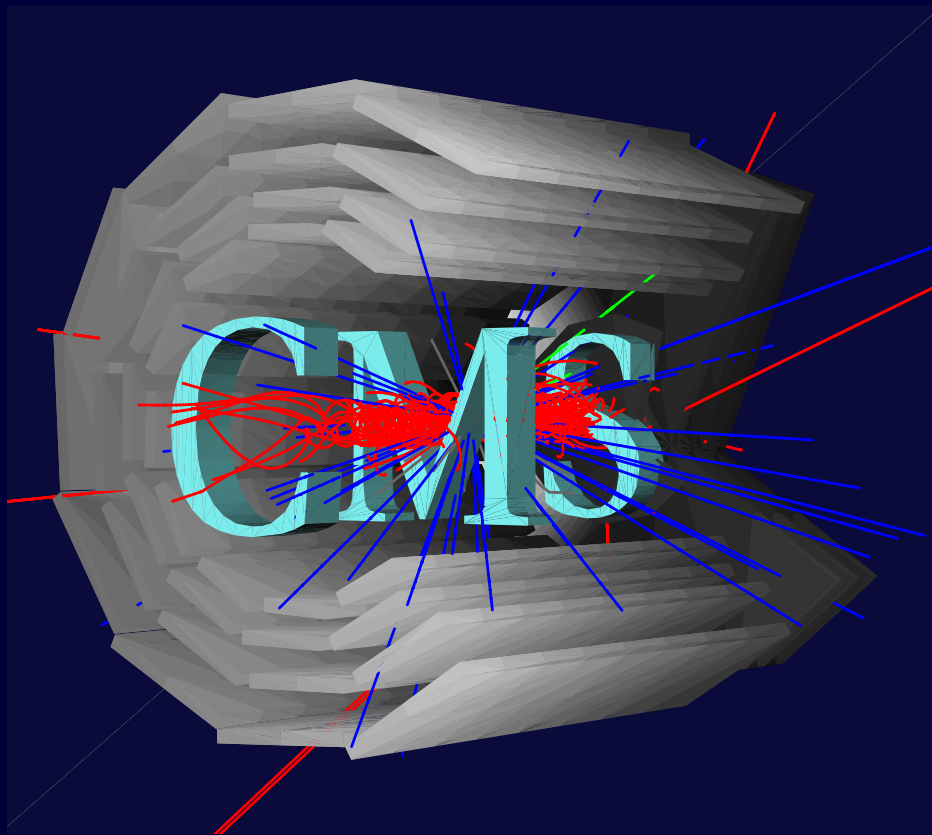


Czy zobaczymy Nową Fizykę w LHC?

Selekcja przypadków w eksperymencie CMS

G. Wrochna



- **Gdzie szukać Nowej Fizyki?**
 - femtobarny i teraelektronowolty
- **Wymagane cechy akceleratora i detektorów**
 - nanosekundy i mikrony
- **System zbierania danych i tryger CMS**
 - GIPSy, TIPSy i petabajty
- **Problemy projektowania i planowania**
 - długie lata ...

Unifikacja oddziaływań

Wielki Wybuch Inflacja Anihilacja Bariogeneza Nukleosynteza Rekombinacja

10^{-43} s

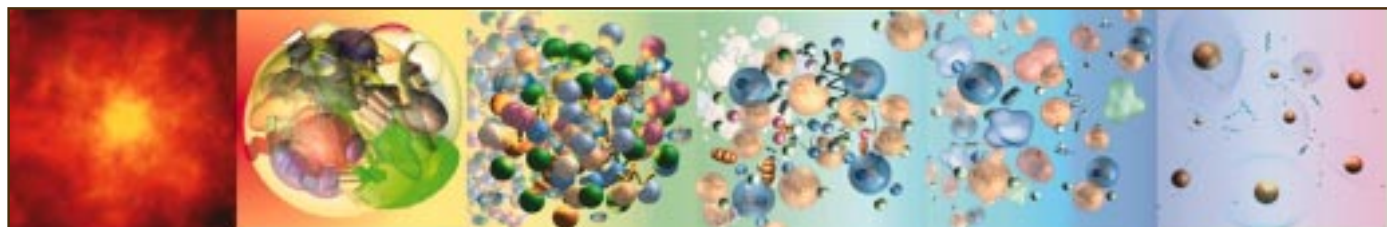
10^{-32} s

10^{-10} s

10^{-4} s

100 s

300000 lat



10^{-35} m
 10^{19} GeV

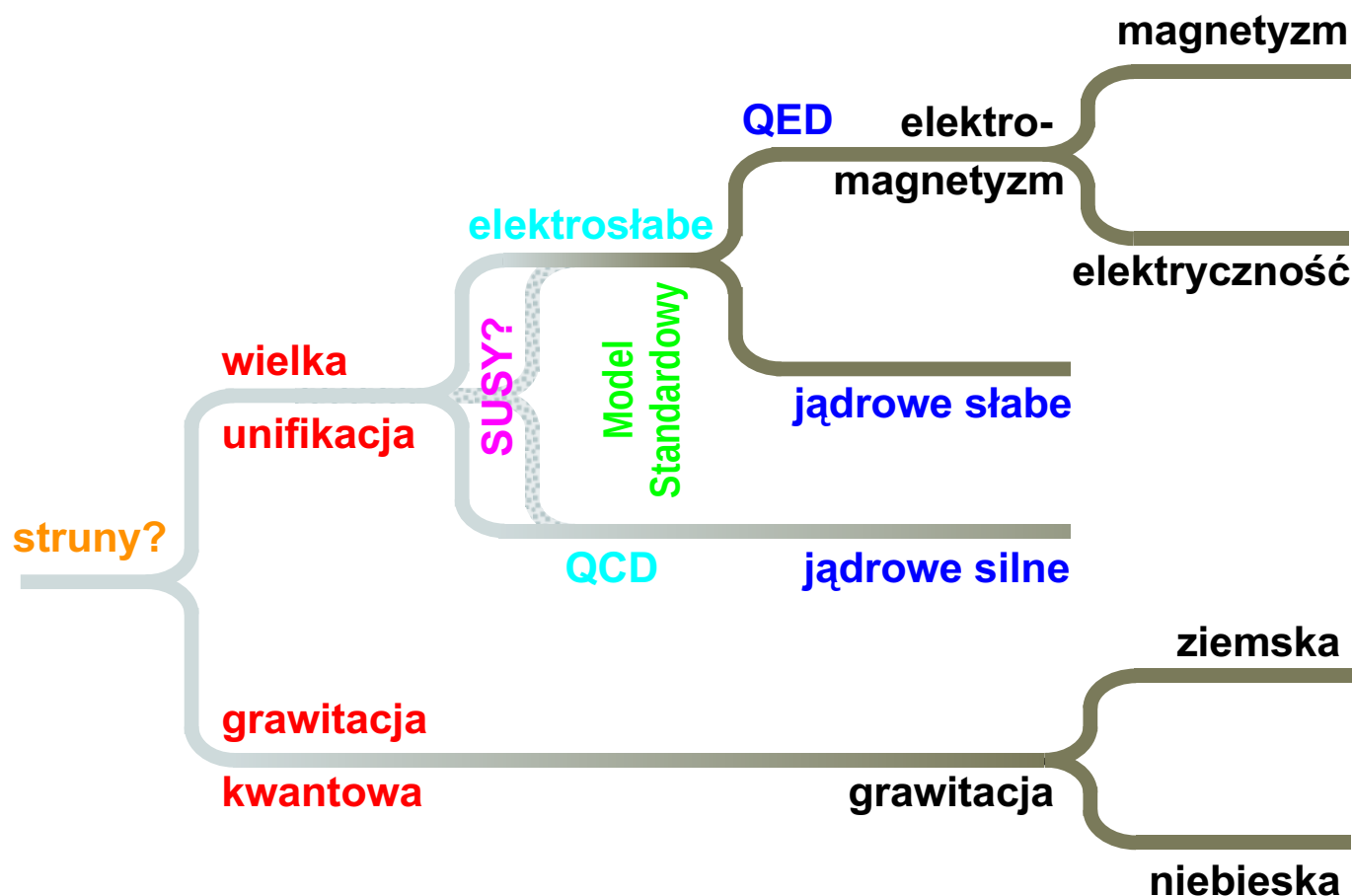
10^{-32} m
 10^{16} GeV

10^{-18} m
 10^2 GeV

10^{-16} m
1 GeV

10^{-15} m
1 MeV

10^{-10} m
10 eV



QED - elektrodynamika kwantowa

QCD - chromodynamika kwantowa

Krótką historia fizyki



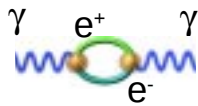
10^{-10}m

$<10\text{eV}$

$3 \cdot 10^7 \text{ lat}$

1900 ...

mechanika kwantowa,
fizyka atomowa



1940-50

elektrodynamika
kwantowa



10^{-15}m

MeV-GeV

3 min.

1950-65

jądra, hadrony,
teorie pola



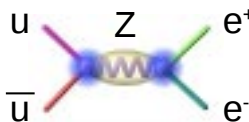
10^{-16}m

$>>\text{GeV}$

10^{-6}s

1965-75

kwarki, teorie pola
z cechowaniem



10^{-18}m

100 GeV

10^{-10}s

1970-83 SPS

QCD, unifikacja
elektrosłaba

3 leptyony	ν_e e	ν_μ μ	ν_τ τ
3 kwarki	u d	c s	t b
x3 kolory	R	G	B

1990 LEP

3 rodziny fermionów

1995 Tevatron

kwark top

pochodzenie
mas

10^{-19}m

10^3GeV

10^{-12}s

2005 LHC

higgs? SUSY?

rozpad
protonu?

10^{-32}m

10^{16}GeV

10^{-32}s

?? eksp. podziemne?

Wielka Unifikacja?

początek
Wszechświata

10^{-35}m

10^{19}GeV

10^{-43}s

?? ??

gravitacja kwantowa?
superstruny?

Sytuacja obecna

Model Standardowy (SM) dobrze opisuje oddziaływania elektroslabe i silne. Dotychczas nie zaobserwowano żadnych znaczących odchyleń od jego przewidywań (prócz zagadki **neutrino**).

Ma jednak wady:

- ~20 wolnych parametrów
- masy cząstek generowane są przez mechanizm Higgsa nie wyjaśniony wewnątrz SM
- cząstka Higgsa nie została (jeszcze?) odkryta
- SM nie wyjaśnia też
 - istnienia trzech pokoleń fermionów
 - mieszania pomiędzy pokoleniami

Strategia na najbliższą przyszłość:

