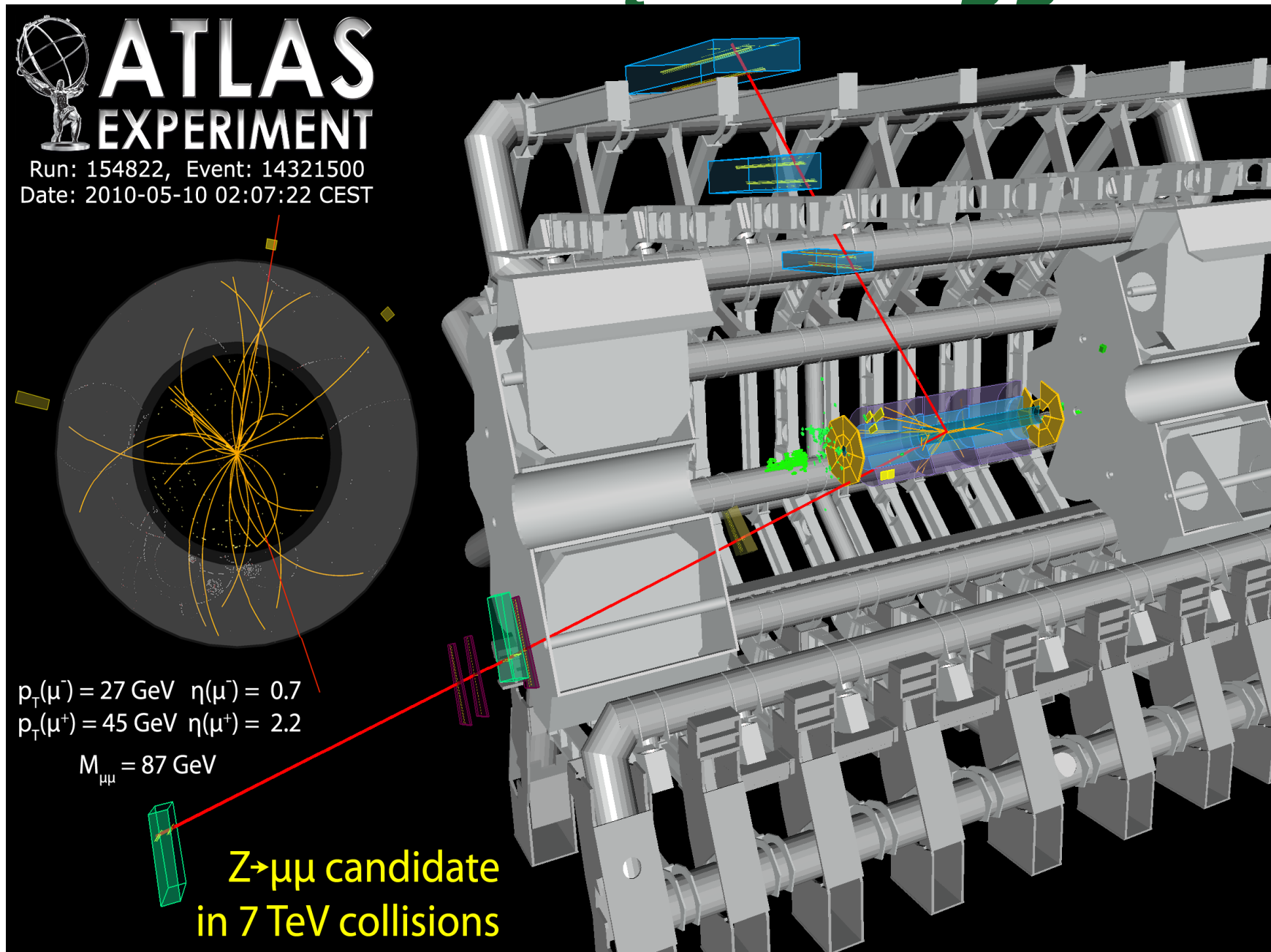


Bozon Z i cząstka Higgsa



Model Standardowy

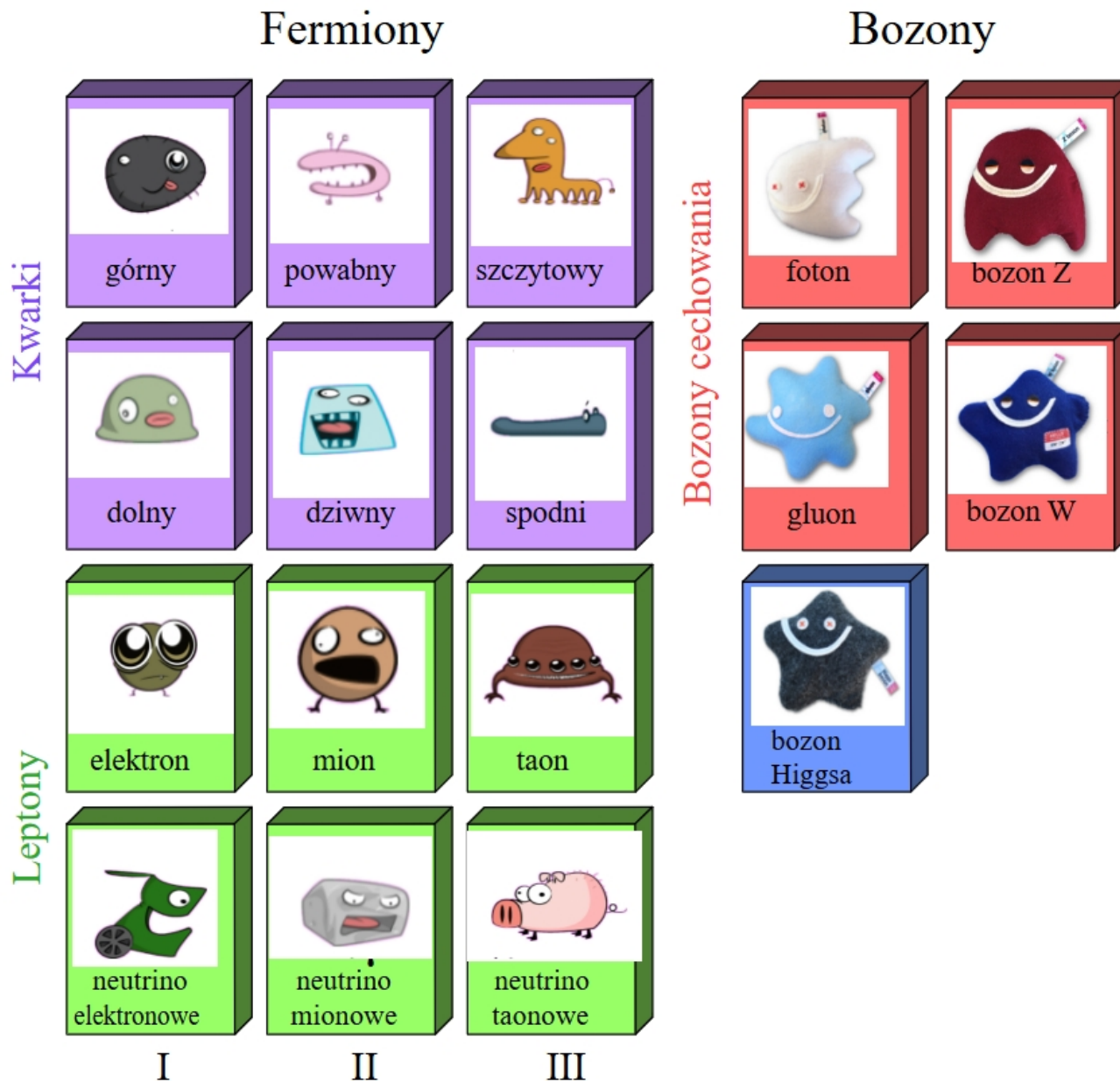
Fermiony			Bozony			
Kwarki	2.3 MeV/c² ²/₃ u ¹/₂ górny	1.27 GeV/c² ²/₃ c ¹/₂ powabny	173.5 GeV/c² ²/₃ t ¹/₂ szczytowy	Bozony cechowania	0 0 1 γ foton	91.2 GeV/c² 0 1 Z⁰ bozon Z
	4.8 MeV/c² ⁻¹/₃ d ¹/₂ dolny	95 MeV/c² ⁻¹/₃ s ¹/₂ dziwny	4.2 GeV/c² ⁻¹/₃ b ¹/₂ spodni		0 0 1 g gluon	80.4 GeV/c² ^{±1} 1 W[±] bozon W
	0.511 MeV/c² ⁻¹ e ¹/₂ elektron	105.7 MeV/c² ⁻¹ μ ¹/₂ mion	1.777 GeV/c² ⁻¹ τ ¹/₂ taon		?126 GeV/c² 0 0 H⁰ bozon Higgsa	
Leptony	<2.2 eV/c² 0 ¹/₂ ν_e neutrino elektronowe	<170 keV/c² 0 ¹/₂ ν_μ neutrino mionowe	<15.5 MeV/c² 0 ¹/₂ ν_τ neutrino taonowe			
	I	II	III			

Masa

Ładunek

Spin

Model Standardowy



Model Standardowy

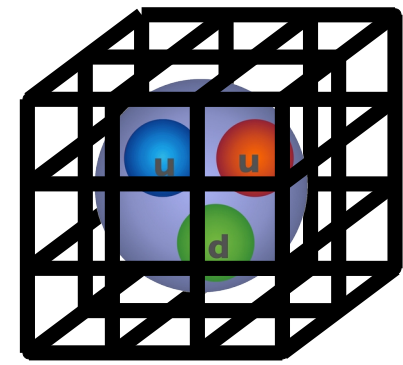


Uwięzienie kwarków

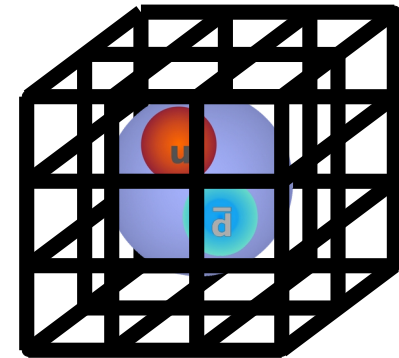
Kwarki występują jedynie w stanie związanym:

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

Nazywamy to uwięzieniem kwarków.



