

Modellezés és adatfeldolgozás (2)



ALICE

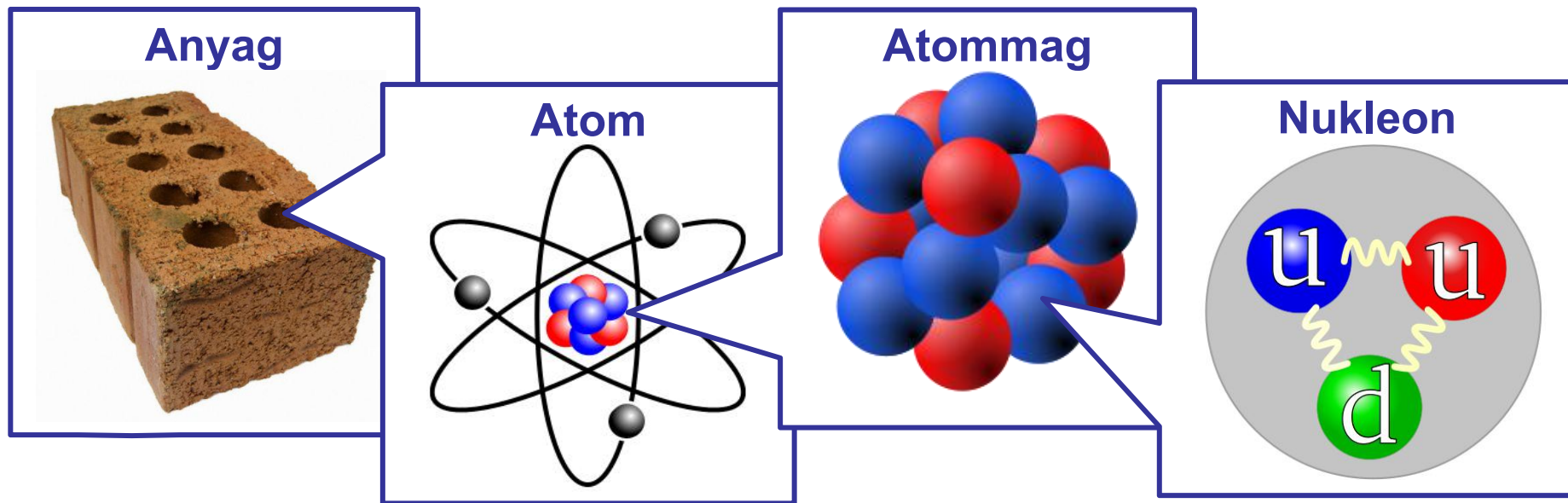
Vértesi Róbert

Wigner Fizikai Kutatóközpont
MTA kiváló kutatóhely

vertesi.robert@wigner.mta.hu

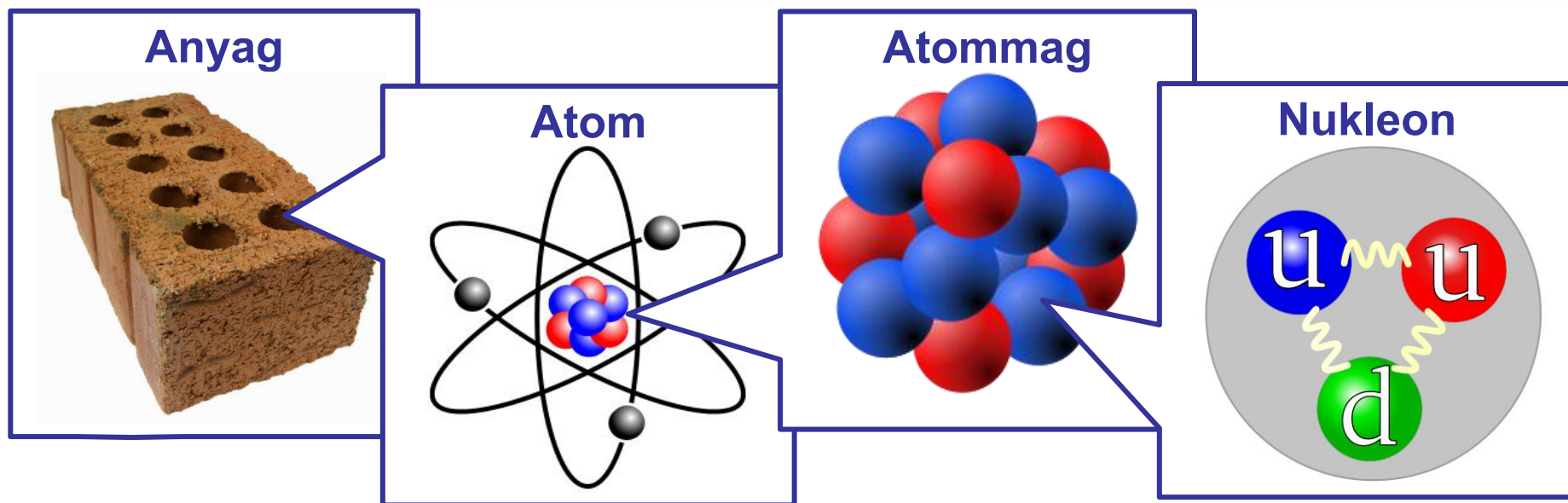


Világunk építőkövei



- **Kvarkok**: az atommag elemi részecskéi
- **Gluonok**: A magot összetartó **erős kölcsönhatás** közvetítői
- **Kvarkbezárás**: nincs magányos kvark! Hadronokat alkotnak
- **Kvantumszín dinamika**: az erős kölcsönhatás elmélete

Világunk építőkövei



- **Kvarkok**: az atommag elemi részecskéi
- **Gluonok**: A magot összetartó **erős kölcsönhatás** közvetítői
- **Kvarkbezárás**: nincs magányos kvark! Hadronokat alkotnak
- **Kvantumszín dinamika**: az erős kölcsönhatás elmélete

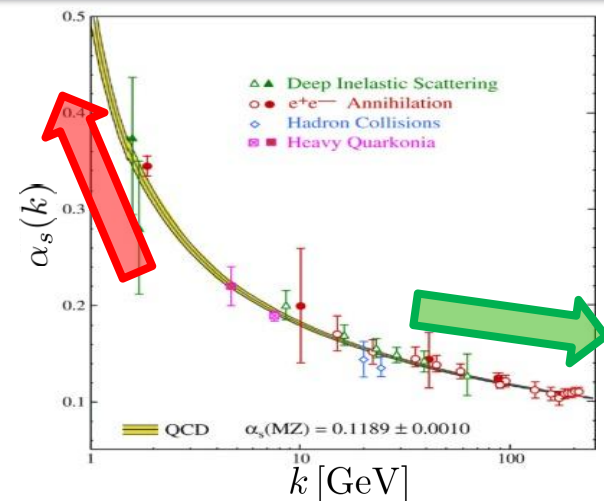
Hogyan tudhatunk meg többet róluk?

Az erős kölcsönhatás kettőssége

A futó csatolási állandó:

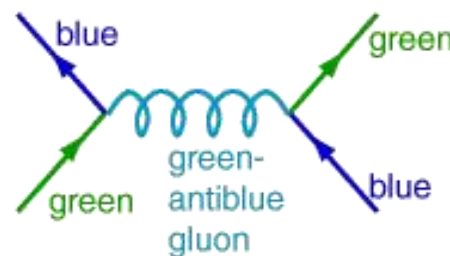
$$\alpha_s(k^2) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{g_s^2(k^2)}{4\pi} \approx \frac{1}{\beta_0 \ln\left(\frac{k^2}{\Lambda^2}\right)},$$

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



Aszimptotikus szabadság $k \gg \Lambda$

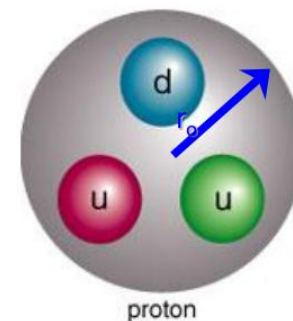
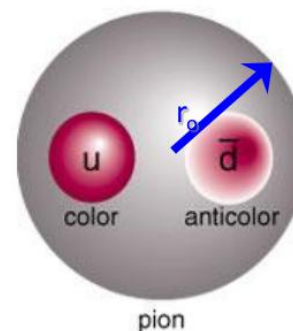
- "Kemény" partonok kölcsönhatása
- Perturbatíván számolható



