

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

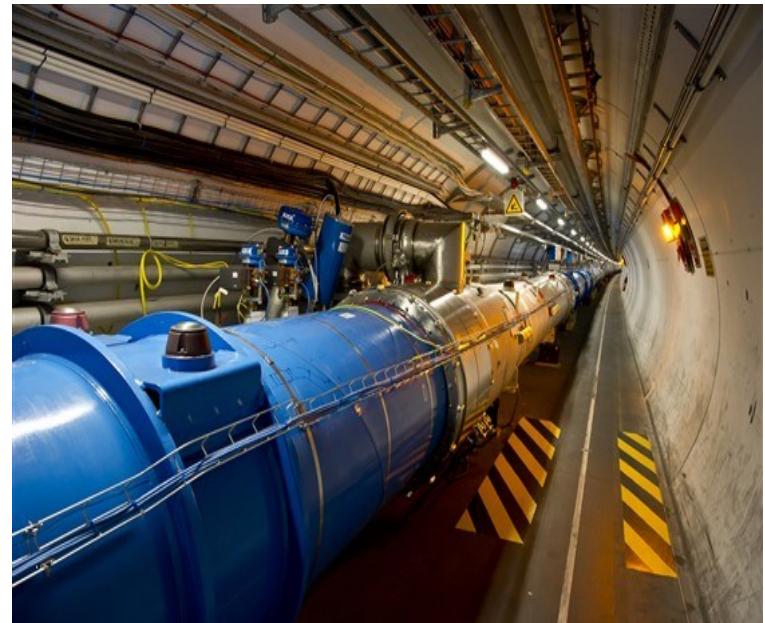
Program fizyczny

- Unifikacja oddziaływań elektroslabych 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 antimaterii),
- 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.



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 Φ (Higgsa). Cząstki oddziałując z nim, widziane będą jako ciężkie.

Bozon Higgosa – bo nie ma lepszego

- Pole Φ 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 Higgosa, w tzw. rozszerzeniach (supersymetrycznych) MS – nawet 5 bozonów Higgosa.
- 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:

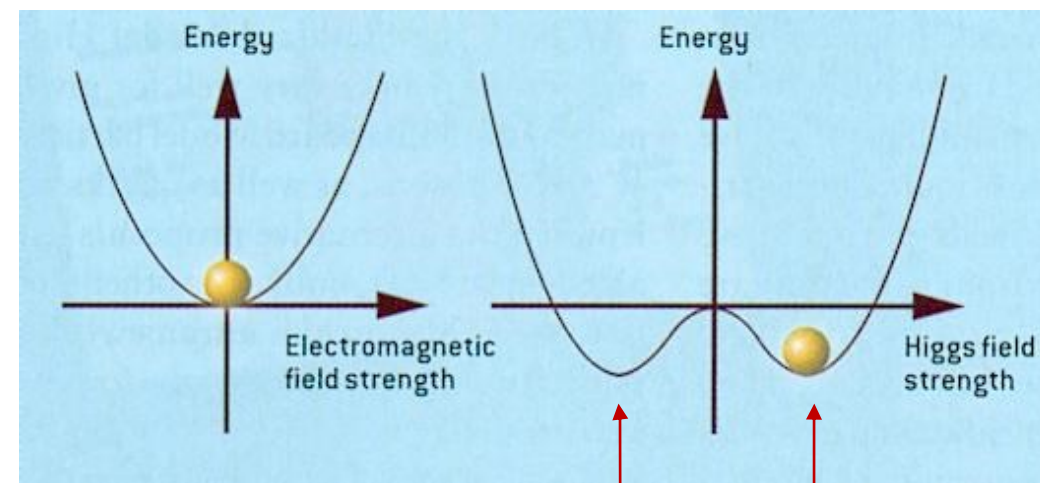
gdy $\mu > 0$ i $\mu^2 > 0$ (μ rzeczywiste),

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

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

$$\Phi_{min} = \pm \sqrt{\frac{-\mu^2}{\lambda}} \equiv \pm v;$$

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



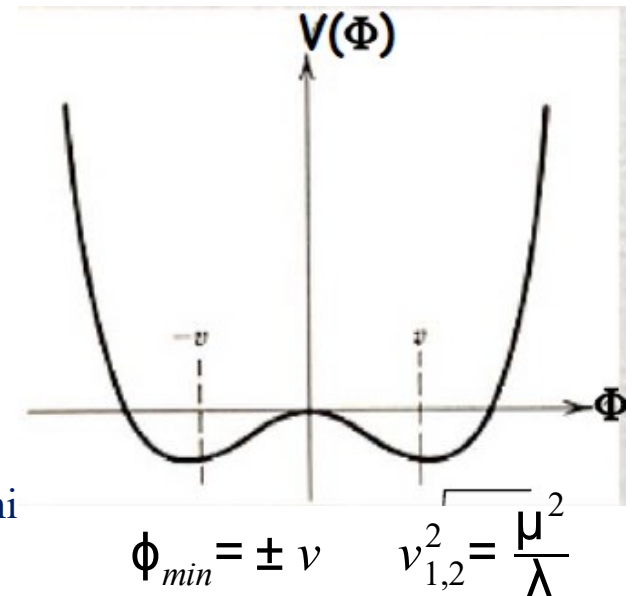
Pole Higgsa

Po wprowadzeniu nowego pola, w stanie o najniższej energii pole jest różne od zera, mówimy o próżniowej wartości oczekiwanej dla skalarnego 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 skalarnego pola.

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

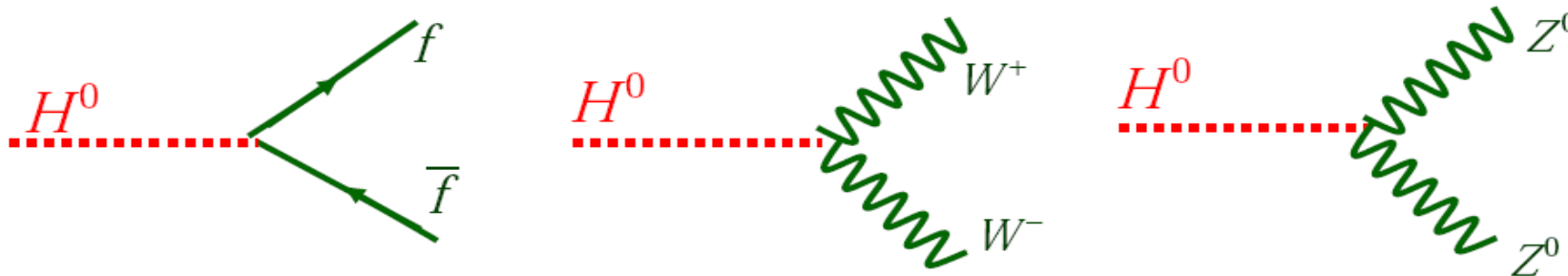


Anekdota o nadawaniu masy

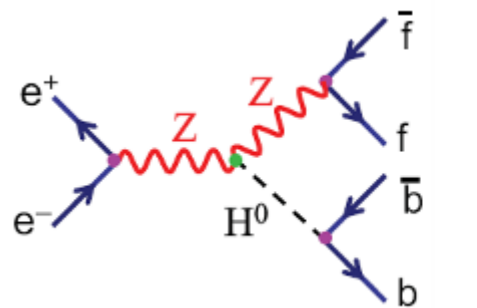
- Efekt ten nazwany został **Spontanicznym Łamaniem Symetrii (SSB)** i jest obserwowany w wielu aspektach, również makroskopowych (przykład).
- Peter Higgs wykazał, że takie niezerowe pole stawia opór cząstkom, które z nim oddziałują, czyli nadaje cząstkom masę.
- Mechanizm Higgsa podaje masy bozonów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

Poszukiwania bozonu Higgsa

Pierwsze poszukiwania bozonu Higgsa przy dostępnych energiach LEPu obejmowały procesy:

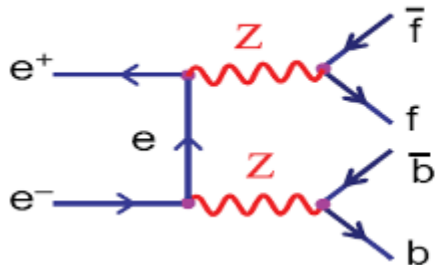


Stałe sprzężenia są proporcjonalne do masy cząstek w wierzchołku, zatem higgs najczęściej będzie rozpadał się do ciężkich cząstek.



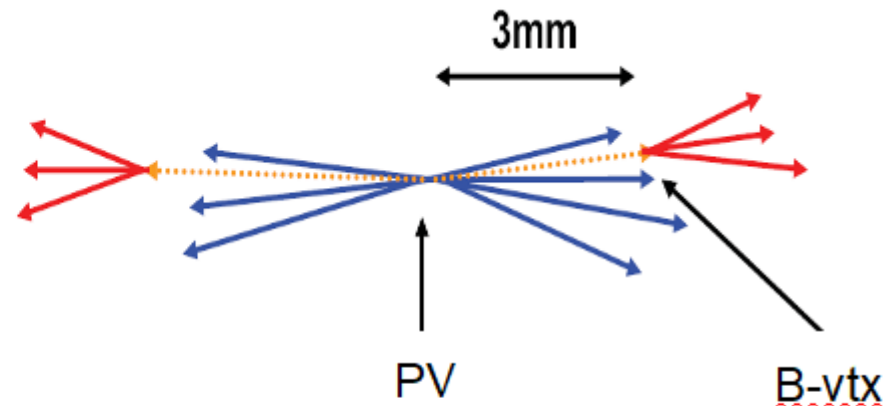
SYGNAŁ

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



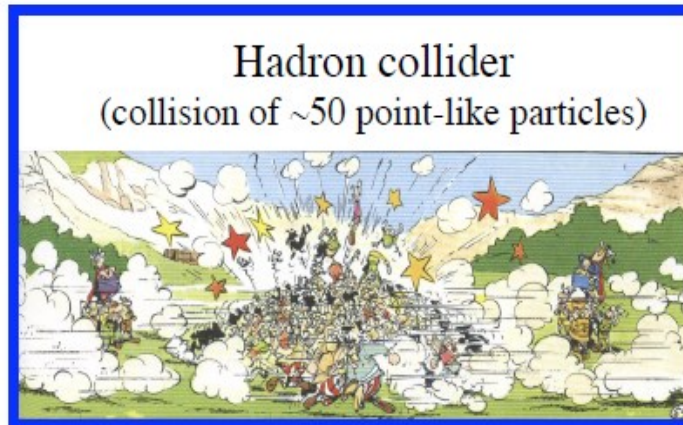
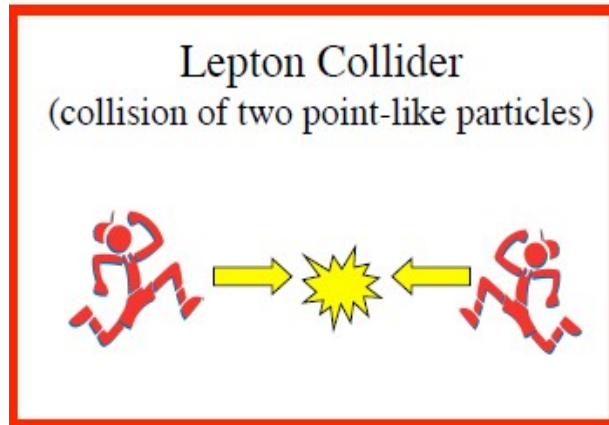
TŁO