barion
3 kwarki



mezon
kwarki + antykwark

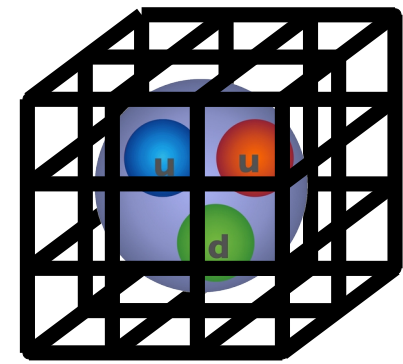
Model Standardowy

Kwarki występują jedynie w stanie związanym:

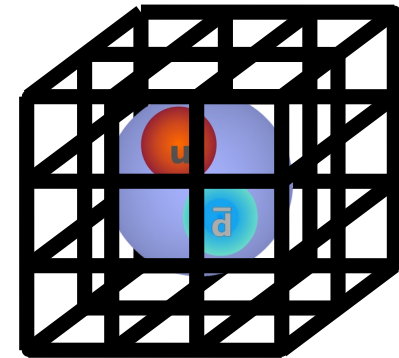
- ♦ bariony - 3 kwarki
(np. proton: uud, neutron: udd)
- ♦ mezony - kwark + antykwark

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

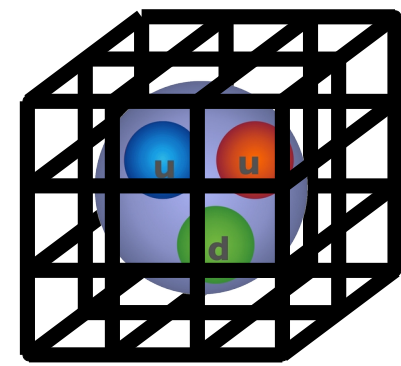
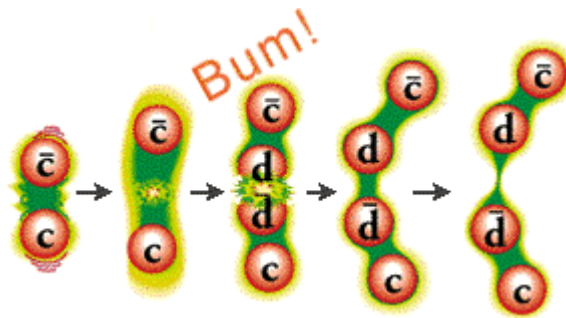
Model Standardowy

Kwarki występują jedynie w stanie związanym:

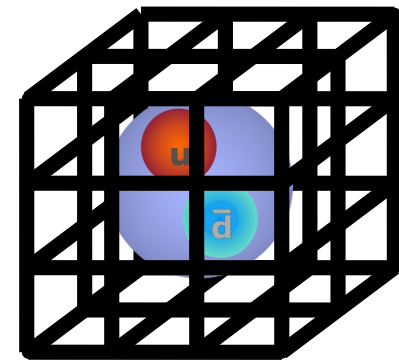
- ♦ bariony - 3 kwarki
(np. proton: uud, neutron: udd)
- ♦ mezony - kwark + antykwark

Dla ułatwienia przypisuje się kwarkom kolory 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:

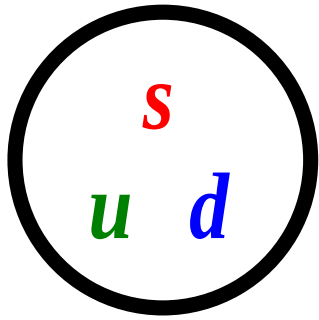


barion
3 kwarki



mezon
kwarki + antykwark

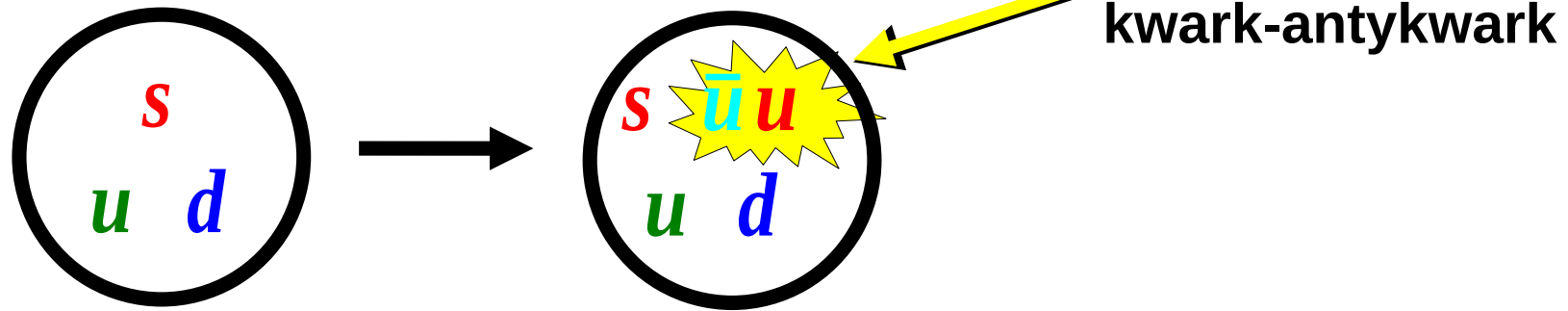
Model Standardowy - rozpady



Λ

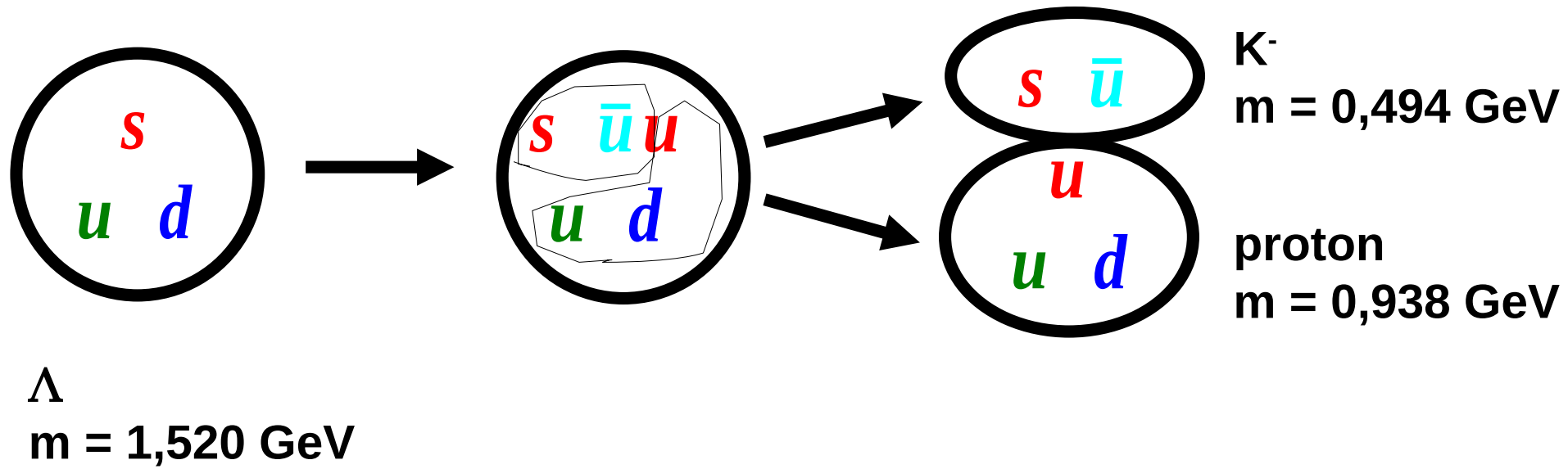
$m = 1,520 \text{ GeV}$

Model Standardowy - rozpady

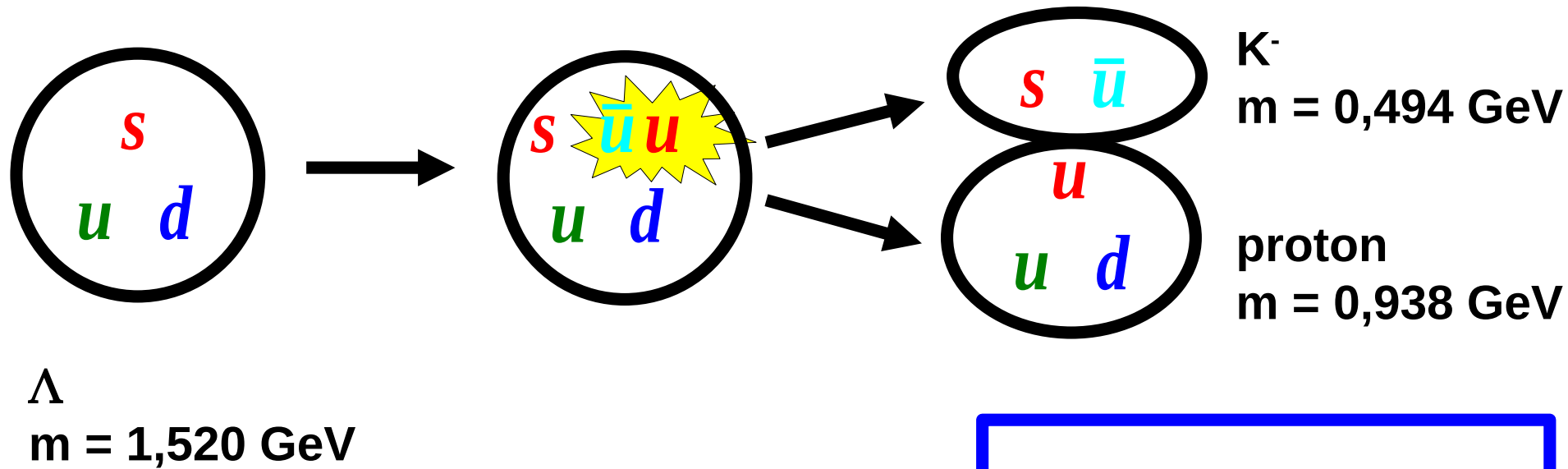


Λ
 $m = 1,520 \text{ GeV}$

Model Standardowy - rozpady



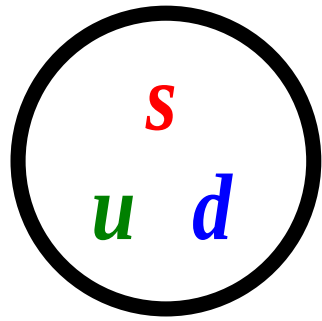
Model Standardowy - rozpady



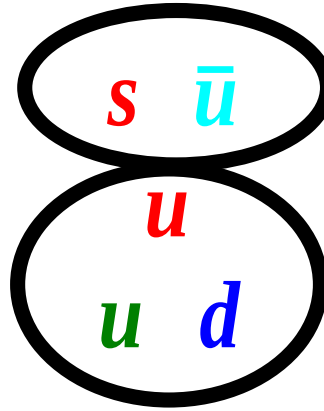
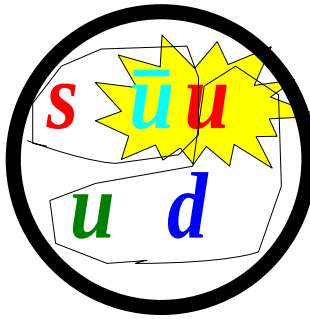
suma mas = 1,432 GeV
 zachowane:
 liczba barionów
 liczba kwarków s

