

Jarosław Kukowski

Uwagi w sprawie tzw. strzałki czasu

Studia Philosophiae Christianae 26/1, 23-40

1990

Artykuł został zdigitalizowany i opracowany do udostępnienia w internecie przez Muzeum Historii Polski w ramach prac podejmowanych na rzecz zapewnienia otwartego, powszechnego i trwałego dostępu do polskiego dorobku naukowego i kulturalnego. Artykuł jest umieszczony w kolekcji cyfrowej bazhum.muzhp.pl, gromadzącej zawartość polskich czasopism humanistycznych i społecznych.

Tekst jest udostępniony do wykorzystania w ramach dozwolonego użytku.

JAROSŁAW KUKOWSKI -

UWAGI W SPRAWIE TZW. STRZAŁKI CZASU

1. Wstęp. 2. Druga zasada termodynamiki. 3. Pojęcie (nie)odwracalności zjawisk. 4. (Nie)odwracalność złożonych procesów fizycznych. 5. Entropia a grawitacja. 6. Wzrost czy maleńie entropii? 7. Miara i kierunek czasu a entropia. 8. Odwracalność kierunku upływu czasu. 9. Kilka uwag o punkcie wyjścia do dyskusji problemu.

1. WSTĘP

Specyfika problemu kierunkowego upływu czasu polega na tym, że znajduje się on niejako na pograniczu filozofii przyrody i fizyki teoretycznej (jeżeli spojrzeć na niego od strony zjawisk zachodzących w świecie materii nieożywionej) lub na pograniczu fenomenologii czasu i psychologii (jeżeli zwrócimy się ku naszemu ludzkiemu odczuwaniu i poznawaniu tego świata). A ponadto wszystko ma również swoją perspektywę metafizyczną, która skłania nas do chęci zrozumienia jedności i racjonalności świata. Problem strzałki czasu jest do dziś otwarty, to znaczy, że żadne proponowane rozwiązanie nie jest ostateczne i obowiązujące, czego dowodem jest bogata literatura obfitująca w komentarze, polemiki, przyczynki i przyczynki do przyczynków itp. Wielowątkowość, wieloaspektowość i szeroki, bogaty kontekst problemu sprawia realną trudność w jego prezentacji, a tym bardziej w jego dyskusji, gdyż trudno jest — jeżeli nie niemożliwe — mówić o jednej kwestii w wielu aspektach na raz. Próby redukcji pewnych aspektów prowadzą do uproszczeń, które najczęściej pociągają za sobą zafałszowania w rozwiązaniu problemu. Wszystko to sprawia trudność w całościowym przedstawieniu problemu. Z uwagi na interdyscyplinarność tego zagadnienia występuje możliwość istnienia bariery utrudniającej dojście do rozwiązania, a polegającej na braku wspólnego języka, tzn. jednakowego rozumienia pojęć i terminów używanych w dyskusji albo też braku jednakowego przetransponowania problemu z pojęć zdroworozsądkowych na pojęcia i terminy odpowiedniej dziedziny wiedzy.

W problemie strzałki czasu można wyróżnić wiele kwestii z których kilka można sformułować następująco:

1. Czy o nieodwracalności czasu decyduje jakiś proces fizyczny czy też nie?
2. Czy o odwróceniu czasu świadczyłoby pojawienie (zaistnienie) początkowego stanu (zdarzenia) A, czy też konieczne byłoby wystąpienie stanów pośrednich B, C, D, (wcześniej zaistniałych) w odwróconej kolejności?
3. Czy odwrócenie kierunku upływu czasu może rozpoznać obserwator postrzegający zjawiska?
4. Czy istnieje związek odwracalności czasu z przyczynowością?
5. Czy można mówić o odwracalności kierunku upływu czasu w różnych znaczeniach odwracalności (np. globalnej, lokalnej)?
6. Czy odwracalność czasu ma jakikolwiek sens fizyczny, czy tylko teoretyczny?

Nie jest to, rzecz jasna, pełna lista pytań. Pojawią się również pytania postaci: jak i dlaczego?

Celem pracy jest przedstawienie aktualnego stanu badań w odniesieniu do zagadnienia strzałki czasu.

2. DRUGA ZASADA TERMODYNAMIKI

Historycznie pierwszym i do dziś najczęściej obarczonym odpowiedzialnością za kierunkowy upływ czasu procesem jest wzrost entropii. Prawo wzrostu entropii jest wyrazem drugiej zasady termodynamiki. W literaturze spotykamy różne jej sformułowania. Oto niektóre z nich:

- (Clausius) — niemożliwy jest taki proces termodynamiczny, którego jedynym rezultatem byłoby przekazanie ciepła przez ciało chłodniejsze ciału bardziej nagrzanemu.
- (Kelwin) — niemożliwy jest taki proces termodynamiczny, którego jedynym rezultatem byłoby pobranie pewnej ilości ciepła przez układ i wykonanie przez układ pracy.
- (Boltzman) — przyroda ma tendencje przechodzenia od stanów mniej prawdopodobnych do stanów bardziej prawdopodobnych¹.

¹ J. Blinowski, *Fizyka dla kandydatów na wyższe uczelnie*, Warszawa 1981.

Prawo wzrostu entropii w języku termodynamiki statystycznej można sformułować następująco:

- procesy fizyczne w układach złożonych i wysoce uporządkowanych dążą do zmniejszenia stopnia uporządkowania, albo inaczej
- „...układ izolowany utrzymuje swój stan porządku albo przechodzi do stanu o wzrastającym braku porządku”².

