

*Henryk Arodź*

Instytut Fizyki im. Mariana Smoluchowskiego,  
Uniwersytet Jagielloński

*Maria Massalska-Arodź*

Instytut Fizyki Jądrowej  
im. Henryka Niewodniczańskiego PAN  
Kraków

## FIZYKA A CZAS

**Streszczenie.** Artykuł nasz jest przeglądem wybranych wyników uzyskanych w fizyce i mających związek z problemem czasu – nie przedstawiamy w nim żadnej własnej „teorii czasu”. Po kilku ogólnych uwagach o problemie czasu, podajemy zarys historii i krótki opis aktualnego stanu pomiarów interwałów czasowych. Następnie omawiamy niektóre dotyczące czasu konsekwencje obu teorii względności: szczególnej i ogólnej. Tutaj czas jest geometrycznym składnikiem czasoprzestrzeni. Kolejna część jest poświęcona czasowi w tzw. hamiltonowskich sformułowaniach teorii cząstek, gdzie jest on parametrem ewolucji. Ostatnia część zawiera uwagi o pewnych próbach wyjścia poza uznane teorie fizyczne, mających związek z problemem czasu.

### 1. Czas fizyczny

Współczesny cywilizowany człowiek na ogół nie ma wątpliwości, że czas istnieje. Żyje on pod presją, jeśli nie terrorem, wpływającego czasu, pracuje w tempie narzuconym harmonogramami, podróżuje zgodnie z rozkładami jazdy itd. Zegar jest jednym z najważniejszych przedmiotów obecnych w naszym życiu codziennym. Mimo tego powszechnego odczucia czasu, udzielenie odpowiedzi na pytanie „co to jest czas?” nie jest zadaniem łatwym. W nauce współczesnej nie istnieje spójna nauka o czasie, jakaś ‘czasologia’. Wyobraźmy sobie, że ktoś nam zadał owo pytanie albo poprosił, by mu opisać czas. Pierwszym naszym odczuciem jest bezradne zakłopotanie. Potem może nasunąć się pierwsza odpowiedź: czasem jest to, co pokazują wskazówki zegarka. Jest to odpowiedź niezadowolająca. Jeśli się z nią zgodzić, to należałoby podobnie uznać, że szybkość należy utożsamić ze wskazaniem prędkościomierza, ciężar

z liczbą odczytaną na skali wagi itp. W tym ujęciu czas, jak i pozostałe wymienione dla przykładu wielkości nie istnieją, jeśli nie są zmierzone – na przykład przed wynalezieniem zegara czas by nie istniał. Odpowiedzi takie są zaledwie unikami – ontologia czasu jest problemem trudnym. Zegar ustala jedynie liczbową miarę czasu, tzw. współrzędną czasową, podobnie jak używając linijki, możemy uzyskać liczbowe miary odległości, czyli współrzędne przestrzenne. Pierwszy problem, przed jakim stajemy, zastanawiając się nad czasem, to rozstrzygnięcie, czy czas jest elementem świata materialnego, tzn. istniejącego niezależnie od świadomości człowieka, czy raczej zjawiskiem neuropsychologicznym związanym ze sposobem postrzegania i porządkowania wrażeń zmysłowych przez mózg. W tym drugim wariancie czasem powinna zajmować się psychologia. Fizycy oczywiście uważają, że czas, który mierzą lub którego używają w swoich równaniach, jest elementem świata materialnego. Całkiem możliwe, że w potocznym słowie „czas” zlewa się kilka naukowych pojęć czasu, na przykład czas psychologiczny i czas fizyczny. Notabene, w literaturze wprowadzany jest także trzeci rodzaj czasu: biologiczny.

W niniejszym artykule, który jest próbą naszkicowania, co fizyka ma nam do powiedzenia o czasie, zajmujemy się oczywiście czasem fizycznym. Należy od razu powiedzieć, że problem czasu fizycznego – jego pochodzenia i właściwości – nie ma jak dotychczas rozstrzygnięcia. Główną trudnością wydaje się brak możliwości wykonywania eksperymentów z czasem. Niezwykle skuteczna metodologia badań fizycznych jest oparta na eksperymentowaniu. Charakteryzując ilościowo zachowanie się badanego obiektu w różnych warunkach, które eksperymentator przemyślnie przygotowuje, wcześniej lub później osiągamy zadowalające zrozumienie struktury i innych własności obiektu, pozwalające przewidzieć jego zachowanie się w danych warunkach zewnętrznych w takim stopniu, w jakim jest to w ogóle możliwe. Niestety, jeszcze nie potrafimy eksperymentować z czasem fizycznym. Mamy na myśli prowadzone aktywnie doświadczenia, a nie bierne obserwacje, na przykład, efektów przewidzianych teoriami względności. Nie jest nawet pewne, że będzie to kiedykolwiek możliwe.

Czas występuje w wielu prawach fizycznych, i analizując je, można uprawiać ‘fenomenologię’ czasu fizycznego, tzn. rejestrować jego własności, nie wnikając w naturę czasu. Uzyskano wiele istotnych ustaleń mających liczne potwierdzenia empiryczne. Należą tutaj, m.in., własności czasu wynikające ze szczególnej i ogólnej teorii względności. Istnieje także wiele prób wyjścia poza fenomenologię czasu. Najczęściej są to

radykalne uogólnienia zaakceptowanych teorii fizycznych. Niestety, z reguły nie mają one żadnego wsparcia ze strony współczesnej fizyki doświadczalnej, bo dotyczą zjawisk niedostępnych dla istniejących przyrządów – są więc zaledwie hipotezami.

## 2. Pomiary czasu

Pierwsze pomiary czasu w sposób naturalny związane były z cyklicznymi zjawiskami w przyrodzie. Już ponad 20 tys. lat temu człowiek rozpoczął oznaczanie dni pomiędzy fazami Księżyca, a pierwsze kalendarze powstawały w Egipcie i Babilonie około 5 tys. lat temu. W ciągu dnia czas był odmierzany zegarem słonecznym, który charakteryzowały godziny sezonowe (1/12 okresu pomiędzy wschodem a zachodem Słońca). W nocy oraz w dni pochmurne czas odmierzano najpierw zegarem wodnym, a potem zegarem piaskowym, gdzie szybkość wypływu ziaren była niezależna od wielkości kolumny piasku nad otworem. Klepsydry oznaczały czas z dokładnością około 10 minut.

