



Az Univerzum mint számítógépes szimuláció

Endrődi Gergely

Eötvös Loránd Tudományegyetem

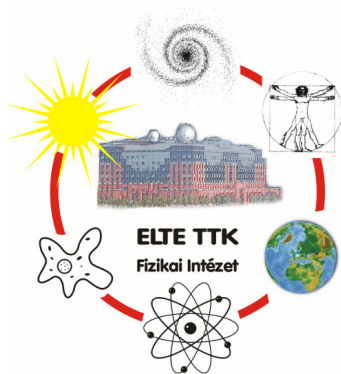


NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI
ÉS INNOVÁCIÓS HIVATAL



Az atomoktól a csillagokig @ ELTE TTK, 2026 március 12

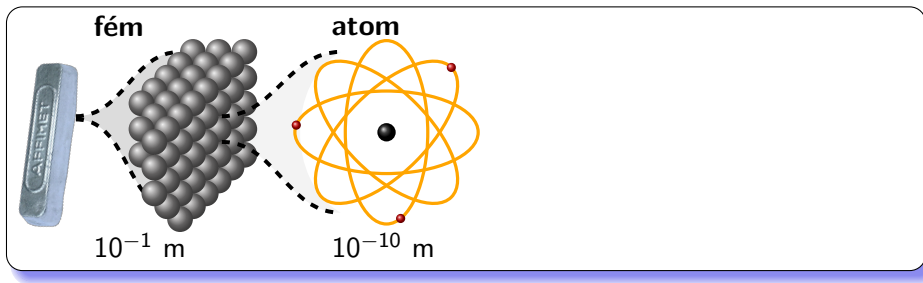
Az atomoktól a csillagokig

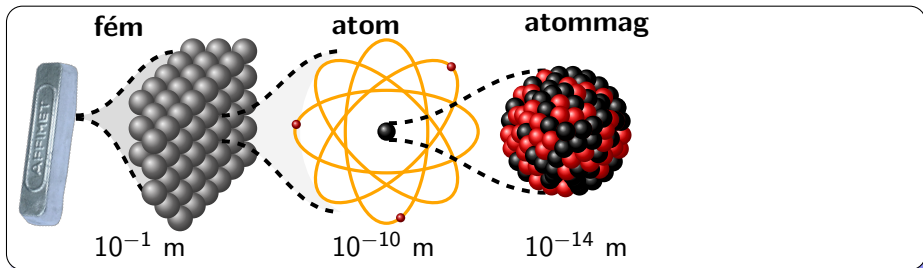


- ▶ a részecskefizika Standard Modellje
 - a csillagoktól az atomokig
 - a korai Univerzumtól a neutroncsillagokig
- ▶ kvantumtérelmélet és szimulációs algoritmusok
 - a dobókockától a szuperszámítógépekig



A csillagoktól az atomokig

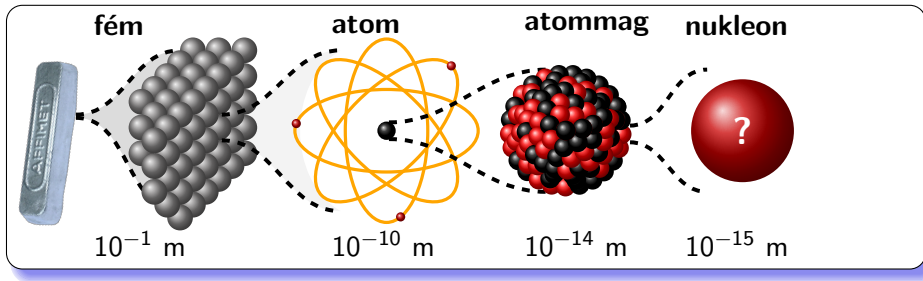


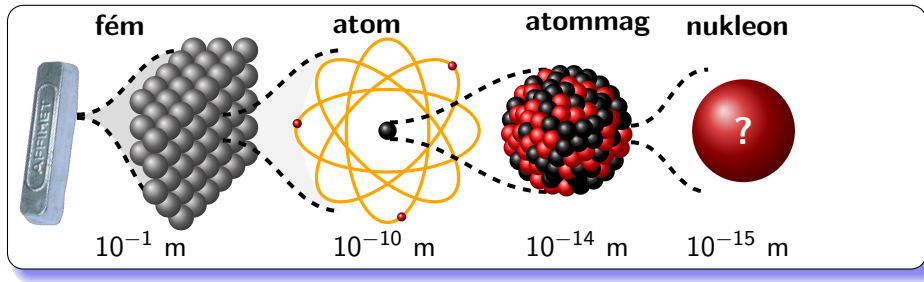


proton



neutron

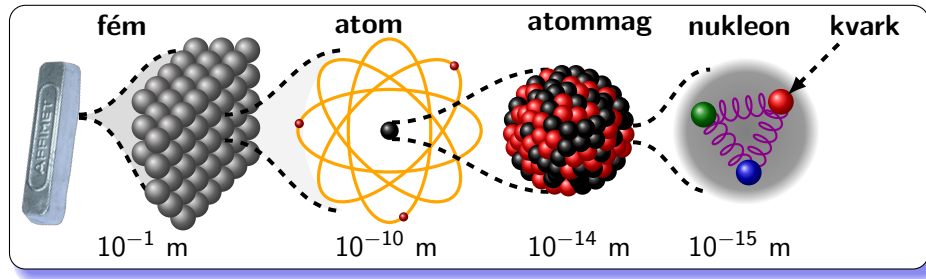




kvarkmodell: (Gell-Mann, Zweig 1964)

Kvantumszíndinamika:

(Fritzsch, Leutwyler, Gross, Politzer, Wilczek 1973)



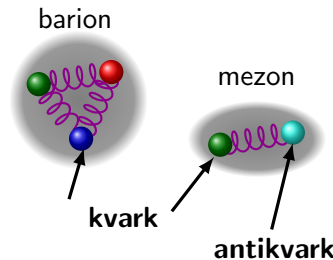
kvarkmodell: (Gell-Mann, Zweig 1964)

