

# REKONSTRUKCJA JETÓW I KLASTRÓW

„... niezbywalne narzędzie analizy stanów końcowych...”

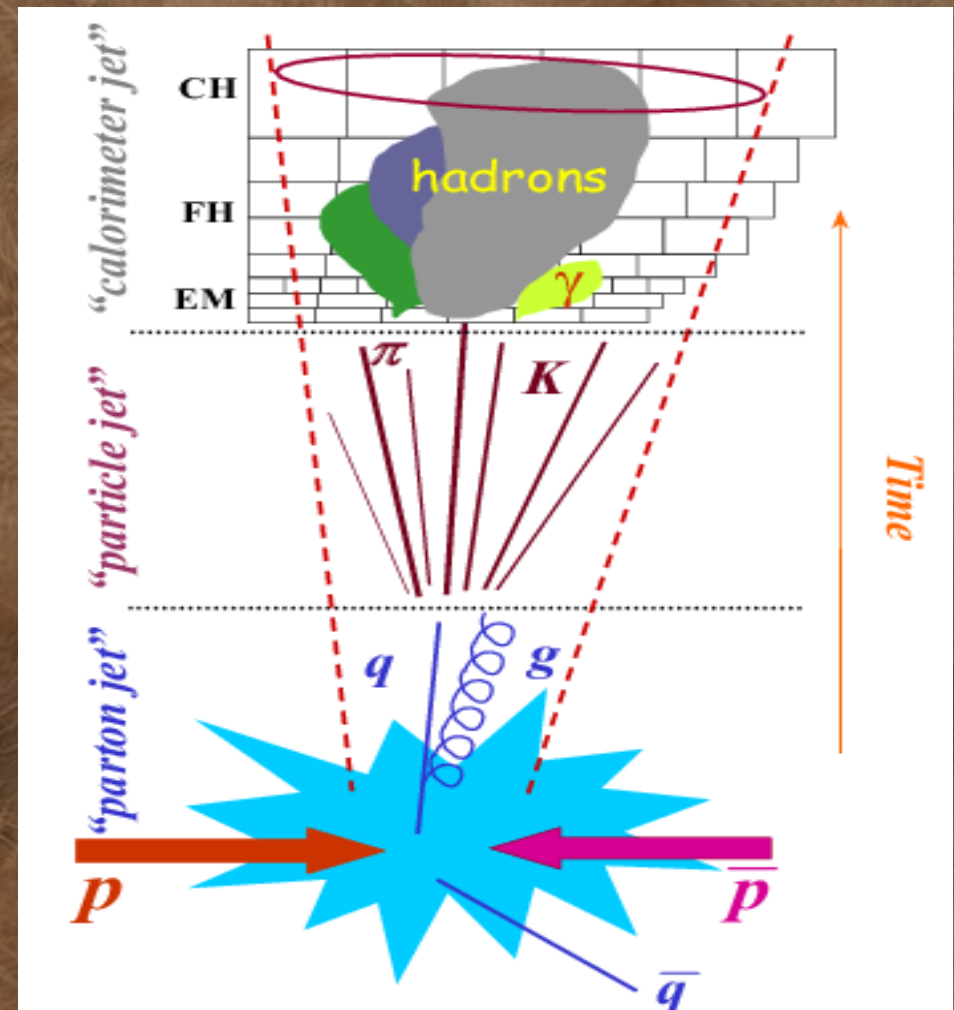
Jety stały się obiektem pomiarów wraz ze wzrostem energii zderzeń. Przejęły jakby rolę cząstek.

1978-80 powstawały eksperymenty (np. NA5), w których - jak obecnie na bozony Higgs'a - oczekiwano na jety.

Czy „wpompowanie” energii w zderzenia hadronów odpowie produkcją wielkich krotności, czy wysokoenergetycznych cząstek, czy może produkcją jetów?

Jety stały się ważną sygnaturą „twardych” procesów.

DEFINICJA JETU NIE JEST UNIKALNA  
a relacja między energią i kierunkiem partonu zależy od wielu czynników.



