Mi az, amit értünk az elemi részecskék világában, és mi az, amit nem?

Nógrádi Dániel

ELTE

2019 július 9 – Bolyai Kollégium

Kezdjük az alapoknál (de azért ne az ókori görögöknél :))

Modern természettudomány céljai:

- Múltbeli kísérletek értelmezése
- Jövőbeli kísérletek előrejelzése (jóslása)

Nem egyszerű feladatok!

Néhány alapfeltételezéssel élni kell, különben esélytelen:

- Van valami, amit megfigyelünk (a természet)
- Ez a valami megérthető
- Ezt a valamit törvények irányítják
- Törvények időben állandók (ha felfedezünk egy új törvényt ma, az működött tegnap is)
- Törvények térben állandók (itt ugyanazok a törvények érvényesek, mint messzi galaxisokban)

Honnan tudjuk, hogy ezek fennállnak?

Nem tudjuk!

Szóval tényleg csak feltételezések ezek?

Igen! Elképzelhető lenne olyan világ, ahol ezek nem igazak.

De úgy tűnik a mi világunkban ezek fennállnak, azaz elég sok evidenciánk van, az ellenkezőjéről viszont semmi.

Ez utóbbi a lényeg: észrevennénk, ha nem állnának fenn.

Nyilván kell:

Kísérlet

Elmélet

Mert: múltbeli kísérletek értelmezése, jövőbeniek jóslása

Hogyan csináljuk mindezt?

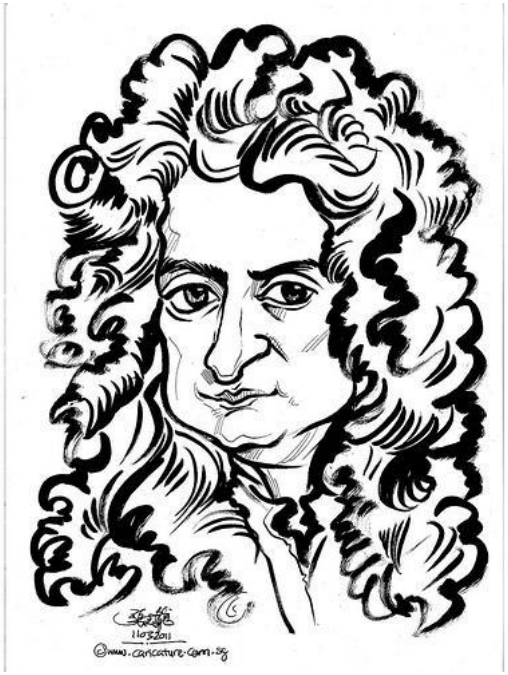
Nem triviális kérdés!

Megint, empirikus alapon: redukció vagy analízis – szintézis, elég jól működik

Redukció vagy analízis – szintézis

Newton: „As in mathematics, so in natural philosophy, the investigation of difficult things by the method of analysis ought ever to precede the method of composition. By this way we may proceed from compounds to ingredients, and from motions to the forces producing them; and in general, from effects to their causes. And the synthesis consists in assuming the causes discovered and by them explaining the phenomena proceeding from them."

→ modern tudomány, ∼ 17. századtól



Miért működik redukció vagy analízis – szintézis?

Még inkább nem triviális kérdés.

Leginkább lokalitás miatt.

Úgy tűnik a világunk lokális: egy esemény vizsgálatához figyelmen kívül hagyhatjuk az univerzum nagyrészét!

- A laborunkat izolálni tudjuk egyre jobban a környezetétől
- Van értelme arról beszélni, hogy csak egy tulajdonságot vizsgálunk
- Mérési eredményeink függetlenek attól, hogy mi történik messze

Más, mint: törvények térben állandók.

Kötelező, hogy a világunk lokális legyen?

Nem! Elképzelhető lenne, hogy nem ilyen.

Úgy tűnik, hogy a világunk lokális, rengeteg az evidencia, nincs semmi evidencia az ellenkezőjére

Praktikus hozzáállás: tegyük fel, hogy ilyen

Nagyon erős és nem-triviális tulajdonság

Tehát pl. ilyesminek lesz értelme:

- szék/asztal/stb $\longrightarrow$
- molekulák $\longrightarrow$
- atomok $\longrightarrow$
- proton/neutron (elektron) $\longrightarrow$
- kvark/gluon

(plusz más elemi részecskék)

Ezek szerint jó módszer:

A minket körülvevő világot bontsuk le a legalapvetőbb építőköveire és azok kölcsönhatásaira

Még egyszer: elképzelhető lenne olyan világ, ahol ez nem túl jól működik (pl. komplikált rendszer kis része ugyanolyan komplikált). A mi világunkban úgy tűnik igen.

Ez önmagában is egy nagyon erős és meghökkentő tulajdonság.

Limitációk

Alapvető alkotórészekről az ezekből felépülő összetett dolgokra áttérni lehet, hogy (nagyon) bonyolult

Pl: 1-2-3 atom leírása lehet, hogy egyszerű, de 10^8 atom leírása már nem annyira

Elemi részecskék alapvető tulajdonságaiból kitalálni pl. homokdomb összes tulajdonságát nehéz

Egy (nagyon) rövid történeti áttekintés

Modern tudomány $\sim$ 17. századtól

- Galilei, 1564 - 1642
- Kepler, 1571 - 1630
- Newton, 1642 - 1727
- etc.

Klasszikus fizika, földi testek mozgása, bolygók mozgása, stb.

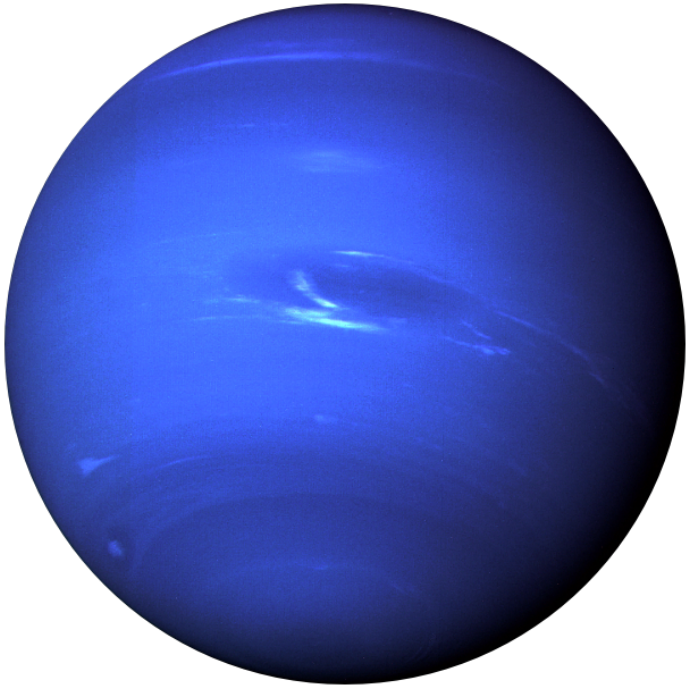
17. és 18. századi fizika manapság unalmasnak tűnik

Pedig nagyon nem triviális eredmények!