Kvantumszíndinamika:

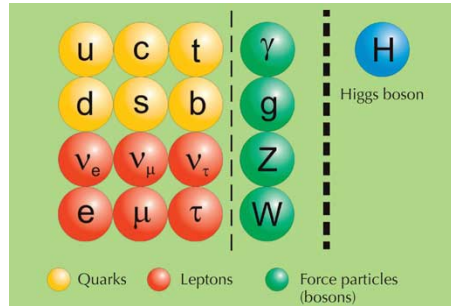
(Fritzsch, Leutwyler, Gross, Politzer, Wilczek 1973)

proton, neutron – **kvarkok kötött állapotai**

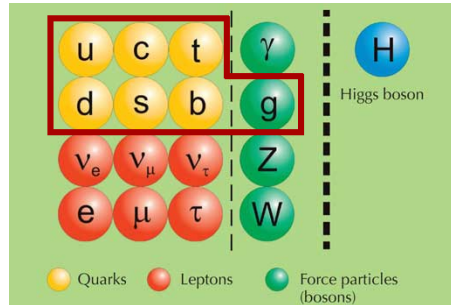
kvarkok között ható erő: **erős kölcsönhatás**



► elemi részecskék és kölcsönhatások

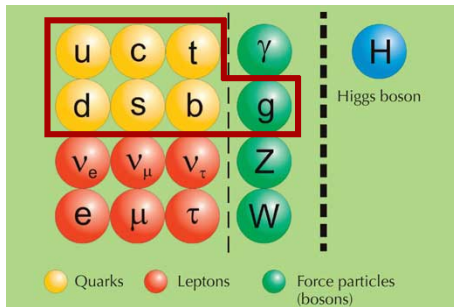


► elemi részecskék és kölcsönhatások



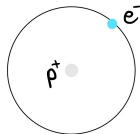
► erősen kölcsönható szektor:
Kvantumszíndinamika (Quantum Chromodynamics, QCD)

► elemi részecskék és kölcsönhatások



- erősen kölcsönható szektor:
Kvantumszíndinamika (Quantum Chromodynamics, QCD)
- az Univerzum látható tömegének több mint 99%-a

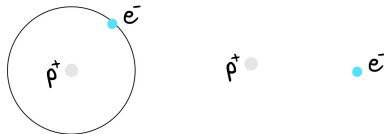
► hidrogénatom



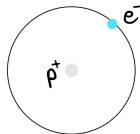
kötési energia $\ll$ teljes tömeg

► hidrogénatom

kötési energia $\ll$ teljes tömeg



► hidrogénatom

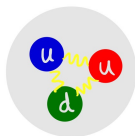


kötési energia $\ll$ teljes tömeg

p^+

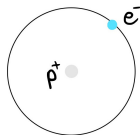
e^-

► proton és bezárás (confinement)



kötési energia $\sim$ teljes tömeg

► hidrogénatom

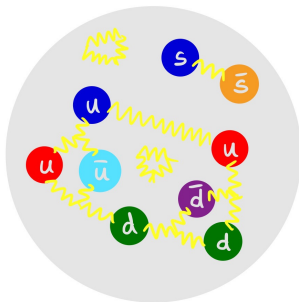


kötési energia $\ll$ teljes tömeg

p^+

e^-

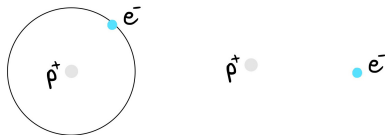
► proton és bezárás (confinement)



kötési energia $\sim$ teljes tömeg

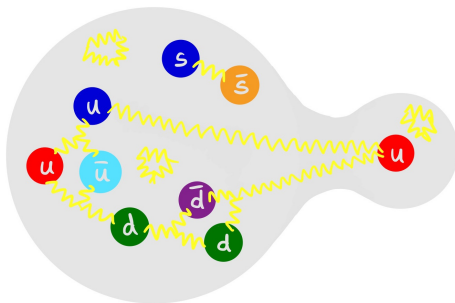
► hidrogénatom

kötési energia $\ll$ teljes tömeg



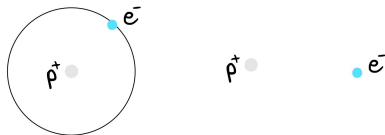
► proton és bezárás (confinement)

kötési energia $\sim$ teljes tömeg



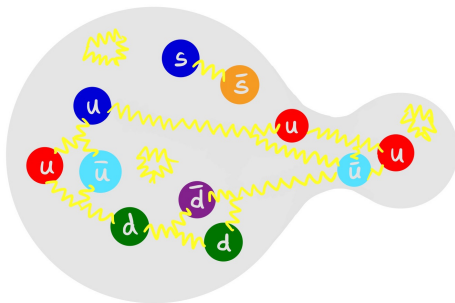
► hidrogénatom

kötési energia $\ll$ teljes tömeg

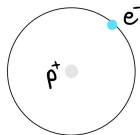


► proton és bezárás (confinement)

kötési energia $\sim$ teljes tömeg



► hidrogénatom

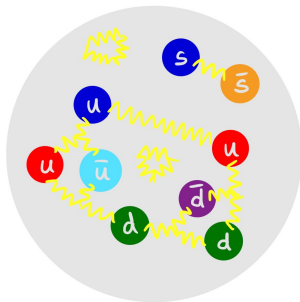


kötési energia $\ll$ teljes tömeg

p^+

e^-

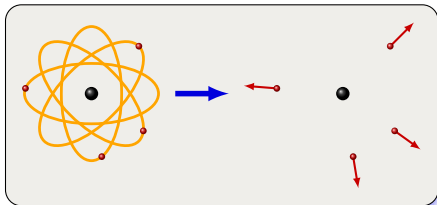
► proton és bezárás (confinement)



