

Wstęp do fizyki cząstek

Piotr Traczyk

CERN

Fizyka cząstek elementarnych lub Fizyka wysokich energii

- Jakie są podstawowe składniki materii?
- Jak opisać oddziaływania między nimi?

Stan na początek XX wieku

- 5 cząstek wystarczy żeby opisać „prawie wszystko”:
 - elektron (Thomson 1897)
 - proton (Rutherford 1919)
 - neutron (Chadwick 1931)
 - Foton (Einstein 1905)
 - Neutrino (Pauli 1930, zaobserwowane dopiero w 1956)
- Do tego dwa oddziaływania:
elektromagnetyczność i grawitacja
- Ale:
 - 1936 - odkrycie mionu
(choć dopiero w okolicach 1950 udało się zrozumieć co to jest za cząstka...)

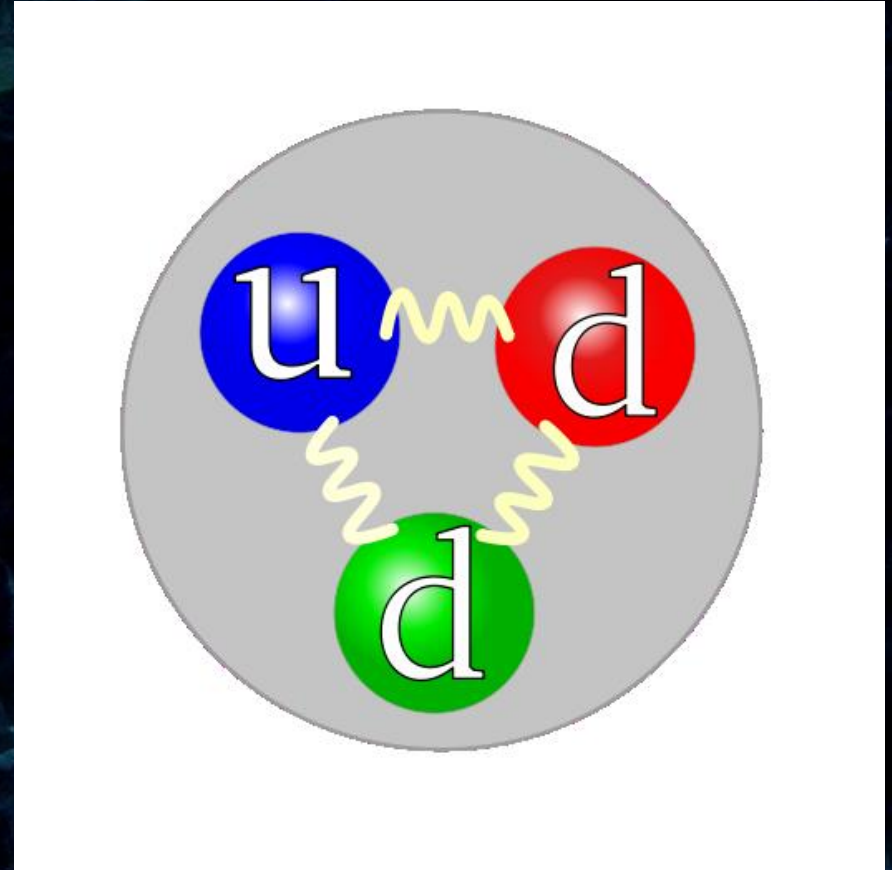
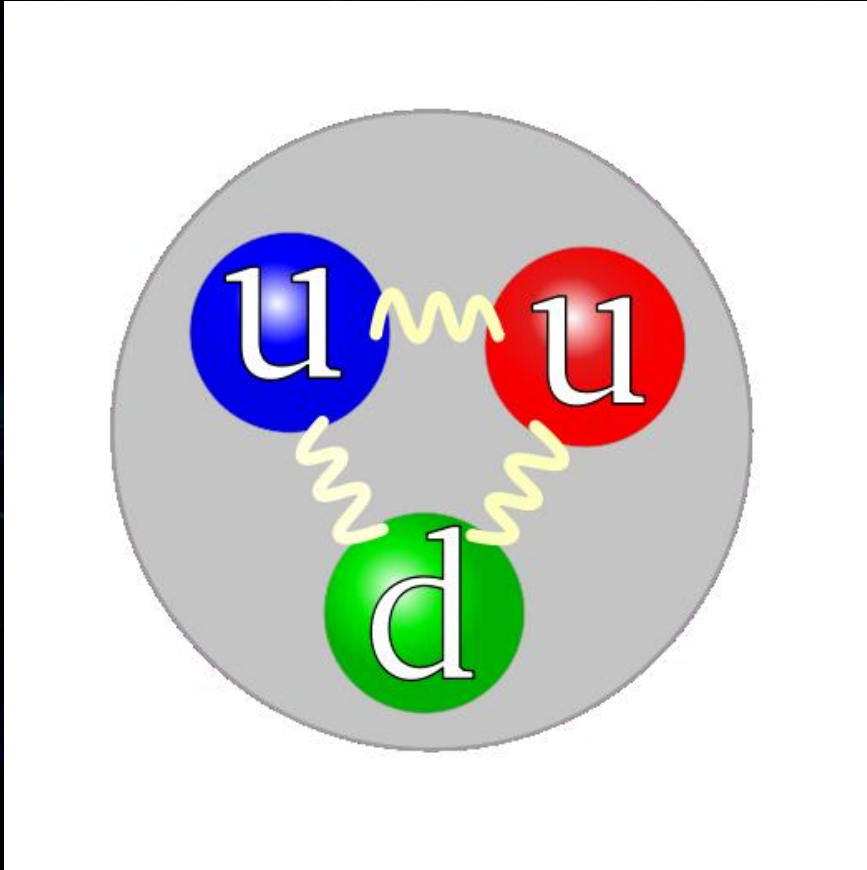
Nowe cząstki

- Z początku szukano nowych cząstek używając „źródeł naturalnych” - głównie w oddziaływaniach promieniowania kosmicznego z atmosferą
- Kolejny krok: przyspieszanie i zderzanie jąder - tworzenie nowych pierwiastków „na żądanie” - ale też innych cząstek
- W latach powojennych odkryto całe „zoo” nowych cząstek
- Gell-Mann (1964) Hipoteza kwarków - kilka składników z których można „budować” inne cząstki jak z klocków
- Proton i neutron -> cząstki ~~elementarne~~ złożone

