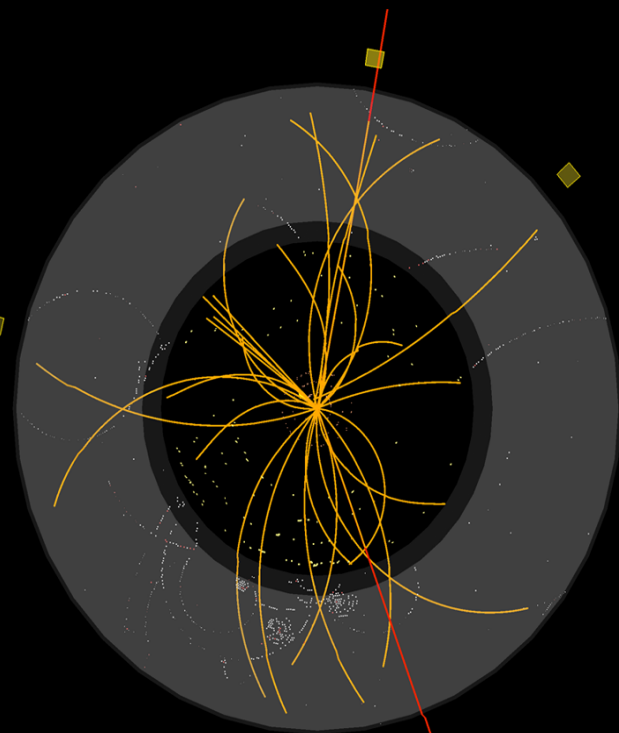
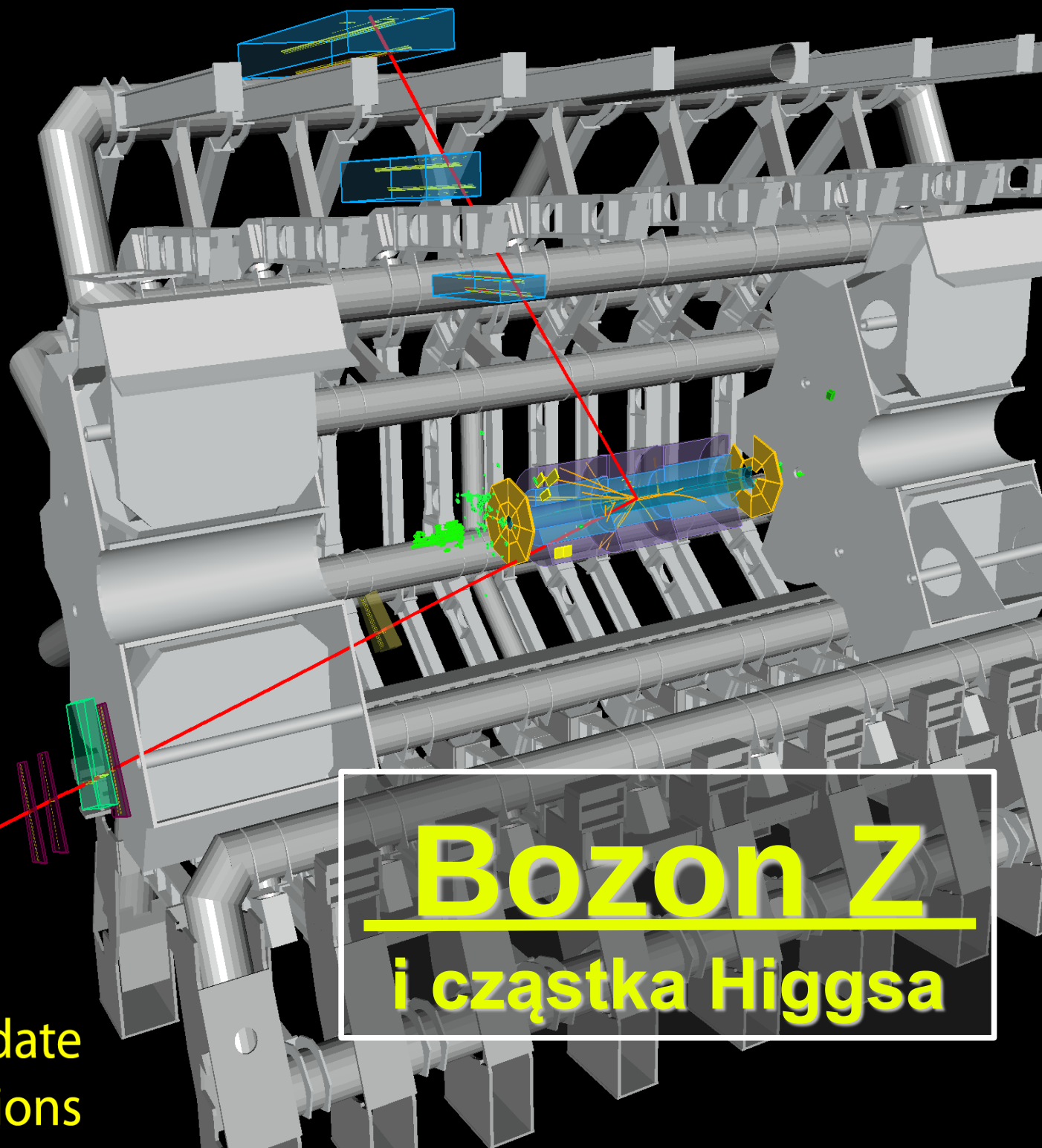


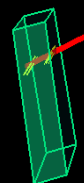
ATLAS EXPERIMENT

Run: 154822, Event: 14321500
Date: 2010-05-10 02:07:22 CEST



$p_T(\mu^-) = 27 \text{ GeV}$ $\eta(\mu^-) = 0.7$
 $p_T(\mu^+) = 45 \text{ GeV}$ $\eta(\mu^+) = 2.2$

$M_{\mu\mu} = 87 \text{ GeV}$



$Z \rightarrow \mu\mu$ candidate
in 7 TeV collisions

Bozon Z
i cząstka Higgsa

Model Standardowy - cząstki (prawdziwie) elementarne

cząstka	ładunek	masa	czas życia
kwark u, d	2/3, -1/3	0,002 - 0,015 GeV	uwięziony
kwark s, c, b, t	-1/3, 2/3, ...	0,1 - 173 GeV	krótki
neutrino	0	~0	∞
elektron	1	0,0005 GeV	∞
mion	1	0,1 GeV	długi ($2 \cdot 10^{-6}$ s)
taon	1	1,78 GeV	bardzo krótki
foton	0	0	∞
gluon	1	~0	uwięziony
bozon W	1	80 GeV	bardzo krótki
bozon Z	0	91 GeV	bardzo krótki
bozon Higgsa	0	126 GeV odkryty w 2012 r.	bardzo krótki

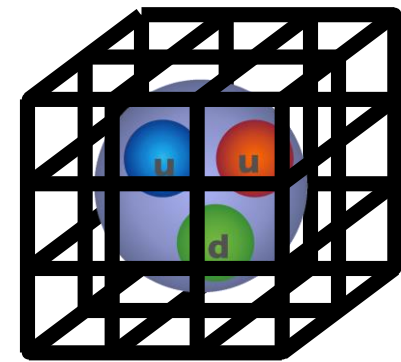
oraz odpowiadające im antycząstki

Uwięzienie kwarków

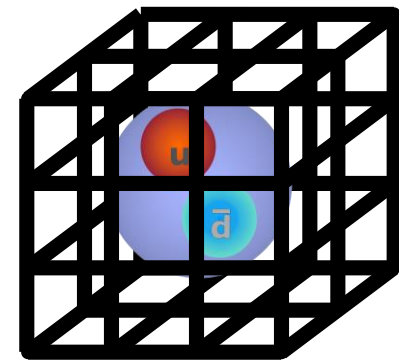
Kwarki występują jedynie w stanie związanym:

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

Nazywamy to uwięzieniem kwarków.



barion
3 kwarki



mezon
kwarki + antykwark

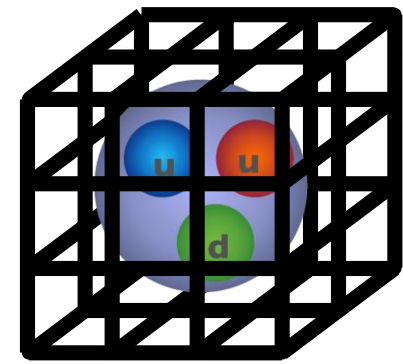
Model Standardowy

Kwarki występują jedynie w stanie związanym:

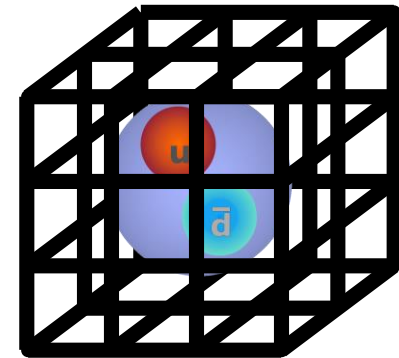
- ♦ bariony - 3 kwarki
(np. proton: uud, neutron: udd)
- ♦ mezony - kwark + antykwark

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

Co stało by się, gdybyśmy próbowali rozdzielić kwarki?



barion
3 kwarki



mezon
kwarki + antykwark

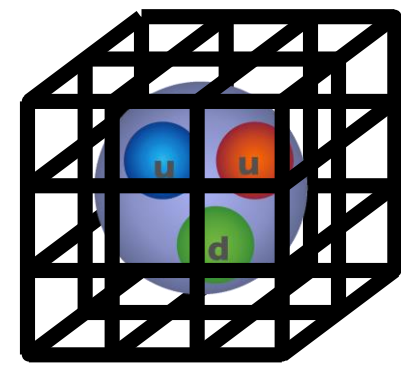
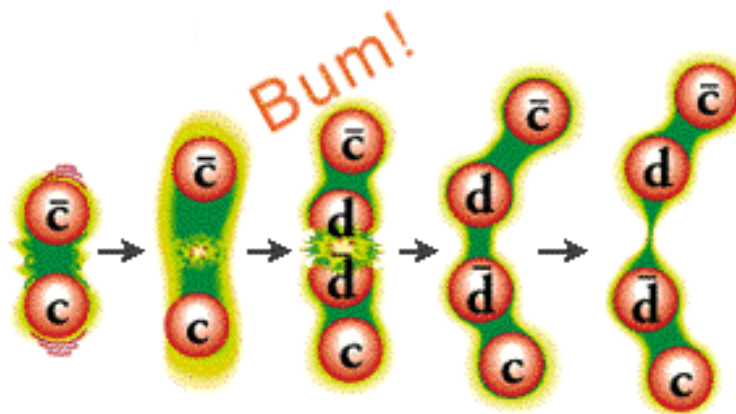
Model Standardowy

Kwarki występują jedynie w stanie związanym:

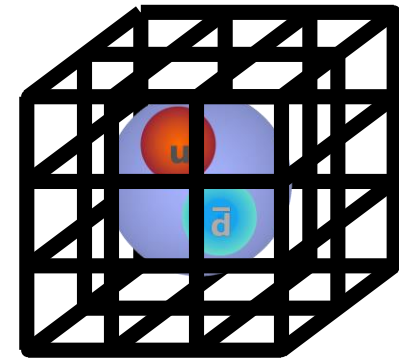
- ♦ bariony - 3 kwarki
(np. proton: uud, neutron: udd)
- ♦ mezony - kwark + antykwark

Dla ułatwienia przypisuje się kwarkom kolory czerwony, zielony, niebieski, a antykwarkom kolory dopełniające. Bariony i mezony są wtedy "białe".

