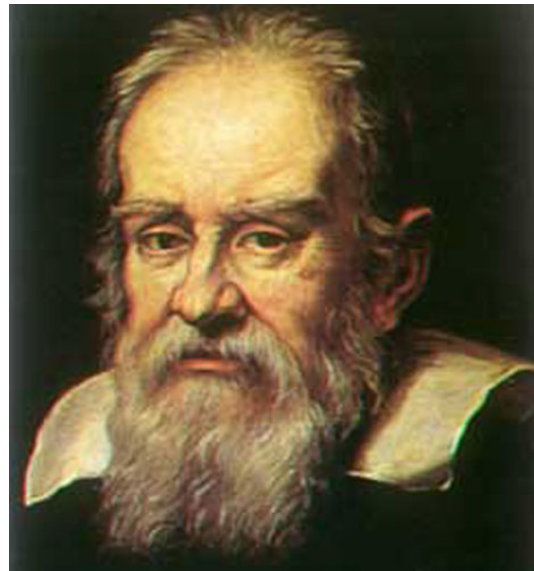
היפרכוס
(Hipparchos)

תנועת כוכבי הלכת

- זיהוי חוקיות במידע (בנתונים): המודל ההליוצנטרי – השמש במרכז, כוכבי הלכת נעים באליפסות – הפרמטרים הם הרדיוסים של המסלולים (האליפסות)



קופרניקוס
Nicolaus Copernicus



גלילאו
Galileo Galilei



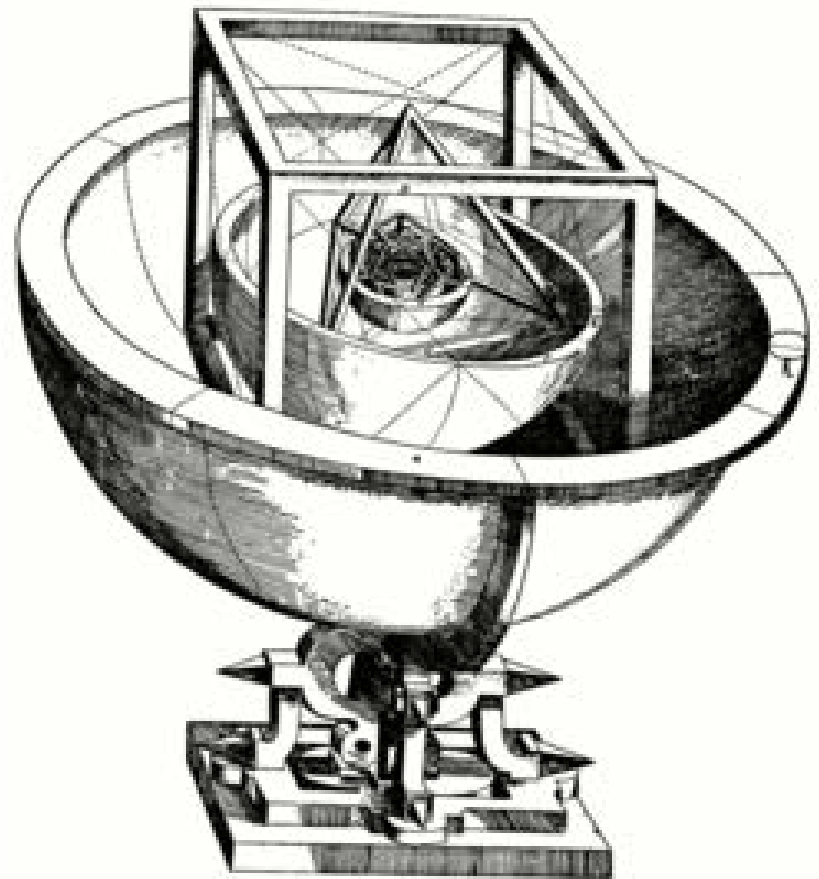
קפלר
Johannes Kepler

תנועת כוכבי הלכת

חיפוש חוקיות בפרמטרים

קפלר חשב על תיאור מתמטי
יפה של גודל המסלולים של כוכבי
הלכת שמבוסס על חמשת
הגופים המשוכללים של אפלטון.

הסתבר שלא רק שהרעיון אינו
נכון, הוא גם עונה על שאלה
שאינה נכונה.



תנועת כוכבי הלכת

- העיקרון הבסיסי: מכניקה קלאסית (ניוטון...)



תנועת כוכבי הלכת האם הפרמטרים שנשארו (הרדיוסים) יציבים?

- האם הקבועים האלו אכן קבועים?
- ניוטון חשש שמערכת השמש אינה יציבה.
- ההסטוריון מייקל הוסקין אמר על השקפתו של ניוטון:
אלוהים מדגים את דאגתו התמידית לעולמו בעזרת מה
שאפשר לתאר כחוזה שרות (אחריות לכל החיים)
למערכת השמש.

