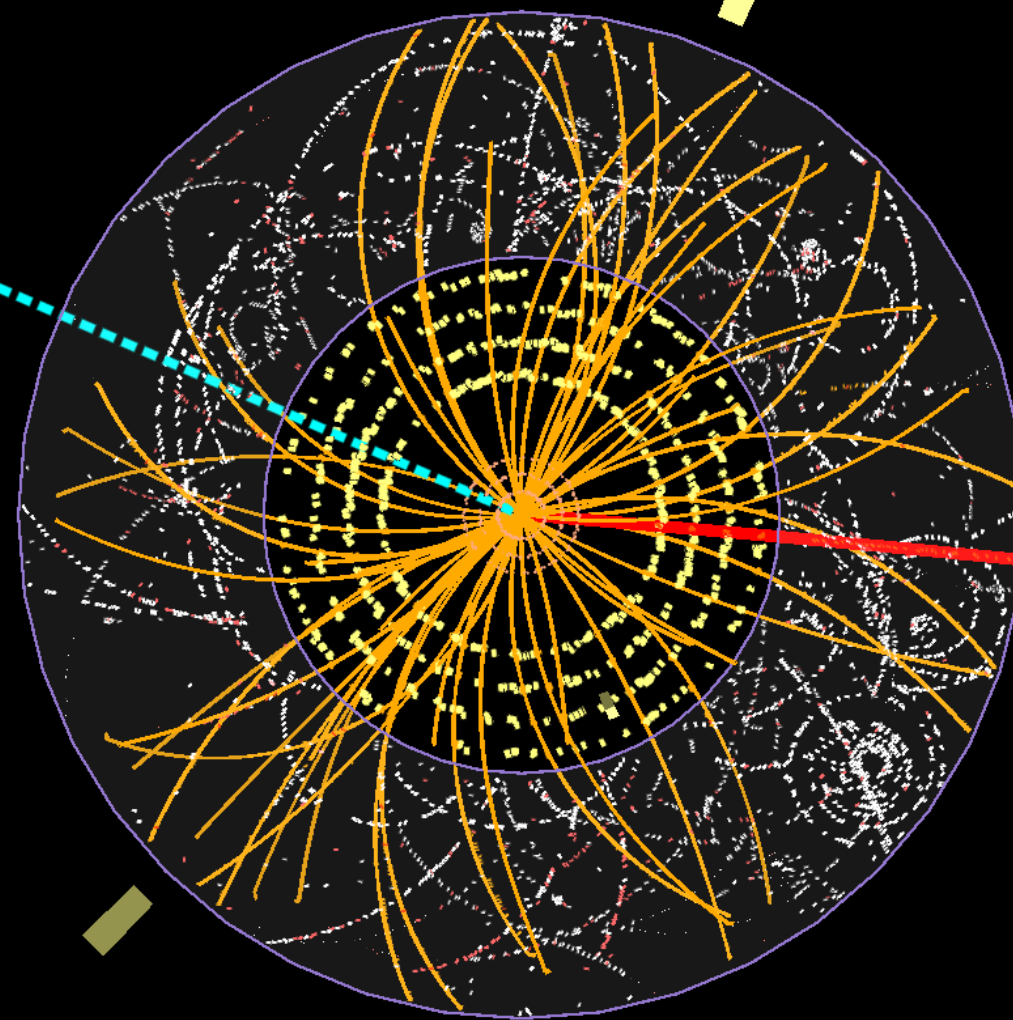


Run: 183081

Event: 101291517

2011-06-05 17:09:02 CEST



$M_T = 82.9 \text{ GeV}$
 $p_T \text{ muon} = 32.8 \text{ GeV}$
 $E_T^{\text{miss}} = 52.4 \text{ GeV}$

O LHC, eksperymencie ATLAS, bozonie W (i nie tylko)

Mateusz Dyndał

WFiS AGH, Katedra Oddziaływań i Detekcji Cząstek

Kraków, 24.03.2023

O jednostkach słów kilka

- ‘Standardową’ jednostką energii w fizyce jest **dżul (J)**
- W fizyce cząstek używamy **elektronowoltów (eV)**
 - to ilość energii, którą pojedynczy elektron nabywa podczas poruszania się w polu elektrycznym o potencjale 1 V

$$1\text{eV} = 1e \cdot 1\text{V} = 1,602\,176\,634 \times 10^{-19}\text{J}$$

- Często używamy energii, które są rzędu milionów elektronowoltów, wygodnie jest więc wprowadzić następujące jednostki:

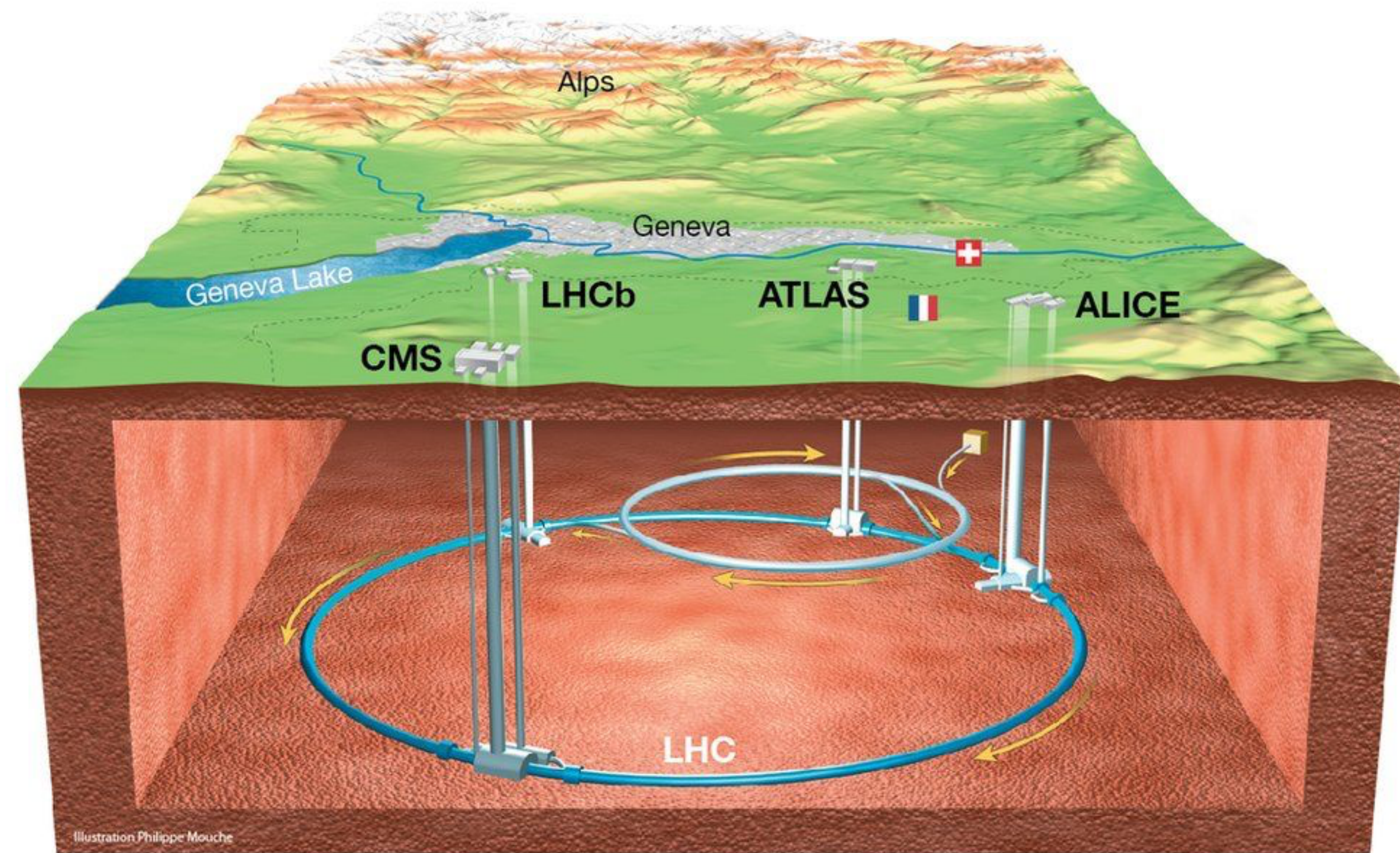
$$\frac{1.000.000}{10^6} \text{ eV} = 1 \text{ MeV (Mega electron volt)}$$
$$\frac{1.000.000.000}{10^9} \text{ eV} = 1 \text{ GeV (Giga electron volt)}$$
$$\frac{1.000.000.000.000}{10^{12}} \text{ eV} = 1 \text{ TeV (Tera electron volt)}$$

O jednostkach słów kilka

- Jednostki **eV** używamy do określania mas cząstek elementarnych
 - Wynika to z relacji pomiędzy masą a energią ($E = mc^2$) oraz faktu używania przez fizyków jednostek, w których $c = 1$ (prędkość światła w próżni).
 - Chcąc wyrażać się ściśle należałoby mówić o jednostkach **eV/c²** jednak zwykle pomija się c
- Przykłady przybliżonych wartości mas cząstek:
 - elektron: **0.511 MeV/c²**
 - proton: **0.938 GeV/c²**
 - bozon W: **80.4 GeV/c²**
 - Bozon Higgsa: **125 GeV/c²**
 - kwark t: **171 GeV/c²** (\approx masa atomu złota)

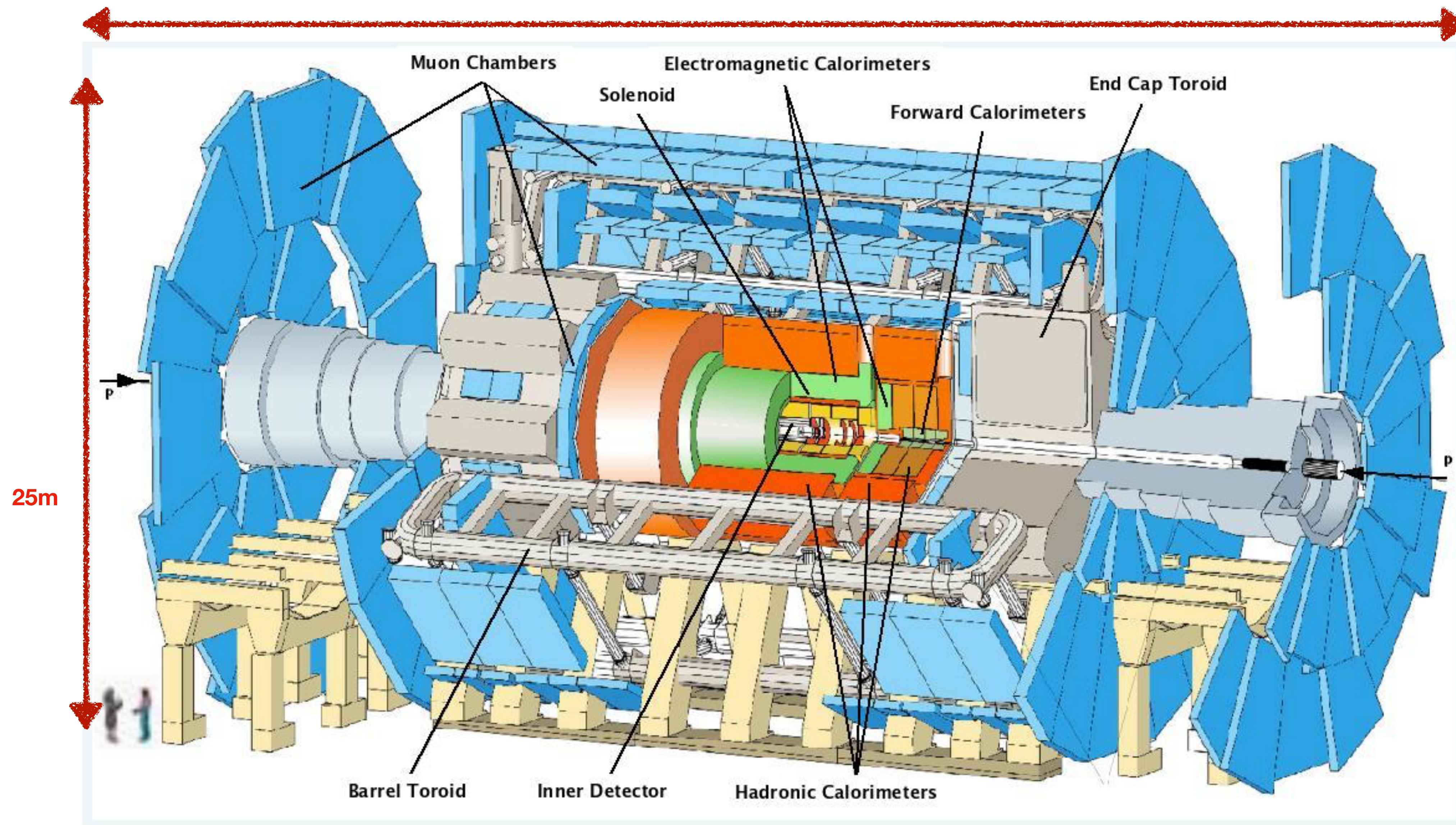
Wielki Zderzacz Hadronów (LHC)

- Umieszczony w tunelu o długości bliskiej **27 km** ok. **100 m** pod powierzchnią ziemi
- Zawiera **9300** magnesów
- Magnesy pracują w temperaturze **1.9 K** (czyli **-271.3°C**)
- W przeciwnych kierunkach krążą w nim dwie wiązki protonów zderzających się w 4 miejscach
- Protony poruszają się z prędkością równą **99.999999%** prędkości światła Protony osiągają energię po **6.8 TeV** (w każdej wiązce)
- Cztery główne detektory zbierają dane od roku 2010

