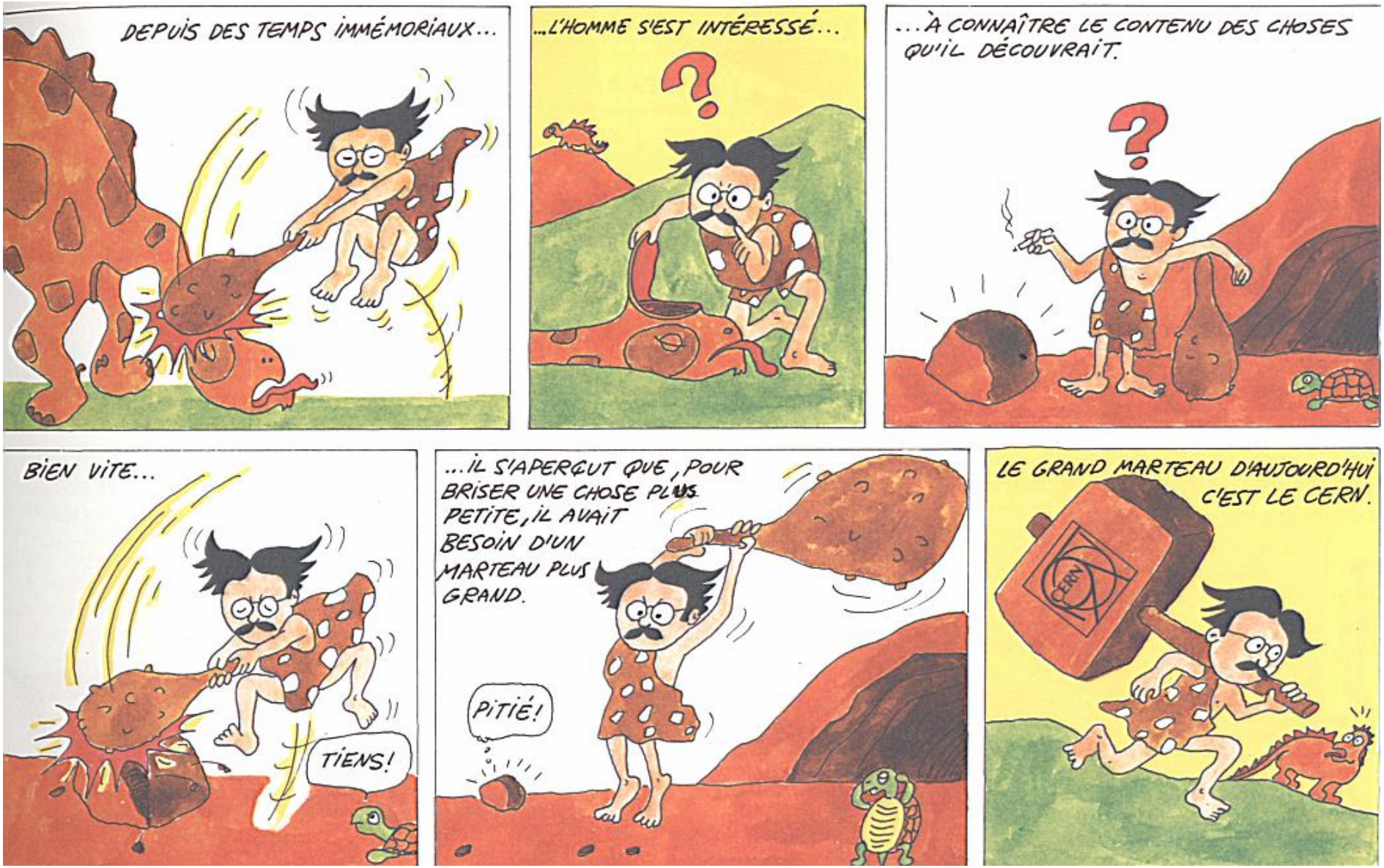
Sylwa czyli *silva rerum* na temat fizyki cząstek elementarnych

Barbara Badełek

Uniwersytet Warszawski i Uniwersytet Uppsalski

Nauczyciele fizyki w CERN
20–26 maja 2007


DEPUIS DES TEMPS IMMÉMORIAUX...
...L'HOMME S'EST INTÉRESSÉ...
...À CONNAÎTRE LE CONTENU DES CHOSES QU'IL DÉCOUVRAIT.
BIEN VITE...
TIENS!
...IL S'APERÇUT QUE, POUR BRISER UNE CHOSE PLUS PETITE, IL AVAIT BESOIN D'UN MARTEAU PLUS GRAND.
PITIÉ!
LE GRAND MARTEAU D'AUJOURD'HUI C'EST LE CERN.
CERN

Treść

1. Wstęp – przypomnienie paru rzeczy użytecznych
2. Elementarne składniki budowy materii
3. Siły (oddziaływania) w przyrodzie
4. Dygresja: zasada nieoznaczoności
5. Diagramy Feynmana
6. Model Standardowy oddziaływań elementarnych...
7. ... i implikacje kosmologiczne
8. Jak wytwarzamy cząstki mikroświata ?
9. Jak eksperymentujemy ?
10. Podsumowanie

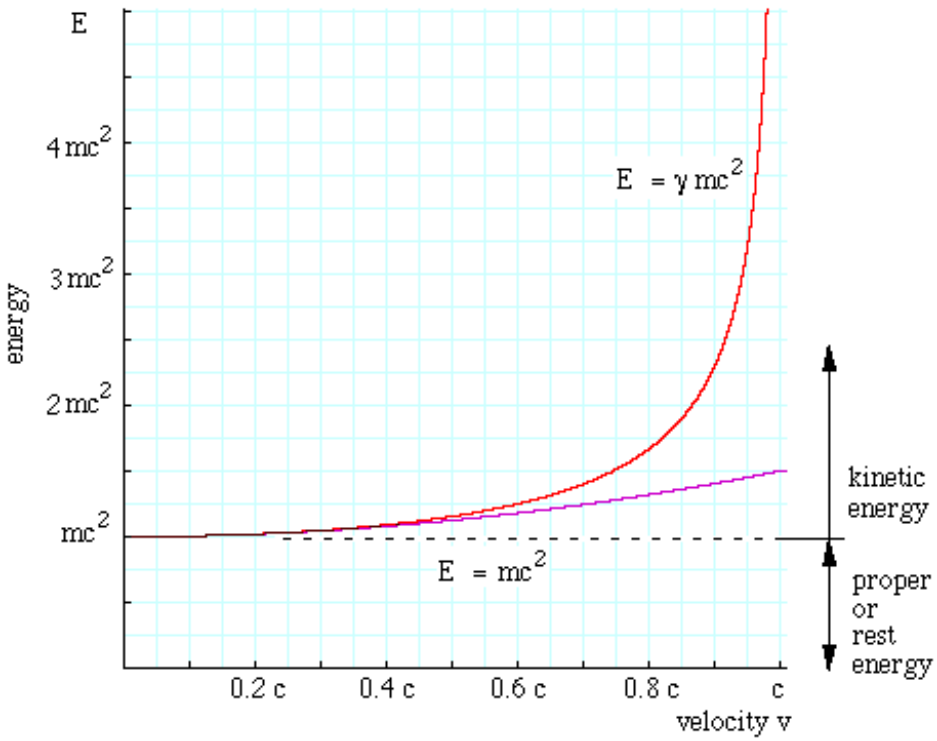
Outline

1. Wstęp – przypomnienie paru rzeczy użytecznych
2. Elementarne składniki budowy materii
3. Siły (oddziaływania) w przyrodzie
4. Dygresja: zasada nieoznaczoności
5. Diagramy Feynmana
6. Model Standardowy oddziaływań elementarnych...
7. ... i implikacje kosmologiczne
8. Jak wytwarzamy cząstki mikroświata ?
9. Jak eksperymentujemy ?
10. Podsumowanie

Wstęp: nazwy jednostek

Potęga 10	Liczba	Symbol
10^{-12}	0.000 000 000 001	p (piko)
10^{-9}	0.000 000 001	n (nano)
10^{-6}	0.000 001	μ (mikro)
10^{-3}	0.001	m (mili)
10^{0}	1	
10^{3}	1 000	k (kilo)
10^{6}	1 000 000	M (mega)
10^{9}	1 000 000 000	G (giga)
10^{12}	1 000 000 000 000	T (tera)

Wstęp: jak szybko rośnie prędkość przyspieszanej cząstki



Energia kinetyczna protonu	Prędkość/c
50 MeV	0.314
1.4 GeV	0.916
25 GeV (PS w CERN)	0.9993
450 GeV (SPS w CERN)	0.999998
7 TeV (LHC w CERN)	0.999999991

Wstęp: jednostki i skale mikroświata

- Jednostki energii (masy) i odległości:
  Elektronowolt: 1 eV (1 eV/c^2) $\approx 1.6 \cdot 10^{-19}$ J; 1 keV, 1MeV, 1GeV, 1 TeV
  Femtometr: 1 fm = 10^{-15}m

- Mikroskop musi używać światła o długości fali $\lambda \lesssim$ promień oglądanego obiektu. Zdolność rozdzielcza najlepszego obecnego ,,mikroskopu'': około 0.001 fm

- Promień protonu: $r_p \sim$1 fm
  Rozmiar elektronu (lub kwarku): $r_{e,q} < 10^{-3}$ fm ($\longrightarrow$ może są punktowe ?)
  Masa protonu: $M \sim 1$ GeV/c^2
  Masa (najlżejszego) elektronu: $m \sim 0.5$ MeV/c^2

- L. de Broglie (1924): każdy obiekt o pędzie p ma cechy fali o długości λ =h/p.
  Np. dla p = 1 GeV/c mamy $\lambda \sim 10^{-15}$m (h$\approx 6.6 \cdot 10^{-34}$ J·s).

