

# Miért egyszerű a tudomány?

Occam borotvája vagy gépi tanulás?

természettudományos modellezés kevés vagy sok paraméterrel

*MTA Szegedi Akadémiai Bizottság székháza Szeged, Somogyi u.7.*

*2024. március 7-8.*

# Miért, egyszerű a tudomány?

Occam borotvája vagy gépi tanulás?

természettudományos modellezés kevés vagy sok paraméterrel

*MTA Szegedi Akadémiai Bizottság székháza Szeged, Somogyi u.7.*

*2024. március 7-8.*

# Bevezetés

- tudomány vs. gépi intelligencia: nagyon aktuális kérdés!
- **Occam elv:** *lex parsimoniae*, “Entia non sunt multiplicanda praeter necessitatem”  
→ két lehetséges magyarázat közül valószínűleg az egyszerűbb lesz az igaz



*Occam and his razor by Leonardo.ai*

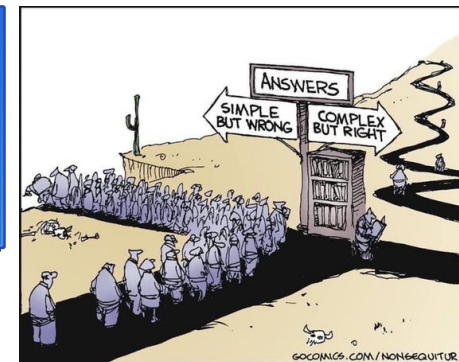
## Tudományos vélekedés:

- a helyes/igaz magyarázatok egyszerűek
- ha nem egyszerű a magyarázatunk, akkor még nem értjük eléggé; majd egyszer jön valaki, aki *igazán* okos, az majd megtalálja az egyszerű képet  
(l. *Newton* és a várépítő mester)  
(l. *Seldon* és a pszichohistória)
- ontológia: az egyszerű az igazi létező ...

# Bevezetés

Emiatt a tudomány szeret egyszerű és bombasztikus válaszokat adni:

- **egyszerű**, mert mi *nagyon* okosak vagyunk (*elvárás-politika/hübrisz/önkép*)
- **bombasztikus**, mert a tudomány *nagyon* hasznos, és a józan észnek ellentmondhat
- *például*:
  - világ = részecskefizika (ToE) + abból számolható következmények
  - kémia = alkalmazott kvantummechanika (QED?)
  - szerelem = oxytocin ([harvard cikk](#)) és egyéb hormonok
  - földi klíma = CO<sub>2</sub> szint (ember által kibocsátott)
  - ember = genom, intelligencia = neural network, stb.
- ... hozzátéve, hogy rendkívül bonyolult számítások kellhetnek.



# Analitikus világnkép

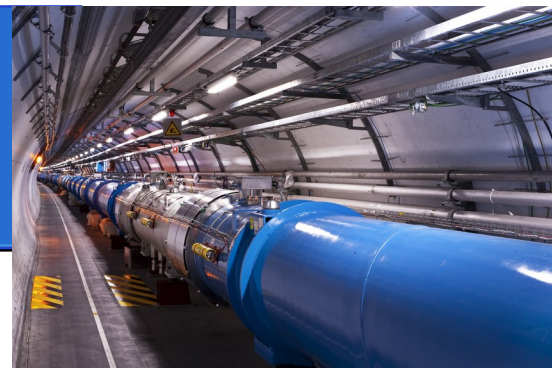


Szofisztikáltabb megközelítés a bonyolult rendszerekhez: **analitikus gondolkodás**

- bonyolult óraszerkezet → szétszedve fogaskerekék és rugók együttese, az alkatrészek egyesével egyszerűek
- egy rendszert úgy **érthetünk meg**, ha felderítjük a részeit és azok kölcsönhatásait
- például:
  - áramló patak – hidrodinamika – tömegpontok & köztük ható erők (mechanika)
  - bonyolult vegyületek – atomok és elektronok & Coulomb és kicserélési kh. (QM)
  - atommag – nukleonok & magerők (erős kölcsönhatás)
- **a világ azért egyszerű, mert a bonyolult jelenségek mögött is a részek egyszerű(bb) rendszere áll**