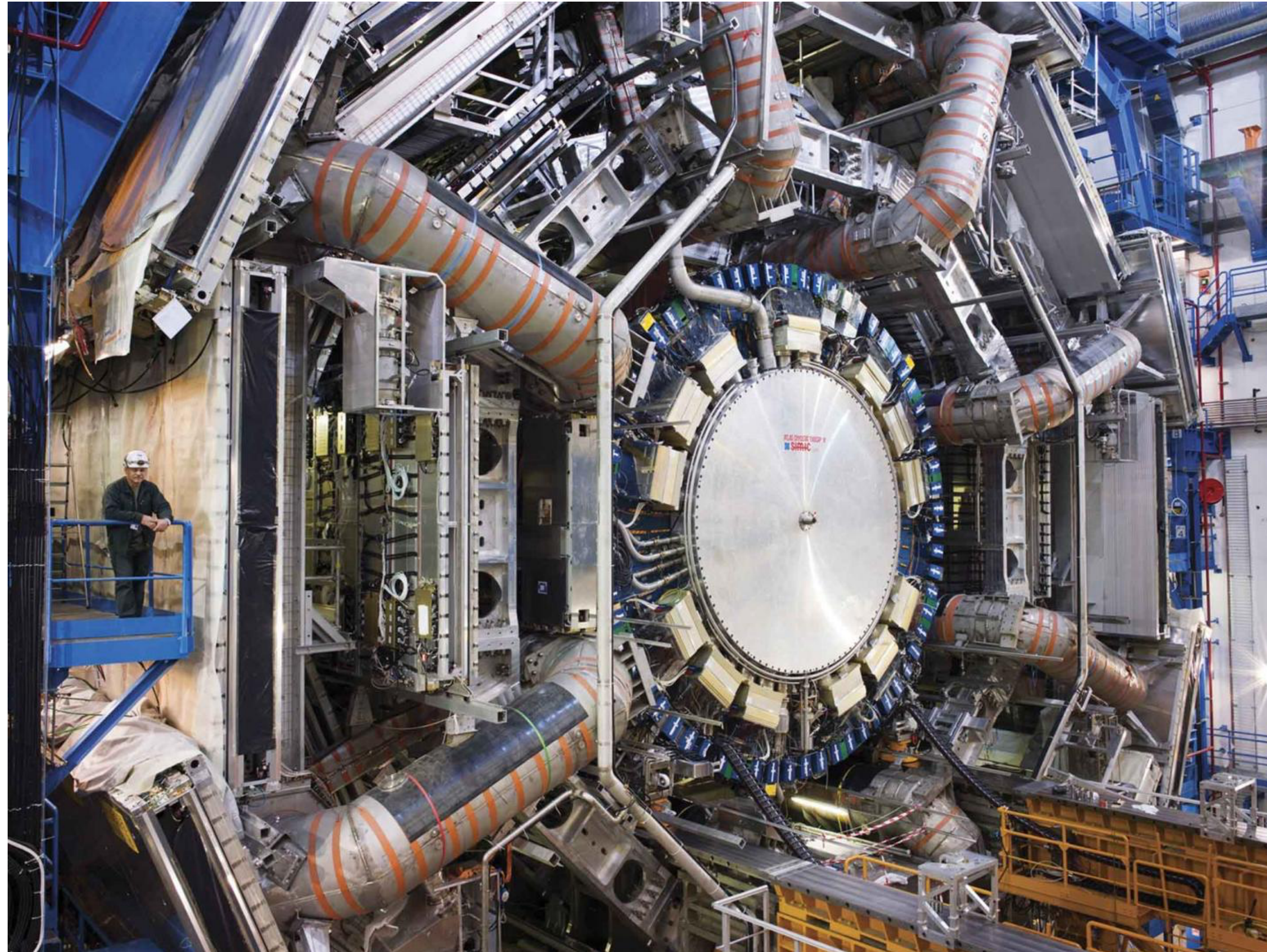


Detektor ATLAS

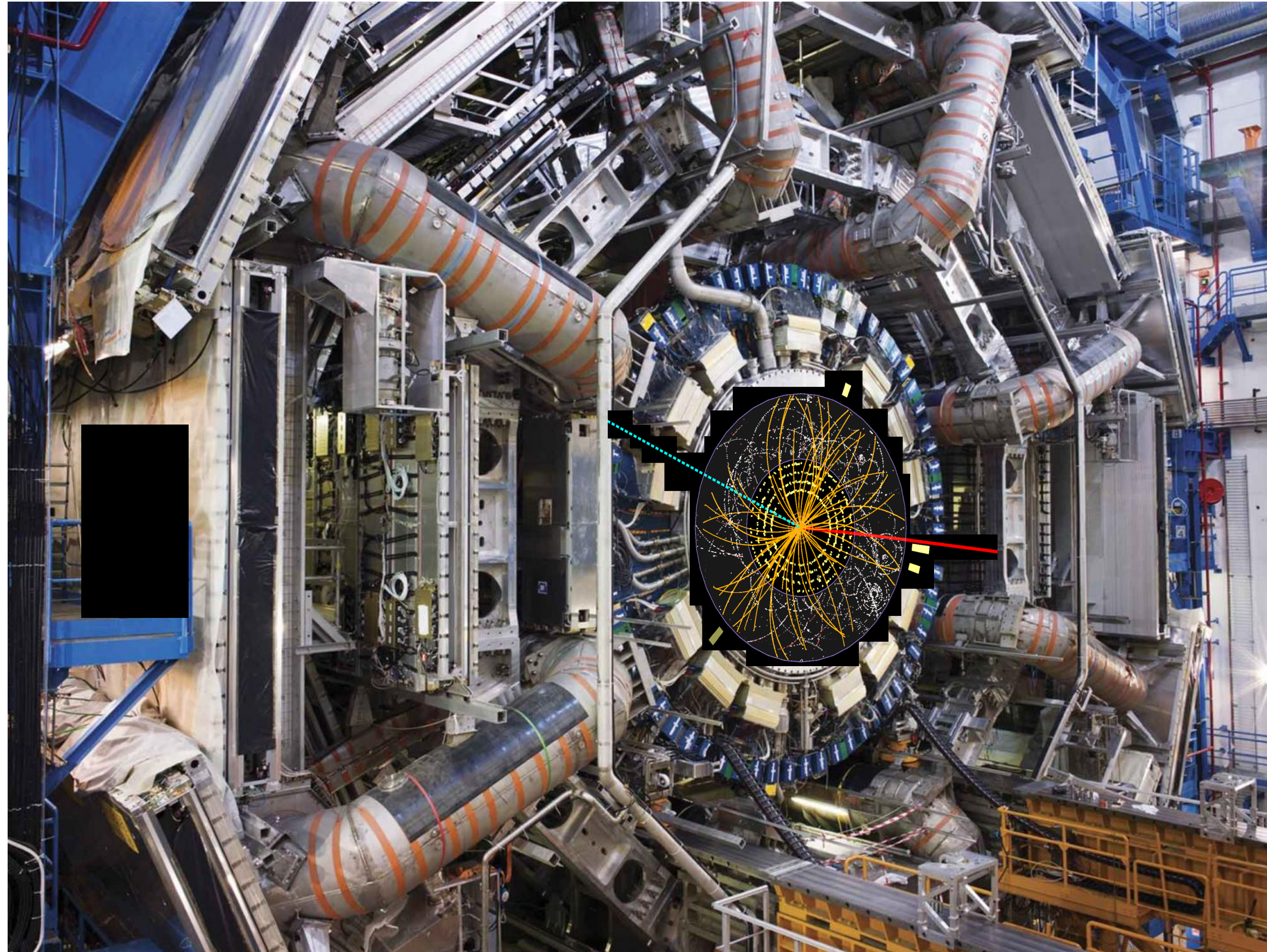
44m



Detektor ATLAS



Detektor ATLAS



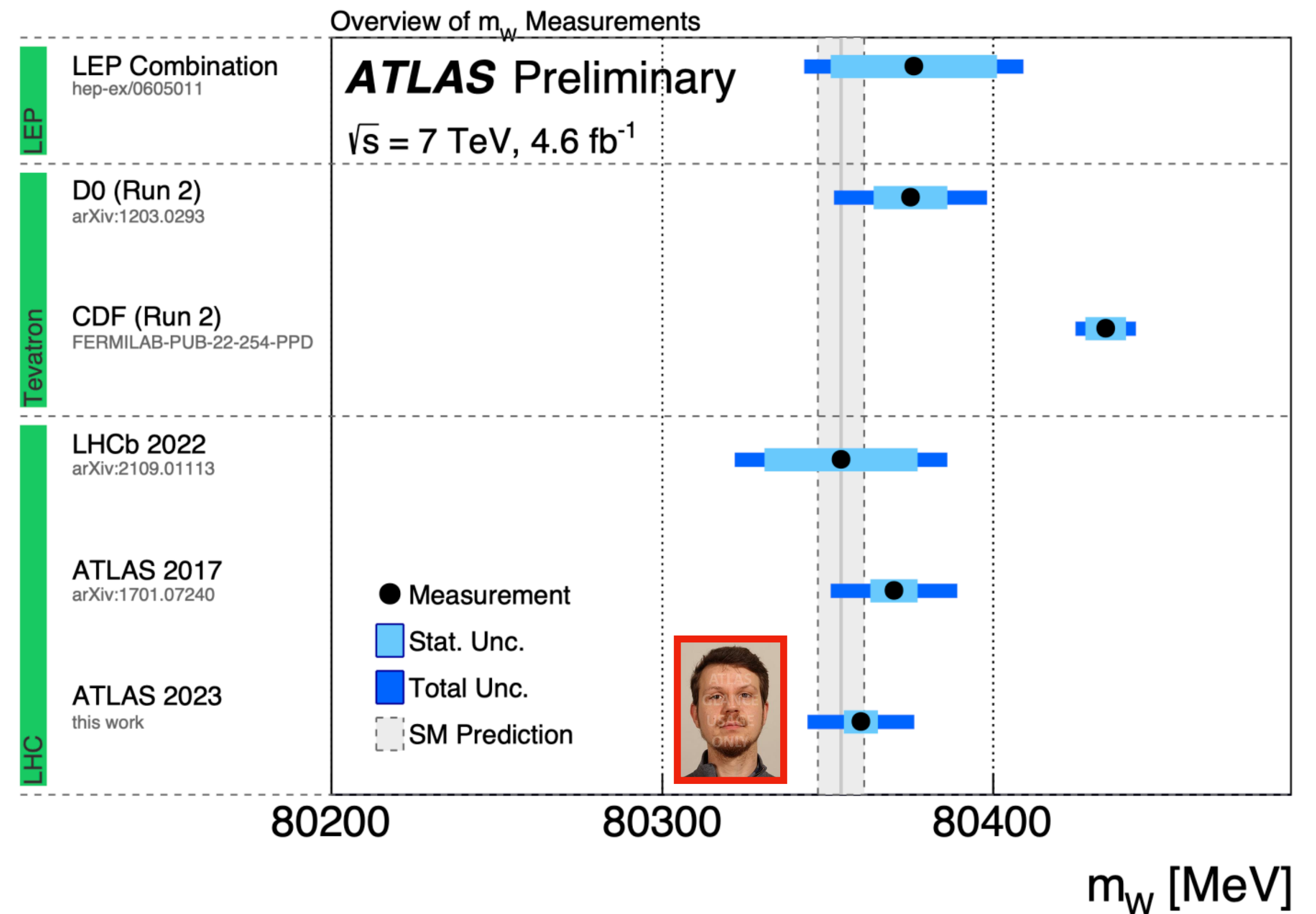
Współpraca ATLAS



- To ponad **3000** naukowców z **42** państw.
- Na co dzień większość z nich pracuje w swoich instytucjach rozrzuconych po całym świecie

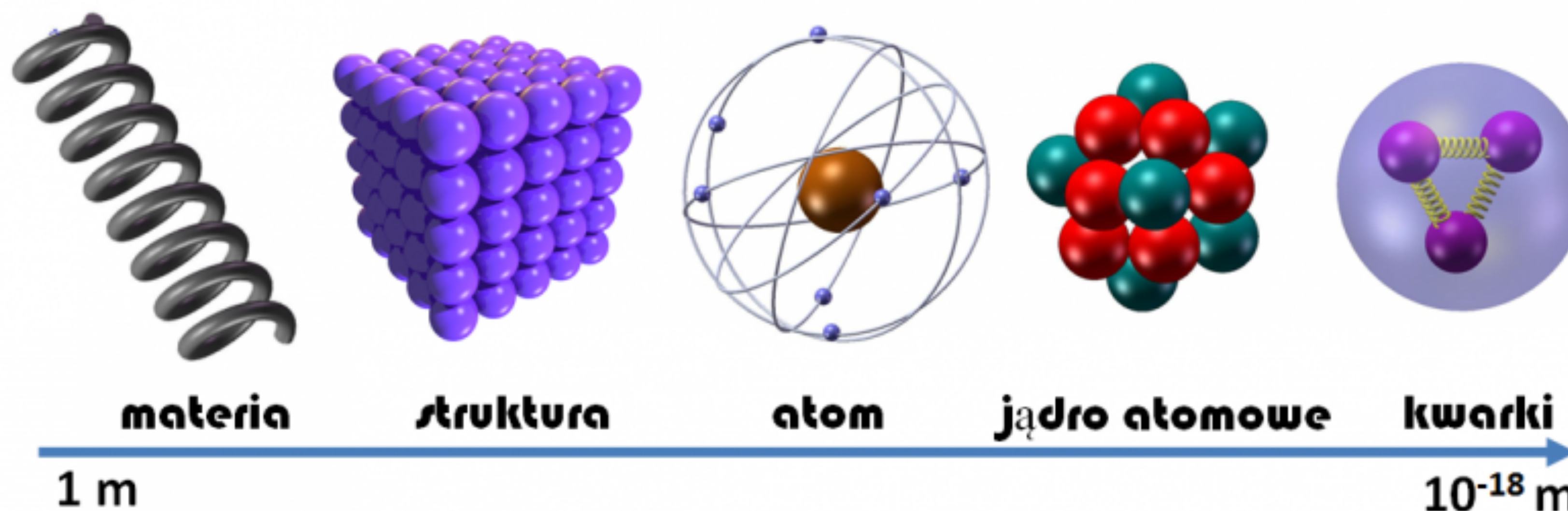
Współpraca ATLAS - najnowszy pomiar

- 23 marca 2023 współpraca zaprezentowała nowy (ulepszony) pomiar masy bozonu W
- W badaniach brał udział nasz były doktorant Jakub Kremer



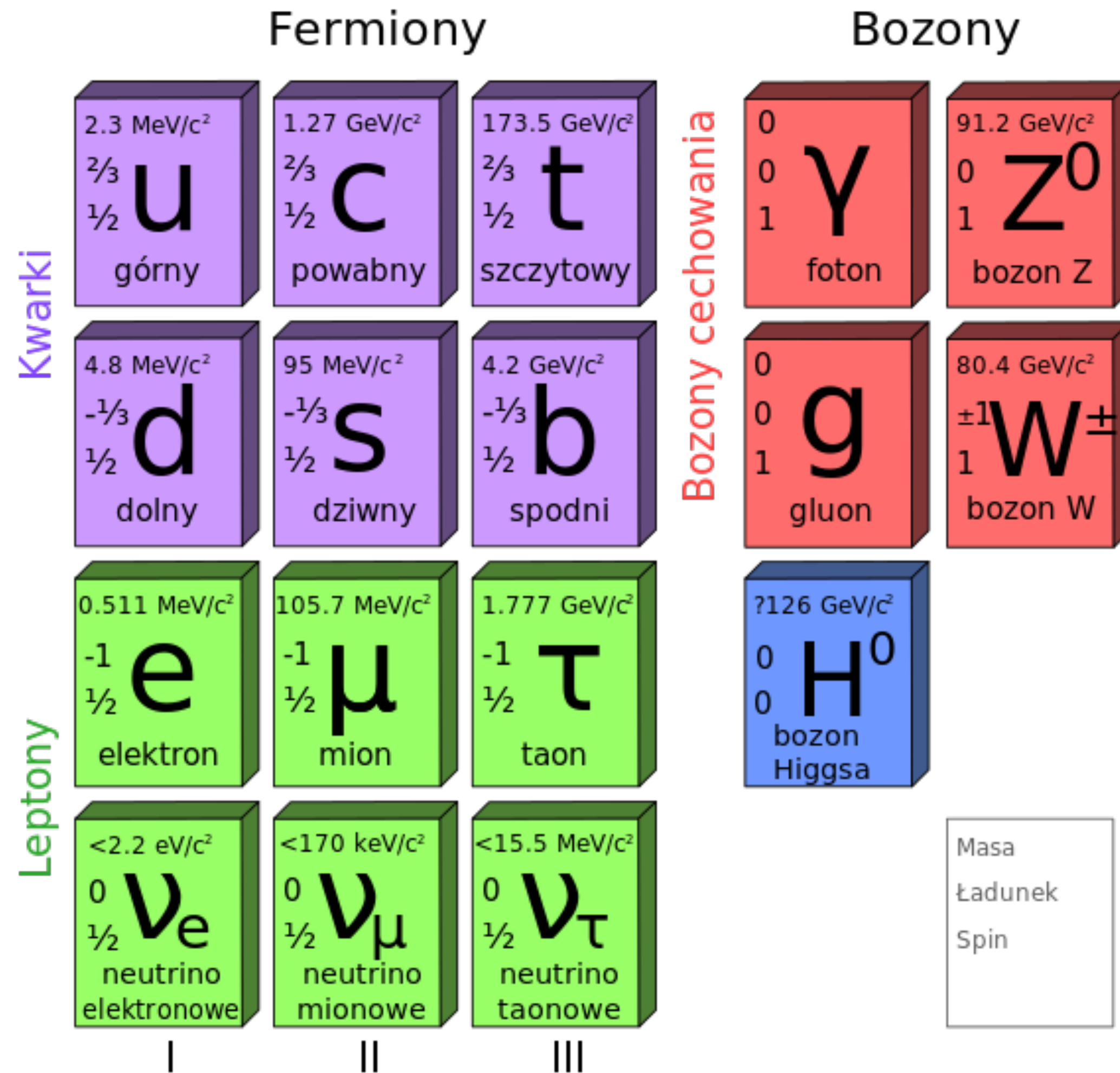
Model Standardowy

- Opisuje budowę materii do rozmiarów jeszcze kilka rzędów wielkości mniejszych niż atom.
 - Opisuje trzy z czterech (z wyjątkiem grawitacji) oddziaływań podstawowych: **elektromagnetyczne, słabe i silne**
 - Nie jest teorią ‘kompletną’, tzn. nie tłumaczy np. asymetrii pomiędzy materią i antymaterią, ciemnej materii, ...



Model Standardowy

- “Układ okresowy” Modelu Standardowego

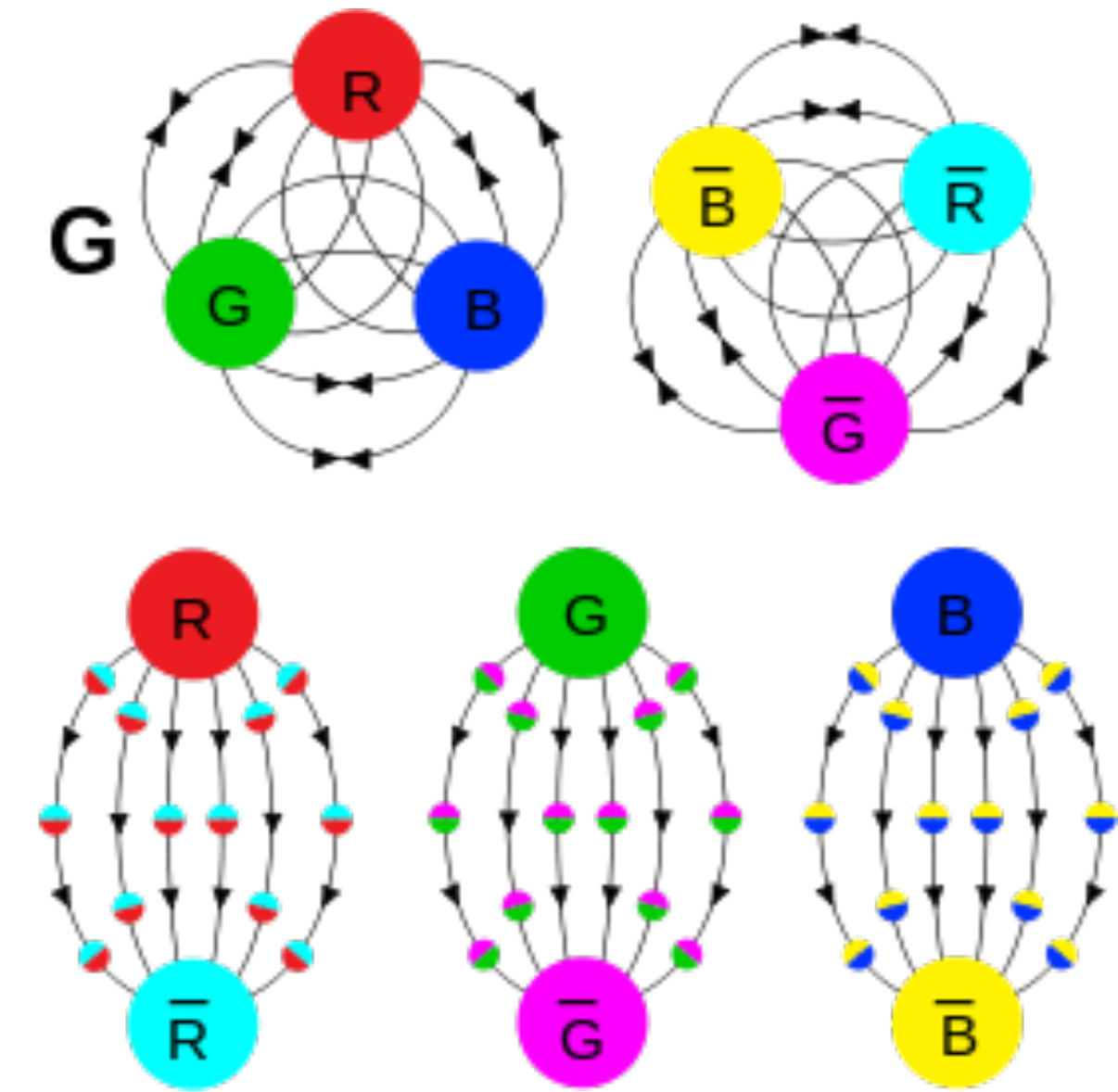
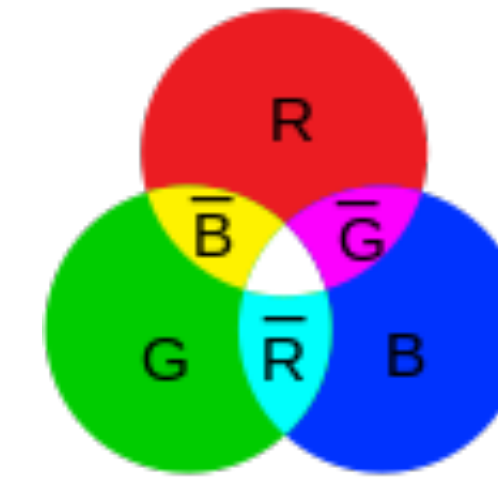


Oddziaływania silne i kwarki

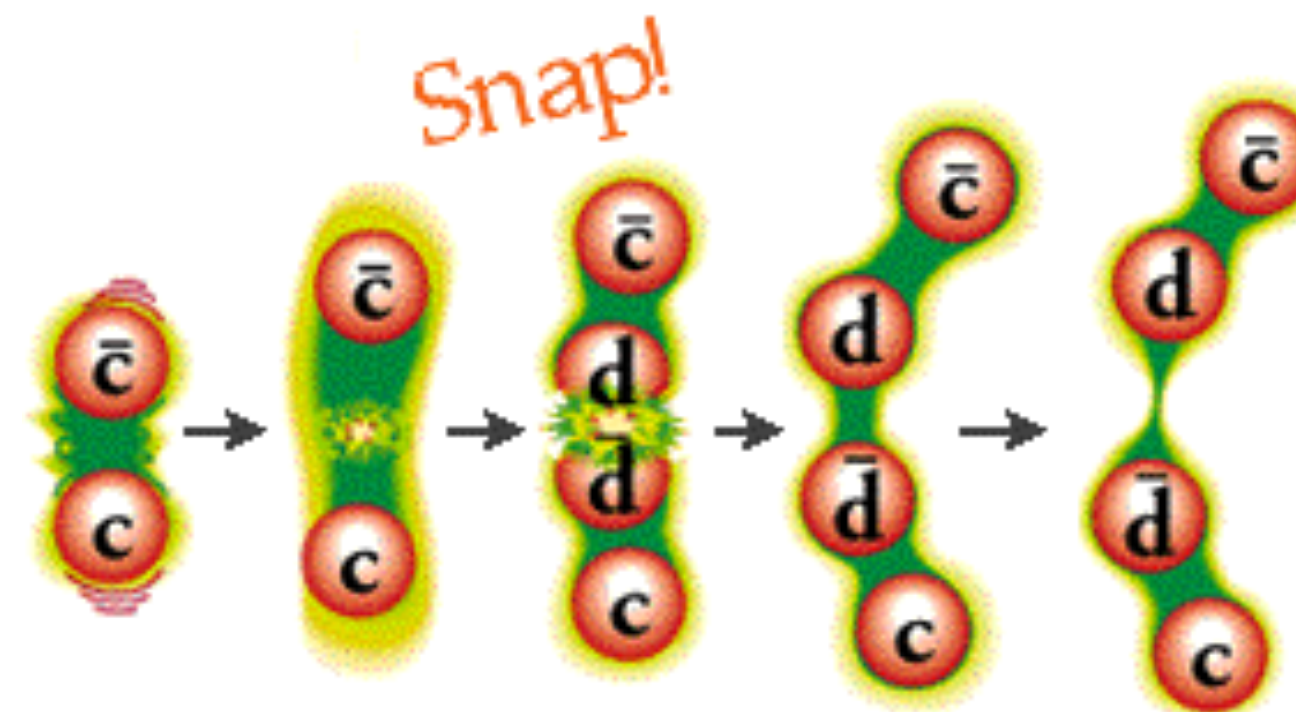
- Kwarki występują jedynie w **stanie związanym**:

- bariony - 3 kwarki (np. **proton: uud**, neutron: udd)
- mezony - kwark + antykwark

- Dla ułatwienia przypisuje się kwarkom kolory **czzerwony, zielony, niebieski**, a antykwarkom antykolory. Bariony i mezony są wtedy "białe".

