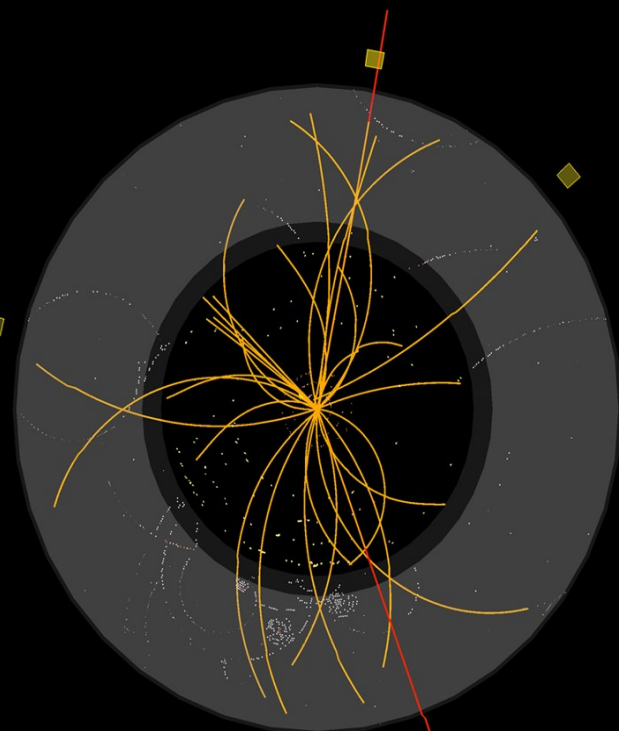
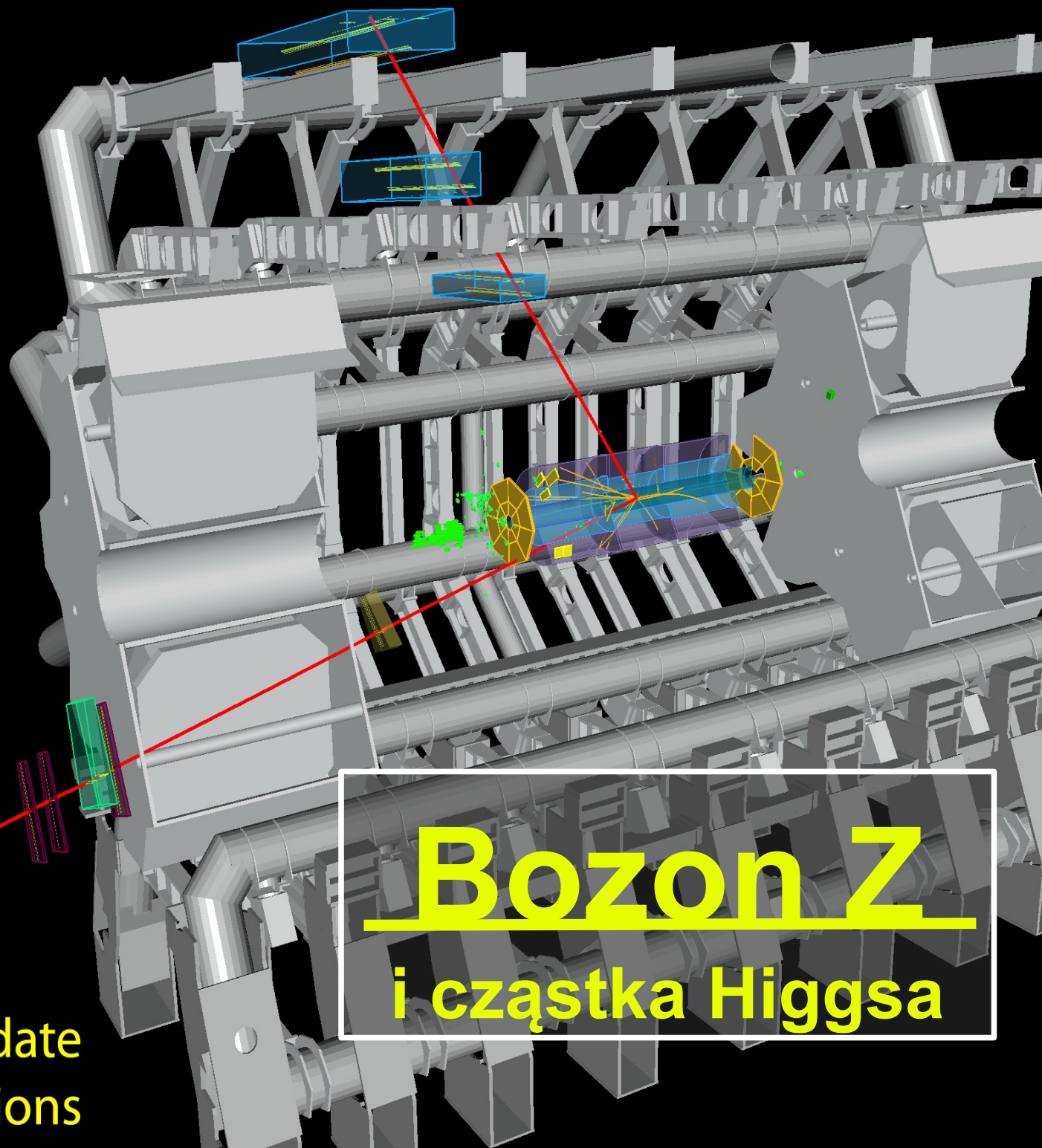


ATLAS EXPERIMENT

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



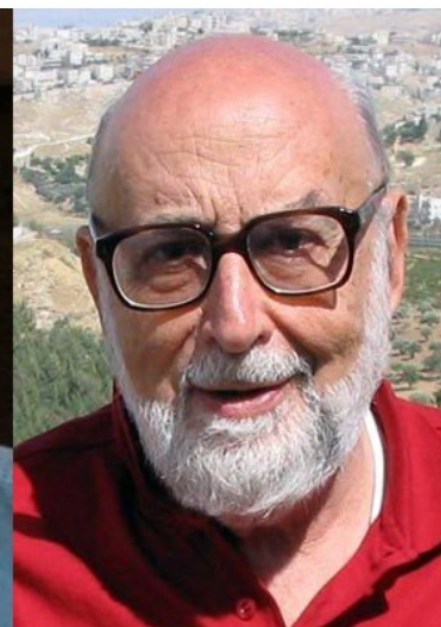
Carlo Rubbia



Simon van der Meer



Peter Ware Higgs



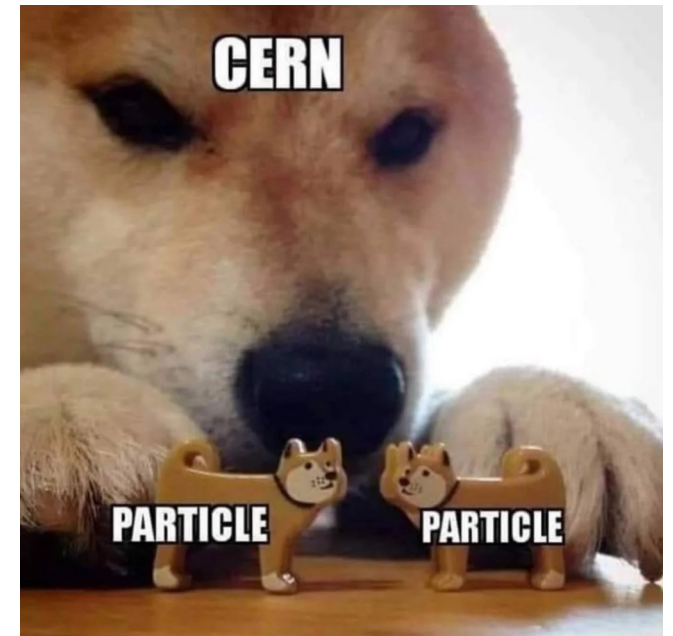
François Englert

Nagroda Nobla w 1984r. za „za decydujący wkład do wielkiego projektu prowadzącego do odkrycia cząstek W i Z”.

