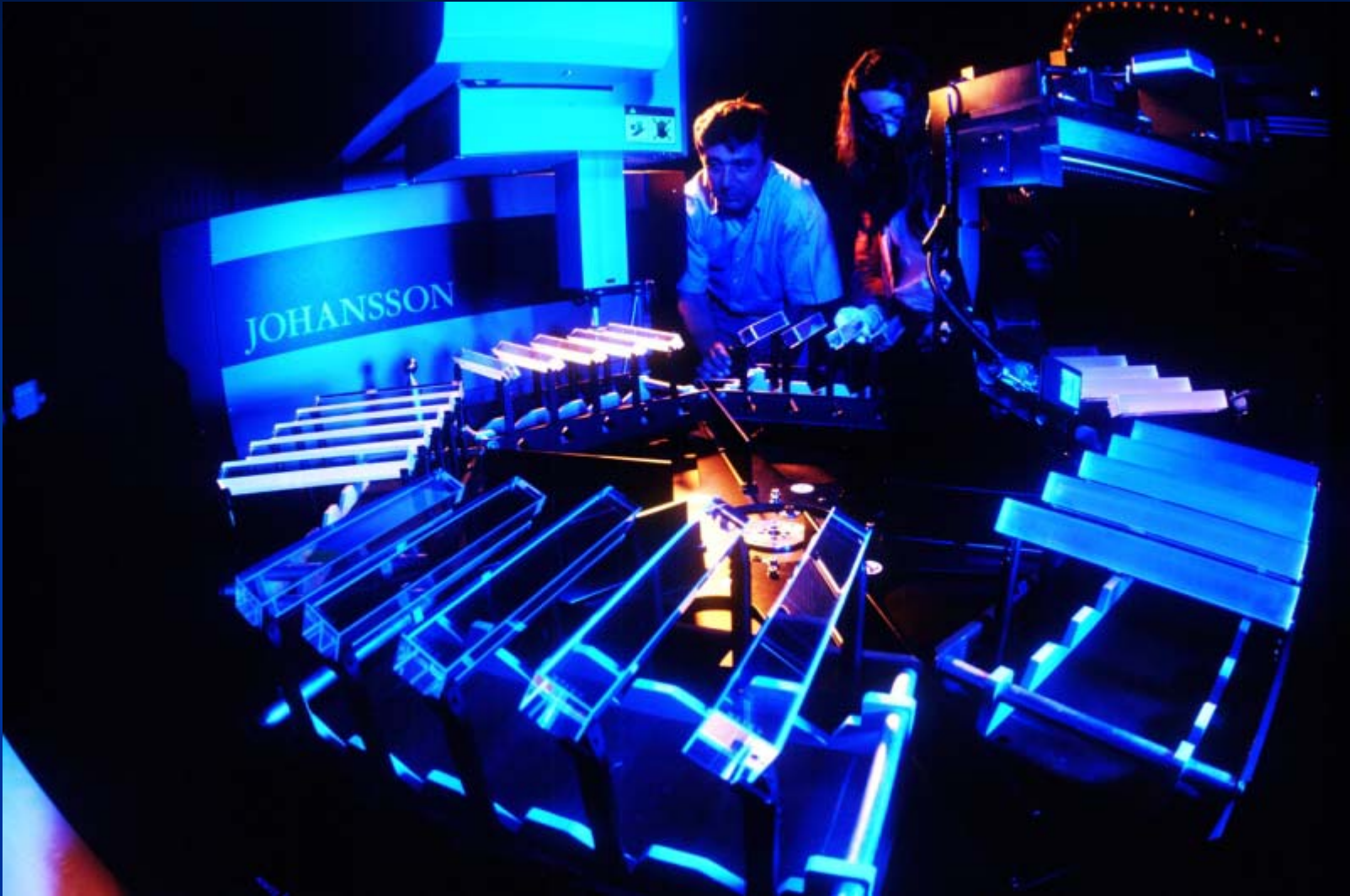


Jet keresés a CMS-ben

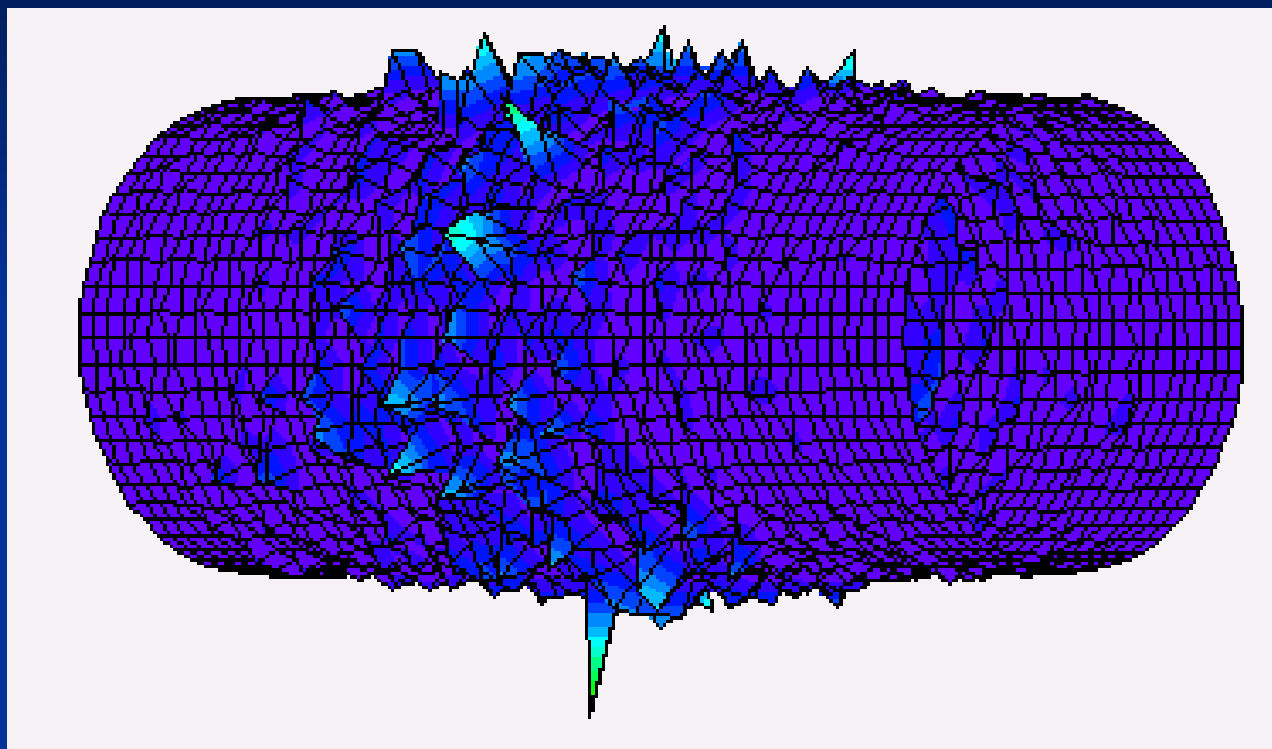


- **Nem foglalkozunk a detektor részleteivel, az előző előadásra építünk.**
- **A legtöbb elmondott dolog „CMS Note” –okban szerepel**

Tartalom

- Jet keletkezési ráta
- Jet trigger
- Jet rekonstrukciós algoritmus $p+p$ és nehézion ütközésekben
- Jet keresés eredményei
- Jet fizika a CMS kísérletben

Jetek nehézion- ütközésekben



η

CMS: Nagyfelbontású és nagy akceptanciájú hadronikus és elektromágneses kalorimetria (1x1 fokos felbontás).