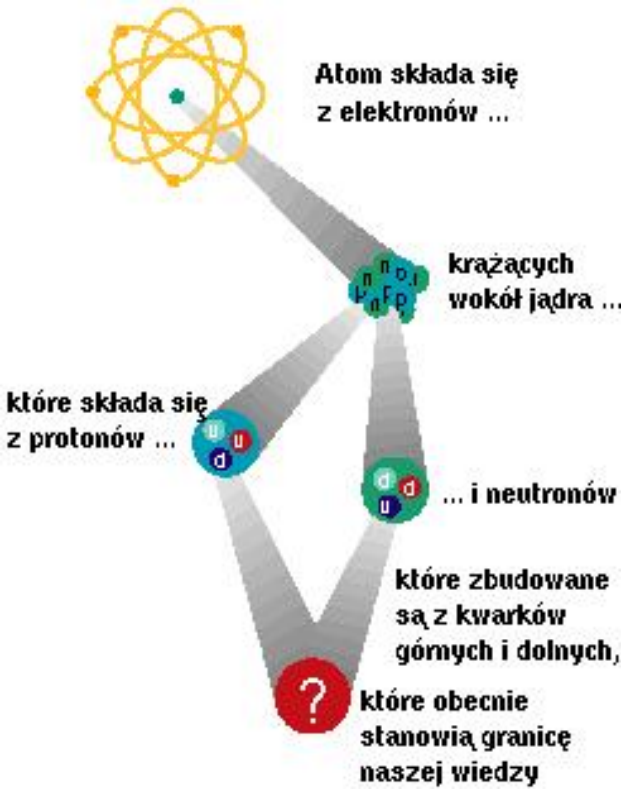
- Energie elektronów w atomach: $\sim$ eV – keV $\longrightarrow$ AKCELERATORY.

- Fizyka cząstek elementarnych $\equiv$ fizyka wielkich energii
  (w porównaniu z masą spoczynkową).

Outline

1. Wstęp – przypomnienie paru rzeczy użytecznych
2. Elementarne składniki budowy materii
3. Siły (oddziaływania) w przyrodzie
4. Dygresja: zasada nieoznaczoności
5. Diagramy Feynmana
6. Model Standardowy oddziaływań elementarnych...
7. ... i implikacje kosmologiczne
8. Jak wytwarzamy cząstki mikroświata ?
9. Jak eksperymentujemy ?
10. Podsumowanie

Z czego składa się materia ?



Cegiełki elementarne (kwarki i leptony)

Cząstka (kwark)	Masa (GeV/c^2)	Ładunek elektr.
u (górny)	0,005	+2/3
d (dolny)	0,01	-1/3
c (powabny)	1,5	+2/3
s (dziwny)	0,2	-1/3
t (prawdziwy)	180	+2/3
b (piękny)	4,7	-1/3

Cząstka (lepton)	Masa (GeV/c^2)	Ładunek elektr.
neutrino elektronowe	$<7\times10^{-9}$	0
elektron	0,000511	-1
neutrino mionowe	<0,0003	0
mion	0,106	-1
neutrino taonowe	<0,03	0
taon	1,7771	-1

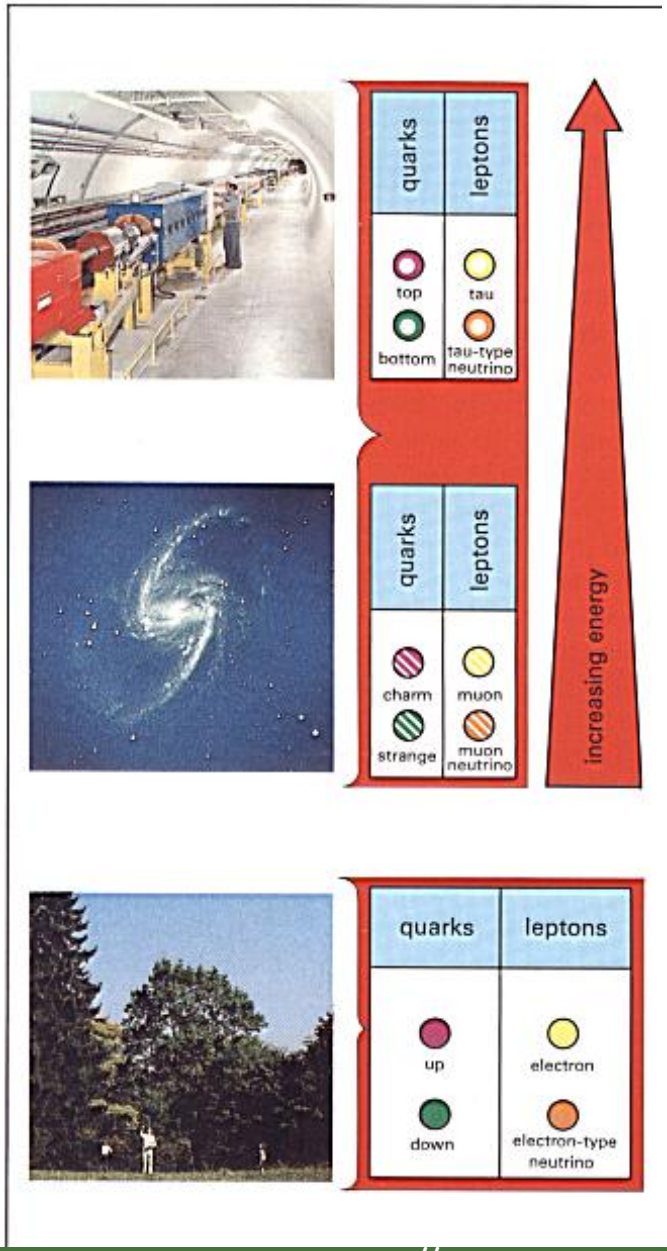
Wszystkie powyższe cząstki mają liczbę kwantową spinu 1/2 (należą do tzw. fermionów).

Trzy rodziny fermionów – ale czy naprawdę tylko 3?

$$N_{rodzin} = 2.994 \pm 0.012$$

(wyniki z LEP w CERN)

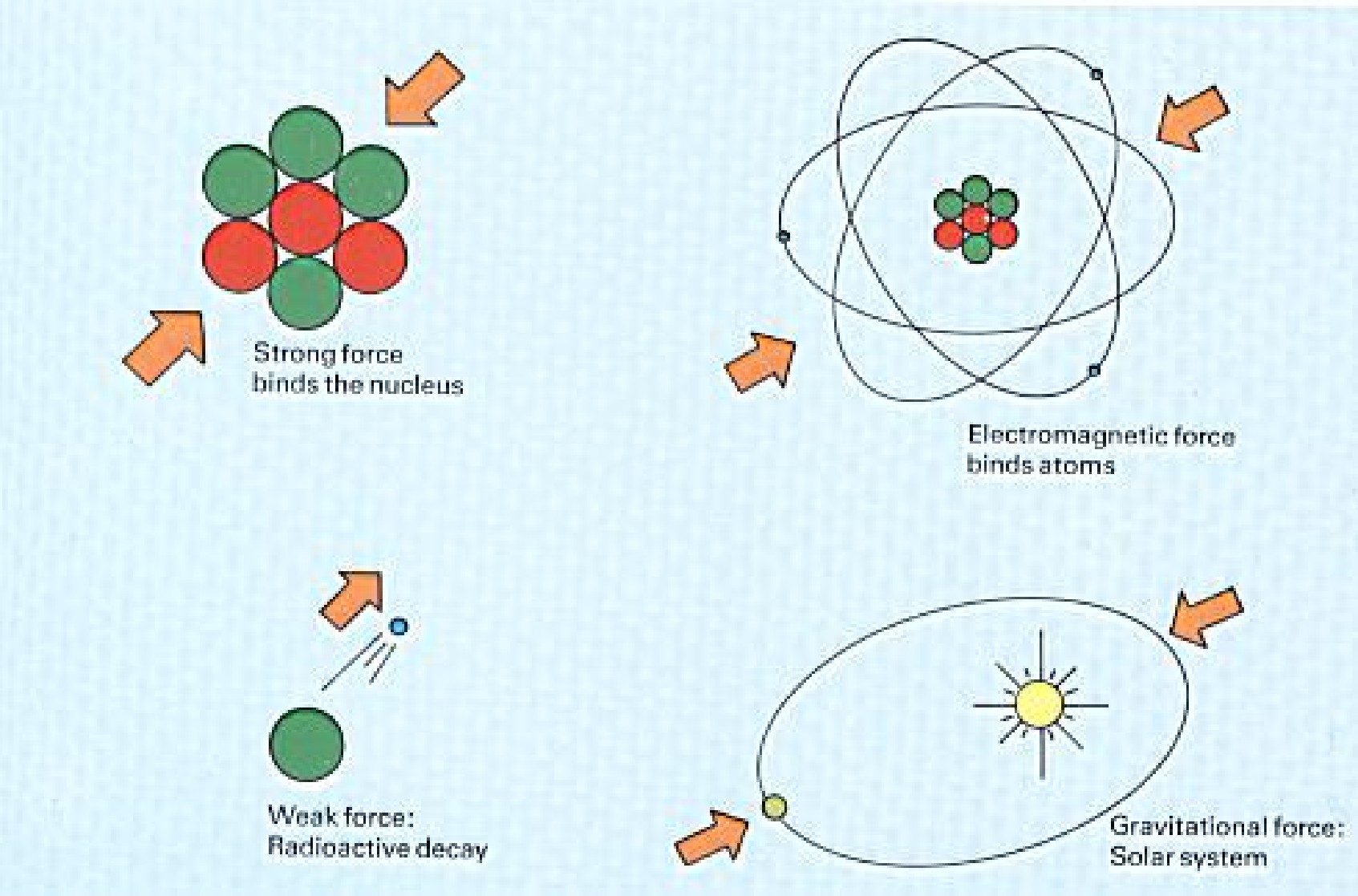
Cegiełki elementarne – skąd je bierzemy ?



