

Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

Wprowadzenie

Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki



11 października 2022

Cel wykładu

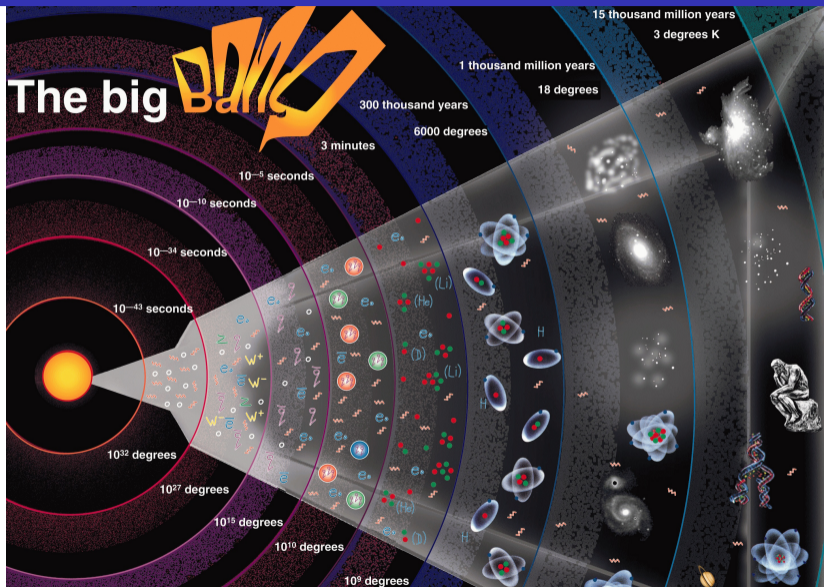
Wykład poświęcony będzie (w przeważającej części) zjawiskom, które zachodzą na poziomie subatomowym: **czątkom elementarnym** i ich **oddziaływaniom**.

Jest to świat zupełnie różny od tego (makroskopowego), który nas otacza.

Rządzi się odmiennymi prawami...

Celem wykładu będzie przybliżenie tej dziedziny: **własności cząstek** fundamentalnych i elementarnych, opisiowi (jakościowemu) ich **oddziaływań**, a także roli jaką oddziaływania te miały w **powstaniu i ewolucji Wszechświata**.

Tam gdzie to możliwe będę starał się ilustrować wykład **pokazami**, choć w wielu przypadkach będą to jedynie **modele zachodzących zjawisk**...



Zasady prowadzenia wykładu

Po trzech edycjach wirtualnych, w tym roku **wykład odbywa się stacjonarnie!**

Jednocześnie jednak będziemy wykorzystywać platformę Kampus

<https://kampus-student2.ckc.uw.edu.pl/course/view.php?id=10888>

W trakcie lub bezpośrednio po każdym wykładzie powinni Państwo rozwiązać krótki test (5 pytań), który będzie jednocześnie pełnił rolę **listy obecności**.

Obecność na wykładach jest obowiązkowa !

Zasady prowadzenia wykładu

Po trzech edycjach wirtualnych, w tym roku **wykład odbywa się stacjonarnie!**

Jednocześnie jednak będziemy wykorzystywać platformę Kampus

<https://kampus-student2.ckc.uw.edu.pl/course/view.php?id=10888>

W trakcie lub bezpośrednio po każdym wykładzie powinni Państwo rozwiązać krótki test (5 pytań), który będzie jednocześnie pełnił rolę **listy obecności**.

Obecność na wykładach jest obowiązkowa !

Materiały z wykładu będą również umieszczane na stronie:

<http://www.fuw.edu.pl/~zarnecki/WCE/>

dostępne są też materiały z lat ubiegłych (linki na dole strony).

oba linki można też znaleźć na stronie USOS przedmiotu

W tym semestrze przewidziane jest **13 wykładów**:

wtorki **od 11 października 2022 do 24 stycznia 2023**, od 15:15 do 16:45.

Warunki zaliczenia

- Obecność na wykładzie (przystąpienie do testu wykładowego)
dopuszczone 2 nieobecności, **każda kolejna obniża ocenę**
- 50% punktów z testów pisemnych:
 - Testy wykładowe: wchodzi z wagą 0.5
 - Test końcowy
90 minut, 30 pytań wielokrotnego wyboru
cztery odpowiedzi, dokładnie jedna poprawna (jak w testach wykładowych)
przykładowe pytania będą udostępnione na stronie wykładu

Test końcowy na platformie Kampus:

31 stycznia 2023 (wtorek), godz. 15:15-16:45 (jak wykład)

Osoby, które nie mogą podejść do egzaminu w tym terminie proszę o kontakt.

