

Zastosowanie pływowch pomiarów grawimetrycznych w badaniach geodezyjnych, geofizycznych i geodynamicznych

Marcin Rajner

Katedra Geodezji i Astronomii Geodezyjnej,
Wydział Geodezji i Kartografii Politechniki Warszawskiej

mrajner@gik.pw.edu.pl
www.grat.gik.pw.edu.pl/igf

28 października 2016
Seminarium ZFL Instytutu Geofizyki UW

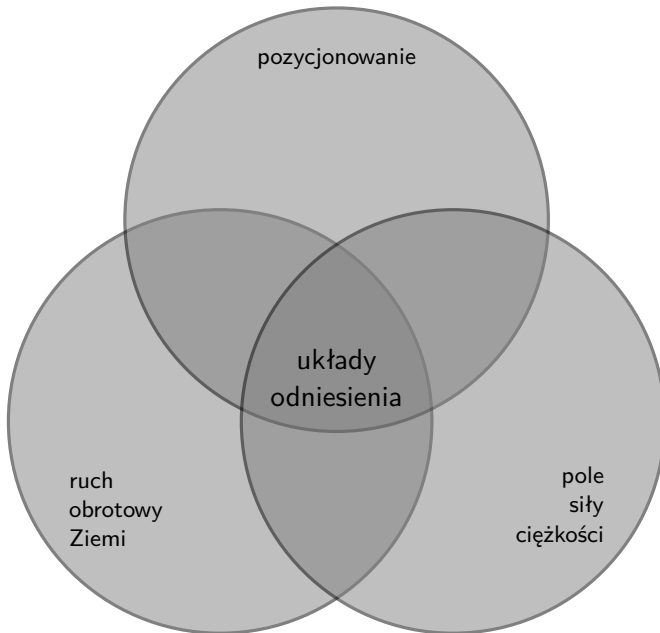
Wprowadzenie

Grawimetria

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska
pływowe?

Inne zastosowania



Wprowadzenie

Grawimetria w geodezji

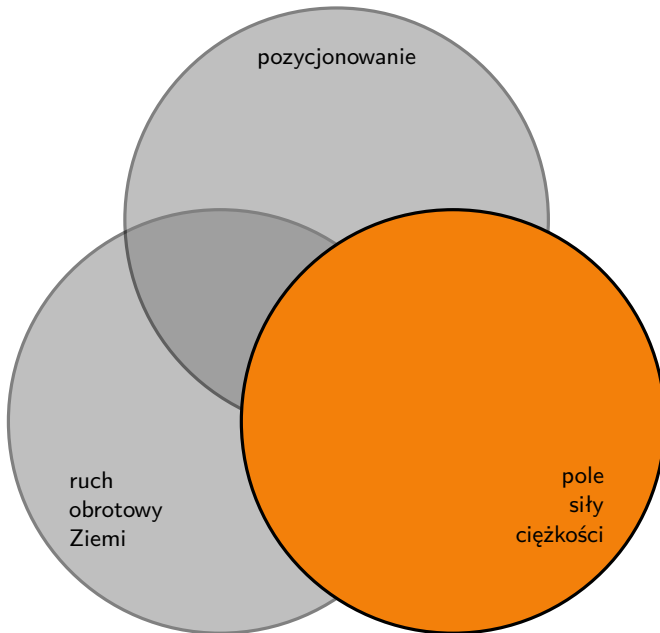
Struktura IAG

Grawimetria

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska
pływowe?

Inne zastosowania



Wprowadzenie

Grawimetria w geodezji

Struktura IAG

Grawimetria

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska
pływowe?

Inne zastosowania

IUGG

IAG



Wprowadzenie

Grawimetria w geodezji

Struktura IAG

Grawimetria

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska
pływowe?

Inne zastosowania

IUGG

IAG

[C2]
Gravity Field

[C3] Earth Rotation
and Geodynamics

[SC3.1] Earth Tides
and Geodynamics

Wprowadzenie

Grawimetria w geodezji

Struktura IAG

Grawimetria

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska
pływowe?

Inne zastosowania

IUGG

IAG

[C2]
Gravity Field

[C3] Earth Rotation
and Geodynamics

[SC3.1] **Earth Tides
and Geodynamics**

ICET International Centre for Earth Tides
IGETS International Geodynamics and Earth Tide Service

JWG2.5 Physics and dynamics of the Earth's Interior from gravimetry
JSG 0.8 Theory and inversion in gravity-solid Earth coupling

Wprowadzenie

Grawimetria w geodezji
Struktura IAG

Grawimetria

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska
pływowe?

Inne zastosowania

Badanie pola siły ciężkości i pływów ziemskich

- Grawimetry
- Klinometry
- Gradientometry
- Astrometria
- Analizy orbit ciał zewnętrznych
- Ekstensometry

Wprowadzenie

Grawimetria

Co mierzą grawimetry?

Ciągłe pomiary grawimetryczne na świecie

Co zawiera sygnał grawimetryczny?

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska pływowe?

Inne zastosowania

Badanie pola siły ciężkości i pływów ziemskich

■ Grawimetry

- naziemne, satelitarne, morskie, lotnicze
- balistyczne, nadprzewodnikowe, sprężynowe, atomowe

■ Klinometry

■ Gradientometry

■ Astrometria

■ Analizy orbit ciał zewnętrznych

■ Ekstensometry

Wprowadzenie

Grawimetrya

Co mierzą grawimetry?

Ciągłe pomiary grawimetryczne na świecie

Co zawiera sygnał grawimetryczny?

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska pływowe?

Inne zastosowania

Badanie pola siły ciężkości i pływów ziemskich

■ Grawimetry

- **naziemne**, satelitarne, morskie, lotnicze
- balistyczne, **nadprzewodnikowe**, **sprężynowe**, atomowe

■ Klinometry

■ Gradientometry

■ Astrometria

■ Analizy orbit ciał zewnętrznych

■ Ekstensometry

Wprowadzenie

Grawimetrya

Co mierzą grawimetry?

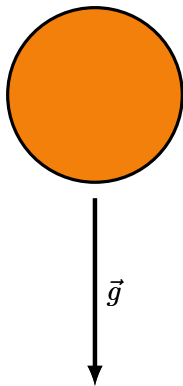
Ciągłe pomiary grawimetryczne na świecie

Co zawiera sygnał grawimetryczny?

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska pływowe?

Inne zastosowania



Wprowadzenie

Grawimetria

Co mierzą grawimetry?

Ciągłe pomiary grawimetryczne na świecie

Co zawiera sygnał grawimetryczny?

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska pływowe?

Inne zastosowania

Wprowadzenie

Grawimetria

Co mierzą grawimetry?

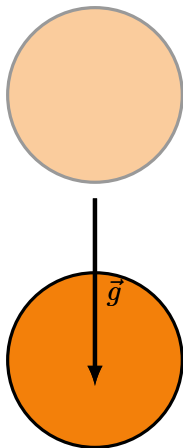
Ciągłe pomiary
grawimetryczne na świecie

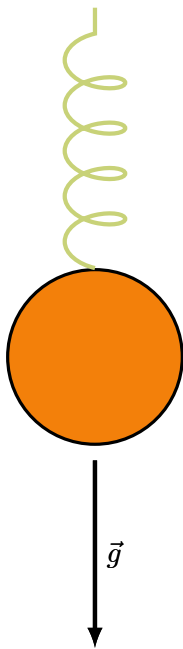
Co zawiera sygnał
grawimetryczny?

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska
pływowe?

Inne zastosowania





Wprowadzenie

Grawimetria

Co mierzą grawimetry?

Ciągłe pomiary grawimetryczne na świecie

Co zawiera sygnał grawimetryczny?

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska pływowe?

Inne zastosowania

Wprowadzenie

Grawimetria

Co mierzą grawimetry?

