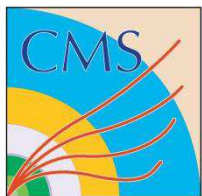


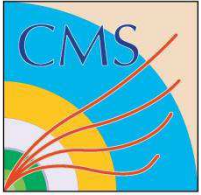
Large Hadron Collider- akcelerator dla poszukiwań fizyki poza Model Standardowym

Jan Królikowski

Instytut Fizyki Doświadczalnej, Wydział Fizyki UW

Streszczenie: Ostatnie 30 lat to okres wielkich triumfów Modelu Standardowego (MS) w fizyce oddziaływań fundamentalnych. Przedstawię stan badań nad MS, który jest teorią wymagającą uzupełnienia, wyjścia poza MS. Następnie przedyskutuję program naukowy LHC, koncentrując się na fizyce poza MS, oraz udziale zespołu warszawskiego w CMS.





Plan



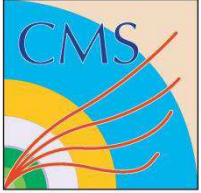
1. Model Standardowy:

1. Krótkie przypomnienie podstawowych własności MS: podstawowe cząstki i oddziaływania
2. Doświadczalne testy MS: LEP, SLC, TeVatron
3. Spontaniczne łamanie symetrii i sektor Higgsa
4. Dlaczego MS wymaga rozszerzenia; problem hierarchii?

2. LHC jako akcelerator do badania zjawisk poza MS

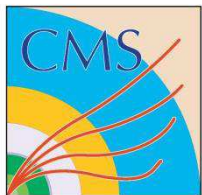
1. Eksperymenty planowane przy LHC
2. Kiedy pojawią się dane?

3. Popularne rozszerzenia MS: SUSY, dodatkowe wymiary i ich sygnatury doświadczalne w LHC



1. Model Standardowy

1.1 Krótkie przypomnienie
podstawowych własności MS:
podstawowe cząstki i oddziaływania



Model Standardowy w pigułce

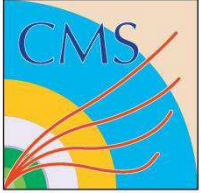


MS to kwantowa teoria pola z cechowaniem
oparta o grupę cechowania $SU(2) \otimes U(1) \otimes SU(2)_C$.

grupa słabego izospinu \otimes grupa słabego hiperładunku
 \otimes grupa kolorowa

W MS kontrolujemy poprawki wyższych rzędów i przewidywania teorii przy wysokich energiach gdyż jest on teorią renormalizowalną.

Renormalizowalność MS w obecności mas fermionów i bozonów pośredniczących nie jest automatyczna, zostaje zapewniona przez dodatkowe pola skalarne, samooddziaływające i oddz. z polami MS oraz i spontaniczne łamanie symetrii (SSB). Najbardziej znanym mechanizmem SSB jest mechanizm Higgsa.



Cząstki MS



1. Materia – fermiony

Leptony (naładowane i neutralne- neutrina)

Kwarki

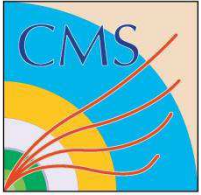
2. Nośniki oddziaływań- bozony:

wektorowe (J=1): bezmasowy foton (EM), ciężkie W i Z (słabe), bezmasowe, uwięzione gluony G (silne QCD)

tensorowe (J=2): grawiton

3. Sektor SSB

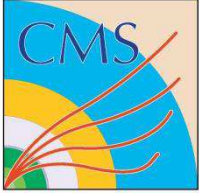
Bozon(y) Higgsa



Oddziaływania MS



- **Elektrosłabe (EW)**: bardzo dobra zgodność (10^{-3} - 10^{-5}) przewidywań MS z danymi doświadczalnymi. Zrozumienie „kwantowych” poprawek wyższych rzędów.
- **Silne (Kolorowe) (QCD)**: brak ścisłego opisu teoretycznego zjawiska uwięzienia – zachowania się teorii na odległościach $> O(1 \text{ fm})$. Dobra zgodność przewidywań perturbacyjnej QCD z danymi dla mniejszych odległości.
- **Sektor SSB**: bardzo słabo poznany doświadczalnie.



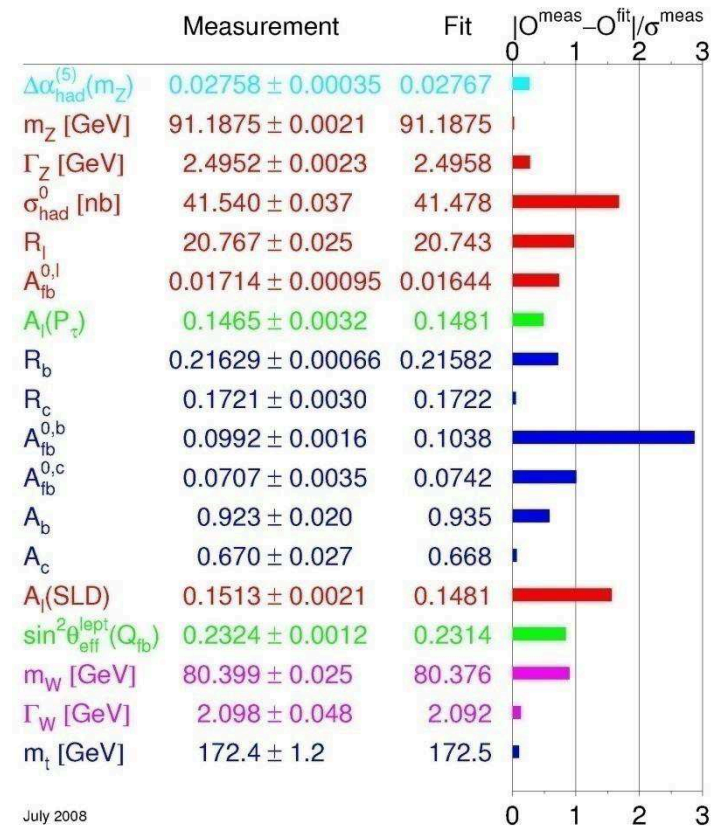
1.2 Doświadczalne testy MS: LEP, SLD, TeVatron



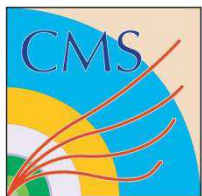
Dane z LEP, SLD i TeVatron 2008

$$\text{Pull} = \left| \frac{\text{Data} - \text{MS}}{\sigma_{\text{data}}} \right|$$

**KOMPILACJA PRZEZ
ELECTROWEAK
WORKING GROUP 2008**



Przewidywania MS

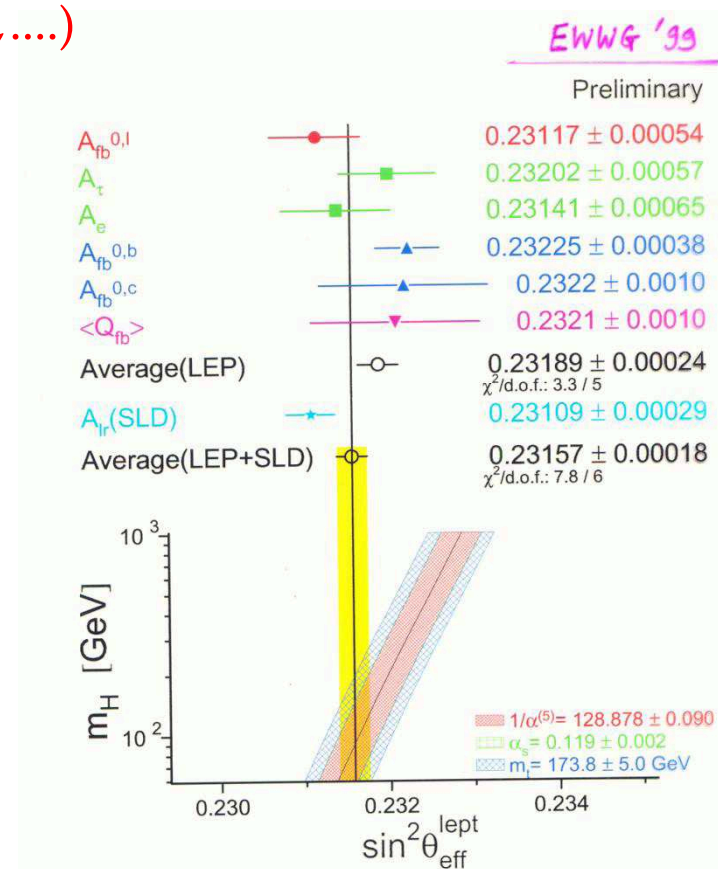


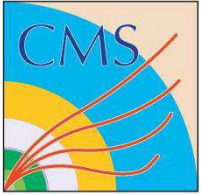
Dobre zrozumienie poprawek pętlowych w MS



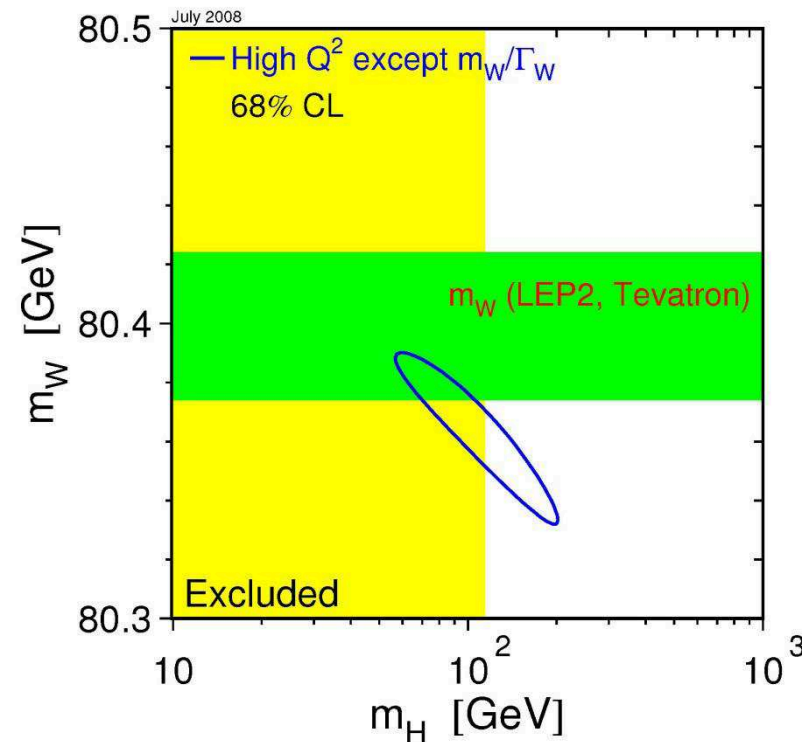
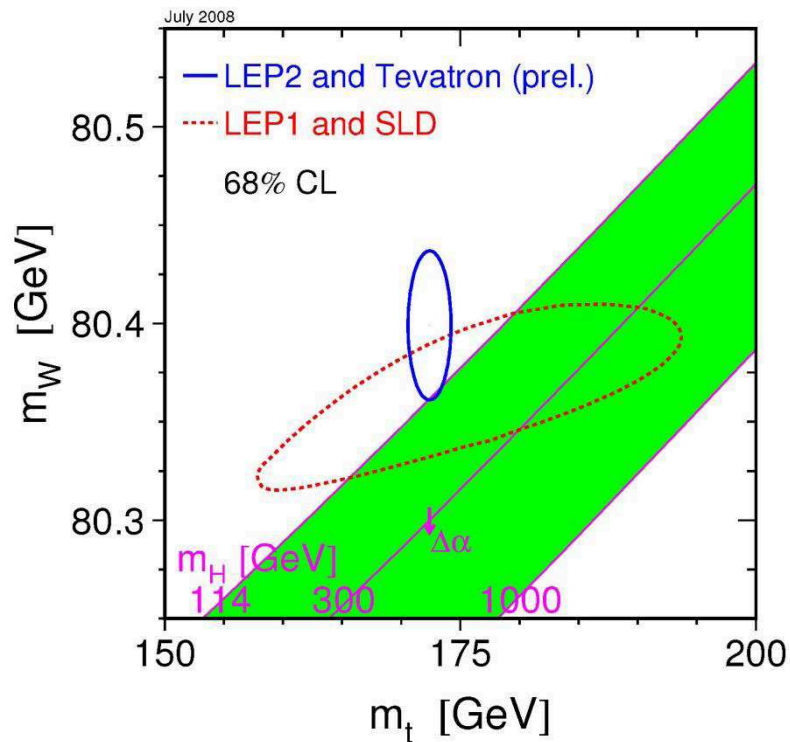
$$R(G_F, \alpha, \alpha_S, \sin^2 \theta_W) = R_{\text{Born}}(G_F, \alpha, \alpha_S, \sin^2 \theta_W) + \delta R_{\text{pętlowe}}(G_F, \alpha, \alpha_S, \sin^2 \theta_W, m_H, m_t, \dots)$$

