

# **Kvarkfolyadék a Rubik Kockán**

## **- feladatok és megoldások**

Csörgő T.

MTA Wigner FK, Budapest és EKE KRC, Gyöngyös



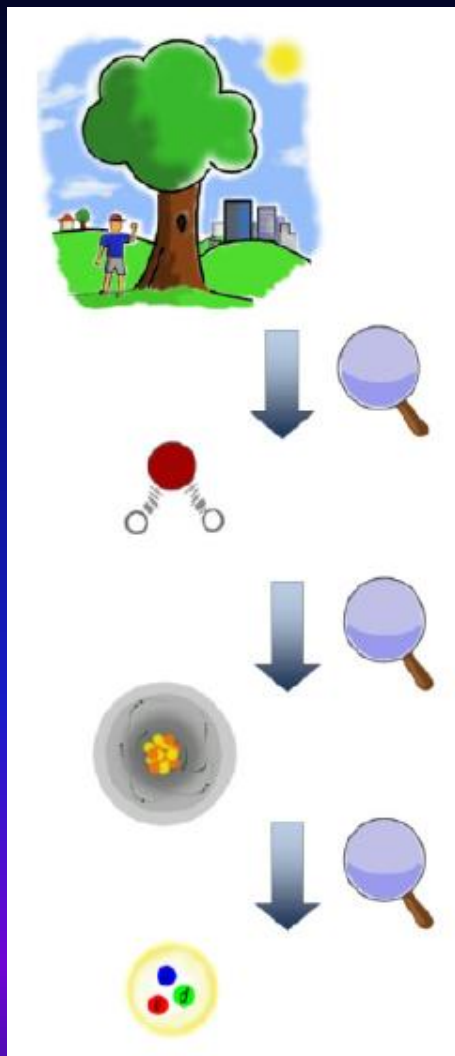
# DEDIKÁCIÓ: KISS LAJOS TANÁR ÚR



**„A diák feje nem edény,  
amit meg kell tölteni,  
hanem fáklya,  
amit lánggra lehet lobbantani.”**

**Kiss Lajos, a Fizika Tanára  
-Plutharkosz után, szabadon**

# ALAPVETŐ KÉRDÉS: MIBŐL VAGYUNK?



Fermionok				
Kvarkok	2.4 MeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ u up	1.27 GeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ c charm	171.2 GeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ t top	
	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	
	<2.2 eV 0 $\frac{1}{2}$ $\nu_e$ elektron neutrínó	<0.17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ $\nu_\mu$ műon neutrínó	<15.5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ $\nu_\tau$ tau neutrínó	91.2 GeV 0 1 Z <sup>0</sup> gyenge
	0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e elektron	105.7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ $\mu$ műon	1.777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ $\tau$ tau	80.4 GeV $\pm 1$ 1 W <sup>±</sup> gyenge
				Bozonok

A modern fizika válasza kissé komplikált, de jól modellezhető:

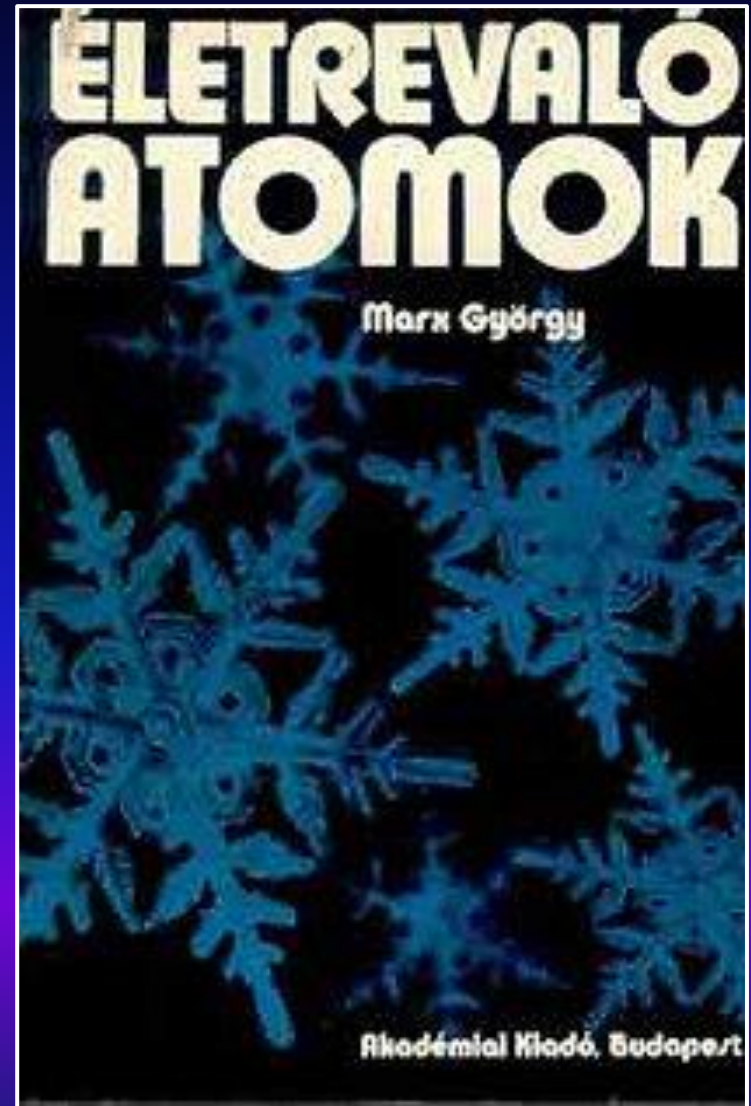
Csörgő J, Török Cs, Csörgő T.: Részecskés kártyajáték – elemi részecskék, játékosan (2011)

# MODELLEZÉS ÉS A MARSLAKÓK

A fény néha  
golyóként viselkedik,  
de nem golyó;  
hullámként terjed,  
de nem hullám;  
Egyszerre golyó is és hullám is,  
Egyszerre egyik sem.  
Akkor mi is a fény?