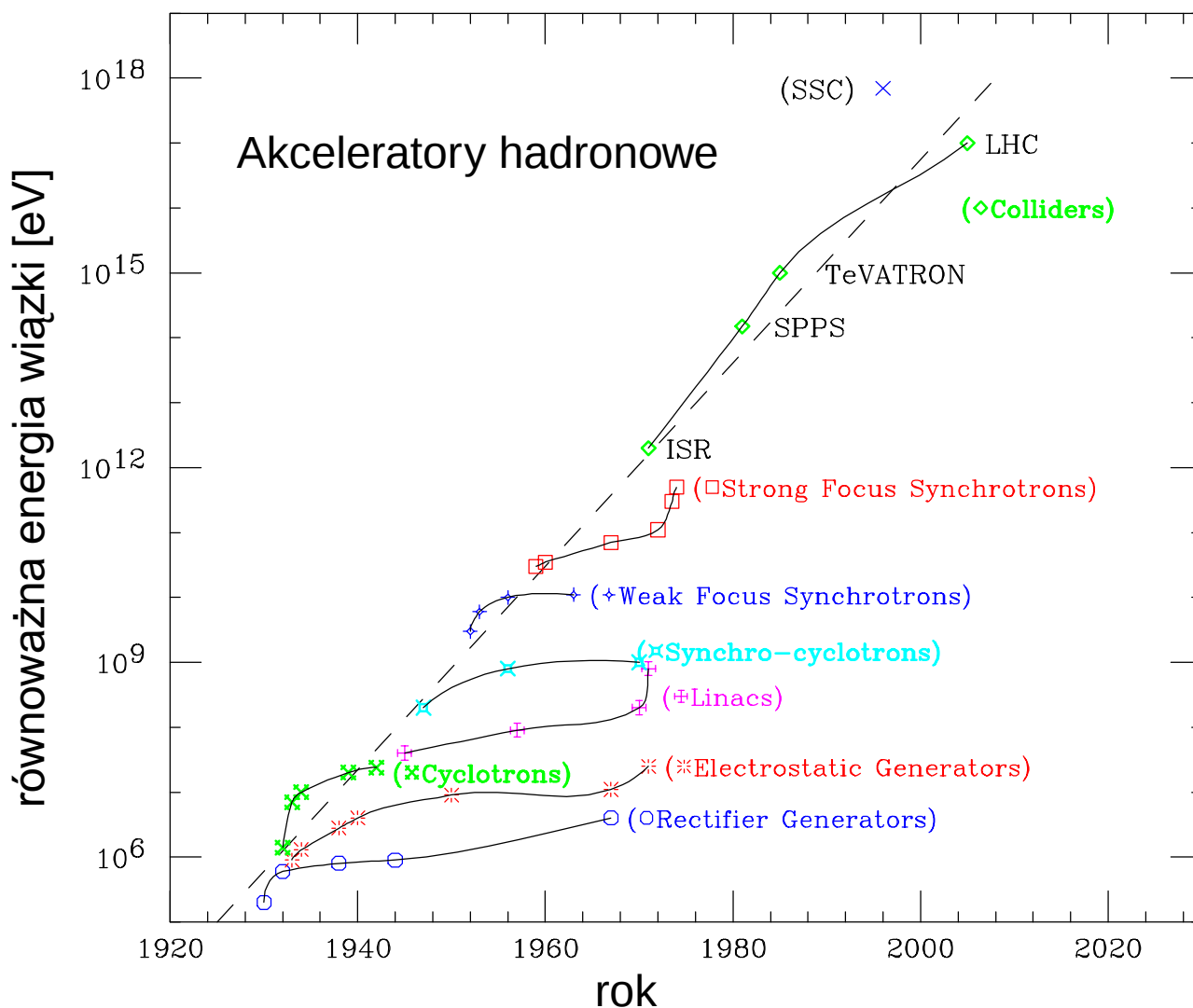
- znaleźć cząstkę Higgsa lub wykluczyć jej istnienie w obszarze dopuszczalnym przez teorię (~1 TeV)
- poszukiwać odchyleń od Modelu Standardowego
- poszukiwać nowych cząstek (~50 GeV — ~5 TeV)

Potrzebne narzędzia

- akcelerator
 - duża energia
 - szeroki zakres energii
 - duża świetlność
- detektory
 - uniwersalność (e, γ , μ , dżety, brakująca energia)
 - granularność (duża liczba cząstek)
 - szybkość (duża świetlność)

Akcelerator LHC

Wykres Livingstona

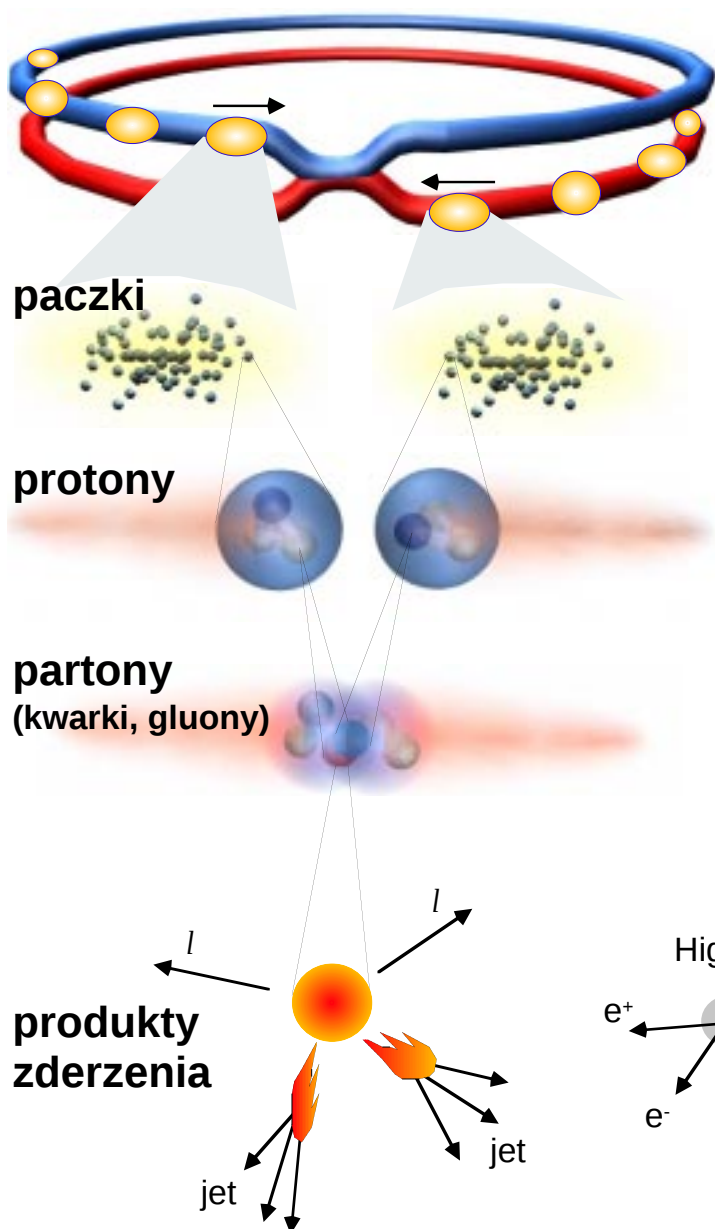


Użycie coraz to nowych technologii umożliwia szybki wzrost możliwości akceleratorów.

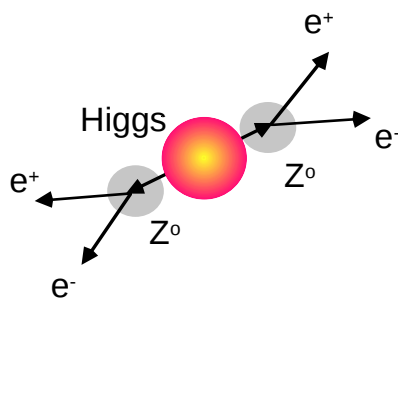
Zastosowanie magnesów nadprzewodzących w istniejącym tunelu LEP (CERN, Genewa) pozwoli zderzać protony z $\sqrt{s}=14$ TeV.



Zderzenia proton-proton w LHC



energia	7+7 TeV
obwód	27 km
pole mag.	8.4 T
światłość	$10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
# paczek	2×2875
#p / paczka	10^{11}
przecięcia paczek:	
częstość	40 MHz
odstęp	25 ns
czyli	7.5 m



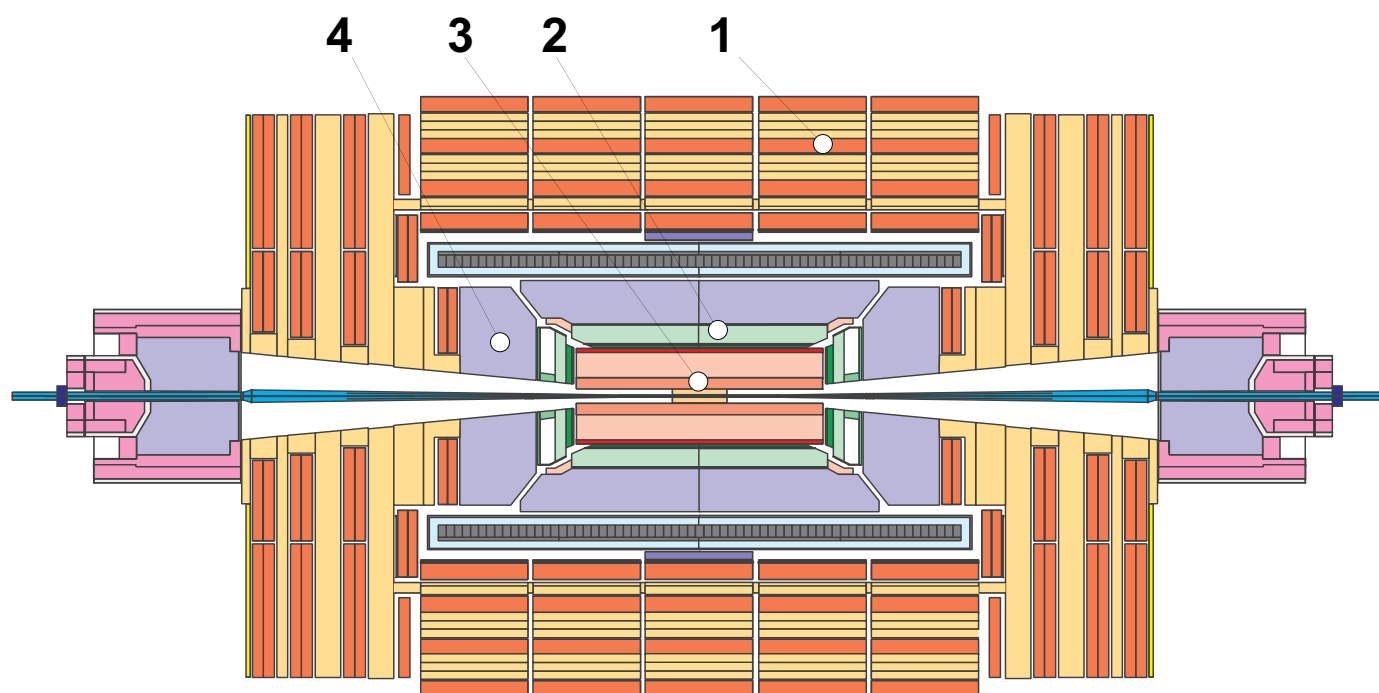
Przy nominalnej światłości w każdym przecięciu paczek zajdzie 10-20 zderzeń proton-proton.

Eksperyment CMS

Compact Muon Solenoid - to detektor przeznaczony do badania zderzeń proton-proton w akceleratorze LHC.

Podstawowe założenia projektowe:

1. **Bardzo dobry system mionowy**
– precyzja pomiaru, hermetyczność, redundancja
2. **Najlepszy możliwy kalorymetr elektromagnetyczny**
– zdolność rozdzielcza, jednorodność, granularność
3. **Wysokiej jakości detektor centralny**
– gęstość próbkowania, precyzja pomiaru
4. **Hermetyczny kalorymetr hadronowy**



Budowa detektora CMS

**SUPERCONDUCTING
COIL**

ECAL Scintillating PbWO_4
Crystals

CALORIMETERS

HCAL Plastic scintillator
copper
sandwich

IRON YOKE

TRACKER

Micro Strip Gas Chambers (MSGC)
Silicon Microstrips
Pixels

MUON BARREL

Drift Tube
Chambers (DT)

Resistive Plate
Chambers (RPC)

MUON ENDCAPS

Cathode Strip Chambers (CSC)
Resistive Plate Chambers (RPC)

Waga 12 500 ton
Średnica 15 m
Długość 22 m
Pole magn. 4 Tesle

Poszukiwanie higgsa

Model Standardowy opiera się na założeniu, że istnieje cząstka Higgsa, lżejsza niż ~ 1 TeV.

Eksperymentalnie wykluczono już $M_H < 92$ GeV.

Jeżeli higgs nie zostanie odkryty przy największej energii LEP (200 GeV), to do przeszukania pozostanie obszar $98 < M_H < 1000$ GeV.

