

Czy kilogram pierza jest cięższy od kilograma ołowiu?

Doc. dr Tomasz HOFMOKL

Z powodu pomyłki arytmetycznej Newton doszedł do wniosku, że jest praktycznie niemożliwe doświadczalne wyznaczenie stałej grawitacji. Obliczył bowiem, że dwie kule o średnicy jednej stopy i o gęstości równej średniej gęstości Ziemi, umieszczone w odległości 1/4 cala i podlegające tylko sile wzajemnego przyciągania zetkną się dopiero po upływie miesiąca (poprawny wynik wynosi 5,5 minuty). *Nawet cała góra nie wystarczy do wywołania jakiegokolwiek mierzalnego efektu.* Zdanie tak wielkiego autorytetu, jakim był Newton, nie zachęcało do wykonywania pomiarów. Dopiero w 50 lat później francuski geofizyk, P. Bouger, wykonał pomiary odchylenia od pionu linki obciążonej ołowiem, umieszczonej w pobliżu ściany skalnej na stokach Chimborazo w Andach. Pierwsze pomiary laboratoryjne wykonane za pomocą wagi skręceń przez Henry'ego Cavendisha zostały opublikowane w 1798 r. Dopiero jednak pod koniec XIX wieku uznano wyższość precyzji pomiarów laboratoryjnych nad wynikami uzyskanymi metodami geofizycznymi.



Rozwiązanie zadania M 523.

Każda liczba ze zbioru A jest postaci

$$(*) \quad k_1(1+2^{-n_1}) + \dots + k_m(1+2^{-n_m}),$$

gdzie $k_1, \dots, k_m, n_1, \dots, n_m$ są

naturalne. Rozpatrujemy zbieżny ciąg

liczb postaci $(*)$. W szczególności jest

on ograniczony przez pewną liczbę M ,

zatem dla każdego wyrazu ciągu mamy

$$\leq M. \text{ Wynika stąd, że istnieje podciąg}$$

dla którego k_1, \dots, k_m są takie same

- istotnie, jest tylko skończenie wiele

możliwych kombinacji tych liczb.

Ograniczmy się więc teraz do takiego

podciągu. Dla uproszczenia nazwijmy

go (x_r) . Mamy

$$x_r = k_1(1+2^{-n_1 \cdot r}) + \dots +$$

$$+ k_m(1+2^{-n_m \cdot r}).$$

Rozpatrzmy ciąg $(n_{1,r})_{r=1}^{\infty}$. Są dwie

możliwości: albo zawiera on podciąg

rozbieżny do nieskończoności, albo jest

ograniczony i wtedy zawiera podciąg

stały. W obu wypadkach jednak można

wybrać podciąg (r_j) , dla którego

granica składnika

$$k_1(1+2^{-n_1 \cdot r_j})$$

jest dwójkowo-wymierna. Powtarzając

to rozumowanie dla kolejnych

składników (tj. wybierając odpowiedni

podciąg z podciągu) otrzymujemy

podciąg wyjściowego ciągu, zbieżny do

granicy dwójkowo-wymierniej, co kończy

dowód.

Tytuł wydaje się całkowicie bezsensowny, przypomina stary i dobrze znany dowcip z ławy szkolnej. Moglibyśmy równie dobrze postawić pytanie „Co spada prędzej: pierze czy ołów?” mając na myśli, oczywiście, spadek w próżni, czyli w warunkach pozwalających zaniedbać opory ruchu. Bezsensowność takich pytań wynika z dobrze ugruntowanego przekonania, że masa bezwładna i masa grawitacyjna są tożsame. Co więcej, niektórzy z Was przypominają sobie słynne doświadczenia węgierskiego fizyka, barona Rolanda Eötvösa (1848 - 1919), który za pomocą skonstruowanej przez siebie wagi skręceń badał oddziaływanie grawitacyjne wywierane przez Ziemię na różne substancje. Przez wiele dziesiątków lat sytuacja była całkiem prosta - we wszystkich doświadczeniach przyciąganie grawitacyjne Ziemi okazywało się nie zależeć od składu chemicznego (czy atomowego) przyciąganej substancji. Być może tak jest naprawdę, ale tylko być może. Właśnie to „być może” skłoniło mnie do napisania tego artykułu. To, co chcę Wam opowiedzieć, będzie reportażem z fragmentu meczu „fizyka przeciwko przyrodzie” i to bez ostatecznego wyniku zmagają.

