

# INTERNATIONAL MASTERCLASSES HANDS ON PARTICLE PHYSICS

Faculty of Physics, Warsaw University of Technology

Wydział Fizyki Politechniki Warszawskiej

Jan Pluta, Zakład Fizyki Jądrowej

28. 03. 2015



# Wstęp do fizyki cząstek elementarnych

1. Świat jest piękny i ciekawy, poraża swą różnorodnością, a jednocześnie prostotą praw, które rządzą całą przyrodą.

2. Wśród wszystkiego, co na świecie istnieje, człowiek wyróżnia się tym, że ma świadomość swego istnienia i stara się zrozumieć strukturę materii, której sam jest cząstką.

3. Jeśli więc podziwiasz górskie krajobrazy, zachwyca Cię tęcza, uśmiechasz się do bajecznie kolorowych kwiatów, to wiedz, że dostrzegasz tylko ostatni element piękna, które odnajdziesz wchodząc w świat struktury atomów i poznając prawa jakimi kierują się elementarne składniki materii, aby tworzyć kolejne stopnie tej struktury prowadzące ostatecznie do tego, co podziwiasz swymi zmysłami.



Każde dziecko zadaje kiedyś pytanie:  
„Co na świecie jest najmniejsze?”

kilometry

metry

centymetry

milimetry

A gdyby tak powiększać ...  
bardziej i bardziej ???

?

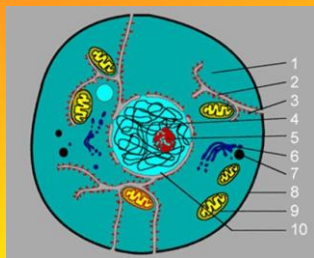
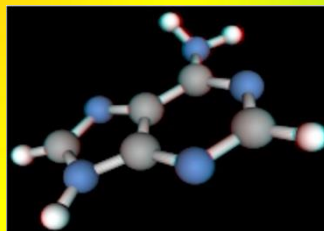


**Można też zapytać inaczej.**

**Czy istnieją takie najmniejsze cząstki, które już z niczego mniejszego się nie składają? Nazwiemy je cząstkami elementarnymi.**

**Starożytny filozof – Demokryt z Abdery uważał, że wszystko na świecie składa się z atomów, które są wieczne i niepodzielne.**

**Atomy łączą się w cząsteczki**



**Z cząsteczek zbudowane są komórki organizmów żywych.**



**Z komórek składają się rośliny, zwierzęta i ludzie.**







# Ale czy atomy naprawdę są niepodzielne?

Przecież wiemy o istnieniu ładunków elektrycznych!



Wystarczy potrzeć długopis chusteczką,  
a na stole rozsypać skrawki papieru



**Elektryzowanie, to rozdzielanie ładunków elektrycznych.**

## **Pytania?**

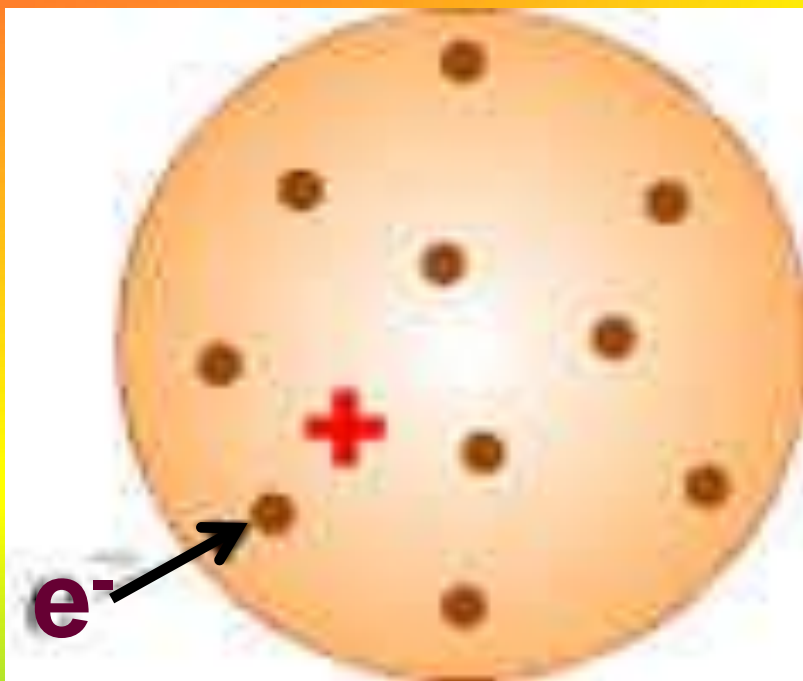
- 1. A gdzie te ładunki są w atomie?**
- 2. Skoro ładunki można rozdzielać, to chyba jednak atom jest podzielny ? !**

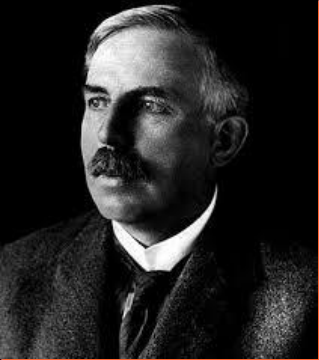


Ładunki elektryczne są dodatnie i ujemne.

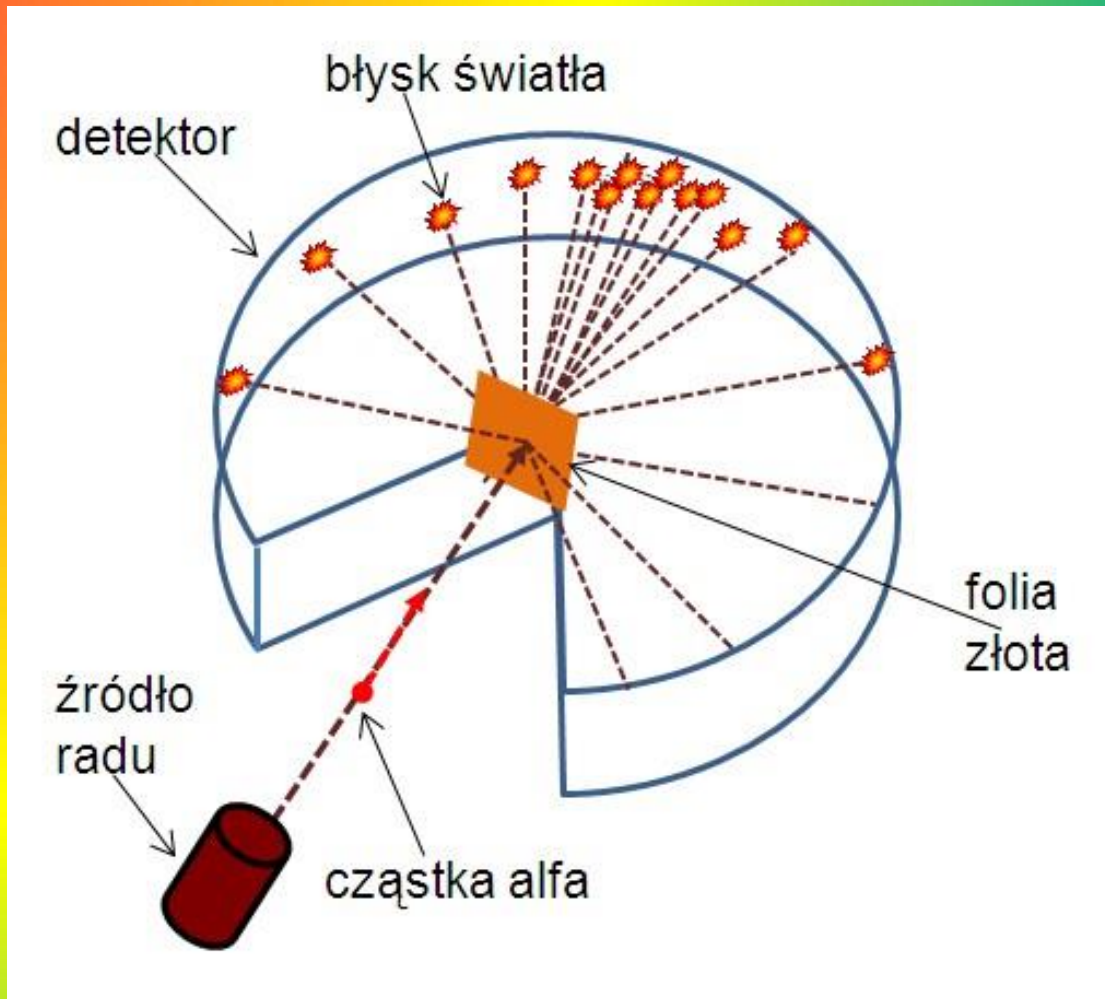
Jak one są rozmieszczone w atomie?

### Model atomu Thomsona, 1904 r.





Angielski fizyk Ernest Rutherford w 1911 r. sprawdził jak cząstki alfa przechodzą przez cienką folię ze złota.



**Na ogół przechodzą; bywa jednak, że odbijają się – ale od czego?**  
(Wiedziano już, że masa cząstek alfa jest dużo większa, niż masa elektronów.)



