

***Systemy wyzwiania***  
***we współczesnych eksperymentach***  
***fizyki wysokich energii***

- charakterystyka “sygnału” i “tła”
- problem redukcji danych
- wielopoziomowe systemy wyzwiania
- architektura i algorytmy I° stopnia trygera
- architektura i algorytmy wyższych stopni trygera

# Zderzacze leptonowe i hadronowe

---

## Zderzacze leptonowe ( $e^+e^-$ )

- cała energia  $\sqrt{s}$  “wykorzystana”
- akcelerator można “nastroić” na produkcję określonych obiektów ( $Z^0$ )
- dominują oddziaływania elektrosłabe
- niewielkie tło
- “łatwy” tryger

## Zderzacze hadronowe ( $pp, p\bar{p}$ )

- zderzają się pojedyncze partony
  - $qq, qg, gg$  ( $q$  walencyjne lub z morza)
- reszta (underlying event) “zaśmieca” detektor
- wykorzystane jedynie  $\sqrt{x_1 x_2 s}$ 
  - $\langle x \rangle \sim 10\%$ , ale nie średnia jest istotna
- ciekawe jedynie “twarde” zderzenia, “na ogonach” funkcji struktury  $F(x)$
- dominują oddziaływania silne
  - “nudna” produkcja “zwykłych” hadronów (dżety)
- konieczność odrzucenia dużego tła
- trudny tryger

# Kinematyka “sygnału” i “tła”

---

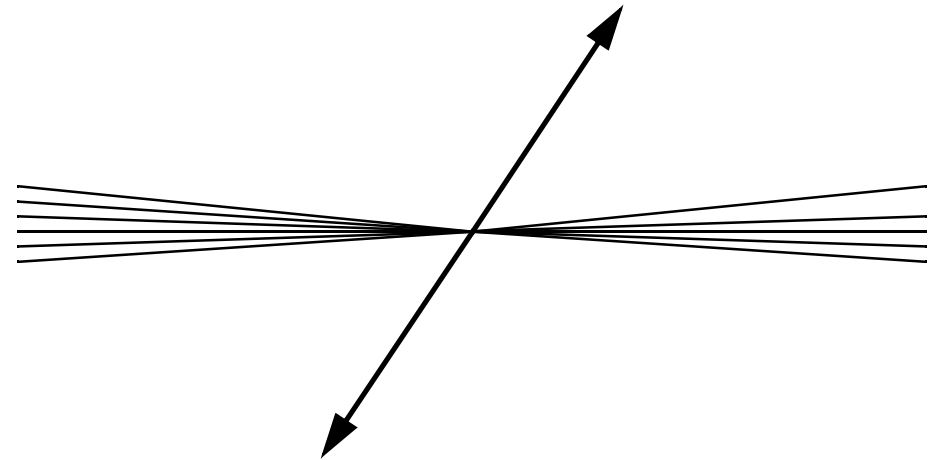
## TŁO:

- rozkład płaski w  $\eta = -\ln \tan(\theta/2)$
- cząstki skoncentrowane w przodzie (i tyle) detektora



## SYGNAŁ:

- ~sferycznie symetryczny rozkład produktów rozpadu ciężkich obiektów
- pęd poprzeczny  $p_T$  miarą “ciekawości” przypadku



# “Energia poprzeczna”

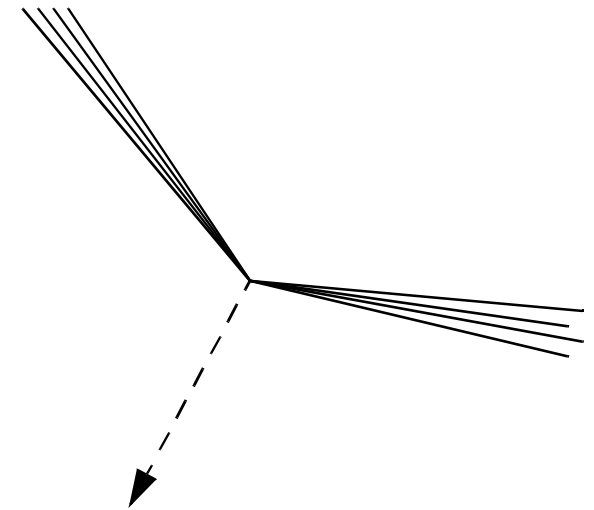
---

*Co to za dziwo i po co?*

**Pęd poprzeczny zmierzony w kalorymetrze.**

**Jak zaobserwować cząstki nieoddziaływujące w detektorze?  
(neutrino, długożyciowe neutralino, etc.)**

- Mierzmy pędy wszystkich cząstek oddziaływujących.
- Jeżeli wypadkowa jest istotnie różna od zera, podejrzewamy, że “coś” uniosło brakujący pęd.