# JEDNYM Z PIERWSZYCH (jedną z pierwszych konwencji) BYŁ ALGORYTM „JADE”

(exclusive, iterative, pairwise clustering scheme)

Algorytm JADE ma dwa główne składniki

- zmienną kontrolną  $\gamma_{ij}$
- procedurę kombinacyjną

Obiektami pierwotnymi są tu hadrony lub cele kalorymetru - w rzeczywistym eksperymencie.

Zmiennej  $\gamma_{ij}$  używa się

- do zdecydowania, czy obiekty  $i$  oraz  $j$  powinny być połączone wg. kryterium  $\gamma_{ij} < \gamma_{cut}$ ,
- do zdecydowania, które obiekty mają być rozważane następnie w procesie łączenia, mianowicie para z najmniejszym  $\gamma_{ij}$ .

Pełni zatem też rolę porządkową.

Procedura „kombinowania” powtarzana jest dopóki nie ma obiektów, które możnaby połączyć.

(wszystkie  $\gamma_{ij} > \gamma_{cut}$ , wszystkie obiekty są określone, zdefiniowane jako jety.

W oryginalnym „JADE”

$\gamma_{ij} = M_{ij}^2 / Q^2$ , gdzie  $Q$  to jest „hard scale” - w praktyce CMS lub „visible energy” w anihilacjach  $e^+ e^-$

$$M_{ij}^2 = 2E_i E_j (1 - \cos \Theta_{ij}),$$

w zasadzie masa efektywna  $ij$

Procedura przypisywania specyfikuje właściwości nowego obiektu powstającego z łączenia  $ij$ . Na przykład w tzw. „E-scheme” bierze się sumy 4-ro pędów:

$$P_{ij} = P_i + P_j$$

## ALGORYTM „JADE” c.d.

Ten, jeden z pierwszych algorytmów, pozwolił na szeroki zakres testów QCD, na wyrafinowane pomiary fizyki oddziaływań elektro-słabych z hadronowymi stanami końcowymi, stosowany następnie do innych (hadronowych) oddziaływań.

[1] JADE Coll. W.Bartel et al., Phys. Lett B 123 (1963) 460, Z.Phys. C33 (1986) 23.

ZASADNICZYM, UNIWERSALNYM WYMAGANIEM JEST, BY IDENTYCZNE ALGORYTMY MOGŁY BYĆ STOSOWANE DO DANYCH EKSPERYMENTALNYCH I DO „PARTONÓW”. CHODZI O ZGODNOŚĆ, PORÓWNANIE, PARTONOWYCH RACHUNKÓW TEORETYCZNYCH Z OBSERWOWANYMI W EKSPERYMENCIE STANAMI HADRONOWYMI.

ALGORYTM POWINIEN BYĆ „INFRARED SAFE” (NIECZUŁY NA EMISJĘ DOWOLNIE MIĘKKICH, KOLINEARNYCH CZĄSTEK) I MIEĆ JAKNAJMNIEJSZE „POPRAWKI HADRONIZACYJNE”, CZYLI DOŚWIADCZALNE JUSTOWANIE PRZEWIDYWAŃ TEORETYCZNYCH PRZED ICH PORÓWNANIEM Z EKSPERYMENTEM.

A loop runs over all pairs of tracks and finds the pair which has the smallest invariant mass  $M$ . If  $(M/EVIS)^2 < YCUT$ , these 2 tracks are merged (i.e., 4-momenta added).

The loop is then rerun over the new list of tracks which has lost 2 particles and gained the merged pair. When no remaining pair has a low enough mass, the track list contains a set of merged tracks called jets.



