

Pomiar a granice poznania

*Instytut Fizyki Teoretycznej, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski

Jan CHWEDENŹCZUK*

0,00000000000000000004 metra (czyli 4×10^{-18} m). 14 września 2015 roku, na ułamek sekundy, o tyle właśnie skróciła się czterokilometrowa rura zakopana pod ziemią w miejscowości Livingston w stanie Luizjana (USA). Skrócenie to było wynikiem przejścia przez Ziemię fali grawitacyjnej będącej echem odległego zderzenia dwóch czarnych dziur. Wraz z drugą rurą, o równej długości, lecz prostopadłą do niej (i jeszcze jedną taką parą, w miejscowości Hanford, stan Waszyngton), tworzą najdokładniejsze urządzenie pomiarowe na naszej planecie, czyli interferometr LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) [1]. Zmierzyć cztery kilometry z taką dokładnością to tak, jakby poznać średnią odległość dzielącą Ziemię od Księżyca, nieco poniżej 500 000 km, z precyzją $\pm 0,5 \times 10^{-13}$ m, co stanowi jedną tysięczną średniego rozmiaru atomu wodoru w stanie podstawowym.

O pierwszej detekcji fal grawitacyjnych pisał Michał Bejger w Δ_{16}^4 .

Poznanie świata poprzez empiryczne badanie jego natury wymaga precyzyjnych urządzeń pomiarowych, a powyższy przykład jest ilustracją tego, jak wiele osiągnęliśmy. Ludzkość, rozumiana jako gatunek *Homo sapiens*, liczy około 300 000 lat, pierwsze słowa padły mniej więcej po 150 000 lat od jej powstania, zaś zaczątki kultury pojawiły się kolejne 100 000 lat później. Współczesna fizyka, licząc od czasów Mikołaja Kopernika (przełom XV i XVI wieku) czy Isaaca Newtona (XVII i XVIII wiek), ma kilkaset lat, co stanowi około dwóch tysięcznych trwania gatunku. W tym czasie radykalnie przesunęliśmy granice poznania,

między innymi dlatego, że nauczyliśmy się mierzyć wielkości fizyczne tak dokładnie, że sekundę, metr czy masę określamy z precyzją do kilkunastu miejsc po przecinku. Czy postęp ten będzie wieczny? Czy rosnąca dokładność urządzeń pomiarowych będzie się przekładać na coraz głębsze rozumienie mechanizmów rządzących Wszechświatem? A może zdolność do formułowania coraz bardziej abstrakcyjnych teorii fizycznych jest w jakiś sposób ograniczona przez budowę naszych mózgów?

To są pytania filozoficzne, i odpowiadając na nie, trudno pozostać w obrębie nauk przyrodniczych, czyli głównie fizyki, chemii i biologii. Odpowiedź, z punktu widzenia metodologii nauk empirycznych, może więc być w jakimś stopniu spekulatywna. Nie jesteśmy jednak zdani na czysto filozoficzne dociekania – cząstkowej wiedzy na temat granic poznania dostarcza współczesna fizyka. Zastanówmy się nad fizycznym aspektem poznania – prześledźmy, jak przebiega proces pomiaru i co wpływa na jego dokładność. Dzięki temu zrozumiemy, jakie są praktyczne ograniczenia postępu w naukach empirycznych.

Gdy mierzymy długość stołu, by się upewnić, że zmieści się w jadalni, przykładamy linijkę do jego powierzchni. Odczytana na skali wartość stanowi *informację* o tym, jaki jest rozmiar mebla. Słowo *informacja* pada tu nieprzypadkowo, z każdym pomiarem bowiem łączy się przepływ informacji od badanego układu do urządzenia pomiarowego i obserwatora. Gdy zrozumiemy konsekwencje tego spostrzeżenia, stanie się jasne, że każdy pomiar ma ograniczoną dokładność.