Po epoce pomiaru czasu na podstawie przepływu ciągłego nastąpiła epoka kontroli nierezonansowej. W udoskonalaniu zegarów istotna była rola Kościoła. Zakonnikom potrzebna była większa dokładność oznaczania czasu dla ścisłego przestrzegania godzin modlitwy. Kościół miał odpowiednie środki finansowe umożliwiające żmudne prace nad nowymi przyrządami do pomiaru czasu. Również rozwijający się handel wymagał ujednolicenia oznaczania czasu tj. wprowadzenia jednakowych godzin i liczenia ich od ustalonego momentu doby. Stało się to możliwe dzięki zegarowi mechanicznemu, który został skonstruowany w roku 1283, w Anglii w opactwie Dunstable. Opadający ciężarek zawieszony na lince powodował stopniowy obrót koła wychwytowego o wielu równo odległych piłokształtnych zębach. Ważnym elementem zegara był kolebnik, którego wypustki blokowały swobodny ruch obrotowy koła wychwytowego, co wywoływało oscylacyjny ruch kolebnika z charakterystycznym „tik i tak”. Od tego czasu wszystkie budowane zegary miały urządzenie drgające ze stałą częstością oraz urządzenie zliczające te drgania. Potem używano w zegarach spirali, gdzie w miarę upływu czasu zamiast grawitacyjnej energii potencjalnej odważników uwalniała się energia potencjalna sprężyny. Zegary ówczesne nie miały wskazówek, tylko wydzwaniały kolejne godziny – i stąd nazwa angielska *clock*. Zegary takie można oglądać w londyńskim Muzeum of Science, a także

w Jędrzejowie w Muzeum Zegarów, założonym przez rodzinę Przypkowskich.

Zegar wahadłowy wprowadził do użycia Huygens w roku 1656 – i tak w pomiarze czasu rozpoczęła się ostatnia epoka, zwana epoką kontroli rezonansowej. Wahadło, którego właściwości badał Galileusz już 70 lat wcześniej, jest dość stabilnym oscylatorem mechanicznym z okresem wahań proporcjonalnym do pierwiastka kwadratowego z długości wahadła – zegar miał dokładność 2 godzin na dobę. By zwiększyć dokładność do 1 minuty na tydzień, Huygens zredukował wpływ wzrastającego kąta wychylenia na stabilność okresu oscylacji, powodując, że ruch ciężarka wahadła zwanego soczewką odbywał się po cykloidzie, a nie po łuku koła.

Precyzyjnego zegara potrzebowali astronomowie, a także marynarze, gdyż dokładny pomiar czasu pozwalał na dokładne ustalenie położenia na morzu. Poprawę dokładności uzyskał Huygens, wprowadzając nowy element do zegara opartego na sprężynie, tzw. ślimak, co spowodowało, że moment obrotowy sprężyny był stały w czasie. Ciągłe jednak dokładność pomiaru czasu była niewystarczająca, aby zapewnić bezpieczną podróż statkom. W roku 1707 z powodu kłopotów z nawigacją zatoneły aż 4 wojenne statki angielskie z załogą liczącą 1600 marynarzy. Wówczas parlament angielski wyznaczył nagrodę dla konstruktora, który zbuduje chronometr pozwalający oznaczyć długość geograficzną z dokładnością do pół stopnia. Miało to zapewnić oznaczenie położenia z dokładnością do 300 mil. Budowa zegara z łożyskami, którego dokładność była równa 3 sekundom na dobę, zajęła 26 lat, ale takie zegary, jak skonstruowany przez Harrisona w roku 1790, działają na statkach do dzisiaj.

Można powiedzieć, że zegar mechaniczny umożliwił rozwój cywilizacji. W wieku XIX czynnikiem sprzyjającym rozwojowi chronometrii były Kompanie Kolejowe. Czas lokalny wyznaczany na podstawie położenia Słońca na niebie w zenicie był różny na różnych stacjach kolejowych i to utrudniało komunikację na dużych odległościach. Od roku 1851, gdy uruchomiono Publiczną Służbę Czasu, sygnały czasu były przesyłane telegrafem do poszczególnych stacji najpierw z Harvard College Observatory Cambridge w Massachusetts, a rok później również z Królewskiego Obserwatorium w Wielkiej Brytanii. W roku 1884 Międzynarodowa Konferencja Południkowa w Waszyngtonie podzieliła kulę ziemską na 24 strefy czasu. Nastąpiła więc standaryzacja ustalenia czasu w każdym miejscu na Ziemi zegarami, które miały już dokładność do 1 sekundy na rok. Kolejne etapy rozwoju chronometrii to stopniowa

miniaturyzacja zegarów oraz ich masowa dostępność. W okresie I wojny światowej zegarek kieszonkowy został ze względów praktycznych wyparty z powszechnego użycia przez zegarek na rękę, który do tego czasu nosiły jedynie kobiety.

Aby dalej zwiększyć dokładność zegarów, należało uniezależnić wskazania miernika czasu od wpływu temperatury oraz przyspieszenia ziemskiego – oba te czynniki były istotne przy pomiarze czasu zegarem mechanicznym. Zapewnia to nowy typ zegarów zwanych zegarami kwarcowymi, gdzie oscylatorem dostarczającym stabilnych drgań był specjalnie wycięty kryształ piezoelektrycznego kwarcu, który umieszczony w zmiennym polu elektrycznym o stałej częstotliwości dostrajał się do niej. Zjawisko piezoelektryczne zostało odkryte w roku 1880 przez braci Curie, a oscylator kwarcowy jako stabilny wzorzec częstotliwości zaproponował W. Morrison z Bell Laboratories w 1928 roku. Zegary kwarcowe wprowadziły standard dokładności równy 1 sekundzie na 10 lat. Niewielkie zegarki zasilane baterią są w powszechnym użyciu od roku 1970 i mają często cyfrowe wyświetlacze.