A fény:  
ÉPPEN OLYAN,  
THATAGATA,  
mint a fény

Értelmezés /Marx György/:  
Marslakó a Földön

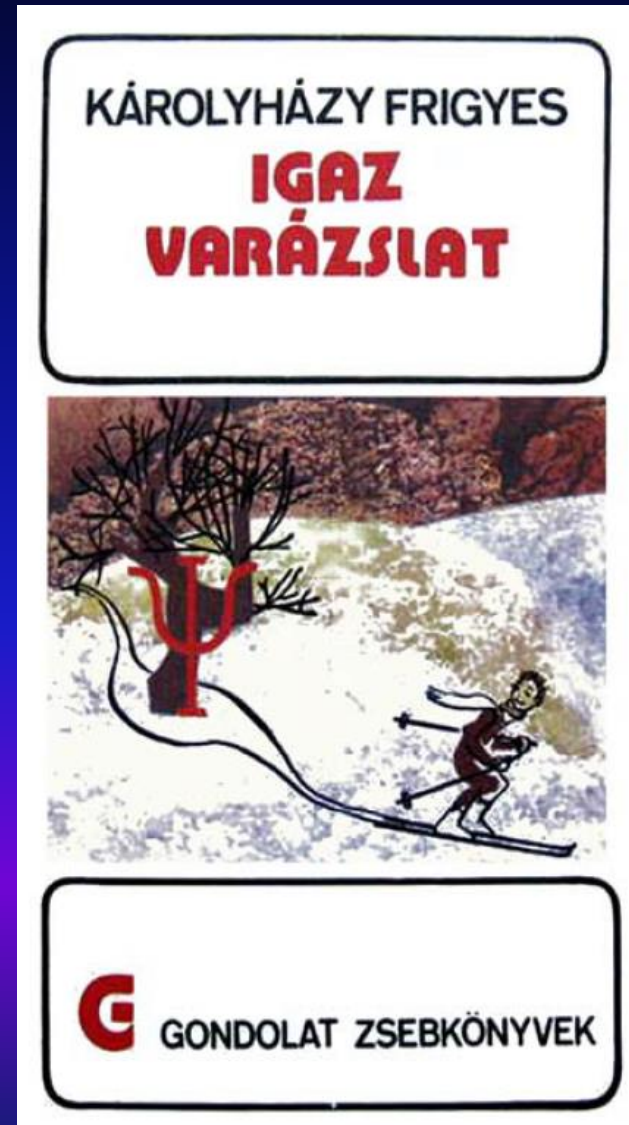


# A KVANTUMMECHANIKA FILOZÓFIÁJA

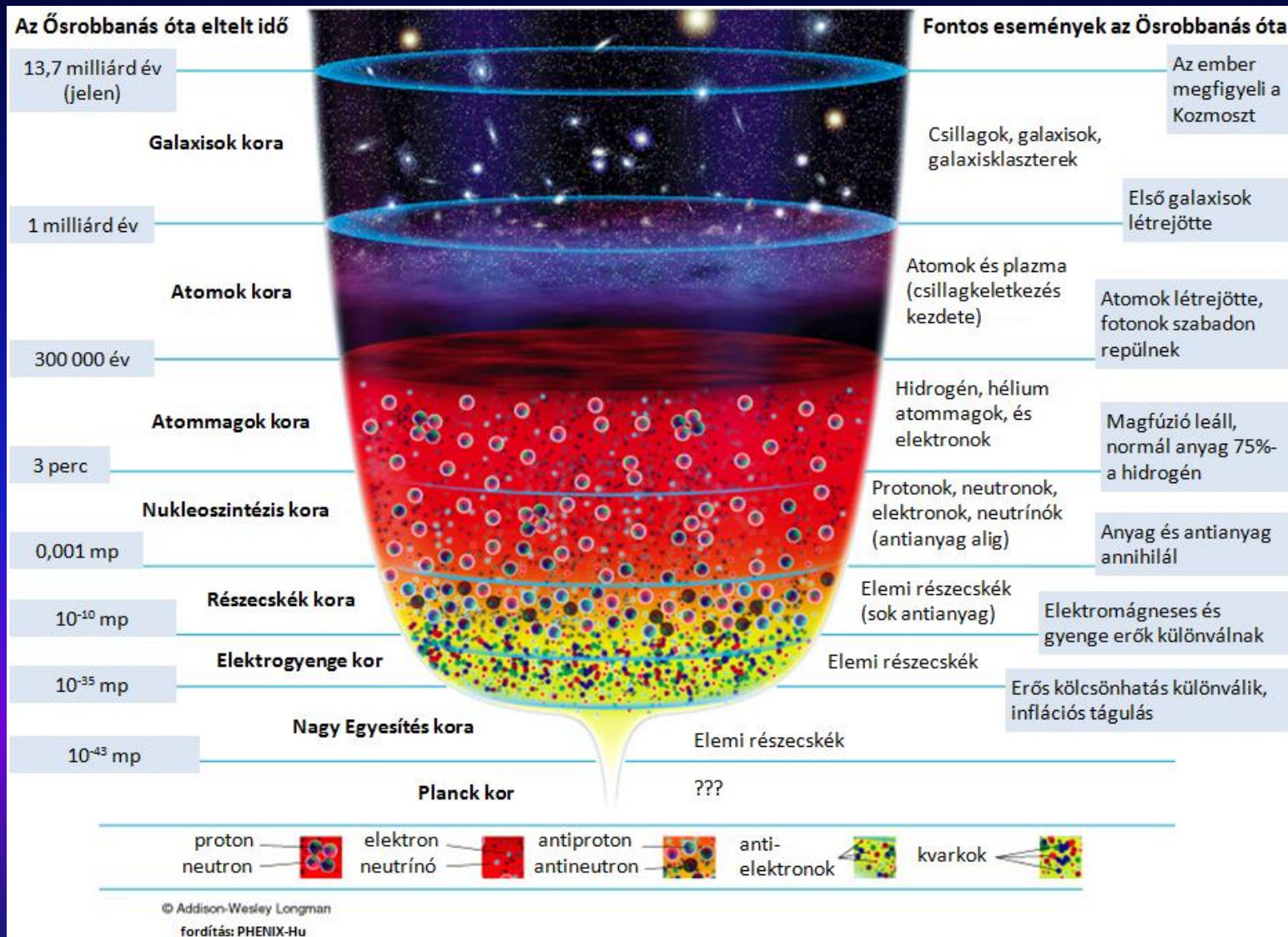
Az elektron  
Golyóként csapódik be, de  
Hullámként terjed  
(síelő elektron a címlapon)

Áthatol a hegyen annak  
megmászása nélkül

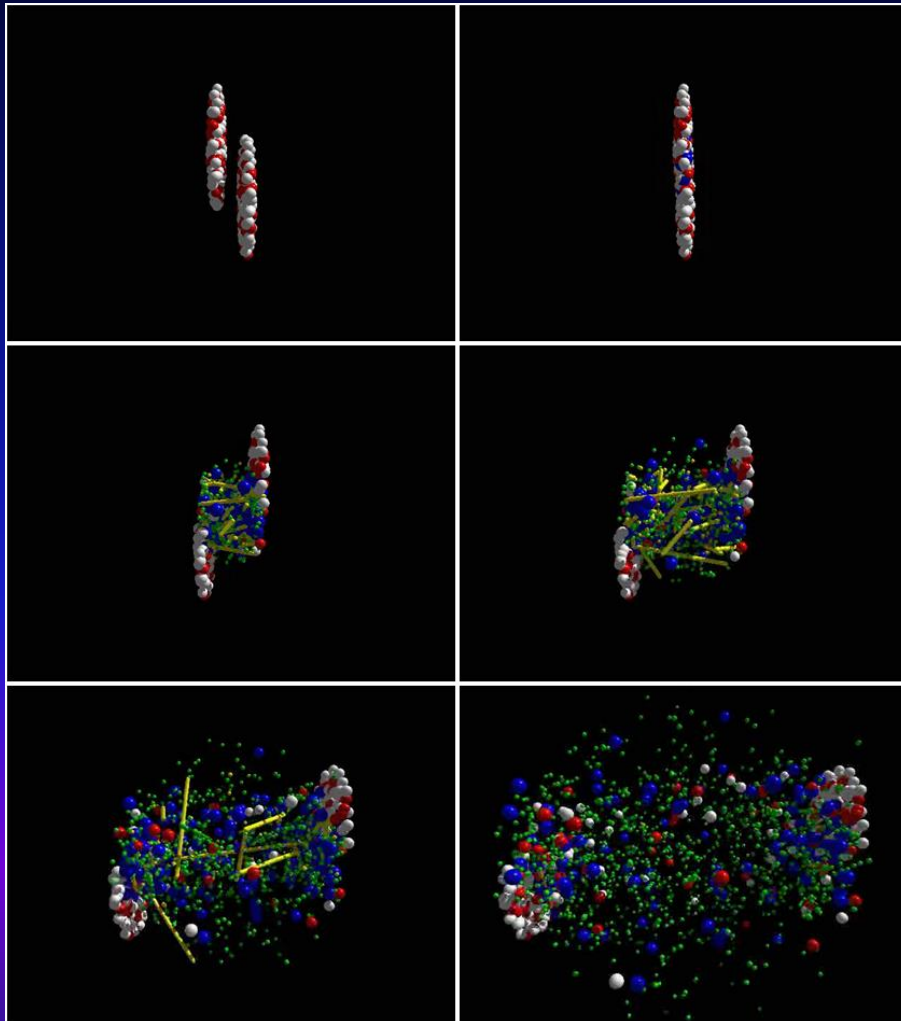
Minden részecske  
éppen ilyen...