Użyłem wyrażenia reportaż, ale właśnie takie skojarzenie nasunęło mi się, gdy pod koniec 1987 roku w czasie rutynowego przeglądania czasopism zwróciłem uwagę na pojawiające się prace o tak zwanej piątej sile. Nic w tym jeszcze nie byłoby dziwnego, gdyby nie fakt, że jedne prace zaprzeczały wynikom innych prac. Można było nawet notować z miesiąca na miesiąc „stan meczu”: ile ukazało się prac za istnieniem piątej siły, a ile przeciwko tej hipotezie. Należy wspomnieć, że wszystkie prace, o których mówię, to prace eksperymentalne.

Pamiętamy z programu szkolnego prawo powszechnego ciężenia Newtona: dwa ciała o masach grawitacyjnych m_1 i m_2 przyciągają się z siłą F proporcjonalną do iloczynu mas i odwrotnie proporcjonalną do kwadratu ich odległości r (współczynnik proporcjonalności G nosi nazwę stałej grawitacyjnej)

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

W ostatnich kilkunastu latach pomiary geofizyczne stałej G stały się na tyle dokładne, że można było je porównywać z wynikami doświadczeń laboratoryjnych. Okazało się, że między tymi pomiarami istnieje systematyczna różnica, na tyle niewielka, że chętnie uznaloby się ją za skutek nieznanymi błędów doświadczalnych. Tego nie można jednak zrobić, tym bardziej że istnieje dość zasadnicza różnica między pomiarami geofizycznymi i laboratoryjnymi. Te pierwsze operują odległościami od setek metrów do kilometrów, te drugie - najwyżej metrów. Stąd nasuwa się przypuszczenie, że to właśnie różnice odległości są odpowiedzialne za obserwowane różnice wyników.

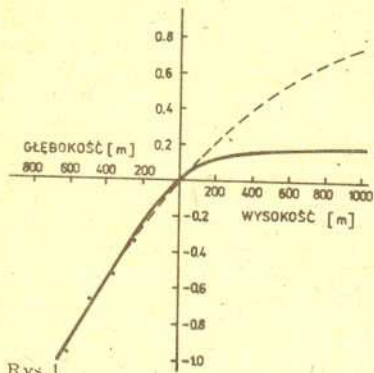
Około 15 lat temu wielu badaczy zaczęło wysuwać hipotezę, że na odległościach dziesiątków do setek metrów można spodziewać się odstępstwa od newtonowskiego prawa grawitacji w postaci dodatkowej krótkozasięgowej siły. Nazwano ją piątą siłą, ponieważ gdyby istniała, byłaby przejawem nowego, piątego oddziaływania fundamentalnego (po czterech już znanych: grawitacyjnym, słabym, elektromagnetycznym i silnym). W pierwszym przybliżeniu potencjał grawitacyjny można przedstawić w postaci

$$V = \frac{G_{\infty} \cdot m}{r} \{1 + \alpha \cdot \exp(-r/\delta)\},$$

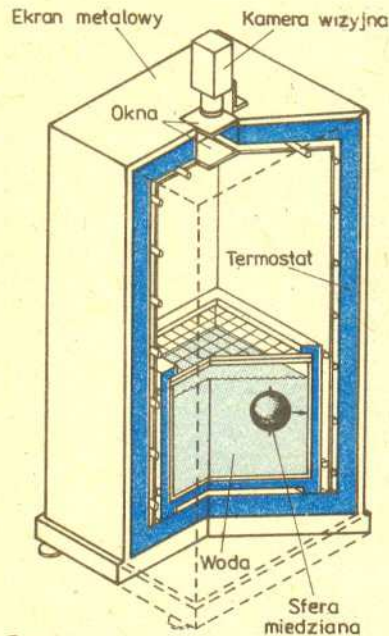
gdzie δ jest zasięgiem piątej siły, a stała α określa jej udział w stosunku do oddziaływania newtonowskiego. G_{∞} jest stałą grawitacyjną na bardzo dużych odległościach ($r \gg \delta$). Jeżeli zasięg oddziaływania jest dużo większy niż odległość mas przy laboratoryjnym wyznaczaniu stałej grawitacji G_{lab} , czyli gdy $\delta \gg r$, wtedy czynnik $\exp(-r/\delta)$ jest bliski jedności i zależność G_{∞} od G_{lab} przybiera przybliżoną postać:

$$G_{lab} = G_{\infty} \cdot (1 + \alpha).$$

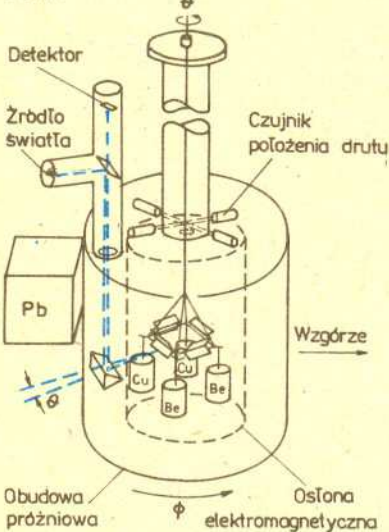
Oznacza to, że pomiary laboratoryjne dają nieprawdziwą wartość stałej grawitacji. Propozycja zaiste rewolucyjna. Nie dość, że wprowadzamy nowe, nie znane dotychczas oddziaływanie elementarne, to żądamy, aby obliczyć jeszcze raz masy wszystkich ciał niebieskich, których wyznaczenie opiera się przecież na znajomości tej stałej. Nie warto więc czekać na „ostateczne” ustalenie, jak to jest z piątą siłą, ale uchwycić życie na gorąco i na przykładzie prac, które ukazały się w 1987 roku, prześledzić, co się w tej dziedzinie dzieje.



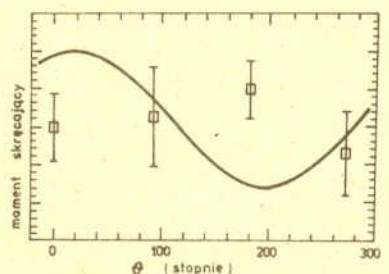
Rys. 1



Rys. 2



Rys. 3



Rys. 4

W styczniu 1987 ukazuje się artykuł przeglądowy (1), w którym przedstawione są wyniki prac wykonywanych metodami geofizycznymi. Przyjrzyjmy się bliżej jednej z metod pomiarowych.

W miarę zagłębiania się w kierunku środka Ziemi oddziaływanie grawitacyjne ulega zmianie, gdyż w dowolnym punkcie pochodzi od całej masy Ziemi, która znajduje się poniżej tego punktu oraz od tej części Ziemi, która znajduje się ponad. Szybkość zmian przyspieszenia spadku swobodnego g , przy założeniu stałej gęstości Ziemi d , można zapisać w postaci:

$$\frac{dg}{dr} = -\frac{2g}{r} + 4\pi Gd.$$

Dokonując pomiarów przyspieszenia ziemskiego g w głębokiej sztolni kopalni na różnych głębokościach możemy wyznaczyć stałą G . Wzór musi ulec, oczywiście, modyfikacji, aby uwzględnić niejednorodność budowy Ziemi. Najnowsze pomiary w sztolniach kopalni pochodzą z obszaru Mount Isa oraz Hilton w północno-zachodnim Queensland. Wartości przyspieszenia grawitacyjnego, zmierzone na różnych głębokościach, porównano z przyspieszeniem grawitacyjnym, obliczonym dla tej samej głębokości, przy założeniu, że stała grawitacji $G = G_{tab}$. Różnicę Δg wartości zmierzonej i obliczonej, wyrażoną w jednostkach miligalach ($1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2$), pokazano na rysunku 1 w zależności od głębokości. Widać wyraźnie, że pomiary i obliczenia różnią się, ale można się też łatwo przekonać, że dane nie pozwalają jednoznacznie wyznaczyć zasięgu oddziaływania δ . Krzywa ciągła jest wynikiem „dopasowania” z parametrami $\alpha = -0,007656$, $\delta = 200 \text{ m}$, natomiast krzywa przerywana obliczona jest dla wartości parametrów $\alpha = -0,010216$, $\delta = 1000 \text{ m}$.

