

**prof. dr hab. inż. Leszek R. Jaroszewicz**  
**członek korespondent PAN**

**Instytutu Fizyki Technicznej**  
**Wydział Nowych Technologii i Chemii**  
**Wojskowa Akademia Techniczna**  
**e-mail: jarosz@wat.edu.pl**



# Początek XX w. jako relatywistyczny przełom w fizyce

**Leszek R. Jaroszewicz**

**Wojskowa Akademia Techniczna  
Warszawa, 15.10.2020**



# Fizyka - istota

- poszukiwanie i poznawanie podstawowych praw przyrody (**M. Smoluchowski** 1872-1917: fizyka jest to nauka o zjawiskach przyrody martwej oraz o zjawiskach, które są wspólne przyrodzie martwej i żywej)
- fizyka bazuje na pomiarach (**M. Faraday** 1791-1867: fizyka to eksperymentowanie i ogłaszanie wyników)
- fizyka jest nauką ścisłą – matematyczny opis praw fizycznych



**Fizyka jest to nauka przyrodnicza zajmująca się ruchem we wszelkich jego przejawach oraz jego przyczynami i skutkami**



# Niezmienniczość Galileusza

*Dialog o dwóch najważniejszych systemach świata*

**Zasada względności Galileusza:** wszystkie **układy mechaniczne**, które poruszają się względem siebie bez przyspieszenia, czyli ruchem jednostajnym prostoliniowym, są równoważne.

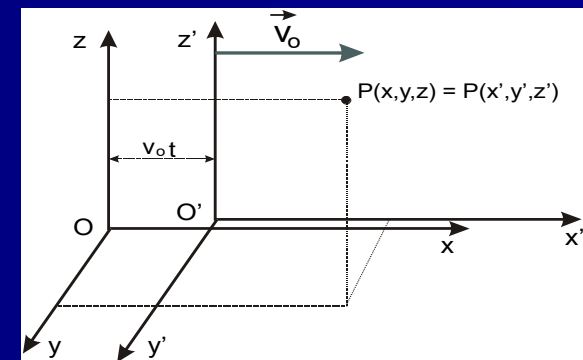
**Jeśli nie jest** spełniona to układ jest **nieinercjalny** i na ciało działają **przyspieszenia pozorne**. Zjawisko to nazywamy **bezwładnością ciała** - tendencja ciała do zachowania stanu ruchu.



**Galileo Galilei**  
1564-1642

Między układami O i O' istnieją związki współrzędnych:

$$\begin{aligned}x' &= x \pm v_0 t \\y' &= y \\z' &= z\end{aligned}$$



które z warunkiem **jednakowego upływu czasu** tworzą tzw. **transformację (przekształcenie) Galileusza**. Umożliwia ona przeliczenie parametrów ruchu pomiędzy dowolnymi inercjalnymi układami.

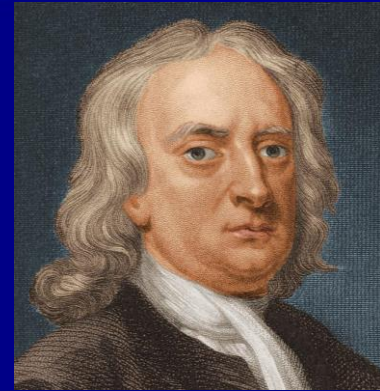
$$v_{wzgl} = v_1 \pm v_2$$



# Bezwzględna przestrzeń i czas a względny ruch

*Matematyczne zasady filozofii naturalnej (Principia 1687)*

**Principia** mają formalną strukturę. Składają się z twierdzeń (tez, lematów, definicji, aksjomatów) zadań i scholiów (mniej formalnych objaśnień ilustrujących omawiane zagadnienia), a także wniosków i przykładów. Newton nie prowadzi rachunków w znanej nam formie. Podstawą rozumowania były graficzne konstrukcje - rachunki, traktowane dziś jako analiza, były na ich marginesie.



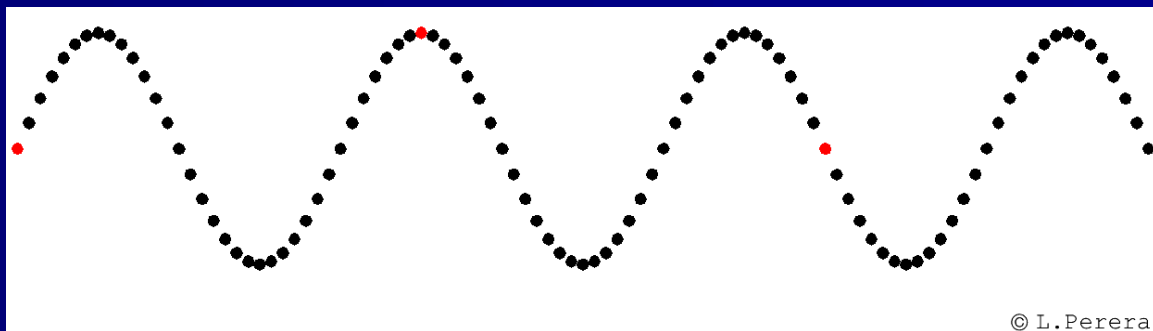
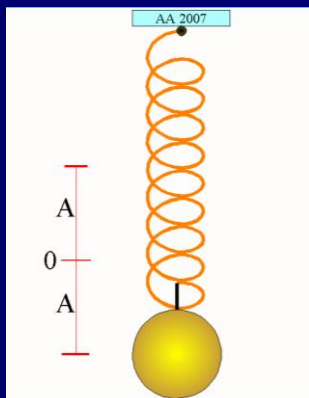
**Isaac Newton**  
1642-1727

- Próba zdefiniowania **czasu absolutnego** „z natury płynącego równomiernie” wskazanie na różnicę pomiędzy nim a czasem wyznaczonym na bazie okresowych zjawisk astronomicznych.
- Odróżnienie: **przestrzeni absolutnej** obiektywnie nieruchomej, istniejącej w oderwaniu od przedmiotów materialnych i **przestrzeni względnej** odniesionej do realnych ciał fizycznych → Dwa rodzaje miejsca w przestrzeni: **absolutne i względne**
- Wiara w **ruch absolutny** ruch względem absolutnej przestrzeni i **ruch względny** odniesiony do innych ciał. Jednak nie umie wskazać ciała absolutnie nieruchomego
- Wspomnienie o **bezwzględności przyspieszenia** na tle względności ruchu i roli **siły** dla **bezwzględnej zmiany ruchu** → **bezwzględny charakter ruchu obrotowego**.





# Ruch drgający a ruch falowy - fale



© L.Perera

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} = -\omega_0^2 y(t)$$

$$y(t) = A \sin(\omega_0 t + \phi_0)$$



$$\frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2}$$

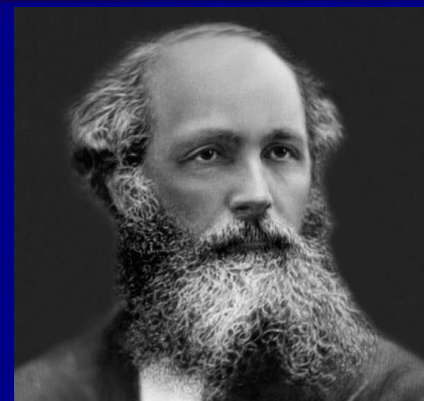
$$y(x, t) = A_0 \sin(\omega t - kx)$$



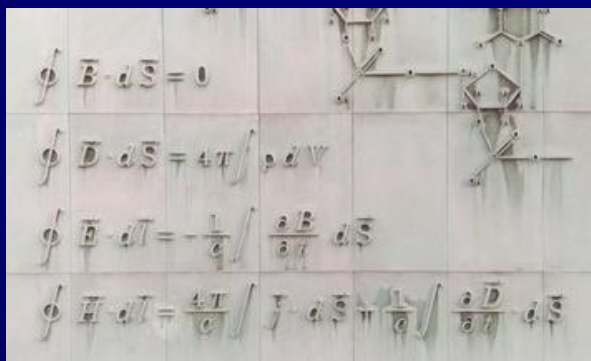
# Światło jako fala elektromagnetyczna

*Traktat o elektryczności i magnetyzmie (1873)*

**1864** – na podstawie doświadczeń M. Faraday'a **James Clark-Maxwell** podaje równania wiążące elektryczność i magnetyzm w jedną spójną **teorię pola elektromagnetycznego**