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



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

Produkcja bozonu Higgsa na LHC

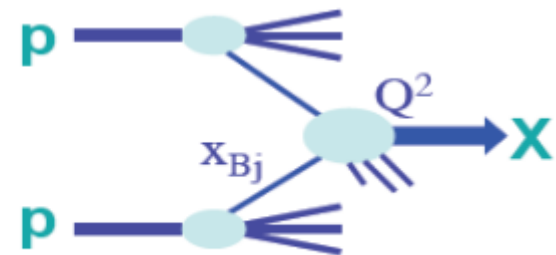


energia zderzającego się partonu:

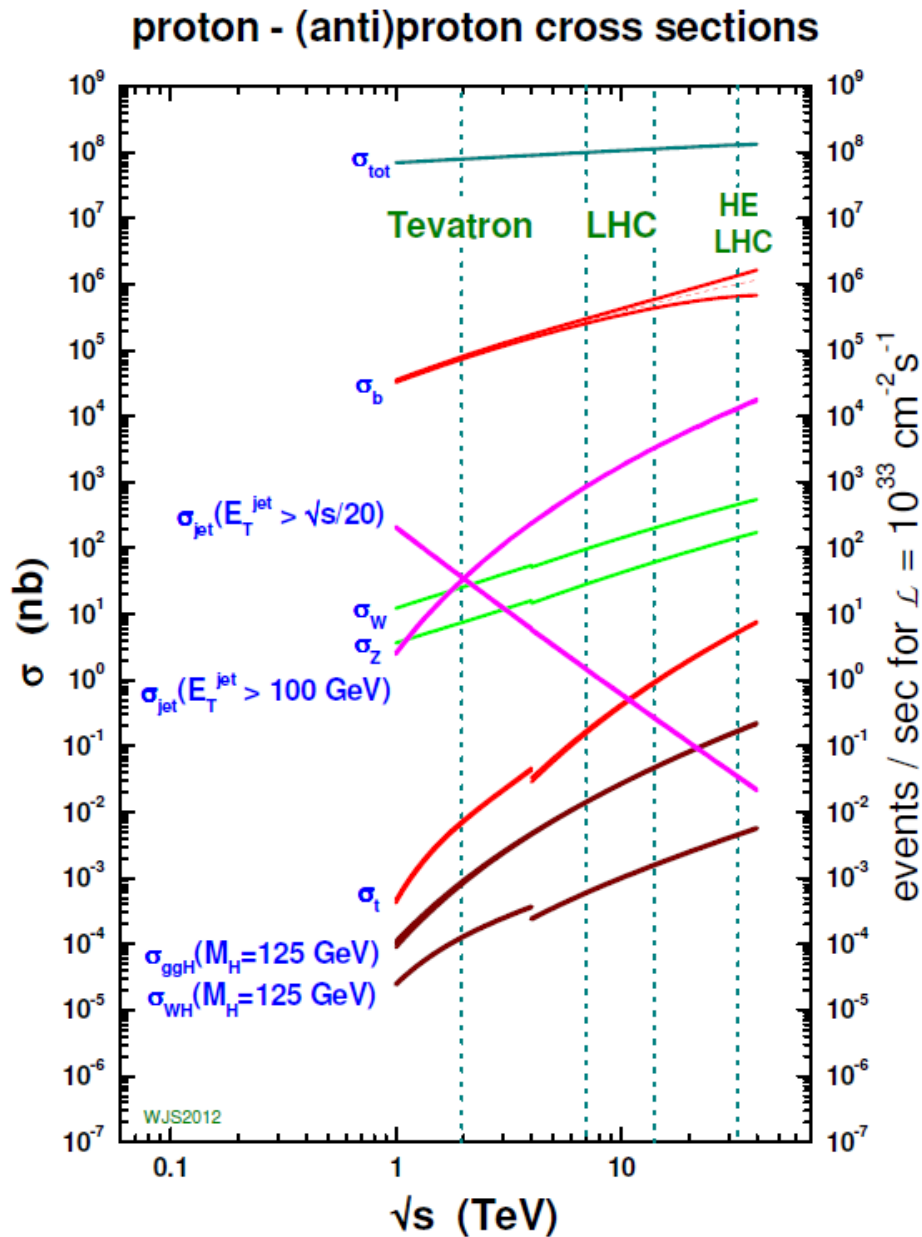
$$\hat{s} = x_p \cdot x_{\bar{p}} \cdot S$$

$$M_X = \sqrt{\hat{s}}$$

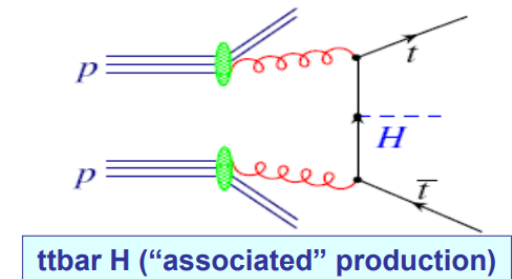
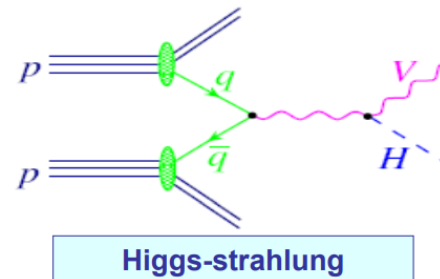
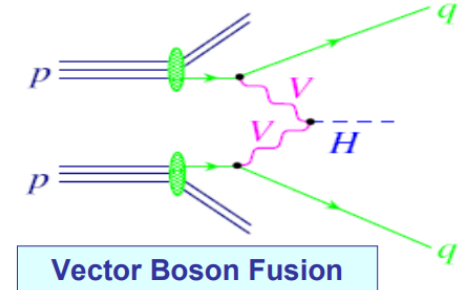
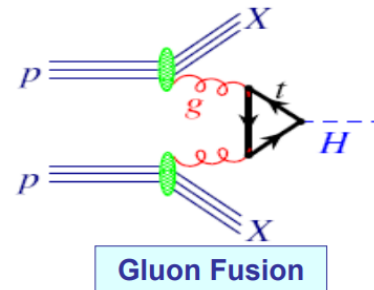
- Higgs: $M \sim 100 \text{ GeV}/c^2$
 - LHC: $\langle x_p \rangle = 100/14000 \approx 0.007$



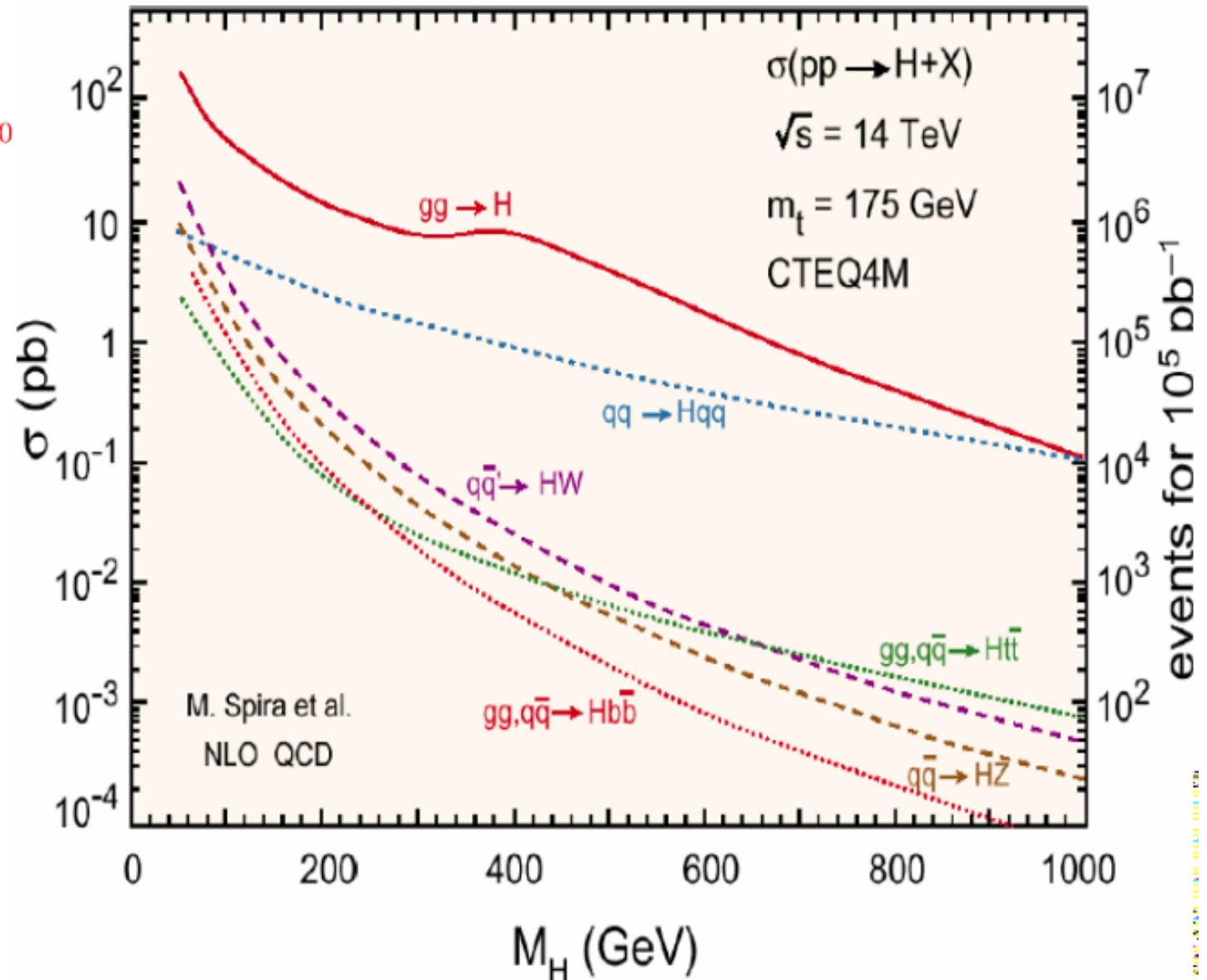
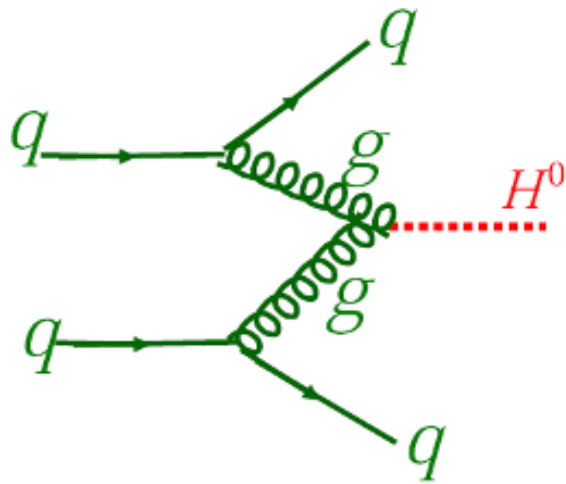
Produkcja bozonu Higgsa na LHC