# Analitikus világkép



## Tudományos diszciplínák hierarchiája

ember – szervek – sejtek – biofizika és biokémia – kémia – atomfizika (QM) – atommagfizika – nukleáris fizika – részecskefizika – Standard Model (SM) – egyesített elméletek (GUT) – húrelmélet – Theory of Everything (ToE) →

$$f(\Psi) = 0$$

Feynman

minden út a ToE-hoz vezet → a világot akkor értjük, ha a ToE-t ismerjük

azonban minden út átvezet a SM-en is, vagyis elég a SM-t érteni

kísérleti tapasztalat:

→ az 1970-es évek óta minden mérést meg tudott magyarázni a SM

→ kísérletileg csaknem minden összetevőjét látjuk (2014: Higgs bozon)

→ gravitációval is összeegyeztethető (asymptotic safety)

értjük a SM-t! → már most **értjük a világot!!**

Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass	3 MeV	1.24 GeV	172.5 GeV	0
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name	u up	c charm	t top	$\gamma$ photon
Quarks	6 MeV	95 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	d down	s strange	b bottom	g gluon
Leptons	<2 eV	<0.19 MeV	<18.2 MeV	90.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	$\nu_e$ electron neutrino	$\nu_\mu$ muon neutrino	$\nu_\tau$ tau neutrino	Z weak force
	0.511 MeV	106 MeV	1.78 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	$\pm 1$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau	W weak force

Bosons (Forces)

# A részecskefizikus és a nagymama pogácsája



Képzeljük el az ifjú részecskefizikust, aki idáig eljut...

- minden mögött a SM áll
- *sokat tanult*: SM, szimmetriák, QFT, renormálás stb., de **megérte, mert mindent ért!**

*Kimegy a konyhába, ahol a nagymamája pogácsát süt, és elgondolkodik*

- a nagymama tud pogácsát sütni, pedig nem érti a SM-t
- ő nem tud pogácsát sütni, pedig mindent ért!
- ő azért nem tud pogácsát sütni, mert a pogácsa  $\sim 10^{24}$  kvarkból áll, így rendkívül bonyolult, és reménytelen dolog lenne leírni  
*(még az sem világos, kvark szinten mi a különbség a nagymama és a pogácsa között)*
- az a tény, hogy a nagymama érti a pogácsakészítés nyelvét, mutatja, hogy az egész nem olyan ördögösen nehéz

# A részecskefizikus és a nagymama pogácsája

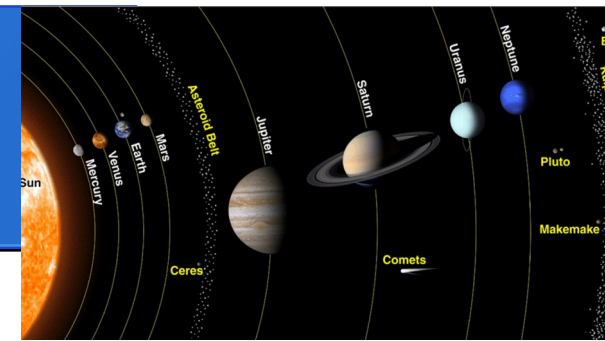


Valahol hibáztunk a gondolatmenetben!

- egy atomnál bonyolultabb a két atom, három atom stb. rendszer ✓
- $\sim 10^{24}$  atom még bonyolultabb ✗
- például  $\sim 10^{24}$  atom lehet egy gáz, amelynek leírása sokkal egyszerűbb, mint pár atom rendszeré!
- SŐT: a gáz leírásának **semmi köze** az atom leírásához!  
(ezért nem volt világos az atomok léte)



# A részecskefizikus és a nagymama pogácsája



**Matematikai háttér:** effektív elméletek, renormálás

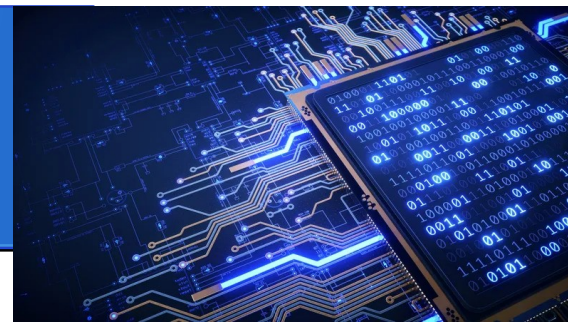
- egy adott jelenségkör (kontextus) leírásához bizonyos kölcsönhatásokat figyelembe kell vennünk (relevánsok), más kölcsönhatások nem fontosak (irrelevánsok).  
*pl. egy atom energiaszintjéhez nem kell tudnunk, hol áll a Mars (pedig befolyásolja az eredményt, csak nagyon kicsit)*
- **kontextus váltás:** mások lehetnek a releváns mennyiségek (*renormálási transzformáció*)  
*pl. az elektrodinamika lineáris, de anyagban, cm-es skálán nem az (tranzisztor)*  
*ahogy elhagyjuk a legkisebb részleteket, úgy válik nemlineáris a Hamilton-operátor*
- praktikusán: **nem ismerjük egy atom Hamilton operátorát!**
  - bizonyos tagokat beleveszünk, amelyek segítségével a mérésekkel egyezhetünk, más tagokat nem (pl. Mars helyzete, vagy az atommag állapota)
  - kontextusváltás során a Hamilton operátor változhat, ami releváns volt, jelentéktelenné válik, ami irreleváns, az felerősödhet.