Outline

1. Wstęp – przypomnienie paru rzeczy użytecznych
2. Elementarne składniki budowy materii
3. Siły (oddziaływania) w przyrodzie
4. Dygresja: zasada nieoznaczoności
5. Diagramy Feynmana
6. Model Standardowy oddziaływań elementarnych...
7. ... i implikacje kosmologiczne
8. Jak wytwarzamy cząstki mikroświata ?
9. Jak eksperymentujemy ?
10. Podsumowanie

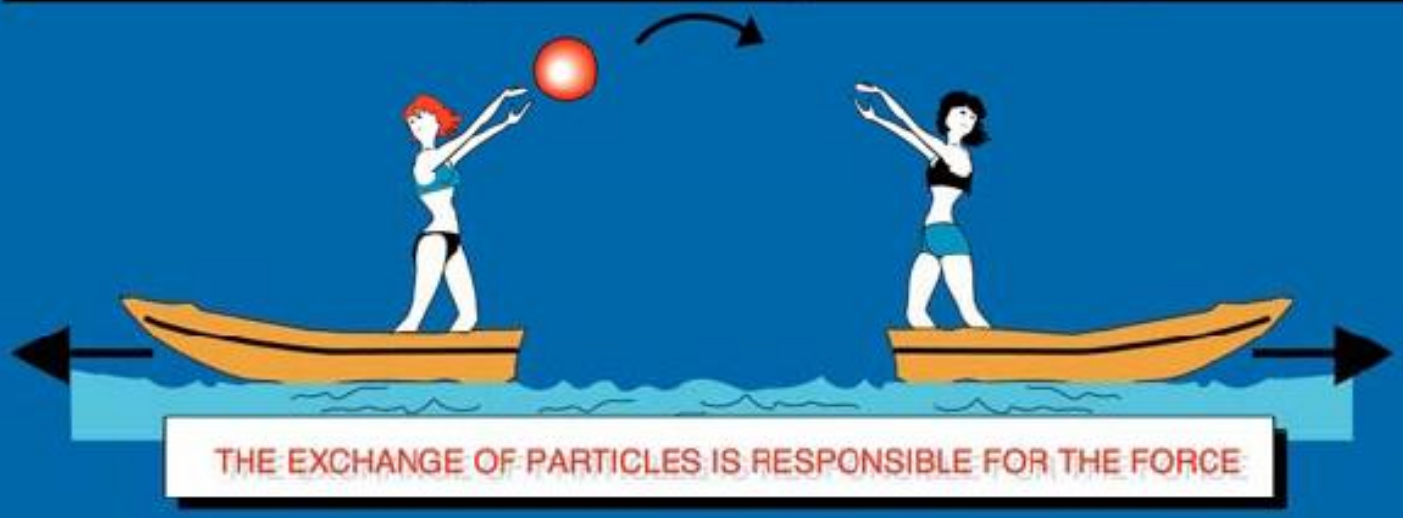
Rodzaje sił działających w przyrodzie



Jeśli na obiekt działa siła to mówimy o oddziaływaniu tego obiektu ze źródłem siły (albo z polem).

Oddziaływanie (siła) to wymiana informacji

TYPE	INTENSITY OF FORCES (DECREASING ORDER)	BINDING PARTICLE (FIELD QUANTUM)	OCCURS IN :
STRONG NUCLEAR FORCE	~ 1	GLUONS (NO MASS)	ATOMIC NUCLEUS
ELECTRO -MAGNETIC FORCE	~ 10^{-3}	PHOTONS (NO MASS)	ATOMIC SHELL ELECTROTECHNIQUE
WEAK NUCLEAR FORCE	~ 10^{-5}	BOSONS Z^0 , W+ , W- (HEAVY)	RADIOACTIVE BETA DESINTEGRATION
GRAVITATION	~ 10^{-38}	GRAVITONS (?)	HEAVENLY BODIES



CERN AC _Z04_ V25/8/1992

Bozony przenoszące oddziaływania (pośredniczące)

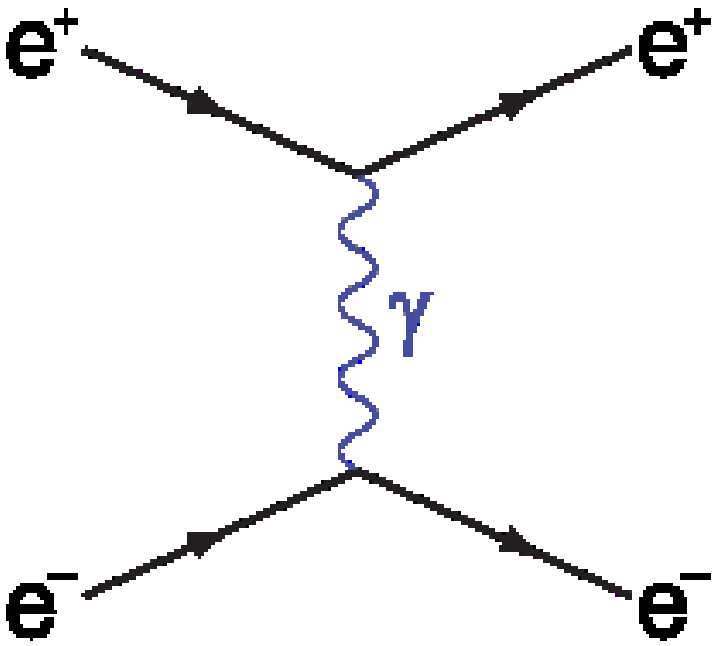
8 gluonów g	masa spoczynkowa = 0	(oddziaływania silne)
1 foton γ	masa spoczynkowa = 0	(oddziaływania elektromagnetyczne)
$W^{\pm}$, Z^0	masa spoczynkowa $\sim$ 100 GeV/c^2	(oddziaływania słabe)
? G (?)	masa spoczynkowa ???	(oddziaływania grawitacyjne)
? H (?)	masa spoczynkowa ???	(mechanizm nadawania mas)

Wszystkie powyższe cząstki mają liczbę kwantową spinu całkowitą (należą do tzw. bozonów);

dla g, γ, $W^{\pm}$, Z^0 jest ona równa 1.

Oddziaływanie (siła) to wymiana informacji, c.d.

Oddziaływanie Coulomba pomiędzy elektronem i pozytronem: obiektem wymienianym jest (wirtualny) foton. Schematycznie zapisujemy to tak:



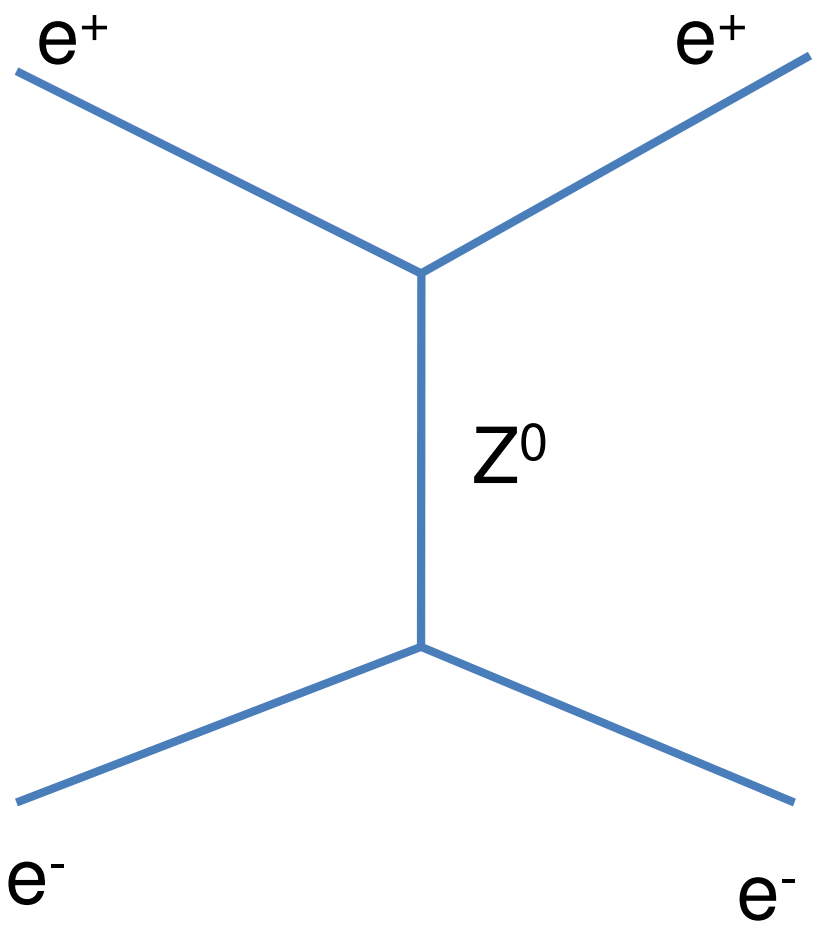
(tzw. diagram Feynmana)

Ale czym jest „wirtualny" foton?