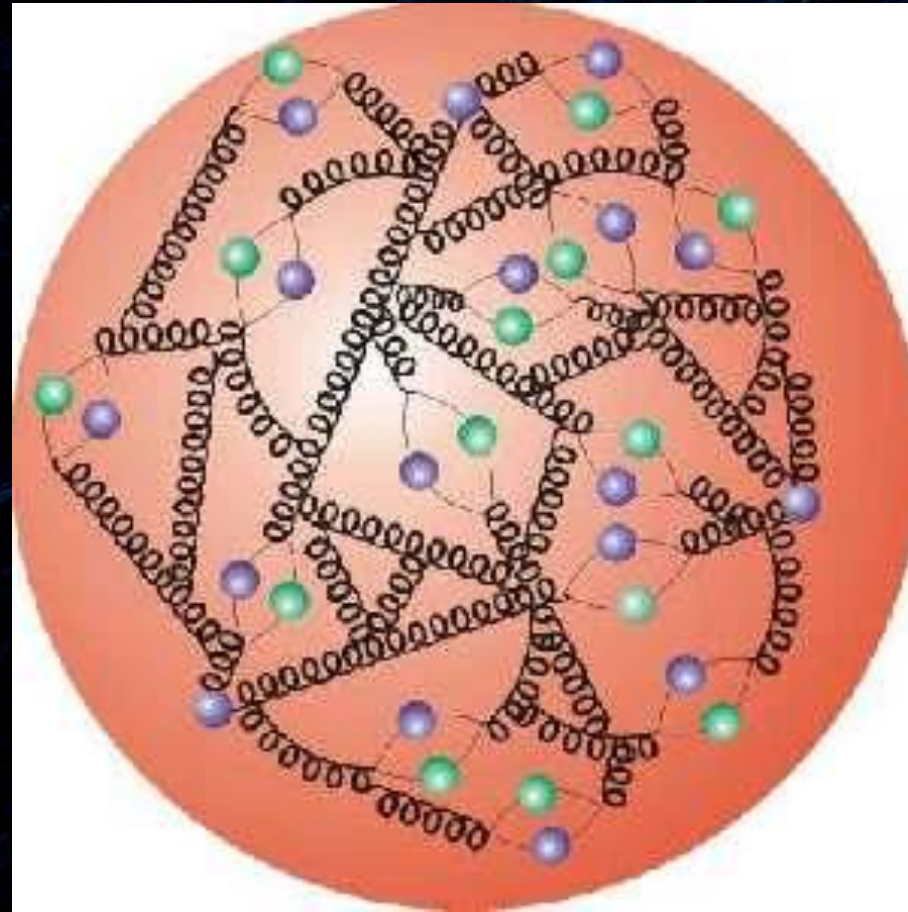
Proton i Neutron

$$2/3 + 2/3 - 1/3 = 1$$

$$2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$$



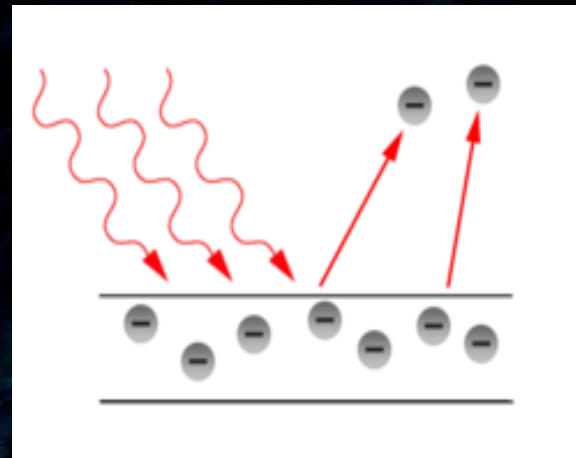
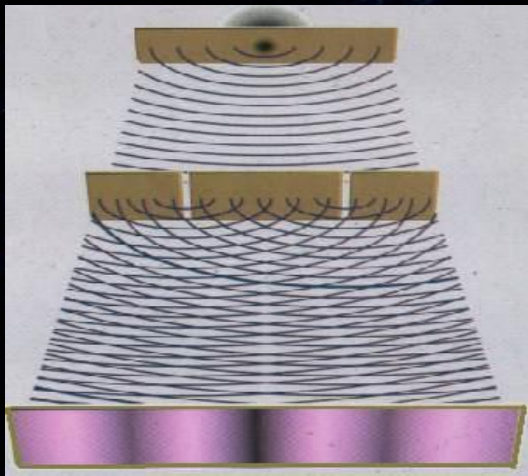
Proton



Z bliska.

Mechanika Kwantowa (1)

- Dualizm korpuskularno-falowy: $\lambda = h/p$
(Louis de Broglie, 1924)
- Popularny przykład - światło, doświadczenie Younga vs zjawisko fotoelektryczne



- Ale na tym nie koniec! „paradoks” dotyczy nie tylko fotonów...

Elektrony jako fale

- Davisson, Germer 1927 - dyfrakcja elektronów na kryształach (Nobel w 1937 r.)
- Faget, Fert 1957 - doświadczenie Younga dla elektronów,



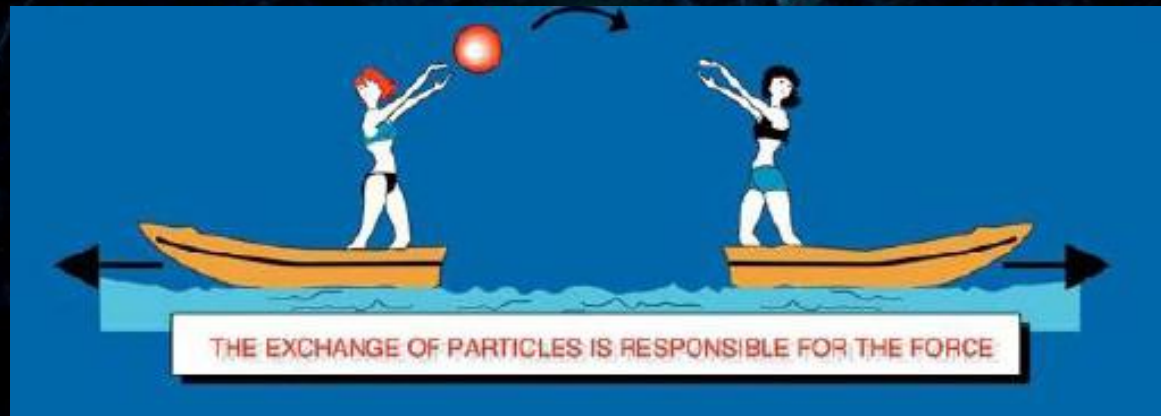
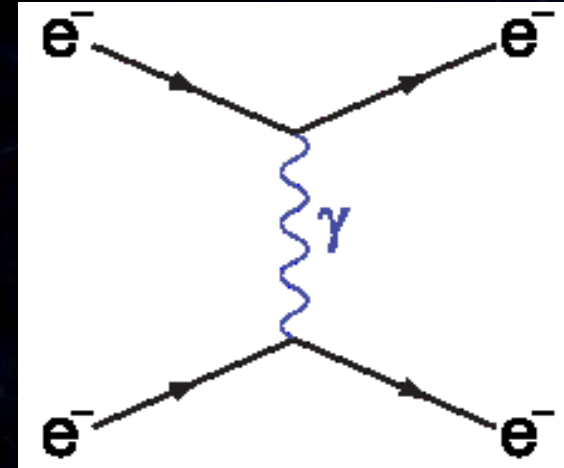
- **UWAGA!** Elektrony przelatują przez szczeliny pojedynczo - z czym interferuje pojedynczy elektron...?

Jak duże cząstki mogą interferować?

2019: cząstki składające się z 2000 atomów każda...