# A részecskefizikus és a nagymama pogácsája

- **tudományos elmélet** (diszciplína): ha egy kontextusrendszerben (pl. adott skálákon) ugyanazok a releváns tagok (*renormálási transzformáció fixpontjai*) egy diszciplína leírásához elég, ha csak a számára releváns tagokat tartjuk meg
- De ott vannak a nem mérhető irreleváns tagok is!  
Ha ezekről elfeledkezünk, hamis következtetésre juthatunk:
  - ➔ ceruza mozgása egyszerű; de a hegyére állított ceruza ledőlése nem magyarázható a ceruza fizikájából (**környezet**)
  - ➔ ugyanez igaz a QM-i méréselméletre: ha azt hisszük, hogy az egy részecske Schrödinger-egyenlet igaz, a mérés véletlennek tűnik; de a mérőberendezéssel együtt már kauzális lehet
  - ➔ példa: életjáték: a szabályok nagyon egyszerűek, mégis a **kezdőfeltételek** miatt Turing teljes



# A részecskefizikus és a nagymama pogácsája



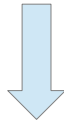
A tudományos diszciplínák viszonya a **softver-hardver** viszonyhoz hasonlít

- **szoftverből nem következik a hardver**, mert
  - a részletek nem mérhetőek ki, nem befolyásolják a szoftver működését (*legfeljebb korlátok vagy szimmetriák formájában*)
  - a szoftver sok hardveren futhat (*pl. egy kép adathordozója lehet fotopapír, dia, pixel monitor*)
- **a hardverből nem következik a szoftver**, mert:
  - a hardver működési törvényeit nem befolyásolja a szoftver (*hacsak erre külön portokat nem biztosít a rendszer*)
  - a szoftver által jelentett változás rendkívül bonyolult hardver szinten, és nem világos, mi hozza el az egyszerűsítést
  - egy hardveren sokféle szoftver futhat

# A részecskefizikus és a nagymama pogácsája

A tudományos diszciplínák viszonya a szoftver-hardver viszonyhoz hasonlít.

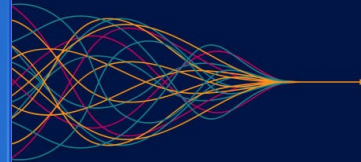
DE a kettőnek semmi köze egymáshoz (analitikusan függetlenek)



**a világ analitikusan nem megérthető**

Következmény: a Standard Model **nem** a mindenség elmélete (ToE), hanem annak csak azon része, amely releváns a  $\sim 10^{-20}$  méter skálán

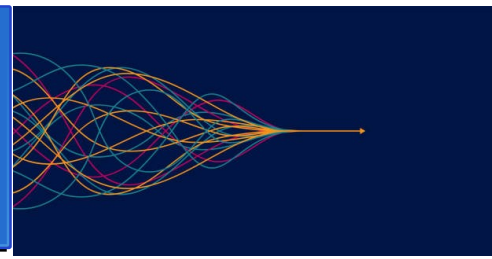
# Egyszerű vs. bonyolult



- A világ egyszerűségének záloga az analitikus megértés (hierarchia), és a részrendszerek egyszerűsége volt
- de a világ nem hierarchikus, így semmi okunk azt gondolni, hogy az egyes diszciplínák kevés releváns kölcsönhatással leírhatók
- **a releváns kölcsönhatások száma egy jelenségkör inherens tulajdonsága**
  - ➔ függ az elvárt pontosságtól: tipikusan pár releváns kölcsönhatás magyarázza a jelenségek nagy részét, pontosítás során nő a számuk
  - ➔ adott pontosság esetén semmiből nem következik, lehet sok vagy kevés.  
(*bármilyen "okosak" is vagyunk, nem egyszerűsíthető le*)
- vajon miért van az, hogy egyes jelenségek egyszerűek, mások bonyolultak?

