

Modellezés és adatfeldolgozás (1)



ALICE

Vértesi Róbert

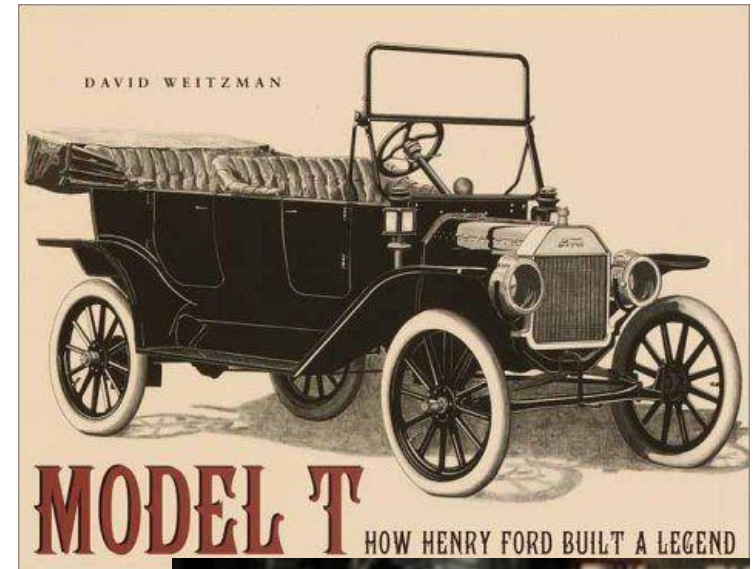
Wigner Fizikai Kutatóközpont
MTA kiváló kutatóhely

vertesi.robert@wigner.mta.hu



Mi a modell?

...sokféle jelentésben használjuk



Mi a modell?

...sokféle jelentésben használjuk

1. **Fizikai modellek: a valóság leképezése matematikává**
 - “Fundamentális” modellek: QCD, a részecskefizika standard modellje...
 - Fenomenogikus modellek: hidrodinamika, húrmodell stb...
2. **Számítások elvégzése szimulációkkal**
 - Fizikai modellek átültetése a számítástechnikába
 - Detektor modellezése
3. **Modellezés az adatkiértékelésben**
 - Statisztikai modellezés; szisztematikus hibák, pseudo-kísérletek
 - Gépi tanulás ...

A továbbiakban ezekből csak ízelítőt tudok mutatni...

Nagyenergiás fizikai modellek: **Az alapvető kölcsönhatások**

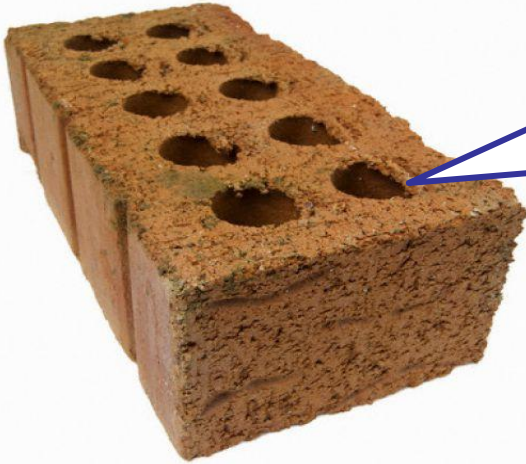
Világ: Az anyag...

Anyag

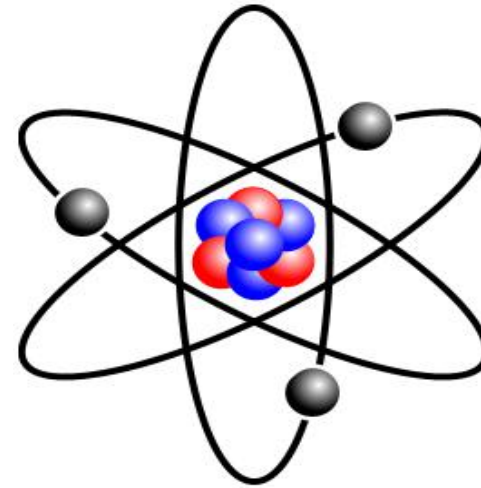


Világ: Az anyag...

Anyag

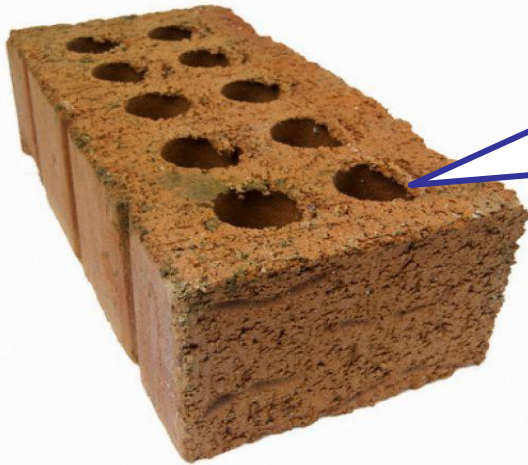


Atom

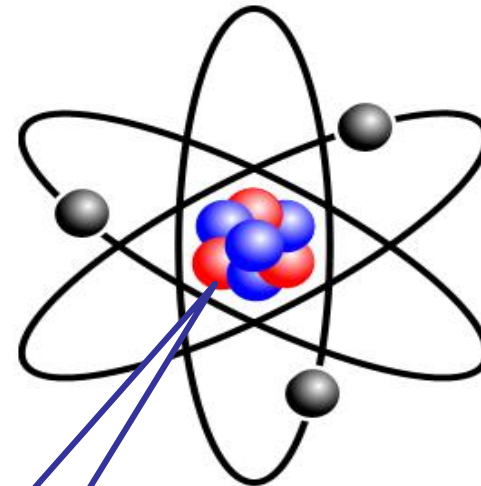


Világ: Az anyag...

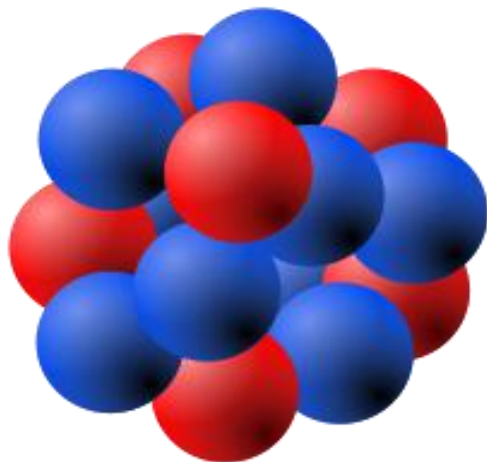
Anyag



Atom

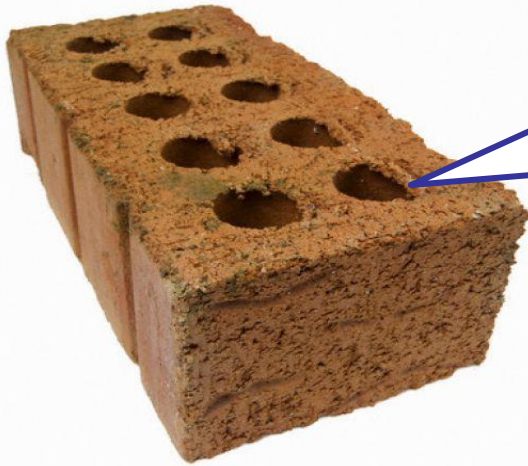


Atommag

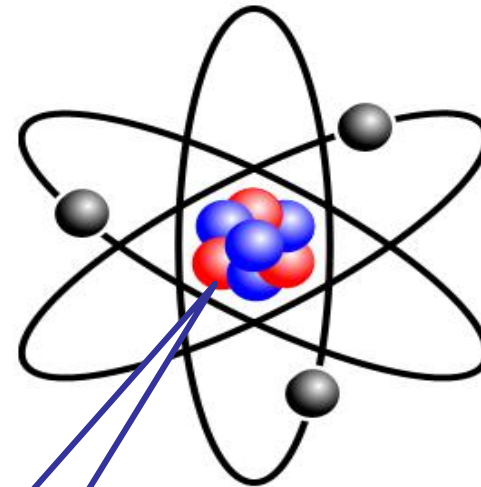


Világ: Az anyag...

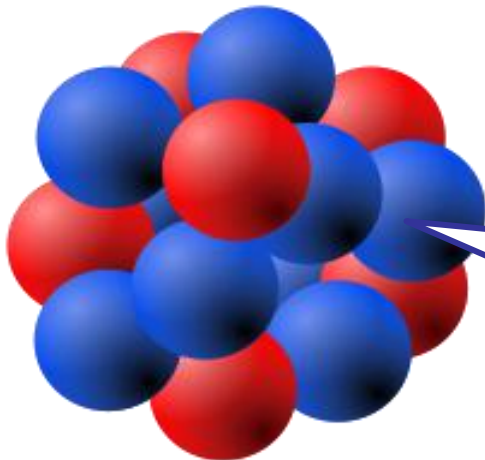
Anyag



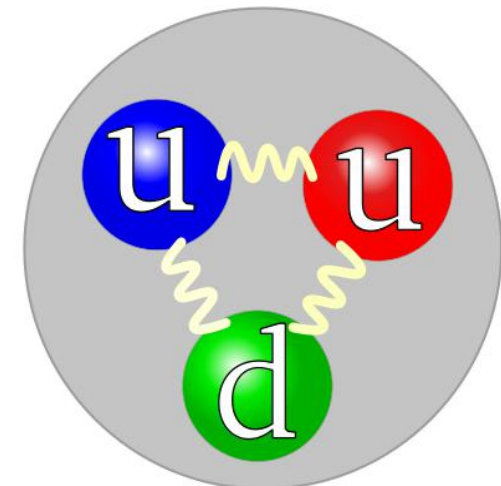
Atom



Atommag



Nukleon



...és a kölcsönhatások

- Mechanikai



...és a kölcsönhatások

- Mechanikai



- Elektromos



- Mágneses

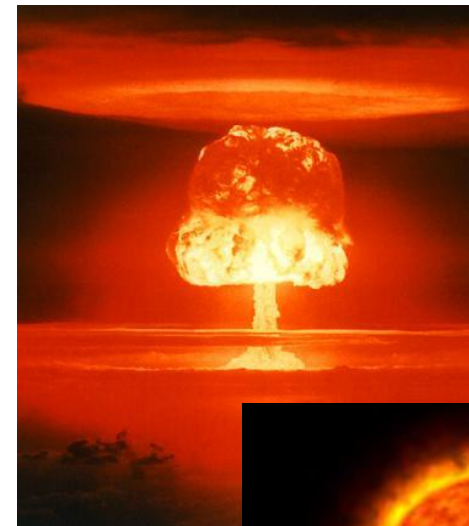


...és a kölcsönhatások

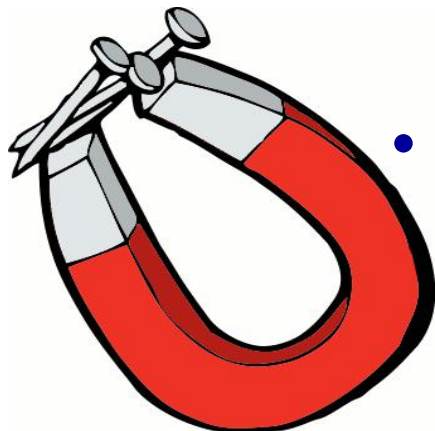
- Mechanikai



- Elektromos



- Mágneses



- Magerők

- Erős kölcsönhatás
- Gyenge kölcsönhatás



...és a kölcsönhatások

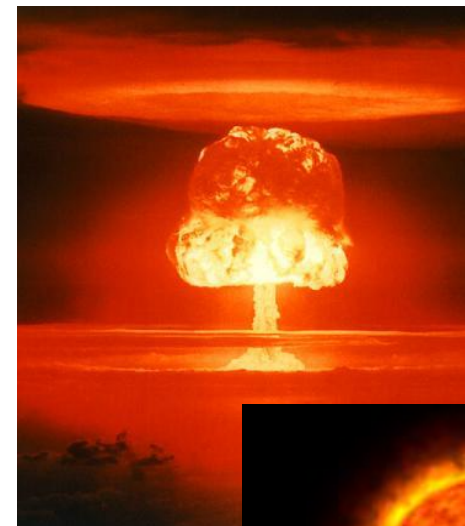
- Mechanikai



- Gravitációs



- Elektromos

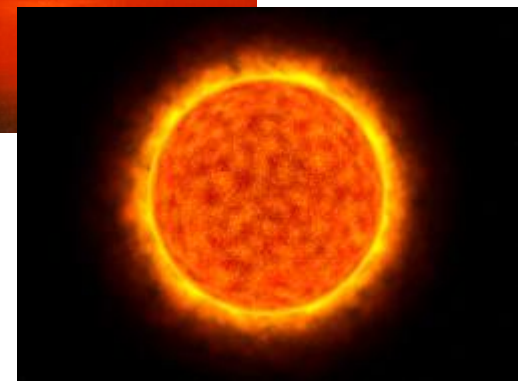


- Mágneses

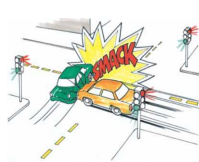


- Magerők

- Erős kölcsönhatás
- Gyenge kölcsönhatás



kölcsönhatás = mező



- Mechanikai



- Elektromos



- Mágneses



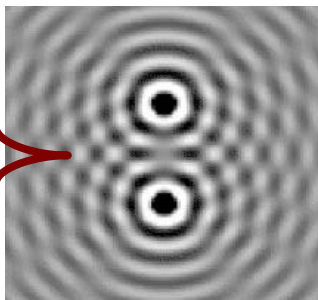
- Gyenge kh.



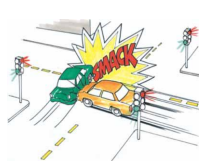
- Erős kh.



- Gravitáció



kölcsönhatás = mező



- Mechanikai



- Elektromos



- Mágneses



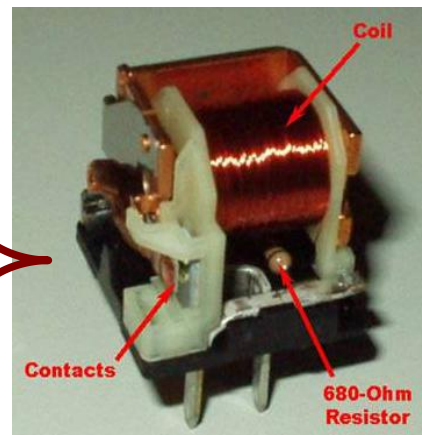
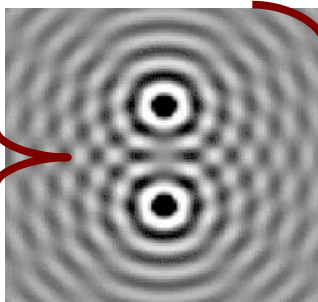
- Gyenge kh.



- Erős kh.



- Gravitáció



- Elektro-
mágneses

kölcsönhatás = mező



• Mechanikai



• Elektromos



• Mágneses



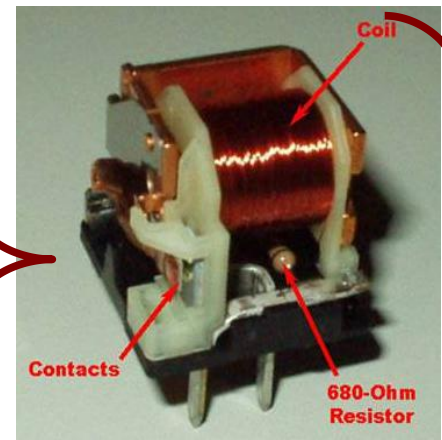
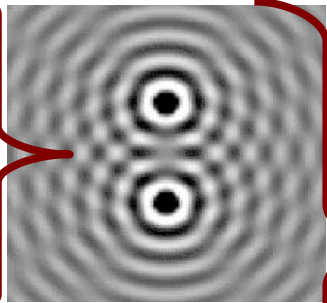
• Gyenge kh.