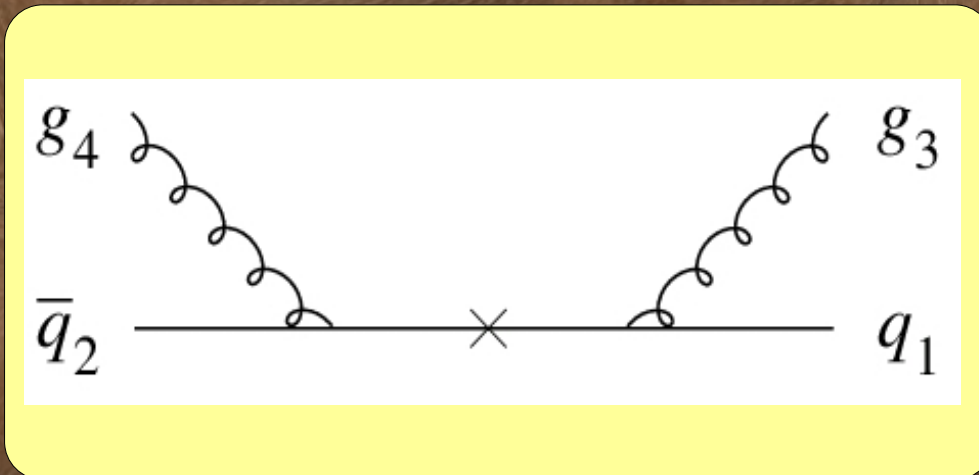
## „JADE” c.d.

O ILE JADE JEST PROSTY I „EKSPERYMENTALNIE KLAROWNY” O TYLE BARDZO TRUDNY „TEORETYCZNIE”:

- MASA NIEZMIENNICZA JEST DOSYĆ NIEODPOWIEDNIĄ WIELKOŚCIĄ DLA EWOLUCJI JETÓW QCD,
- MULTI-JET PHASE-SPACE NIE MA STRUKTURY FAKTORYZOWALNEJ ...

W KONSEKWENCJI MAŁO JEST PORÓWNAŃ TEORIA-EKSPERYMENT.

PODSTAWOWA ZAŚ SŁABOŚĆ - NA PRZYKŁADZIE „PARTON-LEVEL SEA GULL DIAGRAM”:



Na pewnym etapie kombinowania

$$Y_{13} \sim x_3 \Theta^2_{13}$$

$$Y_{24} \sim x_4 \Theta^2_{24}, \quad x_i = 2E_i/Q$$

$$Y_{34} \sim x_3 * x_4$$

Ponieważ wszystkie  $y$  są małe, to istnieje

sub-region, w którym  $y_{34}$  może się okazać najmniejsze i prowadzić do złączenia  $g_3 g_4$ , prowadząc do pozornego jetu gluonowego, pod dużym kątem do  $qq$ , gdzie nie ma w rzeczywistości żadnych cząstek!

TO DOPROWADZIŁO DO „DURHAM” ALGORITHM



## ALGORYTM „DURHAM”

[2] Yu.Dokshitzer – Proc. Workshop on Jet Studies at LEP and HERA, Durham, Dec. 1990. J.Phys. G17 (1991) 1537

[3] S.Catani, Yu. Dokshitzer, M.Olsson, G.Turnock & B.R.Webber Phys. Lett. B269 (1991) 432

ZNACZNE ULEPSZENIE „JADE”.  $M_{ij}^2$  ZASTĘPUJE SIĘ PRZEZ

$$k_{Tij}^2 = 2 \min\{E_i, E_j\}^2 (1 - \cos \Theta_{ij})$$

co jest (prawie) kwadratem pędu poprzecznego  $i, j$  i odbija fundamentalną rolę pędu poprzecznego  $k_T$ .

W diagramie „sea gull”  $\gamma_{13} \sim x_3^2 \Theta_{13}^2$ ,  $\gamma_{24} \sim x_4^2 \Theta_{24}^2$ ,  $\gamma_{34} \sim \min\{x_3^2, x_4^2\}$  i stąd dwa gluony nie mogą być skombinowane.

$K_T$  odpowiada teorii, umożliwia studia  $f(\gamma_{cut})$  i bardzo przydaje się do studiów styku perturbacyjnej i nie-perturbacyjnej QCD. W regionie, gdzie  $\gamma_{cut} < 10^{-4}$   $Q \approx M_Z$ , co odpowiada  $k_T < 1 \text{ GeV}$ . („Low energy behaviour of effective strong coupling studies”).