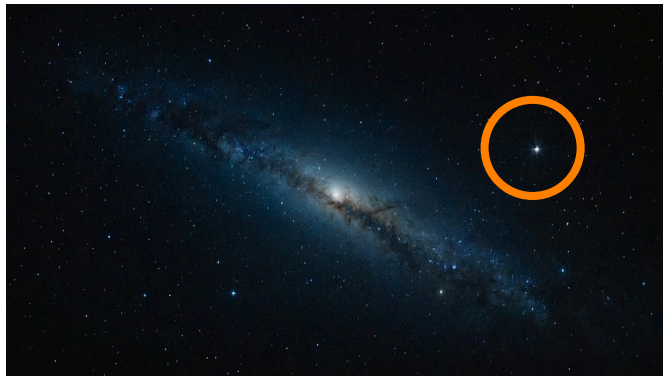


# Egyszerű vs. bonyolult

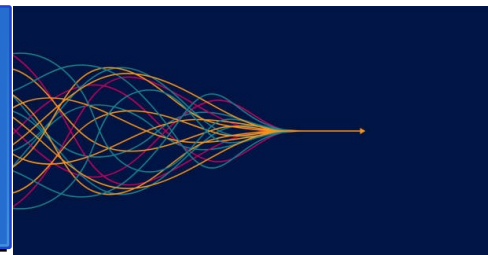


## Miért egyszerűek bizonyos elméletek?

- űrhajóban egy távoli fénypontot látunk: helye, sebessége, esetleg tömege számít
- közelebb jön: formát ölt, az alakja is számít
- még közelebb jön: egy UFO, esetleg ismeretlen technológiákkal



# Egyszerű vs. bonyolult



## Tudományos modellekre alkalmazva:

- ha az alulfekvő elmélet “messze” van, azaz nagy a skálaszeparáció, akkor a részletek nem lesznek fontosak, **kevés releváns mennyiségre van szükség**
  - mechanika: tömegpont mérete  $\sim \mu\text{m}$ , 6 nagyságrend a m-es skáláig
  - termodinamika: a sokaság  $\sim 10^{23}$  elemből áll, pár extenzív mennyiséggel szemben
  - egyszerű atomok, molekulák: atommag mérete 5 nagyságrenddel kisebb
- Ha nincs elég távlat ahhoz, hogy a modell leegyszerűsödjön, akkor sok részlet számít, az **elmélet bonyolult marad**:
  - hidrodinamika, atommagfizika, óriásmolekulák, protein folding
  - képfelismerés, beszéd, gondolkodás, művészetek

# A rendszerek leírása

**Hogyan kell kezelni a kevés és sok paraméteres modelleket?**

■ **állítás:**

- kevés paraméteres rendszer: tudomány
- sok paraméteres rendszer: intelligencia

# A rendszerek leírása



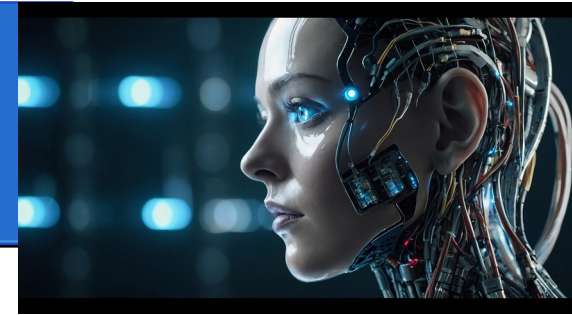
Ha a releváns kölcsönhatások (paraméterek) száma **kevés**, akkor

- a paramétereknek saját szerepük van, ezek a szerepek a mérésekben beazonosíthatók
- a rendszernek létezik egyértelmű matematikai modellje
- a paraméterek pár méréssel meghatározhatók, a többi mérés jóslat
- a jóslat és valóság összevetésével a pontos matematikai modell felírható

**tudományos módszer:** jelenségek feltérképezése, legfontosabb releváns erők beazonosítása, modellezés, jóslás, a modell finomítása (esetleg kevésbé releváns effektusok figyelembe vételével).

Mivel a releváns kölcsönhatások száma kevés, ez **a módszer konvergens**.