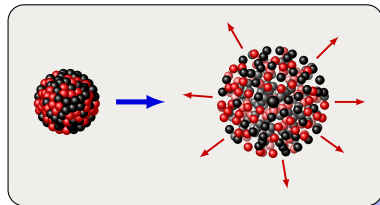
kötési energia $\sim$ teljes tömeg



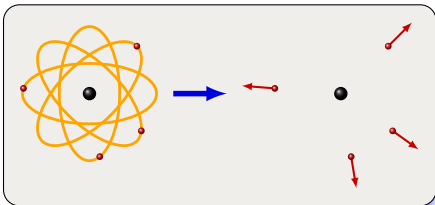
ionizáció



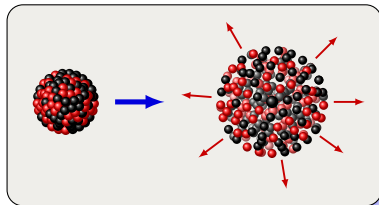
maghasadás



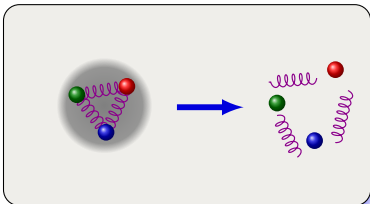
ionizáció



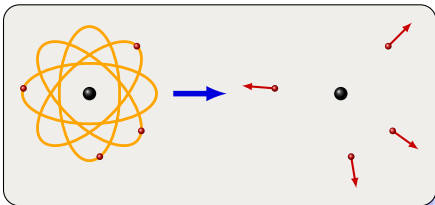
maghasadás



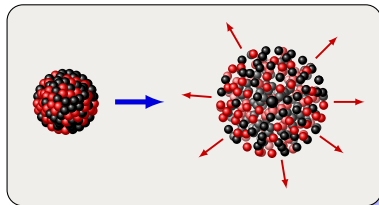
átalakulás a kvark-gluon plazma állapotba



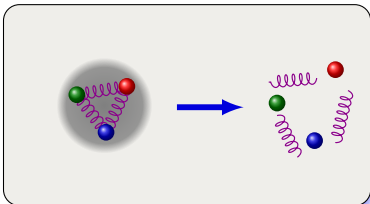
ionizáció



maghasadás



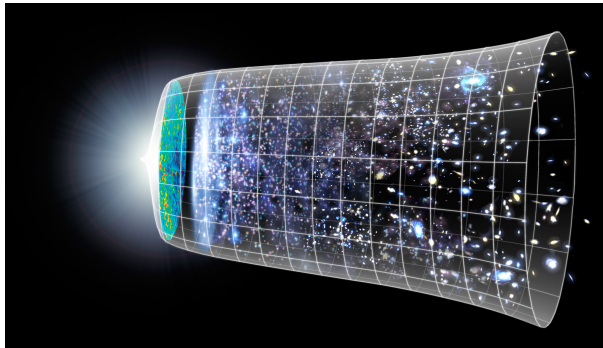
átalakulás a kvark-gluon plazma állapotba



kvarkok és gluonok magas hőmérsékleten:
korai Univerzum

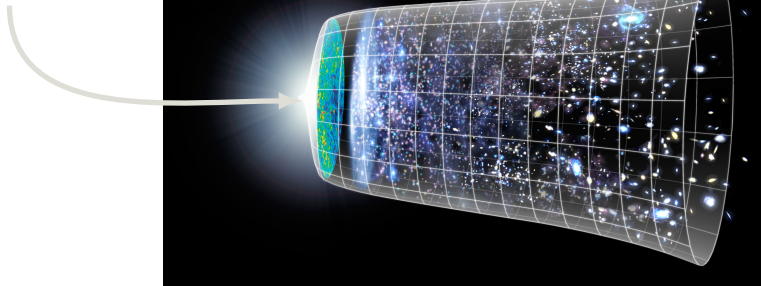
kvarkok és gluonok nagy sűrűségnél:
neutroncsillagok

- ▶ távoli galaxisok sebességéből tudjuk:
a Világegyetem tágul [WMAP](#) [NASA](#)



- ▶ távoli galaxisok sebességéből tudjuk:
a Világegyetem tágul [WMAP](#) [NASA](#)

Ősrobbanás



A Világegyetemet kitöltő anyag



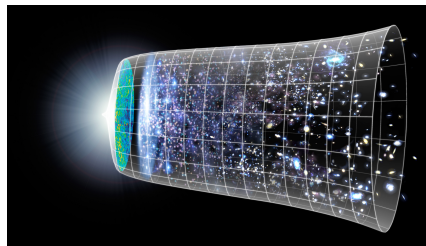
$T \sim -270\text{ °C}$ $t \sim 13.800.000.000\text{ év}$
a mai Világegyetem

$T \sim 4000\text{ °C}$ $t \sim 350.000\text{ év}$
atomok ionizációja

$T \sim 10^{9-10}\text{ °C}$ $t \sim 3 - 20\text{ perc}$
nukleoszintézis

$T \sim 10^{12}\text{ °C}$ $t \sim 10^{-5}\text{ másodperc}$
kvark bezárás

 WMAP  NASA



A Világegyetemet kitöltő anyag

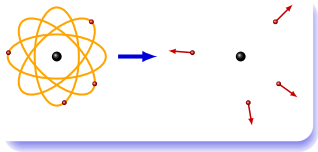


$T \sim -270\text{ °C}$ $t \sim 13.800.000.000\text{ év}$
a mai Világegyetem

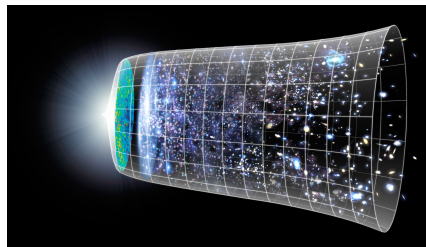
$T \sim 4000\text{ °C}$ $t \sim 350.000\text{ év}$
atomok ionizációja