- 1 Fizyka przełomu XIX i XX wieku
- 2 Skale w fizyce
- 3 Granice stosowalności fizyki klasycznej
- 4 Szczególna Teoria Względności

- 1 Fizyka przełomu XIX i XX wieku
- 2 Skale w fizyce
- 3 Granice stosowalności fizyki klasycznej
- 4 Szczególna Teoria Względności

Fizyka klasyczna

Pod koniec XIX wieku fizyka wydawało się, że badania podstawowe w dziedzinie fizyki zmierzają ku końcowi. Praktycznie wszystkie obserwowane zjawiska mogły być wytłumaczone w oparciu o niewielką liczbę **fundamentalnych praw**

Fizyka klasyczna

Pod koniec XIX wieku fizyka wydawało się, że badania podstawowe w dziedzinie fizyki zmierzają ku końcowi. Praktycznie wszystkie obserwowane zjawiska mogły być wytłumaczone w oparciu o niewielką liczbę **fundamentalnych praw**

Prawa dynamiki Newtona (1687)

- *Każde ciało trwa w swym stanie spoczynku lub ruchu prostoliniowego i jednostajnego, jeśli siły przyłożone nie zmuszają ciał do zmiany tego stanu (pojęcie bezwładności \Rightarrow masa)*
- *Zmiana ruchu jest proporcjonalna do przyłożonej siły poruszającej i odbywa się w kierunku prostej, wzdłuż której siła jest przyłożona. (pojęcie siły)*
- *Każdemu działaniu towarzyszy równe i przeciwnie skierowane przeciwdziałanie.*
 \Rightarrow **bardzo dobrze opisują otaczający nas świat !**

Grawitacja jest najbardziej “widocznym” oddziaływaniem. Mimo to stosunkowo długo brak było spójnej teorii grawitacji. Dopiero Newton dostrzegł związek między np. ruchem planet i lotem kuli armatniej.

Prawo powszechnego ciążenia

Newton pokazał także, że **każde ciało** we Wszechświecie przyciąga każde inne ciało siłą zależną od **ich mas** i **odległości** między nimi. Podał bardzo prosty wzór:

$$F_g = G_N \cdot \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad G_N \approx 6.67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg s}^2}$$

Nie widzimy oddziaływania między dwoma jabłkami, bo grawitacja zbyt słaba...

Gawitacja jest najbardziej “widocznym” oddziaływaniem. Mimo to stosunkowo długo brak było spójnej teorii grawitacji. Dopiero Newton dostrzegł związek między np. ruchem planet i lotem kuli armatniej.

Prawo powszechnego ciążenia

Newton pokazał także, że **każde ciało** we Wszechświecie przyciąga każde inne ciało siłą zależną od **ich mas** i **odległości** między nimi. Podał bardzo prosty wzór:

$$F_g = G_N \cdot \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad G_N \approx 6.67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg s}^2}$$

Nie widzimy oddziaływania między dwoma jabłkami, bo grawitacja zbyt słaba...

Piękno i uniwersalność praw natury \Rightarrow analogiczny wzór opisuje oddziaływanie ładunków elektrycznych (**prawo Coulomba**):

$$F_{el} = k \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

Budowa materii

W chemii, dzięki pracom Daltona i Avogadro, ugruntowało się pojęcie **atomu jako najmniejszej, niepodzielnej drobiny** pierwiastka chemicznego.

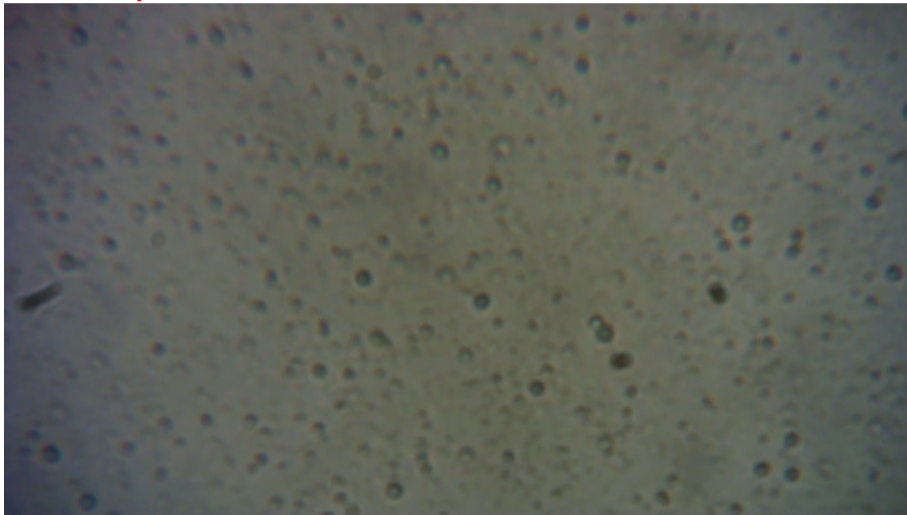
Było to jedyne sensowne wytłumaczenie odkrytego w XVIII wieku tzw. prawa stosunków stałych.

Doświadczalnym potwierdzeniem atomowej budowy materii były **ruchy Browna** (1827), choć wtedy nie potrafiono ich jeszcze opisać ilościowo.