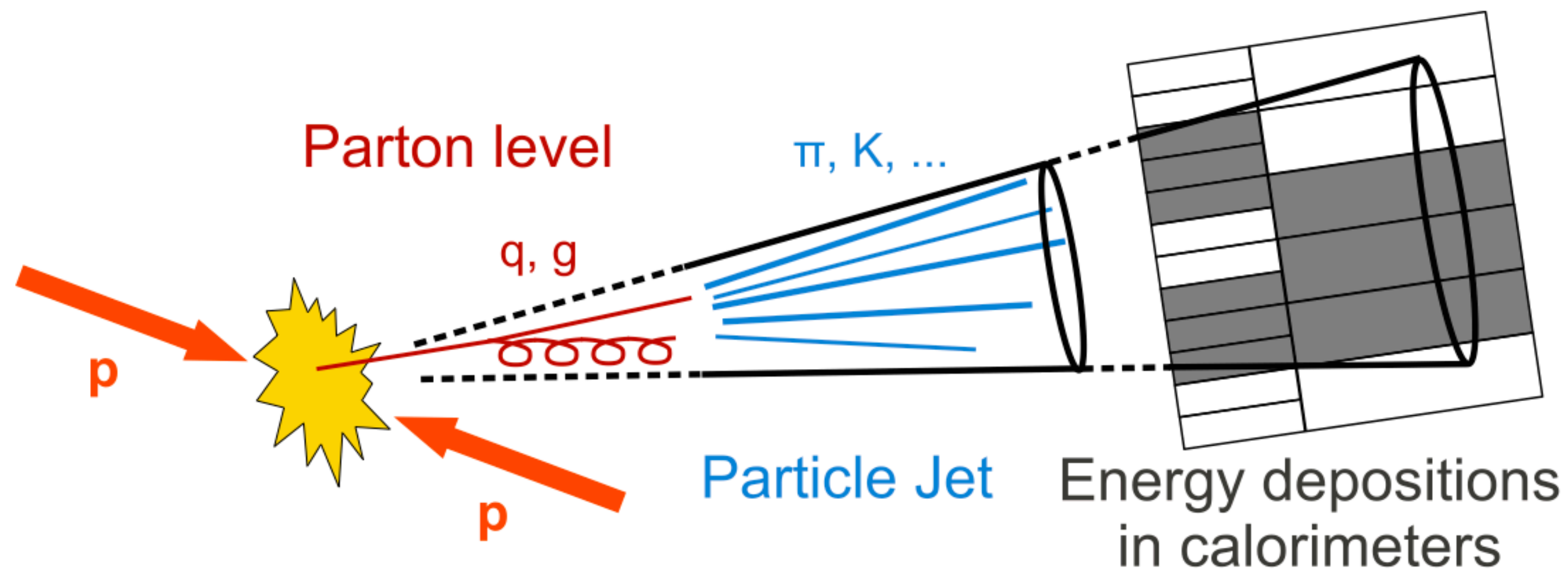


- Próba rozdzielenia kwarków (poprzez dostarczenie im energii) prowadzi do powstania pary kwark + antykwark kompensującej kolor (tzw. **uwięzienie koloru**)

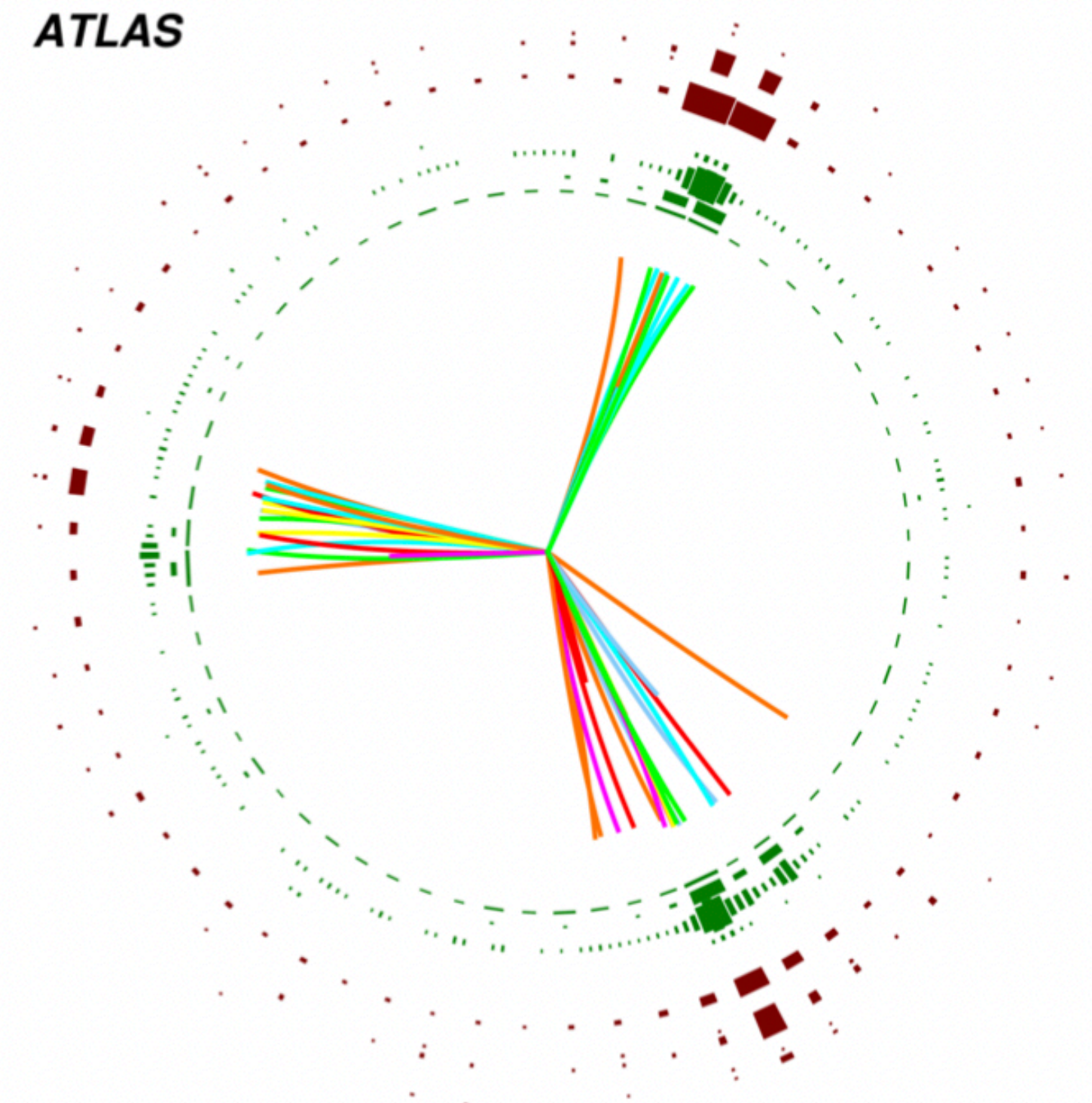


Oddziaływania silne i kwarki

- Czy możemy zobaczyć kwarki bezpośrednio w detektorze?
 - Niestety nie jest możliwe!
 - Eksperyment rejestruje jedynie ‘strugi’ cząstek powstałych w wyniku procesu konwersji kwarków na pary cząstek. Te strugi cząstek nazywamy **dżetami**.

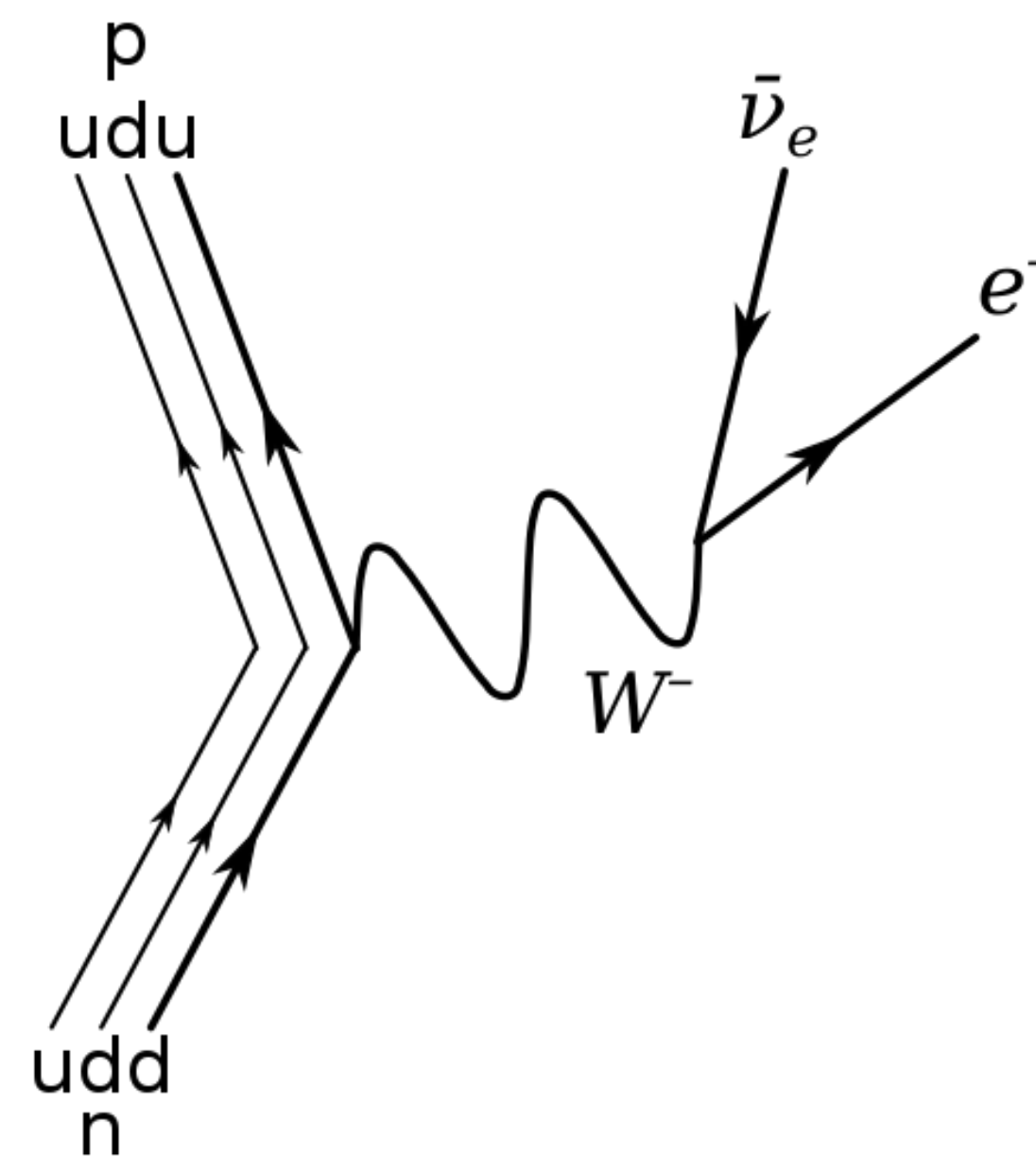
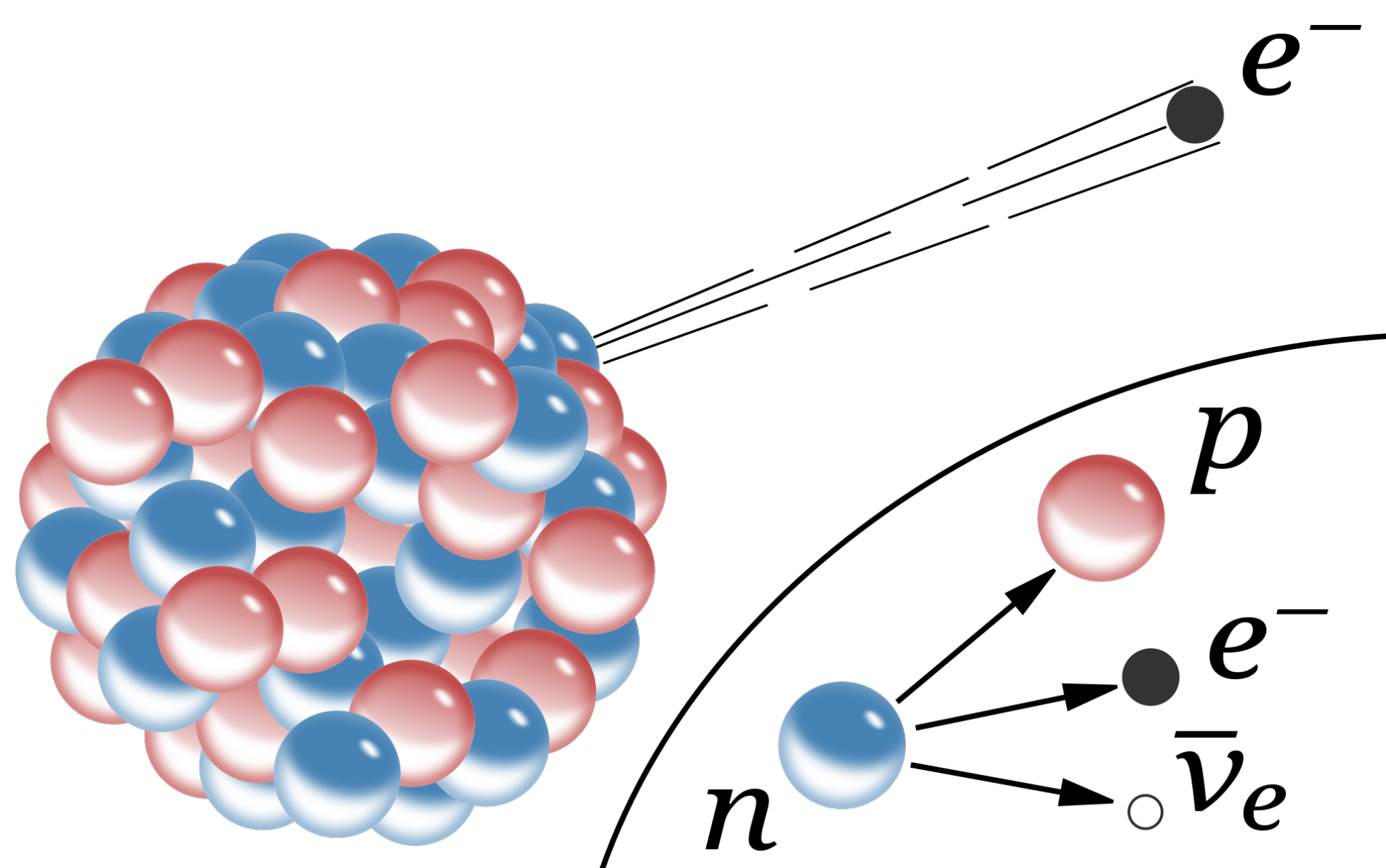


ATLAS



Oddziaływania słabe

- Przenoszone za pomocą jednej z trzech masywnych cząstek: bozonów naładowanych (W^+ i W^-) oraz bozonu neutralnego (Z^0)
- Jest odpowiedzialne za **rozpad beta** i związaną z nim radioaktywność
- Siła oddziaływania słabego jest 10^9 razy mniejsza niż oddziaływania silnego
 - Jest zbyt słabe, by połączyć leptony w większe cząstki, tak jak oddziaływania silne łączą w hadronach kwarki.