דוגמאות היסטוריות

2. כימיה

- איסוף מידע (הרבה אנשים כולל האלכימאים)



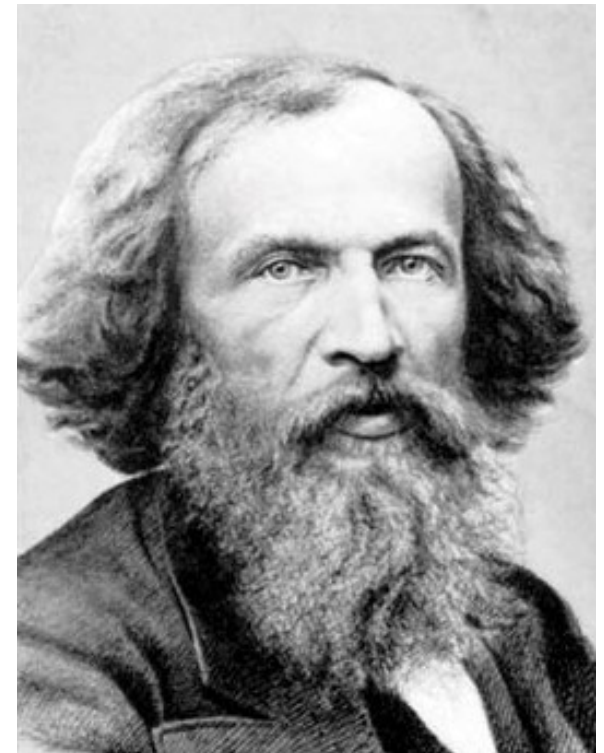
כימיה

- החוקיות – הטבלה המחזורית של מנדלייב (Dmitri Mendeleev)

I	II											III	IV	V	VI	VII	VIII
1	2											13	14	15	16	17	18
1 H 1.008																	2 He 4.003
3 Li 6.941	4 Be 9.012											5 B 10.811	6 C 12.011	7 N 14.007	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne 20.180
11 Na 22.990	12 Mg 24.305											13 Al 26.982	14 Si 28.086	15 P 30.974	16 S 32.066	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948
19 K 39.098	20 Ca 40.078	21 Sc 44.956	22 Ti 47.88	23 V 50.942	24 Cr 51.996	25 Mn 54.938	26 Fe 55.847	27 Co 58.933	28 Ni 58.69	29 Cu 63.546	30 Zn 65.39	31 Ga 69.723	32 Ge 72.61	33 As 74.922	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.80
37 Rb 85.468	38 Sr 87.62	39 Y 88.906	40 Zr 91.224	41 Nb 92.906	42 Mo 95.94	43 Tc (98)	44 Ru 101.07	45 Rh 102.906	46 Pd 106.42	47 Ag 107.868	48 Cd 112.411	49 In 114.82	50 Sn 118.710	51 Sb 121.757	52 Te 127.60	53 I 126.905	54 Xe 131.29
55 Cs 132.905	56 Ba 137.327	57 La 174.967	58 Ce 175.49	59 Pr 180.948	60 Nd 183.85	61 Pm 186.207	62 Sm 190.2	63 Eu 192.22	64 Gd 195.08	65 Tb 196.967	66 Dy 200.59	67 Ho 204.383	68 Er 207.2	69 Tm 208.980	70 Yb (209)	71 Lu (210)	72 Hf (222)
87 Fr (223)	88 Ra 226.025	89 Ac (260)	90 Th (261)	91 Pa (262)	92 U (263)	93 Np (264)	94 Pu (265)	95 Am (266)	96 Cm (268)	97 Bk (269)	98 Cf (272)						

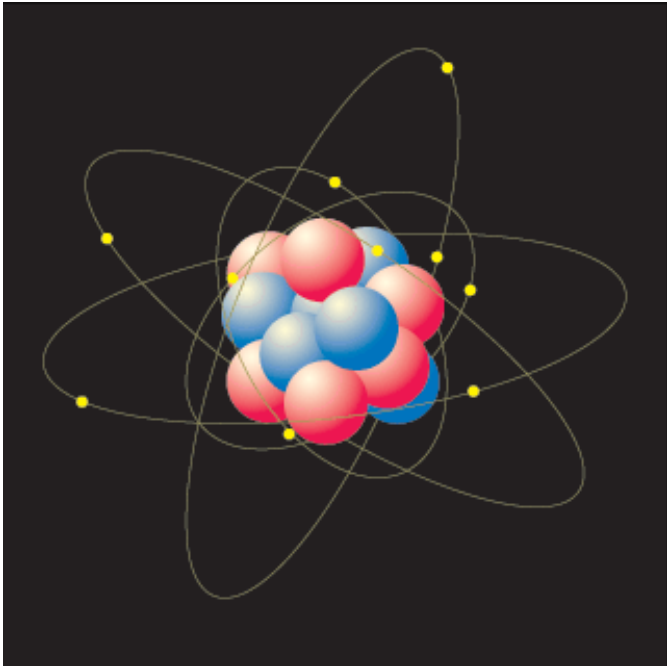
Periodic Table of the Elements

57 La 138.906	58 Ce 140.115	59 Pr 140.908	60 Nd 144.24	61 Pm (145)	62 Sm 150.36	63 Eu 151.965	64 Gd 157.25	65 Tb 158.925	66 Dy 162.50	67 Ho 164.93	68 Er 167.26	69 Tm 168.934	70 Yb 173.04
89 Ac 227.028	90 Th 232.038	91 Pa 231.036	92 U 238.029	93 Np 237.048	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)