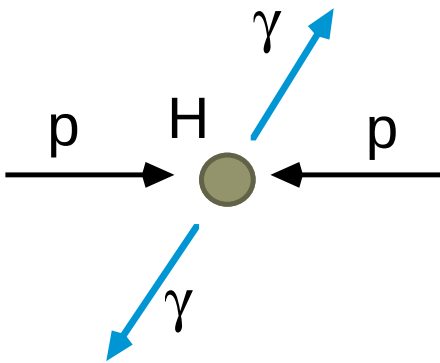
Optymalna strategia poszukiwania higgsa w LHC zależy od jego masy:

$80 < M_H < 140$ GeV $H \rightarrow \gamma\gamma$

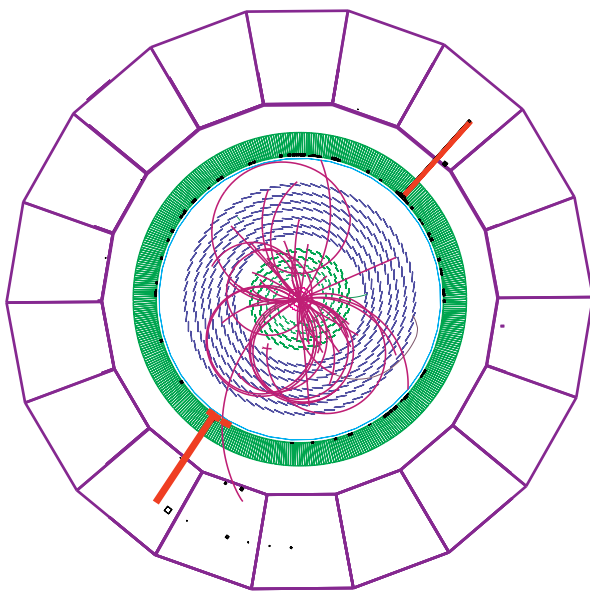
$130 < M_H < 700$ GeV $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4$ leptony

$500 < M_H < 1000$ GeV $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 2$ leptony + 2 dżety

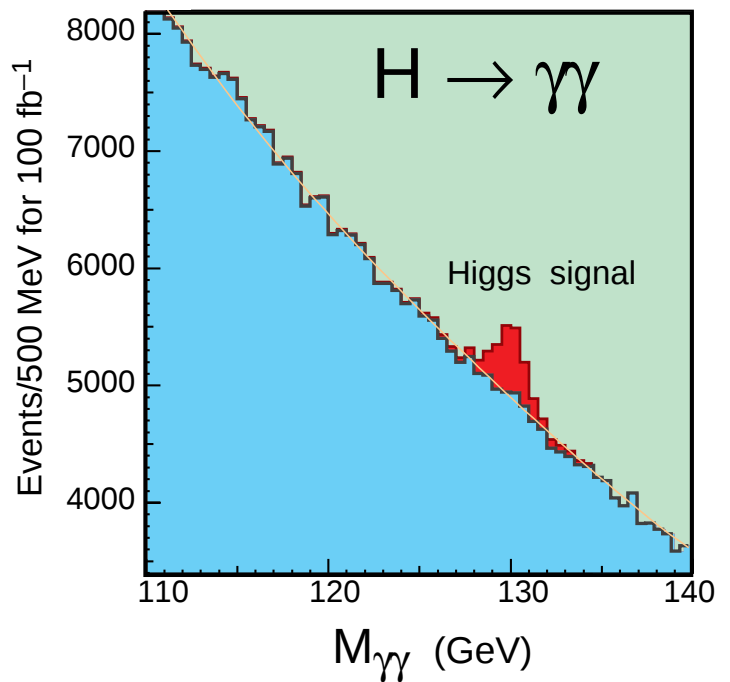
$$H \rightarrow \gamma\gamma \quad (80 < M_H < 140 \text{ GeV})$$



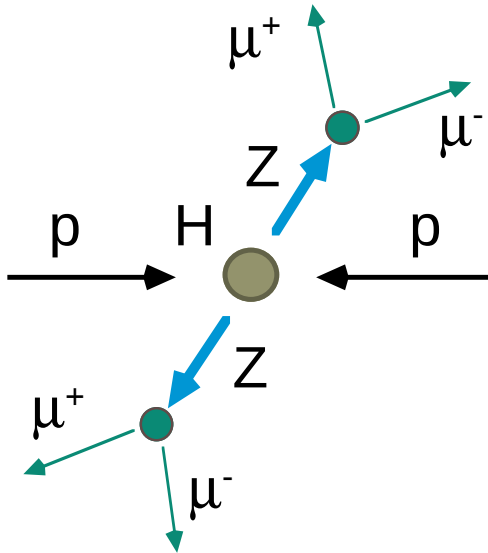
Precyzyjny pomiar energii i kierunku fotonów pozwala zrekonstruować masę $M_H \sim 100 \text{ GeV}$ z dokładnością do 1% i wydobyć sygnał spod olbrzymiego tła.



$M_{\text{Higgs}} = 100 \text{ GeV}$



$H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4 \text{ leptony} \quad (130 < M_H < 500 \text{ GeV})$

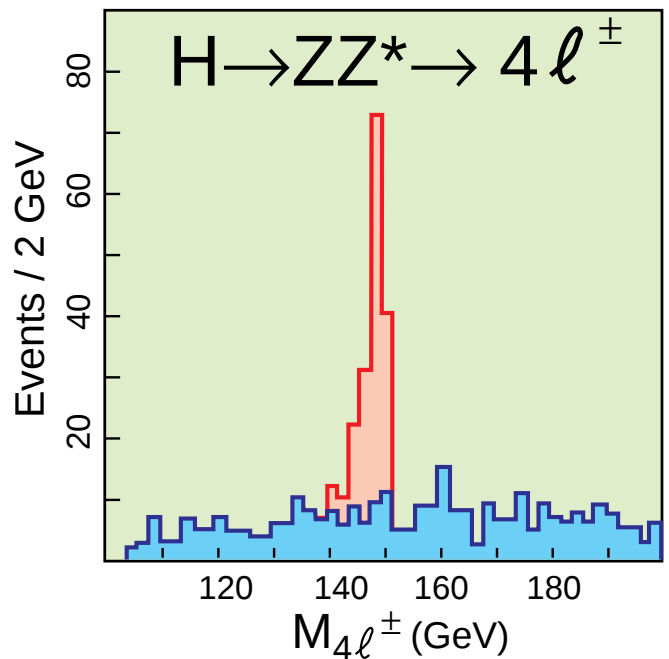
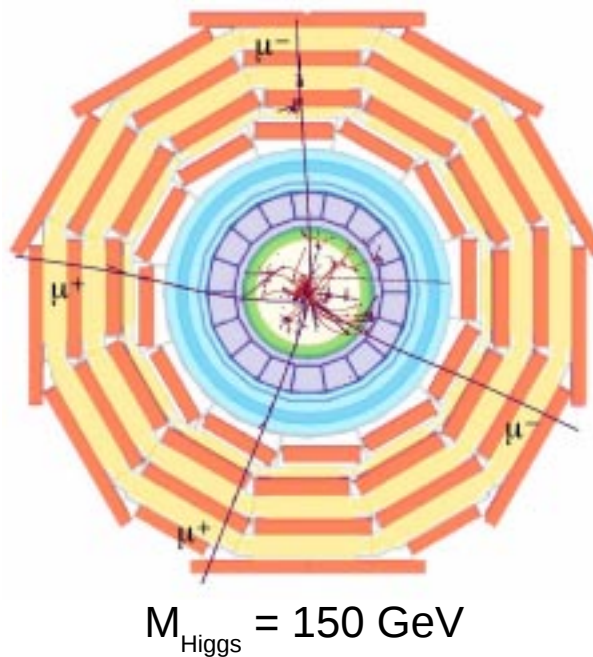


Przypadku z czterema wysokoenergetycznymi leptonami (e lub μ) nie da się nie zauważyć.

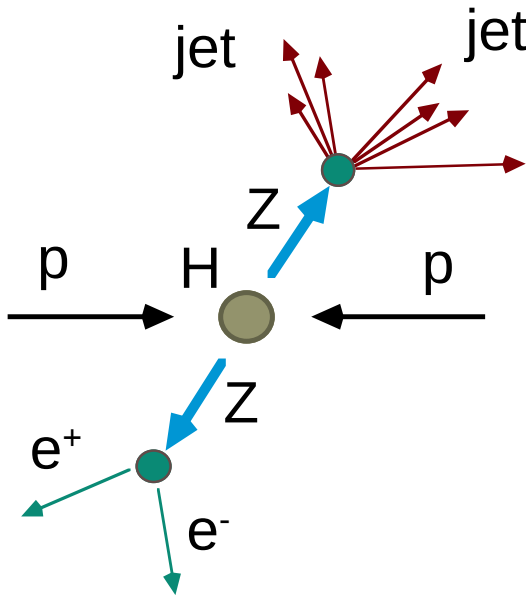
Zwłaszcza pewna identyfikacja mionów ("złoty kanał") pozwala niemal całkowicie wyeliminować tło.

Precyzja:

$$\sigma (M_H \sim 170 \text{ GeV}) = 1 \text{ GeV}.$$



$H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow \text{leptony} + \text{dżety}$ ($130 < M_H < 500 \text{ GeV}$)



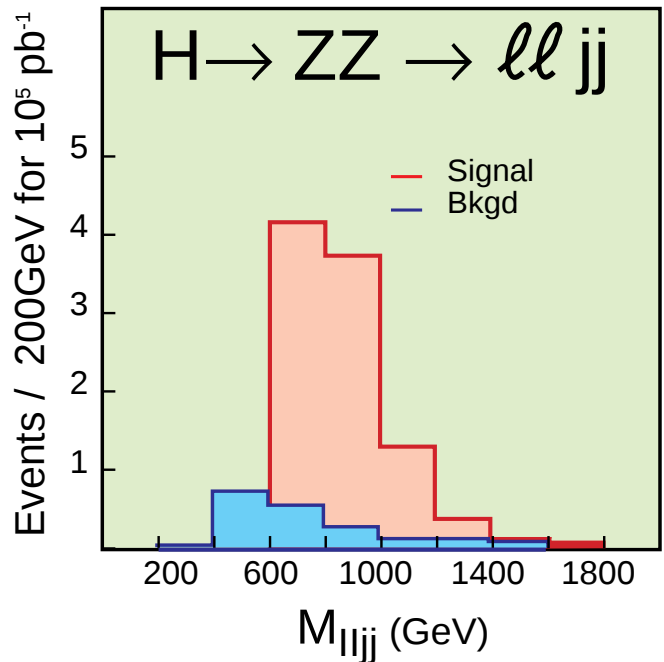
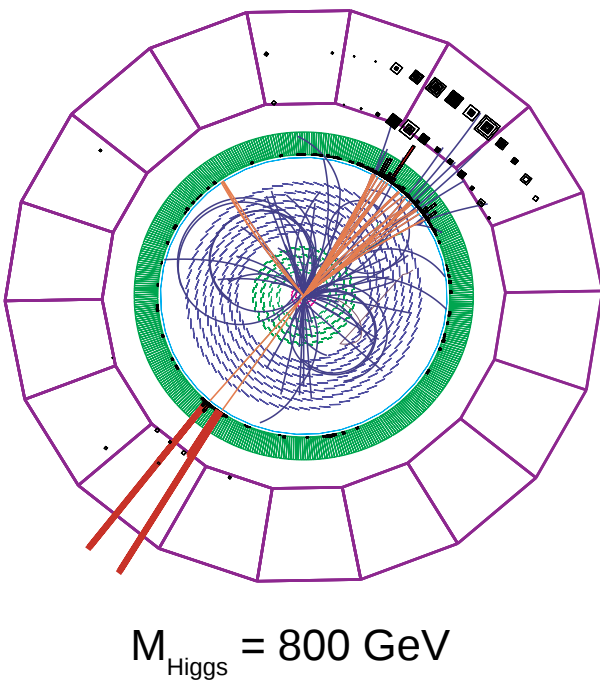
W reakcjach:

$$H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow \ell^+ \ell^- jj$$

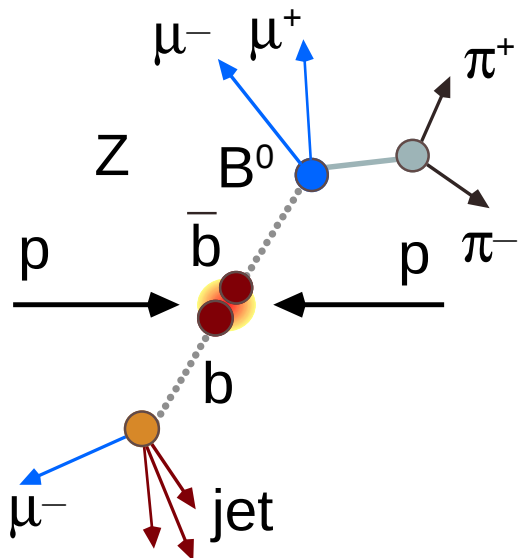
$$H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow \ell^+ \ell^- \nu \nu$$

$$H \rightarrow W^+ W^- \rightarrow \ell^\pm \nu jj$$

kalorymtr hadronowy mierzy energię dżetów (j) i brakującą energię poprzeczną E_t^{miss} , charakterystyczną dla neutrin (ν).