Pl. gravitáció itt ugyanaz, mint messzi bolygók közelében

18. és 19. századra a modern tudomány módszerei jól fejlettek és robusztusak

Egy jó példa erre: Neptunusz felfedezése



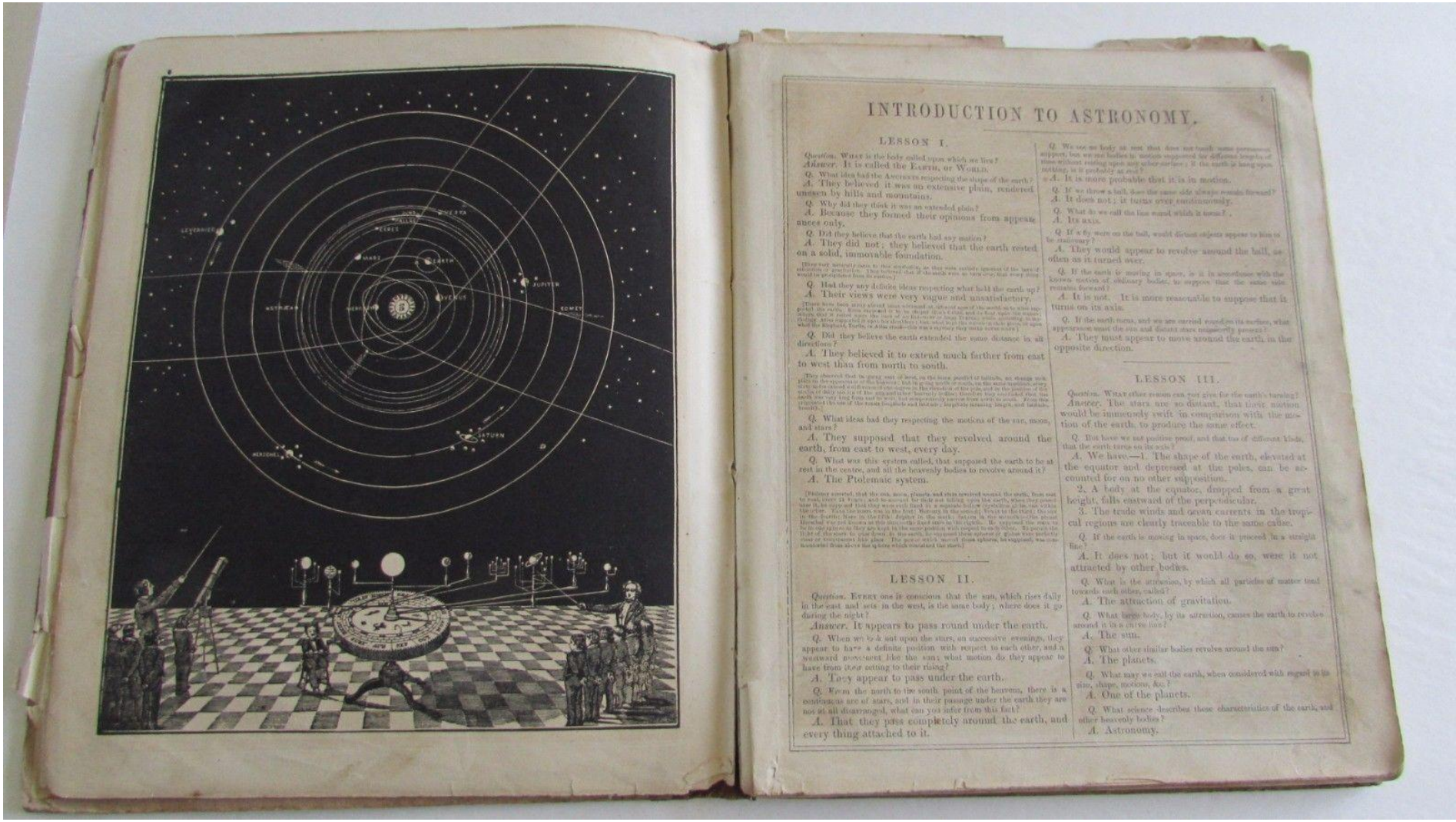
Uránusz: 1781 William Herschel

Apró szisztematikus eltérések a várt pályától

Le Verrier, 1846, Neptunusz jóslása Newton gravitációs elméletéből

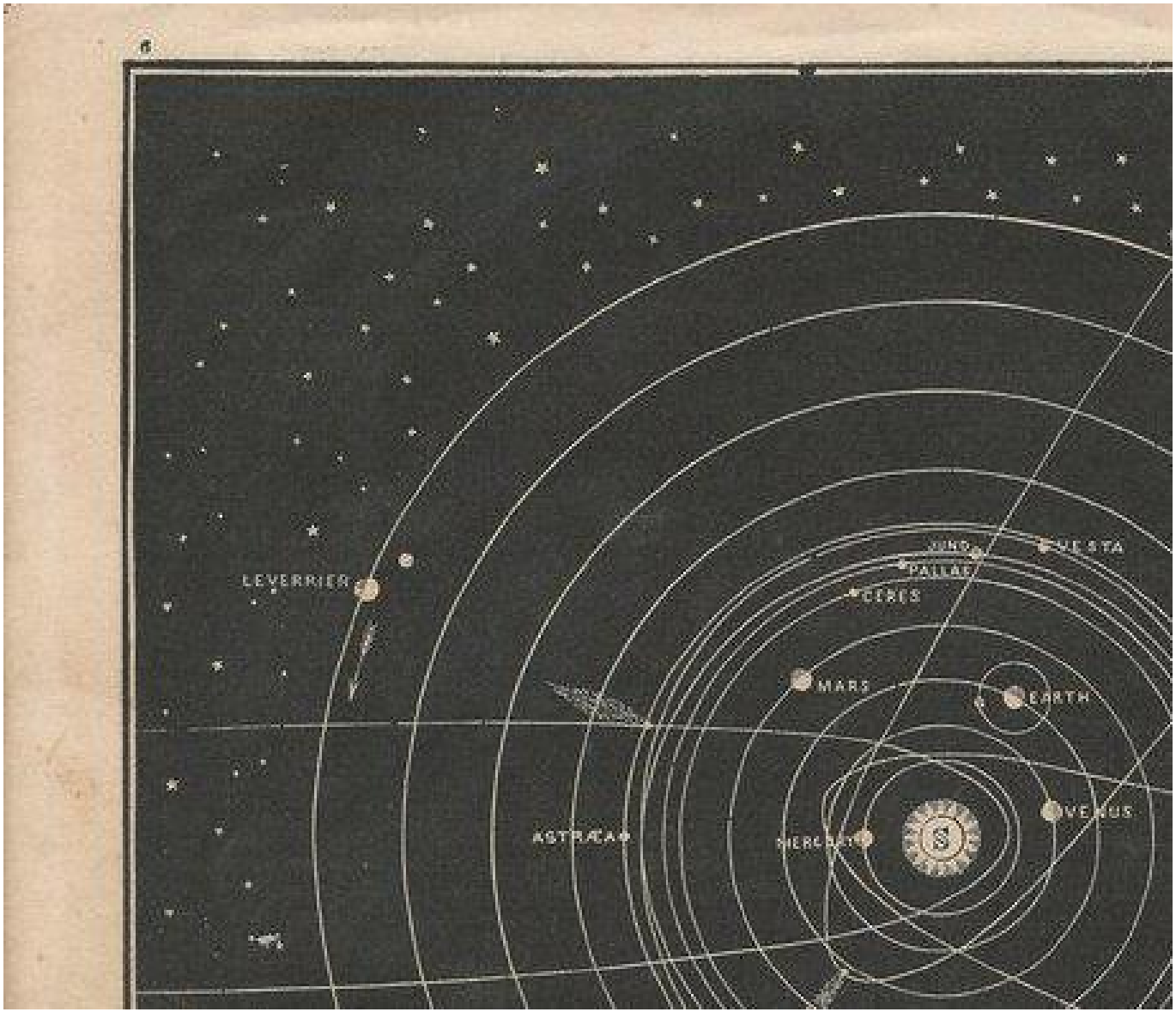
Neptunuszt felfedezik ugyanabban az évben 1 fokra pontosan ott, ahol jósolva volt