Bozony - nośniki oddziaływań

- Jak opisujemy oddziaływania w świecie cząstek?
- Przykład: rozpraszania elektronów zachodzi przez wymianę fotonu
- **Pytanie:** skąd elektron wie, że ma wysłać foton?
- **Odpowiedź:** nie wie, więc robi to bez przerwy...



Mechanika Kwantowa (2)

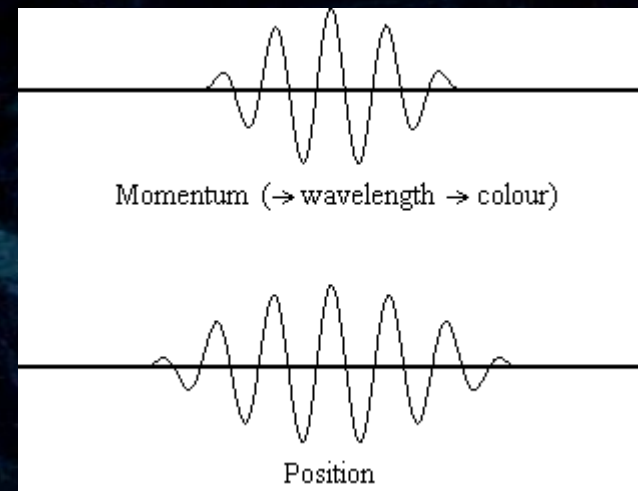
- Zasada nieoznaczoności Heisenberga:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$$

- Nie można jednocześnie zmierzyć pędu i położenia cząstki z dowolną dokładnością

- Analogia - położenie i częstotliwość fali

$$\lambda = h/p$$



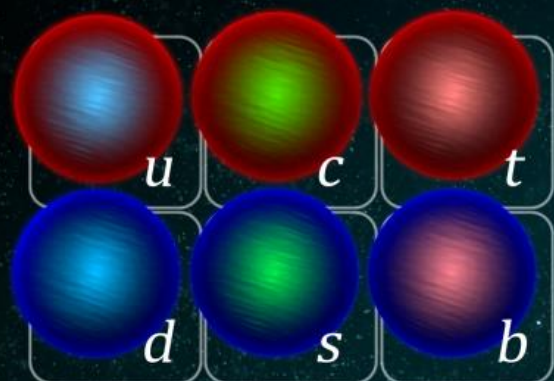
Oddziaływania elementarne

<i>Strong</i>	<p>Force which holds nucleus together</p>	<p>Strength</p> <p>1</p>	<p>Range (m)</p> <p>10^{-15} (diameter of a medium sized nucleus)</p>	<p>Particle</p> <p>gluons, π(nucleons)</p>
<i>Electro-magnetic</i>		<p>Strength</p> <p>$\frac{1}{137}$</p>	<p>Range (m)</p> <p>Infinite</p>	<p>Particle</p> <p>photon mass = 0 spin = 1</p>
<i>Weak</i>	<p>neutrino interaction induces beta decay</p>	<p>Strength</p> <p>10^{-6}</p>	<p>Range (m)</p> <p>10^{-18} (0.1% of the diameter of a proton)</p>	<p>Particle</p> <p>Intermediate vector bosons W^+, W^-, Z_0, mass > 80 GeV spin = 1</p>
<i>Gravity</i>		<p>Strength</p> <p>6×10^{-39}</p>	<p>Range (m)</p> <p>Infinite</p>	<p>Particle</p> <p>graviton ? mass = 0 spin = 2</p>

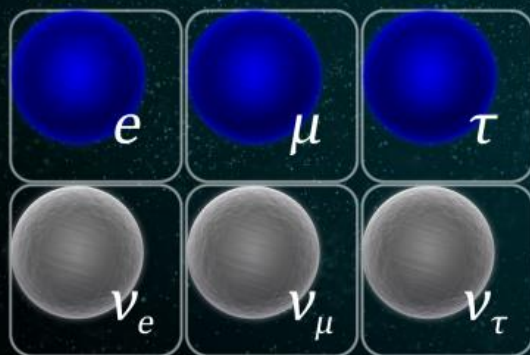
Model Standardowy

- Rozwinięty w latach '70 poprzedniego stulecia
- Kwantowa teoria pola - teoria pola zgodna z mechaniką kwantową i teorią względności
 - Pierwszą kwantową teorią pola była elektrodynamika kwantowa, opisująca oddziaływania elektronów i fotonów
- Bardzo dobrze zgodny z doświadczeniem, kilka spektakularnych sukcesów - odkrycie bozonów W i Z (1983 CERN), kwarku top (1995 Fermilab) oraz 2012 - bozon Higgsa

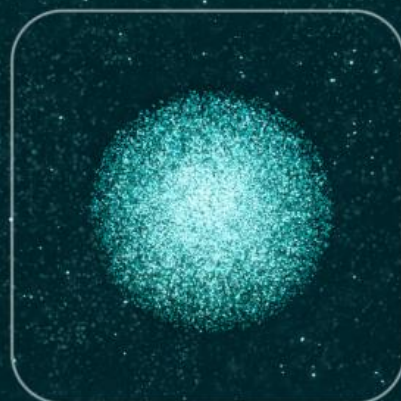
Składniki Modelu Standardowego



Quarks



Leptons



Higgs boson



Forces

Klasyfikacja cząstek

Fermiony

leptony

kwarki

Bozony

nośniki
oddziaływań

bariony

(3 kwarki)

mezony

(kwark - antykwark)

hadrony

Najnowszy sukces modelu
standardowego -
odkrycie bozonu Higgsa

Bozon Higgsa (od strony teoretycznej)

- Równania modelu standardowego można napisać tylko dla cząstek bezmasowych
- „Człony masowe” łamią jedną z podstawowych symetrii tych równań, bez której cała teoria przestaje mieć sens
- Ale w przyrodzie występują cząstki masywne...

...dlaczego przywiązujemy tak dużą wagę do „symetrii”?
(i co to w ogóle jest)

Twierdzenie Noether

- W 1915 roku Emmy Noether udowodniła fundamentalną zależność pomiędzy symetriami praw fizyki a obowiązującymi w tejże fizyce zasadami zachowania
- Znane nam dobrze zasady zachowania - energii, pędu czy momentu pędu są nierozłącznie związane z symetriami (niezmienniczością równań) względem przesunięcia w czasie, przestveni oraz obrotu



- Pole Higgsa:



- Pole Higgsa:



- Cząstka Higgsa:



Jak odkryć bozon Higgsa?