Oto przykłady, które pokazują naturalną skalę czasową zjawisk, z jakimi mamy do czynienia na co dzień:

- 1 sekunda – charakteryzuje rytm pracy serca,
- 8 minut – to czas przelotu światła ze Słońca na Ziemię,
- 1 godzina – zajmuje podział jednej komórki w organizmie,
- 1 dzień – to czas pełnego obrotu Ziemi wokół jej osi,
- 1 rok – zajmuje okrążanie Słońca przez Ziemię,
- 0,1 sekundy – trwa mgnienie oka,
- 1 ns – to czas trwania jednej operacji na komputerze,
- 10 fs – jest okresem drgań światła emitowanego przez atom.

Nie dla wszystkich tych zjawisk zegar kwarcowy jest wystarczająco dobrym chronometrem. Dwa ostatnie przykłady wkraczają w zakres czasów tak krótkich, że do ich obserwacji potrzebny jest lepszy przyrząd. Takie możliwości mają zegary atomowe, gdzie oscylacji o stałej częstotliwości dostarczają rezonansowe przejścia w atomie cezu pomiędzy poziomami energetycznymi różniącymi się o 9.2 GHz. Atomy są schładzane do 2 K, aby wszystkie były prawie nieruchome – nie trzeba wówczas uwzględniać poprawek związanych z prędkością atomów. Wytrysk fontanny  $10^8$  atomów prowadzi się aż na 2 m, tak aby atomy przebywały jak najdłużej w obszarze, gdzie promieniowanie elektromagnetyczne odwraca spiny ich elektronów zapewniając przejście do stanu o wyższej energii. Można zliczyć, że 1 sekunda to czas trwania 9 192 631 770 okresów drgań fali świetlnej odpowiadającej emisji promieniowania

między dwoma poziomami nadsubtelnymi podstawowego stanu atomu  $^{133}\text{Cs}$  – i taka jest obecnie definicja sekundy. Pierwszy zegar atomowy powstał w Narodowym Laboratorium Fizycznym w Anglii w 1955 roku, a najbardziej stabilny zegar atomowy zbudowano w Instytucie Miar i Wag w Paryżu. Wzorzec czasu znajduje się w Boulder w Stanie Colorado w National Institute of Standards and Technology: czas zwany uniwersalnym czasem skoordynowanym jest tam ustalany z względną dokładnością  $10^{-15}$ , czyli 500 razy dokładniej niż 20 lat temu, na podstawie wskazań 200 zegarów atomowych. Niedokładność takich zegarów to 1 sekunda na 6 milionów lat. Zegar firmy Agilent z wiązką atomów cezu można już kupić za 63 tys. \$. Ma on dokładność  $10^{-13}$ , czyli dopiero po 80 latach spóźni się o 1 sekundę. Takie zegary działają jednak tylko 20 lat; krótki czas eksploatacji jest więc istotną wadą zegarów atomowych. W planie jest umieszczenie zegara atomowego na Międzynarodowej Stacji Kosmicznej, gdzie ze względu na mniejsze przyciąganie wysokość fontanny można będzie ograniczyć. Zadaniem będzie sprawdzenie, na ile czas zmierzony na orbicie blisko Ziemi będzie różny od zmierzonego na Ziemi.

Prowadzone są eksperymenty z budową czasomierzy opartych na innym źródle oscylacji niż atomy cezu. Zegary rubidowe mają mniejszy przekrój czynny na zderzenia. W zegarach z atomami wapnia  $^{40}\text{Ca}$  (badania w Federalnym Instytucie Fizyki i Metrologii w Brunshwiku w Niemczech) czy jonami indu częstotliwość emisji promieniowania przy przechodzeniu elektronu z jednego stanu do stanu o odwróconym spinie jest wyższa i wynosi około 500 THz. Są to urządzenia „tykające” z taką dużą częstotliwością, że pojawia się problem zliczania aż  $10^{16}$  cykli na sekundę – liczniki elektroniczne działają jedynie do mikrofal. W roku 1999 w Boulder zastosowano pomiar liczby cykli, wykorzystując impulsowy laser o częstotliwości 1 GHz z czasem trwania impulsu równym  $1/4$  femtosekundy, czyli kilku  $10^{-16}$  s, skonstruowany pierwszy raz w Instytucie Optyki Kwantowej w Garching w Niemczech. Można go również wykorzystać do liczenia cykli w zegarze zbudowanym z jednego jonu rtęci  $^{199}\text{Hg}^+$ . Na razie zegar jonowy działa stabilnie przez około 15 dni, a częstotliwość jego ‘tykania’ związana z przeskokami elektronu walencyjnego jest równa 1000 THz przy stabilności  $\pm 10$  Hz. W budowie współczesnych czasomierzy wykorzystywana jest wiedza z różnych działów fizyki i inżynierii. Potrzebne są: 1) lasery emitujące impulsy o czasie trwania równym jednej bilionowej części sekundy oraz 2) precyzyjne układy elektroniczne do zliczania w sekundzie gigantycznej liczby cykli promieniowania z przejść kwantowych w atomach i jonach, a także

3) odpowiednio skonstruowane układy pól elektromagnetycznych do ich unieruchomienia.