ALE! Problem poważny: zmniejszanie  $\gamma_{cut}$  powoduje, że algorytmy mają tendencję do szukania (i znajdowania!) jetów wśród hadronów o małych  $p_T$  („junk-jets”), np. gdy  $\gamma_{cut} \sim \Lambda/Q$ , gdzie  $\Lambda \sim 0.5 \text{ GeV}$ .



Zbierając: JADE -->

$$M^2 = 2 E_1 E_2 (1 - \cos(\theta_{12}))$$

$$M^2 = 2 (\text{MIN}(E_1 E_2))^2 (1 - \cos(\theta_{12}))$$

<---- DURHAM

Obydwa algorytmy kombinują cząstki w jety używając jednego ze schematów:

E scheme:

$$\begin{aligned} P_{ij} &= P_i + P_j \\ E_{ij} &= E_i + E_j \end{aligned}$$

P scheme:

$$\begin{aligned} P_{ij} &= P_i + P_j \\ E_{ij} &= |P_{ij}| \end{aligned}$$

E<sub>0</sub> scheme:

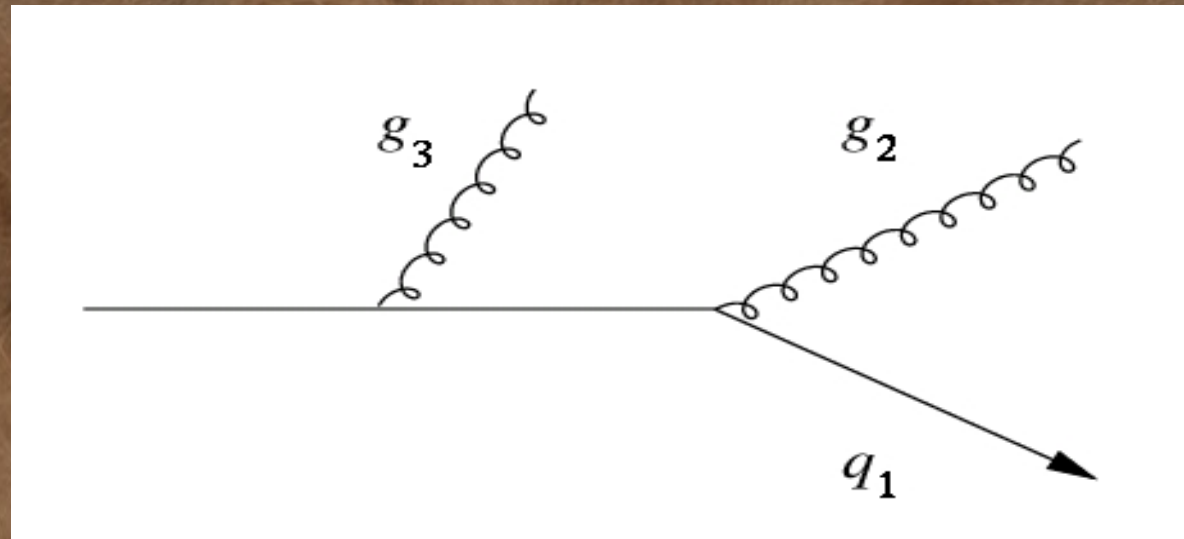
$$\begin{aligned} E_{ij} &= E_i + E_j \\ P_{ij} &= E_{ij} \frac{(P_i + P_j)}{|(P_i + P_j)|} \end{aligned}$$



„DURHAM” WPADA TEŻ W TĘ PUŁAPKĘ. WNIKLIWE STUDIA (Cavendish-HEP-97/06 – Yu. Dokshitzer, G.D.Leder, S.Moretti, B.R.Webber) BADAJĄ JAK „PROBLEM HADRONIZACJI” PSUJE OBRAZ PARTONOWY ...

---> CAMBRIDGE ALGORITHM

...liczne zmartwienia ...



i bardzo kuchenne przepisy ...