**Jądro atomowe składa się z protonów (naładowanych dodatnio) i neutronów (obojętnych elektrycznie)**



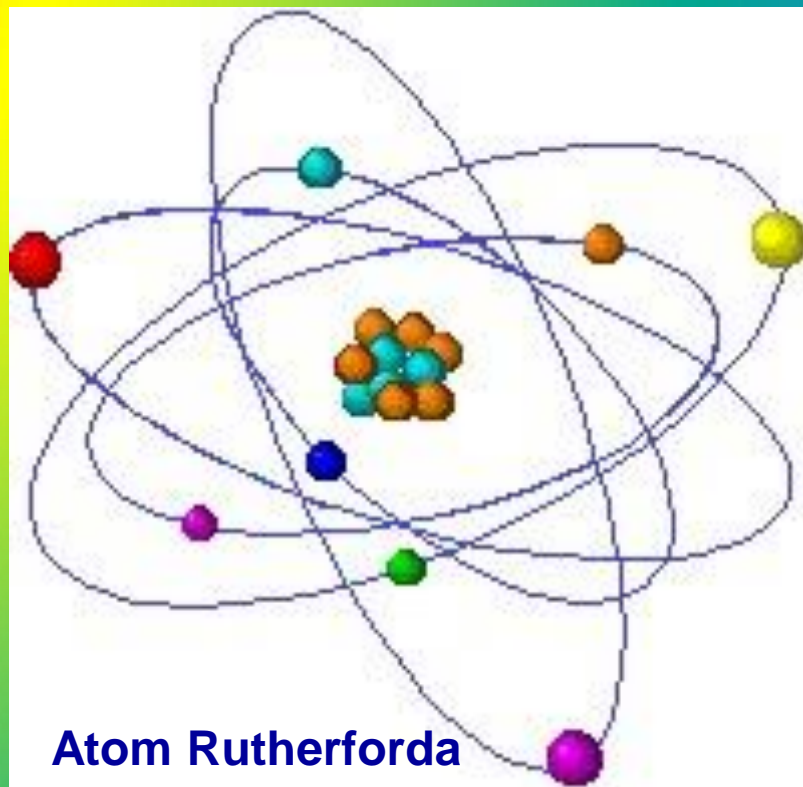
**Pojawiają się jednak dwa zasadnicze pytania:**

1. Czy protony i neutrony, w których jest prawie cała masa atomu, składają się z jakichś mniejszych cząstek?

**(Jakie cząstki są elementarne?)**

2. Dlaczego protony nie rozlatują się, skoro są tak blisko siebie ?

**(Jakie oddziaływania występują w przyrodzie?)**



**Historia fizyki jest jak fascynująca  
opowieść detektywistyczna...**

**Zachęcam do przeczytania książki  
prof. A. K. Wróblewskiego  
*„Historia Fizyki”***

# Jak ewoluowała nasza wiedza w XX wieku?

J. Nowożyłow

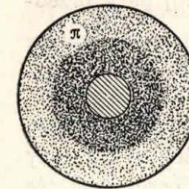
## CZĄSTKI ELEMENTARNE



WARSZAWA 1961  
PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE

się one obserwacji. Struktura obserwowana w doświadczeniach jest jakby nałożeniem się chmur wirtualnych, związanych z poszczególnymi procesami i różniących się swym promieniem.

Ogólny obraz nukleonu możemy naszkicować w sposób następujący. W części środkowej nukleonu znajduje się pewnego rodzaju jądro — „rdzeń” o promieniu  $0,2—$



Rys. 38. Struktura nukleonu  
W środku „rdzeń” o promieniu  $0,2—0,4 \cdot 10^{-13}$  cm, który otoczony jest chmurą mezonową

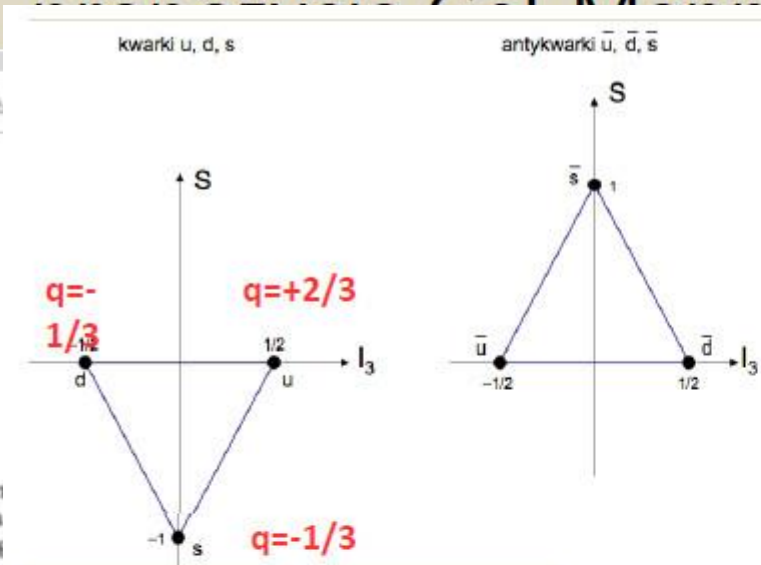
$—0,4 \cdot 10^{-13}$  cm, w którym ważną rolę odgrywają cząstki dziwne (mezony  $K$  i hiperony) oraz pary nukleon-anty-nukleon. Jest to obszar, o którym nic nie wiemy. Część zewnętrzną wypełnia chmura mezonowa (rys. 38); część ta jest jeszcze mało zbadana, z wyjątkiem zewnętrznego brzegu chmury mezonowej, który jest dostępny analizie teoretycznej.

Strukturę nukleonu można wykryć w doświadczeniach nad zderzeniami cząstek z nukleonem. Ciekawe wyniki dały doświadczenia polegające na rozpraszaniu szybkich elektronów na protonach. Wyniki tych doświadczeń można jakościowo przewidzieć z góry, opierając się na istnieniu wirtualnej struktury nukleonu. Możemy oczekiwać, że wszystkie naładowane cząstki wirtualne, wchodzące w skład nukleonu, muszą również rozpraszać elektrony. Ponieważ proton znajduje się przez pewien okres czasu w postaci neutronu i pionu  $\pi^+$ , następnie w postaci hiperonu  $\Lambda^0$  i mezonu  $K^+$  itd., przeto łączne rozpraszanie składa się niejako z poszczególnych udziałów, wniesionych przez rozpraszanie elektronów na mezonie  $\pi^+$ , na mezonie  $K^+$  itd. Oczywiście, w doświadczeniu obserwujemy rozpraszanie na protonie jako całości.

W rezultacie rozpraszanie szybkich elektronów przez proton różni się od rozpraszania ich przez cząstkę p u n k-



# Jak ewoluowała nasza wiedza w XX wieku?



wszystkie znane wówczas szątki można "poskładać" z 3 cegiełek o dość dziwnych własnościach

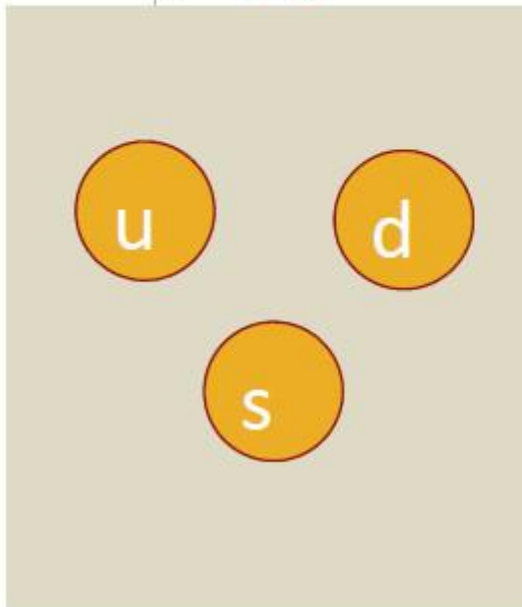
- między innymi ich ładunek musi być ułamkowy ( $1/3$  i  $2/3$ )

np.  
proton = uud



Volume 8, num 1

If we assume...  
ons and meson  
the broken "eig  
look for some  
tion. A highly



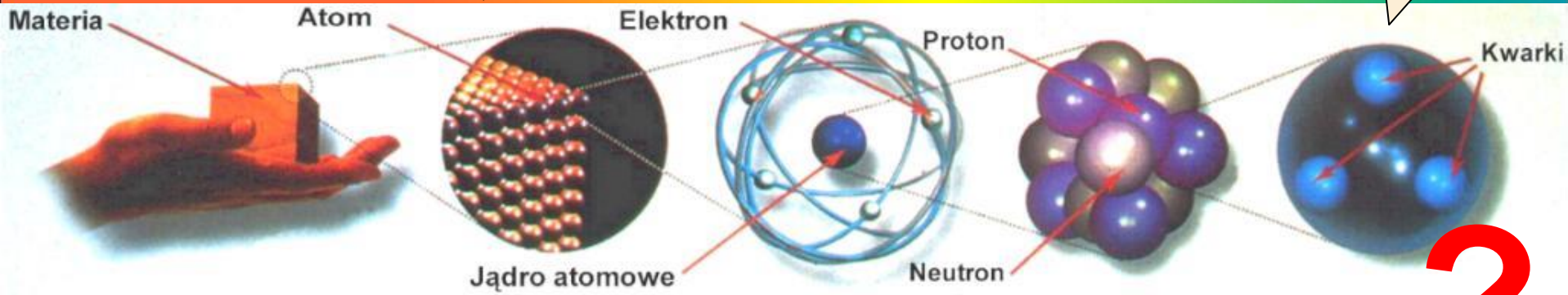
"Praca z propozycją istnienia kwarków została przyjęta do druku w *Physics Letters* tylko dlatego, że autorem był Gell-Mann. Redaktor pomyślał sobie: ta praca jest zwariowana, ale jeśli ją zaakceptujemy i okaże się nonsensem, to blamaż spadnie na Gell-Manna, a nie na *Physics Letters*. Jeśli jednak ją odrzucimy a okaże się prawdziwa, to będą się z nas wyśmiewać."