Produkcja bozonów W na LHC

- Czy możemy poszukiwać cząstki W o masie ok. 80 GeV w zderzeniach protonów w LHC?
- Zgodnie ze wzorem Einsteina ($E = mc^2$) cząstki cięższe i nietrwałe mogą zostać wyprodukowane w zderzeniach, np. protonów o wysokich energiach, pod warunkiem, że:

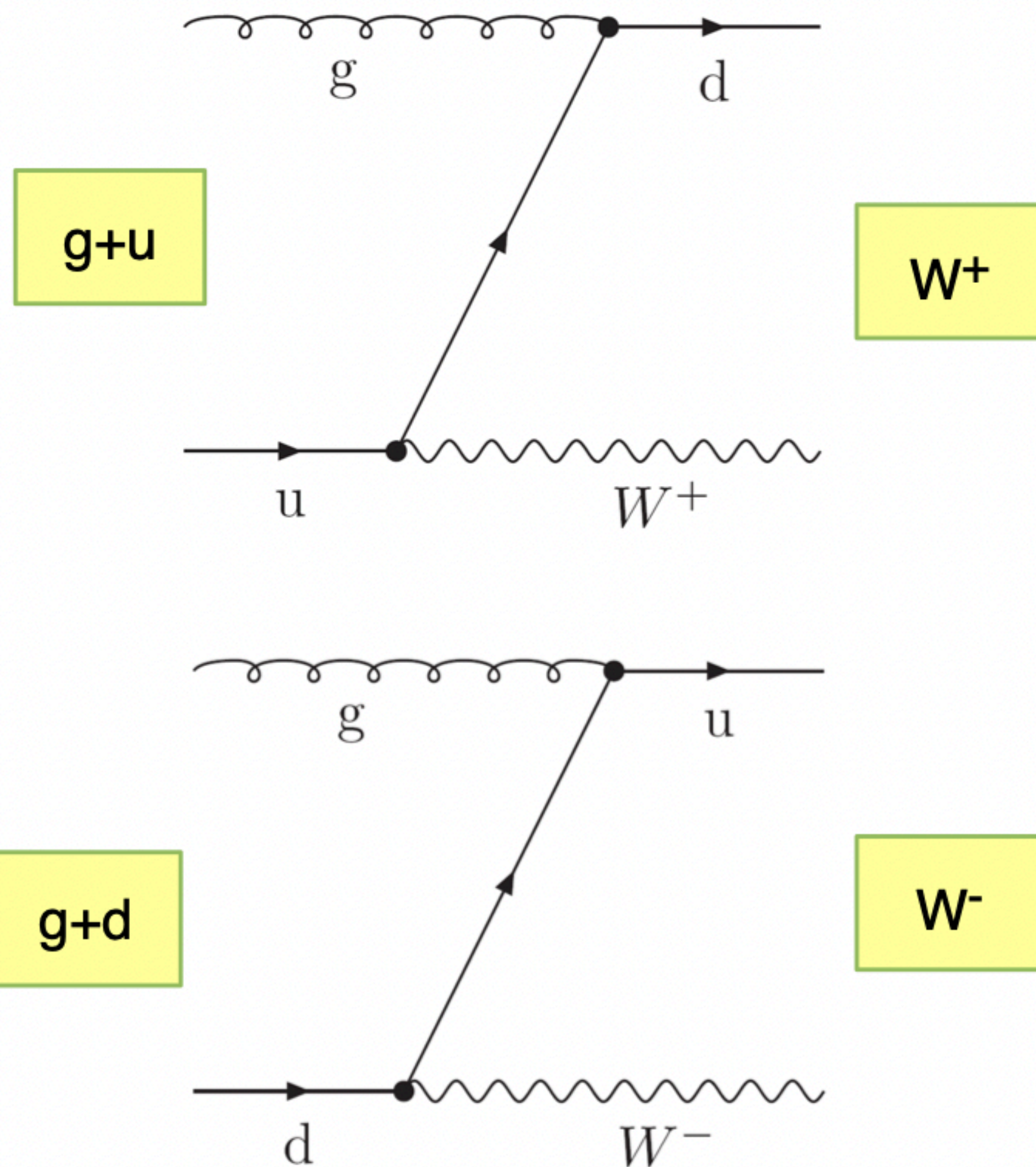
Energia zderzeń \geq masa bozonu W

- W naszym przypadku:

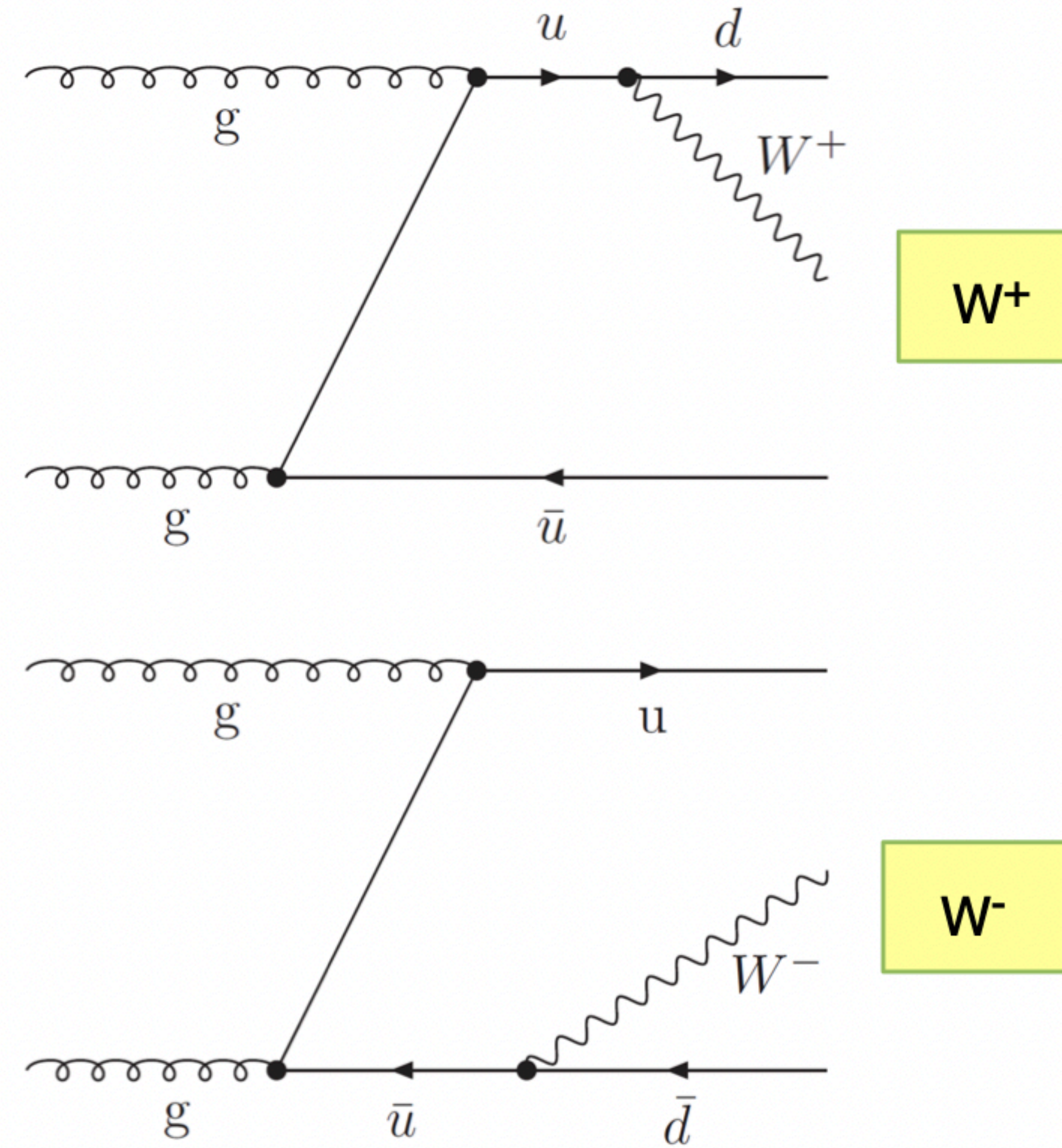
13.6 TeV \gg 80 GeV

Produkcja bozonów W na LHC

zderzenia kwark-gluon



zderzenia gluon-gluon



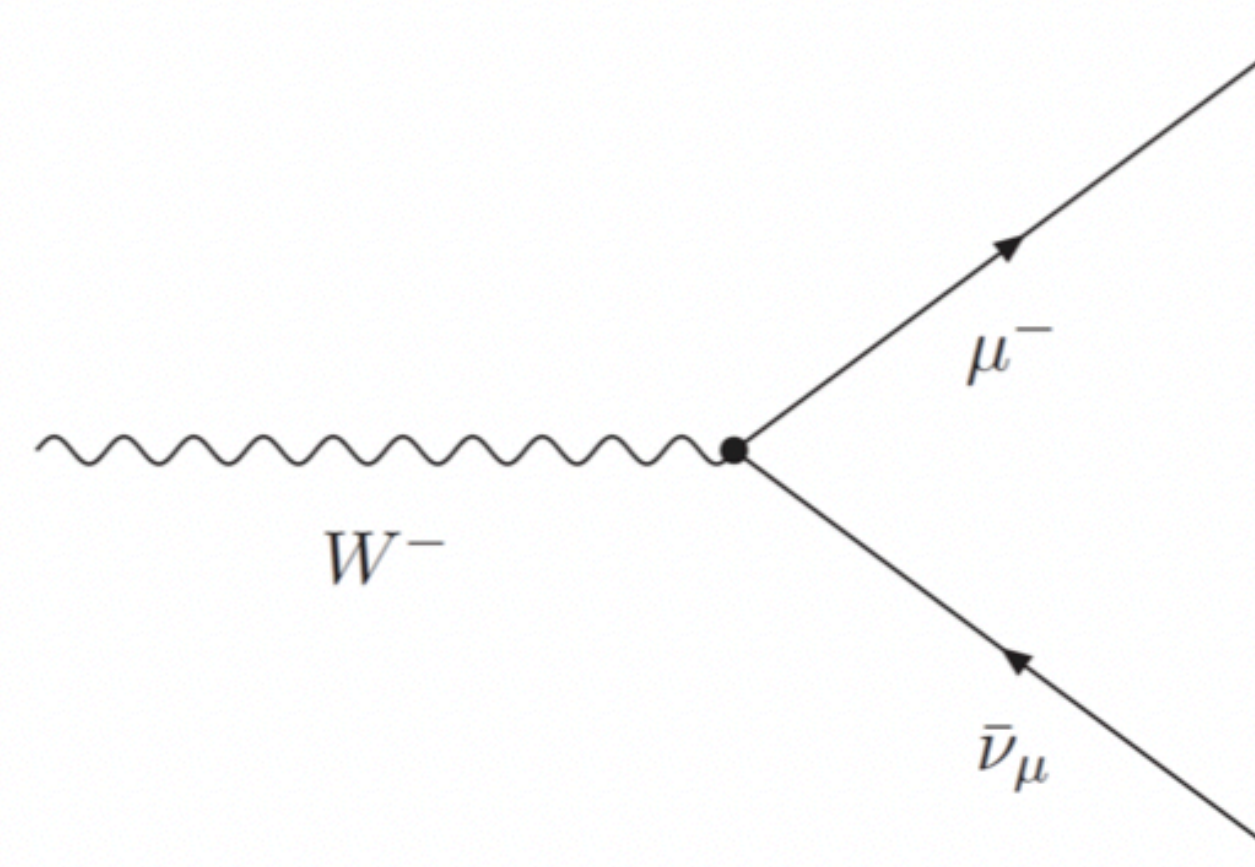
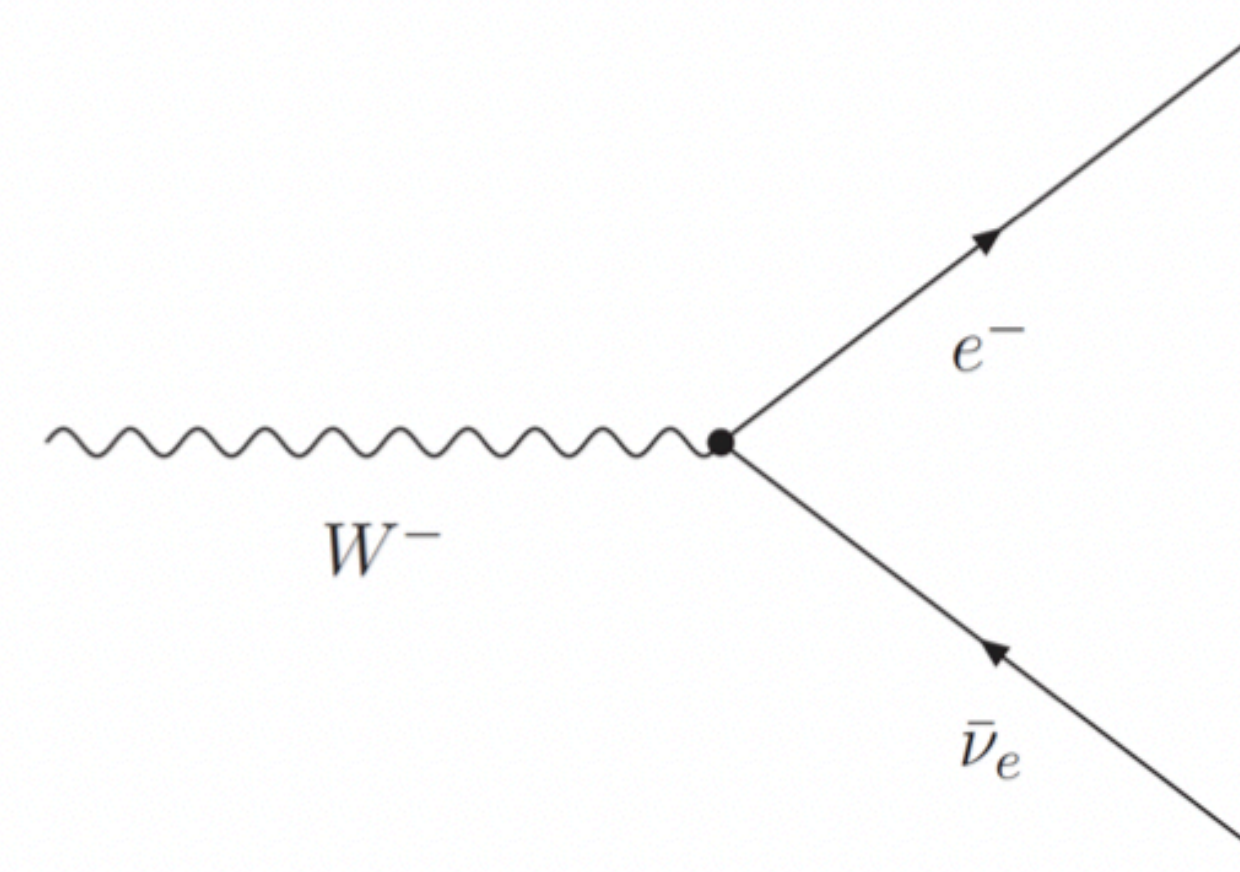
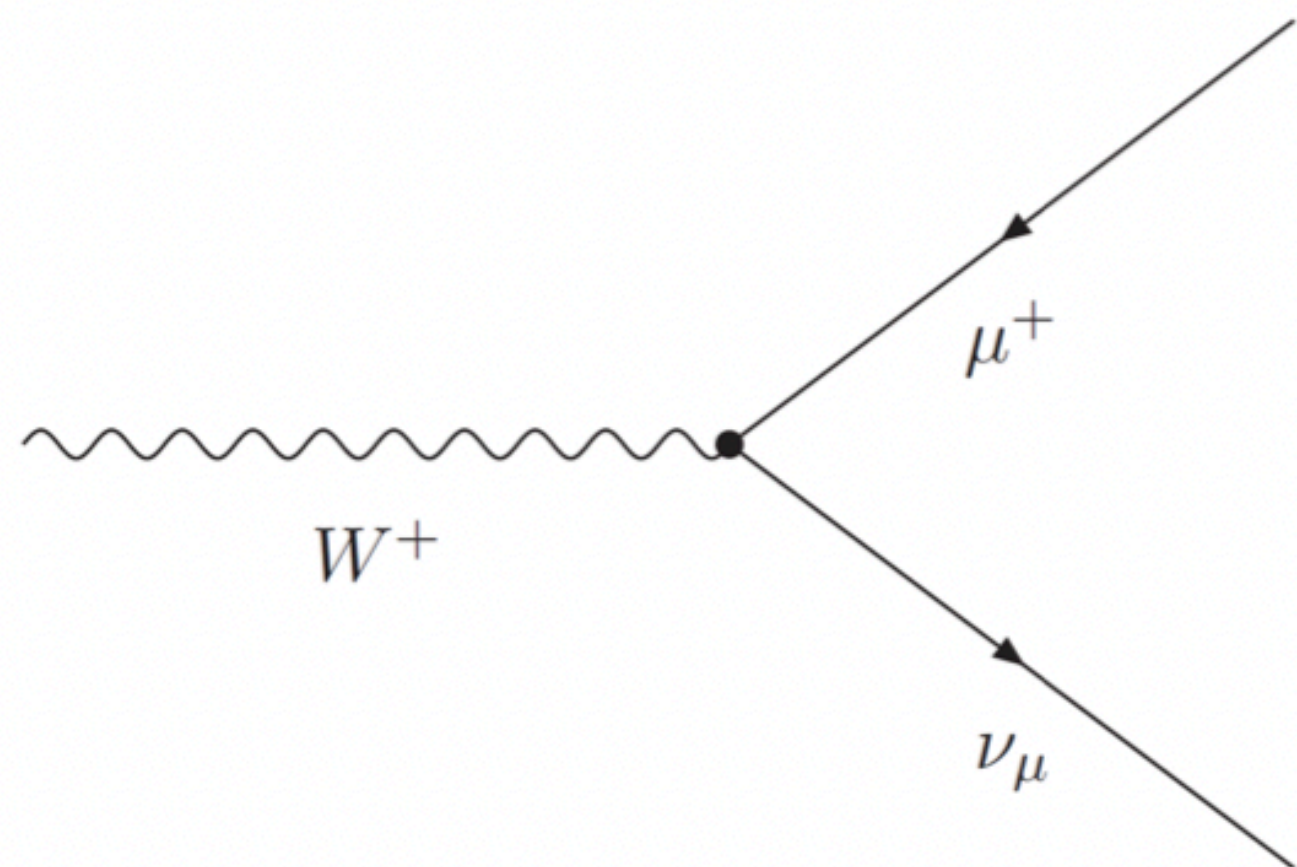
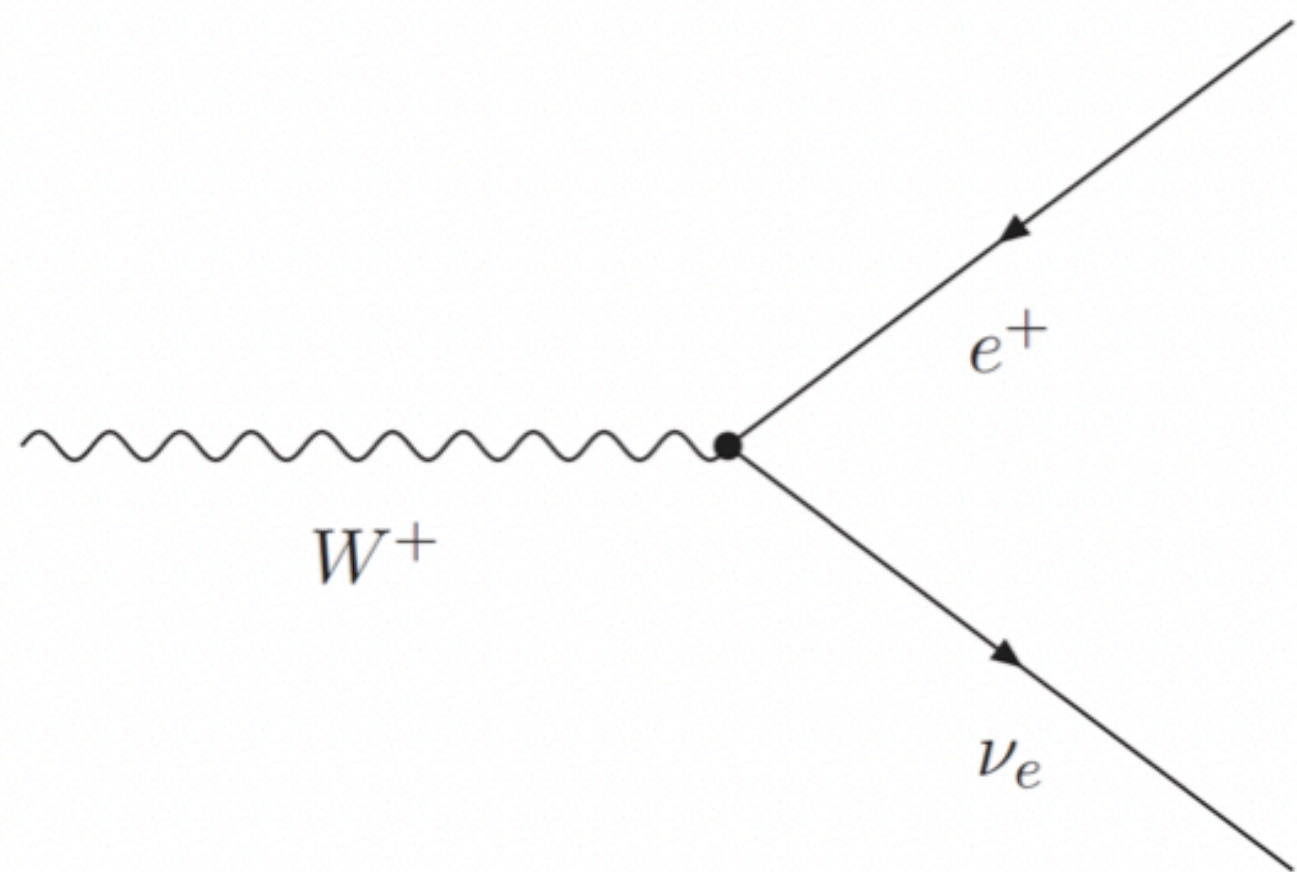
Przewidywanie: $R = \frac{N_{W^+}}{N_{W^-}} > 1$