Łamanie CP



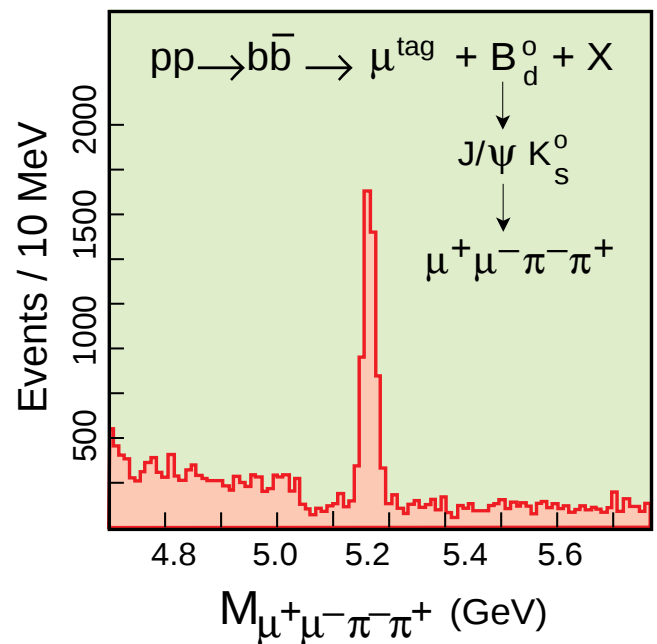
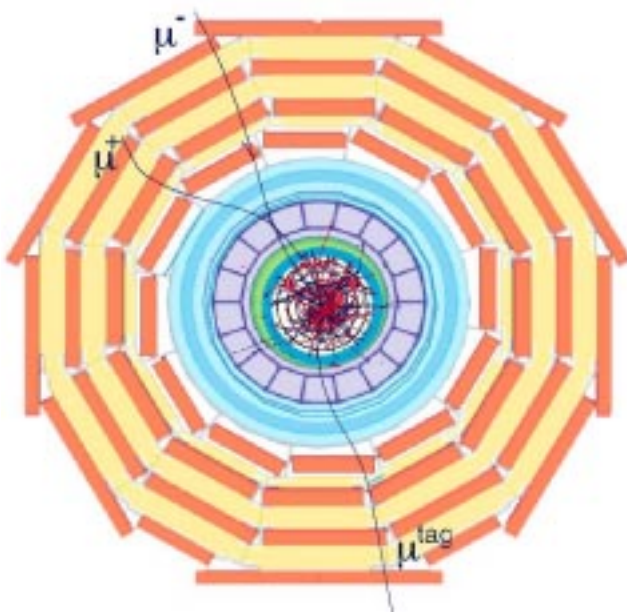
Łamanie CP najsilniej powinno przejawiać się w różnicy częstości rozpadów

$$B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0 \quad \text{ i } \quad \bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$$

gdzie

$$J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-, \quad K_S^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$$

Można je rozróżnić rekonstruując topologię przypadku.



Supersymetria

Teorie supersymetryczne zakładają, że każda znana (dzisiaj) cząstka ma (jeszcze) nieodkrytego partnera:

fermion (spin połówkowy) $\Leftrightarrow$ **bozon** (spin całkowity)

Atrakcyjność supersymetrii:

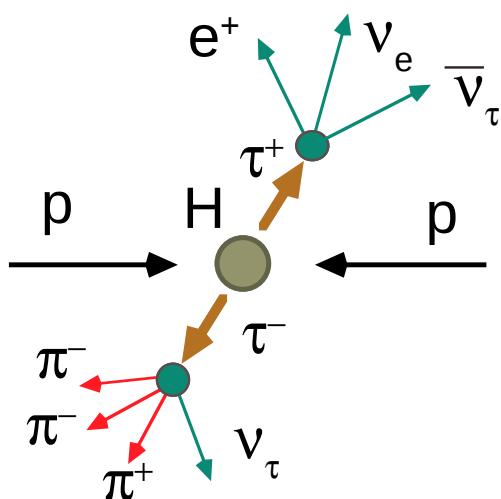
- elegancja symetrii
- wyjaśnienie małej masy higgsa
- krok w stronę Wielkiej Unifikacji
- możliwość wyjaśnienia ciemnej materii we Wszechświecie (**neutralino**)

Najprostszy z modeli,

"Minimal Supersymmetric Standard Model" (MSSM),
przewiduje istnienie pięciu bozonów Higgsa:

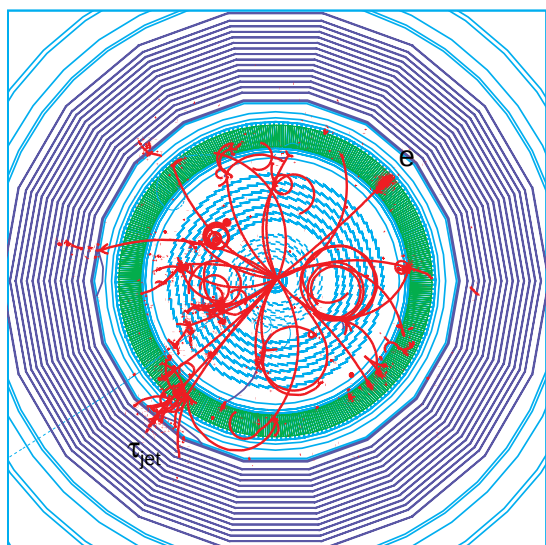
h^0 , H^0 , A^0 , H^+ , H^-

Supersymetryczne higgasy



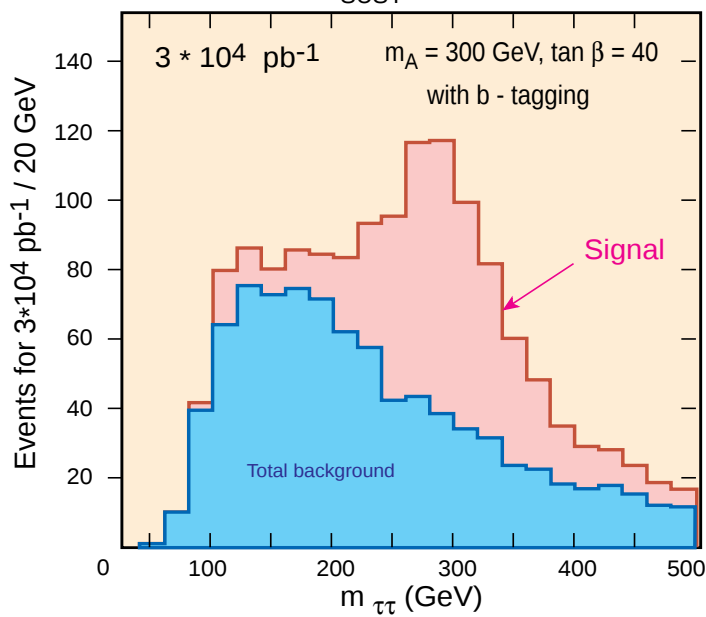
Poszukiwać ich można metodami podobnymi jak w przypadku H_{MS} .

Pojawiają się jednak nowe możliwości, np. rozpad higgasa na 2 leptyony.

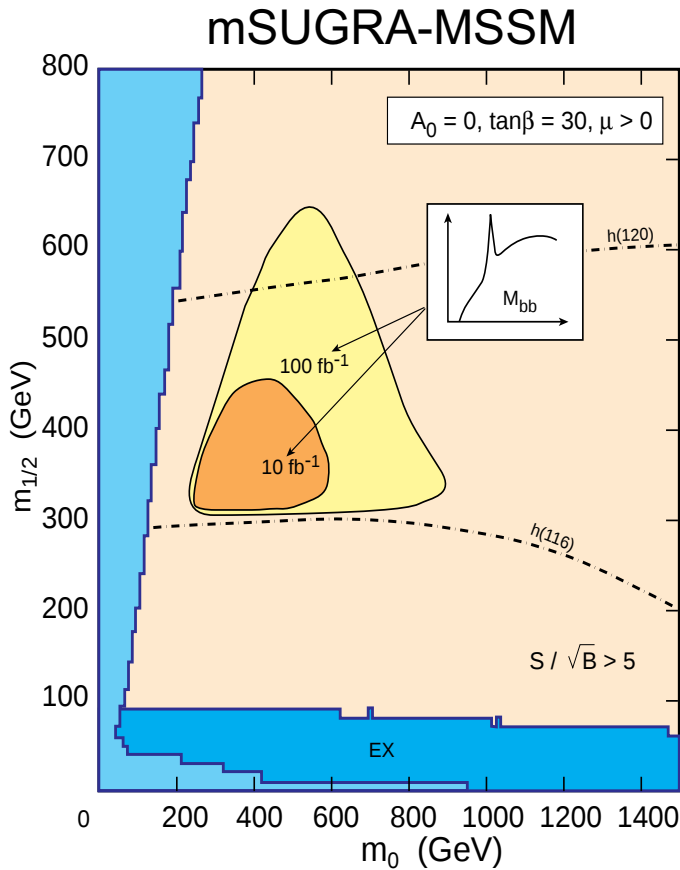


$H \rightarrow \tau\tau \rightarrow e + \tau_{\text{jet}}$ ("3-prong")

$A^0, H^0, h^0 \rightarrow \tau^+\tau^- \rightarrow e/\mu + \tau_{\text{jet}} + E_{\text{t}}^{\text{miss}}$
in $b\bar{b}H_{\text{SUSY}}$ final states



Możliwości odkrycia supersym. higgsa

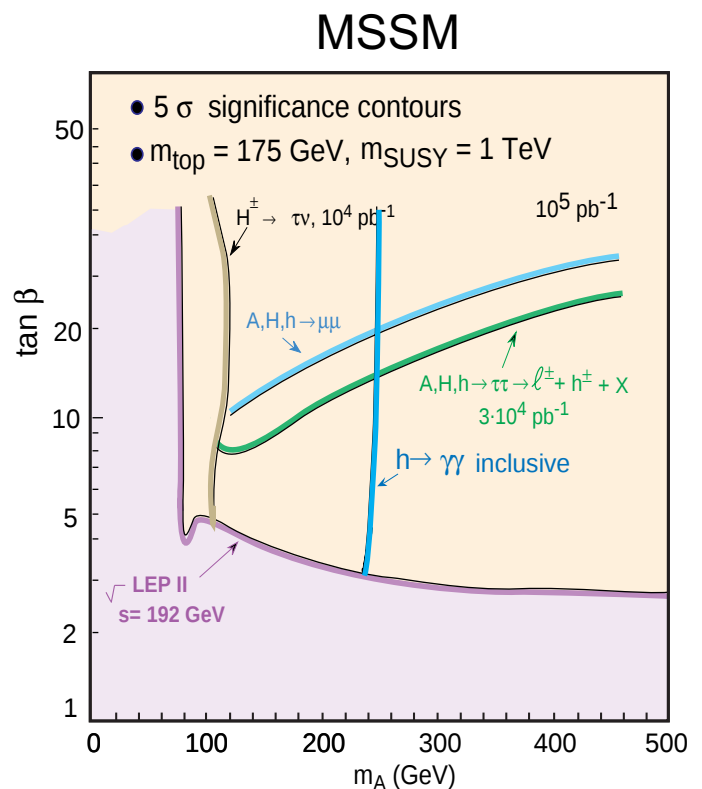


Poszukiwanie higgsa w różnych reakcjach pozwala pokryć znaczną część przestrzeni parametrów podstawowych modeli supersymetrycznych.

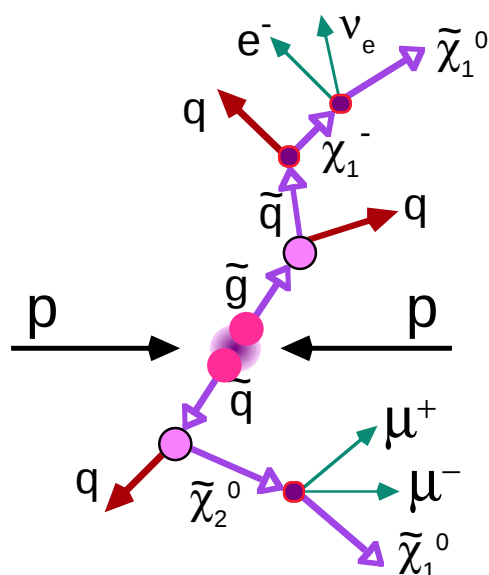
Założmy, że cząstka może być odkryta jeżeli sygnał **S** przekracza pięciokrotnie niepewność wielkości tła $\sqrt{B}$.