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

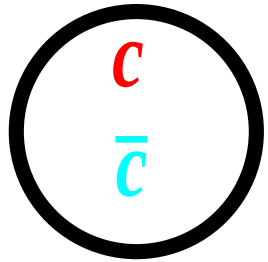
Model Standardowy - rozpady



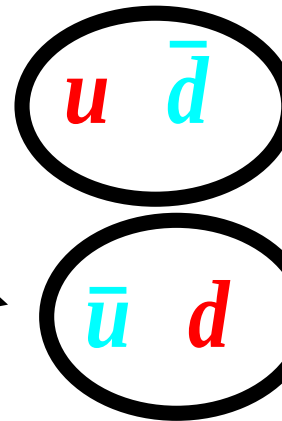
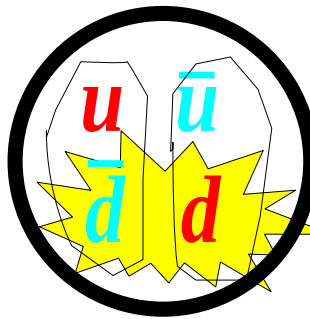
Λ
m = 1,520 GeV



K^-
m = 0,494 GeV
proton
m = 0,938 GeV



J/ψ
m = 3,097 GeV



ρ^+
m = 0,767 GeV
 π^-
m = 0,140 GeV

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

Bozon Z



Ładunek – 0
Masa $\sim 91,2 \text{ GeV}$
Czas życia $\sim 3 \times 10^{-25} \text{ s}$

Jak go rozpoznać? – Poprzez cząstki, na które się rozpada!

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.

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)~~

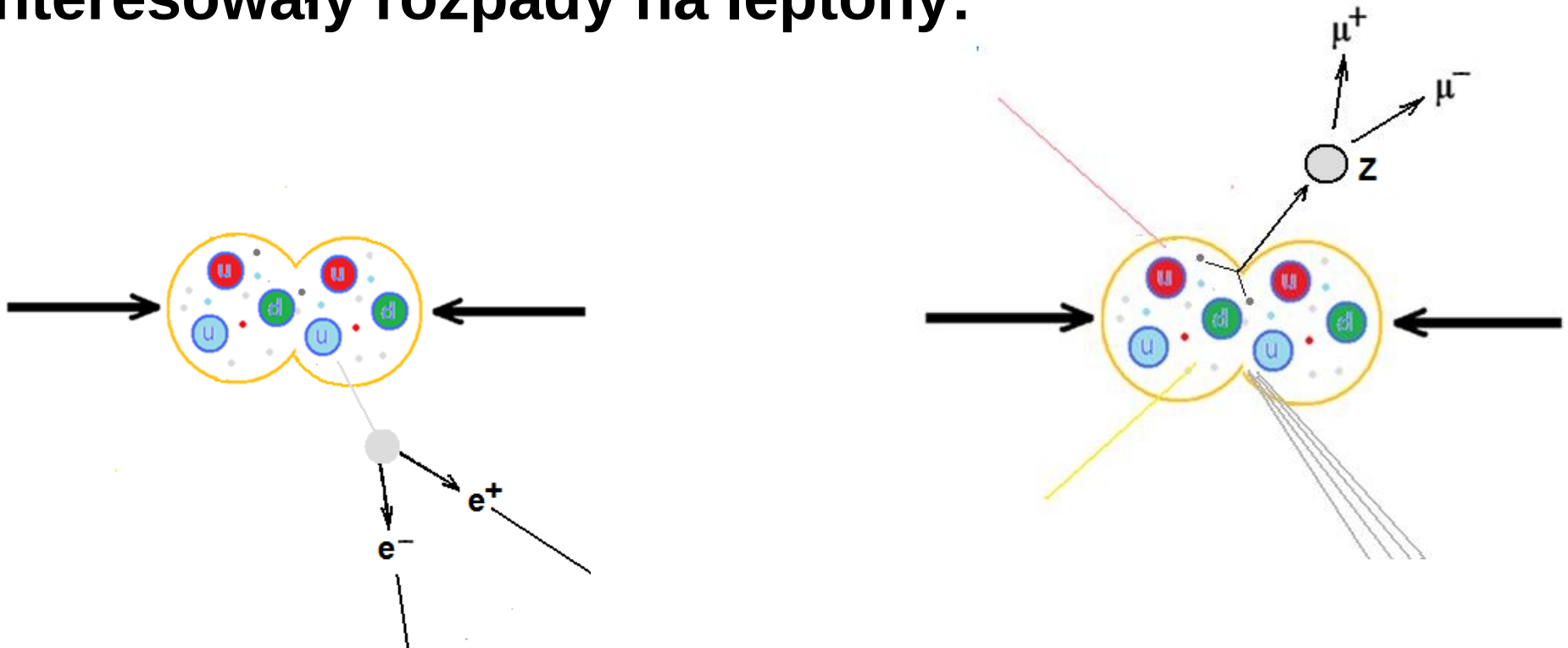
~~♦ na kwarki: $u \bar{u}$, $d \bar{d}$, $s \bar{s}$, $c \bar{c}$, $b \bar{b}$ (15 możliwości)~~



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

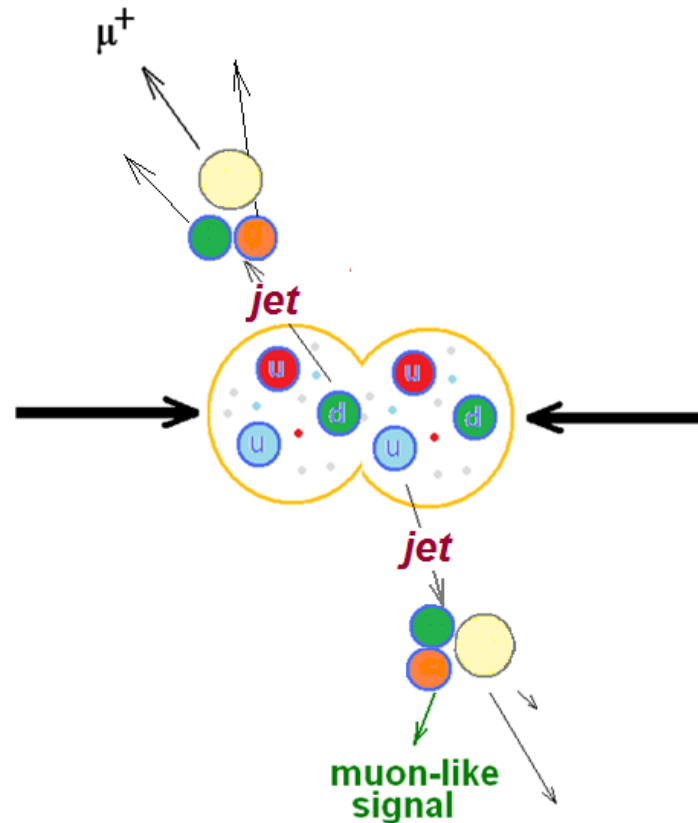
Bozon Z jest produkowany w LHC w zderzeniach protonów.

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:

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

($c = 1$)

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

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:

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

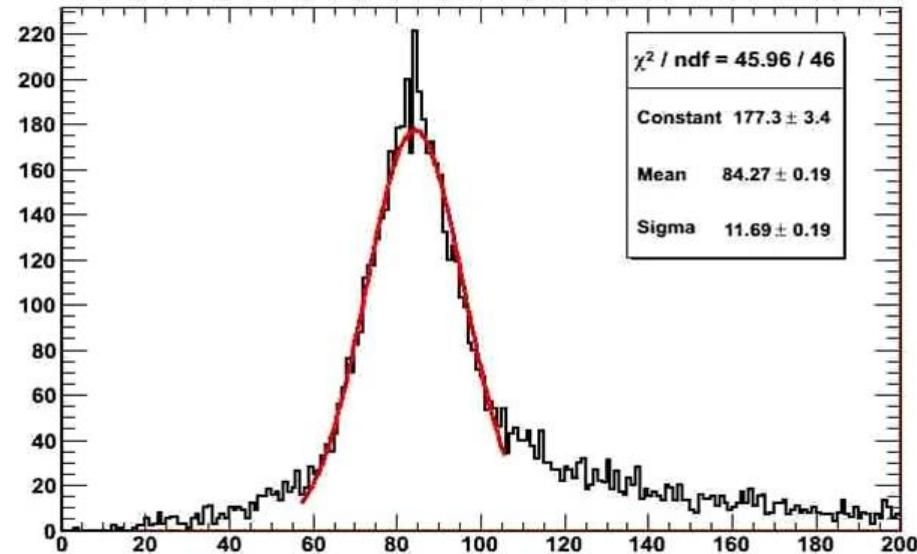
Dokonując pomiaru pędu i energii produktów rozpadu, możemy poznać masę cząstki, z której powstały.

