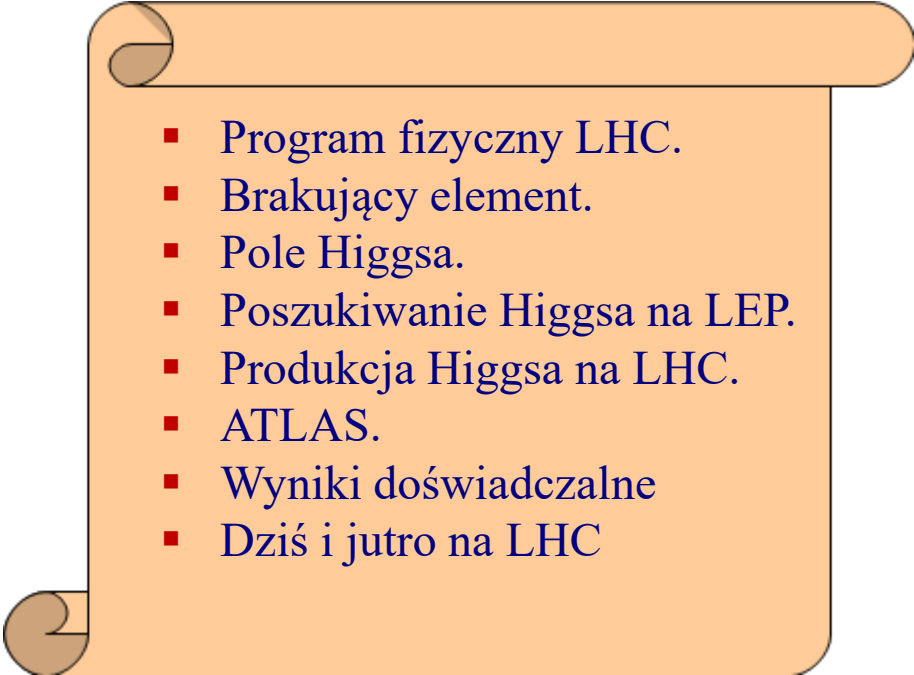


# Fizyka na LHC – boson Higgsa

- 
- Program fizyczny LHC.
  - Brakujący element.
  - Pole Higgsa.
  - Poszukiwanie Higgsa na LEP.
  - Produkcja Higgsa na LHC.
  - ATLAS.
  - Wyniki doświadczalne
  - Dziś i jutro na LHC

# Program fizyczny

- Unifikacja oddziaływań elektroślabych została potwierdzona na eksperymentach na LEPie, ale nie zostało potwierdzone odkrycie bozonu Higgsa.
- Zbyt niska energia nie pozwoliła również na zbadanie fizyki kwarka t.
- Projekt LHC W CERNie z energią wiązek protonów 7 TeV:

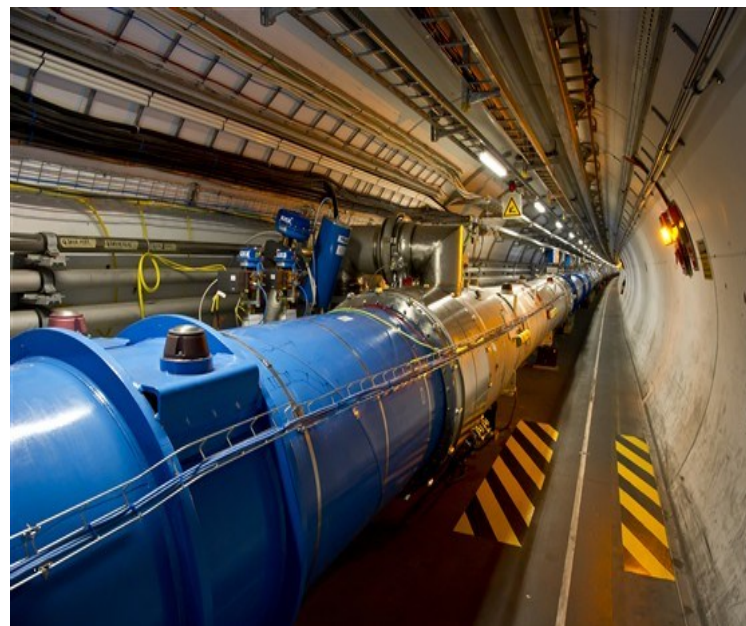
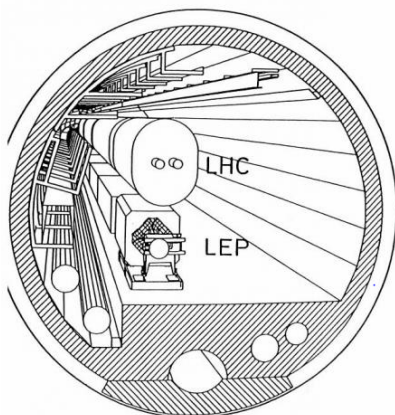
Obserwacja bozonu Higgsa (jednego, dwóch?), jako sposobu na wyjaśnienie masy cząstek,

- rozstrzygnięcie poprawności proponowanych modeli,
- badanie niezachowania parzystości kombinowanej CP (w celu wyjaśnienia braku antymaterii),
- badania fizyki kwarku t i leptonu tau.
- obserwacja cząstek supersymetrycznych (teorie SUSY), jako kandydatów na ciemną energię i
- oszacowanie skali Wielkiej Unifikacji,

Należy również zauważyć, że budowa LHC przyczyniła się do znacznego postępu w elektronice i informatyce.

21 MARCH 1984

A Large Hadron Collider in the LEP Tunnel?



# Bozon Higgsa – no po co po co????

Wróćmy do konstrukcji teorii – w QED, która jest teorią najlepiej „przeliczoną” i najlepiej zbadaną doświadczalnie, symetria cechowania pola oznaczała istnienie oddziaływania fotonów z elektrycznie naładowanymi cząstkami. Kłopot polegała na tym, że w równaniu Diraca **leptony były bezmasowe**.

Lagrangian w Modelu Standardowym ma składowe:

$$\begin{aligned}\mathcal{L} &= \mathcal{L}_f + \mathcal{L}_{int} \\ \mathcal{L}_f &= \bar{\psi}(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi \\ \mathcal{L}_{int} &= -\frac{g}{\sqrt{2}} \left[ (\bar{u}, \bar{c}, \bar{t})_L \gamma^\mu V_{CKM} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}_L W_\mu^- + (\bar{d}, \bar{s}, \bar{b})_L \gamma^\mu V_{CKM}^\dagger \begin{pmatrix} u \\ c \\ t \end{pmatrix}_L W_\mu^+ \right]\end{aligned}$$

- Przy próbie unifikacji oddz. elektromagnetycznych i słabych, cechowanie pola doprowadziło do opisu oddz. za pomocą czterech **BEZMASOWYCH** bozonów  $W_{1,2,3}$  i  $B$ .
- Fizycznie oddz. przenoszone poprzez prądy naładowane ( $W^{+-}$ ) oraz neutralne ( $Z^0$  i foton), które są kombinacjami pól  $W_3$  i  $B$ :

$$\begin{aligned}Z^0 &= W_3 \cos\theta - B \sin\theta \\ \gamma &= W_3 \sin\theta + B \cos\theta \quad \sin\theta = 0.5\end{aligned}$$

- W tym opisie pojawia się problem niezgodności z doświadczeniem – bozony  $W$  i  $Z$  są całkiem masywne:

$$M_W \approx 100 \text{ GeV}$$

- Proponowane rozwiązanie polega na wprowadzeniu dodatkowego pola  $\Phi$  (Higgsa). Cząstki oddziałując z nim, widziane będą jako ciężkie.

# Bozon Higgsa – bo nie ma lepszego

- Pole  $\Phi$  jest zespolone, w postaci dubletu: 
$$\Phi = \begin{pmatrix} \varphi_1^+ + i\varphi_2^+ \\ \varphi_3^0 + i\varphi_4^0 \end{pmatrix}$$
- W teorii kwantowej istnienie pola oznacza istnienie cząstki, czyli pole to cząstki, które ze sobą oddziałują.
- Przy odpowiednich warunkach (wysoka energia) cząstki ta może być obserwowana.
- W ramach MS powinien być jeden neutralny bozon Higgsa, w tzw. rozszerzeniach (supersymetrycznych) MS – nawet 5 bozonów Higgsa.
- Dodatkowe pole jest opisywane jako dodatkowy człon (masowy) w lagranżianie:

$$V(\Phi) = \frac{1}{2}\mu^2 + \frac{1}{4}\lambda\Phi^4$$

Licząc minimum tego potencjału:

$$\frac{\partial V}{\partial \Phi} = \Phi(\mu^2 + \lambda\Phi^4) = 0$$

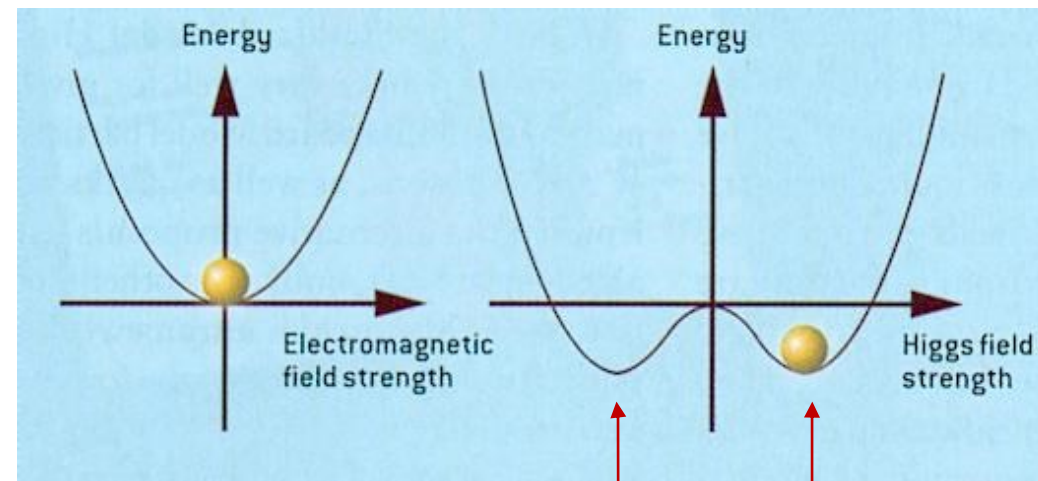
dostajemy:

gdy  $\mu > 0$  i  $\mu^2 > 0$  ( $\mu$  rzeczywiste),

to  $\Phi_{min} = 0$  i  $V(\Phi_{min}) = 0$ ;

gdy  $\mu$  jest urojone i  $\mu^2 < 0$ , to są dwa minima:

$$\Phi_{min} = \pm \sqrt{\frac{-\mu^2}{\lambda}} \equiv \pm v; \quad V(\Phi_{min}) = -\frac{1}{4} \frac{\mu^4}{\lambda} = -\frac{\lambda}{4} v^4$$



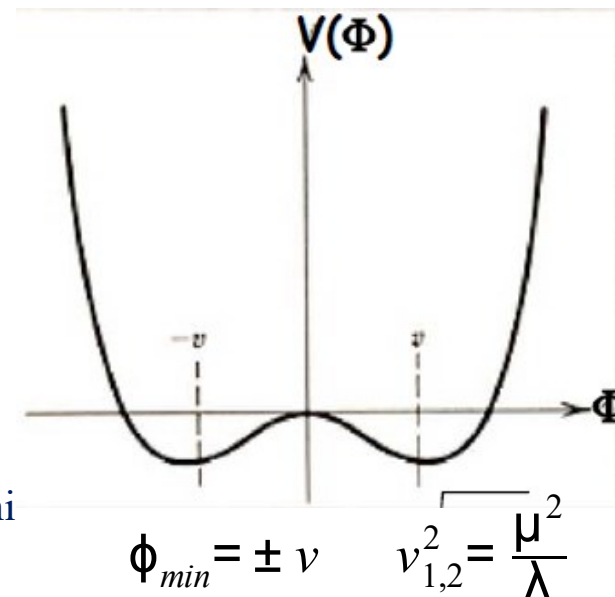
# Pole Higgsa

Po wprowadzeniu nowego pola, w stanie o najniższej energii pole jest różne od zera, mówimy o próżniowej wartości oczekiwanej dla skalarne go pola bozonowego, o degeneracji próżni.

$$V(\Phi_{min}) = -\frac{1}{4} \frac{\mu^4}{\lambda} = -\frac{\lambda}{4} v^4$$

**Mechanizm Higgsa** polegał zatem na tym, że do lagranżianu o pewnej symetrii dodaliśmy człon pochodzący od skalarne go pola.