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



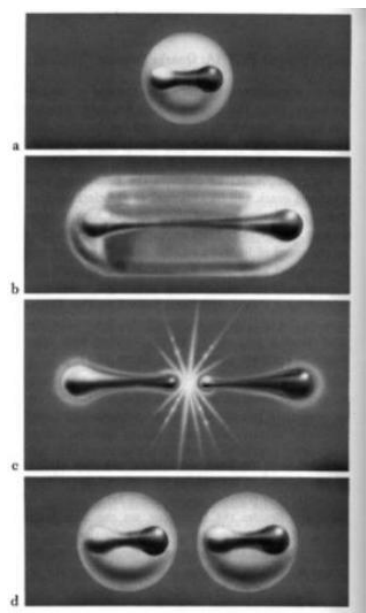
Hadronizáció, jet

Egymástól távolodó kvarkok

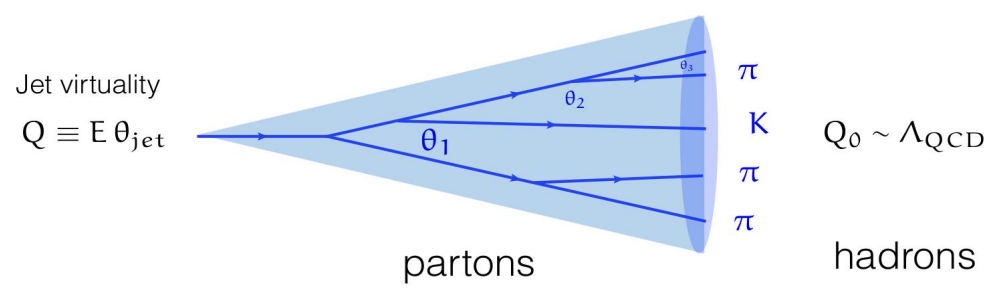
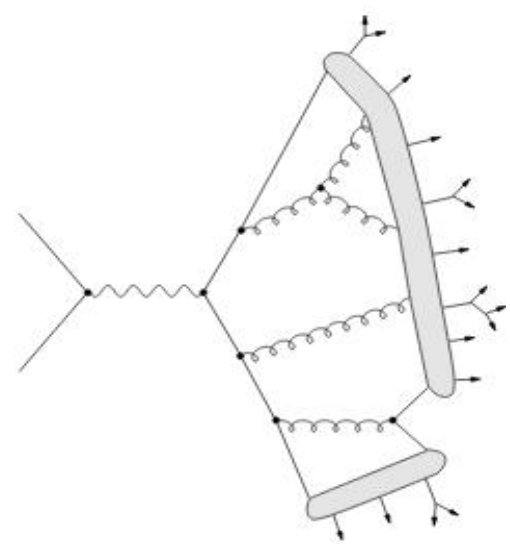
- Lineáris potenciál, "húr": $U \sim \sigma r$ ($\sigma \sim 1 \text{ GeV/fm}$)
- Halmozódó energia \rightarrow újabb $q\bar{q}$ pár keltése

Hadronizáció:

- QCD parton \leftrightarrow hadronok kollimált nyalábja

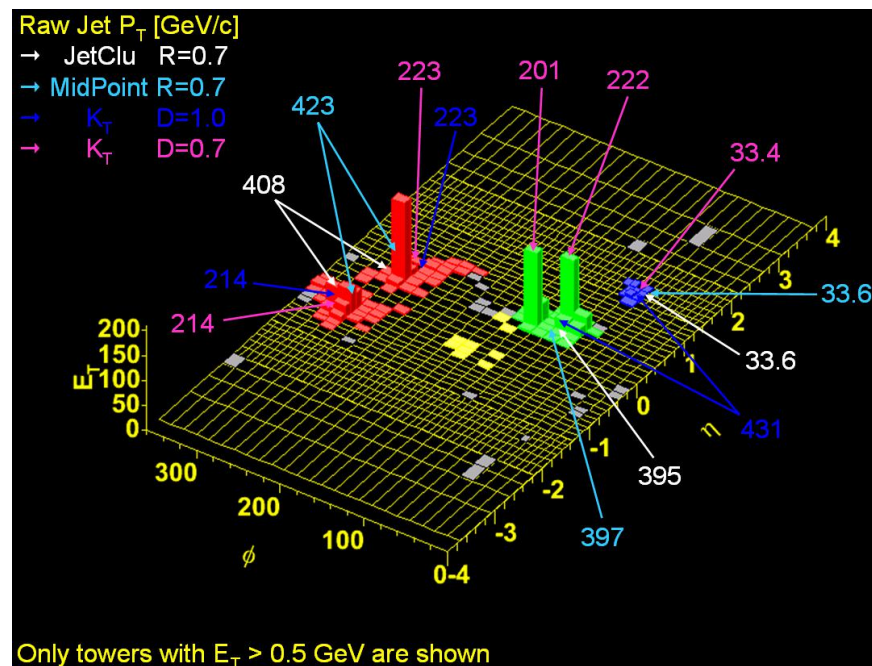
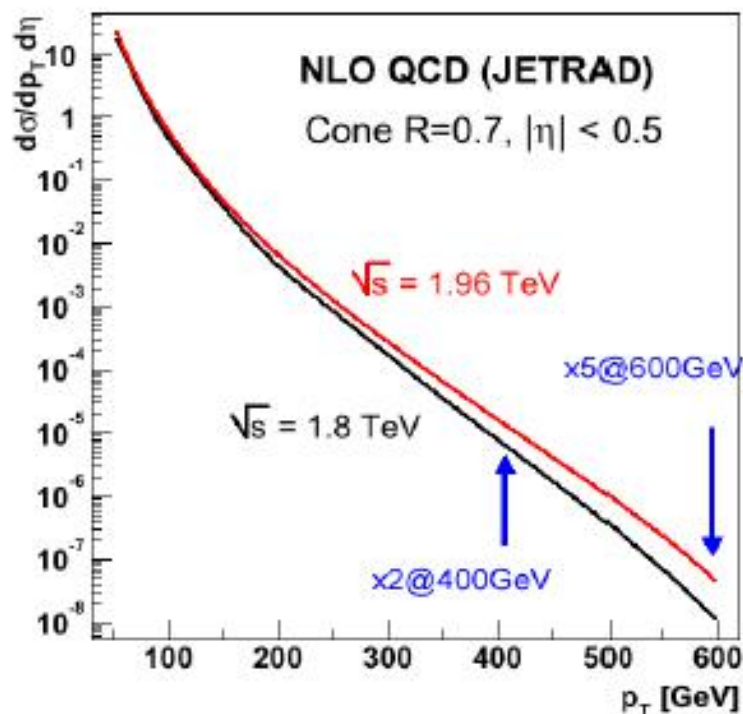


[illustration from Fritsch]



Jet: egyezményes definíció,
"kísérlet-elmélet interface"

Jetek: elmélet és kísérlet

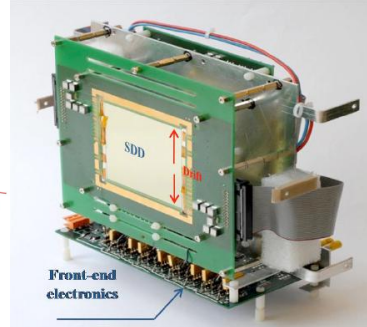
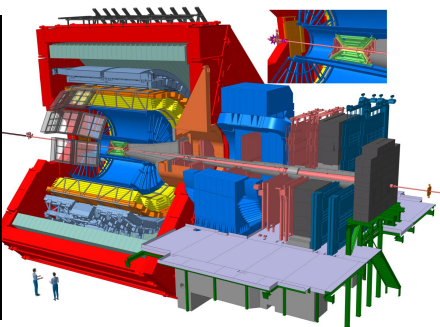


- Elmélet: NLO számításban 0,1,2 vagy 3 parton van
- Kísérlet: Jetdefiníció a rekonstrukció oldaláról:
 - Sok részecske, fragmentáció után
 - Értenünk kell a detektor kísérleti válaszát
 - Értenünk kell a jet alatti háttéreseeményt

Hogyan férünk hozzá a fizikához?