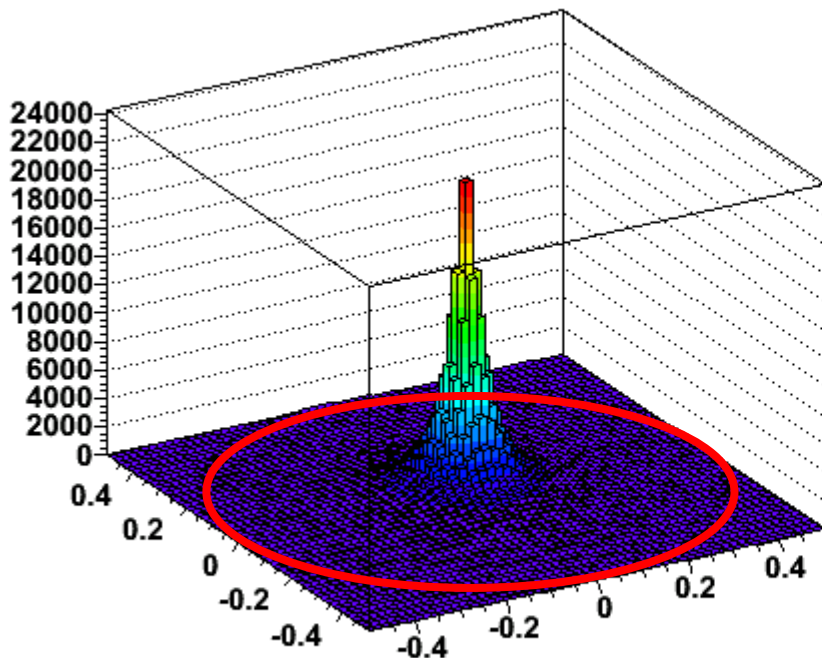
Jet alakok: fontos lesz (módosulhat)

[Pythia eseménygenerátor, p+p ütközések]

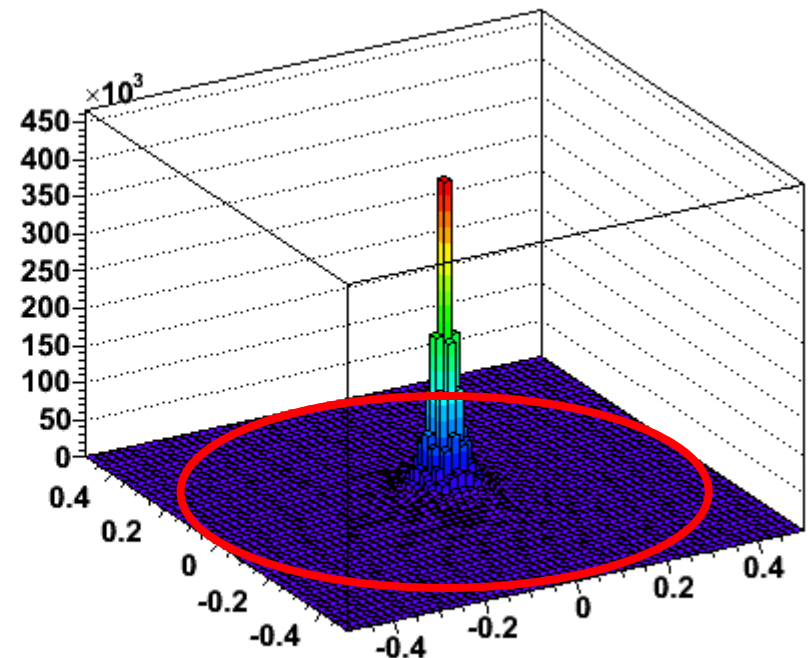
részecskék

E_T

parthist



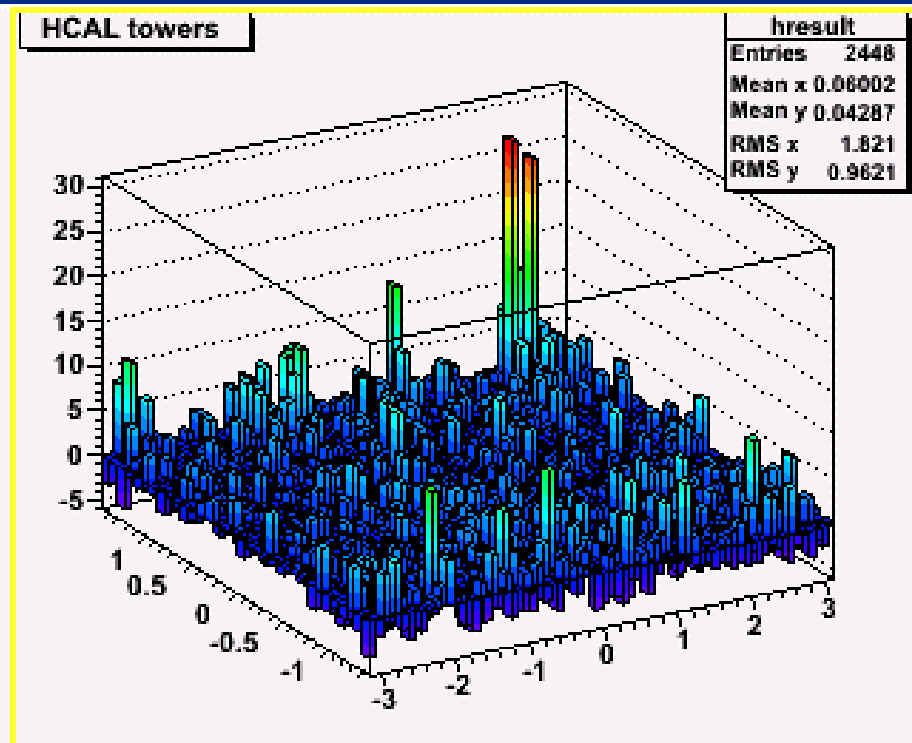
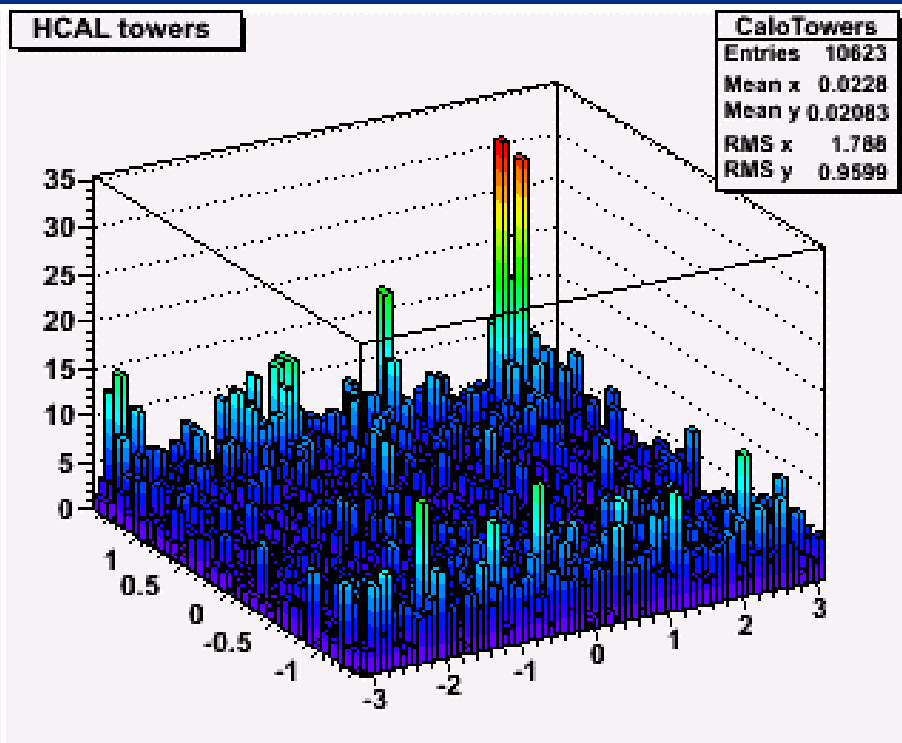
partehist



Példa: nehézion esemény

Caloriméter tornyok

...háttérlevonás után



Jet keletkezési ráta

Érdekes jelenségek, amelyek megfigyelhetők a CMS detektorral:

- high- p_T jet pair production [10];
- jets tagged by a leading charged hadron or neutral pion [11];
- B -jets tagged by a leading muon [12];
- jets produced opposite a gauge boson in γ +jet [13, 14] and γ^*/Z^0 +jet [15, 16, 17] final states;
- high mass dimuons from semileptonic B and D decays [18, 19] and secondary J/ψ [19];
- inclusive high- p_T particle spectra [20];
- energy flow measurements [21, 22]