Rozpady bozonu W

- Bozon W^+ może rozpaść się na:
 - pary leptonów: e^+v_e , μ^+v_μ , τ^+v_τ (3 możliwości)
 - na pary kwark-antykwar: (15 możliwości)
 - * 5 par kwark/antykwar x trzy kolory;
 - ** rozpad na parę zawierającą kwark t jest niemożliwy, bo ma on zbyt dużą masę
- Problemy:
 - **Kwarki** z rozpadu bozonu W przekształcają się w hadrony (dżety), co utrudnia stwierdzenie, czy pochodzą z rozpadu W
 - Cząstki τ prawie natychmiast rozpadają się, dlatego rozpady W z ich udziałem są trudne do badania

Rozpady bozonu W

- Interesujące nas rozpady:

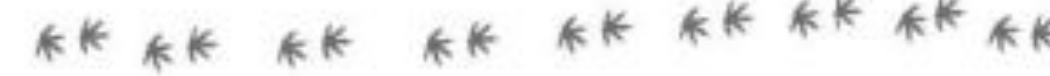


Detekcja cząstek

- Powstaje pytanie, jak odróżnić elektrony (pozytony) oraz miony od innych cząstek?
- Można tego dokonać analizując **ślady** pozostawione przez cząstki w detektorze!

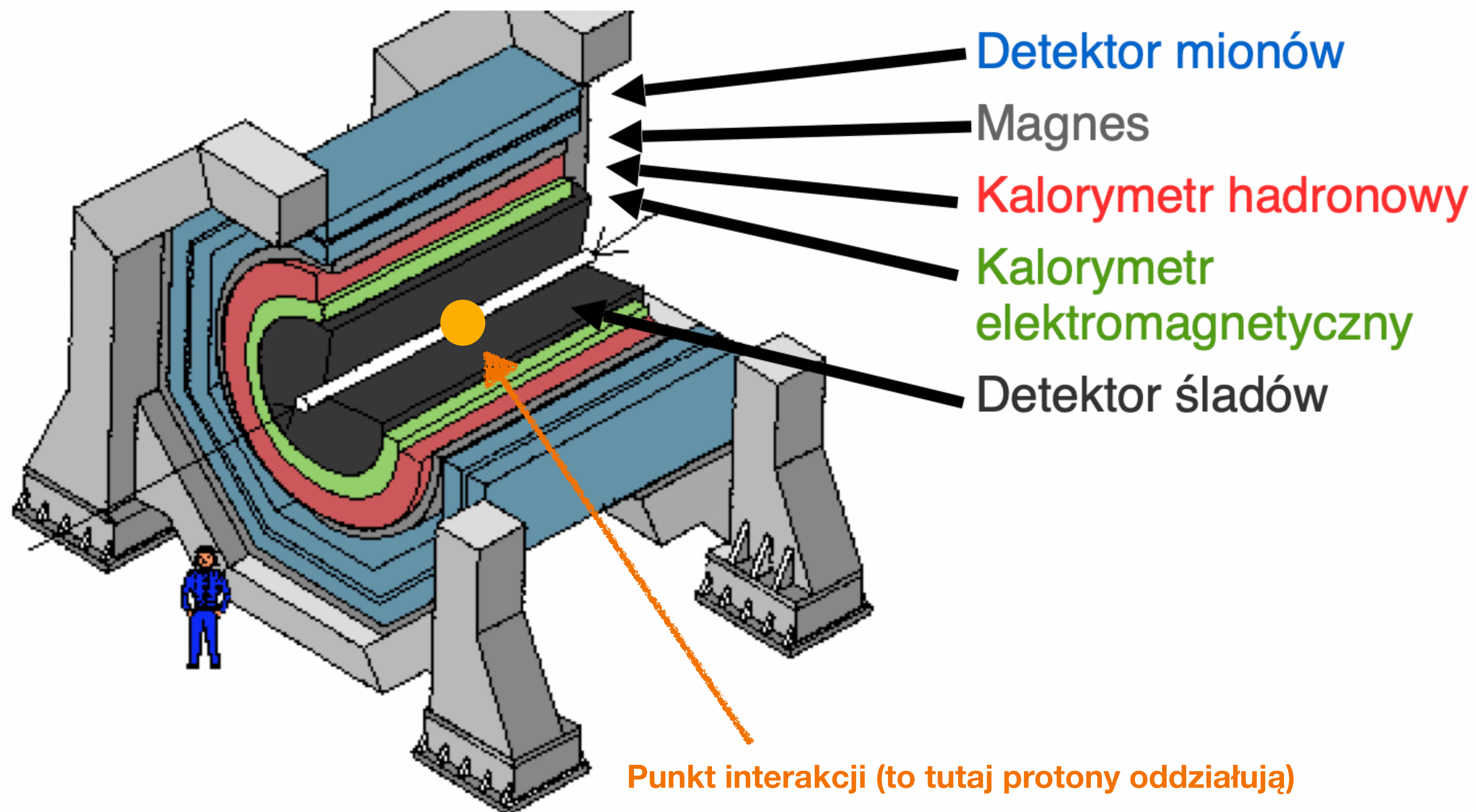
Ślady zwierząt na śniegu

1. Dopasuj ślady do zwierząt, które je zostawiają na śniegu



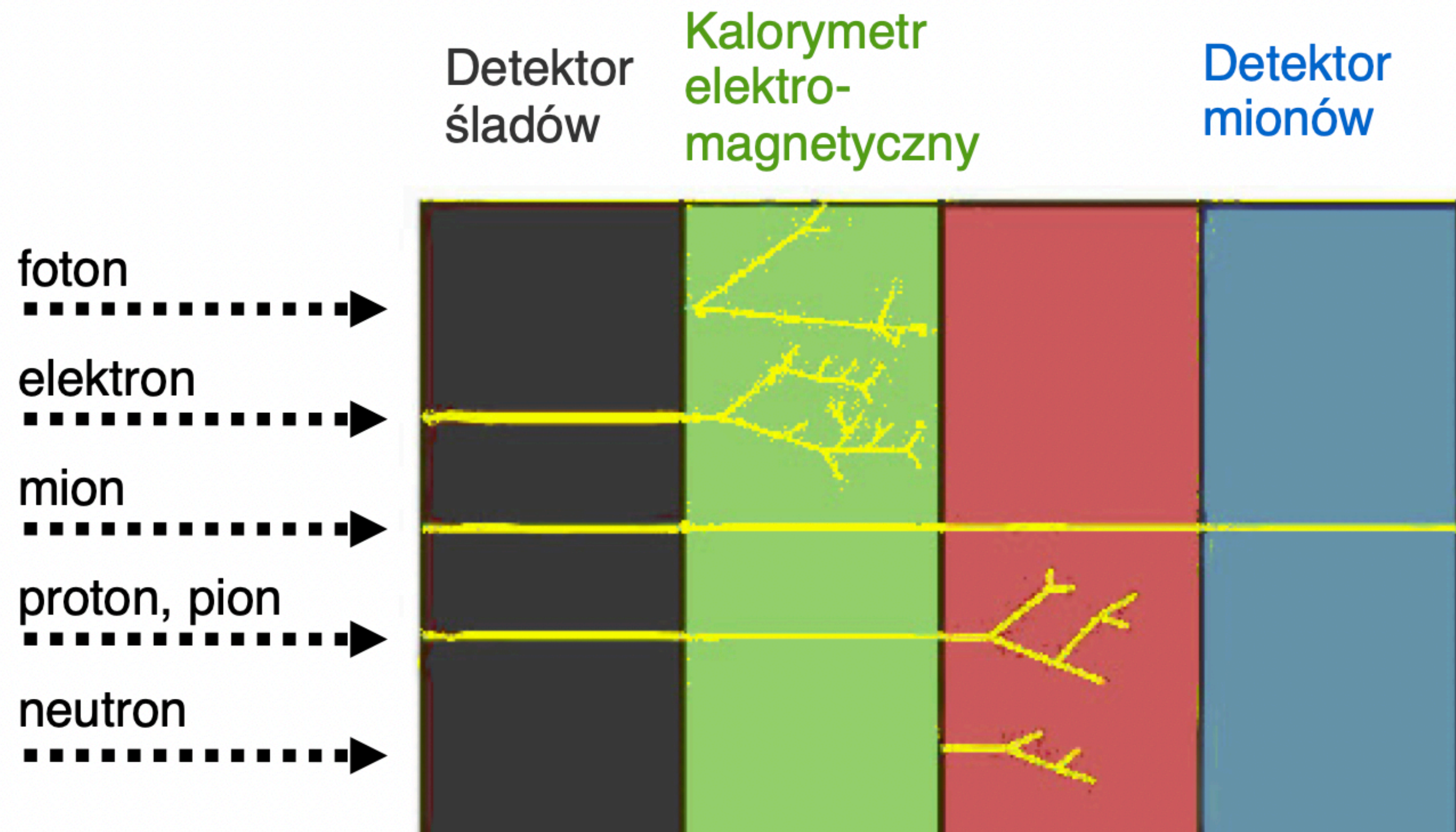
Detekcja cząstek

- Elementy detektora w eksperymentach fizyki cząstek



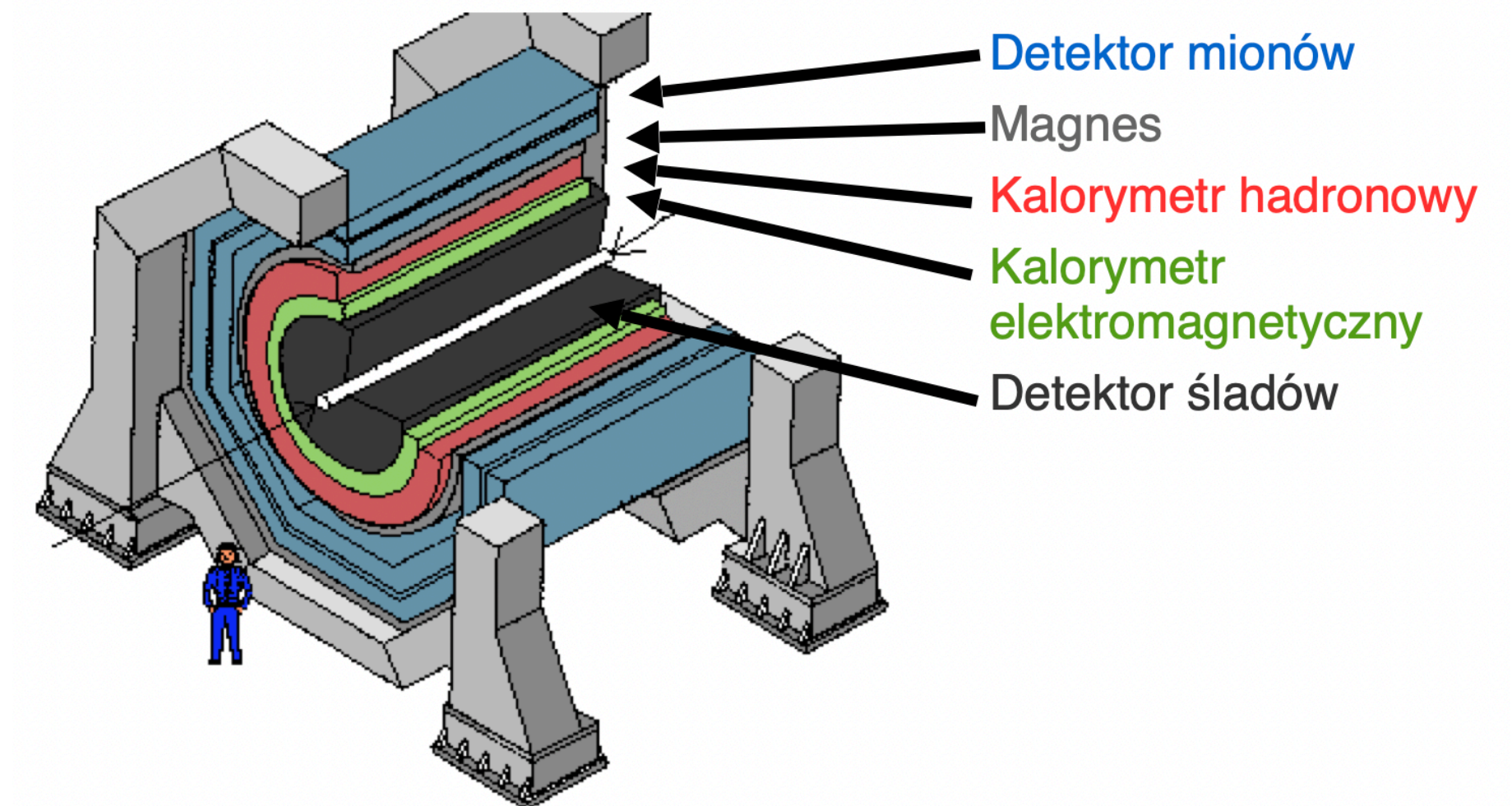
Detekcja cząstek

- **Ślady** w detektorze pozostawiane przez różne typy cząstek

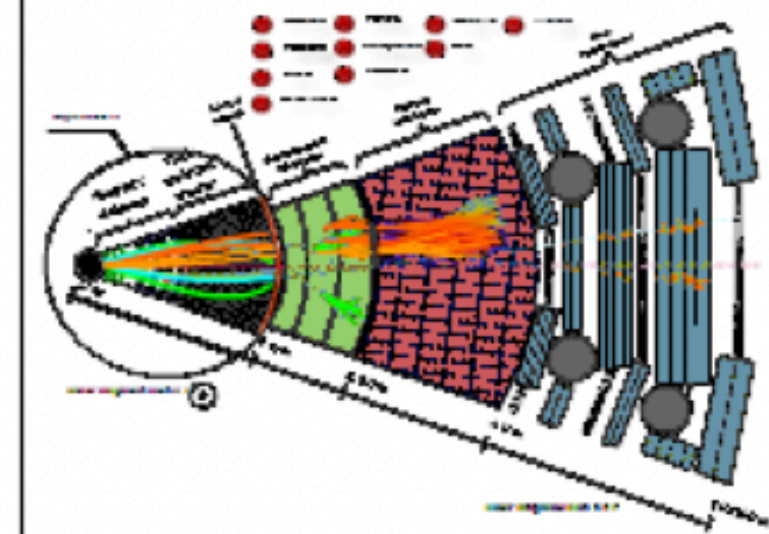
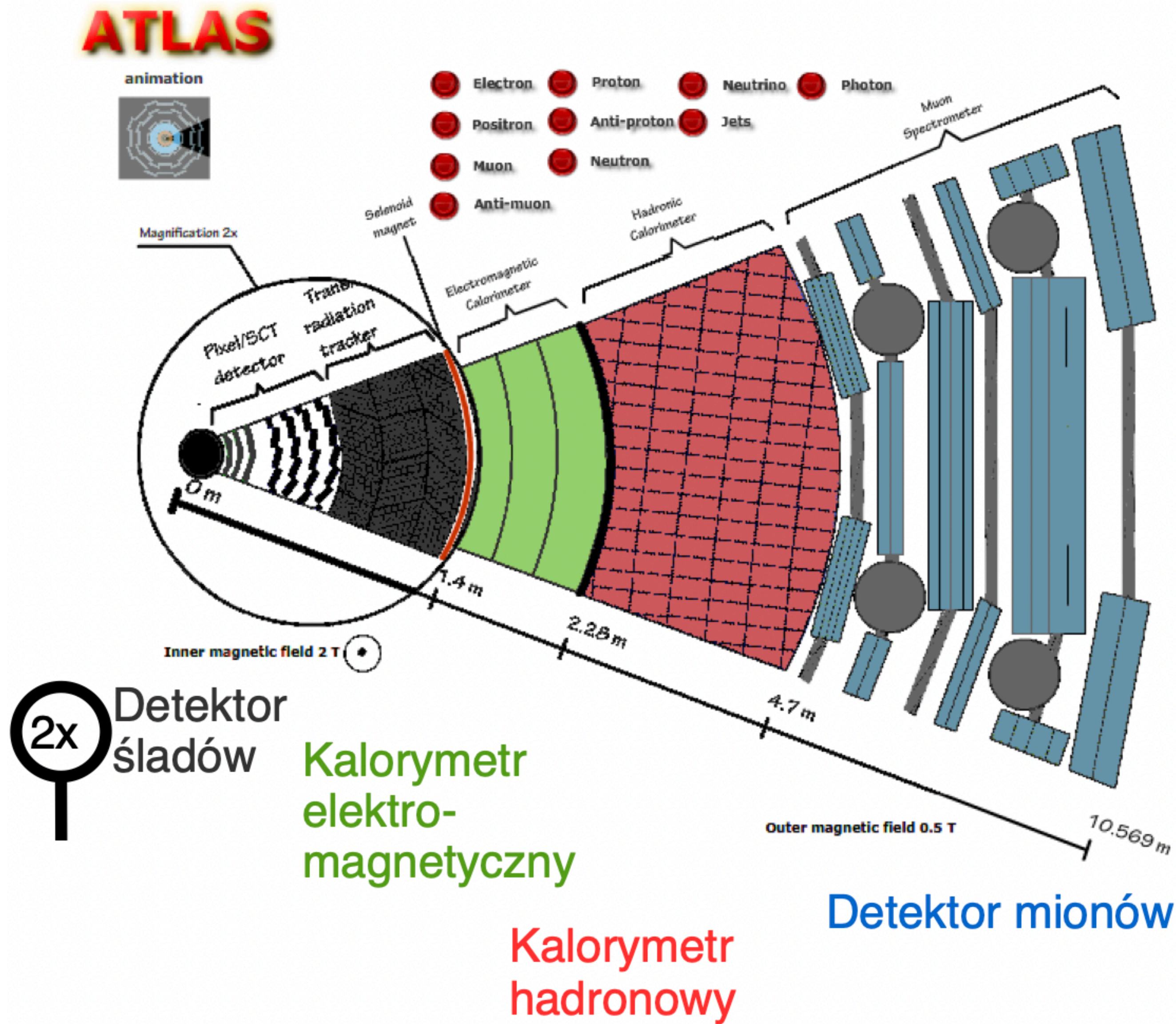