Próba rozdzielenia kwarków poprzez dostarczenie im energii prowadzi do powstania pary kwark + antykwark kompensującej kolor:

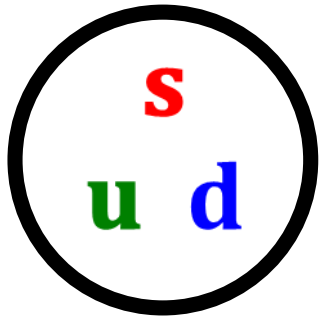


barion
3 kwarki



mezon
kwarki + antykwark

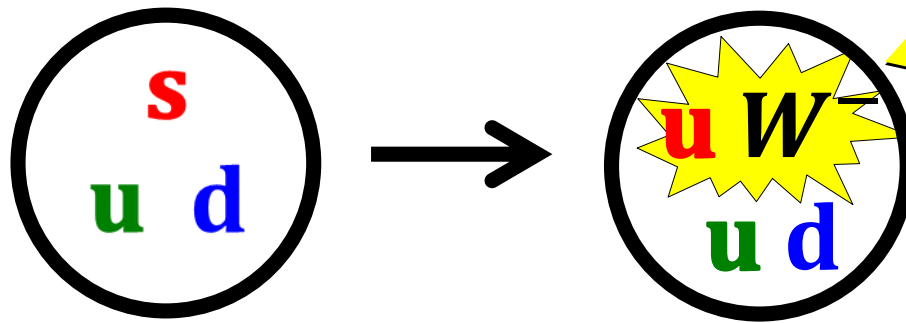
Model Standardowy - rozpady



Λ

$m = 1,520 \text{ GeV}$

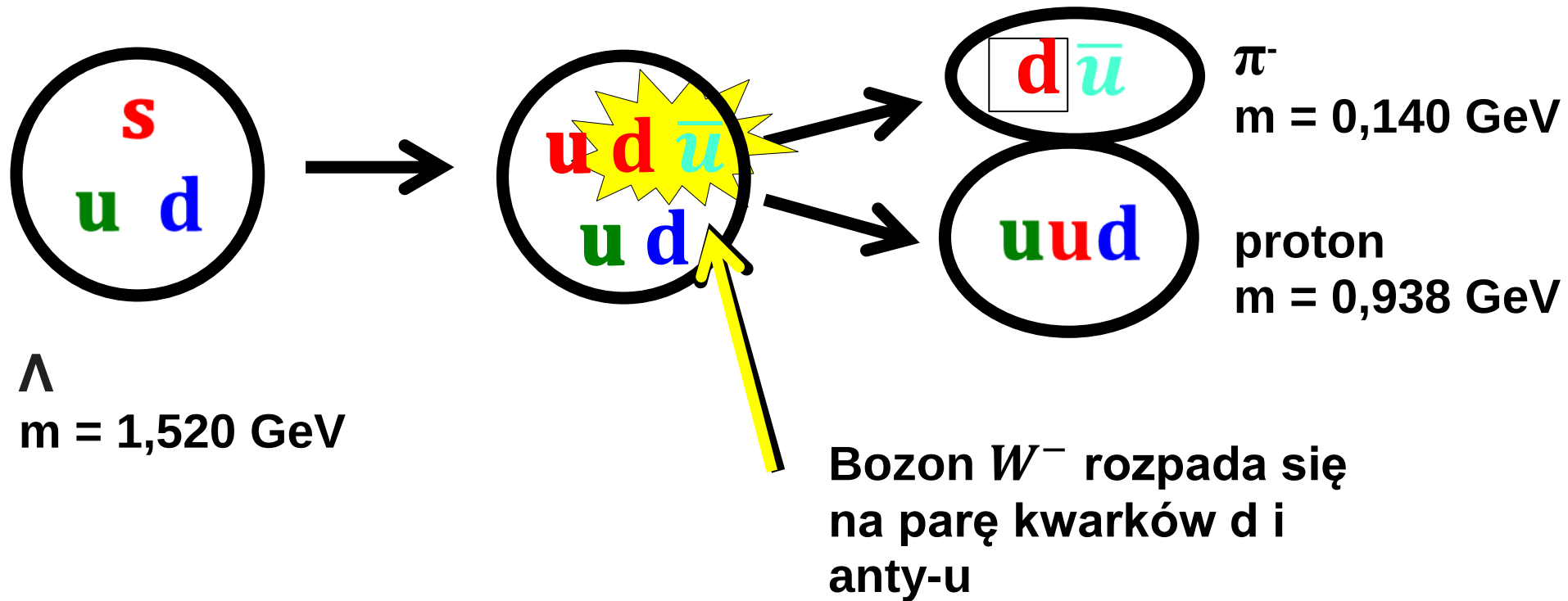
Model Standardowy - rozpady



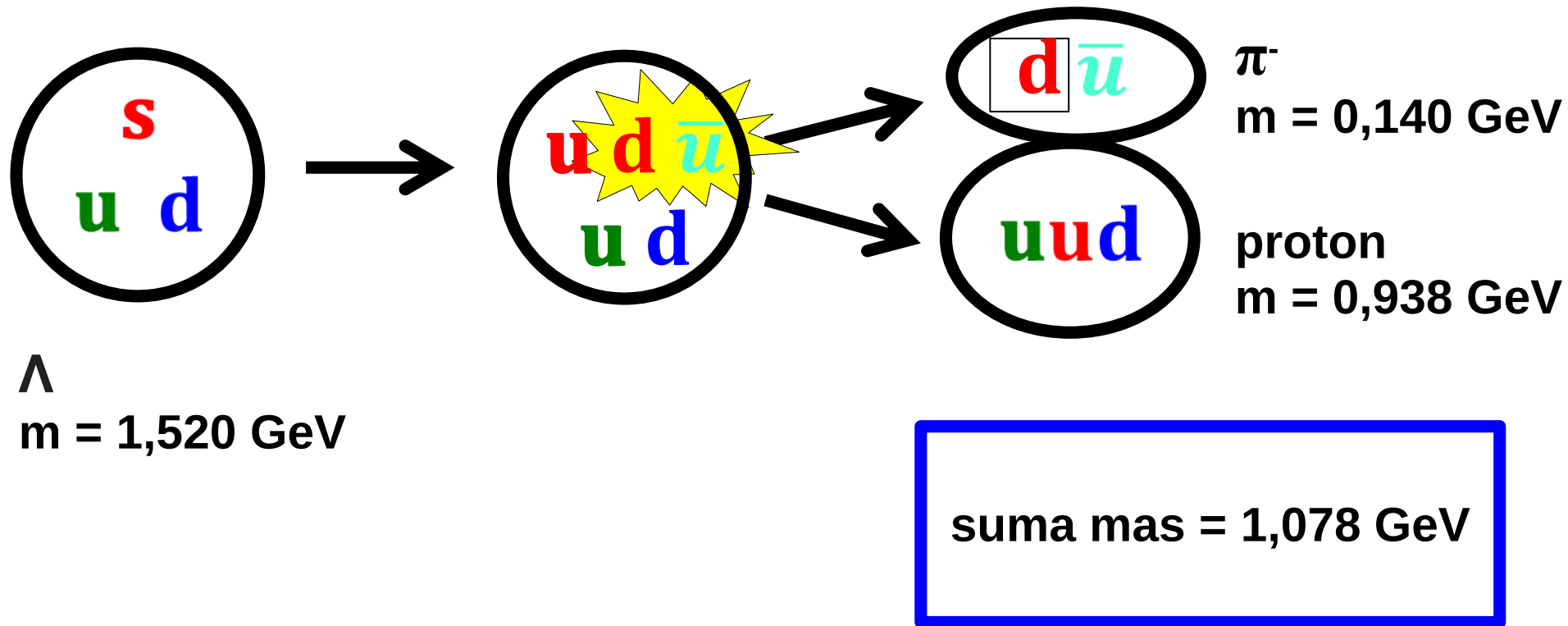
Kwark s rozpada się
na kwark u przez emisję
Bozonu W^-

Λ
 $m = 1,520 \text{ GeV}$

Model Standardowy - rozpady

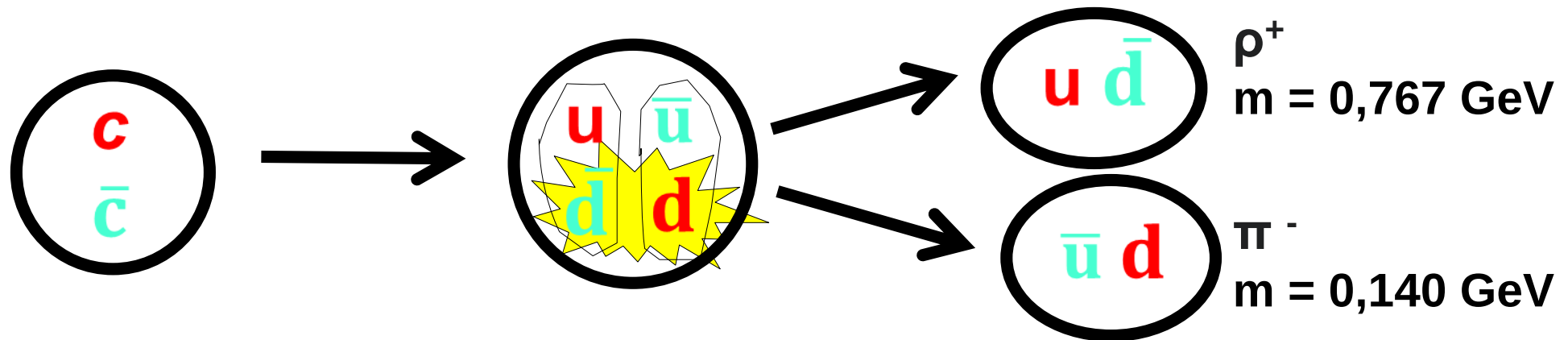
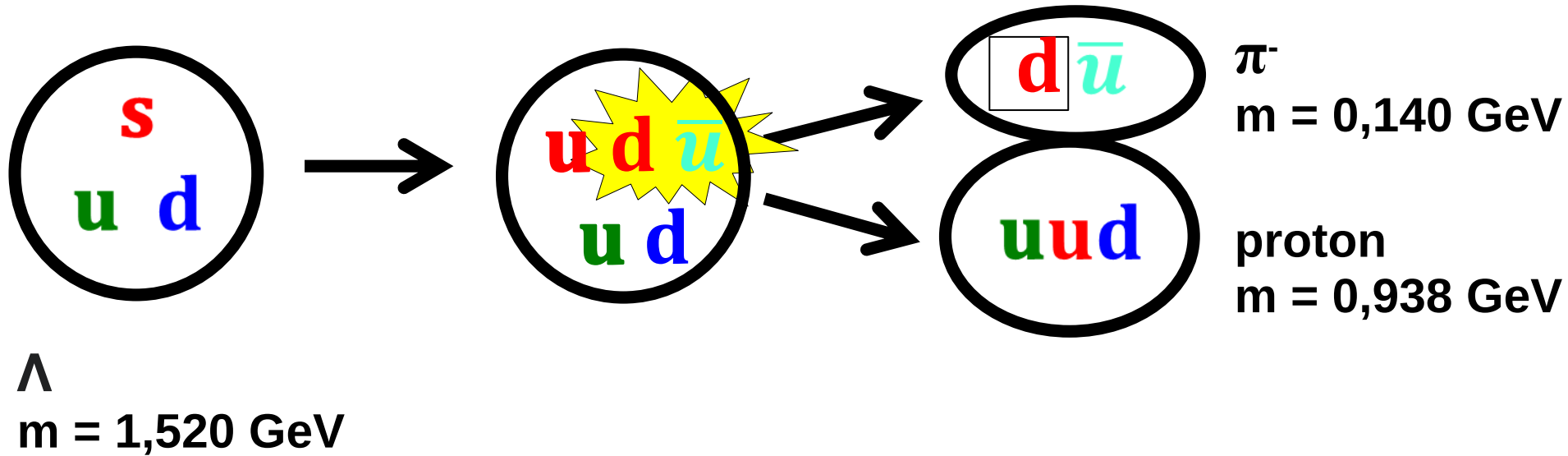


Model Standardowy - rozpady



Różnica między masą cząstki Λ a sumą mas jej produktów rozpadu (π^- , p) przekształca się w energię rozlotu tych cząstek.