B - liczba przypadków tła.

Kontury $S/\sqrt{B}=5$ dla h, H, A zaznaczono na wykresach.



Supercząstki



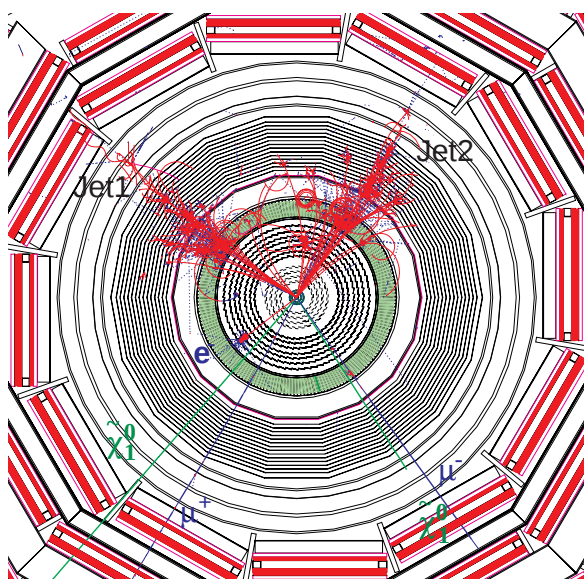
Istnienie supercząstek powinno przejawiać się bogactwem spektakularnych procesów z brakującą energią, obfitujących w wysokoenergetyczne dżety i leptyony o nietypowych spektrach.

Przykład:

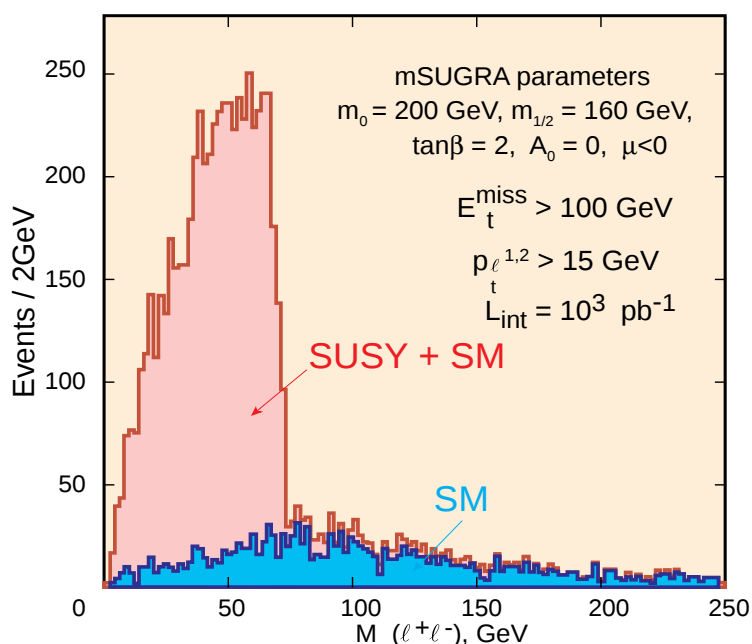
"urwany" rozkład $M_{\ell\ell}$ w rozpadzie

$$\chi_2^0 \rightarrow \chi_1^0 \ell^+ \ell^-$$

Inclusive $\ell^+ \ell^- + E_t^{\text{miss}}$ final states

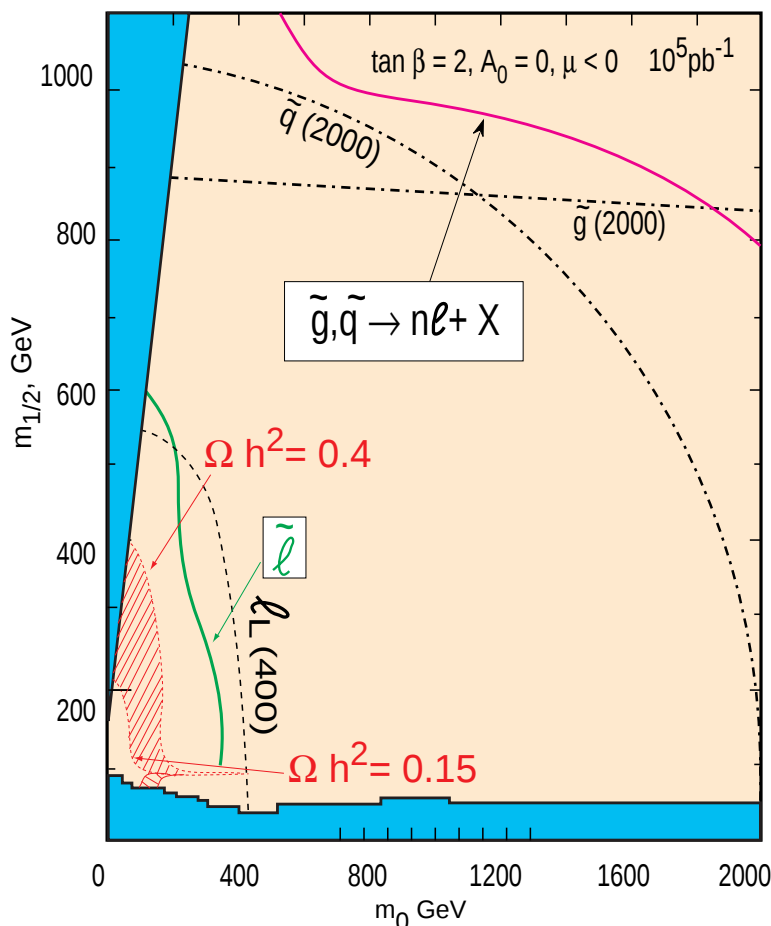


SUSY event with
3 leptons + 2 Jets signature



Możliwości odkrycia supercząstek w LHC

Zakres parametrów mSUGRA
pokrywany przez LHC

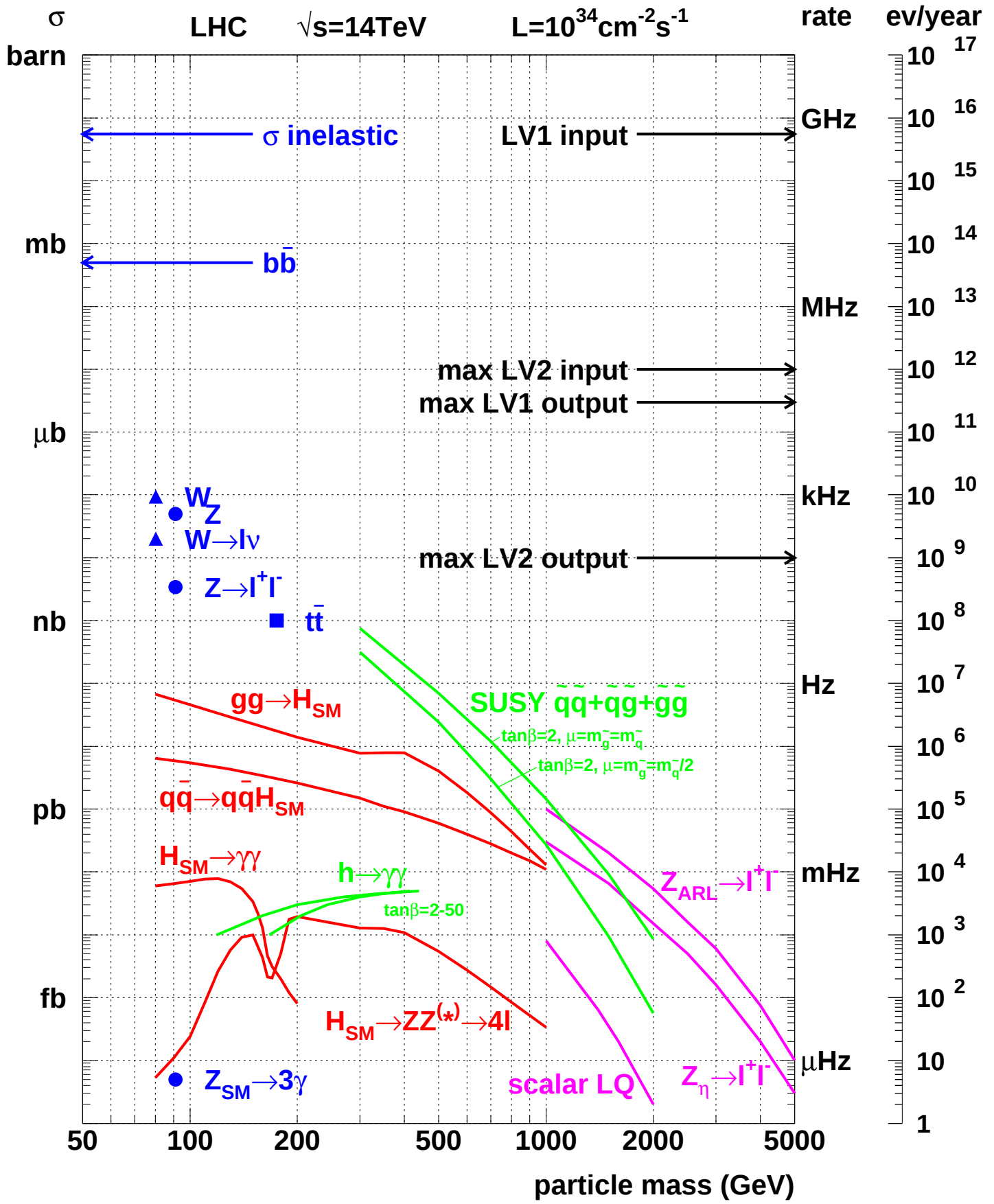


W LHC można
będzie poszukiwać
skwarków i gluin
do $M \sim 2.2$ TeV,
sleptonów
do $M \sim 350$ GeV.

Można też będzie
przebadać zakres
masy **neutralina**,
w którym może ono
stanowić zimną,
ciemną materię
Wszechświata:

$$0.15 < \Omega h^2 < 0.4$$

**Supersymetria, jeżeli istnieje,
będzie niemal na pewno odkryta w LHC.**



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?

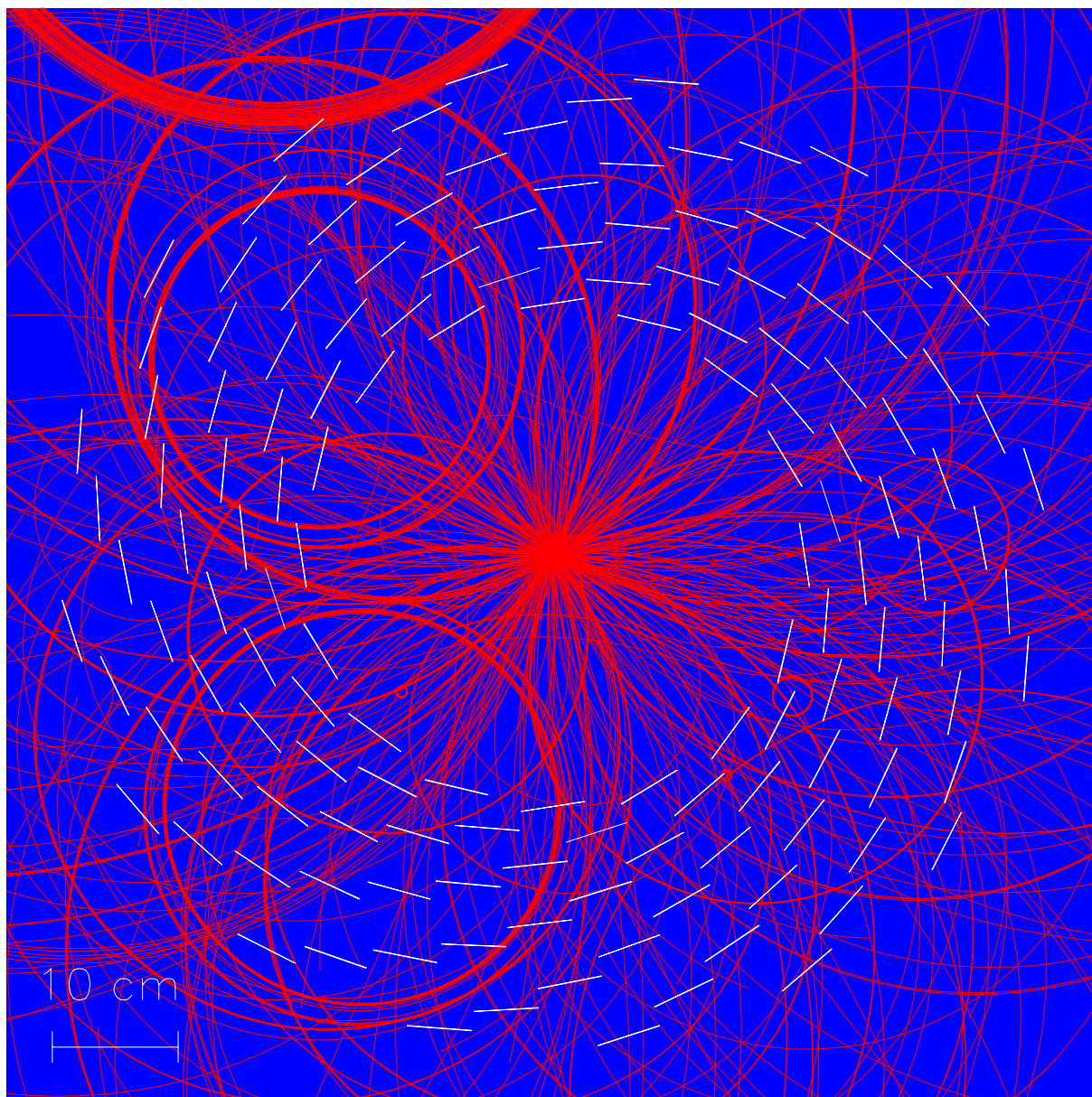
- typowa igła — 5 mm^3
- typowy stóg siana — 50 m^3