neutrino ?? wykrywane na podstawie brakującego pędu

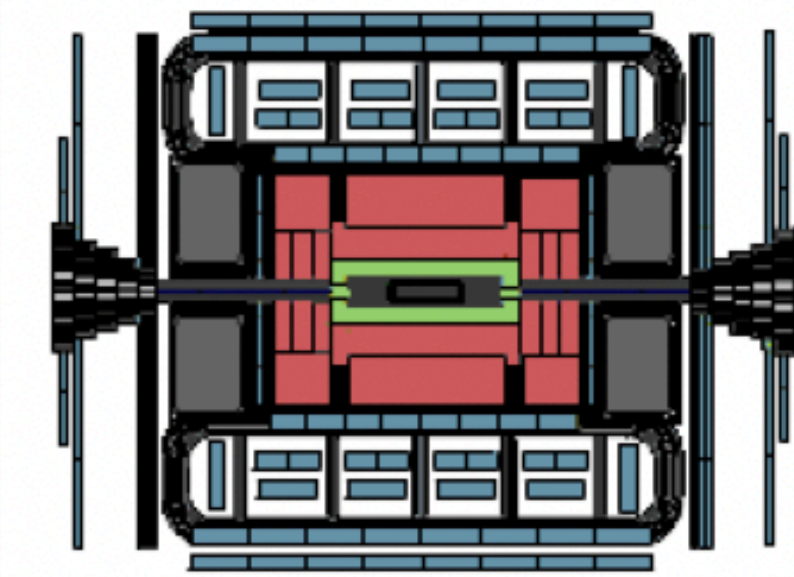
Kalorymetr hadronowy



Detekcja cząstek



End view

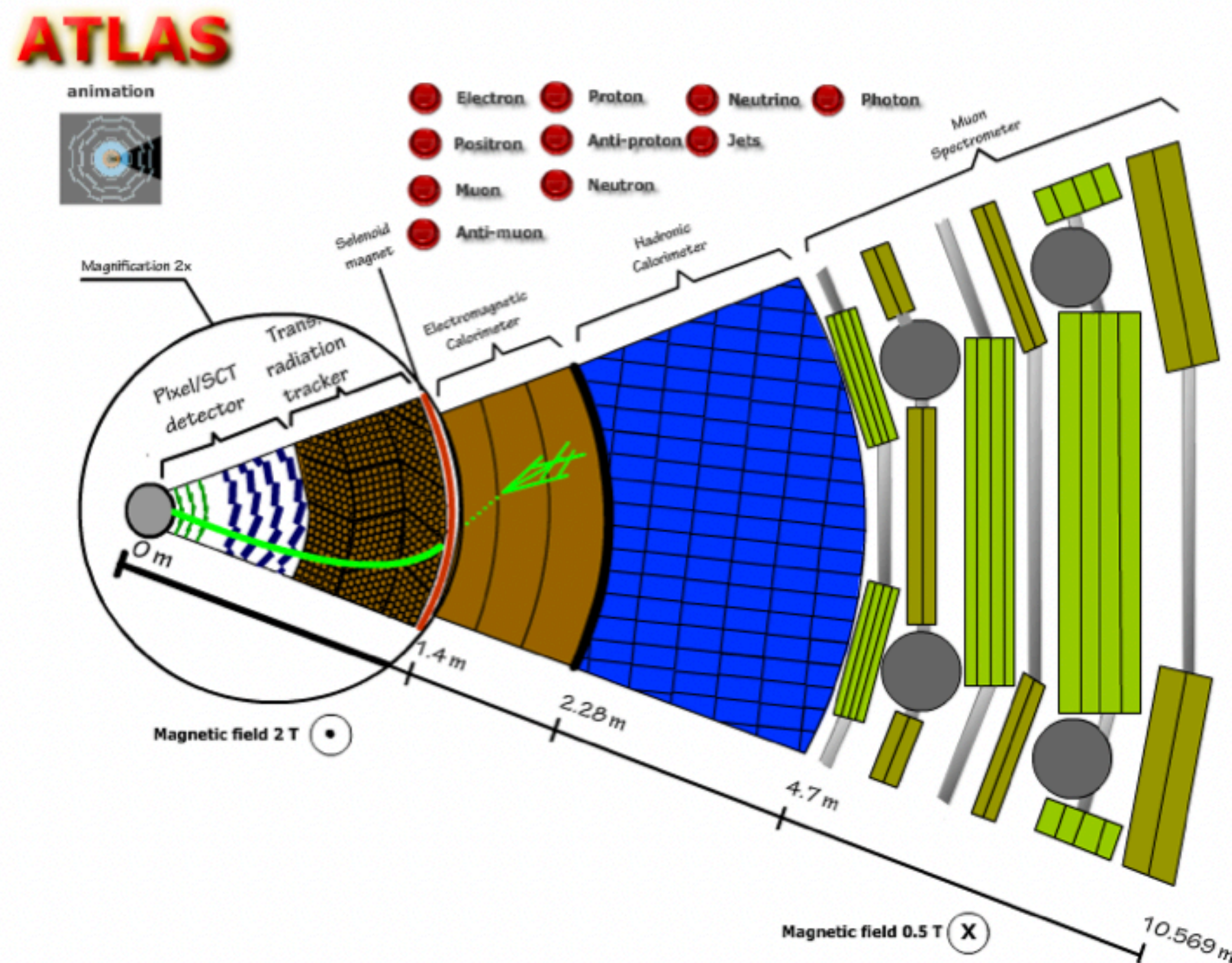


Side view

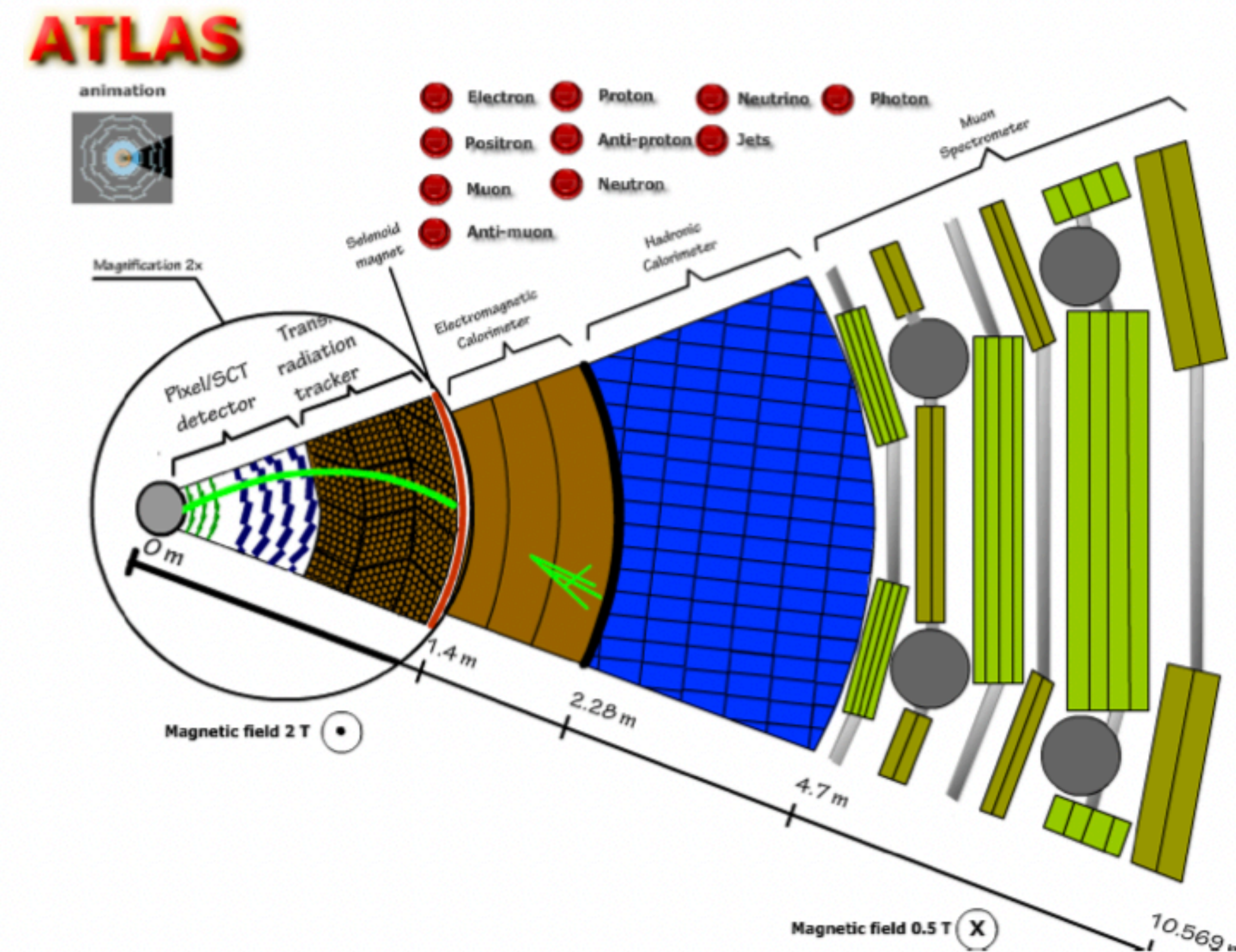
Created by Jeřábek, Jende 2010

Pomiar ładunku elektrycznego cząstek

- Skąd wiadomo czy nasz elektron jest dodatnio lub ujemnie naładowany?
- Nasze detektory zanurzone są w silnym **polu magnetycznym**
 - Pomiar ładunku = sprawdzanie w którą stronę 'zagina się' ślad cząstki



electron

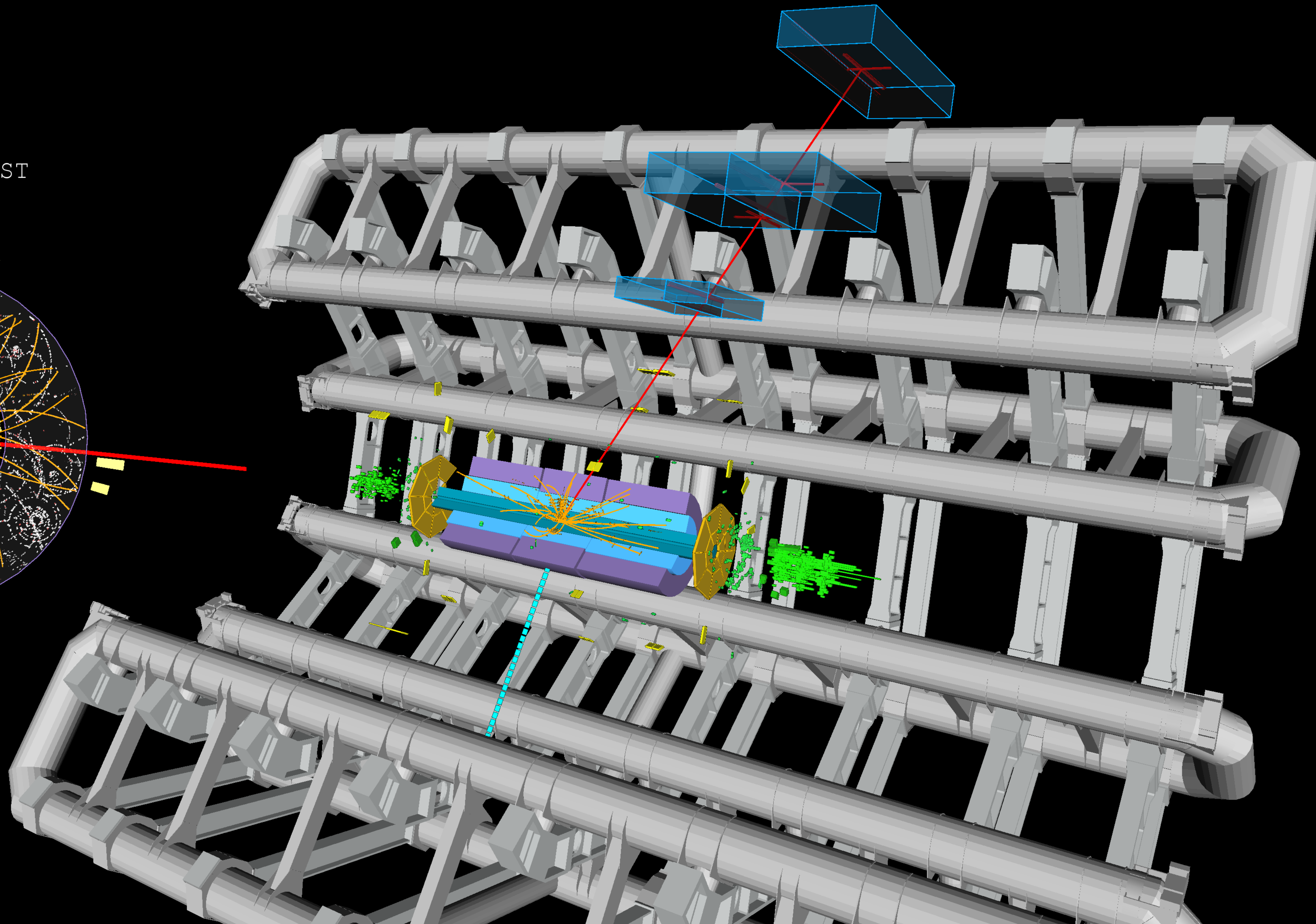
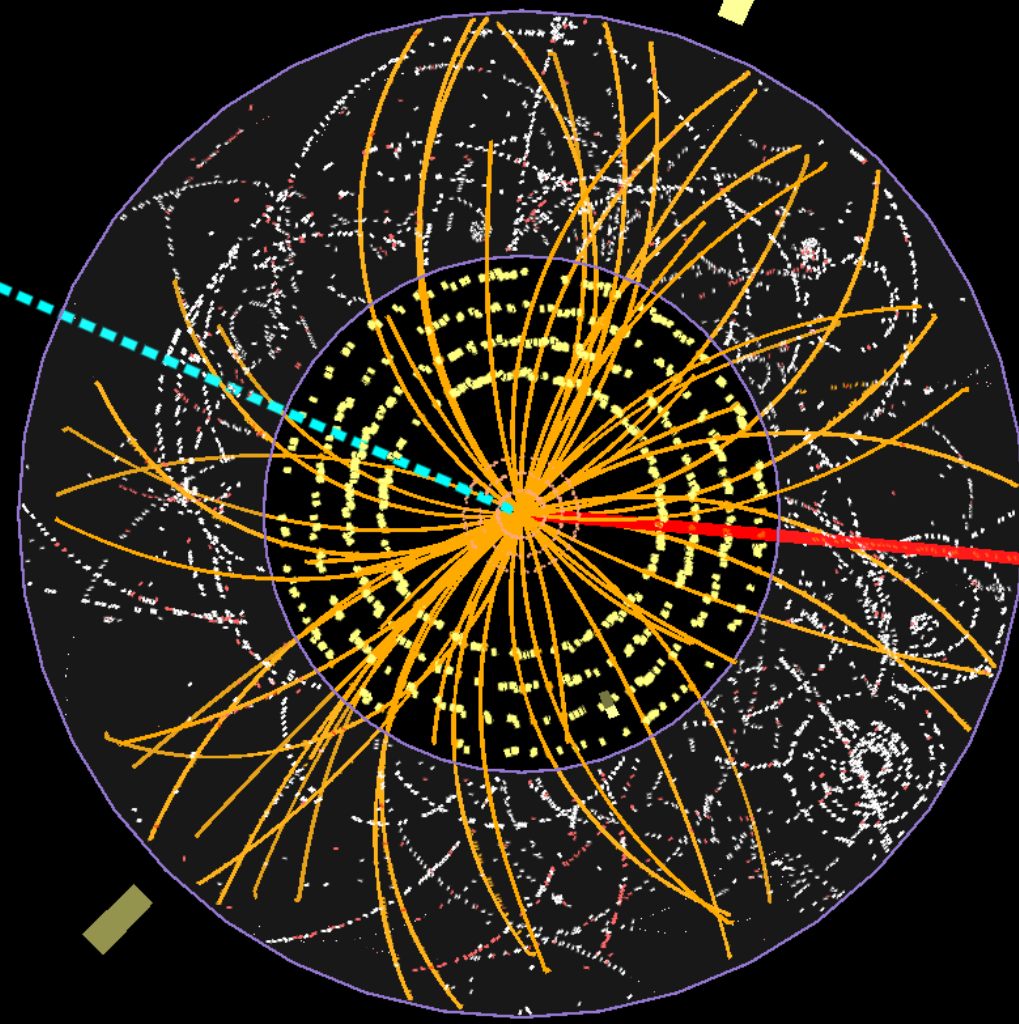


positron

Run: 183081

Event: 101291517

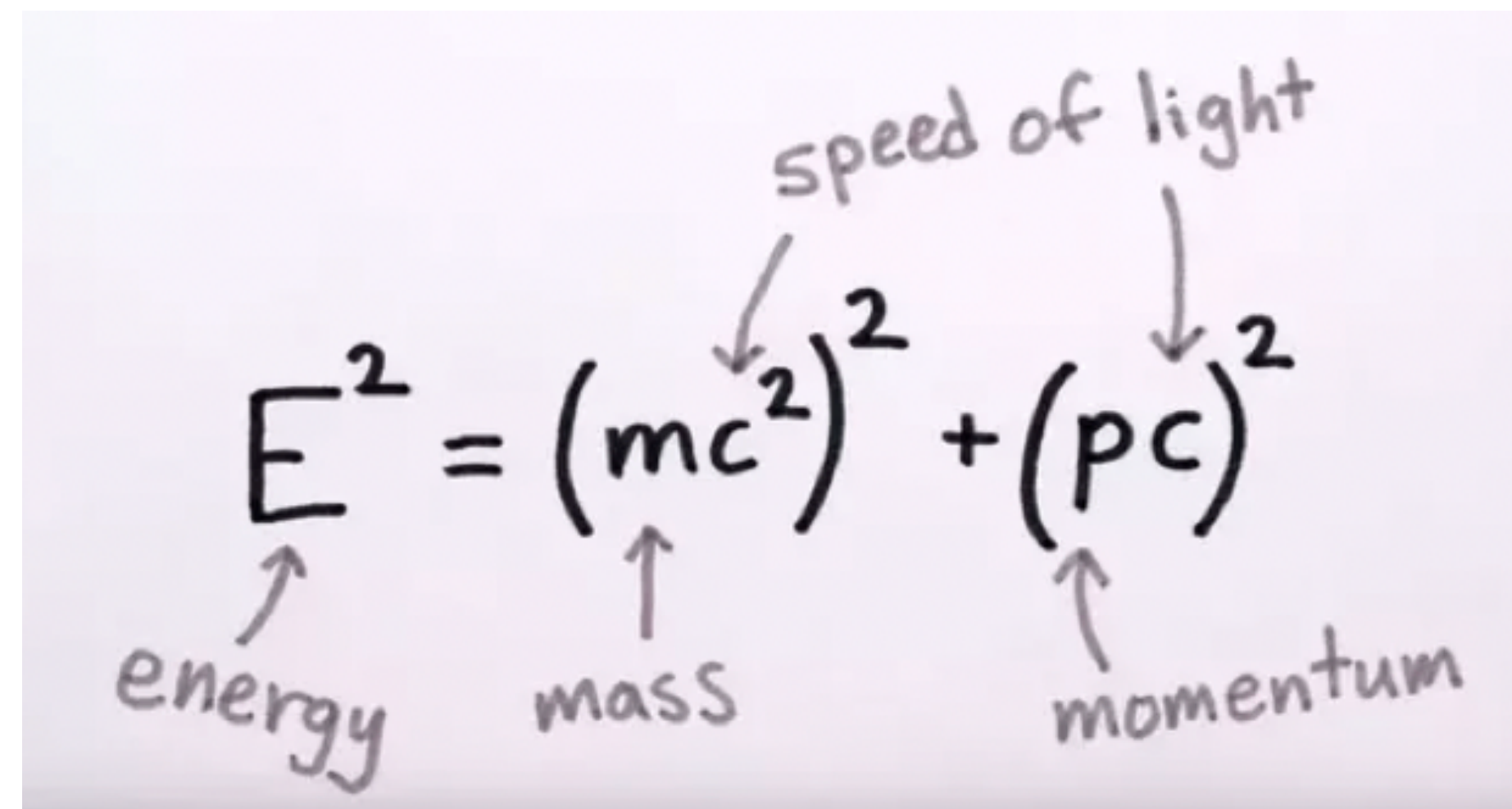
2011-06-05 17:09:02 CEST



$M_T = 82.9 \text{ GeV}$
 $p_T \text{ muon} = 32.8 \text{ GeV}$
 $E_T^{\text{miss}} = 52.4 \text{ GeV}$