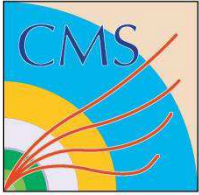
Przykład 1: wyznaczanie wartości $\sin^2 \theta_W$ z wartości pomiarów asymetrii rozkładów kątowych produktów rozpadu Z^0



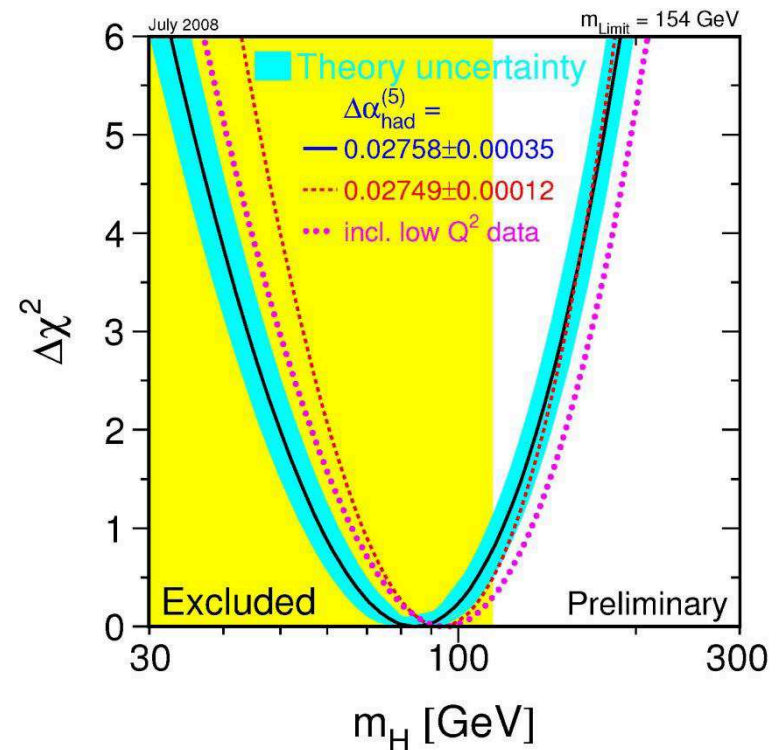
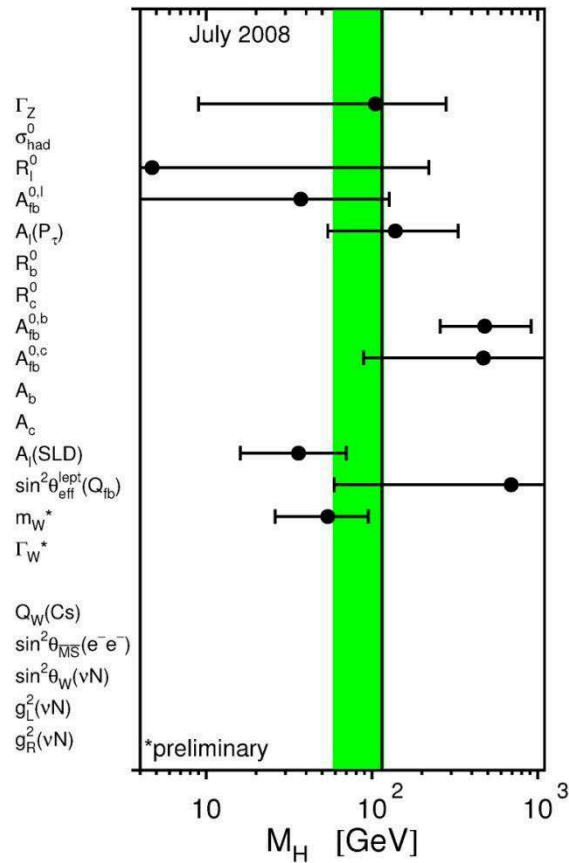


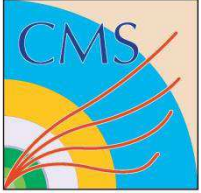
Poprawki pętlowe pozwalają „zobaczyć” niedostępne ciężkie cząstki





Więzy dla cząstek higgosa





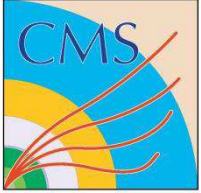
1.3 Spontaniczne łamanie symetrii i sektor Higgsa

Teorie pola z masywnymi bozonami pośredniczącymi są nierenormalizowalne (np. teoria Fermiego).

Renormalizowalność MS jest zapewniona przez oddziaływania początkowo bezmasowych pól fermionowych (materii) i bozonowych (nośników oddziaływań) z dodatkowymi polami Higgsa.

Dzięki spontanicznemu łamaniu symetrii pola Higgsa uzyskują niezerowe wartości próżniowe v .

Człony masowe cząstek są proporcjonalne do wartości próżniowych pól Higgsa.



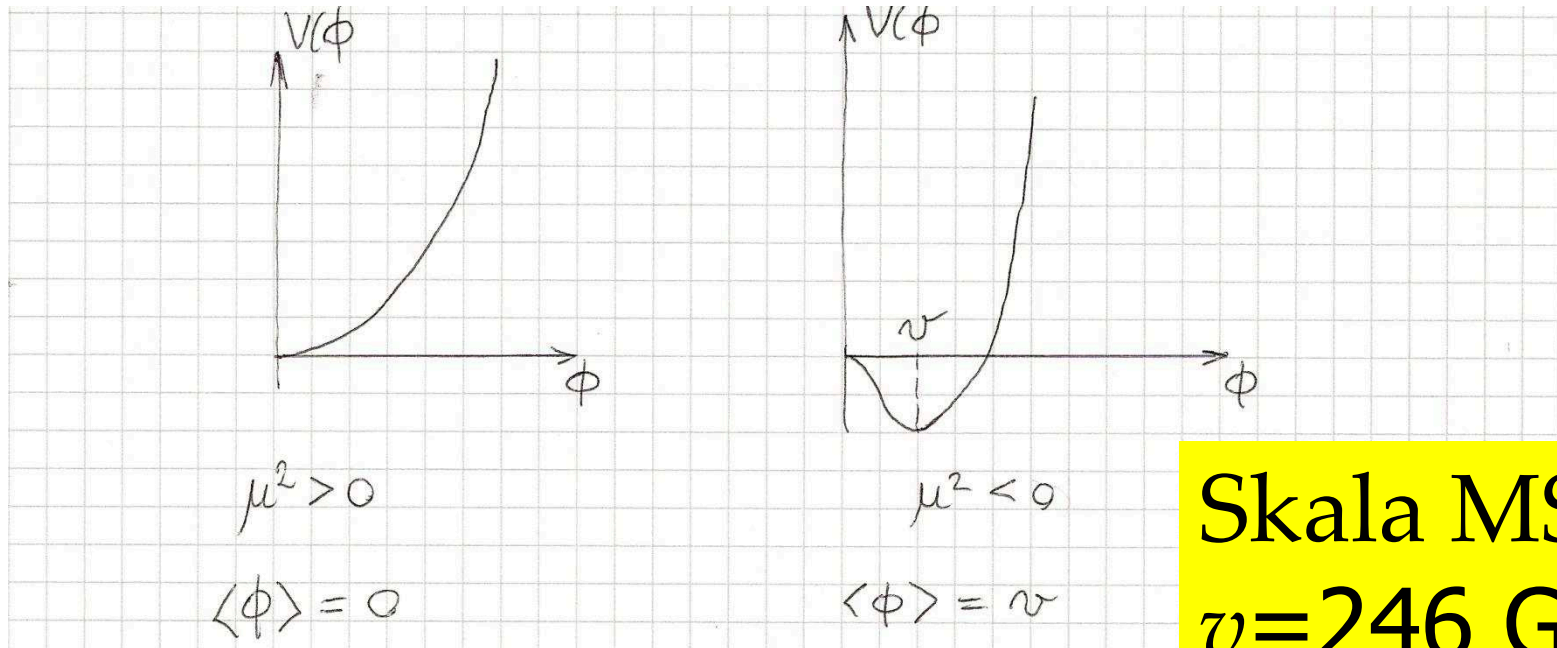
Mechanizm Higgsa



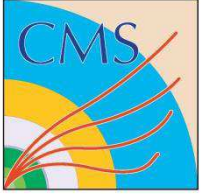
**Dodatkowy dublet $SU(2)_L$ pól skalarnych:
samoodziałujących:**

$$V(\phi) = \mu^2 \phi^+ \phi + \lambda (\phi^+ \phi)^2$$

$$\phi = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix}$$



**Skala MS:
 $v = 246 \text{ GeV}$**



Konsekwencje fenomenologiczne



- Bozony W i Z uzyskują masy:

$$M_W = \frac{1}{2} g v; \quad M_Z = \frac{M_W}{\cos \theta_W}$$

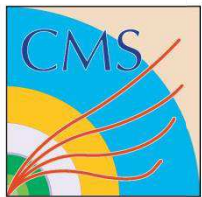
- Fermiony dzięki sprzężeniom Yukawy uzyskują masy:

$$Y \bar{\psi}_L \phi \psi_L \rightarrow Y \bar{\psi}_L v \psi_L$$

- Pojawiają się fizyczne bozony Higgsa o dobrze określonych sprzężeniach i nieznanymi masach.