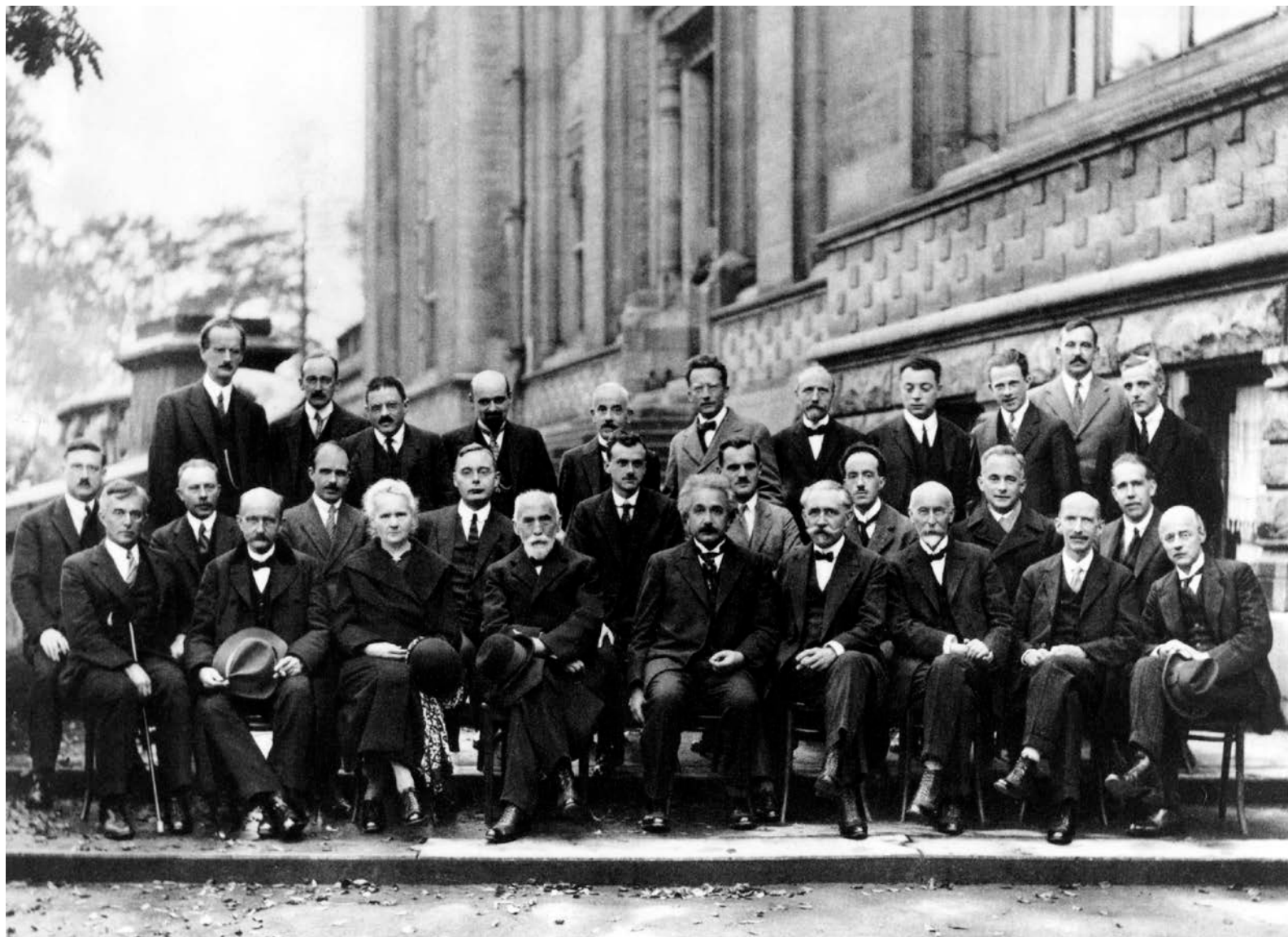


כימיה

העקרונות החדשים – מבנה האטום, תורת הקוואנטים



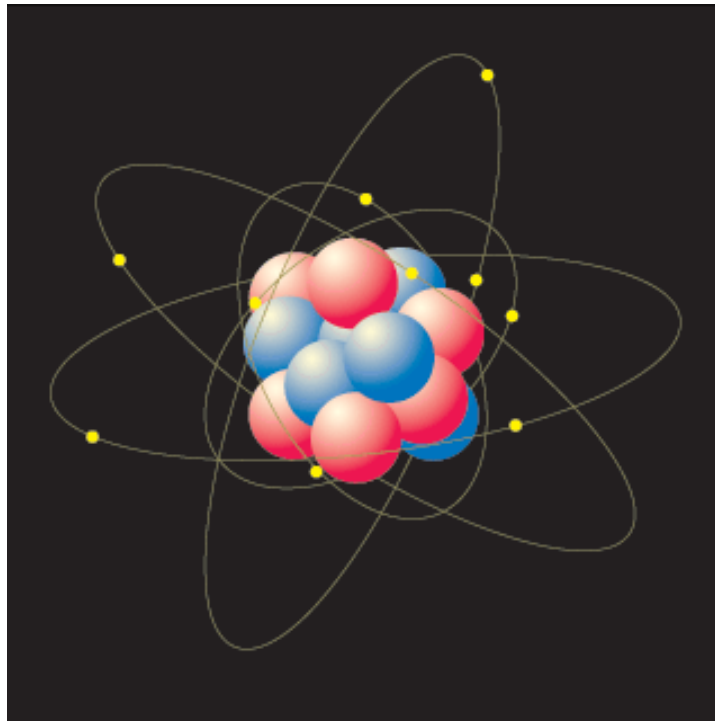
כינוס סולביי (Solvay) הראשון (1911)



כינוס סולביי (1927)

כימיה

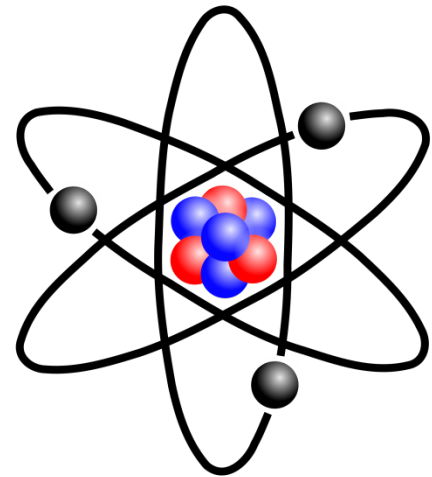
- הפרמטרים שעדיין לא הוסברו: מסת האלקטרון, מסות גרעיני האטומים, ...