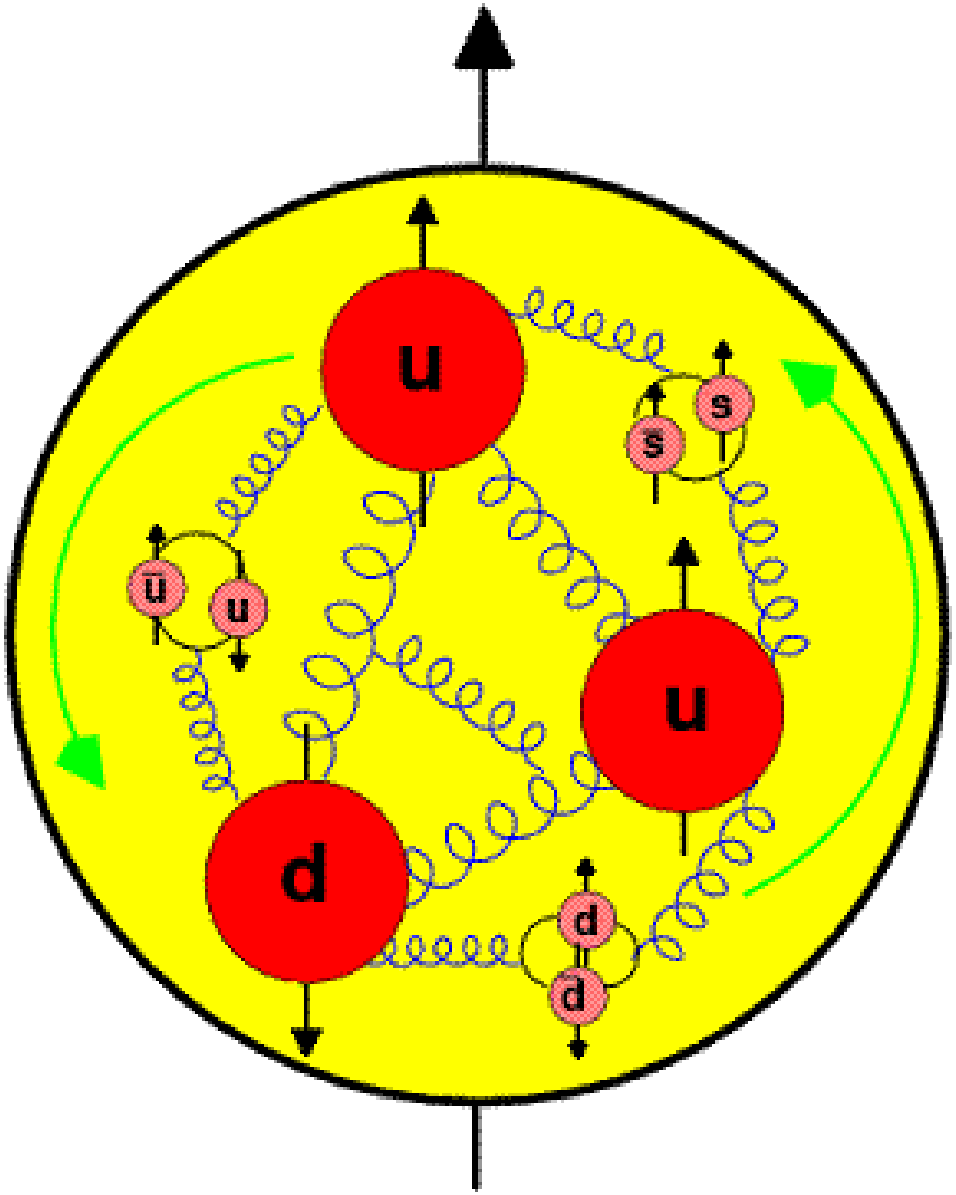
Albo wirtualna cząstka masywna ?

Oddziaływanie (siła) to wymiana informacji, c.d.

Ten przykład bardzo podobny ale tu elektron i pozytron oddziaływują słabo !
(wymieniany nośnik oddziaływań słabych)



Struktura protonu pod mikroskopem



Dygresja: przypomnienie zasady nieoznaczoności

- Zachowanie energii zdefiniowane tylko z dokładnością do ΔE takiego, że:

$$\Delta E \cdot \Delta t \gtrsim \frac{\hbar}{2}$$

- Możliwe więc fluktuacje jednych cząstek w drugie albo kreacja i anihilacja par cząstka – antycząstka, jeśli zachodzą w czasie $\Delta t \gtrsim \hbar/2\Delta E$.
- Ważne! Istnienie cząstek wirtualnych wywiera mierzalny wpływ na cząstki rzeczywiste!
- Ważne! Dlaczego potrzebne „wielkie" energie aby oglądać małe obiekty ?

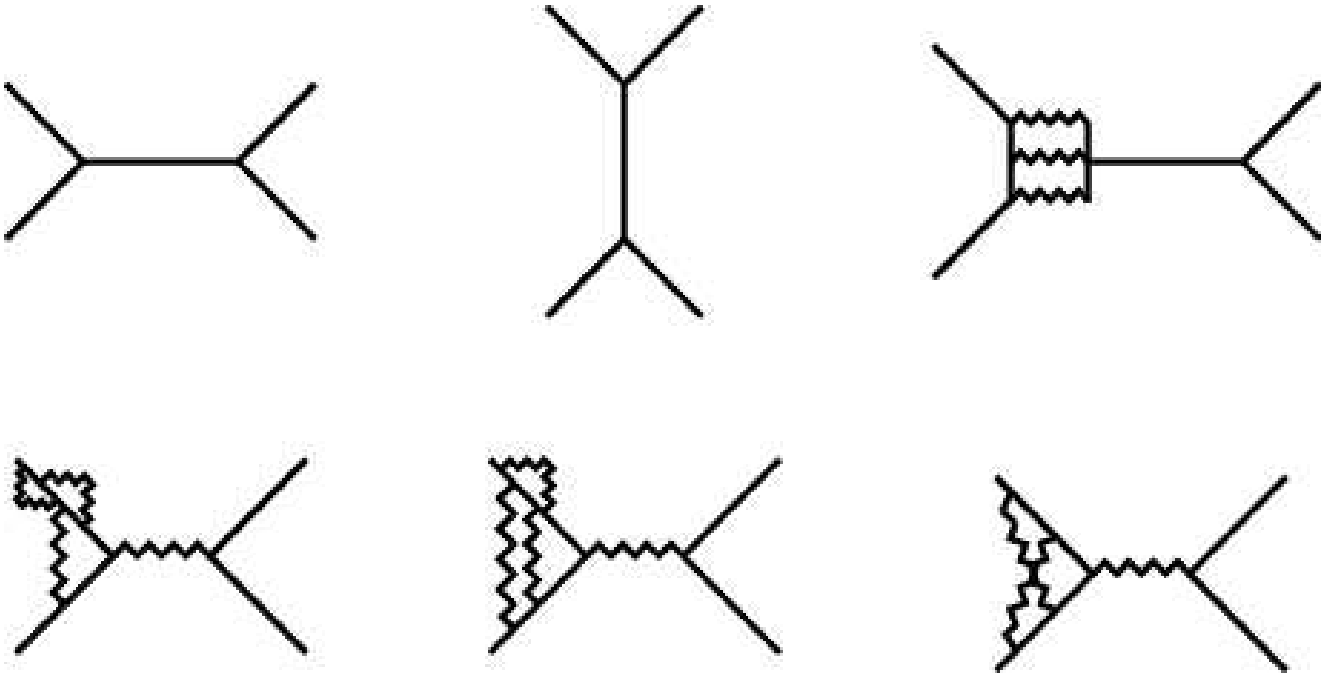
$$\Delta p \cdot \Delta x \gtrsim \frac{\hbar}{2}$$

Outline

1. Wstęp – przypomnienie paru rzeczy użytecznych
2. Elementarne składniki budowy materii
3. Siły (oddziaływania) w przyrodzie
4. Dygresja: zasada nieoznaczoności
5. Diagramy Feynmana
6. Model Standardowy oddziaływań elementarnych...
7. ... i implikacje kosmologiczne
8. Jak wytwarzamy cząstki mikroświata ?
9. Jak eksperymentujemy ?
10. Podsumowanie

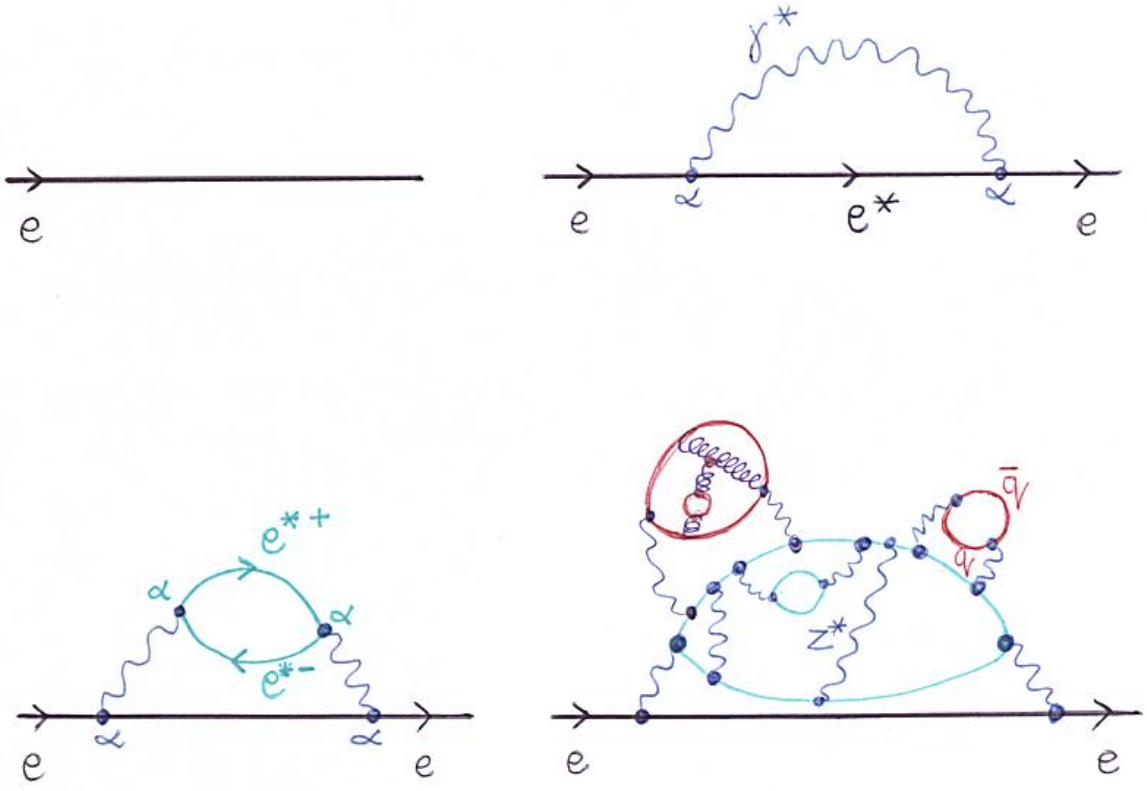
Diagramy Feynmana

Dżungla diagramów:



Diagramy Feynmana, c.d.