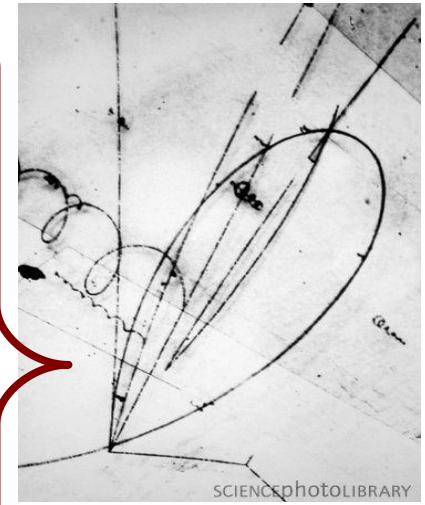
• Erős kh.



• Gravitáció



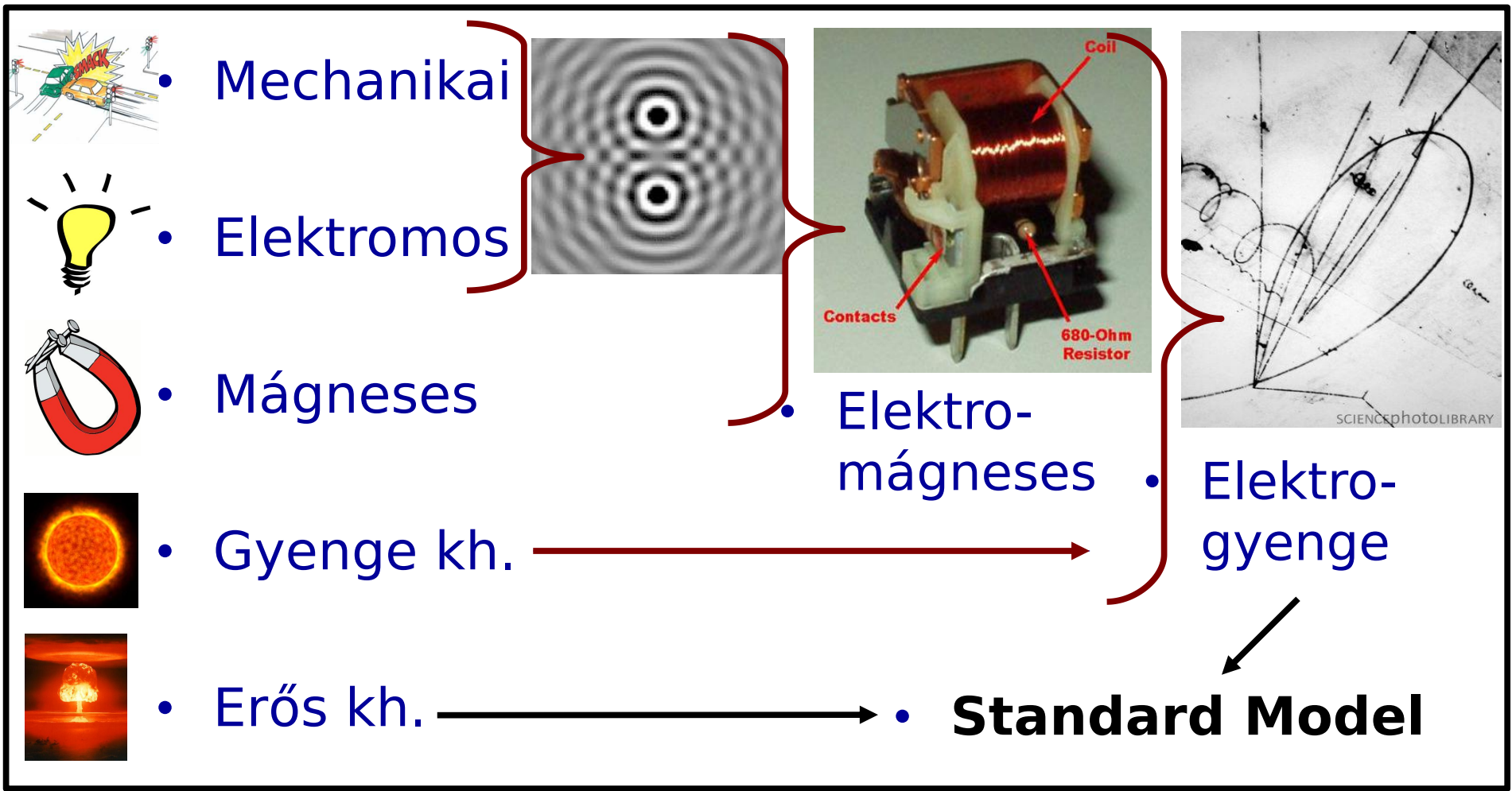
• Elektromágneses



• Elektrogyenge



kölcsönhatás = mező



- Gravitáció

mező = részecske

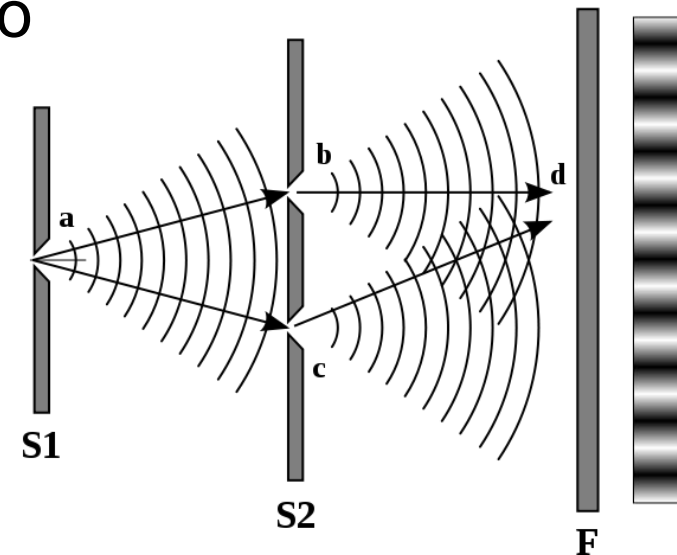
- Kétréses kísérlet:

- anyag ~ részecske ~ hullám ~ ψ mező

- “Szuperponált állapotok”:

- Határozatlansági reláció

$$\Delta p \Delta x > \sim \hbar$$



mező = részecske

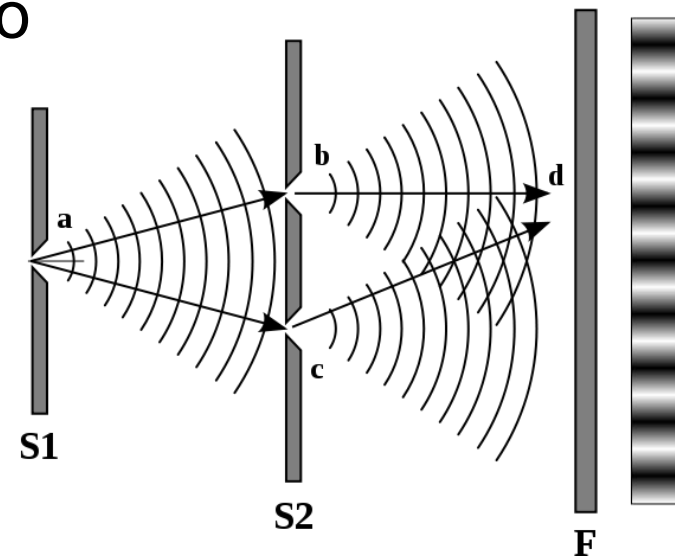
- Kétréses kísérlet:

- anyag ~ részecske ~ hullám ~ ψ mező

- “Szuperponált állapotok”:

- Határozatlansági reláció

$$\Delta p \Delta x > \sim h$$



- Mérés szerepe

- A kimenetel véletlenszerű

- **DE: sok kísérletben a fizikai törvényszerűségek érvényesülnek** (nagy számok törvénye)

- Nagyon precíz jóslatokat tehetünk

A standard modell építőkövei

- Az elemi részecskék periódusos rendszere

- Kölcsönhatások

“**bozon**”, spin=1 (vektor)

– Elektromágneses: **foton**

– Erős: **gluonok**

– Gyenge: **W, Z bozonok**

+ **Higgs: spin=0** (skalár)

- Anyag (antianyag)

“**fermion**”, spin=1/2 (spinor)

– Három generáció

– **Kvarkok** + **leptonok**

– **Hagyományos anyag:**
1. generáció u, d, e

Az anyagi részecskék három családja (fermionok)

	I	II	III		
tömeg→	2.3 MeV/c ²	1.27 GeV/c ²	173 GeV/c ²	0	125 GeV/c ²
töltés→	2/3	2/3	2/3	0	0
spin→	1/2	1/2	1/2	1	0
név→	u-kvark	c-kvark	t-kvark	foton	Higgs-bozon
	4.8 MeV/c ²	95 MeV/c ²	4.2 GeV/c ²	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	d-kvark	s-kvark	b-kvark	gluon	
	<2,2 eV/c ²	<0,17 MeV/c ²	<15,5 MeV/c ²	91,2 GeV/c ²	
	0	0	0	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	elektron-neutrínó	müon-neutrínó	tau-neutrínó	Z ⁰ -bozon	
	0,511 MeV/c ²	105,7 MeV/c ²	1,777 GeV/c ²	80,4 GeV/c ²	
	-1	-1	-1	±1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	e elektron	μ müon	τ tau	W [±] -bozon	

Kvarkok

Leptonok

Bozonok (kölcsönhatások)

A standard modell: térelmélet

Kvantumtérelmélet

=

kvantummechanika

+

(speciális) relativitás

kölcsönhatás

tömeges tér (e)

$$\mathcal{L} = \bar{\psi}(i\gamma^\mu D_\mu - m)\psi - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}$$

$$D_\mu \equiv \partial_\mu + ieA_\mu$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$

mértéktér (foton)

- 1
$$-\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^b g_\mu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e + \frac{1}{2}i g_s^2 (\bar{q}_i^\sigma \gamma^\mu q_j^\sigma) g_\mu^a + \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{G}^a G^b g_\mu^c - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- -$$
- 2
$$M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - \frac{1}{2}m_h^2 H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \frac{1}{2c_w^2} M \phi^0 \phi^0 - \beta_h [\frac{2M^2}{g^2} + \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-)] + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - igc_w [\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)] - ig s_w [\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)] - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\nu^+ W_\nu^- + \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^+ W_\nu^- + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- - Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\nu W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w c_w [A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-] - g\alpha [H^3 + H\phi^0 \phi^0 + 2H\phi^+ \phi^-] - \frac{1}{8}g^2 \alpha_h [H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2] - gM W_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2}g \frac{M}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H - \frac{1}{2}ig [W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0)] + \frac{1}{2}g [W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) - W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu H)] + \frac{1}{2}g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) - ig \frac{s_w^2}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + ig s_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + ig s_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{4}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- [H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-] - \frac{1}{4}g^2 \frac{1}{c_w} Z_\mu^0 Z_\mu^0 [H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{2}g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - g^1 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- - \bar{e}^\lambda (\gamma \partial + m_e) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda \gamma \partial \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma \partial + m_u) u_j^\lambda - \frac{d_j^\lambda}{3} (\gamma \partial + m_d) d_j^\lambda + ig s_w A_\mu [-(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \frac{1}{3}(\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda)] + \frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5) u_j^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 - \gamma^5) d_j^\lambda)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda\kappa} d_j^\kappa)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- [(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\kappa C_{\lambda\kappa}^\dagger \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^\lambda)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} \frac{m_e^2}{M} [-\phi^+ (\bar{\nu}^\lambda (1 - \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (\bar{e}^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda)] -$$
- 3
$$\frac{g}{2} \frac{m_e^2}{M} [H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + i\phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda)] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ [-m_d^\kappa (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) d_j^\kappa) + m_u^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) d_j^\kappa) + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_d^\lambda (\bar{d}_j^\kappa C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\kappa) - m_u^\kappa (\bar{d}_j^\kappa C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \gamma^5) u_j^\kappa) - \frac{g}{2} \frac{m_u^2}{M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_d^2}{M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_u^2}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_d^2}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 -$$
- 4
$$\frac{M^2}{c_w} X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + igc_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + ig s_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + igc_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + ig s_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \partial_\mu \bar{Y} X^+) + igc_w Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + ig s_w A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2}gM [\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w} \bar{X}^0 X^0 H] + \frac{1-2c_w^2}{2c_w} igM [\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-] + \frac{1}{2c_w} igM [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + igM s_w [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \frac{1}{2}igM [\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0]$$
- 5
$$\frac{1-2c_w^2}{2c_w} igM [\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-] + \frac{1}{2c_w} igM [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + igM s_w [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \frac{1}{2}igM [\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0]$$

A standard modell: térelmélet

Kvantumtérelmélet

=

kvantummechanika

+

(speciális) relativitás

kölcsönhatás

tömeges tér (e)

$$\mathcal{L} = \bar{\psi}(i\gamma^\mu D_\mu - m)\psi - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}$$

$$D_\mu \equiv \partial_\mu + ieA_\mu$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$

mértéktér (foton)

a fizika legpontosabb jóslatai!

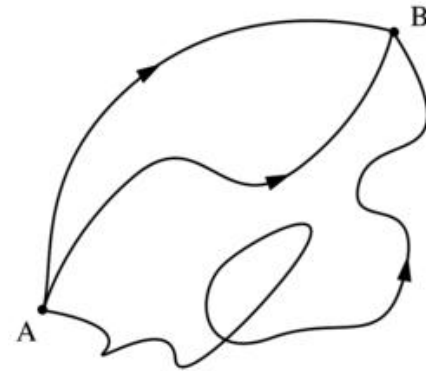
müon mágneses momentum

- Elmélet: $g_\mu^{\text{QED}} = -2.0023318361(10)$
- Kísérlet: $g_\mu^{\text{exp}} = -2.0023318418(13)$

$$\begin{aligned}
& -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^b g_\mu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e + \\
& \frac{1}{2}i g_s^2 (\bar{q}_i^\sigma \gamma^\mu q_j^\sigma) g_\mu^a + \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{G}^a G^b g_\mu^c - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
& M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - \\
& \frac{1}{2}m_h^2 H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \frac{1}{2c_w^2} M \phi^0 \phi^0 - \beta_h \left[\frac{2M^2}{g^2} + \right. \\
& \left. \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right] + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - igc_w [\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
& W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\mu W_\mu^+) + Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
& W_\nu^- \partial_\mu W_\mu^+)] - ig_s w [\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
& W_\nu^- \partial_\mu W_\mu^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\mu W_\mu^+)] - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\nu^+ W_\nu^- + \\
& \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^+ W_\nu^- + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\nu^+ Z_\nu^0 W_\mu^- - Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\nu^+ W_\mu^-) + \\
& g^2 s_w^2 (A_\mu W_\nu^+ A_\nu W_\mu^- - A_\mu A_\nu W_\nu^+ W_\mu^-) + g^2 s_w c_w [A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
& W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-] - g\alpha [H^3 + H\phi^0 \phi^0 + 2H\phi^+ \phi^-] - \\
& \frac{1}{8}g^2 \alpha_h [H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2] - \\
& gM W_\mu^+ W_\nu^- H - \frac{1}{2}g \frac{M}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\nu^0 H - \frac{1}{2}ig [W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - \\
& W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0)] + \frac{1}{2}g [W_\mu^+ (H\partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) - W_\mu^- (H\partial_\mu \phi^+ - \\
& \phi^+ \partial_\mu H)] + \frac{1}{2}g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (H\partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) - ig \frac{s_w^2}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \\
& ig_s w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + \\
& ig_s w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{4}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- [H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-] - \\
& \frac{1}{4}g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\nu^0 [H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{2}g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
& W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
& W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - \\
& g^1 s_w^2 A_\mu A_\nu \phi^+ \phi^- - \bar{e}^\lambda (\gamma^\mu \partial_\nu + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu \partial_\nu \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma^\mu \partial_\nu + m_u^\lambda) u_j^\lambda - \\
& \bar{d}_j^\lambda (\gamma^\mu \partial_\nu + m_d^\lambda) d_j^\lambda + ig_s w A_\mu [-(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \frac{1}{3}(\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda)] + \\
& \frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - \\
& 1 - \gamma^5) u_j^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 - \gamma^5) d_j^\lambda)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) e^\lambda) + \\
& (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda\kappa} d_j^\kappa)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- [(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\kappa C_{\lambda\kappa}^\dagger \gamma^\mu (1 + \\
& \gamma^5) u_j^\lambda)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} \frac{m_\lambda^2}{M} [-\phi^+ (\bar{\nu}^\lambda (1 - \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (\bar{e}^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda)] - \\
& \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} [H(\bar{e}^\lambda e^\lambda) + i\phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda)] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ [-m_d^\kappa (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) d_j^\kappa) + \\
& m_u^\kappa (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) d_j^\kappa)] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_d^\kappa (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\kappa) - m_u^\kappa (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \\
& \gamma^5) u_j^\kappa) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} H(\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} H(\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \\
& \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda)] + \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 - \\
& \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + igc_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + ig_s w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \\
& \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + igc_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + ig_s w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \\
& \partial_\mu \bar{Y} X^+) + igc_w Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + ig_s w A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\
& \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2}gM [\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w} \bar{X}^0 X^0 H] + \\
& \frac{1-2c_w^2}{2c_w} igM [\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-] + \frac{1}{2c_w} igM [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \\
& igM s_w [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \frac{1}{2}igM [\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0]
\end{aligned}$$