**Kalorymetr lepiej się do tego nadaje niż detektory śladowe, gdyż “widzi” także cząstki neutralne (n,γ).**

- W praktyce każdej celi kalorymetru przypisujemy liczby

$$E_x = E \sin\theta \cos\phi, \quad E_y = E \sin\theta \sin\phi,$$

gdzie  $E$  - energia zdeponowana;  $\phi, \theta$  - położenie celi.

- Brakująca energia poprzeczna  $E_T^{\text{miss}} = -\text{sqrt} [ (\sum E_x)^2 + (\sum E_y)^2 ]$

# Pożyteczne wzory

---

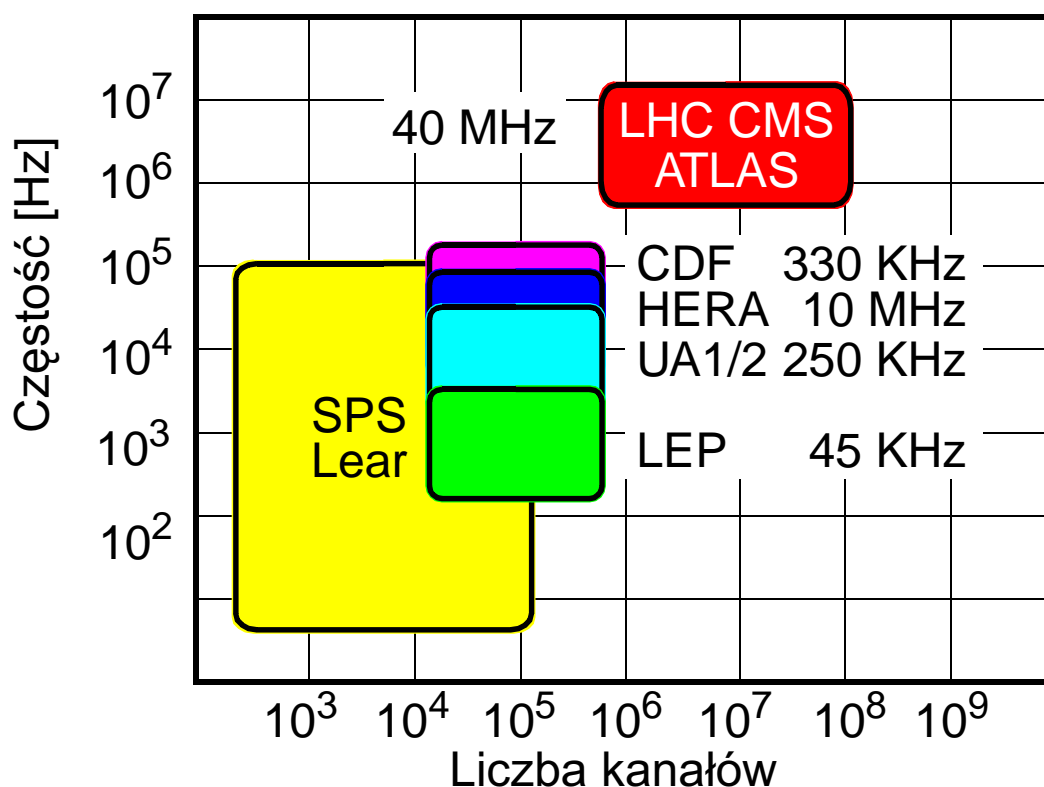
1 barn	1 mb	1 pb	1 fb	
1	$10^{-3}$	$10^{-12}$	$10^{-15}$	barns
$10^{-24}$	$10^{-27}$	$10^{-36}$	$10^{-39}$	$\text{cm}^2$