Harry Lipkin (1997)

# Początek XX-go wieku

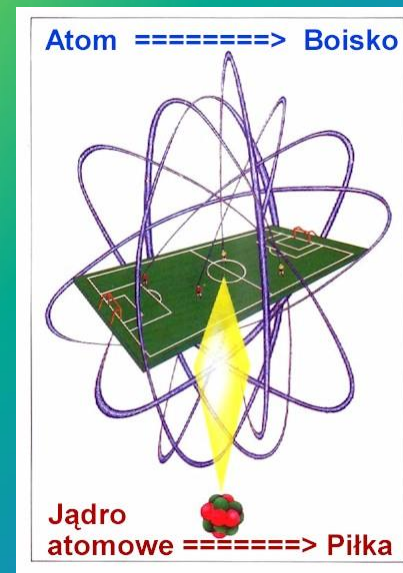
# Początek XXI-go wieku



$10^{-1}m$

$10^{-10}m$

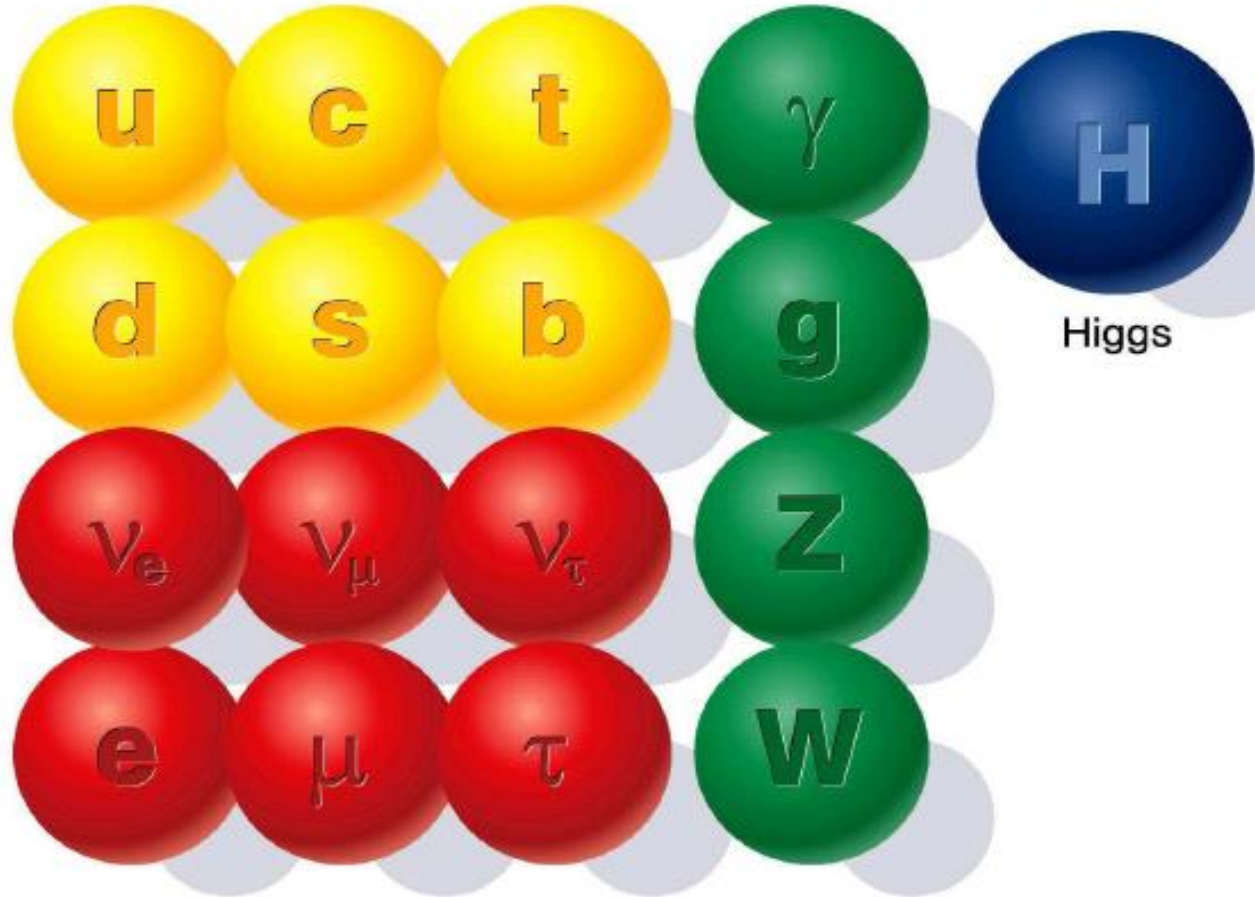
$10^{-14}m$





# Cząstki elementarne

kwarki



fermiony

leptony

bozony

nośniki oddziaływań



# Elementarne składniki materii

Leptony					Kwarki			
Nazwa	Symbol	Masa (MeV)	Czas życia (s)	Ładunek elektr.	Nazwa	Symbol	Masa (MeV/c <sup>2</sup> )	Ładunek elektr.
elektron	e	0.511	trwały	-1	down (dolny)	d	5.0 ÷ 8.5	-1/3
neutrino elektronowe	$\nu_e$	<7.3 *10 <sup>-6</sup>	trwałe	0	up (górny)	u	1.5 ÷ 4.5	2/3
mion	m	105.66	2.197 *10 <sup>-6</sup>	-1	strange (dziwny)	s	80 ÷ 155	-1/3
neutrino mionowe	$\nu_\mu$	<0.17	trwałe	0	charm (powabny)	c	(1.0 ÷ 1.4) *10 <sup>3</sup>	2/3
tau	t	1777.0	3.1 *10 <sup>-13</sup>	-1	bottom/beauty (piękny)	b	(4.0 ÷ 4.5) *10 <sup>3</sup>	-1/3
neutrino taonowe	$\nu_\tau$	<18	trwałe	0	top/truth (prawdziwy)	t	174 *10 <sup>3</sup>	2/3

# Fundamentalne oddziaływania w przyrodzie

## Oddziaływania fundamentalne i ich nośniki

Nośnik oddziaływania	Ładunek elektr.	Masa*c <sup>2</sup> (GeV)	Rodzaj oddziaływania	Zasięg	Względne natężenie
grawiton (hipotetyczny)	0	0	grawitacyjne	nieskończony	10 <sup>-38</sup>
foton	0	0	elektromagnetyczne	nieskończony	10 <sup>-2</sup>
bozony pośredniczące	W <sup>+</sup>	+1	słabe	10 <sup>-18</sup> m	10 <sup>-5</sup>
	W <sup>-</sup>	-1			
	Z <sup>0</sup>	0			
8 gluonów	0	0*	silne	10 <sup>-15</sup> m	1

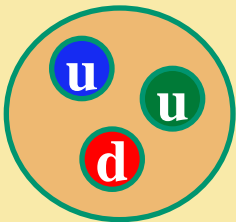
# Elementarne składniki struktury materii (1)

Jaki jest więc obraz struktury materii obecnie, na początku XXI wieku?

Wiemy już, że jądro atomowe składa się z protonów i neutronów, a te składają się z kwarków. Jak to jest możliwe, skoro proton posiada elementarny ładunek elektryczny i mniejszych ładunków w przyrodzie nikt nigdy nie obserwował. Jakie są więc ładunki kwarków

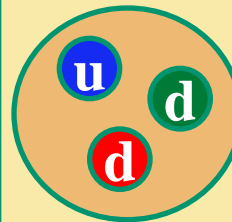
Hipoteza, którą w 1964 roku wysunęli amerykańscy fizycy: Gell-Mann i Zweig zakłada, że kwarki posiadają ładunki stanowiące  $2/3$  oraz  $-1/3$  ładunku protonu. Kwark posiadający ładunek  $2/3$  nazwano górnym (po angielsku „up”) i oznaczono symbolem „ $u$ ”, a kwark posiadający ładunek  $-1/3$  nazwano dolnym (po angielsku „down”) i oznaczono symbolem „ $d$ ”.  
Czy można „zbudować” proton i neutron z trójek kwarków  $u$  i  $d$ ?

Spróbujmy „skonstruować” proton i neutron z trójek kwarków  $u$  i  $d$  tak, aby ładunek protonu równy był  $+1$ , a ładunek neutronu  $0$ .



kwarkowa struktura protonu

- skład kwarkowy (uud)
- ładunek:  $1=2 \cdot 2/3 - 1/3$



kwarkowa struktura neutronu

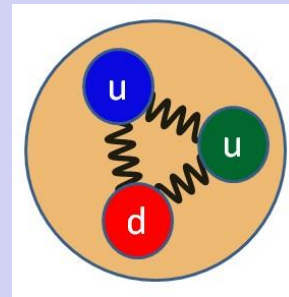
- skład kwarkowy (udd)
- ładunek:  $0=2 \cdot (-1/3) + 2/3$



## Elementarne składniki struktury materii (2)

A jakie siły sprawiają, że kwarki tworzą zwarte obiekty, takie jak protony i neutrony? Są to tzw. **oddziaływania silne**, te same, które wiążą protony i neutrony w jądra atomowe. Teorią, która opisuje oddziaływania kwarków jest **chromodynamika kwantowa**. Zgodnie z tą teorią, łączenie kwarków w obiekty złożone odbywa się za pośrednictwem **nośników oddziaływań**, (ang. „mediators”) którymi, w przypadku oddziaływań silnych, są cząstki zwane **gluonami**. Oddziaływanie odbywa się poprzez wymianę gluonów pomiędzy kwarkami.

Struktura protonu, w której uwidoczniono oddziaływanie pomiędzy kwarkami. Oddziaływanie odbywa się poprzez wymianę gluonów, które przenoszą ładunek kolorowy. Oddziaływanie to zaznaczono w postaci linii podobnych do sprężyny.



**Zróbmy mały test – najwięcej jakich cząstek elementarnych zawiera ciało człowieka: elektronów, kwarków „u”, kwarków „d”?**

# Model Standardowy – współczesna teoria cząstek elementarnych

## Własności:

- Opisuje trzy spośród czterech oddziaływań: elektromagnetyczne, słabe i silne.
- Nie opisuje oddziaływań grawitacyjnych.
- Zawiera w sobie wcześniejsze teorie:
  - Mechanika kwantowa,
  - Chromodynamika kwantowa
  - Teoria oddziaływań elektroslabych
- Ma 19 swobodnych parametrów, których wartości nie wyjaśnia.
- Zgadza się z doświadczeniem do ułamków procenta.
- Wyjaśnia pochodzenie masy cząstek, pod warunkiem istnienia bozonu Higgsa. Warunek ten jest spełniony: 4 lipca 2012 r !!!



