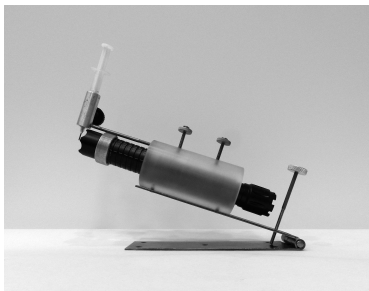


Rys. 2. Uproszczone wyjaśnienie wytwarzania obrazu przez mikroskop; 1 – obcięty koniec igły, 2 – kropla wody, 3 – wiązka światła laserowego, 4 – ekran, AB – przedmiot, A_1B_1 – obraz przedmiotu AB .



Fot. 3. Bardziej uniwersalna wersja mikroskopu zbudowana z zastosowaniem zawiasu i przystosowana do zamocowania wskaźników laserowych o różnych rozmiarach. Widoczny jest tutaj niebieski wskaźnik laserowy o mocy około 1 W.

wiązkę światła, która pada najpierw na powierzchnię kropli znajdującą się bliżej jego otworu wyjściowego. Powierzchnia ta ma bardzo mały promień krzywizny i działa jak soczewka o dużej zdolności skupiającej. Wewnątrz kropli mogą znajdować się kryształki nierozpuszczalnych w wodzie tlenków żelaza (pochodzących ze stalowych rur wodociągowych), glony, pyłki kurzu itp. – zależy to od źródła, z którego została pobrana kropla. Obiekty te są mniej przezroczyste niż woda, a ich rozmiary wynoszą 10^{-3} – 10^{-1} mm. Mniejsza przezroczystość powoduje, że dają one obraz cieniowy. Na ich brzegach i niejednorodnościach zachodzi również dyfrakcja, a dalej interferencja światła. Małe rozmiary tych obiektów i spójność wiązki światła laserowego ułatwiają obserwację powstających przy tym prążków interferencyjnych. Światło dochodzące do powierzchni kropli, znajdującej się dalej od wskaźnika, niesie informację o zawartych w niej obiektach. Powierzchnia ta ma również bardzo mały promień krzywizny i działa jak lupa o dużym powiększeniu. Skutkiem tego na ekranie tworzy się cieniowo-interferencyjny obraz obiektów zawartych w kropli. Obraz ten jest powiększony i odwrócony. Z tego powodu większość widocznych na ekranie obiektów porusza się ku górze, chociaż w kropli one opadają. Przedstawiony sposób tworzenia się obrazów charakteryzuje się dużą czułością. Skutkiem tego widoczne są też prążki odpowiadające zafalowaniu powierzchni kropli wskutek wstrząsów czy ruchom konwekcyjnym w jej wnętrzu. Jeżeli zmierzmy średnicę kropli i obrazu, to możemy obliczyć powiększenie naszego mikroskopu. Im dalej kropla będzie umieszczona od ekranu, tym to powiększenie będzie większe, ale wtedy jasność obrazu zmaleje i obserwacja szczegółów oraz ich sfotografowanie staną się trudniejsze.

Mikroskop, w którym elementy połączone są kawałkiem drutu miedzianego, jest bardzo łatwy do wykonania, ale podczas dłuższej pracy wymaga ponownej regulacji i pasuje tylko do rozmiarów jednego wskaźnika laserowego. Jeżeli chcielibyśmy poeksperymentować ze wskaźnikami o różnych rozmiarach i długościach fali światła, to możemy pokusić się o zbudowanie bardziej uniwersalnej wersji mikroskopu. Można wykorzystać w nim tulejki o większych otworach i duży zawias, który świetnie nadaje się jako gotowy element mocujący i regulacyjny. Wygląd takiej wersji mikroskopu przedstawia fotografia 3. Warto też zauważyć, że zjawisko dyfrakcji światła ogranicza możliwości rozróżniania szczegółów, czyli zdolność rozdzielczą tradycyjnych mikroskopów optycznych. To właśnie zjawisko jest również istotnym czynnikiem decydującym o tworzeniu się obrazu i jego interesujących właściwościach w opisanym tu mikroskopie.