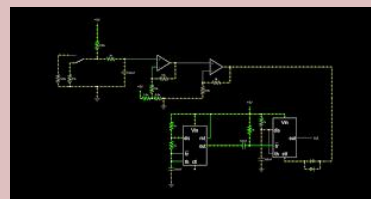
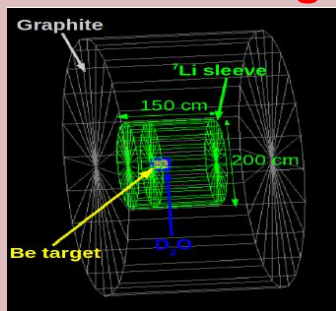
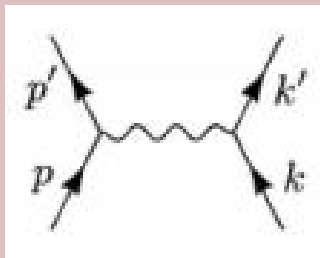
- Direkt módon csak a legelemibb folyamatok érthetőek meg
- Ehelyett egységes rendszerbe foglalt adatgyűjtés és szimuláció jellemző

Valós adat feldolgozása



Reakció ==> Észlelés ==> Jelfeldolgozás

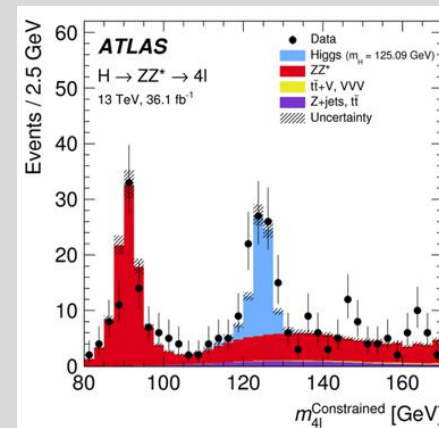
Szimuláció feldolgozása



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



==> Szelekció, tárolás



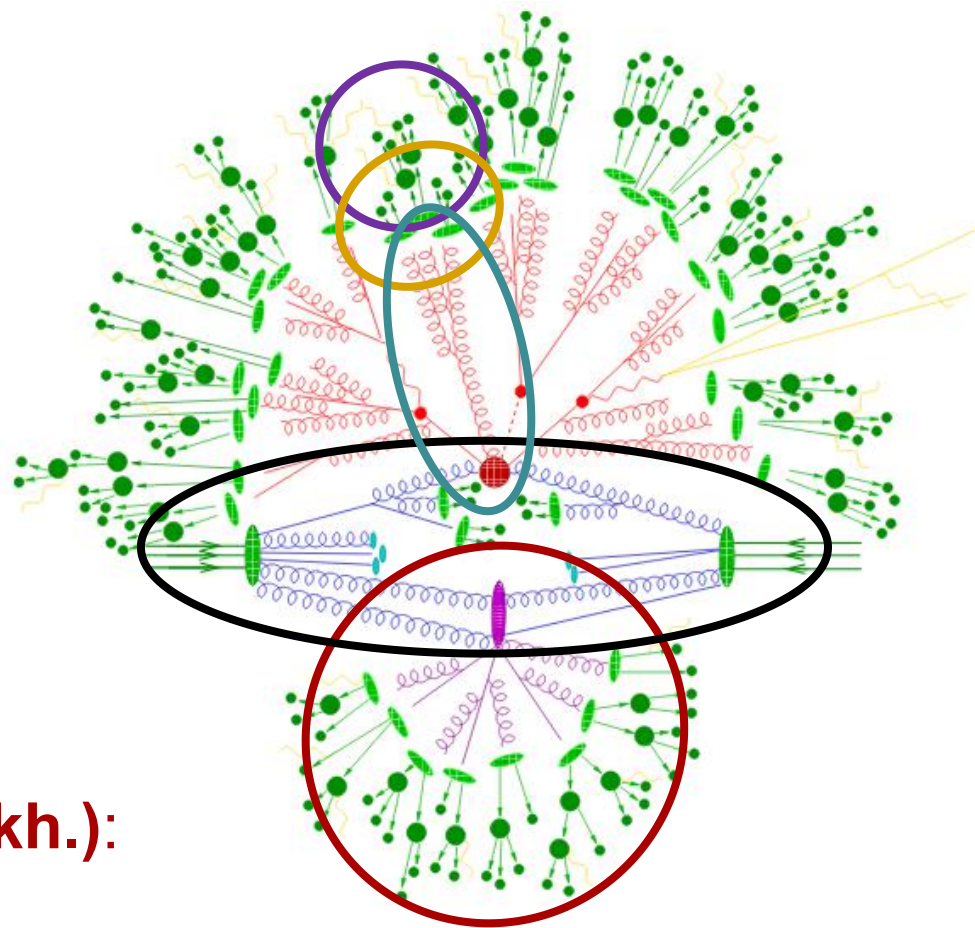
==> Adatanalízis

pp-ütközések modellezése:
A PYTHIA eseménygenerátor

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

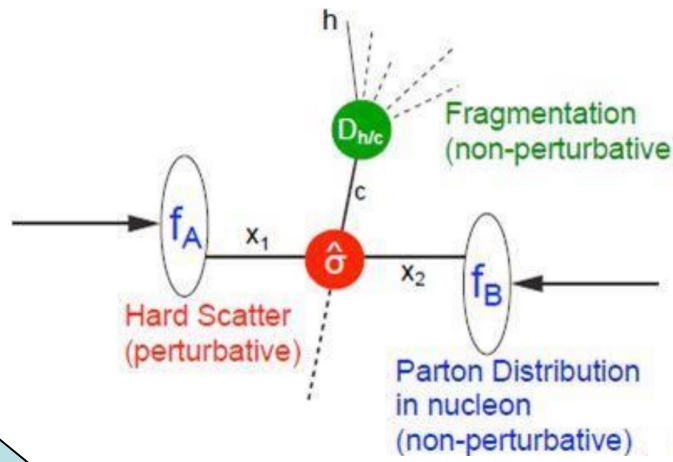
$$\sigma = \sum_{a,b} \int_0^1 dx_a dx_b \int f_a^{h_1}(x_a, \mu_F) f_b^{h_2}(x_b, \mu_F) d\hat{\sigma}_{ab \rightarrow n}(\mu_F, \mu_R)$$

$$= \sum_{a,b} \int_0^1 dx_a dx_b \int d\Phi_n f_a^{h_1}(x_a, \mu_F) f_b^{h_2}(x_b, \mu_F) \times \frac{1}{2\hat{s}} |\mathcal{M}_{ab \rightarrow n}|^2(\Phi_n; \mu_F, \mu_R),$$

Átmeneti mátrixelem (Feynmann-diagrammok)

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

Partoneloszlás-függvény



Partonszintű folyamat hatáskeresztmetszete

Fázistér-elem

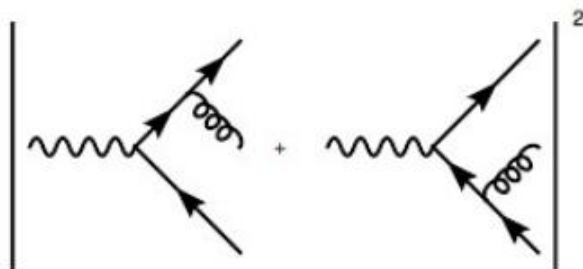
$$d\Phi_n = \prod_{i=1}^n \frac{d^3 p_i}{(2\pi)^3 2E_i} \cdot (2\pi)^4 \delta^{(4)}(p_a + p_b - \sum_{i=1}^n p_i)$$

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

■ Probléma: Mátrixelemek divergálnak

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

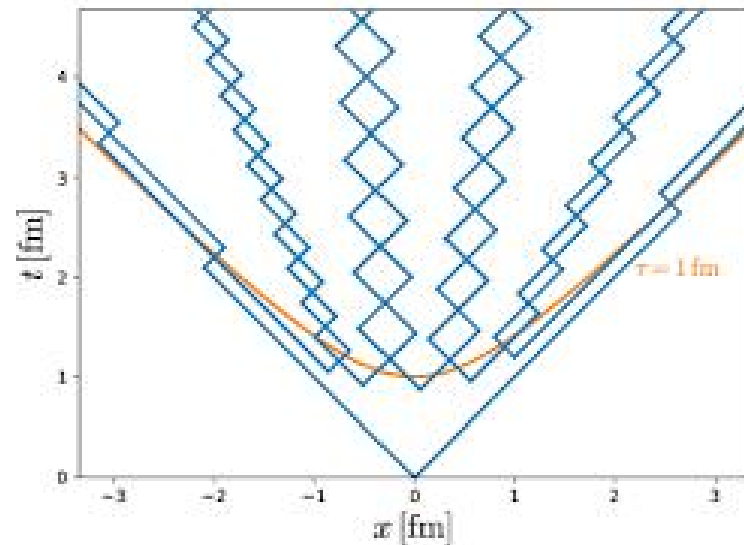
■ Megoldás (egyik): “többszörös kollineáris evolúció”