Ważny przykład: czym więc jest np. elektron ?



Outline

1. Wstęp – przypomnienie paru rzeczy użytecznych
2. Elementarne składniki budowy materii
3. Siły (oddziaływania) w przyrodzie
4. Dygresja: zasada nieoznaczoności
5. Diagramy Feynmana
6. Model Standardowy oddziaływań elementarnych...
7. ... i implikacje kosmologiczne
8. Jak wytwarzamy cząstki mikroświata ?
9. Jak eksperymentujemy ?
10. Podsumowanie

Model Standardowy oddziaływań elementarnych

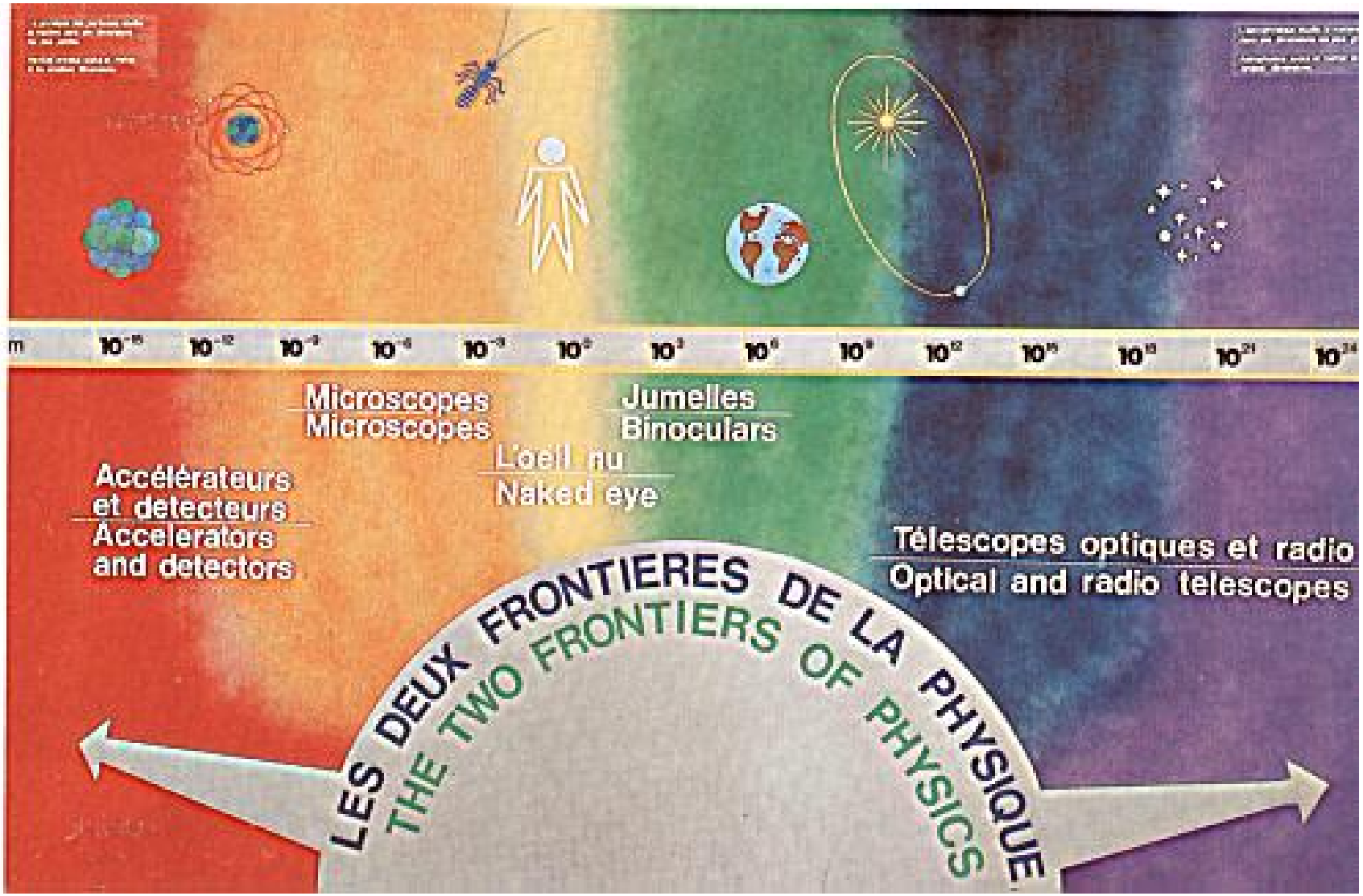
- Rodzina obiektów elementarnych - bardzo liczna, ma co najmniej 36 członków, z których co najmniej 12 odpowiada za przenoszenie oddziaływań (sił).
- W naszych warunkach istnieją co najmniej 4 oddziaływania (siły), przy czym ze wzrostem energii względna moc oddziaływań zmienia się, np:
  - silnych $\searrow$
  - elektromagnetycznych $\nearrow$

  Być może w innych warunkach (np. „zaraz" po Wielkim Wybuchu) wszystkie oddziaływania mogłyby mieć podobne natężenia ? $\longrightarrow$ Teorie Wielkiej Unifikacji: $E \gtrsim 10^{15}$ GeV (masa protonu: ~ 1 GeV/c^2; najwyższa obecnie energia protonów w akceleratorach: $\sim 10^3$ GeV; wkrótce LHC: 7 TeV).
- Model Standardowy świetnie zgodny z doświadczeniem ale NIE przewidujący szeregu parametrów, np. mas cząstek i cech sił – razem około 20 „wolnych" parametrów. Także: grawitacja? Oraz...

Outline

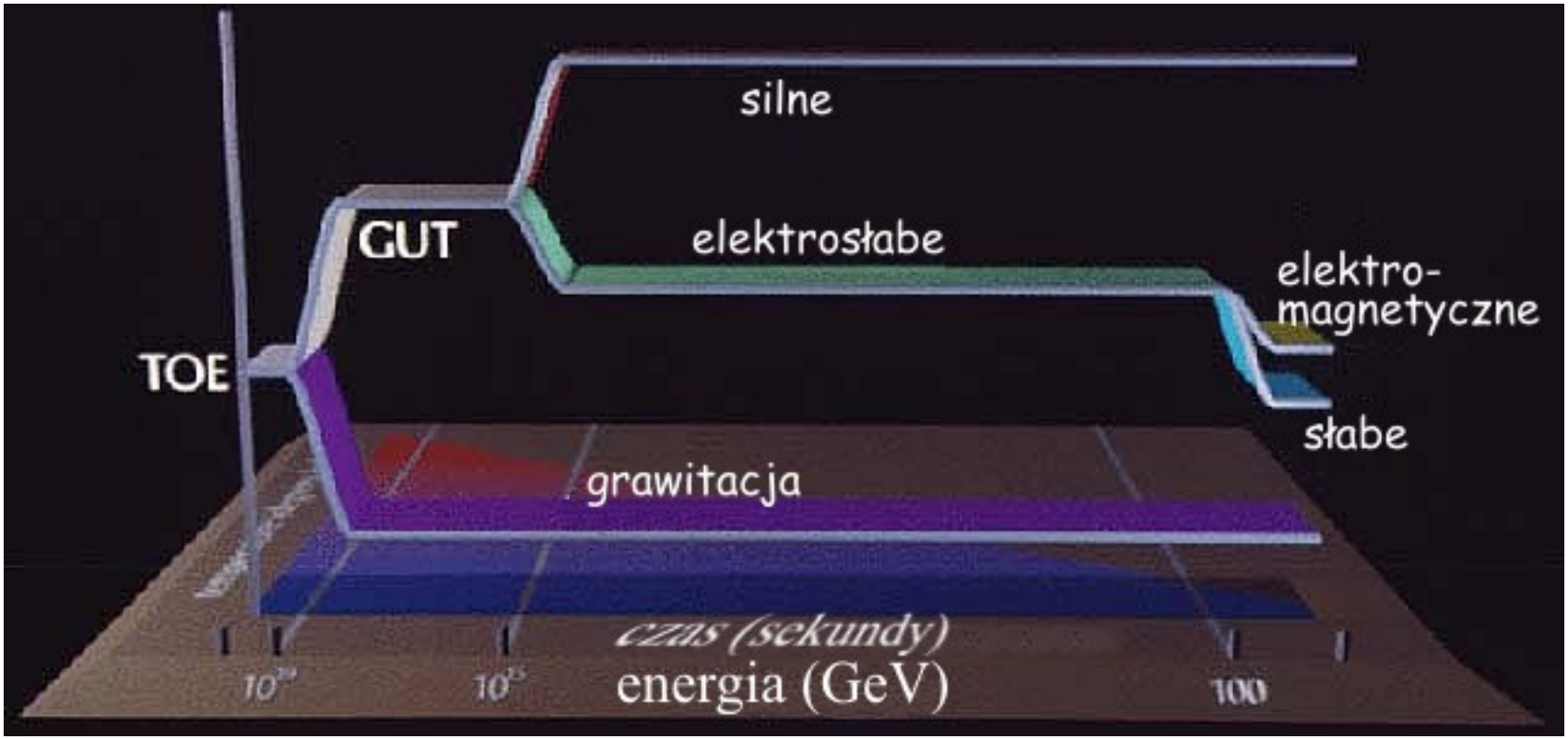
1. Wstęp – przypomnienie paru rzeczy użytecznych
2. Elementarne składniki budowy materii
3. Siły (oddziaływania) w przyrodzie
4. Dygresja: zasada nieoznaczoności
5. Diagramy Feynmana
6. Model Standardowy oddziaływań elementarnych...
7. ... i implikacje kosmologiczne
8. Jak wytwarzamy cząstki mikroświata ?
9. Jak eksperymentujemy ?
10. Podsumowanie

Otwarte horyzonty...