**J. Clark-Maxwell**  
1831-1879



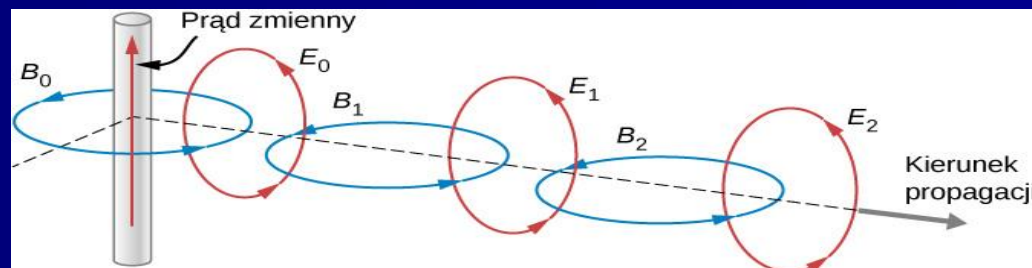
$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0} \frac{\partial^2 E}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial^2 B}{\partial t^2} = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0} \frac{\partial^2 B}{\partial x^2}$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ [m/s]} \equiv c$$

**Światło** – zaburzenie elektromagnetyczne, jest falą, która przemieszcza się ze stałą prędkością – **c** (wprowadzoną jak stała fizyczna przez J.C-Maxwella).

**1886** – **generacja** za pomocą oscylatora elektrycznego fali elektromagnetycznej **Heinrich Rudolf Hertz** 1857-1894





# Problem eteru światelnego

Jeśli światło to fala – to w czym się rozchodzi (patrz fala mechaniczna)?

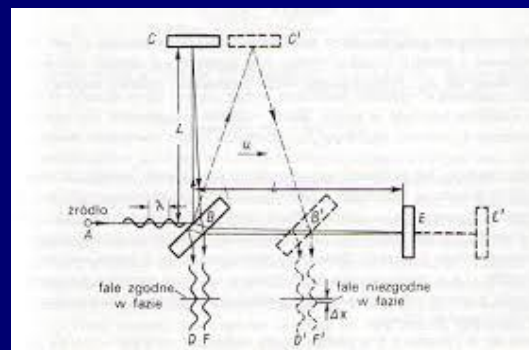
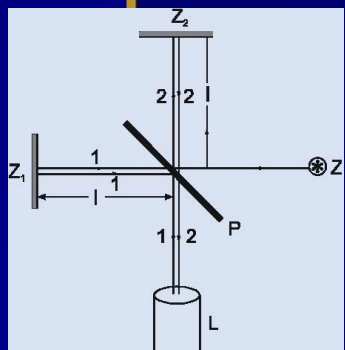
Eter światlny:

- Jeśli eter istnieje to:
  - musiałby przenikać całą przestrzeń
  - musiałby być pierwotnym i bezwzględnym układem odniesienia dla światła.
- Ziemia musi albo pozostawać w spoczynku w tym eterze albo poruszać się względem niego, a w konsekwencji inercjalny układ odniesienia dla światła musi być w spoczynku lub poruszać się względem Ziemi.

**1887** – ostateczny eksperyment **A.A. Michelsona** i **E.W. Morley'a** w celu sprawdzenia natury eteru światelnego i wyznaczenia prędkości światła względem niego.



Albert A. Michelson  
1852-1931



$$\frac{2lc}{c^2 - v^2} = t_1 \neq t_2 = \frac{2l}{\sqrt{c^2 - v^2}}$$

**Brak:**

- eteru,
- bezwzględnego spoczynku,
- $c$  ma stałą wartość





# Pchnięcie Lorentza

Co będzie gdy będziemy gonić promień świetlny z prędkością  $c$ ?  
Z intuicji (transformata Galileusz) oraz praw ruchu Newtona – światło wyda się stacjonarne.

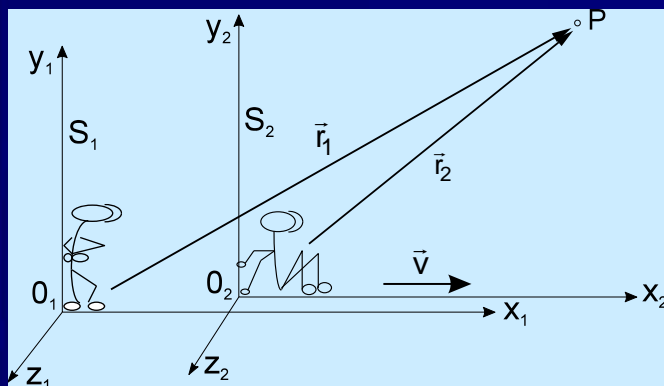
## I sprzeczność współczesnej fizyki

1890 – **pchnięcie** (transformacja) Lorentza:

- Stała prędkość światła w różnych układach inercjalnych
- Przekształcenie liniowe
- Ruch jednostajny przekształca się w ruch jednostajny
- Dla małych prędkości staje się transformacja Galileusza.



Hendrik A Lorentz  
1853-1928



$$x_2 = \gamma(x_1 - vt_1)$$

$$y_2 = y_1$$

$$z_2 = z_1$$

$$t_2 = \gamma \left( t_1 - \frac{\beta}{c} x_1 \right)$$

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

$$\beta = \frac{v}{c}$$

$$l_1 = l_2 \sqrt{1 - \beta^2} \quad l_1 < l_2$$

$$T_2 = T_1 \sqrt{1 - \beta^2} \quad T_2 < T_1$$

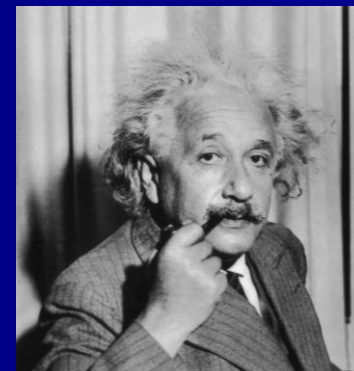


# Względność czasu

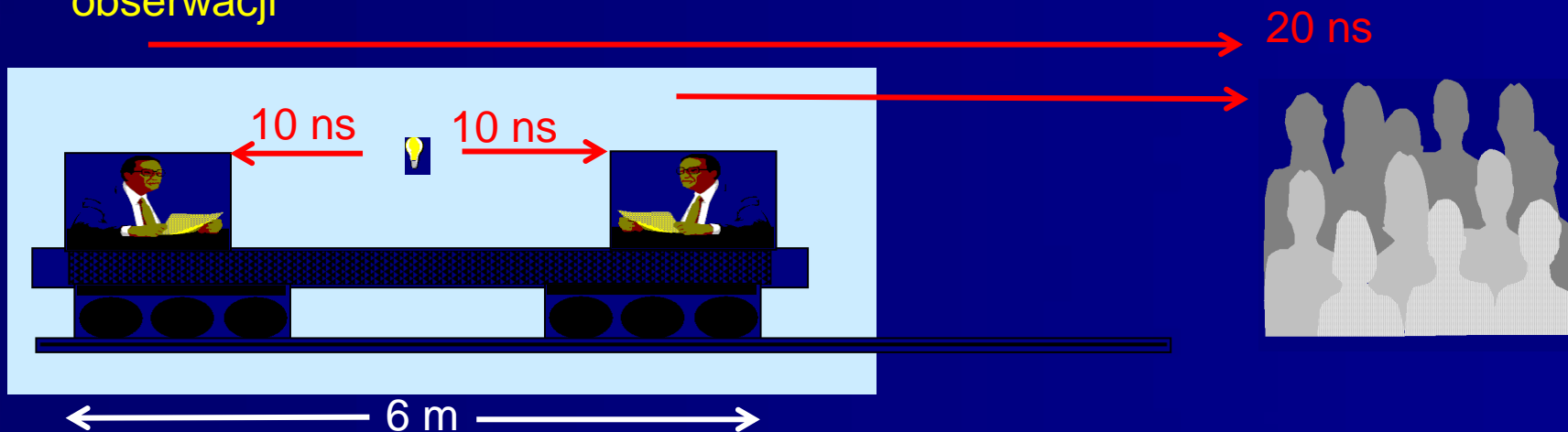
Lorentz - zjawisko skrócenia przedmiotu w ruchu jest spowodowane pewną siłą działającą na ten przedmiot w czasie jego przechodzenia przez stacjonarny eter.