W MS jest to jeden H^0 , w modelu SUSY MSSM 5 higgsów: h^0, H^0, A^0, H^\pm

LEP: $m_H \geq 114.5 \text{ GeV} / c^2 @ 95\% \text{ CL}$



1.4 Dlaczego MS wymaga rozszerzenia; problem hierarchii?



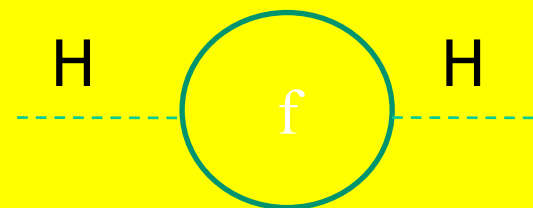
Istnieją argumenty za tym, że istnieje inna skala energii Λ niż $v=246$ GeV Modelu Standardowego:

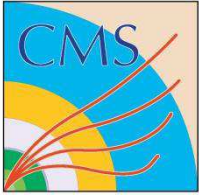
- skala Plancka 2.10^{19} GeV,
- unifikacja stałych sprzężenia przy skali $\Lambda \sim 10^{16}$ GeV
- Problem hierarchii:

$v \ll \Lambda$ ale $M_H \sim v$???

$$M_H^2 = M_{\text{HBorn}}^2 + \Delta M_{\text{Hpętlowe}}^2$$

$$\Delta M_{\text{Hpętlowe}}^2 \approx 2Y_f^2 \int^\Lambda d^4k \frac{-1}{k^2 - M_f^2} = -2Y_f^2 \Lambda^2$$

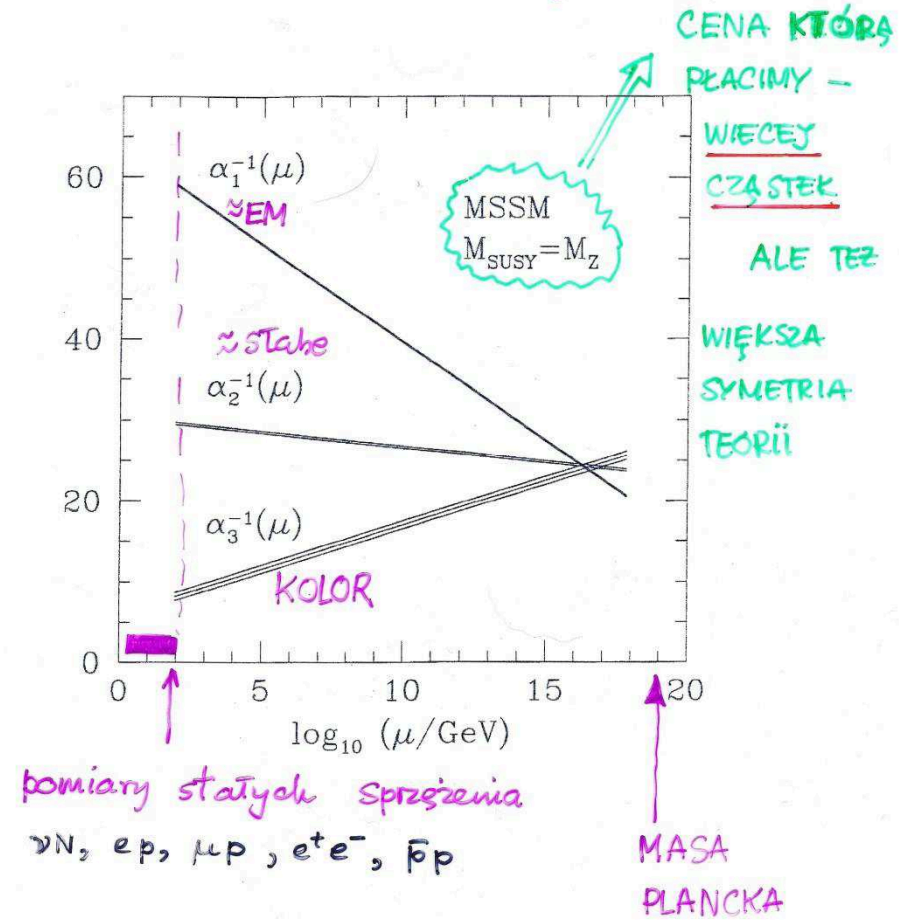


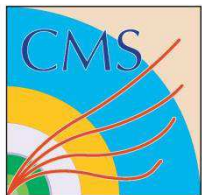


BIEGNĄCE STAŁE SPRĘŻENIA $\frac{1}{\alpha} = b \ln\left(\frac{\mu}{\text{GeV}}\right)$

SUGESTIA UNIFIKACJI?

Unifikacja stałych sprzężenia





Problem hierarchii: dwa typy rozwiązań:



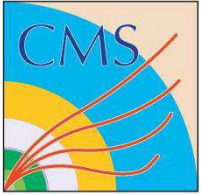
$\Lambda \sim 1 \text{ TeV}$:

- Technikolor- Higgs-
cząstka złożona
- Fermiony złożone
- Dodatkowe wymiary

$\Lambda \sim 10^{16} \text{ GeV}$

SUperSymetria:
kasowanie się wkładów
pętli bozonowych i
fermionowych

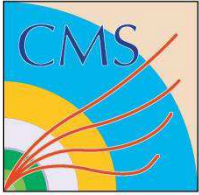
**Nowa fizyka i nowe cząstki przy 1 TeV
czyli w zasięgu LHC**



2. LHC jako akcelerator do badania zjawisk poza MS

2.1 Eksperymenty planowane przy LHC

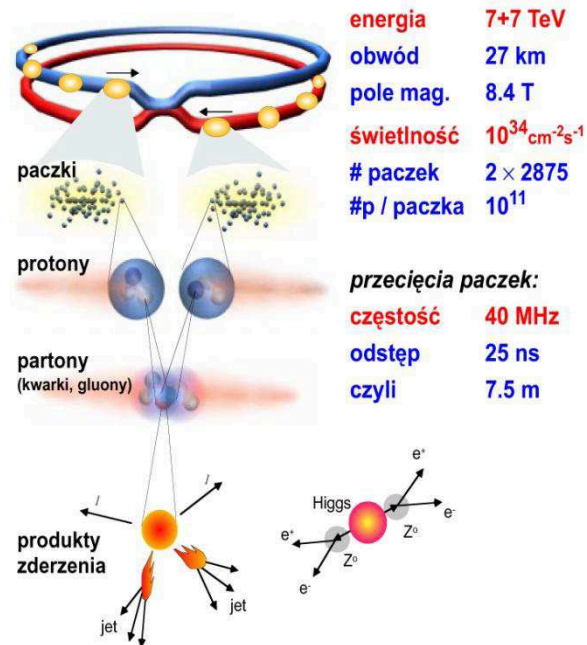
2.2 Kiedy pojawią się dane?



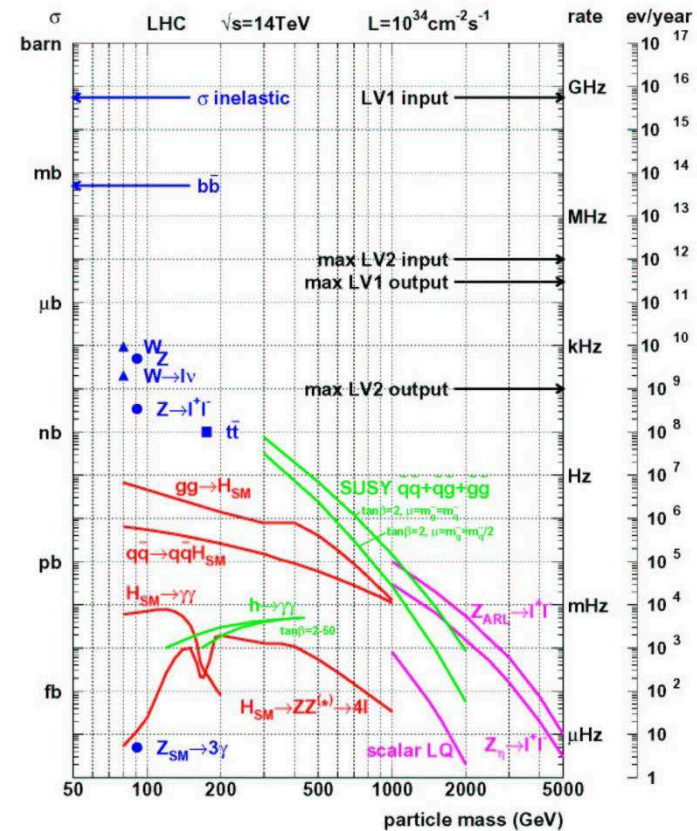
Akcelerator LHC nadprzewodzący zderzacz pp

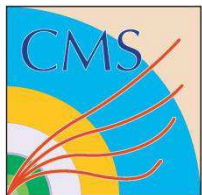


Zderzenia proton-proton w LHC



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

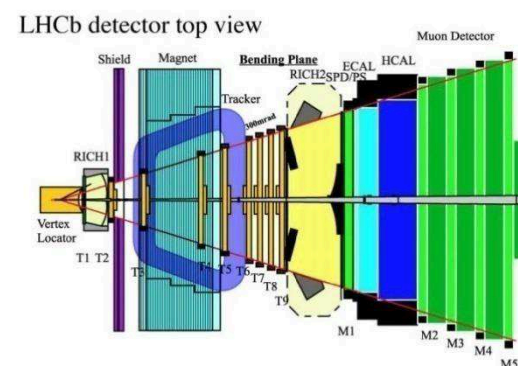


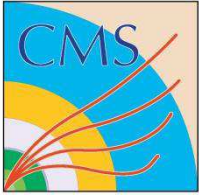


2.2 Eksperymenty przy LHC



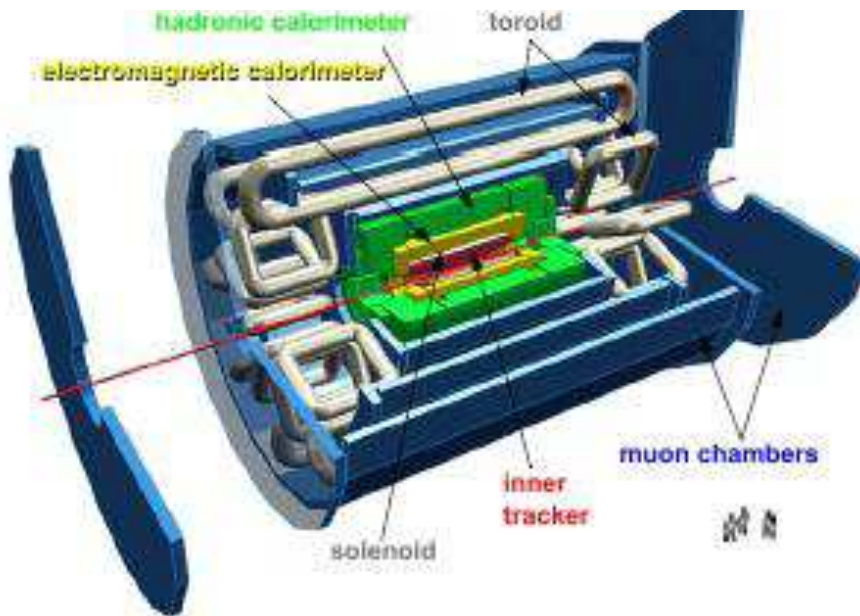
- Dwa eksperymenty „ogólnego przeznaczenia”: **ATLAS i CMS**
- **ALICE**- eksperyment dedykowany dla zderzeń ciężkich jonów
- **LHCb**- eksperyment dedykowany dla badania rozpadów kwarków b