שני מודלים סטנדרטיים

במהלך העשורים האחרונים מדענים פיתחו שני "מודלים סטנדרטיים"

- **בתורת החלקיקים:** מודל כמעט מושלם שמתאר את כל הפיזיקה במרחקים גדולים מבערך 10^{-19} מטר (עשירית ממילארדית המליארדית של המטר)
- **בקוסמולוגיה (תורת היקום):** מודל כמעט מושלם שמתאר את כל הפיזיקה עד מרחקים של בערך 10^{26} מטר – כל היקום הנראה. הוא מתאר גם את תחילת היקום.



המודל הסטדרטי של פיסיקת החלקיקים

מתאר את החלקיקים היסודיים ואת הכוחות הפועלים ביניהם.

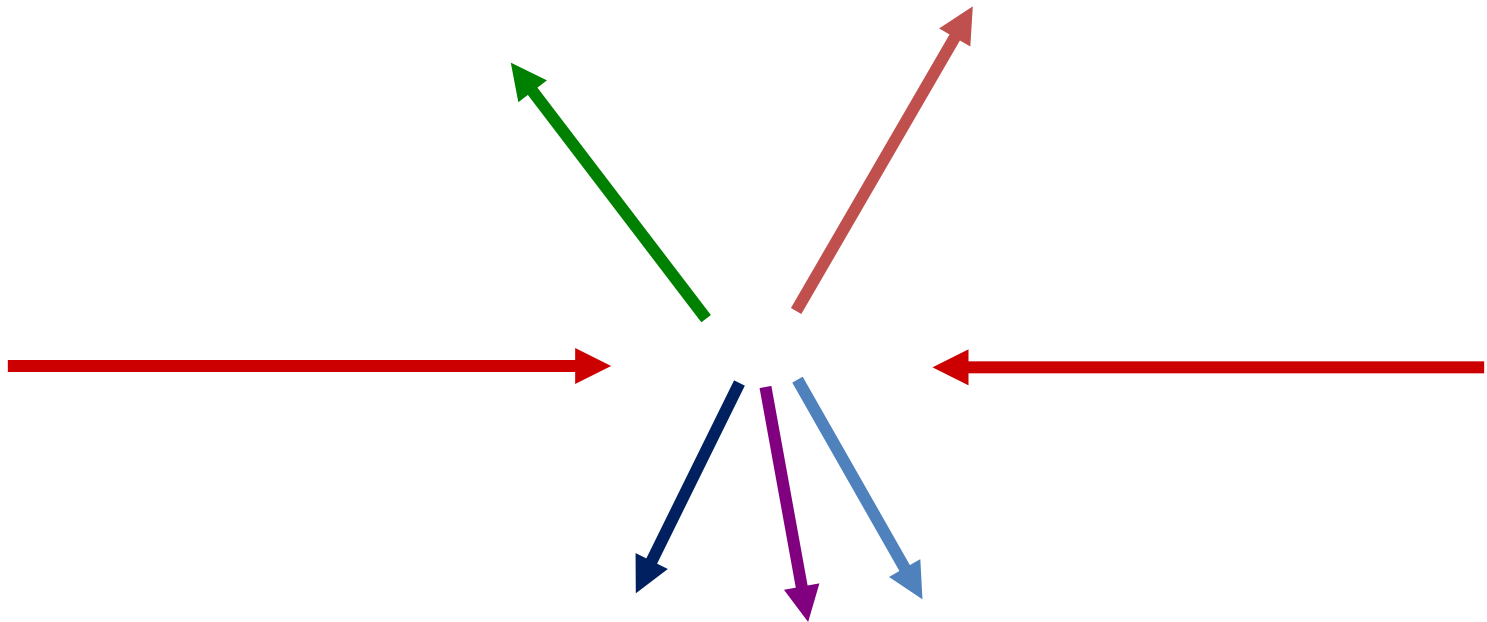
כל הפיסיקה הגרעינית, הפיסיקה האטומית, הכימיה ואפילו הביולוגיה נובעים מהמודל הזה.

לפחות באופן עקרוני כל המדעים האלו נובעים מפיסיקת החלקיקים.

אנחנו מבינים את חוקי הפיסיקה ומתארים אותם באמצעות משוואות. אבל ברוב המיקרים המשואות כל כך מסובכות שאי אפשר לפתור אותן.

מקור המידע

בעיקר ממאיצי חלקיקים
פרוטונים או אלקטרונים מתנגשים זה בזה ואנחנו בוחנים
את תוצרי ההתנגשות.



מקור המידע

במאיץ החלקיקים הזה פרוטונים נעים במנהרה. היא נמצאת כ-100 מטר מתחת לפני האדמה והיקפה הוא כ-27 ק"מ.