## Albert Einstein:

1. skrócenie to jest właściwością samej przestrzeni jako takiej i że bezwzględny lub wyróżniony spośród innych układ odniesienia nie istnieje.
2. jednoczesność zdarzeń uzależniona jest od układu obserwacji



Albert Einstein  
1879-1955



Zmiana naszego subiektywnego poglądu co do jednoczesności zdarzeń



# Szczególna teoria względności

## 1905 - szczególna zasada względności:

Wszystkie prawa **fizyki** muszą być takie same we wszystkich układach inercjalnych poruszających się względem siebie ruchem jednostajnym prostoliniowym.

## Postulaty STW (1905 r.):

- zasada względności obowiązuje dla wszystkich praw fizyki
- prędkość światła jest taka sama we wszystkich inercjalnych układach odniesienia

**prędkość**

**miara odległości, jaką pokonuje obiekt w danym przedziale czasu**

miara ilości przestrzeni  
znajdującej się między dwoma  
punktami

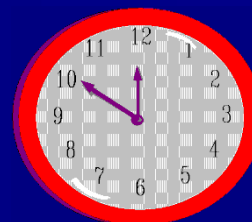
czas jaki upływa między dwoma  
zdarzeniami - pojęcie trwania  
zdarzenia

$$c = \mathit{const} \equiv \{tylko\ tyle\} \equiv \frac{\Delta L}{\Delta t} \{\mathit{jest\ stały!!!}\} = \frac{10}{5} = \frac{20}{10} = \dots$$



# STW - dla układów pozostających w ruchu zarówno czas jak i przestrzeń są zależne od ich wzajemnej prędkości

w układzie poruszającym się czas płynie wolniej, zaś obserwatorzy widzą poruszający się obiekt jako skrócony



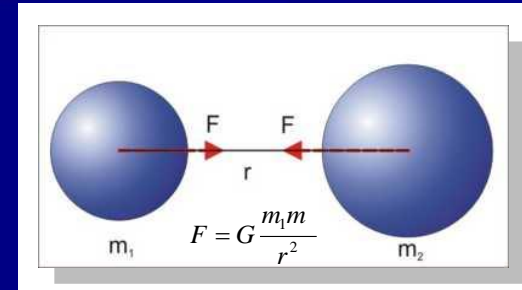
Zmiana naszego subiektywnego poglądu co do jednoczesności zdarzeń,  
a co za tym idzie bezwzględności pojęcia czasu i przestrzeni

# Prawo powszechnego ciężenia



Pomiędzy dowolną parą ciał posiadających masy pojawia się siła przyciągająca, która działa na linii łączącej ich środki, a jej wartość rośnie z iloczynem ich mas i maleje z kwadratem odległości.

Brak zależności czasowej => niezgodność z STW !!!



## II sprzeczność współczesnej fizyki

**Principia:** Grawitację musi powodować jakiś czynnik działający stale zgodnie z pewnymi prawami: ale kwestię, czy jest on materialny, czy niematerialny, pozostawiam do rozważenia moim czytelnikom

Dla każdego obiektu Newton podaje dwa pojęcia, które wiążą się ściśle z masą obiektu - miarą ilości materii w nim zawartej.

Pojęcie masy związane jest z **bezwładnością** - zdolnością ciał do przeciwstawiania się zmianom ich ruchu (II zasada Newtona - ciało dąży do zachowania stanu spoczynku), stąd określenie masy jako tzw. **masy bezwładnej**.

Jednocześnie **grawitacja** to oddziaływanie obserwowane jako przyciąganie mas w postaci siły ciężkości (powyższe prawo powszechnego ciężenia) - stąd określenie masy jako tzw. **masy ciężkiej**.

Ale **dlaczego** dwa „różne” określenia jednej fizycznej masy ????

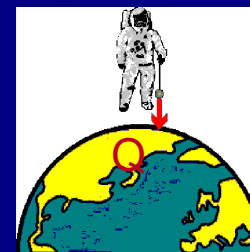




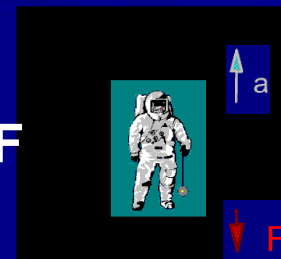
# Czasoprzestrzeń jako element OTW

1907- **zasada równoważności** Einsteina:

dla ograniczonej przestrzeni zachodzi całkowita nierozróżnialność ruchu przyspieszonego oraz oddziaływania grawitacyjnego  $|a|=|g|$ .

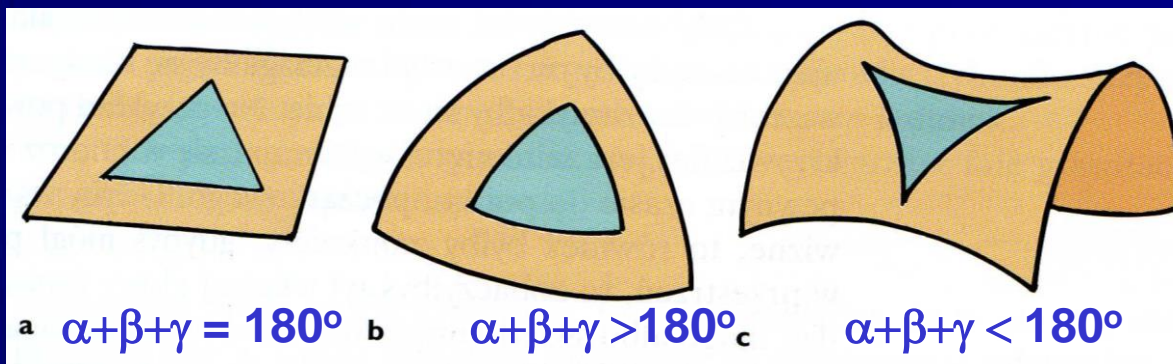


$$Q=F$$



**Geometria euklidesowa** (Euklides, IV/III w. p.n.e.)- przestrzeń jest płaska (występuje w prawach Newtona). Cechy: linia prosta jest najkrótszą odległością pomiędzy dwoma punktami, suma kątów każdego trójkąta wynosi 180 stopni, linie równoległe nigdy się nie przecinają.

**Ale trójkąt na powierzchni zakrzywionej ...**



Interwał przestrzenny:

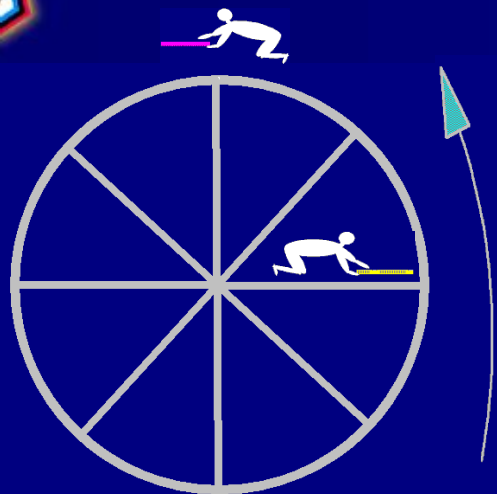
$$ds^2 = \sum_{\mu,\nu}^N g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

$g_{\mu\nu}$  – tensor metryczny

Matematyczny opis tzw. geometrii nieeuklidesowych podał **B. Reimann** (1854), tzw. **geometrie reimannowskie** - wielowymiarowe uogólnienia klasyfikacji geometrii różniczkowej na dwuwymiarowych powierzchniach (zapoczątkowanej przez C.F. Gaussa).



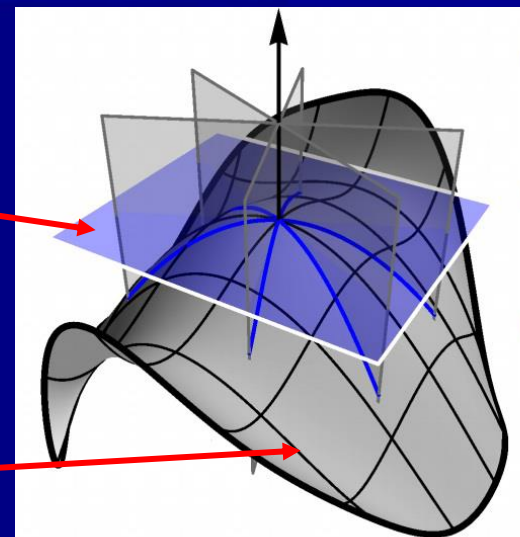
**1912** [Einstein do Sommerfelda]: pracuję teraz wyłącznie nad problemem grawitacji [...] Jedno jest pewne - nigdy w życiu aż tak się nie namęczyłem [...] W porównaniu z tym problemem pierwotna [szczególna] teoria względności to dziecinna igraszka".