Model Standardowy - rozpady

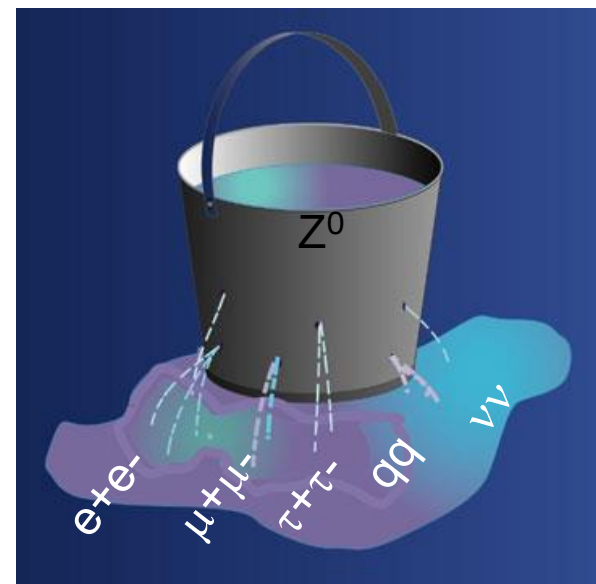


kwarki c i anty-c anihilują i dają parę u i anty-u oraz energię pozwalającą na powstanie dodatkowo pary d i anty-d

Rozpady bozonu Z:

- na leptony naładowane: e^+e^- , $\mu^+\mu^-$, $\tau^+\tau^-$ (3 możliwości)
- na neutrina: $\nu_e\bar{\nu}_e$, $\nu_\mu\bar{\nu}_\mu$, $\nu_\tau\bar{\nu}_\tau$ (3 możliwości)
- na kwarki: $u\bar{u}$, $d\bar{d}$, $s\bar{s}$, $c\bar{c}$, $b\bar{b}$ (15 możliwości)
 - 5 par kwark/antykwar * trzy kolory
 - rozpad na parę $t\bar{t}$ jest niemożliwy, bo kwark t ma zbyt dużą masę

Prawdopodobieństwa rozpadów nie są identyczne, dlatego obserwujemy różne liczby rozpadów na różne pary cząstek.



Obserwowanie rozpadów bozonu Z:

- Neutrino są cząstkami bardzo słabo oddziałującymi z materią - praktycznie nie ma szans na ich bezpośrednie zaobserwowanie.



Obserwowanie rozpadów bozonu Z:

- Neutrino są cząstkami bardzo słabo oddziałującymi z materią - praktycznie nie ma szans na ich bezpośrednie zaobserwowanie. X
- Kwarki z rozpadu bozonu Z przekształcają się w hadrony (dżety hadronowe), co utrudnia stwierdzenie, czy pochodziły z rozpadu Z. X

Obserwowanie rozpadów bozonu Z:

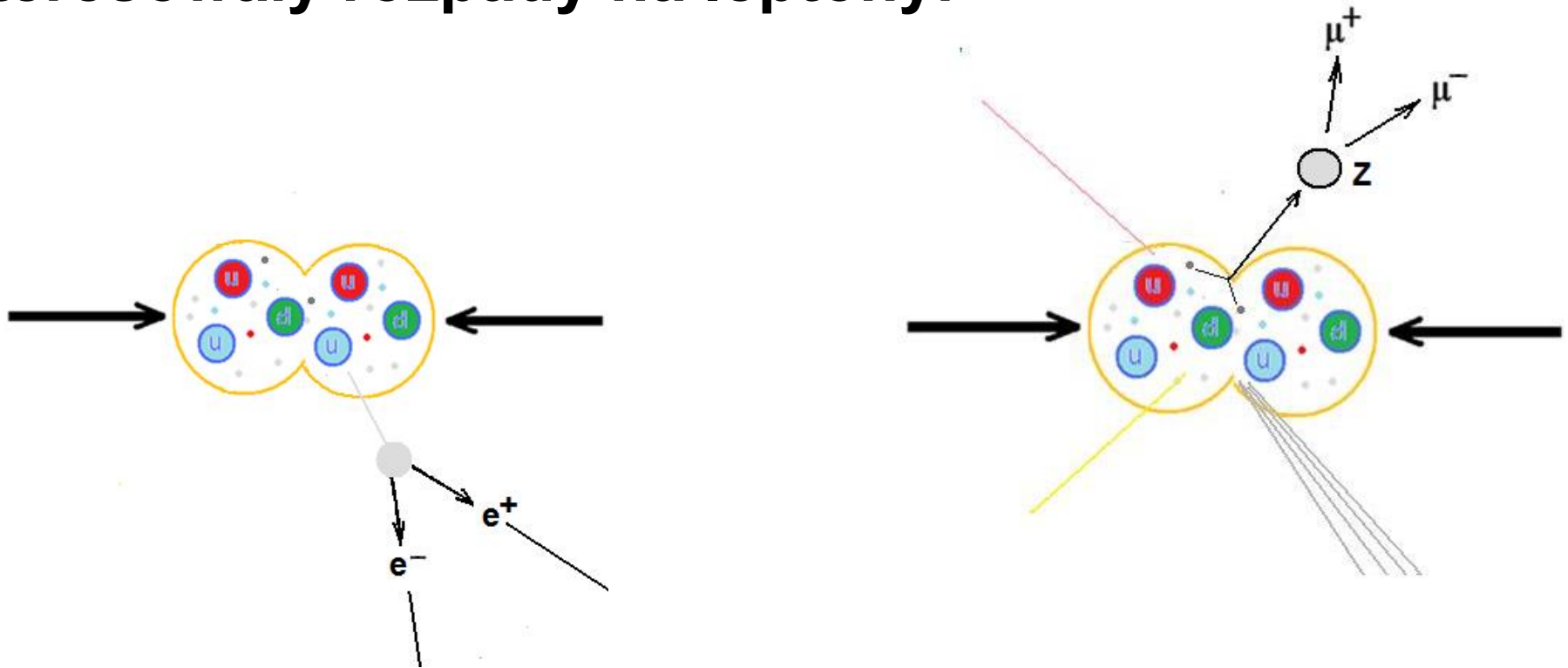
- Neutrino są cząstkami bardzo słabo oddziałującymi z materią - praktycznie nie ma szans na ich bezpośrednie zaobserwowanie. 
- Kwarki z rozpadu bozonu Z przekształcają się w hadrony (dżety hadronowe), co utrudnia stwierdzenie, czy pochodziły z rozpadu Z. 
- Cząstki τ prawie natychmiast rozpadają się, dlatego rozpady Z z ich udziałem są trudne do badania. 

Obserwowanie rozpadów bozonu Z:

- Neutrino są cząstkami bardzo słabo oddziałującymi z materią - praktycznie nie ma szans na ich bezpośrednie zaobserwowanie. 
- Kwarki z rozpadu bozonu Z przekształcają się w hadrony (dżety hadronowe), co utrudnia stwierdzenie, czy pochodziły z rozpadu Z. 
- Cząstki τ prawie natychmiast rozpadają się, dlatego rozpady Z z ich udziałem są trudne do badania. 
- Tylko rozpady na lekkie leptony (2 na 21 możliwości) są stosunkowo łatwe do wyszukania i badania. 

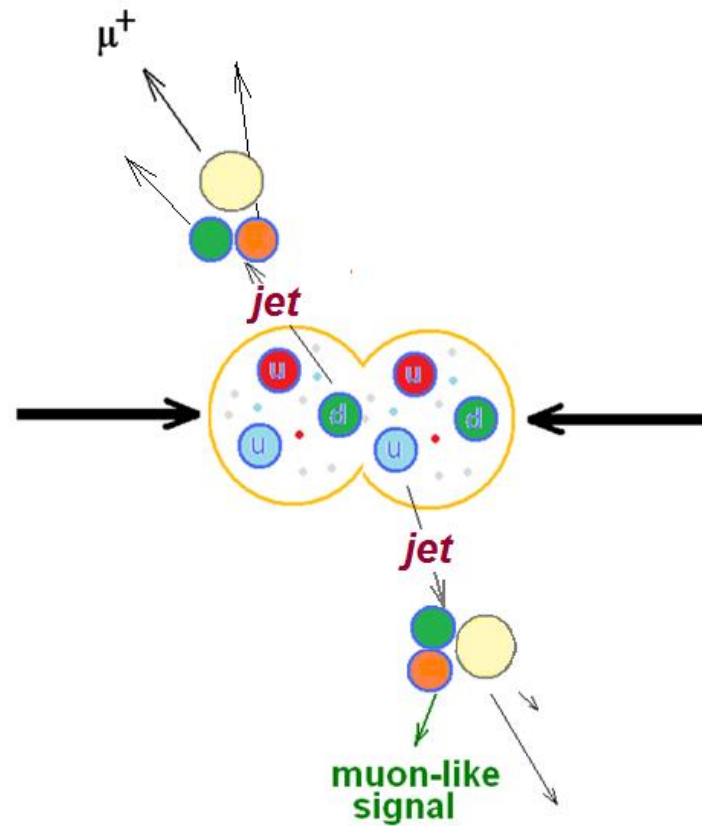
Bozon Z jest produkowany w LHC w zderzeniach protonów.

Może on rozpadać się na kilka sposobów, nas będą interesowały rozpady na leptony:



Czasem może być trudno odróżnić rozpady Z od innych procesów dających parę $\mu^+ \mu^-$ (lub $e^+ e^-$):

Przypadki bez bozonu Z, w których jednak znajdujemy takie same cząstki, jak z rozpadu Z, nazywamy przypadkami tła.



Przypadek tła z dżetami

Podobnie rozpadają się także inne cząstki, ale jak zobaczymy, można je odróżnić przy analizie masy niezmienniczej.

Skąd wiadomo, że para e^+e^- ($\mu^+\mu^-$) pochodzi z rozpadu bozonu Z?