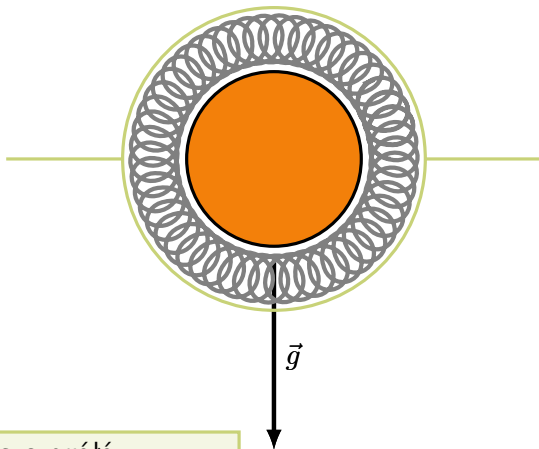
Ciągłe pomiary grawimetryczne na świecie

Co zawiera sygnał grawimetryczny?

Pływy ziemskie

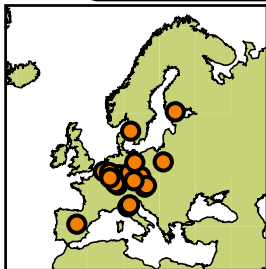
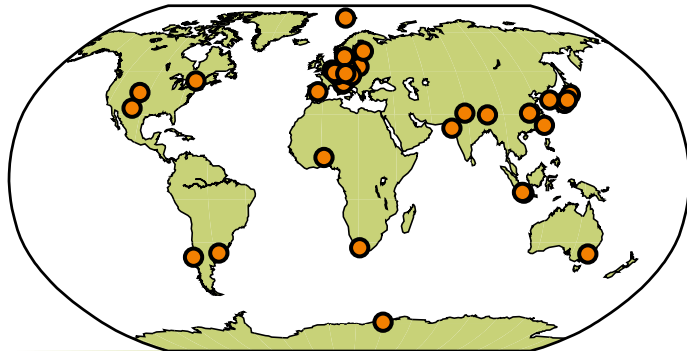
Czym są zjawiska pływowe?

Inne zastosowania



Więcej szczegółów
na kolejnych seminariach

Grawimetryczne pomiary pływowe



Wprowadzenie

Grawimetria

Co mierzą grawimetrie?

Ciągłe pomiary grawimetryczne na świecie

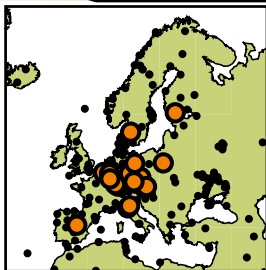
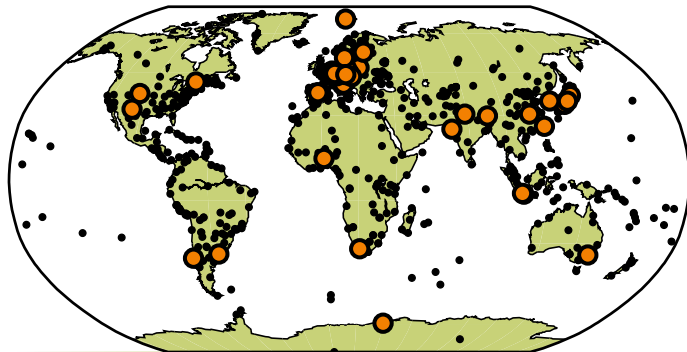
Co zawiera sygnał grawimetryczny?

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska pływowe?

Inne zastosowania

Grawimetryczne pomiary pływowe



Wprowadzenie

Grawimetria

Co mierzą grawimetrie?

Ciągłe pomiary grawimetryczne na świecie

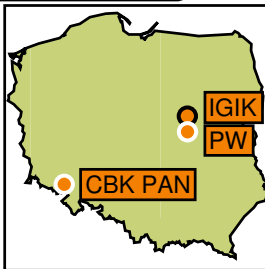
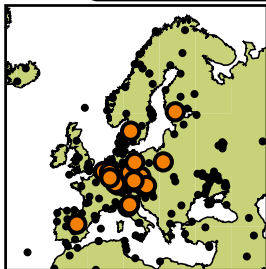
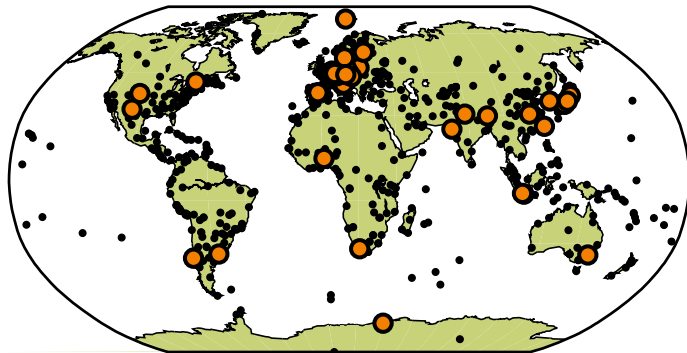
Co zawiera sygnał grawimetryczny?

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska pływowe?

Inne zastosowania

Grawimetryczne pomiary pływowe



Wprowadzenie

Grawimetria

Co mierzą grawimetry?

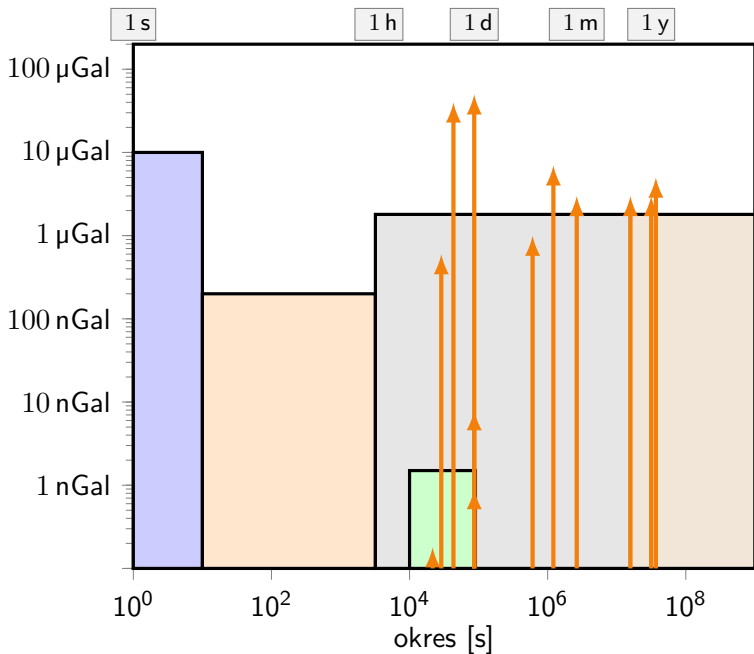
Ciągłe pomiary grawimetryczne na świecie

Co zawiera sygnał grawimetryczny?

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska pływowe?

Inne zastosowania



Wprowadzenie

Grawimetria

Co mierzą grawimetry?

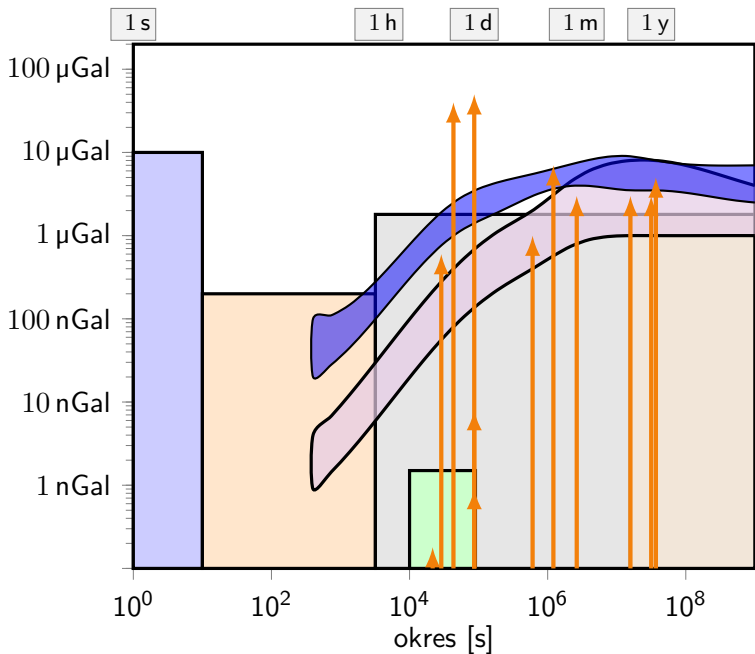
Ciągłe pomiary grawimetryczne na świecie

Co zawiera sygnał grawimetryczny?