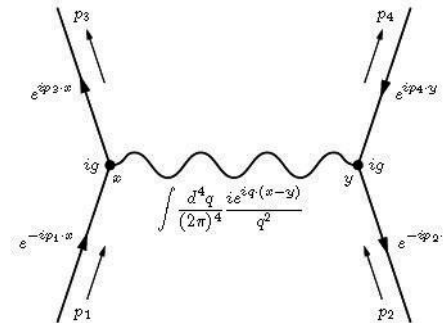
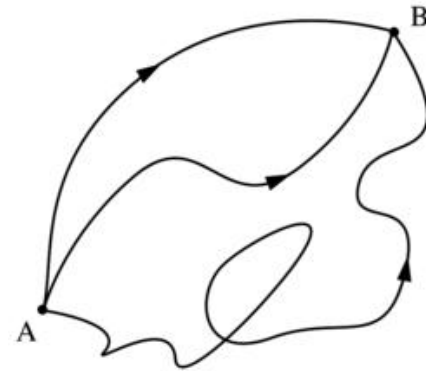
Feynmann-diagrammok

- Feynmann-pályaintegrál
 - Kétréses kísérlet általánosítása
 - Amplitúdók összegzése minden lehetséges útvonalon



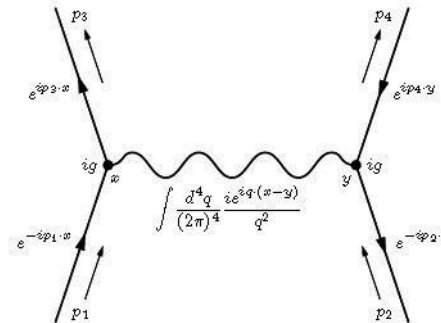
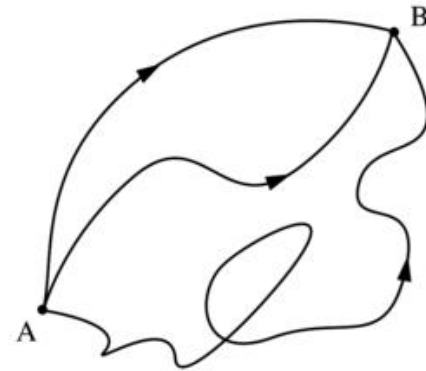
Feynmann-diagrammok

- Feynmann-pályaintegrál
 - Kétréses kísérlet általánosítása
 - Amplitúdók összegzése minden lehetséges útvonalon
- Feynmann-gráfok
 - grafikus reprezentáció



Feynmann-diagrammok

- **Feynmann-pályaintegrál**
 - Kétréses kísérlet általánosítása
 - Amplitúdók összegzése minden lehetséges útvonalon
- **Feynmann-gráfok**
 - grafikus reprezentáció
- **Feynmann-szabályok:**
 - propagátorokhoz, vertexekhez, hurkokhoz rendelt faktorok és műveletek



photon propagator

$$\text{wavy line } \frac{-ig_{\mu\nu}}{p^2 + i\epsilon}$$

electron propagator

$$\text{arrow } \frac{i(p_\mu \gamma^\mu + m)}{p^2 - m^2 + i\epsilon}$$

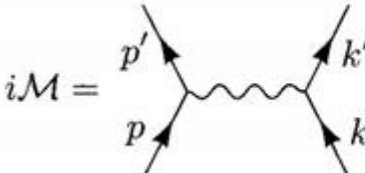
QED Vertex

$$\text{vertex } iQe\gamma^\mu$$

Feynman QED rules

Perturbációszámítás

- Gráf számolása



$$i\mathcal{M} = (-ie)^2 \bar{u}(p') \gamma^\mu u(p) \frac{-ig_{\mu\nu}}{(p' - p)^2} \bar{u}(k') \gamma^\nu u(k)$$

hatáskeresztmetszet: $\sigma = \mathbf{M} \times \text{fázistér}$

Perturbációszámítás

- Gráf számolása

$$i\mathcal{M} = \begin{array}{c} \text{diagram} \\ \text{with incoming momenta } p, p' \text{ and outgoing } k, k' \end{array} = (-ie)^2 \bar{u}(p') \gamma^\mu u(p) \frac{-ig_{\mu\nu}}{(p' - p)^2} \bar{u}(k') \gamma^\nu u(k)$$

hatáskeresztmetszet: $\sigma = \mathbf{M} \times \text{fázistér}$

- Adott reakció: az összes lehetséges gráf összegzése
Működik, ha:

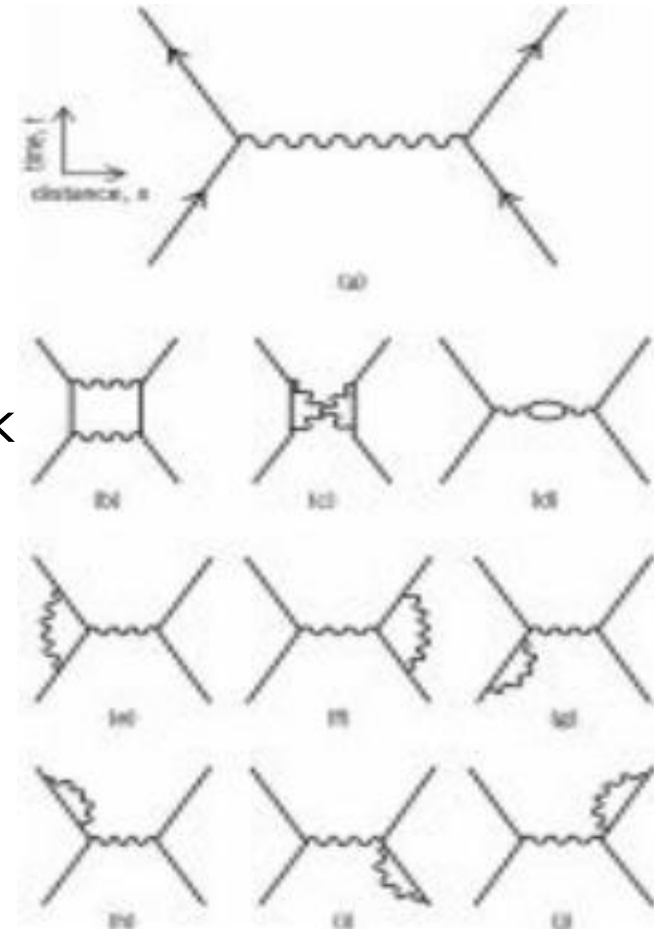
- Magasabb rendben csökkenő járulékok
- Vertexekhez tartozó csatolási állandó kicsi ($\alpha < 1$)

$$\sigma(\text{LO}) \sim \alpha$$

$$\sigma(\text{NLO}) \sim \alpha^2$$

$$\sigma(\text{NNLO}) \sim \alpha^3$$

...



Elektromágneses és erős kölcsönhatás

■ Kvantum-elektrodinamika (QED):

- Abeli U(1) mértékelmélet
- Generátor \sim foton

kölcsönhatás

tömeges tér (e)

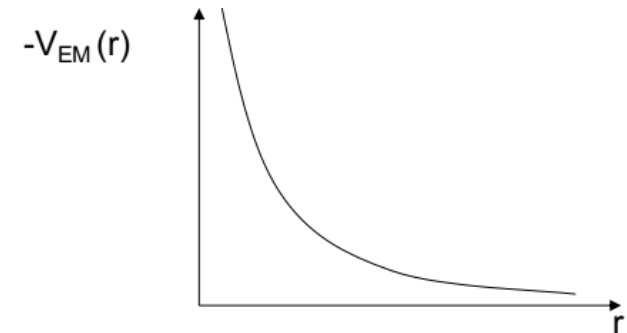
$$\mathcal{L} = \bar{\psi}(i\gamma^\mu D_\mu - m)\psi - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}$$

$$D_\mu \equiv \partial_\mu + ieA_\mu$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$

mértéktér (foton)

Effektív potenciál $V_{EM}(r) \sim -\alpha/r$



Elektromágneses és erős kölcsönhatás

■ Kvantum-elektrodinamika (QED):

- Abeli U(1) mértékelmélet
- Generátor ~ foton

kölcsönhatás

tömeges tér (e)

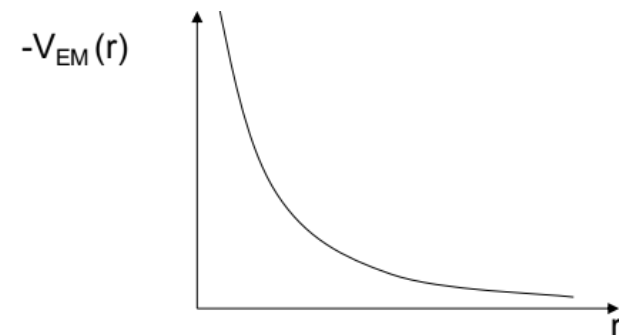
$$\mathcal{L} = \bar{\psi}(i\gamma^\mu D_\mu - m)\psi - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}$$

$$D_\mu \equiv \partial_\mu + ieA_\mu$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$

mértéktér (foton)

Effektív potenciál $V_{EM}(r) \sim -\alpha/r$



■ Kvantumszíndinamika (QCD):

- Nem-abeli SU(3) mértékelmélet
- 8 független generátor ~ 8 gluon
- **gluon: színtöltés, önkölcsönhatás**

$$\mathcal{L}_{QCD} = \bar{\psi}_i (i(\gamma^\mu D_\mu)_{ij} - m \delta_{ij}) \psi_j - \frac{1}{4}G_{\mu\nu}^a G_a^{\mu\nu}$$

$$G_{\mu\nu}^a = \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a + gf^{abc} A_\mu^b A_\nu^c,$$

Elektromágneses és erős kölcsönhatás

■ Kvantum-elektrodinamika (QED):

- Abeli U(1) mértékelmélet
- Generátor ~ foton

kölcsönhatás

tömeges tér (e)

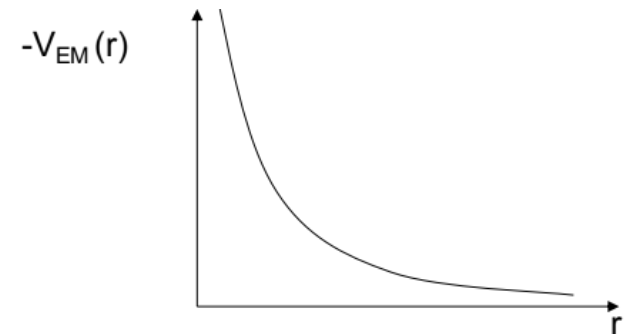
$$\mathcal{L} = \bar{\psi}(i\gamma^\mu D_\mu - m)\psi - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}$$

$$D_\mu \equiv \partial_\mu + ieA_\mu$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$

mértéktér (foton)

Effektív potenciál $V_{EM}(r) \sim -\alpha/r$



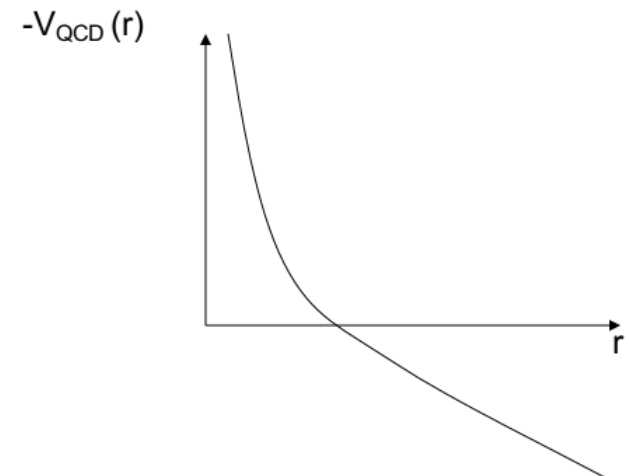
■ Kvantumszíndinamika (QCD):

- Nem-abeli SU(3) mértékelmélet
- 8 független generátor ~ 8 gluon
- gluon: színtöltés, **önkölcsönhatás**

$$\mathcal{L}_{QCD} = \bar{\psi}_i (i(\gamma^\mu D_\mu)_{ij} - m \delta_{ij}) \psi_j - \frac{1}{4}G_{\mu\nu}^a G_a^{\mu\nu}$$

$$G_{\mu\nu}^a = \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a + gf^{abc} A_\mu^b A_\nu^c,$$

Effektív potenciál $V_{QCD} \sim -\alpha/r + \sigma$

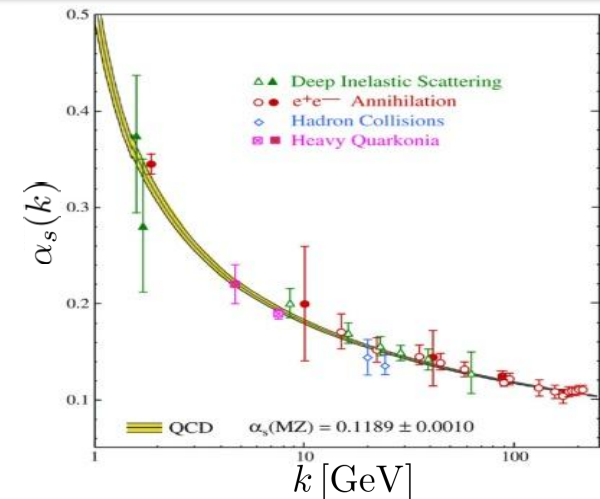


Az erős kölcsönhatás kettőssége

A futó csatolási állandó:

$$\alpha_s(k^2) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{g_s^2(k^2)}{4\pi} \approx \frac{1}{\beta_0 \ln\left(\frac{k^2}{\Lambda^2}\right)},$$

k: momentumátadás
 $\Lambda \sim 200$ MeV: QCD skálaparaméter

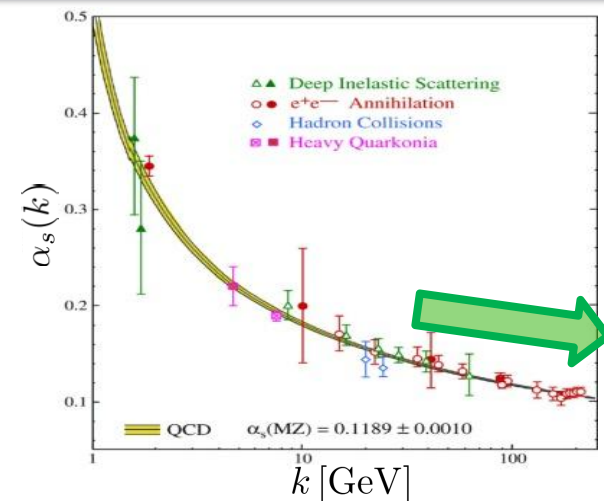


Az erős kölcsönhatás kettőssége

■ A futó csatolási állandó:

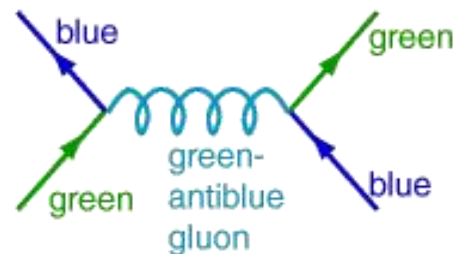
$$\alpha_s(k^2) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{g_s^2(k^2)}{4\pi} \approx \frac{1}{\beta_0 \ln\left(\frac{k^2}{\Lambda^2}\right)},$$

k: momentumátadás
 $\Lambda \sim 200$ MeV: QCD skálaparaméter



■ Aszimptotikus szabadság $k \gg \Lambda$

- "Kemény" partonok kölcsönhatása
- Perturbatíván számolható



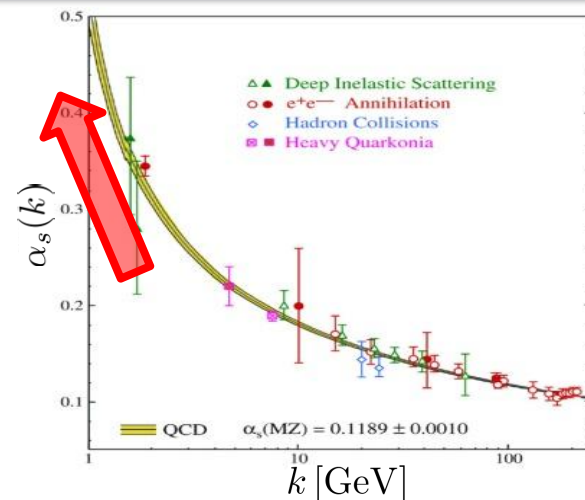
Gluon-mediated interaction between two quarks.