$T \sim 10^{9-10}\text{ °C}$ $t \sim 3 - 20\text{ perc}$
nukleoszintézis

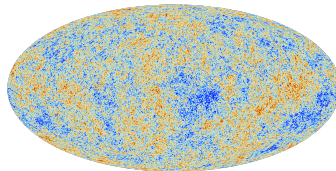
$T \sim 10^{12}\text{ °C}$ $t \sim 10^{-5}\text{ másodperc}$
kvark bezárás



WMAP NASA



kozmosz háttérsugárzás



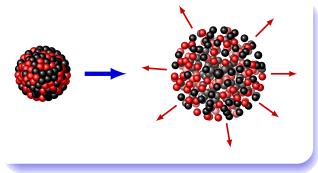
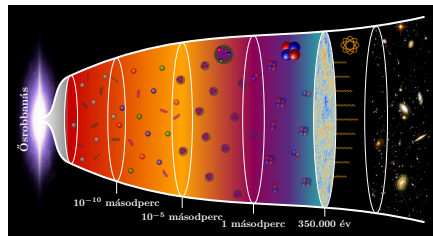
ESA Planck Collaboration

$T \sim -270\text{ °C}$ $t \sim 13.800.000.000\text{ év}$
a mai Világegyetem

$T \sim 4000\text{ °C}$ $t \sim 350.000\text{ év}$
atomok ionizációja

$T \sim 10^9\text{--}10^{10}\text{ °C}$ $t \sim 3\text{--}20\text{ perc}$
nukleoszintézis

$T \sim 10^{12}\text{ °C}$ $t \sim 10^{-5}\text{ másodperc}$
kvark bezárás



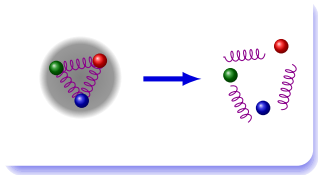
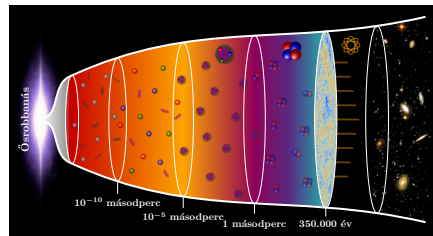
A Világegyetemet kitöltő anyag

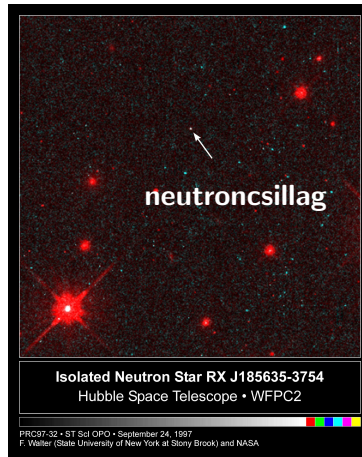
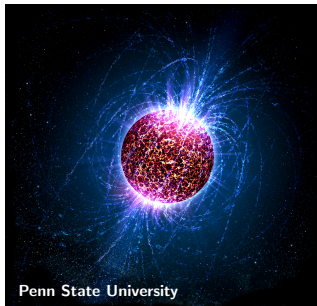
$T \sim -270\text{ °C}$ $t \sim 13.800.000.000\text{ év}$
a mai Világegyetem

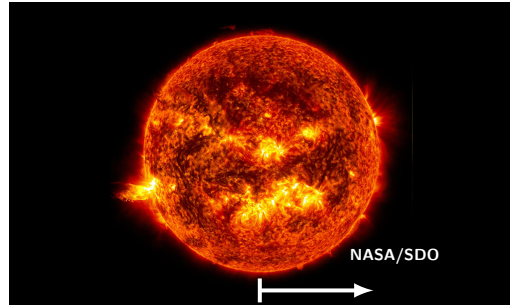
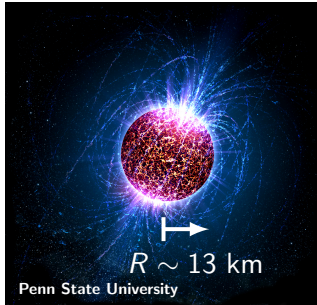
$T \sim 4000\text{ °C}$ $t \sim 350.000\text{ év}$
atomok ionizációja

$T \sim 10^9\text{--}10^{10}\text{ °C}$ $t \sim 3\text{--}20\text{ perc}$
nukleoszintézis

$T \sim 10^{12}\text{ °C}$ $t \sim 10^{-5}\text{ másodperc}$
kvark bezárás





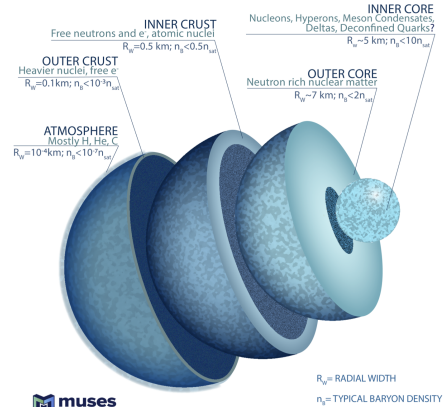
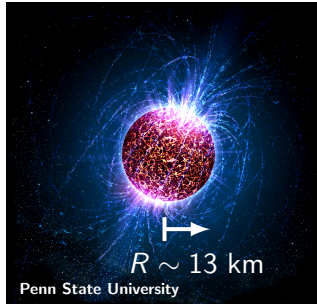