Próba minimalizacji potencjału doprowadziła do obserwacji, że stan próżni oznacza niezerowe pole, czyli obecność cząstki.

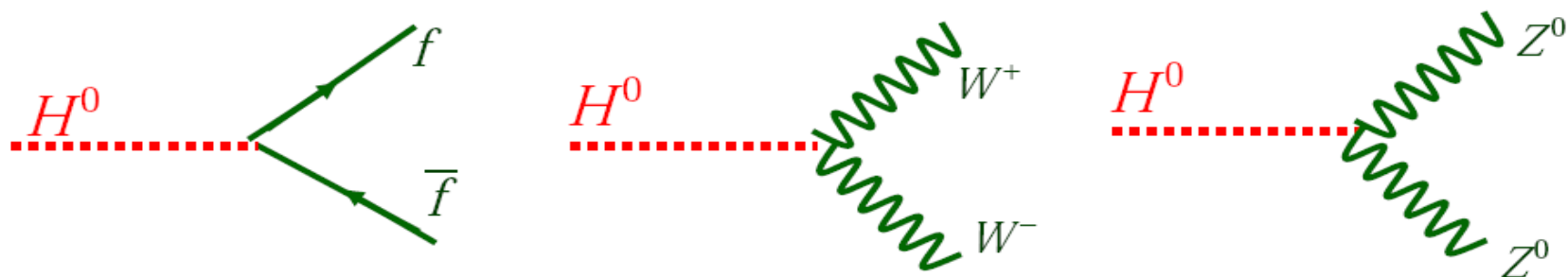


## Anekdota o nadawaniu masy

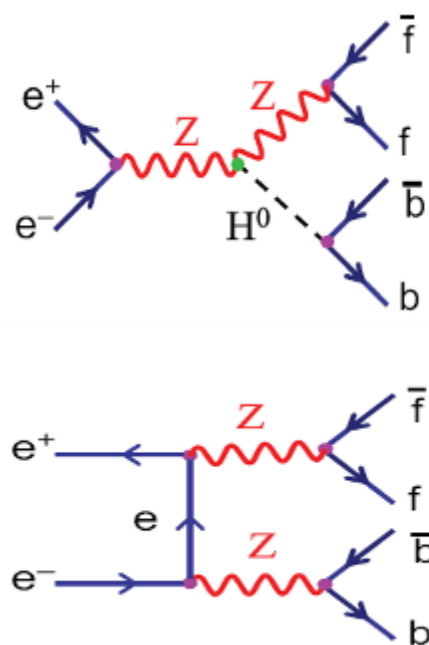
- Efekt ten nazwany został **Spontanicznym Łamaniem Symetrii (SSB)** i jest obserwowany w wielu aspektach, również makroskopowych (przykł).
- Peter Higgs wykazał, że takie niezerowe pole stawia opór cząstkom, które z nim oddziałują, czyli nadaje cząstkom masę.
- Mechanizm Higgsa podaje masy bozonów  $W^+$  i  $Z^0$  oraz przewiduje, że fermiony mają masę, ale o nieznanej wartości (masa pozostaje parametrem empirycznym).
- W najprostszej wersji postuluje się istnienie jednego neutralnego skalarne go bozonu Higgsa.

# Poszukiwania bozonu Higgsa

Pierwsze poszukiwania bozonu Higgsa przy dostępnych energiach LEPu obejmowały procesy:



Stałe sprzężenia są proporcjonalne do masy cząstek w wierzchołku, zatem higgs najczęściej będzie rozpadał się do ciężkich cząstek.

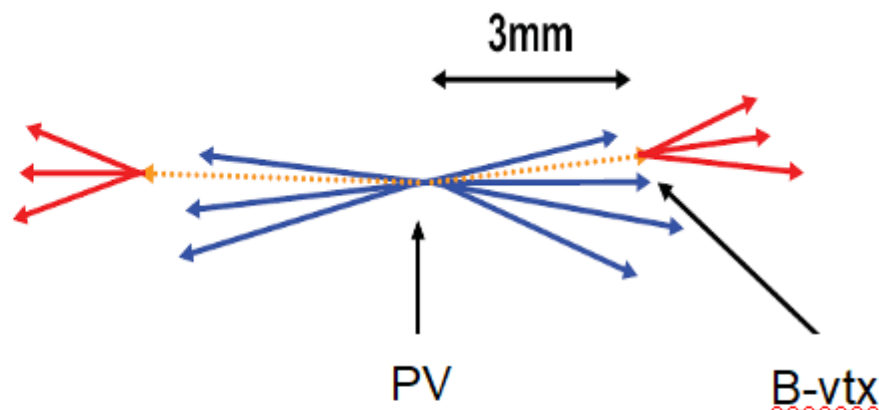


SYGNAŁ

$$m_{b\bar{b}} = m_H$$

TŁO

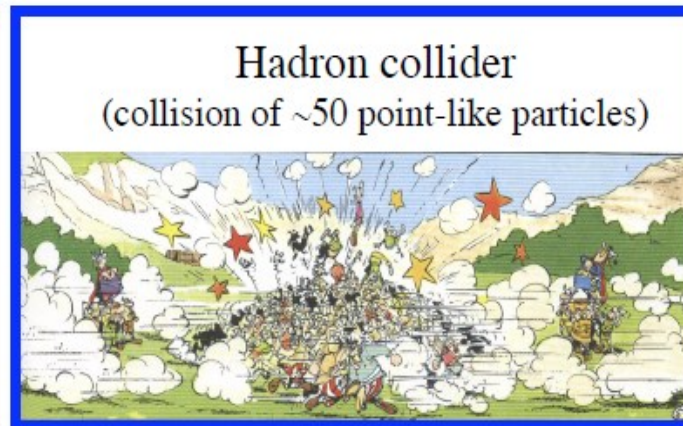
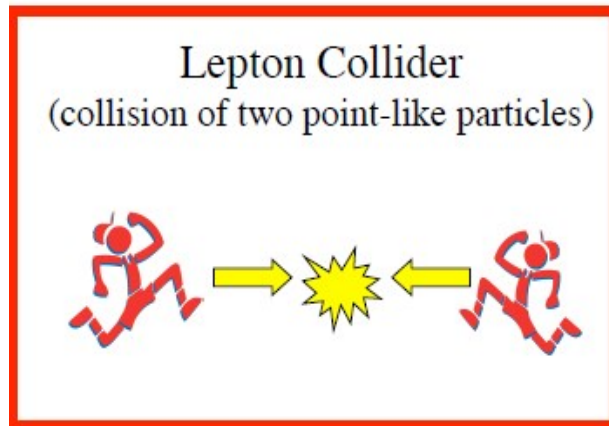
$$m_{b\bar{b}} = m_Z$$



Wykorzystując długi czas życia mezonów B, najlepszą sygnaturą były odseparowane wierzchołki pierwotny i wtórny (kilka mm).



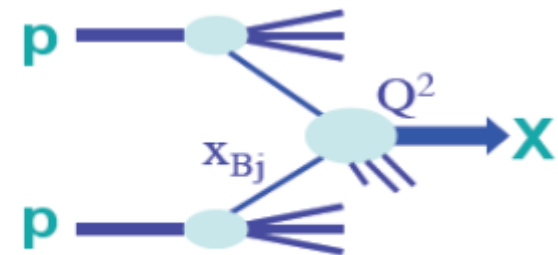
# Produkcja bozonu Higgsa na LHC



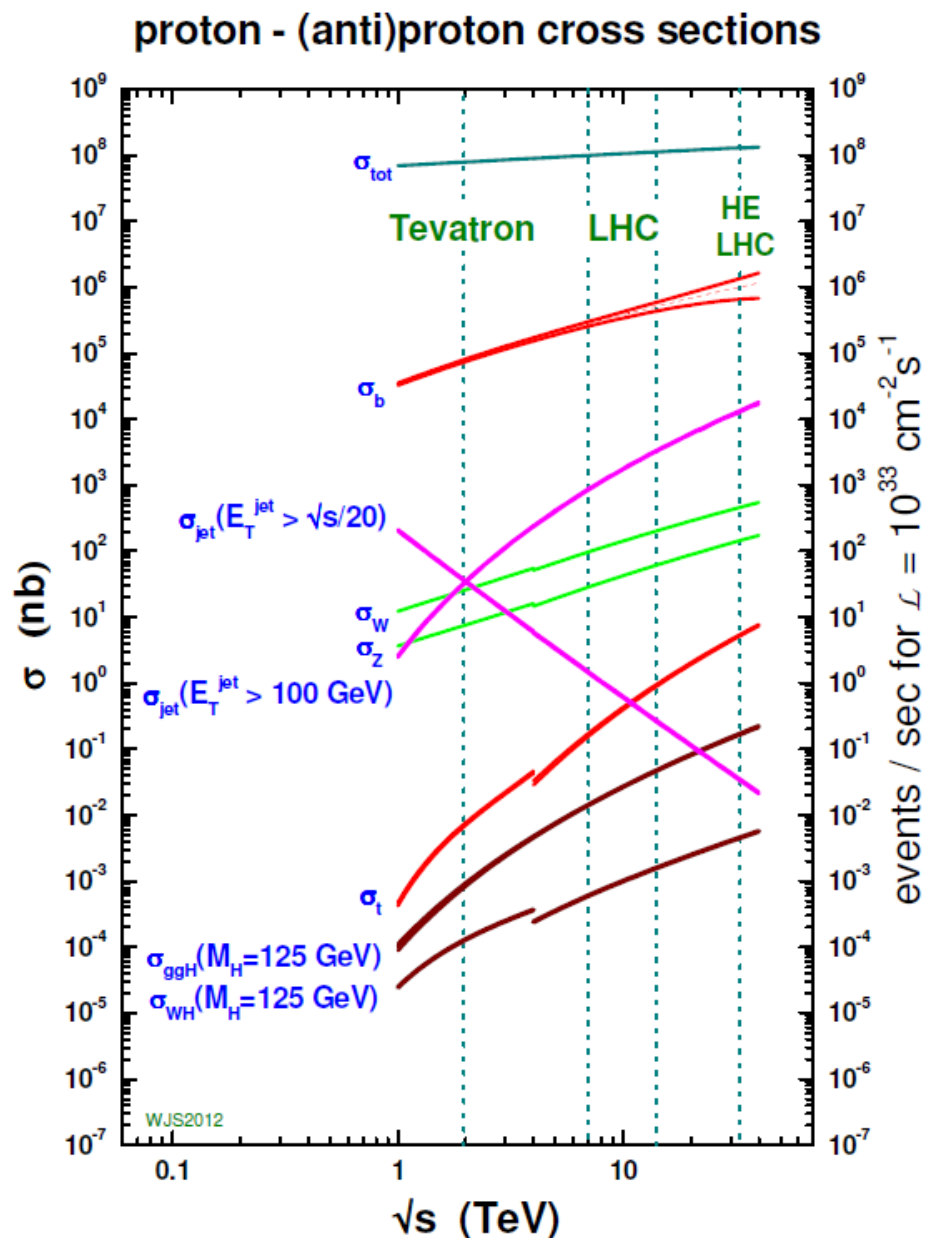
energia zderzającego się partonu:

$$\hat{s} = x_p \cdot x_{\bar{p}} \cdot s$$
$$M_X = \sqrt{\hat{s}}$$

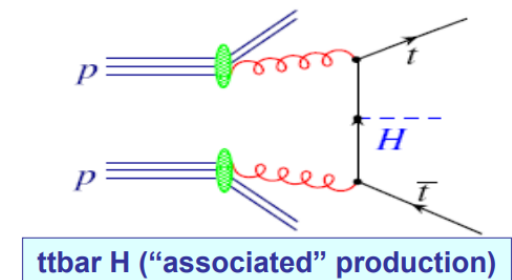
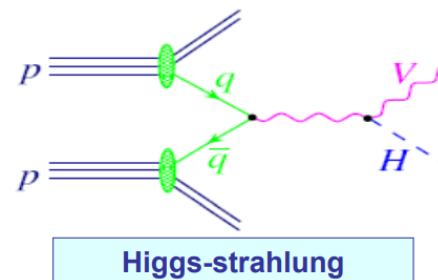
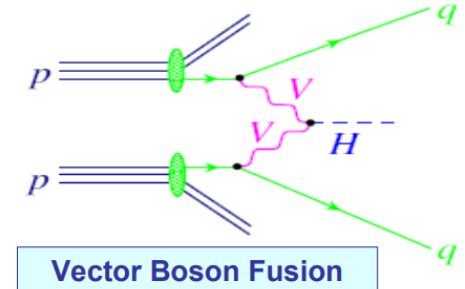
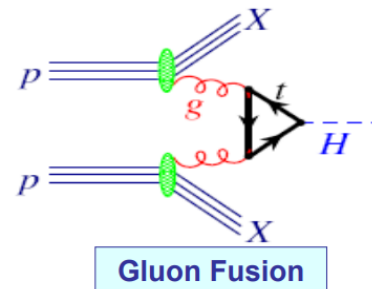
- Higgs:  $M \sim 100 \text{ GeV}/c^2$ 
  - LHC:  $\langle x_p \rangle = 100/14000 \approx 0.007$