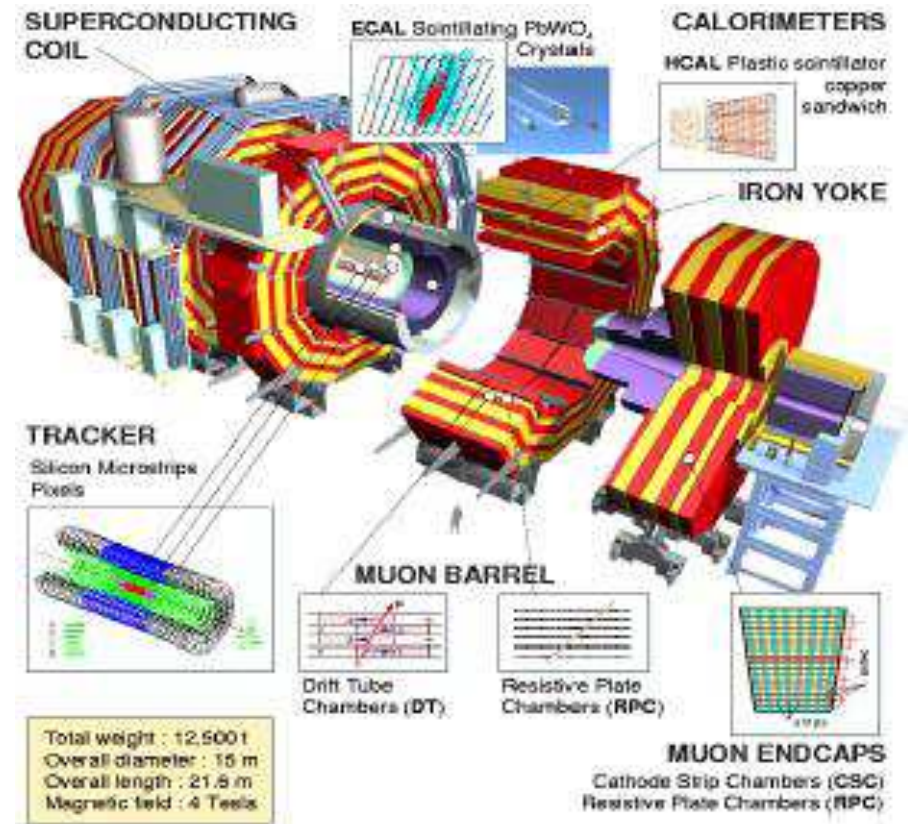


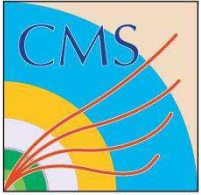
ATLAS and CMS detectors

CMS

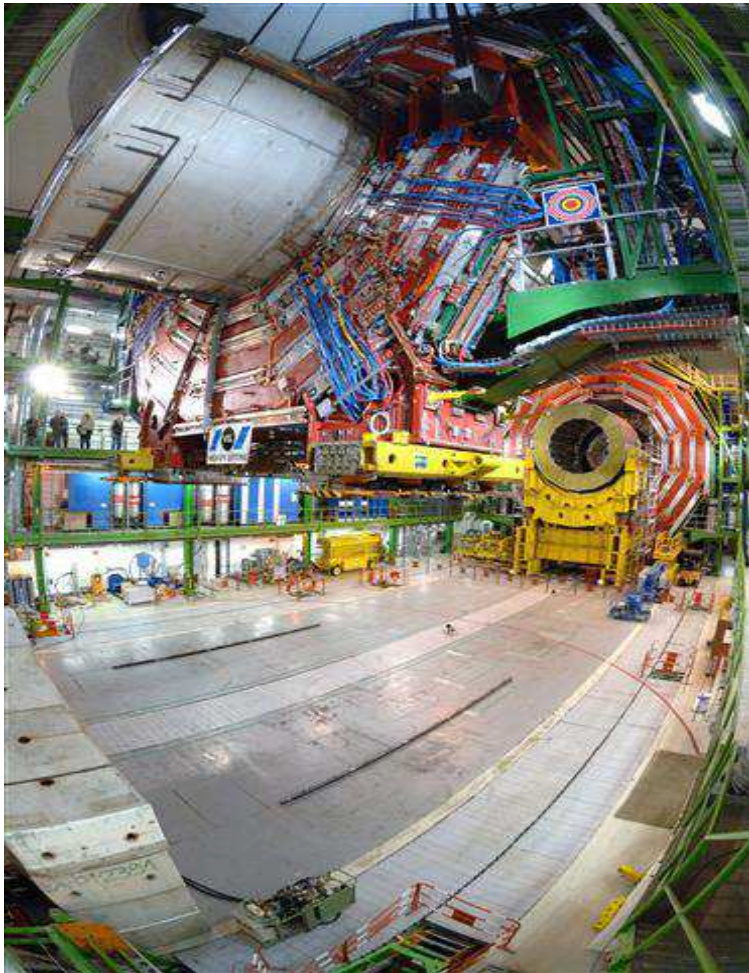


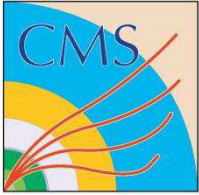
ATLAS



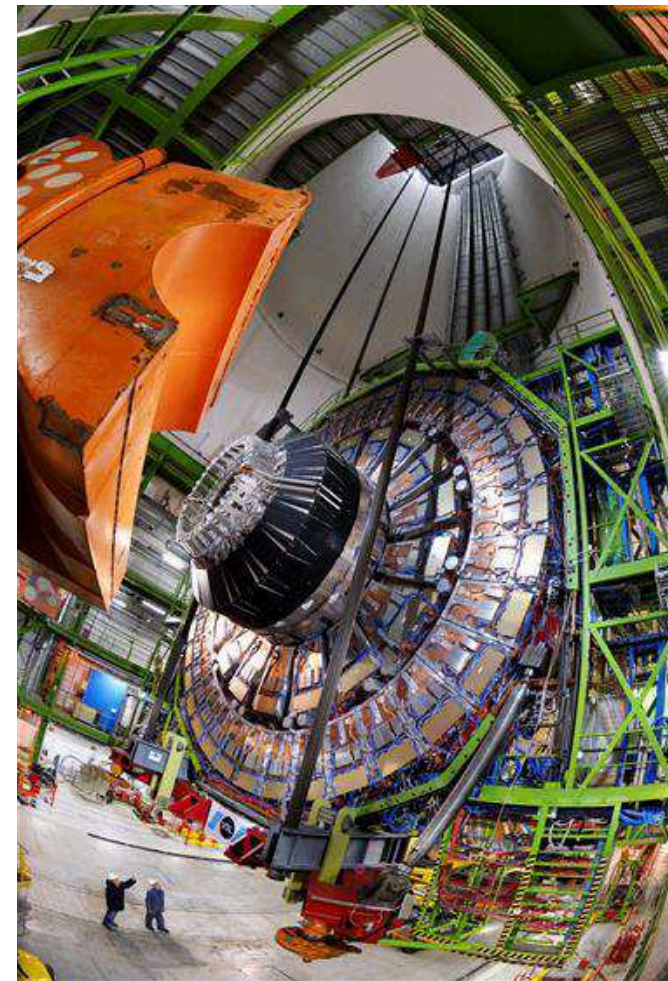
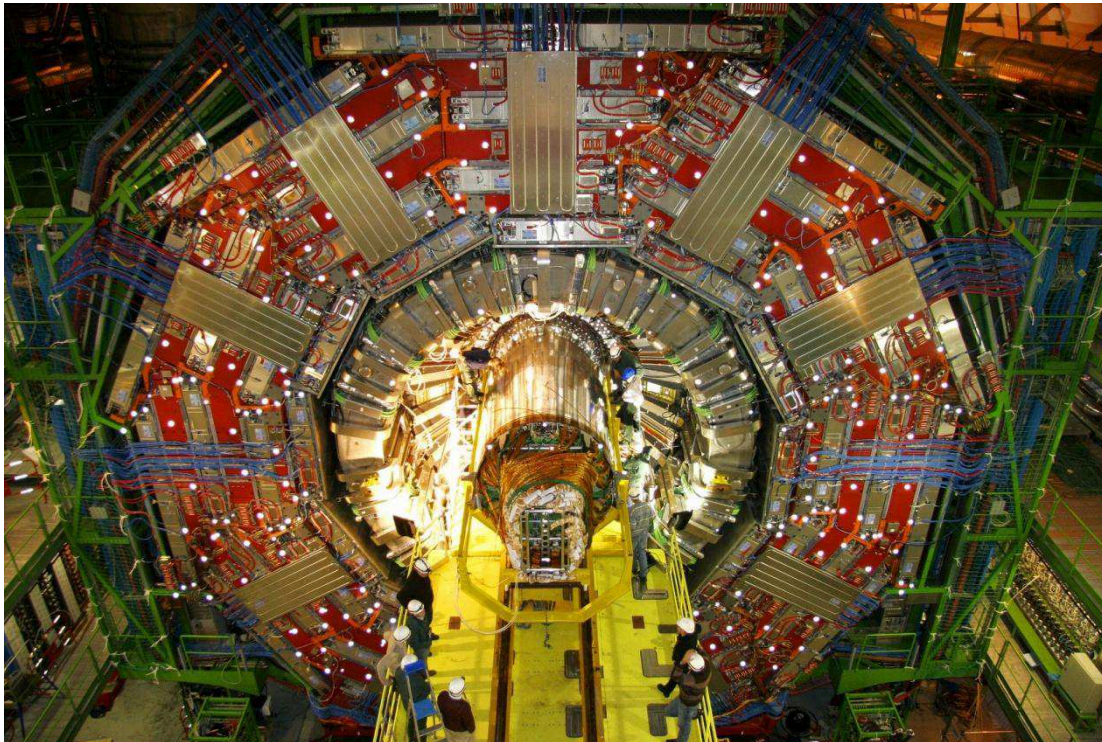