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska pływowe?

Inne zastosowania



Wprowadzenie

Grawimetria

Co mierzą grawimetry?

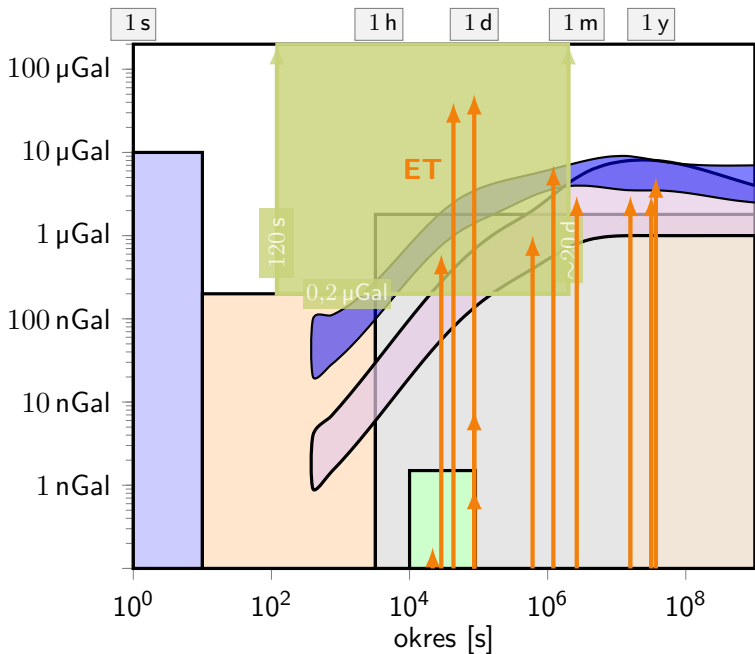
Ciągłe pomiary grawimetryczne na świecie

Co zawiera sygnał grawimetryczny?

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska pływowe?

Inne zastosowania



Wprowadzenie

Grawimetria

Co mierzą grawimetrie?

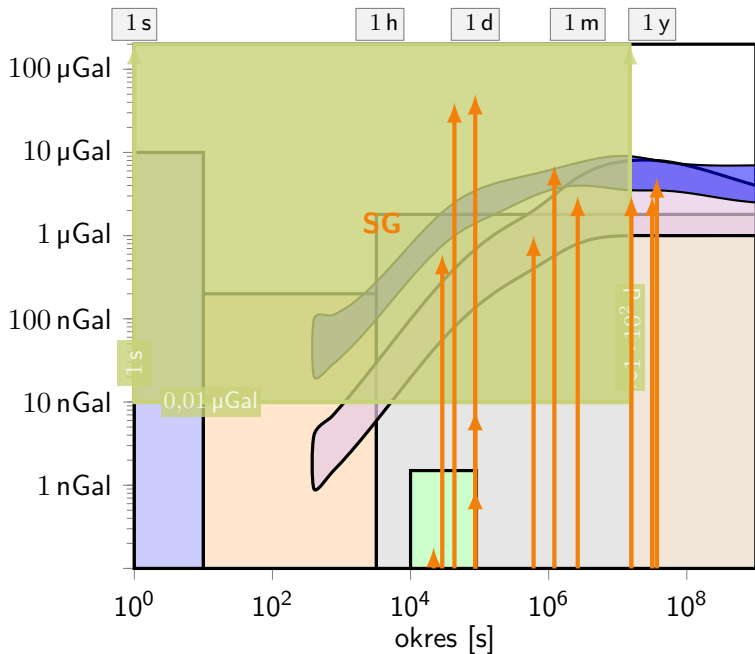
Ciągłe pomiary grawimetryczne na świecie

Co zawiera sygnał grawimetryczny?

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska pływowe?

Inne zastosowania



Wprowadzenie

Grawimetria

Co mierzą grawimetrie?

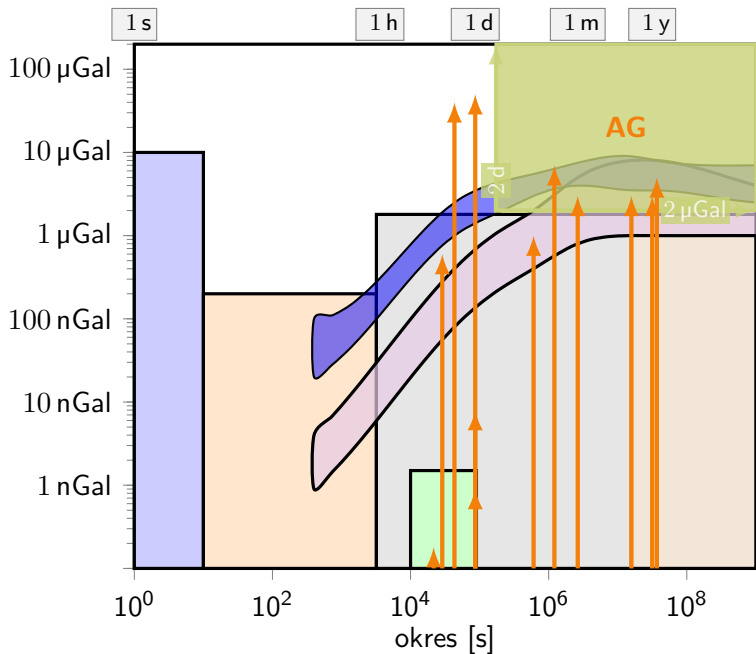
Ciągłe pomiary grawimetryczne na świecie

Co zawiera sygnał grawimetryczny?

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska pływowe?

Inne zastosowania



Wprowadzenie

Grawimetria

Co mierzą grawimetrie?

Ciągłe pomiary grawimetryczne na świecie

Co zawiera sygnał grawimetryczny?

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska pływowe?

Inne zastosowania

*„....If I were asked to tell what I mean
by the Tides I should feel it exceedingly
difficult to answer the question...”
Lord Kelvin, 1882*

- Efekty powodowane przez różnicowe grawitacyjne oddziaływanie ciał zewnętrznych

Wprowadzenie

Grawimetria

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska
pływowe?

Przykłady zjawisk
pływowych

Pole sił pływowych

Składowa pionowa

Potencjał grawitacyjny

Rozwinięcie Doodsona

Fale pływowe

Analiza pływowa

Istota grawimetrycznych
obserwacji pływowych

Inne zastosowania

*„....If I were asked to tell what I mean
by the Tides I should feel it exceedingly
difficult to answer the question...”
Lord Kelvin, 1882*

- Efekty powodowane przez różnicowe grawitacyjne oddziaływanie ciał zewnętrznych

ODDYCHANIE ZIEMI

Wprowadzenie

Grawimetria

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska
pływowe?

Przykłady zjawisk
pływowych

Pole sił pływowych

Składowa pionowa

Potencjał grawitacyjny

Rozwinięcie Doodsona

Fale pływowe

Analiza pływowa

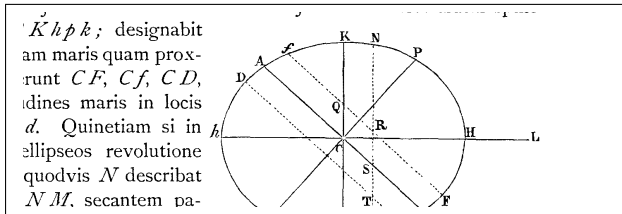
Istota grawimetrycznych
obserwacji pływowych

Inne zastosowania

„...If I were asked to tell what I mean
by the Tides I should feel it exceedingly
difficult to answer the question...”
Lord Kelvin, 1882

- Efekty powodowane przez różnicowe grawitacyjne oddziaływanie ciał zewnętrznych

ODDYCHANIE ZIEMI



Rysunek: Newton, 1687 – *Philosophiæ naturalis principia mathematica*

Wprowadzenie

Grawimetria

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska
pływowe?