- 1) Produkcja w zderzeniu protonów
- 2) Rozpad na znane cząstki (w zależności od tego jak cząstka Higgsa się rozpadnie będzie ją łatwiej lub trudniej „zobaczyć“)
- 3) Rejestracja produktów rozpadu w detektorze
- 4) Analiza danych - zderzenia zawierające rozpad Higgsa trzeba oddzielić od „tła“



Więcej:

The Higgs Discovery
Explained - Ep. 1/3 | CERN

⋮ The Higgs Discovery
Explained - Ep. 2/3 | CERN

⋮ The Higgs Discovery
Explained - Ep. 3/3 | CERN

https://www.youtube.com/playlist?list=PLAk-9e5KQYEgo_IhLOkbzjeUso9vlGJI3

Problemy Modelu Standardowego

Typ I - opisuje ale nie wyjaśnia

- Masy cząstek, siły oddziaływań itp.
Skąd tak duże różnice?
($m_e = 511 \text{ MeV}$, $m_t = 175 \text{ GeV}$)
- Dlaczego trzy rodziny fermionów
- ładunek protonu = - ładunek elektronu

Problemy Modelu Standardowego

Typ II - braki i niezgodności

- Ciemna materia/ciemna energia
- Asymetria materia-antymateria
- Grawitacja - całkowicie pominięta
- Masy neutrin - od 1998 wiemy, że nie są zero

Problemy Modelu Standardowego

Typ III - pasuje do danych

- Bezpośrednie pomiary jak dotąd całkowicie zgodne z modelem
- Coraz bardziej precyzyjne pomiary pozwalają lepiej zrozumieć teorię
- Poszukiwania procesów/cząstek wykraczających poza Model Standardowy - jak dotąd bez wyraźnych wyników

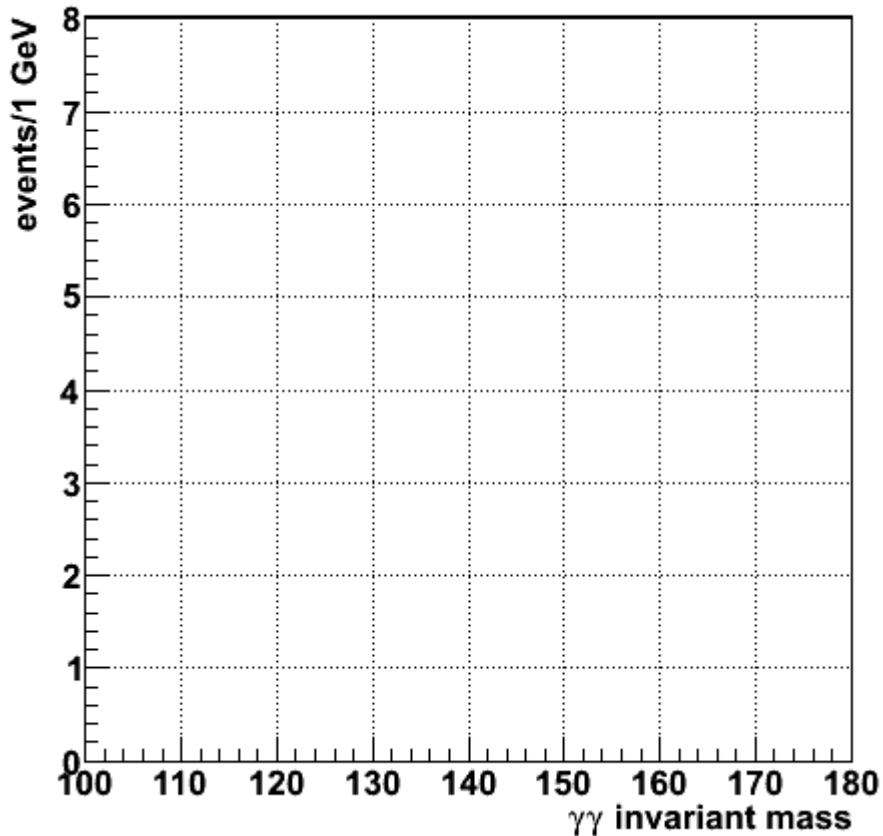


Koniec.

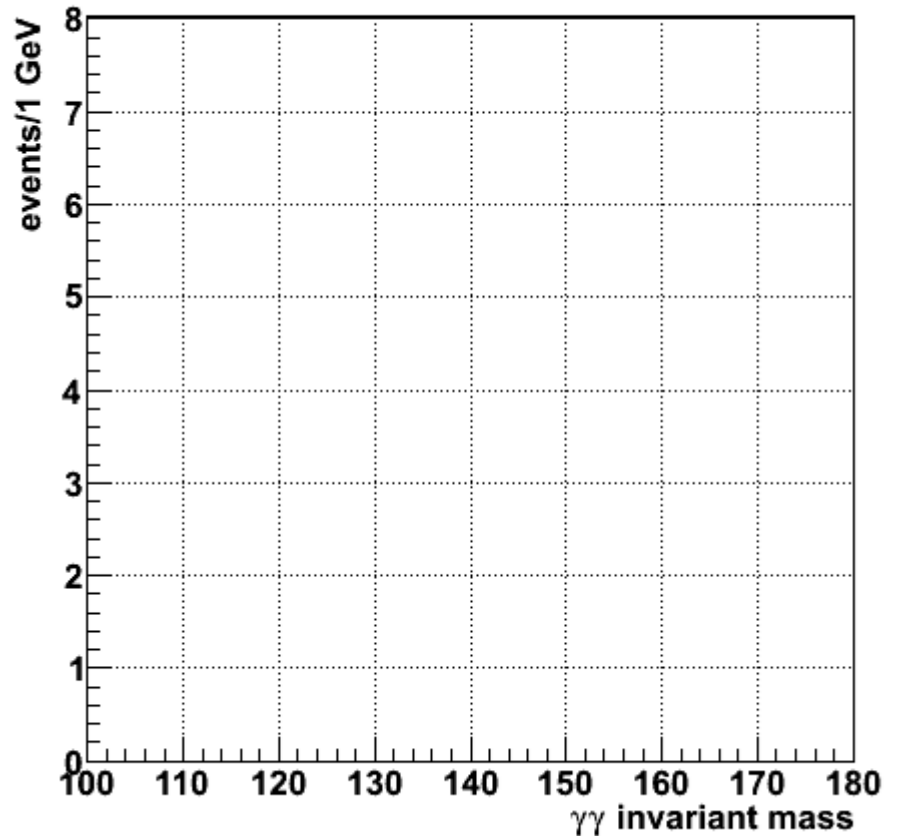
Dziękuję za uwagę!