Az erős kölcsönhatás kettőssége

A futó csatolási állandó:

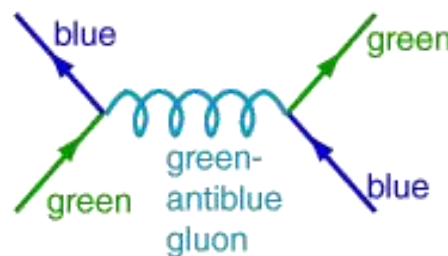
$$\alpha_s(k^2) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{g_s^2(k^2)}{4\pi} \approx \frac{1}{\beta_0 \ln\left(\frac{k^2}{\Lambda^2}\right)},$$

k: momentumátadás
 $\Lambda \sim 200$ MeV: QCD skálaparaméter



Aszimptotikus szabadság $k \gg \Lambda$

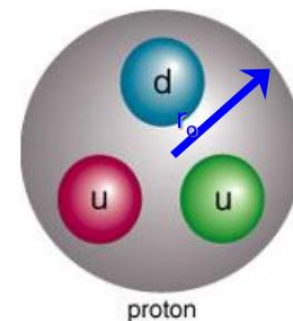
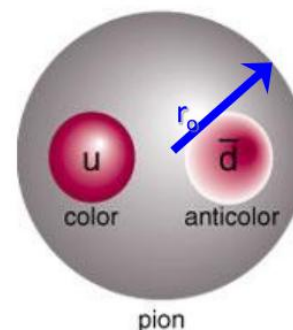
- "Kemény" partonok kölcsönhatása
- Perturbatíván számolható



Gluon-mediated interaction between two quarks.

Kvarkbezárás $k \lesssim \Lambda$

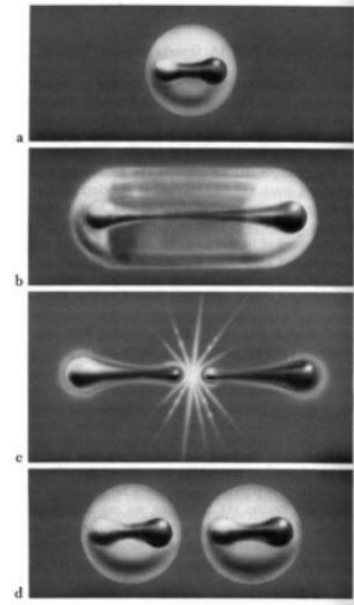
- mezon ($q\bar{q}$), barion (qqq)
- **Analitikusan nem számolható**
- Rács-QCD
- Effektív modellek: zsák, húr, hidrodinamika



Hadronizáció, jet

Egymástól távolodó kvarkok

- Lineáris potenciál, "húr": $U \sim \sigma r$ ($\sigma \sim 1 \text{ GeV/fm}$)
- Halmozódó energia \rightarrow újabb $q\bar{q}$ pár keltése



[illustration from [Fritzsche](#)]

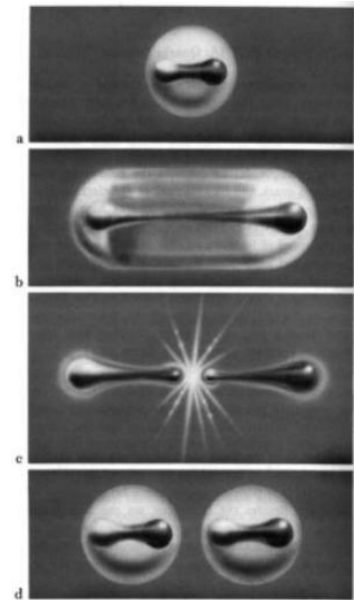
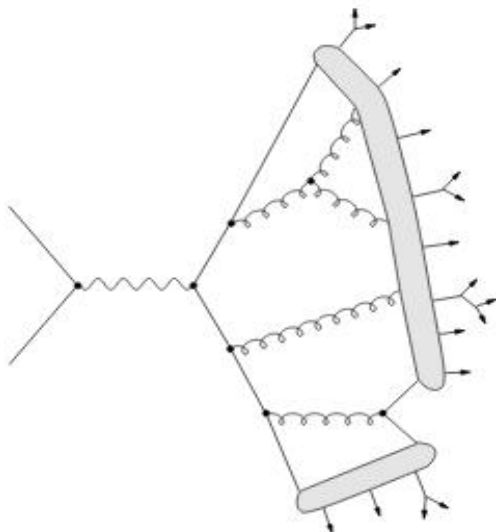
Hadronizáció, jet

Egymástól távolodó kvarkok

- Lineáris potenciál, "húr": $U \sim \sigma r$ ($\sigma \sim 1 \text{ GeV/fm}$)
- Halmozódó energia \rightarrow újabb $q\bar{q}$ pár keltése

Hadronizáció:

- QCD parton \leftrightarrow hadronok kollimált nyalábja



[illustration from Fritzsche]

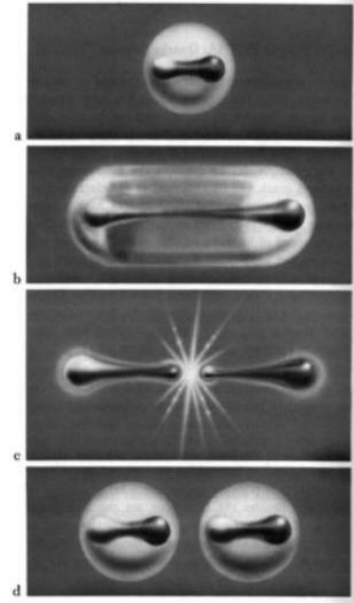
Hadronizáció, jet

Egymástól távolodó kvarkok

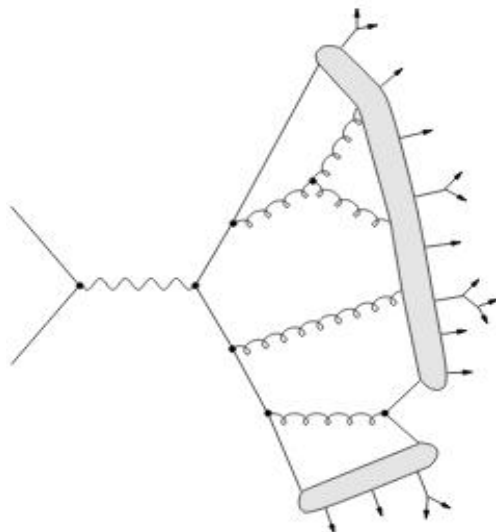
- Lineáris potenciál, "húr": $U \sim \sigma r$ ($\sigma \sim 1 \text{ GeV/fm}$)
- Halmozódó energia \rightarrow újabb $q\bar{q}$ pár keltése

Hadronizáció:

- QCD parton \leftrightarrow hadronok kollimált nyalábja

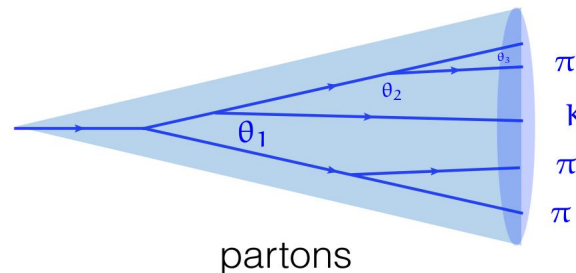


[illustration from Fritsch]



Jet virtuality

$$Q \equiv E \theta_{\text{jet}}$$



$$Q_0 \sim \Lambda_{\text{QCD}}$$

hadrons

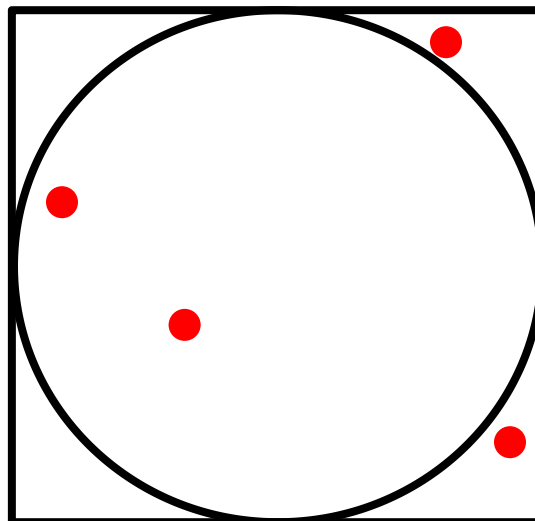
Jet: egyezményes definíció,
"kísérlet-elmélet interface"

Nagyenergiás fizikai szimulációk: **Eseménygenerátorok**

Monte Carlo módszerek

- Neumann János nevéhez köthető
- Véletlen felhasználása determinisztikus probléma megoldására (számítógép: pseudo-random)
 - Ismert valószínűségi eloszlás szerint, véletlenszerűen választunk egy kiindulási értéket
 - Ebből a kiválasztott kiindulási értékből ismert (nem véletlen) módszerrel eredményt számolunk
 - Sokszor megismételjük az eljárást, összesítjük az eredményt
- Kaszinóról kapta a nevét
 - Hiszen sorsolás van, az eredmény mégsem véletlen: a ruletten hosszú távon mindig a kaszinó nyer...
 - Említhetnénk a biztosítókat is

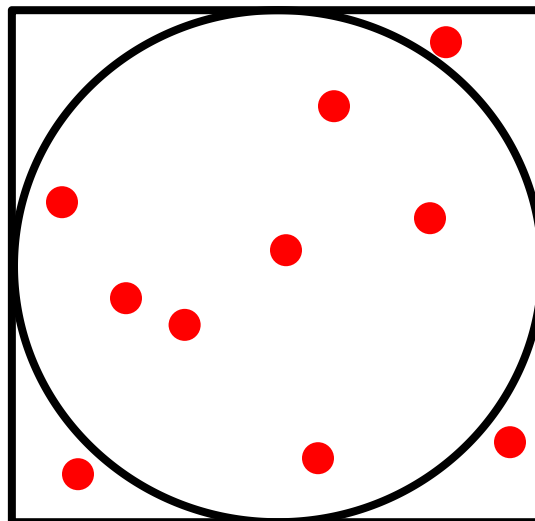
Példa: a π kiszámítása MC-val



$$\pi \sim (2/4) * 4 = 2$$

- Célbádobás egyenletes eloszlással a négyzeten
- Számoljuk, hányszor találunk a körbe (N dobásból K alkalom)
- A kör és a négyzet területének aránya $\pi/4$
- Nagy számok törvénye: ha N elég nagy, akkor $K/N \sim \pi/4$, vagyis kiszámoltuk a π -t

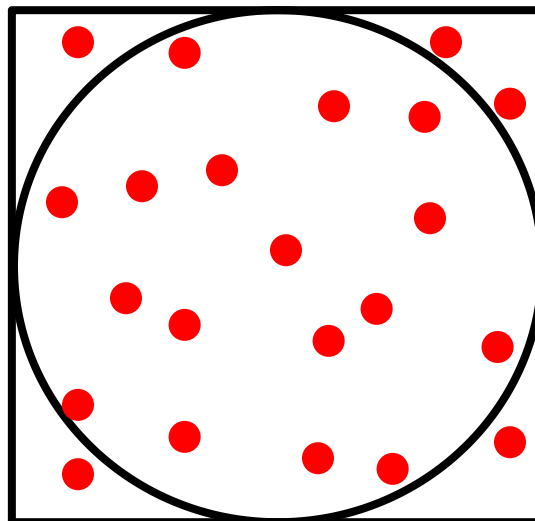
Példa: a π kiszámítása MC-val



$$\pi \sim (7/10) * 4 = 2.8$$

- Célpádobás egyenletes eloszlással a négyzeten
- Számoljuk, hányszor találunk a körbe (N dobásból K alkalom)
- A kör és a négyzet területének aránya $\pi/4$
- Nagy számok törvénye: ha N elég nagy, akkor $K/N \sim \pi/4$, vagyis kiszámoltuk a π -t

Példa: a π kiszámítása MC-val



$$\pi \sim (17/22) * 4 \sim 3.1$$

- Célbádobás egyenletes eloszlással a négyzeten
- Számoljuk, hányszor találunk a körbe (N dobásból K alkalom)
- A kör és a négyzet területének aránya $\pi/4$
- Nagy számok törvénye: ha N elég nagy, akkor $K/N \sim \pi/4$, vagyis kiszámoltuk a π -t

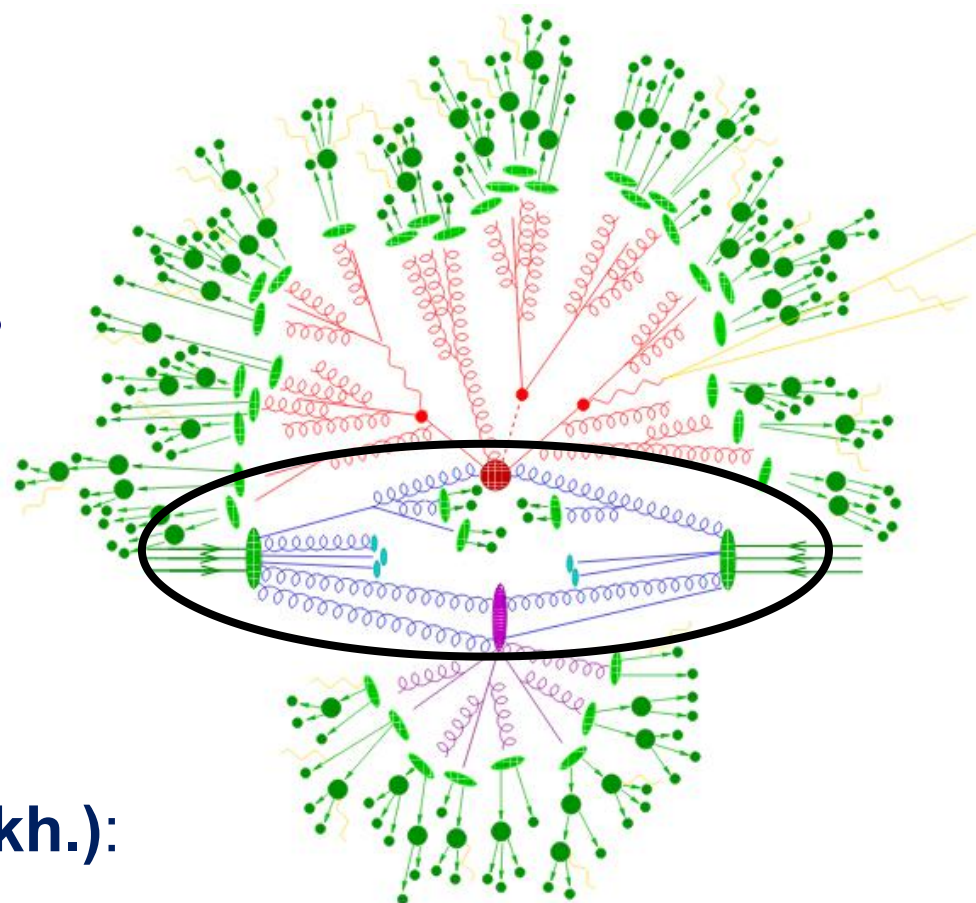
Monte Carlo használata

- Hullámok terjedése közegben – biológia, egészségügy, fizika, számítógépes grafika
- Reaktorfizika
- Környezetvédelem, szennyezésterjedés modellezése
- Sejtek, komplex molekulák modellezése
- **Részecskefizika**
 - Elemi folyamatok szimulációja
 - Detektor viselkedése
 - Akceptancia megbecslése
- Sok más terület

Eseménygenerátorok

Egy “egyszerű” proton-proton ütközés...