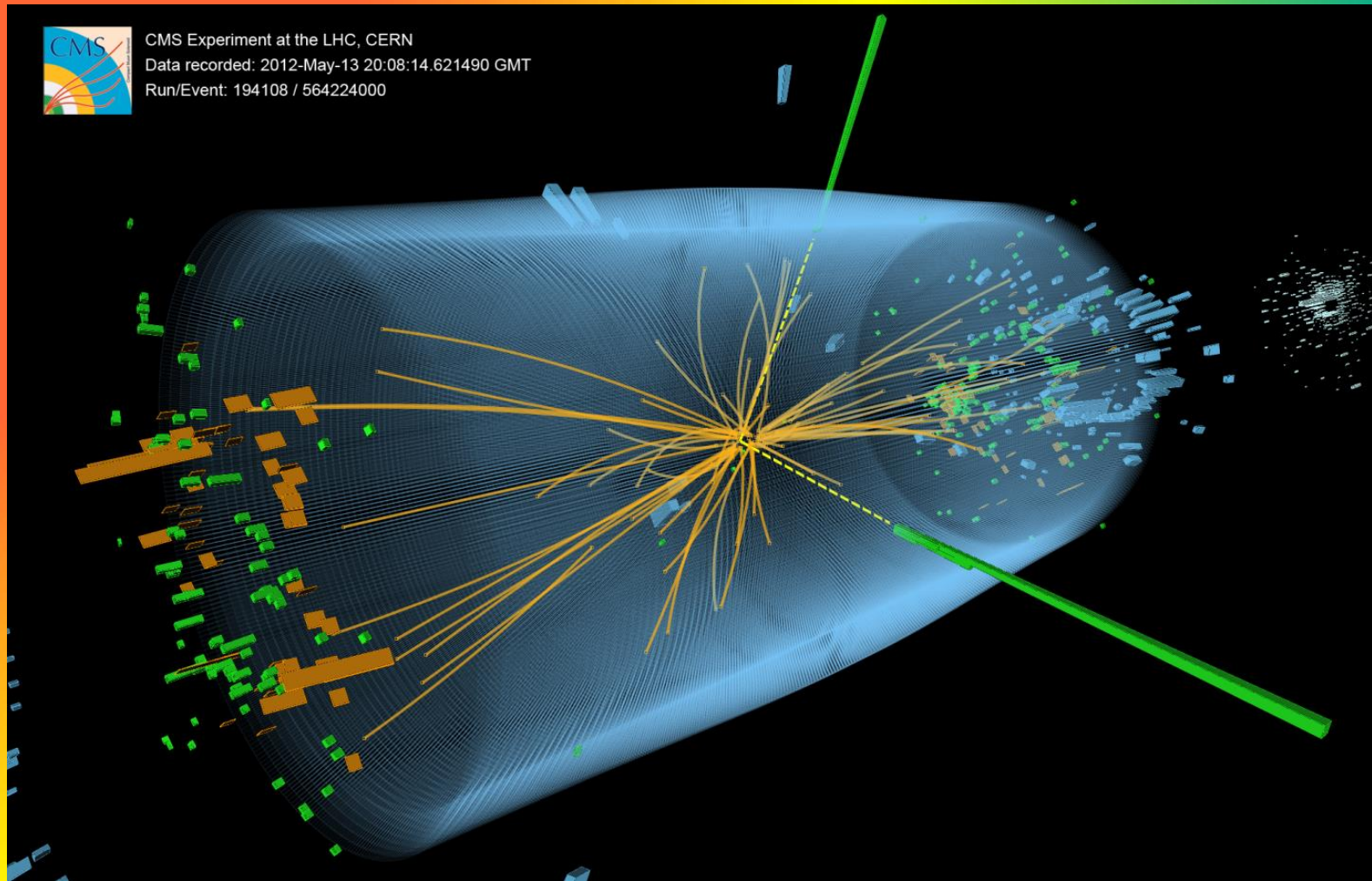
# Co to jest „bozon Higgsa” i jaki ma związek z masą

- W modelu standardowym masa cząstek pojawia się wskutek tzw. „mechanizmu Higgsa” czyli oddziaływania cząstek z „polem Higgsa”.
- Silniej oddziałująca cząstka nabywa większą masę.
- Nośnikiem tych oddziaływań jest **bozon Higgsa**.
- Przewidywania teoretyczne nie określały jednoznacznie jaka ma być masa bozonu Higgsa, co stanowiło trudność doświadczalną
- Czas życia bozonu Higgsa jest bardzo mały  $<10^{-20}$  s i wykryć można go jedynie przez rejestrację produktów jego rozpadu.
- Odkrycie bozonu Higgsa stanowiło fascynującą przygodę dla fizyków w CERN

**Jak zaobserwować bozon Higgsa?  
To jest „szukanie igły w stogu siana”!!!**

**Trzeba zarejestrować cząstki, na które się rozpada,  
zmierzyć ich kierunki i energie i na tej podstawie  
wyliczyć odpowiadającą im masę.**

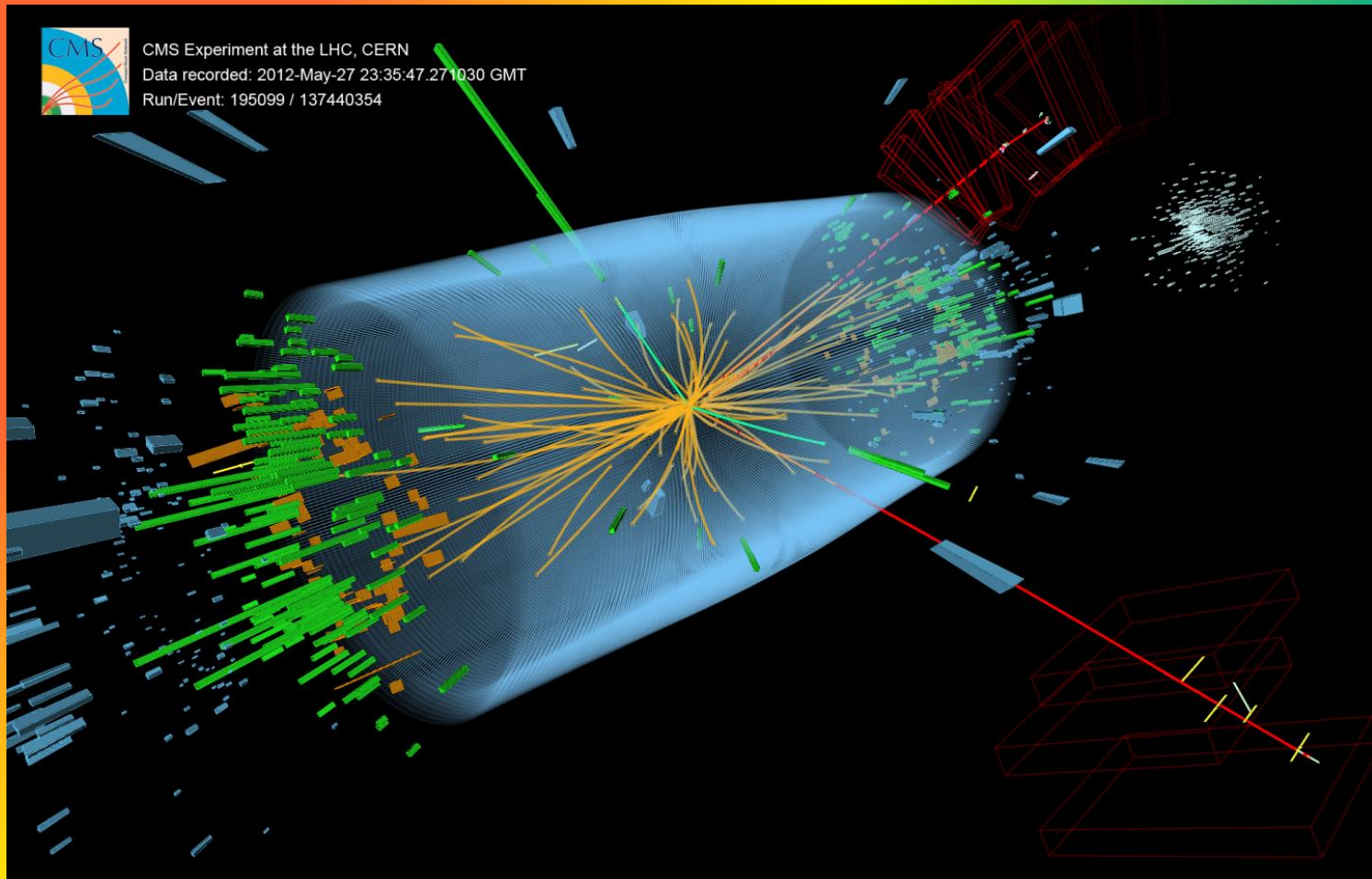
# Przykład 1. rozpad na dwa fotony



Przypadek zarejestrowany w detektorze CMS w 2012 roku, przy energii w środku masy równej 8 TeV. Przypadek jest zgodny z charakterystyką oczekiwaną dla rozpadu standardowego bozonu Higgsa na parę fotonów (żółte, przerywane linie i zielone prostopadłościąny). Przypadek ten może też być efektem znanych procesów tła opisywanych przez model standardowy.