Duża dokładność pomiaru czasu za pomocą zegarów atomowych jest istotna dla GPS, czyli Globalnego Systemu Lokalizacji, gdyż umożliwia lepszą lokalizację satelitów oraz obszarów, gdzie wystąpiły trzęsienia ziemi czy wybuchy jądrowe, a także uszkodzeń sieci telekomunikacyjnych. Niedokładność 1 milionowej sekundy na zegarze atomowym satelity odpowiada błędowi odczytu położenia na Ziemi równemu 1/3 km. GPS to układ 28 satelitów wystrzelonych na wysokość 20 tys. m przez Departament Obrony Stanów Zjednoczonych w 1989 roku, kontrolowanych przez pięć naziemnych stacji odbiorczych. Informacje o położeniu i czasie, wysyłane w postaci sygnałów radiowych przez co najmniej cztery z nich, pozwalają wyliczyć z 'atomową precyzją' współrzędne i czas dla samochodu czy samolotu, na którym jest odbiornik GPS tak, że błąd nie przekracza 1m (przy użyciu dwóch odbiorników) i  $10^{-13}$  s. GPS jest obecnie w powszechnym użyciu. Reguluje automatycznie zegary systemów informatycznych, pomaga w nawigacji powietrznej i morskiej, może służyć w ustaleniu położenia poszczególnych wędrowców na całym świecie, jeśli tylko zaopatrzyli się w odpowiedni miniaturowy odbiornik. W systemie GPS jest miejsce na zastosowanie zegarów atomowych. Nie służyłyby one do pomiaru czasu, ale pozwoliłyby na zmniejszenie szerokości pasma częstości wysyłanych sygnałów, co utrudniłoby zasadniczo ich zagłuszenie.

**Bibl. Jag.**

Dla czasu dokładność pomiaru jest obecnie 1000 razy lepsza niż dla innych jednostek podstawowych. Na podstawie wzorca sekundy są definiowane jednostki długości (1 m to odległość pokonywana przez światło w czasie 1/299 792 458 s), świetlności oraz natężenia prądu. Można oczekiwać, że na podstawie definicji jednostki czasu będzie niedługo zdefiniowana również jednostka masy przy wykorzystaniu równania Einsteina  $E = mc^2$ .

Wkrótce dokładność pomiarów zbliży się do 17 miejsc po przecinku, co oznacza 1 ms niedokładności pomiaru czasu na 3 mln lat. Pojawia się wówczas problem względności czasu, który zaczyna być istotny już na poziomie codzienności: 1) ruch piechura zaczyna wpływać na oznaczony z taką dokładnością czas, 2) zegary na Mont Blanc będą szybsze o 30  $\mu$ s niż te na poziomie morza i można będzie tę różnicę zmierzyć. Pojawia się też trudności z porównaniem wskazań zegarów, gdyż ich synchronizacja z taką dokładnością jest niemożliwa. Ciekawe jest, że można będzie sprawdzić poprawność założenia o niezależności od czasu tzw. stałych fundamentalnych używanych w fizyce, np. takich, jak stała struktury

subtelnej  $\alpha \approx 1/137$ , co ma istotne znaczenie dla teorii takich, jak Model Standardowy.

Ultradokładnych wzorców czasu mogą w przyszłości dostarczyć chronometry, gdzie atomy tworzą kondensat Bosego–Einsteina<sup>1</sup>. Temperatura poniżej milikelwinów eliminuje oddziaływania pomiędzy atomami i powoduje spowalnianie ich ruchu.

### 3. Czas jako element czasoprzestrzeni

Do początku XX wieku fizycy uważali czas za wielkość całkowicie niezależną od przestrzeni, podobnie jak większość ludzi obecnie, kierując się potocznym odczuciem. Szczegółowa analiza matematycznego opisu zjawisk elektromagnetycznych, dokonana na przełomie wieków XIX i XX przez, m.in., H. Lorentza, H. Poincarégo oraz A. Einsteina, wykazała, że czas i przestrzeń nie mogą być traktowane rozłącznie. Ten zaskakujący wniosek został sformułowany przez A. Einsteina w roku 1905 w jego szczególnej teorii względności. Elegancką matematyczną postać nadał mu kilka lat później H. Minkowski, wprowadzając pojęcie czasoprzestrzeni. Założył on, że czterowymiarowa czasoprzestrzeń istnieje niezależnie od dziejących się w niej zjawisk fizycznych – jest sceną dla tych zjawisk. Jest ona płaska, nieskończona i pozbawiona brzegów. Gdyby czasoprzestrzeń była dwuwymiarowa, to jej obrazem geometrycznym byłaby zwykła płaszczyzna. Pod tym względem czas i przestrzeń w czasoprzestrzeni Minkowskiego nie różnią się od przestrzeni i czasu w teoriach fizycznych z wcześniejszych wieków. Nowością było odkrycie, że podział czasoprzestrzeni na czas i przestrzeń zależy do pewnego stopnia od obserwatora! Chodzi tutaj o podział analogiczny do intuicyjnie oczywistego podziału na kierunki poziome i kierunek pionowy, na przykład w pokoju o płaskiej, poziomej podłodze.

Niech fizyk  $O_2$  porusza się względem kolegi fizyka  $O_1$  ruchem prostoliniowym ze stałą szybkością  $v$ . Obaj postrzegają tę samą czasoprzestrzeń, a w niej zjawiska fizyczne podlegające prawom fizycznym mającym identyczną postać dla nich obu. Fizyk  $O_1$  parametryzuje kierunek czasowy wskazaniem posiadanego zegara, nie ma on też trudności z ustaleniem, że istnieją trzy wzajemnie prostopadłe kierunki przestrzenne. Potrafi on zmierzyć odstęp czasowy dzielący zdarzenia

<sup>1</sup> Cornell, Ketterle, Wieman – Nagroda Nobla w roku 2001.



fizyczne i ich wzajemną odległość w przestrzeni. Fizyk  $O_2$  postrzega te same zdarzenia fizyczne, co jego kolega. Używając takiego samego jak  $O_1$  zegara i miarki odległości, wyznacza odstępy czasowe i odległości między zdarzeniami. Otóż otrzyma on wyniki inne niż  $O_1$ ! Różnica zależy od stosunku szybkości  $v$  do szybkości światła w próżni  $c$  i jest bardzo mała, gdy szybkość  $v$  ma wartości spotykane w codziennym życiu (pomijamy tutaj osoby pracujące przy akceleratorach cząstek, gdzie typowe szybkości cząstek są bardzo bliskie  $c$ ). Niech na przykład dwa zdarzenia dzieli według fizyka  $O_1$  1 sekunda i niech zachodzą one w tym samym miejscu przestrzeni – może to być włączenie lampy stojącej na biurku fizyka  $O_1$  i zgaszenie jej sekundę później. Fizyk  $O_2$ , przejeżdżający w pobliżu samochodem z szybkością 60 km/godz., stwierdzi, że lampa świeciła dłużej, o  $1,5 \cdot 10^{-15}$  s ponad 1 sekundę. Gdyby pojazd fizyka  $O_2$  poruszał się z szybkością 0,866  $c$ , to zaobserwowany czas świecenia lampy byłby równy 2 sekundy. Dla coraz większych szybkości (ale oczywiście mniejszych od  $c$ ) czas ten może być dowolnie wydłużony. To, że czasy świecenia lampy zmierzone przez  $O_1$  i  $O_2$  są różne, związane jest z tym, że dla  $O_2$  włączenie i zgaszenie lampy następują w różnych punktach przestrzeni. Z jego punktu widzenia budynek, w którym  $O_1$  ma gabinet, porusza się ruchem prostoliniowym z szybkością  $-v$ .