Nie zawsze pamięta się o tym, że pojęcie porządku (nieporządku) jest pojęciem względnym w tym sensie, że ta sama sytuacja może być uporządkowana pod jednym względem, ale nieuporządkowana pod jakimś innym np: wektory prędkości cząstek mogą być ułożone koncentrycznie lub równolegle. Te „względy” to nic innego jak pewne reguły, warunki nakładane na masę, prędkość, położenie, kierunek, rozkład prędkości i ich kombinację, a będące podstawą uporządkowania układu³. Mimo istnienia tych różnych porządków mówi się, że entropia w ramach teorii kinetycznej lub mechaniki statystycznej jest identyfikowana ze stopniem nieuporządkowania układu⁴. Entropia układu jest mała, kiedy układ jest wysoce uporządkowany lub kiedy konfiguracja położenia i prędkości jego cząsteczek jest bardzo mało prawdopodobna. Maksymalna entropia układu odpowiada konfiguracji najbardziej prawdopodobnej. Jednakże trzeba stwierdzić, że taka interpretacja entropii w języku mechaniki statystycznej nie jest jednoznaczna, ponieważ można mówić o różnych rodzajach minimalnego stopnia nieuporządkowania, ale o jednym rodzaju niskiej entropii. Taki stan rzeczy powoduje trudności przy rozważaniu problemu odwracalności entropii.

3. POJĘCIE (NIE)ODWRACALNOŚCI ZJAWISK

Nieodwracalność zjawisk jest oddzielnym i szerokim problemem. Z konieczności ograniczymy się do pewnych tylko jego aspektów. W swym klasycznym sformułowaniu problem brzmi: jak można pogodzić nieodwracalność makroprocesów z odwracalnością mikroprocesów. Nie jest to pytanie najszcześliwiej postawione, aczkolwiek bywa tak formułowane.

² R. Schlegel, *Time and Entropy, w: Time in Science and Philosophy*, Academia, Prague 1971.

³ J. Earman, *An Attempt to Add a Little Direction to „The problem of the Direction of Time”*, *Phil. Sci.* 41(1974), 15—47.

⁴ L. N. Cooper, *Istota i struktura fizyki*, Warszawa 1975.

Zauważmy, że można tu mówić albo o (nie)odwracalności procesów zachodzących w elementarnym, izolowanym układzie termodynamicznym, albo o (nie)odwracalności w złożonych procesach fizycznych obserwowanych w świecie podpadającym pod nasze zmysły.

W pierwszym przypadku — jak wiemy — cząsteczki gazu pozostawione (same sobie) w bardzo mało prawdopodobnych warunkach początkowych (sprężony gaz w jednym narożniku zbiornika) w wyniku niezliczonej liczby odwracalnych (potencjalnie) zdarzeń będą zmierzać do równomiernego wypełnienia zbiornika osiągając bardziej prawdopodobny stan od początkowego. Proces ten jest nieodwracalny w sensie termodynamicznym. Pamiętajmy, że proces odwrotny nie jest niemożliwy, jest jedynie wielce nieprawdopodobny. To „nieprawdopodobieństwo” rośnie wraz ze wzrostem liczby cząsteczek składających się na rozpatrywany układ, ale też maleje gdy maleje ich liczba. Im mniej jest ich w gazie tym bardziej zmniejsza się dysproporcja między ilością makrostanów mało prawdopodobnych i wielce prawdopodobnych (wiąże się to z ilością możliwych do zrealizowania mikrostanów). Zmniejszając więc liczbę cząsteczek w układzie izolowanym (z miliardów do kilkuset, kilkudziesięciu) skracamy tym samym czas naszego oczekiwania na zaobserwowanie zjawiska jakim jest samorzutne malenie entropii (jednakże entropia przestaje być w tym momencie dobrze określoną funkcją).

Powróćmy jednak do układów w dosłownym tego słowa znaczeniu wielocząsteczkowych, w których to bezpiecznie nie narażając się na krytykę można sformułować prawo wzrostu entropii⁵.

Zauważmy, że pytanie: jak można pogodzić nieodwracalność makroprocesów z odwracalnością mikroprocesów? — nabiera konkretnego znaczenia gdy jest rozważane jako pytanie o pogodzenie nieodwracalności procesów wielocząsteczkowych z odwracalnością procesów złożonych z dwu cząsteczek. Przejście z jednego poziomu na drugi (interpretacja temperatury i entropii w języku termodynamiki statystycznej) łączy się z uśrednieniem pewnych wielkości fizycznych, co sprawia, że prawo uzyskane na tej drodze nie jest prawem w ścisłym tego słowa znaczeniu (nie ma nomologicznej konieczności).

R. Penrose mówi wręcz, że entropia jest wielkością subiektywną w tym sensie, że jej definicja związana jest z procedu-

⁵ R. Schlegel, *Time and Entropy*, 30.

rażą tzw. *coarse-graining* (wygładzanie, wyśrednianie, drobnych, nieistotnych szczegółów), czyli dowolnym do pewnego stopnia grupowaniem stanów fizycznych w większe klasy w których poszczególne stany są traktowane jako nieodróżnialne od siebie makroskopowo⁶. Równoważne temu jest stwierdzenie, że symetria równań ruchu jest łamana dzięki dodatkowym założeniom (stąd się bierze brak ścisłości w przejściu między poziomami). „Sposzczerzenie, że procedury łamiące symetrię równań ruchu mają charakter dodatkowych założeń probabilistycznych (niemechanicznych), doprowadziło wielu fizyków do poglądu, że nieodwracalność jest tylko złudzeniem spowodowanym tym, iż obserwujemy po prostu ewolucję układów od stanów mniej do stanów bardziej prawdopodobnych, nie obserwujemy natomiast makroskopowo naruszeń drugiej zasady termodynamiki, gdyż naruszenia takie są bardzo mało prawdopodobne (...). Jest to procedura typu: mechanika plus jakiś rozkład prawdopodobieństwa dają w wyniku prawo wzrostu entropii”⁷. Jednym z tych wątpiących fizyków był M. Smoluchowski, który „...w ślad za Poincare’em dochodzi do zrozumienia faktu, iż zjawiska odwracalne nie różnią się w sposób absolutny od nieodwracalnych. A więc nieodwracalność procesów termodynamicznych nie podważa mechaniki klasycznej pod warunkiem statystycznej interpretacji drugiej zasady. Proces przedstawia się nam jako odwracalny, jeśli stan, o który chodzi ma w stosunku do trwania obserwacji krótki czas powrotu. Jeśli zaś czas ten jest długi uważamy zjawisko za nieodwracalne”⁸.