- Neutralne bozony najczęściej produkowane są z anihilacji kwart-antykwarok.
- W LHC są zderzane protony – antykwaroki 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

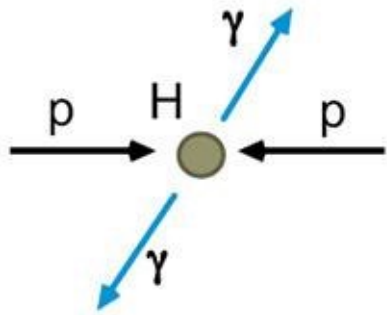


Obserwacja bozonu Higgsa na LHC

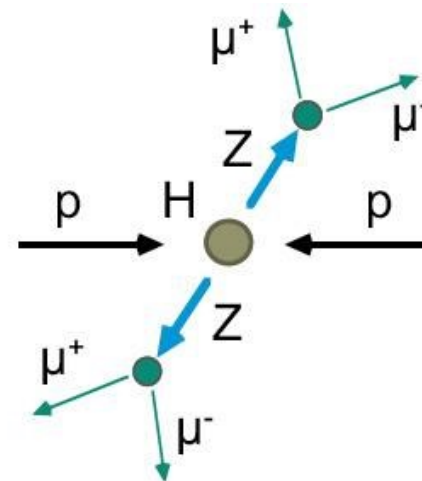
Bozon Higgsa może rozpaść się na kilkanaście sposobów, w zależności od swojej masy (której nie znamy).

Poszukiwaliśmy go zatem w rozpadach, które można łatwo zidentyfikować:

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



$H \rightarrow 4$ leptony
(elektrony, miony)

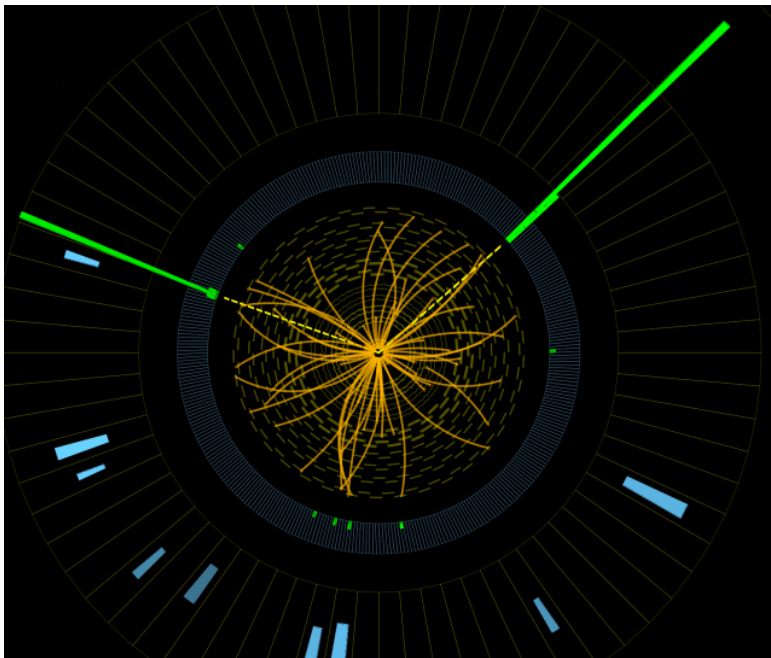


Obserwacja bozonu Higgsa na LHC

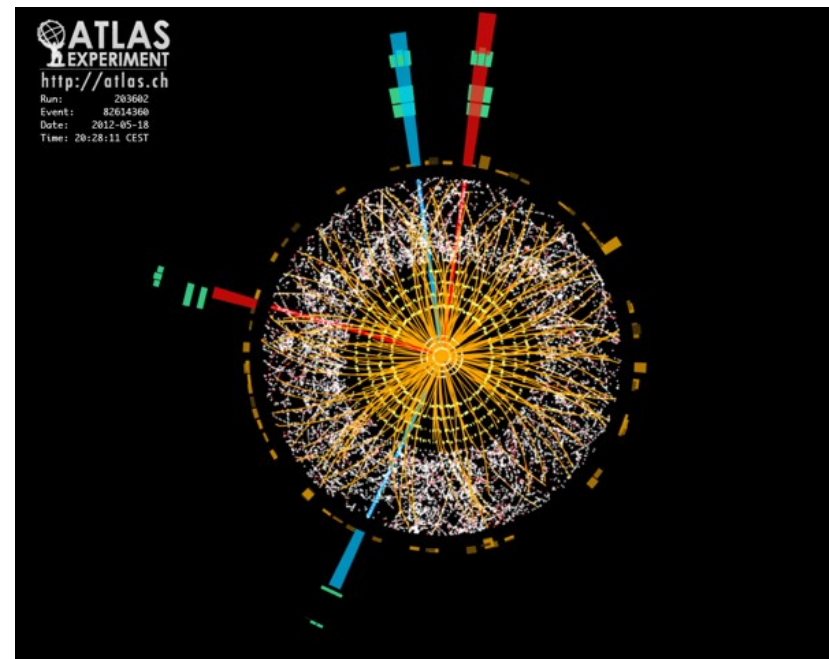
Bozon Higgsa może rozpaść się na kilkanaście sposobów, w zależności od swojej masy (której nie znamy).

Poszukiwaliśmy go zatem w rozpadach, które można łatwo zidentyfikować:

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



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

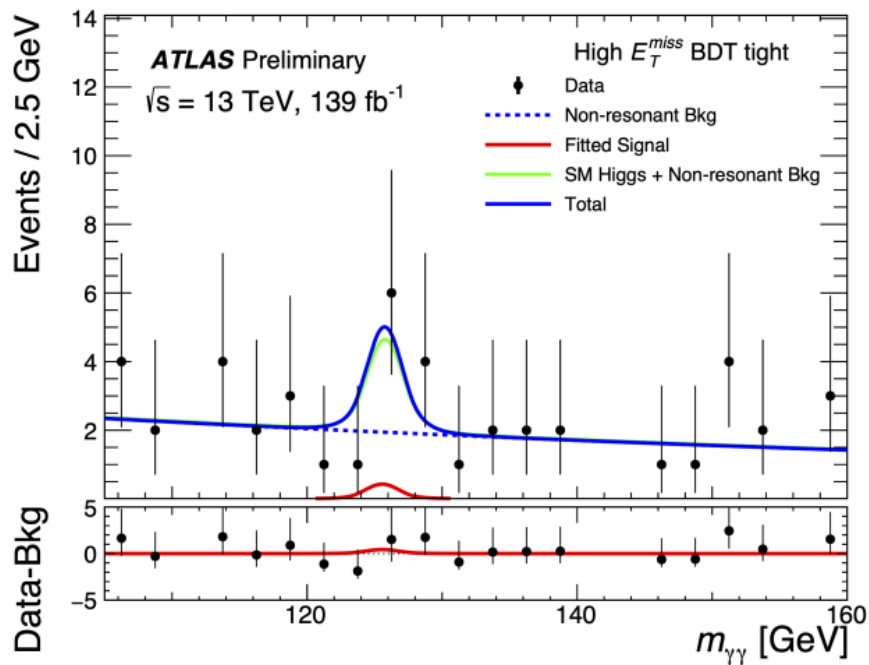


Obserwacja bozonu Higgsa na LHC

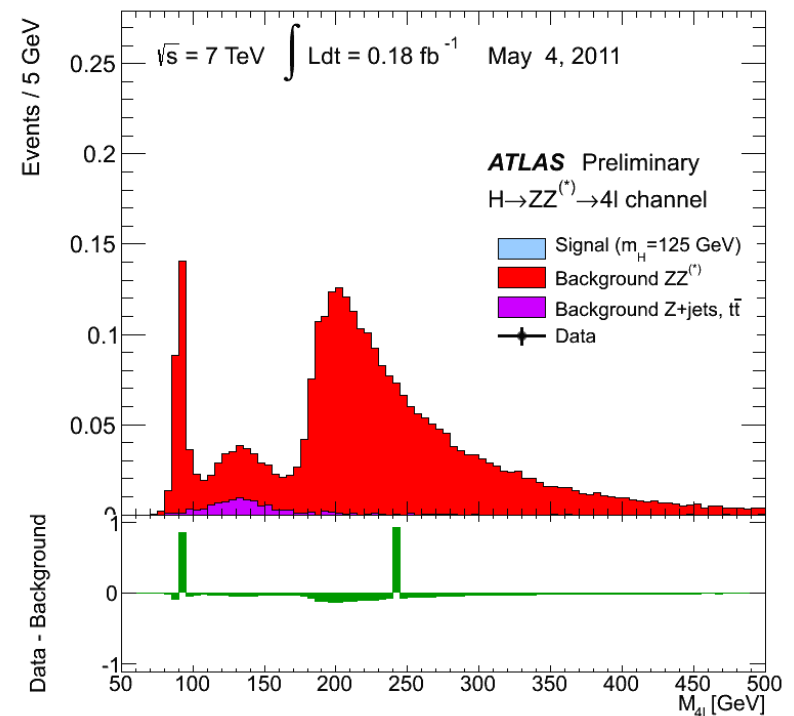
Bozon Higgsa może rozpaść się na kilkanaście sposobów, w zależności od swojej masy (której nie znamy).