**obwód / promień**  
 $= 2\pi$



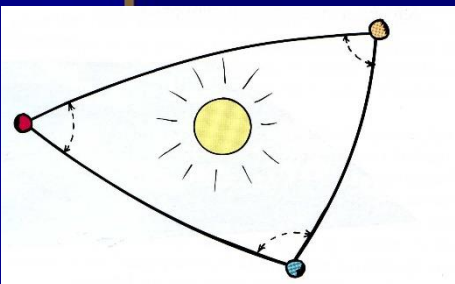
**obwód / promień**  
 $> 2\pi$



**Wniosek** - ruch przyspieszony powoduje zakrzywienie przestrzeni, a także zakrzywienie czasu (różne tempo jego upływu).

**A. Einstein** - grawitacji i ruch przyspieszonego nie da się rozróżnić oraz ruch przyspieszony ma związek z zakrzywieniem czasoprzestrzeni → OTW ogólna teoria względności (20.03.1916 r.):

### Grawitacja to zakrzywienie przestrzeni i czasu

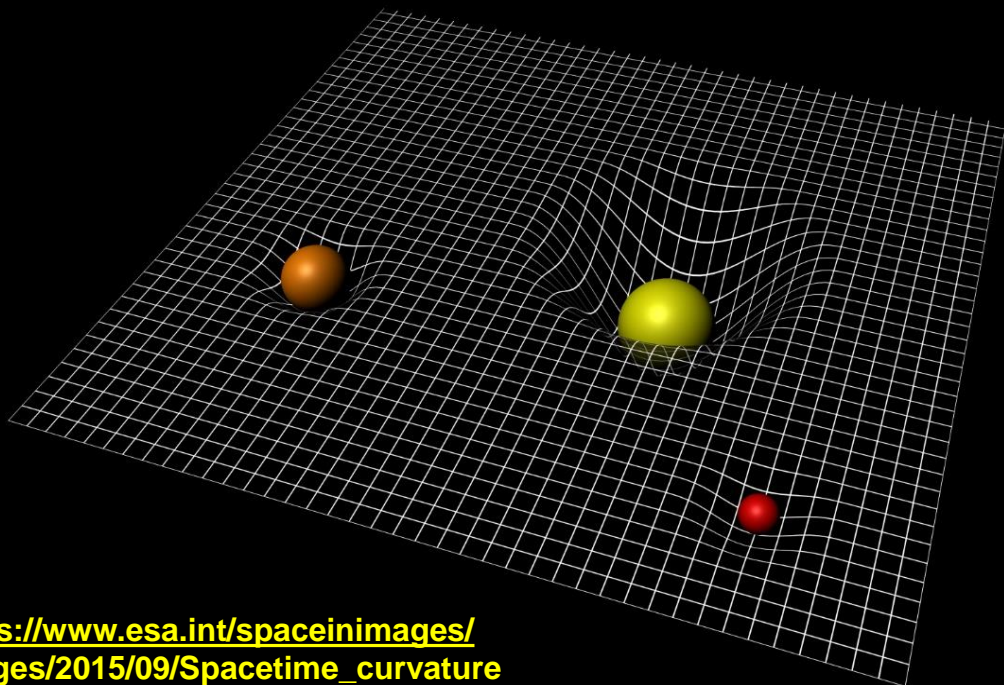
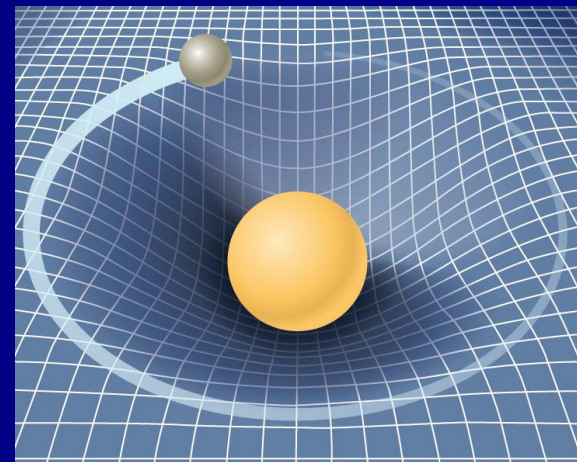


Promienie świetlne przebiegające między trzema planetami wyznaczają trójkąt. Ponieważ w pobliżu Słońca ulegają zakrzywieniu, suma kątów w tym trójkącie jest większa od  $180^\circ$

# Ogólna teoria względności



Tylko pusta przestrzeń jest płaska (euklidesowa). Obecność masy lub energii ( $E=mc^2$ , konsekwencja STW), wg. OTW zakrzywia czas i przestrzeń wokół niej. Ruch każdego ciała posiadającego masę jest reakcją na zakrzywienie czasoprzestrzeni. Zatem masy a także promienie świetlne poruszają się po tzw. liniach geodezyjnych, które są najkrótszymi drogami pomiędzy dwoma punktami.

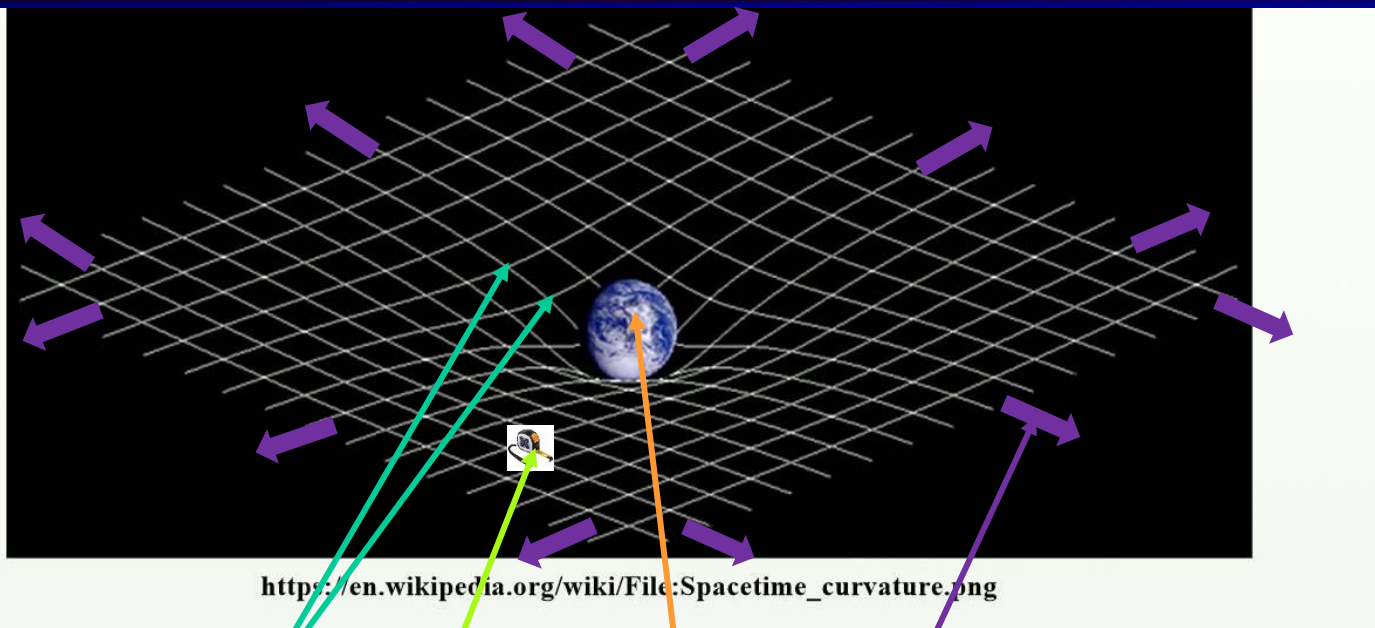


Grawitacja nie jest siłą działającą między dwoma ciałami, lecz jest wynikiem oddziaływania każdego ciała z efektami, jakie inne ciała wywierają na czasoprzestrzeń go otaczającą.