LHC at CERN near Geneva

המודל הסטדרטי של פיסיקת החלקיקים

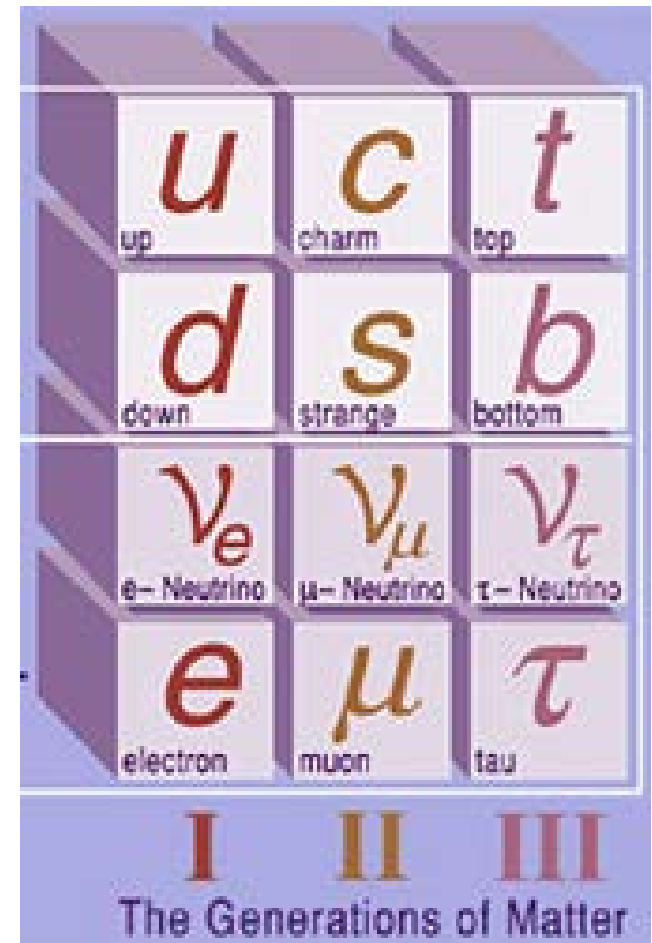
- **עקרונות:** תורת הקוואנטים ותורת היחסות הפרטית של איינשטיין
- **חלקיקי החומר:** אלקטרונים, קווארקים...
- **כוחות:** כוח אלקטרומגנטי (חשמל ומגנטיות), כח גרעיני חלש, כח גרעיני חזק
- **פרמטרים:** מסות החלקיקים, עוצמת הכוחות...

חלקיקי החומר

הפרוטונים והנאטרונים מורכבים
מקווארקים.

יש מספר סוגי קווארקים.
האלקטרון חבר במשפחת חלקיקים
דומים לו אך כבדים יותר.

ברור שצריך להסביר את החוקיות
הזו



u up	c charm	t top
d down	s strange	b bottom
ν_e e- Neutrino	ν_μ μ - Neutrino	ν_τ τ - Neutrino
e electron	μ muon	τ tau
I	II	III
The Generations of Matter		

"הטבלה המחזורית"
של חלקיקי החומר

חלקיק היגס

- חלקיק זה נותן מסה לכל חלקיקי החומר ולחלקיקים של הכח הגרעיני החלש.
- הוא התגלה בשנת 2012 במאיץ שליד ז'נבה
- זהו החלקיק האחרון שהתגלה במודל הסטנדרטי



היגס (Higgs)
ואנגלר (Englert)

המודל הסטנדרטי מאוד מוצלח

- מספר קטן של פרמטרים (כמו מסות החלקיקים) מסביר מספר עצום של תוצאות ניסויות.
- המודל אינו סותר אף תוצאה ניסוית!
- הצלחה ללא תקדים
 - כמה גדלים ניתנים גם לחישוב וגם למדידה בדיוק פנטסטי של 10 ספרות משמעותיות!

בעיות שהמודל אינו פותר

- המודל מציג חוקיות. מה מסתתר מאחוריה?
- מה מקור החלקיקים, מה הסיבה ל"טבלה המחזורית"?
- מה מקור הכוחות היסודיים? מה קובע את עוצמתם?
- מה קובע את הפרמטרים השונים כמו מסות החלקיקים?
- המודל אינו מושלם (יותר טכני).
- מסת חלקיק היגס אינה יציבה
- נאוטרינו-ים יש מסה
- יש להוסיף את כח הכבידה

בקרוב יהיה מידע נוסף

- הגדלה באנרגיית המאיץ ובמספר ההתנגשויות
- מידע מפורט יותר עם רמת איבחון גבוהה יותר
- אפשר לקוות לתוצאות חדשות



המודל הסטנדרטי של הקוסמולוגיה



הוא מתאר את היקום כולו ואת התפתחותו.

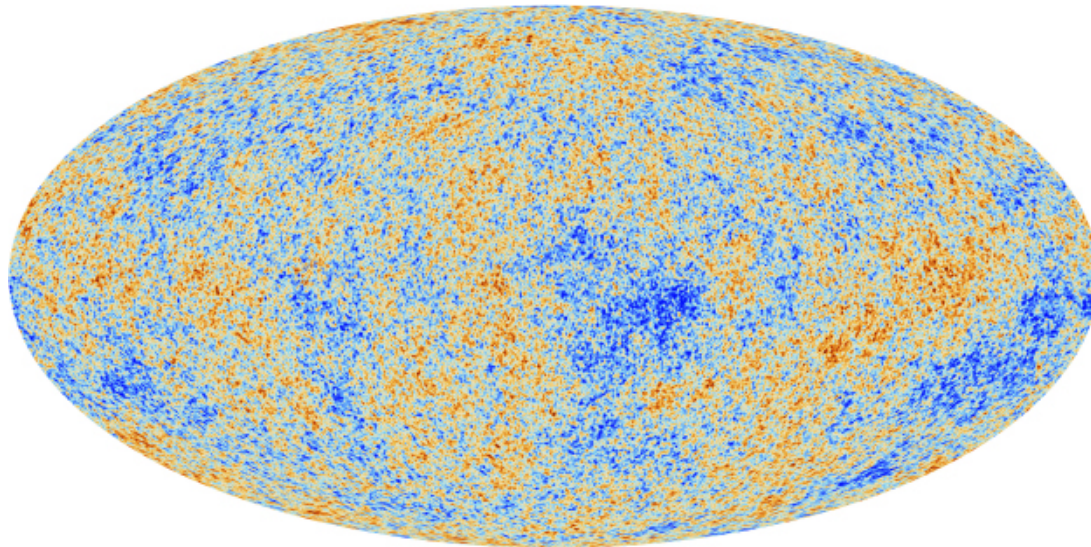
- המפץ הגדול
- התפתחות היקום מאז שהיה בן חלקיק שניה
- מקור החומר ביקום
- היווצרות גלקסיות, כוכבים וכו'