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

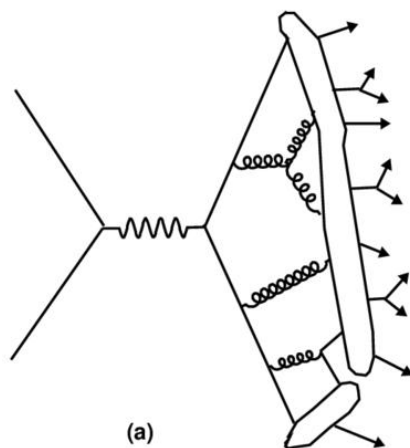
- levágás bevezetése $\Delta_i(Q^2, Q_0^2) \sim \exp\left\{-C_F \frac{\alpha_s}{2\pi} \log^2 \frac{Q^2}{Q_0^2}\right\}$

Fragmentáció (Lund-húrmodell)

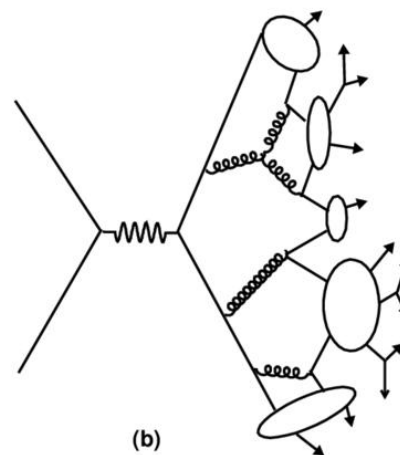
- Könnyű kvarkokat összekötő húr
- Mezonok: “jojó”
(állandó terület a téridő-diagramban)
- Fragmentáció



Húrmodell

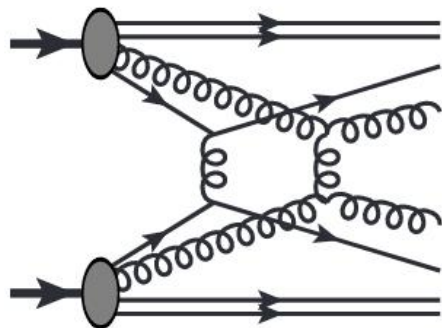


Klaszter-modell

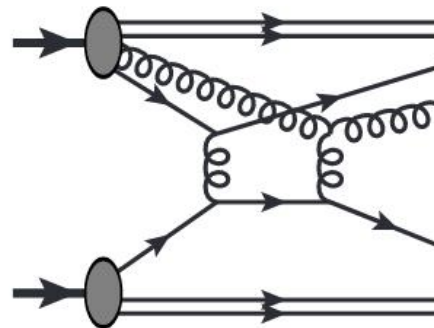


Sokparton-kölcsönhatás

- Egy reakcióban lehet több kemény folyamat
 - Ezek partonszinten összekapcsolódhatnak



összekapcsolt kölcsönhatás

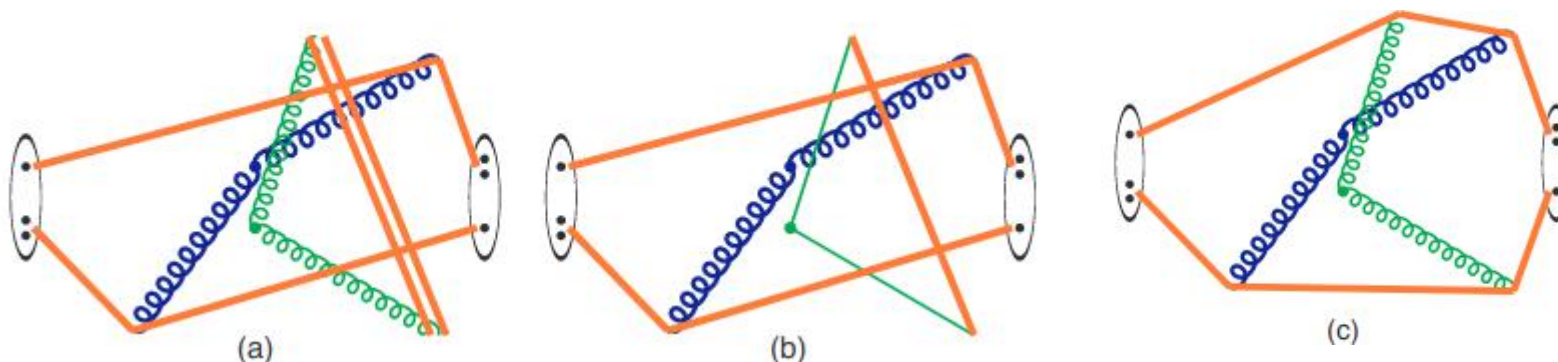


újraszóródás

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

Szín-újrarendezés

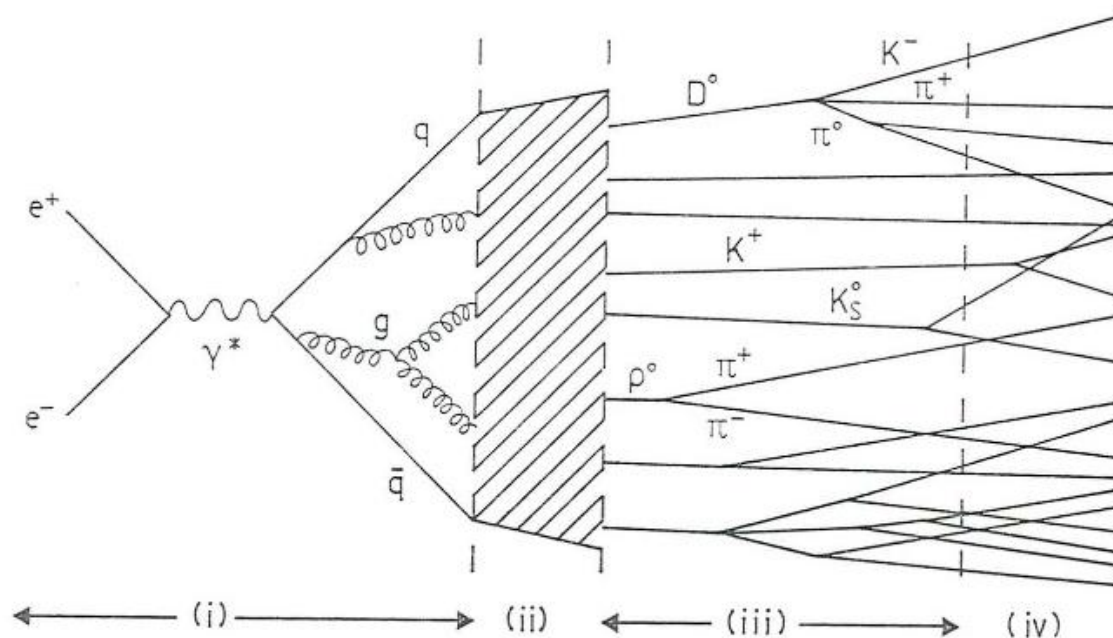
- A sokparton-kölcsönhatás szimulációja nincs tekintettel a színekre
 - Analitikus, de nem fundamentális formalizmus
- Utólag, mesterségesen kell “rendberakni”
 - Nem egyértelmű a megoldás a végállapotban
 - Színhúrok “rövidre zárása”. A pontos algoritmus, a hatótáv választás kérdése



PYTHIA története (T. Sjöstrand, Lund)

Modern event generators were born at DESY,
for the PETRA e^+e^- collider! (1978 – 86, 13 – 46 GeV)

- Combine perturbative picture of hard processes, involving electroweak and strong interactions, with nonperturbative picture of hadronization.
- Provide “complete” events, with parameters to be tuned to data, and used to study and understand different kinds of physics.