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

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

Łamigłówka

18 nałożonych zderzeń pp,
widzianych przez wewnętrzną część krzemowego detektora
mikropaskowego.
Wśród nich rozpad cząstki Higgsa na 4 miony.

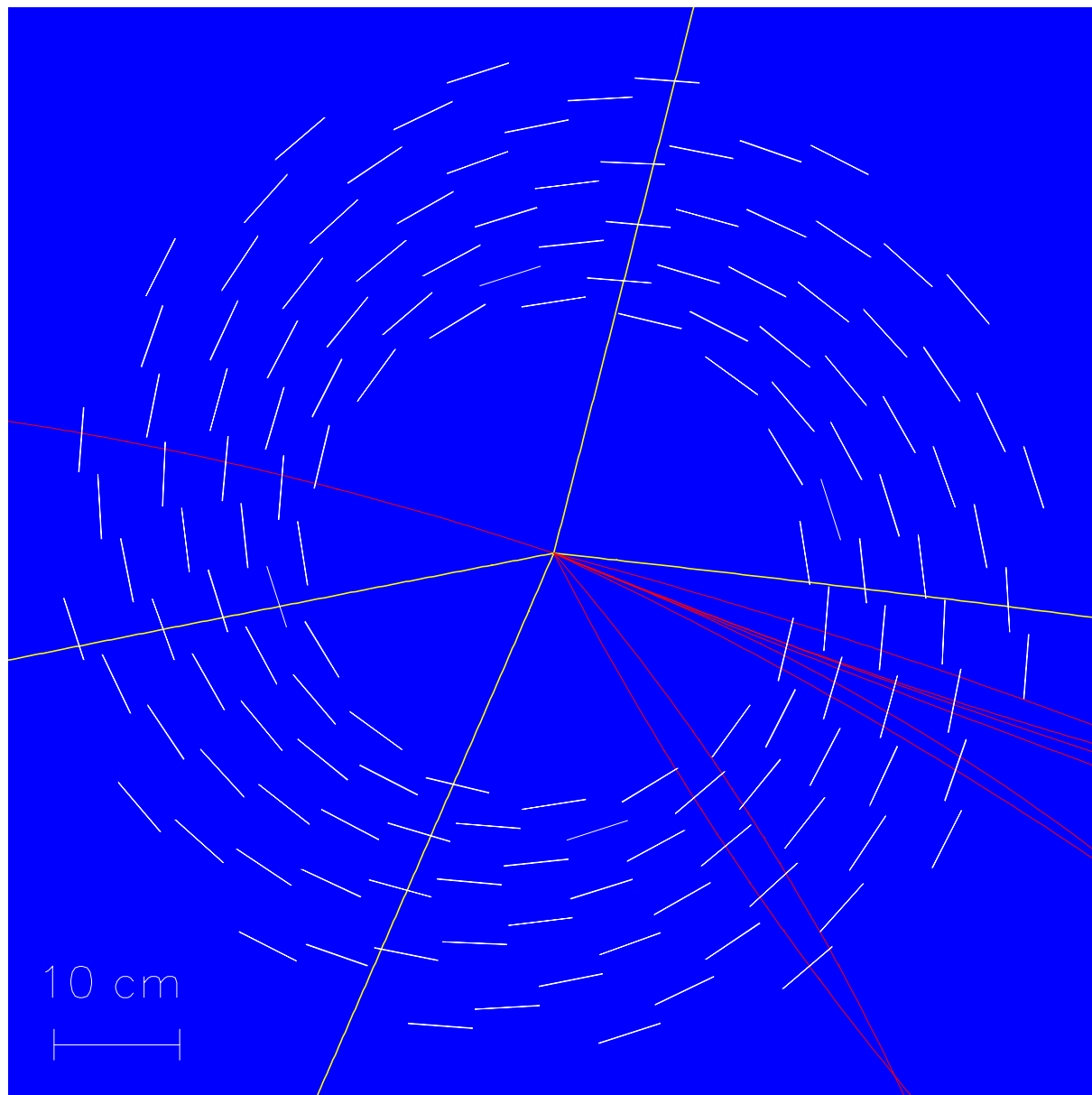


Znajdź 4 proste ślady.

Rozwiązanie łamigłówki

Zrekonstruowane ślady o $p_t > 2 \text{ GeV}$.

Wśród nich dobrze widoczne 4 miony z rozpadu Higgsa.



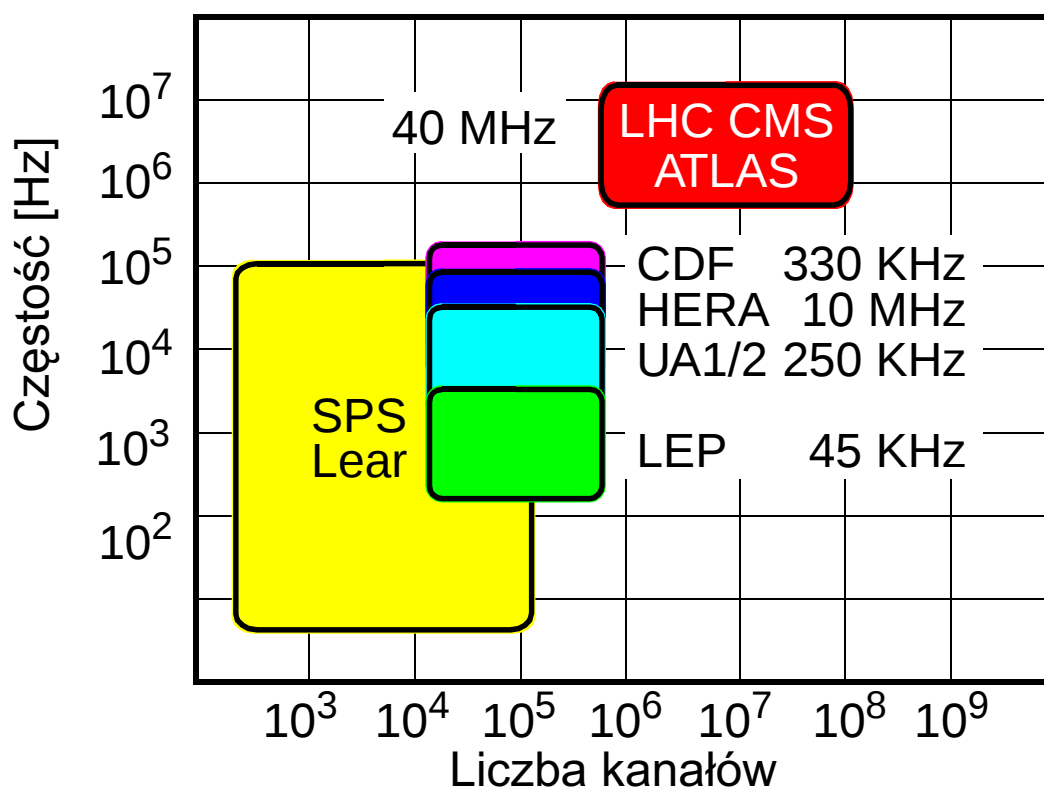
Rozwiązanie możliwe jeśli zajętość detektora $\sim 1\%$

→ powierzchnia mikropaska $\sim 1 \text{ mm}^2$

→ $> 10^7$ kanałów odczytu

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)

Ciężkie jony w CMS

CMS to także detektor ciężkich jonów

	p p	O O	Ca Ca	Nb Nb	Pb Pb
A	1	16	40	93	207
$\mathcal{L}$ [cm ⁻² s ⁻¹]	10 ³⁴	3.2·10 ³¹	2.5·10 ³⁰	9·10 ²⁸	10 ²⁷
f [kHz]	550 000	32 000	5200	400	7.6

zajętości	20 × p p	Pb Pb central
cząstek/[η]	20 × 5	8000
pixel r=7cm	0.024 %	0.53 %
pixel r=11cm	0.024 %	0.28 %
MSGC r=1m	1 %	10 %
kalorymetry	5 %	100 %

Elastyczność trygera i systemu zbierania danych CMS pozwala na rejestrację zderzeń ciężkich jonów.

Dużo większa niż w przypadku pp zajętość detektora jest kompensowana przez mniejszą częstość zderzeń.

Redukcja on-line liczby przypadków i objętości danych zapewnia podobną jak dla pp wielkość przypadku (~1 MB) i częstość zapisu (~100 przypadków/s).

System wyzwalania (tryger)

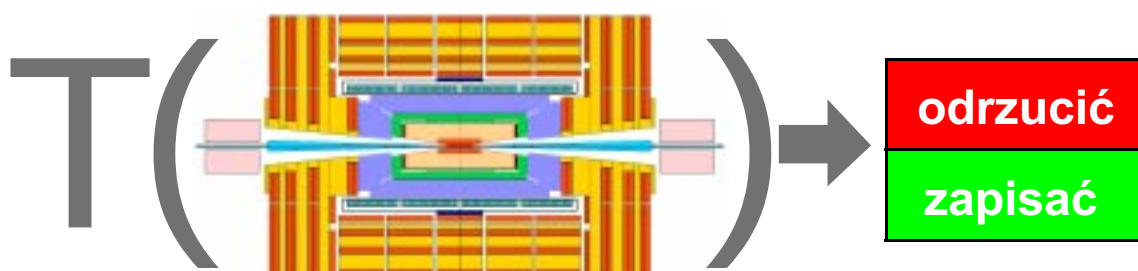
Nowoczesne systemy pamięci masowej pozwalają zapisywać ~ 100 MB/s.