# Produkcja bozonu Higgsa na LHC

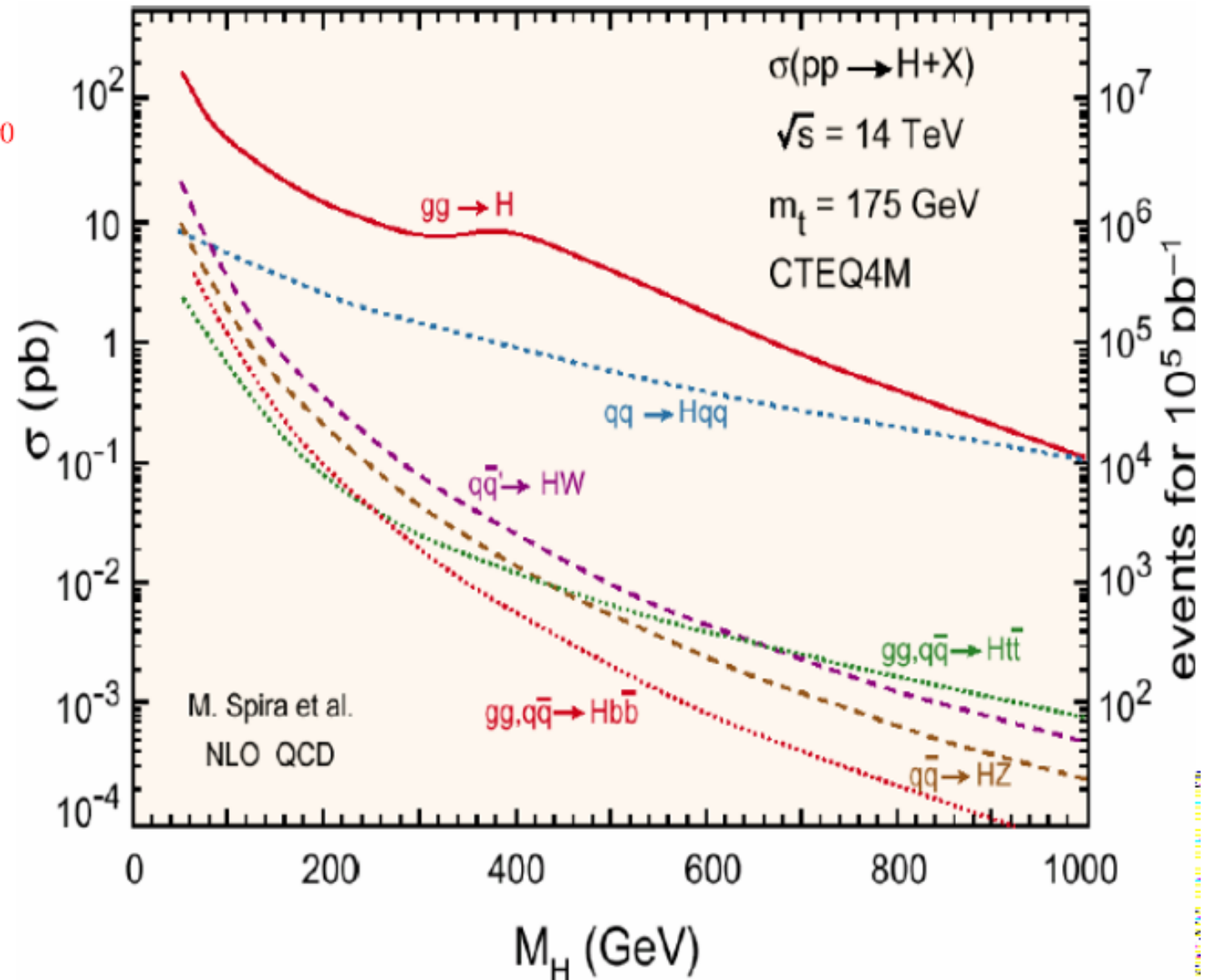
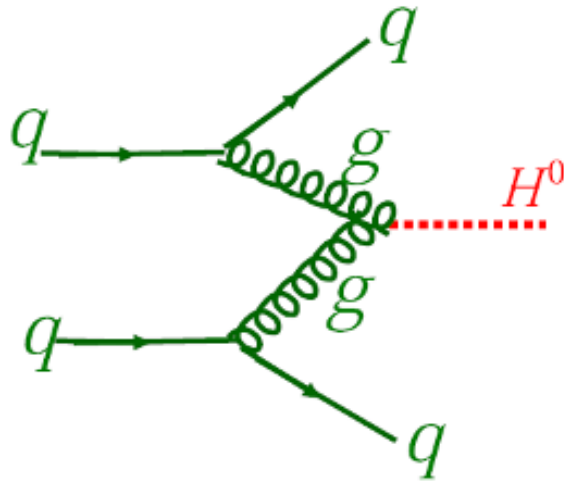


- Neutralne bozony najczęściej produkowane są z anihilacji kwart-antykwarek.
- W LHC są zderzane protony – antykwarki pochodzą tylko z morza.
- Stąd dominującym procesem prowadzącym do produkcji Higgsa i bozonów W i Z jest tzw fuzja gluonowa:





# Rozpady bozonu Higgsa na LHC

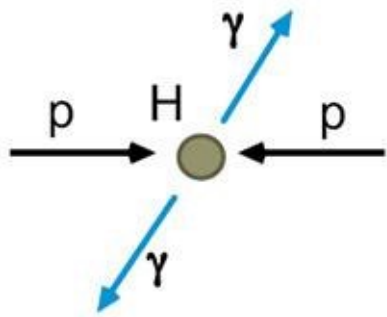


# Obserwacja bozonu Higgsa na LHC

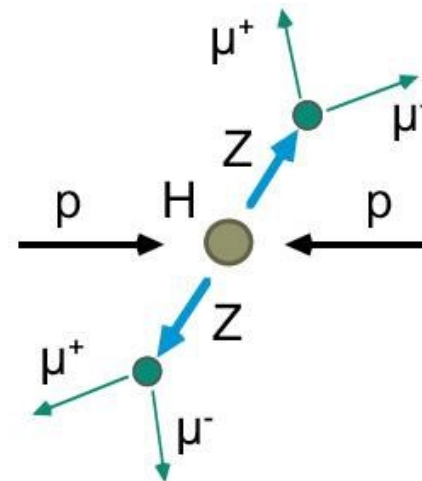
Bozon Higgsa może rozpaść się na kilkanaście sposobów, w zależności od swojej masy (której nie znamy).

Poszukiwaliśmy go zatem w rozpadach, które można łatwo zidentyfikować:

$H \rightarrow \gamma\gamma$  (dwa fotony)



$H \rightarrow 4 \text{ leptony}$   
(elektrony, miony)

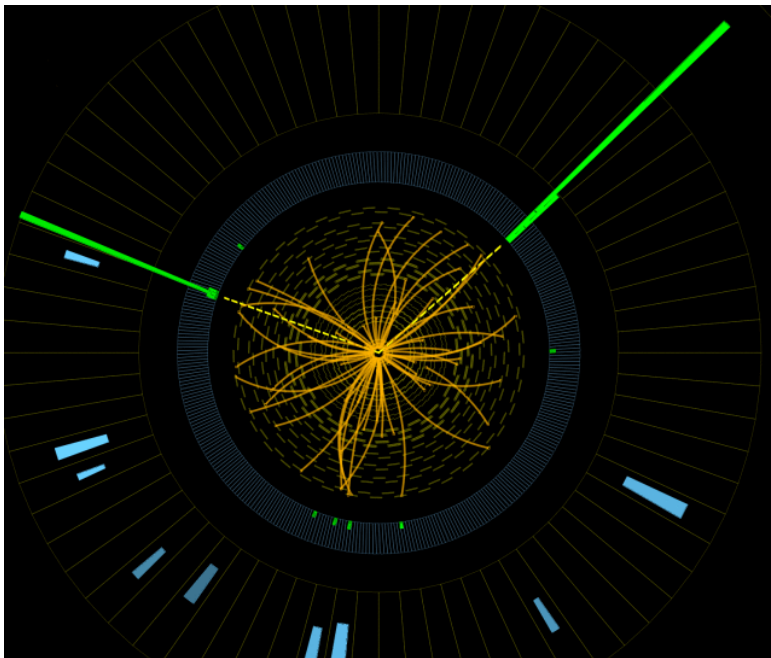


# Obserwacja bozonu Higgsa na LHC

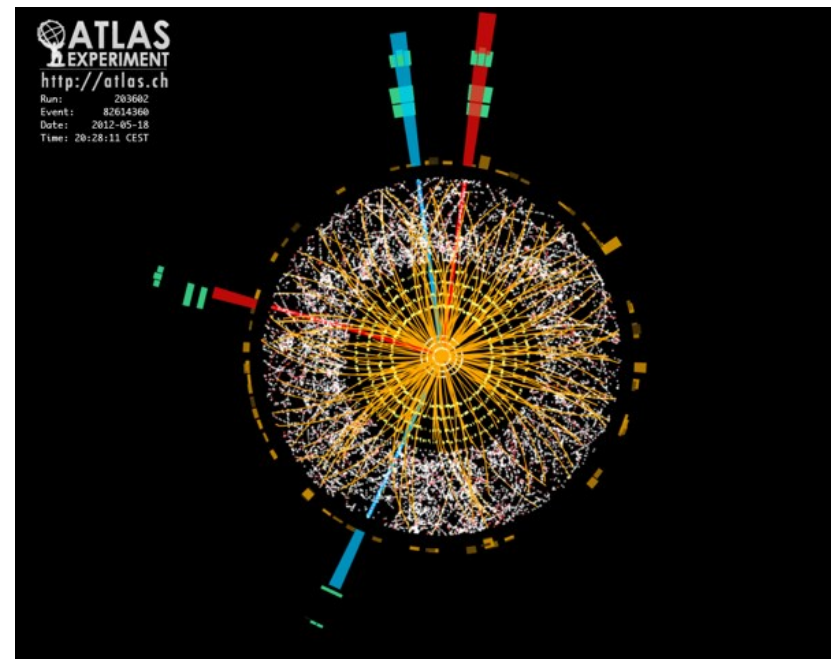
Bozon Higgsa może rozpaść się na kilkanaście sposobów, w zależności od swojej masy (której nie znamy).