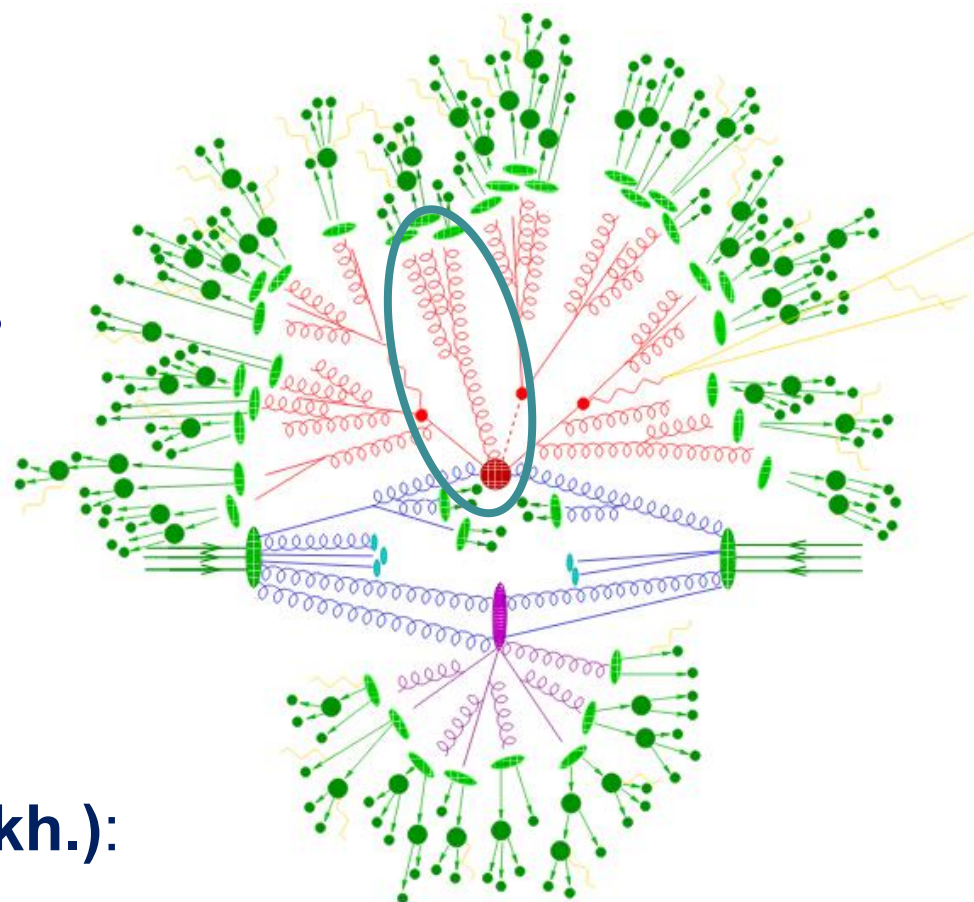
- **kemény folyamat:**
rögzített rendű
perturbációszámítás
- **partonzápor:**
kezdeti-, végállapotú sugárzás
- **Hadronizáció:**
fenomenológiai modellek
- **Hadronbomlások:**
effektív elméletek
- **Háttéreseemény (sokparton-kh.):**
fenomenológiai modellek



Eseménygenerátorok

Egy “egyszerű” proton-proton ütközés...

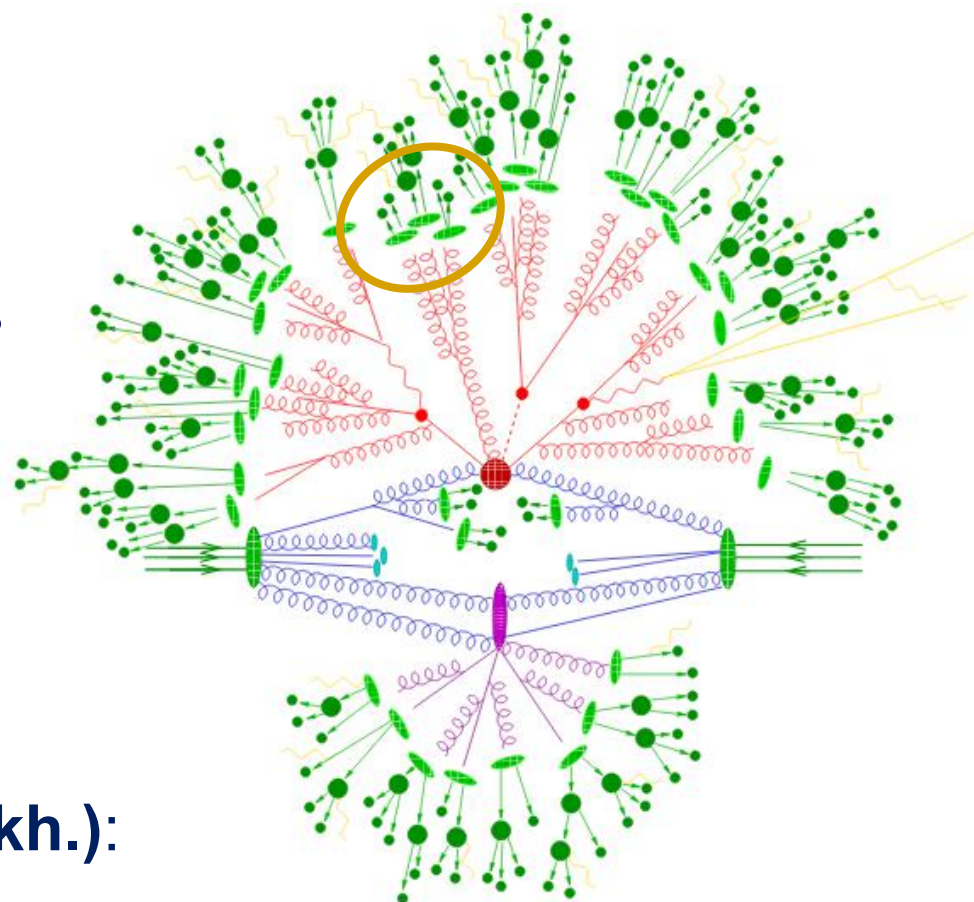
- **kemény folyamat:**
rögzített rendű
perturbációszámítás
- **partonzápor:**
kezdeti-, végállapotú sugárzás
- **Hadronizáció:**
fenomenológiai modellek
- **Hadronbomlások:**
effektív elméletek
- **Háttéresemény (sokparton-kh.):**
fenomenológiai modellek



Eseménygenerátorok

Egy “egyszerű” proton-proton ütközés...

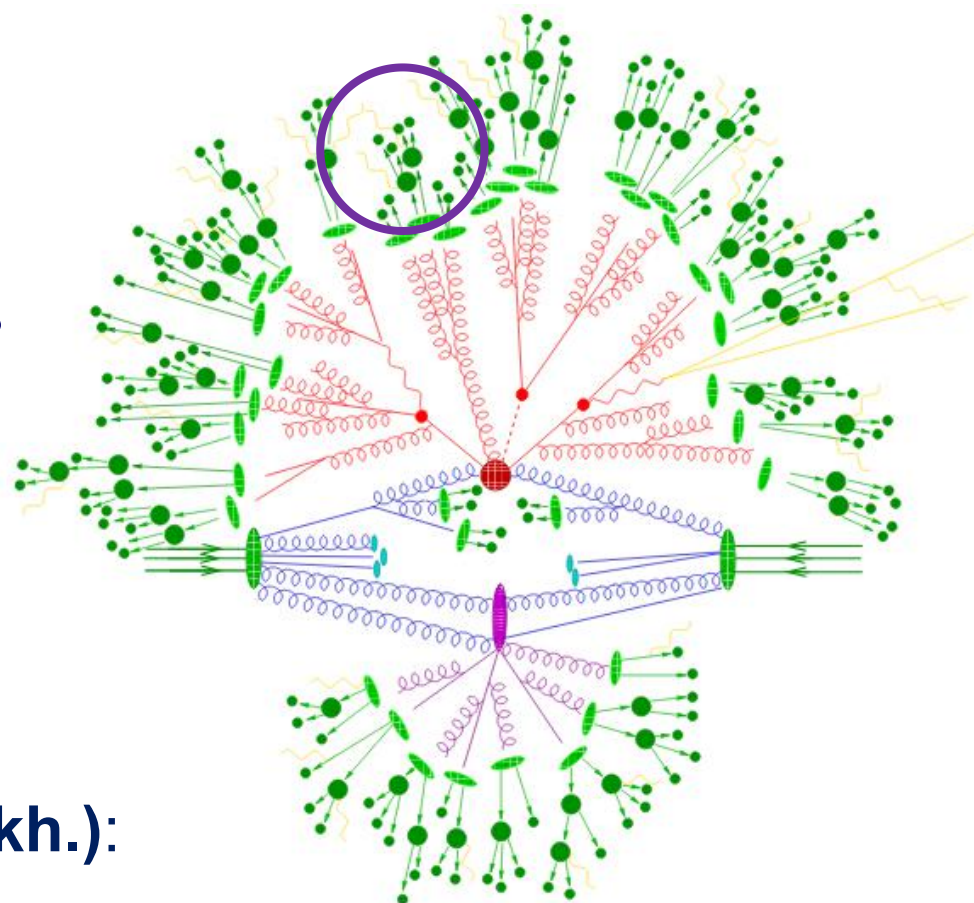
- **kemény folyamat:**
rögzített rendű
perturbációszámítás
- **partonzápor:**
kezdeti-, végállapotú sugárzás
- **Hadronizáció:**
fenomenológiai modellek
- **Hadronbomlások:**
effektív elméletek
- **Háttéresemény (sokparton-kh.):**
fenomenológiai modellek



Eseménygenerátorok

Egy “egyszerű” proton-proton ütközés...

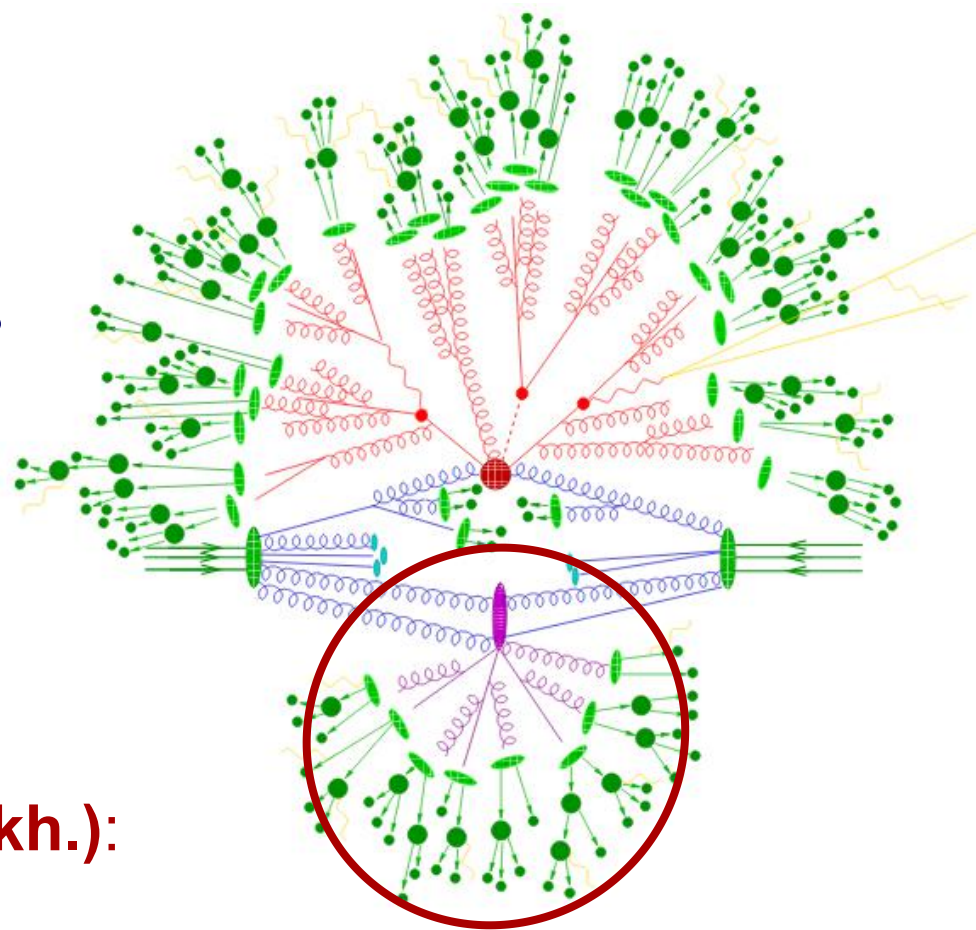
- **kemény folyamat:**
rögzített rendű
perturbációszámítás
- **partonzápor:**
kezdeti-, végállapotú sugárzás
- **Hadronizáció:**
fenomenológiai modellek
- **Hadronbomlások:**
effektív elméletek
- **Háttéresemény (sokparton-kh.):**
fenomenológiai modellek



Eseménygenerátorok

Egy “egyszerű” proton-proton ütközés...