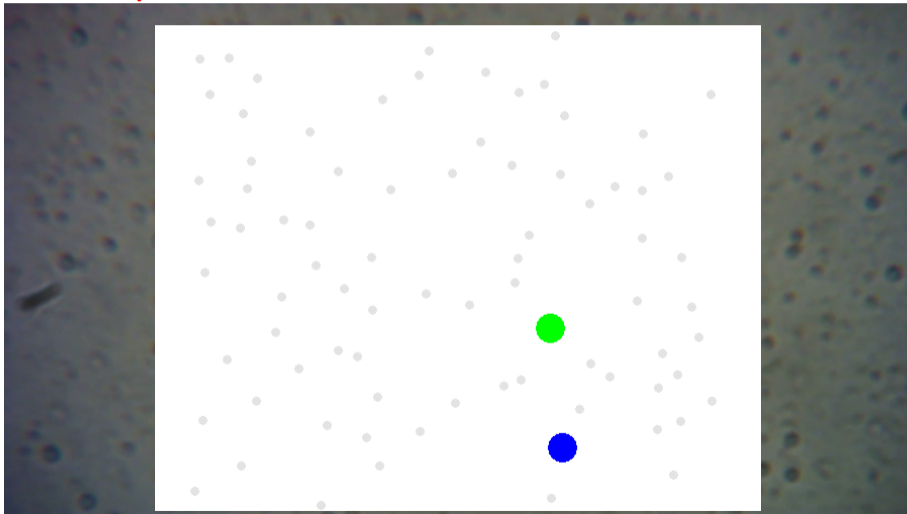
Atomy były głównie domeną **zainteresowania chemików!**

Fizycy mało się nimi interesowali, nie były im potrzebne...

Ruchy Browna - pokaz

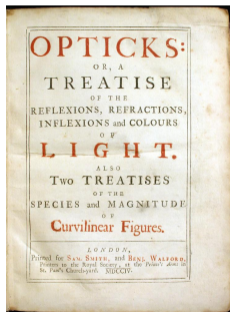


Ruchy Browna - pokaz



Światło

Teoria emisyjna światła, której zwolennikiem był m.in. Newton, zakładała że światło jest **strumieniem** “nadzwyczaj subtelných” **cząstek materii**. Teoria ta pozwalała wyjaśnić przewidywania optyki geometrycznej.



1704

Światło

W XIX wieku przyjęto jednak powszechnie teorię Younga (1801), zgodnie z którą światło jest **falą**. Dowodem była obserwacja zjawisk **dyfrakcji i interferencji** światła.

Światło

W XIX wieku przyjęto jednak powszechnie teorię Younga (1801), zgodnie z którą światło jest **falą**. Dowodem była obserwacja zjawisk **dyfrakcji i interferencji** światła.

Sformułowanie **Równań Maxwella** (1865) stanowiło ukoronowanie prowadzonych w XVIII i XIX wieku badań nad **elektrycznością i magnetyzmem**. Były one “podumowaniem” całej naszej wiedzy o klasycznych oddziaływaniach ładunków elektrycznych.

Jednocześnie **przewidywały one istnienie fal elektromagnetycznych** rozchodzących się z prędkością zgodną z mierzoną prędkością światła.

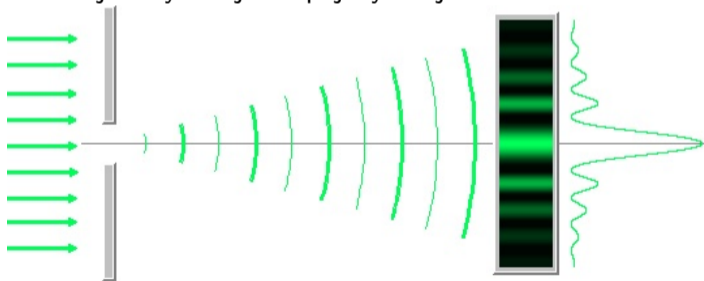
⇒ “udowodniły”, że światło jest **falą elektromagnetyczną**

Dyfrakcja

Zjawiska dyfrakcji i interferencji możemy obserwować **wyłącznie dla fal!**

Obserwujemy je zarówno dla fal mechanicznych (dźwięk, fale na wodzie) jak i w szerokim spektrum fal elektromagnetycznych (radiowe, mikrofałe, światło, promienie rentgena)

Najprostrzym przykładem jest dyfrakcja na pojedynczej szczelinie



Fala płaska ugina się na szczelinie i rozchodzi się w różnych kierunkach.

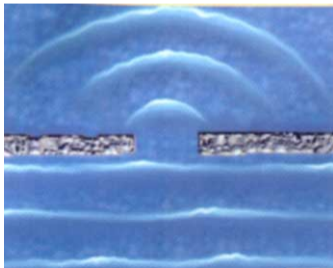
Dyfrakcja

Zjawiska dyfrakcji i interferencji możemy obserwować **wyłącznie dla fal!**

Obserwujemy je zarówno dla fal mechanicznych (**dźwięk, fale na wodzie**) jak i w szerokim spektrum fal elektromagnetycznych (**radiowe, mikrofae, światło, promienie rentgena**)

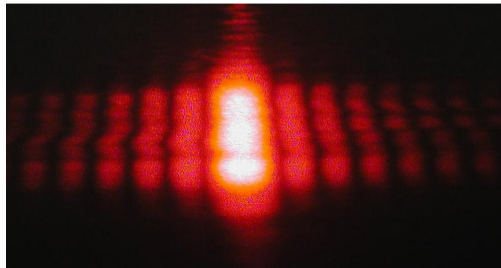
Najprostrzym przykładem jest dyfrakcja na pojedynczej szczelinie