CMS CR 2005/005, Igor Lokhtin

Jet keletkezési ráta

Jet párok keletkezési rátája centrális A + A eseményekben:

$$\frac{dN_{ij}^{dijet}}{dy_1 dy_2 dp_{T1} dp_{T2}} = T_{AA}(0) \int_0^{2\pi} \frac{d\varphi}{2\pi} \int_0^{R_A} dR \cdot P_A(R) \int dp_T^2 \frac{d\sigma_{ij}}{dp_T^2} \delta(p_{T1} - p_T + \Delta E_i(\varphi, R)) \delta(p_{T2} - p_T + \Delta E_j(\pi - \varphi, R)),$$

$$\frac{d\sigma_{ij}}{dp_T^2} = K \int dx_1 \int dx_2 \int dt \hat{f}_i(x_1, p_T^2) f_j(x_2, p_T^2) \frac{d\hat{\sigma}_{ij}}{dt} \delta(p_T^2 - \frac{\hat{t}\hat{u}}{\hat{s}}),$$

$$R_{AA}^{dijet}(p_{T1}, p_{T2} > p_T^{cut}, y = 0) = \int dy_1 \int dy_2 \int_{p_T^{cut}} dp_{T1} \int_{p_T^{cut}} dp_{T2} \sum_{i,j} \left(\frac{dN_{ij}^{dijet}}{dy_1 dy_2 dp_{T1} dp_{T2}} \right)_{AA},$$

$$R_{AA}^{mono}(p_{T1} > p_T^{cut}, p_{T2} < p_T^{cut}, y = 0) = \int dy_1 \int dy_2 \int_{p_T^{cut}} dp_{T1} \int_{p_T^{cut}} dp_{T2} \sum_{i,j} \left(\frac{dN_{ij}^{dijet}}{dy_1 dy_2 dp_{T1} dp_{T2}} \right)_{AA}.$$

CMS NOTE 1999/016

Egy hónap alatt

$L = 10^{27} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Luminositással:

Channel	Barrel+Endcap
jet+jet, $E_T^{jet} > 100 \text{ GeV}$	8.7×10^6
γ +jet, $E_T^{jet,\gamma} > 100 \text{ GeV}$	6×10^3
$Z(\rightarrow \mu^+ \mu^-)$ +jet, $E_T^{jet}, P_T^Z > 100 \text{ GeV}$	90
$Z(\rightarrow \mu^+ \mu^-)$ +jet, $E_T^{jet}, P_T^Z > 50 \text{ GeV}$	600

Jet keletkezési ráta az impakt paraméter függvényében

CMS NOTE 2000/060

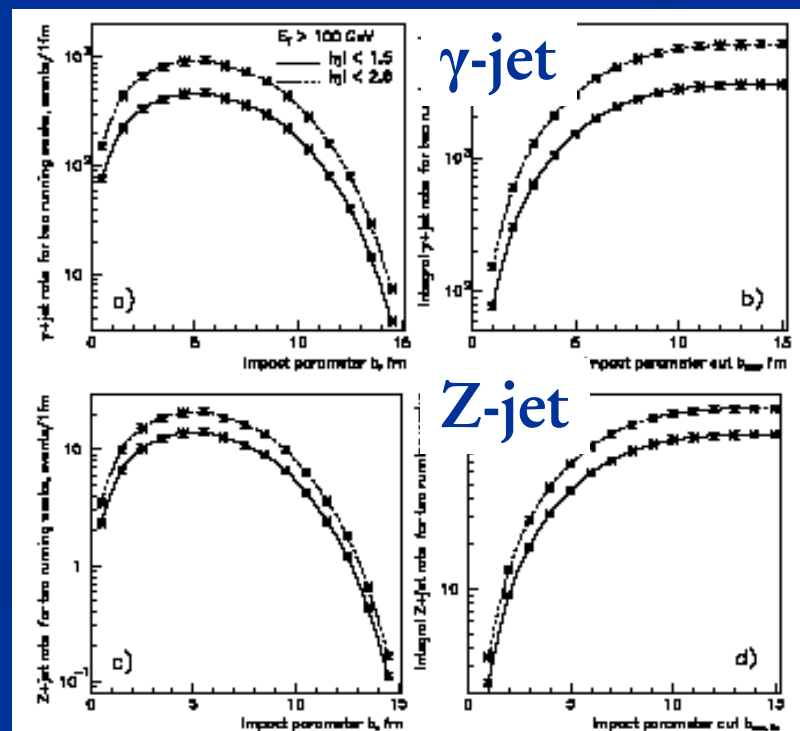
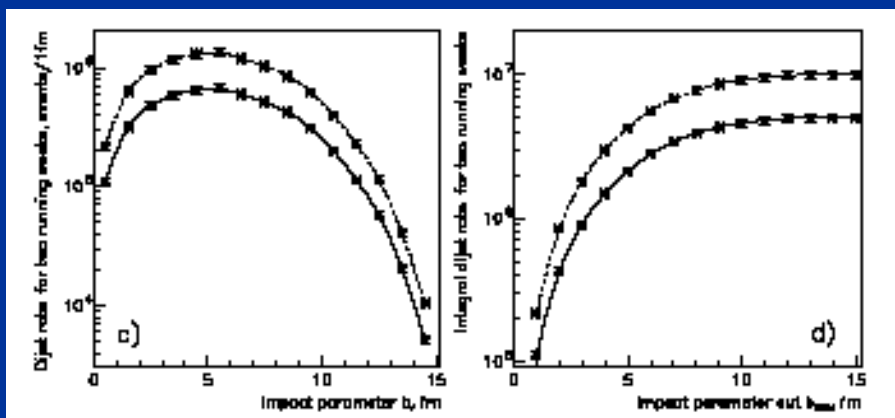
Egy adott b impakt paraméternél az E_T feletti jetek száma A+A ütközésekben:

$$\bar{N}_{A_1 A_2}^h(b, \sqrt{s}, E_T) = T_{A_1 A_2}(b) \sigma_{NN}^h(\sqrt{s}, E_T)$$

Integrált jet ráta:

$$\sigma_{AA}^{in} \bar{N}_{AA}^h L$$

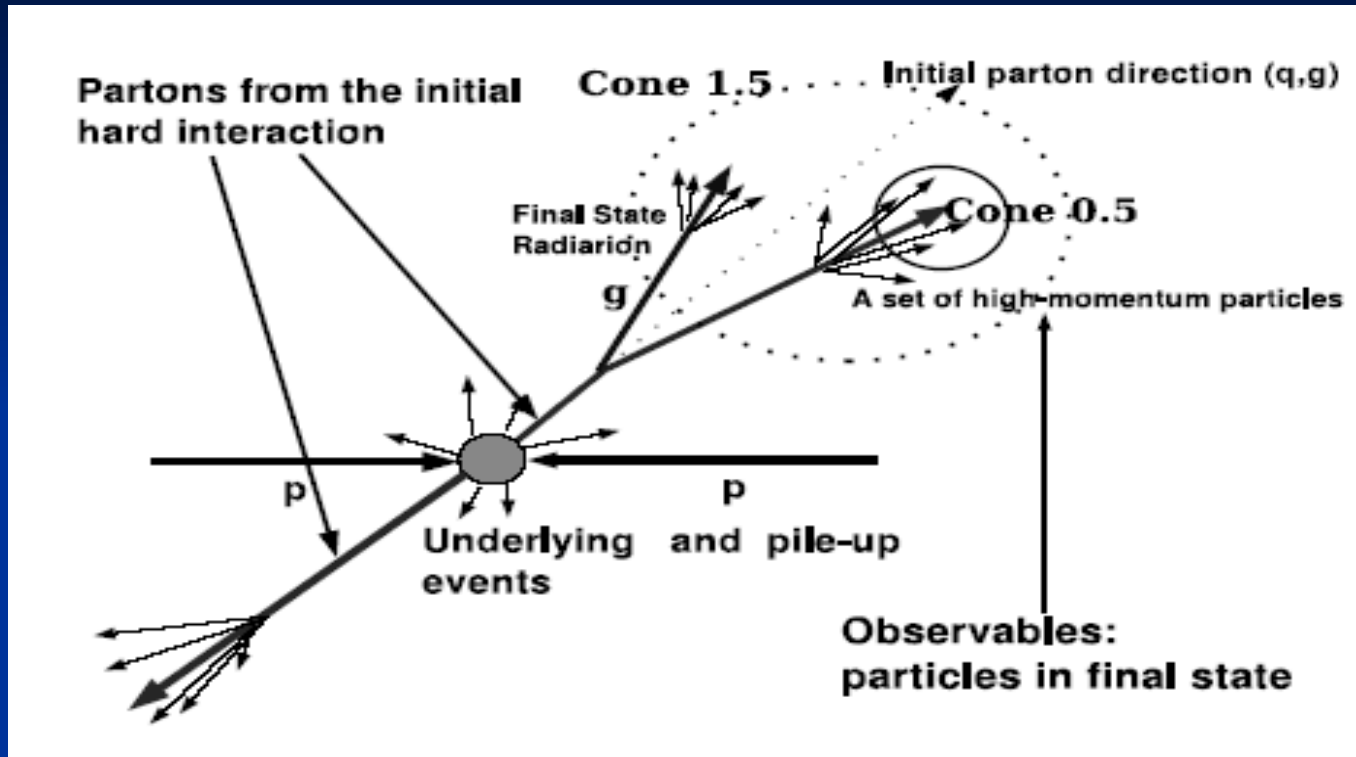
Differenciális és integrált jet ráták (jet párok, γ -jet, Z-jet) két hét futási idő alatt, az $|\eta| < 1.5$ (hordó) és a $|\eta| < 2.6$ (hordó + kupak) intervallumban:



Trigger on jets

- L1 jet trigger: kiszámolja az ECAL és a HCAL cellákban mért transzverzális energiák összegét $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.348 \times 0.348$ cellákban (4x4 trigger cella).
- 40 - 50 GeV küszöbértékre 200 - 400 Hz kimeneti ráta
- 50 GeV feletti transzverz energiájú jetekre teljesen effektív periférikus, 100 GeV felett centrális ütközésekben.
- Magas szintű triggerrel (HLT) amely teljes jetet rekonstrukciót végez, a kimeneti frekvencia 10 Hz 10 Hz alá csökkenthető 100 GeV feletti transzverzális 100 GeV feletti transzverzális energiájú jetekre.
e.

Jet rekonstrukciós algoritmus



- Parton zápor (perturbatív) és hadronizáció (nemperturbatív)
- Jetek: a kvarkok és gluonok kísérleti megnyilvánulásai, lokalizált energia-klaszterek a kaloriméterekben
- A jet kinematikai jellemzői (energia, impulzus) összefüggésben van a nagy energiájú szórt partonok (kvark, gluon) jellemzőivel.

Jet rekonstrukciós algoritmus

Két alapvető fajtájuk van:

➤ Kúp algoritmusok

hadron ütköztető:

- SimpleCone (ORCA)
- Snowmass Cone Algorithm (ORCA: IterativeCone) - Tevatron Run I
- Streamlined Seedless - Tevatron Run II
- Improved Legacy Cone Algorithm (ORCA: MidPoint) - Tevatron Run II

➤ Klaszterező algoritmusok (k_T -algoritmus)

$e+e^-$ és $e-p$ ütköztetők:

- JADE
- Durham (k_T e -ütköztetők részére)
- Cambridge pp

mai ütköztetők :

- k_T - Tevatron Run II

“Jet algorithms - subjective overview”, Paweł Zych, 05/25/2005

Jet rekonstrukciós algoritmusok

Kúp-algoritmus

Alapötlet: **kis szöget bezáró részecskéket keres**

Iteratív kúp:

1. Maximális E_T -jű kaloriméter cella $>$ küszöb?
2. Definiálunk egy kúp sugarat $\Delta R = \sqrt{\Delta\phi^2 + \Delta\eta^2}$ a kúp tengelye körül $(\varphi^{\text{kúp}}, \eta^{\text{kúp}})$
3. Kiszámoljuk az E_T -vel súlyozott (φ_i, η_i) összeget a kúpon belüli objektumokra:

$$\begin{aligned} E_T &= \sum E_{T,i}, \\ \eta &= \frac{1}{E_T} \sum E_{T,i} \eta_i, \\ \phi &= \frac{1}{E_T} \sum E_{T,i} \phi_i. \end{aligned}$$

4. Az így kapott (φ, η) az új kúp tengely. A fenti lépéseket ismételjük amíg a jet energiája kevesebb mint 1%-kal változik az iterációk között, vagy a proto-jet tengelyének iránya kevesebb mint 0.01 egységgel változik.
5. Az egész eljárást ismételjük, amíg már nincs egyetlen jet sem amire $E_t >$ küszöb.

Jet rekonstrukciós algoritmusok

klaszter (k_T)-algoritmus

Alapötlet: impulzustérbeli közelség

1. Pre-klaszterekből indulunk ki, melyeket a kaloriméter cellákból formálunk.
2. Minden „i” pre-klaszterre definiáljuk:

$$d_i = p_{T,i}^2 .$$

Minden (i, j) pre-klaszterre ($i \neq j$) definiáljuk:

$$\begin{aligned} d_{ij} &= \min(p_{T,i}^2, p_{T,j}^2) \frac{\Delta \mathcal{R}_{ij}^2}{D^2} \\ &= \min(p_{T,i}^2, p_{T,j}^2) \frac{(y_i - y_j)^2 + (\phi_i - \phi_j)^2}{D^2} \end{aligned}$$

3. Keressük meg a minimumát a d_i és d_{ij} értékeknek, és nevezzük el d_{\min} -nek.
4. Ha d_{\min} tipusa d_{ij} , akkor az i és j pre-klasztert töröljük a listából, és betesszük a listába a belőlük összegyűrt pde-klasztert: (E_{ij} , p_{ij}):

$$E_{ij} = E_i + E_j ,$$

$$p_{ij} = p_i + p_j .$$

Ha d_{\min} tipusa d_i , akkor ez a pre-klaszter nem egyesíthető senkivel. Töröljük a pre-klaszterek listájából és felvesszük a jet-ek listájára!

5. Ezt ismétéljük amíg el nem fogynak a pre-klaszterek.

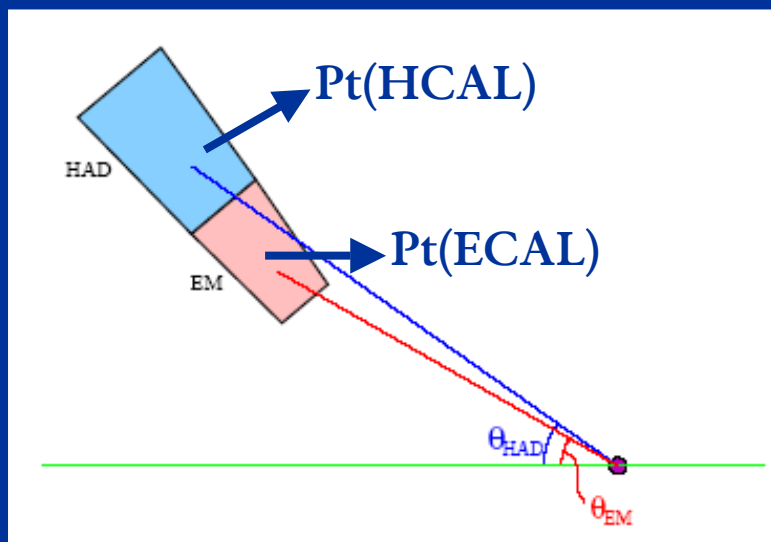
Jet rekonstrukciós algoritmusok

klaszter-algoritmus

■ Pre-klaszterezés: mi a cél és hogyan érjük el?

A pre-klaszterezés célja hogy a detektortól minél inkább függetlenek legyünk,

A detektor egyedi specialitásait ne vigyük át a jet keresésbe.



Pl. a CDF kísérletben:

$Pt(\text{total}) = Pt(\text{HCAL}) + Pt(\text{ECAL}) > 100\text{MeV}$,
Esetén pre-klaszternek nevezzük.

hep-ex/0005012, Run II jet physics

Jet rekonstrukció nehézion- ütközésekben

- Nehéz, mert a háttér egy nagyon sok részecskéből álló, nagy transzverzális energia-fluxussal rendelkező, fluktuáló esemény
- Ilyen eseményekben a kaloriméter cellái teljesen betöltöttek, és a cellában detektált kis energiájú részecskék egy nagy energiájú beütést imitálnak!
- A QCD jet-ek rekonstrukciója fontos a CMS nehézion-programja számára.
- A jet analízis nehézionra való optimalizálásáról néhány vizsgálat már elvégzésre került a CMS kísérletben.
 - Módosított kúp-algoritmus
 - Csúszó-ablakos jet kereső algoritmus

*“Jet Physics with CMS”,
A. Nikitenko, 10/13/2001*

Jet rekonstrukció nehézion- ütközésekben

■ Módosított kúp-algoritmus

A cél az volt hogy a háttéresemény hatását csökkenteni lehessen.