The $H \rightarrow \gamma\gamma$ channel

$L=0.00 \text{ fb}^{-1}$



$L=0.00 \text{ fb}^{-1}$

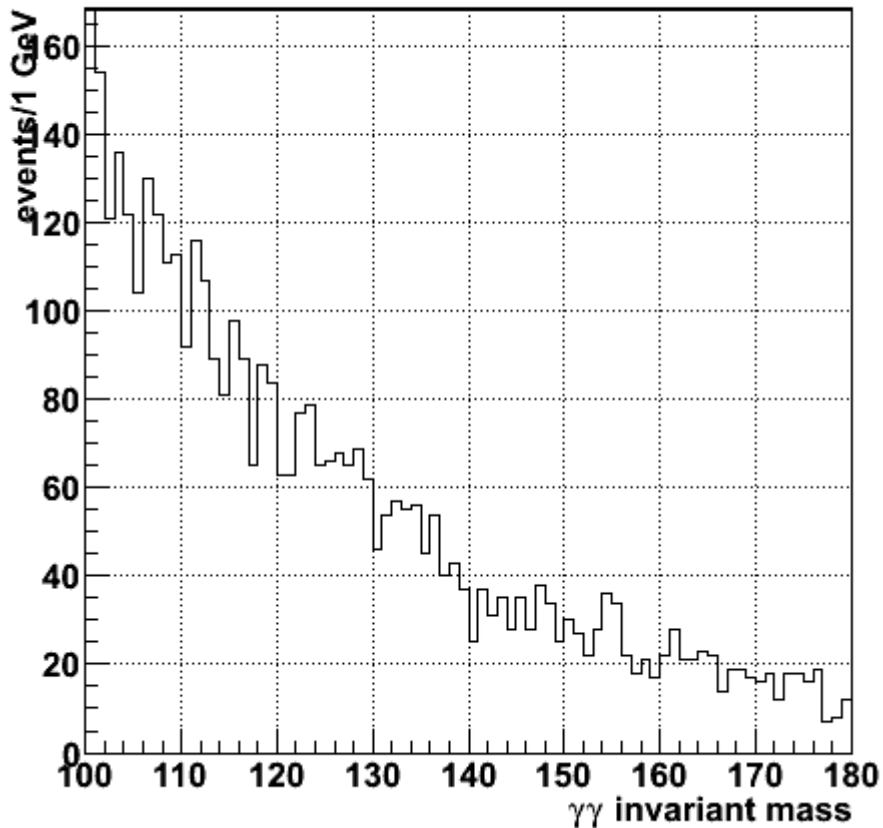


One of these plots contains the (simulated) Higgs boson signal.

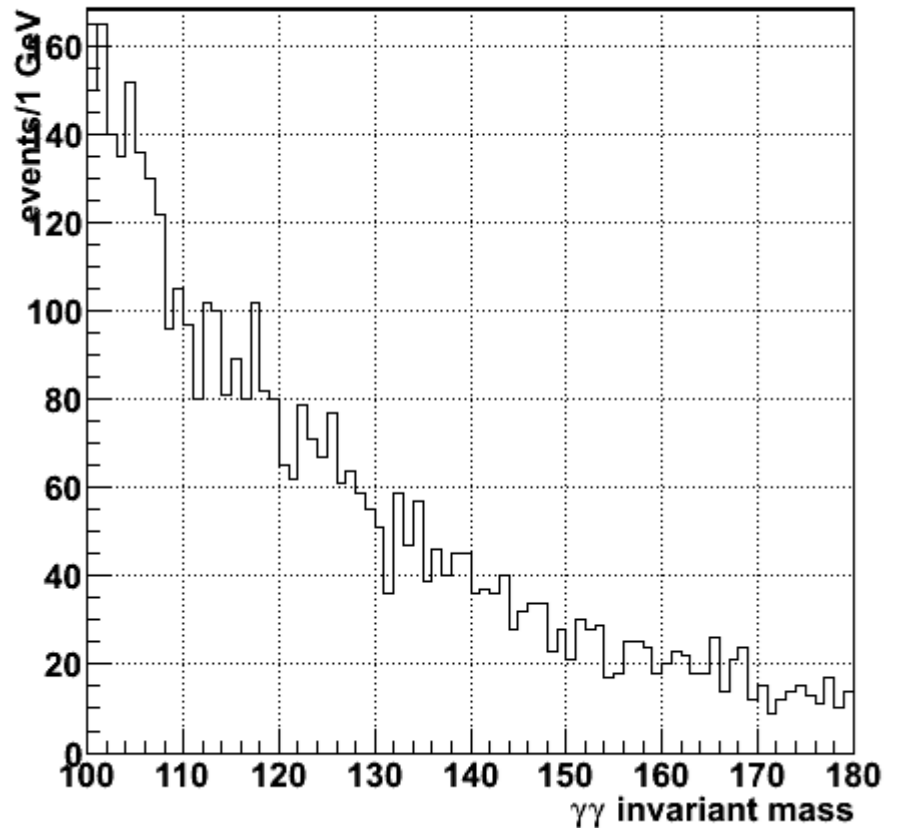
Can you spot it?

The $H \rightarrow \gamma\gamma$ channel

$L=1.00 \text{ fb}^{-1}$



$L=1.00 \text{ fb}^{-1}$

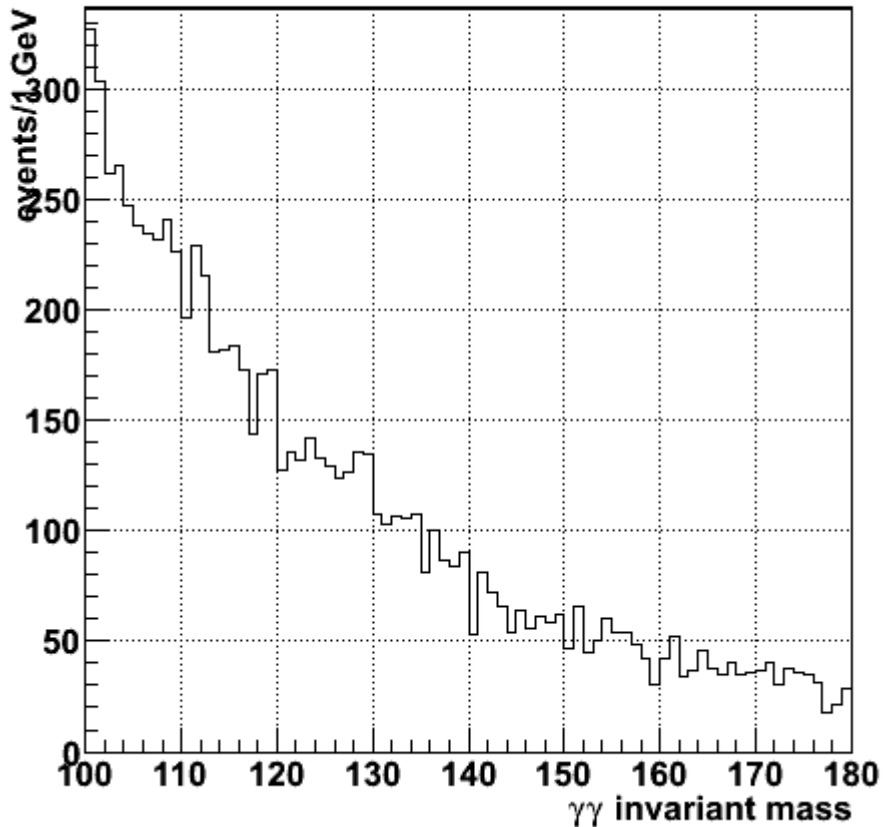


One of these plots contains the (simulated) Higgs boson signal.