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

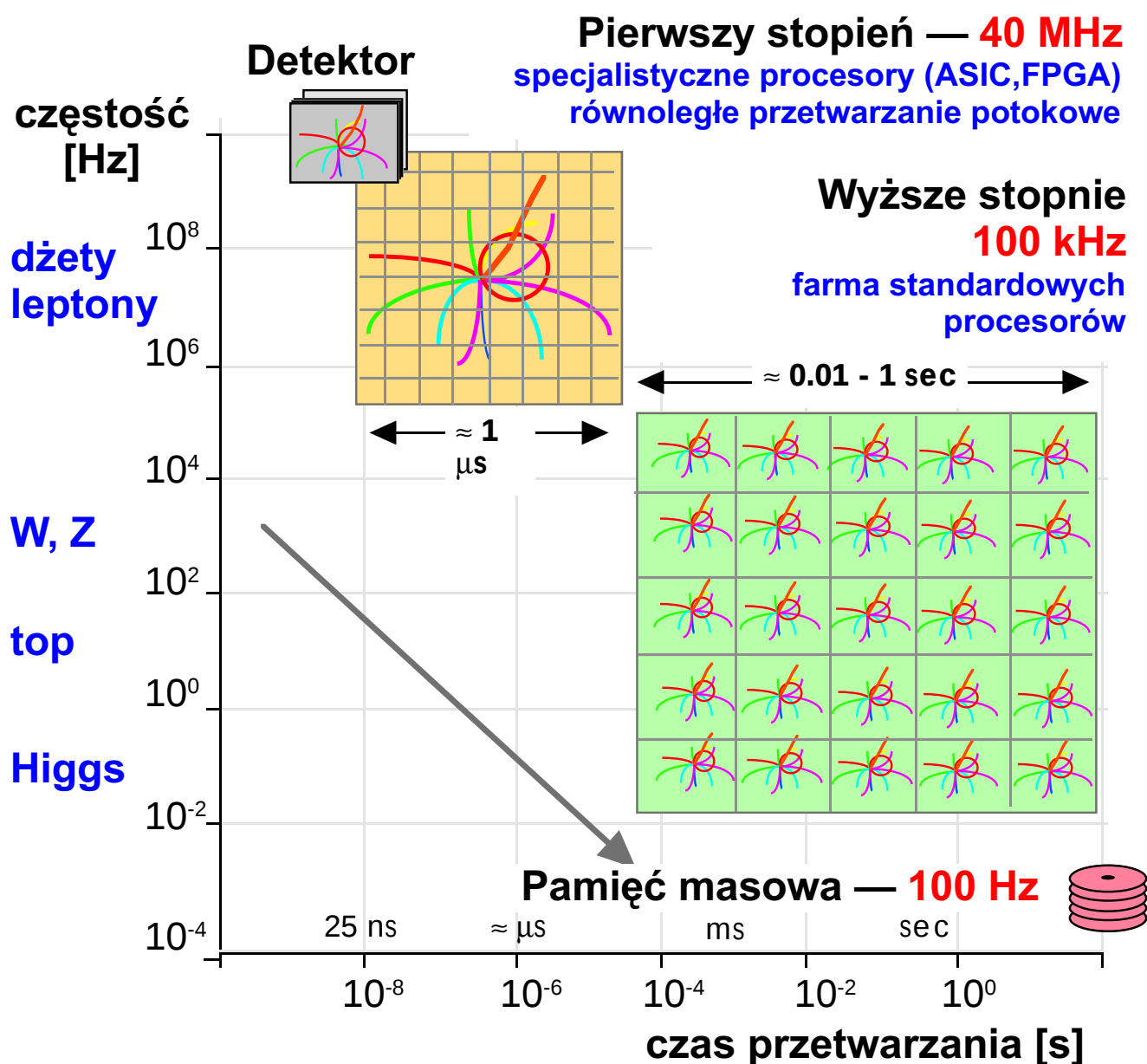


Ponieważ nie wszystkie dane są natychmiast dostępne a funkcja jest skomplikowana, $T(.)$ jest obliczane w kolejnych przybliżeniach zwanych

stopniami trygera

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

Selekcja przypadków



Liczba procesorów w farmie CMS jest porównywalna z liczbą wszystkich stacji roboczych i komputerów osobistych w CERNie w 1995 roku (~4000).

Przetwarzanie potokowe

Tryger musi zanalizować dane z **każdego zderzenia**

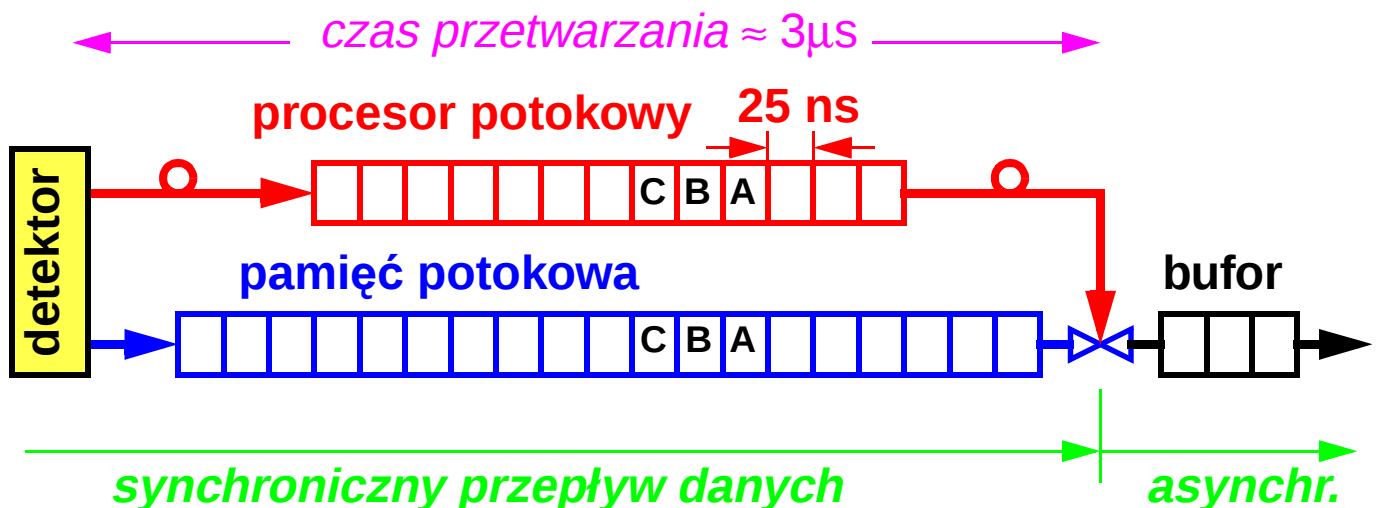
- **co 25ns** musi zapisać decyzja czy je zapisać

Jej wypracowanie wymaga jednak dłuższego czasu.

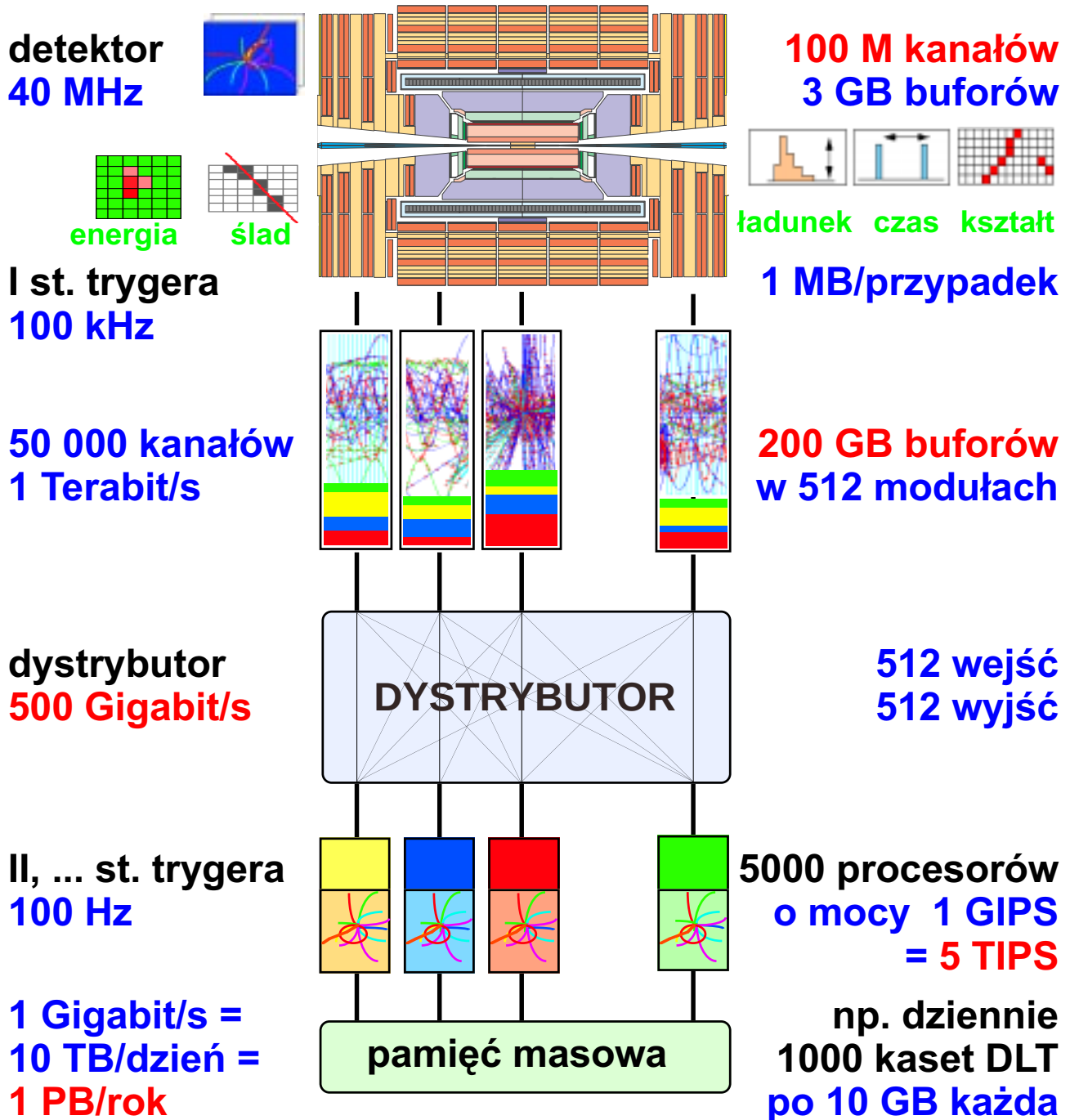
Rozwiązanie problemu:

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 $\sim 3\mu s$, a wyniki pojawiają się na jego wyjściu co 25ns;
- pełne dane czekają na decyzję trygera, płynąc synchronicznie w pamięci potokowej.



Przepływ danych w CMS



1 TB = 1 terabajt = 10^{12} bajtów
1 PB = 1 petabajt = 10^{15} bajtów

1 GIPS = 10^9 instrukcji/s
1 TIPS = 10^{12} instrukcji/s

Dystrybutor

Dystrubutor

to "górką rozrządową" systemu zbierania danych.

Jego zadaniem jest zebranie danych dotyczących danego przypadku ze wszystkich części detektora i przesłanie ich do określonego procesora.