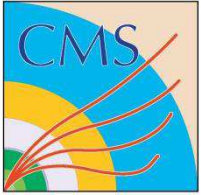
CMS - instalacja WO z cewką



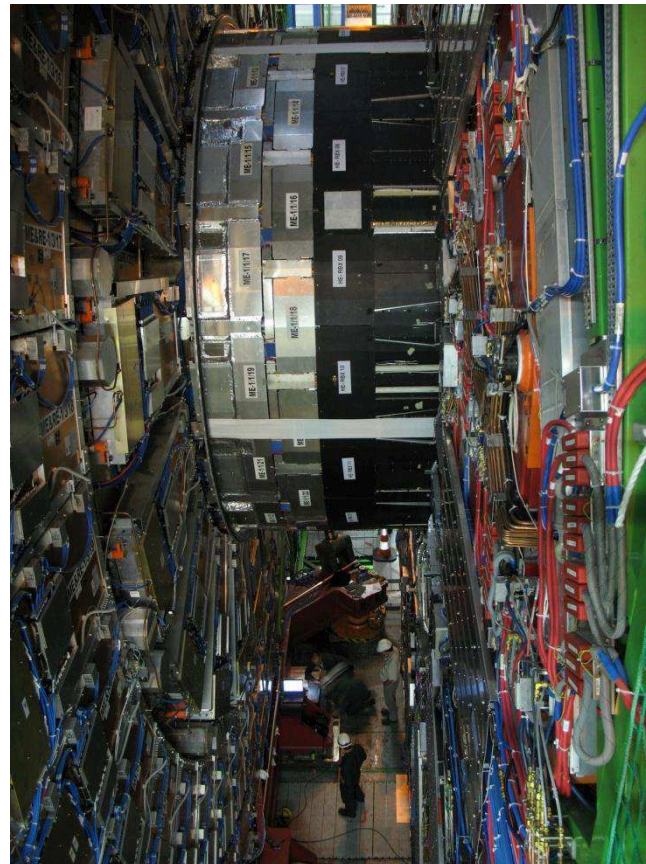


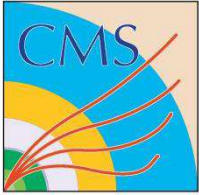
CMS instalacja trackera i endcap



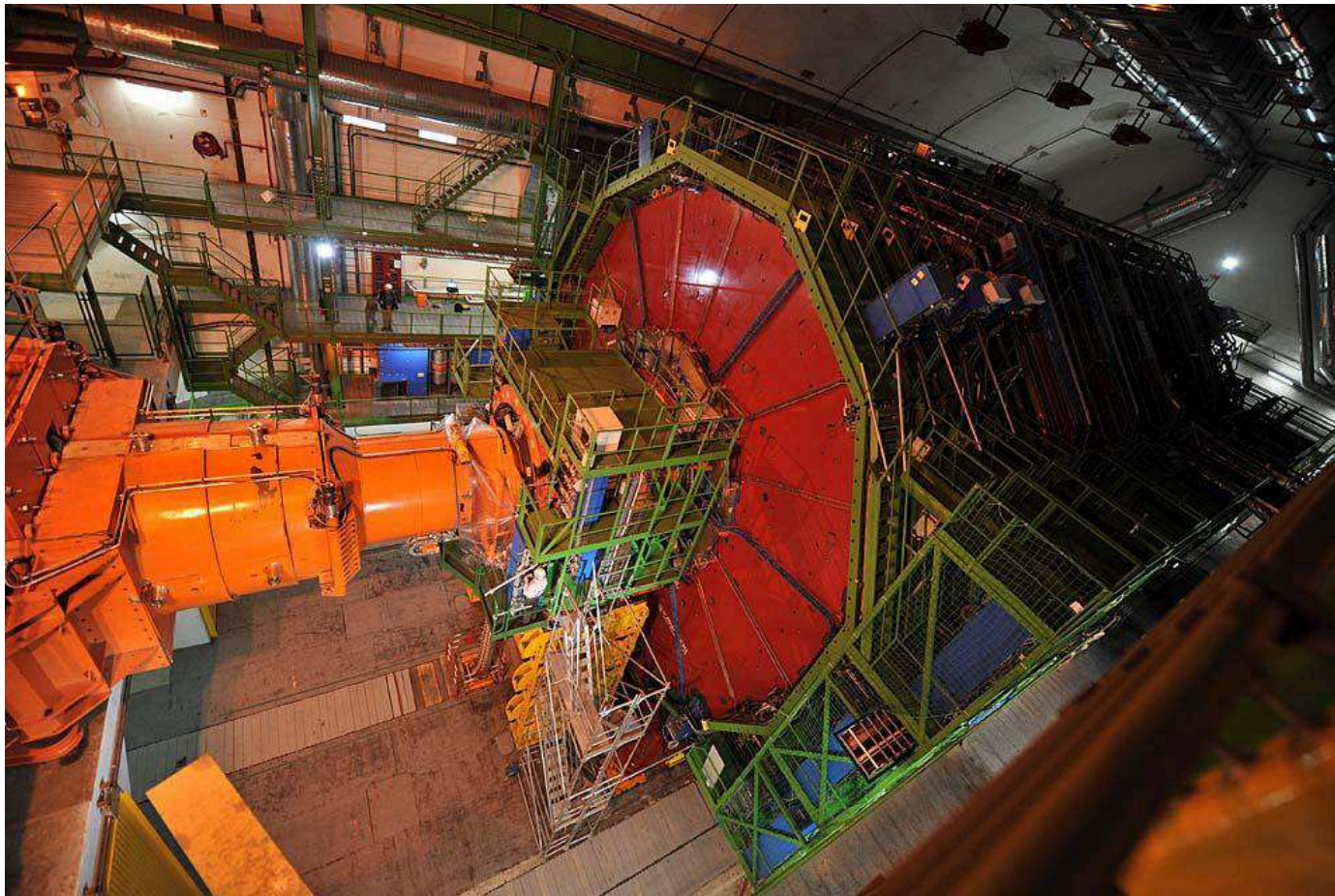


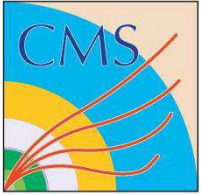
Zamknięcie CMS





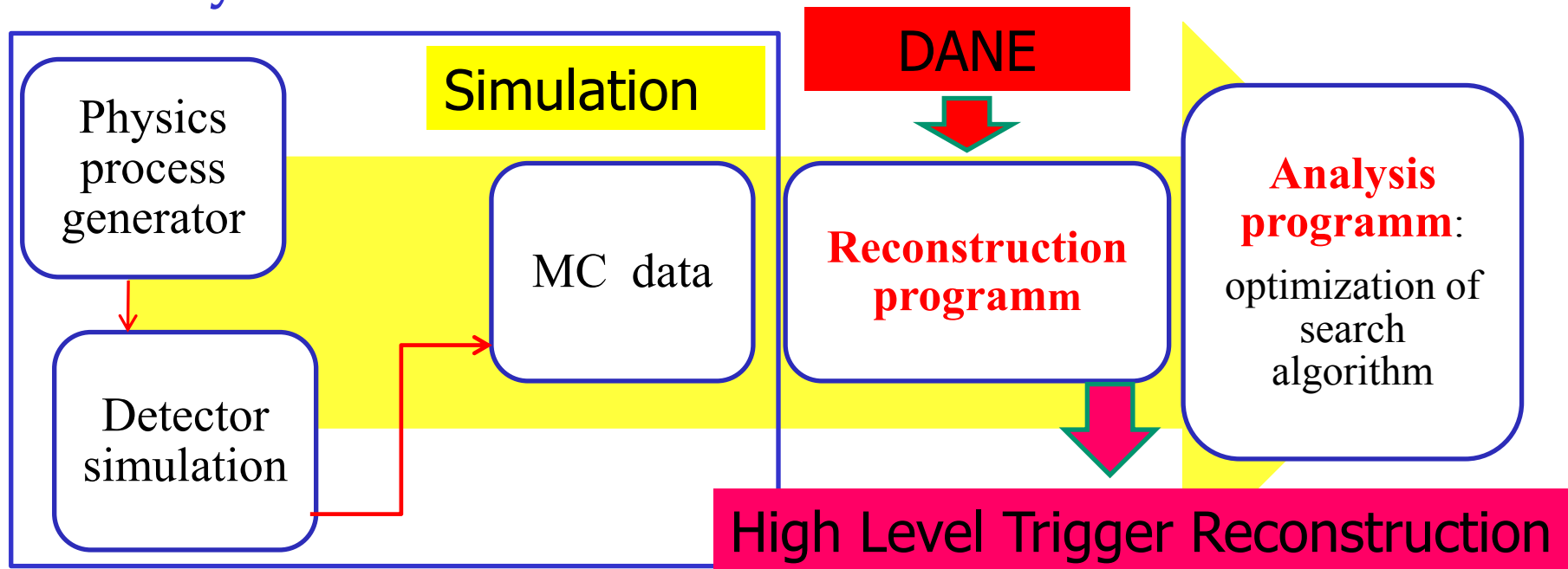
CMS zamknięty i gotowy do pracy (wrzesień 2008)

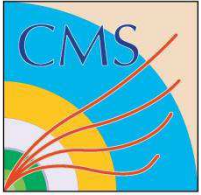




The Tools: Monte Carlo simulations, detector and analysis design

The method of Monte Carlo simulation of the physics and detector response, followed by the reconstruction is used to optimize the detector, trigger and future analyses .





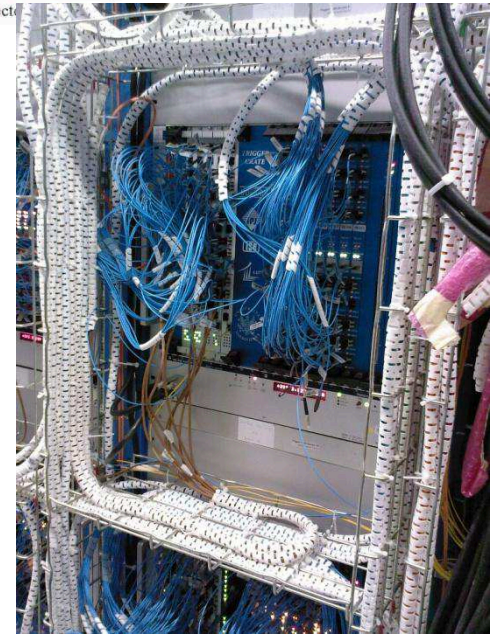
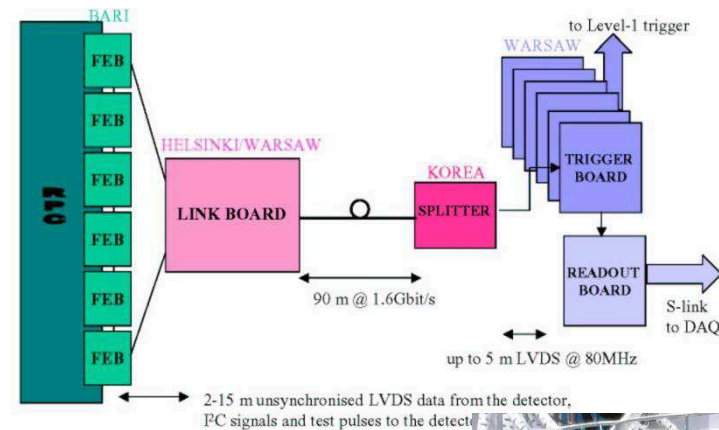
Grupa Warszawska w CMS