מקורות המידע

שני מקורות עיקריים

1. מדידת קרינת מיקרוגל שנפלטה ביקום הקדום – זוהר המפץ הגדול

Cosmic Background Explorer (COBE), ... ,
Planck space telescope



מקורות המידע

2. תצפיות בסופרנובות רחוקות



Riess



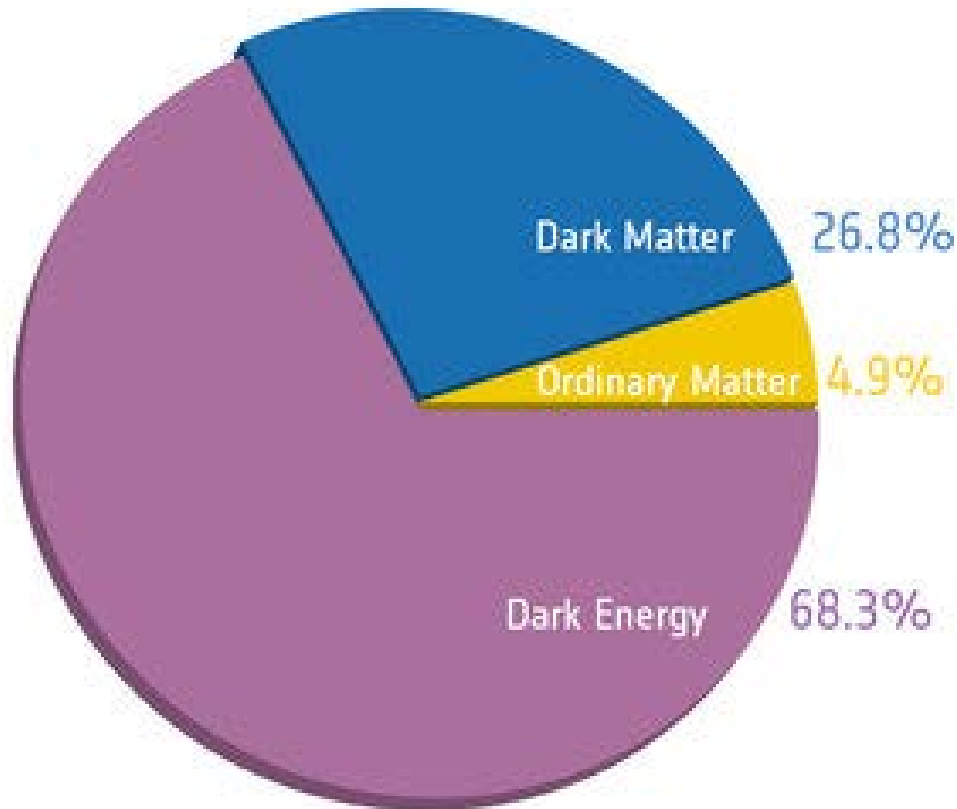
Perlmutter



Schmidt

המודל הסטנדרטי של קוסמולוגיה

- העקרונות: תורת היחסות הכללית (כבידה), המפץ הגדול
- התפלגות החומר והאנרגיה ביקום

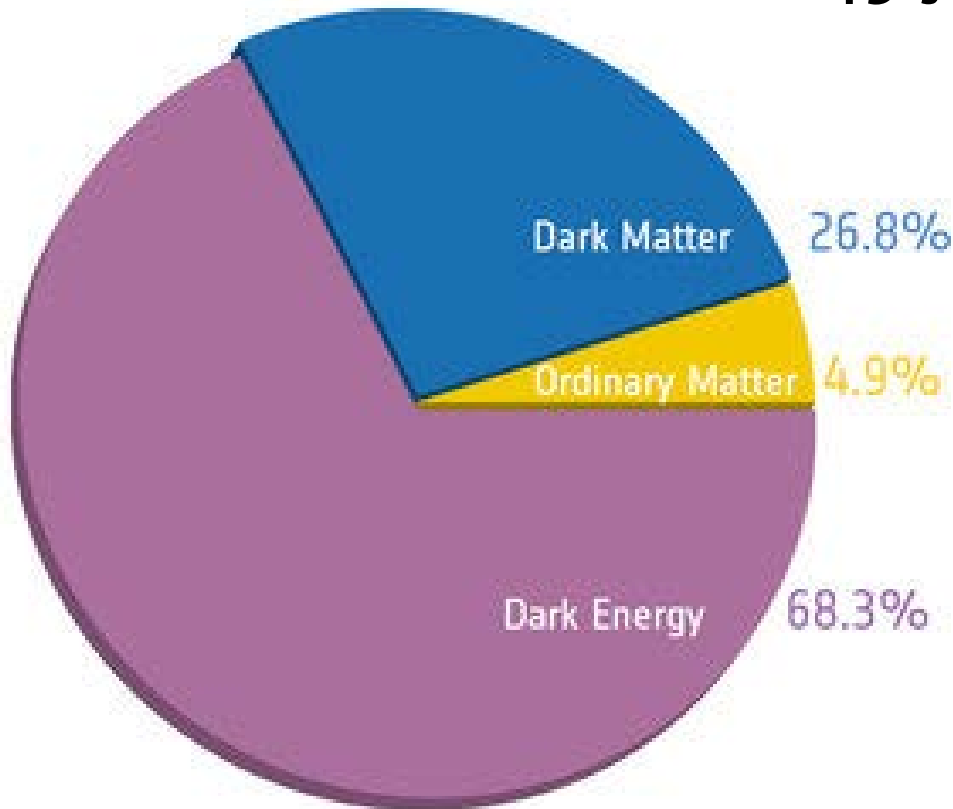


- חומר רגיל
- חומר אפל
- אנרגיה אפלה

המודל הסטנדרטי של קוסמולוגיה

עקרונות אלו ומספר קטן של
פרמטרים שנמדדו במדויק
מתארים באופן מושלם את כל
המדידות.