$R \sim 696.000 \text{ km}$

sugár: $13 \text{ km} \sim 2 \cdot 10^{-5} R_{\odot}$

tömeg: $\sim 1.5 M_{\odot}$

→ $n \sim 3 \cdot 10^{14} n_{\odot}$



muses

MUSES collaboration



Elemi részecskék szimulációi

- ▶ a részecskék terek gerjesztései



gitárhúr

rezgési amplitúdó

$\sim$ tér

$\sim$ részecskeszám

- ▶ a részecskék terek gerjesztései



gitárhúr

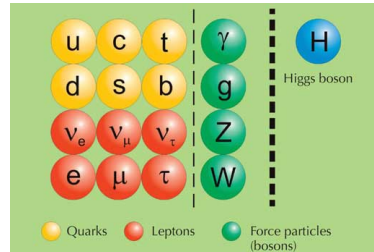
rezgési amplitúdó

$\sim$ tér

$\sim$ részecskeszám

- ▶ Standard Modell

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i \bar{\psi} \not{D} \psi + h.c. \\ & + \chi_i y_{ij} \chi_j \phi + h.c. \\ & + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi) \end{aligned}$$



- ▶ kvantummechanika: terek minden megvalósulására átlagolni kell



- ▶ kvantummechanika: terek minden megvalósulására átlagolni kell



- ▶ Euklideszi pályaintegrál *↗ Feynman Rev. Mod. Phys. 20 (1948)*

$$\mathcal{Z} = \int \mathcal{D}\psi \mathcal{D}\bar{\psi} \mathcal{D}A \exp(-S[\bar{\psi}, \psi, A])$$

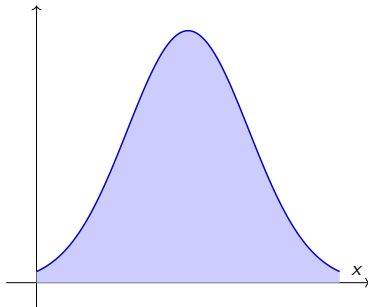
$\psi(x)$, $\bar{\psi}(x)$, $A(x)$ kvark, antikvark, gluon terek



Szimulációs algoritmusok – néhány dimenzióban

- integrál mint függvény alatti terület

$$F = \int_0^1 dx P(x) f(x), \quad \int_0^1 P(x) = 1$$



- ▶ egyenletes mintavételezéssel:
generáljunk $x_n \in [0, 1]$ véletlen számokat egyenletes eloszlással

$$F = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N P(x_n) f(x_n)$$



→ animáció

- ▶ fontossági mintavételezés:
generáljunk x_n véletlen számokat $P(x_n)$ valószínűséggel

$$F = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N f(x_n)$$

→ animáció

- ▶ mit tehetünk, ha nem tudunk $P(x_n)$ eloszlással generálni x_n számokat?
- ▶ Markov lánc

$$x_0 \rightarrow x_1 \rightarrow x_2 \rightarrow x_3 \rightarrow \dots$$

$$F = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N f(x_n)$$

→ animáció

- ▶ mit tehetünk, ha nem tudunk $P(x_n)$ eloszlással generálni x_n számokat?
- ▶ Markov lánc

$$x_0 \rightarrow x_1 \rightarrow x_2 \rightarrow x_3 \rightarrow \dots$$

$$F = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N f(x_n)$$

→ animáció

- ▶ paraméterek: lépésköz, elfogadási arány

- ▶ mit tehetünk, ha nem tudunk $P(x_n)$ eloszlással generálni x_n számokat?
- ▶ Markov lánc

$$x_0 \rightarrow x_1 \rightarrow x_2 \rightarrow x_3 \rightarrow \dots$$

$$F = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N f(x_n)$$

→ animáció

- ▶ paraméterek: lépésköz, elfogadási arány
- ▶ kihívások: termalizáció, ergodicitás

- ▶ hasonló integrál, de “ ∞ dimenziós”:

$$\int \mathcal{D}\psi \mathcal{D}\bar{\psi} \mathcal{D}A \exp(-S[\bar{\psi}, \psi, A])$$

x pont $\leftrightarrow \psi = \psi(x), \bar{\psi} = \bar{\psi}(x), A = A(x)$ térkonfiguráció

- ▶ $P = \exp(-S)$
- ▶ hasonlatos egy statisztikus fizikai rendszer **állapotösszegéhez**

- ▶ hasonló integrál, de “ ∞ dimenziós”:

$$\int \mathcal{D}\psi \mathcal{D}\bar{\psi} \mathcal{D}A \exp(-S[\bar{\psi}, \psi, A])$$

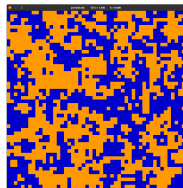
x pont $\leftrightarrow \psi = \psi(x), \bar{\psi} = \bar{\psi}(x), A = A(x)$ térkonfiguráció

- ▶ $P = \exp(-S)$
- ▶ hasonlatos egy statisztikus fizikai rendszer **állapotösszegéhez**
- ▶ egyszerűbb terek: Ising modell



Szimulációs algoritmusok – diszkrét terek

- ▶ **felfelé** vagy **lefelé** mutató spinek kétdimenziós rácson



- ▶ Hamilton függvény: kölcsönhatás a szomszédok $\langle i, j \rangle$ között

$$H[s] = - \sum_{\langle i, j \rangle} s_i s_j$$

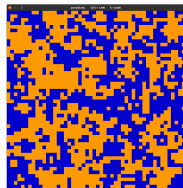
$\rightsquigarrow$ szomszédos spinek egy irányba mutatnak

- ▶ állapotösszeg

$$\mathcal{Z} = \sum_{\{s\}} e^{-H[s]/T}$$

$\rightsquigarrow$ a hőmérséklet rendezetlenséghez vezet

- ▶ **felfelé** vagy **lefelé** mutató spinek kétdimenziós rácson



- ▶ Hamilton függvény: kölcsönhatás a szomszédok $\langle i, j \rangle$ között

$$H[s] = - \sum_{\langle i, j \rangle} s_i s_j$$

$\rightsquigarrow$ szomszédos spinek egy irányba mutatnak

- ▶ állapotösszeg

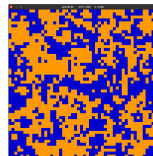
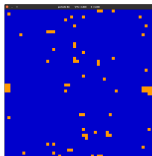
$$\mathcal{Z} = \sum_{\{s\}} e^{-H[s]/T}$$