Fale na wodzie

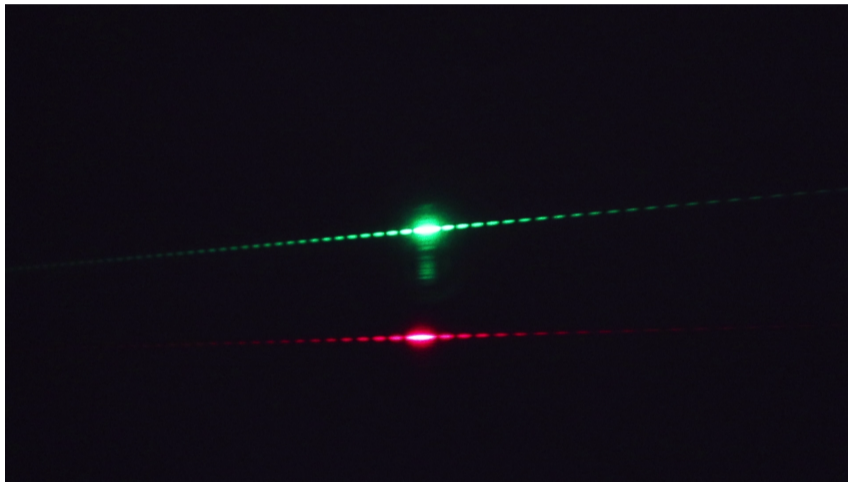


A.F. Żarnecki

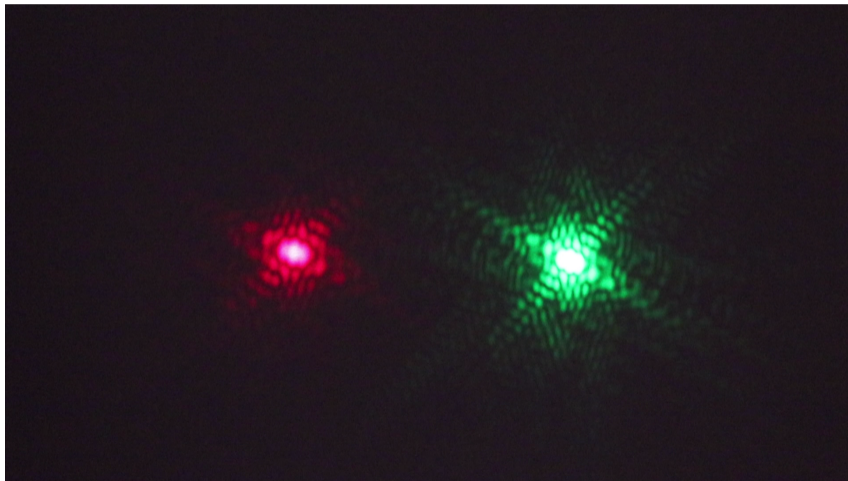
Światło



Dyfrakcja - pokaz



Dyfrakcja - pokaz



Koniec XIX wieku

Odkrycie fal elektromagnetycznych przez Heinricha Hertza (1886)

⇒ wielki sukces, potwierdzenie teorii Maxwella

Choć wciąż nie była jasna natura ładunku elektrycznego,

ani pochodzenie linii widmowych pierwiastków...

fizyka wydawała się być dziedziną bez większej przyszłości!

Koniec XIX wieku

Odkrycie fal elektromagnetycznych przez Heinricha Hertza (1886)

⇒ wielki sukces, potwierdzenie teorii Maxwella

Choć wciąż nie była jasna natura ładunku elektrycznego,

ani pochodzenie linii widmowych pierwiastków...

fizyka wydawała się być dziedziną bez większej przyszłości!

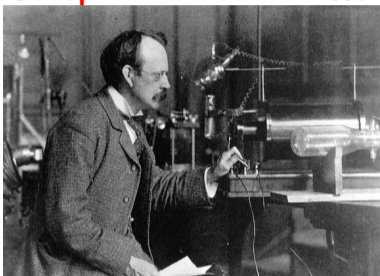
Przełom XIX i XX wieku

Przyniósł szereg przełomowych, nieoczekiwanych odkryć

- odkrycie promieni X przez Wilhelma Röntgena w 1895,
- odkrycie promieniotwórczości przez Henri Becquerel'a w 1896,
- odkrycie elektronu przez Josepha Thomsona w 1897,
- badania efektu fotoelektrycznego (Lenard, 1902) ⇒ foton (Einstein)