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:

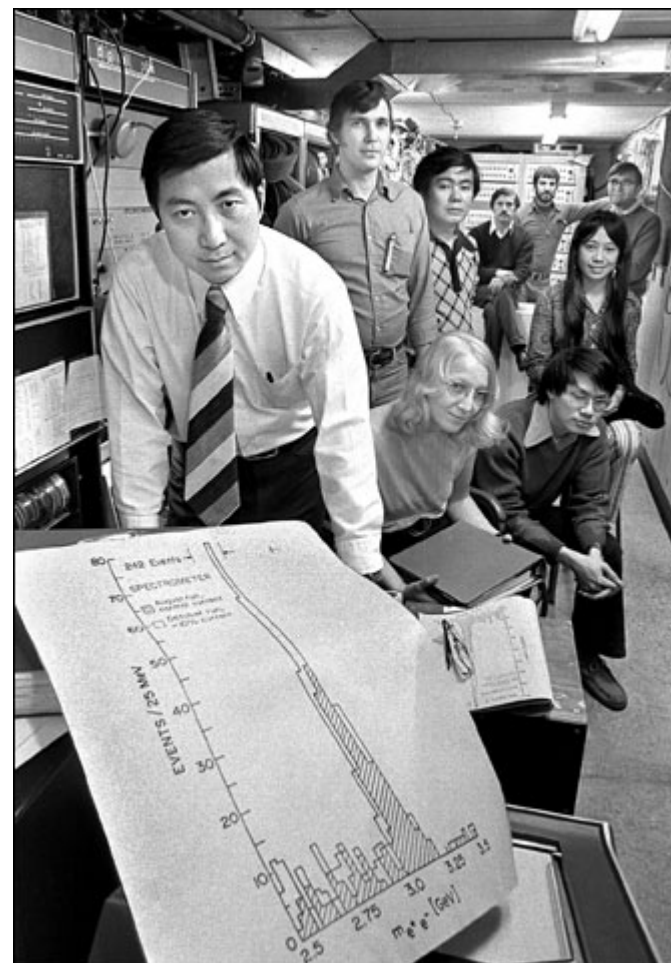
$$2.4952 \pm 0.0023 \text{ GeV} \quad (\text{bez uwzględnienia błędów pomiarowych})$$

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^- .

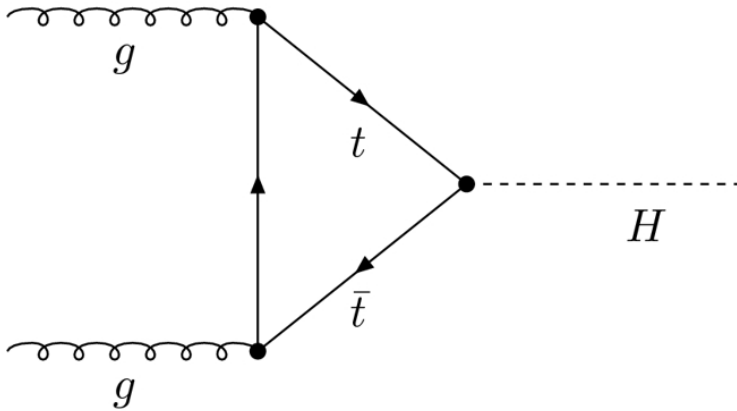
Nowych cząstek można spodziewać się zwłaszcza wtedy, gdy zwiększamy energię zderzenia i mamy szansę wyprodukować cząstki o masie większej niż dotychczas.



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

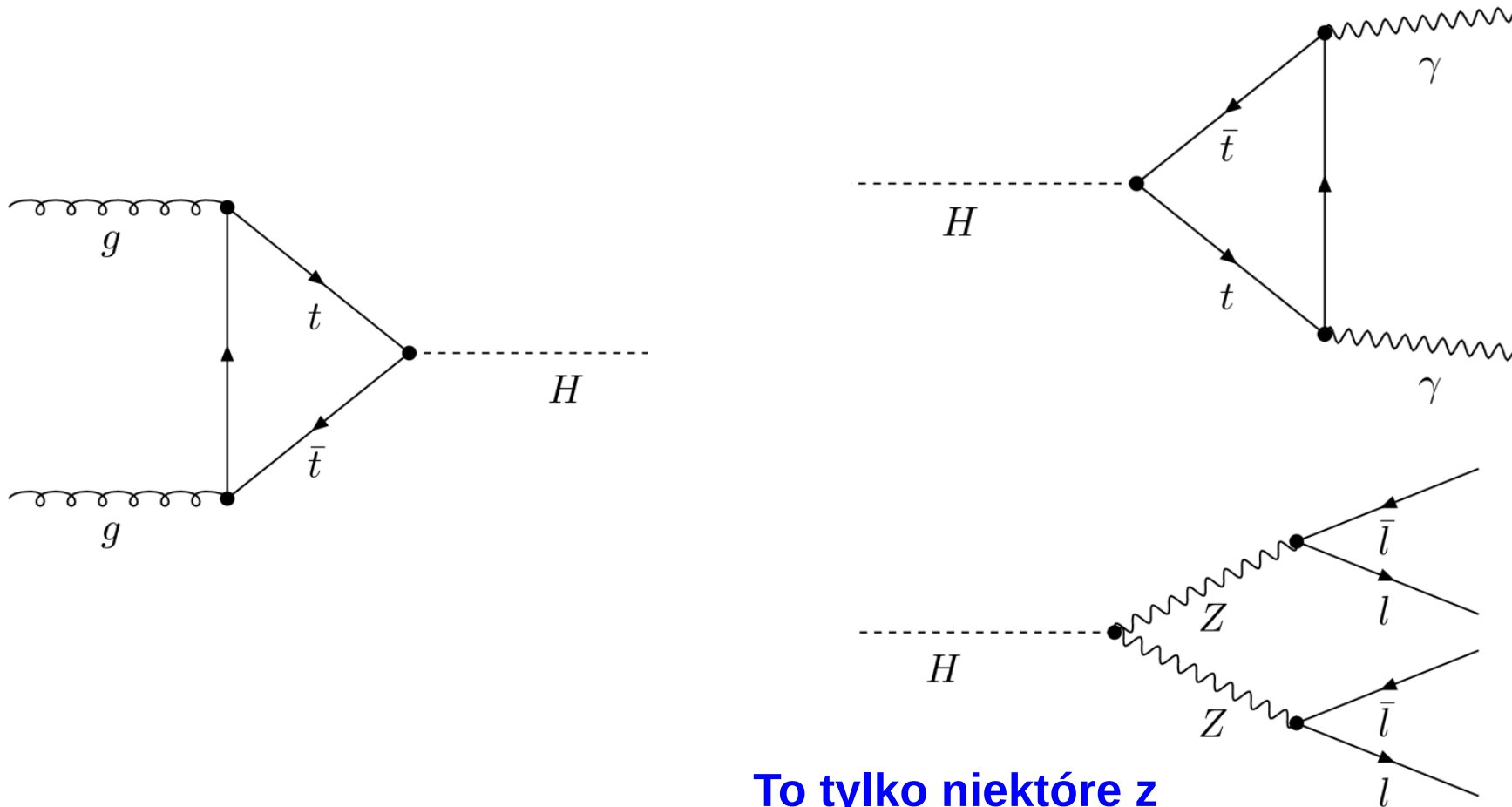
Powstanie i rozpady cząstki Higgsa:

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

Bozon Higgsa

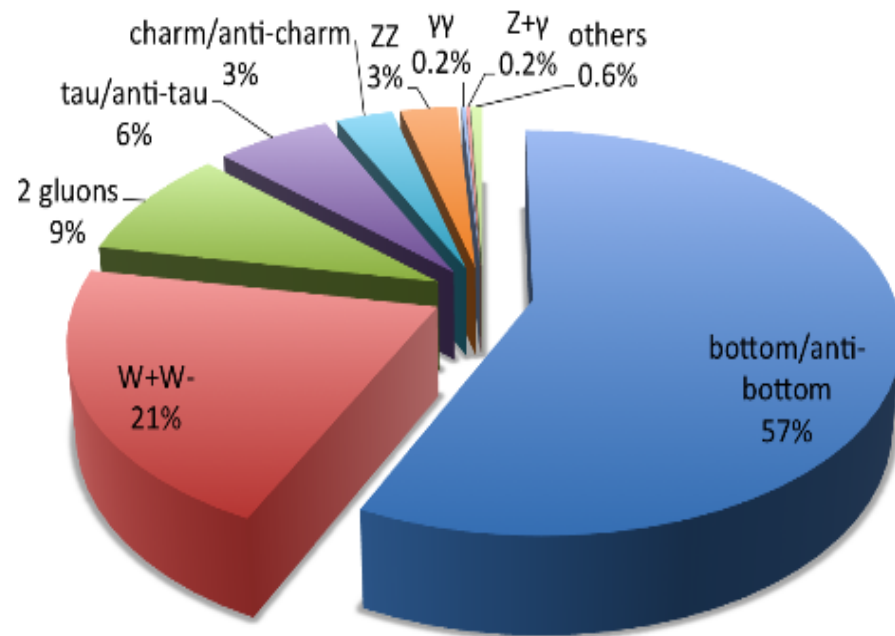
Ładunek – 0

Masa ~ 125 GeV

Czas życia ~ 10^{-22} s



Decays of a 125 GeV Standard-Model Higgs boson



Bozon Higgsa

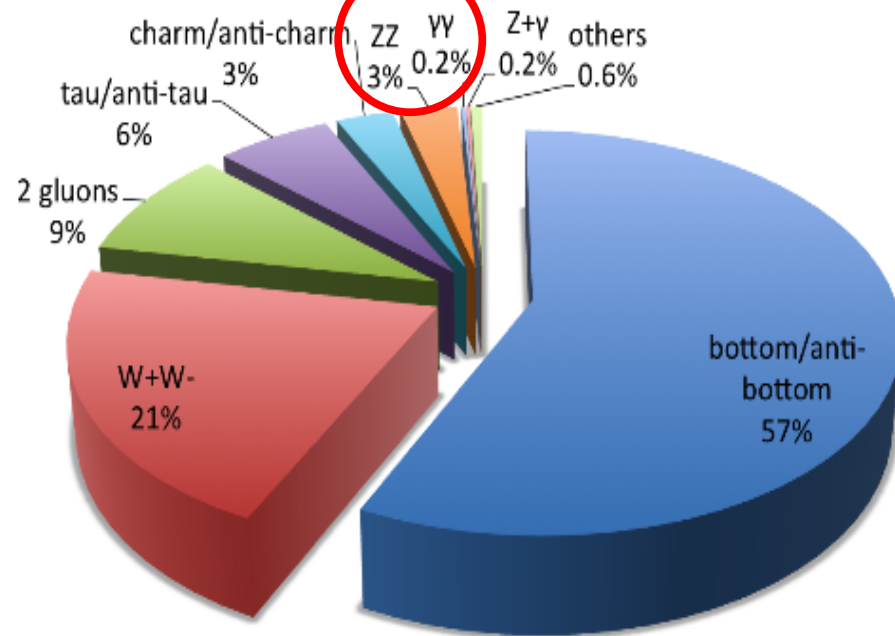
Ładunek – 0

Masa ~ 125 GeV

Czas życia ~ 10^{-22} s



Decays of a 125 GeV Standard-Model Higgs boson



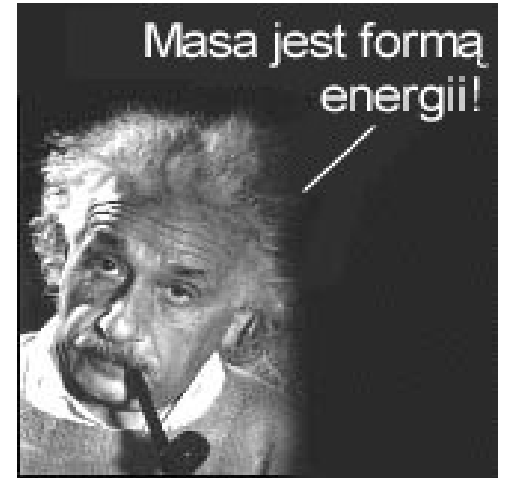
Przepis na wytwarzanie cząstek

1. Równanie Einsteina

$$E=mc^2$$

(E-energia, m-masa, c-prędkość światła)

→ energię można zamienić na materię,
a materię na energię!



Jednak uderzenie np. młotkiem w stół nie wytworzy nowych cząstek -> aby odtworzyć warunki panujące we wczesnych fazach rozwoju Wszechświata, potrzebną energię trzeba skoncentrować w odpowiednio małym obszarze!

Potrafimy to zrobić zderzając rozpędzone cząstki.

W wyniku zderzenia wyzwala się energia z której mogą powstać nowe cząstki!

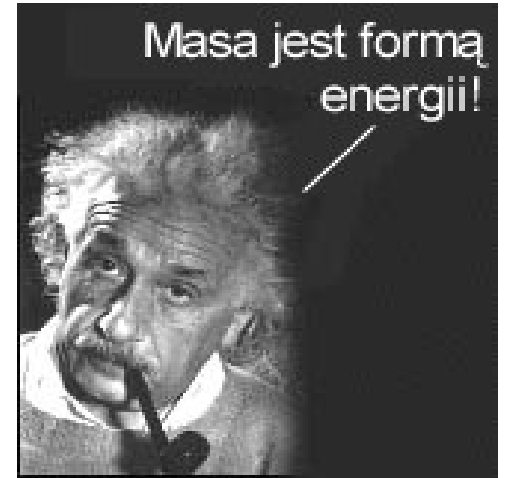
Przepis na wytwarzanie cząstek

1. Równanie Einsteina

$$E=mc^2$$

(E-energia, m-masa, c-prędkość światła)

→ energię można zamienić na materię,
a materię na energię!



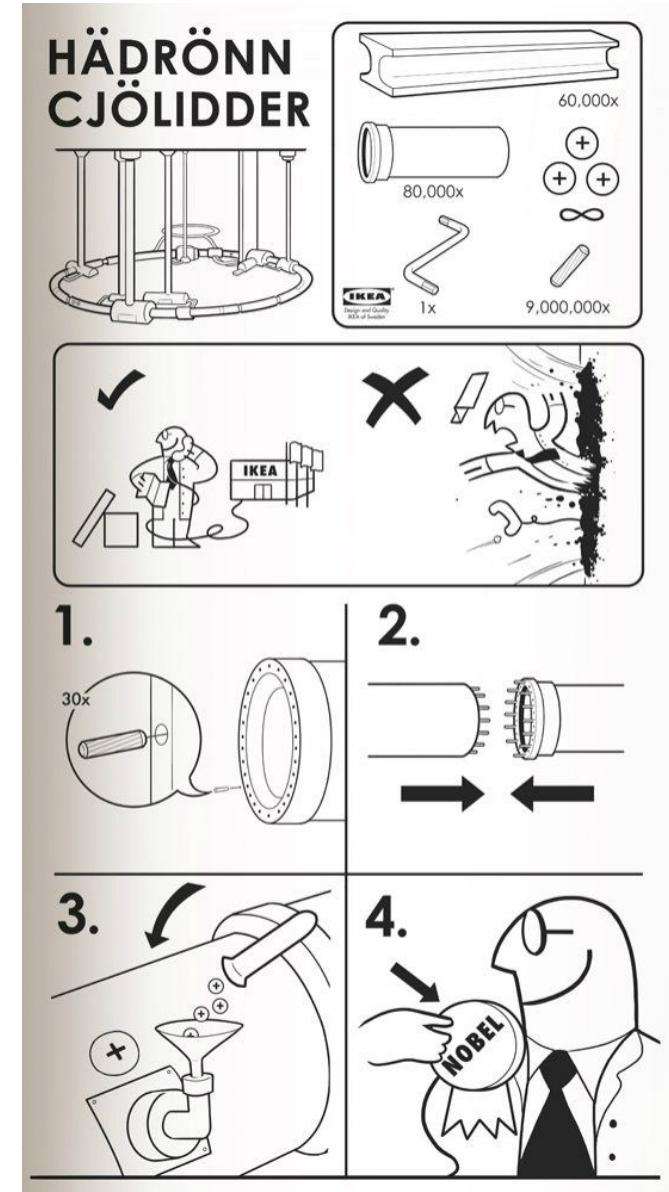
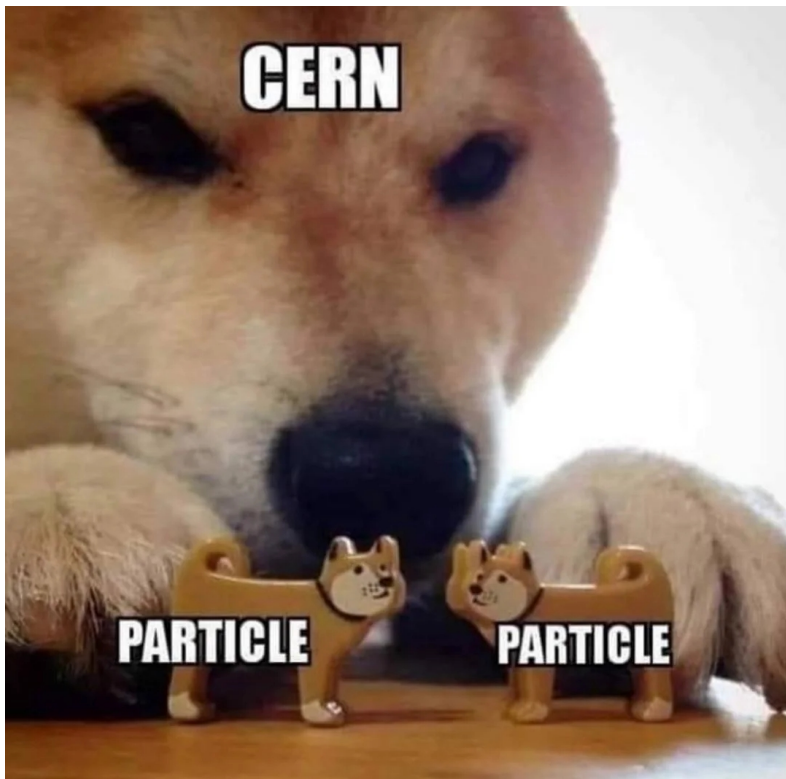
2. Odpowiednie warunki: akcelerator!

Jednak uderzenie np. młotkiem w stół nie wytworzy nowych cząstek -> aby odtworzyć warunki panujące we wczesnych fazach rozwoju Wszechświata, potrzebną energię trzeba skoncentrować w odpowiednio małym obszarze!

Potrafiemy to zrobić zderzając rozpędzone cząstki.

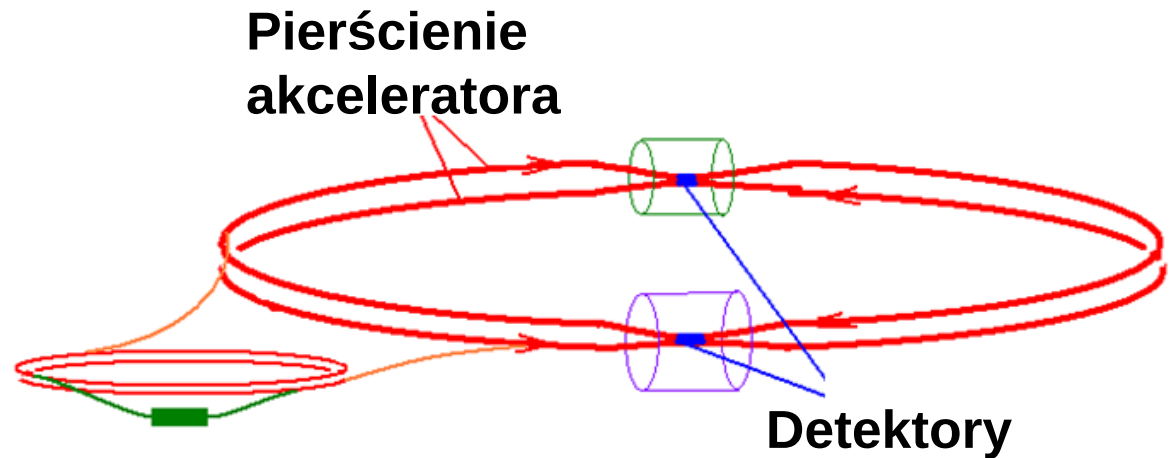
W wyniku zderzenia wyzwala się energia z której mogą powstać nowe cząstki!