Skąd się bierze długość Plancka?

Michał BEJGER

Niestety, do naszych czasów nie dotrwała żadna z prac Demokryta, a informacje o nich można jedynie czerpać z (najczęściej krytycznych i nie wprost) wzmianek w pismach m.in. Platona i Arystotelesa.

Już około 2500 lat temu Leukip i Demokryt z Abdery wiedzą, że świat składa się wyłącznie z niepodzielnych elementów materii („atomów”) oraz z próżni. Mechanika Newtona (XVII w.) operująca pojęciami absolutnego czasu i absolutnej przestrzeni umożliwia po raz pierwszy w historii jakościowy opis zachowania się cząstek materii (np. planet, a także fotonów uznawanych wówczas za korpuskuły). Faraday i Maxwell (XIX w.) dodają do listy składników świata pojęcie pola (np. pole elektromagnetyczne). Teoria względności Einsteina (XX w.) łączy czas i przestrzeń: dzięki temu na początku minionego stulecia świat składa się z czasoprzestrzeni, cząstek i pól, przy czym pole grawitacyjne zostało powiązane z nieeuklidesową geometrią czasoprzestrzeni. Przełomy związane z mechaniką kwantową (Planck, Bohr, Born, Jordan, Heisenberg, Dirac, Feynman...) doprowadzają do kolejnej unifikacji: cząstki są w istocie konsekwencją istnienia pól (kwantami pól). W połowie XX wieku do opisu świata potrzeba więc jedynie kwantowych pól oraz czasoprzestrzeni. Aktualnym wyzwaniem jest zrozumienie, w jaki sposób skwantować pole grawitacyjne: dotychczas było ono bowiem zawsze opisywane przy użyciu klasycznej, choć

Naturalne jednostki miary są to, słowami samego Plancka, *jednostki długości, masy i czasu, niezależne od właściwości ciał lub substancji, zachowujące swoje specjalne znaczenie niezależnie od czasów i kultur, także pozaziemskich i pozaludzkich* (Planck 1899)

Badaczem, który jako pierwszy zwrócił uwagę na fundamentalną cechę odróżniającą pole grawitacyjne od innych pól był Matvei P. Bronstein (1906–1938). Obecnie jest uważany za pioniera teorii kwantowej grawitacji i to jego argumenty z prac z roku 1936 przytaczam w tekście.

Charakterystyczną masę Plancka m_p można dostać porównując długość fali Comptona cząstki o masie m , $\lambda_c = h/mc$, i promień czarnej dziury Schwarzschilda $R = 2Gm/c^2$. Krytyczna maksymalna masa kwantowej cząstki to $m = \sqrt{\pi}m_p$.



krzywoliniowej, geometrii. Jeśli grawitacja jest kwantowa, powinien istnieć charakterystyczny, minimalny rozmiar kwantu przestrzeni, przy którym czasoprzestrzeń przestaje wydawać się ciągła.

Zanim oszacujemy ten rozmiar, przypomnijmy *naturalne jednostki miary* zaproponowane przez Maksa Plancka w 1899 roku:

$$x_p = c^\alpha G^\beta \hbar^\gamma,$$

gdzie c oznacza prędkość światła, G stałą grawitacji Newtona, a \hbar zredukowaną stałą Plancka ($\hbar = h/2\pi$, gdzie h to stała Plancka). Dobierając odpowiednie potęgi α , β i γ można dostać charakterystyczną długość $l_p = (\hbar G/c^3)^{1/2} \approx 10^{-33}$ cm, masę $m_p = (\hbar c/G)^{1/2} \approx 10^{-5}$ g oraz czas $t_p = (\hbar G/c^5)^{1/2} \approx 10^{-43}$ s.

