

Szczególna Teoria Względności - czy *nadal* obowiązuje?



Jacek Jasiak

Wydział Fizyki UW
Festiwal Nauki 2005

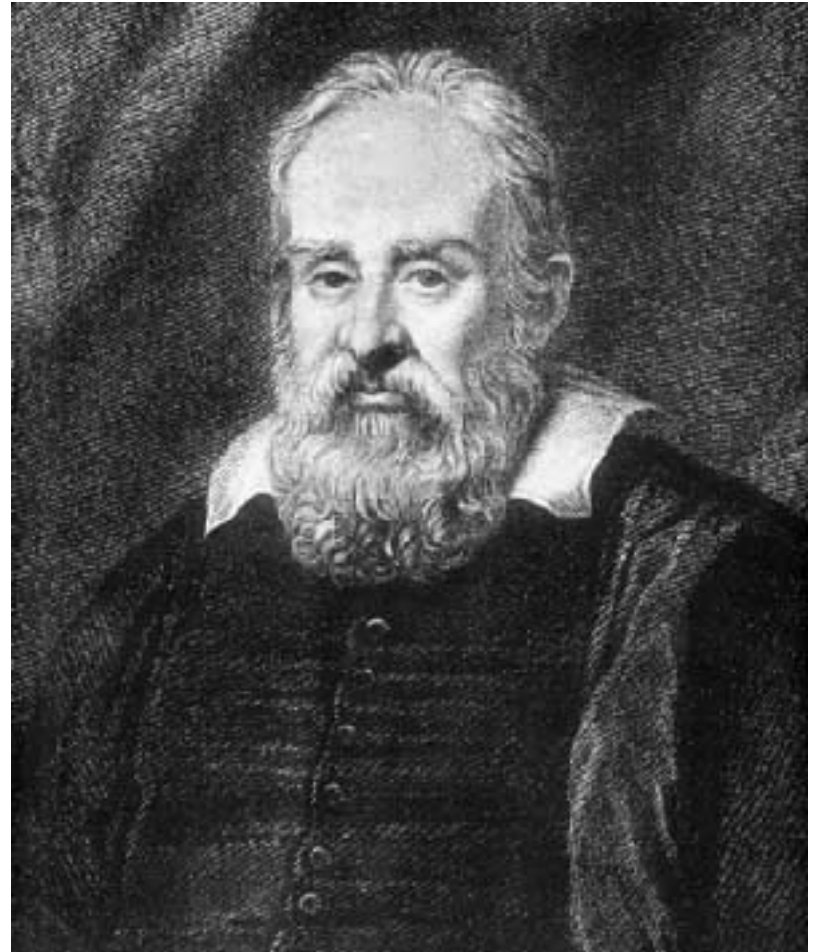


Treść

1. Szczególna Teoria Względności - przypomnienie
2. Czy można poprawić STW ?
3. Podsumowanie.

Podstawa wszystkiego:
Zasada Względności

Galileusza!



Zasada względności

Prawa fizyki są takie same w każdym (inercyjnym) układzie odniesienia

lub

Nie można ustalić z jaką prędkością się poruszamy nie „wyglądając” przez „okno”

lub

Wszystkie inercyjne układy odniesienia są sobie równoważne

lub...

Zasada względności

Prawa fizyki są takie same w każdym (inercjalnym) układzie odniesienia

Galileusz rozważał prawa fizyki w żaglowcu majestatycznie sunącym po falach

Musiał wyeliminować wpływ *wiatru*, *kołysania*, ..., na przebieg doświadczenia.



Analogia

Wyobraźmy sobie, że mieszkamy w dwuwymiarowym świecie, w którym każde miejsce jest takie samo (wszystkie są sobie równoważne).
Jak wygląda ten świat?