ZWYKLE ZACZYNA SIĘ OD „SOFTTEST PARTICLE IN JET” (HADRON #1) I ŁĄCZY JĄ Z CZĄSTKĄ O NAJMNIEJSZYM KĄCIE WZGLĘDEM #1.

W TEN SPOSÓB #1 NIE JEST ŁĄCZONE A HADRONEM WIODĄCYM JETU ALE TYPOWO Z „NAJMIĘKSZYM” HADRONEM, KTÓRY JEST NAJBLIŻEJ W KĄCIE, ZWYKŁA PO TEJ SAMEJ STRONIE OSI JETU.

## Trzy składniki przepisu: (Cambridge C algorithm)

1. zmienna porządkująca
2. zmienna testowa
3. procedura kombinacyjna

Przygotowanie: tablica obiektów pierwotnych o energiach  $E_i$  i kątach względem pozostałych, w formie zmiennej porządkującej

$$v_{ij} = 2 (1 - \cos(\theta_{ij}))$$

Procedura:

krok 0 - jeśli w tablicy pozostaje tylko jeden obiekt to uznaj go za jet i STOP

krok 1 - wybierz parę obiektów (ij) o minimalnej wartości zmiennej porządkującej i uporządkuj tak by  $E_i < E_j$

krok 2 - zbadaj zmienną testową

$$y_{ij} = E_i^2 v_{ij}$$

- jeśli  $y_{ij} < y_{cut}$  to uaktualnij tablicę wyrzucając i oraz j, a wprowadzając (ij) z czteropędem  $P_{ij} = P_i + P_j$  oraz przeliczając odpowiednie wartości zmiennej porządkującej

- jeśli  $y_{ij} \geq y_{cut}$  to zapisz i jako jet i wyrzuć z tablicy

krok 3 - wróć do kroku 0





## KULTURA (FOLKLOR ?) DOTYCZĄCA JETÓW HADRONOWYCH

FERMILAB I OGÓLNIIE ŚRODOWISKO USA BARDZO CZYNNIE W USTALANIU KONWENCJI.

Dwóm wiodącym eksperymentom: CDF i D0 uzgodnienie zasad zajęło dużo czasu i aktywności.

Zbudowano warianty ALGORYTMU STOŻKOWEGO (CONE) opartego na sędziwej „umowie Snowmass”

Operuje się na obiektach w pseudo-rapidity  $\eta$  i kącie azymutalnym. Obiektami są cząstki, partony, cele kalorymetrów lub wieże kalorymetrów.

SNOWMASS: JET JEST DEFINIOWANY JAKO STOŻEK O PROMIENIU

$$\Delta R = \sqrt{\Delta\Phi^2 + \Delta\eta^2} = 0.7$$

$E_T$  jest sumą energii wież wpadających w stożek. Pozycja jetu zdefiniowana jest przez średnie ważone.



## Wzory dla algorytmów stożkowych

$$E_T^{JET} = \sum_i E_T^i$$

$$\eta_{jet} = \frac{\sum_i (E_T^i \eta_i)}{E_T}$$

i biegnie przez wszystkie  
obiekty w  $\Delta R$

$$\Phi_{jet} = \frac{\sum_i (E_T^i \Phi_i)}{E_T}$$

SNOWMASS nie określa PROGU ani postępowania z przekrywającymi się jetami



## DETALE DO:

### DWIE FAZY „KLASTROWANIA”

- W PIERWSZEJ WSZYSTKIE ENERGIE NALEŻĄCE DO JETU SĄ GROMADZONE
- W DRUGIEJ WYLICZA SIĘ  $\eta$ ,  $\Phi$  i  $E_T$

### Konkretne kroki:

1. ZLICZA SIĘ CELE Z  $E_T \geq 1 \text{ GeV}$ , ZACZYNAJĄC OD NAJWIĘKSZEJ  $E_T$  FORMOWANE SĄ PRE-KLASTRY PRZEZ DODAWANIE  $E_T$  Z SĄSIEDNICH CEL (WIEŻ) WEWNĄTRZ  $R=0.3$
2. KIERUNEK JETU PRZELICZA SIĘ ZGODNIE ZE „SNOWMASS”
3. WSZYSTKIE ENERGIE WIEŻ WEWNĄTRZ  $R=0.7$ , WOKÓŁ PRE-KLASTRÓW SĄ SUMOWANE I UŻYTE DO PRZELICZENIA  $\eta$  i  $\Phi$
4. KROKI 2 i 3 SĄ POWTARZANE DOPÓTY DOPÓKI KIERUNEK JETU NIE JEST STABILNY.