⇒ wszystko to wymagało zupełnie nowego spojrzenia na fizykę

Joseph Thomson 1897



Thomson badał tzw. **promienie katodowe**



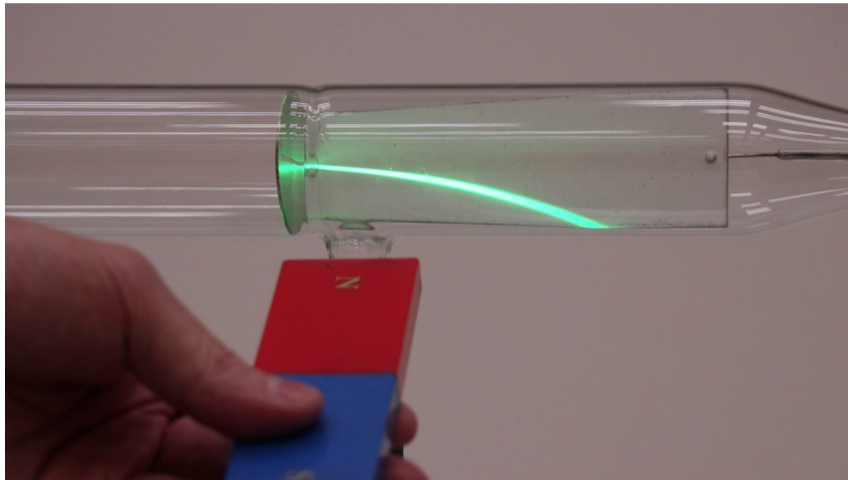
pokazał, że promienie te odchylają się w polu elektrycznym.

Wynikało z tego że jest to **strumień cząstek (elektronów)**,
ale z pomiaru mógł wyznaczyć jedynie stosunek ładunku do masy elektronu

Dopiero w 1909 roku Robert Millikan wyznaczył **ładunek** elektronu, i obliczył jego **masę**:
była **2000 razy mniejsza od masy atomu wodoru !!!**

Atom wodoru był najmniejszą znaną cząstką atomową \Rightarrow elektron to **cząstka subatomowa**

Odchylenie promieni katodowych - pokaz



- 1 Fizyka przełomu XIX i XX wieku
- 2 Skale w fizyce**
- 3 Granice stosowalności fizyki klasycznej
- 4 Szczególna Teoria Względności

SI - Systéme Internationale

Międzynarodowy układ jednostek wprowadzony w 1960 roku.

ale ciągle aktualizowany, ostatnio w 2020 (Dz.U. 2020 Poz. 1024)

| | | |
|-------------------------------|----------|-------|
| Długość | metr | [m] |
| Masa | kilogram | [kg] |
| Czas | sekunda | [s] |
| Natężenie prądu elektrycznego | amper | [A] |
| Temperatura termodynamiczna | kelwin | [K] |
| Ilość substancji | mol | [mol] |
| Światłość | kandela | [cd] |

Ale to są jednostki “klasyczne”, użyteczne w “życiu codziennym”...

Jak poradzić sobie gdy mamy do czynienia z wartościami dużo większymi lub dużo mniejszymi?

Notacja naukowa

Ułatwia zapisywanie bardzo dużych i bardzo małych liczb:

- prędkość światła: $c \approx 3000000000 \text{ m/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
 $= 3 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 10 \text{ m/s}$

Notacja naukowa

Ułatwia zapisywanie bardzo dużych i bardzo małych liczb:

- prędkość światła: $c \approx 300000000 \text{ m/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
- rozmiar protonu: $r \sim 0.0000000000000001 \text{ m} = 1/10^{15} \text{ m} = 1 \cdot 10^{-15} \text{ m}$
 $= 1/10/10/10/10/10/10/10/10/10/10/10/10/10/10/10 \text{ m}$

Notacja naukowa

Ułatwia zapisywanie bardzo dużych i bardzo małych liczb:

- prędkość światła: $c \approx 300000000 \text{ m/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
- rozmiar protonu: $r \sim 0.000000000000001 \text{ m} = 1/10^{15} \text{ m} = 1 \cdot 10^{-15} \text{ m}$
- masa Ziemi: $m_Z \approx 5972000000000000000000000 \text{ kg} = 5.972 \cdot 10^{24} \text{ kg}$

Notacja naukowa

Ułatwia zapisywanie bardzo dużych i bardzo małych liczb:

- prędkość światła: $c \approx 300000000 \text{ m/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
- rozmiar protonu: $r \sim 0.000000000000001 \text{ m} = 1/10^{15} \text{ m} = 1 \cdot 10^{-15} \text{ m}$
- masa Ziemi: $m_Z \approx 5972000000000000000000000 \text{ kg} = 5.972 \cdot 10^{24} \text{ kg}$

Wykładnik potęgi 10 określa nam “rząd wielkości”

Różnica o rząd wielkości to dużo!



⇐ ×10 ⇒



Notacja naukowa

Ułatwia zapisywanie bardzo dużych i bardzo małych liczb:

- prędkość światła: $c \approx 300000000 \text{ m/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
- rozmiar protonu: $r \sim 0.000000000000001 \text{ m} = 1/10^{15} \text{ m} = 1 \cdot 10^{-15} \text{ m}$
- masa Ziemi: $m_Z \approx 5972000000000000000000000 \text{ kg} = 5.972 \cdot 10^{24} \text{ kg}$

Wykładnik potęgi 10 określa nam “**rzęd wielkości**”

Różnica o rząd wielkości to dużo!