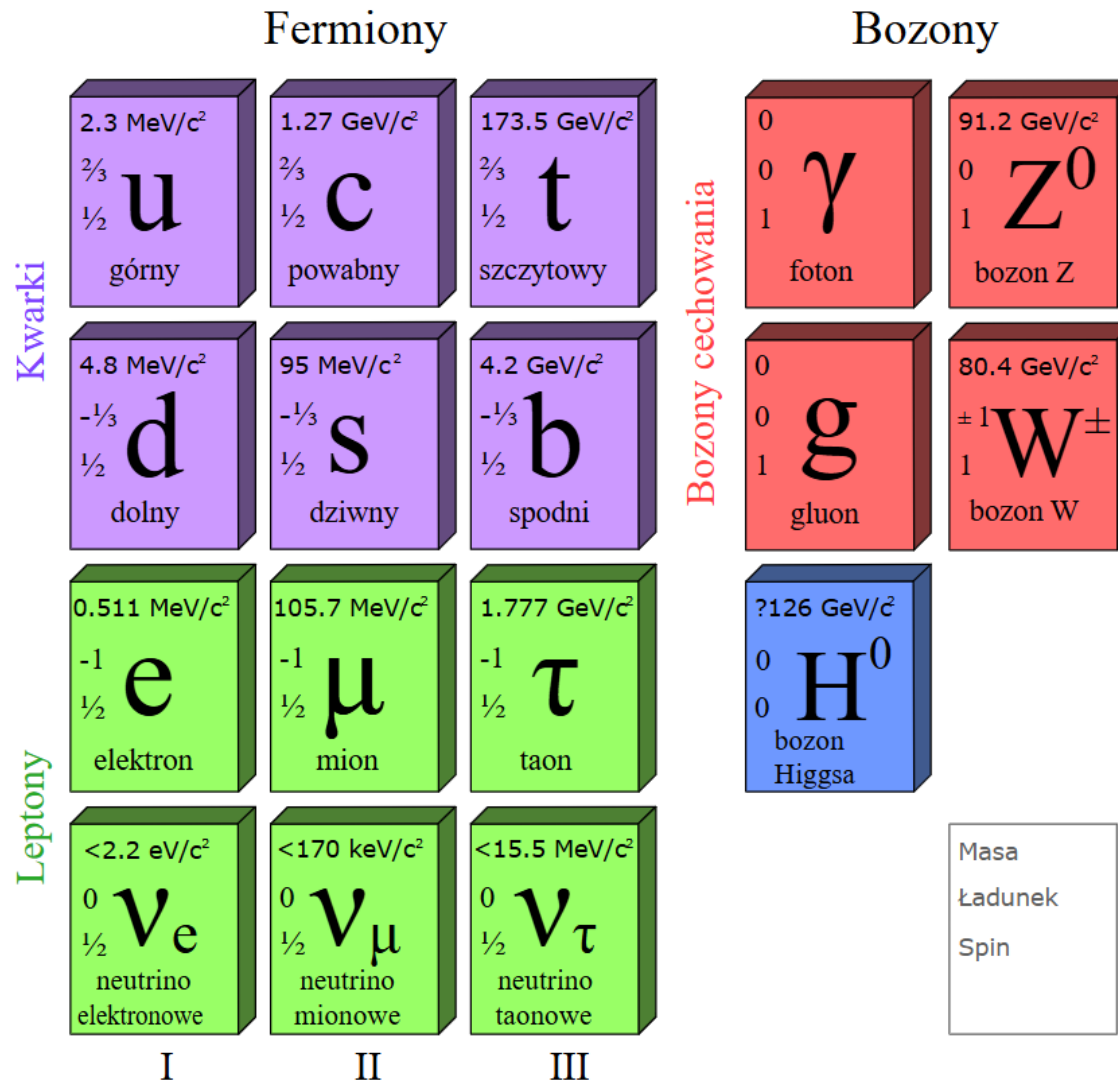
Nagroda Nobla w 2013r. za „Za teoretyczne odkrycie mechanizmu, który pomaga nam zrozumieć pochodzenie masy cząstek subatomowych, co zostało niedawno potwierdzone dzięki odkryciu postulowanej cząstki elementarnej podczas eksperymentów ATLAS i CMS przeprowadzonych w Wielkim Zderzaczu Hadronów w CERN”.

Spis treści

1. Cząstki elementarne
2. Rozpad bozonu Z
3. Rozpad bozonu Higgsa
4. Rozpoznawanie cząstek w detektorze



Model Standardowy - cząstki (prawdziwie) elementarne



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

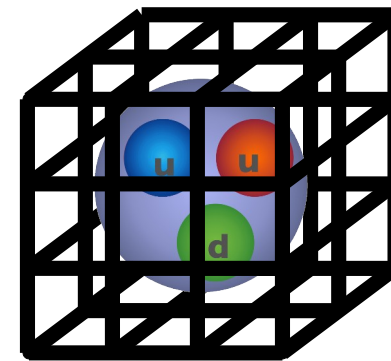
oraz odpowiadające im antycząstki

Uwięzienie kwarków

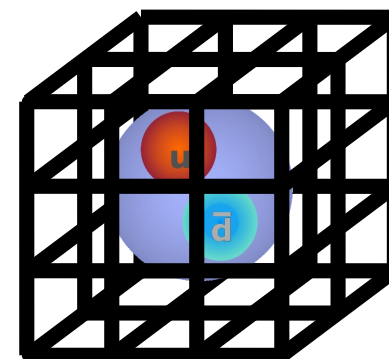
Kwarki występują jedynie w stanie związanym:

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

Nazywamy to uwięzieniem kwarków.



barion
3 kwarki



mezon
kwarki + antykwark

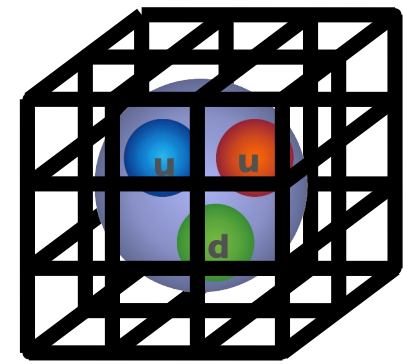
Model Standardowy

Kwarki występują jedynie w stanie związanym:

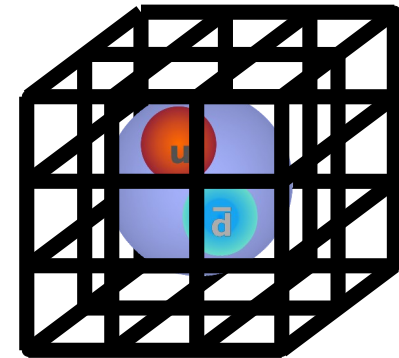
- ♦ bariony - 3 kwarki
(np. proton: uud, neutron: udd)
- ♦ mezony - kwark + antykwark

Dla ułatwienia przypisuje się kwarkom kolory czerwony, 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

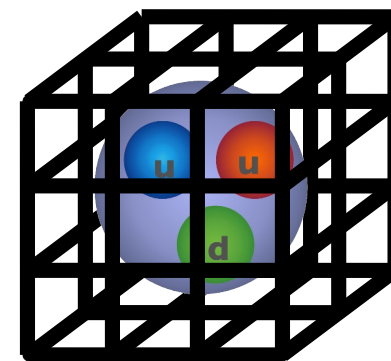
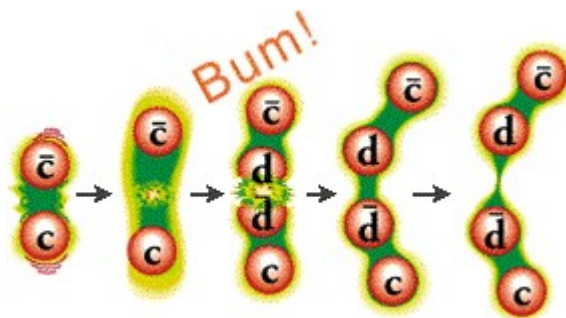
Model Standardowy

Kwarki występują jedynie w stanie związanym:

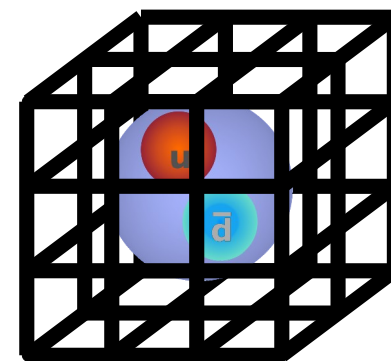
- ♦ bariony - 3 kwarki
(np. proton: uud, neutron: udd)
- ♦ mezony - kwark + antykwark

Dla ułatwienia przypisuje się kwarkom kolory **czzerwony**, **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:

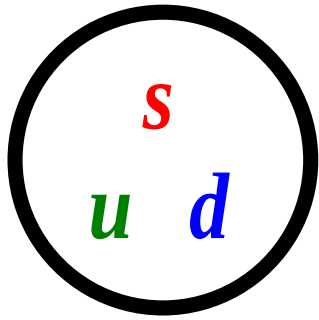


barion
3 kwarki



mezon
kwarki + antykwark

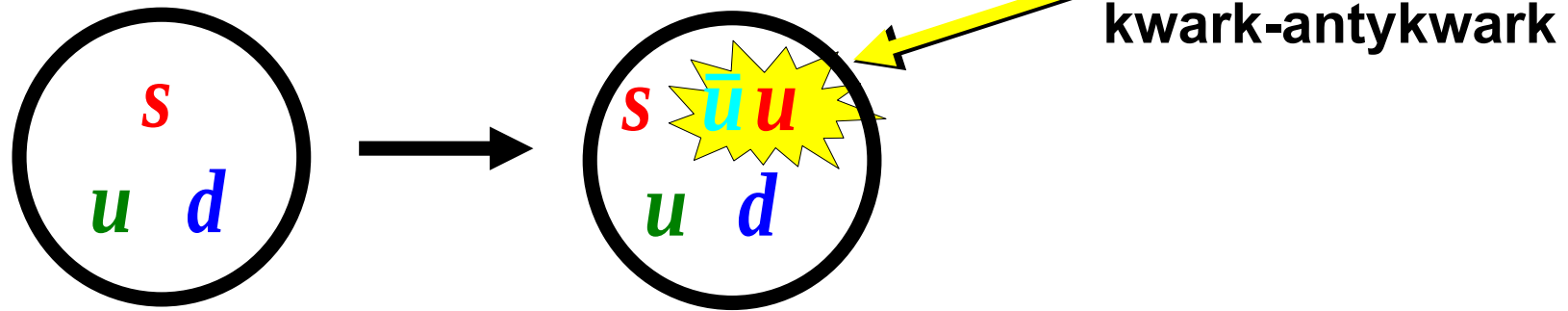
Model Standardowy - rozpady



Λ

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

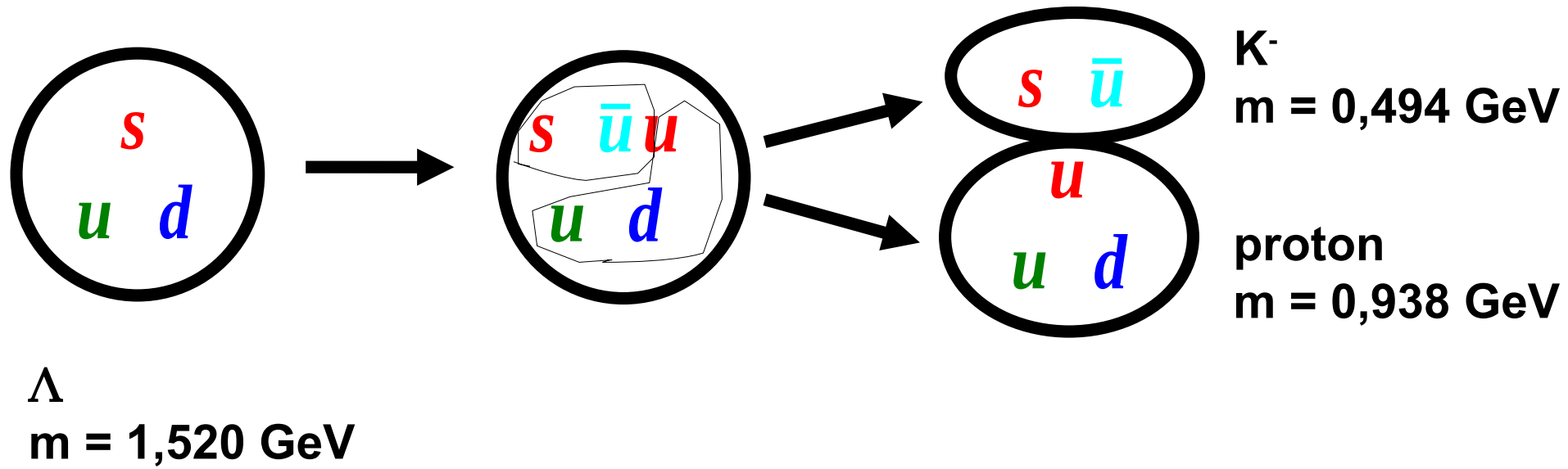
Model Standardowy - rozpady



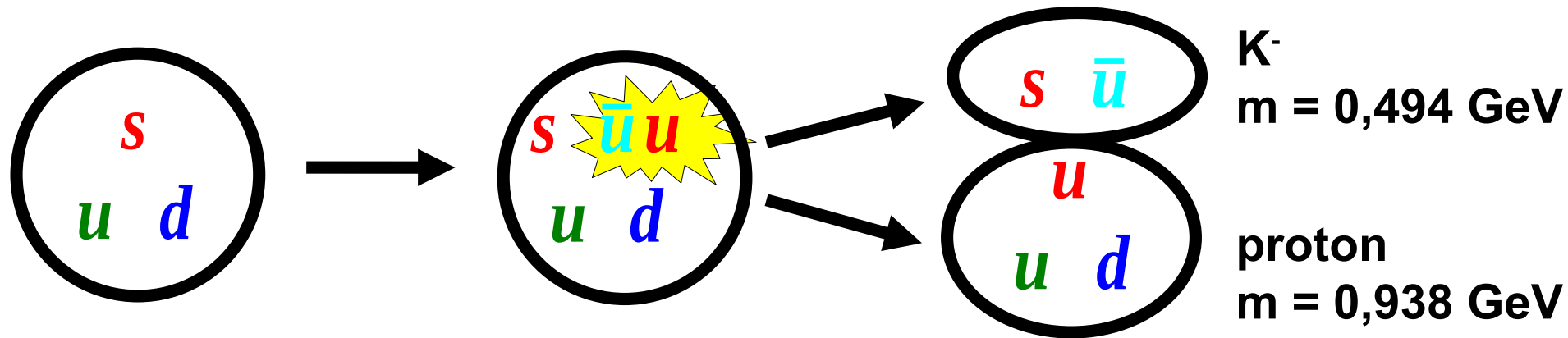
Λ

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

Model Standardowy - rozpady



Model Standardowy - rozpady

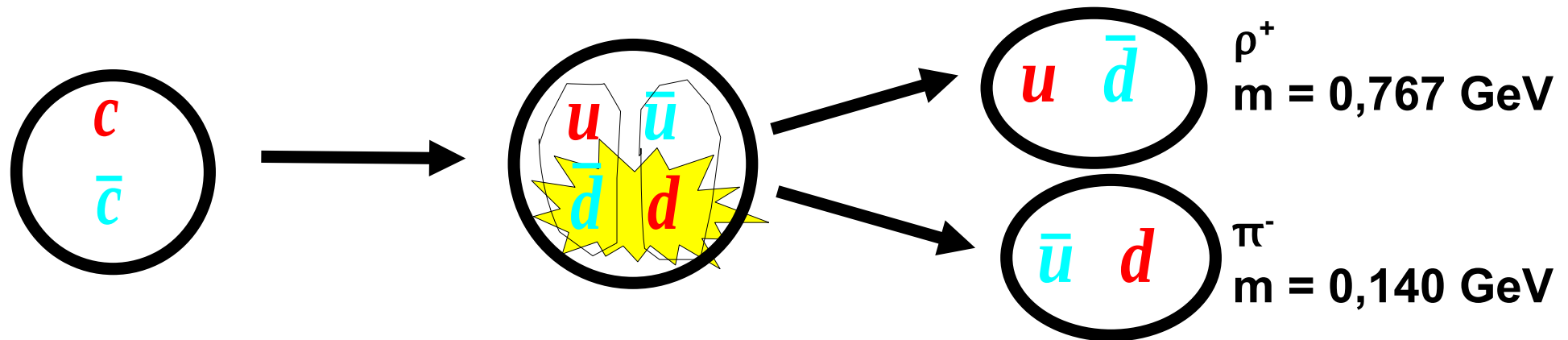
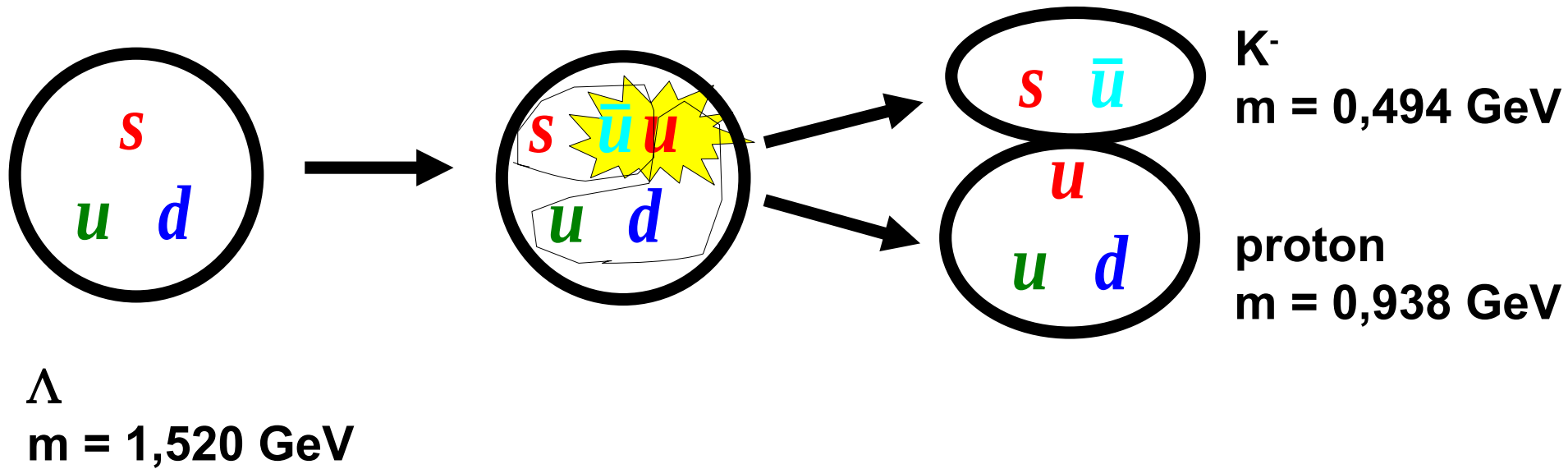


Λ
 $m = 1,520 \text{ GeV}$

suma mas = 1,432 GeV
 zachowane:
 liczba barionów
 liczba kwarków s

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

Model Standardowy - rozpady

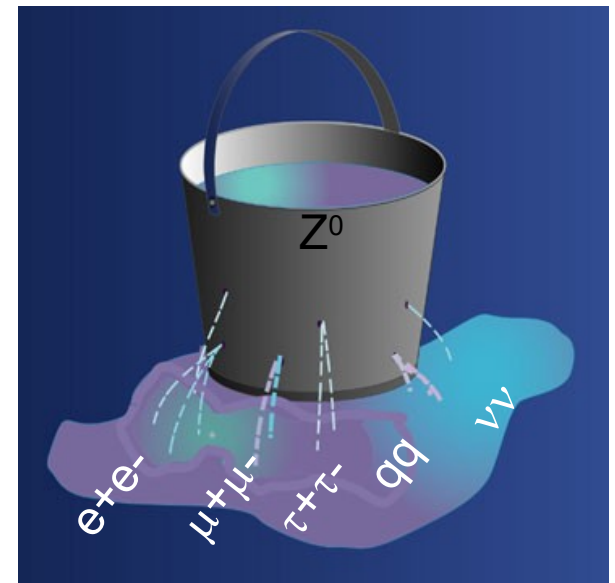


kwarki c i anty- c anihilują i dają parę u i anty- u oraz energię pozwalającą na powstanie dodatkowo pary d i anty- d

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.



cząstka	ładunek	masa	czas życia
neutrino	0	~ 0	∞

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. 