Przykłady zjawisk
pływowych

Pole sił pływowych

Składowa pionowa

Potencjał grawitacyjny

Rozwinięcie Doodsona

Fale pływowe

Analiza pływowa

Istota grawimetrycznych
obserwacji pływowych

Inne zastosowania

- pływy morskie
- pływy skorupy ziemskiej
 - zmiany wysokości
 - zmiany siły ciężkości
 - zmiany kierunku linii pionu
 - zmiany długości, powierzchni, objętości
- pływy atmosfery
- pływowe zmiany prędkości obrotowej Ziemi
- pływowe zmiany orientacji Ziemi
- efekty pośrednie pływów oceanicznych i atmosferycznych
- perturbacje SSZ
- „ciemna strona księżyca” i jego ucieczka
- rozrywanie ciał niebieskich
- wzmożona aktywność wulkaniczna
- trzęsienia Ziemi
- ...

Wprowadzenie

Grawimetria

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska pływowe?

Przykłady zjawisk pływowych

Pole sił pływowych

Składowa pionowa

Potencjał grawitacyjny

Rozwinięcie Doodsona

Fale pływowe

Analiza pływowa

Istota grawimetrycznych obserwacji pływowych

Inne zastosowania

- pływy morskie
- **pływy skorupy ziemskiej**
 - zmiany wysokości
 - **zmiany siły ciężkości**
 - zmiany kierunku linii pionu
 - zmiany długości, powierzchni, objętości
- pływy atmosfery
- pływowe zmiany prędkości obrotowej Ziemi
- pływowe zmiany orientacji Ziemi
- efekty pośrednie pływów oceanicznych i atmosferycznych
- perturbacje SSZ
- „ciemna strona księżyca” i jego ucieczka
- rozrywanie ciał niebieskich
- wzmożona aktywność wulkaniczna
- trzęsienia Ziemi
- ...

Wprowadzenie

Grawimetria

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska
pływowe?

Przykłady zjawisk
pływowych

Pole sił pływowych

Składowa pionowa

Potencjał grawitacyjny

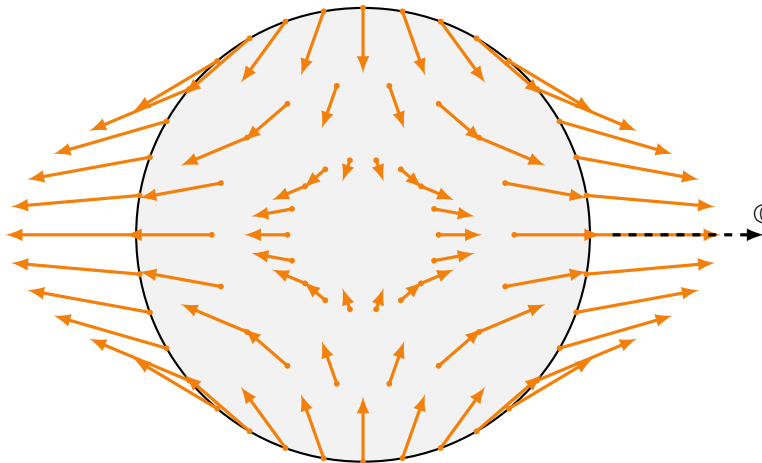
Rozwinięcie Doodsona

Fale pływowe

Analiza pływowa

Istota grawimetrycznych
obserwacji pływowych

Inne zastosowania



Wprowadzenie

Grawimetria

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska
pływowe?

Przykłady zjawisk
pływowych

Pole sił pływowych

Składowa pionowa

Potencjał grawitacyjny

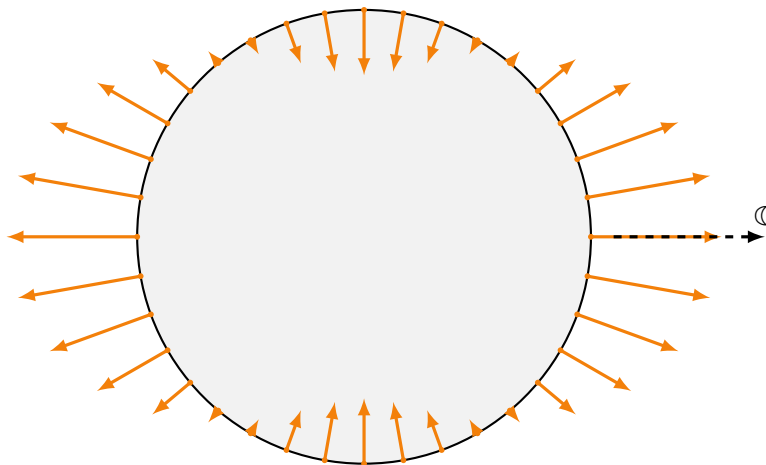
Rozwinięcie Doodsona

Fale pływowe

Analiza pływowa

Istota grawimetrycznych
obserwacji pływowych

Inne zastosowania



Wprowadzenie

Grawimetria

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska
pływowe?

Przykłady zjawisk
pływowych

Pole sił pływowych

Składowa pionowa

Potencjał grawitacyjny

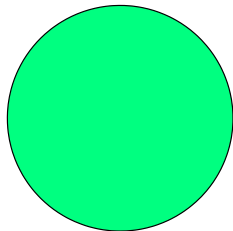
Rozwinięcie Doodsona

Fale pływowe

Analiza pływowa

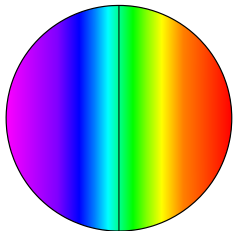
Istota grawimetrycznych
obserwacji pływowych

Inne zastosowania

$n = 0$ 

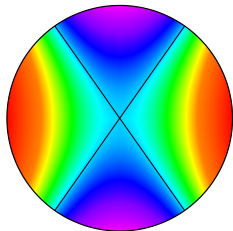
$$\zeta 4 \cdot 10^3$$

$$\odot 3 \cdot 10^8$$

 $n = 1$ 

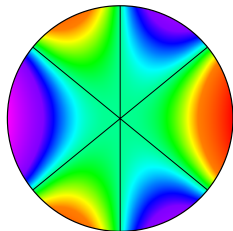
$$\zeta 6 \cdot 10^1$$

$$\odot 1 \cdot 10^4$$

 $n = 2$ 

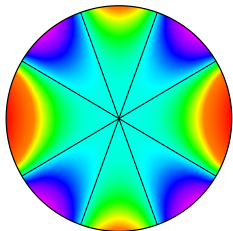
$$\zeta 1$$

$$\odot 5 \cdot 10^{-1}$$

 $n = 3$ 

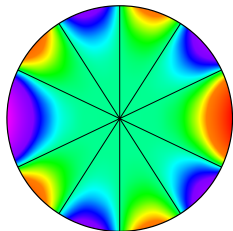
$$\zeta 2 \cdot 10^{-2}$$

$$\odot 2 \cdot 10^{-5}$$

 $n = 4$ 

$$\zeta 3 \cdot 10^{-4}$$

$$\odot 8 \cdot 10^{-10}$$

 $n = 5$ 

$$\zeta 5 \cdot 10^{-6}$$

$$\odot 4 \cdot 10^{-14}$$

Wprowadzenie

Grawimetria

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska
pływowe?Przykłady zjawisk
pływowych

Pole sił pływowych

Składowa pionowa

Potencjał grawitacyjny

Rozwinięcie Doodsona

Fale pływowe

Analiza pływowa

Istota grawimetrycznych
obserwacji pływowych

Inne zastosowania

Laplace

$$V = \frac{Gm}{r} \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{R}{r}\right)^n f(\varphi, \delta, t)$$

Doodson

$$= \sum A(K_{1-6}, R, \varphi) \sin \left\{ (a_1 \dot{\tau} + a_2 \dot{s} + a_3 \dot{h} + a_4 \dot{p} + a_5 \dot{N}' + a_6 \dot{p}_s) t \right\}$$

$\dot{\tau}$	24,833	h	średni czas księżycowy
\dot{s}	27,3	d	średnia długość Księżyca
\dot{h}	365,25	d	średnia długość Słońca
\dot{p}	8,8	lat	średnia długość perigeum orbity Księżyca
$-\dot{N}$	18,6	lat	średnia długość węzła wstępującego orbity Ks
\dot{p}_s	20 942	lat	średnia długość perigeum orbity Słońca

Wprowadzenie

Grawimetria

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska
pływowe?