Névadás? Leverrier - Neptunusz



1848 Smith's Illustrated Astronomy School Book

Névadás? Leverrier - Neptunusz



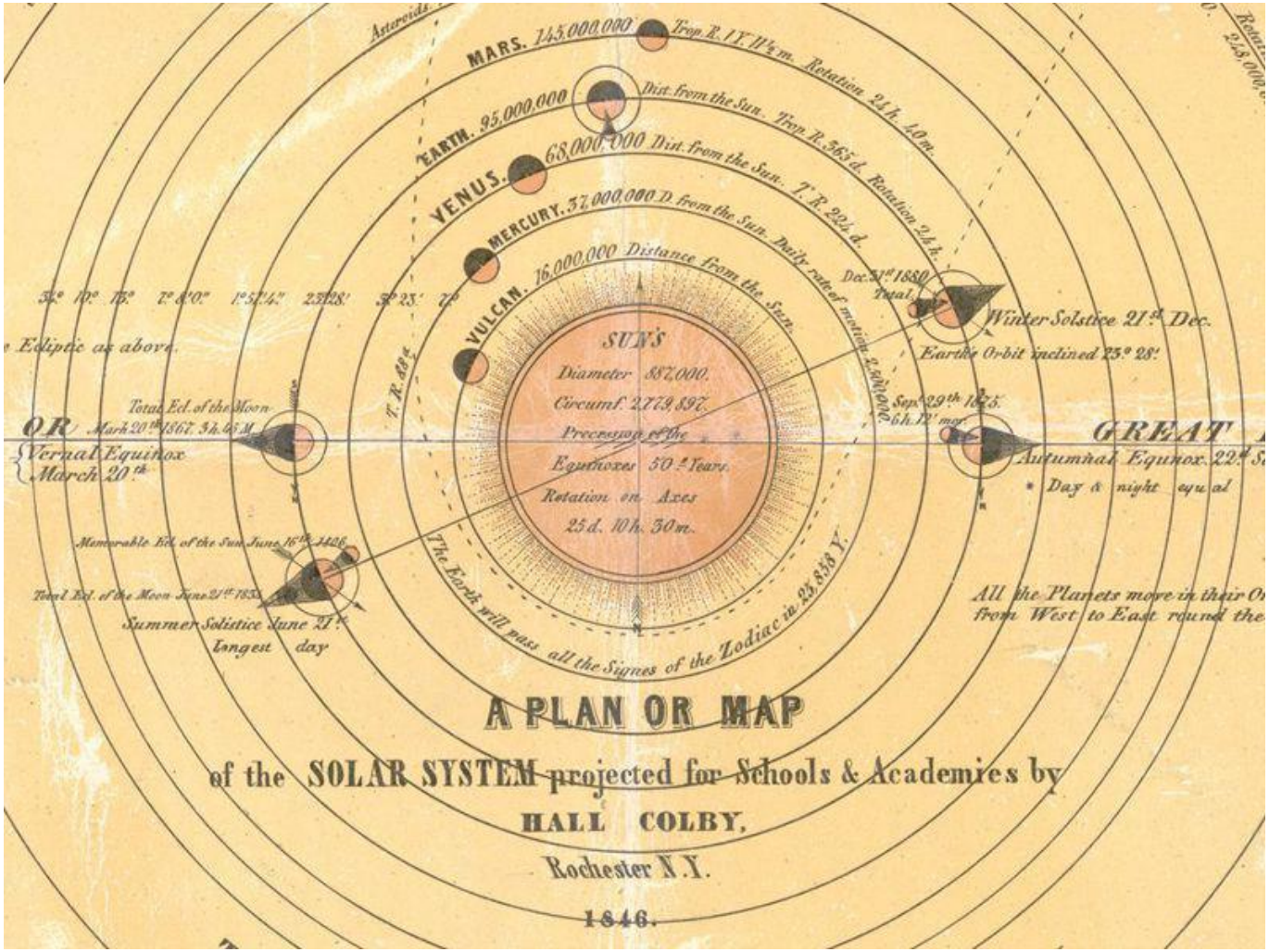
Le Verrier tanulmányozta a Merkúrt is 1843 óta

1859: apró szisztematikus eltérések a pályájában

Új bolygó? $\rightarrow$ Vulkán?

Új bolygó? → Vulkán?

1846



Új bolygó? → Vulkán?

Nem igazán. → általános relativitáselmélet (sokkal később, 1915)

Neptunusz felfedezése

- megfigyelések (pontosság!)
- elmélet
- matematika
- jóslat
- megfigyelésekkel alátámasztva

Eddig inkrementális fejlődés

Neptunusz felfedezése után

- ugyanezt alkalmazzuk másra
- nem működik
- paradigmaváltás, egészen újfajta elmélet

Elektromágnesesség

Első dolog, amit nem látunk (hmmm, gravitáció ...)!

- Oersted, 1777 - 1851
- Faraday, 1791 - 1867
- Maxwell, 1831 - 1879
- Hertz, 1857 - 1894

18. században elektromos és mágneses jelenségek két külön dolognak volt elképzelve

Oersted: elektromos áram $\rightarrow$ mágneses tér

Faraday: mágneses tér megváltozása $\rightarrow$ elektromos tér

Maxwell, 1861: vegyük az eddig ismert elektromos és mágneses jelenségeket

Próbáljunk egy konzisztens elméletet gyártani hozzájuk

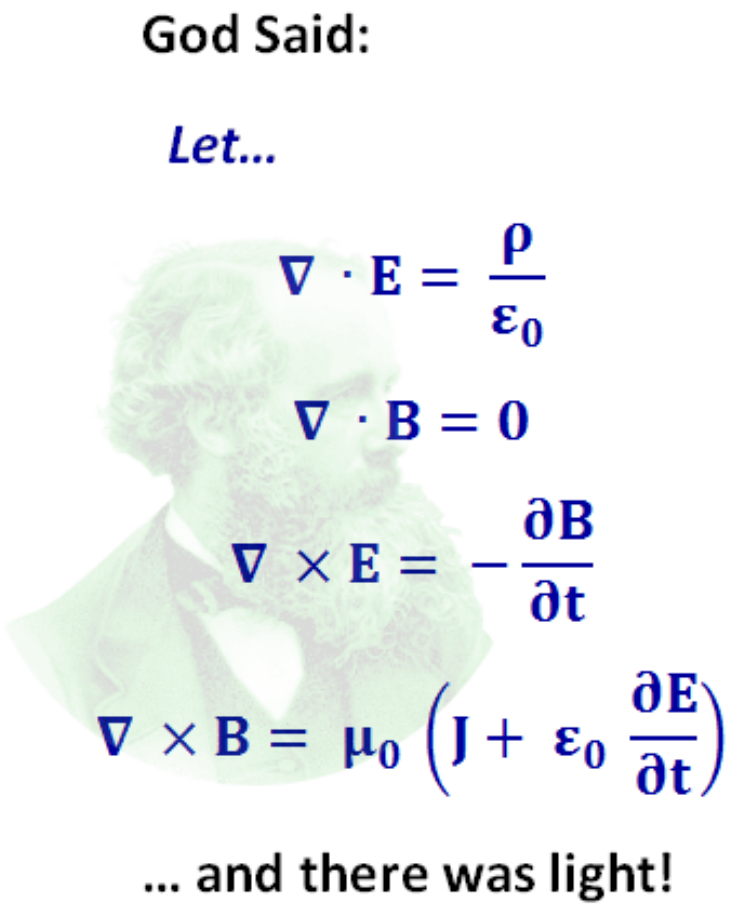
Nem igazán működik, mindenféle ellentmondások jelentkeznek

Tegyünk hozzá egy új effektust

Elektromos tér megváltozása $\rightarrow$ mágneses tér

Eddig nem volt tapasztalva!