Poszukiwaliśmy go zatem w rozpadach, które można łatwo zidentyfikować:

$H \rightarrow \gamma\gamma$  (dwa fotony)



$H \rightarrow 4 \text{ leptony}$   
(elektrony, miony)

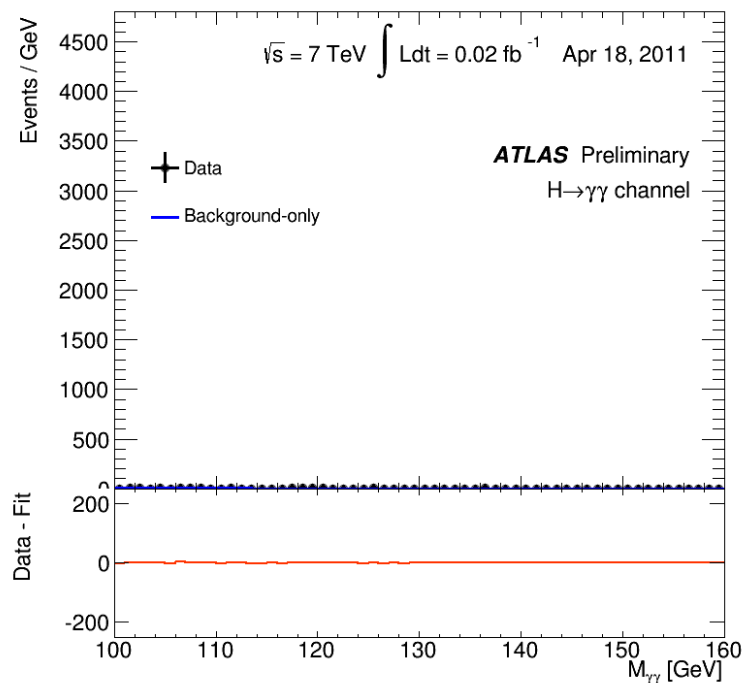


# Obserwacja bozonu Higgsa na LHC

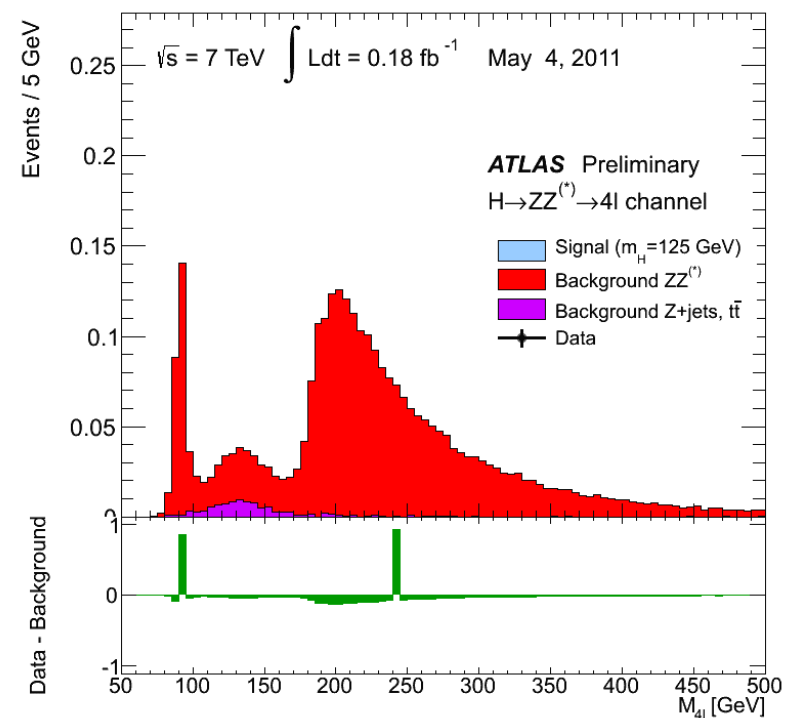
Bozon Higgsa może rozpaść się na kilkanaście sposobów, w zależności od swojej masy (której nie znamy).

Poszukiwaliśmy go zatem w rozpadach, które można łatwo zidentyfikować:

$H \rightarrow \gamma\gamma$  (dwa fotony)



$H \rightarrow 4 \text{ leptony}$   
(elektrony, miony)



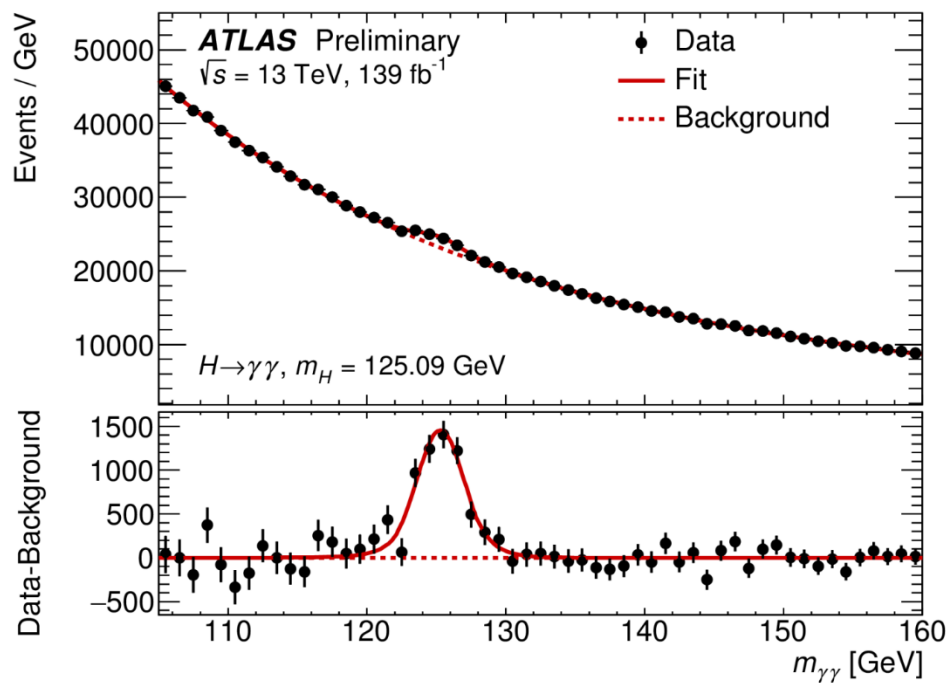
ATLAS Experiment © 2014 CERN

# Obserwacja bozonu Higgsa na LHC

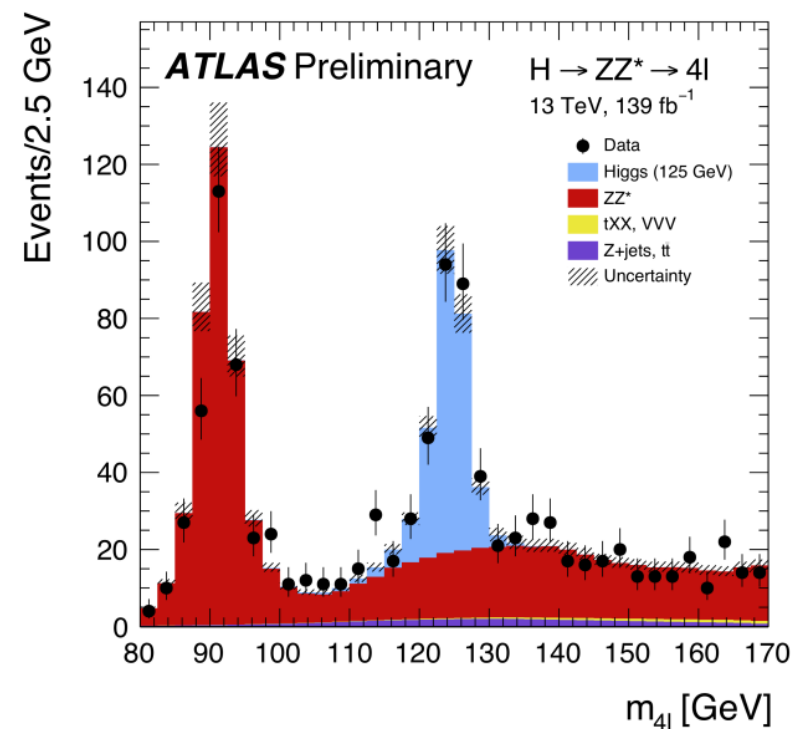
Bozon Higgsa może rozpaść się na kilkanaście sposobów, w zależności od swojej masy (której nie znamy).

Poszukiwaliśmy go zatem w rozpadach, które można łatwo zidentyfikować:

$H \rightarrow \gamma\gamma$  (dwa fotony)

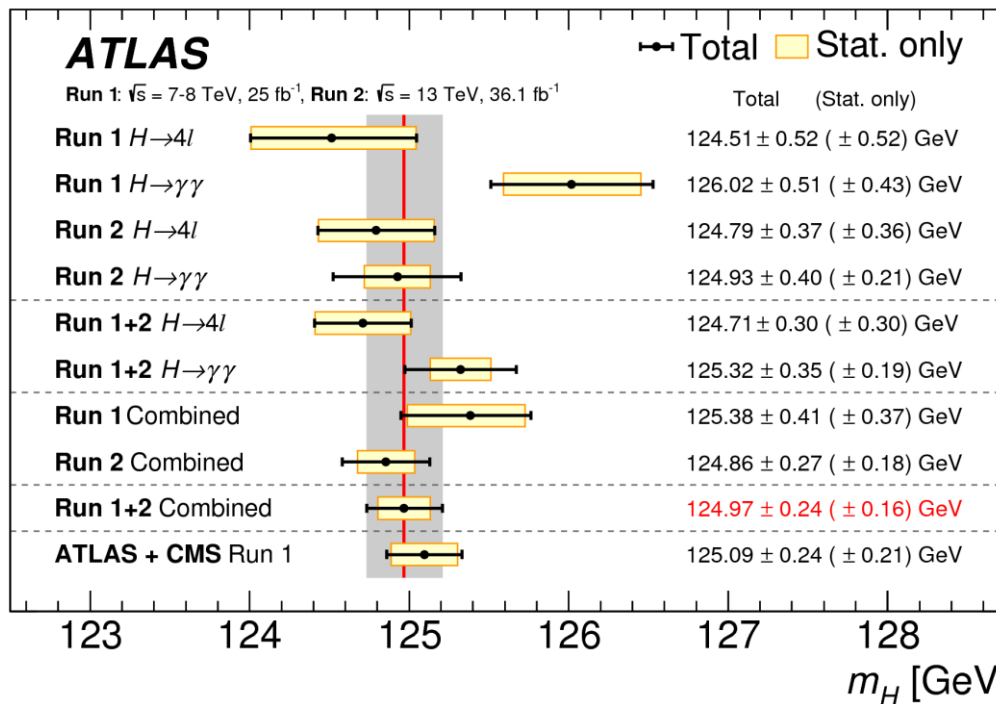
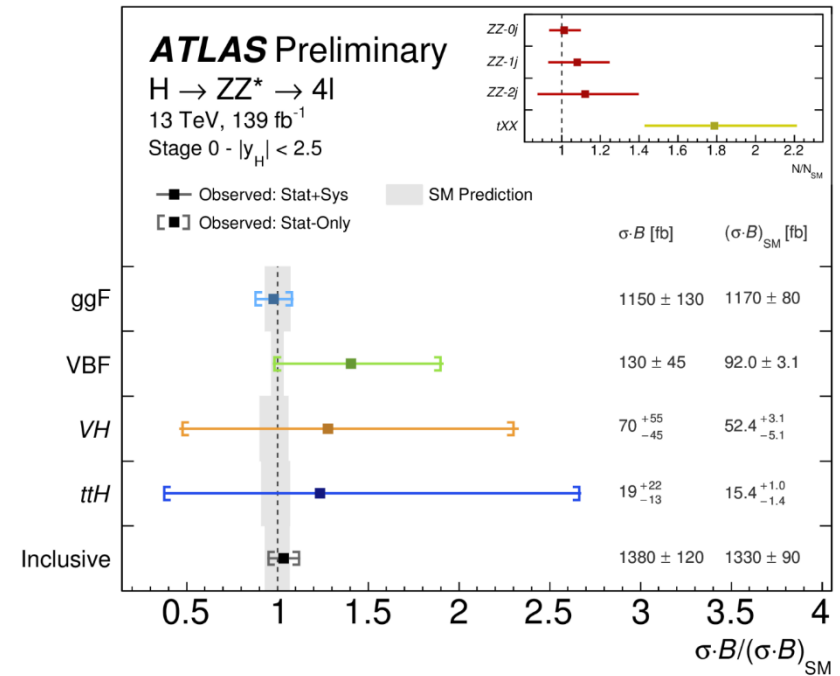
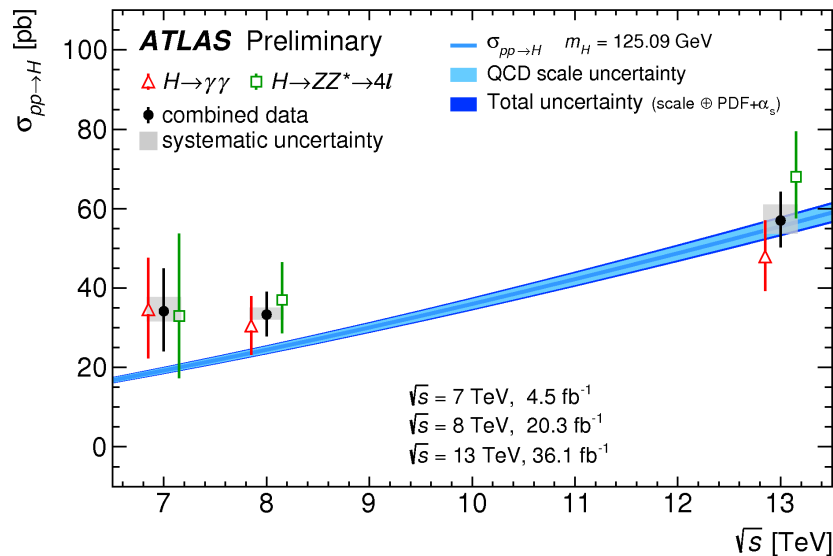