# VILÁGEGYETEMÜNK: A MAI FIZIKAI KÉP ÉS A TÖKÉLETES KVARKFOLYADÉK FIZIKÁJA



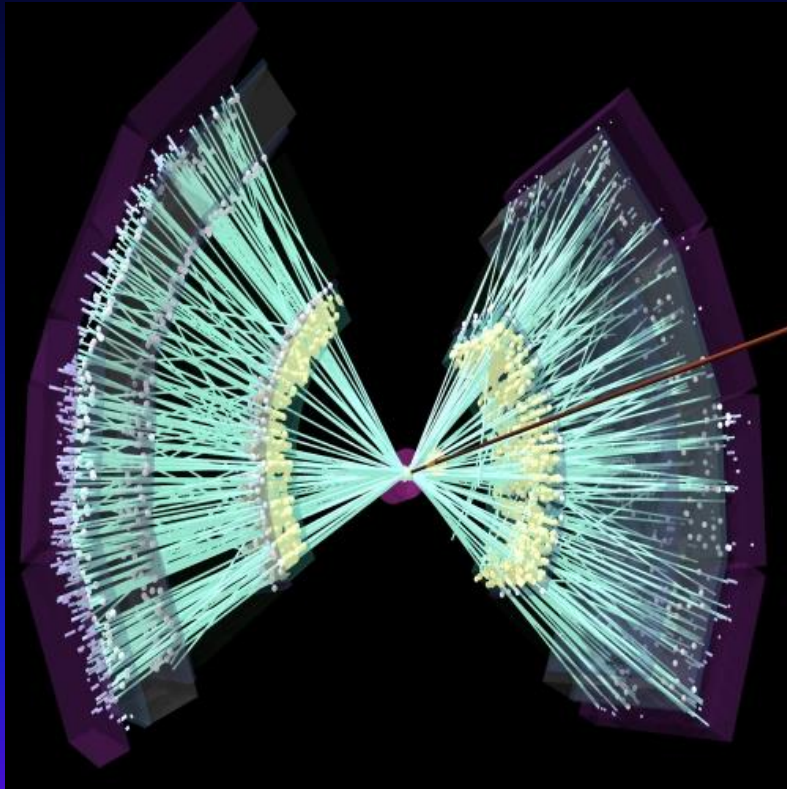
# A KVARKANYAG - ELMÉLETILEG



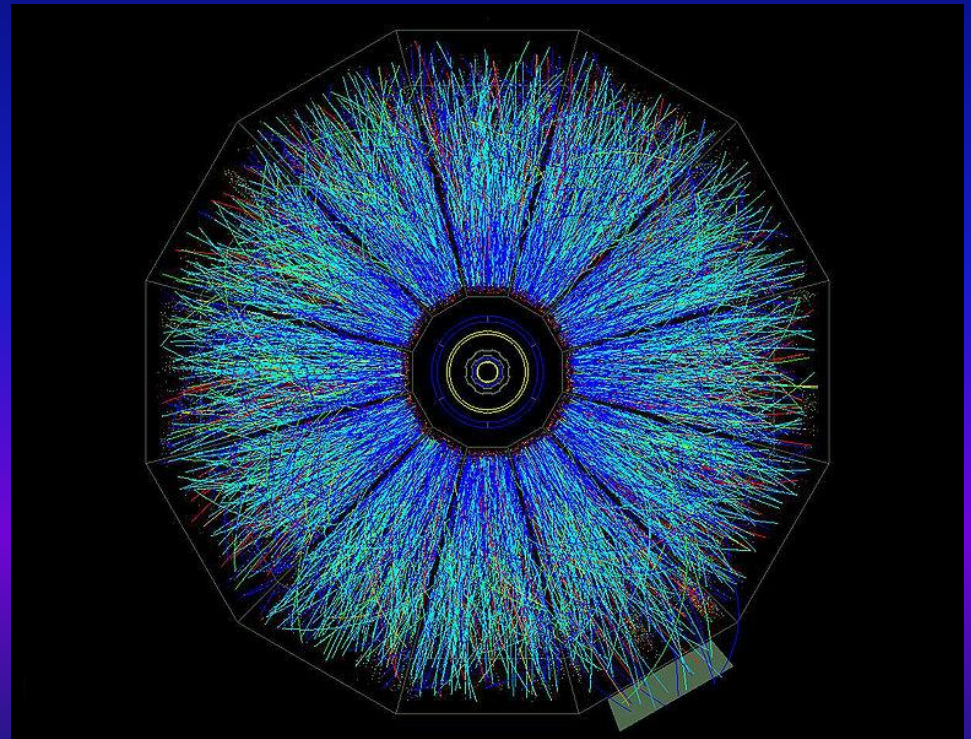
A RHIC Au+Au ütközéseinek elméleti leírása. Nagy energiás nehézion-ütközésekben erősen kölcsönható kvark-gluon plazma jön létre, meglepő tulajdonságokkal: a kvarkok tökéletes folyadékának tulajdonságait az USA Relativisztikus Nehézion Ütköztető (RHIC) gyorsítójának kísérletei tárták fel a Brookhaveni Nemzeti Laboratóriumban. Az eredményeket megerősítették, és további részletekkel gazdagították a CERN LHC ALICE, ATLAS és CMS kísérletei.

# KVARKFOLYADÉK - KÍSÉRLETILEG

A kvarkok tökéletes folyadékát, angol rövidítésével az sQGP-t az USA Brookhaveni Nemzeti Laboratóriumában a PHENIX és a STAR kísérletben fedezték fel a RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) gyorsítóban.



A tökéletes kvarkfolyadék, az sQGP tulajdonságait megerősítette és további részletekkel gazdagította a CERH LHC ALICE, ALTAS és CMS kísérlete.





# A KVARKFOLYADÉK TULAJDONSÁGAI

## A RHIC-nél

Au+Au:

Új jelenség

Új anyag

Folyadék halmazáll.

Kvarkok folynak

A folyás  $\sim$  tökéletes

## Jellemzői:

Opálos,  $R_{AA} \sim 0.2$

Csillapítási hossz  $\sim 2$  fm

$C_s = 0.35 \pm 0.05$

$\eta/s \leq$  szuperfolyékony He/5

$T_{init} \geq 4 \times 10^{12}$  K

$\epsilon_{init} \geq 15$  GeV/fm<sup>3</sup>

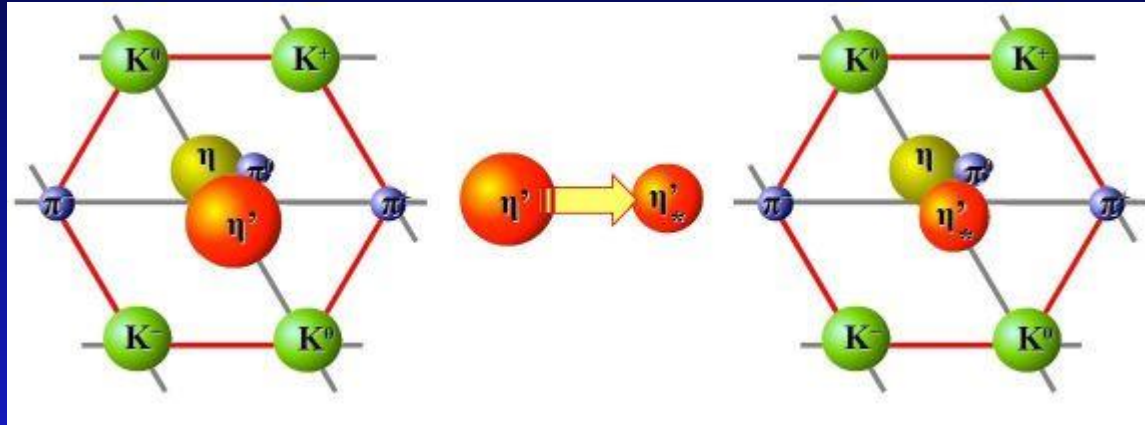
$p_{init} \geq 1.5$  GeV/fm<sup>3</sup>

**Forró, robban, folyik!**

## A RHIC-nél

az  $\eta'$  mezon tömegcsökkenése

egy elveszett szimmetria helyreáll



T. Cs, R. Vértesi, J. Sziklai  
Phys.Rev.Lett.105:182301,2010

**Új eredmény (PHENIX, 2017):**

A kvarkfolyadékban az elveszett szimmetria tényleg visszaáll –

Archimédesz törvénye?

# ELEMI RÉSZECSKÉK

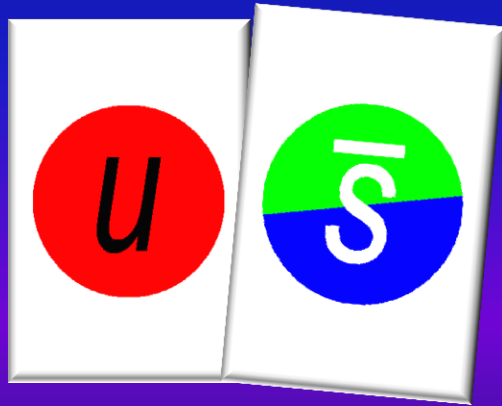
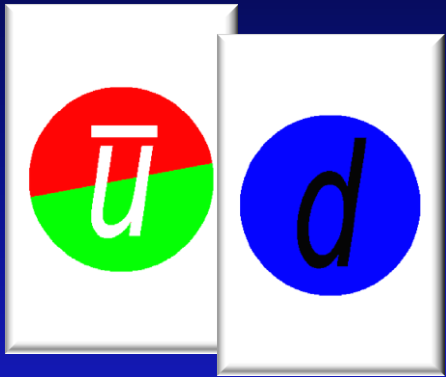
Three generations of matter (fermions)

	I	II	III		
mass →	2.4 MeV/c <sup>2</sup>	1.27 GeV/c <sup>2</sup>	171.2 GeV/c <sup>2</sup>	0	? GeV/c <sup>2</sup>
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
name →	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> photon	<b>H</b> Higgs boson
Quarks	4.8 MeV/c <sup>2</sup>	104 MeV/c <sup>2</sup>	4.2 GeV/c <sup>2</sup>	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluon	
Leptons	<2.2 eV/c <sup>2</sup>	<0.17 MeV/c <sup>2</sup>	<15.5 MeV/c <sup>2</sup>	91.2 GeV/c <sup>2</sup>	
	0	0	0	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>Z<sup>0</sup></b> Z boson	
	0.511 MeV/c <sup>2</sup>	105.7 MeV/c <sup>2</sup>	1.777 GeV/c <sup>2</sup>	80.4 GeV/c <sup>2</sup>	
	-1	-1	-1	$\pm 1$	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>W<sup>±</sup></b> W boson	
					Gauge bosons