אין סתירה בין החישובים
והמדידות.



בעיות פתוחות

נותר להבין:

- מהו החומר האפל?
- מהי האנרגיה האפלה?
- מקור הפרמטרים (הסבר החוקיות)
- מקור היקום וגורלו בעתיד

אינפלציה קוסמית :

- תקופה קדומה של התפשטות מהירה מאוד של היקום
- הנחה זו מסבירה הרבה מהחוקיות
- נתמכת על ידי התצפיות
- אבל משאירה הרבה חידות

עוד מידע בקרוב

החזית: מדידת הקיטוב של הקרינה מהמפץ הגדול



עוד מידע בקרוב

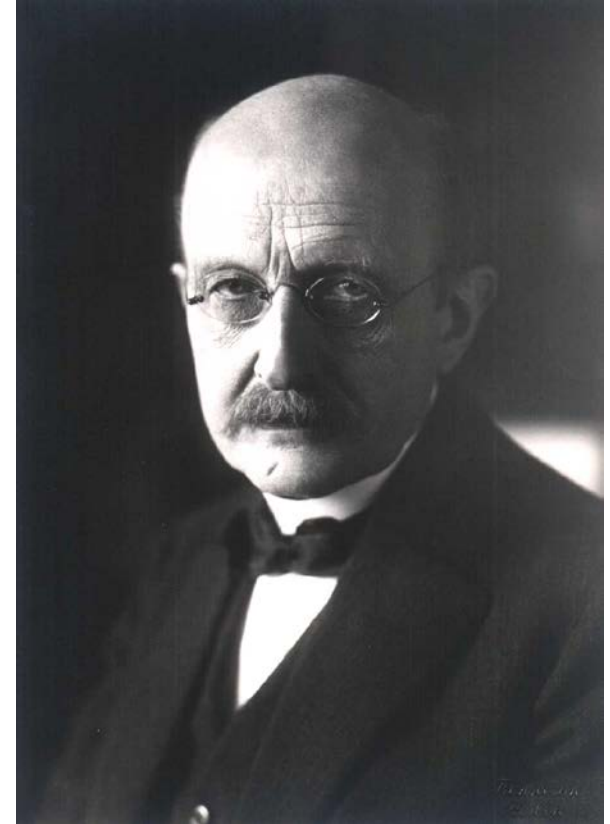
קרינת כבידה נותנת לנו מבט חדש על היקום – לא בעזרת קרינה אלקטרומגנטית (למשל אור)



The LIGO detectors

השאלה העמוקה ביותר

- יש לאחד את שני המודלים הסטנדרטיים
- אחד תורת הקואנטים ותורת היחסות הכללית (כבידה)
- כבידה קואנטית נהיית חשובה בסקאלת פלנק – הסקאלה היסודית של הטבע
 - 10^{-35} מטר
 - 10^{-43} שניות
- האיחוד הזה גם יסביר את מבנה היקום כשהיה בגיל 10^{-43} שניות – בריאת העולם



הרעיון המוביל: תורת המיתרים

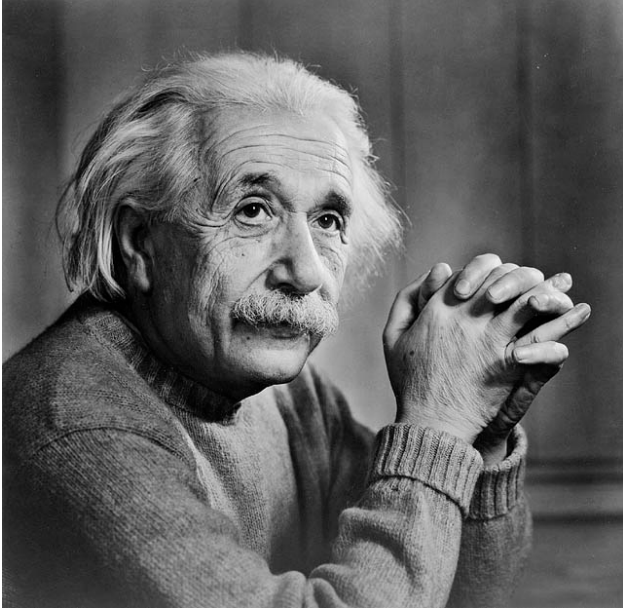
התקדמות עצומה ומרתקת עם תובנות מדהימות במהלך העשורים האחרונים.

פיסיקה עמוקה עם השפעה מרחיקת לכת על מתמטיקה וענפים אחרים של הפיסיקה.