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. 

cząstka	ładunek	masa	czas życia
taon	1	1,78 GeV	bardzo krótki

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.



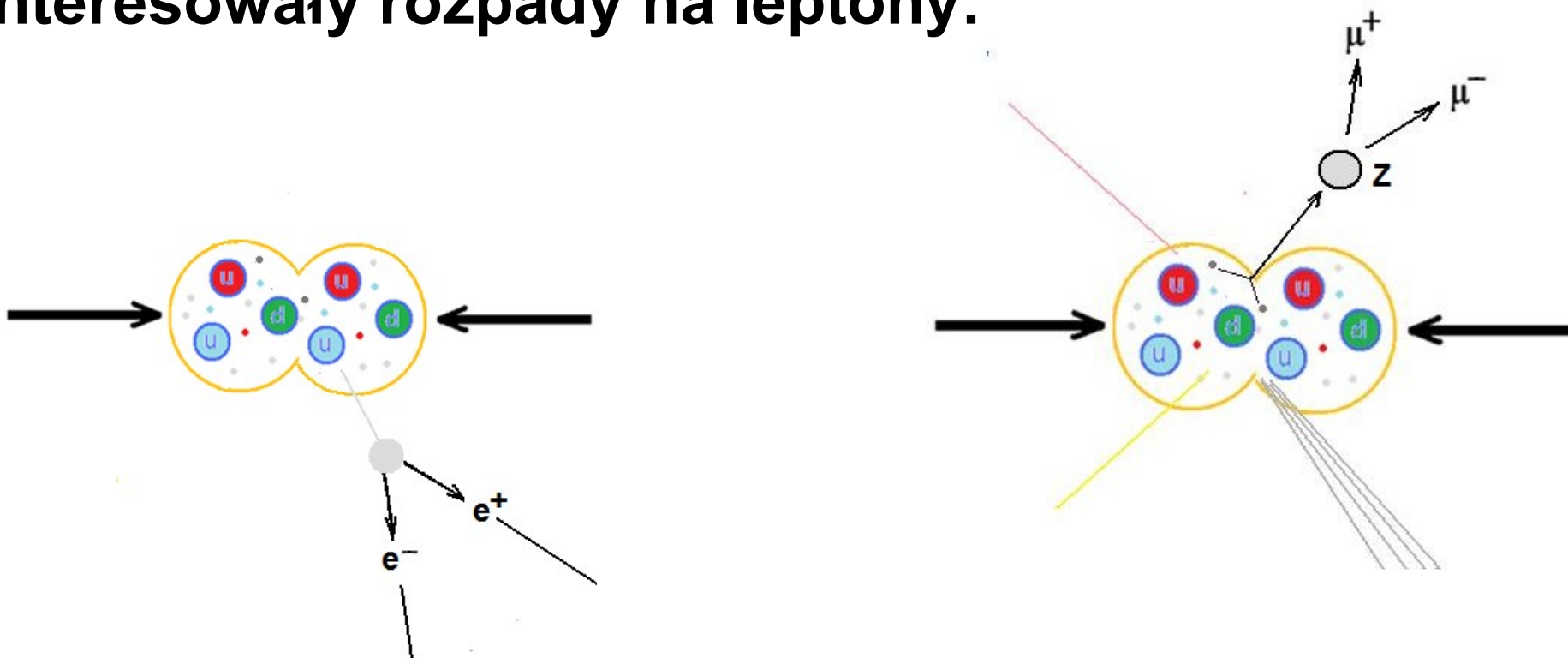
→ Tylko rozpady na lekkie leptony (2 na 21 możliwości) są stosunkowo łatwe do wyszukania i badania.



$$e^+ e^-, \mu^+ \mu^-$$

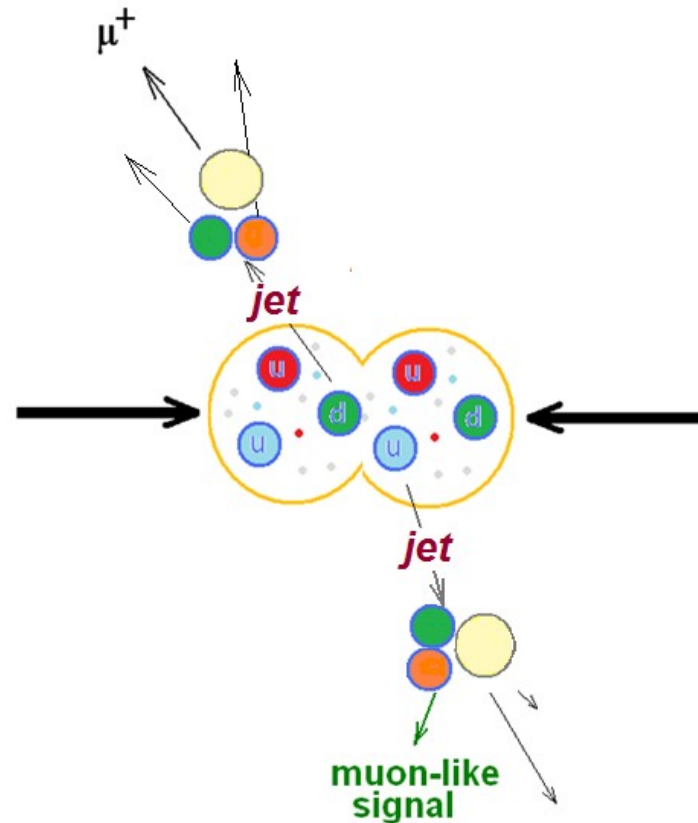
Bozon Z jest produkowany w LHC w zderzeniach protonów.

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



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

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



Przypadek tła
z dżetami

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

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

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

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

Energię 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:

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

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:

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

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

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

$$\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2$$

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:

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

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

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

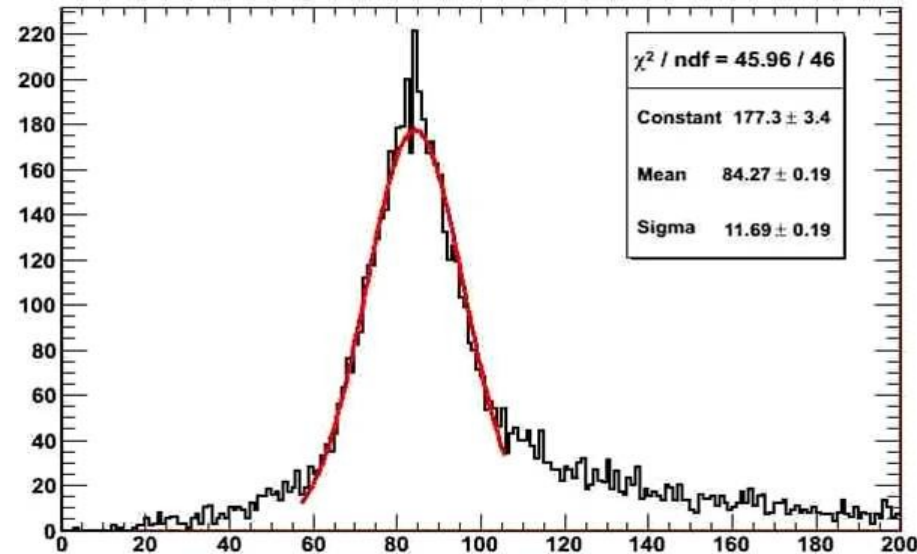
Dokonując pomiaru pędu i energii produktów rozpadu, możemy poznać masę cząstki, z której powstały.

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

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

↓
0

Wyliczona masa bozonu Z dla wielu przypadków:



Charakteryzuje się ona pewną wartością średnią:

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

oraz szerokością rozkładu:

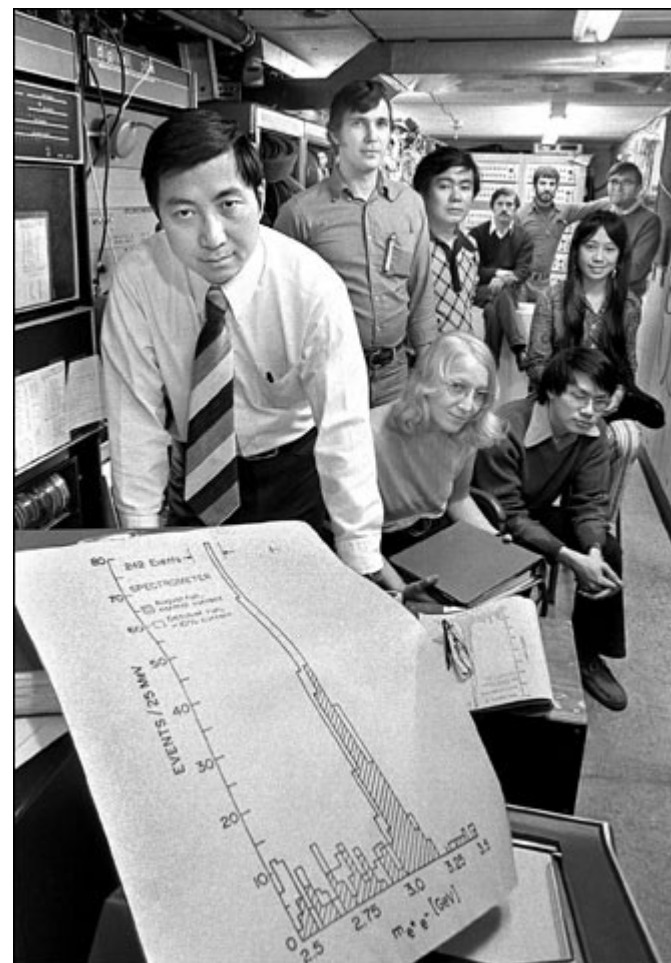
$$2.4952 \pm 0.0023 \text{ GeV} \quad (\text{bez uwzględnienia błędów pomiarowych})$$

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 3,0969 GeV (składająca się z dwu kwarków $c\bar{c}$) i rozpadająca się m.in. na parę e^+e^- .