Przeczytanie artykułu (1) właściwie przekonuje czytelnika, że „coś w tym jest”. W dodatku autorzy cytują wcześniejszą pracę (2) Fischbacha i współpracowników, w której po powtórnych przeanalizowaniu wyników doświadczenia Eötvösa również stwierdzono istnienie krótkozasięgowej siły. „Kibice” piątej siły mogą być więc pełni optymizmu.

W marcu 1987 roku w tym samym numerze *Physical Review Letters* pojawiają się dwa artykuły (3,4). W pierwszym z nich opisano bardzo pomysłowy zestaw doświadczalny, w którym sprawdzano, czy istnieje różnica oddziaływania grawitacyjnego dwóch substancji o różnym stosunku liczby barionów na jednostkę masy – miedzi i wody. Urządzenie składające się z wydrążonej kuli miedzianej swobodnie pływającej w wodzie (patrz rys. 2) umieszczono nad brzegiem przepaści (161 m) w New Jersey nad rzeką Hudson. Naruszało to symetrię sił grawitacyjnych. Od strony przepaści było mniej materii i „nie miało co przyciągać”. Jeżeli wypadkowe oddziaływanie grawitacyjne otaczających mas skalnych inaczej działałoby na kulę niż na wodę, to kula powinna powoli płynąć w kierunku jednej ze ścianek. Takie zjawisko zaobserwowano. Kula poruszała się z przyspieszeniem $(8,5 \pm 1,3) \cdot 10^{-8} \text{ cm/s}^2$ oddalając się od klifu. Autorzy dochodzą do wniosku, że wyniki doświadczenia są zgodne z istnieniem piątej siły, przy czym jeżeli zasięg δ zawarty jest w granicach od 5 do 100 m, to $\alpha \cdot \delta = 1,2 \pm 0,4 \text{ m}$.

Jak widać, „kibice” piątej siły mogą zacierać ręce, ale tylko do czasu rzucenia okiem na następny, sąsiadujący artykuł. Autorzy drugiej pracy dochodzą do wniosku przeciwnego: nie zaobserwowano niczego, co mogłoby świadczyć o istnieniu piątej siły. Pomiary wykonywano inną metodą. Rysunek 3 ilustruje zasadę pomiaru. Wykorzystano w nim wagę skręceń umieszczoną na zboczu wzgórza w Laboratorium Fizyki Jądrowej Uniwersytetu w Seattle. Wagę skręceń obciążają dwa walce z miedzi i dwa walce z berylu (wyraźnie inny skład nukleonowy). Jeżeli siła działająca na beryl jest różna od siły działającej na miedź, to powinniśmy zaobserwować dodatkowy moment skręcający. Całe urządzenie obracało się niezwykle powoli wokół osi pionowej dokonując jednego obrotu na tysiąc sekund. Moment skręcający powolnie zmieniać się sinusoidalnie w zależności od kąta Φ , jaki tworzy układ z wybranym kierunkiem geograficznym. Wyniki pomiarów są przedstawione na rysunku 4. Krzywa ciągła pokazuje przewidywania dla wartości $\alpha = 10^{-3}$ i $\delta = 100 \text{ m}$. Nawet najbardziej zagorzały „kibic” piątej siły nie powie, że wyniki podtrzymują tę hipotezę. Stan meczu 2:1 na korzyść piątej siły.

Dziesiątego sierpnia ukazuje się praca (5) pod tytułem *Test Galileusza piątej siły*. Powtórzono w nim słynne doświadczenie Galileusza, który badał spadek różnych ciał z krzywej wieży w Pizie. Eksperyment był podobny, tylko pomiar przyspieszenia ziemskiego, a raczej pomiar różnicy przyspieszeń, z jakimi spadają dwa różne materiały: miedź i uran, był przeprowadzony z maksymalną, osiągalną obecnie precyzją.