Wielki Zderzacz Hadronów (LHC)



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

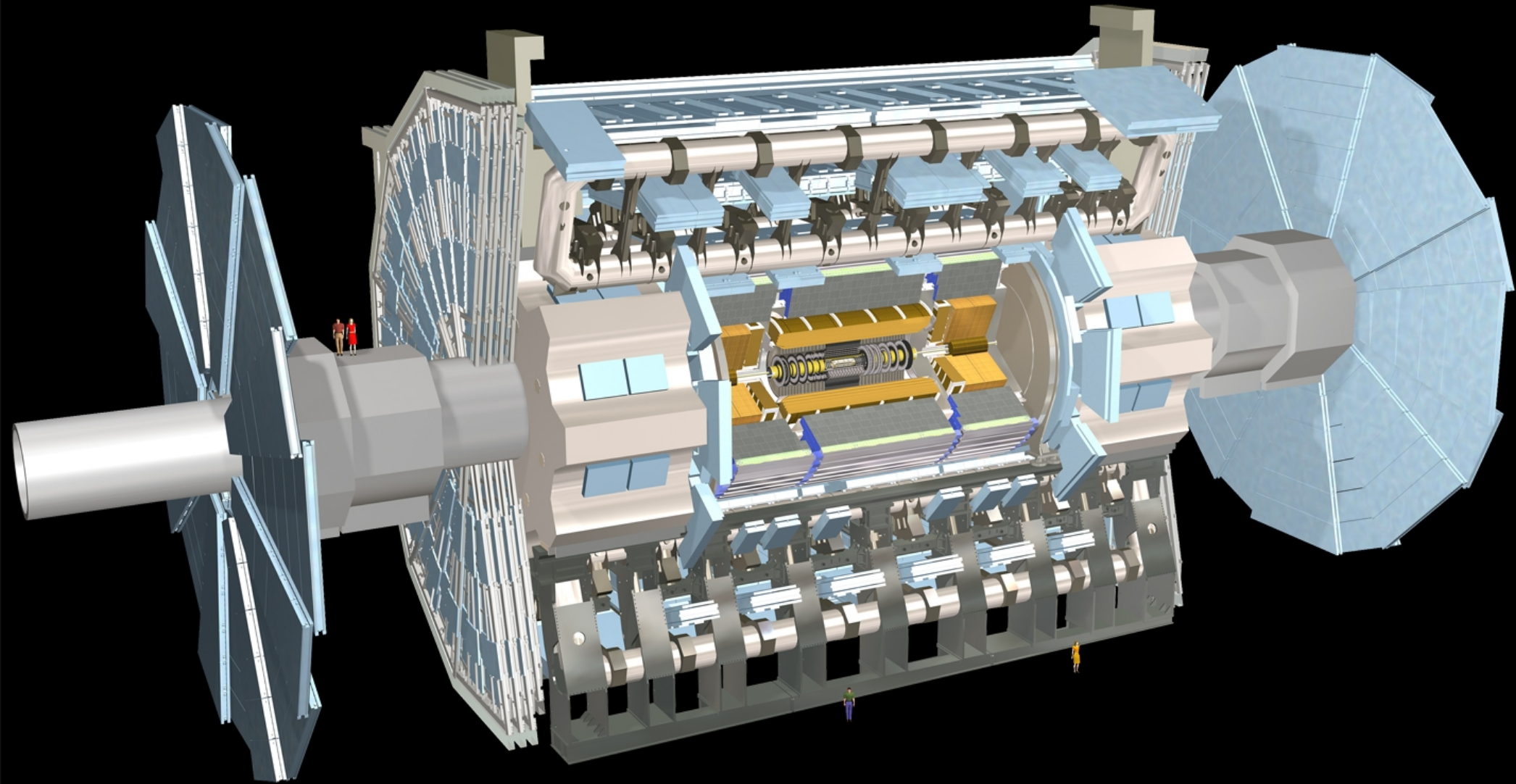


Large Hadron Collider beauty experiment

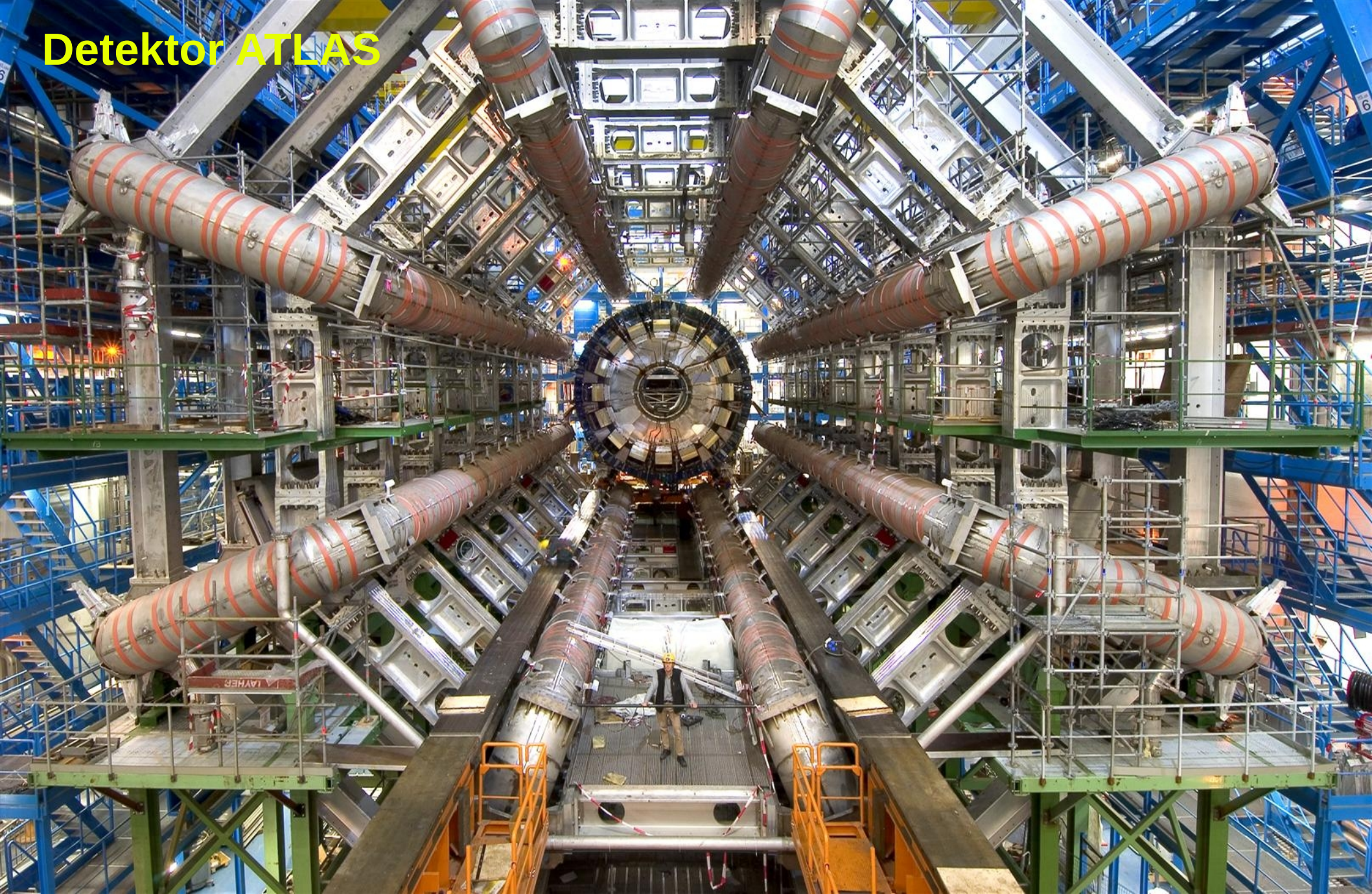
European Organization for Nuclear Research



Detektor ATLAS



Detektor ATLAS



Jak zobaczyć cząstki?

Śledzić



Umożliwia pomiar min.
pędu i ładunku cząstki

Jak zobaczyć cząstki?

Śledzić



Umożliwia pomiar min. pędu i ładunku cząstki

Łapać



Uzyskamy informację na temat energii jaką miała cząstka

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

Można tego dokonać analizując ślady pozostawione przez cząstki w detektorze.