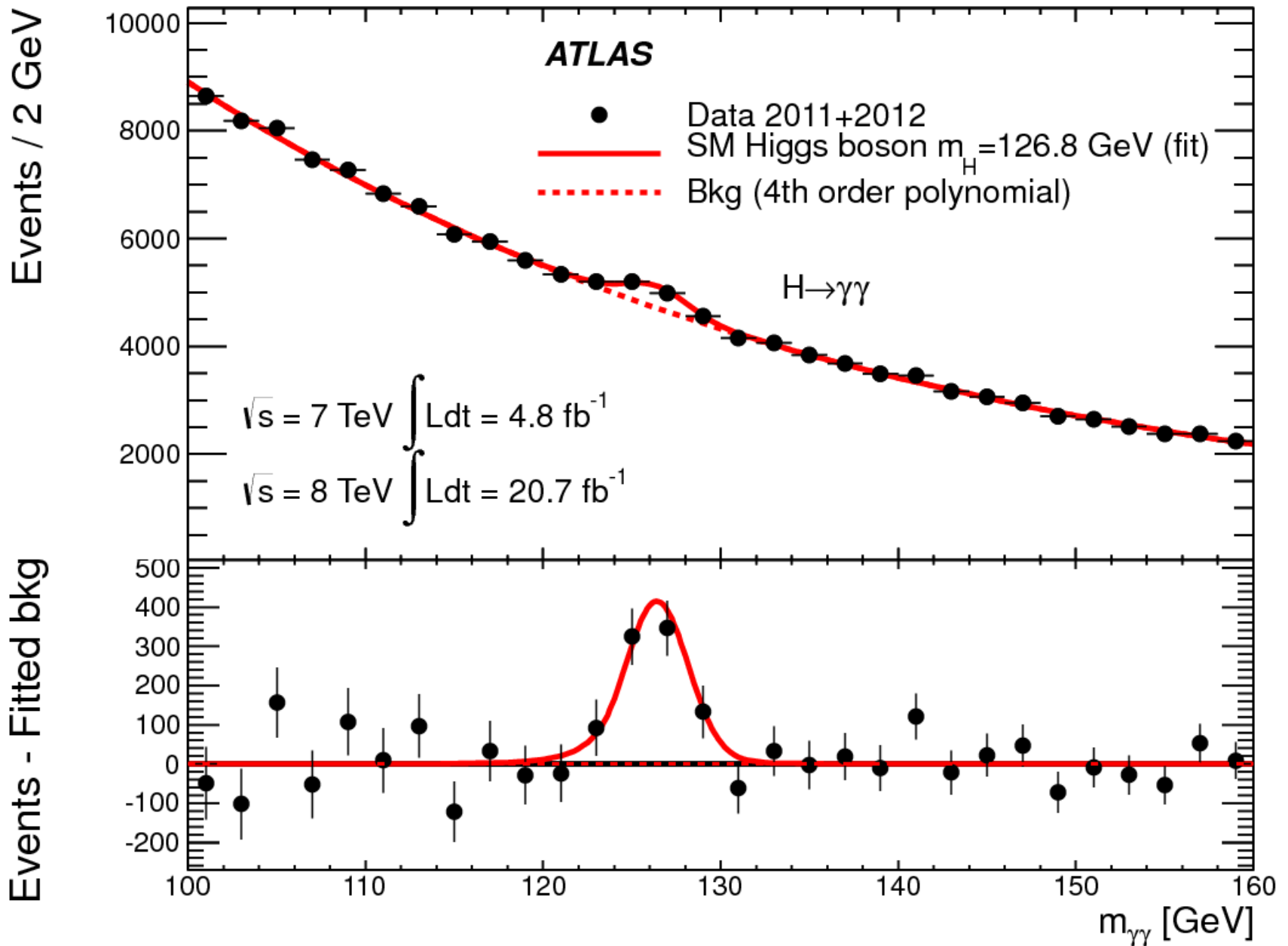


## Przykład 2. rozpad na parę bozonów Z



Przypadek zarejestrowany w detektorze CMS w 2012 roku, przy energii w środku masy równej 8 TeV. Przypadek jest zgodny z charakterystyką oczekiwaną dla rozpadu standardowego bozonu Higgsa na parę bozonów Z, z których jeden rozpadł się na parę elektronów (zielone linie i prostopadłości) a drugi na parę mionów (czerwone linie). Przypadek ten może też być efektem znanych procesów tła opisywanych przez model standardowy.

# Obserwacja bozonu Higgsa w 2013 r. (eksperyment ATLAS)



# Nagroda Nobla w 2013 r. Peter Higgs i Francois Englert

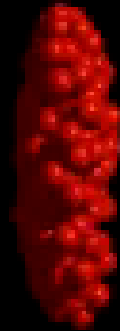
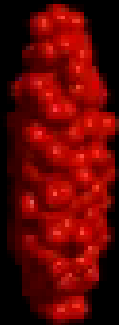






**A jak badać własności  
cząstek elementarnych?**

**Zrobić podobnie, jak Rutherford.  
Zderzać ze sobą protony i neutrony,  
rozbić je i zobaczyć z czego się składają.**



**Zderzenie jąder atomowych.  
modelowanie komputerowe (1)**



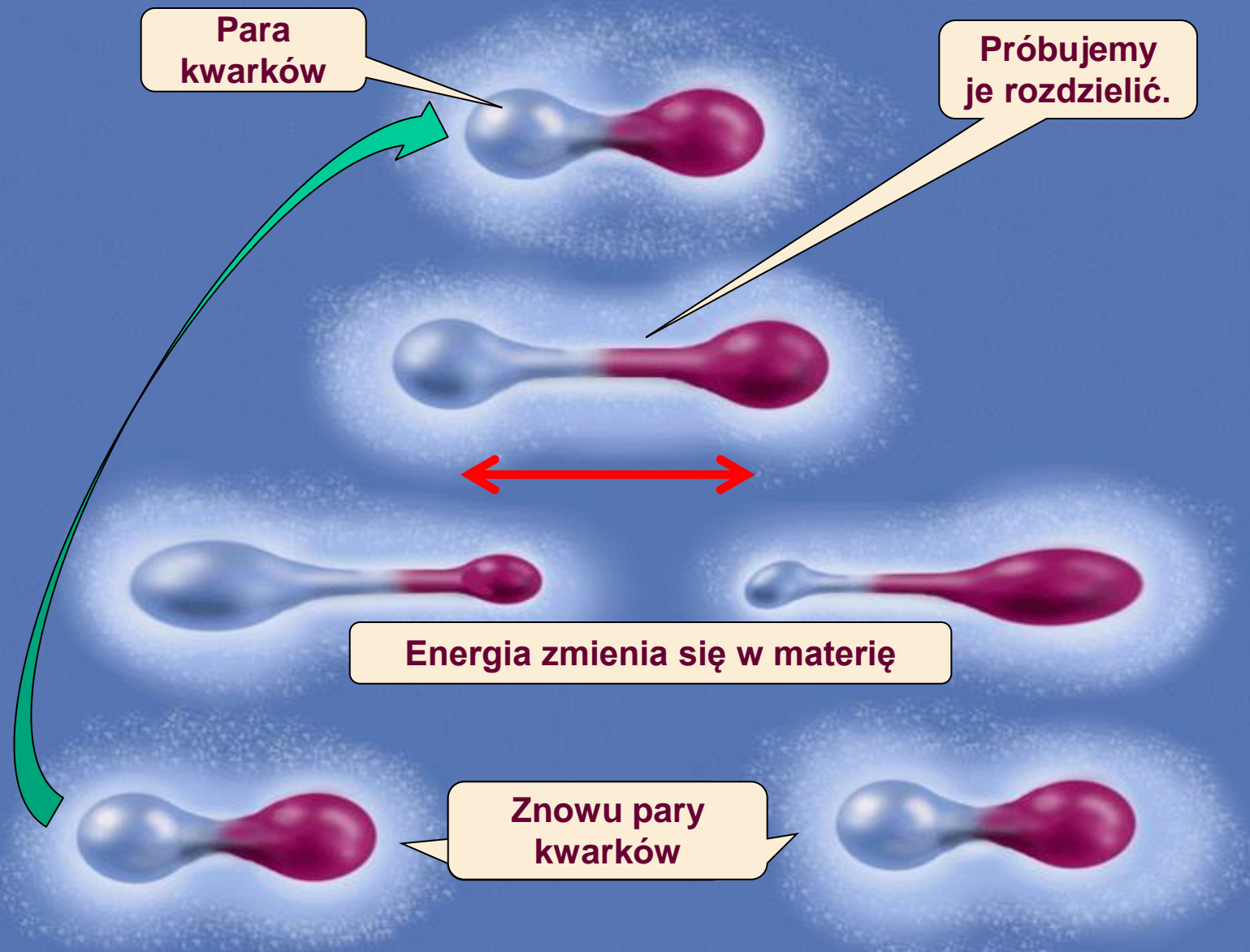
1. **Jak opisać przebieg tego procesu w czasie i przestrzeni?**
2. **Czy można zaobserwować kwarki?**