# A rendszerek leírása



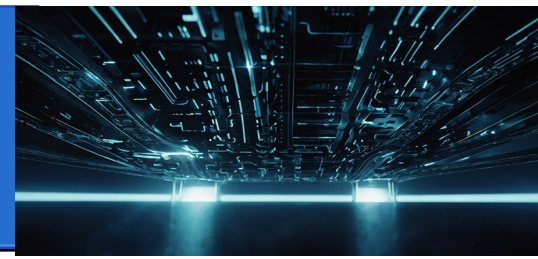
Ha a releváns kölcsönhatások (paraméterek) száma **sok**, akkor

- a paraméterek többségének *nincs elkülönült szerepe*, egymással helyettesíthetők
- a rendszernek *nincs egyértelmű matematikai modellje*, azaz a rendszer tudományos értelmében nem “megérthető”
- egyik modell sem ad pontos eredményt, mindig fennáll a tévedés lehetősége
- több modell is ugyanolyan jól írhatja le a valóságot, bár részletekben eltérhetnek
- a jóslat és valóság összevetésével a matematikai modell finomítható, de a pontos leírás nem érhető el

**intelligens módszer:** általános függvényter felírása a modellezéshez, amely több jelenségkör leírására is használható, a jelenségek vizsgálata, a paraméterek egy lehetséges beállításának megtalálása, finomítás az új megfigyelésekkel

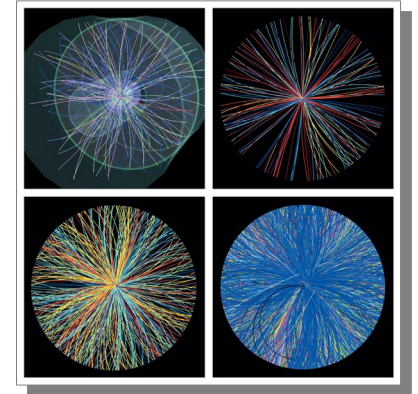


# A rendszerek leírása

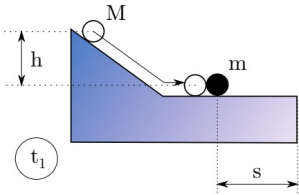


## Hol van a határ a tudományos és az intelligens megközelítés között?

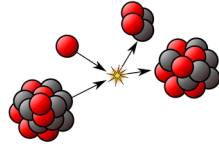
- **nuclear physics példa:** a hadronokat az 1960-as évek óta ismerjük, ismerjük a szimmetriákat, az alulfekvő elméletet (QCD), a NP modelljét mégsem tudjuk
  - fel lehet írni egy modellt, amely 80-90%-ig pontos
  - nem működik a finomítási módszer (itt javít, ott ront)
- **HIJING++ példa:** a CERN gyorsítóhoz a 90-es évek elején írtak egy eseménygenerátort FORTRAN-ban, ezt most átírták C++-ra
  - voltak benne bug-ok: ez OK, minden nagyobb szoftver hibás lehet
  - de ez nem derült ki 25 évig: a paraméterek beállításával a hibák elfedhetők voltak
- **pénzügyi modellek:** Black-Scholes model a jelenségek nagy részét jól írja le, 90-95% feletti pontosság általános modellel nem érhető el



# A rendszerek leírása



point mechanics  
~ 5 relevant



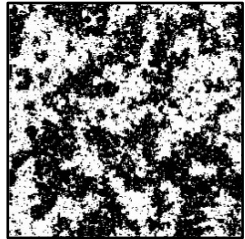
nuclear physics  
20-? relevant



chemistry, biology  
20-? relevant



natural environment  
? relevant ? irrelevant

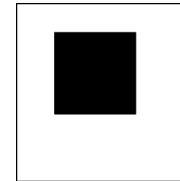
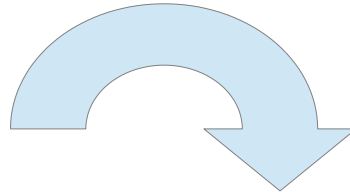


Ising model  
3 relevant

Drei Generationen der Materie (Fermionen)

	I	II	III
Quarks	u up 6.0 MeV	c charm 1.370 GeV	t top 173.2 GeV
Leptonen	d down 4.8 MeV	s strange 96 MeV	b bottom 4.18 GeV
	v <sub>e</sub> Elektron-Neutrino 0.49 MeV	v <sub>μ</sub> Myon-Neutrino 0.106 MeV	v <sub>τ</sub> Tau-Neutrino 1.777 GeV
	e Elektron 0.511 MeV	μ Myon 105.7 MeV	τ Tau 1.777 GeV
			W W-Boson 80.4 GeV
			Z Z-Boson 91.2 GeV
			H Higgs-Boson 125.1 GeV