$H \rightarrow 4 \text{ leptony}$   
(elektrony, miony)



ATLAS Experiment © 2014 CERN

# Higgs @ ATLAS

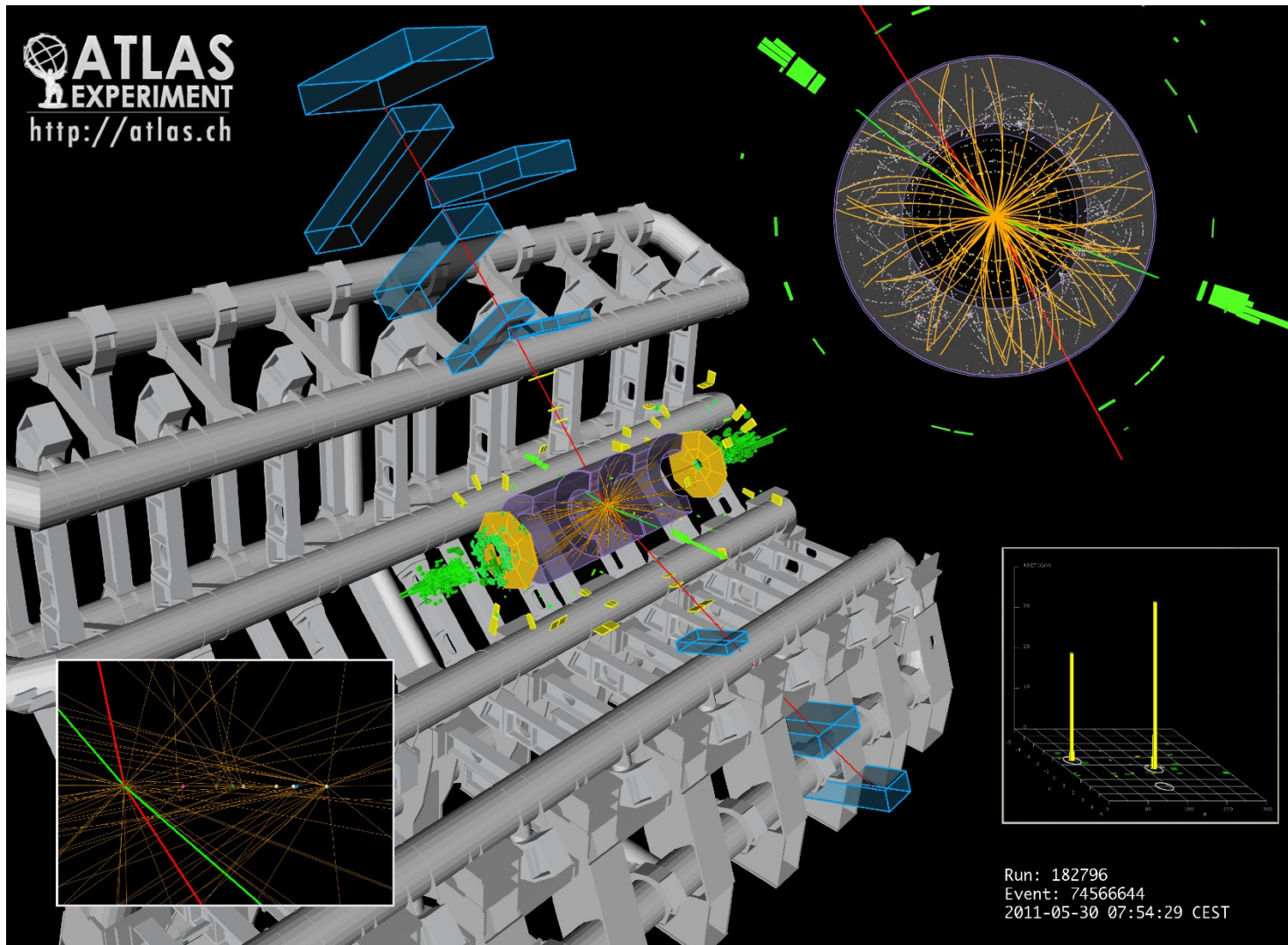


**Peter Higgs**  
 2013 – laureat  
 nagrody Nobla



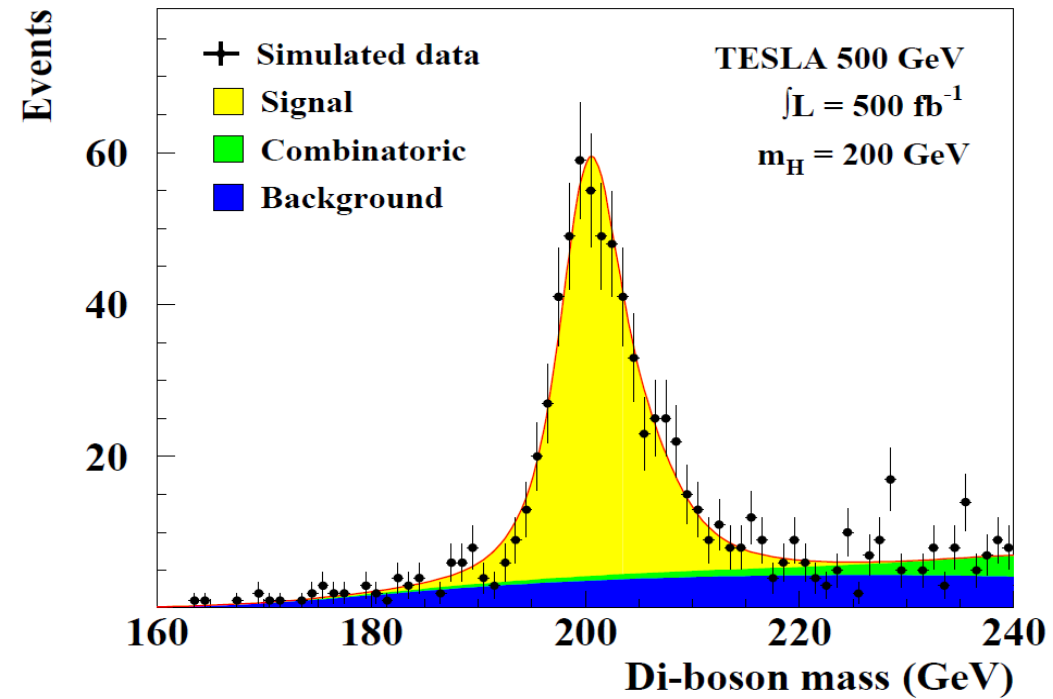
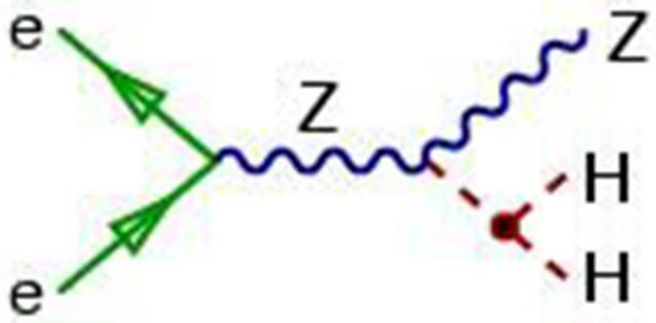
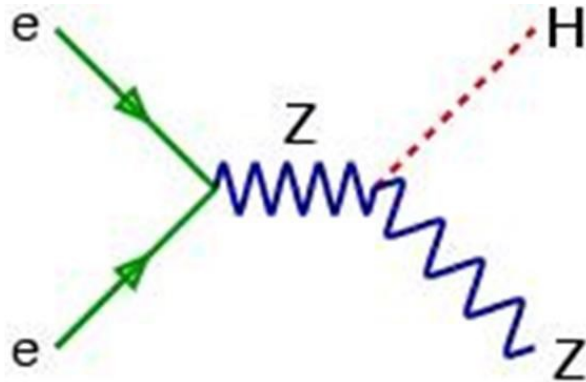


# Jaki to przypadek?



# Higgs na ILC

International Linear Collider = Higgs factory:



# Higgs na ILC

International Linear Collider = Higgs factory:

	ILC	ILC	ILC	CLIC	CLIC	CLIC	LEP3
$\sqrt{s}$ [GeV]	250	500	1000	500	1500	3000	240
Luminosity [ $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ]	0.75	1.8	4.9	1.3	3.7	5.9	1 per IP
>0.99 $\sqrt{s}$ fraction	87%	58%	45%	54%	38%	34%	100%
polarization $e^-$	80%	80%	80%	80%	80%	80%	-
polarization $e^+$	30%	30%	20%	>50%?	>50%?	>50%?	-
beam size $\sigma_x$ [nm]	729	474	335	100	60	40	71000
beam size $\sigma_y$ [nm]	7.7	5.9	2.7	2.6	1.5	1	320
Power [MW]	128	162	300	235	364	589	200

**$L \sim 10^{34}$  (250 GeV)  $\rightarrow$  20,000 H / year**

Philip Burrows

# Dzisiaj na LHC

4 grudnia 2018 skończyło się zbieranie danych na LHC (2-letnia przerwa na przygotowania Run III)

- Osiągnięta świetność LHC powyżej nominalnej.
- Odkrycie bozonu Higgsa.
- Łamanie parzystości CP.
- Brak dowodów na Nową Fizykę.