אתגרים:

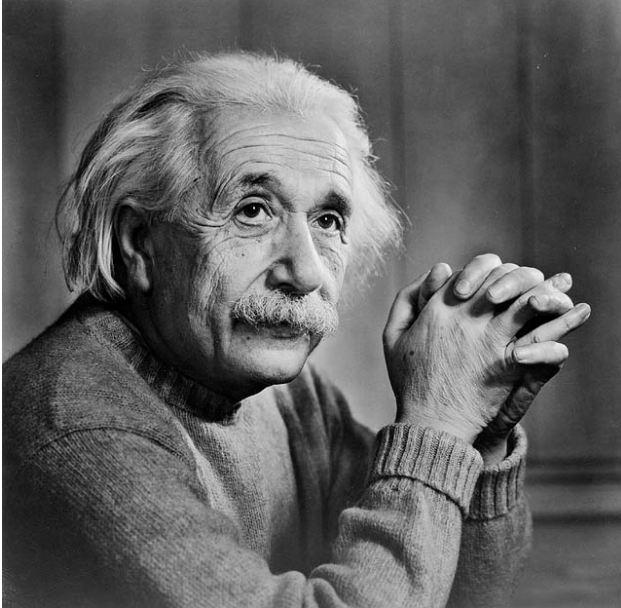
- אין מבינים את העקרונות היסודיים של התורה
- יש צורך באישור נסויי
- אפשר שיקח זמן רב להשיג את המטרות האלו

חלומו של איינשטיין



“...there are no arbitrary constants ... nature is so constituted that it is possible logically to lay down such strongly determined laws that within these laws only rationally determined constants occur (not constants, therefore, whose numerical value could be changed without destroying the theory).”

חלומו של איינשטיין



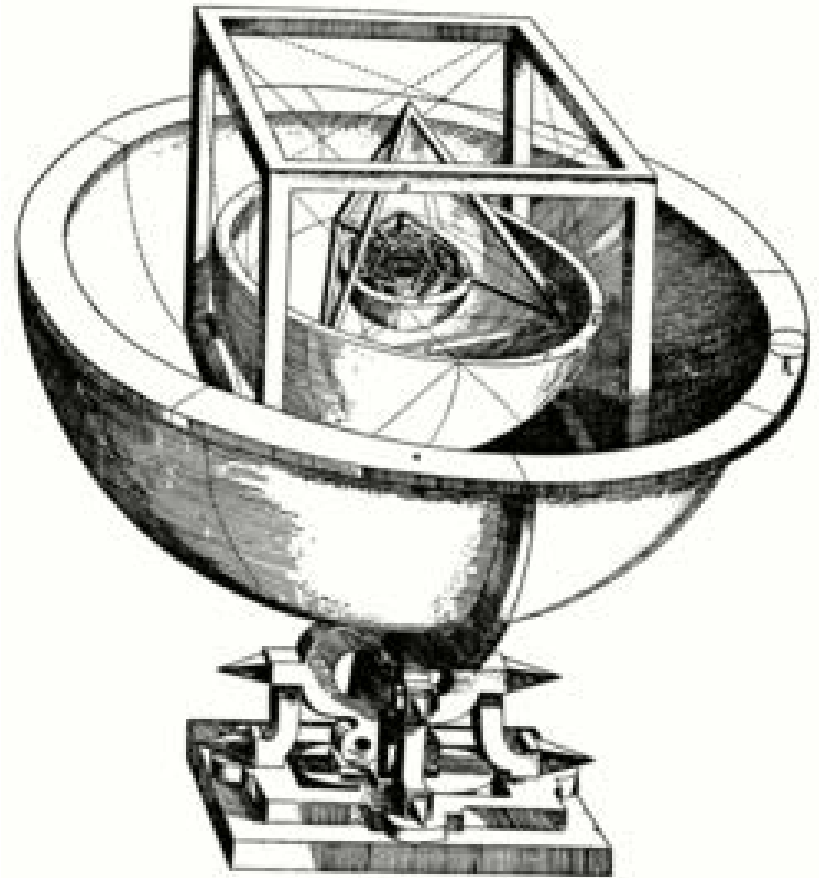
"... אין קבועים שרירותיים... הטבע הוא כזה שאפשר לנסח באופן הגיוני חוקי טבע, שבמסגרתם כל הקבועים יקבעו (לכן לא יהיו קבועים שערכם המספרי יכול להשתנות מבלי להרוס את התאוריה)".

אין מקום לפרמטרים שאינם מוסברים.

תזכורת – לקח מההיסטוריה

קפלר חשב על תיאור מתמטי
יפה של גודל המסלולים של כוכבי
הלכת שמבוסס על חמשת
הגופים המשוכללים של אפלטון.

הסתבר שלא רק שהרעיון אינו
נכון, הוא גם עונה על שאלה
שאינה נכונה.



אפשרות לשינוי פרדיגמה רב-יקום

- היקום הרבה יותר גדול משאנו חושבים – הרבה יקומים
- חוקי הפיסיקה שונים ביקומים השונים
 - מסה שונה לאלקטרון, עוצמה שונה לכוח החשמלי וכו'
 - החלקיקים היסודיים שונים שם
 - מספר מימדי המרחב שונה שם
- כמה מהפרמטרים שאנו רוצים להסביר אינם יסודיים.
ערכם שונה במקומות אחרים.

סיכום

- אנו מכירים שני מודלים סטנדרטיים מוצלחים ביותר
 - תורת החלקיקים – מרחקים קצרים
 - קוסמולוגיה – היקום כולו
- ברור שקיימות תופעות שהמודלים האלו אינם מתארים
- אתגר אחד הוא לאחד אותם – כבידה קוואנטית
- בעיה קלה יותר: יש להסביר את החוקיות ואת הפרמטרים השונים של המודלים האלו.
- ניסויים חדשים בעתיד הקרוב יספקו רמזים שיעזרו להתקדם בהבנת הטבע.

ברור שעתיד הפיסיקה היסודית
יהיה מרתק

תודה על תשומת הלב!