# Równanie Einsteina



$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu}$$

opisuje jak zmienia się krzywizna z pkt. do pkt.

opisuje jak liczyć odległość przy danej krzywiznie w pkt.

źródło zakrzywienia czasoprzestrzeni

dodany przez Einsteina dla zachowania stabilności wszechświata

$R_{\mu\nu}$  - tensor krzywizny Ricci

$R$  - skalar krzywizny

$g_{\mu\nu}$  - tensor metryczny

$G$  - stała grawitacji Newtona

$T_{\mu\nu}$  - tensor energii-pędu

$\Lambda$  - stała kosmologiczna



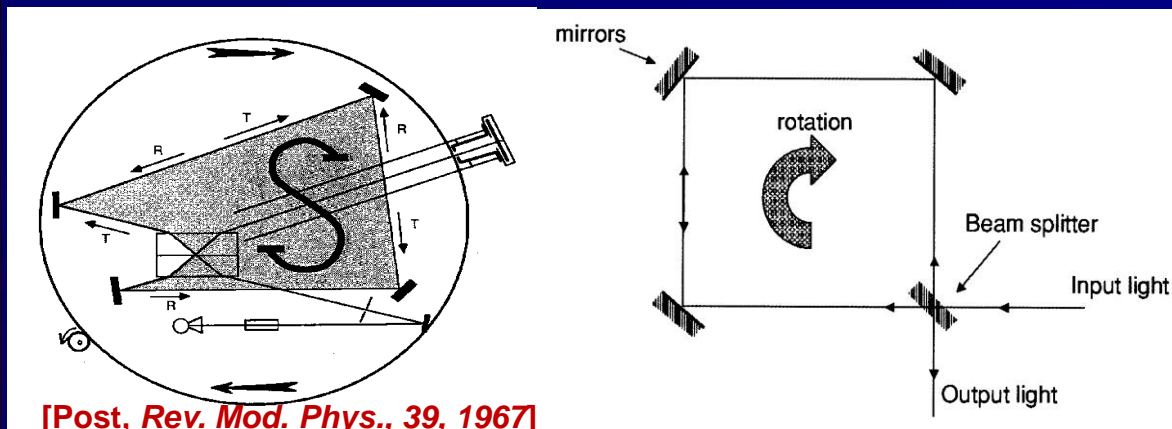
# A jednak może eter ?

**1913 Sagnac** “eksperyment” - społeczność naukowa jasno stwierdza, że jest to eksperyment Sagnaca, jednakże uczciwie jest mówić o efekcie “Von Laue - Sagnac”!

Sagnac chciał pokazać, że STW A. Einsteina jest nieprawdziwa oraz, że Eter Światłny istnieje!



**George Sagnac**  
1869-1928



[Post, Rev. Mod. Phys., 39, 1967]

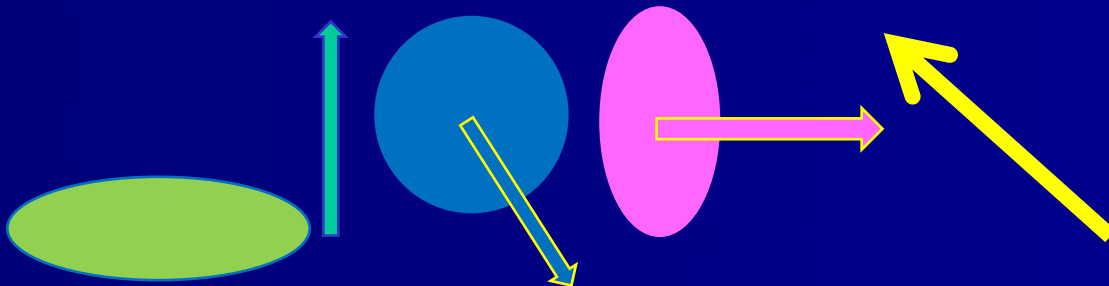
Pętla o  $S=1 \text{ m}^2$  – przesunięcie prążków rzędu  $\lambda/10$  dla obrotu z szybkością kilku obr/s

Obserwowane przesunięcie prążków opisuje reguła:

$$\Delta Z = 4 \frac{\vec{\Omega} \cdot \vec{S}}{\lambda_0 c}$$

czyli jest niezależne od:

- kształtu powierzchni  $S$ ,
- lokalizacji środka obrotu,
- obecności obracającego się przezroczystego ośrodka.







# Nawigacja inercyjna

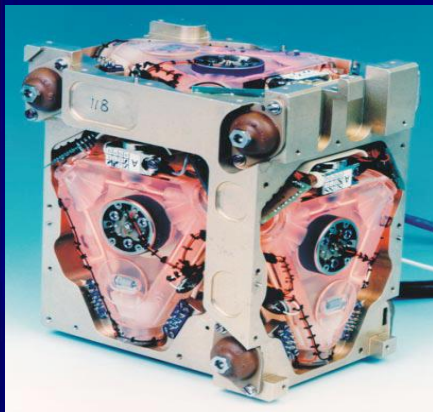
Pytanie: obrót ale względem czego?

Odpowiedź – **obrót bezwzględny** (powrót do koncepcji **Newtona bezwzględnego charakteru ruchu obrotowego**) względem tzw. przestrzeni inercyjnej (ułomna definicja). Interferometr Sagnaca mierzy obrót względem gwiazd stałych, a nie względem powierzchni Ziemi.

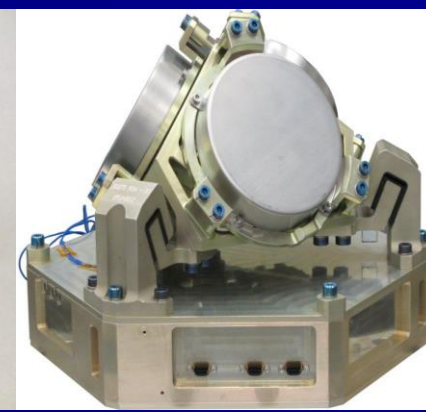
Nawigacja inercyjna  $\Omega$  – od 0,001 °/h do 400 °/s

$$\vartheta = \int \Omega dt$$

RLG – Ring Laser Gyroscope

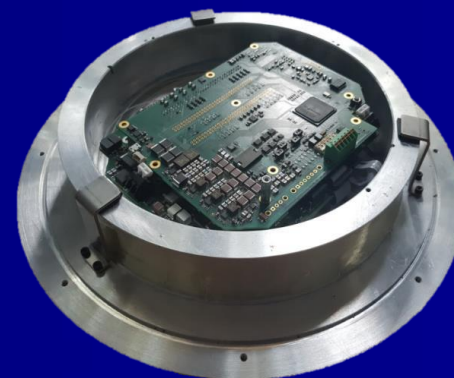
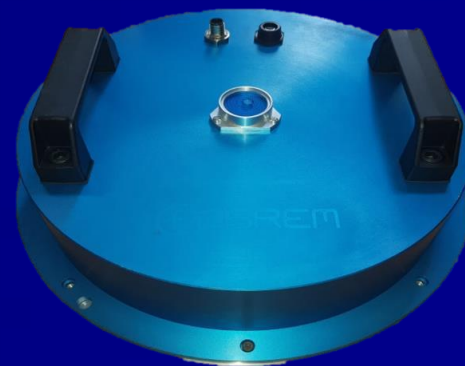
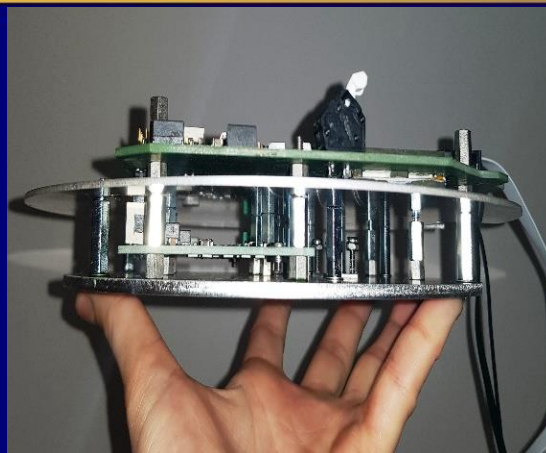
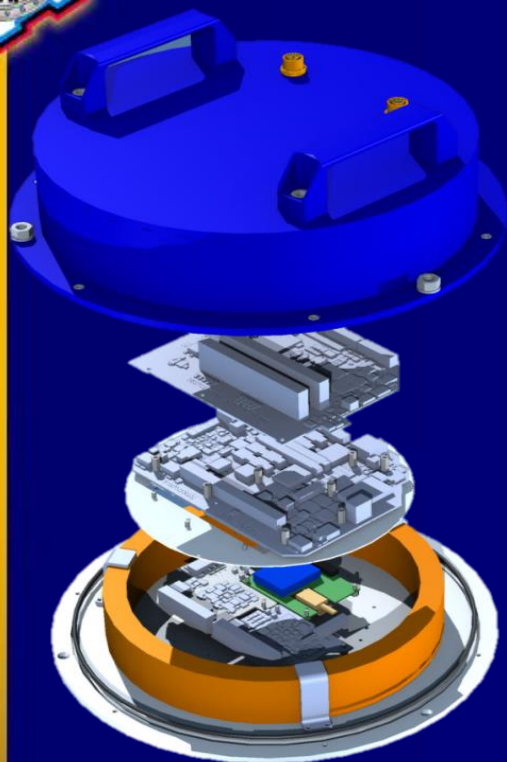


