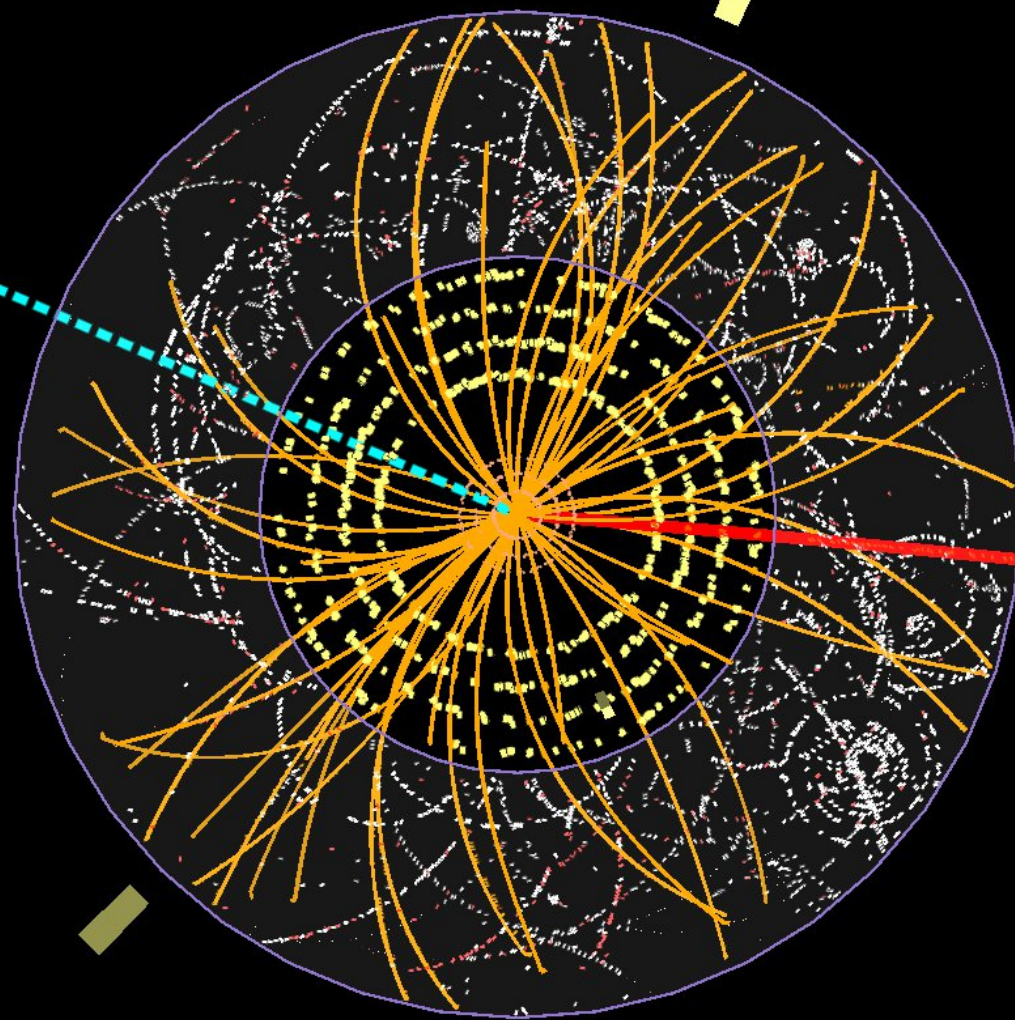


Run: 183081

Event: 101291517

2011-06-05 17:09:02 CEST



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

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

Paweł Rybczyński

WFiS AGH, Katedra Oddziaływań i Detekcji Cząstek

Kraków, 20.02.2026

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

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

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

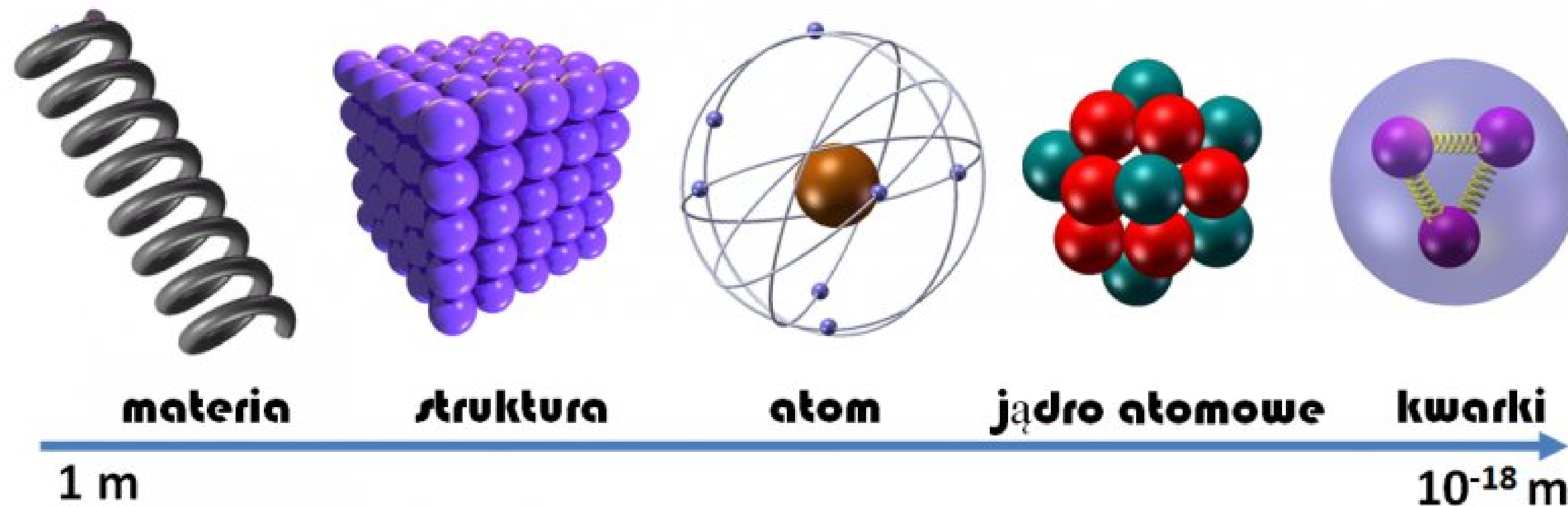
$$\begin{aligned}\frac{1.000.000}{10^6} \text{ eV} &= 1 \text{ MeV (Mega electron volt)} \\ \frac{1.000.000.000}{10^9} \text{ eV} &= 1 \text{ GeV (Giga electron volt)} \\ \frac{1.000.000.000.000}{10^{12}} \text{ eV} &= 1 \text{ TeV (Tera electron volt)}\end{aligned}$$

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
- Idąc dalej **eV** można używać też do określania pędu
 - Dla cząstek relatywistycznych $E = pc$, czyli jednostką pędu będzie **eV/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)

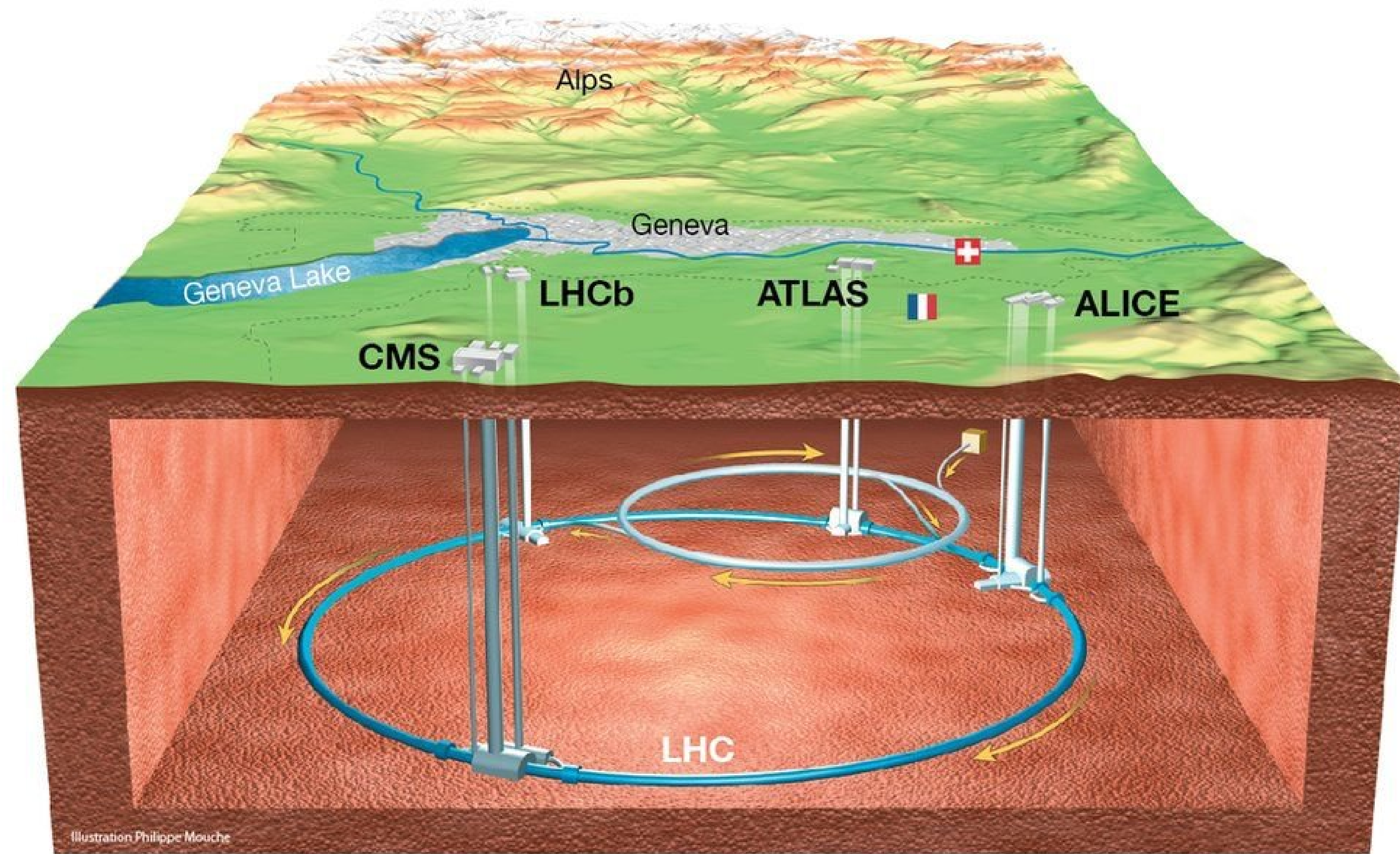
Budowa materii

- W poszukiwaniu prawdziwie elementarnych cząstek naukowcy zagłębiali się w coraz mniejszych wymiarach

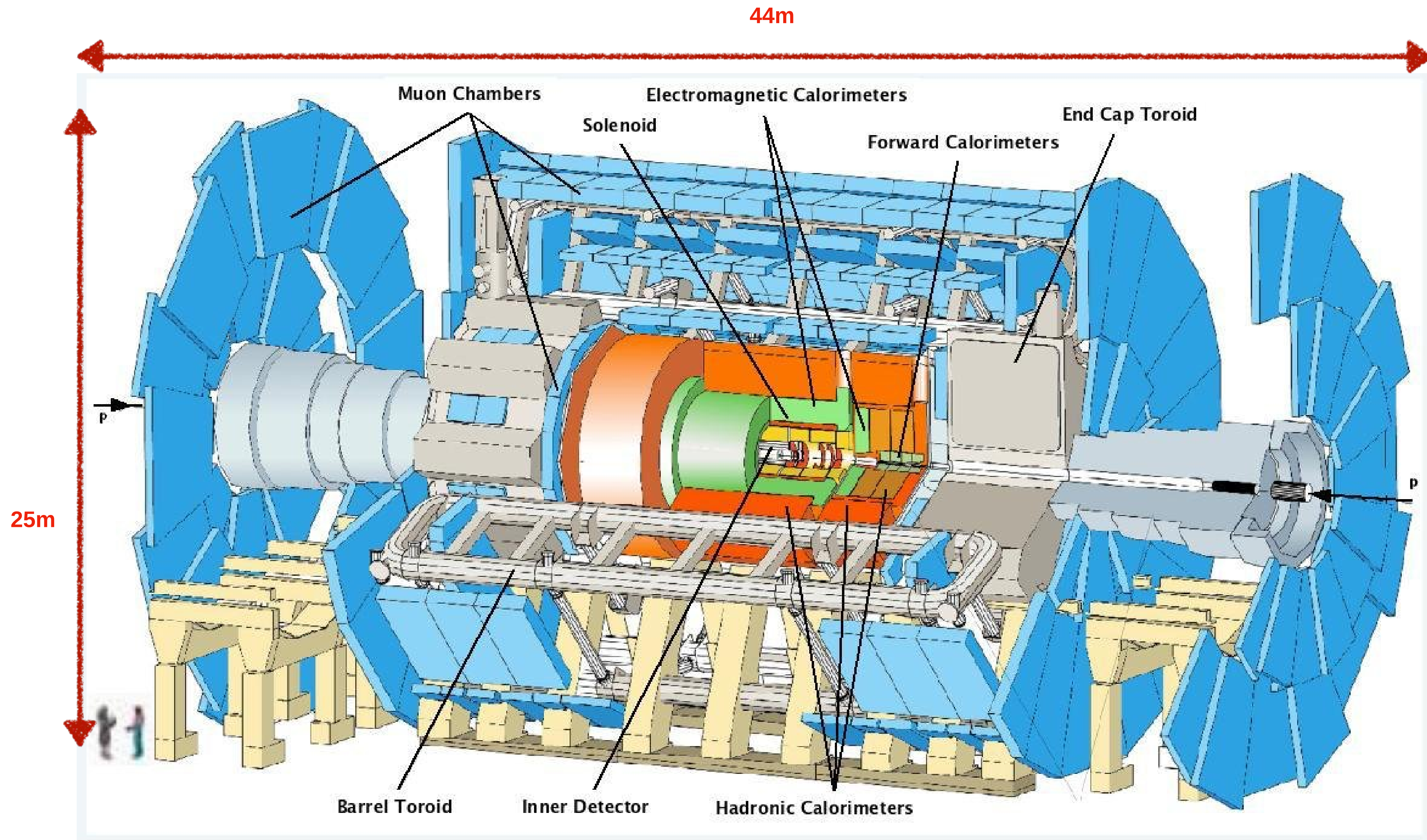


Wielki Zderzacz Hadronów (LHC)

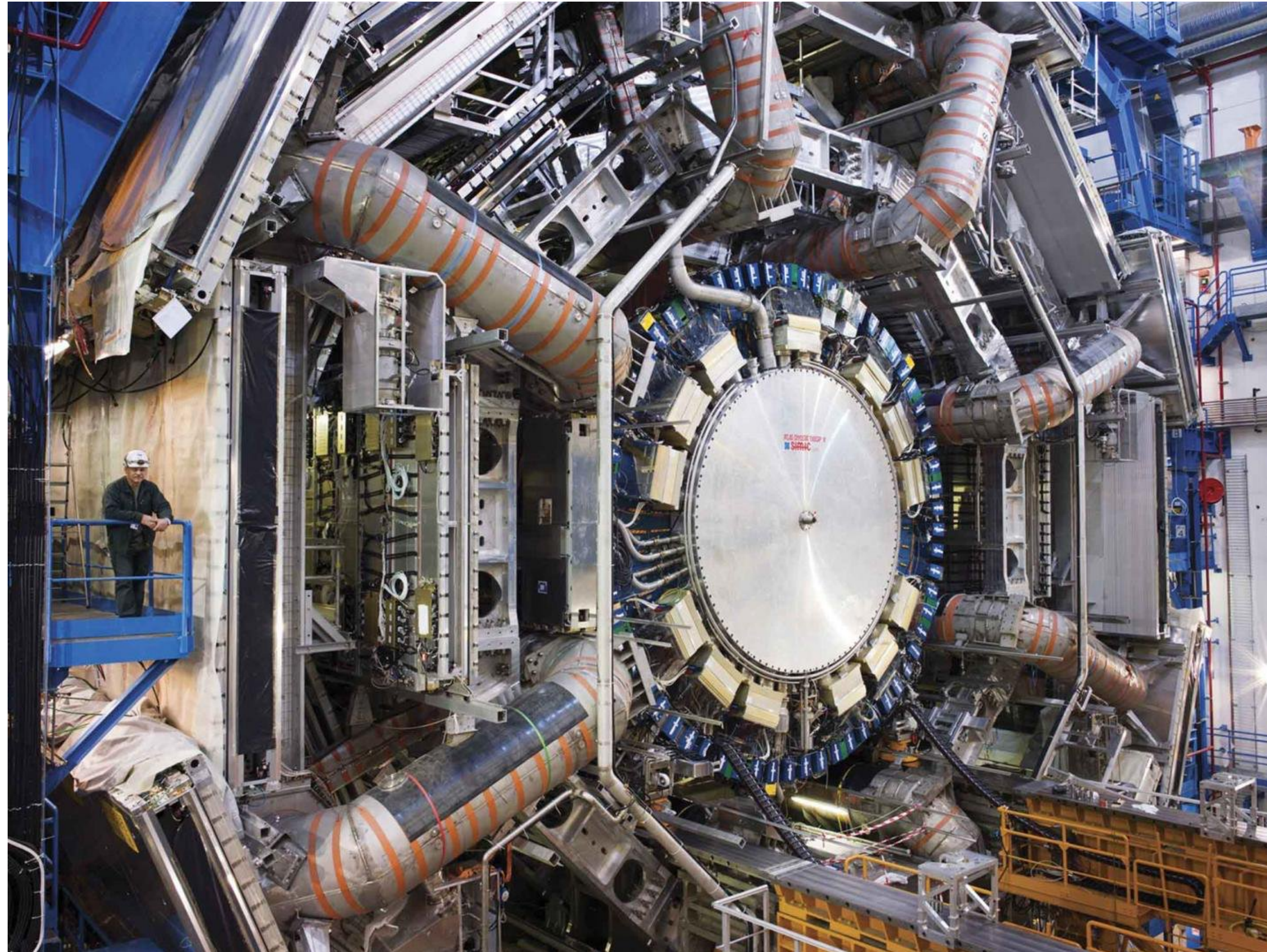
- Umieszczony w tunelu o długości bliskiej **27 km** ok. **100 m** pod powierzchnią ziemi
- Zawiera **9300** magnesów
- Magnesy pracują w temperaturze **1.9 K** (czyli **-271.3°C**)
- W przeciwnych kierunkach krążą w nim dwie wiązki protonów zderzających się w 4 miejscach
- Protony poruszają się z prędkością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