Zasada względności może prowadzić do różnych postaci
związku między współrzędnymi w różnych układach
odniesienia

$$t' = t, x' = x - vt$$

Transformacja
Galileusza

$$t' = \frac{t + vx/d^2}{\sqrt{1 + v^2/d^2}}, x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 + v^2/d^2}}$$

Obrót

$$t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Transformacja
Lorentza

Geometria Szczególnej Teorii Względności

**Geometria czasoprzestrzeni jest
bardzo podobna do geometrii zwykłej
przestrzeni**

Dla uproszczenia będziemy rozważali tylko dwuwymiarową przestrzeń (i dwuwymiarową czasoprzestrzeń (czas + położenie))

Zjawiska związane ze STW

Względność równoczesności

Dylatacja czasu

To „widzimy”!

Skrócenie Lorentza

Istnienie prędkości granicznej,
nieosiągalnej dla zwykłych ciał

To też „widzimy”!

Nieosiągalność prędkości granicznej



$$v_{31} = \frac{v_{21} + v_{32}}{1 + v_{21}v_{32}/c^2}$$

Dla $v_{21}=0,9c$, $v_{32}=0,9c$, otrzymamy $v_{31}=0,994\dots c$

Dla $v_{21}=0,9c$, $v_{32}=c$, otrzymamy $v_{31}=c$

Ale

dla $v_{21}=0,5c$, $v_{32}=2c$, otrzymamy $v_{31}=1,25c$!?

*Tak naprawdę ewentualne istnienie cząstek poruszających się
szybciej niż światło nie przeczyłoby STW...*

Porównanie

Płaszczyzna

Tw. Pitagorasa:

$$x^2 + y^2 = x^2 + y^2$$

Najkrótsza linia łącząca
dwa punkty jest
prosta

Czasoprzestrzeń

$$(ct)^2 - x^2 = (ct)^2 - x^2$$

gdy $c=1$:

$$t^2 - x^2 = t^2 - x^2$$

Najdłuższy czas własny
odpowiada ruchowi
jednostajnemu

Energia i pęd

- Newton:

$$E = mv^2/2 = p^2/(2m), \quad p = mv$$

- Einstein:

$$E^2 = m^2c^4 + p^2c^2, \quad p = v E/c^2$$

lub

$$E^2 = m^2 + p^2 \quad (\text{dla } c=1)$$

Energia i pęd jeszcze raz

($c=1$)

$$E^2 - p^2 = m^2$$

Wzór analogiczny do

$$t^2 - x^2 = \tau^2$$

W porównaniu z teorią nierelatywistyczną:

Nie mamy zachowania masy!!!

Mamy zachowanie energii!!!

Konsekwencje $E^2 - p^2 = m^2$

$$E = \pm \sqrt{m^2 + p^2}$$

Istnieją antycząstki

W zderzeniach możliwe jest tworzenie nowych cząstek i anihilacja starych

Kreacja i anihilacja

Cząstki mogą powstawać (kreacja) i zniknąć (anihilacja), pod warunkiem, że są spełnione zasady zachowania. Przykłady:



Ciekawostka: z jaką dokładnością znamy prędkość światła?

Dokładnie!

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

(Metr jest zdefiniowany jako iloczyn c i sekundy)

Oznacza, to że fizycy powszechnie
przyjęli STW jako podstawową teorię !!!

W teorię nierelatywistyczną
nikt już nie wierzy!!!

Codzienne życie stale potwierdza
istnienie efektów związanych ze
Szczególną Teorią Względności

Ale ...

Nie można doświadczalnie **udowodnić**
słuszności jakiegoś prawa fizyki,
choć można doświadczalnie je obalić ...

Podsumowanie

- STW jest prostą, elegancką i wewnętrznie spójną teorią
- Wszelkie próby podważenia STW przez wykazanie jej wewnętrznej sprzeczności, są skazane na niepowodzenie
- Jest mnóstwo obserwacji, doświadczeń, przewidywań potwierdzających jej słuszność
- Nie ma (?) faktów podważających jej przewidywania...