FOG – Fiber Optic Gyroscope





# FOS – światłowodowy sejsmograf rotacyjny



Max. prędkość obrotowa: **10 rad/s**

Czułość:  **$2.18 \cdot 10^{-9}$  rad/s/ $\sqrt{\text{Hz}}$**

ARW (badania tzw. AV): **20 nrad/s**

BI (badania tzw. AV): **8 nrad/s**

Pasma częstotliwości: **DC do 100 Hz**

Konfiguracja: **closed-loop z cyfrowym przetwarzaniem**

Przyłącza: FOS-5: **2xRS-485, USB2.0**

PCU: **1Gbps RJ-45, 5G LTE (PCU)**

Archiwizacja danych: **128 GB SSD (do 14 dni danych)**

Zarządzanie: **lokalne i zdalne przez Internet**

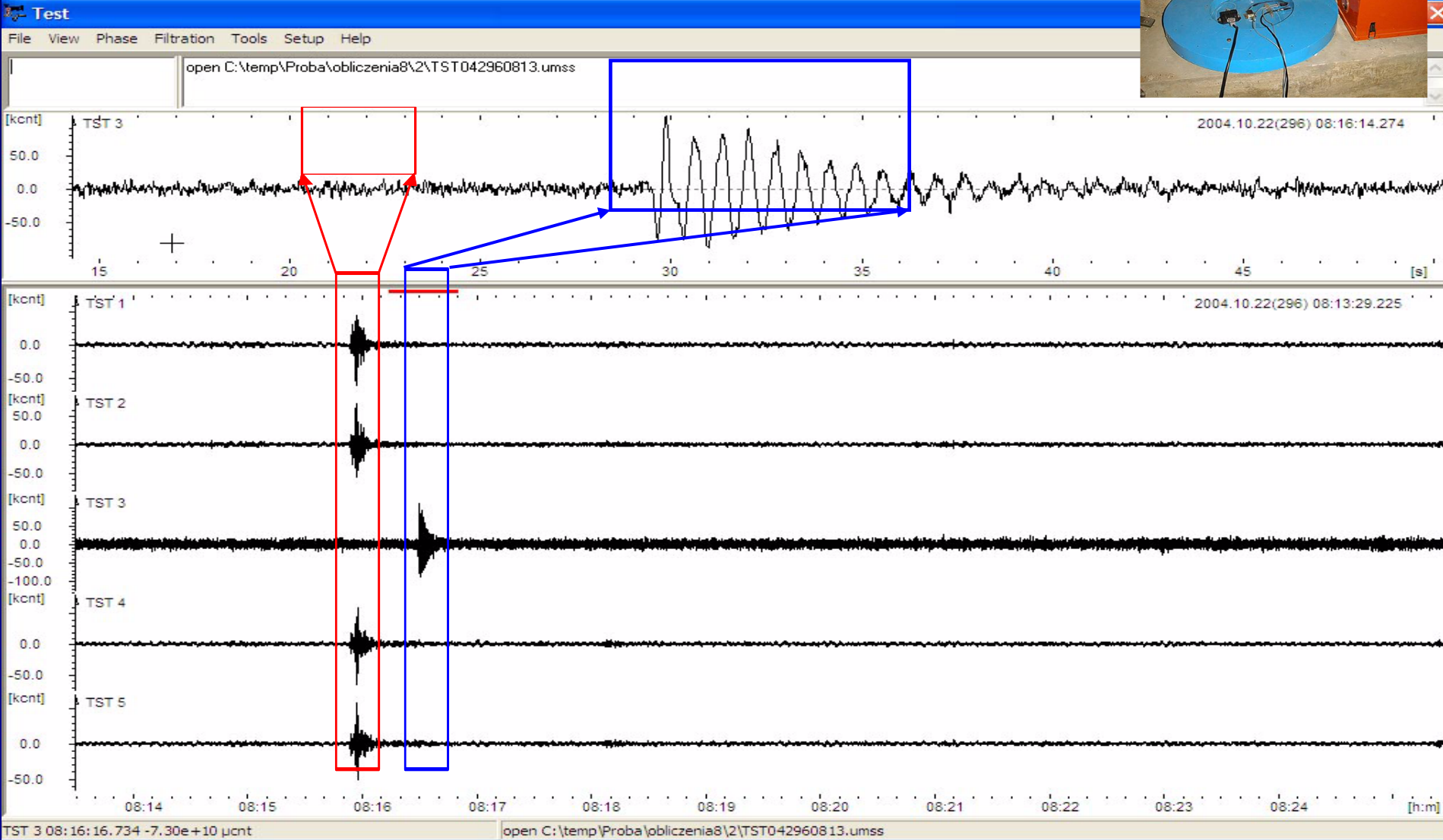
Zasilanie: **24VDC/20W, 85-240VAC (via PCU)**

Szczelność mechaniczna: **IP67**

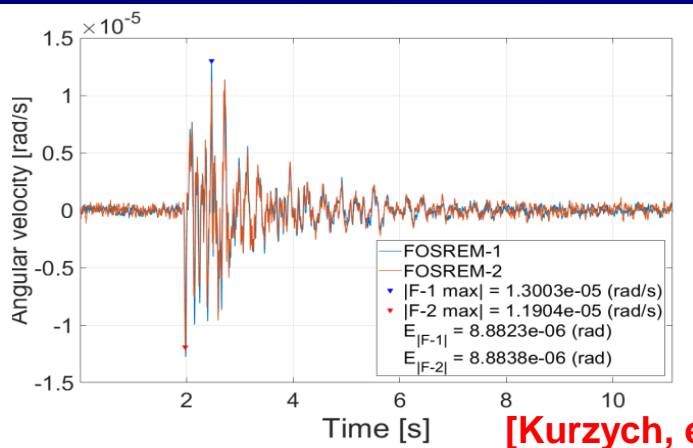
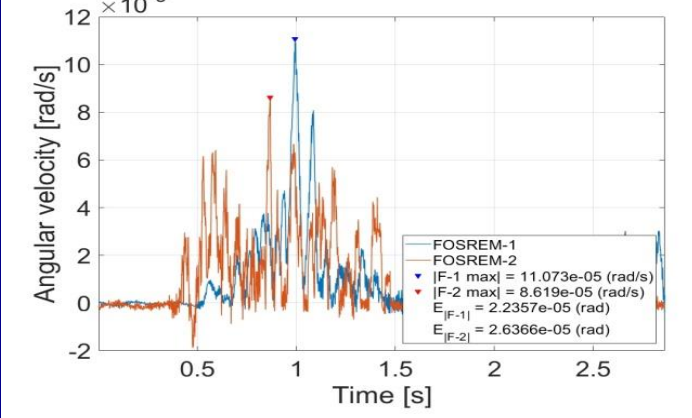
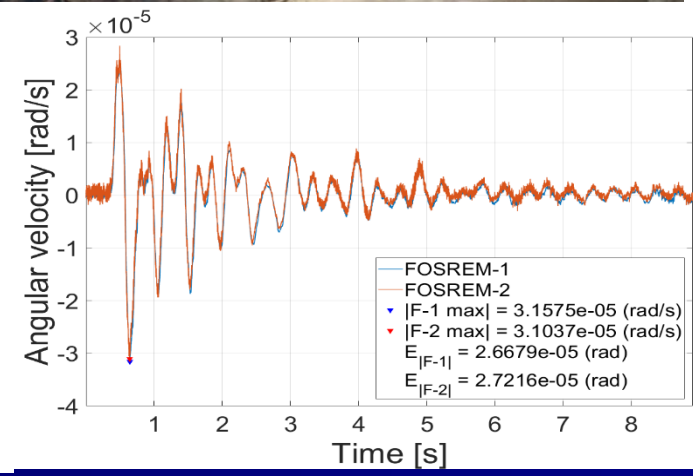
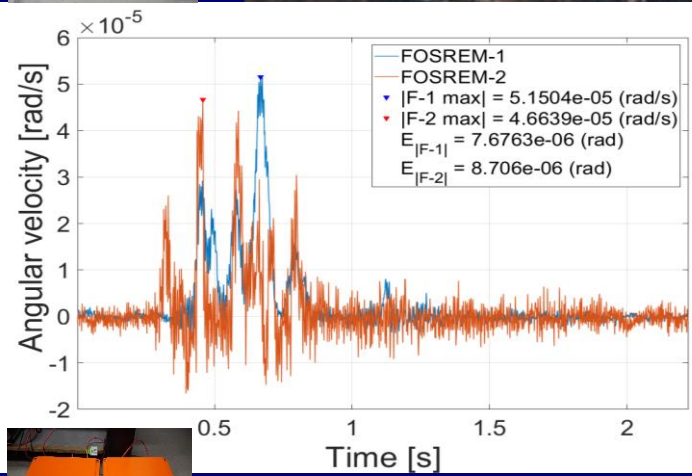
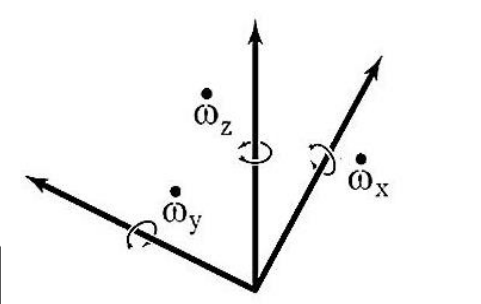
Wymiary: FOS-5: **320 x 120 mm**