Szépen működik minden → Maxwell egyenletek

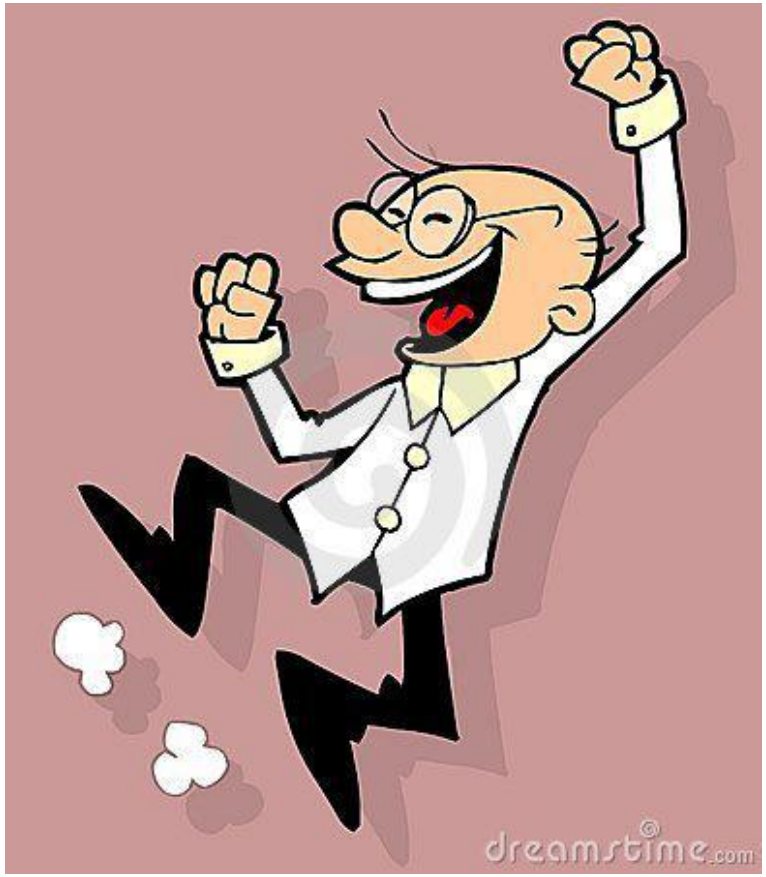


Maxwell egyenletekből: elektromos és mágneses jelenségek fénysebességgel közlekednek

Maxwell: elektromos/mágneses jelenségek: fény!

Hertz: kísérletileg igazolva később

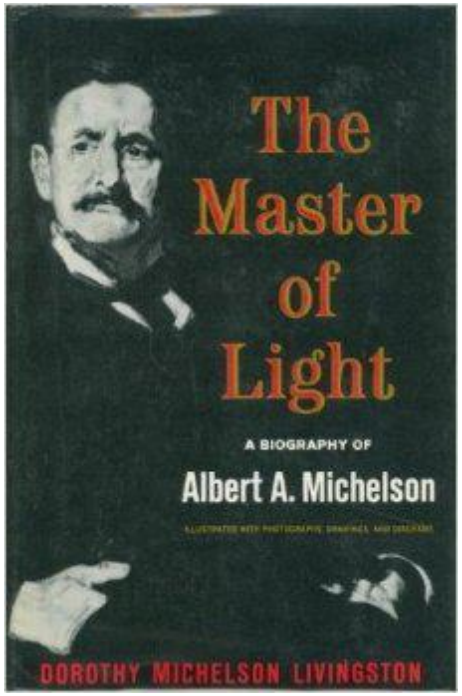
19. század végére általános optimizmus: mindent értünk!



Mechanika, gravitáció: hétköznapi tárgyak, égitestek mozgása

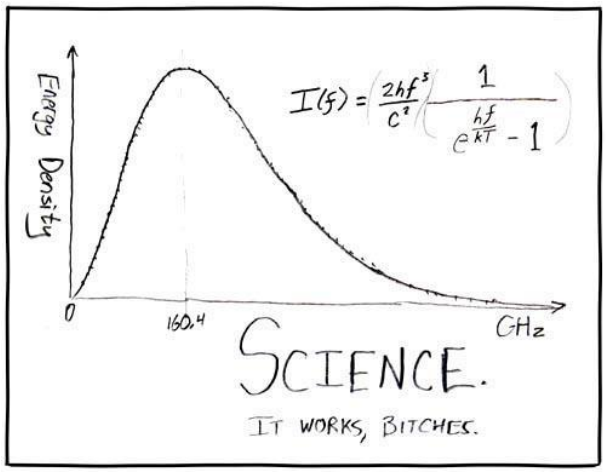
Elektromágnesség: fény, elektromágneses hullámok

Albert Michelson 1894: „The more important fundamental laws and facts of physical science have all been discovered, and these are now so firmly established that the possibility of their ever being supplanted in consequence of new discoveries is exceedingly remote ... Our future discoveries must be looked for in the sixth place of decimals."



De Kelvint aggasztotta „két sötét felhő”:

- Fekete test sugárzás $\longrightarrow$ kvantummechanika



- Nem találtak étert $\longrightarrow$ relativitáselmélet

20. század eleje: relativitáselmélet, kvantummechanika

Relativitáselmélet: idő - tér hasonló, egymásba transzformálható

Kvantummechanika: valószínűségeket tudunk csak jósolni

20. század második fele:

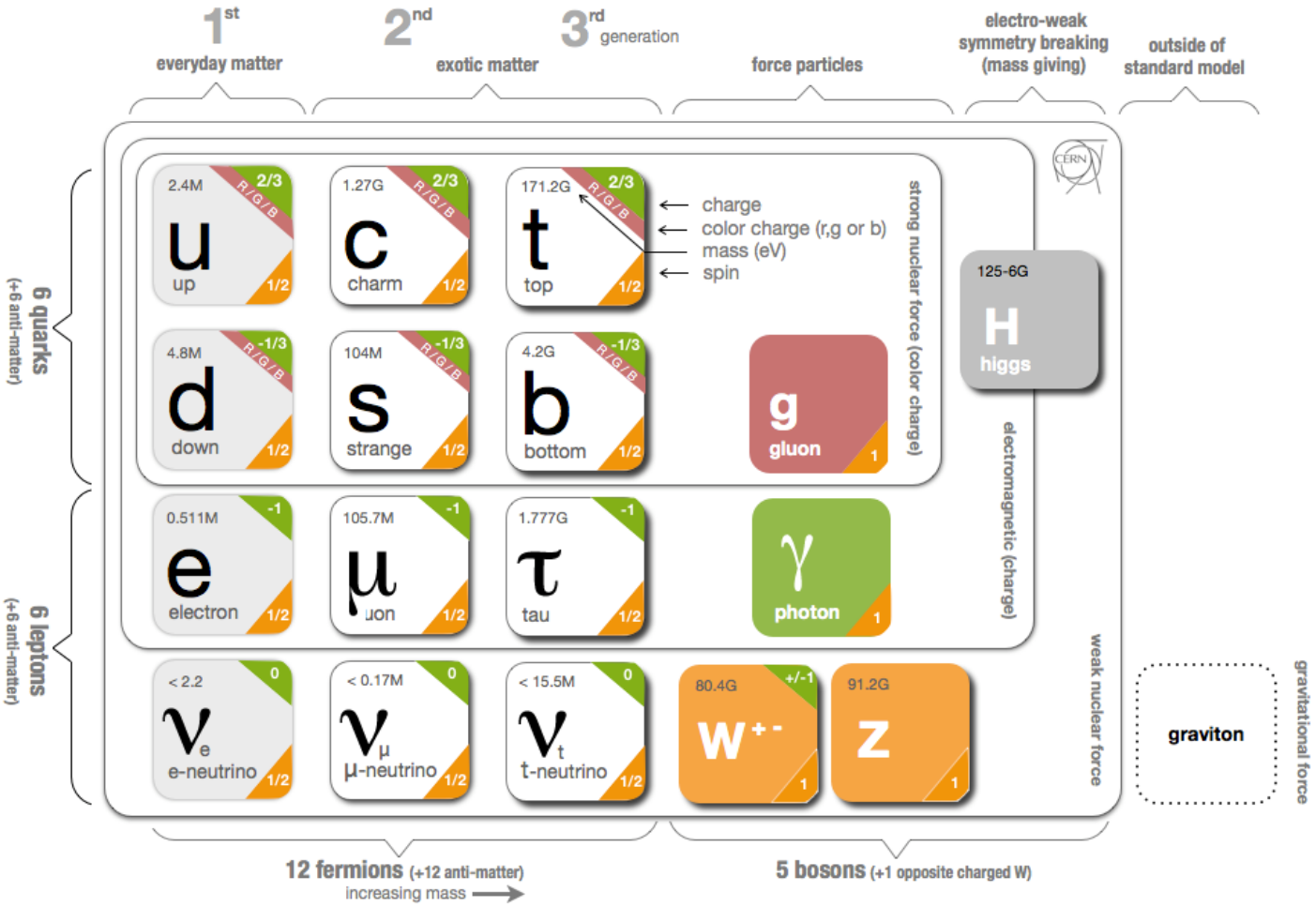
relativitáselmélet + kvantummechanika = kvantumtérelmélet

Elektromágnesesség kvantumtérelmélete: kvantumelektrodinamika

Rádioaktivitás kvantumtérelmélete: gyenge kölcsönhatás

Proton/neutron alkotórészeinek (kvarkok/gluonok) kvantumtérelmélete: erős kölcsönhatás

Egész egyben: Standard Model


1st
everyday matter
2nd
exotic matter
3rd generation
force particles
electro-weak symmetry breaking (mass giving)
outside of standard model
6 quarks
(+6 anti-matter)
6 leptons
(+6 anti-matter)
2.4M
2/3
R / G / B
u
up
1/2
1.27G
2/3
R / G / B
c
charm
1/2
171.2G
2/3
R / G / B
t
top
1/2
charge
color charge (r,g or b)
mass (eV)
spin
4.8M
-1/3
R / G / B
d
down
1/2
104M
-1/3
R / G / B
s
strange
1/2
4.2G
-1/3
R / G / B
b
bottom
1/2
g
gluon
1
strong nuclear force (color charge)
125-6G
H
higgs
0.511M
-1
e
electron
1/2
105.7M
-1
μ
uon
1/2
1.777G
-1
τ
tau
1/2
γ
photon
1
electromagnetic (charge)
< 2.2
0
νe
e-neutrino
1/2
< 0.17M
0
νμ
μ-neutrino
1/2
< 15.5M
0
νt
t-neutrino
1/2
80.4G
+/-1
W+-
1
91.2G
Z
1
weak nuclear force
graviton
gravitational force
12 fermions (+12 anti-matter)
increasing mass
5 bosons (+1 opposite charged W)

Standard Model

Nagyon egyszerű elmélet, néhány paramétertől függ csak, a kölcsönhatások szimmetriákból következnek és a korábbi lokalitásból

Hihetetlen pontosság, elektron/müon anomális mágneses momentuma, kísérletből:

$$g_e/2 = 1.00115965218085(76)$$

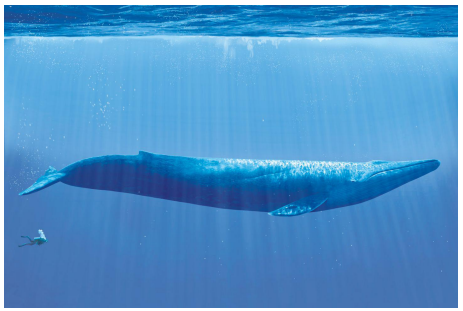
$$g_\mu/2 = 1.00116592091(54)$$

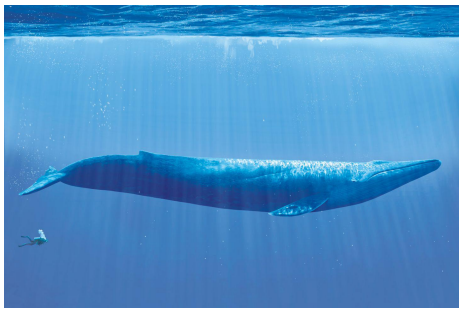
Elméleti számolás ezekkel konzisztens és a hiba hasonló (apró eltérés a müonra...)

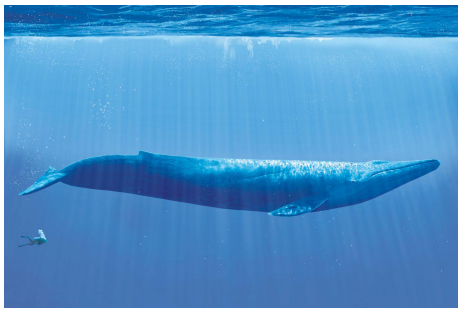
Természettudományok legpontosabb mérései/számolásai!