**Nie, kwarki są uwięzione w hadronach i nie można ich zaobserwować.**

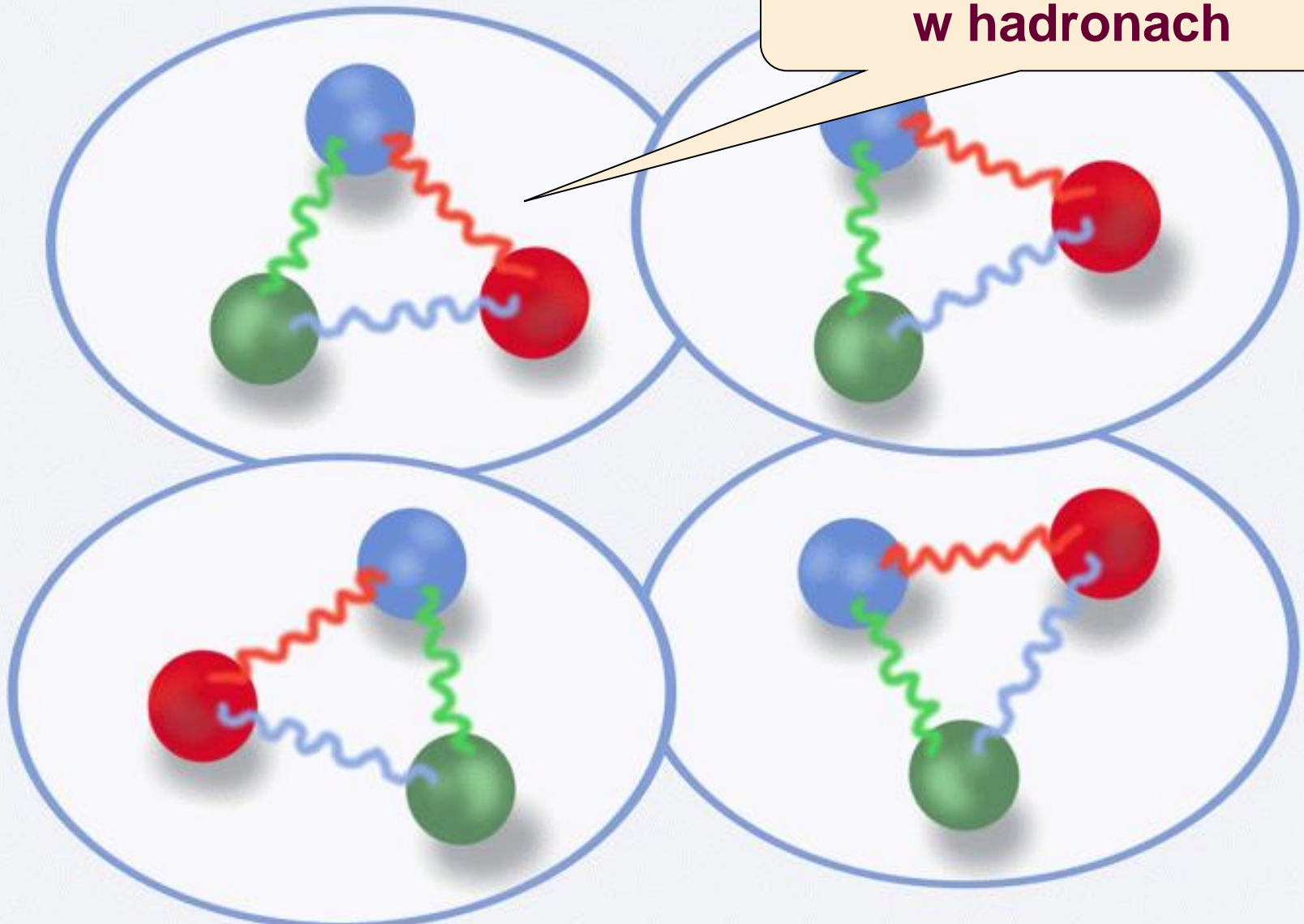
**Dlaczego?**



# Kwarki - cząstki niezwykle; kiedy próbuje się je rozdzielić...



**Kwarki uwięzione są  
w hadronach**



**Pytanie zasadnicze – Jak wydobyć kwarki z hadronów?**



**Ale czy musimy koniecznie  
„wydobywać” kwarki  
z protonów i neutronów?**

**Czy nie lepiej wytworzyć takie warunki,  
w których kwarki będą swobodne,  
„jak ryby w wodzie” ?**

**Przecież, aby badać zwyczaje ryb,  
nie należy ich wyciągać z wody !!!**



# Jak badać zwyczaje ryb?

**Czy  
tak?**

**Nie!**





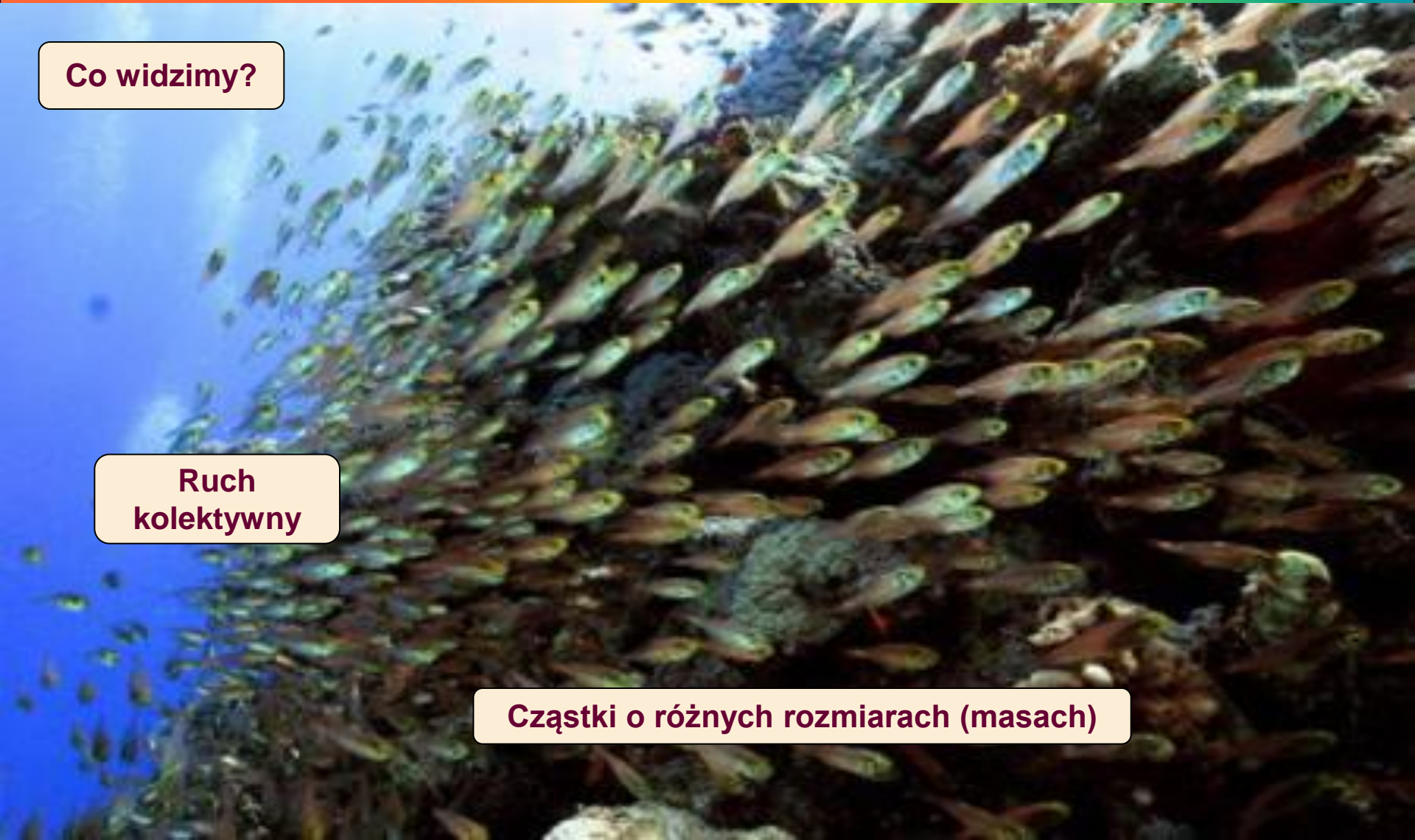
# Jak badać zwyczaje ryb?

## Lepiej samemu zanurkować !!!

Co widzimy?

Ruch  
kolektywny

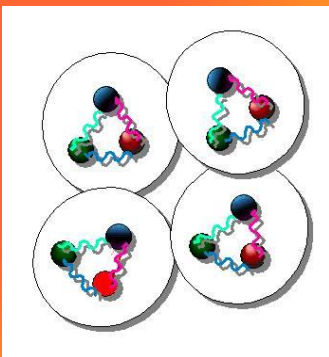
Cząstki o różnych rozmiarach (masach)



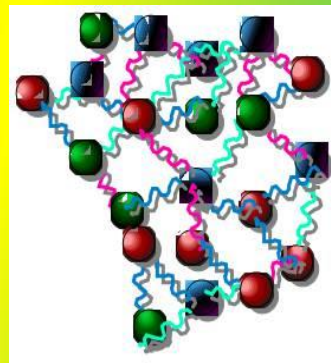
# Jak uwolnić kwarki ?

„Oto jest pytanie!”

Materia hadronowa:  
kwarki  
uwięzione w  
protonach i  
neutronach

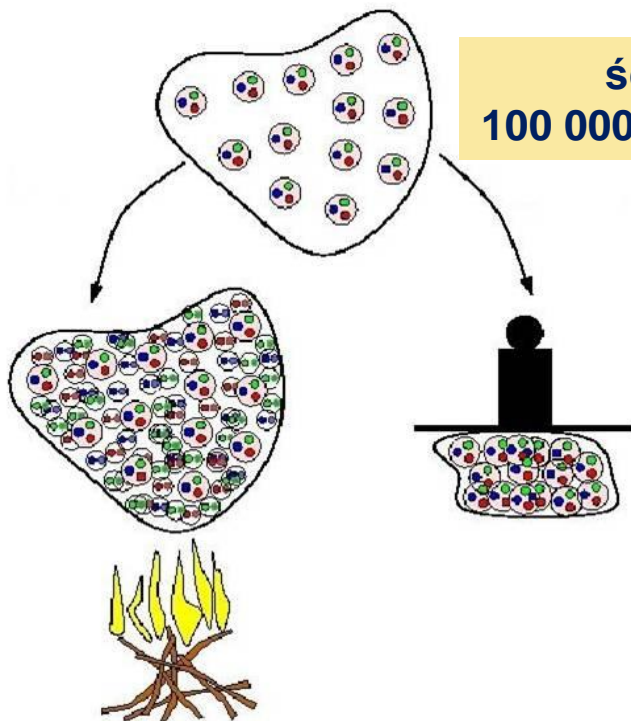


?



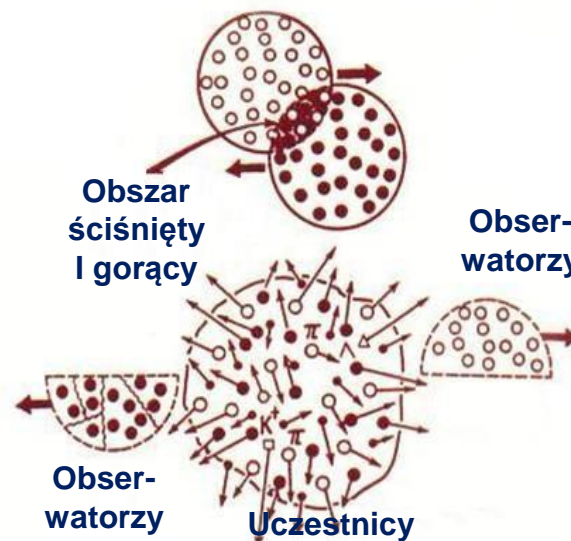
Materia  
kwarkowa  
Kwarki są  
swobodne i  
mogą się  
przemieszcza

ścisnąć  
100 000 000 ton/cm<sup>3</sup>

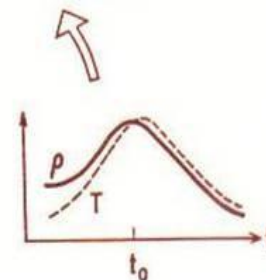


...poprzez  
zderzenia  
ciężkich  
jonów !!!