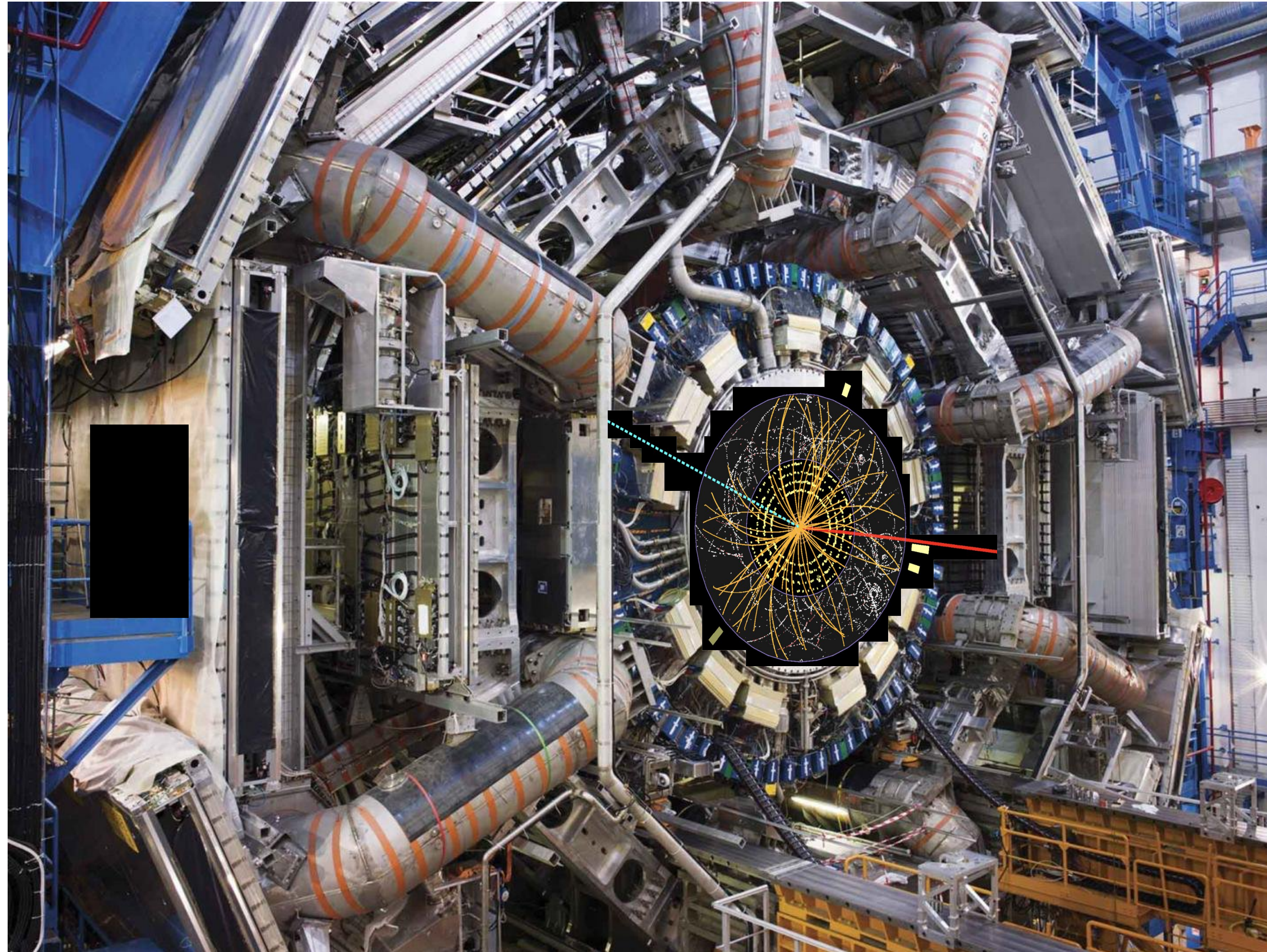
Detektor ATLAS



Detektor ATLAS



Detektor ATLAS

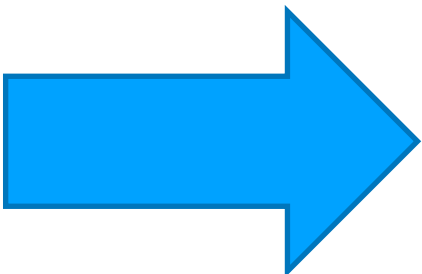
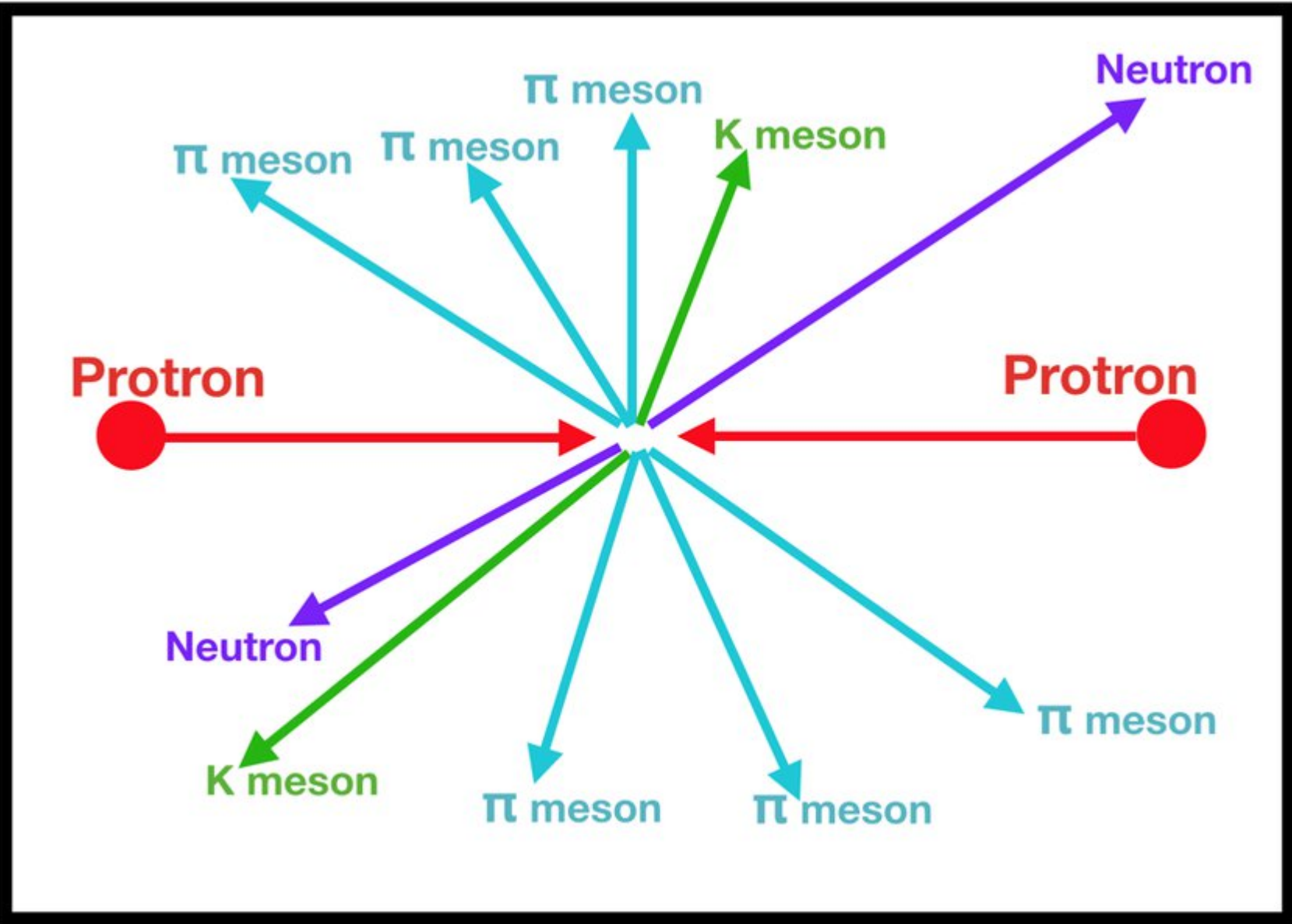


Współpraca ATLAS



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

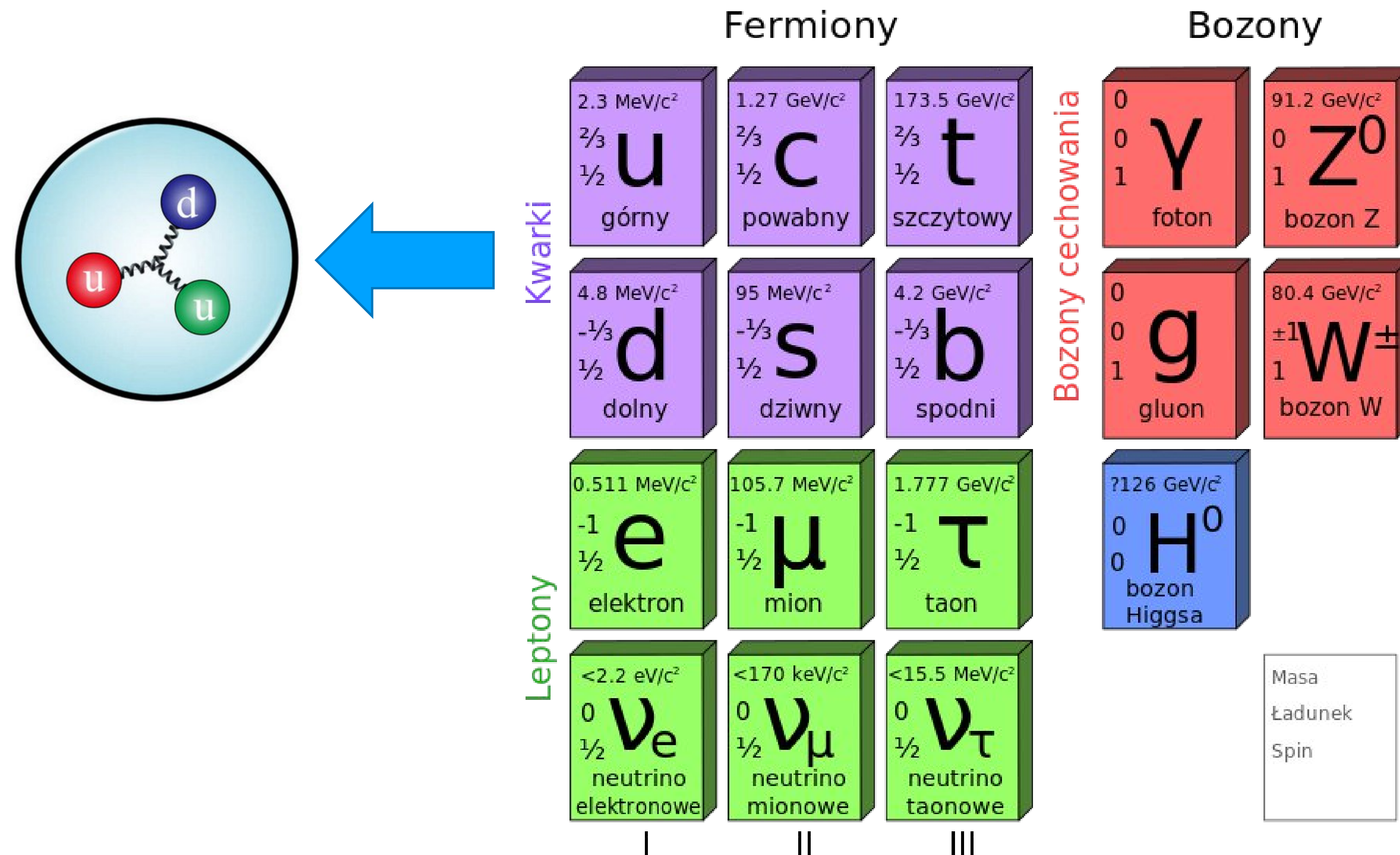
Pierwsze obserwacje zderzeń



Category	Particle Name	Symbol	Anti-particle	Mass (MeV/c ²)	<i>B</i>	<i>L_e</i>	<i>L_μ</i>	<i>L_τ</i>	<i>S</i>	Lifetime(s)	Spin
Leptons	Electron	e [−]	e ⁺	0.511	0	+1	0	0	0	Stable	$\frac{1}{2}$
	Electron–neutrino [†]	ν _{<i>e</i>}	ν̄ _{<i>e</i>}	< 2 eV/c ²	0	+1	0	0	0	Stable	$\frac{1}{2}$
	Muon	μ [−]	μ ⁺	105.7	0	0	+1	0	0	2.20 × 10 ^{−6}	$\frac{1}{2}$
	Muon–neutrino [†]	ν _{<i>μ</i>}	ν̄ _{<i>μ</i>}	< 2 eV/c ²	0	0	+1	0	0	Stable	$\frac{1}{2}$
	Tau	τ [−]	τ ⁺	1 777	0	0	0	+1	0	2.9 × 10 ^{−13}	$\frac{1}{2}$
	Tau–neutrino [†]	ν _{<i>τ</i>}	ν̄ _{<i>τ</i>}	< 2 eV/c ²	0	0	0	+1	0	Stable	$\frac{1}{2}$
Hadrons											
<i>Mesons</i>	Pion	π ⁺	π [−]	139.6	0	0	0	0	0	2.60 × 10 ^{−8}	0
		π ⁰	Self	135.0	0	0	0	0	0	8.52 × 10 ^{−17} s	0
	Kaon	K ⁺	K [−]	493.7	0	0	0	0	+1	1.24 × 10 ^{−8}	0
		K _{<i>S</i>} ⁰	K̄ _{<i>S</i>} ⁰	497.7	0	0	0	0	+1	0.89 × 10 ^{−10}	0
		K _{<i>L</i>} ⁰	K̄ _{<i>L</i>} ⁰	497.7	0	0	0	0	+1	5.1 × 10 ^{−8}	0
<i>Baryons</i>	Proton	p	p̄	938.3	+1	0	0	0	0	Stable	$\frac{1}{2}$
	Neutron	n	n̄	939.6	+1	0	0	0	0	881	$\frac{1}{2}$
	Lambda	Λ ⁰	Λ̄ ⁰	1 115.7	+1	0	0	0	−1	2.6 × 10 ^{−10}	$\frac{1}{2}$
	Sigma	Σ ⁺	Σ̄ [−]	1 189.4	+1	0	0	0	−1	0.80 × 10 ^{−10}	$\frac{1}{2}$
		Σ ⁰	Σ̄ ⁰	1 192.6	+1	0	0	0	−1	7.4 × 10 ^{−20}	$\frac{1}{2}$
		Σ [−]	Σ̄ ⁺	1 197.4	+1	0	0	0	−1	1.5 × 10 ^{−10}	$\frac{1}{2}$
	Delta	Δ ⁺⁺	Δ̄ ^{−−}	1 232	+1	0	0	0	0	6 × 10 ^{−24}	$\frac{3}{2}$
		Δ ⁺	Δ̄ [−]	1 232	+1	0	0	0	0	6 × 10 ^{−24}	$\frac{3}{2}$
		Δ ⁰	Δ̄ ⁰	1 232	+1	0	0	0	0	6 × 10 ^{−24}	$\frac{3}{2}$
		Δ [−]	Δ̄ ⁺	1 232	+1	0	0	0	0	6 × 10 ^{−24}	$\frac{3}{2}$
	Xi	Ξ ⁰	Ξ̄ ⁰	1 315	+1	0	0	0	−2	2.9 × 10 ^{−10}	$\frac{1}{2}$
		Ξ [−]	Ξ̄ ⁺	1 322	+1	0	0	0	−2	1.64 × 10 ^{−10}	$\frac{1}{2}$
	Omega	Ω [−]	Ω ⁺	1 672	+1	0	0	0	−3	0.82 × 10 ^{−10}	$\frac{3}{2}$