asfalt

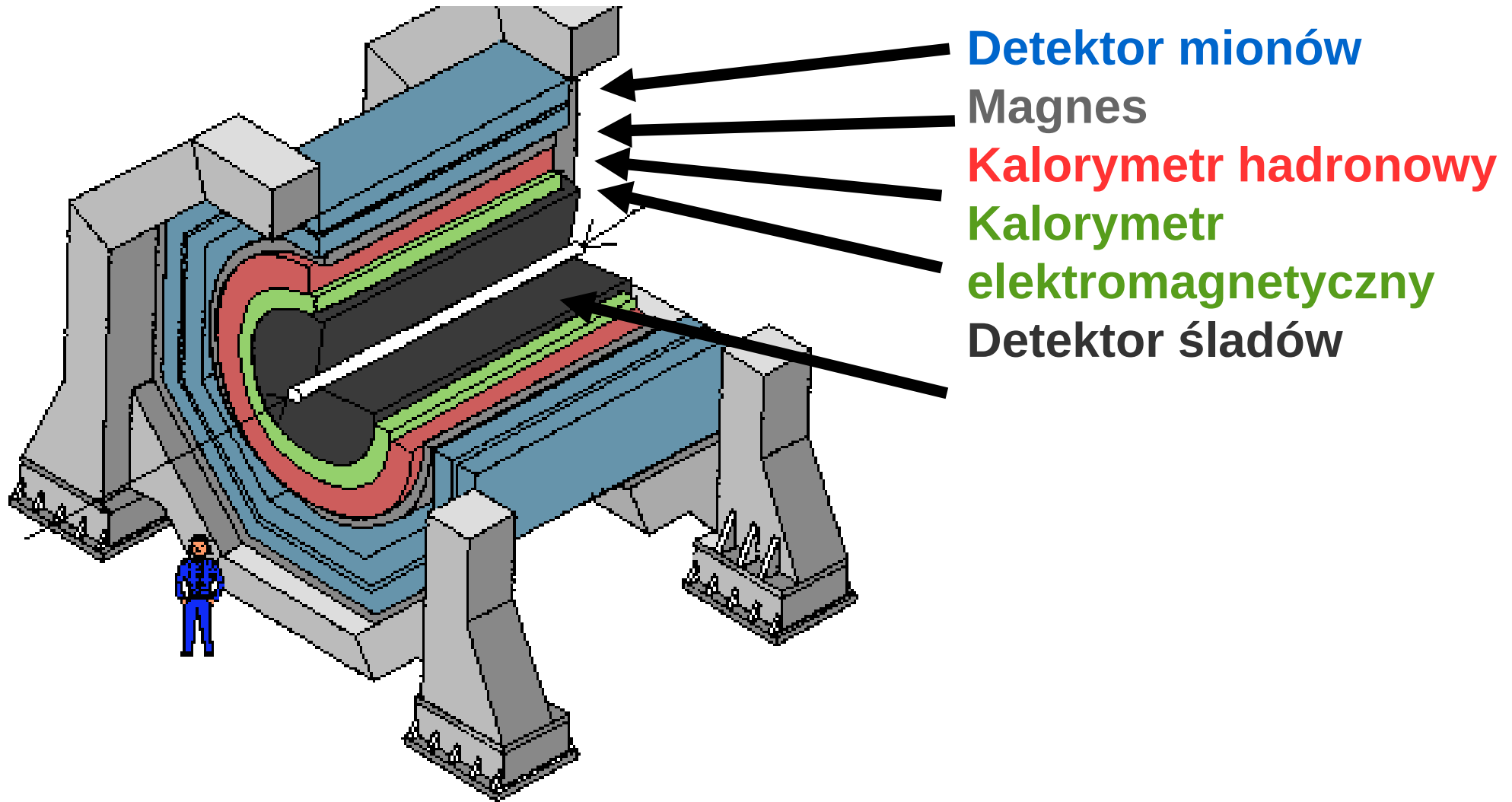


śnieg

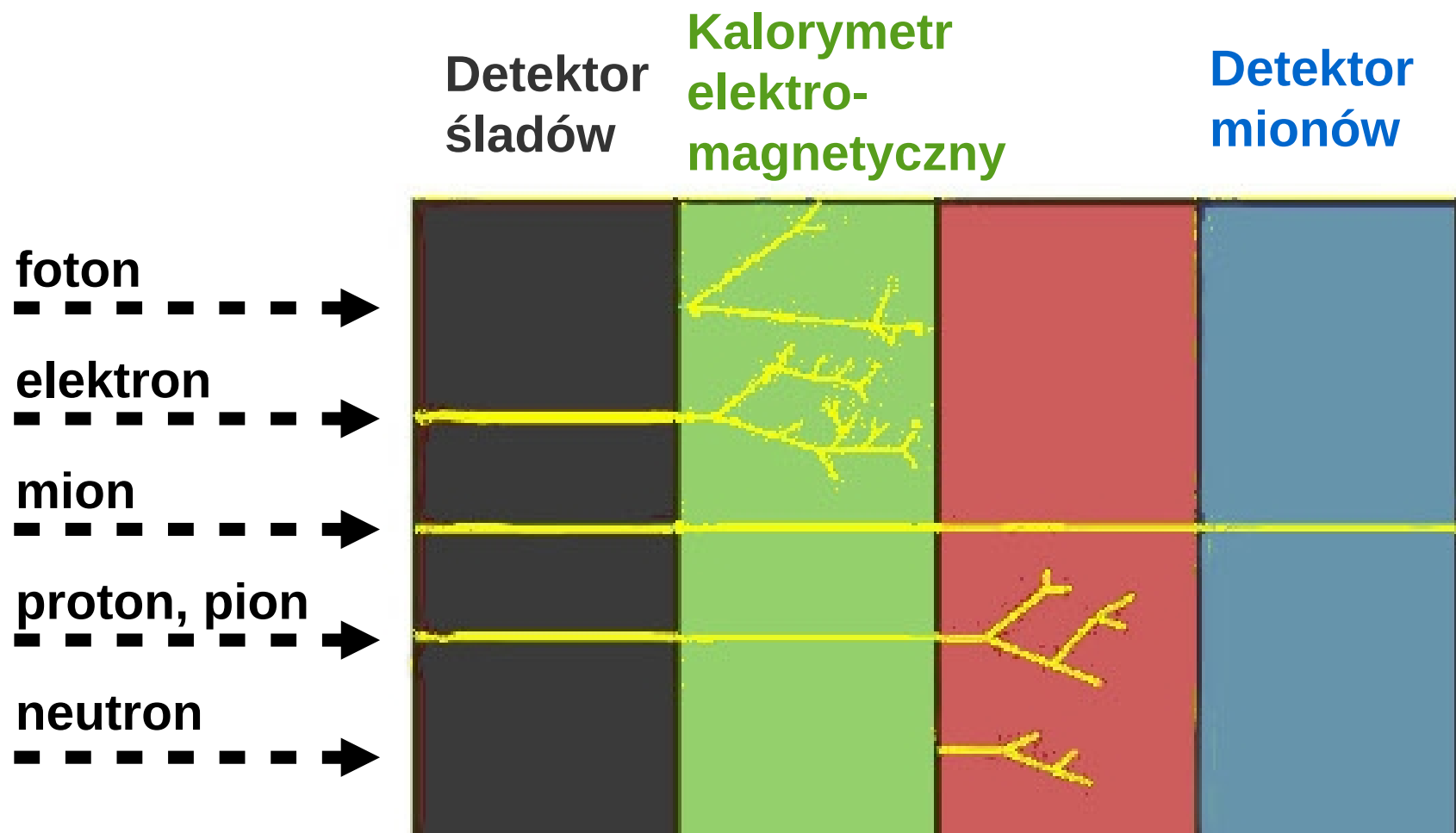


śnieg

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:

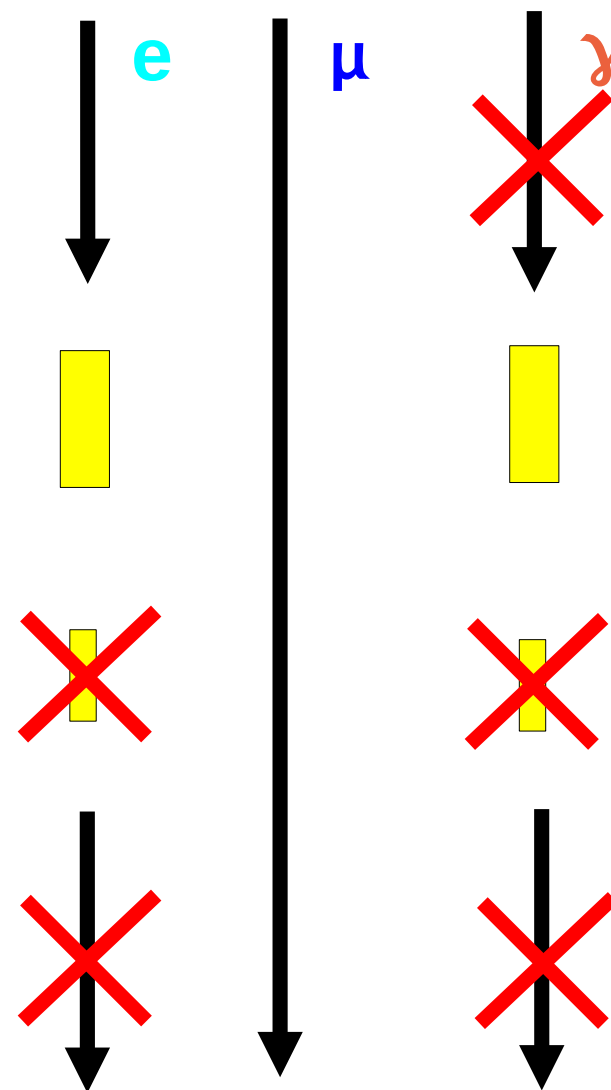
- **elektron**: wyraźny depozyt energii
- **mion**: widoczny ślad
- **foton**: wyraźny depozyt energii

Kalorymetr hadronowy:

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

Detektor mionowy:

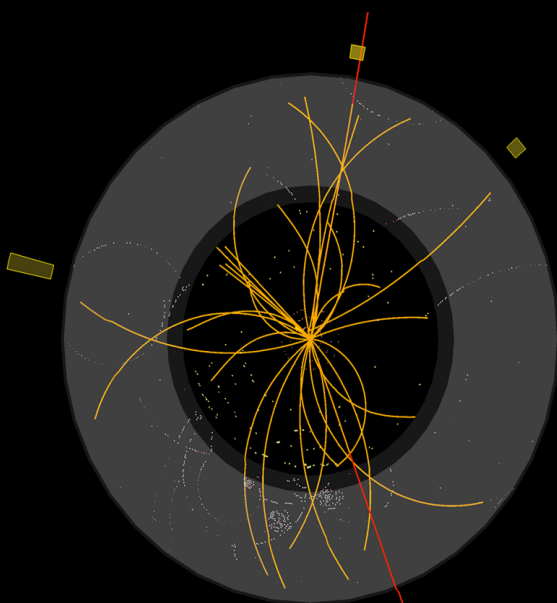
- **elektron**: brak śladu
- **mion**: widoczny ślad
- **foton**: brak śladu