Jak działa zasada względności - przykład

W układzie Ziemi obserwujemy protony o energii 10^{20}eV (10^{11} razy większej niż energia /masa/ spoczynkowa)

Obserwujemy też fotony o energii 10^{-3}eV (promieniowania reliktowe o $T = 2,7 \text{K}$)

Korzystając z zasady względności możemy rozważyć te cząstki w układzie protonu

W tym układzie foton ma energię 300 MeV ($0,3$ masy energii spoczynkowej protonu)

Może zajść reakcja:



Obcięcie Greisena-Zatsepina-Kuzumina (GZK)

Czyli tak wysokoenergetyczne protony są spowalniane przez promieniowanie tła

Ale je obserwujemy!

Rozwiązania:

- Źródło tych protonów jest gdzieś blisko (ale gdzie?)
- ...
- Zasada względności nie obowiązuje (czyli STW nie jest prawdziwa!)
- ...

Pomysły

$$E_{\alpha} = \sqrt{m^2 c_{\alpha}^4 + p^2 c_{\alpha}^2}$$

Graniczna (maksymalna) prędkość cząstki zależy od jej rodzaju

$$E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2 + \Delta(p)$$

Zależność energii od pędu jest bardziej skomplikowana

Ewentualne poprawki pojawiają się dla naprawdę „nieziemskich” energii !!!

Inne problemy, które próbuje się (*niektórzy próbują*) rozwiązać poprzez łamanie zasady względności:

- Problemy z oscylacjami neutrin
- Obserwacje wysokoenergetycznych (TeV) promieni gamma z blazara Mkn501
- Przyspieszanie ekspansji Wszechświata
- Zależność (?) stałej struktury subtelnej od czasu
-



Właściwie każdą niezgodność obserwacji astrofizycznych z istniejącymi teoriami można próbować wyjaśnić przez modyfikację STW ...

Teoretyczne przesłanki łamania symetrii lorentzowskiej

- Struny itp.: *niektórzy* twierdzą, że dla dużych energii teoria strun prowadzi do odstępstw od tej symetrii
- Kwantowa grawitacja: przewiduje skwantowanie długości (i czasu?), a to *może* nie być zgodne z zasadą względności
- Istnienie masy Plancka $M_p = \sqrt{hc / 2\pi G_N} \approx 1,2 \cdot 10^{19} \text{ GeV}/c^2$
-

A prócz tego:

Każdy chciałby być lepszy od Einsteina...

Co oznacza poprawianie STW ?

- Każda (prawie) modyfikacja STW wymaga wprowadzenia wyróżnionego układu odniesienia
- Zwykle przyjmujemy, że jest to układ w którym promieniowanie reliktowe jest izotropowe

Koncepcyjnie jest to cofnięcie się niemal do
Arystotelesa ...