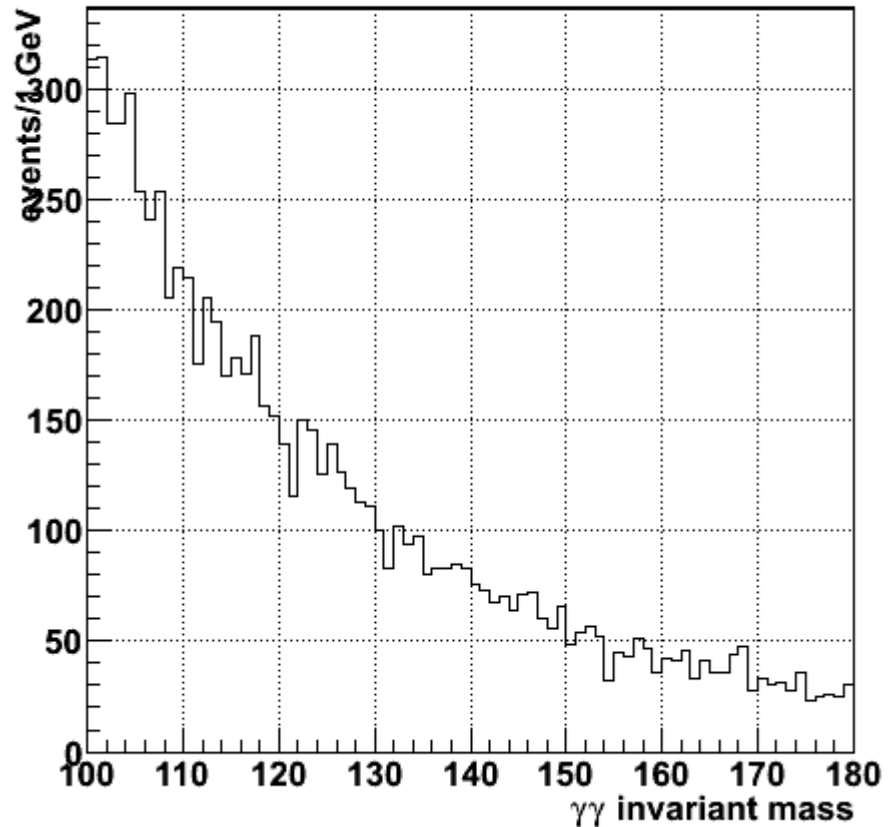
Can you spot it?

The $H \rightarrow \gamma\gamma$ channel

$L=2.00 \text{ fb}^{-1}$



$L=2.00 \text{ fb}^{-1}$

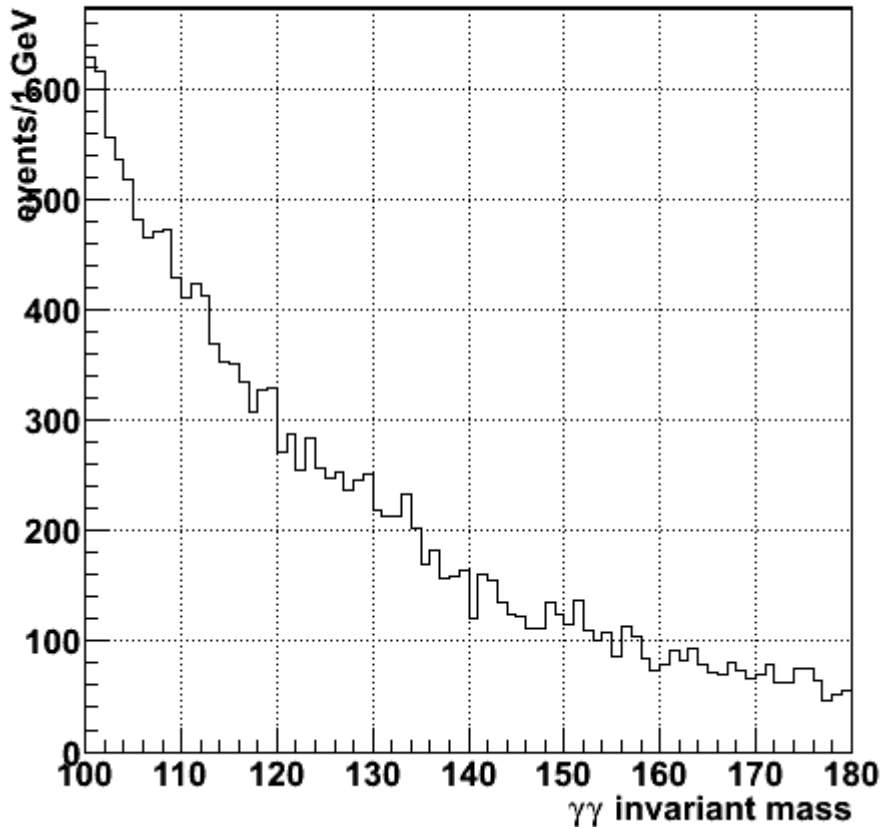


One of these plots contains the (simulated) Higgs boson signal.

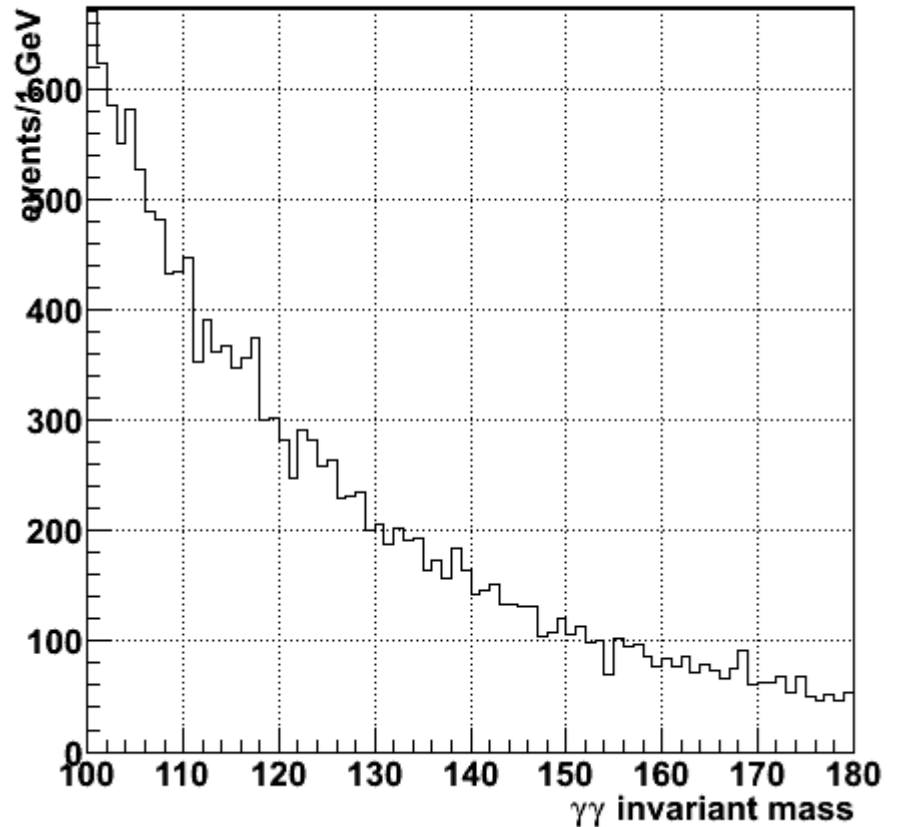
Can you spot it?