Wykorzystujemy wzór relatywistyczny, wiążący ze sobą masę, energię i pęd cząstki:

$$E^2 = (mc^2)^2 + (\vec{p}c)^2$$

Energie i pęd można zmierzyć. a potem wyliczyć masę.

Skąd wiadomo, że para e^+e^- ($\mu^+\mu^-$) pochodzi z rozpadu bozonu Z?

Wykorzystujemy wzór relatywistyczny, wiążący ze sobą masę, energię i pęd cząstki:

$$E^2 = (mc^2)^2 + (\vec{p}c)^2$$

UWAGA O JEDNOSTKACH:

W obliczeniach fizycznych dotyczących zjawisk występujących w życiu codziennym, używamy standardowego układu jednostek (SI)

W fizyce cząstek elementarnych takie jednostki są niewygodne, gdyż musielibyśmy operować jednocześnie na bardzo małych i bardzo dużych liczbach. Dlatego **energię wyrażą się w jednostkach eV** - jest to energia jaką elektron uzyskuje po przejściu pola elektrycznego o różnicy potencjałów 1 V. ($1 \text{ eV} = 1,603 \cdot 10^{-19} \text{ J}$)

Dodatkowo, **prędkości cząstek są bardzo bliskie prędkości światła**. Dlatego pęd cząstek wyraża się w eV/c co oznacza, że **prędkość światła wynosi 1**. Można wtedy pominąć c w powyższym wzorze - i przyjmuje on znacznie prostszą postać:

$$E^2 = m^2 + \vec{p}^2$$

Skąd wiadomo, że para e^+e^- ($\mu^+\mu^-$) pochodzi z rozpadu bozonu Z?

Wykorzystujemy wzór relatywistyczny, wiążący ze sobą masę, energię i pęd cząstki:

$$E^2 = (mc^2)^2 + (\vec{p}c)^2$$

Z prawa zachowania energii i pędu wynika, że dla cząstki rozpadającej się na dwie inne:

$$m = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2}$$

Dokonując pomiaru pędu i energii produktów rozpadu, możemy poznać masę cząstki, z której powstały.

Skąd wiadomo, że para e^+e^- ($\mu^+\mu^-$) pochodzi z rozpadu bozonu Z?

Wykorzystujemy wzór relatywistyczny, wiążący ze sobą masę, energię i pęd cząstki:

$$E^2 = (mc^2)^2 + (\vec{p}c)^2$$

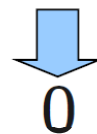
Z prawa zachowania energii i pędu wynika, że dla cząstki rozpadającej się na dwie inne:

$$m = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2}$$

Dokonując pomiaru pędu i energii produktów rozpadu, możemy poznać masę cząstki, z której powstały.

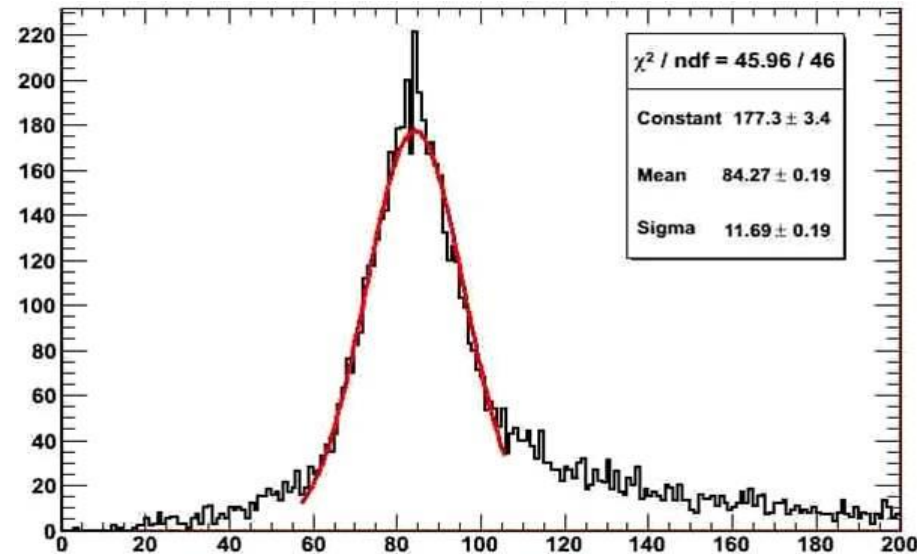
Jednocześnie powyższy wzór pozwala określić, jaką masę może mieć najcięższa wytwarzana cząstka, gdy zderzamy ze sobą przeciwbieżnie wiązki protonów:

$$m_{max} = \sqrt{4E_{beam}^2 - (\vec{p}_{beam,1} + \vec{p}_{beam,2})^2} = 2E_{beam}$$



0

Wyliczona masa bozonu Z dla wielu przypadków:



Charakteryzuje się ona pewną wartością średnią:

$$91.1876 \pm 0.0021 \text{ GeV}$$

oraz szerokością rozkładu:

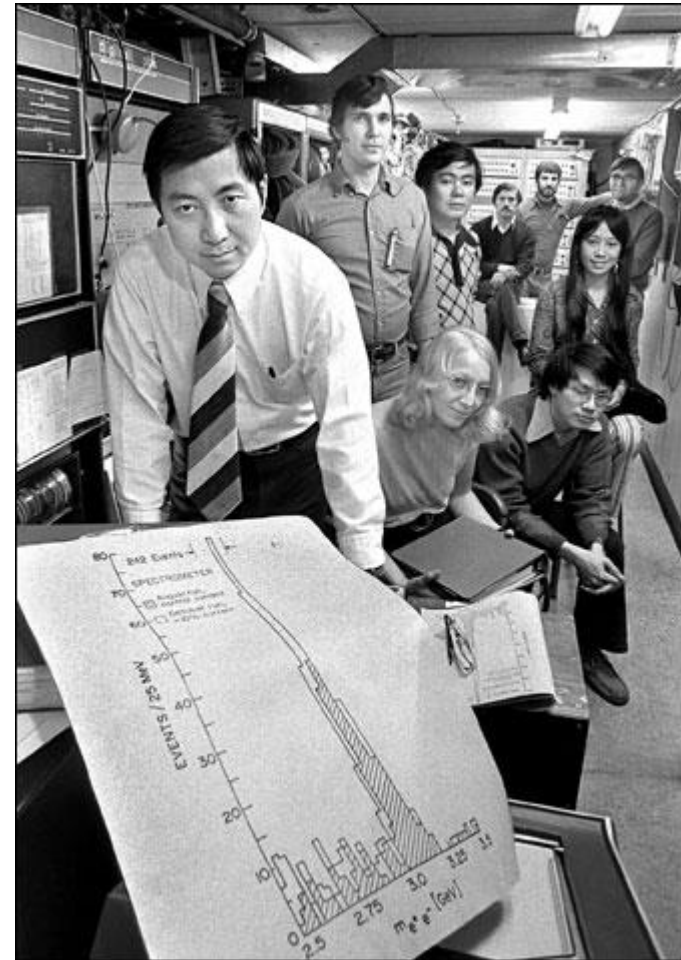
$$2.4952 \pm 0.0023 \text{ GeV} \quad (\text{bez uwzględnienia błędów pomiarowych})$$

Odkrywanie nowych cząstek

Badanie rozkładu masy niezmienniczej obserwowanych cząstek doprowadziło do odkrycia wielu nowych cząstek.

W ten sposób znaleziona została np. cząstka J/ψ , o masie 3,0969 GeV (składająca się z dwu kwarków $c\bar{c}$) i rozpadająca się m.in. na parę e^+e^- .

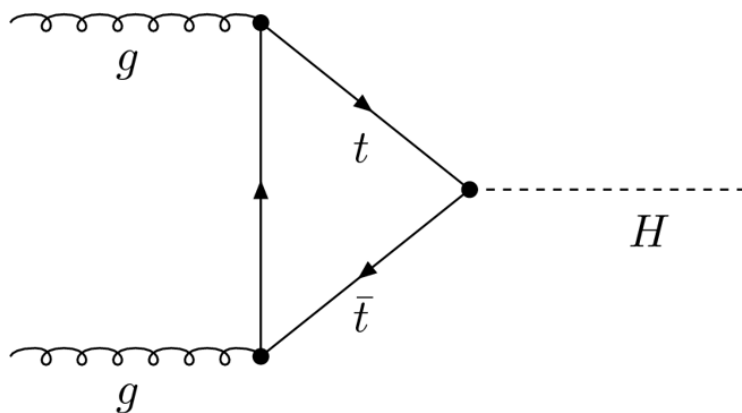
Nowych cząstek można spodziewać się zwłaszcza wtedy, gdy zwiększamy energię zderzenia i mamy szansę wyprodukować cząstki o masie większej niż dotychczas.



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

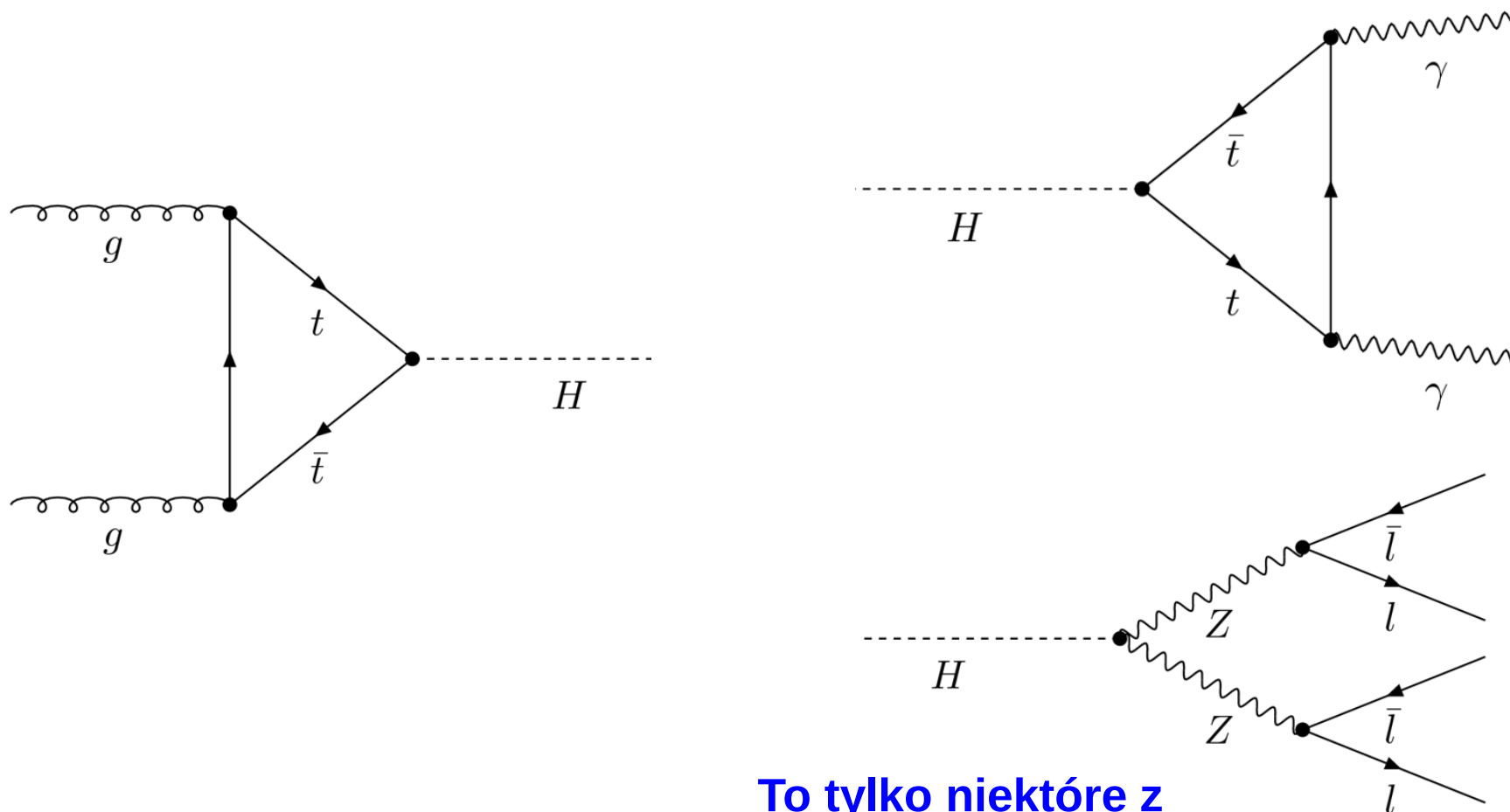
Powstanie i rozpady cząstki Higgsa:

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



Powstanie i rozpad cząstki Higgsa:

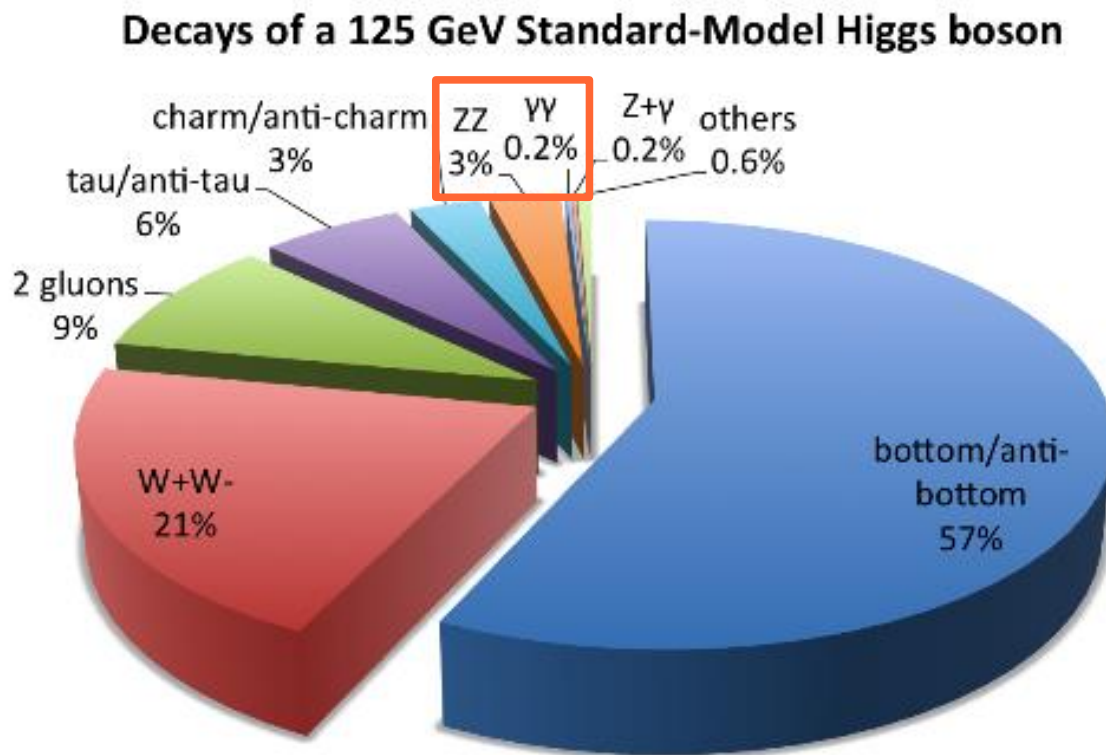
Również rozpad cząstki Higgsa jest dość skomplikowany:



To tylko niektóre z
możliwych rozpadów

Powstanie i rozpad cząstki Higgsa:

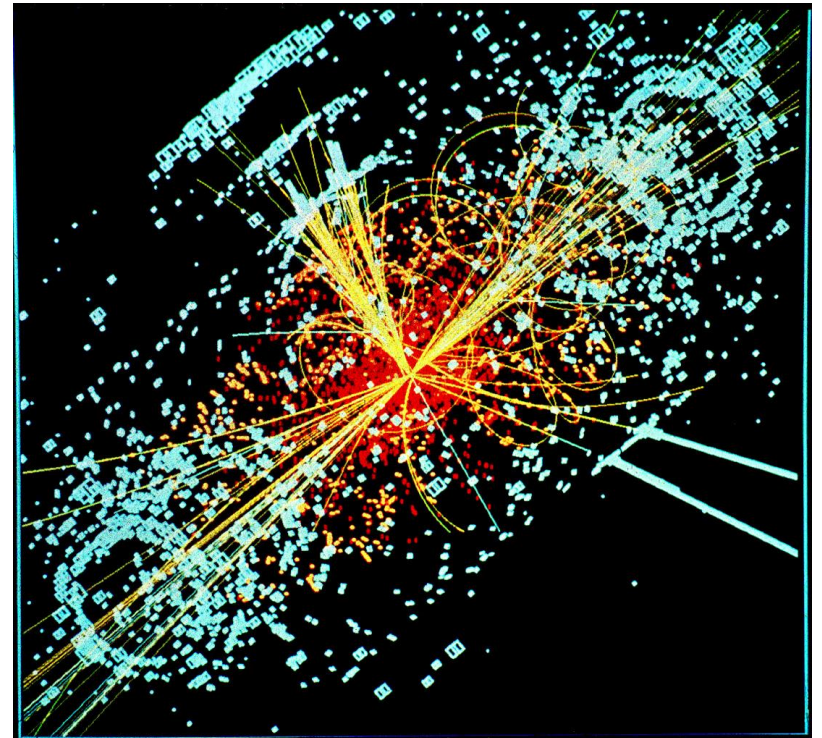
Możliwych jest bardzo wiele różnych typów rozpadu cząstki Higgsa:



Nas będą interesowały rozpady na **dwa bozony Z** lub na **dwa fotony** - dość rzadkie, ale za to stosunkowo łatwe do odróżnienia od przypadków, w których bozonu Higgsa w ogóle nie było.

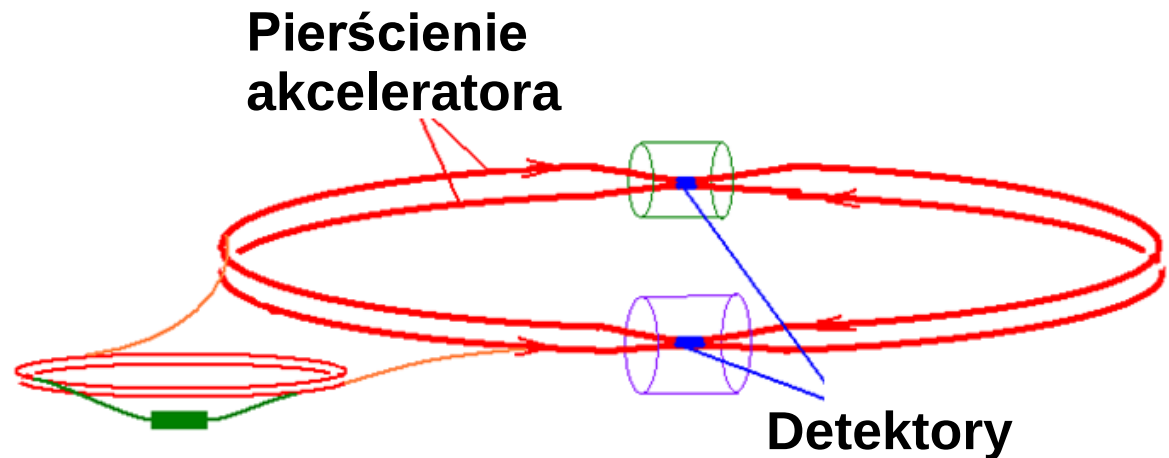
Jak możemy badać cząstki elementarne?

- Cząstek elementarnych nie da się wziąć w rękę czy położyć na wadze, dlatego stosuje się metody pośrednie, pozwalające na identyfikację takich cząstek.
- Potrzebne są do tego specjalne urządzenia – **akceleratory**.
- Cząstki “produkujemy” w akceleratorach zderzając inne cząstki ze sobą, bądź z “tarczą”. W takim zderzeniu wyzwala się energia, z której może nastąpić produkcja 1, 2, 3, ..., N cząstek
- Produkcja zawsze następuje z zasadą zachowania energii i pędu.
- **Największym akceleratorem jest Wielki Zderzacz Hadronów (LHC) w CERN.**



Akcelerator LHC

- znajduje się w CERNie, pod Genewą, w Szwajcarii
- umieszczony w tunelu o długości bliskiej 27 km
- zawiera 9300 magnesów
- magnesy pracują w temperaturze 1,9 K (czyli $-271,3^{\circ}\text{C}$)
- w przeciwnych kierunkach krążą w nim dwie wiązki protonów zderzających się w 4 miejscach
- protony poruszają się z prędkością równą 99.999999991% prędkości światła
- protony osiągną energię do 7 TeV (w każdej wiązce) - aktualnie po 6,8 TeV
- oprócz protonów, w LHC przyspieszane i zderzane są także jądra ołowiu