Żeby zmierzyć słuszność STW musimy wprowadzić parametry które będą to mierzyć

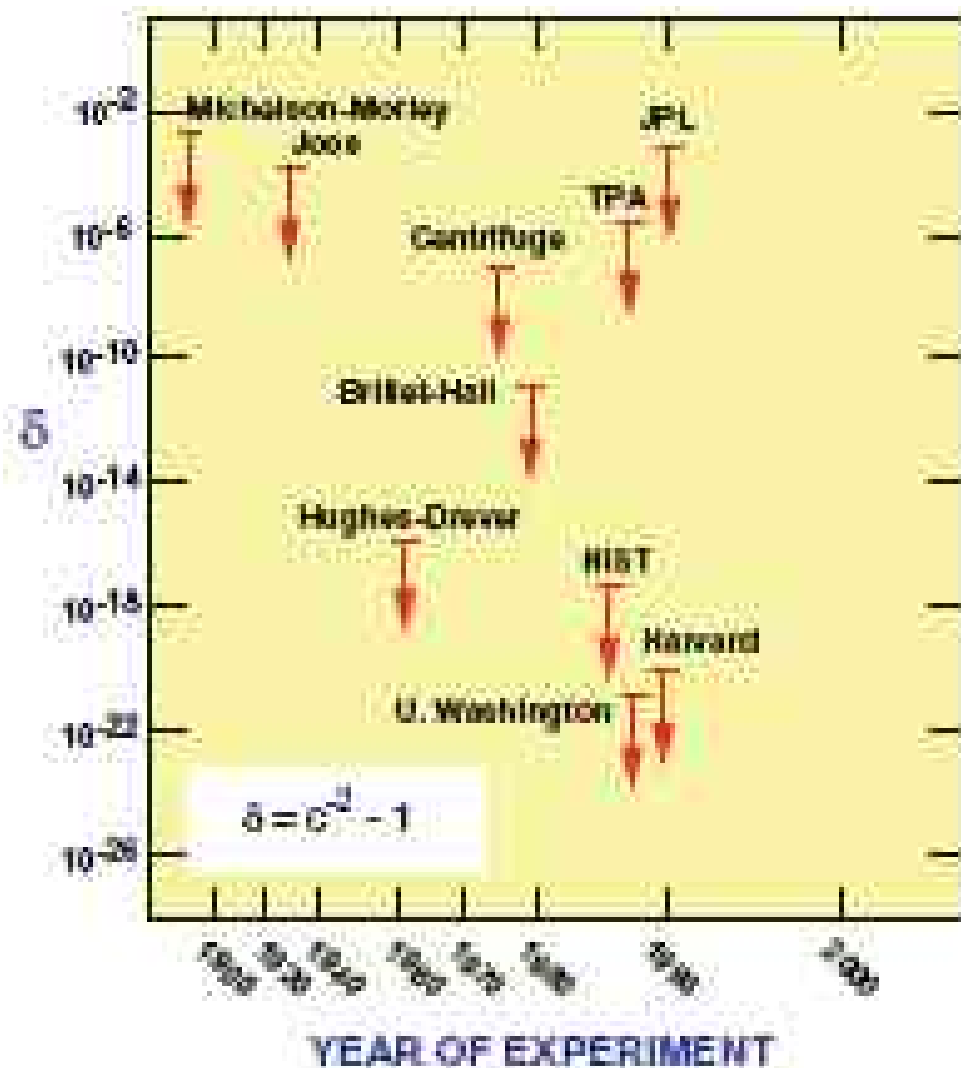
- Kinematycznie np:

$$E^2 = m^2 + p^2 + \eta^{(1)} \frac{\mu^2}{M_P} |p| + \eta^{(2)} \frac{\mu}{M_P} p^2 + \eta^{(3)} \frac{p^3}{M_P}$$

- Dynamicznie: do „zwykłych” oddziaływań pól dodajemy oddziaływanie tych pól z „eterem” odpowiadającym wyróżnionemu układowi odniesienia

Formalnie takie podejście jest lorentzowsko niezmiennicze, ale możemy porównać oddziaływanie z „eterem” do wiatru, przed którym nie można się schować

Wyniki eksperymentów: zgodność prędkości światła ze stałą c



$$\delta = \left(\frac{c_{\text{światła}}}{c} \right)^2 - 1$$

Niektóre ograniczenia doświadczalne i obserwacyjne łamania symetrii lorentza

$$E^2 = m^2 + p^2 + \eta^{(1)} \frac{\mu^2}{M_p} |p| + \eta^{(2)} \frac{\mu}{M_p} p^2 + \eta^{(3)} \frac{p^3}{M_p}$$
$$M_p \approx 1,2 \cdot 10^{19} \text{ GeV}/c^2 \quad \mu \approx 1 \text{ GeV}$$