Poszukiwaliśmy go zatem w rozpadach, które można łatwo zidentyfikować:

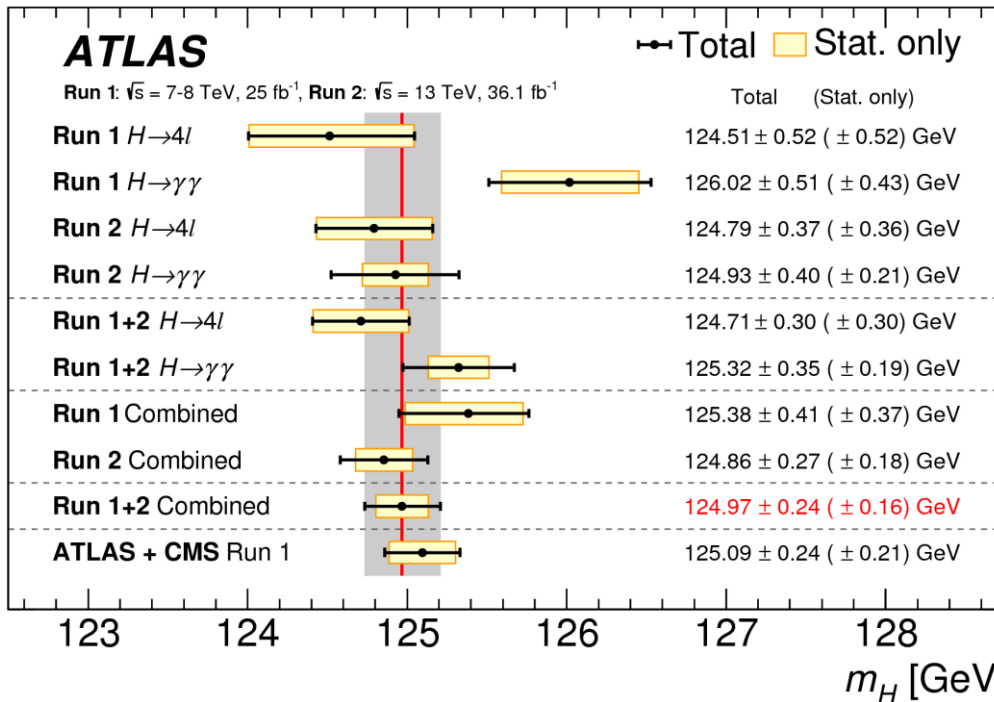
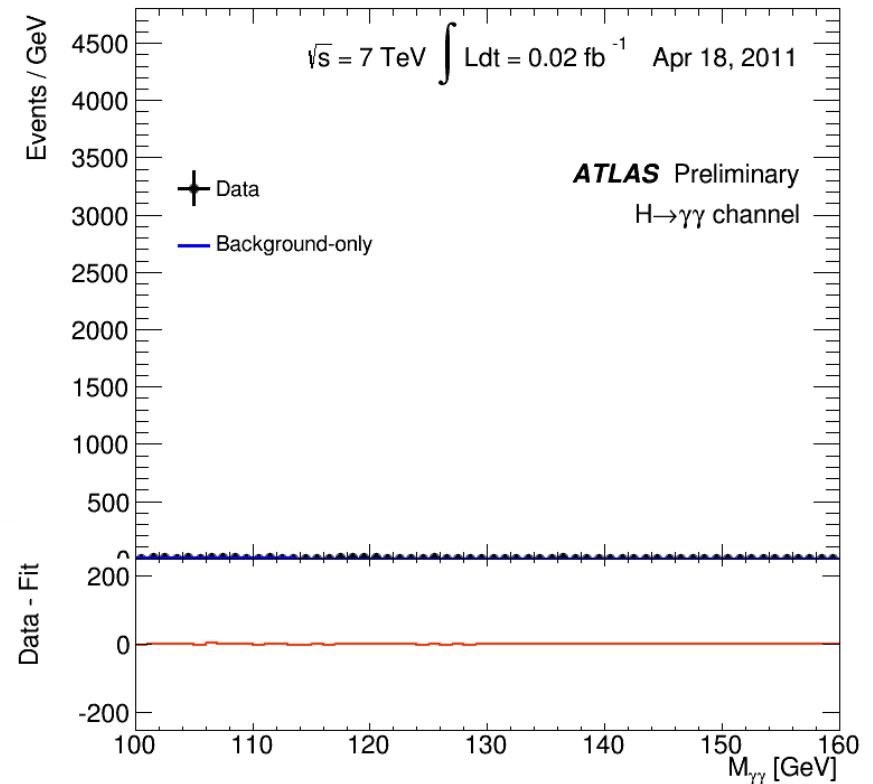
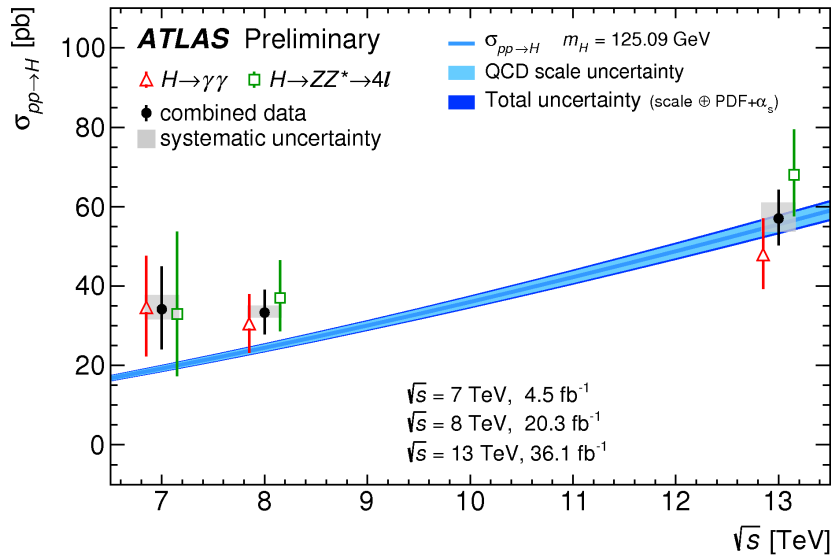
$H \rightarrow \gamma\gamma$ (dwa fotony)



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



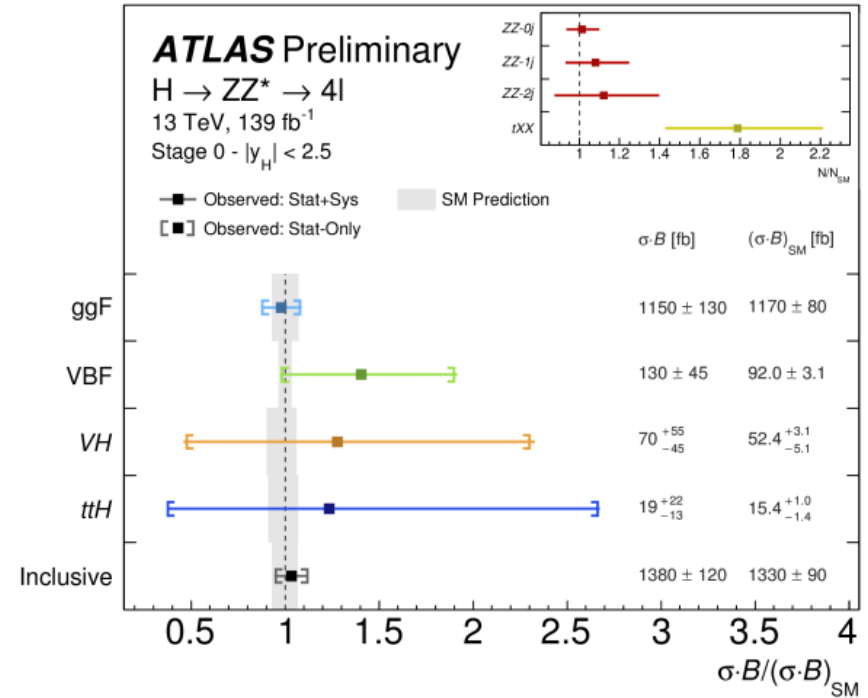
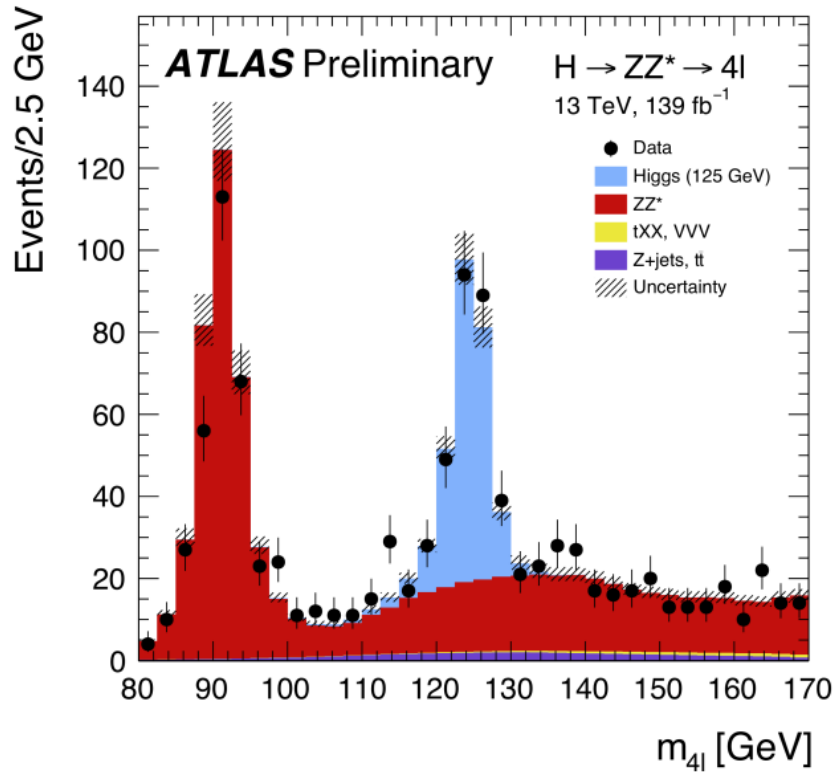
Higgs @ ATLAS