- **kemény folyamat:**
rögzített rendű
perturbációszámítás
- **partonzápor:**
kezdeti-, végállapotú sugárzás
- **Hadronizáció:**
fenomenológiai modellek
- **Hadronbomlások:**
effektív elméletek
- **Háttéreseemény (sokparton-kh.):**
fenomenológiai modellek



A kemény folyamat

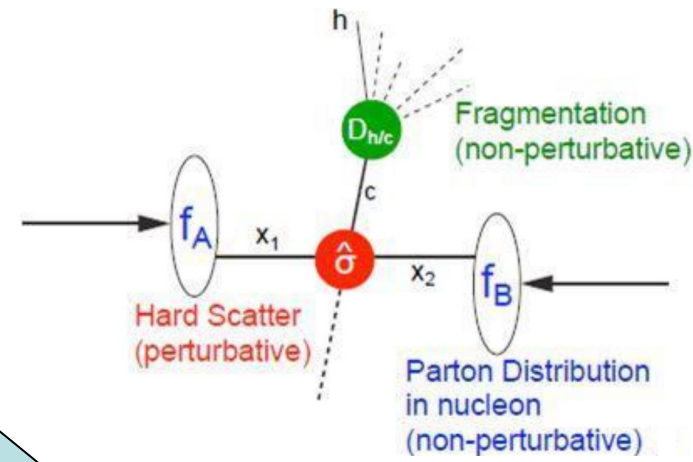
■ Faktorizálhatóság

Szórási folyamat hatáskeresztmetszete

Partoneloszlás-függvény

$$\sigma = \sum_{a,b} \int_0^1 dx_a dx_b \int f_a^{h1}(x_a, \mu_F) f_b^{h2}(x_b, \mu_F) d\hat{\sigma}_{ab \rightarrow n}(\mu_F, \mu_R)$$

$$= \sum_{a,b} \int_0^1 dx_a dx_b \int d\Phi_n f_a^{h1}(x_a, \mu_F) f_b^{h2}(x_b, \mu_F) \times \frac{1}{2\hat{s}} |\mathcal{M}_{ab \rightarrow n}|^2(\Phi_n; \mu_F, \mu_R),$$



Partonszintű folyamat hatáskeresztmetszete

Átmeneti mátrixelem (Feynmann-diagrammok)

Fázistér-elem

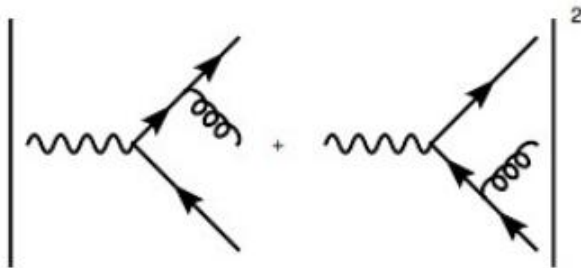
$$\mathcal{M}_{ab \rightarrow n} = \sum_i \mathcal{F}_{ab \rightarrow n}^{(i)}$$

$$d\Phi_n = \prod_{i=1}^n \frac{d^3 p_i}{(2\pi)^3 2E_i} \cdot (2\pi)^4 \delta^{(4)}(p_a + p_b - \sum_{i=1}^n p_i)$$

Integrál kiszámítása MC módszerrel

Partonzápor

- Gyorsuló színtöltés sugároz
 - gluonok is töltöttek -> partonzápor



$$\frac{d\sigma_{q\bar{q}g}}{d\cos\theta dz} \approx \sigma_{q\bar{q}} C_F \frac{\alpha_s}{2\pi} \frac{2}{\sin^2\theta} \frac{1+(1-z)^2}{z}$$

szín-faktor

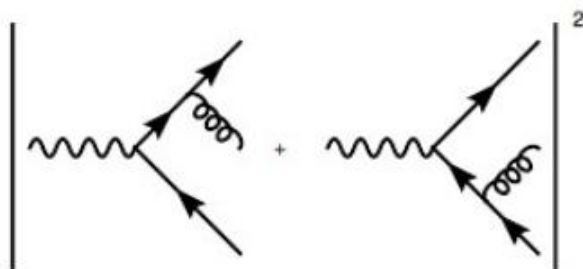
sugárzási szög

gluon-energiarány

Partonzápor

■ Gyorsuló színtöltés sugároz

- gluonok is töltöttek -> partonzápor



$$\frac{d\sigma_{q\bar{q}g}}{d\cos\theta dz} \approx \sigma_{q\bar{q}} C_F \frac{\alpha_s}{2\pi} \frac{2}{\sin^2\theta} \frac{1+(1-z)^2}{z}$$

szín-faktor

sugárzási szög

gluon-energiarány

■ Probléma: Mátrixelemek divergálnak

- párhuzamos határeset, ($\theta \rightarrow 0, \pi$) lágy határeset ($z \rightarrow 0$)

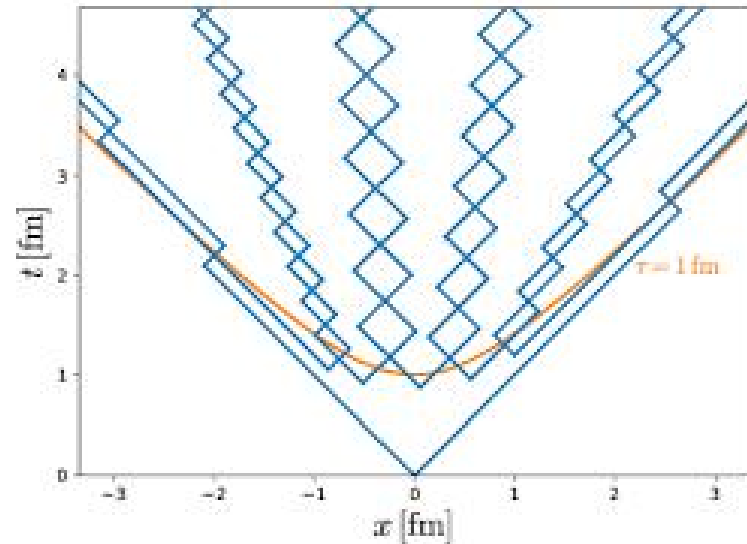
■ Megoldás (egyik): “többszörös kollineáris evolúció”

- A sugárzási valószínűség kifejezése a szöggel, illetve “virtualitással” (Q)

- levágás bevezetése $\Delta_i(Q^2, Q_0^2) \sim \exp\left\{-C_F \frac{\alpha_s}{2\pi} \log^2 \frac{Q^2}{Q_0^2}\right\}$

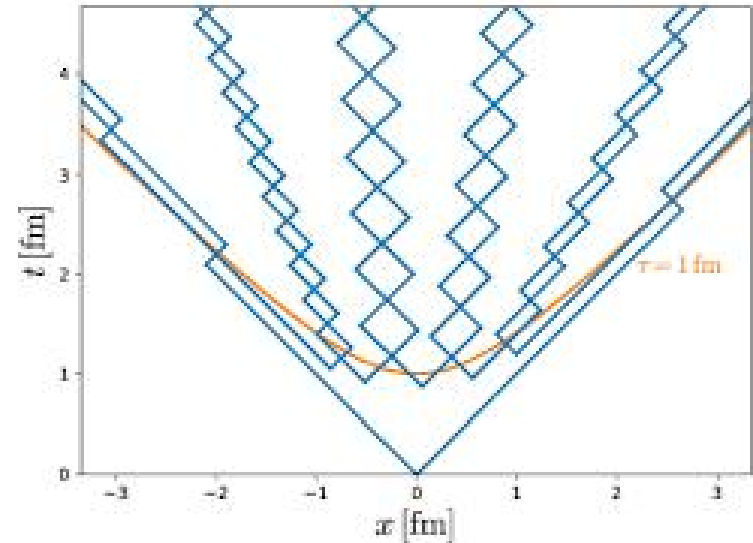
Fragmentáció (Lund-húrmodell)

- Könnyű kvarkokat összekötő húr
- Mezonok: “jojó”
(állandó terület
a téridő-diagramban)

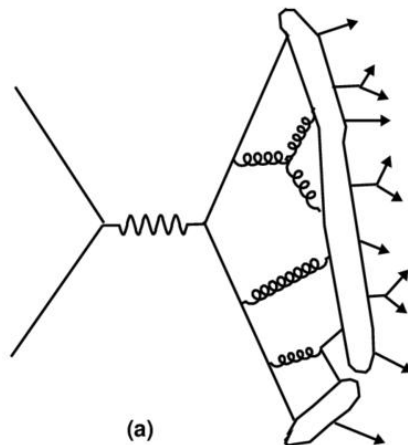


Fragmentáció (Lund-húrmodell)

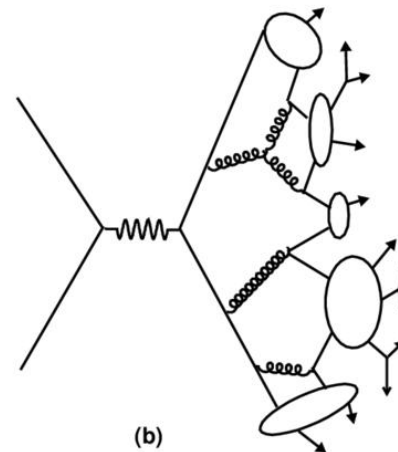
- Könnyű kvarkokat összekötő húr
- Mezonok: “jojó”
(állandó terület a téridő-diagramban)
- Fragmentáció



Húrmodell

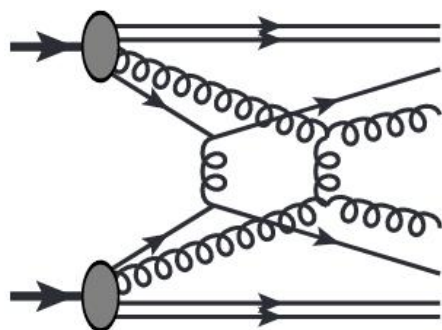


Klaszter-modell

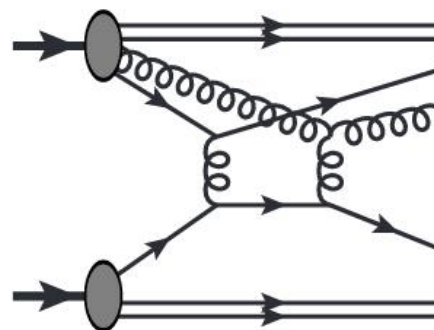


Sokparton-kölcsönhatás

- Egy reakcióban lehet több kemény folyamat
 - Ezek partonszinten összekapcsolódhatnak



összekapcsolt kölcsönhatás

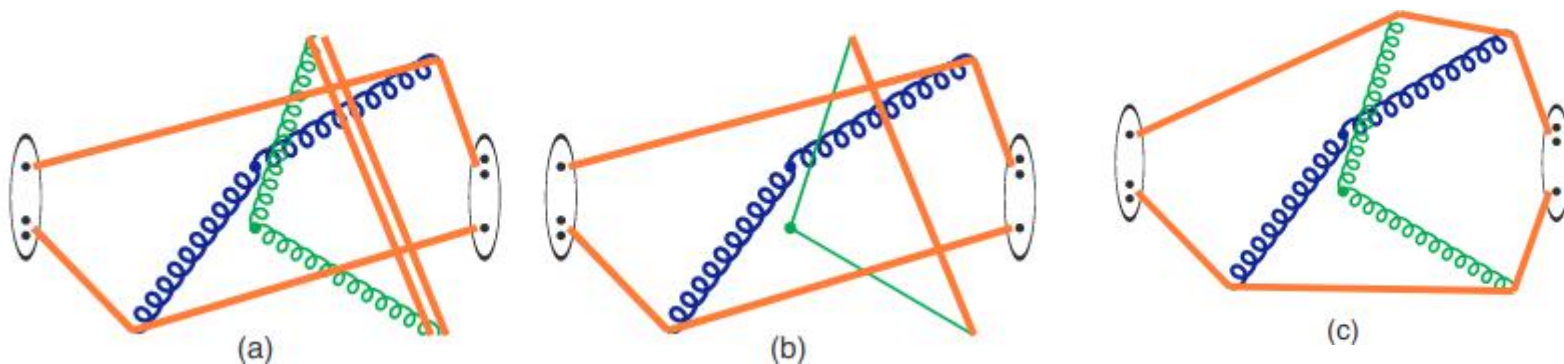


újraszóródás

- Analitikus, de nem fundamentális formalizmus
- Utóbbi időben megértettük a jelentőségét:
 - Nagy multiplicitású eseményekben a háttéresemény és a vezető folyamat összefügg!

Szín-újrarendezés

- A sokparton-kölcsönhatás szimulációja nincs tekintettel a színekre
 - Analitikus, de nem fundamentális formalizmus
- Utólag, mesterségesen kell “rendberakni”
 - Nem egyértelmű a megoldás a végállapotban
 - Színhúrok “rövidre zárása”. A pontos algoritmus, a hatótáv választás kérdése

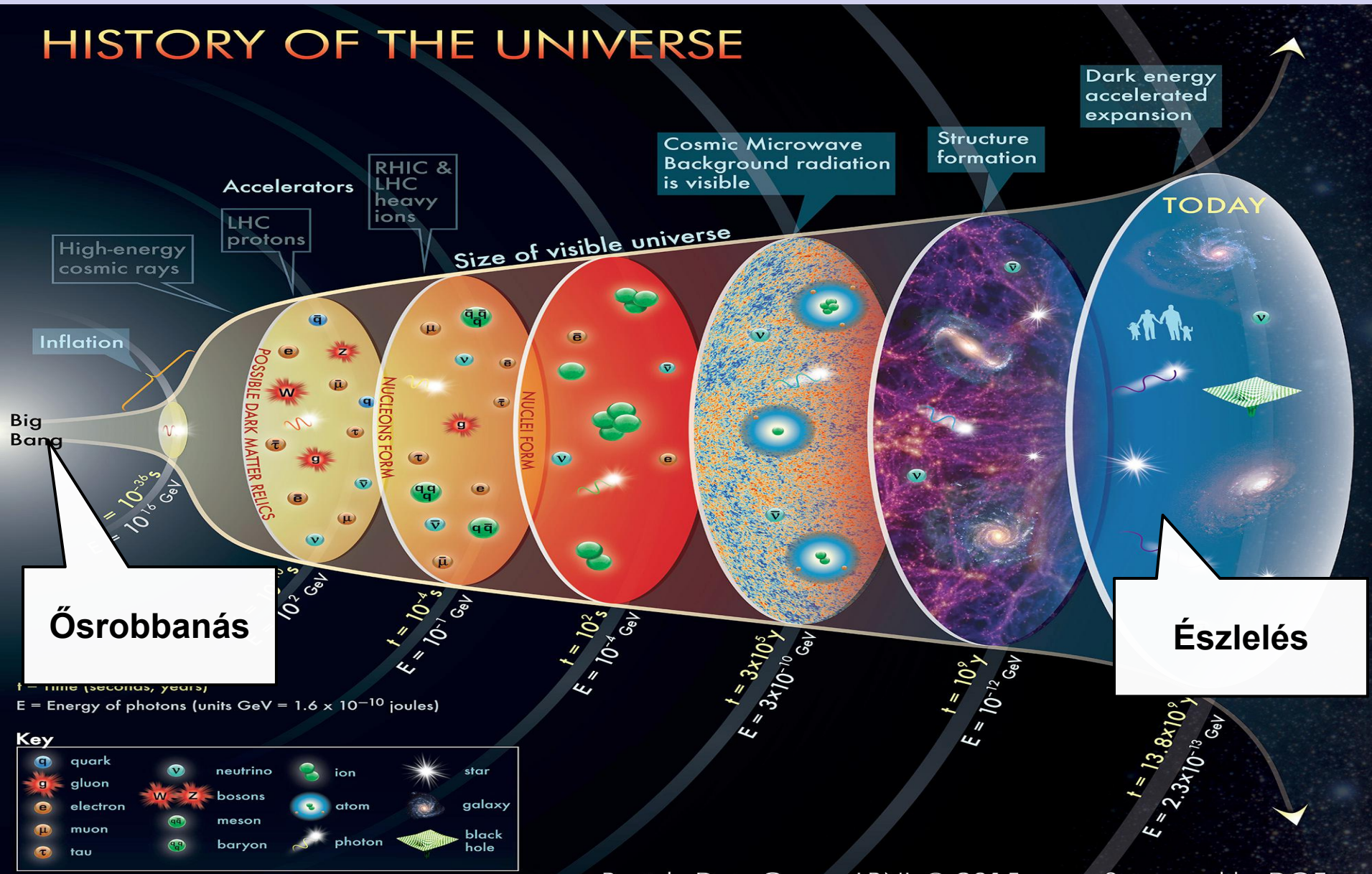


Mérés és adatgyűjtés

Az adat útja a kísérlettől az eredményig

A kezdet: "nagy bummm"

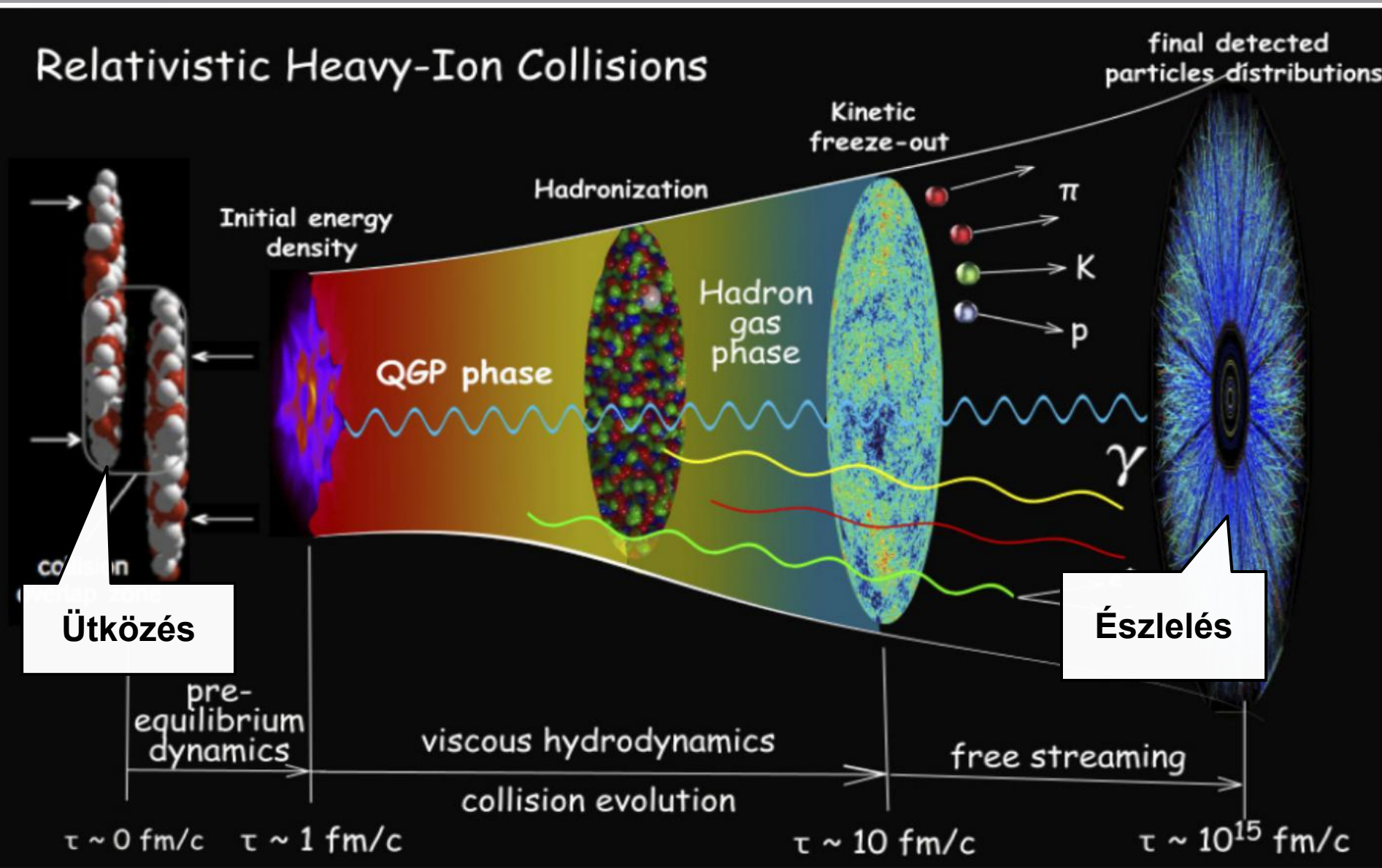
HISTORY OF THE UNIVERSE



The concept for the above figure originated in a 1986 paper by Michael Turner.