PCU: **240 x 88 x 65 mm**

# Sejsmologia rotacyjna







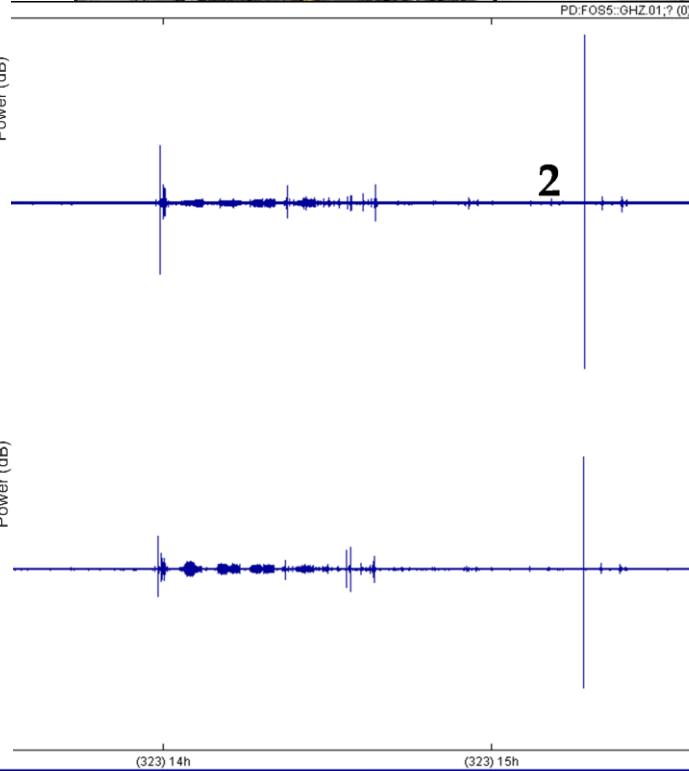
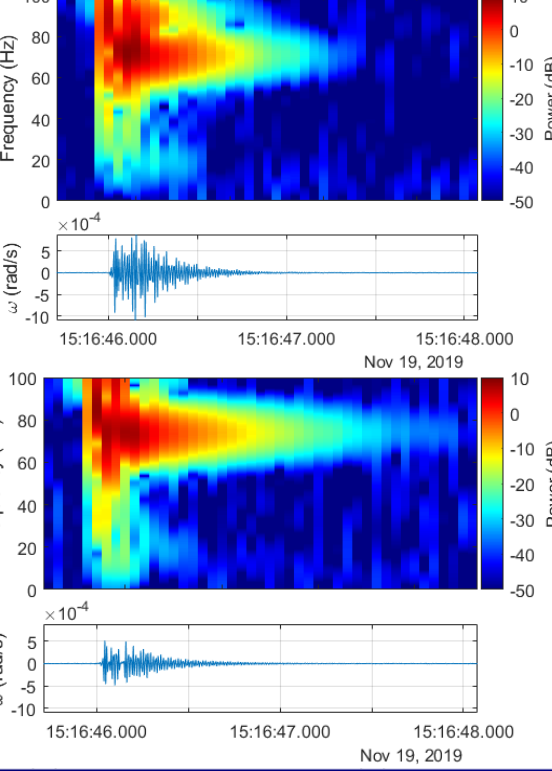
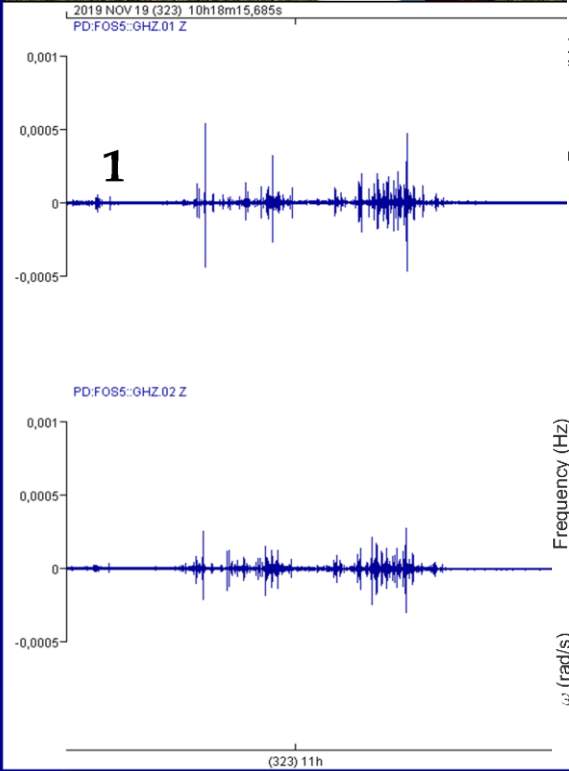
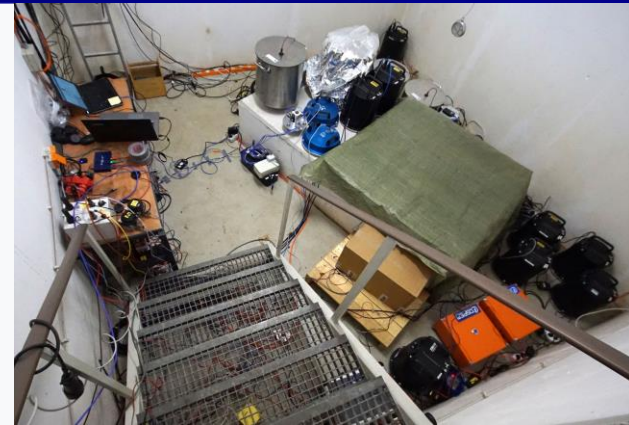
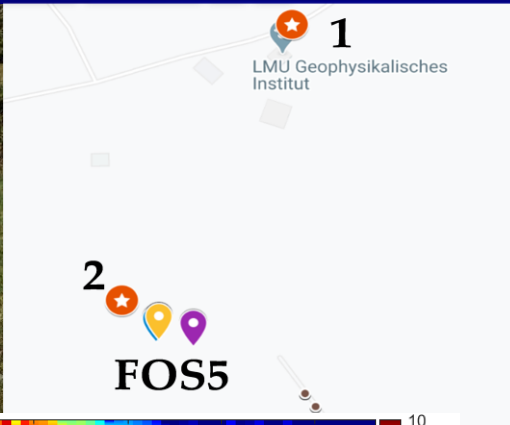
[Lee, *BSSA*, 99, (2009), 1082]