The $H \rightarrow \gamma\gamma$ channel

$L=4.00 \text{ fb}^{-1}$



$L=4.00 \text{ fb}^{-1}$

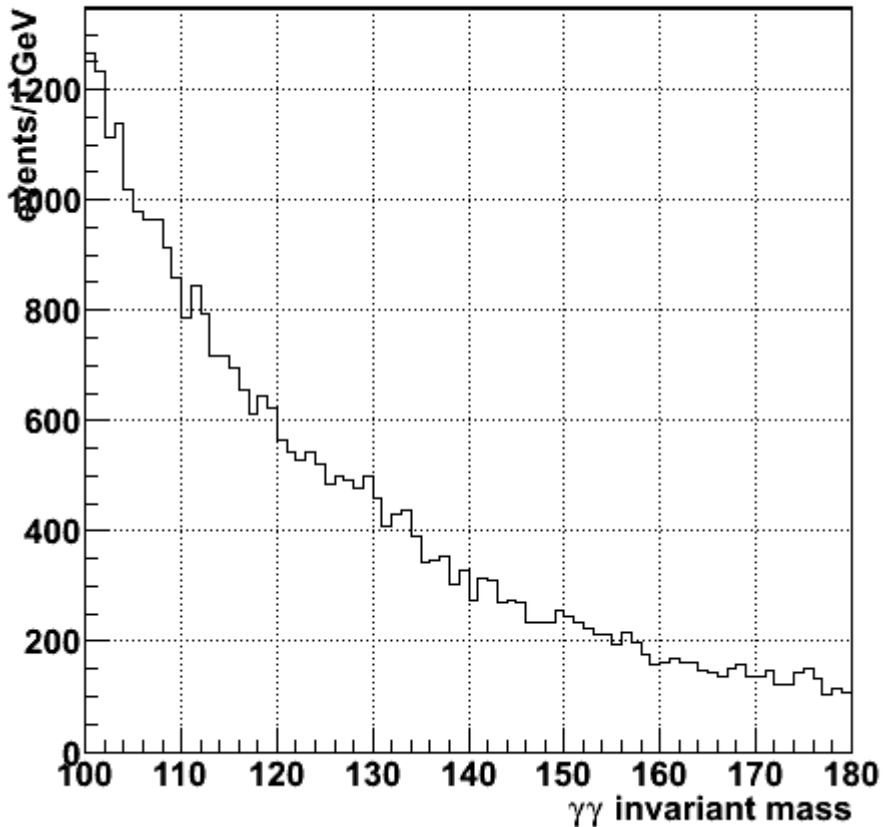


One of these plots contains the (simulated) Higgs boson signal.

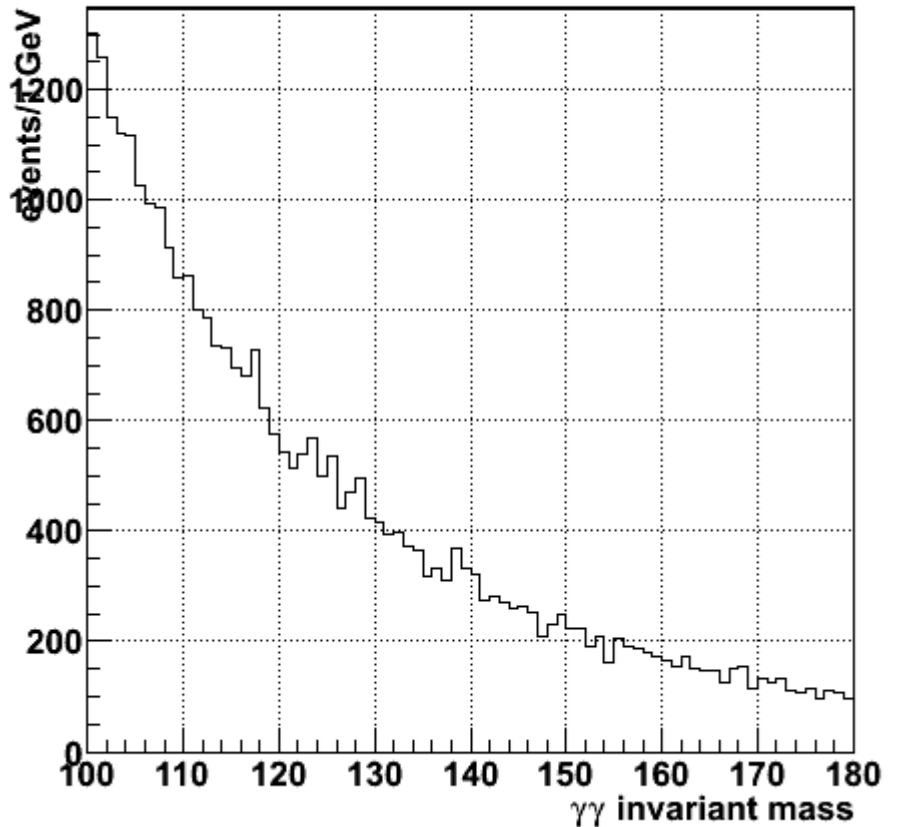
Can you spot it?

The $H \rightarrow \gamma\gamma$ channel

$L=8.00 \text{ fb}^{-1}$



$L=8.00 \text{ fb}^{-1}$

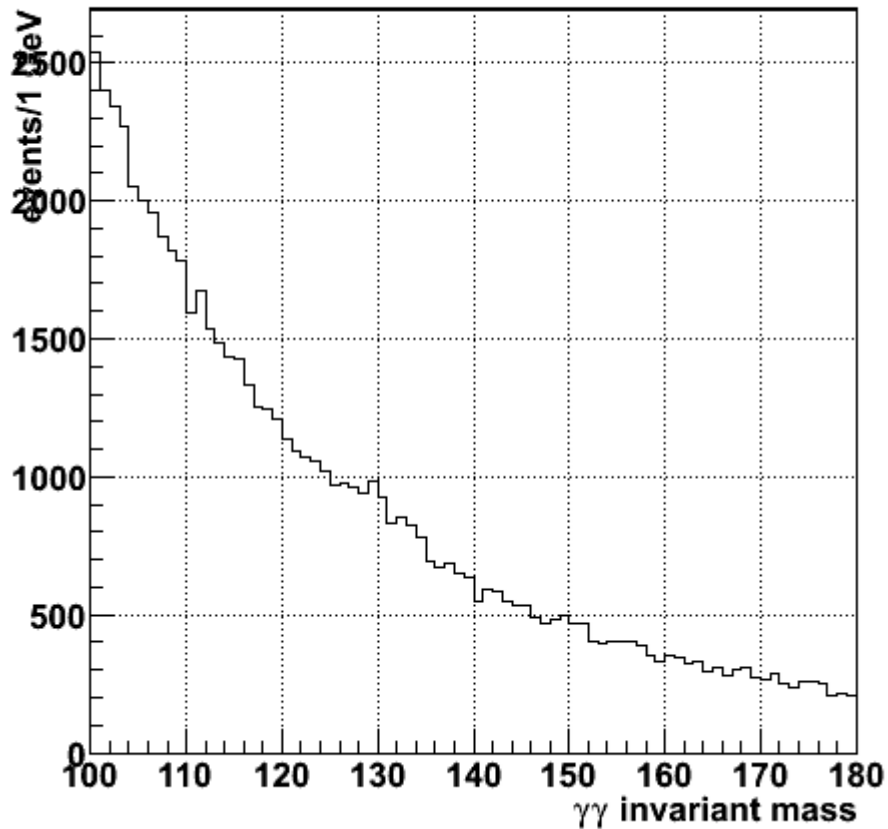


One of these plots contains the (simulated) Higgs boson signal.