Zauważmy, że tutaj (nie)odwracalność ujawnia nam się również jako własność względna (relatywna) do naszych ludzkich odczuć co do długości interwałów czasowych. O odwracalności układu termodynamicznego (wielocząsteczkowego) można się przekonać obserwując go bardzo (nieskończenie?) długo. Jak już wcześniej zauważyliśmy, czas oczekiwania na żądany proces odwrotny skrócić możemy, jeżeli w znaczny sposób zmniejszymy ilość cząsteczek w układzie.

Jeszcze szerzej widzi tę sprawę Earman, aczkolwiek trochę z innej strony podchodzi do tego tematu. Problem ten u niego

⁶ R. Penrose, *Singularities and Time — Asymetry*, w: S. W. Hawking, W. Israel, (ed), *General Relativity*, Cambridge Univ. Press 1979.

⁷ A. Fuliński, *Nieodwracalność*, w: J. A. Janik, P. Lenartowicz SJ, (red), *Nauka — Religia — Dzieje*, III seminarium 1986.

⁸ J. Szumilewicz, *Teoria śmierci cieplnej Wszechświata*, 32 Warszawa 1961.

sprawdza się do wyjaśnienia dlaczego pewne procesy, które dzięki dodatkowym założeniom pochodzącym z mechaniki statystycznej, są równie prawdopodobne jak procesy do nich przeciwne, a są w mniejszej ilości przypadków obserwowane przez nas niż owe procesy przeciwne. Ta asymetria na poziomie makroskopowym ma miejsce ponieważ nasze obserwacje są skończone w dwu ważnych znaczeniach. „Po pierwsze, są dokonywane w skończonych, czasowych przedziałach i nie dotyczą długiego okresu czasu. Po drugie, jako ludzkie istoty jesteśmy ograniczeni do obserwowania skończonych porcji wszechświata; porcje te nigdy nie są zupełnie odizolowane od reszty wszechświata”⁹.

Pierwszy rodzaj ograniczenia można uznać za analogiczny do wyjaśnienia M. Smoluchowskiego, ale w drugim sugeruje się, że izolacja układu jest zawsze pozorna, a de facto układ ma jakieś powiązania z resztą wszechświata. Rzeczywiście Earman za Morissonem stwierdza „...że choć z pewnych względów możemy traktować skończone układy, jak gdyby były wyizolowane, to nigdy zupełnie takimi nie są, np. zawsze istnieje powiązanie grawitacyjne, które nigdy nie może być wyeliminowane. Nawet gdy oddziaływanie grawitacyjne może być słabe, ciągle jest wystarczające żeby wywrzeć wpływ na wyjątkowo delikatne korelacje położenia i prędkości, od których na przykład zależy odwracalność”¹⁰.

Ta ewentualna zależność od grawitacji sugeruje, że zdarzenia, procesy na poziomie termodynamicznym mogłyby być nieodwracalne. Na razie pozostaje to jedynie sugestią.

4. (NIE)ODWRACALNOŚĆ ZŁOŻONYCH PROCESÓW FIZYCZNYCH

Codziennie doświadczenie poucza, że przytłaczająca ilość zjawisk w obserwowanym świecie jest nieodwracalna. Toteż dziwnym wydaje się to, że większość praw fizyki mówi coś przeciwnego. Konsekwentnie istnieje tendencja, aby prawa, które są asymetryczne względem czasu, wyprowadzać z bardziej podstawowych — symetrycznych względem czasu — praw. Nadto nie bardzo wiadomo dlaczego czas zawsze ma płynąć w jedną tylko stronę, a nie w przeciwną, chociaż symetryczne prawa nie wyróżniają żadnego z kierunków? Radykalne zdanie w tej sprawie ma L. Brillouin: „...zbyt wielu naukowców ciągle ma wrażenie, że wszystkie podstawowe prawa

⁹ J. Earman, *An Attempt to Add a Little Direction to „The problem of the Direction of Time”*, 37.

¹⁰ *Tamże*, 38.

powinny być podobne do praw mechaniki klasycznej, że mają być ściśle deterministyczne. Tak nie jest. Wszystkie podstawowe prawa fizyki wyrażane są przez wzory stytystyczne. Żadne dokładne przewidywanie nie jest możliwe (przynajmniej obecnie) i wszystko jest nieodwracalne. (...) Wielu ludzi jest bardziej pod wrażeniem matematycznych teorii niż doświadczalnych obserwacji. Bardziej wierzą w teoretyczne modele niż troszczą się o fakty. (...) Jeżeli pocisk porusza się po pewnej drodze z północy na południe, inny podobny pocisk mógłby poruszać się wzdłuż tej samej drogi z południa na północ. Zauważmy jednak od razu, że wypowiedź ta jest poprawna tylko wtedy, gdy wszystkie człony opisujące tłumienie są równe zeru. (...) Fizyka nie zna żadnego ruchu bez tłumienia. (...) A zatem punkt wyjścia do dyskusji na temat odwracalności jest błędny i odpowiada nierzeczywistym uproszczeniom”¹¹.

Do podobnych wniosków dochodzi H. Weyl. Opis matematyczny nie jest opisem zewnętrznym, nie naruszającym samego opisywanego przedmiotu — opis matematyczny równocześnie ten przedmiot preparuje¹². Czymże innym jak nie preparacją przedmiotów jest idealizacja zjawiska czy też obiektów (model gazu doskonałego).

Wróćmy jednak do tematu. Wcześniej padło podejrzenie, że czynnikiem tłumiącym w procesach mikroskopowych może być grawitacja, natomiast na poziomie makroskopowym na pewno takim znaczącym czynnikiem jest opór powietrza. Obiekt, na przykład pocisk poruszający się w powietrzu, oddziałuje poprzez niezliczoną ilość zderzeń z całą masą cząsteczek gazu, w wyniku czego znaczna część jego energii kinetycznej jest przekazywana cząsteczkom gazu¹³. Szybki ruch powoduje lokalne zaburzenia ciśnień, które wyrównują się po ustąpieniu „intruza” jakim jest pędzący olbrzymi obiekt, zakłócający lokalny, względny spokój (dlatego względny, gdyż jak wiemy, gaz jest w mikroskali niezwykle ruchliwy). O tym zakłóceniu ciśnień można powiedzieć, że lokalnie jest wytworzeniem mało prawdopodobnych warunków początkowych. Stąd też w najbliższym otoczeniu takiego zdarzenia po ustąpieniu „intruza” entropia wzrasta. Atmosfera ziemską jest wielkim układem termodynamicznym, w którym „zanurzone” są wszelkiego ro-

¹¹ L. Brillouin, *The Arrow of Time*, 15 w: J. Zeman, (ed), *Time in Science and Philosophy*, Academia, Prague 1971.