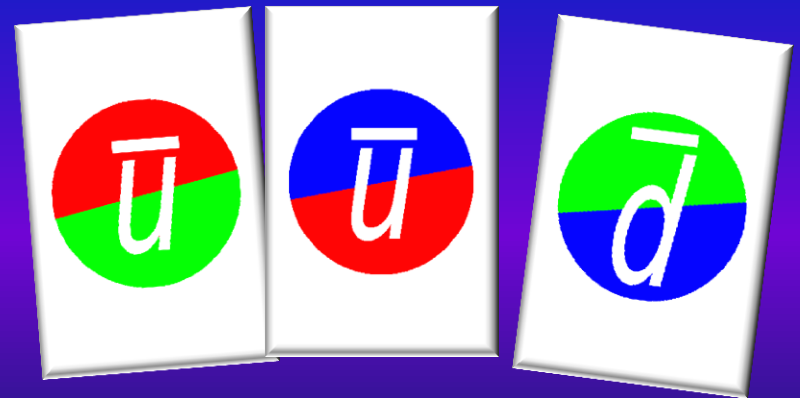
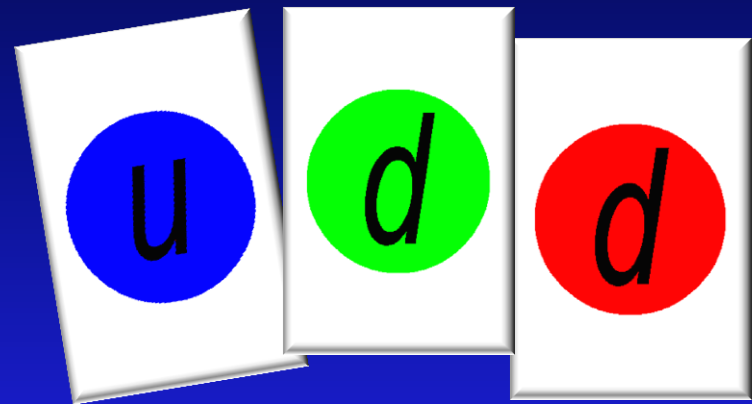


# SU(3) SZÍN ÉS AZ OPTIKAI SZÍNEK

Mezonok



Barionok



# KVARKANYAG – A RUBIK KOCKÁN



Tökéletes kvarkfolyadék a Rubik kockán:

Lokálisan színes, globálisan fehér:

**Piros**, szemben vele anti-piros: zöld/kék

**Zöld**, szemben vele anti-zöld: kék/piros

**Kék**, szemben vele anti-kék: piros/zöld

kvarkok, szemben velük anti-kvarkok

megmaradási törvények

forog és „tágul”

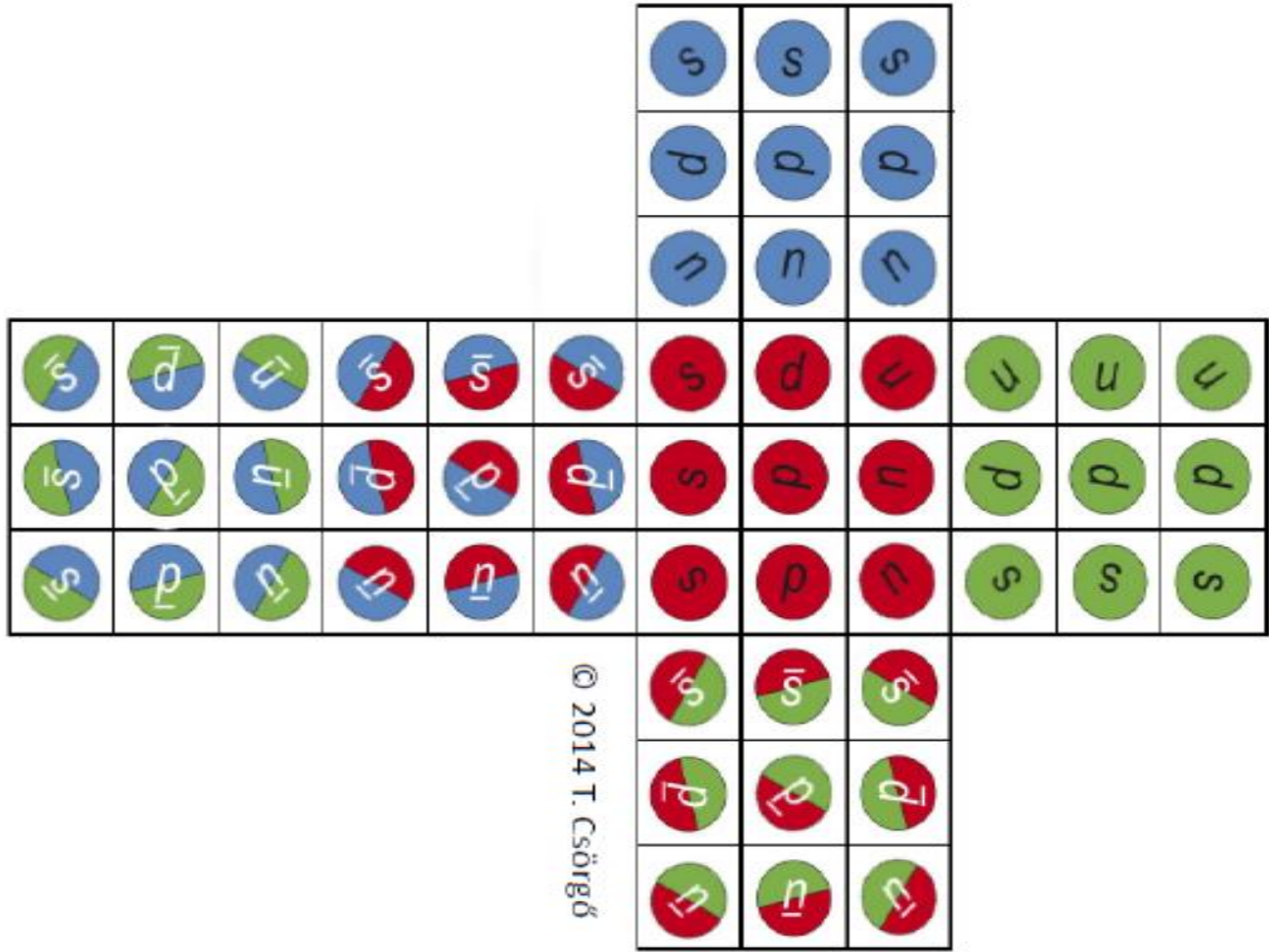
nagy mértékben összekeveredhet (entrópia)

könnyen forog –

a tökéletes kvarkfolyadék modellje



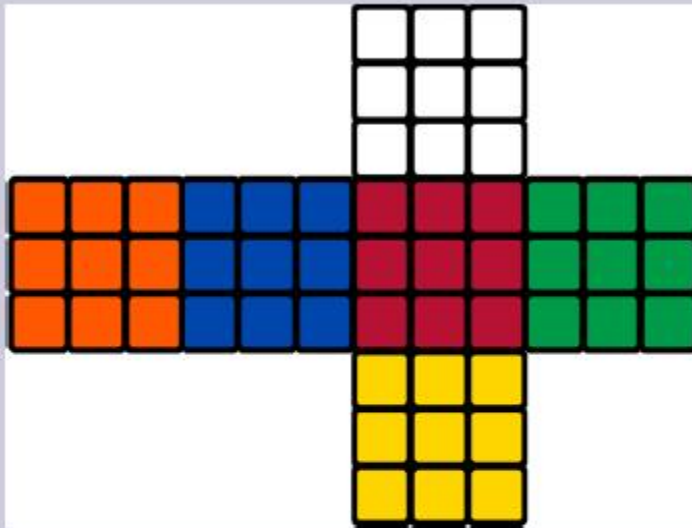
# KVACKA – KVARKANYAG A KOCKÁN



© 2014 T. Csörgő

# KVACKA – KVARANYAG A KOCKÁN

Original Rubik's Cube

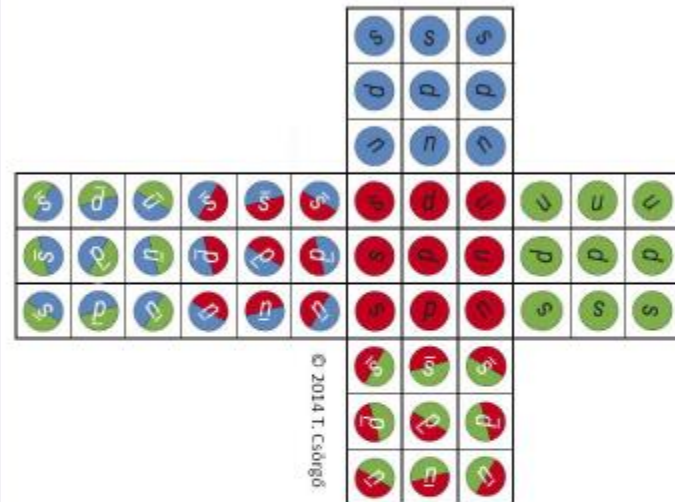


(red, orange)