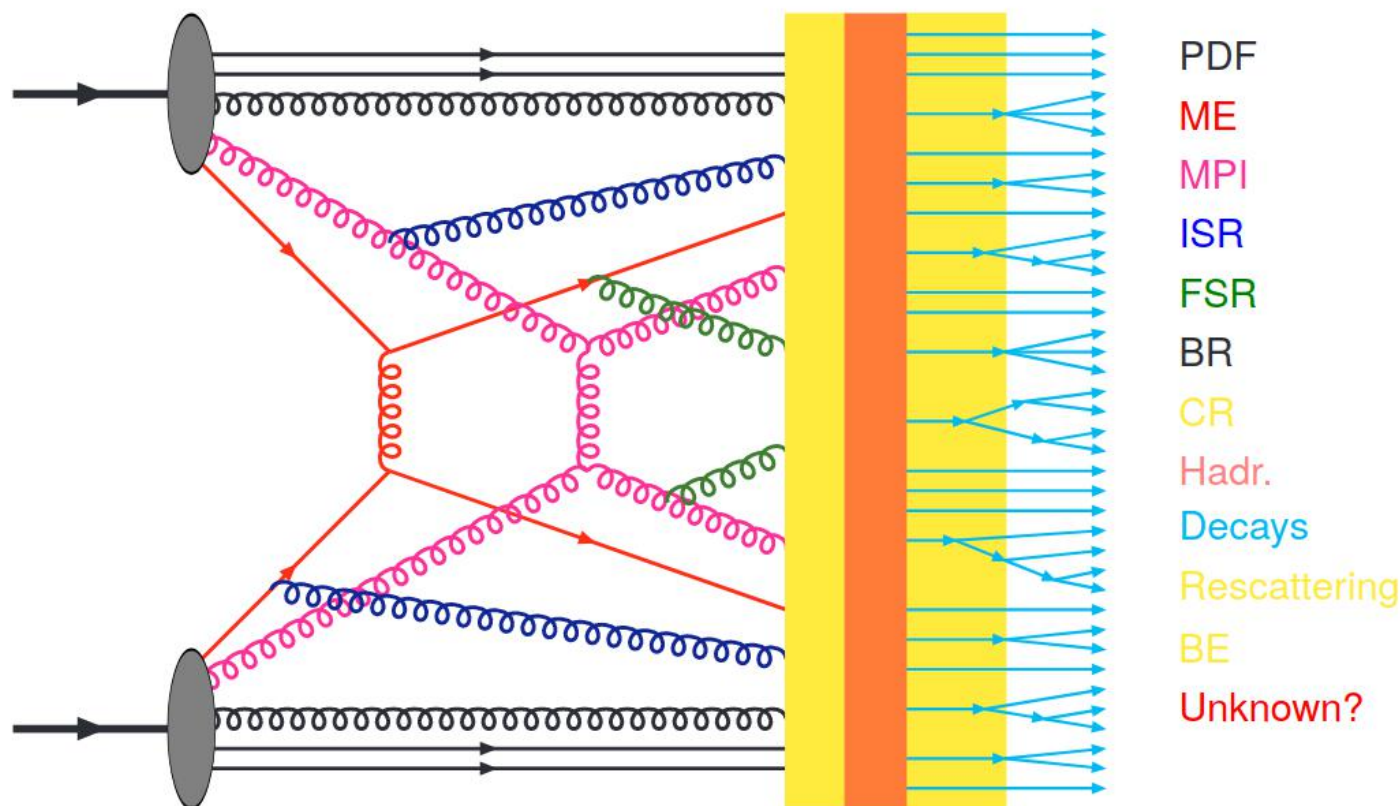
JETSET (PYTHIA predecessor): $\sim 1,000$ lines of Fortran code in 1980

PYTHIA története (T. Sjöstrand, Lund)

General-purpose event generators: PYTHIA, HERWIG, SHERPA

PYTHIA size: $\sim 80,000$ lines (Fortran in PYTHIA 6, C++ in PYTHIA 8)

So the event picture at the LHC will have to become even more messy:



The road leads to more complexity, not less.

Another example: matching to NLO, NNLO (VINCIA; Lönnblad & Prestel).

The need for experiment \leftrightarrow generators \leftrightarrow theory remains.

A PYTHIA 8 hangolása

- Számos ponton nem fundamentális a modell
 - Nemperturbatív QCD (Hadronizáció, háttéreseemény stb.)
 - Részben perturbatív, de LO + záporok

A PYTHIA 8 hangolása

- Számos ponton nem fundamentális a modell
 - Nemperturbatív QCD (Hadronizáció, háttéresemény stb.)
 - Részben perturbatív, de LO + záporok
- PYTHIA tune-ok:
 - Szabad paraméterek hangolása széles adathalmazon
Sok van! Célszoftverek léteznek, pl. PROFESSOR
 - Monash13: alapértelmezett,
 - 4C: CMS 2C háttéresemény-hangoláson alapul
 - MonashStar : Monash-ból háttéreseményre optimalizálva

A PYTHIA 8 hangolása

- Számos ponton nem fundamentális a modell
 - Nemperturbatív QCD (Hadronizáció, háttéreseemény stb.)
 - Részben perturbatív, de LO + záporok
- PYTHIA tune-ok:
 - Szabad paraméterek hangolása széles adathalmazon
Sok van! Célszoftverek léteznek, pl. PROFESSOR
 - Monash13: alapértelmezett,
 - 4C: CMS 2C háttéreseemény-hangoláson alapul
 - MonashStar : Monash-ból háttéreseeményre optimalizálva
- Partoneloszlás-függvény (PDF)
 - Diszkrét pontokon interpolál: LHAPDF6 csomag
 - EPS09NLO, EPPS16, CTEQ15 ...

Hangolás #1 - fragmentáció

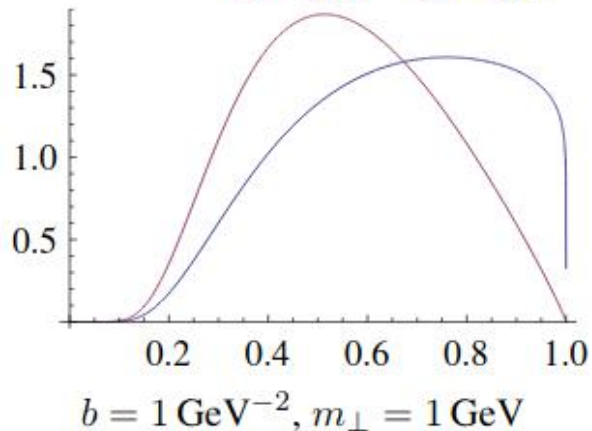
■ Lund-Fragmentációs függvény

$$f(z) \propto \frac{z^{(a_i - a_j)} (1 - z)^{a_j}}{z} \exp\left(\frac{-bm_{\perp}^2}{z}\right)$$

f: új húr által elvitt energiahányad
 z: új hadron energiahányada adott kvarkból
 m_{\perp} : transzverz tömeg (inv. tömeg p_z nélkül)

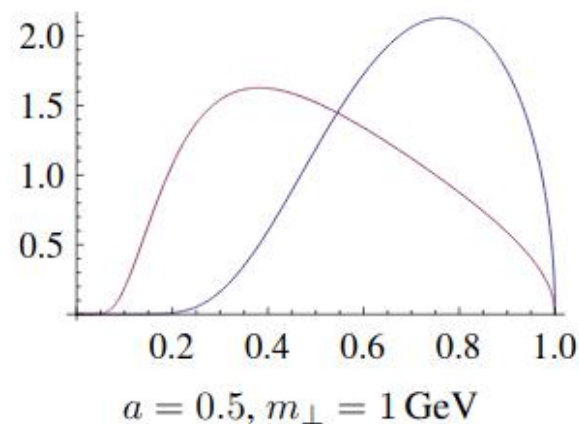
The a parameter

$a = 0.9$ $a = 0.1$



The b parameter

$b = 0.5$ $b = 2.0$



Hangolás #1 - fragmentáció

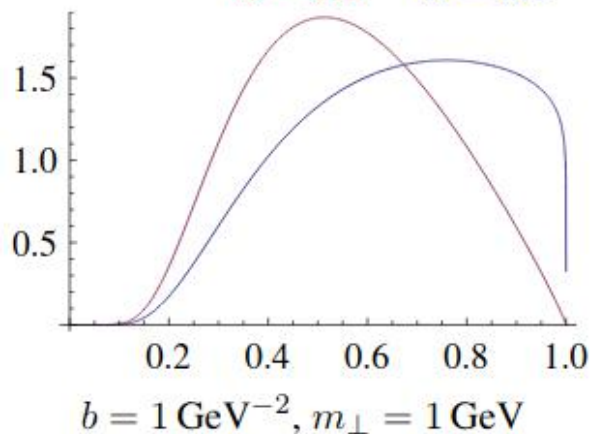
■ Lund-Fragmentációs függvény

$$f(z) \propto \frac{z^{(a_i - a_j)}(1 - z)^{a_j}}{z} \exp\left(\frac{-bm_{\perp}^2}{z}\right)$$

f: új húr által elvitt energiahányad
 z: új hadron energiahányada adott kvarkból
 m_{\perp} : transzverz tömeg (inv. tömeg p_z nélkül)