Standard Model  
21 relevant  
(symmetries!)



geometric images  
~ 10-100 irrelevant



face recognitions  
~ 30000 irrelevant

# A rendszerek leírása



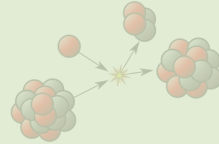
natural environment  
? relevant ? irrelevant



face recognitions  
~ 30000 irrelevant



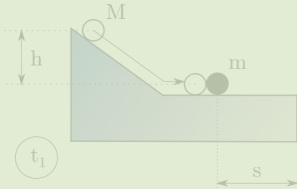
chemistry, biology  
~ 100-? relevant



nuclear physics  
20-? relevant

**Tudomány**

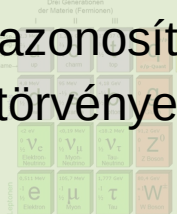
Kevés releváns mennyiség  
egyesével beazonosíthatók  
“egzakt” törvények



point mechanics  
~ 5 relevant

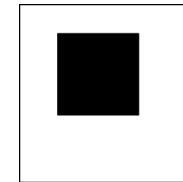


Ising model  
3 relevant

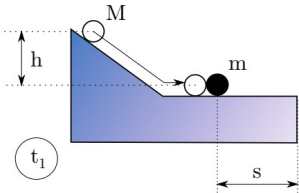


Standard Model  
21 relevant  
(symmetries!)

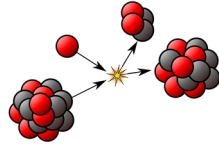
geometric images  
~ 10-100 irrelevant



# A rendszerek leírása



point mechanics  
~ 5 relevant



nuclear physics  
20-? relevant



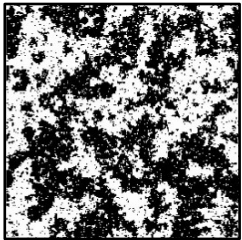
chemistry, biology  
~ 100-? relevant



## Intelligencia

Sok releváns mennyiség

nem beazonosítható szerep,  
egymással helyettesíthetők  
közelítő törvények



Ising model  
3 relevant

Drei Generationen der Materie (Fermionen)

	I	II	III
Quarks	u up 6.2 MeV	c charm 1.370 GeV	t top 173.2 GeV
Leptonen	e Elektron 0.511 MeV	μ Mikron 105.7 MeV	τ Tau 1.777 GeV
Neutrinos	ν <sub>e</sub> Elektron-Neutrino 0.1 MeV	ν <sub>μ</sub> Mikron-Neutrino 0.1 MeV	ν <sub>τ</sub> Tau-Neutrino 0.1 MeV
Photonen	γ	γ	γ

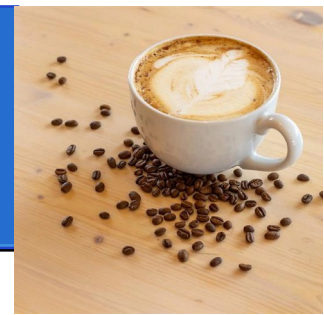
Standard Model  
21 relevant  
(symmetries!)

geometric images  
~ 10-100 irrelevant

face recognitions  
~ 30000 irrelevant



# Összefoglalás



A világ különböző jelenségköreit (diszciplínáit) leíró modellek:

- **NEM alkotnak analitikusan egymásból kiszámítható hierarchiát** (hardver-szoftver)
  - alulfekvő modellből nem következik az összetett modell, és viszont
  - a modellekben releváns kölcsönhatások száma inherens tulajdonság
  - világ  $\neq$  SM, kémia  $\neq$  Schrödinger egyenlet, klíma  $\neq$  CO<sub>2</sub> szint, stb.
- az elméletben szereplő paraméterek száma inherens tulajdonság: “távlat”, pontosság
- kevés paraméteres rendszereknél (<10-20) működik a **tudományos módszer** egzakt, megérthető, egyértelmű
- sok paraméteres rendszerekben (>100) **intelligens megközelítés** kell nem egzakt, nem egyértelmű, részleteiben nem megérthető
- valójában a kettő kombinációja adja a legpontosabb eredményeket



The end