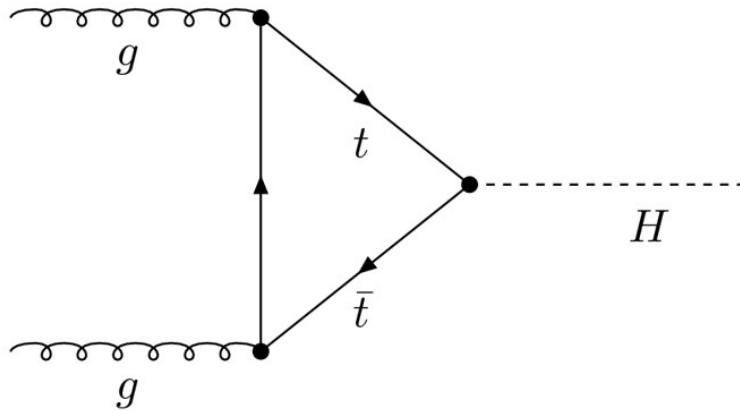
Nowych cząstek można spodziewać się zwłaszcza wtedy, gdy zwiększamy energię zderzenia i mamy szansę wyprodukować cząstki o masie większej niż dotychczas.



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

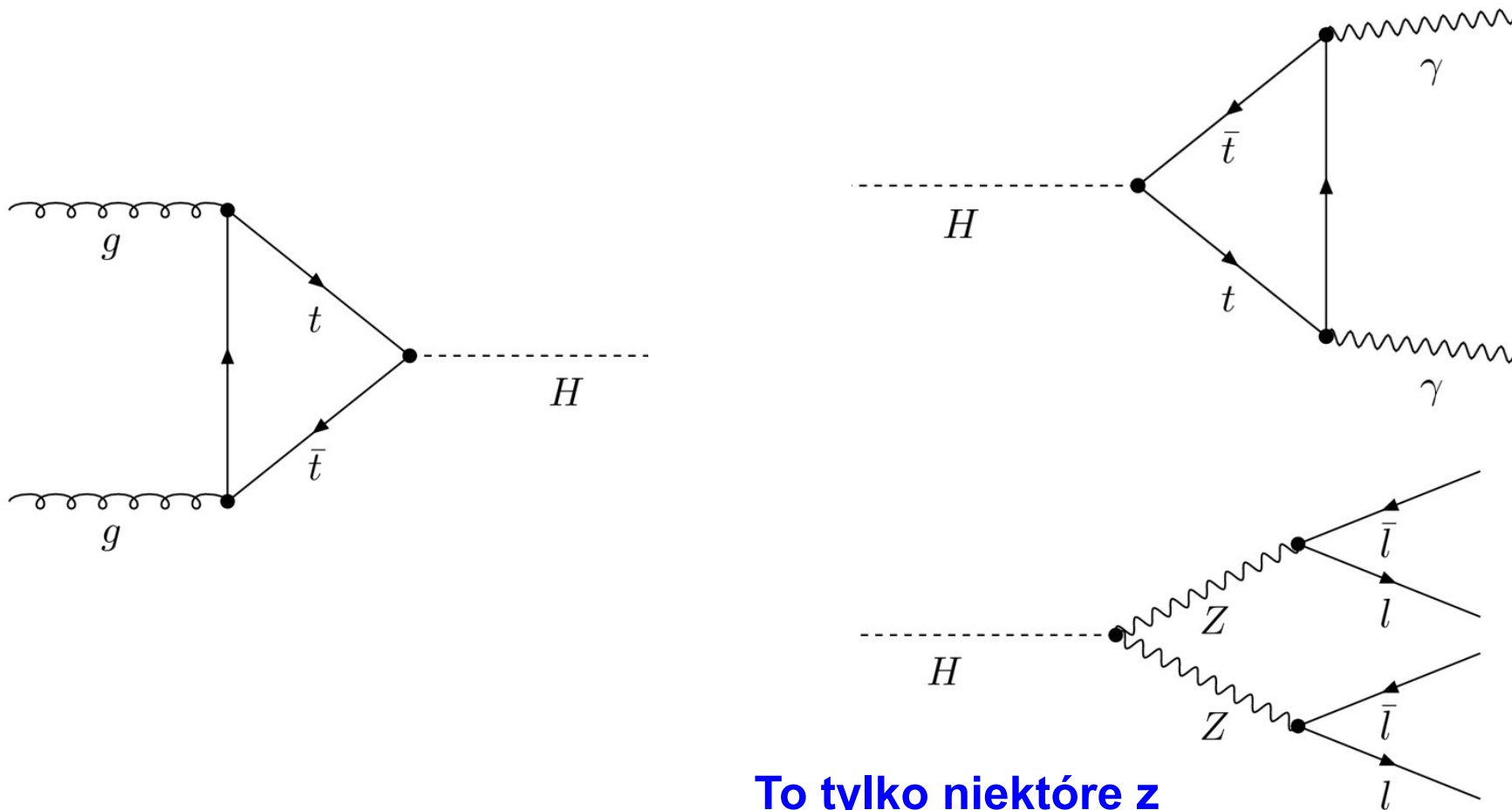
Powstanie i rozpady cząstki Higgsa:

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



Powstanie i rozpad cząstki Higgsa:

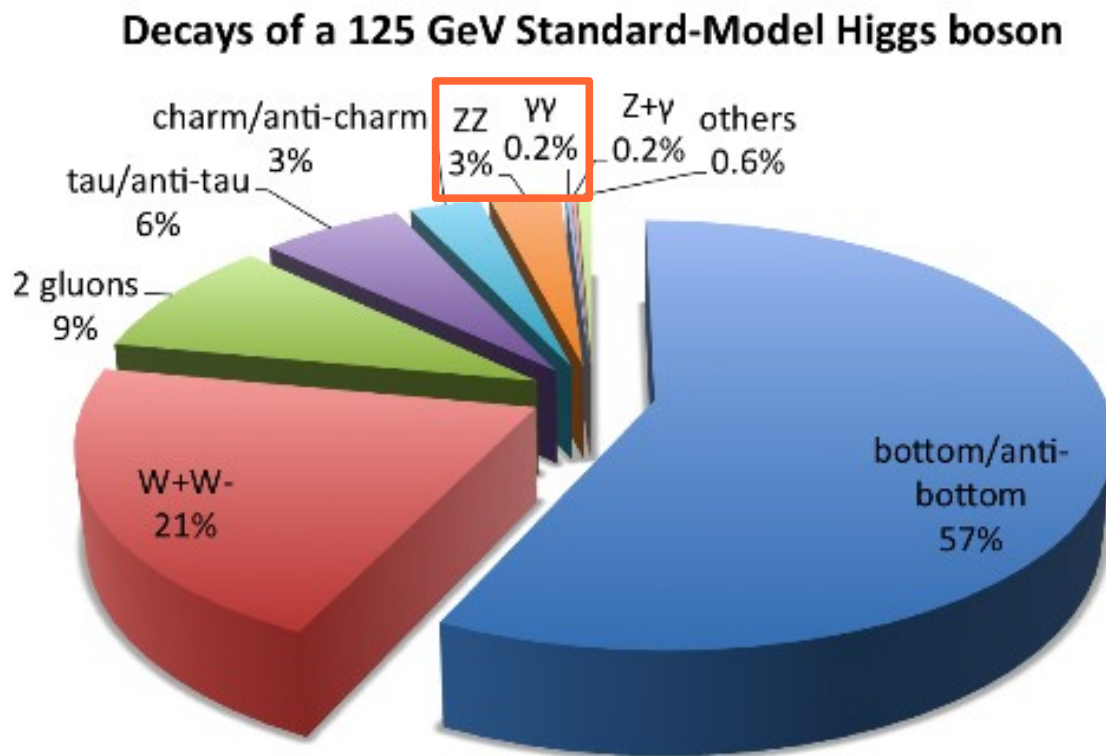
Również rozpad cząstki Higgsa jest dość skomplikowany:



To tylko niektóre z
możliwych rozpadów

Powstanie i rozpad cząstki Higgsa:

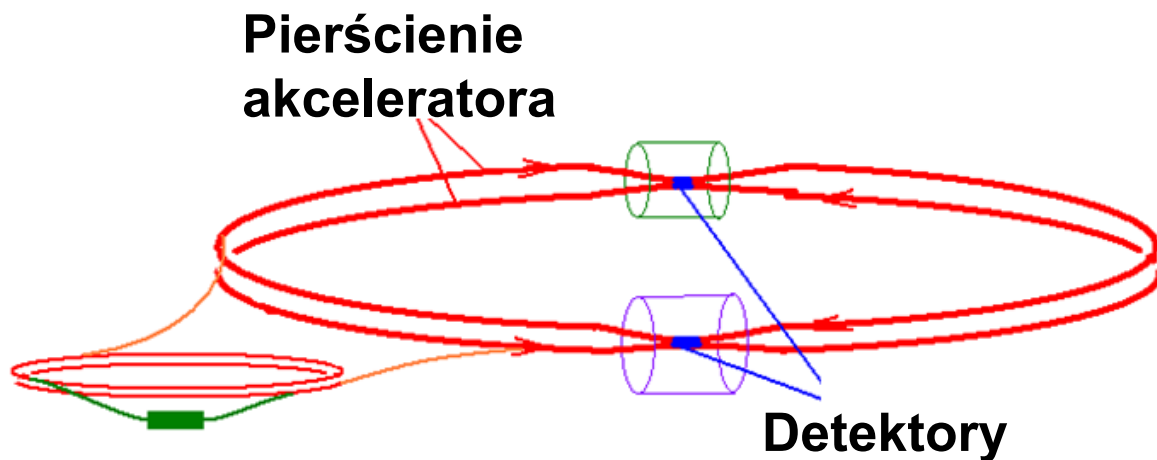
Możliwych jest bardzo wiele różnych typów rozpadu cząstki Higgsa:



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.