podgrzać: 1 000 000 000 000 °C

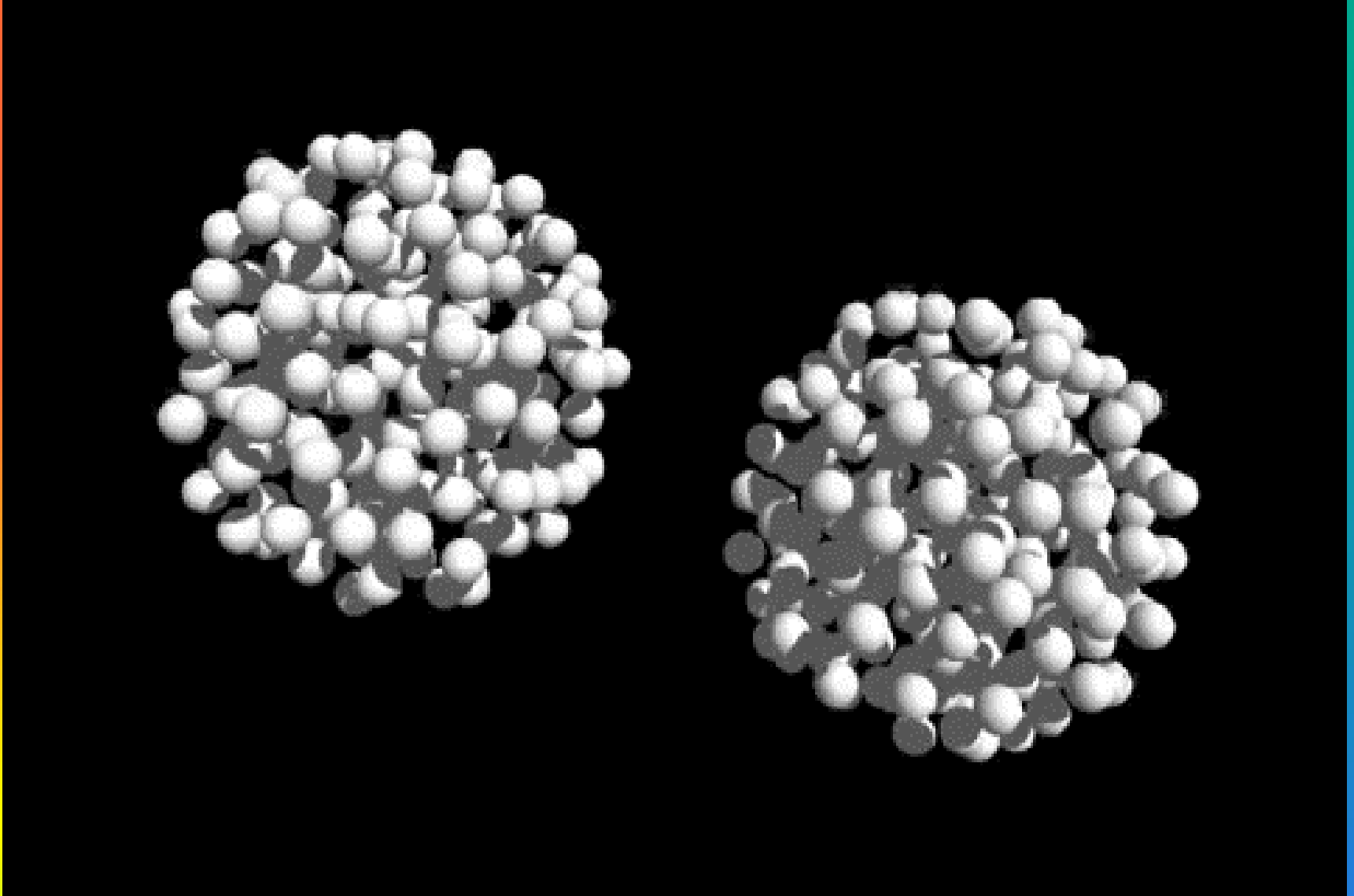


Zmiana  
gęstości,  $\rho$  i  
temperatury,  $T$





# UrQMD – Ultra-relativistic Quantum-Molecular Dynamics

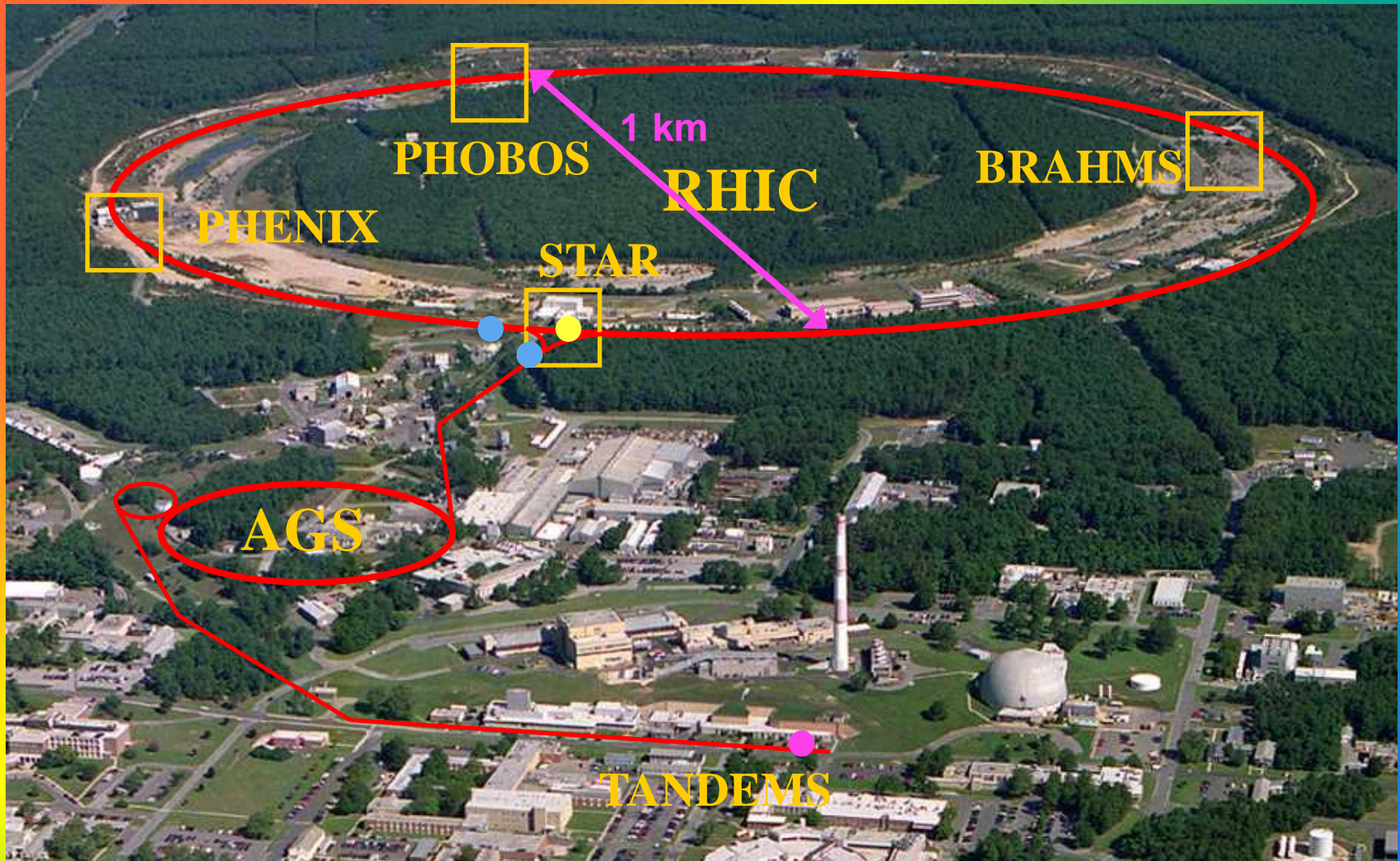


**Zderzenie jąder atomowych.  
modelowanie komputerowe (2)**

**...ale jak to zrealizować w praktyce???**

**Powstały ogromne laboratoria  
fizyki jądrowej  
skupiające naukowców z całego świata.  
Jednym z takich laboratoriów jest  
Brookhaven National Laboratory w USA  
gdzie działa  
Relativistic Heavy Ion Collider**

# Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) at Brookhaven





Największym na świecie urządzeniem  
(akceleratorem - zderzaczem)  
gdzie badane są reakcje cząstek elementarnych,  
jest

**Large Hadron Collider, LHC**

działający w  
Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych -  
**CERN**

**Gdzie to jest?**



# CERN i LHC

An aerial photograph of the CERN facility in Geneva, Switzerland. The image shows a vast landscape of agricultural fields and some urban areas. A large, white, circular line is drawn over the landscape, representing the path of the Large Hadron Collider (LHC). The line starts in the lower right, loops around the center, and extends towards the top left. A smaller, white, circular line is also visible in the lower right quadrant, highlighting a specific area of the facility.

**...ale tym będzie mowa  
w następnych wykładach**



**Dlaczego to jest  
takie ważne?**

**Bo każde dziecko  
zadaje też inne pytanie?**

**Co na świecie jest największe?**



# Wszelch świat



Ale czy zawsze był taki duży?

Jak się tworzył?