Oto inny przykład względności relacji czasowych i przestrzennych. Niech fizyk  $O_1$  ma na biurku dwie lampy stojące w odległości 1 m od siebie, które włączył równocześnie. Przyjmijmy dla uproszczenia, że linia łącząca lampy jest równoległa do ulicy, po której porusza się fizyk  $O_2$ . Obserwując lampy, stwierdzi on, że ta, którą mija jako pierwszą, była włączona później niż druga, zaś odległość między lampami jest mniejsza niż 1 m.

Obecnie fizycy nie mają żadnych wątpliwości co do realności takich efektów. W sformułowaniu matematycznym, którego szczegółów nie będziemy tu omawiać, oznacza to, że wyróżnienie w czasoprzestrzeni kierunku czasowego i kierunków przestrzennych dokonane przez  $O_1$ ,  $O_2$  różni się. W szczególności, kierunek czasowy ustalony przez  $O_2$  jest kombinacją liniową kierunku czasowego i kierunków przestrzennych fizyka  $O_1$ , której współczynniki zależą od prędkości  $O_2$  względem  $O_1$ .

Należy dodać, że nie oznacza to, iż kierunek czasowy i liczniki przestrzenne są równoważne. Nie jest możliwe, by kierunek czasowy fizyka  $O_2$  pokrywał się z jednym z kierunków przestrzennych fizyka  $O_1$ . W czasoprzestrzeni Minkowskiego kierunki czasowe są wyraźnie oddzielone od kierunków przestrzennych zgodnie z odczuciem, że czas to

coś zupełnie innego niż przestrzeń. Opisana wyżej dowolność dotyczy jedynie domieszek kierunków przestrzennych do kierunku czasowego lub *vice versa*, ale domieszki te zawsze są zbyt małe, by przekształcić kierunek czasowy w przestrzenny lub odwrotnie.

Czasoprzestrzeń Minkowskiego jest dobrym opisem relacji czasowo-przestrzennych, gdy można zaniedbać siły grawitacyjne. Około roku 1915, dziesięć lat po sformułowaniu szczególnej teorii względności, A. Einstein podał teorię grawitacji zwaną także ogólną teorią względności. Zawarte jest w niej uogólnienie czasoprzestrzeni Minkowskiego na czasoprzestrzenie o charakterze pseudoriemannowskim. W kwestii natury czasu ogólna teoria względności nie wnosi nic nowego – jest on nadal elementem czterowymiarowej czasoprzestrzeni, której istnienie jest przyjęte jako założenie pierwotne. Co więcej, lokalnie, tzn. w odpowiednio małym otoczeniu danego punktu przestrzeni i odpowiednio małym przedziale czasowym obejmującym daną chwilę czasu, czasoprzestrzeń jest równoważna czasoprzestrzeni Minkowskiego (w języku matematyki: przestrzeń styczna do czasoprzestrzeni jest taka sama, jak czasoprzestrzeń Minkowskiego).

Szczegółowe metryczne własności czasoprzestrzeni w ogólnej teorii względności są obliczane z równań Einsteina, słynnych m.in. z powodu swej złożoności. Znalaziono wiele rozwiązań tych równań. Jest wśród nich czasoprzestrzeń Minkowskiego, ale także tzw. czarne dziury i fale grawitacyjne. Czasoprzestrzeń przewidywana równaniami Einsteina zwykle jest zakrzywiona, podczas gdy czasoprzestrzeń Minkowskiego jest płaska. Ich analogonami mogą być, odpowiednio, zakrzywione powierzchnie i płaszczyzna w przestrzeni trójwymiarowej. Zakrzywienie czasoprzestrzeni odczuwamy jako siłę grawitacyjną – tym większą, im większe zakrzywienie. Czarna dziura to obszar wokół miejsca, gdzie zakrzywienie osiąga wartość nieskończoną – analogią byłby ostry występ (szpic) na powierzchni.

Równania Einsteina przewidują istnienie 'dziwnych' czasoprzestrzeni, których własności niepokoją niektórych teoretyków. Chodzi o czasoprzestrzenie z tzw. zamkniętymi krzywymi czasowymi. Nie wchodząc w szczegóły, krzywe czasowe reprezentują ruch cząstek o niezerowej masie spoczynkowej (są to tzw. linie świata tych cząstek). Zamkniętość linii czasowej oznacza, że cząstka po wykonaniu realnego ruchu wraca po jakimś czasie do położenia początkowego i chwili początkowej! Istnieją też rozwiązania, w których cząstka wraca do punktu wyjścia w chwili wcześniejszej, niż z niego wyruszyła. Mogłoby się wydawać, że takie rozwiązania prowadzą do paradoksów podważających zasadę przyczyno-

wości. Na przykład, kosmonauta wyrusza w podróż rakieta, wraca do kosmodromu przed chwilą startu i uszkodza rakieta, co uniemożliwia jej start, który przecież jednak się wydarzył.