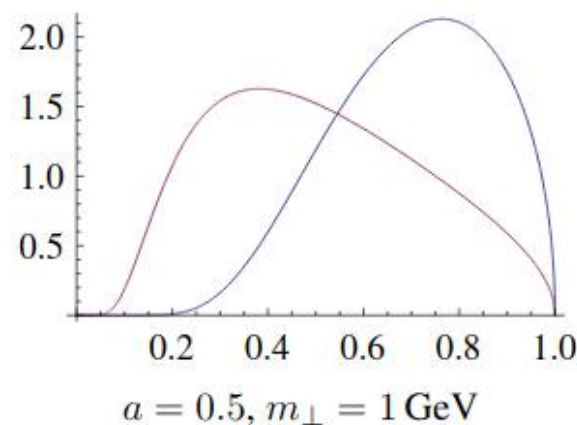
The a parameter

$a = 0.9$ $a = 0.1$



The b parameter

$b = 0.5$ $b = 2.0$



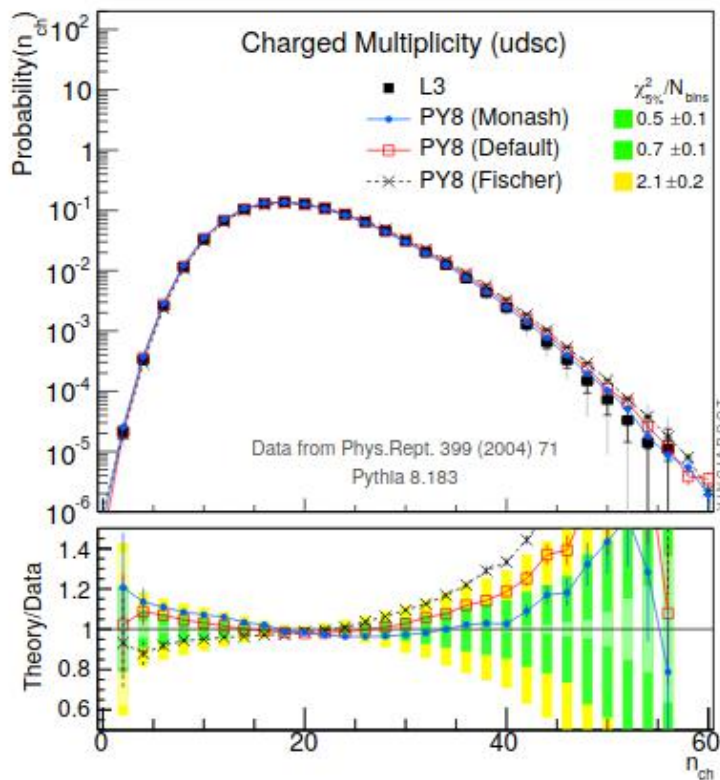
■ Paraméterek hatása arra érzékeny adatokra

- χ^2 -minimalizálás (5% inherens szimulációs bizonytalansággal)

$$\langle \chi_{5\%}^2 \rangle = \frac{1}{N_{\text{bins}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{bins}}} \frac{(\text{MC}_i - \text{Data}_i)^2}{\sigma_{\text{Data},i}^2 + (0.05\text{MC}_i)^2}$$

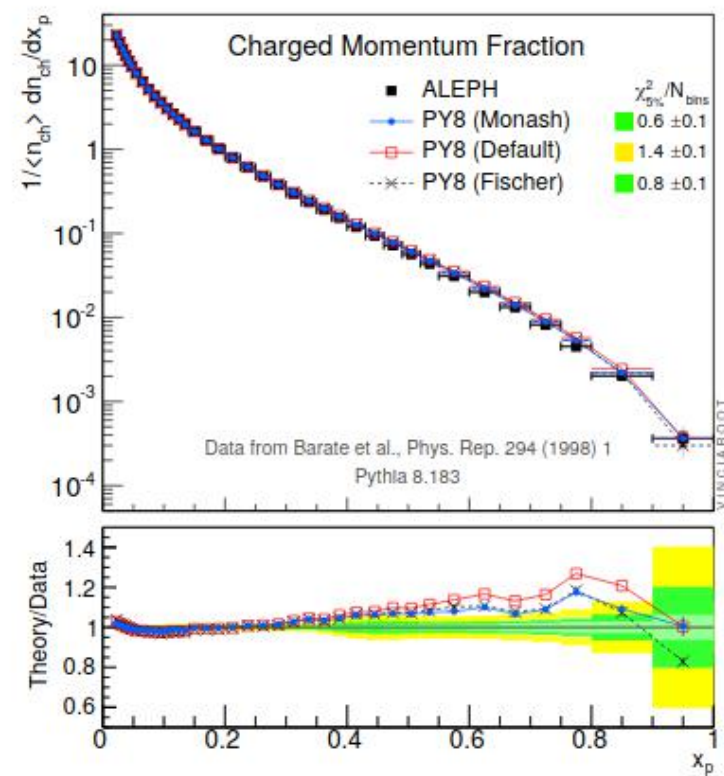
Hangolás #1 - fragmentáció

Z-bozon hadronos bomlási eseményei



Töltött hadronok multiplicitása
(végállapotú darabszám)

CERN-PH-TH-2014-069, arXiv:1404.5630



Momentumhányad ($x = 2|p| / E_{cm}$)

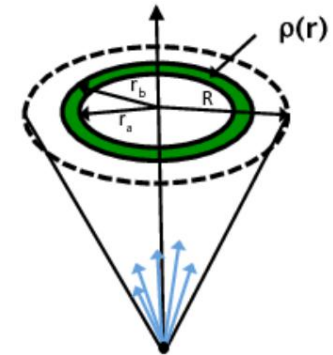
```
StringZ:aLund           = 0.68
StringZ:bLund           = 0.98
StringZ:aExtraDiquark   = 0.97
StringZ:aExtraSquark    = 0.00
```

Hangolás #2 - jetszerkezet

- Differenciális jetszerkezet ρ
 - Radiális impulzusprofil a jeten belül

$$\rho(r) = \frac{1}{\delta r} \frac{1}{p_T^{\text{jet}}} \sum_{r_a < r_i < r_b} p_T^i$$

$$r_i = \sqrt{(\phi_i - \phi_{\text{jet}})^2 + (\eta_i - \eta_{\text{jet}})^2}$$



CMS, JHEP 06, 160 (2012).

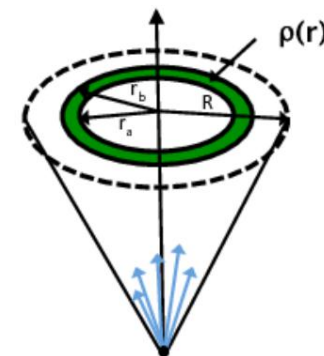
Hangolás #2 - jetszerkezet

■ Differenciális jetszerkezet ρ

- Radiális impulzusprofil a jeten belül

$$\rho(r) = \frac{1}{\delta r} \frac{1}{p_T^{\text{jet}}} \sum_{r_a < r_i < r_b} p_T^i$$

$$r_i = \sqrt{(\phi_i - \phi_{\text{jet}})^2 + (\eta_i - \eta_{\text{jet}})^2}$$



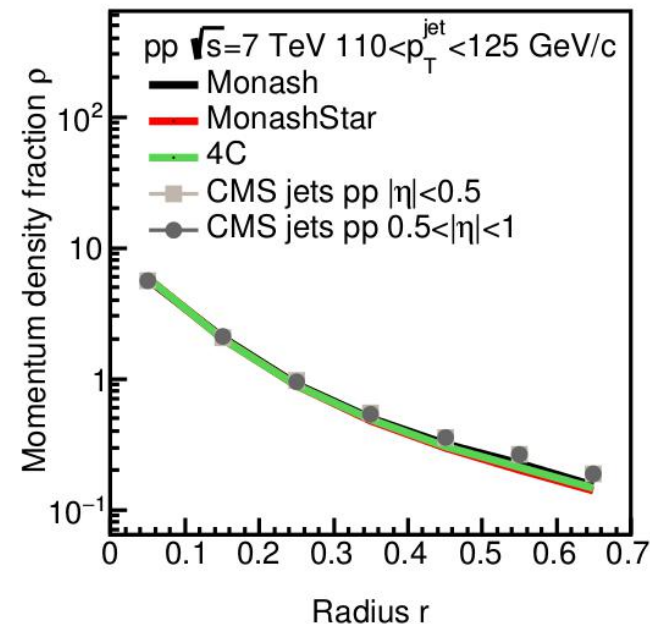
CMS, JHEP 06, 160 (2012).