2-3 rzędy to bardzo dużo, 10 rzędów to “przepaść”



$\Leftarrow \times 10^{10} \Rightarrow$



Jednostki pochodne

| | | | | | |
|-------|-----------|----|-------|------------|-------|
| jotta | 10^{24} | Y | decy | 10^{-1} | d |
| zetta | 10^{21} | Z | centy | 10^{-2} | c |
| eksa | 10^{18} | E | mili | 10^{-3} | m |
| peta | 10^{15} | P | mikro | 10^{-6} | μ |
| tera | 10^{12} | T | nano | 10^{-9} | n |
| giga | 10^9 | G | piko | 10^{-12} | p |
| mega | 10^6 | M | femto | 10^{-15} | f |
| kilo | 10^3 | k | atto | 10^{-18} | a |
| hekto | 10^2 | h | zepto | 10^{-21} | z |
| deka | 10 | da | jokto | 10^{-24} | y |

np. $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m} = 0.000 \text{ 000 001 m}$

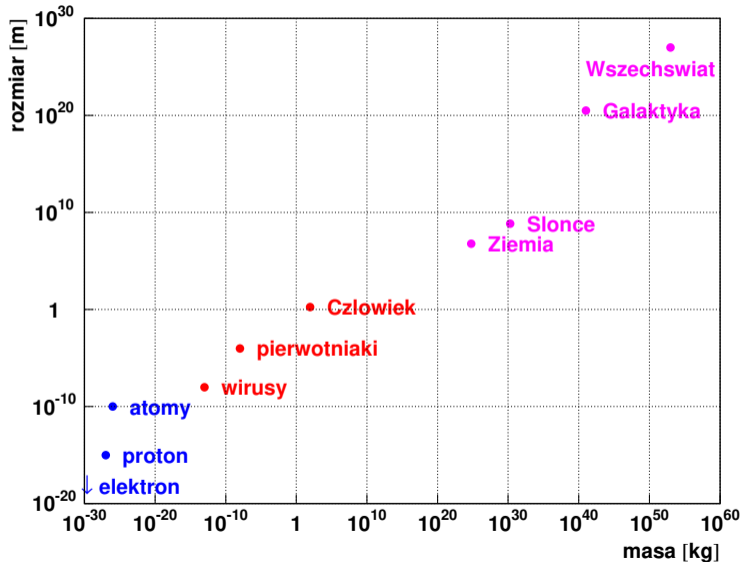
Rozmiary badanych obiektów:

| | | |
|-------------|-------------|---------------------------------------|
| 1 m | 10^0 m | ludzie, fale radiowe, |
| 10 km | 10^4 m | najwyższe góry, komety |
| 10 tys. km | 10^7 m | promień Ziemi |
| 1 mln km | 10^9 m | promień Słońca |
| 1 AU | 10^{11} m | orbita Ziemi |
| 30 AU | 10^{13} m | układ słoneczny (orbita Neptuna) |
| 4 ly | 10^{16} m | najbliższa gwiazda (Proxima Centauri) |
| 150 tys. ly | 10^{21} m | Droga Mleczna (nasza galaktyka) |
| 100 mln ly | 10^{24} m | supergromada galaktyk |
| 14 mld. ly | 10^{26} m | promień obserwowanego Wszechświata |

Ciekawa animacja: <http://htwins.net/scale2/>

Rozmiary badanych obiektów:

| | | |
|-------------------|--------------|-----------------------------------|
| 1 m | 10^0 m | ludzie, fale radiowe, |
| 1 mm | 10^{-3} m | ziarna piasku, pchła |
| 100 μm | 10^{-4} m | ludzki włos, pierwotniaki |
| 10 μm | 10^{-5} m | komórki zwierzęce |
| 1 μm | 10^{-6} m | bakterie |
| 10 nm | 10^{-8} m | małe wirusy |
| 1 nm | 10^{-9} m | grubość nici DNA |
| 1 Å | 10^{-10} m | rozmiar atomu |
| 1 fm | 10^{-15} m | proton, jądro atomowe |
| poniżej | 10^{-18} m | ograniczenie na rozmiar elektronu |



- 1 Fizyka przełomu XIX i XX wieku
- 2 Skale w fizyce
- 3 Granice stosowalności fizyki klasycznej**
- 4 Szczególna Teoria Względności

Fizyka klasyczna

Dobrze opisuje zjawiska “dnia codziennego”:

- obiekty makroskopowe
- poruszające się z “umiarkowanymi” prędkościami
- w słabych polach grawitacyjnych
(same też nie mogą być zbyt masywne)

Fizyka klasyczna

Dobrze opisuje zjawiska “dnia codziennego”:

- obiekty makroskopowe
- poruszające się z “umiarkowanymi” prędkościami
- w słabych polach grawitacyjnych
(same też nie mogą być zbyt masywne)

Szczególna Teoria Względności

Wkracza wtedy, gdy prędkości względne stają się porównywalne z prędkością światła
 $c \equiv 299\,792\,458 \text{ m/s} \approx 300\,000 \text{ km/s}$.

Fizyka współczesna bardzo często wymaga stosowania podejścia relatywistycznego.
Nie tylko w przypadku dużych prędkości...

Bez uwzględnienia efektów relatywistycznych nie jest także możliwe pełne zrozumienie wielu “codziennych” zjawisk, np. oddziaływań magnetycznych! Nie mówiąc już np. o działaniu GPS...