Model Standardowy

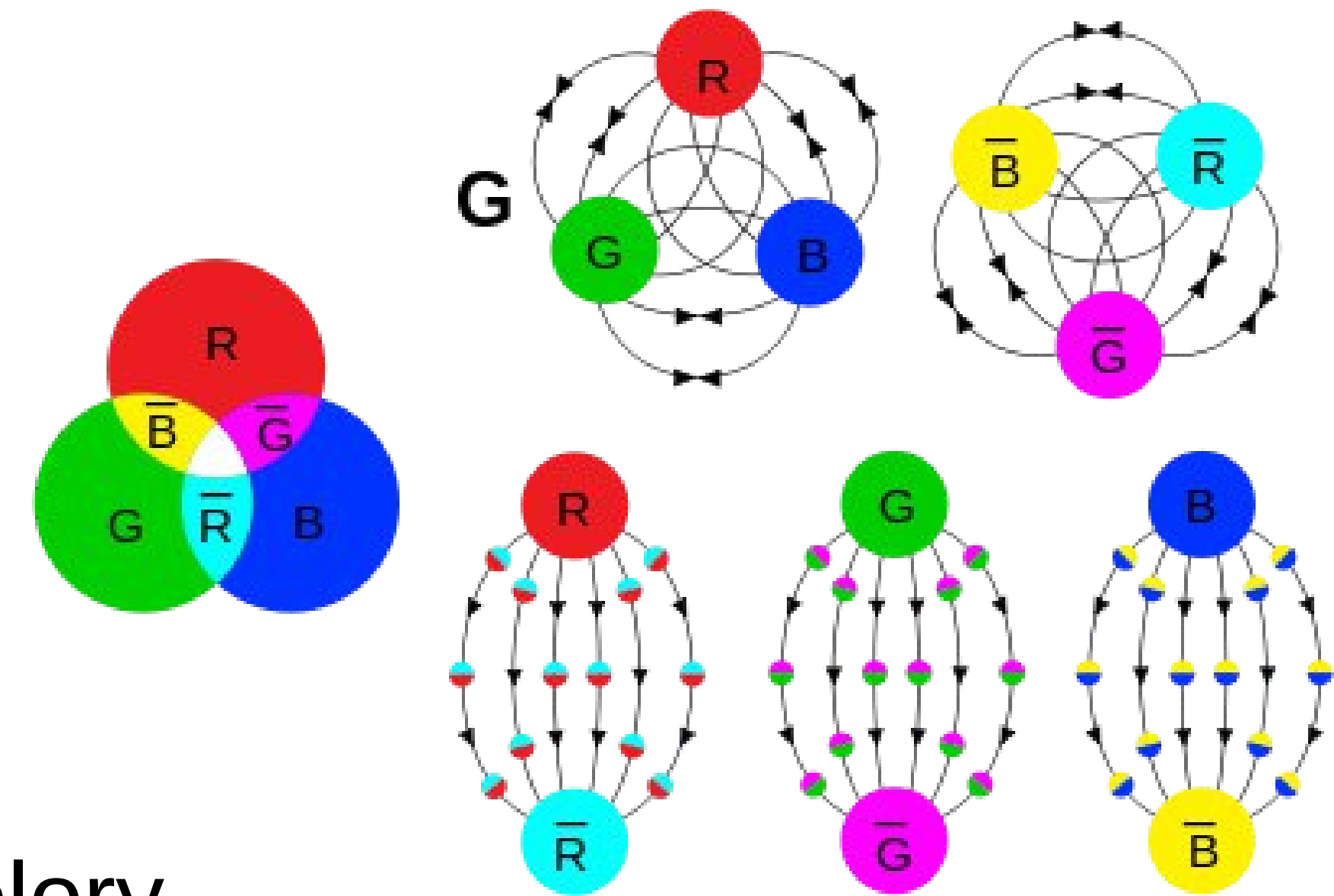
- “Układ okresowy” Modelu Standardowego



- 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, ...

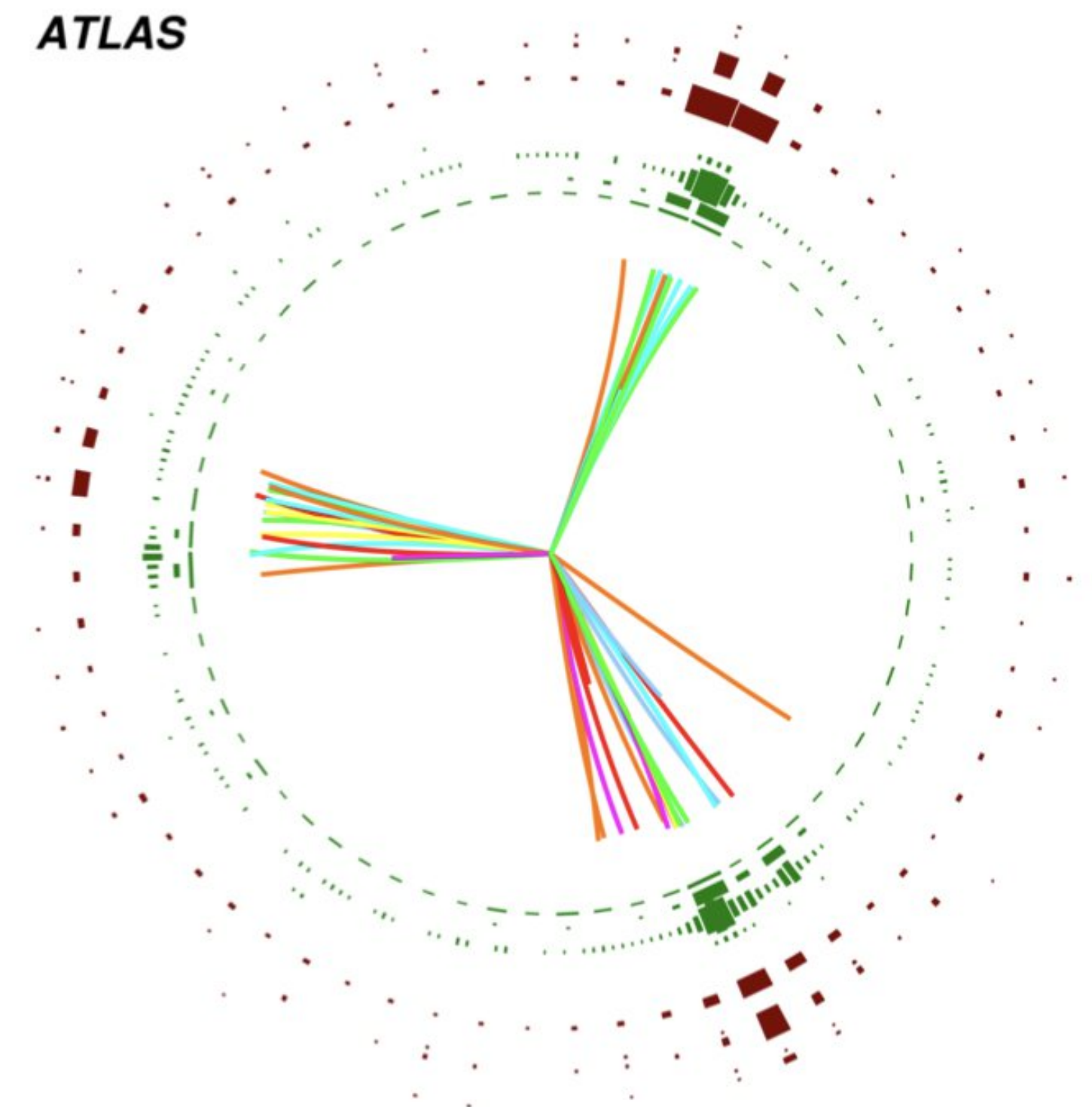
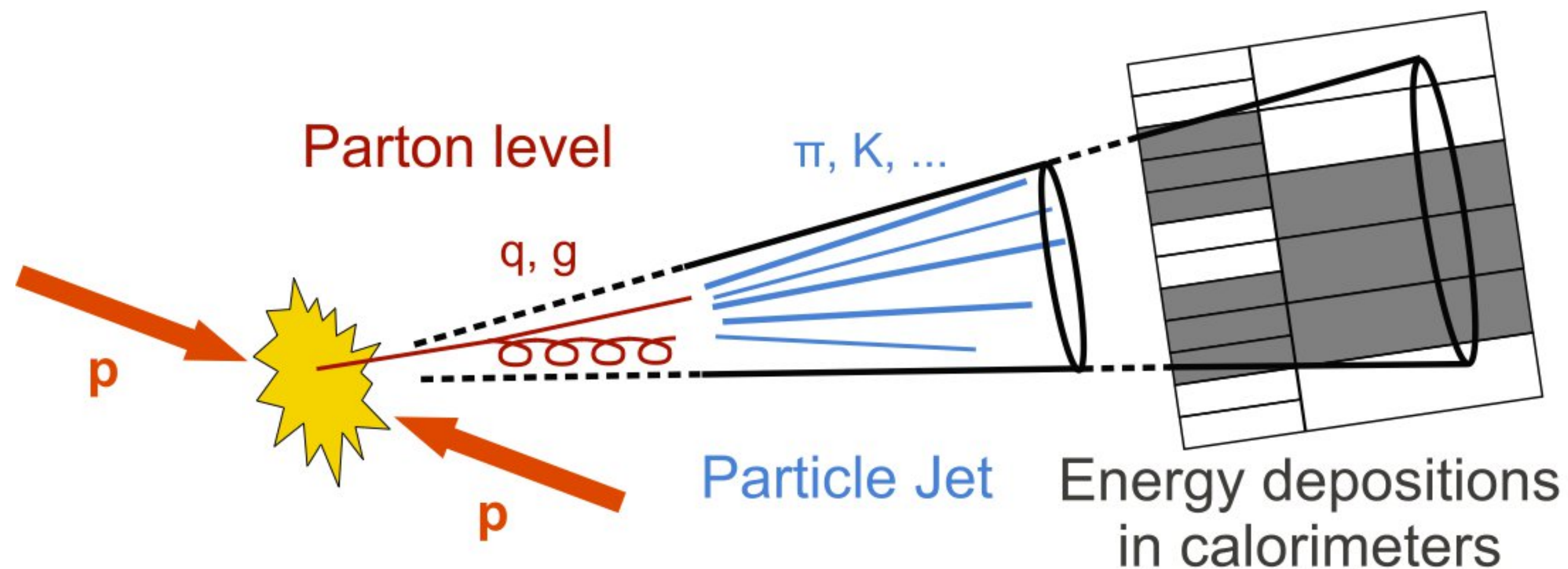
Oddziaływania silne i kwarki

- 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**)



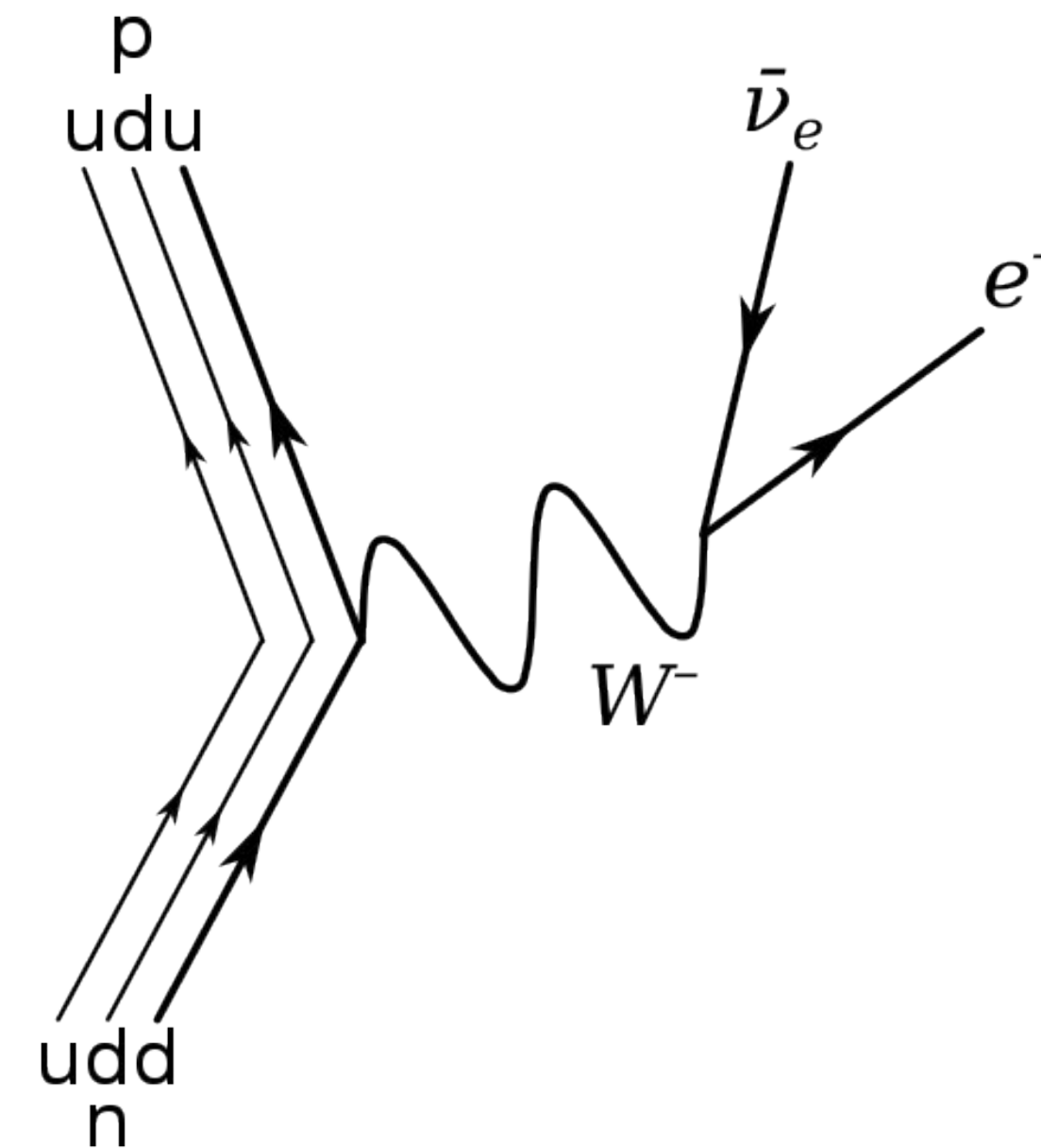
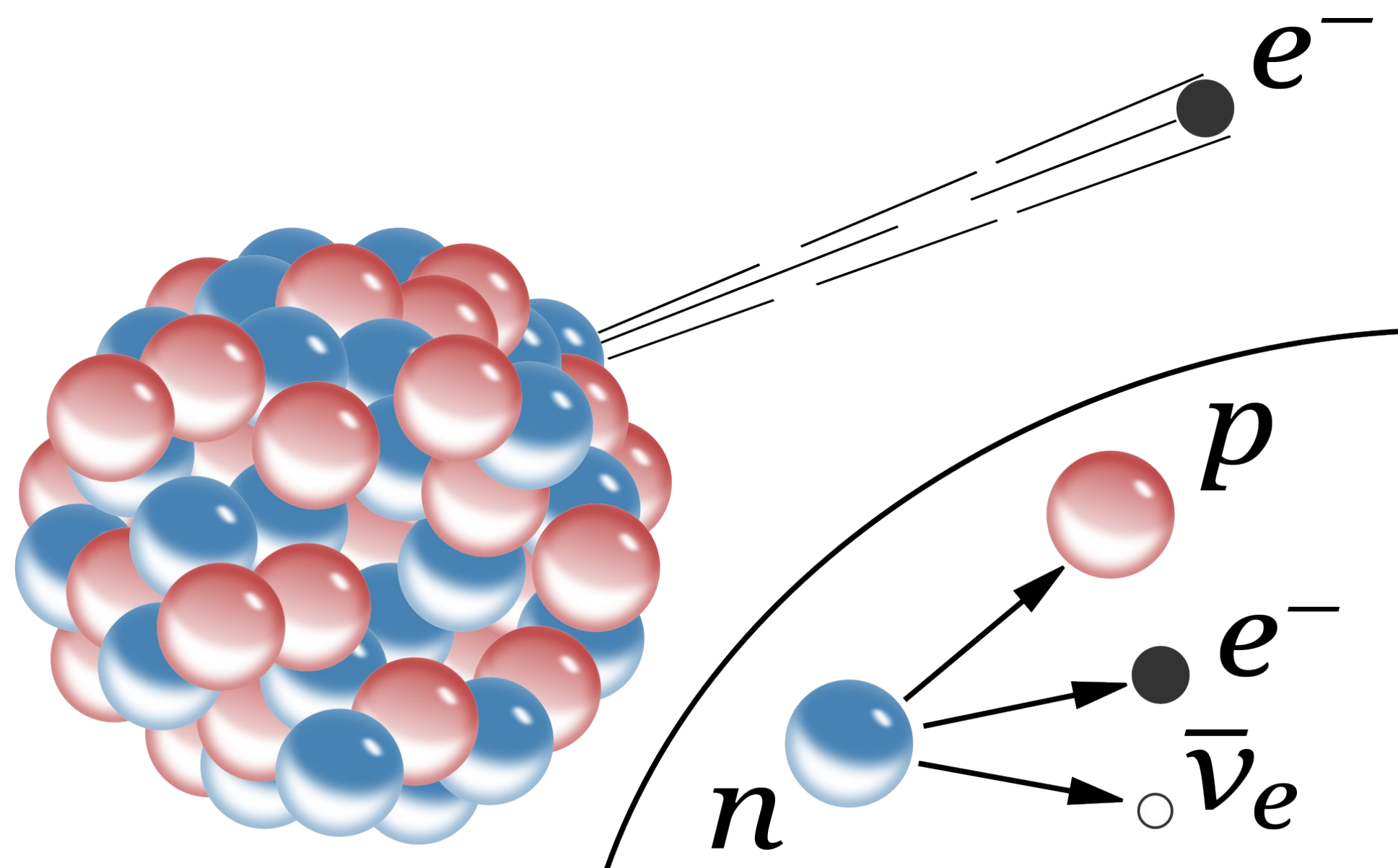
Oddziaływania silne i kwarki

- 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**.