Akcelerator LHC

- 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 99.9999991% prędkości światła
- protony osiągną energię do 7 TeV (w każdej wiązce) - aktualnie po 6,5 TeV
- oprócz protonów, w LHC przyspieszane i zderzane są także jądra ołowiu



Akcelerator LHC - eksperymenty

ALICE



A Large Ion Collider Experiment

European Organisation for Nuclear Research



ATLAS



CMS



LHCb

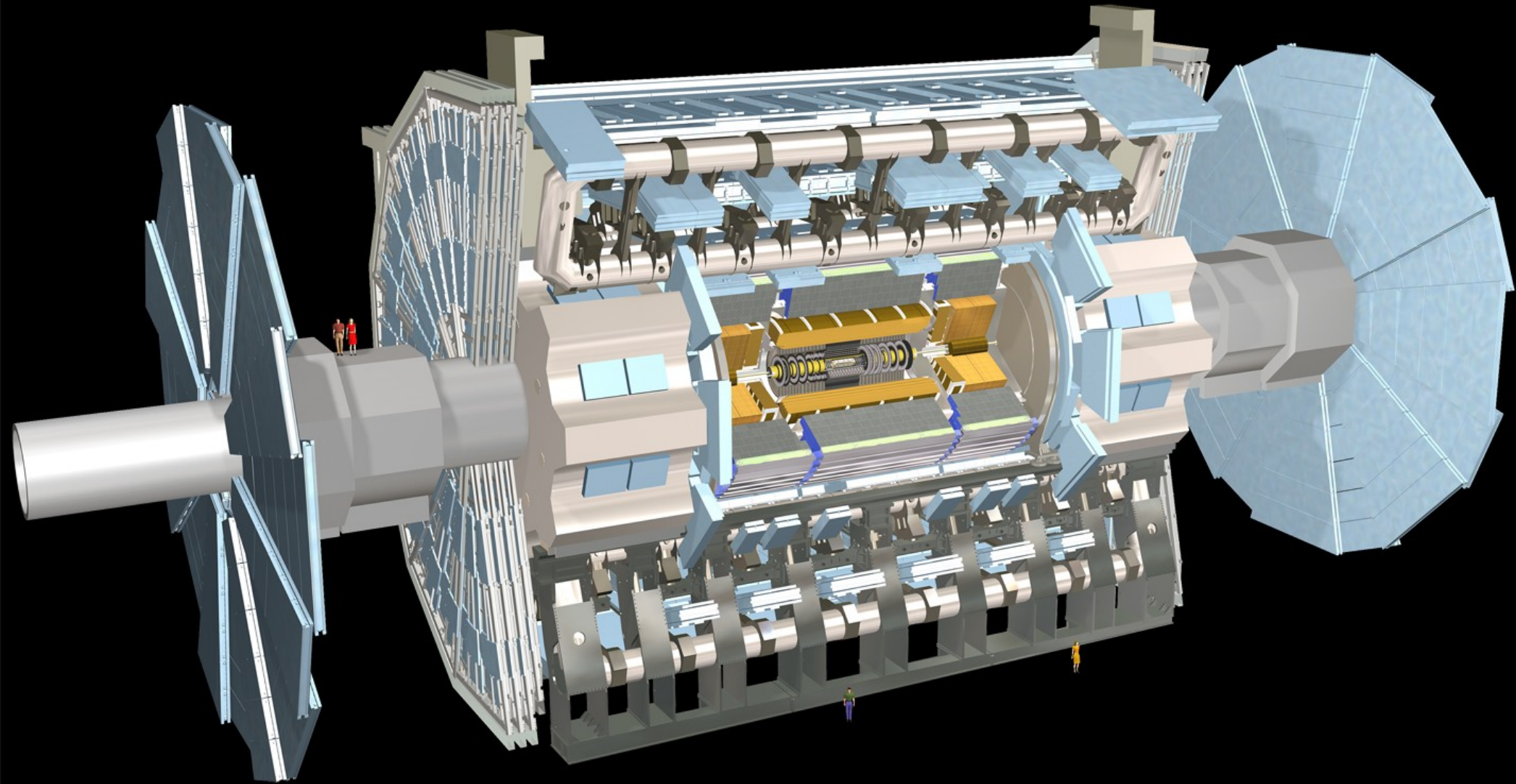


Large Hadron Collider beauty experiment

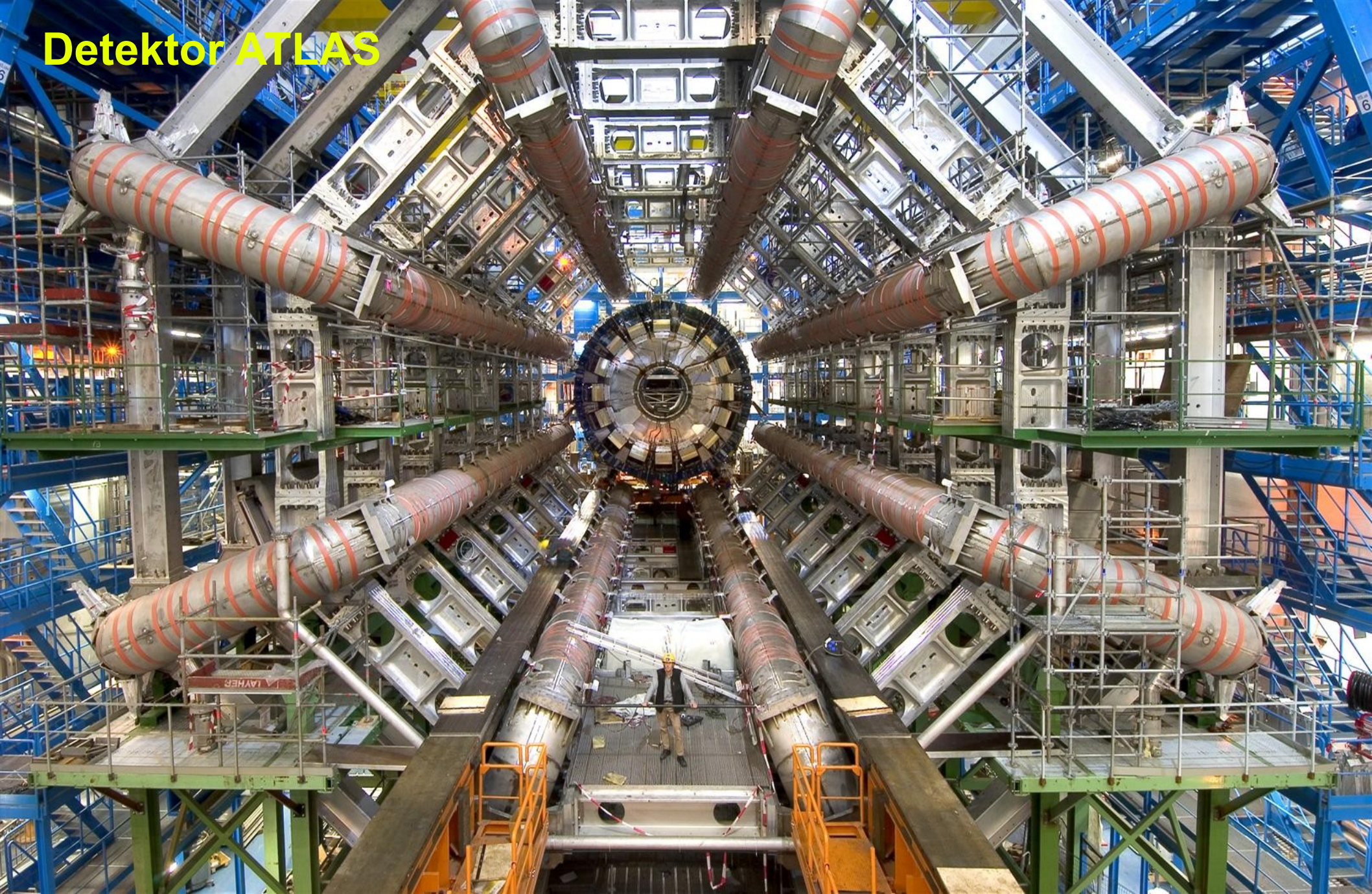
European Organization for Nuclear Research



Detektor ATLAS



Detektor ATLAS



Powstaje pytanie, jak odróżnić elektrony (pozytony) oraz miony od innych cząstek?