Wraz ze sformulowaniem zasady nieoznaczoności Heisenberga, $\Delta x \Delta p > \hbar$, określającej pary wielkości (np. położenie x i pęd p), których nie da się zmierzyć jednocześnie z dowolną dokładnością, pojawiło się pytanie, czy w związku z tym nieoznaczoność przeszkadza przy pomiarze składowych jakiegoś interesującego nas kwantowego pola. W 1933 roku Bohr i Rosenfeld dostarczyli odpowiedzi dla pola elektromagnetycznego: mimo kwantowej nieoznaczoności można mierzyć składowe tego pola z dowolną dokładnością. Czy podobnie jest dla pola grawitacyjnego? Problem polega na tym, że w przeciwieństwie do przypadków kwantowych pól *znajdujących się* w czasoprzestrzeni, w której dokonujemy pomiaru, pole grawitacyjne *jest* czasoprzestrzenią.

W praktyce pomiar oznacza detekcję oddziaływania pola z jakąś materialną cząstką, która znajduje się w położeniu x z określoną dokładnością l . Stosując zasadę Heisenberga nieoznaczoność położenia musi spełniać nierówność $\Delta x < l$, czyli $\Delta x > \hbar/\Delta p$, a więc $\Delta p > \hbar/l$. Dla dużych wartości pędu średnia wartość kwadratu pędu p^2 jest większa od $(\Delta p)^2$, co daje oszacowanie $p^2 > (\hbar/l)^2$. Wynik ten jest oczywistą konsekwencją zasady nieoznaczoności: duża dokładność pomiaru położenia wymaga dużych pędów. Z tego powodu w doświadczeniach akceleratorowych, w których bada się coraz mniejsze skale odległości, zderzają się bardzo szybkie cząstki. Energia relatywistycznej cząstki o masie spoczynkowej m_0 i pędzie p to $E = mc^2 = \sqrt{(m_0c^2)^2 + (cp)^2}$. Dla dużych pędów energia związana z masą spoczynkową m_0c^2 jest zaniedbywalna, więc można przyjąć, że $E = cp$. Dokładny pomiar położenia wymaga zatem jak największej energii w jak najmniejszej objętości.

Jak dużo energii można zgromadzić w jednym miejscu? W teorii względności energia jest równoważna masie ($m \equiv E/c^2$), więc podobnie do „zwykłej” masy zakrzywia przestrzeń wokół miejsca, w którym jest zlokalizowana. Interesującym nas ograniczeniem na ilość masy-energii jest krytyczne zakrzywienie, przy którym powstaje czarna dziura. Rozmiar czarnej dziury (promień Schwarzschilda) to $R = 2Gm/c^2$. Zmniejszanie l , czyli coraz bardziej precyzyjna lokalizacja, prowadzi do, jak nakazuje zasada nieoznaczoności, zwiększania masy-energii, jednak jedynie do momentu, w którym $R = l$, ponieważ dla $R > l$ nasz system pomiarowy zaczyna znajdować się wewnątrz czarnej dziury, do której z definicji nie mamy dostępu. Łącząc powyższe oszacowania, otrzymujemy minimalny rozmiar wyznaczony przez prawa fizyki:

$$l = \frac{mG}{c^2} = \frac{EG}{c^4} = \frac{pG}{c^3} = \frac{\hbar G}{lc^3} \quad \text{czyli} \quad l = l_p \equiv \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \approx 1.616 \cdot 10^{-33} \text{ cm},$$

a więc (niespodzianka!) minimalnym rozmiarem okazuje się długość Plancka l_p . Mimo, że przedstawione argumenty opierają się w zasadzie o klasyczną fizykę, ich znaczenie jest jasne: dla odległości porównywalnych z l_p czasoprzestrzeni nie można już uważać za ciągłą, a dla długości mniejszych od l_p pojęcie odległości w ogóle traci sens.

Ziarnistość czasoprzestrzeni w najmniejszych skalach prowokuje pytania o możliwe odstępstwa od uznanych klasycznych teorii (np. czy istnienie minimalnego rozmiaru wymaga modyfikacji szczególnej teorii względności?), ale z drugiej strony rozwiązuje paradoks Zenona z Elei, o którym na pewno wiedział Demokryt: na skwantowanej bieżni Achilles zawsze dogoni żółwia.