$\rightsquigarrow$ a hőmérséklet rendezetlenséghez vezet

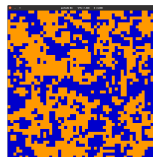
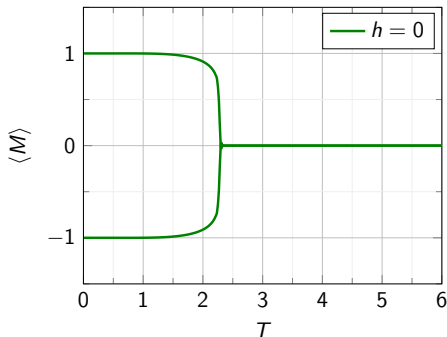
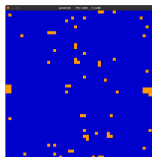
- ▶ Monte-Carlo szimuláció: Markov-lánc fontossági mintavételezéssel

$\rightarrow$ animáció

- rendparaméter: mágnesezettség $M = \sum_i s_i$



- rendparaméter: mágnesezettség $M = \sum_i s_i$



- kritikus hőmérséklet, másodrendű fázisátalakulás



Szimulációs algoritmusok – QCD

- ▶ egy komplikáltabb pályaintegrál

$$\mathcal{Z} = \int \mathcal{D}\bar{\psi} \mathcal{D}\psi \mathcal{D}A \exp(-S[\bar{\psi}, \psi, A])$$

s_i spin $\rightsquigarrow \psi, \bar{\psi}$ bispinor, A vektortér

i 2d koordináta $\rightsquigarrow x, y, z, t$ téridőpont

- ▶ matematikai definícióhoz szükséges: tér és idő diszkrétizált
rácstérelmélet  [Wilson PRD 10 \(1974\)](#)

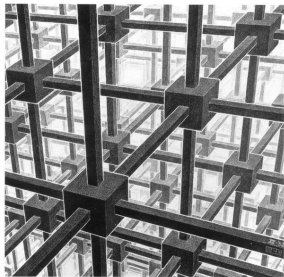
- ▶ egy komplikáltabb pályaintegrál

$$\mathcal{Z} = \int \mathcal{D}\bar{\psi} \mathcal{D}\psi \mathcal{D}A \exp(-S[\bar{\psi}, \psi, A])$$

s_i spin $\rightsquigarrow \psi, \bar{\psi}$ bispinor, A vektortér

i 2d koordináta $\rightsquigarrow x, y, z, t$ téridőpont

- ▶ matematikai definícióhoz szükséges: tér és idő diszkrétizált
rácstérelmélet [↗ Wilson PRD 10 \(1974\)](#)



- ▶ egy komplikáltabb pályaintegrál

$$\mathcal{Z} = \int \mathcal{D}\bar{\psi} \mathcal{D}\psi \mathcal{D}A \exp(-S[\bar{\psi}, \psi, A])$$

s_i spin $\rightsquigarrow \psi, \bar{\psi}$ bispinor, A vektortér

i 2d koordináta $\rightsquigarrow x, y, z, t$ téridőpont

- ▶ matematikai definícióhoz szükséges: tér és idő diszkrétizált rácsatélmélet [Wilson PRD 10 \(1974\)](#)
- ▶ kontinuum limesz: rácsállandó $\rightarrow 0$

- ▶ egy komplikáltabb pályaintegrál

$$\mathcal{Z} = \int \mathcal{D}\bar{\psi} \mathcal{D}\psi \mathcal{D}A \exp(-S[\bar{\psi}, \psi, A])$$

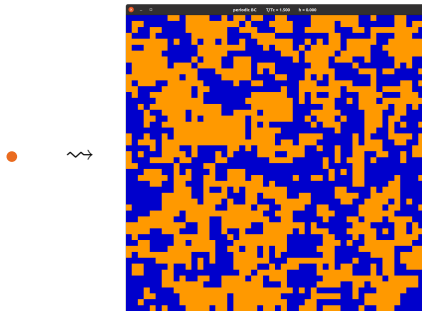
s_i spin $\rightsquigarrow \psi, \bar{\psi}$ bispinor, A vektortér

i 2d koordináta $\rightsquigarrow x, y, z, t$ téridőpont

- ▶ matematikai definícióhoz szükséges: tér és idő diszkrétizált rácsatélmélet [Wilson PRD 10 \(1974\)](#)
- ▶ kontinuum limesz: rácsállandó $\rightarrow 0$
- ▶ 10^9 integrálási változó $\rightsquigarrow$ szuperszámítógépek

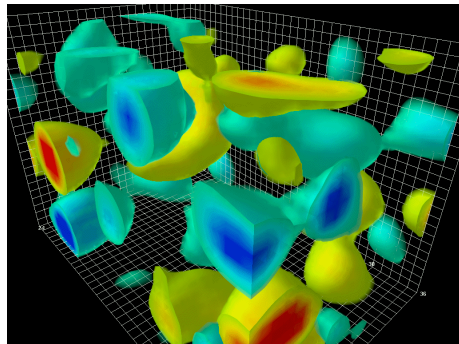
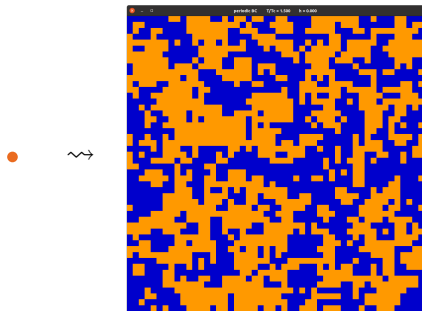