PRZEKRYWAJĄCE SIĘ JETY SĄ KOMBINOWANE WTEDY, GDY PONAD 50% MNIEJSZEGO (POD WZGLĘDEM  $E_T$ ) JEST ZAWARTE W REGIONIE PRZEKRYWANIA. JEŚLI MNIEJ, TO JETY SĄ ROZDZIELONE, A ENERGIĘ REGIONU PRZEKRYWANIA PRZYDZIELA SIĘ BLIŻSZEMU JETOWI. PO POŁĄCZENIU LUB ROZŁĄCZENIU WSZYSTKO JEST PRZELICZONE



W KOŃCU :

$$E^{JET} = \sum_i E_i \quad E_T^{JET} = \sum_i E_T^i$$

$$\tan(\Theta_{JET}) = \frac{\sqrt{\left(\sum_i E_x^i\right)^2 + \left(\sum_i E_y^i\right)^2}}{\sum_i E_z^i} \quad \Phi_{JET} = \tan^{-1} \left( \frac{\sum_i E_{yi}}{\sum_i E_{xi}} \right)$$

gdzie

$$E_x^i = E_i \sin \Theta_i \cos \Phi_i$$

$$E_y^i = E_i \sin \Theta_i \sin \Phi_i$$

$$E_z^i = E_i \cos \Theta_i$$



## DETALE CDF:

### PODOBNIIE JAK DO: DWIE FAZY (GROMADZENIE, PRZELICZANIE)

KROK 1. - UTWÓRZ LISTĘ WIEŻ Z  $E_T > 1 \text{ GeV}$

KROK 2. - FORMUJ PRE-KLASTRY Z „UNBROKEN CHAIN OF CONTIGUOUS SEED TOWERS”, O MONOTONICZNIE ZMNIEJSZAJĄCYCH SIĘ  $E_T$ , JEŚLI WIEŻA JEST POZA OKNEM  $7 \times 7$  OTACZAJĄCYM „SEED” TO JEST UŻYTA DO FORMOWANIA NOWEGO KLASTRA

KROK 3. - PRE-KLASTRY STAJĄ SIĘ KLASTRAMI PRZEZ WYLICZENIE  $E_T$  I CENTROIDY WAŻONEJ OSI ZE WSZYSTKICH WIEŻ O  $E > 100 \text{ MeV}$  WEWNĄTRZ  $R=0.7$  WOKÓŁ OSI

KROK 4. - NOWA OŚ WYLICZANA JEST Z ZAAKCEPTOWANYCH KLASTRÓW

KROK 5. - PRZESŁANIANIE: ŁĄCZENIE ZACHODZI WTEDY, GDY REGION WSPÓLNY STANOWI  $> 75\%$  ENERGII MNIEJSZEGO JETU.

PO ZAKOŃCZENIU SKŁADANIA NASTĘPUJE FAZA 2 = PRZELICZENIE NOWYCH WIELKOŚCI (PRZY CZYM  $E_T = E \sin(\Theta_{\text{JET}})$  !!!

DO deklaruje zgodność ze SNOWMASS na poziomie 1%, CDF ?

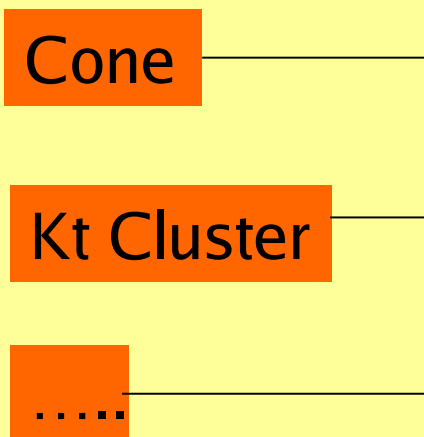


NARADY, MIĘDZYNARODOWE KONFERENCJE, WORKSHOPY, SZKOŁY,  
DOKTORATY ... JEST CO ŚĘDZIĆ NA SIECI ...