Akcelerator LHC – główne eksperymenty

ALICE



A Large Ion Collider Experiment

European Organisation for Nuclear Research



ATLAS



CMS



LHCb

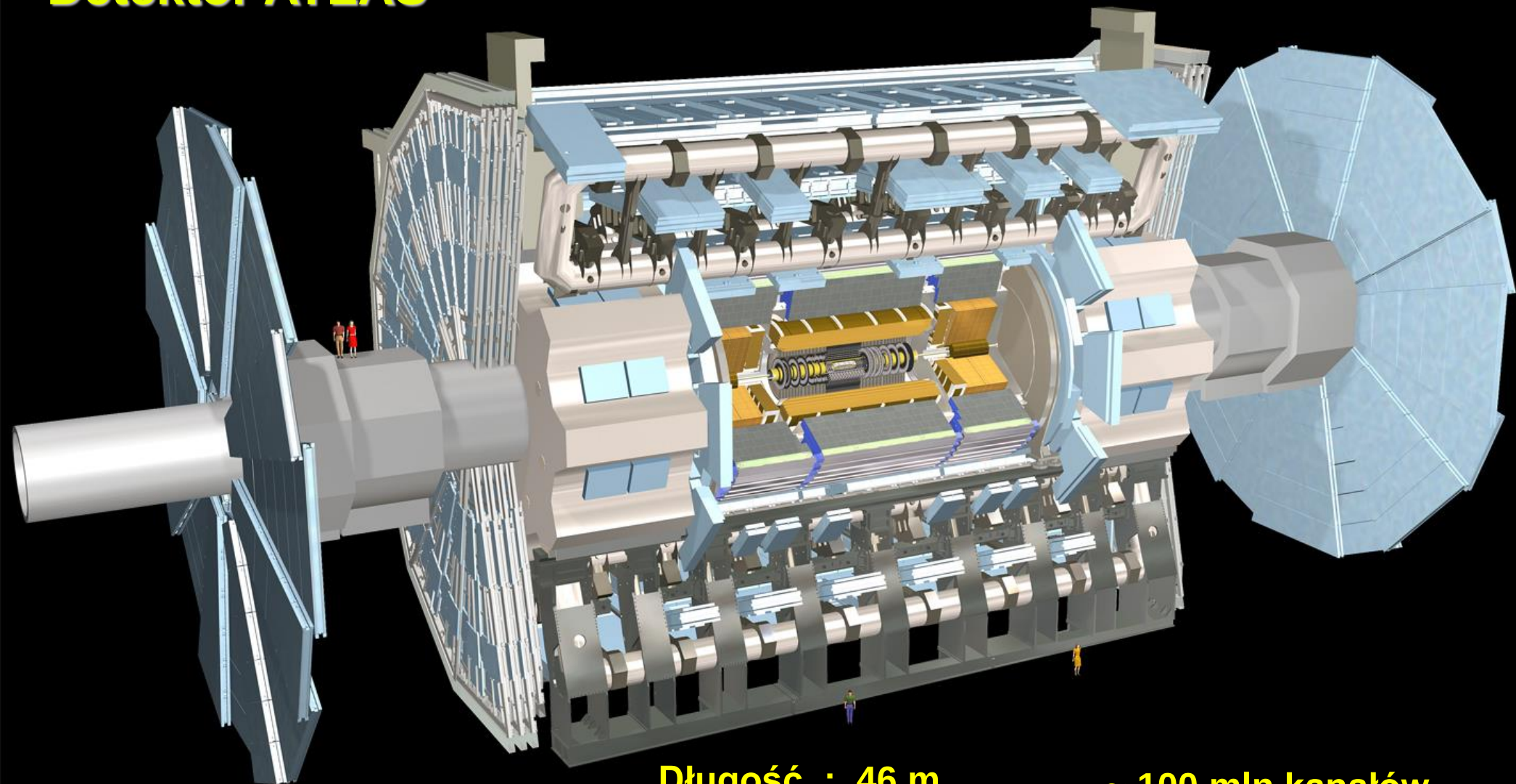


Large Hadron Collider beauty experiment

European Organization for Nuclear Research



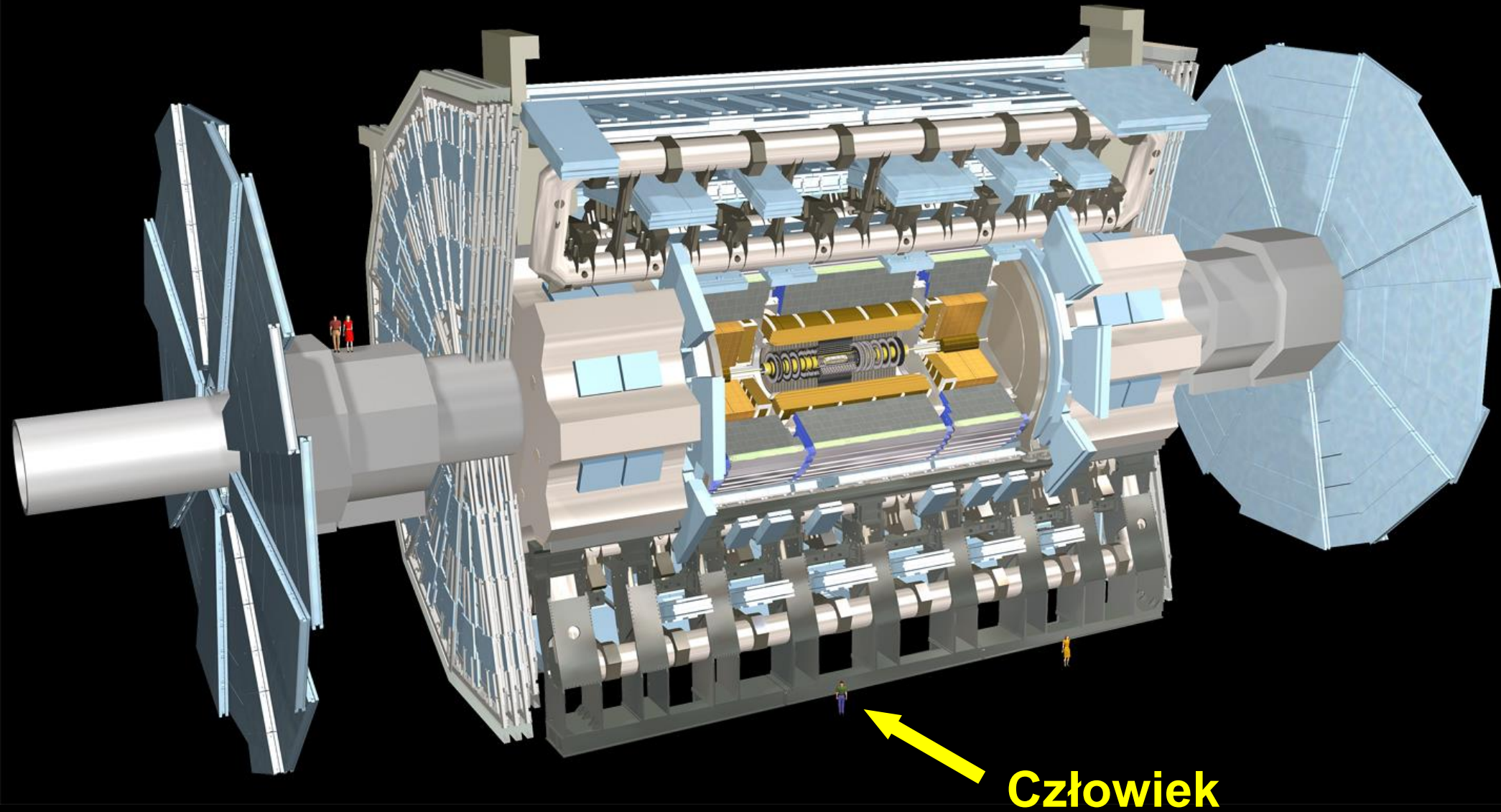
Detektor ATLAS



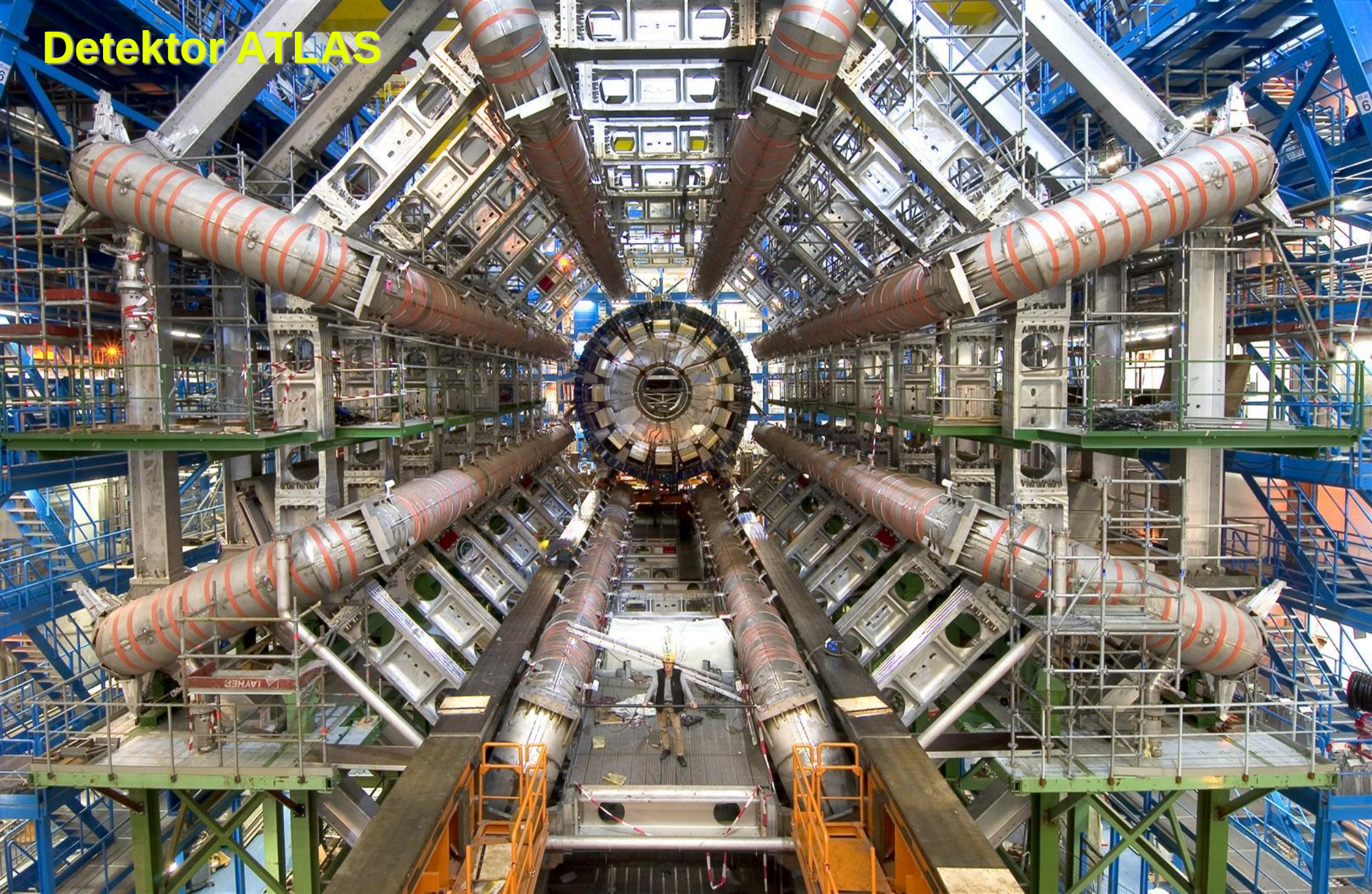
Długość : 46 m
Średnica : 25 m
Waga : 7 tys. ton
wieża Eiffela 10 tys. ton!

**~ 100 mln kanałów
elektroniki**
~ 3000 km kabli
Koszt: 450 milionów CHF

Detektor ATLAS



Detektor ATLAS



Powstaje pytanie, jak odróżnić jedne cząstki od innych, np. elektrony (pozytony) od mionów?

Można tego dokonać analizując ślady pozostawione przez cząstki w detektorze.



asfalt

Powstaje pytanie, jak odróżnić jedne cząstki od innych, np. elektrony (pozytony) od mionów?

Można tego dokonać analizując ślady pozostawione przez cząstki w detektorze.



asfalt



śnieg

Powstaje pytanie, jak odróżnić jedne cząstki od innych, np. elektrony (pozytony) od mionów?