- Jet keresés egy küszöb felett
- Jetek kizárásával az átlagos ET (M) és az ET szórásának (D) kiszámítása
- Minden kaloriméter cella-energiából $M+D$ levonása
- Jetek újrakeresése a küszöb felett

(mindez η -gyűrűnként)

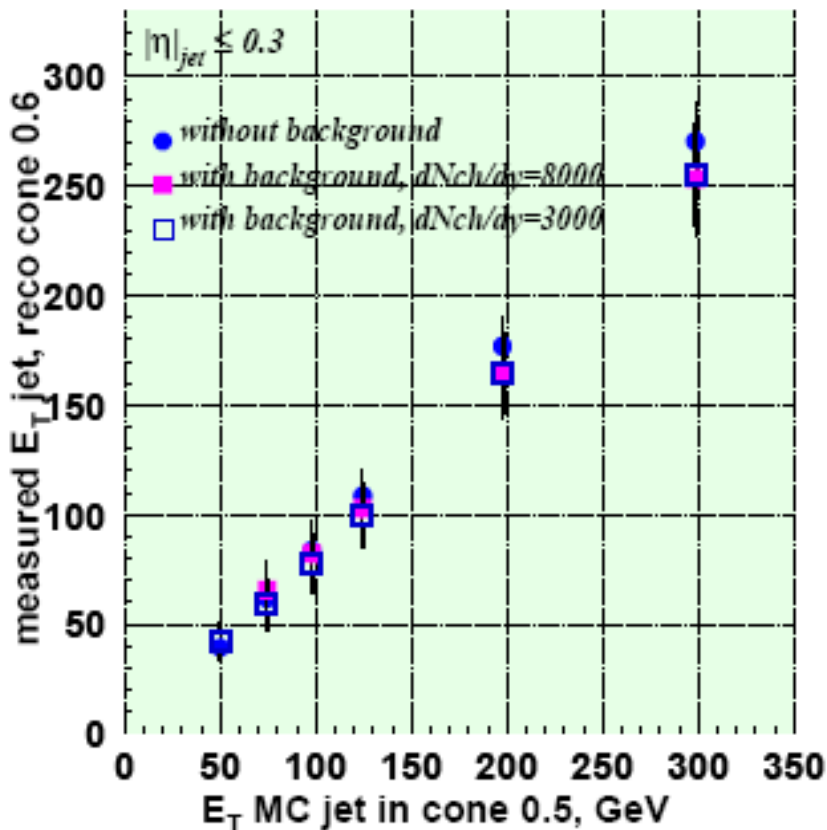
A jet keresés eredményei nehézion ütközésekben

Jet keresés eredményei, CMS

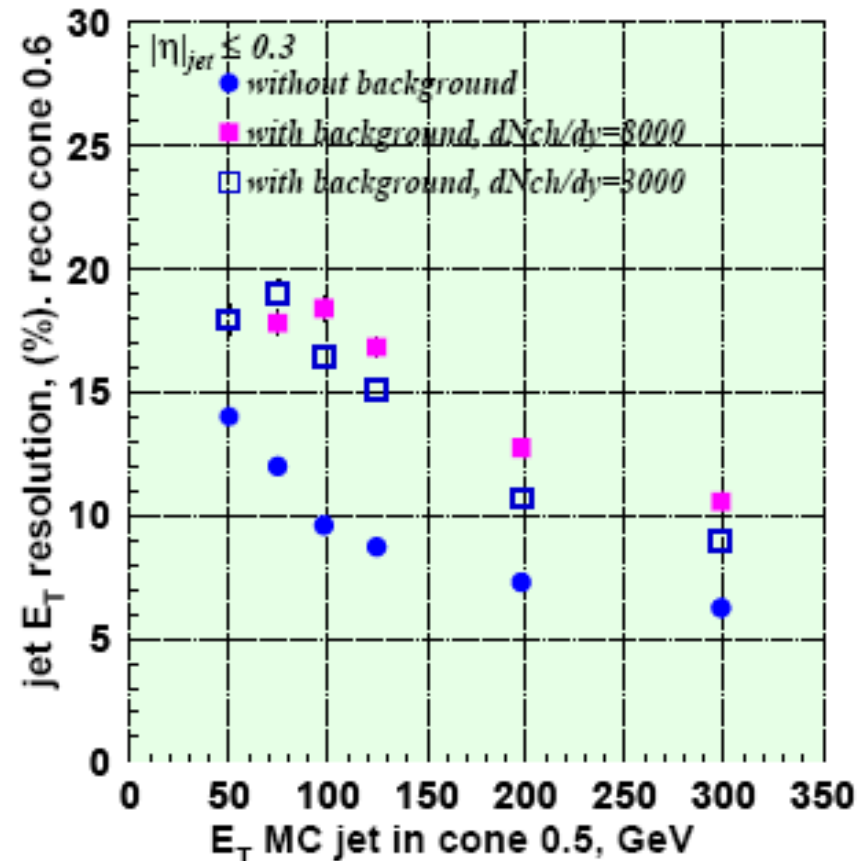
hep-ph/0310274 v1, "HARD PROBES IN HEAVY ION COLLISIONS AT THE LHC: JET PHYSICS"

Midrapiditásnál, az $\eta < 0.3$ intervallumban:

Linearitás az input és a mért E_T között:



Jet energiafelbontás



Jet keresési eredmények, CMS

Tisztaság, fake rate, felbontás:

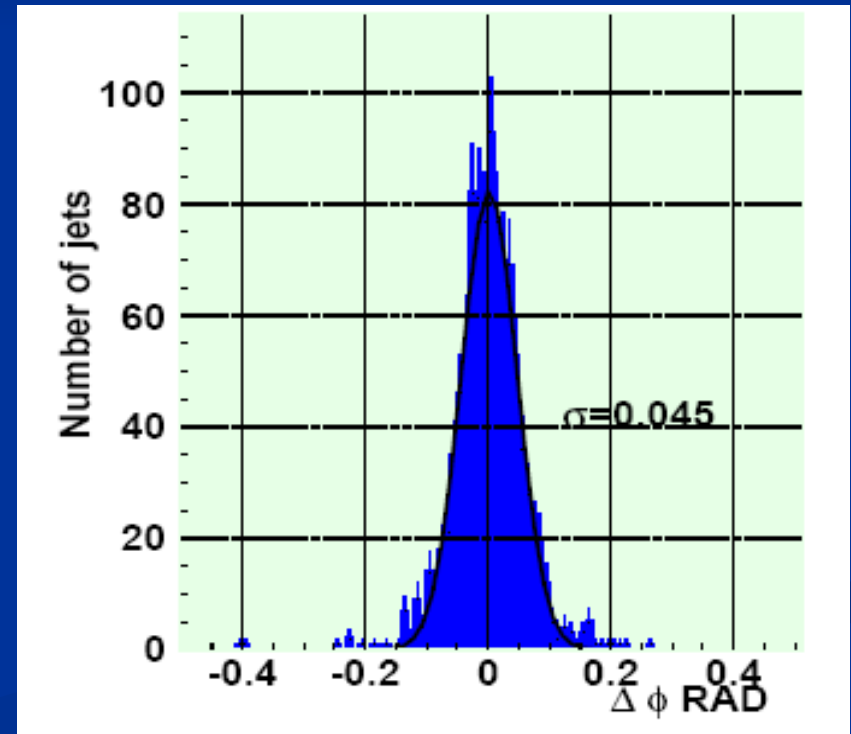
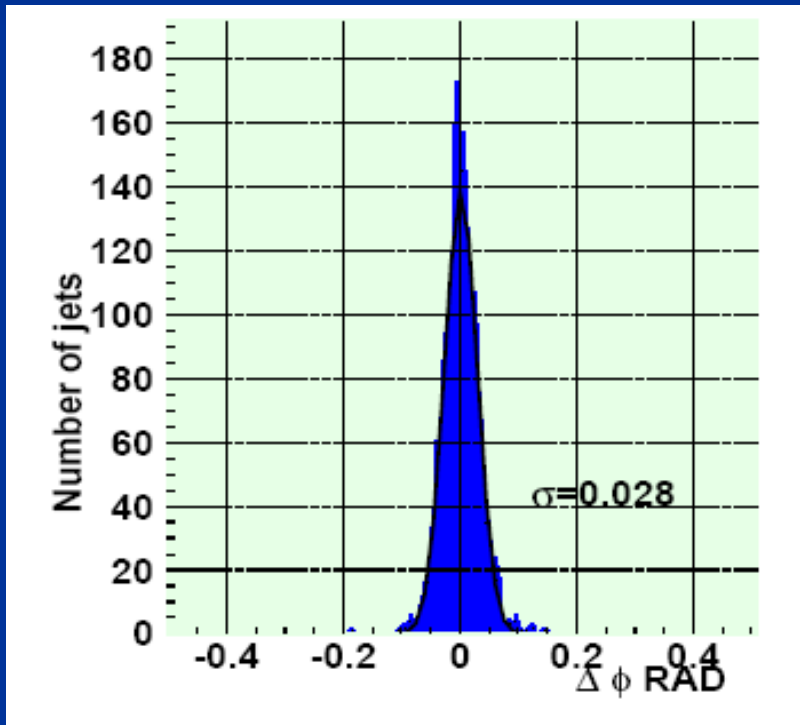
E_T min (GeV)	Purity		Noise		$\sigma(E_T)/E_T$ (%)	
	3000	8000	3000	8000	3000	8000
75	0.96 ± 0.03	0.88 ± 0.03	0.021 ± 0.006	0.083 ± 0.009	19.0	17.8
100	0.99 ± 0.03	0.97 ± 0.03	0.002 ± 0.001	0.011 ± 0.003	16.4	18.4
125	1.00 ± 0.03	0.99 ± 0.03	0.000 ± 0.000	0.004 ± 0.002	15.1	16.8
200	1.00 ± 0.03	0.99 ± 0.03	0.000 ± 0.000	0.001 ± 0.001	10.7	12.7