Zasada przyczynowości, obojętne w jakim sformułowaniu, nie jest jakimś pierwotnym, nadrzędnym prawem fizycznym. Jest to jedynie pewna własność układów fizycznych, wynikająca (lub nie) z zapostulowanych równań ruchu dla tych układów. Na przykład, klasyczna zasada przyczynowości, mówiąca, że położenie i prędkość cząstki w pewnej chwili determinuje przy zadanym polu sił jej położenie i prędkość w chwilach późniejszych, traci ścisły sens po zastąpieniu teorii klasycznej przez ogólniejszą od niej teorię kwantową (pozostaje jednak prawdziwa w pewnym przybliżonym znaczeniu). W szczególności, okazuje się, że ewolucja czasowa charakteryzuje się pewnym teleologizmem. Chodzi o to, że często linię świata cząstki otrzymuje się z tzw. zasady stacjonarnego działania, zakładając, jakie są jej położenia początkowe i końcowe. Prędkość i położenie cząstki w chwilach pośrednich między chwilą początkową i końcową są wtedy jednoznacznie określone przez przyjęte położenia początkowe i końcowe. Można powiedzieć, że cząstka dobiera położenia i prędkości w chwilach pośrednich tak, by osiągnąć zadane położenie końcowe. Właśnie ów teleologizm pozwala na uniknięcie wyżej wspomnianego paradoksu: skoro kosmonauta zdołał wystartować, to po powrocie do kosmodromu przed chwilą startu nie będzie miał on fizycznej możliwości uszkodzenia rakiety.

Czasoprzestrzeń jest niewątpliwie pojęciem bardzo użytecznym. Pozwala ono zastosować metody matematycznej teorii różnicowości do badania oddziaływań grawitacyjnych. Bardzo ułatwia konstruowanie teorii fizycznych zgodnych ze szczególną teorią względności, tzn. niezmienniczych względem transformacji Lorentza. Pociągająca jest również matematyczna elegancja, jaką uzyskują teorie fizyczne w takim czterowymiarowym ujęciu<sup>2</sup>. Niemniej jednak nie jest pewne, czy taka unifikacja czasu i przestrzeni jest najlepszym ich opisem. Jest ona sprzeczna z elementarnym odczuciem, że przestrzeń jest statyczna, zaś czas 'płyne'. Inaczej mówiąc, zwykle patrzymy na zjawiska fizyczne, jak na film rozwijający się migawka po migawce z upływem czasu. Takie

---

<sup>2</sup> Notabene, H. Minkowski należał do grupy współpracowników D. Hilberta, który starał się zrealizować swój ambitny program geometryzacji fizyki. Był to zamiar przekształcenia fizyki w dział matematyki. Program ten dał kilka istotnych wyników; najbardziej znane z nich to koncepcja czasoprzestrzeni Minkowskiego oraz twierdzenia E. Noether o związku symetrii funkcjonału działania z całkami ruchu. Po powstaniu mechaniki kwantowej w roku 1925 stało się jasne, że program ten nie jest wykonalny w rozsądnym czasie.

ujęcie zjawisk fizycznych jest charakterystyczne dla tzw. ujęcia hamiltonowskiego omawianego niżej. Tymczasem w ujęciu czasoprzestrzennym podajemy położenia badanego układu fizycznego we wszystkich chwilach jednocześnie. Na przykład, ruch cząstki punktowej jest reprezentowany przez linię (linię świata cząstki), a nie przez położenie i prędkość (lub pęd) cząstki w przestrzeni w kolejnych chwilach czasowych.

Ujęcie czasoprzestrzenne praw fizyki święciło triumfy do czasu powstania mechaniki kwantowej, dzięki której po roku 1925 nastąpił renesans ujęcia hamiltonowskiego znanego w mechanice klasycznej już w wieku XIX. Einstein pozostał mu wierny do końca, ale jego próby stworzenia teorii unifikującej oddziaływania elektromagnetyczne i grawitacyjne, oparte głównie na rozszerzaniu koncepcji czasoprzestrzeni, nie powiodły się. Niektóre współczesne próby rozwinięcia (lub zastąpienia) koncepcji czasoprzestrzeni wymieniamy w końcowej części artykułu. W zakończeniu tego rozdziału dodajmy, że ogólna teoria względności przy całej swej złożoności i niezwykłości ma już zastosowanie techniczne: teoretyczne podstawy systemu GPS są oparte na obu teoriach względności. Jest to świetna ilustracja znanego powiedzenia, że „nie ma nic bardziej praktycznego niż dobra teoria”.

#### 4. Czas jako parametr ewolucji

Obie teorie względności dają geometryczne spojrzenie na czas. W fizyce teoretycznej istnieją też sformułowania praw fizycznych takie, że czas w nich występujący nie musi być elementem czasoprzestrzeni. Nazwiemy je sformułowaniami hamiltonowskimi<sup>3</sup> dynamiki cząstek. Czas pełni w nich rolę parametru ewolucji układów fizycznych, zaś przestrzeń pojawia się jako zbiór możliwych położenia cząstek. W rozważaniach z zakresu fizyki różnice między geometrycznym i hamiltonowskim wprowadzeniem czasu na ogół nie mają istotnego znaczenia, ale z ontologicznego punktu widzenia są one kolosalne. W ujęciu hamiltonowskim czas i przestrzeń nie istniałyby, gdyby nie istniała materia – są one wprowadzane, by opisać zachowanie się układów fizycznych. Przestrzeń jest zbiorem położenia obiektów materialnych (dlatego często jest nazywana przestrzenią konfiguracyjną danego obiektu), zaś czas jest

---

<sup>3</sup> Nazwę tę wprowadzamy na potrzeby niniejszego artykułu. Ma ona szerszy zakres niż w fizyce: obejmujemy nią także znane z fizyki teoretycznej ujęcia lagranżowskie.

wprowadzony by móc opisać zjawisko ruchu tych obiektów, tzn. zmiany ich położenia. Ujęcie takie podkreśla różnicę między czasem a kierunkami przestrzennymi. W szczególności, powyższa definicja przestrzeni implikuje, że obiekt materialny może być przemieszczany w przestrzeni, natomiast przesuwanie obiektu w czasie nie jest przewidywane. Sformułowanie hamiltonowskie jest zbyt wąskie, by umożliwić chociażby teoretyczne rozważania na temat przemieszczania obiektów fizycznych w czasie. Ta cecha sformułowania hamiltonowskiego odzwierciedla fakt, że nie zbudowano jeszcze wehikułu do swobodnego przemieszczania się w czasie.