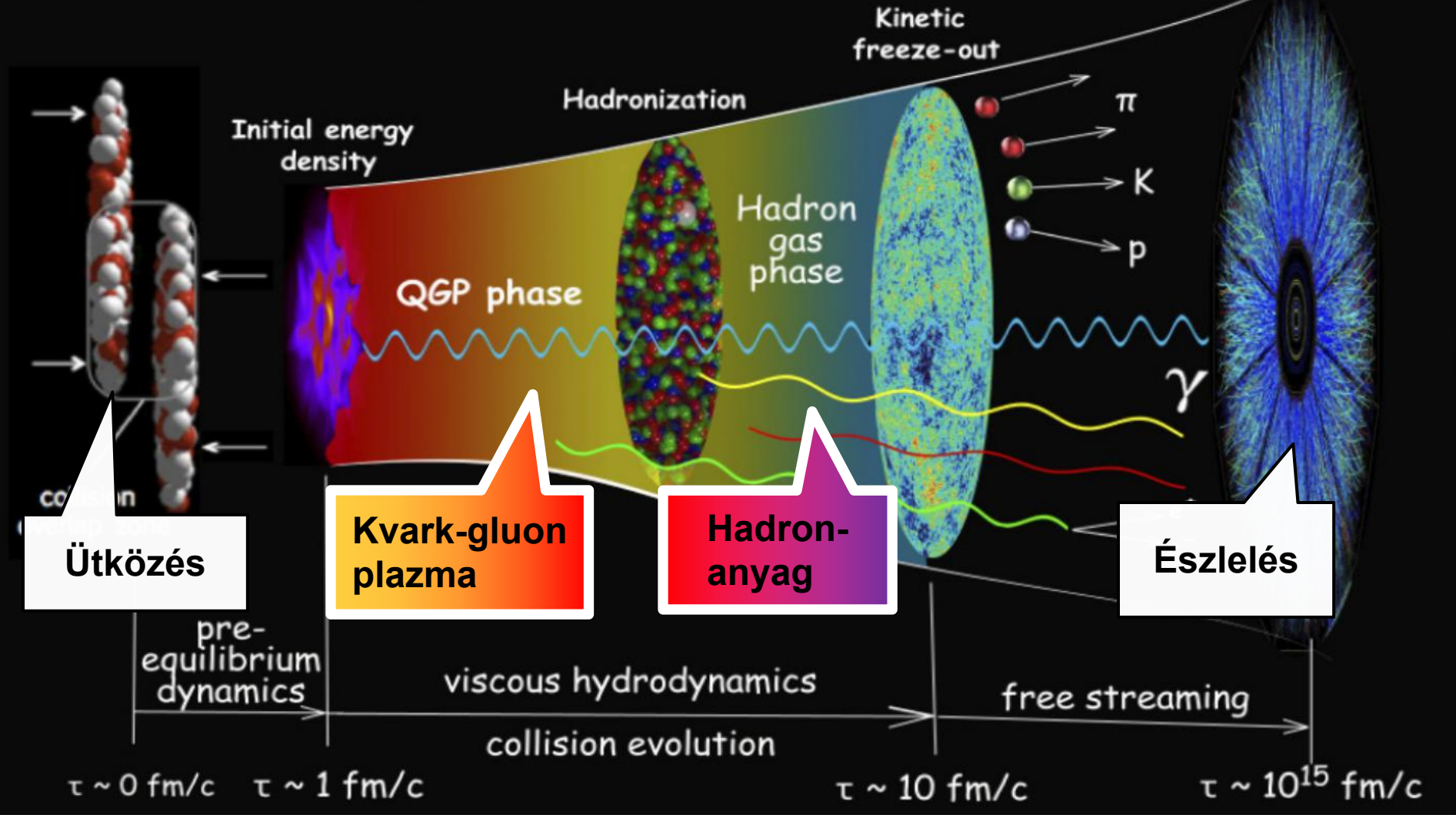
Nehézion-ütközések: "kis bumm"

Relativistic Heavy-Ion Collisions



Nehézion-ütközések: "kis bumm"

Relativistic Heavy-Ion Collisions



Ütközés

Kvark-gluon plazma

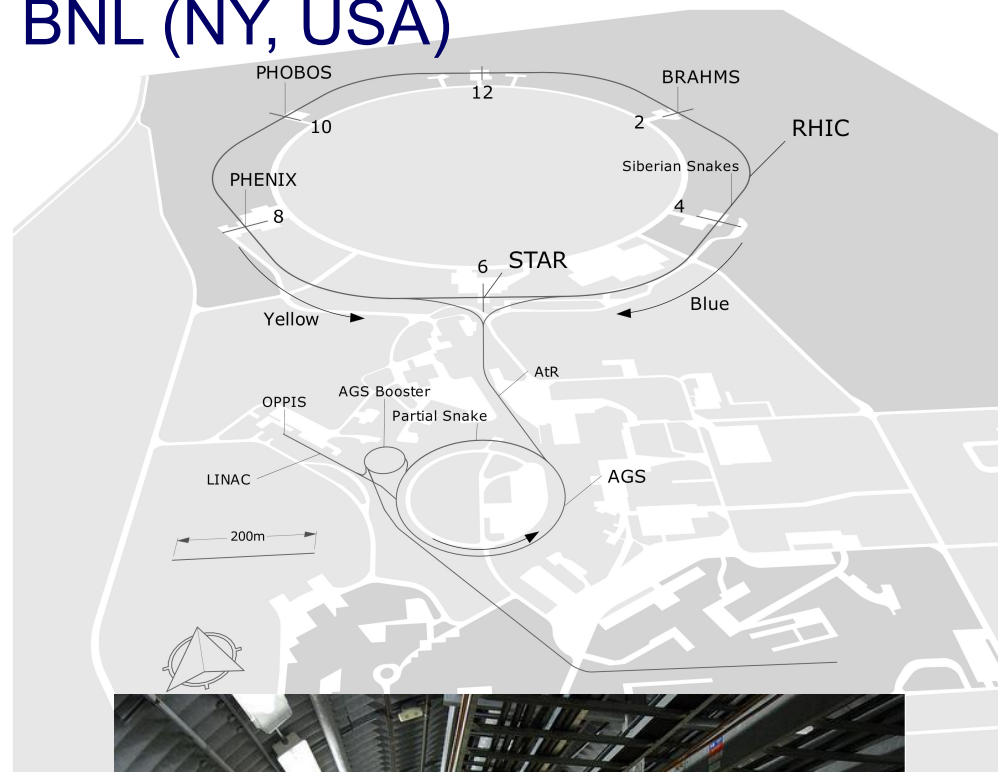
Hadron-anyag

Észlelés

RHIC relativisztikus nehézion-ütköztető

- Két 3,6 km hosszú szinkrotron-gyűrű
- Rendkívül sokoldalú
 - Au, Cu, U, d, ^3He , p
 - polarizált protonok (\rightarrow spinfizika)
 - Aszimmetrikus ütközések
- Széles energiatartomány
 - **p+p:**
 $\sqrt{s} = 62 - 500 \text{ GeV}$
 - **Au+Au:**
 $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.5 - 200 \text{ GeV}$
(fix target: 2.7 GeV)
- Kísérletek: STAR, PHENIX (PHOBOS, BRAHMS)

BNL (NY, USA)

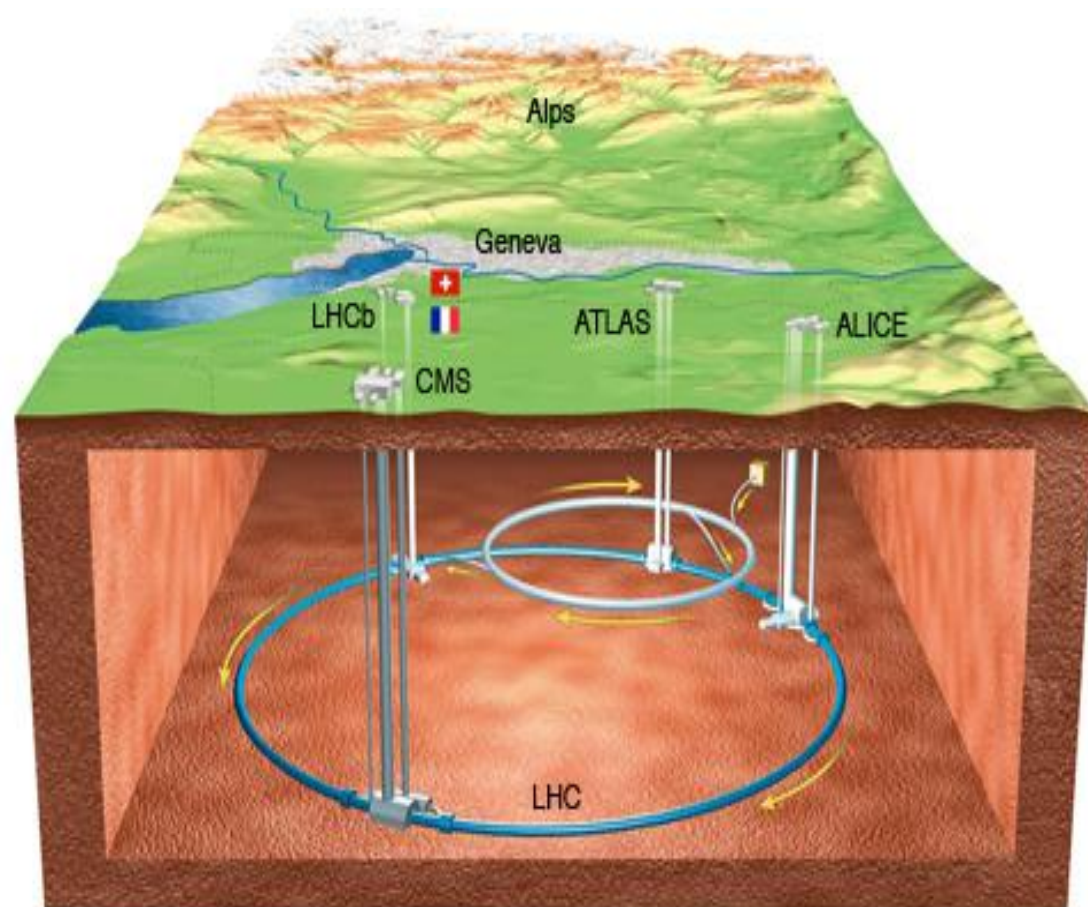


LHC: a Nagy Hadronütköztető

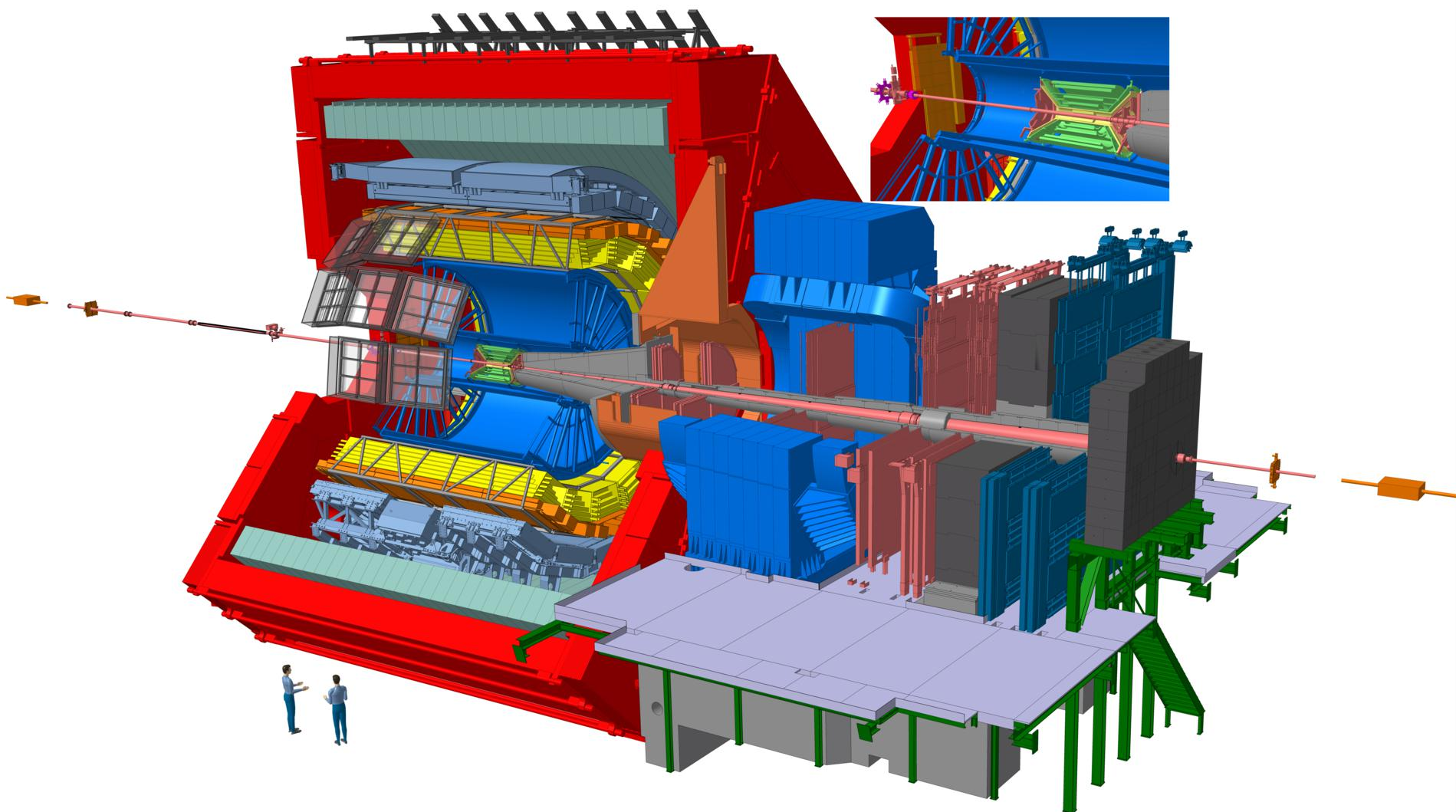


- CERN: Közös európai kutatóközpont
- 22 tagország együttműködése

- LHC: 27 km hosszú gyorsítógyűrű
- Legnagyobb energia
 - **p+p**: $\sqrt{s}=13$ TeV
 - **Pb+Pb**: $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV
- Kísérletek:
ALICE, CMS,
ATLAS, LHCb