**Torsion** – obroty lub naprężenia wokół pionowej osi struktury

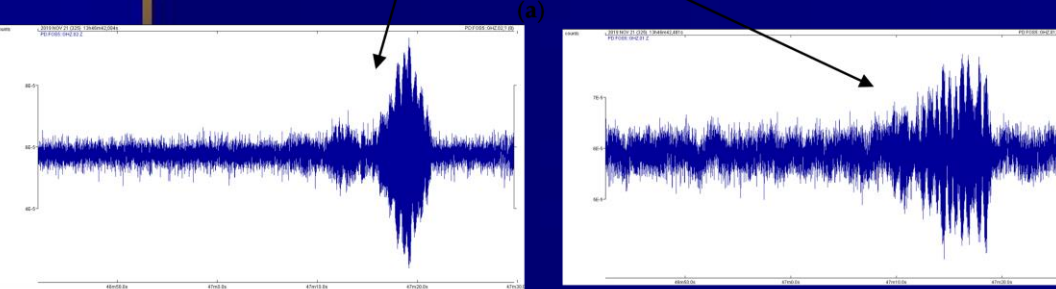
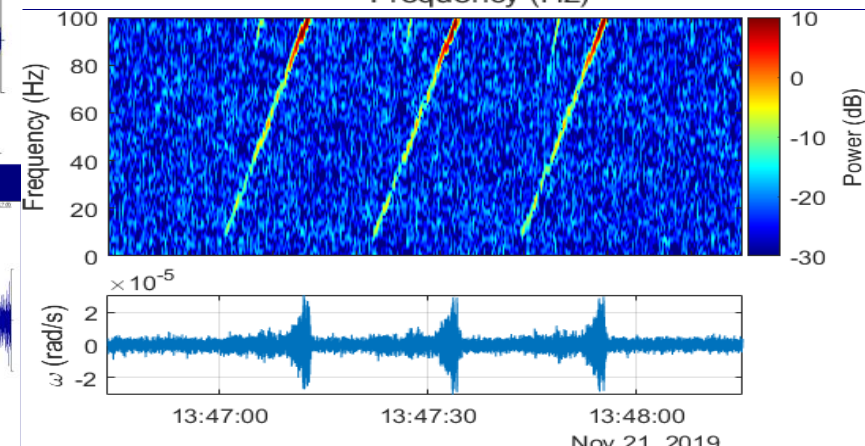
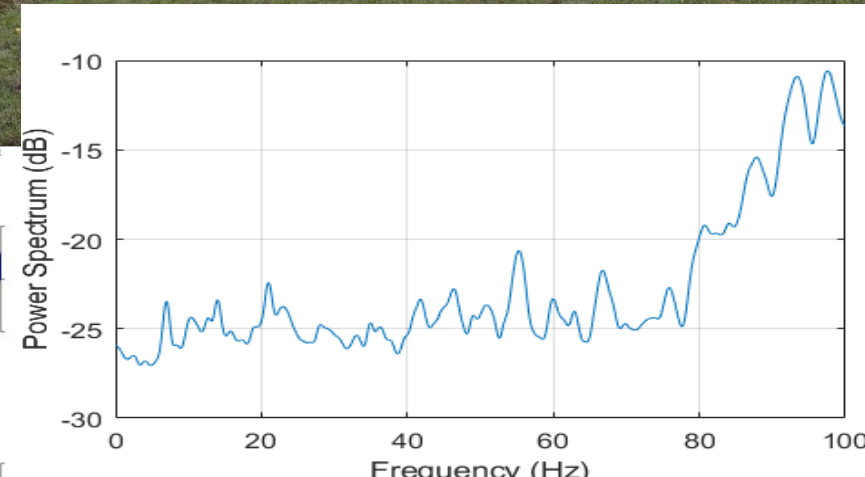
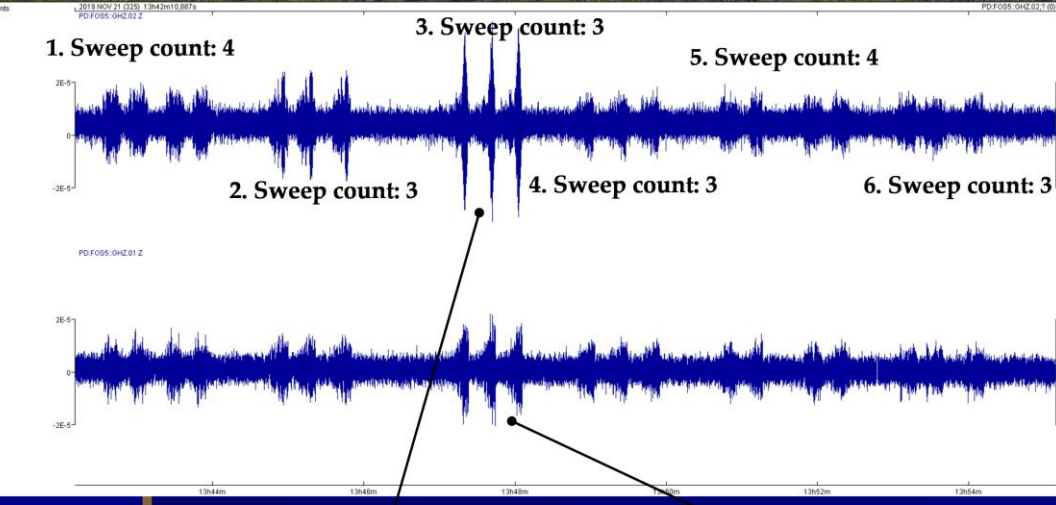
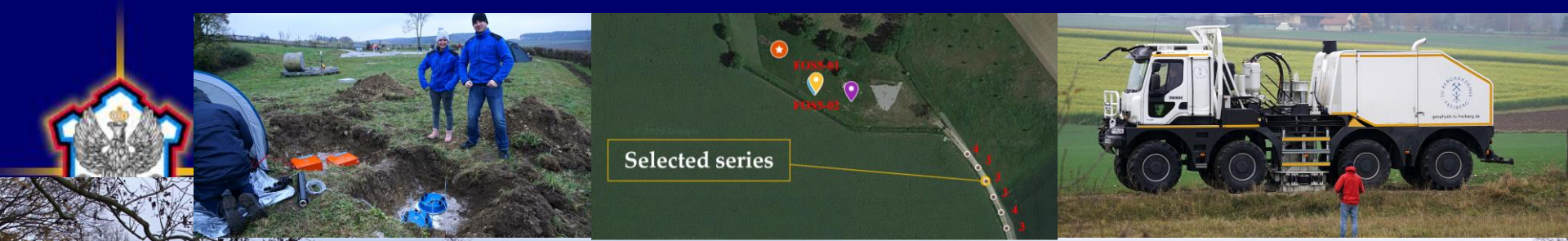
**Tilt** – długookresowe wokół osi poziomych (statyczny obrót)

[Kurzych, et al., *JLT*, 37, (2019), 4851]

# A comparative Sensor Test Fürstenfeldbruck 19-22.11.2019









## Literatura:

- Royston M. Roberts: *Serendipity. Accidental Discoveries in Science*, John Wiley & Sons, Inc., 1989
- Schaar and Co: *Accidental Scientific Discoveries*, Chicago, 1955
- John Stachel: *Einstein's Miraculous Year Five Papers That Changed the Face of Physics*, Princeton University Press, 1998
- Andrzej K. Wróblewski: *Historia fizyki*, PWN, Warszawa, 2006
- Andrzej K. Wróblewski: *Uczeni w anegdocie*, Prószyński i S-ka, Warszawa, 1999
- Florian Cajori: *A History of Physics*, The MacMillan Company, New York, 1899
- Helge Kragh: *Quantum Generations: A History of Physics in the Twentieth Century*, Princeton University Press, Princeton 1999
- Laurie M. Brown, Abraham Pais, Brian Pippard: *Twentieth Century Physics*, Institute of Physics Publishing, Boston and Philadelphia, and American Institute of Physics Press, New York, 1995
- zasoby internetu: notki biograficzne, zdjęcia
- Isaac Newton: *Matematyczne zasady filozofii naturalnej*, Copernicus Center Press, Kraków, 2020