- częstość [MHz] =  $\sigma$  [mb] · L [ $10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ]
- liczba przypadków =  $\int \sigma \cdot L \, dt = \sigma \cdot \int L \, dt$
- rok kalendarzowy =  $\pi \cdot 10^7 \text{ s}$
- rok akceleratorowy =  $10^7 \text{ s}$

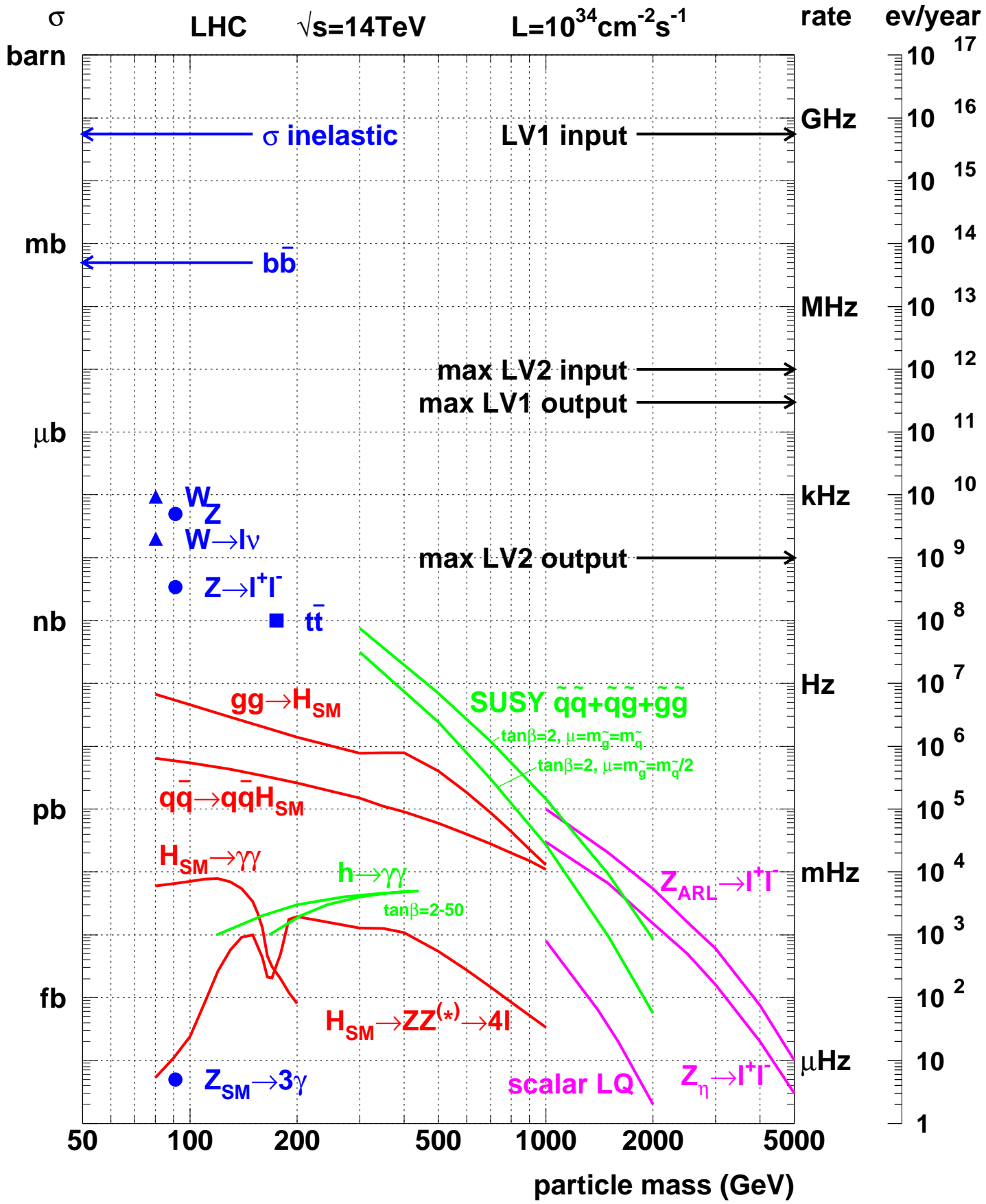
L	$10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
$\int L \, dt$ 1 rok	$10^4 \text{ pb}^{-1} = 10 \text{ fb}^{-1}$	$10^5 \text{ pb}^{-1} = 100 \text{ fb}^{-1}$