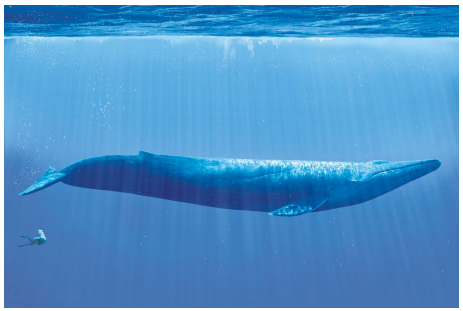
Pontosság

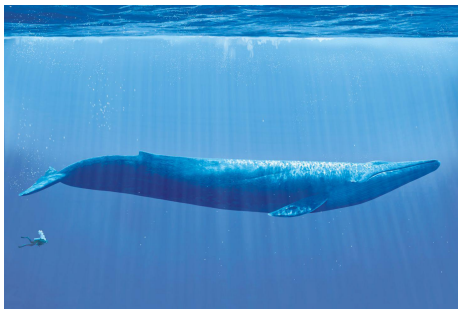
:

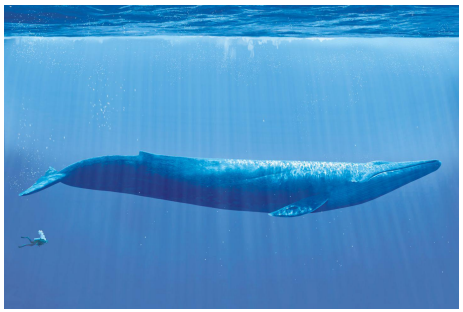












Standard Model részei:

Elektromágneses rész: Maxwell egyenletek kvantumelmélete (1×1 mátrixok)

Gyenge kölcsönhatási rész: Maxwell egyenletek általánosításának kvantumelmélete (2×2 mátrixok)

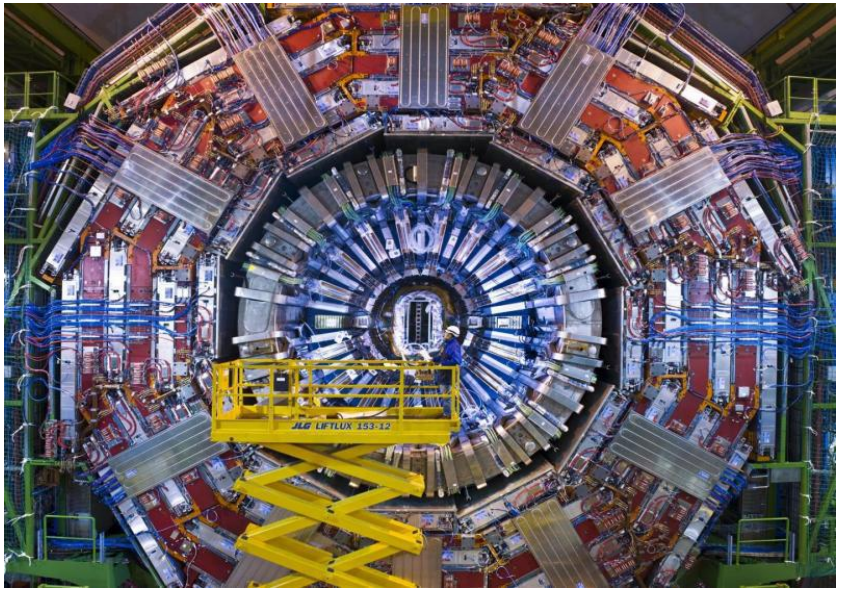
Erős kölcsönhatási rész: Hasonló általánosítás kvantumelmélete (3×3 mátrixok)

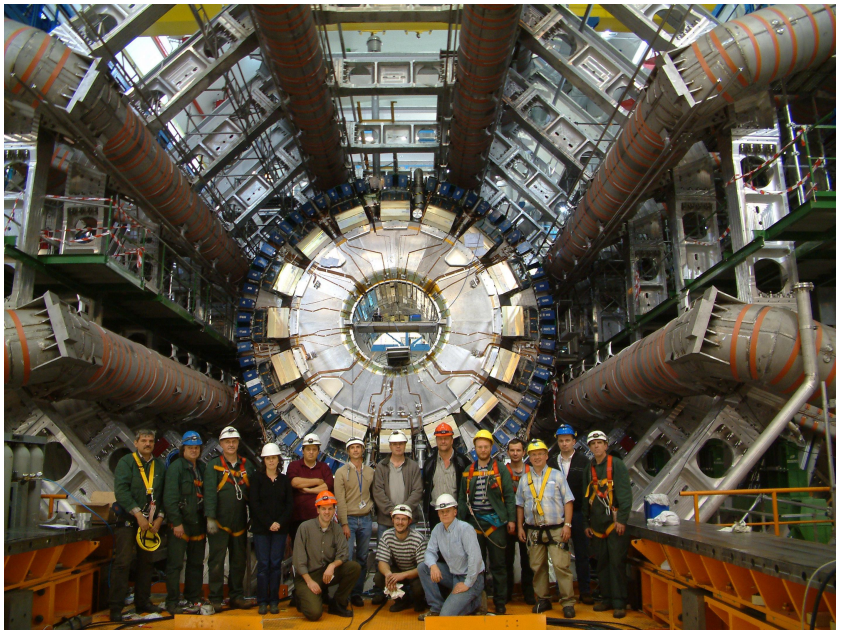
Egy különleges részecske: Higgs bozon

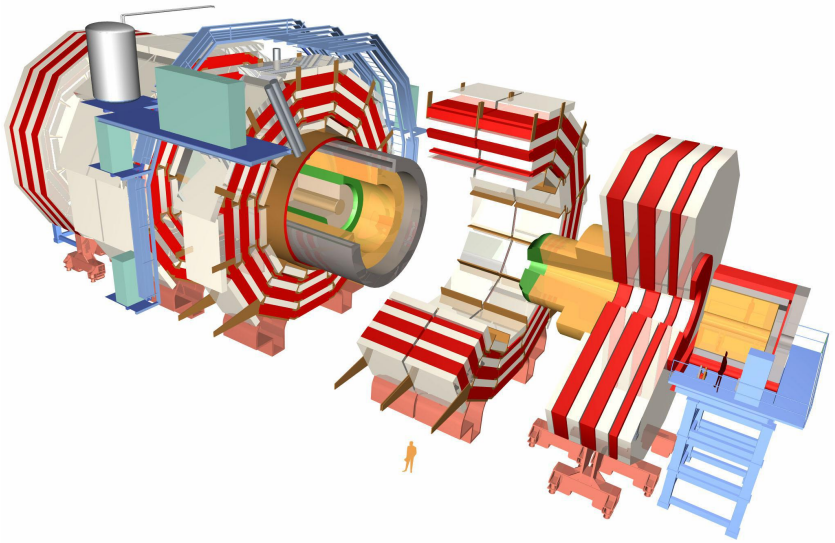
Egészen 2012 július 4-ig hipotetikus részecske

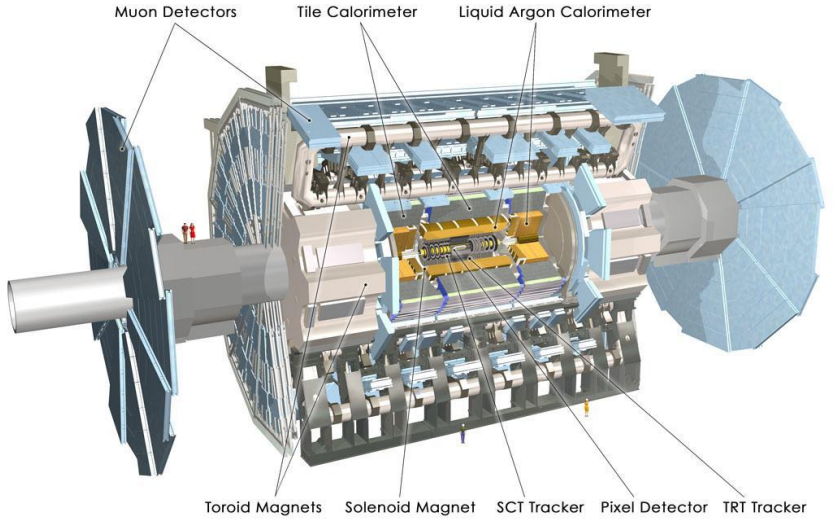
2012 július 4: CERN LHC megtalálta (5σ szignifikancia)

CERN: LHC (CMS, ATLAS)









Miért különleges a Higgs bozon?