Odejście od zasad fizyki klasycznej także w przypadku obiektów mikroskopowych. **Ale nie rozmiar jest najistotniejszy!**

Mechanika kwantowa

Wkracza gdy badane zjawiska zachodzą na skalach porównywalnych ze **stałą Plancka**:

$$h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

Skala zjawiska może dotyczyć energii i czasu, pędu i długości, momentu pędu

Stała Plancka jest niesłychanie mała.

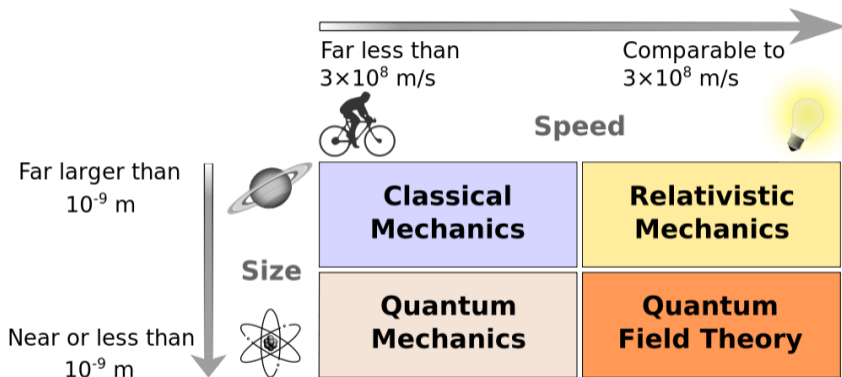
Fizyka kwantowa istotna dopiero na poziomie subatomowym.

$$h \sim m_p \cdot r_p \cdot c \quad m_p, r_p - \text{masa i promień protonu}$$

Dla wszelkich obiektów makroskopowych stosujemy fizykę klasyczną

W fizyce cząstek nieodzowna staje się **mechanika kwantowa!**

Relatywistyczne i kwantowe rozszerzenia mechaniki klasycznej



Współczesna fizyka cząstek opisywana jest w języku **Kwantowych Teorii Pola** łączących szczególną teorię względności z mechaniką kwantową

Jest to świat bardzo różny od tego do którego jesteśmy przyzwyczajeni...

- 1 Fizyka przełomu XIX i XX wieku
- 2 Skale w fizyce
- 3 Granice stosowalności fizyki klasycznej
- 4 Szczególna Teoria Względności

Problem:

Z równań Maxwella wynika, że prędkość światła

nie zależy od układu odniesienia!

Jest to sprzeczne z zasadami mechaniki klasycznej!

albo światło musiałyby się rozchodzić w ośrodku, eterze...

Doświadczenie potwierdziło słuszność równań Maxwella ! (eter nie istnieje)

Problem:

Z równań Maxwella wynika, że prędkość światła

nie zależy od układu odniesienia!

Jest to sprzeczne z zasadami mechaniki klasycznej!

albo światło musiałyby się rozchodzić w ośrodku, eterze...

Doświadczenie potwierdziło słuszność równań Maxwella ! (eter nie istnieje)

W roku 1905 Einstein opublikował pracę "O elektrodynamice ciał w ruchu".

Zawarł w niej dwa postulaty:

- prawa fizyki są identyczne we wszystkich układach odniesienia (zasada względności - obowiązuje też w fizyce klasycznej!)
- prędkość światła w próżni, c , jest jednakowa we wszystkich układach odniesienia, niezależnie od wzajemnego ruchu obserwatora i źródła (uniwersalność prędkości światła)

Konsekwencje

Drugi postulat Einsteina oznacza, że **czas przestaje być uniwersalny!**

Każdy pomiar zależy od układu odniesienia, w którym jest wykonany!

Każdy układ odniesienia (obserwator) musi mieć **własny zegar!**

Inaczej nie może poprawnie dokonywać pomiarów...

Konsekwencje

Drugi postulat Einsteina oznacza, że **czas przestaje być uniwersalny!**
Każdy pomiar zależy od układu odniesienia, w którym jest wykonany!

Każdy układ odniesienia (obserwator) musi mieć **własny zegar!**
Inaczej nie może poprawnie dokonywać pomiarów...

Pomiar czasu pomiędzy dwoma zdarzeniami
(np. startem i lądowaniem rakiety albo produkcją cząstki i jej rozpadem)
zależy od układu odniesienia, z którego prowadzimy obserwację!

Czas lotu samolotu mierzony przez pilota i przez kontrolera lotów jest różny
(potwierdzone doświadczalnie choć różnice są na poziomie ns!)

Konsekwencje

Drugi postulat Einsteina oznacza, że **czas przestaje być uniwersalny!**
Każdy pomiar zależy od układu odniesienia, w którym jest wykonany!

Każdy układ odniesienia (obserwator) musi mieć **własny zegar!**
Inaczej nie może poprawnie dokonywać pomiarów...

Pomiar czasu pomiędzy dwoma zdarzeniami
(np. startem i lądowaniem rakiety albo produkcją cząstki i jej rozpadem)
zależy od układu odniesienia, z którego prowadzimy obserwację!

Czas lotu samolotu mierzony przez pilota i przez kontrolera lotów jest różny
(potwierdzone doświadczalnie choć różnice są na poziomie ns!)