# CMS a inne eksperymenty

detektor	l. kanałów	zajętość	przypadek
mozaikowy	80 000 000	0.01 %	100 kB
mikropaskowy	16 000 000	3 %	700 kB
wczesnych kaskad	512 000	10 %	50 kB
kalorymetry	125 000	5 %	50 kB
mionowy	1 000 000	0.1 %	10 kB
całkowita wielkość przypadku			1 MB



Strumień danych kontrolnych CMS (temperatura, napięcie itp.) jest porównywalny ze strumieniem wszystkich danych jednego ze współczesnych eksperymentów LEP (100 kB/s)



# Selekcja przypadków

---

W ciągu 10 lat pracy LHC zajdzie  $10^{17}$  zderzeń pp.

Zaobserwowanie 10 “egzotycznych” przypadków może stanowić epokowe odkrycie “nowej fizyki”.

Należy jednak umieć odszukać owe **10** przypadków wśród wszystkich  **$10^{17}$** .

## Szukanie igły w stogu siana?

- typowa igła —  $5 \text{ mm}^3$
- typowy stóg siana —  $50 \text{ m}^3$

$$\text{igła} : \text{stóg} = 1 : 10^{10}$$

**Poszukiwanie “nowej fizyki” w LHC to szukanie igły w milionie stogów siana.**

# System wyzwalania (tryger)

---

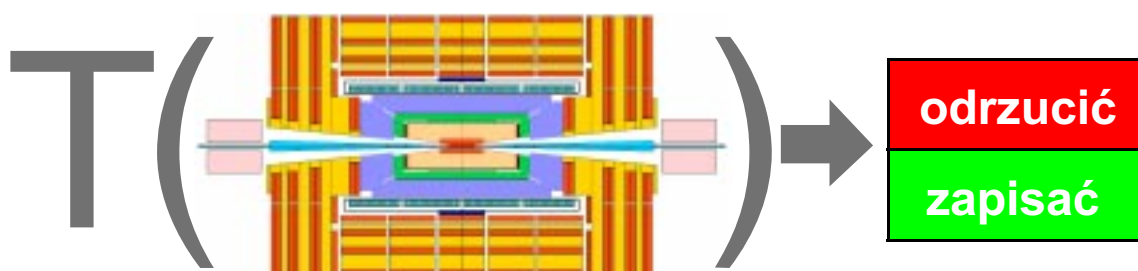
Nowoczesne systemy pamięci masowej pozwalają zapisywać  $\sim 100$  MB/s.

Spośród  $\sim 10^9$  przypadków zaobserwowanych w ciągu każdej sekundy jedynie 100 może być zapisanych.

Wyboru dokonuje system wyzwalania zwany *trygerem*.

**TRYGER** jest to dwuwartościowa funkcja

- zarejestrowanych danych
- stanu detektora
- badanej fizyki



Ponieważ nie wszystkie dane są natychmiast dostępne a funkcja jest skomplikowana,  $T(\cdot)$  jest obliczane w kolejnych przybliżeniach zwanych

***stopniami trygera***

Do odrzucenia przypadku wystarczy ograniczona dokładność, do następnego stopnia przechodzą więc tylko przypadki z decyzją "zapisać".