Egyetlen elemi részecske, ami minden koordinátarendszerben ugyanúgy néz ki: semleges és skalár (nem transzformálódik, hasonóan a vákuumhoz)

Később lesz ebből probléma...

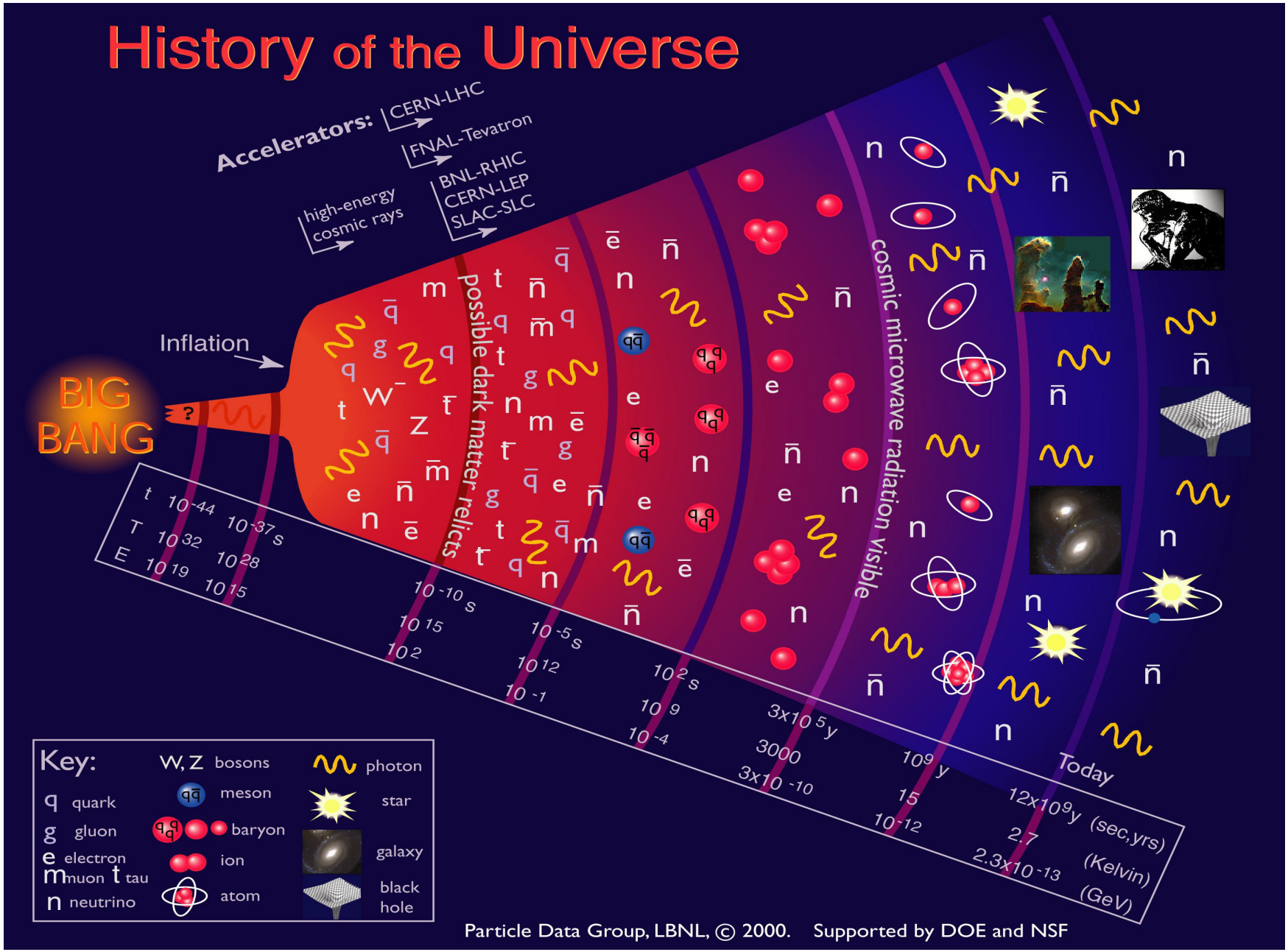
Ami jó benne: tömeget ad az elemi részecskéknek

2012 Higgs felfedezés fontos mérföldkő, utolsó hiányzó láncszem a Standard Modelben

$\longrightarrow$ körülöttünk látható világ minden korábbinál sikeresebb és pontosabb leírása, elmélet/kísérlet hihetetlenül pontos összhangja

Redukció vagy analízis – szintézis sikere

Standard Model



video

(Majdnem) tökéletes leírásunk van 10^{26} – $10^{-17}\,m$ között

43 nagyságrend

(megint) mindent értünk ?!?!?!

Deja vu ...

Albert Michelson 1894: „The more important fundamental laws and facts of physical science have all been discovered, and these are now so firmly established that the possibility of their ever being supplanted in consequence of new discoveries is exceedingly remote ... Our future discoveries must be looked for in the sixth place of decimals."

Van néhány „sötét felhő”:

Gravitáció teljesen ki van hagyva a Standard Modelből

Minden kvantumos, kivéve gravitáció

Gravitáció kvantumelmélete teljesen ismeretlen (ötletek vannak, megoldások nem nagyon ...)

Pedig klasszikus gravitációs hullámokat nemrég láttunk már

Egy biztos: kb. $10^{19}\,GeV$ energián (proton: 1 GeV) biztos releváns lesz a kvantumgravitáció, akármi is legyen az

Van néhány „sötét felhő”:

Standard Model biztos elromlik $10^{19}\,GeV$-en

LHC: $13\,TeV = 1.3 \times 10^4 GeV$

15 nagyságrenddel odébb van ...

Higgs bozon mégis mond nekünk valamit erről:

Higgs tömege GeV egységben:

$$100000000000000125 - 100000000000000000 = 125$$

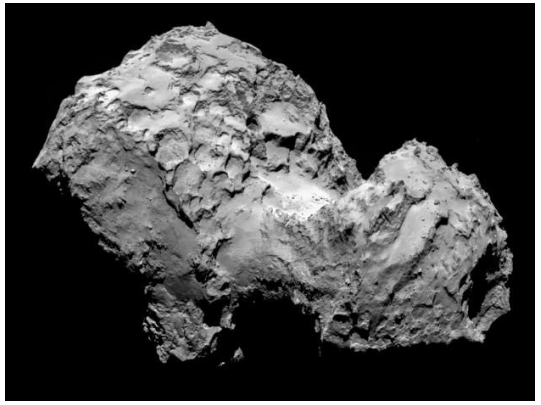
Finomhangolási probléma

Finomhangolási probléma (második „sötét felhő”)

$$10000000000000000125 - 10000000000000000000 = 125$$

Az arány itt:

:



Miért probléma ez?

Képzeljük el, hogy egy országban az adószabályok olyanok, hogy ha a profitunk \$1000 alatt van, akkor nem kell adózni egyáltalán.

Pl: egy cég bevételei \$8000, kiadásai \$7500, profit: \$500 $\rightarrow$ nem kell adózni

Vagy: bevétel: \$12000, kiadás: \$9000, profit: \$3000, ez után kell adózni

Vagy: bevétel: \$10.000.000, kiadás \$7.000.000, profit: \$3.000.000, ez után kell adózni

Vagy: bevétel: \$10.000.000, kiadás \$9.999.100, profit: \$900 $\rightarrow$ nem kell adózni

Hmmmmmmmm ...