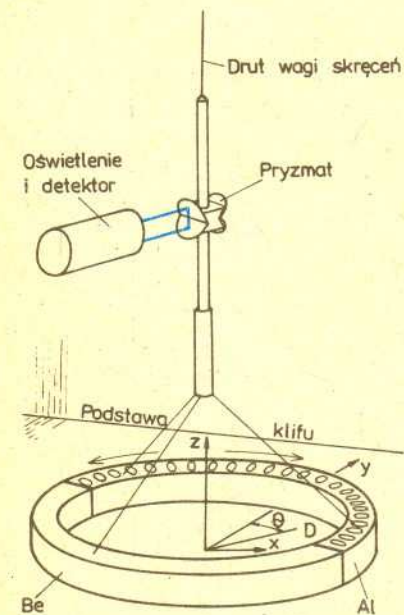
- (1) F.D. Stacey, G.J. Tuck, G.I. Moore, S.C. Holding, B.D. Goodwin, R. Zhou, *Reviews of Modern Physics* Vol 59(1987)157.
- (2) E. Fischbach, D. Sudarsky, A. Szafer, C. Talmadge, S.H. Arosen, *Physical Review Letters* 56(1986)3.
- (3,4) P. Thieberger, *Physical Review Letters* 58(1987) 1066 oraz C.W. Stubbs, E.G. Adelberger, F.J. Raab, J.H. Gundlach, B.R. Heckel, K.D. McMurry, H.E. Swanson, R. Watanabe, *Physical Review Letters* 58(1987)1070.
- (5) T.M. Niebauer, M.P. McHugh, J.E. Faller, *Physical Review Letters* 59(1987)609.
- (6) A.T. Hsui, *Science* 237(1987)881.
- (7) E.G. Adelberger, C.W. Stubbs, W.F. Rogers, F.J. Raab, B.R. Heckel, J.H. Gundlach, H.E. Swanson, R. Watanabe *Physical Review Letters* 59(1987)849.
- (8) F.E. Boynton, D. Crosby, P. Ekström, A. Szumilo, *Physical Review Letters* 59(1987)1385.

Niech żałują ci, co nie byli

W dniach 14-19 lipca 1988 r. w Działdowie odbył się I Ogólnopolski Zlot Młodzieży Szkół Średnich - Miłośników Matematyki. Co prawda uczestnicy spoza Działdowa nie dopisali, ale impreza była niezwykle udana. Pokazała, że matematyka może być nauką przyjemną i że można się nią bawić także w czasie wakacji. Za zainicjowanie i zorganizowanie tak wspaniałej imprezy serdecznie dziękuję nauczycielowi matematyki z Liceum Ogólnokształcącego w Działdowie, panu magistrowi Piotrowi Szymaniakowi.

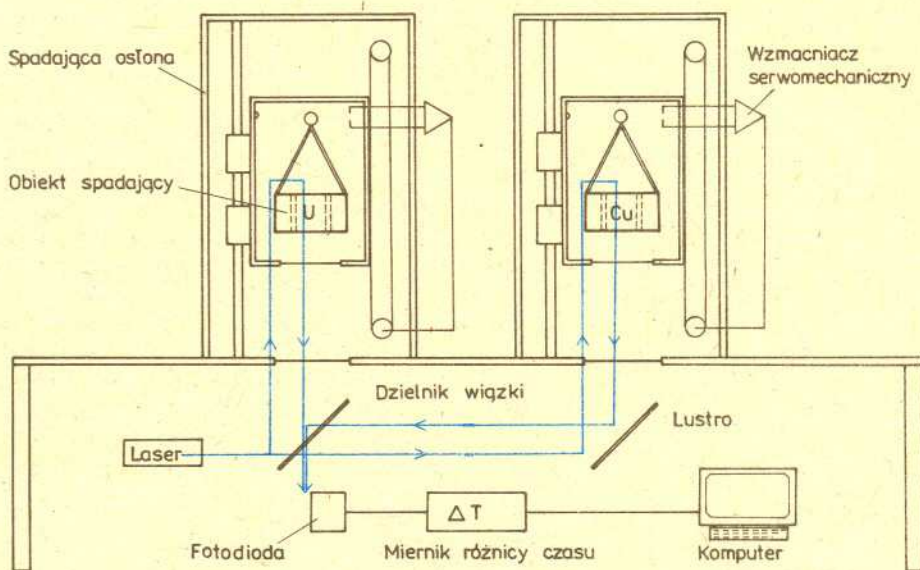
A wszystkim nastolatkom - Czytelnikom *Delty* gorąco radzę uważnie przeglądać numery *Delty*. Może wkrótce ukaże się ogłoszenie o następnym tego typu spotkaniu.