(white, yellow)

(blue, green)

PF Quarks Cube



© 2014 T. Csörgő

(red, anti-red)

(green, anti-green)

(blue, anti-blue)

# A KVARKOK MÁR A RUBIK KOCKÁN VANNAK

Alapötlet (CsT, 2014):  
Részecskés Kártyajáték  
3 szín és 3 anti-szín:  
Illik a Rubik kockára  
(csak kvarkok és anti-kvarkok)

Megvalósítás (CsT+Rubik Co., '14):  
100 szponzorált példány  
a WPCF 2014 résztvevőinek  
<http://wpcf2014.karolyrobert.hu/>

Angol leírás (CsT, 2015 június):  
2015 AGS and RHIC Users Meeting  
BNL, USA és KEK, Japán

Nyilvános bemutatás (2015/09):  
2015 CERN @ Wigner Nyílt Napok  
Budapest

Bernáth B: 1'10" + vakon rakom!





# A RUBIK KOCKA MATEMATIKÁJA

## Eredeti Rubik (bűvös) kocka:

3x3x3 kocka, 6 szín  
8 sarok-elem, 3 szín, 3 állás  
12 él-elem, 2 szín, 2 állás  
6 lapközép-elem, 1 szín, 1 állás  
csak páros permutációk!

sarok-elemek: 8! sorrend  
 $3^8 / 3 = 3^7$  lehetséges orientáció

él-elemek: 12! sorrend  
 $2^{12} / 2 = 2^{11}$  lehetséges orientáció

lapközepek: nincs orientáció

a kocka állása: nincs orientáció

Lehetséges állapotok száma:  
 $8! \times 3^7 \times 12! \times 2^{11} \times 1 \times 1 / 2$   
 $\sim 4.3 \times 10^{19}$

## Kvarkos (folyékony) kocka:

3x3x3, 3 szín+3 anti-szín  
8 sarok-elem, 3 szín, 3 állás  
12 él-elem, 2 szín, 2 állás  
6 lapközép-elem, 1 szín, 4 állás  
csak páros permutációk!

sarok-elemek: 8! sorrend  
 $3^8 / 3 = 3^7$  lehetséges orientáció

él-elemek: 12! sorrend  
 $2^{12} / 2 = 2^{11}$  orientáció lehet

lapközepek:  $4^6 / 2 = 2^{11}$  állás

kocka állása: 6x4 féle lehet

Lehetséges állapotok száma:  
 $8! \times 3^7 \times 12! \times 2^{11} \times 2^{11} \times 24 / 2$   
 $\sim 2.1 \times 10^{24}$

# A KVARKOS KOCKA FIZIKÁJA

	Eredeti Rubik kocka	Kvarkos kocka
Állapotok száma (N)	43252003274489856000	2125922464947725402 112000
Entrópia ( $S = \ln N$ )	$\sim 45.21$	$\sim 56.02$
Oldal hossza (L, mm)	57	57
Entrópiasűrűség ( $s = S/L^3, \text{m}^{-3}$ )	$\sim 2.4 \times 10^5$	$\sim 3.0 \times 10^5$
Szemben színek	(szín, szín+sárga): (fehér,sárga), (kék,zöld), (piros,narancs)	(szín, anti-szín): (piros,anti-piros), (kék, anti-kék), (zöld, anti-zöld)

	Tökéletes kvarkfolyadék
Energiasűrűség, $e$ [GeV/fm <sup>3</sup> ]	15
Hangsebesség, $c_s^2$	0.1
Hőmérséklet, $T$ [GeV]	0.22
Entrópiasűrűség $s = (1+c_s^2) e / T$ , [m <sup>-3</sup> ]	$7.5 \times 10^{46}$

**Hű modellhez:**  
 $L' = L / 25^{1/3} / 10^{10}$   
 $L' \sim 2 \times 10^{-12} \text{ m}$

# FELADATOK A KVARKOS KOCKÁVAL

**1. feladat:** A kvarkos kocka kirakott állapota (alapállapota) színsemleges, azaz fehér, mivel a szemközti oldalak színeinek eredője szín + antiszín = fehér. Ubulka este elcsente a kvarkos kockánkat és alaposan összekeverte, nem tudta kirakni reggelig. Milyen színű lett az Ubulka által összekevert kvarkos kockánk?

## 1. feladat megoldása:

A kvarkos kocka alapállapotában jelöljük a kis piros, kék és zöld lapok színét rendre  $p$ ,  $k$  és  $z$ -vel, az antipiros, antikék és antizöld lapokat pedig jelölje az ellentett előjel,  $-p$ ,  $-k$  és  $-z$ .

A globális színtelen alapállapot jele legyen  $0$ .

A kezdő, kirakott állapot egyenlete, sorba menve a 6 lapon:

$$0 = (9 p) + (9 z) + (9 k) + (- 9 p) + (- 9 z) + (- 9 k)$$

Azaz  $0 = 9 (p - p) + 9 (z - z) + 9 (k - k)$

Ubulka összekevert kockája a lapok helyzetét változtatta meg, az első lapon  $u_{p1}$  piros,  $u_{z1}$  zöld,  $u_{k1}$  kék,  $u_{ap1}$  antipiros stb lappal, de csak a lapok helyzete változott meg. Tehát ha összeszámoljuk továbbra is minden színből és minden antiszínből 9 van:

$$U = 9 p - 9 p + 9 z - 9 z + 9 k - 9 k = 0.$$

Tehát bárhogyon forgatta Ubulka a kockát, annak

**eredő fehér színe megmarad. Ez a szín-megmaradás törvénye.**

# FELADATOK A KVARKOS KOCKÁVAL

**1. feladat általánosítása:** A kvarkos kocka kirakott állapota (alapállapota) színsemleges, azaz GLOBÁLISAN fehér. Tervezzünk olyan kvarkos Rubik kockát, amelyik lokálisan is (minden elemében) fehér!