# ***“Klasyczny” układ stopni trygera***

---

I°

- zgrubne dane z części detektorów (często dedykowanych)
- rozpoznanie interesujących obiektów ( $\mu$ ,  $e$ ,  $\gamma$ ,  $Z$ ,  $E_T^{\text{miss}}$ )

- “hardware”
- specjalnie projektowane procesory
- przetwarzanie synchroniczne
- $t \sim \mu\text{s}$

II°

- dokładniejsze dane z części detektorów
- pomiar interesujących obiektów

- “firmware”
- procesory niskiego poziomu (Digital Signal Processor - DSP)
- $t \sim \text{ms}$

III°

- pełne dane z wszystkich detektorów (dostępne, ale niekoniecznie użyte)
- (częściowa) rekonstrukcja przypadku

- “software”
- komputery
- $t \sim \text{s}$

W LHC już na I° zgrubny pomiar ( $p_T$ ,  $E_T$ )

W CMS już II° to “software” na komputerach



# Physics with muons

---

## Standard Model Higgs

- $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4\mu$  ( $m_H=130-750$  GeV)  
– mass resolution  $< 1$  GeV at  $m_H=130$  GeV

## SUSY Higgses

- $h, H, A \rightarrow \mu^+\mu^-$   
– mass resolution  $< 1$  GeV

## Superpartners

- $\tilde{q}, \tilde{g} \rightarrow \text{multi-lepton} + \text{multi-jet} + E_t^{\text{miss}}$   
– muon recognition in multi-jet environment

## Beyond the Standard Model

- $Z' \rightarrow \mu^+\mu^-$   
–  $p_t^\mu$  measurement and sign determ. above 1 TeV

## B-physics

- rare decays, e.g.  $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$
- CP violation, e.g.  $B_d^0 \rightarrow J/\psi \rightarrow \mu\mu K_S^0 + \mu_{\text{tag}}$   
– low  $p_t$  trigger threshold (2-4 GeV)

## Heavy Ions

- $\Upsilon, \Upsilon', \Upsilon'' \rightarrow 2\mu$   
– mass resolution  $\sim 40$  MeV

## Specific muon features

- calibration of isolation algorithms
- b-tagging



# CMS/LHC Trigger Physics

## Standard model Higgs (high luminosity)

- $H (80 \text{ GeV}) \rightarrow \gamma \gamma$
- $H (120 \text{ GeV}) \rightarrow Z Z^* (4 \text{ leptons})$
- $H (>500 \text{ GeV}) \rightarrow \text{leptons } (+ \nu\text{'s})$
- $H (< 2M_w \text{ Associated } t \text{ or } W \text{ or } Z) \rightarrow b b (\text{lepton} + X)$

## SUSY Higgs (low luminosity)

- (standard model Higgs like channels)
- $h, H, A \rightarrow \tau \tau (\text{lepton} + X) \text{ or } \rightarrow \mu \mu$
- $A \rightarrow Z h ; h \rightarrow b b (\text{lepton} + X)$
- $p p \rightarrow t t X; t \rightarrow H^+ b; H^+ \rightarrow \tau \nu; t \rightarrow \text{lepton} + X; \tau \rightarrow X$

## SUSY sparticle searches (low luminosity)

- MSSM sparticle  $\rightarrow$  LSP (Missing  $E_T$ ) + n jets
- MSSM sparticle  $\rightarrow$  Same sign dileptons + X

## Other new particles

- $Z' \rightarrow$  dileptons
- Leptoquarks: dileptons

## Top physics (low luminosity)

- $t \rightarrow \text{lepton} + X$
- $t \rightarrow$  multijets

## Bottom physics (low luminosity)

- $b \rightarrow \text{lepton} + X$
- $b \rightarrow \psi k_s (\text{leptons} + X)$

## QCD

- Low luminosity 100 GeV jets
- High luminosity 200 GeV jets

## $\Rightarrow$ Trigger candidate requirements:

- High luminosity: lepton/ $\gamma$  (30 GeV), dileptons/ $\gamma\gamma$  (15 GeV)  
missing  $E_T$  (100 GeV), jets (200 GeV)
- Low luminosity: lepton/ $\gamma$  (15 GeV), dileptons/ $\gamma\gamma$  (10 GeV)  
missing  $E_T$  (50 GeV), jets (100 GeV)

# *Tryger I-stopnia @ LHC*

---

## Cykl pracy

co **25 ns** następuje

- pobranie próbki danych z detektora (**~1ms**)
- analiza przypadku (**~1ms**)
- wysłanie decyzji do detektora (**~1ms**)

## Tryger mionowy

- rozpoznanie śladu (ułożenie punktów w tor)
- przypisanie do danego zdarzenia (pomiar czasu)
- pomiar pędu
- porównanie z progiem