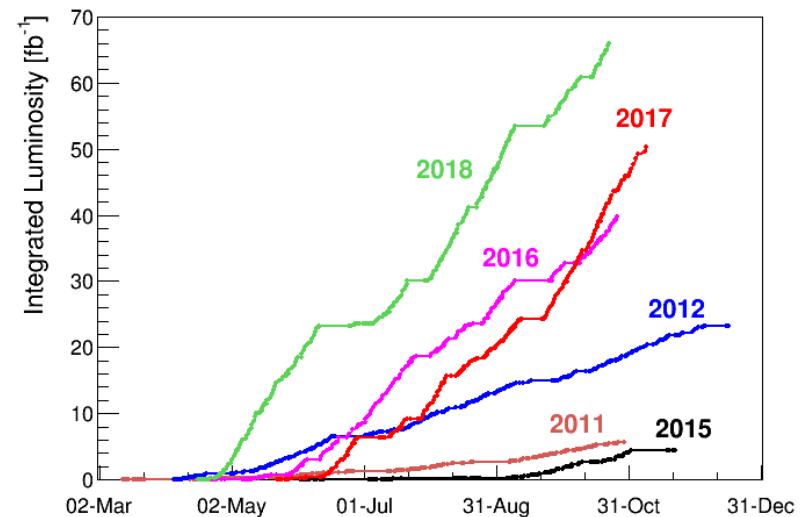
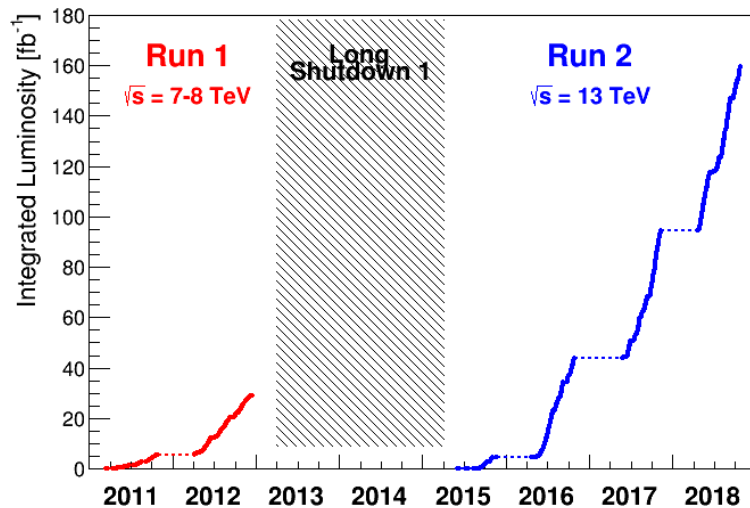
LHC Page1    Fill: 7501    E: 450 GeV    t(SB): 00:00:00    21-05-21 11:13:46

**SHUTDOWN: NO BEAM**

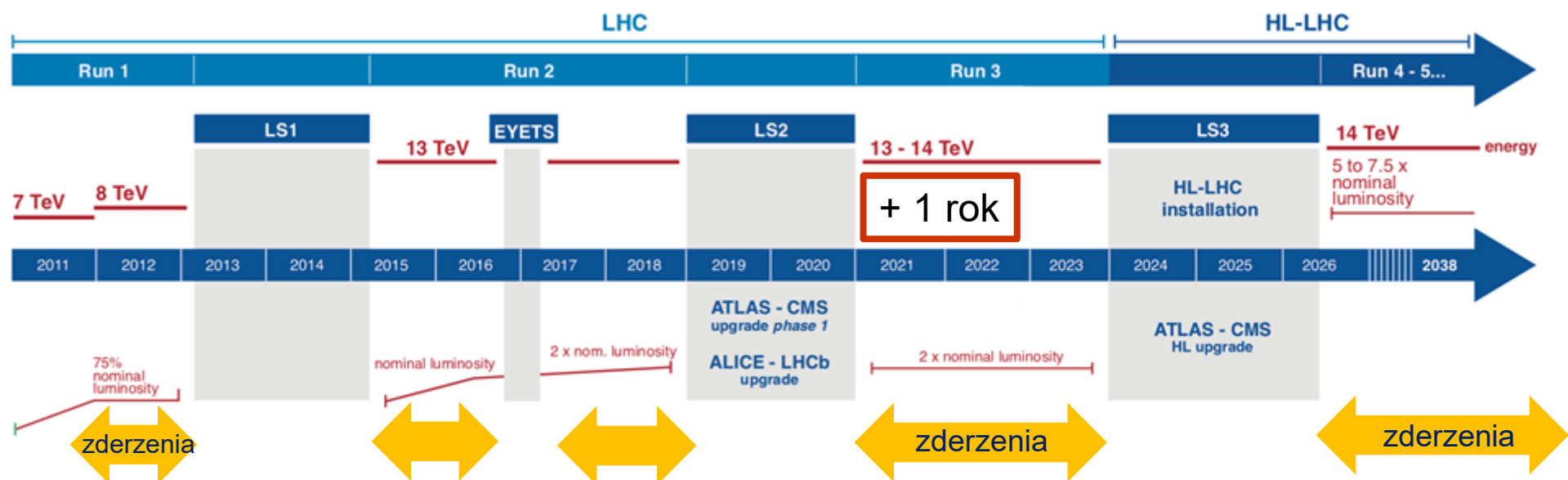
Comments (19-May-2021 17:28:40)  
W20 powering in all points  
Magnet training in S12, S23, S34 and S45

BIS status and SMP flags		B1	B2
Link Status of Beam Permits		false	false
Global Beam Permit		false	false
Setup Beam		false	false
Beam Presence		false	false
Moveable Devices Allowed In		false	false
Stable Beams		false	false

AFS: 25ns\_315b\_302\_225\_228\_48bpl\_11inj\_800ns\_3INDIVPM Status B1 **ENABLED** PM Status B2 **ENABLED**



# Jutro na LHC- Higher Lumi



## The High Luminosity Large Hadron Collider

The New Machine for Illuminating the Mysteries of Universe

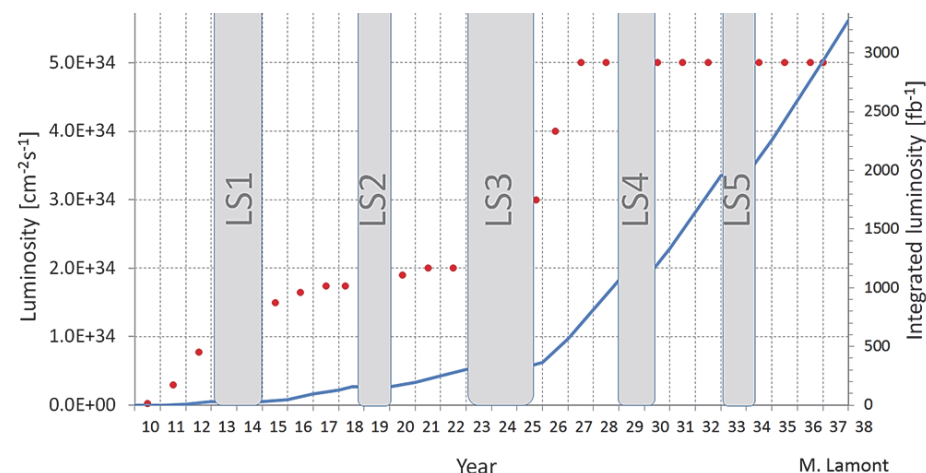
[HL-LHC Technical Design Report](#) and the [HL-LHC book](#)

### Program fizyczny:

- Badania bozonu Higgsa.
- Fizyka poza Modelem Standardowym (BSM).

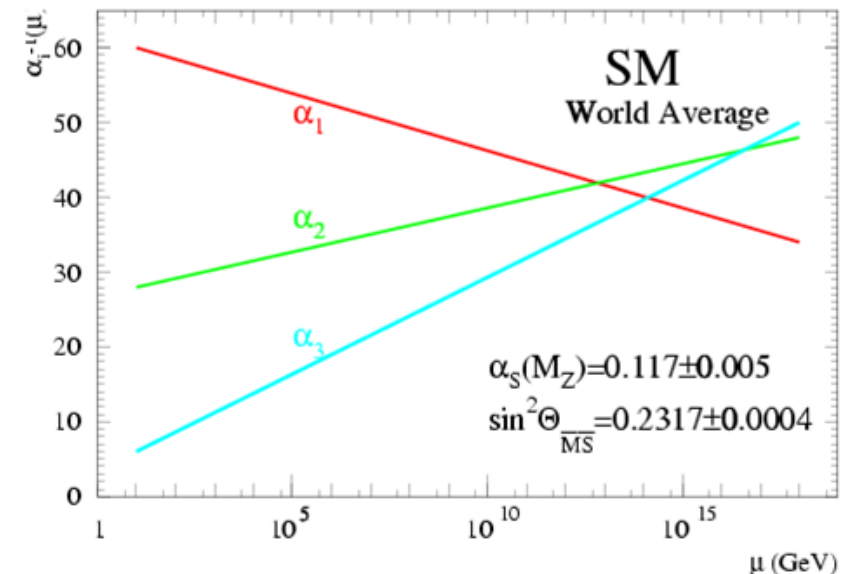
### Upgrade:

- Modernizacja optyki akceleratora (nowe magnesy, punkty oddziaływań):
- Problem zniszczeń radiacyjnych w detektorach (głównie krzemowych)



# Poza Modelem Standardowym

- Model Standardowy to teoria w której leptony i kwarki oddziałują ze sobą poprzez wymianę bozonów pośredniczących.
- Opis oddziaływań elektroślabych i silnych bardzo dobrze zgadza się z doświadczeniem.
- Po rozwiązaniu problemu mas cząstek, MS nie przewiduje **Wielkiej Unifikacji** (GUT), a w szczególności nie unifikuje oddz. grawitacyjnych.
- W MS aż 19 parametrów wyznaczanych jest eksperymentalnie.
- W MS nic nie wiadomo o masach neutrin.
- To, co wykracza poza MS nazywamy **Nową Fizyką** (lub Beyond Standard Model)
- Unifikacja oddziaływań (GUT)– przy pewnej skali energii stałe oddziaływań przyjmują tę samą wartość, ale obliczenia pokazują, że w obszarze  $10^{11} - 10^{16}$  GeV stałe te **zbiegają się tylko parami**.
- **Problem hierarchii** – dlaczego jest tak duża „przerwa” w skali energii pomiędzy unifikacją elektroślabą a GUT ( $10^2$  GeV a  $10^{16}$  GeV), a mało brakuje do SGUT ( $10^{19}$  GeV)?  
Jest to przesłanka, że w tym obszarze jest miejsce na nowe zjawiska.
- Problem ekspansji Wszechświata i składników Ciemnej Energii. Rozpad protonu?
- Jednym z rozwiązań jest wprowadzenie nowego świata cząstek – **cząstek supersymetrycznych (1970)**.
- Teoria – MSSM Minimal Supersymmetric Standard Model





# MSSM

Sypersymetria: symetria łącząca cząstki o różnych spinach.

Mamy operator Q:  $\hat{Q}|bozon\rangle = |fermion\rangle$ , który zmienia spin cząstki.