¹² M. Heller, *Kilka uwag o filozofii matematyki Herman Weyla w: Zagadnienia filozoficzne w nauce*, z. 8, Kraków 1986.

¹³ E. M. Rogers, *Fizyka dla dociekliwych*, t. 3, Warszawa 1986.

dzaju zjawiska. Nic więc dziwnego, że łańcuch przemian energetycznych kończy się na stratach cieplnych, a więc na rozproszeniu energii. Gdyby chcieć odwrócić jakiś ruch makroskopowy, trzeba by odwrócić wektor pędu nie tylko w poruszającym się obiekcie, ale również w olbrzymiej liczbie cząsteczek gazu. Mimo wszystko nie dałoby się tego osiągnąć chociaż by ze względu na niezwykle szybki, a więc bogaty w zdarzenia ruch cząsteczek gazu, który jest praktycznie nie do odtworzenia. Odwracalne mogą być tylko sytuacje wyidealizowane w myślowych doświadczeniach. Każde inne zdarzenia czy procesy makroskopowe są nieodwracalne i prowadzą do rozproszenia energii.

Można wskazać jeszcze jedno wyjaśnienie nieodwracalności makroprocesów; może nim być asymetria warunków początkowych dla mikroprocesów¹⁴. Od razu nasuwają się dwa pytania:

— Dlaczego nie obserwujemy procesów odpowiadających warunkom początkowym o przeciwnej symetrii?

— Skąd się wzięły takie, a nie inne warunki początkowe?

Odpowiedź na oba pytania jest jedna — z innych warunków początkowych. Jednakże *regressus ad infinitum* nie ma miejsca w tym przypadku ponieważ ten ciąg kończy się w momencie *Big Bangu*. „Strumień zdarzeń od przeszłości do przyszłości został zdeterminowany raz na zawsze przez zdarzenie od którego zaczął się nasz świat”¹⁵. Można więc Wielki Wybuch nazwać jednym-wielkim-warunkiem-początkowym.

5. ENTROPIA A GRAWITACJA

Mimo, że oddziaływanie elektrostatyczne jest 10^{40} raza większe od siły grawitacyjnej, to jednak ta ostatnia ma istotny wpływ na zachodzące zjawiska w przypadkach, gdy mamy do czynienia z bardzo wielkimi masami. Siły grawitacyjne ujawniają się w wielkoskalowych, kosmicznych warunkach. Porównanie z pozostałymi, fundamentalnymi oddziaływaniami, ujawnia jeszcze inne, specyficzne własności sił grawitacyjnych. Na przykład, żadnego obszaru przestrzeni nie da się wyizolować od wpływu grawitacji: masy reagują na siebie tylko przyciąganiem (brak analogii do zjawiska elektrostatycznego odpychania). Wpływ grawitacji na izolowane układy termodynamiczne jest jak wiemy pomijany, co wcale nie znaczy, że

¹⁴ L. Brillouin, *The Arrow of Time*, por. też A. Fuliński, *Nieodwracalność*.

¹⁵ A. Fuliński, *Nieodwracalność*, 65.

ostateczne rozwiązanie interesującego nas problemu nie może być ukryte w tym subtelnym i niezauważalnym jeszcze dla nas oddziaływaniu. Teraz jednak chcemy skupić uwagę na wszechobecnej tendencji do skupiania się masy.

Jeżeli w przestrzeni kosmicznej jest rozmieszczona pewna masa w postaci drobnego pyłu w sposób jednorodny i izotropowy, to najmniejsza fluktuacja (nieważne jest tu skąd ona pochodzi) powoduje skupianie się materii w jedno ciało (masę). Takie początkowe „równomierne” rozłożenie masy jest mało stabilne ze względu na siły grawitacyjne. Dlatego stany, w których materia skupia się są bardziej prawdopodobne niż mało stabilny stan „równomiernego” rozproszenia.

Na podstawie takiego, przykładowego rozumowania wprowadza się pojęcie entropii grawitacyjnej i „naturalne” prawo jej wzrostu (wynikające z natury siły grawitacyjnej). Ze zrozumiałych względów prawa wzrostu entropii termodynamicznej i grawitacyjnej działają w przeciwnych kierunkach: pierwsze ku rozproszeniu, drugie ku skupieniu. Konsekwencje tego stanu rzeczy są godne uwagi.

Przewiduje się mianowicie, że gdyby udało się zbliżyć do siebie dwie gwiazdy A-gorącą i B-zimną, tak by nie spadały na siebie pod wpływem sił grawitacyjnych, a możliwy był przepływ ciepła z A do B, to okazałoby się coś sprzecznego z drugą zasadą termodynamiki. Gwiazda A ogrzałaby się bardziej, a gwiazda B bardziej by ostygła. Zjawisko to stanie się zrozumiałe jeżeli przypomnimy, że stan równowagi gwiazdy jest utrzymywany dzięki działaniu dwu wzajemnie przeciwnych sił: własnej grawitacji i ciśnienia wewnętrznego. Każde wypromieniowane ciepło powoduje spadek ciśnienia wewnętrznego, które powoduje kurczenie się gwiazdy pociągające za sobą wzrost ciśnienia (sprężenie gazów) co przejawia się we wzroście temperatury gwiazdy A. W gwieździe B zachodzi zjawisko odwrotne, rozszerzanie się gwiazdy powoduje jej stygnięcie¹⁶.

Powyższy przykład pokazuje, że wzrost entropii grawitacyjnej może nadawać pewnej dynamiki innym procesom obserwowanym we wszechświecie, a w szczególności może być motorem zjawisk termodynamicznych. Strzałki czasu elektromagnetyczna i termodynamiczna wymagają aby stan początkowy (Wielki Wybuch) charakteryzował się niską entropią, a stan końcowy — wysoką. Opisuując ekspansję w języku ter-

¹⁶ J. Narlikar, *Struktura Wszechświata*, Warszawa 1985.

modynamiki trzeba powiedzieć, że istnieje przypadek w którym ekspansja wszechświata ściśle wiąże się z niską entropią w osobliwości początkowej i wysoką entropią w osobliwości końcowej.