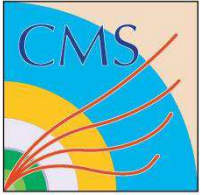


IFD UW, IPJ, ISE PW

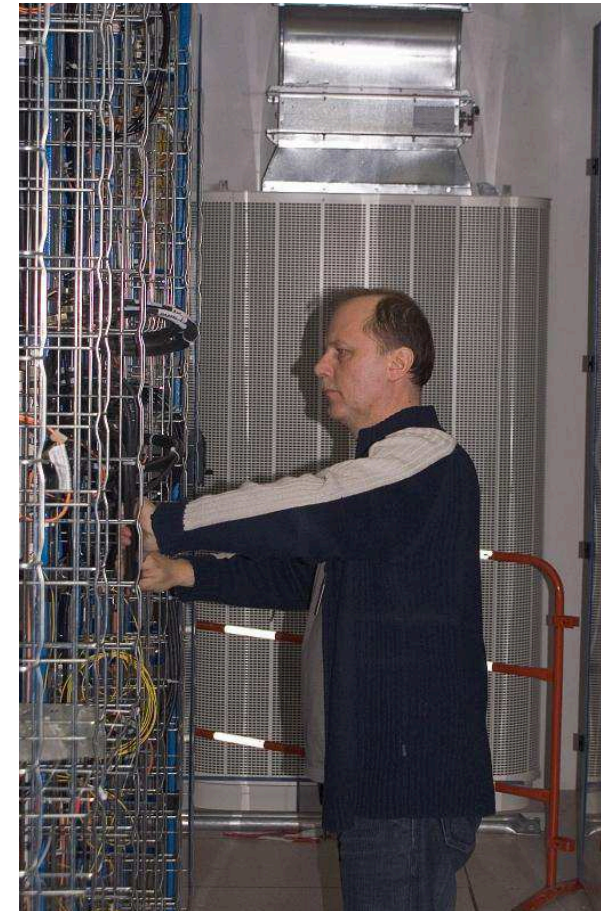
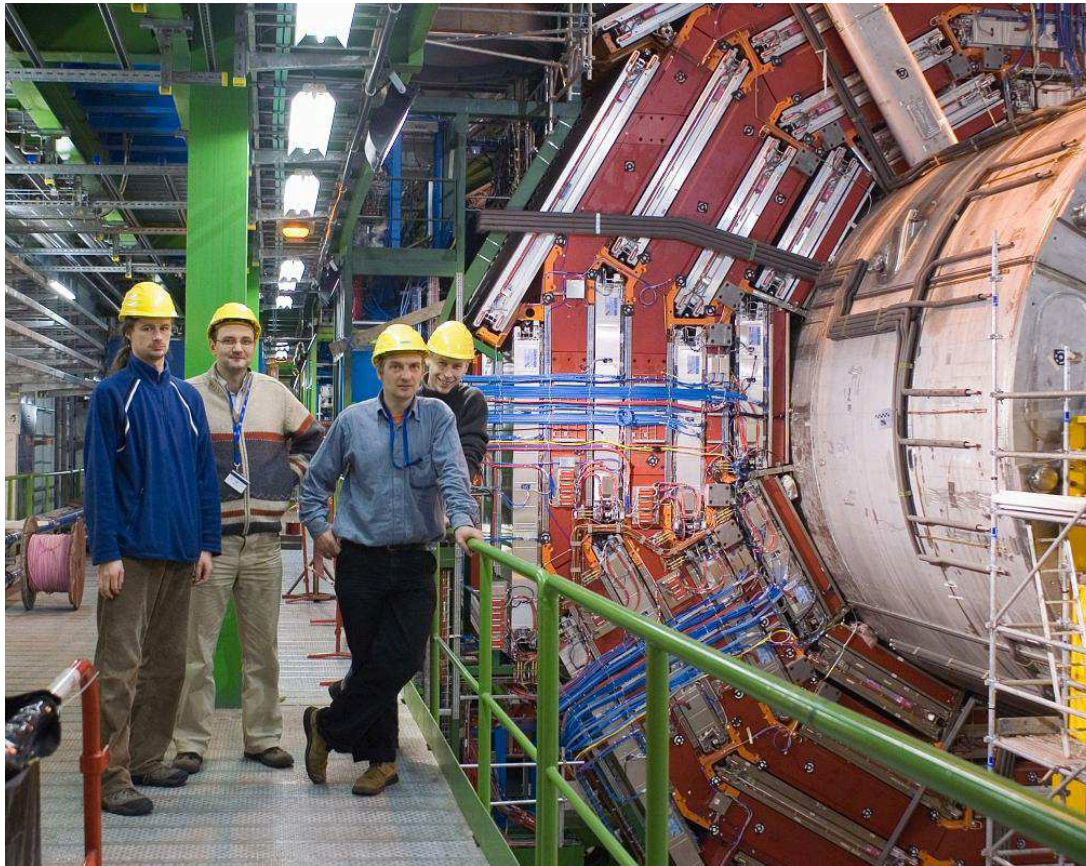
Projekt, prototypy, produkcja i uruchomienie unikatowego systemu wyzwalania na miony o dużych pędach poprzecznych PACT.

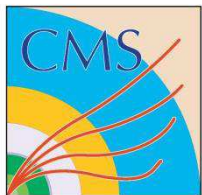
**Program fizyczny:
przygotowanie analizy kilku kanałów fizyki BSM: GSMB
SUSY, stany KK w teoriach z dodatkowymi wymiarami**





CMS grupa warszawska





2.3 Kiedy dane z LHC?



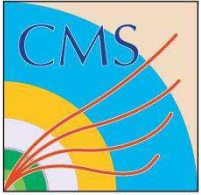
Awaria 18.09.08- spalenie połączenia między dipolem a kwadrupolem w sektorze 3-4 przy natężeniu prądu 8.7 kA.

Naprawa i ponowne schłodzenie magnesów potrwa co najmniej 2 miesiące. Potem przerwa zimowa w pracy akceleratorów.

Pierwsze dane będą więc zbierane na wiosnę (kwiecień?).

Zebranie statystyki potrzebnej do odkrycia higgsów (na poziomie 5σ) będzie wymagało 2-3 lat.

Odkrycie innych sygnałów (np. SUSY) może nastąpić wcześniej.

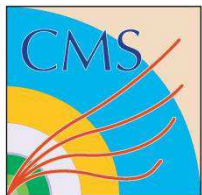


3. Popularne rozszerzenia MS: SUSY, dodatkowe wymiary i ich sygnatury doświadczalne w LHC

Higgs : lekki <130 GeV, ciężki >800 GeV

SUSY

Dodatkowe wymiary



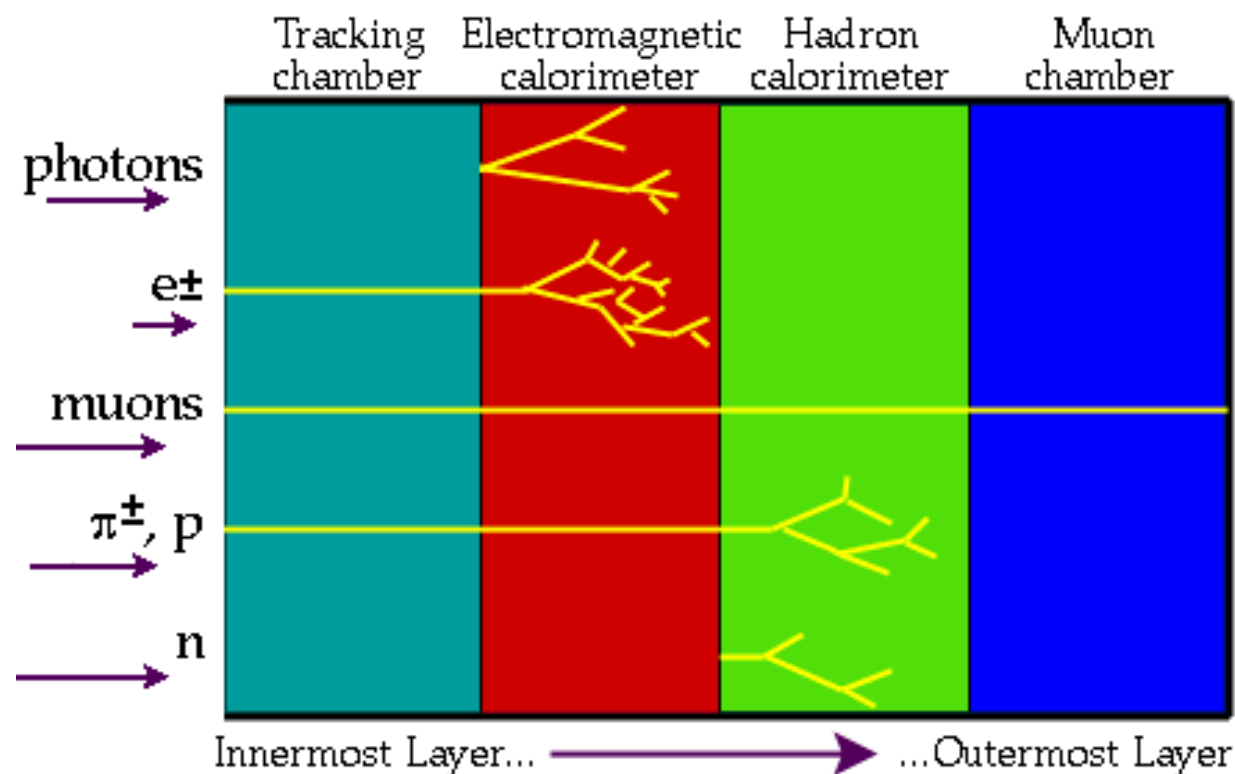
Sensitivities of the LHC experiments to the BSM signals

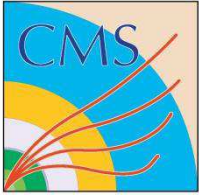


ATLAS and CMS are multipurpose detectors, built out of several heavily segmented layers with different functionalities.

Each layer identifies and measures different object:

- Charged track,
- Photon and electron,
- Hadrons nad jet,
- Muon,
- Missing energy





Kanal $H \rightarrow \gamma\gamma$ dla $M_H < 130 \text{ GeV}$

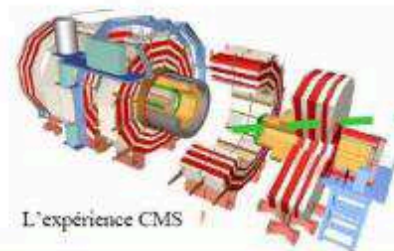


Le calorimètre électromagnétique de CMS CMS electromagnetic calorimeter



CMS (compact Muon Solenoid) est l'une des 4 expériences de l'accélérateur du CERN le LHC (Cessy)
CMS is one of 4 experiments for the CERN accelerator The LHC (Cessy)

La découverte du Boson de Higgs est un objectif majeur de CMS_ECAL



L'expérience CMS

CMS est composé de plusieurs détecteurs ayant chacun sa fonction

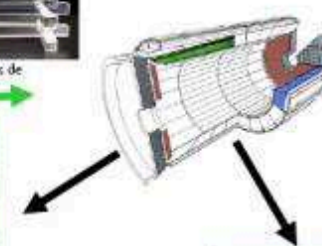
- Tracker (détection des particules chargées)
- Calorimètre électromagnétique (détection des électrons & photons)
- Calorimètre hadronique (détection des hadrons)
- Chambres à Muons (détection des Muons)



Cristaux de



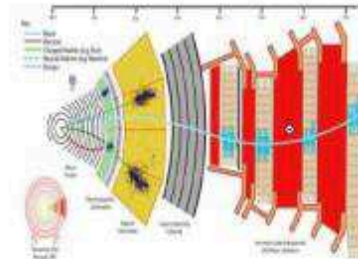
4 "D" de 4000 cristaux constituent les bouchons
The Endcaps consist of 4 "D" with 4000 crystals each



36 supermodules de 1700 cristaux constituent le tonneau
The barrel consists of 36 Supermodules with 1700 crystals each



Signature du Higgs



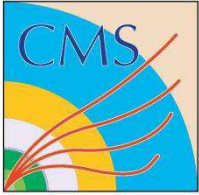
Trajet des différentes particules dans les sous-détecteurs de CMS
Track of different particles in CMS sub-detector

Le calorimètre électromagnétique de CMS C'est :

- ~ 80000 cristaux scintillateurs de PbWO_4
- 100 tonnes
- 6m de long, 60cm de large
- 250 collaborateurs de 17 pays différents : Arménie, Bélorussie, CERN, Chine, Croatie, Chypre, France, Grèce, Inde, Italie, Portugal, Russie, Serbie, Suisse, Taiwan, UK, USA