Sformułowania hamiltonowskie dominują w kwantowych teoriach cząstek. Przyjrzyjmy się standardowej mechanice kwantowej jednej cząstki w trójwymiarowej przestrzeni. Położenie cząstki w przestrzeni jest zaliczane do zbioru obserwabli, odpowiada mu pewien hermitowski operator określony w przestrzeni Hilberta stanów cząstki, podobnie jak jej energii i pędowi. Nie wprowadza się żadnego operatora czasu – czas nie jest obserwabłą. Jest jedynie pewną współrzędną (zmienną niezależną) występującą w kwantowym równaniu ruchu, tj. w równaniu Schroedingera. Zakres jej wartości zależy od postaci kwantowego hamiltonianu (czyli operatora energii). W wypadku naszej cząstki punktowej w przestrzeni jest to cała oś liczbowa, ale na przykład dla prostego układu z dwoma poziomami energetycznymi, a także dla oscylatora harmonicznego, całkowicie wystarcza odcinek skończony. W tym ostatnim przykładzie hamiltonowski czas jest okresowy. Ma on własności analogiczne do kąta obrotu – po osiągnięciu maksymalnej wartości ( $2\pi$  w wypadku obrotów) wraca do wartości początkowej.

Obecnie wiemy, że świat jest kwantowy – teorie kwantowe lepiej opisują zjawiska fizyczne niż teorie klasyczne. To, że czas, który odczuwamy, nie jest okresowy wynika ze złożoności hamiltonianu kwantowego dla całej materii. Hamiltonian taki ma ciągły zbiór poziomów energetycznych. W tym sensie złożoność świata materialnego jest przyczyną, że czas nie jest periodyczny.

Akceptując fakt, że teorie kwantowe cząstek, a zatem i sformułowanie hamiltonowskie ich dynamiki, są bardziej podstawowe, stajemy wobec pytania, jak stąd dojść do czasoprzestrzeni rozważanych w obu teoriach względności. Jest to bardzo trudny problem, a jego pełne rozwiązanie nie jest znane. Rozwiązanie takie, jak się obecnie uważa, wymagałoby między innymi podania kwantowej teorii grawitacji.

W ramach kwantowej teorii grawitacji Einsteinowską czasoprzestrzeń otrzymalibyśmy jako pewne przybliżenie, analogiczne do przybliżenia

klasycznego w mechanice kwantowej cząstek. Jak pokazał Feynman, można uważać, że cząstka kwantowa porusza się jednocześnie po wielu trajektoriach. Przytłaczająca większość owych trajektorii ma nieskończenie wiele ostrych załamania (matematycznie: trajektorie są ciągłe, lecz nie muszą być różniczkowalne). Niemniej w przybliżeniu klasycznym dominuje zwykle jedna trajektoria, która jest gładka i spełnia znane z mechaniki klasycznej równania Newtona. Analogicznie, w kwantowej teorii grawitacji mielibyśmy wiele czasoprzestrzeni; większość z nich nie byłaby gładka, ale w przybliżeniu klasycznym dominowałaby czasoprzestrzeń gładka, spełniająca równania Einsteina znane z ogólnej teorii względności. Niestety, dotychczas kwantowej teorii grawitacji nie udało się stworzyć. Nie ułatwia pracy fizykom fakt, że nie jest znane żadne zjawisko fizyczne jednoznacznie wskazujące na potrzebę wprowadzenia kwantowej teorii grawitacji. Motywacja dla takiej teorii jest czysto teoretyczna. Te trudności spowodowały, że wielu fizyków teoretyków sądzi, iż być może potrzebne jest bardziej radykalne podejście. O niektórych próbach wzmiankujemy w następnym paragrafie.

Mniej ambitny program ma na celu 'pogodzenie' teorii kwantowych cząstek z czasoprzestrzenią Minkowskiego. Z fizycznego punktu widzenia odpowiada to sytuacji, gdy pole grawitacyjne jest na tyle słabe, że możemy je zaniedbać. Na tym poziomie rozwiązanie jest znane, głównie dzięki pracom P.A.M. Diraca z końca lat dwudziestych i E. Wignera z lat czterdziestych XX wieku. W wariacie uboższym, znanym jako relatywistyczna mechanika kwantowa, występują pewne dotkliwie mankamenty. Wariant pełny, znany jako relatywistyczna kwantowa teoria pola, jest zadowalający, ale oczywiście oddziaływania grawitacyjne są zupełnie pominięte. Udowadnia się, że kwantowa teoria cząstek w sformułowaniu hamiltonowskim wynika z teorii pól kwantowych określonych na czasoprzestrzeni Minkowskiego. Oczywiście, nie ma tutaj mowy o jakiejś kwantowej czasoprzestrzeni Minkowskiego. Czasoprzestrzeń tu występująca nie jest powiązana z jakimiś cząstkami – jest to tylko scena, na której istnieją pola. Obiektami pierwotnymi są czasoprzestrzeń oraz pola. Cząstki pojawiają się jako obiekty pochodne, wywodzone z pola, co uwidocznione jest w ogólnej nazwie tych cząstek: kwanty pola. Dotyczy to również obserwabli związanych z cząstkami, w tym także operatora położenia. W kwantowej teorii pól czas i przestrzeń są zapostulowane od razu w postaci czasoprzestrzeni Minkowskiego. Trójwymiarowa przestrzeń konfiguracyjna, tj. przestrzeń będąca zbiorem możliwych położenia cząstek, jest w ramach kwantowej teorii pól konstruowana jako obiekt pomocniczy. Dla wielu zastosowań tej teorii nie ma ona większego

znaczenia. Podsumowując, w ramach kwantowej teorii pól określonych na czasoprzestrzeni Minkowskiego można uzyskać równania mechaniki kwantowej dla cząstek, a także skonstruować operator położenia cząstek. W tym sensie ujęcie hamiltonowskie dynamiki cząstek jest zawarte w ujęciu czasoprzestrzennym kwantowej teorii pól.