Entropia grawitacyjna przyczynia się do powstawania (w dalekiej perspektywie) takich obiektów jak czarne dziury. Osobliwość początkowa w przeciwieństwie do końcowej nie posiada w sobie tych obiektów. Czarne dziury w swoim najbliższym otoczeniu wytwarzają niezerową krzywiznę Weyla. Stąd można wnioskować, że szukanym fundamentalnym warunkiem nakładanym na osobliwość początkową może być (w przeciwieństwie do osobliwości końcowej) krzywizna Weyla równa zeru¹⁷.

Z tego co powiedzieliśmy powyżej ważne jest to, że nasza znajomość tego jak wyglądają stany początkowy i końcowy decyduje o możliwości rozstrzygnięcia czy wzrost entropii jest zawsze ściśle zdeterminowany. Znaczyło by to, że niejednoznaczność interpretacji statystycznej uniemożliwia rozwiązanie problemu?

6. WZROST CZY MALENIE ENTROPII?

Niejednoznaczność interpretacji ujawnia, że w prawie tym zakłada się z góry jak wygląda stan początkowy (na pewno niska entropia) i końcowy (na pewno wysoka entropia) i to, że układ ewoluuje z konieczności od niskiej do wysokiej entropii, ale wcale nie zauważa się, że układ może ewoluować (rozwijać się) od jednego typu uporządkowania do drugiego, od niskiej do niskiej entropii w sposób bezpośredni.

Ktoś mógłby powiedzieć, że jest to prawdziwe stwierdzenie, ale tylko wtedy gdy układ obserwujemy w odpowiednio krótkim przedziale czasu, bo w przeciwnym razie nieubłąganie nastąpi wzrost stopnia nieuporządkowania. Z drugiej strony wiemy, że w twierdzeniu Boltzmana o entropii dopuszcza się jej malenie, a więc wzrost stopnia uporządkowania. Jest to przypadek przejścia od niskiej do niskiej entropii przez długo trwający stan względnego chaosu (sposób pośredni). Ktoś inny mógłby powiedzieć, że jest to prawdziwe stwierdzenie, ale tylko wtedy gdy układ obserwujemy w odpowiednio długim przedziale czasu, gdyż w przeciwnym razie zaobserwujemy nieubłągany wzrost stopnia nieuporządkowania.

Widzimy, że entropia może w sposób fizycznie dopuszczal-

¹⁷ R. Penrose, *Singularities and Time — Asymetry*, 614.

ny wzrastać i maleć w zależności od długości czasu obserwacji. Pojęcie uporządkowania wprowadziło zamieszanie, skupienie uwagi na mikroskopowym obrazie spowodowało, że zaczęto entropię traktować nie tylko jako rozproszenie ciepła, lecz również jak rozproszenie cząsteczek. W pierwszym przypadku chodzi o wyrównywanie energii kinetycznych (wyśrednianie), których różnica pochodzi z początkowego stanu anormalnego (mało prawdopodobnego), a w drugim o tendencję do zajmowanego coraz to większych obszarów przestrzeni, zaś w przypadku ograniczenia izolującymi ściankami tendencji do uchaotyczniania ruchu poszczególnych cząsteczek (zmiana kierunku ruchu w wyniku zderzeń). Obie sytuacje opisują w szczególności zmiany prędkości, z tym, że pierwsza opisuje zmiany wartości prędkości z różnych wartości na równe (zbliżone), a druga zmiany kierunków wektorów prędkości: z uporządkowanych w jakimś sensie (równoległe, koncentryczne itp.) na bezładne, przypadkowe. Widzimy tu pewną opozycję, w jednym przypadku jest przejście: różne wartości — równe (zbliżone) wartości, a w drugim: równe kierunki (w jakimś sensie) — różne kierunki.

Wszystko, co powiedzieliśmy, pozwala stwierdzić, że w sformułowaniu prawa wzrostu entropii ważniejszą, bardziej podstawową jest myśl o wzroście jako o ewolucji od ... do ..., niż myśl, że wzrost następuje od stanu uporządkowania do chaosu. Można powiedzieć (i być bardziej w zgodzie z prawdą), że entropia ewoluuje (zmienia się), a to czy rośnie czy maleje zależy nie tylko od

- a) długości czasu obserwacji, ale również od
- b) wielkości obserwowanego obszaru (jego ograniczoności lub nieograniczoności), czy od
- c) warunków początkowych i końcowych.

Użycie pojęcia entropii do różnych, a nawet przeciwnie przebiegających zjawisk (termodynamicznych — grawitacyjnych) podkreśla wartość i pierwszoplanowość jej ewolucyjnego sensu. Opozycja w jakiej znajdują się entropie termodynamiczna i grawitacyjna nie jest żadną sprzecznością. Jeżeli nie jest to do tej pory jasne, to wyjaśnijmy, że obie opisują ten sam układ ale w dwóch różnych aspektach: entropia termodynamiczna mówi przede wszystkim o rozpraszaniu energii kinetycznej (temperatury), co czasem osiąga za sobą rozpraszanie masy, a grawitacyjna o skupianiu mas, co pociąga za sobą wzrost energii kinetycznej skupianych cząsteczek.

Wieloznaczność pojęcia „uporządkowanie” użytego do me-

chanicznej interpretacji entropii termodynamicznej dopuszcza takie rozumienie, w którym prawa wzrostu entropii w tych dwóch aspektach działają w przeciwnych kierunkach.

7. MIARA I KIERUNEK CZASU A ENTROPIA

Na początku wyjaśnijmy, że słowo „czas” w ustach kosmologa znaczy „czasowy aspekt czasoprzestrzeni”. Różnica między czasem, a czasowym aspektem czasoprzestrzeni polega na tym, że w tym drugim pojęciu własności czasu są uwikłane we własności czasoprzestrzeni (grupa Lorentza).