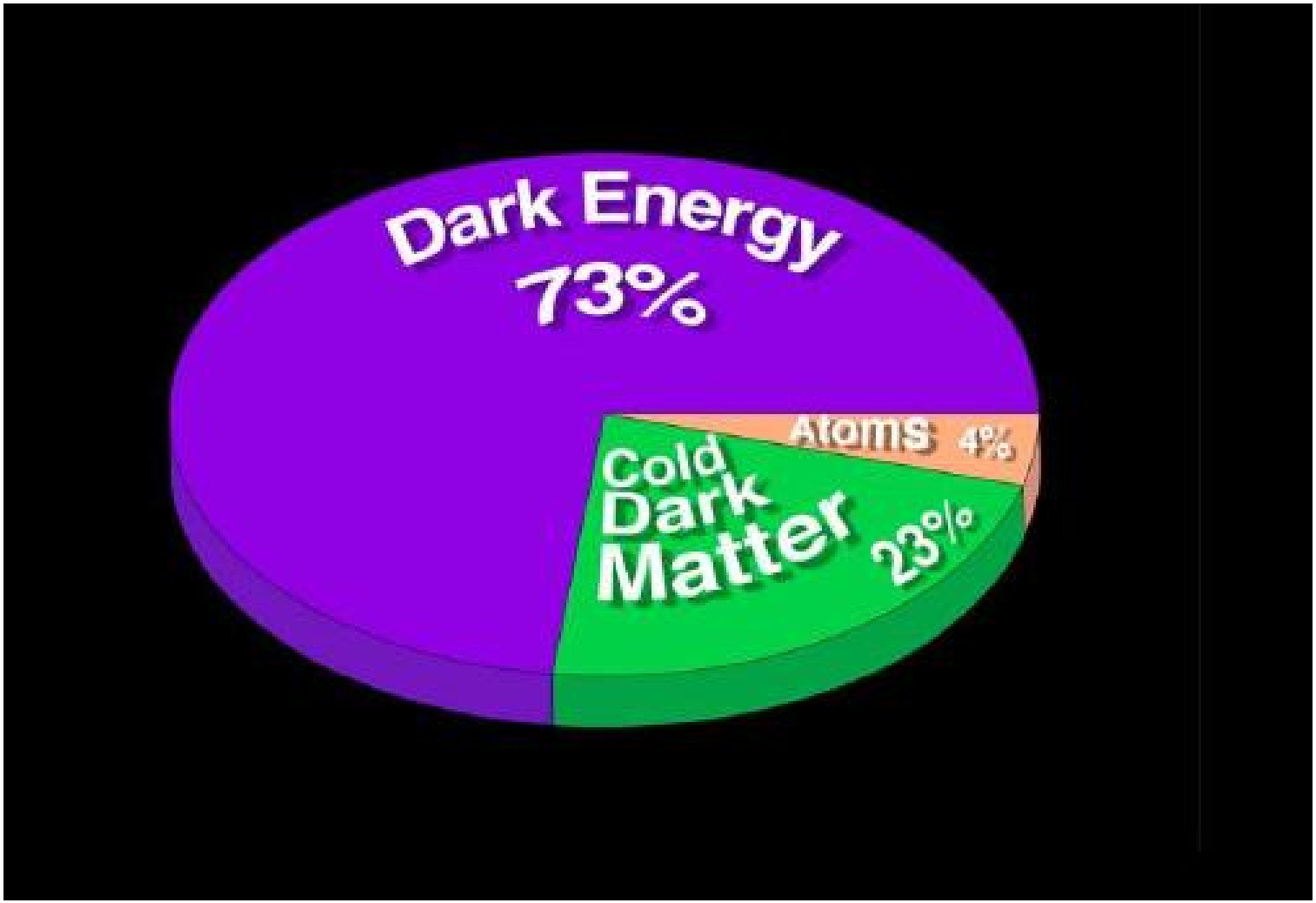


Wielka Unifikacja

Ostateczna teoria (TOF) opisywałaby jedno oddziaływanie, z którego narodził się (?) Wszechświat



Ale czy naprawdę rozumiemy budowę materii?



Outline

1. Wstęp – przypomnienie paru rzeczy użytecznych
2. Elementarne składniki budowy materii
3. Siły (oddziaływania) w przyrodzie
4. Dygresja: zasada nieoznaczoności
5. Diagramy Feynmana
6. Model Standardowy oddziaływań elementarnych...
7. ... i implikacje kosmologiczne
8. Jak wytwarzamy cząstki mikroświata ?
9. Jak eksperymentujemy ?
10. Podsumowanie

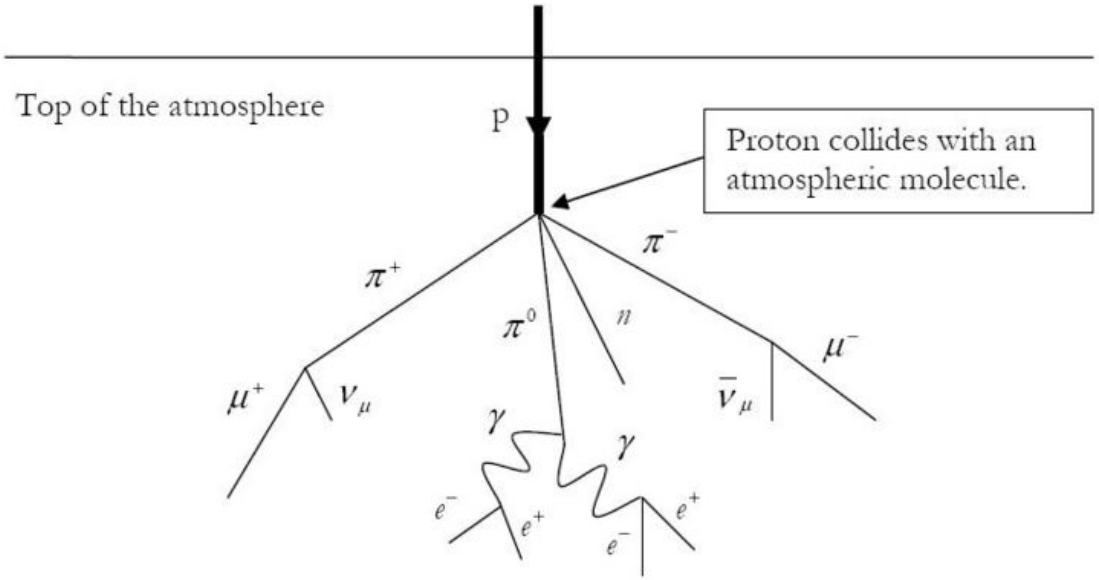
Jak wytwarzamy cząstki mikroświata ?

- „Archeologia kosmiczna" $\equiv$ pozostałości po Wielkim Wybuchu (jeśli był...), np. fotony i neutrina promieniowania tła.
- Promieniowanie kosmiczne: pierwotne (procesy zachodzące w ciałach niebieskich i ich zbiorowiskach, np. spalanie gwiazd) i wtórne (procesy zachodzące w atmosferze ziemskiej).
- Wytwarzanie sztuczne, w akceleratorach:

$$E = mc^2$$

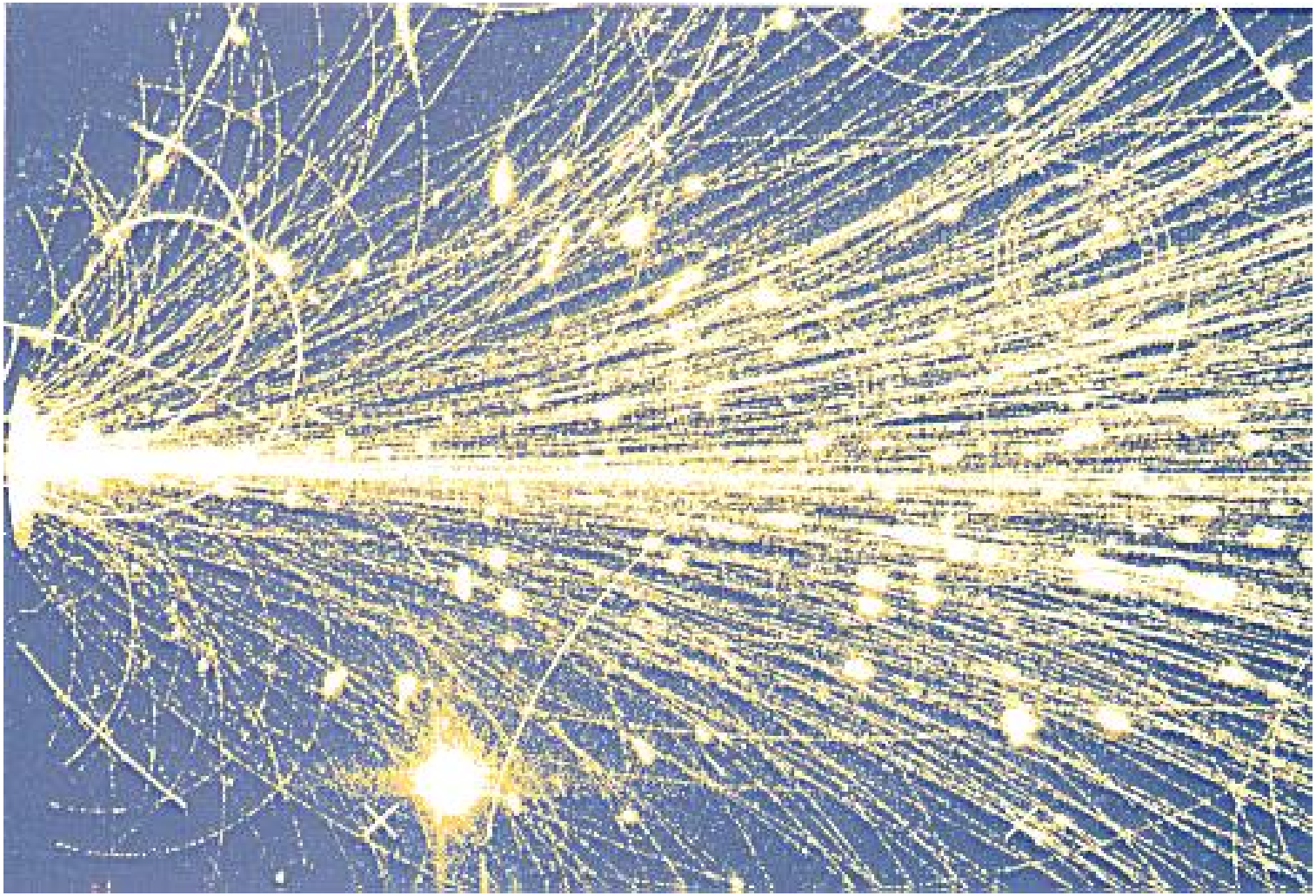
Jak wytwarzamy cząstki mikroświata ? c.d.