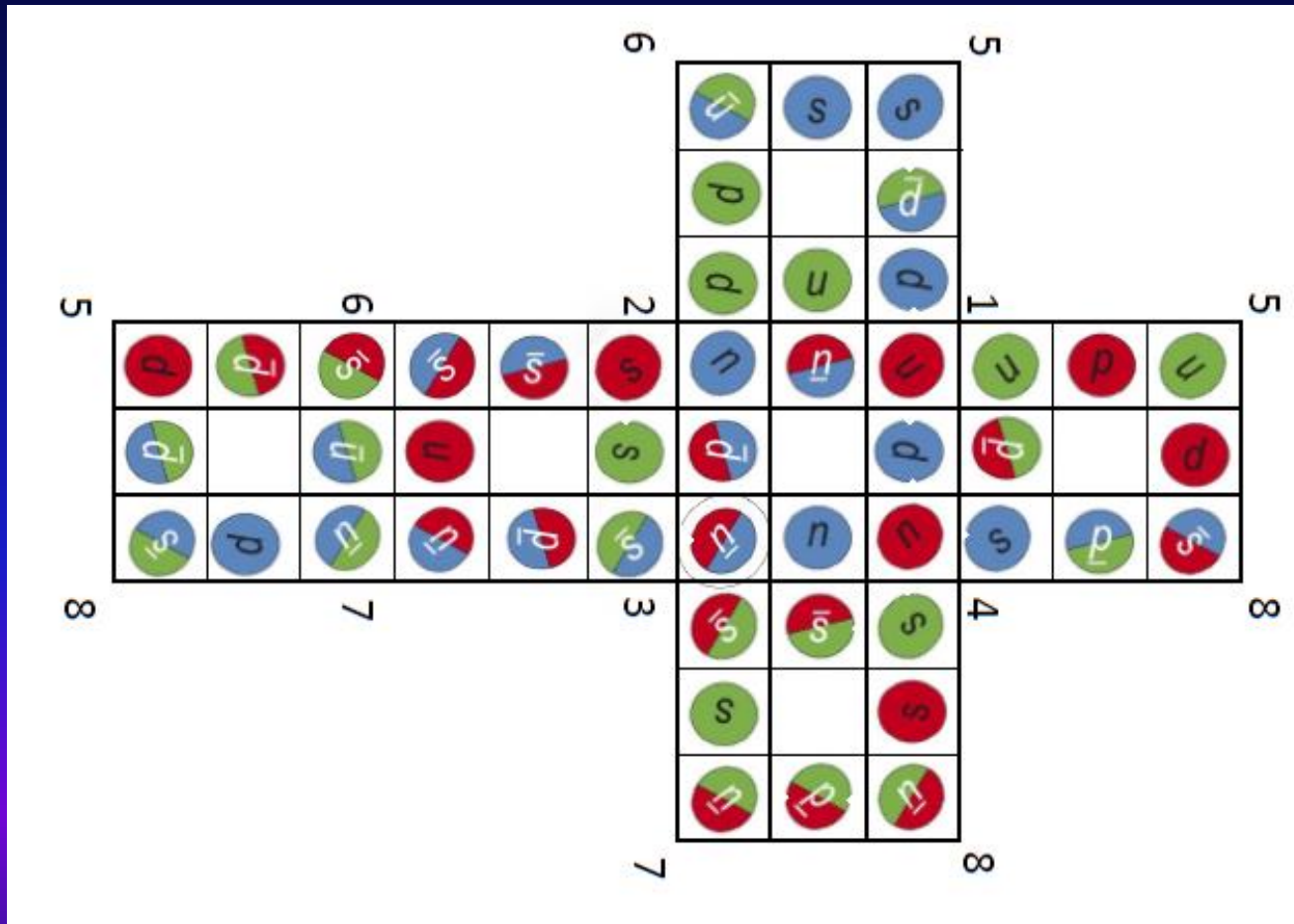
**1. feladat általánosításának a megoldása:** A Rubik kockán sarok, él és lapközép elemek is vannak. A sarok elemek színsemlegesen megfeleltethetően barionoknak és anti-barionoknak is. Az él-elemek színsemlegesen megfeleltethetően a mezonoknak. Azonban a lapközép elemekre akár kvark, akár anti-kvark kerül, nettó színük megmarad. Ezért a 3x3x3-as Rubik kockán lokálisan színsemleges hadronanyag nem rakható ki. **A globálisan színsemleges tökéletesen folyékony kvarkanyag lokálisan színes, lényegesen különbözik a lokálisan fehér hadronanyagtól.**

2. A fentiekből következik, hogy a **lokálisan színsemleges hadronanyag csak a lapközép elem nélküli, ún. lyukas Rubik kockán modellezhető.**

# HADRONANYAG A LYUKAS KOCKÁN

**Az 1. feladat általánosításának a megoldása:**

A lyukas Rubik kocka lokálisan fehér kirakása – a hadronanyag modellje



**Az 1. feladatból nyitott kérdés (megoldatlan probléma):**

Hányféle lényegesen különböző, lokálisan fehér hadronanyag modell van?

# FELADATOK A KVARKOS KOCKÁVAL

**2. feladat:** A kvarkos kocka kirakott állapota (alapállapota) a korai Világegyetemhez hasonlóan ugyanannyi kvarkot tartalmaz, mint amennyi antikvarkot. Mivel három kvark színsemleges kombinációja egy bariont, három antikvark pedig egy antibariont alkot, és a barionszám a barionok és az antibarionok számának a különbsége, a kvarkos kocka nettó barionszáma  $B = [(3+3+3) + (3+3+3) + (3+3+3) - (3+3+3) - (3+3+3) - (3+3+3)]/3 = 0$ .

Ubulka másnap este is elcsente az újra kirakott kvarkos kockánkat és alaposan összekeverte, és megint nem tudta kirakni reggelig. Mennyi lett barionszáma az Ubulka által összekevert kvarkos kockánknak?

## **2. feladat megoldása:**

A kvarkos kockán a keveréstől a lapok csak helyzetet, sorrendet változtatnak, új helyre kerülhetnek, de a kvarkokat jelképező lapok ugyanazok maradnak. Így Ubulka összekevert kockáján is pontosan  $9 \times 3 = 27$  kvark és  $9 \times 3 = 27$  antikvark maradt, akárhogy forgatta a kockát. Az eredő barionszám továbbra is:

$$UB = (27 - 27)/3 = 0.$$

Tehát bárhogyan is forgatta Ubulka a kockát, annak

**eredő barionszáma megmaradt.**

**Ez a barionszám-megmaradás törvénye.**

# FELADATOK A KVARKOS KOCKÁVAL

**3. feladat:** A kvarkos kockán pontosan kilenc  $u$ , kilenc  $d$ , kilenc  $s$  és kilenc anti- $u$ , anti- $d$  és anti- $s$  kvark jelképét láthatjuk. Forgassuk úgy a folyékony Rubik kockát, **hogy az oldalakat a kvarkok íze szerint rendezzük, azaz minden oldalon azonos ízű kvarkok legyenek.**

## **3. feladat megoldása:**

A feladat feltételezi, hogy a folyékony, kvarkos Rubik kockának van olyan állapota, amelyben minden oldalon azonos ízű kvarkok vannak, és azt is feltételezi, hogy ez az állapot az alapállapotból forgatással elérhető. Azonban bármilyen legyen is a forgatás, az a lapközepeket nem változtatja meg, csak az él és sarok kockákat cserélgeti. Mivel valamennyi lapközép  $d$  vagy anti- $d$  ízű kvarkot jelöl, ezeket nem lehet egy lapra rendezni. Emiatt a feladatnak nincs megoldása.

## **3. feladat általánosítása:**

A lapközepek miatt még egyetlen egy oldalt sem lehet úgy kikeverni, hogy azon minden kvark íze azonos legyen: lesz a lapközép kockán egy  $d$  vagy egy anti- $d$  kvark, de mind a többi 8 nem lehet azonos a lapközéppel. A feladat csak a lapközép nélküli, lyukas Rubik kockán oldható meg.

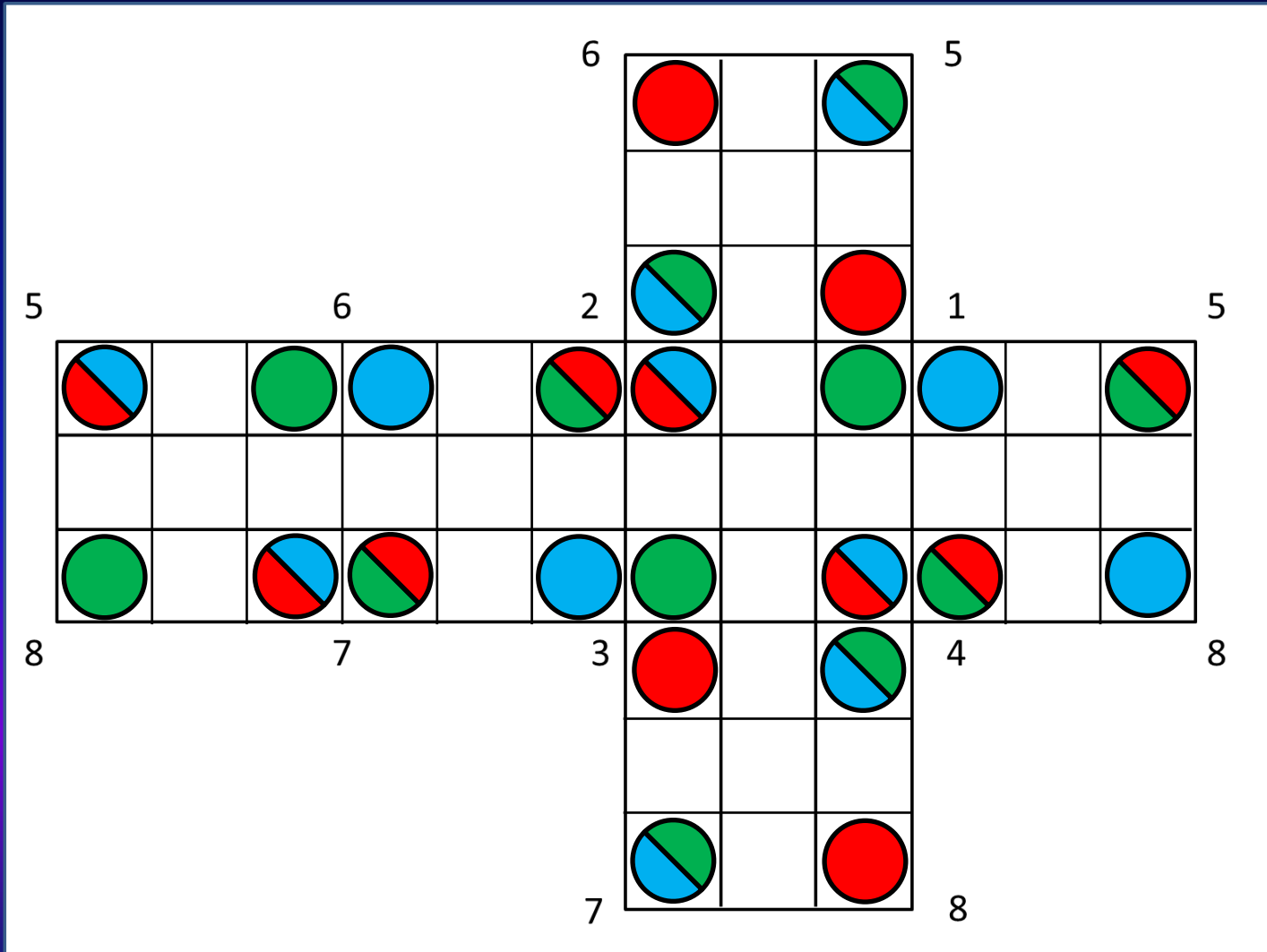
## **3. feladat általánosításának általánosítása:**