Każda z dwóch zakopanych pod ziemią rur interferometru LIGO zakończona jest lustrami. Dzięki temu impuls laserowy, który porusza się wewnątrz rury, wielokrotnie przemierza czterokilometrowy odcinek, a każdy cykl oscylacji (od lustro znajdującego się na początku rury do końca i z powrotem) trwa około 25 mikrosekund. Zmiana długości rury spowodowana przez falę grawitacyjną sprawia, że ten cykl wydłuża się bądź skraca. Oznacza to, że w danej chwili czoło impulsu światła w rurze nietkniętej przez falę grawitacyjną będzie w innym miejscu niż w zaburzonej. Falę grawitacyjną wykrywa się, nakładając na siebie impulsy laserowe pochodzące z obu rur. Dochodzi do interferencji (światło jest falą), w analogii do nakładania się dwu kolistych fal na wodzie. Powstaje zbiór prążków interferencyjnych (dlatego urządzenie pomiarowe nazywamy interferometrem), czyli jaśniejszych i ciemniejszych obszarów, a ich położenie zmienia się w obecności fali grawitacyjnej, co stanowi konsekwencję przesunięcia się czoła impulsu świetlnego w jednej z rur. Zamyka się w ten sposób cykl pomiarowy – informacja o fali grawitacyjnej przechodzi z rury (nazywanej ramieniem interferometru) do impulsu świetlnego, który interferując z wiązką odniesienia, pochodzącą z drugiego ramienia, daje wiedzę o pojawieniu się zaburzenia.

Im większe jest natężenie światła w każdym z ramion, tym wyraźniejsze są prążki interferencyjne, a to rzutuje na czułość interferometru, rozumianą jako jego zdolność do wykrywania subtelnych sygnałów. Stąd prosty przepis na zwiększenie dokładności – wystarczy wpuścić więcej światła do każdej z rur. Rzecz w tym, że mocne impulsy świetlne wprawiają lustra w drgania,





Rozwiązanie zadania M 1694.
Stosując nierówność między średnimi dla k liczb a_k^{k+1} i $\frac{1}{2^{k+1}}$, dostajemy

$$\frac{1}{2} a_k^k \leq \frac{k a_k^{k+1} + \frac{1}{2^{k+1}}}{k+1} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow (k+1) a_k^k \leq 2k a_k^{k+1} + \frac{1}{2^k}.$$

Sumując otrzymane nierówności po wszystkich k i stosując założenie, mamy

$$\sum_{k=1}^n (k+1) a_k^k \leq 2 \sum_{k=1}^n k a_k^{k+1} + \sum_{k=1}^n \frac{1}{2^k} <$$

$$< 2 \cdot 1 + 1 = 3.$$

Zasada nieoznaczoności Heisenberga (o której można przeczytać więcej w Δ_{17}^{10}) orzeka, że iloczyn rozrzutów dwóch sprzężonych wielkości (np. składowych położenia i pędu w tym samym kierunku) nie może być mniejszy od pewnej granicznej wartości. Dla światła dwiema sprzężonymi wielkościami, dla których obowiązuje zasada nieoznaczoności Heisenberga, są „kwadratury pola”, będące odpowiednikami położenia i pędu cząstki masywnej (na przykład elektronu czy atomu). Stan ściśnięty światła to taki, w którym zmniejszony („ściśnięty”) jest rozrzut jednej z kwadratur kosztem zwiększonego rozrzutu drugiej, przy czym iloczyn tych rozrzutów spełnia zasadę nieoznaczoności. To ściśnięcie sprawia, że pojemność informacyjna stanu światła jest większa niż „zwykłego” impulsu laserowego, stąd stany ściśnięte znajdują zastosowanie w pomiarach interferometrycznych. O stanach ściśniętych i ich wykorzystaniu w detektorach fal grawitacyjnych pisał również Jan Kolodźyński w Δ_{13}^5 .

Literatura

- [1] B. P. Abbott *et al.*, „Observation of gravitational waves from a binary black hole merger,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 116, p. 061102, Feb 2016.
- [2] J. Aasi *et al.*, „Enhanced sensitivity of the ligo gravitational wave detector by using squeezed states of light,” *Nature Photonics*, vol. 7, no. 8, pp. 613–619, 2013.

obniżając ostrość obrazu interferencyjnego. Jest to pozornie nieistotny efekt, ale ma on wpływ na precyzję pomiaru w tak czułym interferometrze, jak LIGO. Urządzenie to ma swój „punkt pracy” – takie natężenie impulsów laserowych rozchodzących się w obu ramionach interferometru, dla którego utrata precyzji wynikająca z drgań luster jest kompensowana przez zysk, który osiągamy, używając mocnego światła.