...z promieniowania kosmicznego:



Jak wytwarzamy cząstki mikroświata ? c.d.

...sztucznie, w akceleratorach, np. w SPS w CERN:



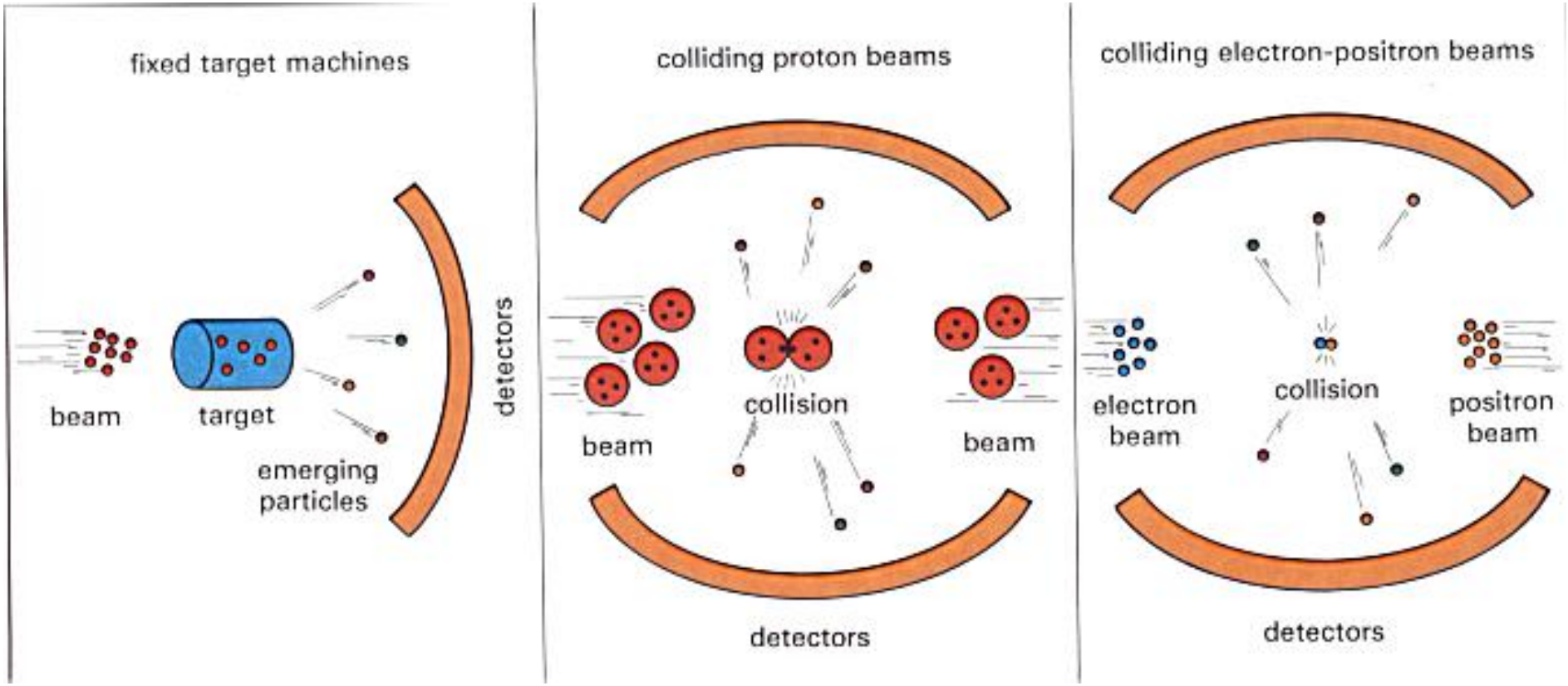
Jak wytwarzamy cząstki mikroświata ? c.d.

...w akceleratorach, np w LHC w CERN:

Outline

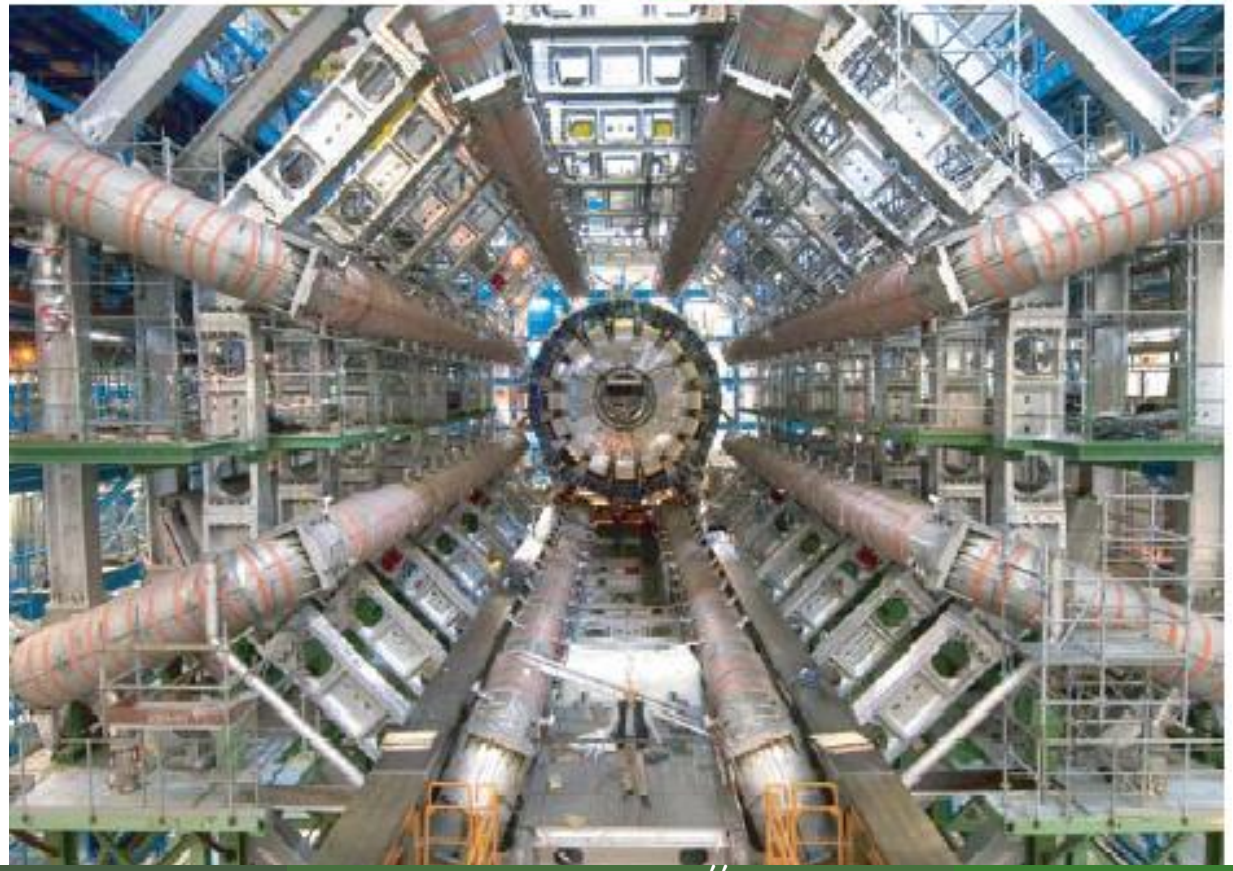
1. Wstęp – przypomnienie paru rzeczy użytecznych
2. Elementarne składniki budowy materii
3. Siły (oddziaływania) w przyrodzie
4. Dygresja: zasada nieoznaczoności
5. Diagramy Feynmana
6. Model Standardowy oddziaływań elementarnych...
7. ... i implikacje kosmologiczne
8. Jak wytwarzamy cząstki mikroświata ?
9. Jak eksperymentujemy ?
10. Podsumowanie