Rekonstrukcja bozonu W

- Skąd wiadomo, że para $e\nu_e$ lub $\mu\nu_\mu$ pochodzi z rozpadu bozonu W?
- Wykorzystujemy wzór relatywistyczny, wiążący ze sobą masę, energię i pęd cząstki:

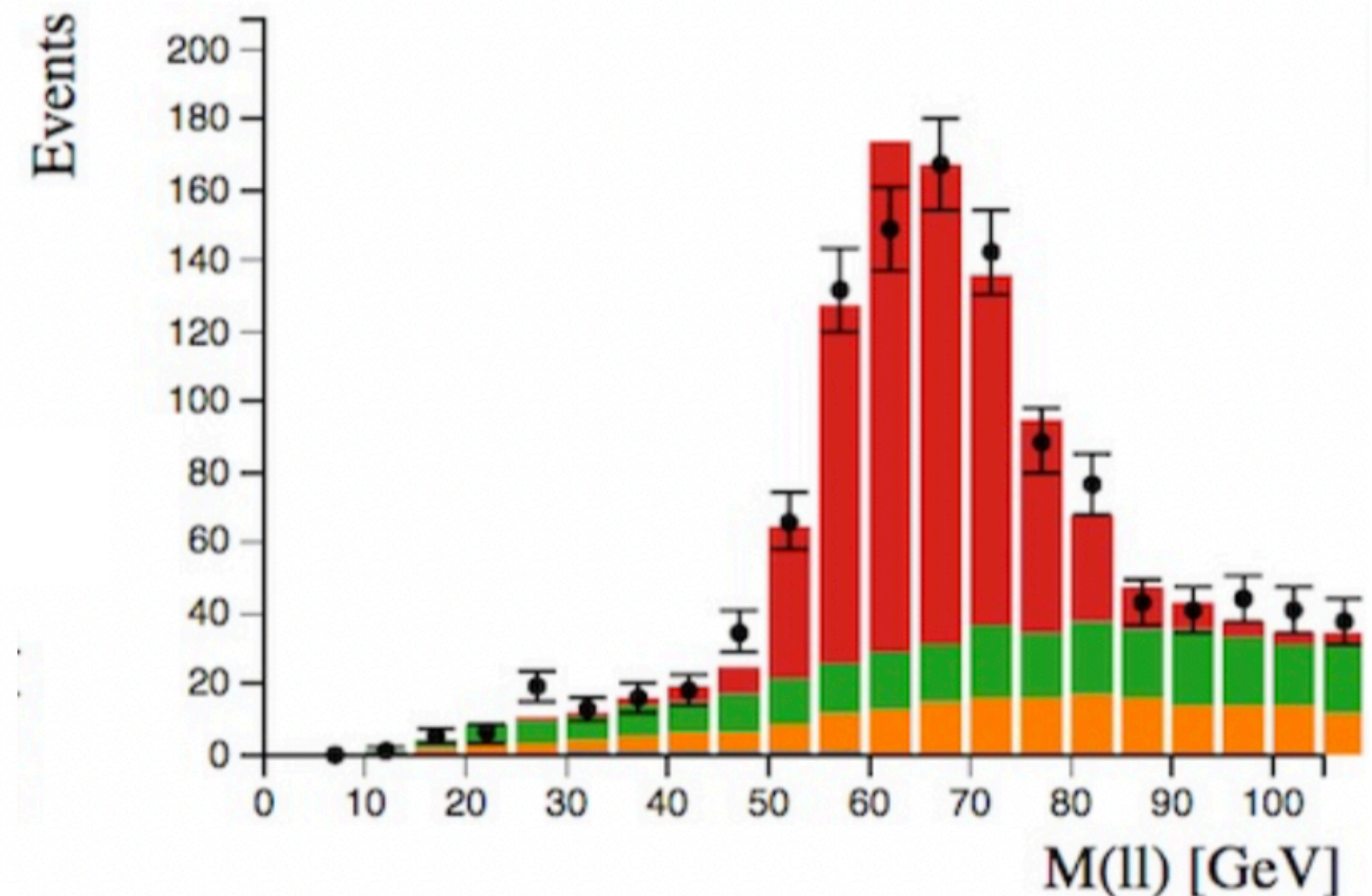
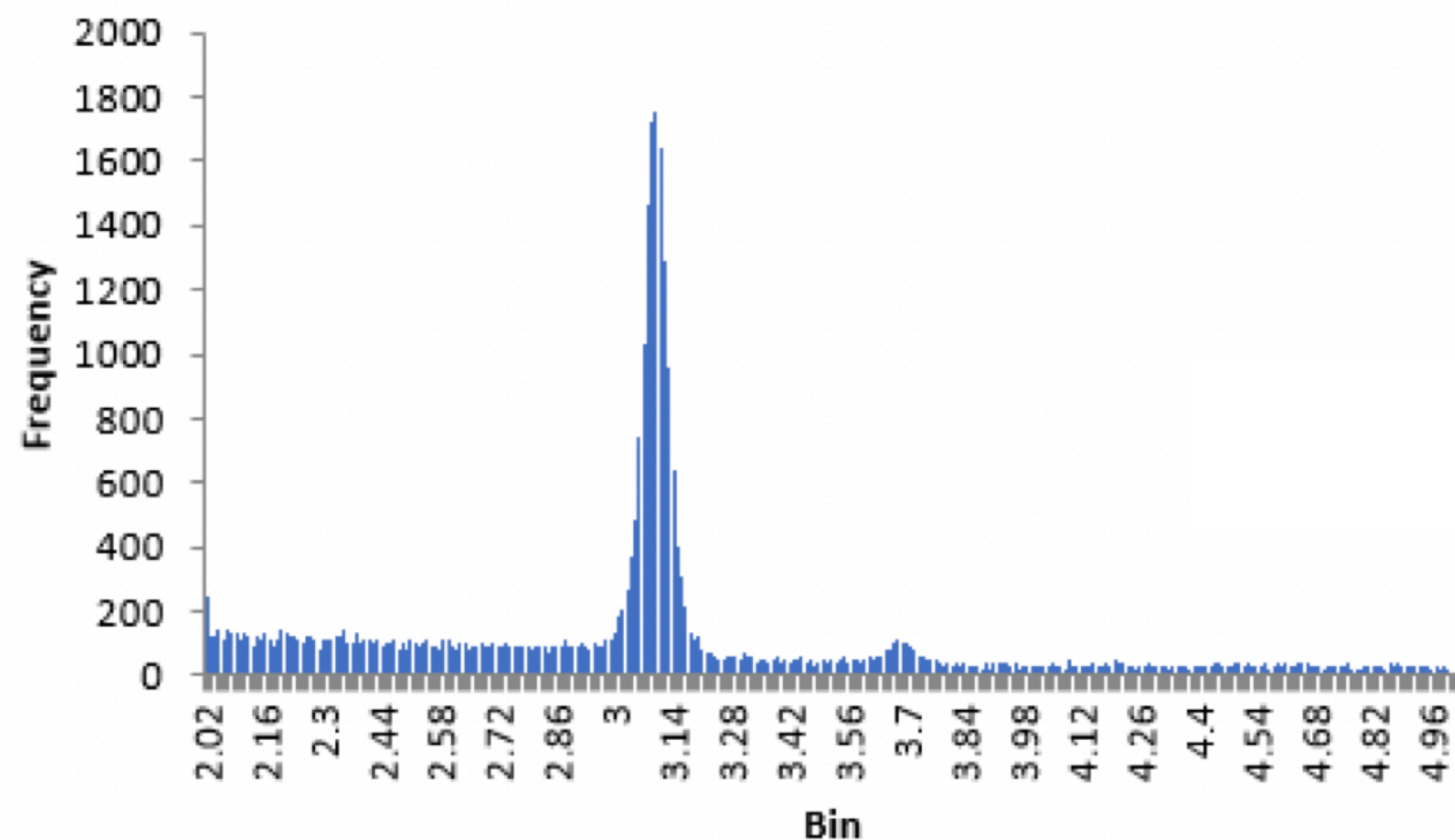


The image shows the relativistic energy-momentum equation written in a handwritten style on a light background. The equation is $E^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2$. Handwritten labels with arrows point to the variables: 'energy' points to E , 'mass' points to m , 'momentum' points to p , and 'speed of light' points to c . The c in mc^2 is also pointed to by the 'speed of light' label.

$$E^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2$$

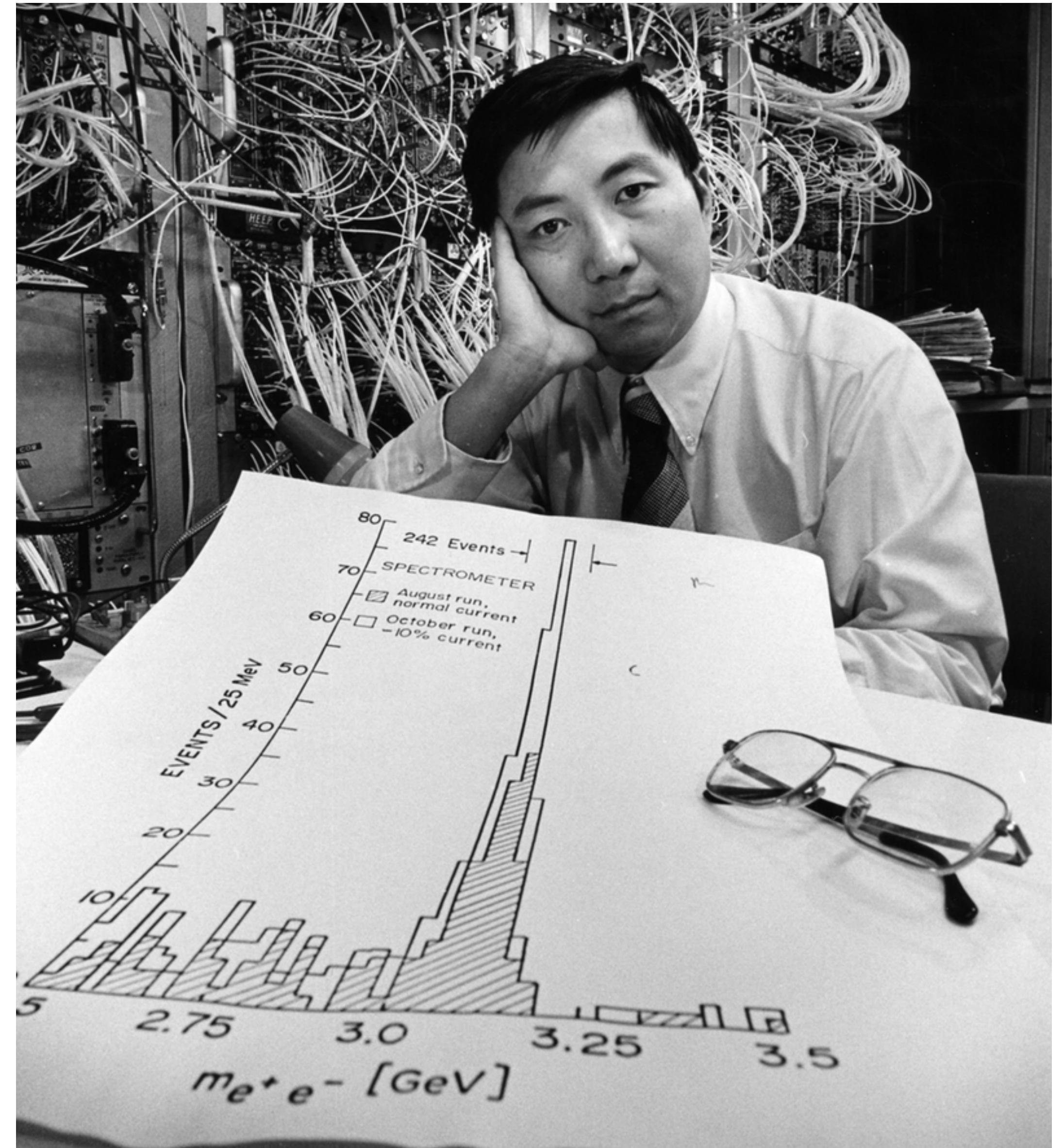
Rozkład masy

- Wyliczona masa (w różnych zarejestrowanych zderzeniach) nie zawsze jest taka sama
 - Powstaje pewien rozkład prawdopodobieństwa -> histogramy
- Rozkład masy cząstki może być mniej lub bardziej skomplikowany:



Nowe cząstki

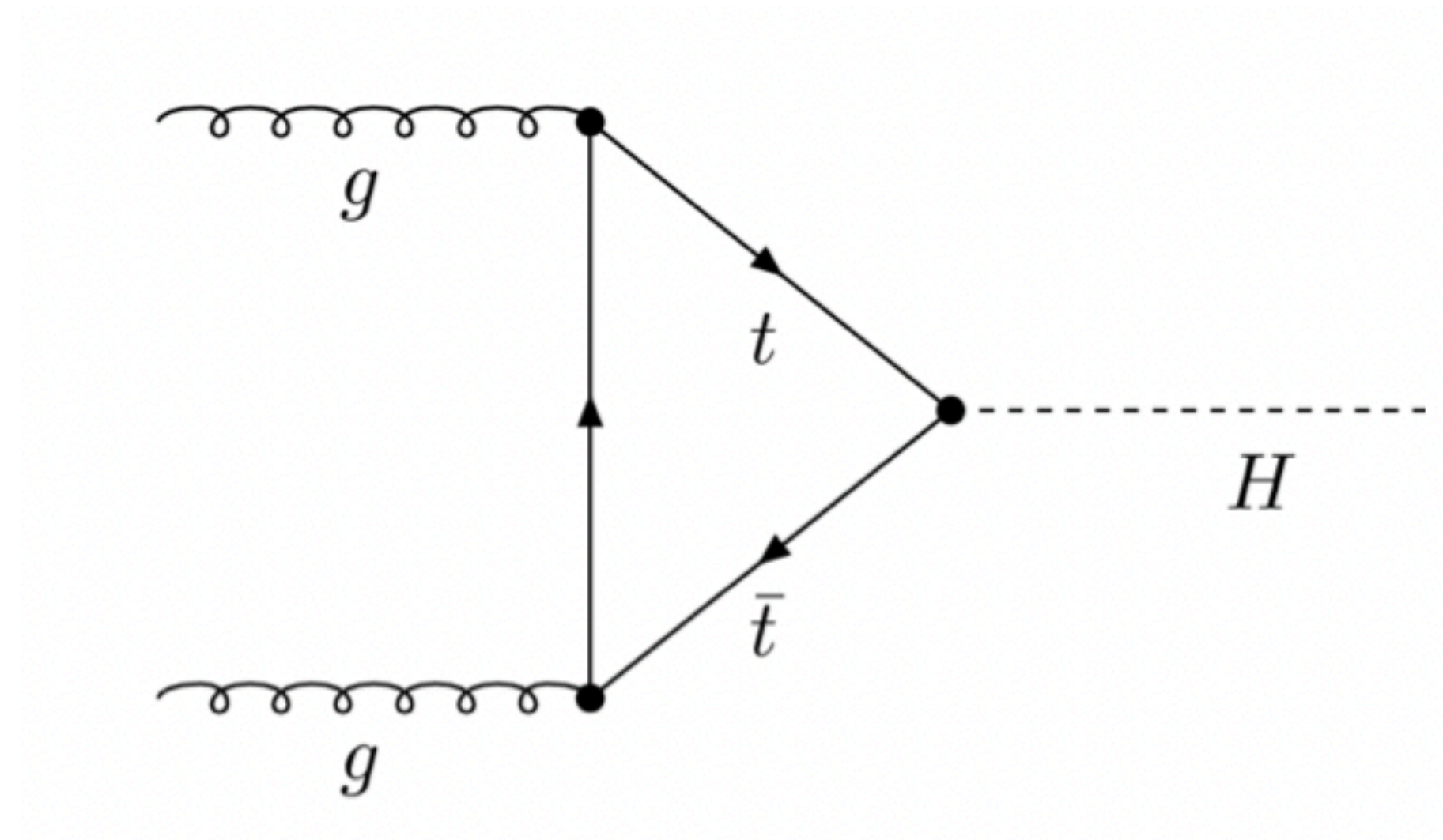
- Badanie rozkładu masy niezmienniczej obserwowanych cząstek doprowadziło do odkrycia wielu nowych cząstek.
- W ten sposób znaleziona została np. cząstka **J/ψ**, o masie **3.097 GeV** (składająca się z kwarku c i anty-c) i rozpadająca się m.in. na parę e+e-
- Nowych cząstek można spodziewać się zwłaszcza wtedy, gdy zwiększamy energię zderzenia i mamy szansę wyprodukować cząstki o masie większej niż dotychczas.