## Tryger kalorymetryczny

- zlokalizowanie dużego depozytu energii
- identyfikacja obiektu (e/g, dżet hadronowy)
- pomiar energii
- porównanie z progiem

# Przetwarzanie potokowe

Tryger musi zanalizować dane z **każdego zderzenia**

- **co 25ns** musi zapisać decyzja czy je zapisać

**Jej wypracowanie wymaga jednak dłuższego czasu.**

Rozwiązanie problemu:

**przetwarzanie potokowe**, czyli “*taśma produkcyjna*”:

- algorytm podzielony jest na kroki wykonywalne w 25ns;
- procesor stanowi łańcuch elementów, z których każdy wykonuje jeden krok algorytmu w 25ns i przekazuje wynik następnemu;
- w ten sposób przetwarzane dane płyną przez procesor  $\sim 3\mu\text{s}$ , a wyniki pojawiają się na jego wyjściu co 25ns;
- pełne dane czekają na decyzję trygera, płynąc synchronicznie w pamięci potokowej.





# Muon Trigger Summary

**$\leq 4$   $\mu$  delivered to the Global Trigger:**

**$p_T$  — 5 bit programmable scale (baseline: 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 60, 70, 90, 100, 120, 140)**

**$\Delta\eta \approx 0.1$ ,  $\Delta\phi = 2.5^\circ$**

**Minimal  $p_T$  — 1.5 GeV (endcap) - 4 GeV (barrel)**

**Single  $\mu$  efficiency  $\approx 96\%$**

**Two  $\mu$  resolution —  $\Delta\eta \approx 0.2$ ,  $\Delta\phi \approx 5^\circ$  for high  $p_T$ ; better for low  $p_T$  (tracks are bent out)**

**Nominal thresholds and rates:**

	$L=10^{33}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$		$L=10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	
	$p_T$	rate	$p_T$	rate
$\mu$	10 GeV	8 kHz	25 GeV	8 kHz
$\mu\mu$	4/4 GeV	0.5 kHz	6/5 GeV	1.6 kHz

**Isolation:  $E_T < 7$  GeV in each of  $2\times 2$  calo regions ( $\Delta\eta\times\Delta\phi=0.35\times 0.35$ ) around  $\mu$**

# Porównanie trygerów ATLAS i CMS

---

## ATLAS

- tryger mionowy i kalorymetryczny rozpoznają obiekty o  $p_T$  ( $E_T$ ) powyżej ustalonych progów
- sprawdzają 128 kryteriów na liczbę obiektów powyżej różnych progów, np.
  - 2  $\mu$  o  $p_T > 6$  GeV
  - 3 dzety o  $E_T > 80$  GeV
- tryger centralny sprawdza, czy spełniona jest  $\geq 1$  z 96 kombinacji (“trigger menu”) powyższych kryteriów, np.
  - 2  $\mu$  o  $p_T > 6$  GeV i 3 dzety o  $E_T > 80$  GeV

## CMS

- tryger mionowy i kalorymetryczny rozpoznają obiekty i zgrubnie mierzą ich  $\phi$ ,  $\eta$  i  $p_T$  ( $E_T$ )
- wybierają po 4 “najtwardsze” obiekty każdego rodzaju i przekazują ich listę, np.
  - $\mu^+$ ,  $\phi=35^\circ$ ,  $\eta=1.2$ ,  $p_T=40$  GeV
  - $e/\gamma$ ,  $\phi=125^\circ$ ,  $\eta=-0.2$ ,  $E_T=70$  GeV
- tryger globalny sprawdza, czy spełnione jest  $\geq 1$  ze 128 kryteriów (“trigger menu”) typu:
  - $\mu^+$ ,  $p_T=40$  GeV i  $e/\gamma$ ,  $E_T=70$  GeV,  $160^\circ < \Delta\phi < 190^\circ$