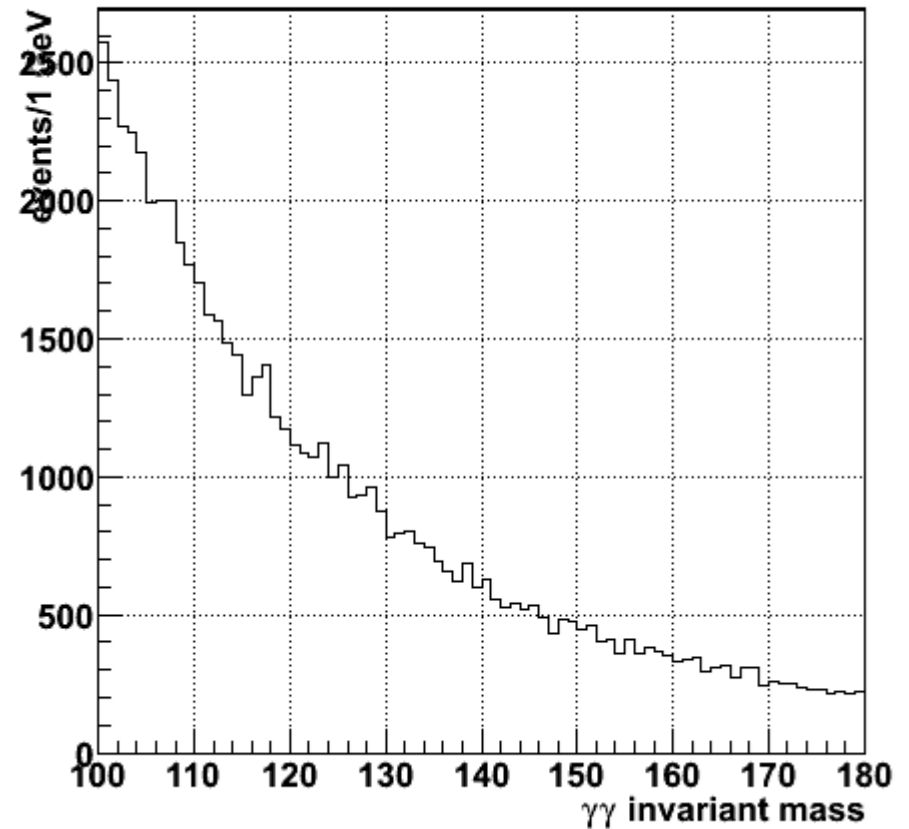
Can you spot it?

The $H \rightarrow \gamma\gamma$ channel

$L=16.00 \text{ fb}^{-1}$



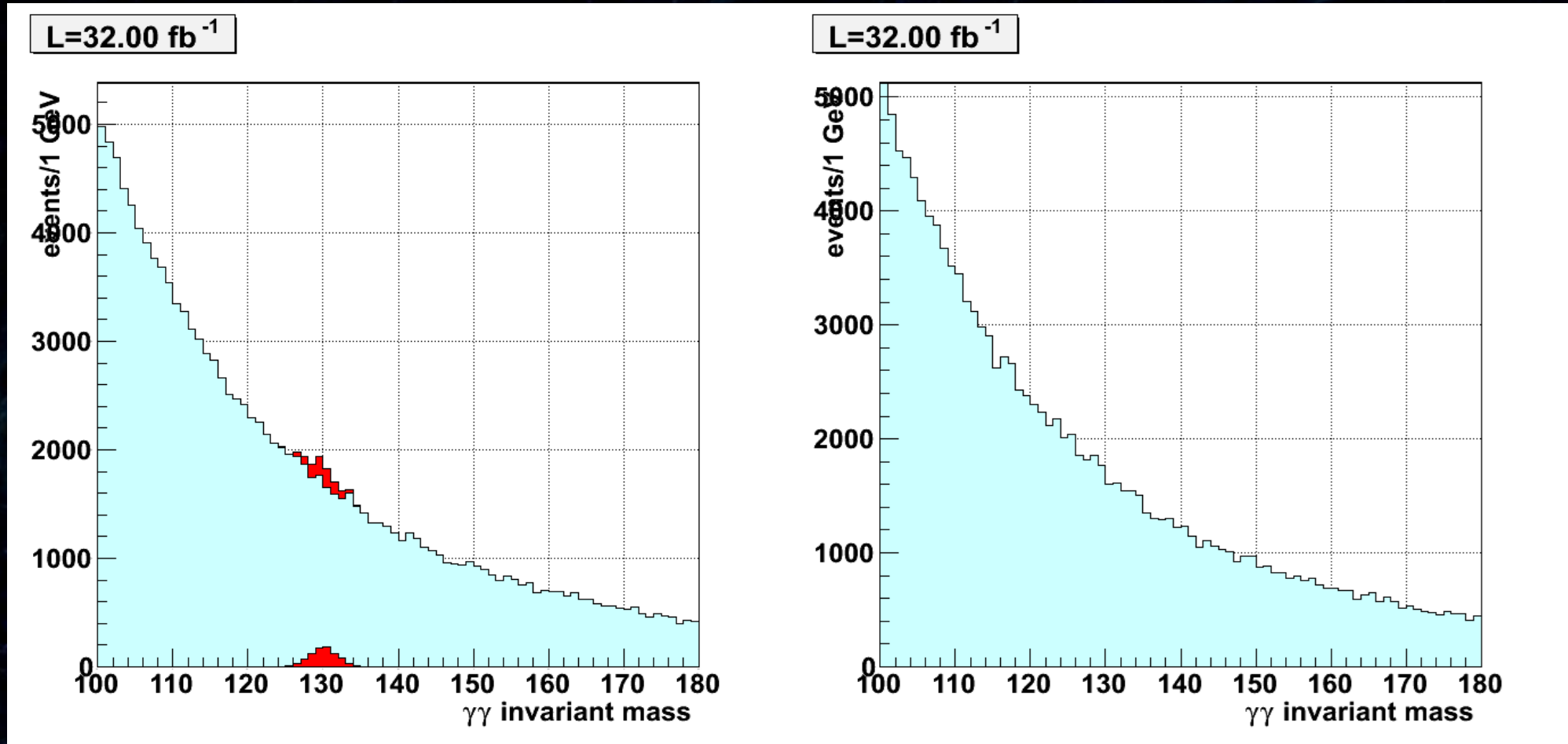
$L=16.00 \text{ fb}^{-1}$



One of these plots contains the (simulated) Higgs boson signal.

Can you spot it?

The $H \rightarrow \gamma\gamma$ channel



One of these plots contains the (simulated) Higgs boson signal.

Can you spot it?