Przykłady zjawisk
pływowych

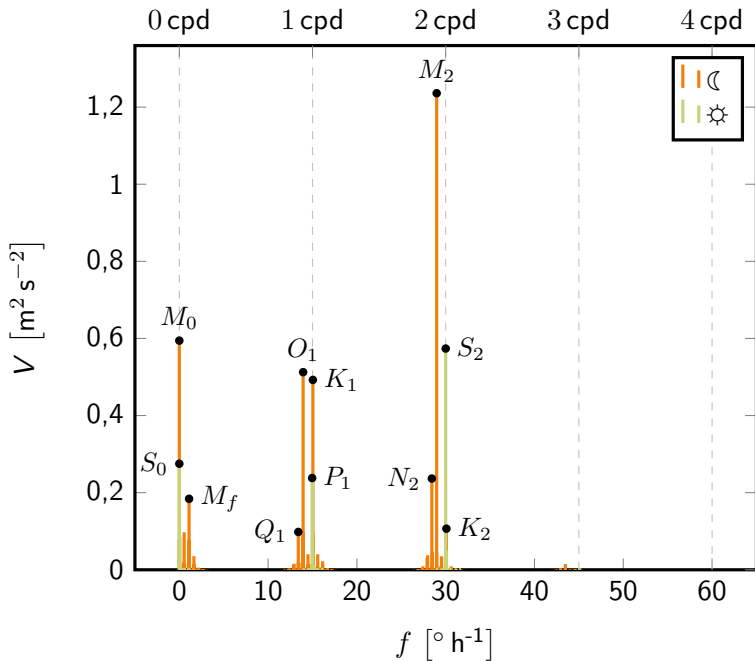
Pole sił pływowych

Analiza pływowa

Istota grawimetrycznych
obserwacji pływowych

Inne zastosowania

Fale pływowe



Wprowadzenie

Grawimetria

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska
pływowe?

Przykłady zjawisk
pływowych

Pole sił pływowych

Składowa pionowa

Potencjał grawitacyjny

Rozwinięcie Doodsona

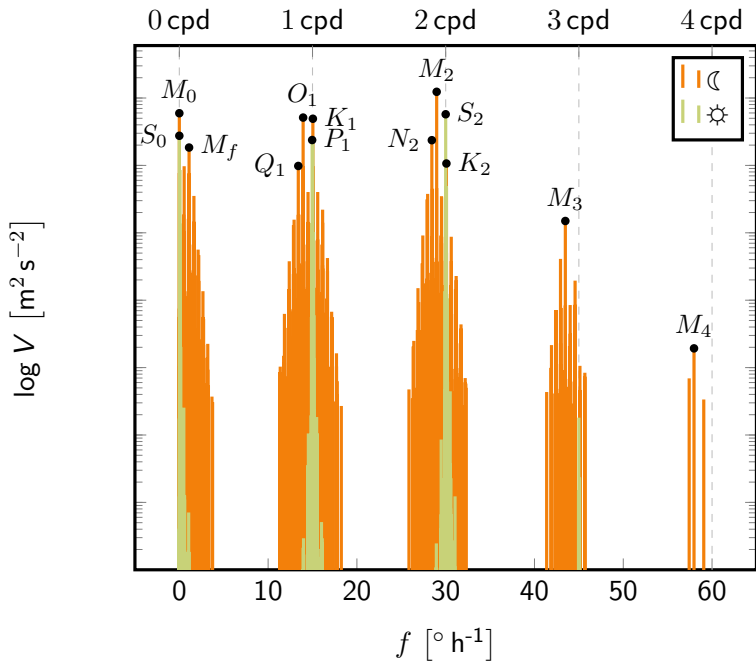
Fale pływowe

Analiza pływowa

Istota grawimetrycznych
obserwacji pływowych

Inne zastosowania

Fale pływowe



Wprowadzenie

Grawimetria

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska pływowe?

Przykłady zjawisk pływowych

Pole sił pływowych

Składowa pionowa

Potencjał grawitacyjny

Rozwinięcie Doodsona

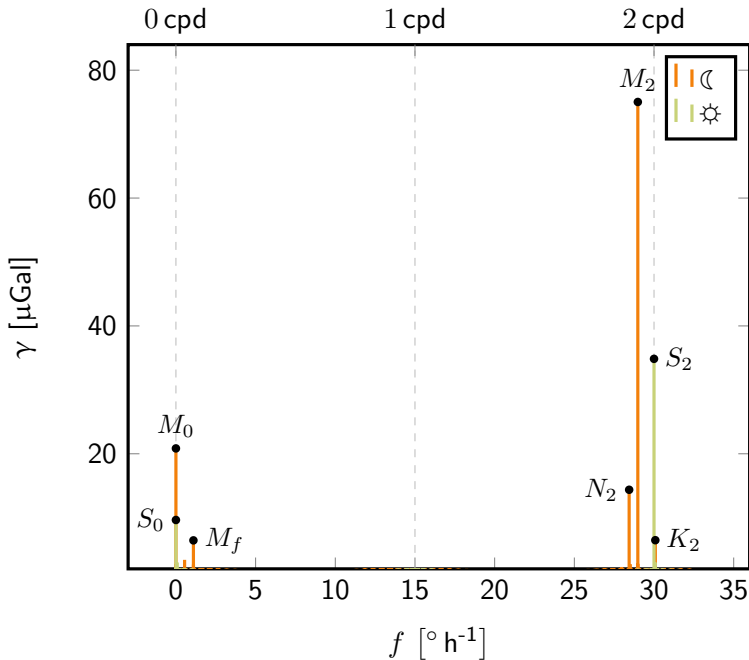
Fale pływowe

Analiza pływowa

Istota grawimetrycznych obserwacji pływowych

Inne zastosowania

Fale pływowe – $\varphi = 0^\circ$



Wprowadzenie

Grawimetria

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska pływowe?

Przykłady zjawisk pływowych

Pole sił pływowych

Pole sił pływowych

Składowa pionowa

Potencjał grawitacyjny

Rozwinięcie Doodsona

Fale pływowe

Analiza pływowa

Analiza pływowa

Istota grawimetrycznych obserwacji pływowych

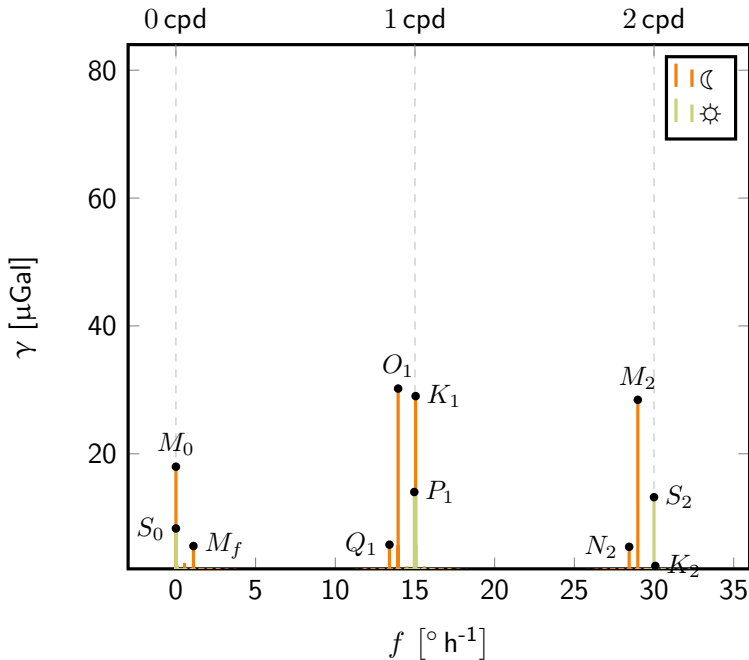
Istota grawimetrycznych obserwacji pływowych

Istota grawimetrycznych obserwacji pływowych

Istota grawimetrycznych obserwacji pływowych

Inne zastosowania

Fale pływowe – $\varphi = 52^\circ$



Wprowadzenie

Grawimetria

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska pływowe?