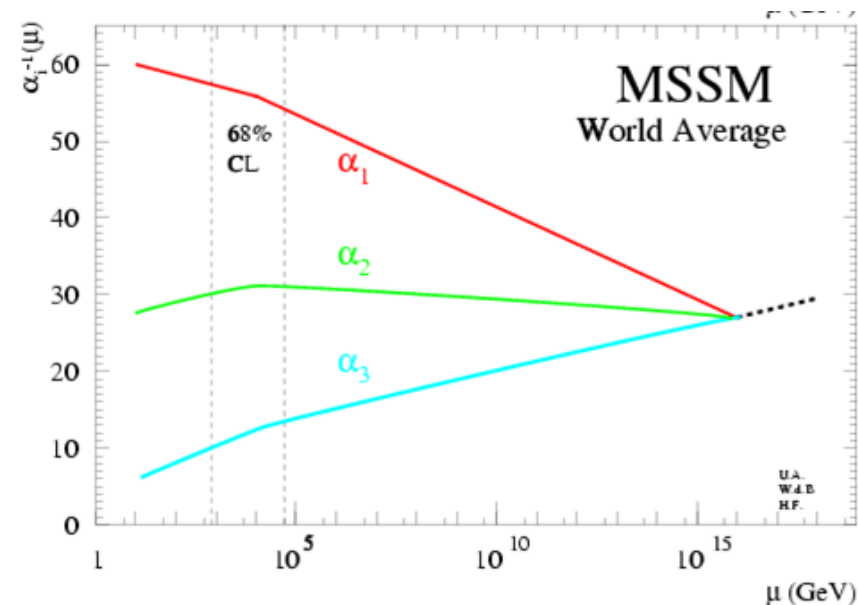
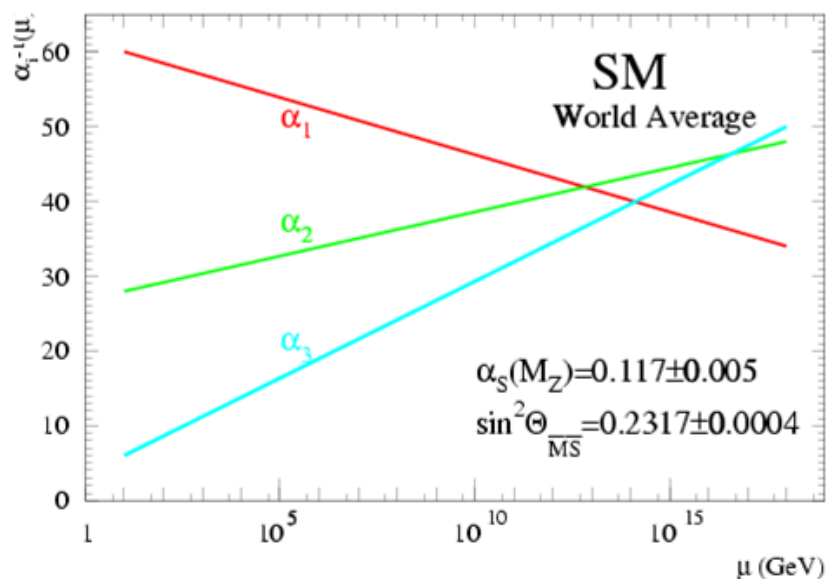
Pojawiają się supersymetryczni partnerzy zwykłych cząstek (o ciekawych nazwach):

cząstki SM	R	partnerzy SUSY	R
Spin = 1/2 { kwark $q$ lepton $l$	1 1	Spin = 0 { skwark $\tilde{q}$ slepton $\tilde{l}$	-1 -1
Spin = 1 { W $W$ Z $Z$ foton $\gamma$ gluon $g$	1	Spin = 1/2 { wino $\tilde{W}$ zino $\tilde{Z}$ fotino $\tilde{\gamma}$ gluino $\tilde{g}$	-1
Spin = 0 higgs $H^0$ $H^\pm$	1	Spin = 1/2 higgsino $\tilde{H}^0$ $\tilde{H}^\pm$	-1

Mamy 3 generacje skwarków i sleptonów.

Sektor Higgsa jest rozszerzony o nowe stany:  $h^0, A^0, H^\pm$  i ich partnerów supersymetrycznych.

# SUSY – wielka unifikacja



Gdyby masa najlżejszej s-cząstki była rzędu  $M_W$ , skala GUT przesunęła się do  $10^{16}$  GeV.

Zmierzone stałe sprzężenia zbiegają się przy skali GUT w SUSY a nie w MS.

Czas życia protonu byłby rzędu  $10^{33}$  lat.

Gdyby supersymetria była symetrią dokładną, masy cząstek i ich s-cząstek byłyby takie same (no i byłyby już obserwowane).

Brak obserwacji cząstki Higgsa daje się wytłumaczyć istnieniem ciężkich cząstek supersymetrycznych.

Przy teoriach SUSY jest bardzo dużo przewidywać łamania CP (np. elektryczny moment dipolowy neutronu)

# Parzystość R

Każdy **fermion** ma swojego supersymetrycznego **partnera bozonowego**.

Każdy **bozon** ma swojego **partnera fermionowego**.

W teoriach supersymetrycznych jest więcej cząstek Higgsa.

Supersymetryczne bozony pośredniczące są mieszaniną s-bozonów:

$$gaugino = \tilde{\gamma}, \tilde{W}^{\pm}, \tilde{Z}^0$$

$$chargino(\chi_{1,2}^{\pm}) = \tilde{W}^{\pm}, \tilde{H}^{\pm}$$

$$neutralino(\chi^0)_{1,2,3,4} = \tilde{Z}^0, \tilde{H}^0$$

Symetria zakłada te same masy, ładunki i stałe sprzężenia dla partnerów.

A skoro nie udało się nam na razie znaleźć cząstek SUSY, to znaczy, że

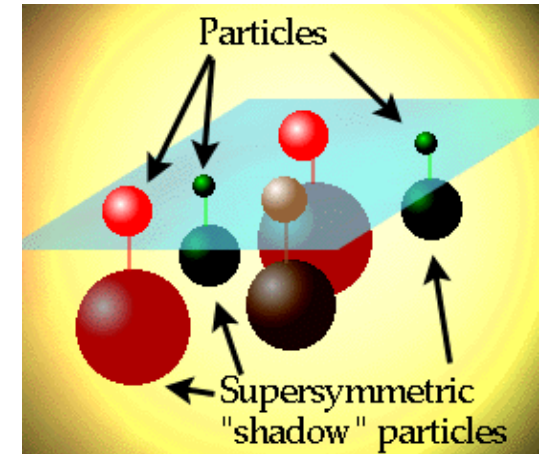
są one bardzo ciężkie:  $M_{SUSY} > 100 \text{ GeV}$

Liczba kwantowa zdefiniowana jako:

$$R = (-1)^{2J+3B+L} \begin{cases} \rightarrow +1 \text{ Cząstki MS} \\ \rightarrow -1 \text{ Cząstki SUSY} \end{cases}$$

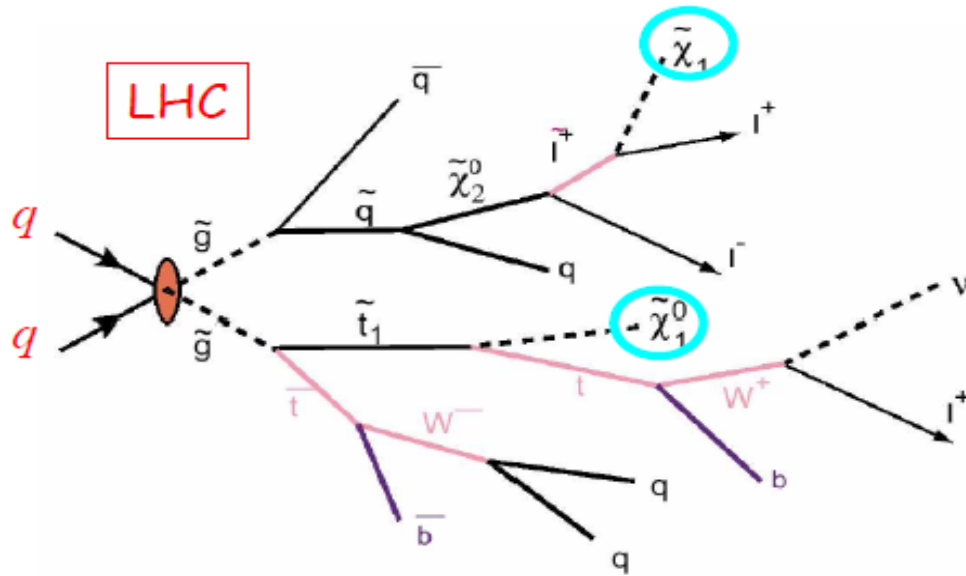
gdyby była zachowana w oddziaływaniach:

- cząstki SUSY produkowane w parach,
- najlżejsza cząstka (LSP) powinna być stabilna,
- LSP bardzo słabo oddziałuje (jak neutrino – nie widzimy go),
- LSP jest kandydatem na ciemną energię, oddziałują tylko grawitacyjnie



$$\text{LSP} \equiv \chi_{1,2}^{\pm} (\text{mieszanina fotina, zina i higsina})$$

# SUSY w LHC

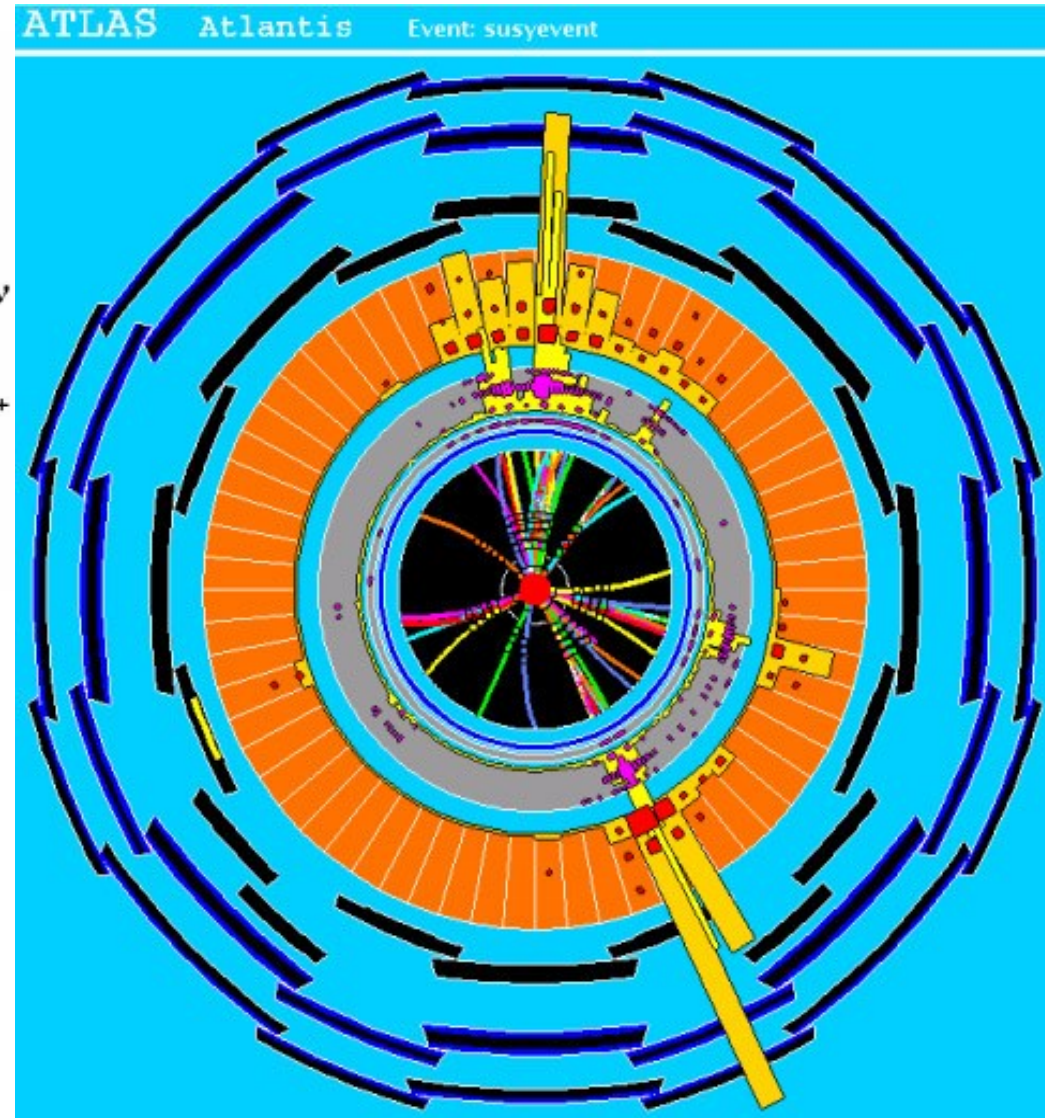


Jeśli SUSY istnieje, to łatwo (i szybko) może być znaleziona na LHC do 3 TeV.

Dzięki dużemu przekrojowi czynnemu i spektakularnym sygnałom tło do tych procesów jest małe.