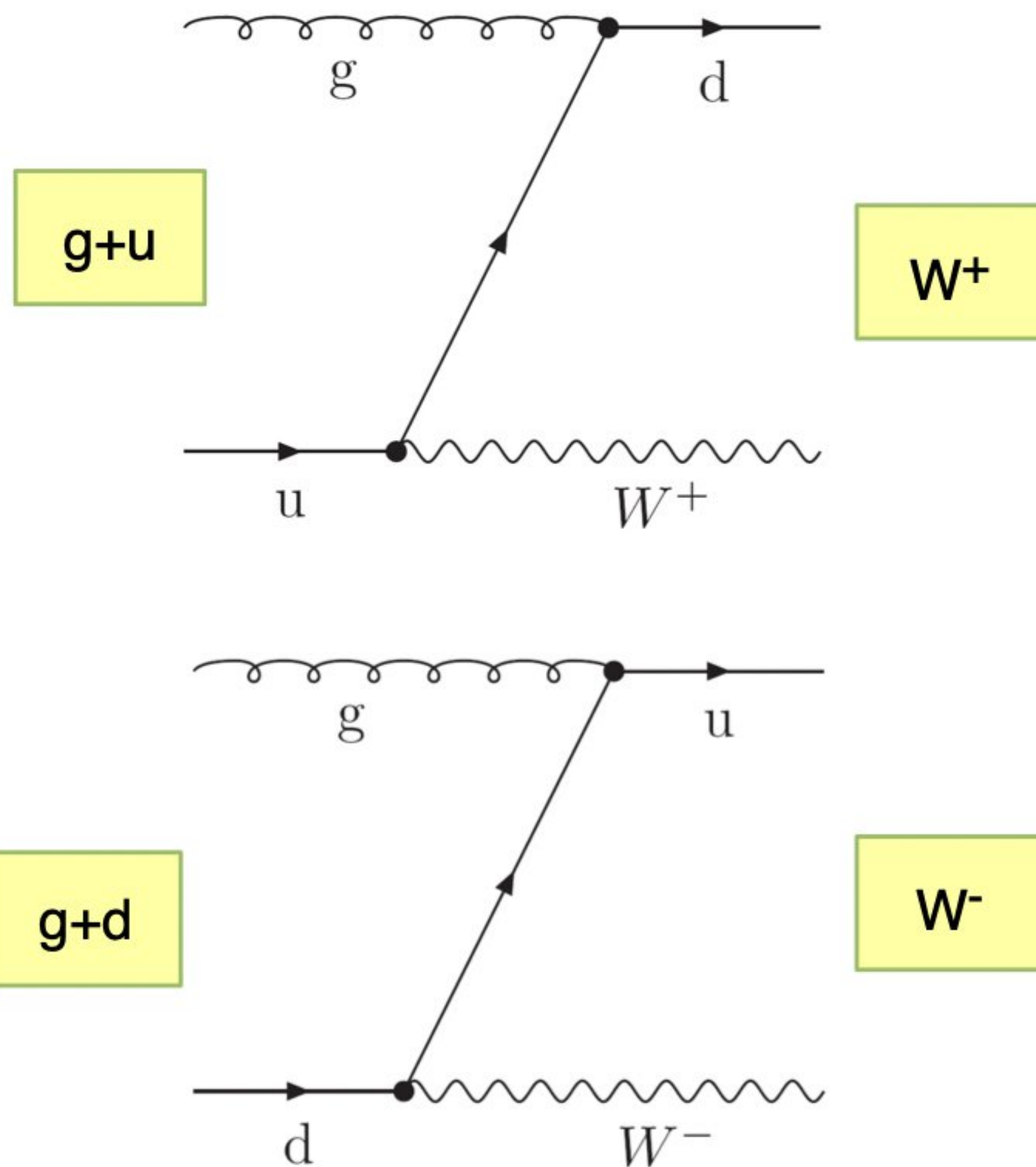
Oddziaływania słabe

- 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.

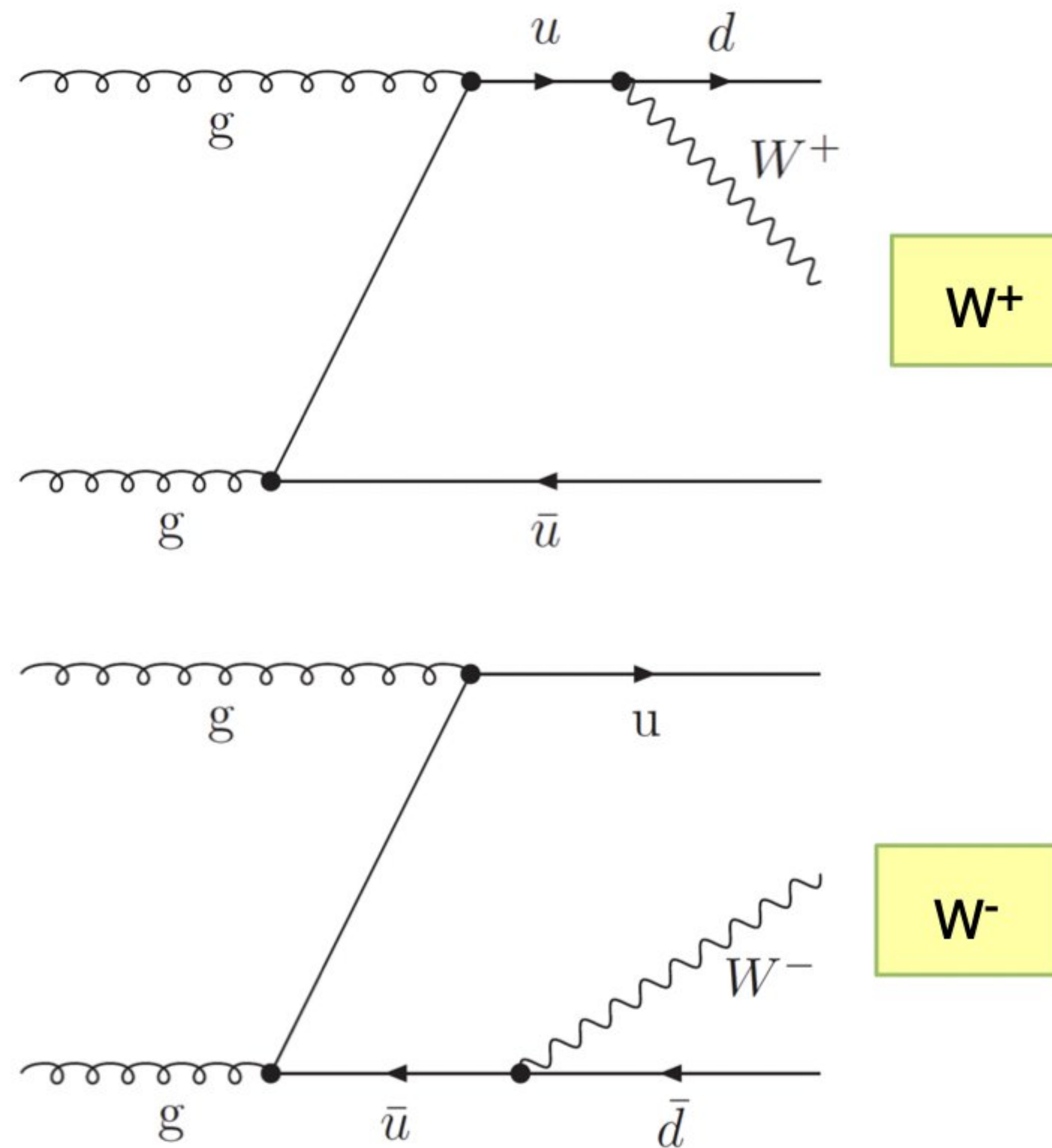


Produkcja bozonów W w zderzeniach

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: $e^+ \nu_e$, $\mu^+ \nu_\mu$, $\tau^+ \nu_\tau$ (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

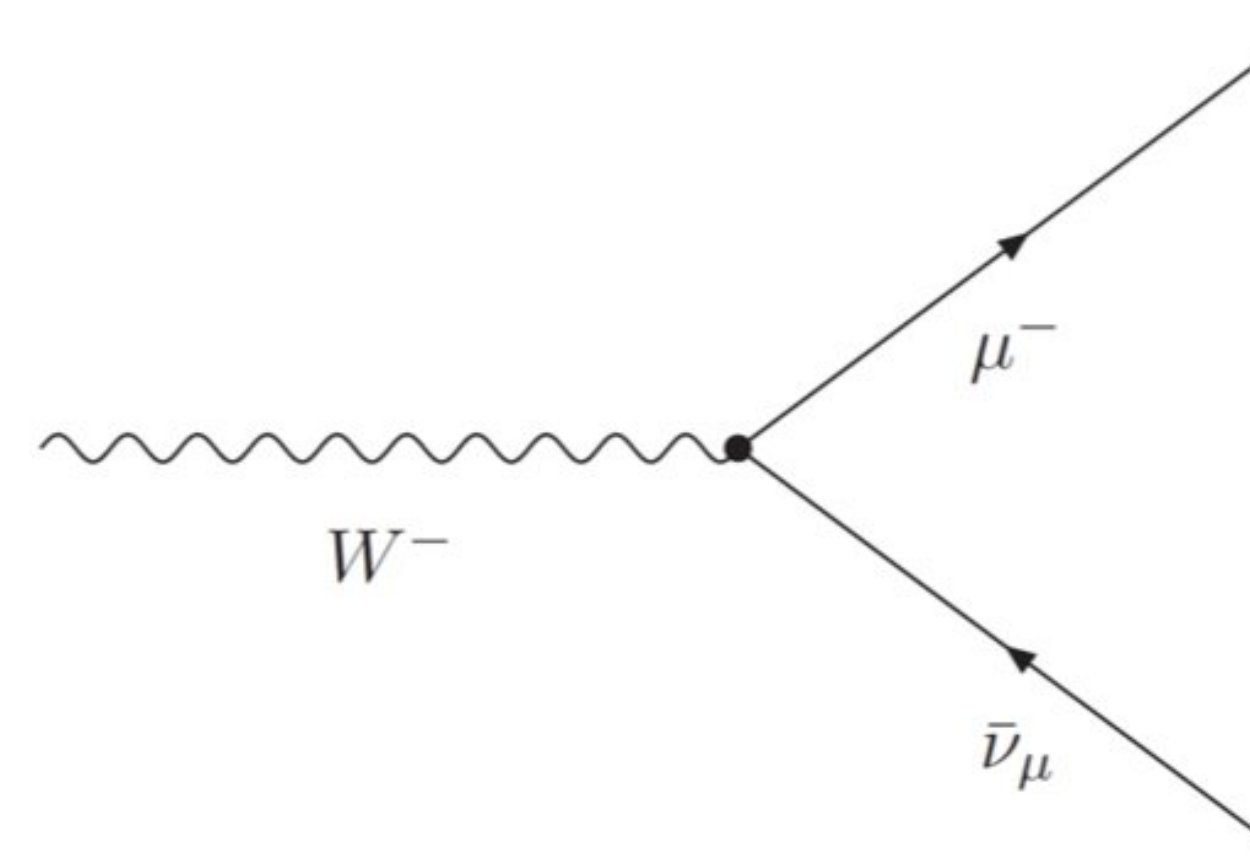
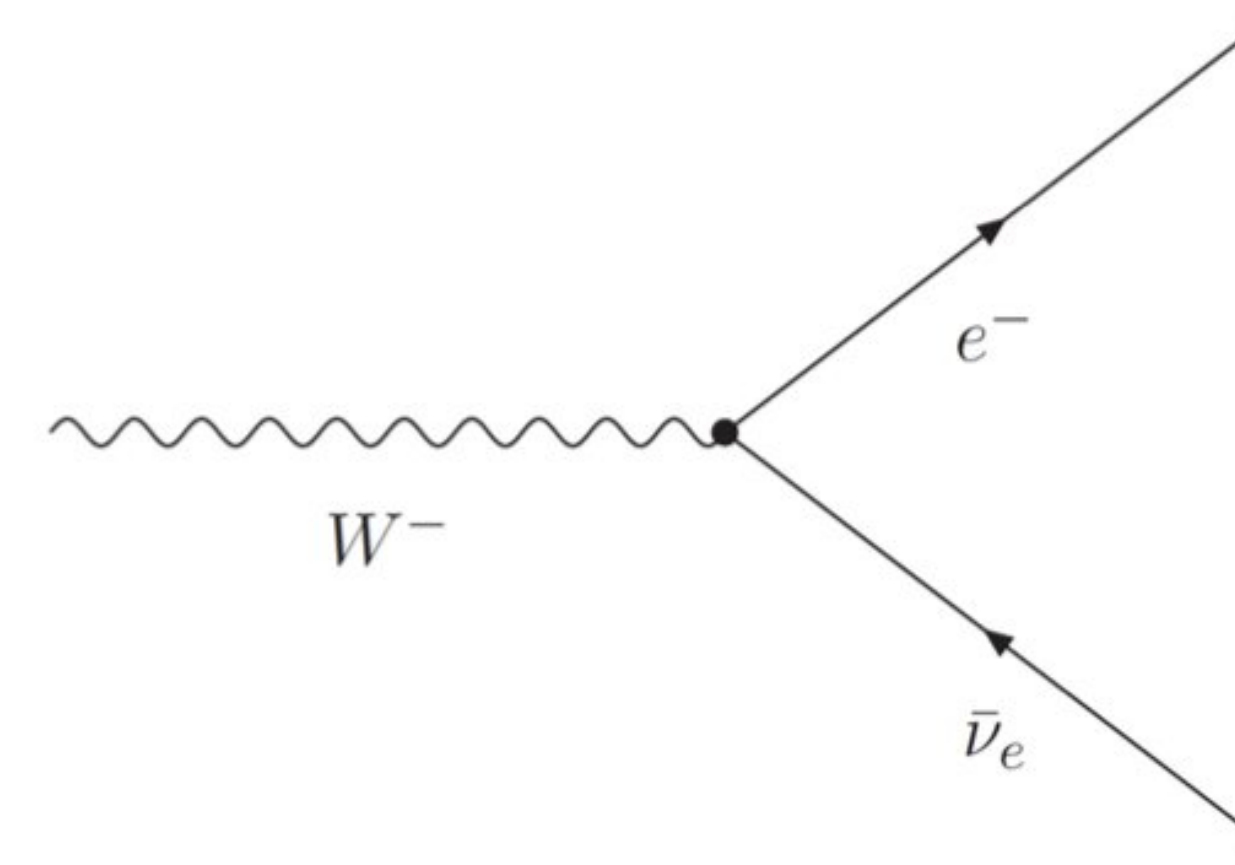
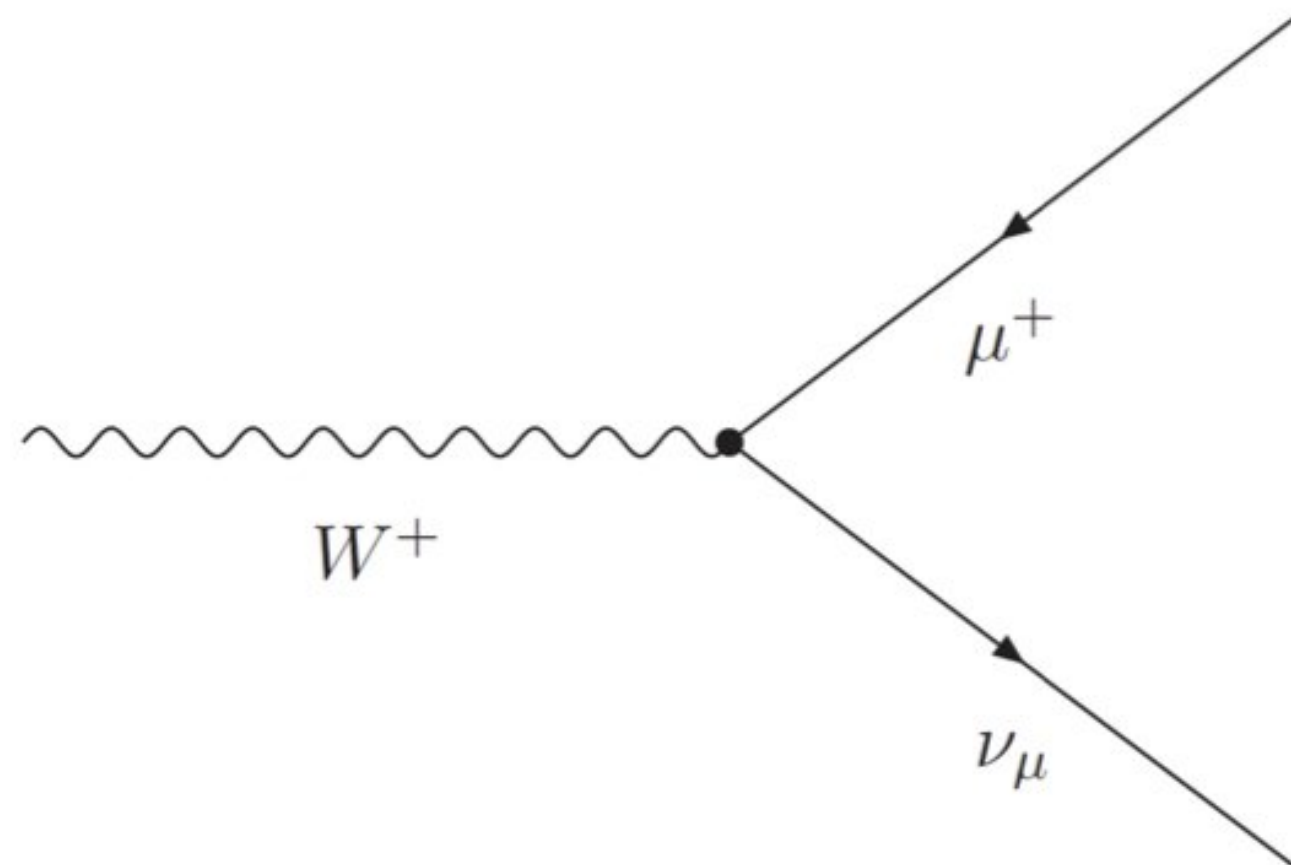
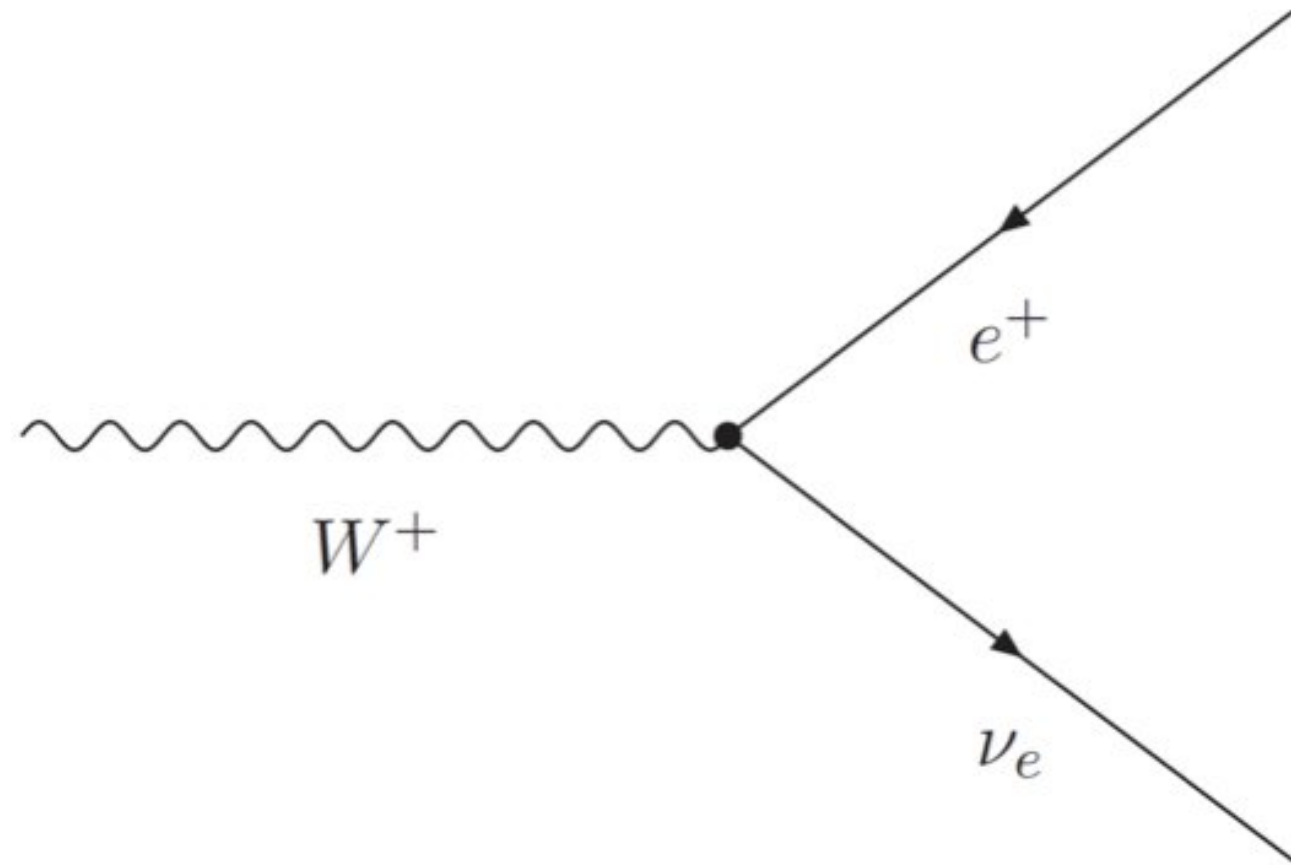
Leptony