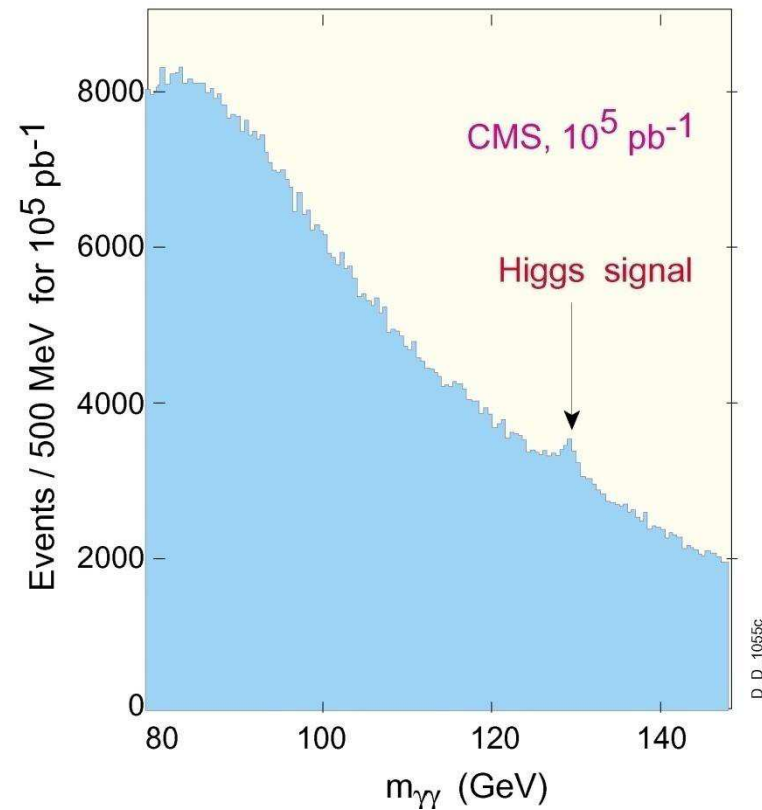
C'est ici au labo27 que sont assemblés les supermodules

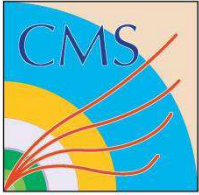
PH_BA4_02_0607



$$H_{SM} \rightarrow \gamma\gamma$$

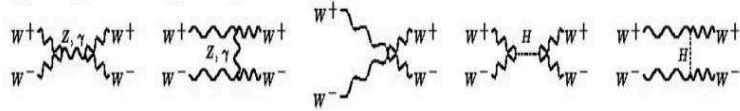
Simulated 2γ mass plot
for 10^5 pb^{-1} $m_H = 130 \text{ GeV}$
in the lead tungstate calorimeter



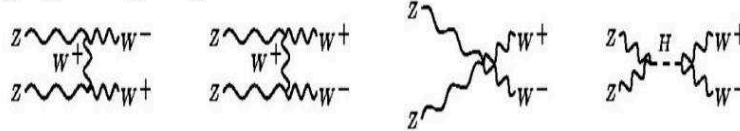


Rozpraszanie WW oknem EWSB dla dużych mas

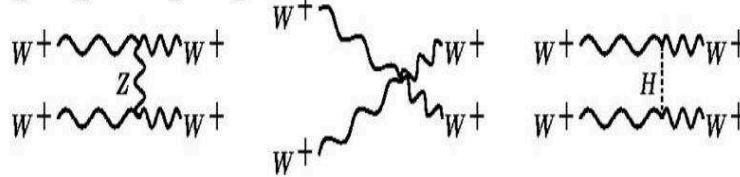
$$W_L^+ W_L^- \rightarrow W_L^+ W_L^-$$



$$Z_L Z_L \rightarrow W_L^+ W_L^-$$



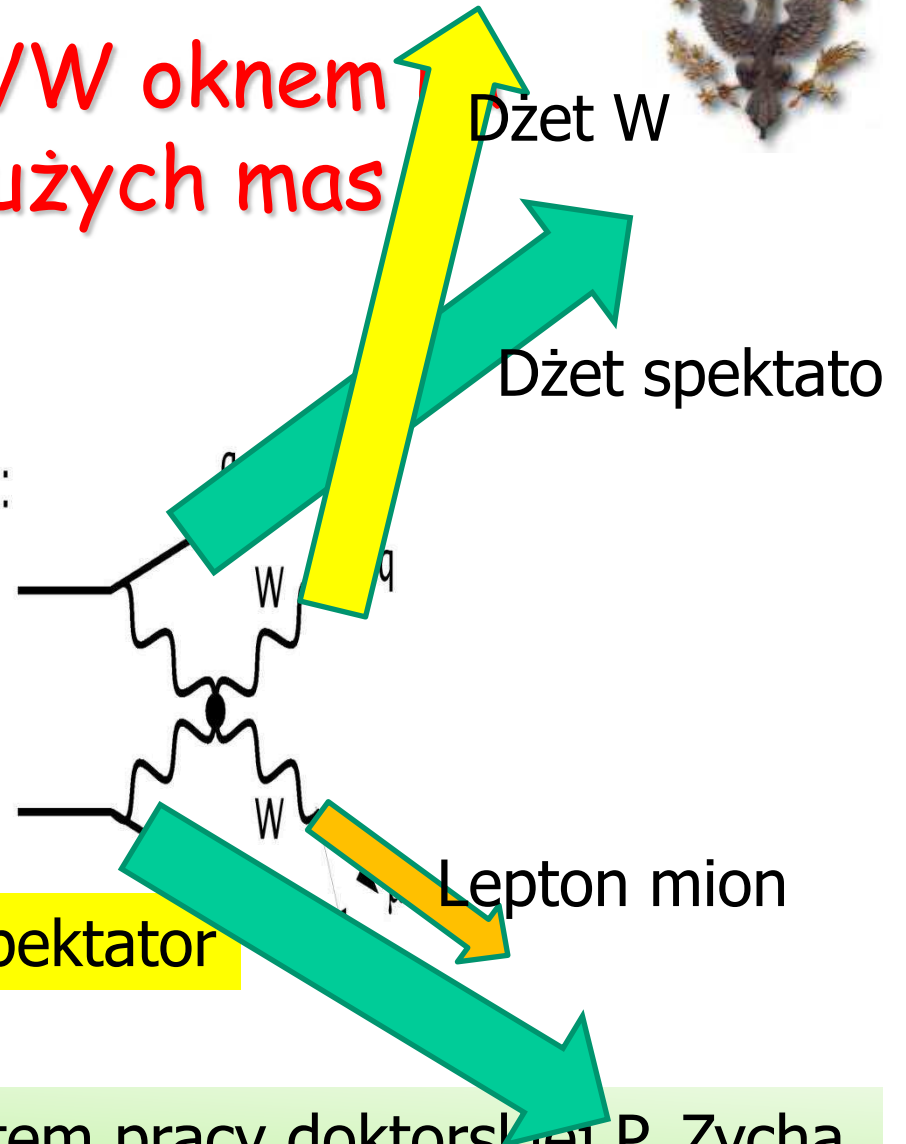
$$W_L^+ W_L^+ \rightarrow W_L^+ W_L^+$$



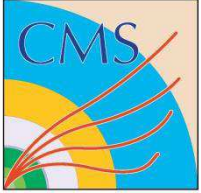
• wybrany kanał :

- $VV \rightarrow WW$

- $WW \rightarrow qq\mu\nu$



Badanie tego procesu było tematem pracy doktorskiej P. Zycha



3. 1 Many theoretical alternatives. Two examples: Supersymmetry and Extra Dimensions

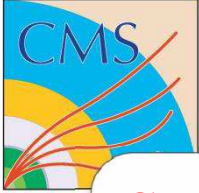


There were many extensions of the SM postulated, and quite a number of these SCENARIOS is consistent with the electroweak data at LEP, SLC and TeVatron.

In these extensions a number of new, heavy particles with masses above the achieved experimental reach were invariably postulated to exist.

The values of masses themselves depend on the scenario and model parameters.

Search for these new particles is an important part of the LHC physics programme.



3.2 SuperSymmetry

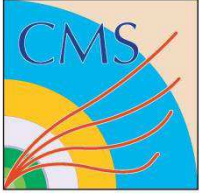
Supersymmetric extensions of the SM are very attractive. Their main properties, common to most SUSY extensions, are summarized below:

In SUSY, every known elementary fermion and boson has its bosonic or fermionic partner.

These partners, unseen up to the presently available energies, are heavy new particles, waiting to be discovered.

Because of the conservation law of R-parity, in collisions of ordinary particles such as quarks and gluons in LHC, the superpartners are produced in pairs of particle- antiparticle.

In the decays of superpartners, the lightest supersymmetric particle (LSP) remains stable. The LSP is neutral, weakly interacting particle, hard to detect, and a good Dark Matter candidate.



SUSY contd.

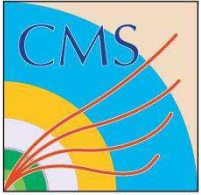


Some SUSY partners:

- quarks ($j=1/2$) \leftarrow ----- \rightarrow squarks ($j=0$)
- leptons (e, μ, τ) \leftarrow ----- \rightarrow sleptons
- neutrinos (ν) \leftarrow ----- \rightarrow sneutrinos
- W, Z, γ ($j=1$), \leftarrow ----- \rightarrow wino, zino, photino ($j=1/2$)
- gluon ($j=1$) \leftarrow ----- \rightarrow gluino ($j=1/2$)
- Higgs h_0 ($j=0$) \leftarrow ----- \rightarrow higgsino ($j=1/2$)

All neutral and charged superparticles may mix, i.e. the physical states of definite mass will be superpositions of several superparticles .

Neutralinos- a superposition of neutral superparticles – are very good candidates for the Dark Matter Particles

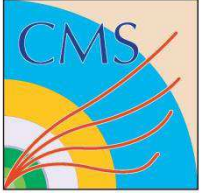


3.3 Extra dimensions



A conjecture that the space-time is not 4-dimensional but of **4+n dimensions**, extra dimensions being compactified, leads to another popular class of SM extensions.

In these models there are so called Kaluza-Klein excitations- massive states with typical masses in excess of $1 \text{ TeV}/c^2$. The exact masses, couplings and other properties depend on the details of the model.



3.4 Search strategies and experimental signatures

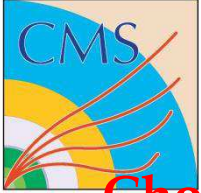


In all scenarios, the crosssections for new, massive particles are small – $O(1-100 \text{ fb})$.

The number of produced new particles at the LHC at maximum luminosity would be $O(10-100)$ / year of data taking.

The production of SM light particles is many orders of magnitude stronger, and may mimic heavy particle production.

The clever search strategies leading to the efficient background reduction are, thus, of primary importance.



3.4 Search strategies contd.

Choice of background reducing signatures depend on the scenario, but there are some general rules good for many of scenarios. Some examples:

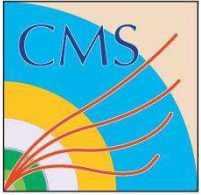
Usually, the new particles decay in cascade chains, with undetectable neutrinos and other weakly interacting neutral particles escaping detection.

Missing transverse energy $E_{T \text{ miss}}$ sensitive to escaping energy, is a good variable to use,

Multiobject final states (several charged leptons, jets, photons etc.) enhance the new particle decay signal,

Clever background subtraction techniques like (opposite sign dileptons – same sign ones) may enhance the signal.

Heavy stable particles may travel with the velocity lower than c . Measuring particle velocity may be useful, but is technically difficult.