Jarosław WRÓBLEWSKI



Rys.6

Rysunek 5 pokazuje schematycznie układ laserowego interferometru, który pozwalał na pomiar bezwzględny przyspieszenia z dokładnością $0,3 \mu\text{Gal}$. Różnica przyspieszeń obiektu miedzianego i uranowego wynosiła $0,13 \pm 0,50 \mu\text{Gal}$, co - tłumacząc na znane nam parametry dotyczące piątej siły - daje ograniczenie: $\alpha \cdot \delta = 1,6 \pm 6,0 \text{ m}$. Autorzy piszą: *ten zerowy wynik daje nowe ograniczenie na zasięg i moc proponowanej piątej siły*. Wynik meczu: 2:2.



Rys.5

W czasopiśmie *Science* pod datą 21 sierpnia ukazuje się artykuł (6), z którego przytoczymy kilka tylko zdań: *Donoszono, że wyznaczana geofizycznie z pomiarów grawimetrycznych w kopalniach australijskich stała grawitacji Newtona jest systematycznie o 1 do 2% większa niż wartość laboratoryjna. Dla sprawdzenia, czy w innym środowisku geologicznym obserwuje się podobny efekt, dokonano pomiarów grawimetrycznych w odwiertach w Michigan. Choćby wyniki nie pozwalają na sformułowanie ostatecznych wniosków z powodu dużych niepewności wyznaczenia masy w skali geofizycznej, to są one na ogół zgodne z wynikami australijskimi. No i co? Wynik chyba remisowy. Stan meczu 2,5:2,5.*

Dwudziestego czwartego sierpnia ukazuje się praca (7), w której autorzy dyskutują różne możliwości wyjaśnienia sprzecznych wyników prac (3,4). Może dałoby się pogodzić oba eksperymenty, gdyby piąta siła zależała od liczby barionów i od liczby leptonów (na przykład elektronów). W pracy (3) używano wody i miedzi, a w pracy (4) miedzi i berylu. Może to tłumaczy sprzeczność wyników obu eksperymentów. Przeprowadzają więc doświadczenie zamieniając miedź na aluminium, ale wynik jest dalej negatywny. Szala zwycięstwa przechyla się na stronę przeciwników piątej siły - 2,5:3,5.

28 września ukazuje się praca (8), w której autorzy tak piszą o swoich pomiarach: *Nasz przyrząd jest podobny do układu Eötvösa w tym, że zawiera złożony dipol zawieszony na wadze skręceń. Zamiast jednak mierzyć małe statyczne kątowe przemieszczenia osi dipola skierowanej równoległe do ściany kłifu (prostopadle do siły zależnej od składu substancji), obserwujemy tę siłę ustawiając oś dipola prostopadle do ściany kłifu i mierząc okres oscylacji o niewielkiej (30°) amplitudzie. Następnie porównujemy ten okres z okresem wyznaczonym przy przeciwnym ustawieniu osi. Sytuację eksperymentalną ilustruje rysunek 6. Z porównania tych wyników można obliczyć wielkość piątej siły. Uzyskany wynik jest zdecydowanie znaczący statystycznie w granicach czterech odchyień standardowych.*

A więc wynik meczu nierozstrzygnięty 3,5:3,5. Nie wiemy, czy piąta siła istnieje, czy nie i od czego zależy.

Na zakończenie można dodać, że grupa Boyntona zamierza przeprowadzić doświadczenie z pierścieniami (widocznymi na rysunku 6) z miedzi i polietyleniu i zaprosiła Stubbsa i Adelbergera do przeprowadzenia ich eksperymentów w tym samym miejscu, aby łatwiej było porównać rezultaty. Sądzę, że w ciągu kilku lat sprawa zostanie wyjaśniona. A jak, tego nikt nie wie.