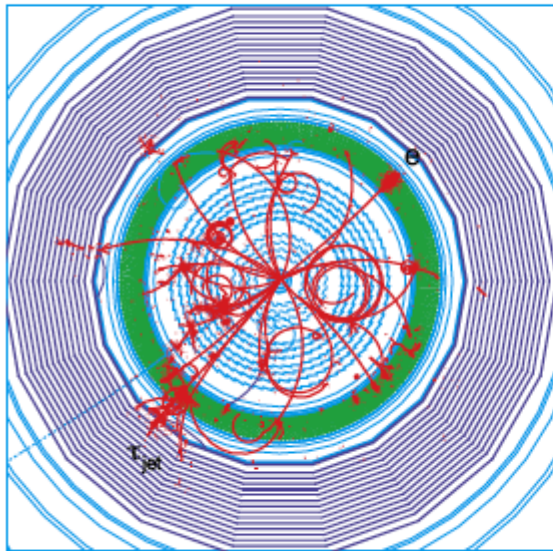
Jeśli nic nie znajdziemy na LHC: SUSY umrze

Jeśli ją znajdziemy: powinniśmy zmierzyć masy niektórych cząstek i zidentyfikować spin.

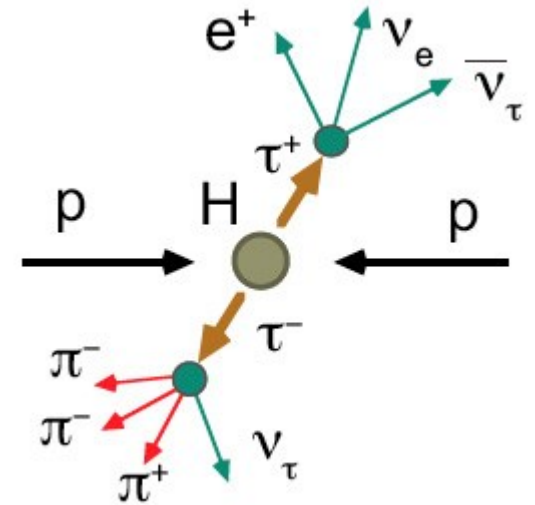
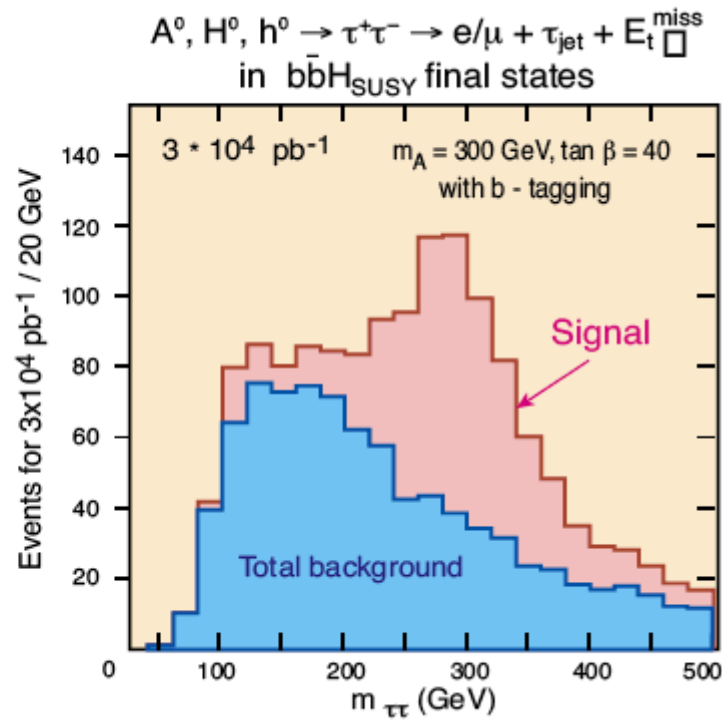


# Higgs SUSY

Teoria supersymetryczna przewiduje istnienie pięciu bozonów Higgsa



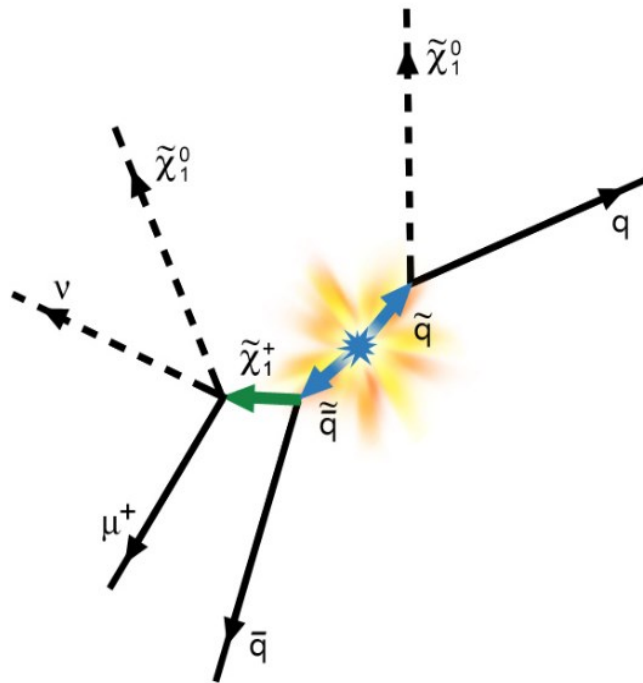
$H \rightarrow \tau\tau \rightarrow e + \tau_{\text{jet}}$  ("3-prong")





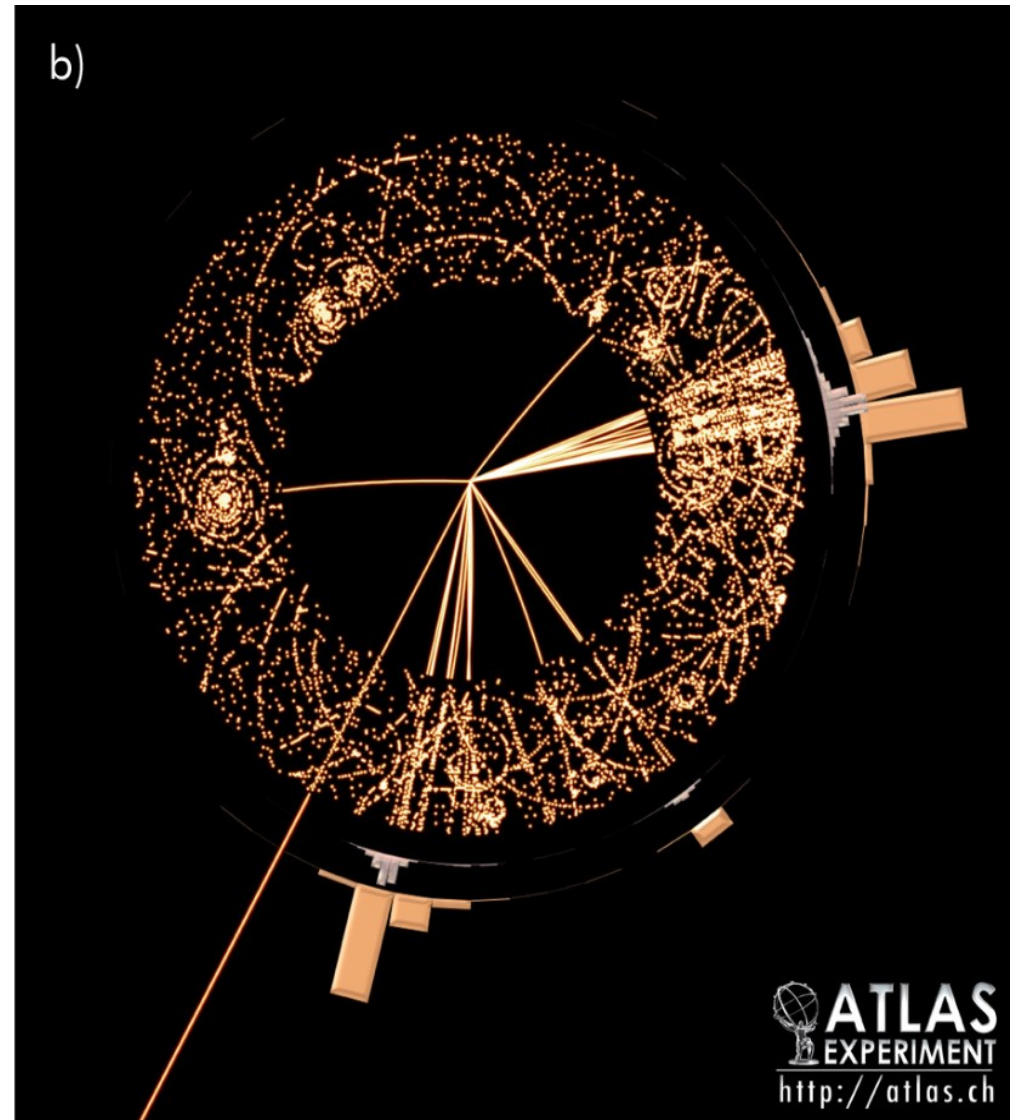
# Sygnatury SUSY - przykłady

a)



$q$  = quark  
 $\tilde{q}$  = squark  
 $\bar{q}$  = anti-quark  
 $\tilde{\bar{q}}$  = anti-squark  
 $\mu$  = muon  
 $\nu$  = neutrino  
 $\tilde{\chi}_1^+$  = chargino  
 $\tilde{\chi}_1^0$  = neutralino  
(lightest super-partner)

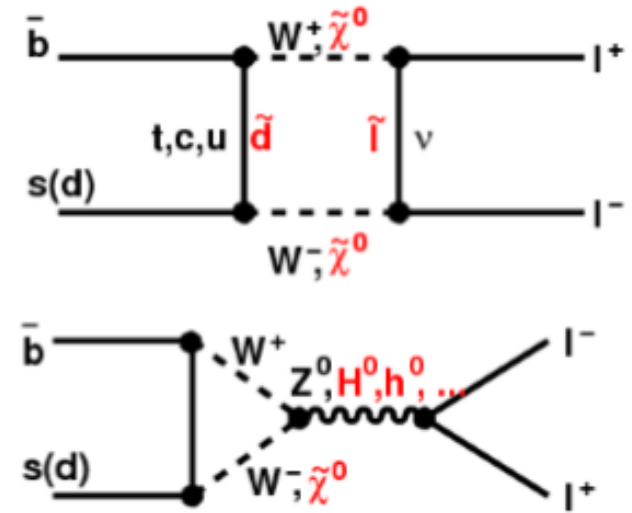
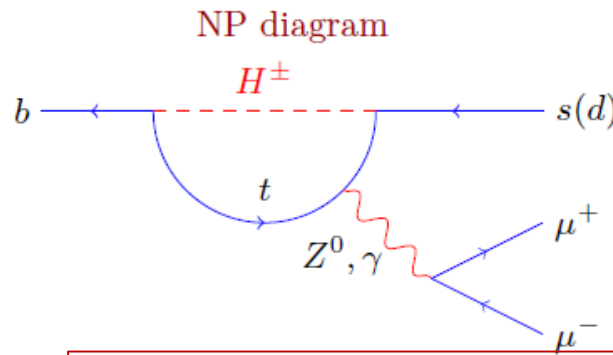
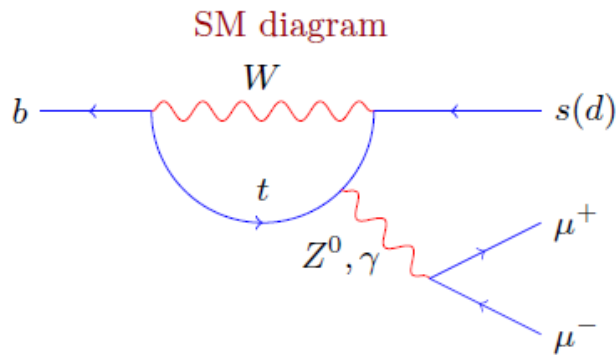
b)





# SUSY na LHCb

- Jeśli nowe cząstki istnieją, to powinny być również widzialne w pośrednich procesach, jako diagramy pętlowe, np. w rozpadach  $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$  i  $B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ :



- Wyniki LHCb nie znajdują dowodów na Fizykę poza Modelem Standardowym (BSM):