Search for SUSY

Typical hadronic signature:

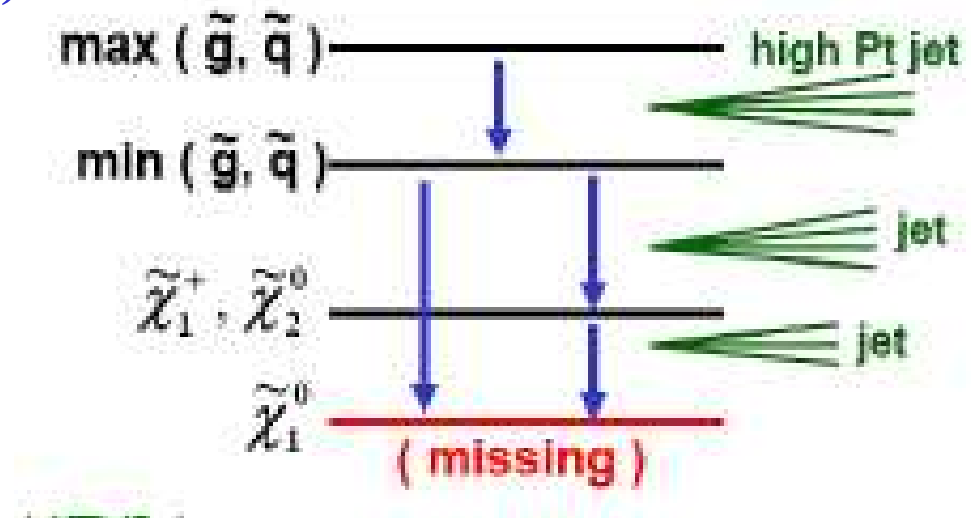
- large missing E_T (≥ 200 GeV)
- Jets ($N \geq 3$)

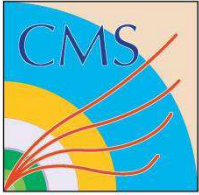
Typical leptonic signature:

- Charged leptons ($N = 1, 2, 3, 4$)
- Missing E_T

Background:

- QCD jets (hadronic)
- Top/ W/Z + Jets (hadronic and leptonic)



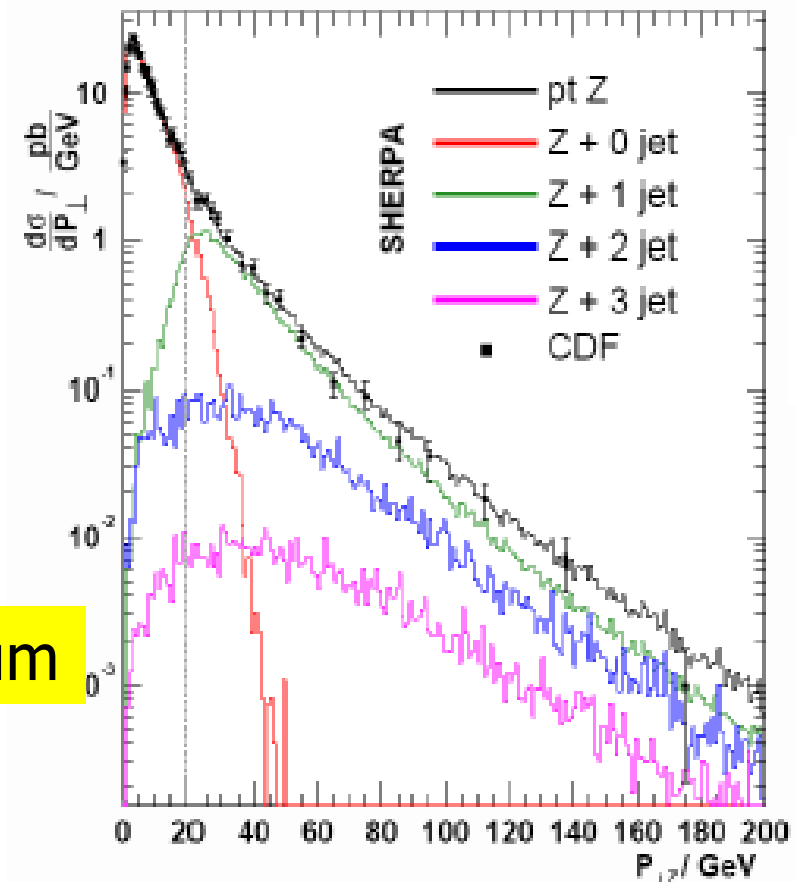


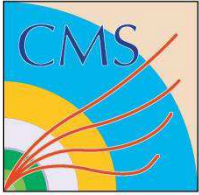
SUSY search: example of CMS MC tuning



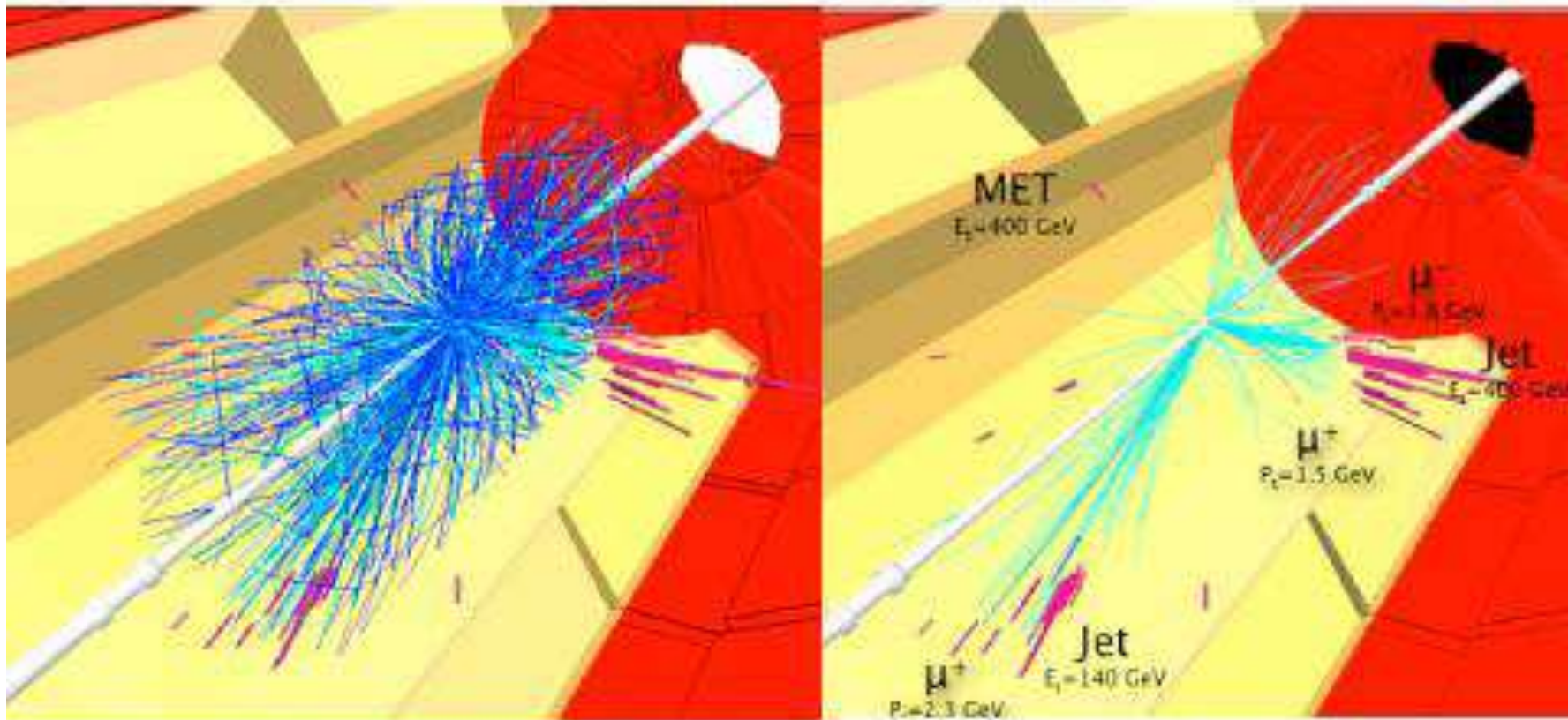
MC is tuned to the existing
CDF data from p-pbar at
1.8 TeV

Z^0 transverse momentum



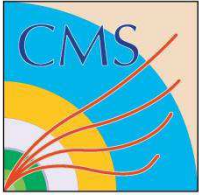


Example: 1.9 TeV gluino in the CMS detector

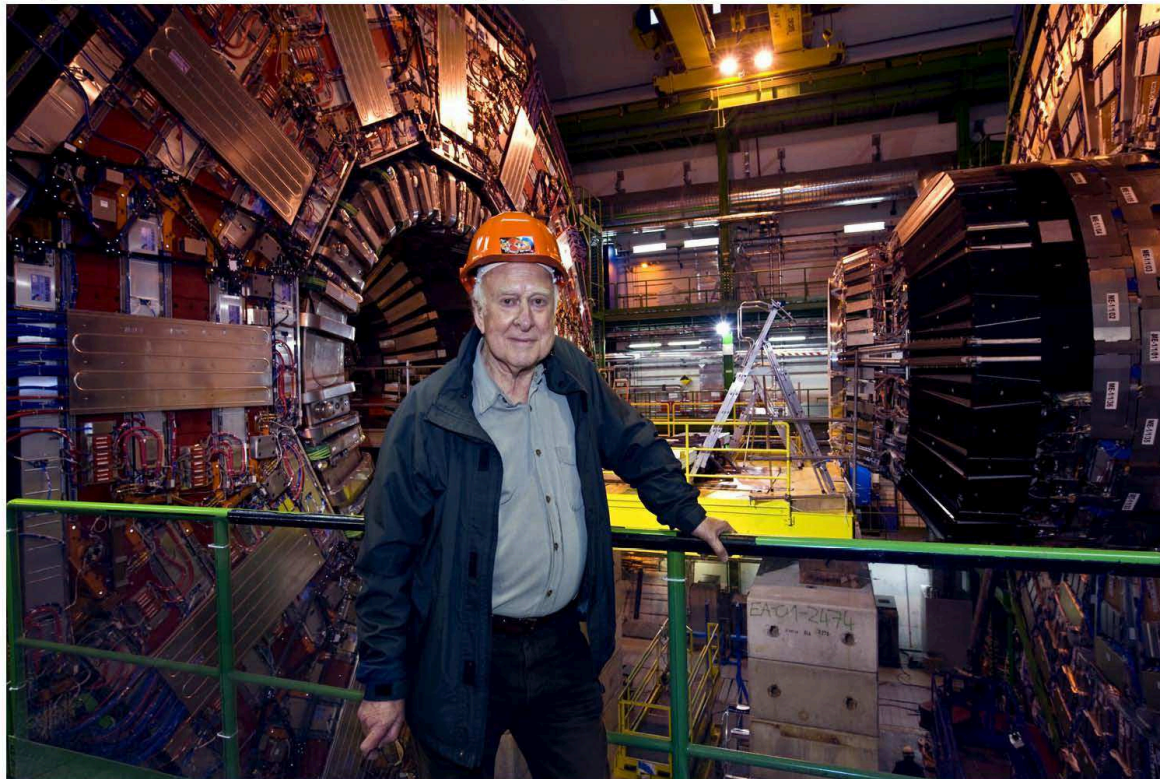


All charged tracks+E

After reconstruction



http://cms-project-cmsinfo.web.cern.ch/cms-project-cmsinfo/Media/Publications/CMSimes/2008/04_14/images/DSC_0350-as-Smart-Object-1.jpg



Peter Higgs
w CMS, tuż
przed
zamknięciem
detektora w
sierpniu
2008

http://cms-project-cmsinfo.web.cern.ch/cms-project-cmsinfo/Media/Publications/CMSimes/2008/04_14/images/DSC_0350-as-Smart-Object-1.jpg2008-04-15 13:24:46