Ezt egy adóbevalláson kicsit gyanúsnak találnánk!

Finomhangolási probléma

És ha bevétel: százezer quadrillió (10^{20}) + 999, kiadás: százezer quadrillió, profit: 999 $\rightarrow$ nem kell adózni

(bevétel: 1 millió Föld GDP-je)

Hmmmmmmmmmmmmmmmm ...

Ezt egy adóbevalláson még gyanúsabbnak találnánk!

Finomhangolási probléma

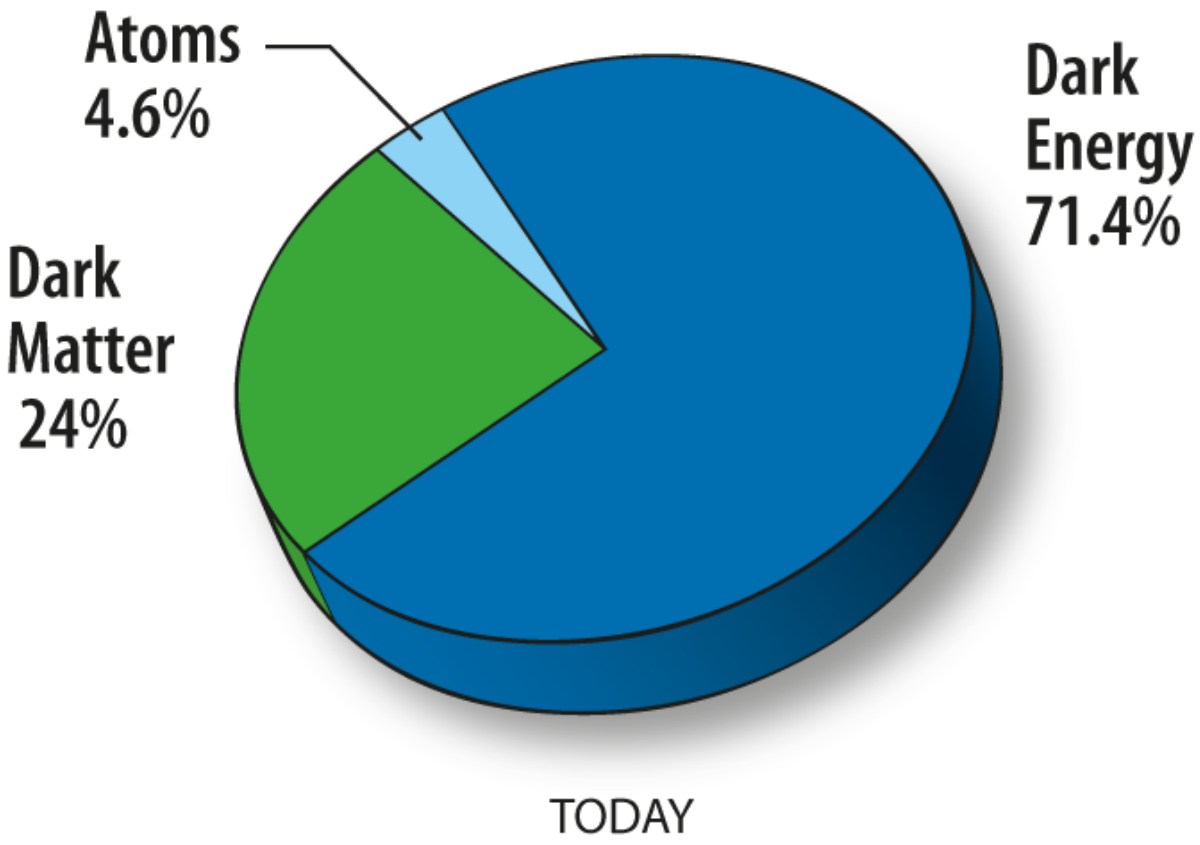
Más részecskével nincs ilyen gond, csak a Higgs-szel (csak ez elemi semleges skalár)

$\longrightarrow$ Standard Modelen túl remélhetőleg van valami, ami ezt megoldja

$\longrightarrow$ mégse értünk mindent

Finomhangolási problémától függetlenül:

Asztrofizikai megfigyelésekből:



Még egy „sötét felhő”

Standard Model: látható univerzum: 5% (jól megértett)

Sötét energia: 70%, kozmológiai állandó, tágulásból (kevésbé misztikus)

Sötét anyag: 25% látható anyag mozgásaiból, gravitációs hatásból (nagyon misztikus)

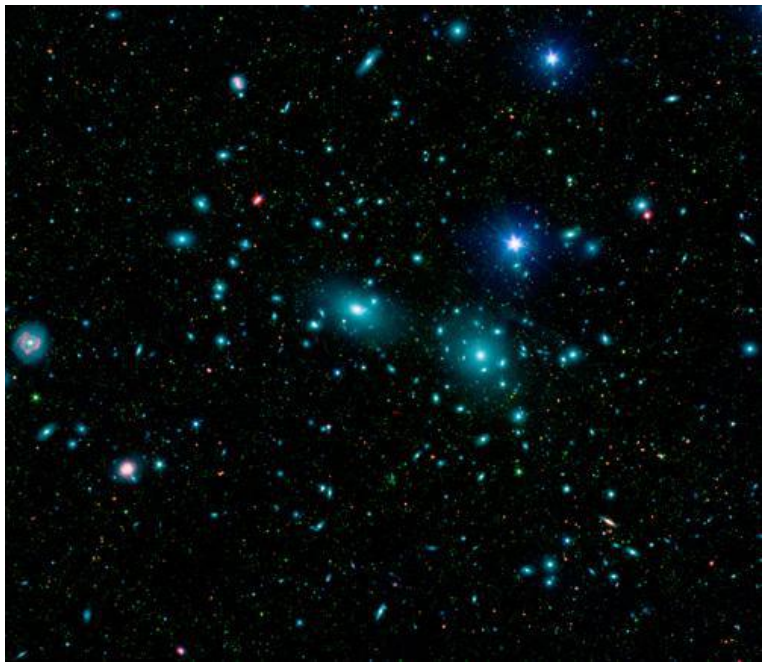
Sötét anyag

Csak gravitációs hatásait látjuk (ebből tudjuk, hogy van)

Zwicky, 1933:

galaxis klaszteren belüli mozgások $\rightarrow$ tömeg

látható fény $\rightarrow$ sokkal kisebb tömeg



Sötét anyag

(Sok további megfigyelés 1933 óta.)

Standard Modelben szereplő egyik részecske se lehet

Valami egész biztos van a Standard Modelen túl! Még akkor is ha a finomhangolási problémát lenyeljük.

Sötét anyag: fogalmunk sincs, hogy mi, azon kívül, hogy tömeges

De az univerzum kb. 1/4 része!

??????????????

Detektorokban próbáljuk elkapni, egyenlőre sikertelenül

Sötét anyag, finomhangolási probléma

Uránusz $\longrightarrow$ Neptunusz ???

Merkúr $\longrightarrow$ Vulkán ???

Merkúr $\longrightarrow$ általános relativitáselmélet ???

Fekete test sugárzás $\longrightarrow$ kvantummechanika ???

Éter $\longrightarrow$ relativitáselmélet ???

És a kvantumgravitáció?

Fogalmunk sincs, hogy a megoldások milyenek lesznek ...

... pont ez benne az izgalmas.