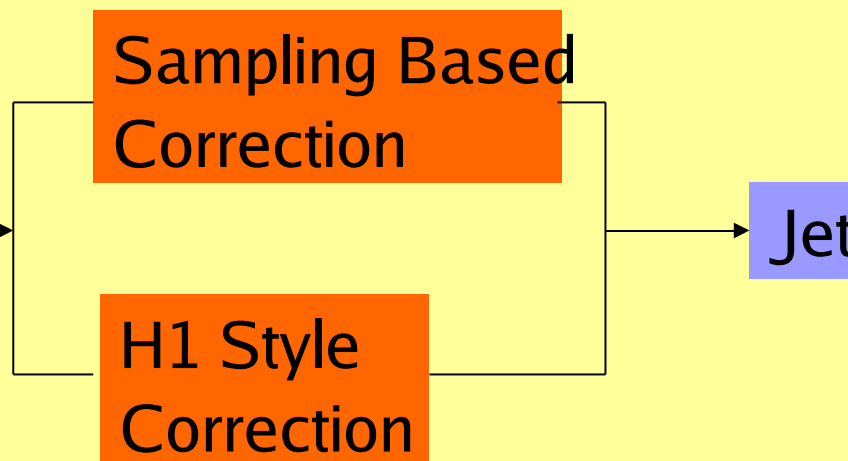
RYSUJĄ SIĘ TENDENCJE DOPASOWYWANIA, OPTYMALIZOWANIA  
ALGORYTMÓW DO KONKRETNÝCH PARTONÓW, DO OSOBNÝCH ŚRODOWISK

WIELKI ODRĘBNY TEMAT: JET ENERGY CALIBRATION

Jet Reconstruction  
Algorithms



Energy Correction  
Algorithms



**PRZYKŁADY ROZMAITYCH RECEPT DLA REKALIBRACJI WYNIKÓW  
REKONSTRUKCJI (POMIARÓW ?) ENERGII ( INNYCH WIELKOŚCI ?)  
JETU.**

**ZAWSZE CHODZI O TO SAMO: JAKNAJLEPSZE ZBLIŻENIE DO  
ODTWORZENIA PRAWDY O PARTONIE.**

**H1 OBSERWUJE, ŻE KASKADY ELEKTROMAGNETYCZNE SĄ WYRAŹNIE GĘSTSZE NIŻ  
HADRONOWE I DECYDUJE SIĘ PRZYPISYWAĆ RÓŻNE WAGI CELOM, WAGI  
„ELEKTROMAGNETYCZNE” LUB „HADRONOWE”**

**POPRAWĘ, PRZESŁANKĘ DO REKALIBRACJI MOŻNA STARAĆ SIĘ ZNALEŻĆ W SYTUACJACH  
POZWALAJĄCYCH NA PORÓWNIANIA - np. Z BADANIA SYMETRII PRZYPADKÓW DWU-JETOWYCH**

**OCZYWIŚCIE WARUNKIEM PODSTAWOWYM JEST POPRAWNA KALIBRACJA PRZYRZĄDU, TESTY  
NA WIĄZCE MONO-ENERGETYCZNEJ, ZNAJOMOŚĆ ZALEŻNOŚCI KĄTOWYCH, ZALEŻNOŚCI OD  
ENERGII, NASYCENIA, WARUNKÓW BRZEGOWYCH, MAPY AKCEPTANCJI ETC.**



## PROPOZYCJE ZADAŃ WŁASNYCH:

- CO TO JEST ALGORYTM  $K_T$  ?
- JET FINDER LIBRARY
- JET FINDING ALGORITHMS AT TEVATRON





fin