Peter Higgs
2013 – laureat
nagrody Nobla

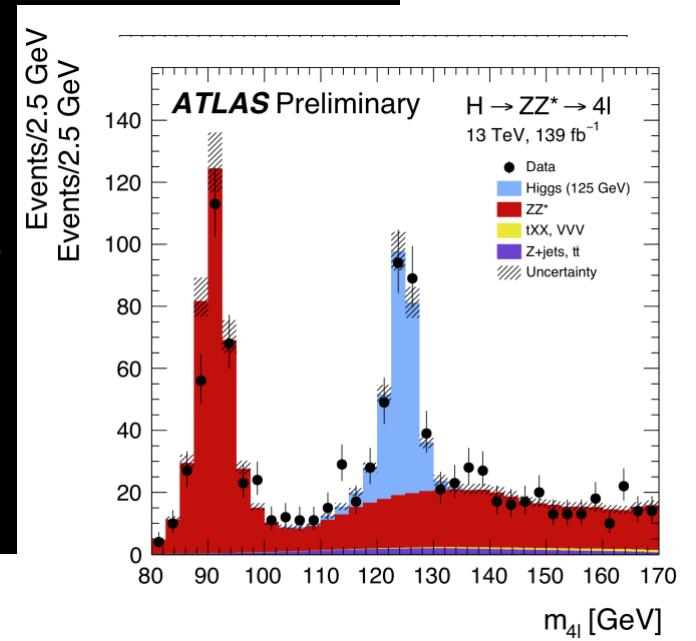
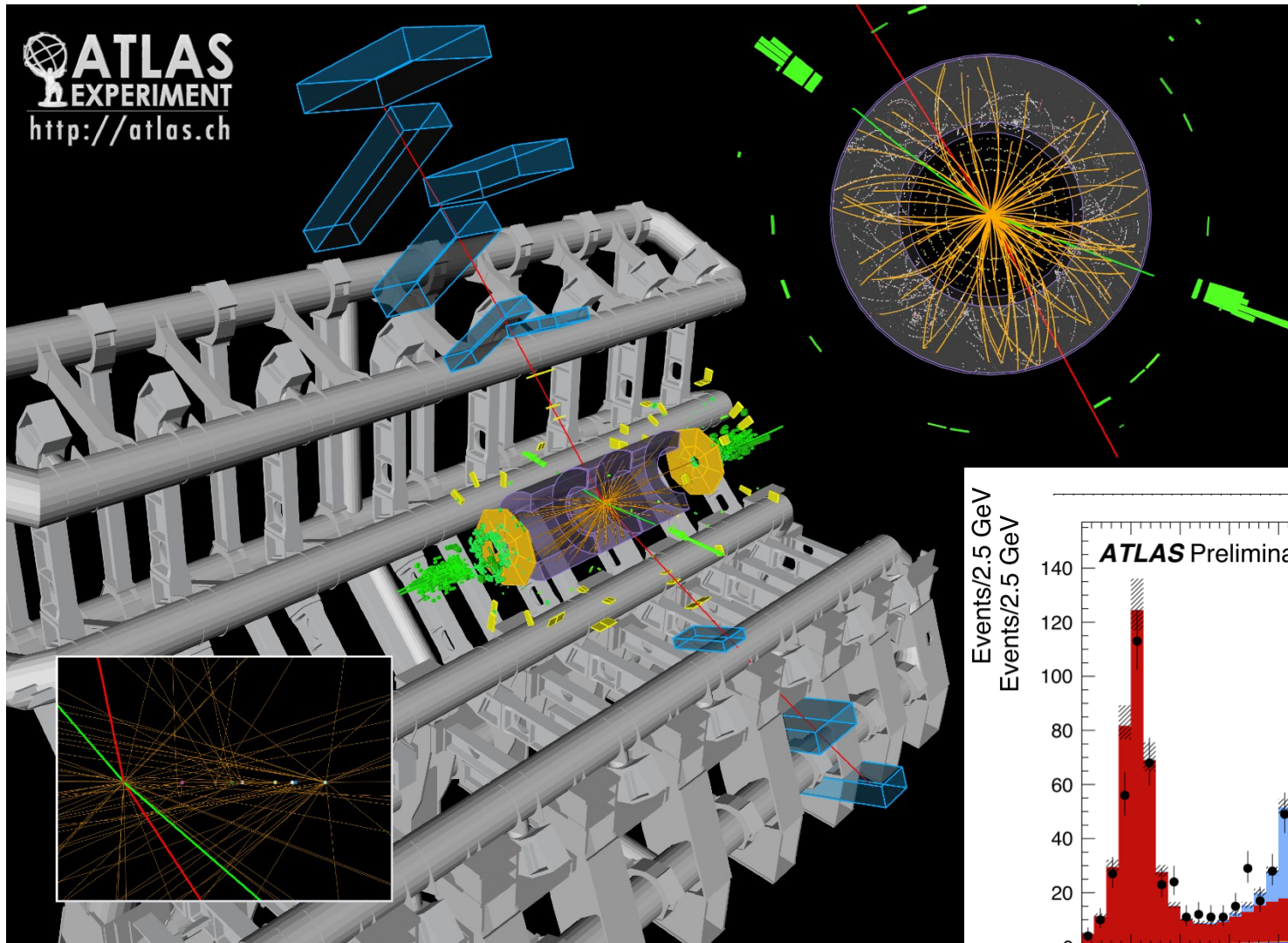


Higgs @ATLAS



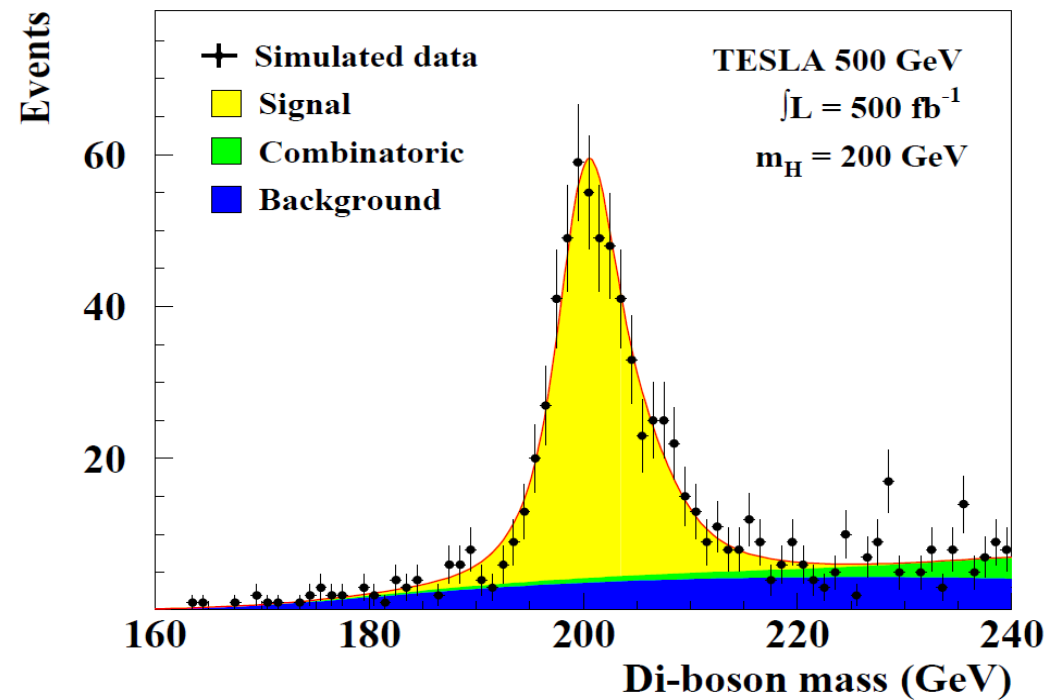
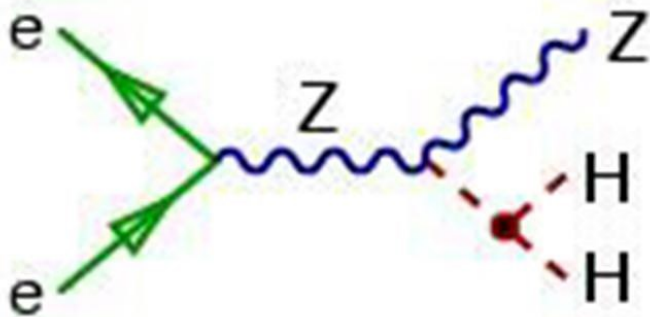
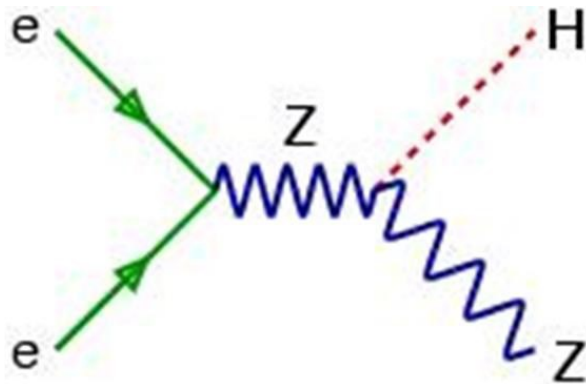
<https://atlas.cern/tags/higgs-boson>

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 [$10^{34} \text{ cm}^{-1}\text{s}^{-1}$]	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 σ_x [nm]	729	474	335	100	60	40	71000
beam size σ_y [nm]	7.7	5.9	2.7	2.6	1.5	1	320
Power [MW]	128	162	300	235	364	589	200