■ CMS adatokat

($\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$, $|y| < 1$ p+p)

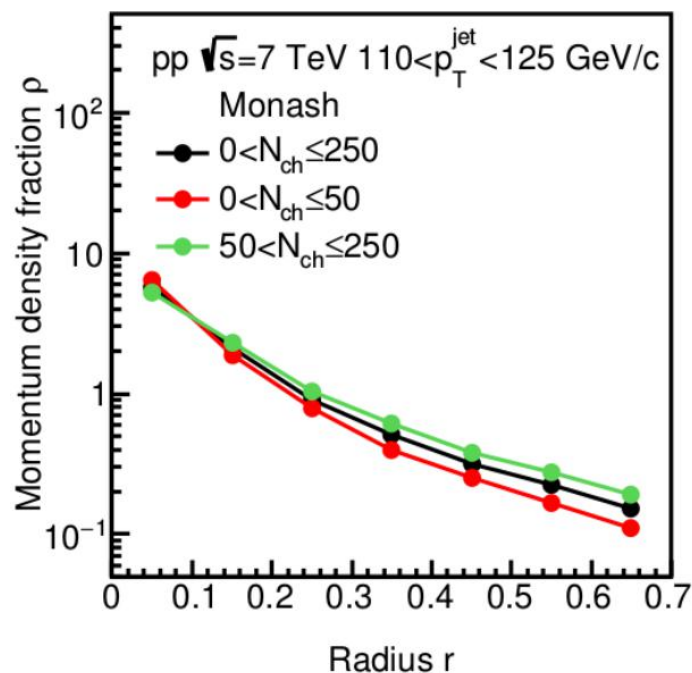
többféle hangolás is jól leírja

- adatok
- Mérési bizonytalanságon belül
- Széles impulzustartomány:
 $15 < p_T < 400 \text{ GeV}/c$



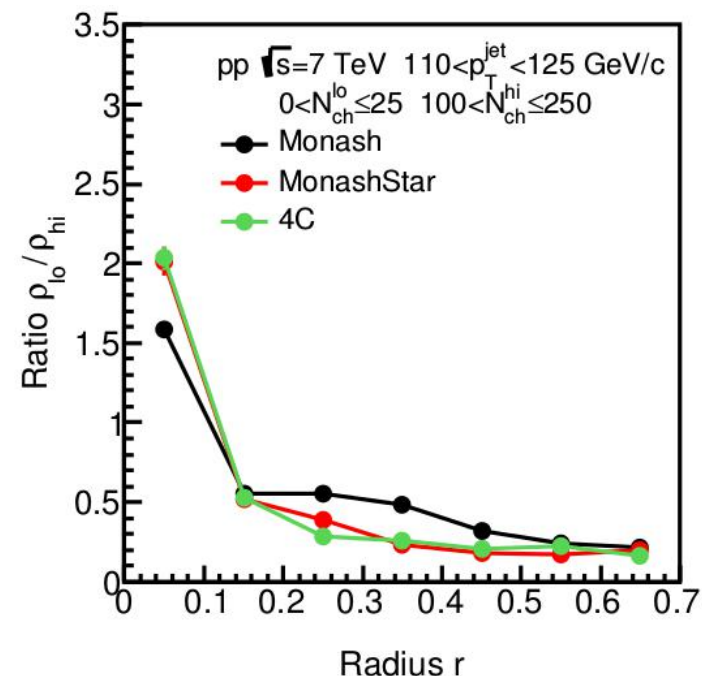
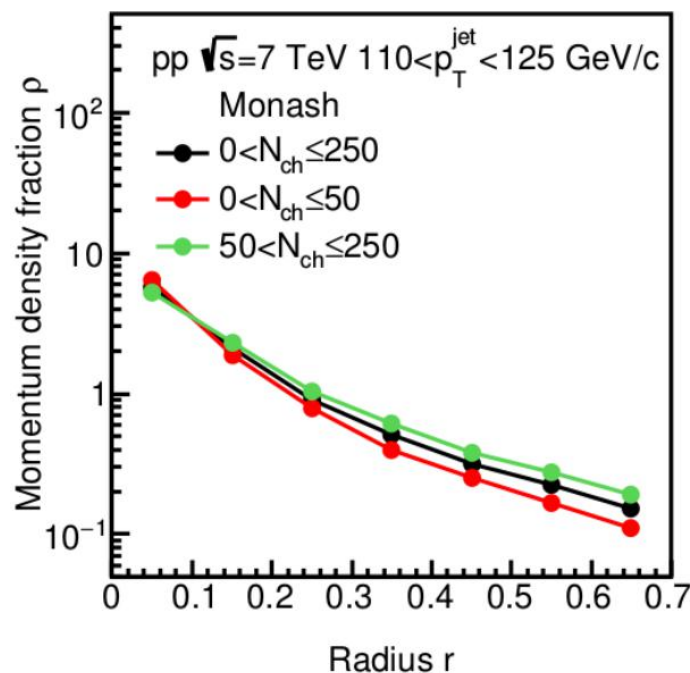
Hangolás #2 - jetszerkezet

- A jetszerkezet függ a végállapoti multiplicitástól



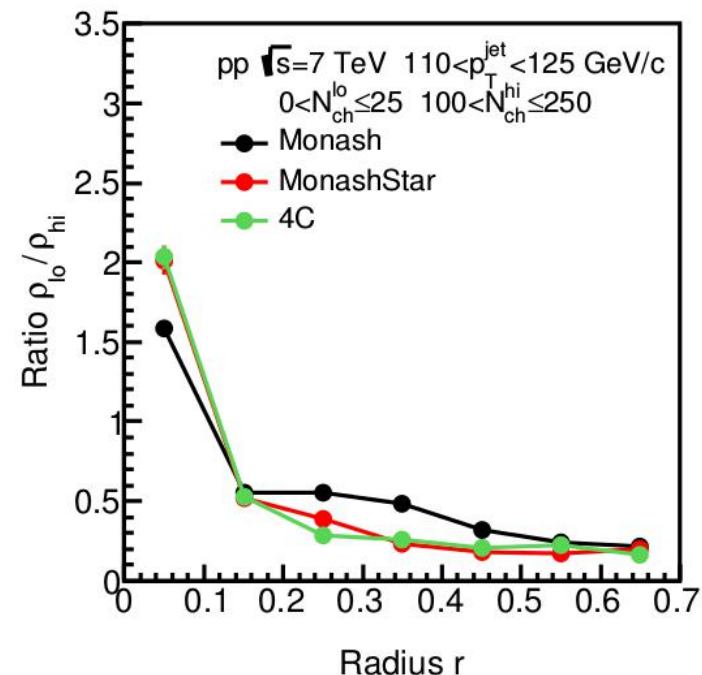
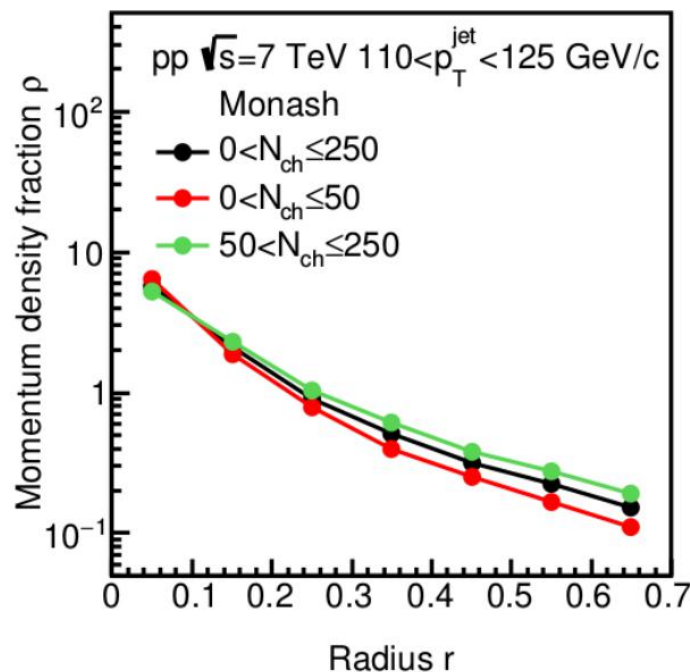
Hangolás #2 - jetszerkezet

- A jetszerkezet függ a végállapoti multiplicitástól
- Ez a függés nagyon eltérő lehet
 - $\rho_{\text{low-Nch}}/\rho_{\text{high-Nch}}$ arányok között akár 2x-es szorzó is