Proton + proton ütközésekre a CMS-ben, összehasonlításként:

	barrel	endcap	very forward
resolution	$1.16/\sqrt{E_T}+0.05$	$0.91/\sqrt{E_T}+0.05$	$0.77/\sqrt{E_T}+0.05$

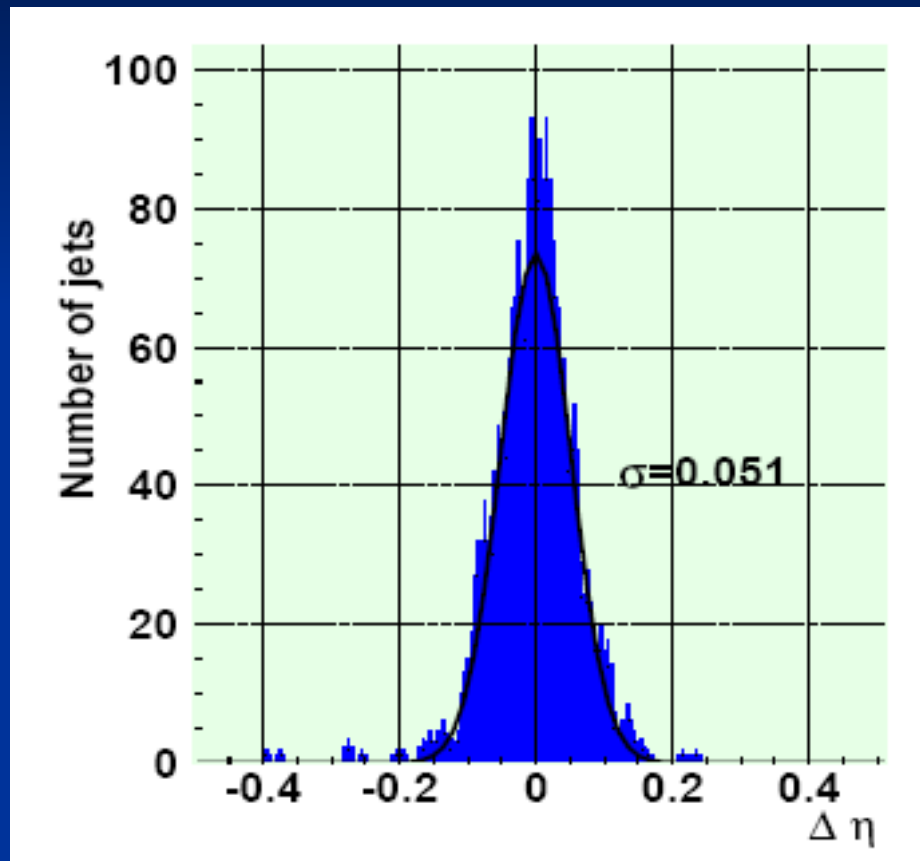
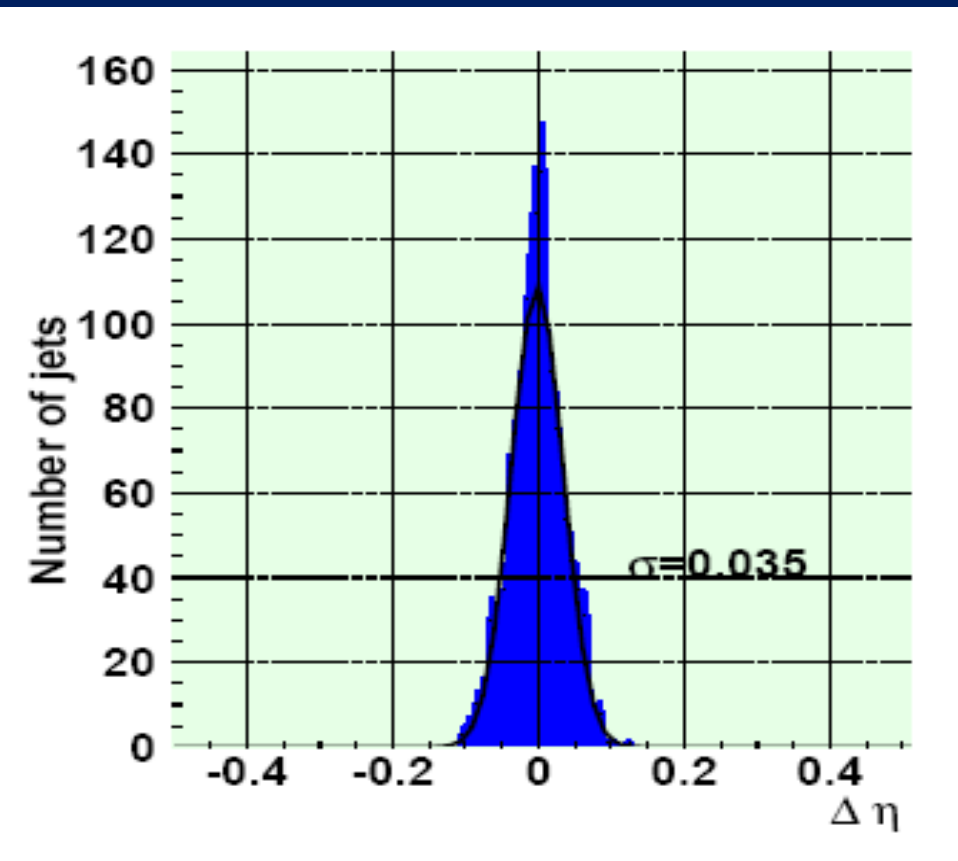
Jet keresési eredmények, CMS

A Φ , η felbontás is fontos ahhoz hogy a jetek azimutális eloszlását, korrelációit mérni lehessen:



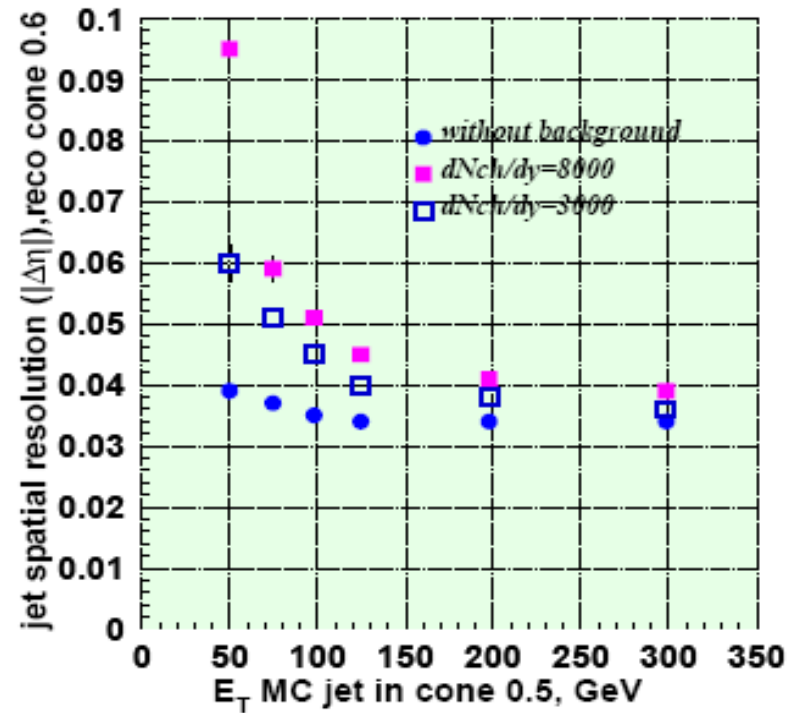
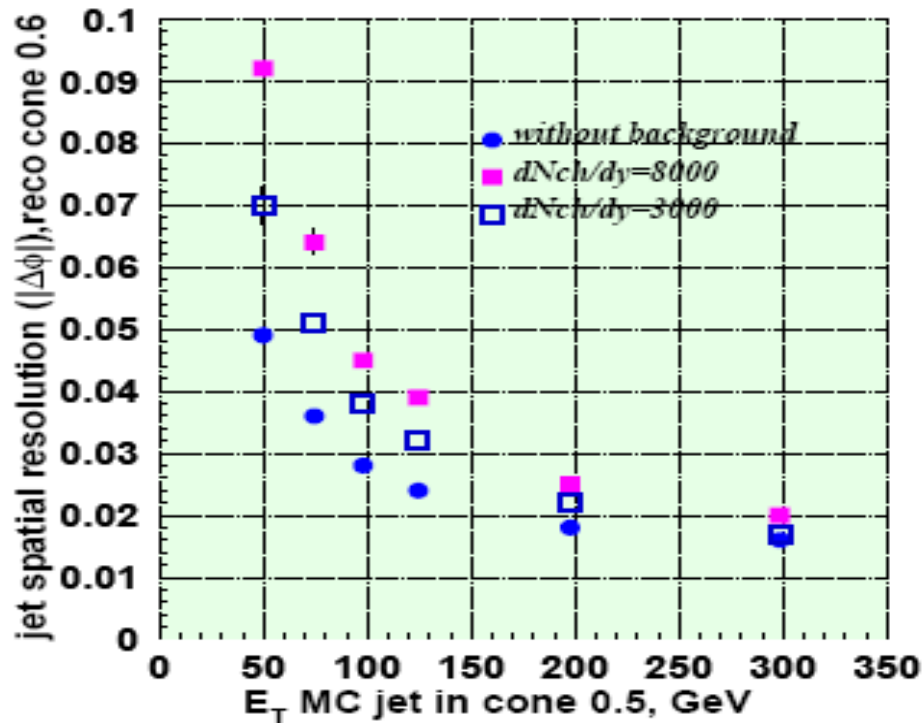
Φ felbontás at $E_t = 100\text{GeV}$ esetben, p+p Pb+Pb ahol $dN/d\eta = 8000$ $\eta = 0$ -nál

Jet keresési eredmények, CMS



Ezek pedig a megfelelő η -eloszlások

Jet keresési eredmények, CMS



Φ és η felbontás a jetek E_T energiájának függvényében

Jet keresési eredmények, CMS

nucl-ex/0405015 v1

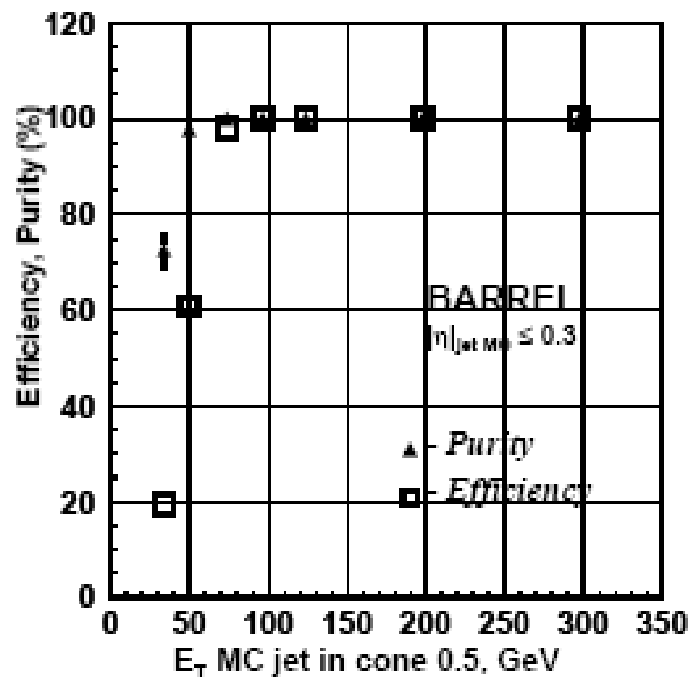


Figure 3: Jet reconstruction efficiency and purity using calorimeters for PYTHIA generated jets embedded in $dN/dy = 5000$ background events.

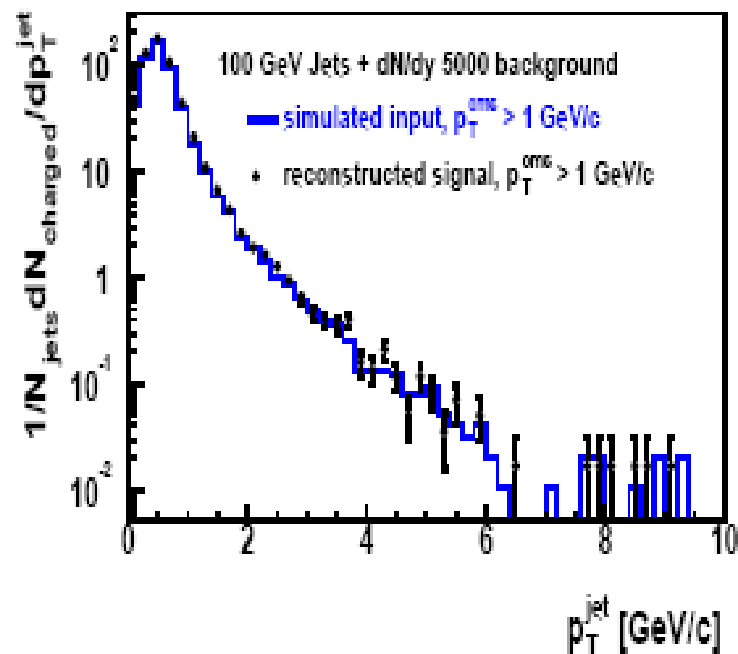


Figure 4: Transverse momentum of charged particles relative to the jet axis, p_T^{jet} , in a 100 GeV jet. A cut on the transverse momentum in the centre-of-mass system, p_T^{CMS} , of 1 GeV/c has been applied.

Jet fizika a CMS-ben: dijetek

- **Dijet:** $gg \rightarrow gg, \quad qg \rightarrow qg, \quad qq \rightarrow qq, \quad gg \rightarrow q\bar{q}, \quad q\bar{q} \rightarrow gg$
gg->gg lesz domináns
- Az első évben 10 millió dijetet várunk
- Ez már elég a jetek módosulásának szisztematikus és részletes vizsgálatához az energia, rapiditás, flavor függvényében.