# ***Wyższe stopnie trygera CMS***

---

**II°**

**wczytanie danych mionowych i kalorymetrycznych — 100 kHz**

**sprawdzenie obiektów I° z pełną rozdzielczością**

**III°**

**wczytanie danych z det. wewnętrznego wokół obiektów II° — 10 kHz**

**dopasowanie torów**

**IV°**

**wczytanie pozostałych danych — 1 kHz**

**pełna rekonstrukcja przypadku**

**zapis na nośnik trwały — 100 Hz**



# *Possible High Level Trigger Data Flow*

---

**processor farm = 500 nodes x 1000 MIPS**

LV	nodes	input f	f/node	t/ev./node	data/ev.	data/node	all data
2	200	100 kHz	500 Hz	2 ms	200 kB	100 MB/s	20 GB/s
3	200	10 kHz	50 Hz	20 ms	+200 kB	10 MB/s	2 GB/s
4	100	1 kHz	10 Hz	100 ms	+600 kB	6 MB/s	0.6 GB/s

# ***Towards a recipe for 100 Hz cocktail***

Grzegorz Wrochna, Sołtan Institute for Nuclear Studies, Warsaw  
Łukasz Gościło, Warsaw University

## ***Exclusive triggers***

- for channels with known topologies and particle masses
- based on topological cuts and invariant mass windows

## ***Inclusive triggers***

- for unknown physics
- based on simple objects like  $\gamma$ ,  $e$ ,  $\mu$ ,  $\tau$ ,  $t$ ,  $W$ ,  $Z$ , jets,  $E_T^{\text{miss}}$

## ***Proposed approach***

- define set of inclusive triggers giving  $< 100$  Hz
- check efficiency for benchmark channels
- devote fraction of bandwidth to more exclusive triggers to recover missing efficiency





channel	off-line cuts	L3 thresholds @10 <sup>34</sup>	comments
$H \rightarrow \gamma\gamma$	$2\gamma > 40, 25$	$\gamma\gamma > 35$	~O.K., asymm.
$WH, t\bar{t}H \rightarrow l \gamma\gamma X$	$2\gamma > 40, 25, l > 20$	$\gamma\gamma l > 15, 20$	O.K.
$(H \rightarrow \gamma\gamma) + jets$	$2\gamma > 40, 25, j > 40$	$\gamma\gamma > 35$	~O.K., asymm.
$W (\rightarrow l\nu) H (\rightarrow b\bar{b})$	$l > 20, 2j > 25, E_T^{miss} > 20$	$l jj > 30, 300$	add isol, $E_T^{miss}$
$t\bar{t} (\rightarrow l\nu+X) H(\rightarrow b\bar{b})$	$l > 20, 6j > 20, E_T^{miss} > 20$	$6j > 70$	add isol. / $6j E_T^{miss}$
$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$	$4l > 20, 10, 5, 5$	$lll > 15$	assym, isol, add $4l$
$H \rightarrow ZZ \rightarrow ll jj$	$2l > 50, 2j > 40$	$ll > 44$	O.K.
$H \rightarrow ZZ \rightarrow ll \nu\nu$	$l > 20, E_T^{miss} > 100$	$ll > 44$	add isol, $E_T^{miss}$
$H \rightarrow Z\gamma$	$2l > 10, \gamma > 30$	$ll \gamma > 15, 10$	~O.K., tune
$H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$	$2l > 30, 20$	$ll > 44$	difficult, isolation
$H \rightarrow WW \rightarrow l\nu jj$	$l > 50, 2j > 40, E_T^{miss} > 100$	$l > 100, l jj > 30, 300$	add isol, $E_T^{miss}$
$h \rightarrow \tau\tau$	$\tau > 20$	$ll > 44$	difficult, isolation
$h \rightarrow \mu\mu$	$\mu > 10$	$ll > 44$	difficult, isolation
$\chi^\pm \chi^0 \rightarrow 3l+X$	$3l > 15$	$lll > 15$	O.K.
$\tilde{l} \tilde{l} \rightarrow ll + E_T^{miss}$	$2l > 20, E_T^{miss} > 50$	$ll > 44$	add isol, $E_T^{miss}$
$\tilde{q} \tilde{g}$	$2l > 10, 2j > 40, E_T^{miss} > 100$	$ll > 44, ll j > 10, 250$	add isol, $ll jj, E_T^{miss}$

- “off-line cuts” quoted are just preselection criteria
  - the efficiency might be still reasonable for higher cuts
- actual efficiency for given L3 thresholds needs to be evaluated