Przykłady zjawisk pływowych

Pole sił pływowych

Składowa pionowa

Potencjał grawitacyjny

Rozwinięcie Doodsona

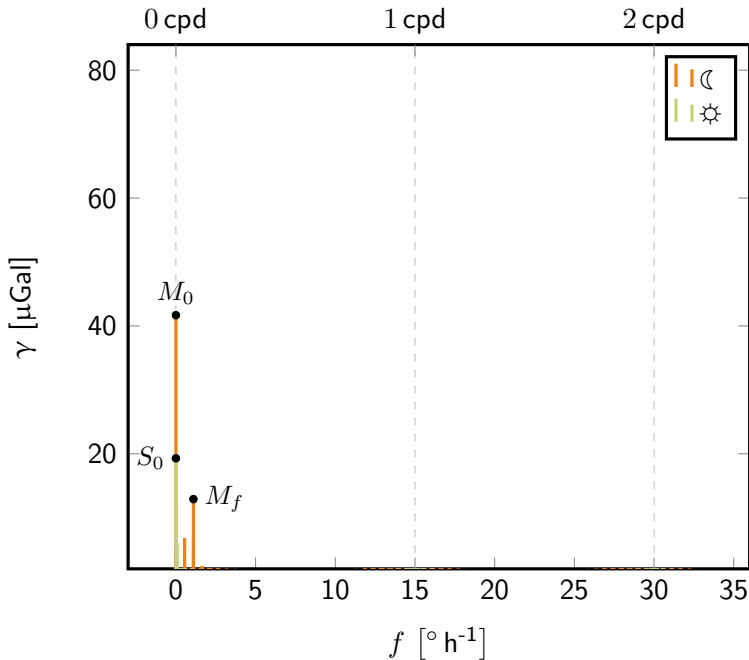
Fale pływowe

Analiza pływowa

Istota grawimetrycznych obserwacji pływowych

Inne zastosowania

Fale pływowe – $\varphi = 90^\circ$



Wprowadzenie

Grawimetria

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska pływowe?

Przykłady zjawisk pływowych

Pole sił pływowych

Składowa pionowa

Potencjał grawitacyjny

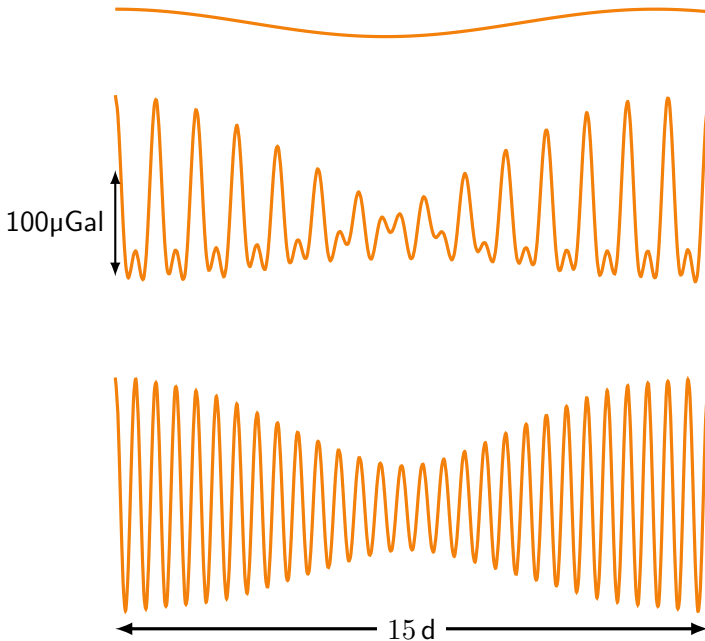
Rozwinięcie Doodsona

Fale pływowe

Analiza pływowa

Istota grawimetrycznych obserwacji pływowych

Inne zastosowania



Wprowadzenie

Grawimetria

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska
pływowe?

Przykłady zjawisk
pływowych

Pole sił pływowych

Składowa pionowa

Potencjał grawitacyjny

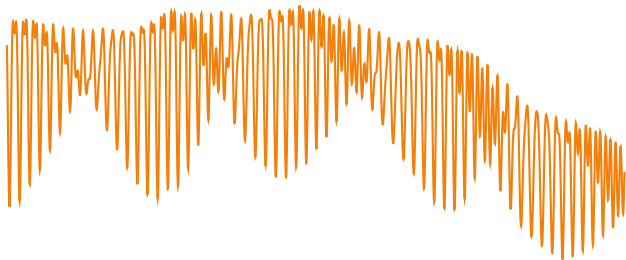
Rozwinięcie Doodsona

Fale pływowe

Analiza pływowa

Istota grawimetrycznych
obserwacji pływowych

Inne zastosowania



Wprowadzenie

Grawimetria

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska
pływowe?

Przykłady zjawisk
pływowych

Pole sił pływowych

Składowa pionowa

Potencjał grawitacyjny

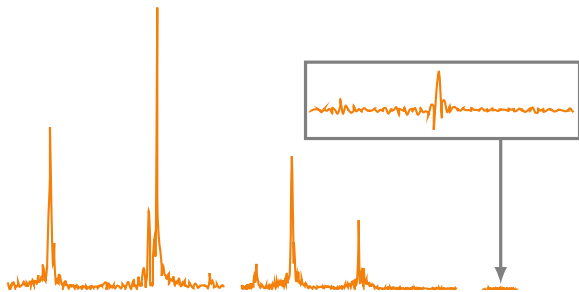
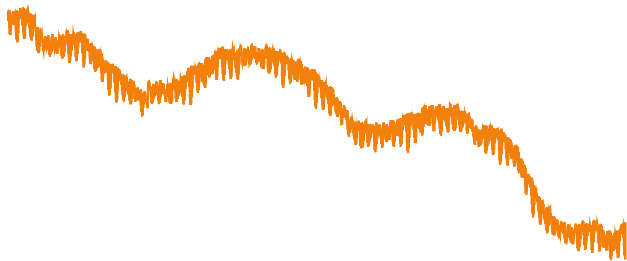
Rozwinięcie Doodsona

Fale pływowe

Analiza pływowa

Istota grawimetrycznych
obserwacji pływowych

Inne zastosowania



Wprowadzenie

Grawimetria

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska
pływowe?

Przykłady zjawisk
pływowych

Pole sił pływowych

Składowa pionowa

Potencjał grawitacyjny

Rozwinięcie Doodsona

Fale pływowe

Analiza pływowa

Istota grawimetrycznych
obserwacji pływowych

Inne zastosowania

Wyznaczanie współczynników grawimetrycznych

$$\delta = 1 - \frac{3}{2}k + h = 1,16$$

Równanie obserwacyjne,

$$v_t = \sum_{n=1}^n R_i \delta_i \cos(\Phi_{it} + \Delta\Phi_i) - P_t - D_t$$

Kiedyś współczynniki grawimetryczne dawały informacje o budowie Ziemi, a opóźnienie fazowe miało dać informacje o lepkości płaszczka.

Wprowadzenie

Grawimetria

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska
pływowe?

Przykłady zjawisk
pływowych

Pole sił pływowych

Składowa pionowa

Potencjał grawitacyjny

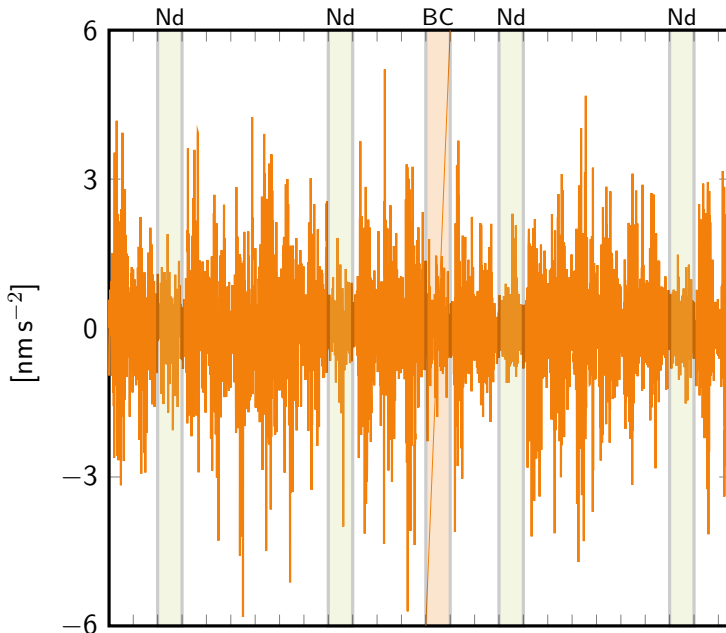
Rozwinięcie Doodsona

Fale pływowe

Analiza pływowa

Istota grawimetrycznych
obserwacji pływowych

Inne zastosowania



Wprowadzenie

Grawimetria

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska
pływowe?