$0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ e elektron	$105.7 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ μ mion	$1.777 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ τ taon
$<2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_e neutrino elektronowe	$<170 \text{ keV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ neutrino mionowe	$<15.5 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ neutrino taonowe
I	II	III

- Problemy:
 - **Kwarki** z rozpadu bozonu W przekształcają się w hadrony (dżety), co utrudnia stwierdzenie, czy pochodziły z rozpadu W
 - Cząstki τ prawie natychmiast rozpadają się, dlatego rozpady W z ich udziałem są trudne do badania

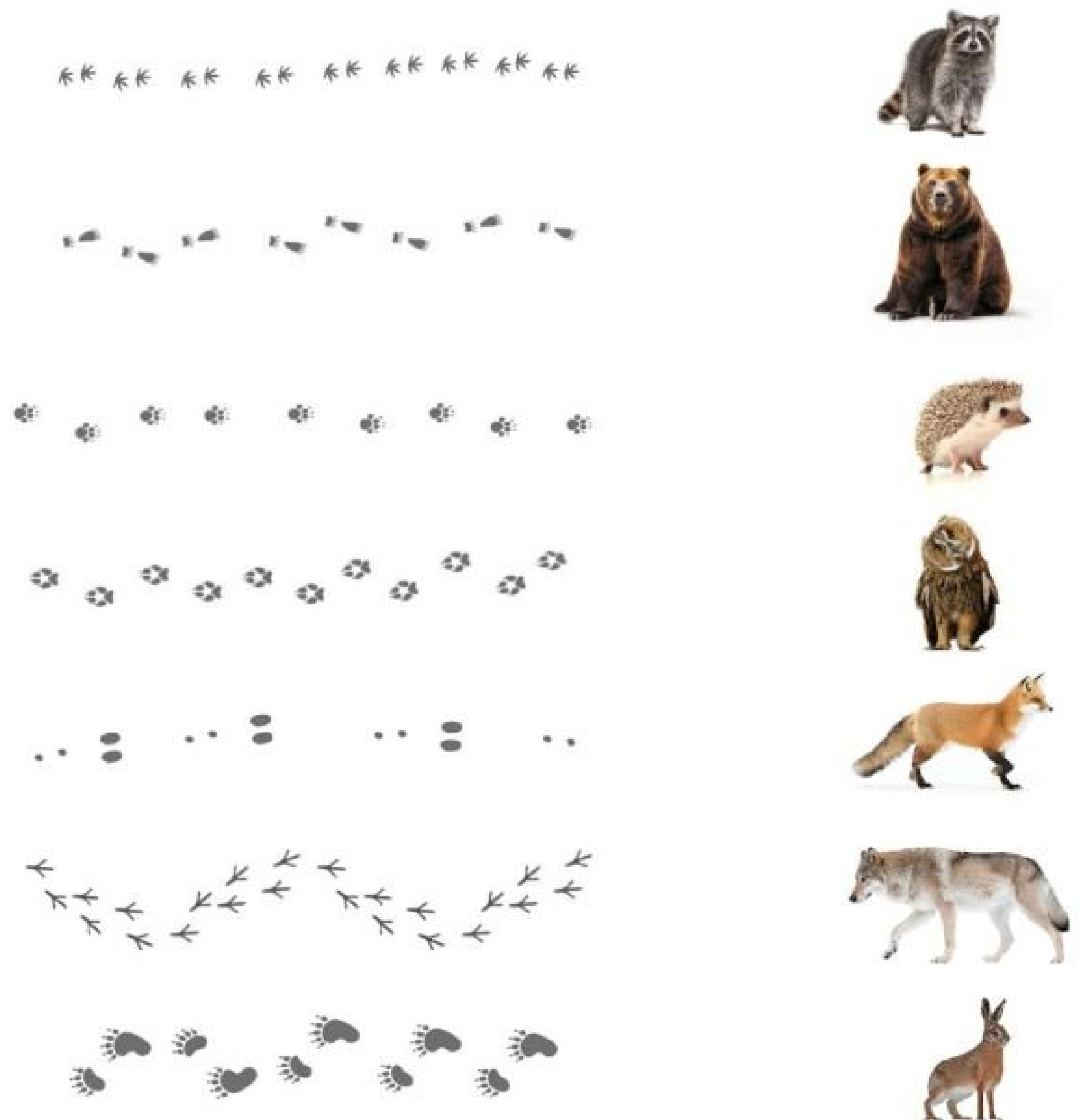
Rozpady bozonu W

- Interesujące nas rozpady:



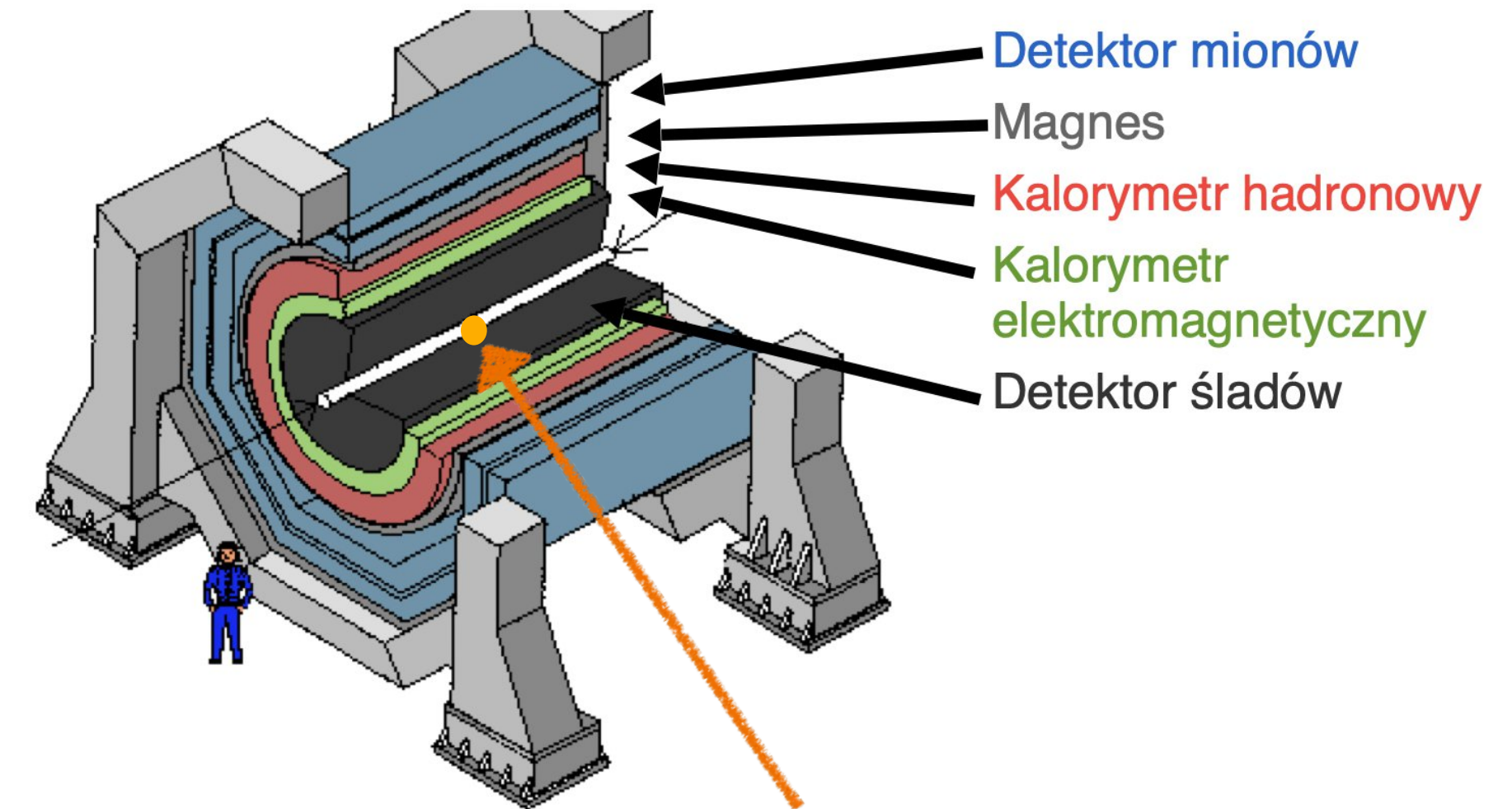
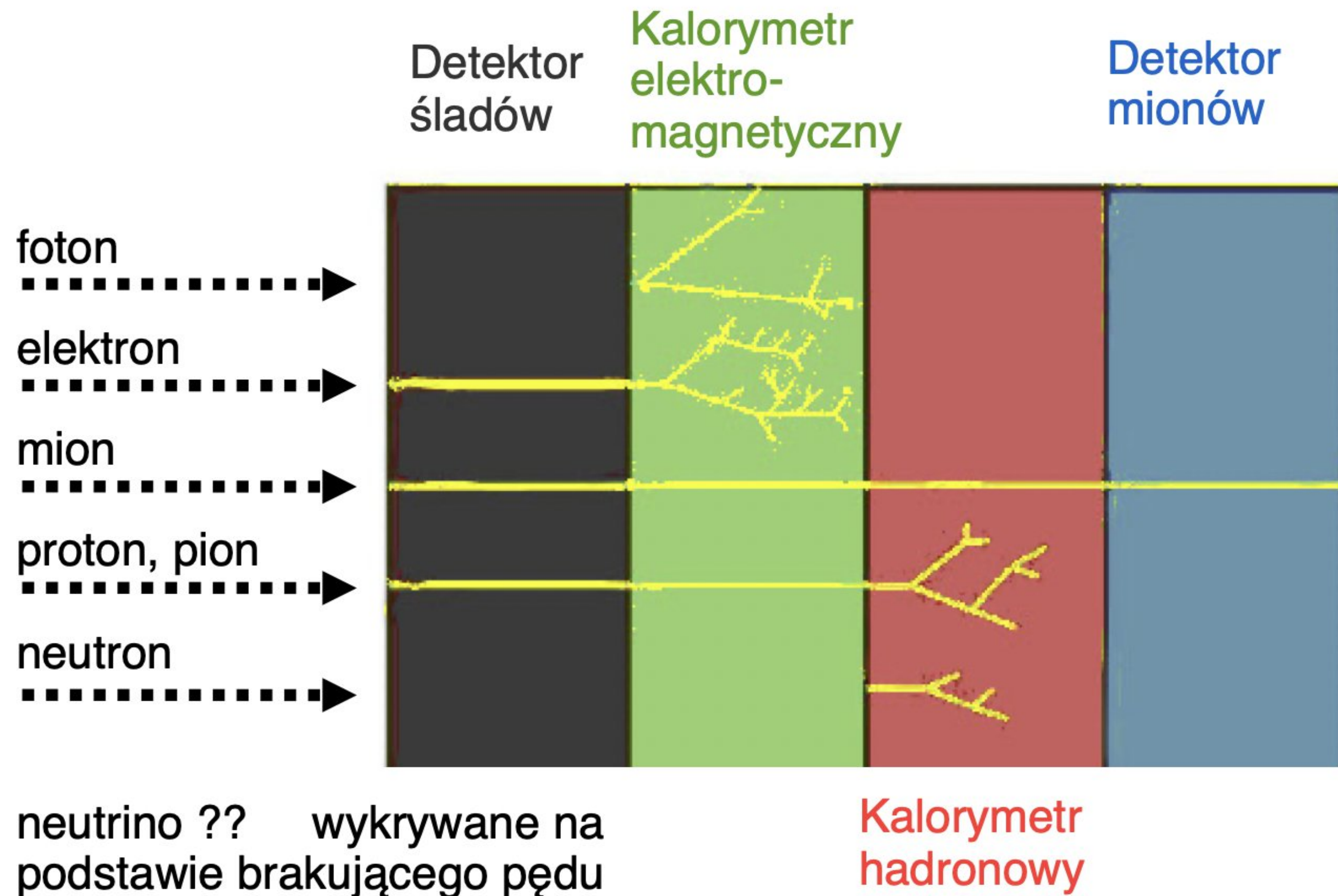
Detekcja cząstek