Az ALICE kísérlet (példa)



- Kifejezetten nehézion-ütközések feldolgozására épült detektorrendszer
- Részecskék megbízható azonosítása széles impulzus-tartományban

Az ALICE kísérlet (példa)

EMCal: elektromágneses részecskék energiája

mágnes 0.5 T

HMPID: nagysebességű hadronok azonosítása

ITS: töltött részecskék azonosítása, nyomkövetése, másodlagos vertex

TPC: töltött részecskék azonosítása, nyomkövetése

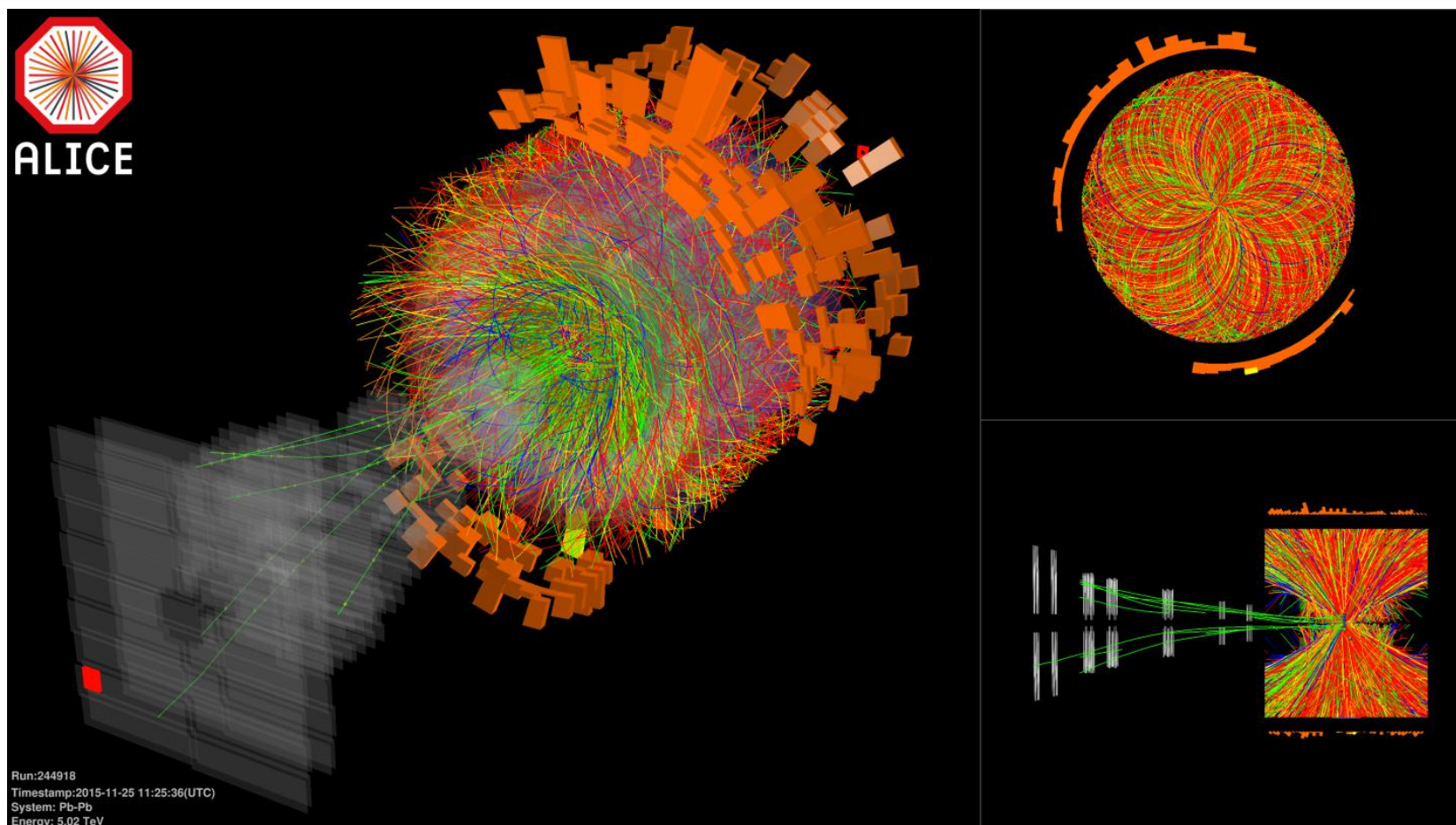
TOF: azonosítás a repülési idő mérésével

Müonspektrométer
(előreszórás): $-4 < \eta < -2.5$
műonok észlelése, nyomkövetése

központi kar: $|\eta| < 0.9$

- Kifejezetten nehézion-ütközések feldolgozására épült detektorrendszer
- Részecskék megbízható azonosítása széles impulzus-tartományban

Rekonstruált nehézion-esemény



- Másodpercenként akár 600 millió ütközés
- Akár több ezer részecske jeleinek azonosítása, értelmezése, feldolgozása
- 2-4 GB adat másodpercenként

Hogyan férünk hozzá a fizikához?

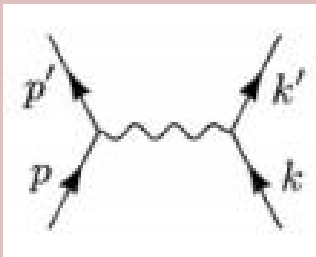
- Direkt módon csak a legelemibb folyamatok érthetőek meg
- Ehelyett egységes rendszerbe foglalt adatgyűjtés és szimuláció jellemző

Valós adat feldolgozása



Reakció

Szimuláció feldolgozása

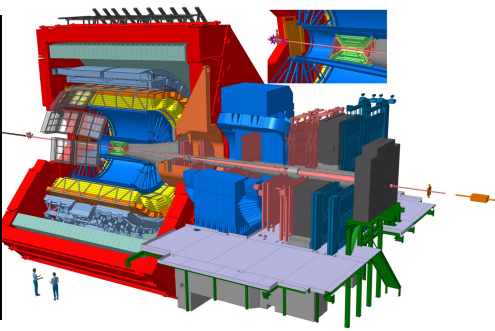


Eseménygenerátor

Hogyan férünk hozzá a fizikához?

- Direkt módon csak a legelemibb folyamatok érthetőek meg
- Ehelyett egységes rendszerbe foglalt adatgyűjtés és szimuláció jellemző

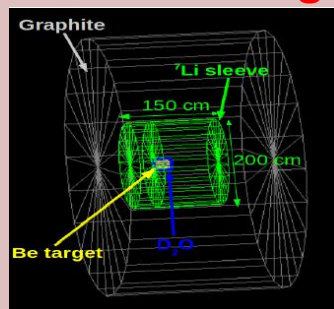
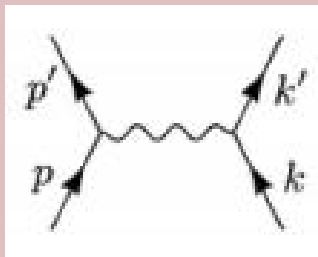
Valós adat feldolgozása



Reakció ==>

Észlelés

Szimuláció feldolgozása

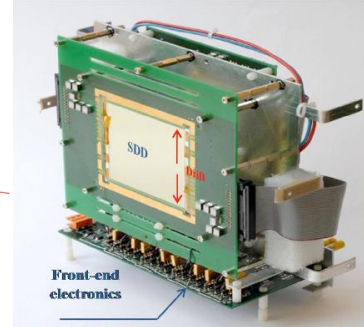
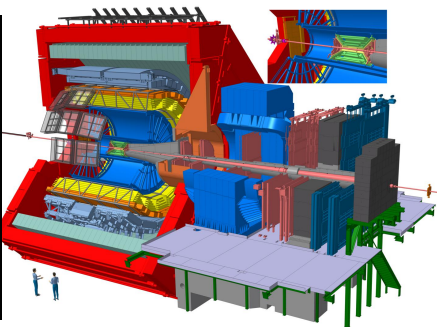


Eseménygen. ==> Detektorszimuláció

Hogyan férünk hozzá a fizikához?

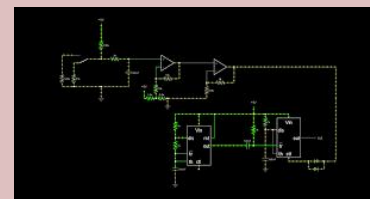
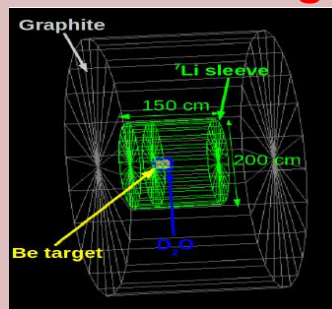
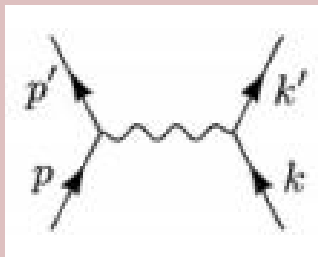
- Direkt módon csak a legelemibb folyamatok érthetőek meg
- Ehelyett egységes rendszerbe foglalt adatgyűjtés és szimuláció jellemző

Valós adat feldolgozása



Reakció ==> Észlelés ==> Jelfeldolgozás

Szimuláció feldolgozása

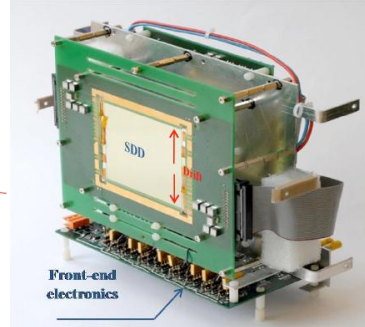
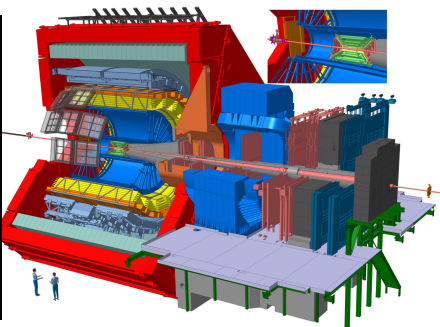


Eseménygen. ==> Detektorszim. ==> Elektronika szim.

Hogyan férünk hozzá a fizikához?

- Direkt módon csak a legelemibb folyamatok érthetőek meg
- Ehelyett egységes rendszerbe foglalt adatgyűjtés és szimuláció jellemző

Valós adat feldolgozása

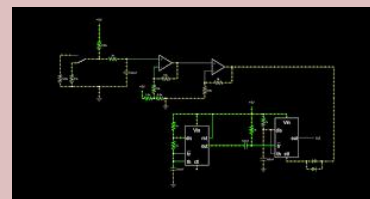
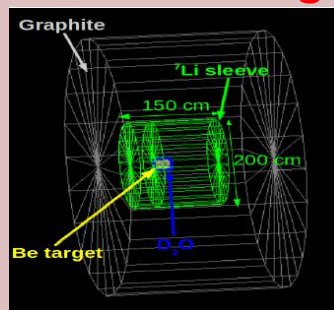
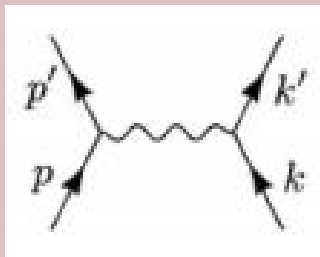


Reakció ==> Észlelés ==> Jelfeldolgozás



==> Szelekció, tárolás

Szimuláció feldolgozása

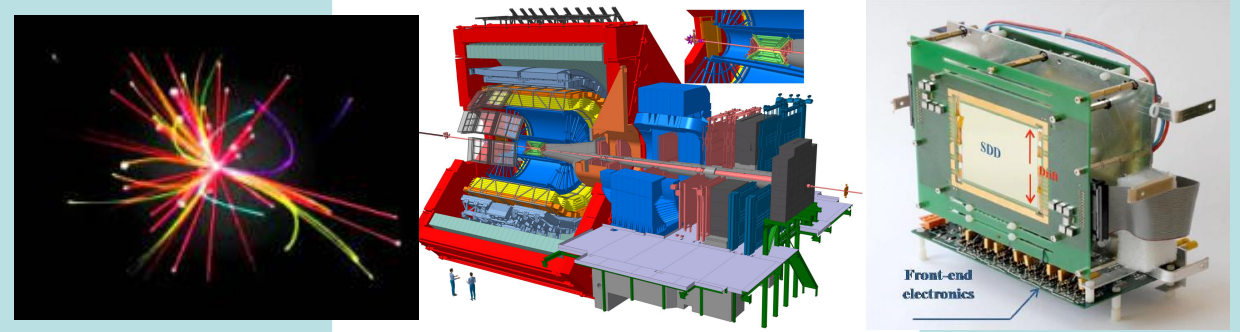


Eseménygen. ==> Detektorszim. ==> Elektronika szim.

Hogyan férünk hozzá a fizikához?

- Direkt módon csak a legelemibb folyamatok érthetőek meg
- Ehelyett egységes rendszerbe foglalt adatgyűjtés és szimuláció jellemző

Valós adat feldolgozása

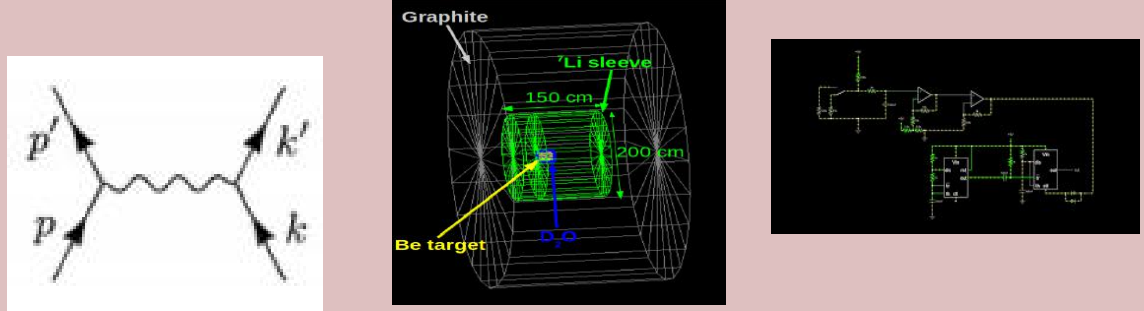


Reakció ==> Észlelés ==> Jelfeldolgozás

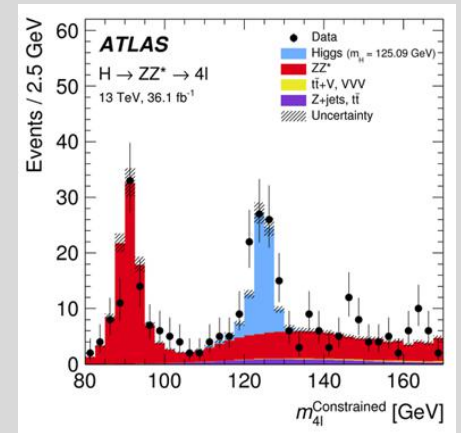


==> Szelekció, tárolás

Szimuláció feldolgozása



Eseménygen. ==> Detektorszim. ==> Elektronika szim.



==> Adatanalízis

Összefoglalás (I. alkalom)

- **Modellek szerepe a nagyenergiás fizikában**
 - A részecskefizika standard modellje
 - Perturbációszámítás
 - Effektív modellek
- **Monte Carlo eseménygenerátorok alapjai**
 - Nagyenergiás fizikai folyamatok számolása
- **Adatgyűjtés és kiértékelés**
 - Adat és szimuláció útja az eredményig
- *II. alkalom: gyakorlatiasabb példa...*

Köszönöm a figyelmet!



ALICE

Vértési Róbert

Wigner Fizikai Kutatóközpont
MTA kiváló kutatóhely

vertesi.robert@wigner.mta.hu