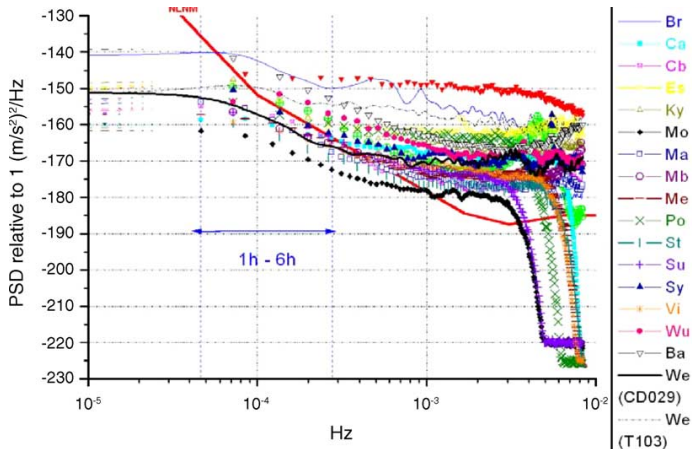
Inne zastosowania

Sejsmometr?

Swobodne oscylacje Ziemi

FCN

Mody jądra



Rysunek: Rosat i in., 2004 – „Performance of superconducting gravimeters from long-period seismology to tides”

Wprowadzenie

Grawimetria

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska
pływowe?

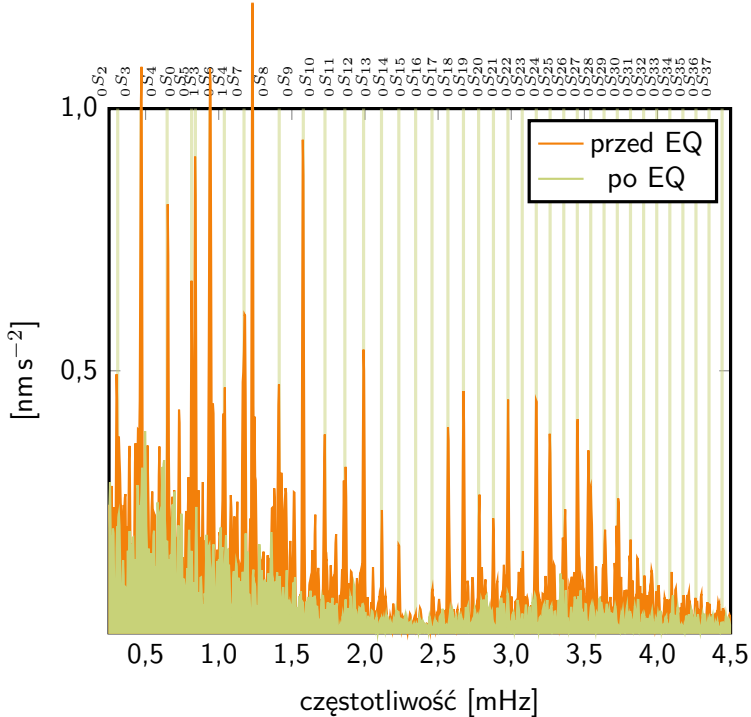
Inne zastosowania

Sejsmometr?

Swobodne oscylacje Ziemi

FCN

Mody jądra



Wprowadzenie

Grawimetria

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska
pływowe?

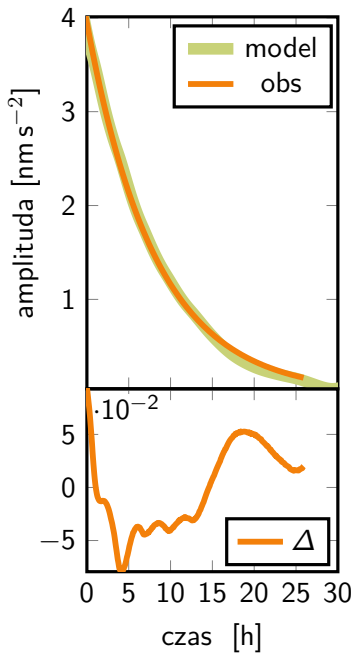
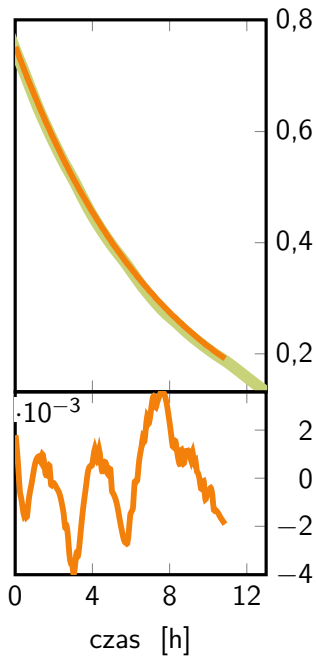
Inne zastosowania

Sejsmometr?

Swobodne oscylacje Ziemi

FCN

Mody jądra

${}^0S_{23}$  ${}^0S_{16}$ 

Wprowadzenie

Grawimetria

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska
pływowe?

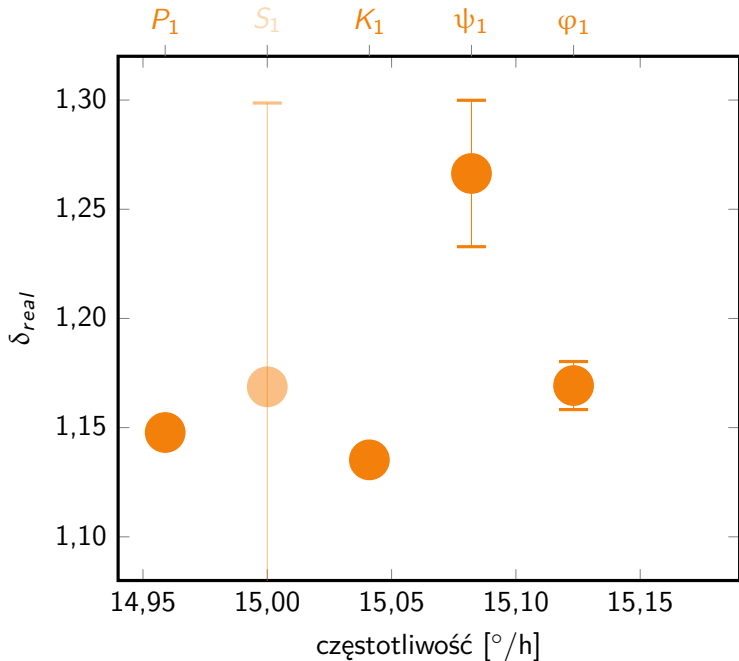
Inne zastosowania

Sejsmometr?

Swobodne oscylacje Ziemi

FCN

Mody jądra



Wprowadzenie

Grawimetria

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska
pływowe?

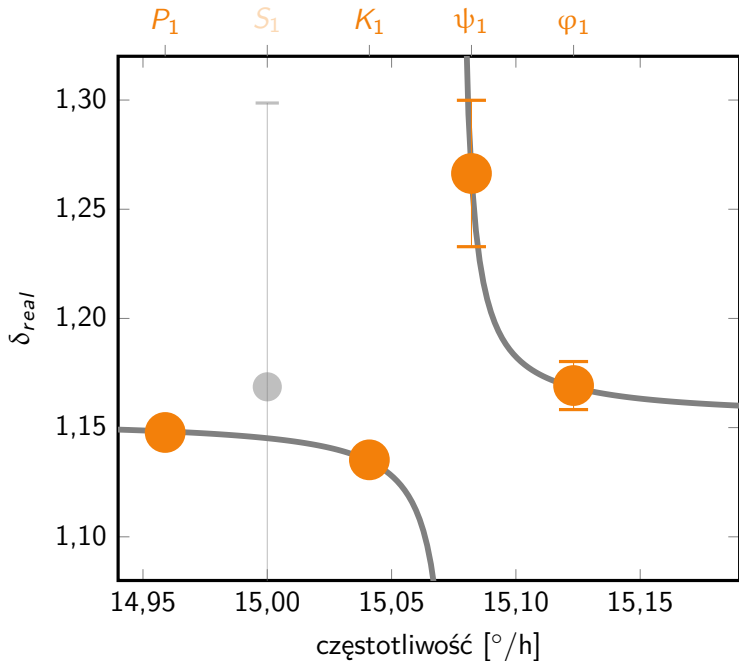
Inne zastosowania

Sejsmometr?