moduły odczytu różnych części detektora



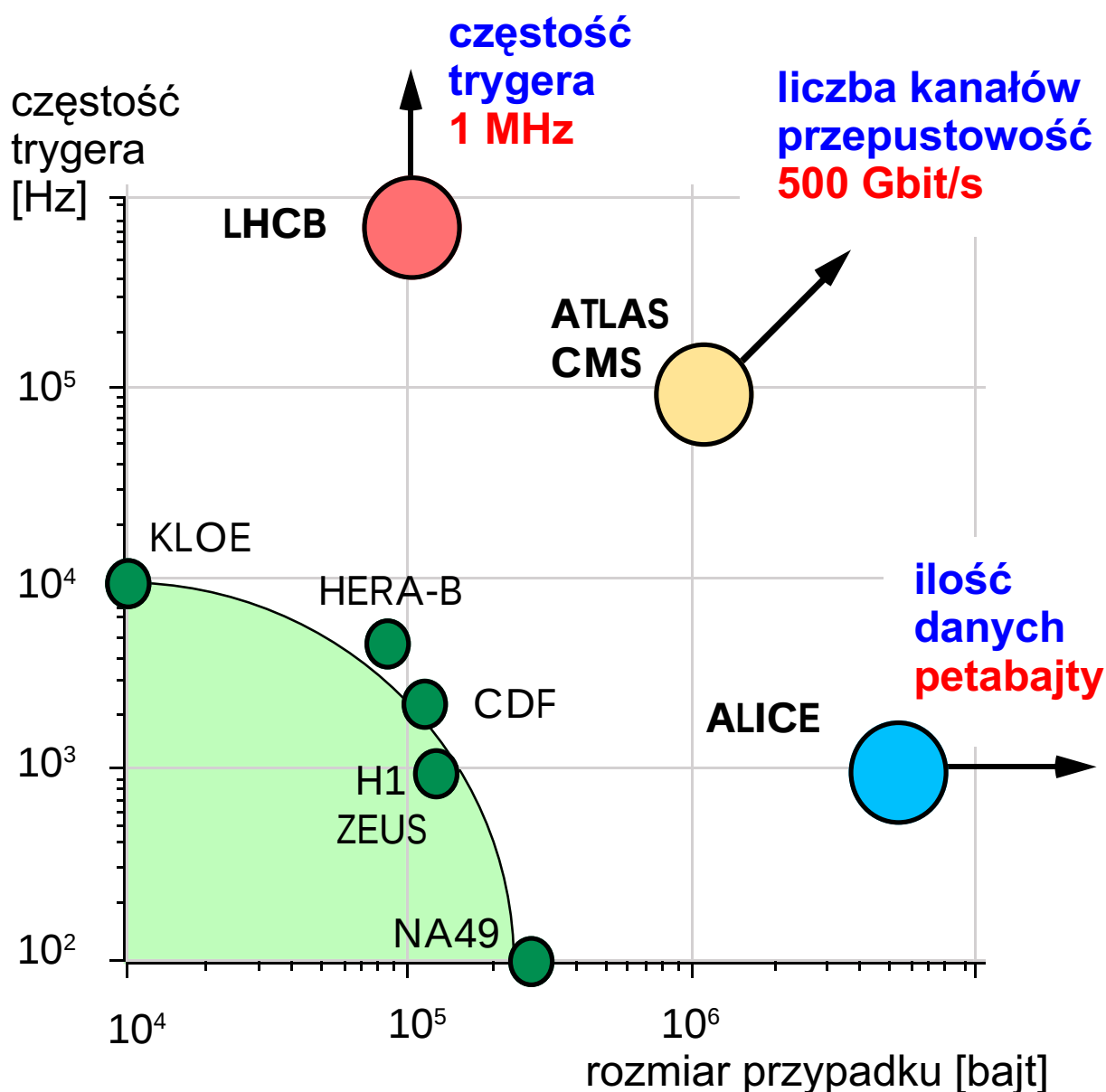
farma procesorów

przepustowość:

500 Gigabit/s

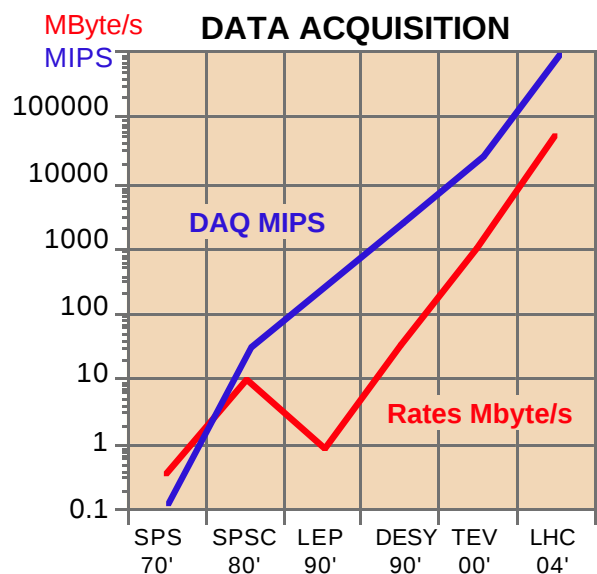
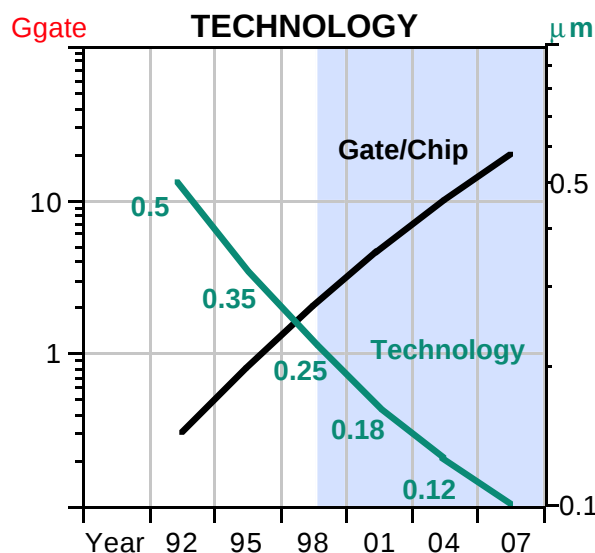
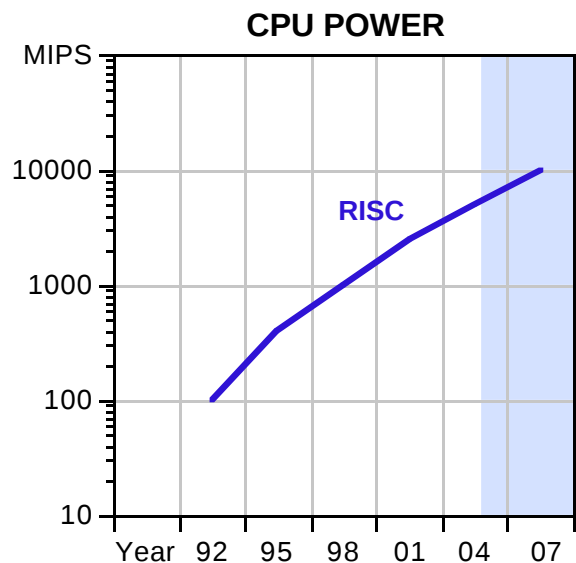
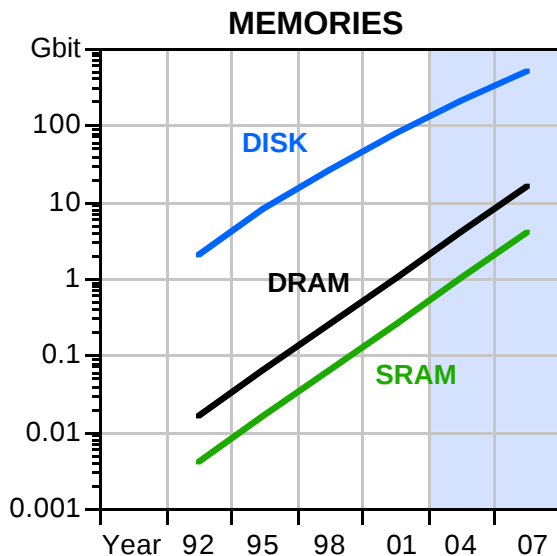
jest równoważna ilości danych przesyłanych przez całą dzisiejszą telekomunikację europejską.

Ewolucja systemów zbierania danych



Ilość danych przepływających przez system odczytu CMS w ciągu 5 minut pracy LHC jest porównywalna z całą ilością danych przesłanych przez wszystkie sieci w CERNie w ciągu całego 1995 roku.

Rozwój technologii

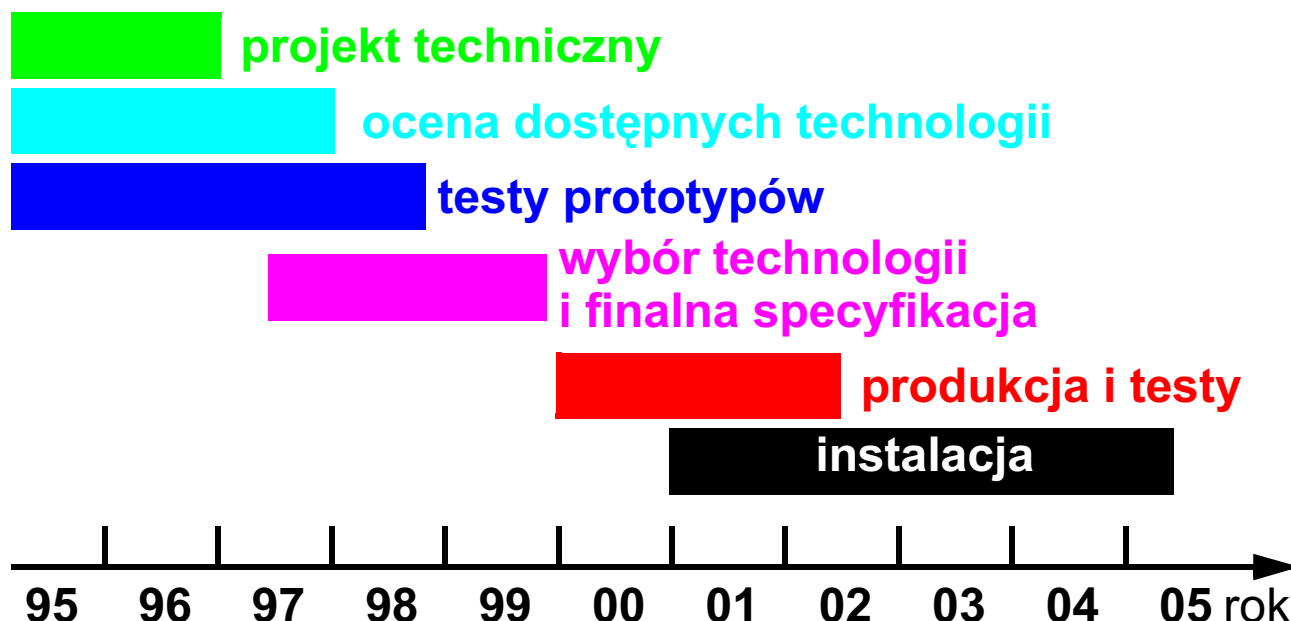


Moc obliczeniowa procesorów wzrasta 10 razy co 5 lat

Pojemność pamięci wzrasta 4 razy co 2 lata

Cała moc obliczeniowa CERNu w 1980 roku była mniejsza niż jednego współczesnego komputera osobistego.

Harmonogram prac



Skala przedsięwzięcia wymaga aby projekt techniczny był gotowy na **8 lat** przed uruchomieniem eksperymentu!

Aby urządzenie nie było przestarzałe już w momencie oddania do użytku, w czasie projektowania należy przewidzieć i uwzględnić możliwy rozwój technologii.

Cały system wyzwala i zbiera danych CMS zawiera ponad 10 000 modułów elektronicznych.

Jeżeli moduł psułby się średnio raz na 3 lata, codziennie należałoby wymieniać 10 modułów.

Podsumowanie

Próba odkrycia “Nowej Fizyki” wymaga
sięgnięcia do bardzo **wysokich energii**
i poszukiwania niezwykle **rzadkich zjawisk**

14 TeV
 $\sigma \sim fb$

Połączenie tych dwóch wymagań stanowi wyzwanie
dla najnowocześniejszych technologii
informatycznych i telekomunikacyjnych:

wysoka energia:

- duża liczba produkowanych cząstek $\sim 100/\text{przypadek}$
- precyzyjny pomiar
w szerokim zakresie dynamicznym $\sim 100\mu/10m$

poszukiwanie rzadkich zjawisk:

- olbrzymia częstość oddziaływań $\sim 1 \text{ GHz}$
- nakładanie się oddziaływań $10-20$
- mały stosunek sygnału do tła $1:10^{11} - 1:10^{16}$

wynikające z powyższego wymagania technologiczne:

- sterowanie przepływem olbrzymiej ilości danych 500 Gbits/s
- analiza przypadków w czasie rzeczywistym
 $\text{selekcja } 1:10^7$
- gigantyczna moc obliczeniowa 5 TIPS
- super-pojemna pamięć masowa 1 PB/rok

**Spełnienie tych wymagań przez detektory CMS i ATLAS
pozwala żywić nadzieję na odkrycie “Czegoś Nowego” w LHC**

Reklama

Jeżeli pociąga cię

- fizyka przy najwyższych energiach
- dostęp do najświeższych danych
- współpraca z największym laboratorium świata CERN

zgłoś się do nas!

Grzegorz Wrochna

wrochna@fuw.edu.pl

<http://cmsdoc.cern.ch/~wrochna/>

pokoj 108 w pawilonie IPJ, tel. 254

Prowadzimy

- trzecią pracownię
- pracownię przedmagisterską
- prace magisterskie
- doktoraty

w zakresie

- fizyka CMS
- symulacja detektora CMS
- oprogramowanie symulacyjne i rekonstrukcyjne CMS

Razem

- znajdziemy higgosa
- złamiemy CP w sektorze b
- sprawdzimy supersymetrię
- wytworzymy plazmę kwarkowo-gluonową
- odkryjemy Nową Fizykę !