Tervezzünk olyan lyukas Rubik kockát, ahol a lapokat ízek szerint rendezzük, és a kocka lokálisan is fehér. Ez a hadronanyag modellje.

# HADRONANYAG A LYUKAS KOCKÁN

## 3. feladat általánosításának a megoldása:

A lyukas Rubik kocka lokálisan fehér és íz szerint is rendezett kirakása

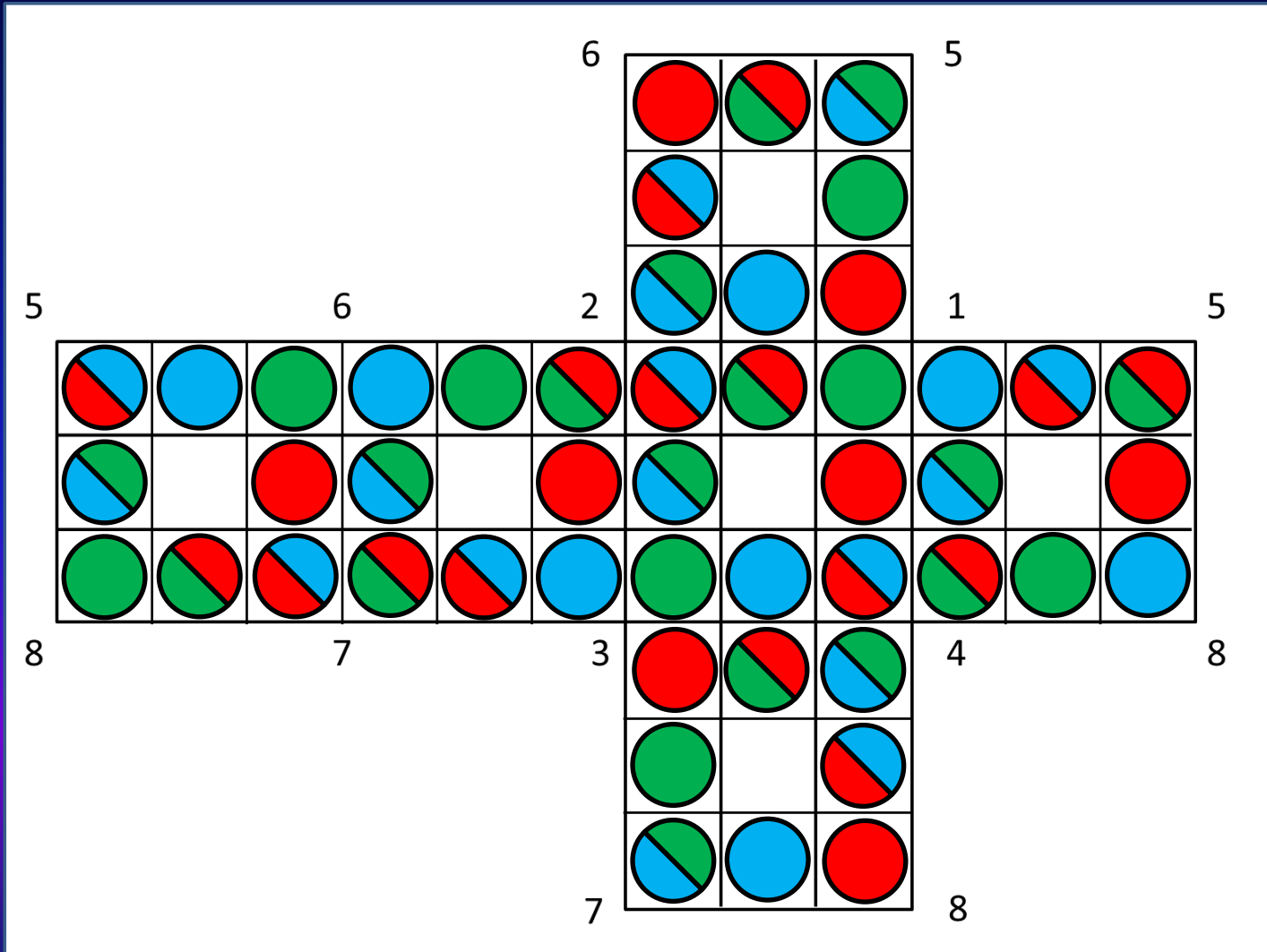




# HADRONANYAG A LYUKAS KOCKÁN

## 3. feladat általánosításának a megoldása:

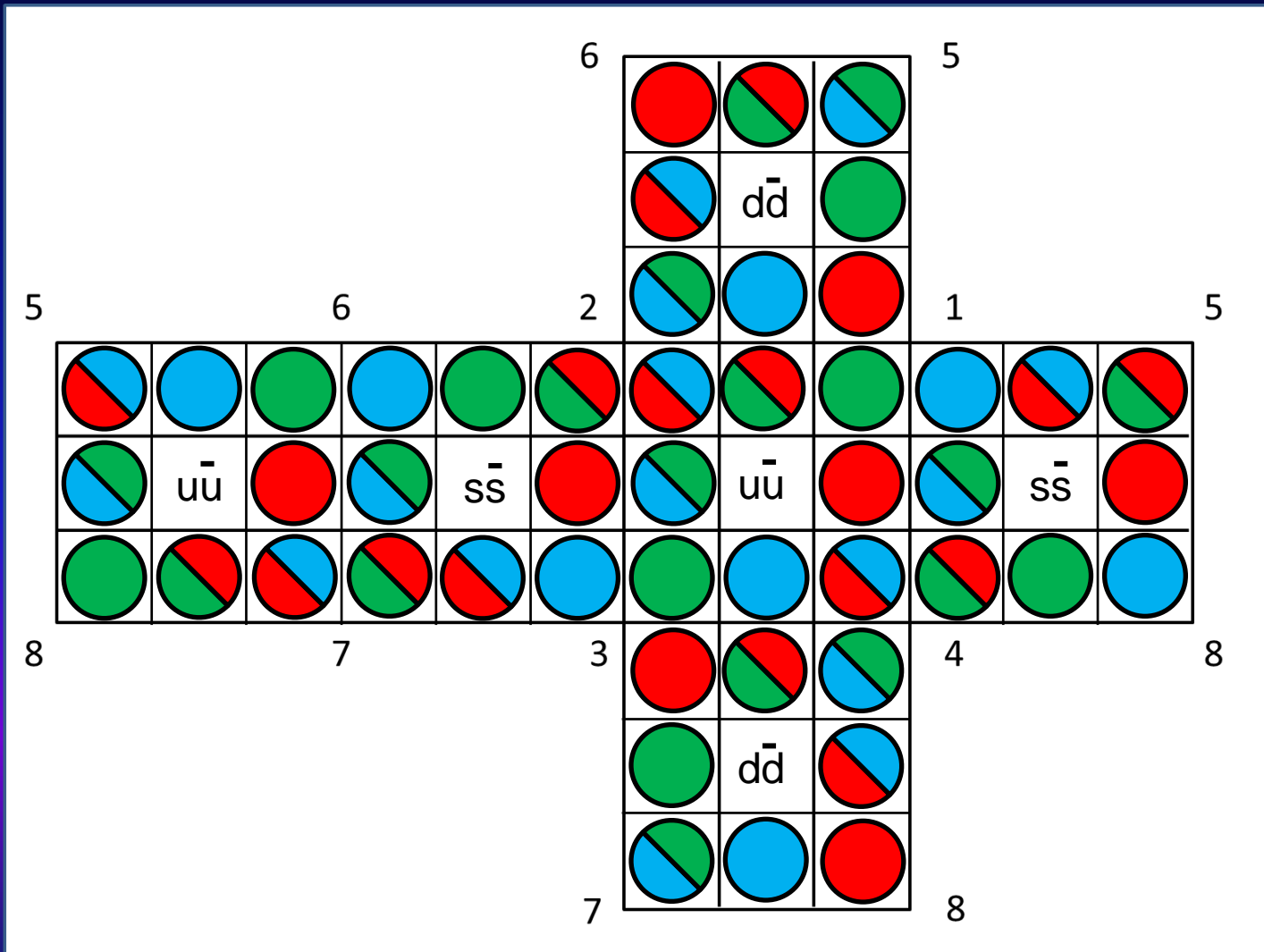
A lyukas Rubik kocka lokálisan fehér és íz szerint is rendezett kirakása