ATLAS EXPERIMENT

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

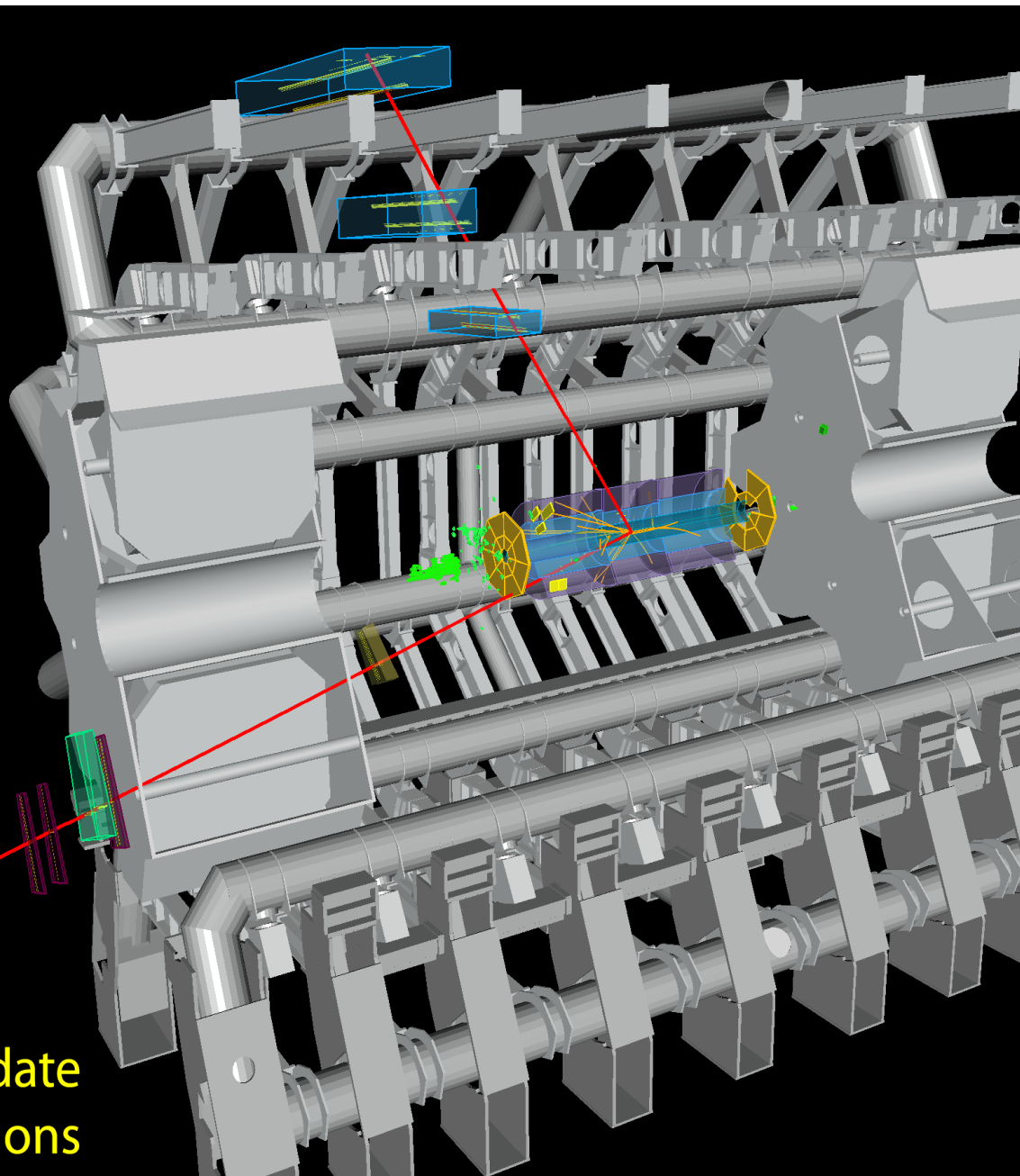


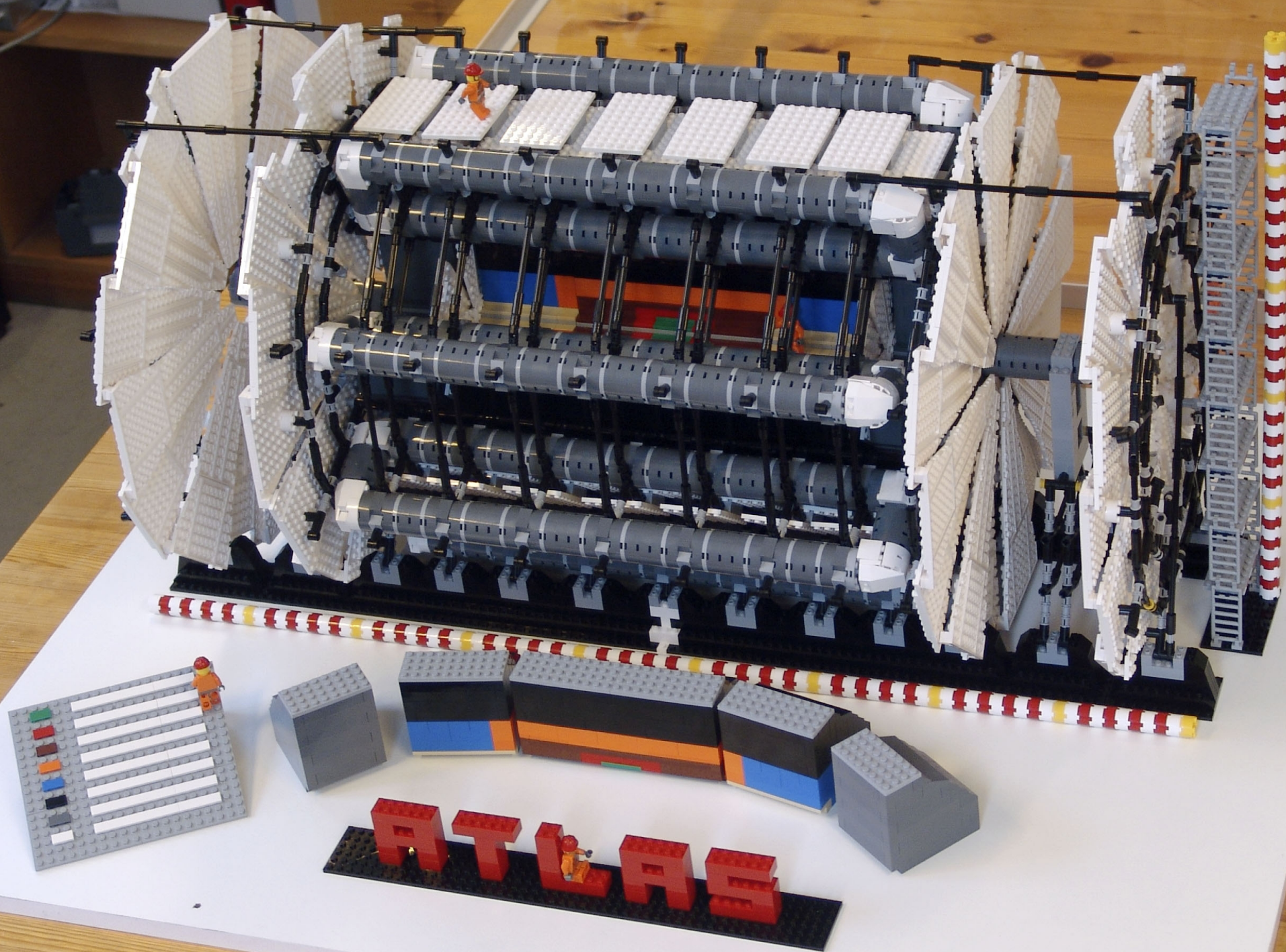
$p_T(\mu^-) = 27 \text{ GeV}$ $\eta(\mu^-) = 0.7$
 $p_T(\mu^+) = 45 \text{ GeV}$ $\eta(\mu^+) = 2.2$

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



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





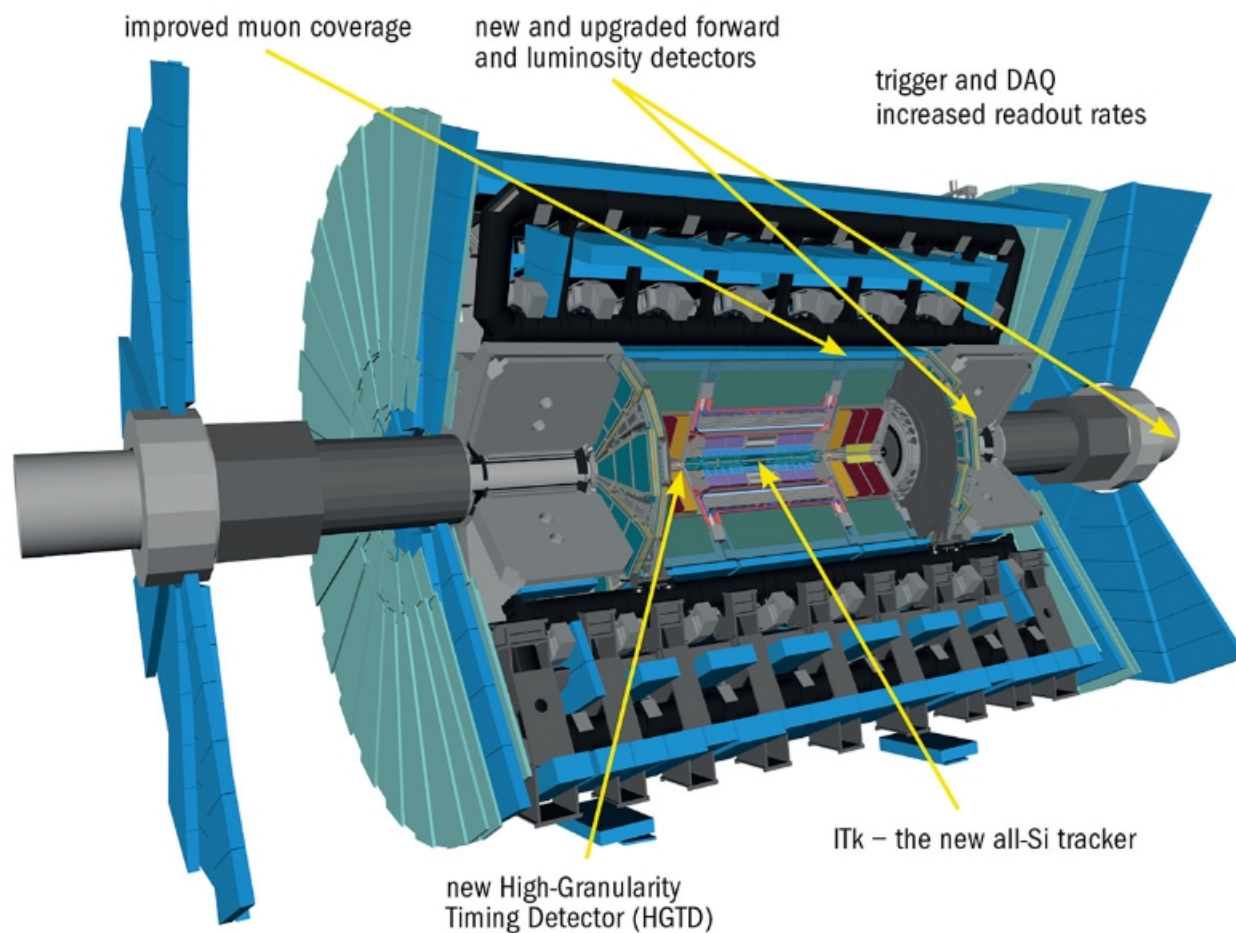
Backup

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)