Idealny zegar Newtona odmierzał w sposób jednostajny równe odcinki czasu zakładając w sposób oczywisty, że odliczanie czasu jest dobre w jedną stronę. Idealny zegar Einsteina odmierza czas w zależności od prędkości obserwatora i pola grawitacyjnego, w konsekwencji nie robi tego ani równo (paradoks bliźniaków) ani jednostajnie (nierówna odległość między zdarzeniami w procesie odpowiedzialnym za kierunkowy upływ czasu pociąga za sobą niejednostajność czasu) przy braku procesów cyklicznych. Obrazowo mówiąc, jeżeli za miarę czasu oberzemy odległość między zdarzeniami, to ciągle zmieniająca się odległość między nimi pociąga za sobą zmianę długości interwałów czasowych (miarki) i powoduje niejednostajność czasu. Jedyną rzeczą jaką zegar Einsteina mógłby wyznaczać w sposób absolutny to właściwy kierunek czasu. Wzrastająca entropia wyrażana bezwymiarową wielkością nadawała się jak w sam raz na fizyczny model zegara Einsteina, który chodzi nieodwołalnie w jednym kierunku.

Mierzenie czasu, a więc pokrycie jedną czasową jednostką całego czasu wszechświata byłoby możliwe gdyby jakiś proces cykliczny nie tylko istniał, ale który by istniał we wszystkich epokach wszechświata. Ani kosmologia ani fizyka nie zna takiego procesu, stąd trudności porównywania, synchronizacji czasu w różnych erach wszechświata.

Entropia maleje po bardzo długim (dla człowieka) czasie oczekiwania, co można wyrazić w ten sposób, że musi się dużo zdarzeń zdarzyć by entropia mogła zmaleć. Trudno rozsądzić co znaczy „po odpowiednio długim czasie” — gdzie? kiedy? dla kogo?

W okolicach mało prawdopodobnego stanu początkowego entropia na pewno rośnie. Natomiast w okolicach stanu końcowego nie wiadomo czy rośnie czy maleje, a to dlatego, że nie możemy powiedzieć z niezachwianą pewnością jak ten stan wygląda i kiedy nastąpi. Jeżeli będzie odpowiednio odległy

w czasie, to może być w stanie mało prawdopodobnym i wówczas powiemy, że entropia między stanem początkowym i końcowym rosła a potem malała. W przypadku gdy czasowa odległość stanu końcowego od początkowego jest odpowiednio mniejsza, wówczas entropia może tylko rosnąć, albo też wówczas kiedy sam stan końcowy ma w sobie jakiś warunek, który w sposób konieczny opisuje go jako chaotyczny (patrz wyżej).

Nie wiemy przy tym jaki dokładnie mają sens wyrażenia: „odpowiednio odległy w czasie” i „czasowa odległość odpowiednio mniejsza”. Zwroty te odnoszą się do ilości zdarzeń które przy braku procesów cyklicznych stanowią jedyną miarę czasu (niedokładną według naszych odczuć). Można powiedzieć: dużo zdarzeń — dużo czasu upływa — czas płynie szybko, mało zdarzeń — mało czasu upływa — czas płynie wolniej. Zmiana odległości między zdarzeniami uniemożliwia wybranie z nich którejkolwiek na miarkę czasu, bo stosowanie jej do okresów dla niej wcześniejszych i późniejszych łączyłoby się zawsze z zafałszowaniem kalendarza (co miarka to kalendarz) tym bardziej, że używa się częściej jednostek pochodnych od podstawowej (jej części np. sekundy lub wielokrotności np. miesiąc).

Nawet nierównomierność cykli służących za naturalny zegar rodzi ten problem. Na przykład jednostkę jaką jest godzina można wyznaczyć na podstawie wschodów i zachodów tylko wtedy, gdy prześledzimy przynajmniej raz jeden pełny cykl. Wówczas to dzielimy go na równe części i skalujemy według tego np. klepsydry. Używając takiej pochodnej miarki (współcześnie są one doskonalsze¹⁸), po pewnym czasie rozsynchronizujemy się z wyjściowym cyklem wschód — zachód. Do ustalenia jednostki konieczne jest więc prześledzenie całego cyklu przynajmniej raz. Bez zakończenia cyklu jego podział i konsekwentne mówienie o godzinie, sekundzie nie ma sensu, jeżeli wymaga się aby każda godzina była równa każdej innej. Stąd też wszechświat jako całość będąc procesem niezakończonym i jednocześnie nie mającym wewnątrz siebie odpowiedniego procesu cyklicznego na całym przebiegu dziejów, jest niepodatny na bezwzględny opis w jakichkolwiek jednostkach czasu (bez zafałszowań)¹⁹.

¹⁸ B. Muchotrzeb, M. Prószyński, *Czas*, Warszawa 1983.

¹⁹ K. Rudnicki, *Wyznaczanie kosmicznych interwałów czasu*, RF 25 (1977), z. 3.

8. ODWRACALNOŚĆ KIERUNKU UPŁYWU CZASU

Jeżeli nie możliwe jest określenie długości czasu obserwacji wszechświata (= jego istnienia), a więc konsekwentne określenie z całą pewnością kierunku zmian entropii, przeto wysoce wątpliwe wydaje się łączenie zawsze jedno kierunkowego upływu czasu ze zmianami entropii. Jeżeli jednak założymy, że zmiany entropii i upływ czasu są ze sobą ściśle związane, to wówczas problematyczny staje się jedno kierunkowy upływ czasu.

Powszechnie dopuszcza się teoretyczną możliwość odwrócenia czasu, jednakże wyobrażenia na ten temat wydają się być co najmniej archaiczne. Spróbujmy teraz wstępnie naszkicować to zagadnienie. Dla każdego obserwatora w orientowalnej czasoprzestrzeni istnieją tylko dwa możliwe kierunki czasu. Ustalenie tego właściwego (czas płynie ku przyszłości) nie jest sprawą ani łatwą ani dowolną. Orientowalność czasoprzestrzeni zapewnia jej jedynie możliwość takiego jednego wyboru na całości. Wybór kierunku musimy oprzeć na mocnych fundamentach, by na przykład w skrajnych sytuacjach móc rozpoznać czy mamy do czynienia z odwróconym czasem czy tylko z jakimś odwróconym ruchem.