$$\eta^{(1)} < 10^{-12}$$

Doświadczenia w laboratoriach

$$\eta^{(2)} < 1$$

Gdyby potwierdziło się istnienie obciążenia GZK

$$|\eta^{(3)}| < 128$$

Z obserwacji 1 i 2 TeV promieni gamma z blazara Markarian 421

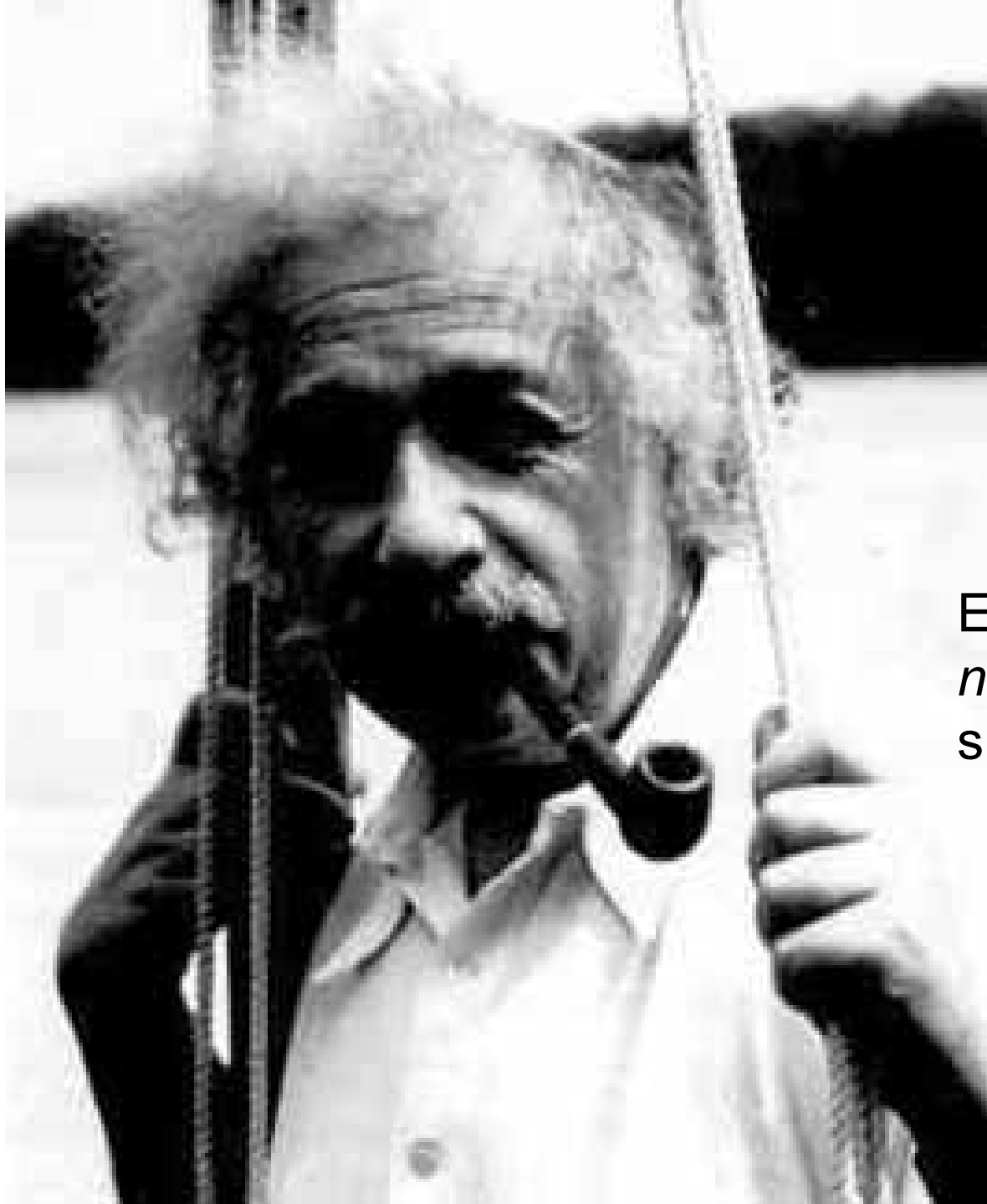
$$|\eta^{(3)}| < 10^{-4}$$

Z nieobserwowania dwójłomności światła w próżni

Podsumowanie 2.

Newton nie
miał racji !





Einstein
nadal trzyma
się mocno