Nadal jednak, przy ustalonym natężeniu impulsów laserowych, można wiele „ugrać”, pod warunkiem, że umiejętnie skorzysta się z dobrodziejstw mechaniki kwantowej. Światło to fala – tak mówi klasyczna elektrodynamika. Światło to zbiór porcji, drobin, czyli fotonów – tak mówi teoria kwantów. Do tej pory przedstawialiśmy proces pomiaru w LIGO, odwołując się do języka fizyki klasycznej, mówiąc o impulsach świetlnych czy interferencji fal. Użyliśmy wprawdzie kilkakrotnie słowa „laser”, lecz zaraz wróciliśmy do klasycznych fal, sugerując, że kwantowa proveniencja lasera nie ma znaczenia dla naszej dyskusji. Rzeczywiście, tak długo, jak interesują nas kolektywne, falowe własności światła, jego cząstkowy charakter można pominąć. Analogicznie postępujemy, opisując ruch wody w oceanie: pływy, fale, prądy. Nie odwołujemy się do tego, że woda to zbiór cząsteczek H_2O , bo w skali, w której obserwujemy te kolektywne zjawiska, jest to nieistotne. Opis mikroskopowy jest bardzo skomplikowany, a zastosowany do badania zjawisk w oceanie uczyniłby obraz nieczytelny. Ale woda to zbiór cząstek H_2O , a światło to zbiór fotonów, i czasem warto o tym pamiętać. Mechanika kwantowa daje przepis, jak manipulować światłem na poziomie pojedynczych fotonów, by uzyskać *nieklasyczny* stan światła, o egzotycznych własnościach, dla których język klasycznego elektromagnetyzmu nie znajduje opisu. Z punktu widzenia precyzji pomiarowej ważne jest, że te własności mogą zwiększyć pojemność informacyjną impulsu. Jeżeli użyjemy odpowiednio „skrojonego” stanu światła do celów pomiarowych, zewnętrzne zaburzenie, takie jak fala grawitacyjna, może w nim zdeponować więcej informacji niż w klasycznym impulsie o takim samym natężeniu. Tym sposobem, nie podnosząc mocy światła, a zatem nie wprawiając luster w nadmierne drgania, możemy zwiększyć czułość interferometru. W LIGO udało się dokonać pierwszych pomiarów, wpuszczając do jednego z ramion tak zwaną „ściśniętą próżnię” – kwantowe światło, które dzięki swoim własnościom poprawiło precyzję urządzenia [2]. Dokładność pomiaru interferometrycznego rzutuje z odległych zakątków Wszechświata. Zbudowanie tak precyzyjnego narzędzia pomiarowego i, pośrednio, otwarcie naszych zmysłów na nowy rodzaj sygnałów – fale grawitacyjne – przesunęło granice poznania w kosmologii, astronomii i astrofizyce.

Czytelnicy mogą odnieść wrażenie, że dyskutując o precyzji pomiarowej lub rozdzielczości wszelkiego rodzaju kamer czy mikroskopów, poświęcamy czas zagadnieniom technicznym. Częściowo tak jest, ale złożoność tych zagadnień jest wyznacznikiem postępu w naukach empirycznych. Fizyka cząstek elementarnych potrzebuje potężnych akceleratorów, w których rozpedzone niemal do prędkości światła cząstki zderzają się i rozpadają na inne, będące przedmiotem badań. Budowa nowego akceleratora, który przesunąłby granice poznania ku jeszcze mniejszym i bardziej egzotycznym bytom, dając wiedzę o strukturze materii i oddziaływaniach, wymaga ogromnych nakładów finansowych. Czy to oznacza, że polityka i pieniądze wyznaczają granice poznania ludzkości? To też w pewnej mierze jest prawda, ale i to jest konsekwencją niezwykle postępu technik pomiarowych. Kopernik czy Newton nie potrzebowali międzynarodowych sojuszy, by zdobyć teleskopy, które przysłużyły się do ich przełomowych odkryć. Gotowość społeczeństw dołożenia na wyszukane detektory, których budowa być może przez wiele lat nie da wymiernego (praktycznego, finansowego) zysku, też jest miarą postępu. Przesuwając granice poznania, sięgając do najdalszych zakątków Wszechświata czy dłużej w najmniejszych drobinach materii, doszliśmy do momentu, kiedy postęp zależy od dostępnych zasobów ludzkości i od zdolności mózgu każdego pojedynczego człowieka do wznoszenia się na coraz wyższe poziomy abstrakcji.