Problem orientowalności czasoprzestrzeni to w ogólności szukanie odpowiedzi na pytanie: czy uzgodnienie wszystkich lokalnych kierunków czasowych jest możliwe czy też nie? Jeżeli jest możliwe, to jest sens mówić o globalnej lub lokalnych strzałkach czasu; jeżeli nie, to można mówić tylko o strzałkach lokalnych. Wyjaśnijmy, że odnośnie do czasowego aspektu czasoprzestrzeni „globalnie” znaczy „zawsze i wszędzie”, a lokalnie znaczyć może:

- 1) „zawsze w ograniczonym obszarze” lub
- 2) „w ograniczonym okresie czasu i w ograniczonym obszarze” lub
- 3) „w ograniczonym okresie czasu i wszędzie”

Matthews podaje ściśle definicje tych terminów wyróżniając rozwiązanie ściśle globalne (równoważne powyższemu rozumieniu globalności), globalne (trzecie rozumienie lokalności), lokalne (drugie rozumienie lokalności) oraz regionalne i ściśle regionalne (pierwsze rozumienie lokalności)²⁰. To ostatnie rozróżnienie Matthewsą dotyczy (nie)możliwości ustalenia strzałki czasu poza naszym, obserwowalnym obszarem wszechświata.

²⁰ G. Matthews, *Time's Arrow and the Structure of Spacetime*, Phil. Sci. 46(1979), 82—97.

Zakładając nieorientowalność czasoprzestrzeni skazujemy się na rozwiązanie lokalne (lub regionalne) tzn. entropia może w ograniczonym obszarze czasoprzestrzeni wyznaczać kierunek upływu czasu, a w pozostałych nie wyznaczać lub wyznaczać kierunek do niego przeciwny. Tu znowu rodzą się dwie ewentualności

- a) kierunku czasu nie należy wiązać z entropią
- b) trzeba rozważyć na serio co znaczy „czas płynie w przeciwną stronę” (np. po dwróceniu).

Gdyby jednak w jakiś sposób orientowalność czasoprzestrzeni była zagwarantowana, to moglibyśmy spodziewać się, że jeżeli w dostępnym naszej obserwacji obszarze czasoprzestrzeni entropia z konieczności wyznacza „nasz” kierunek upływu czasu, to czyni to również poza tym obszarem²¹. Pewności, że tak jest nie mielibyśmy jednak nigdy.

Zastanówmy się teraz, jakie byłyby konsekwencje przyjęcia możliwości upływu czasu w kierunku przeciwnym do naszego. Aby uczynić to w zadawalający sposób, należałoby przeanalizować znaczenie wyrażenia „odwrócenie czasu”. Temu celowi służyły by teoretyczne modele zawierające roztrzygnięcia (arbitralne lub bardziej uzasadnione) dotyczące przebiegu zjawisk takich jak: fizyczne, biologiczne i psychiczne w odniesieniu do tego jednego procesu odpowiedzialnego za kierunkowy upływ czasu. Jest to zadanie godne osobnego artykułu. Dla naszych potrzeb wybierzemy tylko niektóre, najbardziej narzucające się rozwiązania.

Założmy, że świat z odwróconym czasem rządzi się odwróconymi lub bardzo podobnymi do odwróconych prawami i ponadto obserwatorzy są w stanie przeżyć w tych osobliwych warunkach. Aby krótko zasygnalizować charakter przyszłych analiz przyjmijmy, dla uproszczenia, że odwrócenie czasu jest tożsame z odwróceniem stożka świetlnego konkretnego obserwatora lub nawet wszystkich możliwych obserwatorów. Wówczas z uwagi na trzy powyższe rodzaje procesów można roztrzygnąć dodatkowo, że stożki przyszłościowy i przeszłościowy

- 1) zamieniają się własnościami albo
 - 2) nie zamieniają się
- ze względu na postrzegającego obserwatora.

Przyjmijmy dla danego obserwatora, że zdarzenia A, B, C należą przed odwróceniem czasu w zdarzeniu D, do jego prze-

²¹ B. Muchotrzeb, B. Paczyński, *Granice Wszechświata*, Warszawa 1981.

złości. Po odwróceniu czasu w sensie 1) zdarzenia A, B, C występują w odwróconej kolejności, ale są jednocześnie wielką niewiadomą dla niego (skutki działań nie są znane, mimo że są nimi przyczyny z okresu przed odwróceniem czasu). Jak widzimy pociąga to za sobą rozstrzygnięcia kwestii trzeciej przytoczonej na wstępie artykułu na „nie”, jeżeli musi on wypowiedzieć się natychmiast albo na „nie” lub „tak”, jeżeli da mu się czas na „rozpoznanie”, „przypomnienie” zaszłych zdarzeń, a może to być zależne od tego czy zdarzy mu się (przypadkiem?) zakreślić taką samą lub podobną linię świata. Może to być nie wykonalne, jeżeli założymy, że przy odwróceniu czasu następuje wymazanie pamięci świadomych obserwatorów.

Jeżeli czas w zdarzeniu D odwraca się w sensie 2), to stożek przeszłościowy staje się stożkiem przyszłościowym, ale zmienia jednocześnie swoje własności na własności stożka przeszłościowego, czyli pozostaje niezmienny z własnymi przeszłymi własnościami. Inaczej mówiąc zaistniała w tym przypadku możliwość poruszania się w przeciwnym kierunku na sztywnej, niezminionej strukturze przyczynowo-skutkowej (skutki działań są znane tak jak przyczyny — przy zachowaniu świadomości odwrócenia tej relacji). Przyszłość teraz nie stanowi tajemnicy dla obserwatora (zachowana pamięć), ale pojawiają się dziwne problemy. W takim świecie albo istnieje jakaś siła zmuszająca obserwatora do poruszania się według wiadomego schematu (uczucie przymusu!), a zdarzenia „oddzarzają się” (film do tyłu) albo też obserwator z wymazaną pamięcią, nie wiedząc nic o sobie kim jest, dokąd zmierza, porusza się od zdarzenia D przez C, B do A dokładnie po tej samej drodze nie wiedząc dlaczego, a tym bardziej nie wiedząc, że w sposób nieodwołalny.