# HADRONANYAG A LYUKAS KOCKÁN

## 3. feladat általánosításának a megoldása:

A lyukas Rubik kocka lokálisan fehér és íz szerint is rendezett kirakása



# FELADATOK A KVACKÁVAL

## 4. feladat:

A RHIC és az LHC kísérleteiben előállított kvarkanyag entrópiasűrűsége  $\sigma \sim 7,5 \cdot 10^{46} / \text{m}^3$ . A kvarkos kocka (kvacka) állapotainak száma:

$$N = 2\,125\,922\,464\,947\,725\,402\,112\,000 \sim 2,12 \times 10^{24}$$

oldaléle

$$L = 57 \text{ mm hosszú.}$$

- Mekkora a kvacka entrópiasűrűsége?
- Mennyire kellene a kvackát lekicsinyíteni, hogy az entrópiasűrűsége akkora legyen, mint a tökéletes kvarkfolyadékéknak?

	Eredeti Rubik kocka	Kvarkos kocka
Állapotok száma (N)	43252003274489856000	2125922464947725402 112000
Entrópia ( $S = \ln N$ )	$\sim 45.21$	$\sim 56.02$
Oldal hossza (L, mm)	57	57
Entrópiasűrűség ( $\sigma = S/L^3, \text{m}^{-3}$ )	$\sim 2.4 \times 10^5$	$\sim 3.0 \times 10^5$

Hű modellhez:

$$\sigma(\text{QM}) = \sigma(\text{Kvacka}) (L/L')^3$$

$$L' = L [\sigma(\text{QM}) / \sigma(\text{Kvacka})]^{1/3}$$

Hű modellhez:

$$L' = L / 25^{1/3} / 10^{10}$$

$$L' \sim 2 \times 10^{-12} \text{ m}$$

# FELADATOK A KVACKÁVAL

## 5. feladat:

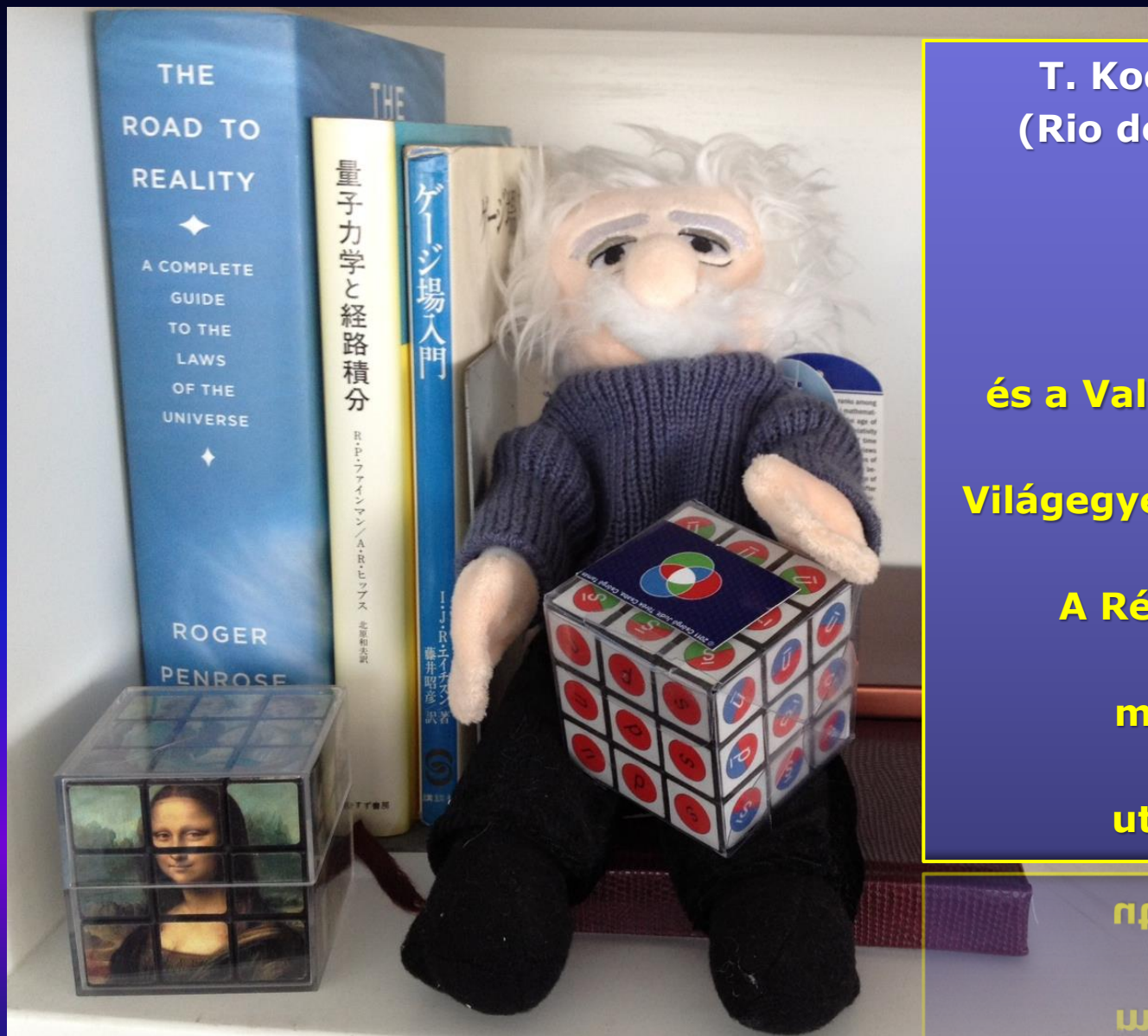
Ubulka szerint nem kell megtanulni a kockaforgatást: véletlenszerűen forgatva majdcsak kijön egyszer a jó eredmény. Tudva hogy a kvarkos kocka (kvacka) állapotainak száma és a legjobb forgatók sem tudnak másodpercenként 10-nél többet forgatni a kockán, becsüljük meg a véletlen helyes kirakáshoz szükséges időt.

	Kvarkos kocka
Állapotok száma (N)	2125922464947725402112000
Kirakáshoz szükséges idő (sec)	212592246494772540211200
Ugyanez az idő években (1 év ~ 365 x 24 x 60 x 60 sec) 1 év ~ 31 536 000 sec	6741255913710443,3 év ~ 6,7 x 10 <sup>15</sup> év
A Világegyetemünk életkora	~ 10 <sup>10</sup> év

**A sikerhez 100 ezer Világkorszaknyi idő kellene**

**Ubulkának érdemes a kocka kirakását megtanulni ...**

# KVARKANYAG – MOSOLYGÓSAN



T. Kodama professzor úr  
(Rio de Janeiro, Brazília):

**Albert Einstein,  
Mona Lisa Mosolya,  
Kvarkos Kocka,  
és a Valósághoz Vezető Út:  
Teljes Útikönyv a  
Világegyetem Törvényeihez.**

**A Részecskés Játékok a  
valóság nem teljes  
modelljei, de nagyon  
érdekes szellemi  
utazásra hívogatnak.**

utazásra hívogatnak.  
érdekes szellemi  
modelljei, de nagyon  
valóság nem teljes

# KVARKFOLYADÉK – KÉZZEL FOGHATÓAN

G.Zweig: aki először  
látta meg a kvarkokat  
kézbe is vehette őket



kvarkok ~ ászok  
kvarkok és a kártyajáték  
kvarkok és a kockajáték  
egyszerre mindkettő?  
egyszerre egyik sem?