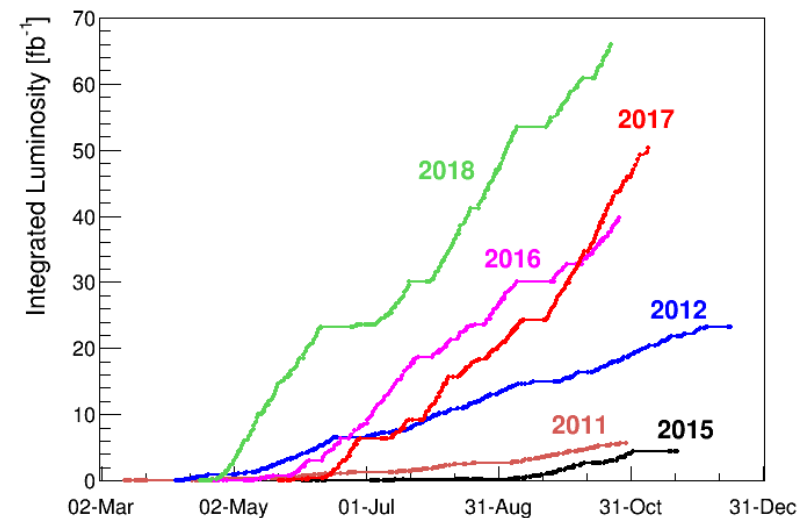
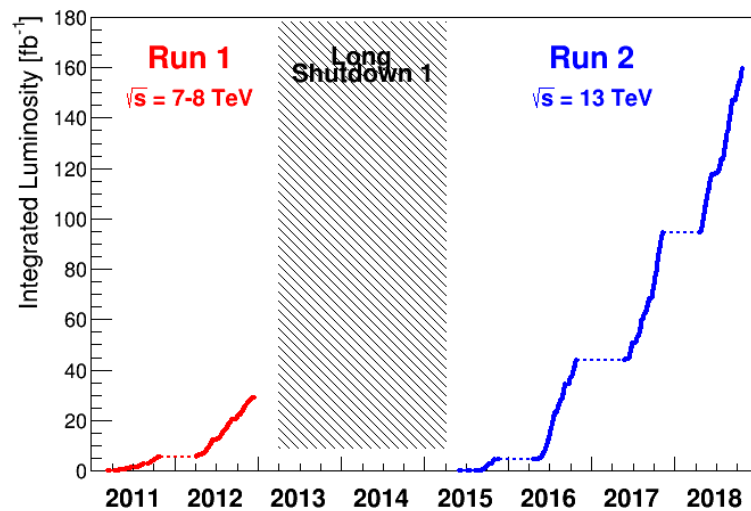
$L \sim 10^{34}$ (250 GeV) \rightarrow 20,000 H / year

Philip Burrows

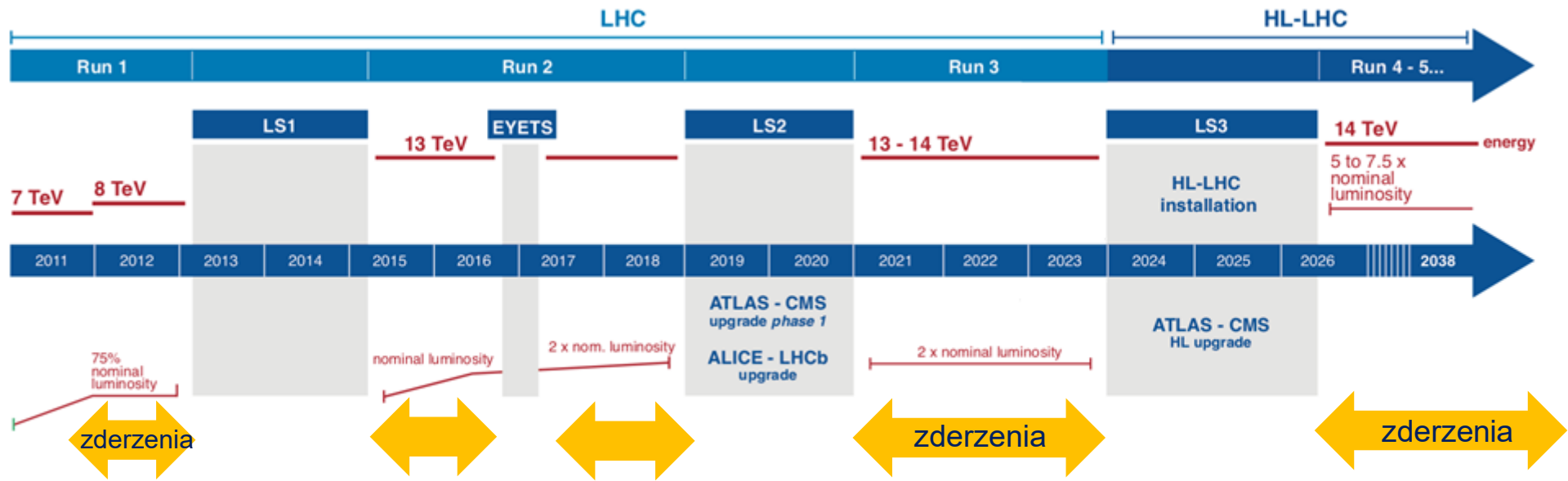
Dzisiaj na LHC

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.



Jutro na LHC- Higher Lumi



The High Luminosity Large Hadron Collider

The New Machine for Illuminating the Mysteries of Universe

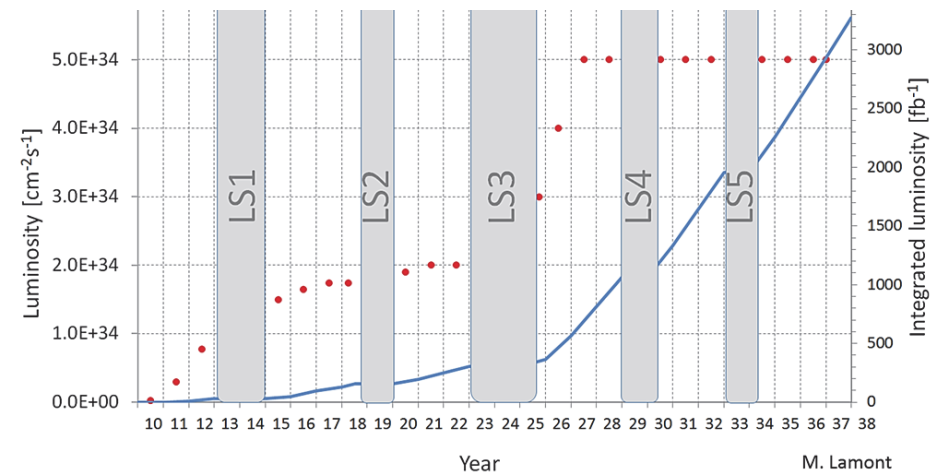
[HL-LHC Technical Design Report](#) and the [HL-LHC book](#)

Program fizyczny:

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

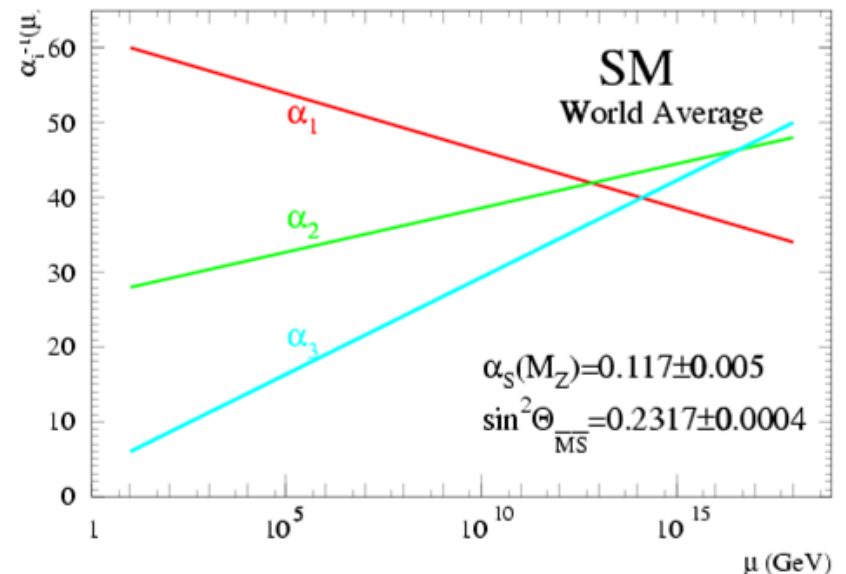
Upgrade:

- 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 elektroślabyh 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 elektroślaba 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.

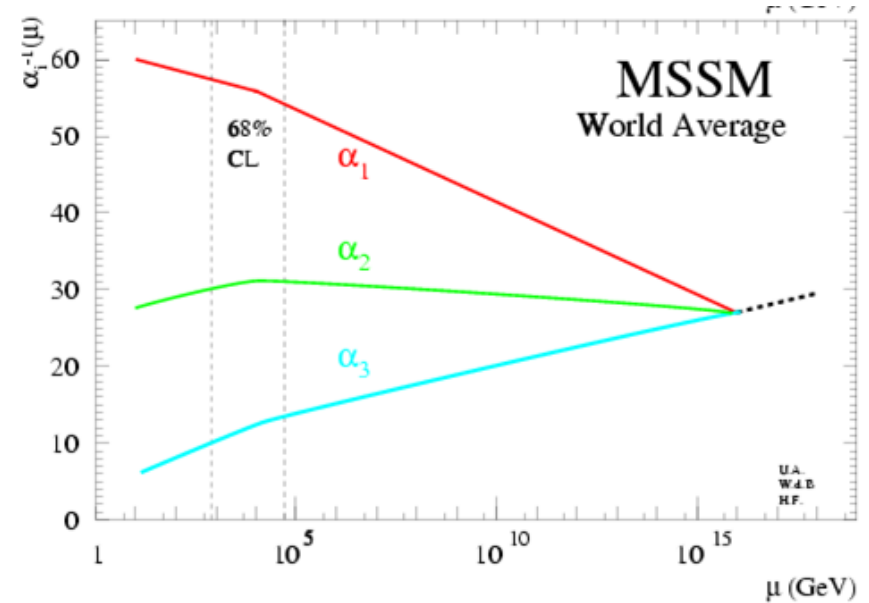
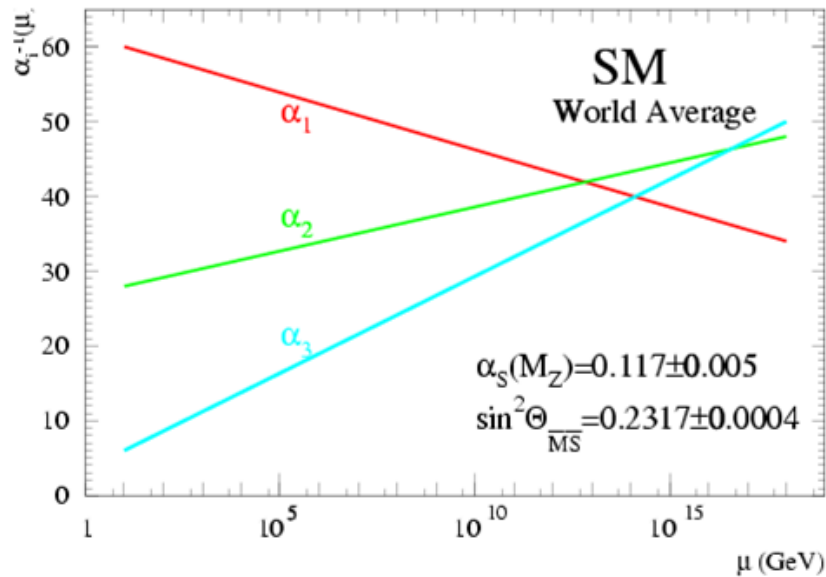
Pojawiają się supersymetryczni partnerzy zwykłych cząstek (o ciekawych nazwach):