Wróćmy do kwestii drugiej nakreślonej we wstępie, w której możliwość pojawienia się zdarzenia A, które „oddzarzyło się” bez przebiegu przez pośrednie zdarzenia C, B. Sytuacja ta wyglądałaby tak jakgdyby stożek świetlny obserwatora ze zdarzenia D przenieść w sposób nieciągły do zdarzenia A bez zmiany przeszłości na przyszłość i odwrotnie, ale przy jednoczesnym „wymazaniu” wszystkich zdarzeń pośrednich. Nie wiadomo przy tym co znaczy „wymazać”. Począwszy od zdarzenia A mogłyby mieć miejsce jakieś inne zdarzenia B', C', D'. Takie oto rozumienie odwracalności czasu jest najbliższe naszym potocznym wyobrażeniom, ale stwarza wiele (nieprzekraczalnych?) trudności. Jak fizycznie rozumieć „wymaza-

nie"?; jaka jest przyczyna nieciągłości nie tylko czasu, ale też całej struktury przyczynowo-skutkowej?; jeżeli pamięć jest również wymazywana, to skąd byśmy mogli się dowiedzieć, że w ogóle takie odwrócenie czasu zaistniało?

Rozważmy jeszcze czy odwrócenie czasu nie można by traktować oddzielnie dla obserwatorów świadomych (żywych) i nieświadomych (martwych) — lokalne odwrócenie czasu dla (pojedynczych?) zdarzeń fizycznych. Utożsamiając się z obserwatorem zauważyliśmy skupianie się drobin szkła, a następnie powstanie szklanki (film do tyłu) lub zniknięcie drobin szkła i równie niespodziewane pojawienie się całej szklanki na stole.

Tego typu zdarzenia (cuda dla świadomego obserwatora) miałyby conajmniej dwie nierównorzędne interpretacje: albo trzeba mówić o dwóch czasach (płatach czasoprzestrzeni), z których jeden został lokalnie odwrócony, albo o jednym czasie (czasoprzestrzeni), w którym działają nieznanne siły (przyczyny). Interpretacje te są w tym sensie nierównorzędne, gdyż fizyk z pewnością przyjąłby tę drugą jako prostszą, aczkolwiek nie bez pewnych oporów.

Innych możliwych teoretycznie i równie interesujących sytuacji do rozważania jest zapewne więcej, ale na podstawie tego co już zostało powiedziane można zorientować się w ciężarze gatunkowym problemów jakie powstają przy dopuszczeniu możliwości odwrócenia czasu. Mówienie o odwróceniu czasu gdzieś daleko od świadomych obserwatorów jest unikami przed konsekwencjami takiego stwierdzenia. To, że gdzieś daleko jakieś procesy z jakichś przyczyn przebiegają odwrotnie niż u nas (obowiązuje tam inna fizyka) jest zawsze do przyjęcia.

9. KILKA UWAG O PUNKCIE WYJŚCIA DO DYSKUSJI PROBLEMU

W pewnych granicach błędu jednostajna miara czasu i idealizacja, modelowanie badanych zjawisk, umożliwiły formułowanie praw w języku matematyki, języku, który posługując się ciągiem liczb zarówno jako siatką milimetrową (interpretacja geometryczna) jak też metronomem (interpretacja czasowa), pozwolił na to, by równania fizyki „same z siebie” i wszystkie razem stanowiły idealny, matematyczny (fizycznie nieistniejący) zegar jednostajnie odmierzający czas (jest to dobry czas dla wszystkich praw, równań).

Można przyjąć za Brillouin'em, że wszystkie zdarzenia są nieodwracalne, a tylko równania fizyki są symetryczne wzglę-

dem odwrócenia w czasie (na wzór symetrii liczb mających swoje ujemne odpowiedniki). Równania te opisują rzeczywiste sytuacje dopiero w łączności z warunkami początkowymi, gdyż nie obejmują ich z powodu idealizacji zjawiska czy też opisywania go w zbyt małym przedziale czasu.

Prawo wzrostu jako jedyne łączy w sobie (ukrywa) warunki początkowe (niska entropia). Interpretacja statystyczna używając pewnych pozafizycznych założeń (ponowna idealizacja matematyczna) uczyniła entropię symetryczną w odpowiednio długich skalach czasowych. Zasadnicza niemożność ustalenia długości czasu istnienia wszechświata, a tym samym prognozowania o sposobie ewolucji entropii, stawia pod znakiem zapytania użyteczność tego pojęcia w wersji termodynamicznej do wyjaśniania problemu kierunkowego upływu czasu.

Jednakże wcześniej opisany związek entropii termodynamicznej z grawitacją, a także związek tej ostatniej z niestatystycznym warunkiem nałożonym przez Penrose'a na osobliwość początkową „ratuje” w pewnym sensie zasadność posługiwania się tym terminem. Przy niezaprzeczalnym związku wzrostu (ogólniej — ewolucji) entropii termodynamicznej z kierunkowym upływem czasu trudno jest nadal mówić o wzroście entropii termodynamicznej jako o przyczynie kierunkowego upływu czasu.

Z drugiej strony z uwagi na niedostateczną jasność terminu „odwrócenie czasu” i przy pewnych jeszcze niezadawalających nas przesłankach za niemożliwością jego odwrócenia, wszelkie próby wyjaśnienia strzałki czasu w terminach wzrostu czy malenia entropii termodynamicznej dopuszczając jakieś odwrócenie czasu są już bezpodstawne.

REMARKS ON THE MATTER OF SO-CALLED „THE ARROW OF TIME”

Summary

There is dogma of physicists — direction of time depends on a physical process. Since the beginning the problem of the arrow of time depended on several questions (to mention but a few) — development of the entropy, symmetry of the physical equations and (un)reversible events.

This paper points out the inadequate appreciation of the facts (symmetry of equations), unprecise understanding and usage of notions (entropy and reversion of time), inadmissible simplifications of phenomena's course description (reversible events) which considerably influence the recognition and the solution of the problem mentioned above.