Hangolás #2 - jetszerkezet

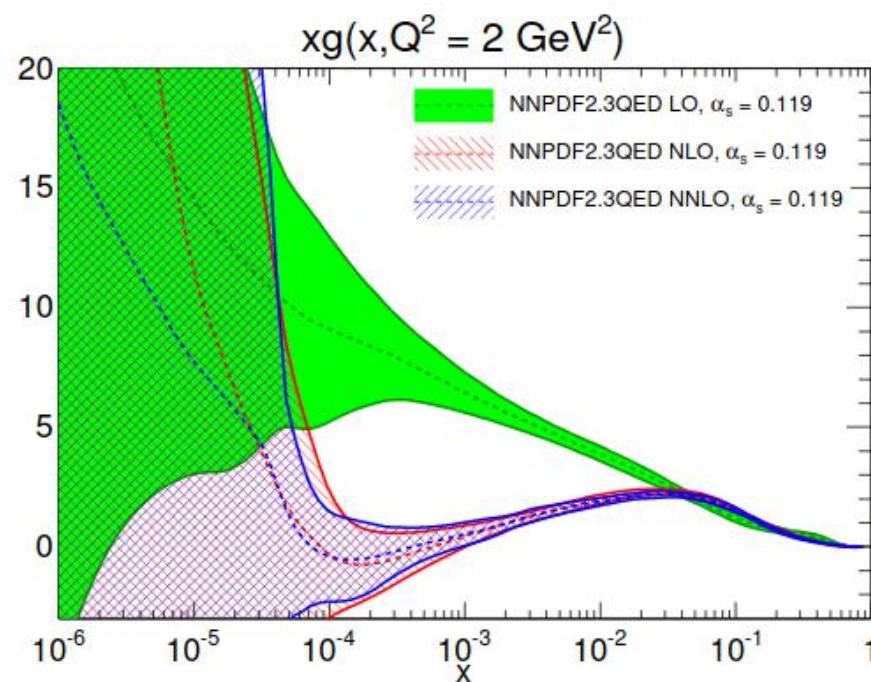
- A jetszerkezet függ a végállapoti multiplicitástól
- Ez a függés nagyon eltérő lehet
 - $\rho_{\text{low-Nch}}/\rho_{\text{high-Nch}}$ arányok között akár 2x-es szorzó is



Lehetőség a modellek finomhangolására

Partoneloszlásfüggvény

- Példa: gluon PDF, NNPDF2.3QED $Q^2 = 2 \text{ GeV}^2/c^2$
 - Különbség LO, NLO and NNLO rendek között
 - Fontos, hogy jól ismerjük
=> elektron-ion ütköztető



**PYTHIA szimuláció a
gyakorlatban: háttéresemény
hatása a spektrumra**

Kísérleti változók

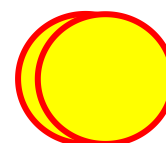
- Nukleononkénti ütközési energia (tkp.): $\sqrt{s_{NN}}$

- Centralitás

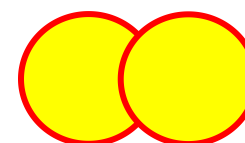
$$c(b) \cong \frac{\pi b^2}{\sigma_{inel}}$$

σ_{inel} : teljes rugalmatlan szórás hatáskm.
 $b < b_{max}$: ütközési paraméter

centrális



periférikus



- Kinematikai változók

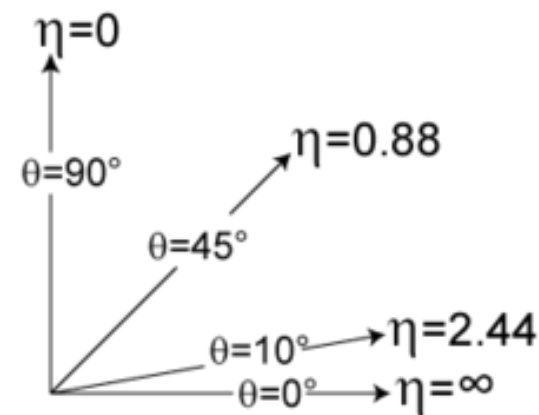
nyalábra merőleges (x,y) sík - "fizika":

- **Transzverzális impulzus:** $p_T = \sqrt{(p_x^2 + p_y^2)}$
- **Azimutszög, φ**

nyalábirányú (z) boost:

- **Rapidity:** $y = 0.5 \log \frac{E+p_z}{E-p_z}$
- **Pseudorapidity** (ha $m=0$, $\eta=y$):

$$\eta = 0.5 \log \frac{p+p_z}{p-p_z} = -\ln \tanh \frac{\theta}{2}$$

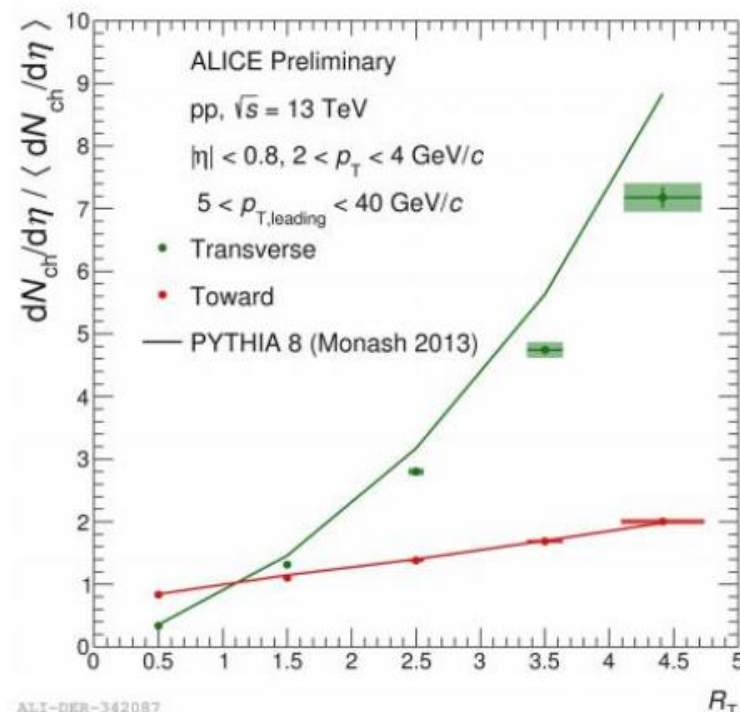
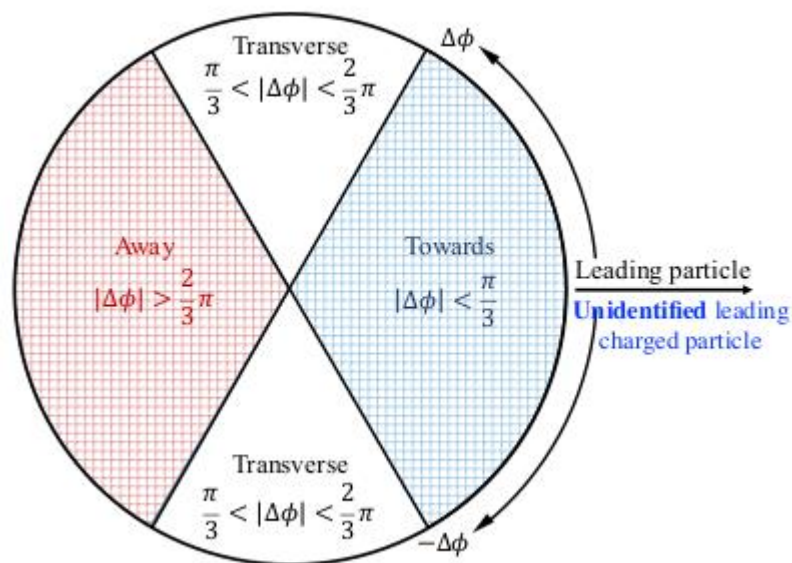


Feladatok

1. Töltsük le a PYTHIA csomagot, és próbáljuk ki a tesztprogramok fordítását, futtatását. Írjunk szimulációt, amely $\sqrt{s}=13$ TeV p+p eseményeket generál!
Készítsük el a töltött hadronok (pionok, kaonok, protonok) p_T -spektrumát (egy eseményre jutó átlagos darabszámát a p_T függvényében) a $|y|<1$ detektálási tartományban.
2. Most korlátozzuk a mérést olyan “kemény” eseményekre, amikben van legalább egy $p_T>5$ GeV/c hadron.
3. Tanulmányozzuk a kemény spektrum háttéreseményfüggését! Hogyan függ a spektrum jellege a sokparton-kölcsönhatások (MPI) darabszámától?
4. Találunk-e az MPI helyett alkalmas, de mérhető fizikai mennyiséget?

Háttéreseemény és kemény folyamat

- Near és away régió: kemény folyamat
- Transzverz régió: háttéreseemény
- Transzverz eseményaktivitás:
 - $R_T = N_{ch}^{\text{transverse}} / \langle N_{ch}^{\text{transverse}} \rangle$



A kód, hivatkozások

- **Leírás, használati útmutató**

<http://home.thep.lu.se/~torbjorn/pythia81html/Welcome.html>

- **Letöltés, telepítés**

<http://home.thep.lu.se/~torbjorn/Pythia.html>

- **Részecskék kódjai**

<http://pdg.lbl.gov/2007/reviews/montecarlohpp.pdf>

- **Folyamatok listája, bevezető előadás**

<http://163.152.42.132/class/2005/phys602/pythia.pdf>

Köszönöm a figyelmet!



ALICE

Vértesi Róbert

Wigner Fizikai Kutatóközpont
MTA kiváló kutatóhely

vertesi.robort@wigner.mta.hu