Można tego dokonać analizując ślady pozostawione przez cząstki w detektorze.



asfalt



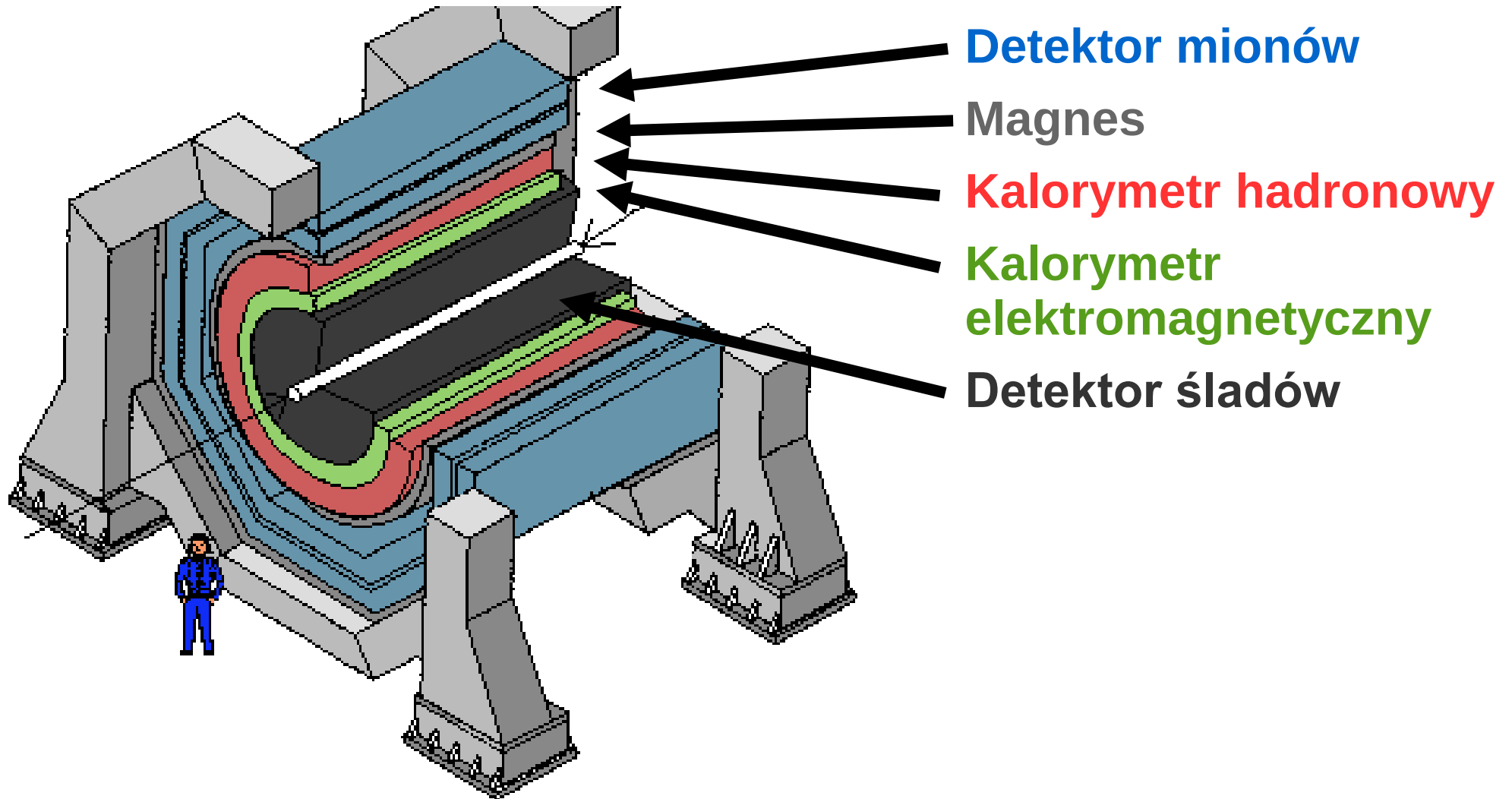
śnieg



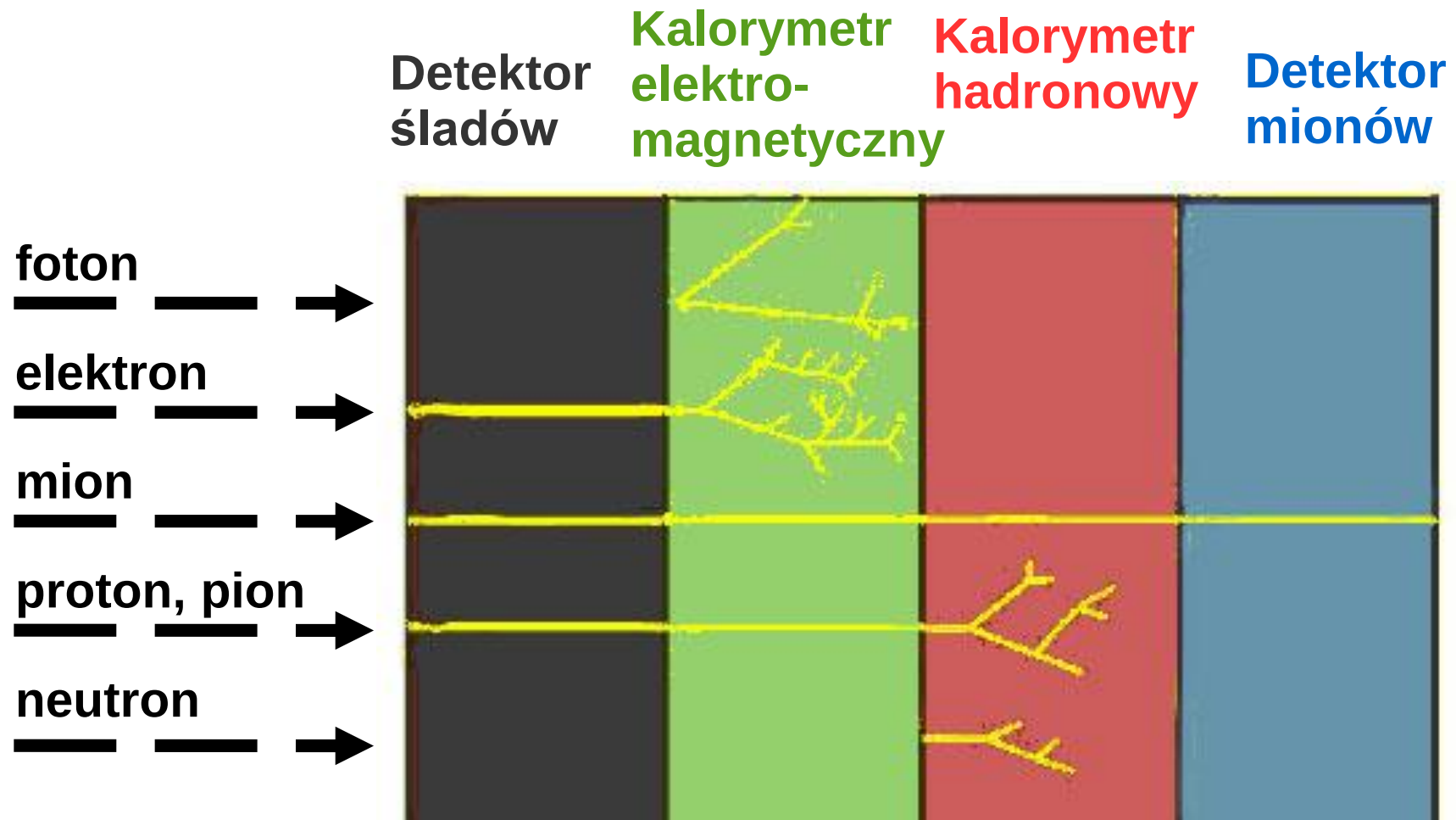
śnieg

W detektorze
nie „widzimy”
cząstek –
widzimy
skutki ich
oddziaływania
z materią
detektora

Elementy detektora w eksperymentach fizyki cząstek elementarnych



Ślady w detektorze pozostawiane przez różne typy cząstek



Co z neutrinem ? wykrywane na
podstawie brakującego pędu

Obserwowanie produktów rozpadów bozonu Z i Higgsa w detektorze:

Detektor śladowy:

- **elektron**: widoczny ślad
- **mion**: widoczny ślad
- **foton**: brak śladu

Kalorymetr elektromagnetyczny:

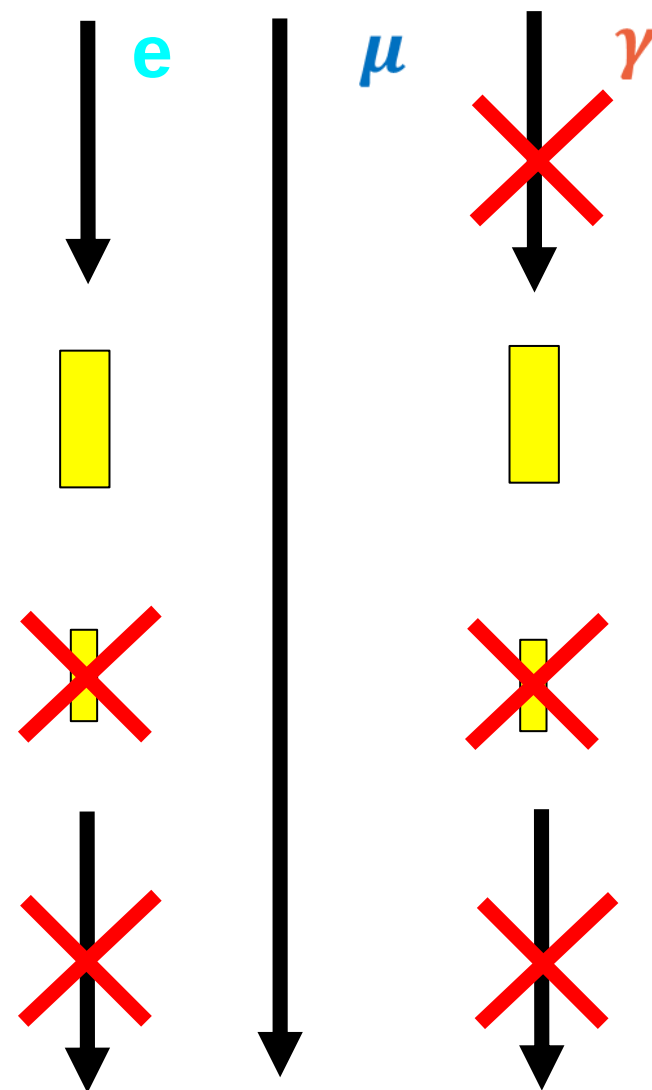
- **elektron**: wyraźny depozyt energii
- **mion**: widoczny ślad
- **foton**: wyraźny depozyt energii

Kalorymetr hadronowy:

- **elektron**: bez sygnałów
- **mion**: widoczny ślad
- **foton**: bez sygnałów

Detektor mionowy:

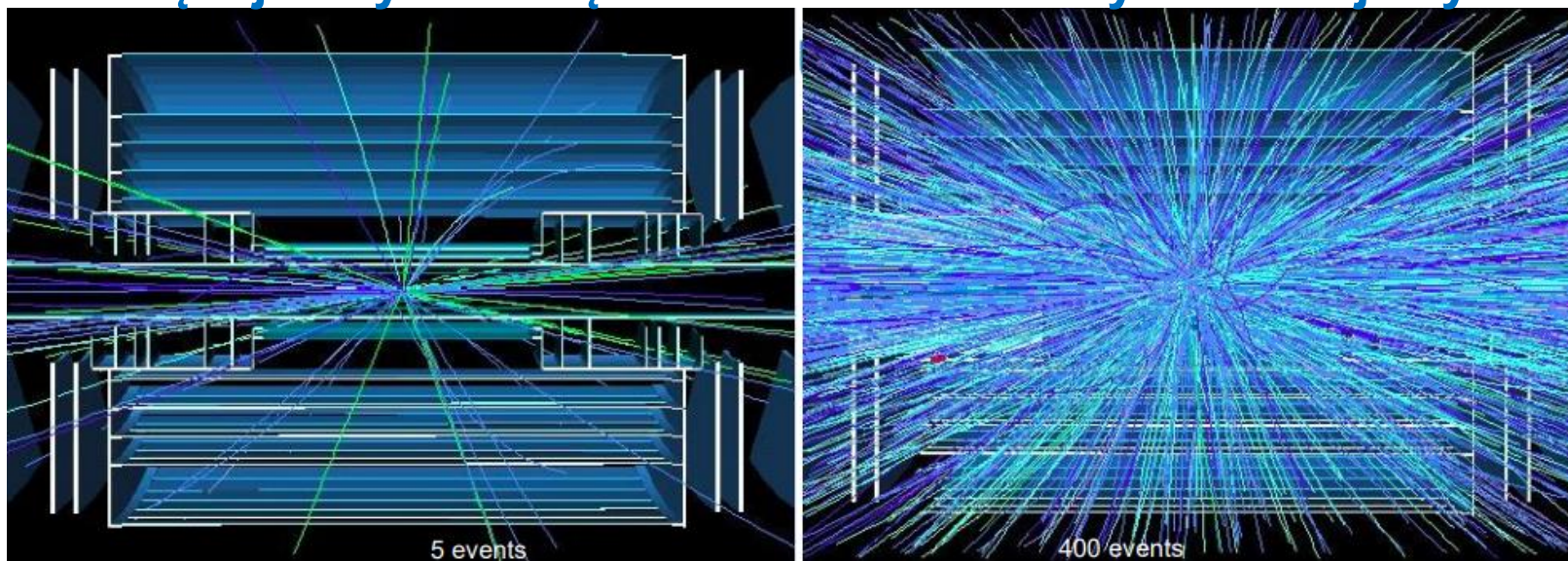
- **elektron**: brak śladu
- **mion**: widoczny ślad
- **foton**: brak śladu



Przyszłość Fizyki Cząstek – LHC Dużej Światłości (HL-LHC)

- HL-LHC to planowana modernizacja Wielkiego Zderzacza Hadronów (LHC), która rozpocznie się po 2029 roku.
- Celem jest **zwiększenie liczby zderzeń protonów (tzw. światłości) nawet 10 razy** w porównaniu do obecnego LHC.
- Pozwoli to na dokładniejsze badania bozonu Higgsa oraz poszukiwanie nowych cząstek i zjawisk fizycznych.

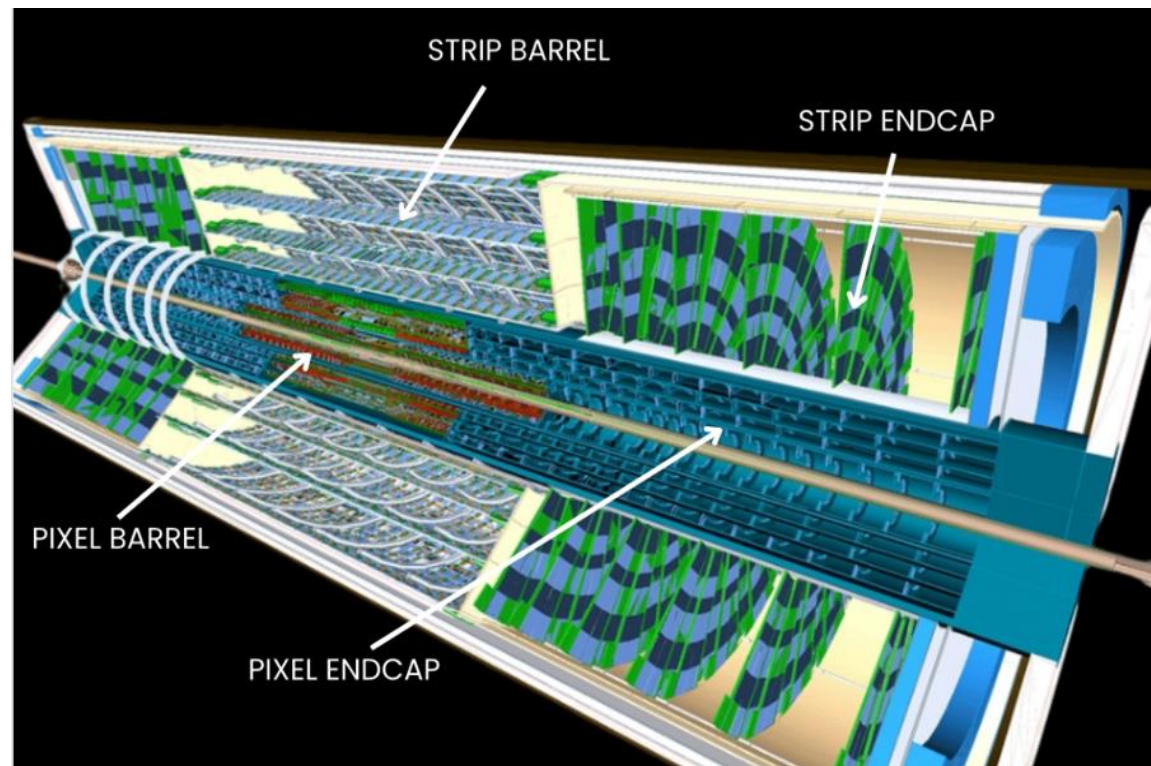
Więcej danych = większa szansa na odkrycie nowej fizyki!



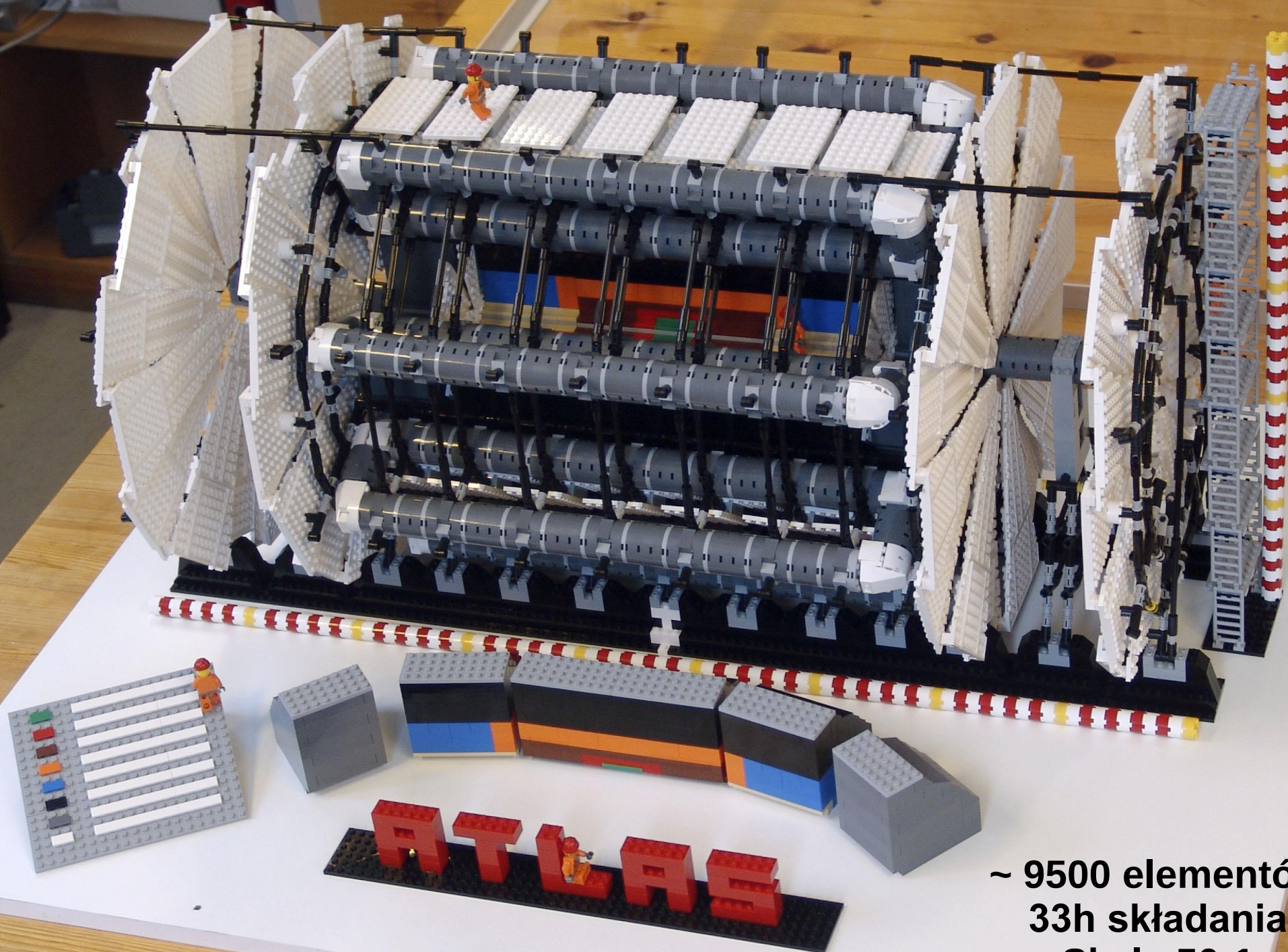
Przyszłość LHC – LHC Dużej Światłości (HL-LHC)

Wyzwania:

- **Zwiększona liczba zderzeń** oznacza więcej danych do analizy – potrzeba potężniejszych komputerów i algorytmów.
- **Większe promieniowanie** może uszkadzać detektory – naukowcy projektują nowe, bardziej odporne technologie.
- **Mocniejsze magnesy** są konieczne do precyzyjnego prowadzenia wiązek cząstek.



**Przyszły Detektor Wewnętrzny
eksperymentu ATLAS dla HL-LHC**



designed by Sascha Mehlhase

~ 9500 elementów
33h składania
Skala 50:1

Projekt CREDO - wspólne badanie promieniowania kosmicznego

Smartfon jako detektor:

- sygnały od cząstek naładowanych są odbierane w matrycy aparatu fotograficznego
- przy zakrytym obiektywie będą widoczne jako jaśniejsze punkty na czarnym tle
- jako kolejne klatki filmu mogą być rejestrowane przez odpowiednie oprogramowanie



Aplikacja CREDO detector

- rejestruje cząstki promieniowania kosmicznego
- analizuje obrazy, odrzucając puste lub naświetlone
- wysyła informacje na serwer
- dane są analizowane przez fizyków
- dostępna w Google Play
- **każdy może dołączyć!**



Konkurs Łowcy Cząstek:

<https://credo.science/lowcyczastek/>

<http://fun.ifj.edu.pl>