Można tego dokonać analizując ślady pozostawione przez cząstki w detektorze.



asfalt

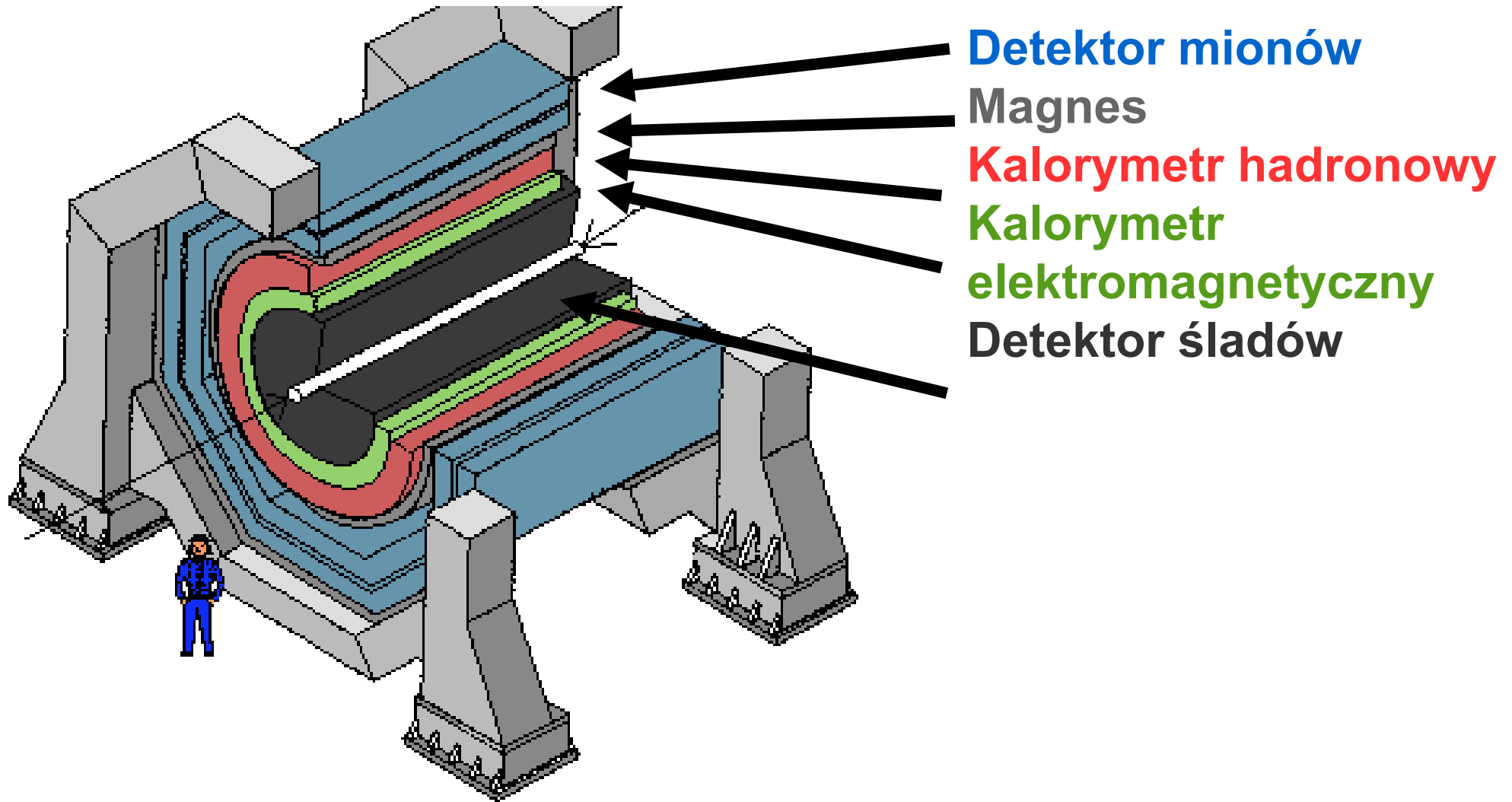


śnieg

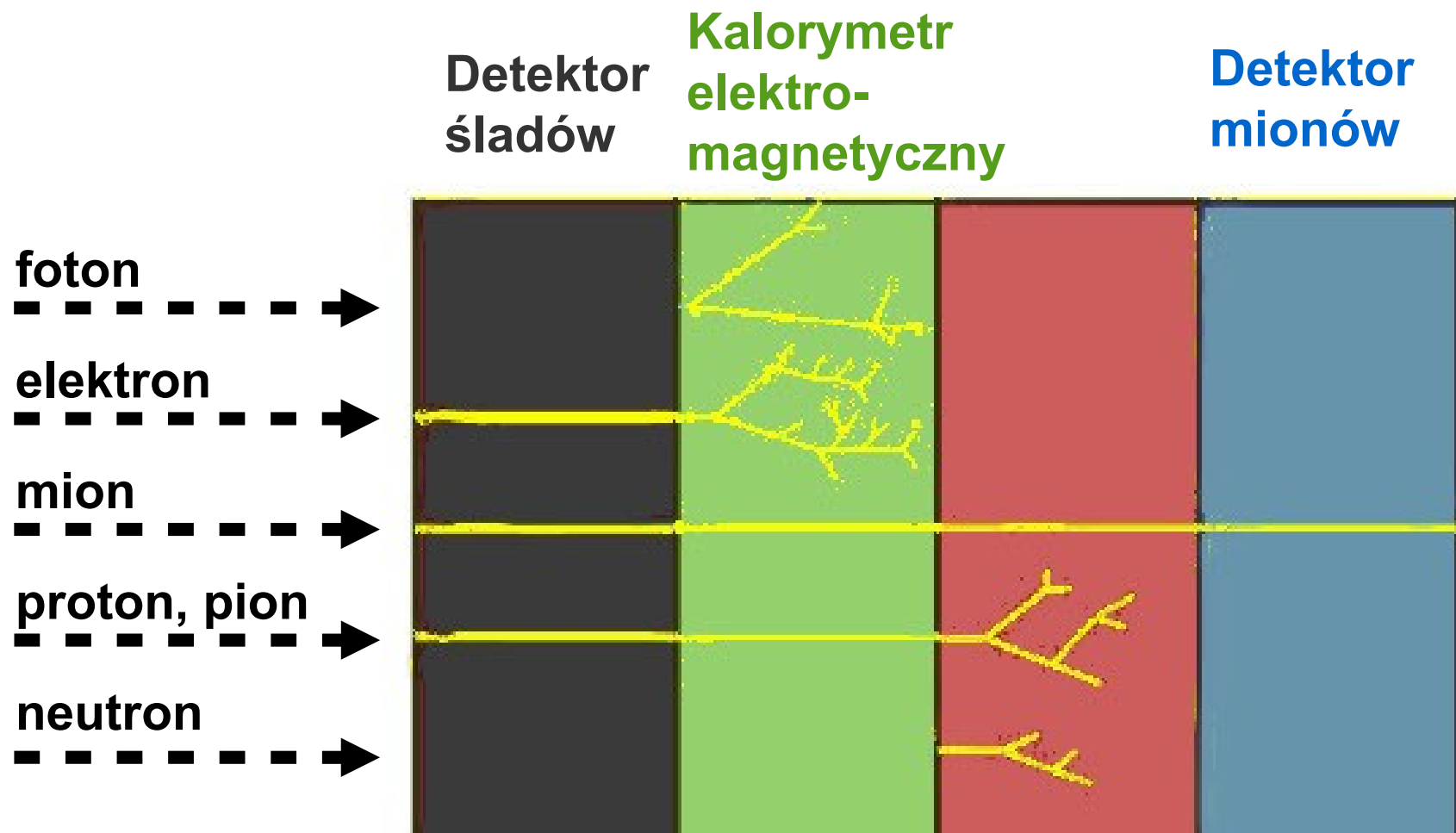


śnieg

Elementy detektora w eksperymentach fizyki cząstek elementarnych



Ślady w detektorze pozostawiane przez różne typy cząstek



neutrino ?? wykrywane na podstawie brakującego pędu

Kalorymetr hadronowy

Obserwowanie produktów rozpadów bozonu Z i Higgsa: e^+e^- , $\mu^+\mu^-$, $\gamma\gamma$

Detektor śladowy:

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

Kalorymetr elektromagnetyczny:

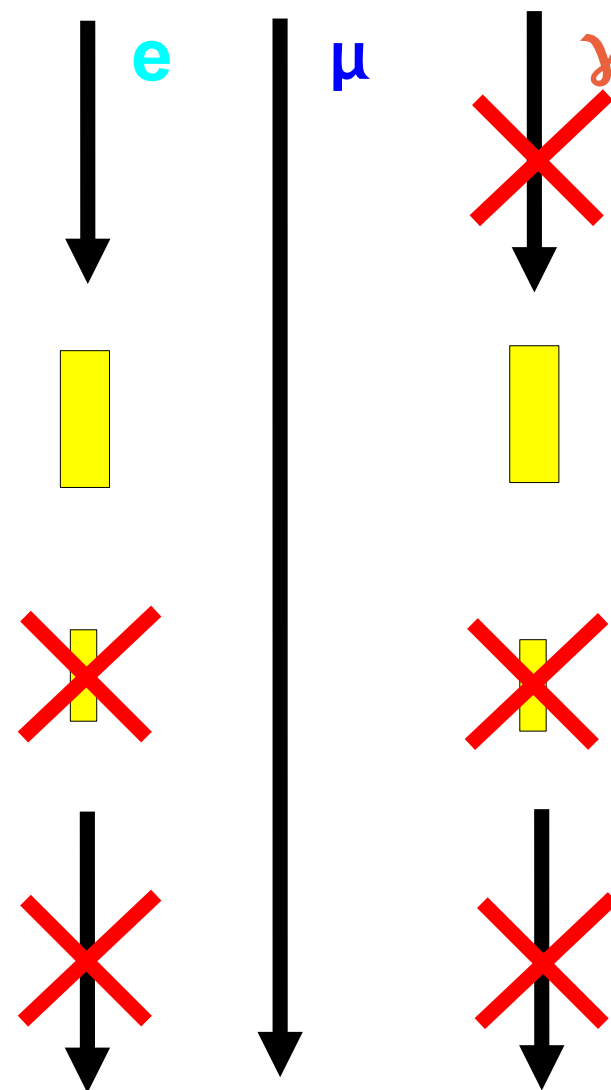
- **elektron**: wyraźny depozyt energii
- **mion**: widoczny ślad
- **foton**: wyraźny depozyt energii

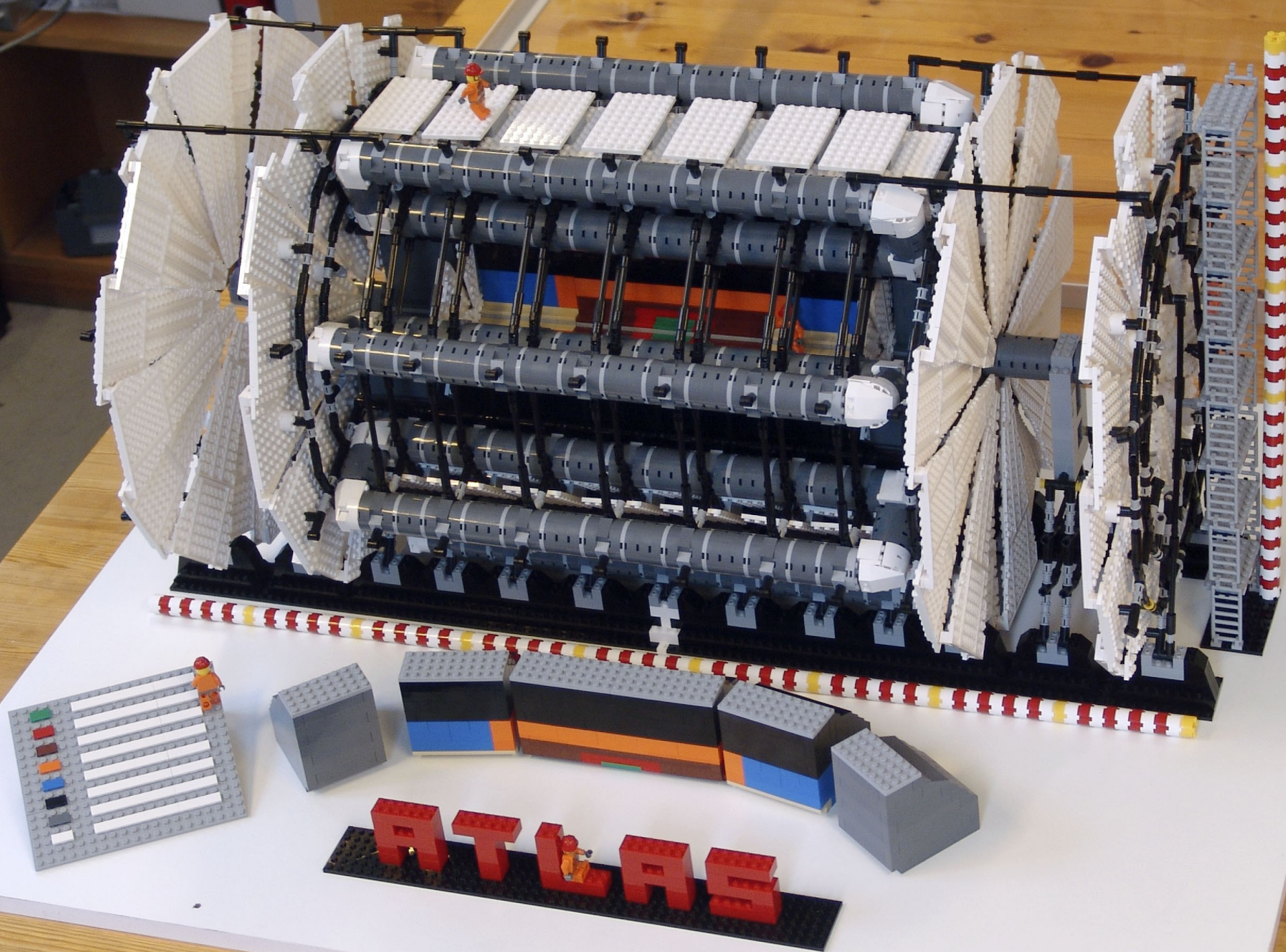
Kalorymetr hadronowy:

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

Detektor mionowy:

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





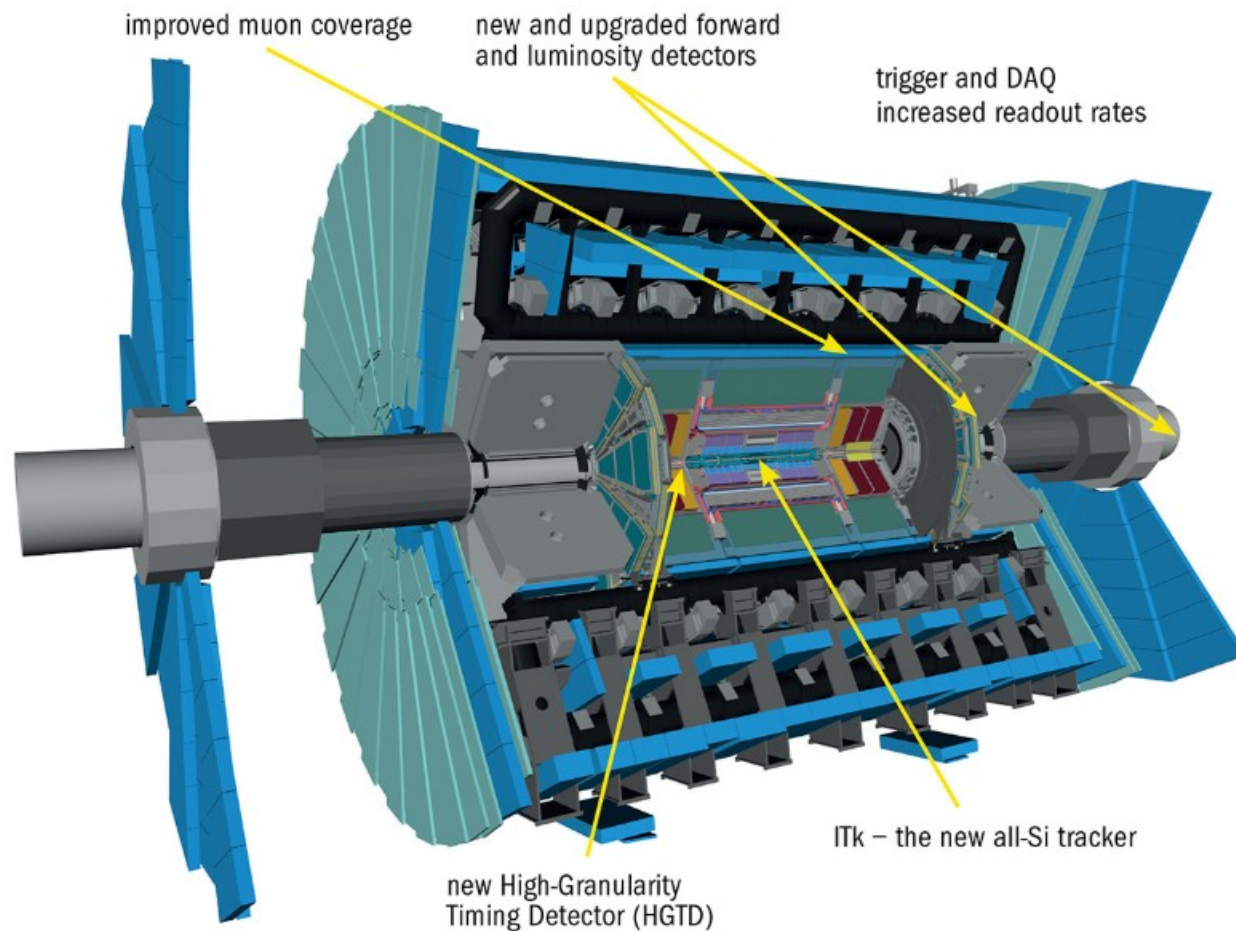
Backup

HL-LHC

2026 Koniec run 3

2030 Rozpoczęcie HL-LHC

~2041 Zakończenie HL-LHC



Źródło: <https://atlas.cern/Updates/Feature/High-Luminosity-ATLAS>

FCC

Długość tunelu ~90 km

2027–2028: Podjęcie decyzji przez CERN Member States oraz międzynarodowych partnerów

2030s: Planowane rozpoczęcie konstrukcji

Mid-2040s: Rozpoczęcie działania FCC-ee (działanie przez ~15 lat)

2070s: Rozpoczęcie działania FCC-hh (działanie przez ~25 lat)