$$\# = 2$$



$\# = 2$

200^2

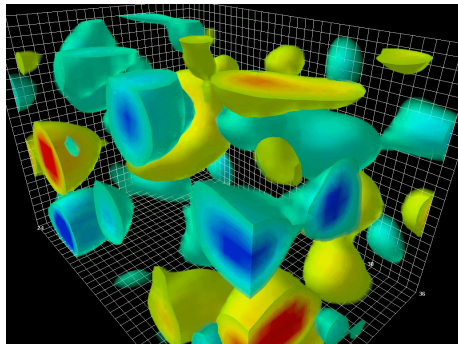
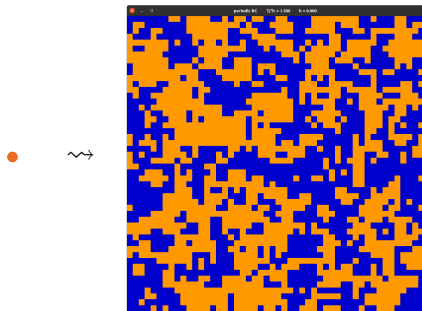


 D. Leinweber, Univ. Adelaide

$\# = 2$

200^2

10^9



 D. Leinweber, Univ. Adelaide

$\# = 2$

200^2

10^9

► virtuális fluktuációk a QCD alapállapotában

▶ számítógépes játékok



 [ea.com](https://www.ea.com)

▶ grafikus kártyák



 [nvidia.com](https://www.nvidia.com)



 [amd.com](https://www.amd.com)

▶ pixelek helyett rácspontokon élő terek Egri et al. CPC '07

▶ szuperszámítógép klaszterek

 [Komondor](https://www.komondor.hu)

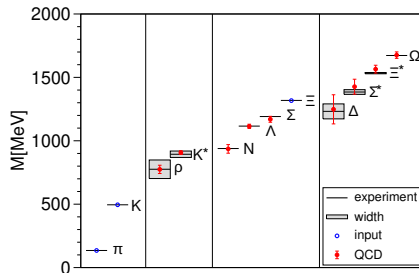
 [TTK GPU cluster](#)



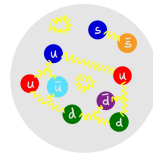
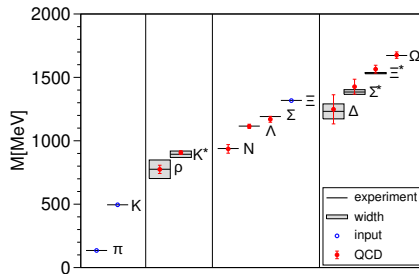


Rács-QCD eredmények

- barionok és mezonok rácsszimulációkból  Dürr et al. Science 322 (2008)

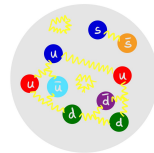
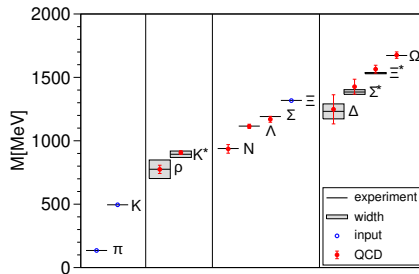


- barionok és mezonok rácsszimulációkból  Dürr et al. Science 322 (2008)



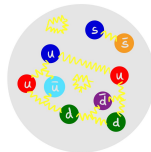
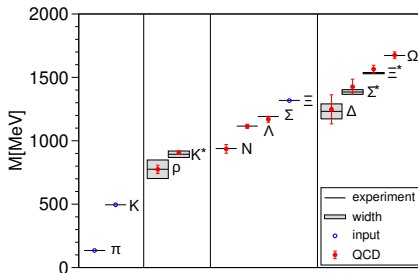
- $2m_u + m_d \approx 10 \text{ MeV} \ll m_p = 938 \text{ MeV}$

- ▶ barionok és mezonok rácsszimulációkból  Dürr et al. Science 322 (2008)



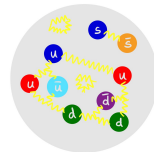
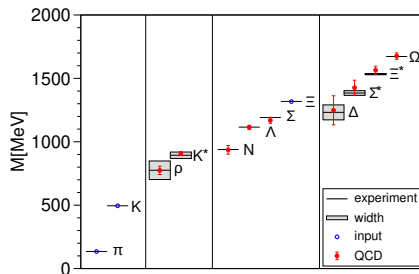
- ▶ $2m_u + m_d \approx 10 \text{ MeV} \ll m_p = 938 \text{ MeV}$
- ▶ kísérleti eredményekkel megegyezik ✓

- ▶ barionok és mezonok rácsszimulációkból  Dürr et al. Science 322 (2008)



- ▶ $2m_u + m_d \approx 10 \text{ MeV} \ll m_p = 938 \text{ MeV}$
- ▶ kísérleti eredményekkel megegyezik ✓
- ▶ elektromágneses korrekciók  Borsányi et al. Science 347 (2015)

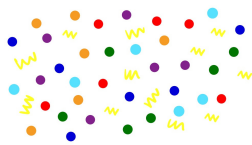
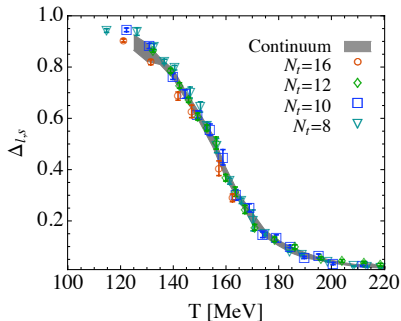
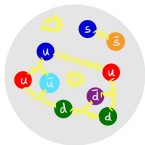
- ▶ barionok és mezonok rácsszimulációkból  Dürr et al. Science 322 (2008)



- ▶ $2m_u + m_d \approx 10 \text{ MeV} \ll m_p = 938 \text{ MeV}$
- ▶ kísérleti eredményekkel megegyezik ✓
- ▶ elektromágneses korrekciók  Borsányi et al. Science 347 (2015)
- ▶ könnyű atommagok  NLPQCD collaboration PRD 87 (2013)