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



Detekcja cząstek

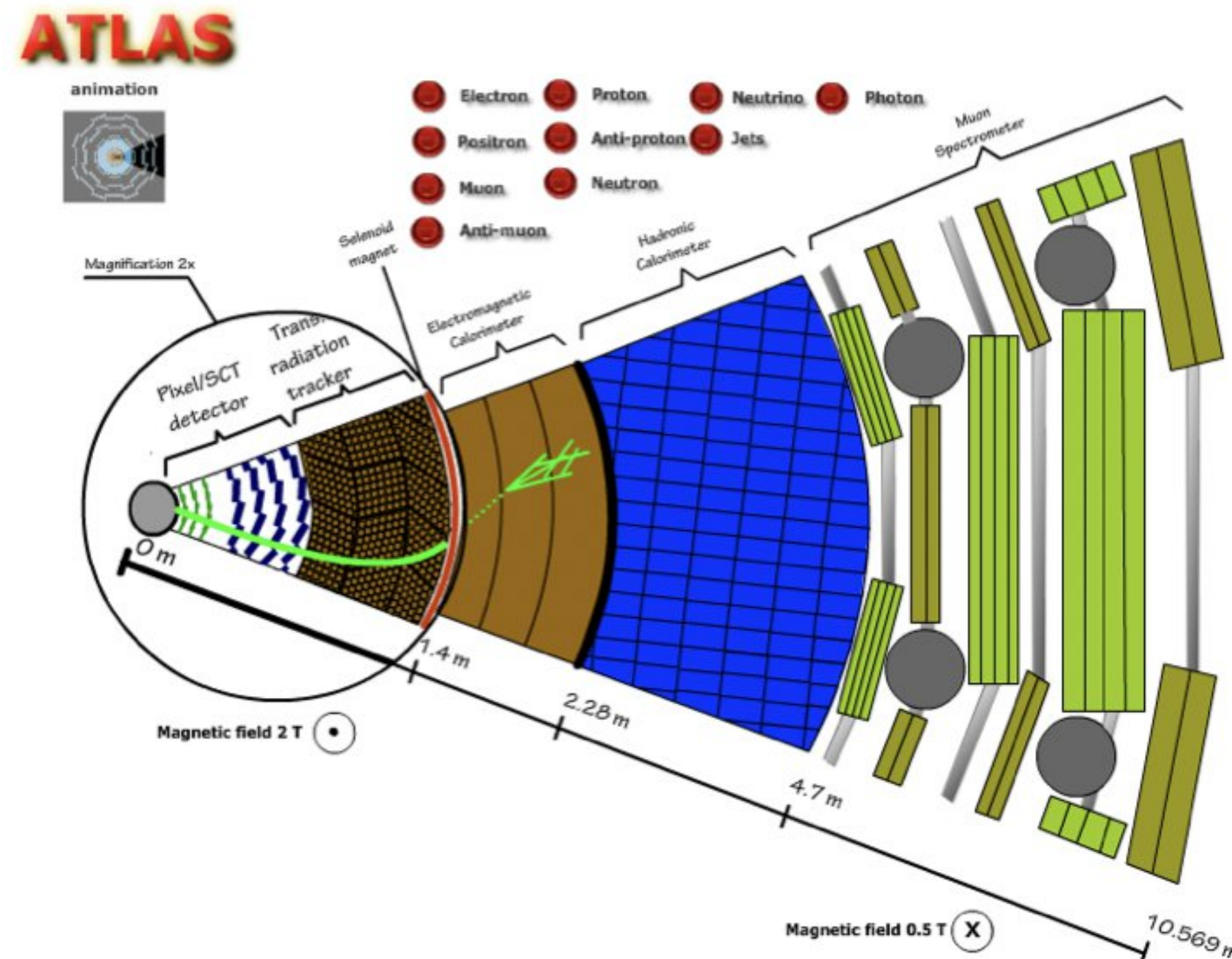
- Ślady w detektorze pozostawiane przez różne typy cząstek



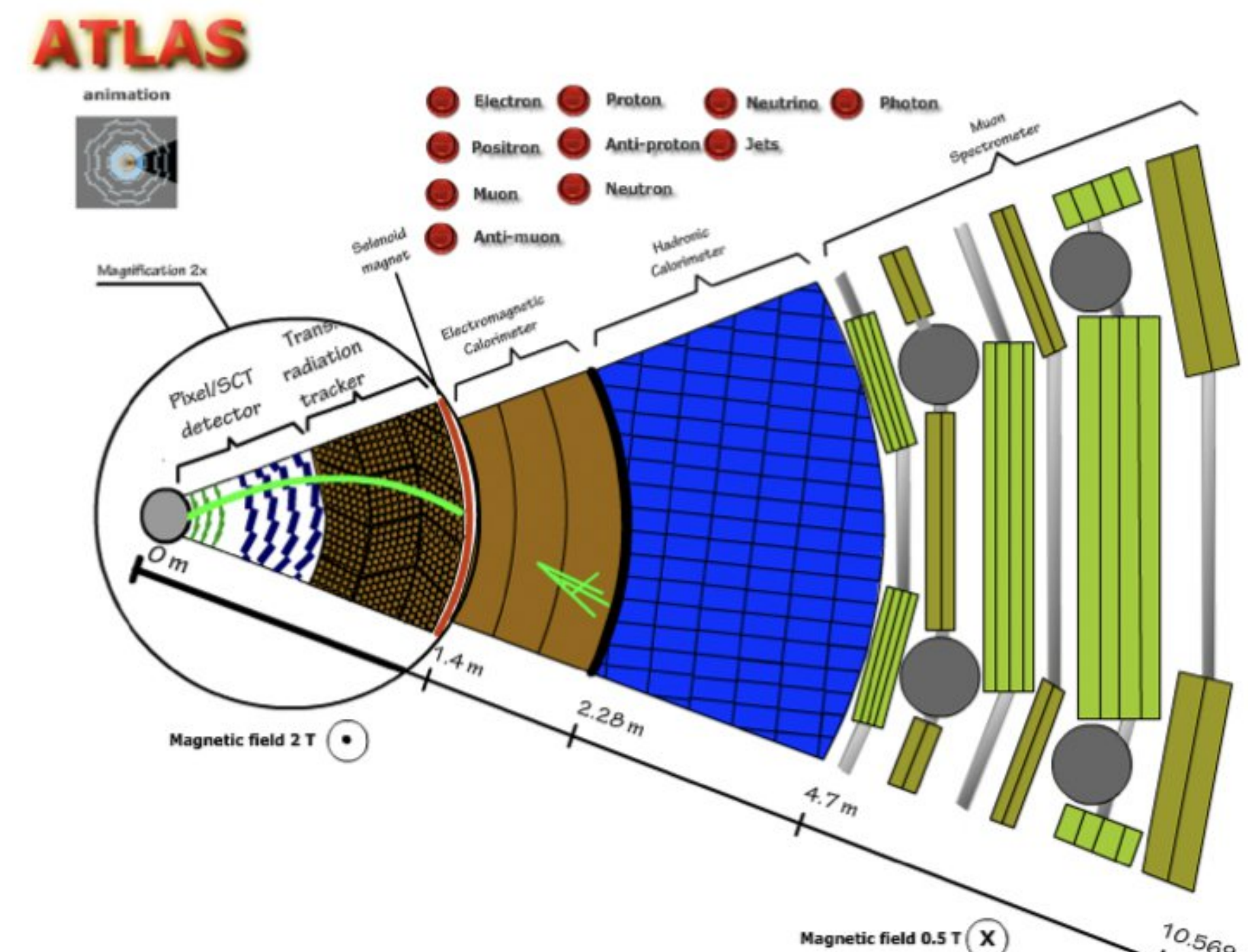
Punkt interakcji (to tutaj protony oddziałują)

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

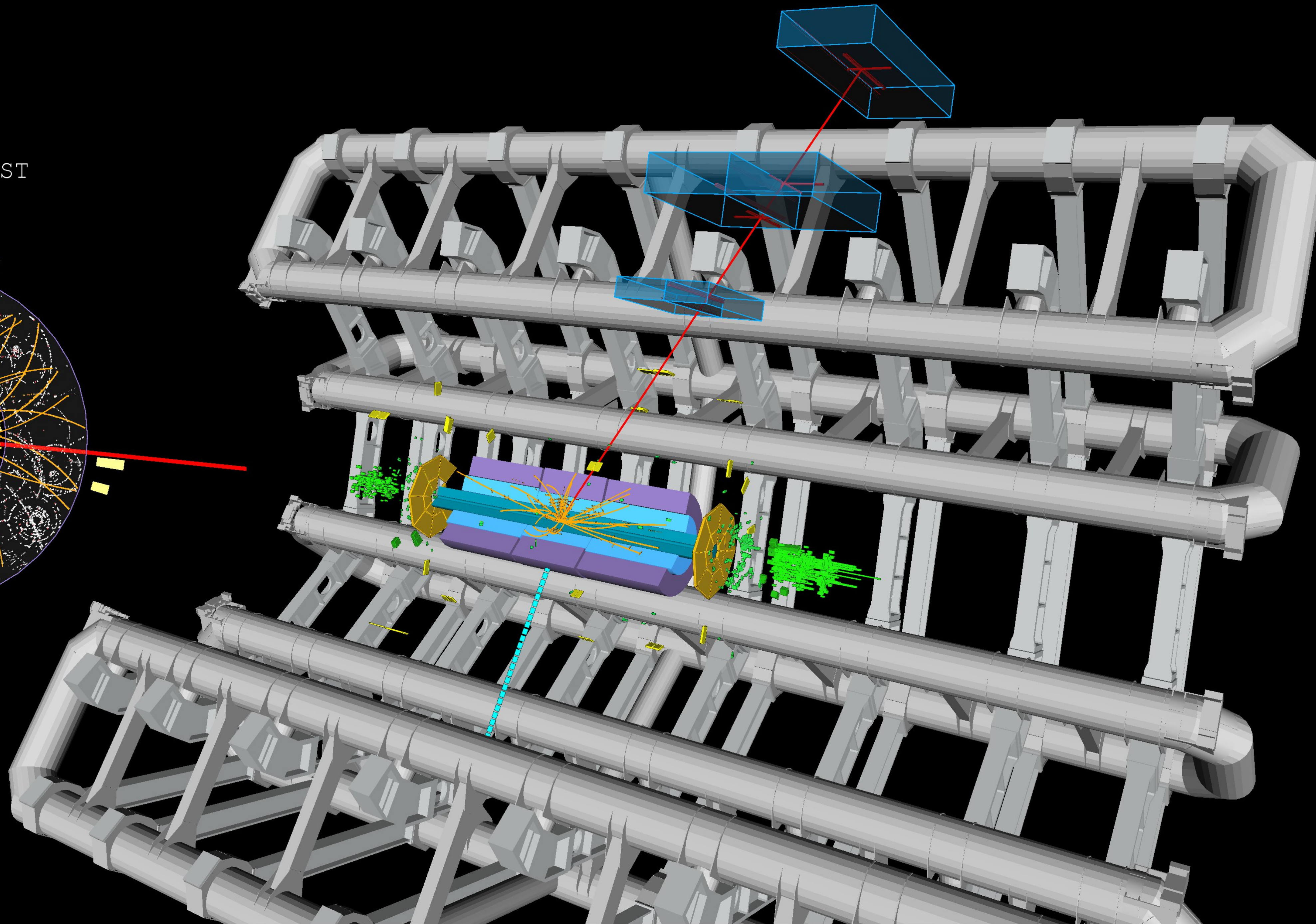
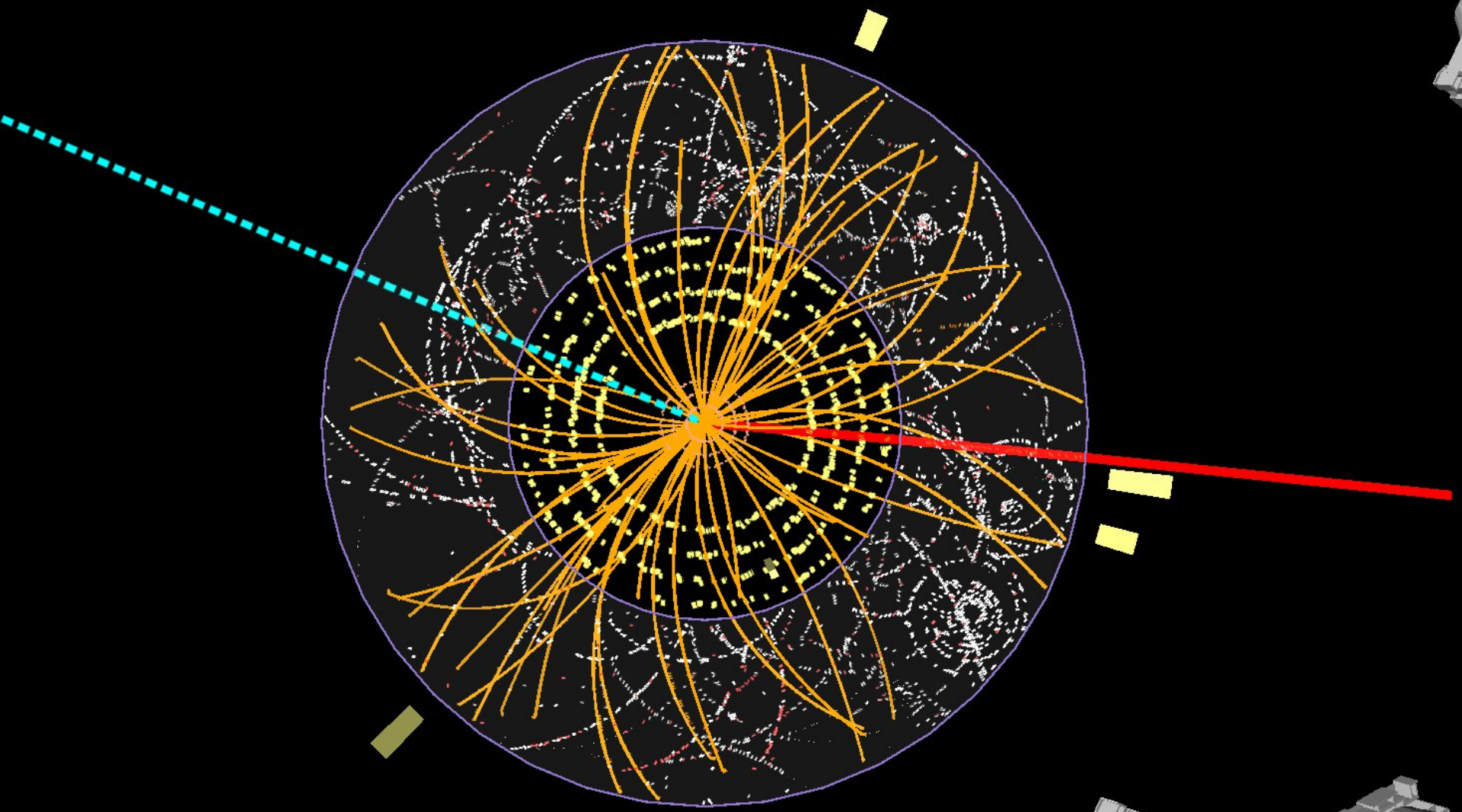