# Chcemy „cofnąć” bieg czasu ...

Przyroda



Plazma  
K-G

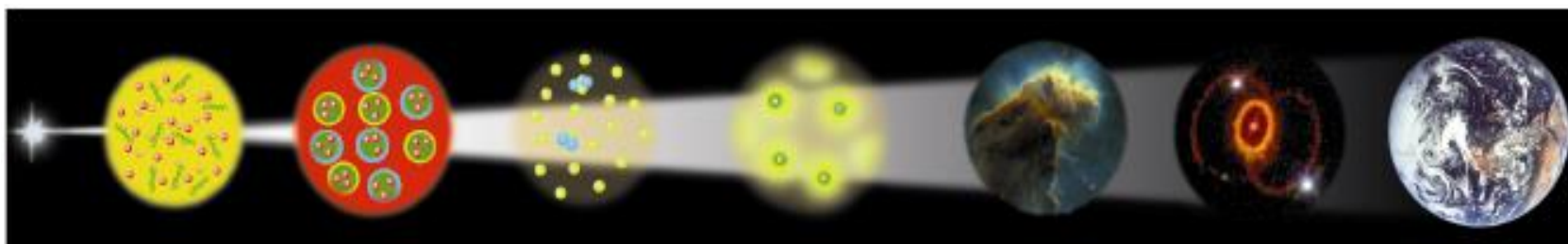
Nukleony

Jądra

Atomy

Dzisiaj

Wielki  
Wybuch



$10^{-6}$  s

$10^{-4}$  s

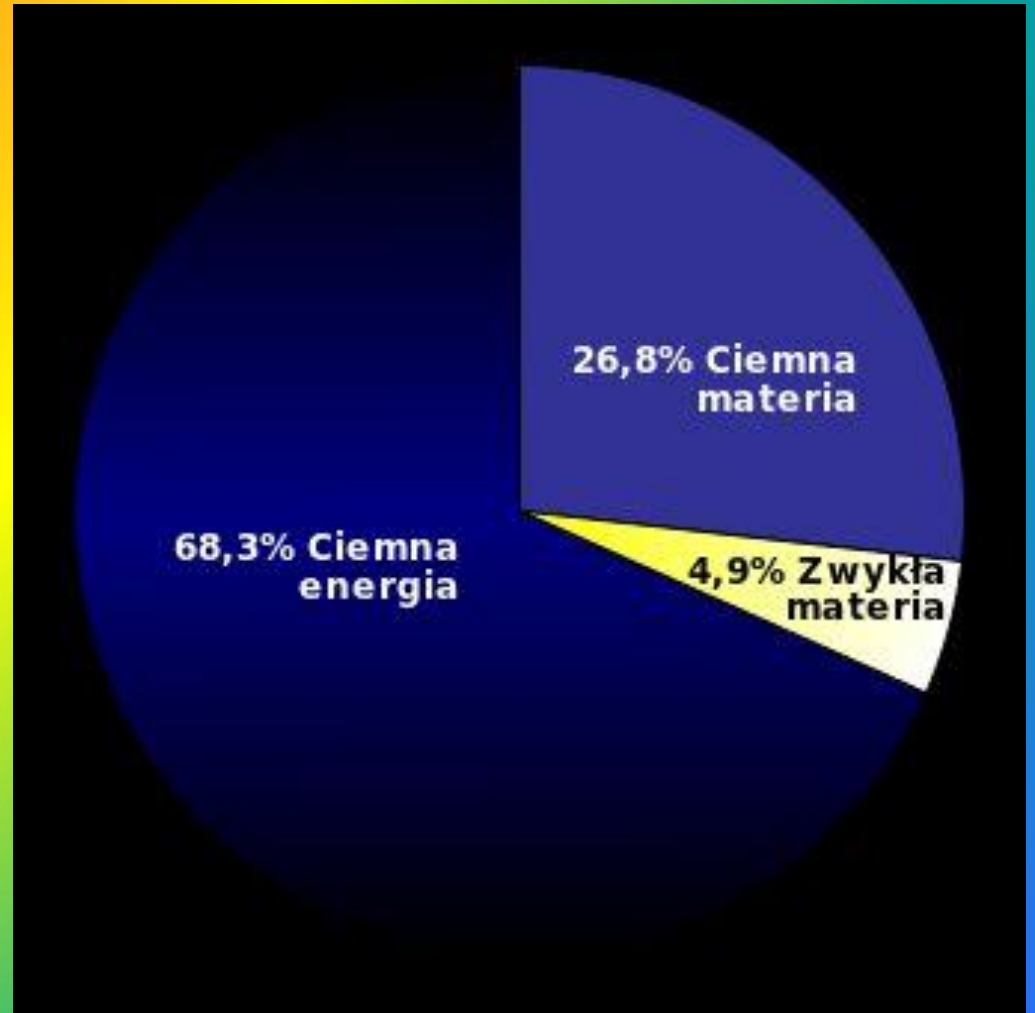
3 min

$13.7 \cdot 10^9$  lat



Eksperyment

***A jaką część  
materii i energii  
we Wszechświecie  
już poznaliśmy?***





***Co z tego wynika?  
Jaki stąd wniosek?***

- 1. Najważniejsze jest, że wiemy,  
że wiele jeszcze nie wiemy.***
- 2. Czyż to nie wspaniałe,  
że tyle jest jeszcze do odkrycia !!!***

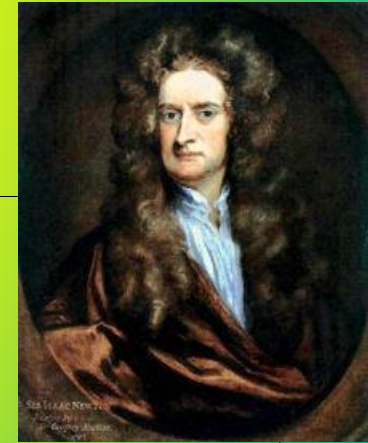
*Dziękuję Wam za uwagę,*

*Jan Pluta*

**Co wiemy o masie jako własności materii?**



# Newton, 1687



Druga zasada dynamiki

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

$F$  - siła

$m$  - masa ciała

$a$  - przyspieszenie

prawo powszechnej grawitacji

$$F = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

$G$  - stała grawitacji

$r$  - odległość

**Masa jest miarą bezwładności ciała.**

# A. Einstein, 1905

$$E = m \cdot c^2$$

$c$  – prędkość światła w próżni

$m$  - masa ciała

**Masa ciała jest miarą zawartej w nim energii.**

$E$  - pełna energia ciała

$$m = m_0 \cdot \gamma$$

$m_0$  - masa spoczynkowa

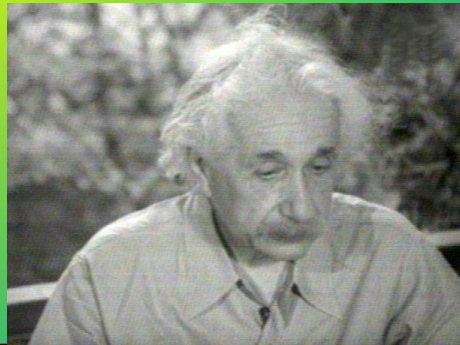
$\beta$  - stosunek prędkości ciała do prędkości światła

$\gamma$  - czynnik Lorentza

$$\gamma = 1 / \sqrt{1 - \beta^2}$$

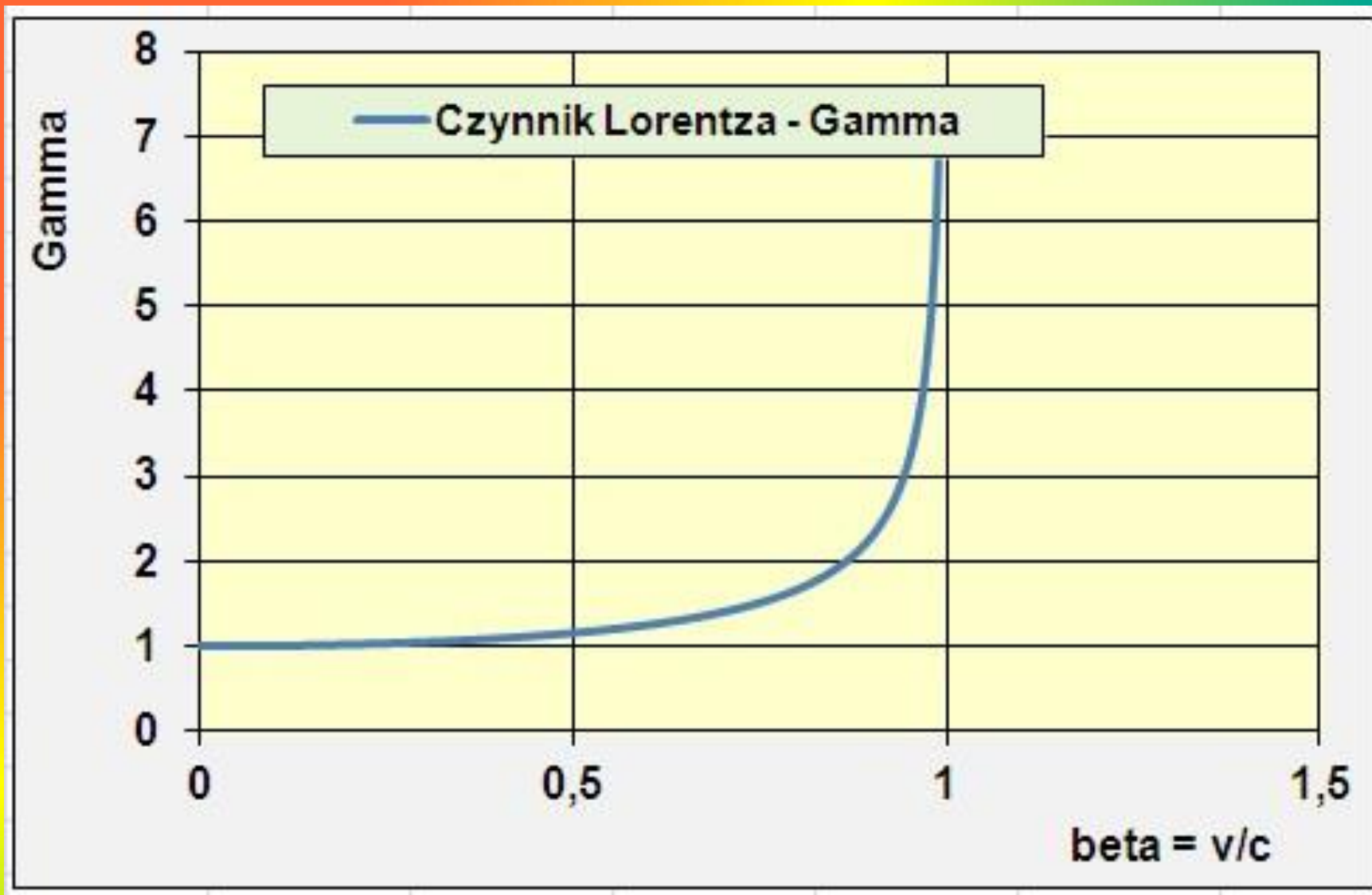
$v$  - prędkość ciała

$c$  - prędkość światła w próżni  
 $c = 299\,792\,458$  m/s,  
czyli ok.  $300\,000$  km/s  
Podstawowa stała fizyczna -  
największa prędkość  
w przyrodzie.



$$\beta = v / c$$

## Czynnik Lorentza (gamma) w funkcji prędkości (beta)





Jak stwierdzić, że to na pewno bozon Higgsa, a nie jakaś inna nowa cząstka?  
Bada się tzw „stosunki rozgałęzień”.

## Decays of a 125 GeV Standard-Model Higgs boson