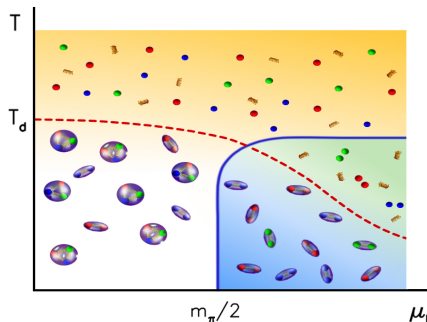
- ▶ magas hőmérsékleti átmenet a kvark-gluon plazma állapotba

✍ Aoki, Endrődi, Fodor, Katz, Szabó Nature 443 (2006) ✍ Borsányi et al. JHEP 09 (2010)



- ▶ rendparaméter ($\sim$ Ising modell)
- ▶ folytonos átmenet “crossover”
- ▶ átmeneti hőmérséklet: $T_c = 155 \text{ MeV} \approx 10^{12} \text{ }^\circ\text{C}$

- ▶ kvarkok és gluonok magas hőmérsékleten és/vagy nagy sűrűségnél
- ▶ szimulációk nagy sűrűségnél $N_u > 0$, $N_d > 0$ egy máig megoldatlan probléma u d
- ▶ egy megoldható részprobléma: $N_u > 0$, $N_{\bar{d}} > 0$ “izospin” u $\bar{d}$
✍ Brandt, Endrődi, Schmalzbauer PRD 97 (2018)

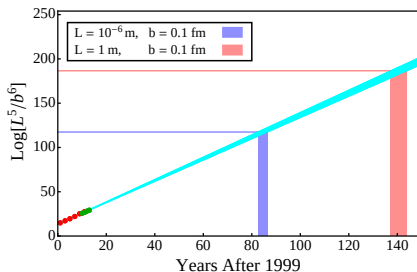


- ▶ rác-QCD szimulációk: erősen kölcsönható anyag precíz leírása, $V = (10 \text{ fm})^3$

- ▶ rác-QCD szimulációk: erősen kölcsönható anyag precíz leírása, $V = (10 \text{ fm})^3$
- ▶ merre tovább?
 - ▶ nagyobb, összetettebb rendszerek
 - ▶ nagy sűrűség; időfüggő, nem-egyensúlyi folyamatok
 - ▶ más fundamentális kölcsönhatások: elektromágneses, gyenge?, gravitációs?

- ▶ rác-QCD szimulációk: erősen kölcsönható anyag precíz leírása, $V = (10 \text{ fm})^3$
- ▶ merre tovább?
 - ▶ nagyobb, összetettebb rendszerek
 - ▶ nagy sűrűség; időfüggő, nem-egyensúlyi folyamatok
 - ▶ más fundamentális kölcsönhatások: elektromágneses, gyenge?, gravitációs?
- ▶ ehhez szükséges
 - ▶ számítógépes kapacitás
 - ▶ új szimulációs algoritmusok
 - ▶ gravitáció kvantumtérelmélete

- ▶ rác-QCD szimulációk: erősen kölcsönható anyag precíz leírása, $V = (10 \text{ fm})^3$
- ▶ merre tovább?
 - ▶ nagyobb, összetettebb rendszerek
 - ▶ nagy sűrűség; időfüggő, nem-egyensúlyi folyamatok
 - ▶ más fundamentális kölcsönhatások: elektromágneses, gyenge?, gravitációs?
- ▶ ehhez szükséges
 - ▶ számítógépes kapacitás
 - ▶ új szimulációs algoritmusok
 - ▶ gravitáció kvantumtérelmélete



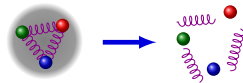
- ▶ ha mindez rendelkezésre áll, tetszőlegesen komplex rendszert tudunk szimulálni?

- ▶ ha mindez rendelkezésre áll, tetszőlegesen komplex rendszert tudunk szimulálni?
- ▶ lehet-e a teljes Univerzumunk egy szimuláció?

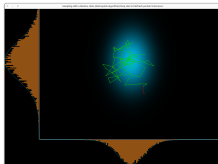
- ▶ ha mindez rendelkezésre áll, tetszőlegesen komplex rendszert tudunk szimulálni?
- ▶ lehet-e a teljes Univerzumunk egy szimuláció?
- ▶ szimulációs trilemma (leegyszerűsítve)
 - ✍ Bostrom, *The Philosophical Quarterly* 53 (2003)
 - ▶ az emberiség kihal mielőtt ilyen szimulációkat tudna futtatni
 - ▶ ilyen szimulációkat futtatni nem lehetséges
 - ▶ nagy valószínűséggel egy szimulációban élünk

- ▶ ha mindez rendelkezésre áll, tetszőlegesen komplex rendszert tudunk szimulálni?
- ▶ lehet-e a teljes Univerzumunk egy szimuláció?
- ▶ szimulációs trilemma (leegyszerűsítve)
 - ✍ Bostrom, *The Philosophical Quarterly* 53 (2003)
 - ▶ az emberiség kihal mielőtt ilyen szimulációkat tudna futtatni
 - ▶ ilyen szimulációkat futtatni nem lehetséges
 - ▶ nagy valószínűséggel egy szimulációban élünk
- ▶ ha tényleg szimulációban élünk, az hogyan észlelhető?
 - ▶ glitch?
 - ▶ diszkrétizált téridő lenyomatai ✍ Beane et al. *EPJA* 50 (2014)

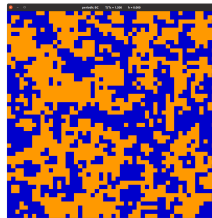
- ▶ erős kölcsönhatás
látható anyag tömege
fázisátmenet a korai Univerzumban



- ▶ sztochasztikus integrálás
fontossági mintavételezés



- ▶ termodinamika, fázisátalakulások



- ▶ rác-QCD szimulációk a jelenben
és a jövőben