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 γ 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 Higsa 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: $M_{SUSY} > 100 \text{ GeV}$

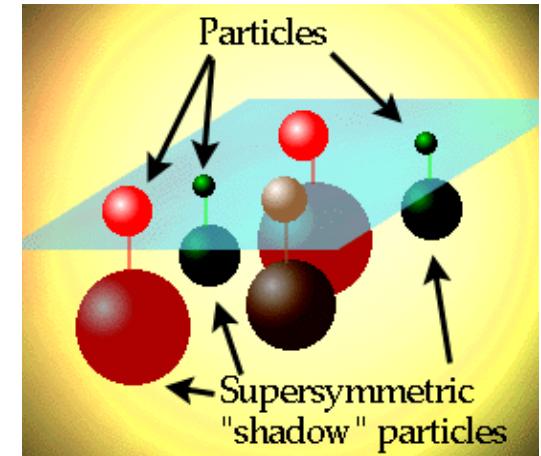
Liczba kwantowa zdefiniowana jako:

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

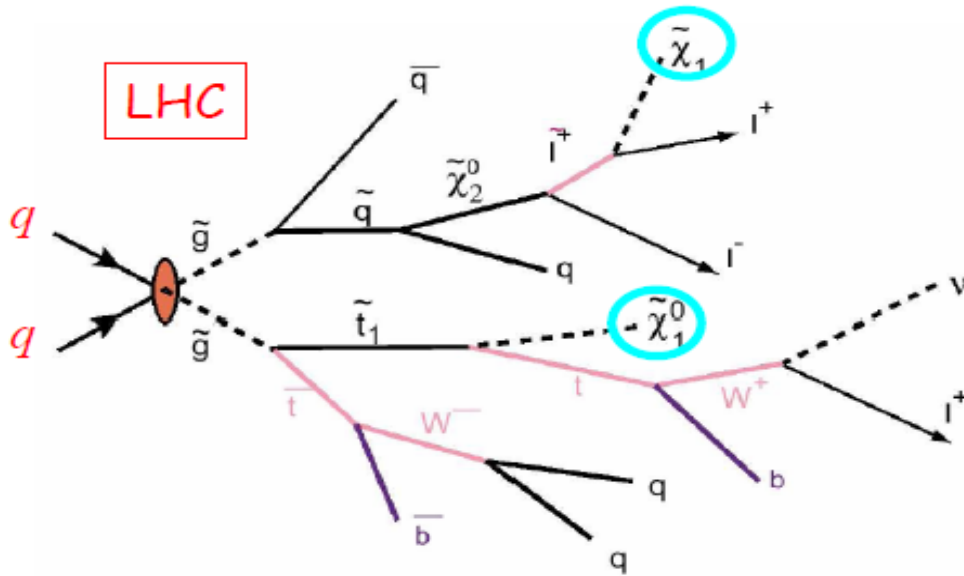
gdyby była zachowana w oddziaływaniach:

- 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

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



SUSY w LHC

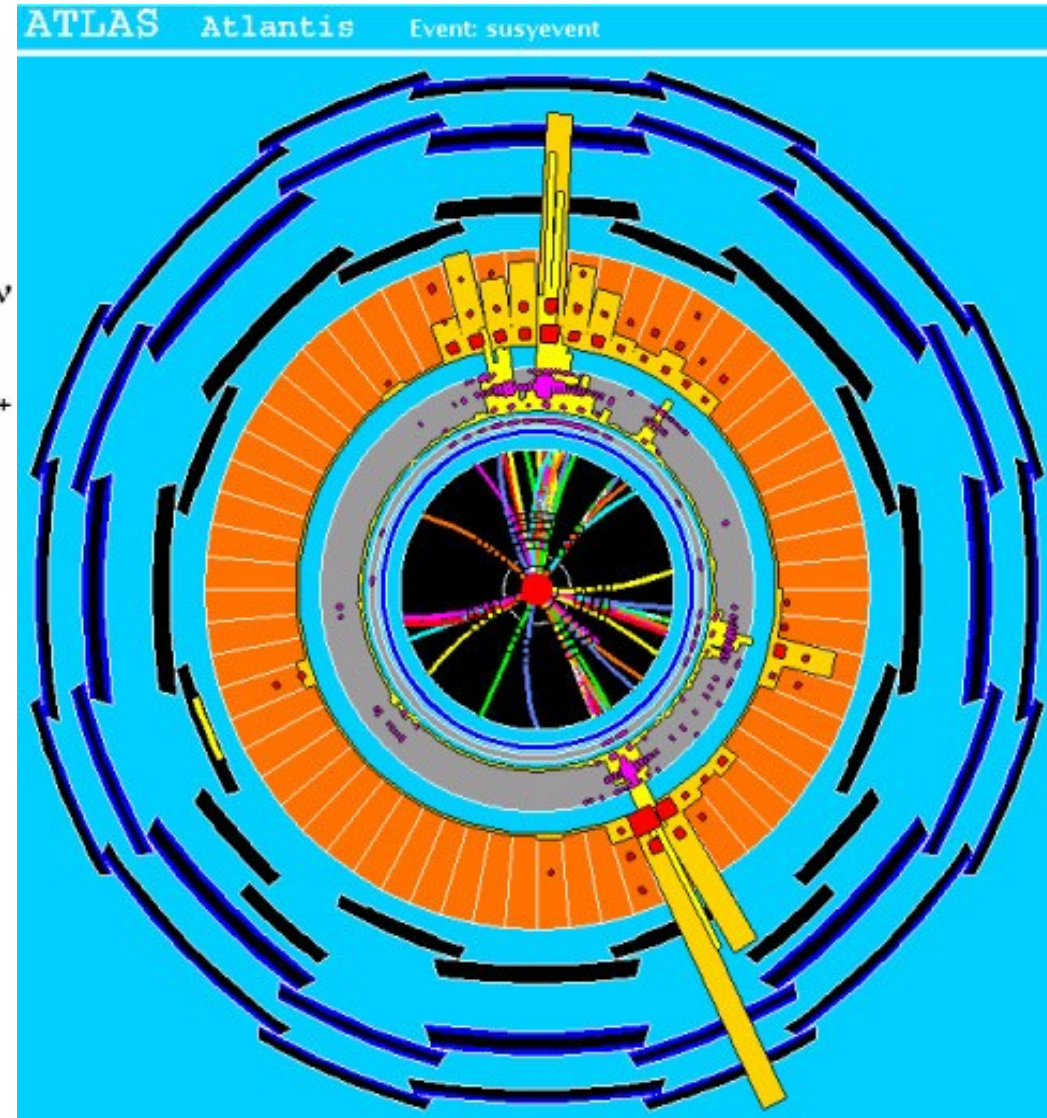


Jeśli SUSY istnieje, to łatwo (i szybko) może być znaleziona na LHC do 3 TeV.

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

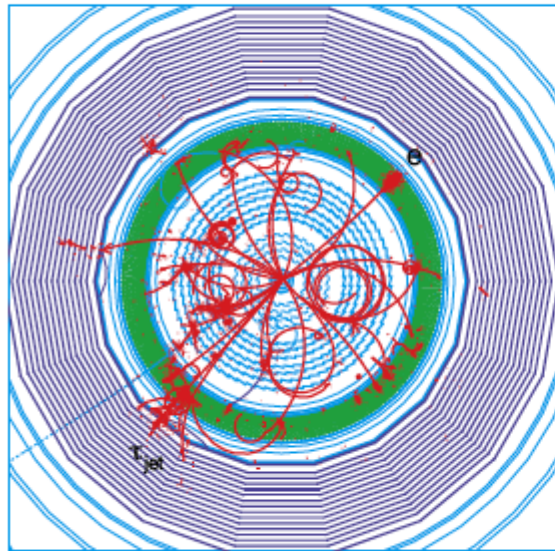
Jeśli nic nie znajdziemy na LHC: SUSY umrze