Swobodne oscylacje Ziemi

FCN

Mody jądra



Wprowadzenie

Grawimetria

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska
pływowe?

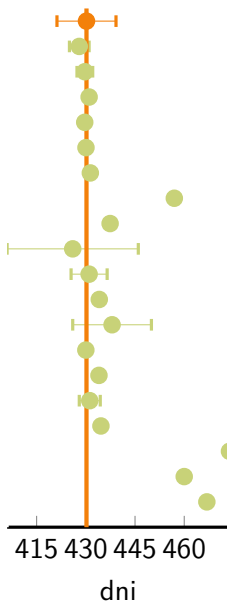
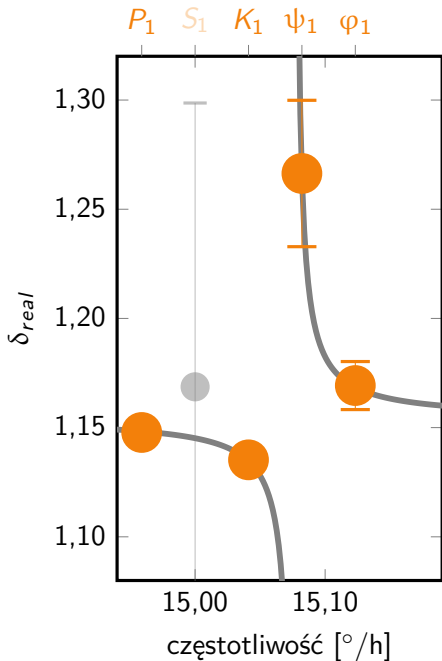
Inne zastosowania

Sejsmometr?

Swobodne oscylacje Ziemi

FCN

Mody jądra



Wprowadzenie

Grawimetria

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska
pływowe?

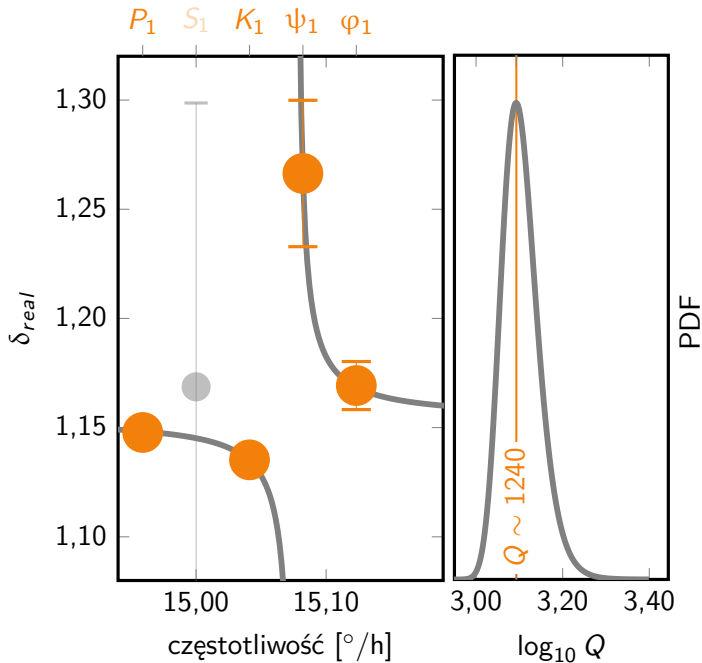
Inne zastosowania

Sejsmometr?

Swobodne oscylacje Ziemi

FCN

Mody jądra



Wprowadzenie

Grawimetria

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska
pływowe?

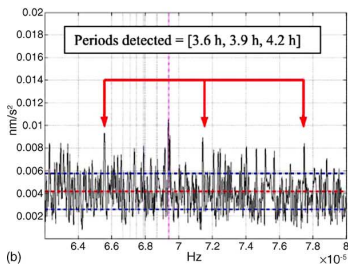
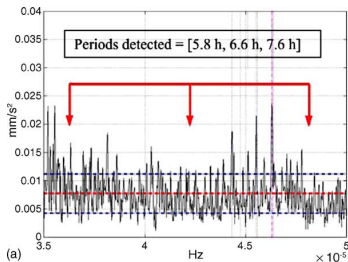
Inne zastosowania

Sejsmometr?

Swobodne oscylacje Ziemi

FCN

Mody jądra



Rysunek: Rosat i in., 2004 – „Performance of superconducting gravimeters from long-period seismology to tides”

Wprowadzenie

Grawimetria

Pływy ziemskie

Czym są zjawiska
pływowe?

Inne zastosowania

Sejsmometr?

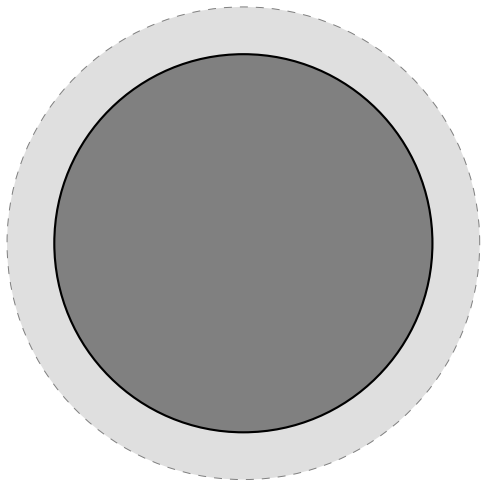
Swobodne oscylacje Ziemi

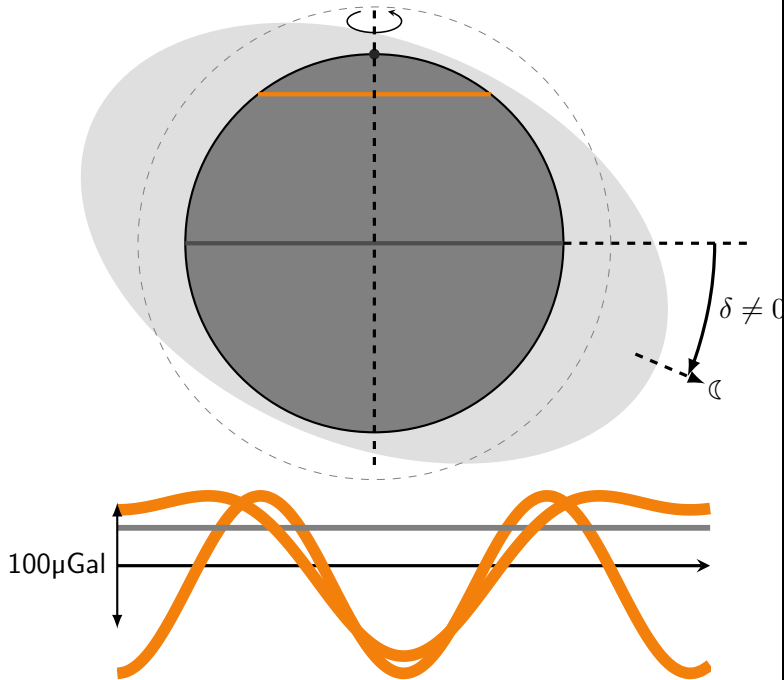
FCN

Mody jądra

Pominięte zastosowania:

- badania atmosferyczne
- badania hydrologiczne
- badania glaciologiczne (wypiętrzanie polodowcowe)
- pośrednie efekty pływów oceanicznych
- odniesienie i weryfikacja innych metod pomiarowych







Newton, I. (1687). *Philosophiæ naturalis principia mathematica*. J. Societatis Regiæ ac Typis J. Streater.



Rosat, S., J. Hinderer, D. Crossley i J. Boy (2004).

„Performance of superconducting gravimeters from long-period seismology to tides”. *Journal of Geodynamics* 38.3–5. Time Varying Gravimetry, GGP, and Vertical Crustal Motions, str. 461–476.