Samuel C.C. Ting - współlaureat Nagrody Nobla z rozkładem masy niezmienniczej par e+e-

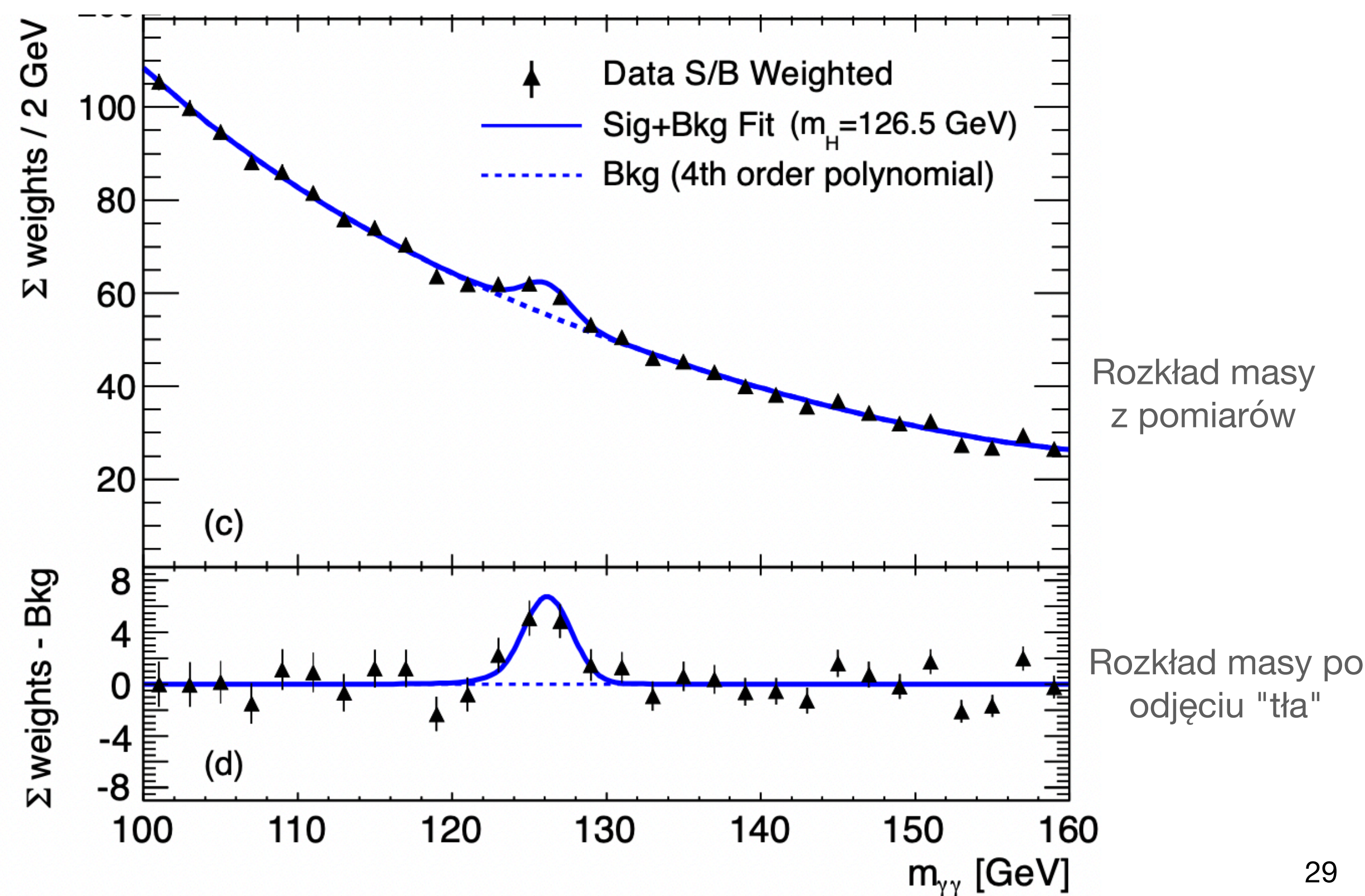
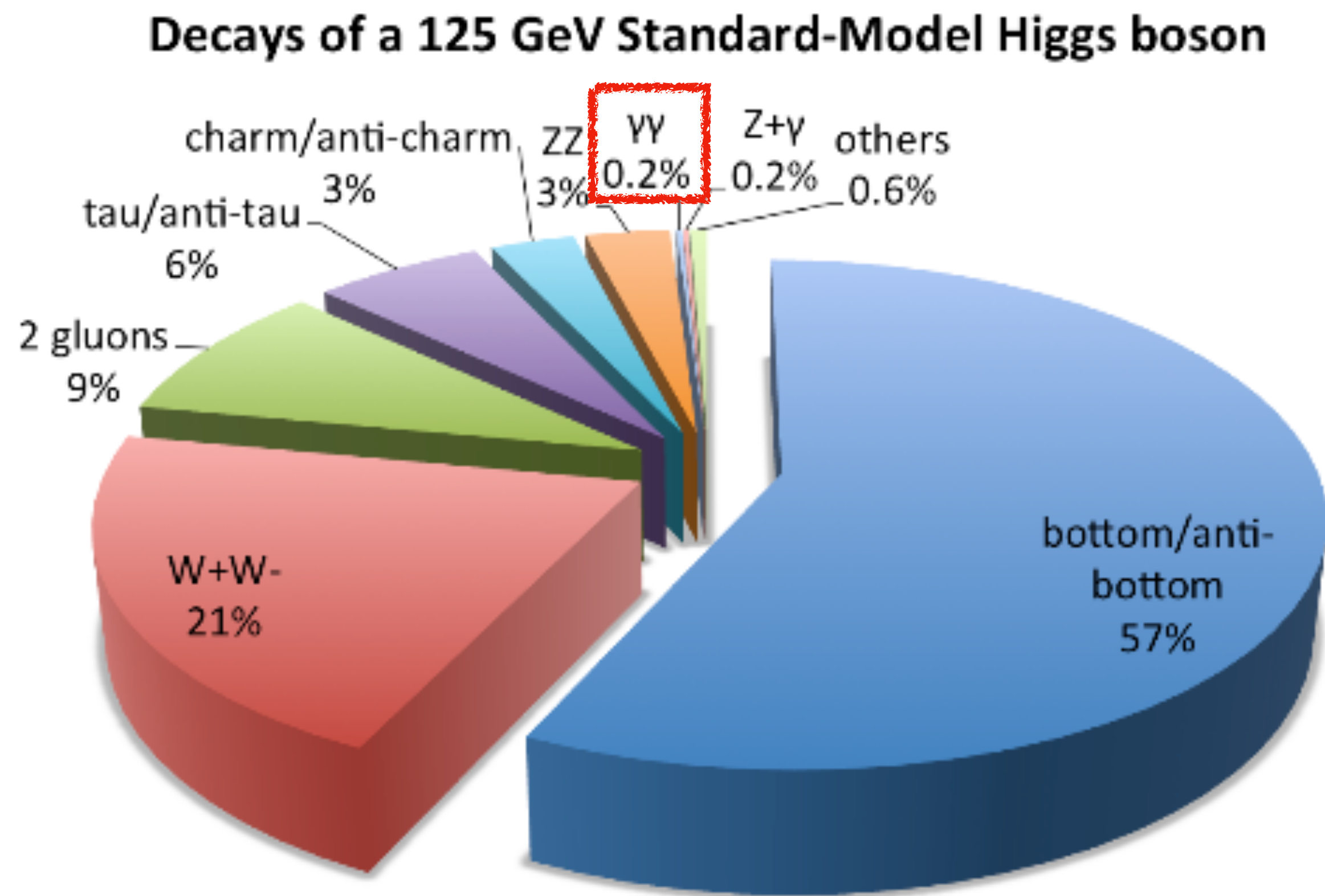
Cząstka Higgsa - produkcja

- Cząstka Higgsa w zderzeniach proton-proton powstaje w dość skomplikowany sposób przedstawiony na diagramie Feynmana:



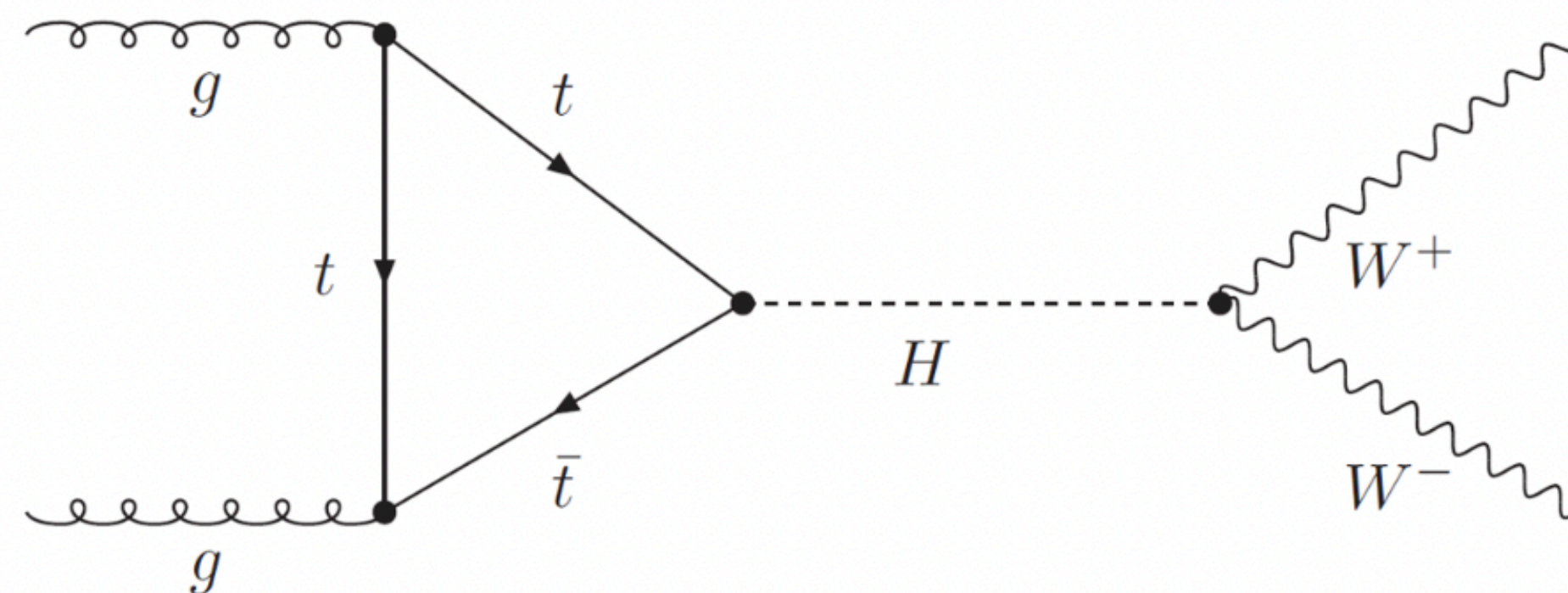
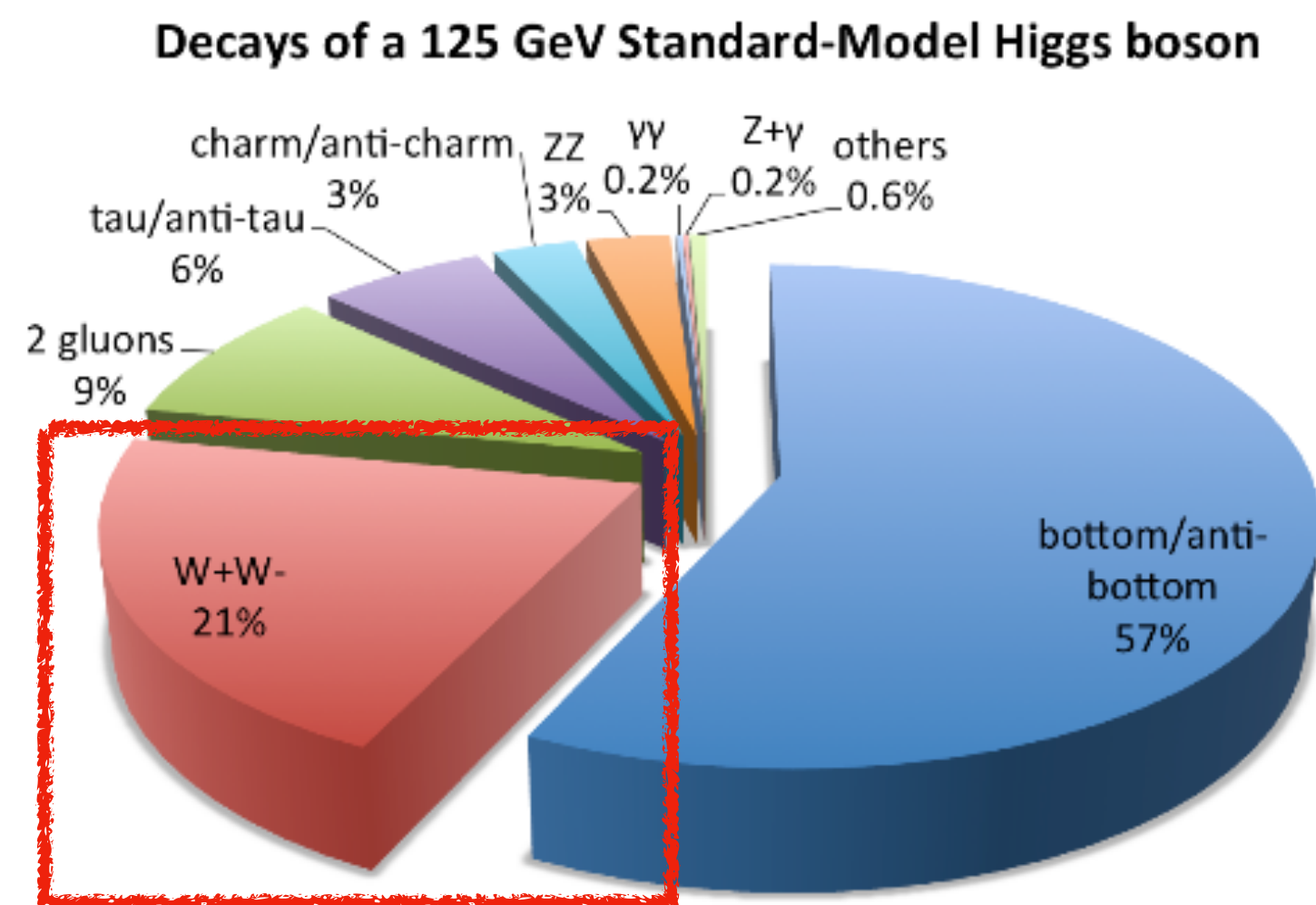
Cząstka Higgsa - rozpad

- Możliwych jest bardzo wiele różnych typów **rozpadu** cząstki Higgsa
- Najprostszy (ale rzadki) to rozpad Higgsa na dwa fotony ($\gamma \gamma$)

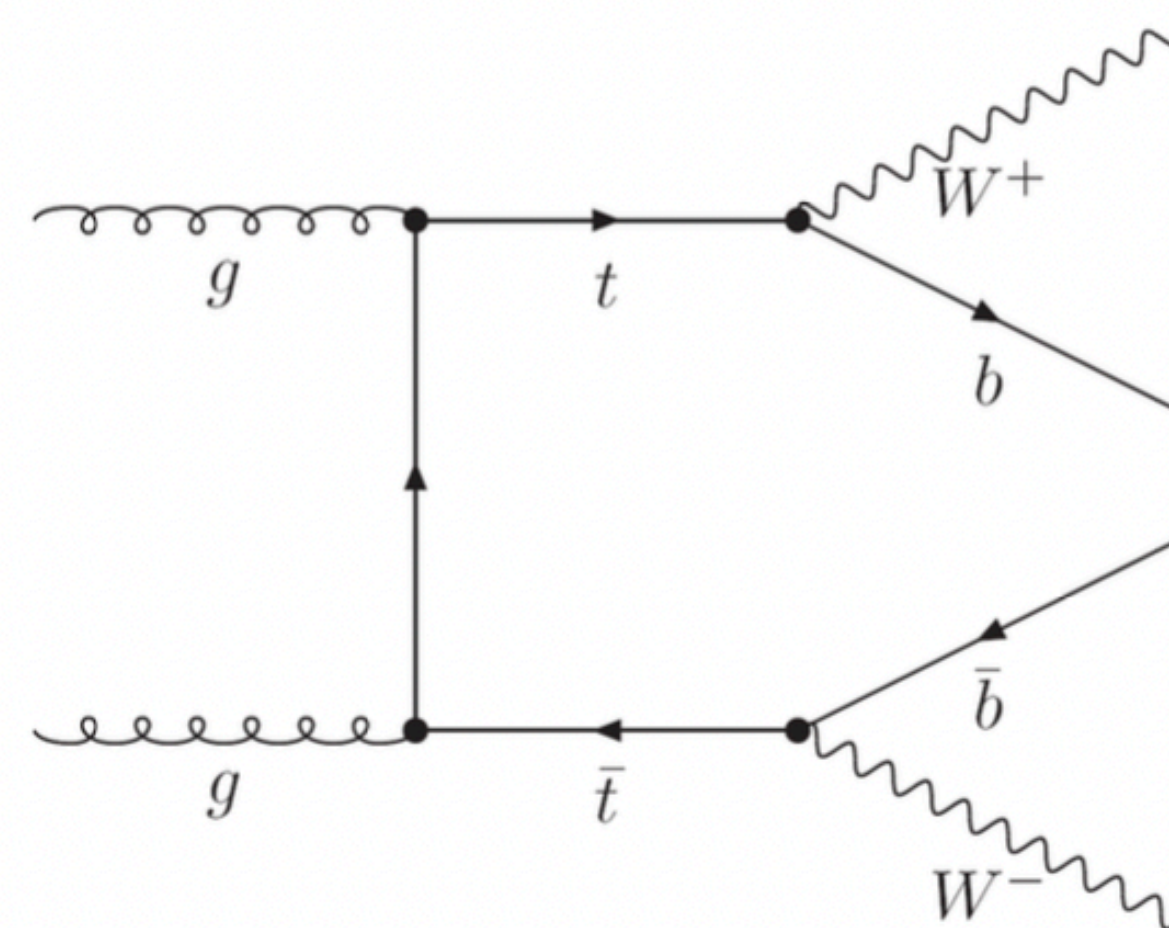


Cząstka Higgsa - rozpad

- Nas będą interesowały rozpady cząstki Higgsa na **dwa bozony W**



Nasz “sygnał”



“Tło”, tzn. przypadki zawierające bozony W wyprodukowane w inny sposób

Dziękuję za uwagę