Typy eksperymentów przy wysokich energiach



np. COMPASS np. ATLAS np. planowany NLC

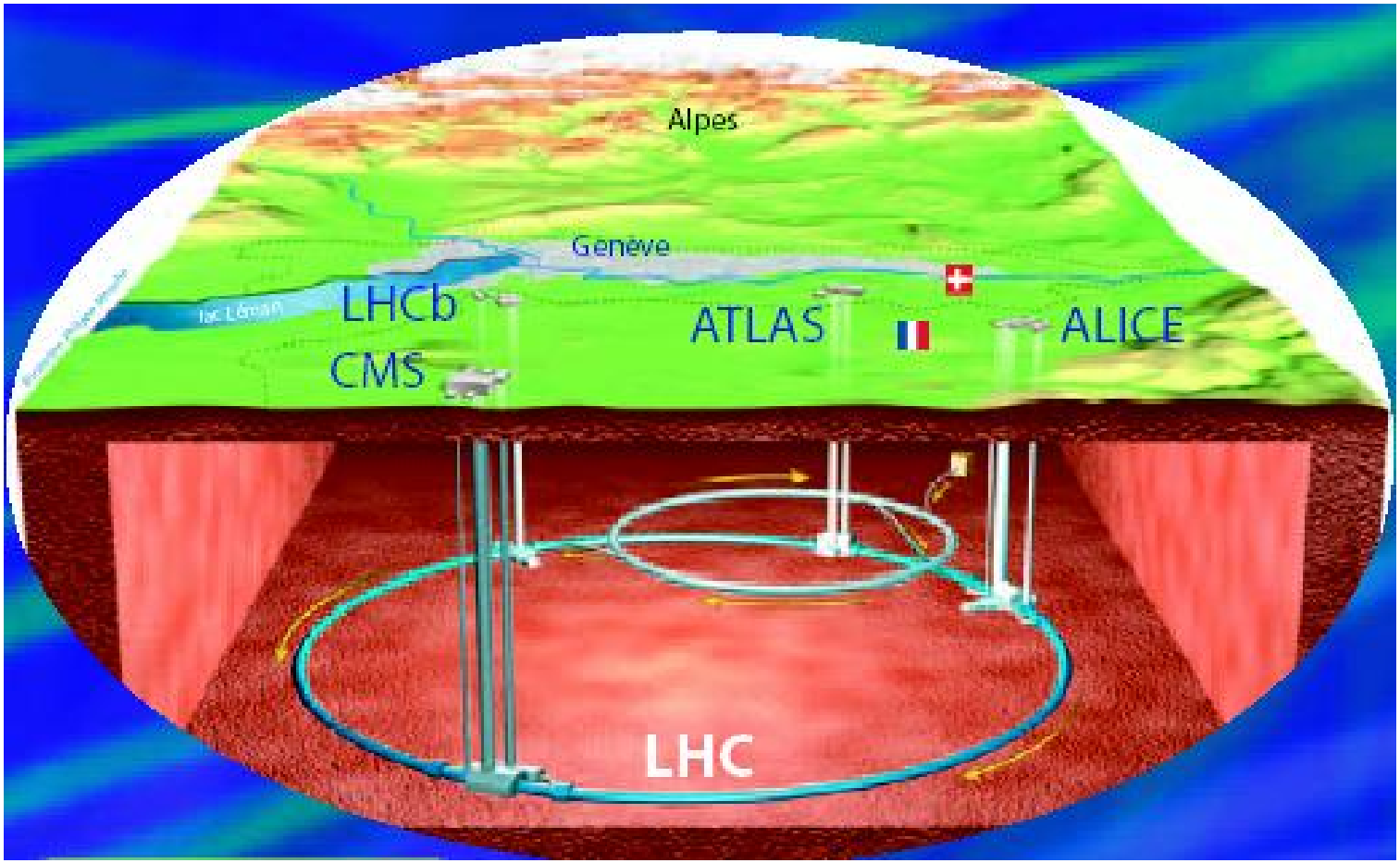
Detektory



Co mierzy się w eksperymentach ?

- Wybiera się i formuje pęczek określonych cząstek pierwotnych (wiązka) oraz materiał na tarczę (jeśli doświadczenie o stałej tarczy).
- Wybiera się i formuje pęczki określonych cząstek pierwotnych – wiązek (jeśli doświadczenie ze zderzaczem).
- Mierzy się pęd wiązki (wiązek).
- Identyfikuje się produkty zderzenia.
- Mierzy się ich pędy.
- Rekonstruuje się przestrzennie całe oddziaływanie (lub jego część).
- Zbiera się wielkie statystyki zdarzeń ($\gg$ miliony !)
- Do ich opracowania komputery wielkiej mocy i o wielkiej pamięci $\longrightarrow$ stymulowanie technologii!

Co więc nam da Large Hadron Collider, LHC ?



Co więc nam da Large Hadron Collider, LHC ?c.d.

- Znajdziemy bozon(y) Higgsa $\longrightarrow$ masy cząstek.
- Znajdziemy cząstki supersymetryczne $\longrightarrow$ unifikacja sił.
- Zrozumiemy brak antymaterii we Wszechświecie.
- Aby te cele osiagnąć w LHC:
  - energia musi być jak największa $\longrightarrow$ wiązki protonów (lub jonów) o energiach 7 TeV + 7 TeV = 14 TeV w środku masy (do tego celu tunel musi też być wielki: 27 km obwodu!). Ta energia bardzo skoncentrowana!
  - To zderzacz bo w nim użyteczna energia = $E_{wiazka1} + E_{wiazka2}$ (w ,,zwykłym'' akceleratorze: użyteczna energia $\sim \sqrt{E_{wiazka}}$)
  - Przyspieszane protony a nie elektrony bo mniejsze straty na promieniowanie hamowania!
- Maszyna rusza w 2008 roku!

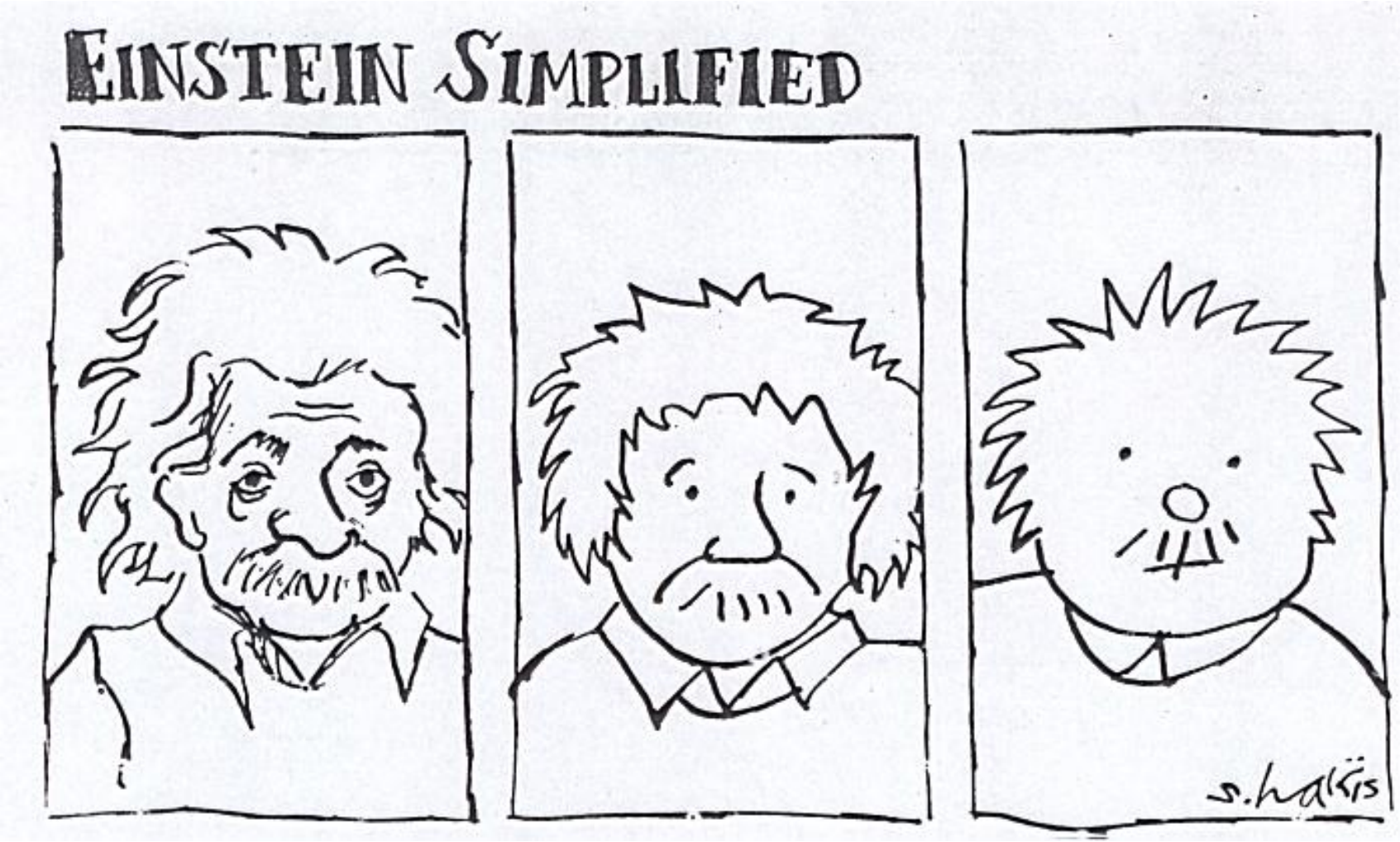
Outline

1. Wstęp – przypomnienie paru rzeczy użytecznych
2. Elementarne składniki budowy materii
3. Siły (oddziaływania) w przyrodzie
4. Dygresja: zasada nieoznaczoności
5. Diagramy Feynmana
6. Model Standardowy oddziaływań elementarnych...
7. ... i implikacje kosmologiczne
8. Jak wytwarzamy cząstki mikroświata ?
9. Jak eksperymentujemy ?
10. Podsumowanie

Podsumowanie: gdzie jesteśmy i dokąd idziemy ?

- W XX wieku ogromny postęp w zrozumieniu budowy materii i podstawowych etapów ewolucji Wszechświata.
- Cechą nauki jest jednak stawianie coraz większej liczby pytań. Oto niektóre z nich dzisiaj:

  - Czy kwarki i leptony są elementarne ?
  - Dlaczego ładunek protonu jest co do wartości identyczny z ładunkiem elektronu ?
  - Co oznaczają ,, generacje'' leptonów i kwarków ? Ile ich jest ?
  - Skąd biorą się masy cząstek ? I stałe fundamentalne ?
  - Co spowodowało inflację (jeśli rzeczywiście była) ?
  - Gdzie antymateria z tamtych lat...?
  - I jak została złamana początkowa symetria sił ($\longrightarrow$ 4 oddziaływania ?)
  - Czym jest 96 % materii we Wszechświecie ?
  - Skąd wzięło się życie we Wszechświecie ?
  - .....(tu proszę wpisać inne).....

- Czy znajdziemy odpowiedzi w tym stuleciu ?

Proszę wybaczyć uproszczenia...