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

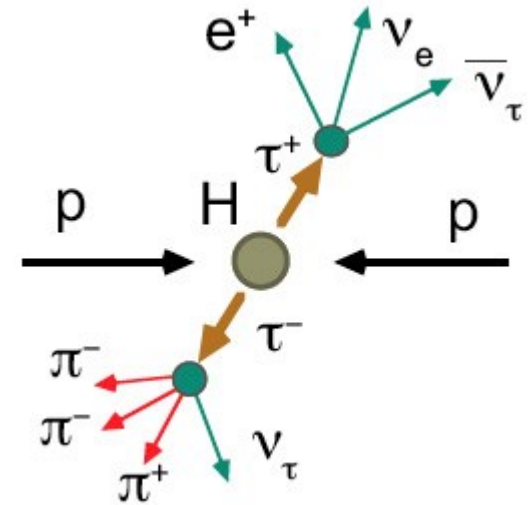
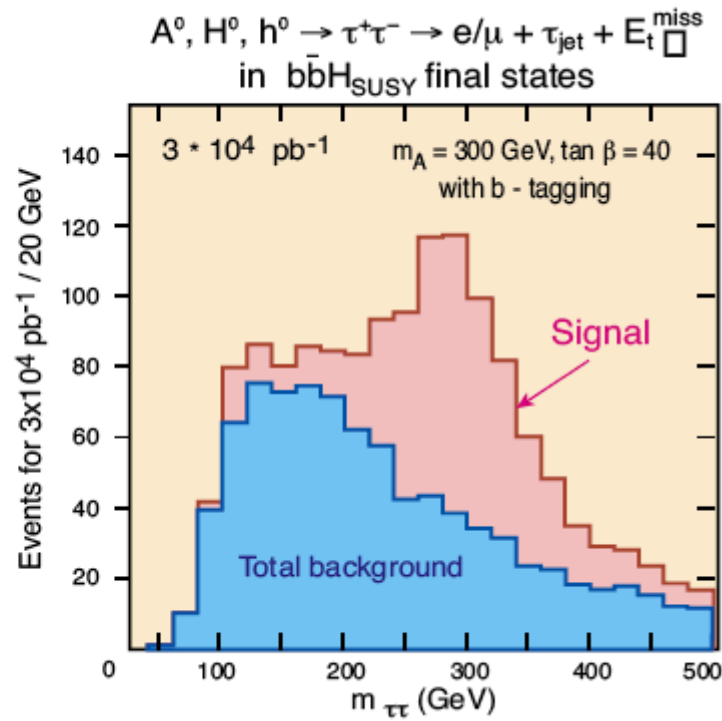


Higgs SUSY

Teoria supersymetryczna przewiduje istnienie pięciu bozonów Higgsa

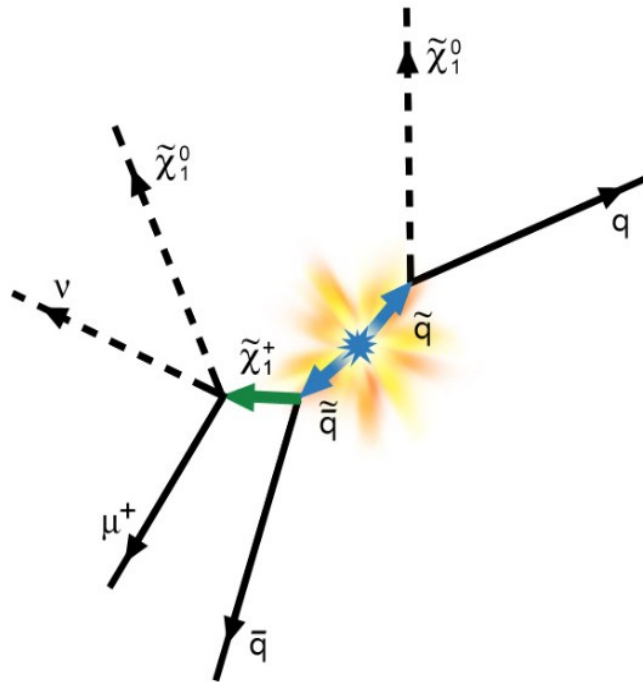


$H \rightarrow \tau\tau \rightarrow e + \tau_{\text{jet}}$ ("3-prong")



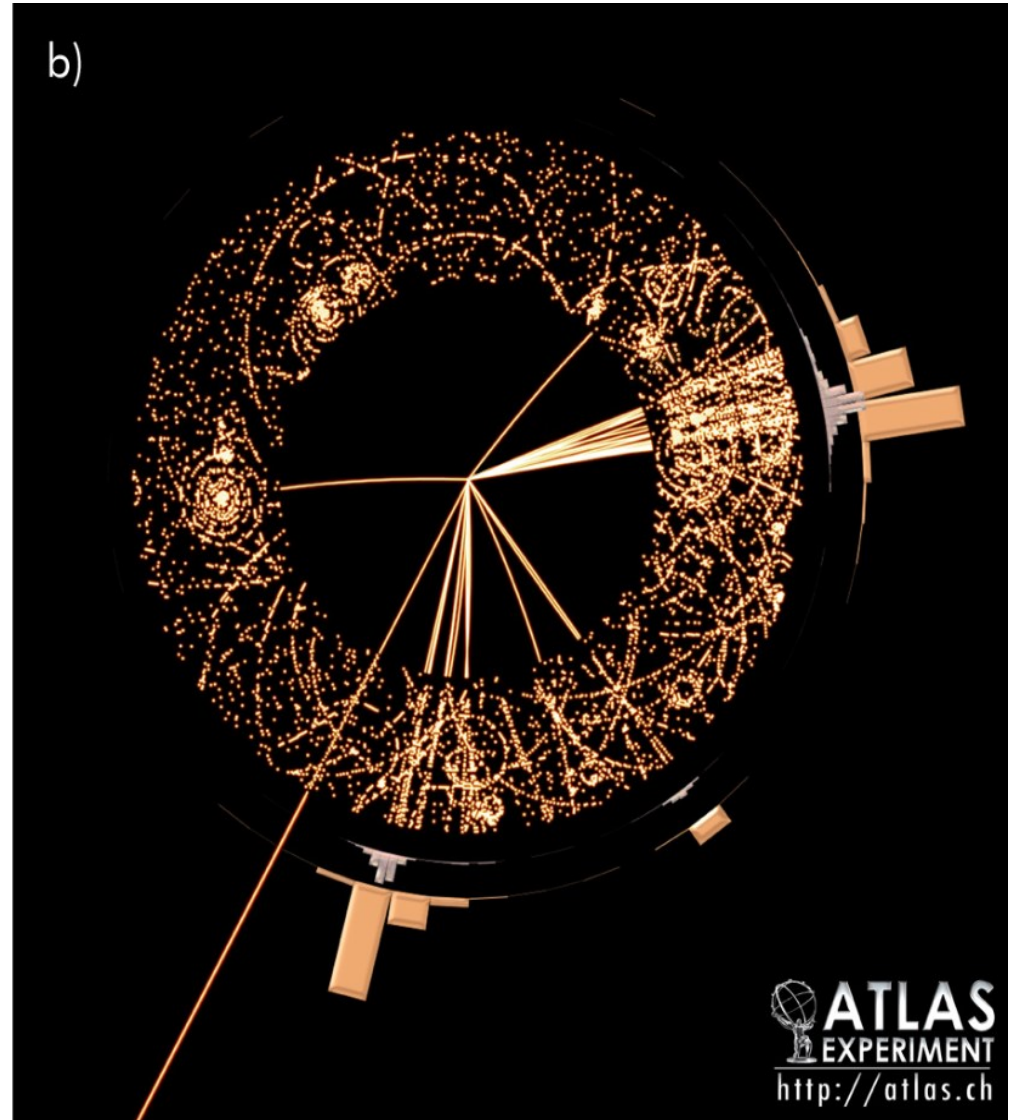
Sygnatury SUSY - przykłady

a)



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

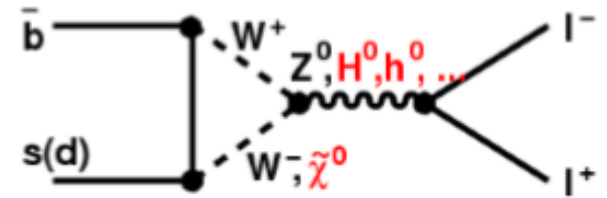
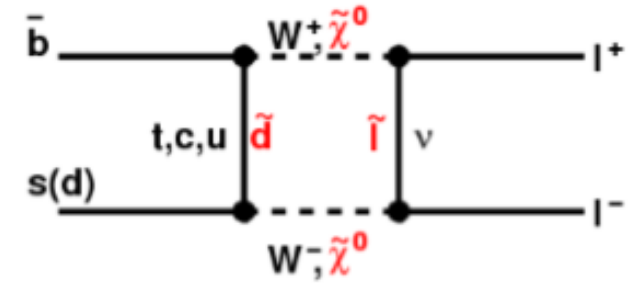
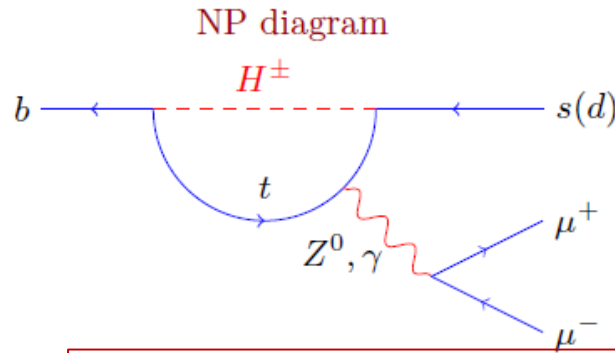
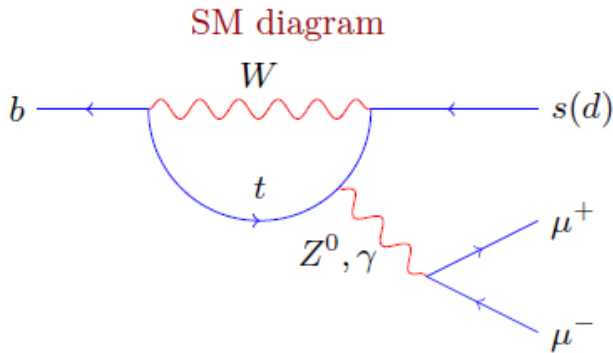
b)



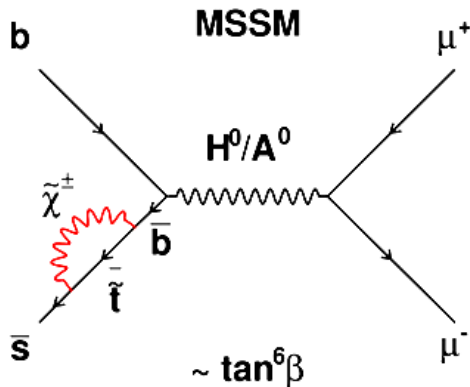
ATLAS
EXPERIMENT
<http://atlas.ch>

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):



LHCb and CMS coll., Nature, 522 (2015) 68