## 5. Próby odrzucenia czterowymiarowej czasoprzestrzeni

W poprzednich dwu paragrafach mówiliśmy o czasie w teoriach mających empiryczne potwierdzenia: szczególnej teorii względności, klasycznej (tj. niekwantowej) teorii pola grawitacyjnego oraz kwantowej teorii pól na czasoprzestrzeni Minkowskiego. W teoriach tych czasoprzestrzeń jest pojęciem pierwotnym, co znaczy, że istnieje ona jako scena dla zjawisk fizycznych. Co więcej, przyjmuje się, zgodnie z obserwacjami, że czasoprzestrzeń zawiera jeden kierunek czasowy i trzy kierunki przestrzenne.

Podjęto wiele prób wyjścia poza te ramy. Na przykład, proponowano teorie, w których czasoprzestrzeń ma kilka kierunków czasowych i więcej niż trzy kierunki przestrzenne. Oczywiście, autorzy tych propozycji podają mniej lub bardziej przekonujące argumenty, że w 'zwyczajnych' zjawiskach nadal będziemy obserwować jeden czas i trzy kierunki przestrzenne. Istnieje też co najmniej jedna teoria, w której w ogóle nie postuluje się kierunków przestrzennych – wystarcza tylko czas. W teorii tej konstruuje się odpowiednik przestrzeni, przy czym w pewnej granicy ma on znane nam własności przestrzeni. Próbowano także wprowadzać czas jako pewną użyteczną zmienną pomocniczą w teoriach przestrzeni i materii (J. Wheeler – B. deWitt, J. Barbour i współpracownicy).

W najdalej idących próbach odrzuca się całkowicie postulat o istnieniu czasoprzestrzeni na poziomie fundamentalnym. Przyjmuje się, że gładka czasoprzestrzeń jest pewnym przybliżeniem, które jest bardzo dobre, jeśli chodzi o zjawiska niewymagające znaczących zmian wielkości fizycznych na odległościach rzędu  $10^{-33}$  cm (jest to tzw. długość Plancka) i w przedziałach czasowych rzędu  $10^{-43}$  s. Natomiast dla pozostałych procesów należy używać zupełnie innego opisu. Niektóre propozycje są konstruowane na podstawie doniosłych wyników uzyskanych w matematyce współczesnej, np. w dziedzinie geometrii nieprzemiennej. Zapoznać się z nimi można korzystając z książki M. Hellera

*Początek jest wszędzie*, w której autor przedstawił także interesującą własną propozycję.

Inna grupa modeli jest oparta na kwantowych teoriach obiektów, takich jak struny lub membrany relatywistyczne. Ich istnienie jest przyjmowane jako postulat. W tym wypadku zarówno czasoprzestrzeń, jak i pola kwantowe w niej istniejące, łącznie z polem grawitacyjnym, są przybliżonym opisem kwantowej teorii takich obiektów. Kwantowe teorie strun i membran są tak bogate, że istnieją w nich dobre odpowiedniki dla czasu, przestrzeni oraz całej znanej materii. W szczególności, nasze ciała byłyby przemyślnymi kompozycjami kwantów drgań struny!

Teorie oparte na geometriach nieprzemiennych oraz kwantowe teorie strun i membran fascynują wielu fizyków teoretyków. Pozwalają one spojrzeć na znane teorie fizyczne z nowej, niezwykle interesującej perspektywy. Co więcej, podczas ich badania są tworzone i rozwijane narzędzia fizyki teoretycznej, które okazują się przydatne w wielu innych badaniach, na przykład z zakresu fizyki przejść fazowych lub fizyki cząstek elementarnych. Z drugiej strony, szanse na bezpośrednią przydatność owych teorii do opisu realnych zjawisk fizycznych w nieodległej przyszłości są niewielkie. Przyrządy fizyczne jeszcze przez długi czas będą niewystarczające dla 'zobaczenia' efektów, które dają się wyjaśnić jedynie poprzez rezygnację z klasycznej czasoprzestrzeni.

## 6. Zakończenie

1. Dlaczego problem czasu jest tak trudny? Można przypuszczać, że jest to związane z globalnym charakterem zjawiska czasu. Fizyka jest bardzo mocna w rozwiązywaniu problemów dotyczących wąskich klas zjawisk lub obiektów. O wiele gorzej idzie rozwiązywanie problemów związanych z globalnymi własnościami świata materialnego. Kwestie takie, jak topologia lub wymiar czasoprzestrzeni, istnienie czasu, są znane od dawna, lecz postęp w ich rozwiązywaniu jest niemal niedostrzegalny.

2. Literatura dotycząca problemu czasu jest bardzo obszerna. W krótkim czasie autorzy niniejszego artykułu zgromadzili ponad 100 preprintów tylko z ostatnich kilku lat. Istnieje sporo pozycji książkowych, także w języku polskim (na przykład Z. Augustynka *Natura czasu* lub S. Snihura *Czas i przemijanie*). Problemowi czasu poświęcono międzynarodowe konferencje naukowe. Przy Uniwersytecie im. Łomonosowa w Moskwie istnieje Institute of Time Nature Explorations założony



w roku 1986. Specjalny numer „Świata Nauki” (czyli polskiego wydania „Scientific American”) z listopada 2002 roku jest zatytułowany *Czym jest czas?* i w całości poświęcony różnym aspektom problemu czasu.

3. Zacytujmy fragment arcydzieła z XIV wieku *Obłok niewiedzy* (przekład z języka angielskiego W. Unolta, W drodze, Wydawnictwo Polskiej Prowincji Dominikanów, 2001).

„Troszcz się zatem bardzo o to, jak przepędzasz czas. Nic nie jest bardziej cenne. W mgnieniu oka zyskać można lub utracić niebo. Bóg ukazuje, jak cenny jest czas, przez to że nie daje nigdy dwóch chwil jednocześnie, lecz zawsze jedną po drugiej”.