Zdarzenia równoczesne dla jednego obserwatora mogą nie być równoczesne dla innego!
(względność równoczesności)

Dylatacja czasu

Jeśli obserwujemy szybko **poruszający się zegar** to porównując z naszym własnym zegarem zauważamy, że **chodzi wolniej** niż powinien

Dylatacja czasu

Jeśli obserwujemy szybko **poruszający się zegar** to porównując z naszym własnym zegarem zauważamy, że **chodzi wolniej** niż powinien

Skrocenie Lorentza

Jeśli zmierzmy **długość szybko poruszającego się obiektu** to będzie ona **mniejsza** niż jego długość rzeczywista (w spoczynku)

Dylatacja czasu

Jeśli obserwujemy szybko **poruszający się zegar** to porównując z naszym własnym zegarem zauważamy, że **chodzi wolniej** niż powinien

Skrocenie Lorentza

Jeśli zmierzmy **długość szybko poruszającego się obiektu** to będzie ona **mniejsza** niż jego długość rzeczywista (w spoczynku)

Składanie prędkości

Jeśli z rakiety poruszającej się z prędkością V względem Ziemi wystrzelimy pocisk z prędkością V' względem rakiety to prędkość pocisku względem Ziemi:

$$U < V + V'$$

w taki sposób, że nigdy osiągniemy prędkości światła!

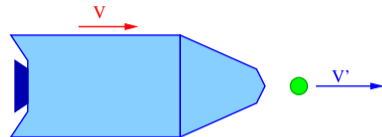
⇒ Prędkość światła jest prędkością graniczną dla wszystkich cząstek!

Składanie prędkości

Z rakiety poruszającej się z prędkością V względem Ziemi
wyszedł pocisk z prędkością V' względem rakiety.

Jaka jest prędkość U pocisku względem Ziemi?

| V | V' | U |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 39 900 km/h 11.08 km/s | 39 900 km/h 11.08 km/s | 79 800 km/h 22.16 km/s |

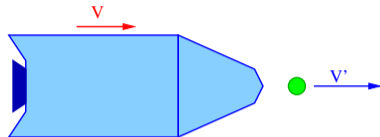


Apollo 10

Składanie prędkości

Z rakiety poruszającej się z prędkością V względem Ziemi wystrzelono pocisk z prędkością V' względem rakiety.

Jaka jest prędkość U pocisku względem Ziemi?



| V/c | V'/c | U/c |
|----------|----------|-------------|
| 0.000037 | 0.000037 | 0.000074 |
| 0.0001 | 0.0001 | 0.0002 |
| 0.001 | 0.001 | 0.001999998 |
| 0.01 | 0.01 | 0.019998 |
| 0.1 | 0.1 | 0.1980 |

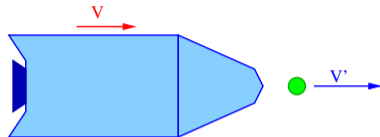
Apollo 10

Ziemia dookoła Słońca

W granicy małych prędkości słuszne jest klasyczne dodawanie prędkości.

Składanie prędkości

Z rakiety poruszającej się z prędkością V względem Ziemi wystrzelono pocisk z prędkością V' względem rakiety.



Jaka jest prędkość U pocisku względem Ziemi?

| V/c | V'/c | U/c |
|-------|--------|--------|
| 0.2 | 0.2 | 0.3846 |
| 0.4 | 0.4 | 0.6897 |
| 0.5 | 0.5 | 0.8000 |
| 0.6 | 0.6 | 0.8824 |
| 0.8 | 0.8 | 0.9756 |
| 0.9 | 0.9 | 0.9945 |

Jednak prędkość światła jest “barierą”, której nie możemy przekroczyć.

Równoważność masy i energii

W teorii Einsteina wciąż ściśle obowiązuje **zasada zachowania energii**
oraz **zasada zachowania pędu** (jak w fizyce klasycznej)
Tylko definicja energii i pędu musi zostać zmieniona!

Równoważność masy i energii

W teorii Einsteina wciąż ściśle obowiązuje **zasada zachowania energii**
oraz **zasada zachowania pędu** (jak w fizyce klasycznej)
Tylko definicja energii i pędu musi zostać zmieniona!

Zawsze zachowana jest energia całkowita układu,
która uwzględnia **energię spoczynkową** związaną z masą cząstki:

$$E_0 = m c^2$$

Równoważność masy i energii

W teorii Einsteina wciąż ściśle obowiązuje **zasada zachowania energii**
oraz **zasada zachowania pędu** (jak w fizyce klasycznej)
Tylko definicja energii i pędu musi zostać zmieniona!

Zawsze zachowana jest energia całkowita układu,
która uwzględnia **energię spoczynkową** związaną z masą cząstki:

$$E_0 = m c^2$$

Masa nie jest zachowana!

Cząstki (masa) mogą być produkowane (**kosztem np. energii kinetycznej**), mogą też się rozpadać, anihilować...

Powoduje to, że możliwe jest wiele procesów, które nie mają klasycznych odpowiedników...

Równoważność masy i energii - analogia klasyczna