Jet fizika a CMS-ben: dijetek

CMS NOTE 1999/016

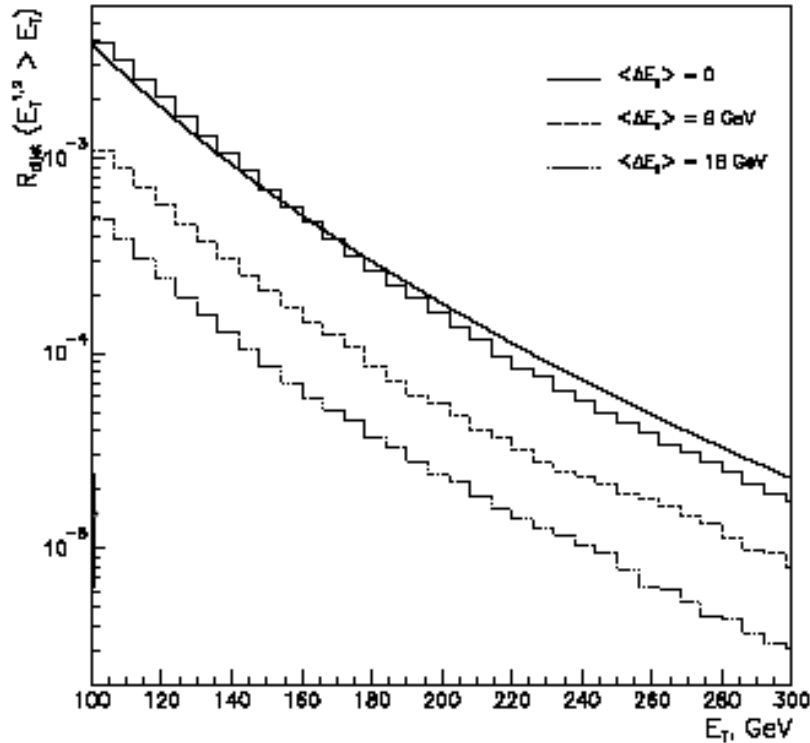


Figure 6: The probability R_{dijet} of dijets with transverse energy $E_T^{jet1,2} > E_T$ in central $Pb - Pb$ collisions for different quenching scenarios: "true" hard (histograms) and "false" (points) dijets, $dN^\pm/dy(y=0) = 8000$, additional criterion on average radius of a jet $\langle R \rangle / R_{jet} < 0.5$ being used ($R_{jet} = 0.5$). Solid curve shows the scaled result for dijet spectrum at parton level as calculated with PYTHIA (initial state gluon radiation is taken into account).

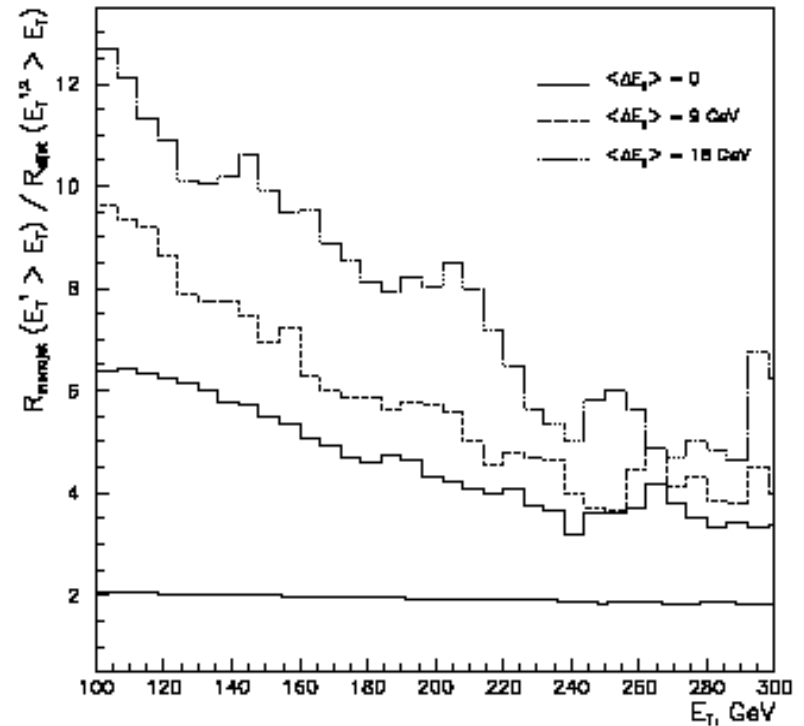
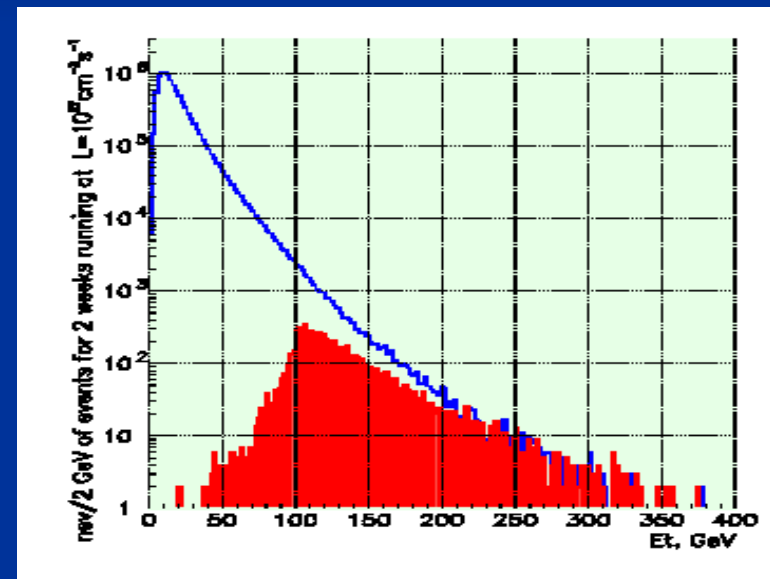
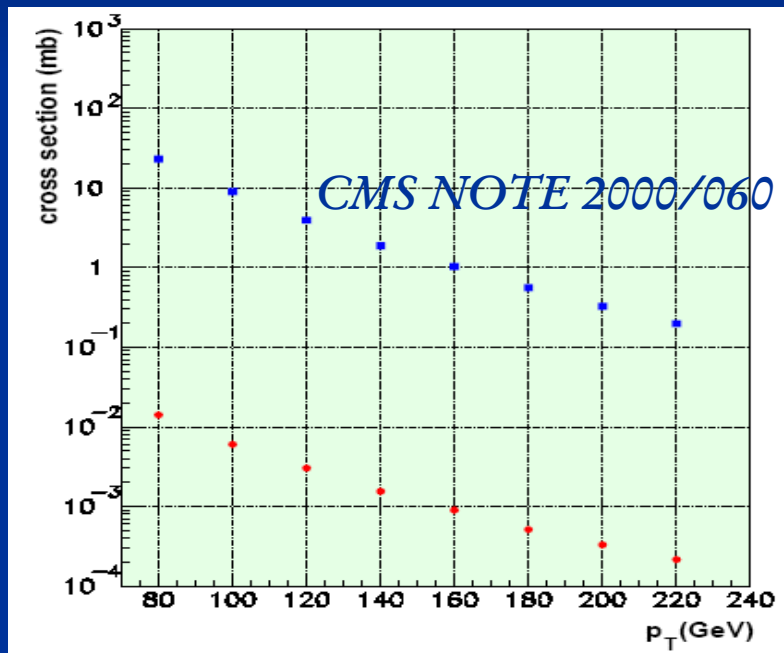


Figure 7: The monojet/dijet production rate ratio as a function of the threshold jet energy E_T in central $Pb - Pb$ collisions for different quenching scenarios, $\langle R \rangle / R_{jet} < 0.5$, $R_{jet} = 0.5$. The solid curve shows the result for monojet/dijet production rate ratio at parton level as calculated with PYTHIA (initial state gluon radiation is taken into account).

Jet fizika a CMS-ben: γ -jet

- egy kvark és egy foton. A kvark energiavesztesége így mérhető!
- Az első évben 6000 nagy ET-vel keletkező gamma-jet pár lesz
- Nagy háttér a π^0 -ák és jetek félreazonosításából



Dijetek (kék) és gamma-jetek (piros)
hatáskeresztmetszete
a transzverzális impulzus függvényében

Figure 6.7: Transverse energy of the photon from γ + jet events (shaded histogram) and the leading pion from jet + jet events (solid line) for events generated with $\hat{p}_\perp > 100$ GeV and $|\eta| < 2.6$. Histograms are normalized to the expected number of events produced in Pb+Pb collisions in a two week running at $\mathcal{L} = 10^{27} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ assuming one experiment. There are 7800 signal events and 1.1×10^7 background events.

Jet fizika a CMS-ben

- Z-jet párok keletkezése
- A jet-eloszlás azimutiszög szerinti aszimetriájának vizsgálata (az impakt paraméter vektorhoz képest)
- Stb...