positron

Run: 183081

Event: 101291517

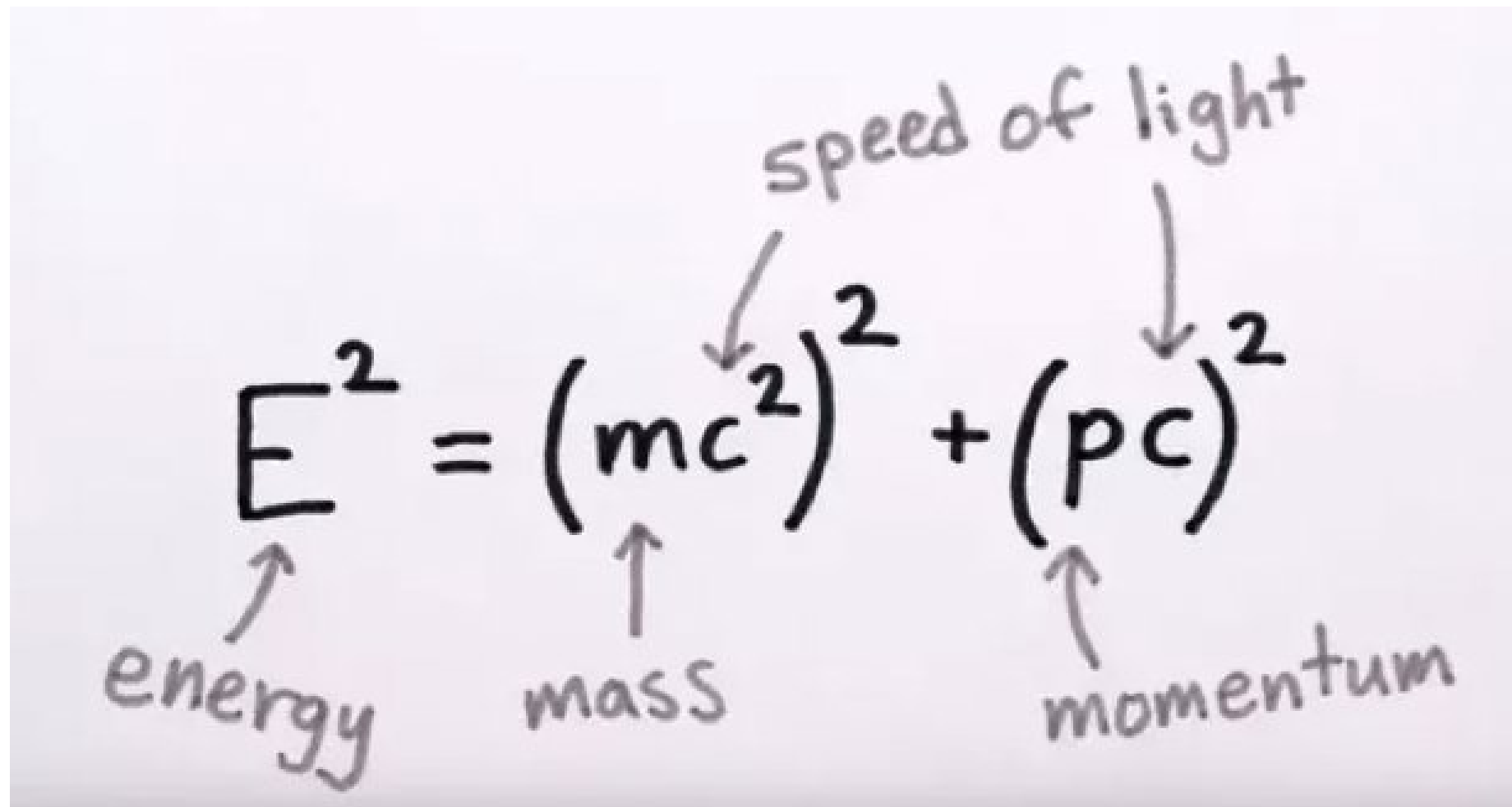
2011-06-05 17:09:02 CEST



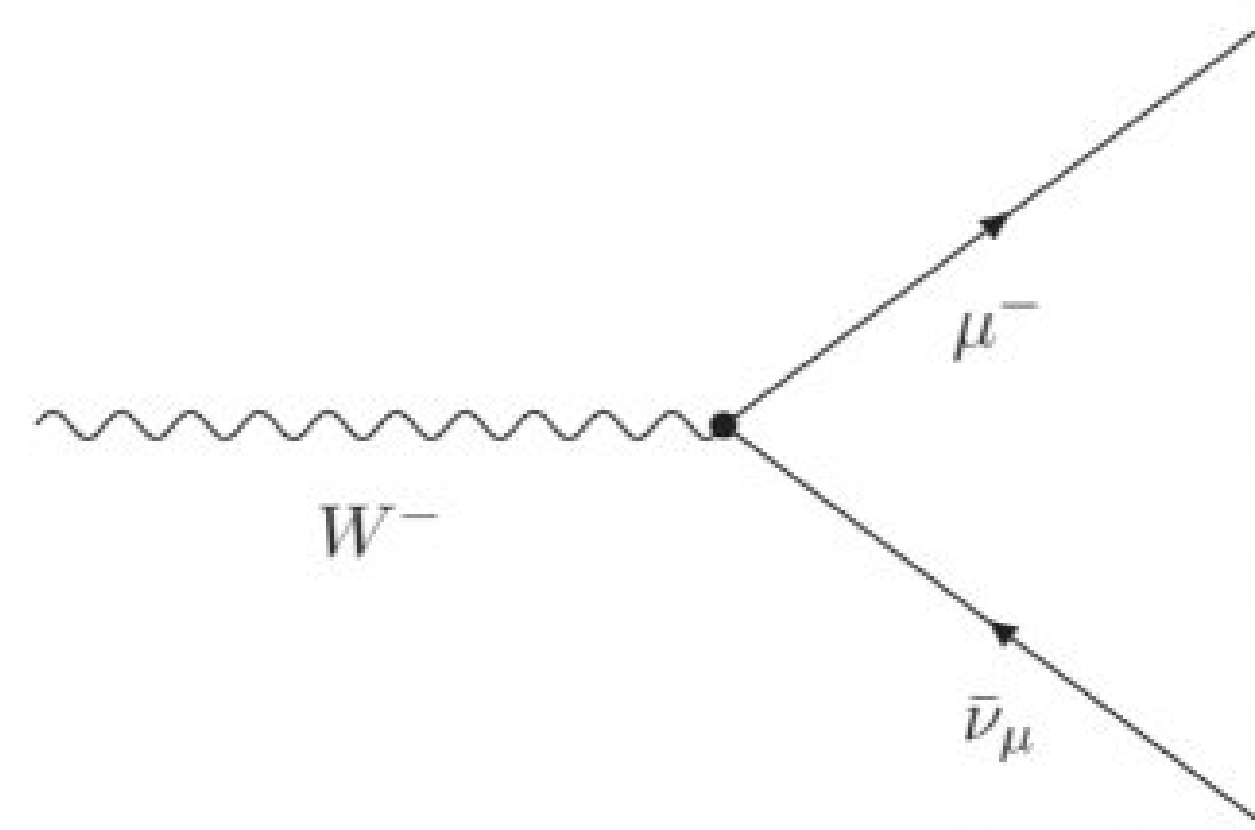
$M_T = 82.9 \text{ GeV}$
 $p_T \text{ muon} = 32.8 \text{ GeV}$
 $E_T^{\text{miss}} = 52.4 \text{ GeV}$

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:

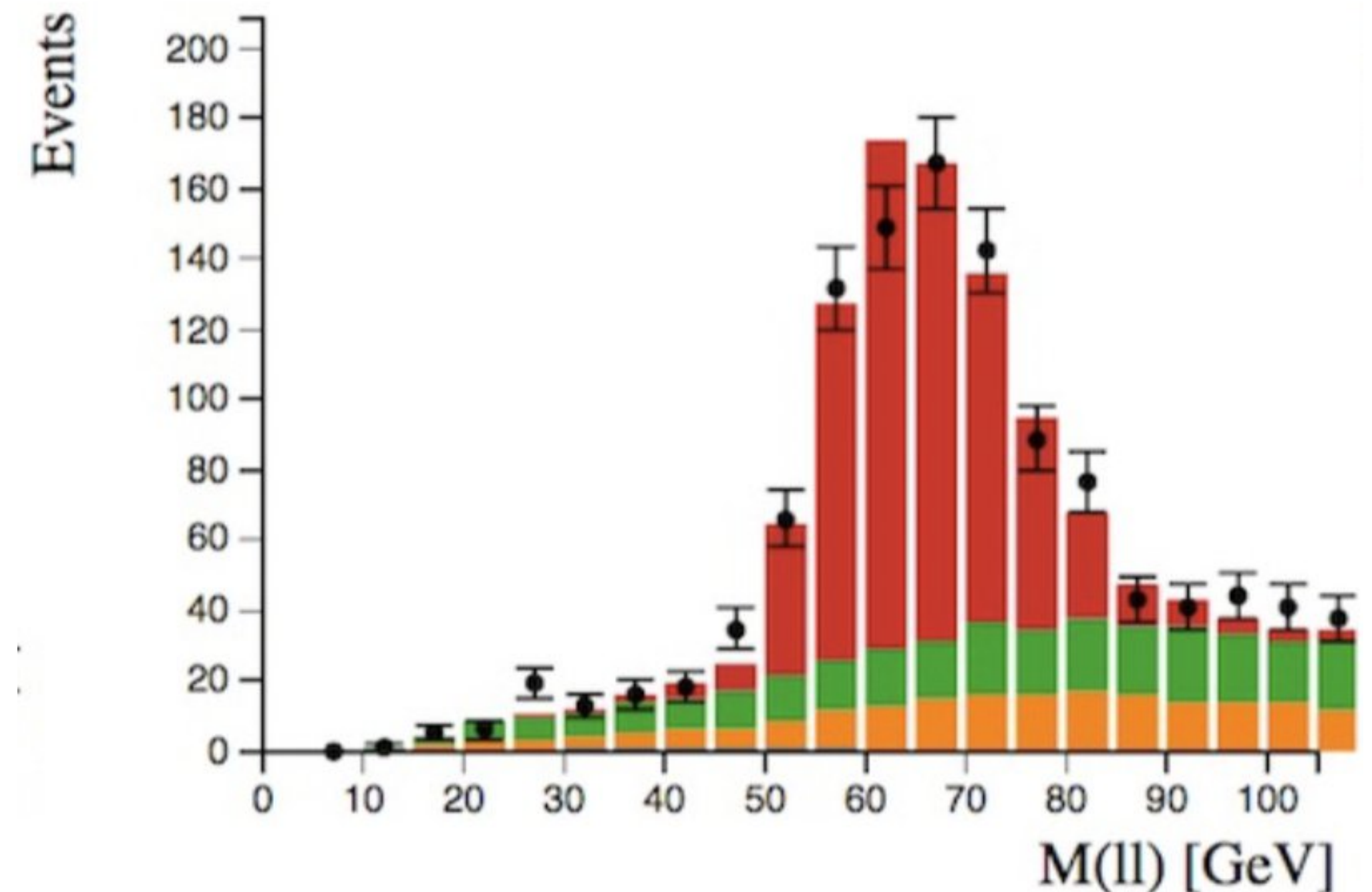
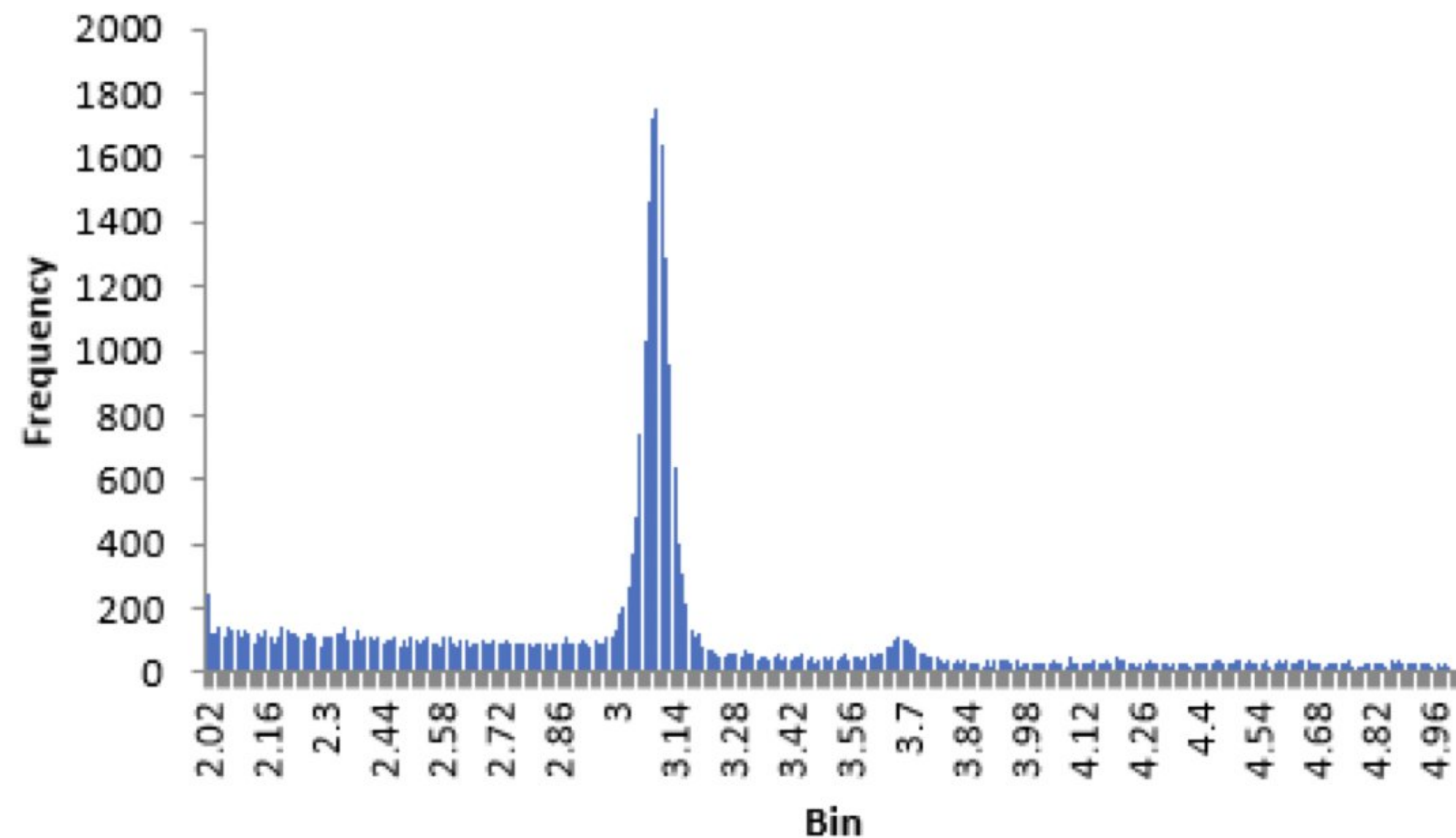


Handwritten equation: $E^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2$. Labels with arrows point to the terms: 'energy' points to E^2 , 'mass' points to m , 'speed of light' points to c^2 , and 'momentum' points to p .



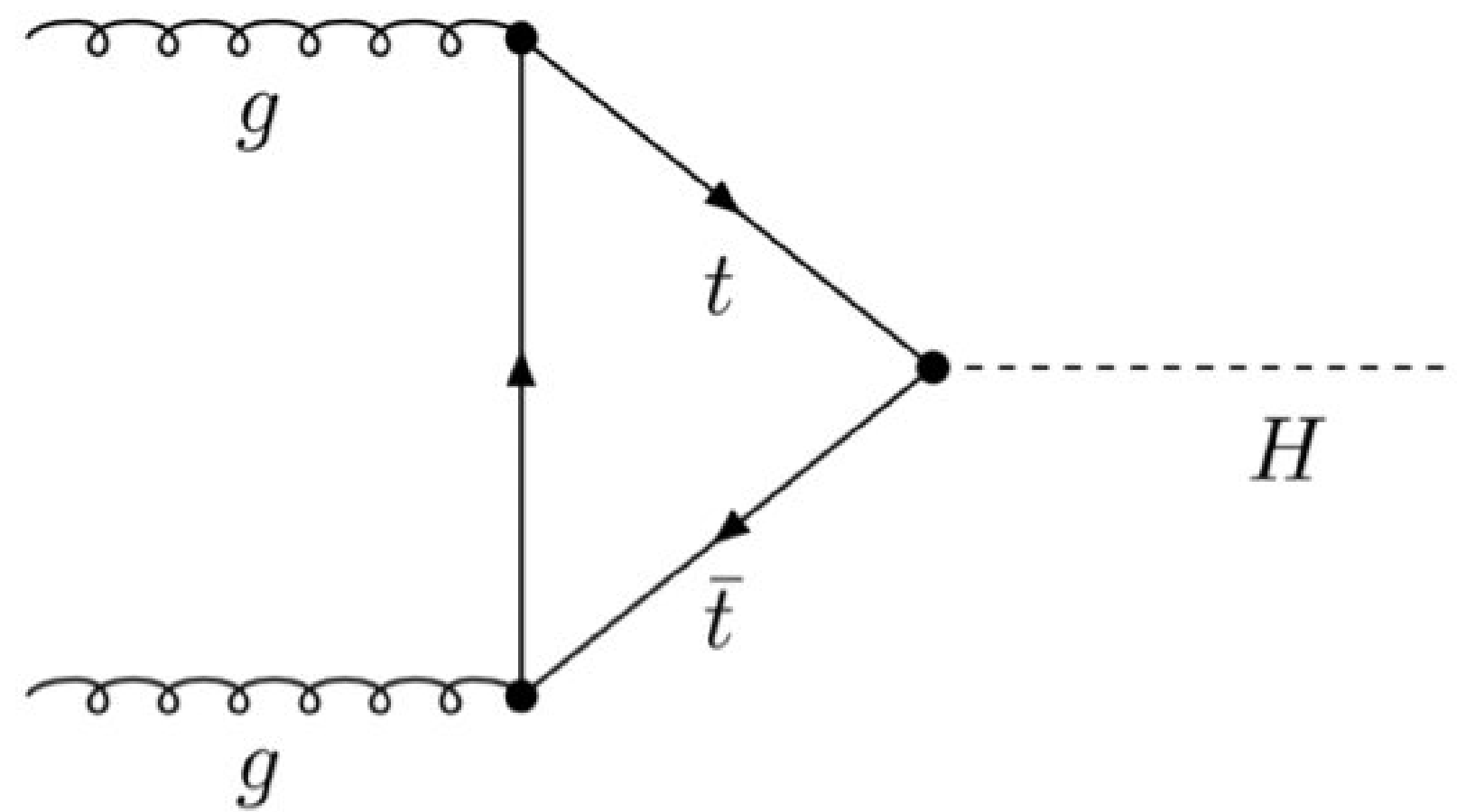
Rozkład masy

- 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:



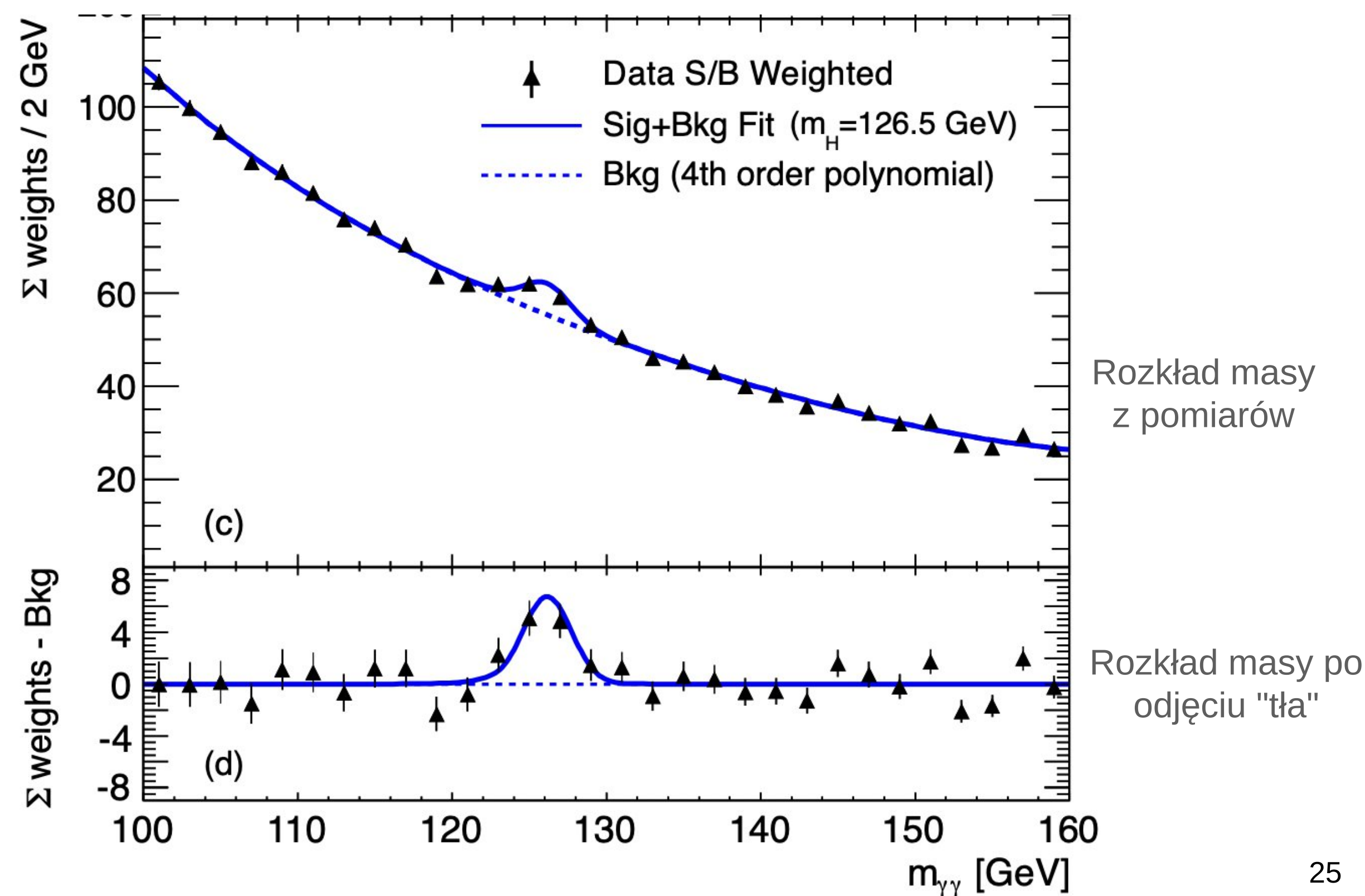
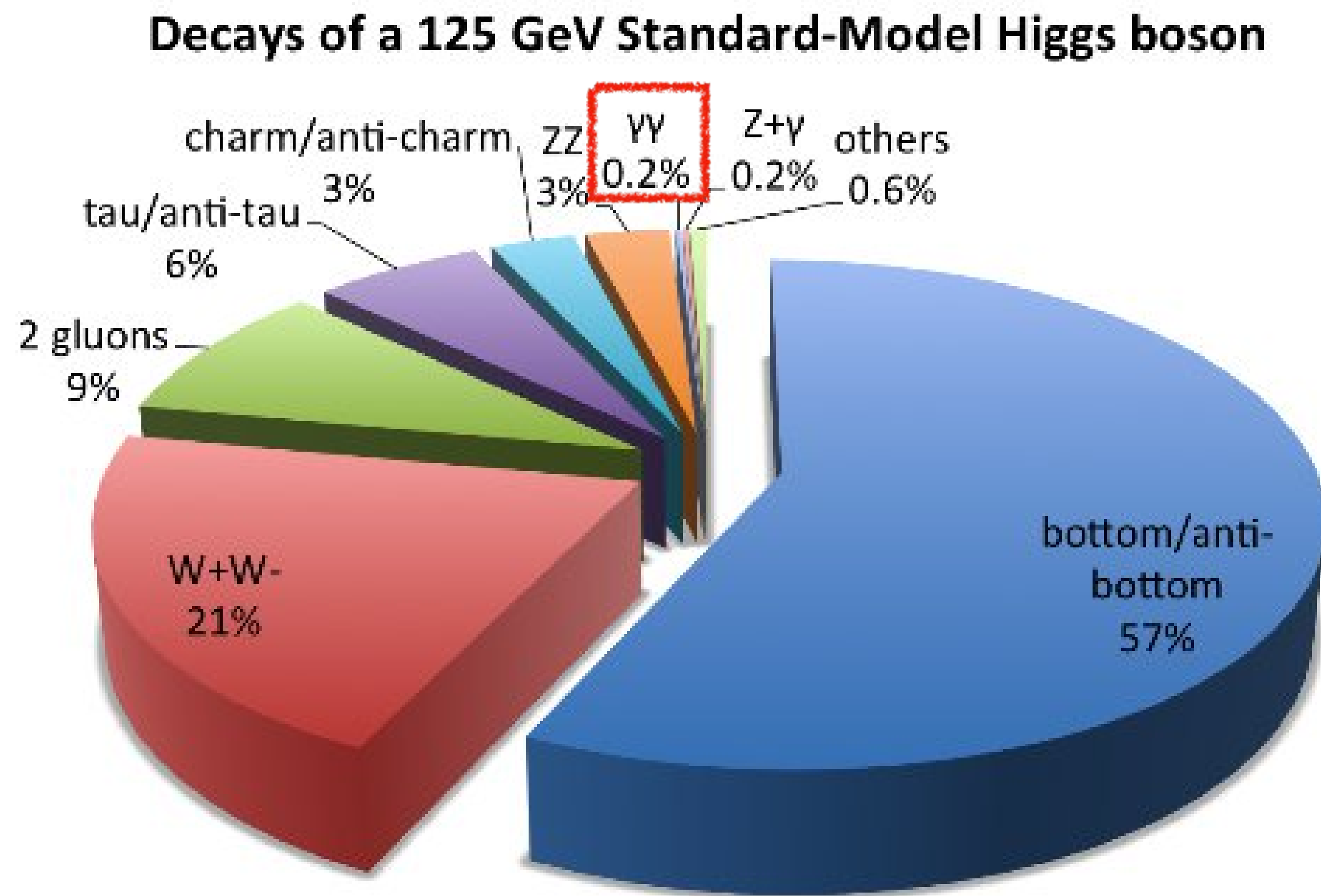
Cząstka Higgsa - produkcja

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



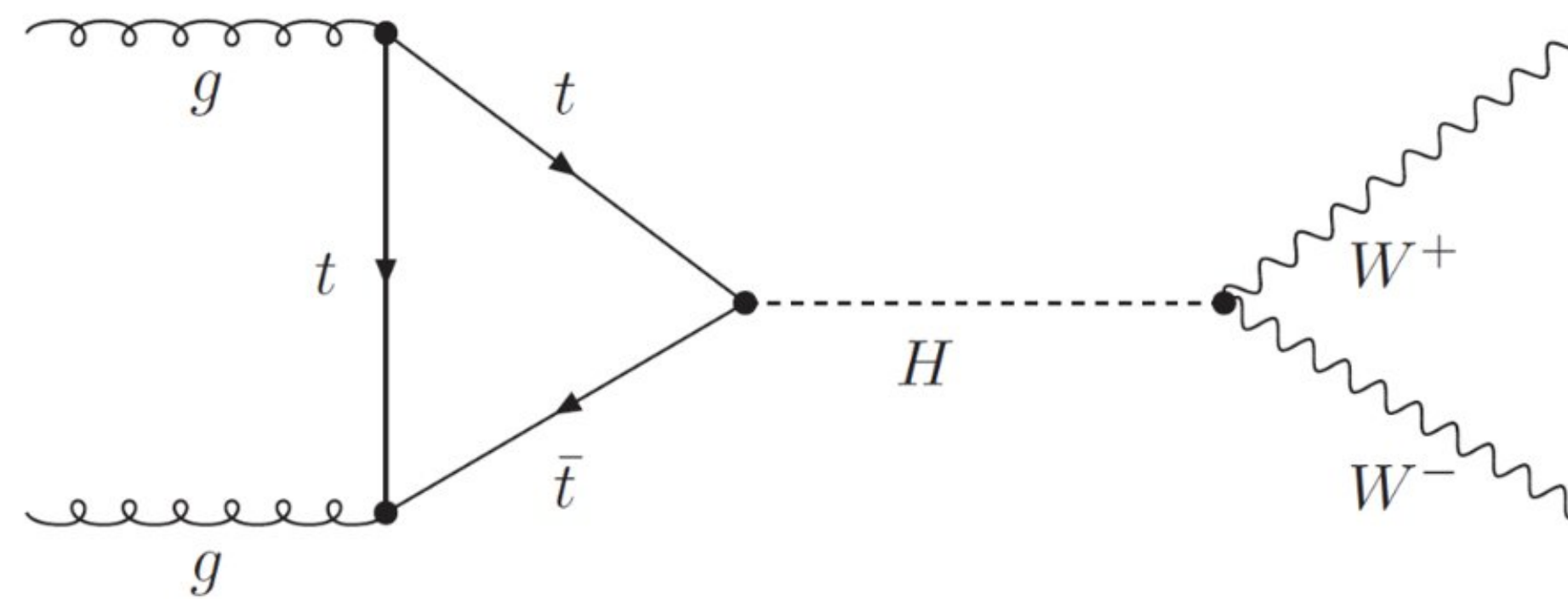
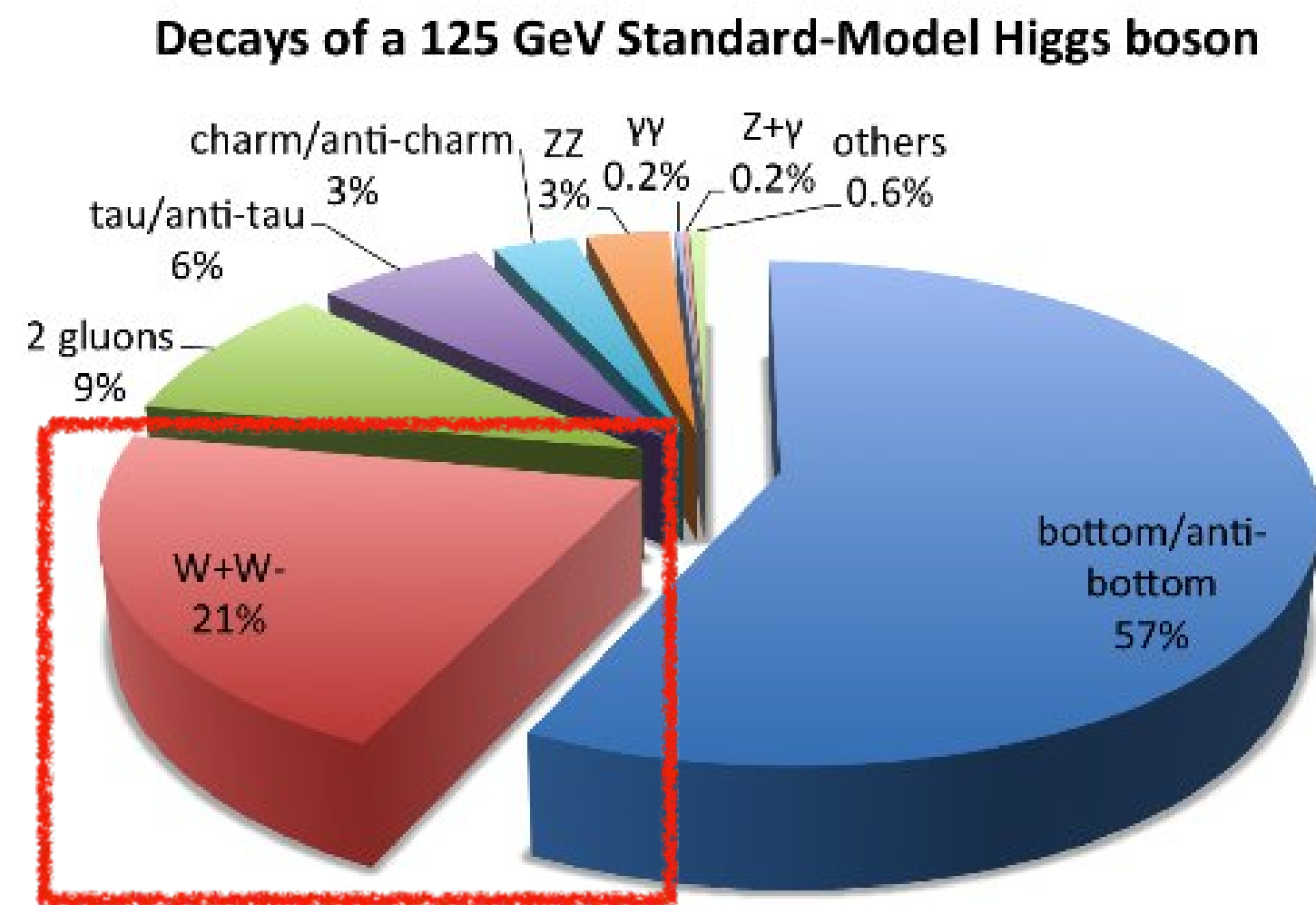
Cząstka Higgsa - rozpad

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

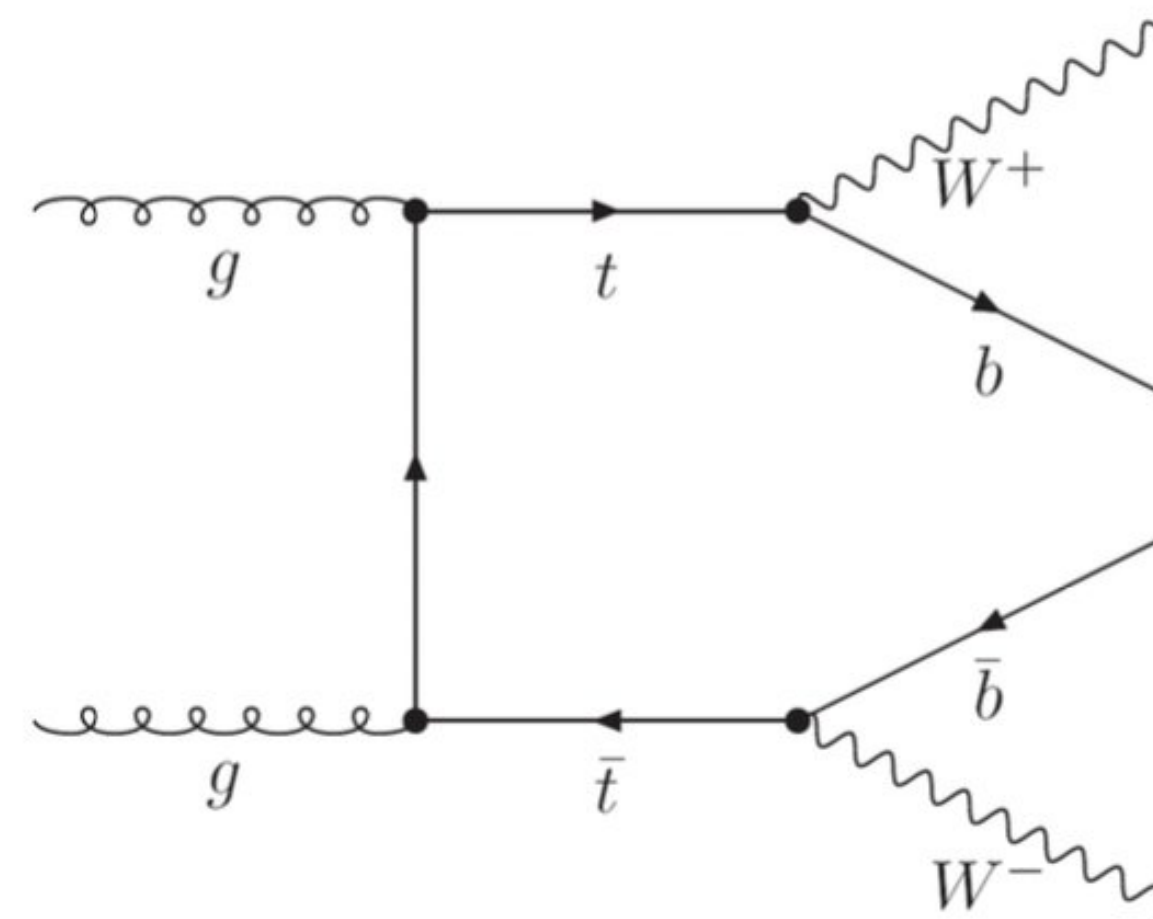


Cząstka Higgsa - rozpad

- 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